

外部電源系統の機能喪失確率評価及び 非常用DGの免震構造の実機適用性の検討

平成 18 年 8 月

独立行政法人 原子力安全基盤機構

本報告書は、独立行政法人 原子力安全基盤機構が実施した業務の
成果をとりまとめたものです。

本報告書の複製、転載、引用等には、当機構の承認が必要です。

外部電源系統の機能喪失確率評価及び 非常用 DG の免震構造の実機適用性の検討

要 旨

原子力発電プラントの地震に対する確率論的安全性評価（以下、「地震 PSA」という。）において、外部電源喪失は炉心損傷頻度に大きな影響を及ぼす起因事象の一つである。これまでの地震 PSA においては、外部電源喪失はプラント内開閉所の碍管付き起動変圧器の損傷によって発生すると仮定され、それ以外の外部電源系統の影響は評価されていなかった。しかし、1995 年の兵庫県南部地震では、発電所外の変電所における変圧器、遮断器等の被害例が報告されており、1999 年の台湾集集地震では、多数の送電鉄塔の倒壊例が報告されている。そのため、外部電源喪失の発生確率をより正確に評価するためには、原子力プラント周辺の外部電源系統を含めた損傷確率を評価する必要がある。

また、外部電源の受電設備である開閉所の変電機器は耐震性が低く、外部電源喪失に係る地震リスク低減策として開閉所の免震化が有効であると考えられる。

さらに、外部電源喪失時の、電源供給を行う機器である非常用ディーゼル発電機（以下、「非常用 DG」という。）については、平成 15 年度より、免震構造の検討を行ってきた。非常用 DG を免震化した場合、周辺機器との接続配管の相対変位が増大するため、免震技術を実機に適用する場合には、非常用 DG と周辺部との取り合い部の構造を検討する必要がある。

本作業では、①送電鉄塔の損傷確率が外部電源喪失の発生確率へ及ぼす影響を把握するために、送電鉄塔の地震時損傷確率を開閉所変電機器の損傷確率と比較して評価した。また、外部電源喪失に係る地震リスク低減策として開閉所を免震化した場合の損傷確率の低減効果を評価した（第

I 編)。②さらに、周辺配管を含めた非常用 DG の免震設計を行い、非常用 DG 免震系の加速度応答の低減と変位応答の増大との関係について検討した（第 II 編）。

第 I 編では、電力中央研究報告「UHV 赤城実規模試験の動的試験」に掲載されている送電鉄塔の損傷確率を評価し、開閉所の変電機器のうち、遮断器及び碍管付き起動変圧器（以下、「起動変圧器」という。）の損傷確率と比較した。その結果、送電鉄塔の損傷確率は開閉所の変電機器の損傷確率に比べて相対的に小さく、外部電源喪失の発生確率への影響は小さいと考えられる。また、起動変圧器と遮断器を用いて、開閉所の簡易モデルを作成し、開閉所全体を免震化した場合の開閉所免震系の損傷確率を評価した。その結果、開閉所を免震化することによって損傷確率を低減できるとの見通しを得た。

第 II 編では、想定 BWR 建屋内に設置されている非常用 DG を対象に、配管の変位と隣接構造物とのクリアランスを考慮した免震設計を行い、免震時及び非免震時の非常用 DG の地震応答解析を行い、非常用 DG 免震系の加速度応答低減と変位応答増大との関係を評価し、以下の結論を得た。

非常用 DG 免震系の最大加速度応答は、免震時の固有周期を 1 秒～2 秒とした場合、約 50%～20%に低減した。このときの最大変位応答は約 5cm～6cm であり、許容変位の 20cm を超えないことを確認した。

本作業の結果、非常用 DG の可動範囲と免震化に必要なスペースの概略値を把握することができた。

外部電源系統の機能喪失確率評価及び
非常用 DG の免震構造の実機適用性の検討

目 次

第 I 編 外部電源系統の機能喪失確率評価

1. 序論.....	I-1-1
1.1 目的.....	I-1-1
1.2 本作業の概要.....	I-1-1
1.2.1 外部電源喪失の事故シナリオの検討.....	I-1-1
1.2.2 送電鉄塔の損傷確率評価.....	I-1-1
1.2.3 開閉所変電機器の損傷確率評価.....	I-1-2
1.2.4 開閉所免震系の損傷確率評価.....	I-1-2
2. 外部電源喪失の事故シナリオの検討.....	I-2-1
2.1 外部電源喪失事象の概要.....	I-2-1
2.2 外部電源系統のモデル化.....	I-2-1
3. 送電鉄塔の地震時損傷確率評価.....	I-3-1
3.1 解析条件.....	I-3-1
3.2 送電鉄塔の損傷確率評価手順.....	I-3-1
3.3 送電鉄塔の固有値解析.....	I-3-1
3.4 設計耐力及び設計応答の算定.....	I-3-2
3.4.1 設計耐力の算定.....	I-3-2
3.4.2 設計応答の算定.....	I-3-2
3.4.3 軸力比の算出.....	I-3-3
3.5 損傷確率の評価.....	I-3-3
3.5.1 評価方法.....	I-3-3

3.5.2	現実的応答の評価	I-3-3
3.5.3	現実的耐力の評価	I-3-4
3.5.4	損傷確率評価結果	I-3-5
4.	開閉所変電機器の地震時損傷確率評価	I-4-1
4.1	評価の概要	I-4-1
4.1.1	対象機器	I-4-1
4.1.2	機器損傷確率の算出	I-4-1
4.2	解析条件	I-4-2
4.2.1	耐力データ	I-4-2
4.2.2	応答データ	I-4-2
4.2.3	解析結果	I-4-2
5.	開閉所免震系の地震時損傷確率評価	I-5-1
5.1	開閉所免震系の地震応答解析	I-5-1
5.1.1	解析条件	I-5-1
5.1.2	地震応答解析結果	I-5-2
5.2	開閉所免震系の地震時損傷確率評価	I-5-2
5.2.1	解析条件	I-5-2
5.2.2	解析結果	I-5-2
6.	結論	I-6-1
	参考文献	I-参-1

表一覧

表 3.1	支柱材の諸元	I-3-6
表 3.2	腹材の諸元	I-3-6
表 3.3	腕金の諸元	I-3-7
表 3.4	水平材の諸元	I-3-7
表 3.5	要素の諸元	I-3-7
表 3.6	固有値解析結果	I-3-8
表 3.7	座屈解析結果	I-3-8
表 3.8	最大軸力となった耐力と応答の組合せ	I-3-9
表 3.9	現実的応答	I-3-9
表 3.10	現実的耐力	I-3-9
表 3.11	損傷確率評価結果	I-3-10
表 4.1	起動変圧器振動解析モデルの諸元(1) 質点の重量及び回転慣性重量	I-4-4
表 4.2	起動変圧器振動解析モデルの諸元(2) 梁要素の各種特性	I-4-4
表 4.3	起動変圧器振動解析モデルの諸元(3) ばね定数及び減衰定数	I-4-4
表 4.4	遮断器モデルの諸元(1) 質点の重量	I-4-4
表 4.5	遮断器モデルの諸元(2) ばね定数及び減衰定数	I-4-4
表 4.6	起動変圧器の応答及び耐力	I-4-5
表 4.7	遮断器の応答及び耐力	I-4-5
表 4.8	地震時損傷確率	I-4-5
表 5.1	開閉所解析モデルの諸元 質点の重量及び回転慣性重量	I-5-3
表 5.2	免震装置の諸元	I-5-3
表 5.3	起動変圧器最大加速度応答	I-5-4
表 5.4	遮断器最大加速度応答	I-5-4
表 5.5	起動変圧器最大変位応答	I-5-4
表 5.6	遮断器最大変位応答	I-5-4
表 5.7	起動変圧器の応答及び耐力 (免震時: 固有周期 2 秒)	I-5-5
表 5.8	起動変圧器の応答及び耐力 (免震時: 固有周期 3 秒)	I-5-5
表 5.9	遮断器の応答及び耐力 (免震時: 固有周期 2 秒)	I-5-5
表 5.10	遮断器の応答及び耐力 (免震時: 固有周期 3 秒)	I-5-5

表 5.11 地震時損傷確率（起動変圧器）	I-5-6
表 5.12 地震時損傷確率（遮断器）	I-5-6

図一覧

図 2.1	外部電源系統の模式図	I-2-2
図 2.2	外部電源系統の FT 解析モデル	I-2-3
図 3.1	赤城試験線の概念図	I-3-11
図 3.2	UHV 送電鉄塔構造図	I-3-11
図 3.3	解析モデル	I-3-12
図 3.4	応答係数法に基づく送電鉄塔の損傷確率評価手順	I-3-13
図 3.5	固有値解析結果（架線直角方向 1 次モード）	I-3-14
図 3.6	固有値解析結果（架線方向 1 次モード）	I-3-14
図 3.7	固有値解析結果（架線直角方向 2 次モード）	I-3-15
図 3.8	固有値解析結果（架線方向 2 次モード）	I-3-15
図 3.9	固有値解析結果（上下方向 1 次モード）	I-3-16
図 3.10	座屈解析に用いる水平震度	I-3-16
図 3.11	静的解析による座屈解析結果（座屈発生時の水平震度分布）	I-3-17
図 3.12	静的解析による座屈解析結果—座屈モード—（架線方向）	I-3-17
図 3.13	静的解析による座屈解析結果—座屈モード—（架線直角方向）	I-3-18
図 3.14	静的解析による座屈解析結果（座屈発生時の軸力分布）	I-3-18
図 3.15	動的解析による座屈解析結果（座屈発生時の水平震度分布）	I-3-19
図 3.16	動的解析による座屈解析結果—座屈モード—（架線方向）	I-3-20
図 3.17	動的解析による座屈解析結果—座屈モード—（架線直角方向）	I-3-20
図 3.18	動的解析による座屈解析結果（座屈発生時の軸力分布）	I-3-21
図 3.19	入力地震動（改良標準波 S ₁ F）	I-3-21
図 3.20	鉄塔頂部の加速度応答時刻歴（架線方向）	I-3-22
図 3.21	鉄塔頂部の変位応答時刻歴（架線方向）	I-3-22
図 3.22	鉄塔頂部の加速度応答時刻歴（架線直角方向）	I-3-23
図 3.23	鉄塔頂部の変位応答時刻歴（架線直角方向）	I-3-23
図 3.24	架線方向加震時の応答加速度分布図（7.50 秒）	I-3-24
図 3.25	架線方向加震時の応答変位分布図（7.50 秒）	I-3-25
図 3.26	架線直角方向加震時の応答加速度分布図（7.54 秒）	I-3-26
図 3.27	架線直角方向加震時の応答変位分布図（7.54 秒）	I-3-27

図 3.28	支柱材の軸力分布図（架線方向加震時、7.50 秒）	I-3-28
図 3.29	支柱材の軸力分布図（架線直角方向加震時、7.54 秒）	I-3-28
図 3.30	腹材断面の出力面	I-3-29
図 3.31	架線方向加震時の腹材の軸力分布（7.50 秒）	I-3-30
図 3.32	架線方向加震時の腹材の軸力分布（7.50 秒）	I-3-31
図 3.33	架線直角方向加震時の腹材の軸力分布（7.54 秒）	I-3-32
図 3.34	架線直角方向加震時の腹材の軸力分布（7.54 秒）	I-3-33
図 3.35	支柱材に作用する最大圧縮軸力分布	I-3-34
図 3.36	地震応答解析による軸力と座屈解析による軸力の比較 （静的荷重、架線直角方向加震時）	I-3-35
図 3.37	軸力比（静的荷重、架線直角方向加震時）	I-3-35
図 3.38	地震応答解析による軸力と座屈解析による軸力の比較 （静的荷重、架線方向加震時）	I-3-36
図 3.39	軸力比（静的荷重、架線方向加震時）	I-3-36
図 3.40	地震応答解析による軸力と座屈解析による軸力の比較 （動的荷重、架線直角方向加震時）	I-3-37
図 3.41	軸力比（動的荷重、架線直角方向加震時）	I-3-37
図 3.42	地震応答解析による軸力と座屈解析による軸力の比較 （動的荷重、架線方向加震時）	I-3-38
図 3.43	軸力比（動的荷重、架線方向加震時）	I-3-38
図 3.44	架線方向加震時の鉄塔基部の損傷確率	I-3-39
図 3.45	架線方向加震時の鉄塔中間部の損傷確率	I-3-39
図 3.46	架線直角方向加震時の鉄塔基部の損傷確率	I-3-40
図 3.47	架線直角方向加震時の鉄塔頂部の損傷確率	I-3-40
図 4.1	起動変圧器の構造と振動モデル	I-4-6
図 4.2	遮断器の構造と振動モデル	I-4-6
図 4.3	入力地震動(改良標準波 $S_1F:Max=286.1Gal$ 、水平成分)	I-4-7
図 4.4	入力地震動(改良標準波 $S_1F:Max=121.5Gal$ 、鉛直成分)	I-4-7
図 4.5	損傷確率曲線(鉄塔、起動変圧器、遮断器)	I-4-8
図 5.1	開閉所のレイアウト	I-5-7
図 5.2	開閉所免震系の振動解析モデル	I-5-7

図 5.3	入力地震動（改良標準波 S_1F ）の加速度時刻歴波形	I-5-8
図 5.4	入力地震動の加速度応答スペクトル	I-5-9
図 5.5	開閉所免震系の最大加速度応答分布 (PGA レベル 750、免震時：固有周期 2 秒)	I-5-10
図 5.6	開閉所免震系の最大加速度応答分布 (PGA レベル 750、免震時：固有周期 3 秒)	I-5-10
図 5.7	開閉所免震系の最大変位応答分布 (PGA レベル 750、免震時：固有周期 2 秒)	I-5-11
図 5.8	開閉所免震系の最大変位応答分布 (PGA レベル 750、免震時：固有周期 3 秒)	I-5-11
図 5.9	起動変圧器加速度応答時刻歴 (PGA レベル 750、免震時：固有周期 2 秒)	I-5-12
図 5.10	起動変圧器加速度応答時刻歴 (PGA レベル 750、免震時：固有周期 3 秒)	I-5-12
図 5.11	起動変圧器変位応答時刻歴 (PGA レベル 750、免震時：固有周期 2 秒)	I-5-13
図 5.12	起動変圧器変位応答時刻歴 (PGA レベル 750、免震時：固有周期 3 秒)	I-5-13
図 5.13	遮断器加速度応答時刻歴 (PGA レベル 750、免震時：固有周期 2 秒)	I-5-14
図 5.14	遮断器加速度応答時刻歴 (PGA レベル 750、免震時：固有周期 3 秒)	I-5-14
図 5.15	遮断器変位応答時刻歴 (PGA レベル 750、免震時：固有周期 2 秒)	I-5-15
図 5.16	遮断器変位応答時刻歴 (PGA レベル 750、免震時：固有周期 3 秒)	I-5-15
図 5.17	起動変圧器の加速度応答低減率	I-5-16
図 5.18	遮断器の加速度応答低減率	I-5-16
図 5.19	起動変圧器の地震時損傷確率	I-5-17
図 5.20	遮断器の地震時損傷確率	I-5-17

第Ⅱ編 非常用 DG の免震構造の実機適用性の検討

1. 序論.....	Ⅱ-1-1
1.1 目的.....	Ⅱ-1-1
1.2 本作業の概要.....	Ⅱ-1-1
1.2.1 非常用 DG の免震構造の試設計.....	Ⅱ-1-1
1.2.2 非常用 DG 免震系の地震応答解析.....	Ⅱ-1-1
1.2.3 入力地震動に関する感度解析.....	Ⅱ-1-1
2. 非常用 DG の免震構造の試設計.....	Ⅱ-2-1
2.1 免震構造及び免震装置の基本仕様.....	Ⅱ-2-1
2.2 解析モデル.....	Ⅱ-2-1
3. 非常用 DG 免震系の地震応答解析.....	Ⅱ-3-1
3.1 BWR 原子炉建屋の地震応答解析.....	Ⅱ-3-1
3.1.1 解析条件.....	Ⅱ-3-1
3.1.2 固有値解析結果.....	Ⅱ-3-1
3.1.3 地震応答解析結果.....	Ⅱ-3-2
3.2 非常用 DG 免震系の地震応答解析.....	Ⅱ-3-2
4. 入力地震動に関する感度解析.....	Ⅱ-4-1
4.1 BWR 原子炉建屋の地震応答解析.....	Ⅱ-4-1
4.2 非常用 DG 免震系の地震応答解析.....	Ⅱ-4-1
5. 結論.....	Ⅱ-5-1
参考文献.....	Ⅱ-参-1

表一覧

表 2.1	非常用 DG 免震系の固有周期及び減衰定数	II-2-2
表 2.2	免震要素の基本仕様	II-2-2
表 2.3	免震系非常用 DG の応答解析モデルの諸元	II-2-2
表 3.1	建屋解析モデル諸元(1) 質点重量	II-3-3
表 3.2	建屋解析モデル諸元(2) 部材の剛性	II-3-3
表 3.3	建屋解析モデル諸元(3) 床バネの剛性	II-3-4
表 3.4	建屋解析モデル諸元(4) 材料定数	II-3-4
表 3.5	建屋解析モデル諸元(5) 復元力特性 (M - ϕ 関係)	II-3-5
表 3.6	建屋解析モデル諸元(6) 復元力特性 (Q - γ 関係)	II-3-6
表 3.7	固有値解析結果 (建屋)	II-3-7
表 3.8	地震応答解析結果	II-3-7
表 4.1	地震応答解析結果 (入力地震動 S_1N : $\text{Max}=2.67\text{m/s}^2$)	II-4-3
表 4.2	地震応答解析結果 (入力地震動 S_2F : $\text{Max}=3.88\text{m/s}^2$)	II-4-3
表 4.3	地震応答解析結果 (入力地震動 S_2N : $\text{Max}=4.07\text{m/s}^2$)	II-4-3

図一覧

図 2.1	BWR 建屋配置図	II-2-3
図 2.2	非常用 DG の免震構造	II-2-3
図 2.3	免震系非常用 DG の応答解析モデル	II-2-4
図 3.1	BWR 原子炉建屋断面図	II-3-8
図 3.2	原子炉建屋振動解析モデル	II-3-8
図 3.3	原子炉建屋の復元力モデル	II-3-9
図 3.4	地盤バネの設定	II-3-9
図 3.5	入力地震動（改良標準波：S ₁ F）の加速度時刻歴波形	II-3-10
図 3.6	入力地震動の加速度応答スペクトル	II-3-10
図 3.7	非常用 DG 設置位置の加速度応答時刻歴波形	II-3-11
図 3.8	非常用 DG 設置位置の加速度応答スペクトル	II-3-11
図 3.9	非常用 DG 設置位置の変位応答スペクトル	II-3-12
図 3.10	加速度応答時刻歴（非免震時）	II-3-13
図 3.11	変位応答時刻歴（非免震時）	II-3-13
図 3.12	最大加速度応答分布（非免震時）	II-3-14
図 3.13	最大変位応答分布（非免震時）	II-3-14
図 3.14	加速度応答時刻歴（免震時：固有周期 1 秒）	II-3-15
図 3.15	加速度応答時刻歴（免震時：固有周期 1.5 秒）	II-3-15
図 3.16	加速度応答時刻歴（免震時：固有周期 2 秒）	II-3-16
図 3.17	変位応答時刻歴（免震時：固有周期 1 秒）	II-3-16
図 3.18	変位応答時刻歴（免震時：固有周期 1.5 秒）	II-3-17
図 3.19	変位応答時刻歴（免震時：固有周期 2 秒）	II-3-17
図 3.20	最大加速度応答分布（免震時）	II-3-18
図 3.21	最大変位応答分布（免震時）	II-3-19
図 4.1	入力地震動（改良標準波 S ₁ N：Max=2.67m/s ² ）の加速度時刻歴波形	II-4-4
図 4.2	入力地震動（改良標準波：S ₁ N）の加速度応答スペクトル	II-4-4
図 4.3	入力地震動（改良標準波 S ₂ N：Max=3.88m/s ² ）の加速度時刻歴波形	II-4-5
図 4.4	入力地震動（改良標準波：S ₂ N）の加速度応答スペクトル	II-4-5
図 4.5	入力地震動（改良標準波 S ₂ F：Max=4.07m/s ² ）の加速度時刻歴	II-4-6

図 4.6	入力地震動（改良標準波： S_2F ）の加速度応答スペクトル	II-4-6
図 4.7	非常用 DG 設置位置の加速度応答時刻歴波形（改良標準波： S_1N ）	II-4-7
図 4.8	非常用 DG 設置位置の加速度応答スペクトル（改良標準波： S_1N ）	II-4-7
図 4.9	非常用 DG 設置位置の変位応答スペクトル（改良標準波： S_1N ）	II-4-8
図 4.10	非常用 DG 設置位置の加速度応答時刻歴波形（改良標準波： S_2N ）	II-4-8
図 4.11	非常用 DG 設置位置の加速度応答スペクトル（改良標準波： S_2N ）	II-4-9
図 4.12	非常用 DG 設置位置の変位応答スペクトル（改良標準波： S_2N ）	II-4-9
図 4.13	非常用 DG 設置位置の加速度応答時刻歴波形（改良標準波： S_2F ）	II-4-10
図 4.14	非常用 DG 設置位置の加速度応答スペクトル（改良標準波： S_2F ）	II-4-10
図 4.15	非常用 DG 設置位置の変位応答スペクトル（改良標準波： S_2F ）	II-4-11
図 4.16	改良標準波 S_1N に対する加速度応答時刻歴（免震時：固有周期 1 秒）	II-4-12
図 4.17	改良標準波 S_1N に対する加速度応答時刻歴（免震時：固有周期 1.5 秒）	II-4-12
図 4.18	改良標準波 S_1N に対する加速度応答時刻歴（免震時：固有周期 2 秒）	II-4-13
図 4.19	改良標準波 S_1N に対する変位応答時刻歴（免震時：固有周期 1 秒）	II-4-13
図 4.20	改良標準波 S_1N に対する変位応答時刻歴（免震時：固有周期 1.5 秒）	II-4-14
図 4.21	改良標準波 S_1N に対する変位応答時刻歴（免震時：固有周期 2 秒）	II-4-14
図 4.22	改良標準波 S_1N に対する最大加速度応答分布	II-4-15
図 4.23	改良標準波 S_1N に対する最大変位応答分布	II-4-16
図 4.24	改良標準波 S_2F に対する加速度応答時刻歴（免震時：固有周期 1 秒）	II-4-17
図 4.25	改良標準波 S_2F に対する加速度応答時刻歴（免震時：固有周期 1.5 秒）	II-4-17
図 4.26	改良標準波 S_2F に対する加速度応答時刻歴（免震時：固有周期 2 秒）	II-4-18
図 4.27	改良標準波 S_2F に対する変位応答時刻歴（免震時：固有周期 1 秒）	II-4-18
図 4.28	改良標準波 S_2F に対する変位応答時刻歴（免震時：固有周期 1.5 秒）	II-4-19
図 4.29	改良標準波 S_2F に対する変位応答時刻歴（免震時：固有周期 2 秒）	II-4-19
図 4.30	改良標準波 S_2F に対する最大加速度応答分布	II-4-20
図 4.31	改良標準波 S_2F に対する最大変位応答分布	II-4-21
図 4.32	改良標準波 S_2N に対する加速度応答時刻歴（免震時：固有周期 1 秒）	II-4-22
図 4.33	改良標準波 S_2N に対する加速度応答時刻歴（免震時：固有周期 1.5 秒）	II-4-22
図 4.34	改良標準波 S_2N に対する加速度応答時刻歴（免震時：固有周期 2 秒）	II-4-23
図 4.35	改良標準波 S_2N に対する変位応答時刻歴（免震時：固有周期 1 秒）	II-4-23
図 4.36	改良標準波 S_2N に対する変位応答時刻歴（免震時：固有周期 1.5 秒）	II-4-24

図 4.37 改良標準波 S_2N に対する変位応答時刻歴（免震時：固有周期 2 秒）	II-4-24
図 4.38 改良標準波 S_2N に対する最大応答加速度分布	II-4-25
図 4.39 改良標準波 S_2N に対する最大応答変位分布	II-4-26

第 I 編 外部電源系統の機能喪失確率評価

1. 序 論

1.1 目的

原子力発電プラントの地震に対する確率論的安全性評価（以下、「地震 PSA」という。）において、外部電源喪失は炉心損傷頻度に大きな影響を及ぼす起因事象の一つである。これまでの地震 PSA においては、外部電源喪失はプラント内開閉所の碍管付き起動変圧器の損傷によって代表させるとの仮定を置き、それ以外の外部電源系統の影響は評価されていなかった。しかし、1995年の兵庫県南部地震では、発電所外の変電所における変圧器、遮断器の被害例が報告されており、1999年の台湾集集地震では、多数の送電鉄塔の倒壊例が報告されている。そのため、外部電源喪失の発生確率をより正確に評価するためには、原子力プラント周辺の外部電源系統を含めた損傷確率を評価する必要がある。

本作業では、地震リスク低減策の検討に役立てるため、地震 PSA 上重要な外部電源喪失事象を対象として、外部電源系統の損傷を考慮した事故シナリオを検討し、原子力発電所外の広域に設置されている送電・変電施設（変圧器、送電鉄塔等）の損傷確率を評価した。評価対象機器として、送電鉄塔、起動変圧器及び遮断器を選定した。送電鉄塔は地震 PSA 評価において、これまで検討されていなかった機器であり、起動変圧器及び遮断器は、現状において外部電源喪失事象の発生原因と見なされている機器である。

また、外部電源喪失に係る地震リスク低減策として開閉所の免震設計を行い、損傷確率の低減効果を評価した。

1.2 本作業の概要

1.2.1 外部電源喪失の事故シナリオの検討

機構が実施してきた代表的 BWR プラントの地震 PSA^{(1),(2)}のシステム解析モデルを参考として、外部電源系統の損傷を考慮した外部電源喪失の事故シナリオを検討した。

1.2.2 送電鉄塔の損傷確率評価

電力中央研究報告「UHV 赤城実規模試験の動的試験」に基づき、送電鉄塔のモデル化を行い、送電鉄塔の損傷確率を評価した。

1.2.3 開閉所変電機器の損傷確率評価

開閉所の変電機器のうち、遮断器及び起動変圧器の損傷確率を評価した。

1.2.4 開閉所免震系の損傷確率評価

一辺 30m 四方の発電所敷地内にある開閉所に、起動変圧器 2 器と遮断器 2 器の計 4 器があると仮定して、開閉所全体の免震設計を行い、免震化による損傷確率の低減効果を検討した。

2. 外部電源喪失の事故シナリオの検討

2.1 外部電源喪失事象の概要

外部電源喪失は、外部電源設備機器が地震による損傷によりプラントへの外部からの電源供給が途絶える事象である。

外部電源喪失の評価対象機器としては、開閉所内の起動変圧器、遮断器、所内配線、外部からの送電線、鉄塔等が挙げられるが、外部電源喪失の発生確率は、現状では、起動変圧器の耐力を使用して算出している。

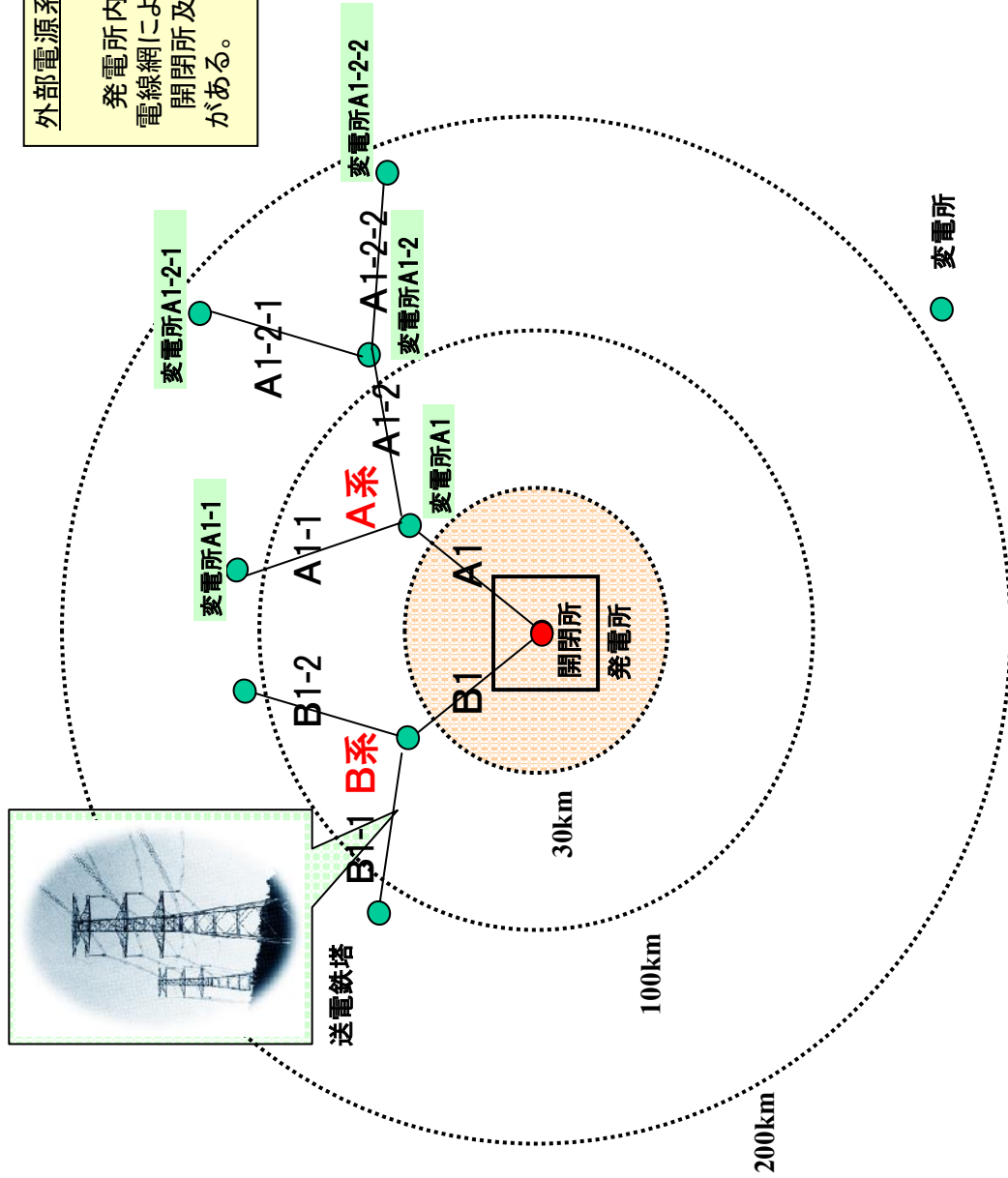
2.2 外部電源系統のモデル化

外部電源系統の損傷を考慮した外部電源喪失の事故シナリオを検討するために、外部電源系統のモデル化を行った。外部電源系統は、発電所内の開閉所を起点とし、変電所を中継点として 2 回線の送電線網によって構成されるものとした。開閉所及び変電所には、変圧器、遮断器、断路器等の変電機器がある。外部電源系統の模式図を図 2.1 に示す。

また、代表的 BWR プラントの地震 PSA^{(1)・(2)}のシステム解析モデルを参考として、外部電源系統の損傷を考慮した外部電源喪失の事故シナリオを検討し、外部電源系統の FT 解析モデルを試作した。外部電源系統の FT 解析モデルを図 2.2 に示す。

外部電源系統

発電所内の開閉所を起点とし、変電所を中継点として2回線の送電線網によって構成される。開閉所及び変電所には、変圧器、遮断器、断路器等の変電機器がある。



起動変圧器



遮断器

図2.1 外部電源系統の模式図

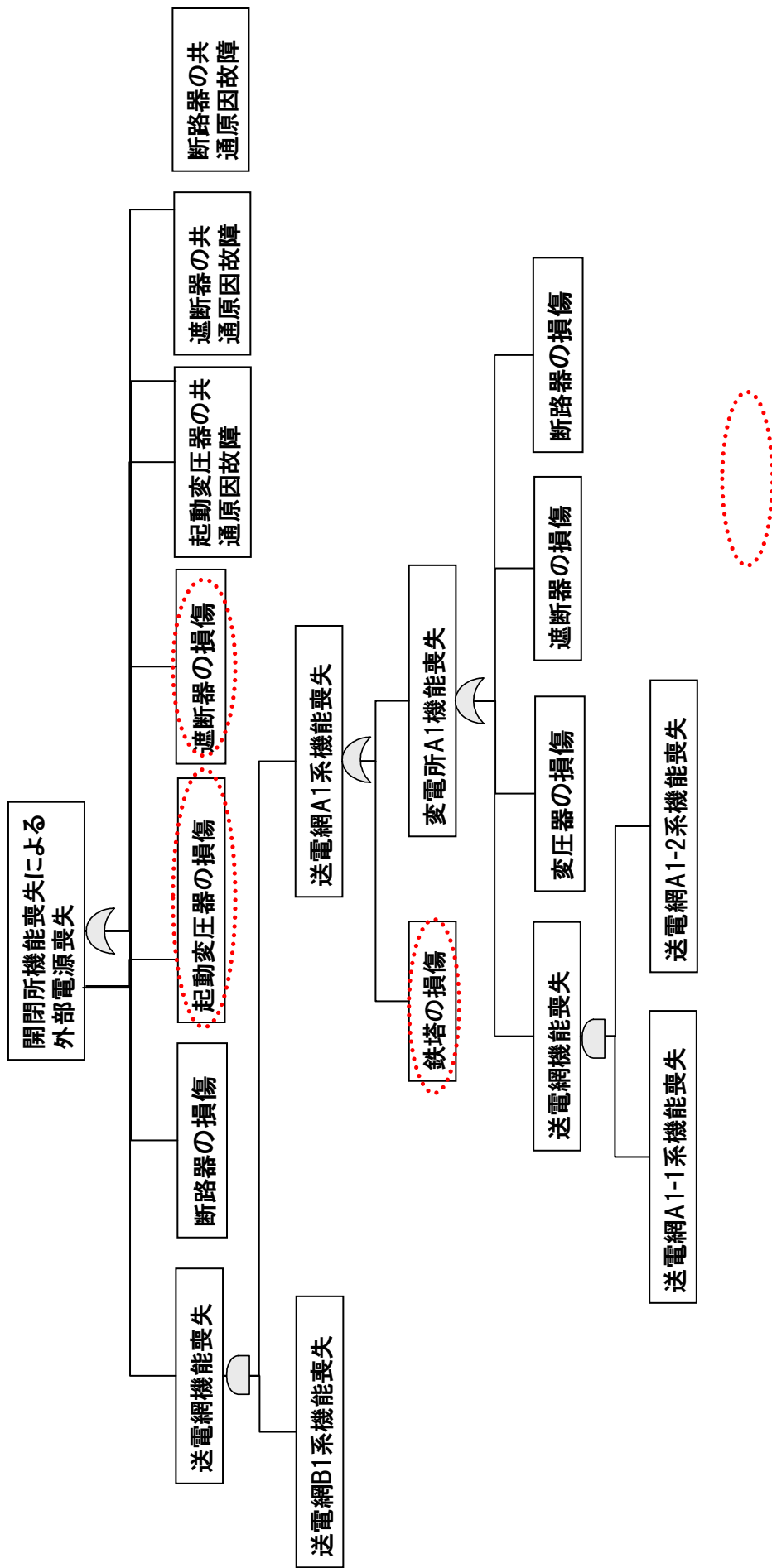


図2.2 外部電源系統のFT解析モデル

3. 送電鉄塔の地震時損傷確率評価

電力中央研究報告「UHV 赤城実規模試験の動的試験」^{(1)~(5)}（以下、「電中研報告」という）に掲載されている鉄塔を対象として、応答係数法に基づき地震時における損傷確率を評価した。

3.1 解析条件

赤城試験線の概念図を図 3.1 に、中央の 2 号鉄塔の構造と寸法を図 3.2 に示す。UHV 赤城実規模試験で用いられた鉄塔は、将来の UHV(1000kV 級)送電用として想定される大型鉄塔であり、従来の鉄塔に比べて塔高や腕金が長大である。

解析モデルは、三基二径間連成系モデルとし、中央鉄塔を評価対象とした。鉄塔本体を梁要素、架渉線をトラス要素でモデル化した。試験線の基礎は鉄塔上部に比して剛であり、鉄塔基部を固定とした場合と基礎-地盤を含めてモデル化した場合で応答にほとんど差がない⁽⁴⁾、したがって、基礎固定としてモデル化し、基礎に直接地震波を入力した。構造材は中空鋼管（JIS G 3444）を使用した。

解析モデルを図 3.3 に示す。主要構造材の諸元を表 3.1~表 3.4 に、要素の諸元を表 3.5 に示す。

解析コードは、汎用構造解析コード Nastran を用いた。

3.2 送電鉄塔の損傷確率評価手順

送電鉄塔の損傷確率は、送電鉄塔の現実的な応答がその耐力を上回る条件付き確率として、応答係数法に基づき評価した。応答係数法に基づく損傷確率評価の手順を図 3.4 に示す。耐力評価では、送電鉄塔の FEM モデルを用いて座屈解析を行い、送電鉄塔の損傷モード及び損傷部位を同定し、座屈軸力（設計耐力）を算定する。応答評価では、現行の耐震設計法に内在する安全裕度（保守要因）を検討して、これらを応答係数として評価するとともに、地震応答解析を行い、耐力評価時に同定した損傷部位の設計応答（軸力）を算定する。次に、最大軸力比（設計応答／設計耐力）となる組合せ、すなわち、最も耐震裕度の小さい組合せを与える損傷部位を同定して損傷確率を評価した。

3.3 送電鉄塔の固有値解析

送電鉄塔の固有値解析を行い、送電鉄塔の震動特性（架線方向、架線直角方向、鉛直方向）を把握した。固有値解析結果を表 3.6 に、代表的なモード図を図 3.5~図 3.9 に示す。送電鉄塔の架線直角方向の 1 次固有振動数は 0.862Hz、架線方向の 1 次固有振動数は 0.881Hz、鉛直方向の 1

次固有振動数は 5.139Hz であった。架線方向、架線直角方向、鉛直方向ともに 1 次モードが卓越し、支配的なモードであると考えられる。

3.4 設計耐力及び設計応答の算定

3.4.1 設計耐力の算定

送電鉄塔の損傷モードは座屈とし、圧縮軸力をパラメータとして、3.1 節で作成した解析モデルを用いて、静的荷重及び動的荷重による座屈解析を行い、送電鉄塔の座屈部位を同定し、座屈発生時の座屈部位の圧縮軸力を設計耐力として評価した。

(1) 静的荷重による座屈解析（静的解析）

静的荷重による座屈解析に用いる水平震度は、送電用支持物設計標準⁽⁶⁾において用いられる震度を参考に、文献⁽⁷⁾の手法に従い、図 3.10 のように作用させた。

座屈発生時の水平震度分布を図 3.11 に、座屈モードを図 3.12～3.13 に、圧縮軸力分布を図 3.14 に示す。

座屈発生位置は、架線方向、架線直角方向ともに鉄塔基部の支柱材であった。

(2) 動的荷重による座屈解析（動的解析）

動的荷重による座屈解析に用いる水平震度は、改良標準波 S_1F を入力地震動とした地震応答解析を行い、鉄塔に作用する加速度分布から水平震度を設定した。

座屈発生時の水平震度分布を図 3.15 に、座屈モードを図 3.16～3.17 に、圧縮軸力分布を図 3.18 に示す。

座屈発生位置は、架線方向では鉄塔中間部の支柱材であり、架線直角方向では鉄塔頂部の支柱材であった。

静的荷重及び動的荷重による座屈解析結果を表 3.7 に示す。

3.4.2 設計応答の算定

3.1 節で作成した解析モデルを用いて、静的荷重及び動的荷重による地震応答解析を行い、3.4.1 項で同定した損傷部位における設計応答を算出した。地震波の入力方向は、架線直角方向又は架線方向の一方向入力とした。

入力地震動（改良標準波 S_1F ）の加速度時刻歴波形を図 3.19 に、鉄塔頂部の加速度応答時刻歴及び変位応答時刻歴を図 3.20～図 3.23 に示す。応答加速度分布図及び応答変位分布図を図 3.24

～図 3.27 に示す。主柱材の軸力分布図を図 3.28～図 3.29 に示す。腹材断面力の出力面番号の位置図を図 3.30 に、各出力面における、腹材の軸力分布図を図 3.31～図 3.34 に示す。主柱材に作用する最大圧縮軸力分布を図 3.35 に示す。

3.4.3 軸力比の算出

3.4.1 項で算定した設計耐力と 3.4.2 項で算定した設計応答から軸力比（設計応答／設計耐力）を算出した。地震応答解析による軸力（設計応答）と座屈解析による軸力（設計耐力）の比較図を図 3.36、図 3.38、図 3.40、図 3.42 に、軸力比を図 3.37、図 3.39、図 3.41、図 3.43 に示す。最大軸力比となった設計応答と設計耐力の組合せ（図中に赤丸で表示。）に対して損傷確率を評価した。最大軸力比となった設計応答と設計耐力の組合せを表 3.8 に示す

3.5 損傷確率の評価

3.5.1 評価方法

鉄塔の損傷確率 $P_{CF}(\alpha)$ は、鉄塔の現実的応答 $f_R(\alpha, X)$ 及び現実的耐力 $f_C(X)$ を互いに独立な確率密度関数として定義し、現実的応答 $f_R(\alpha, X)$ が現実的耐力 $f_C(X)$ を上回る条件付き確率として次式で評価した。

なお、評価対象とする時震動レベルは、解放基盤表面で 0～2000Gal の範囲とした。

$$P(\alpha) = \int_0^{\infty} f_R(\alpha, X) \left\{ \int_0^X f_C(X) dX \right\} dX \quad \dots\dots\dots \text{式 (3.1)}$$

ここで、

$f_R(\alpha, X)$: 現実的応答に対する確率密度関数

$f_C(X)$: 現実的耐力に対する確率密度関数

α : 解放基盤表面における地震動の最大加速度

X : 応答等のパラメータ

3.5.2 現実的応答の評価

鉄塔の現実的応答 $f_R(\alpha, X)$ を次式で評価した。

$$f_R(\alpha, X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \beta_R \cdot X} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln X - \ln \left(\frac{q^D}{F_R} \cdot \frac{\alpha}{\alpha^D} \right)}{\beta_R} \right)^2 \right] \dots\dots\dots \text{式 (3.2)}$$

ここで、

$\overline{F_R}$: 応答係数の中央値

β_R : 応答係数の対数標準偏差

α^D : 解放基盤表面における設計用基準地震動の最大加速度

q^D : 設計応答 (kN)

α : 解放基盤表面における地震動の最大加速度

X : 応答等のパラメータ

応答係数は次式により評価した。

$$F_R = F_{WA} \cdot F_{SO} \cdot F_{ST} \dots\dots\dots \text{式 (3.3)}$$

ここで、

F_{WA} : 入力地震動に係るサブ応答係数

F_{SO} : 地盤モデルに係るサブ応答係数

F_{ST} : 構造物モデルに係るサブ応答係数

入力地震動に係るサブ応答係数 F_{WA} は、平成 17 年度の BWR プラントの建屋機器連成地震応答解析作業による応答係数の見直し^(付録)により、中央値 1.27、対数標準偏差 0.44 とした。地盤モデルに係るサブ応答係数 F_{SO} は、基礎岩盤設置のため、中央値 1.00、対数標準偏差 0.00 とした。構造物モデルに係るサブ応答係数 F_{ST} は、3 次元 FEM モデルを用いたため、中央値 1.00、対数標準偏差 0.00 とした。以上のサブ応答係数から応答係数を算出し、応答係数の中央値 1.27、対数標準偏差 0.44 とした。

確率論的に評価した鉄塔の現実的応答を表 3.9 に示す。

3.5.3 現実的耐力の評価

鉄塔の現実的耐力 $f_C(X)$ を次式で評価した。

$$f_C(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \beta_C \cdot X} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{\ln X - \ln(\overline{F_S} \cdot M_S)}{\beta_C} \right)^2 \right\} \dots\dots\dots \text{式 (3.4)}$$

ここで、

M_S : 設計耐力 (kN)

$\overline{F_S}$: 強度係数の中央値

β_C : 強度係数の対数標準偏差

X : 応答等のパラメータ

強度係数は鋼材の材料強度のばらつきに基づいて設定した。既往の材料試験結果⁽⁸⁾に基づき、送電鉄塔の強度係数の対数標準偏差は 0.1 とした。また、強度係数の中央値は、設計耐力が現実的耐力をほぼ近似すると仮定して、1.0 とした。

確率論的に評価した鉄塔の現実的耐力を表 3.10 に示す。

3.5.4 損傷確率評価結果

3.5.2 項で評価した現実的応答と 3.5.3 項で評価した現実的耐力を用いて、各損傷部位における損傷確率を評価した。評価結果を表 3.11 及び図 3.36～図 3.39 に示す。

損傷確率評価結果から、架線直角方向加震時の鉄塔頂部の損傷確率が最大であり、地震動レベル 900Gal における損傷確率は約 0.01、1300 Gal における損傷確率は約 0.07 であった。その他の損傷部位における損傷確率は問題とならないほど小さかった。

表 3.1 主柱材の諸元

パネル	パネル長 L[m]	塔体幅		主柱材							
		下側 a[m]	上側 b[m]	長さ L1[m]	断面積 A1[cm ²]	外径 D[m]	断面積 A[cm ²]	厚さ t[mm]	断面2次 I[cm ⁴]	質量 M[kg/m]	重量 W[tf]
1	4.5	6.29	6.00	4.5	30.87	165.2	30.01	6	952	23.6	0.1
2	4.5	6.57	6.29	4.5	30.87	165.2	30.01	6	952	23.6	0.1
3	5.0	6.89	6.57	5.0	53.61	267.4	57.27	7	4860	45.0	0.2
4	5.0	7.21	6.89	5.0	53.61	267.4	57.27	7	4860	45.0	0.2
5	5.0	7.52	7.21	5.0	57.26	267.4	57.27	7	4860	45.0	0.2
6	5.5	7.87	7.52	5.5	78.04	318.5	78.4	8	9410	61.3	0.3
7	5.0	8.19	7.87	5.0	78.04	318.5	78.4	8	9410	61.3	0.3
8	5.0	8.51	8.19	5.0	98.00	355.6	98.0	9	14700	76.9	0.4
9	5.0	8.83	8.51	5.0	124.50	355.6	129.5	12	19100	102.0	0.5
10	5.5	9.17	8.83	5.5	124.50	355.6	129.5	12	19100	102.0	0.6
11	5.0	9.49	9.17	5.0	148.70	406.4	148.7	12	28900	117.0	0.6
12	8.0	10.00	9.49	8.0	148.70	406.4	148.7	12	28900	117.0	0.9
13	10.0	12.35	10.00	10.07	167.60	457.2	167.8	12	41600	132.0	1.3
14	11.0	14.94	12.35	11.08	187.00	508	187.0	12	57500	147.0	1.6
15	13.0	18.00	14.94	13.09	187.00	508	187.0	12	57500	147.0	1.9

主柱材の重量 (×4本) 37.6tf

表 3.2 腹材の諸元

パネル	パネル長 L[m]	塔体幅		腹材							
		下側 a[m]	上側 b[m]	長さ L2[m]	断面積 A2[cm ²]	外径 D[m]	断面積 A[cm ²]	厚さ t[mm]	断面2次 I[cm ⁴]	質量 M[kg/m]	重量 W[tf]
1	4.5	6.29	6.00	7.61	12.18	114.3	12.18	3.5	187	9.6	0.1
2	4.5	6.57	6.29	7.85	12.18	114.3	12.18	3.5	187	9.6	0.1
3	5.0	6.89	6.57	8.38	22.72	165.2	22.72	4.5	734	17.8	0.1
4	5.0	7.21	6.89	8.64	38.36	267.4	38.70	6.0	4210	38.7	0.3
5	5.0	7.52	7.21	8.90	38.36	267.4	38.70	6.0	4210	38.7	0.3
6	5.5	7.87	7.52	9.46	38.36	267.4	38.70	6.0	4210	38.7	0.4
7	5.0	8.19	7.87	9.46	38.36	267.4	38.70	6.0	4210	38.7	0.4
8	5.0	8.51	8.19	9.73	38.36	267.4	38.70	6.0	4210	38.7	0.4
9	5.0	8.83	8.51	10.00	38.36	267.4	38.70	6.0	4210	38.7	0.4
10	5.5	9.17	8.83	10.55	38.36	267.4	38.70	6.0	4210	38.7	0.4
11	5.0	9.49	9.17	10.59	38.36	267.4	38.70	6.0	4210	38.7	0.4
12	8.0	10.00	9.49	12.61	53.61	318.5	58.91	6.0	7190	46.2	0.6
13	10.0	12.35	10.00	15.00	38.36	267.4	38.70	6.0	4210	38.7	0.6
				15.00	53.61	318.5	58.91	6.0	7190	46.2	0.7
14	11.0	14.94	12.35	17.53	38.36	267.4	38.70	6.0	4210	38.7	0.7
				17.53	53.61	318.5	58.91	6.0	7190	46.2	0.8
15	13.0	18.00	14.94	20.98	53.61	318.5	58.91	6.0	7190	46.2	1.0

腹材の重量 (×8本) 60.8tf

表 3.3 腕金の諸元

パネル	パネル長 L[m]	塔体幅		腕 金							
		下側 a[m]	上側 b[m]	全長 L3[m]	断面積 A3[cm ²]	外径 D[m]	断面積 A[cm ²]	厚さ t[mm]	断面2次 I[cm ⁴]	質量 M[kg/m]	重量 W[tf]
1	4.5	6.29	6.00	125.8	30.87	165.2	30.01	6.0	952	23.6	3
2											
3	5.0	6.89	0.00	206.2	53.61	267.4	57.27	7.0	4860	45.0	9
4											
5											
6											
7	5.0	8.19	0.00	213.5	78.04	318.5	78.4	8.0	9410	61.3	13
8											
9											
10											
11	5.0	9.49	0.00	225.1	148.70	406.4	148.7	12.0	28900	117.0	26
12											
13											
14	11.0	14.94	12.35	176.00	187.00	508	187.0	12.0	57500	147.0	26
15											

腹材の重量 (×左右分) 155.1tf

表 3.4 水平材の諸元

パネル	パネル長 L[m]	塔体幅		水 平 材							
		下側 a[m]	上側 b[m]	長さ L1[m]	断面積 A1[cm ²]	外径 D[m]	断面積 A[cm ²]	厚さ t[mm]	断面2次 I[cm ⁴]	質量 M[kg/m]	重量 W[tf]
1	4.5	6.29	6.00	4.5	30.87	165.2	30.01	6.0	952	23.6	0.1
2	4.5	6.57	6.29	4.5	30.87	165.2	30.01	6.0	952	23.6	0.1
3	5.0	6.89	6.57	5.0	53.61	267.4	57.27	7.0	4860	45.0	0.3
4	5.0	7.21	6.89	5.0	53.61	267.4	57.27	7.0	4860	45.0	0.3
5	5.0	7.52	7.21	5.0	57.26	267.4	57.27	7.0	4860	45.0	0.3
6	5.5	7.87	7.52	5.5	78.04	318.5	78.4	8.0	9410	61.3	0.5
7	5.0	8.19	7.87	5.0	78.04	318.5	78.4	8.0	9410	61.3	0.5
8	5.0	8.51	8.19	5.0	98.00	355.6	98.0	9.0	14700	76.9	0.6
9	5.0	8.83	8.51	5.0	124.50	355.6	129.5	12.0	19100	102.0	0.9
10	5.5	9.17	8.83	5.5	124.50	355.6	129.5	12.0	19100	102.0	0.9
11	5.0	9.49	9.17	5.0	148.70	406.4	148.7	12.0	28900	117.0	1.1
12	8.0	10.00	9.49	8.0	148.70	406.4	148.7	12.0	28900	117.0	1.1
13	10.0	12.35	10.00	10.07	167.60	457.2	167.8	12.0	41600	132.0	1.3
14	11.0	14.94	12.35	11.08	187.00	508	187.0	12.0	57500	147.0	1.8
15	13.0	18.00	14.94	13.09	187.00	508	187.0	12.0	57500	147.0	2.2

主柱材の重量 (×断面積) 48.3tf

表 3.5 要素の諸元

部材	使用要素	ヤング係数 E [N/mm ²]	せん断弾性係数 G [N/mm ²]	ポアソン比 ν
鉄塔本体	梁要素	200000.	$E/2(\nu+1)$	0.3
架渉線	トラス要素	200000.	$E/2(\nu+1)$	0.3
基礎	—	—	—	—

表 3.6 固有値解析結果

次数	電中研報告書計算値		解析結果						
	固有振動数(Hz)		モード	固有振動数 (Hz)	固有周期 (SEC)	モード	有効質量 (kg)		
	計算値	実験値					線路直角方向(N)	線路方向(E)	鉛直方向
1	0.786	0.78	線路直角方向(N) 1次	0.862	1.160	線路直角方向(N) 1次	156.1	0.0	0.0
2	0.805	0.80	線路方向(E) 1次	0.881	1.135	線路方向(E) 1次	0.0	164.0	0.0
3	1.523		振り(T) 1次	1.847	0.541	振り(T) 1次	0.0	0.0	0.0
4	2.316	2.45	N 2次	2.284	0.438	N 2次	133.8	0.0	0.0
5	2.687	2.68	E 2次	2.468	0.405	E 2次	0.0	143.1	0.0
6	3.382		T 2次	3.593	0.278	T 2次	0.0	0.0	0.0
7	3.798	4.20	N 3次	3.908	0.256	N 3次	42.1	0.0	0.0
8	4.226		腕金(C4)	4.653	0.215	E 3次	0.0	44.8	0.0
9	4.321		腕金(C4)	5.139	0.195	上下方向(D) 1次	0.0	0.0	300.3
10	4.436		上下方向(D) 1次	5.218	0.192	腹材の面外振動	0.0	0.0	0.0
11	4.545		腕金(G)	5.311	0.188	T 3次	0.0	0.0	0.0
12	4.758	4.80	腕金(G, C4)	5.598	0.179	N 4次と腕金Gの連成	22.3	0.0	0.0
13	5.185	5.35	N(擬似) 3次	6.086	0.164	N 5次と腕金Gの連成	7.4	0.0	0.0
14	5.231	5.50	E 3次	6.636	0.151	T 4次	0.0	0.0	0.0
15	5.586		T 3次	6.701	0.149	上下方向(D) 2次	0.0	0.0	3.2
16	6.156		腕金(C1, C3)	6.909	0.145	E 4次	0.0	11.2	0.0
17	6.242		腕金(C2, C3)	7.244	0.138	腕金(G, C1)	0.2	0.0	0.0
18	6.541		腕金(C2, C3)	7.517	0.133	腕金(C3, C4)	2.4	0.0	0.0
19	6.837		腕金(G, C1)	7.702	0.130	腹材の面外振動	0.0	0.0	0.0
20	7.012		腕金(G, 振り)	8.399	0.119	水平材の上下振動	0.0	0.0	0.0

ただし、

G：架空地線腕金

C1：上相腕金

C2：中相腕金

C3：下相腕金

C4：遮へい線 腕金

表 3.7 座屈解析結果

座屈解析	架線方向	架線直角方向
静的解析	座標：1.78～22.76m 圧縮軸力：27.2～41.5×10 ³ kN	座標：1.78～22.76m 圧縮軸力：28.9～41.3×10 ³ kN
動的解析	座標：55.7～74.9m 圧縮軸力：9.37～15.7×10 ³ kN	座標：86.8～95.9m 圧縮軸力：0.54～3.38×10 ³ kN

(注) 表中の圧縮軸力は座屈発生時の値を示す。

表 3.8 最大軸力比となった耐力と応答の組合せ

	座屈荷重	高さ(m)	軸力(kN)		軸力比
			設計耐力 (座屈解析)	設計応答 (地震応答解析)	
架線方向	静的	14.5	32,620	1,902	0.058
	動的	63.8	13,028	989	0.076
架線直角方向	静的	14.5	33,242	1,805	0.054
	動的	93.6	542	76	0.141

表 3.9 現実的応答

入力方向	評価対象部位	設計応答 (kN)	応答係数	
			中央値	対数標準偏差
架線方向	鉄塔基部	1,902	1.27	0.44
	鉄塔中間部	989		
架線直角方向	鉄塔基部	1,805		
	鉄塔頂部	76		

表 3.10 現実的耐力

入力方向	評価対象部位	設計耐力 (kN)	強度係数	
			中央値	対数標準偏差
架線方向	鉄塔基部	32,620	1.0	0.1
	鉄塔中間部	13,028		
架線直角方向	鉄塔基部	33,242		
	鉄塔頂部	542		

表 3.11 損傷確率評価結果

地震動レベル (Gal)	架線方向		架線直角方向	
	鉄塔基部	鉄塔中間部	鉄塔基部	鉄塔頂部
100	0.00	0.00	0.00	0.00
200	0.00	0.00	0.00	0.00
300	0.00	0.00	0.00	9.84×10^{-7}
400	0.00	2.98×10^{-8}	0.00	1.85×10^{-5}
500	0.00	2.98×10^{-7}	0.00	1.40×10^{-4}
600	1.19×10^{-7}	2.12×10^{-6}	5.96×10^{-8}	6.22×10^{-4}
700	6.56×10^{-7}	1.03×10^{-5}	2.98×10^{-7}	1.95×10^{-3}
800	2.74×10^{-6}	3.68×10^{-5}	1.28×10^{-6}	4.79×10^{-3}
900	9.09×10^{-6}	1.06×10^{-4}	4.41×10^{-6}	9.90×10^{-3}
1000	2.52×10^{-5}	2.60×10^{-4}	1.27×10^{-5}	1.80×10^{-2}
1100	6.08×10^{-5}	5.58×10^{-4}	3.16×10^{-5}	2.97×10^{-2}
1200	1.31×10^{-4}	1.08×10^{-3}	7.00×10^{-5}	4.53×10^{-2}
1300	2.57×10^{-4}	1.93×10^{-3}	1.41×10^{-4}	6.49×10^{-2}
1400	4.69×10^{-4}	3.21×10^{-3}	2.63×10^{-4}	8.84×10^{-2}
1500	8.00×10^{-4}	5.05×10^{-3}	4.59×10^{-4}	1.16×10^{-1}
1600	1.29×10^{-3}	7.57×10^{-3}	7.59×10^{-4}	1.46×10^{-1}
1700	2.00×10^{-3}	1.09×10^{-2}	1.20×10^{-3}	1.79×10^{-1}
1800	2.96×10^{-3}	1.51×10^{-2}	1.81×10^{-3}	2.14×10^{-1}
1900	4.24×10^{-3}	2.03×10^{-2}	2.63×10^{-3}	2.50×10^{-1}
2000	5.90×10^{-3}	2.65×10^{-2}	3.72×10^{-3}	2.88×10^{-1}

1号 引留型
鉄塔全高 93m
概算質量 400t
碍子 北側 #3 54t 懸垂碍子 34個×4連
その他 5相 42t 懸垂碍子 38個×4連

2号 直線耐張型
鉄塔全高 97m
概算質量 310t
碍子 1号と同じ
塔頂架空地線アーム上に自然
雷捕捉絶縁アーム設置
GW：接地線
SW：シールド線

3号 引留型
鉄塔全高 90m
概算質量 380t
碍子 1号と同じ

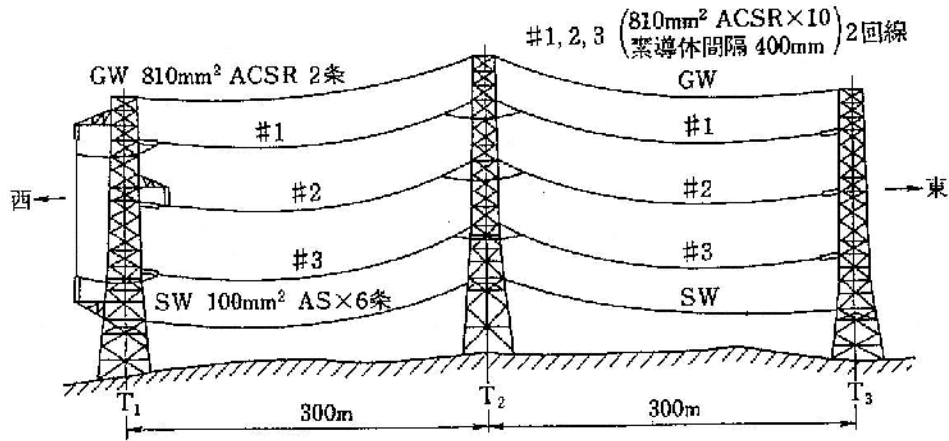


図 3.1 赤城試験線の概念図

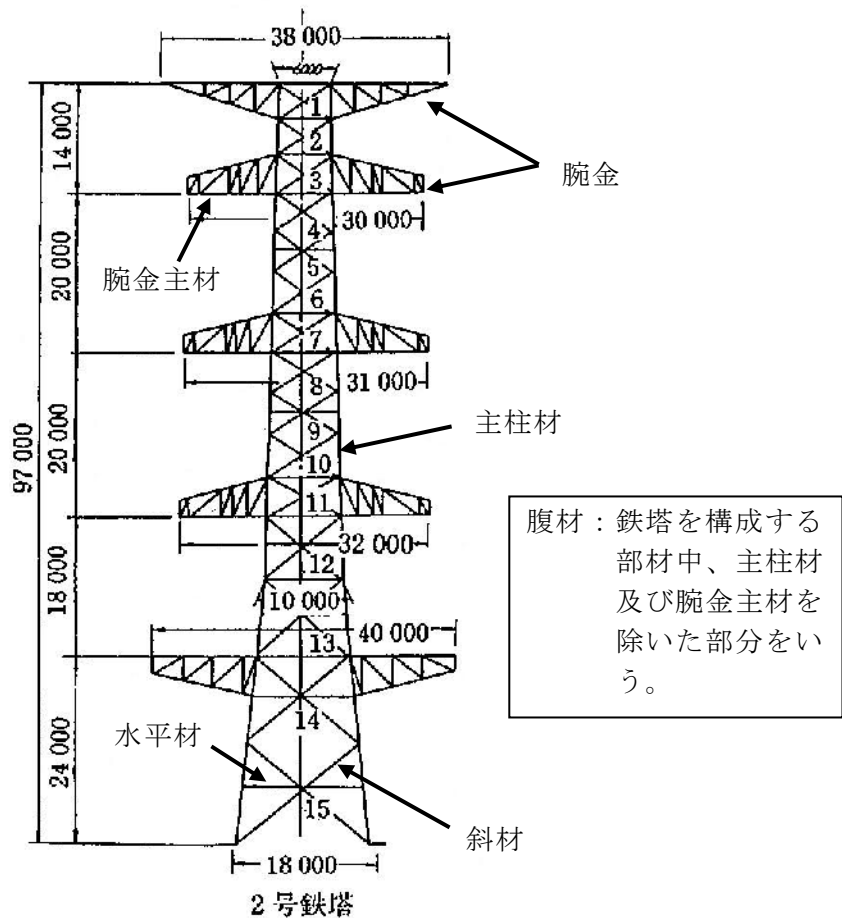
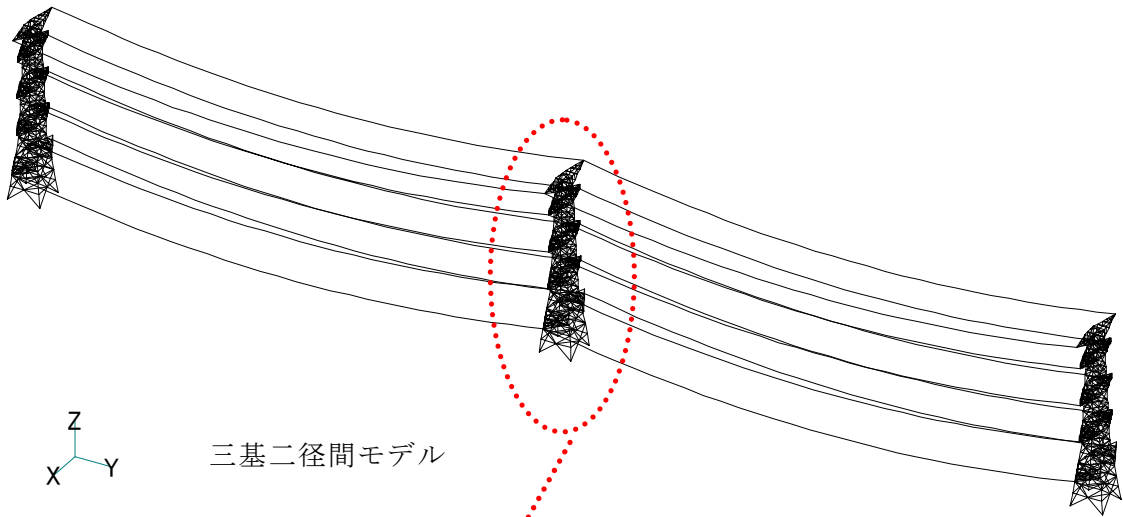
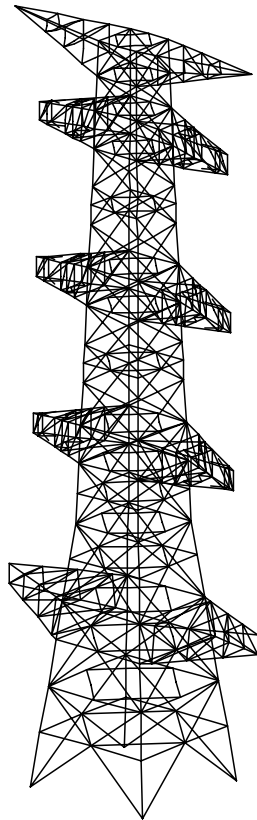


図 3.2 UHV 送電鉄塔構造図



三基二径間モデル



中央 2 号鉄塔 FEM モデル

図 3.3 解析モデル

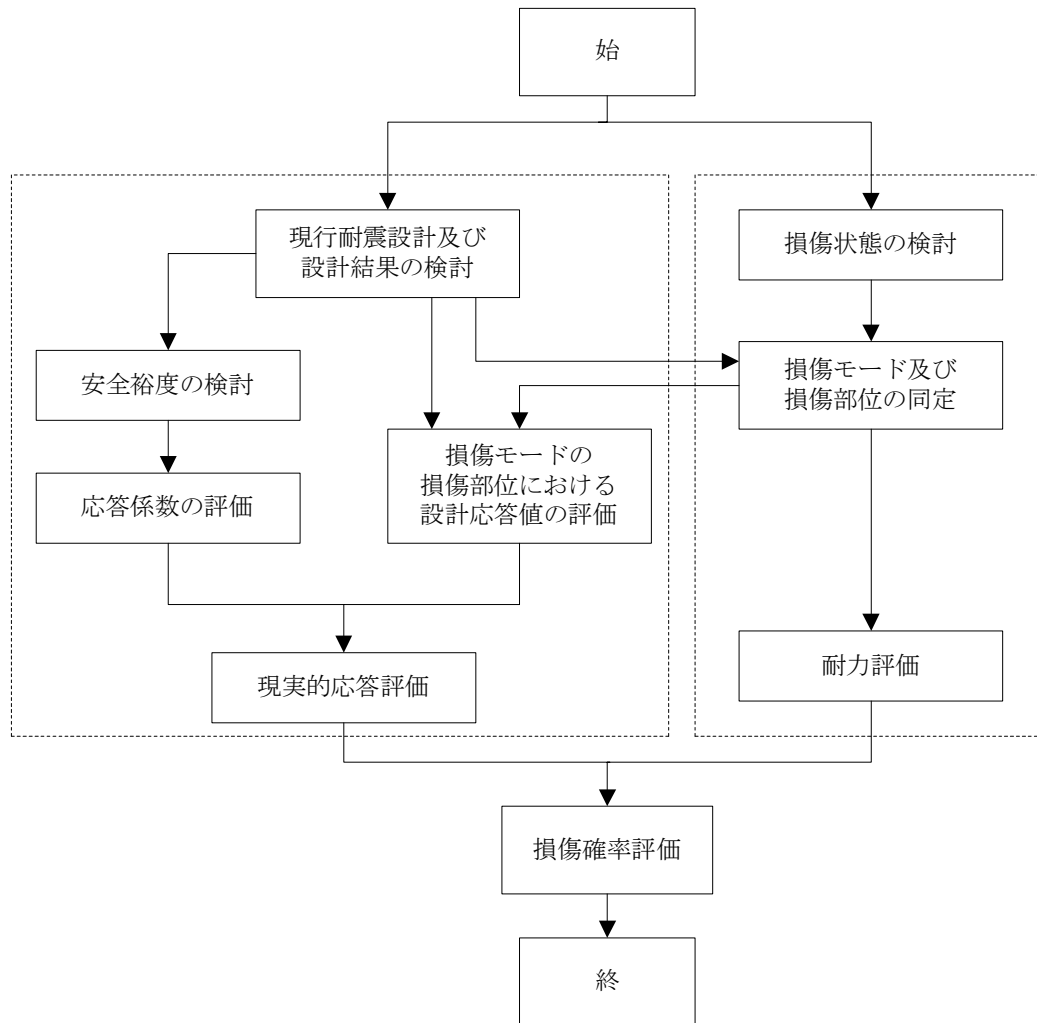


図 3.4 応答係数法に基づく送電鉄塔の損傷確率評価手順

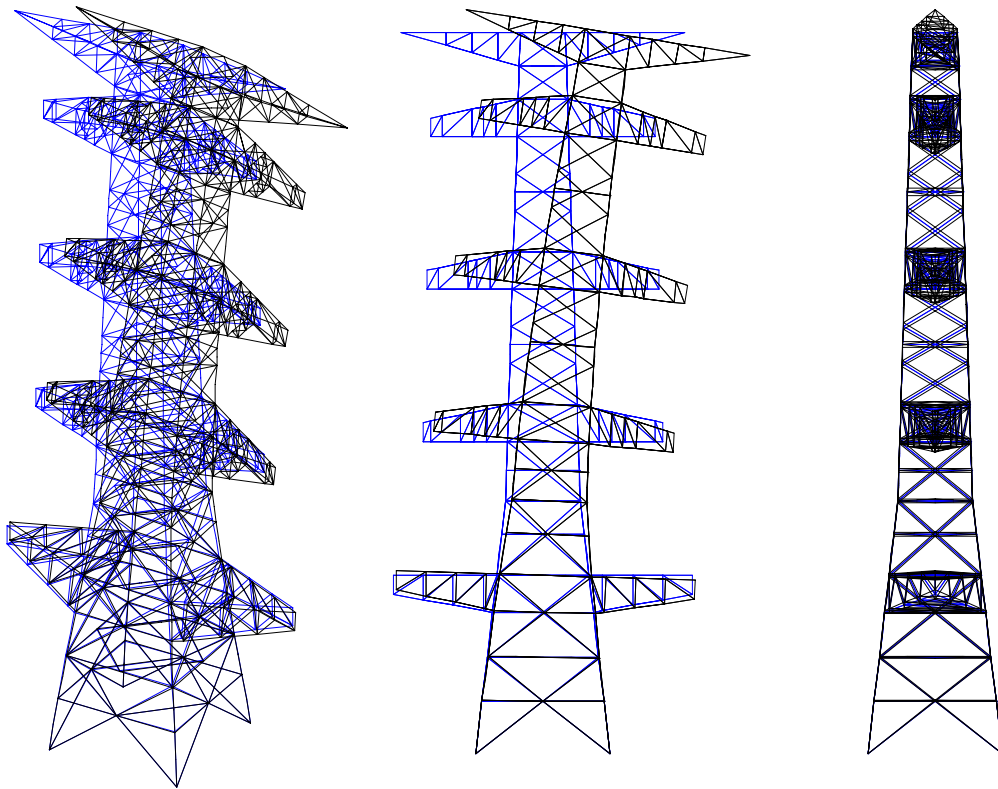


図 3.5 固有値解析結果（架線直角方向 1 次モード）

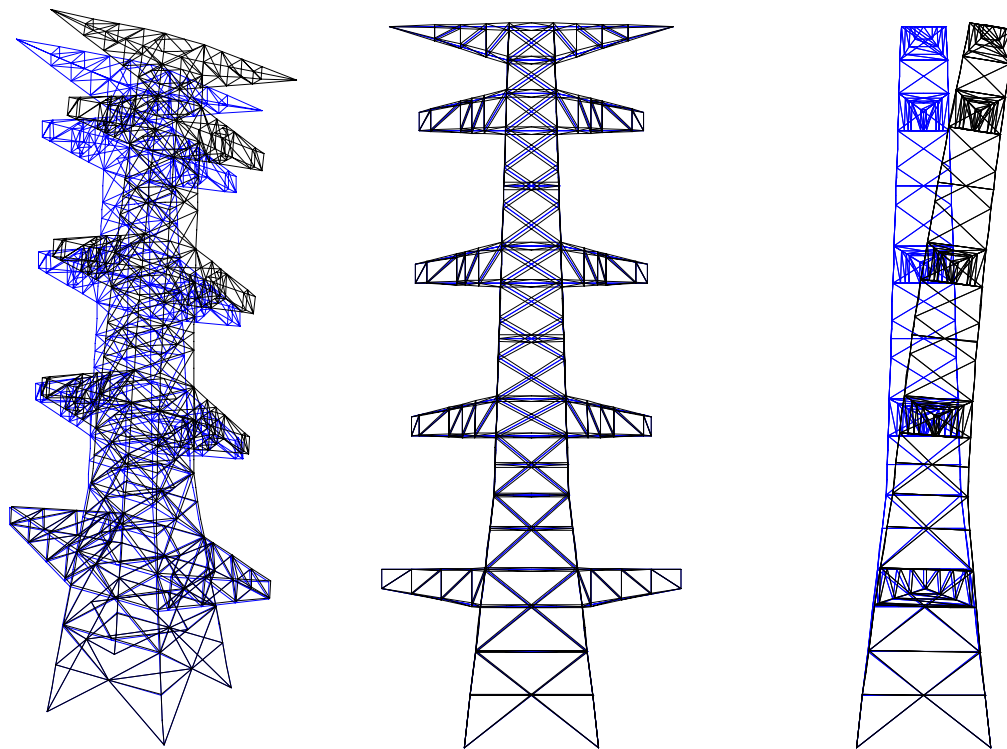


図 3.6 固有値解析結果（架線方向 1 次モード）

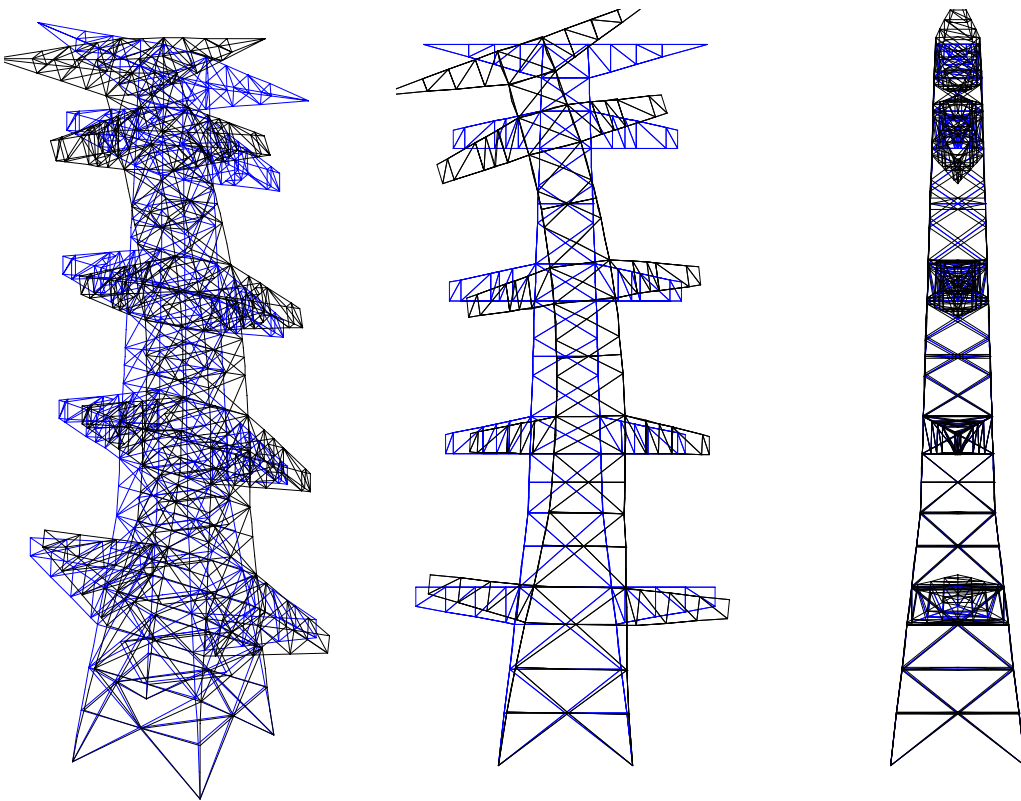


図 3.7 固有値解析結果（架線直角方向 2 次モード）

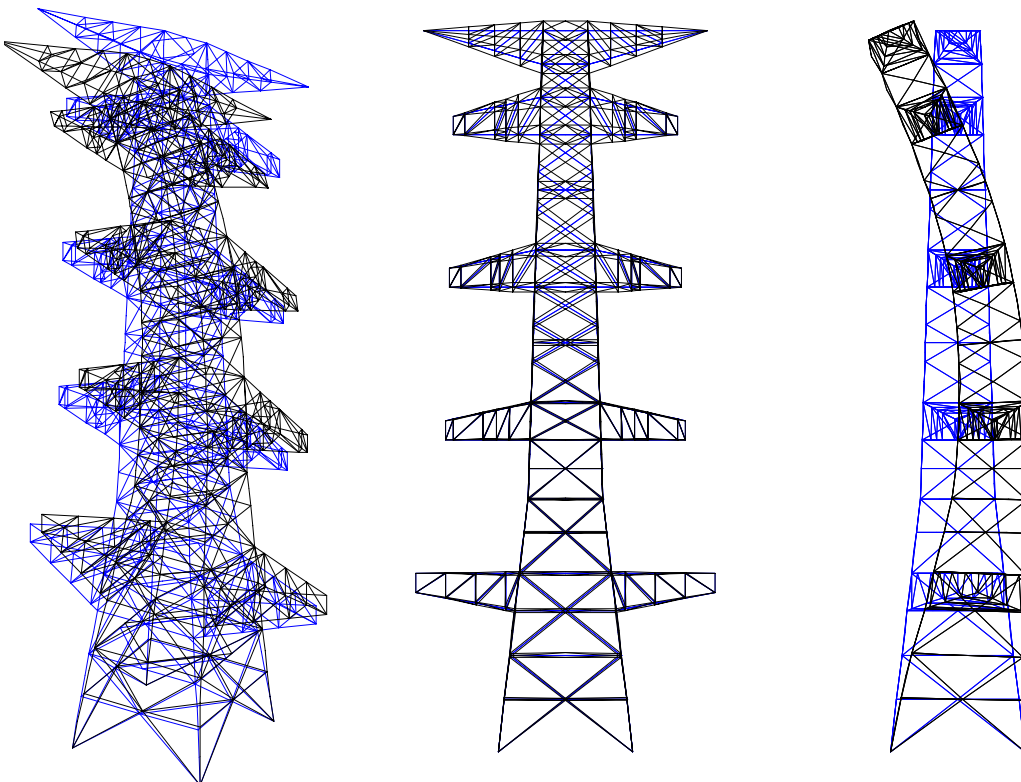


図 3.8 固有値解析結果（架線方向 2 次モード）

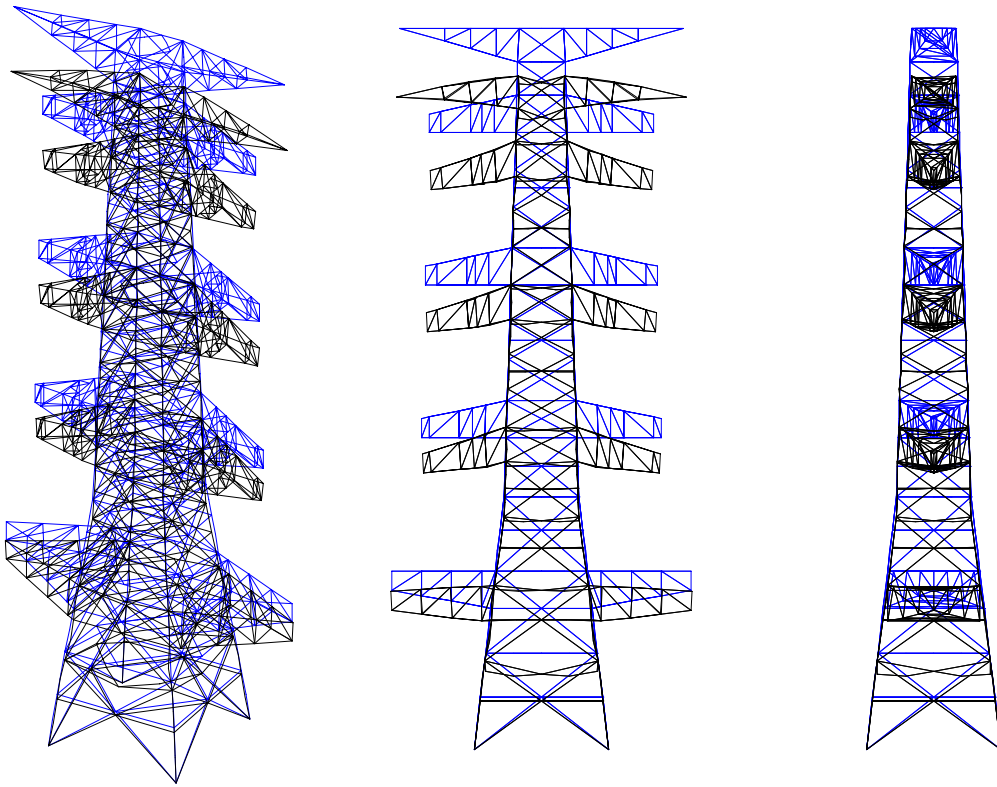


図 3.9 固有値解析結果（上下方向 1 次モード）

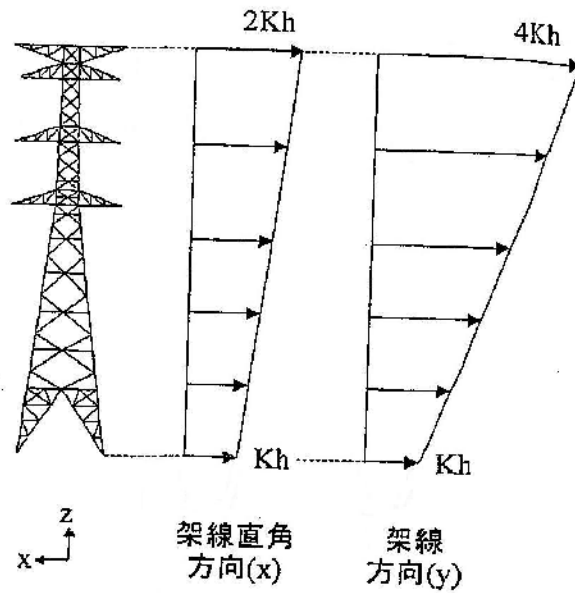


図 3.10 座屈解析に用いる水平震度

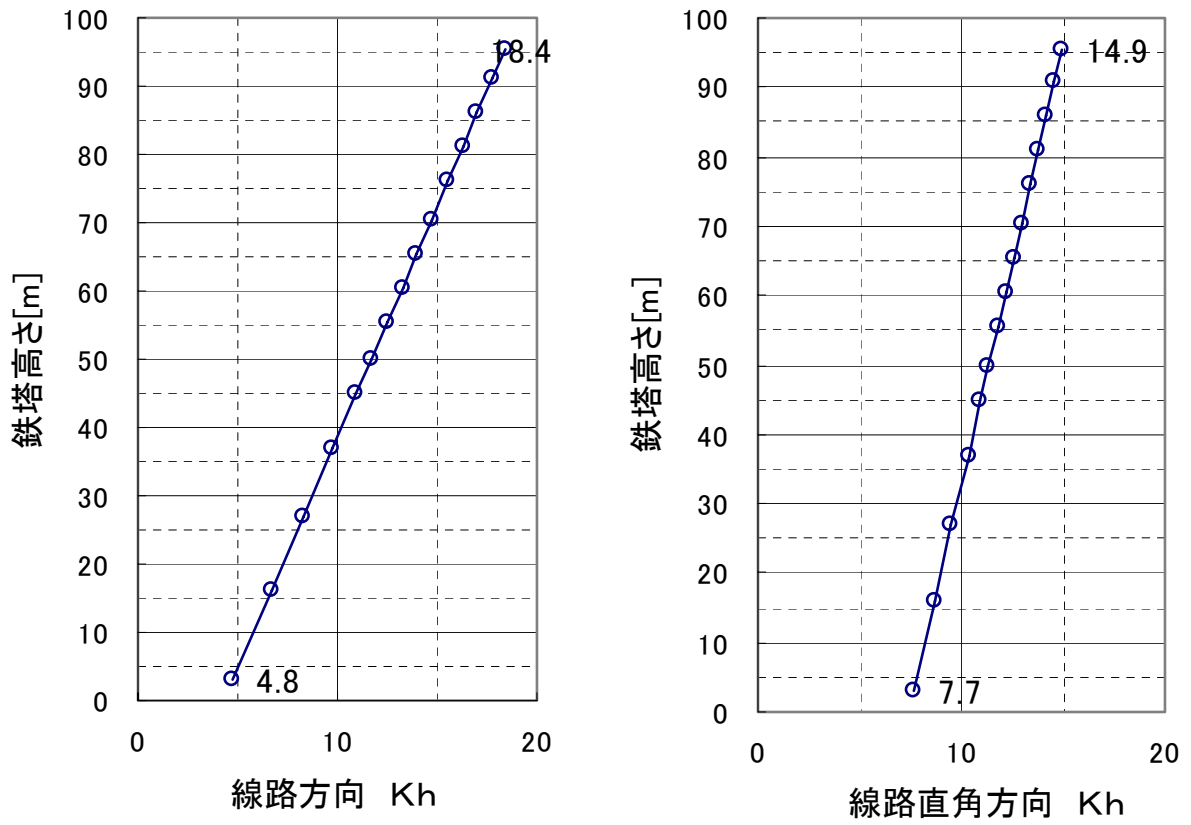


図 3.11 静的解析による座屈解析結果（座屈発生時の水平震度分布）

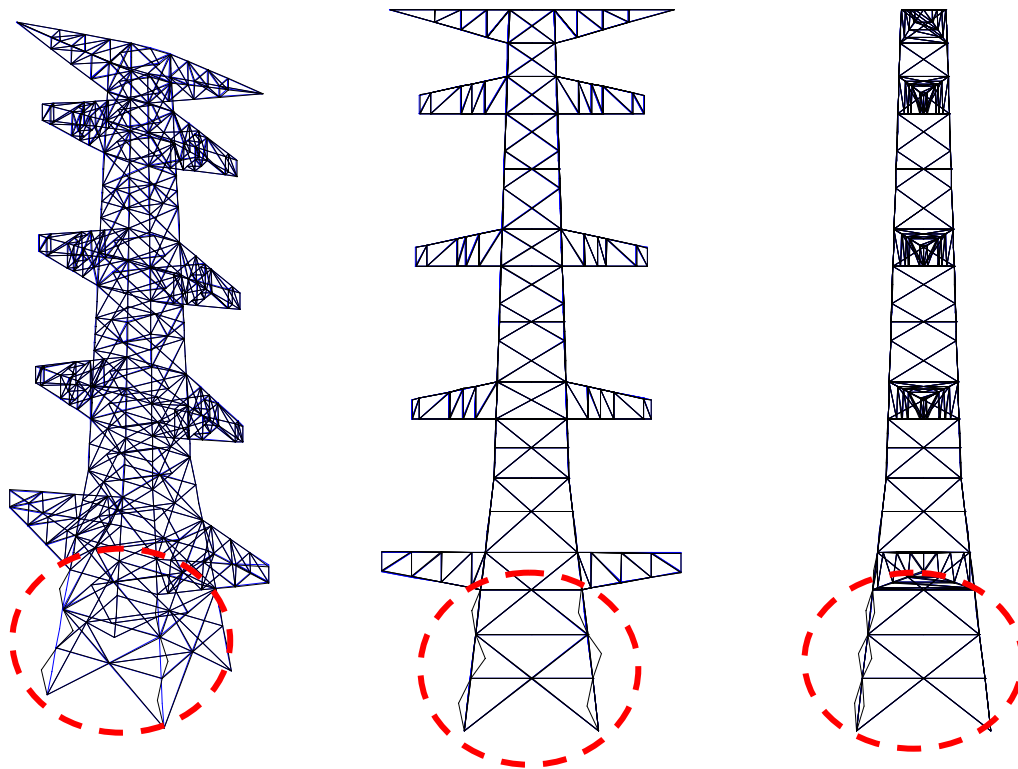


図 3.12 静的解析による座屈解析結果—座屈モード—（架線方向）

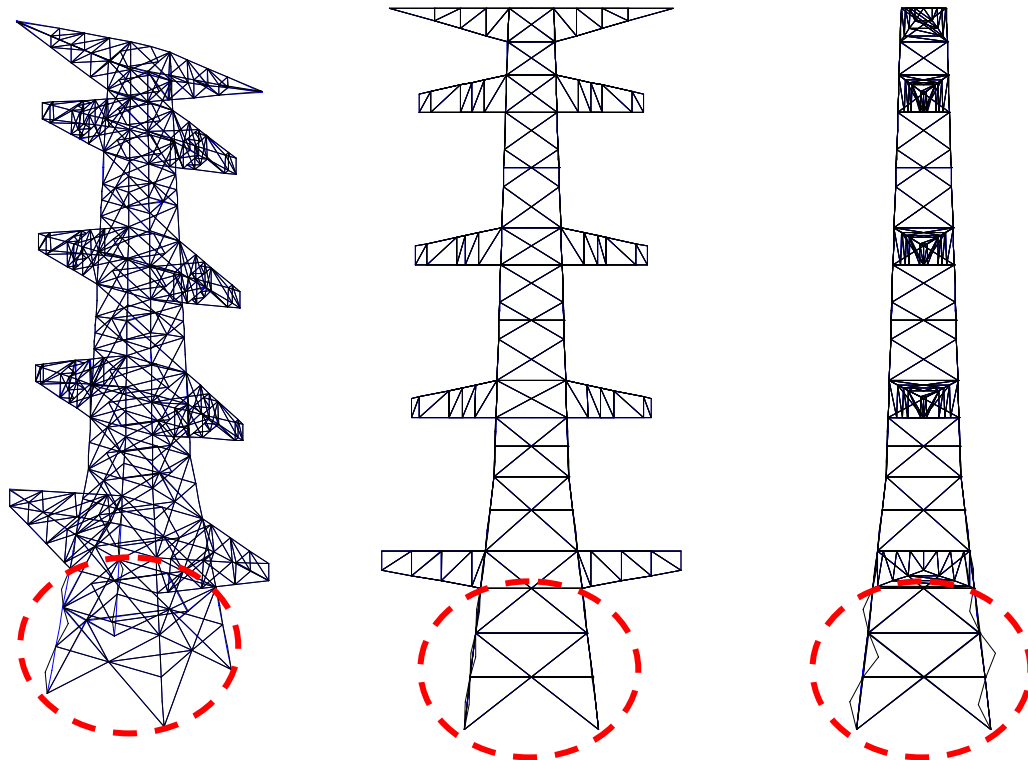
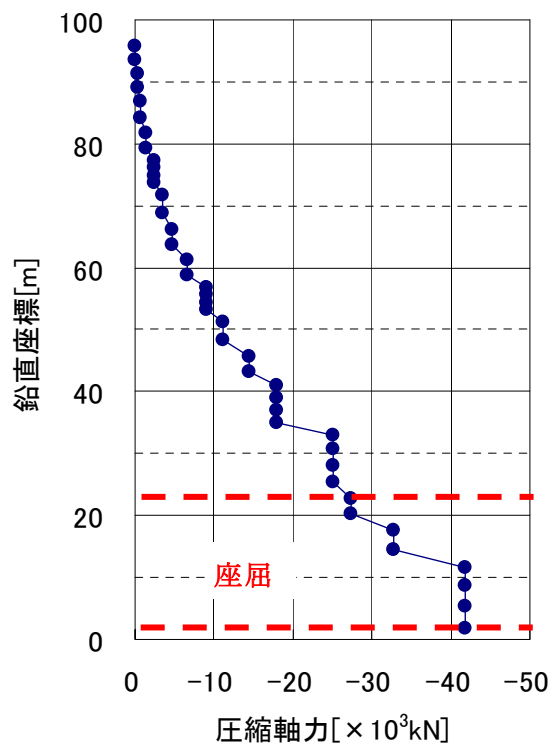


図 3.13 静的解析による座屈解析結果—座屈モード—（架線直角方向）

架線方向の圧縮軸力



架線直角方向の圧縮軸力

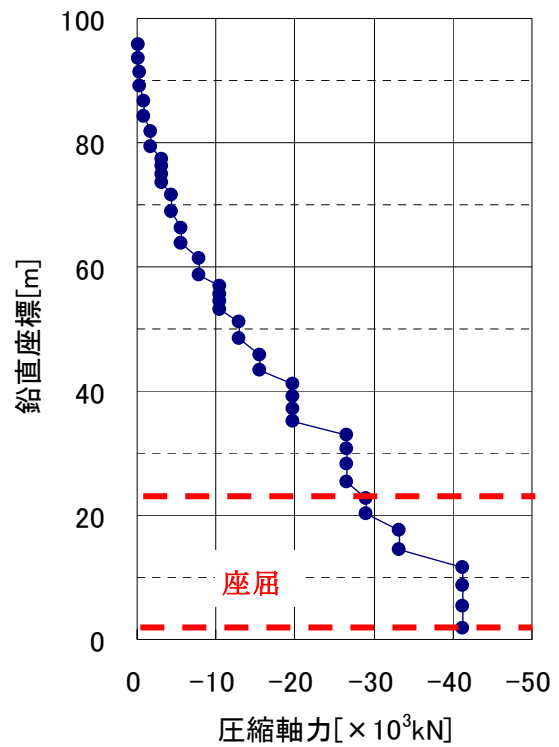


図 3.14 静的解析による座屈解析結果（座屈発生時の軸力分布）

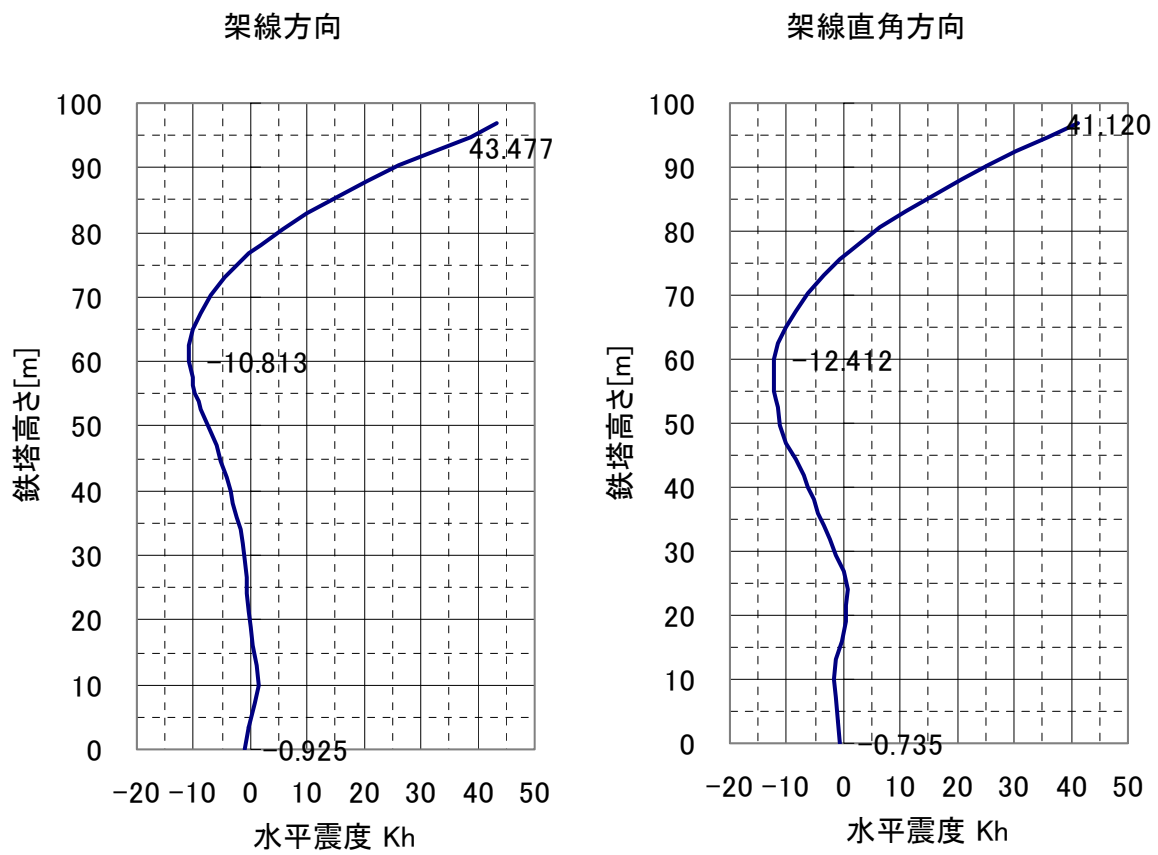


図 3.15 動的解析による座屈解析結果（座屈発生時の水平震度分布）

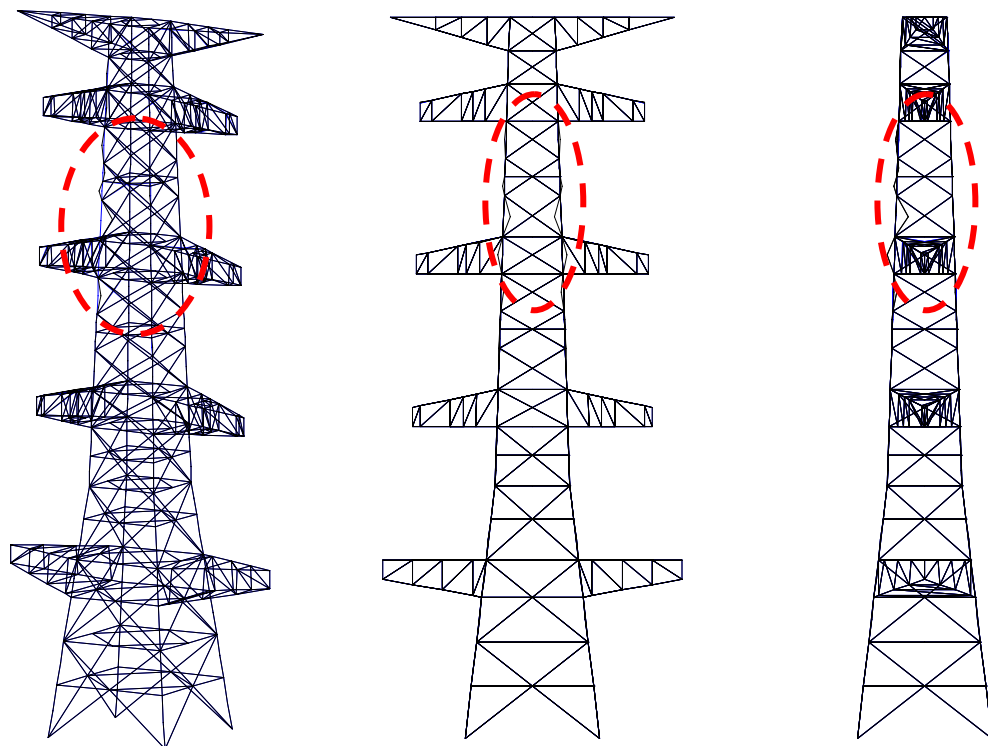


図 3.16 動的解析による座屈解析結果—座屈モード—（架線方向）

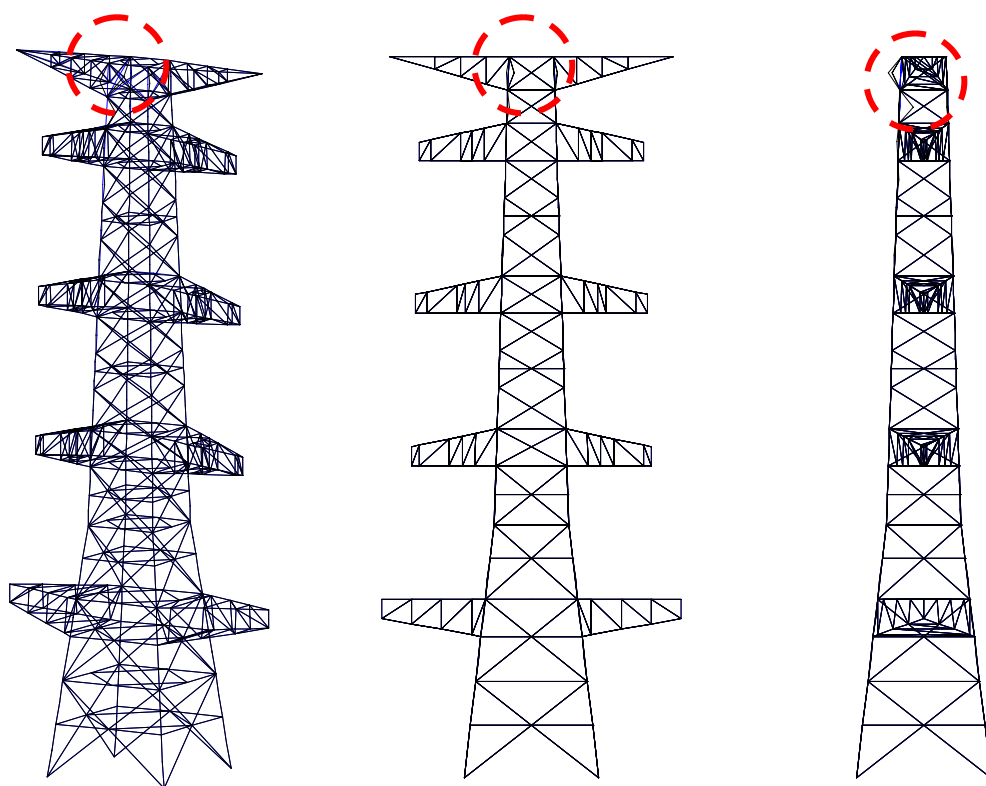


図 3.17 動的解析による座屈解析結果—座屈モード—（架線直角方向）

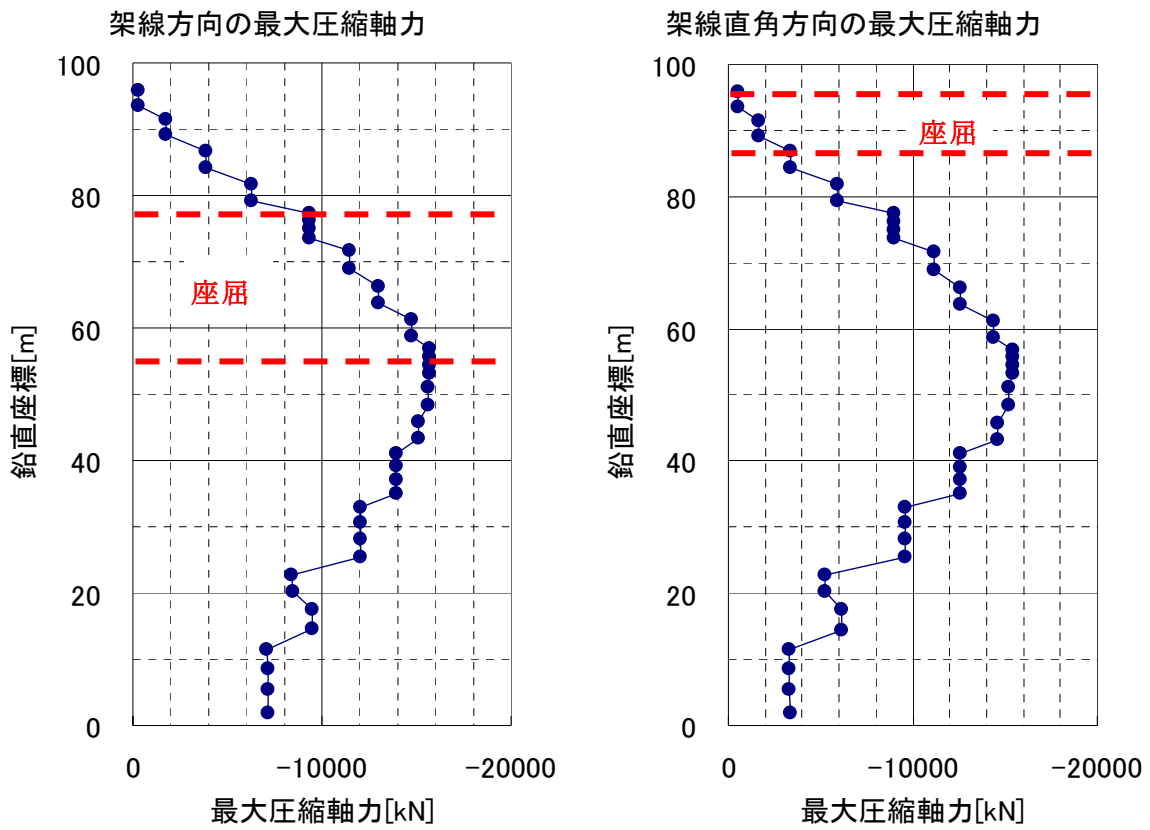


図 3.18 動的解析による座屈解析結果（座屈発生時の軸力分布）

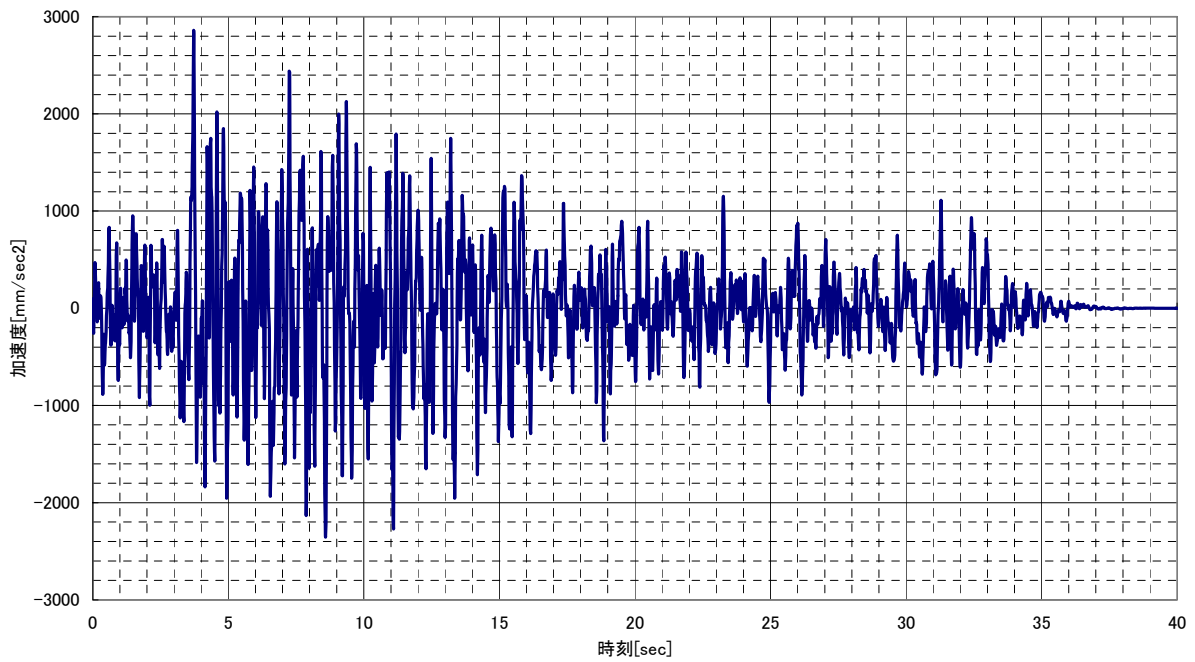


図 3.19 入力地震動（改良標準波 S₁F）

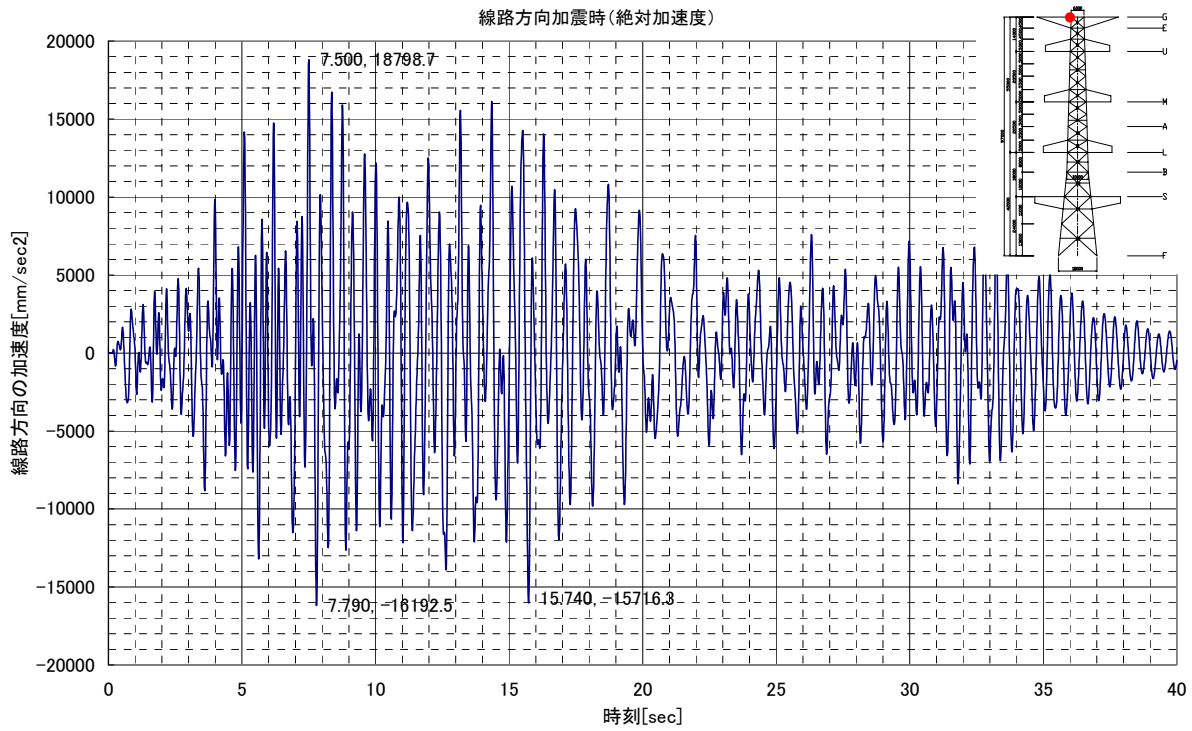


図 3.20 鉄塔頂部の加速度応答時刻歴（架線方向）

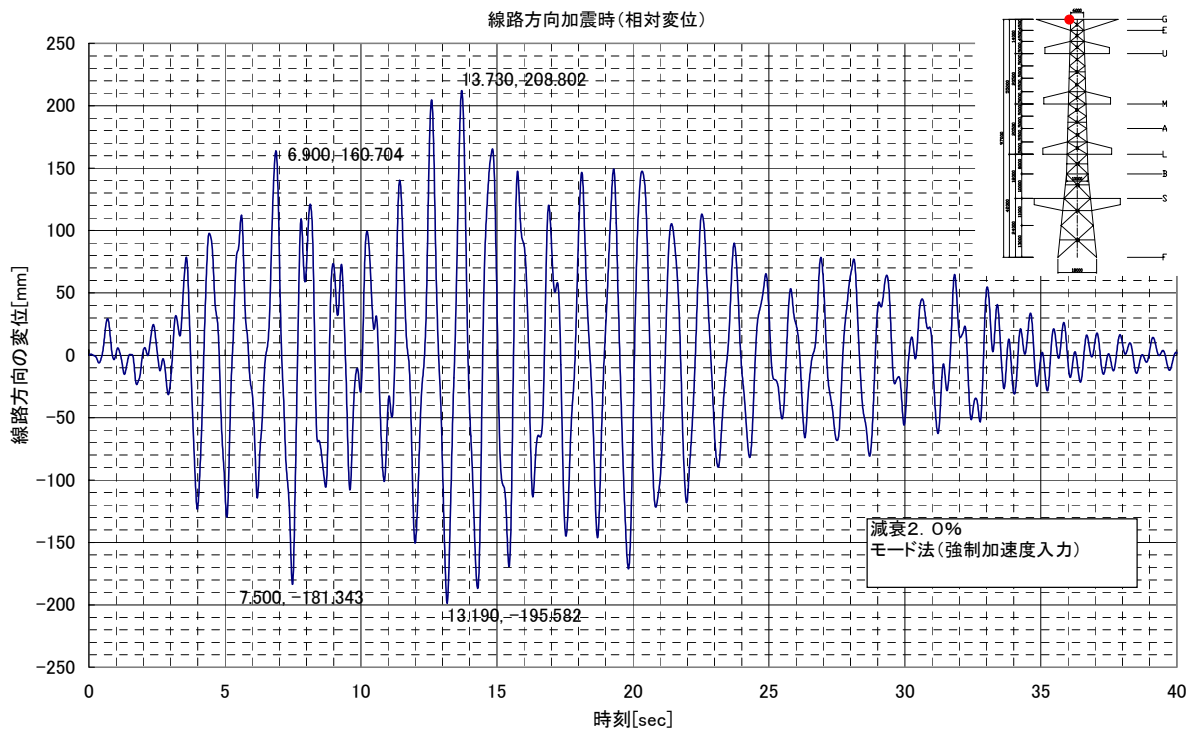


図 3.21 鉄塔頂部の変位応答時刻歴（架線方向）

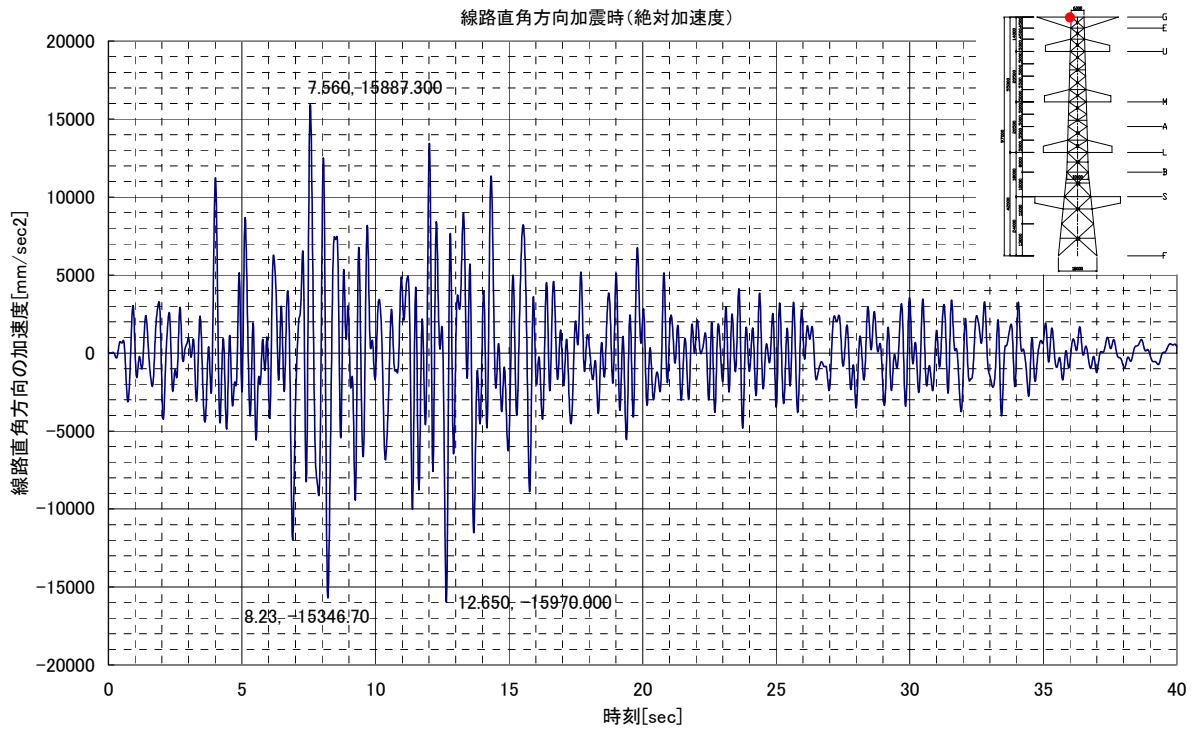


図 3.22 鉄塔頂部の加速度応答時刻歴 (架線直角方向)

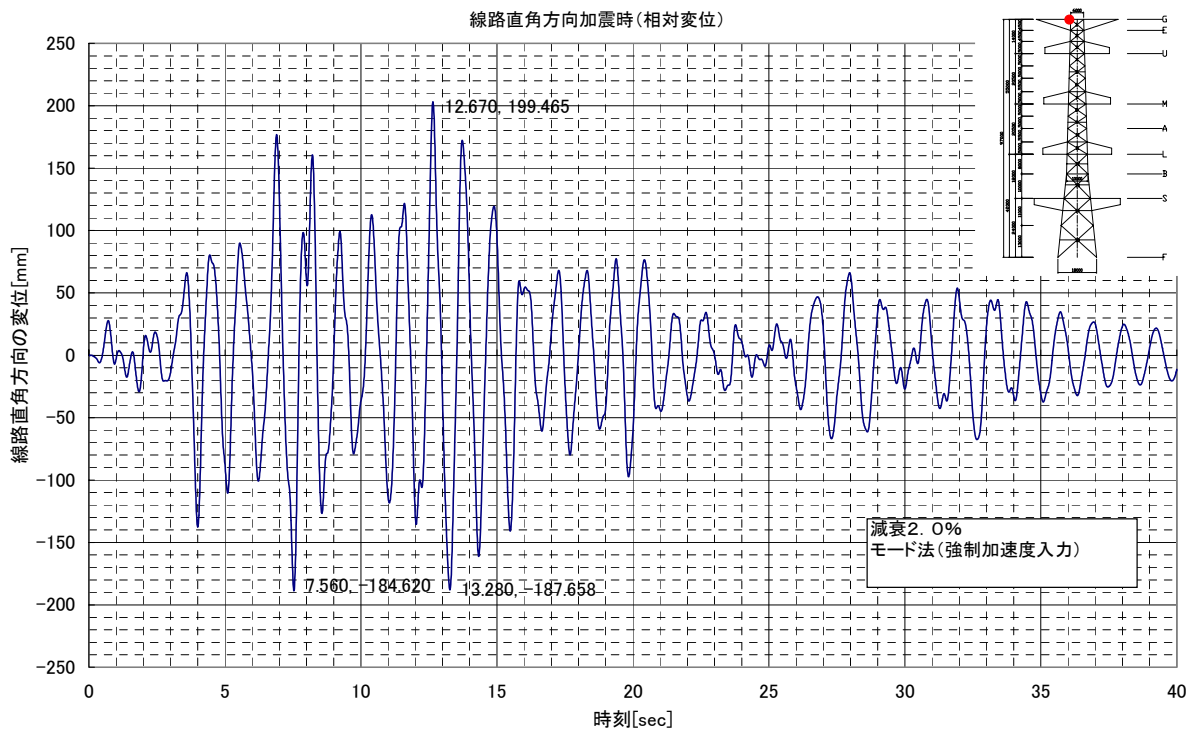


図 3.23 鉄塔頂部の変位応答時刻歴 (架線直角方向)

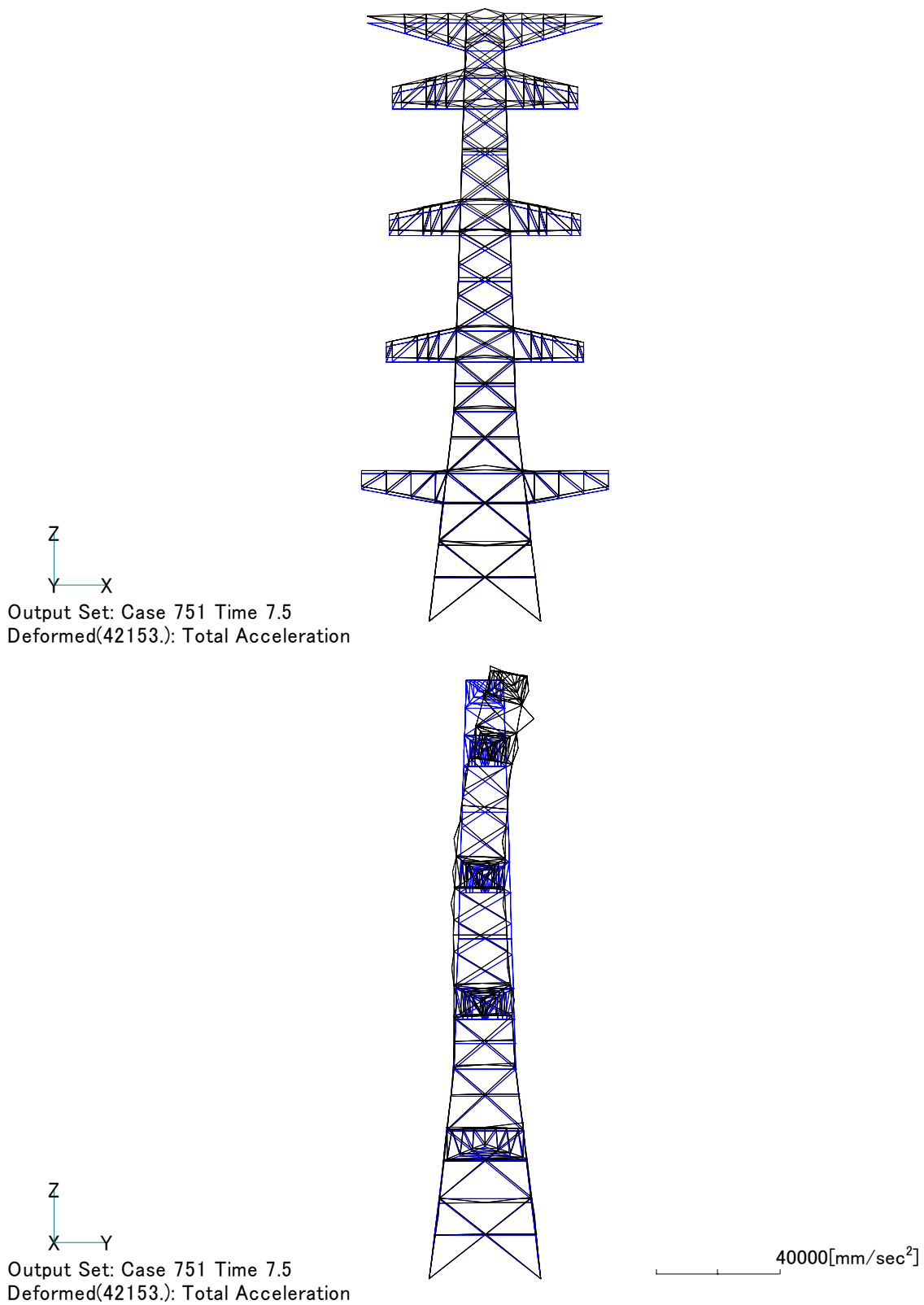


図 3.24 架線方向加震時の応答加速度分布図 (7.50 秒)

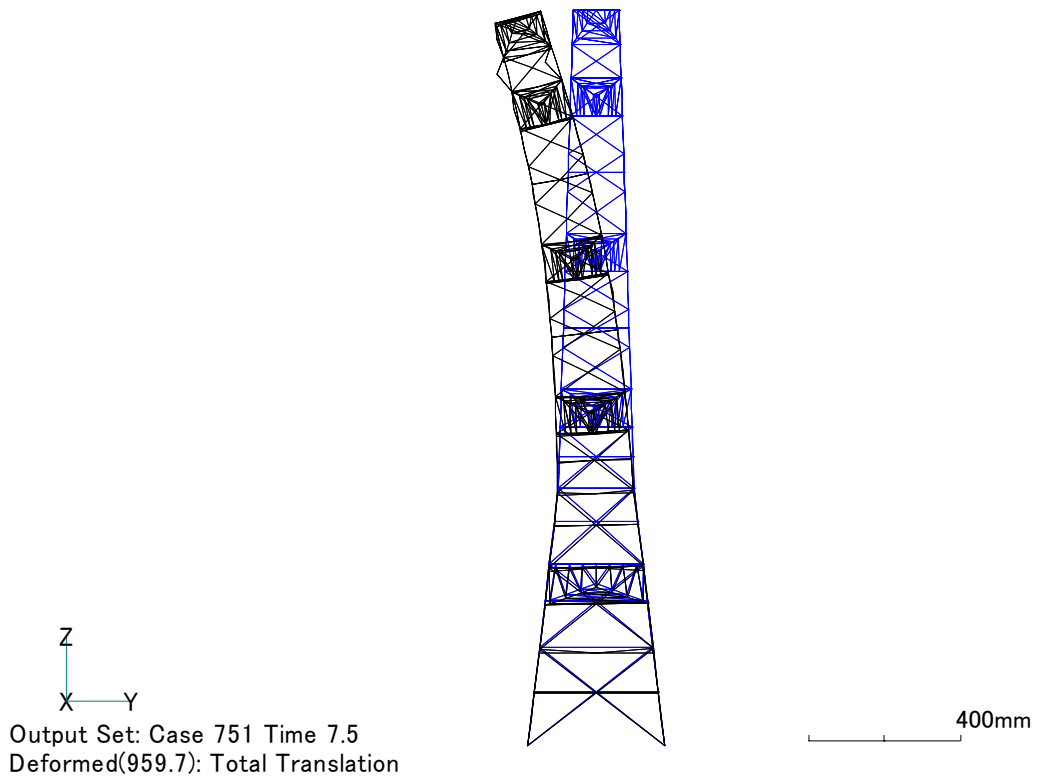
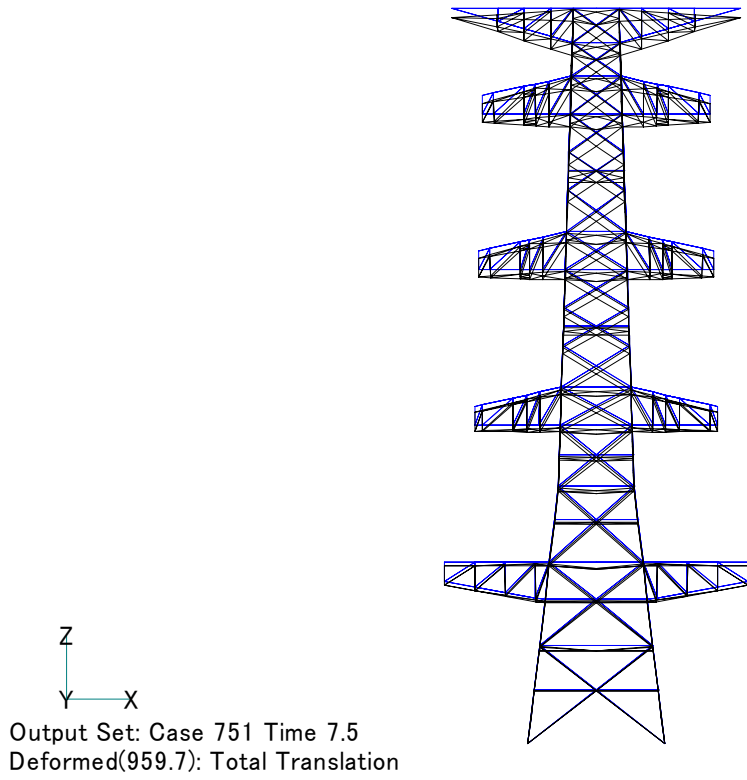


図 3.25 架線方向加震時の応答変位分布図 (7.50 秒)

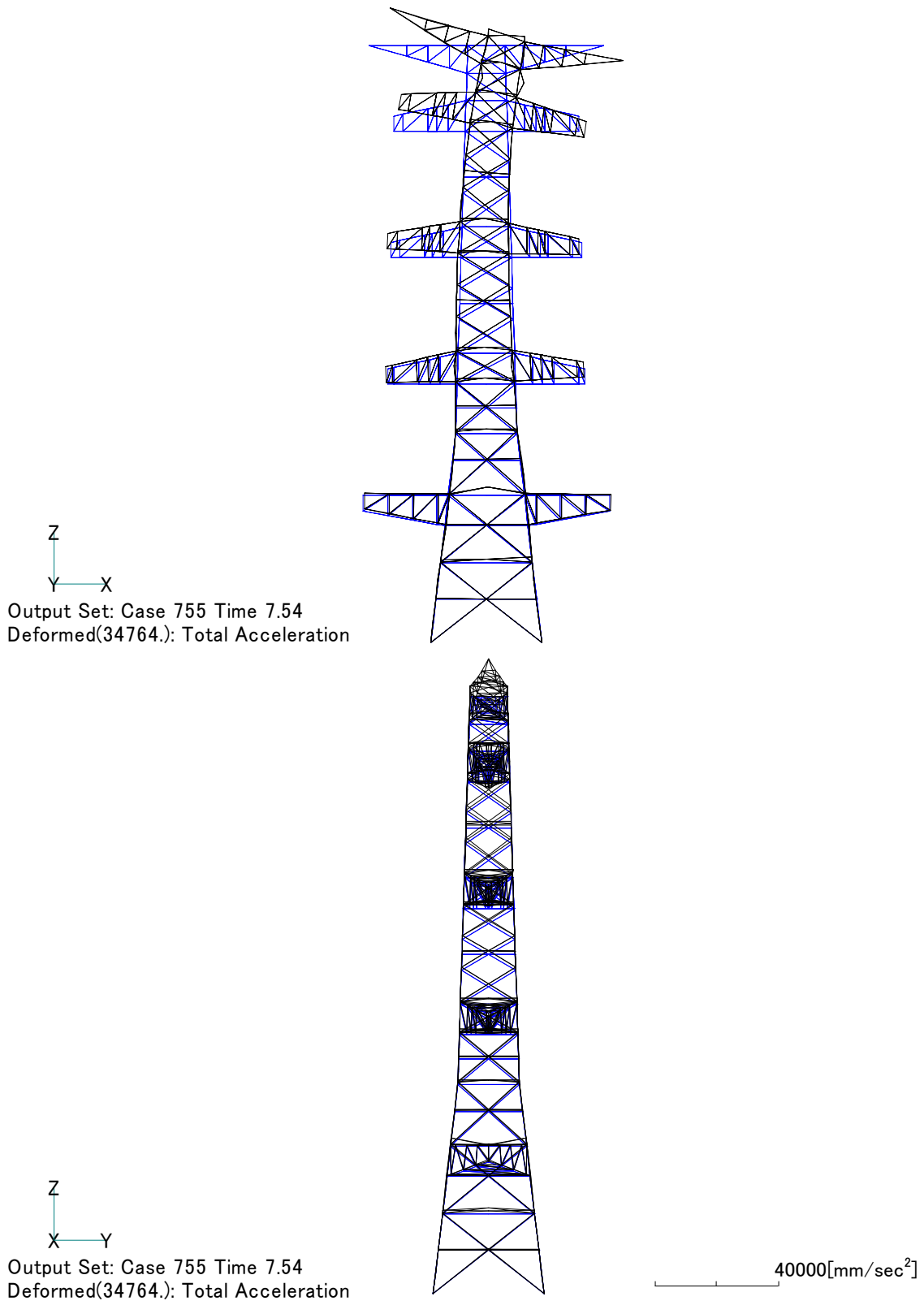


図 3.26 架線直角方向加震時の応答加速度分布図 (7.54 秒)

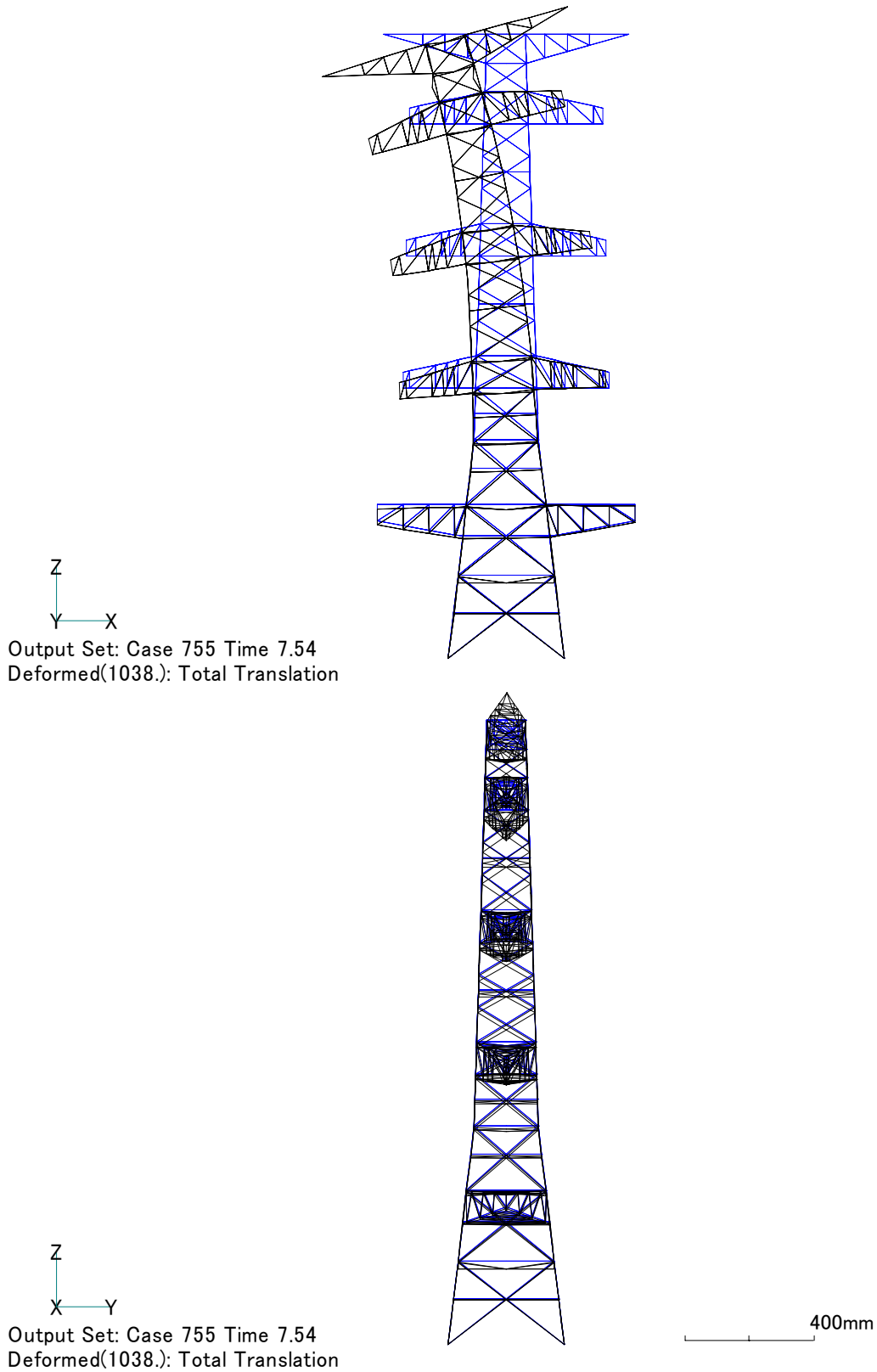


図 3.27 架線直角方向加震時の応答変位分布図 (7.54 秒)

軸力[N]

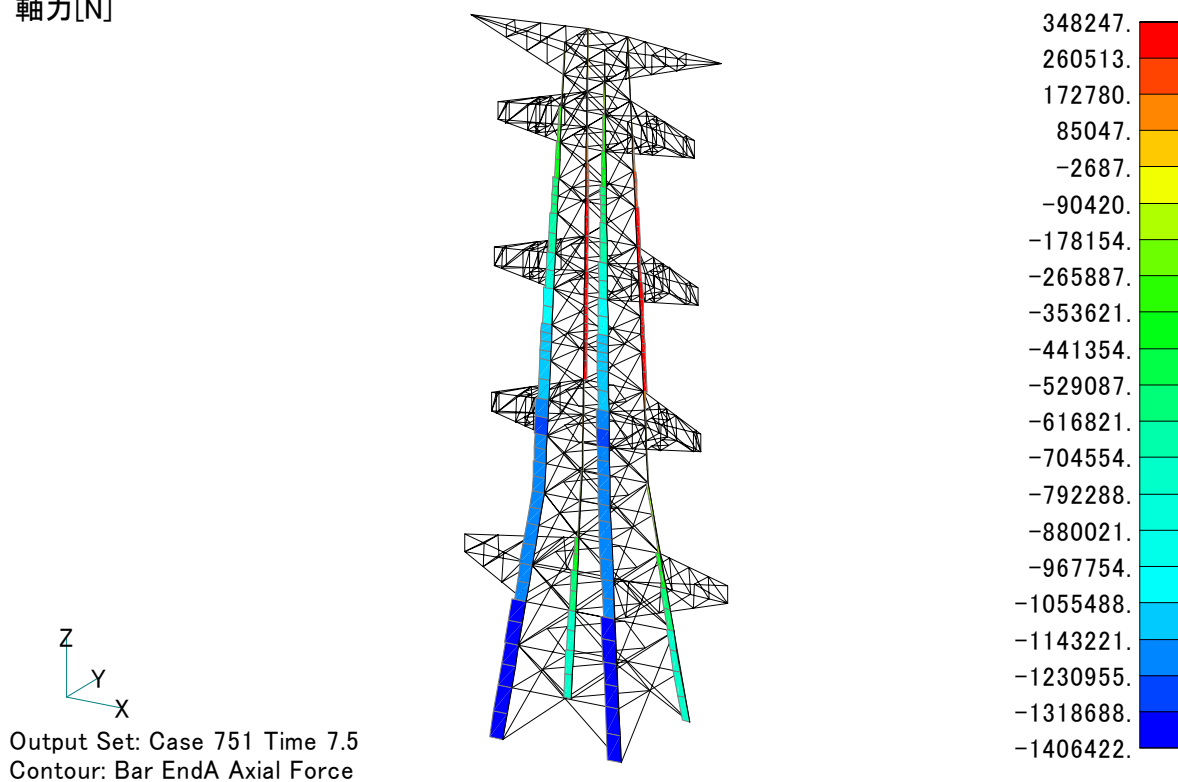


図 3.28 主柱材の軸力分布図（架線方向加震時、7.50 秒）

軸力[N]

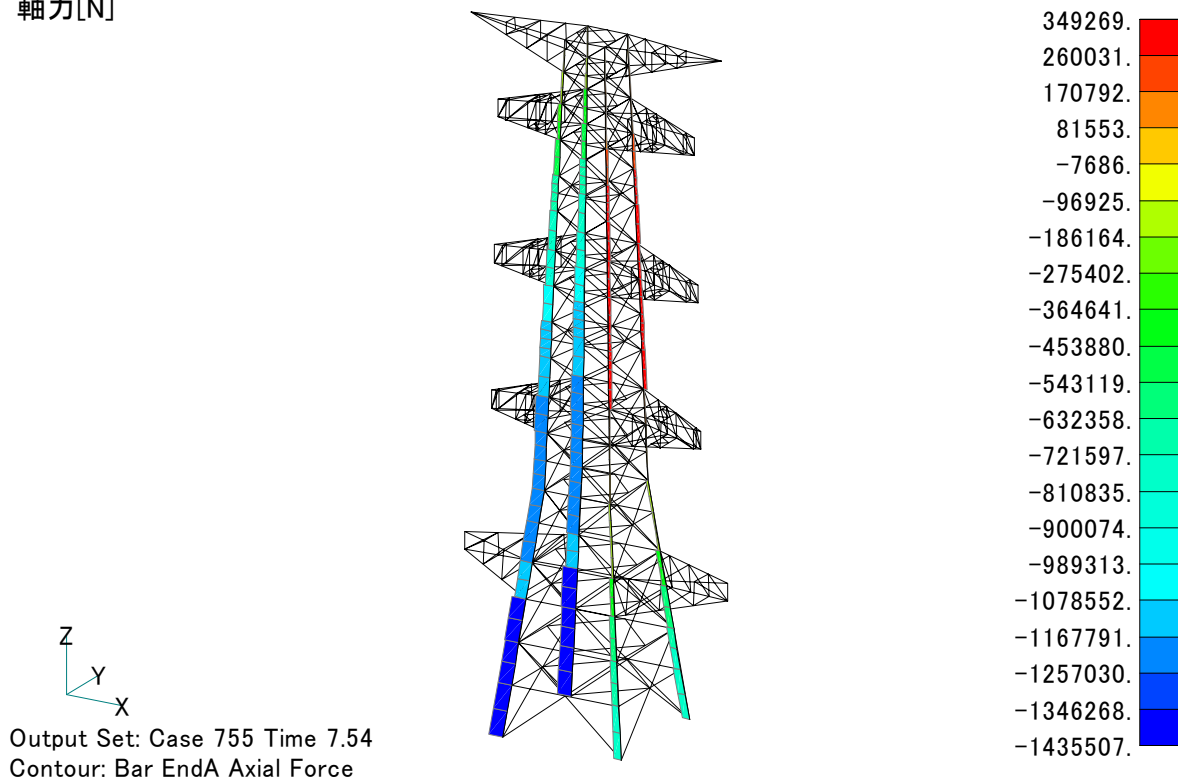


図 3.29 主柱材の軸力分布図（架線直角方向加震時、7.54 秒）

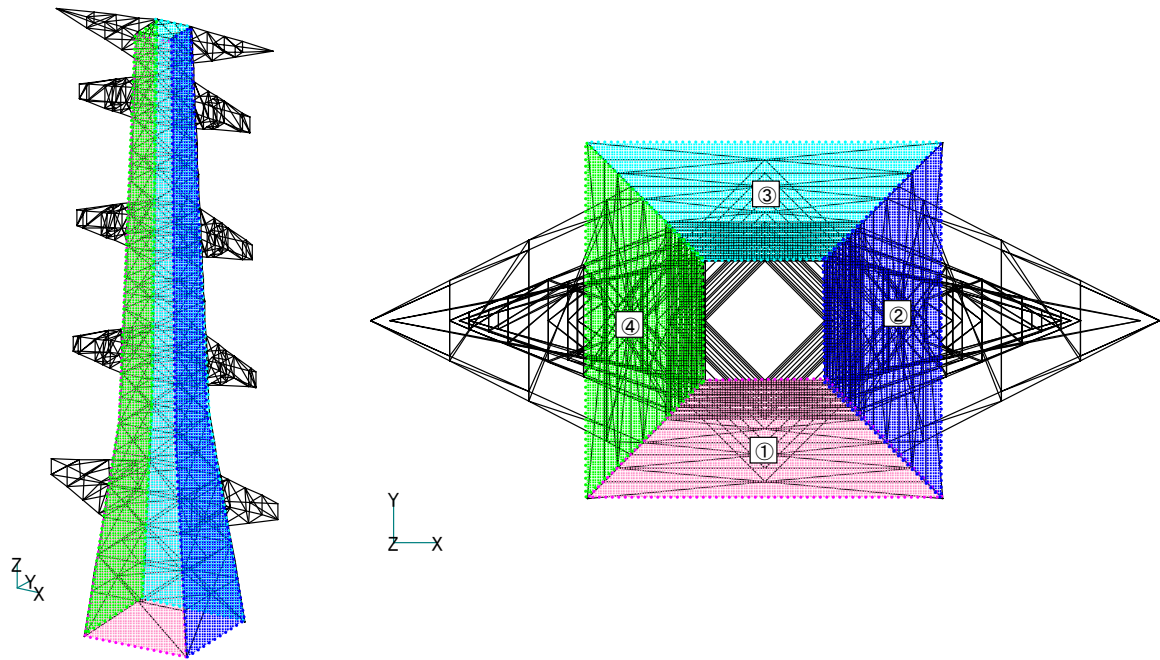


図 3.30 腹材断面の出力面

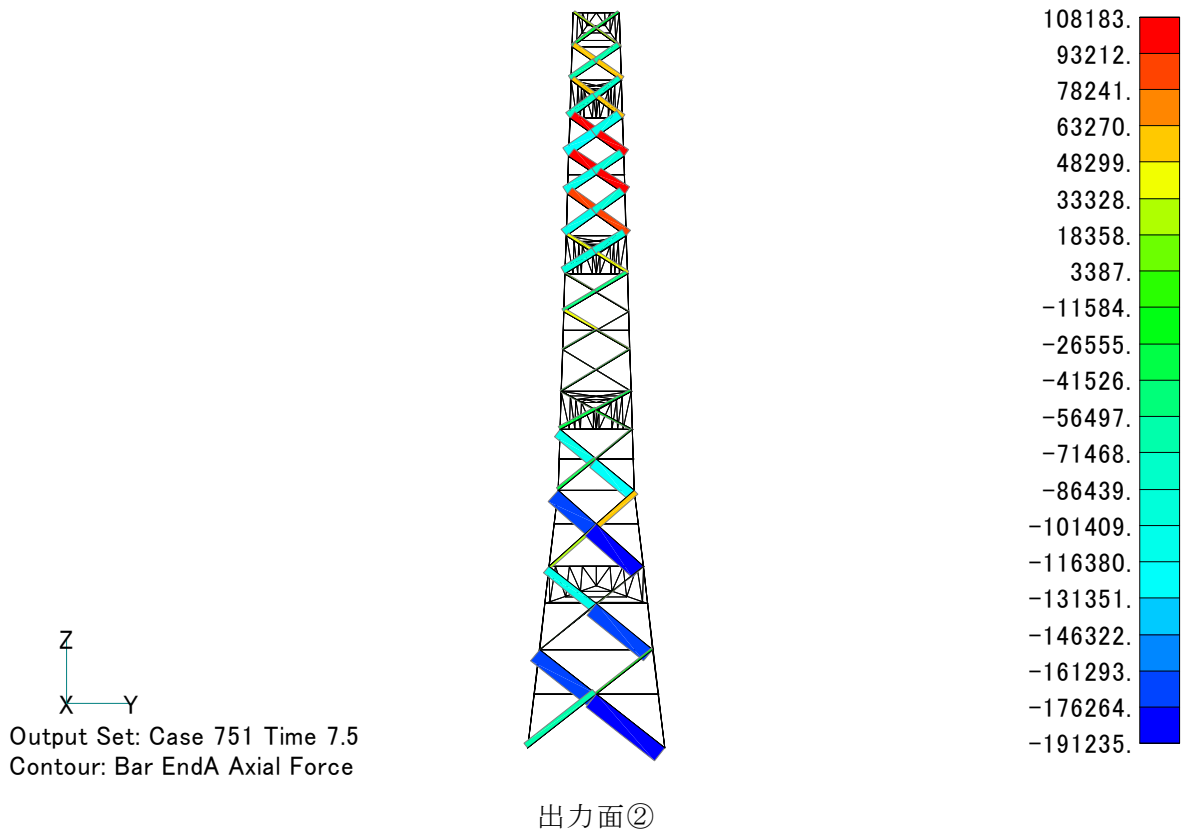
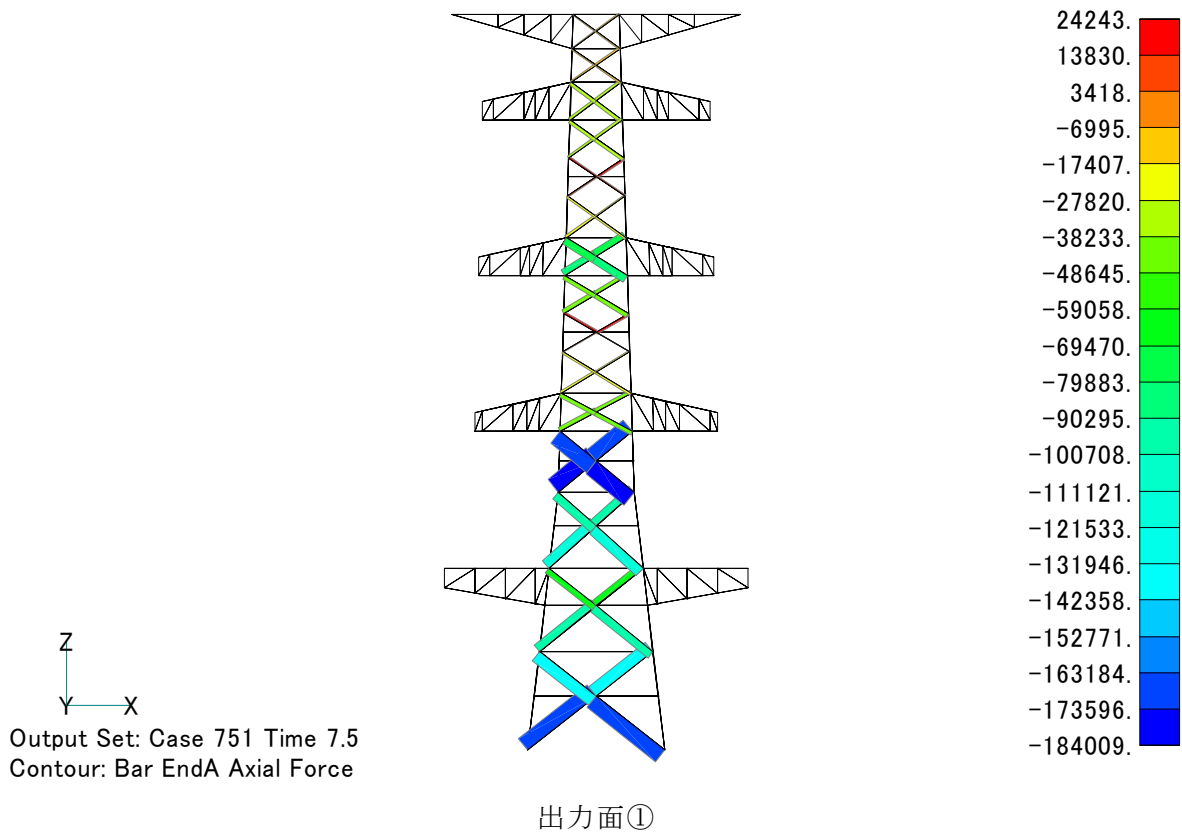
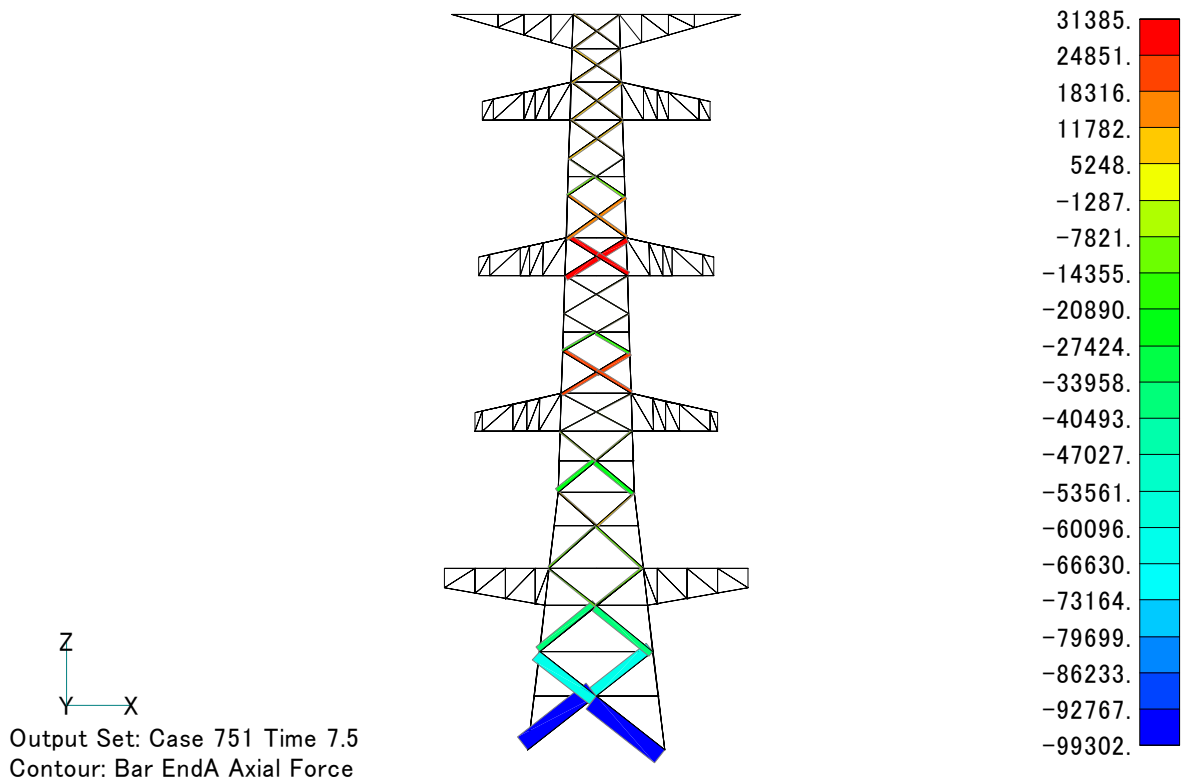
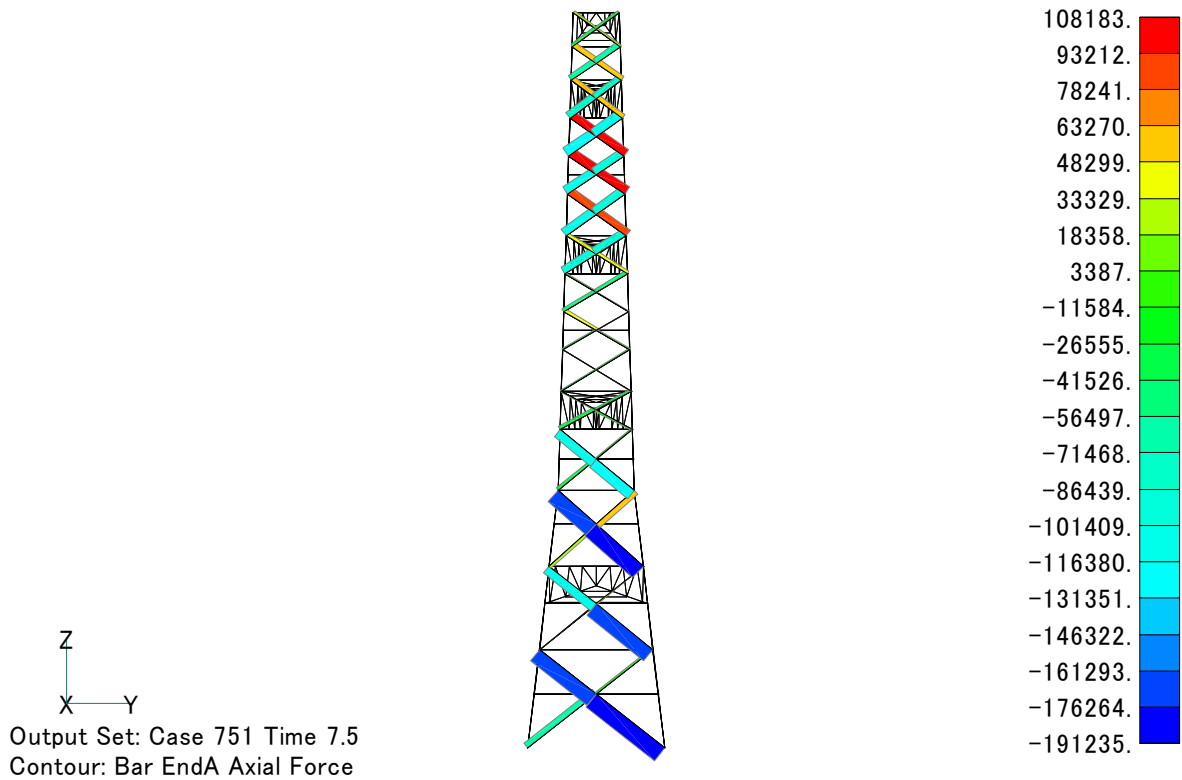


図 3.31 架線方向加震時の腹材の軸力分布 (7.50 秒)

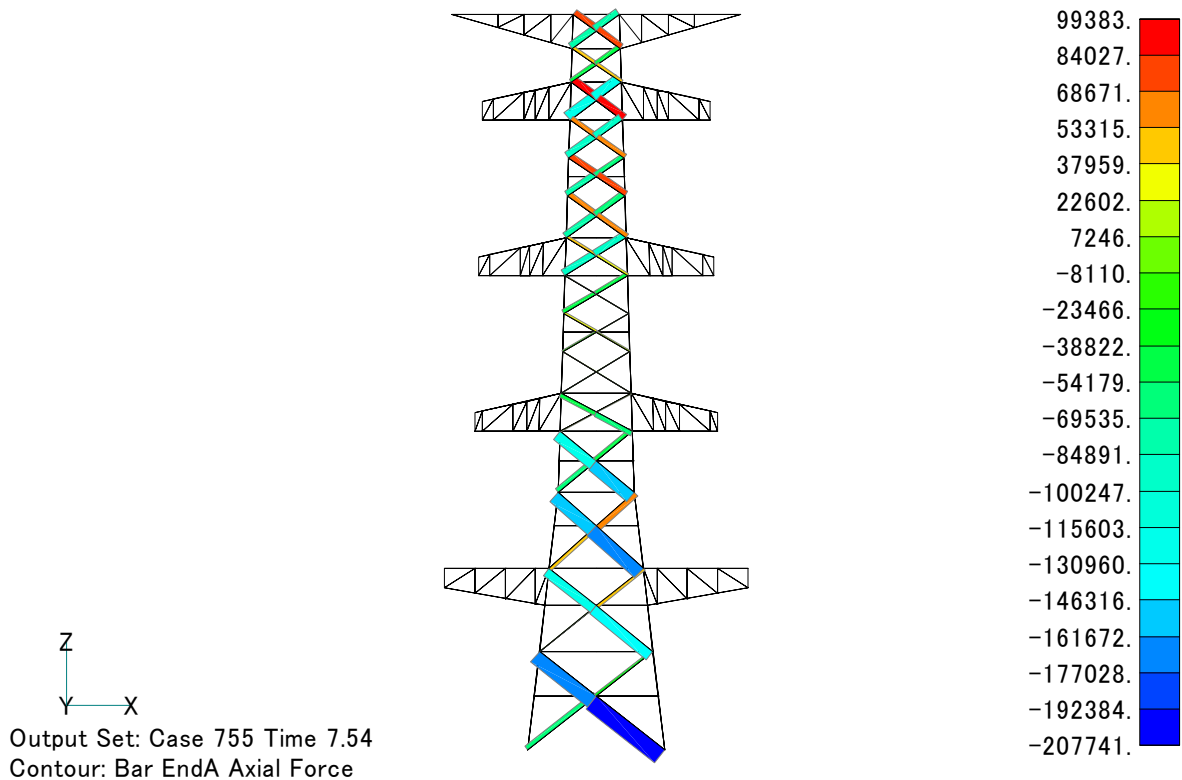


出力面③

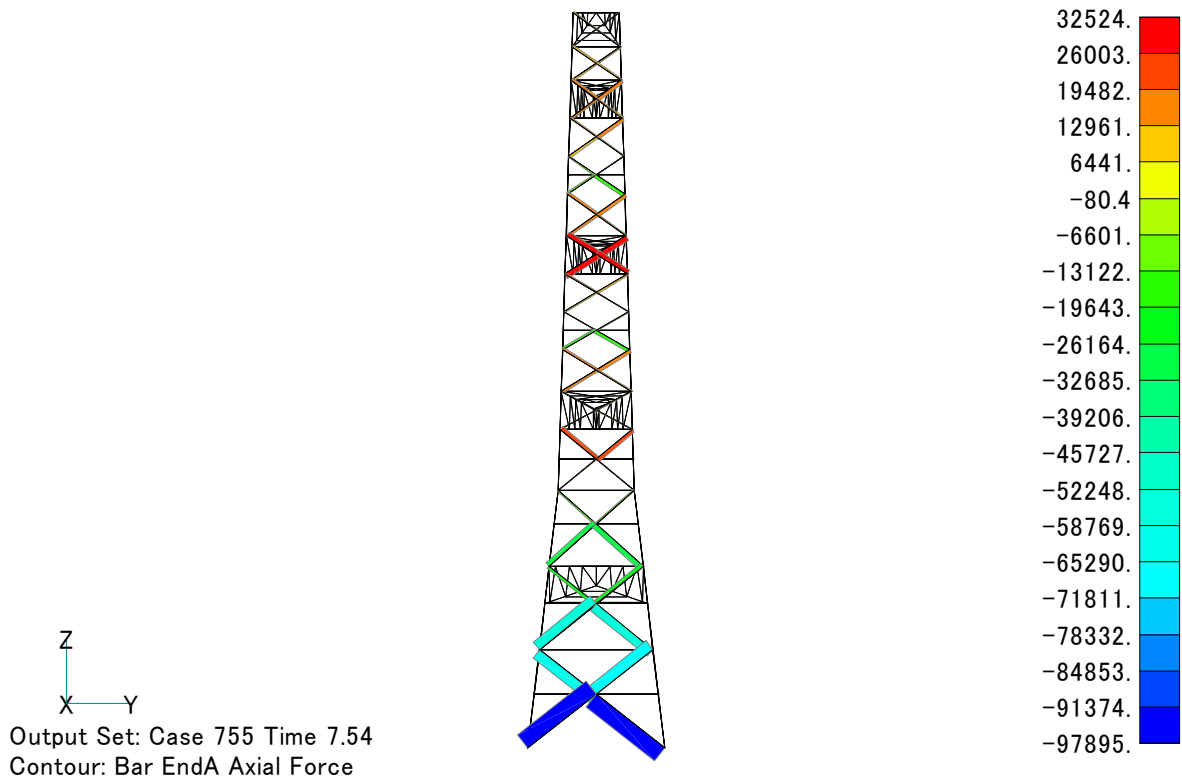


出力面④

図 3.32 架線方向加震時の腹材の軸力分布 (7.50 秒)

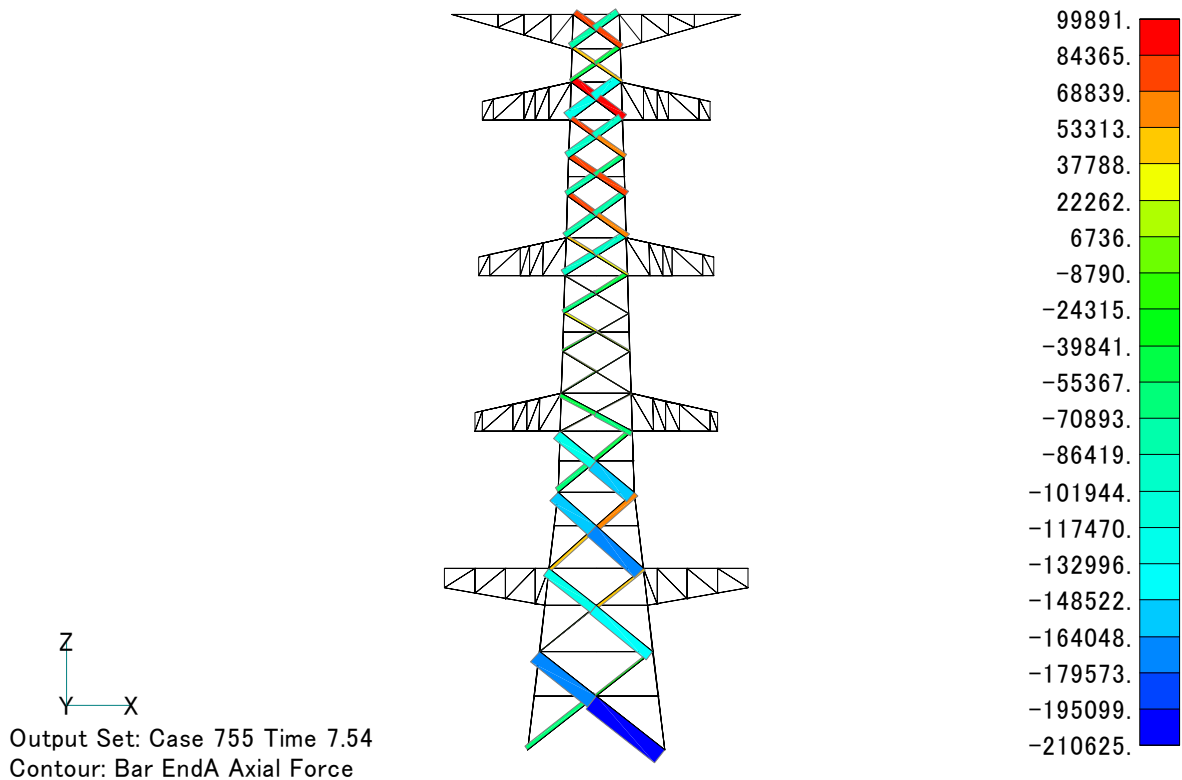


出力面①

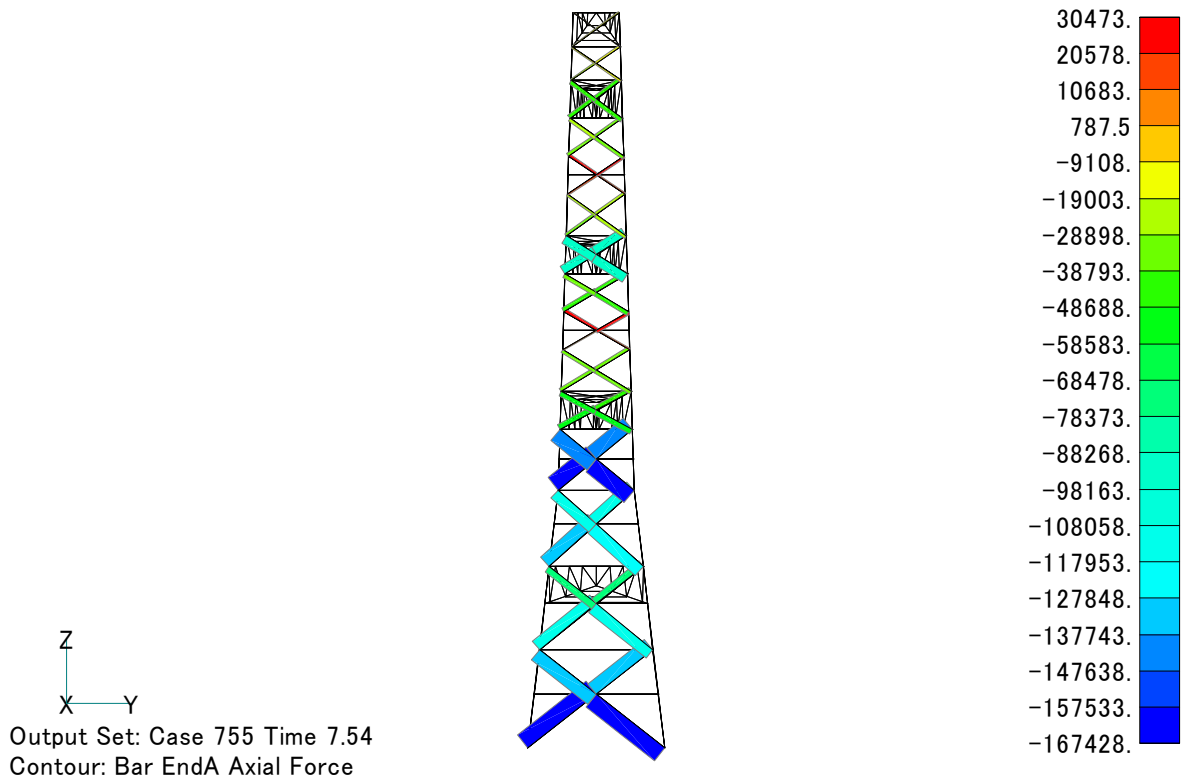


出力面②

図 3.33 架線直角方向加震時の腹材の軸力分布 (7.54 秒)



出力面③



出力面④

図 3.34 架線直角方向加震時の腹材の軸力分布 (7.54 秒)

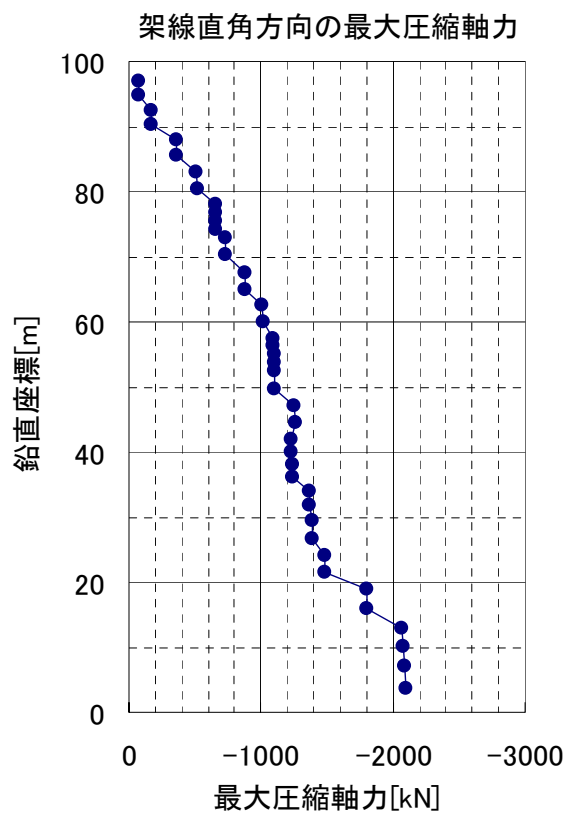
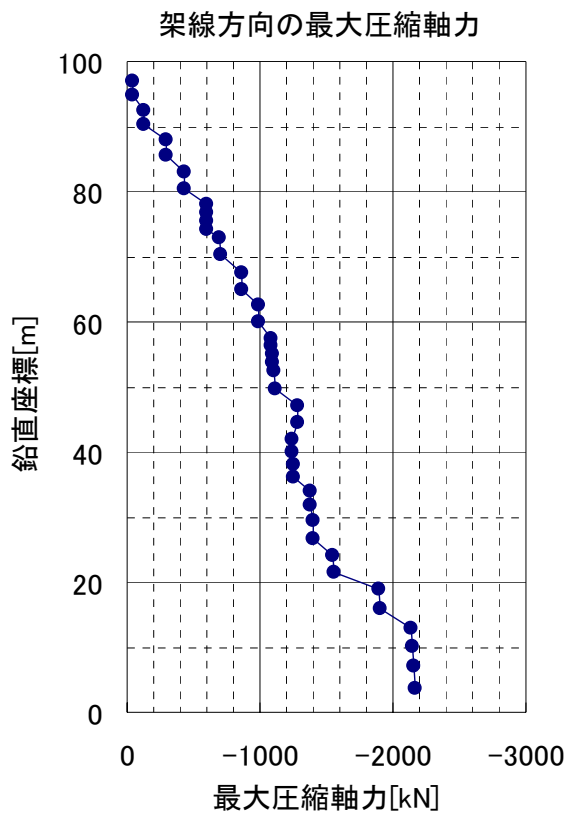


図 3.35 支柱材に作用する最大圧縮軸力分布

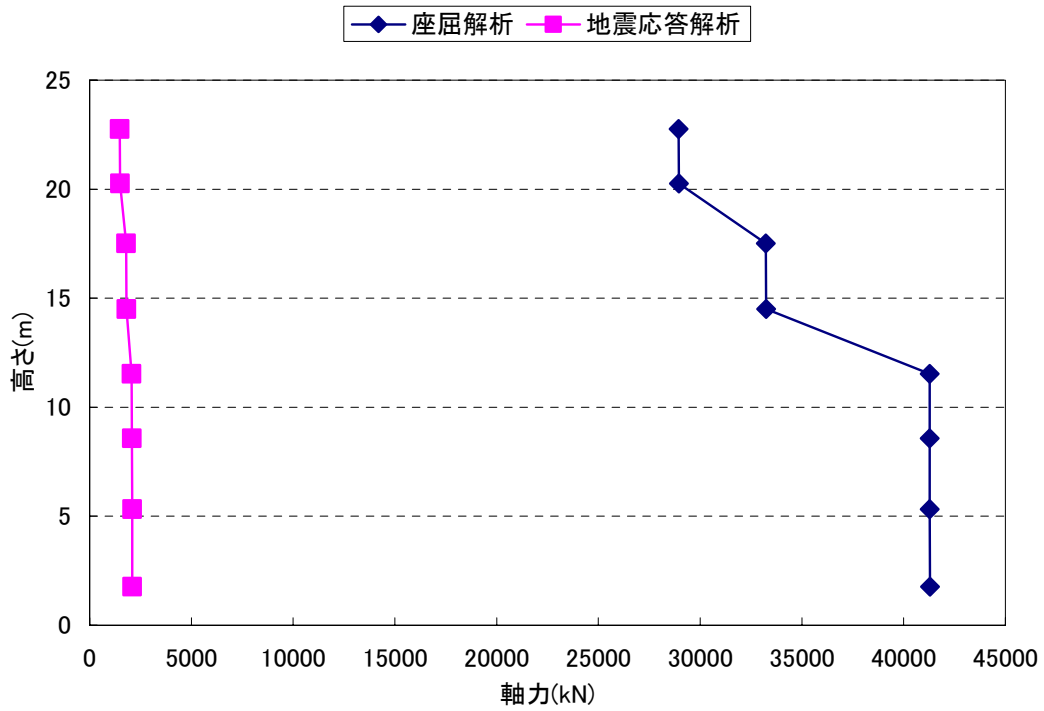


図 3.36 地震応答解析による軸力と座屈解析による軸力の比較
(静的荷重、架線直角方向加震時)

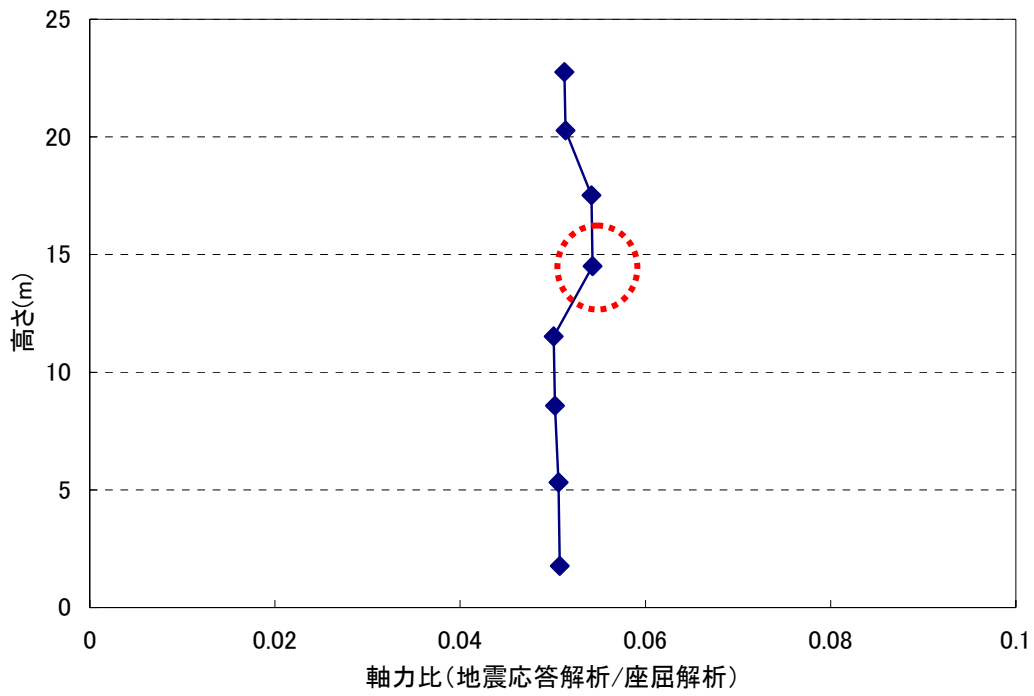


図 3.37 軸力比 (静的荷重、架線直角方向加震時)

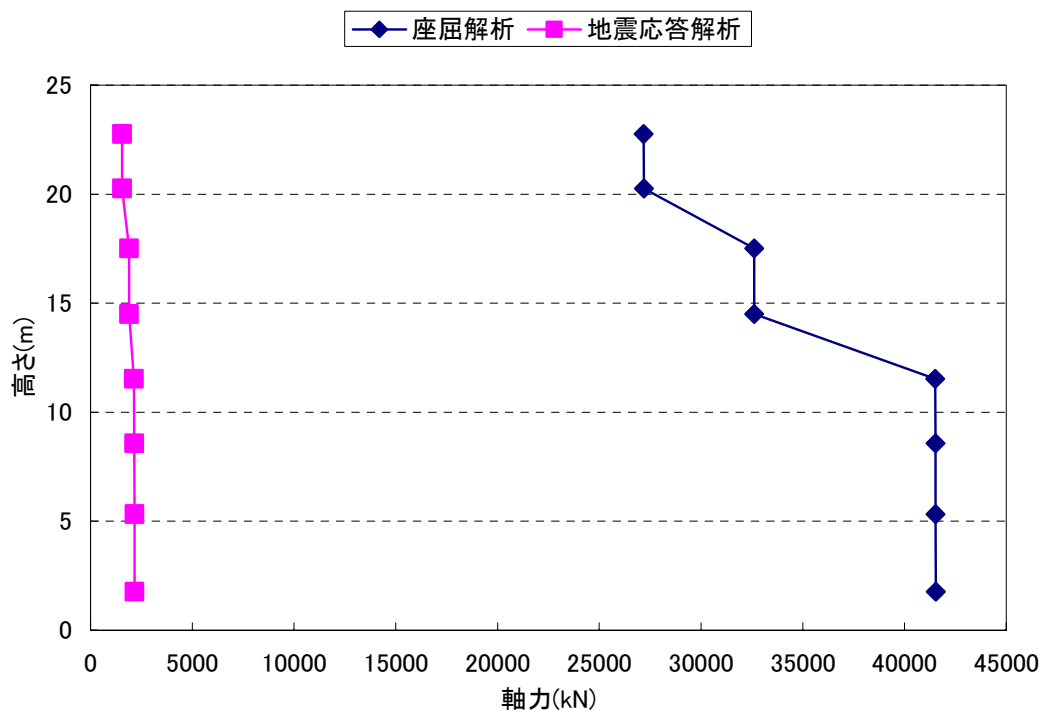


図 3.38 地震応答解析による軸力と座屈解析による軸力の比較
(静的荷重、架線方向加震時)

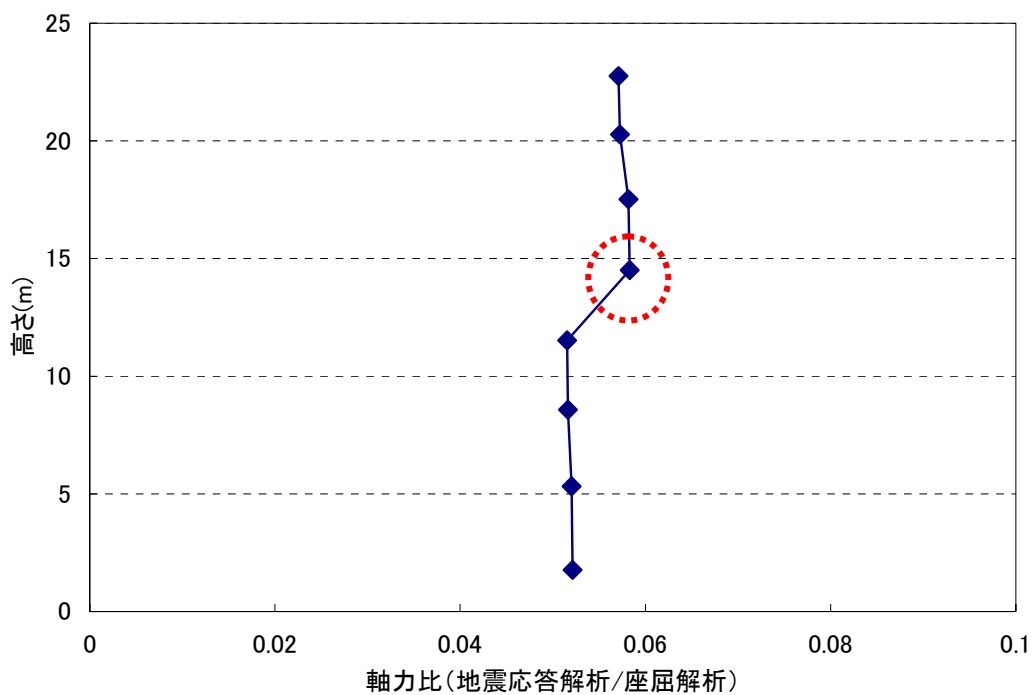


図 3.39 軸力比 (静的荷重、架線方向加震時)

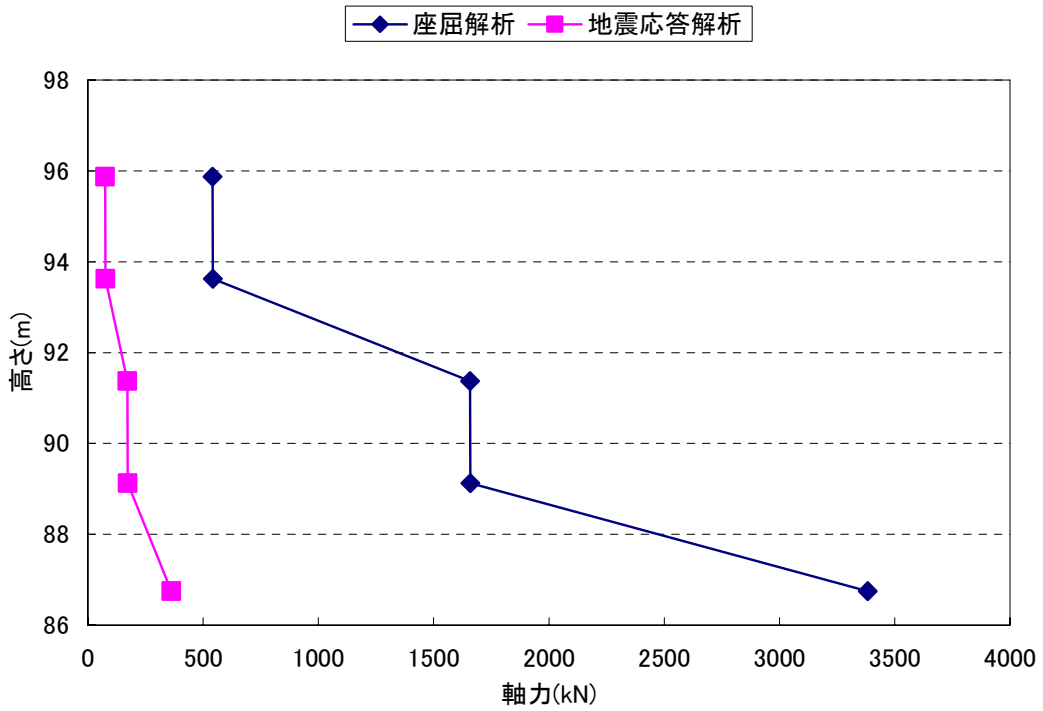


図 3.40 地震応答解析による軸力と座屈解析による軸力の比較
(動的荷重、架線直角方向加震時)

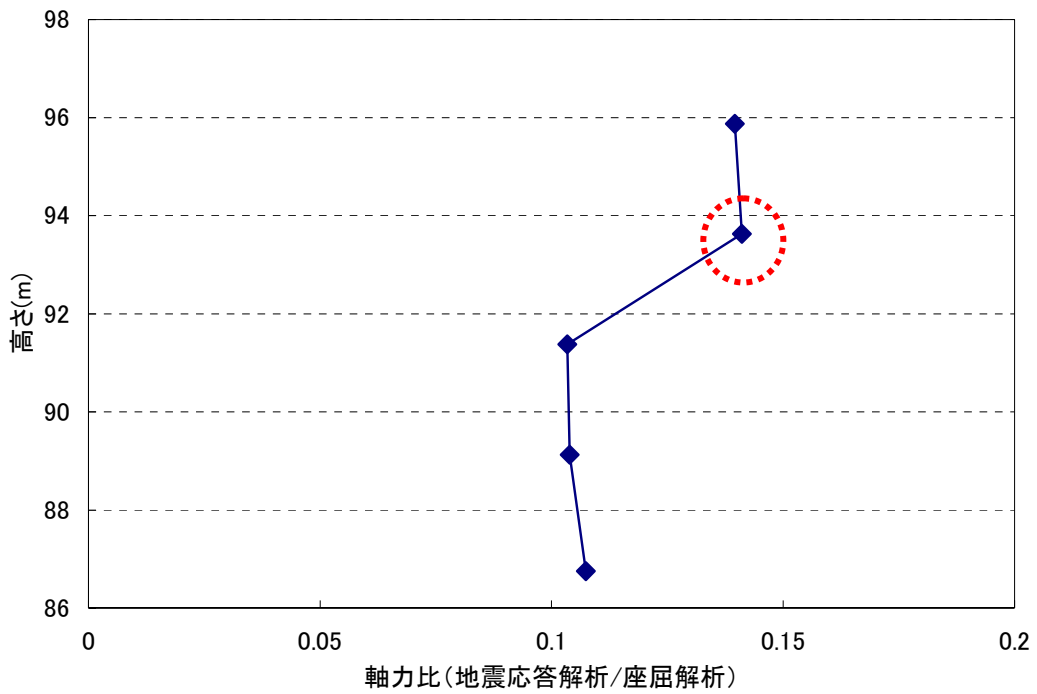


図 3.41 軸力比 (動的荷重、架線直角方向加震時)

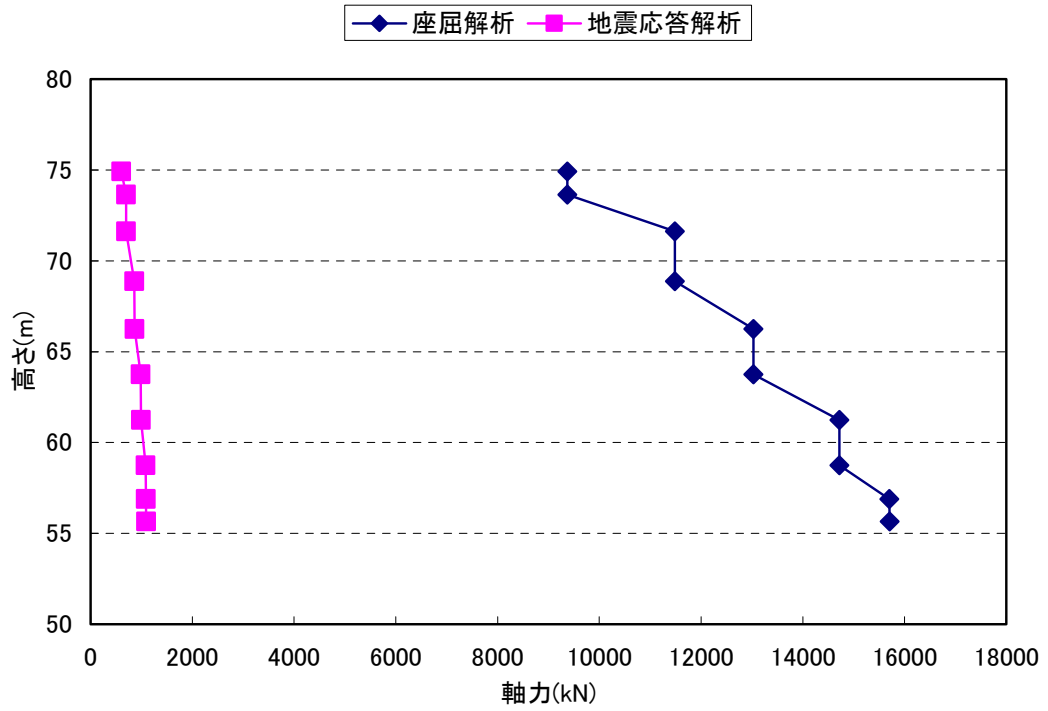


図 3.42 地震応答解析による軸力と座屈解析による軸力の比較
(動的荷重、架線方向加震時)

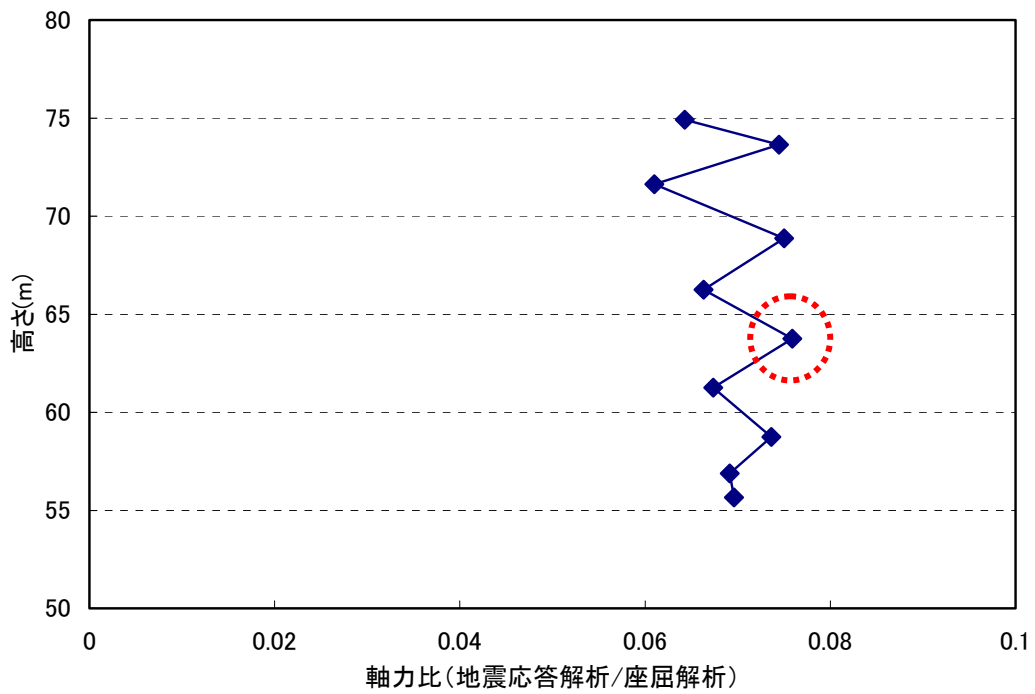


図 3.43 軸力比 (動的荷重、架線方向加震時)

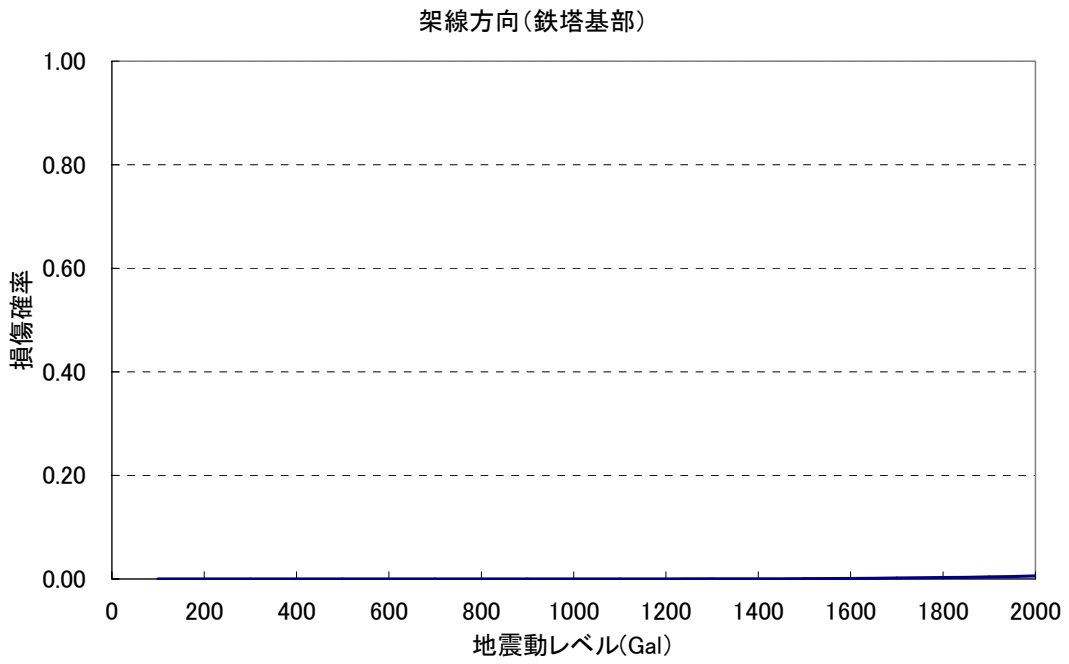


図 3.44 架線方向加震時の鉄塔基部の損傷確率

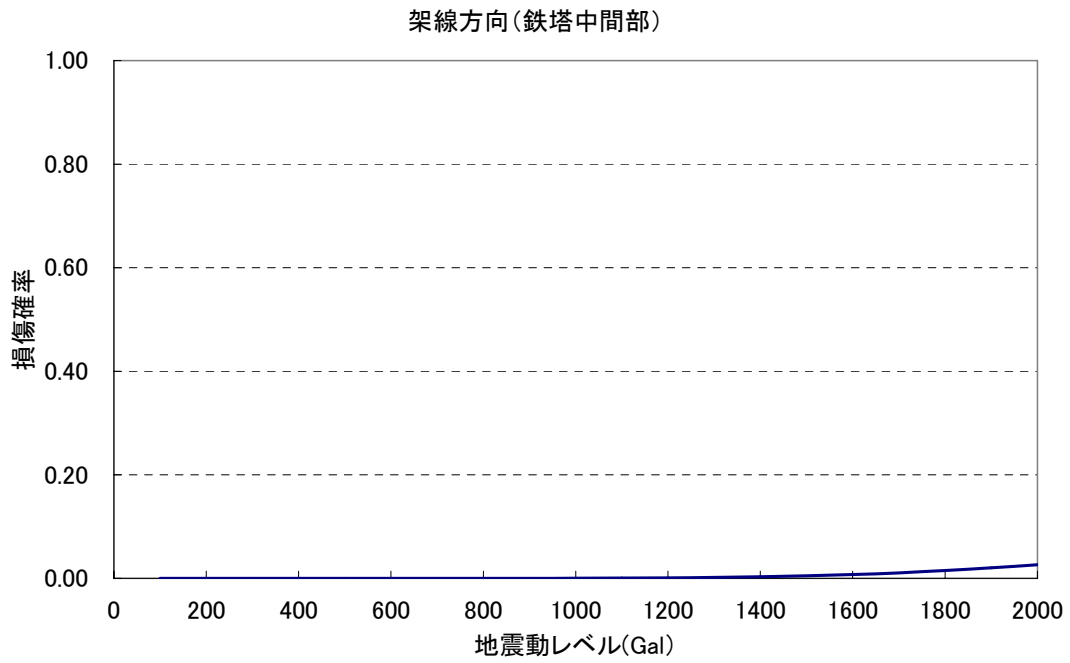


図 3.45 架線方向加震時の鉄塔中間部の損傷確率

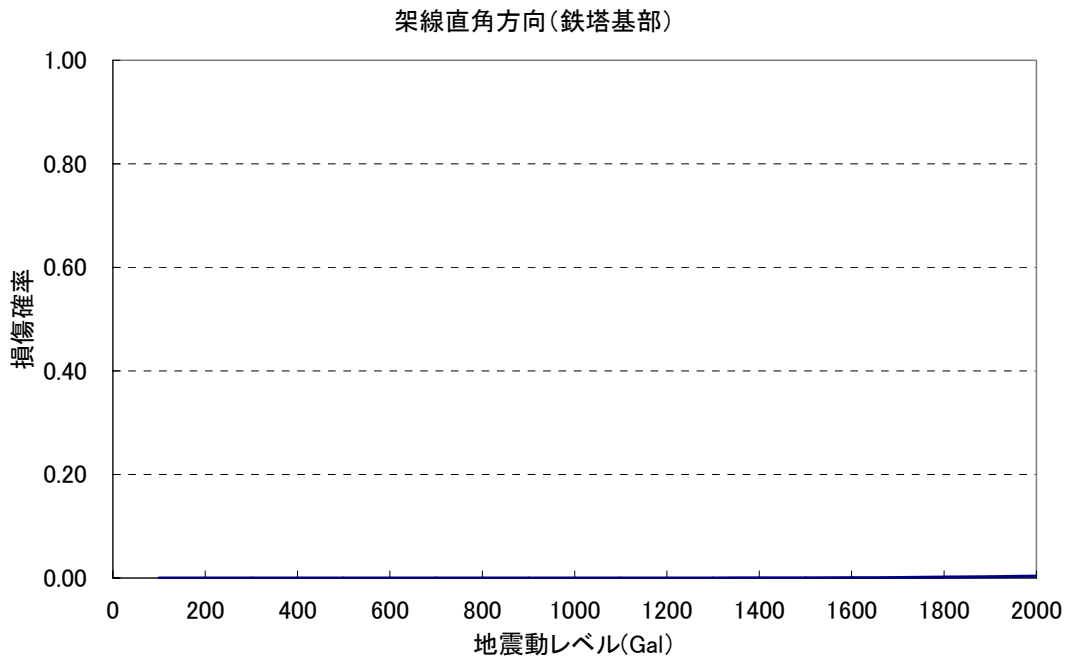


図 3.46 架線直角方向加震時の鉄塔基部の損傷確率

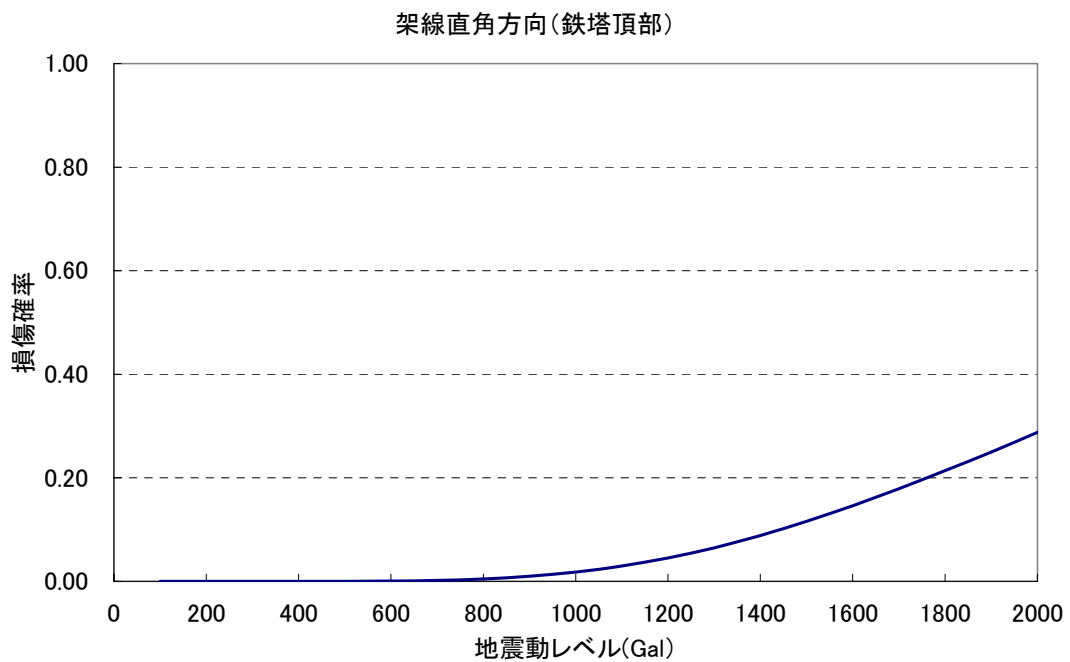


図 3.47 架線直角方向加震時の鉄塔頂部の損傷確率

4. 開閉所変電機器の地震時損傷確率評価

4.1 評価の概要

BWR モデルプラントを想定して、プラント内の屋外開閉所に設置されている変電機器の地震時損傷確率を評価した。

4.1.1 対象機器

起動変圧器及び空気遮断器（以下、「遮断器」という。）を評価対象機器として選定した。起動変圧器及び遮断機は、地震 PSA において、外部電源喪失事象の発生原因と見なされている機器である。

起動変圧器及び遮断器の構造と振動解析モデルを図 4.1～図 4.2 に、振動解析モデルの諸元を表 4.1～表 4.5 に示す。

4.1.2 機器損傷確率の算出

機器の地震時損傷確率は、機器応答及び耐力の確率分布が対数正規分布に従うと仮定し、応答が耐力を上回る条件付確率として求めた。機器の地震時損傷確率の算出式を以下に示す。評価対象地震動レベルは、300Gal、450Gal、600Gal、750Gal、900Gal、1100Gal、1300Gal の 7 地震動レベルとした。

$$P(a) = \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \int_{-\infty}^{\alpha} f_c(\alpha) d\alpha \right\} f_R(\alpha | a) d\alpha \quad \dots\dots\dots \text{式 (4.1)}$$

ここで、 α : 地震動、応答及び耐力の確率分布の指標

a : 評価対象とする地震動レベル

$P(a)$: 地震動レベル a での機器損傷確率

$f_c(\alpha)$: 機器耐力の確率分布

$f_R(\alpha | a)$: 地震動レベル a における機器応答の確率分布

機器応答及び耐力の確率分布が対数正規分布に従うと仮定すると、式(4.1)は次式で表される。

$$P(a) = \Phi \left[\frac{\ln \left(\frac{M_R(a)}{M_c} \right)}{\sqrt{\beta_{rr}^2(a) + \beta_{ru}^2(a) + \beta_{cr}^2 + \beta_{cu}^2}} \right] \quad \dots\dots\dots \text{式 (4.2)}$$

ここで、 a : 評価対象とする地震動レベル

- $P(a)$: 地震動レベル a での機器損傷確率
- Φ : 標準正規確率関数
- $M_R(a)$: 地震動レベル a での機器応答の中央値
- M_c : 機器耐力の中央値
- $\beta_{rr}(a)$: 地震動レベル a での機器応答のランダムな不確実さに係る対数標準偏差
- $\beta_{ru}(a)$: 地震動レベル a での機器応答のモデルや知識の不確実さに係る対数標準偏差
- β_{cr} : 耐力のランダムな不確実さに係る対数標準偏差
- β_{cu} : 耐力のモデルや知識の不確実さに係る対数標準偏差

4.2 解析条件

4.2.1 耐力データ

起動変圧器の耐力の中央値及び対数標準偏差は、平成 17 年度に実施した機器フラジリティ評価（BWR プラント）作業⁽¹⁾で作成したデータを使用した。また、遮断器の耐力は、セラミックの耐力を参考に工学的判断により設定した。

4.2.2 応答データ

起動変圧器及び遮断器の応答は、4.1.1 項の多質点振動解析モデルを用い、任意の地震動レベルで応答解析を行い、この結果を用いて他の地震動レベルは線形外挿した。入力地震動は、改良標準波 S1F の水平及び鉛直成分を用いた。入力地震動の加速度時刻歴波形を図 4.3～図 4.4 に示す。応答のばらつきは、機器フラジリティ評価（BWR プラント）作業⁽¹⁾で作成した応答のばらつきを参考に設定した。

起動変圧器及び遮断器の応答及び耐力を表 4.6～表 4.7 に示す。

4.2.3 解析結果

式 (4.2) の算出式に基づいて、機器の地震動レベルごとの損傷確率を算出した。また、各地震動レベルにおける損傷確率を近似して累積損傷確率曲線を算定した。起動変圧器及び遮断器の損傷確率を鉄塔の損傷確率と併せて表 4.8 に、損傷確率曲線を図 4.5 に示す。

鉄塔の損傷確率は開閉所の起動変圧器及び遮断器の損傷確率に比べて相対的に小さく、外部電源喪失の発生確率への影響は小さいことが分かった。したがって、外部電源喪失の発生確率は、

開閉所の変電機器の損傷によって決定されることが考えることができる。開閉所は耐震性が低く、設備の改良による耐震性向上は難しいことから、外部電源喪失に係る地震リスク低減策として開閉所の免震化が有効であると考えられる。

表 4.1 起動変圧器振動解析モデルの諸元(1)
質点の重量及び回転慣性重量

節点番号	高さ(m)	重量 (kgf)	回転慣性重量 ($\times 10^3 \text{kgf}\cdot\text{m}^2$)
1	6.800	1900	
2	5.200		
4	4.500	1300	
6	4.100	5000	
7	2.100	67800	113.2
8	0.000	4000	

表 4.2 起動変圧器振動解析モデルの諸元(2)
梁要素の各種特性

高さ (m)	せん断 断面積 As (cm ²)	断面 2 次 モーメント I ($\times 10^4 \text{cm}^4$)	ヤング係数 E ($\times 10^2 \text{t/cm}^2$)	せん断 弾性係数 G ($\times 10^2 \text{t/cm}^2$)	減衰 定数 h	備考
6.80-5.20	200.0	5.25	5.0	1.92	0.05	碍管
5.20-4.50	308.0	50.0	21.0	8.10	0.05	ポケット
4.50-4.10	308.0	50.0	21.0	8.10	0.05	ポケット
4.10-2.10	6000	20000	21.0	8.10	0.05	変圧器
2.10-0.00	6000	20000	21.0	8.10	0.05	変圧器

表 4.3 起動変圧器振動解析モデルの諸元(3)
ばね定数及び減衰定数

ばね 高さ (m)	ばね定数 K ($\times 10^4 \text{tf}\cdot\text{cm/rad}$)	減衰定数
5.20	10.00	0.05
4.10	(剛ばね)	0.05

表 4.4 遮断器モデルの諸元(1)
質点の重量

節点番号	高さ (m)	重量 (kgf)	備考
4	10.74	10700	遮断部
2,3	5.73		ばね
1	0.00		

表 4.5 遮断器モデルの諸元(2)
ばね定数及び減衰定数

ばね	ばね定数 K (kgf/m)	減衰定数
水平	1.104×10^5	0.12
鉛直	4.046×10^7	0.05

表 4.6 起動変圧器の応答及び耐力

入力地震動 (Gal)	応答		耐力	
	現実的応答 (G)	標準偏差	中央値 (G)	標準偏差
300	0.78	0.29 $\left[\begin{array}{l} \beta_R=0.14 \\ \beta_U=0.25 \end{array} \right]$	0.66	0.14 $\left[\begin{array}{l} \beta_R=0.10 \\ \beta_U=0.10 \end{array} \right]$
450	1.16			
600	1.55			
750	1.94			
900	2.33			
1100	2.85			
1300	3.36			

β_R : ばらつき、 β_U : 不確かさ

表 4.7 遮断器の応答及び耐力

入力地震動 (Gal)	応答		耐力	
	現実的応答 (G)	標準偏差	中央値 (G)	標準偏差
300	0.34	0.28 $\left[\begin{array}{l} \beta_R=0.12 \\ \beta_U=0.25 \end{array} \right]$	1.0	0.15 $\left[\begin{array}{l} \beta_R=0.15 \\ \beta_U=0.03 \end{array} \right]$
450	0.50			
600	0.67			
750	0.84			
900	1.01			
1100	1.23			
1300	1.45			

β_R : ばらつき、 β_U : 不確かさ

表 4.8 地震時損傷確率

地震動 (Gal)	300	450	600	750	900	1100	1300
起動変圧器	6.9×10^{-01}	9.6×10^{-01}	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
遮断器	2.8×10^{-04}	1.5×10^{-02}	1.0×10^{-01}	2.9×10^{-01}	5.1×10^{-01}	7.4×10^{-01}	8.8×10^{-01}
鉄塔	1.1×10^{-05}	4.1×10^{-04}	3.3×10^{-03}	1.3×10^{-02}	3.5×10^{-02}	8.6×10^{-02}	1.6×10^{-01}

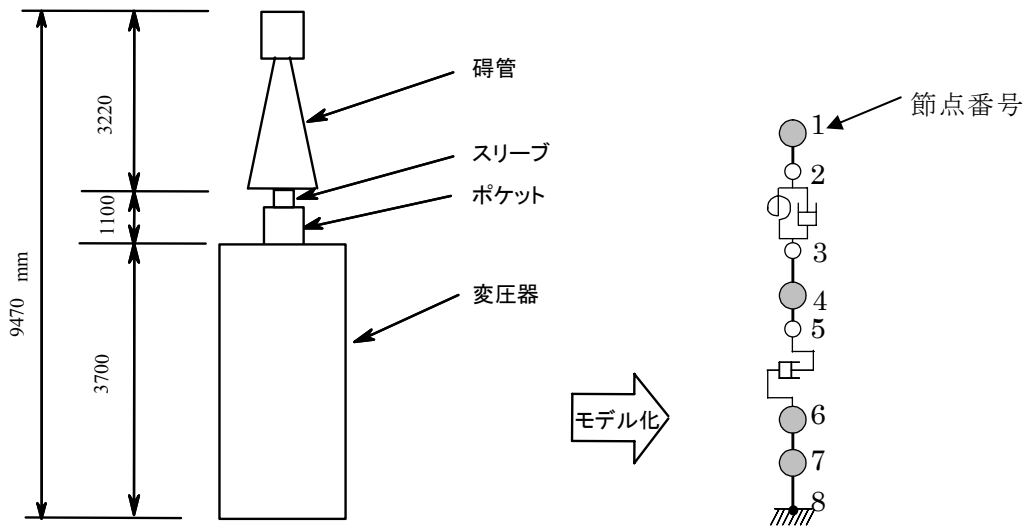


図 4.1 起動変圧器の構造と振動モデル

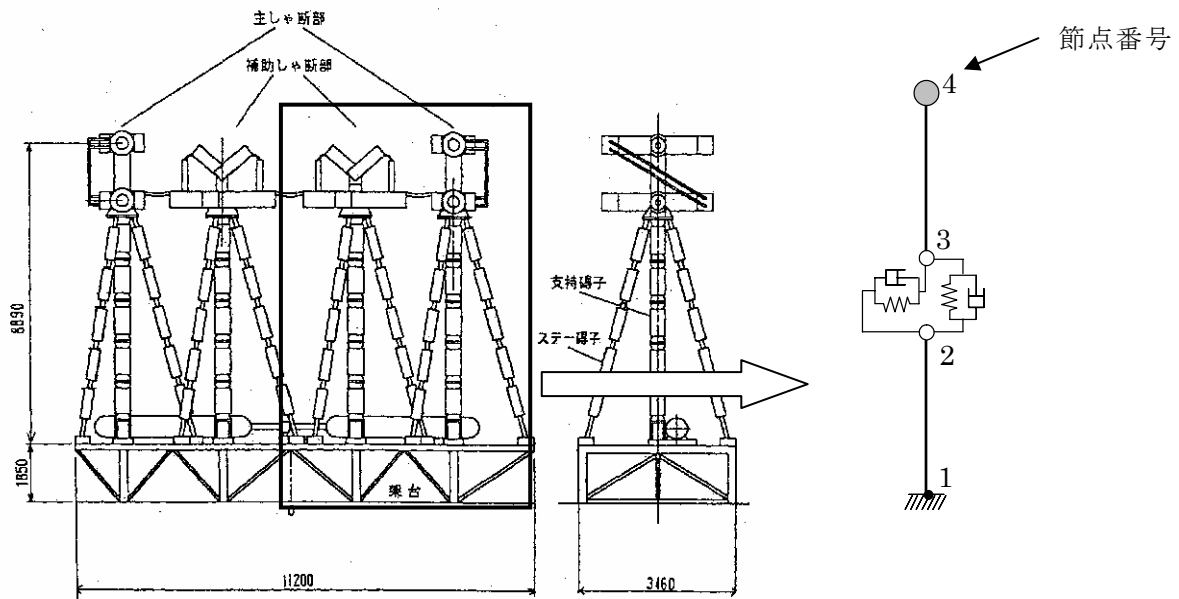


図 4.2 遮断器の構造と振動モデル

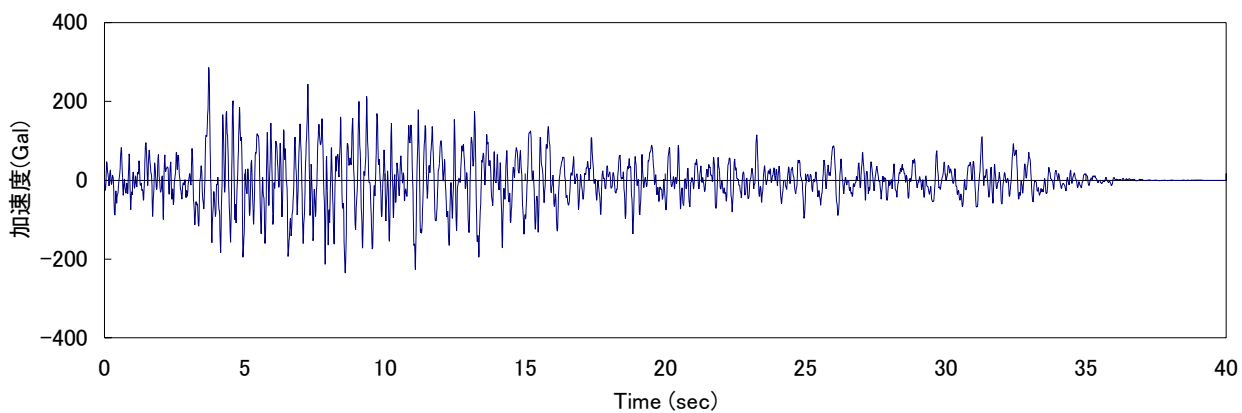


図 4.3 入力地震動(改良標準波 $S_1F:Max=286.1Gal$ 、水平成分)

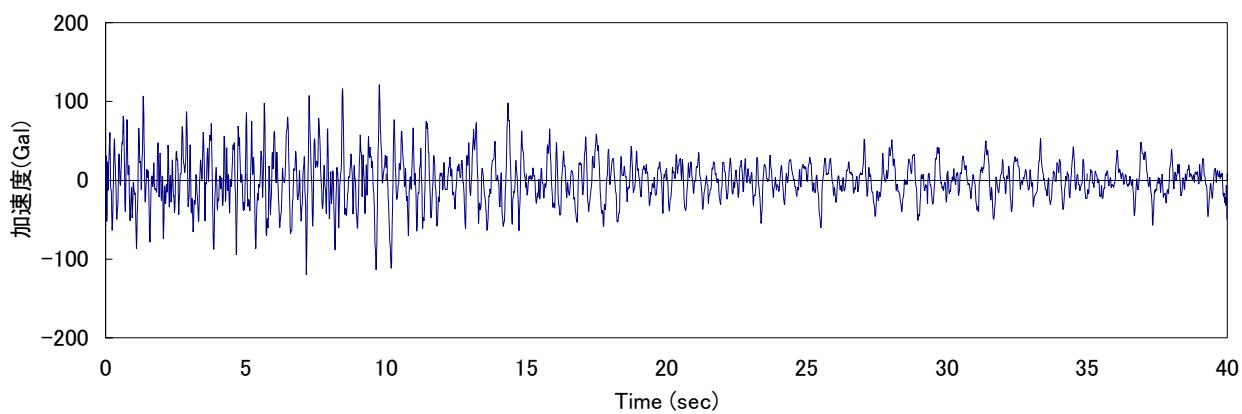


図 4.4 入力地震動(改良標準波 $S_1F:Max=121.5Gal$ 、鉛直成分)

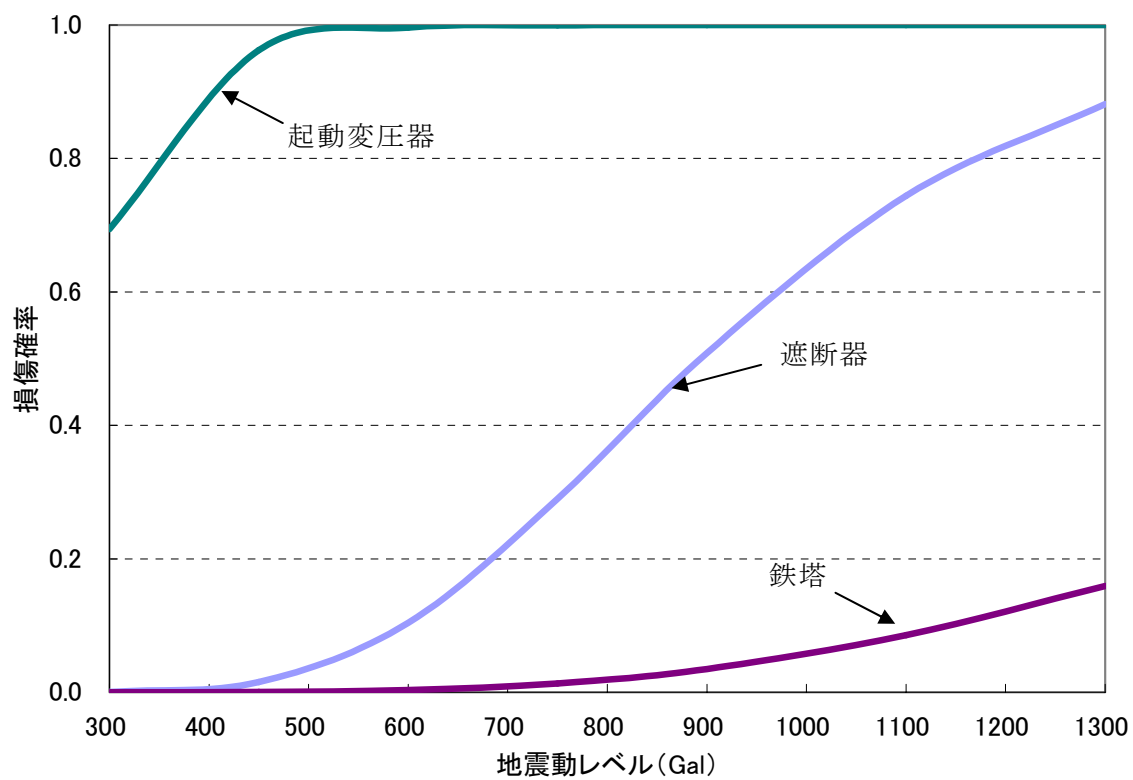


図 4.5 損傷確率曲線(鉄塔、起動変圧器、遮断器)

5. 開閉所免震系の地震時損傷確率評価

地震リスク低減策を検討するために、開閉所を免震化した場合の変電機器の地震時損傷確率を評価し、4章で算出した非免震時の変電機器の損傷確率と比較し、免震化による損傷確率の低減効果を評価した。

5.1 開閉所免震系の地震応答解析

想定 BWR プラントの敷地内にある開閉所を免震化した場合について、改良標準波 S_1F の水平及び鉛直成分を入力地震動として地震応答解析を行った。

4章における非免震時の機器の応答は線形であるので、任意の地震動レベルで応答解析を行い、他の地震動レベルは線形外挿した。これに対し、免震時の機器の応答は非線形であるので、各地震動レベルに対して地震応答解析を行った。

5.1.1 解析条件

(1) 開閉所の免震設計

一辺 30m 四方の開閉所に、起動変圧器 2 器と遮断器 2 器の計 4 器があると仮定して、開閉所全体の免震設計を行った。開閉所のレイアウトを図 5.1 に示す。免震装置として高減衰積層ゴムを使用し、機器及び鉄筋コンクリート製床版の重量配分及び免震層の固有周期（2 秒～3 秒）を考慮して配置した。

起動変圧器及び遮断器の諸元は、4章と同一とした。

(2) 開閉所解析モデル

(1)項の開閉所のレイアウトを基に、開閉所免震系の振動解析モデルを作成した。鉄筋コンクリート製床版を剛体と仮定し、遮断器及び起動変圧器を各々1個に集約した。また、免震装置群を加震直角方向の5個の水平及び回転ばねに置換した。免震装置の水平特性については、非線形特性を考慮し、鉛直特性については、開閉所の固有周期が 0.5 秒となるように設定した。なお、鉛直方向の減衰定数は 0.10 とした。解析モデルの諸元を表 5.1 に、免震装置の諸元を表 5.2 に、開閉所免震系の振動解析モデルを図 5.2 に示す。

(3) 入力地震動

解析に用いる入力地震動は、高地震帯用改良標準波 S_1F の水平及び鉛直成分とし、最大加速度を 300Gal～1300Gal の 7 レベルに正規化して求めた。入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトルを図 5.3～図 5.4 に示す。

5.1.2 地震応答解析結果

5.1.1 項(2)の解析モデルと 5.1.1 項(3)の入力地震動を用いて地震応答解析を行い、開閉所免震系の応答時刻歴を求めた。開閉所免震系の最大加速度応答及び最大変位応答を表 5.3～表 5.6 に、PGA レベル 750 における最大加速度応答分布及び最大変位分布を図 5.5～図 5.10 に、加速度応答時刻歴を図 5.11～図 5.16 に示す。また、免震時と非免震時の起動変圧器及び遮断器の最大加速度応答比（免震化による応答低減率）を図 5.17～図 5.18 に示す。

図 5.17 から、起動変圧器の応答低減率は、免震時の固有周期を 2 秒とした場合で非免震時の約 8%～17%、固有周期 3 秒で約 6%～9%であった。また、図 5.18 から、遮断器の応答低減率は固有周期 2 秒の場合で非免震時の約 25%～50%、固有周期 3 秒で約 16%～28%であった。

5.2 開閉所免震系の地震時損傷確率評価

開閉所を免震化した場合の起動変圧器及び遮断器の地震時損傷確率を算出し、4 章で算出した非免震時の損傷確率と比較することによって、開閉所免震化による機器の損傷確率の低減効果を評価した。

5.2.1 解析条件

機器の耐力データは、4.2.1 項で設定したデータを使用した。応答は 5.1 節で算出した各地震動レベルにおける応答値を用い、応答のばらつきは 4.2.2 項で設定したデータを使用した。免震時の起動変圧器及び遮断器の応答及び耐力を表 5.8～表 5.11 に示す。

5.2.2 解析結果

式 (4.2) の算出式に基づいて、機器の地震動レベルごとの損傷確率を算出した。また、各地震動レベルにおける損傷確率を近似して累積損傷確率曲線を算定した。起動変圧器及び遮断器の損傷確率を表 5.12～表 5.13 に、損傷確率曲線を図 5.23～図 5.24 に示す。

起動変圧器は耐力が小さいため、地震動レベルが 450Gal を超える領域では 0.9 を上回る損傷確率となったが、免震化により損傷確率は大幅に低減した。遮断器は、起動変圧器と比べて損傷確率の絶対値は小さいが、免震化による損傷確率の低減効果は大きい。

表 5.1 開閉所解析モデルの諸元
質点の重量及び回転慣性重量

水平位置 (m)	鉛直位置 (m)	重量 (kgf)	回転慣性重量 (kgf・m ²)
0.000	0.000	1.102×10 ⁵	
3.000	0.000	3.306×10 ⁵	
9.000	0.000	3.306×10 ⁵	
12.000	0.000	2.204×10 ⁵	
15.000	0.000	3.306×10 ⁵	
21.000	0.000	4.488×10 ⁵	
27.000	0.000	3.306×10 ⁵	
30.000	0.000	1.102×10 ⁵	
12.000	10.740	4.280×10 ⁴	
21.000	6.800	3.800×10 ³	
21.000	4.500	2.600×10 ³	
21.000	4.100	1.000×10 ⁴	
21.000	2.100	1.356×10 ⁵	2.264×10 ⁵

表 5.2 免震装置の諸元

機器免震仕様	免震ケース 2	免震ケース 3
免震装置固有周期 (sec)	2	3
免震装置の剛性 (1箇所) (kN/m)	0.95×10 ³	0.42×10 ³
免震装置の減衰定数 (%)	10.0	10.0

表 5.3 起動変圧器最大加速度応答

入力地震動 (Gal)	非免震時 (Gal)	免震時(Gal)	
		固有周期 2 秒	固有周期 3 秒
300	763	127	68
450	1144	168	65
600	1525	215	122
750	1906	239	144
900	2288	248	153
1100	2796	246	168
1300	3305	274	185

表 5.4 遮断器最大加速度応答

入力地震動 (Gal)	非免震時 (Gal)	免震時(Gal)	
		固有周期 2 秒	固有周期 3 秒
300	328	168	92
450	492	218	122
600	657	278	154
750	821	311	182
900	985	332	198
1100	1204	346	208
1300	1423	352	227

表 5.5 起動変圧器最大変位応答

入力地震動 (Gal)	免震時(mm)	
	固有周期 2 秒	固有周期 3 秒
300	38.7	32.2
450	60.1	53.4
600	80.8	79.5
750	93.5	104.2
900	111.3	146.0
1100	134.8	183.1
1300	168.0	205.8

表 5.6 遮断圧器最大変位応答

入力地震動 (Gal)	免震時(mm)	
	固有周期 2 秒	固有周期 3 秒
300	49.8	39.4
450	77.6	64.7
600	98.1	93.2
750	122.7	119.5
900	142.8	146.0
1100	166.3	183.7
1300	199.7	215.9

表 5.7 起動変圧器の応答及び耐力（免震時：固有周期 2 秒）

入力地震動 (Gal)	応答		耐力	
	現実的応答 (G)	標準偏差	中央値 (G)	標準偏差
300	0.13	0.29 $\left[\begin{array}{l} \beta_R=0.14 \\ \beta_U=0.25 \end{array} \right]$	0.66	0.14 $\left[\begin{array}{l} \beta_R=0.10 \\ \beta_U=0.10 \end{array} \right]$
450	0.17			
600	0.22			
750	0.24			
900	0.25			
1100	0.25			
1300	0.28			

β_R ：ばらつき、 β_U ：不確かさ

表 5.8 起動変圧器の応答及び耐力（免震時：固有周期 3 秒）

入力地震動 (Gal)	応答		耐力	
	現実的応答 (G)	標準偏差	中央値 (G)	標準偏差
300	0.07	0.29 $\left[\begin{array}{l} \beta_R=0.14 \\ \beta_U=0.25 \end{array} \right]$	0.66	0.14 $\left[\begin{array}{l} \beta_R=0.10 \\ \beta_U=0.10 \end{array} \right]$
450	0.07			
600	0.12			
750	0.15			
900	0.16			
1100	0.17			
1300	0.19			

β_R ：ばらつき、 β_U ：不確かさ

表 5.9 遮断器の応答及び耐力（免震時：固有周期 2 秒）

入力地震動 (Gal)	応答		耐力	
	現実的応答 (G)	標準偏差	中央値 (G)	標準偏差
300	0.17	0.29 $\left[\begin{array}{l} \beta_R=0.14 \\ \beta_U=0.25 \end{array} \right]$	0.66	0.14 $\left[\begin{array}{l} \beta_R=0.10 \\ \beta_U=0.10 \end{array} \right]$
450	0.22			
600	0.28			
750	0.32			
900	0.34			
1100	0.35			
1300	0.36			

β_R ：ばらつき、 β_U ：不確かさ

表 5.10 遮断器の応答及び耐力（免震時：固有周期 3 秒）

入力地震動 (Gal)	応答		耐力	
	現実的応答 (G)	標準偏差	中央値 (G)	標準偏差
300	0.09	0.29 $\left[\begin{array}{l} \beta_R=0.14 \\ \beta_U=0.25 \end{array} \right]$	0.66	0.14 $\left[\begin{array}{l} \beta_R=0.10 \\ \beta_U=0.10 \end{array} \right]$
450	0.12			
600	0.16			
750	0.19			
900	0.20			
1100	0.21			
1300	0.23			

β_R ：ばらつき、 β_U ：不確かさ

表 5.11 地震時損傷確率（起動変圧器）

地震動 (Gal)	300	450	600	750	900	1100	1300
非免震	6.9×10^{-01}	9.6×10^{-01}	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
免震 (固有周期 2 秒)	1.8×10^{-07}	1.3×10^{-05}	2.9×10^{-04}	9.2×10^{-04}	1.3×10^{-03}	1.3×10^{-03}	3.7×10^{-03}
免震 (固有周期 3 秒)	8.3×10^{-13}	3.1×10^{-13}	9.1×10^{-08}	1.3×10^{-06}	3.2×10^{-06}	1.3×10^{-05}	4.6×10^{-05}

表 5.12 地震時損傷確率（遮断器）

地震動 (Gal)	300	450	600	750	900	1100	1300
非免震	2.8×10^{-04}	1.5×10^{-02}	1.0×10^{-01}	2.9×10^{-01}	5.1×10^{-01}	7.4×10^{-01}	8.8×10^{-01}
免震 (固有周期 2 秒)	1.3×10^{-08}	1.0×10^{-06}	3.5×10^{-05}	1.5×10^{-04}	3.1×10^{-04}	5.0×10^{-04}	6.0×10^{-04}
免震 (固有周期 3 秒)	4.2×10^{-14}	2.5×10^{-11}	2.6×10^{-09}	5.1×10^{-08}	2.2×10^{-07}	4.7×10^{-07}	1.9×10^{-06}

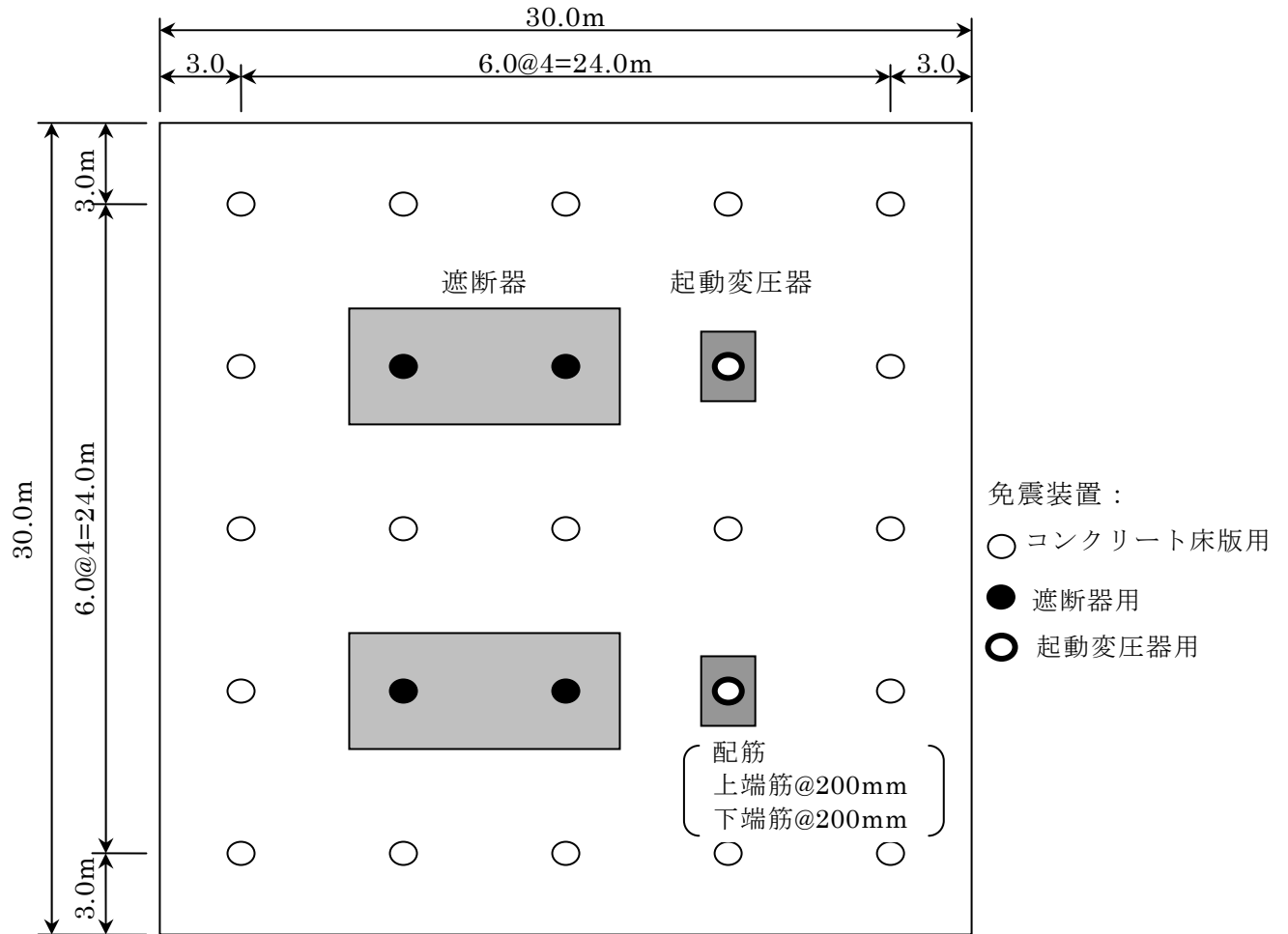


図 5.1 開閉所のレイアウト

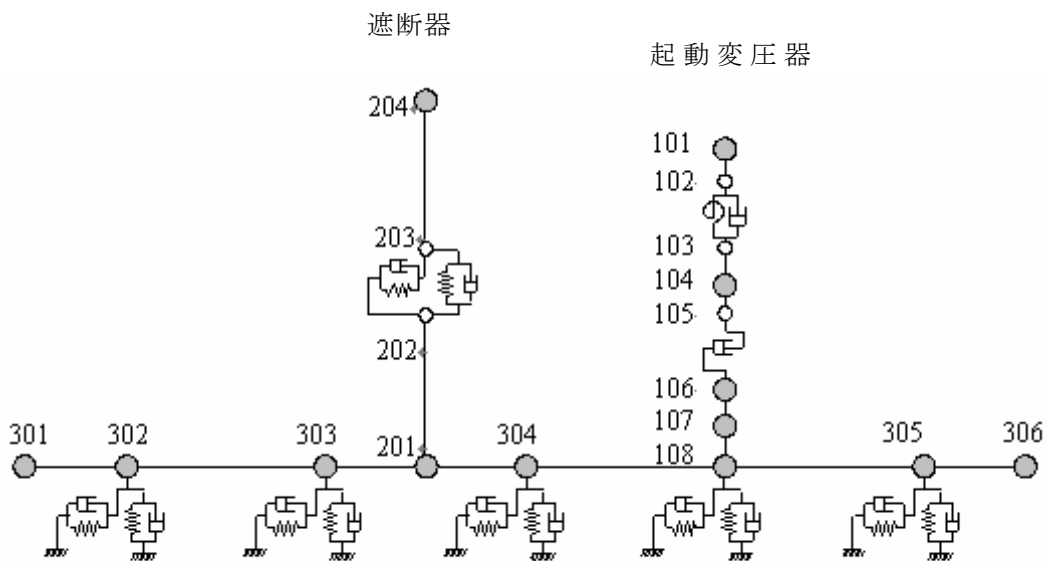
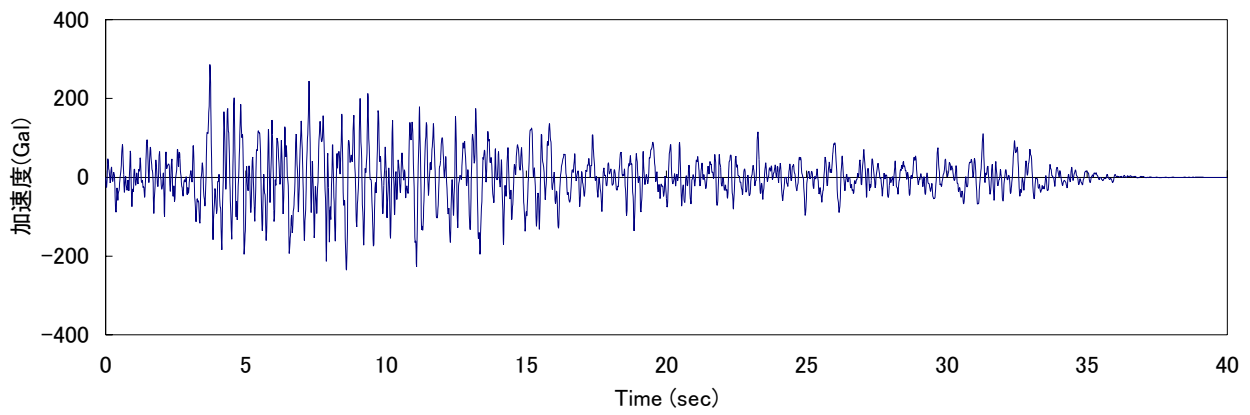
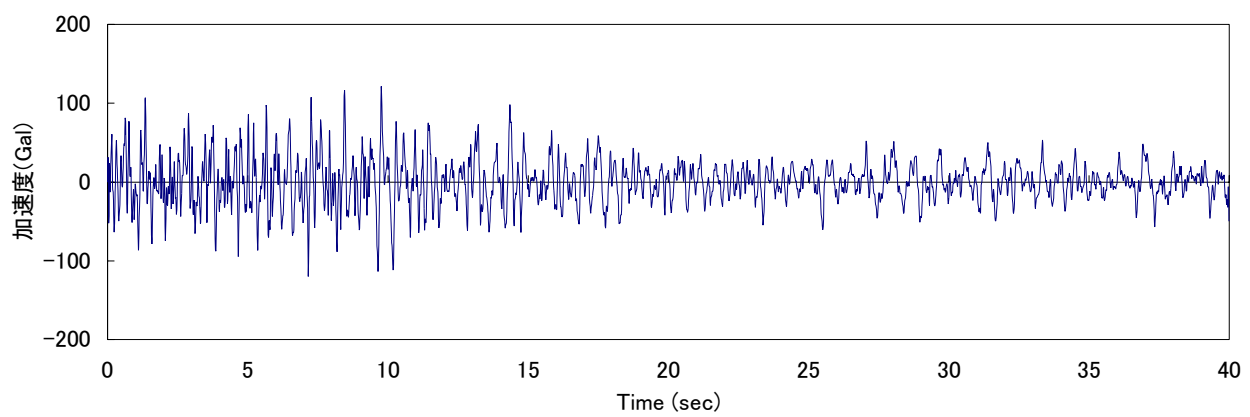


図 5.2 開閉所免震系の振動解析モデル

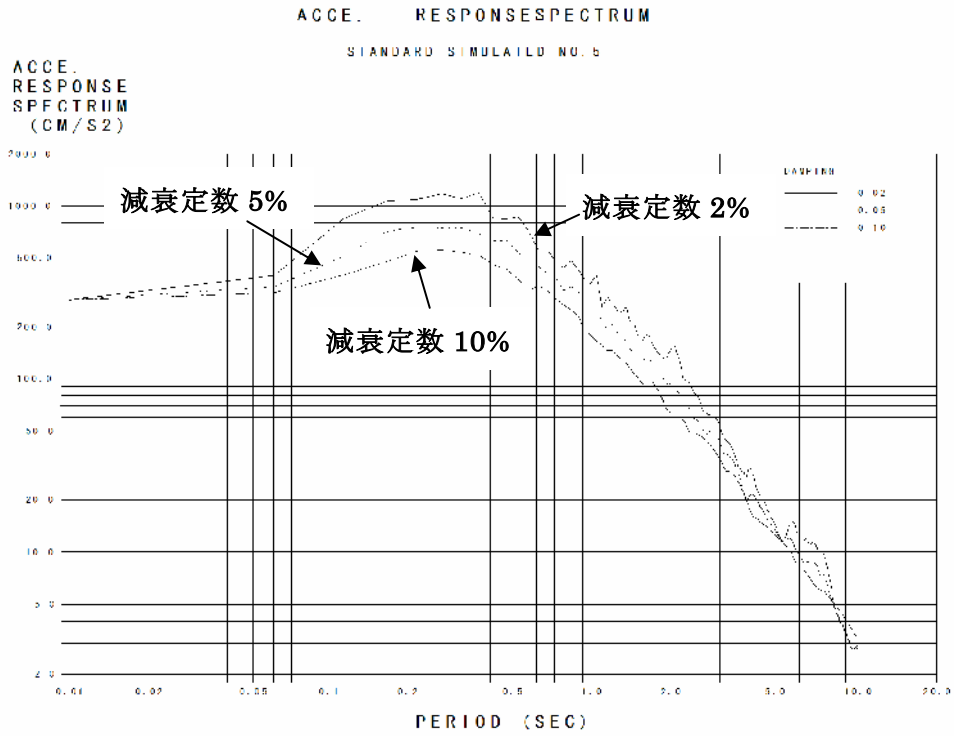


(a) 水平成分

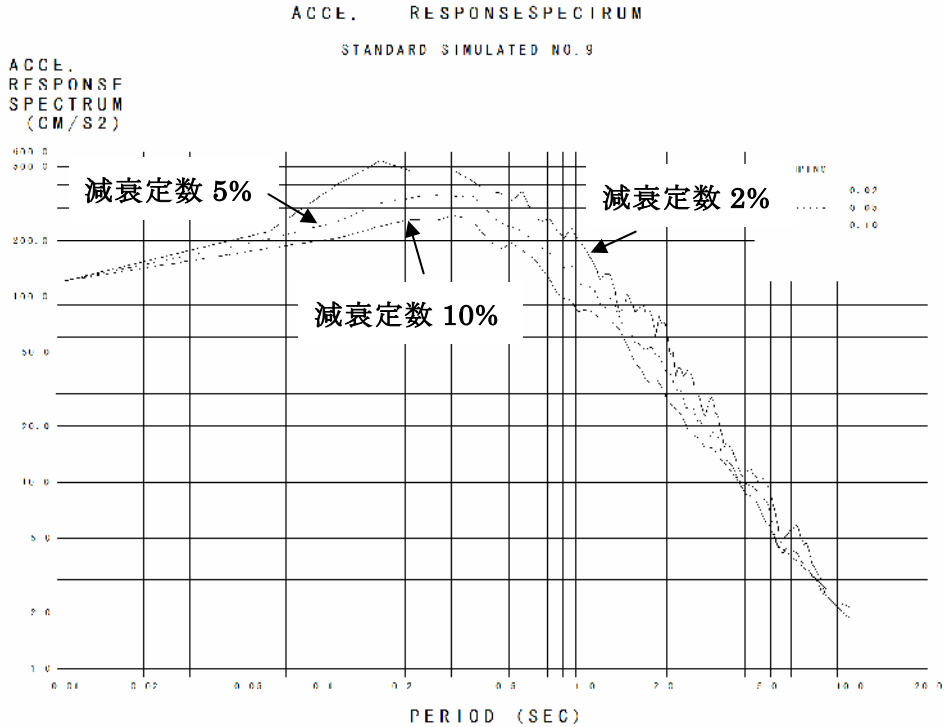


(b) 鉛直成分

図 5.3 入力地震動（改良標準波 S₁F）の加速度時刻歴波形



(a) 水平成分



(b) 鉛直成分

図 5.4 入力地震動の加速度応答スペクトル

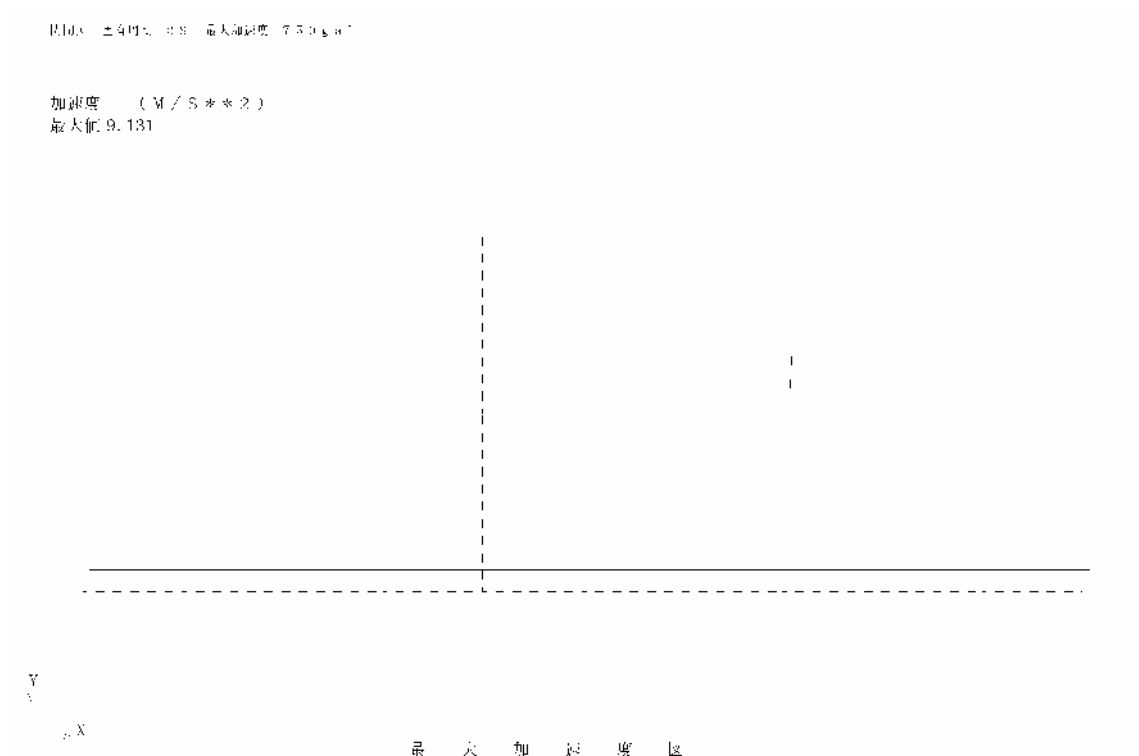


図 5.5 開閉所免震系の最大加速度応答分布
(PGA レベル 750、免震時：固有周期 2 秒)

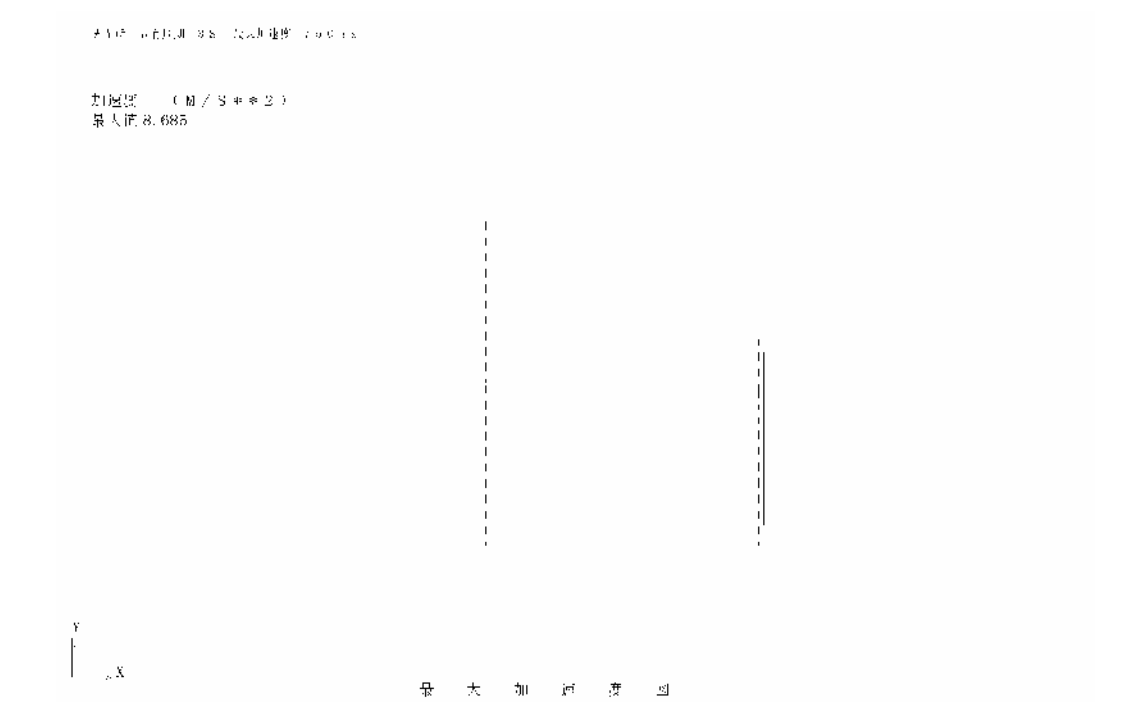


図 5.6 開閉所免震系の最大加速度応答分布
(PGA レベル 750、免震時：固有周期 3 秒)

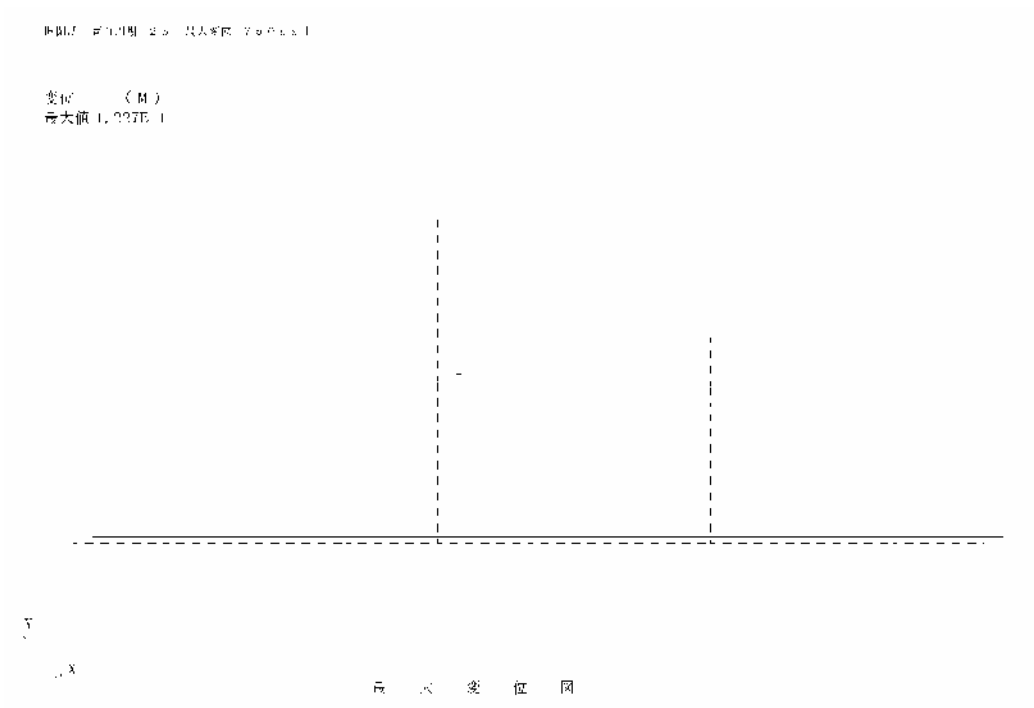


図 5.7 開閉所免震系の最大変位応答分布
(PGA レベル 750、免震時：固有周期 2 秒)

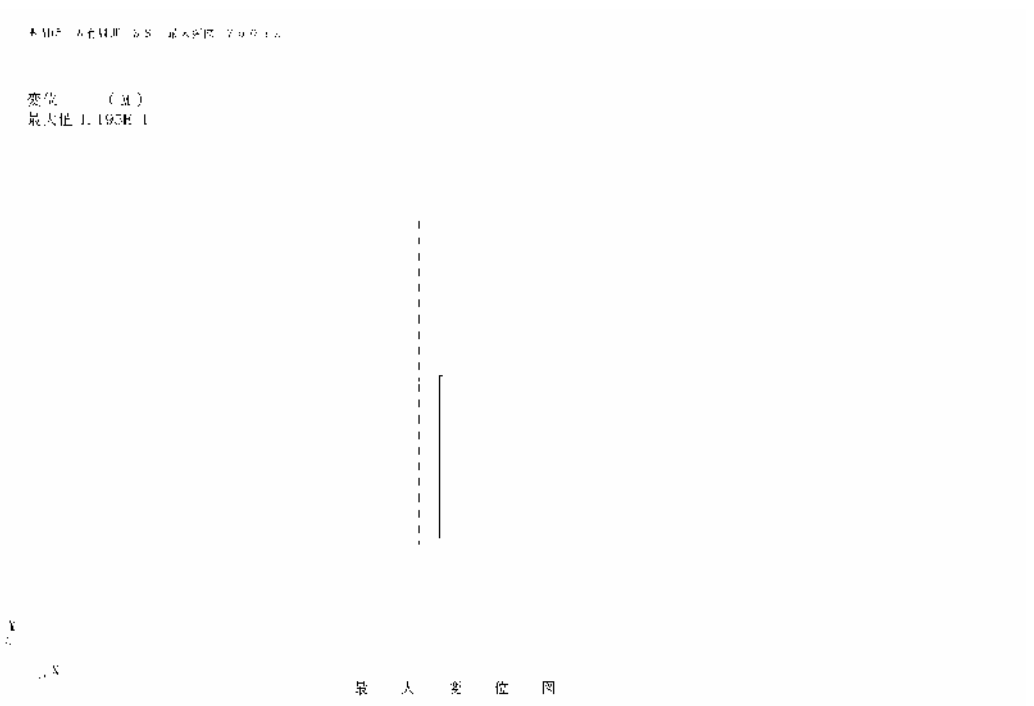


図 5.8 開閉所免震系の最大変位応答分布
(PGA レベル 750、免震時：固有周期 3 秒)

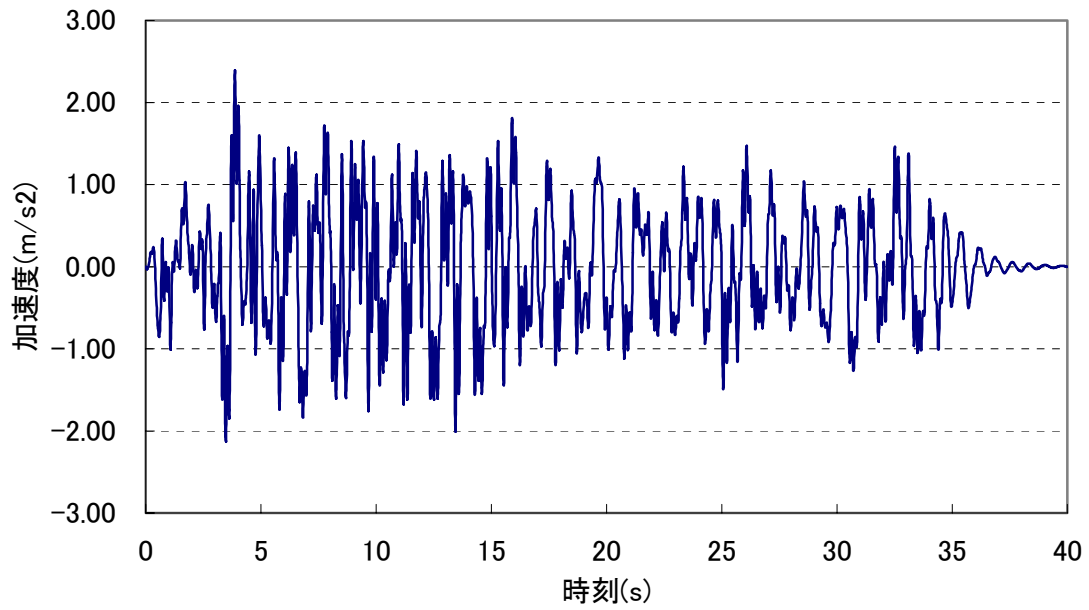


図 5.9 起動変圧器加速度応答時刻歴
(PGA レベル 750、免震時：固有周期 2 秒)

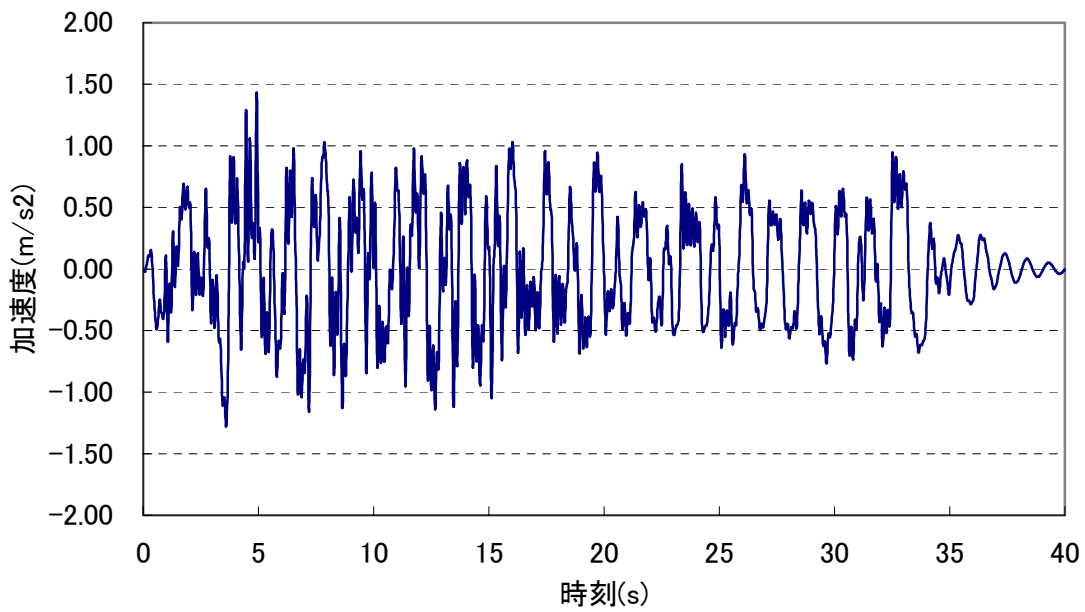


図 5.10 起動変圧器加速度応答時刻歴
(PGA レベル 750、免震時：固有周期 3 秒)

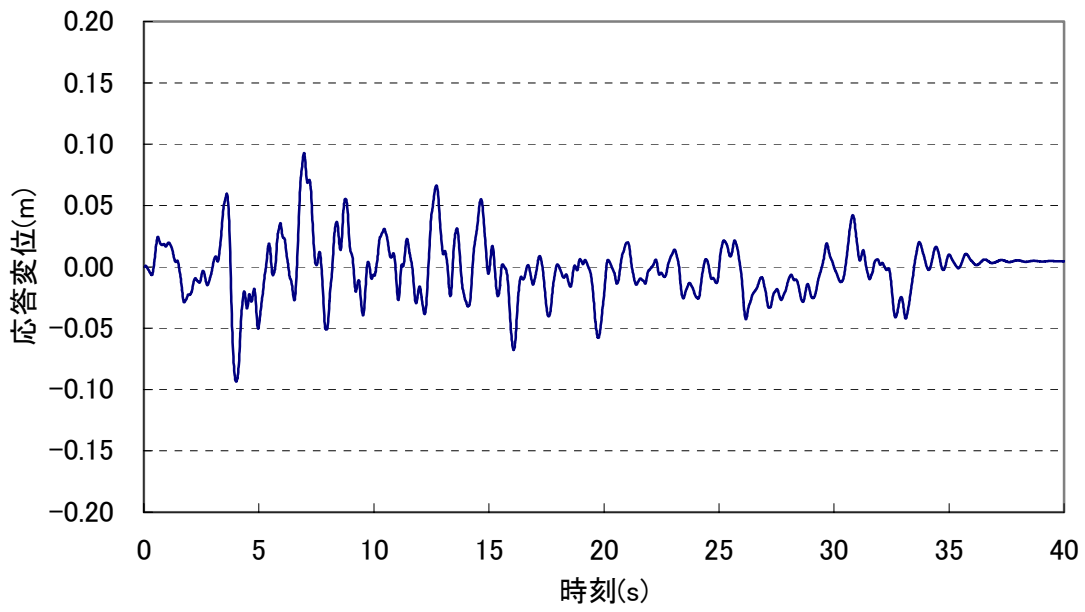


図 5.11 起動変圧器変位応答時刻歴
(PGA レベル 750、免震時：固有周期 2 秒)

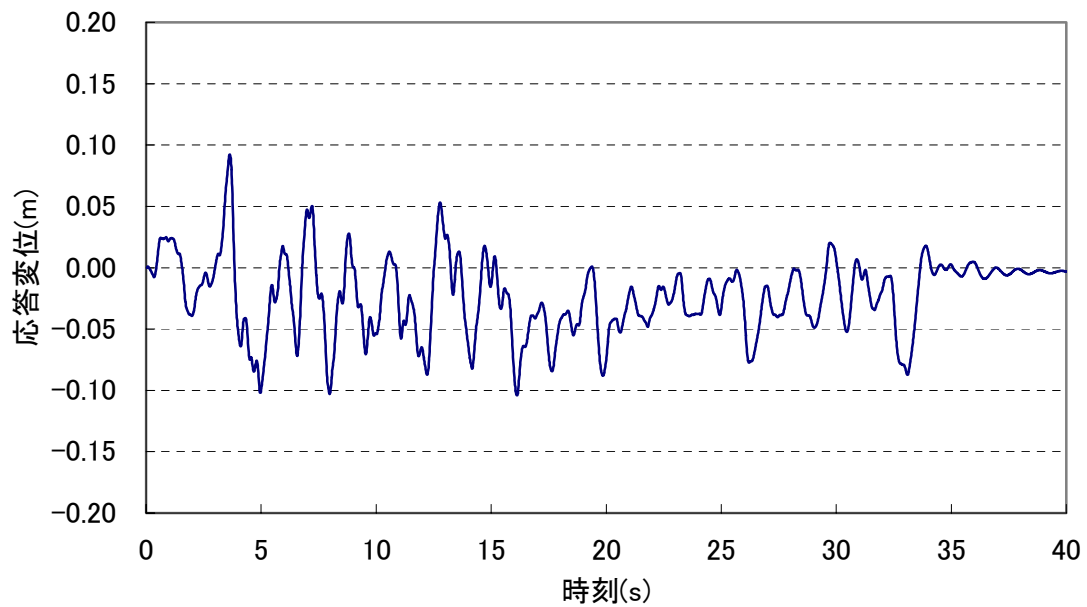


図 5.12 起動変圧器変位応答時刻歴
(PGA レベル 750、免震時：固有周期 3 秒)

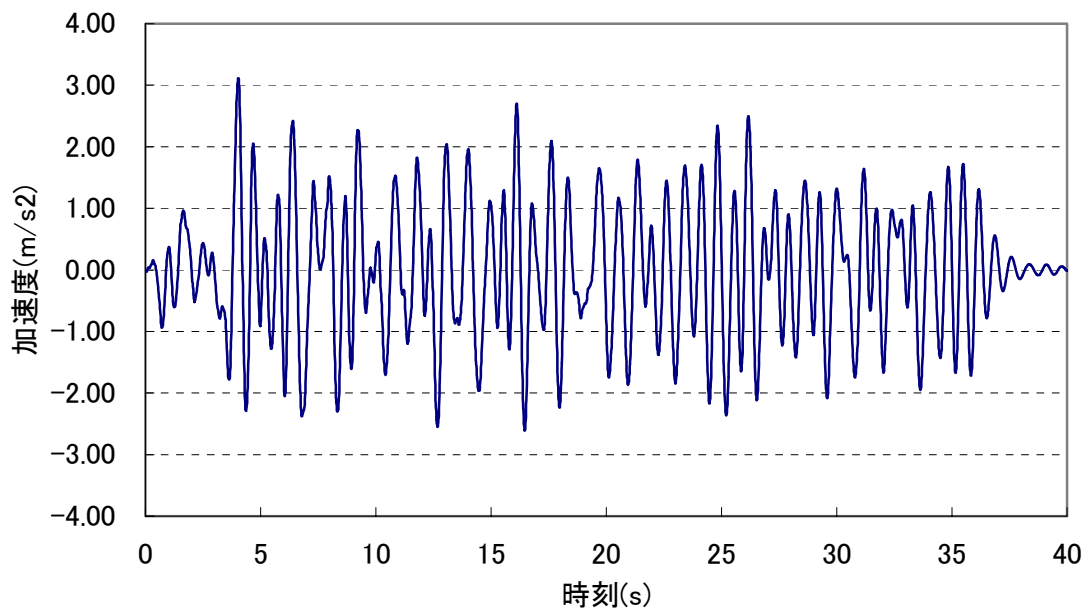


図 5.13 遮断器加速度応答時刻歴
(PGA レベル 750、免震時：固有周期 2 秒)

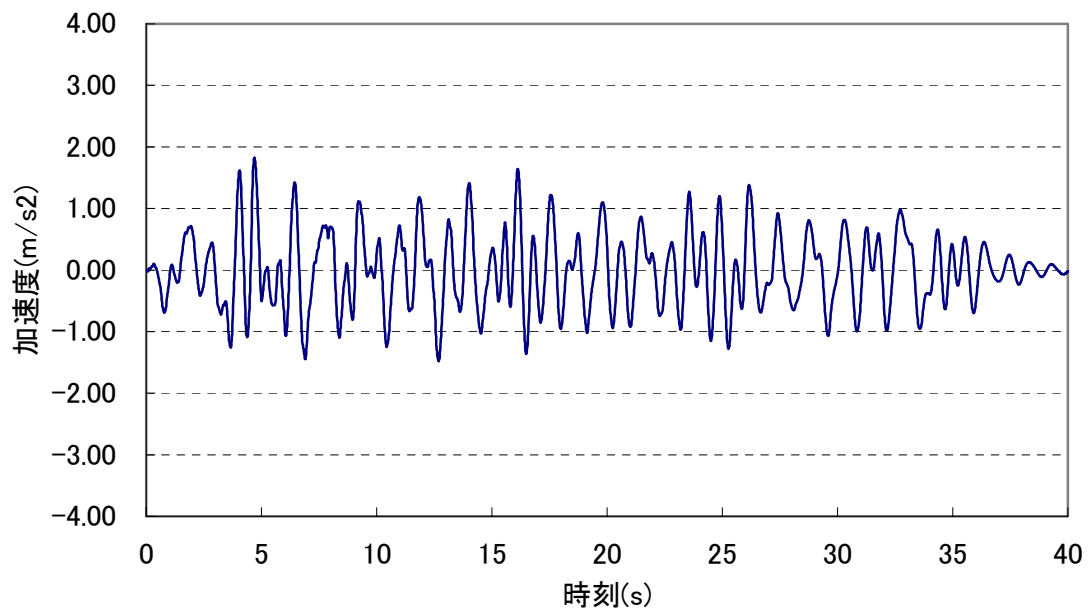


図 5.14 遮断器加速度応答時刻歴
(PGA レベル 750、免震時：固有周期 3 秒)

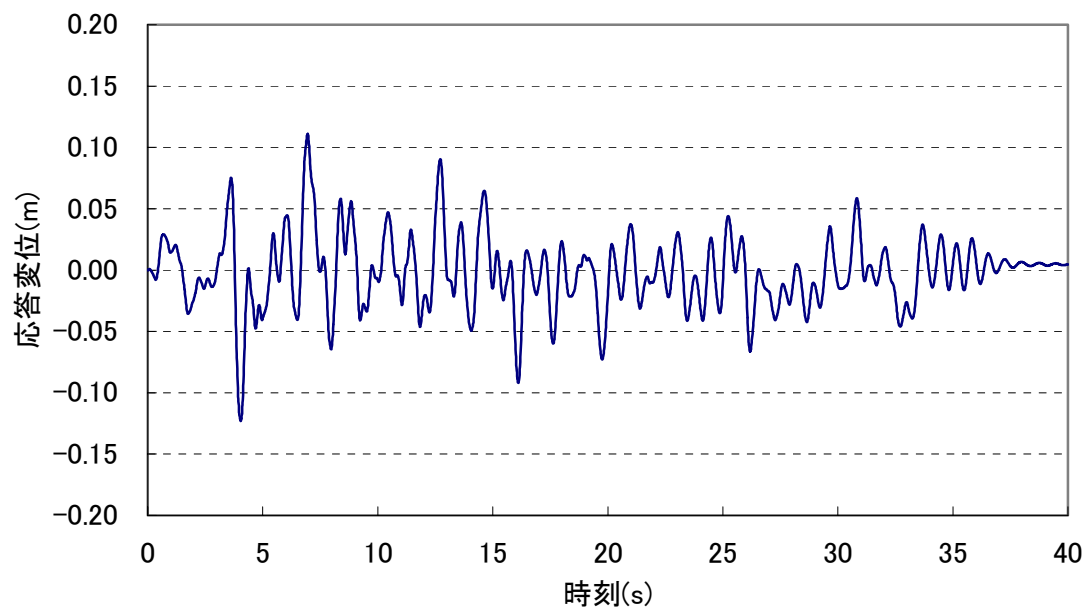


図 5.15 遮断器変位応答時刻歴
(PGA レベル 750、免震時：固有周期 2 秒)

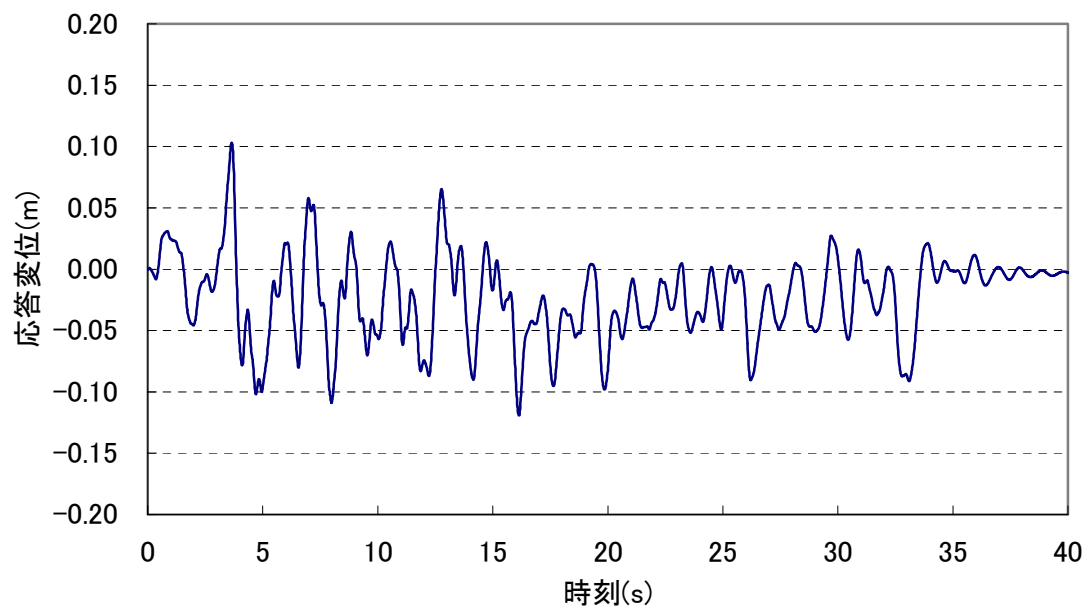


図 5.16 遮断器変位応答時刻歴
(PGA レベル 750、免震時：固有周期 3 秒)

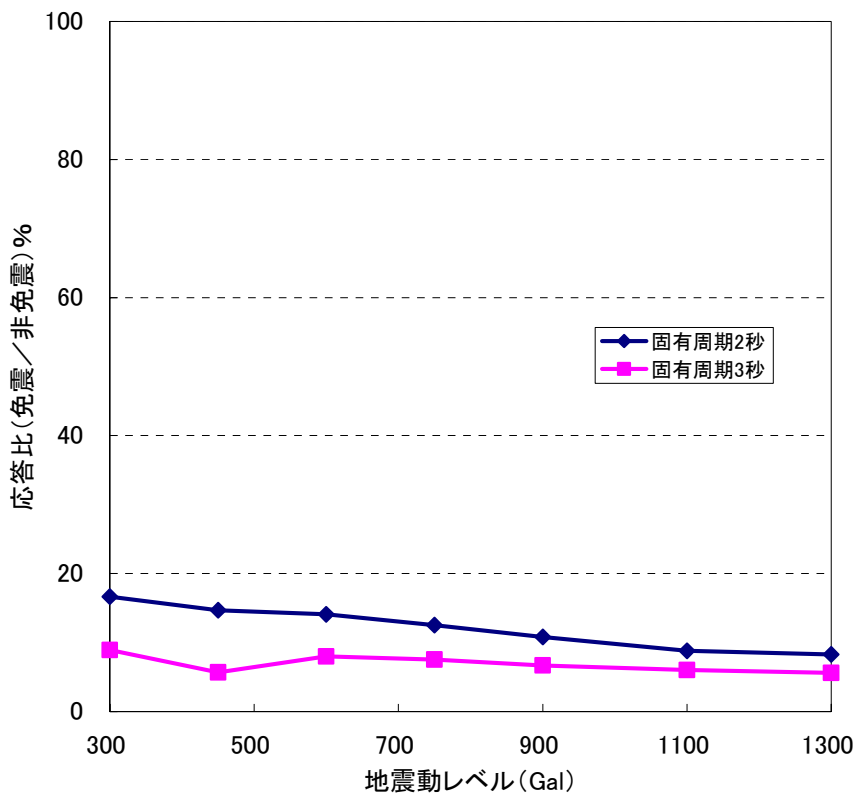


図 5.17 起動変圧器の加速度応答低減率

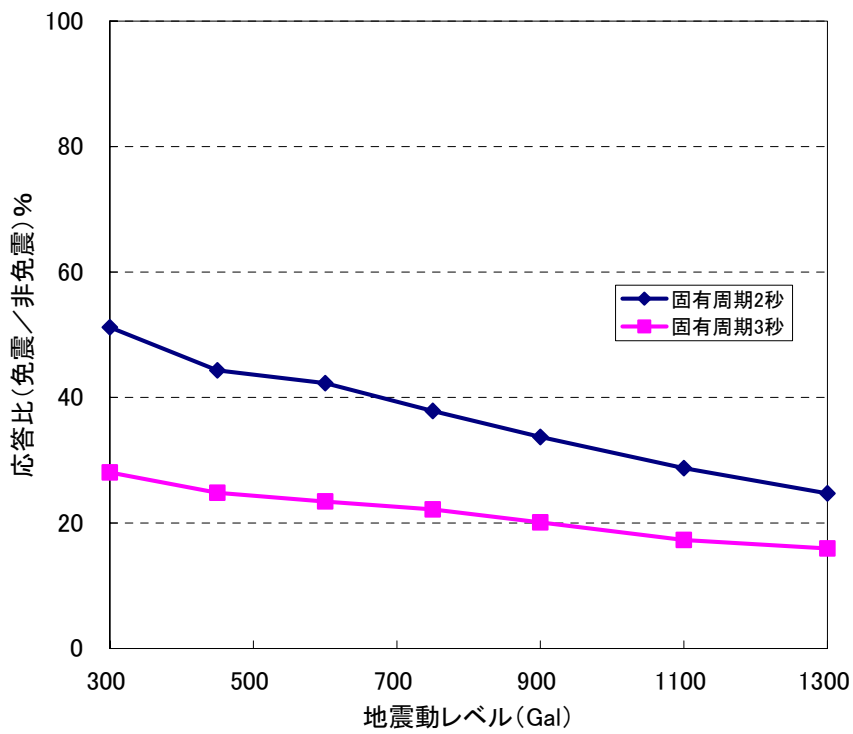


図 5.18 遮断器の加速度応答低減率

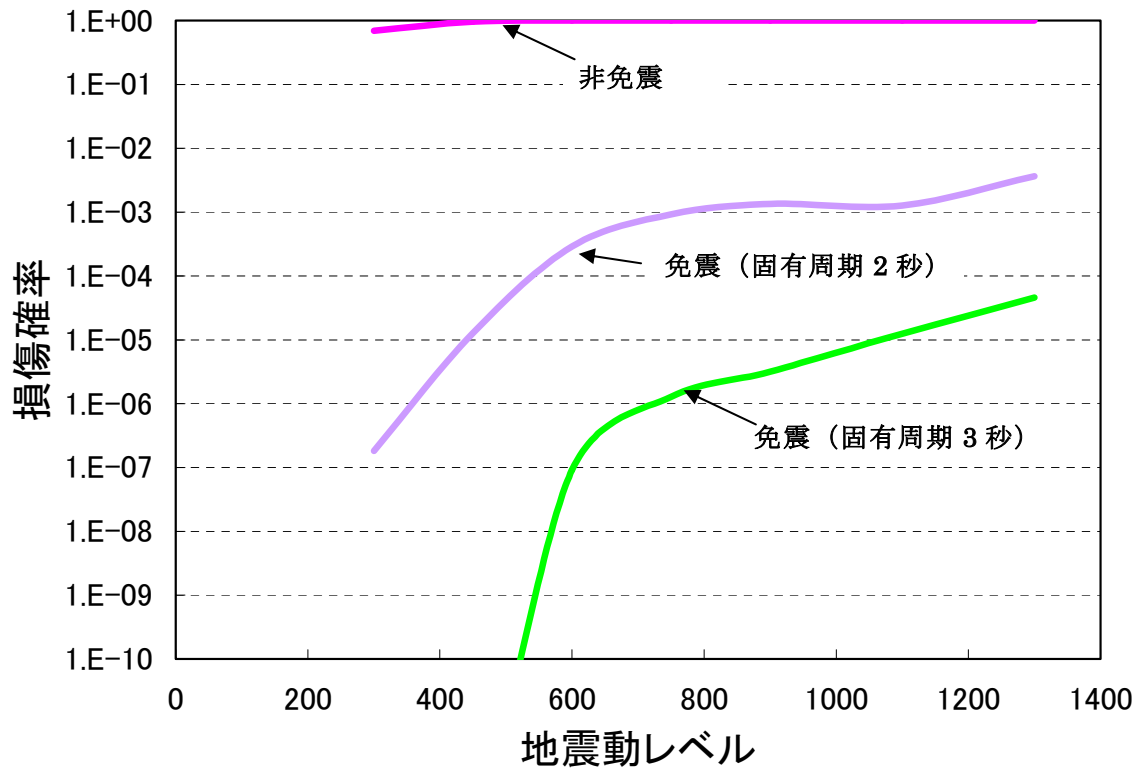


図 5.19 起動変圧器の地震時損傷確率

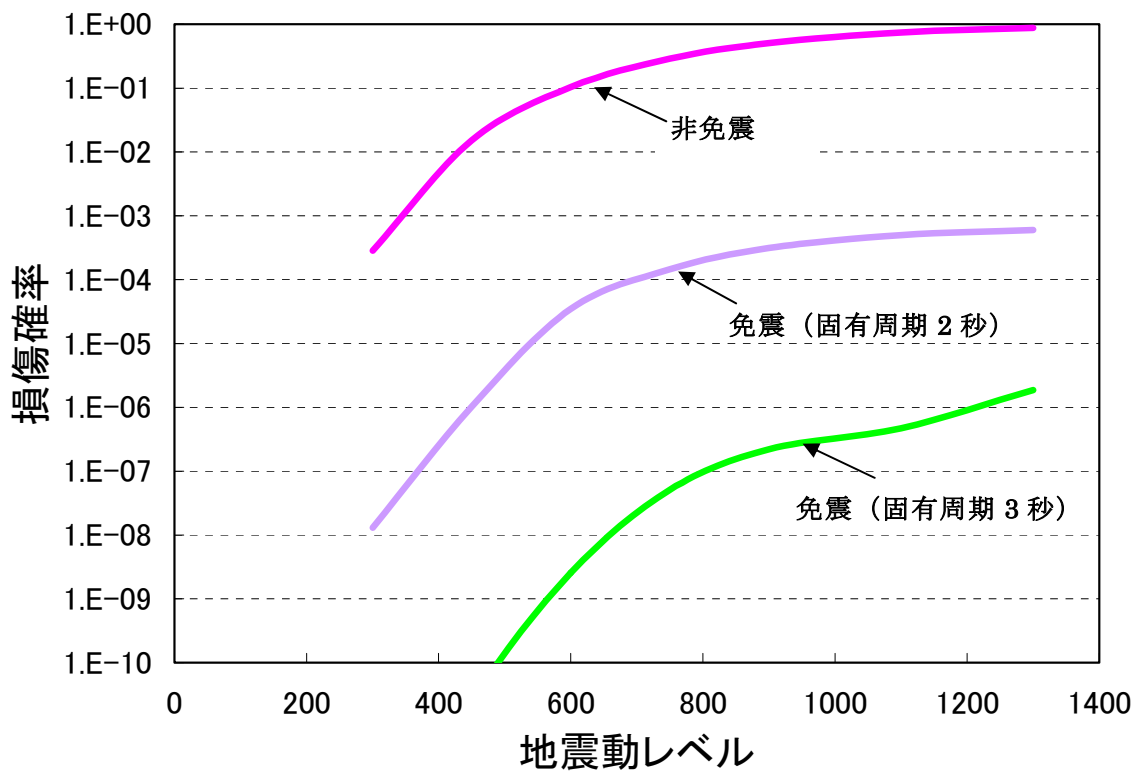


図 5.20 遮断器の地震時損傷確率

6. 結論

地震リスク低減策の検討に役立てるため、地震 PSA 上重要な外部電源喪失事象を対象として、外部電源系統のうち、送電鉄塔、起動変圧器及び遮断機の損傷確率を評価した。また、外部電源喪失に係る地震リスク低減策とし、開閉所を免震化した場合の変電機器の損傷確率の低減効果を検討した。

本作業の結論を以下に示す。

(1) 外部電源喪失の事故シナリオの検討

外部電源系統の損傷を考慮した外部電源喪失の事故シナリオを検討し、外部電源系統の FT 解析モデルを試作した。

(2) 送電鉄塔の損傷確率評価

電力中央研究報告「UHV 赤城実規模試験の動的試験」に掲載されている鉄塔を対象として、地震時損傷確率を評価した。架線直角方向加震時の鉄塔頂部の損傷確率が最も大きく、地震動レベル 900Gal における損傷確率は約 0.01、1300 Gal における損傷確率は約 0.07 であった。

(3) 開閉所変電機器の地震時損傷確率評価

BWR モデルプラントを想定して、プラント内の屋外開閉所に設置されている変電機器の地震時損傷確率を評価し、送電鉄塔の損傷確率と比較した。その結果、送電鉄塔の損傷確率は開閉所の起動変圧器及び遮断器の損傷確率に比べて相対的に小さくなるとの見通しを得た。

(4) 開閉所免震系の損傷確率評価

地震リスク低減策を検討するために、開閉所を免震化した場合の変電機器の損傷確率と非免震時の変電機器の損傷確率を比較して、免震化による損傷確率の低減効果を評価した。その結果、起動変圧器、遮断器ともに免震化により損傷確率が大幅に低減することが分かり、開閉所を免震化することにより外部電源喪失に係る地震リスクを低減できるとの見通しを得た。

参考文献

- (1) 地震に係る確率論的安全評価手法の整備に関する報告書＝BWR事故シーケンスの試解析＝、原子力発電技術機構、INS/M01-09、平成14年3月。
- (2) 地震に係る確率論的安全評価手法の整備＝BWR4の事故シーケンスの試解析＝、原子力安全基盤機構、JNES/SAE05-023、平成17年10月。
- (3) 北原、花田：UHV赤城実規模試験線の動的試験－地盤調査および地盤物性試験－、電力中央研究所研究報告、380053、1981。
- (4) 花田他：UHV赤城実規模試験線の動的試験－鉄塔基礎の試験結果とその力学モデル－、電力中央研究所研究報告、381039、1982。
- (5) 前野、花田：UHV赤城実規模試験線の動的試験－その(3)鉄塔単体の試験結果－、電力中央研究所研究報告、382051、1983。
- (6) 前野、花田：UHV赤城実規模試験線の動的試験－その(4)鉄塔単体の数値モデルと動特性－、電力中央研究所研究報告、382052、1983。
- (7) 前野、花田、北原：UHV赤城実規模試験線の動的試験－その(5)鉄塔－架渉線練成系の動的挙動と耐震性－、電力中央研究所研究報告、385051、1986。
- (8) 電気学会：送電用支持物設計標準（JEC-127）、電気書院、1979。
- (9) 松田他：台湾集集地震により倒壊した超高压送電鉄塔の被害原因の解明と耐震性向上に関する研究、土木学会論文集、No.801/I-73, 51-68, 2005。
- (10) 西村昭：鋼材の機械的性質のばらつきについて、鋼材の機械的性質調査結果続報、JSSC, Vol.5. No.48, 68-75, 1969。
- (11) 地震に係る確率論的安全評価手法の整備に関する報告書＝建屋・土木構造物・斜面の損傷確率評価＝、原子力発電技術機構、INS/M02-16、平成15年3月。
- (12) 蛭沢勝三：確率論的損傷評価手法による機器免震の有効性に関する研究、1997。

第Ⅱ編 非常用 DG の免震構造の実機適用性の検討

1. 序 論

1.1 目的

機器免震技術を実機に適用する場合には、免震機器と周辺配管の取合い部の変位応答を抑制する必要がある。本作業では、免震技術の実機適用性を検討するために、想定 BWR 建屋内に設置されている非常用 DG を対象に、周辺配管等の取合い部を含めた免震設計を行い、簡便な解析モデルを用いた地震応答解析を行い、その免震特性を把握した。

非常用 DG は安全上重要な機器であり、耐力の増強が難しく、免震化による応答低減が期待される機器である。また、ディーゼル発電機及び吸排気管が同一基礎上にコンパクトに設置されているため周辺配管等の取合い部を含めた免震構造を検討するには良好な例である。

1.2 本作業の概要

1.2.1 非常用 DG の免震構造の試設計

想定 BWR プラントの原子炉建屋内に設置されている非常用 DG を対象として、隣接構造物とのクリアランスや配管等の取合い部の変位を許容値以下に抑えることを考慮した免震設計を行った。

1.2.2 非常用 DG 免震系の地震応答解析

(1) BWR 原子炉建屋の地震応答解析

想定 BWR プラントの原子炉建屋を対象に地震応答解析を行い、非常用 DG 設置床の応答（加速度時刻歴）を算定した。

(2) 非常用 DG 免震系の地震応答解析

(1)項で算定した床応答を用いて、免震時及び非免震時の非常用 DG の地震応答解析を行い、免震化による加速度応答の低減効果を評価した。

1.2.3 入力地震動に関する感度解析

入力地震動の周波数特性を変えた 3 ケース（改良標準波 S₁N、S₂N、S₂F）の感度解析を行い、入力地震動の周波数特性の違いが非常用 DG 免震系の加速度応答及び変位応答に及ぼす影響を評価した。

2. 非常用 DG の免震構造の試設計

想定 BWR 建屋内に設置されている非常用 DG を対象として、隣接構造物とのクリアランスや配管等の取合い部の変位を許容値以下に抑えることを考慮した免震設計を行った。

2.1 免震構造及び免震装置の基本仕様

免震構造は 3 次元免震構造とした。免震構造は、鉄筋コンクリート製の剛構造の基礎上に非常用 DG を設置し、水平方向及び上下方向の免震装置で支持する形式とした。水平免震装置には天然積層ゴムを、上下免震装置には皿ばねを、減衰装置にはオイルダンパーを使用した。また、非常用 DG と吸排気管等との接続は、ユニバーサルベローズを介して行った。このベローズによって、非常用 DG と配管系との相対変位を吸収するものとした。クリアランス及び変位の許容値は「軽水炉発電所のあらまし」⁽¹⁾に掲載されている BWR 建屋配置図を参考に、許容変位±200mm とした。BWR 建屋配置図を図 2.1 に、非常用 DG の免震構造を図 2.2 に示す。非常用 DG 免震系の固有周期及び減衰定数を表 2.1 に、免震要素の基本仕様を表 2.2 に示す。

2.2 解析モデル

非常用 DG 及び基礎は、3 質点からなるはり要素によりモデル化した。免震系非常用 DG の解析モデルを図 2.3 に、解析モデルの諸元を表 2.3 に示す。

表 2.1 非常用 DG 免震系の固有周期及び減衰定数

	固有周期 (秒)	減衰定数 (%)
水平方向	1.0	10
	1.5	
	2.0	
上下方向	0.5	10

表 2.2 免震要素の基本仕様

	材料	設置個数	許容変位(mm)
水平免震装置	天然積層ゴム	6 体	200
上下免震装置	皿ばね	6 体	20
	オイルダンパー	4 体	

表 2.3 免震系非常用 DG の応答解析モデルの諸元

機器免震仕様	免震ケース1	免震ケース2	免震ケース3
免震装置水平固有振動数(Hz)	1.00	0.67	0.50
機器免震系全重量(tonf)	300	300	300
DG重量(tonf)	120	120	120
基礎重量(tonf)	180	180	180
免震装置目標水平剛性(tonf/m)	1.2×10^3	5.4×10^5	3.0×10^5
積層ゴムユニット数(台)	6	6	6
積層ゴム1台の支持荷重(tonf)	50	50	50
積層ゴム鉛直剛性(tonf/m)	3.1×10^5	3.1×10^5	3.1×10^5
積層ゴム回転剛性(tonf・m/rad)	7.1×10^5	7.1×10^5	7.1×10^5
水平減衰(%)	0.1	0.1	0.1
短辺DG回転慣性(tonf・m・s ²)	18	18	18
短辺基礎回転慣性(tonf・m・s ²)	2.6×10^5	2.6×10^5	2.6×10^5

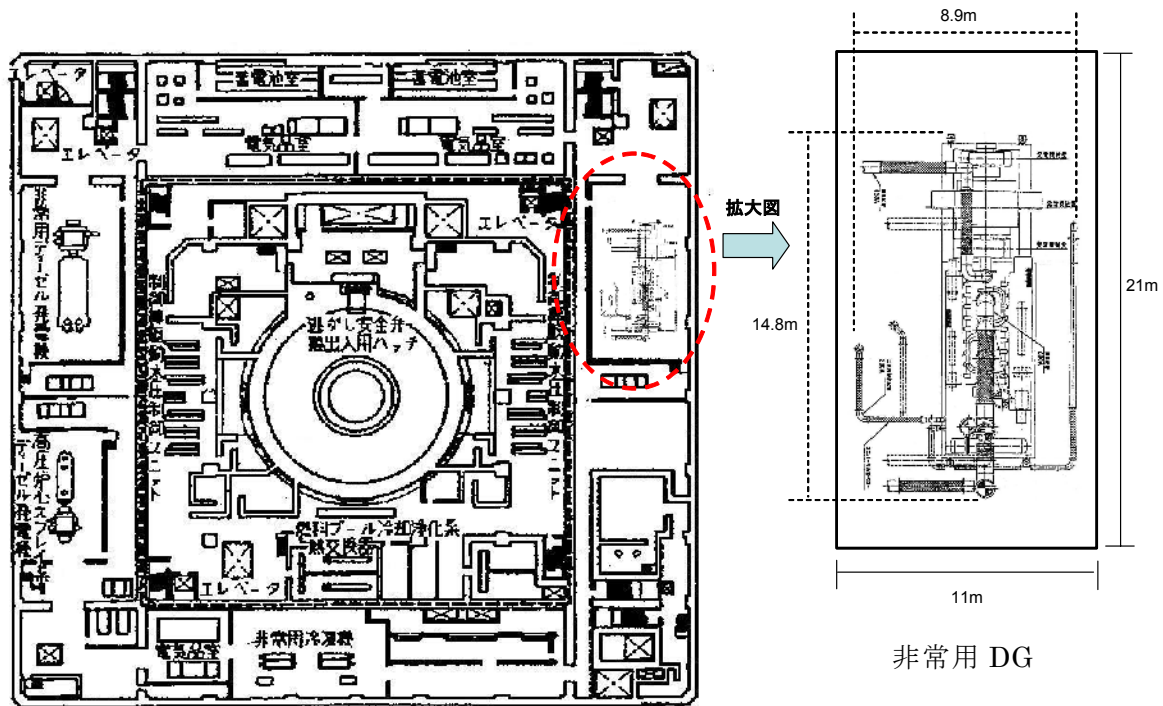


図 2.1 BWR 建屋配置図

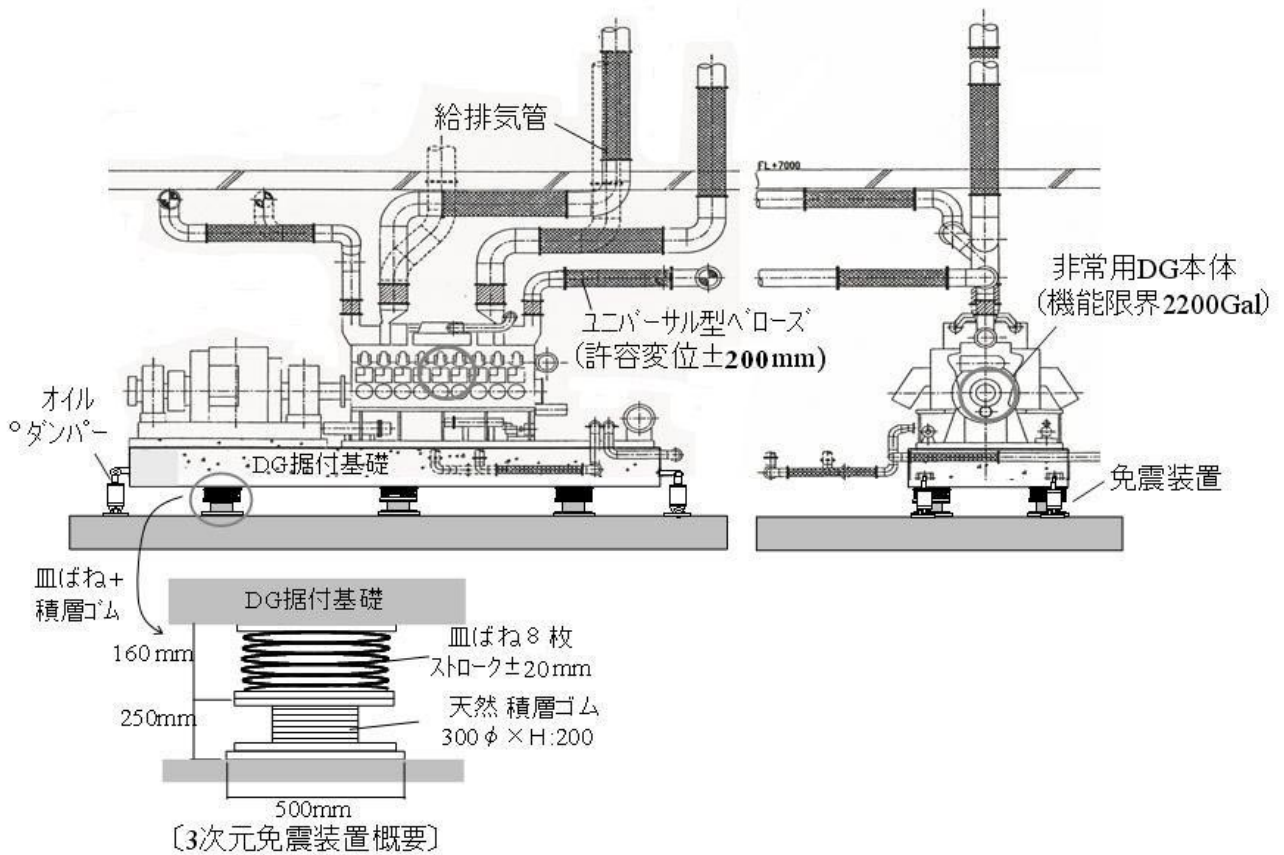


図 2.2 非常用 DG の免震構造

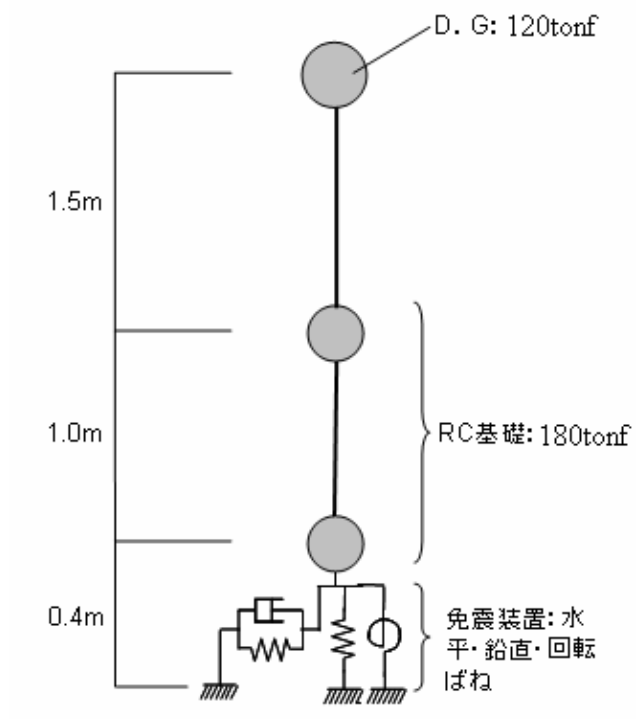


図 2.3 免震系非常用 DG の応答解析モデル

3. 非常用 DG 免震系の地震応答解析

3.1 BWR 原子炉建屋の地震応答解析

想定 BWR プラントの原子炉建屋を対象に地震応答解析を行い、非常用 DG 設置床の応答（加速度時刻歴）を算出した。

3.1.1 解析条件

(1) 原子炉建屋解析モデル

想定 BWR 原子炉建屋の断面図を図 3.1 に、振動解析モデルを図 3.2 に示す。同図に示すように原子炉建屋の振動解析モデルは、外部ボックス壁（OW）、内部ボックス壁（IW）及びシエル壁（SW）を 3 本棒の梁要素に置換したスウェイ・ロッキング（SR）モデルとした。解析モデルの諸元を表 3.1～表 3.6 に示す。

(2) 建屋の復元力特性

解析モデルにおける梁要素について非線形の復元力モデルを設定した。せん断応力-せん断ひずみ関係の復元力モデルには最大点指向型モデルを用い、曲げモーメント-曲率関係の復元力モデルには Degrading Tri-Linear（深田）モデル⁽²⁾を用いた（図 3.3 参照）。

(3) 地盤-建屋相互作用地盤ばねの算定

原子炉建屋は、岩盤上($V_s=1000\text{m/s}$)に設置されているものとし、基礎底面地盤の水平及び回転ばねの剛性と減衰特性として、基礎マットを剛体として振動アドミタンス理論に基づく複素剛性から、静的剛性と建屋の 1 次固有振動数に対応する減衰係数を設定した。また、浮き上がりによる基礎回転ばねの非線形特性を考慮し、骨格曲線をトリリニア型とし、履歴モデルを逆行型とした(図 3.4 参照)。

(4) 入力地震動

入力地震動は高地震帯用改良標準波 S_1F 波を用いた。入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトルを図 3.5、図 3.6 に示す。

3.1.2 固有値解析結果

建屋の固有値解析結果を表 3.7 に示す。建屋の 1 次固有周期は 0.318 秒、2 次固有周期は 0.160 秒であり、弾性応答においては刺激係数から 1 次及び 2 次固有振動モードが支配的(約 90%)である。また、図 3.6 に示す入力地震動の加速度応答スペクトルから、1 次及び 2 次固有周期の周期

帯（0.1 秒～0.4 秒）において、応答の増幅が最も大きくなることが推定される。

3.1.3 地震応答解析結果

建屋の解析結果として、非常用 DG 設置位置の加速度応答波形、加速度応答スペクトル及び変位応答スペクトルを図 3.7～図 3.9 に示す。非常用 DG 設置位置の最大加速度応答は約 392Gal となった。また、図 3.8 から、周期 0.15 秒および 0.3 秒付近にピークが見られるが、これらは原子炉建屋の 1 次および 2 次の固有周期に対応する。

3.2 非常用 DG 免震系の地震応答解析

2 章で作成した解析モデルと 3.1 節で算出した床応答を用いて、免震時及び非免震時の非常用 DG の地震応答解析を行い、免震化による加速度応答の低減効果を評価した。

地震応答解析結果を表 3.8 に示す。非免震時の加速度応答時刻歴及び変位応答時刻歴を図 3.10～図 3.11 に、最大加速度応答分布及び最大変位応答分布を図 3.14～図 3.16 に示す。免震時の加速度応答時刻歴及び変位応答時刻歴を図 3.17～図 3.19 に、最大加速度応答分布及び最大変位応答分布を図 3.20～図 3.21 に示す。

非常用 DG 免震系の最大加速度応答は、免震時の固有周期を 1 秒とすると、非免震時の約 50% に、固有周期を 1.5 秒とすると約 27% に、固有周期を 2 秒とすると約 17% に減少した。また、最大変位応答は、4.9cm～6.3cm であり、許容変位 20cm を十分下回っていることを確認した。

表 3.1 建屋解析モデル諸元(1) 質点重量

F.L(m)	重量×10 ³ (t)			回転慣性モーメント ×10 ⁶ (tm ² /rad)		
	OW	IW	SW	OW	IW	SW
70.0		3.5			0.7	
60.0		4.1			0.8	
50.0		10.0	5.2		3.1	0.1
40.0		17.3	12.6		5.8	0.3
32.0		11.8	7.7		3.8	0.3
24.0	4.0	13.7	7.5	8.5	4.5	0.3
18.0	13.0	24.9	9.0	17.3	5.9	1.4
12.0	10.0	18.4	6.4	12.2	5.1	1.1
6.0	8.7	16.0	6.5	9.2	5.5	1.8
0.0~-6.5		124.3			66.3	

表 3.2 建屋解析モデル諸元(2) 部材の剛性

F.L(m)	せん断断面積(m ²)			断面二次モーメント×10 ⁵ (m ⁴)		
	OW	IW	SW	OW	IW	SW
70.0						
		55.0			0.30	
60.0						
		71.0			0.38	
50.0						
		126.0	58.0		0.47	0.06
40.0						
		136.0	71.0		0.70	0.10
32.0						
		179.0	72.0		0.86	0.15
24.0						
	149.0	262.0	146.0	2.87	1.04	0.18
18.0						
	229.0	258.0	111.0	3.03	1.17	0.25
12.0						
	280.0	245.0	101.0	3.39	1.19	0.23
6.0						
	280.0	245.0	101.0	3.43	1.15	0.23
0.0						
		6400.0			3413.0	
-6.5						

表 3.3 建屋解析モデル諸元(3) 床バネの剛性

F. L (m)	床剛性 $\times 10^4$ (t/m)	
	OW-IW	IW-SW
50.0		132.0
40.0		73.0
32.0		87.0
24.0	620.0	108.0
18.0	827.0	196.0
12.0	377.0	76.0
6.0	186.0	76.0

表 3.4 建屋解析モデル諸元(4) 材料定数

コンクリート材料定数	
ヤング係数(E)	2.30×10^6 (t/m ²)
せん断弾性係数(G)	0.98×10^6 (t/m ²)
圧縮強度(Fc)	240 (kg/cm ²)
鉄筋定数	
ヤング係数(E)	2.10×10^7 (t/m ²)
鉄筋降伏強度(δy)	3500 (kg/cm ²)

表 3.5 建屋解析モデル諸元(5) 復元力特性 (M- ϕ 関係)

(OW)

層	M_c (kg · cm)	ϕ_c (rad/cm)	M_y (kg · cm)	ϕ_y (rad/cm)	α_1	α_2
4	2.10E+11	3.18E-08	2.18E+11	9.59E-08	0.0200	0.01
3	2.39E+11	3.44E-08	3.49E+11	1.59E-07	0.1262	"
2	2.77E+11	3.56E-08	4.51E+11	1.84E-07	0.1504	"
1	2.94E+11	3.73E-08	5.15E+11	1.98E-07	0.1746	"

(IW)

層	M_c (kg · cm)	ϕ_c (rad/cm)	M_y (kg · cm)	ϕ_y (rad/cm)	α_1	α_2
9	3.73E+10	5.41E-08	4.71E+10	2.28E-07	0.0821	0.01
8	5.05E+10	5.78E-08	6.83E+10	2.60E-07	0.1002	"
7	6.56E+10	6.07E-08	1.31E+11	4.04E-07	0.1762	"
6	1.14E+11	7.08E-08	1.78E+11	3.68E-07	0.1332	"
5	1.41E+11	7.12E-08	2.61E+11	3.99E-07	0.1847	"
4	1.64E+11	6.86E-08	3.64E+11	4.61E-07	0.2129	"
3	2.08E+11	7.73E-08	4.15E+11	4.68E-07	0.1974	"
2	2.34E+11	8.54E-08	4.43E+11	4.90E-07	0.1886	"
1	2.41E+11	9.11E-08	4.75E+11	5.44E-07	0.1953	"

(SW)

層	M_c (kg · cm)	ϕ_c (rad/cm)	M_y (kg · cm)	ϕ_y (rad/cm)	α_1	α_2
7	2.10E+10	1.52E-07	6.98E+10	1.30E-06	0.3088	0.01
6	3.38E+10	1.47E-07	8.23E+10	1.14E-06	0.2130	"
5	5.05E+10	1.46E-07	1.25E+11	1.05E-06	0.2389	"
4	4.88E+10	1.18E-07	1.56E+11	1.05E-06	0.2787	"
3	7.32E+10	1.27E-07	1.98E+11	9.55E-07	0.2617	"
2	7.45E+10	1.41E-07	1.97E+11	1.04E-06	0.2592	"
1	7.92E+10	1.50E-07	2.05E+11	1.07E-06	0.2564	"

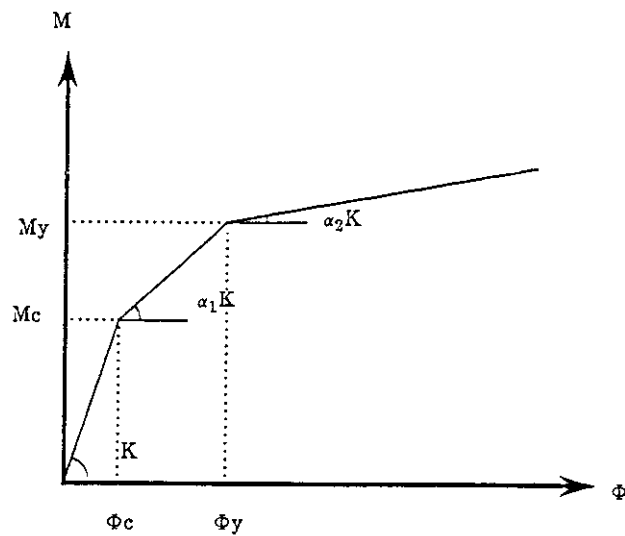


表 3.6 建屋解析モデル諸元(6) 復元力特性 (Q- γ 関係)

(OW)

層	Q_c (kg)	γ_c	Q_y (kg)	γ_y	Q_u (kg)	γ_u	α_1	α_2
4	2.41E+07	1.65E-04	3.25E+07	4.94E-04	8.80E+07	4.00E-03	0.1750	0.1085
3	3.95E+07	1.76E-04	5.33E+07	5.28E-04	1.36E+08	"	"	0.1064
2	4.97E+07	1.81E-04	6.71E+07	5.43E-04	1.67E+08	"	"	0.1055
1	5.15E+07	1.88E-04	6.96E+07	5.63E-04	1.71E+08	"	"	0.1078

(IW)

層	Q_c (kg)	γ_c	Q_y (kg)	γ_y	Q_u (kg)	γ_u	α_1	α_2
9	9.35E+06	1.74E-04	1.26E+07	5.21E-04	3.15E+07	4.00E-03	0.1750	0.1008
8	1.28E+07	1.83E-04	1.72E+07	5.50E-04	4.10E+07	"	"	0.0991
7	2.35E+07	1.90E-04	3.17E+07	5.71E-04	7.32E+07	"	"	0.0978
6	2.85E+07	2.14E-04	3.85E+07	6.41E-04	8.08E+07	"	"	0.0945
5	3.76E+07	2.15E-04	5.08E+07	6.44E-04	1.11E+08	"	"	0.1021
4	5.36E+07	2.09E-04	7.24E+07	6.26E-04	1.62E+08	"	"	0.1036
3	5.75E+07	2.27E-04	7.76E+07	6.82E-04	1.62E+08	"	"	0.1005
2	5.84E+07	2.43E-04	7.89E+07	7.30E-04	1.56E+08	"	"	0.0980
1	6.10E+07	2.54E-04	8.23E+07	7.62E-04	1.57E+08	"	"	0.0964

(SW)

層	Q_c (kg)	γ_c	Q_y (kg)	γ_y	Q_u (kg)	γ_u	α_1	α_2
7	1.02E+07	1.79E-04	1.38E+07	5.38E-04	3.75E+07	4.00E-03	0.1750	0.1206
6	1.48E+07	2.13E-04	2.00E+07	6.38E-04	4.24E+07	4.00E-03	0.1750	0.0959
5	1.63E+07	2.31E-04	2.20E+07	6.94E-04	4.59E+07	"	"	0.1021
4	2.97E+07	2.08E-04	4.02E+07	6.24E-04	9.35E+07	"	"	0.1105
3	2.56E+07	2.36E-04	3.46E+07	7.07E-04	7.27E+07	"	"	0.1065
2	2.50E+07	2.52E-04	3.37E+07	7.57E-04	6.71E+07	"	"	0.1041
1	2.60E+07	2.62E-04	3.51E+07	7.87E-04	6.77E+07	"	"	0.1028

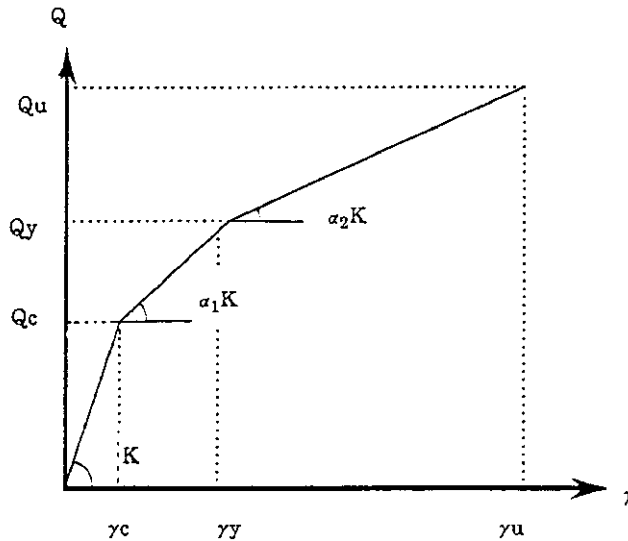


表 3.7 固有値解析結果（建屋）

MODE	固有振動数	固有周期	刺激係数（有効質量比）	
	(1/SEC)	(SEC)	水平	回轉
1	3.145	0.318	0.574	0.040
2	6.267	0.160	0.316	0.033
3	7.306	0.137	0.050	0.004
4	10.725	0.093	0.040	0.267
5	11.085	0.090	0.000	0.443
6	12.340	0.081	0.010	0.071

表 3.8 地震応答解析結果

		床応答加速度 (m/s ²)	最大加速度応答 (m/s ²)	応答低減率	最大変位応答 (m)
非免震時		3.921	3.991	1	2.94E-05
免震時	固有周期 1 秒	3.921	2.014	0.50	0.049
	固有周期 1.5 秒	3.921	1.067	0.27	0.058
	固有周期 2 秒	3.921	0.661	0.17	0.063

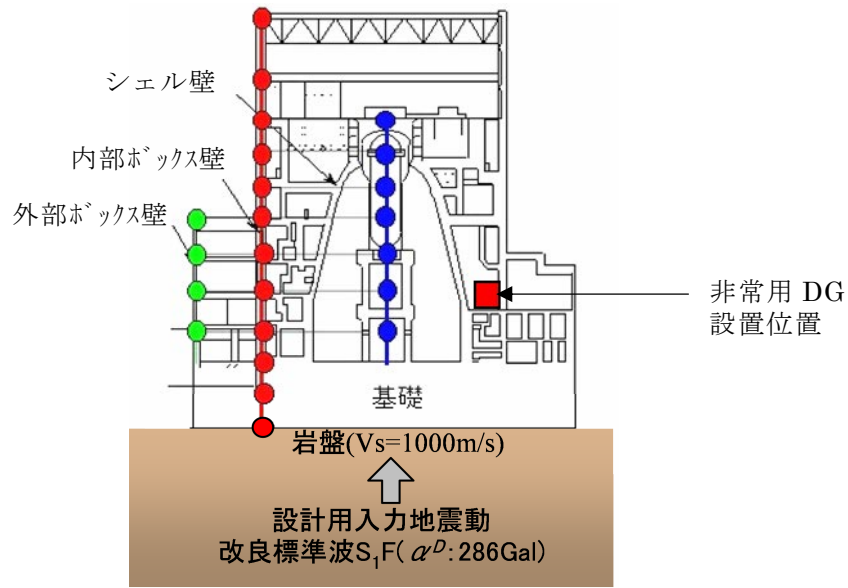


図 3.1 BWR 原子炉建屋断面図

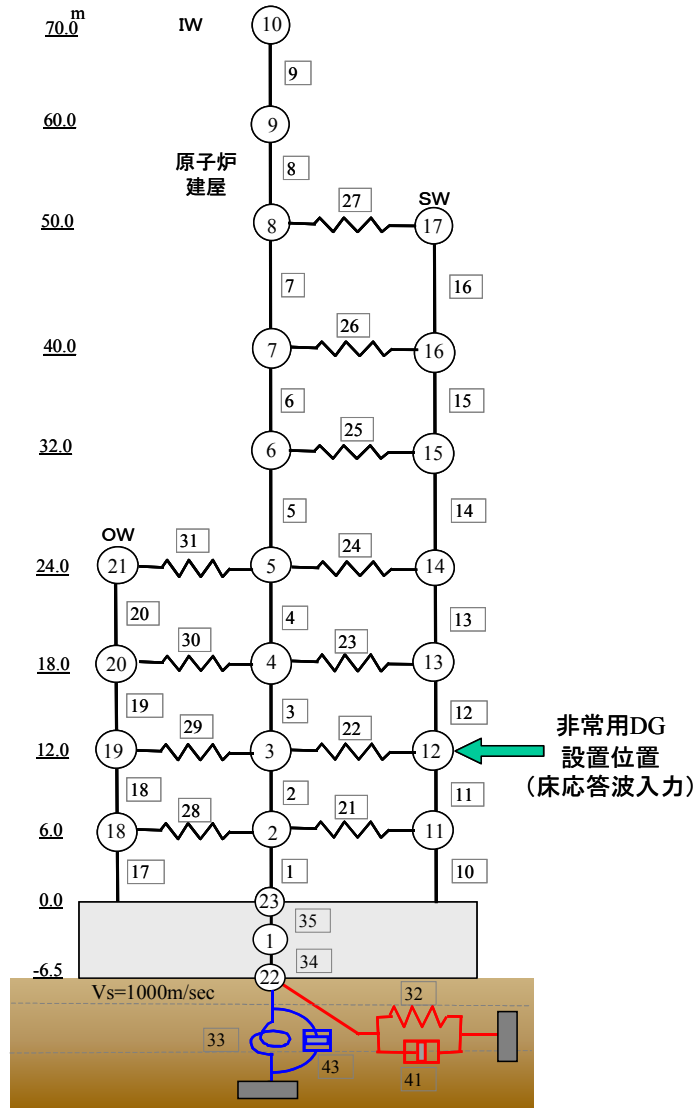


図 3.2 原子炉建屋振動解析モデル

【曲げモーメント-曲率復元力モデル】

【せん断応力-せん断ひずみ復元力モデル】

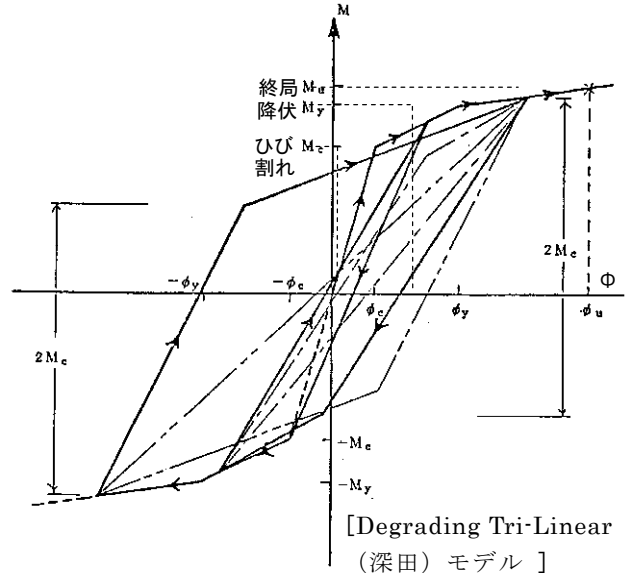
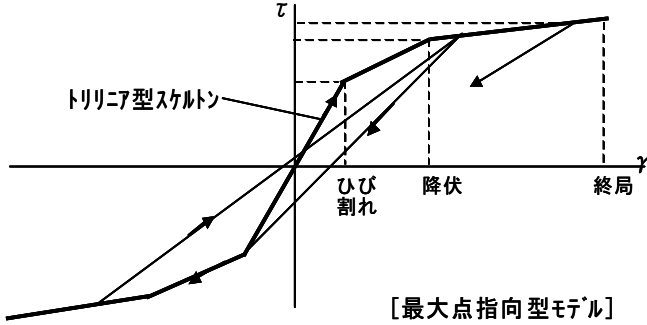
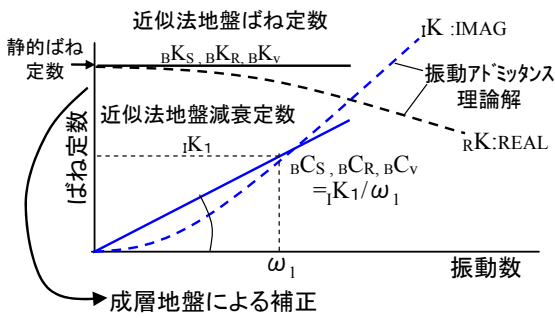


図 3.3 原子炉建屋の復元力モデル

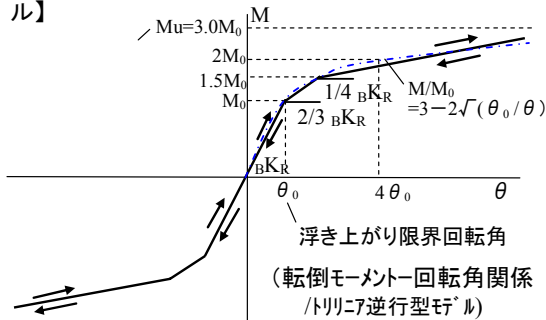
【基礎底面地盤ばねの設定方法】



【基礎支持地盤ばね定数】

- ・せん断剛性 (tf/m²) = 182000
 - ・ポアソン比 = 0.405
 - ・ V_S (M/SEC) = 1000
 - ・密度 (tf·sec²/m⁴) = 0.182
- ↓
- ・水平ばね定数 (K_h , t/m) = 4.1×10^7
 - ・水平ばね抵抗係数 (t·sec/m) = 1.1×10^6
 - ・回転ばね定数 (K_θ tm/rad) = 7.3×10^{10}
 - ・回転ばね抵抗係数 (t·sec/rad) = 3.8×10^8
- (建屋1次固有振動数3.14Hz, $\omega_1=19.8\text{rad/sec}$)

【浮き上がりを考慮した基礎回転ばね復元力モデル】



- ・ M_0 (tm) = 4.5×10^6 , $\theta_{M_0} = 6.2 \times 10^{-5}$
- ・ $1.5M_0$ (tm) = 6.7×10^6 , $\theta_{1.5M_0} = 1.1 \times 10^{-4}$
- ・ $M_u=NL/2$ (tm) = 1.3×10^7

図 3.4 地盤バネの設定

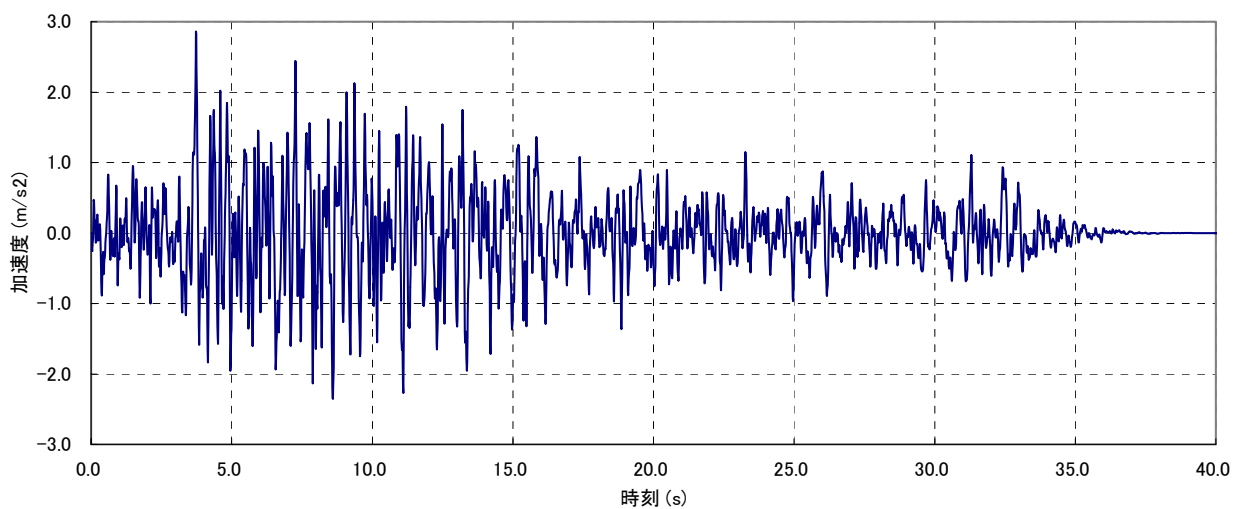


図 3.5 入力地震動（改良標準波：S₁F）の加速度時刻歴波形

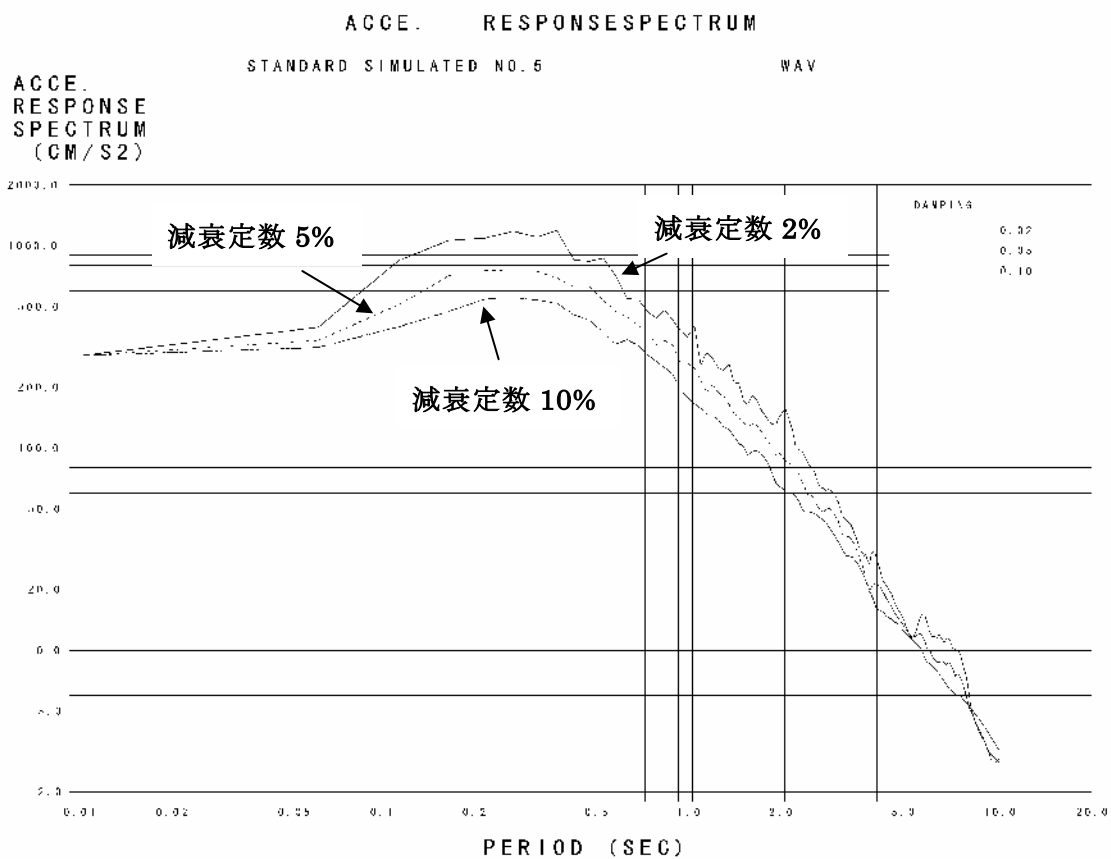


図 3.6 入力地震動の加速度応答スペクトル

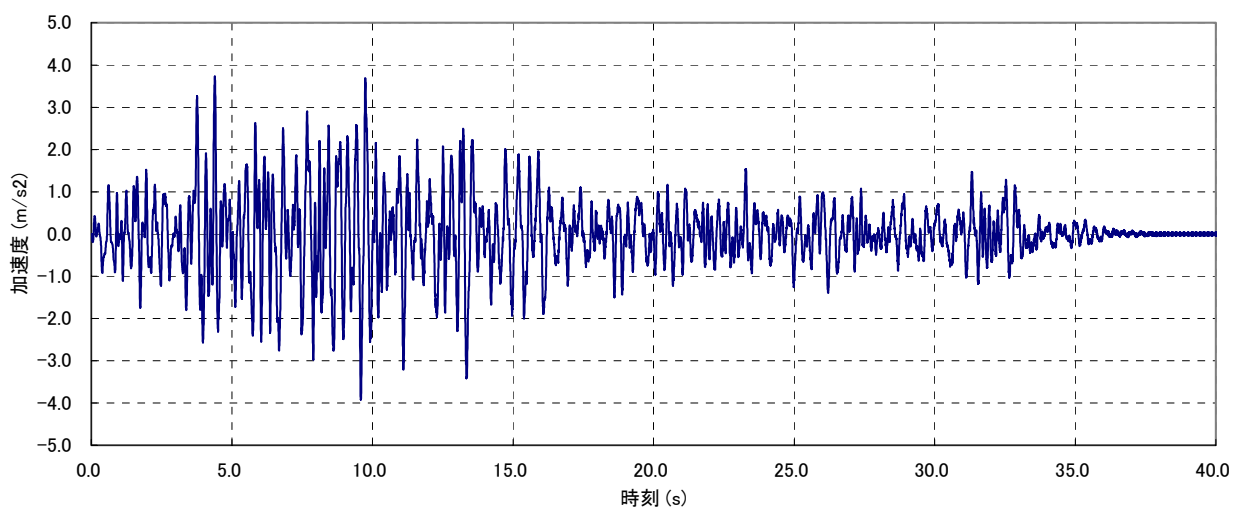


図 3.7 非常用 DG 設置位置の加速度応答時刻歴波形

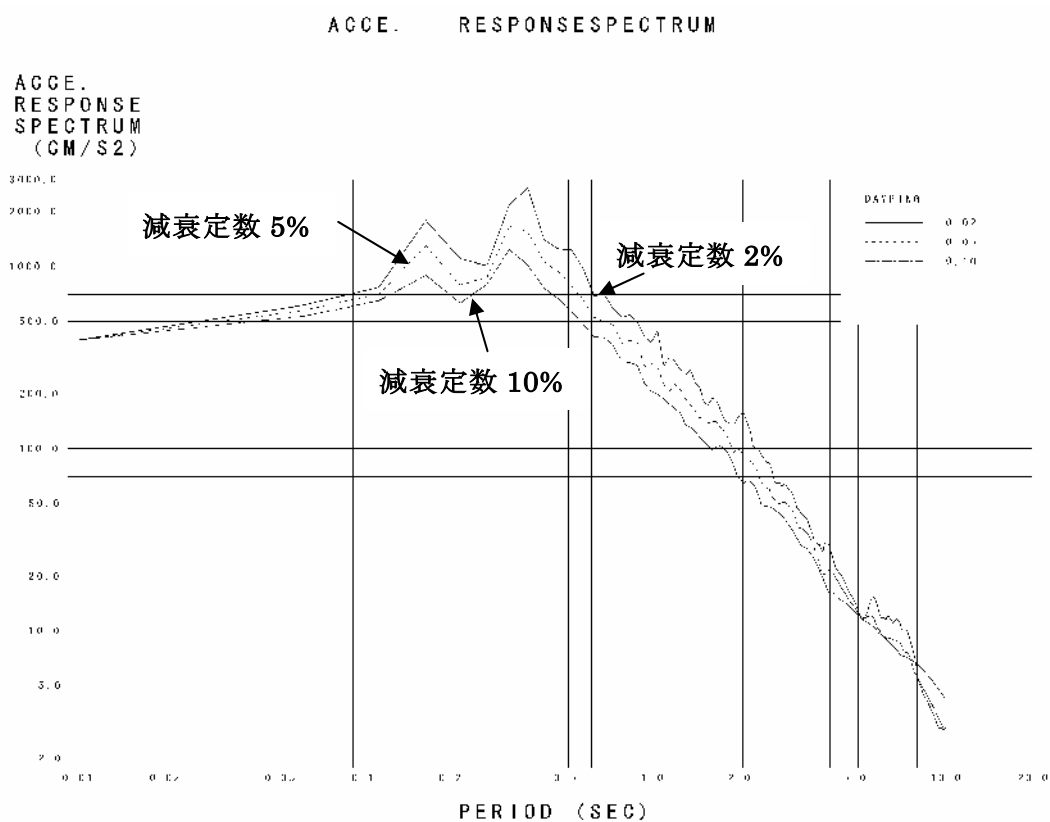


図 3.8 非常用 DG 設置位置の加速度応答スペクトル

DISP. RESPONSESPECTRUM

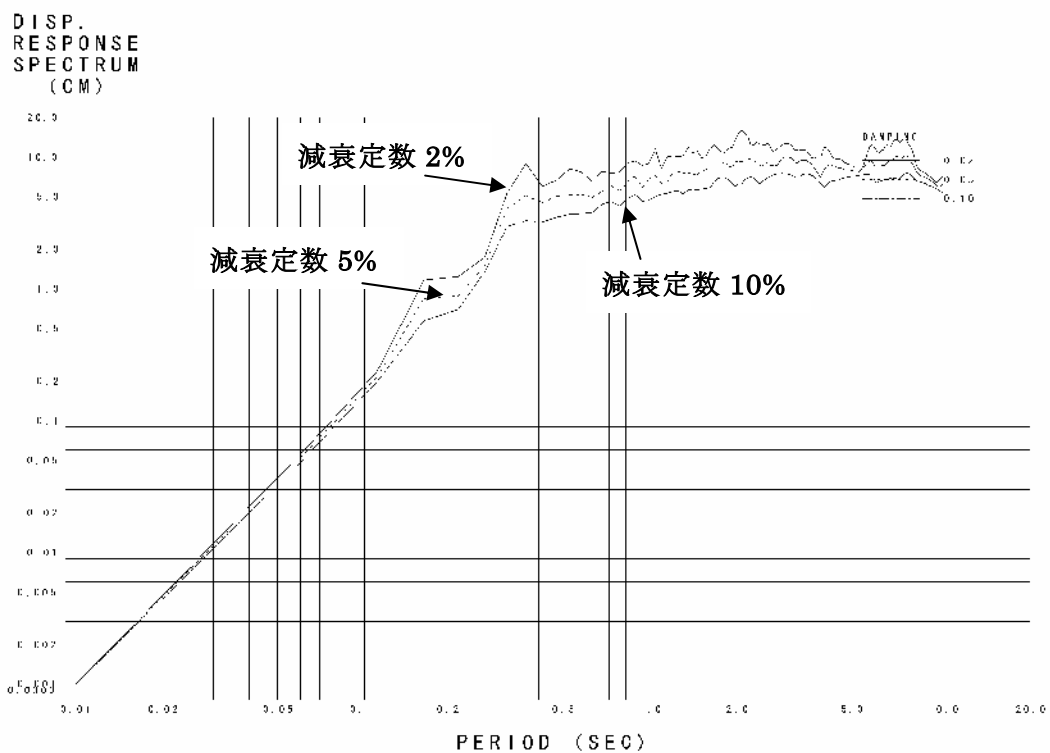


図 3.9 非常用 DG 設置位置の変位応答スペクトル

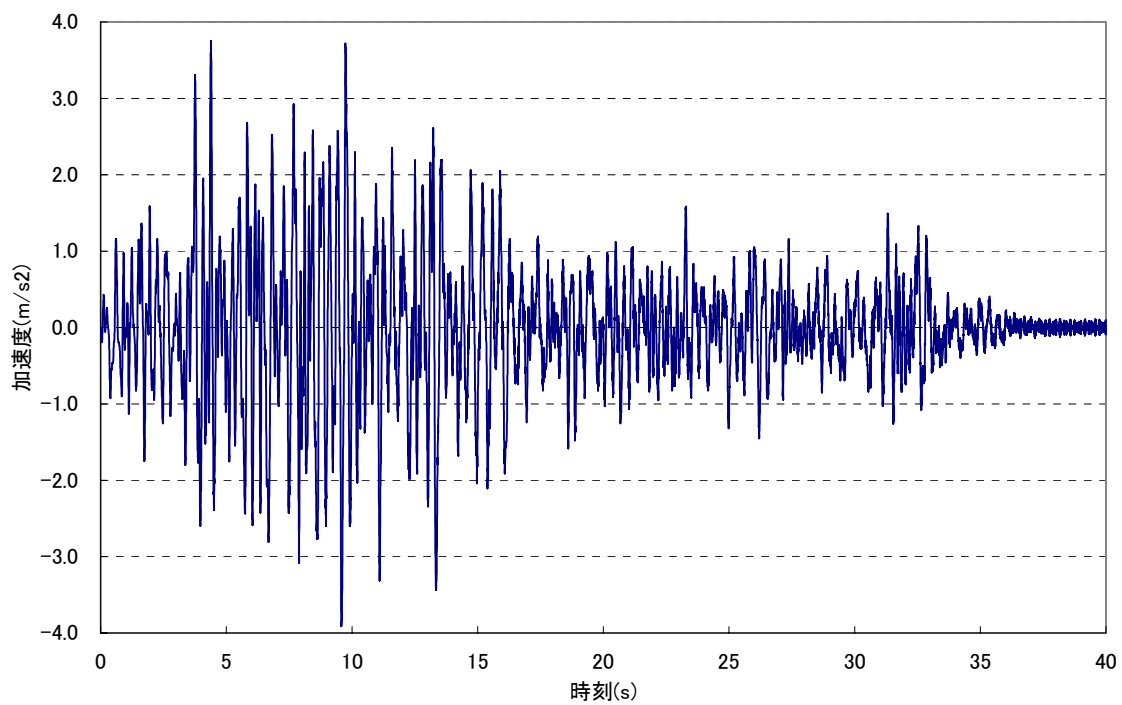


图 3.10 加速度应答時刻歴（非免震時）

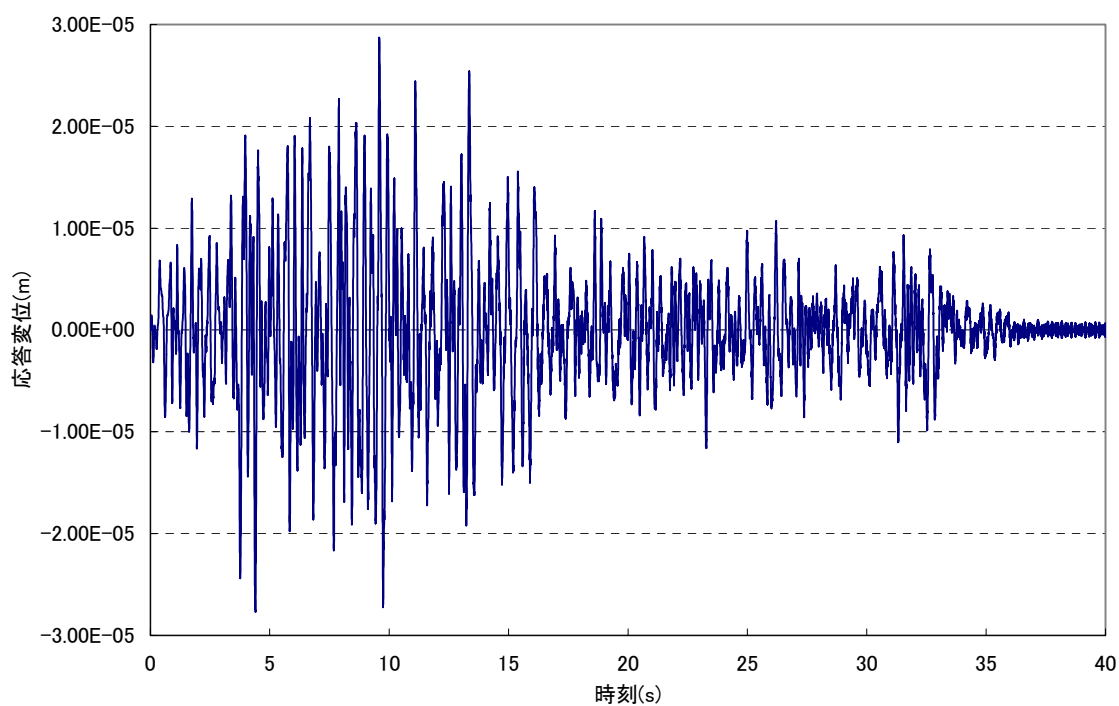


图 3.11 変位应答時刻歴（非免震時）

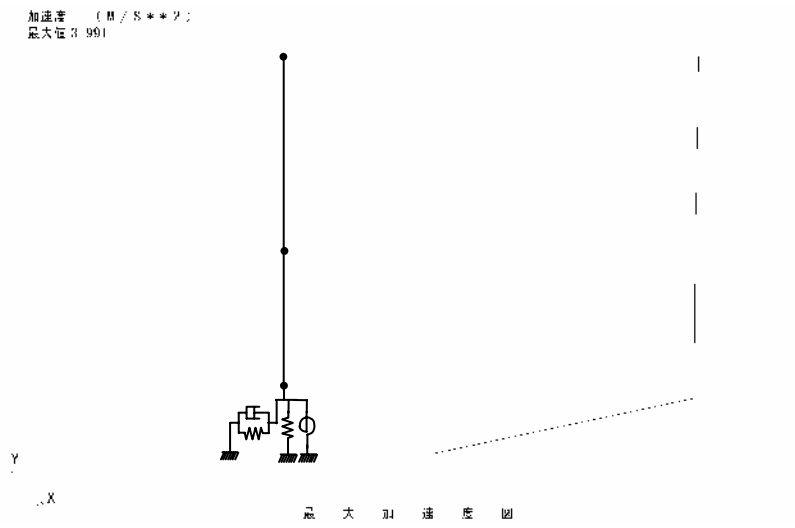


图 3.12 最大加速度应答分布 (非免震時)

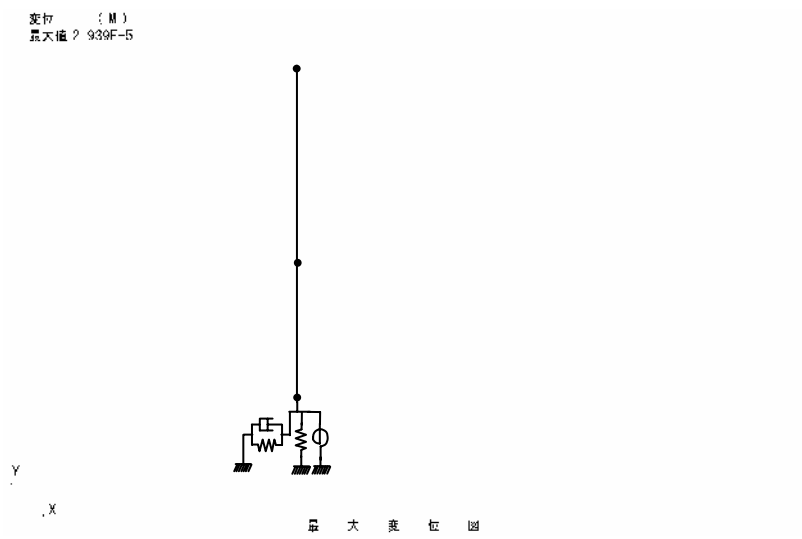


图 3.13 最大変位应答分布 (非免震時)

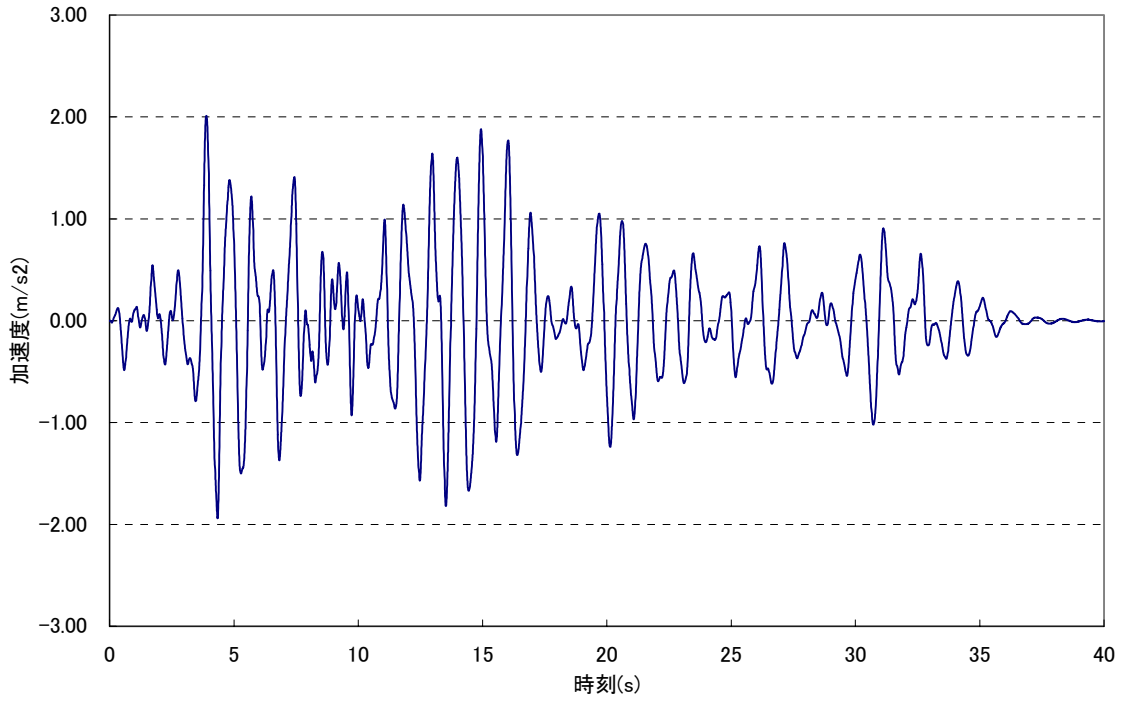


图 3.14 加速度応答時刻歴（免震時：固有周期 1 秒）

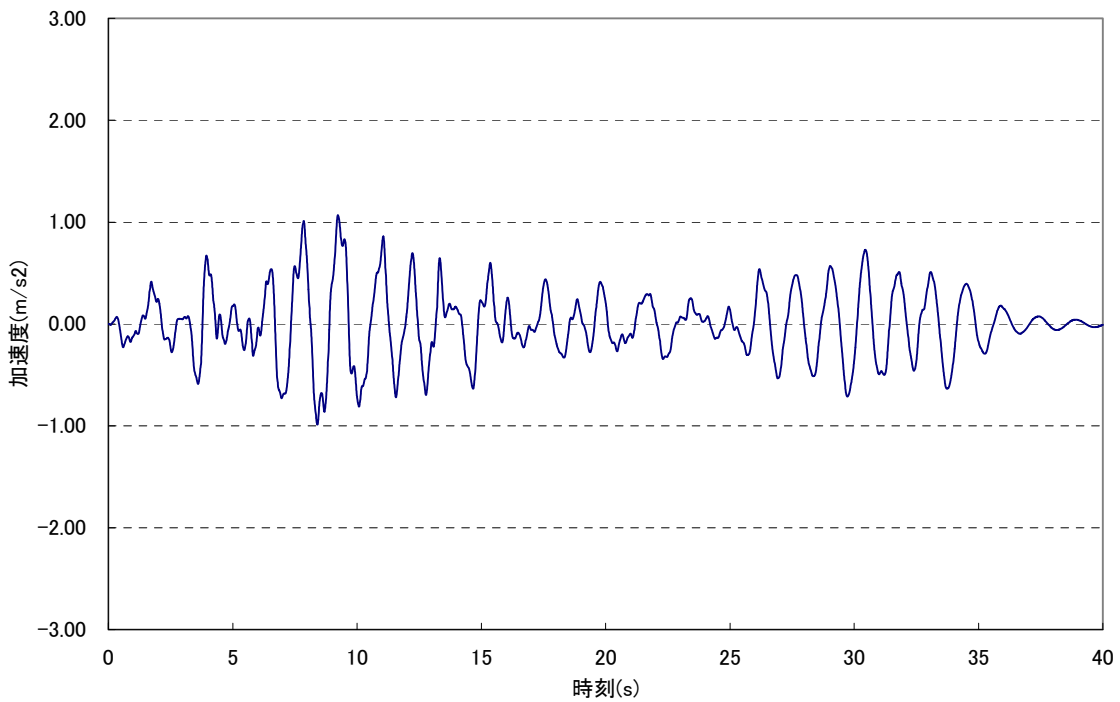


图 3.15 加速度応答時刻歴（免震時：固有周期 1.5 秒）

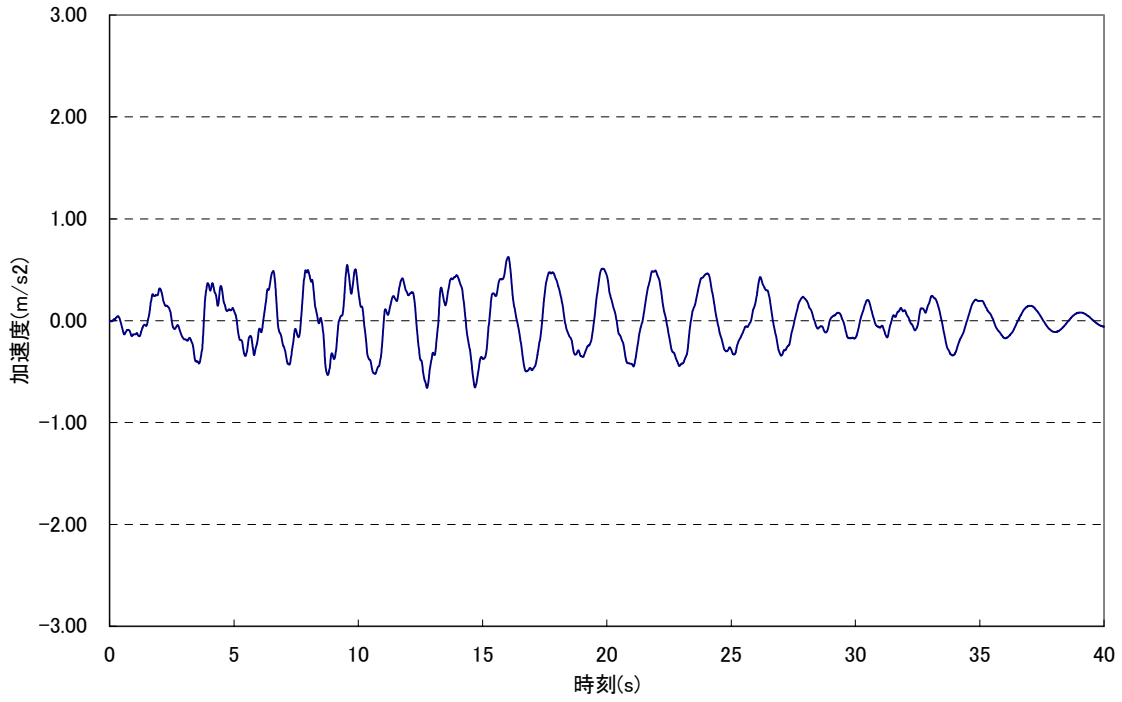


图 3.16 加速度応答時刻歴（免震時：固有周期 2 秒）

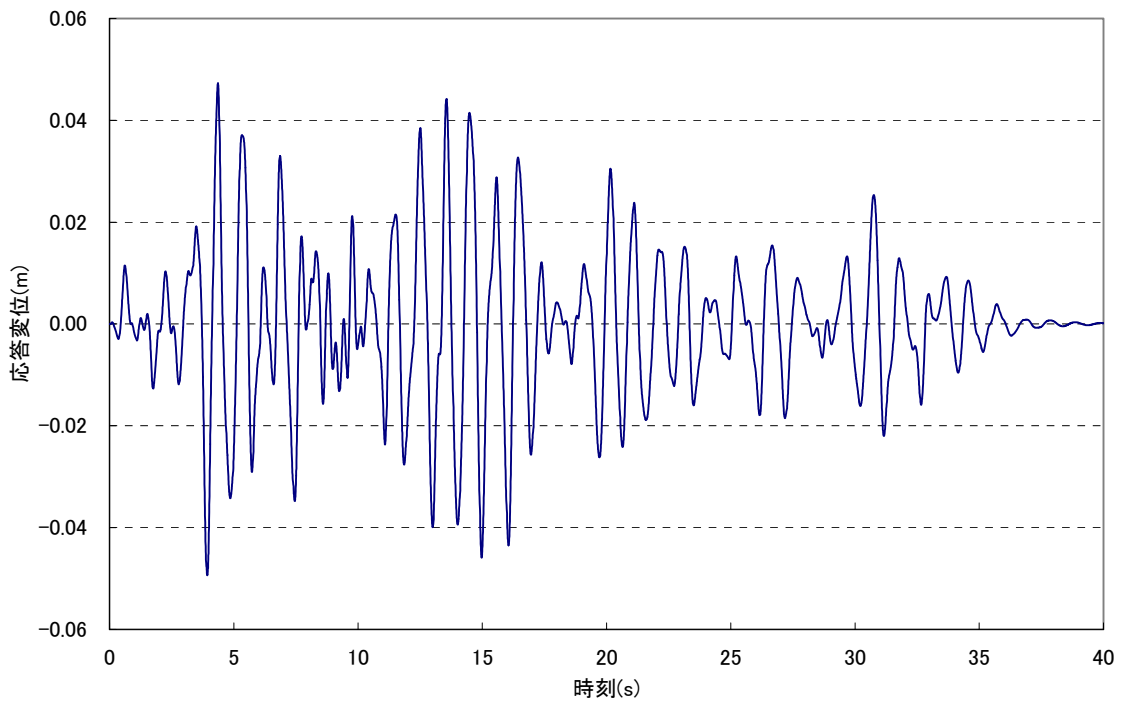


图 3.17 変位応答時刻歴（免震時：固有周期 1 秒）

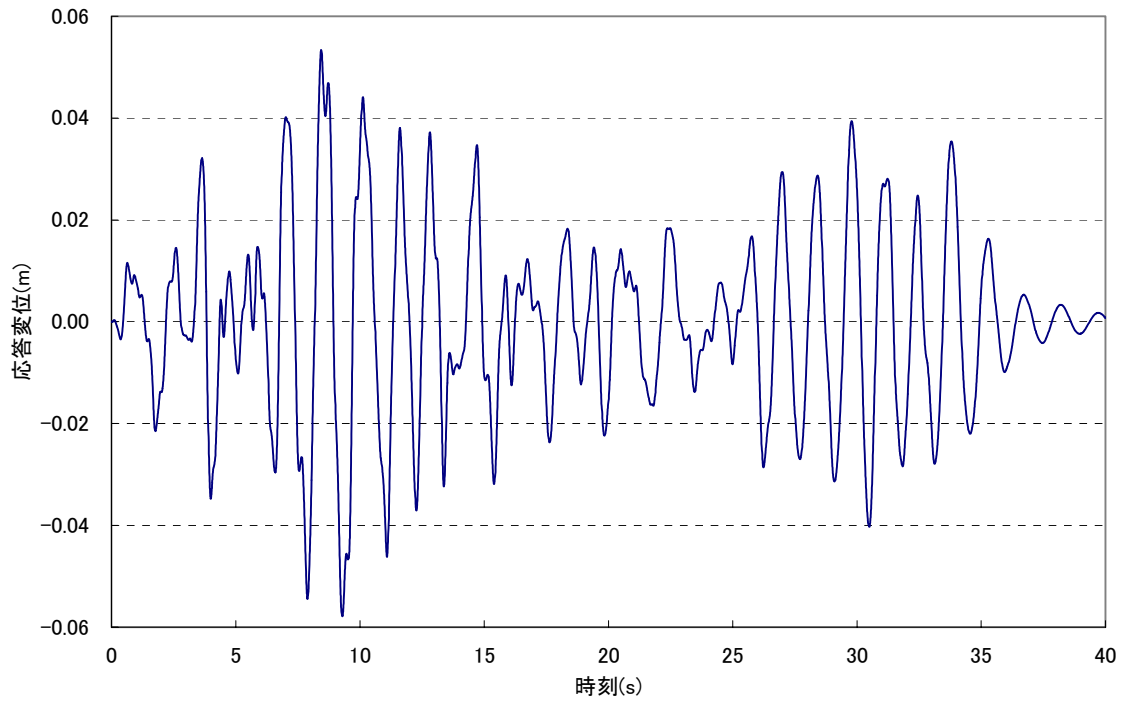


图 3.18 変位応答時刻歴 (免震時：固有周期 1.5 秒)

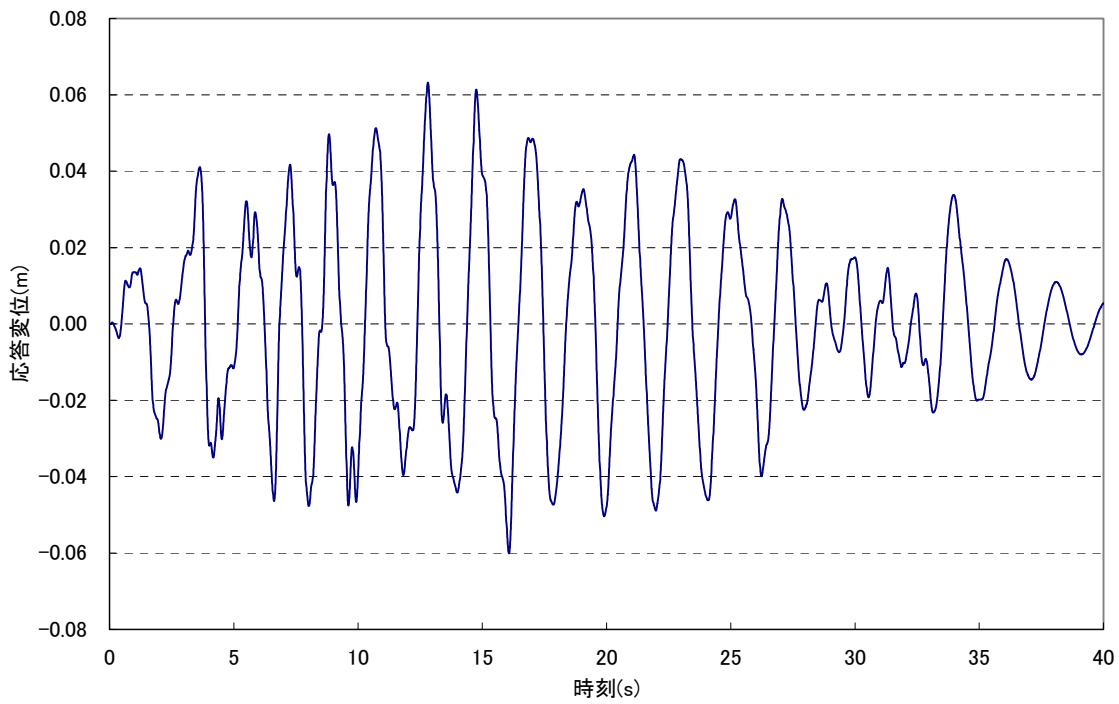
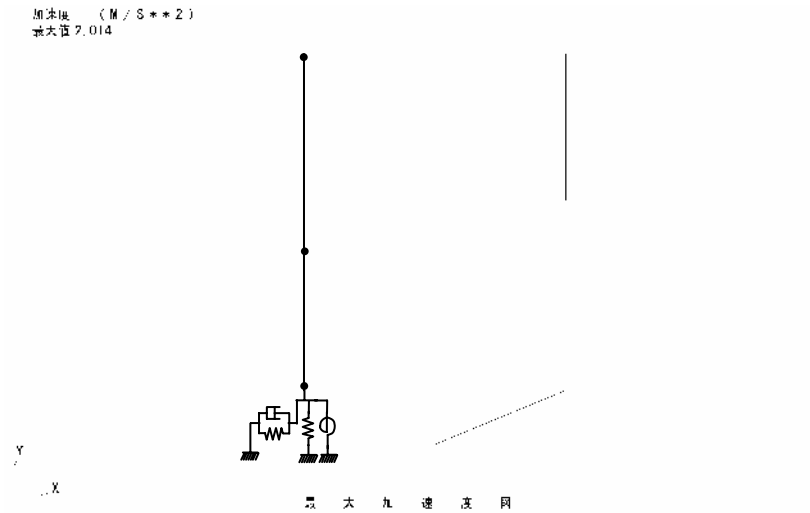
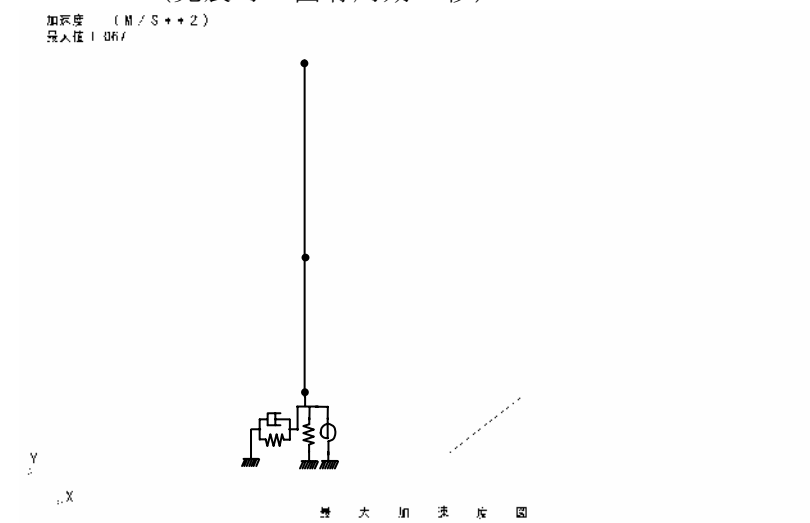


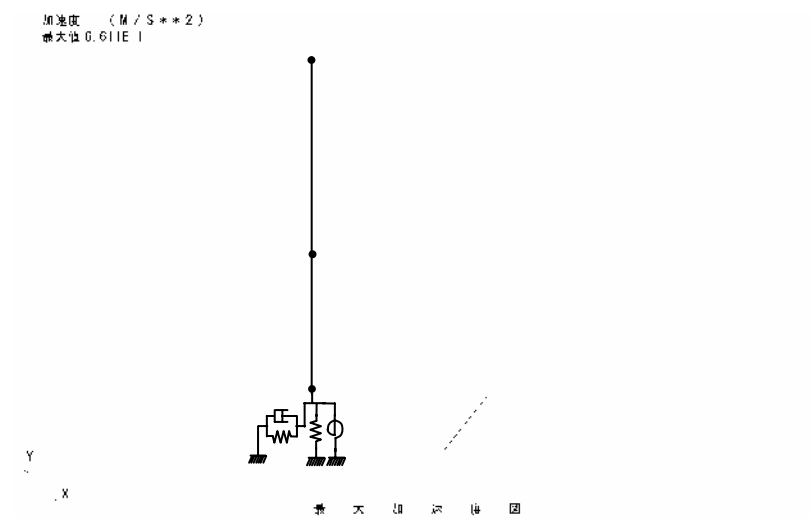
图 3.19 変位応答時刻歴 (免震時：固有周期 2 秒)



(免震時：固有周期 1 秒)

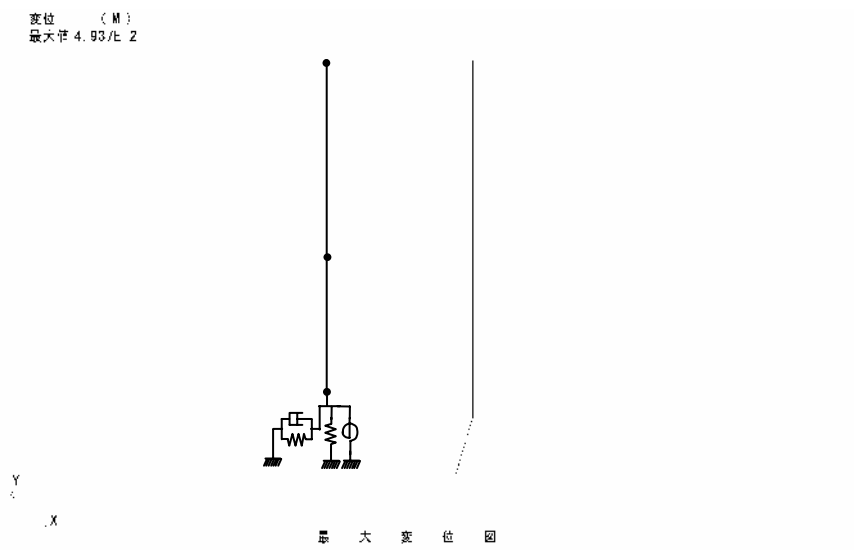


(免震時：固有周期 1.5 秒)

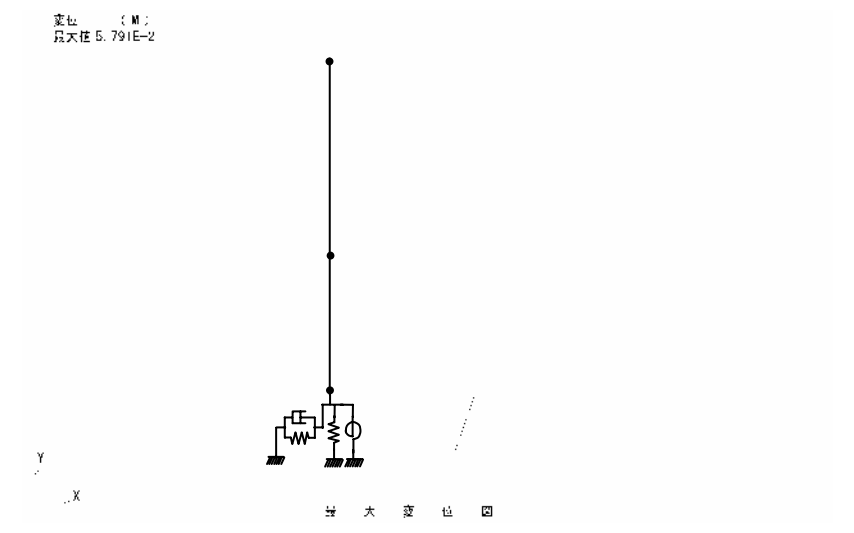


(免震時：固有周期 2 秒)

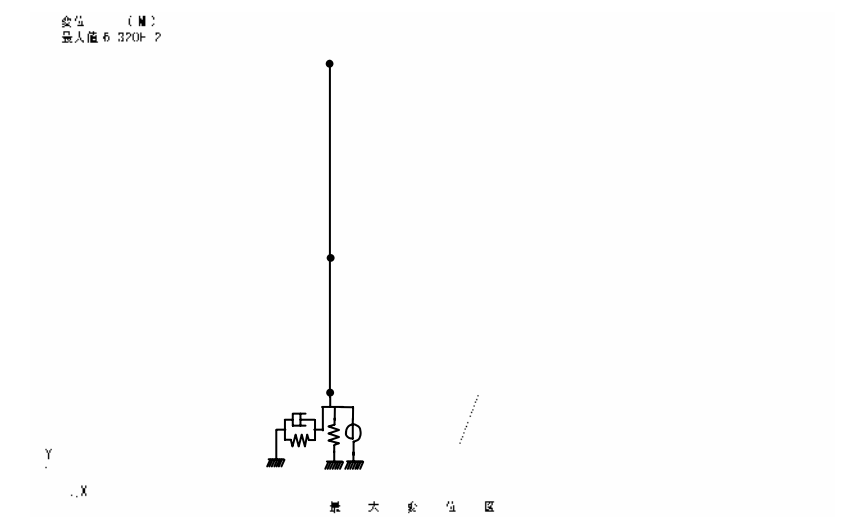
图 3.20 最大加速度応答分布 (免震時)



(免震時：固有周期 1 秒)



(免震時：固有周期 1.5 秒)



(免震時：固有周期 2 秒)

图 3.21 最大变位応答分布 (免震時)

4. 入力地震動に関する感度解析

入力地震動の周波数特性を変えた感度解析を行い、入力地震動の周波数特性の違いが非常用 DG 免震系の加速度応答及び変位応答に及ぼす影響を評価した。

4.1 BWR 原子炉建屋の地震応答解析

想定 BWR プラントの原子炉建屋を対象に入力地震動の周波数特性を変えた 3 ケースの地震応答解析を行い、非常用 DG 設置床の応答（加速度時刻歴）を算出した。

(1) 解析条件

入力地震動は改良標準波 S_{1N} 、 S_{2N} 、 S_{2F} の 3 波を用いた。入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトルを図 4.1～図 4.6 に示す。その他の原子炉建屋の解析条件は、3 章で設定した条件と同一とした。

(2) 地震応答解析結果

建屋の応答解析結果として、非常用 DG 設置位置の加速度応答波形、加速度応答スペクトル及び変位応答スペクトルを図 4.7～図 4.15 に示す。

なお、非免震時の非常用 DG の応答は、非常用 DG 設置位置の床応答に一致するものとした。

4.2 非常用 DG 免震系の地震応答解析

2 章で作成した解析モデルと 4.1 節で算出した床応答を用いて、免震時の非常用 DG の地震応答解析を行った。

地震応答解析結果を表 4.1～表 4.3 に示す。改良標準波 S_{1N} に対する加速度応答時刻歴及び変位応答時刻歴を図 4.16～図 4.21 に、最大加速度応答分布及び最大変位応答分布を図 4.22～図 4.23 に示す。改良標準波 S_{2F} に対する加速度応答時刻歴及び変位応答時刻歴を図 4.24～図 4.29 に、最大加速度応答分布及び最大変位応答分布を図 4.30～図 4.31 に示す。改良標準波 S_{2N} に対する加速度応答時刻歴及び変位応答時刻歴を図 4.32～図 4.37 に、最大加速度応答分布及び最大変位応答分布を図 4.38～図 4.39 に示す。

表 4.1 及び図 4.16～図 4.21 から、改良標準波 S_{1N} に対する非常用 DG 免震系の最大加速度応答は、免震時の固有周期を 1 秒とすると、非免震時の約 27%に、固有周期を 1.5 秒とすると約 14%に、固有周期を 2 秒とすると約 9%に減少した。また、最大変位応答は 2.6cm～3.4cm であり、固有周期 1 秒を基準とすると、固有周期 1.5 秒で 1.1 倍、固有周期 2 秒で 1.3 倍に増加した。

したがって、応答加速度の減少と変位応答の増大を勘案すると、非常用 DG 免震系の固有周期は 1.5 秒～2 秒の範囲が適当であると考えられる。

表 4.2 及び図 4.24～図 4.29 から、改良標準波 S₂F に対する非常用 DG 免震系の最大加速度応答は、免震時の固有周期を 1 秒とすると、非免震時の約 55%に、固有周期を 1.5 秒とすると約 32%に、固有周期を 2 秒とすると約 18%に減少した。また、最大変位応答は約 8cm～約 10cm であり、固有周期 1 秒を基準とすると、固有周期 1.5 秒で 1.3 倍、固有周期 2 秒で 1.2 倍に増加した。したがって、応答加速度の減少と変位応答の増大を勘案すると、非常用 DG 免震系の固有周期は 1.5 秒～2 秒の範囲が適当であると考えられる。

表 4.3 及び図 4.32～図 4.37 から、改良標準波 S₁N に対する非常用 DG 免震系の最大加速度応答は、免震時の固有周期を 1 秒とすると、非免震時の約 34%に、固有周期を 1.5 秒とすると約 17%に、固有周期を 2 秒とすると約 10%に減少した。また、最大変位応答は約 5cm～約 6cm であり、固有周期 1 秒を基準とすると、固有周期 1.5 秒で 1.1 倍、固有周期 2 秒で 1.2 倍に増加した。したがって、応答加速度の減少と変位応答の増大を勘案すると、非常用 DG 免震系の固有周期は 1.5 秒～2 秒の範囲が適当であると考えられる。

S₂ 地震動に対する非常用 DG 免震系の加速度低減効果は S₁ 地震動に対する加速度低減効果に比べ小さくなり、変位応答は大きくなる傾向が見られる。しかし、いずれの場合も最大変位応答が許容変位 20cm を十分下回っていることを確認した。

表 4.1 地震応答解析結果（入力地震動 S₁N : Max=2.67m/s²）

固有周期 (s)	建屋床応答 (m/s ²)	非常用 DG 応答		
		最大加速度 (m/s ²)	加速度 低減率	最大変位 (m)
1.0	3.881	1.051	0.27	0.026
1.5	3.881	0.537	0.14	0.029
2.0	3.881	0.364	0.09	0.034

表 4.2 地震応答解析結果（入力地震動 S₂N : Max=3.88m/s²）

固有周期 (s)	建屋床応答 (m/s ²)	非常用 DG 応答		
		最大加速度 (m/s ²)	加速度 低減率	最大変位 (m)
1.0	5.932	2.022	0.34	0.049
1.5	5.932	0.995	0.17	0.052
2.0	5.932	0.618	0.10	0.060

表 4.3 地震応答解析結果（入力地震動 S₂F : Max=4.07m/s²）

固有周期 (s)	建屋床応答 (m/s ²)	非常用 DG 応答		
		最大加速度 (m/s ²)	加速度 低減率	最大変位 (m)
1.0	5.974	3.285	0.55	0.080
1.5	5.974	1.935	0.32	0.103
2.0	5.974	1.055	0.18	0.099

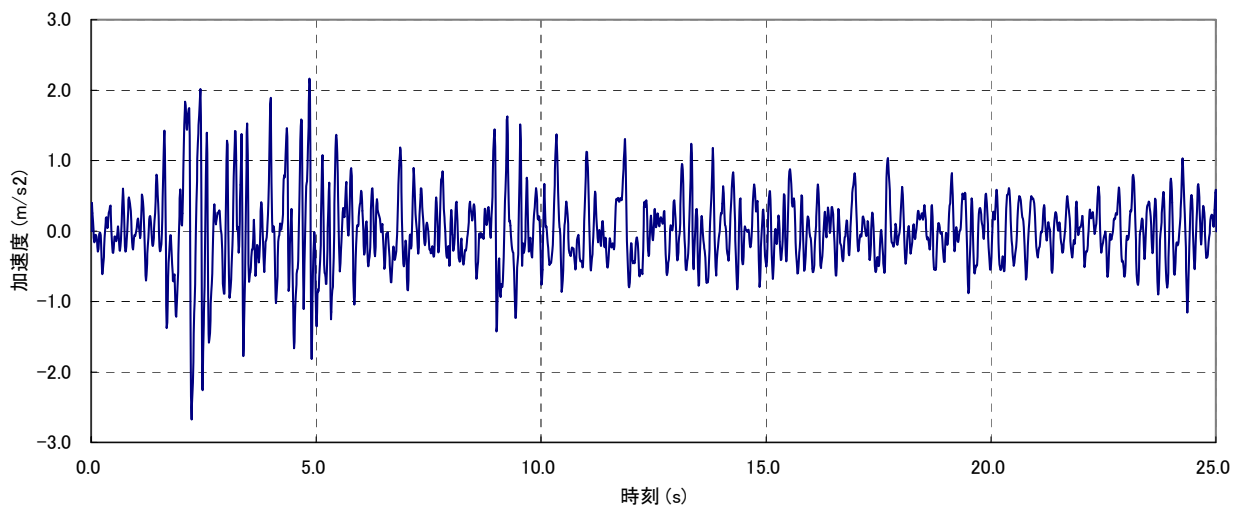


図 4.1 入力地震動（改良標準波 S_{1N} : $Max=2.67m/s^2$ ）の加速度時刻歴波形

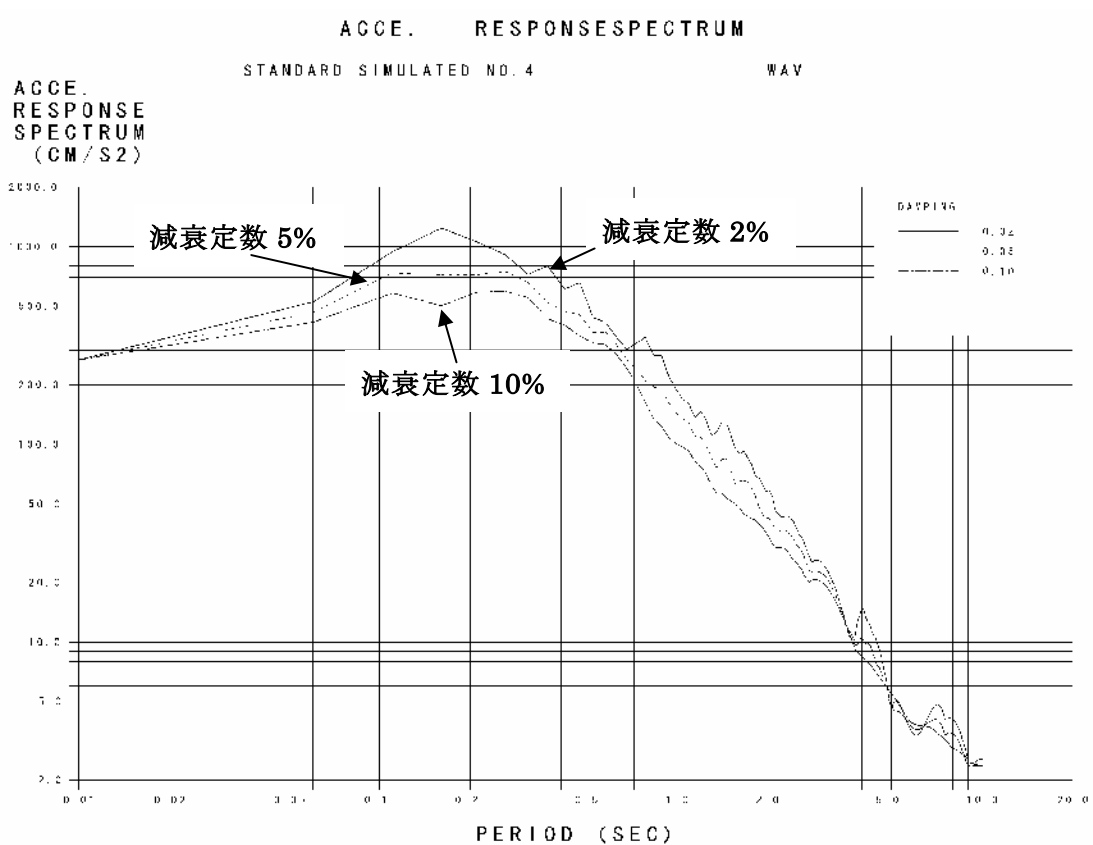


図 4.2 入力地震動（改良標準波： S_{1N} ）の加速度応答スペクトル

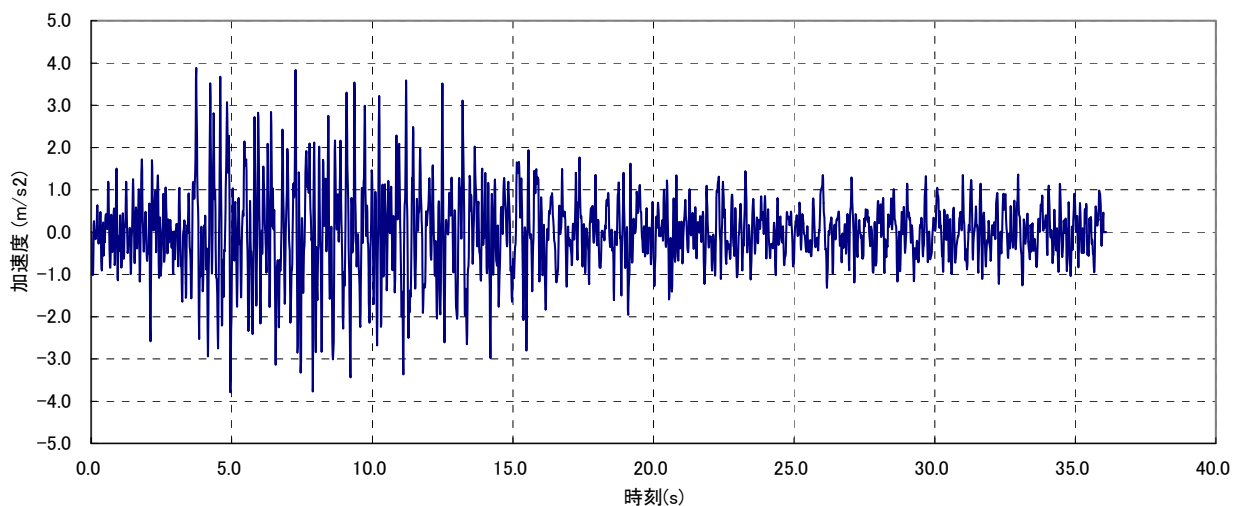


図 4.3 入力地震動（改良標準波 S_2N : $Max=3.88m/s^2$ ）の加速度時刻歴波形

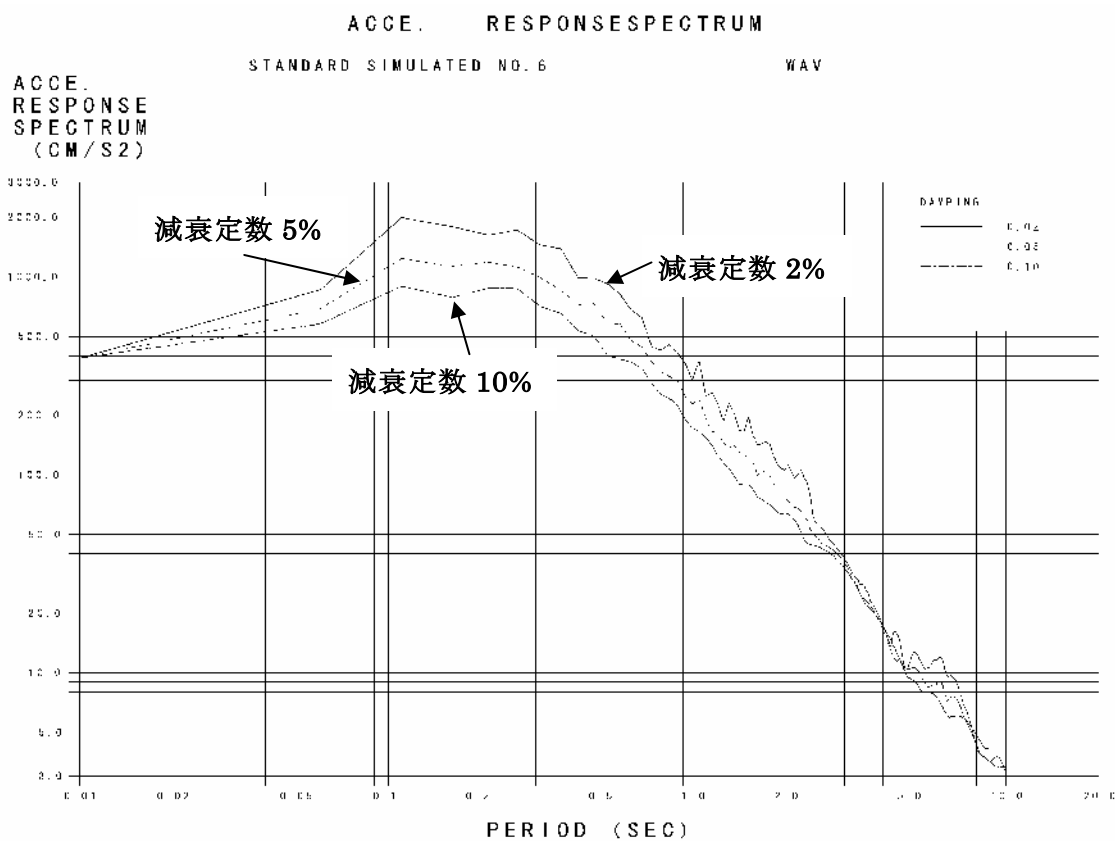


図 4.4 入力地震動（改良標準波 : S_2N ）の加速度応答スペクトル

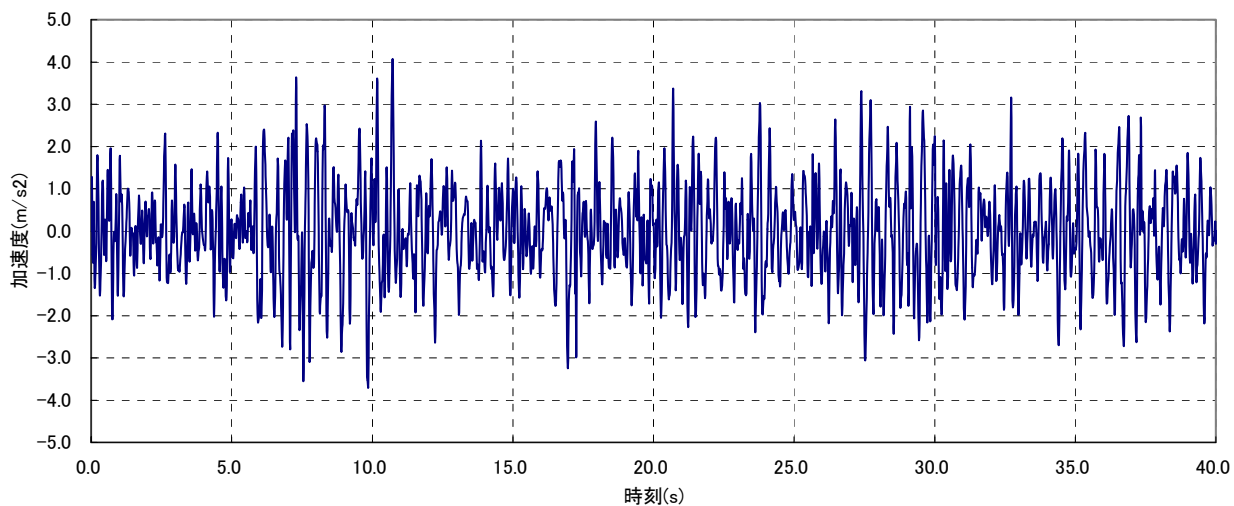


図 4.5 入力地震動（改良標準波 S₂F : Max=4.07m/s²）の加速度時刻歴

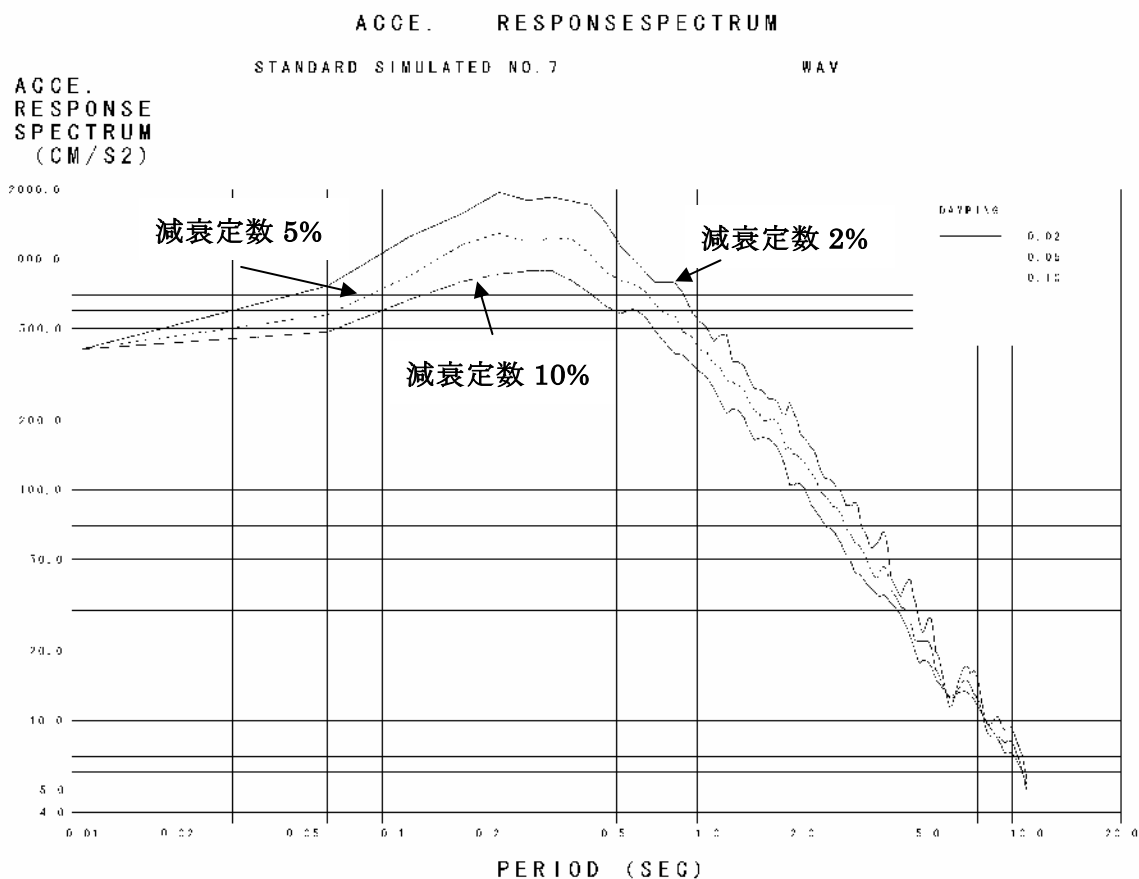


図 4.6 入力地震動（改良標準波 : S₂F）の加速度応答スペクトル

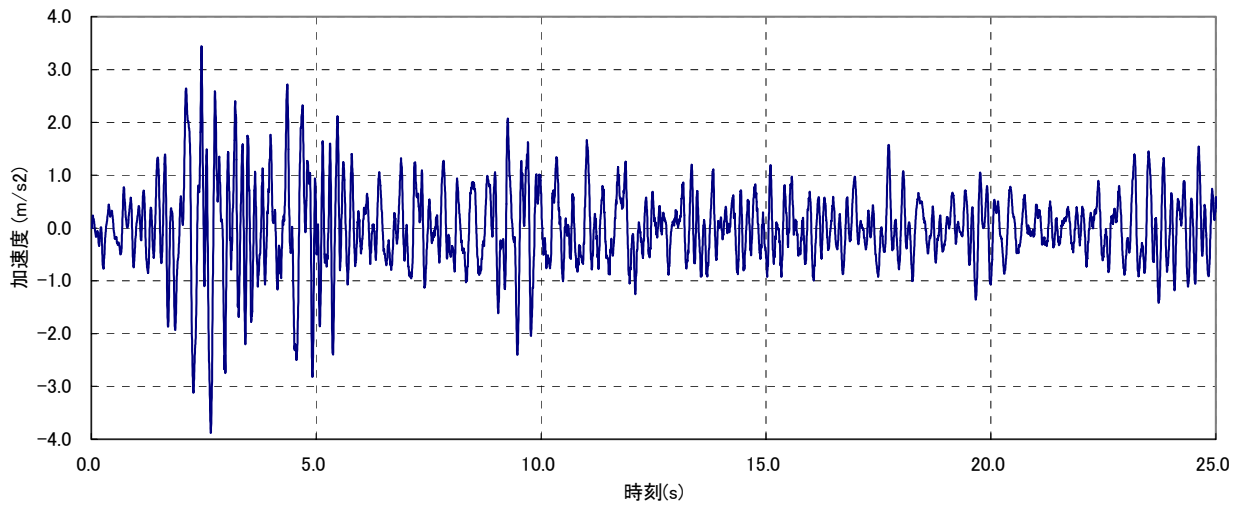


図 4.7 非常用 DG 設置位置の加速度応答時刻歴波形 (改良標準波 : S₁N)

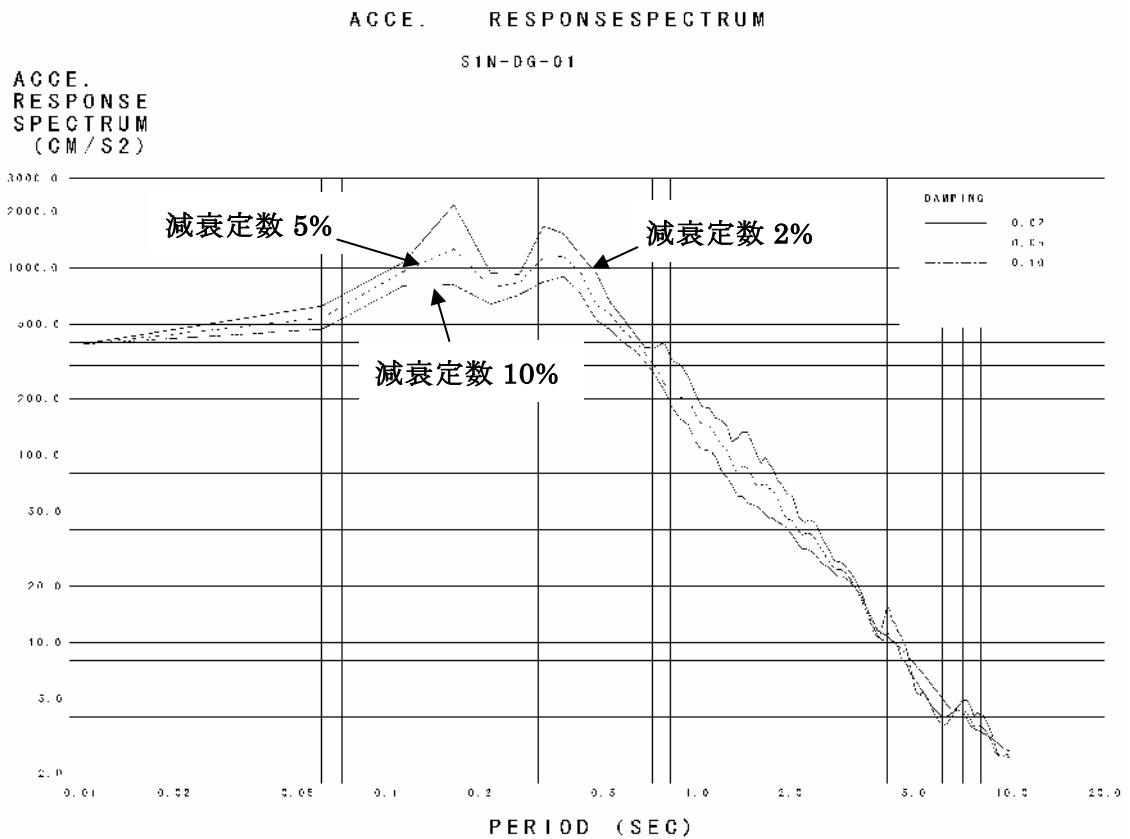


図 4.8 非常用 DG 設置位置の加速度応答スペクトル (改良標準波 : S₁N)

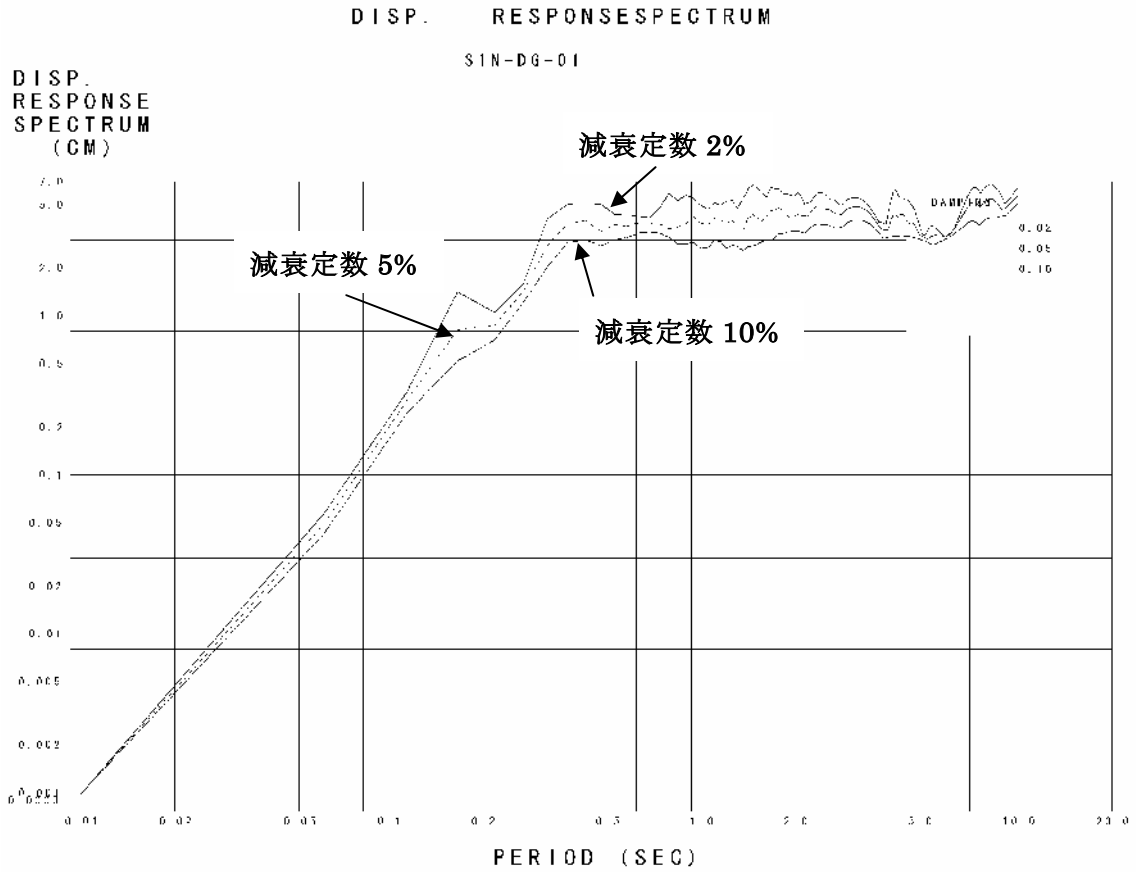


図 4.9 非常用 DG 設置位置の変位応答スペクトル (改良標準波 : S₁N)

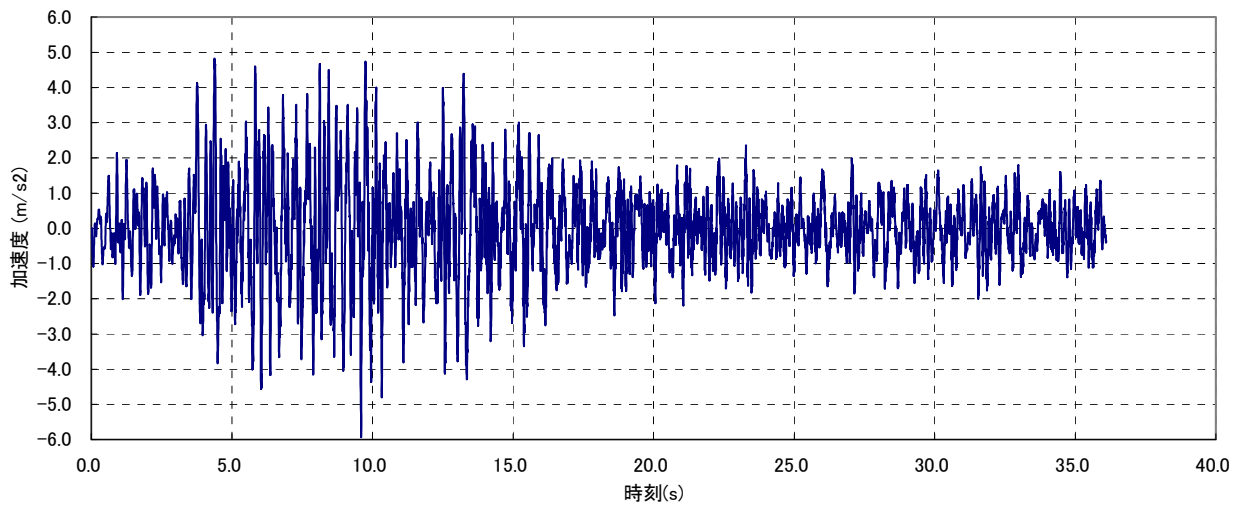


図 4.10 非常用 DG 設置位置の加速度応答時刻歴波形 (改良標準波 : S₂N)

ACCE. RESPONSESPECTRUM

ACCE.
RESPONSE
SPECTRUM
(CM/S²)

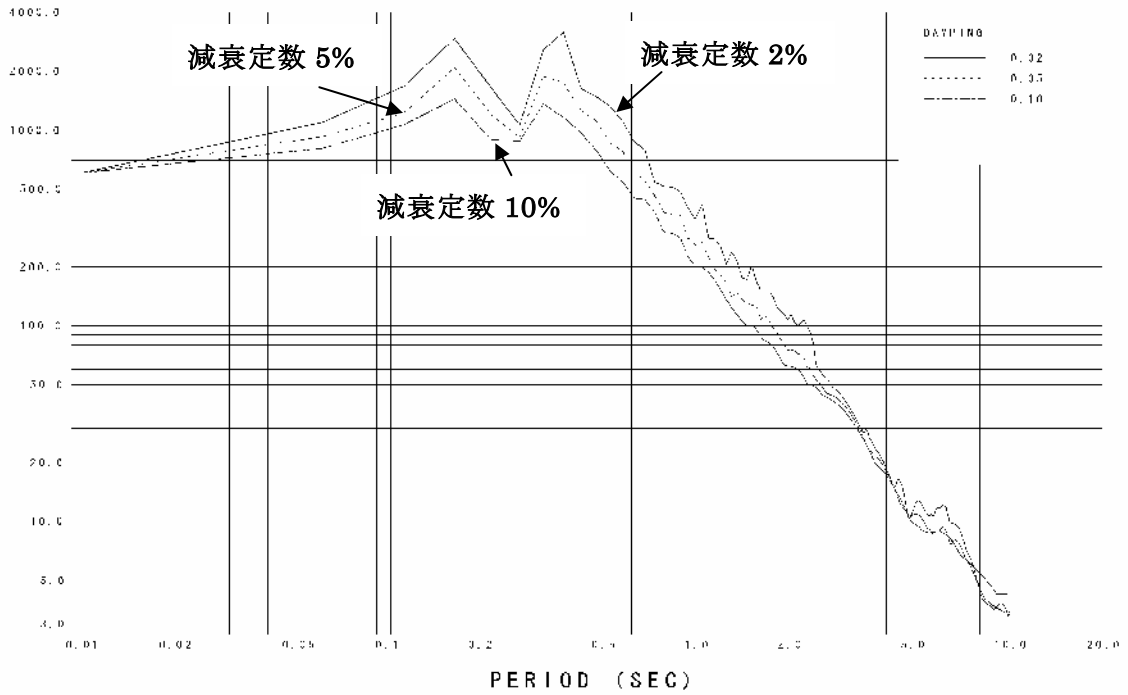


図 4.11 非常用 DG 設置位置の加速度応答スペクトル (改良標準波 : S₂N)

DISP. RESPONSESPECTRUM

DISP.
RESPONSE
SPECTRUM
(CM)

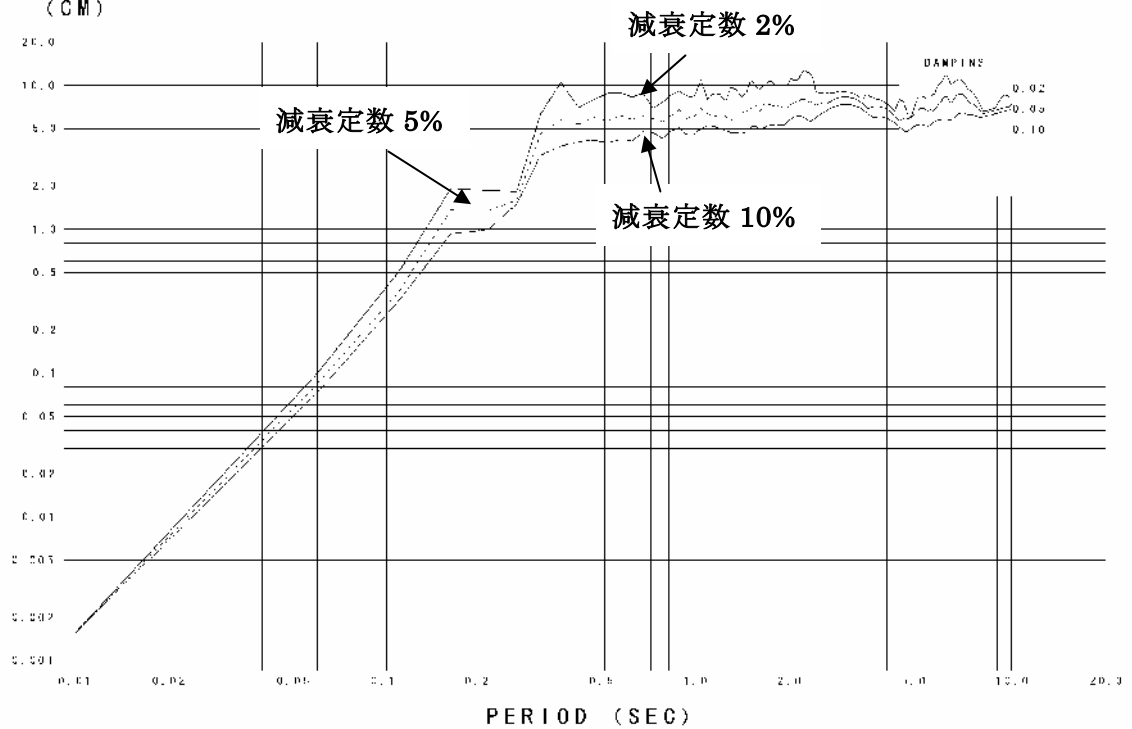


図 4.12 非常用 DG 設置位置の変位応答スペクトル (改良標準波 : S₂N)

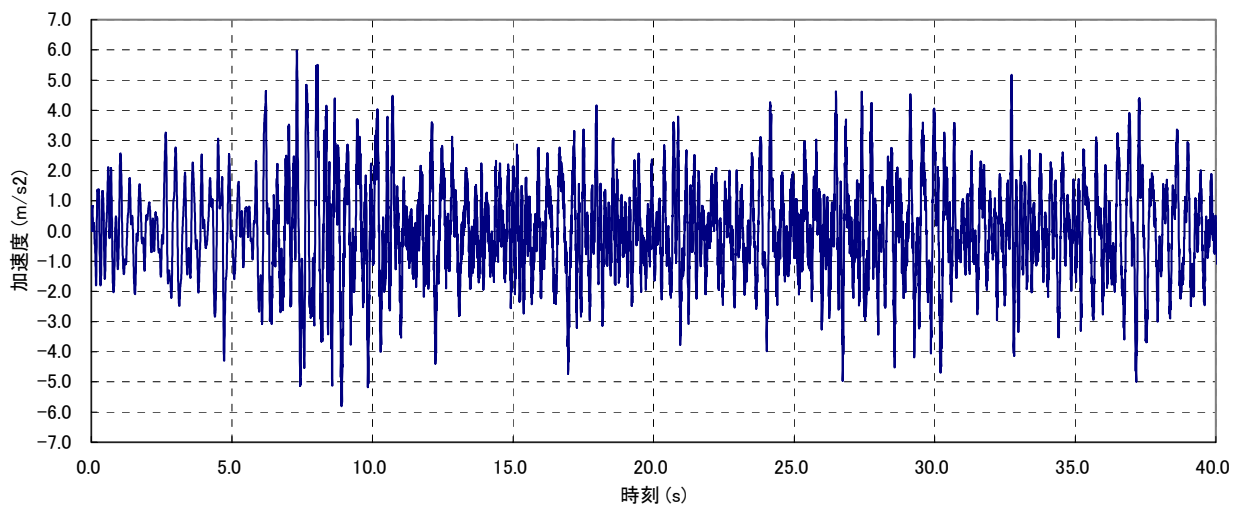


図 4.13 非常用 DG 設置位置の加速度応答時刻歴波形 (改良標準波: S₂F)

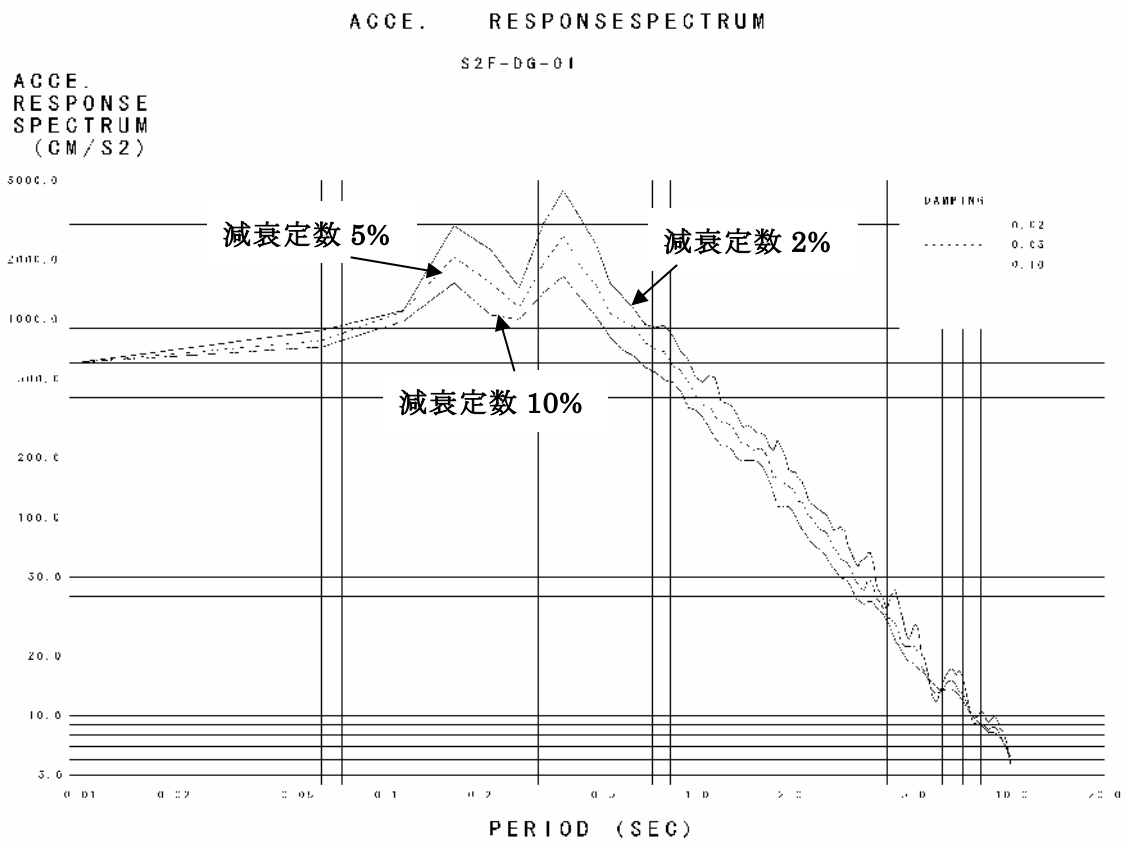


図 4.14 非常用 DG 設置位置の加速度応答スペクトル (改良標準波: S₂F)

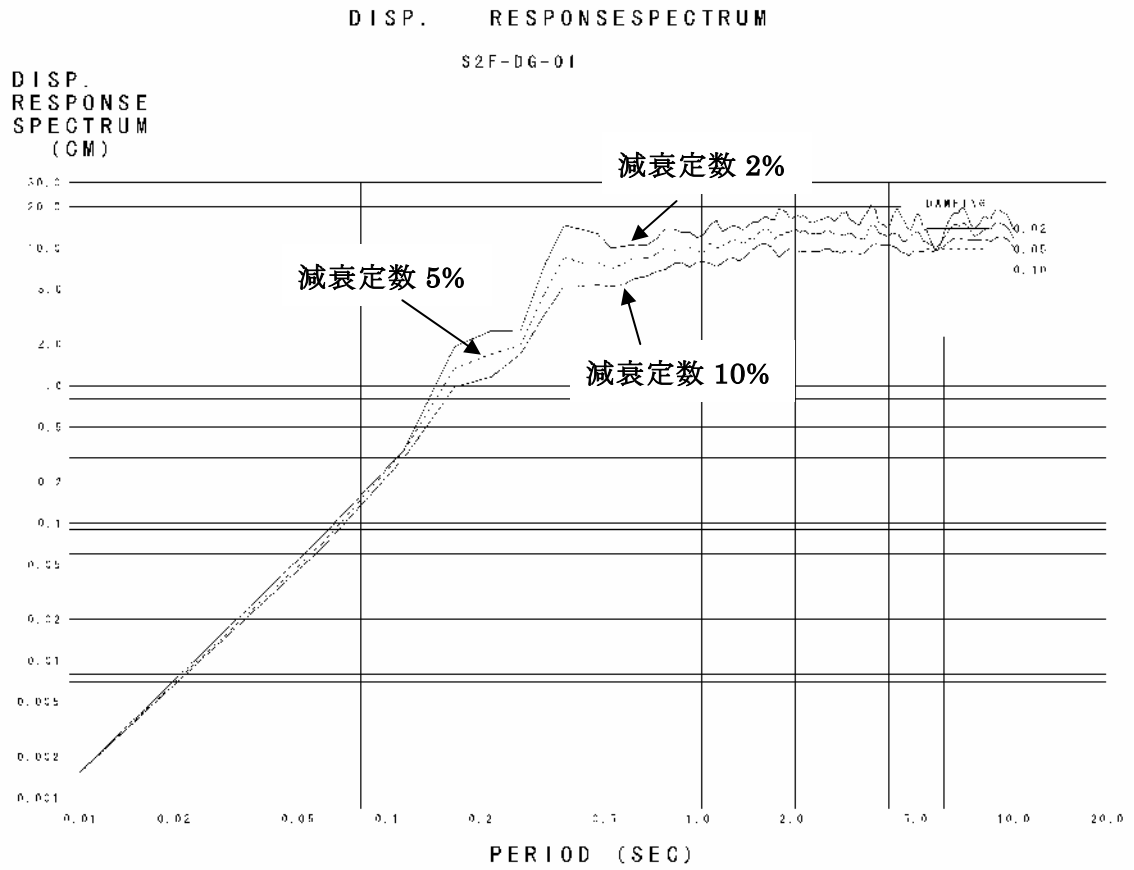


図 4.15 非常用 DG 設置位置の変位応答スペクトル (改良標準波 : S₂F)

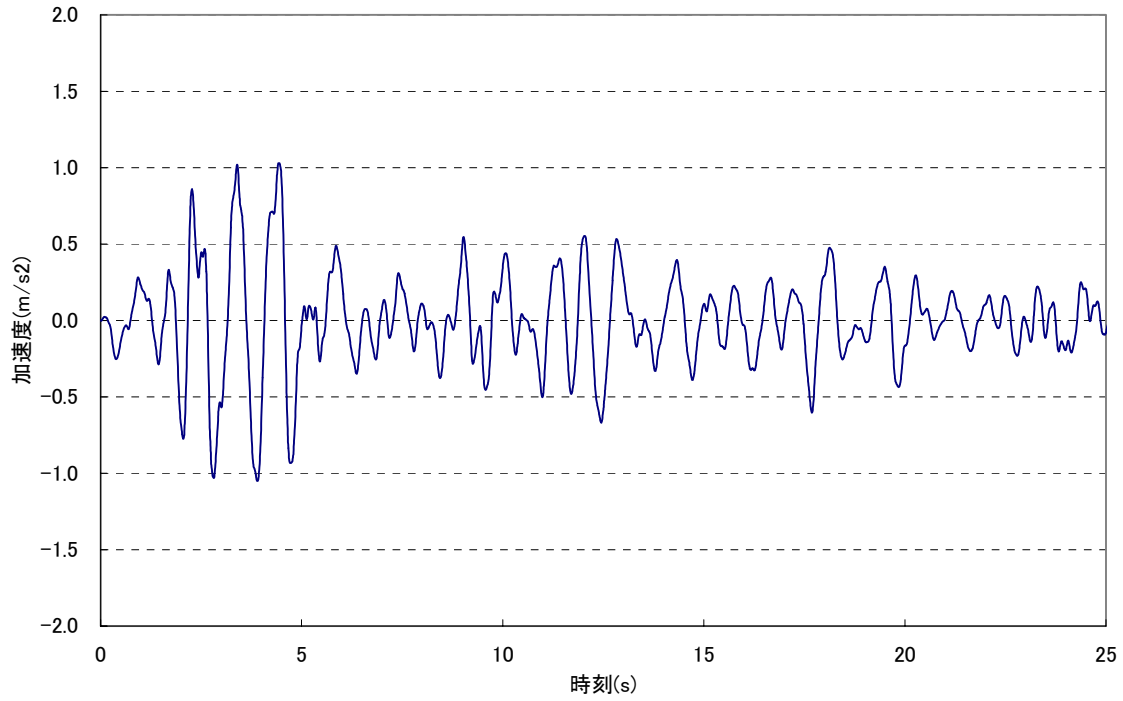


図 4.16 改良標準波 S₁N に対する加速度応答時刻歴（免震時：固有周期 1 秒）

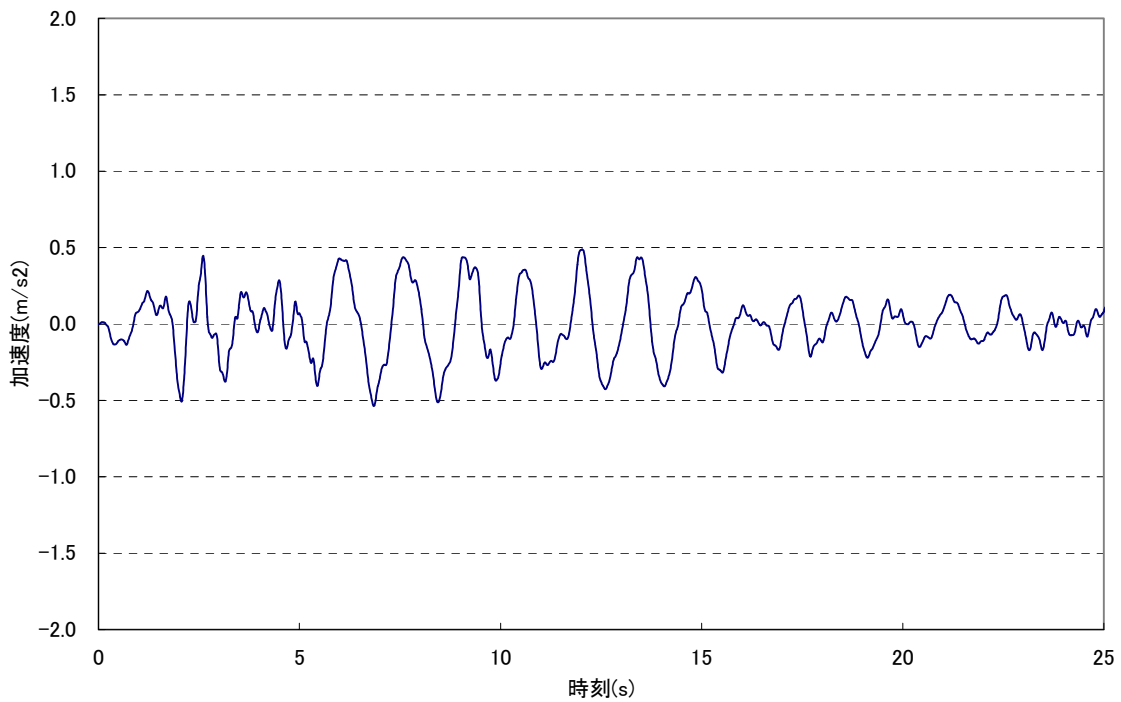


図 4.17 改良標準波 S₁N に対する加速度応答時刻歴（免震時：固有周期 1.5 秒）

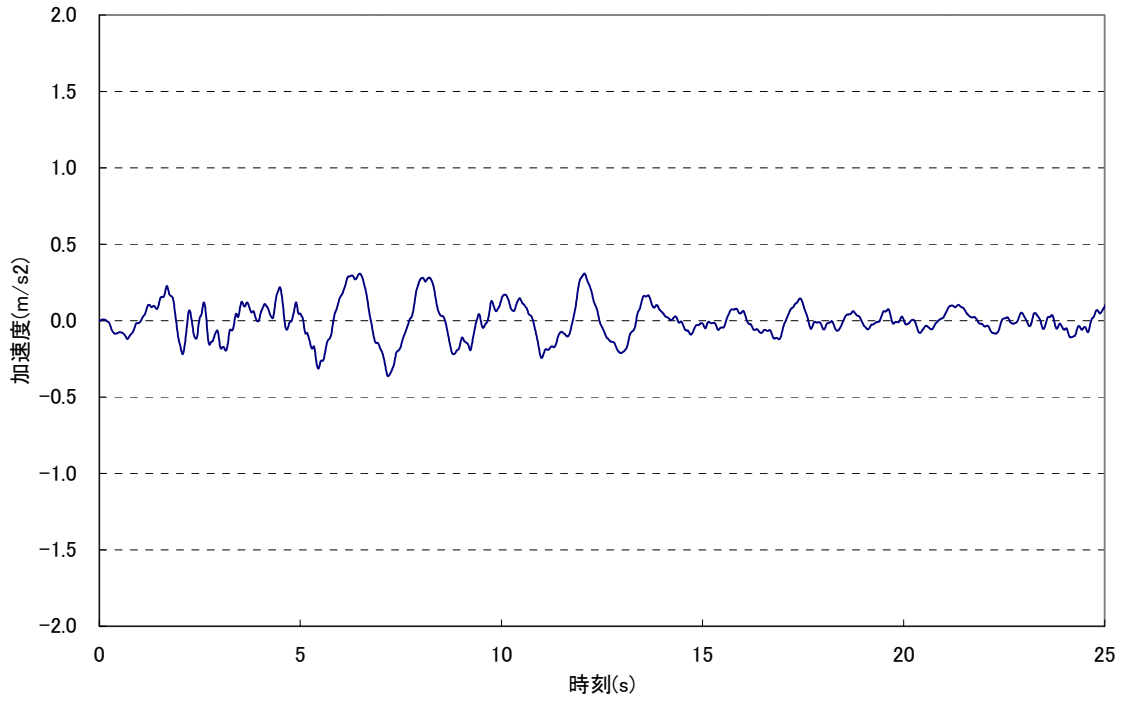


図 4.18 改良標準波 S₁N に対する加速度応答時刻歴（免震時：固有周期 2 秒）

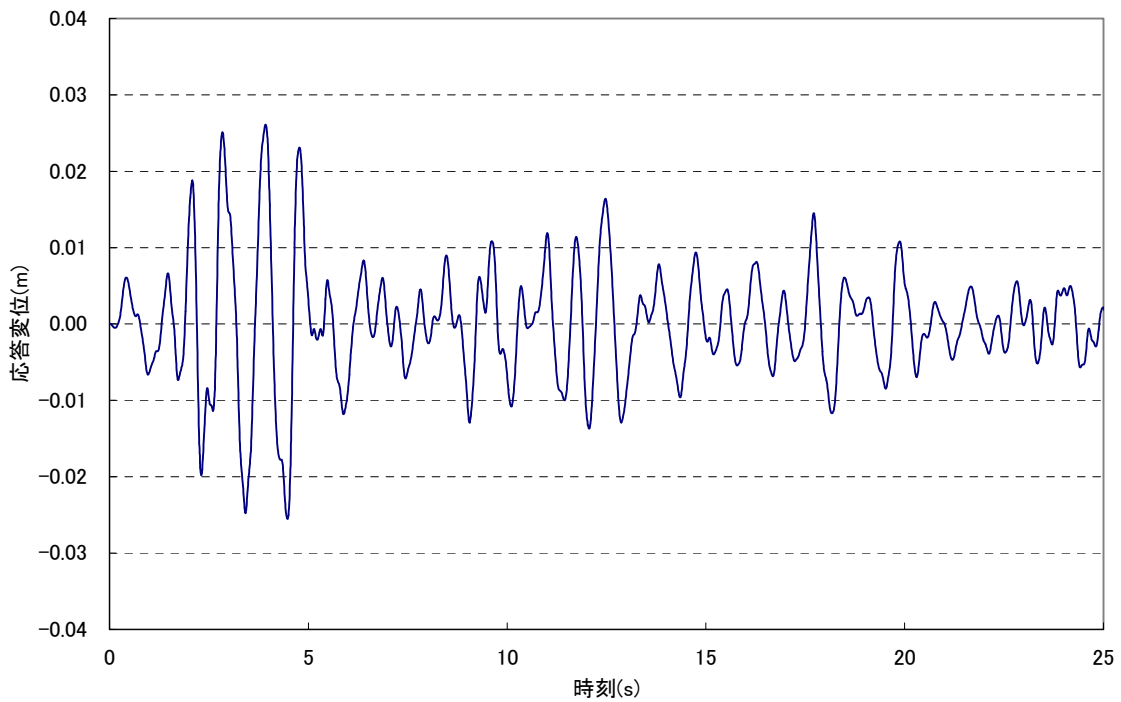


図 4.19 改良標準波 S₁N に対する変位応答時刻歴（免震時：固有周期 1 秒）

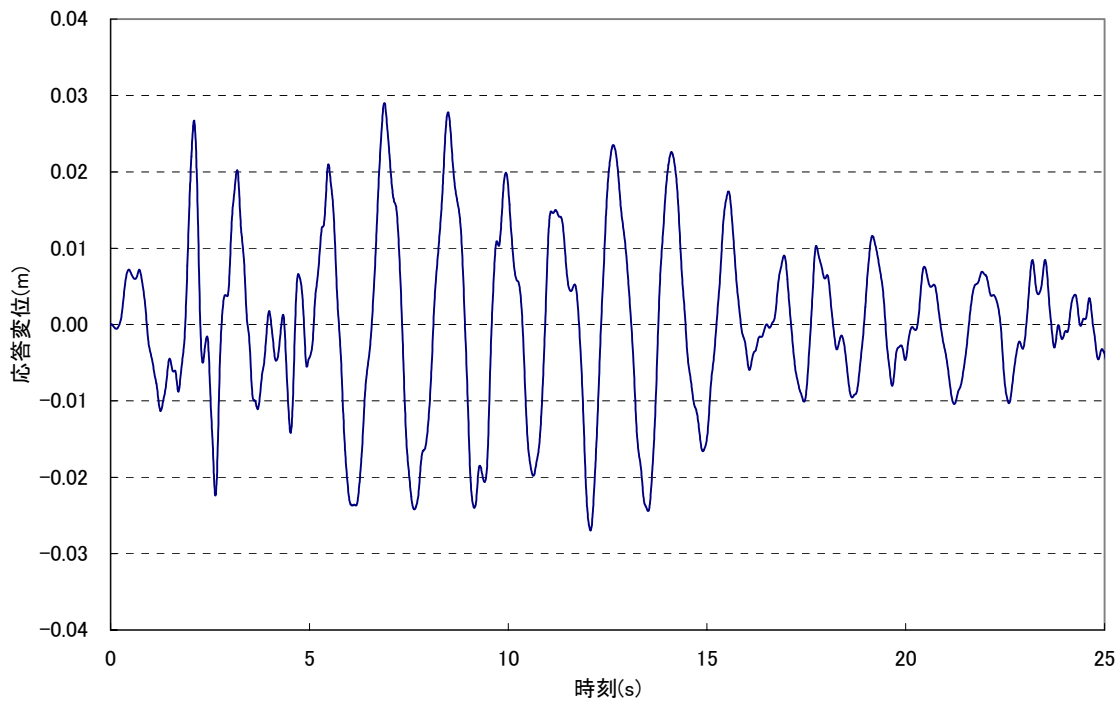


図 4.20 改良標準波 S₁N に対する変位応答時刻歴 (免震時：固有周期 1.5 秒)

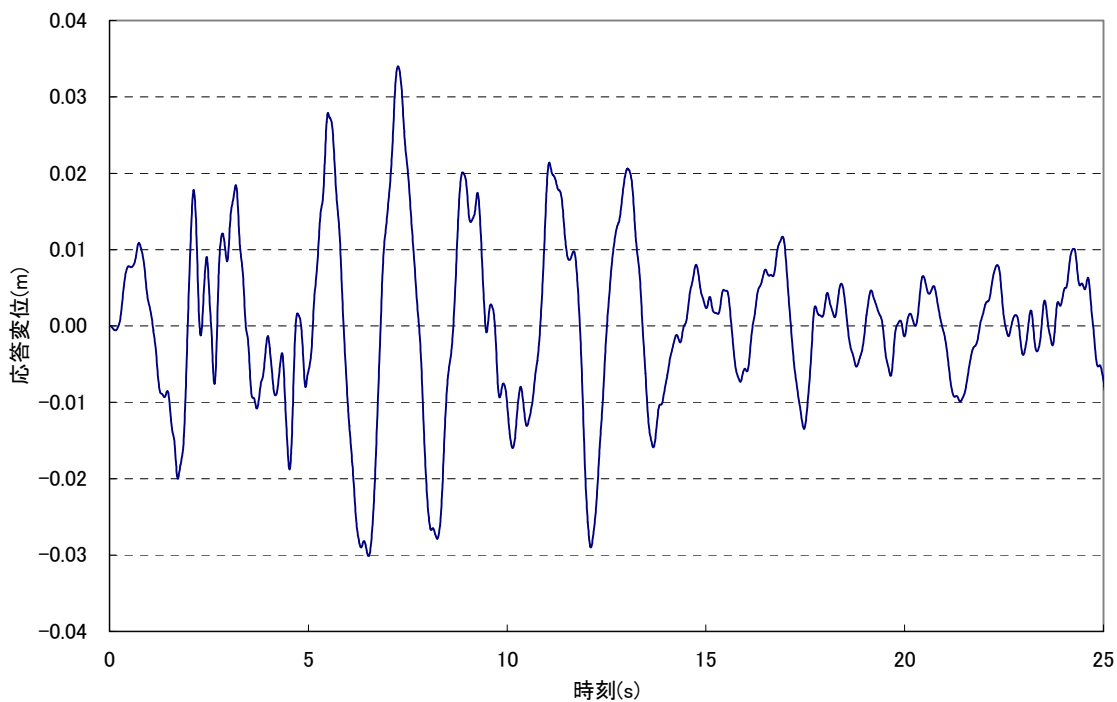
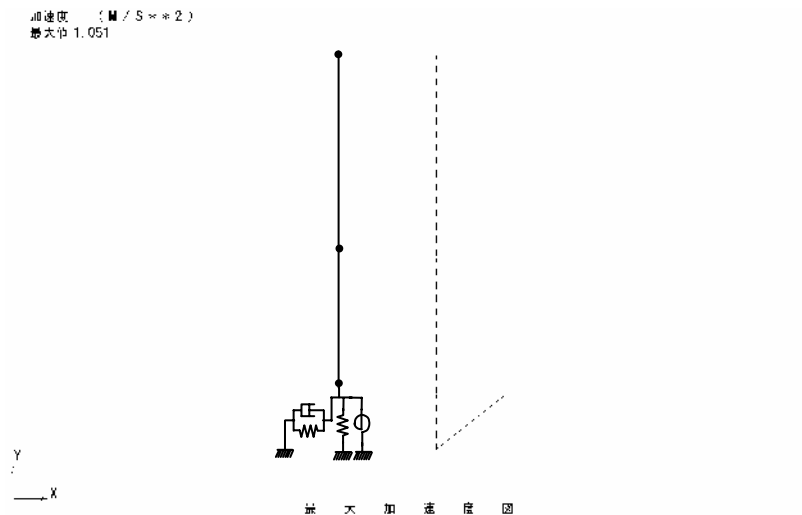
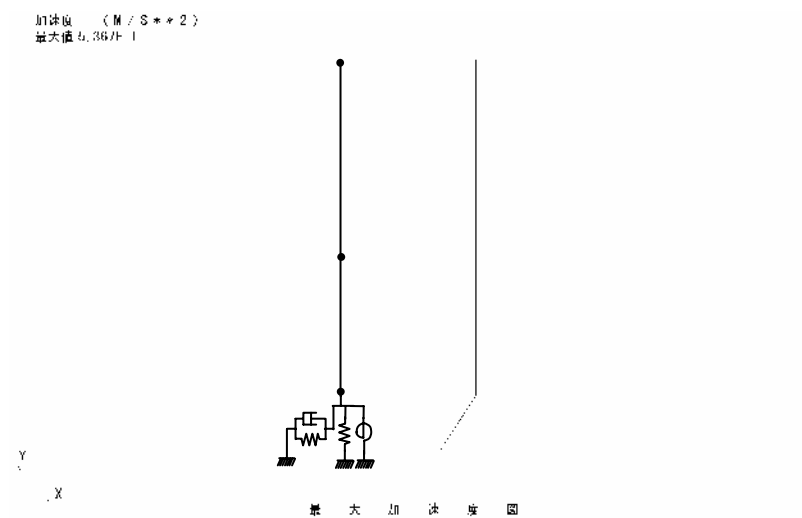


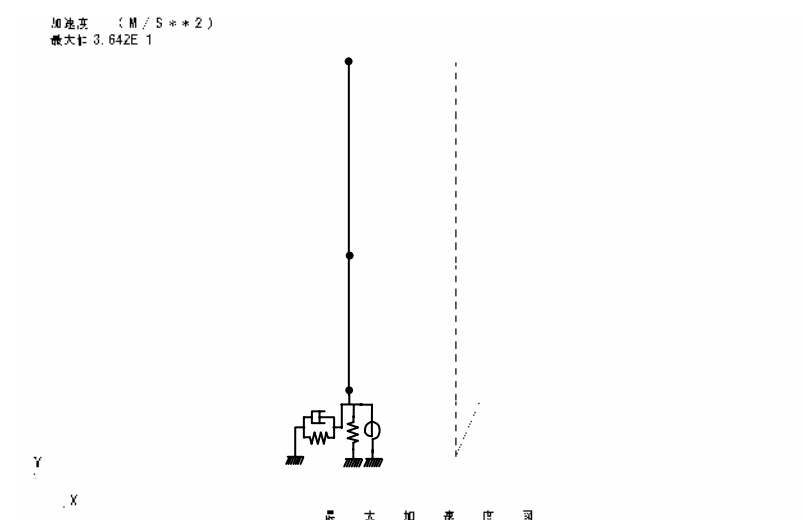
図 4.21 改良標準波 S₁N に対する変位応答時刻歴 (免震時：固有周期 2 秒)



固有周期 1 秒

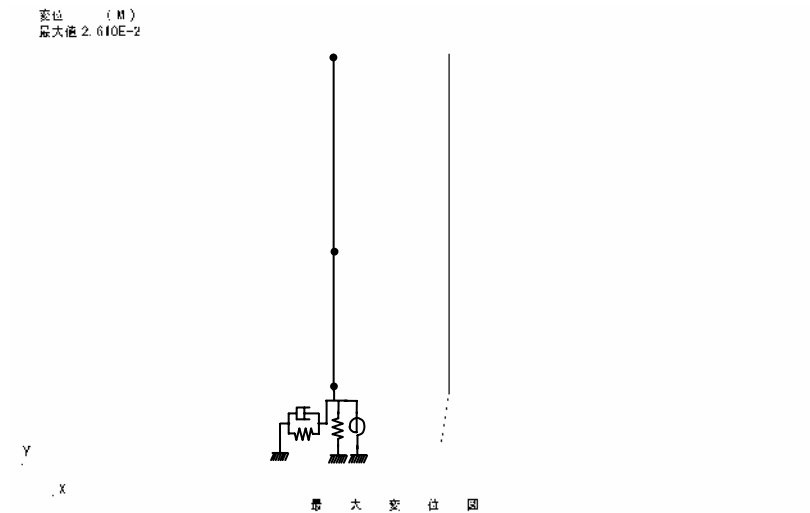


固有周期 1.5 秒

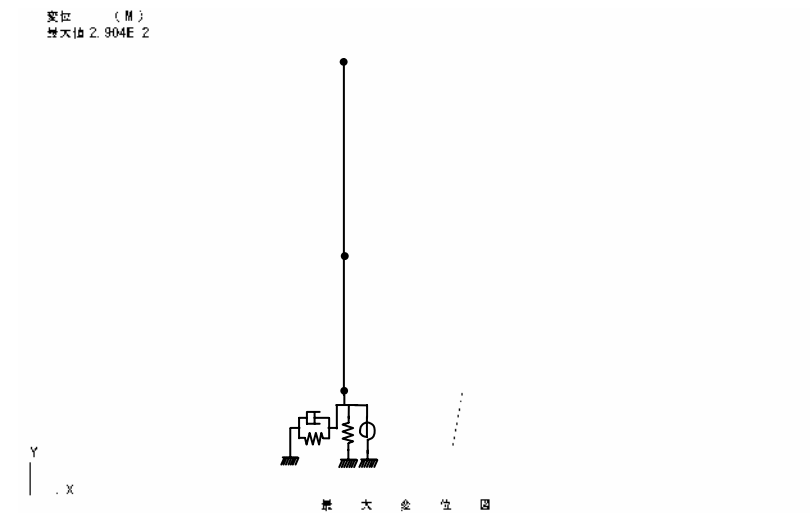


固有周期 2 秒

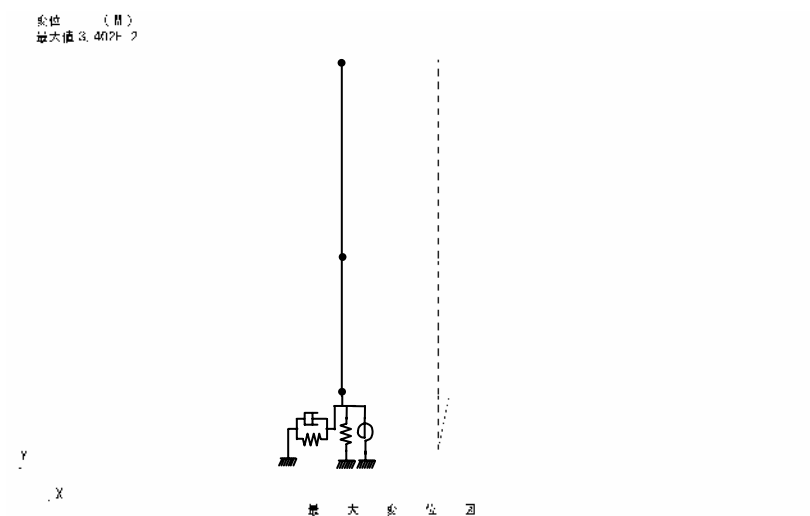
図 4.22 改良標準波 S_{1N} に対する最大加速度応答分布



固有周期 1 秒



固有周期 1.5 秒



固有周期 2 秒

図 4.23 改良標準波 S₁N に対する最大変位応答分布

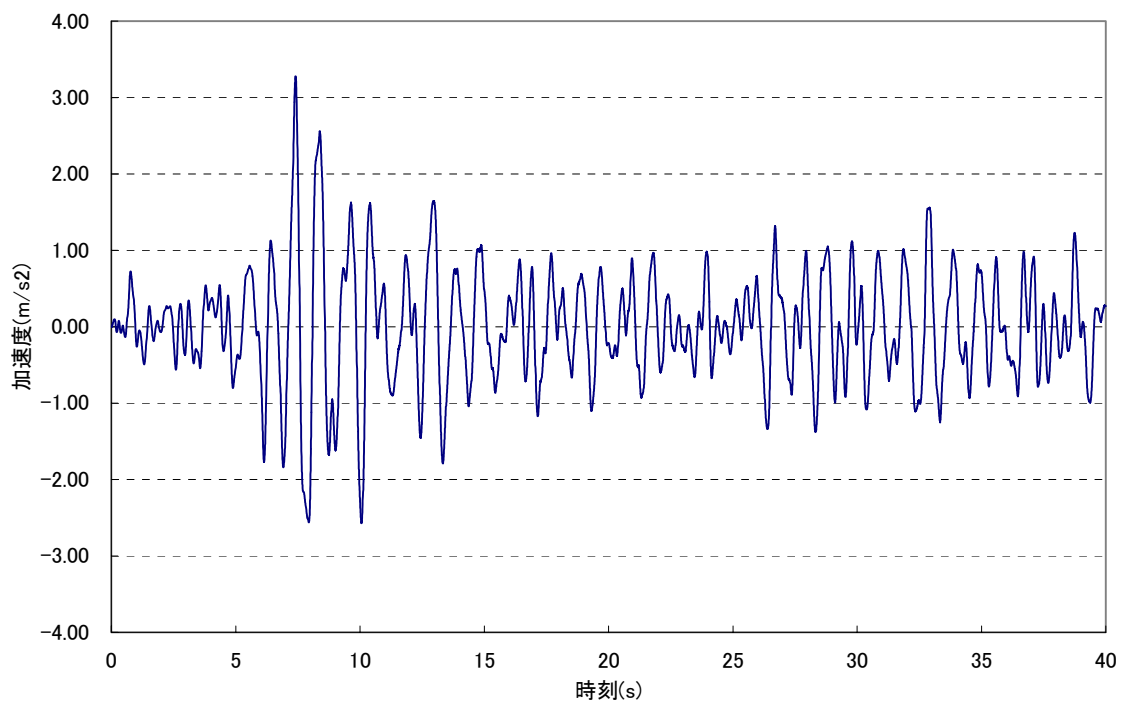


図 4.24 改良標準波 S_2F に対する加速度応答時刻歴（免震時：固有周期 1 秒）

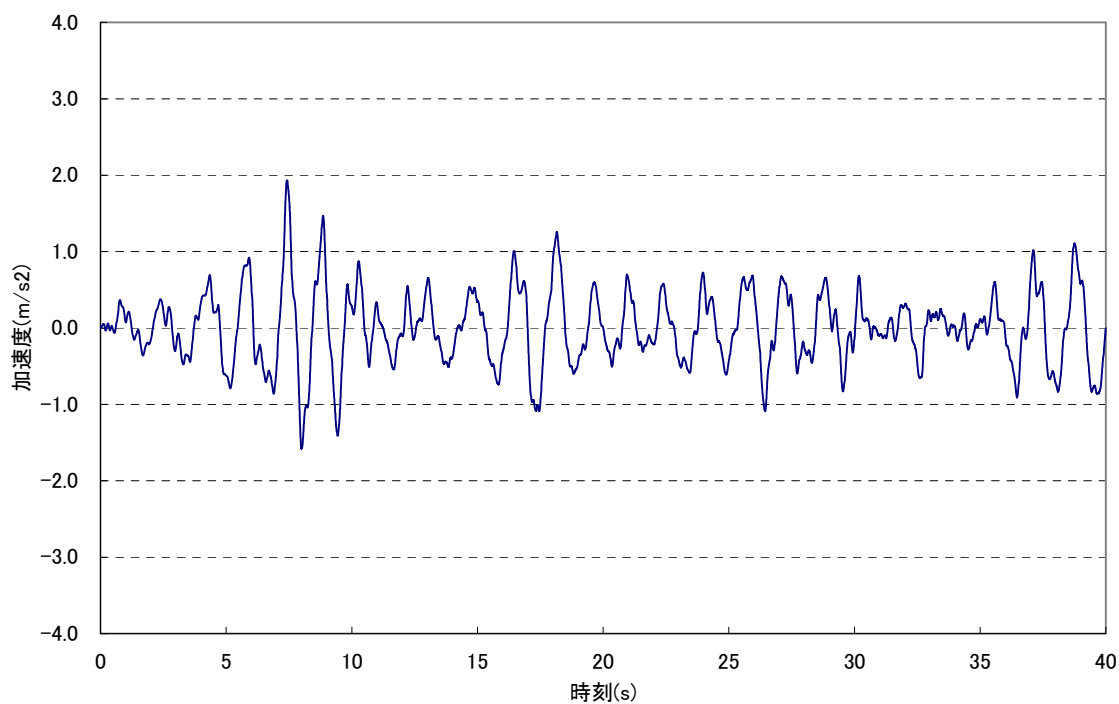


図 4.25 改良標準波 S_2F に対する加速度応答時刻歴（免震時：固有周期 1.5 秒）

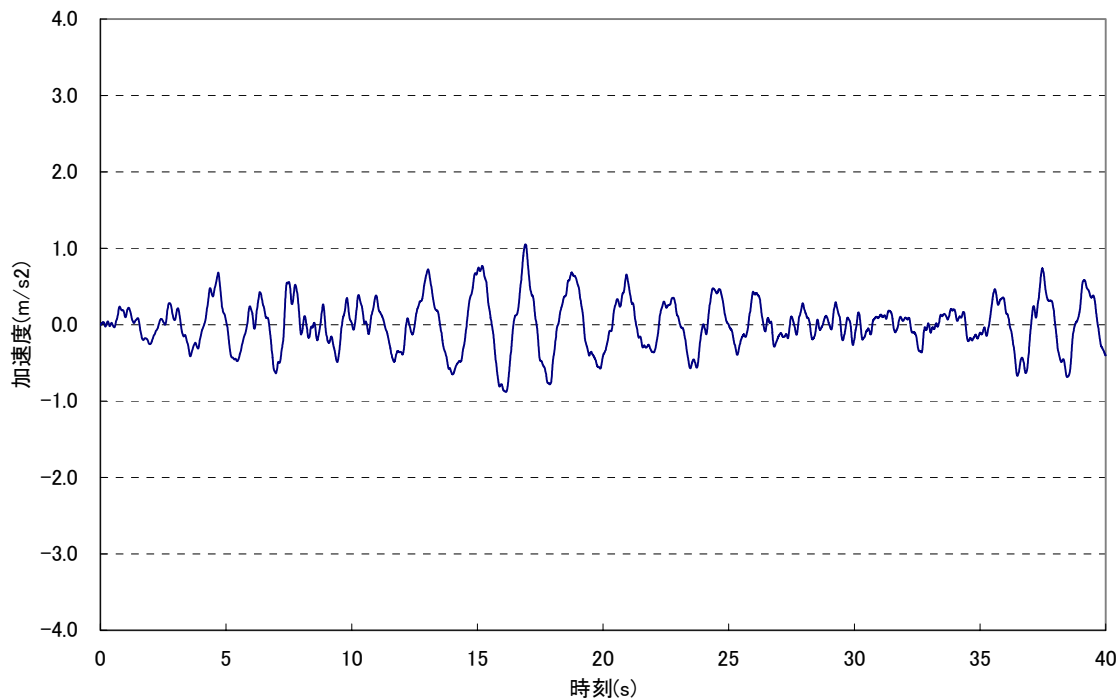


図 4.26 改良標準波 S_2F に対する加速度応答時刻歴 (免震時：固有周期 2 秒)

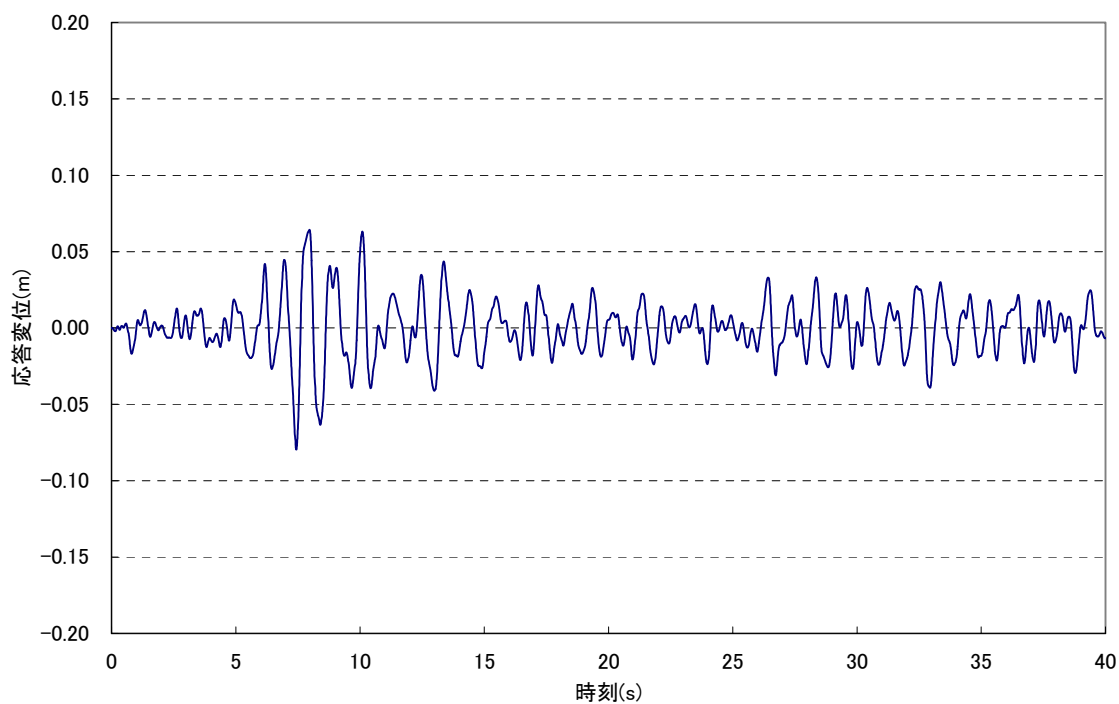


図 4.27 改良標準波 S_2F に対する変位応答時刻歴 (免震時：固有周期 1 秒)

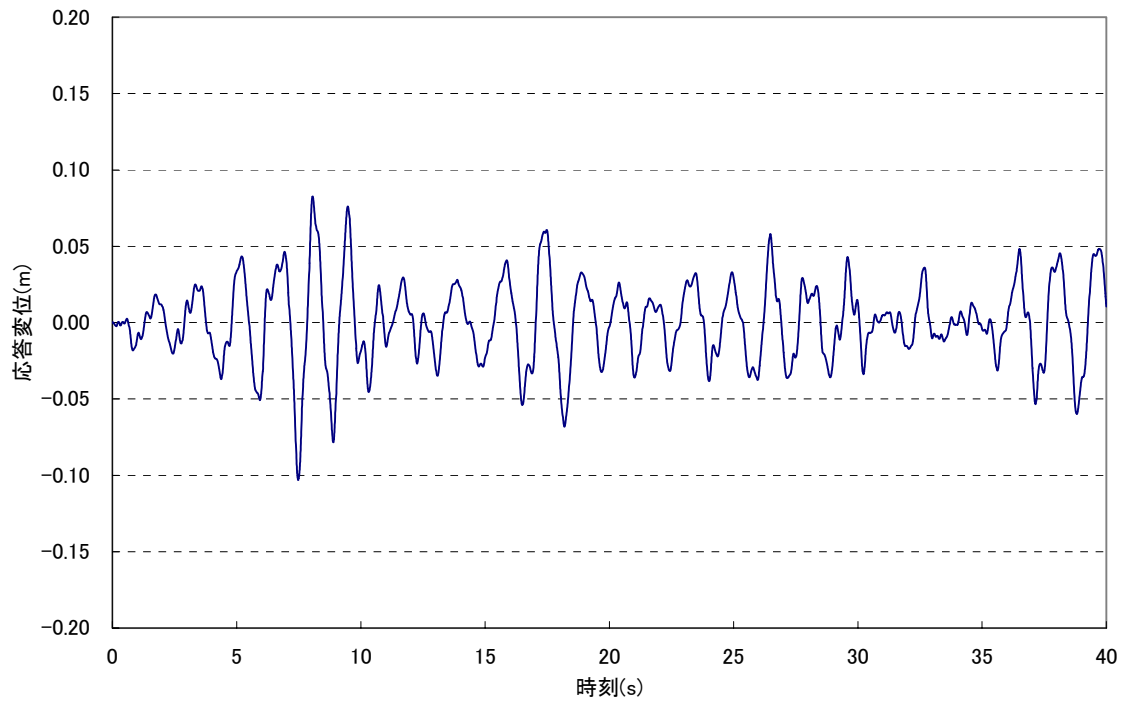


図 4.28 改良標準波 S_2F に対する変位応答時刻歴（免震時：固有周期 1.5 秒）

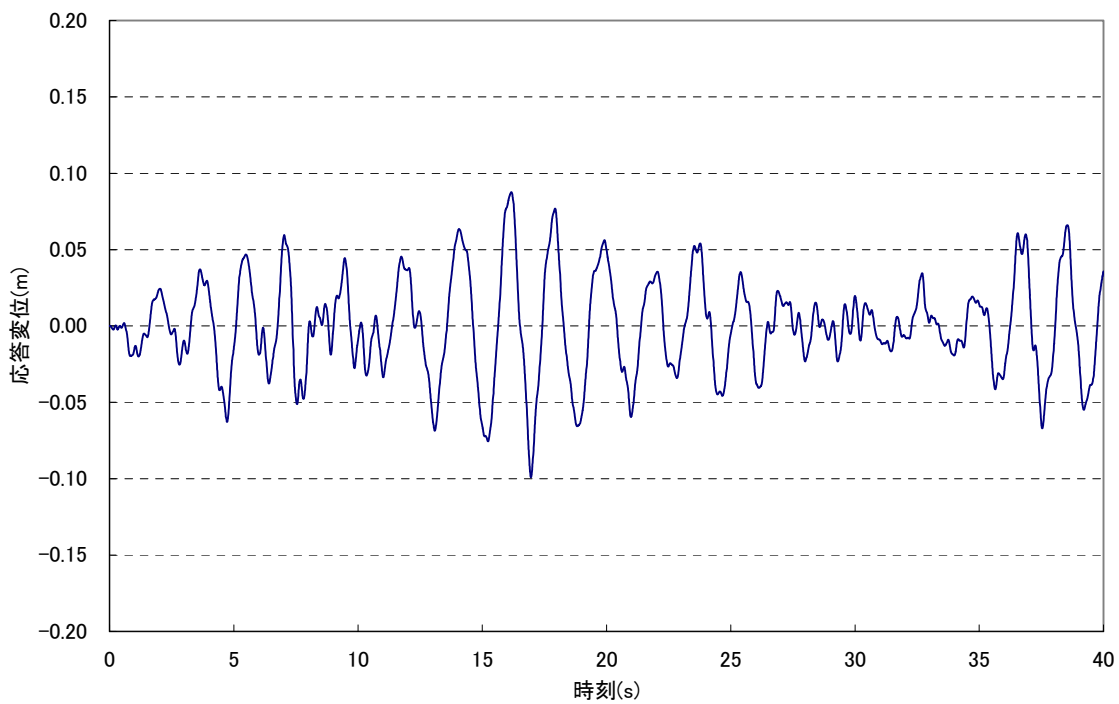
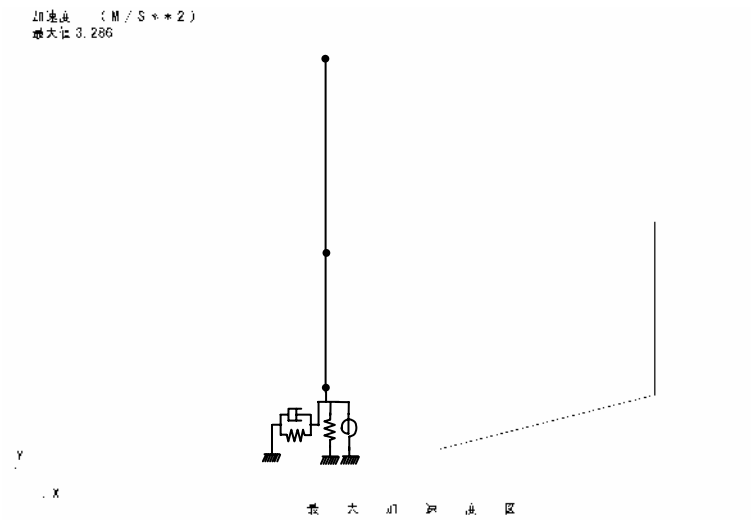
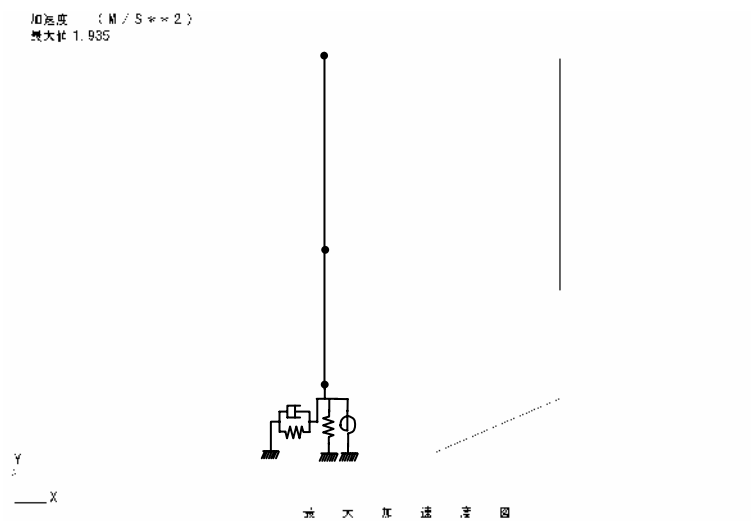


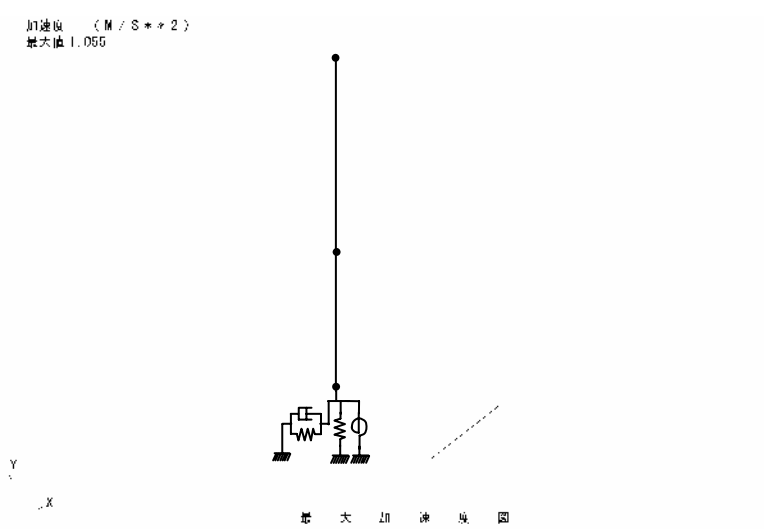
図 4.29 改良標準波 S_2F に対する変位応答時刻歴（免震時：固有周期 2 秒）



固有周期 1 秒

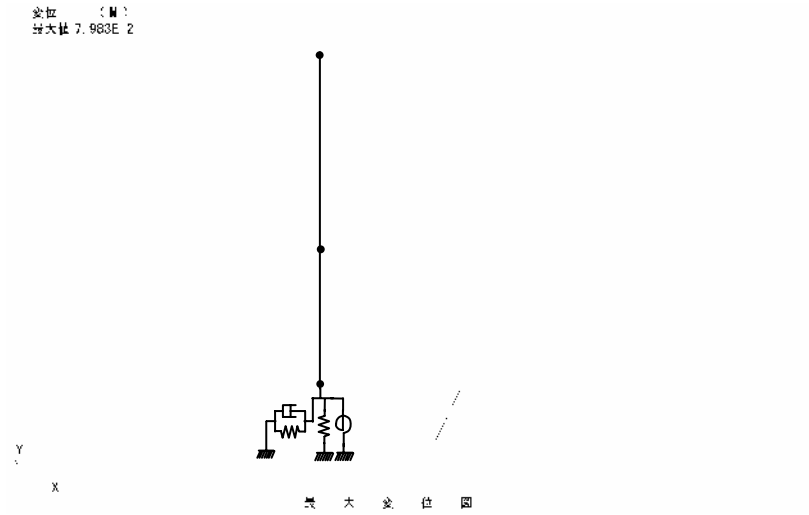


固有周期 1.5 秒

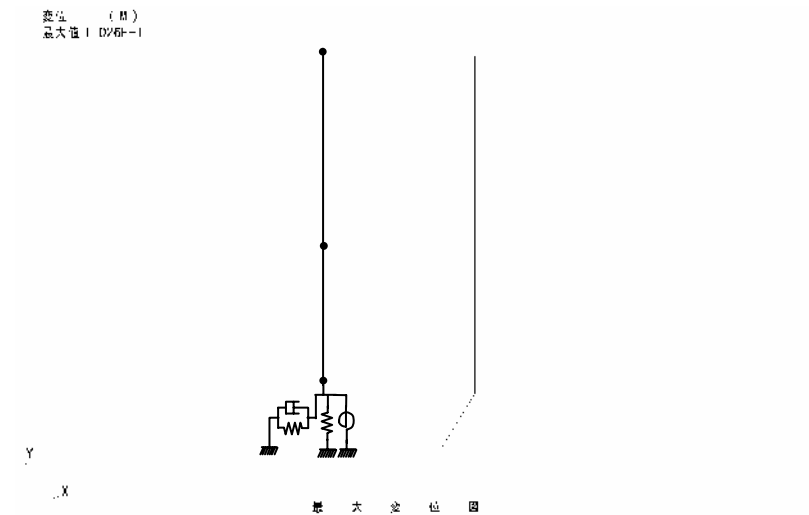


固有周期 2 秒

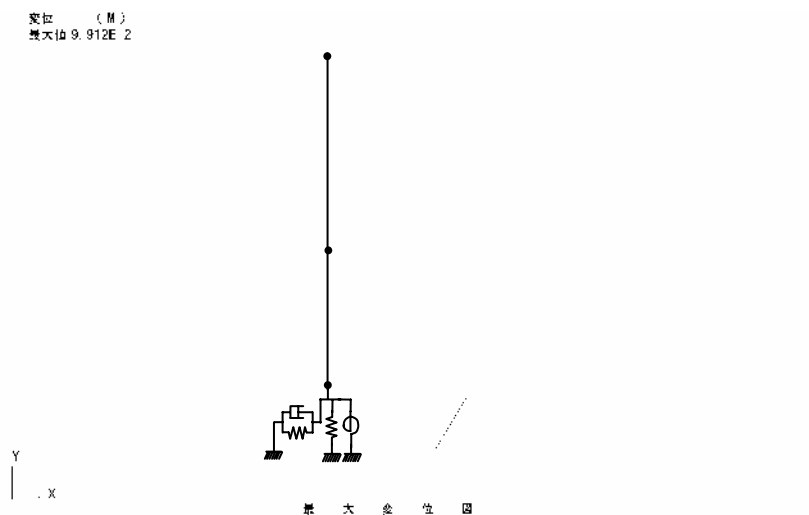
図 4.30 改良標準波 S₂F に対する最大加速度応答分布



固有周期 1 秒



固有周期 1.5 秒



固有周期 2 秒

図 4.31 改良標準波 S_2F に対する最大変位応答分布

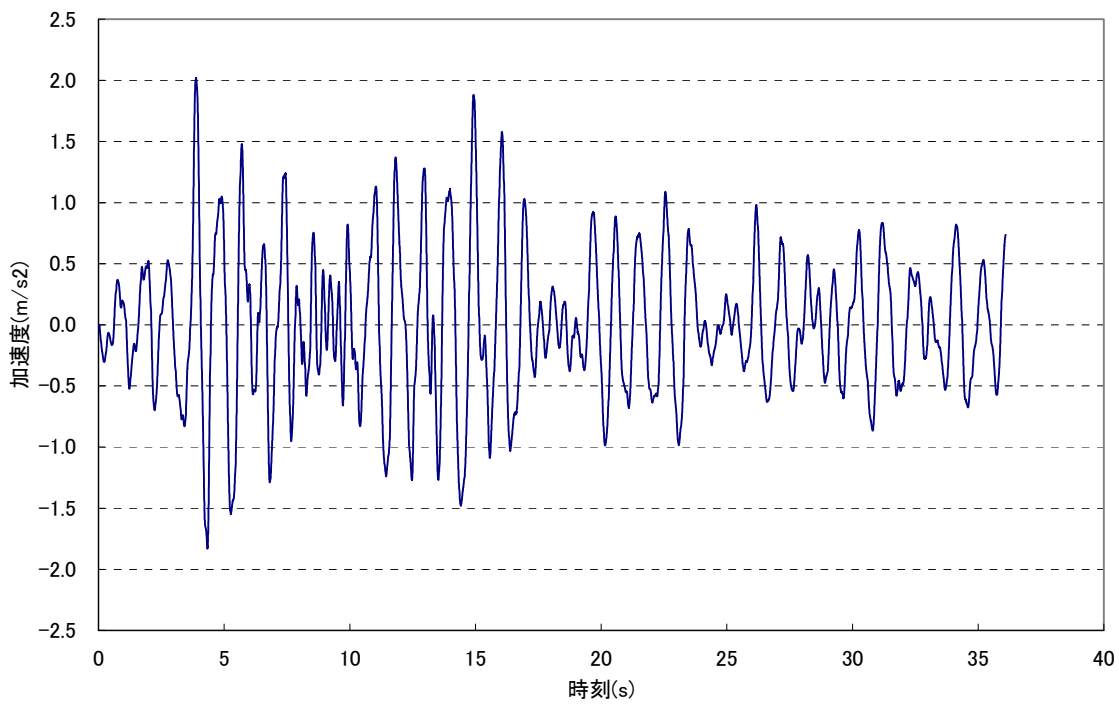


図 4.32 改良標準波 S_2N に対する加速度応答時刻歴 (免震時：固有周期 1 秒)

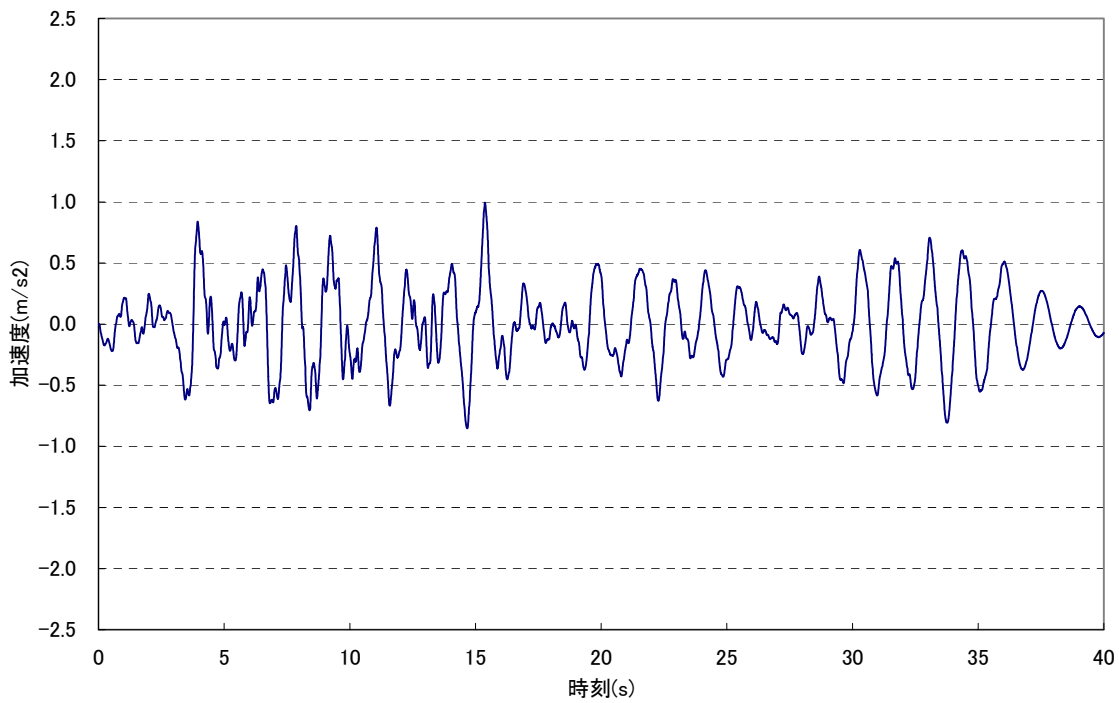


図 4.33 改良標準波 S_2N に対する加速度応答時刻歴 (免震時：固有周期 1.5 秒)

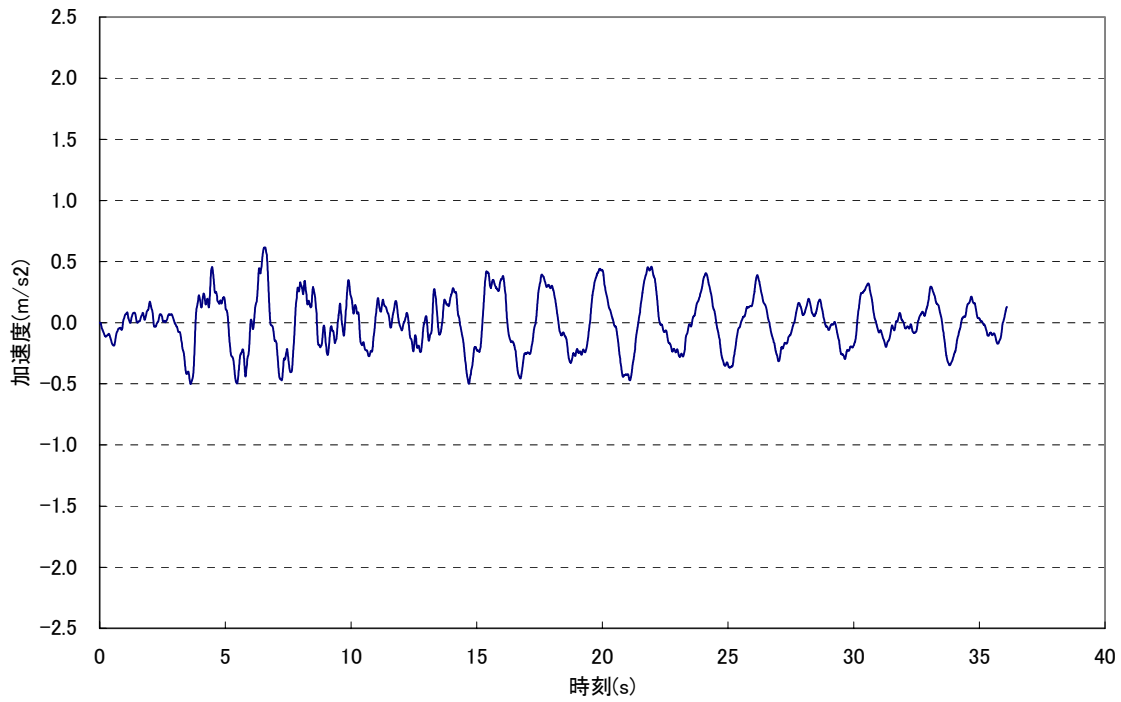


図 4.34 改良標準波 S_2N に対する加速度応答時刻歴（免震時：固有周期 2 秒）

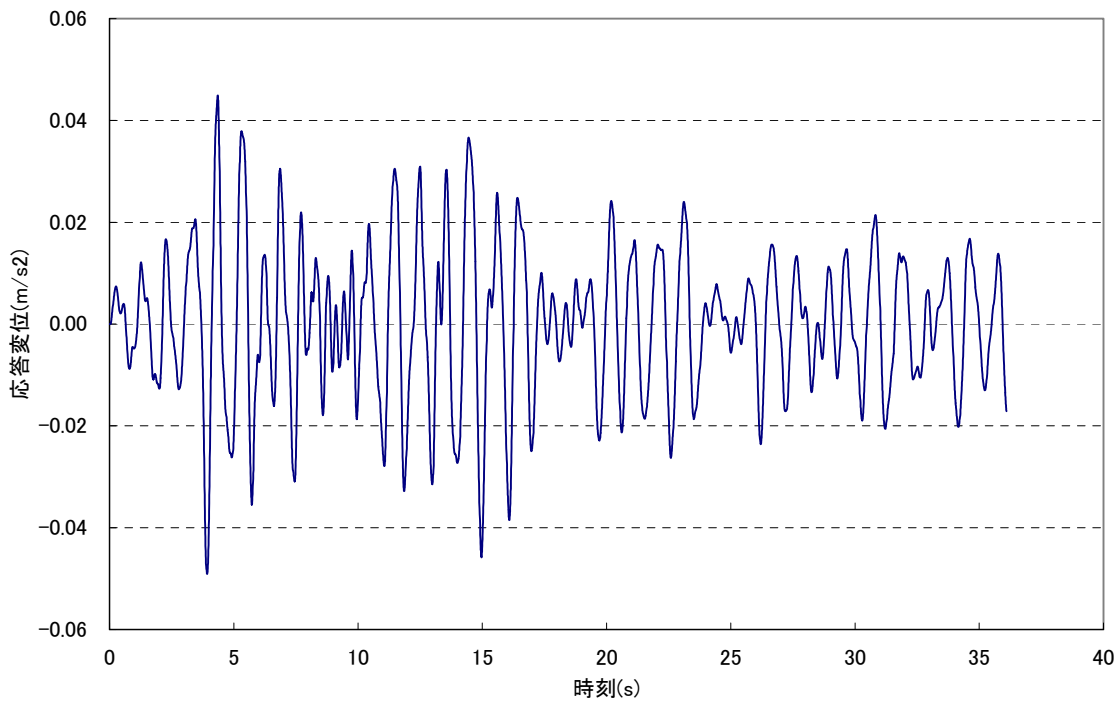


図 4.35 改良標準波 S_2N に対する変位応答時刻歴（免震時：固有周期 1 秒）

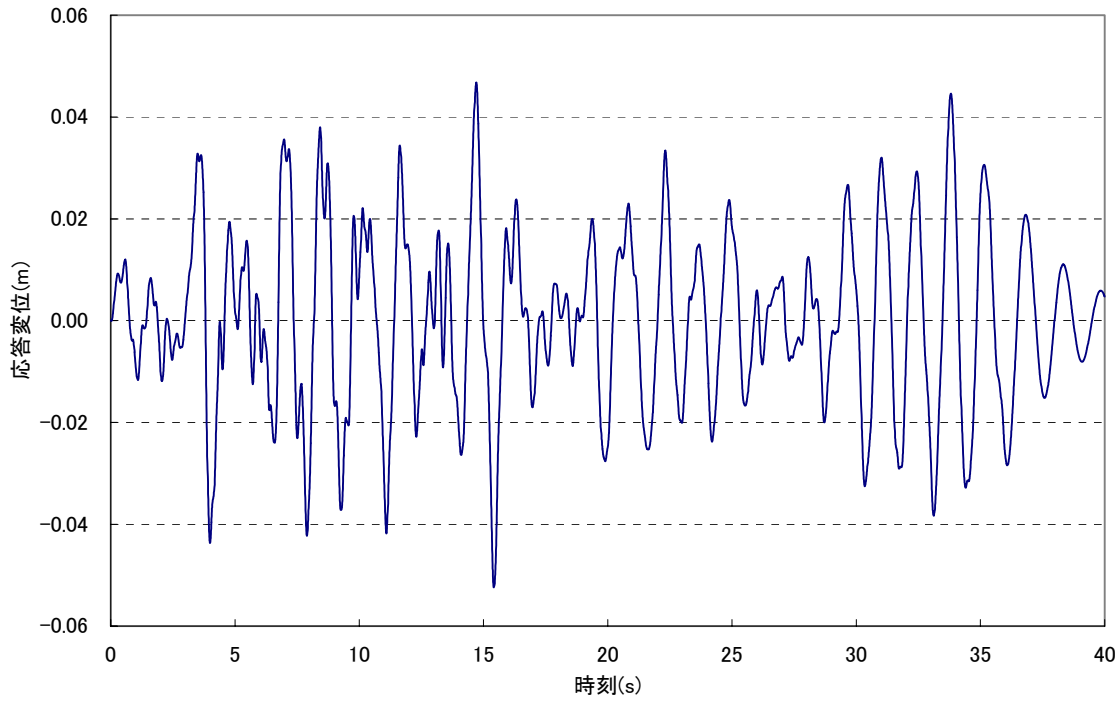


図 4.36 改良標準波 S_2N に対する変位応答時刻歴（免震時：固有周期 1.5 秒）

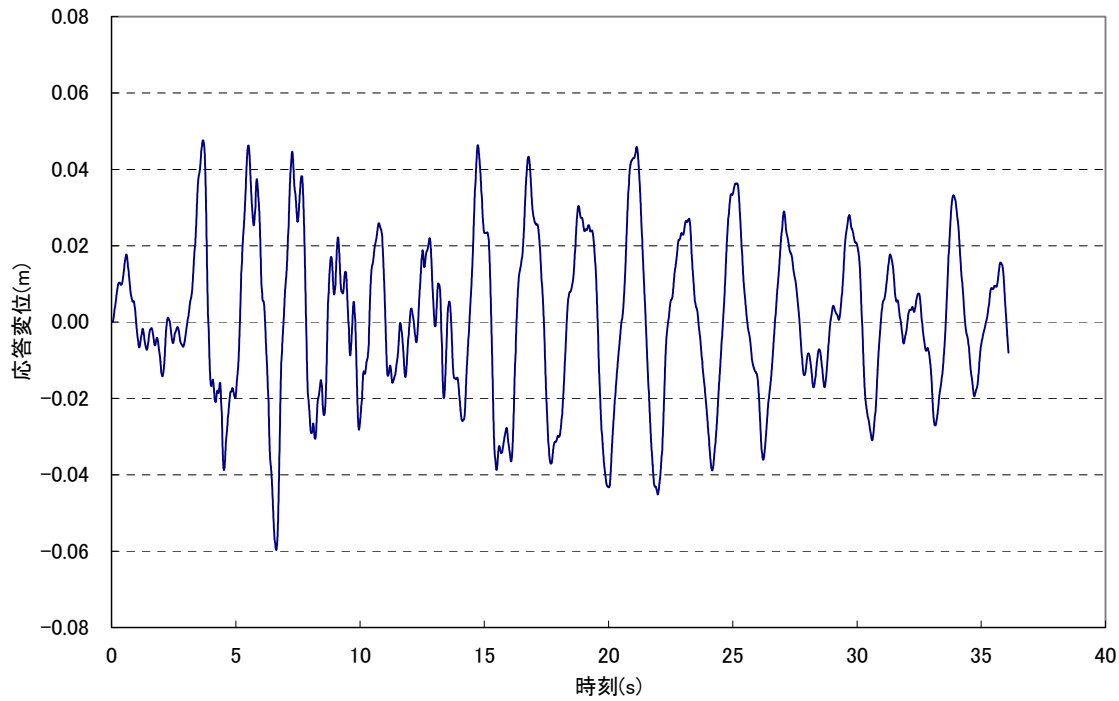
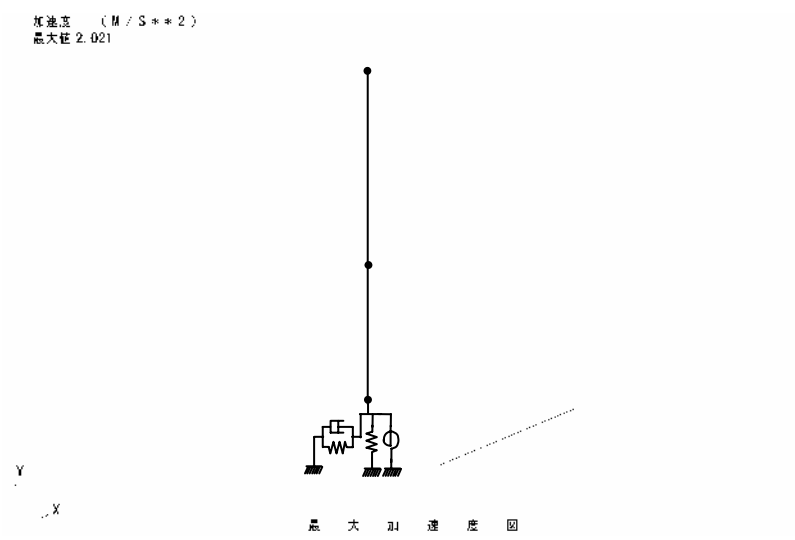
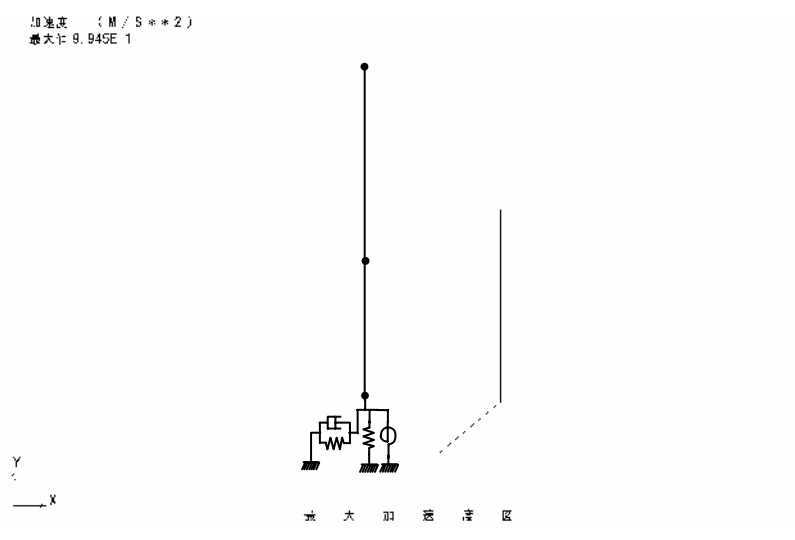


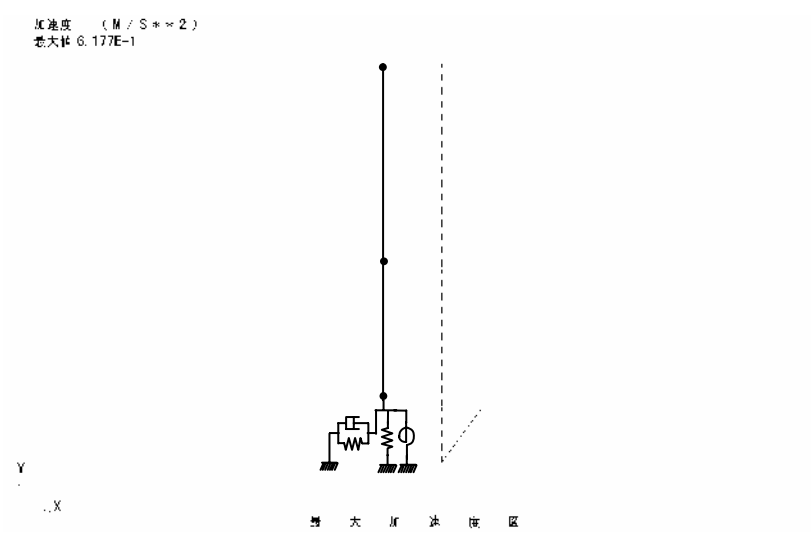
図 4.37 改良標準波 S_2N に対する変位応答時刻歴（免震時：固有周期 2 秒）



固有周期 1 秒

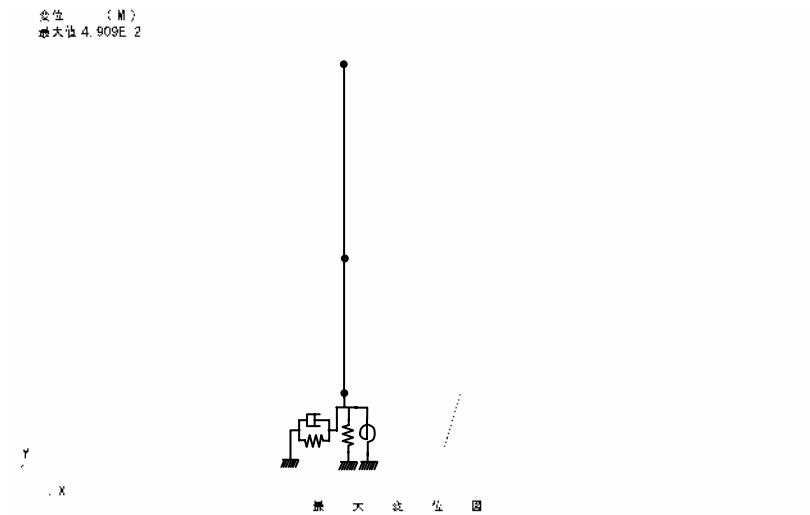


固有周期 1.5 秒

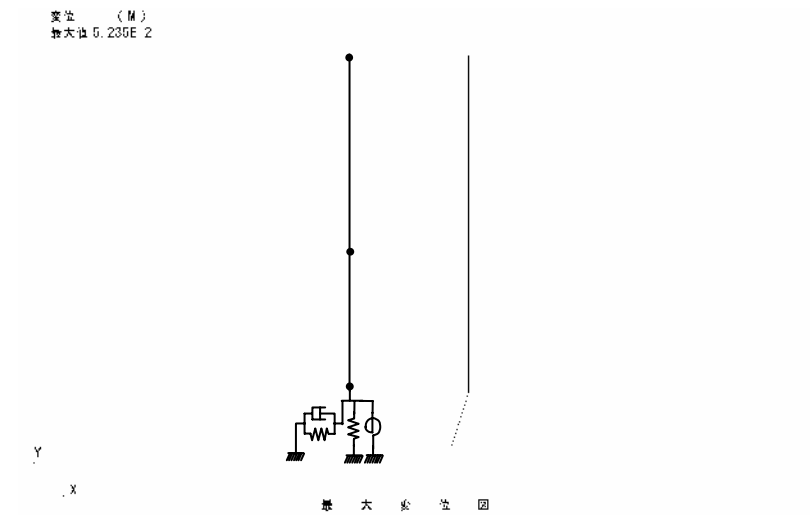


固有周期 2 秒

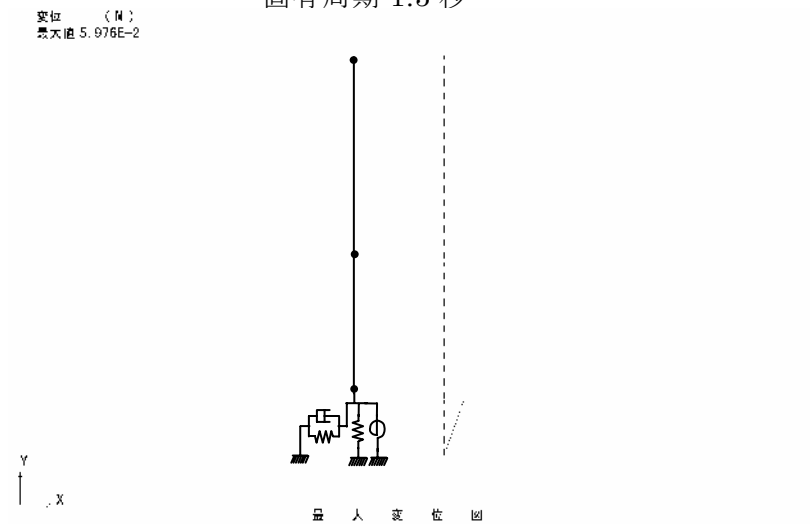
図 4.38 改良標準波 S₂N に対する最大応答加速度分布



固有周期 1 秒



固有周期 1.5 秒



固有周期 2 秒

図 4.39 改良標準波 S_2N に対する最大応答変位分布

5. 結論

免震技術の実機適用性を検討するために、想定 BWR 建屋内に設置されている非常用 DG を対象に、周辺配管等の取合い部を含めた免震設計を行い、簡便な解析モデルを用いた地震応答解析を行い、その免震特性を把握した。また、入力地震動の周波数特性を変えた感度解析を行い、入力地震動の周波数特性の違いが非常用 DG 免震系の加速度応答及び変位応答に及ぼす影響を評価した。

得られた結果を以下に示す。

非常用 DG 免震系の最大加速度応答は、免震時の固有周期を 1 秒とすると、非免震時の約 50% に、固有周期を 1.5 秒とすると約 27% に、固有周期を 2 秒とすると約 17% に減少した。また、最大変位応答は、4.9cm～6.3cm であり、許容変位 20cm を十分下回っていることを確認した。

一方、入力地震動の周波数特性を変えた感度解析結果から、改良標準波 S₁N に対する非常用 DG 免震系の最大加速度応答は、免震時の固有周期を 1 秒とすると、非免震時の約 27% に、固有周期を 1.5 秒とすると約 14% に、固有周期を 2 秒とすると約 9% に減少した。また、最大変位応答は 2.6cm～3.4cm であり、固有周期 1 秒を基準とすると、固有周期 1.5 秒で 1.1 倍、固有周期 2 秒で 1.3 倍に増加した。

また、改良標準波 S₂F に対する非常用 DG 免震系の最大加速度応答は、免震時の固有周期を 1 秒とすると、非免震時の約 55% に、固有周期を 1.5 秒とすると約 32% に、固有周期を 2 秒とすると約 18% に減少した。また、最大変位応答は約 8cm～約 10cm であり、固有周期 1 秒を基準とすると、固有周期 1.5 秒で 1.3 倍、固有周期 2 秒で 1.2 倍に増加した。

さらに、改良標準波 S₁N に対する非常用 DG 免震系の最大加速度応答は、免震時の固有周期を 1 秒とすると、非免震時の約 34% に、固有周期を 1.5 秒とすると約 17% に、固有周期を 2 秒とすると約 10% に減少した。また、最大変位応答は約 5cm～約 6cm であり、固有周期 1 秒を基準とすると、固有周期 1.5 秒で 1.1 倍、固有周期 2 秒で 1.2 倍に増加した。

したがって、応答加速度の減少と変位応答の増大を勘案すると、非常用 DG 免震系の固有周期は 1.5 秒～2 秒の範囲が適当であると考えられる。

S₂ 地震動に対する非常用 DG 免震系の加速度低減効果は S₁ 地震動に対する加速度低減効果に比べ小さくなり、変位応答は大きくなる傾向が見られる。しかし、いずれの場合も最大変位応答が許容変位 20cm を十分下回っていることを確認した。

本作業の結果、非常用 DG の可動範囲と免震化に必要なスペースの概略値を把握した。

参考文献

- (1) 軽水炉発電所のあらし、原子力安全研究協会、平成 4 年 10 月.
- (2) 深田泰夫：鉄筋コンクリート造建物の復元力特性に関する研究（その 1）、日本建築学会関東支部研、No.40、pp121-124、1969.11.