

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。

V-5-32 計算機プログラム（解析コード）の概要・LS-DYNA

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）LS-DYNA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-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	971
V-3-別添1-2-1-2	防護鋼板の強度計算書	R9.2.0, 971
V-3-別添1-2-1-3	架構の強度計算書	R9.2.0, 971

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	LS-DYNA
使用目的	3次元有限要素法による衝突解析（竜巻飛来物影響評価）
開発機関	Livemore Software Technology Corporation
開発時期	1987年
使用したバージョン	Ver. 971 Ver. R9. 2. 0
コードの概要	<p>LS-DYNAは、Lawrence Livemore研究所により開発・公開された陽解法有限要素法DYNA3Dを基に開発された構造解析用の汎用市販コードである。</p> <p>機械・土木建築その他広範な分野に及ぶ要素群，非線形モデルを多数サポートしており，国内外の宇宙航空，自動車，機械，建築，土木などの様々な分野において多くの利用実績があり，陽的時間積分を用いていることから，衝突問題など短時間の動的現象のシミュレーションに適している。また，大変形の非線形問題への適用が容易である点に特徴がある。</p> <p>衝突問題や動的荷重を受ける構造物の応力，ひずみや加速度応答などを算出する。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>LS-DYNA Ver. 971は，竜巻より防護すべき施設を内包する施設の屋根スラブの3次元有限要素法による衝突解析（竜巻飛来物影響評価）に使用している。</p> <p>LS-DYNA Ver. R9. 2. 0は，竜巻飛来物防護対策設備の3次元有限要素法による衝突解析（竜巻飛来物影響評価）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とおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・開発機構マニュアルにおいて提示している3次元有限要素法による衝突解析に関する例題解析を実施し，解析結果がマニュアルに記載された結果と一致することを確認している。 ・Norwegian University of Science and Technologyにより，シェル要素及びソリッド要素を用いた薄板鋼管の軸方向圧縮破壊試験のシミュレーション解析が行われており，解析結果と実験結果が概ね一致することを確認している。 ・本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。

<p>検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)</p>	<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、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none">・本解析コードは、国内外の宇宙航空、自動車、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。・開発機関が提示するマニュアルにより、本解析コードの適正な用途適用範囲を確認している。・本工事計画で行う3次元有限要素法（はり要素、シェル要素、ソリッド要素）による動的解析（衝突解析）の用途、適用範囲が上述の妥当性確認範囲内にあることを確認している。・本工事計画において使用するバージョンのうちVer. 971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。・本工事計画において使用するバージョンのうちVer. R9. 2. 0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行われていないことを確認している。・本工事計画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衝突解析（竜巻飛来物影響評価）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。
--	--

V-5-33 計算機プログラム（解析コード）の概要・SOLVER

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）SOLVER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-2-8-3-3-2	管の耐震性についての計算書	Rev 02.05
V-3-8-1-3-4	管の応力計算書	Rev 02.05

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	SOLVER
使用目的	3次元有限要素法（はり要素）による固有値解析，地震応答解析及び応力解析
開発機関	株式会社 東芝
開発時期	1988年
使用したバージョン	Rev 02.05
コードの概要	<p>SOLVER（以下「本解析コード」という。）は構造物の静的及び動的解析のメインプログラムである「SAP」を基に作られている。「SAP」は，米カリフォルニア大学にて開発された計算機プログラムである。</p> <p>任意の3次元形状に対し，有限要素法により静的解析，動的解析を行い，反力・モーメント・応力，固有振動数・刺激係数等の算出が可能である。</p> <p>本解析コードは，原子力の配管設計において，多くの実績を有している。</p>
検証（Verification）及び妥当性確認（Validation）	<p>【検証（Verification）】</p> <ul style="list-style-type: none"> 本解析コードと世界的に使用実績及びクライアント数の多い配管解析プログラムの一つである解析コード [] による解析結果を比較し，結果が合致することを確認している。 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。 <p>【妥当性確認（Validation）】</p> <ul style="list-style-type: none"> 本解析コードは，他プラントの既工事計画において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，地震応答解析及び応力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，地震応答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。

V-5-34 計算機プログラム（解析コード）の概要・V I A N A

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、添付資料において使用した計算機プログラム（解析コード）VIANA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資料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-2-1-7	設計用床応答曲線の作成方針	Ver. 1.0

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	VIANA
使用目的	設計用床応答曲線作成
開発機関	株式会社 東芝
開発時期	1983年
使用したバージョン	Ver. 1.0
コードの概要	<p>VIANA（以下「本解析コード」という。）は、加速度時刻歴から床応答曲線を作成するプログラムであり、建物・構築物床応答時刻歴から設計用床応答曲線を作成することを目的とする。</p> <p>一定の固有周期および減衰定数を有する1質点系の、与えられた加速度時刻歴に対する最大応答加速度を計算し、周期と減衰定数が同一の系で計算された複数の床応答曲線の包絡値を求め、また床応答曲線の拡幅を行う。</p> <p>本解析コードは、設計用床応答曲線を作成するために開発したハウスコードである。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</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"> ・理論解と本解析コードで作成した床応答曲線と比較し、一致していることを確認した。 ・拡幅機能については、±10%拡幅した算出値と、本解析コードで作成した算出値を比較し、一致していることを確認した。 ・包絡機能については、包絡した床応答曲線の最大値と、本解析コードで作成した算出値を比較し、一致していることを確認した。 ・本解析コードの運用環境について、動作環境を満足する計算機にインストールして用いていることを確認している。 <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、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本工事計画で使用する解析機能は、理論モデルをそのままコード化したものであり、妥当性は確認されている。 ・設計用床応答曲線を作成する際、入力とする時刻歴データの時間刻み幅、データの形式は、妥当性を確認している範囲内での使用であることを確認している。

<p>検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)</p>	<ul style="list-style-type: none">• 10%拡幅，時刻歴波の時間刻み，固有周期計算間隔は JEAG4601-1987 に従っており，妥当性は確認されている。• 本工事計画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。
--	--

V-5-35 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ A u t o P I P 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 AutoPIPE Ver. 09.00.00.09	3
2.2 AutoPIPE Ver. 09.04.00.19	4

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）AutoPIPE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-2-4-3-2-1	管の耐震性についての計算書	Ver. 09. 00. 00. 09
V-2-5-5-5-2	管の耐震性についての計算書	Ver. 09. 00. 00. 09
V-2-5-7-1-3	管の耐震性についての計算書	Ver. 09. 00. 00. 09
V-2-9-4-3-2-1	管の耐震性についての計算書	Ver. 09. 00. 00. 09
V-2-9-4-3-4-1	管の耐震性についての計算書	Ver. 09. 00. 00. 09
V-2-9-5-6-1	管の耐震性についての計算書	Ver. 09. 00. 00. 09
V-2-9-7-1-1	管の耐震性についての計算書	Ver. 09. 00. 00. 09
V-2-10-1-2-9	管の耐震性についての計算書	Ver. 09. 00. 00. 09
V-2-10-1-3-8	管の耐震性についての計算書	Ver. 09. 00. 00. 09
V-2-別添1-10	ガス供給配管の耐震計算書	Ver. 09. 00. 00. 09
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. 09. 00. 00. 09
V-3-4-2-2-2	管の応力計算書	Ver. 09. 00. 00. 09
V-3-5-4-5-5	管の応力計算書	Ver. 09. 00. 00. 09
V-3-5-6-1-4	管の応力計算書	Ver. 09. 00. 00. 09
V-3-9-2-2-2-2	管の応力計算書	Ver. 09. 00. 00. 09
V-3-9-2-2-4-2	管の応力計算書	Ver. 09. 00. 00. 09
V-3-9-2-3-3-2	管の応力計算書	Ver. 09. 00. 00. 09
V-3-9-2-5-1-2	管の応力計算書	Ver. 09. 00. 00. 09
V-3-10-1-1-1-5	管の応力計算書	Ver. 09. 00. 00. 09
V-3-10-1-1-2-5	管の応力計算書	Ver. 09. 00. 00. 09
V-1-1-8	発電用原子炉施設の溢水防護に関する説明書	Ver. 09. 04. 00. 19
V-2-7-2-2-1	管の耐震性についての計算書	Ver. 09. 04. 00. 19
V-2-7-2-3-1	管の耐震性についての計算書	Ver. 09. 04. 00. 19
V-2-10-1-2-9	管の耐震性についての計算書	Ver. 09. 04. 00. 19
V-2-10-1-3-8	管の耐震性についての計算書	Ver. 09. 04. 00. 19
V-2-10-1-4-6	管の耐震性についての計算書	Ver. 09. 04. 00. 19
V-2-別添1-10	ガス供給配管の耐震計算書	Ver. 09. 04. 00. 19
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. 09. 04. 00. 19

2. 解析コードの概要

2.1 AutoPIPE Ver. 09.00.00.09

項目 \ コード名	AutoPIPE
使用目的	有限要素法（はりモデル）による，固有値解析及び応力解析
開発機関	株式会社ベントレー・システムズ
開発時期	1986年
使用したバージョン	Ver. 09.00.00.09
コードの概要	<p>AutoPIPE（以下「本解析コード」という。）は，静的及び動的荷重に対する配管の応力を解析することを目的に，任意形状の3次元モデルの静的解析及び動的解析を有限要素法を用いて行うものである。</p> <p>主な解析機能として，内圧・熱膨張・強制変位の線形の静的解析及び摩擦力等を考慮した非線形の静的解析，固有値解析・応答スペクトル解析等の動解析，そしてハンガーサポートの自動選定があり，本解析コードは，工業用配管システム設計及び，建築・土木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>【検証 (Verification)】</p> <ul style="list-style-type: none"> 世界的に使用実績の多いプログラムの1つである構造解析用解析コード「TRIFLEX」を用いて，代表的な配管検証用モデルに対し静的解析（自重・熱膨張）を行い拘束点反力・移動量の計算結果の比較を行い，両者の解析結果が一致していることにより計算結果の検証を行ったことを確認している。 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。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <ul style="list-style-type: none"> 本解析コードは，工業用配管システム設計及び，建築・土木工学等の様々な分野における使用実績を有しており，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り，妥当性は十分に確認されている。 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。 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。

2.2 AutoPIPE Ver. 09. 04. 00. 19

項目	コード名 AutoPIPE
使用目的	有限要素法（はりモデル）による，固有値解析及び応力解析
開発機関	株式会社ベントレー・システムズ
開発時期	1986年
使用したバージョン	Ver. 09. 04. 00. 19
コードの概要	<p>AutoPIPE（以下「本解析コード」という。）は，静的及び動的荷重に対する配管の応力を解析することを目的に，任意形状の3次元モデルの静的解析及び動的解析を有限要素法を用いて行うものである。</p> <p>主な解析機能として，内圧・熱膨張・強制変位の線形の静的解析及び摩擦力等を考慮した非線形の静的解析，固有値解析・応答スペクトル解析等の動解析，そしてハンガーサポートの自動選定があり，本解析コードは，工業用配管システム設計及び，建築・土木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>【検証 (Verification)】</p> <ul style="list-style-type: none"> 世界的に使用実績の多いプログラムの1つである構造解析用解析コード「CAESAR II」を用いて，代表的な配管検証用モデルに対し静的解析（自重・熱膨張）及び動的解析を行い拘束点反力・移動量の計算結果の比較を行い，両者の解析結果が一致していることにより計算結果の検証を行ったことを確認している。 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。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <ul style="list-style-type: none"> 本解析コードは，工業用配管システム設計及び，建築・土木工学等の様々な分野における使用実績を有しており，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り，妥当性は十分に確認されている。 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。 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。

V-5-36 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ S T A A D . P r o

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 STAAD.Pro Ver. 20.07.10.65	3
2.2 STAAD.Pro Ver. 20.07.11.50	4

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）STAAD.Pro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-2-4-3-2-1	管の耐震性についての計算書	Ver. 20.07.10.65
V-2-5-5-5-2	管の耐震性についての計算書	Ver. 20.07.10.65
V-2-5-7-1-3	管の耐震性についての計算書	Ver. 20.07.10.65
V-2-9-4-3-2-1	管の耐震性についての計算書	Ver. 20.07.10.65
V-2-9-4-3-4-1	管の耐震性についての計算書	Ver. 20.07.10.65
V-2-9-5-6-1	管の耐震性についての計算書	Ver. 20.07.10.65
V-2-9-7-1-1	管の耐震性についての計算書	Ver. 20.07.10.65
V-2-10-1-2-9	管の耐震性についての計算書	Ver. 20.07.10.65
V-2-10-1-3-8	管の耐震性についての計算書	Ver. 20.07.10.65
V-2-別添1-10	ガス供給配管の耐震計算書	Ver. 20.07.10.65
V-2-10-1-2-9	管の耐震性についての計算書	Ver. 20.07.11.50
V-2-10-1-3-8	管の耐震性についての計算書	Ver. 20.07.11.50
V-2-10-1-4-6	管の耐震性についての計算書	Ver. 20.07.11.50
V-2-別添1-10	ガス供給配管の耐震計算書	Ver. 20.07.11.50

2. 解析コードの概要

2.1 STAAD.Pro Ver. 20.07.10.65

項目 \ コード名	STAAD.Pro
使用目的	有限要素法（はりモデル）による，静的解析
開発機関	株式会社ベントレー・システムズ
開発時期	1985年
使用したバージョン	Ver. 20.07.10.65
コードの概要	<p>STAAD.Pro（以下「本解析コード」という。）は，3次元架構構造モデルの構造解析を目的に，任意形状の3次元モデルの静的解析及び動的解析を有限要素法にて行うものである。</p> <p>引張・圧縮・せん断などの一般的な静解析から，地震などの動解析までサポートしており，本解析コードは，プラント設計及び，建築・土木工学等の分野で世界的に広く実績を有している。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・材料力学に基づく計算手法を用いて，代表的な簡易骨組モデル「H形鋼材」及び「L形鋼材」に対し圧縮応力，曲げ応力，せん断応力計算を行い発生応力の計算結果の比較を行い，両者の解析結果が一致していることにより計算結果の検証を行ったことを確認している。 ・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。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは，プラント設計及び，建築・土木工学等の様々な分野における使用実績を有しており，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り，妥当性は十分に確認されている。 ・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。 ・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。

2.2 STAAD.Pro Ver. 20.07.11.50

項目	コード名 STAAD.Pro
使用目的	有限要素法（はりモデル）による，応力解析
開発機関	株式会社ベントレー・システムズ
開発時期	1972年
使用したバージョン	Ver. 20.07.11.50
コードの概要	<p>STAAD.Pro（以下「本解析コード」という。）は，3次元架構構造モデルの構造解析を目的に，任意形状の3次元モデルの静的解析及び動的解析を有限要素法にて行うものである。</p> <p>引張・圧縮・せん断などの一般的な静解析から，地震などの動解析までサポートしており，本解析コードは，プラント設計及び，建築・土木工学等の分野で世界的に広く実績を有している。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <ul style="list-style-type: none"> 世界的に使用実績の多いプログラムの1つである構造解析用解析コード「NASTRAN」を用いて，代表的な配管サポート検証用モデル対し静的解析（自重・熱膨張）を行い固有値解析・拘束点反力計算結果の比較を行い，両者の解析結果が一致していることにより計算結果の検証を行ったことを確認している。 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。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <ul style="list-style-type: none"> 本解析コードは，プラント設計及び，建築・土木工学等の様々な分野における使用実績を有しており，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り，妥当性は十分に確認されている。 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。 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。

V-5-37 計算機プログラム（解析コード）の概要・PEG A

目次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. PEGAの概要	3
3. PEGA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	7
3.5 検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation)	8

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）PEGA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	Ver. 1

2. PEGAの概要

項目	コード名	PEGA
使用目的		地震応答解析モデルにおける群杭の水平, 回転, 上下の地盤ばねの算定。
開発機関		清水建設株式会社
開発時期		1995年
使用したバージョン		Ver. 1
コードの概要		PEGA (以下「本解析コード」という。) は, 均質又は成層地盤内における任意の杭配置や群杭効果を考慮した杭頭インピーダンスが求められる。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>PEGAは, 緊急時対策所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モデルの杭基礎の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"> • PEGAを用いて評価した杭頭インピーダンスが公開文献の結果と良い一致を示すことを確認している。 • 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。 <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"> • 検証の内容のとおり, 杭頭インピーダンス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。

3. PEGAの解析手法について

3.1 一般事項

PEGAは、3次元薄層要素法により、群杭の杭頭インピーダンス（水平・回転・上下成分）を計算するプログラムである。PEGAは、緊急時対策所建屋の地震応答解析を行う際に入力データとして必要な杭基礎の地盤ばねの評価に使用している。

3.2 解析コードの特徴

PEGAの主な特徴を以下に示す。

- ・地盤は均質又は水平成層となる半無限地盤とする。
- ・杭配置は任意に設定できる。
- ・単杭および群杭の杭頭インピーダンス（水平・回転・上下成分）が算定できる。
- ・群杭効率の算定ができる。

3.3 解析手法

水平成層な半無限地盤内にN本からなる正方配列の群杭が存在する場合を考える。群杭全体系の運動方程式は次式で表わされる。

$$\{P\} = [S]\{u\} \quad (\text{式3.3-1})$$

$$[S] = [K_p] - [K_p^G] + [A(i\omega)]^{-1} - \omega^2([M_p] - [M_p^G]) \quad (\text{式3.3-2})$$

ここに、

$\{P\}$: 杭の任意節点における節点加振力ベクトル (図3-1)

$\{u\}$: 杭の任意節点における節点変位ベクトル (図3-1)

$[K_p]$: 杭の剛性マトリックス

$[M_p]$: 杭の質量マトリックス

$[K_p^G]$: 杭と同体積土柱の排土剛性マトリックス

$[M_p^G]$: 杭と同体積土柱の排土質量マトリックス

$[A(i\omega)]$: 杭間の連成効果を表す影響係数マトリックス

ω : 加振円振動数

ここで、図3-1における杭頭節点 $i=1$ とそれ以外の節点 $i=2\sim n$ に式3-1を分けて次式のように書き直す。

$$\begin{Bmatrix} \{P\}_1 \\ \{P\}_{2-n} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [S]_{1,1} & [S]_{1,2-n} \\ [S]_{2-n,1} & [S]_{2-n,2-n} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\}_1 \\ \{u\}_{2-n} \end{Bmatrix} \quad (\text{式3.3-3})$$

杭頭柔性方程式は、第3-3式に $\{P\}_{2-n} = \{0\}$ を代入した次式で与えられる。

$$\{u\}_1 = [\alpha]_{1,1} \{P\}_1 \quad (\text{式3.3-4})$$

$$[\alpha]_{1,1}^{-1} = [S]_{1,1} - [S]_{1,2-n} [S]_{2-n,2-n}^{-1} [S]_{2-n,1} \quad (\text{式3.3-5})$$

ここに、

$$[\alpha]_{1,1} \quad : \text{杭頭柔性マトリックス}$$

次に、基礎の運動方程式は、基礎の運動をx方向並進成分、y方向回転成分、z方向上下成分の3自由度とすれば、次式で表せる。ここで、基礎は無質量剛基礎とする。

$$\begin{Bmatrix} F_x \\ M_y \\ F_z \end{Bmatrix} = [K] \begin{Bmatrix} \delta_x \\ \phi_y \\ \delta_z \end{Bmatrix} \quad (\text{式3.3-6})$$

ここに、

$$\begin{Bmatrix} F_x \\ M_y \\ F_z \end{Bmatrix} \quad : \text{杭頭に加振力ベクトル}$$

$$\begin{Bmatrix} \delta_x \\ \phi_y \\ \delta_z \end{Bmatrix} \quad : \text{杭頭の節点変位ベクトル}$$

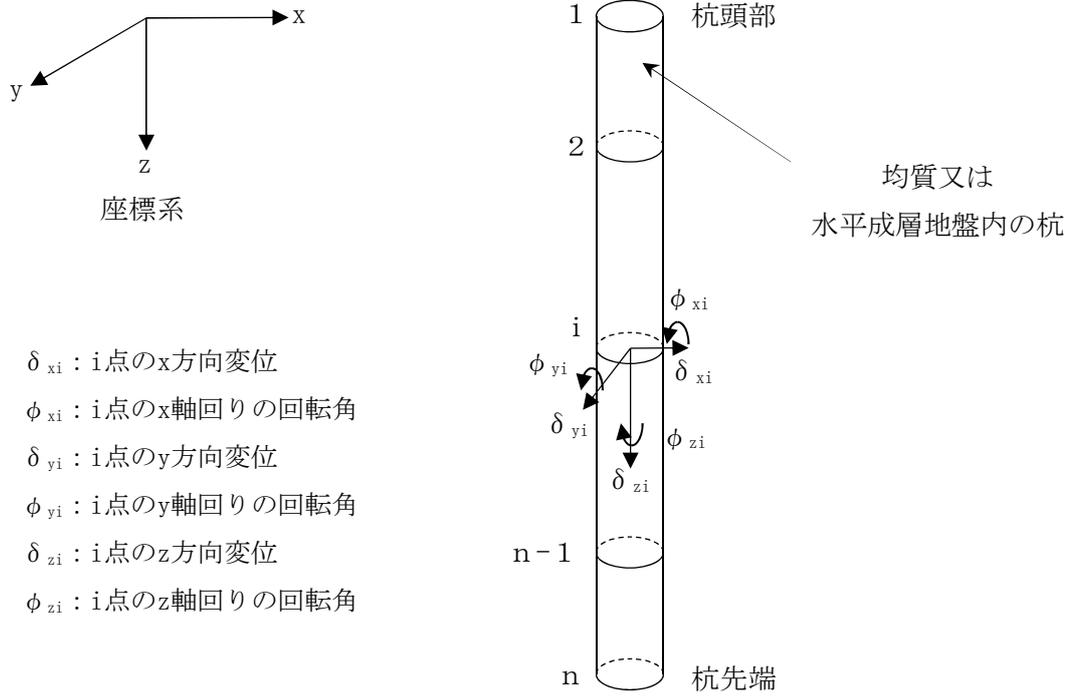
$$[K] \quad : \text{杭頭剛性マトリックス}$$

杭頭剛性マトリックス $[K]$ は、杭頭柔性マトリックス $[\alpha]_{1,1}$ を用いて次式で表わされる。

$$[K] = [T]^T [\alpha]_{1,1}^{-1} [T] \quad (\text{式3.3-7})$$

ここに、

$$[T] \quad : \text{杭頭の変位拘束条件を与えるための変換マトリックス}$$



- δ_{xi} : i点のx方向変位
- ϕ_{xi} : i点のx軸回りの回転角
- δ_{yi} : i点のy方向変位
- ϕ_{yi} : i点のy軸回りの回転角
- δ_{zi} : i点のz方向変位
- ϕ_{zi} : i点のz軸回りの回転角

図3-1 座標系と節点自由度

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。

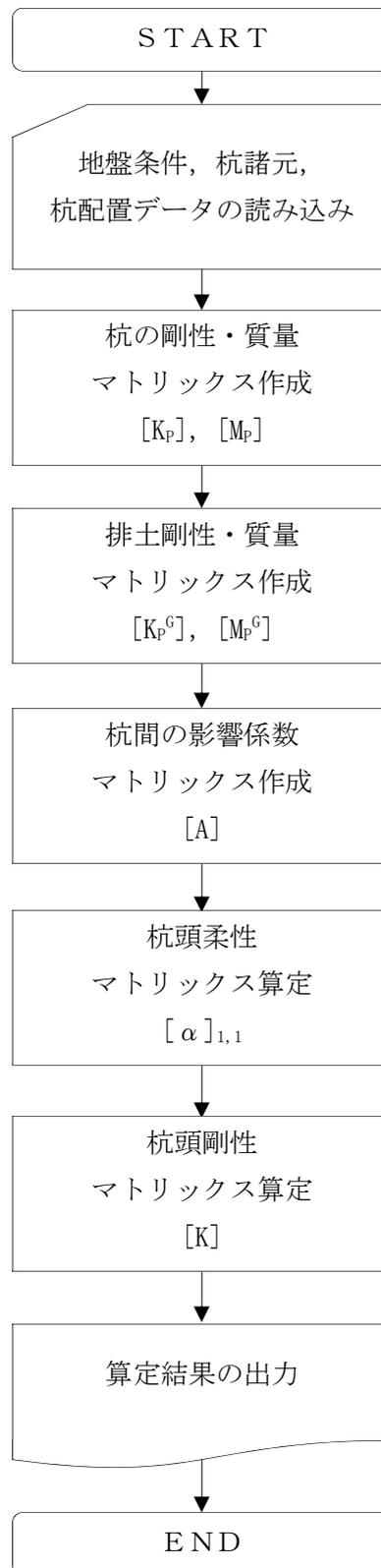


図3-2 解析フローチャート

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

(1) 公開文献との比較による検証

検証は、均質地盤を対象として、PEGAの解析解と公開文献*で示されている解析解の比較を行う。検証を行う解析モデル図及び解析諸元を図3-3に示す。

単杭及び群杭基礎の動的地盤ばねを算定し公開文献の結果と合わせて図3-4に示す。図3-4より両者は概ね一致しており、PEGAが杭基礎の動的ばねを正しく評価していることが確認できる。

注記 * : 入門・建物と地盤との動的相互作用 174頁～175頁 (社) 日本建築学会
1996年4月, 第1版第1刷

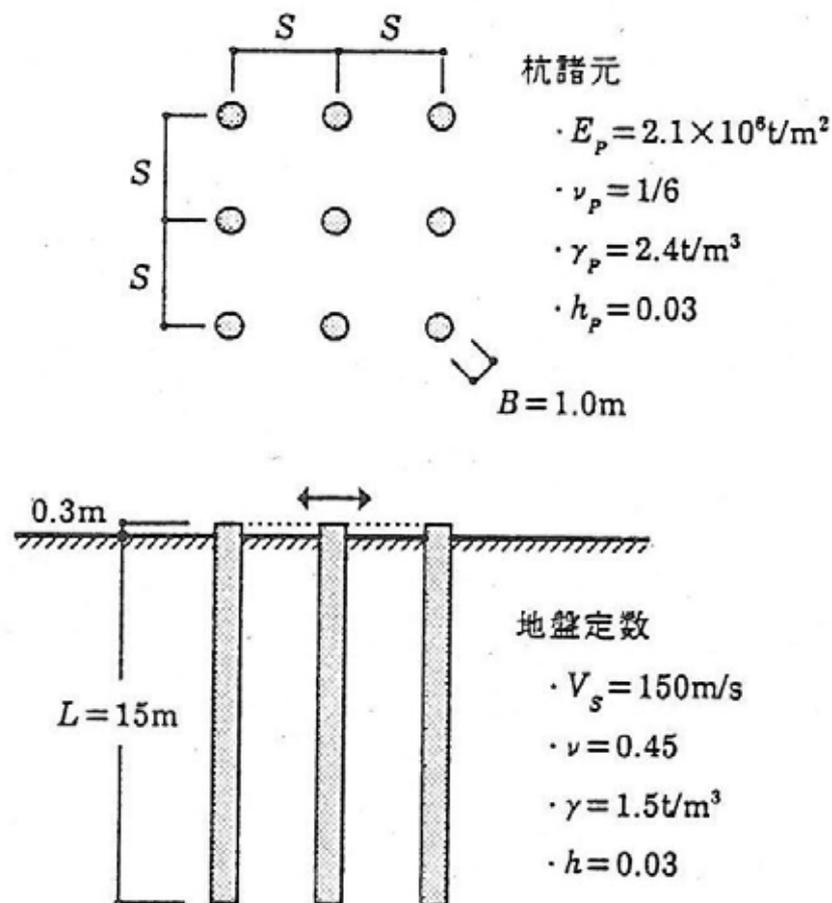


図3-3 解析モデル及び解析諸元

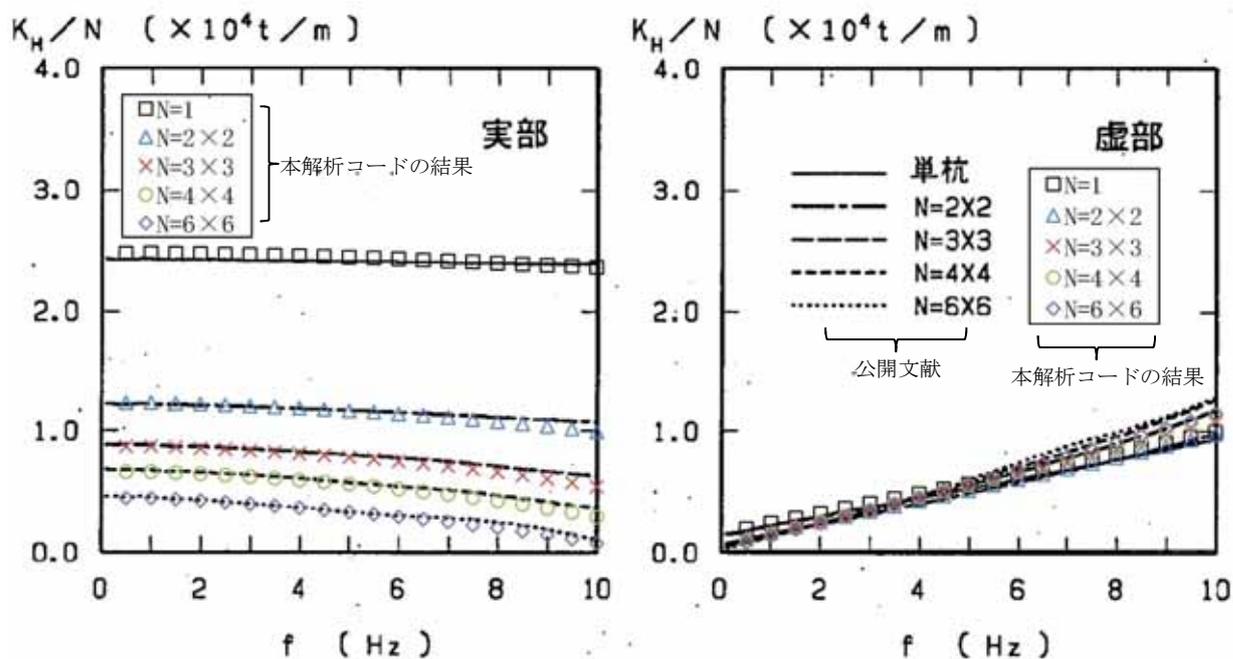


図3-4 公開文献*の解析解とPEGAによる動的地盤ばねの比較

注記 * : 入門・建物と地盤との動的相互作用 174頁～175頁 (社)日本建築学会
1996年4月, 第1版第1刷

(2) 使用内容に対する妥当性

緊急時対策所建屋の地震応答解析における杭基礎の地盤ばねの算定にPEGA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、杭頭インピーダンス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-5-38 計算機プログラム（解析コード）の概要・SCARC

目次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. SCARCの概要	3
3. SCARCの解析手法について	5
3.1 一般事項	5
3.2 解析コードの特徴	5
3.3 解析手法	5
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)	14

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）SCARC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-2-2-5	使用済燃料乾式貯蔵建屋の耐震性についての計算書	2014

2. SCARCの概要

コード名 項目	SCARC
使用目的	壁・床部材の断面算定
開発機関	大林組
開発時期	2014年
使用したバージョン	Ver. 2014 (2014.7) 選定理由：検証及び妥当性が確認された最新バージョンであるため
コードの概要	<p>SCARC（以下「本解析コード」という。）は壁・床の面部材を対象に、FEM応力解析により得られた設計用断面力を用いて断面算定を行う解析コードである。</p> <p>断面算定は、軸力-曲げモーメントについてはコンクリート・鉄筋の応力度やひずみを、また面内・面外せん断力については許容せん断力（又は許容せん断応力度）を算出し、それぞれの許容値に対する安全裕度を評価する。</p> <p>断面算定式は、RC-N規準・RC規準及びCCV規格から、対象建屋や部材に応じて適宜選択することができる。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>本解析コードは、大林組の自社開発コードであり、使用済燃料乾式貯蔵建屋の壁・床部材の断面算定で使用している。</p> <p>【検証の内容】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> 軸力-曲げモーメント、面内せん断力及び面外せん断力の各項目について、電算結果と理論解による結果と概ね一致することを確認している。 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。 <p>【妥当性確認】</p> <p>SCARCを断面算定に使用することは、次の通り妥当である。</p> <ul style="list-style-type: none"> 九州電力玄海3号機工事計画認可申請書の資料3（耐震性に関する説明書）において、鉄筋コンクリート部材の断面算定に使用された実績がある。 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。

	<p>る。</p> <ul style="list-style-type: none">• 本工事計画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。• 検証内容のとおり、断面算定結果について検証していることから、断面算定評価の目的に照らして今回の計算に使用することは妥当である。
--	--

3. SCARCの解析手法について

3.1 一般事項

SCARCは壁・床の面部材を対象に、FEM応力解析により得られた設計用断面力を用いて断面算定を行う解析コードである。

断面算定は、軸力-曲げモーメントについてはコンクリート・鉄筋の応力度やひずみを、また面内・面外せん断力については許容せん断力（又は許容せん断応力度）を算出し、それぞれの許容値に対する安全裕度を評価する。

断面算定式は、RC-N規準・RC規準及びCCV規格から、対象建屋や部材に応じて適宜選択することができる。

3.2 解析コードの特徴

SCARCの主な特徴を以下に示す。

- (1) 壁・床の面部材について、FEM応力解析より得られた設計用断面力を、単位幅あたりの断面力として断面算定を行う。
- (2) 断面算定式は、RC-N規準・RC規準及びCCV規格から選択でき、材料の許容応力度は任意に設定できる。
- (3) FEM応力解析結果を定形ファイル形式で取り込み、荷重組合せに応じた設計用断面力を算出し、各組合せケースに対する断面算定を一括して行うことが可能である。

3.3 解析手法

3.3.1 解析理論

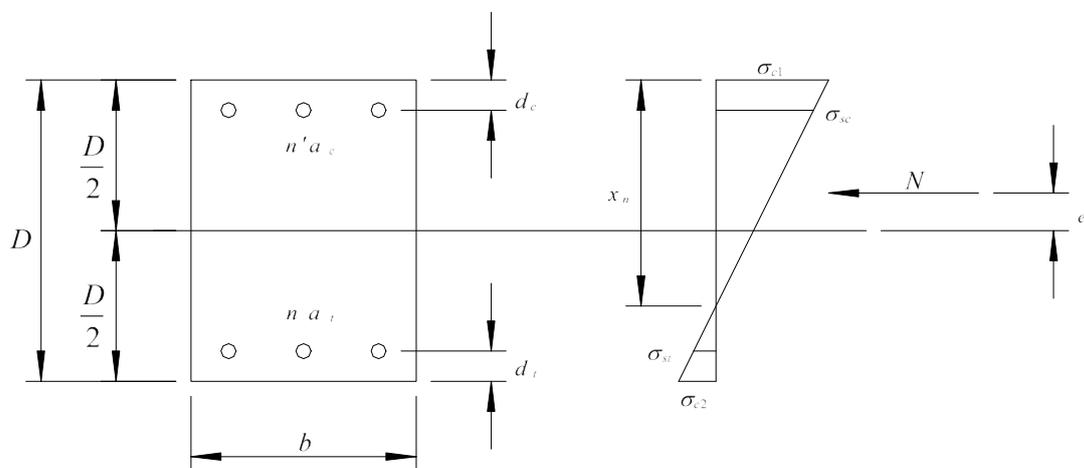
断面算定は軸力-曲げモーメント、面内せん断及び面外せん断の3種類について行う。それぞれの概要を以下に記す。

(1) 軸力-曲げモーメント

軸力-曲げモーメントについては、RC-N規準・RC規準及びCCV規格とも同じ理論であり、以下の仮定に基づいている。

- a. 断面は曲げモーメントを受けた後も平面を保持し、コンクリート・鉄筋のひずみは中立軸からの距離に比例する。
- b. コンクリートの引張強度は無視する。

軸力-曲げモーメントに関する理論の概要を以下に示す。なお、ここでは中立軸が断面内にある場合を示す。



- b : 梁幅 (単位幅)
- D : 部材厚
- n', n : 圧縮側及び引張側ヤング係数比
- a_c, a_t : 圧縮鉄筋量及び引張鉄筋量
- d_c : 圧縮縁から圧縮鉄筋重心位置までの距離
- d_t : 引張縁から引張鉄筋重心位置までの距離
- N : 軸力
- e : 偏心距離 ($e = M/N$, M : 曲げモーメント)
- σ_{c1}, σ_{c2} : 圧縮縁及び引張縁コンクリート応力度
- σ_{sc}, σ_{st} : 圧縮鉄筋応力度及び引張鉄筋応力度
- x_n : 圧縮縁から中立軸までの距離

有効等価断面の中立軸まわりの断面1次モーメント S_n 及び断面2次モーメント I_n は、以下のように表される。

$$S_n = \left\{ \frac{1}{2} x_{n1}^2 + n' p_c (x_{n1} - d_{c1}) - n p_t (1 - d_{t1} - x_{n1}) \right\} b D^2 \quad (3.1-1)$$

$$I_n = \left\{ \frac{1}{3} x_{n1}^3 + n' p_c (x_{n1} - d_{c1})^2 + n p_t (1 - d_{t1} - x_{n1})^2 \right\} b D^3 \quad (3.1-2)$$

ここで、

$$x_{n1} = x_n / D$$

$$d_{c1} = d_c / D$$

$$d_{t1} = d_t / D$$

$$p_c = a_c / b \cdot D \quad : \text{圧縮鉄筋比}$$

$$p_t = a_t / b \cdot D \quad : \text{引張鉄筋比}$$

また、中立軸に関する式は以下となる。

$$x_n - \frac{D}{2} + e = \frac{I_n}{S_n} \quad (3.1-3)$$

(3.1-1), (3.1-2) 式を (3.1-3) 式に代入すると、中立軸に関する次の3次方程式が求められる。

$$\begin{aligned} & \frac{1}{6} x_{n1}^3 + \frac{1}{2} \left(e_1 - \frac{1}{2} \right) x_{n1}^2 + (n' + n) p_g \left(g_{s1} + e_1 - \frac{1}{2} \right) x_{n1} \\ & - \left\{ n' p_c d_{c1} \left(e_1 - \frac{1}{2} + d_{c1} \right) + n p_t (1 - d_{t1}) \left(e_1 + \frac{1}{2} - d_{t1} \right) \right\} = 0 \end{aligned} \quad (3.1-4)$$

また、断面に作用する曲げモーメント M を、次式のように表すことができる。

$$M = N e = \frac{\sigma_{c1}}{x_n} \left\{ I_n + \left(\frac{D}{2} - x_n \right) S_n \right\} \quad (3.1-5)$$

したがって、断面上縁のコンクリートの応力 σ_{c1} ・ひずみ ε_{c1} が以下のように求められる。

$$\sigma_{c1} = \frac{M \cdot x_n}{I_n + \left(\frac{D}{2} - x_n \right) S_n} \quad (3.1-6)$$

$$\varepsilon_{c1} = \frac{M}{E_c} \cdot \frac{x_n}{I_n + \left(\frac{D}{2} - x_n \right) S_n} \quad (3.1-7)$$

比例関係から、断面下縁のコンクリートの応力 σ_{c2} ・ひずみ ε_{c2} が以下のように求められる。

$$\sigma_{c2} = - \frac{M(D - x_n)}{I_n + \left(\frac{D}{2} - x_n \right) S_n} \quad (3.1-8)$$

$$\varepsilon_{c2} = - \frac{M}{E_c} \cdot \frac{D - x_n}{I_n + \left(\frac{D}{2} - x_n \right) S_n} \quad (3.1-9)$$

同様に、鉄筋の応力・ひずみは以下のように求められる。

$$\varepsilon_{sc} = \frac{M}{E_c} \cdot \frac{x_n - d_c}{I_n + \left(\frac{D}{2} - x_n\right) S_n} \quad (3.1-10)$$

$$\sigma_{sc} = Mn' \cdot \frac{x_n - d_c}{I_n + \left(\frac{D}{2} - x_n\right) S_n} \quad (3.1-11)$$

$$\varepsilon_{st} = -\frac{M}{E_c} \cdot \frac{D - d_t - x_n}{I_n + \left(\frac{D}{2} - x_n\right) S_n} \quad (3.1-12)$$

$$\sigma_{st} = -Mn \cdot \frac{D - d_t - x_n}{I_n + \left(\frac{D}{2} - x_n\right) S_n} \quad (3.1-13)$$

検定比は、これらのコンクリート・鉄筋応力度を許容応力度で除して算出する。

$$\text{(圧縮コンクリート応力度 検定比)} = \sigma_{c1} / f_c \quad (3.1-14)$$

$$\text{(圧縮鉄筋応力度 検定比)} = \sigma_{sc} / r f_c \quad (3.1-15)$$

$$\text{(引張鉄筋応力度 検定比)} = \sigma_{st} / f_t \quad (3.1-16)$$

ここで

f_c : コンクリートの圧縮許容応力度

$r f_c$: 鉄筋の許容圧縮応力度

f_t : 鉄筋の許容引張応力度

(2) 面内せん断力

RC-N規準とCCV規格について、それぞれの断面算定の概要を示す。RC-N規準については短期を、CCV規格については荷重状態IVを示す。なお、RC規準の面内せん断力の検討は、RC-N規準のものと同様であるため、省略する。

a. RC-N 規準

RC-N規準における短期許容面内せん断力は以下となる。

$$Q_A = \max(Q_1, Q_2) \quad (3.2-1)$$

$$Q_1 = t \cdot l \cdot f_s \quad (3.2-2)$$

$$Q_2 = \sum Q_w + \sum Q_c \quad (3.2-3)$$

$$Q_w = p_s \cdot t \cdot l' \cdot s f_t \quad (3.2-4)$$

$$Q_c = b j \{ \alpha f_s + 0.5 w f_t (p_w - 0.002) \} \quad (3.2-5)$$

ここで、

t : 部材厚

l : 部材の全せい

l' : 部材の内法長さ

b : 柱幅

j : 柱の応力中心間距離

f_s : コンクリートの短期許容せん断応力度

$s f_t$: 壁筋のせん断補強用短期許容引張応力度

$w f_t$: 柱帯筋のせん断補強用短期許容引張応力度

p_s : 壁のせん断補強筋比

p_w : 柱の帯筋比

α : 拘束効果による割増係数で、 $\alpha = 1.5$ とする。

断面算定は、(3.2-1)式により許容面内せん断力 Q_A を算出し、以下により検定比を評価する。

$$(\text{面内せん断力に対する検定比}) = Q/Q_A \quad (3.2-6)$$

Q : 設計用面内せん断力

b. CCV 規格

ここでは、プレストレストコンクリートの許容面内せん断応力度について記す。
CCV規格における許容面内せん断応力度は以下となる。

$$\tau_u = \min(\tau_{u1}, \tau_{u2}) \quad (3.2-7)$$

$$\tau_{u1} = 0.5\{(p_{t\phi}f_y - \sigma_{p\phi} - \sigma_{0\phi}) + (p_{t\theta}f_y - \sigma_{p\theta} - \sigma_{0\theta})\} \quad (3.2-8)$$

$$\tau_{u2} = 1.25\sqrt{F_c} \quad (3.2-9)$$

ここで

$p_{t\phi}$: 子午線方向主筋の鉄筋比

$p_{t\theta}$: 円周方向主筋の鉄筋比

$\sigma_{p\phi}$: プレストレス荷重により生じる子午線方向の膜応力度

$\sigma_{p\theta}$: プレストレス荷重により生じる円周方向の膜応力度

$\sigma_{0\phi}$: プレストレス荷重以外の外力により生じる子午線方向の膜応力度

$\sigma_{0\theta}$: プレストレス荷重以外の外力により生じる円周方向の膜応力度

f_y : 鉄筋の許容引張・圧縮応力度

F_c : コンクリートの設計基準強度

断面算定は、(3.2-7)式より許容面内せん断応力度を算出し、以下により検定比を評価する。

$$(\text{面内せん断応力度に対する検定比}) = \tau/\tau_u \quad (3.2-10)$$

τ : 設計用面内せん断応力度

(3) 面外せん断力

RC-N規準とCCV規格について、それぞれの断面算定の概要を示す。RC-N規準については短期を、CCV規格については荷重状態IVを示す。なお、ここでは面材（壁・床）の面外せん断に関する理論を示すため、RC規準による面外せん断力の検討は省略する。

a. RC-N 規準

RC-N規準における面材の短期許容面外せん断力は以下となる。

- ・面外せん断補強筋がない場合

$$Q_A = bj\alpha f_s \quad (3.3-1)$$

- ・面外せん断補強筋がある場合

$$Q_A = bj\{\alpha f_s + 0.5 w f_t (p_w - 0.002)\} \quad (3.3-2)$$

ここで、

- b : 断面幅（単位幅）
- j : 断面の応力中心間距離
- α : せん断スパン比による割増係数（ $1 \leq \alpha \leq 2$ ）
- f_s : コンクリートの短期許容せん断応力度
- $w f_t$: せん断補強筋の短期許容引張応力度
- p_w : せん断補強筋比

断面算定は、(3.3-1)・(3.3-2)式により許容面外せん断力を算出し、以下により検定比を評価する。

$$(\text{面外せん断力に対する検定比}) = Q/Q_A \quad (3.3-3)$$

Q : 設計用面外せん断力

b. CCV 規格

ここでは、シェル部の許容面外せん断応力度について記す。

CCV規格における許容面外せん断応力度は以下となる。

$$\tau_R = \min(\tau_{R1}, \tau_{R2}) \quad (3.3-4)$$

$$\tau_{R1} = \varphi \{0.1(p_t f_y - \sigma_0) + 0.5p_w f_{wy} + 0.235\sqrt{F_c}\} \quad (3.3-5)$$

$$\tau_{R2} = 1.10\sqrt{F_c} \quad (3.3-6)$$

ここで

p_t : 主筋の鉄筋比

p_w : 面外せん断力に対する補強筋の鉄筋比

f_y : 主筋の許容引張・圧縮応力度

f_{wy} : 面外せん断補強筋の許容引張・圧縮応力度

σ_0 : 外力による子午線方向の膜応力度

F_c : コンクリートの設計基準強度

φ : 低減係数 ($0.58 \leq \varphi \leq 1$)

断面算定は、(3.3-4)式により許容面外せん断応力度を算出し、以下により検定比を評価する。

$$(\text{面外せん断応力度に対する検定比}) = \tau / \tau_R \quad (3.3-7)$$

τ : 設計用面外せん断応力度

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。

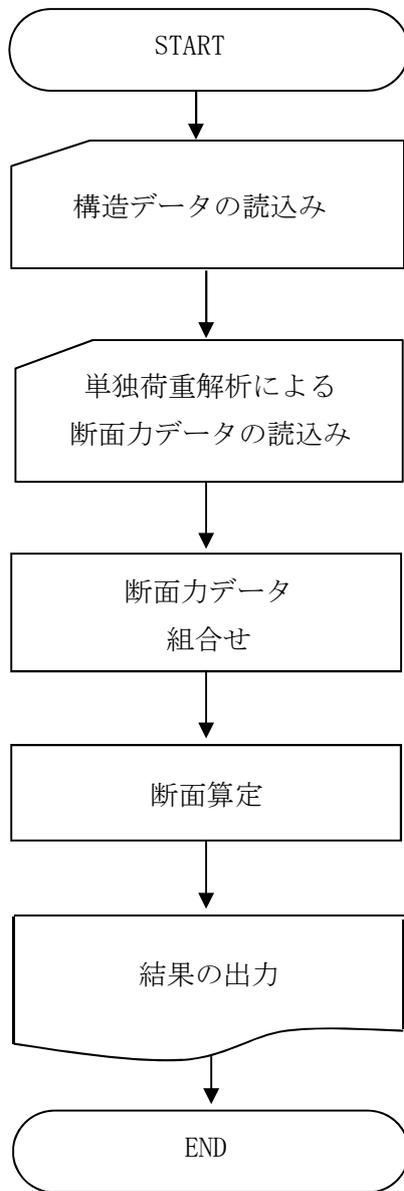


図 3-1 解析フローチャート

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

(1) 理論解結果との比較による検証

断面算定プログラムSCARCの妥当性を確認するため、SCARCでの結果と理論解による結果を比較する。検証は軸力-曲げモーメント、面内せん断力及び面外せん断力の3種類について行う。

a. 軸力-曲げモーメントに対する検証

軸力-曲げモーメントに関する検証は、まず断面とコンクリート及び鉄筋の応力度を設定し、その応力状態となる軸力・曲げモーメントを算出する。そして、算出した軸力・曲げモーメントを入力値としてSCARCにて計算し、出力されたコンクリート及び鉄筋の応力度と、最初に設定したものと比較することでSCARCの妥当性を確認する。

本検証において、SCARCはRC-N規準を適用した場合の結果を示す。軸力-曲げモーメントについては、計算方法はRC-N規準、RC規準及びCCV規格とも同じであるので、本検証結果で妥当性が示されれば、各規準・規格で適用できるものとなる。

断面・材料及び許容応力度は以下に示すものとする。

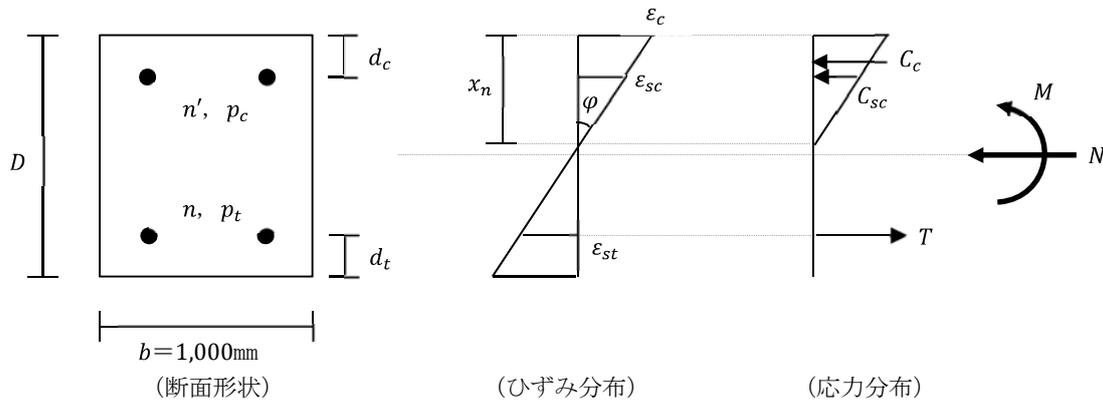


表 3-1 断面形状

部材せい D (mm)	鉄筋重心位置		主筋比	
	dc (mm)	dt (mm)	Pc (%)	Pt (%)
1,000	150	150	1.000	1.000

表 3-2 コンクリート諸元

コンクリート強度 Fc (N/mm ²)	ヤング係数 Ec (N/mm ²)	ヤング係数比	
		圧縮側n'	引張側n
36	24,000	10	10

表 3-3 鉄筋の許容応力度

主筋 f _t (N/mm ²)	面外せん断補強筋 _w f _t (N/mm ²)
390	—

コンクリート及び鉄筋の応力度は以下より設定する。

曲率 φ 及び中立軸深さ $X_n(=x_{n1} \cdot D)$ が定められれば、コンクリート及び鉄筋のひずみ・応力度は以下となる。

(ひずみ)

$$\begin{aligned} \text{コンクリート圧縮縁ひずみ} & \quad \varepsilon_c = \varphi \cdot x_{n1} \cdot D \\ \text{圧縮鉄筋ひずみ} & \quad \varepsilon_{sc} = \varphi(x_{n1} - d_{c1})D \\ \text{引張鉄筋ひずみ} & \quad \varepsilon_{st} = \varphi(1 - x_{n1} - d_{t1})D \end{aligned}$$

(応力度)

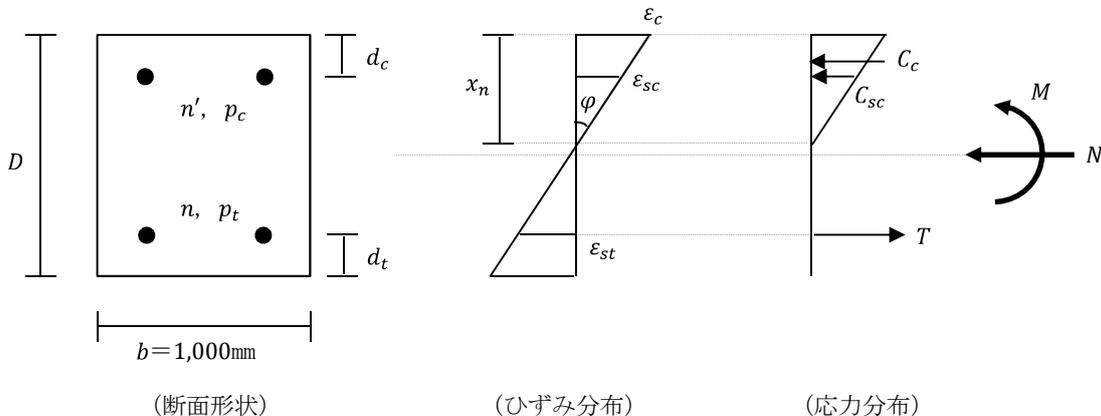
$$\begin{aligned} \text{コンクリート圧縮縁応力度} & \quad \sigma_c = E_c \cdot \varphi \cdot x_{n1} \cdot D \\ \text{圧縮鉄筋応力度} & \quad \sigma_{sc} = n'E_c \cdot \varphi(x_{n1} - d_{c1})D \\ \text{引張鉄筋応力度} & \quad \sigma_{st} = nE_c \cdot \varphi(1 - x_{n1} - d_{t1})D \end{aligned}$$

ここでは、曲率 φ 及び中立軸深さ比 x_{n1} を以下として設定する。

$$\begin{aligned} \text{曲率}\varphi & \quad = 2.00 \times 10^{-6} \text{ (1/mm)} \\ \text{中立軸深さ比}x_{n1} & \quad = 0.45 \end{aligned}$$

この場合のコンクリート・鉄筋の応力度は以下となる。(なお、本検証では、これらの応力度とSCARC出力値を比較する。)

$$\begin{aligned} \sigma_c & = 24,000\text{N/mm}^2 \times 2.00 \times 10^{-6}/\text{mm} \times 0.45 \times 1,000\text{mm} \\ & = 21.6\text{N/mm}^2 \\ \sigma_{sc} & = 10 \times 24,000\text{N/mm}^2 \times 2.00 \times 10^{-6}/\text{mm} \times \{0.45 - (150\text{mm} / 1,000\text{mm})\} \times 1,000\text{mm} \\ & = 144\text{N/mm}^2 \\ \sigma_{st} & = 10 \times 24,000\text{N/mm}^2 \times 2.00 \times 10^{-6}/\text{mm} \times \{1.0 - 0.45 - (150\text{mm} / 1,000\text{mm})\} \times 1,000\text{mm} \\ & = 192\text{N/mm}^2 \end{aligned}$$



また、軸力・曲げモーメントは以下となる。

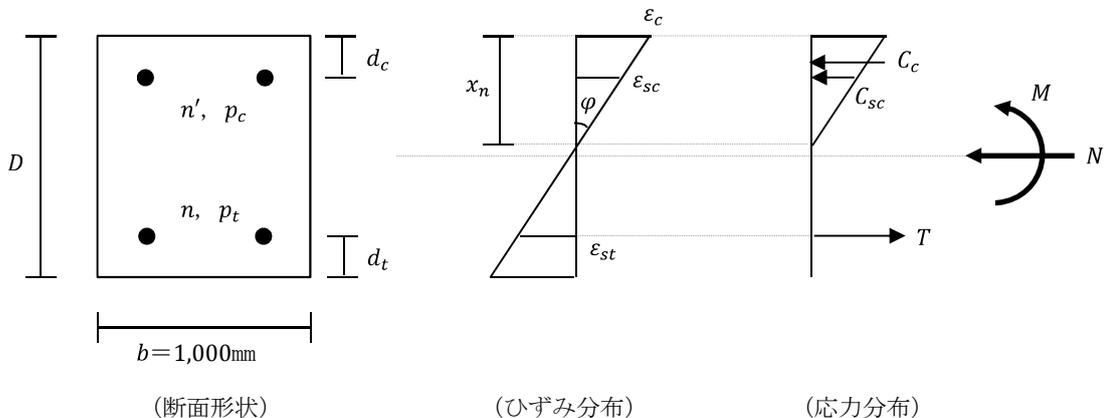
$$\begin{aligned}
 C_c &= \frac{1}{2} b \cdot x_{n1} D \cdot \sigma_{sc} \\
 &= 1/2 \times 1,000\text{mm} \times 0.45 \times 1,000\text{mm} \times 21.6\text{N/mm}^2 / 1,000 \\
 &= 4,860\text{kN} \text{ (圧縮)} \\
 &\quad \text{(作用位置: 材芯より } 1/2 \times 1,000\text{mm} - 1/3 \times 0.45 \times 1,000\text{mm} = 350\text{mm)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C_{sc} &= p_c \cdot b \cdot D \cdot \sigma_{sc} \\
 &= 1.0/100 \times 1,000\text{mm} \times 1,000\text{mm} \times 144\text{N/mm}^2 / 1,000 \\
 &= 1,440\text{kN} \text{ (圧縮)} \\
 &\quad \text{(作用位置: 材芯より } 1/2 \times 1,000\text{mm} - 150\text{mm} = 350\text{mm)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T &= p_t \cdot b \cdot D \cdot \sigma_{st} \\
 &= 1.0/100 \times 1,000\text{mm} \times 1,000\text{mm} \times 192\text{N/mm}^2 / 1,000 \\
 &= 1,920\text{kN} \text{ (引張)} \\
 &\quad \text{(作用位置: 材芯より } 1/2 \times 1,000\text{mm} - 150\text{mm} = 350\text{mm)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 N &= C_c + C_{sc} - T \\
 &= 4,860\text{kN} + 1,440\text{kN} - 1,920\text{kN} \\
 &= \underline{4,380\text{kN}} \text{ (圧縮力)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M &= 4,860\text{kN} \times 350\text{mm} / 1,000 + 1,440\text{kN} \times 350\text{mm} / 1,000 + 1,920\text{kN} \times 350\text{mm} / 1,000 \\
 &= \underline{2,877\text{kN} \cdot \text{m}}
 \end{aligned}$$



この軸力N及び曲げモーメントMを入力値として、SCARCでコンクリート・鉄筋応力度及び検定比を算出する。

なお、上記入力時におけるコンクリート圧縮縁・圧縮及び引張鉄筋の検定比は以下となり、これとSCARC結果とを比較する。

$$\begin{aligned}
 \text{(コンクリート圧縮縁 検定比)} &= 21.6\text{N/mm}^2 / (2/3 \times 36\text{N/mm}^2) = 0.9000 \\
 \text{(圧縮鉄筋 検定比)} &= 144\text{N/mm}^2 / 390\text{N/mm}^2 = 0.3692 \\
 \text{(引張鉄筋 検定比)} &= 192\text{N/mm}^2 / 390\text{N/mm}^2 = 0.4923
 \end{aligned}$$

設定値と SCARC 出力値の比較を以下に示す。

表 3-4 設定値と SCARC 結果の比較

(a) 応力度

	設定値	SCARC	誤差 (%)
コンクリート圧縮縁応力度 σ_c (N/mm ²)	21.6	21.6	0.0000
圧縮鉄筋応力度 σ_{sc} (N/mm ²)	144	144	0.0000
引張鉄筋応力度 σ_{st} (N/mm ²)	192	192	0.0000

(b) 検定比

	設定値	SCARC	誤差 (%)
コンクリート圧縮縁 検定比	0.9000	0.9000	0.0000
圧縮鉄筋 検定比	0.3692	0.3692	0.0000
引張鉄筋 検定比	0.4923	0.4923	0.0000

以上より、軸力-曲げモーメントについて、SCARC結果は設定値と一致したため、SCARCの計算結果は妥当であると判断できる。

(2) 面内せん断力に対する検証

面内せん断力に対する検証は、設定断面における許容せん断力（又は許容せん断応力度）及び検定比について、SCARC結果と理論解結果との比較にて行う。

a. RC-N 規準

以下に示す壁断面，材料・許容応力度及び荷重（短期）に対して，SCARCと理論解による結果の比較を行う。

表 3-5 断面形状

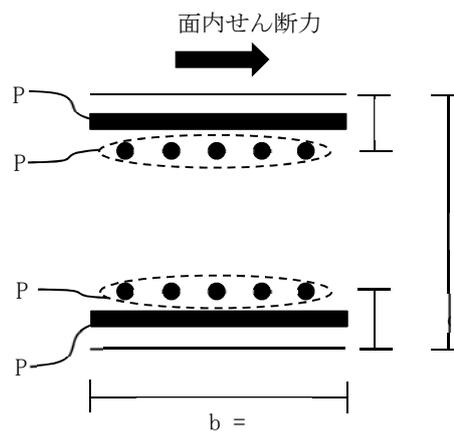
壁厚 t (mm)	鉄筋重心位置		X方向壁筋比		Y方向壁筋比	
	dc (mm)	dt (mm)	Pc_X (%)	Pt_X (%)	Pc_Y (%)	Pt_Y (%)
1,000	100	100	0.570	0.570	0.570	0.570

表 3-6 コンクリート強度及び鉄筋の許容応力度

コンクリート強度 Fc (N/mm ²)	主筋 許容応力度 f _t (N/mm ²)
30	390

表 3-7 荷重条件

軸力 N (kN/m)	曲げモーメント M (kN・m/m)	面内せん断力 N _{xy} (kN/m)	面外せん断力 Q (kN/m)
0	0	4000	0



理論解による許容面内せん断力及び検定比を算定する。

$$Q_A = \max(Q_1, Q_2)$$

$$Q_1 = t \cdot l \cdot f_s$$

$$Q_2 = \sum Q_w + \sum Q_c$$

$$Q_w = p_s \cdot t \cdot l' \cdot s f_t$$

$$Q_c = b j \{ \alpha f_s + 0.5_w f_t (p_w - 0.002) \}$$

$$t = 1,000 \text{ mm}$$

$$l = b = 1,000 \text{ mm}$$

$$f_s = 1.5 \times \min(0.49 + 30/100, 30/30) = 1.185 \text{ N/mm}^2$$

$$p_s = P_{c_X} + P_{t_X} = 0.570 + 0.570 = 1.14\%$$

$$l' = b = 1,000 \text{ mm}$$

$$s f_t = f_t = 390 \text{ N/mm}^2$$

$$Q_w = 1.14/100 \times 1,000 \text{ mm} \times 1,000 \text{ mm} \times 390 \text{ N/mm}^2 / 1000 = 4,446 \text{ kN}$$

$$Q_c = 0 \text{ kN}$$

$$Q_1 = 1,000 \text{ mm} \times 1,000 \text{ mm} \times 1.185 \text{ N/mm}^2 / 1,000 = 1,185 \text{ kN}$$

$$Q_2 = Q_w + Q_c = 4,446 \text{ kN}$$

$$Q_A = \max(Q_1, Q_2) = 4,446 \text{ kN}$$

$$\text{検定比} = Q / Q_A = 0.8997$$

SCARCによる計算結果と、理論解結果の比較を示す。

表 3-8 計算結果の比較

	SCARC	理論解	誤差(%)
許容面内せん断力 Q_A (kN)	4,446	4,446	0.0000
検定比	0.8997	0.8997	0.0000

以上より、RC-N規準を準用した場合の面内せん断力について、SCARC結果と理論解結果は一致したため、SCARCの計算結果は妥当であると判断できる。

b. CCV 規格

以下に示す壁断面，材料・許容応力度及び荷重（荷重状態IV）に対して，SCARCと理論解による結果の比較を行う。

表 3-9 断面形状

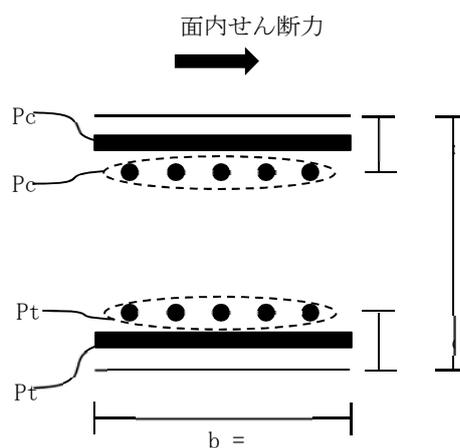
壁厚 t (mm)	鉄筋重心位置		円周方向壁筋比		子午線方向壁筋比	
	dc (mm)	dt (mm)	Pc_θ (%)	Pt_θ (%)	Pc_φ (%)	Pt_φ (%)
1,100	205	305	0.431	0.727	0.889	0.889

表 3-10 コンクリート強度及び鉄筋の許容応力度

コンクリート強度 Fc (N/mm ²)	主筋 f _t (N/mm ²)
42	390

表 3-11 荷重条件

	軸力		曲げモーメント M (kN・m/m)	面内せん断力 N _φ (kN/m)	面外せん断力 Q (kN/m)
	円周方向 N _θ (kN/m)	子午線方向 N _φ (kN/m)			
プレストレス以外	-121	-8,712	0	3,886	0
プレストレス	-4,543	-5,016	0	-392	0
合計	-4,664	-13,728	0	3,494	0



理論解による許容面内せん断応力度及び検定比を算定する。

$$\begin{aligned}\tau_u &= \min(\tau_{u1}, \tau_{u2}) \\ \tau_{u1} &= 0.5\{(p_{t\phi}f_y - \sigma_{p\phi} - \sigma_{0\phi}) + (p_{t\theta}f_y - \sigma_{p\theta} - \sigma_{0\theta})\} \\ \tau_{u2} &= 1.25\sqrt{F_c}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}t &= 1,100\text{mm} \\ p_{t\phi} &= P_{c_phi} + P_{t_phi} = 0.889 + 0.889 = 1.778\% \\ \sigma_{p\phi} &= -5,016\text{kN} \times 1,000 / (1,100\text{mm} \times 1,000\text{mm}) = -4.56\text{N/mm}^2 \\ \sigma_{0\phi} &= -8,712\text{kN} \times 1,000 / (1,100\text{mm} \times 1,000\text{mm}) = -7.92\text{N/mm}^2 \rightarrow 0.00\text{N/mm}^2 \\ p_{t\theta} &= P_{c_theta} + P_{t_theta} = 0.431 + 0.727 = 1.158\% \\ \sigma_{p\theta} &= -4,543\text{kN} \times 1,000 / (1,100\text{mm} \times 1,000\text{mm}) = -4.13\text{N/mm}^2 \\ \sigma_{0\theta} &= -121\text{kN} \times 1,000 / (1,100\text{mm} \times 1,000\text{mm}) = -0.11\text{N/mm}^2 \rightarrow 0.00\text{N/mm}^2 \\ f_y &= f_t = 390\text{N/mm}^2 \\ F_c &= 42\text{N/mm}^2 \\ \tau_{u1} &= 0.5 \times \{ (1.778/100 \times 390\text{N/mm}^2 - (-4.56\text{N/mm}^2) - (0.00\text{N/mm}^2)) \\ &\quad + (1.158/100 \times 390\text{N/mm}^2 - (-4.13\text{N/mm}^2) - (0.00\text{N/mm}^2)) \} = 10.07\text{N/mm}^2 \\ \tau_{u2} &= 1.25 \times \sqrt{42} = 8.101\text{N/mm}^2 \\ \tau_u &= \min(10.07\text{N/mm}^2, 8.101\text{N/mm}^2) = 8.101\text{N/mm}^2 \\ Q &= 3,494\text{kN} \\ \tau &= 3,494\text{kN} \times 1,000 / (1,100\text{mm} \times 1,000\text{mm}) = 3.176\text{N/mm}^2 \\ \text{検定比} &= \tau/\tau_u = 3.176\text{N/mm}^2 / 8.101\text{N/mm}^2 = 0.3921\end{aligned}$$

SCARCによる計算結果と、理論解結果の比較を示す。

表 3-12 計算結果の比較

	SCARC	理論解	誤差(%)
許容面内せん断応力度 τ_u (N/mm ²)	8.101	8.101	0.0000
検定比	0.3921	0.3921	0.0000

以上より、CCV規格を準用した場合の面内せん断応力度について、SCARC結果と理論解結果は一致したため、SCARCの計算結果は妥当であると判断できる。

(3) 面外せん断力に対する検証

面外せん断力に対する検証は、設定断面における許容せん断力（又は許容せん断応力度）及び検定比について、SCARC結果と理論解結果との比較にて行う。

a. RC-N 規準

以下に示す壁断面、材料・許容応力度及び荷重に対して、SCARCと理論解による結果の比較を行う。なお、応力は短期応力として行う。

表 3-13 断面形状

壁厚 t (mm)	鉄筋重心位置		X方向壁筋比		Y方向壁筋比		面外せん断補強筋比 Pw (%)
	dc (mm)	dt (mm)	Pc_X (%)	Pt_X (%)	Pc_Y (%)	Pt_Y (%)	
1,000	100	100	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000

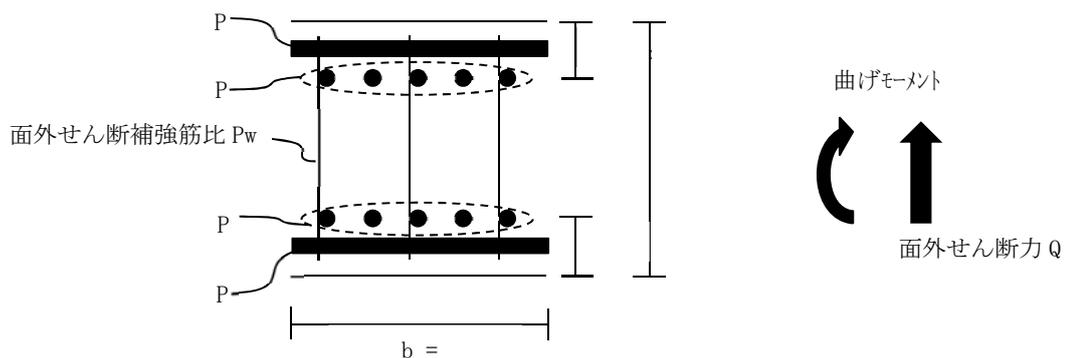
表 3-14 コンクリート強度及び鉄筋の許容応力度

コンクリート強度 Fc (N/mm ²)	面外せん断補強筋 許容応力度 wf _t (N/mm ²)
30	0

(Pw=0%の場合の検討のため、wf_t = 0N/mm²)

表 3-15 荷重条件

軸力 N (kN/m)	曲げモーメント M (kN・m/m)	面内せん断力 Nxy (kN/m)	面外せん断力 Q (kN/m)
0	460	0	400



理論解による許容面外せん断力及び検定比を算定する。

- ・面外せん断補強筋がない場合

$$Q_A = bj\alpha f_s$$

- ・面外せん断補強筋がある場合

$$Q_A = bj\{\alpha f_s + 0.5_w f_t(p_w - 0.002)\}$$

$$b = 1,000\text{mm}$$

$$D = t = 1,000\text{mm}$$

$$d_t = 100\text{mm}$$

$$d = 1,000\text{mm} - 100\text{mm} = 900\text{mm}$$

$$j = 7/8 \times 900\text{mm} = 787.5\text{mm}$$

$$M = 460\text{kN} \cdot \text{m}/\text{m}$$

$$Q = 400\text{kN}/\text{m}$$

$$M/Qd = 460\text{kN} \cdot \text{m}/\text{m} / \{400\text{kN}/\text{m} \times (900\text{mm} / 1,000)\} = 1.278$$

$$\alpha = 4 / (1.278 + 1) = 1.756$$

$$f_s = 1.5 \times \min(0.49 + 30/100, 30/30) = 1.185\text{N}/\text{mm}^2$$

$$p_w = 0.0\%$$

$$Q_A = 1,000\text{mm} \times 787.5\text{mm} \times 1.756 \times 1.185\text{N}/\text{mm}^2 / 1,000 = 1,639\text{kN}$$

$$\text{検定比} = 400\text{kN} / 1,639\text{kN} = 0.2441$$

SCARCによる計算結果と、理論解結果の比較を示す。

表 3-16 計算結果の比較

	SCARC	理論解	誤差(%)
許容面外せん断力 Q_A (kN)	1,639	1,639	0.0000
検定比	0.2441	0.2441	0.0000

以上より、RC-N規準を準用した場合の面外せん断力について、SCARC結果と理論解結果は一致したため、SCARCの計算結果は妥当であると判断できる。

b. CCV 規格

以下に示す壁断面，材料・許容応力度及び荷重に対して，SCARCと理論解による結果の比較を行う。なお，荷重状態IVとして検討を行う。

表 3-17 断面形状

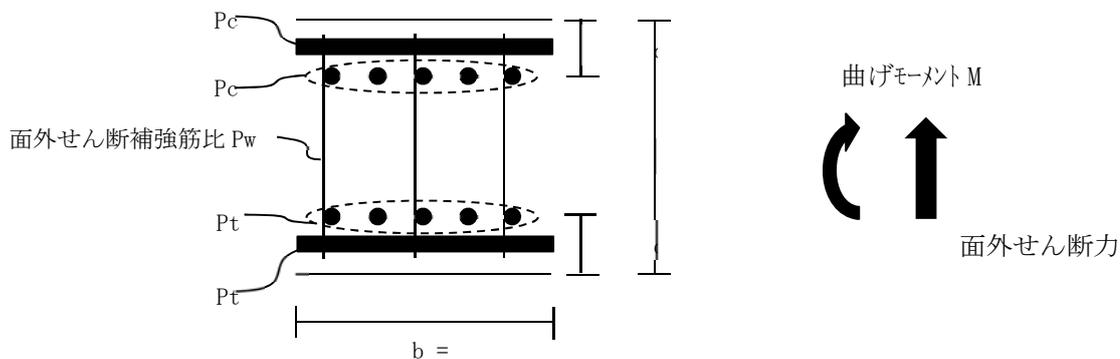
壁厚 t (mm)	鉄筋重心位置		円周方向壁筋比		子午線方向壁筋比		面外せん断補強筋比 Pw (%)
	dc (mm)	dt (mm)	Pc_θ (%)	Pt_θ (%)	Pc_φ (%)	Pt_φ (%)	
2,000	295	395	0.900	0.900	1.182	1.773	0.532

表 3-18 コンクリート強度及び鉄筋の許容応力度

コンクリート強度 Fc (N/mm ²)	主筋 許容応力度 f _t (N/mm ²)	面外せん断補強筋 許容応力度 w _t f _t (N/mm ²)
42	390	345

表 3-19 荷重条件

軸力 N (kN/m)	曲げモーメント M (kN・m/m)	面内せん断力 N _{xy} (kN/m)	面外せん断力 Q (kN/m)
10,680	12,258	0	2,704



理論解による許容面外せん断応力度及び検定比を算定する。

$$\tau_R = \min(\tau_{R1}, \tau_{R2})$$

$$\tau_{R1} = \varphi\{0.1(p_t f_y - \sigma_0) + 0.5p_w \cdot f_{wy} + 0.235\sqrt{F_c}\}$$

$$\tau_{R2} = 1.10\sqrt{F_c}$$

$$D = t = 2,000\text{mm}$$

$$d_t = 395\text{mm}$$

$$p_t = P_{c_phi} + P_{t_phi} = 1.182\% + 1.773\% = 2.955\%$$

$$p_w = 0.532\%$$

$$f_y = f_t = 390\text{N/mm}^2$$

$$f_{wy} = w f_t = 345\text{N/mm}^2$$

$$F_c = 42 \text{ N/mm}^2$$

$$N = 10,680\text{kN}$$

$$\sigma_0 = 10,680\text{kN} \times 1,000 / (2,000\text{mm} \times 1,000\text{mm}) = 5.34\text{N/mm}^2$$

$$M = 12,258\text{kN} \cdot \text{m}$$

$$Q = 2,704\text{kN}$$

$$d = 2,000\text{mm} - 395\text{mm} = 1,605\text{mm}$$

$$M/Qd = 12,258\text{kN} \cdot \text{m} / \{2,704\text{kN} \times (1,605\text{mm} / 1,000)\} = 2.824$$

$$\varphi = 1 / \sqrt{2.824} = 0.5951$$

$$\tau_{R1} = 0.5951 \times \{0.1 \times (2.955\% / 100 \times 390\text{N/mm}^2 - 5.34) + 0.5 \times 0.532\% / 100 \times 345\text{N/mm}^2 + 0.235 \times \sqrt{42\text{N/mm}^2}\} = 1.820\text{N/mm}^2$$

$$\tau_{R2} = 1.10 \times \sqrt{42\text{N/mm}^2} = 7.129\text{N/mm}^2$$

$$\tau_R = \min(\tau_{R1}, \tau_{R2}) = 1.820\text{N/mm}^2$$

$$\tau = 2,704\text{kN} \times 1,000 / (2,000\text{mm} \times 1,000\text{mm}) = 1.352\text{N/mm}^2$$

$$\text{検定比} = 1.352\text{N/mm}^2 / 1.820\text{N/mm}^2 = 0.7429$$

SCARCによる計算結果と、理論解結果の比較を示す。

表 3-20 計算結果の比較

	SCARC	理論解	誤差(%)
許容面外せん断応力度 τ_R (N/mm ²)	1.820	1.820	0.0000
検定比	0.7428	0.7429	0.0135

以上より、CCV規格を準用した場合の面外せん断応力度について、SCARC結果と理論解結果の誤差は微小であり、SCARCの計算結果は妥当であると判断できる。

(4) 使用に関する妥当性

SCARCを原子力施設の壁・床部材の断面算定に使用することは次のとおり妥当である。

- ・ 検証の内容のとおり，軸力-曲げモーメント，面内せん断力及び面外せん断力に対する断面算定結果は，理論解結果との比較により検証していることから，断面算定評価の目的に照らして今回の計算に使用することは妥当である。

V-5-39 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ E n g i n e e r ' s S t u d i o

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 (耐震・耐津波関連)	3
3.	Engineer's Studio の解析手法について (耐震・耐津波関連)	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	10
3.5	検証(Verification)と妥当性(Validation)	11
4.	解析コードの概要 (竜巻関連)	21
5.	Engineer's Studio の解析手法について (竜巻関連)	22
5.1	一般事項	22
5.2	解析コードの特徴	22
5.3	解析手法	22
5.4	解析フローチャート	25
5.5	検証(Verification)と妥当性(Validation)	27

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）Engineer's Studio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-2-2-7	取水構造物の耐震性についての計算書	Ver. 6.00.04
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. 6.00.04
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. 6.00.04
V-2-10-4-3	海水引込み管の耐震性についての計算書	Ver. 6.00.04
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. 6.00.04
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. 6.00.04
V-3-別添1-1-10-1	建屋及び構造物の強度計算書	Ver. 6.00.04
V-3-別添3-2-1-1	防潮堤（鋼製防護壁）の強度計算書	Ver. 6.00.04
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. 6.00.04

2. 解析コードの概要 (耐震・耐津波関連)

項目 \ コード名	Engineer's Studio
使用目的	3次元有限要素法による静的解析
開発機関	株式会社フォーラムエイト
開発時期	2009年
使用したバージョン	Ver. 6.00.04
コードの概要	<p>Engineer's Studio (以下「本解析コード」という。)は、3次元有限要素法 (FEM) 解析を行う解析コードである。主な特徴は下記のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・土木建築構造物の部材を、1本の棒に見立てたはり要素や平面的に連続した平板要素でモデル化して構造物の応答解析を行い、断面力及び変位の算出を行う。 ・地盤の非線形性は、非線形バネ要素でモデル化することにより考慮する。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>本解析コードは、はり及び平板要素並びに非線形地盤バネを用いた静的解析による断面力及び変位の算定に使用されている。</p> <p>【検証(Verification)】 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"> ・本解析コードによる単純梁、単純平板モデルに対する解析結果と理論解が一致することを確認している。 ・本解析コードによる非線形地盤バネの履歴が想定している骨格曲線と一致していることを確認している。 ・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。 <p>【妥当性確認(Validation)】 本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・検証内容のとおり、梁モデル、平板モデル、地盤バネ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。

3. Engineer's Studioの解析手法について (耐震・耐津波関連)

3.1 一般事項

Engineer's Studioは土木・建築構造物の部位を1本の棒に見立てた梁要素や平面的に連続した平板要素でモデル化して、構造物の非線形挙動を解析できる3次元有限要素法(FEM)解析プログラムである。Engineer's Studioは、防潮堤躯体及び連続壁基礎の梁、板、非線形地盤バネモデルを用いた静的解析による断面力及び変位の算定に使用している。

3.2 解析コードの特徴

Engineer's Studioの主な特徴を以下に示す。

- ・構造物を1本棒に見立てたはり要素や平面的に連続した平板要素でモデル化して、構造物の応答解析を行い、断面力及び変位の算出が可能である。
- ・地盤の非線形性は、バネ要素でモデル化することにより考慮することが可能である。

3.3 解析手法

(1) 弾性梁要素

弾性梁要素は2節点を直線で結ぶ要素であり、軸方向の伸縮変形と2節点の回転変位を含む相対変位によって生じる曲げと捻れ変形に対して弾性の復元力を持つ要素である。

2節点要素であるから、3次元空間内にある要素両端自由度は12であり、要素の剛体としての変位を拘束する自由度は6個必要であるから、差し引き6個の自由度が要素の弾性変形を表す要素端変形となる。この要素端変形と仕事の対をなす力が要素端力である。言い換えれば、要素端に働く3つの力の内、6個は要素変形を生じさせ、6個は要素を支持する支点反力を意味する。この静定な支点条件要素座標系の設定によって、要素端力と要素端変形が確定する。

要素座標系として単純支持あるいは片持ち支持など考えることができる。本解析では要素座標系内における幾何学的非線形を考慮しないため、非線形解析では要素内の幾何学的非線形性の度合いに応じて解が異なる。一方、線形解析では要素座標系の取り方に解は依存しない。要素内の変形において、その幾何学的非線形性の影響が小さい支持条件が解析上合理的と言えるから、定義する要素座標系は、単純支持の支点条件を採用する。したがって、6個の要素端変形を次のように定義し、図示すれば、図3-1のとおりである。

$$\Delta l, \theta_x, \theta_{iy}, \theta_{iz}, \theta_{jy}, \theta_{jz}$$

ここに、サフィックス i, j は要素両端を表す。なお、図中の $\theta_{ic} e_{ic}$ と $\theta_{jc} e_{ic}$ は、要素端の回転変形成分の合成ベクトルである。

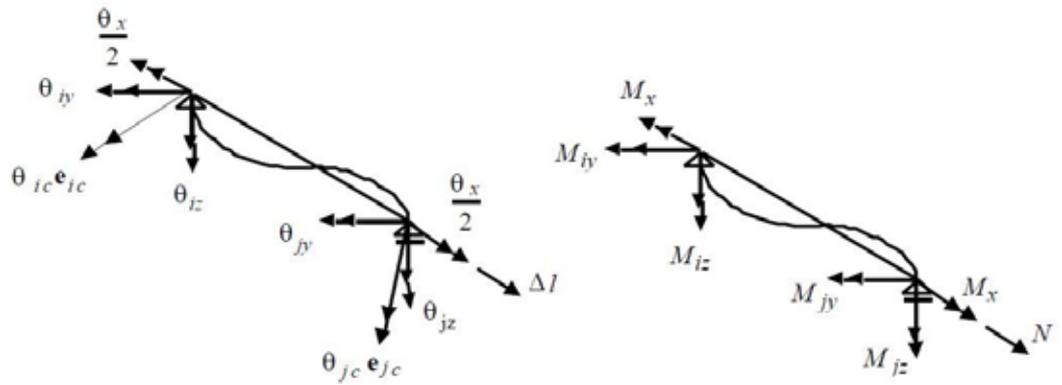


図3-1 要素端変形と要素端力

一方、要素端変形の仕事の対である要素端力は、要素両端を結ぶ弦方向の力 N 、弦回りの端モーメント M_x 、両端それぞれにおいて弦に直交する2軸回りの端モーメントとなる。まとめれば、

$$N, M_x, M_{iy}, M_{iz}, M_{jy}, M_{jz}$$

であり、これも図3-1に示すとおりである。

(2) 平板要素

Engineer's Studioで用いられているMindlin平板要素は有限要素法 (FEM) について記載されている一般的な参考書を参照している。以降は主要な点だけを述べるが、理論の詳細は下記文献に基づいている。

参考文献 (1)

Zienkiewicz, O. C. and Taylor, R. L. The Finite Element Method. Fifth Edition. 2000. Vol. 1 The Basis. ISBN 0 7506 5049 4.

参考文献 (2)

The Finite Element Method. Fifth Edition. 2000. Vol. 2 Solid Mechanics. ISBN 0 7506 5055 9.

Engineer's Studioの板要素は3次元の平板要素であり、要素は3次元空間に平面を仮定する。要素は節点により定義される。Engineer's Studioは4つの異なる、3節点三角形、6節点三角形、4節点四角形と8節点四角形の平板要素に対応している。6節点及び8節点の平板要素は「セレンディピティ型」要素として知られている要素に属しており、この名前は、要素で使用されている形状関数に起因する。(詳細は参考文献 (1) 8.6章174ページを参照)

	Triangular			Quadrilateral		
Shape						
Nodes	3	6	8	4	8	9
Gauss Points	1	3	4	1	4	9
Gauss Level	1 X	2	3 X	1 X	2	3

X Not supported n Standard node position n in the element description.

図3-2 平板要素のメッシュ要素

面内については、一般的な2次元平面応力モデルが適用される。（詳細は例えば、参考文献(1)の4章「平面応力と平面ひずみ」を参照）

面外については、せん断、曲げ成分両方を考慮する。面外の曲げは、平板要素の厚みから得られる面内層のひずみを積分したもので、面外せん断モデルは線形弾性であり、その値は要素の厚さを通して全ての層で積分することで得られる。

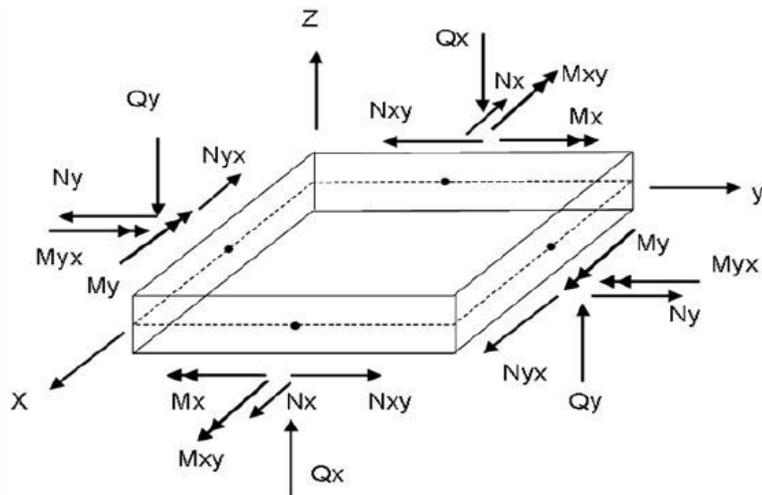


図3-3 平板要素断面力

(3) 地盤バネ

バネ要素は要素の長さがゼロあるいは無視できる要素に対して適用する。バネ要素両端に接続された2節点の変位から計算される要素両端の相対変位を要素変形と定義する。

図3-4には要素変形を明確にするため、並進変形と回転変形を分離して示している。

並進変形及び回転変形の成分を求めるために必要となる変位後の要素座標系は、次のように決定する。節点変位と共に回転する要素端 i に設定された要素端座標系が、変位後の他端 j 要素端座標系に一致する回転を求める。この回転の半回転を i 端座標系に与えた回転後の座標系を要素座標系と定義する。並進変形の各成分は 2 節点を結ぶベクトルの要素座標軸成分であり、回転変形は i 端座標系が j 端座標系に一致する回転ベクトルを要素座標軸成分として求めたものになる。

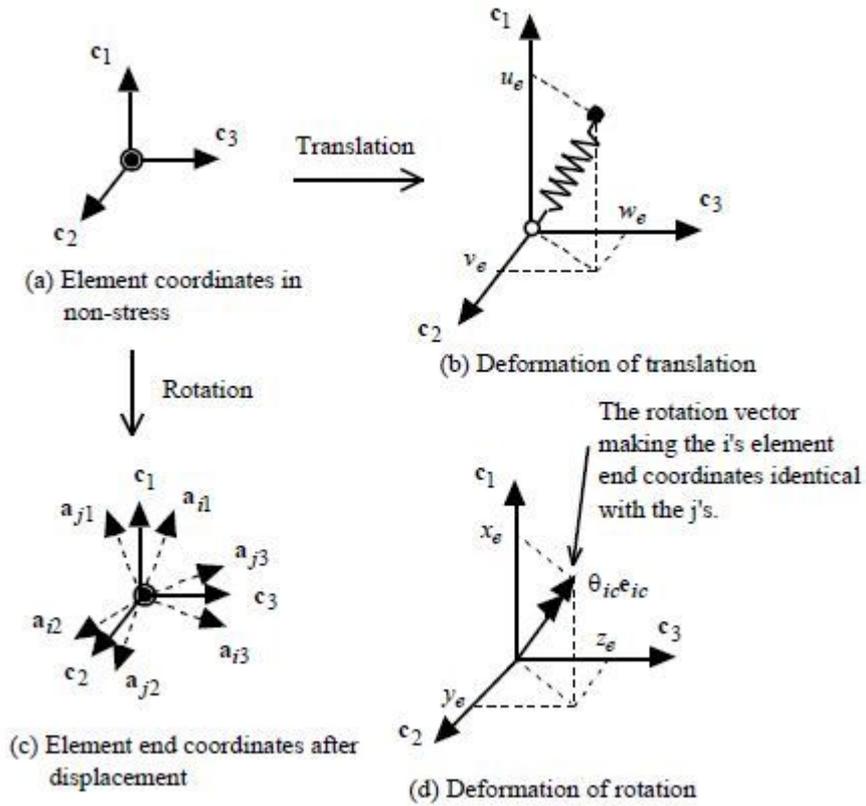


図3-4 バネ要素の要素変形と要素座標系

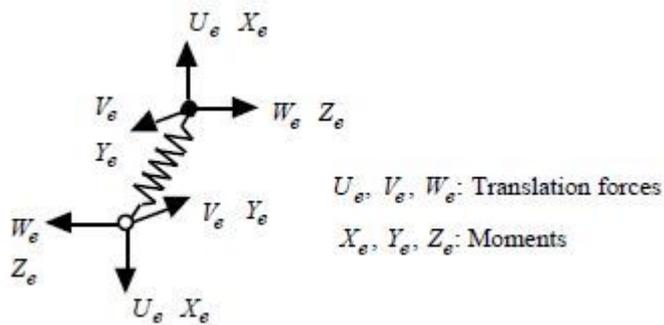


図3-5 バネ要素の要素端力

したがって、これら要素変形と仕事の対を成す要素端力は、図3-5に示すように、要素座標軸に平行であり要素両端で逆向きとなる3つの対をなす並進力と、要素座標軸周り両端逆向きの3対の端モーメントである。要素端に作用するそれぞれ6個の力の内、これら3並進力と3端モーメントの6つの力が独立である。要素端に作用する12の力の内、これら独立な端力を除く6つの力は3対の並進力に釣り合うべき端モーメントであることは明白であるが、これらの従属する力が要素両端にどのように作用するかは明確ではない。しかし、定義された要素座標系から厳密な適合条件により導かれる要素変形を節点変位により展開することによって、線形の適合条件が導かれるとともに、平衡条件式も同様に得ることができる。結果として、3並進力に釣り合うべき3つのモーメントを両端に均等に配分することにより生じる6つのモーメント（回転変形と対を成すモーメントとは異なるモーメント）が、従属な要素端力となる。

この要素座標系の大きな特徴は、バネ要素が接続される2節点の均等性が保証されることと、バネ要素長がゼロであっても幾何剛性が算出できる点にある。線要素に単純梁要素座標系を採用した場合、軸力をその要素長で割る幾何剛性が存在し、これ故に要素長ゼロが発生する要素に対しては単純梁要素座標系が適用できない。一方、片持ち梁要素座標系では幾何剛性にゼロ割は生じないものの、固定端側に接続される節点と自由端側に接続される節点では、要素内の幾何学的非線形を完全に取り入れない限り節点間の不均等性が現れ、片持ち梁要素座標系の与え方次第で解は異なることになる。ここで定義した要素座標系はこれらの問題点を解消できるものである。しかしながら、ゴム支承などのせん断変形が卓越し、要素長が確実に保証できる部材にこの要素座標系を適用した場合、せん断変形により見かけ上軸方向の圧縮変形が生じ、本来存在しない圧縮力を生み出すこととなり、実現象に対する精度の悪化は否めない。要素長ゼロの可能性が無い要素であれば、曲げ変形に加えてせん断変形を行う線要素として単純梁要素座標系を使用することが望ましい。本解析で使用するバネ要素においては、要素端力は仕事の対として対応する要素変形によってバネ定数から独立に決定されるものとし、他の要素変形との連成は無いものとする。要素変形と要素端力の関係は非弾性も可能とし、バネの復元力特性として、バイリニアあるいは一方向のみ復元力がバイリニアとなる非弾性性状を与えることができるものとする。

図3-6に示す2重節点（要素両端の変位が1つ以上の自由度について一致する節点）は、このバネ要素で設定するものとする。非線形解析においては、変位が一致する方向は節点変位と共に変化するため、厳密な適合条件から求めた変位後の要素座標系を使用して、2重節点における変位が一致する方向を確定する必要がある。

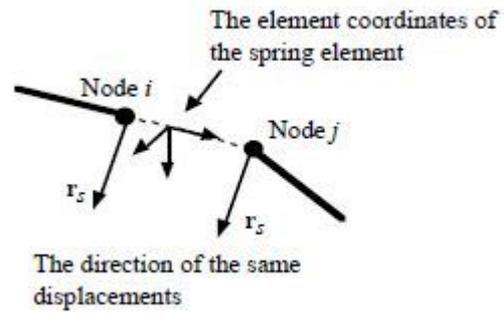


图3-6 2重节点

3.4 解析フローチャート

解析フローチャートを図3-7に示す。

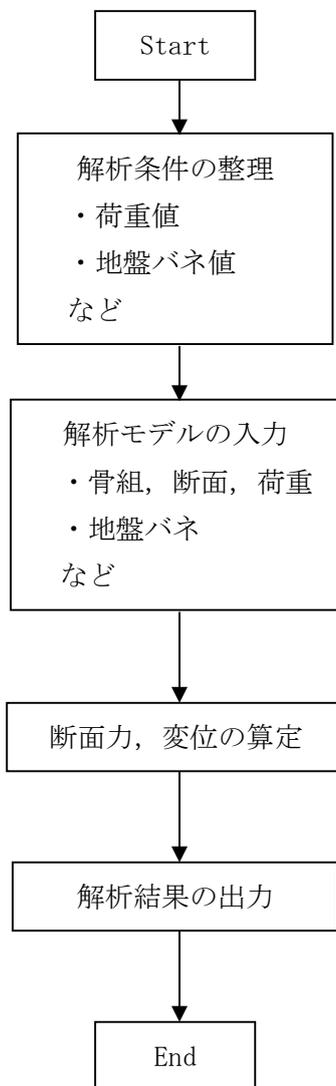


図3-7 解析フローチャート

3.5 検証(Verification)と妥当性(Validation)

(1) 理論解との比較による検証

梁モデル及び平板モデルについては、単純梁、単純板の理論解と比較を行う。地盤バネについては、単純なモデルで地盤バネの履歴が想定している骨格曲線と一致しているかを確認し検証を行う。

a. 梁モデル

単純梁モデルに等分荷重を載荷した時の最大曲げモーメント，最大せん断力，最大たわみの理論解と解析結果の比較を行う。

・解析モデル

解析モデルは図3-8に示すモデルとし，解析条件は下記のとおりとする。

- ・長さ L : 10 (m)
- ・ヤング係数 E : 25000 N/mm² → 25000000 kN/m²
- ・断面二次モーメント I : 1 m⁴
- ・等分布荷重 q : 10 kN/m

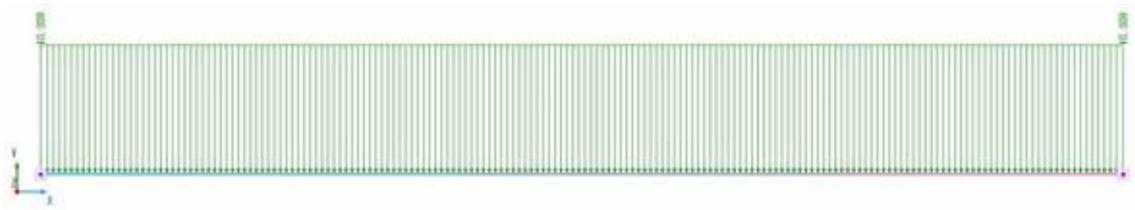


図3-8 解析モデル図(梁モデル)

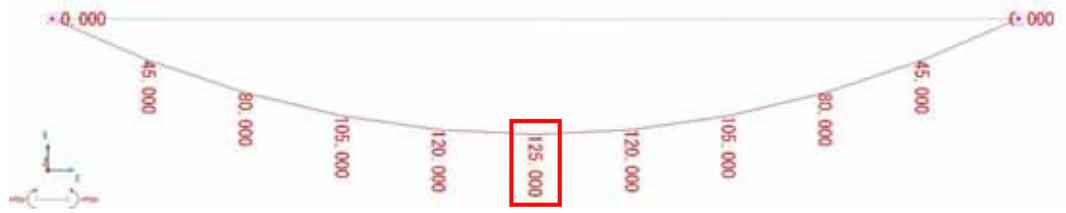
この条件での最大曲げモーメント，最大せん断力，最大たわみの理論解は，構造力学公式集より以下のとおりとなる。

$$\text{最大曲げモーメント } M_{\max} = qL^2/8 = (10 \times 10^2)/8 = 1000/8 = 125 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$\text{最大せん断力 } S_{\max} = qL/2 = (10 \times 10)/2 = 50 \text{ kN}$$

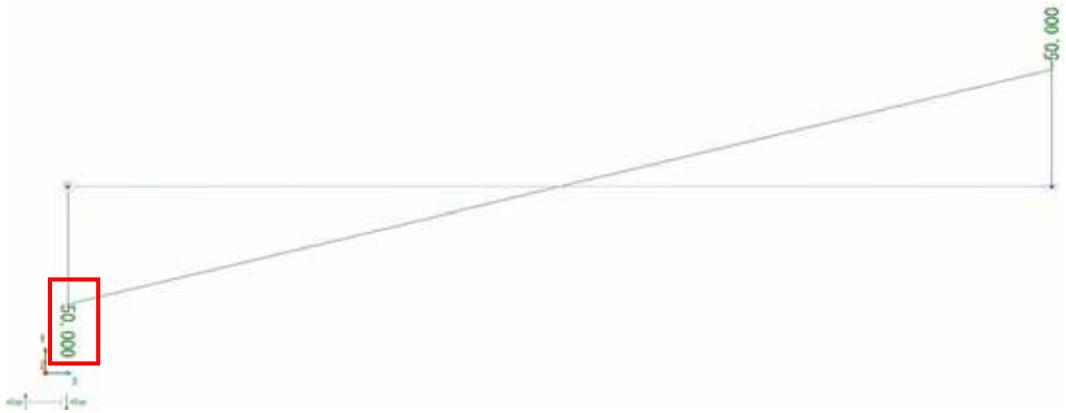
$$\begin{aligned} \text{最大たわみ } y_{\max} &= 5qL^4/384EI = (5 \times 10 \times 10^4)/(384 \times 25000000 \times 1) = 5.20833 \times 10^{-5} \text{ m} \\ &= 0.052083 \text{ mm} \end{aligned}$$

Engineer's Studioの曲げモーメントの算出結果を図3-9に，せん断力の算出結果を図3-10に，たわみの算出結果を図3-11に示す。



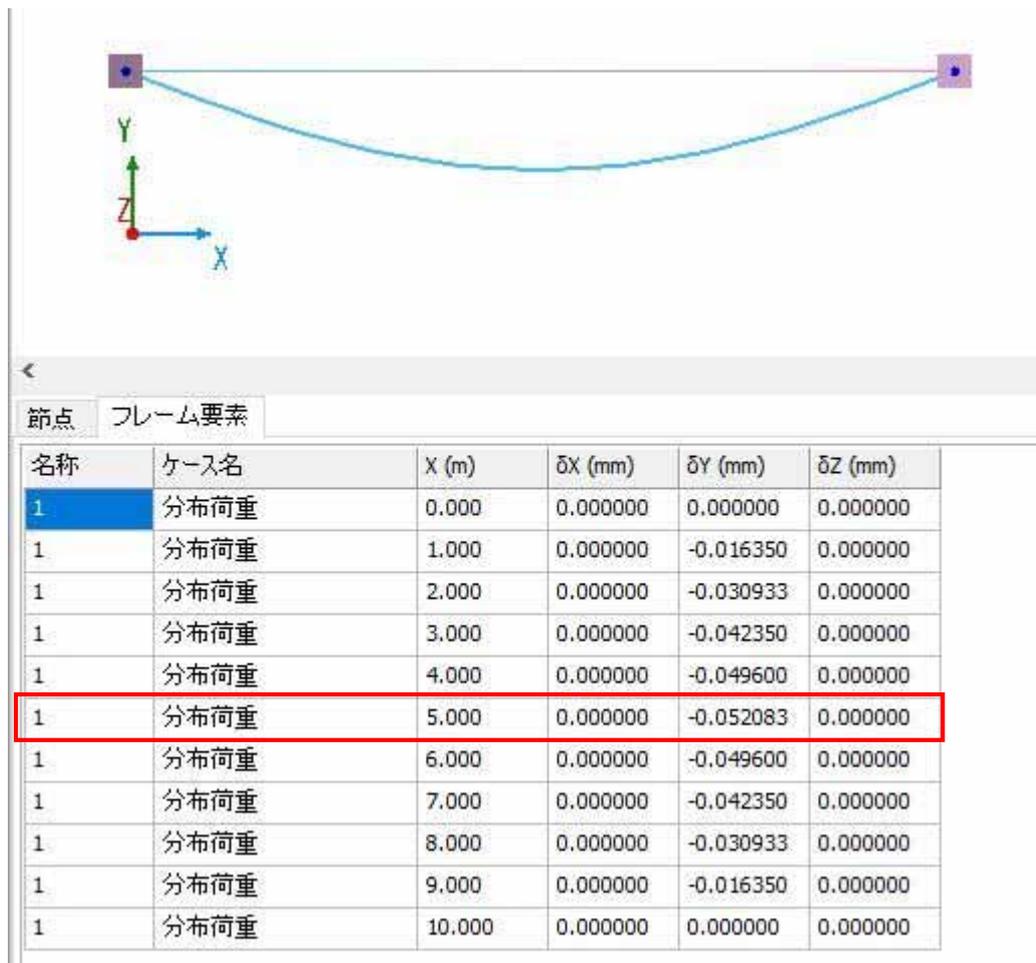
最大曲げモーメント $M_{z \text{ p m a x}} = 125 \text{ kN}\cdot\text{m}$

図3-9 曲げモーメントの算出結果



最大せん断力 $S_{y \text{ p m a x}} = 50 \text{ kN}$

図3-10 せん断力の算出結果



最大たわみ $\delta y_{max} = -0.052083$ mm

図3-11 たわみの算出結果

表3-1 理論解と解析結果の比較

対象		理論解	解析結果	比率
最大曲げモーメント	(kN・m)	125	125	100.0%
最大せん断力	(kN)	50	50	100.0%
最大たわみ	(mm)	0.052083	-0.052083	100.0%

表3-1に理論解と解析結果の比較を示す。

最大曲げモーメント，最大せん断力，最大たわみが理論解と解析結果で一致しており，断面力，変位が正しく算出されていることが確認できる。

b. 平板要素

4辺固定の単純板に等分布荷重を載荷した時の曲げモーメントの理論解と解析結果の比較を行う。

・ 解析モデル

解析モデルは図3-12に示すモデルとし、解析条件は下記のとおりとする。

- ・ 長さ $a, b : 4 \text{ m}$
- ・ 等分布荷重 $p_0 : 50 \text{ kN/m}$
- ・ ポアソン比 $\nu : 0.3$

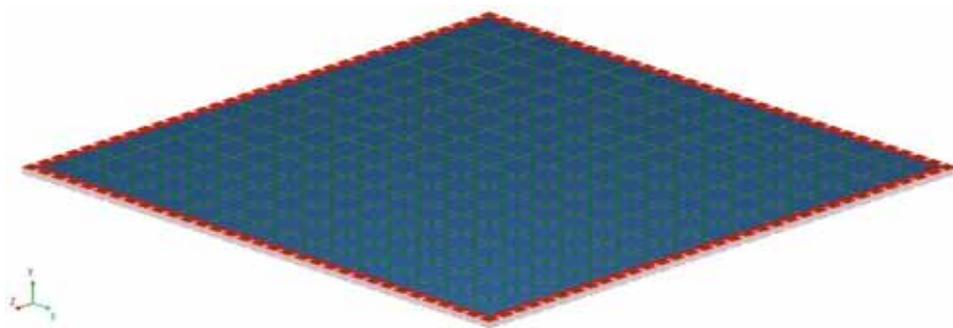


図3-12 解析モデル図（平板要素）

この条件での最大曲げモーメント，最大たわみの理論解は，構造力学公式集より以下のとおりとなる。

$b/a = 4/4 = 1.0$ より，端部の $\beta_1 = -0.0513$ ，中央部 $\beta_2 = 0.0231$

端部曲げモーメント $M_1 = \beta_1 \times p_0 \times a^2 = -0.0513 \times 50 \times 4^2 = -41.04 \text{ kN}\cdot\text{m}$

中央曲げモーメント $M_2 = \beta_2 \times p_0 \times a^2 = 0.0231 \times 50 \times 4^2 = 18.48 \text{ kN}\cdot\text{m}$

Engineer's Studioの端部及び中央部の曲げモーメントの結果を図3-13に示す。

端部曲げモーメント $M_{x1} = -40.07 \text{ kN}\cdot\text{m}$

中央曲げモーメント $M_{x2} = 18.48 \text{ kN}\cdot\text{m}$

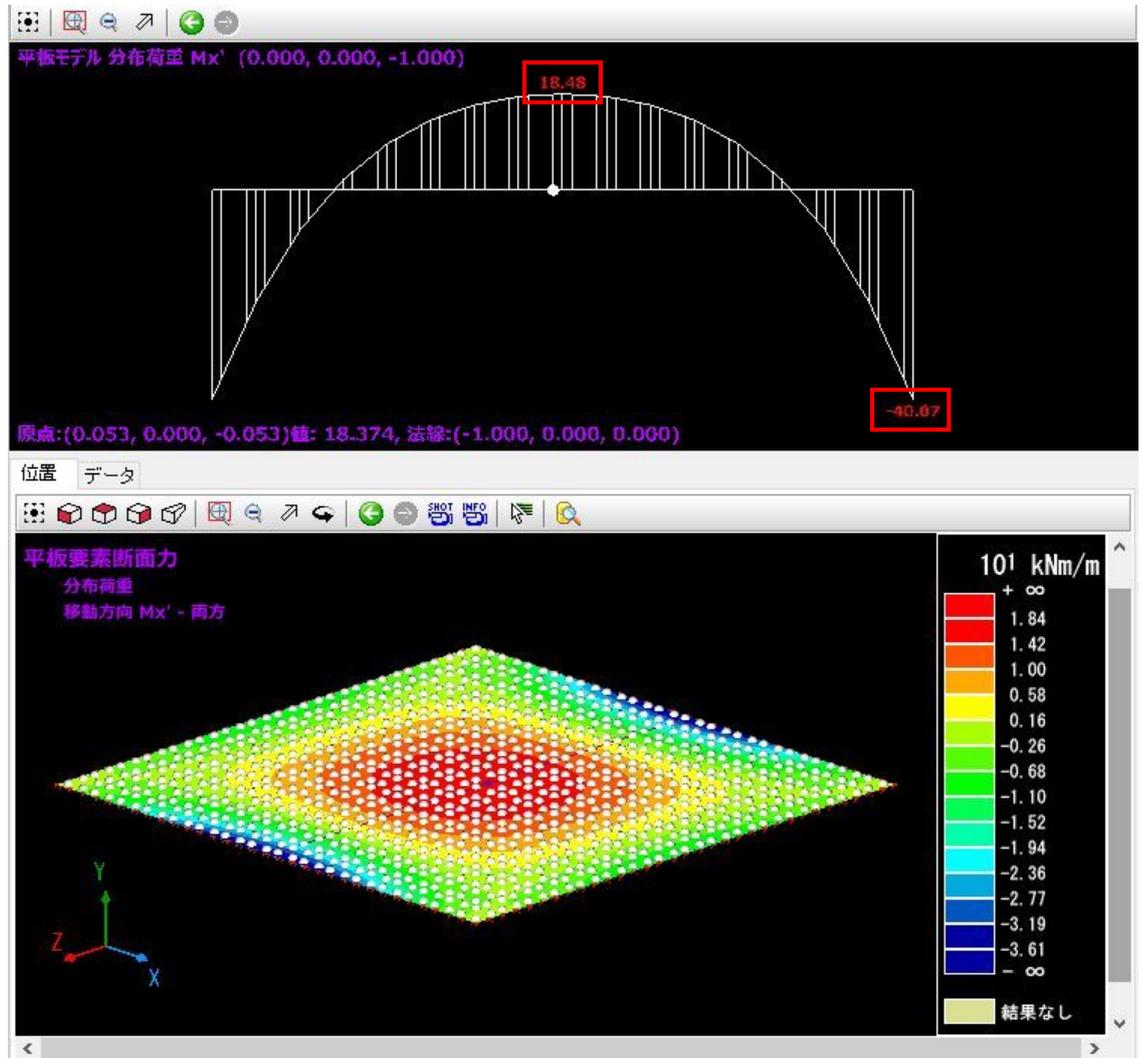


図3-13 曲げモーメントの算出結果

表3-2 理論解と解析結果の比較

対象		理論解	解析結果	比率
端部モーメント	($\text{kN}\cdot\text{m}$)	41.04	40.07	97.6%
中央モーメント	($\text{kN}\cdot\text{m}$)	18.48	18.48	100.0%

表3-2に理論解と解析結果の比較を示す。

曲げモーメントが理論解と解析結果でほぼ一致しており、断面力が正しく算出されていることが確認できる。

c. 地盤バネ

単純な地盤バネモデルに対して、増分荷重を载荷した時に、バネの応答履歴が想定している骨格曲線と一致しているか確認を行う。

・解析モデル

解析モデルは図3-14に示すモデルとし、解析条件は下記のとおりとする。なお、モデル図としてわかりやすくするため、バネ要素に長さを持たせているが、解析上の長さは無視して計算され、影響はない。

- ・バネの初期剛性 $K1 : 100 \text{ kN/m} \rightarrow 0.1 \text{ kN/mm}$
- ・バネの二次剛性 $K2 : 0 \text{ kN/m}$
- ・バネの降伏変位 $\delta 1 : -100 \text{ mm}$
- ・载荷荷重 P : 水平強制変位 10 mm を 20 ステップ増分载荷。(最終変位 $= 10 \times 20 = 200 \text{ mm}$)



図3-14 解析モデル(地盤バネ)

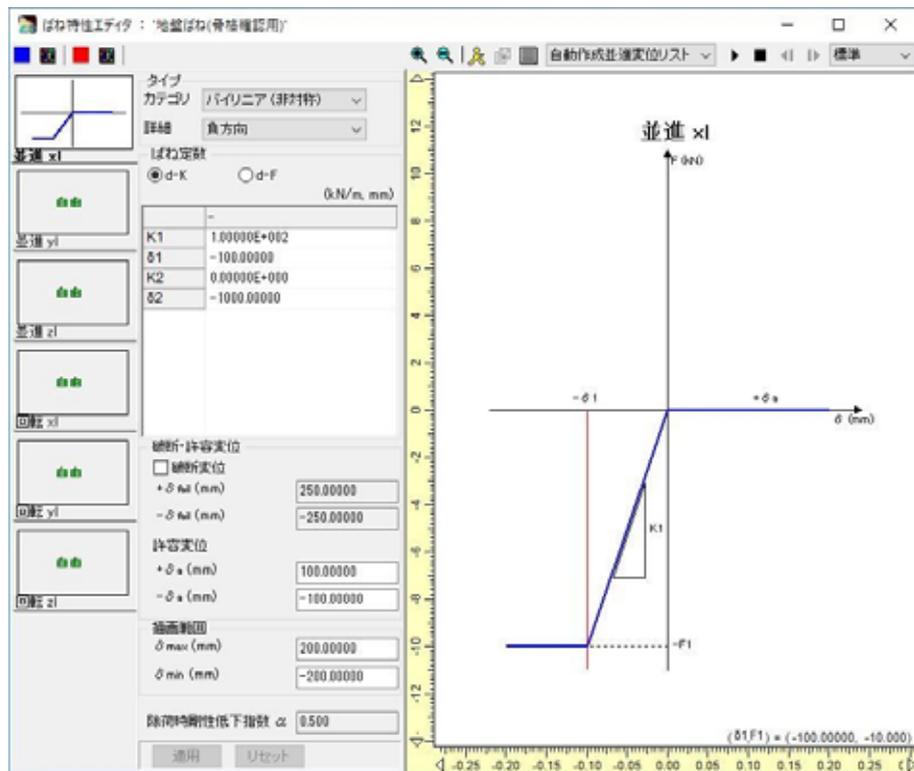


図3-15 バネの骨格曲線

図3-15にバネの骨格曲線を示す。この条件では、水平変位 10 mm に対し、バネ反力は 1 kN ずつ増加し、降伏変位 100 mm (100 ステップ) 以降の反力は変化しない。

骨格曲線と解析結果の比較を図 3-16 に示す。

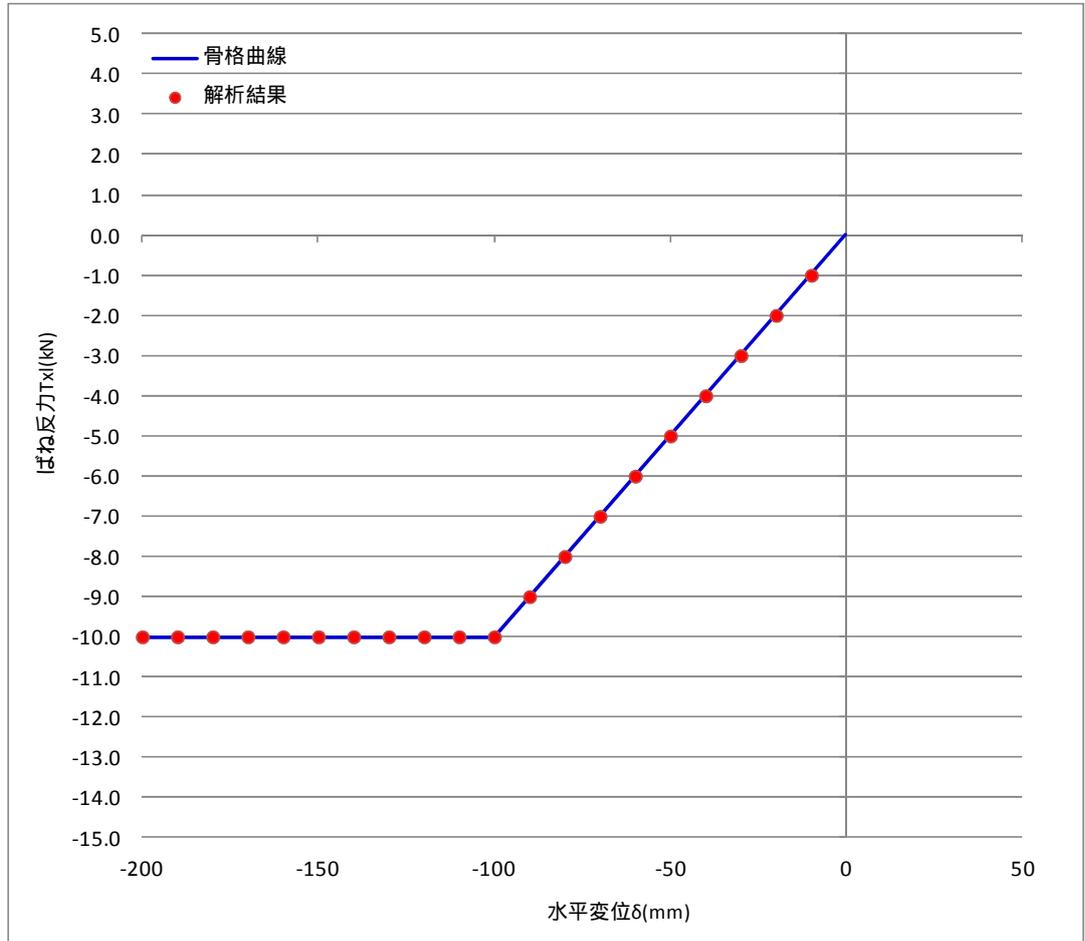


図3-16 骨格曲線と解析結果の比較結果

バネの応答履歴を図3-17に、数値解析結果を図3-18に示す。

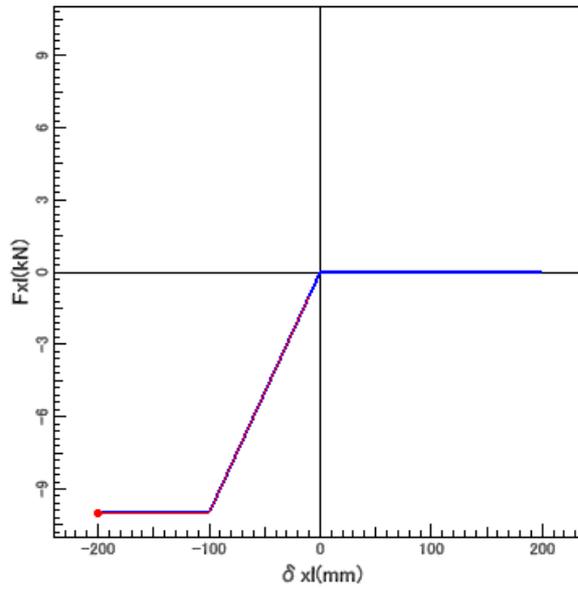


図3-17 バネの応答履歴

ナビゲーション		グラフ 強制変位増分						
ばね時刻履歴結果		ステップ	δx_l (mm)	T_{x_l} (kN)	δy_l (mm)	T_{y_l} (kN)	δz_l (mm)	T_{z_l} (kN)
ばね要素	1	1	-10.00000	-1.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000
ラン		2	-20.00000	-2.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000
<input checked="" type="checkbox"/> 強制変位増分		3	-30.00000	-3.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000
		4	-40.00000	-4.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000
		5	-50.00000	-5.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000
		6	-60.00000	-6.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000
		7	-70.00000	-7.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000
		8	-80.00000	-8.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000
		9	-90.00000	-9.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000
		10	-100.00000	-10.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000
		11	-110.00000	-10.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000
		12	-120.00000	-10.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000
		13	-130.00000	-10.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000
		14	-140.00000	-10.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000
		15	-150.00000	-10.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000
		16	-160.00000	-10.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000
		17	-170.00000	-10.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000
		18	-180.00000	-10.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000
		19	-190.00000	-10.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000
		20	-200.00000	-10.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000

図3-18 数値解析結果

理論解と解析結果の比較を表3-3に示す。

表3-3 理論解と解析結果の比較

ステップ	水平変位			ばね反力		
	$\delta x1$ (mm)			Fx1 (kN)		
	理論解	解析結果	比率	理論解	解析結果	比率
1	-10.000	-10.000	100.0%	-1.000	-1.000	100.0%
2	-20.000	-20.000	100.0%	-2.000	-2.000	100.0%
3	-30.000	-30.000	100.0%	-3.000	-3.000	100.0%
4	-40.000	-40.000	100.0%	-4.000	-4.000	100.0%
5	-50.000	-50.000	100.0%	-5.000	-5.000	100.0%
6	-60.000	-60.000	100.0%	-6.000	-6.000	100.0%
7	-70.000	-70.000	100.0%	-7.000	-7.000	100.0%
8	-80.000	-80.000	100.0%	-8.000	-8.000	100.0%
9	-90.000	-90.000	100.0%	-9.000	-9.000	100.0%
10	-100.000	-100.000	100.0%	-10.000	-10.000	100.0%
11	-110.000	-110.000	100.0%	-10.000	-10.000	100.0%
12	-120.000	-120.000	100.0%	-10.000	-10.000	100.0%
13	-130.000	-130.000	100.0%	-10.000	-10.000	100.0%
14	-140.000	-140.000	100.0%	-10.000	-10.000	100.0%
15	-150.000	-150.000	100.0%	-10.000	-10.000	100.0%
16	-160.000	-160.000	100.0%	-10.000	-10.000	100.0%
17	-170.000	-170.000	100.0%	-10.000	-10.000	100.0%
18	-180.000	-180.000	100.0%	-10.000	-10.000	100.0%
19	-190.000	-190.000	100.0%	-10.000	-10.000	100.0%
20	-200.000	-200.000	100.0%	-10.000	-10.000	100.0%

以上より、バネの応答履歴が想定している骨格曲線と一致していることが確認できる。

(2) 使用内容に対する妥当性

鉄筋コンクリート防潮壁，鋼製防護壁，海水引込み管及び緊急用海水取水管の梁，板及び非線形地盤バネモデルの地震応答解析における断面力及び変位の算定にEngineer's Studioを使用することは，次の通り検証されており，妥当である。

- ・検証の内容のとおり，梁モデル，平板モデル，地盤バネ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。

4. 解析コードの概要 (竜巻関連)

項目 \ コード名	Engineer's Studio
使用目的	3次元骨組みモデルによる断面力，変位並びに固有周期の算定
開発機関	株式会社フォーラムエイト
開発時期	2009年
使用したバージョン	Ver. 6.00.04
コードの概要	<p>Engineer's Studio (以下「本解析コード」という。)は，3次元有限要素法 (FEM) 解析を行う解析コードである。主な特徴は下記のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・土木建築構造物の部材を，1本の棒に見立てたはり要素や平面的に連続した平板要素でモデル化して構造物の応答解析並びに固有値解析を行い，断面力及び変位並びに固有周期の算出を行う。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>本解析コードは，海水ポンプ室周りの竜巻防護施設の設計において，はり要素を用いた静的応答解析による断面力及び変位の算定並びにはり要素を用いた固有値解析による固有周期の算定に使用されている。</p> <p>【検証 (Verification)】</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"> ・本解析コードによる単純はりモデルに対する応答解析結果と理論解が一致することを確認している。 ・本解析コードによる固有値解析結果と理論解が一致することを確認している。 ・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。 <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，以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・検証内容のとおり，はりモデル，固有値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。

5. Engineer's Studioの解析手法について (竜巻関連)

5.1 一般事項

Engineer's Studioは土木・建築構造物の部位を1本の棒に見立てた梁要素や平面的に連続した平板要素でモデル化して、構造物の非線形挙動を解析できる3次元有限要素法(FEM)解析プログラムである。Engineer's Studioは、梁要素を用いた静的応答解析による断面力及び変位の算定並びに梁要素を用いた固有値解析による固有周期の算定に使用している。

5.2 解析コードの特徴

Engineer's Studioの主な特徴を以下に示す。

- ・土木建築構造物の部材を、1本の棒に見立てた梁要素や平面的に連続した平板要素でモデル化して構造物の応答解析並びに固有値解析を行い、断面力及び変位並びに固有周期の算出。

5.3 解析手法

(1) 弾性梁要素

弾性梁要素は2節点を直線で結ぶ要素であり、軸方向の伸縮変形と2節点の回転変位を含む相対変位によって生じる曲げと捻れ変形に対して弾性の復元力を持つ要素である。

2節点要素であるから、3次元空間内にある要素両端自由度は12であり、要素の剛体としての変位を拘束する自由度は6個必要であるから、差し引き6個の自由度が要素の弾性変形を表す要素端変形となる。この要素端変形と仕事の対をなす力が要素端力である。言い換えれば、要素端に働く3つの力の内、6個は要素変形を生じさせ、6個は要素を支持する支点反力を意味する。この静定な支点条件要素座標系の設定によって、要素端力と要素端変形が確定する。

要素座標系として単純支持あるいは片持ち支持など考えることができる。本解析では要素座標系内における幾何学的非線形性を考慮しないため、非線形解析では要素内の幾何学的非線形性の度合いに応じて解が異なる。一方、線形解析では要素座標系の取り方に解は依存しない。要素内の変形において、その幾何学的非線形性の影響が小さい支持条件が解析上合理的と言えるから、定義する要素座標系は、単純支持の支点条件を採用する。したがって、6個の要素端変形を次のように定義し、図示すれば、図5-1のとおりである。

$$\Delta l, \theta_x, \theta_{iy}, \theta_{iz}, \theta_{jy}, \theta_{jz}$$

ここに、サフィックス i, j は要素両端を表す。なお、図中の $\theta_{ic} e_{ic}$ と $\theta_{jc} e_{ic}$ は、要素端の回転変形成分の合成ベクトルである。

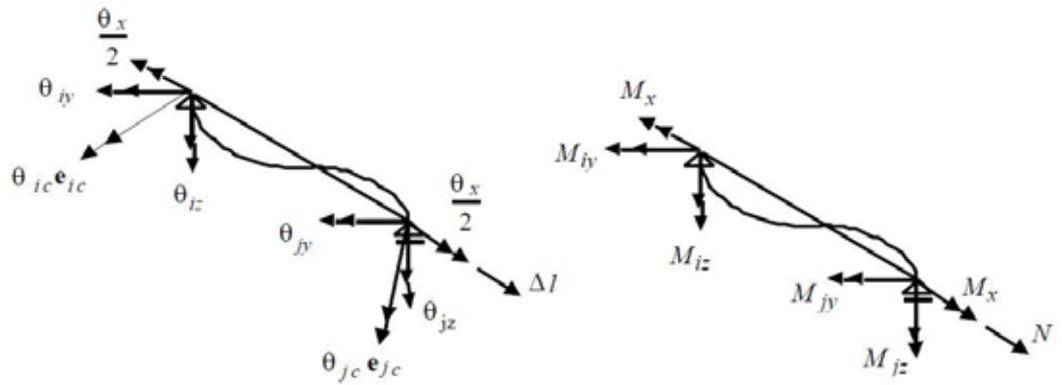


図5-1 要素端変形と要素端力

一方、要素端変形の仕事の対である要素端力は、要素両端を結ぶ弦方向の力 N 、弦回りの端モーメント M_x 、両端それぞれにおいて弦に直交する2軸回りの端モーメントとなる。まとめれば、

$$N, M_x, M_{iy}, M_{iz}, M_{jy}, M_{jz}$$

であり、これも図5-1に示すとおりである。

(2) 固有値解析

固有値解析では、減衰のない自由振動の運動方程式

$$[M] \{x''\} + [K] \{x\} = 0 \dots (1)$$

[M] : モデル全体の質量マトリクス

[K] : モデル全体の剛性マトリクス (初期剛性)

{x''} : 節点の加速度ベクトル

{x} : 節点の変位ベクトル

から出発して、以下のように固有値(固有振動数, 固有モード)を求める。

式(1)の解を

$$\{x\} = \{X\} \cdot \exp(i\omega t)$$

ただし、

$$\{X\} = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}^T \quad (\hat{T} \text{は転置を意味する})$$

i : 虚数単位

t : 時間

ω : 固有円振動数で、固有振動数 f との関係は $\omega = 2\pi f$

とおくと、式(1)は

$$([K] - \omega^2 \cdot [M]) \cdot \{X\} = 0 \dots (2)$$

となる。

これを満足する ω^2 と $\{X\}$ を求める。 $\{X\} = 0$ は静止状態を表すので振動問題では興味がなく、

通常は $\{X\} = 0$ 以外の解を持つことを考える。そのためには係数行列の行列式がゼロでなければならない。

$$|[K] - \omega^2 \cdot [M]| = 0$$

これを解くと、 n 個の正根 $\omega_1^2, \omega_2^2, \dots, \omega_n^2$ が得られる ($\omega_1 < \omega_2 < \dots, < \omega_n$)。 ω_i を第 i 次の固有円振動数と呼ぶ。 ω_i を (2) 式に代入して得られる方程式から $\{X\}$ の各成分の比が求まる。

$$\{X_i\} = (X_{1i}, X_{2i}, \dots, X_{ni})^T$$

$\{X_i\}$ を第 i 次の固有振動形または基準振動形と呼ぶ。

$\{X_i\}$ は各成分の相対的な比率で構成される固有ベクトルなので一意的ではないが、特に次の条件を満たす $\{X_i\}$ を $\{\phi_i\}$ で表し、正規化された基準振動形と呼ぶ。

$$\{\phi_i\}^T \cdot [M] \cdot \{\phi_i\} = 1 \quad \dots (3)$$

本プログラムにおいても、式(3)により正規化された固有ベクトル $\{\phi_i\}$ を算出し、それを用いて刺激係数を求めている。

5.4 解析フローチャート

応答解析の解析フローチャートを図5-2に、固有値解析の解析フローチャートを図5-3に示す。

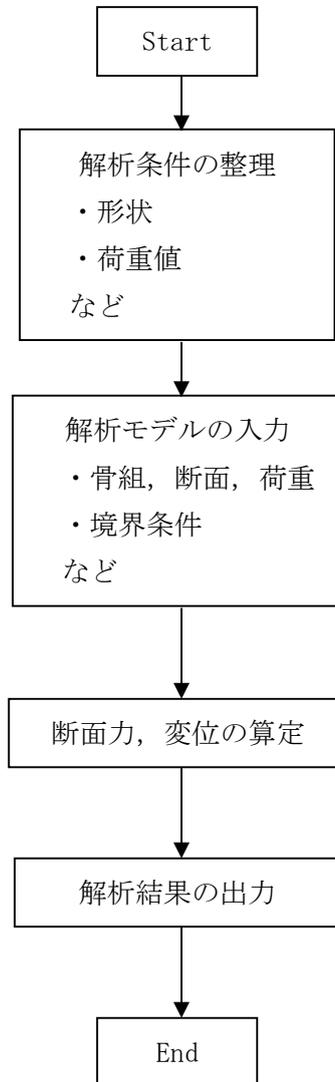


図5-2 解析フローチャート(応答解析)

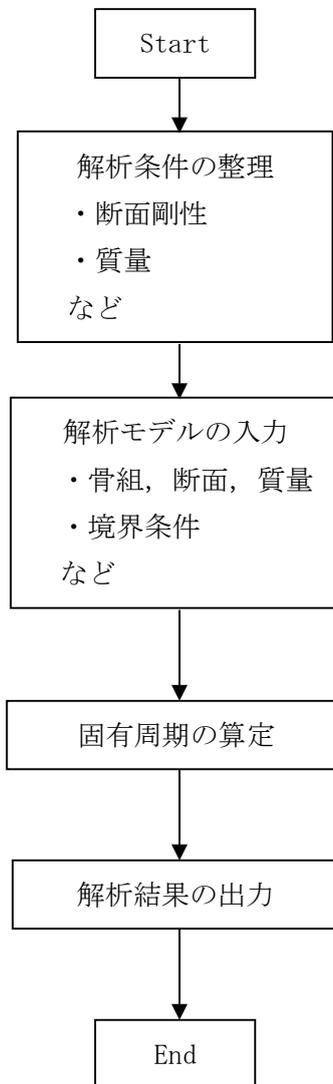


図5-3 解析フローチャート(固有値解析)

5.5 検証(Verification)と妥当性(Validation)

(1) 理論解との比較による検証

応答解析, 固有値解析のそれぞれについて, 単純梁の理論解との比較を行う。

a. 応答解析

単純梁モデルに等分荷重を載荷した時の最大曲げモーメント, 最大せん断力, 最大たわみの理論解と解析結果の比較を行う。

・解析モデル

解析モデルは図5-4に示すモデルとし, 解析条件は下記のとおりとする。

- ・長さ L : 10 (m)
- ・ヤング係数 E : 25000 N/mm² → 25000000 kN/m²
- ・断面二次モーメント I : 1 m⁴
- ・等分布荷重 q : 10 kN/m

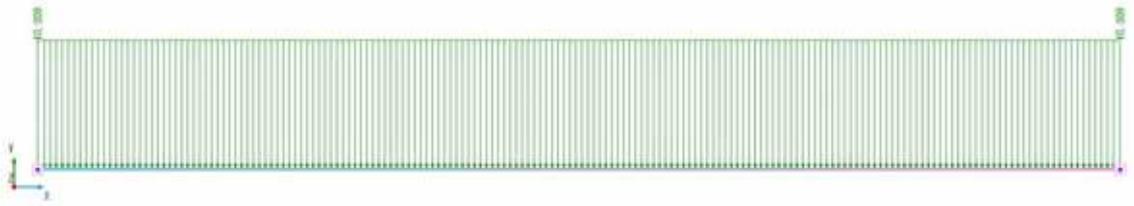


図5-4 解析モデル図(梁モデル)

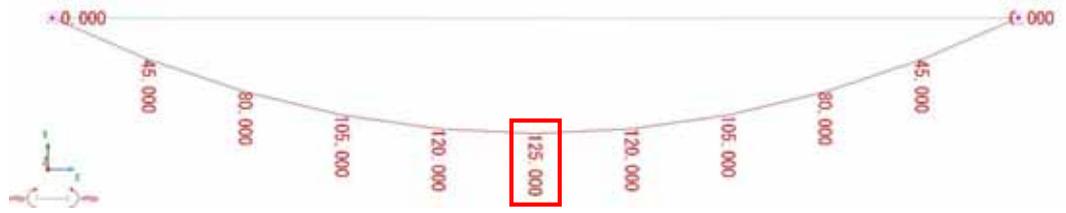
この条件での最大曲げモーメント, 最大せん断力, 最大たわみの理論解は, 構造力学公式集より以下のとおりとなる。

$$\text{最大曲げモーメント } M_{\max} = qL^2/8 = (10 \times 10^2)/8 = 1000/8 = 125 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

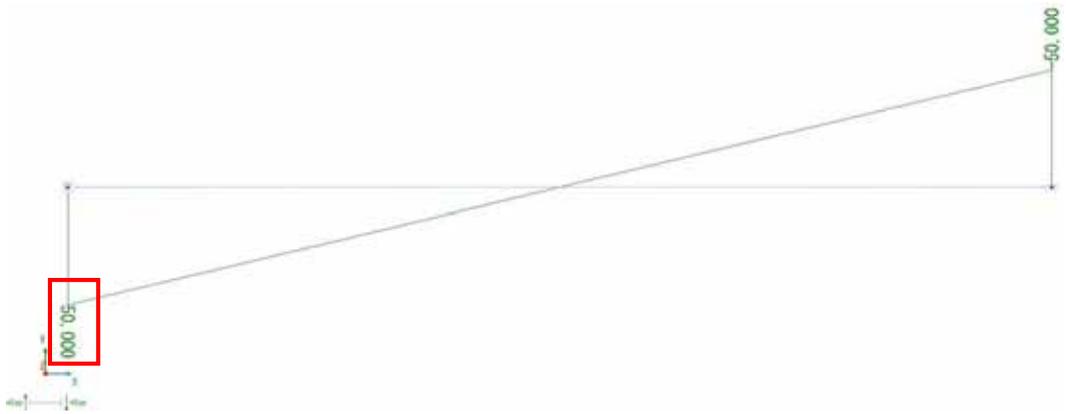
$$\text{最大せん断力 } S_{\max} = qL/2 = (10 \times 10)/2 = 50 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} \text{最大たわみ } y_{\max} &= 5qL^4/384EI = (5 \times 10 \times 10^4)/(384 \times 25000000 \times 1) = 5.20833 \times 10^{-5} \text{ m} \\ &= 0.052083 \text{ mm} \end{aligned}$$

Engineer's Studioによる断面力の算出結果を図5-5に, たわみの算出結果を図5-6に示す。

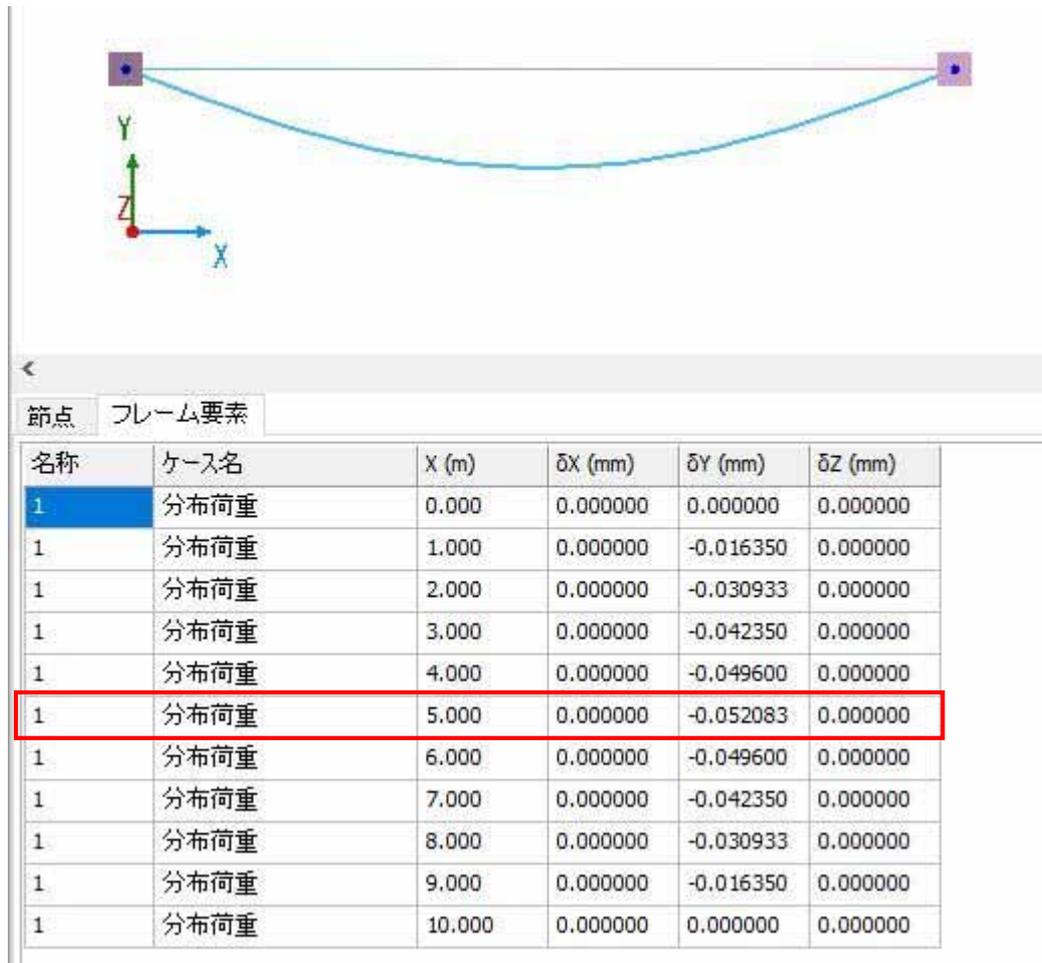


最大曲げモーメント $M_{z \text{ p m a x}} = 125 \text{ kN}\cdot\text{m}$



最大せん断力 $S_{y \text{ p m a x}} = 50 \text{ kN}$

図5-5 断面力の算出結果



最大たわみ $\delta y_{max} = -0.052083$ mm

図5-6 たわみの算出結果

表5-1 理論解と解析結果の比較

対象		理論解	解析結果	比率
最大曲げモーメント	(kN・m)	125	125	100.0%
最大せん断力	(kN)	50	50	100.0%
最大たわみ	(mm)	0.052083	0.052083	100.0%

表5-1に理論解と解析結果の比較を示す。

最大曲げモーメント，最大せん断力，最大たわみが理論解と解析結果で一致しており，断面力，変位が正しく算出されていることが確認できる。

b. 固有値解析

単純梁モデルの固有値解析について、計算例と解析結果の比較を行う。

・解析モデル

参考とする計算例は「入門建設振動学 小坪 清真著 1996年 森北出版(株)」とし、P13-14の第2章 1自由度系の自由振動 2.3振動方程式の解の例題2.2とする。

図5-7に示すような曲げ剛性EIが一定で長さLの両端支持ばりの中点に質量mのおもりが乗り、梁の質量はおもりの質量に比し無視できるとした場合、上下振動の固有周期は以下の式で求められる。

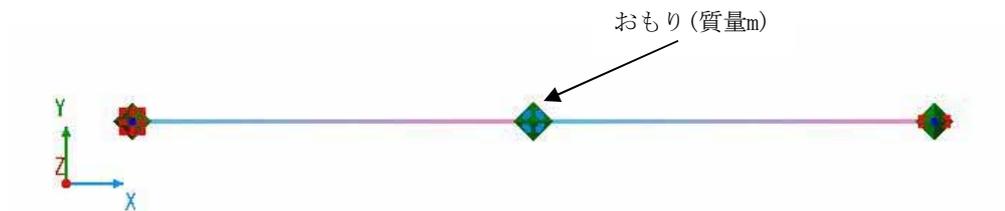


図5-7 解析モデル図(固有値解析)

$$\text{固有円振動数 } n = \sqrt{\frac{ml^3}{48EI}}$$

$$\text{固有周期 } T = \frac{2\pi}{n} = 2\pi\sqrt{\frac{ml^3}{48EI}}$$

そこで、下記の解析条件で固有周期を求めて比較する。

- ・長さ L : 1.0(m)
- ・質量 m : 100(ton)
- ・断面2次モーメント I : 0.0001(m⁴)
- ・ヤング係数 E : 20000(N/mm²) → 20000000(kN/m²)

条件を算出式へ代入すると、固有周期は下記の通りとなる。

$$T = 2 \times 3.141596 \times \sqrt{\frac{100 \times 1^3}{48 \times 20000000 \times 0.0001}} = 0.20278 \cong 0.203(\text{s})$$

Engineer's Studioの固有値解析結果を図5-8に示す。



図5-8 固有値解析結果

表5-2 理論解と解析結果の比較

対象		理論解	解析結果	比率
固有周期	(s)	0.203	0.203	100.0%

表5-2に理論解と解析結果の比較を示す。

固有周期が理論解と解析結果で一致しており，固有値が正しく算出されていることが確認できる。

(2) 使用内容に対する妥当性

海水ポンプ室周りの竜巻防護施設の設計において，梁要素を用いた静的応答解析による断面力及び変位の算定並びに梁要素を用いた固有値解析による固有周期の算定に使用することは，次の通り検証されており妥当である。

- ・ 検証の内容のとおり，梁モデル，固有値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-5-40 計算機プログラム（解析コード）の概要・FRAME（面内）

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）FRAME（面内）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-2-2-27	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. 5.0.4
V-2-2-29	代替淡水貯槽の耐震性についての計算書	Ver. 5.0.4

2. 解析コードの概要

項目	コード名 FRAME (面内)
使用目的	2次元骨組構造解析 (断面力算出)
開発機関	株式会社 フォーラムエイト
開発時期	1998年
使用したバージョン	Ver. 5.0.4
コードの概要	<p>(株) フォーラムエイトによって開発された、平面骨組構造解析の汎用市販コードである。</p> <p>本解析コードは、微小変位理論による変位法を用いて、2次元平面骨組モデルの断面力・変位・反力を算出するための構造解析プログラムである。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>FRAME (面内) は汎用市販コードであり、常設低圧代替注水系ポンプ室及び代替淡水貯槽の断面力算出に使用している。</p> <p>【検証 (Verification)】</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"> ・今回の工認申請で使用する機能の検証として、材料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て静的解析を実施した解析解と、構造力学公式集に記載の理論式による理論解とを比較し、解析解と理論解が一致することを確認している。 ・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。 <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、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、国内の建築・土木分野において使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。 ・関西電力株式会社の「大飯原子力発電所第3号機」において、止水壁の平面骨組解析 (断面力算出) に本コード (Ver. 5.00) が使用された実績がある。 ・本工事計画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、本解析の使用範囲の結果に影響の無いことを確認している。

	<ul style="list-style-type: none">・本解析コードの理論は、一般的に認知されているものであり、今回の工認申請で使用する2次元骨組モデルによる断面力算定での適用は妥当である。・本工事計画における構造に対して行う断面力算定の使用目的に対し、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。
--	---

V-5-41 計算機プログラム（解析コード）の概要・F R E M I N G

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. FREMING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 解析理論	5
3.4 解析フローチャート	25
3.5 検証 (Verification) 及び妥当性確認 (Validation)	26

1. はじめに

本資料は、添付書類において用いた解析コードFREMINGについて説明するものである。

本解析コードを用いた添付書類を示す使用状況一覧に、解析コードの概要を以降にそれぞれ記載する。

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. 14.1B
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. 14.1B
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. 14.1B
V-3-別添3-2-9	貯留堰の強度計算書	Ver. 14.1B

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	FREMING
使用目的	平面骨組解析（断面力算出）
開発機関	富士通エフ・アイ・ピー株式会社
開発時期	1995年
使用したバージョン	Ver. 14.1B
コードの概要	<p>富士通エフ・アイ・ピー株式会社によって開発された、平面骨組構造解析の汎用市販コードである。</p> <p>本解析コードは、平面骨組計算プログラムであり、平面構造物にモデル化できる構造物はすべて計算が可能である。</p> <p>適用範囲として、橋梁、鉄塔、トンネル、及び共同溝などの土木構造物から、ビル、建屋など建築構造物の設計計算に利用可能である。</p> <p>また、面内荷重及び面外荷重において、線形及び非線形解析が可能である。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>FREMING Ver. 14.1B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））並びに貯留堰の平面骨組解析（断面力算出）に用いている。</p> <p>【検証（Verification）】</p> <p>本解析コードの検証内容は、次の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・材料力学分野における一般的知見によって解を求めることができる体系について、平面骨組解析モデルによる解析解（断面力）と理論解と比較し、解析解が理論解と一致することを確認している。 ・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。 <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、次の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、国内の土木建築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。 ・本解析コードによる解析結果と、類似解析コードFRAME（面内）の解析結果を比較し、双方の解が一致することを確認している。 ・今回の工認申請で実施する骨組解析モデルによる断面力算出の用途、及び適用範囲が、上述の妥当性確認の範囲内にあることを確認している。

3. FREMINGの解析手法について

3.1 一般事項

本解析コードは、平面骨組解析用の解析コードである。今回は、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））並びに貯留堰の骨組解析モデルの静的解析に用いている。

3.2 解析コードの特徴

FREMINGの主な特徴を以下に示す。

- ① バイリニア，トリリニアの材料非線形性を考慮可能である。
- ② RC矩形断面に対応したM- ϕ 曲線のひび割れ等を計算するはり要素を設定可能である。
- ③ 荷重モデルでは，分布荷重，及び集中荷重を考慮することができる。
- ④ 地中構造物の耐震設計法として応答変位法に基づいて入力することができる。

3.3 解析理論

解析理論を以下に示す。

3.3.1 座標系

(1) 基準座標系

基準座標系は、解析すべき骨組構造物を定義する座標系であり、

- ・ Y 軸 : 鉛直上向きを正
- ・ X 軸 : Y 軸と直交する直線の右方向を正

とする。

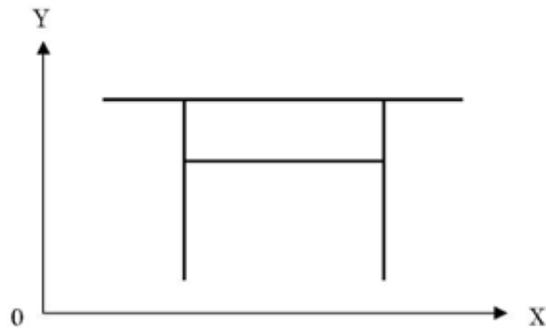


図3-1 基準座標系

(2) 部材座標系

部材座標系は、構造物を構成する各部材にそれぞれ設定する。梁部材は、

- ・ x 軸 : 部材を構成する節点 $i - j$ の i から j へ向かう方向を正
- ・ y 軸 : x 軸を i 端基点で反時計廻り 90° の方向を正

とする。

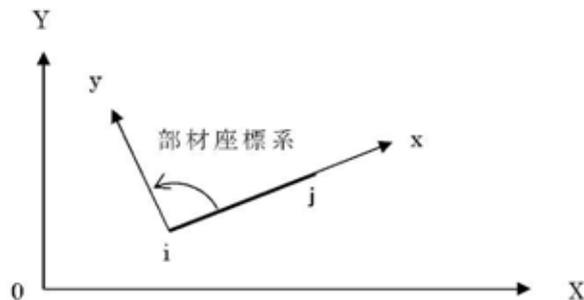


図3-2 梁部材座標系

バネ部材は、傾斜角を設定しない場合に基準座標系と一致する。
傾斜角を設定する場合は時計廻りの方向を正として設定する。

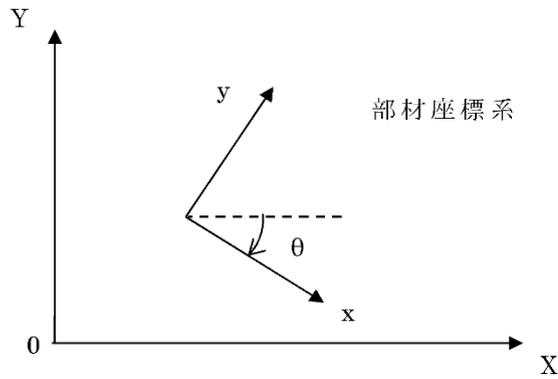


図3-3 バネ部材座標系

(3) 傾斜座標系

傾斜座標系は、傾斜支点に設定する。

設定方法は、入力データにおいて傾斜角（基準座標系に対して反時計廻りを正とした角度）を指示することにより行う。

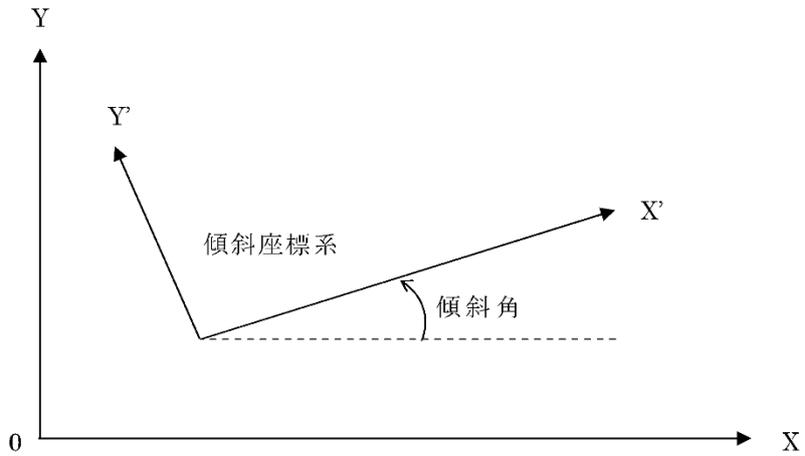


図3-4 傾斜座標系

3.3.2 要素剛性

(1) 材端変位, 材端力

断面形状が一定の部材の力と変位の関係を式で表すと式 (3.1) のようになる。

$$\{\bar{f}\} = [\bar{k}] \cdot \{\bar{d}\} \quad (3.1)$$

材端力

$$\{\bar{f}\} = \begin{Bmatrix} N_i \\ S_i \\ M_i \\ N_j \\ S_j \\ M_j \end{Bmatrix} \quad (3.2)$$

材端変位

$$\{\bar{d}\} = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ \theta_i \\ u_j \\ v_j \\ \theta_j \end{Bmatrix} \quad (3.3)$$

ただし,

N_i , N_j : x 軸方向力 (軸力), x 軸廻りモーメント (ねじりモーメント)

S_i , S_j : y 軸方向力 (せん断力), z 軸方向力 (せん断力)

M_i , M_j : z 軸廻りのモーメント (曲げモーメント),
y 軸廻りのモーメント (曲げモーメント)

u_i , u_j : x 軸方向の変位

v_i , v_j : y 軸方向の変位

θ_i , θ_j : z 軸廻りの回転角

(2) 梁要素

梁要素の要素剛性マトリックスを式 (3.4) のように示す。

$$[\bar{k}] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ \hline -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

面外は下線部分が GJ/L となる。

ただし,

E : 弾性係数 (kN/m²)

G : せん弾性係数 (kN/m²)

A : 断面積 (m²)

I : z 軸 (y 軸) 廻り断面二次モーメント (m⁴)

J : ねじり定数 (m⁴)

(5) 弾性支承上梁

a. 部材軸方向

部材軸方向に力を受ける弾性支承上梁の剛性マトリックスを式 (3.7) に、荷重項を式 (3.8) に示す。

$$[\bar{k}] = \frac{EA\omega}{\sinh(\omega L)} \begin{bmatrix} \cosh(\omega L) & -1 \\ -1 & \cosh(\omega L) \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$[\bar{f}] = \left\{ \begin{array}{l} -\frac{1}{\sinh(\omega L)} \int_0^L \sinh(\omega(L-\eta)) \cdot P(\eta) d\eta \\ -\frac{1}{\sinh(\omega L)} \int_0^L \sinh(\omega\eta) \cdot P(\eta) d\eta \end{array} \right\} \quad (3.8)$$

ただし、

E : 弾性係数 (kN/m²)

A : 断面積 (m²)

L : 部材長 (m)

P(x) : 分布荷重値 (kN/m)

ω : $\sqrt{\frac{k}{EA}}$

k : 地盤反力係数 (kN/m²)

注) 面外解析では、考慮されない。

b. 部材軸直交方向

部材軸直交方向に力を受ける弾性支承上梁の剛性マトリックスを式 (3.9) に、荷重項を式 (3.10) に示す。

$$[k] = \begin{bmatrix} 4EI\beta^3 \frac{sh \cdot ch + s \cdot c}{sh^2 - s^2} & 2EI\beta^2 \frac{sh^2 + s^2}{sh^2 - s^2} & -4EI\beta^3 \frac{ch \cdot s + sh \cdot c}{sh^2 - s^2} & 4EI\beta^2 \frac{sh \cdot s}{sh^2 - s^2} \\ 2EI\beta^2 \frac{sh^2 + s^2}{sh^2 - s^2} & 2EI\beta \frac{sh \cdot ch - s \cdot c}{sh^2 - s^2} & -4EI\beta^2 \frac{sh \cdot s}{sh^2 - s^2} & 2EI\beta \frac{ch \cdot s - sh \cdot c}{sh^2 - s^2} \\ -4EI\beta^3 \frac{ch \cdot s + sh \cdot c}{sh^2 - s^2} & -4EI\beta^2 \frac{sh \cdot s}{sh^2 - s^2} & 4EI\beta^3 \frac{sh \cdot ch + s \cdot c}{sh^2 - s^2} & -2EI\beta^2 \frac{sh^2 + s^2}{sh^2 - s^2} \\ 4EI\beta^2 \frac{sh \cdot s}{sh^2 - s^2} & 2EI\beta \frac{ch \cdot s - sh \cdot c}{sh^2 - s^2} & -2EI\beta^2 \frac{sh^2 + s^2}{sh^2 - s^2} & 2EI\beta^3 \frac{sh \cdot ch - s \cdot c}{sh^2 - s^2} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$[\bar{f}] = \begin{bmatrix} \frac{-1}{sh^2 - s^2} \int_0^L [sh \cdot \{cosh(\beta(L-\eta)) \cdot \sin(\beta\eta) + sinh(\beta(L-\eta)) \cdot \cos(\beta\eta)\} - s \cdot \{\cos(\beta(L-\eta)) \cdot \sinh(\beta\eta) + \sin(\beta(L-\eta)) \cdot \cosh(\beta\eta)\}] \cdot P(\eta) d\eta \\ \frac{-1}{\beta(sh^2 - s^2)} \int_0^L [sh \cdot \{sinh(\beta(L-\eta)) \cdot \sin(\beta\eta) - s \cdot \sin(\beta(L-\eta)) \cdot \sinh(\beta\eta)\}] \cdot P(\eta) d\eta \\ \frac{-1}{sh^2 - s^2} \int_0^L [sh \cdot \{cosh(\beta\eta) \cdot \sin(\beta(L-\eta)) + sinh(\beta\eta) \cdot \cos(\beta(L-\eta))\} - s \cdot \{\cos(\beta\eta) \cdot \sinh(\beta(L-\eta)) + \sin(\beta\eta) \cdot \cosh(\beta(L-\eta))\}] \cdot P(\eta) d\eta \\ \frac{1}{\beta(sh^2 - s^2)} \int_0^L [sh \cdot \{sinh(\beta\eta) \cdot \sin(\beta(L-\eta)) - s \cdot \sin(\beta\eta) \cdot \sinh(\beta(L-\eta))\}] \cdot P(\eta) d\eta \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

ただし,

- $ch = \cosh(\beta L)$
- $sh = \sinh(\beta L)$
- $s = \sin(\beta L)$
- $c = \cos(\beta L)$
- E : 弾性係数 (kN/m²)
- I : 断面二次モーメント (m⁴)
- L : 部材長 (m)
- k : 地盤反力係数 (kN/m²)
- $P(x)$: 分布荷重値 (kN/m)

$$\cdot \beta = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}}$$

3.3.3 全体剛性

(1) 座標変換

部材座標系 (x, y) と基準座標系 (X, Y) の座標変換マトリックスを [Te] とすると、次式が成り立つ。

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = [Te] \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix} \quad (3.11)$$

ここに、

$$[Te] = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

L_{ij} : 方向余弦

式 (3.12) を用いることにより、基準座標系での剛性マトリックス [k] が求められる。

まず、基準座標系での変位ベクトルを {d}, 断面力を {f} とすると、次式が成り立つ。

$$\{\bar{d}\} = [T] \cdot \{d\} \quad (3.13)$$

$$\{\bar{f}\} = [T] \cdot \{f\} \quad (3.14)$$

$$\text{ここに } [T] = \begin{bmatrix} Te & 0 \\ 0 & Te \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

式 (3.1) に、(3.13), (3.14) を代入すると

$$\begin{aligned} [T] \{f\} &= [\bar{k}] [T] \{d\} \\ \{f\} &= [T]^T [\bar{k}] [T] \{d\} \\ &= [k] \{d\} \end{aligned} \quad (3.16)$$

すなわち、基準座標系に関する剛性マトリックスは、式 (3.17) で表す。

$$[k] = [T]^T [\bar{k}] [T] \quad (3.17)$$

(2) 傾斜座標変換

基準座標系 (X, Y) と傾斜座標系 (X', Y') の座標変換マトリックスを [Te'] とすると、次式が成り立つ。

$$\begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix} = [Te'] \begin{Bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{Bmatrix} \quad (3.18)$$

ここに

$$[Te'] = \begin{Bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix} \quad (3.19)$$

$\alpha =$ 傾斜角

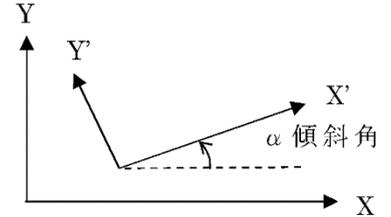


図3-5 傾斜座標系

式 (3.18) を用いることにより、傾斜座標系での剛性マトリックス [k'] が求められる。

まず、傾斜座標系での変位ベクトルを {d'}, 断面力を {f'} とすると、次式が成り立つ。

$$\{d\} = [T'] \cdot \{d'\} \quad (3.20)$$

$$\{f\} = [T'] \cdot \{f'\} \quad (3.21)$$

$$\text{ここに } [T'] = \begin{bmatrix} Te' & 0 \\ 0 & Te' \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

式 (3.16) に、式 (3.20)、式 (3.21) を代入すると

$$[T'] \{f'\} = [k] [T'] \{d'\}$$

$$\begin{aligned} \{f'\} &= [T']^T [k] [T'] \{d'\} \\ &= [k'] \{d'\} \end{aligned} \quad (3.23)$$

すなわち、傾斜座標系に関する剛性マトリックスは、式 (3.24) で表す。

$$[k'] = [T']^T [k] [T'] \quad (3.24)$$

(3) 全体剛性マトリックス

構造物全体の $\{U\}$ と力 $\{F\}$ を関連づける剛性方程式は、式 (3.25) にて表す。

$$\{F\} = [K] \{U\} \quad (3.25)$$

ここで、

[K] : 全体剛性マトリックス

この全体剛性マトリックスは、各部材ごとで求めた剛性マトリックスを重ね合わせる
ことにより求められる。

3.3.4 荷重

(1) 等価節点力

a. 全面等分布荷重

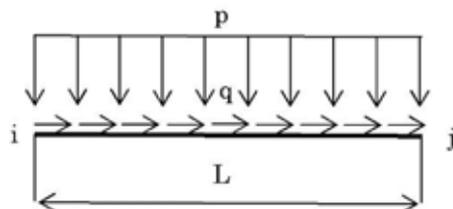


表3-1 満載分布荷重

	軸力	せん断力	モーメント
i端	$-\frac{qL}{2}$	$-\frac{pL}{2}$	$-\frac{pL^2}{12}$
j端	$-\frac{qL}{2}$	$-\frac{pL}{2}$	$\frac{pL^2}{12}$

b. 全面不等分布荷重

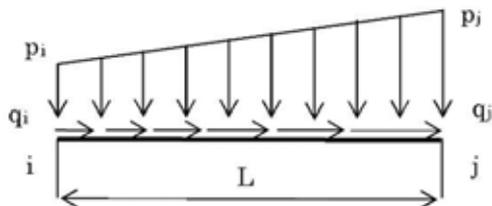


表3-2 直線分布荷重

	軸力	せん断力	モーメント
i端	$-\frac{L(2q_i + q_j)}{6}$	$-\frac{L(7p_i + 3p_j)}{20}$	$-\frac{L^2(3p_i + 2p_j)}{60}$
j端	$-\frac{L(q_i + 2q_j)}{6}$	$-\frac{L(3p_i + 7p_j)}{20}$	$\frac{L^2(2p_i + 3p_j)}{60}$

c. 部分等分布荷重

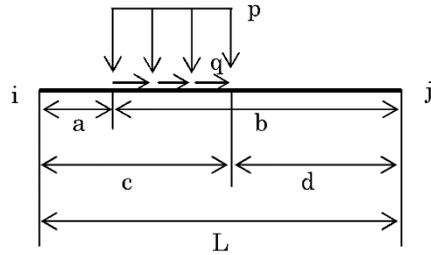


表3-3 等分布荷重

	軸力	せん断力	モーメント
i端	$-\frac{q(b^2-d^2)}{2L}$	$\frac{-p}{2L^3} \cdot [2L(b^3-d^3)-(b^4-d^4)]$	$\frac{-p}{12L^2} \cdot [4L(b^3-d^3)-3(b^4-d^4)]$
j端	$-\frac{q(c^2-a^2)}{2L}$	$\frac{-p}{2L^3} \cdot [2L(c^3-a^3)-(c^4-a^4)]$	$\frac{p}{12L^2} \cdot [4L(c^3-a^3)-3(c^4-a^4)]$

d. 集中荷重

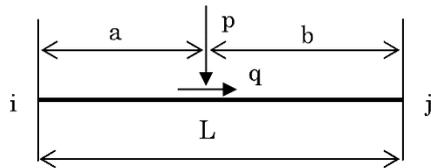


表3-4 集中荷重

	軸力	せん断力	モーメント
i端	$-\frac{qb}{L}$	$-\frac{pb^2(L+2a)}{L^3}$	$-\frac{pab^2}{L^2}$
j端	$-\frac{qa}{L}$	$-\frac{pa^2(L+2b)}{L^3}$	$\frac{pa^2b}{L^2}$

e. 集中モーメント荷重

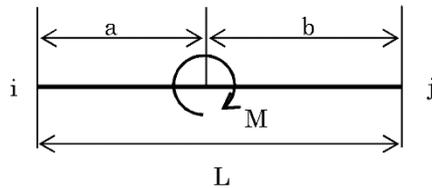


表3-5 集中モーメント荷重

	軸力	せん断力	モーメント
i端	—	$\frac{6Mab}{L^3}$	$\frac{Mb(2L-3b)}{L^2}$
j端	—	$-\frac{6Mab}{L^3}$	$\frac{Ma(2L-3a)}{L^2}$

f. 温度上昇

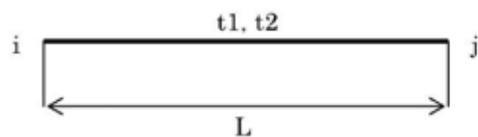


表3-6 温度荷重

	軸力	せん断力	モーメント
i端	$\alpha(t1+t2)/2 \cdot E A$	—	$\alpha(t1-t2) \cdot hEI$
j端	$-\alpha(t1+t2)/2 \cdot E A$	—	$-\alpha(t1-t2) \cdot hEI$

注) 面外解析では考慮されない。

ただし,

- α : 線膨張係数
- E : 弾性係数 (kN/m²)
- A : 断面積 (m²)
- I : 断面二次モーメント (m⁴)
- h : 断面高さ (m)
- $t 1$: 上面温度 (°C)
- $t 2$: 下面温度 (°C)

(2) 支点移動

図 3-6 のように、支点のあるものが移動した場合、次式が成り立つ。

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U \\ U_0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ R_0 \end{Bmatrix} \quad (3.26)$$

ここで、

K_{11} : 構造物の全体剛性マトリックス

K_{12} : 支点移動を起こした方向のバネ定数を含む全体剛性マトリックスの列の要素

K_{21} : K_{12}

K_{22} : 支点移動を起こした方向のバネ定数

U_0 : 支点の移動量

R_0 : 支点移動の作用外力

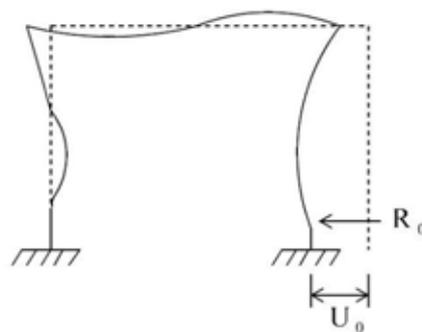


図3-6 支点移動のある場合

式 (3.26) を展開し、支点移動を起こした方向のバネ定数を含む全体剛性マトリックスの列の要素に移動量をかけ、符号を変えて右边に廻し荷重項とする。

$$K_{11} \cdot U + K_{12} \cdot U_0 = 0 \quad (3.27)$$

$$K_{11} \cdot U = -K_{12} \cdot U_0 \quad (3.28)$$

いま、 $K_{11} \rightarrow [K]$, $U \rightarrow \{U\}$, $-K_{12} \cdot U_0 \rightarrow \{F\}$ とすれば、式 (3.28) は式 (3.25) となる。

3.3.5 連立方程式の解法

(1) コレスキー分解

式 (3.25) にて表される連立方程式を Cholesky 法で解き，節点の変位を求められる。

ここでは，以下のように剛性マトリックスを LDL^T 分解して解く。

$$\begin{aligned}
 [K] \{U\} &= \{F\} \\
 [L] [D] [L]^T \{U\} &= \{F\} \\
 [D] [L]^T \{U\} &= [L]^T \{F\} \\
 \{U\} &= [L] [D]^{-1} [L]^T \{F\}
 \end{aligned}
 \tag{3.29}$$

(2) ノーテンション解析

a. バネの非線形解析 (NO-TENSION)

一般に，壁体の移動による土圧の変化は，下図に示すような非線形性を示す。

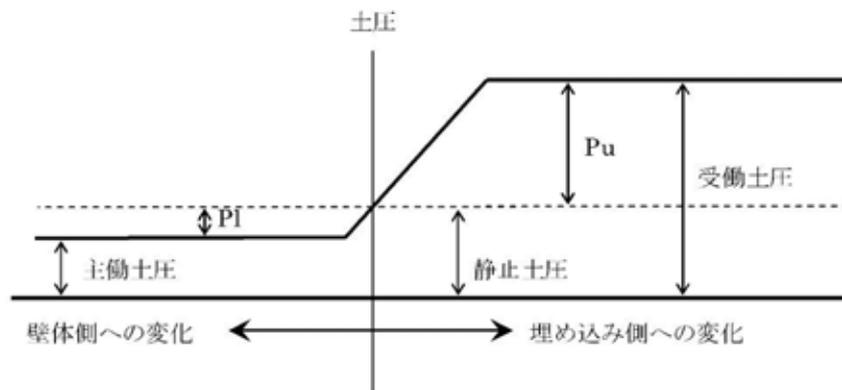


図3-7 土圧変化図

上図は，地中構造物が荷重を受けて変化しても，その変位がある一定以上になれば，土圧は変化しないことを示す。

本システムでは，節点に集中バネを配置し，静土圧を基準としたところからのバネの反力（土圧増減量）を求めることができる。

b. 処理手順

①各節点の変位 δ を求める。

②極限值のチェックを行う。

(イ) $P_l \leq K(\delta - \delta_G) \leq P_u$ のとき, 何も行わない。

(ロ) $K(\delta - \delta_G) < P_l$ のとき,
 $K=0.0$ とし, 極限でおさえたバネ反力を荷重項に加える。

(ハ) $K(\delta - \delta_G) > P_u$ のとき,
 $K=0.0$ とし, 極限でおさえたバネ反力を荷重項に加える。

③収束判定

(イ) 一つでもバネがクリアーされていれば, ①へ戻る。

(ロ) すべての非線形バネが変化しなかった場合は処理終了。

(ハ) すべての非線形バネがクリアーされた場合は処理中断。

(3) 応答変位法解析

骨組モデルを用いる応答変位法は、地震時に生じる地下構造物の応力を、地盤の変位を構造物に与えることによって静的に計算しようとする耐震設計法であり、当初線状地下構造物が地震によって軸直角方向に曲がったり、軸方向に伸びたり縮んだりする横断方向の動きに対する耐震計算法として用いられていた。

その後、比較的規模の大きい地下構造物や線状地下構造物の横断方向の耐震設計法として震度法に代わって用いられるようになった。

骨組モデルによる応答変位法の解析手順として

- ① 地震時の地盤変位，地盤剛性，せん断応力，加速度などを算出する。
- ② 骨組モデルを作成する。
- ③ 地盤剛性を用い地盤バネを算定する。
- ④ 地震時荷重を算定する。
- ⑤ 骨組モデルに地震時荷重を載荷して，地震による断面力を求める。

⑤を定式化すると以下のとおりに表すことができる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{SS} & \mathbf{K}_{SG} \\ \mathbf{K}_{GS} & \mathbf{K}_{GG} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_S \\ \mathbf{u}_G \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_S \\ \mathbf{F}_G \end{Bmatrix} \quad (3.30)$$

ただし，

- \mathbf{K}_{SS} : 構造物の剛性，地盤～構造物間バネから成る剛性マトリックス
- $\mathbf{K}_{SG}, \mathbf{K}_{GS}$: 地盤～構造物間バネから成る剛性マトリックス
- \mathbf{K}_{GG} : 地盤～構造物間バネを対角項にもつ剛性マトリックス
- \mathbf{u}_S : 構造物の変位ベクトル
- \mathbf{u}_G : 地盤の変位ベクトル
- \mathbf{F}_S : 構造物の外力ベクトル
- \mathbf{F}_G : 地盤の外力ベクトル

いま，この構造系には外力が作用しないとした場合， $\mathbf{F}_S = \mathbf{F}_G = 0$

地盤変位 \mathbf{u}_G は既知であるから，

$$[\mathbf{K}_{GG}] \cdot \{\mathbf{F}_S\} + [\mathbf{K}_{SG}] \cdot \{\mathbf{u}_G\} = \{0\} \quad (3.31)$$

$$\{\mathbf{u}_G\} = -[\mathbf{K}_{GG}]^{-1} [\mathbf{K}_{SG}] \cdot \{\mathbf{u}_G\} \quad (3.32)$$

式 (3.32) より，構造物の変位を求めることができる。

(4) 部材断面力, 支点反力

$$\{f\} = [k] \{U\} - \{Pe\} \quad (3.33)$$

ここで,

$$[k] = [\bar{k}] [T]$$

- $\{f\}$: 部材断面力
- $\{U\}$: 基準座標系での節点変位
- $[\bar{k}]$: 部材剛性マトリックス
- $[T]$: 座標変換マトリックス
- $\{Pe\}$: 内力 (等分布荷重を受ける場合)

また, 支点反力は, 支点を構成する部材の断面力及び部材の重量を考慮して求める。

(5) 静的非線形解析

解析モデルを増分法で表すと次式のようなになる。

ただし、増分 Δ は、荷重増分ピッチ内の計算を意味する。

$$K \cdot \Delta u = \Delta F \tag{3.34}$$

ここで、

K : 荷重増分における構造物の剛性マトリックス

Δu : 構造物の変位増分

ΔF : 外力増分

式 (3.34) を解くことにより、応答変位増分 Δu を求めることができる。しかし、外力増分 ΔF において剛性 K が変化した場合、構造系には不平衡力 ΔF_r が生じることになる。

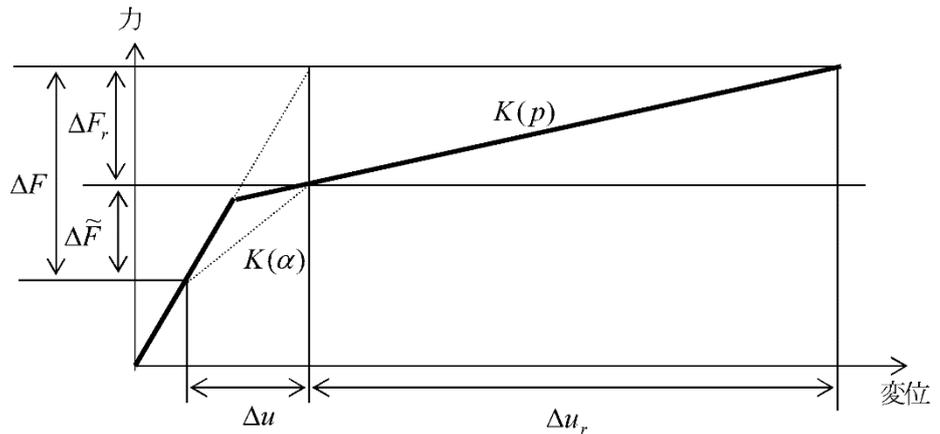


図3-8 力と変位の関係

$$\Delta F_r = \Delta F - \Delta \tilde{F} \tag{3.35}$$

ここで、

$$\Delta \tilde{F} = \tilde{K} \cdot \Delta u \tag{3.36}$$

\tilde{K} : 修正された剛性マトリックス

ΔF_r : 不平衡力

$\Delta \tilde{F}$: 構造系内で実際に作用している外力増分による力

この不平衡力 ΔF_r を消去するために式 (3.37) を用いて同様な計算をし、変位誤差が十分小さくなるまで繰り返し行い、誤差を消去していく。

$$\tilde{K} \cdot \Delta \tilde{u} = \Delta F_r \tag{3.37}$$

ここで、

$\Delta \tilde{u}$: 不平衡力 ΔF_r に相当する構造物変位増分

このようにして求めた $\Delta \tilde{u}$ を累積し、構造物変位を求める。

$$\Delta u = \Delta u + \sum (\Delta \tilde{u}) \quad (3.38)$$

<不平衡力 (ΔF_r) 計算時バネ値>

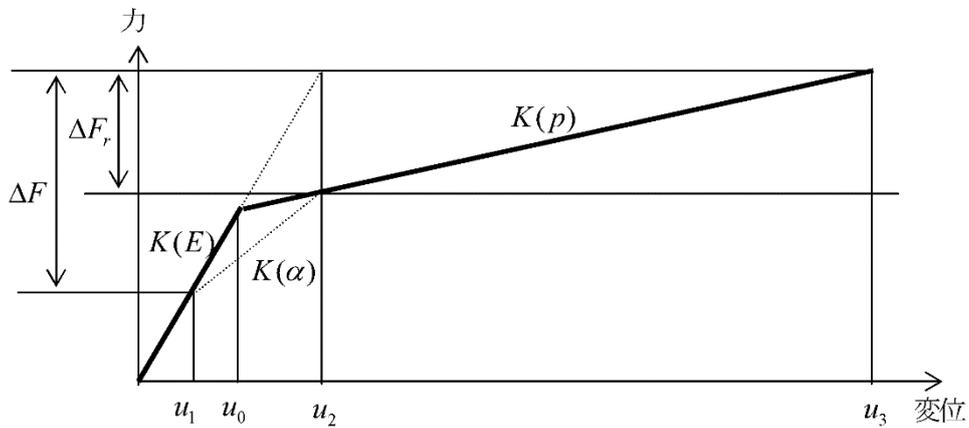


図3-9 力と変位の関係

式(3.36)で定義している \tilde{K} は、バネが変化した時の不平衡力 (ΔF_r) を求めるための剛性である。

その時のバネ値 $K(\alpha)$ を次のように定義する。

$$\alpha = \frac{u_0 - u_1}{u_2 - u_1} \quad (3.39)$$

$$K(\alpha) = \alpha \cdot K(E) + (1 + \alpha) \cdot K(p) \quad (3.40)$$

3.4 解析フローチャート
解析フローチャートを以下に示す。

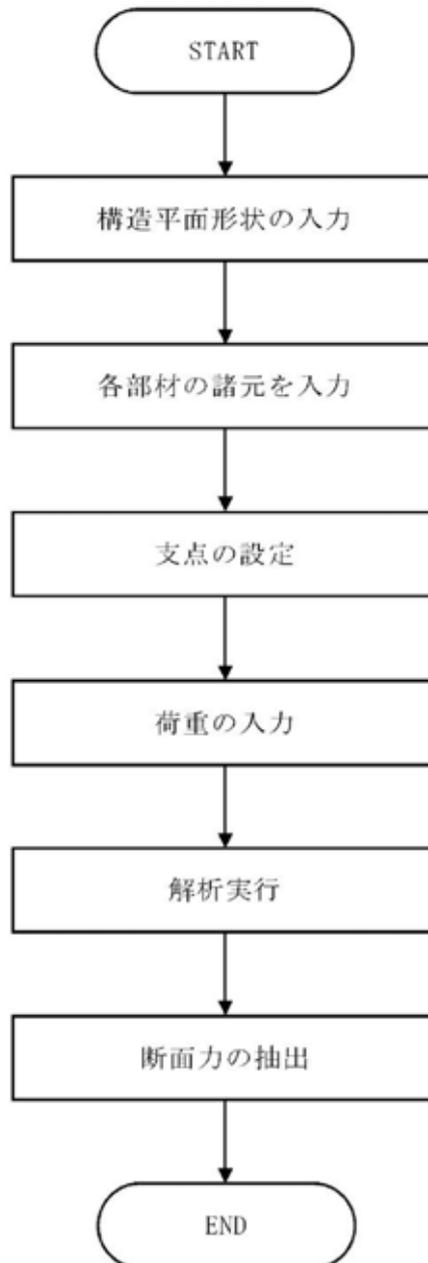


図3-10 解析フローチャート

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

本解析コードを今回の解析に用いるに当たり、検証として構造力学公式集（土木学会，1994）による理論解との比較を、また、妥当性確認として類似解析コードとの比較を実施した。その詳細な内容については以下のとおりとする。

3.5.1 検証 (Verification)

単純はりを対象として、構造力学公式集に基づいた断面力及びたわみを算出し、FREMING との解析結果を比較することで検証を行った。その結果、構造力学公式集による理論値と本解析コードの解析結果は一致した。

(1) 単純はりの概要

$L=10$ m のスパンに設置した支点上に H 型鋼材 (H-300×300×10×15) の単純はりを仮定する。作用荷重は、鉛直方向に $w=10$ kN/m の等分布荷重が載荷された状態を想定する。

なお、境界条件は、ピン支承及びローラー支承とする。

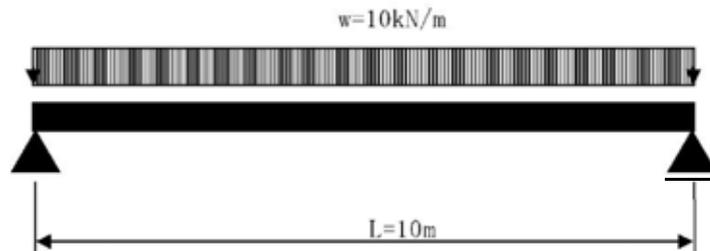


図3-11 検証に用いる単純はり

(2) H型鋼材 (H-300×300×10×15) の断面諸元

H 型鋼材 (H-300×300×10×15) の断面諸元を以下に示す。

断面二次モーメント : $I = 0.000202$ (m^4)
ヤング係数 : $E = 2.0 \times 10^8$ (kN/m^2)

(3) 構造力学公式集に基づく理論解の算出

構造力学公式集に基づいて算出した、はりに作用する最大曲げモーメント M_{\max} 、最大せん断力 Q_{\max} 、及び最大たわみ δ_{\max} を示す。

【最大曲げモーメント】

$$M_{\max} = \frac{wL^2}{8} = \frac{10 \times 10^2}{8} = 125.0 (\text{kN} \cdot \text{m})$$

【最大せん断力】

$$Q_{\max} = \frac{wL}{2} = \frac{10 \times 10}{2} = 50.0 (\text{kN})$$

【最大たわみ】

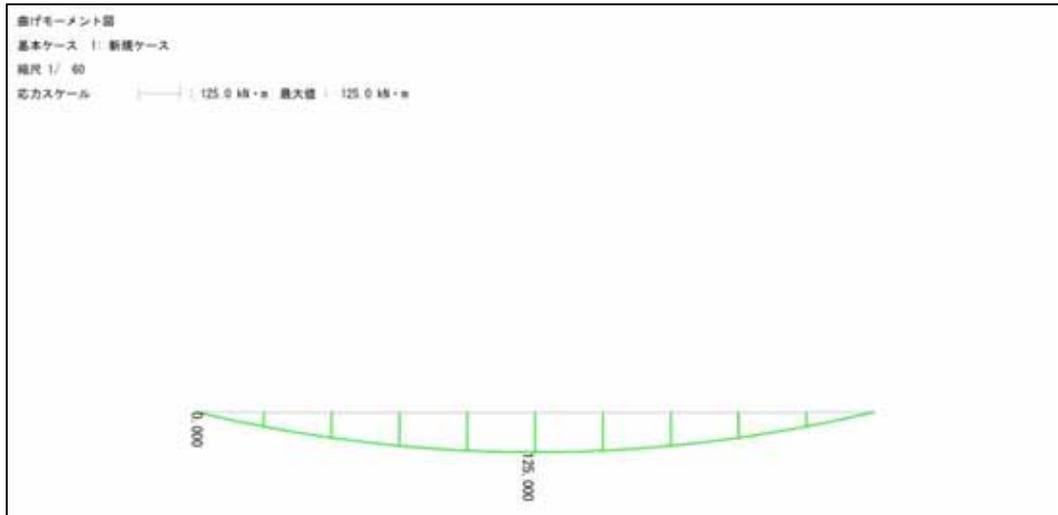
$$\delta_{\max} = \frac{5wL^4}{384EI} = \frac{5 \times 10 \times 10^4}{384 \times 2.0 \times 10^8 \times 0.00202} = 0.003223 (\text{m}) = 3.223 (\text{cm})$$

(4) FREMINGによる解析結果

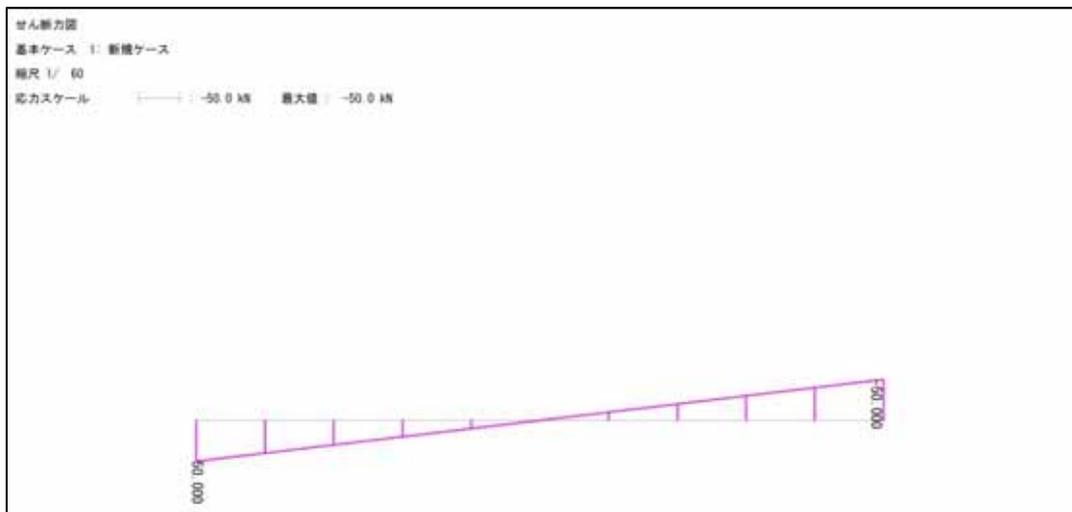
FREMING の解析結果を以下に示す。

表3-7 解析結果 (FREMING)

構成節点	曲げモーメント (kN・m)	せん断力 (kN)	たわみ (cm)
1	0.0	50.0	0.000
2	45.0	40.0	1.012
3	80.0	30.0	1.914
4	105.0	20.0	2.621
5	120.0	10.0	3.069
6	125.0	0.0	3.223
7	120.0	-10.0	3.069
8	105.0	-20.0	2.621
9	80.0	-30.0	1.914
10	45.0	-40.0	1.012
11	0.0	-50.0	0.000
最大値	125.0	50.0	3.223



(a) 曲げモーメント



(b) せん断力

図3-12 断面力図

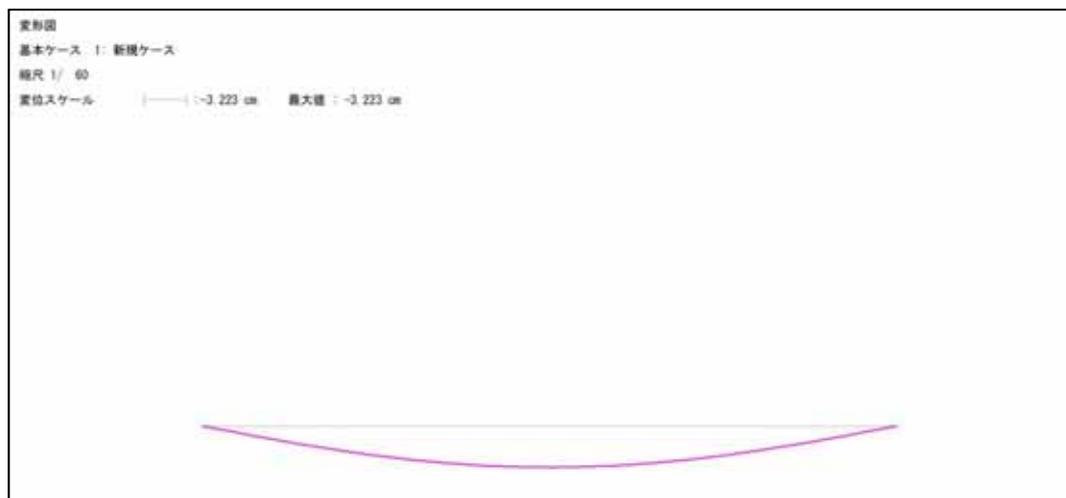
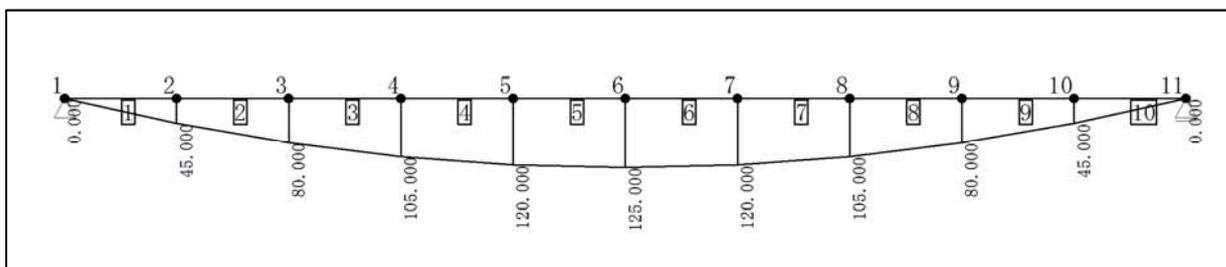


図3-13 変形図

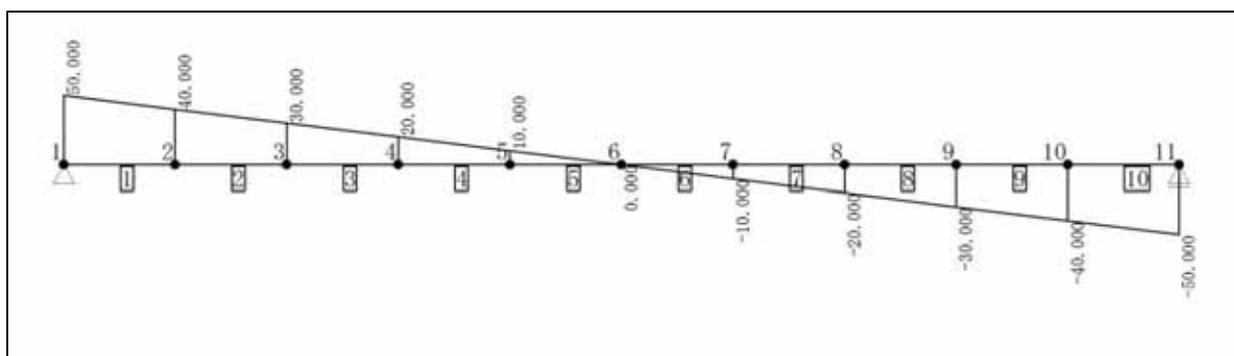
3.5.2 妥当性確認 (Validation)

類似解析コードFRAME (面内) を用いた解析結果と比較し、本解析コードFREMINGの妥当性を確認する。

本解析コードFREMINGとFRAME (面内) の解析結果が一致することを確認した。



(a) 曲げモーメント



(b) せん断力

図3-14 断面力図

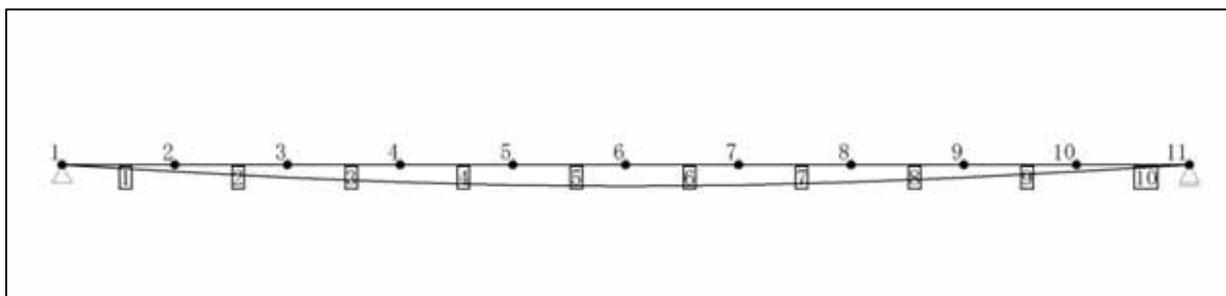


図3-15 変形図

表3-8 解析結果 (FRAME (面内))

構成 節点	曲げ モーメント (kN・m)	せん断力 (kN)	たわみ (cm)
1	0.0	50.0	0.000
2	45.0	40.0	1.012
3	80.0	30.0	1.914
4	105.0	20.0	2.621
5	120.0	10.0	3.069
6	125.0	0.0	3.223
7	120.0	-10.0	3.069
8	105.0	-20.0	2.621
9	80.0	-30.0	1.914
10	45.0	-40.0	1.012
11	0.0	-50.0	0.000
最大値	125.0	50.0	3.223

3.5.3 評価結果

表 3-9 に示すとおり，検証の結果，本解析コード FREMING の解析結果は，構造力学公式集による理論解，及び類似解析コード FRAME（面内）の解析結果と一致することを確認した。

以上より，本解析コード FREMING の解析結果は，応力度照査に用いる断面力において，構造力学公式集による計算結果と一致しており，類似解析コードとの整合性も良好である。したがって，本解析コードを構造物の断面力算定に適用することは妥当といえる。

表3-9 理論解と解析結果の比較

断面力	理論解 (構造力学公式集)	解析結果 (FREMING)	解析結果 (FRAME (面内))
M_{max} (kN・m)	125.0	125.0	125.0
Q_{max} (kN)	50.0	50.0	50.0
δ_{max} (cm)	3.223	3.223	3.223

V-5-42 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ 波形処理プログラム k-WAVE for Windows

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.	波形処理プログラム k-WAVE for Windows Ver.6.2.0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）波形処理プログラム k-WAVE for Windows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-2-1-7	設計用床応答曲線の作成方針	6.2.0

2. 解析コードの概要

項目	コード名 波形処理プログラム k-WAVE for Windows
使用目的	設計用床応答曲線の作成
開発機関	(株) 構造計画研究所
開発時期	1998年
使用したバージョン	Ver 6.2.0
コードの概要	<p>波形処理プログラム k-WAVE for Windows (以下「本解析コード」という。)は、加速度時刻歴から床応答曲線を作成するプログラムであり、建物・構築物床応答時刻歴から設計用床応答曲線を作成することを目的とする。</p> <p>一定の固有周期および減衰定数を有する1質点系の、与えられた加速度時刻歴に対する最大応答加速度を計算し、周期と減衰定数が同一の系で計算された複数の床応答曲線の包絡値を求め、また床応答曲線の拡幅を行う。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】 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"> ・別解析コード「Seismic Analysis System (SAS)」により作成した設計用床応答曲線と本解析コードで作成した設計用床応答曲線とを比較し、一致していることを確認した。 ・本解析コードの運用環境について、動作環境を満足する計算機にインストールして用いていることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】 本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・今回の工事計画認可申請で使用する機能は床応答スペクトルの作成機能であり、同一の入力条件に対する1自由度系の最大応答加速度を固有周期毎に算定し、別解析コードSeismic Analysis System (SAS) と本解析コードの結果を比較することで、妥当性を確認している。 ・設計用床応答曲線を作成する際、入力とする時刻歴データの時間刻み幅、データの形式は、妥当性を確認している範囲内での使用であることを確認している。 ・10%拡幅、時刻歴波の時間刻み、固有周期計算間隔は J E A G 4 6 0 1 -1987に従っており、妥当性は確認されている。 ・今回の工事計画認可申請における使用用途及び使用方法に関して、上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

3. 波形処理プログラム k-WAVE for Windows Ver. 6. 2. 0 の解析手法について

3.1 一般事項

本書は、建物・構築物の地震応答解析から算出される加速度時刻歴から床応答スペクトルを作成する解析コードである波形処理プログラム k-WAVE for Windows Ver. 6. 2. 0（以下「本解析コード」という。）の説明書である。

本解析コードは、一定の固有周期および減衰定数を有する 1 質点系の、与えられた加速度時刻歴に対する最大応答加速度を計算する。また、周期と減衰定数が同一の系で計算された複数の床応答スペクトルの包絡値を求め、拡張した床応答曲線の作成を行う。

3.2 解析コードの特徴

本解析コードにおける 1 自由度系を用いた床応答スペクトルの作成は、ニガム法を用いることにより行う。

主な特徴を下記に示す。

- ・ 加速度時刻歴から周期及び減衰定数に応じた床応答スペクトルを作成する。
- ・ 複数の床応答スペクトルを包絡させた床応答スペクトルに対して拡張した設計用床応答曲線を作成する。

3.3 解析手法

各床面での加速度時刻歴を入力とする 1 自由度系における応答について、減衰定数をパラメータとして以下ニガム法より算出する。

各質点における相対変位を x ，固有円振動数を ω ，減衰定数を h ，地動の加速度時刻歴を $\ddot{y}(t)$ としたとき、系の運動方程式は、

$$\ddot{x} + 2h\omega\dot{x} + \omega^2x = -\ddot{y}(t) \quad (1) \text{式}$$

と表される。 t は一定時間間隔 Δt ごとに与えられて、 \ddot{y}_i と \ddot{y}_{i+1} の間を直線によって補間し、 t_i を原点とするこの区間 $t_i \sim t_{i+1}$ 内の局所的な時間を τ ， $\Delta\ddot{y} = \ddot{y}_{i+1} - \ddot{y}_i$ とすれば、

$$\ddot{y}(t) = \frac{\Delta\ddot{y}}{\Delta t}\tau + \ddot{y}_i \quad 0 \leq \tau \leq \Delta t$$

と表される。(1)式は区間的に

$$\ddot{x}(\tau) + 2h\omega\dot{x}(\tau) + \omega^2x(\tau) = -\frac{\Delta\ddot{y}}{\Delta t}\tau - \ddot{y}_i \quad 0 \leq \tau \leq \Delta t$$

となる。この非同次微分方程式を解いて、区間のはじめ時刻 t_i における初期条件

$$\tau = 0 : x = x_i, \quad \dot{x} = \dot{x}_i$$

を与えれば、区間の終わり $\tau = \Delta t$ (時刻 $t_{i+1} = t_i + \Delta t$) における相対変位応答および相対速度応答は、次のような形で求まる。

$$\left. \begin{aligned} x_{i+1} &= A_{11}x_i + A_{12}\dot{x}_i + B_{11}\ddot{y}_i + B_{12}\ddot{y}_{i+1} \\ \dot{x}_{i+1} &= A_{21}x_i + A_{22}\dot{x}_i + B_{21}\ddot{y}_i + B_{22}\ddot{y}_{i+1} \end{aligned} \right\} \quad (2) \text{式}$$

ここで、 A 、 B は、 ω 、 h 、 Δt が定まれば一意に定まる係数である。 x_{i+1} 、 \dot{x}_{i+1} が定まれば、絶対加速度応答は(1)式より

$$(\ddot{x} + \ddot{y})_{i+1} = -(2h\omega\dot{x}_{i+1} + \omega^2x_{i+1}) \quad (3) \text{式}$$

によって求められる。したがって、 $t=0$ における応答の初期値

$$\begin{aligned} x_1 &= 0 \\ \dot{x}_1 &= -\ddot{y}_1\Delta t \\ (\ddot{x} + \ddot{y})_1 &= 2h\omega\ddot{y}_1\Delta t \end{aligned}$$

を与えれば、後は(2)式と(3)式によって、応答値が算出される。

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1に示す。

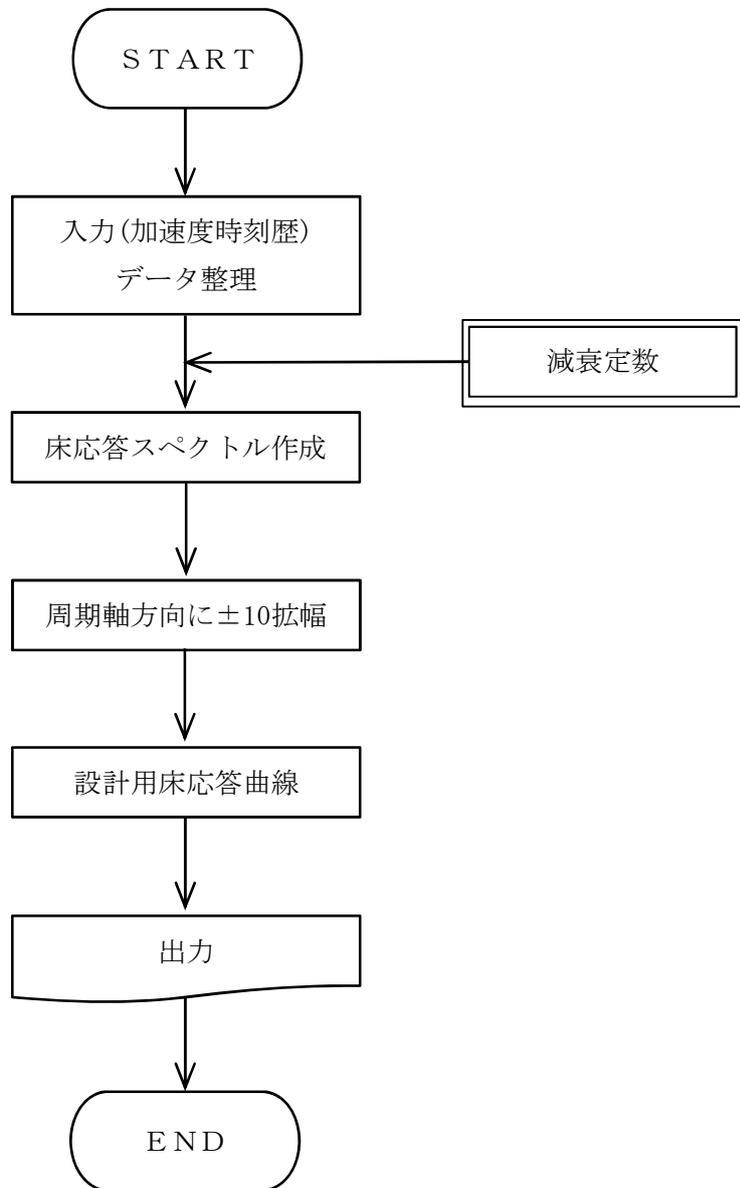


図1 解析フローチャート

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

3.5.1 検証 (Verification)

(1) 検証の概要

別解析コードにて作成した床応答スペクトルを包絡, 拡張した設計用床応答曲線(検証用データ)と本解析コードで同様に作成した設計用床応答曲線 (k-WAVEデータ) の加速度 (震度) を比較することで, 本解析コードの検証を行った。

表 1 検証内容における比較項目

検証内容	比較項目
設計用床応答曲線	応答加速度 (震度)

(2) 検証条件

東海第二発電所原子炉建屋地震応答解析結果から得られた基準地震動 S_s に対する加速度時刻歴を用いた。検証に用いた加速度時刻歴は, 水平方向としてNS方向及びEW方向の質点1 (EL. 63.65m), 質点6 (EL. 29.00m) 及び質点11 (EL. -4.00m) の応答を用いた。また, 設計用床応答曲線の作成するための減衰定数は, 機器・配管系の耐震計算に適用される0.5%, 1.0%, 2.0%及び5.0%とした。図2に水平方向の原子炉建屋地震応答解析モデルを示す。

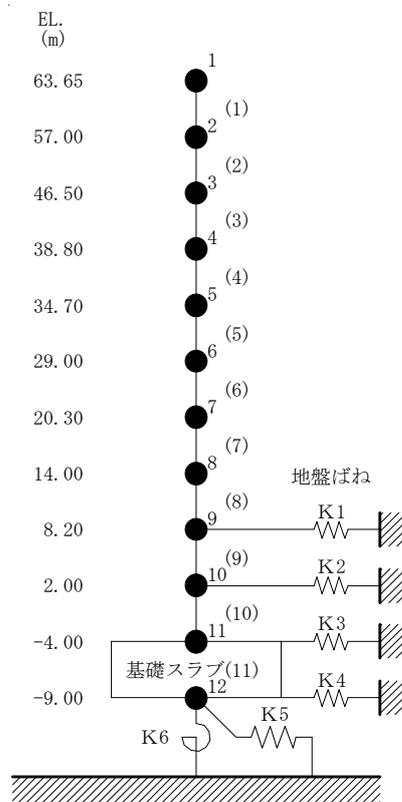


図2 原子炉建屋地震応答解析モデル (水平方向)

(3) 解析結果の比較

各検証条件のもと作成した設計用床応答曲線について、検証用データとk-WAVEデータとを比較した結果を図3～図5に示す

(5) 検証結果

前項に示す設計用床応答曲線（固有周期と応答加速度（震度））の比較結果のとおり、両者は一致しており、本解析コードを用いて得られた計算結果の妥当性を確認した。

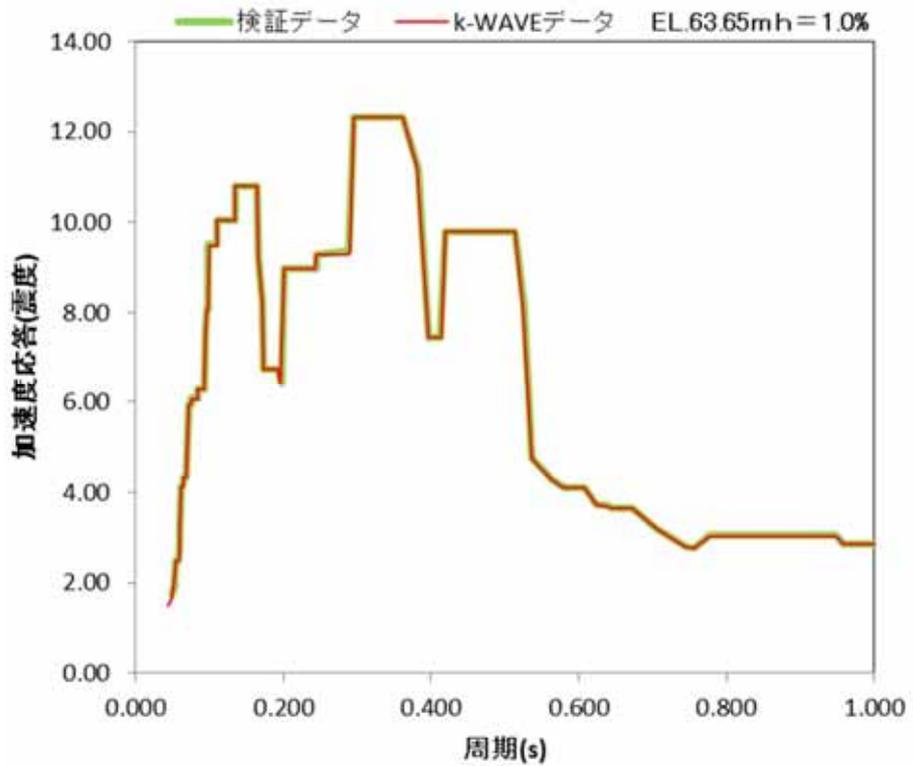
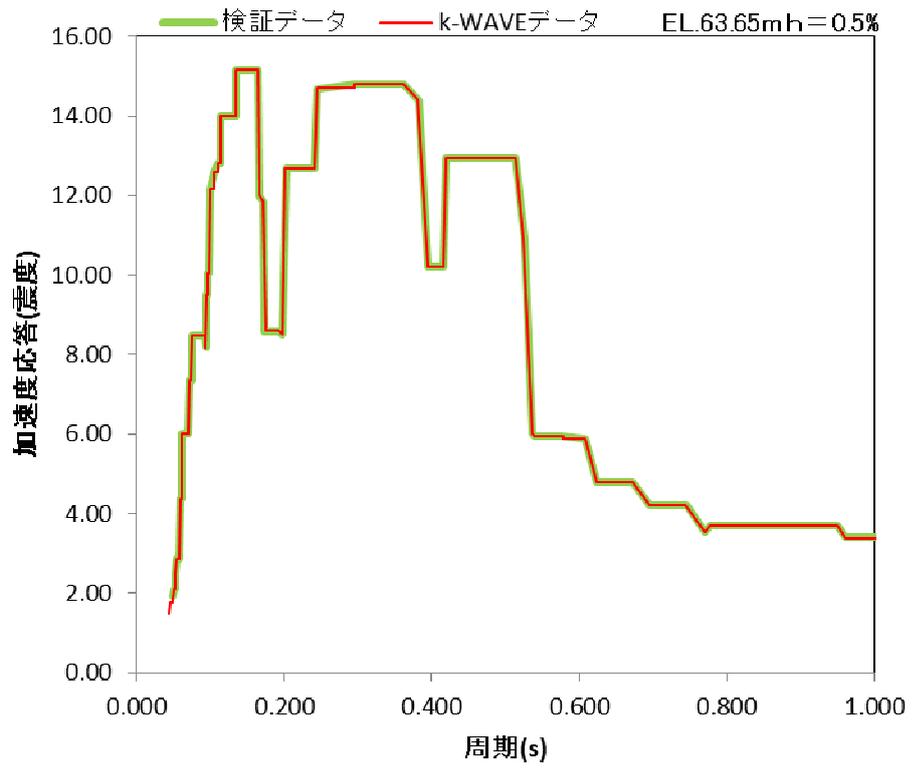


図 3(1) 検証用データと k-WAVE データとを比較した結果 (EL. 63. 65m)

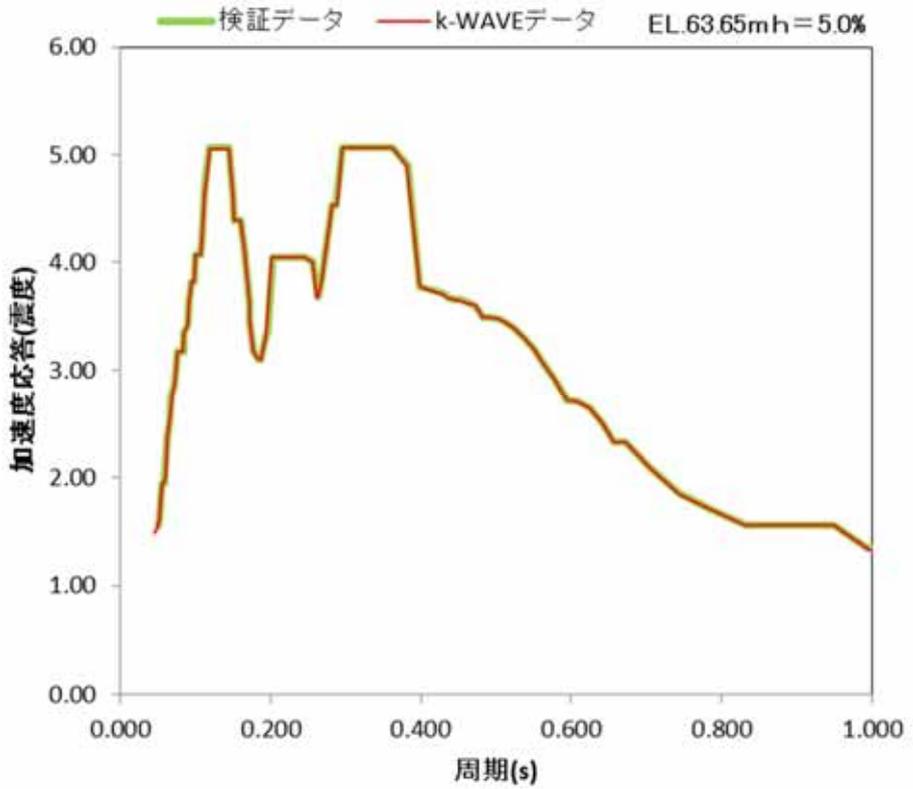
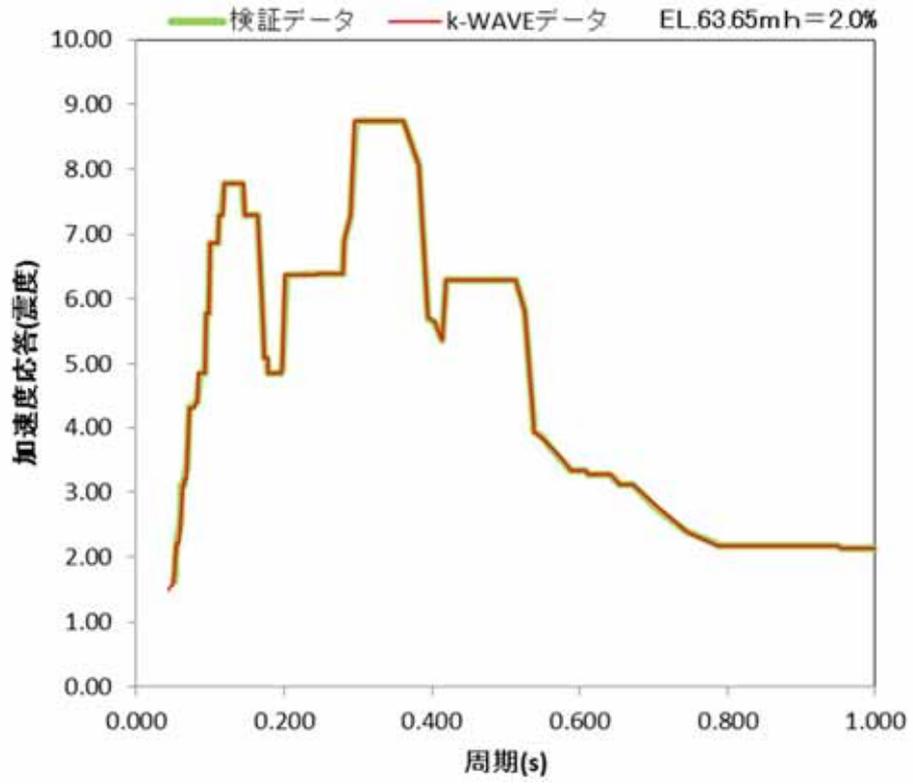


図 3(2) 検証用データと k-WAVE データとを比較した結果(EL. 63. 65m)

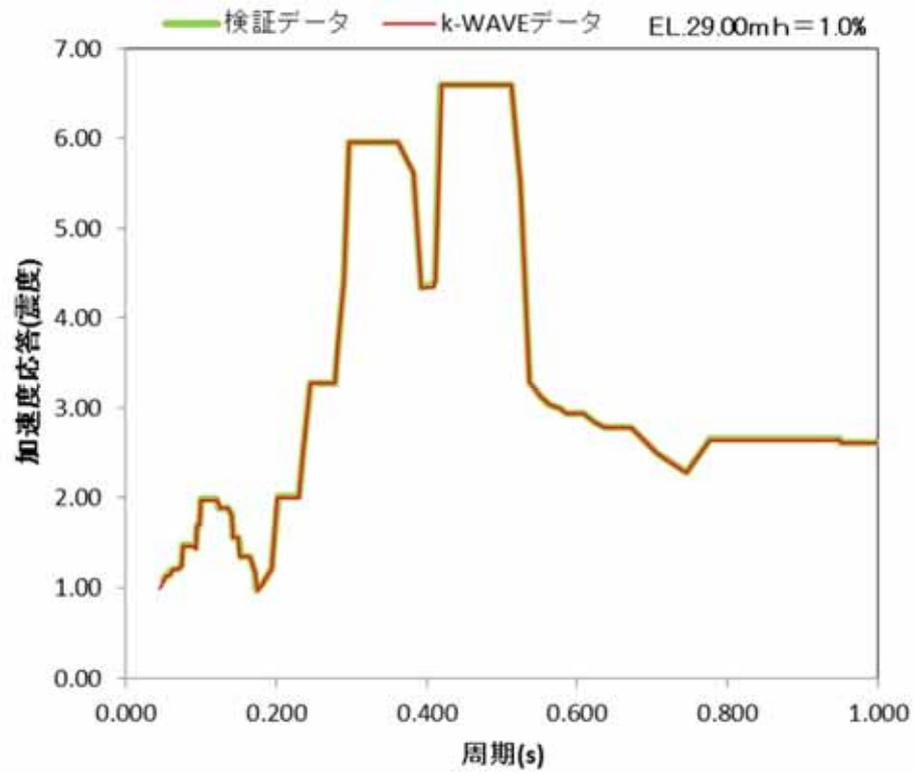
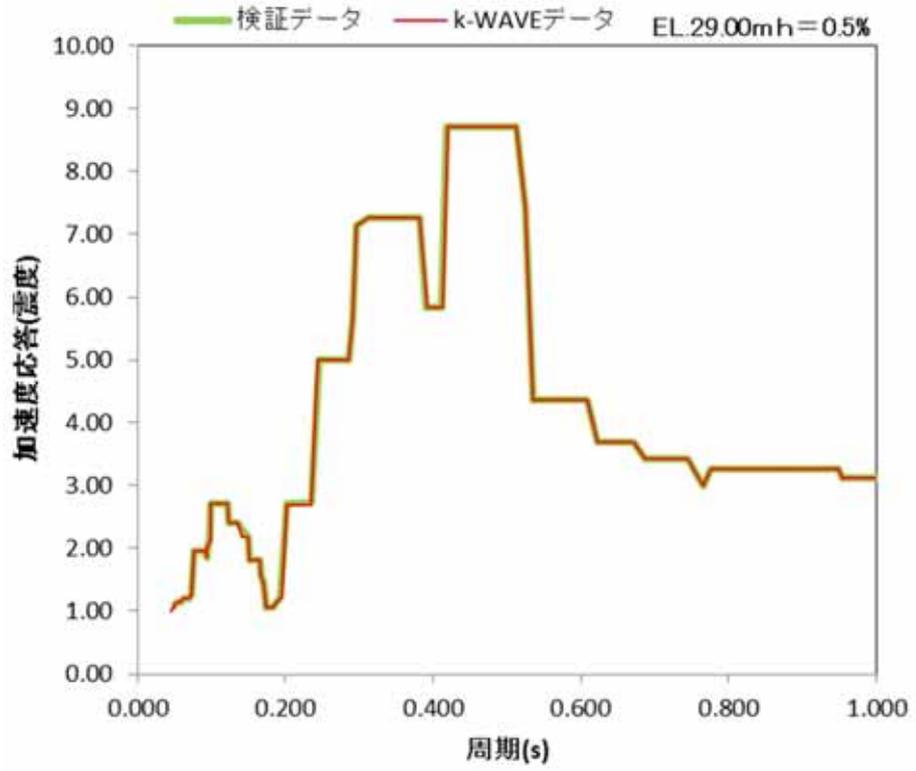


図 4(1) 検証用データと k-WAVE データとを比較した結果 (EL. 29. 00m)

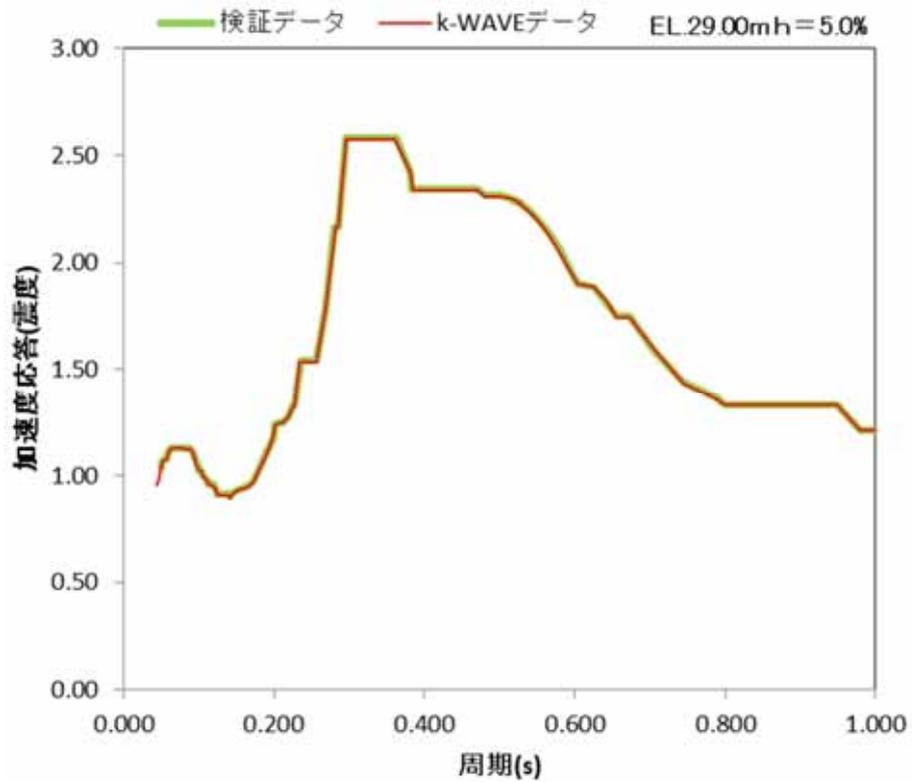
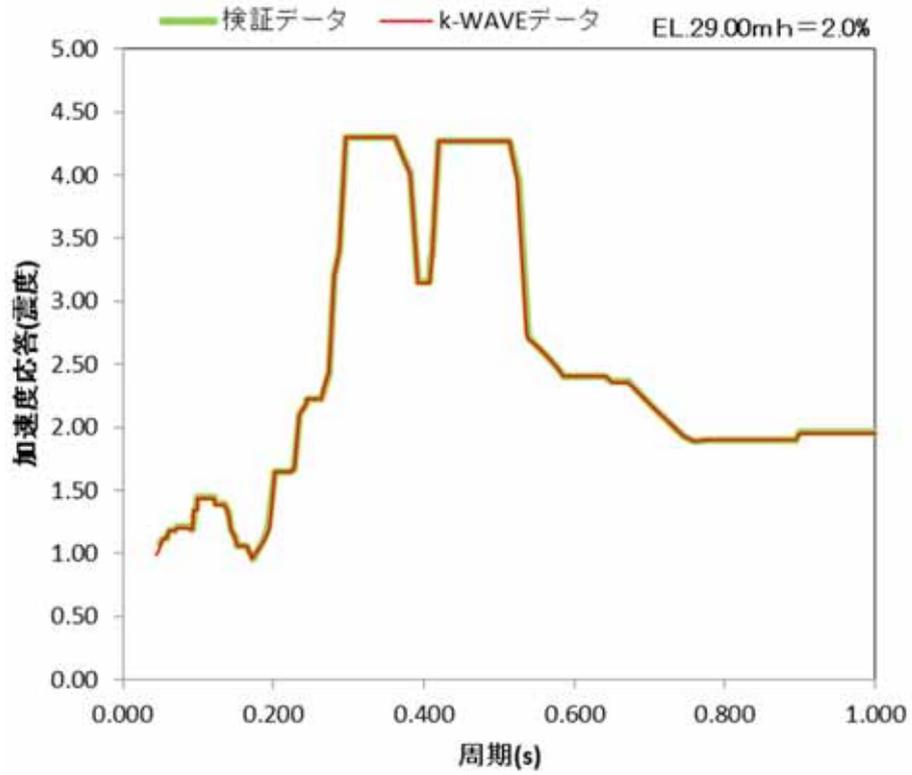


図 4(2) 検証用データと k-WAVE データとを比較した結果(EL.29.00m)

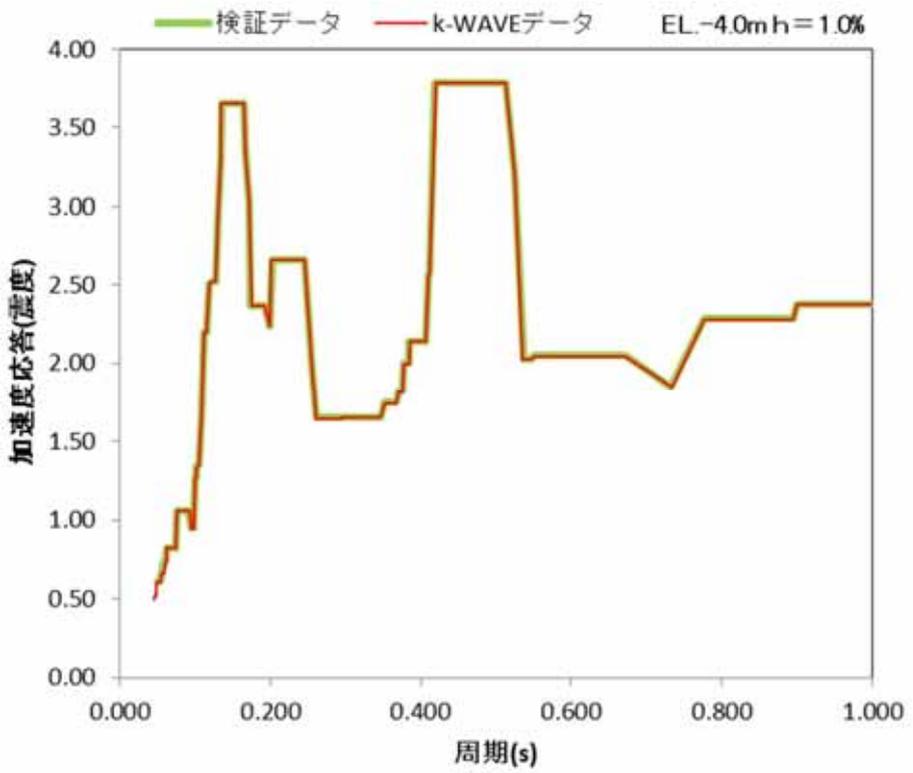
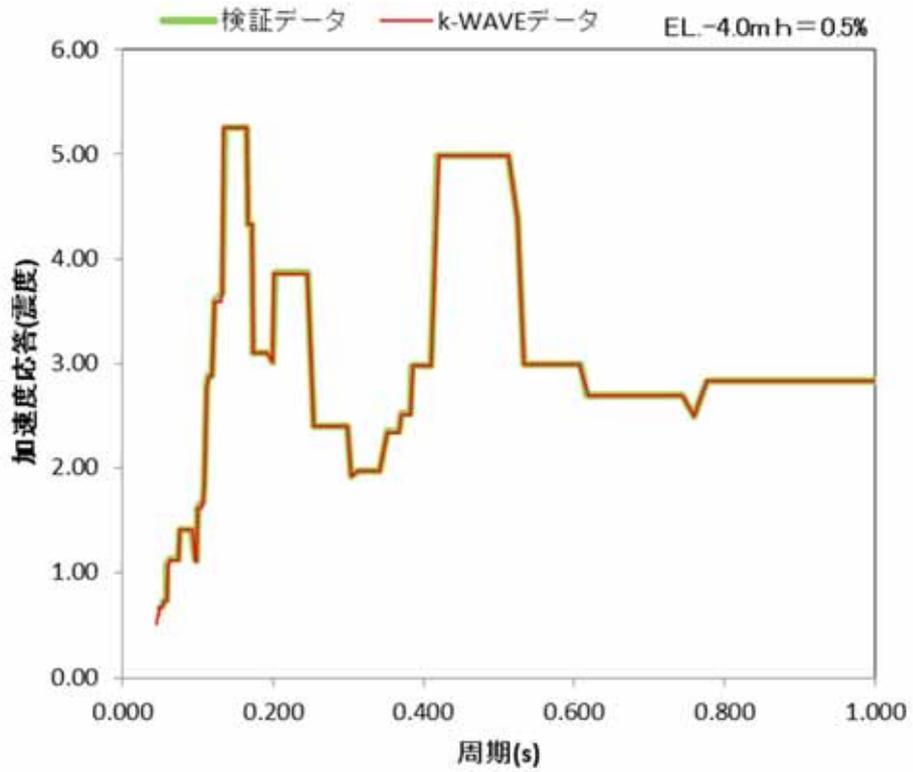


図 5(1) 検証用データと k-WAVE データとを比較した結果(EL. -4.00m)

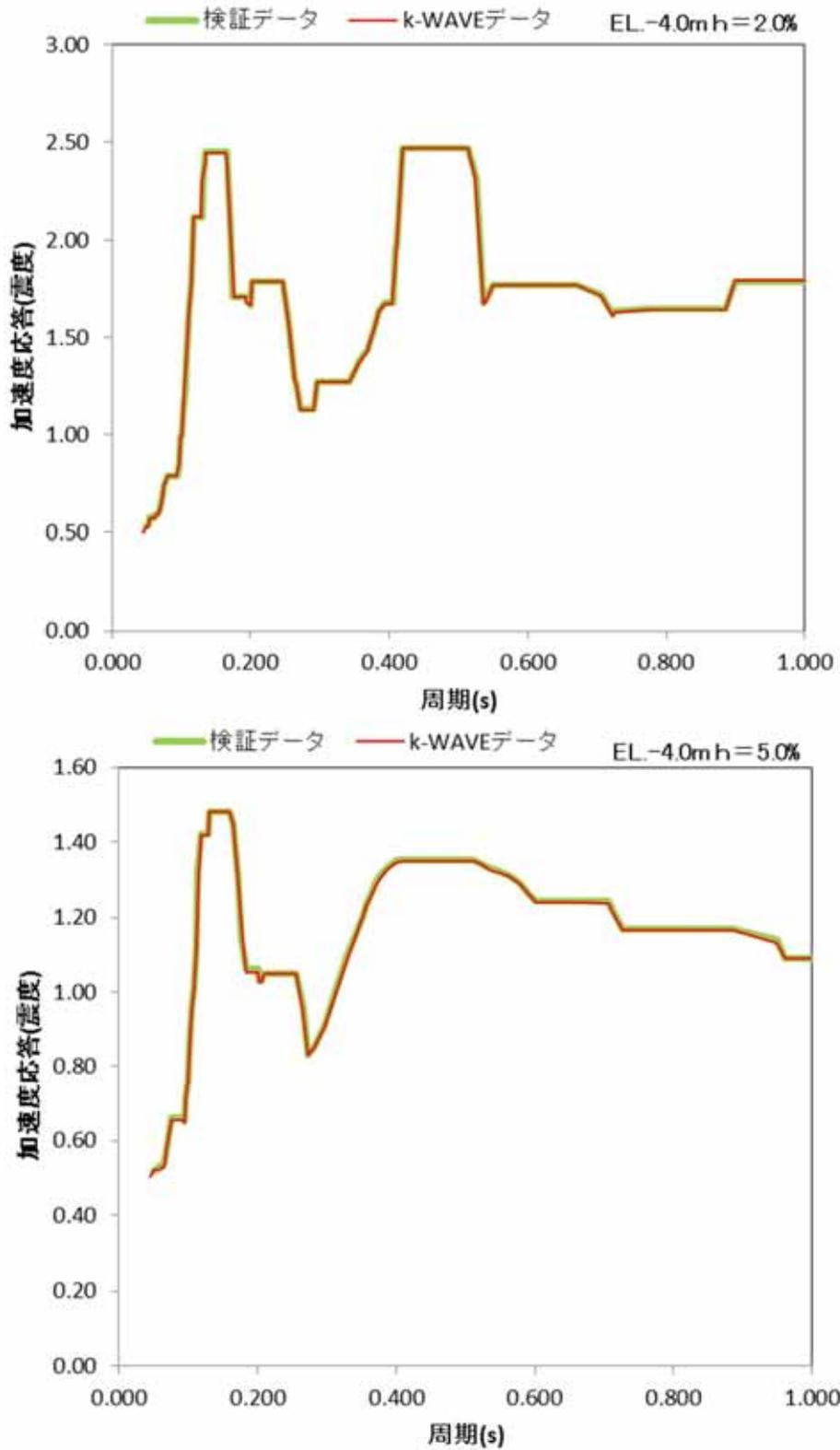


図 5(2) 検証用データと k-WAVE データとを比較した結果(EL. -4.00m)

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。

- ・ 今回の工事計画で使用する機能は床応答スペクトルの作成機能であるため、同一の入力条件に対する1自由度系の最大応答加速度を固有周期毎に算定し、別解析コード Seismic Analysis System (S A S) と本解析コードの結果を比較することで、妥当性を確認している。
- ・ 設計用床応答曲線を作成する際、入力とする時刻歴データの時間刻み幅、データの形式は、上述の妥当性を確認している範囲内での使用である。
- ・ 10%拡幅、時刻歴波の時間刻み、固有周期計算間隔は J E A G 4 6 0 1 -1987に従っており、妥当性に問題はない。

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設計用床応答曲線の作成に用いることは妥当である。

V-5-43 計算機プログラム（解析コード）の概要・RC断面計算

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）RC断面計算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-2-2-13	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. 8.0.5
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. 8.0.5
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. 8.0.5
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. 8.0.5
V-2-2-29	代替淡水貯槽の耐震性についての計算書	Ver. 8.0.5
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. 8.0.5
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. 8.0.5
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. 8.0.5
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. 8.0.5
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. 8.0.5
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. 8.0.5
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. 8.0.5
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. 8.0.5
V-2-11-2-9	海水ポンプエリア竜巻防護対策施設の耐震性についての計算書	Ver. 8.0.5
V-3-別添1-1-10-1	建屋及び構造物の強度計算書	Ver. 8.0.5
V-3-別添3-2-1-1	防潮堤（鋼製防護壁）の強度計算書	Ver. 8.0.5
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. 8.0.5
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. 8.0.5
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. 8.0.5
V-3-別添3-2-1-4	防潮扉の強度計算書	Ver. 8.0.5
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. 8.0.5

2. 解析コードの概要

項目	コード名 RC断面計算
使用目的	鉄筋コンクリートの応力度計算
開発機関	株式会社フォーラムエイト
開発時期	1998年
使用したバージョン	Ver. 8.0.5
コードの概要	RC断面計算は、様々な断面形状を持つ鉄筋コンクリート断面に対する応力度計算用に開発された解析コードである。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>本解析コードは、鉄筋コンクリート部材の応力解析で使用している。</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"> ・本解析コードを用いた応力度解析解と、弾性理論に基づく理論式から求めた理論解を比較し、解析解が理論解と一致することを確認している。 ・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。 <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、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・今回の解析に本解析コードを使用することの妥当性は、前述の検証の中で確認している。 ・九州電力株式会社の「玄海原子力発電所第3号機」において、海水管ダクト堅坑、海水戻り管堅坑、大容量空冷式発電機エリア基礎の鉄筋コンクリートの応力解析（断面照査）に本コード（Ver. 5.02.04）が使用された実績がある。 ・本工事計画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。 ・本工事計画における構造に適用する要素、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。

V-5-44 計算機プログラム（解析コード）の概要・R E S P - T

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	RESP-T Ver. 5.1.3.4 (耐震・耐津波関連)	4
2.2	RESP-T Ver. 5.1.2.2 (建物・構築物関連)	4
3.	解析コードの検証(ESP-T Ver. 5.1.3.4)	5
3.1	検証方法	5
3.2	諸元	5
3.3	結果比較	11
4.	解析コードの検証(ESP-T Ver. 5.1.2.2)	13
4.1	ESP-T の解析手法について	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）RESP-T 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-2-2-37	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. 5.1.3.4
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. 5.1.3.4
V-3-別添 3-2-1-4	防潮扉の強度計算書	Ver. 5.1.3.4
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. 5.1.3.4
V-2-11-2-14	サービス建屋の耐震性についての計算書	Ver. 5.1.2.2

2. 解析コードの概要

2.1 RESP-T Ver. 5.1.3.4 (耐震・耐津波関連)

項目 \ コード名	RESP-T
使用目的	2次元はりモデルによる静的解析
開発機関	株式会社構造計画研究所
開発時期	1989年
使用したバージョン	Ver. 5.1.3.4
コードの概要	<p>RESP-T (以下「本解析コード」という。)は、(株)構造計画研究所によって開発され保守されている建築・土木構造物等の構造解析用の汎用解析コードである。</p> <p>建屋、機器及び配管を含む3次元構造物を、はり要素、配管要素、平面要素(面内要素)及びバネ要素に置換して、静的・動的非線形解析(応答解析を含む)を行うものである。なお、本解析コードは、汎用解析コードである。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>RESP-T Ver. 5.1.3.4は、鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁の2次元フレームモデルを対象とした静的解析に使用している。</p> <p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードによる解析解と、既工事計画において実績のある別コード (Femap with NX Nastran) による解析解が一致することを確認している。 ・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。 <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、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、建築、土木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。 ・開発機関が提示するマニュアルにより、本工事計画で使用する2次元はり要素による静的フレーム解析が本解析コードで適用できることを確認している。 ・本解析コードの適用制限として使用節点数・要素数があるが、開発機関から提示された範囲内であることを確認している。 ・本工事計画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、使用する機能に変更はないことを確認している。

2.2 RESP-T Ver. 5.1.2.2 (建物・構築物関連)

項目 \ コード名	RESP-T
使用目的	固有値解析及び弾塑性応答解析
開発機関	株式会社構造計画研究所
開発時期	1989年
使用したバージョン	Ver. 5.1.2.2
コードの概要	RESP-T (以下「本解析コード」という。) は、建築・土木構造物を対象とした静的解析及び時刻歴による地震応答解析を行う解析用プログラムである。建物の諸定数(せん断ばね, 減衰定数, 層高さ, 質量等)を入力として, 静的解析及びニューマークβ法を用いた地震応答解析を行うことができる。解析結果としては, 加速度, 変位, せん断力, 曲げモーメント等が求められる。なお, 本解析コードは, 汎用解析コードである。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>RESP-T は, サービス建屋の水平方向について, 基準地震動 S_0 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>【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"> ・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。 ・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。 <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"> ・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。 ・地震応答解析に対して, 川内原子力発電所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た。 ・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。

3.2.2 検証ケース

検証ケースを表 3-1 に示す。

表 3-1 検証ケース

ケース	長期荷重		地震		津波	風	漂流物	動水圧	その他	地盤バネの評価		備考
	死荷重	積雪・降灰	本震	余震						算定法	上限値	
津波時	○	○			○		○		○	静的地盤バネ	ピーク強度より算定	津波遡上 高さ T. P. +18.0m

3.2.3 入力荷重

(1) 長期荷重

a. 死荷重

死荷重は被覆コンクリート、鋼管及び杭体内の土の重量とし、各節点の節点荷重とする。

b. 積雪

積雪は被覆コンクリートの水平面のみ作用するものとし、天端の節点の節点荷重とする。

c. 降灰

降灰は被覆コンクリートの水平面のみ作用するものとし、天端の節点の節点荷重とする。

長期荷重の節点荷重を表 3-2 に示す。

表 3-2 長期荷重の節点荷重

T. P. (m)	支配 長さ (m)	天端コン 節点荷重 (kN)	被覆コン 節点荷重 (kN)	鋼管 節点 荷重 (kN)	地盤 改良層 荷重 (kN)	Ag2 層 荷重 (kN)	積雪 節点 荷重 (kN)	降灰 節点 荷重 (kN)
17.50	0.50	-73.26	-34.77	-5.97	0.00	0.00	-3.83	-35.19
16.50	1.00	0.00	-69.54	-11.94	0.00	0.00	0.00	0.00
15.50	1.00	0.00	-69.54	-11.94	0.00	0.00	0.00	0.00
14.50	1.00	0.00	-69.54	-11.94	0.00	0.00	0.00	0.00
13.50	1.00	0.00	-69.54	-11.94	0.00	0.00	0.00	0.00
12.50	1.00	0.00	-69.54	-11.94	0.00	0.00	0.00	0.00
11.50	1.00	0.00	-69.54	-11.94	0.00	0.00	0.00	0.00
10.50	1.00	0.00	-69.54	-11.94	0.00	0.00	0.00	0.00
9.50	1.00	0.00	-69.54	-11.94	0.00	0.00	0.00	0.00
8.50	0.75	0.00	-52.16	-8.96	0.00	0.00	0.00	0.00
8.00	0.65	0.00	-52.16	-7.76	-23.89	0.00	0.00	0.00
7.20	0.80	0.00	0.00	-9.56	-47.78	0.00	0.00	0.00
6.40	0.80	0.00	0.00	-9.56	-47.78	0.00	0.00	0.00
5.60	0.80	0.00	0.00	-9.56	-47.78	0.00	0.00	0.00
4.80	0.80	0.00	0.00	-9.56	-47.78	0.00	0.00	0.00
4.00	0.80	0.00	0.00	-9.56	-47.78	0.00	0.00	0.00
3.20	0.80	0.00	0.00	-9.56	-47.78	0.00	0.00	0.00
2.40	0.85	0.00	0.00	-10.15	-50.77	0.00	0.00	0.00
1.50	0.70	0.00	0.00	-8.36	-26.88	-14.72	0.00	0.00
1.00	0.50	0.00	0.00	-8.96	0.00	-44.15	0.00	0.00
0.50	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.00

(2) 短期荷重

a. 設計波圧

各節点に作用する波圧は以下の計算により算出する。堤体外側から作用するものとする。

b. 漂流物

漂流物による荷重は道路橋示方書の式により算出する。堤体に対して最も厳しい評価とするため、津波が堤体高さまで遡上しているとし、上端の節点のみに漂流物の全荷重を被覆コンクリート面に垂直に作用させる。方向は堤外側からとする。

津波の節点荷重を表 3-3 に示す。

表 3-3 津波の節点荷重

T. P. (m)	支配長さ (m)	設計波圧 節点荷重 (kN)	漂流物 節点荷重 (kN)
17.50	0.50	127.78	180.00
16.50	1.00	151.01	0.00
15.50	1.00	174.24	0.00
14.50	1.00	197.47	0.00
13.50	1.00	220.70	0.00
12.50	1.00	243.94	0.00
11.50	1.00	267.17	0.00
10.50	1.00	290.40	0.00
9.50	1.00	313.63	0.00
8.50	0.75	250.47	0.00
8.00	0.65	86.39	0.00
7.20	0.80	0.00	0.00
6.40	0.80	0.00	0.00
5.60	0.80	0.00	0.00
4.80	0.80	0.00	0.00
4.00	0.80	0.00	0.00
3.20	0.80	0.00	0.00
2.40	0.85	0.00	0.00
1.50	0.70	0.00	0.00
1.00	0.50	0.00	0.00
0.50	0.25	0.00	0.00

3.2.4 地盤バネ

2次元静的フレーム解析に用いる地盤バネは「道路橋示方書・同解説 IV下部構造物」の「9.6.2 地盤力反力係数」及び「12.10.4 断面力、杭頭反力及び変位の計算(2)の2)」に従い水平方向地盤反力係数を求め、さらに「11.5.2 地盤反力の上限值」と同じく「12.10.4 断面力、杭頭反力及び変位の計算(2)の2)」により上限値を設定するバイリニア型とする。

地盤バネを表 3-4、上限値を表 3-5 に示す。

表 3-4 地盤バネ

T. P. (m)	H (m)	E_0 (kN/m ²)	αE_0 (kN/m ²)	k_{H0} (kN/m ²)	$1/\beta$ (m)	k_H (kN/m ³)	k_h (kN/m)
8.00	0.40	300000	600000	2000000	2.882	420338	336271
7.20	0.80	300000	600000	2000000	2.882	420338	672541
6.40	0.80	300000	600000	2000000	2.882	420338	672541
5.60	0.80	300000	600000	2000000	2.882	420338	672541
4.80	0.80	300000	600000	2000000	2.882	420338	672541
4.00	0.80	300000	600000	2000000	2.882	420338	672541
3.20	0.80	300000	600000	2000000	2.882	420338	672541
2.40	0.85	300000	600000	2000000	2.882	420338	714575
1.50	0.70	67200	537600	1792000	2.971	372370	564490
1.00	0.50	67200	537600	1792000	2.971	372370	372370
0.50	0.25	—	—	—	—	—	186185

表 3-5 上限値

T. P. (m)	支配 長さ H (m)	粘着力 C (kN/m ²)	内部 摩擦角 ϕ (°)	地表面と 水平面の 角度 α (°)	杭と土 の 摩擦角 δE (°)	有効 上載圧 q (kN/m ²)	受動 土圧 係数 K _{EP}	水平地盤 反力度 P _u (kN/m ²)	係数 $\eta_p \alpha_p$	上限値 P _h (kN)
8.00	0.40	500.0	0.0	0.00	0.00	0.00	1.00	1016.00	1.50	1219.2
7.20	0.80	500.0	0.0	0.00	0.00	16.00	1.00	1032.00	1.50	2457.6
6.40	0.80	500.0	0.0	0.00	0.00	32.00	1.00	1048.00	1.50	2496.0
5.60	0.80	500.0	0.0	0.00	0.00	48.00	1.00	1064.00	1.50	2534.4
4.80	0.80	500.0	0.0	0.00	0.00	64.00	1.00	1080.00	1.50	2572.8
4.00	0.80	500.0	0.0	0.00	0.00	80.00	1.00	1096.00	1.50	2611.2
3.20	0.80	500.0	0.0	0.00	0.00	96.00	1.00	1112.00	1.50	2649.6
2.40	0.85	500.0	0.0	0.00	0.00	112.00	1.00	1130.00	1.50	2859.9
1.50	0.70	81.0	36.7	0.00	-6.12	130.00	4.96	1055.32	1.15	2317.0
1.00	0.50	81.0	36.7	0.00	-6.12	134.95	4.96	1079.88	1.15	1227.7
0.50	0.25	81.0	36.7	0.00	-6.12	139.89	4.96	1104.44	1.15	620.9

3.2.5 鋼管杭の物性

鋼管杭の物性を表 3-6 に示す。

表 3-6 鋼管杭の物性

【 $\phi=2000\text{mm}$, $t=25\text{mm}$ 】

管種 SKK490*1	外形 ϕ (mm)	長さ L (mm)	厚さ t (mm)	単位質量 w(kg/m)	ヤング係数*3 E(N/mm ²)
	2,000	17,000	25	1218	2.0×10^5
	断面積 A (m ²)	断面係数 Z (m ³)	断面 2次モーメント I (m ⁴)	有効せん断 断面積 A _s *2 (m ²)	ポアソン比*3 ν
$14,884 \times 10^{-5}$	726×10^{-4}	725×10^{-4}	$14,884 \times 10^{-5}$	0.30	

注記 *1: JFE スチール株式会社 「JFE の鋼管杭」 より

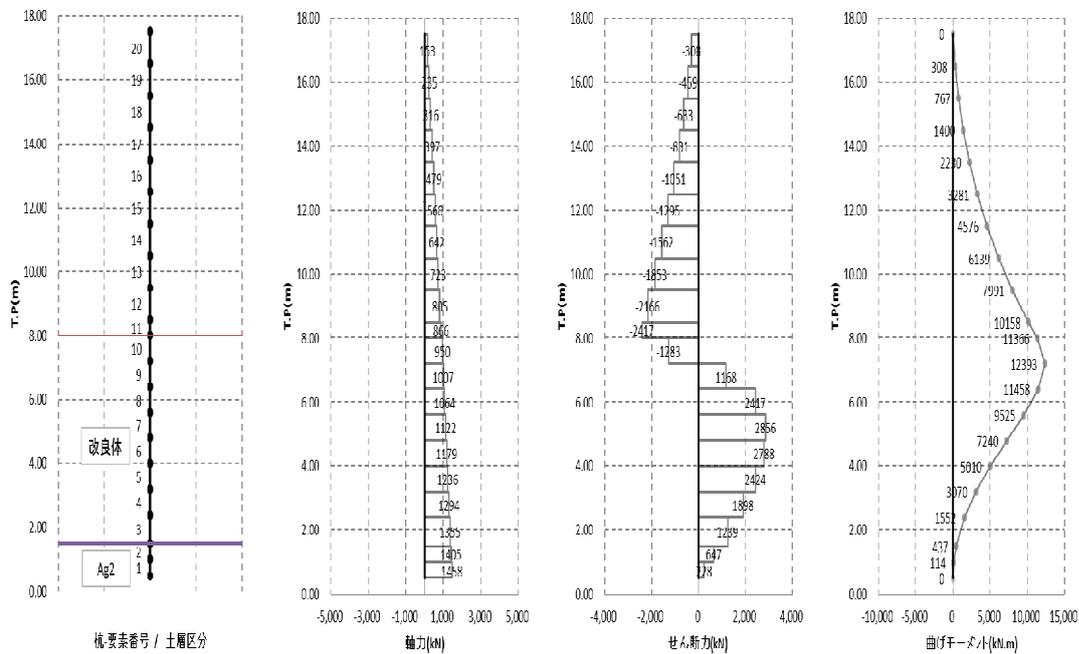
*2: 有効せん断断面積比は 1.0 とした。

*3: 「道路橋示方書・同解説 I 共通編」 「3.3 設計計算に用いる物理定数」 (P.86) より

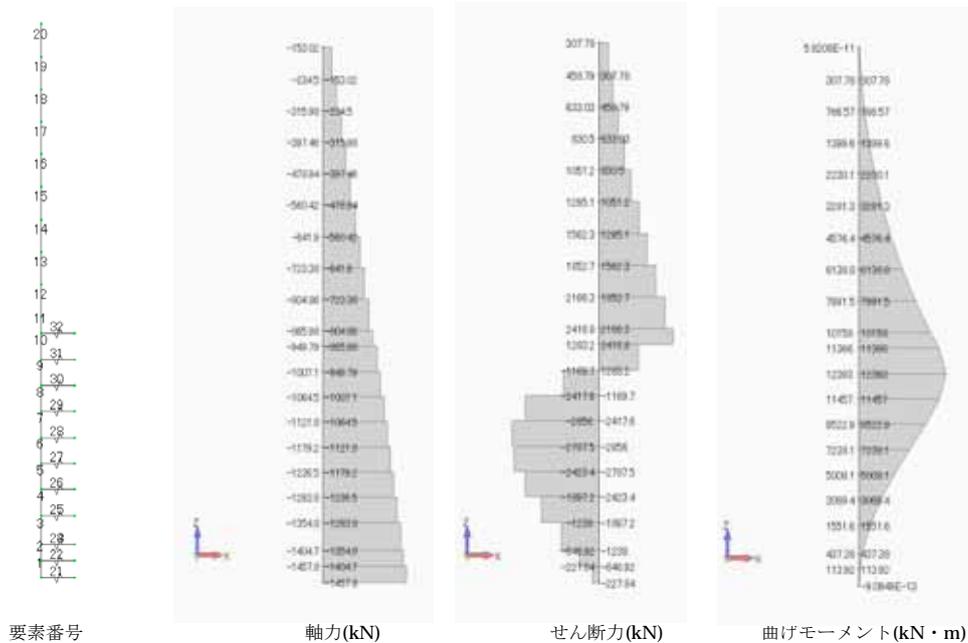
3.3 結果比較

3.3.1 断面力

断面力図を図 3-2、断面力の比較を表 3-7 に示す。



(1) RESP-T



(2) Femap with NX Nastran

図 3-2 断面力図

表 3-7 断面力の比較

要素 番号	軸力 (kN)		
	RESP-T	NASTRAN	差異の比率
1	1457.82	1457.82	0.00%
2	1404.71	1404.71	0.00%
3	1354.75	1354.75	0.00%
4	1293.83	1293.83	0.00%
5	1236.49	1236.49	0.00%
6	1179.15	1179.15	0.00%
7	1121.81	1121.81	0.00%
8	1064.47	1064.47	0.00%
9	1007.13	1007.13	0.00%
10	949.79	949.79	0.00%
11	865.98	865.98	0.00%
12	804.86	804.86	0.00%
13	723.38	723.38	0.00%
14	641.90	641.90	0.00%
15	560.42	560.42	0.00%
16	478.94	478.94	0.00%
17	397.46	397.46	0.00%
18	315.98	315.98	0.00%
19	234.50	234.50	0.00%
20	153.02	153.02	0.00%

要素 番号	せん断力 (kN)		
	RESP-T	NASTRAN	差異の比率
1	227.64	227.84	-0.09%
2	647.35	646.92	0.07%
3	1238.54	1238.04	0.04%
4	1897.66	1897.23	0.02%
5	2424.01	2423.40	0.03%
6	2787.84	2787.53	0.01%
7	2856.09	2856.02	0.00%
8	2416.78	2417.55	-0.03%
9	1168.30	1169.68	-0.12%
10	-1283.16	-1283.16	0.00%
11	-2416.81	-2416.81	0.00%
12	-2166.34	-2166.34	0.00%
13	-1852.71	-1852.71	0.00%
14	-1562.31	-1562.31	0.00%
15	-1295.14	-1295.14	0.00%
16	-1051.20	-1051.20	0.00%
17	-830.50	-830.50	0.00%
18	-633.03	-633.03	0.00%
19	-458.79	-458.79	0.00%
20	-307.78	-307.78	0.00%

要素 番号	曲げモーメントI端 (kN・m)		
	RESP-T	NASTRAN	差異の比率
1	0.00	0.00	0.00%
2	-113.82	-113.92	-0.09%
3	-437.49	-437.38	0.03%
4	-1552.18	-1551.61	0.04%
5	-3070.31	-3069.39	0.03%
6	-5009.52	-5008.11	0.03%
7	-7239.79	-7238.13	0.02%
8	-9524.66	-9522.95	0.02%
9	-11458.10	-11456.99	0.01%
10	-12392.70	-12392.73	0.00%
11	-11366.20	-11366.21	0.00%
12	-10157.80	-10157.80	0.00%
13	-7991.46	-7991.46	0.00%
14	-6138.75	-6138.75	0.00%
15	-4576.44	-4576.44	0.00%
16	-3281.30	-3281.30	0.00%
17	-2230.10	-2230.10	0.00%
18	-1399.60	-1399.60	0.00%
19	-766.57	-766.57	0.00%
20	-307.78	-307.78	0.00%

4. 解析コードの検証 (RESP-T Ver. 5.1.2.2)

4.1 RESP-T の解析手法について

(1) 一般事項

RESP-T は、(株) 構造計画研究所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計算機コードである。RESP-T は、サービス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応答を評価するために使用している。

(2) 解析コードの特徴

RESP-T 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) 解析手法

a. 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。

$$[M] \{\ddot{u}\} + [C] \{\dot{u}\} + [K] \{u\} = \{f\} \quad (4.1-1)$$

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

(4.1-1)式の荷重ベクトルを $\{0\}$ 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。

$$[M] \{\ddot{u}\} + [K] \{u\} = \{0\} \quad (4.1-2)$$

(4.1-2)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。

$$(-\omega_r^2 [M] + [K]) \{u_r\} = \{0\} \quad (4.1-3)$$

一般に、 $\{u_r\} = \{0\}$ 以外の(4.1-3)式を満足する ω_r 及び $\{u_r\}$ を求めることを固有値問題と呼び、 ω_r を固有値、 $\{u_r\}$ を固有ベクトルという。

b. 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。

$$h_i = \frac{\sum_k h_0^j E_i^j}{\sum_k E_i^j} \quad (4.1-4)$$

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

c. 直接積分法

直接積分法はニューマークの β 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 β 及び γ をパラメータとして、以下の式で表される。

$$\{\dot{u}_{(n+1)}\} = \{\dot{u}_n\} + (1 - \gamma) \{\ddot{u}_n\} + \gamma \{\ddot{u}_{(n+1)}\} \quad (4.1-5)$$

$$\{u_{(n+1)}\} = \{u_n\} + \Delta t \{\dot{u}_n\} + \frac{\Delta t^2}{2} \{\ddot{u}_n\} + \beta \Delta t^2 (\{\ddot{u}_{(n+1)}\} - \{\ddot{u}_n\}) \quad (4.1-6)$$

(4.1-5) 式及び (4.1-6) 式を (2.4.2-1) 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。

$$[\bar{K}] (\{u_{(n+1)}\} - \{u_n\}) = \{\bar{f}\} \quad (4.1-7)$$

ただし、

$$[\bar{K}] = [K] + \frac{1}{\beta \Delta t^2} [M] + \frac{\gamma}{\beta \Delta t} [C]$$

$$\{\bar{f}\} = \{f_{(n+1)}\} - \{f_n\} + [M] \left(\frac{1}{\beta \Delta t} \{\dot{u}_n\} + \frac{1}{2\beta} \{\ddot{u}_n\} \right) + [C] \left\{ \frac{\gamma}{\beta} \{\dot{u}_n\} + \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) \Delta t \{\ddot{u}_n\} \right\}$$

(4.1-7) 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。

(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。

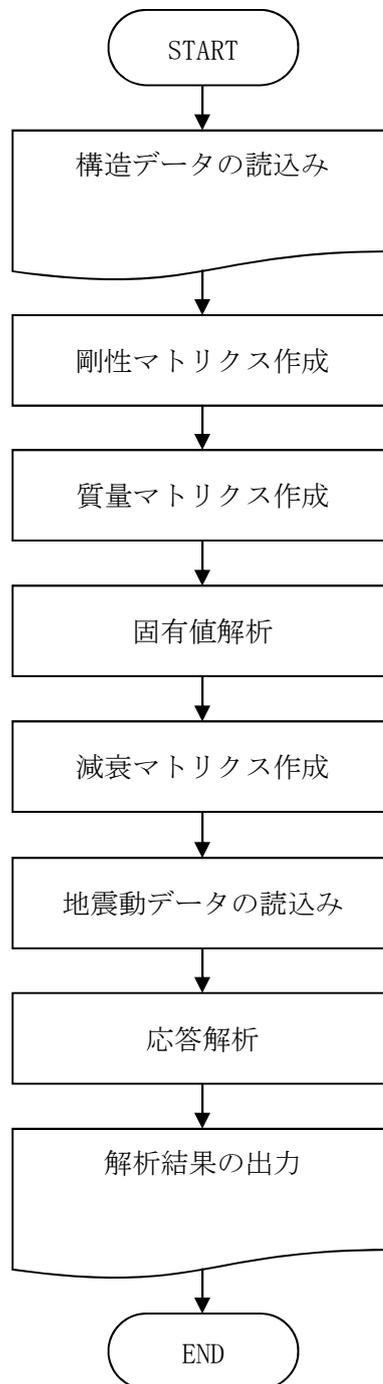


図 4-1 解析フローチャート

(5) 検証(Verification)及び妥当性確認(Validation)

a. 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プログラム「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. 3.05」は、川内原子力発電所第1号機の工事計画で実績がある。

解析モデルの諸元を表4-1～表4-5に、検討に用いる入力地震動を図4-2に、解析結果の比較を図4-3に示す。

図4-3より、RESP-T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4-1 解析モデル諸元

EL. (m)	重量 W (kN)	回転慣性重量 I _g (×10 ⁶ kN・m ²)	せん断断面積 A _s (m ²)	断面2次モーメント I (m ⁴)
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

表4-2 材料定数

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

表 4-3 復元力特性 ($\tau - \gamma$ 関係)

要素 番号	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)	τ_3 (N/mm ²)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_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 4-4 復元力特性 ($M - \phi$ 関係)

要素 番号	M_1 ($\times 10^6$ kN \cdot m)	M_2 ($\times 10^6$ kN \cdot m)	M_3 ($\times 10^6$ kN \cdot m)	ϕ_1 ($\times 10^{-6}$ 1/m)	ϕ_2 ($\times 10^{-6}$ 1/m)	ϕ_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 4-5 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_c	減衰係数 C_c
K1	5	底面・並進	4.0×10^7 kN/m	1.0×10^6 kN \cdot s/m
K2	5	底面・回転	3.0×10^{10} kN \cdot m/rad	3.0×10^8 kN \cdot m \cdot s/rad

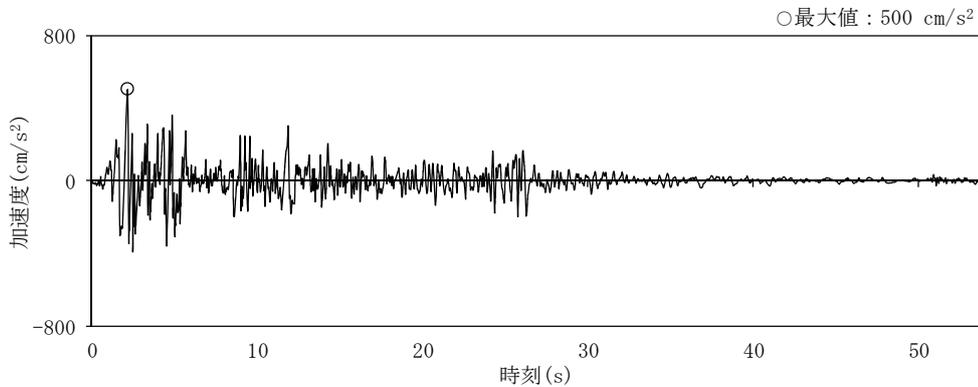
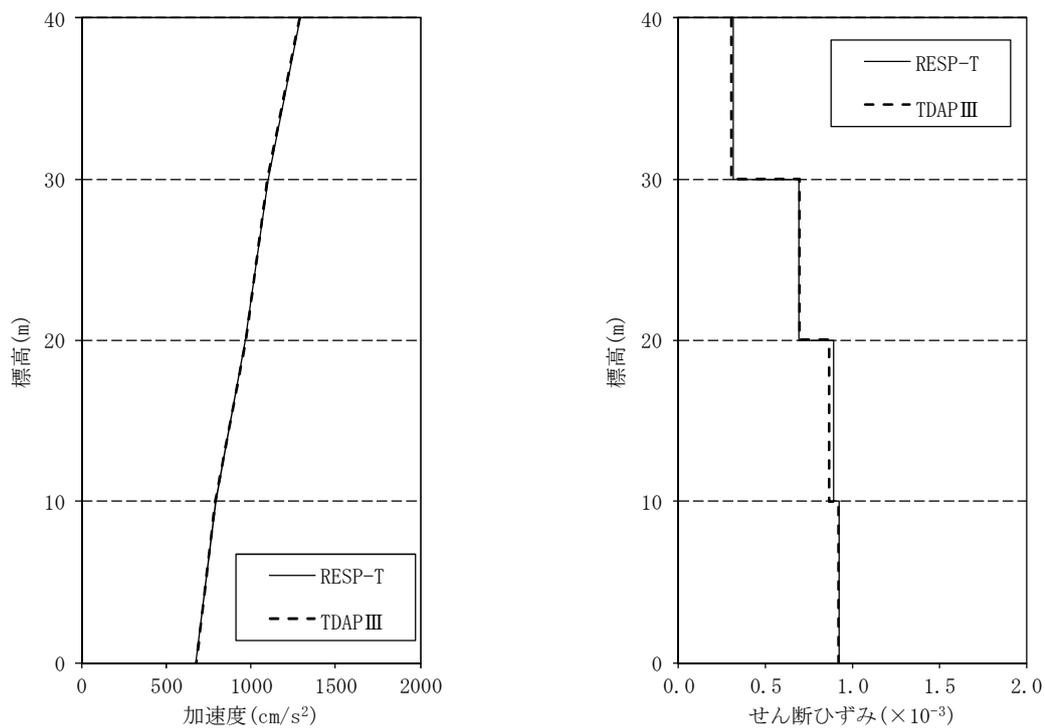


図 4-2 入力地震動



(a) 加速度

(b) せん断ひずみ

図 4-3 解析結果の比較 (最大応答分布)

b. 使用内容に対する妥当性

サービス建屋の地震応答解析に RESP-T 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-5-45 計算機プログラム（解析コード）の概要・T D A P III

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	TDAPⅢ Ver. 3.07 (建物・構築物関連)	3
2.2	TDAPⅢ Ver. 3.08 (耐震・耐津波関連)	5
3.	TDAPⅢの解析手法について (3次元骨組みモデルによる動的解析)	8
3.1	一般事項	8
3.2	解析コードの特徴	8
3.3	解析手法	8
3.4	解析フローチャート	10
3.5	検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation)	11

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）TDAPⅢ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-2-2-5	使用済燃料乾式貯蔵建屋の耐震性についての計算書	Ver. 3.07
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. 3.08
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. 3.08
V-2-2-29	代替淡水貯槽の耐震性についての計算書	Ver. 3.08
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. 3.08

2. 解析コードの概要

2.1 TDAPⅢ Ver. 3.07 (建物・構築物関連)

項目	コード名 TDAPⅢ
使用目的	2次元骨組構造解析
開発機関	大成建設株式会社 株式会社アーク情報システム
開発時期	1994年
使用したバージョン	Ver. 3.07
コードの概要	<p>TDAPⅢ (以下「本解析コード」という。) は、2次元、3次元及び軸対称問題に対応可能で、静荷重、動荷重の取り扱いができる構造解析の汎用解析コードである。動的解析においては、線形弾性解析及び材料非線形解析等を時間領域における数値積分により行う。</p> <p>土木・建築分野の特化した要素群、材料非線形モデルを数多くサポートしていることが特徴で、日本国内では、建設部門を中心として、官公庁、大学、民間問わず、多くの利用実績がある。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>本解析コードは、使用済燃料乾式貯蔵建屋の杭の応力解析に使用している。</p> <p>【検証の内容】 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"> ・本解析コードの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。 ・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、2次元骨組構造解析の検証として、はり要素を用いた構造解析を行い、解析解が文献解と一致することを確認している。 ・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。 <p>【妥当性確認】 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"> ・九州電力玄海3号機工事計画認可申請書の添付資料3 (耐震性に関する説明書) において、固有値解析及び弾塑性解析に使用された実績がある。 ・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。 ・本工事計画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。 ・本工事計画における構造に対し使用する要素、2次元有限要素法に

	<p>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。</p>
--	--

2.2 TDAPⅢ Ver. 3.08 (耐震・耐津波関連)

項目	コード名 TDAPⅢ
使用目的	静的応力解析
開発機関	大成建設株式会社 株式会社アーク情報システム
開発時期	1994年
使用したバージョン	Ver. 3.08
コードの概要	<p>TDAPⅢ (以下「本解析コード」という。)は、2次元、3次元及び軸対称問題に対応可能で、静荷重、動荷重の取り扱いができる構造解析の汎用解析コードである。動的解析においては、線形弾性解析及び材料非線形解析等を時間領域における数値積分により行う。</p> <p>土木・建築分野の特化した要素群、材料非線形モデルを数多くサポートしていることが特徴で、日本国内では、建設部門を中心として、官公庁、大学、民間問わず、多くの利用実績がある。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>本解析コードは、常設代替高圧電源装置用カルバート (立坑部)、常設低圧代替注水系ポンプ室、代替淡水貯槽の静的応力解析に使用している。</p> <p>【検証 (Verification)】</p> <ul style="list-style-type: none"> 本解析コードの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。 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。 <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、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> 橋梁・橋脚、地盤・構造物連成、地中構造物等をはじめとする多数の解析において本解析コードが使用されており、十分な使用実績があるため、信頼性があると判断できる。 四国電力株式会社の「伊方原子力発電所第3号機」において、中央制御室遮へいの静的応力解析に本解析コード (Ver. 3.05) が使用された実績がある。 本工事計画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、本解析の使用範囲の結果に影響の無いことを確認している。 本工事計画における構造に対して行う静的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。

項目	コード名 TDAPⅢ
使用目的	2次元骨組構造解析
開発機関	大成建設株式会社 株式会社アーク情報システム
開発時期	1994年
使用したバージョン	Ver. 3.08
コードの概要	<p>TDAPⅢ（以下「本解析コード」という。）は、2次元、3次元及び軸対称問題に対応可能で、静荷重、動荷重の取り扱いができる構造解析の汎用解析コードである。動的解析においては、線形弾性解析及び材料非線形解析等を時間領域における数値積分により行う。</p> <p>土木・建築分野の特化した要素群，材料非線形モデルを数多くサポートしていることが特徴で，日本国内では，建設部門を中心として，官公庁，大学，民間問わず，多くの利用実績がある。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>本解析コードは，常設代替高圧電源装置用カルバート（立坑部）の水平方向断面検討のための2次元骨組構造解析に使用している。</p> <p>【検証(Verification)】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードの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。 ・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。 <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，以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・橋梁・橋脚，地盤・構造物連成，地中構造物等をはじめとする多数の解析において本解析コードが使用されており，十分な使用実績があるため，信頼性があると判断できる。 ・九州電力株式会社の「川内原子力発電所第1号機」において，取水ピット，取水路，取水口，貯留堰，海水管ダクト縦坑部，海水管ダクト，海水ポンプエリア防護壁，防護堤の2次元骨組構造解析に本解析コード（Ver. 3.01）が使用された実績がある。 ・本工事計画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，本解析の使用範囲の結果に影響の無いことを確認している。 ・本工事計画における構造に対して行う2次元骨組構造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。

項目	コード名 TDAPⅢ
使用目的	3次元骨組みモデルによる動的解析
開発機関	大成建設株式会社 株式会社アーク情報システム
開発時期	1994年
使用したバージョン	Ver. 3.08
コードの概要	<p>TDAPⅢ（以下「本解析コード」という。）は、2次元、3次元及び軸対称問題に対応可能で、静荷重、動荷重の取り扱いができる構造解析の汎用解析コードである。動的解析においては、線形弾性解析及び材料非線形解析等を時間領域における数値積分により行う。</p> <p>土木・建築分野の特化した要素群、材料非線形モデルを数多くサポートしていることが特徴で、日本国内では、建設部門を中心として、官公庁、大学、民間問わず、多くの利用実績がある。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>本解析コードは、鋼製防護壁上部工の3次元骨組みモデルによる動的解析に使用している。</p> <p>【検証(Verification)】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードの計算機能が適正であることは、別途、妥当性確認資料の中で確認している。 ・基礎位置に強制変位を与える動的解析手法における基礎位置での強制変位の入力値と応答値および固有値解析における支配的なモード図の形状と応答値が一致していることを確認している。 ・別の解析コード (Femap with NX NASTRAN (Ver10.3.1B)) による応答値との比較を実施し、応答値の発生傾向が一致することを確認している。 ・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。 <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、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・橋梁・橋脚、地盤・構造物連成、地中構造物等をはじめとする多数の解析において本解析コードが使用されており、十分な使用実績があるため、信頼性があると判断できる。 ・本工事計画における構造に対して行う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。

3. TDAPⅢの解析手法について（3次元骨組みモデルによる動的解析）

3.1 一般事項

TDAPⅢは、2次元及び3次元の有限要素解析を行う汎用プログラムである。土木・建築分野に特化した多種多様な構造要素や地盤要素、非線形構成則の機能を有している。主として地盤・構造物練成系の地震応答解析を行うものであり、鋼製防護壁の3次元骨組みモデルによる動的解析に使用している。

3.2 解析コードの特徴

TDAPⅢは、土木・建築分野に特化した多種多様な構造要素や地盤要素、非線形構成則の機能を有する特徴を持つが、今回の使用目的に対しては以下の①～②の特徴を挙げることができる。

- ① 2次元動的FEM解析を時間領域における数値積分により行う。
- ② 線材要素を用いる。

3.3 解析手法

a. 運動方程式

一般的に、多自由度系に対する離散化された運動方程式は式(3.3.1)のように表すことができる。

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{F\} \quad (3.3.1)$$

ここで、

- $[M]$: 質量行列
- $[C]$: 減衰行列
- $[K]$: 剛性行列
- $\{U\}$: 絶対変位ベクトル
- $\{\dot{U}\}$: 絶対速度ベクトル
- $\{\ddot{U}\}$: 絶対加速度ベクトル
- $\{F\}$: 荷重ベクトル

出所：TDAPⅢ理論説明書

b. 運動方程式の直接積分による解法

運動方程式(3.3.1)は、以下のようにニューマークベータ法により解く。

$$[M]\{\ddot{U}_{t+\Delta t}\} + [C]\{\dot{U}_{t+\Delta t}\} + [K]\{U_{t+\Delta t}\} = \{F_{t+\Delta t}\} \quad (3.3.2)$$

を、

$$\{\dot{U}_{t+\Delta t}\} = \{\dot{U}_t\} + [(1-\delta)\{\ddot{U}_t\} + \delta\{\ddot{U}_{t+\Delta t}\}]\Delta t \quad (3.3.3)$$

$$\{U_{t+\Delta t}\} = \{U_t\} + \{\dot{U}_t\}\Delta t + \left[\left(\frac{1}{2} - \beta \right) \{\ddot{U}_t\} + \beta \{\ddot{U}_{t+\Delta t}\} \right] \Delta t^2 \quad (3.3.4)$$

の仮定のもとに解く。ここで $\delta \geq 0.5, \beta \geq 0.25(0.5 + \delta)^2$

式(3.3.4)を $\{\ddot{U}_{t+\Delta t}\}$ について解き、これを式(3.3.3)に代入すると、

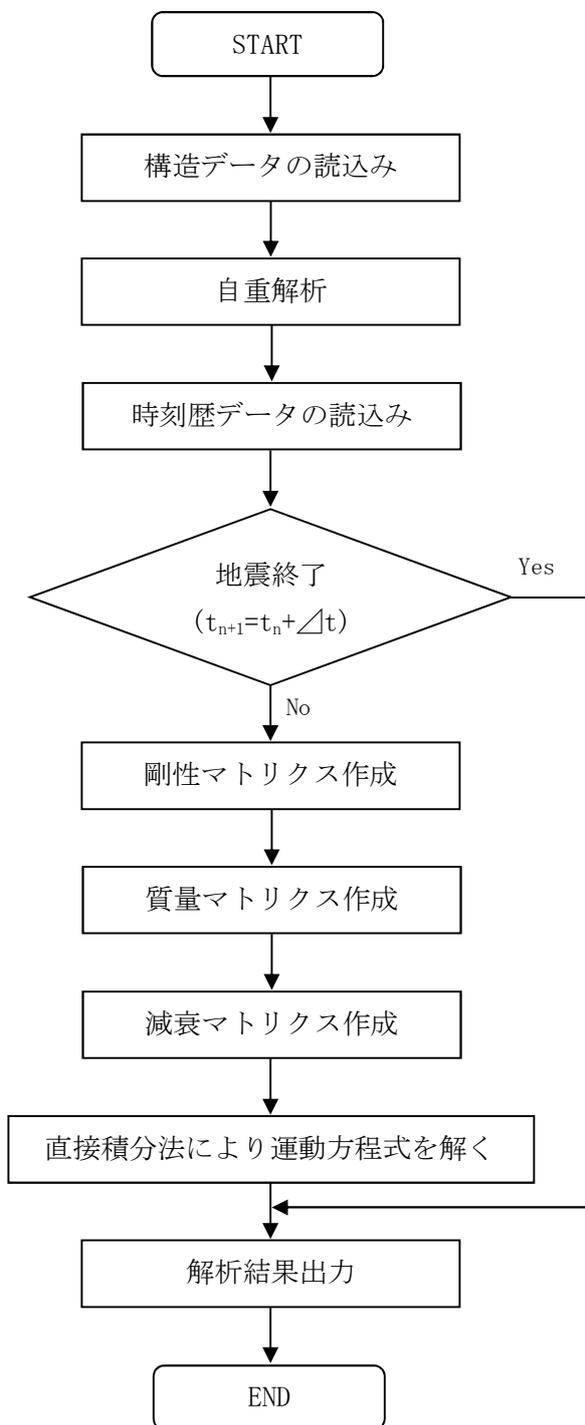
$$\begin{aligned} \{\dot{U}_{t+\Delta t}\} &= \left(1 - \frac{\delta}{2\beta}\right)\{\ddot{U}\}\Delta t + \left(1 - \frac{\delta}{\beta}\right)\{\dot{U}_t\} + \frac{\delta}{\beta\Delta t}(\{U_{t+\Delta t}\} - \{U_t\}) \\ \{\ddot{U}_{t+\Delta t}\} &= \frac{1}{\beta\Delta t^2} \left[\{U_{t+\Delta t}\} - \{U_t\} - \{\dot{U}_t\}\Delta t - \frac{\Delta t^2}{2}\{\ddot{U}_t\} \right] + \{\ddot{U}_t\} \end{aligned}$$

と書ける。これを式(3.3.2)に代入して $\{U_{t+\Delta t}\}$ に関する方程式としてまとめると、式(3.3.5)となる。

$$\begin{aligned} & \left[[K_t] + \frac{1}{\beta\Delta t^2} [M] + \frac{\delta}{\beta\Delta t} [C_t] \right] \{U_{t+\Delta t}\} \\ &= \{F_{t+\Delta t}\} + [M] \left[\frac{1}{\beta\Delta t^2} \{U_t\} + \frac{1}{\beta\Delta t} \{\dot{U}_t\} + \left(\frac{1}{2\beta} - 1\right)\{\ddot{U}_t\} \right] + \\ & \quad [C] \left[\frac{\delta}{\beta\Delta t} \{U_t\} + \left(\frac{\delta}{\beta} - 1\right)\{\dot{U}_t\} + \left(\frac{\delta}{2\beta} - 1\right)\Delta t\{\ddot{U}_t\} \right] \end{aligned} \quad (3.3.5)$$

出所：TDAPⅢ理論説明書

3.4 解析フローチャート



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

a. 基礎位置の入力値と応答値の比較による検証

鋼製防護壁をモデル化した3次元骨組みモデルにおいて、基礎位置の水平変位・鉛直変位・回転角の入力値に対して、解析結果の応答値の比較を実施する。

検証モデルを図3-1に示す。加振方向は壁軸方向加震と壁直方向加震の2通り行い、表3-1、表3-2に示すとおり、いずれのケースも入力値と応答値が完全に一致していることを確認した。

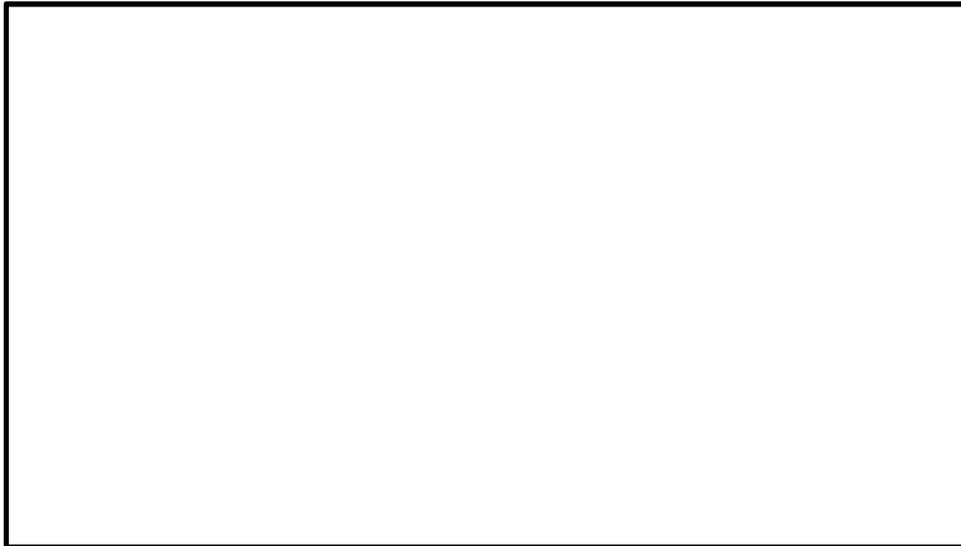


図3-1 検証モデル

表3-1 壁軸方向加震 入力値と応答値の比較

		南基礎			北基礎		
		水平変位 (m)	鉛直変位 (m)	回転角 (rad)	水平変位 (m)	鉛直変位 (m)	回転角 (rad)
入力値	最大	0.218	0.010	0.00320	0.220	0.018	0.00267
	最小	-0.336	-0.056	-0.00405	-0.340	-0.044	-0.00362
応答値	最大	0.218	0.010	0.00320	0.220	0.018	0.00267
	最小	-0.336	-0.056	-0.00405	-0.340	-0.044	-0.00362
比率 (応答値/入力値)	最大	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	最小	100%	100%	100%	100%	100%	100%

表3-2 壁直方向加震 入力値と応答値の比較

		南基礎			北基礎		
		水平変位 (m)	鉛直変位 (m)	回転角 (rad)	水平変位 (m)	鉛直変位 (m)	回転角 (rad)
入力値	最大	0.174	0.018	0.00515	0.358	0.020	0.01118
	最小	-0.341	-0.047	-0.00217	-0.731	-0.050	-0.00420
応答値	最大	0.174	0.018	0.00515	0.358	0.020	0.01118
	最小	-0.341	-0.047	-0.00217	-0.731	-0.050	-0.00420
比率 (応答値/入力値)	最大	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	最小	100%	100%	100%	100%	100%	100%

b. 変形性状の固有値解析モード図と応答値の比較による検証

鋼製防護壁をモデル化した3次元骨組みモデルにおいて、固有値解析の支配的なモード図の形状と解析結果の変形性状の比較を実施する。

検証モデルを図3-2に示す。加振方向は壁軸方向加震と壁直方向加震の2通り行う。動的解析は、基礎位置に強制変位を入力する手法のため基礎部の変形は大きいですが、鋼製防護壁の変形性状は固有値解析のモード図と解析結果で同様であることを確認した。図3-3に壁軸方向加時震時の比較結果を、図3-4に壁直方向加震時の比較結果を示す。

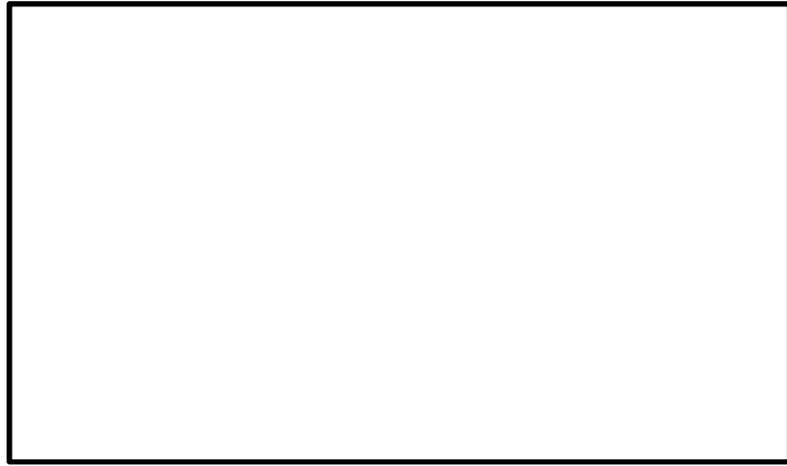


図3-2 検証モデル

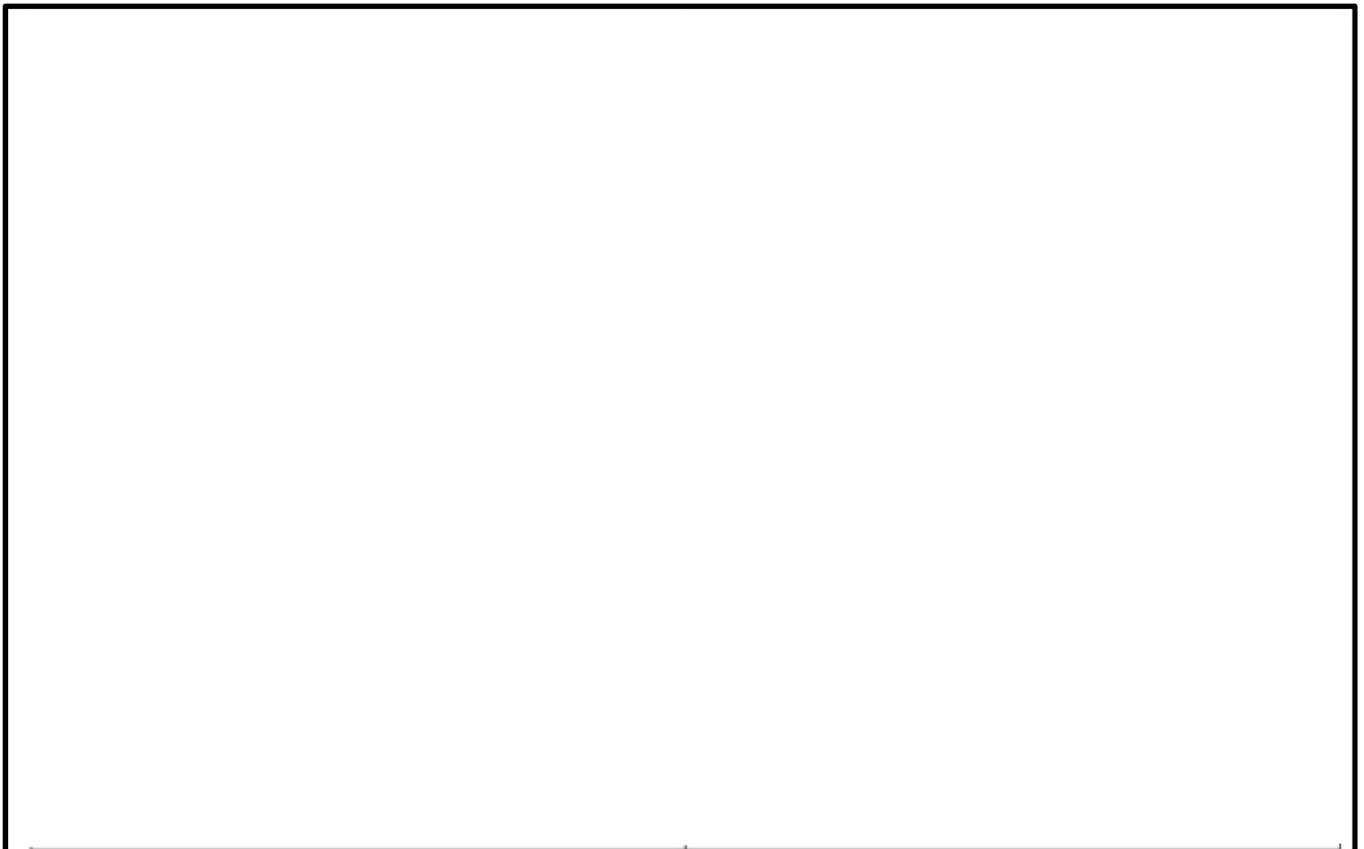


図3-3 壁軸方向加時震時の比較結果

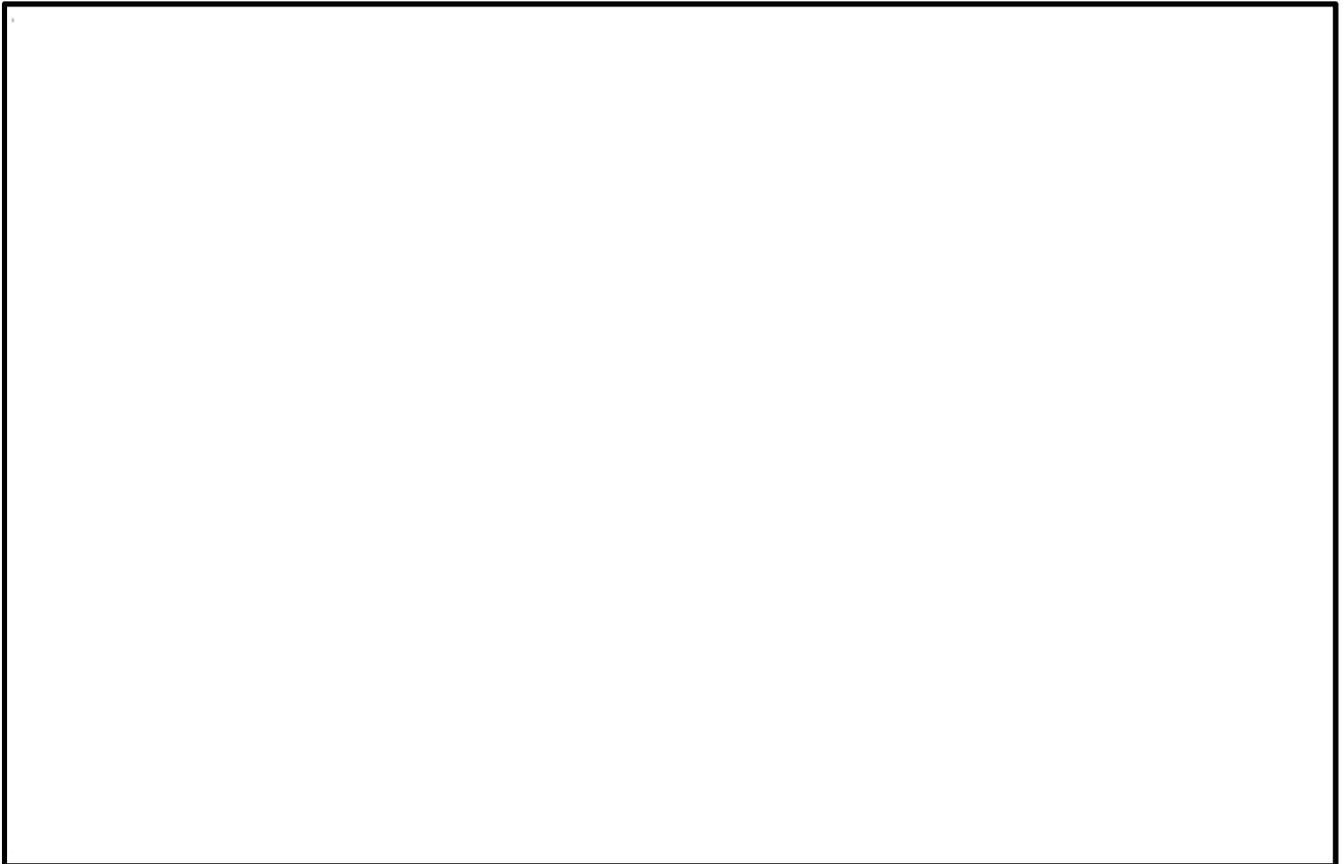


図3-4 壁直方向加時震時の比較結果

c. 他構造解析用汎用コード[Femap with NX NASTRAN]の応答値の比較による検証

NX NASTRANは、アメリカ航空宇宙局（NASA）の構造解析プログラムとして開発されたNASTRANが、1971年にThe MacNeal-Schwendler Co.（MSC社の前身）から商用版としてリリースされ、このコードをベースにUGS社（Siemens Product Lifecycle Management Software Inc.の前身）がNX NASTRANとして継承、開発を続けている有限要素法による構造解析汎用コードである。

鋼製防護壁をモデル化した3次元骨組みモデルにおいて、TDAPⅢとFemap with NX NASTRANの二つの解析コードにおける時刻歴応答値の比較を実施する。使用した、Femap with NX NASTRANのバージョンは、「Ver10.3.1B日本語版（64bit）」である。

表3-3及び図3-5に検証モデルと比較を実施した応答値出力位置を示す。応答値の比較は、支間中央部下端と両基礎拡幅付け根下端で実施した。

表3-3 応答値出力位置

	支間中央部下端	南基礎 拡幅付け根下端	北基礎 拡幅付け根下端
変位出力 節点番号	180	10071	10286

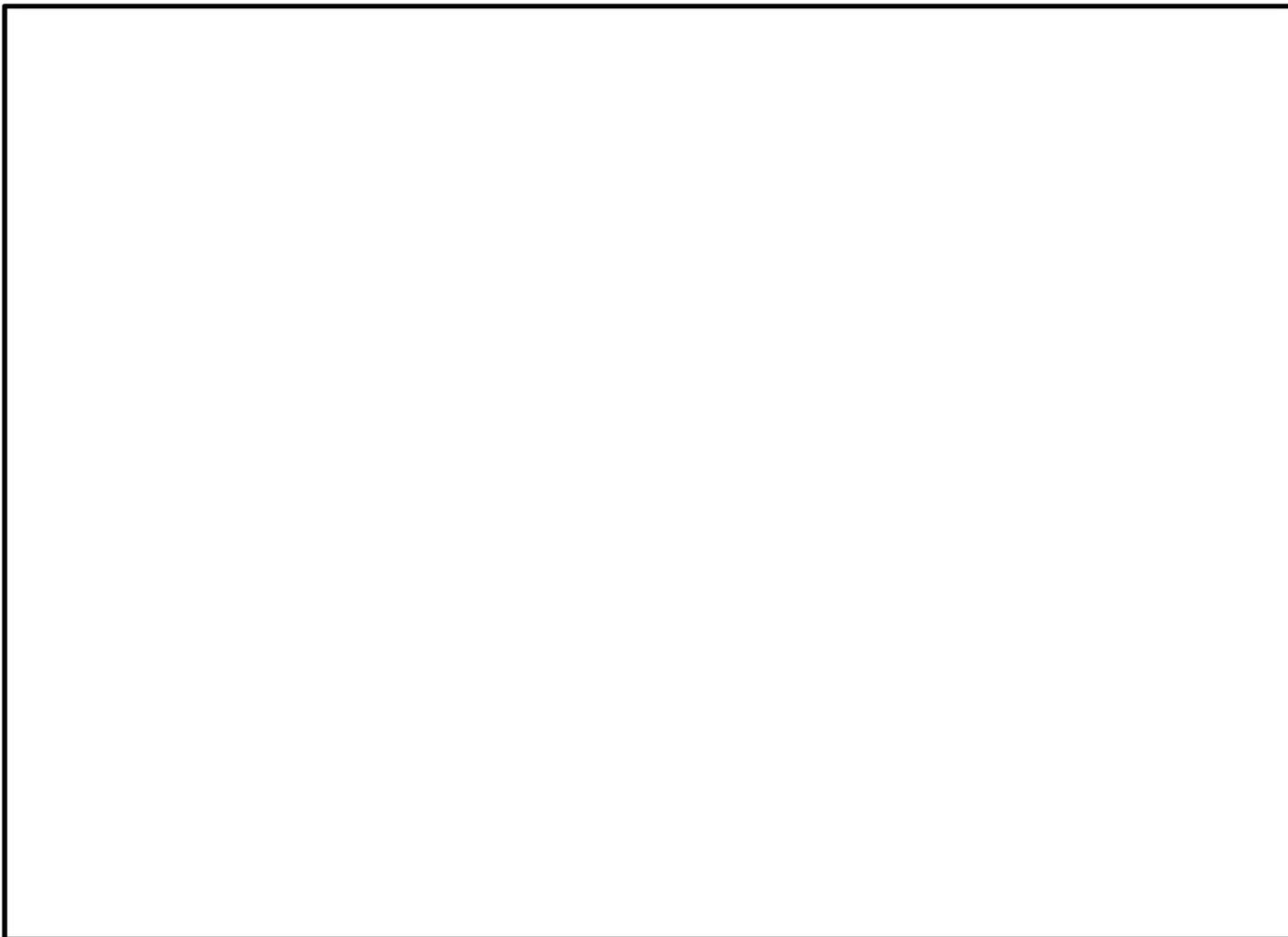


図3-5 検証モデル及び応答値出力位置

以下に、変形比較結果を示す。時刻歴変位の発生傾向がFemap with NX NASTRANとTDAPⅢで一致している。また、最大値及び最小値の比率も誤差がないことを確認した。

図3-6 節点180(支間中央)におけるX, Y, Z方向の時刻歴応答変位比較結果

図3-7 節点10071(南基礎側付け根)におけるX, Y, Z方向の時刻歴応答変位比較結果

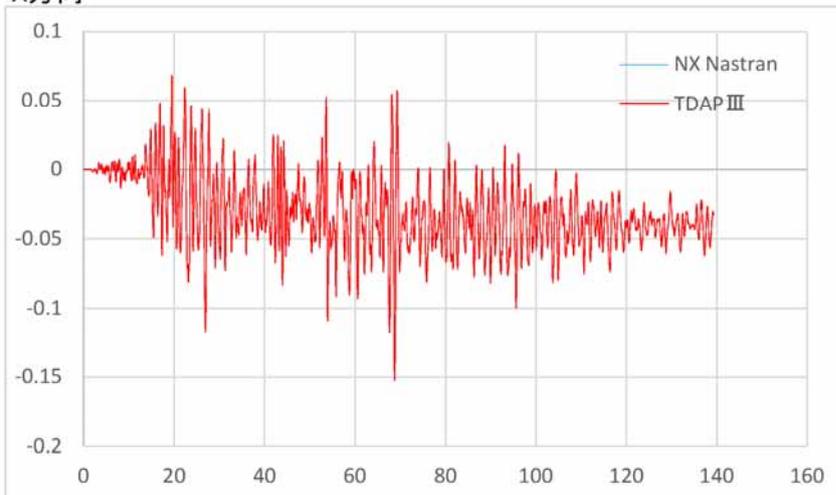
図3-8 節点10286(北基礎側付け根)におけるX, Y, Z方向の時刻歴応答変位比較結果

表3-4 X, Y, Z方向の最大最小変位比較結果

変位比較

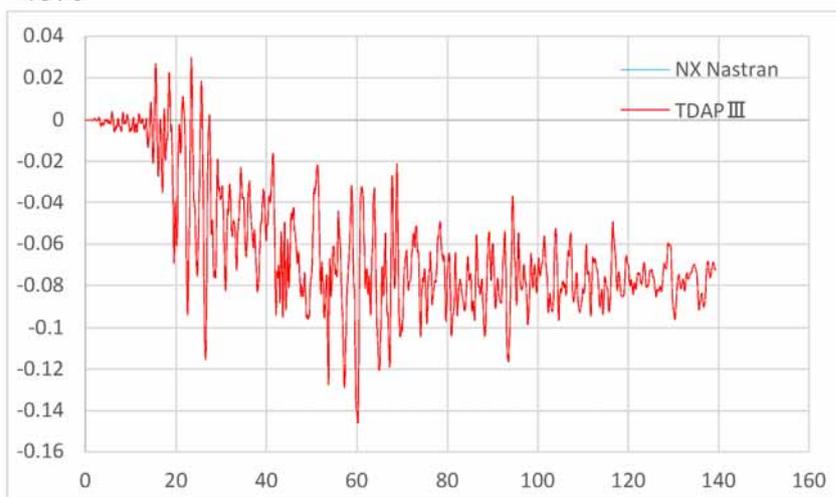
ID 180 支間中央

X方向



ID 180 支間中央

Y方向



ID 180 支間中央

Z方向

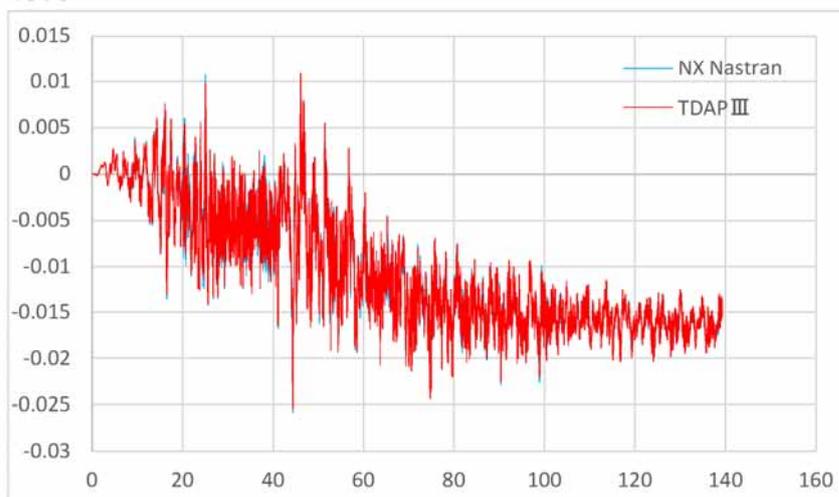
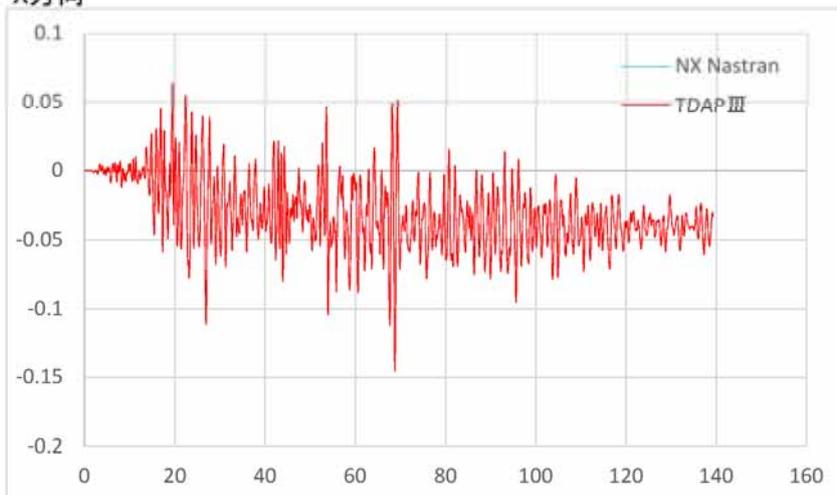


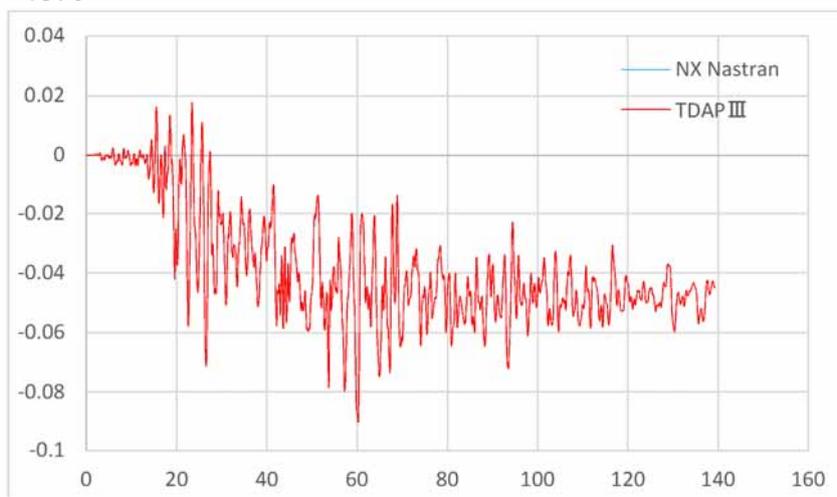
図3-6 節点180(支間中央)におけるX, Y, Z方向の時刻歴応答変位比較結果

変位比較

ID 10071 南基礎側 付け根
X方向



ID 10071 南基礎側 付け根
Y方向



ID 10071 南基礎側 付け根
Z方向

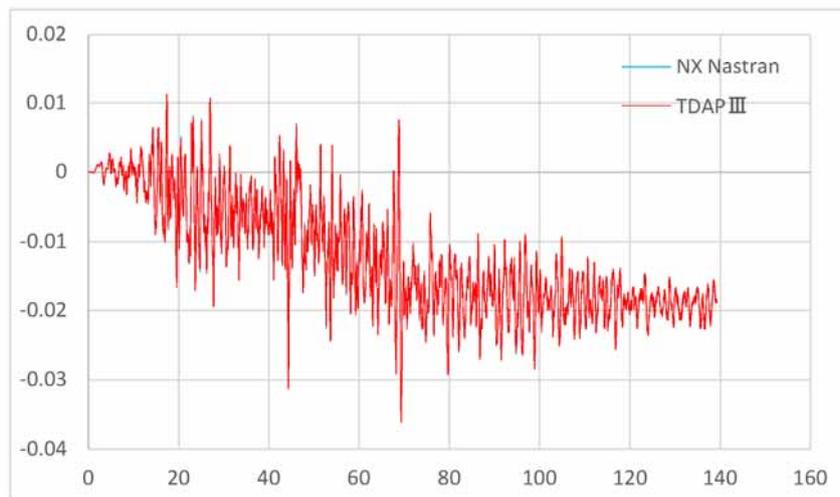
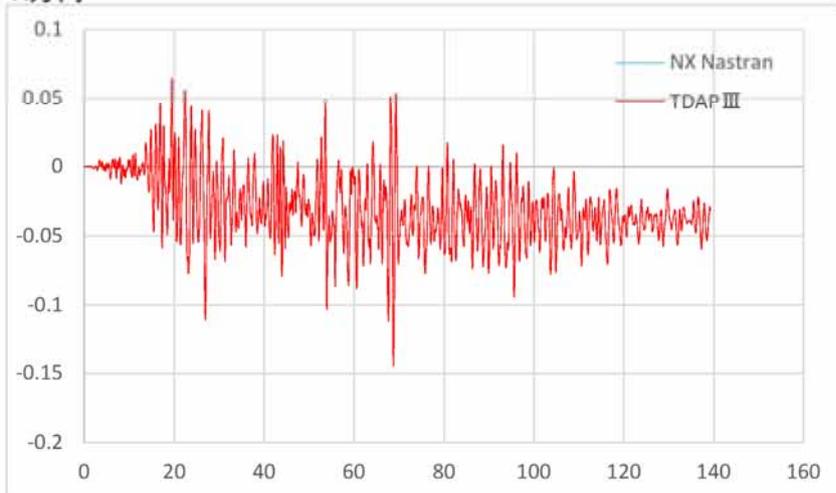


図3-7 節点10071(南基礎側付け根)におけるX, Y, Z方向の時刻歴応答変位比較結果

変位比較

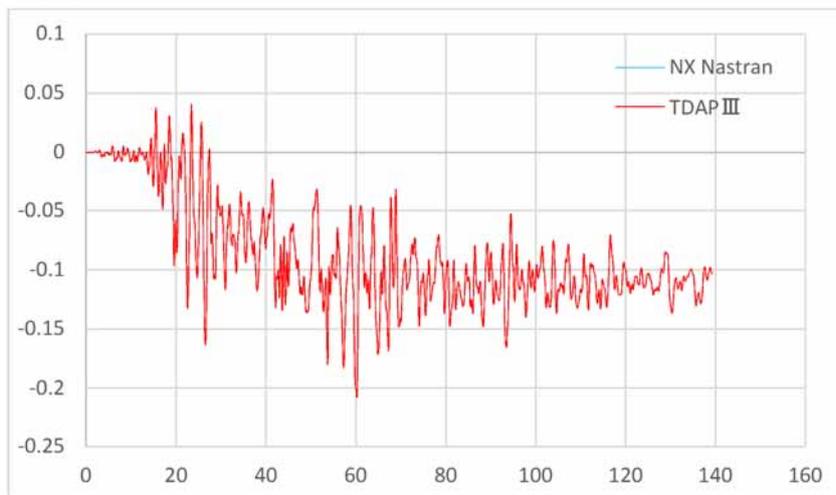
ID 10286 北基礎側 付け根

X方向



ID 10286 北基礎側 付け根

Y方向



ID 10286 北基礎側 付け根

Z方向

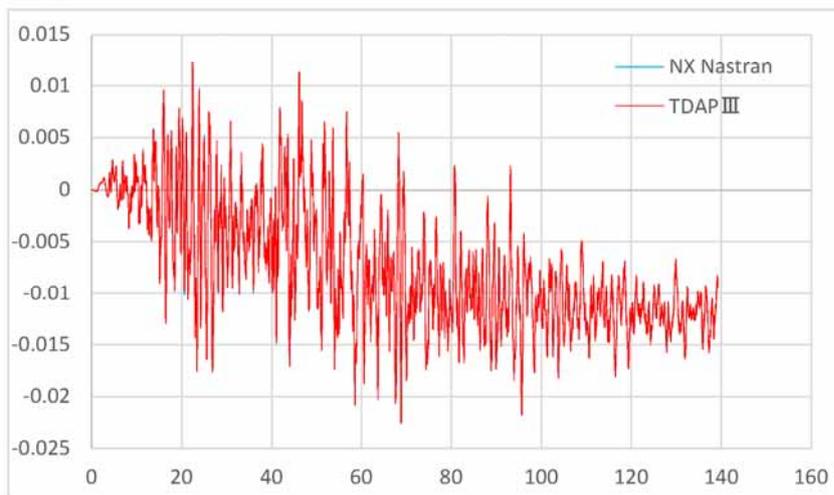


図3-8 節点10286(北基礎側付け根)におけるX, Y, Z方向の時刻歴応答変位比較結果

表3-4 X, Y, Z方向の最大最小変位比較結果

		節点; 180 場所; 支間中央		
		DX	DY	DZ
最大値	TDAP	68 mm	30 mm	11 mm
	NX Nastran	68 mm	30 mm	11 mm
	比率(TDAP /NX Nastran)	100%	100%	100%
最小値	TDAP	-153 mm	-146 mm	-25 mm
	NX Nastran	-153 mm	-146 mm	-26 mm
	比率(TDAP /NX Nastran)	100%	100%	96%
		節点; 10071 場所; 南基礎側付け根		
		DX	DY	DZ
最大値	TDAP	64 mm	18 mm	11 mm
	NX Nastran	64 mm	18 mm	11 mm
	比率(TDAP /NX Nastran)	100%	100%	100%
最小値	TDAP	-146 mm	-91 mm	-36 mm
	NX Nastran	-146 mm	-91 mm	-36 mm
	比率(TDAP /NX Nastran)	100%	100%	100%
		節点; 10286 場所; 北基礎側付け根		
		DX	DY	DZ
最大値	TDAP	64 mm	41 mm	12 mm
	NX Nastran	64 mm	41 mm	12 mm
	比率(TDAP /NX Nastran)	100%	100%	100%
最小値	TDAP	-145 mm	-208 mm	-23 mm
	NX Nastran	-145 mm	-208 mm	-23 mm
	比率(TDAP /NX Nastran)	100%	100%	100%

d. 使用内容に対する妥当性

鋼製防護壁の3次元骨組みモデルによる動的解析にTDAPⅢ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されており、妥当である。

- ・検証の内容のとおり、基礎位置の入力値と応答値の検証、固有値解析と動的解析の変形性状の比較による検証、他構造解析汎用コードとの応答値の比較による検証を行っていることから、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-5-46 計算機プログラム（解析コード）の概要
・UC-win/Section

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.	UC-win/Section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	8
3.5	検証(Verification)と妥当性(Validation)	9

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）UC-win/Section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-2-2-33	S A用海水ピットの耐震性についての計算書	Ver. 6.02.01
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. 6.02.01
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. 6.02.01
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. 6.02.01

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	UC-win/Section
使用目的	鉄筋コンクリート断面の応力度照査
開発機関	株式会社フォーラムエイト
開発時期	2003年
使用したバージョン	Ver. 6.02.01
コードの概要	<p>UC-win/Sectionは、鉄筋コンクリート断面の断面諸量、応力度計算、断面耐力算定を行う解析コードで、主な特徴は下記の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・鉄筋の情報(位置、断面積)を1本毎に考慮でき、複鉄筋など配筋に忠実な断面計算が可能である。 ・任意形状に対して2軸曲げの計算が可能である。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>UC-win/Sectionは鋼製防護壁及び鉄筋コンクリート防潮壁の地中連続壁基礎並びにS A用海水ピット及びS A用海水ピット取水塔の応力度照査に使用されている。</p> <p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は、以下の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードによる複鉄筋の断面照査結果と理論解が一致することを確認している。 ・本解析コードによる2軸曲げの計算結果と理論解が一致することを確認している。 ・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。 <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"> ・検証の内容の通り、複鉄筋及び2軸曲げ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。

3. UC-win/Sectionの解析手法について

3.1 一般事項

UC-win/Sectionは鉄筋コンクリート断面の断面諸量，応力度計算，断面耐力算定を行うことができるプログラムである。UC-win/Sectionは，地中連続壁基礎の応力度照査，耐力照査に使用している。

3.2 解析コードの特徴

UC-win/Sectionの主な特徴を以下に示す。

- ・ 鉄筋の情報(位置, 断面積)を1本毎に考慮でき, 複鉄筋など配筋に忠実な断面計算が可能である。
- ・ 任意形状に対して2軸曲げの計算が可能である。

3.3 解析手法

(1) 曲げ応力度

本プログラムでは2軸曲げ状態を基本として曲げ応力度の計算を行う。

・ 計算上の仮定

1. 維ひずみは中立軸からの距離に比例する（平面保持の仮定）。
2. コンクリートと鉄筋のヤング係数比は15とする（デフォルト値）。鉄筋以外の材料のヤング係数は次式により算定される。

$$Ei_design = Ei_input \cdot n \cdot (Ec_base / 200000) \cdots式A$$

ここで,

Ei_design : 応力度計算に使用するヤング係数 (N/mm^2)

Ei_input : 材料～材料エディター～ で入力されているヤング係数 (N/mm^2)

Ec_base : コンクリートのヤング係数 (N/mm^2)。設計基準強度が異なる複数のコンクリートが配置されている場合は, 面積が最も大きいコンクリートのヤング係数を採用する。

n : 入力されたヤング係数比 (通常は15)

3. コンクリート, 鉄筋, 鋼板, PC鋼材, 炭素繊維シート, アラミド繊維シートは線形弾性体とする。
4. コンクリートの引張強度は無視する。
5. PC鋼材の圧縮側応力, 炭素繊維 (アラミド繊維) シートの圧縮側応力は無視する (応力がゼロ)。
6. 外ケーブルは平面保持に従うものとする。
7. 荷重の入力において与えられた軸力は断面図心に作用し, 曲げモーメントは主軸 (Zp, Yp) まわりに作用する。

8. 計算中の力の釣り合いを考える点は断面図心まわりとする。

・ 計算手順

1. 入力された軸力と曲げモーメントから中立軸の角度と図心での軸方向ひずみ及びひずみ平面の傾き（曲率）を仮定する。
2. ひずみ平面から各材料の応力分布を求める。
3. 応力を積分して断面内に発生する軸力と曲げモーメントを求める（内力の計算）。
4. 入力された軸力と曲げモーメントと内力が一致しているかどうかをチェックする。
5. 一致していなければ、再度中立軸の角度と図心での軸方向ひずみ及びひずみ平面の傾き（曲率）を仮定しなおす。
6. 1～5を収束するまで繰返して行う。
(鉄筋とPC鋼材は、点のデータとして1本ごとに考慮して計算。)

(2) 終局曲げモーメント

終局モーメント μ は、与えられた軸力 N' と曲げモーメント M_{zp} 、 M_{yp} の合成方向の角度を中立軸角度として与え、その中立軸まわりに曲率を変化させて求めています。

・ 計算上の仮定

1. 縦ひずみは中立軸からの距離に比例する（平面保持の仮定）。
2. コンクリート、鉄筋、鋼板、PC鋼材の応力ひずみ曲線は断面に設定された曲げ計算用準拠基準の設定を使う。
3. コンクリートの引張強度は無視する。
4. 炭素繊維シート、アラミド繊維シートは線形弾性体とする。
5. PC鋼材の圧縮側応力、繊維シートの圧縮側応力は無視する（応力がゼロ）。
6. 終局ひずみ発生位置が与えられている場合はそれを考慮する。このとき、入力された位置より外側のコンクリート領域は圧縮力を分担しないものとみなす（応力がゼロ）。
7. PC鋼材のひずみは有効鋼材応力度 σ_{pe} による初期ひずみを考慮する。このとき σ_{pe} によるコンクリートの初期ひずみは無視する。
8. 外ケーブルは平面保持に従わない。「 $\sigma_{pe} + \Delta \sigma_{pe}$ 」によるひずみ値で一定とする。ここで、 σ_{pe} は有効プレストレス応力、 $\Delta \sigma_{pe}$ は初降伏・終局モーメント計算用のプレストレス応力の増分。
9. 荷重の入力において与えられた軸力は断面図心に作用する。曲げモーメントは主

軸 (z_p, y_p) まわりに作用する。

10. 計算中の力の釣り合いを考える点は断面図心まわりとする。

- 終局曲げモーメント M_u の算定

与えられた軸力 N' と曲げモーメント M_{z_p} と M_{y_p} を合成した方向 ($\sqrt{(M_{z_p}^2 + M_{y_p}^2)}$) の2つを収束条件として終局モーメント M_u をダイレクトに算定する。計算方法は下記「3次元相互作用図の作成」とほぼ同じ。ダイレクト計算が相互作用図作成時と異なる点は、次の2点である。

1. 軸力の分割点リスト (N_1, N_2, \dots) を作成せずに与えられた軸力 N' を使用する。
2. θ を15度ずつ変化させるのではなく与えられた M_{z_p} と M_{y_p} を合成した方向 ($\sqrt{(M_{z_p}^2 + M_{y_p}^2)}$) の角度 θ を使用する。

- 3次元 M_u-N 相互作用図の作成

断面の主軸 Z_p 軸を起点として反時計まわりに角度 θ を考える。

1. 圧縮側にコンクリートの終局ひずみ ϵ_{cu} を置く。
2. ひずみ平面を断面に平行なまま終局ひずみ点まで移動する。(これをB点とする)。そのときの応力分布を積分して求めた軸力が軸力の最大値となる。
3. 引張側に終局ひずみの規定がない場合は、プログラムは非常に大きなひずみ値を仮定する。引張側に終局ひずみの規定がある場合はそれを配置する。いずれの場合も引張側のひずみをA点とする。
非常に大きなひずみ値を仮定した場合は、2次元/3次元相互作用図に、それを示す緑色が表示される。
炭素・アラミド繊維シートの場合は、破断・剥離ひずみの小さいほうの値を終局ひずみとする(これをA点とします)。
A点を通り、断面に平行なひずみ平面から応力度分布を求め、これを積分して軸力の最小値とする。
4. 上記で求めた最大軸力点と最小軸力点の間を約15分割 (N_1, N_2, \dots, N_{15}) する。このとき、各分割点が (1×10^n) または (2.5×10^n) または (5×10^n) の倍数になるように調整する。したがって、調整後は15分割よりも多く(あるいは少なく)なることがある。また、軸力がゼロの点も追加される。
5. 軸力 N_1 でのモーメントを求めるために、ひずみ平面の傾きを仮定する。ひずみ平面の傾きはB点を支点にしてA点側に回転させ(曲率 ϕ_1)、A点に到達するとその後はA点を支点にして回転する向き(曲率 ϕ_2) とする。
6. 仮定されたひずみ平面の傾き(曲率 ϕ_1 または ϕ_2) から各材料の応力度分布を積分し、内力としての軸力とモーメントを計算する。

7. 与えられた軸力 N_1 と内力として計算された軸力が一致するまで繰り返す。
8. 軸力が収束した時点でのモーメントを終局曲げモーメント M_u とする。
9. 同様な計算をその他の軸力 (N_2, \dots, N_{15}) に対しても行う (上記5~8を繰り返す)。
10. 各軸力位置でのモーメントを結んで2次元 M_u-N 相互作用図 ($\theta = 0$ 度) を作成する。
11. 同様な計算をその他の角度についても24回 ($\theta = 0, 15, 30, \dots, 330$ 度) 行う (上記5~10)。
12. 各角度で得られた2次元 M_u-N 相互作用図を集めて3次元 M_u-N 相互作用図が完成する。

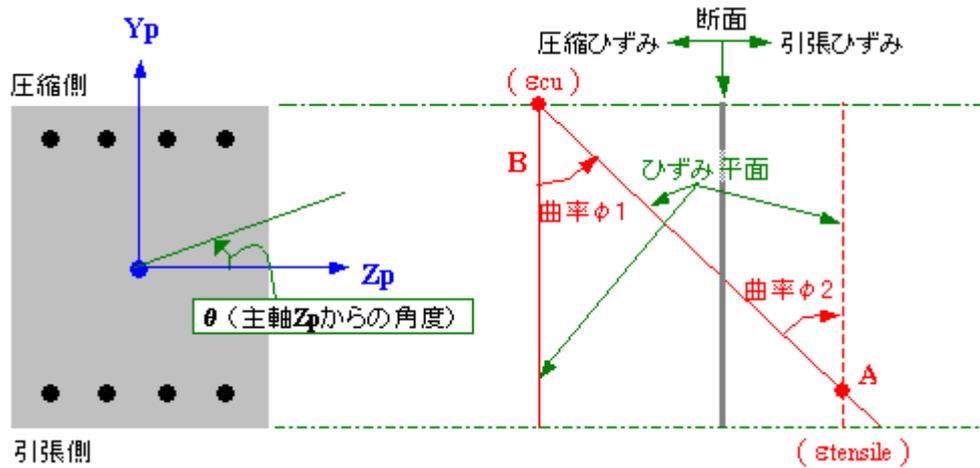


図3-1 3次元 M_u-N 相互作用図の作成

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。

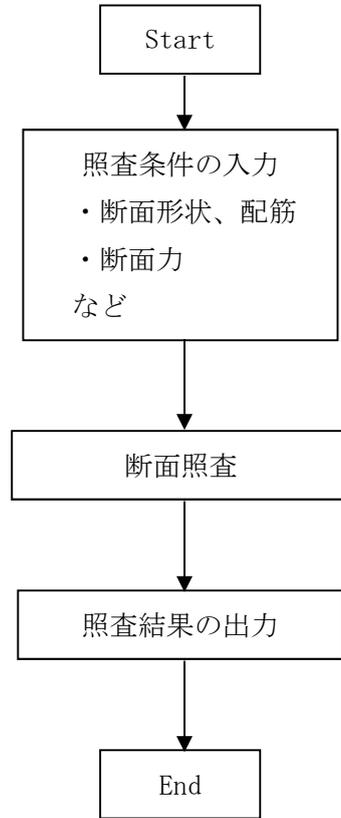


図3-2 解析フローチャート

3.5 検証(Verification)と妥当性(Validation)

a. 理論解との比較による検証

複鉄筋の計算及び2軸曲げの計算について、理論解と比較を行う。

(1) 複鉄筋の計算

複鉄筋の断面における、コンクリートの応力度、引張鉄筋の応力度、圧縮鉄筋の応力度について、計算例と解析結果の比較を行う。

・解析モデル

参考とする計算例は「実務に役立つ鉄筋コンクリート設計計算入門 計算例で学ぶ許容応力度設計法と限界状態設計法 磯貝 忠著 2006年 (株)山海堂」とし、P123の第II編第2章 複鉄筋く形断面 2.4 断面力M, Nが与えられた場合(計算例5)とする。

本計算例の解析条件は下記の通りである。解析モデルを図3-3に示す。

- ・コンクリートの設計基準強度 σ_{ck} : 24(N/mm²)
- ・鉄筋の強度 : SD295A
- ・ヤング係数比 n : 15
- ・全幅 b : 0.500(m)
- ・全高 d : 0.700(m)
- ・かぶり(上下共通) a : 0.070(m)
- ・配置鉄筋(上下共通) : D25×5本
- ・軸力 N : 200(kN)
- ・曲げモーメント M : 250(kN・m)

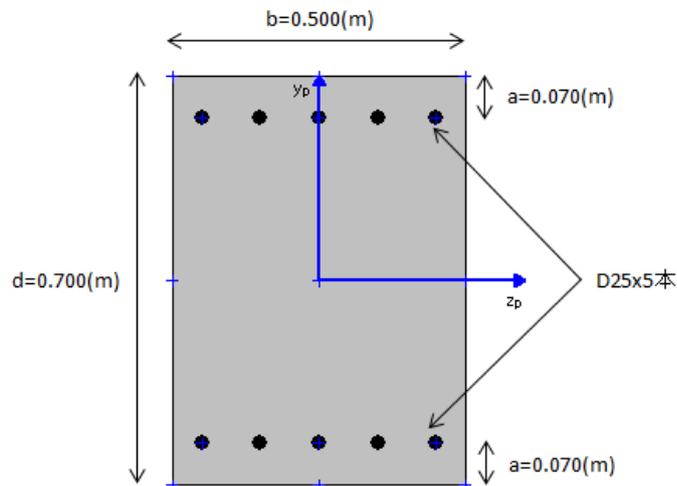


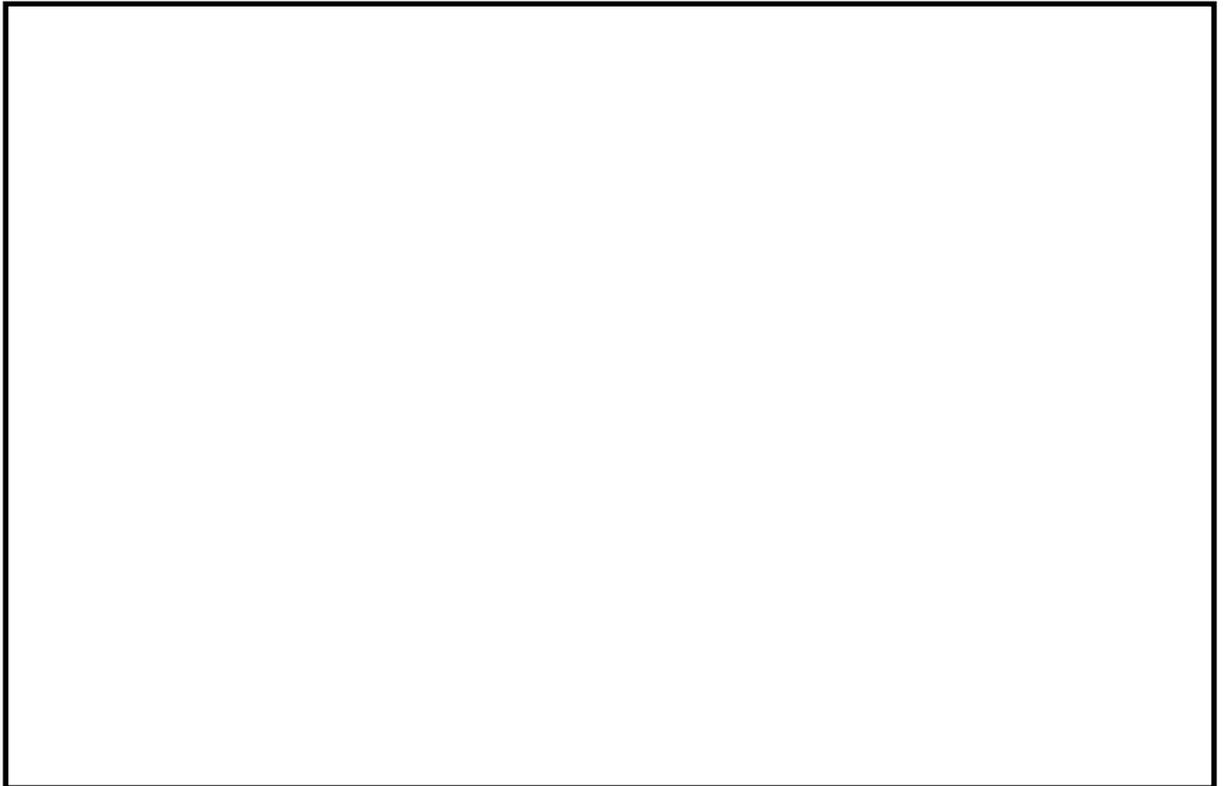
図3-3 解析モデル(複鉄筋)

この条件での計算例の応力度結果は下記の通りとなる。

コンクリートの応力度 $\sigma_c=6.27$ (N/mm²)

引張鉄筋の応力度 $\sigma_{s1}=140.7$ (N/mm²)

圧縮鉄筋の応力度 $\sigma_{s2}=68.0$ (N/mm²)



UC-win/Sectionのコンクリートの応力度，引張鉄筋の応力度，圧縮鉄筋の応力度の解析結果を図3-4に示す。

OK	許容曲げ応力度の照査		
	σ_c (N/mm ²)	σ_s (N/mm ²)	σ_s (N/mm ²)
白 部材1			
白 着目点 1			
└ 応力度計算	6.18 < 8.00 OK	140.41 < 180.00 OK	66.74 < 180.00 OK

図3-4 解析結果

計算例と解析結果の比較を表3-1に示す。

表3-1 計算例と解析結果の比較

対象		計算例	解析結果	比率
コンクリートの応力度	(N/mm ²)	6.27	6.18	101.5%
鉄筋の引張応力度	(N/mm ²)	140.7	140.4	100.2%
鉄筋の圧縮応力度	(N/mm ²)	68.0	66.7	101.9%

コンクリートの応力度、引張鉄筋の応力度、圧縮鉄筋の応力度が計算例と解析結果でほぼ一致しており、応力度の算出が正しく算出されていることが確認できる。

(2) 2軸曲げの計算

(1)の複鉄筋の計算で応力度が正しく算出できることが確認できた。2軸曲げに対し、単純な円形の断面の場合、曲げモーメントの載荷角度を変えても応力度の算出結果は変わらない。そこで2軸曲げについては、単純な円形の断面に対して、曲げモーメントの載荷角度を変化させた場合に、応力度の結果が変わらないことを確認する。

解析モデル(2軸曲げ)を図3-5に、曲げモーメントの載荷角度を図3-6に示す。

・解析モデル

解析条件は以下の通りとする。

- ・コンクリートの設計基準強度 σ_{ck} : 24(N/mm²)
- ・鉄筋の強度 : SD295A
- ・ヤング係数比 n : 15
- ・直径 D : 1.000(m)
- ・かぶり(全周共通) a : 0.100(m)
- ・配置鉄筋 : D16×36本
- ・基準曲げモーメント M : 100(kN・m)

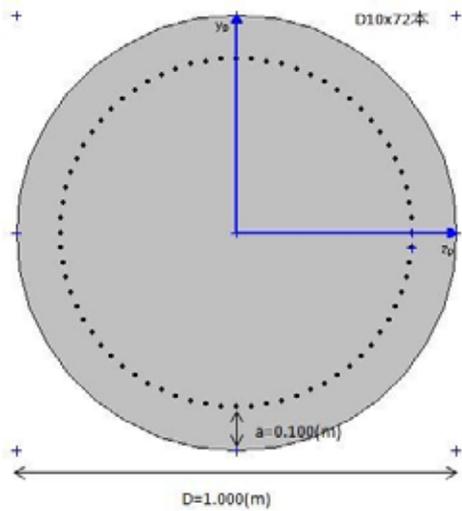


図3-5 解析モデル(2軸曲げ)

断面力としては、基準曲げモーメント100(kN・m)を載荷角度 $\theta = 0$ 度(=Mzpのみ)を基準として、30度、45度、60度、90度(=Mypのみ)と変化させる。

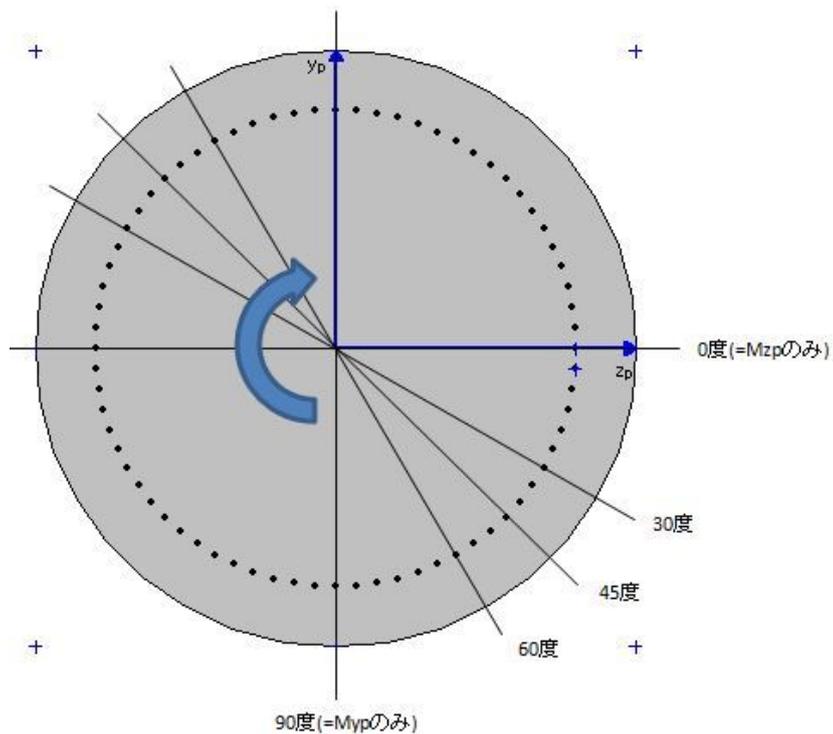


図3-6 曲げモーメントの載荷角度

各載荷角度 θ における曲げモーメントの値は下記のようになる。

$$Myp = 100 * \cos(90 - \theta)$$

$$Mzp = 100 * \sin(90 - \theta)$$

各載荷角度における曲げモーメントを表3-2に示す。

表3-2 各載荷角度における曲げモーメント

対象	角度 (度)	Myp (kN・m)	Mzp (kN・m)
0度	0	0.000	100.000
30度	30	50.000	86.603
45度	45	70.711	70.711
60度	60	86.603	50.000
90度	90	100.000	0.000

UC-win/Sectionの各載荷角度のコンクリートの応力度、引張鉄筋の応力度、圧縮鉄筋の応力度の結果は以降の通りである。

各載荷角度における解析結果を図3-7～図3-11に示す。

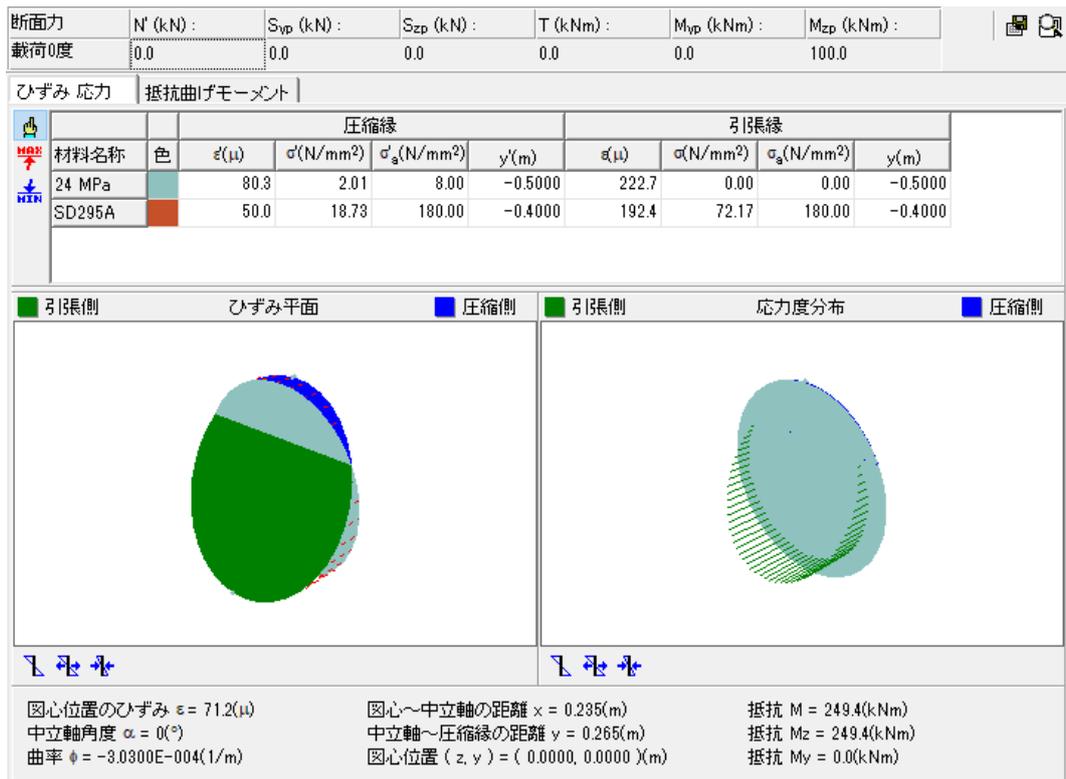


図3-7 解析結果(載荷角度0度)

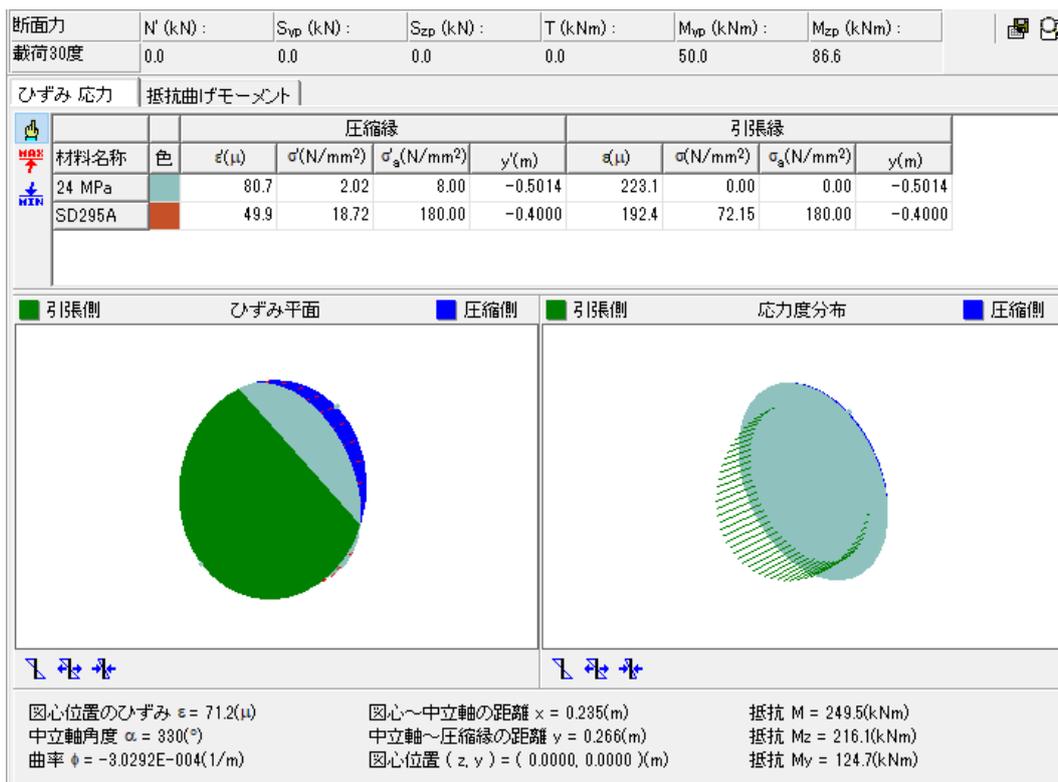


図3-8 解析結果(載荷角度30度)

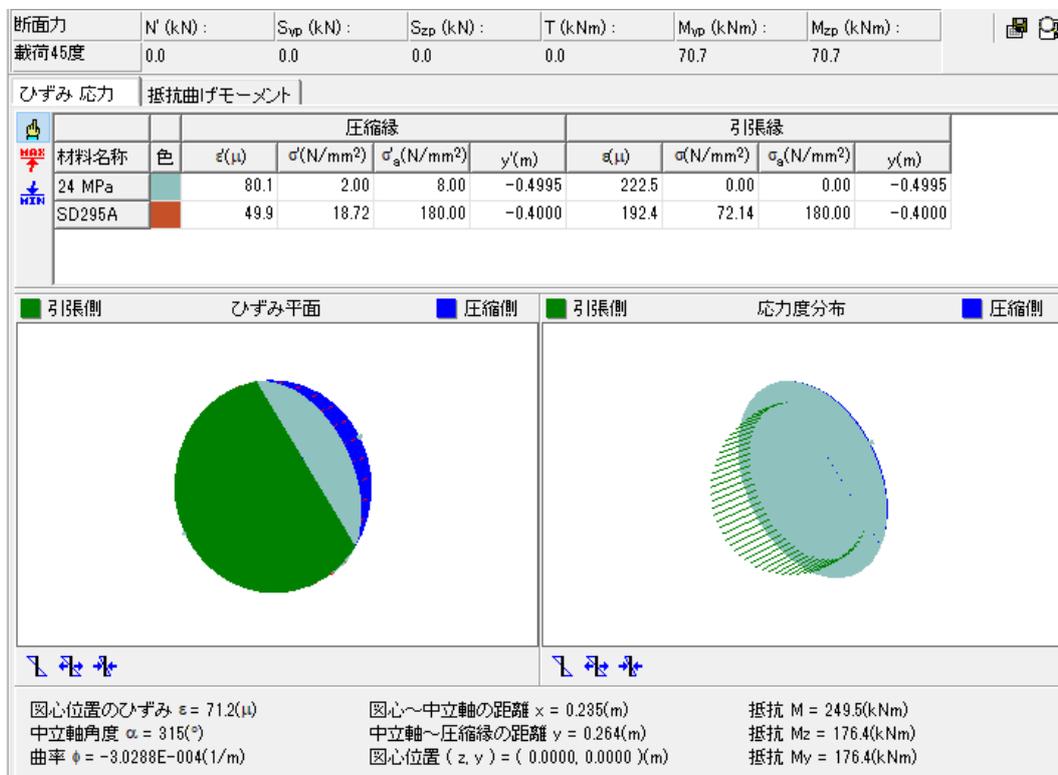


図3-9 解析結果(載荷角度45度)

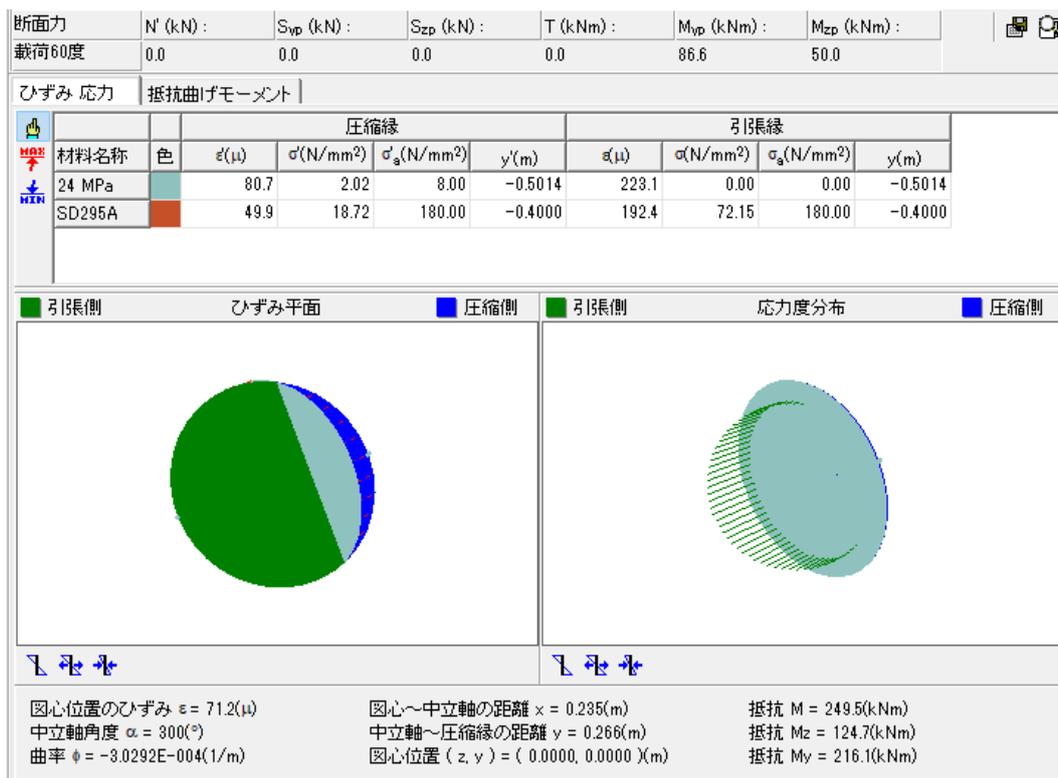


図3-10 解析結果(載荷角度60度)

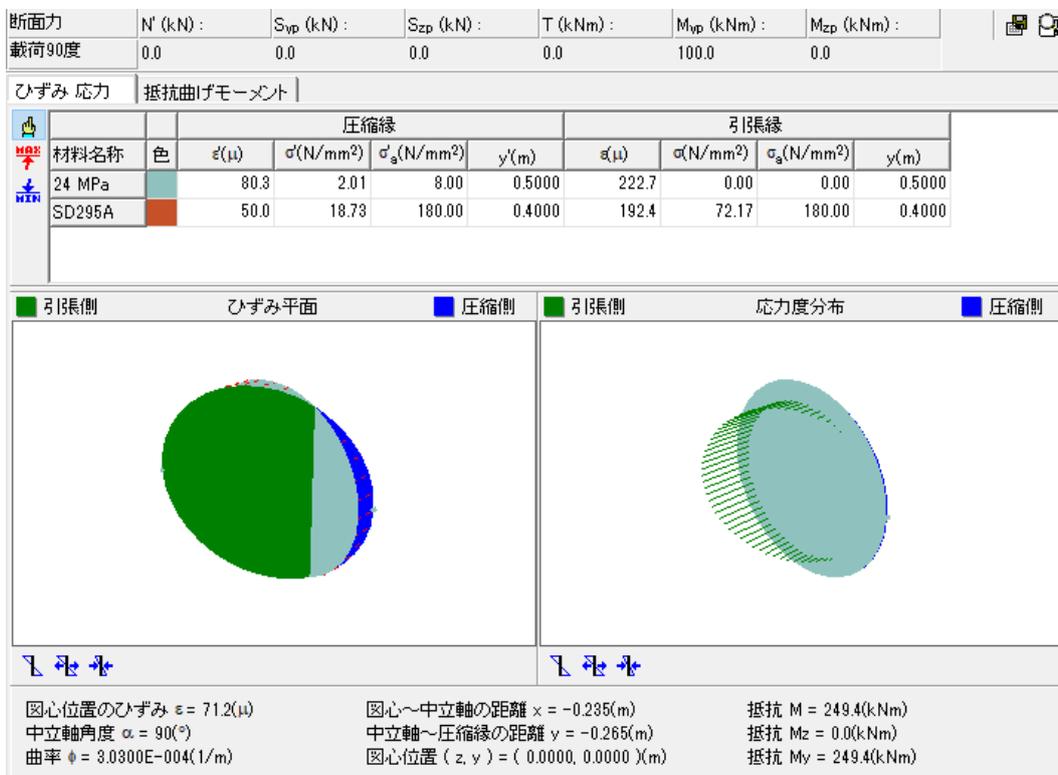


図3-11 解析結果(載荷角度90度)

以上の結果を整理すると表3-3の通りとなる。

表3-3 載荷角度0度を基準とした場合の各載荷角度の比率

対象	備考	コンクリートの 応力度		鉄筋の引張応力度		鉄筋の圧縮応力度	
		解析 結果	比率	解析 結果	比率	解析 結果	比率
0度	Mzp	2.01	100.0%	72.17	100.0%	18.73	100.0%
30度		2.02	100.5%	72.15	100.0%	18.72	99.9%
45度		2.00	99.5%	72.14	100.0%	18.72	99.9%
60度		2.02	100.5%	72.15	100.0%	18.72	99.9%
90度	Myp	2.01	100.0%	72.17	100.0%	18.73	100.0%

単純な円形断面について、コンクリートの応力度、引張鉄筋の応力度、圧縮鉄筋の応力度が各載荷角度によらず、ほぼ一致していることが確認できる。よって載荷角度が変化する2軸曲げについても、応力度が正しく算出されていることが確認できる。

b. 使用内容に対する妥当性

連続壁基礎の応力度照査，耐力照査にUC-win/Sectionを使用することは，次の通り検証されており，妥当である。

- ・ 検証の内容の通り，複鉄筋及び2軸曲げ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-5-47 計算機プログラム（解析コード）の概要
・MSAP（配管）

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）MSAP（配管）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-2-4-3-3-3	管の耐震性についての計算書	
V-2-5-5-4-2	管の耐震性についての計算書	
V-2-5-5-6-2	管の耐震性についての計算書	
V-2-6-6-3-1	管の耐震性についての計算書	
V-2-8-3-2-1	管の耐震性についての計算書	
V-2-8-3-4-1	管の耐震性についての計算書	
V-2-9-4-3-3-1	管の耐震性についての計算書	
V-2-9-5-6-1	管の耐震性についての計算書	
V-2-10-1-2-9	管の耐震性についての計算書	
V-2-10-1-3-8	管の耐震性についての計算書	
V-3-4-2-3-4	管の応力計算書	
V-3-5-4-4-3	管の応力計算書	
V-3-5-4-6-3	管の応力計算書	
V-3-6-3-3-3	管の応力計算書	
V-3-8-1-2-3	管の応力計算書	
V-3-8-1-4-3	管の応力計算書	
V-3-9-2-2-3-2	管の応力計算書	
V-3-9-2-3-3-2	管の応力計算書	
V-3-10-1-1-1-5	管の応力計算書	
V-3-10-1-1-2-5	管の応力計算書	

2. 解析コードの概要

項目	コード名 MSAP (配管)
使用目的	3次元有限要素法 (はり要素) による 固有値解析, 地震応答解析, 構造解析, 応力算出
開発機関	三菱重工業株式会社
開発時期	[Redacted]
使用したバージョン	[Redacted]
コードの概要	<p>強度及び耐震計算で使用している解析コードMSAP (配管) (以下「本解析コード」という。)は, [Redacted]</p> <p>[Redacted]汎用コードである。</p> <p>対話方式による入力及び構造解析の出力データを基に規格基準の算出式に従った評価が可能である。</p> <p>[Redacted]</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <p>[Redacted] 開発元より発行されている例題集の中で, モデル要素ごとに静的及び動的解析の例題に対して, 解析結果と理論モデルによる理論解又は他の解析コードでの計算結果と一致していることを確認している。また, サンプルモデルに対する固有値解析結果が, 理論計算と一致することを確認している。</p> <ul style="list-style-type: none"> 対話方式により入力されたデータはインプットファイルとして出力され, 入力データと一致していることを確認している。 入力データが正しく構造解析に受け渡されていること, 構造解析データが正しく規格計算に受け渡されていることをそれぞれ確認している。 構造解析結果として出力されたデータを規格基準に従い, 発生応力, 疲労累積係数を算出しており, その過程が理論解を再現できることを確認している。 地震動の組合せ処理は, 本解析コード内で処理しており, アウトプットファイルと理論計算結果が一致することを確認している。 本解析コードの適用制限として使用節点数・要素数があるが, 適用範囲内であることを確認している。 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。

<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"> ・ J E A G 4 6 0 1 -1987 6. 5. 2項の加圧水型原子力発電設備における1次冷却ループの多質点3次元はりモデルによる解析の妥当性確認として、 <div style="border: 1px solid black; height: 100px; width: 100%;"></div> <p style="text-align: right;">確認している。</p> <div style="border: 1px solid black; height: 80px; width: 100%;"></div> <ul style="list-style-type: none"> ・ 上記妥当性確認を行ったのは加圧水型原子力発電設備における1次冷却ループの3次元はりモデルであるが、1次冷却ループに含まれる1次冷却材管は今回解析する配管と幾何学的に類似しており、同様の3次元はりモデルを用いてモデル化している。 ・ 今回の工事計画認可申請で行う3次元有限要素法（はり要素）による固有値解析，地震応答解析，構造解析，応力算出の用途，適用範囲が，上述の妥当性確認範囲内にあることを確認している。
--	--

V-5-48 計算機プログラム（解析コード）の概要・ANSYS

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）ANSYS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-2-4-2-5	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	14.0

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	ANSYS
使用目的	3次元有限要素法（はり，シェル要素）による固有値解析，応力解析
開発機関	アンシス
開発時期	1970年
使用したバージョン	14.0 (June 2012)
コードの概要	<p>ANSYS（以下「本解析コード」という。）は，スワンソン・アナリシス・システムズ（現，アンシス）により開発された有限要素法による計算機プログラムである。</p> <p>本解析コードは，広範囲に亘る多目的有限要素法による計算機プログラムである。本解析コードは，構造，マルチフィジックス，流体，陽解法による動的，電磁界および流体力学のシミュレーションならびに解析を実施するものである。</p> <p>本解析コードは，ISO9001およびASME NQA-1を取得し，アメリカ合衆国原子力規制委員会による10CFR Part 50ならびに10CFR21の要求を満たしており，数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，機械，建築，土木等の様々な分野の構造解析に広く利用されている。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</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"> ・本解析コードの検証は，開発元のリリースノートの例題集において，多くの解析例に対する理論解と解析結果との比較が実施されており，理論解と解析解が一致していることを確認している。 ・本解析コードが適正であることは，コード配布時に同梱されたANSYS Mechanical APDL Verification Testing Packageにより確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発元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。 <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次のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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，機械，建築，土木等の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，原子力分野では，原子炉設置（変更）許可申請書における応力解析等，これまで多くの構造解析に対し使用実績があることを確認している。

V-5-49 計算機プログラム（解析コード）の概要
・NX 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	3
2.1 NX NASTRAN Ver. 9.1, Ver. 8.1, Ver. 6.1, Ver. 5mp1	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）NX 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-2-6-7-2-2	屋外アンテナ（中央制御室）の耐震性についての計算書	Ver. 9.1
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	Ver. 9.1
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	Ver. 9.1
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	Ver. 9.1
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	Ver. 8.1
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	Ver. 8.1
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	Ver. 6.1
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. 5mp1

2. 解析コードの概要

2.1 NX NASTRAN Ver. 9. 1, Ver. 8. 1, Ver. 6. 1, Ver. 5mp1

項目		コード名 NX NASTRAN
使用目的	Ver. 9. 1	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
	Ver. 8. 1	3次元有限要素法（シェルモデル及びビームモデル）による固有値解析及び地震応答解析
	Ver. 6. 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地震応答解析
	Ver. 5mp1	3次元有限要素法（はりモデル）による固有値解析及び応力解析
開発機関		Siemens PLM(Product Lifecycle Management) Software Inc.
開発時期		1971年（The MacNeal-Schwendler Corporation） 2005年（Siemens PLM Software Inc.）
使用したバージョン		Ver. 9. 1, Ver. 8. 1, Ver. 6. 1, Ver. 5mp1
<div style="border: 1px solid red; width: 100px; height: 20px; margin-bottom: 5px;"></div> <div style="text-align: center; margin-bottom: 5px;">↓</div> <div style="border: 1px solid red; padding: 2px;">コードの概要</div> <p style="color: red; margin-top: 5px;">文字のセンタリング</p>		<p>NX 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The MacNeal-Schwendler Corporationにより開発され、Siemens PLM Software Inc.に引き継がれた有限要素法による構造解析用の汎用プログラムであり、MSC NASTRANと同じ機能を持つ。</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)</p> <div style="border: 1px solid red; padding: 2px; display: inline-block;">及び 妥当性確認 (Validation)</div> <div style="color: red; font-size: 2em; vertical-align: middle;">↕</div> <p style="color: red; margin-top: 5px;">行間の調整</p>		<p>【検証 (Verification)】</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"> ・材料力学分野における一般的な知見により解を求めることができる体系について，3次元有限要素法（3次元シェル及びはりモデル）による固有値解析，地震応答解析及び応力解析を行い，解析解が理論解と一致することを確認している。 ・構造力学分野における一般的な知見により解を求めることができる体系について，シェル要素及びビーム要素を用いた固有値解析，応力解析の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。 ・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。

<p>検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)</p>	<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次のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none">・本解析コードは、自動車、航空宇宙、防衛、重機、造船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で行う動解析と類似するものとして、NX NASTRAN代理店である（株）エヌ・エス・ティが実施したタワークレーンの地震応答解析の事例がある。（（株）エヌ・エス・ティパンプレット）・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（はりモデル、ビームモデル、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に本解析コードが適用できることを確認している。・検証の体制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できる。・今回の工事計画認可申請で行う3次元有限要素法（3次元シェル、ビーム及びはりモデル）による固有値解析、地震応答解析及び応力解析の用途、適用範囲が、上述の妥当性確認範囲内にあることを確認している。・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。
--	--

V-5-50 計算機プログラム (解析コード) の概要
• A P O L L O S u p e r D e s i g n e r S e c t i o n

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. APOLLO SuperDesigner Section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	5
3.4 解析フローチャート	8
3.5 検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation)	9

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）APOLLO SuperDesigner Section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-2-10-2-2-1	防潮堤（鋼製防護壁）の耐震性についての計算書	Ver. 10.11.0.3
V-3-別添3-2-1-1	防潮堤（鋼製防護壁）の強度計算書	Ver. 10.11.0.3

2. 解析コードの概要

項目	コード名 APOLLO SuperDesigner Section
使用目的	鋼部材の断面剛性算出
開発機関	株式会社横河技術情報
開発時期	1996年
使用したバージョン	Ver. 10.11.0.3
コードの概要	APOLLO SuperDesigner Sectionは、曲げねじり理論によって算出した断面諸量を用いて、垂直応力度・せん断応力度・ねじり応力度を算出し、各種適用許容応力度を用いて照査を行うプログラムである。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>APOLLO SuperDesigner Sectionは、静的解析及び動的解析により算定された格点位置での断面力に対して応力計算を行い、各部位での発生応力が許容値内に収まっているかを照査する際の断面剛性（ねじり剛性）の算出に使用している。</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"> ・ APOLLO SuperDesigner Section を用いて算出した断面諸量(ねじり剛性)が、構造力学公式集によって算出した断面諸量 (ねじり剛性) と一致していることを確認している。 ・ 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。 <p>【妥当性検証 (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"> ・ 検証の内容の通り、断面諸量計算結果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。

3. APOLLO SuperDesigner Sectionの解析手法について

3.1 一般事項

APOLLO SuperDesigner Sectionは、曲げねじり理論によって算出した断面諸量を用いて、垂直応力度・せん断応力度・ねじり応力度を算出し、各種適用許容応力度を用いて照査を行うプログラムである。

3.2 解析コードの特徴

APOLLO SuperDesigner Sectionの主な特徴を以下に示す。

断面形状

- ・基本断面形状は、RC箱桁、鋼床版箱桁、鋼床版I桁に対応しているが、追加プログラムとして梯形断面等の任意断面の適用が可能。
- ・鋼床版のデッキプレートは重ね継ぎ手にも対応している。
- ・鋼床版の左右張り出し部と上フランジで材質、板厚を各々指定可能。
- ・鋼床版の縦リブは任意の位置に複数種類の断面の設定が可能。

断面力

- ・3成分断面力、6成分断面力に対応している。
- ・鋼床版については架設系、完成系に対応している。

計算方法その他

- ・せん断流の計算において、トラフリブは等価なプレートに換算して算出する。
- ・トラフリブが有効幅内かの判断は、トラフリブの中心位置が有効幅内に入っているかで判断する。
- ・板厚が40mmを超える場合には、以下の2通りの許容応力度算出方法が選択可能である。
 - ①道路橋示方書通りの許容応力度を使用する。
 - ②40mm以下の板厚と同様の許容応力度算出式を使用する。（-H仕様）
- ・部材の寸法の押さえとして、板厚の逃げ方向を以下の三種類から選択が可能。
 - ①中心押さえ
 - ②部材の定義した方向の左側押さえ
 - ③部材の定義した方向の右側押さえ
- ・縦リブ断面として①板リブ、②バルブプレート、③トラフリブの3種類が選択可能。

3.3 解析手法

3.3.1 断面諸量の計算方法

小松氏の「曲げねじり理論」により算出する。

1つの部材（フランジや腹板）を、意味がある点（腹板取り付け点、重心位置、有効幅位置など）で分割したものを「要素」とし、計算は1要素毎に計算し、その合計で求める。上フランジの要素分割例を図3-1に示す。

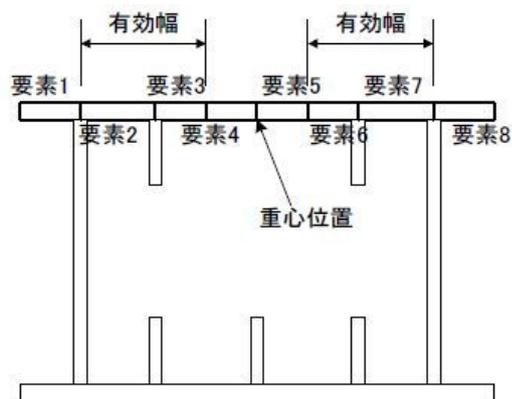


図3-1 上フランジの要素分割例

(1) 断面積および重心位置

$$\Sigma A = \Sigma B_j \times T_j \quad \text{ここに } j: \text{各要素番号 } B: \text{幅 } T: \text{厚}$$

曲率がある場合,

$$A'_j = A_j / \rho_j \quad \text{ここに } \rho_j: \text{各要素の中心点より平面曲率中心までの距離}$$

重心位置（曲率がある場合）

$$R_0 = \Sigma A_j / \Sigma A'_j$$

$$X_c = R_0 - R$$

$$Y_c = (\Sigma (A'_j \times Y'_j)) \times R_0 / \Sigma A_j$$

ここで Y'_j : 基準軸から各要素の中心までの距離 (Y方向の距離)

(2) 剛度

$$I_x = R_0 \times \Sigma [(I_{x'j} + A_j \times Y_j^2) / \rho_j]$$

$$I_y = R_0 \times \Sigma [(I_{y'j} + A_j \times X_j^2) / \rho_j]$$

$$I_{xy} = R_0 \times \Sigma [(I_{xy'j} + A_j \times Y_j \times X_j) / \rho_j]$$

ここで $I_{x'}$, $I_{y'}$, $I_{xy'}$: 要素自身の断面二次モーメントと相乗モーメント

X_j , Y_j : 要素の重心位置座標

I_{xy} は相乗曲げモーメントを考慮する場合にのみ有効となる。

(3) ねじり関数, ねじり抵抗

1室の場合

・ねじり関数

$$q_k = 1/R_0 \times \Sigma [(X_e \times Y_s - X_s \times Y_e) j / \rho j^2] / \Sigma [B_j / (\rho j^3 \times T_j)]$$

ここで Σ : 閉断面を構成する要素の総和

R_0 : 重心位置曲率半径

ρj : 要素の重心位置の曲率半径

$(X_s \times Y_s), (X_e \times Y_e)$: 要素の終始点座標

B_j : 要素の長さ

T_j : 要素の板厚

・ねじり抵抗

$$J = R_0^2 \times q_k \times \Sigma [(X_e \times Y_s - X_s \times Y_e) j / \rho j^2] + \Sigma B_j \times T_j / 3$$

閉断面区間

開断面区間

3.3.2 応力度の計算方法

(1) 垂直応力度

軸力Nによる応力度

$$\sigma_n = (R / \rho) \times (N / A)$$

面内曲げモーメント M_x による応力度

$$\sigma_{mx} = (R_i / \rho) \times (I_{y_i} \times y_i - I_{xy_i} \times x_i) \times M_x / (I_{x_i} \times I_{y_i} - I_{xy_i}^2)$$

面外曲げモーメント M_y による応力度

$$\sigma_{my} = (R_o / \rho) \times (I_{x_o} \times x_o - I_{xy_o} \times y_o) \times M_y / (I_{x_o} \times I_{y_o} - I_{xy_o}^2)$$

ここで, ρ : 照査位置の曲率半径

	総断面	面内有効断面	面外有効断面
重心位置 (x軸)	x_c	x_{c_i}	x_{c_o}
重心位置 (y軸)	y_c	y_{c_i}	y_{c_o}
重心位置から照査位置までの距離	x	x_i	x_o
	y	y_i	y_o
重心位置の曲率半径	R	R_i	R_o
断面積	A	A_i	A_o
x軸回りの断面二次モーメント	I_x	I_{x_i}	I_{x_o}
y軸回りの断面二次モーメント	I_y	I_{y_i}	I_{y_o}
相乗モーメント	I_{xy}	I_{xy_i}	I_{xy_o}
ねじり定数	J	-	-

(2) せん断応力度

$$\tau = S_x \times qb / T_j$$

(3) ねじり応力度

$$\tau = T \times (J_1 / J) / (2 \times F \times T_j) \quad \text{閉断面}$$

$$\tau = 3 \times T \times (J_2 / J) / (B_j \times T_j) \quad \text{開断面}$$

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。

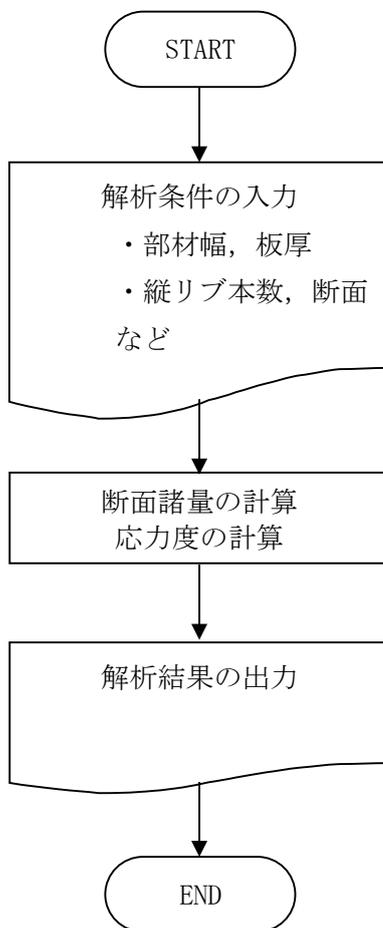


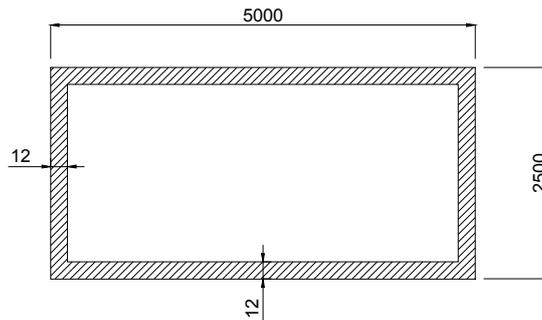
図3-1 解析フローチャート

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

(1) 構造力学公式集により算出したねじり剛性比較による検証

以下に示す断面において構造力学公式集によりねじり剛性を算出し、プログラムの出力結果と比較する。

ねじり剛性算出対象断面



構造力学公式集により算出したねじり剛性

断面形	ねじり剛性 GJ
	$\frac{2t_1(a-t)^2(b-t_1)^2}{at+bt_1-t^2-t_1^2} G$

(構造力学公式集 P. 46)

図3-2 ねじり剛性算出断面

構造力学公式集から算出するねじり剛性は以下のとおりである。

$$\begin{aligned}
 a &= 5000 \text{ (mm)} , b = 2500 \text{ (mm)} , t_1 = 12 \text{ (mm)} , t = 12 \text{ (mm)} \text{ より,} \\
 J &= \{2 \times 12 \times 12 \times (5000-12)^2 \times (2500-12)^2\} / (5000 \times 12 + 2500 \times 12 - 12^2 - 12^2) \\
 &= 494,419,499,500 \text{ (mm}^4\text{)} \\
 &= 49,441,950 \text{ (cm}^4\text{)}
 \end{aligned}$$

APOLLO SuperDesigner Section出力結果を図3-3に示す。

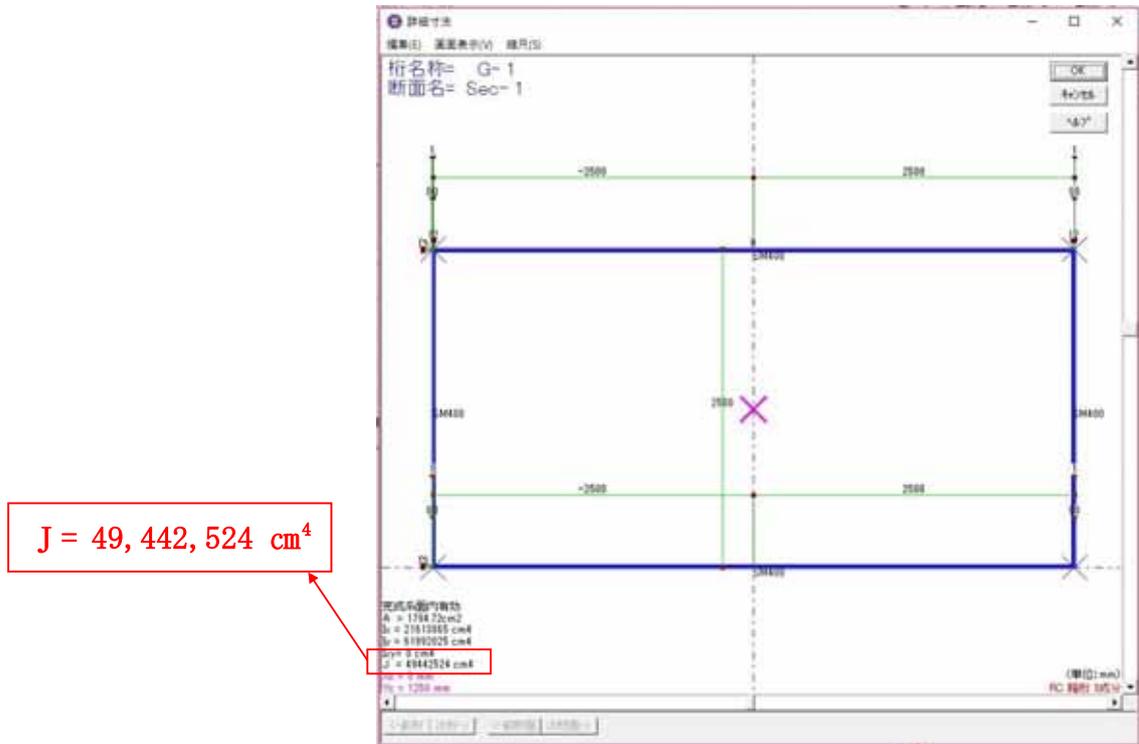


図3-3 APOLLO SuperDesigner Section出力結果

構造力学公式集より算出したねじり剛性とプログラムより算出したねじり剛性の比較を表3-1に示す。

表3-1 計算例と解析結果の比較

	計算例	解析結果	比率
	構造力学公式集	APOLLO SuperDesigner Section	
ねじり剛性 J (cm ⁴)	49,441,950	49,442,524	99.999%

構造力学公式集の計算結果とAPOLLO SuperDesigner Sectionの出力結果が良く一致していることを確認しており、ねじり剛性の算出が正しく実行できていることが確認できる。

(2) 使用内容に対する妥当性

鋼製防護壁の鋼部材の部材連結部の設計にAPOLLO SuperDesigner Sectionによって算出したねじり剛性を使用することは、構造力学公式集による算出結果と検証を行った結果から今回の解析に使用することは妥当である。

V-5-51 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ A P O L L O S u p e r D e s i g n e r S p l i c 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
3. APOLLO SuperDesigner Splice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.....	5
3.4 解析フローチャート.....	8
3.5 検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation)	9

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）APOLLO SuperDesigner Splice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-2-10-2-2-1	防潮堤（鋼製防護壁）の耐震性についての計算書	Ver. 10.11.0.3
V-3-別添3-1-1-1	防潮堤（鋼製防護壁）の強度計算書	Ver. 10.11.0.3

2. 解析コードの概要

項目	コード名 APOLLO SuperDesigner Splice
使用目的	鋼部材連結部のボルト設計・添接板応力照査
開発機関	株式会社横河技術情報
開発時期	1996年
使用したバージョン	Ver. 10.11.0.3
コードの概要	本プログラムは、道路橋示方書（Ⅰ共通編・Ⅱ鋼橋編）・同解説（（社）日本道路協会，平成24年3月）「高力ボルト継手」に準拠した鋼構造連結部の摩擦接合による継手計算を行うものである。
検証（Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	<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"> ・ APOLLO SuperDesigner Splice を用いて算出した継手部における必要ボルト本数及び必要添接板厚が、道路橋示方書の規定により算出した必要ボルト本数及び必要添接板厚と一致することを確認している。 ・ 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。 <p>【妥当性検証（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"> ・ 検証の内容の通り、添接計算結果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。

3. APOLLO SuperDesigner Spliceの解析手法について

3.1 一般事項

APOLLO SuperDesigner Spliceは、道路橋示方書Ⅱ鋼橋編の「高力ボルト継手」に準拠した鋼構造連結部の継手計算を行うプログラムである。

3.2 解析コードの特徴

APOLLO SuperDesigner Spliceの主な特徴を以下に示す。

- ・本プログラムの添接計算は、断面単位（鉸桁、箱桁など）ではなく、板単位（フランジ、腹板など）で行うため、ある程度任意の断面形状に対応している。（例外として、桁構造を想定したプログラムのため、トラス固有の添接計算方法などには対応していない）
- ・ボルト自動配置の方法は以下の方法に対応している。
 - ①建設省方式 ②道路公団大阪建設局方式 ③YTI方式それぞれの方法についてフランジ添接板を母材より5mm小さくして自動配置する事が出来る。
- ・フランジ方式の計算方法は以下の方法に対応している。
 - ①便覧方式（孔引き後の断面積で照査する方式）
 - ②橋建方式（孔引き前の断面積で照査する方式）
- ・腹板の計算方法は以下の方法に対応している。
 - ①通常方式（曲げモーメントとせん断力で計算する方法）
 - ②簡易方式（せん断力のみで計算する方法）
- ・箱桁の縦リブの孔引き照査方法は以下の方法に対応している。
 - ①縦リブ断面を母材に含めて照査する方法（縦リブの母材アップはしない考え方）
 - ②縦リブ単独で計算する方法
- ・フランジ添接板の必要断面積の考え方は以下の方法に対応している。
 - ①全添接板（両側）で必要断面積を満足する方法
 - ②片側添接板で必要断面積の1/2を満足する方法
- ・腹板の添接計算を行う場合、一番端部のボルト作用力の一部をフランジに持たせた計算方法に対応している。

3.3 解析手法

摩擦接合は、高力ボルトで母材及び連結板を締付け、それらの間の摩擦力によって応力を伝達させるものである。高力ボルトに摩擦接合を採用する場合には、摩擦面のすべり及び母材又は連結板の降伏に対して安全となるように設計しなければならない。設計手法は「道路橋示方書（Ⅱ鋼橋編）・同解説」（（社）日本道路協会、平成14年3月）の「7.3 高力ボルト継手」に則る。

3.3.1 ボルトの許容力

摩擦接合のボルトの許容力は「道路橋示方書（Ⅱ鋼橋編）・同解説」（（社）日本道路協会、平成14年3月）の「3.2.3 溶接部及び接合用鋼材の許容応力度」の規定による。摩擦接合用高力ボルトの許容力を表3-1に示す。

表3-1 摩擦接合用高力ボルトの許容力（1ボルト1摩擦面あたり）
(b)接触面に無機ジンクリッチペイントを塗布する場合

ボルトの等級 ねじの呼び	F8T	F10T	S10T
M20	35	44	44
M22	44	54	54
M24	51	63	63

(kN)

3.3.2 摩擦接合用高力ボルトの設計

摩擦接合におけるボルトは、母材に作用する軸方向力、せん断力及び曲げモーメントに対して安全となるように設計しなければならない。全強の75%の強度を持たせる場合は、これに相当する応力に対して安全となるように設計する。

垂直応力が作用する板を連結する場合には、各列のボルトが式(3.3.2-1)を満たすように設計する。ただし、垂直応力が均等に分布している場合は、式(3.3.2-2)を満たせばよい。ボルトに作用する力を図3-1に示す。

$$\rho_{pi} = \frac{P_i}{n_i} \leq \rho_a \quad (3.3.2-1)$$

$$\rho_p = \frac{P}{n} \leq \rho_a \quad (3.3.2-2)$$

- ここに、 ρ_{pi} : i 列目のボルト1本に作用する力 (N)
 ρ_p : ボルト1本に作用する力 (N)
 P_i : i 列目の接合線の片側にあるボルト群に作用する力 (N)
 P : 接合線の片側にある全ボルトに作用する力 (N)
 n_i : i 列目の接合線の片側にあるボルト群のボルト本数 (本)
 n : 接合線の片側にある全ボルトの全本数 (本)
 ρ_a : ボルト1本あたりの許容力 (N)

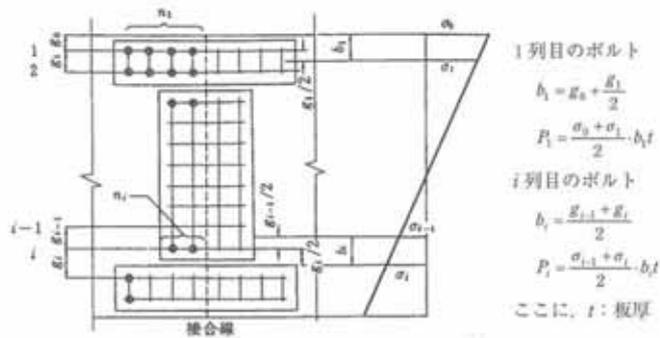


図3-1 (1) ボルトに作用する力（垂直応力の分布が均等でない場合）

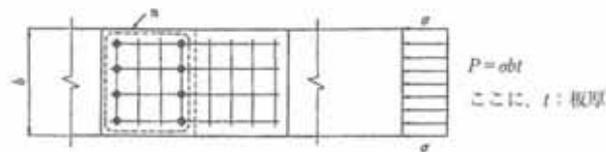


図3-1 (2) ボルトに作用する力（垂直応力の分布が均等な場合）

せん断力が作用する板を連結する場合は、式 (3.3.2-3) を満たすように設計する。

$$\rho_s = \frac{S}{n} \leq \rho_a \quad (3.3.2-3)$$

- ここに、 ρ_s : ボルト1本に作用する力 (N)
 S : せん断力 (N)
 n : 接合線の片側にあるボルトの全本数 (本)
 ρ_a : ボルト1本あたりの許容力 (N)

3.3.3 連結板の設計

連結板は作用力に対して安全であると同時に、部材全体として必要な継手強度が得られるように設計しなければならない。

引張力が作用する板の連結板は、「3.3.4 純断面積」の計算に規定する純断面に生じる応力度が許容引張応力度以下となるように設計する。圧縮力が作用する板の連結板は、総断面に生じる応力度が「道路橋示方書（Ⅱ鋼橋編）・同解説」（（社）日本道路協会，平成14年3月）の「3.2.1 構造用鋼材の許容応力度」に規定する許容圧縮応力度の上限値以下となるように設計する。

曲げモーメントが作用する板の連結板は、式 (3.3.3-1) を満たすように設計する。

$$\sigma = \frac{M}{I} y \leq \sigma_a \quad (3.3.3-1)$$

- ここに、 σ : 連結板の縁端に生じる応力度 (N/mm²)
 M : 連結板に作用する曲げモーメント (N・mm)
 I : 中立軸に関する連結板の総断面の断面二次モーメント (mm⁴)
 y : 中立軸から連結板の縁端までの距離 (mm)
 σ_a : 道路橋示方書Ⅱ鋼橋編3.2.1に規定する許容応力度の上限値 (N/mm²)

3.3.4 純断面積の計算

高力ボルトの継手部の設計にあたっては、継手部の断面積を適切に考慮しなければならない。

引張材の純断面積は次の各項により計算する。

- 1) 純断面積は純幅と板厚との積とする。この場合、材片の純幅はその総幅からボルト孔により失われる幅を除いたものとする。
- 2) 摩擦接合では、母材及び連結板の純断面応力度を照査する場合に用いる純断面積は1)の規定により計算される値の1.1倍まで割増してよい。ただし、総断面積を超えてはならない。
- 3) 部材の純断面積を算定する場合のボルト孔の径は、ボルトの呼びに3mmを加えたものとする。
- 4) 千鳥にボルト締めされた材片の純幅は、純幅から考えている断面の最初のボルト孔についてその全幅を控除し、以下順次に式(3.3.4-1)の w を各ボルト孔について控除したものとする。

$$w = d - \frac{p^2}{4g} \text{ (mm)} \quad (3.3.4-1)$$

- ここに、 d : ボルト孔の直径 (ボルトの呼び + 3mm)
 p : ボルトのピッチ (mm)
 g : 応力直角方向のボルト線間距離 (mm)

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。

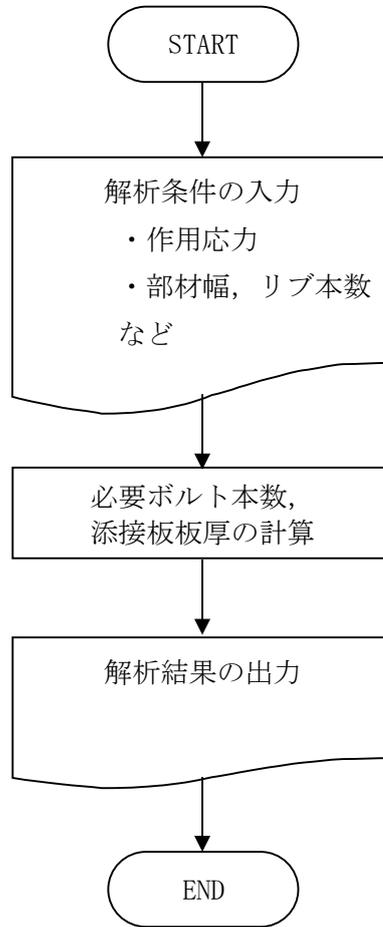


図3-2 解析フローチャート

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

a. 道路橋示方書の規定により算出した計算結果との比較による検証

以下に示す2通りの条件において添接計算を実施した結果の比較を行う。

・フランジ方式

1) 計算条件

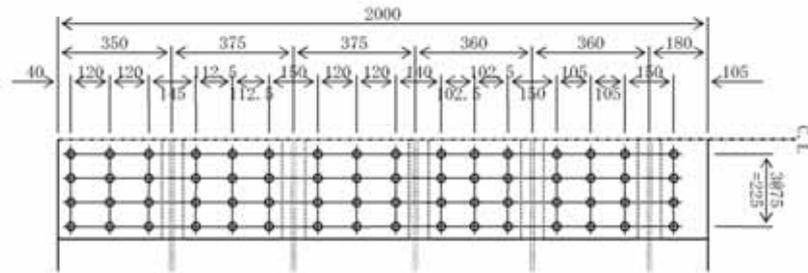
作用応力度 $\sigma_{tmax} = 36 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_{cmax} = -36 \text{ N/mm}^2$

母材断面 1-Flg PL 2000 × 20 (SM490Y)

4-Rib PL 230 × 22 (SM490Y)

フランジ及びリブのボルト配置を図3-3に示す。

フランジ



リブ

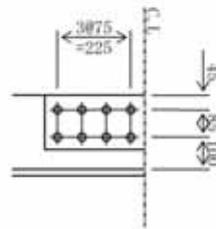


図3-3 フランジ及びリブのボルト配置図

2) 設計応力

$$0.75 \times 210 = 157.5 \text{ N/mm}^2 > 36 \text{ N/mm}^2$$

作用応力度より全強の75%の方が大きいため、設計応力は全強の75%とする。

3) 母材断面積

総断面積 フランジ $2000 \times 20 = 40000 \text{ mm}^2$

リブ $4 \times 230 \times 22 = 20240 \text{ mm}^2$

合計 $40000 + 20240 = 60240 \text{ mm}^2$

純断面積

フランジ 35200 mm^2

$$(40000 - (163 \times 25) \times 20) \times 1.1 = 35200 \text{ mm}^2 < 40000 \text{ mm}^2$$

リブ 17420 mm^2

$$(20240 - 4 \times (2 \times 25) \times 22) \times 1.1 = 17424 \text{ mm}^2 < 20240 \text{ mm}^2$$

$$\text{合計 } 35200 + 17424 = 52624 \text{ mm}^2$$

4) 設計軸力

$$\text{引張力 } P_t = 157.5 \text{ N/mm}^2 \times 35200 \text{ mm}^2 / 1.1 = 5040000 \text{ N}$$

$$P_{tr} = 157.5 \text{ N/mm}^2 \times 17424 \text{ mm}^2 / 1.1 = 2494800 \text{ N}$$

$$\text{圧縮力 } P_c = 157.5 \text{ N/mm}^2 \times 40000 \text{ mm}^2 = 6300000 \text{ N}$$

$$P_{cr} = 157.5 \text{ N/mm}^2 \times 20240 \text{ mm}^2 = 3187800 \text{ N}$$

5) 必要ボルト本数

$$\text{フランジ } 6300000 \text{ N} / 108000 \text{ N} = 58.3 \text{ 本} < 64 \text{ 本使用 } \underline{\text{OK}}$$

$$\text{リブ } 3187800 \text{ N} / 108000 \text{ N} = 29.5 \text{ 本} < 32 \text{ 本使用 } \underline{\text{OK}}$$

6) 添接板必要断面積

$$\text{総断面積 フランジ } 5040000 / 210 / 2 = 12000 \text{ mm}^2$$

$$\text{リブ } 2494800 / 210 = 11880 \text{ mm}^2$$

$$\text{純断面積 フランジ } 6300000 / 210 / 2 = 15000 \text{ mm}^2$$

$$\text{リブ } 3187800 / 210 = 15180 \text{ mm}^2$$

7) 添接板厚と添接板照査

添接板厚

$$\text{フランジ 親板 } 10\text{mm}, \text{ 子板 } 16\text{mm} \quad \text{リブ } 19\text{mm}$$

添接板照査

フランジ親板

$$\text{総断面積 } 2000 \times 10 = 20000 \text{ mm}^2 = 20000 \text{ mm}^2 > 12000 \text{ mm}^2 \quad \text{OK}$$

$$\text{純断面積 } (20000 - (1 \times 25) \times 10) \times 1.1 = 17600 \text{ mm}^2 < 20000 \text{ mm}^2$$

$$= 17600 \text{ mm}^2 > 15000 \text{ mm}^2 \quad \underline{\text{OK}}$$

フランジ子板

総断面積

$$145 \times 16 + 290 \times 16 + 285 \times 16 + 2 \times 320 \times 16 + 305 \times 16$$

$$= 26640 \text{ mm}^2 > 12000 \text{ mm}^2 \quad \underline{\text{OK}}$$

純断面積

$$1.1 \times (145 \times 16 - (1 \times 25) \times 16) = 2112 \text{ mm}^2 < 2320 \text{ mm}^2$$

$$1.1 \times (290 \times 16 - (3 \times 25) \times 16) = 3784 \text{ mm}^2 < 4640 \text{ mm}^2$$

$$1.1 \times (285 \times 16 - (3 \times 25) \times 16) = 3696 \text{ mm}^2 < 4560 \text{ mm}^2$$

$$1.1 \times (2 \times 320 \times 16 - 2 \times (3 \times 25) \times 16) = 8624 \text{ mm}^2 < 10240 \text{ mm}^2$$

$$1.1 \times (305 \times 16 - (3 \times 25) \times 16) = 4048 \text{ mm}^2 < 4880 \text{ mm}^2$$

$$2112 + 3784 + 3696 + 8624 + 4048 = 22264 \text{ mm}^2 > 15180 \text{ mm}^2 \quad \underline{\text{OK}}$$

リブ

$$\text{総断面積 } 8 \times 165 \times 19 = 25080 \text{ mm}^2 > 11880 \text{ mm}^2 \quad \text{OK}$$

$$\begin{aligned} \text{純断面積} & (25080 - 8 \times (2 \times 25) \times 19) \times 1.1 = 19448 \text{mm}^2 < 25080 \text{mm}^2 \\ & = 19448 \text{mm}^2 > 15180 \text{mm}^2 \quad \text{OK} \end{aligned}$$

・ウェブ方式の計算条件

1) 計算条件

作用応力度 $\sigma_{tmax} = 47 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_{cmax} = -47 \text{ N/mm}^2$, $\tau = 24 \text{ N/mm}^2$

母材断面 1-Web PL 4500 × 12 (SM490Y)

添接板断面 2-SPL PL 4380 × 9 (SM490Y)

2) 設計応力及びボルト配置

$$0.75 \times 210 = 157.5 \text{ N/mm}^2 > 47 \text{ N/mm}^2$$

作用応力度より全強の75%の方が大きいため、設計応力は全強の75%とする。

ボルト配置及び作用応力度を図3-4に示す。

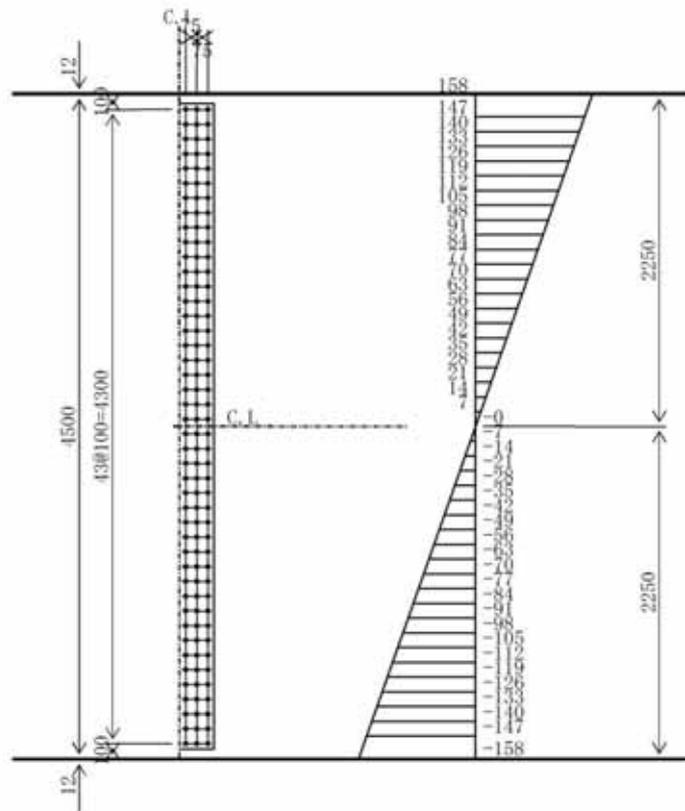


図3-4 ボルト配置及び作用応力度

3) 必要ボルト本数

再下段のボルトで必要ボルト本数を計算する。

分担幅 $b = 150 \text{ mm}$

設計応力度 $\sigma_L = 158 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_{L-1} = 147 \text{ N/mm}^2$

分担力 $PL = 150 \times 12 \times (157.5 + 147) / 2 = 274050 \text{ N}$

必要ボルト本数 $N = 274050 / 108000 = 2.5 \text{ 本} < 3 \text{ 本使用 OK}$

4) せん断力の照査

総ボルト本数 $\Sigma N = 44 \times 3 = 132$ 本

ボルト1本あたりのせん断力

$$\rho_s = 24 \times 4500 \times 12 / 132 = 9818 \text{ N} < \rho_a = 108000 \text{ N OK}$$

合成応力の照査

$$\rho_\kappa = \sqrt{((274050 / 3)^2 + 9818^2)} = 91876 \text{ N} < \rho_a = 108000 \text{ N OK}$$

添接板の照査

ウェブの断面二次モーメント

$$I_w = 1/12 \times 12 \times 4500^3 = 9.1125 \times 10^{10} \text{ mm}^4$$

ウェブの曲げモーメント

$$M_w = \sigma \times I_w / y = 157.5 \times 9.1125 \times 10^{10} / (4500/2) = 6.37875 \times 10^9 \text{ Nmm}$$

添接板の断面二次モーメント

$$I_s = 1/12 \times 9 \times 4380^3 \times 2 = 1.26042 \times 10^{11} \text{ mm}^4$$

添接板の曲げ応力度

$$\sigma_s = 6.37875 \times 10^9 / 1.26042 \times 10^{11} \times (4380 / 2) = 111 \text{ N/mm}^2$$

$$< \sigma_a = 210 \text{ N/mm}^2 \text{ OK}$$

フランジ方式、ウェブ方式共に、(添付1) 及び (添付2) に示す APOLLO SuperDesigner Splice の出力結果と一致することを確認しており、添接計算が正しく実行できていることが確認できる。計算例と解析結果の比較を表3-2に示す。

表3-2 計算例と解析結果の比較

対 象				計算例	解析結果	比 率	
フランジ 方式	必要ボルト本数		フランジ	本	58.3	58.3	100%
			リブ	本	29.5	29.5	100%
	添接板 必要 断面積	総断面	フランジ	cm ²	120.0	120.0	100%
			リブ	cm ²	118.8	118.8	100%
		純断面	フランジ	cm ²	150.0	150.0	100%
			リブ	cm ²	151.8	151.8	100%
ウェブ 方式	必用ボルト本数			本	2.5	2.5	100%
	ボルトせん断力			N	9,818	9,818	100%
	ボルト合成応力			N	91,876	91,876	100%
	添接板応力			N/mm ²	111	111	100%

b. 使用内容に対する妥当性

鋼製防護壁の鋼部材の部材連結部の設計にAPOLLO SuperDesigner Splice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されており、妥当である。

検証の内容のとおり、フランジ部材、腹板部材の添接計算の検証を行っていることから、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。

(添付1) フランジ方式 APOLLO SuperDesigner Splice 出力結果

(a) 作用応力度

$$\begin{aligned} \sigma_{tmax} &= 36 \text{ N/mm}^2 & 0.75 \sigma_{ta} &= 0.75 \times 210 = 158 \text{ N/mm}^2 \\ \sigma_{cmax} &= -36 \text{ N/mm}^2 & 0.75 \sigma_{ca} &= 0.75 \times 210 = 158 \text{ N/mm}^2 \\ \therefore \sigma_c &= 158 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

(b) 母材総断面

$$\begin{aligned} 1\text{-FLG} & \quad \text{PL} \quad 2000 \times 20 & \quad A_g &= 400.0 \text{ cm}^2 & \quad (\text{SM490Y}) \\ 4\text{-RIB} & \quad \text{PL} \quad 230 \times 22 & \quad A_{gr} &= 202.4 \text{ cm}^2 & \quad (\text{SM490Y}) \\ \Sigma A_g &= A_g + A_{gr} = 400.0 + 202.4 = 602.4 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

(c) ボルト配置図

ボルト配置図を図3-5に示す。

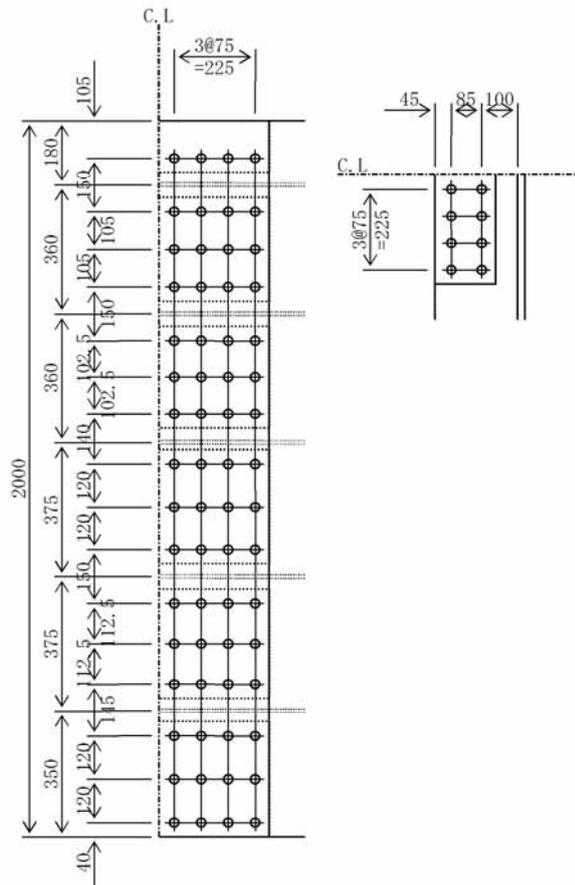


図3-5 ボルト配置及び作用応力度

(d) 母材断面の照査

$$\begin{aligned} 1\text{-FLG} & \quad \text{PL} \quad 2000 \times 20 & \quad A &= 400.0 \\ & (400 - (16 \times 2.5) \times 2.0) \times 1.1 = 352.0 < 400.0 & \therefore A_n &= 352.0 \text{ cm}^2 \\ 4\text{-RIB} & \quad \text{PL} \quad 230 \times 22 & \quad A_r &= 202.4 \\ & (202.4 - 4 \times (2 \times 2.5) \times 2.2) \times 1.1 = 174.2 < 202.4 & \therefore A_{nr} &= 174.2 \text{ cm}^2 \\ \Sigma A_n &= A_n + A_{nr} = 352.0 + 174.2 = 526.2 \text{ cm}^2 \\ \Sigma t_n &= \sigma_{tmax} \times \Sigma A_g / \Sigma A_n = 36 \times 602.4 / 526.2 = 41 \text{ N/mm}^2 \\ & & & < \sigma_a = 210 \text{ N/mm}^2 \text{ OK} \end{aligned}$$

(e) 設計軸力

・母材 $P_t = 0.75 \sigma_{ta} \times A_n / 1.1 = 158 \times 35200 / 1.1 = 5040000 \text{ N}$
 $\quad > \sigma_{ta} \times A_n = 41 \times 35200 = 1450595 \text{ N}$
 $P_c = \sigma_c \times A_g = 158 \times 40000 = 6300000 \text{ N}$

・リブ $P_{tr} = 0.75 \sigma_{ta} \times A_{nr} / 1.1 = 158 \times 17424 / 1.1 = 2494800 \text{ N}$
 $\quad > \sigma_{tn} \times A_{nr} = 41 \times 17424 = 718045 \text{ N}$
 $P_{cr} = \sigma_c \times A_{gr} = 158 \times 20240 = 3187800 \text{ N}$

(f) 添接板必要断面積

・母材(片側) $A_{nR} = P_t / \sigma_a / 2 = 5040000 / 210 / 2 = 12000 \text{ mm}^2 = 120.0 \text{ cm}^2$
 $A_{gR} = P_c / \sigma_a / 2 = 6300000 / 210 / 2 = 15000 \text{ mm}^2 = 150.0 \text{ cm}^2$

・リブ $A_{nrR} = P_{tr} / \sigma_a = 2494800 / 210 = 11880 \text{ mm}^2 = 118.8 \text{ cm}^2$
 $A_{grR} = P_{cr} / \sigma_a = 3187800 / 210 = 15180 \text{ mm}^2 = 151.8 \text{ cm}^2$

(g) 必要ボルト本数

・母材 $n = P_c / (108000 \times 1.00) = 6300000 / 108000 = 58.3 \text{ 本 (64本使用)}$

・リブ $n_r = P_{cr} / (108000 \times 1.00) = 3187800 / 108000 = 29.5 \text{ 本 (4@8=32本使用)}$
 (高力ボルト S10T M22 2面許容摩擦力 $\rho_a = 108000 \text{ N}$ 無機ジंक $N_{max} = 4.4 \text{ 本}$)

(h) 添接板の照査

(SM490Y) 孔引き	Ans (cm ²)
1-SPL PL 2000×10 (200.0 - (16×2.5) × 1.0) × 1.1=176.0 < 200.0 ∴21.1	=AnR
=AgR	=AnR
1-SPL PL 145×16 (23.2 - (1×2.5) × 1.6) × 1.1=21.1 < 23.2 ∴21.1	
1-SPL PL 290×16 (46.4 - (3×2.5) × 1.6) × 1.1=37.8 < 46.4 ∴37.8	
1-SPL PL 285×16 (45.6 - (3×2.5) × 1.6) × 1.1=37.0 < 45.6 ∴37.0	
2-SPL PL 320×16 (102.4 - 2×(3×2.5) × 1.6) × 1.1=86.2 < 102.4 ∴86.2	
1-SPL PL 305×16 (48.8 - (3×2.5) × 1.6) × 1.1=40.5 < 48.8 ∴40.5	
266.4	222.6
>AgrR	>AnrR
8-SPL PL 165×19 (250.8 - 8×(2×2.5) × 1.9) × 1.1=192.3 < 250.8 ∴192.3	
>AgrR	>AnrR

(添付2) ウェブ方式 APOLLO SuperDesigner Splice 出力結果

(a) 作用応力度

$$1\text{-WEB} \quad \text{PL } 4500 \times 12 \quad A = 540.0 \text{ cm}^2 \quad (\text{SM490Y})$$

(b) 設計応力度

$$\sigma_U = 47 \text{ N/mm}^2 < \sigma_a \times 0.75 = 210 \times 0.75 = 158 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_L = -47 \text{ N/mm}^2 < \sigma_a \times 0.75 = 210 \times 0.75 = 158 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{Un} = 158 \times 47 / 47 = 158 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{Ln} = 158 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau = 24 \text{ N/mm}^2$$

(c) ボルト配置及び作用応力度

ボルト配置及び作用応力度を図3-6に示す。

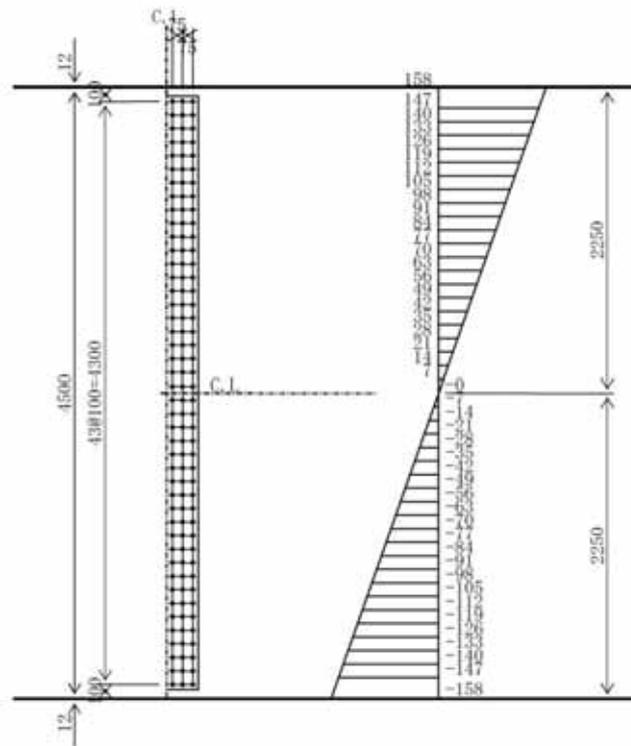


図3-6 ボルト配置及び作用応力度

(d) ボルトの応力度照査

44列目のボルト照査

$$\text{分担幅} \quad b_1 = 15.0 \text{ cm}$$

分担する力の合計

$$P_1 = 150 \times 12 \times (147 + 158) / 2 = 274050 \text{ N}$$

必要ボルト本数 (使用ボルト本数)

$$N_1 = 274050 / (108000 \times 1.00) = 2.5 \text{ 本} \quad (3 \text{ 本使用})$$

せん断力の照査

$$\rho s = \tau \times A / 132 = 24 \times 54000 / 132 = 9818 \text{ N} > \rho a = 108000 \text{ N}$$

合成応力の照査

$$\rho c44 = \sqrt{((274050/3)^2 + 9818^2)} = 91876 \text{ N} > \rho a = 108000 \text{ N}$$

(高力ボルト S10T M22 2面許容摩擦力 $\rho a = 108000 \text{ N}$ 無機ジンク $N_{\max} = 3$ 本)

(e) 添接板の照査

$$2\text{-SPL PL } 4380 \times 9 \text{ As} = 788.4 \text{ cm}^2 \text{ (SM490Y)}$$

$$\text{添接板の断面2次モーメント } I_s = 12604151 \text{ cm}^4 > I_w$$

$$\text{腹板の断面2次モーメント } I_w = 9112500 \text{ cm}^4$$

腹板の受持つ曲げモーメント

$$M_w = 158 \times 9112500 \times 10^4 / 2250 = 6379 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

添接板の曲げモーメント

$$\sigma_{sp} = 6379 \times 10^6 / (12604151 \times 10^4) \times 2190 = 111 \text{ N/mm}^2 < \sigma_a = 210 \text{ N/mm}^2$$

V-5-52 計算機プログラム (解析コード) の概要
• APOLLO SuperDesigner Ribcheck

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. APOLLO SuperDesigner Ribcheck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）APOLLO SuperDesigner Ribcheck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-2-10-2-2-1	防潮堤（鋼製防護壁）の耐震性についての計算書	Ver. 10.11.0.3
V-3-別添3-2-1-1	防潮堤（鋼製防護壁）の強度計算書	Ver. 10.11.0.3

2. 解析コードの概要

項目	コード名 APOLLO SuperDesigner Ribcheck
使用目的	鋼部材におけるリブの応力照査
開発機関	株式会社横河技術情報
開発時期	1996年
使用したバージョン	Ver. 10.11.0.3
コードの概要	本プログラムは、道路橋示方書（Ⅰ 共通編・Ⅱ 鋼橋編）・同解説（（社）日本道路協会，平成24年3月）（4.2.5）に準拠した縦リブの剛性照査及び横リブ断面指定及び剛性照査を行うものである。
検証（Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	<p>APOLLO SuperDesigner Ribcheck は、鋼製防護壁の外面鋼板の剛性確保のために設けられている縦リブについて、道路橋示方書の規定に則り、必要剛度を確保できているかの確認に使用している。</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"> ・ APOLLO SuperDesigner Ribcheck を用いて算出した縦リブの必要断面剛性と、道路橋示方書に規定されている必要剛性が一致していることを確認している。 ・ 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。 <p>【妥当性検証（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"> ・ 検証の内容の通り、道路橋示方書を満足するリブ剛性を確保できていることを照査できていることから、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。

3. APOLLO SuperDesigner Ribcheckの解析手法について

3.1 一般事項

APOLLO SuperDesigner Ribcheckは、「道路橋示方書（Ⅰ 共通編・Ⅱ 鋼橋編）・同解説（（社）日本道路協会，平成24年3月）（4.2.5）」に準拠した縦リブの剛性照査及び横リブ断面指定並びに剛性照査を行うプログラムである。

3.2 解析コードの特徴

APOLLO SuperDesigner Ribcheckの主な特徴を以下に示す。

- ・本プログラムでは，指定した縦リブ断面に対する断面剛性照査に加えて，横リブの断面指定の有無が選択可能であり，指定した横リブ断面における剛性照査や，必要剛性を満たす最小の横リブ断面の推定も可能である。

3.3 解析手法

補剛板の補剛材は，「道路橋示方書（Ⅰ 共通編・Ⅱ 鋼橋編）・同解説（（社）日本道路協会，平成24年3月）（4.2.5）」に準じて下記式を満たすものとする。

縦リブの必要断面積

$$A_{L_{req}} = b \times t / (10 \times n)$$

縦リブの必要剛度

$$I_{L_{req}} = b \times t^3 / 11 \times \gamma_{L_{req}}$$

縦リブの必要剛比及び横リブの必要剛度

($\alpha \leq \alpha_0$ かつ横リブの剛度が $I_{C_{req}}$ を満足する場合)

$$\gamma_{L_{req}} = 4\alpha^2 n \times (t_0/t)^2 \times (1+n \times \delta L) - (\alpha^2 + 1)^2 / n \quad (t \geq t_0)$$

$$\gamma_{L_{req}} = -4\alpha^2 n \times (1+n \times \delta L) - (\alpha^2 + 1)^2 / n \quad (t < t_0)$$

ここに，横リブの必要剛度は，

$$I_{C_{req}} = (b \times t^3 / 11) \times \{(1+n \times \gamma_{L_{req}}) / (4 \times \alpha^3)\}$$

(上記以外の場合)

$$\gamma_{L_{req}} = [\{2n^2 \times (t_0/t)^2 \times (1+n \times \delta L) - 1\}^2 - 1] / n \quad (t \geq t_0)$$

$$\gamma_{L_{req}} = [\{2n^2 \times (1+n \times \delta L) - 1\}^2 - 1] / n \quad (t < t_0)$$

ここで，

t : 補剛板の板厚 (mm)

b : 補剛板の全幅 (mm)

a : 横リブ間隔 (mm)

n : 縦リブによって区切られるパネル数

- α : 補剛板の縦横寸法比 (= a/b) (図3-1参照)
- α_0 : 限界縦横寸法比 ($\sqrt[4]{1+n\gamma L}$)
- δL : 縦リブ 1 個の断面積比 (AL/bt)
- γL : 縦リブの剛比 ($IL/(bt^3/11)$)
- t_0 : 板厚 (mm) (表3-1参照)
- 道路橋示方書 (I 共通編・II 鋼橋編) ・同解説 ((社) 日本道路協会, 平成24年3月) 表-4.2.6より
- f : 応力勾配による係数 (=1)
- AL : 縦リブ 1 本の断面積 (mm^2)
- IL : 縦リブ 1 本の断面二次モーメント (mm^4)
- Ic : 横リブ 1 本の断面二次モーメント (mm^4)

表3-1 板厚 t_0

鋼 種	SS400 SM400 SMA400W	SM490	SM490Y SM520 SMA490W	SM570 SMA570W
t_0	$\frac{b}{28fn}$	$\frac{b}{24fn}$	$\frac{b}{22fn}$	$\frac{b}{22fn}$

f : 4.2.4 に規定する応力勾配による係数

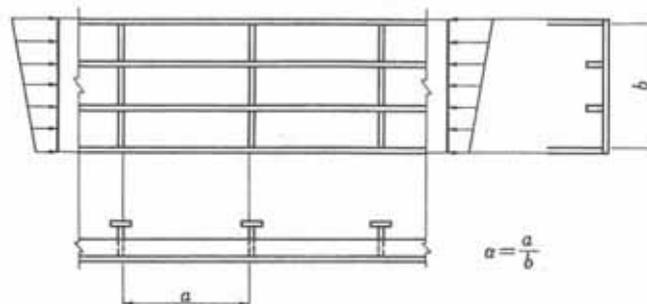


図3-1 補剛板の縦横寸法比 α

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。

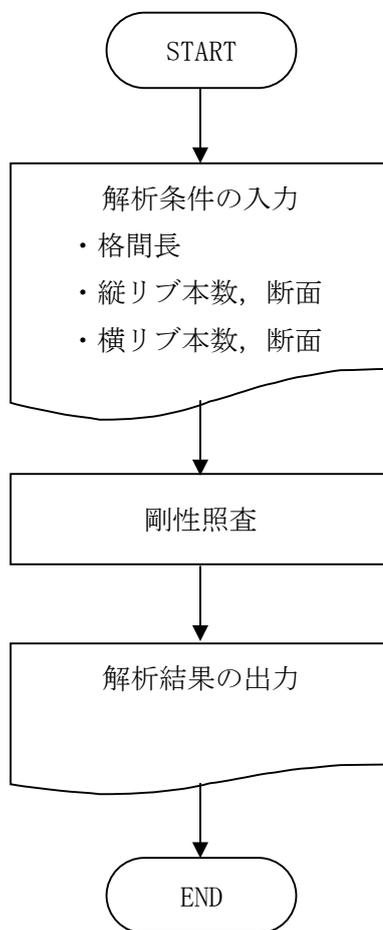


図3-2 解析フローチャート

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

a. 道路橋示方書の規定により算出した計算結果との比較による検証

1) 設計条件

設計条件を表3-2に示す。

表3-2 設計条件

		単位	
補剛板厚	t	mm	30
補剛板幅	b	mm	1460
横リブ間隔	a	mm	2800
縦リブによって区切られるパネル数	n		3
補剛板の縦横寸法比	α		1.918
限界縦横寸法比	α_0		3.239
縦リブ1個の断面比	δL		0.143
縦リブの剛比	γL		36.33
「道示Ⅱ・表-4.2.6」に示す板厚	t_0	mm	22.1
応力勾配による係数 (=1)	f		1
縦リブ1本の断面積	AL	mm ²	6250
縦リブ1本の断面二次モーメント	IL	mm ⁴	130208333
縦リブ断面幅	Br	mm	250
縦リブ断面板厚	tr	mm	25
補剛板材質			SM490Y

2) 剛度照査

$$A = 250 \times 25 = 6250 \text{ mm}^2$$

$$I = (25 \times 250^3) / 12 + (25 \times 250) \times (250/2)^2 = 130208333 \text{ mm}^4$$

$$\gamma = 130208333 / \{(1460 \times 30^3) / 11\} = 36.33$$

$$\alpha = 1.918, \alpha_0 = 3.239 \text{ より } \alpha \leq \alpha_0$$

$$t = 30\text{mm}, t_0 = 22.1\text{mm} \text{ より } t \geq t_0$$

従って、式(4.2.5)*より、

$$\begin{aligned} \gamma L_{\text{req}} &= 4 \times 1.918^2 \times 3 \times (22.1/30)^2 \times (1 + 3 \times 0.143) - (1.918^2 + 1)^2 / 3 \\ &= 26.976 < \gamma L_{\text{req}} = 36.33 \quad \text{OK} \end{aligned}$$

$$AL_{\text{req}} = 1460 \times 30 / (10 \times 3) = 1460 \text{ mm}^2 < AL = 6250 \text{ mm}^2 \quad \text{OK}$$

$$IL_{\text{req}} = 1460 \times 30^3 \times 26.976 / 11 = 96672175 \text{ mm}^4 < IL = 130208333 \text{ mm}^4 \quad \text{OK}$$

注記 * : 道路橋示方書 (Ⅰ 共通編・Ⅱ 鋼橋編) ・同解説 ((社) 日本道路協会, 平成24年3月) の式 (4.2.5) より

以下に添付する，APOLLO SuperDesigner Ribcheckの出力結果と一致することを確認しており，縦リブの剛性照査が正しく実行できていることが確認できる。

計算例と解析結果の比較を表3-3に示す。

表3-3 計算例と解析結果の比較

対 象		計算例	解析結果	比 率	
断面積	cm ²	AL	62.50	62.50	100%
	cm ²	AL _{req}	14.60	14.60	100%
剛度	cm ⁴	IL	13021	13021	100%
	cm ⁴	IL _{req}	9667	9667	100%
剛比	-	γL	36.33	36.33	100%
	-	γ_{req}	26.976	26.976	100%

b. 使用内容に対する妥当性

鋼製防護壁の外側鋼板の剛性確保のために設けられている縦リブの剛性照査に，APOLLO SuperDesigner Ribcheckを使用することは，次の通り本解析の適用範囲に対して検証されており，妥当である。

- ・検証の内容の通り，縦リブの必要断面積と必要剛度の照査の検証を行っていることから，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。

(添付) APOLLO SuperDesigner Ribcheck 出力結果

パネル長	: 2800 mm	横リブ本数	: 0 本	横リブ間隔 (a)	: 2800 mm
補剛板材質	: SM490Y	補剛板幅 (b)	: 1460 mm	補剛板厚 (t)	: 30 mm
縦リブ本数	: 2本	縦リブ高	: 250 mm	縦リブ厚	: 25 mm

$$\begin{aligned}AL &= 25.0 \times 2.5 = 62.50 \text{ cm}^2 & IL &= 25.0^3 \times 2.5 / 3 = 13021 \text{ cm}^4 \\ \delta L &= 62.5 / (146.0 \times 3.0) = 0.143 & \gamma L &= 13021 / (146.0 \times 3.0^3 / 11) = 36.33 \\ \alpha &= 280.00 / 146.0 = 1.918 & \alpha_0 &= \sqrt[4]{1 + 3 \times 36.33} = 3.239 \\ t_0 &= 146.0 / (22 \times 1.000 \times 3) = 2.21 \text{ cm} & t &= 3.0 \text{ cm}\end{aligned}$$

$\alpha \leq \alpha_0$, $t \geq t_0$, なので「道示Ⅱ・式 (4.2.5)」より

$$\begin{aligned}\gamma L_{\text{req}} &= 4 \times 1.918^2 \times 3 \times (2.2 / 3)^2 \times (1 + 3 \times 0.143) - (1.918^2 + 1)^2 / 3 = 26.976 \\ AL_{\text{req}} &= 146.0 \times 30 / (10 \times 3) = 14.60 \text{ cm}^2 < AL = 62.50 \text{ cm}^2 \\ IL_{\text{req}} &= 146.0 \times 30^3 \times 26.976 / 11 = 9667 \text{ cm}^4 < IL = 13021 \text{ cm}^4\end{aligned}$$

V-5-53 計算機プログラム（解析コード）の概要・ASHSD2-B

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）ASHSD2-B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及び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-1-2-2	原子炉圧力容器の脆性破壊防止に関する説明書	Ver. 0
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	Ver. 0
V-2-3-4-1-2	原子炉圧力容器の耐震性についての計算書（その1）	
（ V -2-3-4-1-2 に含める）	下部鏡板の耐震性についての計算書 給水ノズル（N4）の耐震性についての計算書 スカート耐震性についての計算書	Ver. 0
V-2-3-4-1-3	原子炉圧力容器の耐震性についての計算書（その2）	
（ V -2-3-4-1-3 に含める）	胴板の耐震性についての計算書 制御棒駆動機構ハウジング貫通部の耐震性についての計算書 再循環水出口ノズル（N1）の耐震性についての計算書 再循環水入口ノズル（N2）の耐震性についての計算書 主蒸気ノズル（N3）の耐震性についての計算書 炉心スプレイノズル（N5）の耐震性についての計算書 差圧検出・ほう酸水注入管ノズル（N10）の耐震性についての計算書 低圧注水ノズル（N17）の耐震性についての計算書 上鏡スプレイノズル（N6）の耐震性についての計算書 ベントノズル（N7）の耐震性についての計算書 ジェットポンプ計測管貫通部ノズル（N8）の耐震性についての計算書 計装ノズル（N11, N12, N16）の耐震性についての計算書 ドレンノズル（N15）の耐震性についての計算書	Ver. 0
V-3-3-1	原子炉圧力容器の強度計算書	
（V-3-3-1に 含める）	主フランジ，上部鏡板及びスタッドボルトの強度計算書 下部鏡板の強度計算書 制御棒駆動機構ハウジング貫通部の強度計算書 中性子計測ハウジング貫通部の強度計算書 再循環水出口ノズル（N1）の強度計算書 再循環水入口ノズル（N2）の強度計算書 主蒸気ノズル（N3）の強度計算書 給水ノズル（N4）の強度計算書 炉心スプレイノズル（N5）の強度計算書 上鏡スプレイノズル（N6）の強度計算書 ベントノズル（N7）の強度計算書 ジェットポンプ計測管貫通部ノズル（N8）の強度計算書 差圧検出・ほう酸水注入管ノズル（N10）の強度計算書 計装ノズル（N11, N12, N16）の強度計算書 ドレンノズル（N15）の強度計算書 低圧注水ノズル（N17）の強度計算書	Ver. 0
V-3-別添6-2	シュラウドサポートの応力計算書	Ver. 0

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	ASHSD2-B
使用目的	2次元有限要素法（軸対称モデル）による応力解析
開発機関	米国カリフォルニア大学及びバブコック日立（株）
開発時期	1979年
使用したバージョン	Ver. 0
コードの概要	<p>ASHSD2-B（以下「本解析コード」という。）は、原子炉圧力容器に対する評価を目的として、有限要素法により軸対称構造物の軸対称及び非軸対称荷重に対する応力を計算する汎用プログラムである。</p> <p>荷重条件としては、内圧、差圧、軸力等の軸対称荷重のほか、水平力、曲げモーメント等非軸対称荷重を扱うことができる。</p> <p>要素としてシェル要素、三角形要素及び四角形要素があり、任意の組合せで構造物をモデル化できる。</p> <p>熱応力計算に当たっては、温度分布解析用解析コード（TACF）の結果をファイルを介して自動的に取り込むことができる。</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>【検証（Verification）】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・内圧を受ける厚肉円筒の弾性解析と、理論解との比較を行い、解析解が理論解と一致することを確認している。 ・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。 <p>【妥当性確認（Validation）】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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。 ・本解析コードは、これまで多くの既工事計画で使用実績を有しており、妥当性は十分確認されている。

V-5-54 計算機プログラム（解析コード）の概要・T A C F

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）TACF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及び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-2-3-4-1-2	原子炉圧力容器の耐震性についての計算書（その1）	
（ V -2-3-4-1-2 に含める）	下部鏡板の耐震性についての計算書 給水ノズル（N4）の耐震性についての計算書 スカート耐震性についての計算書	Ver. 0
V-2-3-4-1-3	原子炉圧力容器の耐震性についての計算書（その2）	
（ V -2-3-4-1-3 に含める）	胴板の耐震性についての計算書 制御棒駆動機構ハウジング貫通部の耐震性についての計算書 再循環水出口ノズル（N1）の耐震性についての計算書 再循環水入口ノズル（N2）の耐震性についての計算書 主蒸気ノズル（N3）の耐震性についての計算書 炉心スプレイノズル（N5）の耐震性についての計算書 差圧検出・ほう酸水注入管ノズル（N10）の耐震性についての計算書 低圧注水ノズル（N17）の耐震性についての計算書 上鏡スプレイノズル（N6）の耐震性についての計算書 ベントノズル（N7）の耐震性についての計算書 ジェットポンプ計測管貫通部ノズル（N8）の耐震性についての計算書 計装ノズル（N11, N12, N16）の耐震性についての計算書 ドレンノズル（N15）の耐震性についての計算書	Ver. 0

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	T A C F
使用目的	2次元有限要素法（軸対称モデル）による応力解析
開発機関	バブコック日立(株)
開発時期	1982年
使用したバージョン	Ver. 0
コードの概要	<p>T A C F（以下「本解析コード」という。）は、原子炉圧力容器に対する評価を目的として、有限要素法により平面及び軸対称構造物の定常及び非定常温度分布を計算するプログラムである。</p> <p>温度分布計算は、領域を小さなメッシュに分割し、各メッシュについての熱平衡方程式をたて、定常問題は弛緩法*により、非定常問題は微小時間でステップ毎の温度分布を順次求める方法による。</p> <p>境界条件としては、強制対流熱伝達のほか、自然対流熱伝達、輻射熱伝達等の非線型熱伝達も扱うことができる。</p> <p>要素として三角形要素及び四角形要素があり、任意の組合せで構造物をモデル化できる。</p> <p>原子力の分野における使用実績を有している。</p> <p>*：エネルギー最小化原理に基づく解法の一つで反復法ともいう。 近似解を仮定し、それを修正する計算を反復することによって、真の解に収束させる手法である。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・平板の1次元熱伝導の温度分布解析と、理論解との比較を行い、解析解が理論解と一致することを確認している。 ・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。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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。 ・本解析コードは、これまで多くの既工事計画で使用実績を有しており、妥当性は十分確認されている。

V-5-55 計算機プログラム（解析コード）の概要・DORT

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）DORT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-1-2-2	原子炉圧力容器の脆性破壊防止に関する説明書	DOORS 3. 2 a 版DORT

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	D O R T
使用目的	遮蔽解析（原子炉圧力容器における中性子の放射線束分布解析）
開発機関	米国オークリッジ国立研究所
開発時期	1988年
使用したバージョン	DOORS 3. 2 a 版 D O R T
コードの概要	<p>D O R T（以下「本解析コード」という。）は、中性子及びガンマ線の物質中の挙動を評価することを目的として、2次元多群輸送方程式を離散座標 S_n 法で解く数値計算により米国オークリッジ国立研究所で開発された計算機プログラムである。</p> <p>本解析コードの計算モデルは、2次元形状（平板（$X-Y$体系）、円柱（$R-Z$体系、$R-\theta$体系））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。また、計算モデル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。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <ul style="list-style-type: none"> 2次元輸送計算コード D O R T と J E N D L - 3 . 3 の組合せによる計算値については、J N D C (Japanese Nuclear Data Committe) においてベンチマーク実験との比較検証*が実施されており、鉄、クロム、ナトリウム等の透過放射線測定において、計算値が実験値と一致することを確認している。 <p>注記 * : Yamano N. et al., Integral Test of JENDL-3.3 with Shielding Benchmarks, J. Nucl. Sci. Technol., Supplement 2, p. 841-846 (Aug. 2002)</p> <ul style="list-style-type: none"> 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。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <ul style="list-style-type: none"> 本解析コードは、原子力施設の遮蔽計算に広く用いられており、通常運転時の原子炉周り遮蔽計算等の豊富な実績がある。 本解析コードは、中性子及びガンマ線の放射線束、線量率及び発熱量を算出することができるコードであり、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評価が可能であり、本解析コードは原子炉圧力容器における中性子の放射線束分布解析に適用可能であることを確認している。

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-896 改5
提出年月日	平成30年10月2日

V-5-56 計算機プログラム（解析コード）の概要・SPAN2000

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）SPAN2000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-2-1-12-1	配管及び支持構造物の耐震計算について	

2. 解析コードの概要

項目	コード名 SPAN2000
使用目的	等分布質量連続はりモデルによる耐震最大支持間隔算出
開発機関	三菱重工業株式会社
開発時期	<input type="text"/>
使用したバージョン	<input type="text"/>
コードの概要	<p>SPAN2000（以下「本解析コード」という。）は、配管等の耐震設計に活用することを目的として三菱重工業株式会社が開発したものである。</p> <p>配管直管部（一般部）について、発生応力、固有振動数等が許容値や制限値を超えない範囲における最大長さを標準支持間隔として求めることが可能であり、加圧水型原子力発電設備において、多くの使用実績を有している。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>配管を等分布質量連続はりでモデル化し、許容値や制限値を超えない範囲における最大の支持間隔を求めるために使用している。</p> <p>【検証 (Verification)】</p> <ul style="list-style-type: none"> 等分布質量連続はりモデルによる配管直管部（一般部）の耐震最大支持間隔算出及びそれに発生する一次応力の算出について、入力データ <input type="text"/> に対する応力算出結果において、解析解と理論モデルによる理論解との比較を行い、解析解が理論解と一致することを確認している。また、固有振動数に関しても、上記検証において、解析解と理論解との比較を行い、解析解が理論解と一致することを確認している。 地震動の組合せ処理 <input type="text"/> <p><input type="text"/></p> <p>に関しては、本解析コード内で処理しており、アウトプットファイルと理論計算結果が一致していることを確認している。</p> <ul style="list-style-type: none"> 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。

<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"> 耐震最大支持間隔算出は、JEAG4601-1987の定ピッチスパン法に従い等分布質量連続はりにモデル化している。 本解析コードは、配管系で使用される要素形状のうち直管部の支持間隔の算出、発生応力の算出に用いられる。今回の工事計画認可申請で行う支持間隔算出、発生応力算出の用途、適用範囲が、上述の妥当性確認範囲内になることを確認している。 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。
--	---

V-5-57 計算機プログラム（解析コード）の概要・F U R S T

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）FURST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-2-3-3-1	燃料集合体の耐震性についての計算書	Ver.5

2. 解析コードの概要

コード名 項目	FURST
使用目的	弾性解析による被覆管応力解析
開発機関	ゼネラル・エレクトリック社
開発時期	1978年
使用したバージョン	Ver. 5
コードの概要	<p>FURST（以下「本解析コード」という。）は、ゼネラル・エレクトリック社により開発された被覆管応力解析コードである。</p> <p>本解析コードは、燃料被覆管温度、燃料棒内圧、炉心条件、燃料棒寸法及び許容応力の統計的分布を考慮し、被覆管の支持格子間及び支持格子接触部の応力評価をモンテカルロ法により統計的に実施する。地震時には、通常運転時及び過渡時に被覆管に発生する応力の他に、水平及び鉛直地震加速度により被覆管に発生する応力を考慮する。</p> <p>本解析コードは、高燃焼度8×8燃料、9×9燃料及びMOX燃料の設計・許認可に適用された実績がある。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</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"> ・被覆管の応力計算式(厚肉円筒)がコードに正しく組み込まれていることを別法計算により確認し、理論解と解析解が一致していることを確認している。 <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次のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・コード検討会等規制機関による確認^{*1,*2,*3}が実施されていることを確認している。

- 注記 *1：沸騰水型原子力発電所 燃料の設計手法について（平成10年2月 株式会社日立製作所 HLR-033訂1）
- *2：沸騰水型原子力発電所 燃料の設計手法について（平成10年1月 株式会社東芝 TLR-045改訂1）
- *3：原子炉安全基準専門部会報告書、発電用軽水型原子炉の燃料設計手法について（昭和63年5月12日 原子力安全委員会了承）

V-5-58 計算機プログラム（解析コード）の概要・BSPAN2

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）BSPAN2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-2-3-3-1	燃料集合体の耐震性についての計算書	Ver. 2.2

2. 解析コードの概要

項目	コード名 BSPAN2
使用目的	弾性解析による被覆管応力解析
開発機関	原子燃料工業株式会社
開発時期	2011年
使用したバージョン	Ver. 2.2 (Mar. 2017)
コードの概要	<p>BSPAN2 (以下「本解析コード」という。) は、原子燃料工業株式会社により開発された被覆管応力解析コードである。</p> <p>本解析コードは、軽水炉向け燃料棒について燃焼中に被覆管に発生する応力を評価し、応力設計比及び運転モードの変化により発生する応力振幅をモンテカルロ法により評価する解析コードBSPANに、耐震解析用の機能等を統合した改良コードである。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</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"> ・組み込み式は、実験値または文献等の根拠に基づくものであり、当該式の使用が適切であることを確認し、理論解と解析解が一致していることを確認している。 <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次のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・改良前のBSPANコードを電力合同プログラム点検にて確認している。 ・組み込み式が正しく反映されることを理論解と解析解が一致していることで確認している。 ・解析コードのバージョンアップ前後の比較により、燃料被覆管応力解析において既許認可の結果が再現することを確認している。

V-5-59 計算機プログラム（解析コード）の概要・S o i l P l u s

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）Soil Plus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-2-2-11	緊急時対策所建屋の耐震性についての計算書	2015 Build3
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	2015 Build3

2. 解析コードの概要

項目	コード名 Soil Plus
使用目的	地震応答解析及び応力解析
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	2005年
使用したバージョン	2015 Build3
コードの概要	<p>Soil Plus (以下「本解析コード」という。) は、2次元及び3次元の静的・浸透・耐震問題を考慮できる総合的な設計が可能な汎用解析コードである。</p> <p>本解析コードは、土木・建築分野に特化した要素群，材料非線形モデルを数多くサポートしていることが特徴で，日本国内では，建設部門を中心として，官公庁，大学，民間問わず，多くの利用実績がある。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>Soil Plusは，緊急時対策所建屋の杭の応力解析及び格納容器圧力逃がし装置格納槽の地震応答解析に使用している。</p> <p>【検証(Verification)】</p> <p>本解析コードの検証の内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードの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。 ・本工事計画において使用する2次元有限要素法による地震応答解析の検証として，実績ある解析コードと地震応答解析結果が一致することを確認している。 ・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。 <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"> ・九州電力玄海発電所3号機工事計画認可申請書の添付書類3(耐震性に関する説明書)において，海水管ダクト堅坑及び海水戻り管堅坑の地震応答解析及び応力解析に使用された実績がある。 ・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。 ・本工事計画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行われていないことを確認している。

	<ul style="list-style-type: none">・本工事計画において行う有限要素法による地震応答解析の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。
--	---

V-5-60 计算机プログラム（解析コード）の概要・SuperFLUSH/3D

目次

1.	はじめに	1
1.1	使用状況一覧	2
2.	SuperFLUSH/3D の概要	3
3.	SuperFLUSH/3Dの解析手法について	4
3.1	一般事項	4
3.2	計算機プログラムの特徴	4
3.3	解析手法	5

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（計算機プログラム）SuperFLUSH/3D について説明するものである。

本計算機プログラムを使用した添付書類を示す使用状況一覧、計算機プログラム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-2-11-2-14	サービス建屋の耐震性についての計算書	VER. 3.0A01

2. SuperFLUSH/3D の概要

項目	コード名 SuperFLUSH/3D
使用目的	群杭基礎の動的地盤ばねの算出
開発機関	構造計画研究所
開発時期	1995年
使用したバージョン	VER. 3. 0A01
コードの概要	SuperFLUSH/3D (以下「本解析コード」という。) は、3次元地盤－構造物連成系モデルの動的相互作用問題をサブストラクチャー法に基づいて解析するプログラムである。なお、本解析コードは、汎用解析コードである。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>本解析コードは、サービス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"> ・本解析コードを用いて評価した単杭もしくは群杭基礎の地盤ばねが公開文献*の結果と良い一致を示すことを確認している。 ・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。 <p>※入門・建物と地盤との動的相互作用, (社) 日本建築学会, pp. 174-175, 1996. 4, 第1版第1刷</p> <p>【妥当性確認(Validation)】</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"> ・検証の内容のとおり, 群杭基礎の地盤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。

3. SuperFLUSH/3Dの解析手法について

3.1 一般事項

SuperFLUSH/3Dは、3次元地盤－構造物連成系モデルの動的相互作用問題をサブストラクチャー法に基づいて解析するプログラムである。SuperFLUSH/3Dは、サービス建屋の地震応答解析を行う際に群杭基礎の地盤ばねの評価に使用している。

3.2 計算機プログラムの特徴

SuperFLUSH/3Dの主な特徴を以下に示す。

- ・地盤は3次元薄層要素法による成層自由地盤とする。
- ・杭配置は任意に設定できる。
- ・単杭もしくは群杭基礎の地盤ばねを算定できる。

3.3 解析手法

3.3.1 解析理論

水平成層な半無限地盤内に群杭が存在する場合を考える。群杭全体系の運動方程式は次式で表わされる。

$$\{P\} = [S] \{u\} \quad (\text{式-1})$$

$$[S] = [K_p] - [K_p^G] + [A(i\omega)]^{-1} - \omega^2([M_p] - [M_p^G]) \quad (\text{式-2})$$

ここで、

- $\{P\}$: 杭の任意節点における節点加振力ベクトル
- $\{u\}$: 杭の任意節点における節点変位ベクトル
- $[K_p]$: 杭の剛性マトリックス
- $[M_p]$: 杭の質量マトリックス
- $[K_p^G]$: 杭と同体積土柱の排土剛性マトリックス
- $[M_p^G]$: 杭と同体積土柱の排土質量マトリックス
- $[A(i\omega)]$: 杭間の連成効果を表す影響係数マトリックス
- ω : 加振円振動数

座標系と節点自由度を図3-1に示す。

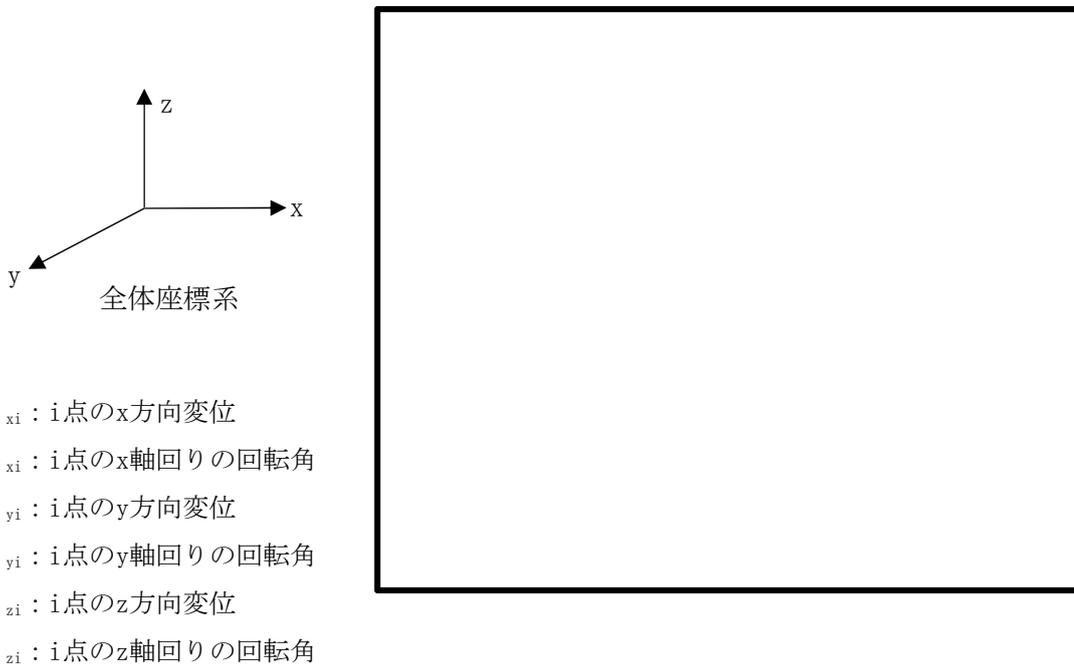


図3-1 座標系と節点自由度

3.3.2 解析フローチャート

解析フローチャートを図2-2に示す。

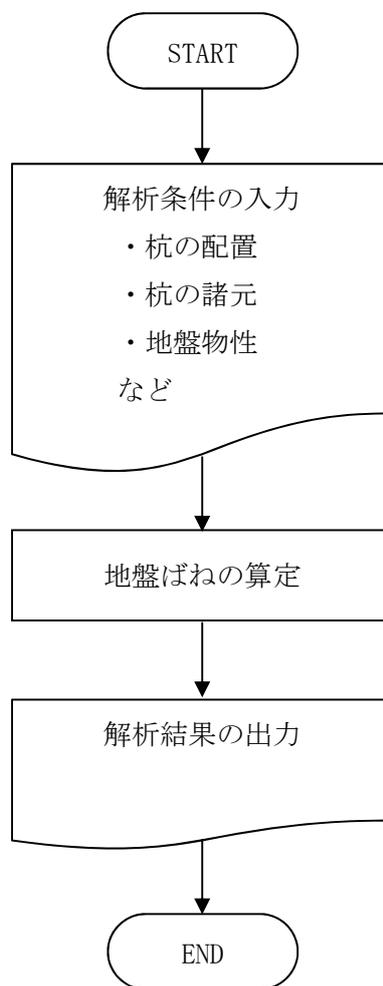


図2-2 解析フローチャート

3.3.3 検証(Verification)及び妥当性確認(Validation)

a. 文献との比較による検証

公開文献*に記載されている図3-3に示す単杭もしくは群杭基礎の地盤ばねの評価結果を再現し、公開論文に記載されている結果との比較を行う。

地盤ばねの比較結果を図3-4に示す。

図より、SuperFLUSH/3Dの結果は公開論文に記載されている結果と良い一致を示しており、SuperFLUSH/3Dが単杭もしくは群杭基礎の地盤ばねを正しく評価していることが確認できる。

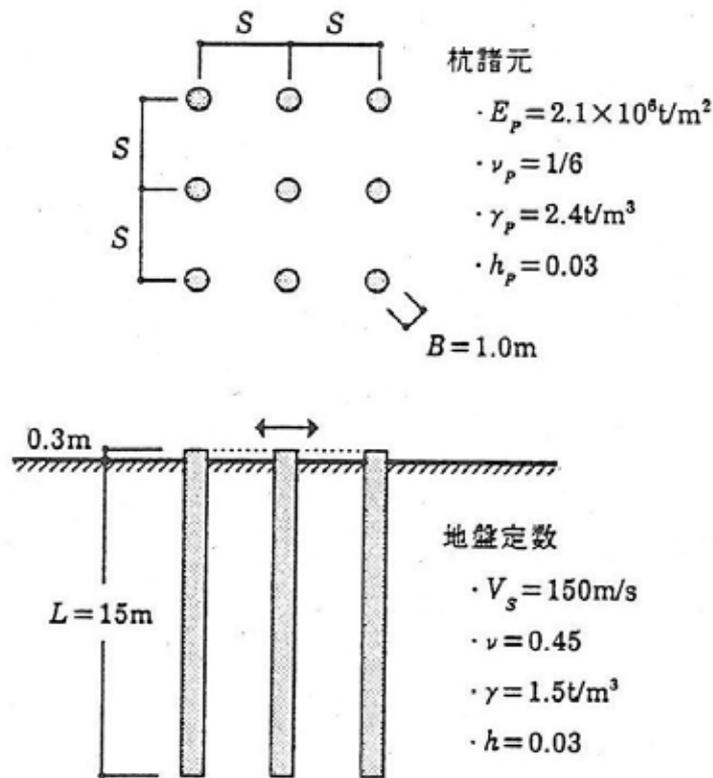
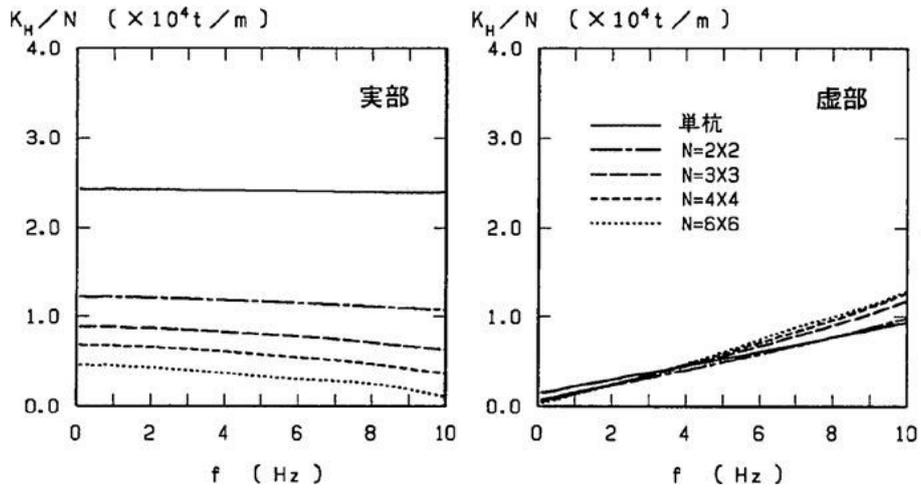
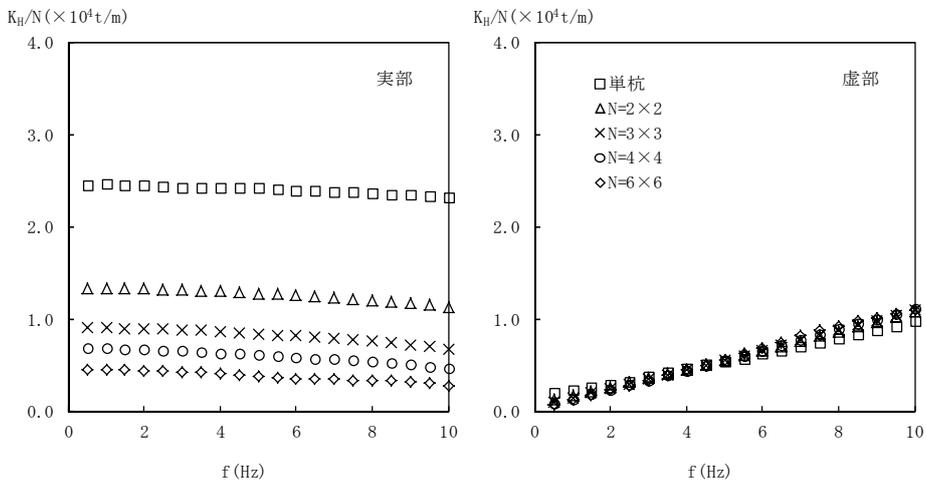


図3-3 解析モデル及び解析諸元

注記 * : 入門・建物と地盤との動的相互作用, (社)日本建築学会, pp.174-175, 1996.4, 第1版第1刷



(a) 公開文献



(b) SuperFLUSH/3D

図3-4 解析結果の比較

b. 使用内容に対する妥当性

サービス建屋の地震応答解析における地盤ばねの算定にSuperFLUSH/3D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されており、妥当である。

- ・ 検証の内容のとおり、群杭基礎の地盤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。

V-5-61 计算机プログラム（解析コード）の概要・m i d a s i G e n

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）`midas iGen`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-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	860

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	midas iGen
使用目的	3次元はりモデルによる静的線形解析（竜巻影響評価）
開発機関	MIDAS IT
開発時期	1990年代前半
使用したバージョン	Ver. 860
コードの概要	midas iGenは、任意形状構造物について、構造解析（静的解析，静的増分解析，免振・制振解析及び固有値解析等）を行うプログラムである。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>midas iGen Ver. 860は、原子炉建屋の鉄骨造躯体の3次元はりモデルによる静的線形解析（竜巻影響評価）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とおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・2層1スパンラーメンのモデルを対象に、midas iGenによる解析結果と、別計算機コード「汎用3次元構造解析コード(MSC NASTRAN Ver. 2016)（以下、「NASTRAN」という。）」による解析結果を比較し、両者の解析結果の差異が1%以下であり十分小さく、許容範囲内であることを確認している。 <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、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、国内外の主に建築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。 ・旧バージョン（ver. 810）が、九州電力株式会社川内原子力発電所1号機の工事計画認可申請書添付資料3において、海水ポンプエリア防護壁の地震応答解析に使用された実績があり、その後のバージョンの変更においては、本解析の使用範囲の結果に影響の無い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、本解析コードの適正な用途適用範囲を確認している。 ・今回の工事計画認可申請で行う3次元はりモデルによる静的線形解析の用途、適用範囲が上述の妥当性確認範囲内にあることを確認している。

V-5-62 計算機プログラム（解析コード）の概要
・Seismic Analysis System (S A S)

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）SAS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-2-1-7	設計用床応答曲線の作成方針	6.1.0

2. 解析コードの概要

項目	コード名	Seismic Analysis System (S A S)
使用目的		設計用床応答曲線の作成
開発機関		日立GEニュークリア・エナジー株式会社
開発時期		2009年
使用したバージョン		Ver6.1.0
コードの概要		<p>Seismic Analysis System (S A S) (以下「本解析コード」という。)は、耐震設計に使用する条件を作成することを目的に、地震波時刻歴データの波形書式の変換機能、地震波時刻歴データから床応答スペクトルを計算する機能、応答分布図や振動モード図の作成機能など、耐震解析用の計算機プログラムを統合したシステムである。このうち床応答スペクトル作成機能を、建屋床応答時刻歴から設計用床応答曲線を作成するために使用する。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)		<p>【検証 (Verification)】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・別解析コードDYNA2Eによる床応答スペクトルと本解析コードで作成した床応答スペクトルを比較し、一致していることを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、動作環境を満足する計算機にインストールして用いていることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・今回の工事計画認可申請で使用する機能は床応答スペクトルの作成機能であるため、同一の入力条件に対する1自由度系の最大応答加速度を固有周期毎に算定し、別解析コードDYNA2Eと本解析コードの結果を比較することで、妥当性を確認している。 ・設計用床応答曲線を作成する際、入力とする時刻歴データの時間刻み幅、データの形式は、上述の妥当性を確認している範囲内での使用であることを確認している。 ・10%拡幅、時刻歴波の時間刻み、固有周期計算間隔はJ E A G 4 6 0 1 -1987に従っており、妥当性に問題はない。 ・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。 ・今回の工事計画認可申請における加速度応答スペクトル、時刻歴データに対し、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。

V-5-63 計算機プログラム（解析コード）の概要

・ F i r e D y n a m i c s T o o l s (F D T s)

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）Fire Dynamics Tools (FDTs) 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-1-1-7	発電用原子炉施設の火災防護に関する説明書	Version 1805.1

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	Fire Dynamics Tools (FDTs)
使用目的	火炎の高さ，火炎プルーム，輻射及び高温ガス層の各影響範囲（ZOI）の算出
開発機関	米国NRC
開発時期	2004年
使用したバージョン	Version 1805.1 (SI Units)
コードの概要	米国NRC（原子力規制委員会）によって開発された，フリーソフトウェアとして公開されている火災力学ツールであり，火災力学の理論式が表計算ソフト（Excel）に組み込まれたものである。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・Fire Dynamics Tools (FDTs)（以下「本解析コード」という。）による算出結果は，米国NRCにより，室内火災の実験結果との比較により，実証（NUREG-1824*¹）されており，また，火災実証試験の結果と本解析コードにより簡易に算出された高温ガス温度を比較することで再現されていることを確認している。 ・本解析コードの使用に当たって，ダウンロードした際に不具合が発生していないことを確認するため，ダウンロードする計算機ごとに，NUREG-1805 Supplement1, Vol 1に示されるExample Problemの入力パラメータを本解析コード（表計算ソフト）に入力し，評価結果がExample Problemと一致することを確認している。 ・本解析コードは理論式が表計算ソフト（Excel）に組み込まれたツールであり，表計算ソフトの計算シートは，あらかじめ入力指定されているセル以外のセルの変更ができないよう，パスワードにより保護されている。 ・なお，本解析コードは，表計算ソフトが使用可能なすべての計算機で解析可能であり，開発機関が開発時に使用したバージョン以上の表計算ソフトをインストールした計算機にて解析を実施している。

	<p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・「原子力発電所の内部火災影響評価ガイド」(以下「ガイド」という。)では、火炎の高さ、火炎プルーム、輻射及び高温ガス層のZOIの算出に本解析コードを使用することが明記されており、本解析コードの適用に当たっては、NUREG-1805*²における火炎の高さ、火炎プルーム、輻射及び高温ガス層の火災影響ごとに記載される使用上の考慮 (Assumptions and Limitations) や、潤滑油等の漏えい火災の燃焼面積の算出方法等のガイドに記載されている評価手順を参照して、適切なパラメータの入力を実施することで、火炎の高さ、火炎プルーム、輻射及び高温ガス層のZOIを算出していることから、今回の解析に適用することは妥当である。 ・本解析コードによる算出結果は、米国NRCによって室内火災の実験試験との比較により、妥当性が実証 (NUREG-1824*¹) されており、また、火災実証試験の結果と本解析コードにより簡易に算出された高温ガス温度を比較することで再現されていることを確認している。 ・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。 ・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、火炎の高さ、火炎プルーム、輻射及び高温ガス層の各影響範囲 (ZOI) の算出の使用目的に対し、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。
--	---

注記 *1 : NUREG-1824 : Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications

*2 : NUREG-1805 : Fire Dynamics Tools (FDTs)