

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	補足-440-1 改 15
提出年月日	平成 30 年 8 月 10 日

工事計画に係る補足説明資料

補足-440-1 【竜巻への配慮が必要な施設の強度に関する説明書 の全般の補足説明】

平成 30 年 8 月

日本原子力発電株式会社

補足説明資料目次

I. はじめに

1. 強度計算の方針に関する補足説明資料
 - 1.1 風力係数について
 - 1.2 強度計算時の施設の代表性について
 - 1.3 換気空調設備の竜巻の影響を考慮する施設について
 - 1.4 構造強度評価における評価対象部位の選定について

2. 竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算に関する補足説明資料
 - 2.1 鉄筋コンクリート部材の裏面剥離評価方法について
 - 2.2 コンクリートの裏面剥離に対する設備対策の評価手法について
 - 2.3 原子炉建屋大物搬入口扉の貫通評価について
 - 2.4 ブローアウトパネル開口部から侵入する風に対する対応方針について
 - 2.5 原子炉建屋外側ブローアウトパネルの飛び出し挙動について
 - 2.6 使用済燃料乾式貯蔵建屋の使用済燃料乾式貯蔵容器冷却性能について
 - 2.7 使用済燃料乾式貯蔵建屋壁面への車両の衝突影響について
 - 2.8 飛来物として設定する車両の設定について
 - 2.9 鉄筋コンクリートの衝突解析モデルにおける破断限界の設定について
 - 2.10 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブ変形評価の許容値の設定について
 - 2.11 車両衝突時における使用済燃料乾式貯蔵建屋内壁ライナの挙動について
 - 2.12 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブの貫通及び裏面剥離評価について
 - 2.13 鉄筋コンクリート部材の貫通評価及び裏面剥離評価について

3. 海水ストレーナの強度計算に関する補足説明資料
 - 3.1 海水ストレーナの評価対象部位について

4. 屋外の重大事故等対処設備の固縛装置の強度計算に関する補足説明資料
 - 4.1 固縛装置の設計における保守性について
 - 4.2 固縛装置の設計における設備の代表性について
 - 4.3 屋外の重大事故等対処設備の収納ラックに対する固縛対応について

5. 主排気筒の強度計算に関する補足説明資料
 - 5.1 竜巻飛来物による構造欠損の想定箇所について
 - 5.2 起因事象を竜巻とした場合の主排気筒に求められる機能について

6. ディーゼル発電機吸気口の強度計算に関する補足説明資料
 - 6.1 ディーゼル発電機吸気口の局部ばね定数及び局部応力の算出について

7. 防護対策施設の強度計算に関する補足説明資料
 - 7.1 シャックルの許容限界について
 - 7.2 飛来物のオフセット衝突の影響について
 - 7.3 金網の設計裕度の考え方
 - 7.4 ワイヤロープの変形を考慮したネットシステムのたわみについて
 - 7.5 ワイヤロープの初期張力について
 - 7.6 補助金網の影響について
 - 7.7 防護対策施設の設計の考え方について
 - 7.8 防護鋼板及び架構の解析手法の保守性について

8. 排気管，放出管及びベント管の強度計算に関する補足説明資料
 - 8.1 ディーゼル発電機排気管の許容応力について

: 今回ご説明分

I. はじめに

1. 概要

本補足説明資料は、以下の説明書についての内容を補足するものである。
本補足説明資料と添付書類との関連を表-1に示す。

- ・ V-3-別添 1 竜巻への配慮が必要な施設の強度に関する説明書

表-1 補足説明資料と添付資料との関連 (1/5)

工事計画添付書類に係わる補足説明資料 (竜巻)		該当添付資料
1.	強度計算の方針に関する補足説明資料	
1.1	風力係数について	<p>V-3-別添 1-1-2 「残留熱除去系海水系ポンプの強度計算書」</p> <p>V-3-別添 1-1-3 「残留熱除去系海水系ストレーナの強度計算書」</p> <p>V-3-別添 1-1-4 「主排気筒の強度計算書」</p> <p>V-3-別添 1-1-5 「換気空調設備の強度計算書」</p> <p>V-3-別添 1-1-6 「ディーゼル発電機海水ポンプの強度計算書」</p> <p>V-3-別添 1-1-7 「ディーゼル発電機海水ストレーナの強度計算書」</p> <p>V-3-別添 1-1-8 「ディーゼル発電機吸気口の強度計算書」</p> <p>V-3-別添 1-1-9 「配管および弁の強度計算書」</p> <p>V-3-別添 1-1-10-2 「消音器の強度計算書」</p> <p>V-3-別添 1-1-10-3 「排気管、放出管およびベント管の強度計算書」</p>
1.2	強度計算時の施設の代表性について	<p>V-3-別添 1-1-2 「残留熱除去系海水系ポンプの強度計算書」</p> <p>V-3-別添 1-1-3 「残留熱除去系海水系ストレーナの強度計算書」</p> <p>V-3-別添 1-1-5 「換気空調設備の強度計算書」</p> <p>V-3-別添 1-1-6 「ディーゼル発電機用海水ポンプの強度計算書」</p> <p>V-3-別添 1-1-7 「ディーゼル発電機用海水ストレーナの強度計算書」</p> <p>V-3-別添 1-1-8 「ディーゼル発電機吸気口の強度計算書」</p> <p>V-3-別添 1-1-9 「配管および弁の強度計算書」</p> <p>V-3-別添 1-1-10-3 「排気管、放出管およびベント管の強度計算書」</p>
1.3	換気空調設備の竜巻の影響を考慮する施設について	<p>V-3-別添 1-1-5 「換気空調設備の強度計算書」</p>

表一1 補足説明資料と添付資料との関連 (2/5)

<p>工事計画添付書類に係わる補足説明資料 (竜巻)</p>	<p>該当添付資料</p>
<p>1.4 構造強度評価における評価対象部位の選定について</p>	<p>V-3-別添 1-1-2 「残留熱除去系海水系ポンプの強度計算書」 V-3-別添 1-1-3 「残留熱除去系海水系ストレーナの強度計算書」 V-3-別添 1-1-4 「主排気筒の強度計算書」 V-3-別添 1-1-5 「換気空調設備の強度計算書」 V-3-別添 1-1-6 「ディーゼル発電機海水ポンプの強度計算書」 V-3-別添 1-1-7 「ディーゼル発電機海水ストレーナの強度計算書」 V-3-別添 1-1-8 「ディーゼル発電機吸気口の強度計算書」 V-3-別添 1-1-9 「配管および弁の強度計算書」 V-3-別添 1-1-10-2 「消音器の強度計算書」 V-3-別添 1-1-10-3 「排気管、放出管およびベント管の強度計算書」</p>
<p>2. 竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算に関する補足説明資料</p> <p>2.1 鉄筋コンクリート部材の裏面剥離評価方法について</p> <p>2.2 コンクリートの裏面剥離に対する設備対策の評価手法について</p> <p>2.3 原子炉建屋大物搬入口扉の貫通評価について</p> <p>2.4 ブローアウトパネル開口部から侵入する風に対する対応方針について</p> <p>2.5 原子炉建屋外側ブローアウトパネルの飛び出し挙動について</p>	<p>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」</p>

表一1 補足説明資料と添付資料との関連 (3/5)

工事計画添付書類に係わる補足説明資料（竜巻）	該当添付資料
2.6 使用済燃料乾式貯蔵建屋の使用済燃料乾式貯蔵容器冷却性能について	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」
2.7 使用済燃料乾式貯蔵建屋壁面への車両の衝突影響について	
2.8 飛来物として設定する車両の設定について	
2.9 鉄筋コンクリートの衝突解析モデルにおける破断限界の設定について	
2.10 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブ変形評価の許容値の設定について	
2.11 車両衝突時における使用済燃料乾式貯蔵建屋内壁ライナの挙動について	
2.12 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブの貫通及び裏面剥離評価について	
2.13 鉄筋コンクリート部材の貫通評価及び裏面剥離評価について	

表-1 補足説明資料と添付資料との関連 (4/5)

工事計画添付書類に係わる補足説明資料 (竜巻)		該当添付資料
3.	海水ストレーナの強度計算に関する補足説明資料	
3.1	海水ストレーナの評価対象部位について	V-3-別添 1-1-3 「残留熱除去系海水系ストレーナの強度計算書」 V-3-別添 1-1-7 「ディーゼル発電機海水ストレーナの強度計算書」
4.	屋外の重大事故等対処設備の固縛装置の強度計算に関する補足説明資料	
4.1	固縛装置の設計における保守性について	
4.2	固縛装置の設計における設備の代表性について	V-3-別添 1-3 「屋外重大事故等対処設備の固縛装置の強度計算の方針」 V-3-別添 1-3-1 「屋外重大事故等対処設備の固縛装置の強度計算書」
4.3	屋外の重大事故等対処設備の収納ラックに対する固縛対応について	
5.	主排気筒の強度計算に関する補足説明資料	
5.1	竜巻飛来物による構造欠損の想定箇所について	
5.2	起因事象を竜巻とした場合の主排気筒に求められる機能について	V-3-別添 1-1-4 「主排気筒の強度計算書」
6.	ディーゼル発電機吸気口の強度計算に関する補足説明資料	
6.1	ディーゼル発電機吸気口の局部ばね定数及び局部応力の算出について	V-3-別添 1-1-8 「ディーゼル発電機吸気口の強度計算書」

表-1 補足説明資料と添付資料との関連 (5/5)

工事計画添付書類に係わる補足説明資料 (竜巻)	該当添付資料
7. 防護対策施設の強度計算に関する補足説明資料	
7.1 シヤックルの許容限界について	
7.2 飛来物のオフセット衝突の影響について	
7.3 金網の設計裕度の考え方	
7.4 ワイヤロープの変形を考慮したネットシステムのためについて	V-3-別添 1-2-1-1 「防護ネットの強度計算書」
7.5 ワイヤロープの初期張力について	V-3-別添 1-2-1-2 「防護鋼板の強度計算書」
7.6 補助金網の影響について	V-3-別添 1-2-1-3 「架構の強度計算書」
7.7 防護対策施設の設計の考え方について	
7.8 防護鋼板及び架構の解析手法の保守性について	
8. 排気管、放出管及びベント管の強度計算に関する補足説明資料	
8.1 デイジーゼル発電機排気管の許容応力について	V-3-別添 1-1-10-3 「排気管、放出管及びベント管の強度計算書」

(空白)

5.2 起因事象を竜巻とした場合の主排気筒に求められる機能について

竜巻影響評価においては、設計荷重に対し、設計対象施設の構造健全性等が維持され、安全機能が維持されることを確認することとされている。

「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」（以下、「設置許可基準規則」という。）において、「安全機能」は次のように定義されている。

- 五 「安全機能」とは、発電用原子炉施設の安全性を確保するために必要な機能であって、次に掲げるものをいう。
- イ その機能の喪失により発電用原子炉施設に運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故が発生し、これにより公衆又は従事者に放射線障害を及ぼすおそれがある機能
 - ロ 発電用原子炉施設の運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故の拡大を防止し、又は速やかにその事故を収束させることにより、公衆又は従事者に及ぼすおそれがある放射線障害を防止し、及び放射性物質が発電用原子炉を設置する工場又は事業所外へ放出されることを抑制し、又は防止する機能

ここで、主排気筒の有する安全機能、つまり放射性物質の放出低減機能は、「発電用原子炉施設の運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故の拡大を防止し、又は速やかにその事故を収束させることにより、公衆又は従事者に及ぼすおそれがある放射線障害を防止し、及び放射性物質が発電用原子炉を設置する工場又は事業所外へ放出されることを抑制し、又は防止する機能」に該当する。

しかしながら、竜巻を起因として放射性物質の放出を伴う事象が発生することはないことから、竜巻影響評価においては、主排気筒に求められる安全機能要求はないと判断している。（表 1-1 参照）また、主排気筒に損傷が確認された場合は、安全上支障の無い期間に損傷箇所の補修を行うこととする。

なお、設置許可基準規則の安全機能には該当しないが、通常時（プラント停止時含む）においても、気体廃棄物等を主排気筒から高所放出していることから、通常時において損傷した主排気筒から放出した場合の被ばくを評価した結果を表 1-2 に示す。実際には、主排気筒に損傷が認められた場合にはプラントを停止し速やかに補修を行うため、被ばく量に対する影響はほとんどないが、本評価においては、保守的な設定（プラントが通常運転を継続し、かつ補修に時間を要する）を用いた場合においても、通常時における線量目標値を満足することを確認した。

以 上

表 1-1 設計基準事故（環境への放射性物質の異常な放出を伴う事象）に関する竜巻による影響

設計基準事故(環境への放射性物質の異常な放出を伴う事象)	事象の概要	評価結果
放射性気体廃棄物処理施設の破損	放射性気体廃棄物施設の一部が破損し、貯留されていた気体状の放射性物質環境に放出される。	放射性気体廃棄物処理設備である活性炭式希ガスホルドアップ装置、隔離弁等は原子炉建屋及びタービン建屋内にあり、竜巻により破損することはない。
燃料集合体の落下	燃料交換時に燃料集合体が落下して破損し、放射性物質が環境に放出される。	使用済燃料プールがある原子炉建屋原子炉棟には、有意な飛来物は侵入しない。また、竜巻準備体制発令時は燃料交換作業を中止する運用とする。したがって、竜巻により燃料集合体が落下・破損することはない。
原子炉冷却材喪失	原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する配管あるいはこれに付随する機器等の破損等により、冷却材が系外に流出する。	原子炉冷却材圧力バウンダリは原子炉格納容器内及び原子炉建屋原子炉等内にあり、竜巻により破損することはない。
制御棒落下	制御棒駆動機構あるいは同ハウジングの損傷等により制御棒が炉心外に落下し、冷却材が系外に流出する。	制御棒駆動機構あるいは同ハウジングは原子炉格納容器内にあり、竜巻により破損することはない。

表 1-2 通常時（プラント停止時含む）における主排気筒破損時の被ばく評価結果

被ばく経路	主排気筒破損時の 1年間の累積線量* (μ Sv/y)	主排気筒健全時の 1年間の累積線量 (μ Sv/y)	目標値 (μ Sv/y)
希ガス	約 10	約 2.8	—
よう素	約 24	約 0.4	—
液体（よう素除く）	約 5.2	約 5.2	—
合計	約 39	約 8.4	50

注記* 評価条件は以下のとおり。

- ・実際には、筒身に損傷が認められた場合にはプラントを停止し速やかに補修を行うが、本評価においては、プラントが通常運転を1年間継続すると保守的に仮定した。
- ・補修に必要な期間として、筒身に想定される局所的な損傷モード（貫通）に対しては保守的と考えられる6ヶ月を想定し、補修完了までの6ヶ月を地上放出、補修完了後の6ヶ月を高所放出とした。
- ・地上放出は放出源有効高さ0mとし、気象データは地上観測データとした。
- ・その他の条件は、設置変更許可申請（平成26年5月20日）と同じとした。

7.8 防護鋼板及び架構の解析手法の保守性について

1. 概要

本資料は、V-3-別添1「竜巻への配慮が必要な施設の強度に関する説明書」のうち、V-3-別添1-2-1-2「防護鋼板の強度計算書」及びV-3-別添1-2-1-3「架構の強度計算書」に関する補足説明資料である。

防護鋼板及び架構を構成する鋼製部材については、それぞれV-3-別添1-2-1-2及びV-3-別添1-2-1-3において3次元FEMモデルを用いた飛来物衝突評価を実施しており、これらの評価における鋼材の動的物性値の設定は、電力中央研究所報告「竜巻飛来物を模擬した重錘の鋼板上への自由落下衝突試験による鋼板貫通評価手法の提案（研究報告：N15004）」（以下、電中研報告という）において実施している重錘の自由落下衝突試験のための事前解析の解析手法を参考に実施している。

本資料においては、上述の動的物性値の設定手法について示すとともに、参照した電中研報告における解析手法（以下、電中研解析手法という）が重錘の自由落下衝突試験結果と整合していること、及び当社の設定条件が電中研報告の試験結果に対し保守性を有していることについて記載する。

設定条件の保守性に係る評価フローを図1-1に示す。

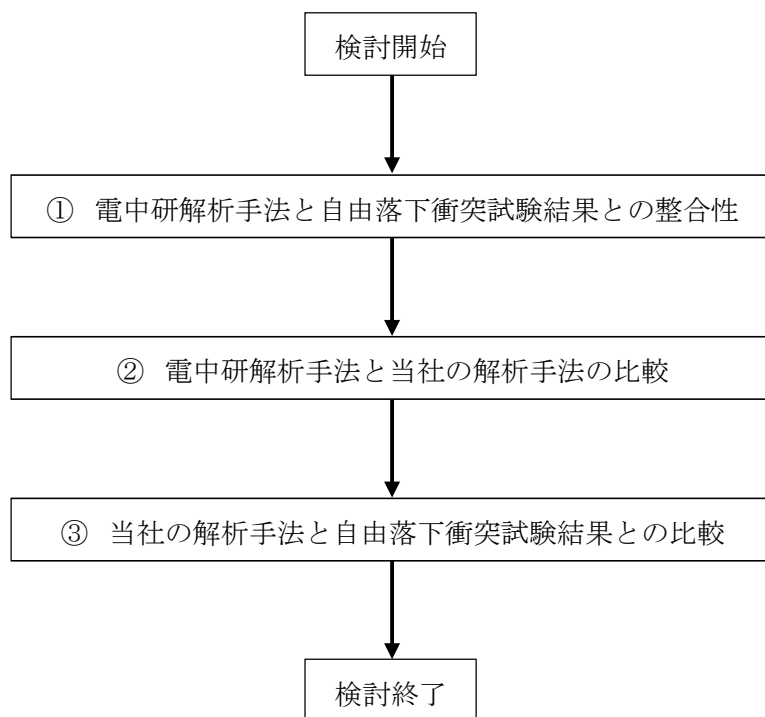


図 1-1 防護鋼板解析手法の保守性に関する評価フロー

2. 動的物性値の選定手法

飛来物の衝突に対する解析は、変形速度が大きいいためひずみ速度効果を考慮することとし、以下に示す Cowper-Symonds の式を適用している。

$$\sigma_{eq} = (A + B\varepsilon_{pl}^n) \left\{ 1 + (\dot{\varepsilon}_{pl}/D)^{1/q} \right\}$$

ここで、 σ_{eq} は動的応力、Aは降伏応力、Bは硬化係数、 ε_{pl} は相当塑性ひずみ、 $\dot{\varepsilon}_{pl}$ は無次元相当塑性ひずみ速度、nは硬化指数、D及びqはひずみ速度係数を表す。これらのパラメータは、日本溶接協会の動的物性の推定式（WES 式）にフィッティングする様に選定した。

以下に、**防護鋼板を例として**、選定したパラメータ（表 2-1 参照）とその選定方法を示す。

表 2-1 Cowper-Symonds 式へ入力するパラメータ（防護鋼板）

	防護鋼板
材料	SM490
B	
n	
D (s ⁻¹)	
q	

降伏応力及び引張強さに関する WES 式は以下のとおり。

$$\sigma_Y = \sigma_{Y0}(T_0) \cdot \exp \left[8 \times 10^{-4} \cdot T_0 \cdot \left(\frac{\sigma_{Y0}(T_0)}{E} \right)^{-1.5} \cdot \left\{ \frac{1}{T \cdot \ln(10^8/\dot{\varepsilon})} - \frac{1}{T_0 \cdot \ln(10^8/\dot{\varepsilon}_0)} \right\} \right]$$

$$\sigma_T = \sigma_{T0}(T_0) \cdot \exp \left[8 \times 10^{-4} \cdot T_0 \cdot \left(\frac{\sigma_{T0}(T_0)}{E} \right)^{-1.5} \cdot \left\{ \frac{1}{T \cdot \ln(10^9/\dot{\varepsilon})} - \frac{1}{T_0 \cdot \ln(10^9/\dot{\varepsilon}_0)} \right\} \right]$$

ここで、 σ_Y 、 σ_{Y0} は降伏応力、 σ_T 、 σ_{T0} は引張強さ、T、 T_0 は温度、 $\dot{\varepsilon}$ 、 $\dot{\varepsilon}_0$ はひずみ速度、Eはヤング係数を示す。

鋼製部材の動的物性値を選定するにあたり、以下の項目を考慮した。

- (1) 貫通評価における許容値は破断ひずみとしていることから、Cowper-Symonds 式により算出した引張強さが WES 式で算出した値にフィッティングする様、パラメータを適切に設定した。
- (2) (1)と併せて、電中研報告書では、ひずみ速度 10 s⁻¹ 近傍において、Cowper-Symonds 式で算出した引張強さが WES 式で算出したものよりも小さくなるように設定し、貫通評価に対して保守的になるように配慮していることを参考に、ここではひずみ速度 0.1~100 s⁻¹ の範囲において WES 式で算出した値よりも小さくなるように設定した。

表 2-1 に示すパラメータを適用したときの動的物性値について、WES 式による値と合わせ図 2-1 に示す。

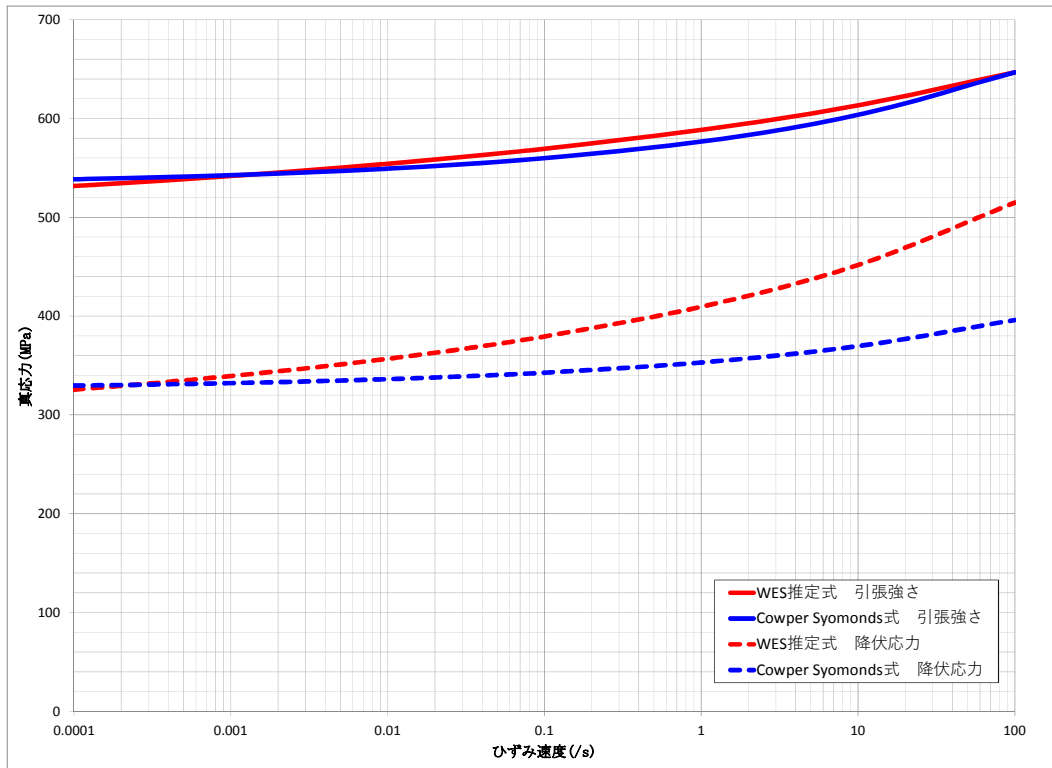


図 2-1 防護鋼板におけるひずみ速度-真応力曲線

3. 電中研解析手法と自由落下衝突試験結果との整合性について

上記の動的物性値設定手法の設定に際し参照した、電中研解析手法の妥当性について以下に示す。

3.1 事前解析における塑性ひずみ及び試験結果における貫通有無について

電中研報告においては、事前解析にて得られた衝突エネルギーと鋼板に発生する相当塑性ひずみの関係を求め、試験の重錘落下高さに反映を行っている。その際に得られた事前解析結果による相当塑性ひずみと自由落下衝突試験における貫通有無の関係を表3-1に示す。

表 3-1 事前解析結果による相当塑性ひずみと自由落下衝突試験における貫通有無

試験(解析) ケース	試験条件			試験結果による貫通有無	事前解析で得られた相当塑性ひずみ(%)
	飛来物	被衝突体*	落下高さ(m)		
SS-1	剛パイプ重錘	SS400	17.0	有	17.4
SS-2	剛パイプ重錘	SS400	12.5	有	14.9
SS-4	剛パイプ重錘	SS400	11	無	14.1
SS-3	剛パイプ重錘	SS400	9.5	無	13.0

注記 * : 有効開口部サイズ 1.4m×1.4m×t9mm, 接続部 2 辺固定

上記の試験結果及び事前解析結果より、試験ケース SS-2 においては、貫通が発生しており、事前解析により得られた相当塑性ひずみは 14.9%である。また、試験ケース SS-4 においては、貫通が発生しておらず、事前解析により得られた相当塑性ひずみは 14.1%である。したがって、試験結果及び事前解析結果より、SS400 鋼板については、相当塑性ひずみが 14.1%~14.9%の間で貫通が発生することが考えられる。

3.2 SS400 鋼板の引張試験における塑性ひずみについて

表 3-2 に自由落下衝突試験に用いた SS400 鋼板の引張試験で得られた材料特性値を示す。ここで、試験に使用した被衝突体である SS400 鋼板の材料試験値から得られた引張ひずみに相当する塑性ひずみが 14.9%であることから、被衝突体である SS400 鋼板の塑性ひずみが 14.9%付近に達した場合に飛来物が貫通することが考えられる。

表 3-2 自由落下衝突試験に用いた SS400 鋼板の材料試験値他

部材	材料試験結果（平均値）				引張ひずみを真 ひずみに換算し た値 (-)	塑性ひずみ(左 記から弾性ひ ずみを差し引 いた値)
	降伏応力 (MPa)	引張強さ (MPa)	引張ひずみ (-)	ヤング率 (GPa)		
鋼板(SS400)	322.3	474.4	0.1624	209.7	0.151	0.149

3.3 電中研解析手法及び自由落下衝突試験結果と材料試験値の整合性

3.1により事前解析における相当塑性ひずみと自由落下衝突試験における貫通有無より、飛来物衝突により発生する SS400 鋼板の相当塑性ひずみが 14.1~14.9%に達した場合に貫通することが考えられること、3.2の SS400 鋼板の引張試験における材料試験値より SS400 鋼板の塑性ひずみが 14.9%であることから、電中研報告における事前解析及び自由落下衝突試験結果は材料試験結果とよく整合していることが確認できる。

したがって、電中研解析手法は自由落下衝突試験結果とよく整合している解析手法であるといえる。表 3-3 に、電中研報告における事前解析及び自由落下衝突試験から得られた結果並びに材料試験から得られた結果を示す。

表 3-3 電中研報告書における事前解析、自由落下衝突試験及び材料試験から得られた結果

事前解析及び自由落下衝突試験から得られた結果	材料試験から得られた結果	結論
SS400 鋼板については、飛来物衝突により相当塑性ひずみが14.1%~14.9%に達した場合に貫通する。	自由落下衝突試験に使用した SS400 鋼板の引張ひずみに相当する塑性ひずみが14.9%	左記より電中研解析手法は自由落下衝突試験結果とよく整合しているといえる。

4. 電中研解析手法と当社の解析手法の比較について

電中研解析手法と当社の解析手法の比較を表 4-1 に示す。本比較表より、当社の解析手法については、「静的な物性値の出典」及び「破断ひずみ（破断条件）」において保守性を有しており、その他については差異がないことから、当社の解析手法は電中研解析手法に比べ保守性を有しているといえる。

表 4-1 電中研解析方法と当社の解析手法の差異

比較項目		電中研解析手法	当社の解析手法	備考
解析コード		AUTODYN	LS-DYNA	「原子力安全基盤機構：原子力発電施設等に係る構造物の爆発衝撃荷重挙動解析 (JNES/SSD08-014, 平成20年11月)」において、AUTODYNとLS-DYNAとの間でコードに依存する特性は少ないことが確認されていることから、解析コードに有意な差はないといえる。
材料物性値	静的な物性値の出典	材料試験値	JIS 規格値	電中研解析手法については、引張試験において得られた材料試験値を使用しており、JIS規格値を使用している当社の解析手法に保守性有 (例. SS400 鋼板の材料試験値の降伏応力 322MPa に対して JIS 値は245MPa)
	動的な物性値の出典	WES 式※1	同左	※1：(社)日本溶接協会「動的繰返し大変形を受ける溶接鋼構造物の脆性破壊性能評価方法, WES2808:2003」による推定式
	応力-ひずみ関係	Cowper Symonds モデル※2	同左	※2：「原子力安全基盤機構：原子力発電施設等に係る構造物の爆発衝撃荷重挙動解析 (JNES/SSD08-014, 平成20年11月)」において使用しているひずみ速度を考慮したモデル
	破断ひずみ (破断条件)	相当塑性ひずみが JSME 規格※3 の限界3 軸ひずみ ϵ_L における TF=2 の値に達した場合を提案 (例. SS400 の場合：12.8%)	破断伸びの JIS 規格値を TF=2 で除し、真ひずみに変換した値に達した場合 (例. SS400 の場合：8.1%)	破断ひずみについて電中研提案の値に対し、 <u>小さな値を採用していることから破断しやすい設定となっております</u> 、保守性を有している。 ※3：「日本機械学会：発電用原子力設備規格シビアアクシデント時の構造健全性評価ガイドライン<BWR 鋼製格納容器編>(2014年7月)」

5. 当社の解析手法の保守性について

当社の解析手法の保守性を確認することを目的として、表 4-1 に記載している当社の解析手法における設定値を用いて、電中研報告における重錘の鋼板上への自由落下衝突試験（以下、電中研試験という）の追解析を行った。その結果を表 5-1 に、解析モデルを図 5-1 に示す。解析モデルは電中研試験と同様 2 辺固定とし、重錘部については、密度を大きくした要素を採用することで重錘の重量を模擬している。また、本検討においては、解析ソフトとして Virtual Performance Solution（以下「VPS」という。）を用いた。VPS については、別紙に示すとおり、AUTODYN との間に有意な差はないといえるため、同様に AUTODYN と差がないと評価されている、強度計算書の計算に用いた LS-DYNA においても、同様の結果が得られると考えられる。

表 5-1 の追解析結果より、自由落下衝突試験において貫通が発生しなかったケースにおいても、当社の解析手法による解析結果においては貫通が発生していること、また貫通が発生したケースにおける残留速度が自由落下衝突試験結果の残留速度よりも大きいことから、当社の解析手法は保守性を有しているといえる。

表 5-1 当社の解析手法による自由落下衝突試験の追解析

試験ケース	試験条件			試験結果による貫通有無(残留速度(m/s))	当社の解析手法を用いた追解析による貫通有無(残留速度(m/s))
	飛来物	被衝突体	落下高さ(m)		
SS-1	剛パイプ重錘	SS400	17.0	有(8.5m/s)	
SS-2	剛パイプ重錘	SS400	12.5	有(2.9m/s)	
SS-4	剛パイプ重錘	SS400	11	無	
SS-3	剛パイプ重錘	SS400	9.5	無	

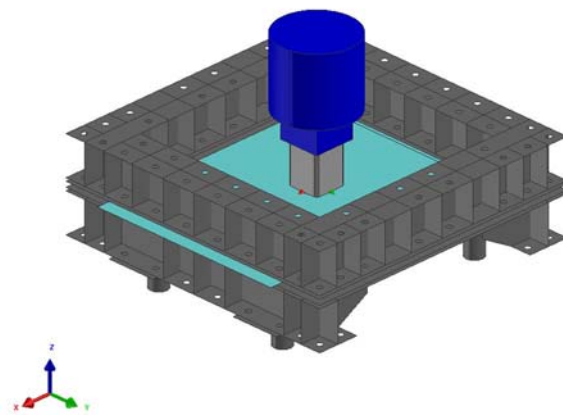


図 5-1 解析モデル

以上

AUTODYN と Virtual Performance Solution の比較検証結果

電中研報告の試験結果に対する動的物性値設定手法の保守性の検討においては、解析ソフトに Virtual Performance Solution (VPS) を用いた。以下に、電中研解析で適用している AUTODYN と VPS との間に有意な差異がないことの検証結果を示す。

AUTODYN と VPS の間における、解析コードに依存する差異の有無を確認するために、材料物性値、固定条件等の入力条件を同一とし、その解析結果を比較した。

解析条件は、表 1 に示す、電中研による自由落下衝突試験の条件とした。また、解析により得られた、鋼板に生じる変位を図 1 に、鋼板に生じる相当塑性ひずみを図 2 に示す。

表 1 影響評価に用いる解析条件

解析ケース	解析条件		
	飛来物	被衝突体	落下高さ (m)
SS-1	剛パイプ重錘	SS400	17.0
SS-2	剛パイプ重錘	SS400	12.5
SS-4	剛パイプ重錘	SS400	11
SS-3	剛パイプ重錘	SS400	9.5

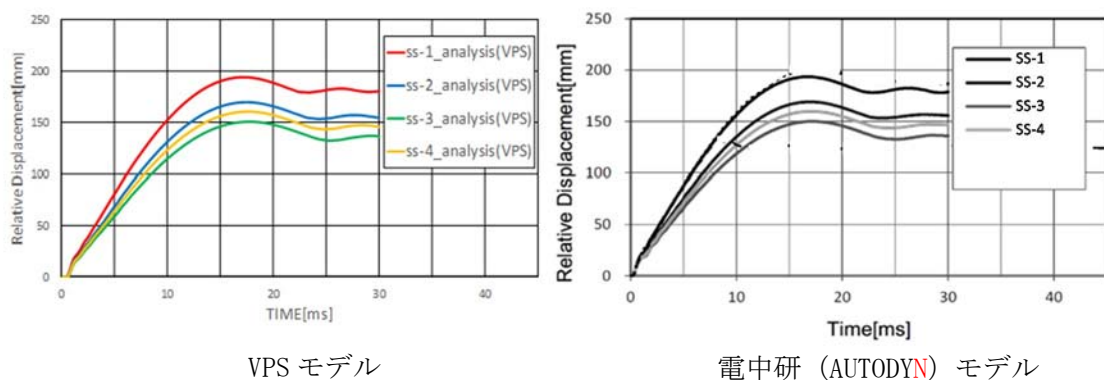
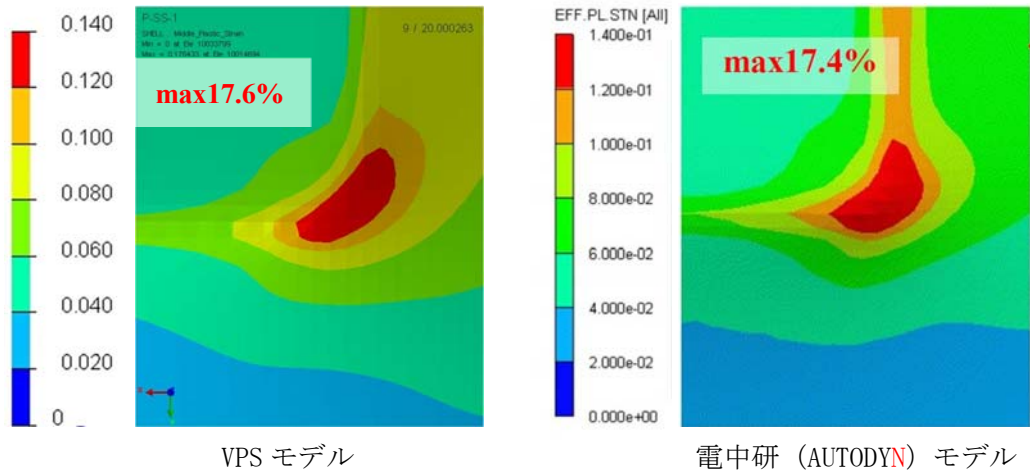
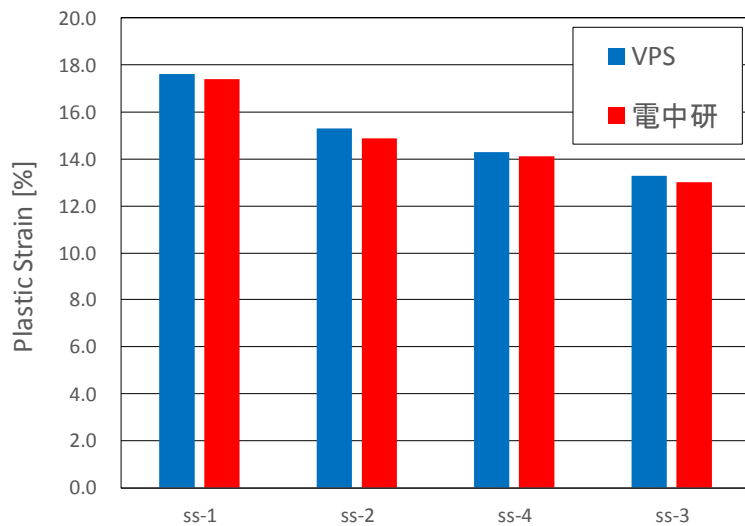


図 1 AUTODYN と VPS の比較検証結果(鋼板の変位)



(a) 相当塑性ひずみコンタ図 (ケース : SS-1)



(b) 相当塑性ひずみ最大値比較

図2 AUTODYN と VPS の比較検証結果(相当塑性ひずみ)

図1及び図2より, AUTODYN と VPS の解析結果に有意な差がないことから, AUTODYN と VPS の間に有意な差異はないといえる。

以 上

計算機プログラム（解析コード）の概要
・ Virtual Performance Solution

目次

1. はじめに	3
1.1 使用状況一覧	4
2. 解析コードの概要	5
3. コードの検証	7

1. はじめに

本資料は、計算機プログラム（解析コード）Virtual Performance Solutionについて説明するものである。

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	Virtual Performance Solution
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	ESI Group
開発時期	2002年
使用したバージョン	2015
コードの概要	Virtual Performance Solution（以下、「VPS」という。）は、ESI Groupにより開発・公開された、衝突安全・機構応力・強度剛性・疲労耐久・振動音響など、多領域の解析ソフトを包括した構造解析用の汎用市販コードであり、衝撃・衝突現象を含めた、強い非線形性（幾何学的／材料／接触）を伴う現象についても、動的陽解法有限要素法を用いた高速・高精度な解析が可能である。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>Virtual Performance Solutionは、動的物性値の設定に用いるパラメータの保守性の確認において、竜巻飛来物に対する防護鋼板への衝突試験結果と比較するための、3次元有限要素法による衝突解析の計算値の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の内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・下記の文献に提示されている動的な事象についてVPSによる解析を実施し、解析結果が文献に記載された理論値や実験結果と一致することを確認している。 <p><参照文献></p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Vibration theory and application, 2nd edition ➤ Vector Mechanics for Engineers, Dynamics, 7th edition ➤ Engineering Mechanics Dynamics, 4th edition ➤ Mechanical vibration, 4th edition ➤ Schaum's Outline of Theory and Problems of Engineering Mechanics, Statics and Dynamics ➤ Classical Dynamics of Particles and Systems, 5th edition <ul style="list-style-type: none"> ・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。

検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<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。
---	--

3. コードの検証

下記の文献に提示されている、種々の動的な事象をVPSにて解析し、結果が文献に記載された理論値や実験の結果と一致することを確認した。評価内容を以降に示す。

3.1 ばね-質点系の振動 (減衰なし)

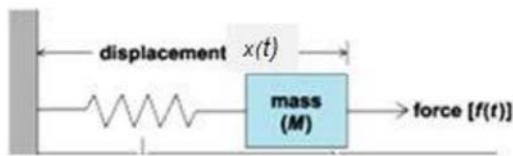
(「Vibration theory and application, 2nd edition」との比較)

単純なばね-質点系モデルの振動に対し挙動を評価し、理論解とよく整合することを確認した。

Test Description

We consider the time response $x(t)$ of an undamped spring-mass system (K, M) subject to a step function $f(t)$ with a rise time t_1 .

Figure (i). Problem sketch.



理論モデル

Figure (ii). Representative finite element model.

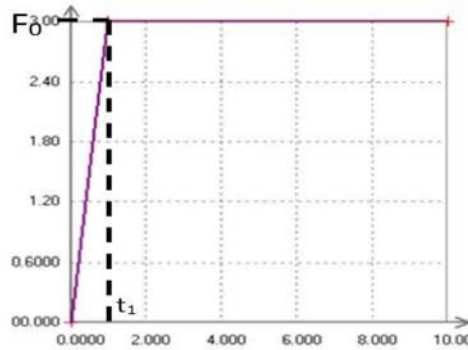


FEM モデル

Unit System:	[m, kg, s]	
	<i>Mass</i>	<i>Spring</i>
Materials properties:	$M = 1\text{ kg}$	$K = 100\text{ N / m}$
Geometric properties:		$l = 1\text{ m}$
Loadings:	$f(t) = \begin{cases} f_0 t, & t_1 \geq t \geq 0 \\ f_0, & t \geq t_1 \end{cases}$ $f_0 = 3\text{ N}$ $t_1 = 1\text{ s}$	

Modeling Notes

The system subject to the following $f(t)$ load reaches a maximum displacement x_{max} at time t_1 .



The maximum displacement is given by:

$$x_{max} = \left(\frac{f_0}{K}\right) \left[1 + \frac{1}{w_0 t_1} \sqrt{2(1 - \cos(w_0 t_1))}\right], \text{ with } w_0 = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad \boxed{\text{理論式}}$$

The Finite Element Model is built with SPRING element, totally constrained at one end and assigned with an added mass at the other end. The free end is subject to $f(t)$.

Results

Output			VPS	Reference	% Error
Mass max. displacement	Case N°1	x_{max} (mm)	3.58E-02	3.58E-02	0.0%

理論解との比較（最大変位）

3.2 落下物とバネの衝突

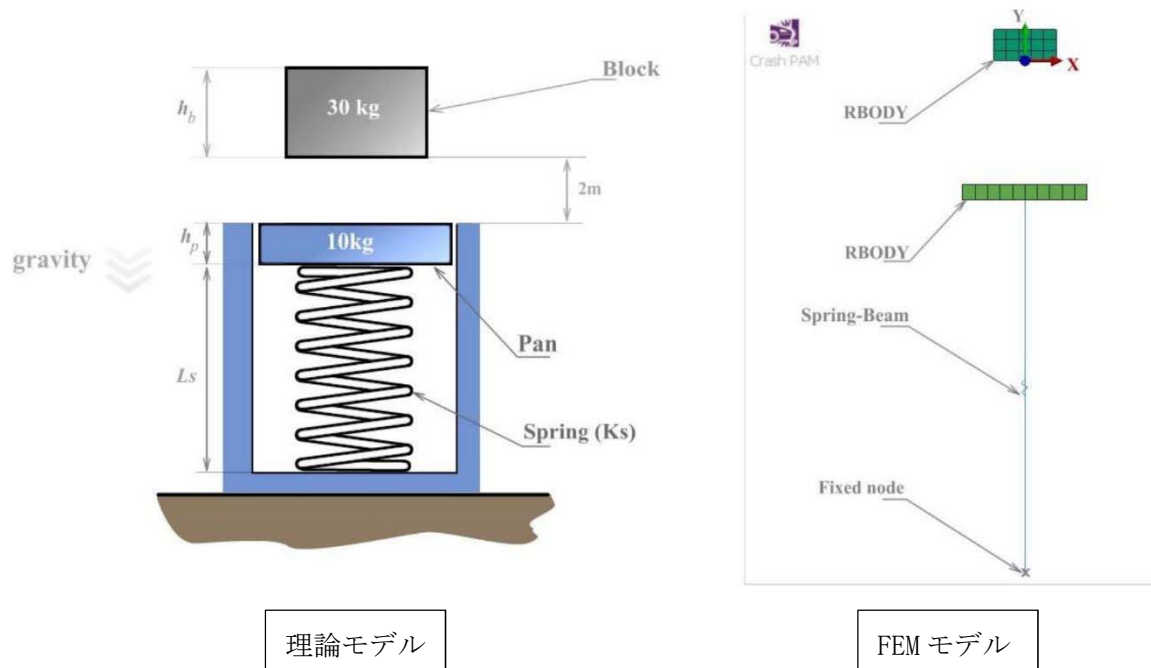
(「Vector Mechanics for Engineers, Dynamics, 7th edition) との比較)

ばねの先端の受け皿に，剛体の落下物が衝突した場合の受け皿の挙動を評価し，文献値とよく整合することを確認した。

Test Description

A 30kg block is dropped from a height of 2m onto the 10kg pan of a spring scale. Assuming the impact to be perfectly plastic we will determine the deflection of the pan.

Figure (i). Problem sketch.



Unit System: [mm, kg, ms]			
	Block	Pan	Spring
Materials properties:	Young's modulus = 207 GPa	Young's modulus = 207 GPa	Ks= 20 kN
	Poisson's ratio = 0.29	Poisson's ratio = 0.29	
	Density = 60 kg/m ³	Density = 10 kg/m ³	
Geometric properties:	1×1(m × m) h _b = 0.5 m	2 × 2(m × m) h _p = 0.25 m	L _s = 6 m
Loadings:	g = 9.81m / s ²	g = 9.81m / s ²	

Hypothesis and Modeling Notes

The pan and the block are assumed to be two rigid bodies. They are modeled using solid elements. Boundary conditions are applied to maintain the motion of the pan and the block in the Y-direction.

Since the impact is an inelastic one, a contact is defined between the pan and the block. Contact type 34, which is a non-symmetric node-to-segment contact, and separation stress (SEPSTR) option are used.

Results

Output			VPS	Reference	% Error
Displacement of the pan	Case N°1	Y (m)	0.2304	0.225	2.40%

文献値（受け皿の変位）との比較

3.3 バネ-質点系（減衰あり）の振動

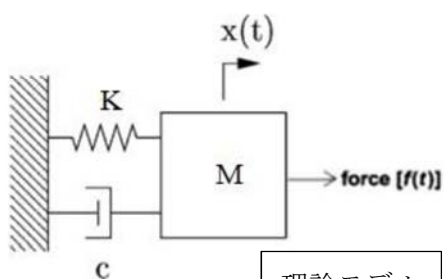
（「Engineering Mechanics Dynamics, 4th edition」との比較）

減衰機構を有するばね-質点系モデルの振動に対し挙動を評価し，理論解とよく整合することを確認した。

Test Description

The time response of a damped spring-mass system (M, K, c) subject to different loads $f(t)$ is studied. Step and ramp loads are used.

Figure (i). Problem sketch.



理論モデル

Figure (ii). Representative finite element model.

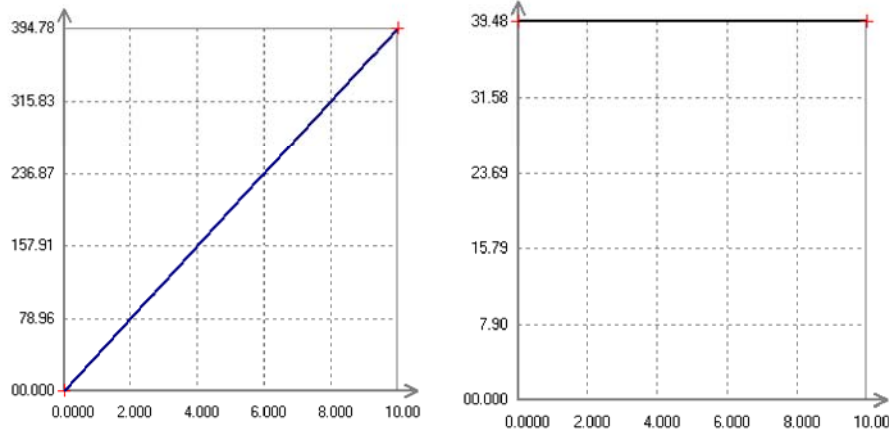


FEM モデル

Unit System:	[m, kg, s]		
Materials properties:	<i>Mass</i>	<i>Damper</i>	<i>Spring</i>
	$M = 1\text{kg}$	$c = 0,21545376$	$K = 4\pi^2\text{N/m}$
Geometric properties:			$l = 1\text{m}$
Loadings:	step input : $f(t) = 4\pi^2$ ramp input : $f(t) = 4\pi^2 t$		

Modeling Notes

The system is subject to the following $f(t)$ loads:



The mass motion for both cases is given by:

- for the step input, the displacement is: $x(t) = Ae^{-\xi w_n t} \sin(w_d t - \varphi) + \frac{F_0}{K}$
- for the ramp input, the velocity:

$$v(t) = w_n A e^{-\xi w_n t} \left[-\xi \sin(w_d t - \varphi) + \sqrt{1 - \xi^2} \cos(w_d t - \varphi) \right] + \frac{F_0}{K} \text{ with}$$

$$w_n = \sqrt{\frac{k}{m}}; \xi = \frac{c}{2mw_n}; w_d = \sqrt{1 - \xi^2} w_n$$

理論式

and A is deduced from the initial conditions.

The Finite Element Model is built with SPRING element, totally constrained at one end and assigned with an added mass at the other end. The damping value is c . The free end is subject to $f(t)$.

Results

Output			VPS	Reference	% Error
Max mass displacement X_{\max}	Case N°1	X (m)	1.9478	1.9475689	0.01%
Max mass velocity V_{\max}	Case N°2	V (m/s)	1.94802	1.9475539	0.02%
Peak time	Case N°1	t (s)	0.5	0.5	0.34%
	Case N°2	t (s)	0.5	0.5	0.57%

理論解との比較（最大変位，最大速度及びピーク時間）

3.4 振動子（減衰なし）の振動

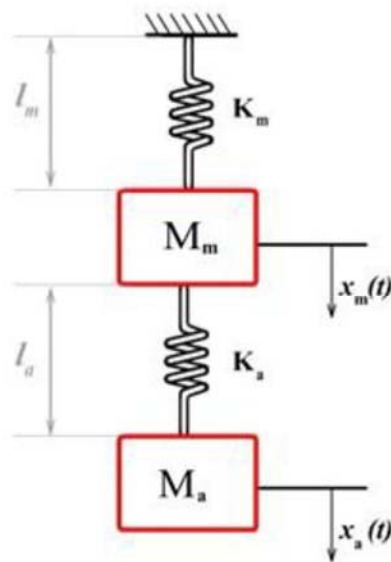
（「Mechanical vibration, 4th edition」 との比較）

2質点のばね-質点系モデルの振動に対し挙動を評価し，理論解とよく整合することを確認した。

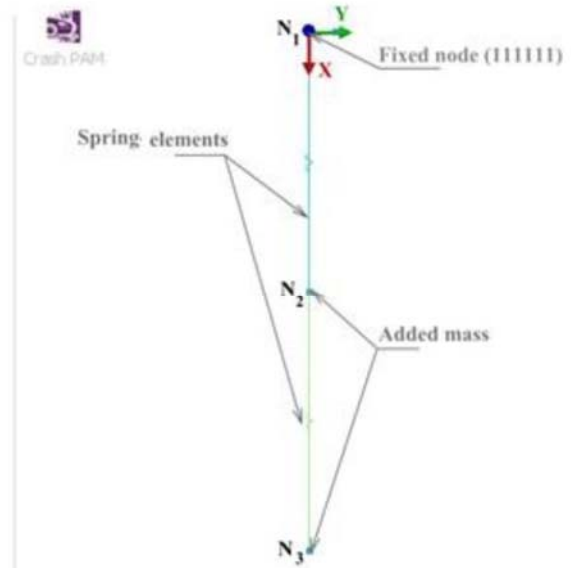
Test Description

The main mass-spring system (M_m, K_m) is subject to a vibrating force $F(t)$. An absorber mass-spring system (M_a, K_a) is added to the main system in order to absorb vibration and ensure that the main mass M_m does not vibrate at all.

Figure (i). Problem sketch.



理論モデル



FEM モデル

Unit System:	[mm, kg, ms]
Materials properties:	$M_m = 5 \text{ kg}$ $M_a = 1 \text{ kg}$ $K_m = 10 \text{ N/m}$ $K_a = 100 \text{ N/m}$
Geometric properties:	$l_m = 1 \text{ m}$ $l_a = 1 \text{ m}$
Loadings:	$N_2: \begin{cases} F(t) = P_0 \sin(\omega t) \\ P_0 = 1 \\ \omega = 10 \text{ rad/s} \end{cases}$ $N_3: \{v_a(t=0) = -0.1 \text{ m/s}\}$

Hypothesis and Modeling Notes

In order to obtain $x_m(t) = 0$, the natural frequency w_a of the attached absorber is chosen to be equal to the frequency w of the disturbing force.

The absorber mass-spring system (M_a, K_a) vibrates in such way that its spring force is at all instant equal and opposite to $F(t)$ so we have:

$$x_a(t) = -(P_0 / K_a) \sin(w_a t)$$

$$v_a(t) = -w_a (P_0 / K_a) \cos(w_a t) \text{ with } w_a = \sqrt{\frac{K_a}{M_a}}$$

理論式

In the Finite Element Model, the two springs are modeled using SPRING-BEAM elements with material type 220. Then two added mass are used to represent the main mass and the attached mass.

Results

Output			VPS	Reference	% Error
Max. absorber mass displacement	Case N°1	$X_{a \max}$ (m)	0.01	0.01	0.2%
Max. main mass displacement	Case N°1	$X_{m \max}$ (m)	6.89E-05	0	0.0%

理論解との比較 (受け皿の変位)

3.5 棒（ピン支持）の重力下での振動

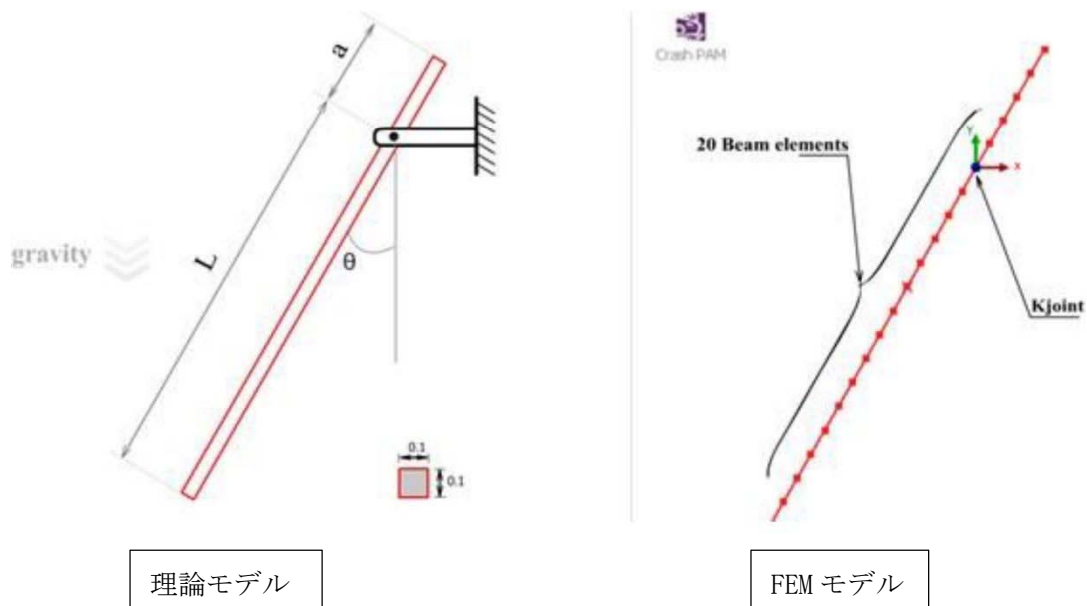
（「Schaum's Outline of Theory and Problems of Engineering Mechanics, Statics and Dynamics」との比較）

1点をピンで留められた棒が重力により振動するモデルに対し挙動を評価し、理論解とよく整合することを確認した。

Test Description

A homogenous bar, pinned at a distance a from one end, with total length L and cross section S , is subjected to gravity loading g and released from rest at an angle $\theta = 30^\circ$ from the vertical. The rotational speed when it passes through $\theta = 0^\circ$ is calculated.

Figure (i). Problem Sketch



Unit System:	[mm, kg, ms]
Materials properties:	Young's modulus = 10 GPa Poisson's ratio = 0.3, Density = 1 kg/m ³
Geometric properties:	$S = 0.1 \times 0.1 (m \times m)$ $L = 1 m$ $a = 0.25 m$
Loadings:	$g = 9.8 m / s^2$

Hypothesis and Modeling Notes

The analytical expression of the bar's rotational velocity magnitude, when $\theta = 0^\circ$, is given by:

$$|\omega| = \sqrt{\frac{0.402g(L-2a)}{L^2-3La+3a^2}}$$

理論式

The bar is modeled using BEAM elements with arbitrary material properties. It's constrained as a rigid body and attached to a fixed node through a KJOINT.

Results

Output			VPS	Reference	% Error
Rotational velocity	Case N°1	ω (rad/s)	2.108	2.121	0.60%

理論解との比較（角速度）

3.6 空気抵抗を受ける発射体の運動

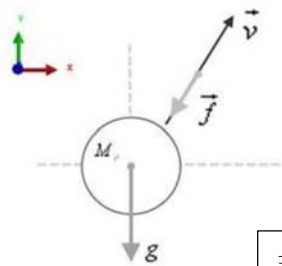
(「Classical Dynamics of Particles and Systems, 5th edition」との比較)

空気抵抗を受ける球状の発射体の挙動を評価し、理論解とよく整合することを確認した。

Test Description

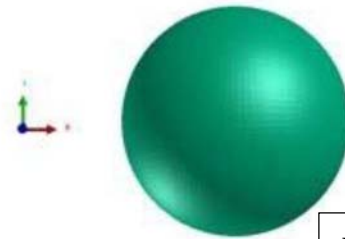
A 1 kg projectile is moved from its original position by acting an initial velocity $\vec{v}_{(t=0)} = \vec{U}_x + \vec{V}_y$. During the travelling the projectile is subjected to the gravity g and to the air resistance f .

Figure (i). Problem sketch.



理論モデル

Figure (ii). Representative finite element model.



FEM モデル

Unit System:	[mm, kg, ms]	
	<i>Projectile</i>	<i>Air</i>
Materials properties:	$M_p = 1kg$	$\alpha = 1$
Geometric properties:	$r_p = 1m$	
Loadings:	$v_{(t=0),x} = U = 1m / s$ $v_{(t=0),y} = V = 10 m / s$ $g = 9.8m / s^2$ $f = -\alpha v M_p$	

Modeling Notes

The force \vec{f} of the air resistance is assumed to be proportional to the mass M_p and to the instantaneous velocity \vec{v} of the projectile:

$$\vec{f} = -\alpha M_p \vec{v}$$

with α being the air resistance constant.

According to the reference, the equation of motion is:

$$\begin{cases} x(t) = \frac{U}{\alpha} (1 - \exp(-\alpha t)) \\ t(t) = -\frac{gt}{\alpha} + \frac{\alpha v + g}{\alpha^2} (1 - \exp(-\alpha t)) \end{cases} \quad \text{理論式}$$

The maximum value of $y(t)$ and the correspondent time are calculated. The travel time T and the travel distance in X-direction when the projectile returns to the horizontal $Y = 0$ are also determined.

Results

Output			VPS	Reference	% Error
Maximum reached Y position	Case N°1	Y_{\max} (m)	3.107	3.110	0.1%
Time to reach maximum Y position	Case N°1	$t_{y \max}$ (s)	0.70	0.70	0.0%
Travel distance in X-direction	Case N°1	D_x (m)	0.80	0.80	0.3%
Time travel	Case N°1	t (s)	1.62	1.62	0.0%

理論解との比較（最大高さ及び到達時刻，最大到達距離及び到達時間）