

本資料のうち、枠囲みの内容は、  
営業秘密又は防護上の観点から  
公開できません。

東海第二発電所 工事計画審査資料	
資料番号	工認-1067 改4
提出年月日	平成30年10月3日

## V-5 計算機プログラム（解析コード）の概要



計算機プログラム（解析コード）を適用している添付書類（1/19）

目録番号	目録名称	適用コード名					
		資料番号					
V-1-1-2-3-2	竜巻の影響を考慮する施設及び固縛対象物の選定	資料番号	V-5-9				
		コード名	TONBOS				
V-1-1-6 別添 1	可搬型重大事故等対処設備の保管場所及びアクセスルート	資料番号	V-5-10	V-5-25			
		コード名	FLIP	k-SHAKE			
V-1-1-6 別添 4	ブローアウトパネル関連設備の設計方針	資料番号	V-5-6	V-5-7	V-5-11	V-5-12	V-5-13
		コード名	QAD-CGGP2R	ORIGEN2	ANISN	G33-GP2R	MAAP
V-1-1-7	発電用原子炉施設の火災防護に関する説明書	資料番号	V-5-63				
		コード名	Fire Dynamics Tools (FDTs)				
V-1-1-8	発電用原子炉施設の溢水防護に関する説明書	資料番号	V-5-3	V-5-29	V-5-30	V-5-35	
		コード名	SAP-IV	STAR-CD	Fluent	AutoPIPE	
V-1-1-8-4	溢水影響に関する評価	資料番号	V-5-14				
		コード名	GOTHIC				
V-1-2-1	原子炉本体の基礎に関する説明書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-1-2-2	原子炉圧力容器の脆性破壊防止に関する説明書	資料番号	V-5-31	V-5-53	V-5-55		
		コード名	NOPS	ASHSD2-B	DORT		
V-1-3-2	燃料取扱設備、新燃料貯蔵設備及び使用済燃料貯蔵設備の核燃料物質が臨界に達しないことに関する説明書	資料番号	V-5-8				
		コード名	SCALE				
V-1-3-4	使用済燃料貯蔵槽の冷却能力に関する説明書	資料番号	V-5-7				
		コード名	ORIGEN2				
V-1-3-5	使用済燃料貯蔵槽の水深の遮蔽能力に関する説明書	資料番号	V-5-6	V-5-7			
		コード名	QAD-CGGP2R	ORIGEN2			
V-1-7-3	中央制御室の居住性に関する説明書	資料番号	V-5-6	V-5-7	V-5-11	V-5-12	V-5-13
		コード名	QAD-CGGP2R	ORIGEN2	ANISN	G33-GP2R	MAAP

計算機プログラム（解析コード）を適用している添付書類（2/19）

目録番号	目録名称	適用コード名					
		資料番号	V-5-1	V-5-5	V-5-6	V-5-7	V-5-11
V-1-8-1	原子炉格納施設的设计条件に関する説明書	コード名	MSC NASTRAN	ABAQUS	QAD- CGGP2R	ORIGEN2	ANISN
		資料番号	V-5-12	V-5-13			
		コード名	G33-GP2R	MAAP			
		資料番号	V-5-13	V-5-14			
V-1-8-2	原子炉格納施設の水素濃度低減性能に関する説明書	コード名	MAAP	GOTHIC			
		資料番号	V-5-6	V-5-7	V-5-11	V-5-12	
V-1-9-3-2	緊急時対策所の居住性に関する説明書	コード名	QAD- CGGP2R	ORIGEN2	ANISN	G33-GP2R	
		資料番号	V-5-34	V-5-62		V-5-42	
V-2-1-7	設計用床応答曲線の作成方針	コード名	VIANA	Seismic Analysis System (S A S)		波形処理プログラム k-WAVE for Windows (k-WAVE)	
		資料番号	V-5-56				
V-2-1-12-1	配管及び支持構造物の耐震計算について	コード名	SPAN2000				
		資料番号	V-5-15	V-5-16	V-5-17	V-5-18	
V-2-2-1	原子炉建屋の地震応答計算書	コード名	GRIMP2	NVK463	KSHAKE	DAC3N	
		資料番号	V-5-17				
V-2-2-2-1	原子炉建屋地下排水設備設置位置の地盤応答	コード名	KSHAKE				
		資料番号	V-5-25	V-5-41	V-5-43		
V-2-2-2-7	原子炉建屋地下排水設備排水シャフトの耐震性についての計算書	コード名	k-SHAKE	FREMING	RC断面計算		
		資料番号	V-5-41				
V-2-2-2-9	原子炉建屋地下排水設備集水管の耐震性についての計算書	コード名	FREMING				
		資料番号	V-5-1				
V-2-2-3	原子炉建屋の基礎の耐震性についての計算書	コード名	MSC NASTRAN				
		資料番号	V-5-19	V-5-20	V-5-21		
V-2-2-4	使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答計算書	コード名	SPRINT	microSHAK E/3D	NORA2D		
		資料番号	V-5-1	V-5-10	V-5-38	V-5-45	
V-2-2-5	使用済燃料乾式貯蔵建屋の耐震性についての計算書	コード名	MSC NASTRAN	FLIP	SCARC	TDAP III	
		資料番号	V-5-10	V-5-25			
V-2-2-6	取水構造物の地震応答計算書	コード名	FLIP	k-SHAKE			
		資料番号	V-5-10	V-5-25	V-5-39		
V-2-2-7	取水構造物の耐震性についての計算書	コード名	FLIP	k-SHAKE	Engineer's Studio		
		資料番号	V-5-10	V-5-25			
V-2-2-8	屋外二重管の地震応答計算書	コード名	FLIP	k-SHAKE			
		資料番号	V-5-1	V-5-10	V-5-25		
V-2-2-9	屋外二重管の耐震性についての計算書	コード名	MSC NASTRAN	FLIP	k-SHAKE		
		資料番号	V-5-2	V-5-17	V-5-37		
V-2-2-10	緊急時対策所建屋の地震応答計算書	コード名	DYNA2E	KSHAKE	PEGA		

計算機プログラム（解析コード）を適用している添付書類（3/19）

目録番号	目録名称	適用コード名					
		資料番号	V-5-1	V-5-10	V-5-59		
V-2-2-11	緊急時対策所建屋の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1	V-5-10	V-5-59		
		コード名	MSC NASTRAN	FLIP	SoilPlus		
V-2-2-12	緊急時対策所用発電機燃料油貯蔵タンク基礎の地震応答計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25			
		コード名	FLIP	k-SHAKE			
V-2-2-13	緊急時対策所用発電機燃料油貯蔵タンク基礎の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25	V-5-43		
		コード名	FLIP	k-SHAKE	RC断面計算		
V-2-2-14	主排気筒の地震応答計算書	資料番号	V-5-22	V-5-23	V-5-24		
		コード名	SHAKE	TLPILESP	NUPP4		
V-2-2-15-1	主排気筒の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-2-15-2	主排気筒の基礎の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-2-16	非常用ガス処理系配管支持架構の地震応答計算書	資料番号	V-5-22	V-5-23	V-5-26		
		コード名	SHAKE	TLPILESP	fappase		
V-2-2-17	非常用ガス処理系配管支持架構の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-27				
		コード名	KANSAS2				
V-2-2-18	格納容器圧力逃がし装置格納槽の地震応答計算書	資料番号	V-5-17	V-5-59			
		コード名	KSHAKE	SoilPlus			
V-2-2-19	格納容器圧力逃がし装置格納槽の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-2-20	格納容器圧力逃がし装置用配管カルバートの地震応答計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25			
		コード名	FLIP	k-SHAKE			
V-2-2-21	格納容器圧力逃がし装置用配管カルバートの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25	V-5-43		
		コード名	FLIP	k-SHAKE	RC断面計算		
V-2-2-22-1	常設代替高圧電源装置置場及び西側淡水貯水設備の地震応答計算書	資料番号	V-5-10	V-5-20			
		コード名	FLIP	microSHAKE/3D			
V-2-2-22-2	常設代替高圧電源装置用カルバート(カルバート部)の地震応答計算書	資料番号	V-5-10	V-5-20			
		コード名	FLIP	microSHAKE/3D			
V-2-2-22-3	常設代替高圧電源装置用カルバート(トンネル部)の地震応答計算書	資料番号	V-5-10	V-5-20			
		コード名	FLIP	microSHAKE/3D			
V-2-2-22-4	常設代替高圧電源装置用カルバート(立坑部)の地震応答計算書	資料番号	V-5-10	V-5-20			
		コード名	FLIP	microSHAKE/3D			
V-2-2-23-1	常設代替高圧電源装置置場及び西側淡水貯水設備の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-10	V-5-20			
		コード名	FLIP	microSHAKE/3D			

計算機プログラム（解析コード）を適用している添付書類（4/19）

目録番号	目録名称	適用コード名					
V-2-2-23-2	常設代替高压電源装置用カルバート(カルバート部)の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-10	V-5-20			
		コード名	FLIP	microSHAKE/3D			
V-2-2-23-3	常設代替高压電源装置用カルバート(トンネル部)の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-10	V-5-20			
		コード名	FLIP	microSHAKE/3D			
V-2-2-23-4	常設代替高压電源装置用カルバート(立坑部)の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-10	V-5-20	V-5-45		
		コード名	FLIP	microSHAKE/3D	TDAP III		
V-2-2-24	可搬型設備用軽油タンク基礎の地震応答計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25			
		コード名	FLIP	k-SHAKE			
V-2-2-25	可搬型設備用軽油タンク基礎の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25	V-5-43		
		コード名	FLIP	k-SHAKE	RC断面計算		
V-2-2-26	常設低圧代替注水系ポンプ室の地震応答計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25			
		コード名	FLIP	k-SHAKE			
V-2-2-27	常設低圧代替注水系ポンプ室の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25	V-5-40	V-5-43	V-5-45
		コード名	FLIP	k-SHAKE	FRAME(面内)	RC断面計算	TDAP III
V-2-2-28	代替淡水貯槽の地震応答計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25			
		コード名	FLIP	k-SHAKE			
V-2-2-29	代替淡水貯槽の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25	V-5-40	V-5-43	V-5-45
		コード名	FLIP	k-SHAKE	FRAME(面内)	RC断面計算	TDAP III
V-2-2-30	常設低圧代替注水系配管カルバートの地震応答計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25			
		コード名	FLIP	k-SHAKE			
V-2-2-31	常設低圧代替注水系配管カルバートの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25	V-5-43		
		コード名	FLIP	k-SHAKE	RC断面計算		
V-2-2-32	SA用海水ピットの地震応答計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25			
		コード名	FLIP	k-SHAKE			
V-2-2-33	SA用海水ピットの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25	V-5-39	V-5-43	V-5-46
		コード名	FLIP	k-SHAKE	Engineer's Studio	RC断面計算	UC-win/Section
V-2-2-34	緊急用海水ポンプピットの地震応答計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25			
		コード名	FLIP	k-SHAKE			
V-2-2-35	緊急用海水ポンプピットの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1	V-5-10	V-5-25	V-5-41	V-5-43
		コード名	MSC NASTRAN	FLIP	k-SHAKE	FREING	RC断面計算
V-2-2-36	防潮堤(鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁)の地震応答計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25			
		コード名	FLIP	k-SHAKE			
V-2-2-37	防潮堤(鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁)の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25	V-5-43	V-5-44	
		コード名	FLIP	k-SHAKE	RC断面計算	RESP-T	

計算機プログラム（解析コード）を適用している添付書類（5/19）

目録番号	目録名称	適用コード名					
		資料番号					
V-2-2-38-1	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁）の地震応答計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25			
		コード名	FLIP	k-SHAKE			
V-2-2-38-2	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア））の地震応答計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25			
		コード名	FLIP	k-SHAKE			
V-2-2-39-1	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁）の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25	V-5-43	V-5-46	
		コード名	FLIP	k-SHAKE	RC 断面計算	UC-win/Section	
V-2-2-39-2	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア））の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25	V-5-41	V-5-43	
		コード名	FLIP	k-SHAKE	FREMING	RC 断面計算	
V-2-3-2	炉心，原子炉压力容器及び原子炉内部構造物並びに原子炉格納容器及び原子炉本体の基礎の地震応答計算書	資料番号	V-5-2				
		コード名	DYNA2E				
V-2-3-3-1	燃料集合体の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-57	V-5-58			
		コード名	FURST	BSPAN2			
V-2-3-3-2-3	シュラウドサポートの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-53				
		コード名	ASHSD2-B				
V-2-3-4-1-2	原子炉压力容器の耐震性についての計算書（その1）	資料番号	V-5-31	V-5-53	V-5-54		
		コード名	NOPS	ASHSD2-B	TACF		
V-2-3-4-1-3	原子炉压力容器の耐震性についての計算書（その2）	資料番号	V-5-31	V-5-53	V-5-54		
		コード名	NOPS	ASHSD2-B	TACF		
V-2-3-4-2-3	制御棒駆動機構ハウジング支持金具の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-3-4-2-4	差圧検出・ほう酸水注入管（ティーより N10 ノズルまでの外管）の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-3-4-3-3	気水分離器及びスタンドパイプの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-5				
		コード名	ABAQUS				
V-2-3-4-3-4	シュラウドヘッドの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-5				
		コード名	ABAQUS				
V-2-3-4-3-5	ジェットポンプの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-3-4-3-6	給水スパー ज्याの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-3-4-3-7	高圧及び低圧炉心スプレイスパー ज्याの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-3-4-3-8	残留熱除去系配管（原子炉压力容器内部）の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				

計算機プログラム（解析コード）を適用している添付書類（6/19）

目録番号	目録名称	適用コード名					
V-2-3-4-3-9	高圧及び低圧炉心スプレ 配管（原子炉圧力容器内部） の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-3-4-3-10	差圧検出・ほう酸水注入管 （原子炉圧力容器内部）の 耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-3-4-3-11	中性子計測案内管の耐震性 についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-4-2-1	使用済燃料プールの耐震性 についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-4-2-2	使用済燃料貯蔵ラックの耐 震性についての計算書	資料番号	V-5-3				
		コード名	SAP-IV				
V-2-4-2-3-1-1	キャスク容器の耐震性につ いての計算書	資料番号	V-5-5				
		コード名	ABAQUS				
V-2-4-2-3-1-2	バスケットの耐震性につい ての計算書	資料番号	V-5-5				
		コード名	ABAQUS				
V-2-4-2-3-1-5	二次蓋の耐震性についての 計算書	資料番号	V-5-5				
		コード名	ABAQUS				
V-2-4-2-3-2-1	キャスク容器の耐震性につ いての計算書	資料番号	V-5-5				
		コード名	ABAQUS				
V-2-4-2-3-2-5	二次蓋の耐震性についての 計算書	資料番号	V-5-5				
		コード名	ABAQUS				
V-2-4-2-3-3-1	キャスク容器の耐震性につ いての計算書	資料番号	V-5-5				
		コード名	ABAQUS				
V-2-4-2-4	使用済燃料プール温度（S A）の耐震性についての計 算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	NSAFE				
V-2-4-2-5	使用済燃料プール水位・温 度（S A広域）の耐震性につ いての計算書	資料番号	V-5-48				
		コード名	ANSYS				
V-2-4-3-1-1	管の耐震性についての計算 書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-2-4-3-2-1	管の耐震性についての計算 書	資料番号	V-5-4	V-5-35	V-5-36		
		コード名	HISAP	AutoPIPE	STAAD. Pr o		
V-2-4-3-3-3	管の耐震性についての計算 書	資料番号	V-5-47				
		コード名	MSAP （配管）				
V-2-5-2-1-1	管の耐震性についての計算 書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-2-5-3-1-2	管の耐震性についての計算 書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				

計算機プログラム（解析コード）を適用している添付書類（7/19）

目録番号	目録名称	適用コード名					
		資料番号	コード名				
V-2-5-3-2-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-2-5-3-3-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-2-5-4-1-1	残留熱除去系熱交換器の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-3				
		コード名	SAP-IV				
V-2-5-4-1-2	残留熱除去系ポンプの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-5-4-1-3	残留熱除去系ストレーナの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-5-4-1-4	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-2-5-4-1-5	ストレーナ部ティーの耐震計算書（残留熱除去系）	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-5-4-2-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-2-5-5-1-1	高圧炉心スプレイ系ポンプの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-5-5-1-3	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-2-5-5-2-1	低圧炉心スプレイ系ポンプの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-5-5-2-3	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-2-5-5-3-1	原子炉隔離時冷却系ストレーナの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-5-5-4-2	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-47				
		コード名	MSAP (配管)				
V-2-5-5-5-2	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-35	V-5-36			
		コード名	AutoPIPE	STAAD. Pro			
V-2-5-5-6-2	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-47				
		コード名	MSAP (配管)				
V-2-5-6-1-3	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-2-5-6-1-4	ストレーナ部ティーの耐震計算書（原子炉隔離時冷却系）	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				

計算機プログラム（解析コード）を適用している添付書類（8/19）

目録番号	目録名称	適用コード名					
		資料番号	コード名				
V-2-5-7-1-1	残留熱除去系海水系ポンプの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-5-7-1-3	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4	V-5-35	V-5-36		
		コード名	HISAP	AutoPIPE	STAAD. Pro		
V-2-5-7-2-1	緊急用海水ポンプの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-5-7-2-3	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-2-5-8-1-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-2-6-3-2-1	水圧制御ユニットの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-3				
		コード名	SAP-IV				
V-2-6-3-2-2	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-2-6-4-1-3	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-2-6-5-1	起動領域計装の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-3				
		コード名	SAP-IV				
V-2-6-5-2	出力領域計装の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-3				
		コード名	SAP-IV				
V-2-6-5-6	低圧代替注水系原子炉注水流量（常設ライン用）の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	NSAFE				
V-2-6-5-7	低圧代替注水系原子炉注水流量（常設ライン狭帯域用）の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	NSAFE				
V-2-6-5-8	低圧代替注水系原子炉注水流量（可搬ライン用）の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	NSAFE				
V-2-6-5-9	低圧代替注水系原子炉注水流量（可搬ライン狭帯域用）の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	NSAFE				
V-2-6-5-10	代替循環冷却系原子炉注水流量の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	NSAFE				
V-2-6-5-14	原子炉隔離時冷却系系統流量の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	NSAFE				
V-2-6-5-19	原子炉圧力（S A）の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	NSAFE				
V-2-6-5-23	原子炉水位（S A広帯域）の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	NSAFE				

計算機プログラム（解析コード）を適用している添付書類（9/19）

目録番号	目録名称	適用コード名					
		資料番号	コード名				
V-2-6-5-25	ドライウェル圧力の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	NSAFE				
V-2-6-5-26	サブプレッション・チェンバ圧力の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	NSAFE				
V-2-6-5-34	格納容器下部水温の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	NSAFE				
V-2-6-5-38	低圧代替注水系格納容器スプレイ流量（可搬ライン用）の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	NSAFE				
V-2-6-5-39	低圧代替注水系格納容器下部注水流量の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	NSAFE				
V-2-6-5-40	代替循環冷却系格納容器スプレイ流量の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	NSAFE				
V-2-6-5-41	サブプレッション・プール水位の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	NSAFE				
V-2-6-5-42	格納容器下部水位の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	NSAFE				
V-2-6-5-43	原子炉建屋水素濃度の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	NSAFE				
V-2-6-6-1-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-2-6-6-2-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-2-6-6-3-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-47				
		コード名	MSAP (配管)				
V-2-6-7-2-2	屋外アンテナ（中央制御室）の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-49				
		コード名	NX NASTRAN				
V-2-6-7-2-3	衛星電話設備用通信機器収納ラック（中央制御室）の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-49				
		コード名	NX NASTRAN				
V-2-6-7-2-5	屋外アンテナ（緊急時対策所）の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-49				
		コード名	NX NASTRAN				
V-2-6-7-2-6	衛星電話設備用通信機器収納ラック（緊急時対策所）の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-49				
		コード名	NX NASTRAN				
V-2-6-7-6	統合原子力防災ネットワーク設備衛星アンテナの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-5				
		コード名	ABAQUS				
V-2-6-7-11	フィルタ装置入口水素濃度の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				

計算機プログラム（解析コード）を適用している添付書類（10/19）

目録番号	目録名称	適用コード名					
V-2-6-7-12	静的触媒式水素再結合器動作監視装置の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	NSAFE				
V-2-6-7-13	フィルタ装置水位の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	NSAFE				
V-2-6-7-14	フィルタ装置圧力の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	NSAFE				
V-2-6-7-16	残留熱除去系海水系系統流量の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	NSAFE				
V-2-7-2-1-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-2-7-2-2-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-35				
		コード名	AutoPIPE				
V-2-7-2-3-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-35				
		コード名	AutoPIPE				
V-2-7-2-5	非常用ガス処理系排気筒の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-8-2-1	主蒸気管放射線モニタの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	NSAFE				
V-2-8-2-2	格納容器雰囲気放射線モニタ(D/W)の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-8-2-3	格納容器雰囲気放射線モニタ(S/C)の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	NSAFE				
V-2-8-2-7	耐圧強化ベント系放射線モニタの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	NSAFE				
V-2-8-3-1-1	中央制御室換気系ダクトの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	NSAFE				
V-2-8-3-2-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-47				
		コード名	MSAP (配管)				
V-2-8-3-3-1	緊急時対策所換気系ダクトの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-3				
		コード名	SAP-IV				
V-2-8-3-3-2	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-33				
		コード名	SOLVER				
V-2-8-3-4-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-47				
		コード名	MSAP (配管)				
V-2-9-2-1	原子炉格納容器の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				

計算機プログラム（解析コード）を適用している添付書類（11/18）

目録番号	目録名称	適用コード名					
V-2-9-2-2	原子炉格納容器底部コンクリートマットの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-9-2-3	上部シアラグ及びスタビライザの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-9-2-4	下部シアラグ及びダイヤフラムブラケットの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-9-2-6	機器搬入用ハッチの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-9-2-7	所員用エアロックの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-9-2-8	サプレッション・チェンバアクセスハッチの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-9-2-9	配管貫通部の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-9-2-10	電気配線貫通部の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-9-3-1	原子炉建屋原子炉棟の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-2				
		コード名	DYNA2E				
V-2-9-3-2	原子炉建屋大物搬入口の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-9-3-4	原子炉建屋基礎盤の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-9-4-1	ダイヤフラム・フロアの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-9-4-2	ベント管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-9-4-3-1	格納容器スプレイヘッドの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-9-4-3-2-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-35	V-5-36			
		コード名	AutoPIPE	STAAD. Pro			
V-2-9-4-3-3-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-47				
		コード名	MSAP (配管)				
V-2-9-4-3-4-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-35	V-5-36			
		コード名	AutoPIPE	STAAD. Pro			

計算機プログラム（解析コード）を適用している添付書類（12/19）

目録番号	目録名称	適用コード名				
		資料番号	コード名			
V-2-9-4-3-5-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4			
		コード名	HISAP			
V-2-9-4-3-5-2	付属設備の耐震性の計算書	資料番号	V-5-4	V-5-4		
		コード名	HISAP	NSAFE		
V-2-9-5-1-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4			
		コード名	HISAP			
V-2-9-5-2-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4			
		コード名	HISAP			
V-2-9-5-2-4	ブローアウトパネル閉止装置の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1			
		コード名	MSC NASTRAN			
V-2-9-5-3-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4			
		コード名	HISAP			
V-2-9-5-4-2	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4			
		コード名	HISAP			
V-2-9-5-5-1	静的触媒式水素再結合器の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-49			
		コード名	NX NASTRAN			
V-2-9-5-6-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-35	V-5-36	V-5-47	
		コード名	AutoPIPE	STAAD. Pr o	MSAP (配管)	
V-2-9-6-1-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4			
		コード名	HISAP			
V-2-9-7-1-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4	V-5-35	V-5-36	
		コード名	HISAP	AutoPIPE	STAAD. Pr o	
V-2-10-1-2-2	非常用ディーゼル発電機空気だめの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-5			
		コード名	ABAQUS			
V-2-10-1-2-3	非常用ディーゼル発電機燃料油デイトンクの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-5			
		コード名	ABAQUS			
V-2-10-1-2-7	非常用ディーゼル発電機用海水ポンプの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1			
		コード名	MSC NASTRAN			
V-2-10-1-2-9	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4	V-5-35	V-5-36	V-5-47
		コード名	HISAP	AutoPIPE	STAAD. Pr o	MSAP (配管)
V-2-10-1-3-2	高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機空気だめの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-5			
		コード名	ABAQUS			
V-2-10-1-3-3	高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機燃料油デイトンクの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-5			
		コード名	ABAQUS			
V-2-10-1-3-6	高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機用海水ポンプの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1			
		コード名	MSC NASTRAN			

計算機プログラム（解析コード）を適用している添付書類（13/19）

目録番号	目録名称	適用コード名					
		資料番号	V-5-4	V-5-35	V-5-36	V-5-47	
V-2-10-1-3-8	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4	V-5-35	V-5-36	V-5-47	
		コード名	HISAP	AutoPIPE	STAAD. Pro	MSAP (配管)	
V-2-10-1-4-6	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-35	V-5-36			
		コード名	AutoPIPE	STAAD. Pro			
V-2-10-1-5-6	緊急時対策所用発電機制御盤の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-10-1-7-17	常設代替高圧電源装置遠隔操作盤の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-10-2-2-1	防潮堤（鋼製防護壁）の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25	V-5-43	V-5-45	V-5-46
		コード名	FLIP	k-SHAKE	RC断面計算	TDAP III	UC-win/Section
		資料番号	V-5-50	V-5-51	V-5-52		
		コード名	APOLLO SuperDesigner Section	APOLLO SuperDesigner Splice	APOLLO SuperDesigner Ribcheck		
V-2-10-2-2-2	防潮扉の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25			
		コード名	FLIP	k-SHAKE			
V-2-10-2-4	構内排水路逆流防止設備の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25			
		コード名	FLIP	k-SHAKE			
V-2-10-4-2	SA用海水ピット取水塔の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25	V-5-39	V-5-43	V-5-46
		コード名	FLIP	k-SHAKE	Engineer's Studio	RC断面計算	UC-win/Section
V-2-10-4-3	海水引込み管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25	V-5-39		
		コード名	FLIP	k-SHAKE	Engineer's Studio		
V-2-10-4-4-1	貯留堰の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25			
		コード名	FLIP	k-SHAKE			
V-2-10-4-4-2	貯留堰取付護岸の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25			
		コード名	FLIP	k-SHAKE			
V-2-10-4-5	緊急用海水取水管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25	V-5-39		
		コード名	FLIP	k-SHAKE	Engineer's Studio		
V-2-11-2-1	燃料取替機の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-3				
		コード名	SAP-IV				
V-2-11-2-2	原子炉建屋クレーンの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-5				
		コード名	ABAQUS				
V-2-11-2-3	使用済燃料乾式貯蔵建屋天井クレーンの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-28				
		コード名	CONDSLIP				
V-2-11-2-4	チャンネル着脱機の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-3				
		コード名	SAP-IV				

計算機プログラム（解析コード）を適用している添付書類（14/19）

目録番号	目録名称	適用コード名					
		資料番号	コード名				
V-2-11-2-8	制御棒貯蔵ハンガの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-3				
		コード名	SAP-IV				
V-2-11-2-9	ウォータレグシールライン（残留熱除去系、高圧炉心スプレイ系及び低圧炉心スプレイ系）の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-2-11-2-10	格納容器機器ドレンサンプの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-49				
		コード名	NX NASTRAN				
V-2-11-2-11	海水ポンプエリア防護対策施設の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1	V-5-39	V-5-43		
		コード名	MSC NASTRAN	Engineer's Studio	RC断面計 算		
V-2-11-2-12	中央制御室天井照明の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-11-2-13	タービン建屋の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-15	V-5-16	V-5-17	V-5-18	
		コード名	GRIMP2	NVK463	KSHAKE	DAC3N	
V-2-11-2-14	サービス建屋の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-17	V-5-44	V-5-60		
		コード名	KSHAKE	RESP-T	SuperFLU SH/3D		
V-2-11-2-15	使用済燃料乾式貯蔵建屋上屋の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-11-2-16	土留鋼管矢板の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25			
		コード名	FLIP	k-SHAKE			
V-2-11-2-18	原子炉建屋外側ブローアウトパネル防護対策施設の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-別添1-4	ハロンボンベ設備の耐震計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-別添1-5	ハロンガス供給選択弁の耐震計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-別添1-7	二酸化炭素ボンベ設備の耐震計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-別添1-8	二酸化炭素供給選択弁の耐震計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-別添1-10	ガス供給配管の耐震計算書	資料番号	V-5-3	V-5-35	V-5-36		
		コード名	SAP-IV	AutoPIPE	STAAD. Pr o		
V-2-別添2-2	溢水源としない耐震B、Cクラス機器の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1	V-5-3	V-5-4	V-5-35	
		コード名	MSC NASTRAN	SAP-IV	HISAP	AutoPIPE	
V-2-別添3-2	可搬型重大事故等対処設備の保管場所等における入力地震動	資料番号	V-5-25				
		コード名	k-SHAKE				

計算機プログラム（解析コード）を適用している添付書類（15/19）

目録番号	目録名称	適用コード名					
V-2-別添3-4	可搬型重大事故等対処設備のうちボンベ設備の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-5	V-5-49			
		コード名	ABAQUS	NX NASTRAN			
V-2-別添3-5	可搬型重大事故等対処設備のうちその他設備の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-49				
		コード名	NX NASTRAN				
V-3-3-1	原子炉圧力容器の強度計算書	資料番号	V-5-31	V-5-53			
		コード名	NOPS	ASHSD2-B			
V-3-4-2-1-3	管の応力計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-3-4-2-2-2	管の応力計算書	資料番号	V-5-4	V-5-35			
		コード名	HISAP	AutoPIPE			
V-3-4-2-3-4	管の応力計算書	資料番号	V-5-47				
		コード名	MSAP (配管)				
V-3-5-1-1-2	管の応力計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-3-5-2-1-3	管の応力計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-3-5-3-1-2	残留熱除去系ポンプの強度計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-3-5-3-1-3	残留熱除去系ストレーナの強度計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-3-5-3-1-6	管の応力計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-3-5-3-1-7	ストレーナ部ティーの応力計算書（残留熱除去系）	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-3-5-3-2-2	管の応力計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-3-5-4-1-1	高圧炉心スプレイ系ポンプの強度計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-3-5-4-1-5	管の応力計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-3-5-4-2-1	低圧炉心スプレイ系ポンプの強度計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-3-5-4-2-5	管の応力計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-3-5-4-3-1	原子炉隔離時冷却系ストレーナの強度計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				

計算機プログラム（解析コード）を適用している添付書類（16/19）

目録番号	目録名称	適用コード名					
		資料番号	コード名				
V-3-5-4-3-2	ストレーナ部ティ어의応力計算書（原子炉隔離時冷却系）	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-3-5-4-4-3	管の応力計算書	資料番号	V-5-47				
		コード名	MSAP (配管)				
V-3-5-4-5-5	管の応力計算書	資料番号	V-5-35				
		コード名	AutoPIPE				
V-3-5-4-6-3	管の応力計算書	資料番号	V-5-47				
		コード名	MSAP (配管)				
V-3-5-5-1-4	管の応力計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-3-5-6-1-4	管の応力計算書	資料番号	V-5-4	V-5-35			
		コード名	HISAP	AutoPIPE			
V-3-5-6-2-4	管の応力計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-3-6-1-1-5	管の応力計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-3-6-3-1-2	管の応力計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-3-6-3-2-3	管の応力計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-3-6-3-3-3	管の応力計算書	資料番号	V-5-47				
		コード名	MSAP (配管)				
V-3-7-1-2-2	管の応力計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-3-8-1-2-3	管の応力計算書	資料番号	V-5-47				
		コード名	MSAP (配管)				
V-3-8-1-3-4	管の応力計算書	資料番号	V-5-33				
		コード名	SOLVER				
V-3-8-1-4-3	管の応力計算書	資料番号	V-5-47				
		コード名	MSAP (配管)				
V-3-9-1-1-2	ドライウエルトップヘッドの強度計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-3-9-1-1-4	ドライウエル本体及びサブ レクション・チェンバ本体 の強度計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-3-9-1-1-7	原子炉格納容器底部コンク リートマットの強度計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				

計算機プログラム（解析コード）を適用している添付書類（17/19）

目録番号	目録名称	適用コード名					
V-3-9-1-2-2	機器搬入用ハッチの強度計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-3-9-1-3-2	所員用エアロックの強度計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-3-9-1-3-4	サブプレッション・チェンバ アクセスハッチの強度計算 書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-3-9-1-4-1	原子炉格納容器貫通部の強 度計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-3-9-1-4-3	電気配線貫通部の強度計算 書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-3-9-2-2-1-2	格納容器スプレイヘッドの 応力計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-3-9-2-2-2-2	管の応力計算書	資料番号	V-5-35				
		コード名	AutoPIPE				
V-3-9-2-2-3-2	管の応力計算書	資料番号	V-5-47				
		コード名	MSAP (配管)				
V-3-9-2-2-4-2	管の応力計算書	資料番号	V-5-35				
		コード名	AutoPIPE				
V-3-9-2-2-5-2	管の応力計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-3-9-2-2-5-4	付属設備の管の応力計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-3-9-2-3-1-2	管の応力計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-3-9-2-3-2-2	管の応力計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-3-9-2-3-3-2	管の応力計算書	資料番号	V-5-35	V-5-47			
		コード名	AutoPIPE	MSAP (配 管)			
V-3-9-2-4-1-3	管の応力計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-3-9-2-5-1-2	管の応力計算書	資料番号	V-5-4	V-5-35			
		コード名	HISAP	AutoPIPE			
V-3-10-1-1-1- 5	管の応力計算書	資料番号	V-5-4	V-5-35	V-5-47		
		コード名	HISAP	AutoPIPE	MSAP (配 管)		
V-3-10-1-1-2- 5	管の応力計算書	資料番号	V-5-4	V-5-35	V-5-47		
		コード名	HISAP	AutoPIPE	MSAP (配 管)		

計算機プログラム（解析コード）を適用している添付書類（18/19）

目録番号	目録名称	適用コード名					
		資料番号	V-5-27	V-5-32	V-5-61		
V-3-別添 1-1-1	竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算書	資料番号	V-5-27	V-5-32	V-5-61		
		コード名	KANSAS2	LS-DYNA	midas iGen		
V-3-別添 1-1-4	主排気筒の強度計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-3-別添 1-1-8	ディーゼル発電機吸気口の強度計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-3-別添 1-1-10-1	建屋及び構造物の強度計算書	資料番号	V-5-39	V-5-43			
		コード名	Engineer's Studio	RC 断面計算			
V-3-別添 1-2-1-2	防護鋼板の強度計算書	資料番号	V-5-32				
		コード名	LS-DYNA				
V-3-別添 1-2-1-3	架構の強度計算書	資料番号	V-5-1	V-5-32			
		コード名	MSC NASTRAN	LS-DYNA			
V-3-別添 2-1-5	ディーゼル発電機吸気口の強度計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-3-別添 2-1-7	建屋の強度計算書	資料番号	V-5-1	V-5-2			
		コード名	MSC NASTRAN	DYNA2E			
V-3-別添 2-2-1	防護対策施設の強度計算書	資料番号	V-5-5				
		コード名	ABAQUS				
V-3-別添 3-2-1-1	防潮堤（鋼製防護壁）の強度計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25	V-5-39	V-5-43	V-5-50
		コード名	FLIP	k-SHAKE	Engineer's Studio	RC 断面計算	APOLLO SuperDesigner Section
		資料番号	V-5-51	V-5-52			
		コード名	APOLLO SuperDesigner Splice	APOLLO SuperDesigner Ribcheck			
V-3-別添 3-2-1-2-1	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁）の強度計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25	V-5-39	V-5-43	
		コード名	FLIP	k-SHAKE	Engineer's Studio	RC 断面計算	
V-3-別添 3-2-1-2-2	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア））の強度計算書	資料番号	V-5-1	V-5-10	V-5-25	V-5-41	V-5-43
		コード名	MSC NASTRAN	FLIP	k-SHAKE	FREING	RC 断面計算
V-3-別添 3-2-1-3	防潮堤（鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁）の強度計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25	V-5-43	V-5-44	
		コード名	FLIP	k-SHAKE	RC 断面計算	RESP-T	
V-3-別添 3-2-1-4	防潮扉の強度計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25	V-5-43	V-5-44	
		コード名	FLIP	k-SHAKE	RC 断面計算	RESP-T	
V-3-別添 3-2-3	構内排水路逆流防止設備の強度計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25	V-5-43	V-5-44	
		コード名	FLIP	k-SHAKE	RC 断面計算	RESP-T	

計算機プログラム（解析コード）を適用している添付書類（19/19）

目録番号	目録名称	適用コード名					
		資料番号	V-5-10	V-5-25	V-5-41		
V-3-別添 3-2-9	貯留堰の強度計算書	コード名	FLIP	k-SHAKE	FREMING		
		資料番号	V-5-53				
V-3-別添 6-2	シュラウドサポートの応力計算書	コード名	ASHSD2-B				
		資料番号					



V-5-1 計算機プログラム（解析コード）の概要  
・MSC NASTRAN

## 目次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2 解析コードの概要	6
2.1 MSC NASTRAN Ver.2018.0.1	6
2.2 MSC NASTRAN Ver.2016.1.1	8
2.3 MSC NASTRAN Ver.2013.1.1, Ver.2013, Ver.2012.2.0, Ver.2008.0.4, Ver.2008.0.0, Ver.2006r1, Ver.2005	10
2.4 MSC NASTRAN Ver.2008r1	12

## 1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）MSC NASTRANについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-2-35	緊急用海水ポンプピットの耐震性についての計算書	Ver. 2018. 0. 1
V-3-別添3-2-1-2-2	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア））の強度計算書	Ver. 2018. 0. 1
V-2-2-3	原子炉建屋の基礎の耐震性についての計算書	Ver. 2016. 1. 1
V-2-2-11	緊急時対策所建屋の耐震性についての計算書	Ver. 2016. 1. 1
V-2-2-19	格納容器圧力逃がし装置格納槽の耐震性についての計算書	Ver. 2016. 1. 1
V-2-4-2-1	使用済燃料プールの耐震性についての計算書	Ver. 2016. 1. 1
V-2-9-2-2	原子炉格納容器底部コンクリートマットの耐震性についての計算書	Ver. 2016. 1. 1
V-2-9-3-4	原子炉建屋基礎盤の耐震性についての計算書	Ver. 2016. 1. 1
V-3-9-1-1-7	原子炉格納容器底部コンクリートマットの強度計算書	Ver. 2016. 1. 1
V-2-2-15-2	主排気筒の基礎の耐震性についての計算書	Ver. 2013. 1. 1
V-2-6-7-11	フィルタ装置入口水素濃度の耐震性についての計算書	Ver. 2013. 1. 1
V-2-9-3-2	原子炉建屋大物搬入口の耐震性についての計算書	Ver. 2013. 1. 1
V-2-9-5-2-4	ブローアウトパネル閉止装置の耐震性についての計算書	Ver. 2013. 1. 1
V-2-11-2-12	中央制御室天井照明の耐震性についての計算書	Ver. 2013. 1. 1
V-1-2-1	原子炉本体の基礎に関する説明書	Ver. 2013
V-1-8-1	原子炉格納施設の設計条件に関する説明書	Ver. 2013
V-2-2-9	屋外二重管の耐震性についての計算書	Ver. 2013
V-2-3-4-2-4	差圧検出・ほう酸水注入管（ティーより N10 ノズルまでの外管）の耐震性についての計算書	Ver. 2013
V-2-3-4-3-9	高圧及び低圧炉心スプレイ配管（原子炉圧力容器内部）の耐震性についての計算書	Ver. 2013
V-2-3-4-3-10	差圧検出・ほう酸水注入管（原子炉圧力容器内部）の耐震性についての計算書	Ver. 2013
V-2-3-4-3-11	中性子計測案内管の耐震性についての計算書	Ver. 2013
V-2-9-4-1	ダイヤフラム・フロアの耐震性についての計算書	Ver. 2013
V-2-11-2-11	海水ポンプエリア防護対策施設の耐震性についての計算書	Ver. 2012. 2. 0
V-2-11-2-18	原子炉建屋外側ブローアウトパネル防護対策施設の耐震性についての計算書	Ver. 2012. 2. 0

使用添付書類		バージョン
V-2-別添2-2	溢水源としない耐震B, Cクラス機器の耐震性についての計算書	Ver. 2012. 2. 0
V-3-別添1-1-8	ディーゼル発電機吸気口の強度計算書	Ver. 2012. 2. 0
V-3-別添1-2-1-3	架構の強度計算書	Ver. 2012. 2. 0
V-3-別添2-1-5	ディーゼル発電機吸気口の強度計算書	Ver. 2012. 2. 0
V-2-2-5	使用済燃料乾式貯蔵建屋の耐震性についての計算書	Ver. 2008r1
V-2-11-2-15	使用済燃料乾式貯蔵建屋上屋の耐震性についての計算書	Ver. 2008r1
V-3-別添2-1-7	建屋の強度計算書	Ver. 2008r1
V-2-10-1-5-6	緊急時対策所用発電機制御盤の耐震性についての計算書	Ver. 2008. 0. 4
V-2-10-1-7-17	常設代替高圧電源装置遠隔操作盤の耐震性についての計算書	Ver. 2008. 0. 4
V-2-2-15-1	主排気筒の耐震性についての計算書	Ver. 2008. 0. 0
V-2-7-2-5	非常用ガス処理系排気筒の耐震性についての計算書	Ver. 2008. 0. 0
V-2-別添1-4	ハロンボンベ設備の耐震計算書	Ver. 2008. 0. 0
V-2-別添1-5	ハロンガス供給選択弁の耐震計算書	Ver. 2008. 0. 0
V-2-別添1-7	二酸化炭素ボンベ設備の耐震計算書	Ver. 2008. 0. 0
V-2-別添1-8	二酸化炭素供給選択弁の耐震計算書	Ver. 2008. 0. 0
V-3-別添1-1-4	主排気筒の強度計算書	Ver. 2008. 0. 0
V-2-5-4-1-2	残留熱除去系ポンプの耐震性についての計算書	Ver. 2006r1
V-2-5-5-1-1	高圧炉心スプレイ系ポンプの耐震性についての計算書	Ver. 2006r1
V-2-5-5-2-1	低圧炉心スプレイ系ポンプの耐震性についての計算書	Ver. 2006r1
V-2-5-7-1-1	残留熱除去系海水系ポンプの耐震性についての計算書	Ver. 2006r1
V-2-5-7-2-1	緊急用海水ポンプの耐震性についての計算書	Ver. 2006r1
V-2-10-1-2-7	非常用ディーゼル発電機用海水ポンプの耐震性についての計算書	Ver. 2006r1
V-2-10-1-3-6	高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機用海水ポンプの耐震性についての計算書	Ver. 2006r1
V-2-別添2-2	溢水源としない耐震B, Cクラス機器の耐震性についての計算書	Ver. 2006r1

使用添付書類		バージョン
V-3-5-3-1-2	残留熱除去系ポンプの強度計算書	Ver. 2006r1
V-3-5-4-1-1	高圧炉心スプレイ系ポンプの強度計算書	Ver. 2006r1
V-3-5-4-2-1	低圧炉心スプレイ系ポンプの強度計算書	Ver. 2006r1
V-1-8-1	原子炉格納施設の設計条件に関する説明書	Ver. 2005
V-2-3-4-2-3	制御棒駆動機構ハウジング支持金具の耐震性についての計算書	Ver. 2005
V-2-3-4-3-5	ジェットポンプの耐震性についての計算書	Ver. 2005
V-2-3-4-3-6	給水スパージャの耐震性についての計算書	Ver. 2005
V-2-3-4-3-7	高圧及び低圧炉心スプレイスパージャの耐震性についての計算書	Ver. 2005
V-2-3-4-3-8	残留熱除去系配管（原子炉圧力容器内部）の耐震性についての計算書	Ver. 2005
V-2-5-4-1-3	残留熱除去系ストレーナの耐震性についての計算書	Ver. 2005
V-2-5-4-1-5	ストレーナ部ティーの耐震計算書（残留熱除去系）	Ver. 2005
V-2-5-5-3-1	原子炉隔離時冷却系ストレーナの耐震性についての計算書	Ver. 2005
V-2-5-6-1-4	ストレーナ部ティーの耐震計算書（原子炉隔離時冷却系）	Ver. 2005
V-2-8-2-2	格納容器雰囲気放射線モニタ（D/W）の耐震性についての計算書	Ver. 2005
V-2-9-2-1	原子炉格納容器の耐震性についての計算書	Ver. 2005
V-2-9-2-3	上部シアラグ及びスタビライザの耐震性についての計算書	Ver. 2005
V-2-9-2-4	下部シアラグ及びダイヤフラムブラケットの耐震性についての計算書	Ver. 2005
V-2-9-2-6	機器搬入用ハッチの耐震性についての計算書	Ver. 2005
V-2-9-2-7	所員用エアロックの耐震性についての計算書	Ver. 2005
V-2-9-2-8	サプレッション・チェンバアクセスハッチの耐震性についての計算書	Ver. 2005
V-2-9-2-9	配管貫通部の耐震性についての計算書	Ver. 2005
V-2-9-2-10	電気配線貫通部の耐震性についての計算書	Ver. 2005
V-2-9-4-2	ベント管の耐震性についての計算書	Ver. 2005
V-2-9-4-3-1	格納容器スプレイヘッドの耐震性についての計算書	Ver. 2005

使用添付書類		バージョン
V-3-5-3-1-3	残留熱除去系ストレーナの強度計算書	Ver. 2005
V-3-5-3-1-7	ストレーナ部ティーの応力計算書（残留熱除去系）	Ver. 2005
V-3-5-4-3-1	原子炉隔離時冷却系ストレーナの強度計算書	Ver. 2005
V-3-5-4-3-2	ストレーナ部ティーの応力計算書（原子炉隔離時冷却系）	Ver. 2005
V-3-9-1-1-2	ドライウエルトップヘッドの強度計算書	Ver. 2005
V-3-9-1-1-4	ドライウエル本体及びサブプレッション・チェンバ本体の強度計算書	Ver. 2005
V-3-9-1-2-2	機器搬入用ハッチの強度計算書	Ver. 2005
V-3-9-1-3-2	所員用エアロックの強度計算書	Ver. 2005
V-3-9-1-3-4	サブプレッション・チェンバアクセスハッチの強度計算書	Ver. 2005
V-3-9-1-4-1	原子炉格納容器貫通部の強度計算書	Ver. 2005
V-3-9-1-4-3	電気配線貫通部の強度計算書	Ver. 2005
V-3-9-2-2-1-2	格納容器スプレイヘッドの応力計算書	Ver. 2005

## 2 解析コードの概要

### 2.1 MSC NASTRAN Ver. 2018. 0. 1

項目	コード名 MSC NASTRAN
使用目的	2次元有限要素法（はり，シェルモデル）による静的解析
開発機関	MSC. Software Corporation
開発時期	1971年（一般商業用リリース）
使用したバージョン	Ver. 2018. 0. 1
コードの概要	<p>MSC NASTRAN（以下「本解析コード」という。）は，航空機の機体強度解析を目的として開発された，有限要素法による構造解析用の汎用計算機プログラムである。</p> <p>適用モデル（主にはり要素，シェル要素，ソリッド要素）に対して，静的解析（線形，非線形），動的解析（過渡応答解析，周波数応答解析），固有値解析，伝熱解析（温度分布解析），熱応力解析，線形座屈解析等の機能を有している。</p> <p>数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木など様々な分野の構造解析に使用されている。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>本解析コードは，緊急用海水ポンプピット及び防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア））における2次元有限要素法（はり，シェルモデル）による静的解析で使用している。</p> <p><b>【検証(Verification)】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・構造力学分野における一般的知見により解を求めることができる体系について，本解析コードを用いた解析結果と理論モデルによる理論解の比較を行い，解析解が理論解と一致することを確認している。</li> <li>・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。</li> </ul>

<p>検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)</p>	<p>【妥当性確認(Validation)】</p> <ul style="list-style-type: none"><li>・本解析コードは、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木などの様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。</li><li>・九州電力株式会社の「玄海原子力発電所第4号機」において、原子炉周辺建屋及びその他の建物・構築物の静的応力解析に本解析コード(Ver. 2008r1)が使用された実績がある。</li><li>・今回の工事計画認可申請において使用するバージョンは、既工事計画において使用されているものと異なるが、バージョンの変更において解析機能に影響のある変更が行われていないことを確認している。</li><li>・既工事計画で妥当性確認を行ったのは、はり要素、シェル要素及びソリッド要素を用いた3次元有限要素法によるモデルであり、今回実施する2次元有限要素法(はり要素、ソリッド要素)による静的解析と理論的には類似であることから、上述した妥当性確認が2次元静的解析にも展開できる。</li><li>・本解析コードの適用制限として使用要素数があるが、使用した要素数は適用制限以下であり、今回の解析に使用することは妥当である。</li></ul>
--	--

2.2 MSC NASTRAN Ver. 2016. 1. 1

項目 \ コード名	MSC NASTRAN
使用目的	3次元有限要素法による応力解析及び温度分布解析
開発機関	MSC Software Corporation
開発時期	1971年（一般商用リリース）
使用したバージョン	2016. 1. 1
コードの概要	<p>MSC NASTRAN（以下「本解析コード」という。）は、航空機の機体強度解析を目的として開発された、有限要素法による構造解析用の汎用計算機プログラムである。</p> <p>適用モデル（主にはり要素，シェル要素，ソリッド要素）に対して，静的解析（線形，非線形），動的解析（過渡応答解析，周波数応答解析），固有値解析，伝熱解析（温度分布解析），熱応力解析，線形座屈解析等の機能を有している。</p> <p>数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木など様々な分野の構造解析に使用されている。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>本解析コードは，原子炉建屋の使用済燃料プール，基礎盤及び原子炉格納容器底部コンクリートマット，緊急時対策所建屋，格納容器圧力逃がし装置格納槽の応力解析に使用している。また，原子炉格納容器底部コンクリートマットの温度分布解析に使用している。</p> <p><b>【検証(Verification)】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・構造力学分野における一般的知見により解を求めることができる体系について，本解析コードを用いた3次元有限要素法による応力解析結果と理論モデルによる理論解の比較を行い，解析解が理論解と一致することを確認している。</li> <li>・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。</li> </ul>

<p>検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)</p>	<p>【妥当性確認(Validation)】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・関西電力大飯発電所3号機工事計画認可申請書の資料13（耐震性に関する説明書）において、原子炉格納容器，原子炉格納施設の基礎，燃料取扱室上屋の3次元有限要素法による応力解析及び温度分布解析に使用された実績がある。</li> <li>・検証の体系と本工事計画で使用する体系が同等であることから，解析解と理論解の一致をもって解析機能の妥当性も確認している。</li> <li>・今回の工事計画認可申請において使用するバージョンは，他プラントの既工事計画において使用されているものと異なるが，バージョンの変更において解析機能に影響のある変更がおこなわれていないことを確認している。</li> <li>・今回の工事計画認可申請における構造に対し使用する要素，3次元有限要素法による応力解析及び温度分布解析の使用目的に対し，使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。</li> </ul>
--	--

2.3 MSC NASTRAN Ver. 2013. 1. 1, Ver. 2013, Ver. 2012. 2. 0, Ver. 2008. 0. 4, Ver. 2008. 0. 0, Ver. 2006r1, Ver. 2005

項目		コード名
		MSC NASTRAN
使用目的	Ver. 2013 . 1. 1	3次元有限要素法(はりモデル及びシェルモデル)による固有値解析及び応力解析
	Ver. 2013	2次元有限要素法(はりモデル及びシェルモデル)による地震応答解析 はりモデルによる固有値解析及び地震応答解析 3次元有限要素法(はりモデル及びシェルモデル)による応力解析
	Ver. 2012 . 2. 0	3次元有限要素法(はりモデル及びシェルモデル)による固有値解析及び応力解析
	Ver. 2008 . 0. 4	3次元有限要素法(はりモデル及びシェルモデル)による固有値解析, 地震応答解析及び応力解析
	Ver. 2008 . 0. 0	はりモデルによる固有値解析及び応力解析
	Ver. 2006 r1	はりモデルによる固有値解析及び地震応答解析 3次元有限要素法(ソリッド要素)による応力計算
	Ver. 2005	はりモデルによる固有値解析, 地震応答解析及び応力解析 3次元有限要素法(シェルモデル)による応力解析
開発機関		MSC Software Corporation
開発時期		1971年(一般商業用リリース)
使用したバージョン		Ver. 2013. 1. 1, Ver. 2013, Ver. 2012. 2. 0, Ver. 2008. 0. 4, Ver. 2008. 0. 0, Ver. 2006r1, Ver. 2005
コードの概要		<p>MSC NASTRAN(以下「本解析コード」という。)は, 航空機の機体強度解析を目的として開発された, 有限要素法による構造解析用の汎用計算機プログラムである。</p> <p>適用モデル(主にはり要素, シェル要素, ソリッド要素)に対して, 静的解析(線形, 非線形), 動的解析(過渡応答解析, 周波数応答解析), 固有値解析, 伝熱解析(温度分布解析), 熱応力解析, 線形座屈解析等の機能を有している。</p> <p>数多くの研究機関や企業において, 航空宇宙, 自動車, 造船, 機械, 建築, 土木など様々な分野の構造解析に使用されている。</p>

<p>検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)</p>	<p><b>【検証 (Verification)】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・構造力学分野における一般的知見により解を求めることが出来る体系について、本解析コードを用いた解析結果と理論モデルによる理論解の比較を行い、解析解が理論解と一致することを確認している。</li> <li>・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・本解析コードは、航空宇宙、自動車、造船、機械、土木及び建築などの様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。</li> <li>・検証の体系と今回の工事計画認可申請で使用する体系が同等であることから、検証結果を持って、解析機能の妥当性も確認できる。</li> <li>・今回の工事計画認可申請における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。</li> </ul>
--	---

2.4 MSC NASTRAN Ver.2008r1

<p>項目</p> <p style="text-align: center;">コード名</p>	<p>MSC NASTRAN</p>
<p>使用目的</p>	<p>3次元有限要素法による応力解析</p>
<p>開発機関</p>	<p>MSC Software Corporation</p>
<p>開発時期</p>	<p>1971年（一般商用リリース）</p>
<p>使用したバージョン</p>	<p>Ver. 2008r1</p>
<p>コードの概要</p>	<p>MSC NASTRAN（以下「本解析コード」という。）は、航空機の機体強度解析を目的として開発された、有限要素法による構造解析用の汎用計算機プログラムである。</p> <p>適用モデル（主にはり要素，シェル要素，ソリッド要素）に対して，静的解析（線形，非線形），動的解析（過渡応答解析，周波数応答解析），固有値解析，伝熱解析（温度分布解析），熱応力解析，線形座屈解析等の機能を有している。</p> <p>数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木など様々な分野の構造解析に使用されている。</p>
<p>検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)</p>	<p>本解析コードは，使用済燃料乾式貯蔵建屋及び使用済燃料乾式貯蔵建屋上屋の3次元有限要素法による静的応力解析及び動的応力解析に使用している。</p> <p><b>【検証(Verification)】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・構造力学分野における一般的知見により解を求めることができる体系について，本解析コードを用いた3次元有限要素法による応力解析結果と理論モデルによる理論解の比較を行い，解析解が理論解と一致することを確認している。</li> <li>・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認(Validation)】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・関西電力大飯発電所3号機工事計画認可申請書の資料13（耐震性に関する説明書）において，原子炉格納容器，原子炉格納施設の基礎，燃料取扱室上屋の3次元有限要素法による応力解析に使用された実績がある。</li> <li>・検証の体系と今回の工事計画認可申請で使用する体系が同等であることから，解析解と理論解の一致をもって解析機能の妥当性も確認している。</li> <li>・今回の工事計画認可申請において使用するバージョンは，他プラントの既工事計画において使用されているものと同じであることを確認している。</li> <li>・今回の工事計画認可申請における構造に対し使用する要素，3次元有限要素法による応力解析の使用目的に対し，使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。</li> </ul>

## V-5-2 計算機プログラム（解析コード）の概要・DYN A 2 E

## 目次

1.	はじめに	1
1.1	使用状況一覧	2
2	解析コードの概要	3
2.1	DYNA2E Ver. 7.2.48	3
2.2	DYNA2E Ver. 8.0.4	5
3.	DYNA2E Ver. 8.0.4 の解析手法について	7
3.1	一般事項	7
3.2	解析コードの特徴	7
3.3	解析手法	8
3.4	解析フローチャート	14
3.5	検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation)	15

1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）DYNA2Eについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-2-10	緊急時対策所建屋の地震応答計算書	8.0.4
V-2-9-3-1	原子炉建屋原子炉棟の耐震性についての計算書	8.0.4
V-3-別添 2-1-7	建屋の強度計算書	8.0.4
V-2-3-2	炉心, 原子炉圧力容器及び圧力容器内部構造物並びに原子炉格納容器及び原子炉本体の基礎の地震応答計算書	7.2.48

## 2 解析コードの概要

### 2.1 DYNA2E Ver. 7.2.48

項目 \ コード名	DYNA2E
使用目的	固有値解析, 応答解析
開発機関	伊藤忠テクノソリューションズ株式会社
開発時期	1972年 (センチュリリサーチセンタ株式会社) 2007年 (伊藤忠テクノソリューションズ株式会社)
使用したバージョン	Ver. 7.2.48
コードの概要	<p>DYNA2E (以下「本解析コード」という。) は, 土木・建築分野における骨組み*解析を対象として開発された, 市販されている汎用構造計算機プログラムである。</p> <p>本解析コードは, 土木・建築分野における2次元/3次元応答解析コードであり, 固有値解析並びに静的解析 (線形) 及び動的解析 (線形, 非線形) による応答解析が可能である。</p> <p>以下に示す構造に対し, 3種類の解析を行うことができる。</p> <p>&lt;構 造&gt;</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 2次元骨組み構造</li> <li>2. 3次元骨組み構造</li> </ol> <p>&lt;解 析&gt;</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 固有値解析</li> <li>2. 静的解析 (線形)</li> <li>3. 動的解析 (線形, 非線形)</li> </ol> <p>注記 * : 本解析コードでは, 主に曲げせん断はり要素を適用する構造のことをいう。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p><b>【検証 (Verification)】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・一本棒の曲げせん断型モデルについて, 本解析コード及び別解析コードMSC NASTRANを用いて得られた結果を比較して検討し, 本解析コードによる解析結果が妥当であることを確認している。</li> <li>・本解析コードの運用環境について, 開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・検証の内容のとおり, 固有値解析及び応答解析について検証していることから, 解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。</li> <li>・<span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 200px; height: 15px;"></span>第2回工事計画認可申請書のIV-2-4 (原子炉本体の基礎の地震応答計算書) において, 動的解</li> </ul>

	<p>析に使用された実績がある。</p> <ul style="list-style-type: none"><li>・今回の工事計画認可申請において使用するバージョンは、他プラントの既工事計画において使用されているものと異なるが、バージョンの変更において解析機能に影響のある変更がおこなわれていないことを確認している。</li><li>・今回の工事計画認可申請における構造に対し使用する固有値解析及び応答解析の使用目的に対し、使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。</li></ul>
--	--

2.2 DYNA2E Ver. 8.0.4

<p>項目</p>	<p>コード名 DYNA2E</p>
<p>使用目的</p>	<p>3次元有限要素法による応力解析，地震応答解析</p>
<p>開発機関</p>	<p>伊藤忠テクノソリューションズ株式会社</p>
<p>開発時期</p>	<p>1972年（センチュリリサーチセンタ株式会社） 2007年（伊藤忠テクノソリューションズ株式会社）</p>
<p>使用したバージョン</p>	<p>Ver. 8.0.4</p>
<p>コードの概要</p>	<p>DYNA2E（以下「本解析コード」という。）は，土木・建築分野における骨組解析を対象として開発された，市販されている汎用構造解析コードである。</p>
<p>検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)</p>	<p>本解析コードは，原子炉建屋の屋根トラスの弾塑性応力解析に使用している。屋根トラスの応力解析では，部材をはり要素などでモデル化し，部材の圧縮座屈による非線形挙動に対して修正若林モデルによる履歴特性を設定している。また，緊急時対策所建屋については地震応答解析に使用している。</p> <p><b>【検証(Verification)】</b> 本解析コードの検証の内容は以下の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・谷口らの論文および若林らの論文に示される式から算定した履歴曲線と解析結果が一致することを確認している。</li> <li>・応答解析については，別の妥当性が確認されている解析コードによる解析結果と一致することを確認している。</li> <li>・本解析コードを用いた3次元有限要素法による応力解析結果と理論解の比較を行い，両者が一致することを確認している。</li> <li>・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認(Validation)】</b> 本解析コードの妥当性確認の内容は以下の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・検証の内容のとおり，非線形挙動及び応力解析について検証していることから，解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。</li> </ul> <p>・<span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 150px; height: 1.2em; vertical-align: middle;"></span>第2回工事計画認可申請書のIV-2-3（原子炉格納容器及び原子炉建屋の地震応答計算書）において，動的解析に使用された実績がある。</p>

	<ul style="list-style-type: none"><li>•地震応答解析に対して、九州電力株式会社川内原子力発電所第1号機第1回工事計画認可申請書の3-16-1(原子炉格納施設の地震応答解析)において、動的解析に使用された実績があるTDAPⅢを用いた解析解と、本解析コードによる解析解を比較した結果、双方の解が一致していることを確認している。</li><li>•本工事計画における構造に対し使用する要素、応力解析及び応答解析の使用目的に対し、使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。</li></ul>
--	--

### 3. DYN2E Ver. 8.0.4の解析手法について

#### 3.1 一般事項

DYN2Eは、伊藤忠テクノソリューションズ株式会社が開発したプログラムであり、市販の解析コードである。DYN2Eは、原子炉建屋の屋根トラスについての3次元有限要素法による弾塑性応力解析及び緊急時対策所建屋についての質点系地盤連成モデルによる応答解析に使用している。

#### 3.2 解析コードの特徴

DYN2Eは、汎用構造計算機プログラムであり、ここでは、屋根トラスの応力解析及び緊急時対策所建屋の応答解析に関連する主な特徴を以下に示す。

- ・ばね要素やはり要素などでモデル化した、骨組系の固有値解析、静的解析及び動的解析を行う。
- ・質量は、集中質量もしくは分布質量として評価する。
- ・要素に非線形特性を設定し、非線形解析を行うことができる。
- ・ひずみエネルギー比例型もしくはレーリー減衰型の減衰を用いることができる。
- ・固有値解析は、ハウスホルダー法もしくはサブスペース法による。
- ・応答解析は、時間領域の直接積分法による。

### 3.3 解析手法

#### a. 系の剛性マトリクス

図3-1に示す均質等断面のはりについて、断面形の不変、断面の平面保持及び微小変形を仮定すると、要素座標系における材端の力と変位の関係を示す剛性マトリクス $K_e$ は以下のように表される。

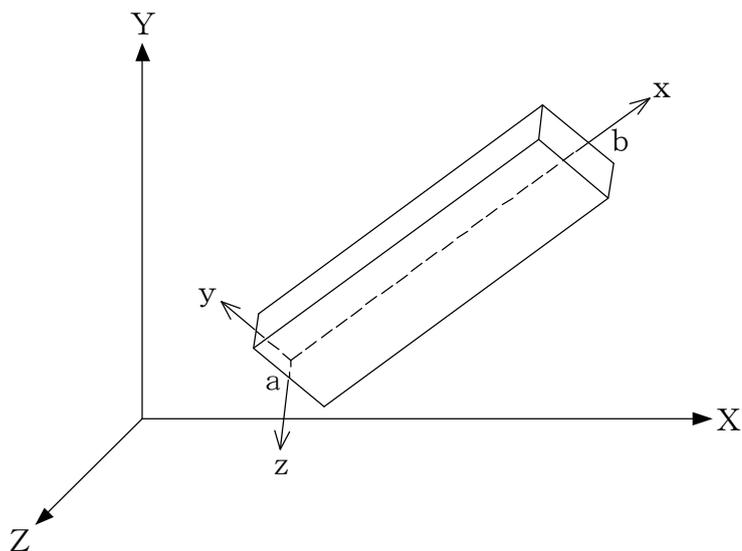


図3-1 はり要素と座標系

$$K_e = \begin{bmatrix} K_{aa} & K_{ab} \\ K_{ba} & K_{bb} \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

ただし,

$$K_{aa} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & & & & & \\ 0 & \frac{12EI_z}{L^3(1+\phi_y)} & & & & \\ 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3(1+\phi_z)} & & & \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & & \\ 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2(1+\phi_z)} & 0 & \frac{(4+\phi_z)EI_y}{L(1+\phi_z)} & \\ 0 & \frac{6EI_z}{L^2(1+\phi_y)} & 0 & 0 & 0 & \frac{(4+\phi_y)EI_z}{L(1+\phi_y)} \end{bmatrix} \quad \text{Sym.}$$

$$K_{ba} = \begin{bmatrix} -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI_z}{L^3(1+\phi_y)} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2(1+\phi_y)} \\ 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{L^3(1+\phi_z)} & 0 & \frac{6EI_y}{L^2(1+\phi_z)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2(1+\phi_z)} & 0 & \frac{(2-\phi_z)EI_y}{L(1+\phi_z)} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_z}{L^2(1+\phi_y)} & 0 & 0 & 0 & \frac{(2-\phi_y)EI_z}{L(1+\phi_y)} \end{bmatrix}$$

$$K_{bb} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & & & & & \\ 0 & \frac{12EI_z}{L^3(1+\phi_y)} & & & & \\ 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3(1+\phi_z)} & & & \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & & \\ 0 & 0 & \frac{6EI_y}{L^2(1+\phi_z)} & 0 & \frac{(4+\phi_z)EI_y}{L(1+\phi_z)} & \\ 0 & -\frac{6EI_z}{L^2(1+\phi_y)} & 0 & 0 & 0 & \frac{(4+\phi_y)EI_z}{L(1+\phi_y)} \end{bmatrix} \quad \text{Sym.}$$

$K_{ab} = K_{ba}^T$  (Tはマトリクスの転置を表す)

$$\phi_y = \frac{12EI_y}{GAs_z L^2}, \quad \phi_z = \frac{12EI_z}{GAs_y L^2}$$

ここで,

- E : ヤング係数
- G : せん断弾性係数
- L : 材長
- A : 断面積
- $A_{s_y}$  : 要素y軸方向のせん断断面積
- $A_{s_z}$  : 要素z軸方向のせん断断面積
- $I_z$  : 要素z軸まわりの断面2次モーメント
- $I_y$  : 要素y軸まわりの断面2次モーメント
- J : 断面ねじりモーメント

要素座標系で表される剛性マトリクスを全体座標系に変換する。図3-2に示す要素座標系と全体座標系の関係は以下のように表される。

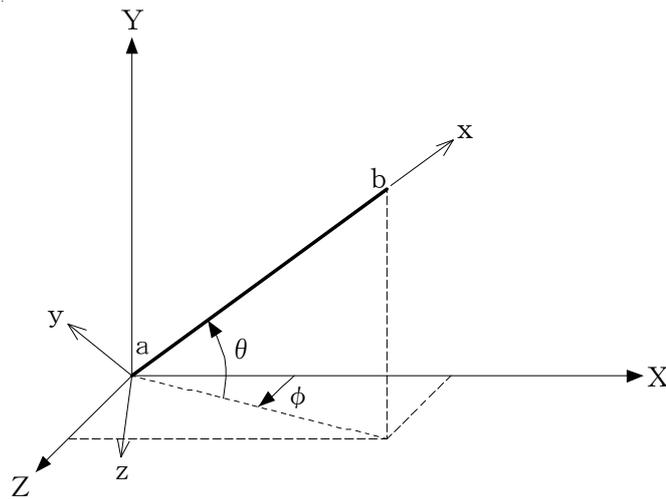


図3-2 要素座標系と全体座標系

$$\begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix} = t \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix}$$

(3-2)

ただし,

$$t = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi \end{bmatrix}$$

全体座標系における材端の力と変位の関係を示す剛性マトリクス $K$ は、要素座標系での剛性マトリクス $K_e$ 及び座標変換マトリクス $T$ を用いて以下のように表される。

$$K = T^{-1} K_e T \quad (3-3)$$

ただし、

$$T = \begin{bmatrix} t & & & \\ & t & & \\ & & t & \\ & & & t \end{bmatrix}$$

全部材の剛性マトリクスを重ね合わせることで、系全体の剛性マトリクスを求めることができる。

b. 非線形解析

増分形式の運動方程式は、変位増分 $\Delta u$ 及び荷重増分 $\Delta f$ を用いて以下のように表される。

$$[M] \{\Delta \ddot{u}\} + [C] \{\Delta \dot{u}\} + [K] \{\Delta u\} = \{\Delta f\} \quad (3-4)$$

ここで、

[M] : 質量マトリクス

[C] : 減衰マトリクス

[K] : 剛性マトリクス

非線形解析では、剛性マトリクスが荷重の増加に伴い変化するため、各ステップにおいて剛性マトリクスを更新し、応答を求めている。例として、図3-3に示すように、ステップ $n$ の応答が線形範囲にあり、ステップ $(n+1)$ において応答が線形範囲を超過した場合には、変位増分 $\Delta u$ はステップ $n$ における剛性マトリクス $K_0$ 及び荷重増分 $\Delta f$ に基づき算出する。次ステップの応答は、変位 $u_{(n+1)}$ に基づく接線剛性マトリクス $K_t$ 及び荷重と応力の不釣り合いである残差荷重 $R$ を用いて、以下に示す運動方程式から求める。

$$[M] \{\Delta \ddot{u}\} + [C] \{\Delta \dot{u}\} + [K_t] \{\Delta u\} = \{f\} + \{R\} \quad (3-5)$$

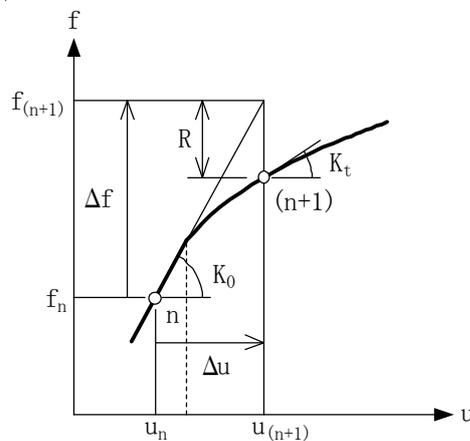


図3-3 非線形解析の概念

## c. 修正若林モデル

屋根トラスの応答解析においては、部材の圧縮座屈による非線形挙動に対して、谷口らの論文(文献1)に示される修正若林モデルによる履歴特性を設定している。修正若林モデルは、若林らの論文(文献2)に示される履歴特性を基に、繰返し载荷による初期座屈以降の耐力低下を、圧縮側累積塑性ひずみの関数として以下の式で評価するモデルである。

$$n/n_0 = 1/(\bar{\zeta} - P_n)^{1/6} \leq 1 \quad (3-6)$$

ただし、

$$n = N/N_y$$

$$P_n = (n_E^2/4) - 5$$

$$n_E = \pi^2 E / (\lambda_e^2 \sigma_y)$$

ここで、

N : 軸力

N<sub>y</sub> : 降伏軸力

n<sub>0</sub> : 無次元化初期座屈耐力(鋼構造設計基準)

$\bar{\zeta}$  : 無次元化圧縮側累積塑性ひずみ

E : 鋼材のヤング係数

$\lambda_e$  : 有効細長比

$\sigma_y$  : 鋼材の降伏応力度

(3-6)式による座屈耐力低下曲線を図3-4に示す。また、若林モデルと修正若林モデルの履歴特性を図3-5に示す。

文献1 : 谷口元 他 : 鉄骨X型ブレース架構の復元力特性に関する研究, 日本建築学会構造工学論文集, B Vol. 37B, pp. 303-316, 1991

文献2 : 若林實 他 : 鉄骨筋違の履歴特性の定式化(その1), 日本建築学会論文報告集, 第316号, pp. 18-24, 1982

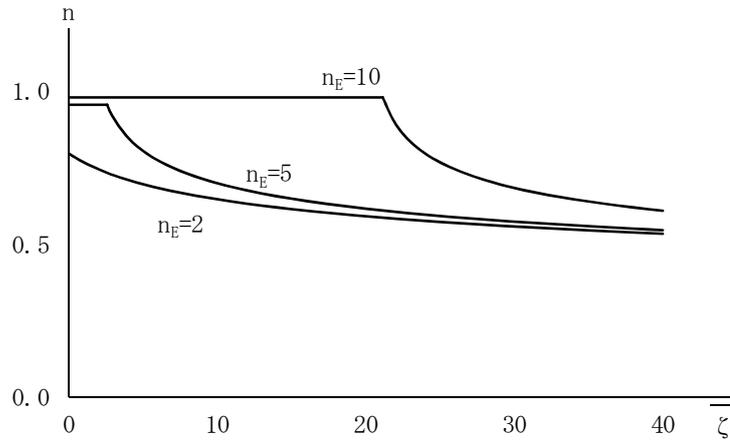
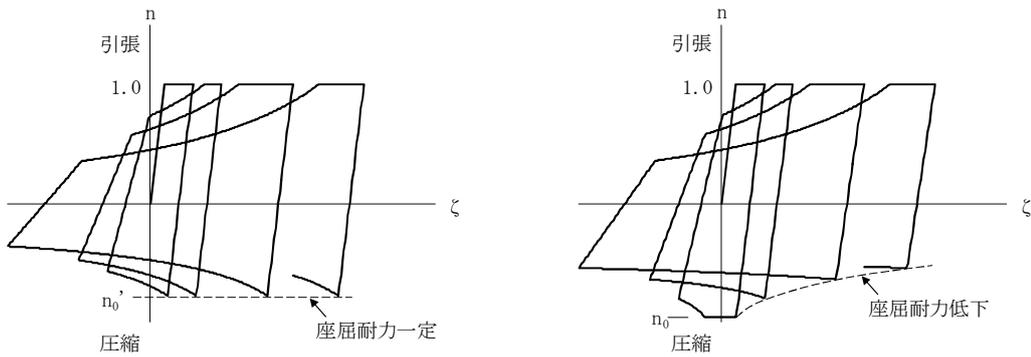


図3-4 修正若林モデルによる座屈耐力低下曲線



(a) 若林モデル

(b) 修正若林モデル

図3-5 若林モデルと修正若林モデルの履歴特性

### 3.4 解析フローチャート

解析フローチャートを図3-6に示す。

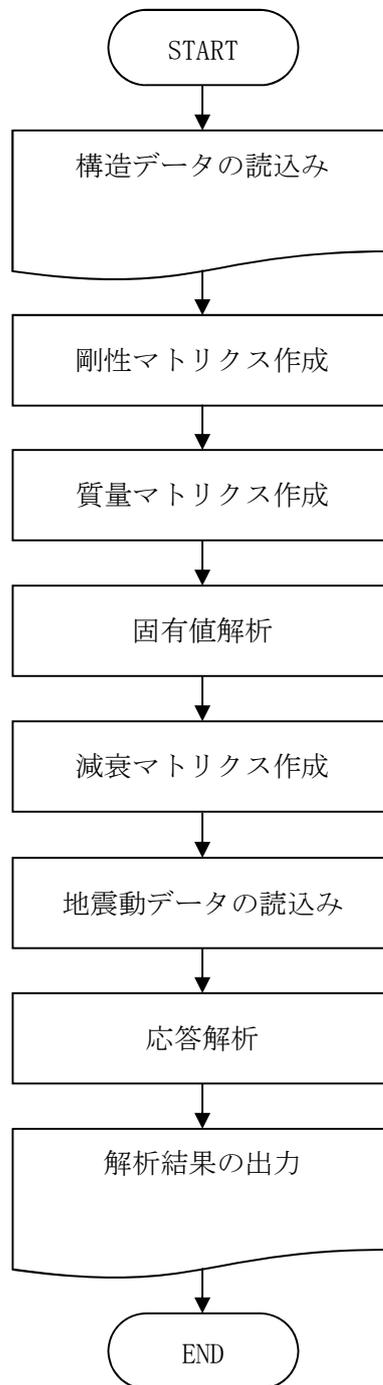


図3-6 解析フローチャート

### 3.5 検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation)

#### a. 文献との比較による検証

以下に示す条件について履歴曲線を算定し、谷口らの論文及び若林らの論文の式から算定した履歴曲線との比較を行う。

- ・オイラー荷重と降伏軸力の比 $n_E$ は5.0とする。
- ・変形サイクルは引張降伏ひずみの比率に対して $\pm 3 \rightarrow \pm 5 \rightarrow \pm 10 \rightarrow +15 \rightarrow 0$ とする。

履歴曲線の比較結果を図3-7に示す。

図より、DYNA2Eの結果は鈴木らの谷口らの論文及び若林らの論文による結果と一致していることが確認できる。

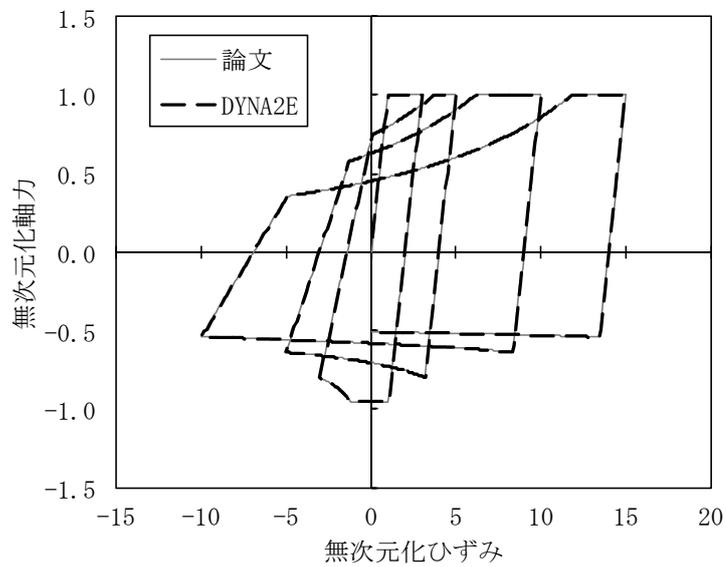


図3-7 解析結果の比較

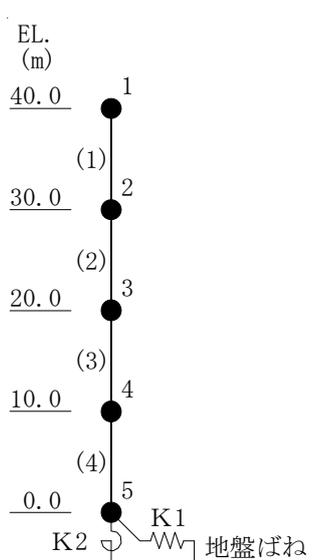
b. 他コードとの比較による検証

緊急時対策所建屋の地震応答解析に使用しているDYNA2Eは、例題に対して、市販されている汎用構造計算機プログラム「TDAPⅢ Ver. 3.09」（大成建設株式会社／株式会社アーキ情報システム）との比較を行う。なお、「TDAPⅢ ver. 3.05」は、九州電力株式会社川内原子力発電所第1号機の工事計画で実績があり、比較には異なるバージョンを使用するが、バージョンの差異により今回使用する解析機能に影響が生じていないことを確認している。

解析モデルの諸元を表3-1～表3-4に、検討に用いる入力地震動を図3-8に、解析結果の比較を図3-9に示す。

図より、DYNA2Eの結果はTDAPⅢによる結果と良い一致を示していることが確認できる。

表3-1 解析モデル諸元



EL. (m)	重量 W (kN)	回転慣性重量 I <sub>g</sub> (×10 <sup>6</sup> kN・m <sup>2</sup> )	せん断断面積 A <sub>s</sub> (m <sup>2</sup> )	断面2次モーメント I (m <sup>4</sup> )
40.0	150000	3.0		
30.0	200000	4.0	100	20000
20.0	250000	5.0	150	30000
10.0	300000	6.0	200	40000
0.0	400000	8.0	250	50000

( )内は要素番号を示す。

表3-2 材料定数

ヤング係数 E (N/mm <sup>2</sup> )	せん断弾性係数 G (N/mm <sup>2</sup> )	減衰定数 h (%)
22100	9210	5

表3-3 (1/2) 復元力特性 ( $\tau - \gamma$  関係)

要素 番号	$\tau_1$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\tau_2$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\tau_3$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\gamma_1$ ( $\times 10^{-3}$ )	$\gamma_2$ ( $\times 10^{-3}$ )	$\gamma_3$ ( $\times 10^{-3}$ )
1	1.79	2.42	5.46	0.194	0.582	4.0
2	1.96	2.65	5.75	0.213	0.639	4.0
3	2.08	2.81	6.09	0.226	0.678	4.0
4	2.18	2.94	6.50	0.237	0.711	4.0

表3-3 (2/2) 復元力特性 (M- $\phi$  関係)

要素 番号	M <sub>1</sub> ( $\times 10^6$ kN $\cdot$ m)	M <sub>2</sub> ( $\times 10^6$ kN $\cdot$ m)	M <sub>3</sub> ( $\times 10^6$ kN $\cdot$ m)	$\phi_1$ ( $\times 10^{-6}$ 1/m)	$\phi_2$ ( $\times 10^{-6}$ 1/m)	$\phi_3$ ( $\times 10^{-6}$ 1/m)
1	2.29	5.74	9.40	5.18	46.0	415
2	4.06	10.8	17.0	6.12	48.0	350
3	6.11	16.9	26.1	6.91	49.4	312
4	8.46	24.0	36.6	7.66	50.7	286

表3-4 地盤のばね定数と減衰係数

ばね 番号	質点 番号	地盤ばね 成分	ばね定数 K <sub>c</sub>	減衰係数 C <sub>c</sub>
K1	5	底面・並進	$4.0 \times 10^{70}$ kN/m	$1.0 \times 10^6$ kN $\cdot$ s/m
K2	5	底面・回転	$3.0 \times 10^{10}$ kN $\cdot$ m/rad	$3.0 \times 10^8$ kN $\cdot$ m $\cdot$ s/rad

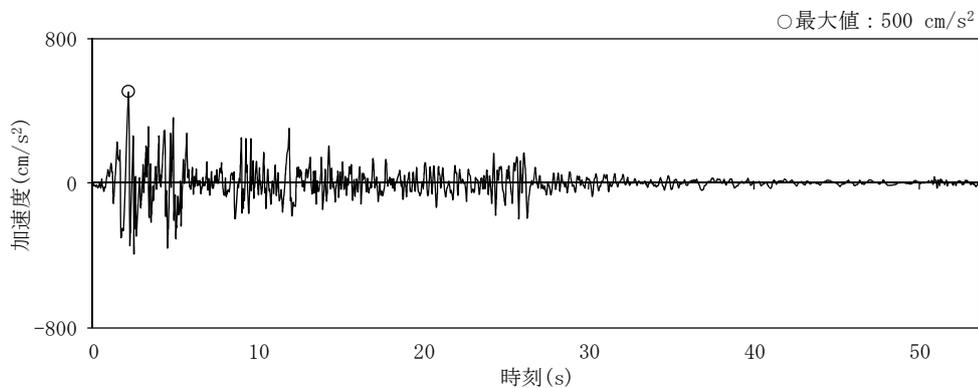
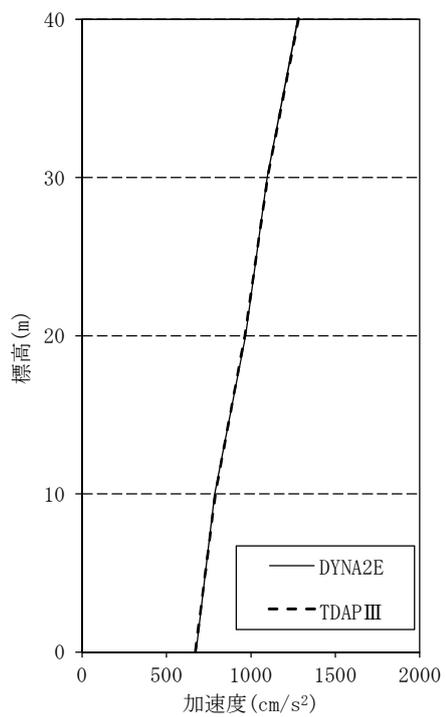
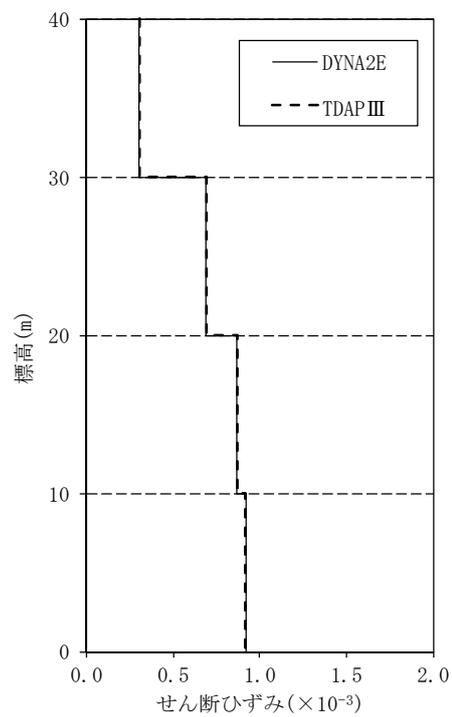


図3-8 入力地震動



(a) 加速度



(b) せん断ひずみ

図3-9 解析結果の比較 (最大応答分布)

c. 使用内容に対する妥当性

原子炉建屋の屋根トラス及び緊急時対策所建屋の応答解析にDYNA2Eを使用することは、次のとおり、本解析の適用範囲に対して検証しており、妥当である。

- ・検証の内容のとおり、非線形挙動及び応力解析について検証していることから、解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。



V-5-3 計算機プログラム（解析コード）の概要・SAP-IV

## 目次

1.	はじめに	1
1.1	使用状況一覧	2
2.	解析コードの概要	3
2.1	SAP-IV CNDYN Ver. 4.1	3
2.2	SAP-IV Ver. 1.00	4
2.3	SAP-IV (統合版) Ver. 8.0 rev.3	5
3.	SAP-IV Ver. 1.00の解析手法について	6
3.1	一般事項	6
3.2	解析コードの特徴	6
3.3	解析手法	6
3.4	解析フローチャート	8
3.5	検証 (Verification) 及び妥当性確認 (Validation)	9
4.	SAP-IV (統合版) Ver. 8.0 rev.3の解析手法について	12
4.1	一般事項	12
4.2	解析コードの特徴	12
4.3	解析手法	12
4.4	解析フローチャート	14
4.5	検証 (Verification) 及び妥当性確認 (Validation)	15

1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）SAP-IVについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-4-2-2	使用済燃料貯蔵ラックの耐震性についての計算書	CNDYN Ver. 4.1
V-2-5-4-1-1	残留熱除去系熱交換器の耐震性についての計算書	CNDYN Ver. 4.1
V-2-6-3-2-1	水圧制御ユニットの耐震性についての計算書	CNDYN Ver. 4.1
V-2-6-5-1	起動領域計装の耐震性についての計算書	CNDYN Ver. 4.1
V-2-6-5-2	出力領域計装の耐震性についての計算書	CNDYN Ver. 4.1
V-2-11-2-1	燃料取替機の耐震性についての計算書	CNDYN Ver. 4.1
V-2-11-2-4	チャンネル着脱機の耐震性についての計算書	CNDYN Ver. 4.1
V-2-11-2-8	制御棒貯蔵ハンガの耐震性についての計算書	CNDYN Ver. 4.1
V-2-8-3-3-1	緊急時対策所換気系ダクトの耐震性についての計算書	Ver. 1.00
V-1-1-8	発電用原子炉施設の溢水防護に関する説明書	(統合版) Ver. 8.0 rev. 3
V-2-別添1-10	ガス供給配管の耐震計算書	(統合版) Ver. 8.0 rev. 3
V-2-別添2-2	溢水源としない耐震B, Cクラス機器の耐震性についての計算書	(統合版) Ver. 8.0 rev. 3

## 2. 解析コードの概要

### 2.1 SAP-IV CNDYN Ver. 4.1

項目	コード名 SAP-IV
使用目的	3次元有限要素法（シェルモデル）による固有値解析及び応力解析 3次元有限要素法（はりモデル）による固有値解析及び地震応答解析
開発機関	
開発時期	1973年（米国カリフォルニア大学） [redacted]
使用したバージョン	CNDYN Ver. 4.1
コードの概要	<p>SAP-IV CNDYN Ver. 4.1（以下「本解析コード」という。）は、カリフォルニア大学が開発したSAP-IVをベースに、[redacted]ある。任意形状の3次元モデル（主にはり要素及びシェル要素）に対して、有限要素法を用いて静的解析及び動的解析を行うもので、主として、機器の固有値計算並びに自重、運転時荷重及び地震力による応力計算等に用いる。</p> <p>本解析コードは、機械工学、土木工学、航空工学等の分野において、多くの実績を有している。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p><b>【検証 (Verification)】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>両持ちはりの単純支持円筒モデルについて、本解析コードによる解析結果と理論解とを比較して検討し、解析解と理論解が一致していることを確認している。</li> <li>平板のモデルについて、シェルモデルによる固有値解析及び応力解析を行い、本解析コードによる解析結果と理論解とを比較して検討し、解析解と理論解が一致していることを確認している。</li> <li>本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>本解析コードは、機械工学、土木工学、航空工学等の分野において、多くの実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。</li> <li>本解析コードのマニュアルにより、今回の工事計画認可申請で使用する3次元有限要素法（シェルモデル）による固有値解析及び応力解析並びに3次元有限要素法（はりモデル）による固有値解析及び地震応答解析に、本解析コードが適用できることを確認している。</li> <li>今回の工事計画認可申請における構造に対し使用する要素及び解析については、既工事計画において使用された実績がある。</li> <li>今回の工事計画認可申請において使用するバージョンは、既工事計画において使用されているものと同じであることを確認している。</li> </ul>

2.2 SAP-IV Ver. 1.00

項目	コード名 SAP-IV
使用目的	3次元有限要素法（はり要素）による固有値解析及び応力解析
開発機関	
開発時期	1973年（米国カリフォルニア大学） [Redacted]
使用したバージョン	Ver. 1.00
コードの概要	<p>SAP-IV Ver. 1.00（以下「本解析コード」という。）は、カリフォルニア大学が開発したSAP-IVをベースに [Redacted] がある。任意形状の3次元モデル（主にはり要素及びシェル要素）に対して、有限要素法を用いて静的解析及び動的解析を行うもので、主として、機器の固有値計算並びに自重、運転時荷重及び地震力による応力計算等に用いる。</p> <p>本解析コードは、機械工学、土木工学、航空工学等の分野において、多くの実績を有している。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p><b>【検証 (Verification)】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・入力されたデータはインプットデータとして解析結果とともに出力され、入力データと一致することを確認している。</li> <li>・片持ちばりの自重による固定端モーメント及び自由端たわみ、固有振動数を本解析コードの静的解析結果及び固有値解析結果と理論解を比較して検討し、解析解と理論解が一致していることを確認している。</li> <li>・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・本解析コードは、機械工学、土木工学、航空工学等の様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。</li> <li>・原子力産業界において、工認申請範囲外の支持構造物に対する耐震性評価に本解析コードの使用実績があることを確認している。</li> <li>・今回の工事計画認可申請で行うはりモデルの固有値解析及び静的解析という解析の使用目的に照らして、用途及び適用範囲が上述の妥当性確認範囲であることを確認している。</li> <li>・開発機関が提示するマニュアルにより今回の工事計画認可申請で使用する3次元有限要素法（はり要素）による固有値解析及び応力解析に本解析コードが適用できることを確認している。</li> </ul>

2.3 SAP-IV（統合版）Ver. 8.0 rev.3

項目 \ コード名	SAP-IV
使用目的	3次元有限要素法（はり要素）による固有値解析及び応力解析
開発機関	株式会社ソフトウェアセンター
開発時期	1973年（米国カリフォルニア大学） <span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 20px; height: 15px;"></span> 年（株式会社ソフトウェアセンター）
使用したバージョン	（統合版）Ver. 8.0 rev3
コードの概要	<p>SAP-IV（統合版）Ver. 8.0 Rev. 3（以下「本解析コード」という。）は、カリフォルニア大学が開発したSAP-IVをベースに、プリポストプログラムの追加を目的としてソフトウェアセンターがカスタマイズした計算機プログラムである。任意形状の3次元モデル（主にはり要素及びシェル要素）に対して、有限要素法を用いて静的解析及び動的解析を行うもので、主として、機器の固有値計算並びに自重、運転時荷重及び地震力による応力計算等に用いる。</p> <p>本解析コードは、機械工学、土木工学、航空工学等の分野において、多くの実績を有している。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p><b>【検証 (Verification)】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>入力されたデータはインプットデータとして解析結果とともに出力され、入力データと一致することを確認している。</li> <li>両端単純支持ばりの自重による中央部のモーメント及びたわみ、固有振動数を本解析コードの静的解析結果及び固有値解析結果と理論解を比較して検討し、解析解と理論解が一致していることを確認している。</li> <li>本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>本解析コードは、機械工学、土木工学、航空工学等の様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。</li> <li>原子力産業界において、工認申請範囲外の管及び支持構造物に対する耐震性評価に本解析コードの使用実績があることを確認している。</li> <li>今回の工事計画認可申請で行うはりモデルの固有値解析及び静的解析という解析の使用目的に照らして、用途及び適用範囲が上述の妥当性確認範囲であることを確認している。</li> <li>開発機関が提示するマニュアルにより今回の工事計画認可申請で使用する3次元有限要素法（はり要素）による固有値解析及び応力解析に本解析コードが適用できることを確認している。</li> </ul>

### 3. SAP-IV Ver. 1.00 の解析手法について

#### 3.1 一般事項

本書は、米国カリフォルニア大学において開発された SAP-IV をベースとして、

汎用解析コード SAP-IV Ver. 1.00 (以下「SAP-IV」という。) の説明書である。

本解析コードは、有限要素法を用いて任意形状の 3 次元モデルの静的解析及び動的解析を行うもので、主として、機器・配管系の自重、運転時荷重及び地震力による応力計算に用いる。

#### 3.2 解析コードの特徴

SAP-IV は、有限要素法を用いて静的解析及び動的解析を行う 3 次元構造解析用の計算機プログラムである。

主な特徴を下記に示す。

- ・ 2 次元及び 3 次元有限要素プログラムである。
- ・ モデル要素として九種類の要素を扱うことができる。
- ・ 静的解析後に、同じモデルを使い、解析条件及び荷重条件を変更し動的解析を行うことができる。

#### 3.3 解析手法

##### 3.3.1 静的解析

要素の平衡方程式を組み立て、構造物全体に対して次の平衡方程式を作り、これを解く。

$$K u = R$$

ここで、

K : 剛性マトリックス

u : 変位ベクトル

R : 荷重ベクトル

計算された節点の変位から、要素の変形及び要素の応力を求める。

### 3.3.2 動的解析

#### (1) 固有値解析

次の固有値方程式を解いて，固有振動数と振動モードを求める。

$$K \phi = \omega^2 M \phi$$

ここで，

K：剛性マトリックス

$\phi$ ：固有ベクトル

$\omega$ ：固有振動数

M：質量マトリックス

上記方程式の解法として，剛性マトリックスと質量マトリックスが小さい場合にはデターミナント法を用い，剛性マトリックスと質量マトリックスが大きい場合はサブスペース反復法が用いられる。

#### (2) 動的応答解析

動的応答解析においては，次の方程式を用いる。

$$M \ddot{u} + C \dot{u} + K u = R(t)$$

ここで，

M：質量マトリックス

$\ddot{u}$ ：加速度ベクトル

$\dot{u}$ ：速度ベクトル

u：変位ベクトル

C：減衰マトリックス

K：剛性マトリックス

R(t)：時刻歴の外荷重ベクトル

上記方程式を用いて，モーダル解析法による時刻歴応答解析，直接積分法による時刻歴応答解析ができる。

### 3.4 解析フローチャート

本解析コードを用いた解析フローチャートを図 3-1 に示す。

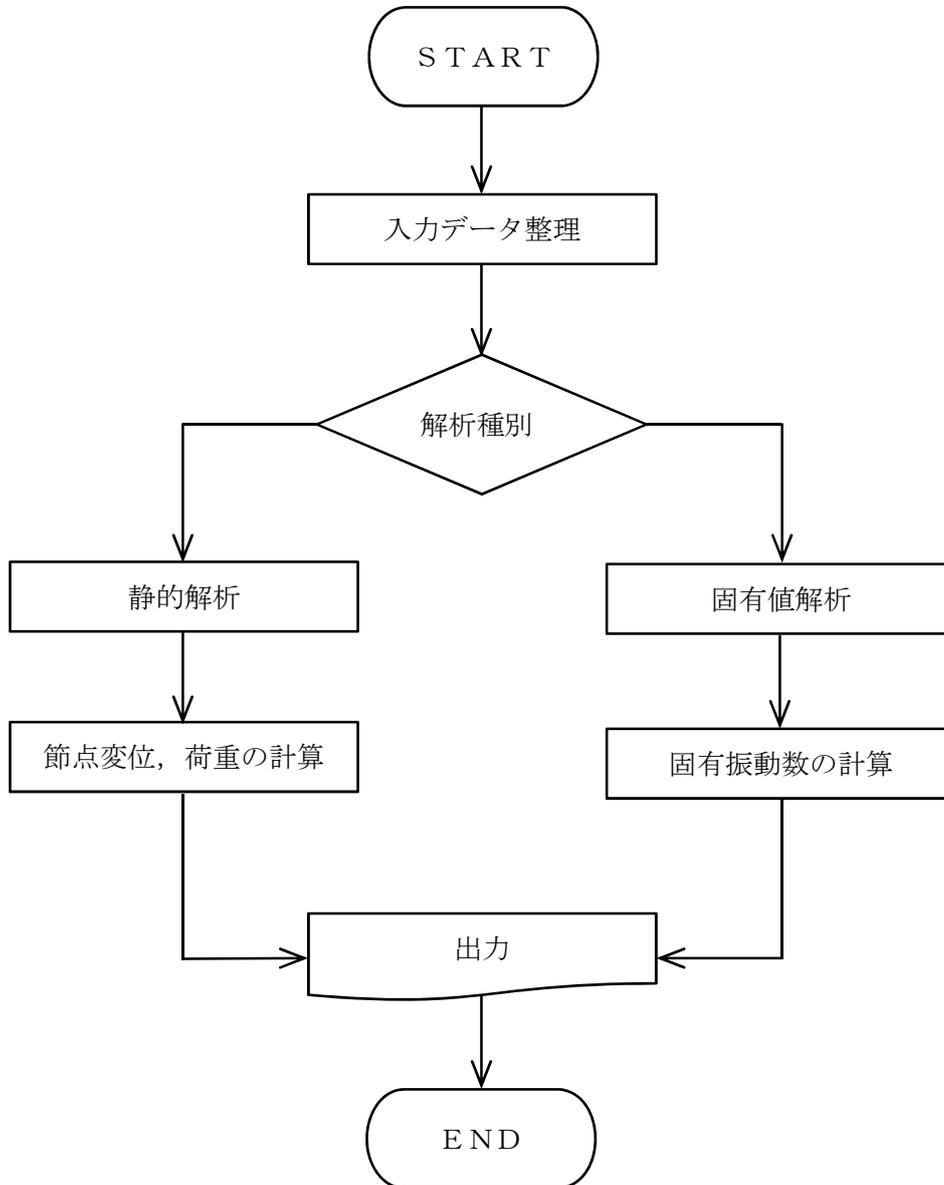


図3-1 解析フローチャート

### 3.5 検証 (Verification) 及び妥当性確認 (Validation)

#### 3.5.1 検証 (Verification)

今回の解析に用いた解析コード SAP-IVの検証として、SAP-IVによる解析結果と理論式より算定する理論解との比較検証を行う。

##### (1) 解析ケース

表 3-1 に示す 2 ケースについて解析を行い、理論解と比較する。

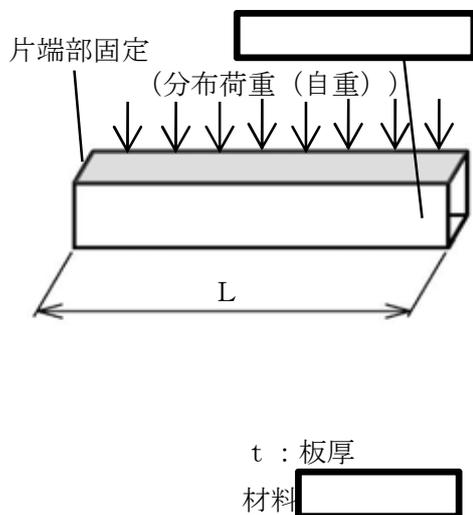
表 3-1 検証ケース

ケース	解析種別	内容	要素	条件
1	静的解析	片持ちばりの自重による 固定端モーメント及び 自由端たわみ	はり要素	角形鋼管，一様密度
2	固有値解析	片持ちばりの固有振動数		

##### (2) 解析条件

使用状況一覧における支持構造物の代表的な部材を使用した解析モデルを使用する。

図 3-2 に解析条件を，図 3-3 に解析モデルを示す。



長さ	L		(mm)
断面形状	—		(mm)
断面積	A		(mm <sup>2</sup> )
有効せん断 断面積	A <sub>s</sub>		(mm <sup>2</sup> )
断面二次 モーメント	I		(mm <sup>4</sup> )
縦弾性係数	E		(N/mm <sup>2</sup> )
横弾性係数	G		(N/mm <sup>2</sup> )
質量密度	$\rho$		(ton/mm <sup>3</sup> )
ポアソン比	$\nu$		(-)
重力加速度	g	9.80665	(m/s <sup>2</sup> )

図3-2 解析条件



図3-3 解析モデル (使用要素：はり要素)

(3) 解析結果

a. 解析結果と理論解との比較（ケース1）

表 3-2 に解析結果と理論解との比較結果を示す。表 3-2 に示すとおり、解析結果と理論解は一致しており、解析コード SAP-IV が検証されていることを確認した。

表 3-2 解析結果と理論解の比較

比較項目	理論解*	解析結果	誤差
$M_{max}$ (固定端モーメント)			
$\delta_{max}$ (自由端たわみ)			
$\sigma$ (発生応力)			

注記\*：理論解は下記の式で計算する。

$$M_{max} = \frac{w \cdot L^2}{2}, \quad w = \rho \cdot A \cdot g \cdot 1000 \quad (\text{出典：機械工学便覧})$$

$$\delta_{max} = \delta + \delta'$$

$\delta$ ：曲げ応力によるたわみ

$$\delta = \frac{w \cdot L^4}{8 \cdot E \cdot I} \quad (\text{出典：機械工学便覧})$$

$\delta'$ ：せん断応力によるたわみ

$$\frac{d\delta'}{dx} = k \frac{Q}{A \cdot G}$$

ここで、 $Q$ ：せん断力

$k$ ：形状係数

$$\sigma = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2} \quad (\text{出典：設計・建設規格})$$

b. 解析結果と理論解との比較（ケース2）

表 3-3 に解析結果と理論解の固有振動数の比較結果を示す。表 3-3 に示すとおり、解析結果を理論解は一致しており、解析コード SAP-IV が検証されていることを確認した。

表 3-3 解析結果と理論解の比較

(単位：Hz)

次数	理論解*	解析結果	誤差

注記\*：理論解は下記の式で計算する。(出典：機械工学便覧)

$$f = \frac{\lambda^2}{2 \cdot \pi \cdot L^2} \sqrt{\frac{E \cdot I}{A \cdot \rho}}$$



3.5.2 妥当性確認 (Validation)

本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。

- ・ 本解析コードは、機械工学、土木工学、航空工学等の様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。
- ・ 原子力産業界において、工認申請範囲外の支持構造物に対する耐震性評価に本解析コードが使用された実績があることを確認している。
- ・ 今回の工事計画認可申請で行うはりモデルの固有値解析及び静的解析という解析の使用目的に照らして、用途、適用範囲が上述の妥当性確認範囲であることを確認している。
- ・ 開発機関が提示するマニュアルにより今回の工事計画認可申請で使用する3次元有限要素法（はり要素）による固有値解析、応力解析に本解析コードが適用できることを確認している。

3.5.3 評価結果

3.5.1 及び 3.5.2 より、本解析コードを使用目的に示す固有値解析及び応力解析に用いることは妥当である。

#### 4. SAP-IV（統合版）Ver. 8.0 rev. 3 の解析手法について

##### 4.1 一般事項

本書は、米国カリフォルニア大学において開発された SAP-IV をベースに、プリポストプログラムの追加を目的として、  年から株式会社ソフトウェアセンターによりカスタマイズされた汎用解析コード SAP-IV（統合版）Ver. 8.0 rev. 3（以下「SAP-IV」という）の説明書である。

本解析コードは、有限要素法を用いて任意形状の 3 次元モデルの静的解析及び動的解析を行うもので、主として、機器・配管系の自重、運転時荷重及び地震力による応力計算に用いる。

##### 4.2 解析コードの特徴

SAP-IV は、有限要素法を用いて静的解析及び動的解析を行う 3 次元構造解析用のプログラムである。

主な特徴を下記に示す。

- ・ 2 次元及び 3 次元有限要素プログラムである。
- ・ モデル要素として九種類の要素を扱うことができる。
- ・ 静的解析後に、同じモデルを使い、解析条件及び荷重条件を変更し動的解析を行うことができる。

##### 4.3 解析手法

###### 4.3.1 静的解析

要素の平衡方程式を組み立て、構造物全体に対して次の平衡方程式を作り、これを解く。

$$K u = R$$

ここで、

K : 剛性マトリックス

u : 変位ベクトル

R : 荷重ベクトル

計算された節点の変位から、要素の変形及び要素の応力を求める。

### 4.3.2 動的解析

#### (1) 固有値解析

次の固有値方程式を解いて、固有振動数と振動モードを求める。

$$K \phi = \omega^2 M \phi$$

ここで、

K : 剛性マトリックス

$\phi$  : 固有ベクトル

$\omega$  : 固有振動数

M : 質量マトリックス

上記方程式の解法として、剛性マトリックスと質量マトリックスが小さい場合にはデターミナント法を用い、剛性マトリックスと質量マトリックスが大きい場合はサブスペース反復法が用いられる。

#### (2) 動的応答解析

動的応答解析においては、次の方程式を用いる。

$$M \ddot{u} + C \dot{u} + K u = R(t)$$

ここで、

M : 質量マトリックス

$\ddot{u}$  : 加速度ベクトル

$\dot{u}$  : 速度ベクトル

u : 変位ベクトル

C : 減衰マトリックス

K : 剛性マトリックス

R(t) : 時刻歴の外荷重ベクトル

上記方程式を用いて、モーダル解析法による時刻歴応答解析、直接積分法による時刻歴応答解析ができる。

#### 4.4 解析フローチャート

本解析コードを用いた解析フローチャートを図 4-1 に示す。

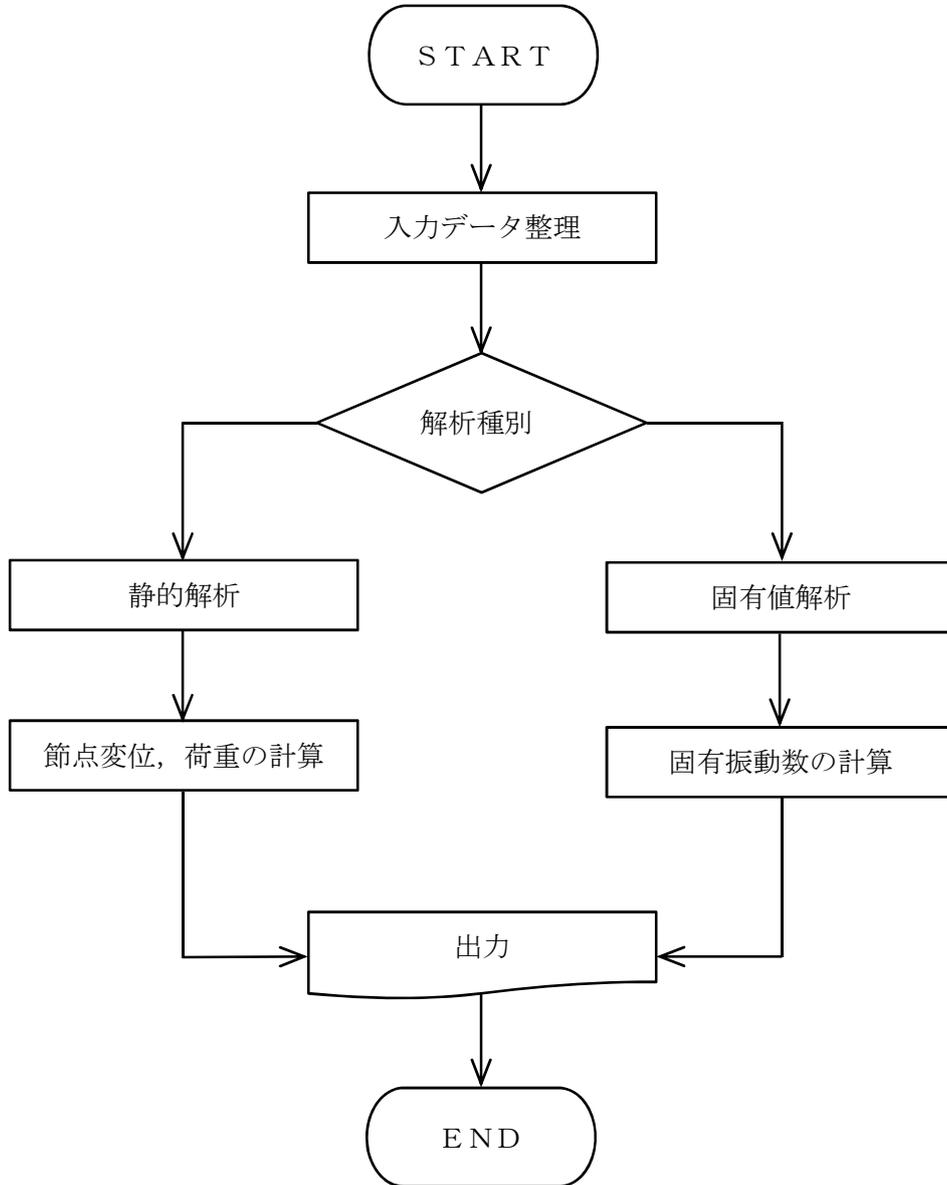


図4-1 解析フローチャート

#### 4.5 検証 (Verification) 及び妥当性確認 (Validation)

##### 4.5.1 検証 (Verification)

今回の解析に用いた解析コード SAP-IV の検証として、SAP-IV による解析結果と理論式より算定する理論解との比較検証を行う。

##### (1) 解析ケース

表 4-1 に示す 2 ケースについて解析を行い、理論解と比較する。

表 4-1 検証ケース

ケース	解析種別	内容	要素	条件
1	静的解析	両端単純支持ばりの自重による中央部のモーメント及びたわみ	はり要素	鋼管，一様密度
2	固有値解析	両端単純支持ばりの固有振動数		

##### (2) 解析条件

使用状況一覧における管の代表的な部材を使用した解析モデルを使用する。

図 4-2 に解析条件を、図 4-3 に解析モデルを示す。

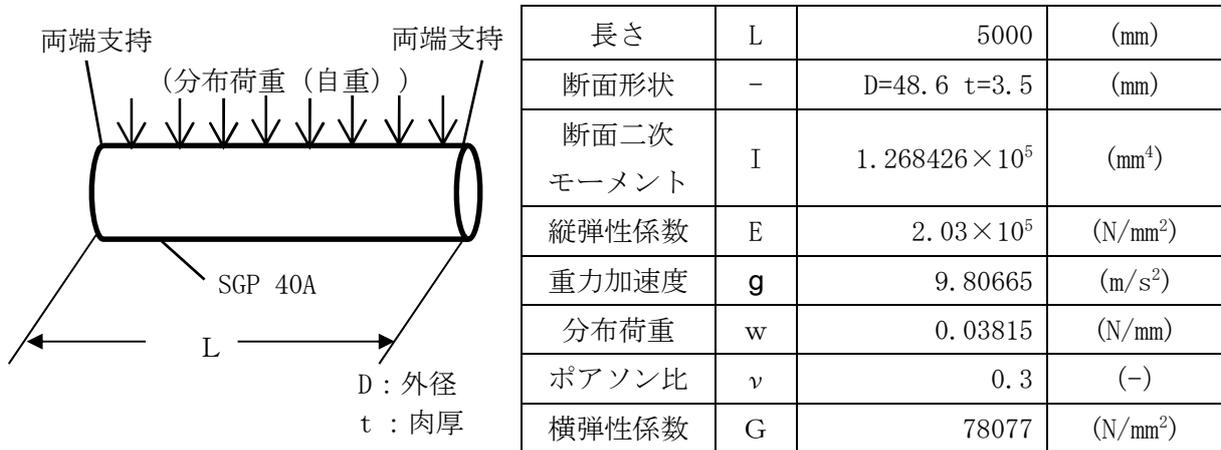


図4-2 解析条件



図4-3 解析モデル (使用要素：はり要素)

(3) 解析結果

a. 解析結果と理論解との比較 (ケース1)

表 4-2 に解析結果と理論解との比較結果を示す。表 4-2 に示すとおり、解析結果と理論解は一致しており、解析コード SAP-IV が検証されていることが確認された。

表 4-2 解析結果と理論解の比較

比較項目	理論解*	解析結果	誤差
$M_{max}$ (中央曲げモーメント)	$1.1922 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{mm}$	$1.1922 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{mm}$	0.00 %
$\delta_{max}$ (中央たわみ)	12.063 mm	12.064 mm	0.01 %

注記 \* : 理論解は下記の式で計算する。

$$M_{max} = \frac{w \cdot L^2}{8} \quad (\text{出典：機械工学便覧})$$

$$\delta_{max} = \delta + \delta'$$

$\delta$  : 曲げ応力によるたわみ

$$\delta = \frac{5w \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} \quad (\text{出典：機械工学便覧})$$

$\delta'$  : せん断応力によるたわみ

$$\delta' = \frac{1}{\kappa \cdot A \cdot G} \int_0^{\frac{L}{2}} Q dx \quad (\text{出典：機械工学便覧})$$

$$= \frac{w \cdot L^2}{4 \cdot A \cdot G}$$

ここで、 $Q$  : せん断力

$\kappa$  : 形状係数 (=0.5) (出典：構造力学公式集)

b. 解析結果と理論解との比較 (ケース2)

表 4-3 に解析結果と理論解の固有振動数の比較結果を示す。表 4-3 に示すとおり、解析結果と理論解は一致しており、解析コード SAP-IV が検証されていることが確認された。

表 4-3 解析結果と理論解の比較

(単位 : Hz)

次数	理論解*	解析結果	誤差
1次	5.112	5.111	-0.02 %

注記 \* : 理論解は下記の式で計算する。(出典 : 機械工学便覧)

なお、解析結果は曲げ及びせん断による変位を考慮しているが、せん断による変位が曲げによる変位に比べて小さいことから、理論解については、せん断による変位を無視して、曲げによる変位のみを考慮する。

$$f = \frac{\lambda^2}{2 \cdot \pi \cdot L^2} \sqrt{\frac{E \cdot I}{w_1}}, \quad w_1 = w \cdot 1000 / g$$

ここに,  $\lambda = \pi$

#### 4.5.2 妥当性確認 (Validation)

本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。

- 本解析コードは、機械工学，土木工学，航空工学等の様々な分野における使用実績を有しており，妥当性は十分に確認されている。
- 原子力産業界において，工認申請範囲外の支持構造物に対する耐震性評価に本解析コードの使用実績があることを確認している。
- 今回の工事計画認可申請で行うはりモデルの固有値解析及び静的解析という解析の使用目的に照らして，用途及び適用範囲が上述の妥当性確認範囲であることを確認している。
- 開発機関が提示するマニュアルにより今回の工事計画認可申請で使用する3次元有限要素法（はり要素）による固有値解析及び応力解析に本解析コードが適用できることを確認している。

#### 4.5.3 評価結果

4.5.1 及び 4.5.2 より，本解析コードを使用目的に示す固有値解析及び応力解析に用いることは妥当である。

V-5-4 計算機プログラム（解析コード）の概要  
・H I S A P 及びN S A F E

## 目次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	5
2.1 HISAP Ver.52	5
2.2 NSAFE Ver.5	6

1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）HISAP及びNSAFEについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-4-3-1-1	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver. 52
V-2-4-3-2-1	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver. 52
V-2-5-2-1-1	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver. 52
V-2-5-3-1-2	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver. 52
V-2-5-3-2-1	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver. 52
V-2-5-3-3-1	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver. 52
V-2-5-4-1-4	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver. 52
V-2-5-4-2-1	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver. 52
V-2-5-5-1-3	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver. 52
V-2-5-5-2-3	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver. 52
V-2-5-6-1-3	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver. 52
V-2-5-7-1-3	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver. 52
V-2-5-7-2-3	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver. 52
V-2-5-8-1-1	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver. 52
V-2-6-3-2-2	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver. 52
V-2-6-4-1-3	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver. 52
V-2-6-6-1-1	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver. 52
V-2-6-6-2-1	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver. 52
V-2-7-2-1-1	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver. 52
V-2-9-4-3-5-1	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver. 52
V-2-9-4-3-5-2	付属設備の耐震性の計算書	HISAP Ver. 52
V-2-9-5-1-1	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver. 52
V-2-9-5-2-1	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver. 52
V-2-9-5-3-1	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver. 52
V-2-9-5-4-2	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver. 52
V-2-9-6-1-1	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver. 52
V-2-9-7-1-1	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver. 52
V-2-10-1-2-9	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver. 52
V-2-10-1-3-8	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver. 52
V-2-11-2-9	ウォータレグシールライン（残留熱除去系，高圧炉心スプレ イ系及び低圧炉心スプレイ系）の耐震性についての計算書	HISAP Ver. 52
V-2-別添 2-2	溢水源としない耐震 B, C クラス機器の耐震性についての計 算書	HISAP Ver. 52
V-3-4-2-1-3	管の応力計算書	HISAP Ver. 52
V-3-4-2-2-2	管の応力計算書	HISAP Ver. 52

使用添付書類		バージョン
V-3-5-1-1-2	管の応力計算書	HISAP Ver. 52
V-3-5-2-1-3	管の応力計算書	HISAP Ver. 52
V-3-5-3-1-6	管の応力計算書	HISAP Ver. 52
V-3-5-3-2-2	管の応力計算書	HISAP Ver. 52
V-3-5-4-1-5	管の応力計算書	HISAP Ver. 52
V-3-5-4-2-5	管の応力計算書	HISAP Ver. 52
V-3-5-5-1-4	管の応力計算書	HISAP Ver. 52
V-3-5-6-1-4	管の応力計算書	HISAP Ver. 52
V-3-5-6-2-4	管の応力計算書	HISAP Ver. 52
V-3-6-1-1-5	管の応力計算書	HISAP Ver. 52
V-3-6-3-1-2	管の応力計算書	HISAP Ver. 52
V-3-6-3-2-3	管の応力計算書	HISAP Ver. 52
V-3-7-1-2-2	管の応力計算書	HISAP Ver. 52
V-3-9-2-2-5-2	管の応力計算書	HISAP Ver. 52
V-3-9-2-2-5-4	付属設備の管の応力計算書	HISAP Ver. 52
V-3-9-2-3-1-2	管の応力計算書	HISAP Ver. 52
V-3-9-2-3-2-2	管の応力計算書	HISAP Ver. 52
V-3-9-2-4-1-3	管の応力計算書	HISAP Ver. 52
V-3-9-2-5-1-2	管の応力計算書	HISAP Ver. 52
V-3-10-1-1-1-5	管の応力計算書	HISAP Ver. 52
V-3-10-1-1-2-5	管の応力計算書	HISAP Ver. 52
V-2-4-2-4	使用済燃料プール温度（S A）の耐震性についての計算書	NSAFE Ver. 5
V-2-6-5-6	低圧代替注水系原子炉注水流量（常設ライン用）の耐震性についての計算書	NSAFE Ver. 5
V-2-6-5-7	低圧代替注水系原子炉注水流量（常設ライン狭帯域用）の耐震性についての計算書	NSAFE Ver. 5
V-2-6-5-8	低圧代替注水系原子炉注水流量（可搬ライン用）の耐震性についての計算書	NSAFE Ver. 5
V-2-6-5-9	低圧代替注水系原子炉注水流量（可搬ライン狭帯域用）の耐震性についての計算書	NSAFE Ver. 5
V-2-6-5-10	代替循環冷却系原子炉注水流量の耐震性についての計算書	NSAFE Ver. 5

使用添付書類		バージョン
V-2-6-5-14	原子炉隔離時冷却系系統流量の耐震性についての計算書	NSAFE Ver. 5
V-2-6-5-19	原子炉圧力 (S A) の耐震性についての計算書	NSAFE Ver. 5
V-2-6-5-23	原子炉水位 (S A 広帯域) の耐震性についての計算書	NSAFE Ver. 5
V-2-6-5-25	ドライウェル圧力の耐震性についての計算書	NSAFE Ver. 5
V-2-6-5-26	サプレッション・チェンバ圧力の耐震性についての計算書	NSAFE Ver. 5
V-2-6-5-34	格納容器下部水温の耐震性についての計算書	NSAFE Ver. 5
V-2-6-5-38	低圧代替注水系格納容器スプレイ流量 (可搬ライン用) の耐震性についての計算書	NSAFE Ver. 5
V-2-6-5-39	低圧代替注水系格納容器下部注水流量の耐震性についての計算書	NSAFE Ver. 5
V-2-6-5-40	代替循環冷却系格納容器スプレイ流量の耐震性についての計算書	NSAFE Ver. 5
V-2-6-5-41	サプレッション・プール水位の耐震性についての計算書	NSAFE Ver. 5
V-2-6-5-42	格納容器下部水位の耐震性についての計算書	NSAFE Ver. 5
V-2-6-5-43	原子炉建屋水素濃度の耐震性についての計算書	NSAFE Ver. 5
V-2-6-7-12	静的触媒式水素再結合器動作監視装置の耐震性についての計算書	NSAFE Ver. 5
V-2-6-7-13	フィルタ装置水位の耐震性についての計算書	NSAFE Ver. 5
V-2-6-7-14	フィルタ装置圧力の耐震性についての計算書	NSAFE Ver. 5
V-2-6-7-16	残留熱除去系海水系系統流量の耐震性についての計算書	NSAFE Ver. 5
V-2-8-2-1	主蒸気管放射線モニタの耐震性についての計算書	NSAFE Ver. 5
V-2-8-2-3	格納容器雰囲気放射線モニタ (S/C) の耐震性についての計算書	NSAFE Ver. 5
V-2-8-2-7	耐圧強化ベント系放射線モニタの耐震性についての計算書	NSAFE Ver. 5
V-2-8-3-1-1	中央制御室換気系ダクトの耐震性についての計算書	NSAFE Ver. 5
V-2-9-4-3-5-2	付属設備の耐震性の計算書	NSAFE Ver. 5

2. 解析コードの概要

2.1 HISAP Ver. 52

コード名 項目	HISAP
使用目的	3次元有限要素法（はりモデル）による管の固有値解析及び応力解析
開発機関	株式会社日立製作所
開発時期	1978年
使用したバージョン	HISAP Ver. 52
コードの概要	<p>HISAP（以下「本解析コード」という。）は、配管の強度解析を目的として開発された計算機プログラムである。本解析コードは、汎用構造解析コード <span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 40px; height: 15px; vertical-align: middle;"></span> をメインプログラムとし、応力評価プログラム及びそれらのインターフェイスプログラムのサブプログラムから成る。</p> <p>任意の1次元、2次元あるいは3次元形状に対し、静的解析、動的解析を行うことが可能で、反力・モーメント・応力、固有値・刺激係数等の算出が可能である。</p> <p>原子力の分野における使用実績を有している。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<b>【検証 (Verification)】</b> <div style="border: 1px solid black; height: 150px; width: 100%;"></div>
	<b>【妥当性確認 (Validation)】</b> <div style="border: 1px solid black; height: 150px; width: 100%;"></div>

2.2 NSAFE Ver. 5

項目 \ コード名	NSAFE
使用目的	3次元有限要素法（はりモデル）による支持構造物の固有値解析及び応力解析
開発機関	株式会社日立プラントコンストラクション
開発時期	1982年
使用したバージョン	NSAFE Ver. 5
コードの概要	<p>NSAFE（以下「本解析コード」という。）は、支持構造物の強度解析を目的として開発された計算機プログラムである。本解析コードは、汎用構造解析コード <span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 1em; height: 1em; vertical-align: middle;"></span> をメインプログラムとし、応力評価プログラム及びそれらのインターフェイスプログラムのサブプログラムから成る。</p> <p>任意の1次元、2次元あるいは3次元形状に対し、静的解析、動的解析を行うことが可能で、反力・モーメント・応力、固有値・刺激係数等の算出が可能である。</p> <p>原子力の分野における使用実績を有している。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p><b>【検証 (Verification)】</b></p> <div style="border: 2px solid black; height: 150px; width: 100%;"></div>
	<p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></p> <div style="border: 2px solid black; height: 150px; width: 100%;"></div>

## V-5-5 计算机プログラム（解析コード）の概要・ABAQUS

## 目次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3
2.1 ABAQUS Ver. 6.14-3	3
2.2 ABAQUS Ver. 6.12-1	4
2.3 ABAQUS Ver. 6.11-2	5
2.4 ABAQUS Ver. 6.11-1, Ver6.4-1	6
2.5 ABAQUS Ver. 6.5-4	7
2.6 ABAQUS Ver. 6.4-4	9
3. ABAQUS Ver. 6.12-1の解析手法について	10
3.1 一般事項	10
3.2 解析コードの特徴	10
3.3 解析手法	11
3.4 解析フローチャート	12
3.5 検証 (Verification) 及び妥当性確認 (Validation)	13

## 1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）ABAQUSについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-4-2-3-1-1	キャスク容器の耐震性についての計算書	Ver. 6.14-3
V-2-4-2-3-1-2	バスケットの耐震性についての計算書	Ver. 6.14-3
V-2-4-2-3-2-1	キャスク容器の耐震性についての計算書	Ver. 6.14-3
V-2-6-7-6	統合原子力防災ネットワーク設備衛星アンテナの耐震性についての計算書	Ver. 6.12-1
V-1-8-1	原子炉格納施設の設計条件に関する説明書	Ver. 6.11-2
V-1-8-1	原子炉格納施設の設計条件に関する説明書	Ver. 6.11-1
V-2-3-4-3-3	気水分離器及びスタンドパイプの耐震性についての計算書	Ver. 6.11-1
V-2-4-2-3-3-1	キャスク容器の耐震性についての計算書	Ver. 6.11-1
V-2-10-1-2-2	非常用ディーゼル発電機空気だめの耐震性についての計算書	Ver. 6.5-4
V-2-10-1-2-3	非常用ディーゼル発電機燃料油デイトンクの耐震性についての計算書	Ver. 6.5-4
V-2-10-1-3-2	高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機空気だめの耐震性についての計算書	Ver. 6.5-4
V-2-10-1-3-3	高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機燃料油デイトンクの耐震性についての計算書	Ver. 6.5-4
V-2-11-2-2	原子炉建屋クレーンの耐震性についての計算書	Ver. 6.5-4
V-2-別添 3-4	可搬型重大事故等対処設備のうちボンベ設備の耐震性についての計算書	Ver. 6.5-4
V-2-3-4-3-4	シュラウドヘッドの耐震性についての計算書	Ver. 6.4-4
V-2-4-2-3-1-1	キャスク容器の耐震性についての計算書	Ver. 6.4-4
V-2-4-2-3-1-5	二次蓋の耐震性についての計算書	Ver. 6.4-4
V-2-4-2-3-2-1	キャスク容器の耐震性についての計算書	Ver. 6.4-4
V-2-4-2-3-2-5	二次蓋の耐震性についての計算書	Ver. 6.4-4
V-3-別添 2-2-1	防護対策施設の強度計算書	Ver. 6.4-4
V-2-4-2-3-3-1	キャスク容器の耐震性についての計算書	Ver. 6.4-1

## 2 解析コードの概要

### 2.1 ABAQUS Ver. 6.14-3

項目 \ コード名	ABAQUS
使用目的	2次元有限要素法（軸対称モデル）による温度分布計算
開発機関	ダッソー・システムズ株式会社
開発時期	1978年 (Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc) 2005年 (ダッソー・システムズ株式会社)
使用したバージョン	Ver. 6.14-3
コードの概要	<p>ABAQUS（以下「本解析コード」という。）は、米国Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc (HKS社) で開発され、ダッソー・システムズ社に引き継がれた有限要素法に基づく構造解析用の汎用計算機プログラムである。</p> <p>適用モデルは1次元～3次元の任意形状の構造要素、連続体要素について取り扱うことが可能であり、静的応力解析、動的応力解析、熱応力解析、伝熱解析、座屈解析等の機能を有している。特に非線形解析が容易に行えることが特徴であり、境界条件として、熱流速、温度、加速度等を取り扱うことができる。</p> <p>数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木などの様々な分野で利用されている実績を持つ。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p><b>【検証 (Verification)】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・本解析コードを用いた解析結果と理論モデルによる理論解の比較を行い、解析解が理論解と一致することを確認している。</li> <li>・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・本解析コードは、数多くの研究機関や企業において、様々な分野の構造解析に広く利用されていることを確認している。</li> <li>・本解析コードは、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木などの様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。</li> <li>・使用する解析モデルは、既工事計画及び耐震評価にて実績のある関連規格及び文献を基に作成した評価モデルを採用していることを確認している。</li> <li>・今回の工事計画認可申請における構造に対し使用する要素、解析については、既工事計画で使用された実績がある。</li> </ul>

2.2 ABAQUS Ver. 6.12-1

項目	コード名 ABAQUS
使用目的	3次元有限要素法（はり要素，シェル要素及びソリッド要素）による固有値解析
開発機関	ダッソー・システムズ株式会社
開発時期	1978年（Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc） 2005年（ダッソー・システムズ株式会社）
使用したバージョン	Ver. 6.12-1
コードの概要	<p>ABAQUS（以下「本解析コード」という。）は，米国Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc（HKS社）で開発され，ダッソー・システムズ社に引き継がれた有限要素法に基づく構造解析用の汎用計算機プログラムである。</p> <p>適用モデルは1次元～3次元の任意形状の構造要素，連続体要素について取り扱うことが可能であり，静的応力解析，動的応力解析，熱応力解析，伝熱解析，座屈解析等の機能を有している。特に非線形解析が容易に行えることが特徴であり，境界条件として，熱流速，温度，加速度等を取り扱うことができる。</p> <p>数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木などの様々な分野で利用されている実績を持つ。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p><b>【検証 (Verification)】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・片持ちはりの自由振動問題を対象に，はり要素モデル及びソリッド要素モデルの解析結果が，理論解と一致することを確認している。</li> <li>・球殻の自由振動問題を対象に，シェル要素モデルの解析結果が，理論解と一致することを確認している。</li> <li>・ばね－質量系の振動問題を対象に，一質点の集中質量モデルの解析結果が，理論解と一致することを確認している。</li> <li>・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・本解析コードは，数多くの研究機関や企業において，様々な分野の構造解析に広く利用されていることを確認している。</li> <li>・本解析コードは，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木などの様々な分野における使用実績を有しており，妥当性は十分に確認されている。</li> <li>・今回の工事計画認可申請における構造に対し使用する要素のうち，はり要素及びシェル要素については既工事計画で使用された実績がある。</li> </ul>

2.3 ABAQUS Ver. 6.11-2

項目	コード名 ABAQUS
使用目的	2次元有限要素法（軸対称モデル）による温度分布計算 3次元有限要素法（ソリッド要素）による弾塑性解析
開発機関	ダッソー・システムズ株式会社
開発時期	1978年（Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc） 2005年（ダッソー・システムズ株式会社）
使用したバージョン	Ver. 6.11-2
コードの概要	<p>ABAQUS（以下「本解析コード」という。）は、米国Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc（HKS社）で開発され、ダッソー・システムズ社に引き継がれた有限要素法に基づく構造解析用の汎用計算機プログラムである。</p> <p>適用モデルは1次元～3次元の任意形状の構造要素、連続体要素について取り扱うことが可能であり、静的応力解析、動的応力解析、熱応力解析、伝熱解析、座屈解析等の機能を有している。特に非線形解析が容易に行えることが特徴であり、境界条件として、熱流速、温度、加速度等を取り扱うことができる。</p> <p>数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木などの様々な分野で利用されている実績を持つ。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p><b>【検証 (Verification)】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・今回使用する適用モデル（ソリッドモデル及び軸対称モデル）について、解析結果が理論モデルによる理論解と一致することを確認している。</li> <li>・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・本解析コードは数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木などの様々な分野における使用実績を持ち、妥当性は十分に確認されている。</li> <li>・今回の工事計画認可申請における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。</li> <li>・開発機関が提示するマニュアルにより、今回の工事計画認可申請で使用する3次元有限要素法（ソリッドモデル）による応力解析及び2次元有限要素法（軸対称モデル）による温度分布解析に、本解析コードが適用できることを確認している。</li> </ul>

2.4 ABAQUS Ver. 6.11-1, Ver. 6.4-1

項目		コード名 ABAQUS
使用目的	Ver. 6.11-1	2次元有限要素法（軸対称モデル）による温度分布計算 3次元有限要素法（ソリッド要素）による弾塑性解析 3次元有限要素法（ソリッド, シェル及びはりモデル）による応力解析
	Ver. 6.4-1	2次元有限要素法（軸対称モデル）による温度分布計算
開発機関		ダッソー・システムズ株式会社 (Ver. 6.11-1) Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc (Ver. 6.4-1)
開発時期		1978年 (Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc) 2005年 (ダッソー・システムズ株式会社)
使用したバージョン		Ver. 6.11-1, Ver. 6.4-1
コードの概要		<p>ABAQUS（以下「本解析コード」という。）は、米国Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc (HKS社) で開発され、ダッソー・システムズ社に引き継がれた有限要素法に基づく構造解析用の汎用計算機プログラムである。</p> <p>適用モデルは1次元～3次元の任意形状の構造要素、連続体要素について取り扱うことが可能であり、静的応力解析、動的応力解析、熱応力解析、伝熱解析、座屈解析等の機能を有している。特に非線形解析が容易に行えることが特徴であり、境界条件として、熱流速、温度、加速度等を取り扱うことができる。</p> <p>数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木などの様々な分野で利用されている実績を持つ。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)		<p>【検証 (Verification)】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>本解析コードを用いた解析結果と理論モデルによる理論解の比較を行い、解析解が理論解と一致することを確認している。</li> <li>本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。</li> </ul> <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>本解析コードは数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木などの様々な分野における使用実績を持ち、妥当性は十分に確認されている。</li> <li>今回の工事計画認可申請における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。</li> <li>開発機関が提示するマニュアルにより、今回の工事計画認可申請で使用される3次元有限要素法（ソリッド要素）による弾塑性解析、3次元有限要素法（ソリッド, シェル及びはりモデル）による応力解析及び2次元有限要素法（軸対称モデル）による温度分布解析に、本解析コードが適用できることを確認している。</li> </ul>

2.5 ABAQUS Ver. 6.5-4

項目	コード名 ABAQUS
使用目的	3次元有限要素法（シェル要素）による応力解析 はりモデルによる固有値解析及び地震応答解析 3次元有限要素法（シェル要素，はり要素）による固有値解析
開発機関	Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc
開発時期	1978年
使用したバージョン	Ver. 6.5-4
コードの概要	<p>ABAQUS（以下「本解析コード」という。）は，米国Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc（HKS社）で開発された有限要素法に基づく構造解析用の汎用計算機プログラムである。</p> <p>適用モデルは1次元～3次元の任意形状の構造要素，連続体要素について取り扱うことが可能であり，静的応力解析，動的応力解析，熱応力解析，伝熱解析，座屈解析等の機能を有している。特に非線形解析が容易に行えることが特徴であり，境界条件として，熱流速，温度，加速度等を取り扱うことができる。</p> <p>数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木などの様々な分野で利用されている実績を持つ。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p><b>【検証 (Verification)】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・本解析コードによる地震応答計算結果と振動試験結果を比較して，検証*が実施され，本解析コードが検証されたものであることを確認した。</li> </ul> <p>注記*：独立行政法人 原子力安全基盤機構「平成19年度 原子力施設等の耐震性評価技術に関する試験及び調査」 動的上下動耐震試験（クレーン類）に係る報告書</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・今回使用する適用要素（シェル要素及びはり要素）について，解析結果が理論モデルによる理論解と一致することを確認している。</li> <li>・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。</li> </ul>

<p>検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)</p>	<p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・本解析コードは、数多くの研究機関や企業において、様々な分野の構造解析に広く利用されていることを確認している。</li> <li>・本解析コードは、航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木などの様々な分野における使用実績を有しており，妥当性は十分に確認されている。</li> <li>・使用する解析モデルは，既工事計画及び耐震評価にて実績のある関連規格及び文献を基に作成した評価モデルを採用していることを確認している。</li> <li>・開発機関が提示するマニュアルにより，今回の工事計画認可申請で使用する3次元有限要素法（シェル要素）による応力解析，はりモデルによる固有値解析及び地震応答解析及び3次元有限要素法（シェル要素，はり要素）による固有値解析に，本解析コードが適用できることを確認している。</li> </ul>
--	---

2.6 ABAQUS Ver. 6.4-4

項目	コード名 ABAQUS
使用目的	3次元有限要素法（ソリッドモデル及びシェルモデル）による応力解析 3次元有限要素法（はり要素）による応力解析 2次元有限要素法（軸対称モデル）による応力解析，温度分布解析
開発機関	Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc
開発時期	1978年
使用したバージョン	Ver. 6.4-4
コードの概要	<p>ABAQUS（以下「本解析コード」という。）は，米国Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc（HKS社）で開発された有限要素法に基づく構造解析用の汎用計算機プログラムである。</p> <p>適用モデルは1次元～3次元の任意形状の構造要素，連続体要素について取り扱うことが可能であり，静的応力解析，動的応力解析，熱応力解析，伝熱解析，座屈解析等の機能を有している。特に非線形解析が容易に行えることが特徴であり，境界条件として，熱流速，温度，加速度等を取り扱うことができる。</p> <p>数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木などの様々な分野で利用されている実績を持つ。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p><b>【検証 (Verification)】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・今回使用する適用モデル（ソリッドモデル，シェルモデル，はり要素及び軸対称モデル）について，解析結果が理論モデルによる理論解と一致することを確認している。</li> <li>・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・本解析コードは数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木などの様々な分野における使用実績を持ち，妥当性は十分に確認されている。</li> <li>・開発機関が提示するマニュアルにより，今回の工事計画認可申請で使用する3次元有限要素法（ソリッドモデル，シェルモデル及びはり要素）による応力解析及び2次元有限要素法（軸対称モデル）による応力解析，温度分布解析に，本解析コードが適用できることを確認している。</li> <li>・使用する解析モデルは，既工事計画及び耐震評価にて実績のある関連規格及び文献を基に作成した評価モデルを採用していることを確認している。</li> </ul>

### 3. ABAQUS Ver. 6.12-1の解析手法について

#### 3.1 一般事項

ABAQUSは有限要素法による汎用非線形構造計算機プログラムである。材料非線形性、接触問題を含む幾何学的非線形性を考慮した構造物の静的応力変形解析や動的解析、熱伝導解析、音響解析機能等が提供されている。また、各分野特有の連成問題（熱応力、構造一流体連成等）も解析可能である。今回は統合原子力防災ネットワーク設備衛星アンテナに対する固有値の算出に用いている。

#### 3.2 解析コードの特徴

ABAQUSの主な特徴を以下に示す。

- ・非線形構造問題（材料，幾何非線形）に必要な機能が充実している。
- ・数多くの要素，材料構成則が提供されており，多様な構造物のモデル化が可能である。
- ・連成問題が解析可能である。

### 3.3 解析手法

統合原子力防災ネットワーク設備衛星アンテナに対する固有値解析手法を3.3.1に示す。

#### 3.3.1 動的解析

##### (1) 固有値解析

次の固有値方程式を解いて，固有振動数と振動モードを求める。

$$K \phi = \omega^2 M \phi$$

ここで，

K：剛性マトリックス

$\phi$ ：固有ベクトル

$\omega$ ：固有振動数

M：質量マトリックス

上記方程式の解法として，ABAQUS Ver. 6.12-1においては，Lanczos法，自動マルチレベル部分構造（AMS）法及びサブスペースイテレーション法が用意されている。

### 3.4 解析フローチャート

本解析コードを用いた解析フローチャートを図 3-1 に示す。

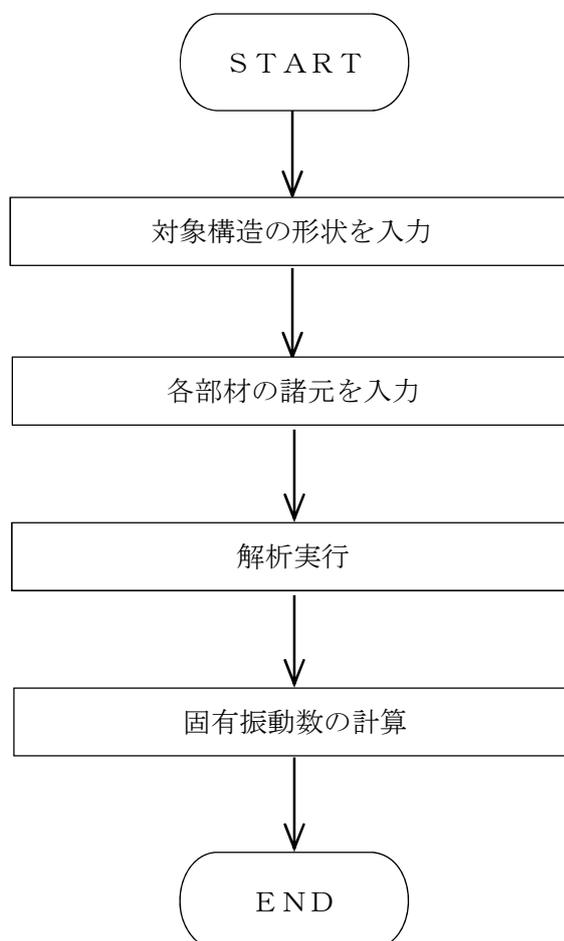


図3-1 解析フローチャート

### 3.5 検証 (Verification) 及び妥当性確認 (Validation)

#### 3.5.1 検証 (Verification)

今回の解析に用いた解析コードABAQUS Ver. 6. 12-1の検証として, ABAQUS Ver. 6. 12-1による解析結果と理論式による理論解との比較検証を行う。

##### (1) 解析ケース

表3-1に示す1ケースについて解析を行い, 理論解と比較する。

表3-1 検証ケース

解析種別	内容	要素	条件
固有値解析	片持ちはりの固有振動数	6面体ソリッド要素	一様密度

##### (2) 解析条件

ABAQUS Benchmark Manualに記載の片持ちはりの例題を使用する。

図3-2に概念図及び解析条件を, 図3-3に解析モデルを示す。

 <p>概念図</p>	半径	r		in
	直径	d		in
	長さ	L		in
	縦弾性係数	E		lb/in <sup>2</sup>
	質量密度	$\rho$		lb-s <sup>2</sup> /in <sup>4</sup>
	断面積	A		in <sup>2</sup>
	断面二次モーメント	I		in <sup>4</sup>

図3-2 概念図及び解析条件

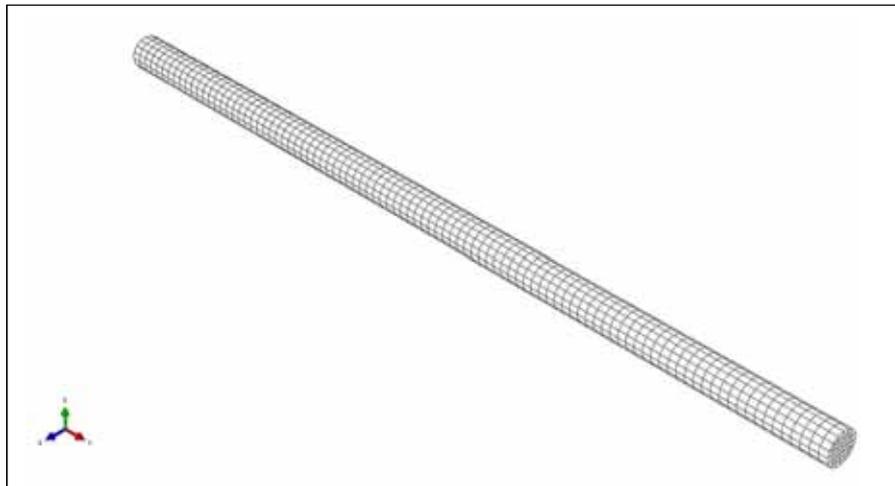


図3-3 解析モデル (使用要素: 6面体ソリッド要素)

(3) 解析結果

a. 解析結果と理論解との比較

表3-2に解析結果と理論解との比較結果を示す。表3-2に示すとおり、解析結果と理論解は一致しており、解析コードABAQUS Ver. 6.12-1が検証されていることを確認した。

表3-2 解析結果と理論解の比較

(単位：Hz)

次数	理論解*	解析結果	誤差
1次			
2次			
3次			

注記\*：理論解は下記の式で計算する。(出典：機械工学便覧)

$$f = \frac{\lambda^2}{2 \cdot \pi \cdot L^2} \sqrt{\frac{E \cdot I}{A \cdot \rho}}$$

--

### 3.5.2 妥当性確認 (Validation)

本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。

- 本解析コードは、数多くの研究機関や企業において、様々な分野の構造解析に広く利用されていることを確認している。
- 本解析コードは、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木などの様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。
- 今回の工事計画認可申請における構造に対し使用する要素のうち、はり要素及びシェル要素については既工事計画で使用された実績がある。

### 3.5.3 評価結果

3.5.1 及び 3.5.2 より、本解析コードを使用状況一覧に示す解析に用いることは妥当である。



V-5-6 計算機プログラム（解析コード）の概要  
・ QAD-CGGP2R

## 目次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3

1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）QAD-CGGP2Rについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-1-3-5	使用済燃料貯蔵槽の水深の遮蔽能力に関する説明書	1.04
V-1-7-3	中央制御室の居住性に関する説明書	1.04
V-1-8-1	原子炉格納施設の設計条件に関する説明書	1.04
V-1-9-3-2	緊急時対策所の居住性に関する説明書	1.04
V-1-1-6	ブローアウトパネル関連設備の設計方針	1.04

## 2. 解析コードの概要

項目	コード名 QAD-CGGP2R
使用目的	燃料プール水深の遮蔽計算 中央制御室及び緊急時対策所の居住性に係る被ばく評価 ベント実施に伴う作業等の作業員の被ばく評価
開発機関	日本原子力研究開発機構（（財）高度情報科学研究機構）
開発時期	2001年（初版開発時期 1967年）
使用したバージョン	1.04
コードの概要	<p>QAD-CGGP2R（以下「本解析コード」という。）は、米国ロスアラモス国立研究所で開発されたガンマ線の物質透過を計算するための点減衰核積分コード「QAD」をベースとし、旧日本原子力研究所が I C R P 1990年勧告の国内関連法令・規則への取入れに合わせて、実効線量を計算できるように改良した最新バージョンである。</p> <p>本解析コードは、線源を直方体、円筒、球の形状に構成でき、任意の遮蔽体で構成される体系のガンマ線実効線量率を計算する。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p><b>【検証 (Verification)】</b></p> <p>本解析コードの検証の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 計算機能が適正であることは、後述する妥当性確認の中で確認している。</li> <li>・ 本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。</li> <li>・ 本解析コードは、線量率評価を実施するコードであり、計算に必要な主な条件は線源条件、遮蔽体条件である。これら評価条件が与えられれば線量率評価は可能であり、使用目的に記載する評価に適用可能である。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></p> <p>本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ JRR-4散乱実験室でのコンクリート透過実験の実験値（「原子力第1船遮蔽効果確認実験報告書」JNS-4（日本原子力船開発事業団，1967））と計算値を比較した。実験孔からのガンマ線を遮蔽体に入射させ、遮蔽体透過後のガンマ線の線量率の実験値と本解析コードによる計算値を比較している。</li> <li>・ 実験値と計算値を比較した結果、概ね一致していることを確認している。</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"><li>・上記妥当性確認では、実験孔からのガンマ線を遮蔽体に入射させ、遮蔽体透過後のガンマ線の線量率の実験値と本解析コードによる計算値を比較している。</li><li>・今回の燃料プール水深の遮蔽計算では、上記妥当性確認における実験体系と同様に、ガンマ線の遮蔽体透過後の線量率を計算する。</li><li>・今回の燃料プール水深の遮蔽計算は上記妥当性確認内容と合致している。</li><li>・また、原子力発電所放射線遮へい設計規程（J E A C 4 6 1 5 - 2008）（日本電気協会 原子力規格委員会 平成20年6月）では、事故時の中央制御室遮蔽のための点減衰核積分コードとして、QADコードが挙げられている。</li></ul>
--	---

## V-5-7 計算機プログラム（解析コード）の概要・ORIGEN2

## 目次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3

## 1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）ORIGEN2について説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-1-3-4	使用済燃料貯蔵槽の冷却能力に関する説明書	2.2
V-1-3-5	使用済燃料貯蔵槽の水深の遮蔽能力に関する説明書	2.2
V-1-7-3	中央制御室の居住性に関する説明書	2.2
V-1-8-1	原子炉格納施設の設計条件に関する説明書	2.2
V-1-9-3-2	緊急時対策所の居住性に関する説明書	2.2
V-1-1-6	ブローアウトパネル関連設備の設計方針	2.2

## 2. 解析コードの概要

項目	コード名 ORIGEN2
使用目的	使用済燃料貯蔵設備の崩壊熱評価 制御棒の線源強度計算 中央制御室及び緊急時対策所の居住性に係る被ばく評価 ベント実施に伴う作業等の作業員の被ばく評価
開発機関	米国オークリッジ国立研究所 (ORNL)
開発時期	1980年
使用したバージョン	2.2
コードの概要	<p>ORIGEN2 (以下「本解析コード」という。)は、使用済燃料等の核種生成量、崩壊熱量並びに中性子及びガンマ線の線源強度を評価するためにORNLで開発され公開された燃焼計算コードであり、原子力発電所施設、再処理施設、廃棄物処理施設等幅広く設計に利用されている。</p> <p>また、国内の最新の使用済燃料についての評価精度向上を目指し、日本原子力研究所シグマ委員会核種生成量評価ワーキンググループにおいてJENDL核データセットに基づくORIGEN2用ライブラリが作成され、公開されている。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p><b>【検証 (Verification)】</b></p> <p>本解析コードの検証の内容は次のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・計算機能が適正であることは、コード配布時に同梱されたサンプル問題の再現により確認している。</li> <li>・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。</li> <li>・本解析コードは、燃焼計算によって得られた核種生成量から炉心内蔵量等を評価するコードであり、計算に必要な主な条件は組成、照射条件、核データライブラリである。</li> </ul> <p>これら評価条件が与えられれば評価は可能であり、本解析コードは使用目的に記載する評価に適用可能である。</p> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></p> <p>本解析コードの妥当性確認の内容は次のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・米国原子力学会 (ANS) のNuclear Technology vol. 62 (1983年9月)の「ORIGEN2 :A Versatile Computer Code for Calculating the Nuclide Compositions and Characteristic of Nuclear Materials」において、ANS標準崩壊熱との比較及び使用済燃料中のウラン、プルトニウム、アメリシウムなどの組成の実測値との比較により妥当性の確認を行っている。</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"><li>• 日本原子力研究所シグマ委員会にて開発されたORLIBJライブラリについては、「JENDL-3.3に基づくORIGEN2用ライブラリ:ORLIBJ33」JAERI-Data/Code 2004-015(2004年11月)等において、核種生成量について照射後試験結果と、本解析コードによる計算値を比較することで妥当性の確認を行っている。</li><li>• 今回の使用目的に記載する評価は上記妥当性確認内容と合致しており、本解析コードの使用は妥当である。</li></ul>
--	---

V-5-8 計算機プログラム（解析コード）の概要・SCALE

## 目次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3

1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）SCALEについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-1-3-2	燃料取扱設備, 新燃料貯蔵設備及び使用済燃料貯蔵設備の核燃料物質が臨界に達しないことに関する説明書	6.0 KENO V. a

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	SCALE
使用目的	使用済燃料貯蔵設備の未臨界性評価
開発機関	米国オークリッジ国立研究所 (ORNL)
開発時期	2009年
使用したバージョン	SCALE6.0 KENO V.a
コードの概要	SCALE (以下「本解析コード」という。) は核燃料物質, 構造材等の幾何形状等を入力とし, 中性子の飛程を乱数を使用して確率的に計算し, 各中性子が吸収されて消滅するか, 体系外に漏れるまでの反応過程で発生する核分裂中性子数を計算し, これらの比から実効増倍率を求めるものである。このため, 計算体系が3次元の複雑な形状でも精度の高い計算ができる。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p><b>【検証 (Verification)】</b></p> <p>米国 PNL *1で行われた臨界実験を対象としたベンチマーク解析*を実施し, 計算精度を検証し, 解析解と理論解が一致していることを確認している。</p> <p>具体的には, 上記臨界試験体系のうち, 非均質ケース16ケースについて, 本解析コードを用いて実効増倍率を算出し, 当該データをヒストグラム化後統計処理することで, 平均値, バイアス, <math>\sigma_{95-95}</math>等を得た。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ バイアス: 実験値と計算値の平均的なずれ</li> <li>・ <math>\sigma_{95-95}</math>: 95 %信頼度-95 %確率の計算の不確かさ</li> </ul> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></p> <p>※ベンチマーク解析</p> <p>ベンチマーク解析の対象としたPNL-3602実験結果は, 国内BWRの燃料貯蔵設備と同様に, 中性子吸収材, 板厚, 水ギャップ幅, 燃料対減速材比及び燃料濃縮度など, 臨界解析で重要と考えられる要因に関し, 数種類の異なる体系で実施されている。また, 臨界実験に用いられた燃料仕様は, 金属キャスク燃料や燃料ラックの臨界評価に用いている燃料仕様と同程度であり, ベンチマーク試験として妥当と考えられる。なお, 本検証については, 米国オークリッジ国立研究所で行われたベンチマーク解析*2が参考になる。</p>

注記 \*1: Pacific Northwest National Laboratory

\*2: J. J. Lichtenwalter, S. M. Bowman, M. D. DeHart, and C. M Hopper, "Criticality Benchmark Guide for Light-Water-Reactor Fuel in Transportation and Storage Packages", NUREG/CR-6361 ORNL/TM-13211, 1997年3月



V-5-9 計算機プログラム（解析コード）の概要・TONBOS

## 目次

1.	はじめに	1
1.1	使用状況一覧	2
2.	解析コードの概要	3
2.1	TONBOS Ver.3 の特徴	4
3.	解析手法	4
3.1	基礎方程式	4
3.2	物体の運動方程式の時間積分法	6
3.3	評価条件	7
3.4	解析条件	8
4.	解析フローチャート	9
5.	解析コードの検証	10
5.1	フジタスケールとの比較	10
5.2	米国 Grand Gulf 原子力発電所への竜巻来襲事例	10
5.3	佐呂間竜巻での車両飛散事例	12
6.	妥当性確認	18
7.	参考文献	18

1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）TONBOSについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-1-1-2-3-2	竜巻の影響を考慮する施設及び固縛対象物の選定	Ver. 3

## 2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	TONBOS
使用目的	竜巻により発生する飛来物の飛散距離等の評価
開発機関	一般財団法人 電力中央研究所
開発時期	2013年
使用したバージョン	Ver. 3
コードの概要	<p>TONBOS（以下、「本解析コード」という。）は、一般財団法人電力中央研究所にて開発・保守されているプログラムである。</p> <p>空気中の物体が受ける抗力、揚力による運動を計算することで、竜巻による風速場の中での飛来物の飛散軌跡を評価することができる解析コードであり、物体の飛散距離等の算出が可能である。</p> <p>仮定する風速場は、地上付近で、竜巻の中心に向かう流れを考慮した3次元の風速成分を持つフジタモデルDBT-77（DBT:Design Basis Tornado）とする。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p><b>【検証 (Verification)】</b></p> <p>本解析コードの検証の内容は次のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・自動車の飛散解析において、フジタスケールの各スケールに対応する被災状況とおおむね合致した結果が得られた。</li> <li>・パイプの飛散解析において、Grand Gulf 原子力発電所への竜巻襲来事例とおおむね合致した結果が得られた。</li> <li>・自動車及びトラックの飛散解析において、佐呂間竜巻での車両飛散事例とおおむね一致した結果を得られた。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></p> <p>TONBOSを竜巻により発生する飛来物の飛散距離等の評価に使用することは次のとおり妥当である。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・本解析コードは、竜巻により発生する飛来物の飛散距離等の評価を目的に開発されたコードであり、使用目的が合致している。</li> <li>・評価は妥当性を確認している範囲内で行うようにしている。</li> </ul>

2.1 TONBOS Ver. 3 の特徴

「TONBOS」は、竜巻の風速場としてフジタモデルDBT-77 (DBT:Design Basis Tornado) を用い、その風速場が水平方向に移動するものとして定め、かつ物体を質点系モデルとして、物体が流体中において抗力、揚力及び重力を受けて運動する軌跡に対する運動方程式を解くことにより、物体の飛散距離、飛散高さ及び飛散速度 (以下、「飛散距離等」という。) を算定する解析コードである。

3. 解析手法

3.1 基礎方程式

(1) 竜巻の風速場

フジタモデルDBT-77 における接線風速等の関係式については、Fujita Work Book<sup>(1)</sup>と同様に以下の式で定義する。

無次元座標  $r = R/R_m$      $z = Z/H_i$

接線風速  $V_\theta = F_r(r)F_h(z)V_m$

$$F_r(r) = \begin{cases} r & (r < 1) \\ 1/r & (r \geq 1) \end{cases} \quad F_h(z) = \begin{cases} z^{k_0} & (z < 1) \\ \exp(-k(z-1)) & (z \geq 1) \end{cases}$$

$$V_r = \begin{cases} 0 & (r \leq v) \\ \frac{V_\theta \tan \alpha_0}{1-v^2} \left(1 - \frac{v^2}{r^2}\right) & (v < r < 1) \\ V_\theta \tan \alpha_0 & (r \geq 1) \end{cases}$$

$$\tan \alpha_0 = \begin{cases} -A(1-z^{1.5}) & (z < 1) \\ B\{1 - \exp(-k(z-1))\} & (z \geq 1) \end{cases}$$

$$V_z = \begin{cases} \frac{3}{28} \frac{\eta V_m}{1-v^2} A (16z^{\frac{7}{6}} - 7z^{\frac{8}{3}}) & (z < 1) \\ \frac{\eta V_m B \exp(-k(z-1))}{k(1-v^2)} \{2 - \exp(-k(z-1))\} & (z \geq 1) \end{cases}$$

$k_0, k, v, \eta, A, B$  は定数

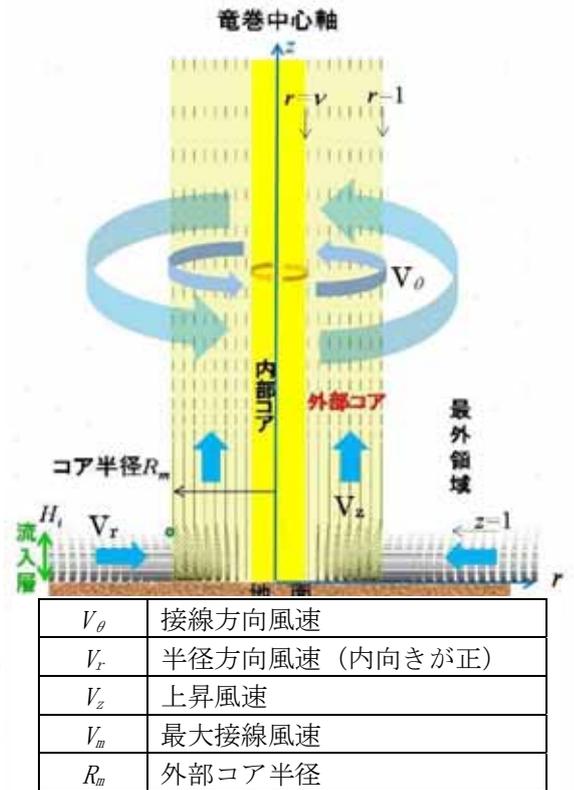


図3-1 フジタモデルDBT-77の概要

また、上記以外の定数として、内部コアの半径 $R_v$ と外部コアの半径 $R_m$ の比  $v = R_v / R_m$ 、流入層高さ $H_i$ 、その他定数 $k_0, k, A, B$ についても、Fujita Work Book<sup>(1)</sup>に基づく以下の式及び値を用いる。

内部コア半径と外部コア半径の比  $v = 0.9 - 0.7 \exp(-0.005R_m)$  (1)

流入層高さ  $H_i = \eta R_m$     ここで  $\eta = 0.55(1-v^2)$  (2)

その他定数  $k_0 = 1/6, k = 0.03, A = 0.75, B = 0.0217$  (3)

時刻 $t=0$  で竜巻中心は原点に位置するものとし、竜巻の風速場は物体の影響を受けないと仮定すると、時刻 $t$  における竜巻の風速ベクトル $V_w$  の各風速成分  $(u, v, w)$  は以下のようになる。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_r \cos \theta - V_\theta \sin \theta \\ V_r \sin \theta + V_\theta \cos \theta \\ V_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_{tr} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

ここで、 $V_{tr}$  は $x$ 軸方向の竜巻の移動速度、 $\theta$  は竜巻中心と各点を結ぶ線分が $x$ 軸となす角であり、竜巻中心からの距離 $r$ は以下で定義されるものである。

$$r = \sqrt{(x - V_{tr} t)^2 + y^2} \quad (5)$$

なお、静止する観測者からみた最大水平風速 $V_D$  は、 $x$ 軸方向の竜巻の移動速度 $V_{tr}$ を $V_m$ に加えた以下で計算される。

$$V_D = V_m + V_{tr} \quad (6)$$

## (2) 物体の運動

物体の運動は、既往研究<sup>(2)~(6)</sup>と同様に方向性がない平均的な抗力（抗力係数一定）と重力のみが外力として作用するものとした。ただし、地表付近では地面の存在により流れが非対称になること（地面効果）による揚力加速度 $L$ を考慮した。この場合、物体の空中での運動方程式は以下のようになる。

$$\frac{dV_M}{dt} = \frac{\rho}{2} \frac{C_D A}{m} |V_w - V_M| (V_w - V_M) - (g - L)k \quad (7)$$

ここで、各変数は以下で定義する。

$V_M$ ：物体の速度ベクトル

$V_w$ ：風速ベクトル（フジタモデルでの風速場と移動速度の和）

$\rho$ ：空気密度

$C_D A$ ：物体の各方向の抗力係数と見附面積の積の平均値

$m$ ：物体の質量

$g$ ：重力加速度

$k$ ：鉛直上向きの単位ベクトル

また、揚力加速度 $l$ は、既往の風洞実験の結果<sup>(7) (8)</sup>を考慮して、高さ $d$ の物体にかかる揚力が、物体底面が地面から $3d$ の高度であるときに消滅するものとした。具体的には、地面から $z$ の距離（高度）にある物体に作用する揚力加速度 $L$ を以下の関数形でモデル化する。

( $Z$ ：物体底面の高度 ( $=z-d/2$ ) )

$$L = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} |V_w - V_M|_{x,y}^2 f(Z/d) \quad (8)$$

ここで $f(Z/d)$ は、既往の風洞実験の結果<sup>(7)</sup>を参考に、以下で定義する。

$$f(Z/d) = \begin{cases} \{1 - (z/3d)\} / \{1 + (Z/d)\} & 0 \leq Z \leq 3d \\ 0 & 3d < Z \end{cases} \quad (9)$$

### 3.2 物体の運動方程式の時間積分法

時刻 $t$ における竜巻の風速ベクトル $V_w = (u, v, w)$ は式(4)で与えられるため、式(7)を時間積分することによって、物体の速度と位置の時刻歴を求めることができる。一定加速度法では、時刻 $\tau$ から時刻 $\tau + \Delta \tau$ における加速度が一定と仮定する。つまり、

$$\frac{dV_M(t)}{dt} = A(\tau) \quad (10)$$

ここで、加速度ベクトル $A(\tau)$ は以下を表す。

$$A(\tau) = \frac{\rho}{2} \frac{C_D A}{m} |V_w(\tau) - V_M(\tau)| \{V_w(\tau) - V_M(\tau)\} - (g - L)k \quad (11)$$

式(11)を時間積分すると、以下を得る。

$$V_M(t) = V_M(\tau) + A(\tau)(t - \tau) \quad (12)$$

さらに式(12)を時間積分すると、以下の物体位置 $X_M(t)$ を得る。

$$X_M(t) = X_M(\tau) + V_M(\tau)(t - \tau) + \frac{A(\tau)}{2}(t - \tau)^2 \quad (13)$$

従って、時刻 $t = \tau + \Delta \tau$ における物体の速度と位置は以下で与えられる。

$$V_M(t + \Delta \tau) = V_M(\tau) + A(\tau) \Delta \tau \quad (14)$$

$$X_M(t + \Delta \tau) = X_M(\tau) + V_M(\tau) \Delta \tau + \frac{A(\tau) \Delta \tau^2}{2} \quad (15)$$

式(14)、(15)の右辺は時刻 $t = \tau$ における既知の速度・位置の関数であるため、陽解法として時間積分を実施する。

### 3.3 評価条件

以下の初期条件を設定する。

- ・ 竜巻の風速場（図3-2）
- ・ 竜巻の最大水平風速 ( $V_m$ ) が85 m/sとなる風速場を設定する。
- ・ 竜巻の移動速度 ( $V_{tr}$ ) は15 m/sとする。
- ・ 竜巻風速半径（外部コア半径： $R_m$ ）は30 mとする。

初期高さ（物体の設置高さ。地面設置の場合は初期高さ0 m）に51×51 個の物体を配置する。

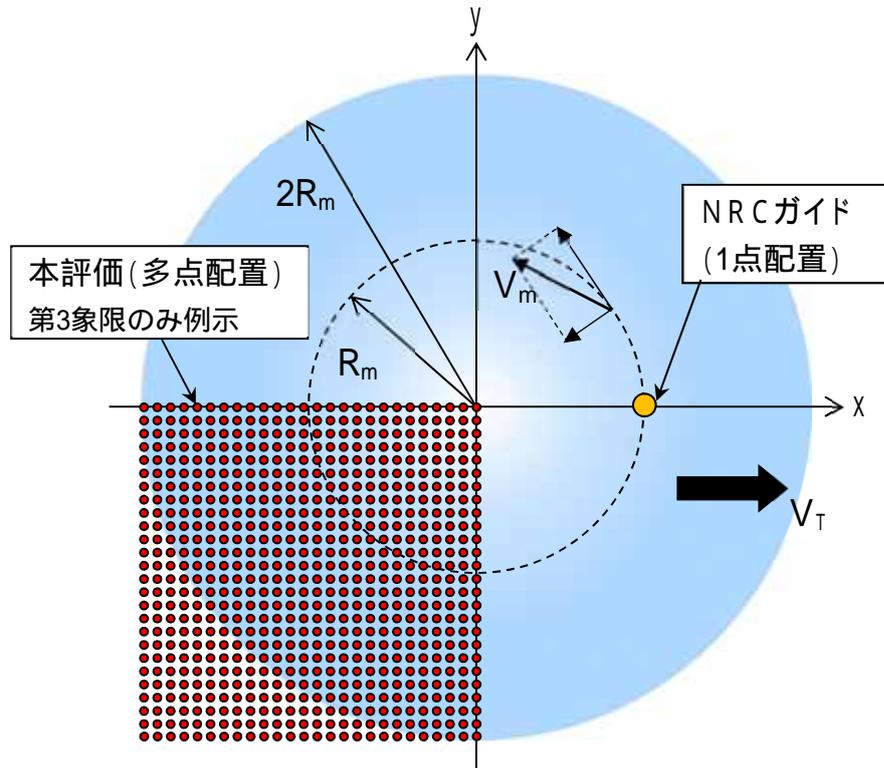


図3-2 竜巻の風速場及び初期物体配置

- ・ 飛散距離等

図3-3に示すとおり，飛散距離は初期位置からの距離とし，物体が地表面に落ちた場合は，それ以上移動しないものとする。飛散高さは，初期高さからの相対高さとする。

2601 (51×51) 個の算出結果のうち，飛散距離，飛散高さ及び飛散速度の最大値を，解析結果として採用する。

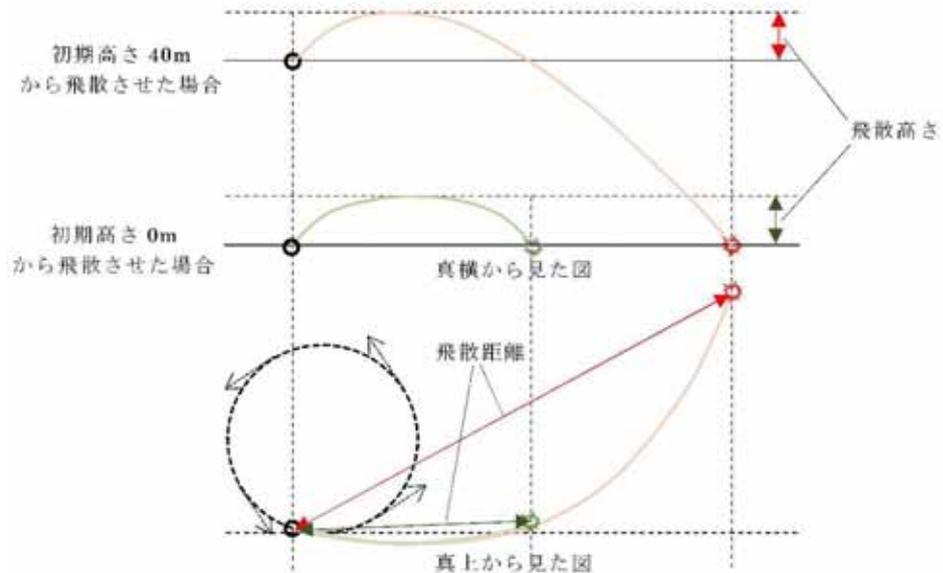


図3-3 飛散距離及び飛散高さ

### 3.4 解析条件

解析は以下の条件で実施することとする。

- ・ 竜巻の最大風速：100 m/sとする。
- ・ 竜巻の最大接線風速：最大風速との比が0.85となる85 m/sとする。
- ・ 竜巻中心の移動速度：最大風速との比が0.15となる15 m/sとする。
- ・ 竜巻の最大接線風速半径：30mとする。
- ・ 空力パラメータ：制限なし
- ・ 解析時間刻み：0.01 秒以下
- ・ 重力加速度，空気密度：それぞれ9.80665 m/s<sup>2</sup>，1.22 kg/m<sup>3</sup>とする。

#### 4. 解析フローチャート

図4-1に解析フローチャートを示す。

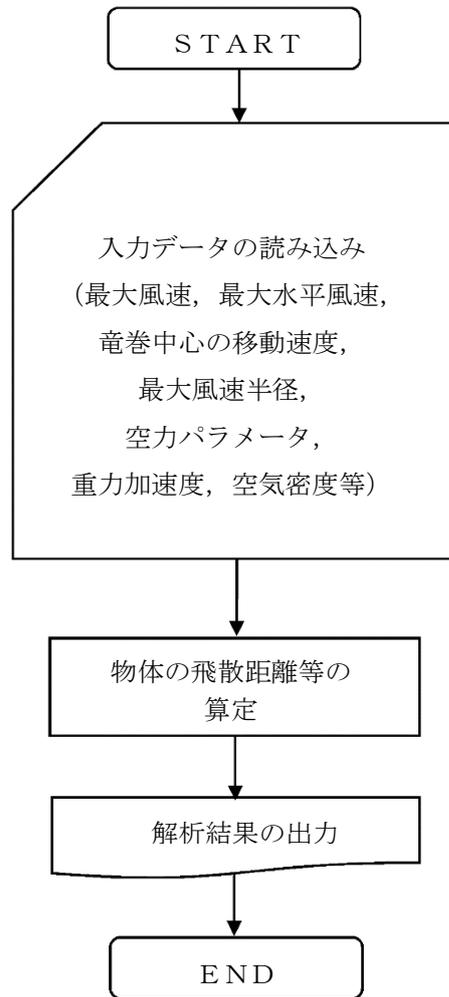


図4-1 解析フローチャート

## 5. 解析コードの検証

### 5.1 フジタスケールとの比較

フジタスケールは、竜巻等の突風により発生した建築物や車両等の被害状況から、当時の竜巻風速を推定するために考案された指標である。このフジタスケールで示されている自動車の被災状況を表5-1に示す。

ここで、TONBOSによって、各スケールに対応する最大風速(69 m/s, 92 m/s, 116 m/s)における、フジタモデルによる自動車の飛散解析を行った結果を表5-2に示す。

TONBOSによる自動車の飛散解析結果は、各スケールに対応する自動車の被災状況とおおむね合致していると考えられる。

表5-1 フジタスケールで示されている自動車の被災状況

フジタスケール	風速 [m/s]	自動車の被災状況
F2	50-69	cars blown off highway (自動車が道路からそれる)
F3	70-92	cars lifted off the ground (自動車が地面から浮上する)
F4	93-116	cars thrown some distances or rolled considerable distances (自動車がある距離を飛ばされる, 又はかなりの距離を転がる)

表5-2 TONBOSによる自動車の飛散解析結果 ( $C_D A/m=0.0052 \text{ m}^2/\text{kg}$ )<sup>(9)</sup>

フジタスケール	最大水平風速 [m/s]	竜巻接線風速 [m/s]	竜巻移動速度 [m/s]	計算結果		
				飛散速度 [m/s]	飛散距離 [m]	飛散高さ [m]
F2	69	59	10	1.0	1.4	0
F3	92	79	13	23	34	1.1
F4	116	99	17	42	59	3.1

### 5.2 米国 Grand Gulf 原子力発電所への竜巻来襲事例

1978年4月17日に、米国のミシシッピ州にて建設中のGrand Gulf原子力発電所にF3の竜巻が来襲した。主な被害として、建設中の冷却塔内部に設置されていたコンクリート流し込み用のクレーンが倒壊し、冷却塔の一部が破損したことが挙げられる。また、竜巻によりトレーラーが台から剥がれ移動したことや、直径8~10インチの木が折れた事例等も確認されており、図5-1は、竜巻による物体の飛散状況が定量的に分かる事例として、資材置場のパイプの飛散状況を示したものである。なお、通過時の竜巻規模はF2であったと考えられている。このパイプはコンクリート・石綿製で、長さは8フィート、直径(内径)は8インチであった。このパイプの飛散状況に対して、TONBOSを用いた再現解析を行った。その計算条件は過去の記録に基づき表5-3のとおりとする。



"Courtesy of HathiTrust"

図5-1 Grand Gulf原子力発電所の資材置場におけるパイプの散乱状況<sup>(10)</sup>

被害状況	<ul style="list-style-type: none"> <li>パイプを収納した木箱（一部は二段重ね）は浮上せずに転倒し、パイプが周辺7 m～9 mに散乱</li> </ul> <p>(Pieces of pipe were scattered over the area, but none traveled more than 25-30 ft. The pipe joints are 8 in. dia x 8 ft long.<sup>(24)</sup>)</p>
------	---

表5-3 Grand Gulf原子力発電所の竜巻によるパイプ飛散の再現解析の計算条件<sup>(9)</sup>

竜巻条件	竜巻の最大風速	67 m/s
	最大接線風速	53.6 m/s
	移動速度	13.4 m/s
	コア半径	45.7 m/s
飛来物条件	直径（外径）	9 inch (0.2286 m)
	高さ	0.229 m
	密度	1700 kg/m <sup>3</sup>
	飛行定数C <sub>D</sub> A/m	0.0080 m <sup>2</sup> /kg
初期配置	<ul style="list-style-type: none"> <li>物体個数51×51 個，竜巻半径の4 倍を一辺とする正方形内 (x, y=[-2Rm, +2Rm ]) に等間隔配置</li> <li>設置高さ1 m (パイプが収納されていた木箱が2 段重ねで配置されていた状況を想定。)</li> </ul>	

計算結果を表5-4に示す。TONBOSによるパイプの飛散解析の結果は、パイプがほとんど飛散せず、木箱が倒れた影響で散乱したと思われる状況とおおむね合致している。

表5-4 Grand Gulf原子力発電所のパイプの再現解析結果<sup>(9)</sup>

風速場モデル	初期物体 高さ	計算結果 (フジタモデル)		
		飛散距離	飛散高さ*1	最大水平速度
フジタモデル	1 m	1.2 m	0.0 m	4.9 m/s

注記 \*1: 初期物体高さからの飛散高さ。

### 5.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例

2006年11月7日に北海道網走支庁佐呂間町に発生した竜巻（以下「佐呂間竜巻」という。）により、4tトラックが約40 m移動したことが報告されている<sup>(11)</sup>。被災状況を図5-2に示す。この事例では被災時に4tトラックに乗員2名が乗車しており、4tトラックの初期位置と移動位置が分かっている（図5-2左上画像の②）。また、4tトラックの他に2 台の自動車（図5-2左上画像の③と⑥）について、初期位置と被災後の移動位置が分かっている。このように竜巻被災前後で車両等の位置が明確になっている事例は極めてまれである。なお、竜巻飛来物の再現計算は、竜巻が頻発する米国でもほとんど実施されていない。この理由としては、来襲した実際の竜巻特性を精度よく計測・推測することが困難であることや自動車等の移動前後の位置が不明確な場合が多いことが挙げられる。

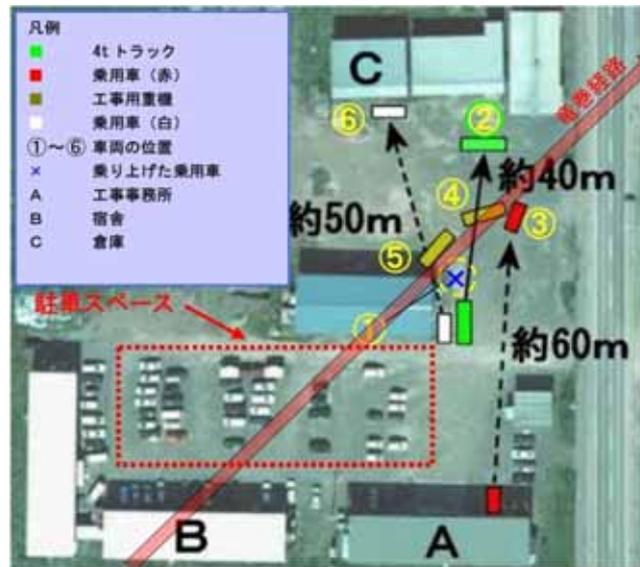


図5-2 佐呂間竜巻(2006. 11. 7)による被災状況（工事事務所敷地内の車両被災）  
（文献(11)の写真に竜巻被害の方向を  で加筆）

ここでは、TONBOSによるフジタモデルを風速場として用いた車両（4tトラック及び乗用車）の飛散解析を行い、実際の被災状況と比べて妥当な結果となるかどうかの確認を行う。

方法としては、下記の2通りとする。

- (a) 竜巻特性や飛来物（4tトラック及び乗用車）の状況を現実的に設定した場合の再現解析
- (b) 東海第二発電所に適用する飛散解析手法による検証

(a) 竜巻特性や飛来物の状況を現実的に設定した場合の再現解析

(i) 4tトラックの再現解析

再現解析の条件として、入手可能なデータ<sup>(11)(12)</sup>に基づき、合理的と考えられる竜巻特性条件と飛来物（4tトラック）の条件を表5-5のように設定する。初期配置の条件として、配置個数は1個とし、竜巻が遠方から近づく状況設定としている。また、風速60 m/s以下では浮上しない設定となっている。その上で、竜巻との距離を合理的な範囲で変化させ、佐呂間竜巻の再現性を確認する。

車両と竜巻中心との距離を18 m, 20 m, 22 mとした場合の解析結果を表5-6及び図5-3に示す。車両の軌跡は竜巻中心との相対位置関係に敏感であるが、各ケースとも飛散方向が実際の移動方向とおおむね合致しており、特に車両と竜巻中心との距離を20 mとしたケース2では飛散距離もほぼ正確に再現されている。このように、TONBOSによる4tトラックの飛散解析の結果で、物体が地上に設置された状況からの飛散挙動が再現できることが確認できる。

表5-5 佐呂間竜巻の4tトラックの再現解析の計算条件<sup>(9)</sup>

竜巻条件	竜巻の最大風速		92 m/s
	最大接線風速		70 m/s
	移動速度		22 m/s
	コア半径		20 m
飛来物条件	車種不明のため、三菱ふそうPA-FK71Dの仕様を採用	車両長さ	8.1 m
		車両幅	2.24 m
		車両高さ	2.5 m
		車両質量	4000 kg
	飛行定数 $C_D A/m$		0.0056 m <sup>2</sup> /kg
初期配置	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 物体個数：1台</li> <li>・ 竜巻は遠方から物体に近づくが、風速60 m/s以下では浮上しない</li> <li>・ 設置高さ0 m</li> </ul>		

表5-6 佐呂間竜巻での4tトラックの再現解析結果<sup>(9)</sup>

解析 ケース	車両と竜巻中心との 距離	計算結果（フジタモデル）		
		飛散距離	飛散高さ	最大水平速度
1	22 m	45.4 m	2.8 m	25.8 m/s
2	20 m	35.5 m	2.3 m	22.2 m/s
3	18 m	25.9 m	1.7 m	18.8 m/s

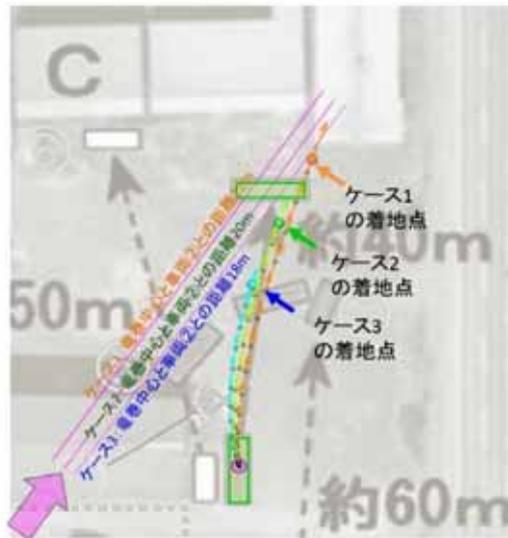


図5-3 TONBOSによるトラック飛散の再現解析結果<sup>(9)</sup>

(ii) 乗用車の再現解析

乗用車（白）（図5-2の⑥）の被災事例を対象として、物体を1点初期配置した条件で最大水平速度等を計算する。

乗用車（白）の計算条件について、表5-7に示す。

表5-7 佐呂間竜巻の乗用車（白）の再現解析の計算条件

竜巻条件	表5-5と同様		
飛来物条件	乗用車（白） 〔トヨタカローラ〕 を仮定	車両長さ	4.4 m
		車両幅	1.7 m
		車両高さ	1.5 m
	飛行定数 $C_D A/m$	0.0097 m <sup>2</sup> /kg	
初期配置	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 物体個数：1台</li> <li>・ 竜巻は遠方から物体に近づくが、風速60 m/s 以下では浮上しない</li> <li>・ 設置高さ0 m</li> </ul>		

乗用車（白）と竜巻中心との距離を18 m、20 m及び22 mとした場合の解析結果を表5-8及び図5-4に示す。飛散距離についてはケース1 でおおむね合致している。

飛散方向については、飛び出し方向はおおむね合致しているものの、最終的な着地点には多少のずれが生じている。これは乗用車（白）が建物に近接して駐車していたため、この建物の倒壊の影響を受けて飛散方向のずれが生じたものと推定される。

なお、赤い乗用車（図5-2の③）について評価した場合は、竜巻中心との距離が大きいため飛散しない解析結果となる。ただし、実際には、赤い乗用車は全壊・飛散したプレハブ建物（軽量鉄骨造2階建て、図5-2のA）のすぐ下流側に駐車しており、そのがれきの影響を受けて一緒に移動したものと考えられる。

表5-8 佐呂間竜巻での乗用車（白）の再現解析結果

解析 ケース	乗用車（白）と竜 巻中心との距離	計算結果（フジモデル）		
		飛散距離	飛散高さ	最大水平速度
1	22 m	51.9 m	3.6 m	28.9 m/s
2	20 m	43.5 m	3.4 m	24.7 m/s
3	18 m	34.7 m	2.9 m	21.1 m/s

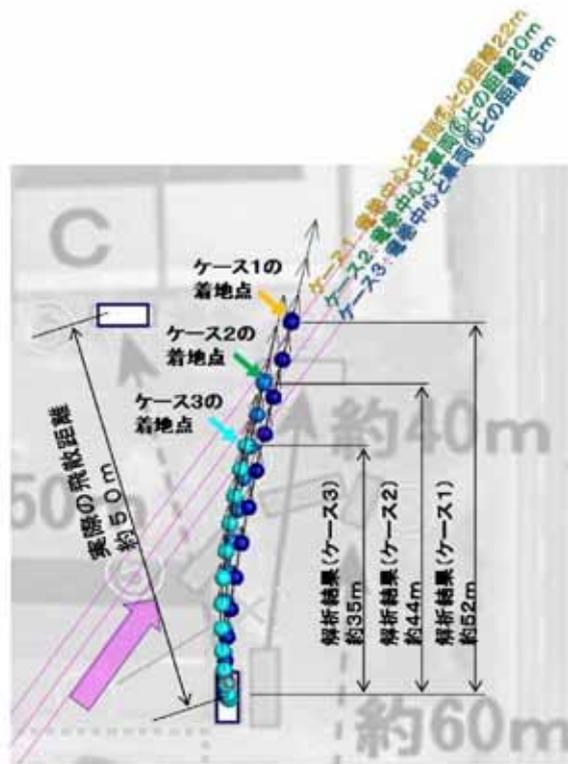


図5-4 TONBOSによる乗用車（白）飛散の再現解析結果

(b) 東海第二発電所に適用する飛散解析手法による検証<sup>(13)</sup>

ここでは、東海第二発電所に適用する飛散解析手法の竜巻条件・物体初期配置条件で前述の佐呂間竜巻における4tトラック及び乗用車（白）の被災事例を評価し、佐呂間竜巻での実際の被災状況（移動距離等）との結果を比較する。

(i) 4tトラックの飛散解析

計算条件について表5-9に示す。竜巻条件としては、設計竜巻の最大風速を92 m/sとし、その他の特性量については、ガイドに例示されている方法に従い、移動速度 $V_t$ を14 m/s（最大風速の15%）、竜巻コア半径 $R_m$ を30 mとする。

表5-9 東海第二発電所に適用する飛散解析手法の計算条件

竜巻条件	設計竜巻風速	92 m/s
	最大接線風速	78 m/s
	移動速度	14 m/s
	コア半径	30 m
飛来物条件	表5-5と同様	
初期配置	・物体個数51×51個、竜巻半径の4倍を一辺とする正方形内（ $x, y = [-2R_m, +2R_m]$ ）に等間隔配置 ・設置高さ0m	

表5-10に実際の被災状況と、東海第二発電所に適用する飛散解析手法の結果の比較を示す。また、図5-5に被災後の4tトラックの状況を示す。

TONBOSによる飛散評価結果として、4tトラックの最大飛散速度は36 m/s、最大飛散高さは3.6 m、最大飛散距離は63.4 mとなる。

実際の4tトラック飛散距離は約40 mであり、TONBOSによる飛散距離の評価結果はこれを上回る。また、飛散高さや最大水平速度については、直接の比較はできないものの、4tトラックの乗員2名が存命であったこと、被災後の4tトラックがほぼ元の外形をとどめていること等から、東海第二発電所に適用する飛散解析手法で飛散解析をした場合でも、実際の被災状況と比較して妥当な結果となるものと考えられる。

表5-10 実際の被災状況と「東海第二発電所の飛散解析手法」との結果の比較  
(4tトラックの場合)

風速場モデル	飛散距離	飛散高さ* <sup>1</sup>	最大水平速度
フジタモデル (地上)	63.4 m	3.6 m	36.0 m/s (毎時130 km)
実際の被害状況	約40 m	乗員2名が幸いにも存命で救出され、搬送先の病院で聞き取り調査に応じており <sup>(11)</sup> 、トラックが地面から3.6 m以上の高所から落下したとは考えにくい。	被災後もほぼ元の外形をとどめていることが示されており <sup>(11)</sup> 、実際の飛散速度は本解析で得られた最大速度(約130 km/h)を超える飛散速度であったとは考えにくい。

注記 \*1: 初期物体高さからの飛散(浮上)高さ



図5-5 竜巻による被災後の4tトラックの様子<sup>(12)(14)</sup>

(ii) 乗用車(白)の飛散解析

4tトラックの場合と同様に、東海第二発電所に適用する飛散解析手法で乗用車(白)の飛散解析を行った場合の結果を表5-11に示す。

乗用車(白)の場合も、TONBOSによる評価が実際の被災状況を包含する結果となっている。

表5-11 実際の被災状況と「東海第二発電所の飛散解析手法」との結果の比較  
(白い乗用車の場合)

風速場モデル	飛散距離	飛散高さ* <sup>1</sup>	最大水平速度
フジタモデル (地上)	82.3 m	4.2 m	44.1 m/s
実際の被災状況	約50 m	—	—

注記 \*1: 初期物体高さからの飛散高さ。

## 6. 妥当性確認

TONBOSを竜巻により発生する飛来物の飛散距離等の評価に使用することは、次のとおり妥当である。

- ・本解析コードは、竜巻により発生する飛来物の飛散距離等の評価を目的に開発されたコードであり、使用目的が合致している。
- ・評価は妥当性を確認している範囲内で行うようにしている。

## 7. 参考文献

- (1) Fujita, T. T., Workbook of tornadoes and high winds for engineering applications, U. Chicago, 1978
- (2) Simiu, E. and Cordes, M., Tornado-Borne Missile Speeds, NBSIR 76-1050, 1976.
- (3) Maruyama, T., Simulation of flying debris using a numerically generated tornado-like vortex. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol.99(4), pp.249-256, 2011.
- (4) 東京工芸大学 (2011) : 平成21~22 年度原子力安全基盤調査研究 (平成22 年度) 竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究, 独立行政法人原子力安全基盤機構
- (5) U.S. Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide 1.76: Design-Basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plants, Revision 1, March 2007.
- (6) 丸山敬, 数値的に生成された竜巻状の渦の性質, 平成 2 1 年度京都大学防災研究所研究発表要旨
- (7) EPRI, Wind field and trajectory models for tornado-propelled objects, report NP-2898, 1978.
- (8) Lei, C., Cheng, L. and Kavanagh, K., Re-examination of the effect of a plane boundary on force and vortex shedding of a circular cylinder, J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.80, pp.263-286, 1999.
- (9) 日本保全学会 原子力規制関連事項検討会, 2015: 軽水型原子力発電所の竜巻影響評価における設計竜巻風速および飛来物速度の設定に関するガイドライン(JSM-NRE-009)
- (10) Fujita, T. T., and J. R. McDonald, Tornado damage at the Grand Gulf, Mississippi nuclear power plant site: Aerial and ground surveys, U.S. Nuclear Regulatory Commission NUREG/CR-0383, 1978.
- (11) 札幌管区气象台:平成18年11月7日から9日に北海道(佐呂間町他)で発生した竜巻等の突風. 災害時気象調査報告, 災害時自然現象報告書, 2006年第1号, 2006.
- (12) 奥田泰雄, 喜々津仁密, 村上知徳, 2006年佐呂間町竜巻被害調査報告. 建築研究所災害調査, 46, 2006.
- (13) 江口譲, 杉本聡一郎, 服部康男, 平口博丸, 原子力発電所での竜巻飛来物速度の合理的評価法 (Fujita の竜巻モデルを用いた数値解析コードの妥当性確認), 日本機械学会論文集, Vol.81, No.823, 2015.
- (14) 土木学会 平成18年11月北海道佐呂間町竜巻緊急災害調査報告書

V-5-10 計算機プログラム（解析コード）の概要・FLIP

## 目次

1.	はじめに	1
1.1	使用状況一覧	2
2.	解析コードの概要	4
3.	解析理論	6
3.1	支配方程式	6
3.2	構成則	13
4.	解析フローチャート	16
5.	FLIPの変更履歴	17
6.	本解析で使用する要素の概要	20
6.1	線形はり要素	20
6.2	線形平面要素	27
6.3	非線形はり要素	28
6.4	非線形ばね要素	31
6.5	ジョイント要素	35
6.6	流体要素、流体-構造連成要素	41
6.7	粘性要素(側方地盤境界、底面地盤境界)	43
6.8	節点集中質量要素	45
6.9	修正武田モデル	46
6.10	杭-地盤相互作用ばねモデル	48
7.	線形はり要素の検証	53
7.1	概要	53
7.2	例題	53
7.3	検証結果	54
8.	修正武田モデルの検証	55
8.1	概要	55
8.2	例題	55
8.3	例題結果(検証結果)	56
8.4	軸力の変動が部材の非線形特性に与える影響(取水構造物の耐震安全評価に関する参考資料)	60
9.	杭-地盤相互作用ばねモデルの検証	63
9.1	概要	63
9.2	杭と周辺地盤の相互作用	63
9.3	解析結果	64

1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード） F L I P について説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-1-1-6-別添1	可搬型重大事故等対処設備の保管場所及びアクセスルート	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-5	使用済燃料乾式貯蔵建屋の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-6	取水構造物の地震応答計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-7	取水構造物の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-8	屋外二重管の地震応答計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-9	屋外二重管の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-11	緊急時対策所建屋の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-12	緊急時対策所用発電機燃料油貯蔵タンク基礎の地震応答計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-13	緊急時対策所用発電機燃料油貯蔵タンク基礎の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-20	格納容器圧力逃がし装置用配管カルバートの地震応答計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-21	格納容器圧力逃がし装置用配管カルバートの耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-22-1	常設代替高圧電源装置置場及び西側淡水貯水設備の地震応答計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-22-2	常設代替高圧電源装置用カルバート（カルバート部）の地震応答計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-22-3	常設代替高圧電源装置用カルバート（トンネル部）の地震応答計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-22-4	常設代替高圧電源装置用カルバート（立坑部）の地震応答計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-23-1	常設代替高圧電源装置置場及び西側淡水貯水設備の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-23-2	常設代替高圧電源装置用カルバート（カルバート部）の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-23-3	常設代替高圧電源装置用カルバート（トンネル部）の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-23-4	常設代替高圧電源装置用カルバート（立坑部）の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-24	可搬型設備用軽油タンク基礎の地震応答計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-25	可搬型設備用軽油タンク基礎の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-26	常設低圧代替注水系ポンプ室の地震応答計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-27	常設低圧代替注水系ポンプ室の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-28	代替淡水貯槽の地震応答計算書	Ver. 7.3.0_2

V-2-2-29	代替淡水貯槽の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-30	常設低圧代替注水系配管カルバートの地震応答解析	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-31	常設低圧代替注水系配管カルバートの耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-32	S A用海水ピットの地震応答計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-33	S A用海水ピットの耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-34	緊急用海水ポンプピットの地震応答計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-35	緊急用海水ポンプピットの耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-36	防潮堤（鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁）の地震応答計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-37	防潮堤（鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁）の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-38-1	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁）の地震応答計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-38-2	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア））の地震応答計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-39-1	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁）の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-39-2	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア））の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-10-2-2-1	防潮堤（鋼製防護壁）の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-10-2-2-2	防潮扉の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-10-2-4	構内排水路逆流防止設備の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-10-4-2	S A用海水ピット取水塔の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-10-4-3	海水引込み管の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-10-4-4-1	貯留堰の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-10-4-4-2	貯留堰取付護岸の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-10-4-5	緊急用海水取水管の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-11-2-16	土留鋼管矢板の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-3-別添3-2-1-1	防潮堤（鋼製防護壁）の強度計算書	Ver. 7.3.0_2
V-3-別添3-2-1-2-1	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁）の強度計算書	Ver. 7.3.0_2
V-3-別添3-2-1-2-2	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア））の強度計算書	Ver. 7.3.0_2
V-3-別添3-2-1-3	防潮堤（鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁）の強度計算書	Ver. 7.3.0_2
V-3-別添3-2-1-4	防潮扉の強度計算書	Ver. 7.3.0_2
V-3-別添3-2-3	構内排水路逆流防止設備の強度計算書	Ver. 7.3.0_2
V-3-別添3-2-9	貯留堰の強度計算書	Ver. 7.3.0_2

## 2. 解析コードの概要

項目	コード名 FLIP
使用目的	2次元有限要素法による地震応答解析（有効応力法）
開発機関	FLIPコンソーシアム
開発時期	1988年
使用したバージョン	Ver. 7.3.0_2
コードの概要	<p>FLIP (Finite element analysis of Liquefaction Program) は、1988年に運輸省港湾技術研究所（現：港湾航空技術研究所）において開発された平面ひずみ状態を対象とする有効応力解析法に基づく、2次元地震応答解析プログラムである。</p> <p>FLIPの主な特徴として、以下の項目を挙げることができる。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>①有限要素法に基づくプログラムである。</li> <li>②平面ひずみ状態を解析対象とする。</li> <li>③地盤の有効応力の変化を考慮した地震応答解析を行い、部材の断面力や変形量を計算する。</li> <li>④土の応力-ひずみモデルとしてマルチスプリング・モデルを採用している。</li> <li>⑤有効応力の変化は有効応力法により考慮する。そのために必要な過剰間隙水圧算定モデルとして井合モデルを用いている。</li> </ul>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p><b>【検証 (Verification)】</b></p> <p>本解析コードの検証内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・マニュアルに記載された例題の提示解と本解析コードによる解析解との比較を実施し、解析解が提示解と一致することを確認している。</li> <li>・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></p> <p>本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・本解析コードは港湾施設の設計に用いられる「港湾施設の技術上の基準・同解説（2007）（日本港湾協会）」において、港湾施設に対して適用性が確認されている解析コードとして扱われており、今回の解析に使用することは妥当である。</li> <li>・関西電力株式会社の「高浜原子力発電所第4号機」において、防潮堤、防潮扉、屋外排水路逆流防止設備、放水ピット止水板の地震応</li> </ul>

	<p>答解析に本コード (Ver. 7. 2. 3. 4) が使用された実績があり、杭以外の構造の施設に適用性があるということは、高浜 4 号で既に検証されている。</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• バージョン更新により導入された杭軸方向の「杭-地盤相互作用ばね要素」は、他プラントの既工事計画で使用されたバージョン (Ver. 7. 2. 3_4) での杭軸方向のジョイント要素と名称は異なるものの実質の構成式としては同じであるが、本工事計画において使用するバージョン (Ver. 7. 3. 0_2) と他プラントの既工事計画で使用されたバージョン (Ver. 7. 2. 3_4) との解析結果の比較を行い、解析結果が等しいことを確認した。なお、杭軸直交方向の杭-地盤相互作用ばねは、Ver. 7. 3. 0_2 と Ver. 7. 2. 3_4 で名称も構成式も同じである。</li><li>• 本工事計画の取水構造物で使用する RC の修正武田モデルについて、改めてその機能の検証および妥当性について確認している。</li><li>• 本工事計画における構造に対し使用する地震応答解析の使用目的に対し、使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。</li></ul>
--	---

### 3. 解析理論

#### 3.1 支配方程式

##### 3.1.1 運動方程式及び水流の収支バランス式

Zienkiewiczらに従い，間隙水で満たされた多孔質体の運動方程式および水流の収支バランスを表す式を次のようにおく（u-p formulation）。

$$\sigma_{ij,j} + \rho g_i = \rho \ddot{u}_i \quad (3-1-1)$$

$$(k_{ij} p_{,j})_{,i} - \varepsilon_{ii} - (k_{ij} \rho_f g_j)_{,i} = -(k_{ij} \rho_f \ddot{u}_j)_{,i} + n \dot{p} / K_f \quad (3-1-2)$$

ここで，

$\sigma_{ij}$	全応力（対称テンソル）
$\rho$	密度（土と水の複合物としての密度）
$g_i$	重力加速度ベクトル
$u_i$	土骨格の変位ベクトル
$k_{ij}$	透水係数（対称テンソル）
$p$	間隙水圧
$\varepsilon_{ij}$	土骨格のひずみ（対称テンソル）
$\rho_f$	間隙水の密度
$n$	間隙率
$K_f$	間隙水の体積弾性係数

である。

また，以下に示す関係がある。

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} - \delta_{ij} p \quad (\text{有効応力原理}) \quad (3-1-3)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (\text{微小ひずみテンソル}) \quad (3-1-4)$$

ここで， $\sigma'_{ij}$ は有効応力， $\delta_{ij}$ はクロネッカーのデルタである。

なお，本定式化では，ひずみと応力に関しては，収縮・圧縮を負，伸張・引張を正とする。ただし，間隙水圧に関しては，圧縮を正とする。

##### 3.1.2 境界条件と初期条件

式(3-1-1) (3-1-2)に対し，次に示す4種の境界条件を考える。

$$u_i = \bar{u}_i \quad \text{on } \partial\Omega_u \quad (3-1-5)$$

$$t_i = \sigma_{ij} n_j = \bar{t}_i \quad \text{on } \partial\Omega_\sigma \quad (3-1-6)$$

$$p = \bar{p} \quad \text{on } \partial\Omega_p \quad (3-1-7)$$

$$q = -\dot{w}_j n_j = k_{ij} (p_{,i} - \rho_f g_i + \rho_f \ddot{u}_i) n_j = \bar{q} \quad \text{on } \partial\Omega_q \quad (3-1-8)$$

ここで，

$\bar{u}_i$	$\partial\Omega_u$ 境界上で規定される変位
$\bar{t}_i$	$\partial\Omega_\sigma$ 境界上で規定される表面力
$\bar{p}$	$\partial\Omega_p$ 境界上で規定される間隙水圧
$\bar{q}$	$\partial\Omega_q$ 境界上で規定される間隙水流入量
$\dot{w}_i$	間隙水の骨格に対する相対速度（断面平均）

なお， $\partial\Omega_u$ 境界と $\partial\Omega_\sigma$ 境界を合わせたものが，対象領域 $\Omega$ の全表面 $\partial\Omega$ に等しい。また，

$\partial\Omega_u$ 境界と $\partial\Omega_\sigma$ 境界の共通部分はない。 $\partial\Omega_p$ 境界と $\partial\Omega_q$ 境界についても同様である。

一方、初期条件は領域 $\Omega$ の各点において、次のように与えられるものとする。

$$u_i = \dot{u}_i = \ddot{u}_i = 0 \quad (3-1-9)$$

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^{st} = \sigma'_{ij}{}^{st} - \delta_{ij}p^{st} \quad (3-1-10)$$

$$p = p^{st} \quad (3-1-11)$$

$$\dot{p} = 0 \quad (3-1-12)$$

特に、境界上では以下のように与えられるものとする。

$$u_i = \bar{u}_i^{st} = 0 \quad \text{on } \partial\Omega_u \quad (3-1-13)$$

$$t_i^{st} = \sigma_{ij}^{st}n_j = \bar{t}_i^{st} \quad \text{on } \partial\Omega_\sigma \quad (3-1-14)$$

$$p = \bar{p}^{st} \quad \text{on } \partial\Omega_p \quad (3-1-15)$$

$$q = k_{ij}(p_i^{st} - \rho_f g_i)n_j = \bar{q}^{st} \quad \text{on } \partial\Omega_q \quad (3-1-16)$$

これ以降、初期条件により示される系の状態を基準状態と呼ぶことにする。基準状態では、式(3-1-1)は、

$$\sigma_{ij,j}^{st} + \rho g_i = 0 \quad (3-1-17)$$

となる。式(3-1-17)を用い、式(3-1-1)から $\rho g_i$ の項を消去すると、次式を得る。

$$(\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^{st})_{,j} = \rho \ddot{u}_i \quad (3-1-18)$$

また、基準状態では、式(3-1-2)は、

$$(k_{ij}p_{,j}^{st})_{,i} - (k_{ij}\rho_f g_j)_{,i} = 0 \quad (3-1-19)$$

となる。式(3-1-19)を用い、式(3-1-2)から重力加速度 $g_i$ を含む項を消去すると、次式を得る。

$$(k_{ij}(p_{,j} - p_{,j}^{st}))_{,i} - \dot{\epsilon}_{ii} = -(k_{ij}\rho_f \ddot{u}_j)_{,i} + n\dot{p}/K_f \quad (3-1-20)$$

以後、式(3-1-18)及び式(3-1-20)を用いて、有限要素法に基づく定式化を行う。

### 3.1.3 運動方程式の離散化

式(3-1-18)に示す運動方程式は、任意の試行関数（重み関数） $\phi_i$ を用いて、以下のとおり書くことができる。

$$\int_{\Omega} \phi_i \left( (\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^{st})_{,j} - \rho \ddot{u}_i \right) dv + \int_{\partial\Omega_u} \phi_i (\bar{u}_i - u_i) ds + \int_{\partial\Omega_\sigma} \phi_i (\bar{t}_i - \sigma_{ij}n_j) ds = 0 \quad (3-1-21)$$

ここで、

$$\phi_i = 0 \quad \text{on } \partial\Omega_u \quad (3-1-22)$$

とすると、式(3-1-21)は、

$$\int_{\Omega} \phi_i (\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^{st})_{,j} dv - \int_{\Omega} \rho \phi_i \ddot{u}_i dv + \int_{\partial\Omega} \phi_i (\bar{t}_i - \sigma_{ij}n_j) ds = 0 \quad (3-1-23)$$

となる。式(3-1-23)の左辺第1項は、Gaussの定理を用いると、

$$\int_{\Omega} \phi_i (\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^{st})_{,j} dv = \int_{\partial\Omega} \phi_i (\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^{st}) n_j ds - \int_{\Omega} \phi_{i,j} (\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^{st}) dv \quad (3-1-24)$$

と表され、これを式(3-1-23)に代入すると次式を得る。

$$\int_{\Omega} \phi_{i,j} (\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^{st}) dv + \int_{\Omega} \rho \phi_i \ddot{u}_i dv - \int_{\partial\Omega} \phi_i (\bar{t}_i - \bar{t}_i^{st}) ds = 0 \quad (3-1-25)$$

式(3-1-25)によれば、表面力としては、基準状態における表面力からの増力のみを考慮すればよいことがわかる。この増加分を $\bar{t}_i^*$ で表すことにする。すなわち、

$$\bar{t}_i^* = (\bar{t}_i - \bar{t}_i^{st}) \quad (3-1-26)$$

より、式(3-1-25)は以下のように書くことができる。

$$\int_{\Omega} \phi_{i,j} (\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^{st}) dv + \int_{\Omega} \rho \phi_i \ddot{u}_i dv - \int_{\partial\Omega} \phi_i \bar{t}_i^* ds = 0 \quad (3-1-27)$$

ここで、応力の対称性を用いると、

$$\int_{\Omega} \frac{1}{2} (\phi_{i,j} + \phi_{j,i}) (\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^{st}) dv + \int_{\Omega} \rho \phi_i \ddot{u}_i dv - \int_{\partial\Omega} \phi_i \bar{t}_i^* ds = 0 \quad (3-1-28)$$

となり、さらに、次式のように書くことができる。

$$\int_{\Omega} (\mathbf{L}\boldsymbol{\phi})^T (\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\sigma}_{st}) dv + \int_{\Omega} \rho \boldsymbol{\phi}^T \ddot{\mathbf{u}} dv - \int_{\partial\Omega} \boldsymbol{\phi}^T \bar{\mathbf{t}}^* ds = 0 \quad (3-1-29)$$

ここで、

$$\mathbf{L}^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (3-1-30)$$

$$\boldsymbol{\sigma}^T = (\sigma_{xx} \quad \sigma_{yy} \quad \sigma_{zz} \quad \sigma_{xy} \quad \sigma_{yz} \quad \sigma_{zx}) \quad (3-1-31)$$

$$(\boldsymbol{\sigma}_{st})^T = (\sigma_{xx}^{st} \quad \sigma_{yy}^{st} \quad \sigma_{zz}^{st} \quad \sigma_{xy}^{st} \quad \sigma_{yz}^{st} \quad \sigma_{zx}^{st}) \quad (3-1-32)$$

$$\mathbf{u}^T = (u_x \quad u_y \quad u_z) \quad (3-1-33)$$

$$\boldsymbol{\phi}^T = (\phi_x \quad \phi_y \quad \phi_z) \quad (3-1-34)$$

$$(\bar{\mathbf{t}}^*)^T = (\bar{t}_x^* \quad \bar{t}_y^* \quad \bar{t}_z^*) \quad (3-1-35)$$

である。

ここで、試行関数 $\boldsymbol{\phi}$ は任意であるので、試行関数として仮想変位 $\delta\mathbf{u}$ を採用すると、式(3-1-29)より以下のような仮想仕事の原理が導かれる。

$$\int_{\Omega} (\mathbf{L}\delta\mathbf{u})^T (\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\sigma}_{st}) dv + \int_{\Omega} \rho (\delta\mathbf{u})^T \ddot{\mathbf{u}} dv - \int_{\partial\Omega} (\delta\mathbf{u})^T \bar{\mathbf{t}}^* ds = 0 \quad (3-1-36)$$

さらに、以下のとおり書ける。

$$\int_{\Omega} (\delta \boldsymbol{\varepsilon})^T (\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\sigma}_{st}) dv + \int_{\Omega} \rho (\delta \mathbf{u})^T \dot{\mathbf{u}} dv - \int_{\partial \Omega} (\delta \mathbf{u})^T \bar{\mathbf{t}}^* ds = 0 \quad (3-1-37)$$

ここで、

$$\boldsymbol{\varepsilon}^T = (\varepsilon_{xx} \quad \varepsilon_{yy} \quad \varepsilon_{zz} \quad \gamma_{xy} \quad \gamma_{yz} \quad \gamma_{zx}) \quad (3-1-38)$$

とする。なお、 $\gamma_{ij} = 2\varepsilon_{ij}$  ( $i \neq j$ )は工学ひずみである。

続いて、式(3-1-36)に示す運動方程式の離散化を行う。すなわち、変位などを補間関数  $H$ 、節点変位ベクトル  $\mathbf{u}$  などを用いて、以下のように表す。

$$\mathbf{u} = H \mathbf{u} \quad (3-1-39)$$

$$\dot{\mathbf{u}} = H \dot{\mathbf{u}} \quad (3-1-40)$$

ここで、2次元の場合、

$$H = \begin{bmatrix} h_1 & 0 & h_2 & 0 & h_3 & 0 & \cdots & h_N & 0 \\ 0 & h_1 & 0 & h_2 & 0 & h_3 & \cdots & 0 & h_N \end{bmatrix} \quad (3-1-41)$$

$$\mathbf{u}^T = [u_x^1 \quad u_y^1 \quad u_x^2 \quad u_y^2 \quad u_x^3 \quad u_y^3 \quad \cdots \quad u_x^N \quad u_y^N] \quad (3-1-42)$$

となる。なお、 $N$ は1要素あたりの節点数である。

さらに、ひずみベクトル  $\boldsymbol{\varepsilon}$  は次のように表される。

$$\boldsymbol{\varepsilon} = L \mathbf{u} = L H \mathbf{u} = B \mathbf{u} \quad (3-1-43)$$

ここで、 $B$ は節点変位-ひずみ変換マトリクスであり、次の関係がある。

$$B = L H \quad (3-1-44)$$

これより、式(3-1-36)に示す運動方程式が、以下のように離散化される。

$$\int_{\Omega} (B \delta \mathbf{u})^T (\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\sigma}_{st}) dv + \int_{\Omega} \rho (H \delta \mathbf{u})^T H \dot{\mathbf{u}} dv - \int_{\partial \Omega} (H \delta \mathbf{u})^T \bar{\mathbf{t}}^* ds \quad (3-1-45)$$

$$= (\delta \mathbf{u})^T \int_{\Omega} B^T (\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\sigma}_{st}) dv + (\delta \mathbf{u})^T \int_{\Omega} \rho H^T H dv \dot{\mathbf{u}} - (\delta \mathbf{u})^T \int_{\partial \Omega} H^T \bar{\mathbf{t}}^* ds = 0$$

式(3-1-45)は、任意の仮想変位に対して成立するので、

$$\int_{\Omega} B^T (\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\sigma}_{st}) dv + M \dot{\mathbf{u}} = \mathbf{t}^* \quad (3-1-46)$$

となる。ここで、

$$M = \int_{\Omega} \rho H^T H dv \quad (3-1-47)$$

$$\mathbf{t}^* = \int_{\partial \Omega} H^T \bar{\mathbf{t}}^* ds \quad (3-1-48)$$

であり、2次元の場合、

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial x} & 0 & \frac{\partial h_2}{\partial x} & 0 & \frac{\partial h_3}{\partial x} & 0 & \dots & \frac{\partial h_N}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial h_1}{\partial y} & 0 & \frac{\partial h_2}{\partial y} & 0 & \frac{\partial h_3}{\partial y} & \dots & 0 & \frac{\partial h_N}{\partial y} \\ \frac{\partial h_1}{\partial y} & \frac{\partial h_1}{\partial x} & \frac{\partial h_2}{\partial y} & \frac{\partial h_2}{\partial x} & \frac{\partial h_3}{\partial y} & \frac{\partial h_3}{\partial x} & \dots & \frac{\partial h_N}{\partial y} & \frac{\partial h_N}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (3-1-49)$$

となる。

なお、式(3-1-46)からは、 $\partial\Omega_u$ 境界上の自由度に対する式は落ちているものとする。

### 3.1.4 有効応力・相対変位を用いた運動方程式

式(3-1-3)に示す有効応力原理より、式(3-4-46)は有効応力を用いて以下のように書くことができる。

$$\int_{\Omega} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}' dv + \mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}} = \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}'_{st} dv + \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \hat{\mathbf{m}}(p - p^{st}) dv + \mathbf{t}^* \quad (3-1-50)$$

ここで、

$$\hat{\mathbf{m}}^T = (1 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0) \quad (3-1-51)$$

$$\boldsymbol{\sigma}'^T = (\sigma'_{xx} \quad \sigma'_{yy} \quad \sigma'_{zz} \quad \sigma'_{xy} \quad \sigma'_{yz} \quad \sigma'_{zx}) \quad (3-1-52)$$

$$(\boldsymbol{\sigma}'_{st})^T = (\sigma'_{xx}{}^{st} \quad \sigma'_{yy}{}^{st} \quad \sigma'_{zz}{}^{st} \quad \sigma'_{xy}{}^{st} \quad \sigma'_{yz}{}^{st} \quad \sigma'_{zx}{}^{st}) \quad (3-1-53)$$

ここで、間隙水圧を、節点における間隙水圧の値を用いて、以下のように離散化する。

$$p = \hat{\mathbf{H}} \mathbf{p} \quad (3-1-54)$$

ここで、補間関数 $\hat{\mathbf{H}}$ は以下のとおり。

$$\hat{\mathbf{H}} = [\hat{h}_1 \quad \hat{h}_2 \quad \hat{h}_3 \quad \dots \quad \hat{h}_N] \quad (3-1-55)$$

式(3-1-54)を式(3-1-50)に適用すると、運動方程式は、減衰項も考慮して次のようになる。

$$\int_{\Omega} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}' dv + \mathbf{C} \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}} = \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}'_{st} dv + \mathbf{Q} \mathbf{p}^* + \mathbf{t}^* \quad (3-1-56)$$

ここで、 $\mathbf{C}$ は減衰マトリクス、また、

$$\mathbf{p}^* = \mathbf{p} - \mathbf{p}_{st} \quad (3-1-57)$$

$$\mathbf{Q} = \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \hat{\mathbf{m}} \hat{\mathbf{H}} dv \quad (3-1-58)$$

である。

さらに、基盤に一様に入射する地震動加速度 $\ddot{u}_g$ に対する応答を求めるために、節点変位を基盤の変位とそれに対する相対変位に分離する。すなわち、

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_r + u_g \mathbf{I} \quad (3-1-59)$$

ここで、

$$\mathbf{u}_r \quad \text{相対変位ベクトル}$$

$u_g$  基盤の変位 (いずれかの座標軸の方向の変位)  
 $I$  加振方向の自由度成分に1, その他に0を割り当てたベクトル  
 式(3-1-59)を式(3-1-56)に代入すると, 次式を得る。

$$\int_{\Omega} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}' dv + \mathbf{C} \dot{\mathbf{u}}_r + \mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}}_r = -\ddot{u}_g \mathbf{M} \mathbf{I} + \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}'_{st} dv + \mathbf{Q} \underline{\mathbf{p}}^* + \mathbf{t}^* \quad (3-1-60)$$

なお,  $I$ は平行移動を表すベクトルであるから, 次式が成り立つ。

$$\mathbf{B} \mathbf{I} = \mathbf{0}, \quad \mathbf{C} \mathbf{I} = \mathbf{0} \quad (3-1-61)$$

ひずみベクトル $\boldsymbol{\varepsilon}$ は, 式(3-1-43) (3-1-59) (3-1-61)より,  $\mathbf{u}$ でも $\mathbf{u}_r$ でも同様に, 以下のよう  
 にして求められる。

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B} \mathbf{u} = \mathbf{B} \mathbf{u}_r \quad (3-1-62)$$

有効応力ではなく全応力で取り扱うべき要素が他にあれば, 式(3-1-60)は次のようになる。

$$\int \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}' dv + \int \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma} dv + \mathbf{C} \dot{\mathbf{u}}_r + \mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}}_r \quad (3-1-63)$$

$$= -\ddot{u}_g \mathbf{M} \mathbf{I} + \int_{\Omega_1} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}'_{st} dv + \int_{\Omega_2} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}_{st} dv + \mathbf{Q} \underline{\mathbf{p}}^* + \mathbf{t}^*$$

上式では, 全領域 $\Omega$ を, 有効応力により定式化される要素の存在する領域 $\Omega_1$ と, 全応力  
 に基づく要素の存在する領域 $\Omega_2$ に分離した。

さらに, 相対変位ベクトル $\mathbf{u}_r$ を, 非拘束自由度 $\mathbf{u}_r^f$ と拘束自由度 $\mathbf{u}_r^c$  ( $\partial\Omega_u$ 境界上の自由度)  
 に分け, また, 行列 $\mathbf{C}, \mathbf{M}$ もこれに応じて区分する。すなわち,

$$\mathbf{u}_r = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_r^f \\ \mathbf{u}_r^c \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = [\mathbf{C}^f \quad \mathbf{C}^c], \quad \mathbf{M} = [\mathbf{M}^f \quad \mathbf{M}^c] \quad (3-1-64)$$

すると, 離散化された運動方程式(3-1-63)は, 以下のように書くことができる。

$$\int_{\Omega_1} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}' dv + \int_{\Omega_2} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma} dv + \mathbf{C}^f \dot{\mathbf{u}}_r^f + \mathbf{M}^f \ddot{\mathbf{u}}_r^f \quad (3-1-65)$$

$$= -\ddot{u}_g \mathbf{M} \mathbf{I} - \mathbf{C}^c \dot{\mathbf{u}}_r^c - \mathbf{M}^c \ddot{\mathbf{u}}_r^c + \int_{\Omega_1} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}'_{st} dv + \int_{\Omega_2} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}_{st} dv + \mathbf{Q} \underline{\mathbf{p}}^* + \mathbf{t}^*$$

### 3.1.5 非排水の場合の運動方程式

間隙水が非排水条件にあると仮定した場合, 式(3-1-2)において $k_{ii} = 0$ とおくことによ  
 り, 次式を得る。

$$\dot{p} = -\frac{K_f}{n} \dot{\varepsilon}_{ii} \quad (3-1-66)$$

これを時間 $t$ に関して積分し, 式(3-1-9) (3-1-11)に示す初期条件を考慮すると,

$$p^* \equiv p - p^{st} = -\frac{K_f}{n} \varepsilon_{ii} \quad (3-1-67)$$

となる。上式を式(3-1-50)に代入すると、式(3-1-60)に代えて次式を得る。

$$\int_{\Omega} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}' dv + \hat{\mathbf{A}} \underline{\mathbf{u}}_r + \mathbf{C} \underline{\dot{\mathbf{u}}}_r + \mathbf{M} \underline{\ddot{\mathbf{u}}}_r = -\ddot{u}_g \mathbf{M} \mathbf{I} + \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}'_{st} dv + \mathbf{t}^* \quad (3-1-68)$$

ここで、

$$\hat{\mathbf{A}} = \int_{\Omega} \frac{K_f}{n} \mathbf{B}^T \hat{\mathbf{m}} \hat{\mathbf{m}}^T \mathbf{B} dv \quad (3-1-69)$$

あるいは、式(3-1-65)に対応して次式を得る。

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega_1} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}' dv + \int_{\Omega_2} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma} dv + \hat{\mathbf{A}} \underline{\mathbf{u}}_r + \mathbf{C}^f \underline{\dot{\mathbf{u}}}_r^f + \mathbf{M}^f \underline{\ddot{\mathbf{u}}}_r^f \\ & = -\ddot{u}_g \mathbf{M} \mathbf{I} - \mathbf{C}^c \underline{\dot{\mathbf{u}}}_r^c - \mathbf{M}^c \underline{\ddot{\mathbf{u}}}_r^c + \int_{\Omega_1} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}'_{st} dv + \int_{\Omega_2} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}_{st} dv + \mathbf{t}^* \end{aligned} \quad (3-1-65)$$

### 3.2 構成則

FLIPでは、前述のとおり、せん断応力-せん断歪関係には、主応力軸の回転が自然に考慮される、東畑・石原(1985)によるマルチスプリング・モデルを採用し、過剰間隙水圧の発生モデルとしては、井合のモデルを採用している。

このマルチスプリング・モデルは、図3-1に示すように任意方向のせん断面に対して仮想的な単純せん断が発生するものとし、これらのせん断面に対して双曲線モデルを適用するものである。FLIPでは、双曲線モデルにおけるMasing則を修正し、履歴ループの大きさを任意に調節可能なように拡張したモデルを使用している。このモデルの特徴は以下のとおりである。

- (1) 排水条件におけるせん断応力-せん断歪の履歴ループ特性（いわゆる歪依存カーブ）は、既往の試験データとよく適合する。
- (2) 主応力の回転が自然に（つまり新たなパラメータを導入しなくても）考慮される。
- (3) 材料としての異方性が導入しやすい形となっている。

他方、過剰間隙水圧発生モデルでは、累積塑性せん断仕事に基づいて、液状化の進展に伴う過剰間隙水圧の上昇、有効応力の減少及びせん断剛性の低下等を、以下に示す手順で評価する。

- ① 地震力の作用により土の各部分ではせん断変形するが、その際の塑性せん断仕事を累積したものが液状化の進展の程度を表す指標になりうると考えられる。井合モデルでは、この累積塑性せん断仕事から、図 3-2 に示す液状化の進展の程度を表す「液状化フロントパラメータ  $S_0$ 」を求める、 $S_0$ が定まれば、図中の液状化フロント(Liquefaction Front)が所定の式により与えられる。なお、図 3-2 は等方圧密後に全拘束圧力一定の条件下で準静的に繰り返しせん断を行う液状化試験において得られる有効応力経路を模式的に描いたものであり、液状化フロントは液状化の進行のある局面における可能な応力経路を示す。
- ② 図 3-2 に示すように、液状化フロントとせん断応力比 $r(= q/(-\sigma_{m0}'))$ から、前述の液状化試験の条件下においては $\sigma_m'/\sigma_{m0}'$ に一致する状態変数 $S$ (図 3-2 の横軸の値)を求める。なお、せん断応力比  $r$  は、進行中の地震応答解析の現時刻における最大せん断応力  $q$  と地震応答解析開始時点の平均有効応力 $\sigma_{m0}'$ から算定する。液状化試験では $\sigma_{m0}'$ は等方圧密後の平均有効応力、 $\sigma_m'$ は試験中の任意の時点における平均有効応力を表す。
- ③ 前述の液状化試験の条件下で考えると、 $(1 - S) \sigma_{m0}'$ は過剰間隙水圧  $u$  に等しく、また、全体積の変化により定まる。一方、平均有効応力と体積弾性歪に関する構成則を導入すれば、平均有効応力 $\sigma_m'(= S\sigma_{m0}')$ に基づき体積弾性歪を算定することができる。したがって、過剰間隙水圧から算定される全体積歪から体積弾性歪を引くと体積塑性歪 $\epsilon_{mp}$ が得られる。この体積塑性歪は、上記液状化試験の条件下で得られるもので、2次元地震応答解析ではこの条件は成立しないが、その場合でも、この方法で見積もった体積塑性歪が

生じるものとする。

- ④ 前述の平均有効応力と体積弾性歪の関係に対して、③で求めた体積塑性歪 $\epsilon_{mp}$ を考慮すれば、全体積歪と平均有効応力との間関係を得る。2次元の地震応答解析の際には、全体積歪は地盤要素の節点変位から直ちに計算することが可能で、これにより平均有効応力 $\sigma_m'$ を評価することができる。また、過剰間隙水圧比は $(1 - \sigma_m'/\sigma_{m0}')$ により算定する。なお、 $\sigma_{m0}'$ は地震応答解析開始時点の平均有効応力である。
- ⑤ 上記④で求めた有効応力 $\sigma_m'$ に応じてせん断強度及び初期せん断剛性を算定し直すのが普通であるが、FLIP では②で求めた状態変数 $S$ に応じてマルチスプリング・モデルのせん断強度等を直接低減させる。これによりマルチスプリング・モデルの各スプリングが従う双曲線モデルの骨格曲線は図3-3に示すように変化する。

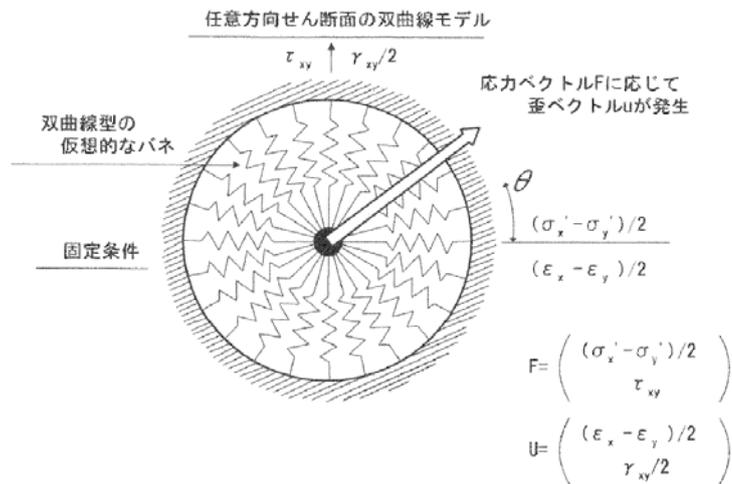


図3-1 マルチスプリング・モデル

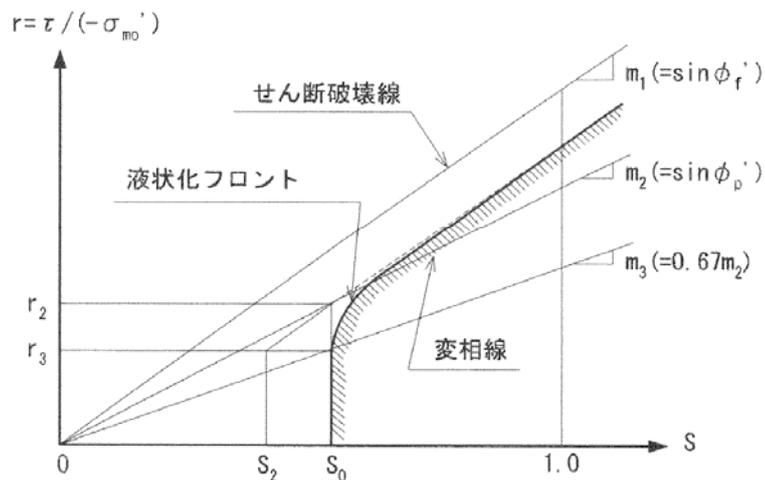


図3-2 過剰間隙水圧モデルの概念図

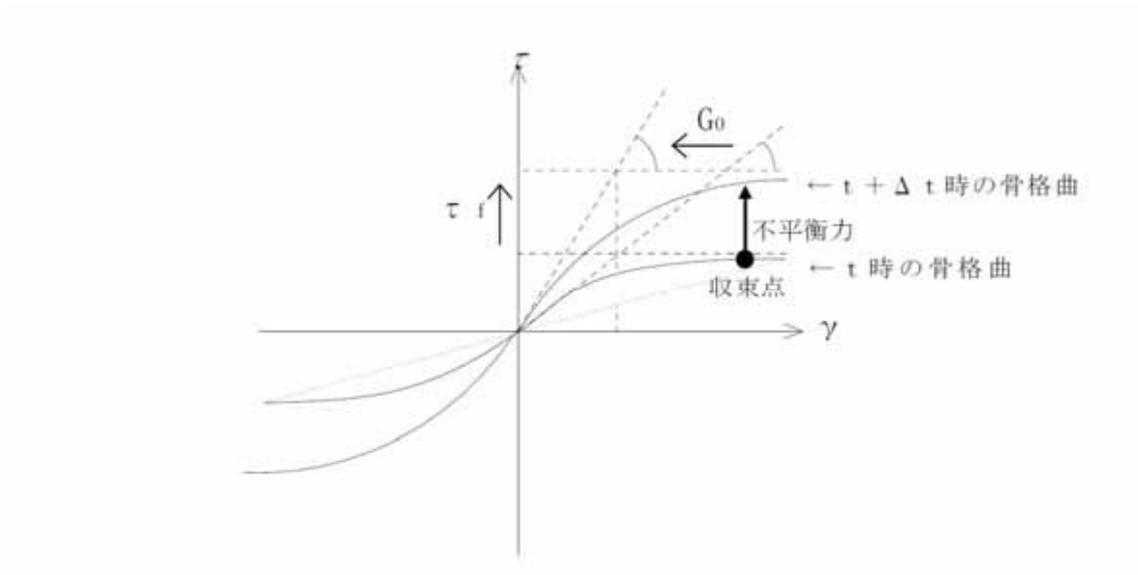


図3-3 双曲線モデルの骨格曲線の液状化による変化（模式図）

#### 4. 解析フローチャート

解析フローチャートを図4-1に示す。

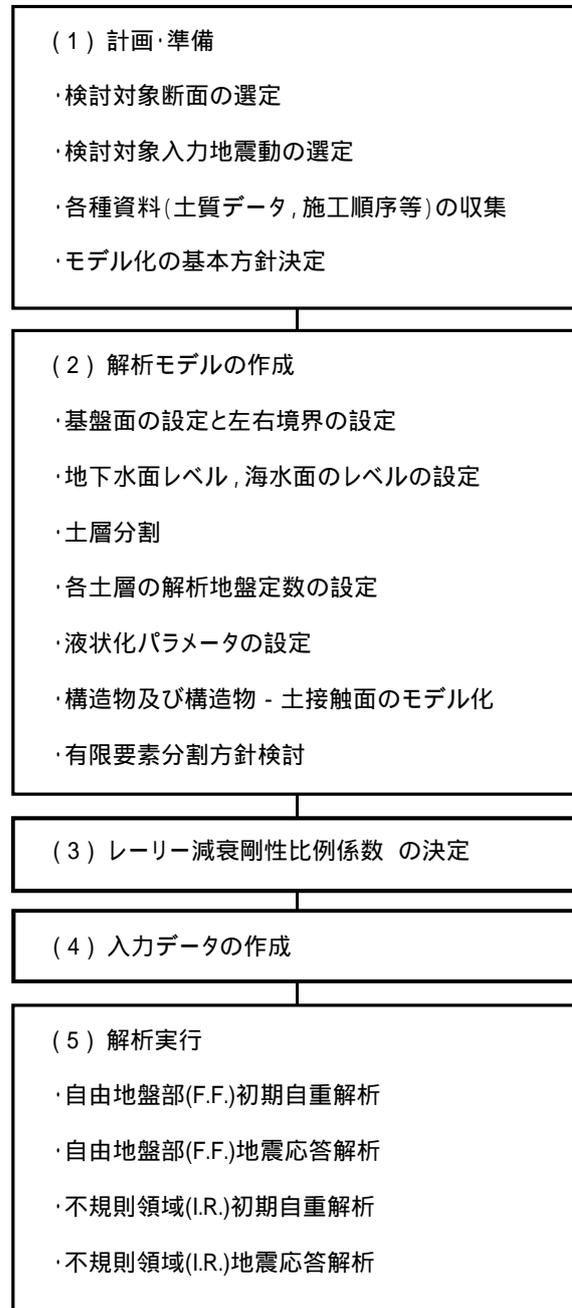


図4-1 解析フローチャート

5. FLIPの変更履歴

関西電力株式会社の「高浜原子力発電所第4号機」において、防潮堤、防潮扉、屋外排水路逆流防止設備、放水ピット止水板の地震応答解析に本コード（Ver. 7. 2. 3\_4）が使用された実績がある。一方、東海第二発電所ではFLIP Ver. 7. 3. 0\_2を使用する。そこで、FLIP Ver. 7. 2. 3\_4からFLIP Ver. 7. 3. 0\_2までの改訂履歴を表5-1～表5-3に示す。

表5-1 FLIP Ver. 7. 2. 3版からFLIP Ver. 7. 2. 3\_5版への改訂内容

改訂項目	内容	実装版	東海第二での使用の有無
カクテルグラスモデル要素	①qusのデフォルト値を10000 (kPa) から0 (Sus法を使用しない)に変更した。	FLIP Ver. 7. 2. 3_3	無
非線形はり要素	①非線形はり要素 (IEL=16) に内蔵のトリリニアモデルのM～φ関係に軸力依存性を導入した。 ※現行方式では、M～φ関係の初期勾配が変わってしまうため、FLIP Ver. 7. 3. 0で改善予定とし、FLIP Ver. 7. 3. 0_2では改善済みとなった。	FLIP Ver. 7. 2. 3_4	無
バグ対応	①FLIP Ver. 7. 2. 3に存在していた、多段階解析の際のジョイント要素の不具合を修正した。	FLIP Ver. 7. 2. 3_2	
	②マルチスプリング要素のIS12 (履歴減衰算定法選択SW) を1と設定した場合の、多重せん断ばねの伸びの最大値算定ルーチンをFLIP Ver. 7. 2. 2相当へ戻した。(修正が不適切だったため)	FLIP Ver. 7. 2. 3_3	
	④非線形はり要素 (IEL=16) で、IAX=1～4の場合で、Ny+とNy-が異なる場合に、両者を取り違えていたバグに対応した。	FLIP Ver. 7. 2. 3_4	
	⑤非線形はり要素 (IEL=16) にて、H形鋼の弱軸回りの全塑性モーメントの軸力依存性を考慮する場合に (IAX=4)、全塑性モーメントが正しく算定されないというバグに対応した。	FLIP Ver. 7. 2. 3_5	

ここで、カクテルグラスモデル要素は不使用であるため、検証対象外である。非線形はり要素についても軸力依存型のトリリニアモデルは不使用であるため、検証対象外となる。

表5-2 FLIP Ver. 7. 2. 3\_5版からFLIP Ver. 7. 3. 0版への改訂内容

改訂項目	内容	実装版	東海第二での 使用の有無
非線形はり要素	①非線形はり要素(IEL=16)に内蔵のトリリニアモデルのM～φ関係に軸力依存性を導入したが(FLIP Ver. 7. 2. 3_4), 導入した方式では, M～φ関係の初期勾配が変わってしまうため, 現行方式を改善した。	FLIP Ver. 7. 3. 0	無
非線形ばね要素	①非線形ばね要素(IEL=17)の軸方向ばねの種類として, 杭先端ばね用双曲線モデルをFLIP Ver. 7. 1. 9-6-2_5に追加したが, これをFLIP Ver. 7. 3. 0に移植した。その際, 一旦引き抜かれて, 再度押し込まれた場合に, ばね力が再び発揮される位置を, 今までは, 最初に押し込みが始まった位置としていたが, 押し込み→引抜きの最後にばねが切れた位置を指定することも可能にした。	FLIP Ver. 7. 3. 0	無
杭-地盤相互作用 ばね要素	①杭-地盤相互作用ばね要素(IEL=18)に, Ver. 7. 2. 3_4に実装されているジョイント要素の杭軸方向の特性と同様の非線形特性を有する「杭-地盤相互作用ばね」という名称の非線形ばねを生成する機能をFLIP Ver. 7. 1. 9-6-2_4からFLIP Ver. 7. 3. 0に移植した。	FLIP Ver. 7. 1. 9 -6-2_4	有
出力関係	①各出力データに記載の時刻表示は, 長期間の圧密解析後の地震応答解析等に対応するため, F15. 4に変更した。 ②要素タイプごとに出力する諸量を見直した。これに伴い, 要素出力成分の成分番号が変更になっているものがある。時刻歴データ(#21, #24)における流体領域の動水圧時刻歴のタイプ番号が変更になっている。また, 要素履歴データ(#23, #25)のタイプ番号が一部変更になっている。 ③固有ベクトルファイルの機番を#35から#69へ変更した。	FLIP Ver. 7. 3. 0	

ここで, 非線形はり要素は前頁で示したように不使用であるため, 検証対象外である。非線形ばね要素については, 杭先端で使用しているものの, 使用しているのはユーザー定義のモデルであり, 双曲線モデルではないため, 検証対象外である。杭-地盤相互作用ばね要素については, 他プラントの既工事計画で使用していないため, 検証が必要となる。

表5-3 FLIP Ver. 7.3.0版からFLIP Ver. 7.3.0\_2版への改訂内容

改訂項目	内容	実装版	東海第二での 使用の有無
非線形はり要素	①非線形はり要素で、IHT=4(トリリニア軸力依存)の場合に、軸力変動に応じたトリリニア曲線を追跡する処理に問題があったため、これを修正した。 ②FLIP Ver. 7.3.0を作成した際に、非線形はり要素で、IHT=2(バイリニア)かつ $302 \leq IAX \leq 324$ の場合、(Mp-N)ダイアグラムの解釈が正しく行われていなかったことに対して、Ver. 7.3.0_2ではこれを修正した。	FLIP Ver. 7.3.0_2	無
杭-地盤相互作用ばね要素	①FLIP Ver. 7.3.0で、マルチスプリング要素対応の杭-地盤相互作用ばね要素の処理方法を指定する「MODESW」の入力を廃止したが、内部的に残しておいた変数MODESWと新設したパラメータ(KILLJ)の記憶域が重複していたため、MODESWがKILLJの値により変化してしまっていた。そこでMODESWの記憶域を解放して、常に、MODESW=0になるよう改めた(従来からの相互作用ばねの挙動)。なお、FLIP Ver. 7.2.3版では、MODESWは0か1の値を取り得たが、どちらにしても、応答にはほとんど差が無い。	FLIP Ver. 7.3.0_2	有
入力関係	①DIST命令で分布流入量を指定した場合に、それを節点流入量に変換する処理に誤りがあったものを修正した。	FLIP Ver. 7.3.0_2	/
出力関係	①間隙水要素(非排水条件)の過剰間隙水圧を応力ファイル(#36)に出力可能にした。	FLIP Ver. 7.3.0_2	/

ここで、非線形はり要素のIHT=4、IHT=2は不使用のため、検証対象外である。杭-地盤相互作用ばね要素の変更については、前頁と同様に検証を行う。ただし、FLIPコンソーシアムによれば応答にはほとんど差が無いと示されている。

以上から、他プラントの既工事計画で使用していない検証を行うべき機能としては、杭-地盤相互作用ばねの鉛直成分である杭-地盤間の摩擦を表現する非線形ばねを生成する機能が対象となる。

6. 本解析で使用する要素の概要

FLIPには種々の要素が用意されている、そのうち3.2章で述べたマルチスプリング要素及び間隙水要素以外では以下の要素を用いている。

6.1 線形はり要素

線形はり要素は、構造物や杭等の構造物をモデル化する場合に用いる場合が多い。FLIPでは、2次元のアイソパラメトリック要素が用意されている。以下にその定式化について記載する。

※以下は「FLIP研究会14年間の検討成果のまとめ」より

右図に示すように2ないし3節点のまっすぐなはり要素を考え、これに対し要素座標系  $x'y'$  を導入する。節点  $i$  の要素座標は  $x'_i$  となる。

この要素は、1節点当り並進2自由度、回転1自由度を持ち、要素座標系では、これらは図に示したように  $u'_i, v'_i, \theta'_i$  となる。

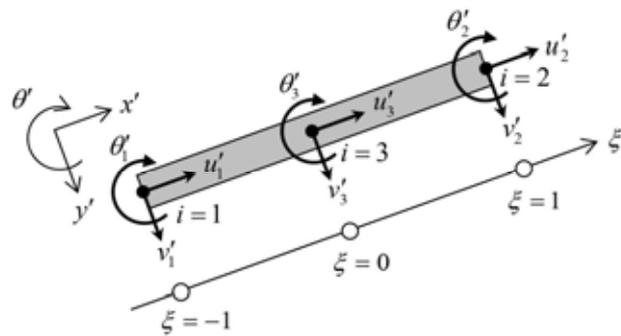


図 4-1-1 アイソパラメトリックはり

自然座標  $\xi$  および補間関数  $h_i(\xi)$  を導入し、要素の中立軸上の任意の位置  $x'$ 、および当該位置  $x'$  における変位  $u', v', \theta'$  は次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} x' &= \sum_i h_i(\xi) x'_i \\ u' &= \sum_i h_i(\xi) u'_i \\ v' &= \sum_i h_i(\xi) v'_i \\ \theta' &= \sum_i h_i(\xi) \theta'_i \end{aligned} \right\} \quad (4-1-1)$$

変位  $u', v', \theta'$  に関する補間式をまとめると、以下のように表される。

$$\{u'\} = H\{U'\} \quad (4-1-2)$$

ここに、

$$\{u'\}^T = (u' \quad v' \quad \theta') \quad (4-1-3)$$

$$\{U'\}^T = (u'_1 \quad v'_1 \quad \theta'_1 \quad u'_2 \quad v'_2 \quad \theta'_2 \quad u'_3 \quad v'_3 \quad \theta'_3) \quad (4-1-4)$$

$$H = \begin{bmatrix} h_1 & & & h_2 & & & h_3 & & \\ & h_1 & & h_2 & & & h_3 & & \\ & & h_1 & & h_2 & & h_3 & & \\ & & & h_1 & & h_2 & & h_3 & \end{bmatrix} \quad (4-1-5)$$

なお、補間関数とその導関数は、3節点要素の場合は次のように与えられる。

$$\left. \begin{aligned} h_1 &= -\frac{1}{2}\xi(1-\xi) & , & \quad \frac{\partial h_1}{\partial \xi} = \xi - \frac{1}{2} \\ h_2 &= \frac{1}{2}\xi(1+\xi) & , & \quad \frac{\partial h_2}{\partial \xi} = \xi + \frac{1}{2} \\ h_3 &= (1-\xi)(1+\xi) & , & \quad \frac{\partial h_3}{\partial \xi} = -2\xi \end{aligned} \right\} \quad (4-1-6)$$

また、2節点要素の場合は次のように与えられる。

$$\left. \begin{aligned} h_1 &= \frac{1}{2}(1-\xi) & , & \quad \frac{\partial h_1}{\partial \xi} = -\frac{1}{2} \\ h_2 &= \frac{1}{2}(1+\xi) & , & \quad \frac{\partial h_2}{\partial \xi} = \frac{1}{2} \end{aligned} \right\} \quad (4-1-7)$$

ここで、はり要素の変形は、図 4-1-2に示すように、変形前に中立軸に対して垂直な線は、変形後も直線を保つと仮定するが、その直線は変形後の中立軸に対する法線と一致する必要はない。このような方法でせん断変形を考慮するはり要素は、Timoshenko のはり理論に基づくものであるが、これを有限要素法に組み込まれるアイソパラメトリック要素に拡張するため、ここでは「アイソパラメトリックはり要素」と呼ぶ。

このような変形に対する要素のひずみベクトル $\{\varepsilon\}$ は、次のように表される。

$$\{\varepsilon\}^T = (\varepsilon' \quad \phi' \quad \gamma') \quad (4-1-8)$$

ここに、

$$\varepsilon' = \frac{\partial u'}{\partial x'} = \sum_i \frac{\partial h_i}{\partial x'} u'_i \quad (\text{軸ひずみ}) \quad (4-1-9)$$

$$\phi' = \frac{\partial \theta'}{\partial x'} = \sum_i \frac{\partial h_i}{\partial x'} \theta'_i \quad (\text{曲率}) \quad (4-1-10)$$

$$\gamma' = \theta' - \frac{\partial v'}{\partial x'} = \sum_i h_i \theta'_i - \sum_i \frac{\partial h_i}{\partial x'} v'_i \quad (\text{せん断角}) \quad 4-1-11$$

また、このひずみベクトル $\{\varepsilon\}$ は、節点変位ベクトル $\{U'\}$ と次のように関連づけることができる。

$$\{\varepsilon\} = B\{U'\} \quad (4-1-12)$$

但し、

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial x'} & \frac{\partial h_2}{\partial x'} & \frac{\partial h_3}{\partial x'} \\ -\frac{\partial h_1}{\partial x'} & h_1 & -\frac{\partial h_2}{\partial x'} & h_2 & -\frac{\partial h_3}{\partial x'} & h_3 \end{bmatrix} \quad (4-1-13)$$

ここに、

$$\frac{\partial h_i}{\partial x'} = \frac{\partial h_i}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial x'} = \frac{\partial h_i}{\partial \xi} / \left( \sum_k \frac{\partial h_k}{\partial \xi} x'_k \right) \quad (4-1-14)$$

これに対し、応力  $\{\sigma\}$  は、次式で表される。

$$\{\sigma\}^T = (\sigma' \quad M' \quad \tau') \quad (4-1-15)$$

ここに、 $\sigma'$  は軸力、 $M'$  はモーメント、 $\tau'$  はせん断力であり、力の向きは図 4-1-3 に従う。

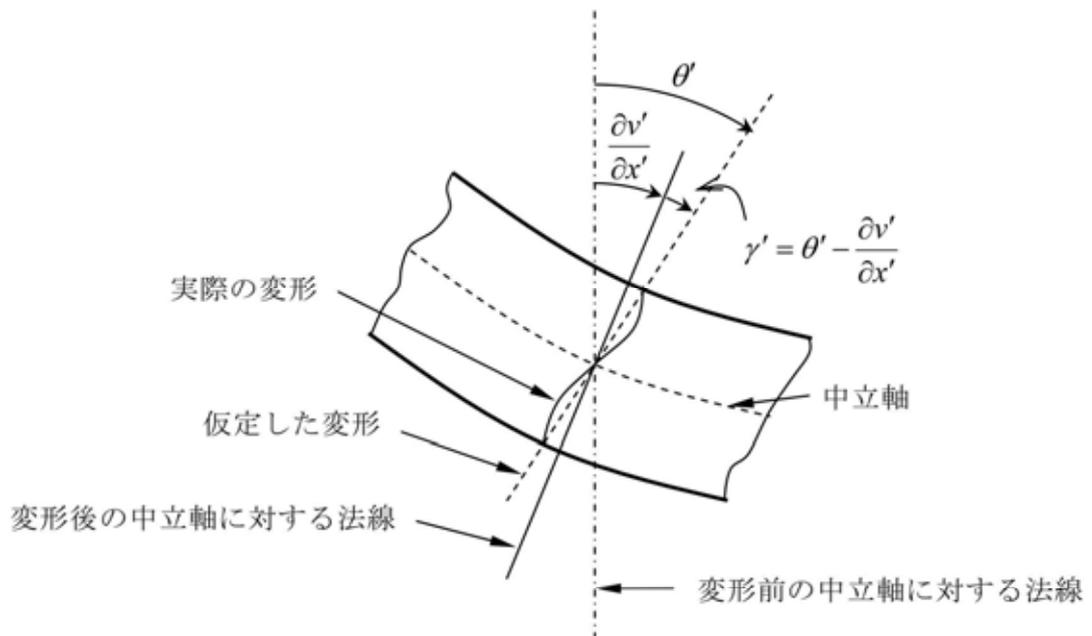


図 4-1-2 アイソパラメトリックはりの変形

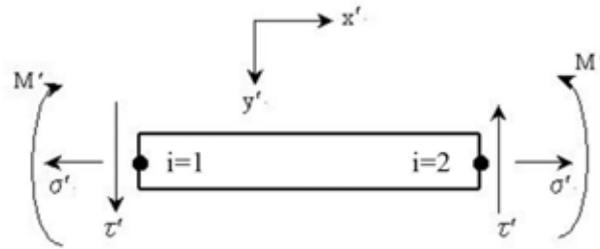


図 4-1-3 力とモーメントの向き

応力 $\{\sigma\}$ とひずみ $\{\varepsilon\}$ の関係は、次式で表される。

$$\{\sigma\} = D\{\varepsilon\} \quad (4-1-16)$$

又は、

$$\begin{Bmatrix} \sigma' \\ M' \\ \tau' \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} EA & & \\ & EI_z & \\ & & GA_y \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon' \\ \phi' \\ \gamma' \end{Bmatrix} \quad (4-1-17)$$

ここに、

- $E$  : ヤング率
- $A$  : 断面積
- $I_z$  : ( $Z'$  軸まわりの) 断面 2 次モーメント
- $G$  : せん断剛性
- $A_y$  : せん断有効面積

さて、はり要素に慣性力および節点集中力が付いている場合、ハミルトンの原理より次式を得る。

$$\int \delta\{\varepsilon\}^T \{\sigma\} dx' + \iint \delta\{\tilde{u}'\}^T \rho \{\ddot{u}'\} dx' dy' - \delta\{U\}^T \{F'\} = 0 \quad (4-1-18)$$

ここで、 $\delta$  は仮想変位又はこれに応ずる仮想ひずみを表す。また、 $\{F'\}$  は節点集中力を、 $\{\tilde{u}'\}$  は要素中の任意の位置 (中立軸上とは限らない) における変位を表す。すなわち、

$$\{F'\}^T = (p'_1 \quad q'_1 \quad m'_1 \quad p'_2 \quad q'_2 \quad m'_2 \quad p'_3 \quad q'_3 \quad m'_3) \quad (4-1-19)$$

$$\{\tilde{u}'\}^T = (\tilde{u}' \quad \tilde{v}') \quad (4-1-20)$$

なお、 $p'_i$ 、 $q'_i$ 、 $m'_i$  は節点  $i$  に働く  $x'$  方向並進力、 $y'$  方向並進力、 $\theta'$  方向モーメントを表す。また  $\{\tilde{u}'\}$  は中立軸上の値を用いて、

$$\begin{Bmatrix} \tilde{u}' \\ \tilde{v}' \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -y \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u' \\ v' \\ \theta' \end{Bmatrix} \quad (4-1-21)$$

あるいは、ベクトル記号を用いて、

$$\{\tilde{u}'\} = S\{u'\} \quad (4-1-22)$$

と書ける。

式(4-1-18)は、以下のように書き換えることができる。

$$\delta\{U'\}^T (K'\{U'\} + M'\{\ddot{U}'\} - \{F'\}) = 0 \quad (4-1-23)$$

ここに、 $K'$ は要素剛性行列で、

$$K' = \int B^T DB \, dx' = \int_{-1}^1 B^T DB \frac{\partial x'}{\partial \xi} d\xi \quad (4-1-24)$$

また、 $M'$ は要素質量行列で、

$$M' = \iint \rho H^T S^T S H \, dx' dy' \quad (4-1-25)$$

$$= \int \rho H^T \mathbf{S} H \, dx' \quad (4-1-26)$$

但し、

$$\mathbf{S} = \int S^T S \, dy' \quad (4-1-27)$$

$$= \int \begin{bmatrix} 1 & 0 & -y' \\ 0 & 1 & 0 \\ -y' & 0 & y'^2 \end{bmatrix} dy' \quad (4-1-28)$$

$$= \begin{bmatrix} A & & \\ & A & \\ & & I_{z'} \end{bmatrix} \quad (4-1-29)$$

ここで、 $A$ は $z'$ 方向単位巾当りの断面積、 $I_{z'}$ は $z'$ 軸まわりの断面2次モーメントを表す。集中質量マトリクスを求める場合は、式(4-1-26)の計算において、補関関数 $h_i$ を次のようにおく。

$$\begin{aligned}
 h_1 &= 1 \quad (-1 \leq \xi \leq -k) \\
 &= 0 \quad (\text{その他}) \\
 h_2 &= 1 \quad (k \leq \xi \leq 1) \\
 &= 0 \quad (\text{その他}) \\
 h_3 &= 1 \quad (-k \leq \xi \leq k) \\
 &= 0 \quad (\text{その他})
 \end{aligned} \tag{4-1-30}$$

ここに、 $k$ は

$$k = \begin{cases} 0 & (2 \text{ 節点要素の場合}) \\ \frac{1}{2} & (3 \text{ 節点要素の場合}) \end{cases} \tag{4-1-31}$$

この補間関数を用いると、 $\int h_i h_j dx'$  は次のように求まる。

$$\int h_i h_j dx' = 0 \quad (i \neq j) \tag{4-1-32}$$

$$\int h_1^2 dx' = \int_{-1}^{-k} \frac{\partial x'}{\partial \xi} d\xi \tag{4-1-33}$$

$$\int h_2^2 dx' = \int_k^1 \frac{\partial x'}{\partial \xi} d\xi \tag{4-1-34}$$

$$\int h_3^2 dx' = \int_{-k}^k \frac{\partial x'}{\partial \xi} d\xi \tag{4-1-35}$$

なお、

$$\int_{\alpha}^{\beta} \frac{\partial x'}{\partial \xi} d\xi = \left( \frac{\beta^2}{2} - \frac{\alpha^2}{2} \right) (x_1' + x_2' - 2x_3') - \left( \frac{\beta}{2} - \frac{\alpha}{2} \right) (x_2' - x_1') \tag{4-1-36}$$

(3 節点要素の場合)

$$\int_{\alpha}^{\beta} \frac{\partial x'}{\partial \xi} d\xi = \left( \frac{\beta}{2} - \frac{\alpha}{2} \right) (x_2' - x_1') \tag{4-1-37}$$

(2 節点要素の場合)

全体座標系と要素座標系の関係は右図のとおりであり、両座標系間のベクトルの変換は次式による。

$$\{U'\} = T\{U\} \quad (4-1-38)$$

$$\{F'\} = T\{F\} \quad (4-1-39)$$

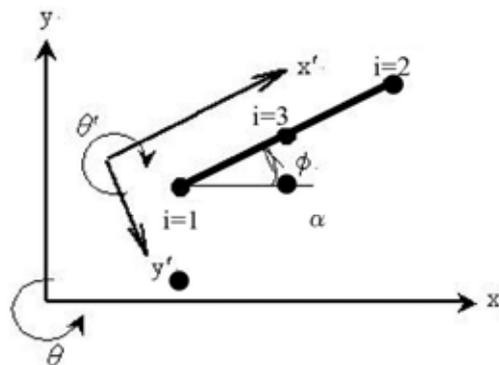


図 4-1-4 座標系

但し、 $\{U\}$ 、 $\{F\}$ は全体座標系による節点変位、節点集中力を成分とするベクトルである。また、座標変換マトリクス $T$ は次のように表される。

$$T = \begin{bmatrix} c & s & 0 & | & 0 & 0 & | & 0 \\ s & -c & 0 & | & 0 & 0 & | & 0 \\ 0 & 0 & -1 & | & 0 & 0 & | & 0 \\ \hline & & & | & c & s & 0 & | & 0 \\ 0 & & & | & s & -c & 0 & | & 0 \\ & & & | & 0 & 0 & -1 & | & 0 \\ \hline & & & | & & & & | & c & s & 0 \\ 0 & & & | & & & & | & s & -c & 0 \\ & & & | & & & & | & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (4-1-40)$$

$$(c \equiv \cos \alpha, s \equiv \sin \alpha)$$

さらに、全体座標系のもとの要素剛性行列 $K$ は、

$$K = T^T K' T \quad (4-1-41)$$

となる。要素質量行列 $M$ についても同様に、

$$M = T^T M' T \quad (4-1-42)$$

となる。

## 6.2 線形平面要素

線形平面要素は、地盤等をモデル化する場合に用いる事が多い。以下にその定式化について記載する。

平面ひずみ状態における線形平面要素の応力～ひずみ関係は次式で表される<sup>3)</sup>。

$$\{\varepsilon\} = D\{\sigma\} \quad (4-2-1)$$

但し、

$$\{\varepsilon\}^T = (\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \gamma_{xy}) \quad (\text{ひずみ}) \quad (4-2-2)$$

$$\{\sigma\}^T = (\sigma_x \quad \sigma_y \quad \tau_{xy}) \quad (\text{応力}) \quad (4-2-3)$$

$$D = \begin{bmatrix} \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} & \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} & \\ \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} & \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} & \\ & & \frac{E}{2(1+\nu)} \end{bmatrix} \quad (4-2-4)$$

ここに、 $E$ はヤング率、 $\nu$ はポアソン比である。

なお、要素形状はマルチスプリング要素と同じ4節点アイソパラメトリック要素を用いている。また、中間節点を持つ8節点アイソパラメトリック要素も組み込まれてはいるが、実用には4節点アイソパラメトリック要素のみで十分である。

### 6.3 非線形はり要素

非線形はり要素は、構造物等をモデル化する場合に用いる事が多い。以下にその定式化について記載する。

非線形はり要素は、線形はりのアイソパラメトリックはり要素を拡張し、 $M \sim \phi$ 関係を規定する曲げ剛性(式(4-1-17)における $EI_2$ )に関して材料非線形性を考慮したものである。軸剛性およびせん断剛性に関しては線形のままである。

本非線形はり要素が扱える非線形特性には、骨格曲線としてバイリニアとトリリニアの2種類があり、履歴曲線としてはMasing則を適用している。また、バイリニアについては曲げの向きに関する第一折れ点の非対称性を考慮でき、さらに、軸力の影響による第一折れ点の変化も考慮できる。

#### (1) バイリニアモデル

図4-4-1にバイリニアモデルの履歴曲線を示す。図中、 $EI_0$ は線形弾性時の曲げ剛性、 $EI_2$ は第一折れ点以降の勾配、 $\phi_p$ は第一折れ点の曲率、 $M_p$ は第一折れ点の曲げモーメントで、これらのうち $EI_0$ 、 $EI_2$ 、 $M_p$ はバイリニアモデルを規定するのに必要な最小限のパラメータである。 $\phi_p$ および $M_p$ は、鋼材を対象とした場合の全塑性時に相当するが、モデル化に応じて降伏時に対応させてもよい。また、RC部材を対象にする場合は、モデル化に応じて第一折れ点をひび割れ時、降伏時、または終局時に対応させる。

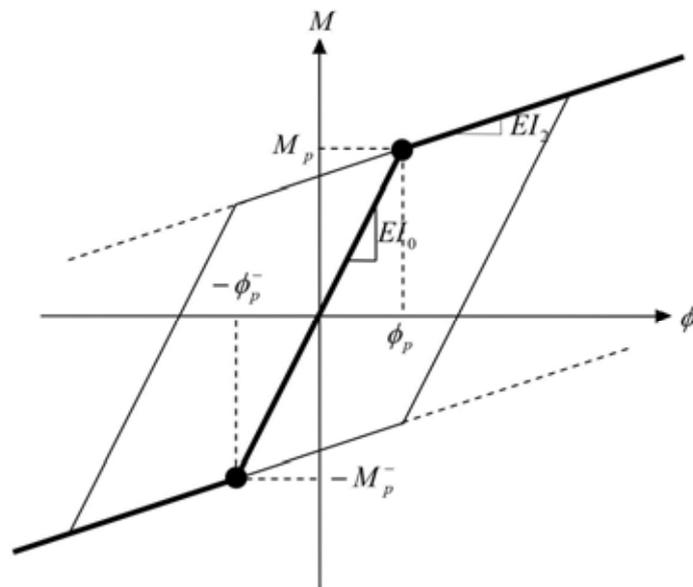


図 4-4-1 バイリニアモデル

$\phi_p^-$ および $M_p^-$ は、曲げの方向に関して非対称な場合に必要となるパラメータであるが、入力を要求されるパラメータは $M_p^-$ のみで、 $\phi_p^-$ は $M_p^-$ と $EI_0$ からプログラム内部で設定される。

パイリニアモデルにおいては、発生軸力に応じて第一折れ点の曲げモーメント（鋼材の場合の全塑性モーメントに対応）の影響を考慮できる。長方形断面および鋼管断面の場合は、次式に示す軸力による全塑性曲げモーメントの低減式<sup>4)</sup>がプログラム内部に組み込まれている。

$$M_{pc} = M_p \left\{ 1 - \left( \frac{N}{N_y} \right)^2 \right\} \quad (\text{長方形断面}) \quad (4-4-1)$$

$$M_{pc} = M_p \cos \left( \frac{\pi}{2} \frac{N}{N_y} \right) \quad (\text{鋼管断面}) \quad (4-4-2)$$

ここに、 $M_{pc}$  は低減後の全塑性曲げモーメント、 $N_y$  は降伏軸方向力である。

また、図 4-4-2に示すようなM-N関係を定義することにより、発生軸力に応じた全塑性曲げモーメントの低減が可能である。

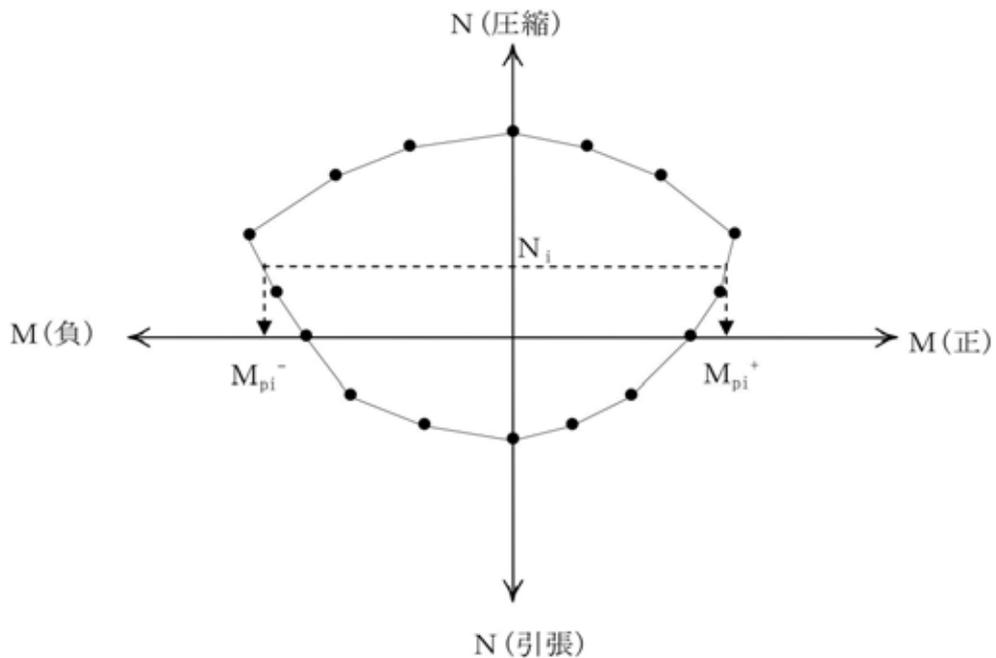


図 4-4-2 M-N関係の定義

## (2) トリリニアモデル

図 4-4-3 にトリリニアモデルの履歴曲線を示す。図中、 $EI_0$  は線形弾性時の曲げ剛性、 $EI_1$  は第一折れ点から第二折れ点間の勾配、 $EI_2$  は第二折れ点以降の勾配、 $M_y$  は第一折れ点の曲げモーメント、 $M_p$  は第二折れ点の曲げモーメントで、これらはトリリニアモデルを規定するのに必要となるパラメータである。 $\phi_y$  および  $\phi_p$  は、与えられたパラメータ ( $EI_0$ 、 $EI_1$ 、 $M_y$ 、 $M_p$ ) からプログラム内部で設定される。 $M_y$  および  $M_p$  は、それぞれ鋼材を対象とした場合の降伏時および全塑性時に相当する。また、RC 部材を対象にする場合は、モデル化に応じて第一折れ点をひび割れ時に、第二折れ点を降伏時に対応させるか、または、第一折れ点を降伏時に、第二折れ点を終局時に対応させる。

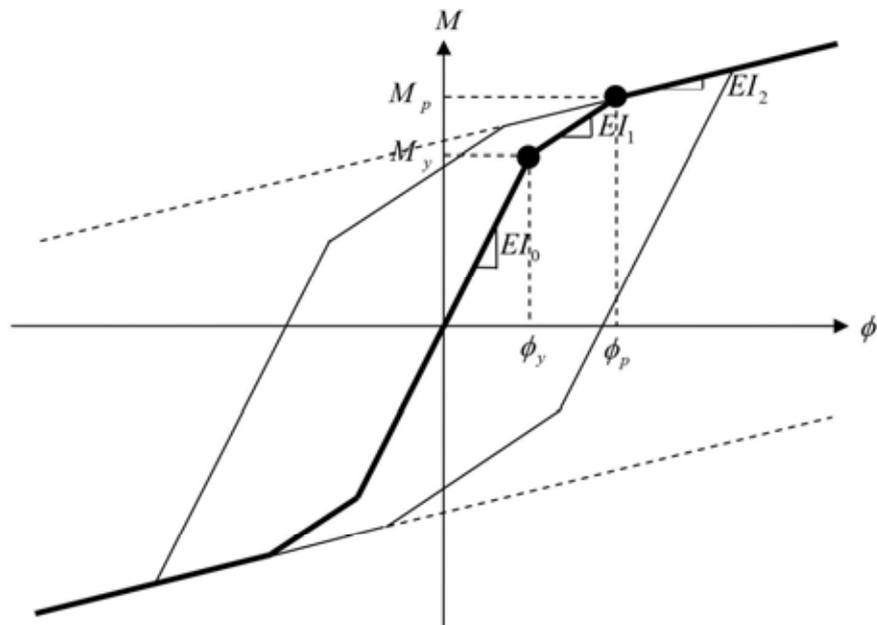


図 4-4-3 トリリニアモデル

### 6.4 非線形ばね要素

非線形ばね要素は、地盤-構造物間の接合等をモデル化する場合に用いる場合が多い。以下にその定式化について記載する。

#### (1) 非線形ばねの定式化

非線形ばね要素は、図 4-5-1に示すように、任意方向の2節点間を軸方向ばね、せん断方向ばね、および回転ばねで結んだものであり、各々のばねに対して個別に各種非線形性を考慮できる。なお、線形ばね要素では直接全体座標系のばねを定義していたが、非線形ばねではそのままでは入力が煩雑になってしまうため、任意方向のばねを考慮できるように局所座標系  $ns$  を導入している。

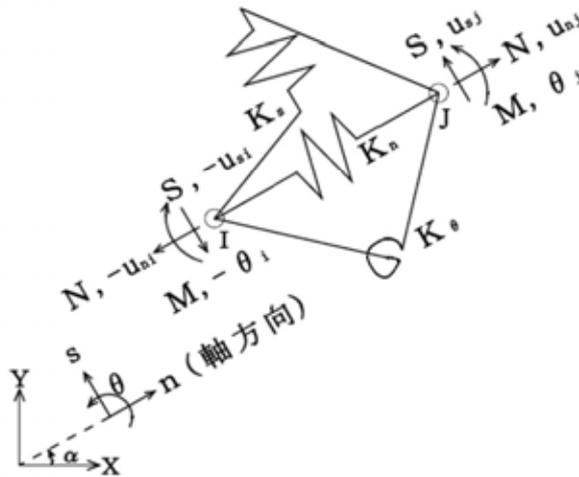


図 4-5-1 非線形ばね

局所座標系  $ns$  における力～変位関係は次式で表される。

$$\{f'\} = K'' \{du\} \quad (4-5-1)$$

但し、

$$\{f'\}^T = (N \quad S \quad M) \quad (4-5-2)$$

$$\{du\}^T = (u_n^j - u_n^i \quad u_s^j - u_s^i \quad \theta^j - \theta^i) \quad (4-5-3)$$

$$K'' = \begin{bmatrix} K_n & & \\ & K_s & \\ & & K_\theta \end{bmatrix} \quad (4-5-4)$$

ここに、 $K_n$  は軸方向ばね定数、 $K_s$  はせん断方向ばね定数、 $K_\theta$  は回転ばね定数である。

ここで、非線形要素に関する変位ベクトルを以下のように並び替えれば、

$$\{u\}^T = (u_n^i \quad u_s^i \quad \theta^i \quad u_n^j \quad u_s^j \quad \theta^j) \quad (4-5-5)$$

力～変位関係は次のように表される。

$$\{f\} = K'\{u\} \quad (4-5-6)$$

但し、

$$\{f\}^T = (-N \quad -S \quad -M \quad N \quad S \quad M) \quad (4-5-7)$$

$$K' = \begin{bmatrix} K_n & & & -K_n & & \\ & K_s & & & -K_s & \\ & & K_\theta & & & -K_\theta \\ -K_n & & & K_n & & \\ & -K_s & & & K_s & \\ & & -K_\theta & & & K_\theta \end{bmatrix} \quad (4-5-8)$$

また、局所座標系  $ns$  から全体座標系への座標変換マトリクスは次式で表される。

$$T = \begin{bmatrix} c & -s & & & & \\ s & c & & & & 0 \\ & & 1 & & & \\ \hline & & & c & -s & \\ 0 & & & s & c & \\ & & & & & 1 \end{bmatrix} \quad (4-5-9)$$

$$(c \equiv \cos \alpha, s \equiv \sin \alpha)$$

したがって、全体座標系における要素剛性行列  $K$  は、以下のようになる。

$$K = T^T K' T \quad (4-5-10)$$

**(2) 非線形特性**

軸方向ばね、せん断方向ばね、回転方向ばねのそれぞれについて、独立して以下の3種類の非線形特性を考慮できる。

- ① 非線形弾性
- ② バイリニアモデル
- ③ トリリニアモデル

**(a) 非線形弾性**

非線形弾性は、図 4-5-2に示すような利用者が定義した骨格曲線の上を動くのみで履歴曲線は描かない。なお、利用者が定義するパラメータは、骨格曲線の折れ点  $(du_i, P_i)$  であり、曲線の勾配  $(K_i)$  はプログラム内部で計算される。また、一番外側の入力点(図 4-5-2を例にとれば、点  $(du_1, P_1)$  と点  $(du_6, P_6)$ ) より外側の骨格曲線は外挿される。

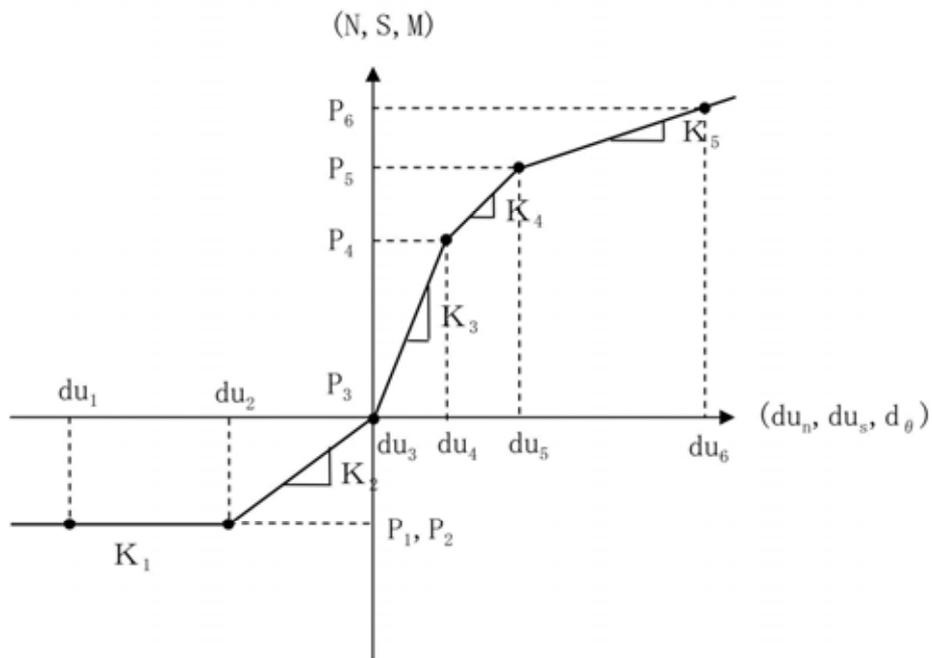


図 4-5-2 非線形弾性

(b)パイリニアモデル

パイリニアモデルの骨格曲線は、図 4-5-3に示すように、 $K_0$ 、 $K_1$ 、 $P_1$ の3つのパラメータで規定され、履歴曲線は Masing 則に従う。

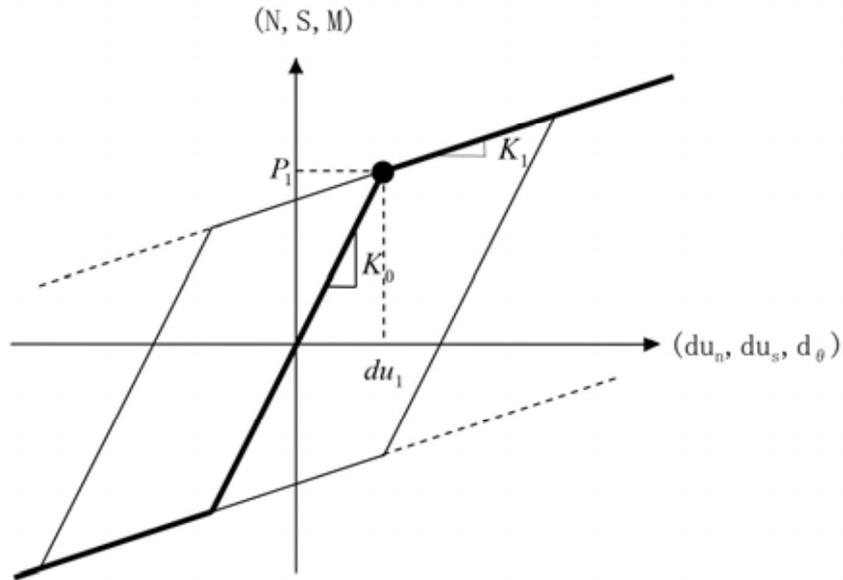


図 4-5-3 パイリニアモデル

(c)トリリニアモデル

トリリニアモデルの骨格曲線は、図 4-5-4に示すように、 $K_0$ 、 $K_1$ 、 $K_2$ 、 $P_1$ 、 $P_2$ の5つのパラメータで規定され、履歴曲線は Masing 則に従う。

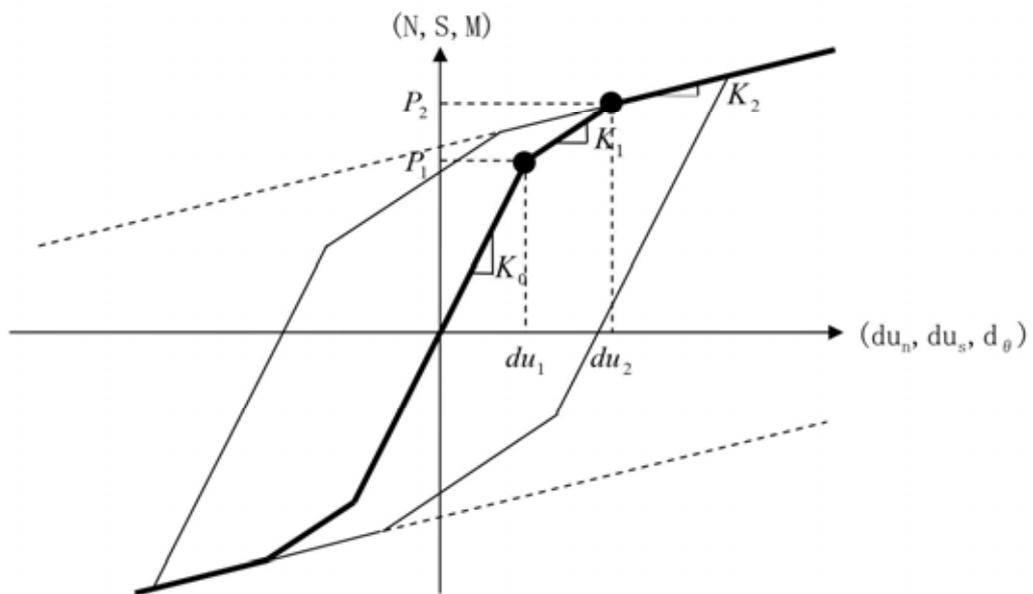


図 4-5-4 トリリニアモデル

## 6.5 ジョイント要素

ジョイント要素は、地盤-構造物間の接合等をモデル化する事が多い。以下にその定式化について記載する。

引張に対しては分離し、せん断に対してはすべり、圧縮に対しては力を伝達するような不連続面を表すため、右図に示すような4節点2次元ジョイント要素を考える。

この要素については、以下に示すように2通りの定式化が行なわれている。

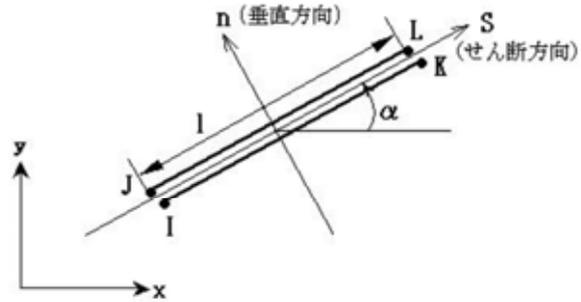


図 4-6-1 4節点ジョイント要素

### (1) Goodman による定式化<sup>5)</sup>

要素座標系 s 方向の節点変位を  $\mu_I, \mu_J, \mu_K, \mu_L$  で表し、又、n 方向のそれを  $v_I, v_J, v_K, v_L$  で表す。節点変位ベクトル  $\{U'\}$  を次のように定義する。

$$\{U'\}^T = (\mu_I, v_I, \mu_J, v_J, \mu_K, v_K, \mu_L, v_L) \quad (4-6-1)$$

さらに、ひずみ  $\{\varepsilon\}$  を次のように定義する。

$$\{\varepsilon\}^T = (\gamma, \varepsilon, \omega) \quad (4-6-2)$$

但し、

$$\gamma = \frac{\mu_J + \mu_L}{2} - \frac{\mu_I + \mu_K}{2} \quad (\text{せん断方向平均変位差}) \quad (4-6-3)$$

$$\varepsilon = \frac{v_J + v_L}{2} - \frac{v_I + v_K}{2} \quad (\text{垂直方向平均変位差}) \quad (4-6-4)$$

$$\omega = \frac{v_L - v_K}{\ell} - \frac{v_J - v_I}{\ell} \quad (\text{開き角}) \quad (4-6-5)$$

ひずみと節点変位ベクトルとの間の関係は、次式で与えられる。

$$\{\varepsilon\} = L_0 \{U'\} \quad (4-6-6)$$

但し、

$$L_0 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} & 0 & -\frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} & 0 & -\frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{1}{\ell} & 0 & -\frac{1}{\ell} & 0 & -\frac{1}{\ell} & 0 & \frac{1}{\ell} \end{bmatrix} \quad (4-6-7)$$

次に、ジョイント要素の応力を次のように定義する。

$$\{\sigma\}^T = (\tau_{ns}, \sigma_n, M_o) \quad (4-6-8)$$

但し、

$$\tau_{ns} = \frac{1}{\ell}(F_{sJ} + F_{sL}) \quad (\text{せん断応力}) \quad (4-6-9)$$

$$\sigma_n = \frac{1}{\ell}(F_{nJ} + F_{nL}) \quad (\text{垂直応力}) \quad (4-6-10)$$

$$M_o = \frac{l}{2}(F_{nL} + F_{nJ}) \quad (\text{モーメント}) \quad (4-6-11)$$

なお、Fは節点力を表し、第1の添字が方向を、第2の添字が節点を表す。なお、節点ベクトル $\{F'\}$ を次により定義する。

$$\{F'\}^T = (F_{sL}, F_{nL}, F_{sJ}, F_{sI}, F_{nJ}, F_{sK}, F_{nK}, F_{sI}, F_{nL}) \quad (4-6-12)$$

応力と節点ベクトルとの間には、次の関係がある。

$$\{F'\} = B\{\sigma\} \quad (4-6-13)$$

但し、

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{l}{2} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{l}{2} & \frac{1}{\ell} \\ \frac{l}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{l}{2} & -\frac{1}{\ell} \\ -\frac{l}{2} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{l}{2} & -\frac{1}{\ell} \\ -\frac{l}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{l}{2} & \frac{1}{\ell} \end{bmatrix} \quad (4-6-14)$$

又、上式の導出に際しては、 $F_{sI} = -F_{sJ}$ などの関係を用いた。

応力-ひずみ関係は、次図に示すように与える。

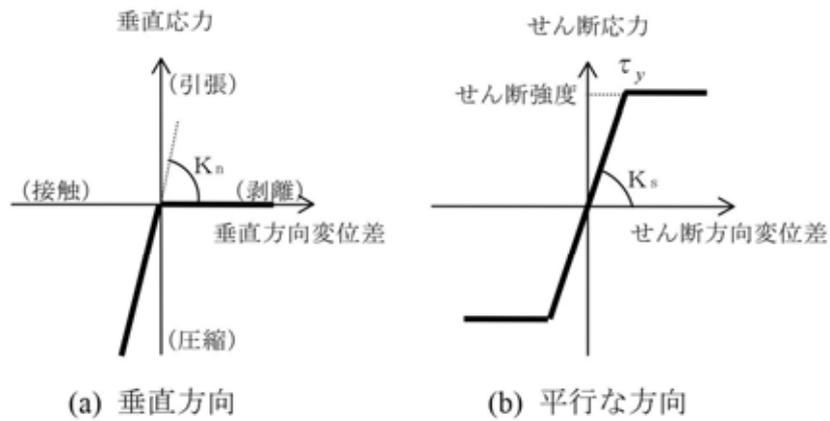


図 4-6-2 応力-ひずみ関係

なお、降伏せん断応力 $\tau_y$ は、次式で与えられるものとする。

$$\left. \begin{aligned} \tau_y &= C_f - \sigma_n \tan \phi_f & (\epsilon \leq 0 \text{の時}) \\ &= 0 & (\epsilon > 0 \text{の時}) \end{aligned} \right\} \quad (4-6-15)$$

ここに、 $C_f$ はジョイントの粘着力、 $\phi_f$ はジョイントの摩擦角を表す。さらに、モーメント $M_o$ と開き角 $\omega$ との間の関係は、

$$\left. \begin{aligned} M_o &= \frac{1}{4} \ell^3 K_n \omega & (\epsilon \leq 0 \text{の時}) \\ &= 0 & (\epsilon > 0 \text{の時}) \end{aligned} \right\} \quad (4-6-16)$$

で与えられるものとする。

以上の関係を用いると、節点変位ベクトルに対する節点力ベクトルを、次に示す手順に従って求めることができる。

$$\{U\} \xrightarrow{\text{座標変換}} \{U'\} \xrightarrow{\text{式(4-6-6)}} \{\epsilon\} \xrightarrow{\text{図 4-6-2 式(4-6-8)}} \{\sigma\} \xrightarrow{\text{式(4-6-13)}} \{F'\} \xrightarrow{\text{座標変換}} \{F\}$$

但し、 $\{U\}$ および $\{F\}$ は、全体座標系による成分から成るベクトルを表す。

次に、接線剛性行列 $K'$ を求める。 $K'$ は、

$$K' = \frac{\partial \{F'\}}{\partial \{U'\}} = BCL_o \quad (4-6-17)$$

と表すことができる。但し、 $C$ は次式で与えられる。

$$C = \frac{\partial \{\sigma\}}{\partial \{\varepsilon\}} = \begin{bmatrix} k_s & 0 & 0 \\ 0 & k_n & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{4} \ell^3 k_n \end{bmatrix} \quad (4-6-18)$$

又、 $k_s$ 、 $k_n$ は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} k_s &= \frac{\partial \tau_{ms}}{\partial \gamma} = K_s && (|\tau_{ms}| < \tau_y \text{の時}) \\ &= 0 && (|\tau_{ms}| = \tau_y \text{の時}) \end{aligned} \right\} \quad (4-6-19)$$

$$\left. \begin{aligned} k_n &= \frac{d \sigma_n}{d \varepsilon} = K_n && (\varepsilon \leq 0 \text{の時}) \\ &= 0 && (\varepsilon > 0 \text{の時}) \end{aligned} \right\} \quad (4-6-20)$$

接線剛性行列は、式(4-6-17)の行列の乗算を行なうと、次のように求められる。

$$K' = \frac{1}{4} \ell \left[ \begin{array}{cccc|cccc} k_s & 0 & -k_s & 0 & k_s & 0 & -k_s & 0 \\ 0 & 2k_n & 0 & -2k_n & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_s & 0 & k_s & 0 & -k_s & 0 & k_s & 0 \\ 0 & -2k_n & 0 & 2k_n & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline k_s & 0 & -k_s & 0 & k_s & 0 & -k_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2k_n & 0 & -2k_n \\ -k_s & 0 & k_s & 0 & -k_s & 0 & k_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2k_n & 0 & 2k_n \end{array} \right] \quad (4-6-21)$$

節点変位ベクトルおよび節点力ベクトルは、全体座標系と要素座標系との間で、それぞれ次のような変換を受ける。

$$\{U'\} = T\{U\} \quad (4-6-22)$$

$$\{F'\} = T\{F\} \quad (4-6-23)$$

但し、

$$T = \begin{bmatrix} c & s & & & & & & & \\ -s & c & & & & & & & \\ & & c & s & & & & & \\ & & -s & c & & & & & \\ & & & & c & s & & & \\ & & & & -s & c & & & \\ & & & & & & c & s & \\ & & & & & & -s & c & \end{bmatrix} \quad (4-6-24)$$

$c \equiv \cos \alpha$  ,  $s \equiv \sin \alpha$

この変換行列を用いると、全体座標系における接線剛性行列  $K$  は、

$$K = T^T K' T \quad (4-6-25)$$

として求まる。

(2) 非線形ばねを用いた定式化

右図に示すように、向かい合う2節点を直交する2本の非線形ばねで結び、それが2組あるようなモデルを考える。図のI、J節点を結ぶばねは、要素の左半分を、又、K、L節点間を結ぶばねは右半分を代表するものとし、I、J節点の自由度とK、L節点の自由度の間には連成を考えない。

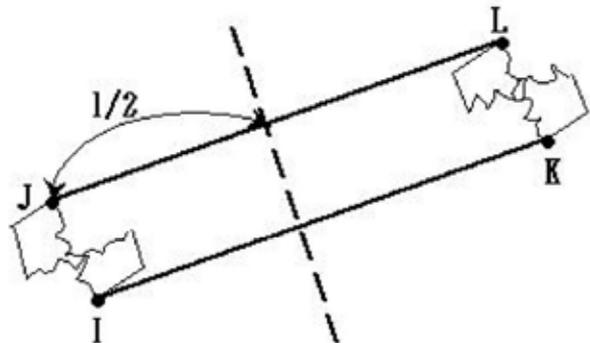


図 4-6-3 非線形ばねを用いたジョイント要素

以下では、図のI、J節点側のみを考えることにするが、K、L節点の方もまったく同様に取り扱うことが出来る。

式(4-6-1)および式(4-6-2)に対応して、節点変位ベクトル  $\{U'\}$  およびひずみ  $\{\varepsilon\}$  を次のように定義する。

$$\{U'\}^T = (\mu_I, v_I, \mu_J, v_J) \quad (4-6-26)$$

$$\{\varepsilon\}^T = (\gamma, \varepsilon) \quad (4-6-27)$$

但し、

$$\gamma = \mu_J - \mu_I \quad (\text{せん断方向変位差}) \quad (4-6-28)$$

$$\varepsilon = v_J - v_I \quad (\text{垂直方向変位差}) \quad (4-6-29)$$

又、 $\{\varepsilon\}$  と  $\{U'\}$  との関係は、次式で与えられる。

$$\{\varepsilon\} = L_0 \{U'\} \quad (4-6-30)$$

さらに、節点力ベクトル  $\{F'\}$  と応力ベクトル  $\{\sigma\}$  を、

$$\{F'\}^T = (F_{sI}, F_{nI}, F_{sJ}, F_{nJ}) \quad (4-6-31)$$

$$\{\sigma\} = (\tau_{ms}, \sigma_n) \quad (4-6-32)$$

と定義すると、両者の間には、式(4-6-13)と同様、次の関係がある。

$$\{F'\} = B\{\sigma\} \quad (4-6-33)$$

但し、

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{\ell}{2} & 0 \\ 0 & -\frac{\ell}{2} \\ \frac{\ell}{2} & 0 \\ 0 & \frac{\ell}{2} \end{bmatrix} \quad (4-6-34)$$

また、ひずみ-応力関係は、図 4-6-2に示すように与える。

以上の関係を用いると、節点変位ベクトルに対する節点力ベクトルを求めることができる。

次に、接線剛性行列  $K'$  は、式(4-6-17)と同様、

$$K' = \frac{\partial \{F'\}}{\partial \{U'\}} = BCL_0 \quad (4-6-35)$$

と表すことができる。但し、ここでは  $C$  は次のようになる。

$$C = \frac{\partial \{\sigma\}}{\partial \{\varepsilon\}} = \begin{bmatrix} k_s & 0 \\ 0 & k_n \end{bmatrix} \quad (4-6-36)$$

式 4-6-35 の乗算を行なうと、接線剛性行列は次式で表される。

$$K' = \frac{\ell}{2} \begin{bmatrix} k_s & 0 & -k_s & 0 \\ 0 & k_n & 0 & -k_n \\ -k_s & 0 & k_s & 0 \\ 0 & -k_n & 0 & k_n \end{bmatrix} \quad (4-6-37)$$

あるいは、全体座標系では次のようになる。

$$K = \frac{\ell}{2} \begin{bmatrix} c^2 k_s + s^2 k_n & csk_s - csk_n & -c^2 k_s - s^2 k_n & -csk_s + csk_n \\ & s^2 k_s + c^2 k_n & -csk_s + csk_n & -s^2 k_s - c^2 k_n \\ \text{Symmetric} & & c^2 k_s + s^2 k_n & csk_s - csk_n \\ & & & s^2 k_s + c^2 k_n \end{bmatrix} \quad (4-6-38)$$

( $c \equiv \cos \alpha$  ,  $s \equiv \sin \alpha$ )

## 6.6 流体要素と流体-構造連成面要素

流体要素及び流体-構造連成面要素は、海水や海水-護岸構造物間の接続をモデル化する場合に用いる事が多い。以下にその定式化について記載する。

### (1) 動水圧に関する定式化<sup>6)</sup>

流体領域は、非圧縮の波動方程式に支配されるものとし、有限要素法による定式化を行なって付加質量マトリックスを求める。この付加質量マトリックスは、運動方程式における質量マトリックスに含まれるものとする。また、荷重項にも、付加質量マトリックスの寄与が含まれるものとする。

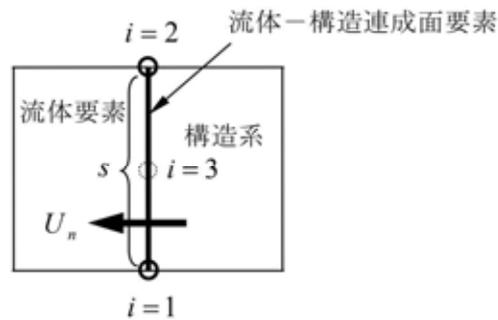


図 4-7-1 流体要素と流体構造連成面要素

圧縮性流体が微小振幅の運動するとき、発生する圧力分布  $p$  の支配方程式は、2次元においては次式で表される。

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} - \frac{1}{\bar{c}^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (4-7-1)$$

ここに、 $\bar{c}$ は音波の速度を表し、粘性による減衰項は省略してある。また、境界が固体で運動している場合は次式で与えられる。

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} (U_n) \quad (4-7-2)$$

ここに、 $\rho$ は流体の密度、 $U_n$ は変位の法線方向成分を表す。

この連成問題において、非圧縮性流体 ( $\bar{c} = \infty$ ) を仮定し、流体領域を有限要素に分割すれば、次式に示す離散化方程式が導かれる。

$$G\{p\} + S\{\ddot{u}\} = 0 \quad (4-7-3)$$

ここに、 $G$ は動水圧に関するマトリックス、 $S$ は流体と構造物の境界面に関するマトリックスで次式で表される。

$$S = \int_s H^T \rho \bar{H} ds \quad (4-7-4)$$

ここに、 $H$ は圧力分布を定義する形状関数で、 $\bar{H}$ は構造系の変位ベクトルと境界面の法線方向の変位を関係づける形状関数(次式参照)、 $s$ は流体と構造物の境界面を表す。

$$\{U_n\} = \bar{H}\{u\} \quad (4-7-5)$$

式 4-7-3 より、境界面における圧力  $\{p\}$  (動水圧) は直接解け、次式の通りになる。

$$\{p\} = -G^{-1}S\{\ddot{u}\} \quad (4-7-6)$$

一方、構造系における有限要素の離散化方程式は次式のように表すことができる。

$$M\{\ddot{u}\} + C\{\dot{u}\} + K\{u\} + \{\bar{f}_s\} + \{r\} = 0 \quad (4-7-7)$$

ここで、外力項は構造系において独立に指定される外力項 $\{r\}$ と境界流体圧力（動水圧）による項 $\{\bar{f}_s\}$ とに分解してある。仮想仕事の原理から、後者は次式で与えられる。

$$\{\bar{f}_s\} = \int_s \bar{H}^T p ds = \frac{1}{\rho} S^T \{p\} \quad (4-7-8)$$

この式に式(4-7-6)を代入すると、次式が得られる。

$$\{\bar{f}_s\} = -\frac{1}{\rho} S^T G^{-1} S \{\ddot{u}\} \quad (4-7-9)$$

したがって、次式に示す質量マトリクスが付加質量マトリクスとして運動方程式に含まれる。

$$-\frac{1}{\rho} S^T G^{-1} S \quad (4-7-10)$$

なお、運動方程式が解かれれば、動水圧は式(4-7-6)より求められる。

## 6.7 粘性要素（側方地盤要素・底面地盤要素）

粘性要素（側方地盤要素・底面地盤要素）は、地盤の半無限性を模擬するための要素である。以下にその定式化について記載する。

### （１）側方地盤要素（側方粘性境界要素）

構造系の側面に側方地盤要素を定義すると、側方粘性境界とみなされ、当該境界に次の表面力が付く。

$$\bar{T}_x^* = -\rho V_p (\dot{U}_x^s - \dot{U}_x^f) \quad (4-8-1)$$

$$\bar{T}_y^* = -\rho V_s (\dot{U}_y^s - \dot{U}_y^f) \quad (4-8-2)$$

但し、 $\rho$ 、 $V_s$ 、 $V_p$ は側方無限地盤の密度、s波速度、p波速度を表す。又 $\dot{U}_x^s$ 、 $\dot{U}_y^s$ は構造系側面の（相対）速度、 $\dot{U}_x^f$ 、 $\dot{U}_y^f$ はfree fieldの（相対）速度。

これらの表面力は離散化された運動方程式において次式に示す減衰項と荷重項に付加される。

$$C_s \left( \{\dot{U}\}_r - \{\dot{U}\}_r^f \right) \quad (4-8-3)$$

但し、

$$C_s = \int_{\text{側面}} H^T \begin{bmatrix} \rho V_p & \\ & \rho V_s \end{bmatrix} H d\Gamma \quad (4-8-4)$$

$\{\dot{U}\}_r^f$ はfree fieldの相対節点速度を表す。また、 $C_s \{\dot{U}\}_r$ が減衰項に、 $+C_s \{\dot{U}\}_r^f$ が荷重項になる。

### （２）下方地盤要素（底面粘性境界要素）

構造系の側面に下方地盤要素を定義すると、底面粘性境界とみなされ、当該境界に次の表面力が付く。

$$\bar{T}_x^* = -\tau_{yx} = -\rho V_s \dot{U}_x^b \quad (4-8-5)$$

$$\bar{T}_y^* = -\sigma_y = -\rho V_p \dot{U}_y^b \quad (4-8-6)$$

但し、 $\rho$ 、 $V_s$ 、 $V_p$ は下方無限地盤の密度、s波速度、p波速度を表す。又、 $\dot{U}_x^b$ 、 $\dot{U}_y^b$ は構造系底面の基盤に対する相対速度である。

下方粘性境界の表面力は、離散化された運動方程式において次式に示す減衰項に付加される。

$$C_b \{\dot{U}\}_r \quad (4-8-7)$$

但し、

$$C_b = \int_{\text{底面}} H^T \begin{bmatrix} \rho V_s \\ \rho V_p \end{bmatrix} H d\Gamma \quad (4-8-8)$$

## 6.8 節点集中質量要素

節点集中質量要素は、載荷される物体の質量を慣性力として模擬するための要素である。以下にその定式化について記載する。

節点集中質量要素は、図 4-9-1 に示すように、一つの節点 ( $i$ ) 上に並進 2 成分と回転成分の計 3 成分の質量を定義し、節点にかかる慣性力を考慮する。

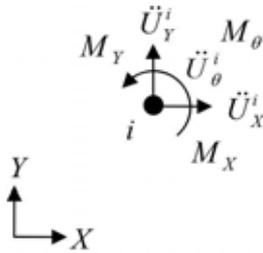


図 4-9-1 節点集中質量要素

節点集中質量要素を定義した節点  $i$  上に生じる慣性力は次式で表される。

$$\begin{Bmatrix} F_{MX}^i \\ F_{MY}^i \\ F_{M\theta}^i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} M_X & & \\ & M_Y & \\ & & M_\theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{U}_x^i \\ \ddot{U}_y^i \\ \ddot{U}_\theta^i \end{Bmatrix} \quad (4-9-1)$$

ここに、 $M_X$  は水平方向で考慮する質量、 $M_Y$  は鉛直方向で考慮する質量、 $M_\theta$  は回転方向で考慮する質量である。

したがって、次式に示す質量マトリクス  $M_{add}$  が離散化された運動方程式の慣性項に該当する自由度に対して付加される。

$$M_{add} = \begin{bmatrix} M_X & & \\ & M_Y & \\ & & M_\theta \end{bmatrix} \quad (4-9-2)$$

## 6.9 修正武田モデル

修正武田モデルは、鉄筋コンクリート部材等を対象とする非線形はり要素の構成則である。特に鉄筋コンクリート部材に用いる場合には、鉄筋の配置が非対称になる場合もあることから、曲げの方向により非対称となる $M \sim \phi$ 関係を設定できる修正武田モデルを適用している。なお、軸力 $\sim$ 軸ひずみ関係やせん断力 $\sim$ せん断角関係は線形である。

以下に修正武田モデルの挙動を示す履歴のルールを記載する。

① 骨格曲線（図 6-1 点線）は tri-linear である。

② これまでの最大変形点における  $\delta$  を  $\delta_{\max}$ （正側）、 $\delta_{\min}$ （負側）とする。 $\delta$  が線形領域（ $-\delta_c^- < \delta_{\min}$  かつ  $\delta_c^+ > \delta_{\max}$ ）から初めて  $\delta_c^+$  を超えた、もしくは  $-\delta_c^-$  を下回った場合、反対側の  $\delta_{\max}$ 、あるいは  $\delta_{\min}$  は  $-\delta_c^-$ 、あるいは  $\delta_c^+$  へ遷移する。また、 $\delta$  がひび割れ領域（ $-\delta_y^- < \delta_{\min}$  かつ  $\delta_y^+ > \delta_{\max}$ ）から初めて  $\delta_y^+$  を超えた、もしくは  $-\delta_y^-$  を下回った場合、反対側の  $\delta_{\min}$ 、 $\delta_{\max}$  はそれぞれ  $-\delta_y^-$ 、 $\delta_y^+$  へ遷移する。なお、最大変形点は常に骨格曲線上に存在する。

③ 線形領域から  $\delta$  が初めて  $\delta_c^+$  を超えた、もしくは  $-\delta_c^-$  を下回った場合、またはこれまでの最大変形点  $\delta_{\max}$  を超えた、もしくは  $\delta_{\min}$  を下回った場合には骨格曲線上を進む。線形領域の外側において荷重  $P$  が载荷から除荷へと移行した場合は、戻り点から復元力が 0 になるまで  $K_r^+$ 、あるいは  $K_r^-$  で戻り、 $\delta$  軸上から反対側の今までの最大変形点を目指す。ここで  $K_r^+$ 、 $K_r^-$  はそれぞれ次式によって定義される。

$$K_r^+ = K_e \cdot \left| \frac{\delta_{\max}}{\delta_c^+} \right|^{-\beta^+} \quad K_r^- = K_e \cdot \left| \frac{\delta_{\min}}{\delta_c^-} \right|^{-\beta^-}$$

ここで、 $K_e$ ：第一勾配  $\beta^+$ ：正側入力係数  $\beta^-$ ：負側入力係数  
デフォルトでは  $\beta^+ = \beta^- = 0.4$

④ 復元力 0 の点から最大変形点に向かう直線上から戻る場合も復元力が 0 になるまでは  $K_r^+$  または  $K_r^-$  で戻り、その後反対側の今までの最大変形点を目指す。

上記のルールの図化したものを次項に示す。

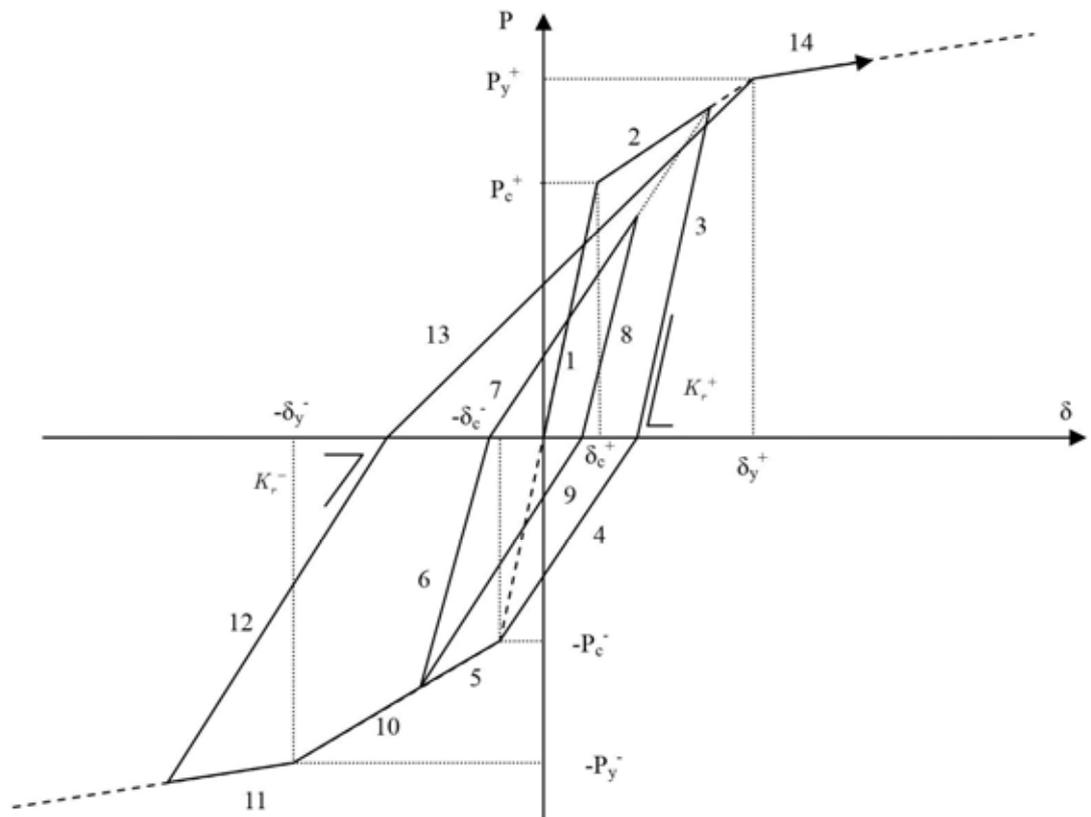


図6-1 修正武田モデル

<6.9 修正武田モデルの参考文献>

- 1) FLIP ROSE (Ver. 7.3.0\_2) 取扱説明書
- 2) 武田寿一：鉄筋コンクリート建物の動的計算, コンクリートジャーナル, Vol. 12, No. 8, 1974. 8.
- 3) 土木学会コンクリート委員会編：2002年制定 コンクリート標準示方書[耐震性能照査編] (Ⅲ. 改訂資料), 2002. 12.

## 6.10 杭－地盤相互作用ばねモデル

杭基礎構造物－地盤系の耐震解析を2次元一体解析として行うには、既往検討<sup>1)~6)</sup>で評価した、杭－地盤相互作用ばねの特性を持つばね要素（以下、杭－地盤相互作用ばね要素）により、杭モデルと2次元地盤モデルを接続する。まず、奥行き方向幅が杭間隔に等しい2次元地盤モデルと奥行き方向に等間隔に配置された杭群中の杭径Dの杭1本分のモデルを用意する。地盤要素にはマルチスプリング要素を適用し、杭は線形または非線形のばね要素でモデル化する。杭節点と対応する2次元地盤モデルの地盤節点の水平方向並進自由度を、図6-4に示すように、杭－地盤相互作用ばね要素により接続する。

このような2次元一体解析のモデルにおいて、杭－地盤相互作用ばね要素は以下に示すように動作する。

- ① 杭の循環境界に対する相対変位  $u$  を算定する。なお、循環境界変位として、一体解析モデルを構成する地盤モデルの対応する節点変位を参照する。

- ② 相対変位  $u$  から、次式を用いて、対応するせん断ひずみ  $\gamma$  を評価する。

$$\gamma = u / (D \times \beta_p)$$

なお、 $\beta_p$ は、土質、不飽和・飽和などの土の状態、杭間隔、荷重レベル（荷重片振幅／破綻荷重＝せん断応力片振幅／初期せん断強度）及び液状化フロントパラメータ $S_0$ に応じて、図6-3から定める。

- ③ 杭近傍の土要素を参照して、その変形特性を決めるパラメータと土の状態（主に、有効拘束圧と液状化フロントパラメータ  $S_0$ ）に基づいて、砂の構成則と同様のせん断応力－せん断ひずみ関係を設定し、せん断ひずみ  $\gamma$  を与えてせん断応力  $\tau$  を算定する。

- ④ せん断応力  $\tau$  から、次式を用いて、ばね力  $F$  を評価する。

$$F = (L \times D \times \alpha_p) \times \tau$$

なお、 $\alpha_p$ は応力－荷重変換係数で、杭間隔と単調載荷時の（破綻荷重／初期せん断強度  $\tau_{m0}$ ）の分布（図6-3）より定まる11.5～12.6の範囲の値である。

上記②において、液状化を考慮する場合に、ひずみ－変位変換係数  $\beta_p$  の値を決めるには、近傍土要素の液状化フロントパラメータ  $S_0$  の値を参照する必要がある。ある  $S_0$  の値に対しては、 $\beta_p$  は概ね一定値を取るため、定数とするか、過去に経験した最大の荷重レベルを適用することが考えられる。図6-5は、杭間隔5Dの場合の飽和砂（ $N_{65}=10$ 、 $\sigma_{m0'}=98\text{kPa}$ 、 $S_0=1.0, 0.5, 0.05, 0.005$ ）を対象とした水平断面モデルによる繰り返し載荷解析で得られた荷重片振幅－最大相対変位関係と過剰間隙水圧モデルに基づいて設定したせん断応力  $\tau$ －せん断ひずみ  $\gamma$  関係から設定した荷重－変位関係を比較したものである。過剰間隙水圧モデルに基づき設定した関係では、荷重＝ $12.6 \times \tau$ 、変位＝ $1.5 \times \gamma$ （ $S_0=1.0, 0.5$ ）、または、変位＝ $1.63 \times \gamma$ （ $S_0=0.05, 0.005$ ）とした。ひずみ－変位変換係数  $\beta_p$  は荷重レベルに依存して変化する量だが、このように、荷重レベルによらない定数と置いても、全体系の解析結果をよく説明するので、このような取扱いでもよい。

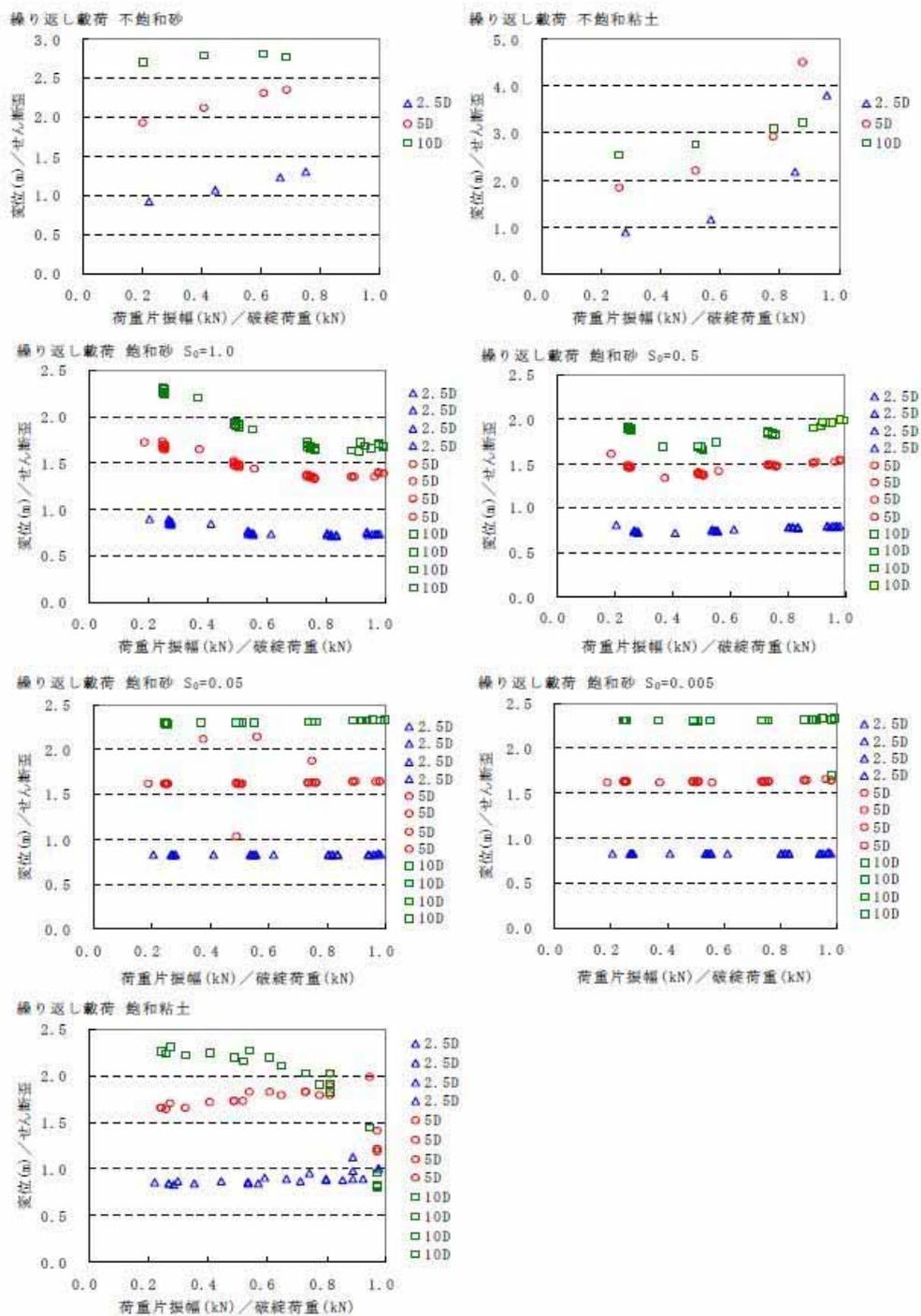


図 6-2 循環境界基準の相対変位振幅と要素シミュレーションのせん断ひずみ振幅の比を  
求めるためのチャート

※ 破綻荷重で正規化した荷重片振幅と杭間隔の関数として表示。

なお、破綻荷重=12.6 (2.5Dの場合は11.5) ×  $\tau_{m0}$

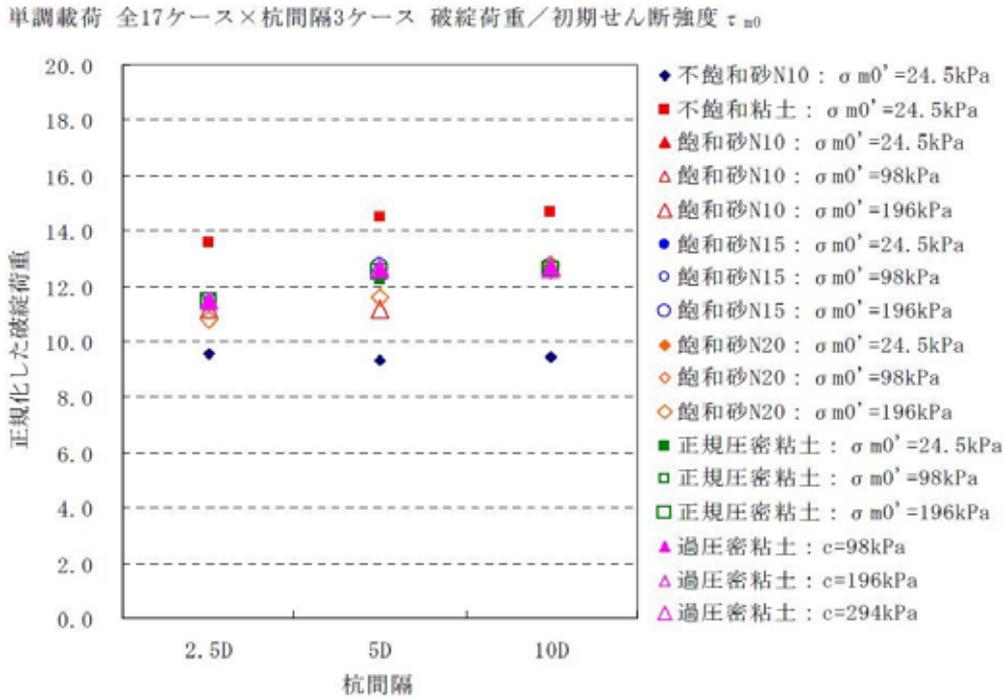


図 6-3 単調載荷時の（破綻荷重／初期せん断強度  $\tau_{m0}$ ）の分布

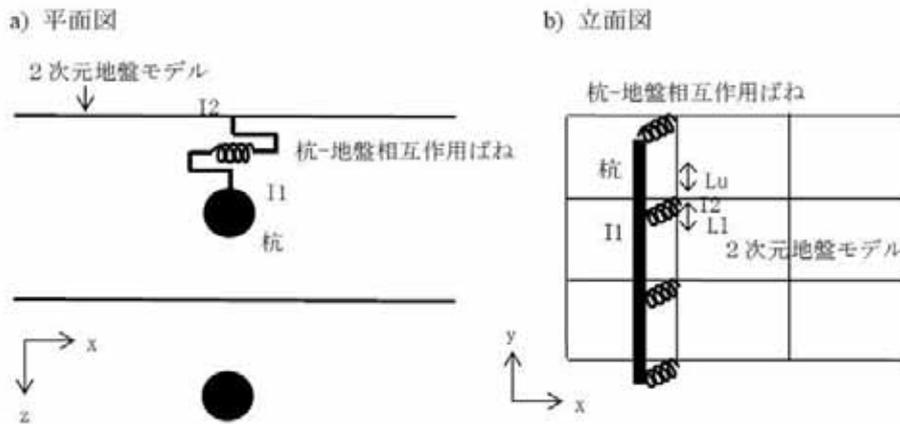


図 6-4 杭-地盤相互作用ばねによる 2次元一体解析の杭モデルと地盤モデルの連結方法（模式図）

※I1は杭-地盤相互作用ばね要素の杭側節点，I2は地盤側節点， $L_u$ はばねの上側配長（隣接する上側のばねまでの半分の長さ）， $L_1$ はばねの下側支配長を表す。

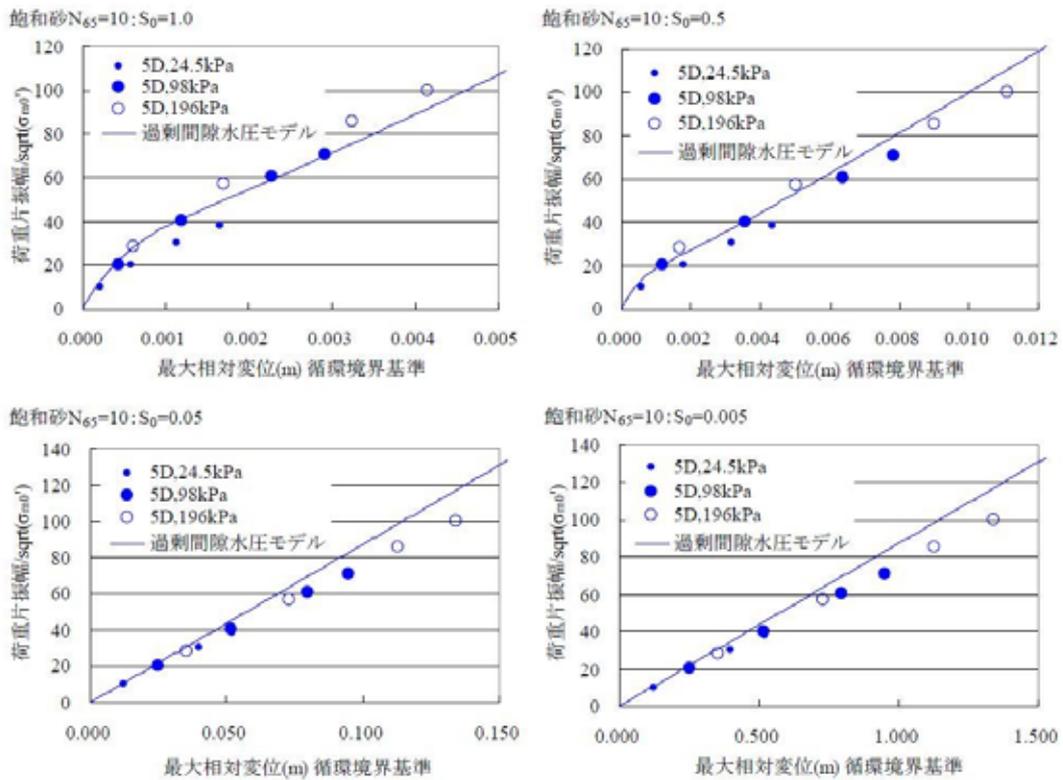


図 6-5 飽和砂 (5D,  $N_{65}=10$ ,  $\sigma_{m0'}=98\text{kPa}$ ,  $S_0=1.0, 0.5, 0.05, 0.005$ ) :  
荷重片振幅－最大相対変位の関係と過剰間隙水圧モデル他に基づいて求めた関係の比較

- ※1 過剰間隙水圧モデルによる曲線は、 $\tau$  と  $S_0$  からせん断強度  $\tau_f$  と初期せん断剛性  $G_0$  を求めて、双曲線関係に基づくせん断応力  $\tau$ －せん断ひずみ  $\gamma$  関係を設定し、それを荷重－変位関係に置き換えたもの。  
置き換えは、荷重  $= 12.6 \times \tau$ 、変位  $= 1.5$  (または  $1.63$ )  $\times \gamma$  とした。
- ※2 全体系で解いた解が、大きな荷重では、過剰間隙水圧モデルによる曲線の下側に来るのは、荷重ステップ間隔の増大による精度低下によるものと思われる。また、変位－ひずみ変換係数は、荷重片振幅に依存する量だが、このように定数と置いても、全体系の解析結果をよく説明する。

<6.10 杭-地盤相互作用ばねの参考文献>

- 1) 三輪滋, 小堤治, 溜幸生, 岡由剛, 一井康二, 井合進, 田河祥一: 2次元水平断面モデルを用いた液状化地盤における杭-地盤系の相互作用の検討, 第38回地盤工学研究発表会, 2003.
- 2) 森田年一, 井合進, Hanlong Liu, 一井康二, 佐藤幸博: 液状化による構造物被害予測プログラムFLIPにおいて必要な各種パラメタ簡易設定法, 港湾技研資料, No. 869, 1997.
- 3) Towhata, I. and Ishihara, K.: Modelling Soil Behavior under Principal Stress Axes Rotation, Proc. of 5th International Conf. on Num. Methods in Geomechanics, Nagoya, Vol. 1, pp. 523-530, 1985.
- 4) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, Report of Port and Harbour Research Institute, Vol. 29, No. 4, pp. 27-56, 1990.
- 5) 小堤治, 溜幸生, 岡由剛, 一井康二, 井合進, 梅木康之: 2次元有効応力解析における杭と液状化地盤の相互作用のモデル化, 第38回地盤工学研究発表会, 2003.
- 6) 小堤治, 溜幸生, 岡由剛, 井合進, 梅木康之: 2次元有効応力解析における杭と液状化地盤の動的相互作用のモデル化, 第58回土木学会年次学術講演会, 2003.

## 7. 線形はり要素の検証

### 7.1 概要

6章で説明した基本的な要素を代表して構造物や杭等のモデル化で使用している線形はり要素について、簡易なモデルを用いて検証を実施し応答結果が妥当であることを確認した。

### 7.2 例題

下図に示す梁長8mを8分割した単純梁のモデルを作成し、理論解と比較することで応答結果が妥当であることを確認した。荷重としては自由端への集中荷重 $P=2\text{N}$ 及び梁全体への等分布荷重 $W=2\text{N/m}$ を設定し、たわみ分布及び曲げモーメント分布を理論解と比較した。

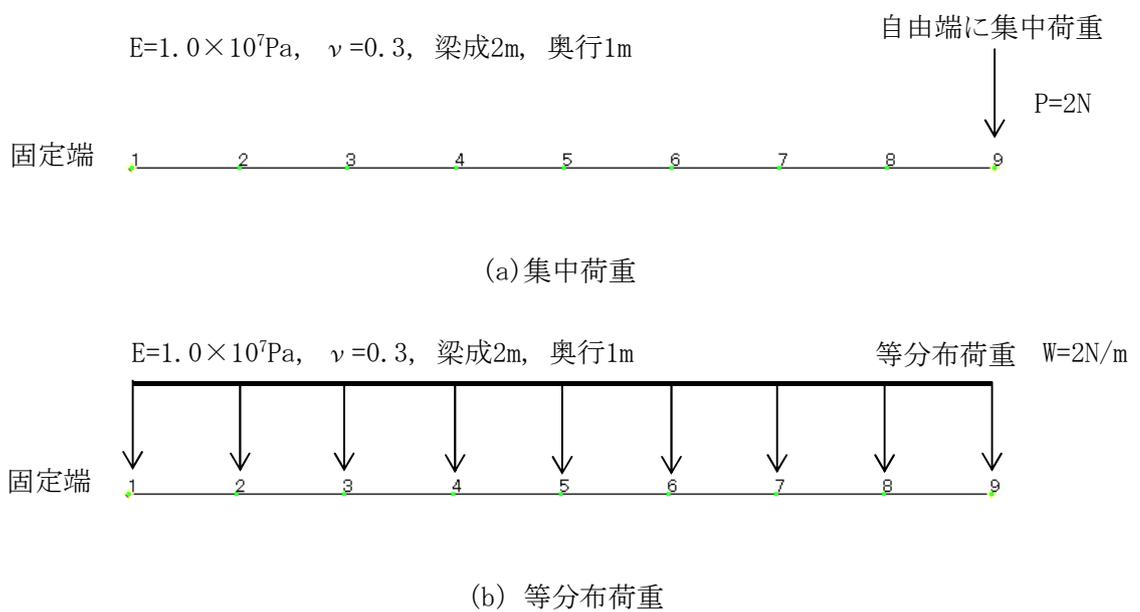


図 7-1 例題で設定したモデル及びパラメータ

また、片持梁のたわみ $\delta$ と曲げモーメント $M$ の理論解は梁長を $L$ 、ヤング率を $E$ 、断面2次モーメントを $I$ とし、固定端からの距離を $x$ として次式から与えられる。

集中荷重 $P$ 載荷時の理論解:

$$\delta(x) = -\frac{P}{EI} \left( \frac{x^3}{6} - L \frac{x^2}{2} \right) \quad M(x) = -P(L - x)$$

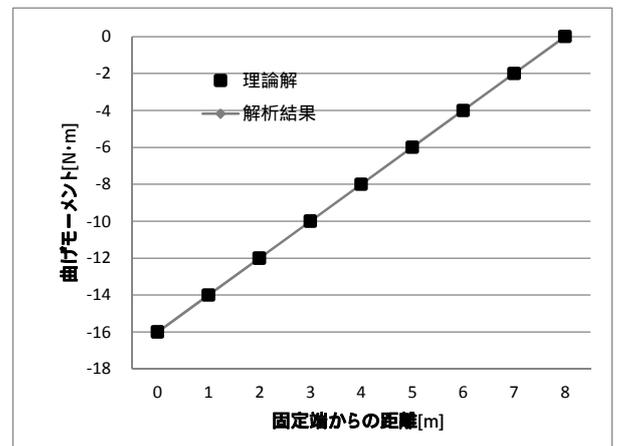
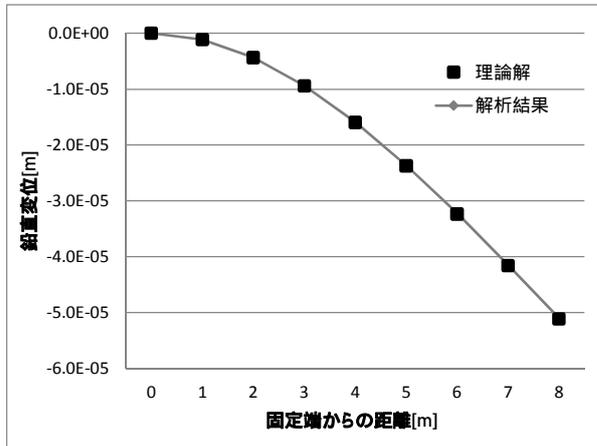
等分布荷重 $W$ 載荷時の理論解:

$$\delta(x) = -\frac{W}{2EI} \left( \frac{x^4}{12} - L \frac{x^3}{3} + L^2 \frac{x^2}{2} \right) \quad M(x) = -W \frac{(L - x)^2}{2}$$

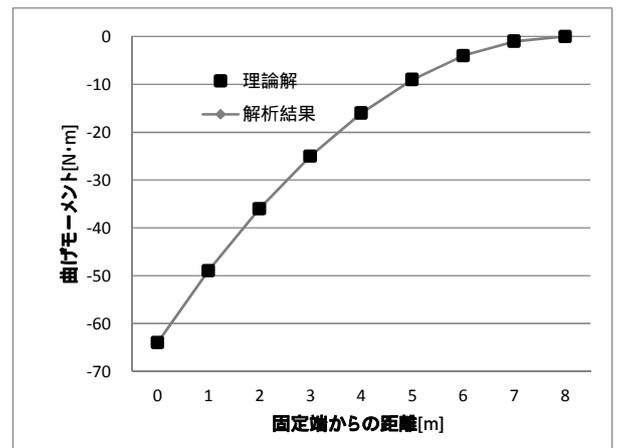
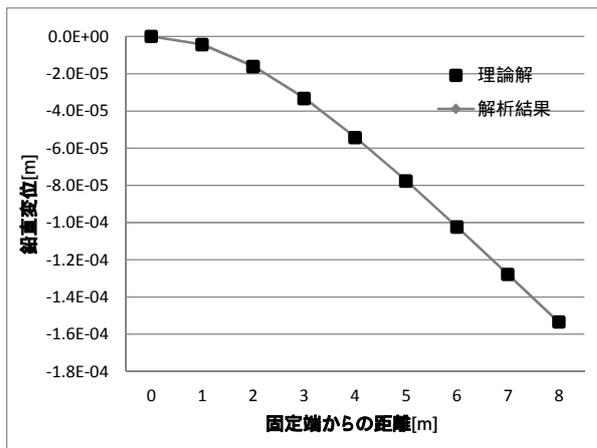
### 7.3 検証結果

以下に集中荷重及び分布荷重を与えた場合の理論解とたわみ分布及び曲げモーメントの分布の解析結果との比較結果を示す。

下図に示す通り、理論解と概ね一致を示しており応答結果が妥当であることを確認した。



(a) 集中荷重



(b) 等分布荷重

図7-2 理論解と解析結果の比較

## 8. 修正武田モデルの検証

### 8.1 概要

修正武田モデルについては、簡易なモデルにてテスト例題解析を実施し、理論値と比較した検証記録がFLIP Ver. 7.3.0\_2のマニュアルに記載されている。テスト例題及びそのテスト例題結果を検証記録とする。

### 8.2 例題

以下に例題を記載する。

#### (5) テスト例題

図 11.1-2のような2節点1要素からなる非線形はり要素に対して、節点①の全自由度を拘束し、節点②に節点集中力  $F_x$  を作用させ、要素中央の  $M-\phi$  関係を計算した。使用したパラメータを表 11.1-1に示す。ただし、表 11.1-1右側の非対称モデルパラメータ(iasym = 1)はテスト例題 6 のみに使用し、そのほかのテスト例題はすべて対称モデル(iasym = 0)とする。以下にテスト例題の結果について示す。

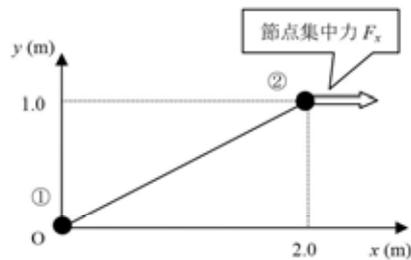


図 11.1-2 テスト例題

表 11.1-1 テスト例題に使用したパラメータ

せん断剛性	100 (kN/m)			
ポアソン比	0.3			
質量密度	2 (t/m <sup>3</sup> )			
断面積	4 (m <sup>2</sup> )			
有効せん断面積係数	0.5			
第一勾配	20 (kN・m <sup>2</sup> )	以下はテスト例題 6 のみ		
第二勾配	10 (kN・m <sup>2</sup> )	第二勾配(負側)	7 (kN・m <sup>2</sup> )	
第三勾配	1 (kN・m <sup>2</sup> )	第三勾配(負側)	0.1 (kN・m <sup>2</sup> )	
第一折れ点モーメント	5 (kN・m)	第一折れ点モーメント(負側)	3 (kN・m)	
第二折れ点モーメント	7 (kN・m)	第二折れ点モーメント(負側)	10 (kN・m)	
除荷剛性低下指数	0.4	除荷剛性低下指数(負側)	0.4	

図8-1 例題で設定したモデル及びパラメータ

※FLIP ROSE (Ver. 7.3.0\_2) 取扱説明書より

8.3 例題結果 (検証結果)

以下に8つのテスト例題結果を示す。

※以下FLIP ROSE (Ver. 7.3.0\_2) 取扱説明書より

a) テスト例題 1(対称:トリリニア試験)

図 11.1-2のはり要素に対して、節点集中力を 30kN まで段階的に作用させ、M-φ 関係を解析した。図 11.1-3に結果を示す。

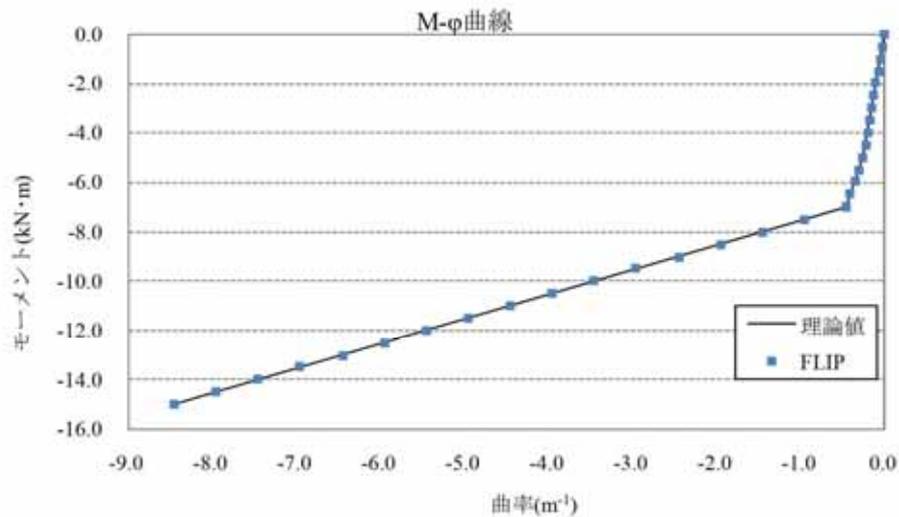


図 11.1-3 テスト例題 1(対称:トリリニア試験)の結果 M-φ 関係

b) テスト例題 2(対称:線形領域)

図 11.1-2のはり要素に対して、節点集中力  $F_x = 9.0\sin(\pi t/10)$  を  $t = 0 \sim 70$ (s)まで作用させ、M-φ 関係を解析した。図 11.1-4に結果を示す。

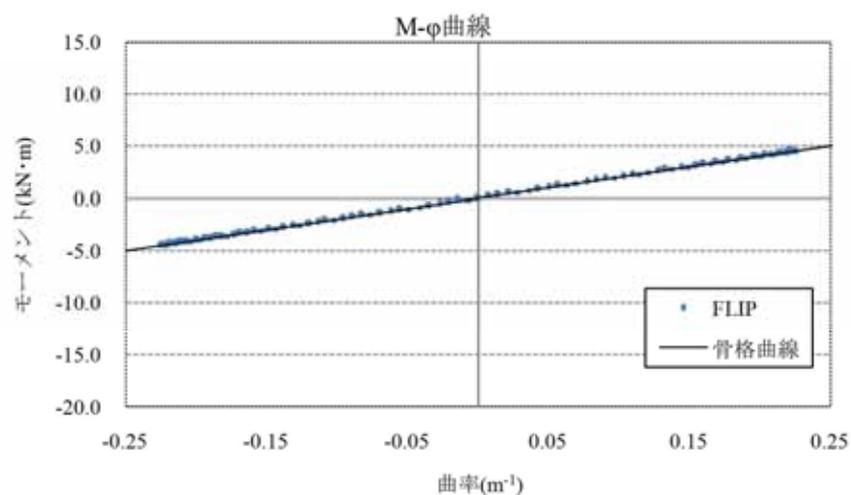


図 11.1-4 テスト例題 2(対称:線形領域)の結果 M-φ 関係

図8-2 テスト例題1及び2

c) テスト例題 3(対称:第一折れ点を超える)

図 11.1-2のはり要素に対して、節点集中力  $F_x = 12.0\sin(\pi t/30)$  を  $t = 0\sim 50$ (s)まで作用させ、M- $\phi$ 関係を解析した。図 11.1-5に結果を示す。

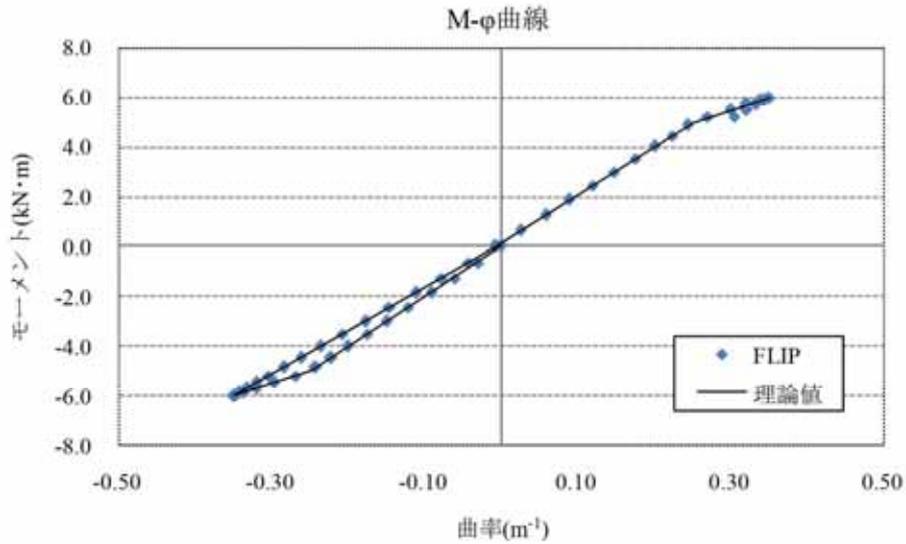


図 11.1-5 テスト例題 3(対称:第一折れ点を超える)の結果 M- $\phi$ 関係

d) テスト例題 4(対称:第二折れ点を超える)

図 11.1-2のはり要素に対して、節点集中力  $F_x = 30.0\sin(\pi t/20)$  を  $t = 0\sim 70$ (s)まで作用させ、M- $\phi$ 関係を解析した。図 11.1-6に結果を示す。

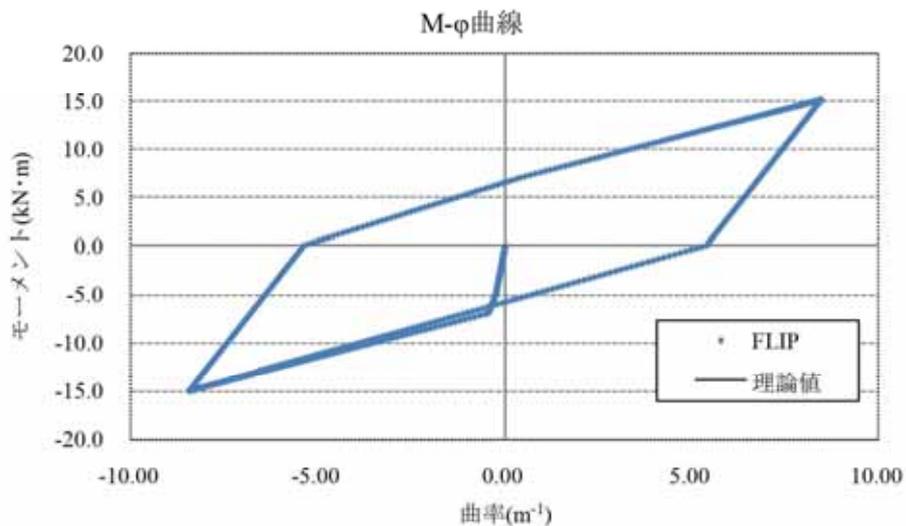


図 11.1-6 テスト例題 4(対称:第二折れ点を超える)の結果 M- $\phi$ 関係

c) テスト例題 5(対称:第二折れ点を超え、最大変形点を更新)

図 11.1-2のはり要素に対して、節点集中力  $F_x = 0.1t + 25.0 \sin(\pi t/10)$  を  $t = 0 \sim 70$ (s)まで作用させ、M- $\phi$  関係を解析した。図 11.1-7に結果を示す。

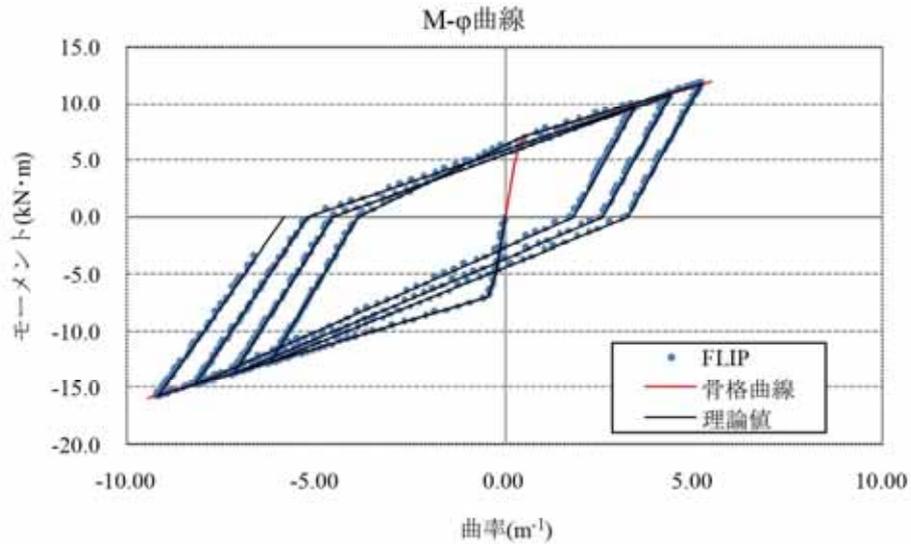


図 11.1-7 テスト例題 5(対称:第二折れ点を超え、最大変形点を更新)の結果 M- $\phi$  関係

f) テスト例題 6(非対称:第二折れ点を超え、最大変形点を更新)

図 11.1-2のはり要素に対して、節点集中力  $F_x = 0.05t + 25.0 \sin(\pi t/10)$  を  $t = 0 \sim 70$ (s)まで作用させ、M- $\phi$  関係を解析した。図 11.1-8に結果を示す。

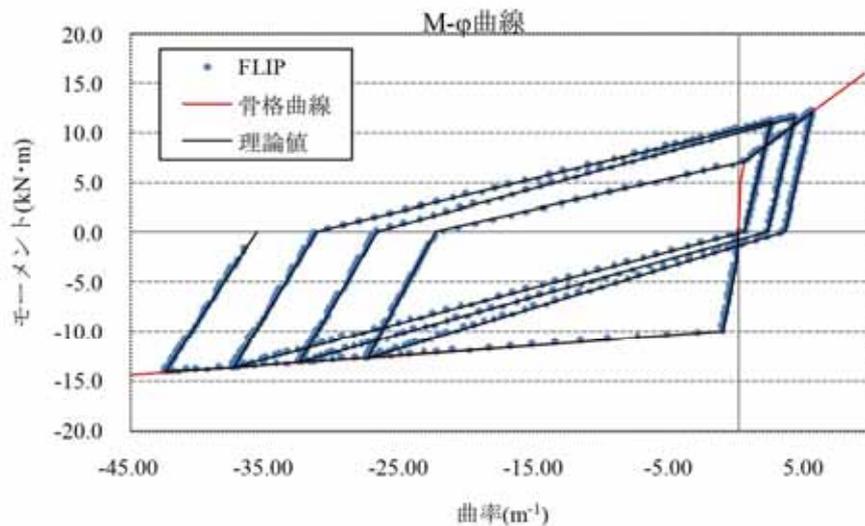


図 11.1-8 テスト例題 6(非対称:第二折れ点を超え、最大変形点を更新)の結果 M- $\phi$  関係

図8-4 テスト例題5及び6

g) テスト例題 7(対称：第一折れ点を超え、除荷中に反転)

図 11.1-2のはり要素に対して、節点集中力  $F_x = 0.1t + 12.0 \sin(\pi t/30)$  を  $t = 0 \sim 60$ (s)まで作用させ、 $M-\phi$  関係を解析した。図 11.1-9に結果を示す。ただし、図をわかりやすくするため、第二勾配を 0.1、第三勾配を 0.01 とした。

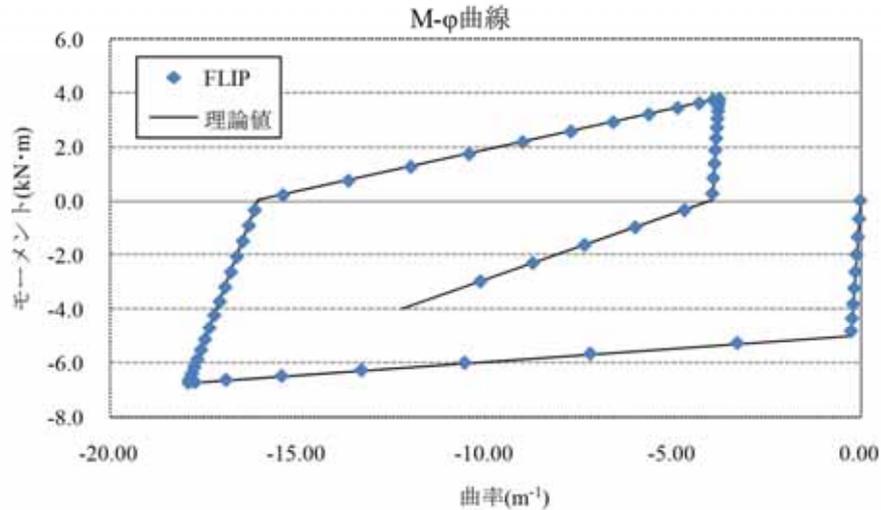


図 11.1-9 テスト例題 7(対称：第一折れ点を超え、除荷中に反転)の結果  $M-\phi$  関係

h) テスト例題 8(対称：第二折れ点を超え、除荷中に反転)

図 11.1-2のはり要素に対して、節点集中力  $F_x = 0.1t + 13.0 \sin(\pi t/30)$  を  $t = 0 \sim 60$ (s)まで作用させ、 $M-\phi$  関係を解析した。図 11.1-10に結果を示す。ただし、図をわかりやすくするため、第二勾配を 0.1、第三勾配を 0.01 とした。

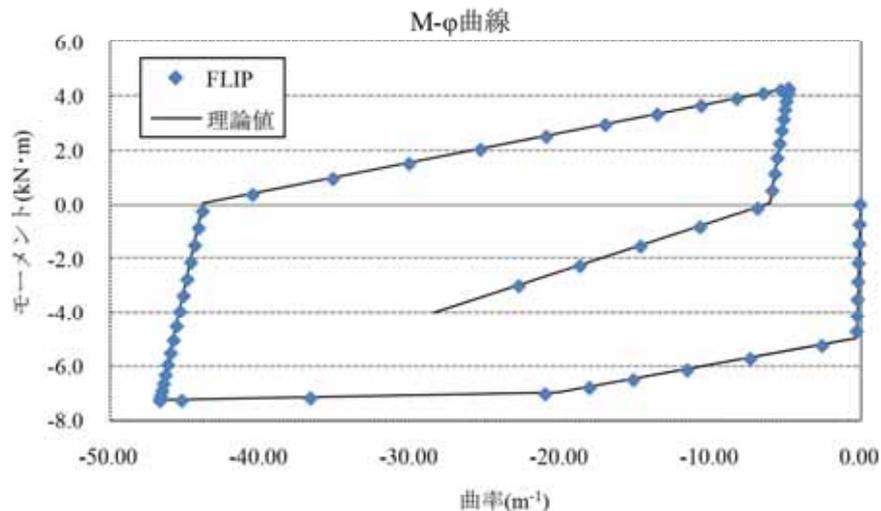


図 11.1-10 テスト例題 8(対称：第二折れ点を超え、除荷中に反転)の結果  $M-\phi$  関係

#### 8.4 軸力の変動が部材の非線形特性に与える影響（取水構造物の耐震安全評価に関する参考資料）

取水構造物の地震応答解析では、鉄筋コンクリート部材及び鋼管杭を非線形はり要素にてモデル化している。この非線形特性として、鉄筋コンクリート部材における非線形特性（ $M-\phi$  関係）にトリリニアモデル（修正武田モデル）を、鋼管杭における非線形特性（ $M-\phi$  関係）にバイリニアモデルを適用しているが、有効応力解析コード「FLIP Ver. 7.3.0\_2」における当該非線形特性では、地震時における部材の軸力は一定とされる。

よって、本項では、基準地震動  $S_s$  を入力とした地震応答解析による各部材の軸力及び曲げモーメントの変動範囲を踏まえた上で、それが部材の非線形特性に与える影響を検討し、取水構造物の耐震評価において軸力が一定とされる有効応力解析コード「FLIP Ver. 7.3.0\_2」の当該非線形特性を用いることの妥当性を検討する。

部材の軸力変動範囲を確認するための解析ケースを以下に示す。

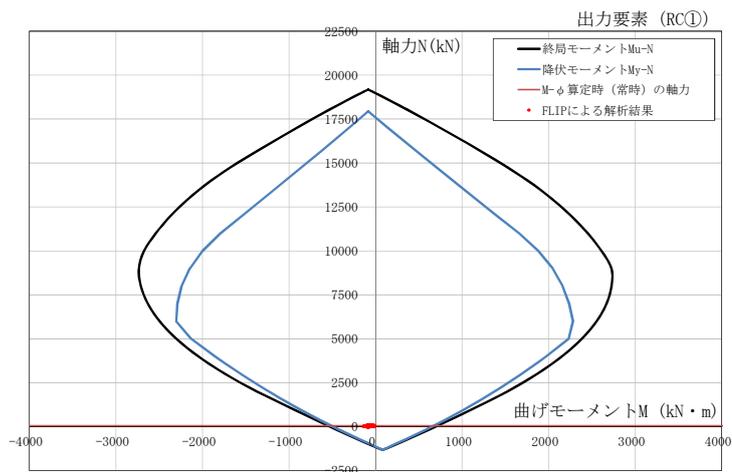
- ・入力地震動： $S_s-D1$ （H+, V+）
- ・検討ケース：①原地盤に基づく液状化強度特性を用いた解析ケース（基本ケース）
- ・解析断面：④-④断面（取水ピット区間）
- ・確認対象部材：図8-6に示す通り。



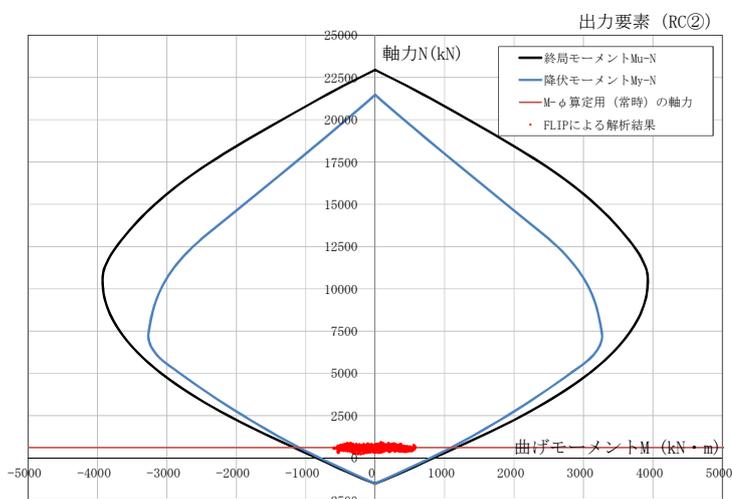
図8-6 軸力及び曲げモーメントの変動範囲の確認対象部材

図8-7にて、鉄筋コンクリート部材における軸力及び曲げモーメントの変動範囲と、当該部材の  $M_u$ （終局モーメント）- $N$ （軸力）関係及び  $M_y$ （降伏モーメント）- $N$ （軸力）関係を比較した。また、同図には、FLIPにて非線形特性として用いられている  $M_u$  及び  $M_y$  の設定根拠である常時応力解析による当該部材の軸力をプロットしている。

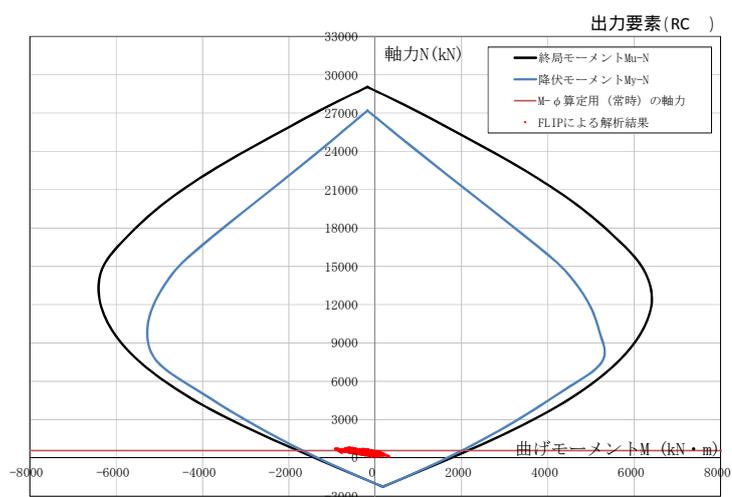
基準地震動  $S_s$  による応答結果によると、地震時の鉄筋コンクリート部材における軸力の変動範囲は限定的であり、概ね常時応力解析における軸力と同等の範囲に収まっている。また、部材に発生する曲げモーメントは  $M_y$ （降伏モーメント）以下であり、概ね弾性範囲内に収まっている。以上より、鉄筋コンクリート部材において、軸力の変動が部材の非線形特性に与える影響は軽微であり、耐震評価において軸力が一定とされる有効応力解析コード「FLIP Ver. 7.3.0\_2」の当該非線形特性を用いることは妥当である。



(RC①)



(RC②)



(RC③)

図8-7 基準地震動 $S_s$ による取水構造物の部材の応答範囲

また、同様の地震応答解析結果を参照し、鋼管杭における軸力変動範囲を把握した上で、その変動が非線形特性（バイリニアモデル）における $M_p$ （全塑性モーメント）にどの程度影響するかを検討した。

基準地震動 $S_s$ による地震応答解析により、図8-6に示す鋼管杭要素にて得られた最大発生軸力 $N_{max}$ 及び最小発生軸力 $N_{min}$ を用いて、 $M_p$ （全塑性モーメント）を算定し、バイリニアモデルを設定した。各軸力におけるバイリニアモデルの比較を図8-8に示す。

いずれの軸力においても、 $M_p$ （全塑性モーメント）に有意な差は無いことから、鋼管杭において、軸力の変動が部材の非線形特性に与える影響は軽微であり、耐震評価において軸力が一定とされる有効応力解析コード「FLIP Ver. 7.3.0\_2」の当該非線形特性を用いることは妥当である。

鋼管杭のM- $\phi$ 関係

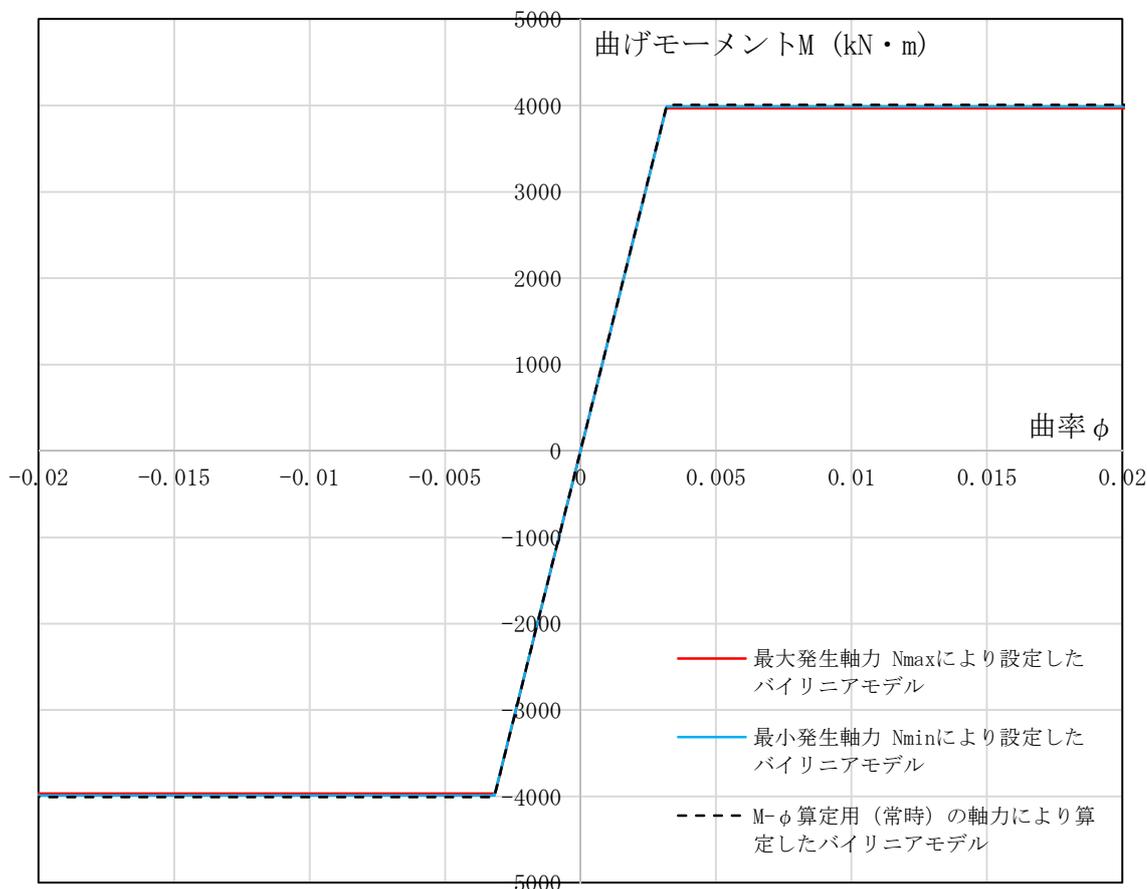


図8-8 鋼管杭の発生軸力により設定したバイリニアモデル

## 9. 杭-地盤相互作用ばねモデルの検証

### 9.1 概要

東海第二発電所の有効応力解析にはFLIP Ver. 7.3.0\_2を用いる。他プラントの既工事計画で使用されたバージョン (Ver. 7.2.3\_4) との主な変更点は、杭-地盤相互作用ばね要素の導入である。そこで、FLIP Ver. 7.3.0\_2とVer. 7.2.3\_4を用いて、杭-地盤相互作用ばね要素の検証及び妥当性確認を行った。

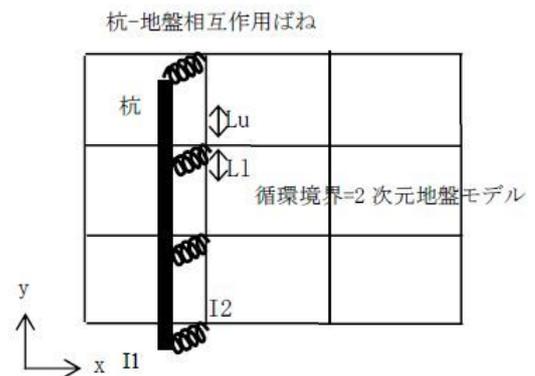
### 9.2 杭と周辺地盤との相互作用

杭と周辺地盤との相互作用として、Ver. 7.3.0\_2では杭-地盤相互作用ばね要素を用いる。また、Ver. 7.2.3\_4ではジョイント要素を用いるものとする。両者の設定方法を以下に述べる。

#### a) 杭-地盤相互作用ばね要素の支配長

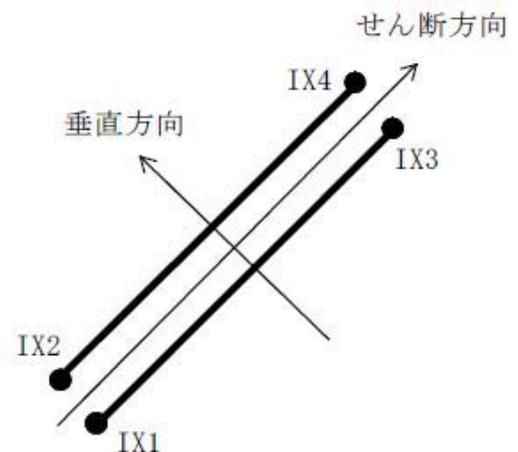
杭-地盤相互作用ばね要素は、その上側支配長 $L_u$ と下側支配長 $L_1$ を自動的に決定する。I1節点（杭側節点）に接続するはり要素を上方に辿り、次の杭-地盤相互作用ばね要素が接続する節点までの距離の半分を上側支配長 $L_u$ とする。そのような節点がない場合は $L_u=0$ とする。同様に、下側支配長 $L_1$ も算定する。

鉛直断面



#### b) ジョイント要素の配置

ジョイント要素は、土（マルチスプリング要素等またはマルチスプリング要素等+間隙水要素）と矢板（線形はり要素）やケーソン（線形平面要素）等の構造物の接触面上（節点間）に置いて、その間の滑り・剥離を表現するのに用いる。



### 9.3 解析結果

比較対象：鋼管杭鉄筋コンクリート防潮堤

Ver. 7.3.0\_2の杭軸方向の杭－地盤相互作用ばね要素とVer. 7.2.3\_4の杭軸方向のジョイント要素は、名称は異なるものの実質の構成式としては同じである。また、杭軸直角方向についてはVer. 7.3.0\_2とVer. 7.2.3\_4で杭軸直交方向の杭－地盤相互作用ばねは名称も構成式も同じである。

Ver. 7.3.0\_2とVer. 7.2.3\_4により加速度の解析結果の比較を行い、解析結果が同等であることを確認した。Ver. 7.3.0\_2では杭－地盤相互作用ばね要素、Ver. 7.2.3\_4ではVer. 7.3.0\_2の杭－地盤相互作用ばね要素に相当するVer. 7.2.3\_4の杭軸方向のジョイント要素を用いた。

Ver. 7.3.0\_2での杭軸方向の杭－地盤相互作用ばねのばね定数は、数値解析上不安定な挙動を起こさない程度に十分大きな値として、表9-1のとおり設定した。また、図9-1に杭－地盤相互作用ばねの力学的特性を示す。Ver. 7.2.3\_4で設定したVer. 7.3.0\_2の杭軸方向の杭－地盤相互作用ばね要素に相当するVer. 7.2.3\_4の杭軸方向のジョイント要素の力学的特性も表9-1のとおり設定した。

図9-2に加速度の出力節点の位置図を示す。水平方向加速度の比較を図9-3に、鉛直方向加速度の比較結果を図9-4に示す。

杭軸方向については、Ver. 7.3.0\_2では杭軸方向の杭－地盤相互作用ばね要素、Ver. 7.2.3\_4では杭軸方向のジョイント要素を用い、杭軸直交方向については、Ver. 7.3.0\_2及びVer. 7.2.3\_4において同じ杭－地盤相互作用ばねを使用して加速度の解析結果を比較した。その結果、図9-3及び図9-4に示す通り解析結果が一致している。ゆえにVer. 7.3.0\_2及びVer. 7.2.3\_4において、杭軸方向及び杭軸直交方向の杭と地盤の相互作用に関する解析は同等の解析結果を与えるものであり、杭と地盤の相互作用の処理について両バージョンによる実質的な差異はない。

表9-1 杭－地盤相互作用ばねのばね定数

	せん断剛性 $k_s$ ( $\text{kN/m}^3$ )
杭軸方向	$1.0 \times 10^6$

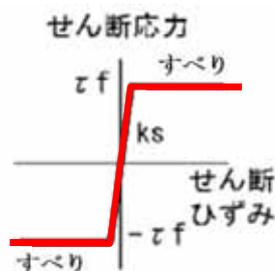


図9-1 杭－地盤相互作用ばね（杭軸方向）の力学的特性



図 9-2 出力節点の位置図

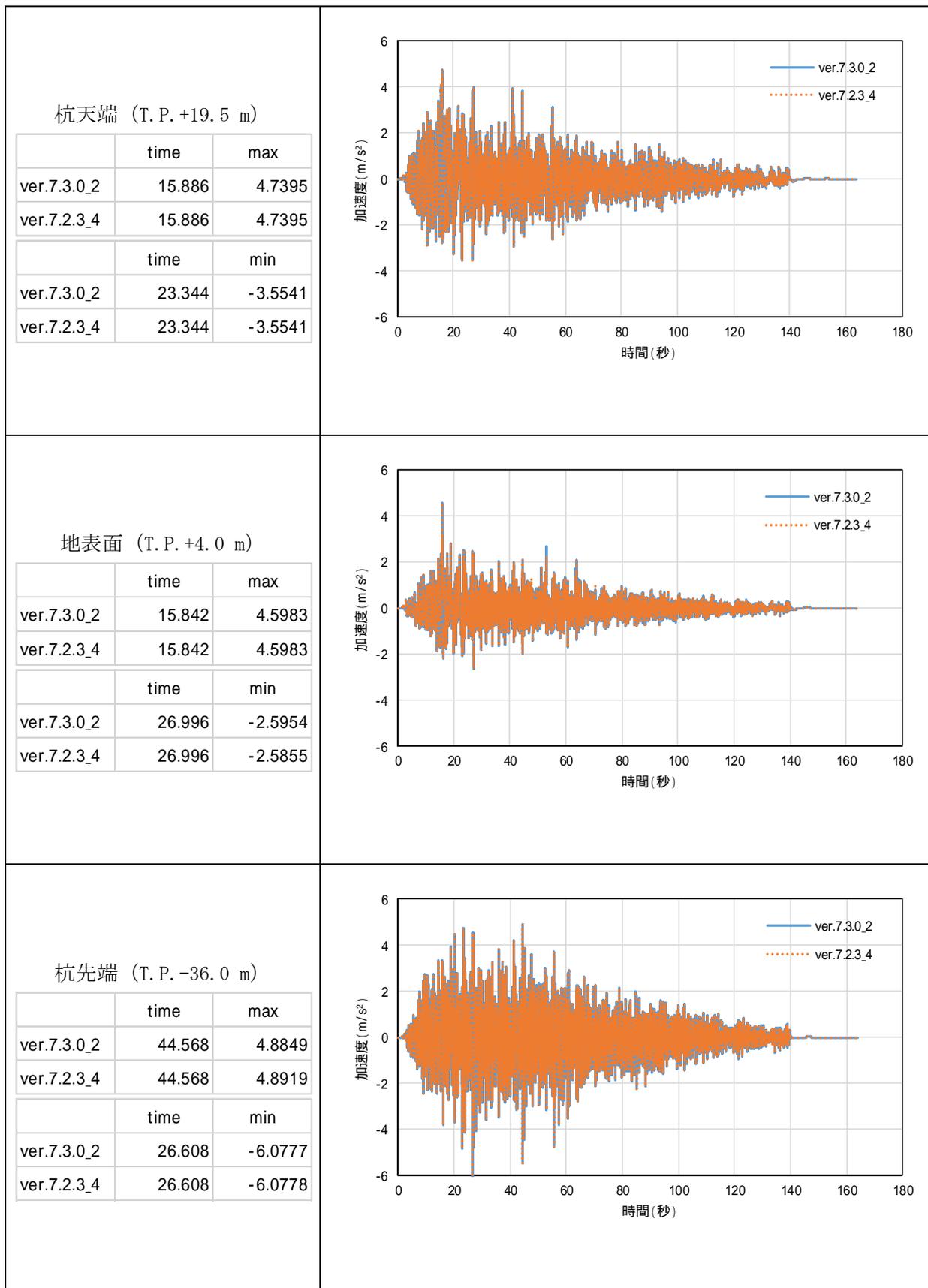


図 9-3 水平方向加速度 (m/s<sup>2</sup>)

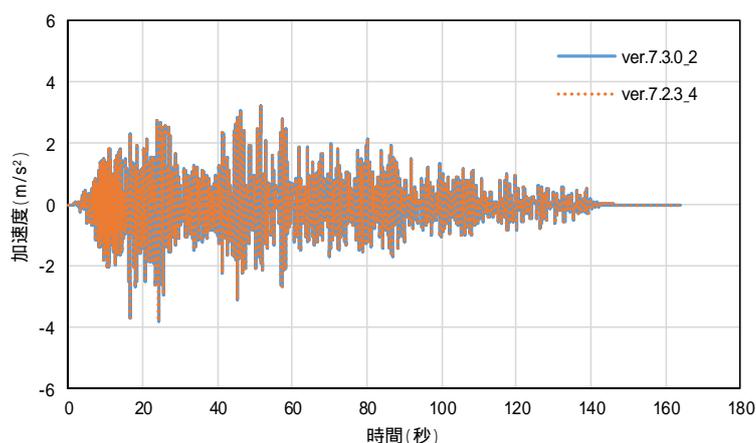
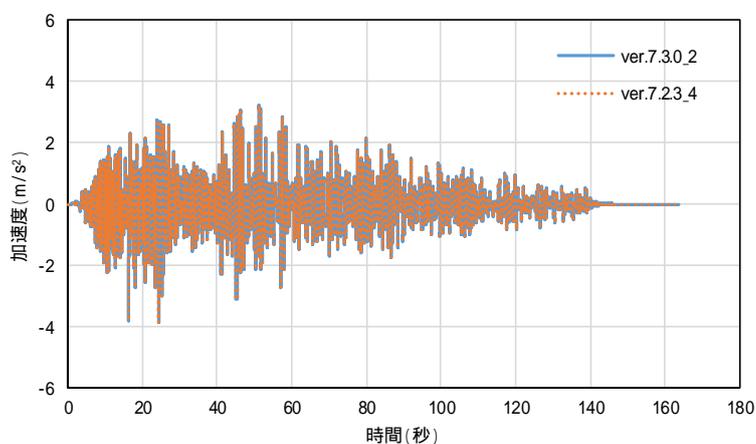
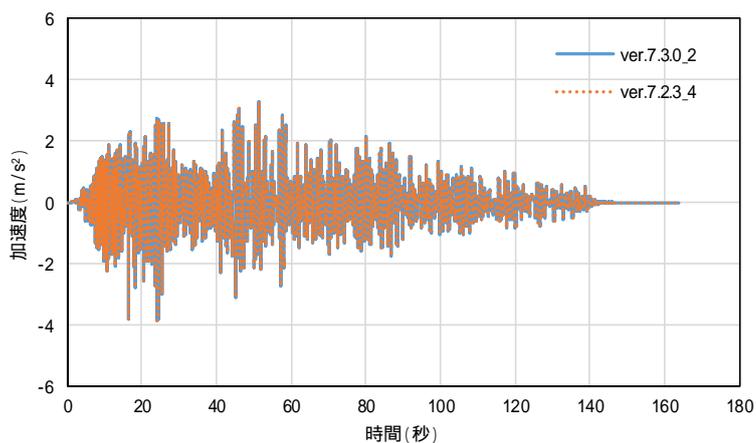
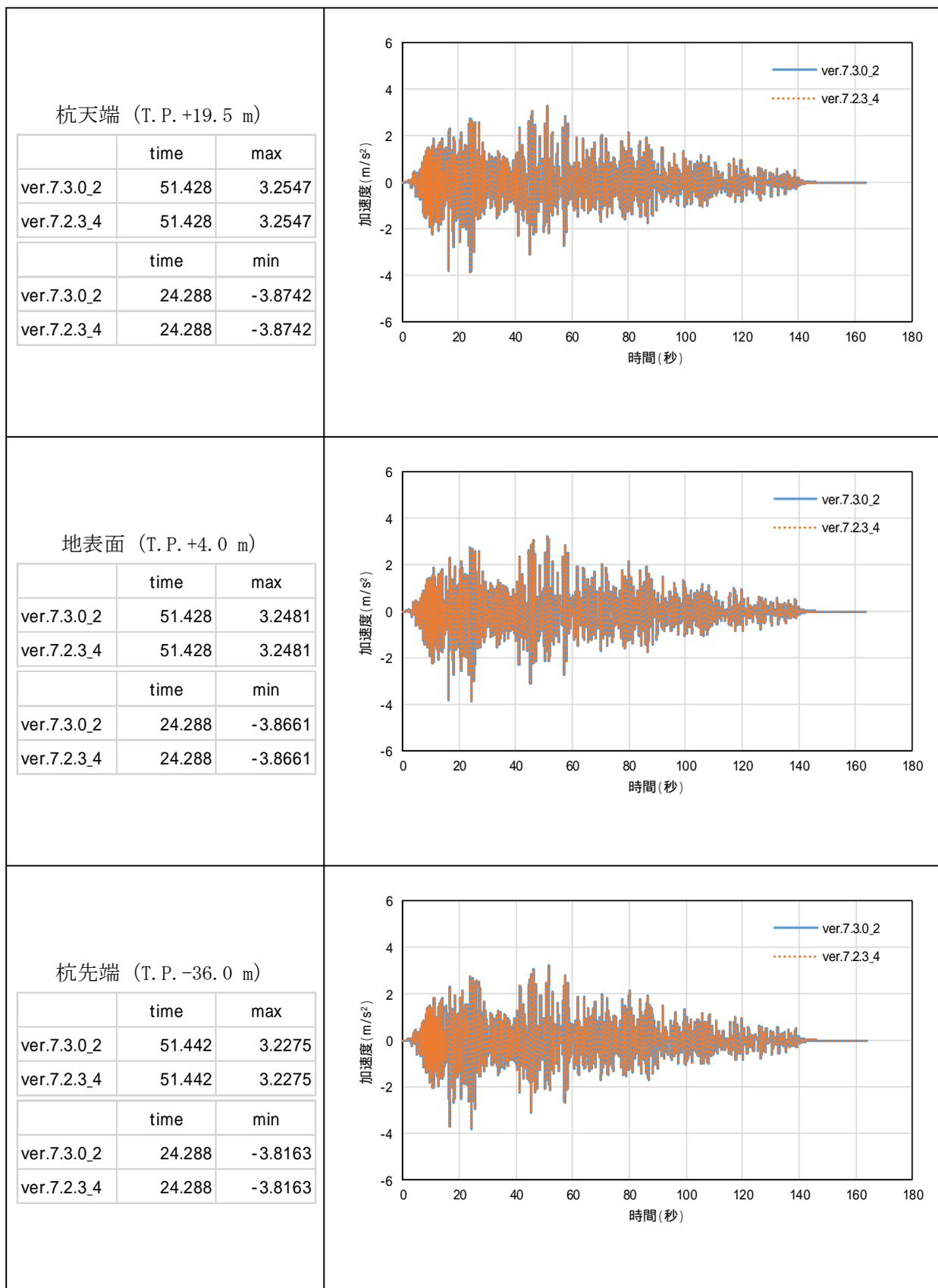


図 9-4 鉛直方向加速度 (m/s<sup>2</sup>)



V-5-11 計算機プログラム（解析コード）の概要・ANISN

## 目次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3

1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）ANISNについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-1-7-3	中央制御室の居住性に関する説明書	ANISN-JR
V-1-8-1	原子炉格納施設の設計条件に関する説明書	ANISN-JR
V-1-9-3-2	緊急時対策所の居住性に関する説明書	ANISN-JR
V-1-1-6	ブローアウトパネル関連設備の設計方針	ANISN-JR

## 2. 解析コードの概要

項目	コード名 ANISN
使用目的	中央制御室及び緊急時対策所の居住性に係る被ばく評価 ベント実施に伴う作業等の作業員の被ばく評価
開発機関	米国オークリッジ国立研究所（（財）高度情報科学研究機構）
開発時期	1977年（初版開発時期1967年）
使用したバージョン	ANISN-JR
コードの概要	ANISN（以下「本解析コード」という。）は、米国オークリッジ国立研究所で開発された、1次元多群輸送方程式を離散座標Sn法で解く計算プログラムである。本解析コードの計算形状は、1次元形状（球、無限平板、無限円筒）であり、中性子及びガンマ線の輸送問題等を解くことができる。本解析コードでは、計算形状内での中性子及びガンマ線の線束が計算され、線量率換算係数又はカーマ係数を乗じることにより、線量率又は発熱量を算出することができる。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p><b>【検証 (Verification)】</b></p> <p>本解析コードの検証の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 計算機能が適正であることは、後述する妥当性確認の中で確認している。</li> <li>・ 本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。</li> <li>・ 本解析コードは、線量率評価を実施するコードであり、計算に必要な主な条件は線源条件、幾何形状条件である。これら評価条件が与えられれば線量率評価は可能であり、使用目的に記載する評価に適用可能である。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></p> <p>本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ スカイシャインガンマ線について、固体廃棄物貯蔵庫を線源とした線量評価が、ANISNコードとG33コードの結合計算法によって実施されている。</li> <li>・ この固体廃棄物貯蔵庫での測定値と計算値の比較の詳細が、原子力施設散乱放射線挙動専門委員会の成果報告会（昭和54年9月、財団法人 原子力安全研究協会）*に示されている。</li> <li>・ 測定値と計算値を比較した結果、概ね一致していることを確認している。</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>・今回の重大事故等時における中央制御室のスカイシャインガンマ線線量評価は, 上記妥当性確認内容と合致している。</li> <li>・また, 原子力発電所放射線遮へい設計規程 (J E A C 4 6 1 5 - 2008) (日本電気協会 原子力規格委員会 平成20年6月) では, 事故時の中央制御室遮蔽のための輸送計算コードとして, ANISNコードが挙げられている。</li> </ul>
--	--

注記 \* : 「ガンマ線スカイサンシャインの線量評価に関する研究」成果報告会・予稿集 (昭和54年9月 財団法人 原子力安全研究協会)

V-5-12 計算機プログラム（解析コード）の概要  
・ G 3 3 - G P 2 R

## 目次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3

1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）G33-GP2Rについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-1-7-3	中央制御室の居住性に関する説明書	1.00
V-1-8-1	原子炉格納施設の設計条件に関する説明書	1.00
V-1-9-3-2	緊急時対策所の居住性に関する説明書	1.00
V-1-1-6	ブローアウトパネル関連設備の設計方針	1.00

## 2. 解析コードの概要

項目	コード名 G33-GP2R
使用目的	中央制御室及び緊急時対策所の居住性に係る被ばく評価 ベント実施に伴う作業等の作業員の被ばく評価
開発機関	日本原子力研究開発機構（（財）高度情報科学研究機構）
開発時期	2001年（初版開発時期 1964年）
使用したバージョン	1.00
コードの概要	<p>G33-GP2R（以下「本解析コード」という。）は、Los Alamos Scientific Laboratoryで開発されたガンマ線多群散乱計算プログラム「G33」をベースとし、旧日本原子力研究所がICRP1990年勧告の国内関連法令・規則への取入れに合わせて、実効線量を計算できるように改良した最新バージョンである。</p> <p>本計算機プログラムは、点等方線源からの一回散乱を計算する。散乱は、クライナー-仁科の式に基づき計算する。散乱が起こる領域は直角、球、円筒座標により指定し、遮蔽体は平板、球、円筒又は二次曲面により入力することができる。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p><b>【検証 (Verification)】</b></p> <p>本計算機プログラムの検証の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 計算機能が適正であることは、後述する妥当性確認の中で確認している。</li> <li>・ 本計算機プログラムの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。</li> <li>・ 本計算機プログラムは、線量率評価を実施するコードであり、計算に必要な主な条件は線源条件、幾何形状条件である。これら評価条件が与えられれば線量率評価は可能であり、使用目的に記載する評価に適用可能である。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></p> <p>本計算機プログラムの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ スカイシャインガンマ線について、米国Radiation Research Associates (RRA) が1977年に米国カンザス州立大学において<sup>60</sup>Co線源を用いたベンチマーク試験を実施している。</li> <li>・ このRRAでの実験値と計算値を比較の詳細が、ガンマ線遮蔽設計ハンドブック（1988年1月、社団法人 日本原子力学会）に示されている。</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"><li>・その結果は、天井遮蔽がないケースでは計算値は実験値とよい一致を示しているが、天井遮蔽があるケースでは、計算値は実験値を過小評価となっている。</li><li>・この原因は、G33コードが天井透過中の散乱成分を考慮してないためであり、この成分を考慮するため、天井遮蔽までをANISNコードで計算することを推奨している。今回の重大事故等時における中央制御室のスカイシャインガンマ線線量評価では、この計算手法を採用している。</li><li>・今回の重大事故等時における中央制御室のスカイシャインガンマ線線量評価は、上記妥当性確認内容と合致している。</li><li>・また、原子力発電所放射線遮へい設計規程（J E A C 4 6 1 5 - 2008）（日本電気協会 原子力規格委員会 平成20年6月）では、事故時の中央制御室遮蔽のための点減衰核積分コード／散乱線計算コードとして、QADコード／G33コードが挙げられている。</li></ul>
--	---

V-5-13 計算機プログラム（解析コード）の概要・MAAP

## 目次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3

1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）MAAPについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

なお、MAAPコードの詳細は、東海第二発電所原子炉設置変更許可申請書添付書類十「追補2. III 重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて」に示している。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-1-7-3	中央制御室の居住性に関する説明書	Ver. 4
V-1-8-1	原子炉格納施設的设计条件に関する説明書	Ver. 4
V-1-8-2	原子炉格納施設の水素濃度低減性能に関する説明書	Ver. 4
V-1-1-6	ブローアウトパネル関連設備の設計方針	Ver. 4

## 2. 解析コードの概要

項目	コード名 MAAP
使用目的	シビアアクシデント解析 (シビアアクシデント時の格納容器圧力逃がし装置による水素排出性能解析及びソースターム解析)
開発機関	EPRI
開発時期	1983年
使用したバージョン	Ver. 4
コードの概要	<p>MAAP (Modular Accident Analysis Program) コードは、米国産業界が実施したIDCOR (Industry Degraded Core Rulemaking) プログラムにおいて、1980年代の初めに米国FAI社 (Fauske &amp; Associates, LLC.) によって開発されたコードであり、プログラムの完了に伴い、所有権が米国EPRI (Electric Power Research Institute) に移管され、EPRIを中心としたMUG (MAAP User's Group) のもとで保守及び改良が進められている。MAAPコードは、軽水炉のシビアアクシデント時の原子炉圧力容器、原子炉格納容器及び原子炉建屋内の熱水力/核分裂生成物 (FP) の放出・移行挙動を同時に一貫して解析できることに特徴があり、PRAやシビアアクシデントマネジメントの策定等において、米国を始め、世界的に広く利用されている。</p> <p>MAAPは、シビアアクシデントの事象進展の各段階を網羅し、炉心、原子炉圧力容器、原子炉格納容器内で起こると考えられる重要な事故時の物理現象をモデル化するとともに、工学的安全施設や炉心損傷防止対策あるいは格納容器破損防止対策で想定する各種の機器についてのモデルを備えている。また、FPに関する物理現象をモデル化しており、事故時に炉心溶融に伴って原子炉圧力容器や原子炉格納容器内に放出されるFPの挙動についても取り扱うことが可能である。このように、広範囲の物理現象を取り扱うことが可能な総合解析コードであり、シビアアクシデントで想定される種々の事故シーケンスについて、起因事象から安定した状態、あるいは過圧・過温により原子炉格納容器健全性が失われる状態まで計算が可能であることが特徴である。</p>

<p>検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)</p>	<p>MAAPコードはシビアアクシデントを評価するための総合システム解析コンピュータ・コードであり、原子炉圧力容器、再循環ポンプ等を含む原子炉冷却材圧力バウンダリ全体及び原子炉格納容器における水、水蒸気、水素、FP、熔融炉心等の挙動の評価並びに格納容器圧力逃がし装置による水素排出評価に使用している。</p> <p><b>【検証 (Verification)】</b></p> <p>本解析コードの検証の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 米国プラントのSBO事象に関するユーザーズマニュアルの例題を実施して、解析解が開発元の結果を再現していることを確認している。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></p> <p>本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 炉心損傷事象に関する国際的な標準問題であるTMI事故を模擬した解析結果が事故データと比較し、概ね一致するため、シビアアクシデント時の炉内の挙動や運転員操作を含む現象モデル全般が妥当であることを確認している。</li> <li>・ HDR炉における実機スケール水素混合実験に対する実機解析を実施し、実機データと概ね一致するため、原子炉格納容器内の伝熱、流動（水素ガス挙動を含む）に関する現象モデルが妥当であることを確認している。</li> <li>・ 熔融燃料あるいは融体金属とコンクリートの相互作用に関するACE実験及びSURC実験を模擬した実験解析を実施。熔融炉心の温度とコンクリート侵食深さの時間変化について、実験データと概ね一致している結果が得られることを確認している。</li> <li>・ シビアアクシデント時の全体挙動、原子炉格納容器内の水素ガスの挙動、熔融炉心とコンクリートの相互作用による水素発生の妥当性を確認しているため、MAAPコードは水素濃度評価へ適用できる。</li> <li>・ 米国NRCで整備されたNUREG-1465における原子炉格納容器内ソースタームとMAAPコードにおける解析結果の比較を行い、NUREG-1465のソースタームとほぼ同等であることを確認しているため、MAAPコードはソースターム評価へ適用できる。</li> </ul>
--	---

V-5-14 計算機プログラム（解析コード）の概要・GOTHIC

## 目次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3

1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）GOTHICについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-1-1-8-4	溢水影響に関する評価	Ver. 8.1
V-1-8-2	原子炉格納施設の水素濃度低減性能に関する説明書	Ver. 8.1

## 2. 解析コードの概要

項目	コード名 GOTHIC
使用目的	蒸気拡散解析 (高エネルギー配管破損時の蒸気拡散影響評価) シビアアクシデント解析 (シビアアクシデント時の原子炉建屋原子炉棟内における水素分布評価及び水素処理設備による水素濃度低減性能解析)
開発機関	Numerical Application Inc. (販売元はEPRI)
開発時期	1989年
使用したバージョン	Ver. 8.1
コードの概要	<p>Electric Power Research Insuituteにより開発された汎用熱流体解析コードである。本解析コードは、気相、液体連続相及び液体分散相(液滴)の3相について、各々、質量、運動量及びエネルギーの3保存式を解く、完全3流体(9保存式)解析コードである。</p> <p>各相間の質量、運動量及びエネルギーの移動は、構成式で表され、これにより、凝縮・沸騰現象や、凝縮した液体によって随伴される気相の流れ等、複雑な混相流現象を模擬することができる。また、ファン・水素再結合器等の機器モデルが組み込まれており、これらの機器の作動及び制御を模擬できる。</p> <p>このような基本構成により、原子炉建物内における気液混相の熱流動を取り扱うことができる。GOTHICは、主に米国において設計基準事故を想定した原子炉格納容器の設計や環境条件、シビアアクシデント時の水素分布解析などに豊富な使用実績がある。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>今回の解析は、高エネルギー配管破損時の蒸気拡散影響評価及びシビアアクシデント時の原子炉建屋原子炉棟内における静的触媒式水素再結合装置の水素濃度低減性能評価に使用している。</p> <p><b>【検証 (Verification)】</b></p> <p>本解析コードの検証の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・コードのサンプル問題を実行し、ユーザーマニュアルに示される同一問題の結果と比較を行い、解析解がそれを再現していることを確認している。</li> <li>・1次元熱伝導の理論解に対する解析解が再現していることを確認している。</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"><li>・本解析コードの適用制限について、蒸気表・各種相関式・物性範囲及び数値計算手法上の制約に対し問題ないことを確認している。</li></ul> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></p> <p>本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"><li>・実機プラントに対する上記の目的に対しては、検証内容が事故時の状況、機器設備の作動状況、物理現象の模擬などに対し適用可能な範囲にあることを確認している。</li><li>・静的触媒式水素再結合装置作動時に見られる重要な物理現象の個別効果及び、それらを重ね合わせた総合効果の再現性を確認している。</li><li>・NUPEC試験など、実機解析の再現能力、適用範囲と不確かさを考慮したうえで、上記目的に対する保守性を有している。</li></ul>
--	--

V-5-15 計算機プログラム（解析コード）の概要・GRIMP 2

## 目次

1.	はじめに	1
1.1	使用状況一覧	2
2.	解析コードの概要	3
3.	GRIMP2の解析手法について	4
3.1	一般事項	4
3.2	解析コードの特徴	4
3.3	解析手法	4
3.4	解析フローチャート	6
3.5	検証(Verification)及び妥当性確認(Validation)	7

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）GRIMP2について説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

### 1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-2-1	原子炉建屋の地震応答計算書	Ver. 2.5
V-2-11-2-13	タービン建屋の耐震性についての計算書	Ver. 2.5

## 2. 解析コードの概要

項目	コード名 GRIMP2
使用目的	地震応答解析モデルにおける基礎底面地盤ばねの算定
開発機関	清水建設株式会社
開発時期	1988年
使用したバージョン	Ver. 2.5
コードの概要	GRIMP2 (以下「本解析コード」という。) は、振動アドミッタンス理論により、基礎の水平、上下及び回転に対する地盤の複素ばね剛性を振動数領域で計算するプログラムである。なお、本解析コードは、インハウスコードである。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>GRIMP2は、原子炉建屋及びタービン建屋の水平方向及び鉛直方向の地震応答解析における質点系地盤連成モデルの基礎底面地盤ばねを評価するために使用している。</p> <p><b>【検証(Verification)】</b> 本解析コードの検証の内容は以下の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>GRIMP2を用いて評価した基礎底面地盤の水平ばね、鉛直ばね及び回転ばねが文献*と良い一致を示すことを確認している。</li> <li>動作環境を満足する計算機にインストールして使用している。</li> </ul> <p>注記 *：日本建築学会，入門・建物と地盤との動的相互作用，技報堂出版，pp. 337-350，1996</p> <p><b>【妥当性確認(Validation)】</b> 本解析コードの妥当性確認の内容は以下の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>検証の内容のとおり，基礎底面地盤の水平ばね，鉛直ばね及び回転ばねについて検証していることから，解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。</li> <li>原子炉建屋及びタービン建屋の地震応答解析における底面地盤ばねの算定にGRIMP2を使用することは，本解析の適用範囲に対して検証しており，妥当である。</li> </ul>

### 3. GRIMP2の解析手法について

#### 3.1 一般事項

GRIMP2は、振動アドミッタンス理論により、基礎の水平、上下及び回転に対する地盤の複素ばね剛性を振動数領域で計算するプログラムである。GRIMP2は、原子炉建屋の水平方向及び鉛直方向の地震応答解析における質点系地盤連成モデルの基礎底面地盤ばねを評価するために使用している。

#### 3.2 解析コードの特徴

GRIMP2の主な特徴を以下に示す。

- ・点加振解に基づき、基礎下の応力分布を仮定した場合の円形基礎及び矩形基礎の底面地盤ばねを求めることができる。
- ・基礎分割法を用いて、点加振解及び等分布加振解に基づき、基礎下の変位分布を仮定した場合の矩形基礎の底面地盤ばねを求めることができる。

#### 3.3 解析手法

一般に地盤上の基礎面に動的な力  $Pe^{i\omega t}$  を加えた場合、それに応じる変位  $w$  は以下の式で表せる。

$$w = \frac{Pe^{i\omega t}}{K_f} \{g_1(\omega) - ig_2(\omega)\} \quad (3.3-1)$$

ここで、

$K_f$  : 静的剛性

この比例係数  $\{g_1(\omega) - ig_2(\omega)\}$  を田治見は振動アドミッタンスと名付けた。

ここで、基礎下の応力分布を仮定し、点加振解を基礎面について積分することで、加振力と基礎の代表変位を用いて基礎の動的地盤ばねを評価できる。

一方で、基礎下の応力分布を仮定せず変位分布を仮定する場合には、図3-1に示すように基礎を複数の要素に分割し、各要素の加振力と変位の関係から基礎の動的地盤ばねを評価できる。

要素  $i$  に荷重  $P_i$  を加えた時の要素  $j$  の変位を  $u_j$  とすると次のような関係が得られる。

$$\{u_j\} = [d_{ij}] \{P_i\} \quad (3.3-2)$$

ここで、 $[d_{ij}]$  は、地盤の柔性マトリクスで、非対角項については点加振解から算定する。また、対角項については、加振点と変位の算定点が一致することから点加振解は発散するため、要素内に一様な応力が作用したときの中心点変位を用いて算定する。

柔性マトリクス  $[d_{ij}]$  の逆マトリクス  $[K_{ij}]$  は剛性マトリクスとなるため、次のような関係が得られる。

$$\{P_i\} = [K_{ij}] \{u_j\} \quad (3.3-3)$$

各要素の変位  $\{u_j\}$  を仮定し、(3.2-3)式に代入すると各要素の反力  $\{P_i\}$  が得られ、反力の合計と基礎の変位を用いて基礎の動的地盤ばねを評価できる。

なお、具体的な数値計算法は吉田の論文\*1に基づいている。

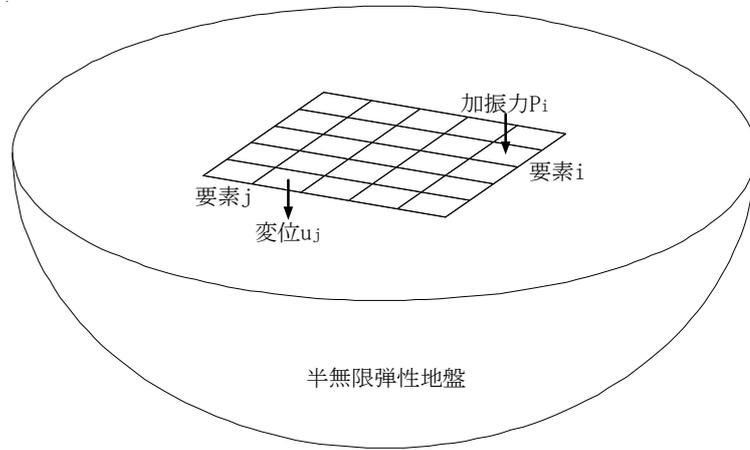


図3-1 基礎の分割

---

注記 \*1：吉田一博：半無限弾性地盤上の矩形基礎の各種の動的地盤ばねについて，日本建築学会構造系論文集，第457号，pp. 19-28，1994

### 3.4 解析フローチャート

解析フローチャートを図 3-2 に示す。

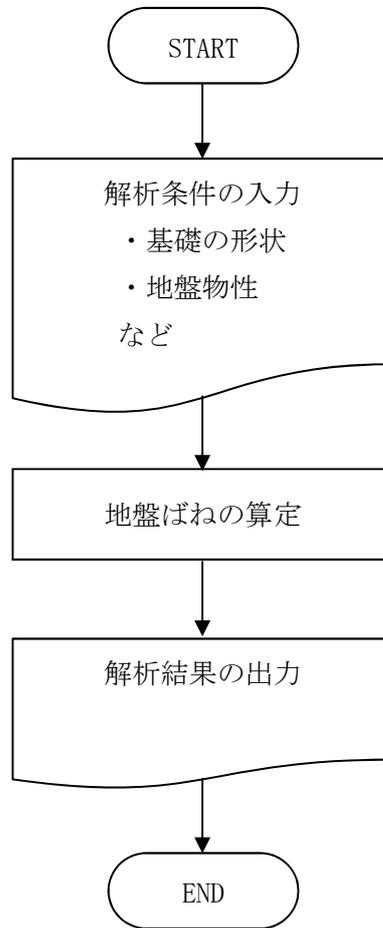


図3-2 解析フローチャート

### 3.5 検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation)

#### 3.5.1 文献との比較による検証

以下に示す条件について地盤ばねを評価し、文献\*2との比較を行う。

- ・地盤のポアソン比は0.45，材料減衰定数は0.00とする。
- ・基礎は剛とし，分割数は20×20とする。

地盤ばねの比較結果を図3-3に示す。

図より，GRIMP2の結果は文献\*2による計算結果と良い一致を示しており，GRIMP2が底面地盤の水平ばね，鉛直ばね及び回転ばねを正しく評価していることが確認できる。

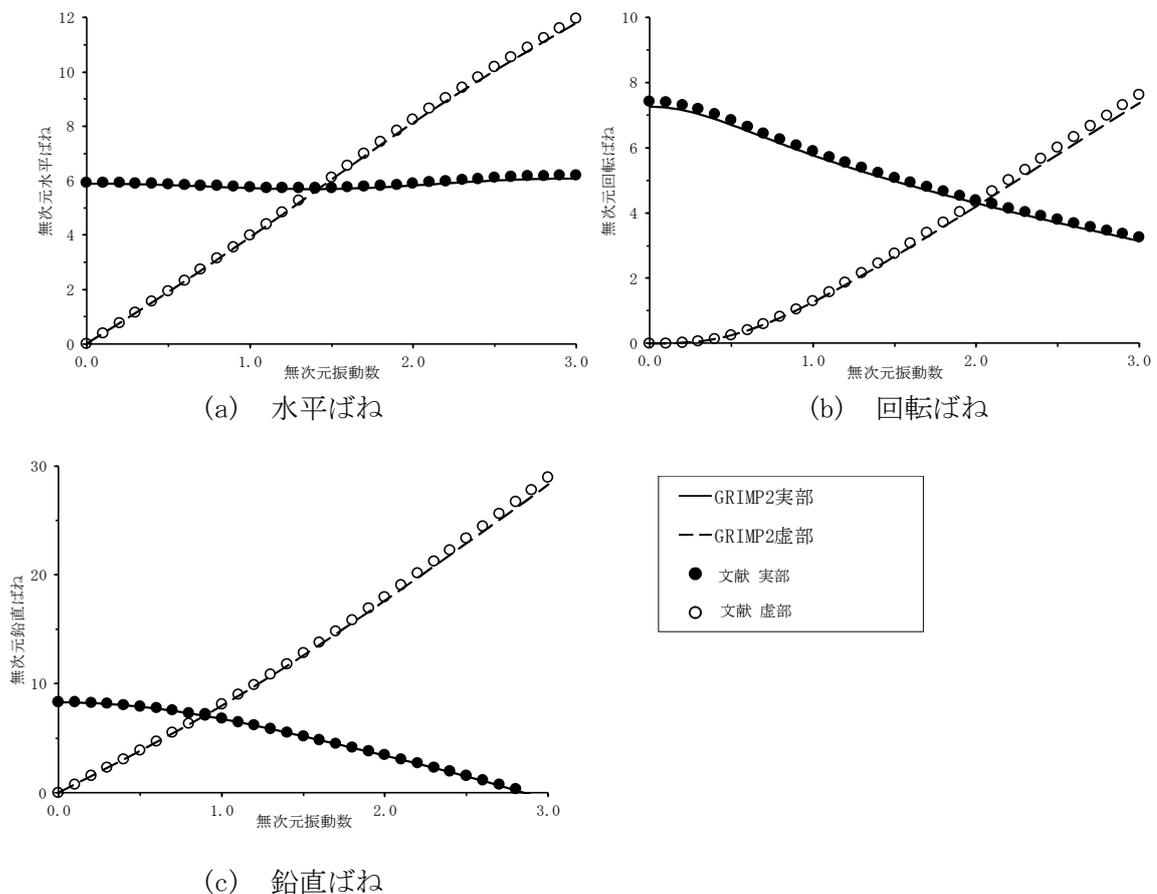


図3-3 解析結果の比較

#### 3.5.1 使用内容に対する妥当性

原子炉建屋及びタービン建屋の地震応答解析における底面地盤ばねの算定にGRIMP2を使用することは，次のとおり，本解析の適用範囲に対して検証しており，妥当である。

- ・検証の内容のとおり，底面地盤の水平ばね，鉛直ばね及び回転ばねについて検証していることから，解析の目的に照らして今回の解析に使用することは妥当である。

注記 \*2：日本建築学会，入門・建物と地盤との動的相互作用，技報堂出版，pp. 337-350，1996



V-5-16 計算機プログラム（解析コード）の概要・NVK463

## 目次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3
3. NVK463の解析手法について	4
3.1 一般事項	4
3.2 解析コードの特徴	4
3.3 解析手法	4
3.4 解析フローチャート	5
3.5 検証(Verification)及び妥当性確認(Validation)	6

1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）NVK463について説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-2-1	原子炉建屋の地震応答計算書	Ver. 1.0
V-2-11-2-13	タービン建屋の耐震性についての計算書	Ver. 1.0

## 2. 解析コードの概要

項目	コード名 NVK463
使用目的	水平方向の地震応答解析モデルにおける側面地盤ばねの算定
開発機関	清水建設株式会社
開発時期	1985年
使用したバージョン	Ver. 1.0
コードの概要	NVK463 (以下「本解析コード」という。) は, Novakの論文*に基づき, 水平, 上下, 回転及びねじれに対する地盤の複素ばね剛性を振動数領域で計算するプログラムである。なお, 本解析コードは, インハウスコードである。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>NVK463は, 原子炉建屋及びタービン建屋の水平方向の地震応答解析における質点系地盤連成モデルの建屋埋込み部分の側面地盤ばねを評価するために使用している。</p> <p>【検証(Verification)】</p> <p>本解析コードの検証の内容は以下の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・NVK463を用いて評価した建屋側面地盤の水平ばねがNovakの論文の結果とよく一致することを確認している。</li> <li>・動作環境を満足する計算機にインストールして使用している。</li> </ul> <p>【妥当性確認(Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認の内容は以下の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・検証の内容のとおり, 建屋側面地盤の水平ばねについて検証していることから, 解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。</li> <li>・原子炉建屋及びタービン建屋の地震応答解析における側面地盤ばねの算定にNVK463を使用することは, 本解析の適用範囲に対して検証しており, 妥当である。</li> </ul>

注記 \* : Milos Novak et al. : Dynamic Soil Reaction for Plane Strain Case, Proc. ASCE, Vol.104, No. EM4 pp. 953-959, 1978

### 3. NVK463の解析手法について

#### 3.1 一般事項

NVK463は、Novakの論文に基づき、水平、上下、回転及びねじれに対する地盤の複素ばね剛性を振動数領域で計算するプログラムである。NVK463は、原子炉建屋の水平方向の地震応答解析における質点系地盤連成モデルの建屋埋込み部分の側面地盤ばねを評価するために使用している。

#### 3.2 解析コードの特徴

NVK463の主な特徴を以下に示す。

- ・平面ひずみを仮定した全無限地盤にある円形基礎の側面地盤ばねを算定できる。
- ・円形基礎は剛体として扱う。

#### 3.3 解析手法

円形基礎の側面と接する地盤に対する水平、上下、回転及びねじれ加振した場合の力-変形関係から建屋の側面地盤ばねを算定する方法である。

今回評価対象とした建屋側面地盤の水平ばねは、0次と1次の変形ベッセル関数を用いて、以下の式で評価される。

$$K_u^j = -\pi H_j G_j a_0^2 \frac{4K_1(b_0^*) K_1(a_0^*) + a_0^* K_1(b_0^*) K_0(a_0^*) + b_0^* K_0(b_0^*) K_1(a_0^*)}{b_0^* K_0(b_0^*) K_1(a_0^*) + a_0^* K_1(b_0^*) K_0(a_0^*) + b_0^* a_0^* K_0(b_0^*) K_0(a_0^*)} \quad (3.3-1)$$

ここで、

$\pi$  : 円周率

$H_j$  : 建物質点 j の支配高さ

$G_j$  : 建物質点 j の支配高さにおける地下部外壁に接する地盤のせん断弾性係数

$a_0 = \omega r_0 / V_s$  (等価円置換の無次元振動数)

$r_0 = \sqrt{B_x B_y / \pi}$  (等価円半径)  $\omega$  : 円振動数

$V_s$  : 地下部外壁に接する地盤のS波速度

$B_x, B_y$  : 建物の辺長

$K_0(\quad), K_1(\quad)$  : それぞれ0次と1次の変形ベッセル関数

$$a_0^* = \frac{a_0}{\sqrt{1 + i \cdot 2h_j}} \cdot i, \quad b_0^* = a_0^* / \eta_j, \quad \eta_j = \sqrt{2(1 - \nu_j) / (1 - 2\nu_j)}$$

$h_j, \nu_j$  : 地下部外壁に接する地盤のそれぞれ減衰定数とポアソン比

### 3.4 解析フローチャート

解析フローチャートを図3-1に示す。

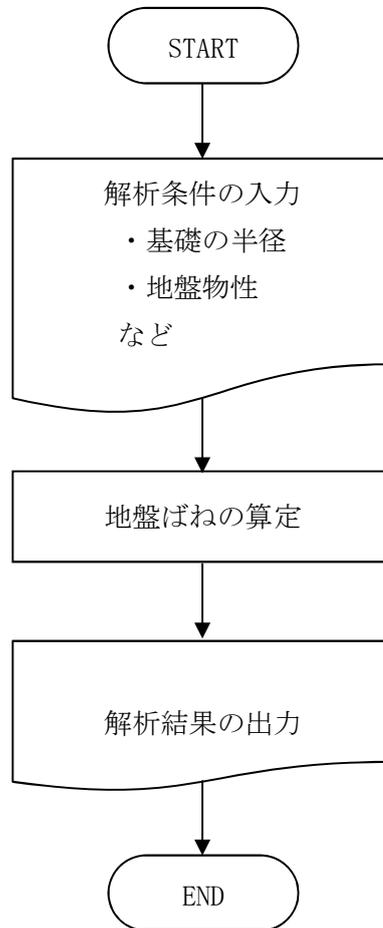


図3-1 解析フローチャート

### 3.5 検証(Verification)及び妥当性確認(Validation)

#### 3.5.1 文献との比較による検証

Novakの論文に記載されている水平ばねの評価結果を再現し、Novakの論文に記載されている結果との比較を行う。

NVK463での解析条件は以下とする。

- 地盤のポアソン比は0.25, 0.40, 0.499の3ケースとする。
- 地盤の材料減衰定数は0.00, 0.05, 0.10の3ケースとする。

水平ばねの比較結果を図3-2に示す。

図より、NVK463の結果はNovakの論文による結果と良い一致を示しており、NVK463が建屋側面地盤の水平ばねを正しく評価していることが確認できる。

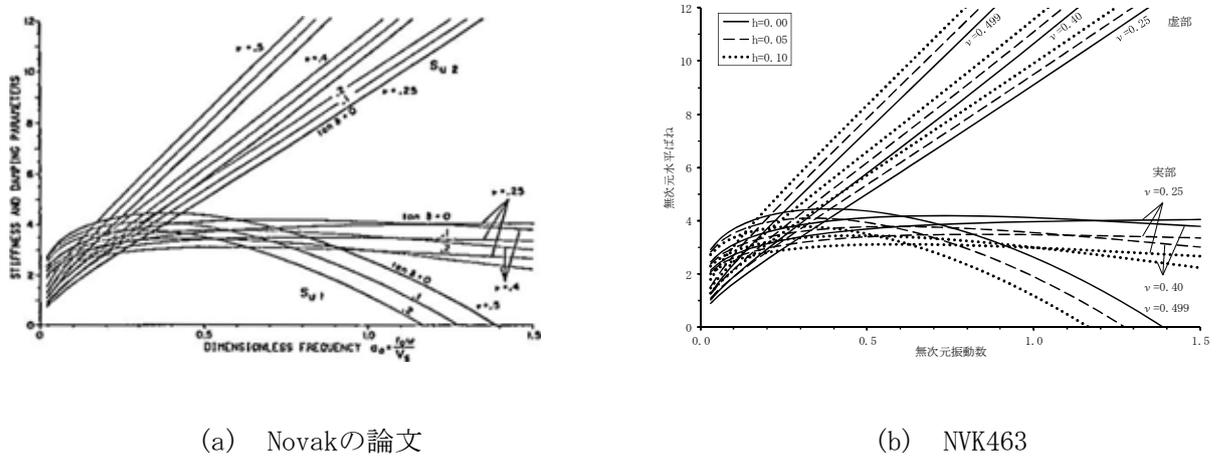


図3-2 解析結果の比較 (水平ばね)

#### 3.5.2 使用内容に対する妥当性

原子炉建屋の地震応答解析における側面地盤ばねの算定にNVK463を使用することは、次のとおり、本解析の適用範囲に対して検証しており、妥当である。

- 検証の内容のとおり、側面地盤の水平ばねの算定について検証していることから、解析の目的に照らして今回の解析に使用することは妥当である。

V-5-17 計算機プログラム（解析コード）の概要・KSHAKE

## 目次

1.	はじめに	1
1.1	使用状況一覧	2
2.	解析コードの概要	3
3.	KSHAKEの解析手法について	4
3.1	一般事項	4
3.2	解析コードの特徴	4
3.3	解析手法	4
3.4	解析フローチャート	6
3.5	検証(Verification)及び妥当性確認(Validation)	7

1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）KSHAKEについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-2-1	原子炉建屋の地震応答計算書	Ver. 2
V-2-2-2-1	原子炉建屋地下排水設備設置位置の地盤応答	Ver. 2
V-2-2-10	緊急時対策所建屋の地震応答計算書	Ver. 2
V-2-2-18	格納容器圧力逃がし装置格納槽の地震応答計算書	Ver. 2
V-2-11-2-13	タービン建屋の耐震性についての計算書	Ver. 2
V-2-11-2-14	サービス建屋の耐震性についての計算書	Ver. 2

## 2. 解析コードの概要

項目	コード名 KSHAKE
使用目的	入力地震動の策定
開発機関	清水建設株式会社
開発時期	1983年
使用したバージョン	Ver. 2
コードの概要	<p>KSHAKE（以下「本解析コード」という。）は、米国カリフォルニア大学から発表されたSHAKEを基本に開発したプログラムで、一次元重複反射理論に基づく地盤の伝達関数及び時刻歴応答波形を計算するプログラムである。なお、本解析コードは、インハウスコードである。</p>
検証（Verification）及び 妥当性確認（Validation）	<p>KSHAKE は、原子炉建屋、<b>原子炉建屋地下排水設備</b>、緊急時対策所建屋、格納容器圧力逃がし装置格納槽、タービン建屋及びサービス建屋の地震応答解析における入力地震動の策定において、基準地震動 <math>S_d</math> 及び弾性設計用地震動 <math>S_{d1}</math> に対する地盤の応答を評価するために使用している。</p> <p><b>【検証(Verification)】</b>          本解析コードの検証の内容は以下の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ KSHAKEを用いて評価した弾性地盤の増幅特性が理論解と一致することを確認している。</li> <li>・ 既工事計画において実績のある別コード（microSHAKE）による解析結果と一致することを確認している。</li> <li>・ 動作環境を満足する計算機にインストールして使用している。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認(Validation)】</b>          本解析コードの妥当性確認の内容は以下の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 検証の内容のとおり、地盤の応答解析について検証していることから、解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。</li> <li>・ 原子炉建屋、緊急時対策所建屋、格納容器圧力逃がし装置格納槽、タービン建屋及びサービス建屋の地震応答解析における入力地震動の策定にKSHAKEを使用することは、本解析の適用範囲に対して検証しており、妥当である。</li> </ul>

### 3. KSHAKEの解析手法について

#### 3.1 一般事項

KSHAKEは、米国カリフォルニア大学バークレイ校でSchnabelとLysmerらにより開発されたSHAKEを基本に開発したプログラムである。KSHAKEは、水平方向に半無限に広がりのある、均質、粘弾性のいくつかの層からなる土層でのせん断波の縦方向伝播に対する応答計算を行う。

#### 3.2 解析コードの特徴

KSHAKEの主な特徴を以下に示す。

- ・一次元重複反射理論に基づき、多層地盤の地震応答解析を行う。
- ・地盤の非線形性は、ひずみ依存特性として等価線形法により考慮する。
- ・鉛直動については、S波速度 $V_s$ をP波速度 $V_p$ として定義することで対応できる。

#### 3.3 解析手法

図3-1に示す線形粘弾性体を通るせん断波の伝播は、水平変位 $u=u(x, t)$ による以下の式で表される。

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \cdot \partial t} \quad (3.3-1)$$

ここで、

- $\rho$  : 単位体積質量
- $G$  : せん断弾性係数
- $\eta$  : 粘性係数

振動数 $\omega$  に対し、調和振動は次のように表せる。

$$u(x, t) = U(x) \cdot e^{i\omega t} \quad (3.3-2)$$

(3.3-2)式は、振動数 $\omega$  の調和振動に対する波動方程式の解として与えられる。

$$u(x, t) = E \cdot e^{i(kx + \omega t)} + F \cdot e^{-i(kx + \omega t)} \quad (3.3-3)$$

ここで、右辺第1項は上昇波、第2項は下降波を示している。また、 $k$ は複素波数と呼ばれ、下式を満足するものである。

$$k^2 = \frac{\rho \omega^2}{G + i\omega \eta} = \frac{\rho \omega^2}{G^*} \quad (3.3-4)$$

ここで、任意の $m$ 層と $(m+1)$ 層の変位とせん断応力の連続性を考え、さらに自由面では $\tau = 0$ の境界条件を導入して、次のような関係が得られる。

$$E_m = e_m(\omega) E_1 \quad (3.3-5)$$

$$F_m = f_m(\omega) F_1 \quad (3.3-6)$$

伝達関数 $e_m$ 及び $f_m$ は、 $E_1=F_1=1$ に対する倍率であり、 $E_1=F_1=1$ を上式に代入することで求まる。

他の伝達関数は、 $e_m$ 及び $f_m$ から得られる。 $n$ 層及び $m$ 層表面での変位を関係付ける伝達関数 $A_{n,m}$ を次のように定義する。

$$A_{n,m}(\omega) = \frac{u_m}{u_n} = \frac{e_m(\omega) + f_m(\omega)}{e_n(\omega) + f_n(\omega)} \quad (3.3-7)$$

これらの式より、伝達関数 $A(\omega)$ は、系のいかなる2つの層の間においても定めることができる。

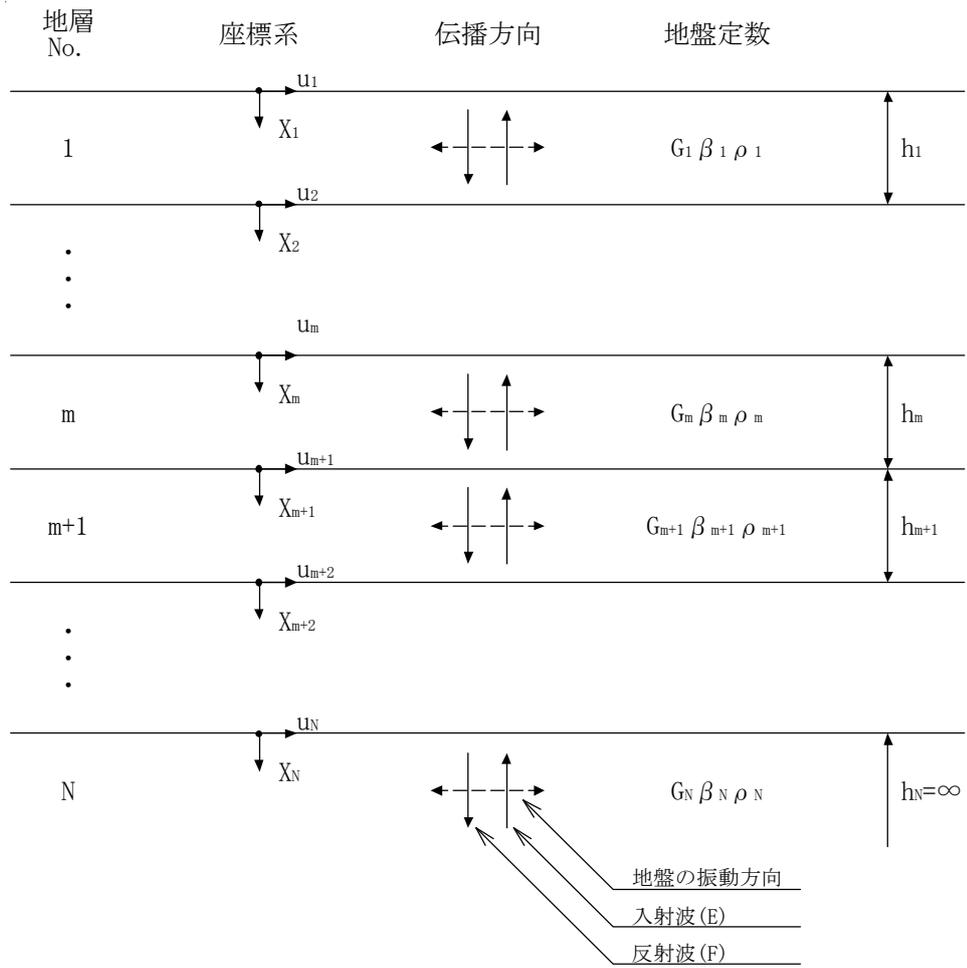


図3-1 1次元地盤モデル

### 3.4 解析フローチャート

解析フローチャートを図3-2に示す。

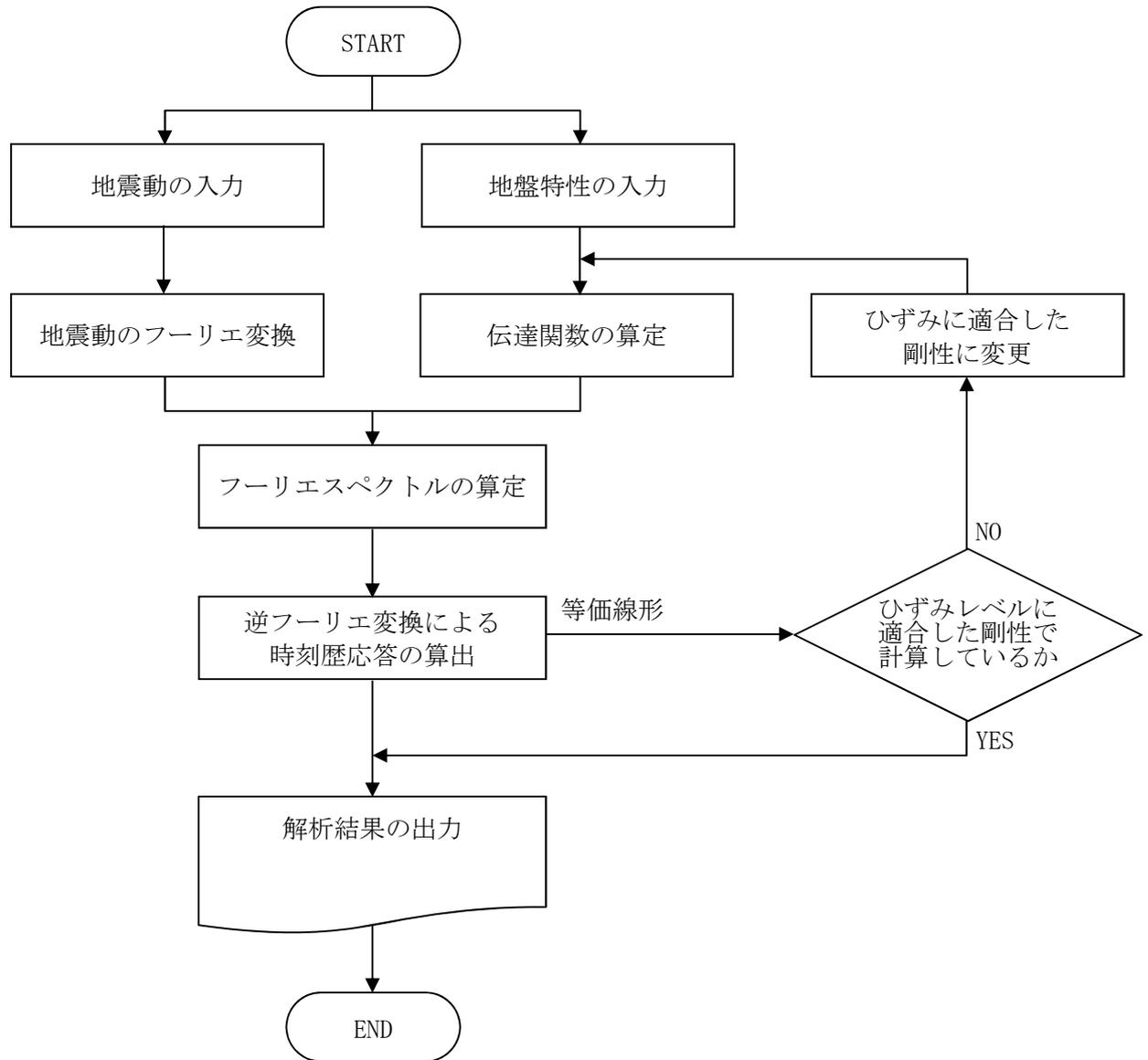


図3-2 解析フローチャート

### 3.5 検証(Verification)及び妥当性確認(Validation)

#### 3.5.1 理論解との比較による検証

2層地盤モデルについて、一次元重複反射理論に基づく伝達関数の理論解との比較を行う。比較は第2層上面のはぎとり波(2E<sub>2</sub>)に対する地表面波(E<sub>1</sub>+F<sub>1</sub>)の伝達関数とし、理論解は以下の式で表される。

$$\frac{e_1(\omega) + f_1(\omega)}{2e_2(\omega)} = \frac{1}{\cosh(ikh) + \alpha \sinh(ikh)} \quad (3.5-1)$$

ただし、

$$k = \sqrt{\frac{\rho_1}{G_1^*}} \omega$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\rho_1 G_1^*}{\rho_2 G_2^*}}$$

$$G_1^* = \rho_1 V_{S1}^2 (1 - 2\beta_1^2 + 2i\beta_1 \sqrt{1 - \beta_1^2})$$

$$G_2^* = \rho_2 V_{S2}^2 (1 - 2\beta_2^2 + 2i\beta_2 \sqrt{1 - \beta_2^2})$$

ここで、

- $\rho_1, \rho_2$  : 第1層, 第2層の単位体積質量
- $V_{S1}, V_{S2}$  : 第1層, 第2層のせん断波速度
- $h$  : 第1層の層厚
- $\beta_1, \beta_2$  : 第1層, 第2層の減衰定数

検討地盤モデルを図3-3に、理論解との伝達関数の比較結果を図3-4に示す。

図より、KSHAKEの結果は理論解と一致しており、KSHAKEが伝達関数を正しく評価していることが確認できる。

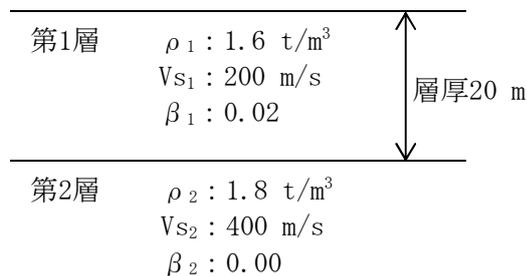


図3-3 検討地盤モデル

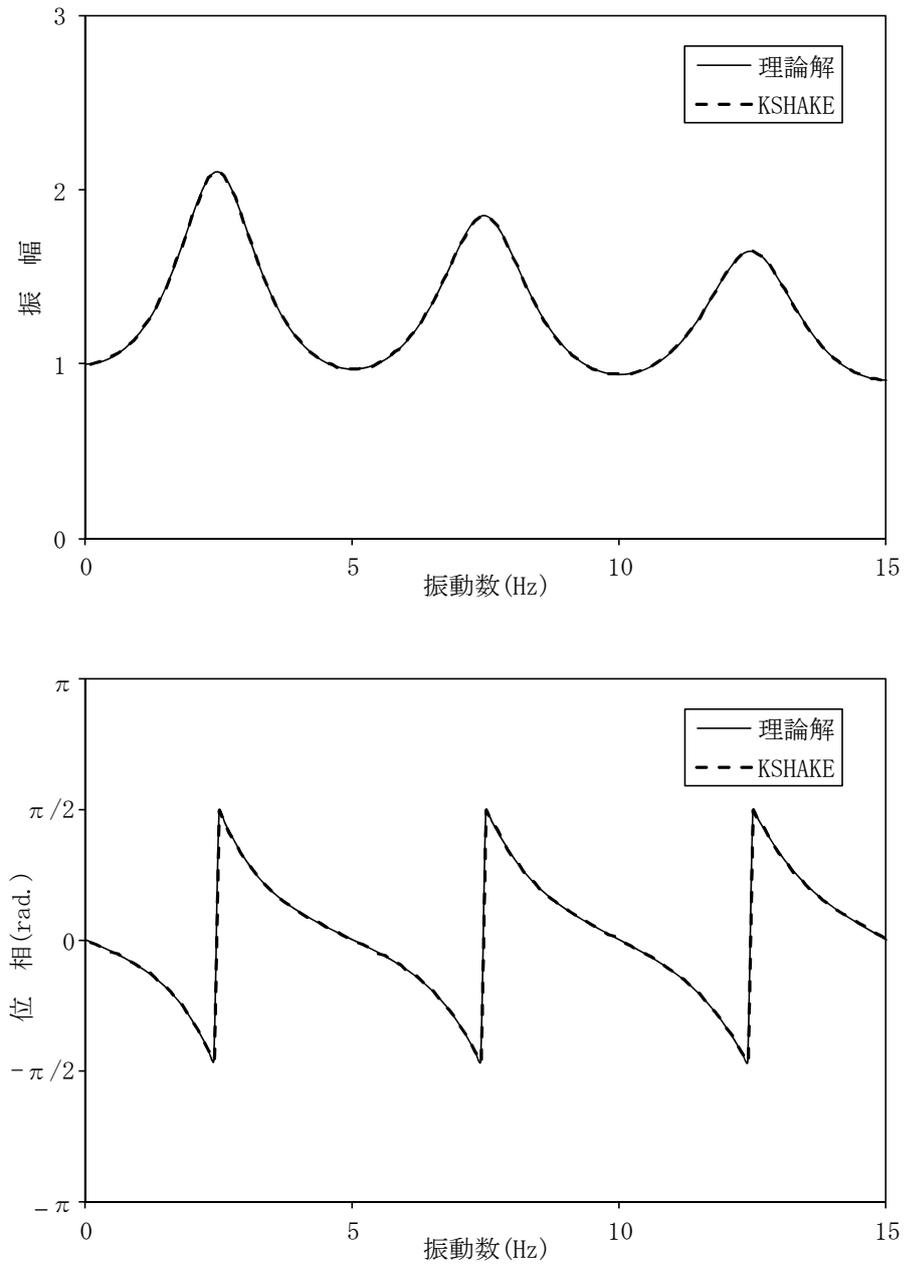


図3-4 理論解との伝達関数の比較

### 3.5.2 他コードとの比較による検証

最下層を半無限体とした3層地盤モデルについて、市販されている1次元地盤の等価線形解析コード「microSHAKE/3D ver. 2.3.0.327」（株式会社地震工学研究所）との比較を行う。なお、「microSHAKE ver. 3.1.0」は、川内原子力発電所第1号機の工事計画で実績があり、比較には異なるバージョンを使用するが、バージョンの差異により今回使用する解析機能に影響が生じていないことを確認している。

検討地盤モデルを表3-1に、ひずみ依存特性を図3-5に、検討に用いる入力地震動(2E波)を図3-6に、解析結果の比較を図3-7に示す。

図より、KSHAKEの結果はmicroSHAKEによる結果と一致していることが確認できる。

表3-1 検討地盤モデル

標高 (m)	区 分	層厚 (m)	単位体積 質 量 (t/m <sup>3</sup> )	せん断波 速 度 (m/s)	減衰定数
0.0	第1層	2.0	1.6	200	0.02
		2.0			
		2.0			
		2.0			
		2.0			
		2.0			
		2.0			
		2.0			
		2.0			
		2.0			
-20.0	第2層	5.0	1.8	400	0.02
		5.0			
		5.0			
		5.0			
		5.0			
		5.0			
		5.0			
		5.0			
		5.0			
		5.0			
-70.0	基 盤	—	2.0	700	0.00

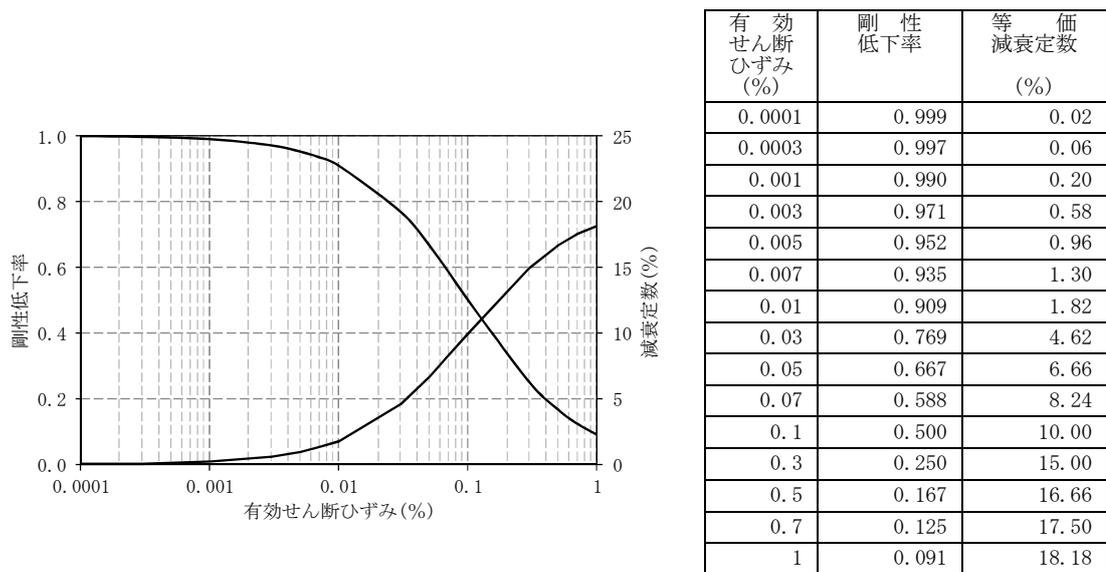


図3-5 (1/2) ひずみ依存特性 (第1層)

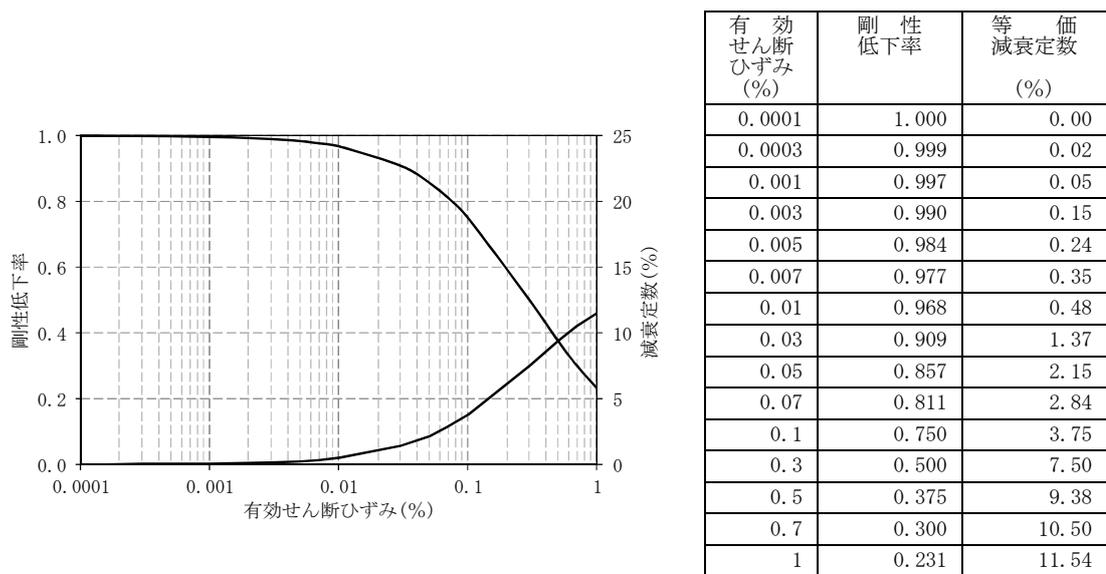


図3-5 (2/2) ひずみ依存特性 (第2層)

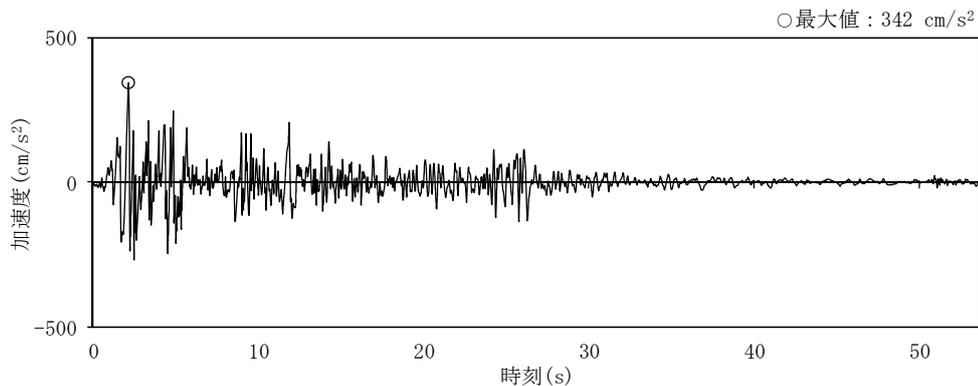
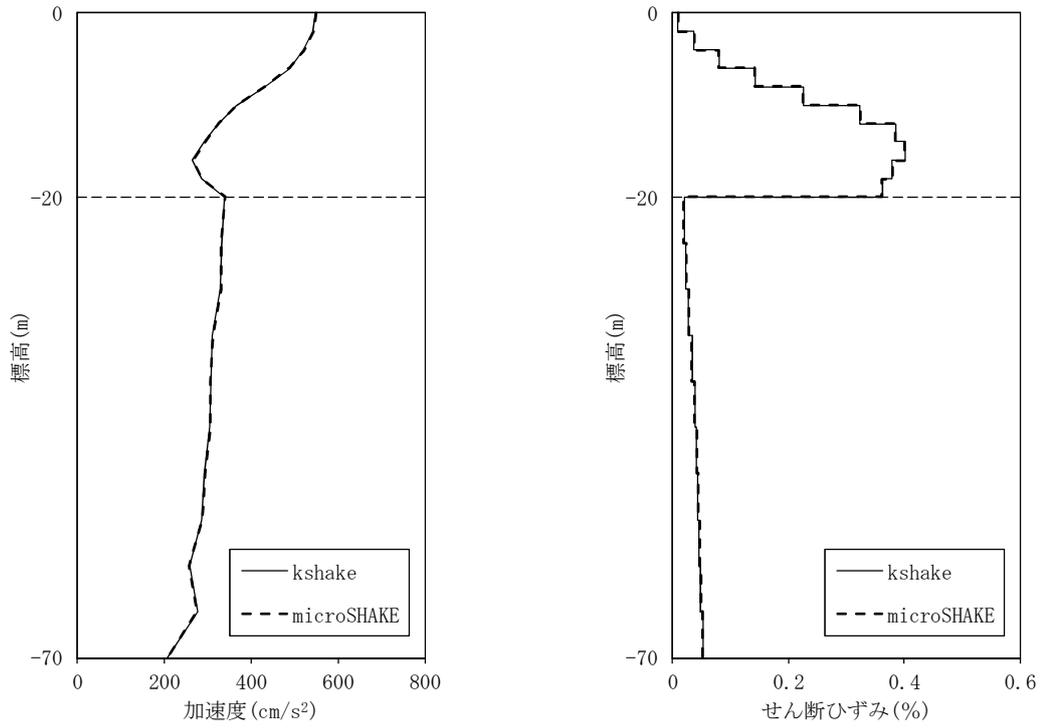


図3-6 入力地震動(2E波)



(a) 加速度 (b) 有効せん断ひずみ

図3-7 (1/2) 解析結果の比較 (最大応答分布)

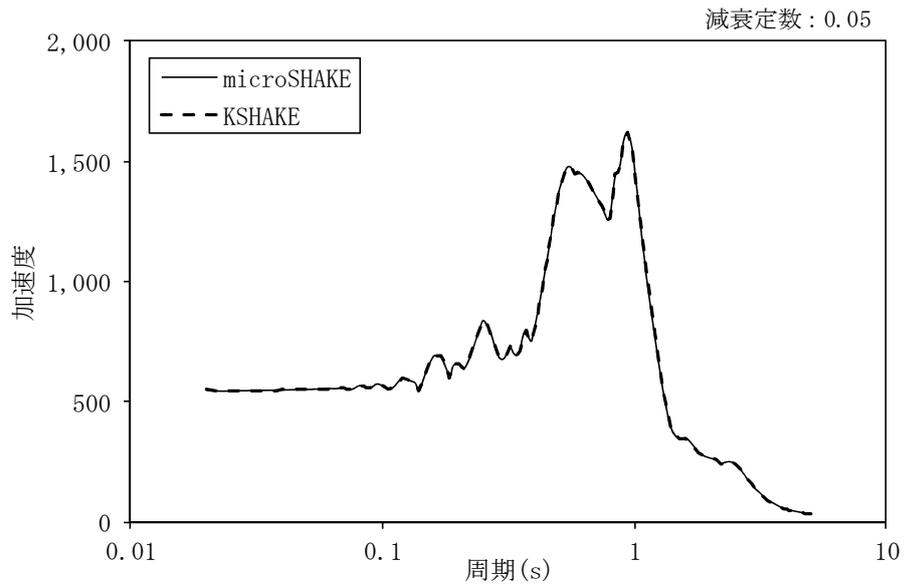


図3-7 (2/2) 解析結果の比較 (地表面加速度応答スペクトル)

### 3.5.3 使用内容に対する妥当性

原子炉建屋の地震応答解析における入力地震動の策定にKSHAKEを使用することは、次のとおり、本解析の適用範囲に対して検証しており、妥当である。

- ・検証の内容のとおり、地盤の応答解析について検証していることから、解析の目的に照らして今回の解析に使用することは妥当である。
- ・評価地盤を水平成層と仮定していることから、一次元重複反射理論の適用範囲である。

V-5-18 計算機プログラム（解析コード）の概要・DAC3N

## 目次

1.	はじめに	1
1.1	使用状況一覧	2
2.	解析コードの概要	3
3.	DAC3Nの解析手法について	4
3.1	一般事項	4
3.2	解析コードの特徴	4
3.3	解析手法	4
3.4	解析フローチャート	6
3.5	検証(Verification)及び妥当性確認(Validation)	7

1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）DAC3Nについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

### 1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-2-1	原子炉建屋の地震応答計算書	V97
V-2-11-2-13	タービン建屋の耐震性についての計算書	V97

## 2. 解析コードの概要

項目	コード名 DAC3N
使用目的	固有値解析及び弾塑性応答解析
開発機関	清水建設株式会社
開発時期	1997年
使用したバージョン	V97
コードの概要	DAC3N (以下「本解析コード」という。) は、ばね要素やはり要素などでモデル化された建屋地盤連成系モデルの固有値解析及び地震応答解析を行うプログラムである。なお、本解析コードは、インハウスコードである。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>DAC3Nは、原子炉建屋及びタービン建屋について、基準地震動 <math>S_s</math> 及び弾性設計用地震動 <math>S_d</math> に対する建屋の応答を評価するために使用している。</p> <p><b>【検証(Verification)】</b> 本解析コードの検証の内容は以下の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・既工事計画において実績のある別コード (TDAPⅢ) による解析結果と一致することを確認している。</li> <li>・動作環境を満足する計算機にインストールして使用している。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認(Validation)】</b> 本解析コードの妥当性確認の内容は以下の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・検証の内容のとおり、弾塑性を考慮した多質点系の地震応答について検証していることから、解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。</li> <li>・原子炉建屋及びタービン建屋の地震応答解析にDAC3Nを使用することは本解析の適用範囲に対して検証しており、妥当である。</li> </ul>

### 3. DAC3Nの解析手法について

#### 3.1 一般事項

DAC3Nは、清水建設株式会社が開発したプログラムであり、時間領域における構造解析用解析コードである。DAC3Nは、原子炉建屋の水平方向及び鉛直方向の地震応答解析における質点系地盤連成モデルの応答を評価するために使用している。

#### 3.2 解析コードの特徴

DAC3Nの主な特徴を以下に示す。

- ばね要素やはり要素などでモデル化した、多質点系の応答解析を行う。
- 質量は、集中質量として評価する。
- 要素に非線形特性を設定し、非線形解析を行うことができる。
- ひずみエネルギー比例型及びレーリー減衰型の減衰を用いることができる。
- 固有値解析は、サブスペース法による。
- 応答解析は、時間領域の直接積分法による。

#### 3.3 解析手法

##### 3.3.1 固有値解析

多自由度系の運動方程式は以下の式で表される。

$$[M] \{\ddot{u}\} + [C] \{\dot{u}\} + [K] \{u\} = \{f\} \quad (3.3-1)$$

ここで、

[M]	: 質量マトリクス
[C]	: 減衰マトリクス
[K]	: 剛性マトリクス
{ $\ddot{u}$ }	: 加速度ベクトル
{ $\dot{u}$ }	: 速度ベクトル
{u}	: 変位ベクトル
{f}	: 外力ベクトル

(3.3-1)式の外力ベクトルを{0}とし、減衰項を除いた自由振動を表す方程式は以下の式で表される。

$$[M] \{\ddot{u}\} + [K] \{u\} = \{0\} \quad (3.3-2)$$

(3.3-2)式の変位{u}に調和振動を仮定すると次のような関係が得られる。

$$(-\omega_r^2 [M] + [K]) \{u_r\} = \{0\} \quad (3.3-3)$$

一般に、{ $u_r$ } = {0} 以外の(3.3-3)式を満足する $\omega_r$ 及び{ $u_r$ }を求めることを固有値問題と呼び、 $\omega_r$ を固有値、{ $u_r$ }を固有ベクトルという。

### 3.3.2 ひずみエネルギー比例型減衰

建屋の減衰は、各次の振動モードにおける部材のひずみエネルギーに比例するものとして以下の式から設定する。

$$h_i = \frac{\sum_k h_0^j E_i^j}{\sum_k E_i^j} \quad (3.3-4)$$

ただし、

$$E_i^j = \frac{1}{2} \{ \phi_i^j \}^T [k^j] \{ \phi_i^j \}$$

ここで、

$h_0^j$  : j部材の減衰定数

$[k^j]$  : j部材の剛性マトリクス

$\{ \phi_i^j \}$  : i次の振動モードにおけるj部材の材端変位ベクトル

### 3.3.3 直接積分法

直接積分法はニューマークの $\beta$ 法を用いる。nステップの変位 $\{u_n\}$ 、速度 $\{\dot{u}_n\}$ 及び加速度 $\{\ddot{u}_n\}$ が既知の場合、次の(n+1)ステップの変位及び速度は $\beta$ 及び $\gamma$ をパラメータとして、以下の式で表される。

$$\{\dot{u}_{(n+1)}\} = \{\dot{u}_n\} + (1-\gamma) \{\ddot{u}_n\} + \gamma \{\ddot{u}_{(n+1)}\} \quad (3.3-5)$$

$$\{u_{(n+1)}\} = \{u_n\} + \Delta t \{\dot{u}_n\} + \frac{\Delta t^2}{2} \{\ddot{u}_n\} + \beta \Delta t^2 (\{\ddot{u}_{(n+1)}\} - \{\ddot{u}_n\}) \quad (3.3-6)$$

(3.3-5)式及び(3.3-6)式を(3.3-1)式に代入し、 $\{\dot{u}_{(n+1)}\}$ 及び $\{\ddot{u}_{(n+1)}\}$ を消去すると、変位増分に対する次のような関係が得られる。

$$[\bar{K}] (\{u_{(n+1)}\} - \{u_n\}) = \{\bar{f}\} \quad (3.3-7)$$

ただし、

$$[\bar{K}] = [K] + \frac{1}{\beta \Delta t^2} [M] + \frac{\gamma}{\beta \Delta t} [C]$$

$$\{\bar{f}\} = \{f_{(n+1)}\} - \{f_n\} + [M] \left( \frac{1}{\beta \Delta t} \{\dot{u}_n\} + \frac{1}{2\beta} \{\ddot{u}_n\} \right) + [C] \left\{ \frac{\gamma}{\beta} \{\dot{u}_n\} + \left( \frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) \Delta t \{\ddot{u}_n\} \right\}$$

(3.3-7)式から、(n+1)ステップの変位が得られ、速度及び加速度を得ることができる。

### 3.4 解析フローチャート

解析フローチャートを図3-1に示す。

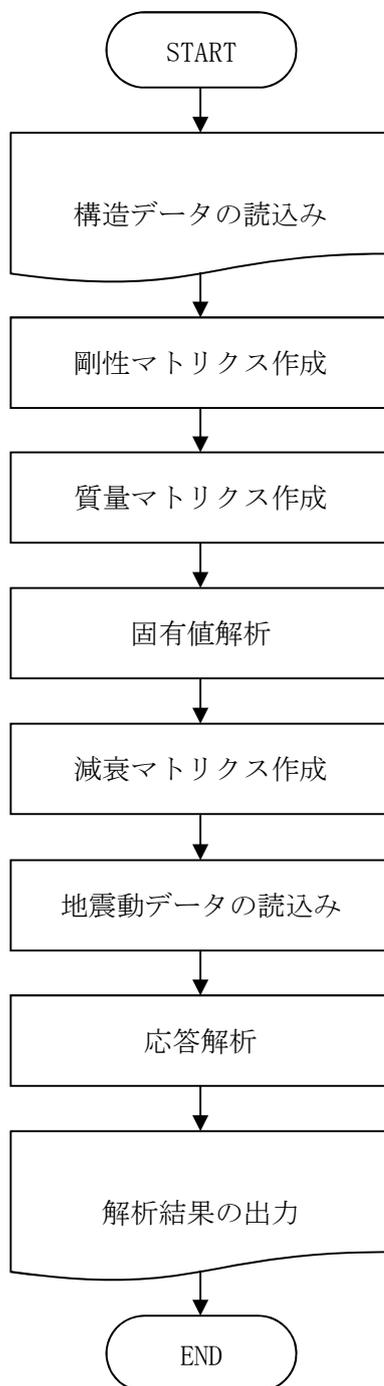


図3-1 解析フローチャート

### 3.5 検証(Verification)及び妥当性確認(Validation)

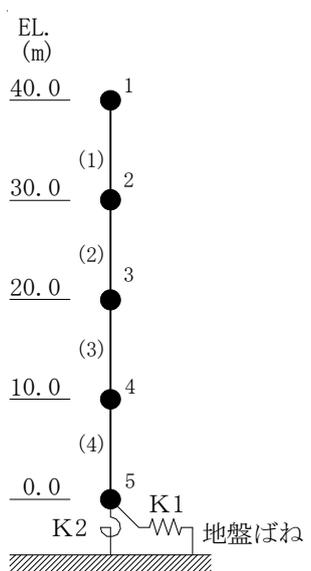
#### 3.5.1 他コードとの比較による検証

例題に対して、市販されている汎用構造解析コード「TDAPⅢ Ver. 3.09」（大成建設株式会社／株式会社アーク情報システム）との比較を行う。なお、「TDAPⅢ Ver. 3.09」は、既工事計画で使用実績がある。

解析モデルの諸元を表3-1～表3-4に、検討に用いる入力地震動を図3-2に、解析結果の比較を図3-3に示す。

図より、DAC3Nの結果はTDAPⅢによる結果と良い一致を示していることが確認できる。

表3-1 解析モデル諸元



EL. (m)	重量 W (kN)	回転慣性重量 I <sub>g</sub> (×10 <sup>6</sup> kN・m <sup>2</sup> )	せん断断面積 A <sub>s</sub> (m <sup>2</sup> )	断面2次モーメント I (m <sup>4</sup> )
40.0	150,000	3.0		
30.0	200,000	4.0	100	20,000
20.0	250,000	5.0	150	30,000
10.0	300,000	6.0	200	40,000
0.0	400,000	8.0	250	50,000

注：（ ）内は要素番号を示す。

表3-2 材料定数

ヤング係数 E (N/mm <sup>2</sup> )	せん断弾性係数 G (N/mm <sup>2</sup> )	減衰定数 h (%)
22100	9210	5

表3-3 (1/2) 復元力特性 ( $\tau - \gamma$  関係)

要素 番号	$\tau_1$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\tau_2$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\tau_3$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\gamma_1$ ( $\times 10^{-3}$ )	$\gamma_2$ ( $\times 10^{-3}$ )	$\gamma_3$ ( $\times 10^{-3}$ )
1	1.79	2.42	5.46	0.194	0.582	4.0
2	1.96	2.65	5.75	0.213	0.639	4.0
3	2.08	2.81	6.09	0.226	0.678	4.0
4	2.18	2.94	6.50	0.237	0.711	4.0

表3-3 (2/2) 復元力特性 (M- $\phi$  関係)

要素 番号	M <sub>1</sub> ( $\times 10^6$ kN·m)	M <sub>2</sub> ( $\times 10^6$ kN·m)	M <sub>3</sub> ( $\times 10^6$ kN·m)	$\phi_1$ ( $\times 10^{-6}$ 1/m)	$\phi_2$ ( $\times 10^{-6}$ 1/m)	$\phi_3$ ( $\times 10^{-6}$ 1/m)
1	2.29	5.74	9.40	5.18	46.0	415
2	4.06	10.8	17.0	6.12	48.0	350
3	6.11	16.9	26.1	6.91	49.4	312
4	8.46	24.0	36.6	7.66	50.7	286

表3-4 地盤のばね定数と減衰係数

ばね 番号	質点 番号	地盤ばね 成分	ばね定数 K <sub>c</sub>	減衰係数 C <sub>c</sub>
K1	5	底面・並進	$4.0 \times 10^7$ kN/m	$1.0 \times 10^6$ kN·s/m
K2	5	底面・回転	$3.0 \times 10^{10}$ kN·m/rad	$3.0 \times 10^8$ kN·m·s/rad

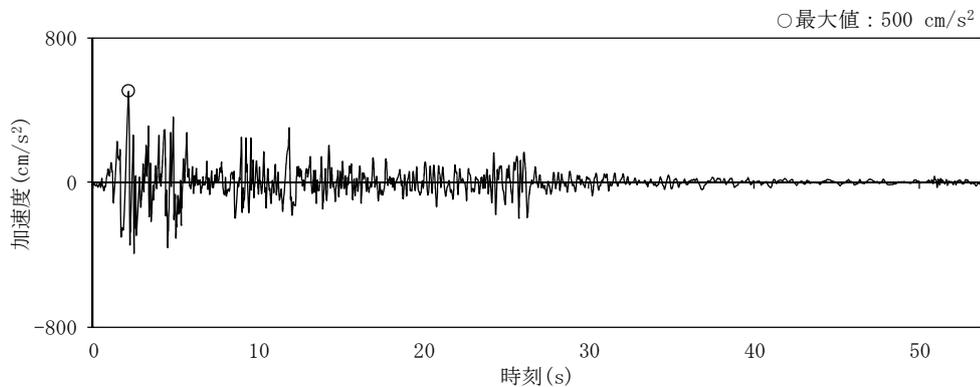
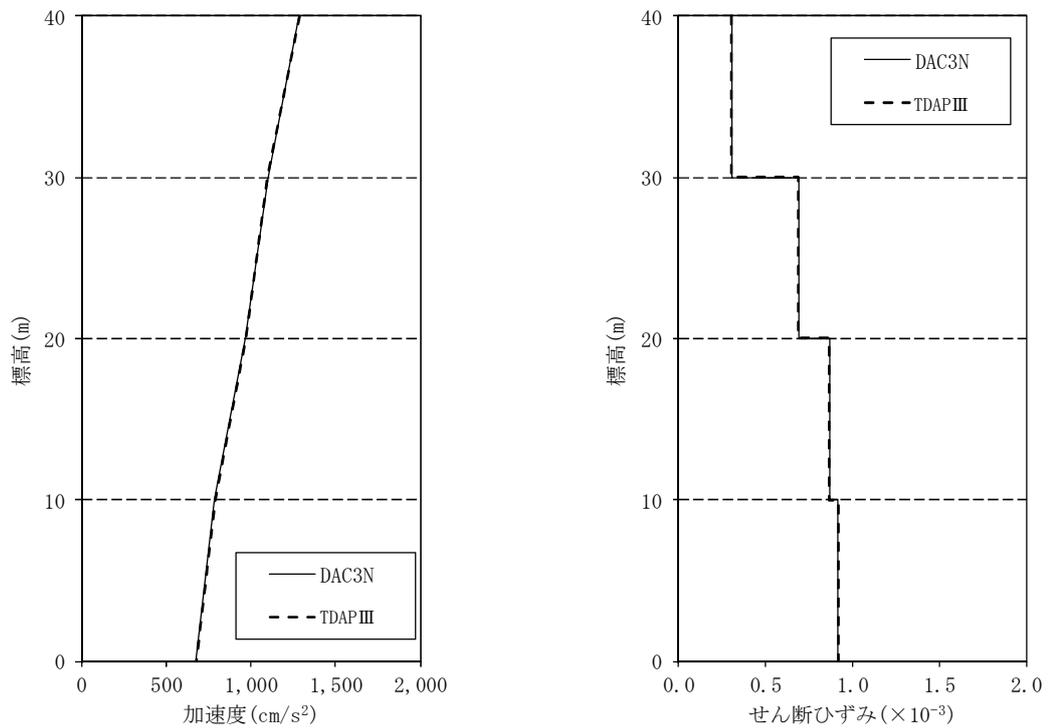


図3-2 入力地震動



(a) 加速度

(b) せん断ひずみ

図3-3 解析結果の比較 (最大応答分布)

### 3.5.2 使用内容に対する妥当性

原子炉建屋の地震応答解析にDAC3Nを使用することは、次のとおり、本解析の適用範囲に対して検証しており、妥当である。

- ・ 検証の内容のとおり、弾塑性を考慮した多質点系の地震応答について検証していることから、解析の目的に照らして今回の解析に使用することは妥当である。



## V-5-19 計算機プログラム（解析コード）の概要・SPRINT

## 目次

1.	はじめに	1
1.1	使用状況一覧	2
2.	解析コードの概要	3
3.	SPRINTの解析手法について	4
3.1	一般事項	4
3.2	解析コードの特徴	4
3.3	解析手法	4
3.4	解析フローチャート	5
3.5	検証(Verification)及び妥当性確認(Validation)	6

1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）SPRINTについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-2-4	使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答計算書	1997/7版

## 2. 解析コードの概要

項目	コード名 SPRINT
使用目的	杭基礎の有効入力動及び地盤ばねの算定
開発機関	株式会社大林組
開発時期	1988年
使用したバージョン	1997/7版
コードの概要	SPRINT (以下「本解析コード」という。) は、薄層要素法により、杭による拘束効果を考慮した有効入力動の計算並びに杭基礎の水平、上下及び回転に対する地盤の複素ばね剛性を振動数領域で計算するプログラムである。なお、本解析コードは、インハウスコードである。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>SPRINTは、使用済燃料乾式貯蔵建屋の有効入力動の計算並びに水平方向及び鉛直方向の地震応答解析における質点系地盤連成モデルの基礎底面地盤ばねを評価するために使用している。</p> <p>【検証(Verification)】 本解析コードの検証の内容は以下の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・SPRINTを用いて評価した有効入力動及び地盤インピーダンスが論文及び他解析コードの結果と良い一致を示すことを確認している。</li> <li>・動作環境を満足する計算機にインストールして使用している。</li> </ul> <p>【妥当性確認(Validation)】 本解析コードの妥当性確認の内容は以下の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・検証の内容のとおり、有効入力動、基礎底面地盤の水平ばね、鉛直ばね及び回転ばねについて検証していることから、解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。</li> <li>・日本原子力発電(株) 東海第二発電所 使用済燃料乾式貯蔵設備工事に係る工事計画認可申請書のV-2-3 (使用済燃料乾式貯蔵建屋の耐震性についての計算書) において、有効入力動の計算並びに水平方向及び鉛直方向の地震応答解析における質点系地盤連成モデルの基礎底面地盤ばねを評価するに使用された実績がある。</li> <li>・検証の体系と本工事計画で使用する体系が同等であることから、解析解と理論解の一致をもって解析機能の妥当性も確認している。</li> <li>・本工事計画において使用するバージョンは、同プラントの既工事計画において使用されているものと同じであることを確認している。</li> </ul>

### 3. SPRINTの解析手法について

#### 3.1 一般事項

SPRINTは、薄層要素法により、杭による拘束効果を考慮した有効入力動の計算並びに杭基礎の水平、上下及び回転に対する地盤の複素ばね剛性を振動数領域で計算するプログラムである。SPRINTは、薄層要素法により、杭基礎の伝達関数（有効基礎入力動）及び地盤ばねの評価に使用している。

#### 3.2 解析コードの特徴

サブストラクチャー法による地盤・構造物動的相互作用解析コードSPRINTは、以下に示す特徴を有している。

- ・薄層要素法を用いているため、成層地盤を取り扱うことが可能である。
- ・薄層要素法を用いているため、水平方向の無限性が解析的に考慮されている。
- ・精度の高いダッシュポット(Paraxial境界要素)を用いて、鉛直方向の半無限性を考慮している。
- ・基礎の埋込みを考慮できる。
- ・群杭の効果を考慮できる。
- ・実体波の斜め入射を考慮できる。
- ・対称条件を用いて計算速度を向上させている。

#### 3.3 解析手法

3次元薄層要素法を用いている。

### 3.4 解析フローチャート

解析フローチャートを図3-1に示す。

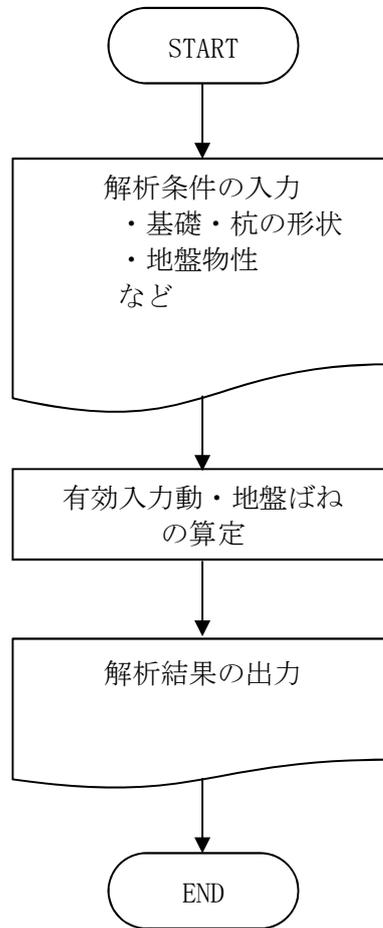


図3-1 解析フローチャート

### 3.5 検証(Verification)及び妥当性確認(Validation)

#### a. 文献, 他解析コードとの比較による検証

既往の文献において, SPRINTとKayniaの手法との比較や上下方向点加振解の比較を実施した。また, 社内別途解析コード「ABLE (動的有限要素法解析コード)」との比較を実施した。比較結果を図3-2～図3-4に示す。

有効入力動は, SPRINTとKayniaによる手法を比較した結果<sup>\*1\*2\*5</sup>, 両者は, 定性的及び定量的によく一致している。

上下方向点加振解はHalpens等と, 円形基礎のグランドコンプライアンスは庄等の結果と比較<sup>\*3\*6\*7</sup>し, よく一致している。

また, SPRINTと軸対象FEM解析コードABLEの結果も良好に一致している<sup>\*4</sup>。

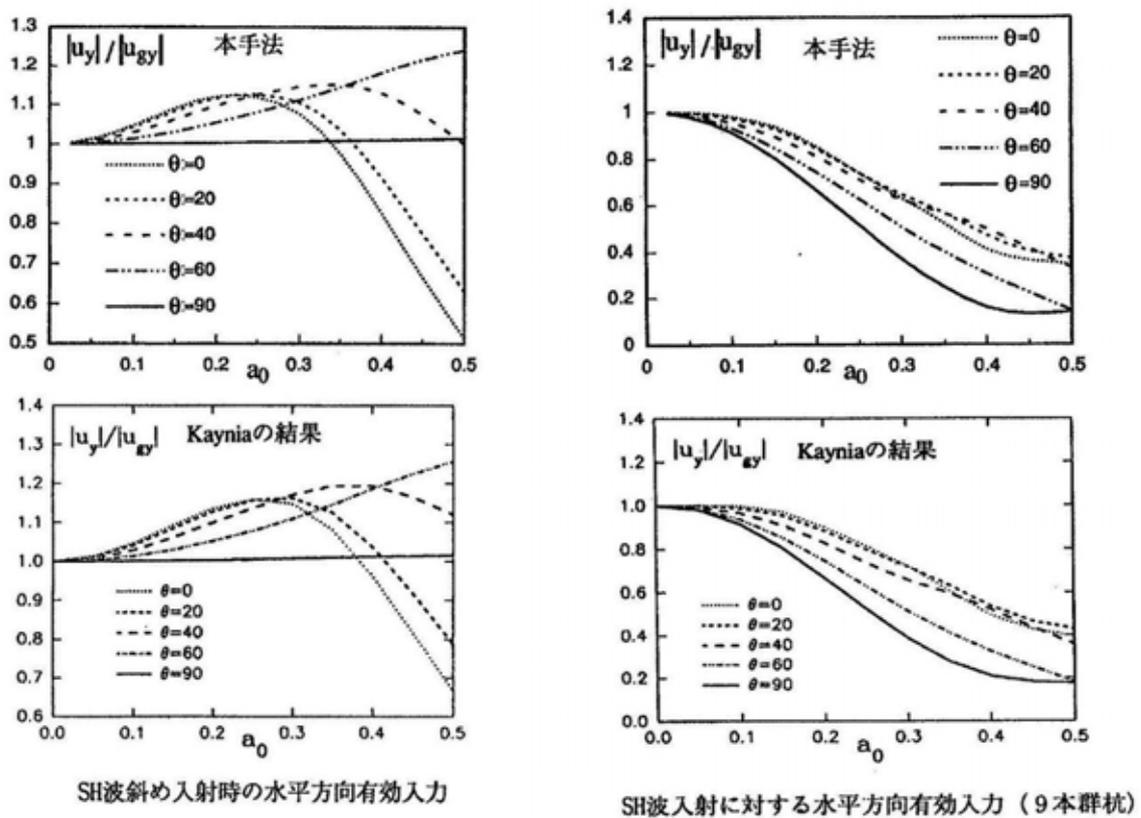


図3-2 有効入力動の比較<sup>\*1\*2\*5</sup>

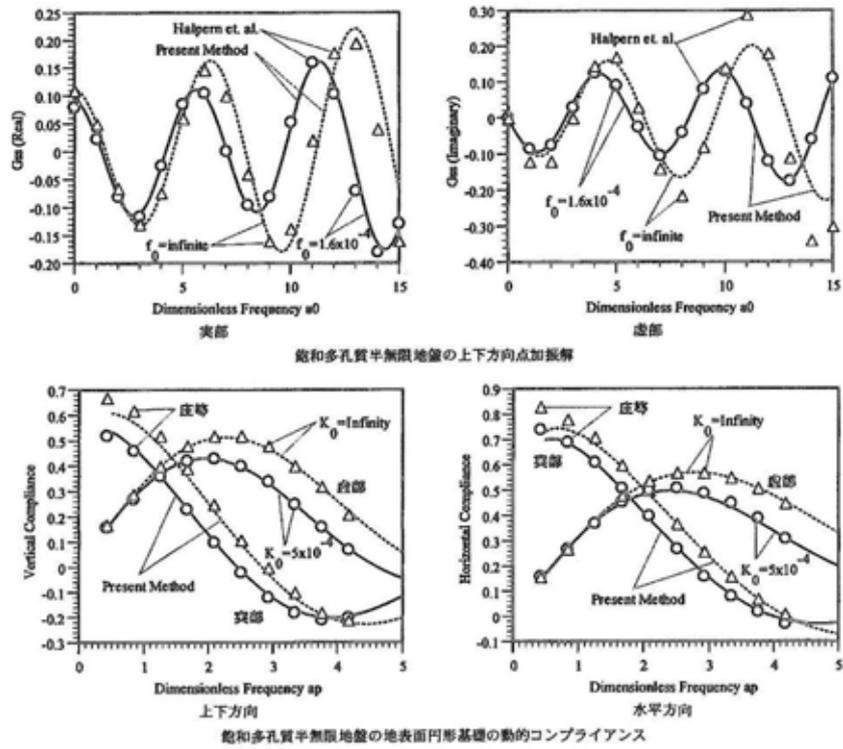
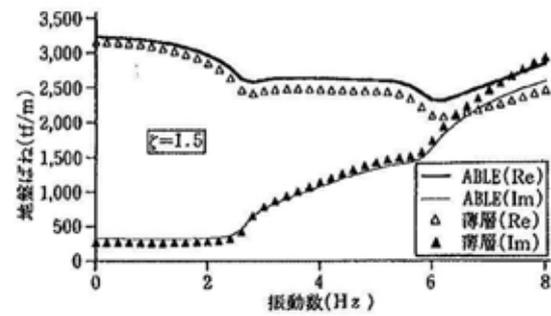
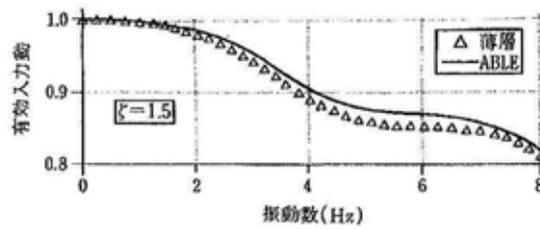


図 3-3 地盤ばねの比較\*3\*6\*7



地盤ばねの振動数依存性



有効入力動の振動数依存性

図 3-4 FEMとの比較\*4

- 注記 \*1: 高野他(1993), サブストラクチャー法を用いた群杭基礎の三次元地震応答解析(その8) 斜め入射実体波に対する有効入力の算定(単杭の場合), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2177
- \*2: 高野他(1993), サブストラクチャー法を用いた群杭基礎の三次元地震応答解析(その8) 斜め入射実体波に対する有効入力の算定(群杭の場合), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2178
- \*3: 高野他(1998), 飽和多孔質成層地盤の三次元薄層要素法による点加振解とその応用, 日本建築学会構造系論文集, 第504号, 49-56, 1998年2月
- \*4: 松田他(1994), 大規模群杭基礎の地震応答特性の解析, 大林組技術研究所報No. 48
- \*5: A. M. Kaynia and M. Novak, "RESPONSE OF FOUNDATIONS TO RAYLEIGH WAVES AND DOBLIQUELY INCIDENT BODY WAVES" Earthquakeeng. struct. dyn. 21 (1992)
- \*6: M. R. Halpern and P. Christiano : Response of Poroelastic Half-space to Steadystate Harmonic Surface Traction, Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech. Vol.10, pp.609・632, 1986
- \*7: 庄健介, 北村泰寿: 半無限多孔質飽和弾性体上の円型基礎の動的コンプライアンス, 構造工学論文集, Vol. 34A, pp. 855・864, 1988.3

## b. 他解析コードとの比較による検証

SPRINTより算出した地盤ばね及び地盤減衰と、既工事計画で実績のある地盤ばね算定コードVAにより算出した地盤ばね及び地盤減衰の比較検証を行う。

VAは質点系モデルにおける基礎底面地盤ばねを振動アドミッタンス理論により求める計算機コードである。振動アドミッタンス理論を用いているVAでは地盤を伝播する波動問題を水平方向・深さ方向ともに連続体の半無限地盤として波動方程式を満足する解を求めている。

薄層要素法を用いているSPRINTでは水平方向には連続体として、深さ方向には有限要素法的な離散化手法を組み合わせている。

薄層法と振動アドミッタンスを用いて、1層の様な半無限地盤上にある40m×80mの剛基礎モデルの地盤インピーダンスを算出し、変位一様分布の加振条件により算出した縮合ばね値（地盤ばね及び地盤減衰）を比較する。なお、振動アドミッタンスの変位評価位置は要素中心である。

解析条件を表3-1に、解析モデル概念図を図3-5に、地盤インピーダンスを表3-2及び図3-6～図3-10に示す。

SPRINTとVAの結果は良好に一致している。

表3-1 解析条件

項目		値
基礎幅 (m)	X方向	80
	Y方向	40
分割数 (個)	X方向	10
	Y方向	5
せん断波速度 $V_s$ (m/s)		1400
粗密波速度 $V_p$ (m/s)		2914
ポアソン比		0.35
単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )		20.0

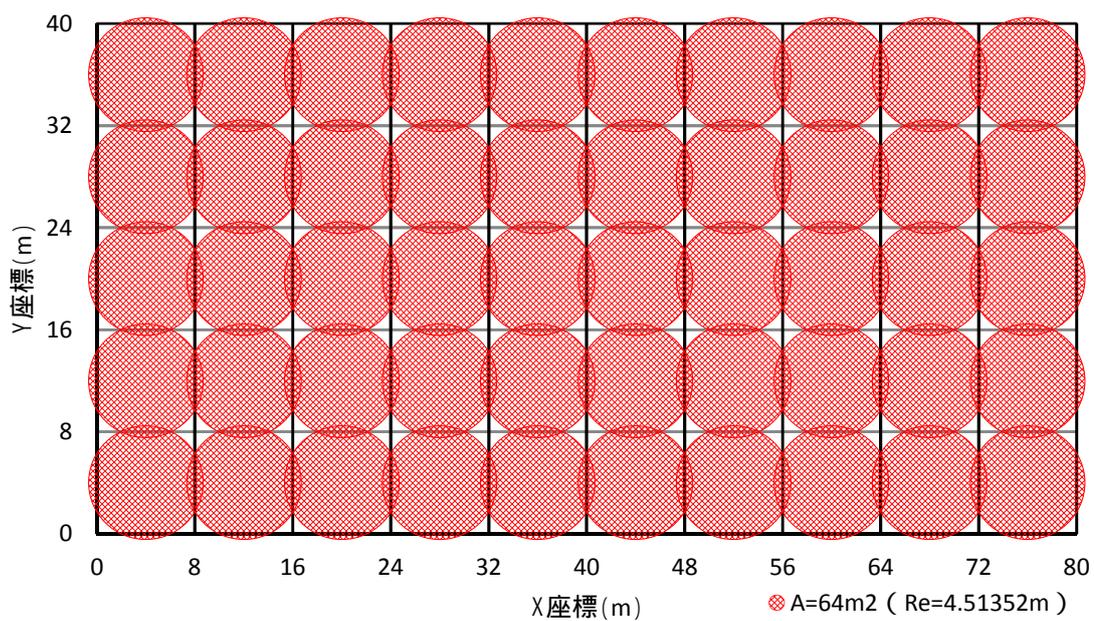


図3-5 SPRINT解析モデル概念図

表3-2 地盤インピーダンスの一覧

		SPRINT	VA	誤差
地盤剛性 kN/m	X	$6.264 \times 10^8$	$6.048 \times 10^8$	3.57%
	Y	$6.743 \times 10^8$	$6.460 \times 10^8$	4.38%
	Z	$8.382 \times 10^8$	$7.923 \times 10^8$	5.79%
地盤減衰* kN・s/m	X	$8.312 \times 10^6$	$7.861 \times 10^6$	5.74%
	Y	$9.718 \times 10^6$	$9.092 \times 10^6$	6.89%
	Z	$1.556 \times 10^7$	$1.523 \times 10^7$	2.17%

注記 \*：地盤減衰は10Hzの複素剛性値と原点との傾きを示している。

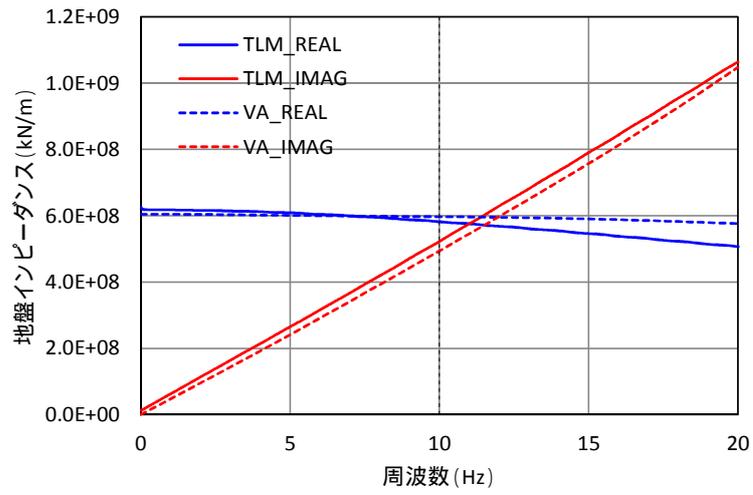


図3-6 X方向の地盤インピーダンス

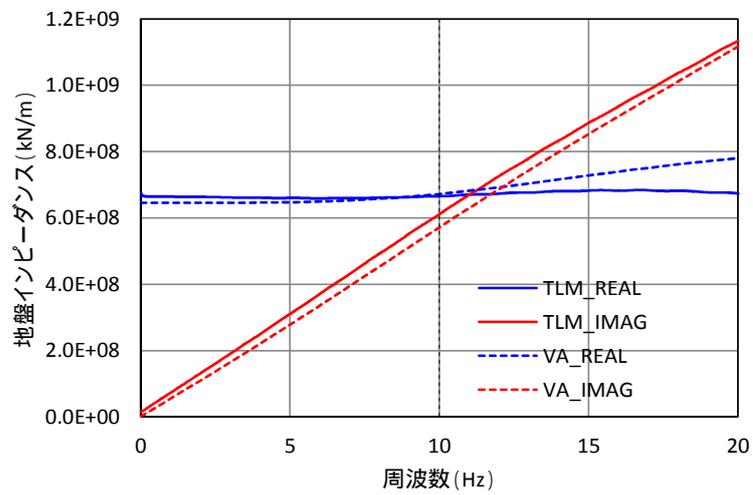


図3-7 Y方向の地盤インピーダンス

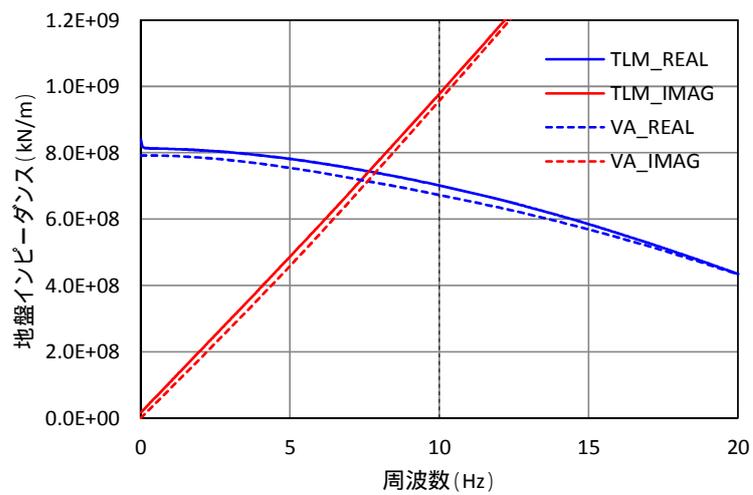


図3-8 Z方向の地盤インピーダンス

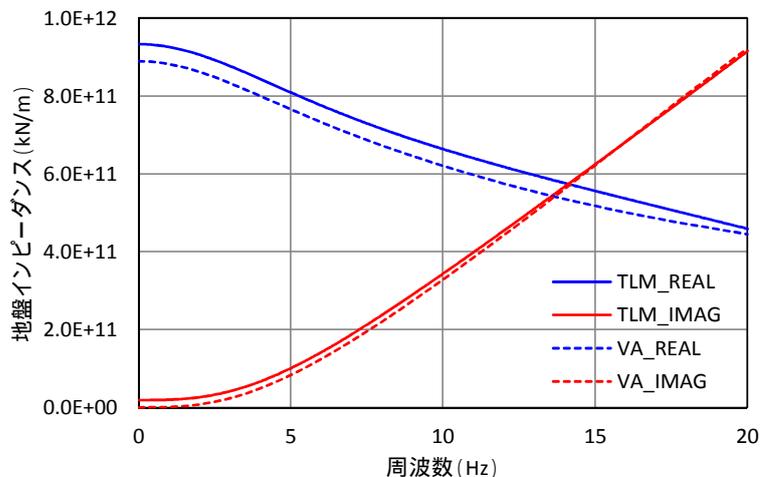


図3-9 Rx方向の地盤インピーダンス

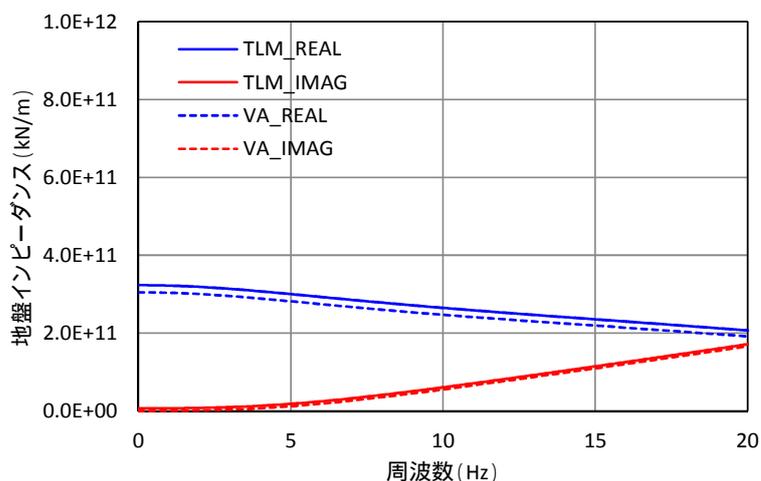


図3-10 Ry方向の地盤インピーダンス

c. 使用内容に対する妥当性

使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答解析における有効入力動及び底面地盤ばねの算定にSPRINTを使用することは、次のとおり、本解析の適用範囲に対して検証しており、妥当である。

- ・ 検証の内容のとおり、有効入力動、底面地盤の水平ばね、鉛直ばね及び回転ばねについて検証していることから、解析の目的に照らして今回の解析に使用することは妥当である。