

外部電源系統の機能喪失確率評価

平成 21 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

要 旨

原子力プラントの地震に係る確率論的安全評価（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、地震起因による外部電源喪失は発電所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し、発電所外の外部電源系統の影響は評価していない。しかし、1999 年の台湾集集地震では、外部電源系統の基幹部である送電鉄塔が倒壊した事例が多数報告されている。そのため、外部電源喪失事象の発生確率をより現実的に評価するためにはプラント周辺の外部電源系統を含めた評価の重要性を再認識した。

平成 17 年度～平成 18 年度の作業において、鋼管鉄塔及び山型鋼鉄塔を対象として損傷確率を算出し、既往の地震 PSA において安全上重要であると判断されている碍管付き起動変圧器及び空気遮断器の損傷確率と比較することにより、送電鉄塔の損傷確率が外部電源喪失の発生確率に及ぼす影響を評価した。しかし、これまでの評価では、鉄塔の位置する表層地盤の地震動増幅特性を考慮していないため、鉄塔の損傷確率をより精度良く評価するためには、表層地盤の増幅特性が送電鉄塔の地震応答に与える影響を考慮する必要がある。また、送電鉄塔の地震応答は、架線を通じて隣接された鉄塔との間に生じる相互作用の影響により、架線の影響を考慮しない場合の地震応答を上回る場合があり、鉄塔－架線連成系の地震応答特性を評価する必要がある。

本作業では、送電鉄塔の位置する表層地盤の地震動増幅特性を考慮した鉄塔の地震時損傷確率を算出し、開閉所変電設備の損傷確率と比較して、送電鉄塔の損傷確率が外部電源喪失の発生確

率に及ぼす影響を評価した。また、架線の地震応答が送電鉄塔の応答に及ぼす影響を評価するための基礎データとして、架線単体の地震応答解析を行い、その応答特性を把握した。

本作業により、表層地盤の応答倍率の概略値を把握することができ、表層地盤の増幅特性を考慮した送電鉄塔の損傷確率を試算した結果、送電鉄塔の損傷確率が起動変圧器の損傷確率を上回らないことを確認した。

また、改良標準波 $S_1F^{(1)}$ を用いた架線の地震応答解析により、架線の応答加速度、応答変位、応答変動軸力ともに、地震波の入力方向が架線方向の水平逆位相の場合の応答が最も大きく、応答加速度、応答変位は鉛直方向で最大値を示すことが分かった。このことから、架線が上下に震動しながら架線方向（線路方向）に動くという架線の応答特性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

目 次

1. 序論	1-1
1.1 目的	1-1
1.2 本作業の概要	1-1
2. 外部電源系統の機能喪失確率評価手法の概要	2-1
2.1 外部電源系統の概要	2-1
2.2 外部電源系統の機能喪失確率評価手法	2-1
3. 送電鉄塔の地震時損傷確率評価	3-1
3.1 送電鉄塔の損傷確率評価手順	3-1
3.2 表層地盤の応答倍率の算定	3-1
3.2.1 地盤モデル	3-2
3.2.2 地盤の地震応答解析	3-3
3.2.3 加速度増幅率評価結果	3-3
3.2.4 表層地盤の応答倍率の評価	3-5
3.3 送電鉄塔の損傷確率評価	3-5
3.3.1 損傷確率の算出方法	3-5
3.3.2 損傷確率解析条件	3-6
3.3.3 損傷確率評価結果	3-6
3.4 外部電源系統の機能喪失確率評価	3-6
4. 架線の地震応答解析	4-1
4.1 解析条件	4-1
4.2 固有値解析	4-1
4.3 時刻歴応答解析	4-1

5. 結論 5-1

参考文献 参-1

表一覽

表 3.1	地盤種別	3-8
表 3.2	地質年代係数	3-8
表 3.3	土質に応じた係数	3-8
表 3.4	地盤モデル No.1 (第一種地盤 粘性土 $T_G=0.198$)	3-9
表 3.5	地盤モデル No.2 (第一種地盤 砂質土 $T_G=0.184$)	3-9
表 3.6	地盤モデル No.3 (第一種地盤 互層 $T_G=0.190$)	3-9
表 3.7	地盤モデル No.4 (第一種地盤 互層 $T_G=0.163$)	3-9
表 3.8	地盤モデル No.5 (第二種地盤 粘性土 $T_G=0.704$)	3-9
表 3.9	地盤モデル No.6 (第二種地盤 粘性土 $T_G=0.449$)	3-10
表 3.10	地盤モデル No.7 (第二種地盤 砂質土 $T_G=0.612$)	3-10
表 3.11	地盤モデル No.8 (第二種地盤 砂質土 $T_G=0.368$)	3-10
表 3.12	地盤モデル No.9 (第二種地盤 互層 $T_G=0.711$)	3-10
表 3.13	地盤モデル No.10 (第二種地盤 互層 $T_G=0.620$)	3-11
表 3.14	地盤モデル No.11 (第二種地盤 互層 $T_G=0.506$)	3-11
表 3.15	地盤モデル No.12 (第二種地盤 互層 $T_G=0.329$)	3-11
表 3.16	地盤モデル No.13 (第三種地盤 粘性土 $T_G=1.168$)	3-11
表 3.17	地盤モデル No.14 (第三種地盤 粘性土 $T_G=0.776$)	3-11
表 3.18	地盤モデル No.15 (第三種地盤 砂質土 $T_G=1.007$)	3-12
表 3.19	地盤モデル No.16 (第三種地盤 砂質土 $T_G=0.773$)	3-12
表 3.20	地盤モデル No.17 (第三種地盤 互層 $T_G=1.145$)	3-12
表 3.21	地盤モデル No.18 (第三種地盤 互層 $T_G=1.047$)	3-12
表 3.22	地盤モデル No.19 (第三種地盤 互層 $T_G=0.906$)	3-13
表 3.23	地盤モデル No.20 (第三種地盤 互層 $T_G=0.767$)	3-13
表 3.24	解析ケース	3-13
表 3.25	山形鋼鉄塔の現実的耐力 (表層地盤の増幅特性を考慮しない)	3-14
表 3.26	鋼管鉄塔の現実的耐力 (表層地盤の増幅特性を考慮しない)	3-14
表 3.27	山形鋼鉄塔の現実的応答 (表層地盤の増幅特性を考慮しない)	3-14
表 3.28	鋼管鉄塔の現実的応答 (表層地盤の増幅特性を考慮しない)	3-14
表 3.29	山形鋼鉄塔の応答及び耐力 (表層地盤の増幅特性考慮)	3-15

表 3.30	鋼管鉄塔の応答及び耐力（表層地盤の増幅特性考慮）	3-15
表 4.1	固有値解析結果	4-3
表 4.2	解析ケース	4-3
表 4.3	最大応答値	4-4

図一覧

図 2.1	外部電源系統の模式図	2-2
図 2.2	外部電源系統の FT 解析モデル	2-2
図 3.1	鉄塔の損傷確率の評価手順	3-16
図 3.2	表層地盤による加速度の増幅のイメージ図	3-16
図 3.3	地盤応答の解析手法のメニュー	3-17
図 3.4	改良標準波 S ₁ F (水平動、減衰定数 5%) の加速度時刻歴波形	3-18
図 3.5	改良標準波 S ₁ F (水平動、減衰定数 5%) の応答加速度スペクトル	3-18
図 3.6	限耐法による加速度増幅率 G _s (第一種地盤、S ₁ F 波 1 倍)	3-19
図 3.7	限耐法による加速度増幅率 G _s (第一種地盤、S ₁ F 波 2 倍)	3-19
図 3.8	限耐法による加速度増幅率 G _s (第二種地盤、S ₁ F 波 1 倍)	3-20
図 3.9	限耐法による加速度増幅率 G _s (第二種地盤、S ₁ F 波 2 倍)	3-20
図 3.10	限耐法による加速度増幅率 G _s (第三種地盤、S ₁ F 波 1 倍)	3-21
図 3.11	限耐法による加速度増幅率 G _s (第三種地盤、S ₁ F 波 2 倍)	3-21
図 3.12	等価線形解析による加速度増幅率 G _s (第一種地盤、S ₁ F 波 1 倍)	3-22
図 3.13	等価線形解析による加速度増幅率 G _s (第一種地盤、S ₁ F 波 2 倍)	3-22
図 3.14	等価線形解析による加速度増幅率 G _s (第二種地盤、S ₁ F 波 1 倍)	3-23
図 3.15	等価線形解析による加速度増幅率 G _s (第二種地盤、S ₁ F 波 2 倍)	3-23
図 3.16	等価線形解析による加速度増幅率 G _s (第三種地盤、S ₁ F 波 1 倍)	3-24
図 3.17	等価線形解析による加速度増幅率 G _s (第三種地盤、S ₁ F 波 2 倍)	3-24
図 3.18	限耐法及び等価線形解析による加速度増幅率 G _s の比較と包絡曲線 (第一種地盤、S ₁ F 波 1 倍)	3-25
図 3.19	限耐法及び等価線形解析による加速度増幅率 G _s の比較と包絡曲線 (第一種地盤、S ₁ F 波 2 倍)	3-25
図 3.20	限耐法及び等価線形解析による加速度増幅率 G _s の比較と包絡曲線 (第二種地盤、S ₁ F 波 1 倍)	3-26
図 3.21	限耐法及び等価線形解析による加速度増幅率 G _s の比較と包絡曲線 (第二種地盤、S ₁ F 波 2 倍)	3-26
図 3.22	限耐法及び等価線形解析による加速度増幅率 G _s の比較と包絡曲線 (第三種地盤、S ₁ F 波 1 倍)	3-27

図 3.23	限耐法及び等価線形解析による加速度増幅率 G_s の比較と包絡曲線 (第三種地盤、S1F 波 2 倍)	3-27
図 3.24	第一種地盤の加速度増幅率 G_s の包絡曲線 (S1F 波 1 倍、S1F 波 2 倍) と 全応力非線形解析による加速度増幅率 G_s (S1F 波 7 倍)	3-28
図 3.25	第二種地盤の加速度増幅率 G_s の包絡曲線 (S1F 波 1 倍、S1F 波 2 倍) と 全応力非線形解析による加速度増幅率 G_s (S1F 波 7 倍)	3-28
図 3.26	第三種地盤の加速度増幅率 G_s の包絡曲線 (S1F 波 1 倍、S1F 波 2 倍) と 全応力非線形解析による加速度増幅率 G_s (S1F 波 7 倍)	3-29
図 3.27	第一種地盤の応答倍率	3-29
図 3.28	第二種地盤の応答倍率	3-30
図 3.29	第三種地盤の応答倍率	3-30
図 3.30	鉄塔の損傷確率曲線	3-31
図 3.31	損傷確率曲線 (山形鋼鉄塔、鋼管鉄塔、起動変圧器、遮断器)	3-31
図 4.1	架線の形状	4-5
図 4.2	架線の解析モデル	4-5
図 4.3	改良標準波 S1F (水平動) の加速度時刻歴波形	4-6
図 4.4	改良標準波 S1F (水平動) の応答加速度スペクトル	4-6
図 4.5	改良標準波 S1F (鉛直動) の加速度時刻歴波形	4-7
図 4.6	改良標準波 S1F (鉛直動) の応答加速度スペクトル	4-7
図 4.7	固有値解析結果 (架線直角方向 1 次モード)	4-8
図 4.8	固有値解析結果 (架線直角方向 3 次モード)	4-8
図 4.9	固有値解析結果 (鉛直方向 3 次モード)	4-9
図 4.10	固有値解析結果 (鉛直方向 4 次モード)	4-9
図 4.11	固有値解析結果 (鉛直方向 5 次モード)	4-10
図 4.12	架線の加振方向	4-10

1. 序 論

1.1 目的

原子力プラントの地震に係る確率論的安全評価（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。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、送電鉄塔等が挙げられるが、これまでの地震 PSA では、起動変圧器を代表的な機器として設定し、外部電源喪失の発生確率を、起動変圧器の耐力を使用して算出している⁽²⁾。しかし、1999 年の台湾集集地震では、外部電源系統の基幹部である送電鉄塔が倒壊した事例が多数報告されている。そのため、外部電源喪失事象の発生確率をより現実的に評価するためには、プラント周辺の外部電源系統を含めた損傷確率の評価が必要である。

平成 17 年度～平成 18 年度の作業⁽³⁾、⁽⁴⁾において、鋼管鉄塔及び山型鋼鉄塔を対象として損傷確率を算出し、既往の地震 PSA 評価において安全上重要であると判断されている碍管付き起動変圧器及び空気遮断器の損傷確率と比較することによって、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評価した。しかし、これまでの評価では、基礎に直接地震波を入力し、表層地盤の地震動増幅特性は考慮していないため、鉄塔の損傷確率をより精度良く評価するためには、表層地盤の地震動増幅特性が送電鉄塔の応答に与える影響を考慮する必要がある。

本作業では、送電鉄塔の位置する表層地盤の地震動増幅特性を考慮した鉄塔の地震時損傷確率を算出し、開閉所変電設備の損傷確率と比較して、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評価した。また、架線の地震応答が送電鉄塔の応答に及ぼす影響を評価するための基礎データとして、架線単体の地震応答解析を行い、その応答特性を把握した。

1.2 本作業の概要

外部電源系統の機能喪失確率評価の流れを以下に示す。

(1) 外部電源系統の機能喪失確率評価手法の概要

外部電源系統を構成する機器損傷の関連をフォールトツリー（FT：Fault Tree）で表し、機能喪失を評価する上で重要な機器を特定し、各機器の損傷確率を基に外部電源系統の機能喪失確率を評価する手法を整備した。

(2) 送電鉄塔の地震時損傷確率評価

鋼管鉄塔及び山形鋼鉄塔を対象に、表層地盤の増幅特性を考慮した送電鉄塔の地震時損傷確率を評価した。

(3) 外部電源系統の機能喪失確率評価

送電鉄塔の地震時における損傷確率を算出し、起動変圧器及び遮断器の損傷確率と比較し、送電鉄塔の損傷が外部電源喪失発生確率に及ぼす影響を評価した。

(4) 架線の地震応答解析

電力中央研究報告「UHV 赤城実規模試験の動的試験」^{(5)~(9)}（以下、「電中研報告」という）に掲載されている架線モデルを使用して架線単体の地震応答解析を行い、架線の応答特性を把握した。

2. 外部電源系統の機能喪失確率評価手法の概要

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、これまでの地震 PSA では、起動変圧器の耐力を使用して算出している。

2.2 外部電源系統の機能喪失確率評価手法

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」とは、外部電源(電力系統又は主発電機)からの電力を原子炉施設に供給するための一連の設備を言い、発電所内の開閉所を起点とし、変電所を中継点として二回線以上の送電線により電力系統に接続している。開閉所及び変電所には、変圧器、遮断器、断路器等の機器がある。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⁽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。同図に示す機器の中から、送電鉄塔、起動変圧器及び遮断器を評価対象機器として選定した。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されている機器であり、送電鉄塔は地震 PSA において、これまで検討されていなかった機器である。送電鉄塔には鋼管鉄塔と山型鋼鉄塔の 2 つのタイプがある。

機構では、平成 17 年度～平成 18 年度の作業⁽³⁾、⁽⁴⁾において、表層地盤の地震動増幅特性を考慮しない鋼管鉄塔及び山型鋼鉄塔を対象として損傷確率を算出し、起動変圧器及び遮断器の損傷確率と比較することによって、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評価した。

本作業では、送電鉄塔の位置する表層地盤の地震動増幅特性を考慮した鉄塔の地震時損傷確率を算出し、起動変圧器及び遮断器の損傷確率と比較して、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評価した。

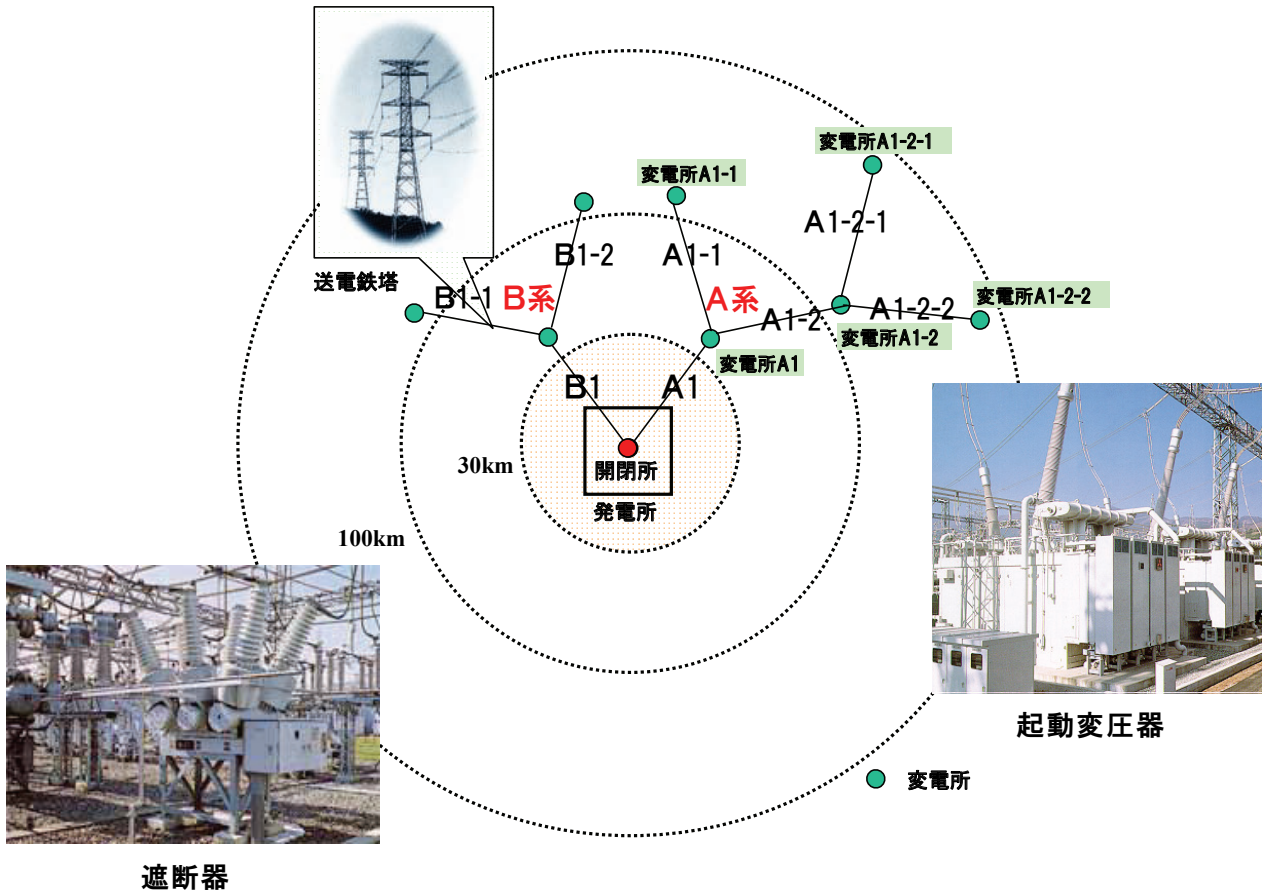


図 2.1 外部電源系統の模式図

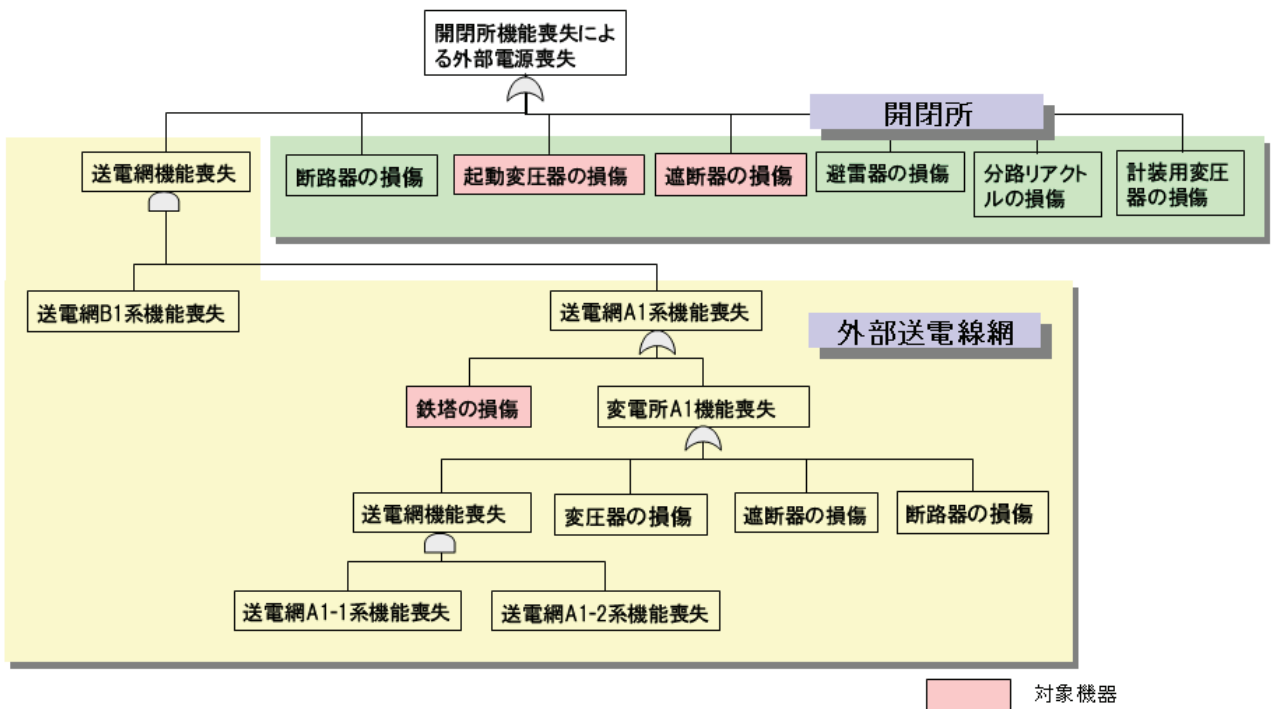


図 2.2 外部電源系統の FT 解析モデル

3. 送電鉄塔の地震時損傷確率評価

電中研報告^{(5)~(9)}に掲載されている鋼管鉄塔及び「送電用鉄塔鉄柱の設計」⁽¹⁰⁾に掲載されている山形鋼鉄塔を対象として、表層地盤の地震動増幅特性を考慮した送電鉄塔の地震時損傷確率を評価した。

3.1 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。送電鉄塔の位置する表層地盤による加速度の増幅率（解放基盤表面と地表面の間の加速度応答スペクトル比）を求め、表層地盤の応答倍率を算定した。この応答倍率を表層地盤の地震動増幅特性を考慮しない鉄塔の応答評価結果^{(3)・(4)}に掛けて表層地盤の地震動増幅特性を考慮した鉄塔の応答を評価した。鉄塔の耐力は、表層地盤の地震動増幅特性を考慮しない鉄塔の耐力^{(3)・(4)}を使用した。鉄塔の応答及び耐力はばらつきを考慮した分布関数で表現される。

鉄塔の損傷確率の算出手順を図 3.1 に、表層地盤による加速度の増幅のイメージ図を図 3.2 に示す。図 3.2 中に示す「解放基盤表面」とは、基盤（概ね第三紀層及びそれ以前の堅牢な岩盤）面上の表層や構造物がないものとして仮想的に設定する自由表面であって、ほぼ水平で相当な広がりを持つと想定される基盤の表面をいう。

3.2 表層地盤の応答倍率の算定

地盤応答の解析手法としては、応答スペクトルを用いた解析法（以下、「応答スペクトル法」という。）と時刻歴波形を用いた地震応答解析による方法（以下、「時刻歴応答解析法」という。）の 2 種類がある。また、時刻歴応答解析法は、地盤物性の非線形性の取扱い方法により「等価線形解析」と「全応力非線形解析」に分けることができる。以下に、3 種類の解析法について述べる。

(1) 応答スペクトル法

応答スペクトル法の考えを用いた計算法の一つである限界耐力計算法（以下、「限耐法」という。）では、表層地盤を等価な一層地盤に置換し、解放基盤表面で設定された入力地震動の応答スペクトルに表層地盤の非線形増幅率を掛け合わせることで地表面の応答スペクトルを評価する。

(2) 等価線形解析

等価線形解析は、地震時の地盤物性値の時間的变化は考慮せず、全時間同じ物性値を用いて線形の時刻歴応答解析を行う方法である。地盤の非線形性は等価剛性と等価減衰定数を設定す

ることで考慮する。ただし、地震動のレベルが大きく、土のせん断歪みが等価線形解析の適用範囲を超える場合は、全応力非線形解析を用いる必要がある。

(3) 全応力非線形解析

全応力非線形解析は、地盤物性の時間的変化を非線形モデルで逐次評価する方法である。土の非線形特性は骨格曲線と履歴曲線で定義された応力～歪み関係を用いて評価する。

地盤応答の解析手法のメニューを図 3.3 に示す。

建設省告示第 1457 号に定められている地盤種別ごとに表層地盤による加速度の増幅率を①制限耐法、②等価線形解析、③全応力非線形解析の 3 種類の解析手法により求め、表層地盤の応答倍率を算定した。

制限耐法による加速度増幅率の算出は、平成 12 年建設省告示第 1457 号第 7 第一号に規定されている式に基づき、「限界耐力計算法の計算例とその解説」⁽¹¹⁾の方法に準拠して行った。

等価線形解析には SHAKE コード、全応力非線形解析には SANNOS コードを用いた。全応力非線形解析の非線形モデルは Rmberg-Osgood (R-O) モデルを使用した。

3.2.1 地盤モデル

対象地盤は、地盤の一次固有周期により分類された第一種地盤、第二種地盤、第三種地盤の 3 種とした。地盤各層の層厚、せん断波速度 V_s 、N 値、初期せん断剛性等をパラメータとして、各地盤種別の一次固有周期を満足する地盤モデルを作成した。地盤種別と固有周期との対応⁽¹²⁾を表 3.1 に示す。

地盤の一次固有周期 T_G は、1/4 波長則と呼ばれる簡易な近似解法⁽¹¹⁾に基づき、次式により算出した。

$$T_G = 4 \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{V_{s_i}} \dots\dots\dots (式 3.1)$$

ここで、

T_G : 地盤の 1 次固有周期 (s)

H_i : 地盤の各層の層厚 (m)

V_{s_i} : 地盤の各層のせん断波速度 (m/s)

V_s 値の算出は、N 値および地質年代を設定した後、次式⁽¹³⁾により算出した。

$$V_s = 68.79 N^{0.171} H^{0.199} Y_g S_i \dots\dots\dots (式 3.2)$$

ここで、

V_s' : 換算せん断波速度 (m/s)

N : N 値

H : 地表面からの深さ (m)

Y_g : 地質年代係数

S_t : 土質に応じた係数

地質年代係数を表 3.2 に、土質に応じた係数を表 3.3 に示す。

初期せん断剛性 G_0 は、弾性論に基づき、次式により算出した。

$$G_0 = \rho V_s^2 \dots\dots\dots (式 3.3)$$

ここで、

V_s : せん断波速度 (m/s)

ρ : 地盤の質量密度 ($t \cdot s^2/m^4$)

解放基盤表面のせん断波速度は、地盤種別によらず $V_s=500m/s$ とした。作成した地盤モデルを表 3.4～表 3.23 に示す。

3.2.2 地盤の地震応答解析

解放基盤表面に入力する地震波は、各手法とも改良標準波 $S_1F^{(1)}$ (高地震帯用、M8.4、震源距離 90km、減衰定数 5%) を用いた。(以下、「 S_1F 波 1 倍」という。) また、入力地震動の大きさによる影響を評価するために、 S_1F 波 1 倍の最大加速度が 2 倍及び 7 倍 (解放基盤表面上の最大値で 2000Gal に相当) になるように補正した時刻歴波形 (以下、それぞれ「 S_1F 波 2 倍」、「 S_1F 波 7 倍」という。) を入力地震動とする解析を行った。

解析ケースを表 3.24 に、改良標準波 S_1F の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトルを図 3.4～図 3.5 に示す。

3.2.3 加速度増幅率評価結果

(1) 限耐法による加速度増幅率

第一種地盤 (岩盤 : 固有周期 0.16 秒～0.2 秒) の加速度増幅率を図 3.6～図 3.7 に示す。図 3.6 より、 S_1F 波 1 倍を入力地震動とした加速度増幅率は、固有周期近傍の 0.2 秒付近に最大値が見られた。また、 S_1F 波 2 倍を入力地震動とした場合 (図 3.7 参照) は、加速度増幅率が小さくなり、最大値が長周期側にシフトしている。これは入力地震動が大きくなると地盤が塑性化し、地盤の履歴減衰効果が大きくなるためである。

第二種地盤（固有周期 0.33 秒～0.71 秒）の加速度増幅率を図 3.8～図 3.9 に示す。図 3.8 より、 S_1F 波 1 倍を入力地震動とした加速度増幅率は、固有周期近傍の 0.3 秒～0.9 秒付近に最大値が見られた。第一種地盤（図 3.6 参照）と比べると、最大値が長周期側にシフトしていることが分かる。また、入力地震動を大きくした場合（図 3.9 参照）は、第一種地盤と同様に加速度増幅率が小さくなり、最大値が長周期側にシフトする傾向が見られた。

第三種地盤（軟弱地盤：固有周期 0.77 秒～1.17 秒）の加速度増幅率を図 3.10～図 3.11 に示す。図 3.10 より、 S_1F 波 1 倍を入力地震動とした加速度増幅率は、0.8 秒～1.7 秒付近に最大値が見られた。第一種地盤（図 3.6 参照）及び第二種地盤（図 3.8 参照）と比べると、最大値がさらに長周期側にシフトしていることが分かる。また、入力地震動を大きくした場合（図 3.11 参照）は、第一種地盤及び第二種地盤と同様に加速度増幅率が小さくなり、最大値が長周期側にシフトする傾向が見られた。

(2) 等価線形解析による加速度増幅率

第一種地盤（岩盤：固有周期 0.18 秒～0.2 秒）の加速度増幅率を図 3.12～図 3.13 に示す。図 3.12 より、 S_1F 波 1 倍を入力地震動とした加速度増幅率は、固有周期近傍の 0.2 秒付近に最大値が見られた。また、入力地震動を大きくした場合（図 3.13 参照）は、加速度増幅率が小さくなり、最大値が長周期側にシフトする傾向が見られた。

第二種地盤（固有周期 0.61 秒～0.71 秒）及び第三種地盤（軟弱地盤：固有周期 0.77 秒～1.17 秒）の加速度増幅率を図 3.14～図 3.17 に示す。いずれも固有周期近傍に最大値が見られ、入力地震動が大きいほど加速度増幅率が小さくなり、最大値が長周期側にシフトする傾向が見られた。

(3) 限耐法及び等価線形解析による加速度増幅率の比較

第一種地盤、第二種地盤及び第三種地盤の限耐法及び等価線形解析による加速度増幅率の平均とそれらの包絡曲線を図 3.18～図 3.23 に示す。限耐法による加速度増幅率が概ね等価線形解析による加速度増幅率を上回る傾向が見られた。これは限耐法が地盤の減衰を等価線形解析よりも小さく評価しているため応答を過大に評価したためである。したがって、限耐法と等価線形解析の包絡曲線を用いれば保守的な評価となる。

(4) 入力地震動の大きさによる影響

S_1F 波 7 倍（解放基盤表面上の最大値で 2000Gal に相当）を入力地震動とした加速度増幅率を S_1F 波 1 倍及び S_1F 波 2 倍を入力地震動とした加速度増幅率の包絡曲線（図 3.18～図 3.23 参照）と併せて図 3.24～図 3.26 に示す。 S_1F 波 7 倍を入力地震動とした加速度増幅率の算出

には全応力非線形解析を用いた。S₁F 波 7 倍を入力地震動とした加速度増幅率は、S₁F 波 1 倍及び S₁F 波 2 倍を入力地震動とした場合と比べて小さくなり、最大値が長周期側にシフトする傾向が見られた。この傾向は第三種地盤、第二種地盤、第一種地盤の順で大きい。加速度増幅率は、地盤周期が長いモデルほど、すなわち軟らかい地盤ほど小さくなる傾向が見られた。

3.2.4 表層地盤の応答倍率の評価

送電鉄塔は、山岳、丘陵、畑、水田及び河川敷等広範囲に建設されるため、各種の異なった地盤条件を有し、標準的な地盤モデルを設定するのは困難である。そこで、保守的な評価となるように最も厳しい評価となる限耐法と等価線形解析による加速度増幅率の包絡曲線を用い、各地盤種別の固有周期帯における加速度増幅率の最大値を各地盤種別の応答倍率とした。図 3.27～図 3.29 より、第一種地盤、第二種地盤及び第三種地盤の応答倍率をそれぞれ 2.4、2.3、2.5 とした。

図 3.28 より、山形鋼鉄塔の損傷確率評価に用いる応答倍率は、山形鋼鉄塔の固有周期と近く共振による加速度応答の増大が考えられる第二種地盤の応答倍率 2.3 とした。また、図 3.29 より、鋼管鉄塔の損傷確率評価に用いる応答倍率は、鋼管鉄塔の固有周期と近い第三種地盤の応答倍率 2.5 とした。

3.3 送電鉄塔の損傷確率評価

3.2 節で求めた表層地盤の応答倍率を用いて、送電鉄塔の地震時損傷確率を試算した。地震動レベルは、当機構において代表的な BWR プラントの地震 PSA で評価対象としている最大地震動加速度 300Gal～1300 Gal の範囲とした。

3.3.1 損傷確率の算出方法

鉄塔の損傷確率 $P_{CF}(\alpha)$ は、鉄塔の応答 $f_R(\alpha, X)$ 及び耐力 $f_C(X)$ を互いに独立な確率密度関数として定義し、応答 $f_R(\alpha, X)$ が耐力 $f_C(X)$ を上回る条件付き確率として求める。鉄塔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、解放基盤表面で 300Gal、450Gal、600Gal、750Gal、900Gal、1100Gal、1300Gal の 7 地震動レベルとした。

$$P(\alpha) = \int_0^{\infty} f_R(\alpha, X) \left\{ \int_0^X f_C(X) dX \right\} dX \quad \dots\dots\dots \text{(式 3.4)}$$

ここで、

$f_R(\alpha, X)$: 鉄塔の応答に対する確率密度関数

- $f_c(X)$: 鉄塔の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

3.3.2 損傷確率解析条件

鉄塔の耐力データは、平成 17 年度～平成 18 年度に実施した表層地盤の増幅特性を考慮しない鉄塔の現実的耐力を使用した。山形鋼鉄塔の損傷モードは鉄塔支持部支柱材の座屈とし、鋼管鉄塔の損傷モードは鉄塔基礎部の軸力とした。表層地盤の増幅特性を考慮しない山形鋼鉄塔及び鋼管鉄塔の現実的耐力を表 3.25～表 3.26 に示す。

応答データは、平成 17 年度～平成 18 年度に実施した表層地盤の増幅特性を考慮しない鉄塔の現実的応答評価結果に 3.2.4 項で算出した山形鋼鉄塔の応答倍率 2.3 及び鋼管鉄塔の応答倍率 2.5 を乗じた値を使用した。表層地盤の増幅特性を考慮しない山形鋼鉄塔及び鋼管鉄塔の現実的応答を表 3.27～表 3.28 に示す。

表層地盤の増幅特性を考慮した山形鋼鉄塔及び鋼管鉄塔の応答及び耐力を表 3.29～表 3.30 に示す。

3.3.3 損傷確率評価結果

表層地盤の増幅特性を考慮した山形鋼鉄塔及び鋼管鉄塔の損傷確率曲線を表層地盤の増幅特性を考慮しない鉄塔の損傷確率曲線と併せて図 3.30 に示す。表層地盤の増幅特性を考慮した場合、考慮しない場合に比べて、地震動レベル 600Gal において山形鋼鉄塔で約 4.5 倍、鋼管鉄塔で約 8 倍損傷確率が大きくなった。しかし、この評価結果は保守的な評価となるように最も厳しい評価となる応答倍率を設定したためであり、周期帯によっては表層地盤の応答低減のため損傷確率が小さくなる場合もある。

3.4 外部電源系統の機能喪失確率評価

3.3.3 項で算出した表層地盤の増幅特性を考慮した山形鋼鉄塔及び鋼管鉄塔の改良標準波 S₁F に対する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図 3.31 に示す。

地震動レベルが小さいほどその発生確率は大きく、地震動レベルが大きいほどその発生確率は小さい。図 3.31 より、地震動レベルが小さい領域においては、地震時の損傷確率は、起動変圧器、山形鋼鉄塔、鋼管鉄塔、遮断器の順に大きく、外部電源喪失の発生確率は、起動変圧器の損傷が

支配的となることが分かった。鉄塔の損傷確率は、起動変圧器に次いで大きな値となっているが、これは保守的な評価となるように最も厳しい評価となる応答倍率を設定したためであるが、それでも鉄塔の損傷確率が起動変圧器の損傷確率を上回らないことを確認した。

起動変圧器及び遮断器については、開閉所を免震化することにより損傷確率を低減できるとの見通しを得ている⁽⁴⁾。

表 3.1 地盤種別

地盤種別	地盤の一次固有周期 T_g (秒)	地盤の特性
第一種地盤	$T_g \leq 0.2$	岩盤
第二種地盤	$0.2 < T_g \leq 0.75$	第一種及び第三種以外のもの
第三種地盤	$0.75 < T_g$	軟弱地盤

表 3.2 地質年代係数

	沖積層	洪積層
Y_g	1.000	1.303

表 3.3 土質に応じた係数

	粘土	砂			砂礫	礫
		細砂	中砂	粗砂		
St	1.000	1.086	1.066	1.135	1.153	1.448

表 3.4 地盤モデル No.1 (第一種地盤 粘性土 $T_G=0.198$)

層	地質年代	土質	層厚 d(m)	深度 H(m)	平均 N値	質量密度 ρ ($t \cdot sec^2/m^4$)	年代係数 γ_g	土質係数 St	せん断剛性 $G_0(kN/m^2)$	換算Vs (m/s)	ΔT_i
1	洪積層	粘土	2.0	1.0	4	1.60	1.303	1.000	20,652	114	0.070
2	洪積層	粘土	4.0	4.0	7	1.70	1.303	1.000	46,135	165	0.097
3	洪積層	砂礫	2.0	7.0	24	2.00	1.303	1.153	137,407	262	0.031
4	基盤	礫	-	8.0		2.10			525,000	$T_G=$	0.198

表 3.5 地盤モデル No.2 (第一種地盤 砂質土 $T_G=0.184$)

層	地質年代	土質	層厚 d(m)	深度 H(m)	平均 N値	質量密度 ρ ($t \cdot sec^2/m^4$)	年代係数 γ_g	土質係数 St	せん断剛性 $G_0(kN/m^2)$	換算Vs (m/s)	ΔT_i
1	洪積層	細砂	4.0	2.0	15	1.90	1.303	1.086	59,894	178	0.090
2	洪積層	細砂	4.0	6.0	25	2.00	1.303	1.086	116,260	241	0.066
3	洪積層	砂礫	2.0	9.0	35	2.00	1.303	1.153	172,778	294	0.027
4	基盤	礫	-	10.0		2.10			525,000	$T_G=$	0.184

表 3.6 地盤モデル No.3 (第一種地盤 互層 $T_G=0.190$)

層	地質年代	土質	層厚 d(m)	深度 H(m)	平均 N値	質量密度 ρ ($t \cdot sec^2/m^4$)	年代係数 γ_g	土質係数 St	せん断剛性 $G_0(kN/m^2)$	換算Vs (m/s)	ΔT_i
1	洪積層	粘土	2.0	1.0	5	1.60	1.303	1.000	22,290	118	0.068
2	洪積層	中砂	4.0	4.0	15	2.00	1.303	1.066	80,044	200	0.080
3	洪積層	粘土	2.0	7.0	8	1.80	1.303	1.000	63,888	188	0.042
4	基盤	礫	-	8.0		2.10			525,000	$T_G=$	0.190

表 3.7 地盤モデル No.4 (第一種地盤 互層 $T_G=0.163$)

層	地質年代	土質	層厚 d(m)	深度 H(m)	平均 N値	質量密度 ρ ($t \cdot sec^2/m^4$)	年代係数 γ_g	土質係数 St	せん断剛性 $G_0(kN/m^2)$	換算Vs (m/s)	ΔT_i
1	洪積層	粗砂	4.0	2.0	15	1.90	1.303	1.135	65,421	186	0.086
2	洪積層	粘土	2.0	5.0	6	1.80	1.303	1.000	50,644	168	0.048
3	洪積層	砂礫	2.0	7.0	35	2.00	1.303	1.153	156,332	280	0.029
4	基盤	礫	-	8.0		2.10			525,000	$T_G=$	0.163

表 3.8 地盤モデル No.5 (第二種地盤 粘性土 $T_G=0.704$)

層	地質年代	土質	層厚 d(m)	深度 H(m)	平均 N値	質量密度 ρ ($t \cdot sec^2/m^4$)	年代係数 γ_g	土質係数 St	せん断剛性 $G_0(kN/m^2)$	換算Vs (m/s)	ΔT_i
1	沖積層	粘土	6.0	3.0	2	1.60	1.000	1.000	14,860	96	0.249
2	沖積層	粘土	4.0	8.0	1	1.70	1.000	1.000	18,405	104	0.154
3	沖積層	粘土	4.0	12.0	3	1.70	1.000	1.000	31,491	136	0.118
4	洪積層	粘土	4.0	16.0	4	1.90	1.303	1.000	73,933	197	0.081
5	洪積層	中砂	4.0	20.0	20	2.00	1.303	1.066	167,589	289	0.055
6	洪積層	砂礫	4.0	24.0	25	2.00	1.303	1.153	227,535	337	0.047
7	基盤	礫	-	26.0		2.10			525,000	$T_G=$	0.704

表 3.9 地盤モデル No.6 (第二種地盤 粘性土 $T_G=0.449$)

層	地質年代	土質	層厚 d(m)	深度 H(m)	平均 N値	質量密度 ρ ($t \cdot sec^2/m^4$)	年代係数 γ_g	土質係数 St	せん断剛性 $G_0(kN/m^2)$	換算Vs (m/s)	ΔT_i
1	沖積層	粘土	4.0	2.0	1	1.60	1.000	1.000	9,977	79	0.203
2	洪積層	粘土	2.0	5.0	5	1.70	1.303	1.000	44,939	163	0.049
3	洪積層	粘土	2.0	7.0	4	1.80	1.303	1.000	50,404	167	0.048
4	洪積層	粘土	4.0	10.0	15	1.80	1.303	1.000	91,293	225	0.071
5	洪積層	中砂	2.0	13.0	20	2.00	1.303	1.066	141,184	266	0.030
6	洪積層	砂礫	4.0	16.0	35	2.00	1.303	1.153	217,240	330	0.049
7	基盤	礫	-	18.0		2.10			525,000	$T_G=$	0.449

表 3.10 地盤モデル No.7 (第二種地盤 砂質土 $T_G=0.612$)

層	地質年代	土質	層厚 d(m)	深度 H(m)	平均 N値	質量密度 ρ ($t \cdot sec^2/m^4$)	年代係数 γ_g	土質係数 St	せん断剛性 $G_0(kN/m^2)$	換算Vs (m/s)	ΔT_i
1	沖積層	細砂	10.0	5.0	6	1.90	1.000	1.086	37,135	140	0.286
2	沖積層	中砂	4.0	12.0	8	2.00	1.000	1.066	58,880	172	0.093
3	洪積層	細砂	4.0	16.0	15	1.90	1.303	1.086	137,030	269	0.060
4	洪積層	細砂	4.0	20.0	20	1.90	1.303	1.086	165,240	295	0.054
5	洪積層	粗砂	4.0	24.0	20	2.00	1.303	1.135	204,285	320	0.050
6	洪積層	砂礫	6.0	29.0	25	2.00	1.303	1.153	245,334	350	0.069
7	基盤	礫	-	32.0		2.10			525,000	$T_G=$	0.612

表 3.11 地盤モデル No.8 (第二種地盤 砂質土 $T_G=0.368$)

層	地質年代	土質	層厚 d(m)	深度 H(m)	平均 N値	質量密度 ρ ($t \cdot sec^2/m^4$)	年代係数 γ_g	土質係数 St	せん断剛性 $G_0(kN/m^2)$	換算Vs (m/s)	ΔT_i
1	沖積層	細砂	2.0	1.0	6	1.60	1.000	1.086	16,480	101	0.079
2	沖積層	中砂	2.0	3.0	10	1.90	1.000	1.066	34,771	135	0.059
3	沖積層	粗砂	4.0	6.0	15	2.00	1.000	1.135	62,806	177	0.090
4	洪積層	細砂	4.0	10.0	25	2.00	1.303	1.086	142,470	267	0.060
5	洪積層	中砂	4.0	14.0	30	2.00	1.303	1.066	167,039	289	0.055
6	洪積層	砂礫	2.0	17.0	35	2.00	1.303	1.153	222,545	334	0.024
7	基盤	礫	-	18.0		2.10			525,000	$T_G=$	0.368

表 3.12 地盤モデル No.9 (第二種地盤 互層 $T_G=0.711$)

層	地質年代	土質	層厚 d(m)	深度 H(m)	平均 N値	質量密度 ρ ($t \cdot sec^2/m^4$)	年代係数 γ_g	土質係数 St	せん断剛性 $G_0(kN/m^2)$	換算Vs (m/s)	ΔT_i
1	沖積層	粘土	6.0	3.0	1	1.60	1.000	1.000	11,724	86	0.280
2	沖積層	砂礫	2.0	7.0	20	2.00	1.000	1.153	76,040	195	0.041
3	沖積層	粘土	6.0	11.0	3	1.80	1.000	1.000	32,209	134	0.179
4	洪積層	中砂	4.0	16.0	20	2.00	1.303	1.066	153,347	277	0.058
5	洪積層	粘土	6.0	21.0	7	1.90	1.303	1.000	99,761	229	0.105
6	洪積層	粗砂	4.0	26.0	25	2.00	1.303	1.135	227,623	337	0.047
7	基盤	礫	-	28.0		2.10			525,000	$T_G=$	0.711

表 3.13 地盤モデル No.10 (第二種地盤 互層 $T_G=0.620$)

層	地質年代	土質	層厚 d(m)	深度 H(m)	平均 N値	質量密度 ρ ($t \cdot sec^2/m^4$)	年代係数 Y_g	土質係数 St	せん断剛性 $G_0(kN/m^2)$	換算 V_s (m/s)	ΔT_i
1	沖積層	粘土	8.0	4.0	1	1.60	1.000	1.000	13,146	91	0.353
2	洪積層	中砂	6.0	11.0	20	1.90	1.303	1.066	125,497	257	0.093
3	洪積層	粘土	10.0	19.0	8	1.80	1.303	1.000	95,063	230	0.174
4	基盤	礫	-	24.0		2.10			525,000	$T_G=$	0.620

表 3.14 地盤モデル No.11 (第二種地盤 互層 $T_G=0.506$)

層	地質年代	土質	層厚 d(m)	深度 H(m)	平均 N値	質量密度 ρ ($t \cdot sec^2/m^4$)	年代係数 Y_g	土質係数 St	せん断剛性 $G_0(kN/m^2)$	換算 V_s (m/s)	ΔT_i
1	沖積層	中砂	2.0	1.0	10	1.90	1.000	1.066	22,455	109	0.074
2	沖積層	粘土	6.0	5.0	2	1.70	1.000	1.000	19,348	107	0.225
3	洪積層	細砂	4.0	10.0	16	1.90	1.303	1.086	116,188	247	0.065
4	洪積層	粘土	2.0	13.0	10	1.80	1.303	1.000	88,219	221	0.036
5	洪積層	中砂	4.0	16.0	20	2.00	1.303	1.066	153,347	277	0.058
6	洪積層	砂礫	4.0	20.0	25	2.00	1.303	1.153	211,609	325	0.049
7	基盤	礫	-	22.0		2.10			525,000	$T_G=$	0.506

表 3.15 地盤モデル No.12 (第二種地盤 互層 $T_G=0.329$)

層	地質年代	土質	層厚 d(m)	深度 H(m)	平均 N値	質量密度 ρ ($t \cdot sec^2/m^4$)	年代係数 Y_g	土質係数 St	せん断剛性 $G_0(kN/m^2)$	換算 V_s (m/s)	ΔT_i
1	沖積層	細砂	8.0	4.0	10	1.90	1.000	1.086	40,465	146	0.219
2	洪積層	粘土	4.0	10.0	6	1.80	1.303	1.000	66,733	193	0.083
3	洪積層	砂礫	2.0	13.0	25	2.00	1.303	1.153	178,268	299	0.027
4	基盤	礫	-	14.0		2.10			525,000	$T_G=$	0.329

表 3.16 地盤モデル No.13 (第三種地盤 粘性土 $T_G=1.168$)

層	地質年代	土質	層厚 d(m)	深度 H(m)	平均 N値	質量密度 ρ ($t \cdot sec^2/m^4$)	年代係数 Y_g	土質係数 St	せん断剛性 $G_0(kN/m^2)$	換算 V_s (m/s)	ΔT_i
1	沖積層	粘土	22.0	11.0	1	1.60	1.000	1.000	19,663	111	0.794
2	沖積層	粘土	6.0	25.0	2	1.80	1.000	1.000	38,874	147	0.163
3	沖積層	粘土	4.0	30.0	1	1.80	1.000	1.000	32,977	135	0.118
4	洪積層	粘土	6.0	35.0	8	1.90	1.303	1.000	127,964	260	0.092
5	基盤	礫	-	38.0		2.10			525,000	$T_G=$	1.168

表 3.17 地盤モデル No.14 (第三種地盤 粘性土 $T_G=0.776$)

層	地質年代	土質	層厚 d(m)	深度 H(m)	平均 N値	質量密度 ρ ($t \cdot sec^2/m^4$)	年代係数 Y_g	土質係数 St	せん断剛性 $G_0(kN/m^2)$	換算 V_s (m/s)	ΔT_i
1	沖積層	粘土	14.0	7.0	1	1.60	1.000	1.000	16,426	101	0.553
2	沖積層	粘土	2.0	15.0	2	1.80	1.000	1.000	31,722	133	0.060
3	洪積層	粘土	6.0	19.0	5	1.80	1.303	1.000	80,948	212	0.113
4	洪積層	細砂	4.0	24.0	25	1.90	1.303	1.086	191,766	318	0.050
5	基盤	礫	-	26.0		2.10			525,000	$T_G=$	0.776

表 3.18 地盤モデル No.15 (第三種地盤 砂質土 $T_G=1.007$)

層	地質年代	土質	層厚 d(m)	深度 H(m)	平均 N値	質量密度 ρ ($t \cdot sec^2/m^4$)	年代係数 γ_g	土質係数 St	せん断剛性 $G_0(kN/m^2)$	換算Vs (m/s)	ΔT_i
1	沖積層	細砂	14.0	7.0	6	1.80	1.000	1.086	40,222	149	0.375
2	沖積層	細砂	10.0	19.0	8	1.90	1.000	1.086	69,705	192	0.209
3	沖積層	中砂	10.0	29.0	10	1.90	1.000	1.066	85,773	212	0.188
4	沖積層	細砂	8.0	38.0	15	1.90	1.000	1.086	113,878	245	0.131
5	洪積層	粗砂	6.0	45.0	20	2.00	1.303	1.135	262,357	362	0.066
6	洪積層	砂礫	4.0	50.0	35	2.00	1.303	1.153	341,892	413	0.039
7	基盤	礫	-	52.0		2.10			525,000	$T_G=$	1.007

表 3.19 地盤モデル No.16 (第三種地盤 砂質土 $T_G=0.773$)

層	地質年代	土質	層厚 d(m)	深度 H(m)	平均 N値	質量密度 ρ ($t \cdot sec^2/m^4$)	年代係数 γ_g	土質係数 St	せん断剛性 $G_0(kN/m^2)$	換算Vs (m/s)	ΔT_i
1	沖積層	細砂	12.0	6.0	6	1.80	1.000	1.086	37,828	145	0.331
2	沖積層	細砂	8.0	16.0	10	1.90	1.000	1.086	70,259	192	0.166
3	沖積層	中砂	4.0	22.0	11	1.90	1.000	1.066	79,389	204	0.078
4	沖積層	中砂	6.0	27.0	12	2.00	1.000	1.066	93,402	216	0.111
5	洪積層	砂礫	8.0	34.0	30	2.00	1.303	1.153	278,184	373	0.086
6	基盤	礫	-	38.0		2.10			525,000	$T_G=$	0.773

表 3.20 地盤モデル No.17 (第三種地盤 互層 $T_G=1.145$)

層	地質年代	土質	層厚 d(m)	深度 H(m)	平均 N値	質量密度 ρ ($t \cdot sec^2/m^4$)	年代係数 γ_g	土質係数 St	せん断剛性 $G_0(kN/m^2)$	換算Vs (m/s)	ΔT_i
1	沖積層	粘土	10.0	5.0	1	1.60	1.000	1.000	14,367	95	0.422
2	沖積層	中砂	8.0	14.0	10	1.90	1.000	1.066	64,192	184	0.174
3	沖積層	粘土	12.0	24.0	1	1.70	1.000	1.000	28,499	129	0.371
4	沖積層	細砂	4.0	32.0	12	1.90	1.000	1.086	98,536	228	0.070
5	沖積層	粘土	2.0	35.0	2	1.80	1.000	1.000	44,444	157	0.051
6	沖積層	砂礫	4.0	38.0	25	2.00	1.000	1.153	160,912	284	0.056
7	基盤	礫	-	40.0		2.10			525,000	$T_G=$	1.145

表 3.21 地盤モデル No.18 (第三種地盤 互層 $T_G=1.047$)

層	地質年代	土質	層厚 d(m)	深度 H(m)	平均 N値	質量密度 ρ ($t \cdot sec^2/m^4$)	年代係数 γ_g	土質係数 St	せん断剛性 $G_0(kN/m^2)$	換算Vs (m/s)	ΔT_i
1	沖積層	粘土	12.0	6.0	1	1.60	1.000	1.000	15,448	98	0.488
2	沖積層	中砂	6.0	15.0	10	1.90	1.000	1.066	65,979	186	0.129
3	沖積層	粘土	10.0	23.0	1	1.80	1.000	1.000	29,668	128	0.312
4	沖積層	粗砂	8.0	32.0	25	2.00	1.000	1.135	145,619	270	0.119
5	基盤	礫	-	36.0		2.10			525,000	$T_G=$	1.047

表 3.22 地盤モデル No.19 (第三種地盤 互層 $T_G=0.906$)

層	地質年代	土質	層厚 d(m)	深度 H(m)	平均 N値	質量密度 ρ ($t \cdot sec^2/m^4$)	年代係数 γ_g	土質係数 St	せん断剛性 $G_0(kN/m^2)$	換算Vs (m/s)	ΔT_i
1	沖積層	細砂	4.0	2.0	10	1.90	1.000	1.086	30,710	127	0.126
2	沖積層	粘土	6.0	7.0	1	1.60	1.000	1.000	16,426	101	0.237
3	沖積層	中砂	6.0	13.0	12	2.00	1.000	1.066	69,827	187	0.128
4	沖積層	粘土	6.0	19.0	1	1.70	1.000	1.000	25,968	124	0.194
5	沖積層	粗砂	8.0	26.0	16	2.00	1.000	1.135	115,091	240	0.133
6	沖積層	砂礫	6.0	33.0	25	2.00	1.000	1.153	152,126	276	0.087
7	基盤	礫	-	36.0		2.10			525,000	$T_G=$	0.906

表 3.23 地盤モデル No.20 (第三種地盤 互層 $T_G=0.767$)

層	地質年代	土質	層厚 d(m)	深度 H(m)	平均 N値	質量密度 ρ ($t \cdot sec^2/m^4$)	年代係数 γ_g	土質係数 St	せん断剛性 $G_0(kN/m^2)$	換算Vs (m/s)	ΔT_i
1	沖積層	細砂	8.0	4.0	15	1.90	1.000	1.086	46,484	156	0.205
2	沖積層	粘土	4.0	10.0	1	1.70	1.000	1.000	20,114	109	0.147
3	沖積層	砂礫	10.0	17.0	20	2.00	1.000	1.153	108,246	233	0.172
4	沖積層	粘土	8.0	26.0	1	1.80	1.000	1.000	31,152	132	0.243
5	基盤	礫	-	30.0		2.10			525,000	$T_G=$	0.767

表 3.24 解析ケース

地盤モデル No.	地盤種別	土質	地盤の1次 固有周期 (s)	限界耐力計算法		等価線形解析		全応力非 線形解析 S_1F7 倍
				S_1F1 倍	S_1F2 倍	S_1F1 倍	S_1F2 倍	
1	第一種地盤	粘性土	0.2	○	○	○	○	—
2		砂質土	0.18	○	○	○	○	—
3		互層地盤	0.19	○	○	○	○	○
4		互層地盤	0.16	○	○	—	—	—
5	第二種地盤	粘性土	0.7	○	○	○	○	—
6		粘性土	0.45	○	○	—	—	—
7		砂質土	0.61	○	○	○	○	—
8		砂質土	0.37	○	○	—	—	—
9		互層地盤	0.71	○	○	○	○	○
10		互層地盤	0.62	○	○	—	—	—
11		互層地盤	0.51	○	○	—	—	—
12		互層地盤	0.33	○	○	○	○	—
13	第三種地盤	粘性土	1.17	○	○	○	○	—
14		粘性土	0.78	○	○	—	—	—
15		砂質土	1.0	○	○	○	○	—
16		砂質土	0.77	○	○	—	—	—
17		互層地盤	1.15	○	○	○	○	○
18		互層地盤	1.05	○	○	—	—	—
19		互層地盤	0.91	○	○	—	—	—
20		互層地盤	0.77	○	○	○	○	—

注) 互層地盤とは、粘性土地盤と砂質土地盤が交互に分布している地盤をいう。

表 3.25 山形鋼鉄塔の現実的耐力（表層地盤の増幅特性を考慮しない）

評価項目	評価対象部位	耐力（強度限界値）	対数標準偏差
座屈（主柱材）	支持部	270 N/mm ²	0.1

表 3.26 鋼管鉄塔の現実的耐力（表層地盤の増幅特性を考慮しない）

評価項目	評価対象部位	耐力（強度限界値）	対数標準偏差
軸力	鉄塔基礎部	460 N/mm ²	0.1

表 3.27 山形鋼鉄塔の現実的応答（表層地盤の増幅特性を考慮しない）

評価対象部位	地震応答(286Galにおける)	応答係数	
		中央値	対数標準偏差
支持部	85 N/mm ²	1.27	0.44

表 3.28 鋼管鉄塔の現実的応答（表層地盤の増幅特性を考慮しない）

評価対象部位	地震応答(286Galにおける)	応答係数	
		中央値	対数標準偏差
鉄塔基礎部	120 N/mm ²	1.27	0.44

表 3.29 山形鋼鉄塔の応答及び耐力（表層地盤の増幅特性考慮）

入力地震動 (Gal)	応答		耐力	
	応答 (N/mm ²)	標準偏差	中央値 (N/mm ²)	標準偏差
300	205.07	0.44	270.0	0.10
450	307.60			
600	410.14			
750	512.67			
900	615.21			
1100	751.92			
1300	888.64			

表 3.30 鋼管鉄塔の応答及び耐力（表層地盤の増幅特性考慮）

入力地震動 (Gal)	応答		耐力	
	応答 (N/mm ²)	標準偏差	中央値 (N/mm ²)	標準偏差
300	314.69	0.44	460.0	0.10
450	472.03			
600	629.37			
750	786.71			
900	944.06			
1100	1153.85			
1300	1363.64			

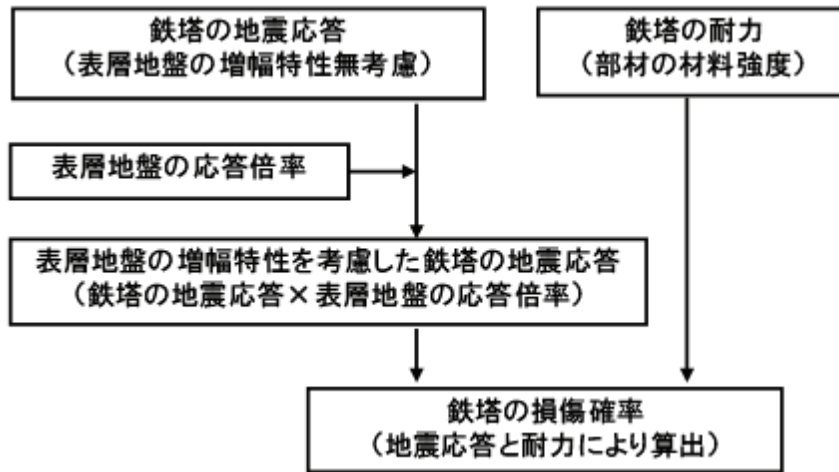


図 3.1 鉄塔の損傷確率の評価手順

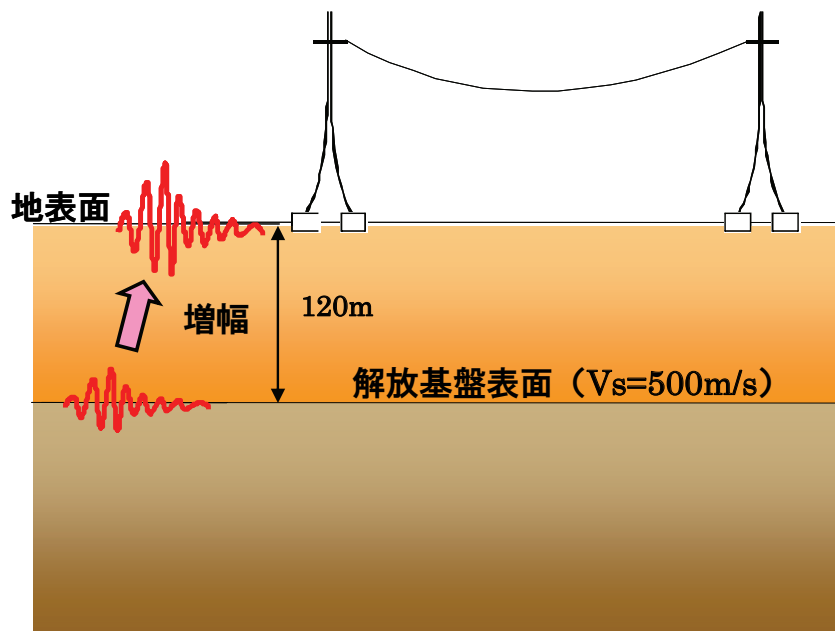


図 3.2 表層地盤による加速度の増幅のイメージ図

計算法	応答スペクトル法		時刻歴応答解析法			
	等価線形		等価線形	非線形		
	限界耐力計算法		等価線形解析	全応力非線形解析		
入力地震動と地盤増幅	解放基盤表面での応答スペクトル×表層地盤の増幅特性 		時刻歴波の等価線形解析 (SHAKE) 応答波形 		時刻歴波の非線形解析 応答波形 	

図 3.3 地盤応答の解析手法のメニュー

maxacc=286.1gal

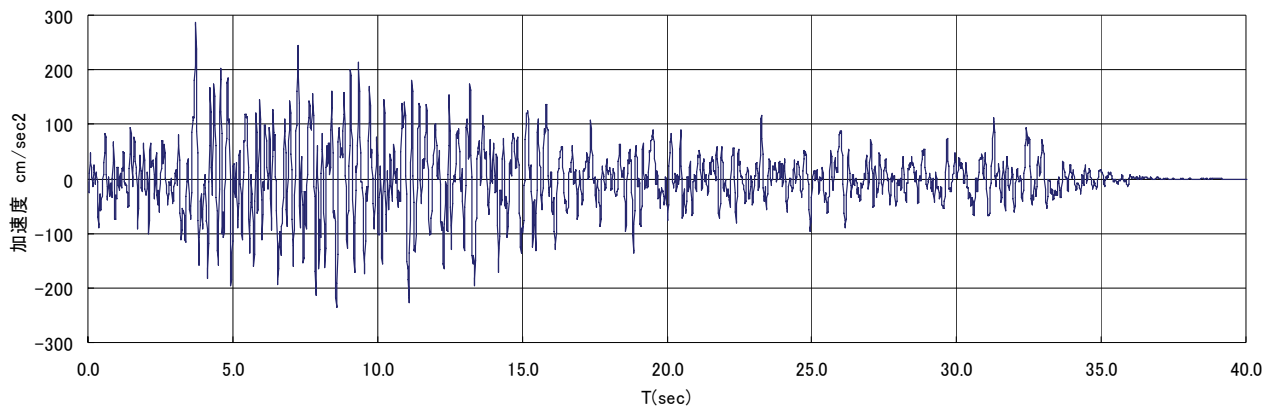


図 3.4 改良標準波 S₁F (水平動、減衰定数 5%) の加速度時刻歴波形

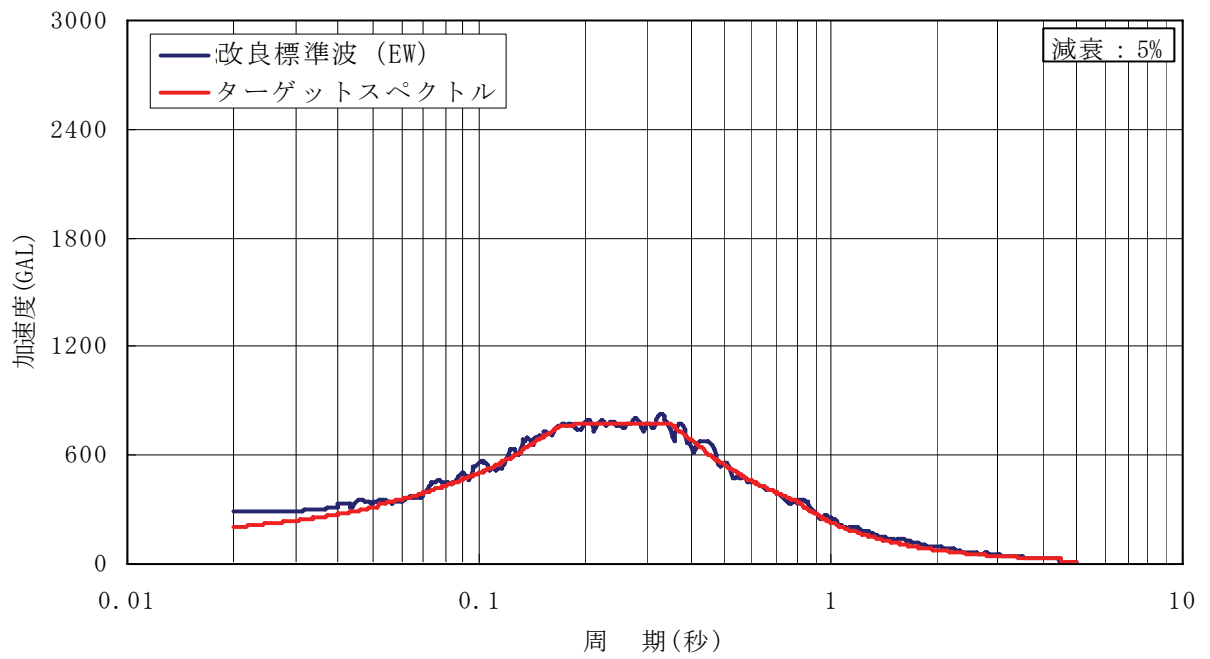


図 3.5 改良標準波 S₁F (水平動、減衰定数 5%) の応答加速度スペクトル

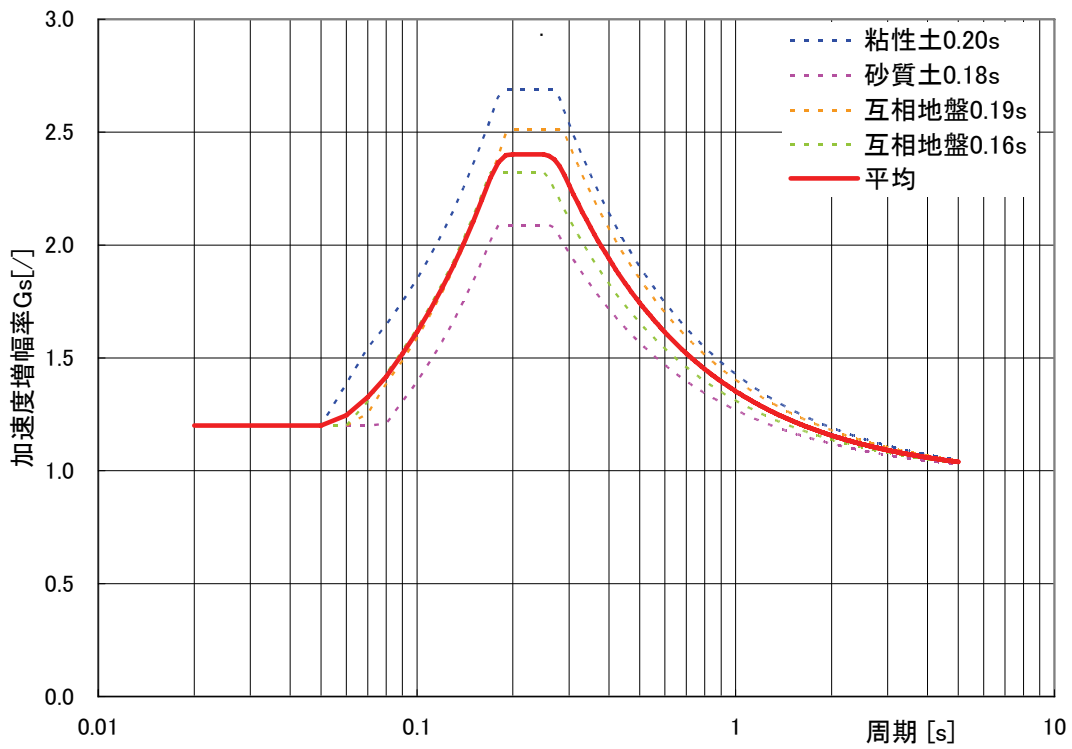


図 3.6 限耐法による加速度増幅率 G_s (第一種地盤、S1F 波 1 倍)

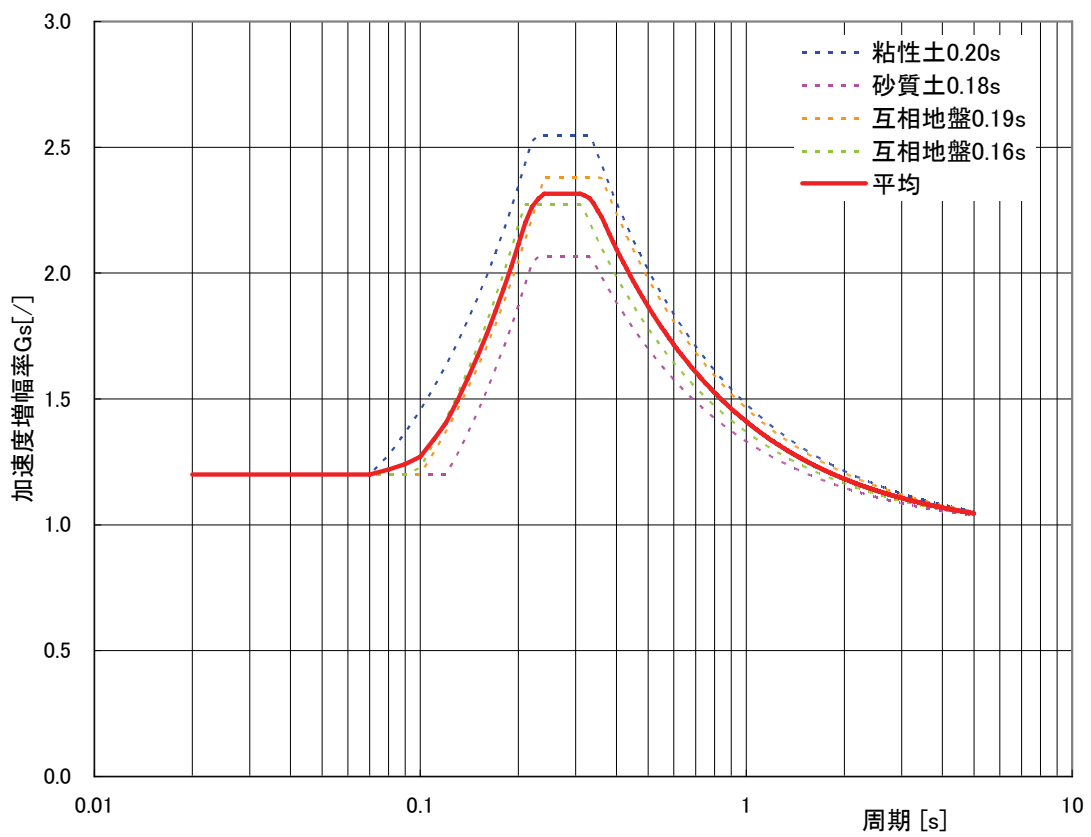


図 3.7 限耐法による加速度増幅率 G_s (第一種地盤、S1F 波 2 倍)

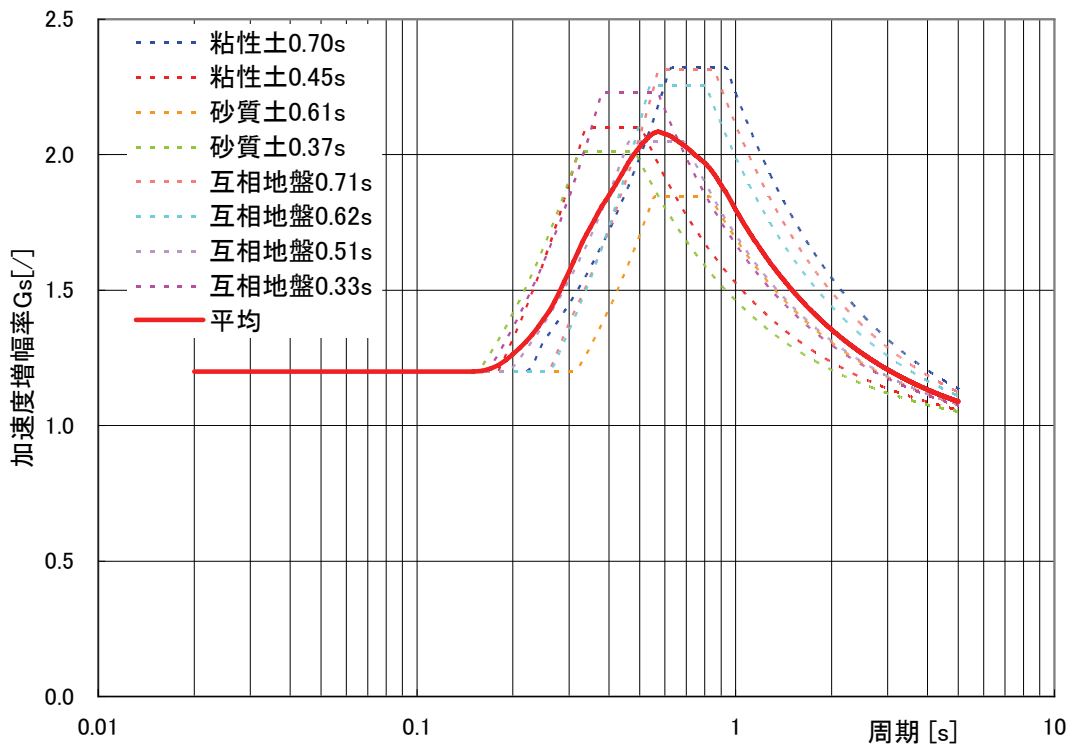


図 3.8 限耐法による加速度増幅率 G_s (第二種地盤、S1F 波 1 倍)

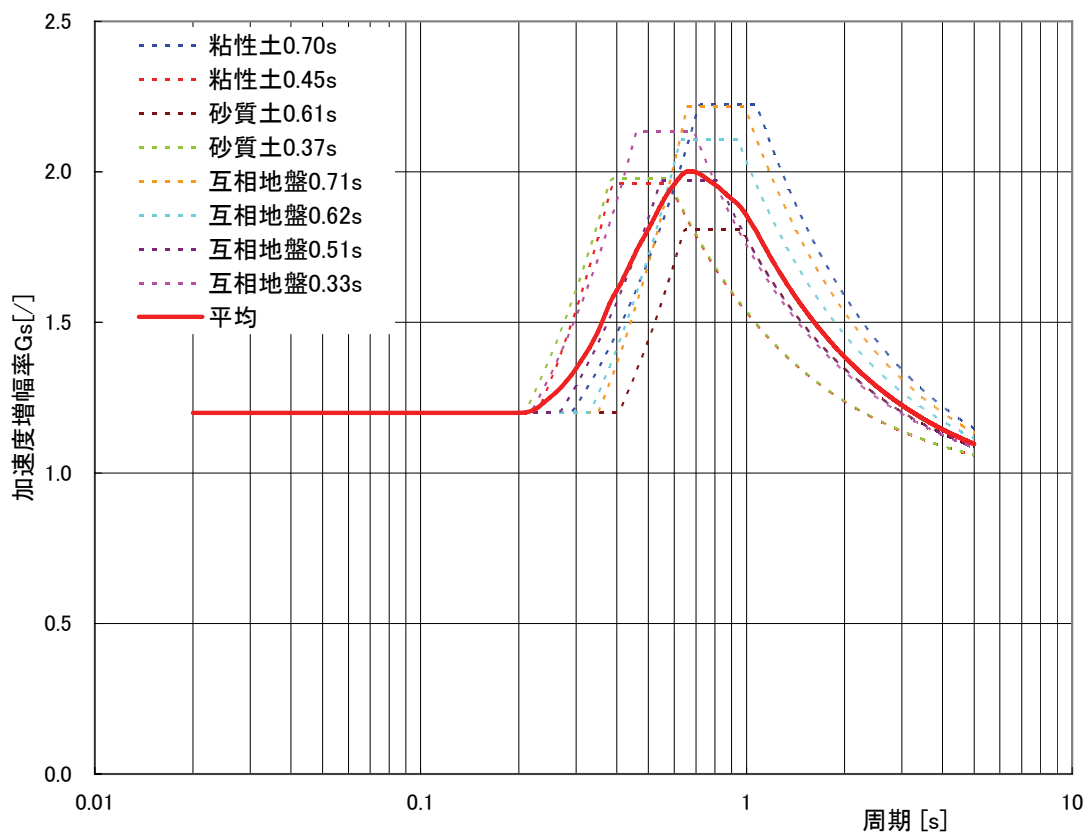


図 3.9 限耐法による加速度増幅率 G_s (第二種地盤、S1F 波 2 倍)

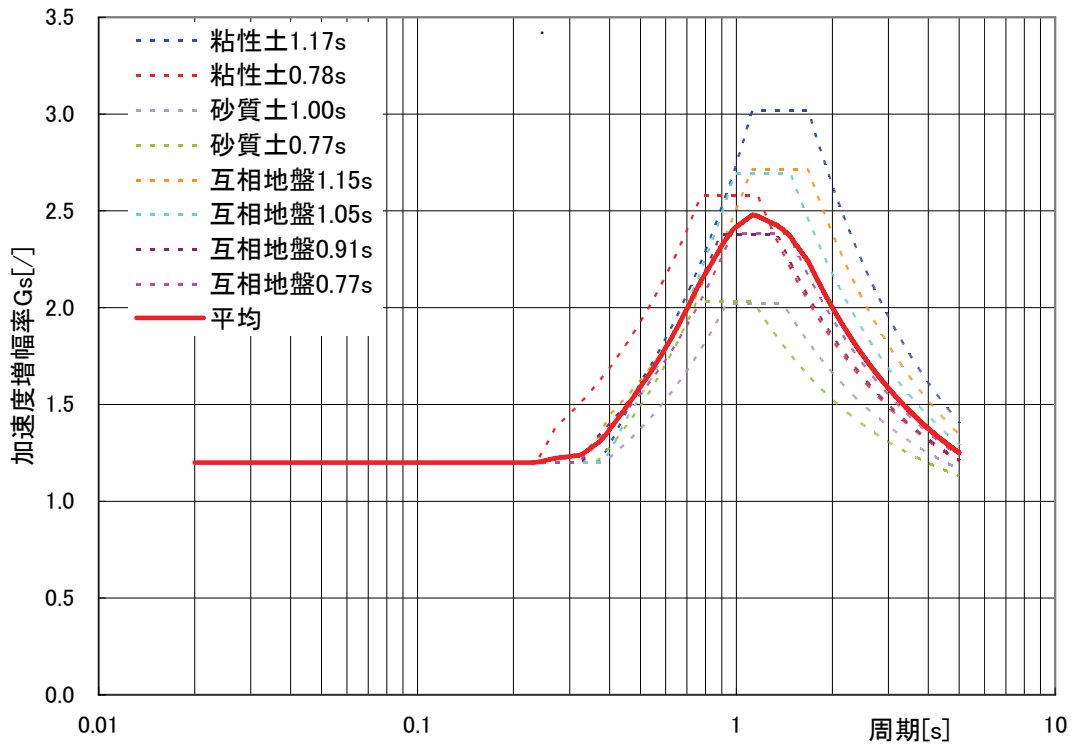


図 3.10 限耐法による加速度増幅率 G_s (第三種地盤、S1F 波 1 倍)

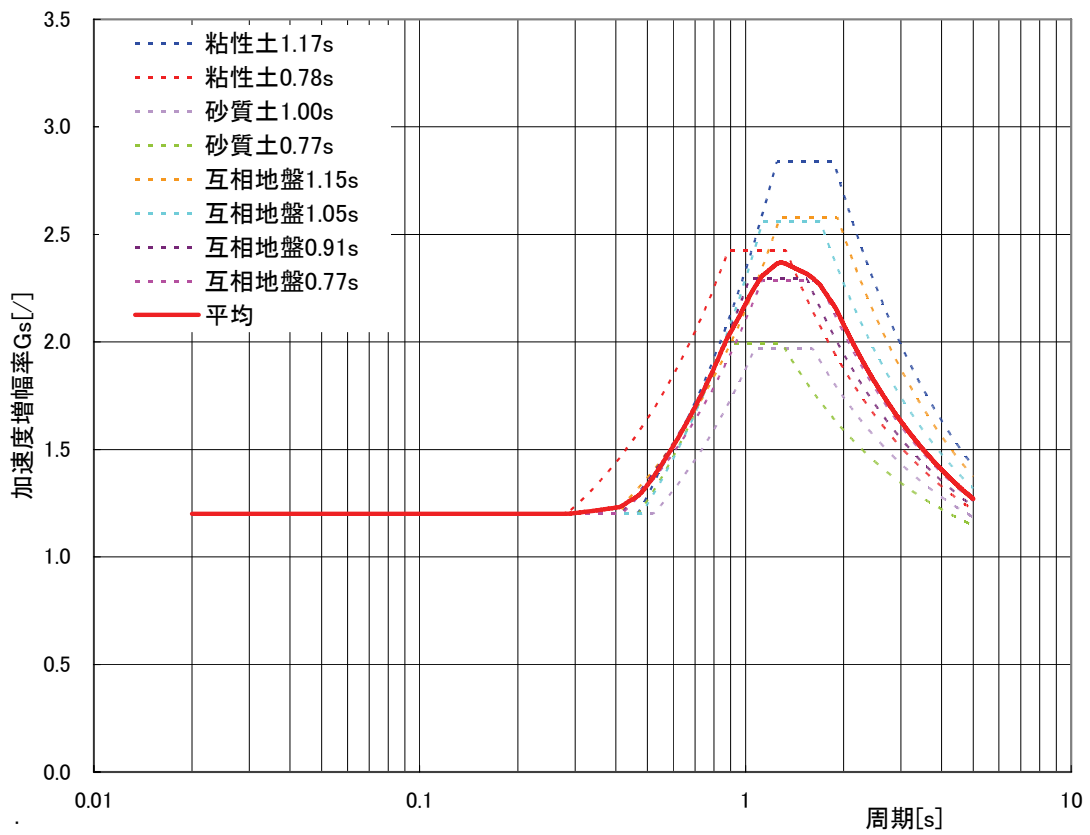


図 3.11 限耐法による加速度増幅率 G_s (第三種地盤、S1F 波 2 倍)

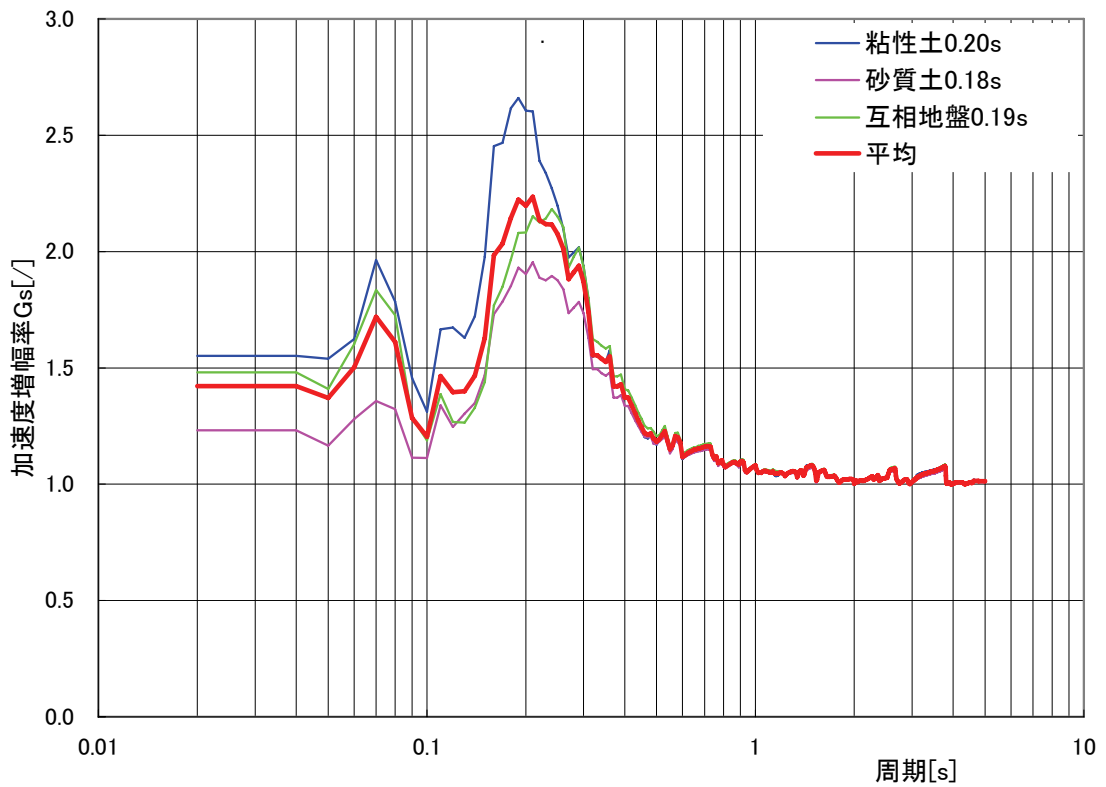


図 3.12 等価線形解析による加速度増幅率 G_s (第一種地盤、S1F 波 1 倍)

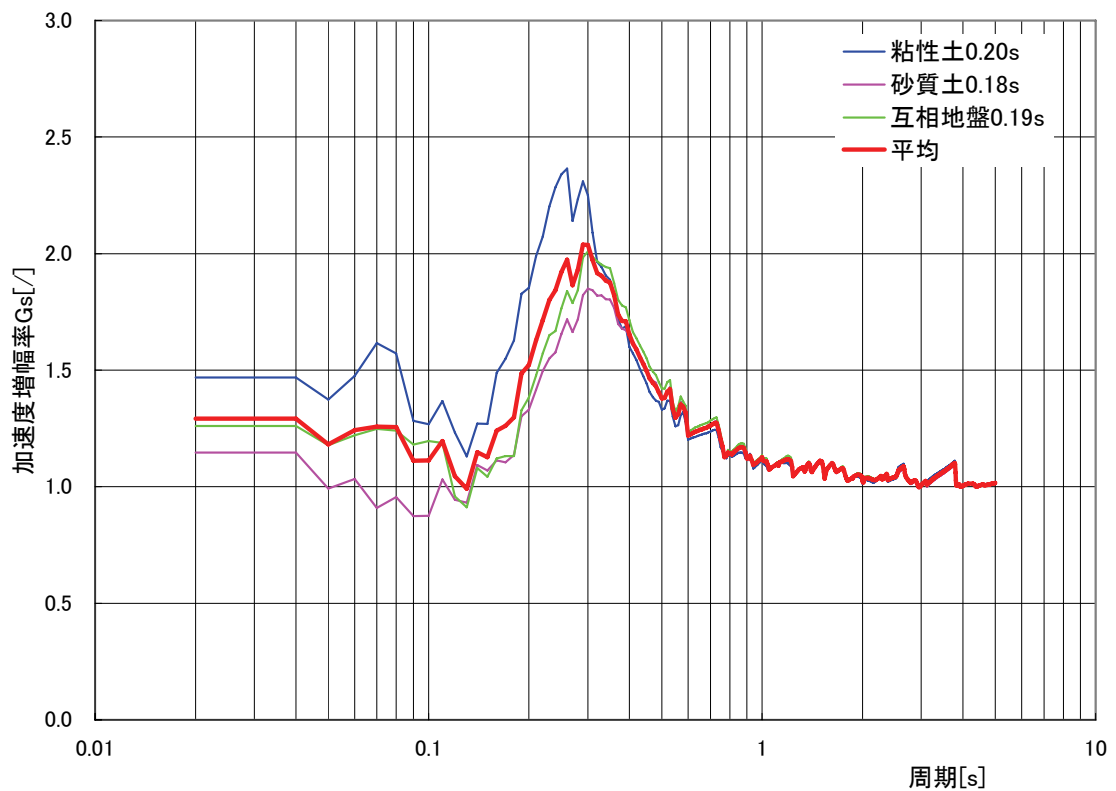


図 3.13 等価線形解析による加速度増幅率 G_s (第一種地盤、S1F 波 2 倍)

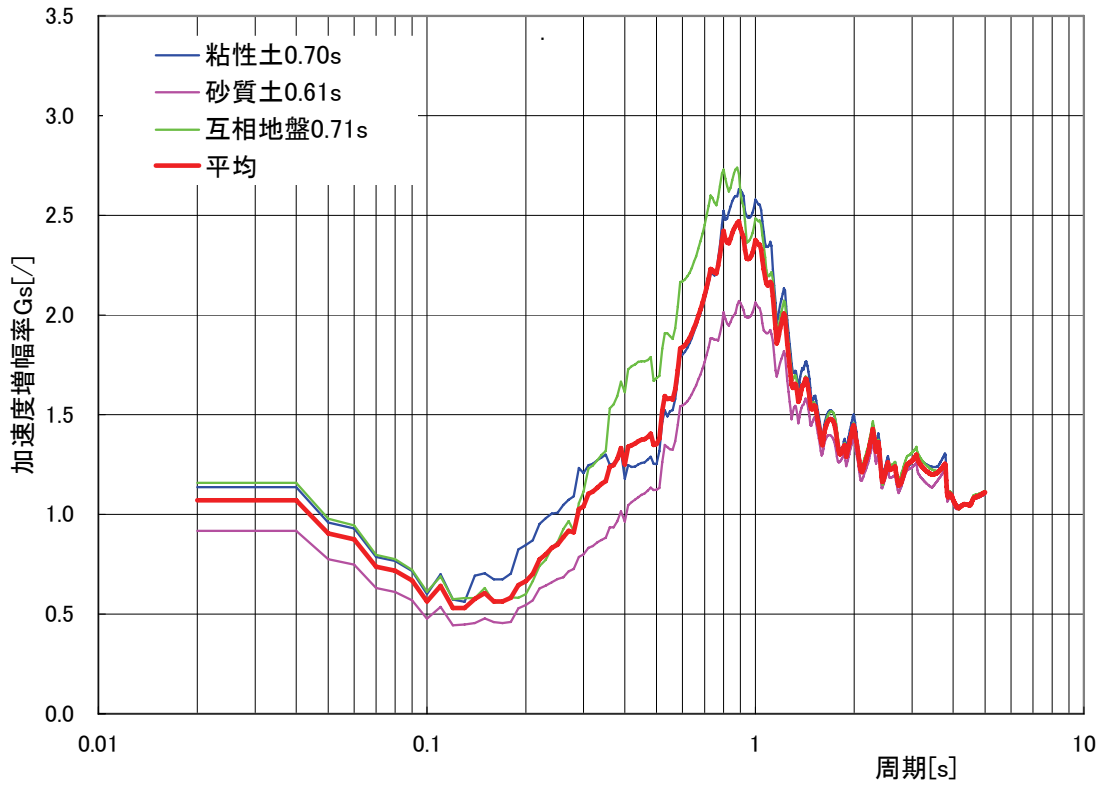


図 3.14 等価線形解析による加速度増幅率 G_s (第二種地盤、S1F 波 1 倍)

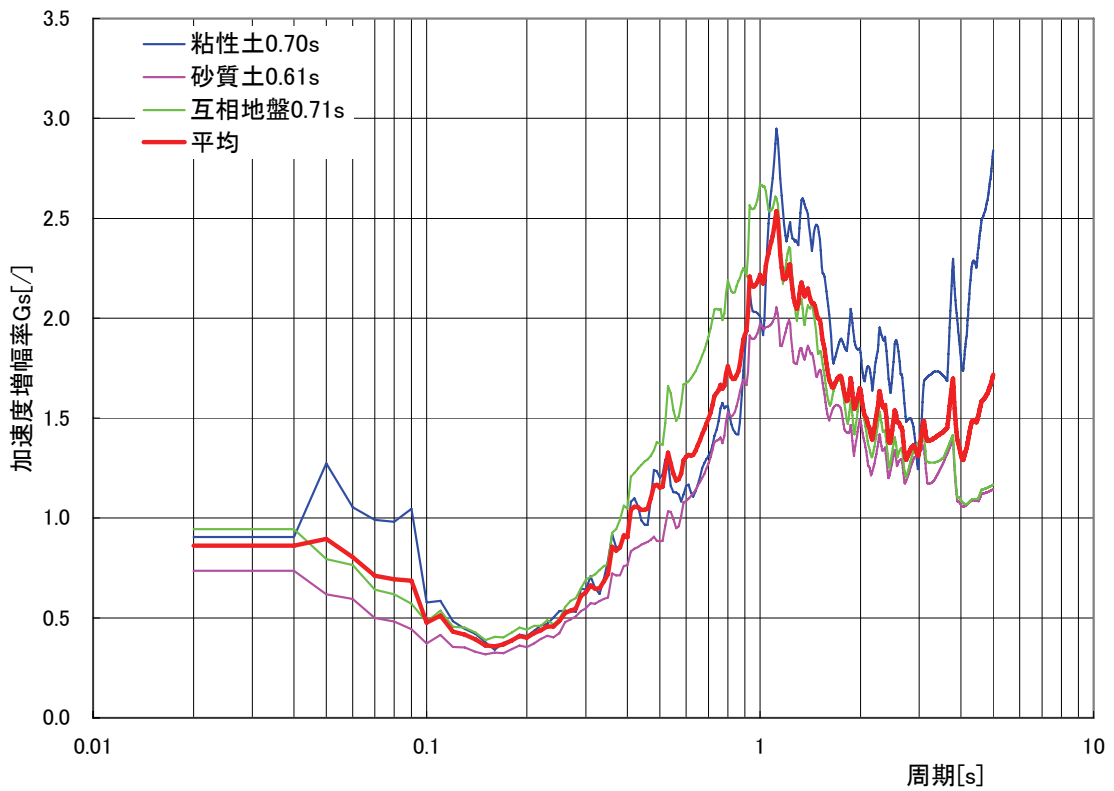


図 3.15 等価線形解析による加速度増幅率 G_s (第二種地盤、S1F 波 2 倍)

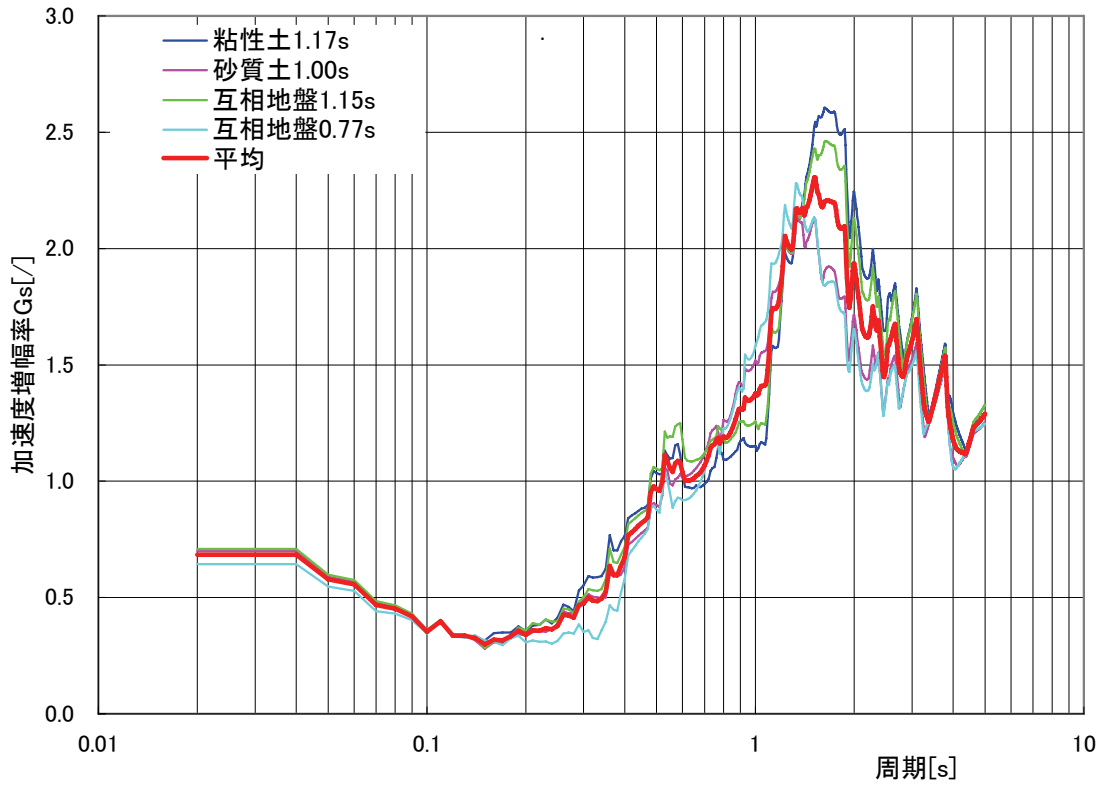


図 3.16 等価線形解析による加速度増幅率 G_s (第三種地盤、S1F 波 1 倍)

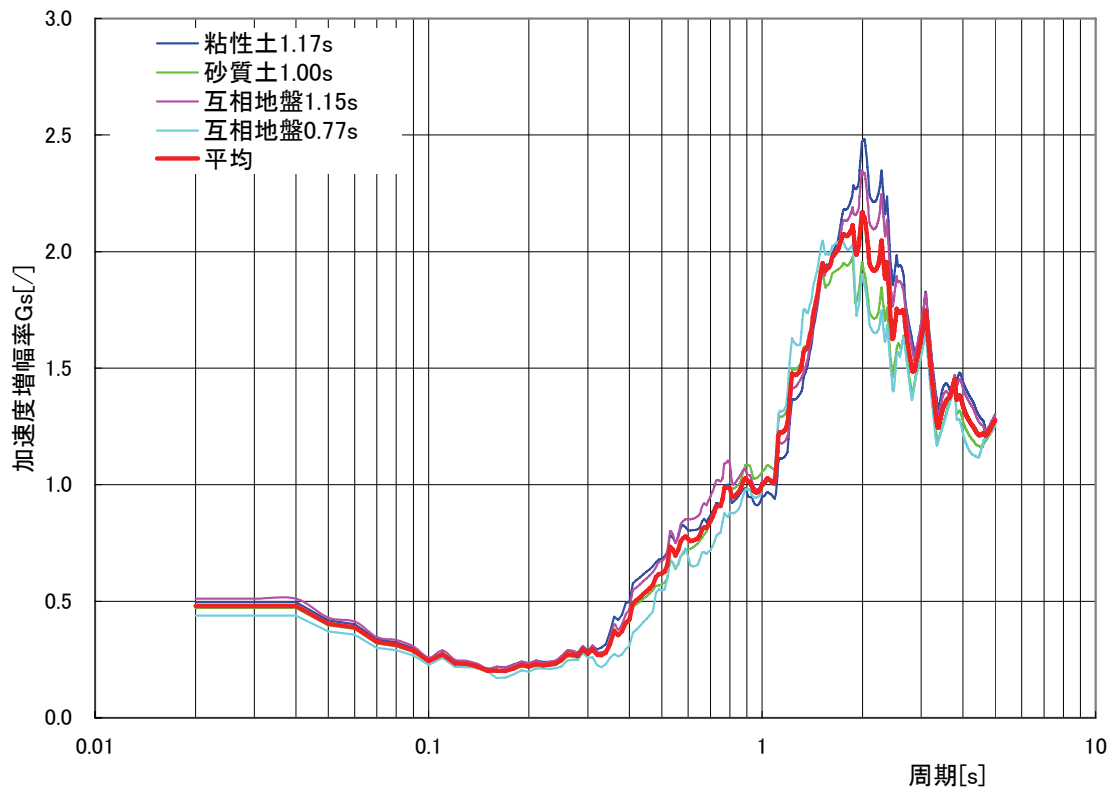


図 3.17 等価線形解析による加速度増幅率 G_s (第三種地盤、S1F 波 2 倍)

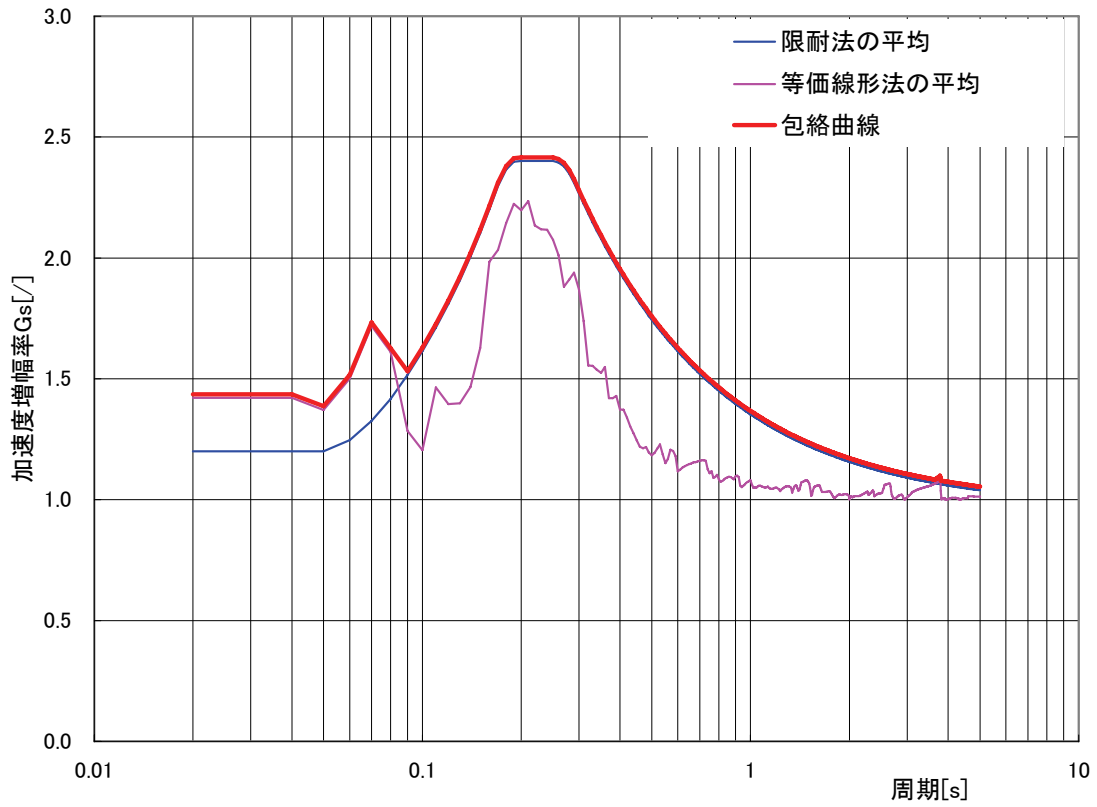


図 3.18 限耐法及び等価線形解析による加速度増幅率 G_s の比較と包絡曲線
(第一種地盤、S1F 波 1 倍)

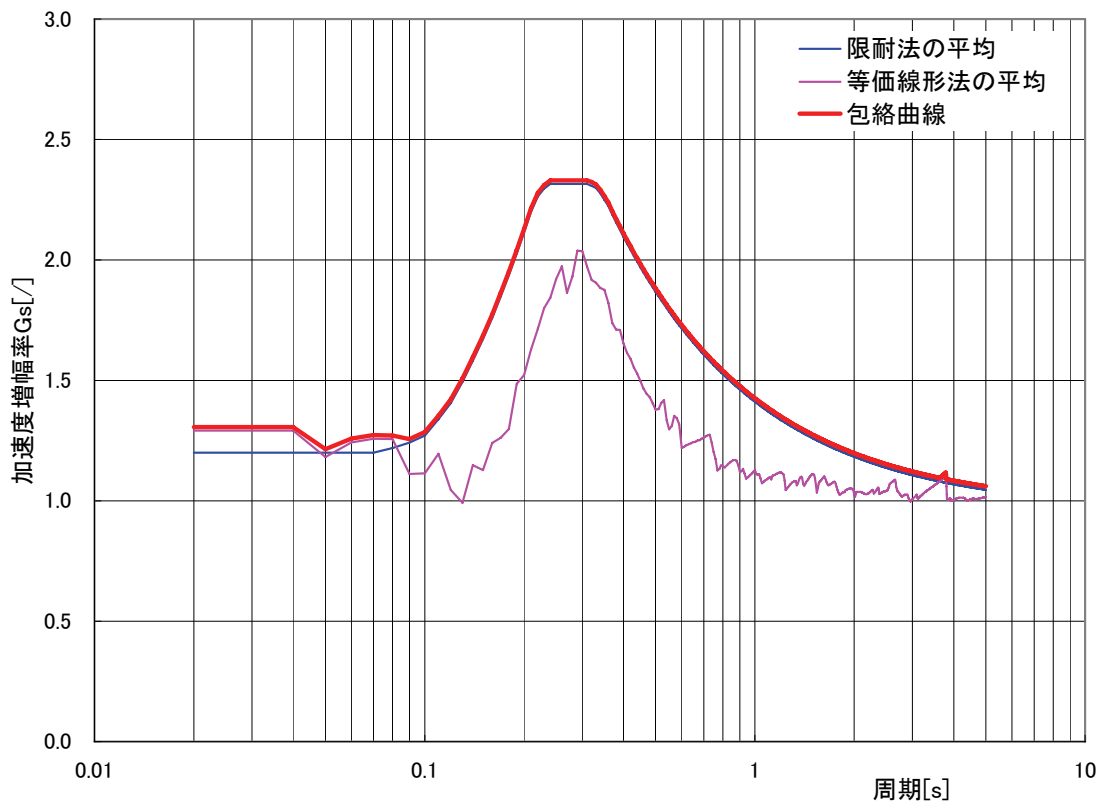


図 3.19 限耐法及び等価線形解析による加速度増幅率 G_s の比較と包絡曲線
(第一種地盤、S1F 波 2 倍)

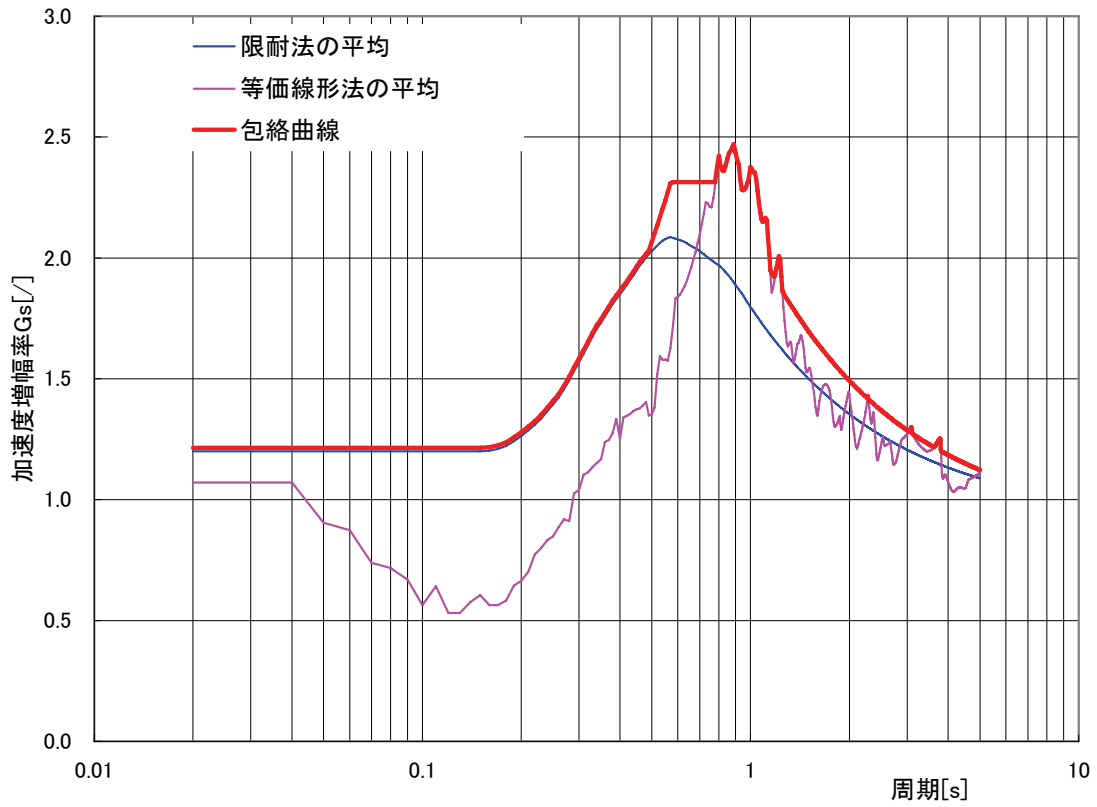


図 3.20 限耐法及び等価線形解析による加速度増幅率 G_s の比較と包絡曲線
(第二種地盤、S1F 波 1 倍)

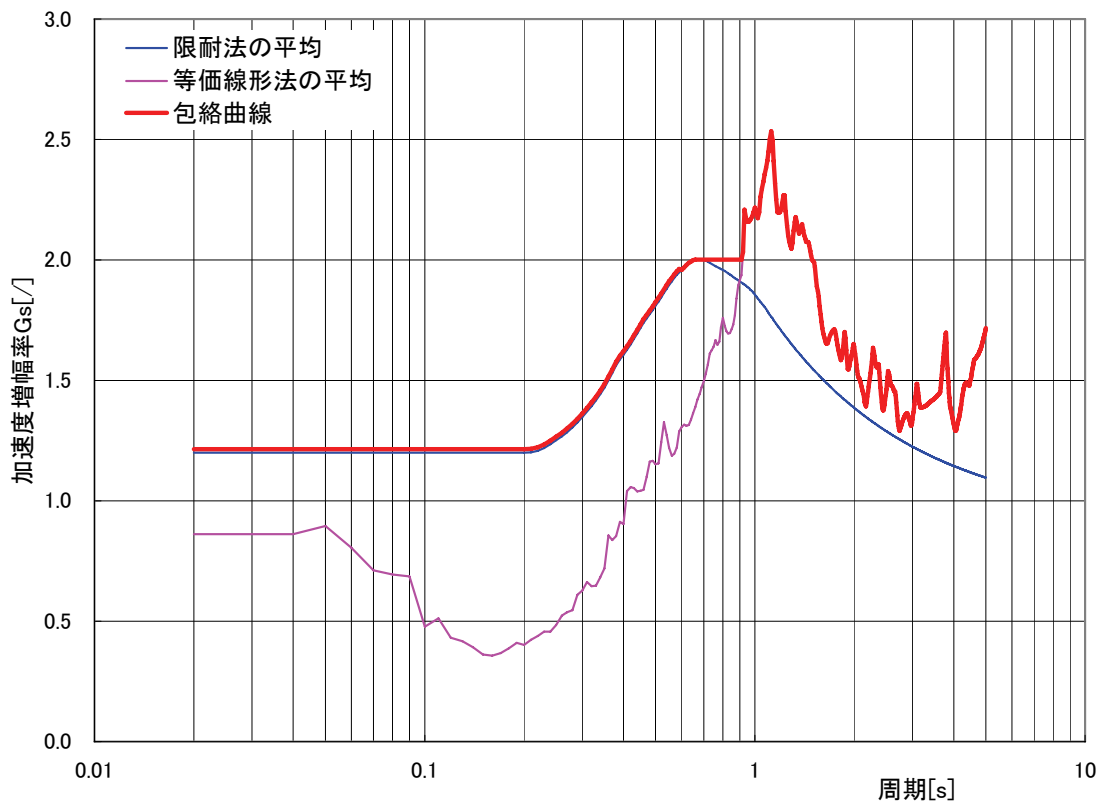


図 3.21 限耐法及び等価線形解析による加速度増幅率 G_s の比較と包絡曲線
(第二種地盤、S1F 波 2 倍)

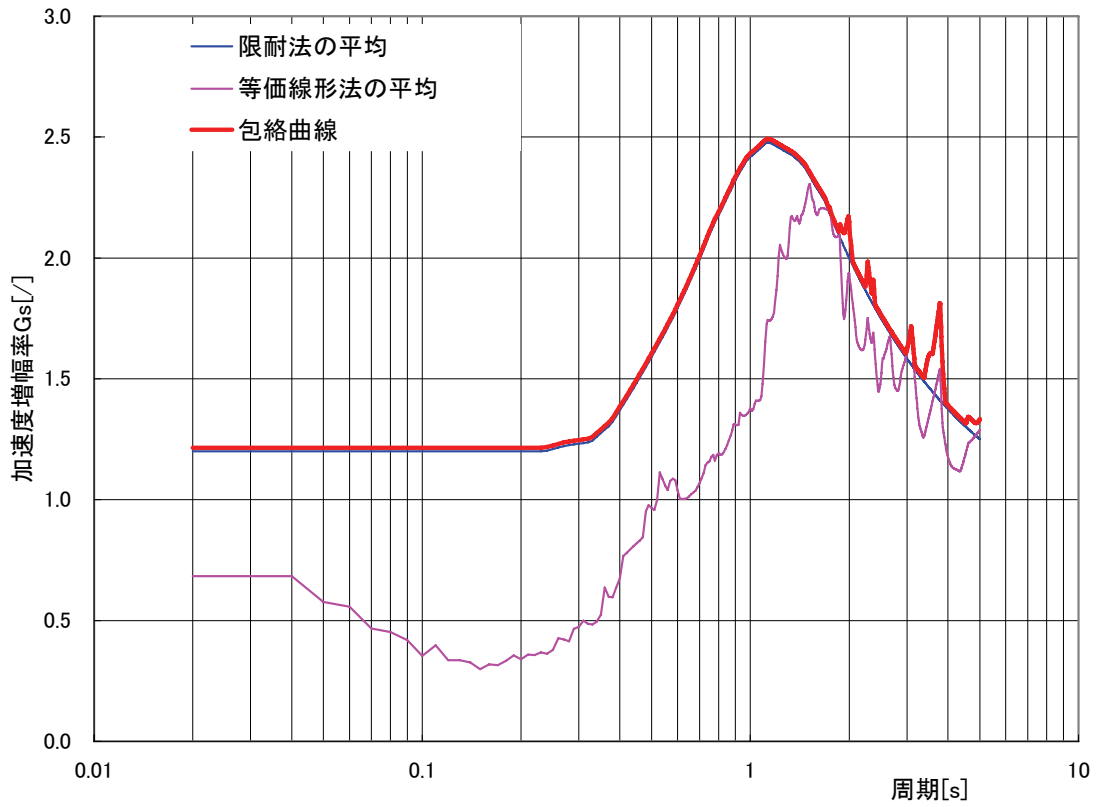


図 3.22 限耐法及び等価線形解析による加速度増幅率 G_s の比較と包絡曲線
(第三種地盤、S1F 波 1 倍)

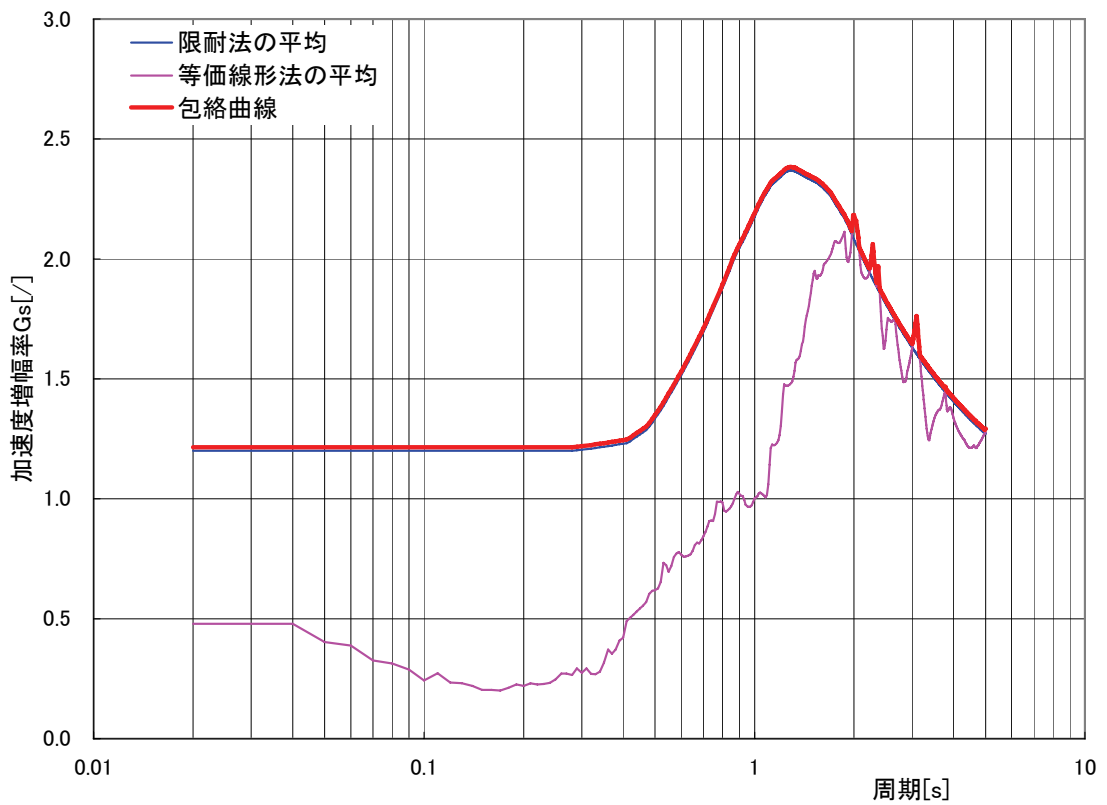


図 3.23 限耐法及び等価線形解析による加速度増幅率 G_s の比較と包絡曲線
(第三種地盤、S1F 波 2 倍)

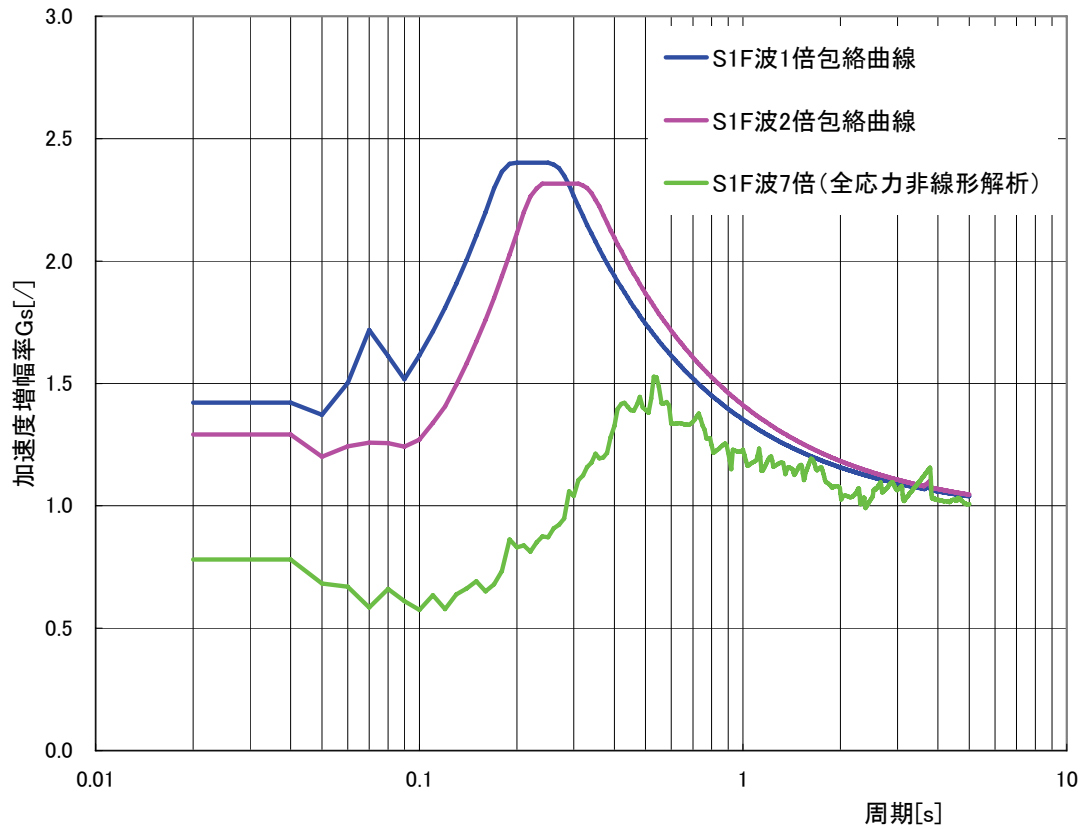


図 3.24 第一種地盤の加速度増幅率 G_s の包絡曲線 (S1F 波 1 倍、S1F 波 2 倍) と全応力非線形解析による加速度増幅率 G_s (S1F 波 7 倍)

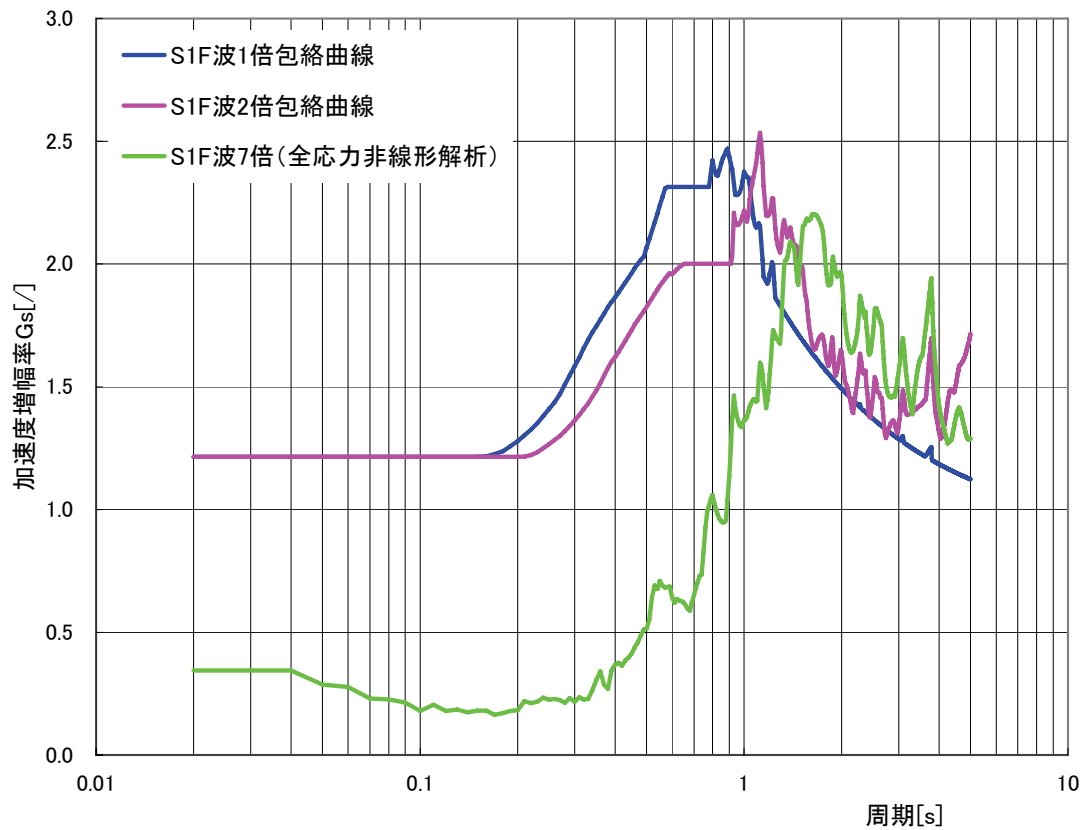


図 3.25 第二種地盤の加速度増幅率 G_s の包絡曲線 (S1F 波 1 倍、S1F 波 2 倍) と全応力非線形解析による加速度増幅率 G_s (S1F 波 7 倍)

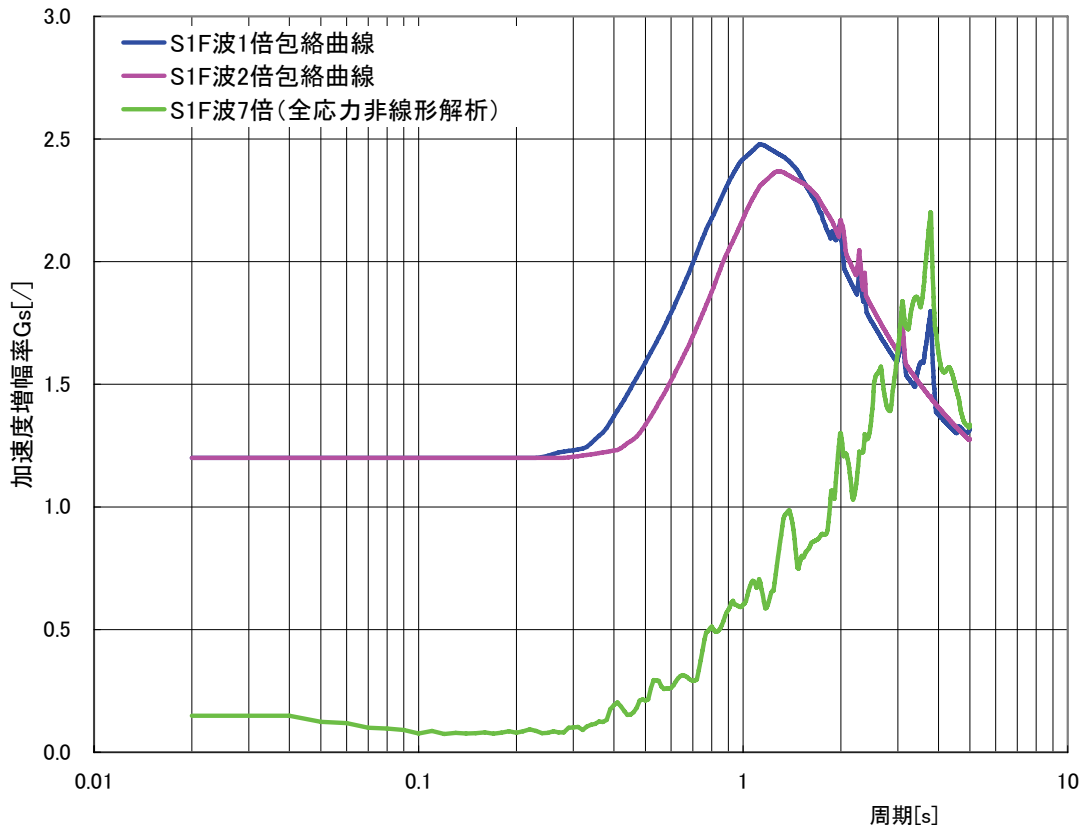


図 3.26 第三種地盤の加速度増幅率 G_s の包絡曲線 (S1F 波 1 倍、S1F 波 2 倍) と全応力非線形解析による加速度増幅率 G_s (S1F 波 7 倍)

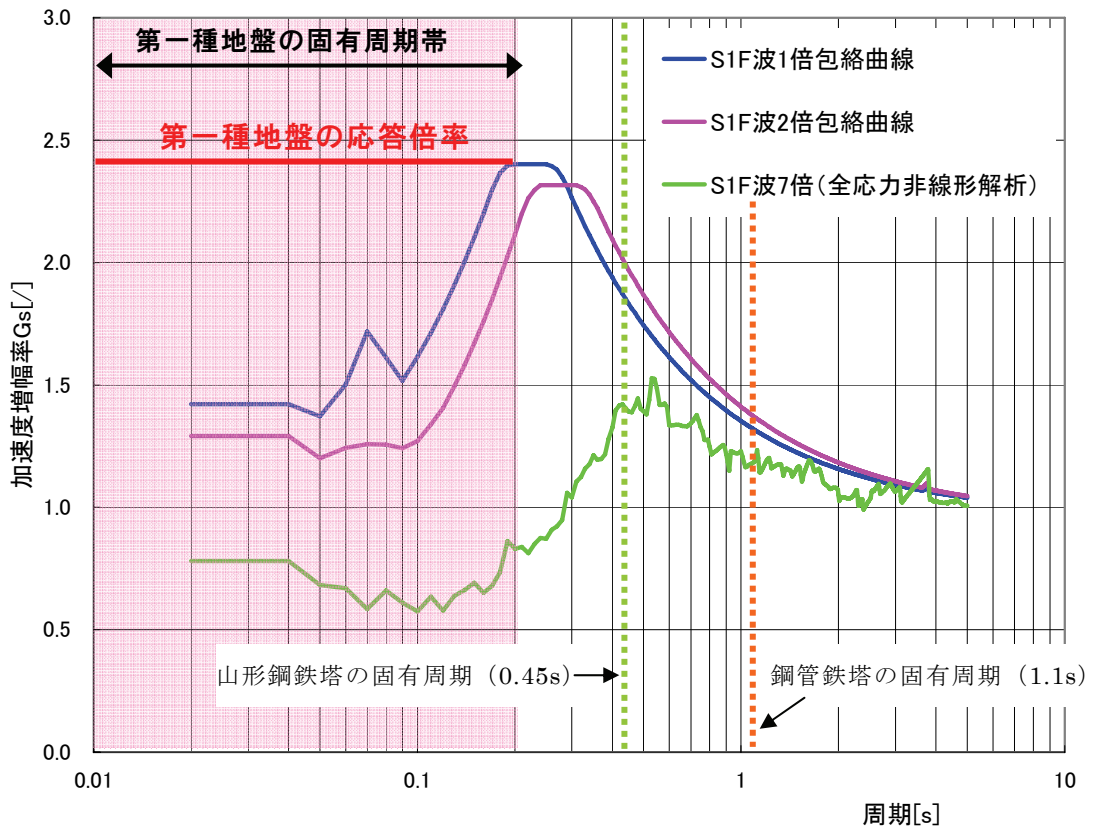


図 3.27 第一種地盤の応答倍率

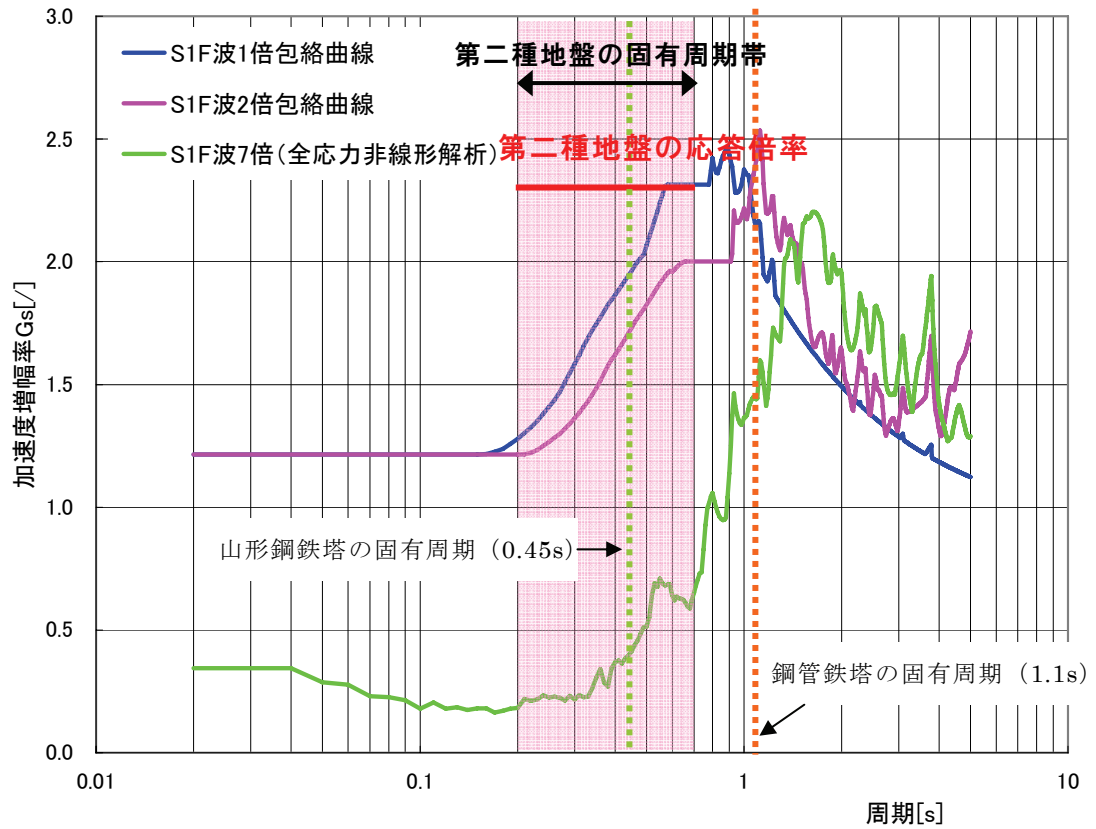


図 3.28 第二種地盤の応答倍率

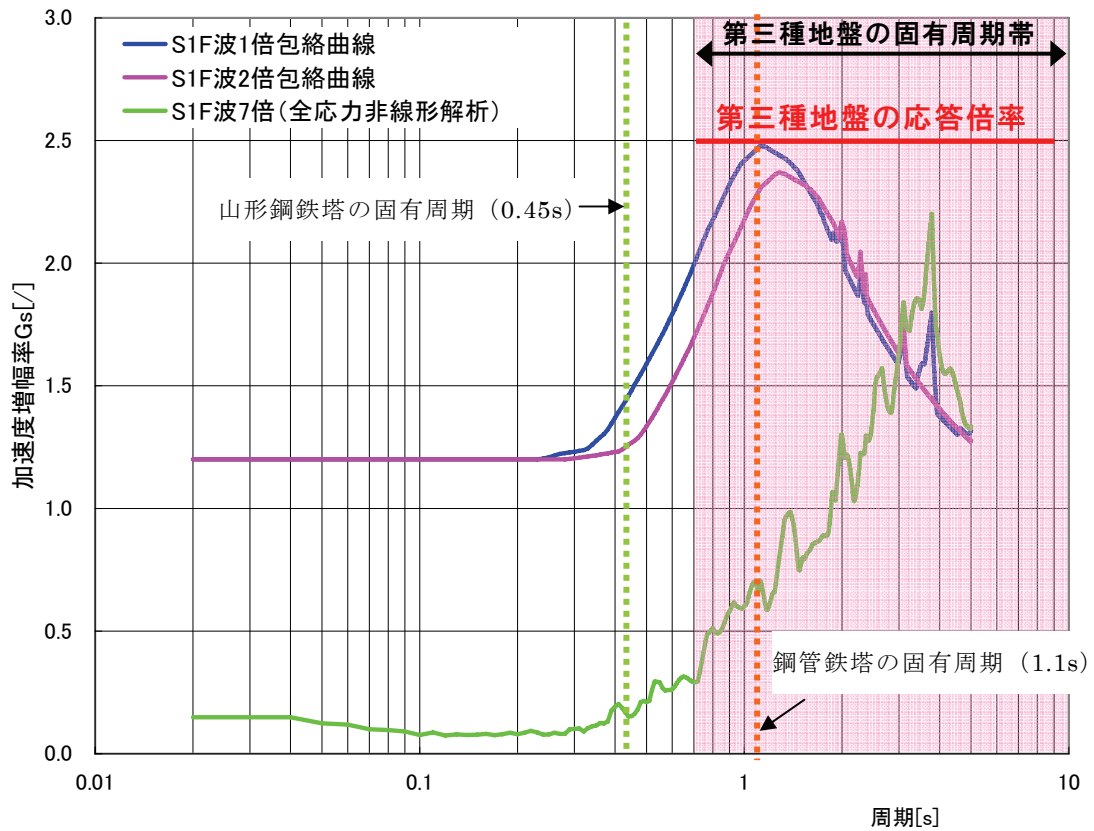


図 3.29 第三種地盤の応答倍率

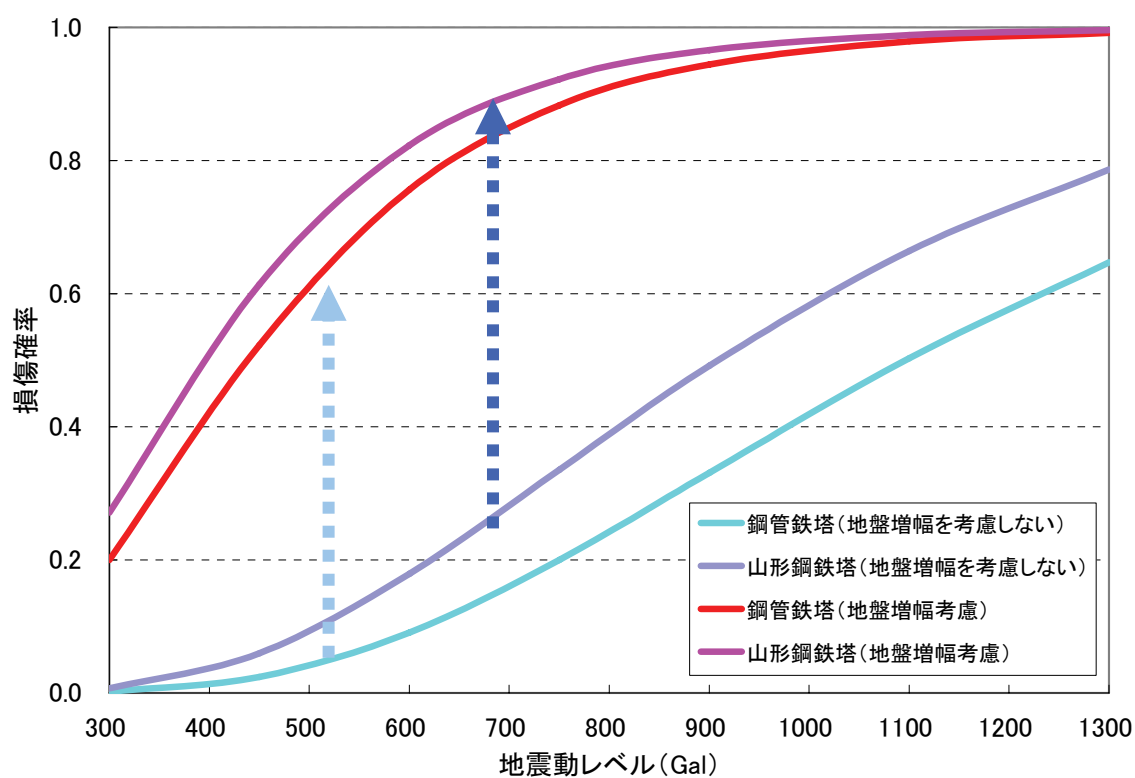


図 3.30 鉄塔の損傷確率曲線

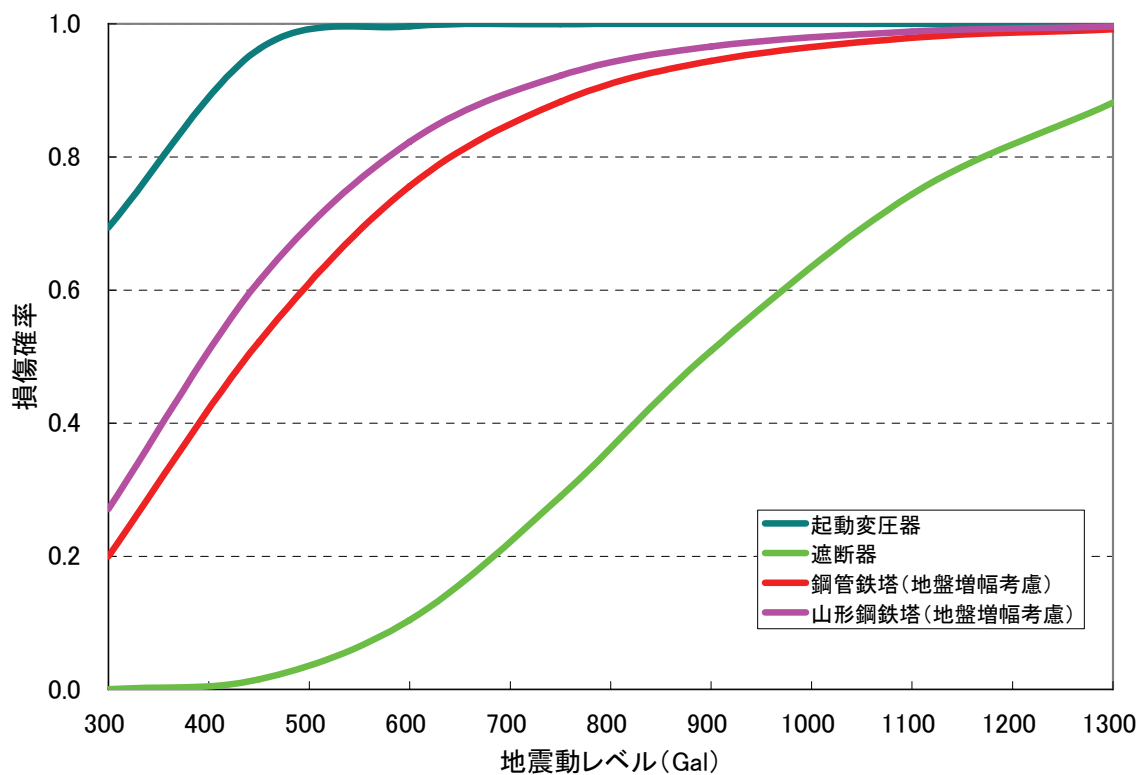


図 3.31 損傷確率曲線 (山形鋼鉄塔、鋼管鉄塔、起動変圧器、遮断器)

4. 架線の地震応答解析

架線の地震応答が鉄塔の応答に及ぼす影響を検討するため、電中研報告^{(5)~(9)}に掲載されている架線モデルを使用して架線単体の3次元地震応答解析を行い、架線の応答特性を把握した。

4.1 解析条件

架線はピンにより接続された梁要素でモデル化し、架線の両端はピン支持とした。架線の形状を図4.1に、解析モデルを図4.2に示す。架線の初期たわみは幾何学的非線形性を考慮した自重解析により算出した。架線の減衰定数は、0.5%、1.0%、2.0%とした。

架線の地震応答解析に用いる入力地震動は、改良標準波 $S_1F^{(1)}$ （高地震帯用、M8.4、震源距離90km、減衰定数5%）の水平地震動及び鉛直地震動とし、架線端部に直接入力した。改良標準波 S_1F の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトルを図4.3~図4.6に示す。

4.2 固有値解析

架線の固有値解析を行い、架線の振動特性を把握した。固有値解析結果を表4.1に、主要モード形状を図4.7~図4.11に示す。表4.1より、卓越モードは架線直角方向（y方向）の1次モード及び鉛直方向（z方向）の4次モードであり、固有周期は架線直角方向で5.7秒、鉛直方向で1.3秒であった。

4.3 時刻歴応答解析

上記4.1節に記載した解析モデルにより時刻歴応答解析を行い、応答加速度、応答変位、応答変動軸力を算出し、架線の応答特性を検討した。時刻歴応答解析の地震波の入力方向は、水平方向については、架線直角方向又は架線方向の一方向入力とし、水平方向と鉛直方向は同時入力とした。架線の加振方向を図4.12に、解析ケースを表4.2に示す。

各解析ケースにおける最大応答値を表4.3に示す。応答解析結果の中で特に値の大きいものを表中にハイライトで示した。表4.3より、架線の減衰定数0.5%~2.0%の範囲では、架線の減衰定数の差異による地震応答への影響は小さいことが分かった。また、応答加速度、応答変位、応答変動軸力ともに、地震波の入力方向が架線方向の水平逆位相の場合の応答が最も大きく、応答加速度、応答変位は鉛直方向で最大値を示した。このことから、架線が上下に震動しながら架線方向（線路方向）に動くという応答特性を把握することができた。

送電鉄塔における地震時の動的応答値は、架線を通じて隣接された鉄塔との間に生じる相互作用

用により、架線の影響を考慮しない場合の応答値を上回る場合がある。

今後の課題として、鉄塔と架線との動的相互作用の影響を評価するために、鉄塔－架線連成系の応答特性を検討する必要がある。

表 4.1 固有値解析結果

電中研報告書計算値			解析結果					
No.	固有振動数	固有周期	固有振動数	固有周期	刺激係数			振動モード
	(Hz)	(SEC)			架線方向(X)	架線直角方向(Y)	鉛直方向(Z)	
1	0.174	5.747	0.176	5.691	0.00	1.27	0.00	架線直角1次
2	0.348	2.874	0.350	2.860	0.17	0.00	0.00	
3	0.348	2.874	0.351	2.848	0.00	0.00	0.00	
4	0.475	2.105	0.488	2.049	0.00	0.00	-0.32	鉛直3次
5	0.522	1.916	0.526	1.899	0.00	0.42	0.00	架線直角3次
6	0.696	1.437	0.701	1.426	-0.08	0.00	0.00	
7	0.696	1.437	0.702	1.425	0.00	0.00	0.00	
8	0.687	1.456	0.768	1.303	0.00	0.00	-1.26	鉛直4次
9	0.870	1.149	0.876	1.141	0.00	-0.25	0.00	
10	0.889	1.125	0.918	1.089	0.00	0.00	-0.95	鉛直5次
11	1.043	0.959	1.050	0.952	-0.05	0.00	0.00	
12	1.043	0.959	1.050	0.952	0.00	0.00	0.00	
13	1.217	0.822	1.223	0.818	0.00	0.18	0.00	
14	1.222	0.818	1.230	0.813	0.00	0.00	0.31	
15	1.391	0.719	1.395	0.717	0.04	0.00	0.00	
16	1.391	0.719	1.395	0.717	0.00	0.00	0.00	
17	1.565	0.639	1.564	0.639	0.00	0.14	0.00	
18	1.567	0.638	1.567	0.638	0.00	0.00	0.19	
19	1.739	0.575	1.731	0.578	0.00	0.00	0.00	
20	1.739	0.575	1.731	0.578	-0.03	0.00	0.00	
21	1.913	0.523	1.895	0.528	0.00	0.11	0.00	
22	1.914	0.522	1.896	0.527	0.00	0.00	0.13	
23	2.087	0.479	2.055	0.487	0.00	0.00	0.00	
24	2.087	0.479	2.055	0.487	0.03	0.00	0.00	
25	2.260	0.442	2.211	0.452	0.00	0.09	0.00	
26	2.261	0.442	2.212	0.452	0.00	0.00	-0.10	
27	2.435	0.411	2.362	0.423	0.00	0.00	0.00	
28	2.435	0.411	2.362	0.423	-0.02	0.00	0.00	
29	2.609	0.383	2.507	0.399	0.00	-0.07	0.00	
30	2.609	0.383	2.507	0.399	0.00	0.00	-0.08	

表 4.2 解析ケース

水平地震動の位相	鉛直地震動の位相	水平地震動の方向	架線の減衰定数 (%)		
同位相	同位相	架線直角方向	0.5	1.0	2.0
逆位相	逆位相	架線方向			

表 4.3 最大応答値

水平地震動 の方向	地震動の位相		減衰定数 (%)	最大応答変位(cm)			最大応答加速度(cm/sec ²)			最大応答 変動軸力(kN)
	水平地震動	鉛直地震動		架線方向 (X方向)	架線直角方向 (Y方向)	鉛直方向 (Z方向)	架線方向 (X方向)	架線直角方向 (Y方向)	鉛直方向 (Z方向)	
架線直 角方向	同位相	同位相	0.5	0.0	27.0	11.5	0.0	457.8	403.3	3.1
			1.0	0.0	25.2	10.9	0.0	448.6	379.8	3.0
			2.0	0.0	22.7	9.8	0.0	430.9	339.4	2.9
	同位相	逆位相	0.5	0.6	27.7	0.7	164.6	487.8	20.5	0.7
			1.0	0.6	26.2	0.6	161.9	477.8	18.7	0.7
			2.0	0.5	23.5	0.4	157.7	458.6	16.8	0.6
	逆位相	同位相	0.5	0.0	0.0	11.0	0.0	0.0	418.4	3.0
			1.0	0.0	0.0	10.4	0.0	0.0	393.1	2.8
			2.0	0.0	0.0	9.5	0.0	0.0	349.9	2.5
	逆位相	逆位相	0.5	0.6	0.0	0.6	164.3	1.6	16.9	0.8
			1.0	0.6	0.0	0.6	161.8	1.5	15.6	0.7
			2.0	0.5	0.0	0.5	157.6	1.3	13.5	0.6
架線方向	同位相	同位相	0.5	0.9	0.0	11.4	2612.5	0.0	404.3	10.1
			1.0	0.8	0.0	10.4	2440.8	0.0	364.3	9.1
			2.0	0.7	0.0	8.8	2191.3	0.0	302.5	7.7
	同位相	逆位相	0.5	1.4	0.0	0.4	2684.1	0.0	23.3	7.6
			1.0	1.3	0.0	0.3	2515.3	0.0	19.0	7.1
			2.0	1.1	0.0	0.2	2246.3	0.0	13.0	6.3
	逆位相	同位相	0.5	0.0	0.0	357.0	0.0	0.0	5824.3	61.4
			1.0	0.0	0.0	339.7	0.0	0.0	8099.9	64.8
			2.0	0.0	0.0	154.8	0.0	0.0	4164.8	44.2
	逆位相	逆位相	0.5	1.5	0.0	344.2	213.7	0.0	5611.0	61.8
			1.0	1.2	0.0	331.2	226.1	0.0	7934.7	66.4
			2.0	0.6	0.0	153.7	199.8	0.0	4637.3	43.7

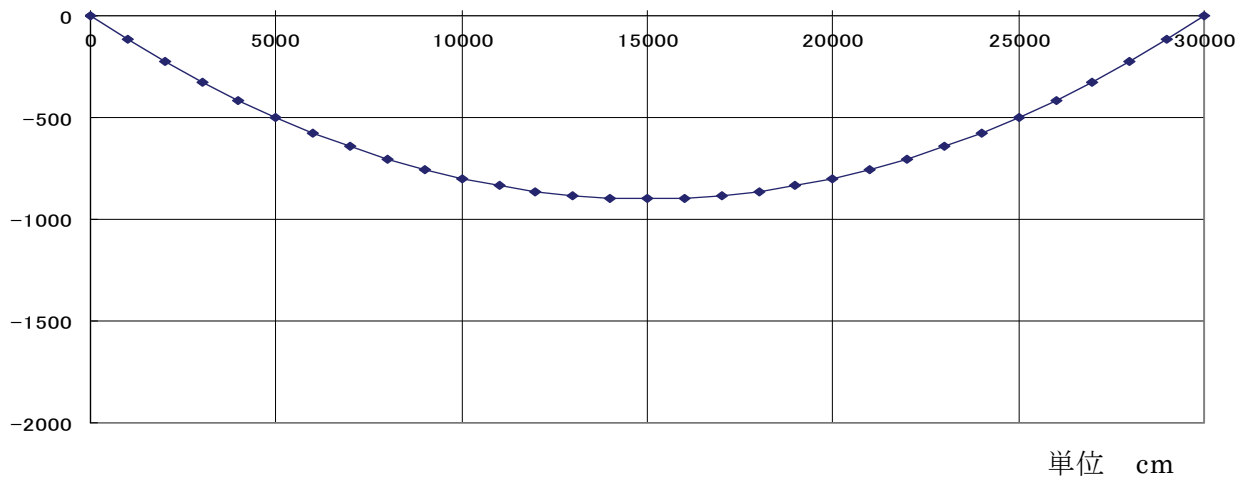


図 4.1 架線の形状



図 4.2 架線の解析モデル

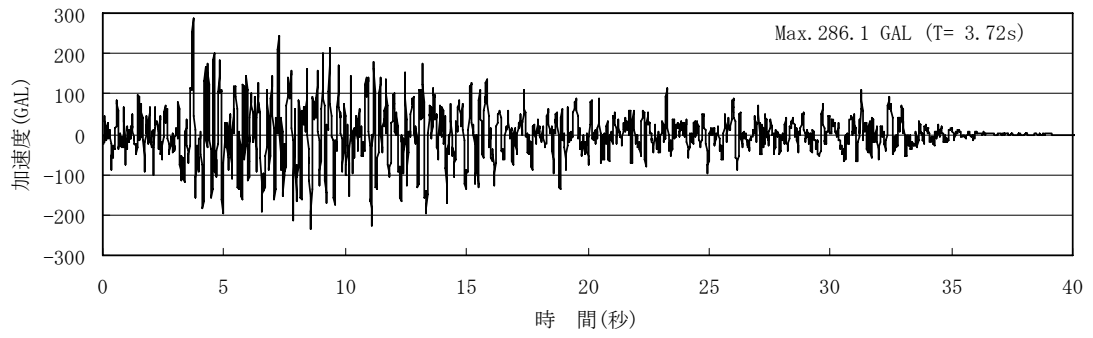


図 4.3 改良標準波 S1F（水平動）の加速度時刻歴波形

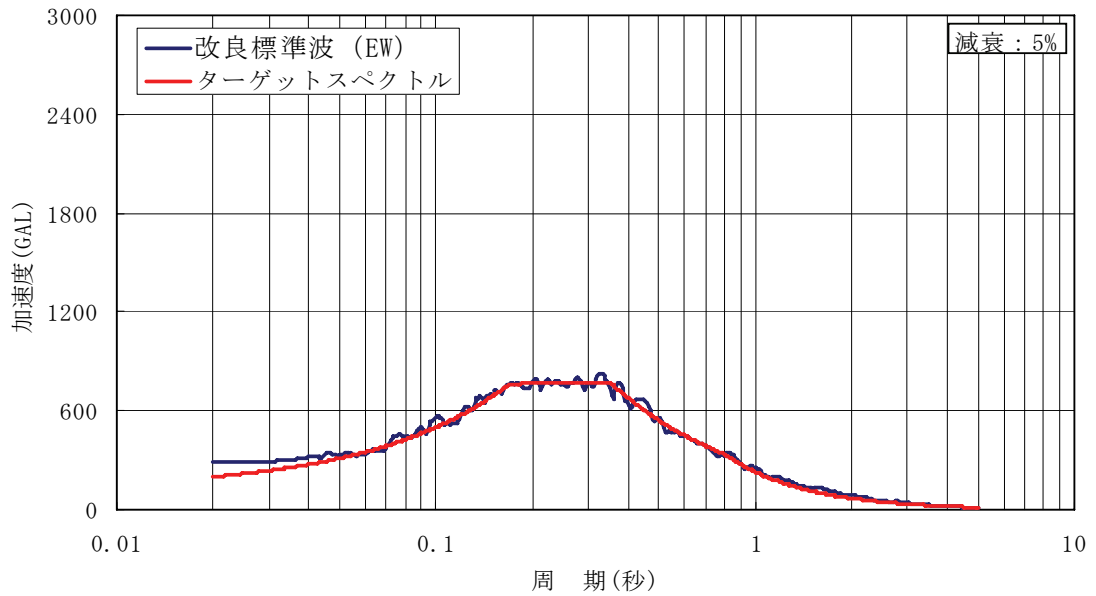


図 4.4 改良標準波 S1F（水平動）の応答加速度スペクトル

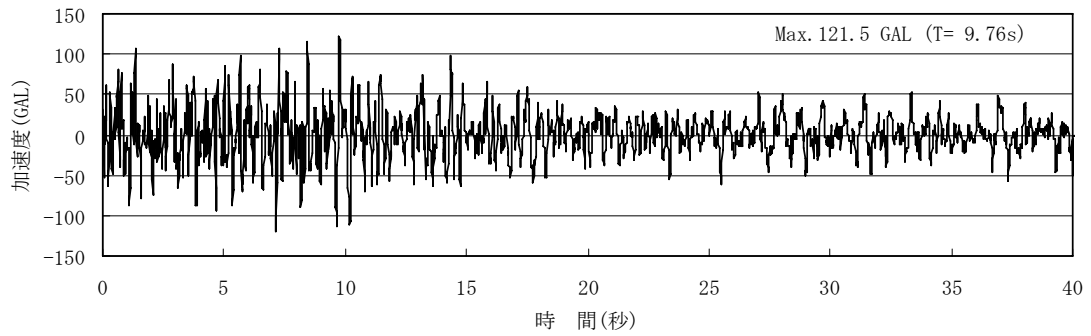


図 4.5 改良標準波 S1F（鉛直動）の加速度時刻歴波形

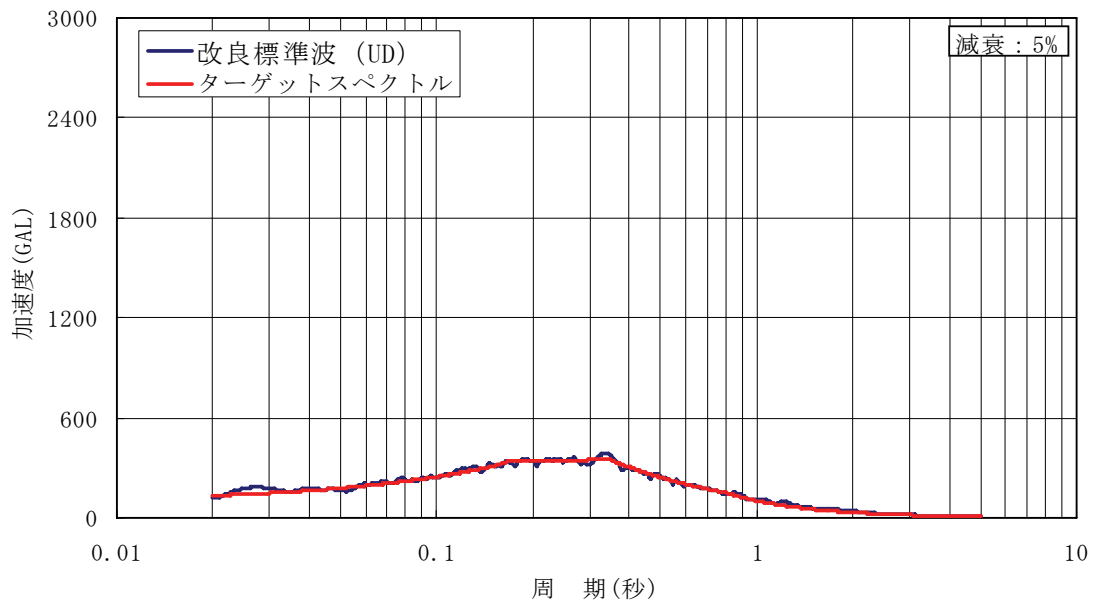


図 4.6 改良標準波 S1F（鉛直動）の応答加速度スペクトル

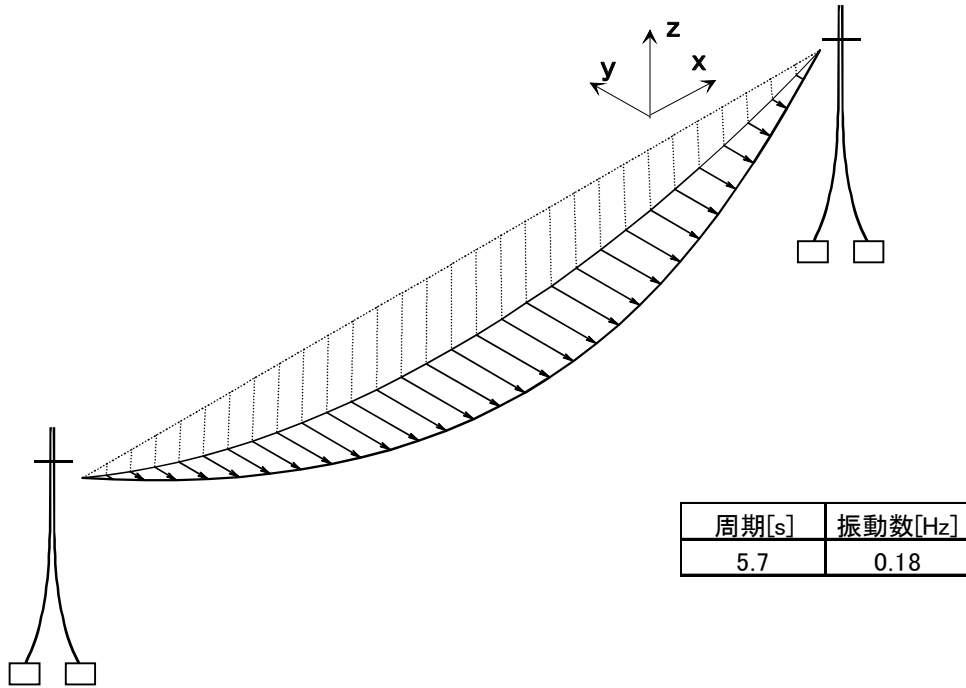


図 4.7 固有値解析結果（架線直角方向 1 次モード）

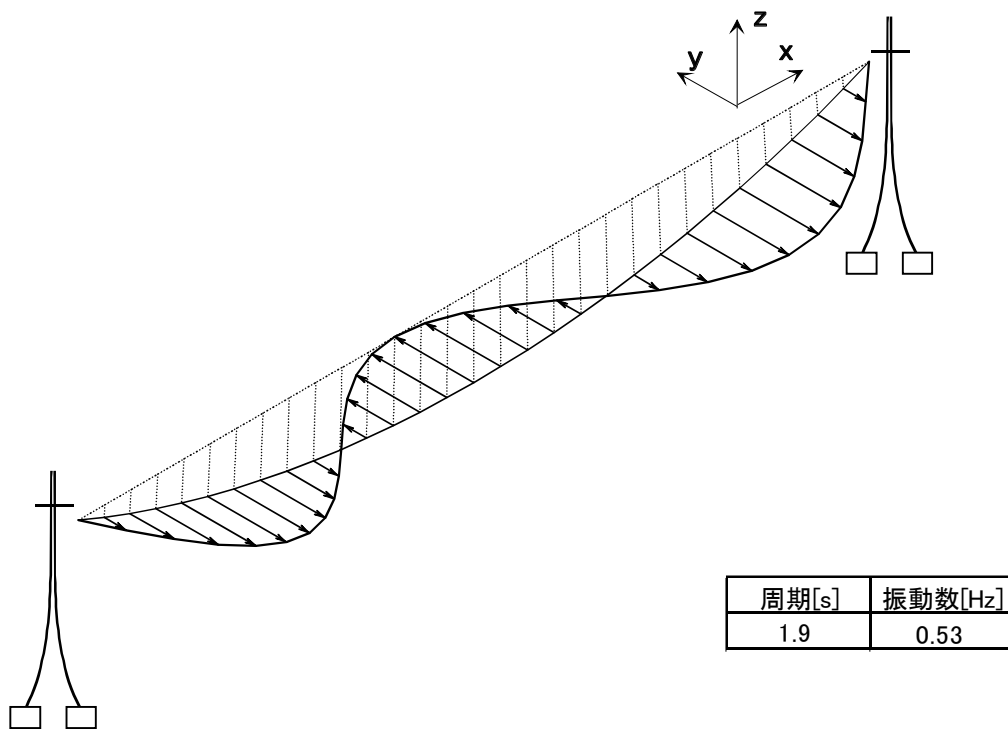


図 4.8 固有値解析結果（架線直角方向 3 次モード）

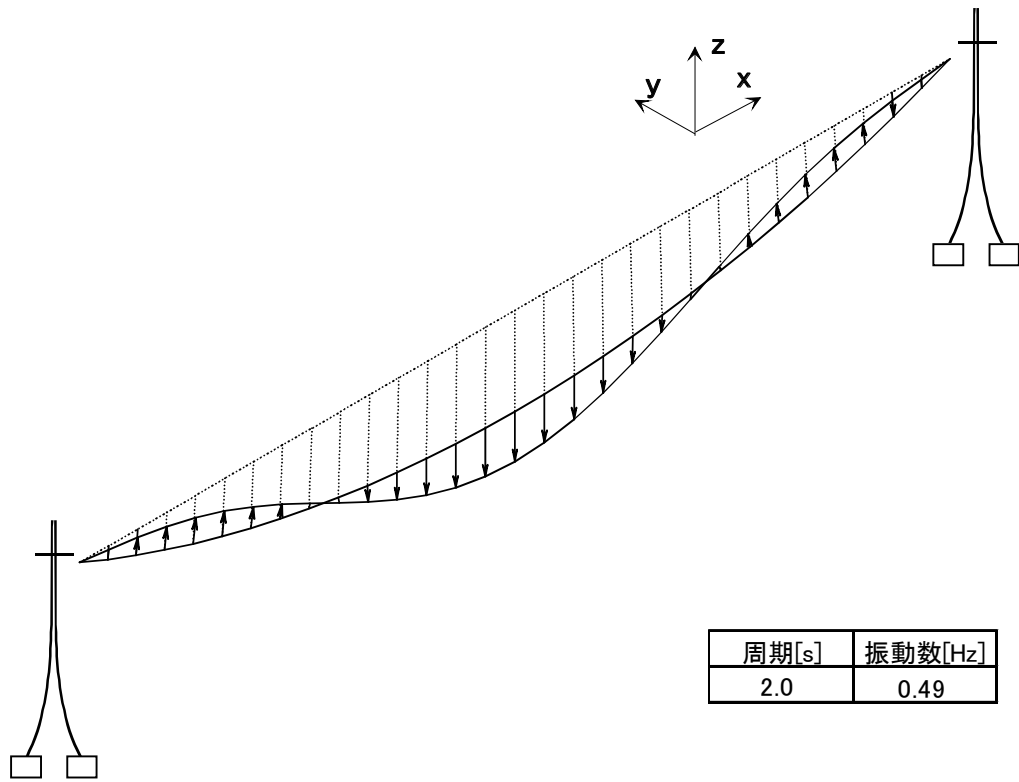


図 4.9 固有値解析結果（鉛直方向 3 次モード）

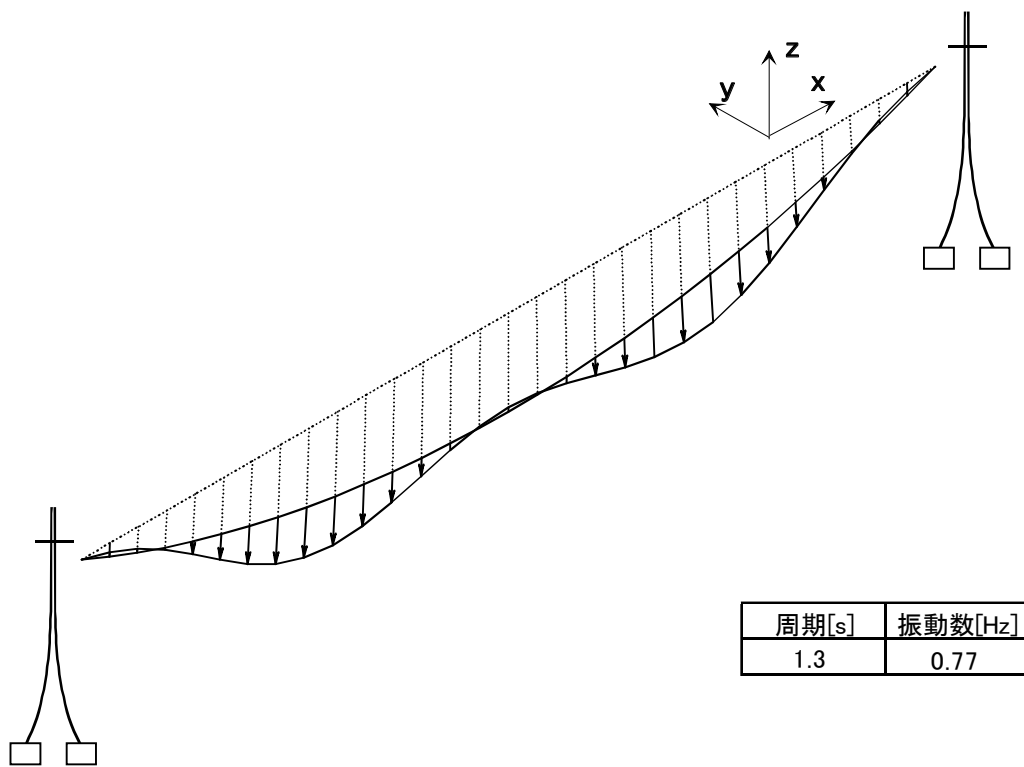


図 4.10 固有値解析結果（鉛直方向 4 次モード）

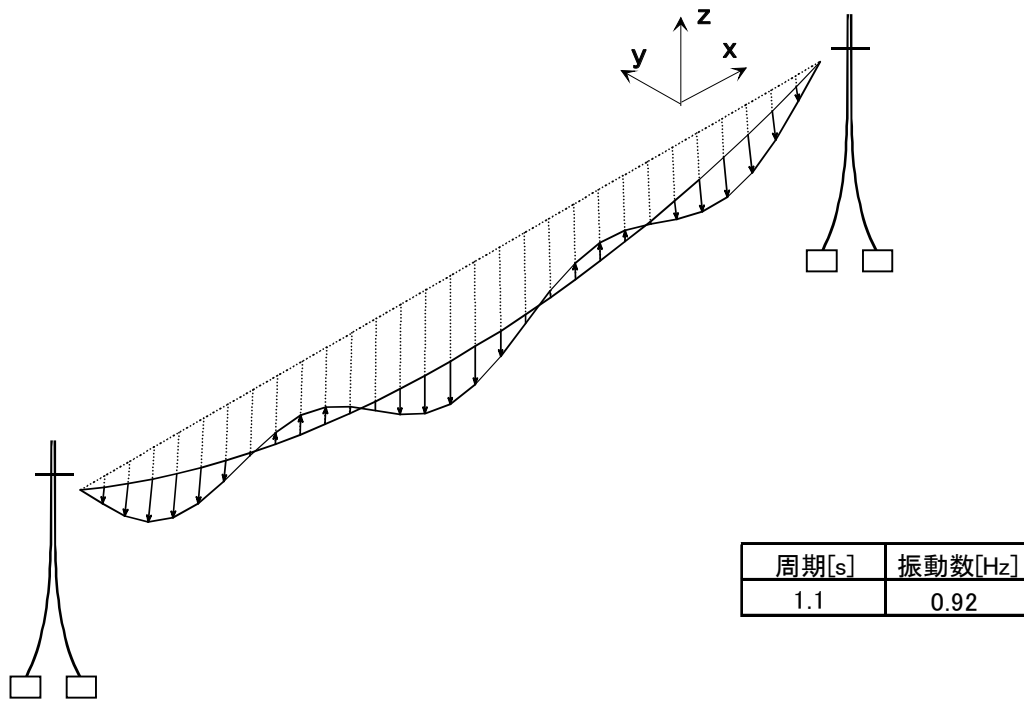


図 4.11 固有値解析結果（鉛直方向 5 次モード）

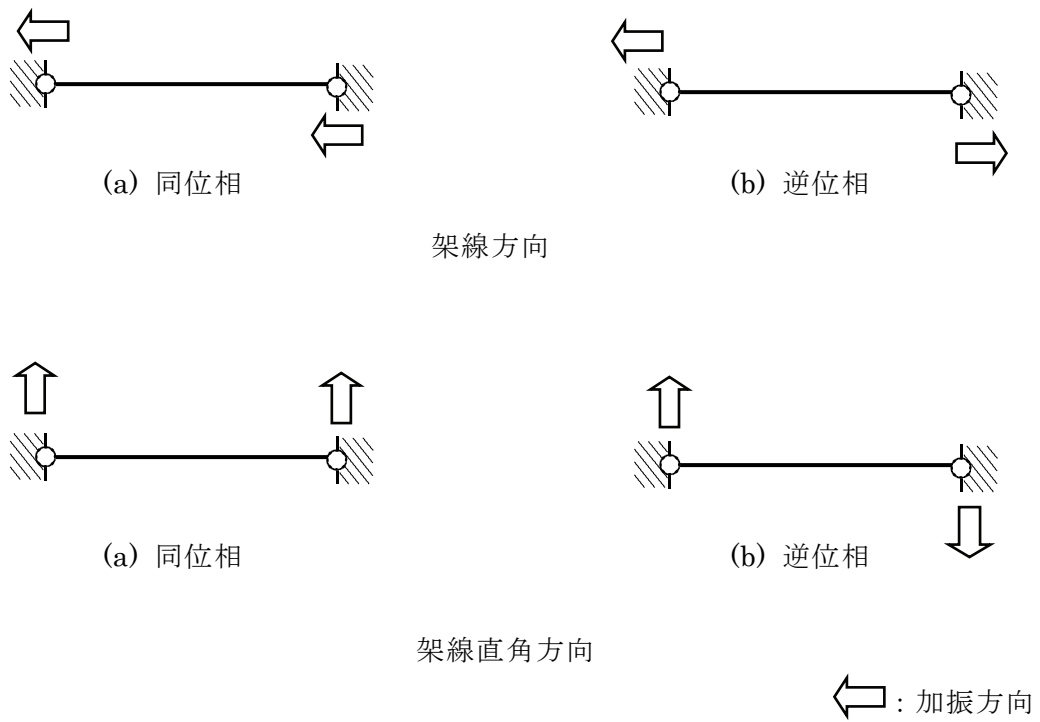


図 4.12 架線の加振方向

5. 結論

本作業では、送電鉄塔の位置する表層地盤の増幅特性を考慮した鉄塔の地震時損傷確率を算出し、表層地盤の増幅特性を考慮しない鉄塔の損傷確率及び開閉所変電設備の損傷確率と比較して、送電鉄塔の損傷確率が外部電源喪失発生確率に及ぼす影響を評価した。また、架線の地震応答が送電鉄塔の応答に及ぼす影響を評価するための基礎データとして、架線単体の地震応答解析を行い、その応答特性を把握した。

その結果、以下の結論が得られた。

(1) 表層地盤の応答倍率

送電鉄塔の位置する表層地盤による加速度の増幅率（解放基盤表面と地表面の間の加速度応答スペクトル比）を求め、表層地盤の応答倍率を算定した。送電鉄塔は、山岳、丘陵、畑、水田及び河川敷等広範囲に建設されるため、各種の異なった地盤条件を有し、標準的な地盤モデルを設定するのは困難である。そこで、保守的な評価となるように最も厳しい評価となる加速度増幅率の包絡曲線の最大値を各地盤種別の応答倍率とした。

さらに、山形鋼鉄塔の固有周期と近く共振による加速度応答の増大が考えられる第二種地盤の応答倍率 2.3 を山形鋼鉄塔の応答倍率に、鋼管鉄塔の固有周期と近い第三種地盤の応答倍率 2.5 を鋼管鉄塔の応答倍率とした。

(2) 送電鉄塔の地震時損傷確率評価

(1)で求めた表層地盤の応答倍率を用いて送電鉄塔の地震時損傷確率を試算した。表層地盤の増幅特性を考慮した山形鋼鉄塔及び鋼管鉄塔の損傷確率は、増幅特性を考慮しない鉄塔の損傷確率に比べて、地震動レベル 600Gal において山形鋼鉄塔で約 4.5 倍、鋼管鉄塔で約 8 倍損傷確率が大きくなった。しかし、この評価結果は保守的な評価となるように最も厳しい評価となる応答倍率を設定したためであり、周期帯によっては表層地盤の応答低減のため損傷確率が小さくなる場合もある。

(3) 外部電源系統の機能喪失確率評価

地震時の損傷確率は、起動変圧器、山形鋼鉄塔、鋼管鉄塔、遮断器の順に大きく、外部電源喪失の発生確率は、起動変圧器の損傷が支配的となることが分かった。送電鉄塔の損傷確率は、

起動変圧器に次いで大きな値となったが、これは保守的な評価となるように最も厳しい評価となる応答倍率を設定したためであるが、それでも送電鉄塔の損傷確率が起動変圧器の損傷確率を上回らないことを確認した。

(4) 架線の応答特性

改良標準波 $S_1F^{(1)}$ を用いた架線の地震応答解析により、架線の応答加速度、応答変位、応答変動軸力ともに、地震波の入力方向が架線方向の水平逆位相の場合の応答が最も大きく、応答加速度、応答変位は鉛直方向で最大値を示すことが分かった。このことから、架線が上下に震動しながら架線方向（線路方向）に動くという架線の応答特性を把握することができた。

本作業の結果、表層地盤の増幅特性を考慮した送電鉄塔の地震時損傷確率の概略値を把握し、表層地盤の増幅特性を考慮した送電鉄塔の損傷確率が起動変圧器の損傷確率を上回らないことを確認した。また、架線単体の地震応答の基本特性を把握することができた。

今後の課題として、鉄塔と架線との動的相互作用の影響を評価するために、鉄塔－架線連成系の応答特性を検討する必要がある。

参考文献

- (1) 耐震設計の標準化に関する調査報告書、原子力工学試験センター、昭和 56 年 6 月.
- (2) 地震に係る確率論的安全評価手法の整備=BWR の事故シーケンスの試解析=、原子力発電技術機構、INS/M02-08, 平成 15 年 3 月.
- (3) 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、原子力安全基盤機構、JNES/SAE06-094, 平成 18 年 8 月.
- (4) 外部電源系統の機能喪失確率評価、原子力安全基盤機構、JNES/SAE07-015, 平成 19 年 4 月.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) 堀貞治：改訂 送電用鉄塔鉄柱の設計、電気書院、1958.
- (11) 国土交通省住宅局建築指導課、建築研究所、日本建築センター、建築研究振興協会：2001 年版限界耐力計算法の計算例とその解説、2006.
- (12) 国土交通省住宅局建築指導課、国土交通省国土技術政策総合研究所、建築研究所、日本建築行政会議、建築物の構造関係技術基準解説書編集委員会：2007 年版 建築物の構造関係技術基準解説書、平成 19 年 8 月.
- (13) 太田裕、後藤典俊：S 波速度を他の土質的諸指標から推定する試み、物理探鉱、第 29 巻第 4 号、pp. 31-41、1976.