

伊方発電所

「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」 の改訂に伴う耐震安全性評価結果 (コメント回答)

○コメント回答	
1. 地盤増幅特性	1
2. 地震応答解析モデル	15
3. 基礎地盤安定解析	29
○以前のコメントを踏まえた検討	
5.4 kmアスペリティ正面モデル	36
○参考	
7.5 km連動モデル	42

平成22年1月29日
四国電力株式会社

1. 地盤増幅特性

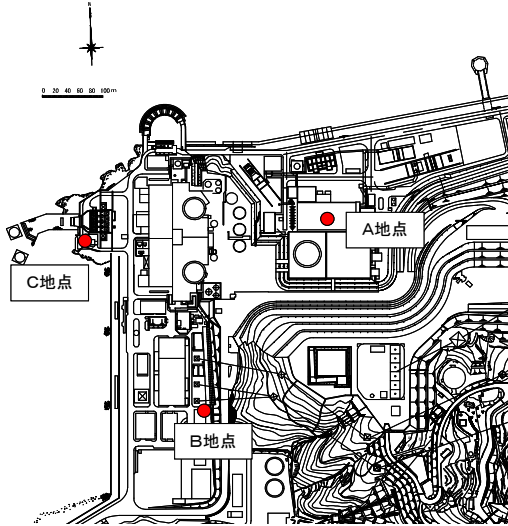
コメント内容

増幅特性の検討として、耐専スペクトルを基準に観測値との比較を行っているが、それをもって地下構造の特異な増幅特性はないとの結論は適切でない。せん断波速度を測定し、地下地盤構造を適切に評価してほしい。地震観測結果を分析してほしい。(森委員)

伊方発電所における地震観測と主な観測記録

伊方発電所における地盤系地震計の設置位置，観測期間および主な観測記録を示す。

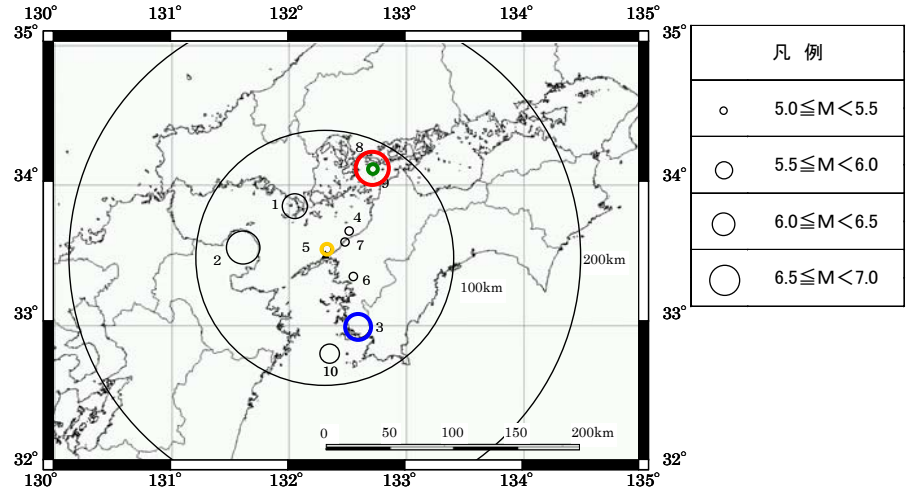
地震計設置位置図(配置図・柱状図)



観測点	観測期間
A地点	1975～1982
B地点	1982～1994
C地点	1999～

標高 (m)	A地点		B地点		C地点	
	地震計	地層	地震計	地層	地震計	地層
+51	▽GL	第四系	▽GL	三波川 変成岩 類	▽GL	三波川 変成岩 類
+10	○GL±0m		○GL-5m		○GL-5m	
+5	○GL-60m	三波川 変成岩 類	○GL-80m	三波川 変成岩 類	○GL-80m	三波川 変成岩 類
-9			○GL-160m		○GL-160m	
-70			○GL-80m		○GL-80m	
-150			○GL-160m		○GL-160m	
-200						

敷地における観測記録

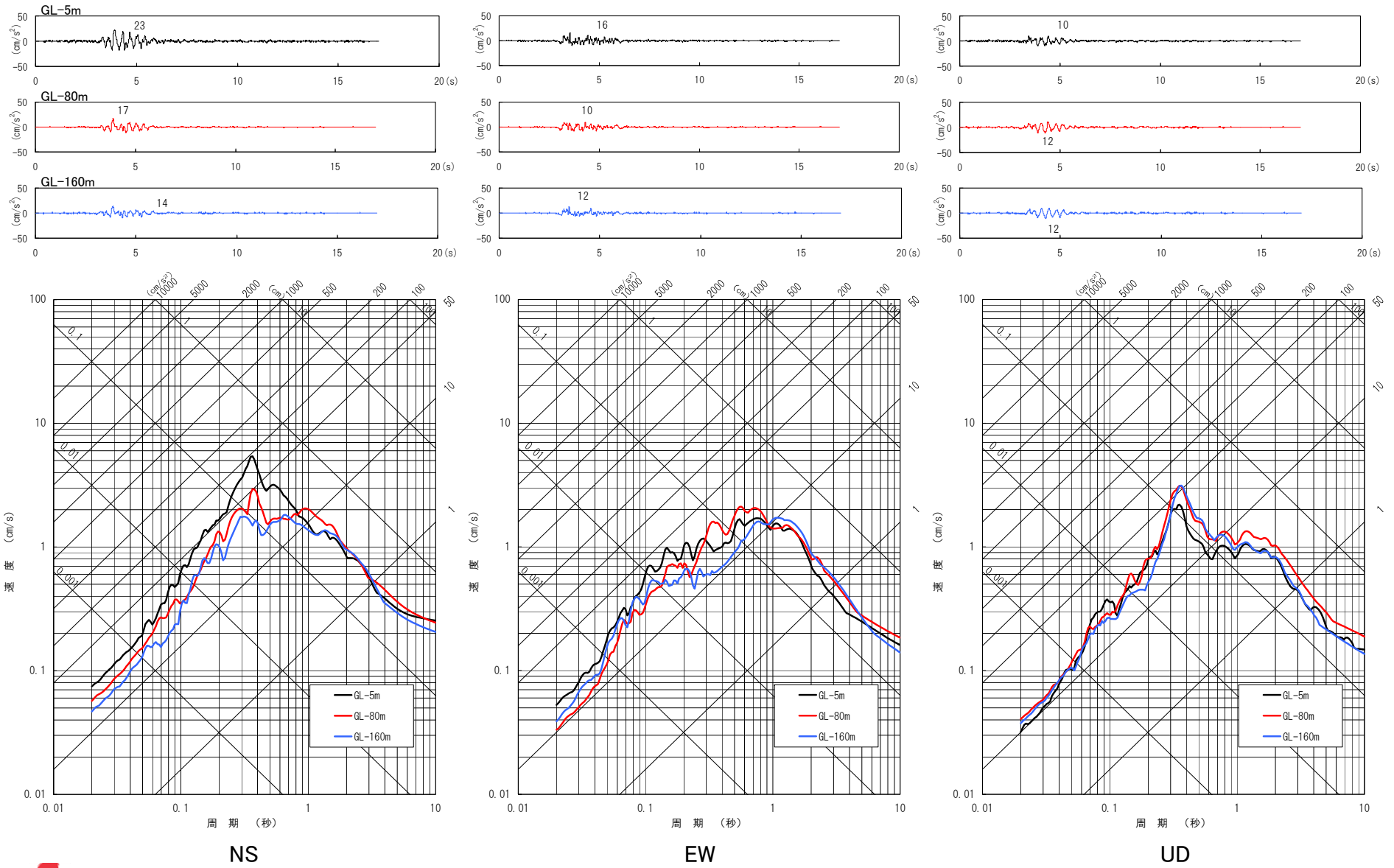


凡例	
○	5.0 ≤ M < 5.5
○	5.5 ≤ M < 6.0
○	6.0 ≤ M < 6.5
○	6.5 ≤ M < 7.0

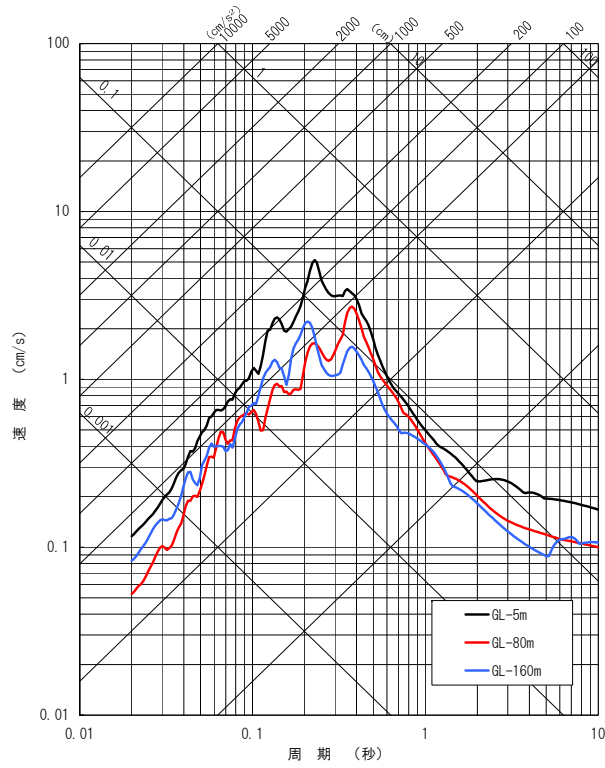
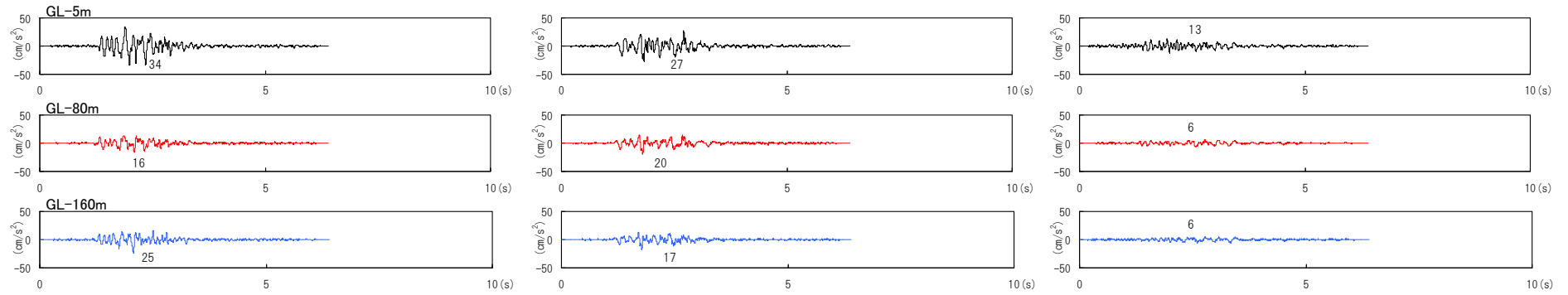
番号	震央位置 または地震名	発生日時	M	深さ (km)	震央 距離 (km)
1	周防灘	1979年7月13日	6.0	70	47
2	大分県北部	1983年8月26日	6.6	116	66
3	愛媛県南予	1985年5月13日	6.0	39	61
4	伊予灘	1988年7月29日	5.1	53	28
5	伊予灘	1991年1月4日	5.3	58	6
6	愛媛県南予	1993年8月14日	5.3	47	27
7	伊予灘	1993年8月31日	5.1	62	19
8	2001年芸予地震	2001年3月24日	6.7	46	80
9	安芸灘	2001年3月26日	5.2	46	78
10	豊後水道	2001年4月25日	5.7	39	77

○経験的グリーン関数法による地震動評価では、
No.3地震 → プレート間地震の要素地震に採用
No.9地震 → 中央構造線断層帯および海洋プレート内地震の要素地震に採用

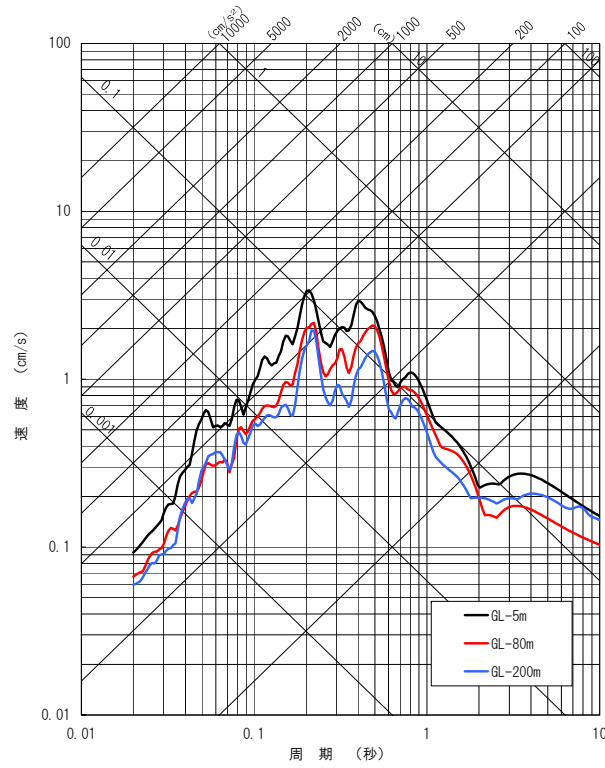
No.3 1985.5.13 愛媛県南予の地震 M6.0



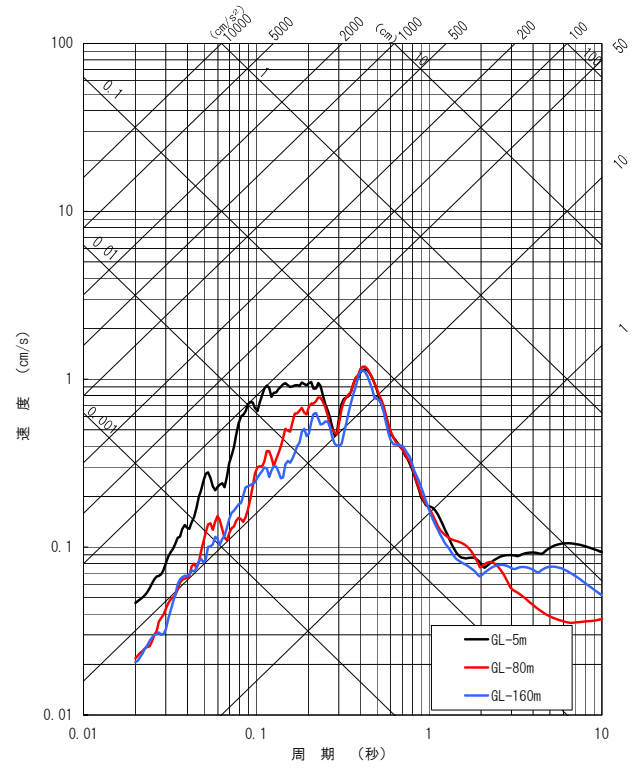
No.5 1991.1.4 伊予灘 M5.3



NS



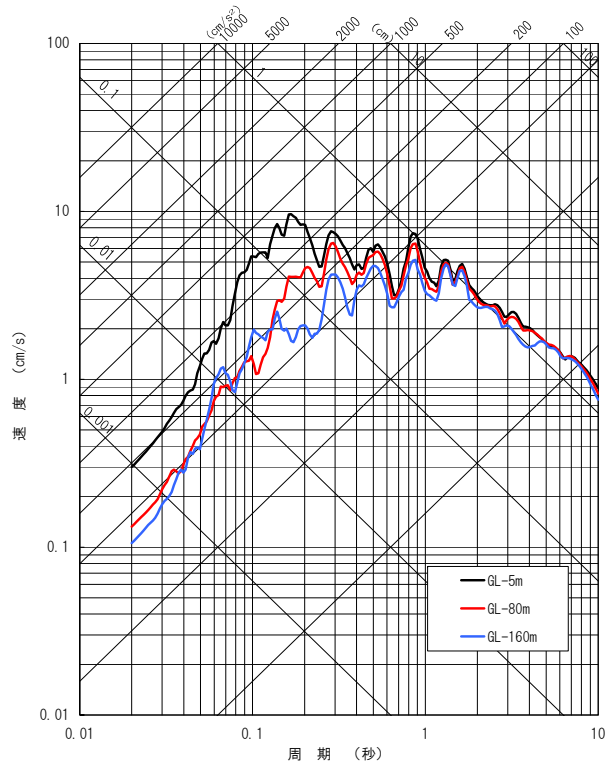
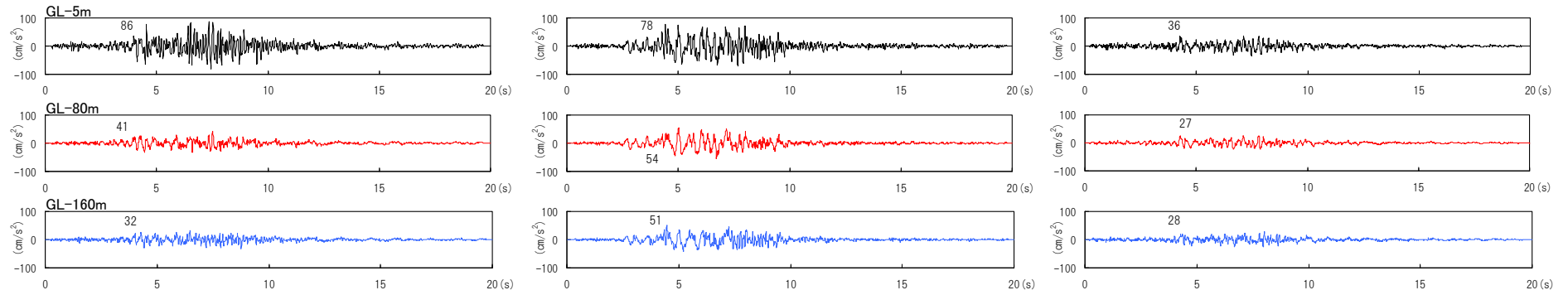
EW



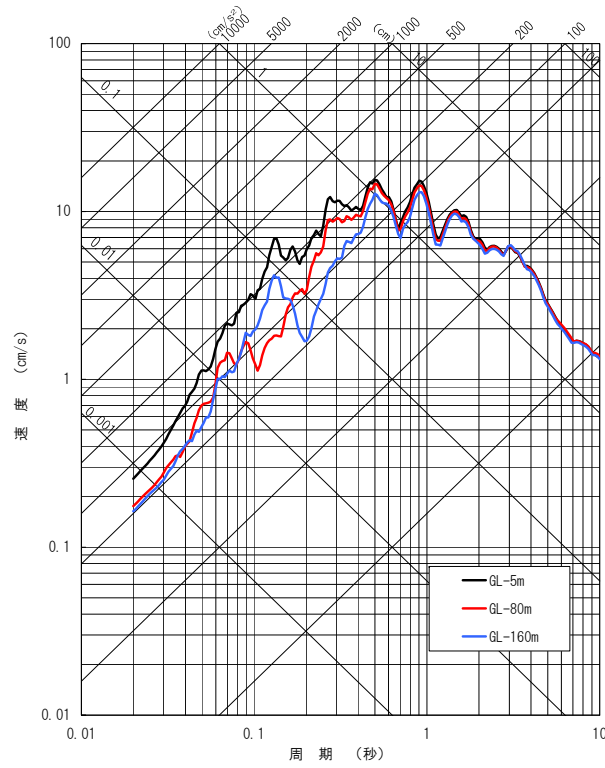
UD



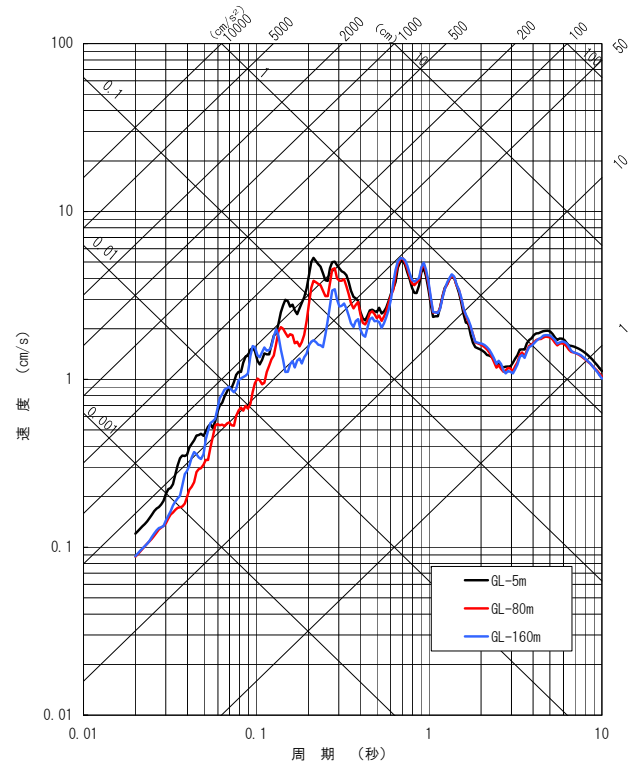
No.8 2001.3.24 2001年芸予地震 M6.7



NS



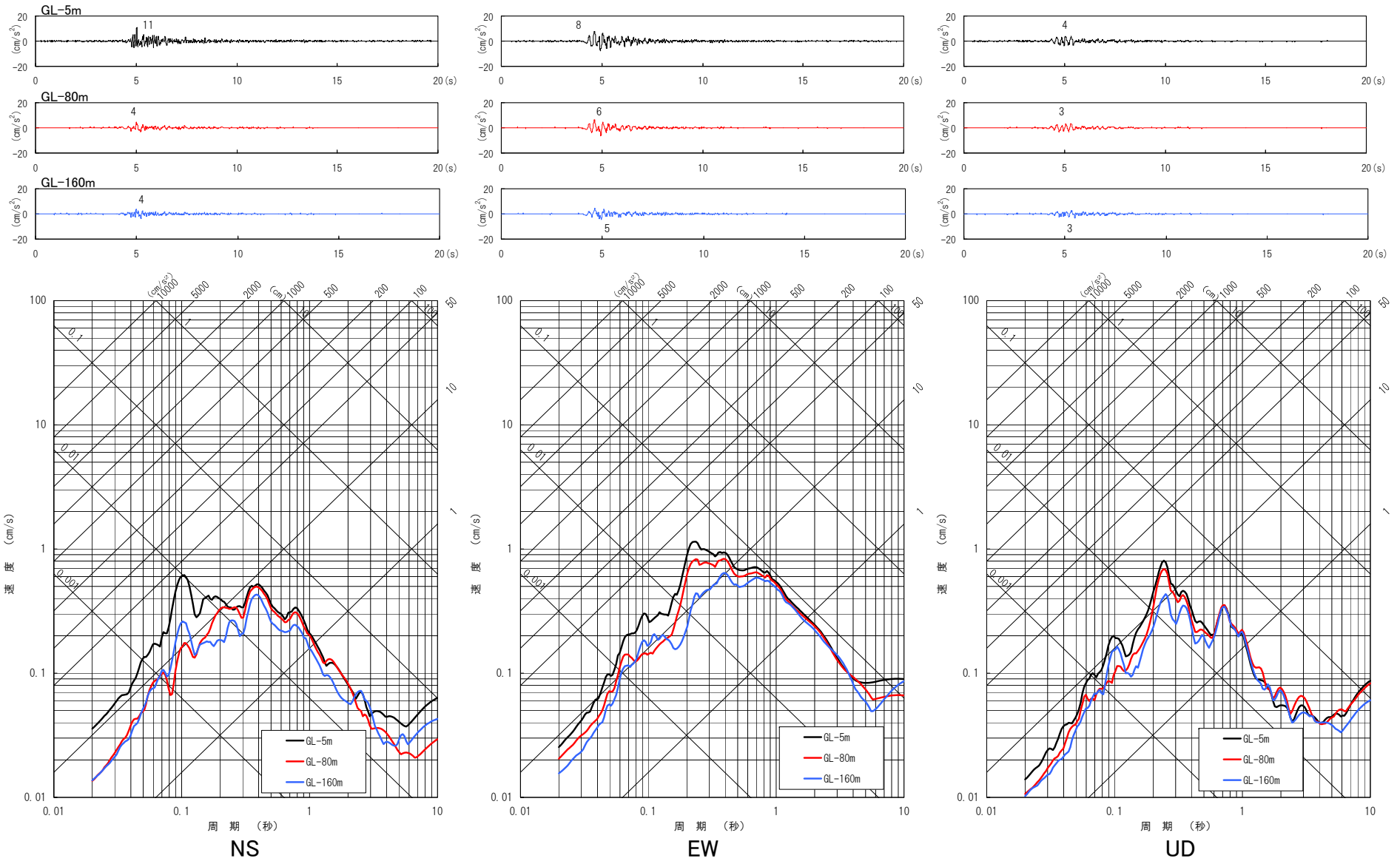
EW



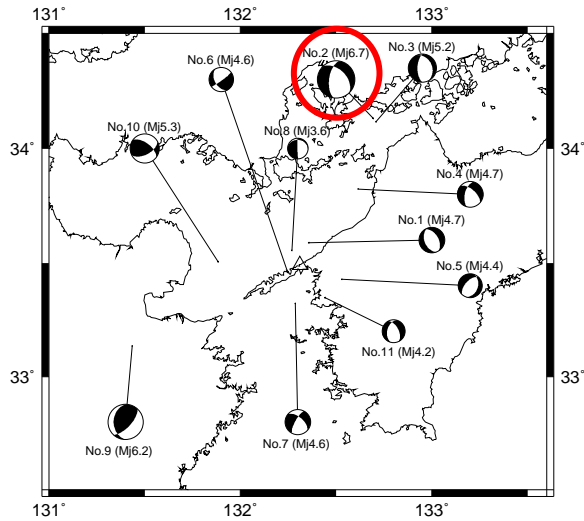
UD



No.9 2001.3.26 安芸灘 M5.2



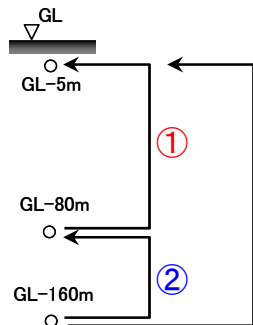
2001年芸予地震における伝達関数の分析



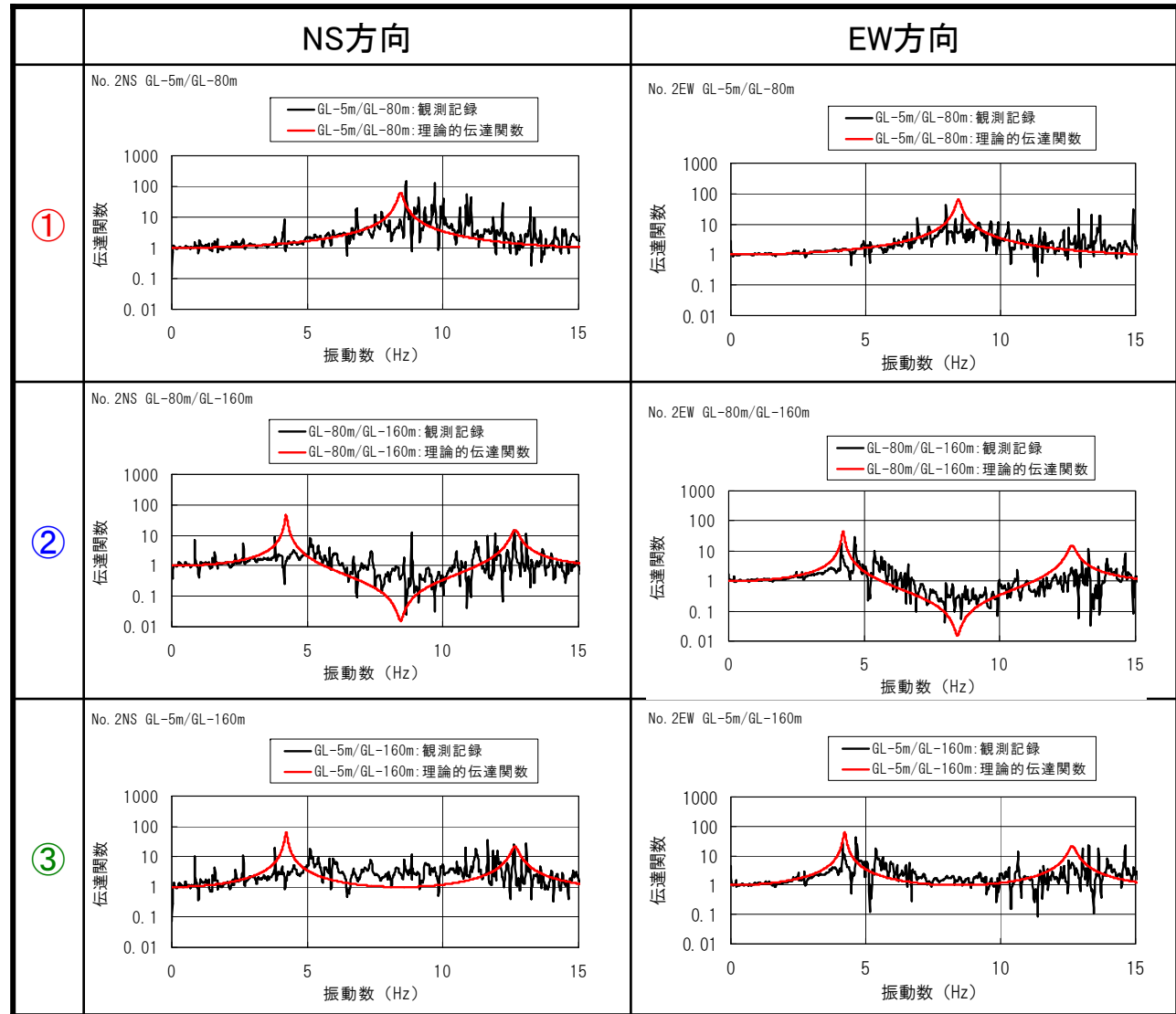
地震位置図

地盤構造モデル

層上面 (m)	V_p (m/s)	V_s (m/s)	密度 (kg/m^3)	Q値
0	5300	2600	3000	50
10	5500	2700	3000	50
200	5700	2800	3000	190
2000	6100	3500	3000	230
16000	6700	3870	2800	400
40000	6600	3820	2800	400
42000	6700	3870	2900	400
46000	8000	4620	3200	1200

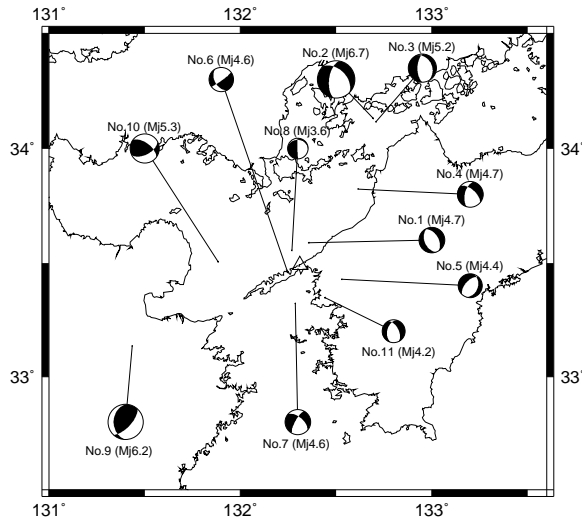


伝達関数
検討位置



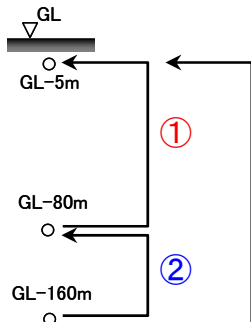
理論的伝達関数は、地盤構造モデルの表層2層から算定した

最大加速度10Gal以上の観測記録を平均した伝達関数との比較

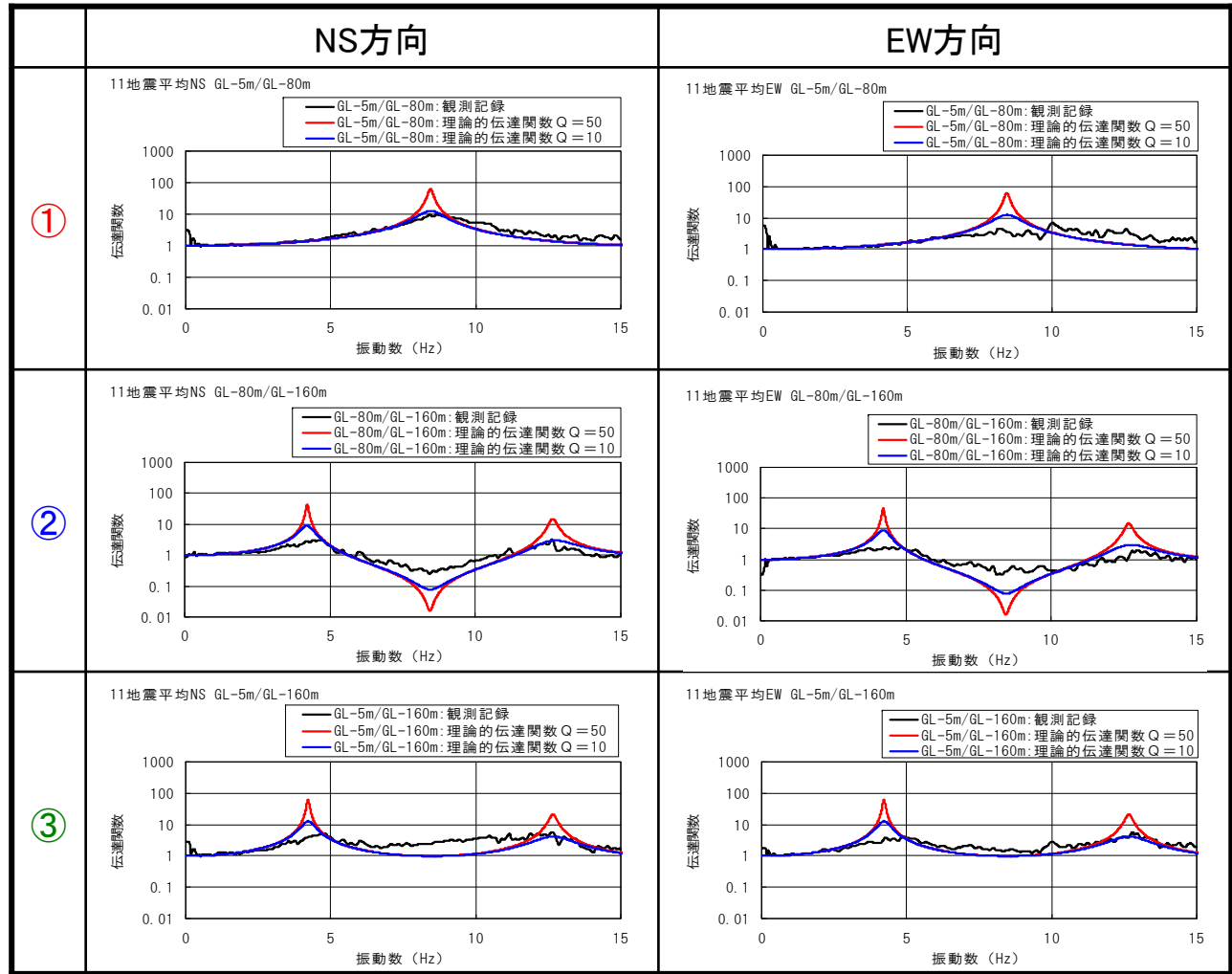


地震位置図

No.	年月日	北緯	東経	深さ(km)	Mj
1	2001/01/09	33° 35.3"	132° 21.4	46	4.7
2	2001/03/24	34° 07.9"	132° 41.6	46	6.7
3	2001/03/26	34° 07.0"	132° 42.5	46	5.2
4	2002/03/25	33° 49.4"	132° 36.9	46	4.7
5	2002/04/06	33° 25.7"	132° 31.8	42	4.4
6	2004/04/20	33° 28.1"	132° 14.6	48	4.6
7	2005/05/25	33° 19.4"	132° 17.2	54	4.6
8	2006/06/06	33° 33.3"	132° 16.1	49	3.6
9	2006/06/12	33° 08.1"	131° 26.1	146	6.2
10	2006/09/26	33° 30.3"	131° 53.0	70	5.3
11	2006/11/19	33° 20.8"	132° 26.4	41	4.4



③
伝達関数
検討位置



設定した地盤構造モデルによる理論的伝達関数(図の赤線)は、観測記録の伝達関数とほぼ整合していることを確認した。

なお参考までに、観測記録の伝達関数のピークレベルと整合するQ値を算定すると、10程度と求まる(図の青線)。

2001年芸予地震を対象として地盤同定解析を実施

解析条件

- 同定するための目的関数は芸予地震の鉛直アレイ記録から計算されるS波の地盤増幅特性（伝達関数）とする
- 同定手法には遺伝的アルゴリズムを使用する
- 伝達関数はNS, EW方向ごとに計算したものを平均化し, バンド幅0.4Hzのparzenウィンドウを掛ける
- 初期地盤構造モデルを設定した後, 地震計設置深度を勘案して層を再分割し, 1段階目で, S波速度構造および減衰定数hをパラメータとして同定を行い, S波速度構造をFIXする。
- 2段階目にその結果を基に減衰定数hのみをパラメータとして再同定を行い, 最終のモデルとする。
- なおパラメータの変動範囲は初期地盤構造の値を基準にS波速度が $\pm 500\text{m/s}$, 減衰は0.01~0.20とする。

初期地盤構造モデル

地震計 設置深度	上端深さ GL (m)	Vs (km/s)	密度 ρ (g/cm ³)	減衰 h
▼-5m	0	2.6	3.0	0.01
▼-80m	-10	2.7	3.0	0.01
▼-160m				
	-200	2.8	3.0	0.0026

地盤構造モデルの同定結果

(第1段階)

上端深さ GL (m)	Vs (km/s)	密度 ρ (g/cm ³)	減衰 h
0	2.6	3.0	0.09
-5	2.6	3.0	
-10	2.77	3.0	0.12
-80	3.16	3.0	
-160	3.16	3.0	

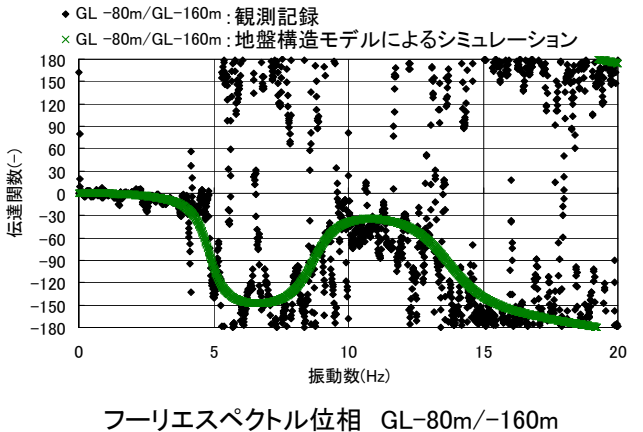
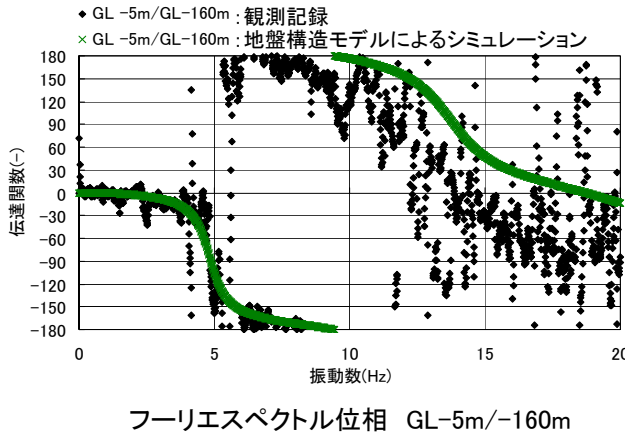
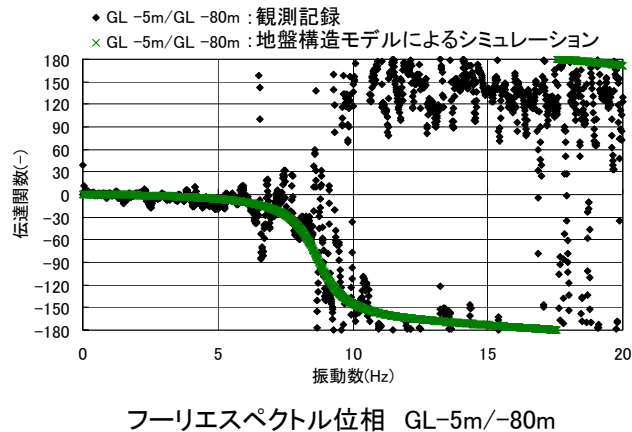
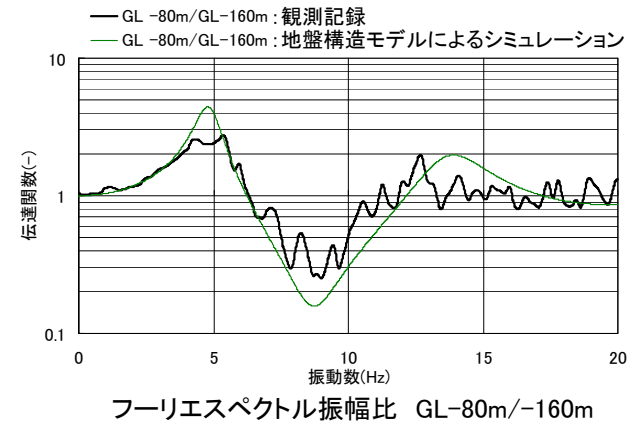
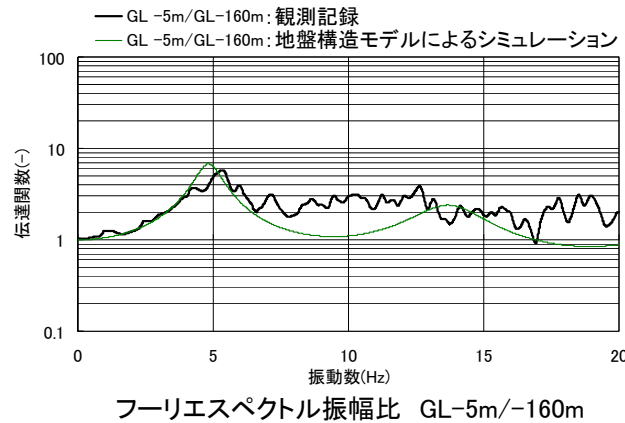
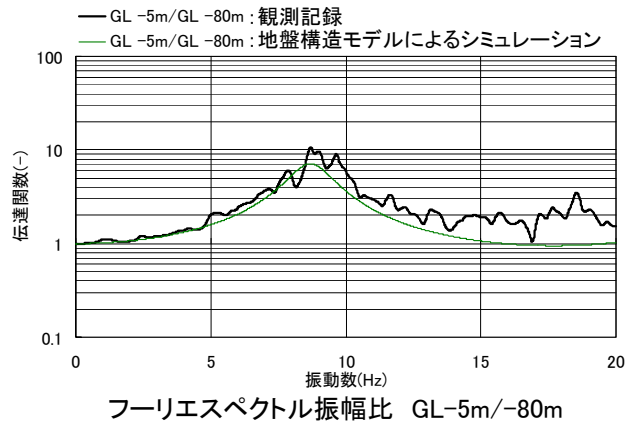
(第2段階)

上端深さ GL (m)	Vs (km/s)	密度 ρ (g/cm ³)	減衰 h
0	2.6	3.0	0.09
-5	2.6	3.0	
-10	2.77	3.0	0.10
-80	3.16	3.0	
-160	3.16	3.0	

同定した地盤構造モデルの伝達関数

同定した地盤構造モデルから一次元波動論により理論的に計算される伝達関数と、観測記録の伝達関数を比較する。

比較した結果、観測記録の伝達関数は同定された地盤構造モデルによる理論値と概ね一致している。



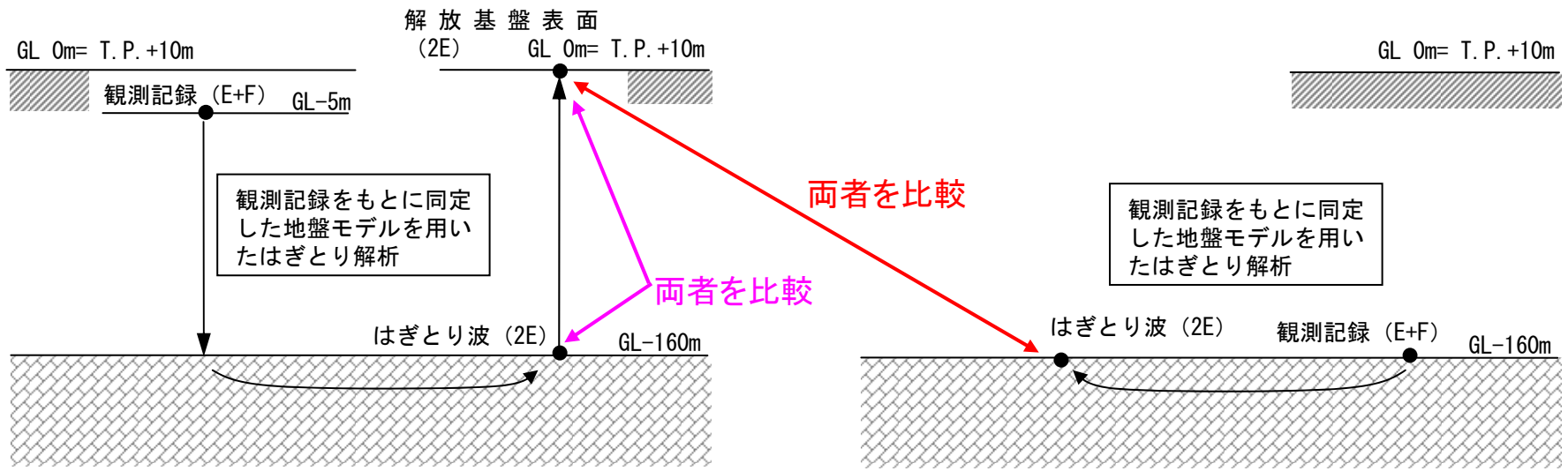
GL-5m/GL-80m

GL-5m/GL-160m

GL-80m/GL-160m

同定した地盤構造モデルを用いて2001年芸予地震ではぎとり解析を実施

表層地盤による増幅の影響を正確に評価するためには、入射波(E)と反射波(F)の干渉による影響を取り除き、2Eで比較する必要がある。このため、同定した地盤構造モデルを用いてはぎとり解析を行い、GL0mおよびGL-160mレベルの2E波を作成し、比較を行う。



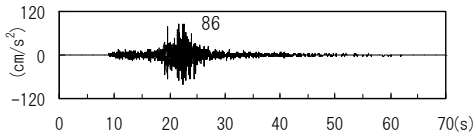
同定した地盤構造モデル

上端深さ GL (m)	Vs (km/s)	密度 ρ (g/cm ³)	減衰 h
0	2.6	3.0	0.09
-5	2.6	3.0	
-10	2.77	3.0	
-80	3.16	3.0	0.10
-160	3.16	3.0	

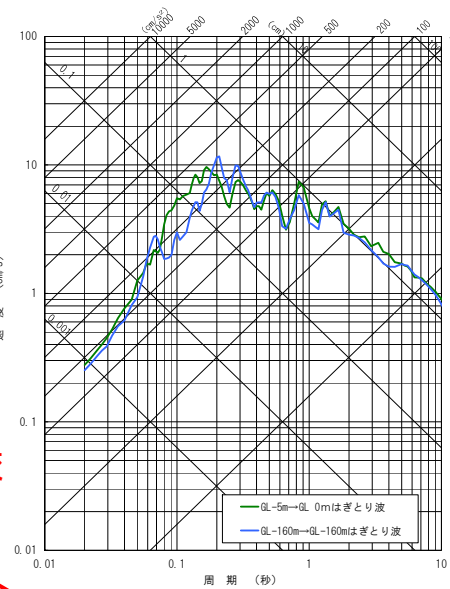
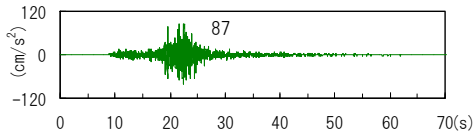


2001年芸予地震 はぎとり解析結果の比較 NS

GL-5m観測記録

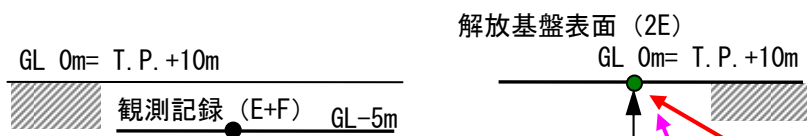


GL0mはぎとり波



一部周期帯にスペクトルが乖離するところはあるが、全体的には大きな増幅はみられない

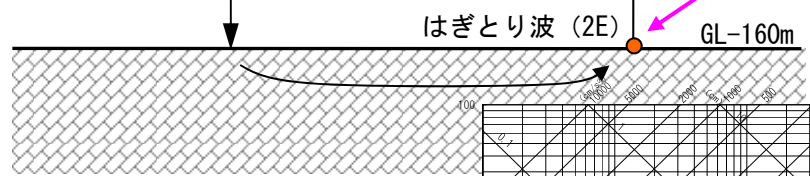
GL 0m= T. P. +10m



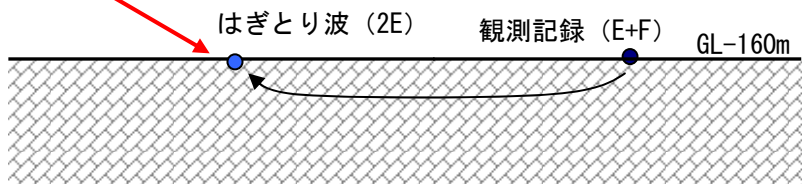
観測記録をもとに同定した地盤モデルを用いたはぎとり解析

両者を比較

両者を比較

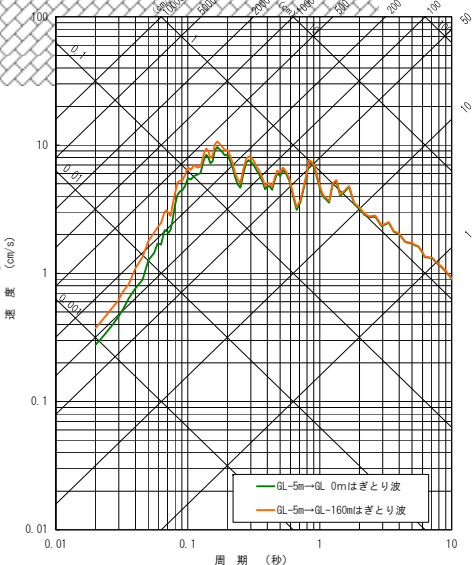
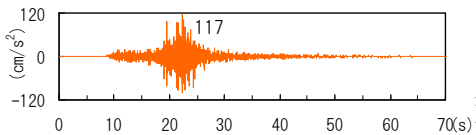


はぎとり波 (2E) GL-160m



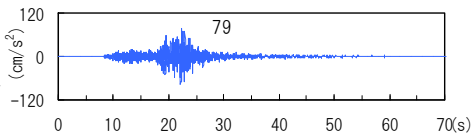
はぎとり波 (2E) 観測記録 (E+F) GL-160m

GL-160mはぎとり波

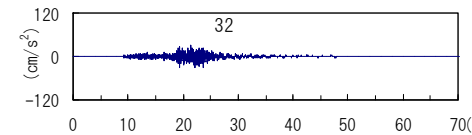


同定した地盤構造モデルからは特定の周期帯における増幅はみられない

GL-160mはぎとり波

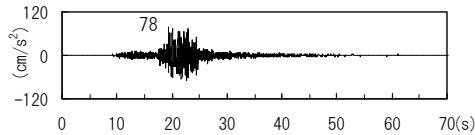


GL-160m観測記録

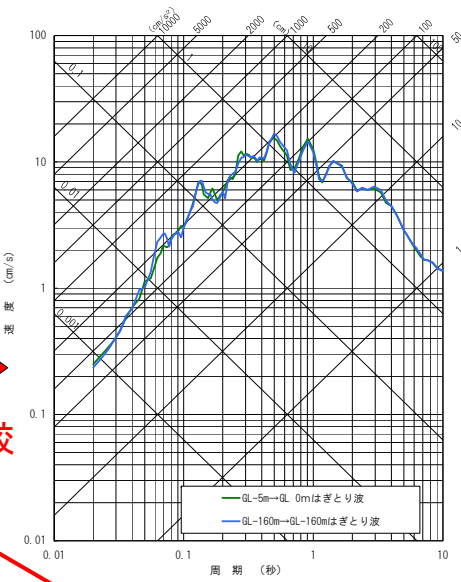
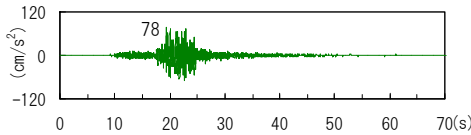


2001年芸予地震 はぎとり解析結果の比較 EW

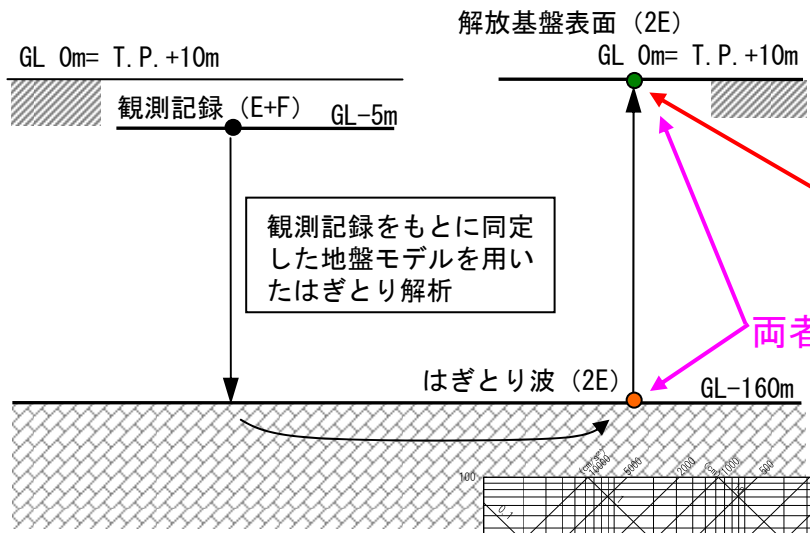
GL-5m観測記録



GL0mはぎとり波



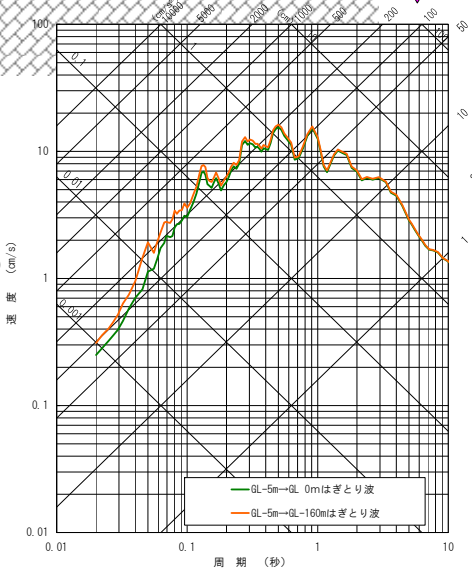
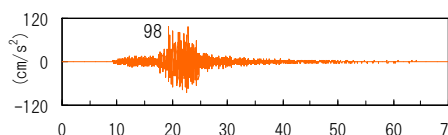
浅部地盤による増幅はほとんどみられない



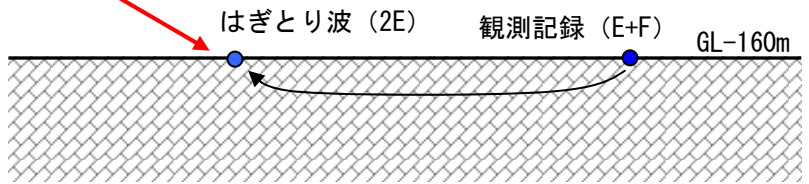
両者进行比较

両者进行比较

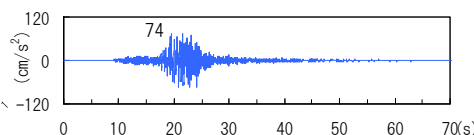
GL-160mはぎとり波



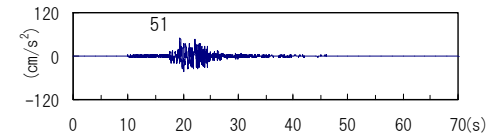
同定した地盤構造モデルからは特定の周期帯における増幅はみられない



GL-160mはぎとり波



GL-160m観測記録



観測記録を用いた地盤増幅特性の分析 まとめ

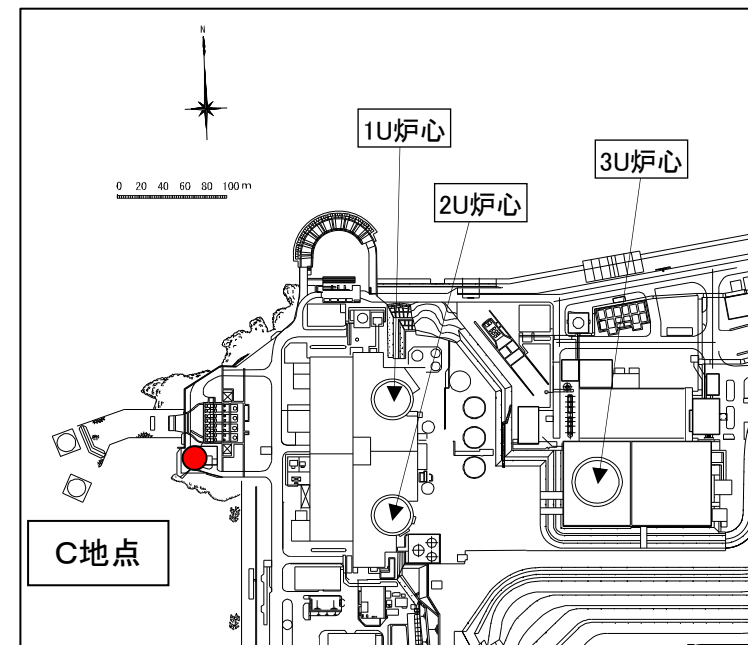
観測記録の伝達関数は理論値と整合的であることから、敷地地盤の特性は比較的素直であり、複雑な構造ではないことを確認した。

また、2001年芸予地震の観測記録を用いてはぎとり解析を行った結果からは、EW方向では敷地の浅部地盤（GL-160m～地表間）における増幅はほとんど見られないものの、NS方向においてはごく一部の周期帯で2倍程度の増幅が見られるが、その増幅は大きいものではないと考えている。

このような傾向は、GL-5m/GL-160m間のNS方向の伝達関数の比較にも現れており、EW方向にはこのような傾向が見られないことから、地盤物性による影響ではないと考えられ、これは地震計が用地の関係から岩礁地形の先端付近に設置されているため、極ローカルな地形の影響の可能性も考えられる。各号機の炉心は地震計が設置されている小規模な岩礁とは異なる奥まった地点に設置されており、炉心ではこのような影響はないと推察される（右図）。

以上のことに鑑み、今後、さらに観測記録の分析を更に進めるとともに、地盤系の地震観測を充実させることも検討中である。

なお、地震動評価においては地盤表層（GL-5m）の記録に基づき要素地震を作成しており、本来補正すべき若干の増幅については要素地震に含まれた状態で、地震動評価に用いているため、その評価結果は安全側の評価となっている。

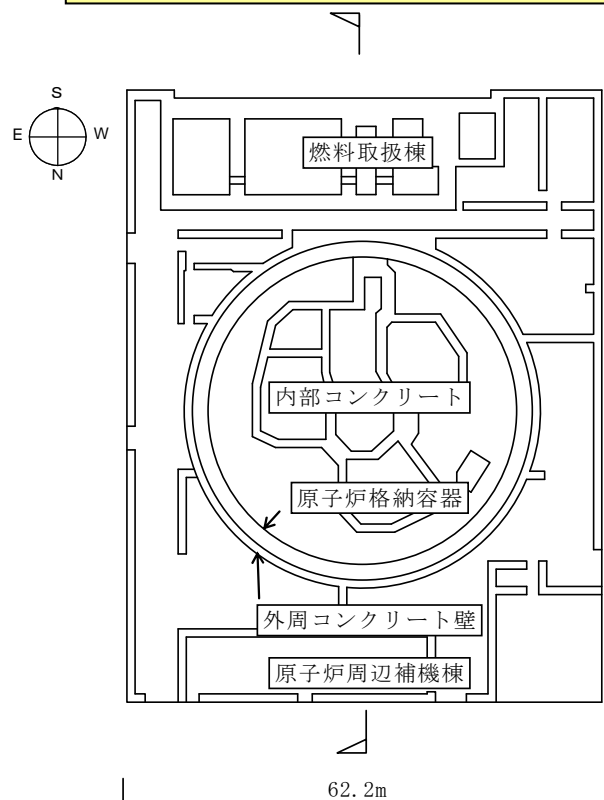


2. 地震応答解析モデル

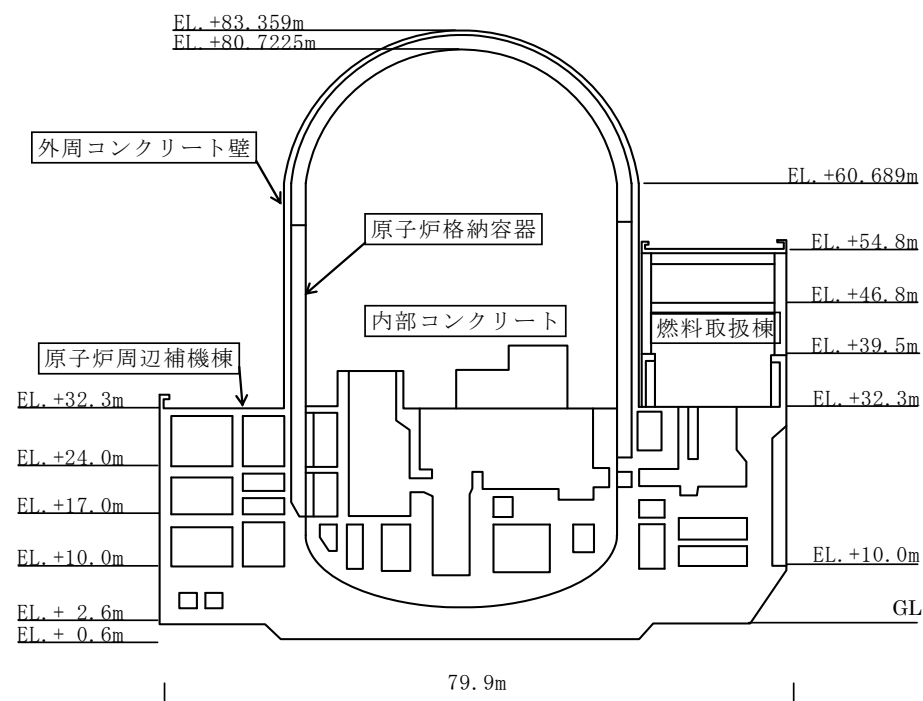
コメント
使用した地震応答解析モデルについて、地震観測結果によって検証した結果を示してほしい。（森委員）

原子炉建屋の概要

構造:鉄筋コンクリート造および鉄骨造(一部鉄骨鉄筋コンクリート造)
基礎:厚さ約9.0m(一部7.4m), 直接岩盤上に設置
平面形状:62.2m(EW方向)× 79.9m(NS方向)
高さ:基礎版底面から約83m
建屋構成:原子炉格納施設(原子炉格納容器, 外周コンクリート壁及び内部コンクリート), 原子炉周辺補機棟及び燃料取扱棟を同一基礎版上に設置

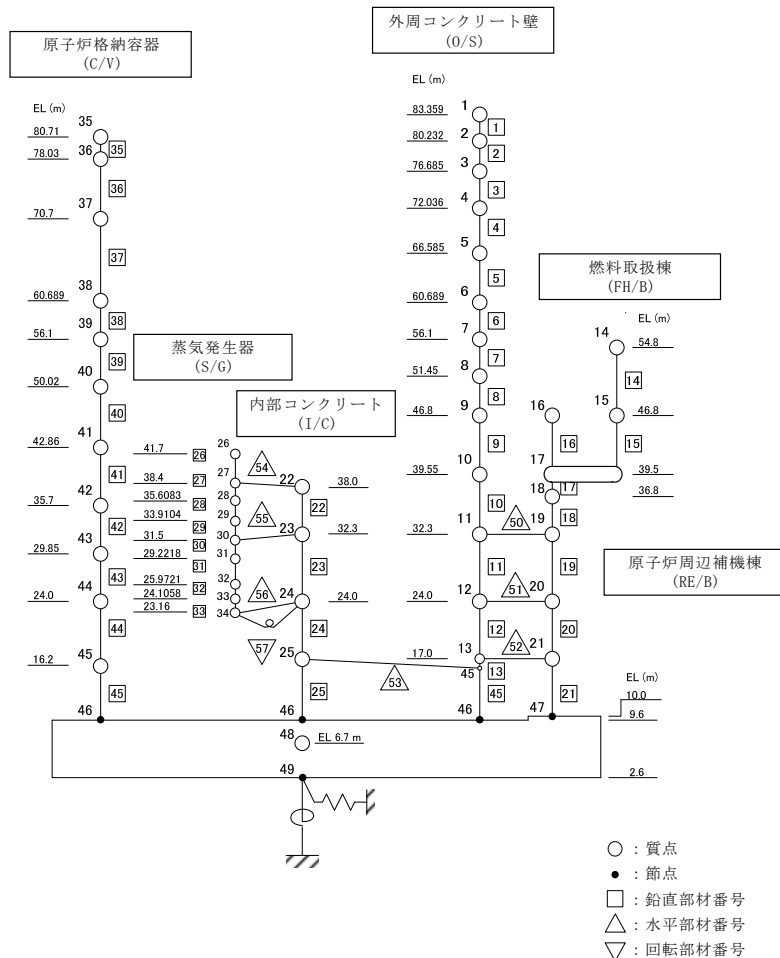


平面図(EL.+24.0m)



断面図

原子炉建屋の地震応答解析モデル(水平方向)



○多軸多質点系スウェイ・ロッキングモデル

- ・設計時のモデルを基に、最新の規格・基準等を反映したモデル

○建屋底面の地盤ばね(水平・回転)

- ・JEAG4601-1991による近似地盤ばね

○建屋の減衰

- ・モード減衰(ひずみエネルギー比例型)
- ・減衰定数

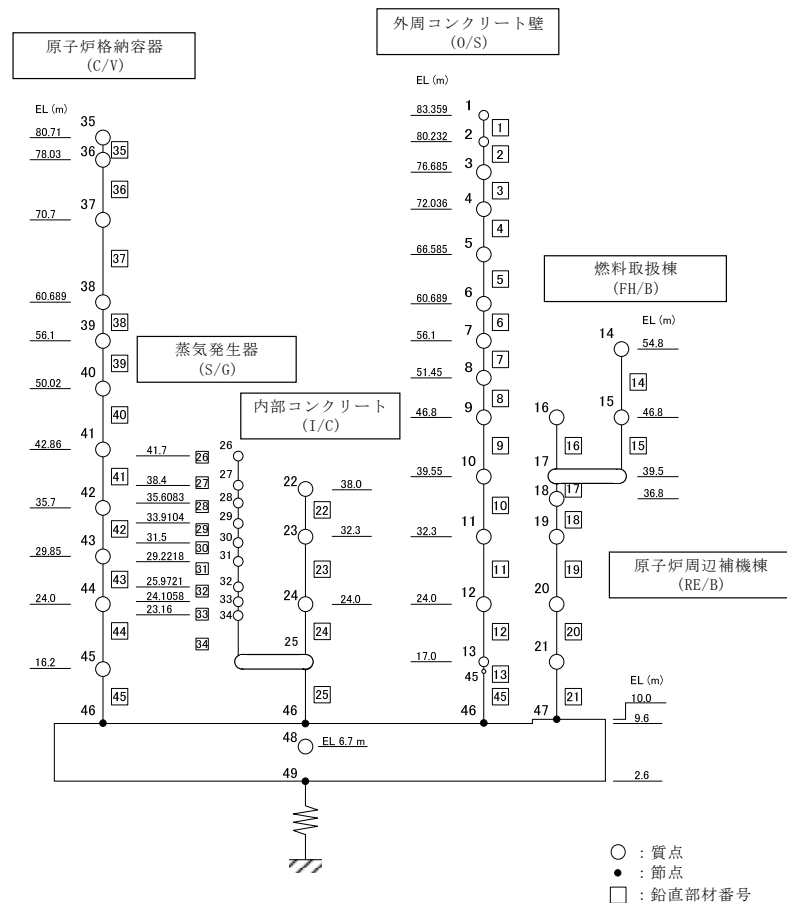
鉄筋コンクリート造部	: 5%
鉄骨造部	: 2%
原子炉格納容器	: 1%
蒸気発生器	: 3%

○非線形特性(JEAG4601-1991)

- ・鉄筋コンクリート造耐震壁の非線形復元力特性
- ・鉄骨造(筋かい、ラーメン架構)の非線形復元力特性
- ・基礎の浮上りによる地盤の回転ばねの幾何学的非線形※

※基礎の浮上りに応じた地震応答解析法の概要について、参考(P27, 28)に示す。

原子炉建屋の地震応答解析モデル(鉛直方向)



○多軸多質点系モデル

○建屋底面の地盤ばね(鉛直)

・JEAG4601-1991による近似地盤ばね

○建屋の減衰

・モード減衰(ひずみエネルギー比例型)

・減衰定数

鉄筋コンクリート造部	:5%
鉄骨造部	:2%
原子炉格納容器	:1%
蒸気発生器	:1%

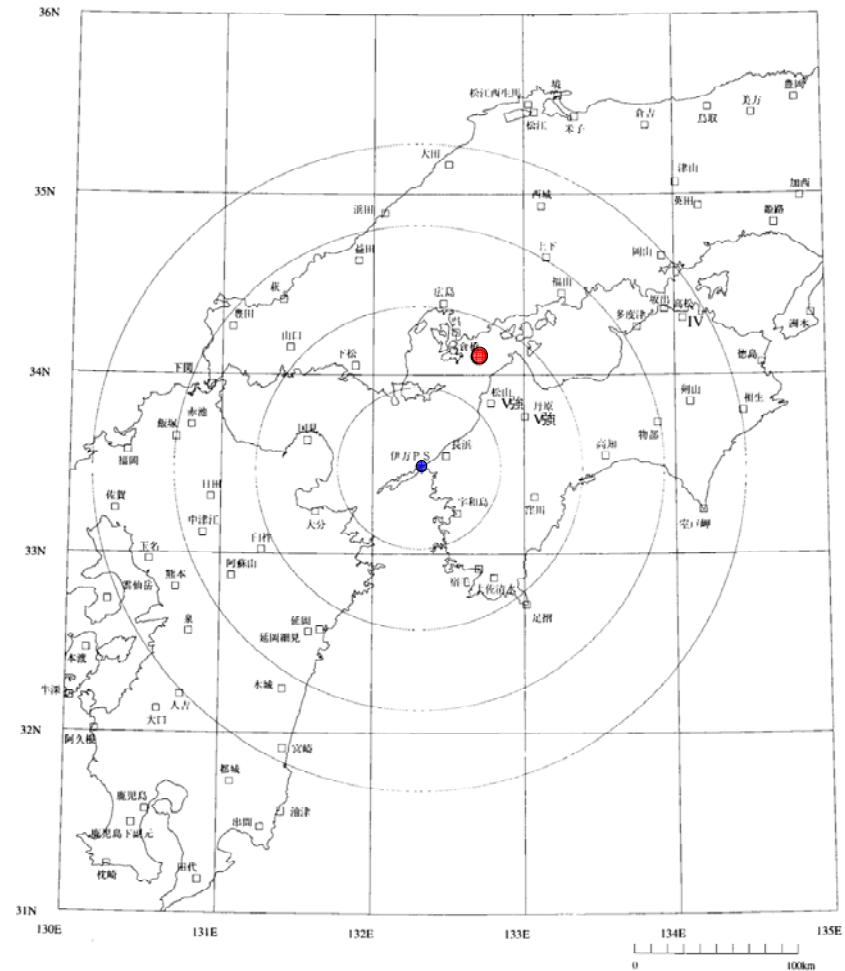
観測記録を用いた検討

・地震応答解析モデルに係る検討として、鉄筋コンクリート造部の減衰定数を5%と設定していることについて、観測記録を用いた応答解析による検討を実施

・平成13年芸予地震時の観測記録(基礎版上で約 50cm/s^2)を用いた検討

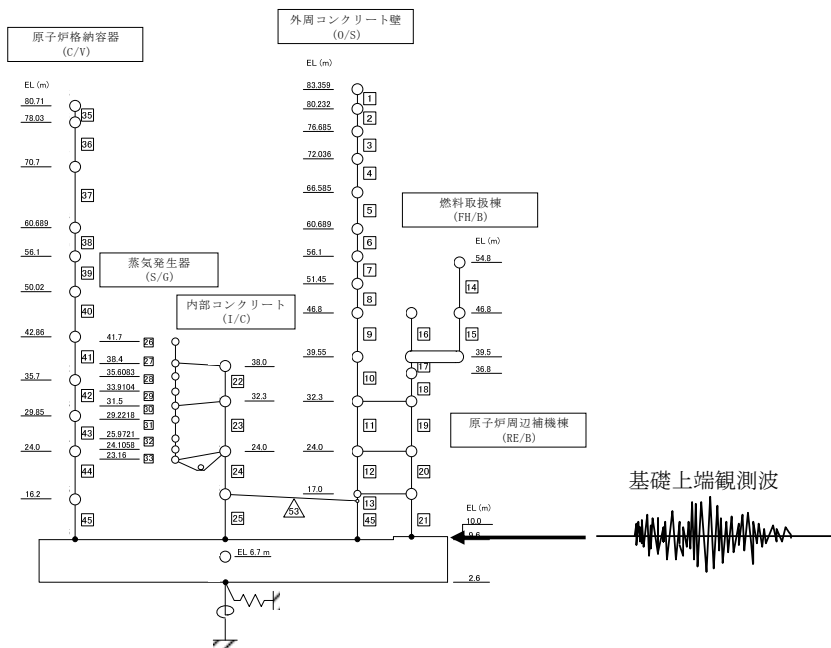
<地震の諸元>

- 平成13年(2001年)芸予地震
- 発 生:平成13年3月24日
- 規 模:マグニチュード6.7
- 震源深さ:約50km
- 震央距離:約80km

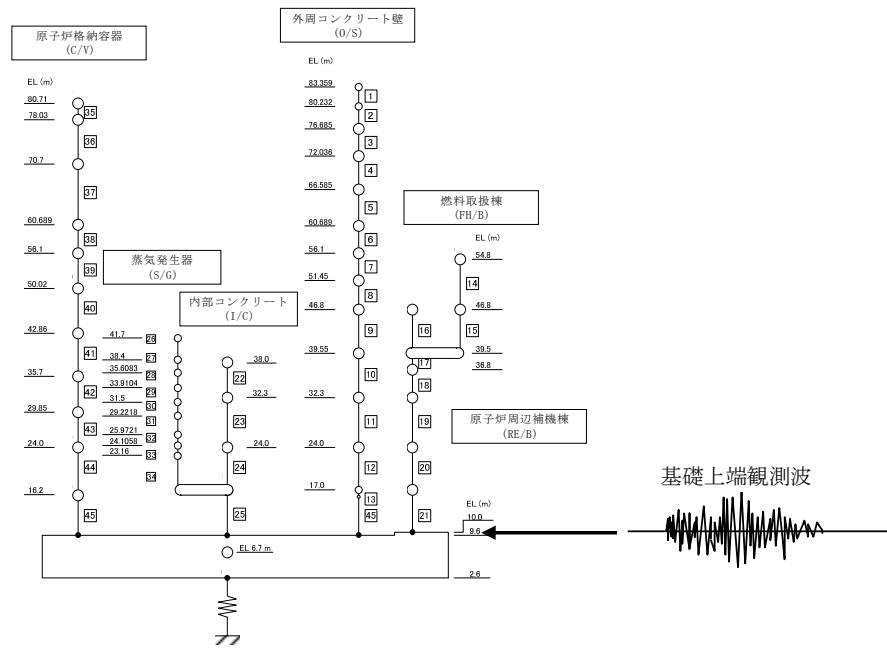


検討内容および結果

- 基礎版上の観測記録を入力としたBCモデルの応答解析(鉄筋コンクリート造部の減衰定数として5%及び3%を設定)を実施。
- 減衰定数5%と3%で応答解析結果に大きな違いは無いが、減衰定数を5%とした場合の方が3%とした場合に比較してより観測記録を近似する傾向がある。
- 建屋・地盤を含めた全体系の減衰の中で鉄筋コンクリート造部の減衰定数を5%と設定して支障が無い。

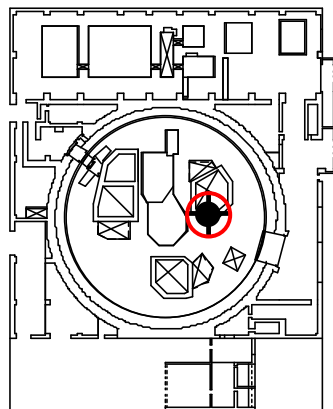


地震応答解析モデル
(水平方向)

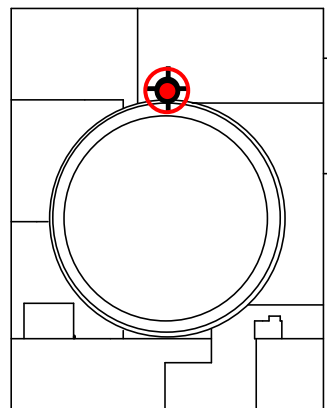


地震応答解析モデル
(鉛直方向)

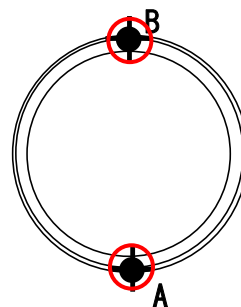
原子炉建屋の地震観測位置



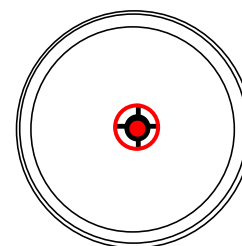
EL. +38m



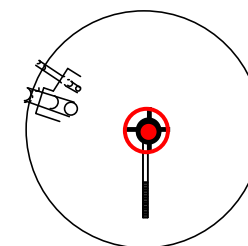
EL. +55m



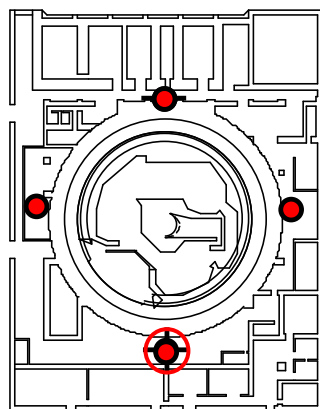
EL. +61m



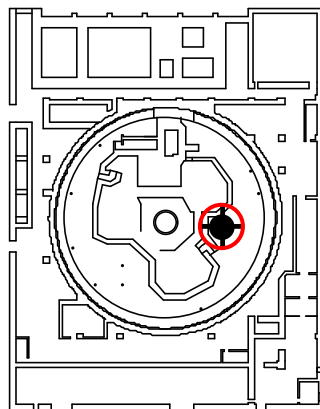
EL. +81m



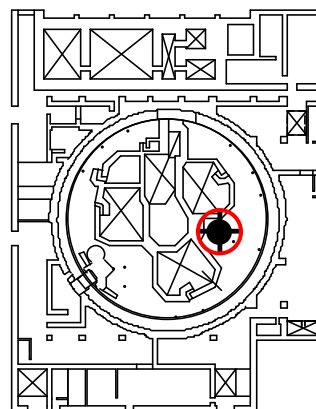
EL. +83m



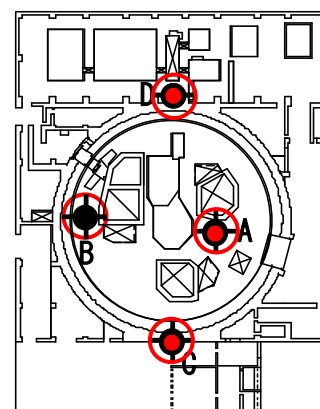
EL. +10m



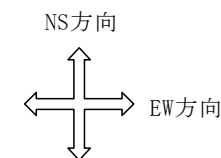
EL. +17m



EL. +24m



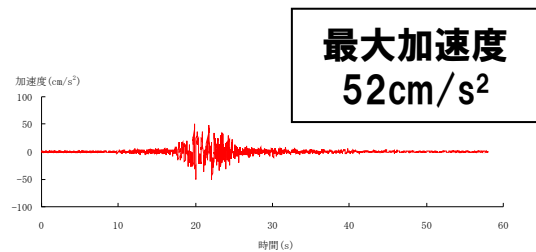
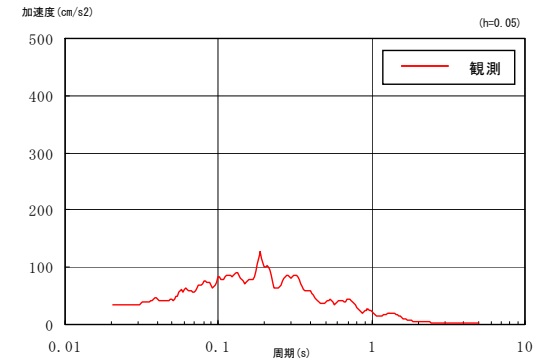
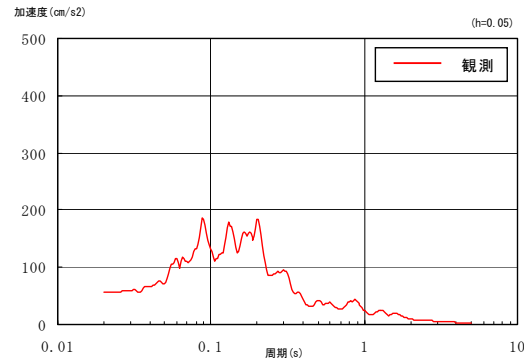
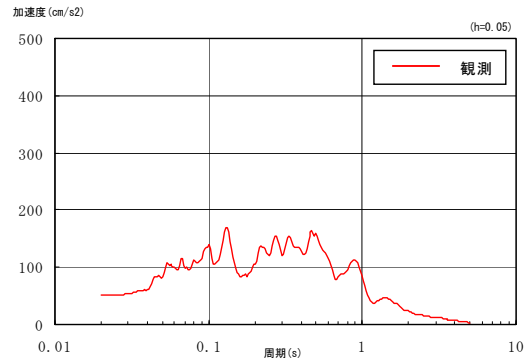
EL. +32m



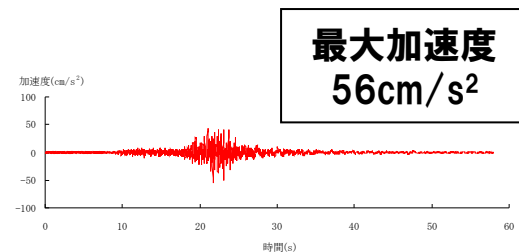
記号	観測方向
	EW方向
	NS方向
	鉛直方向

検討に用いた地震計

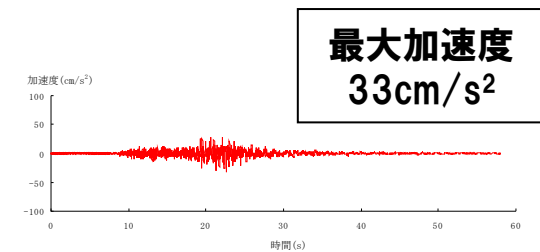
基礎版上の観測記録



EW方向

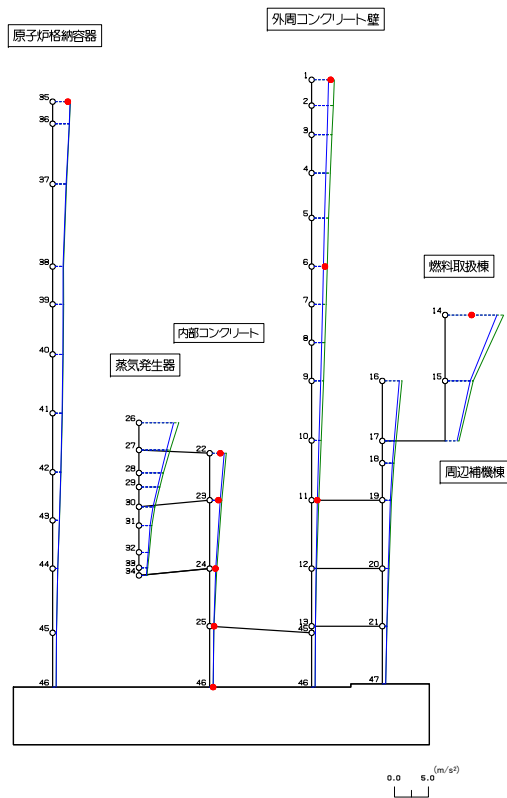
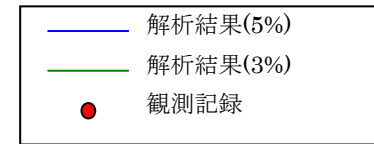


NS方向

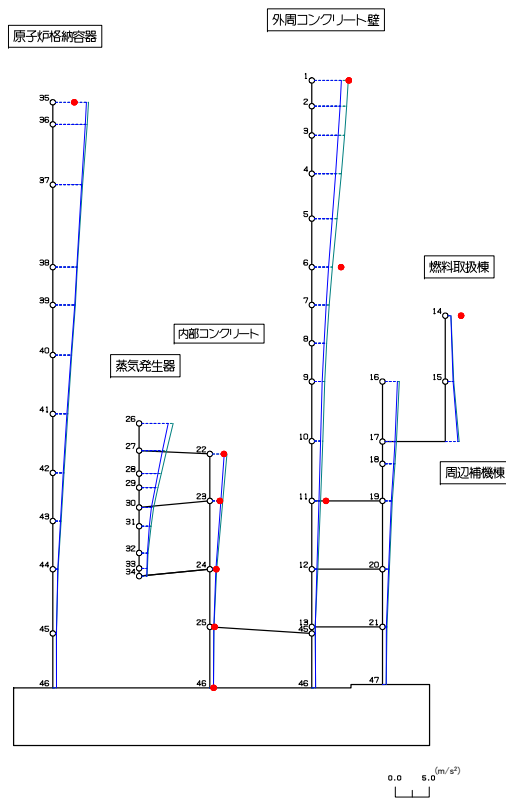


UD方向

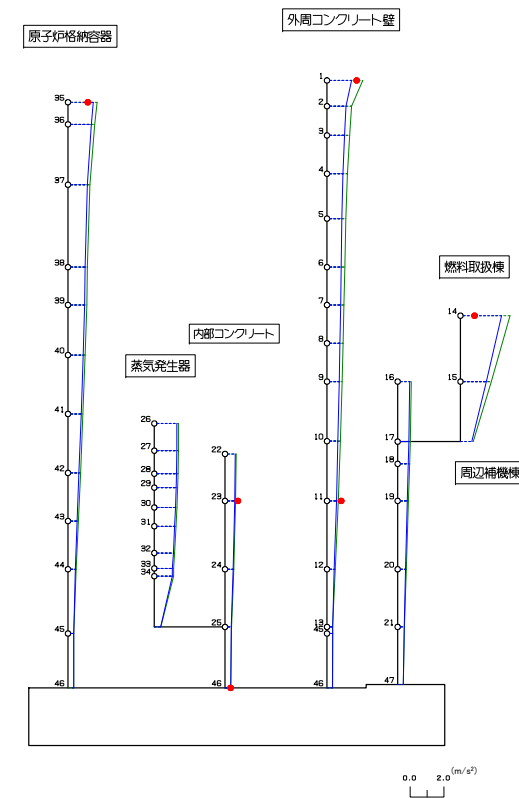
応答解析結果と観測記録 (最大応答加速度)



EW方向

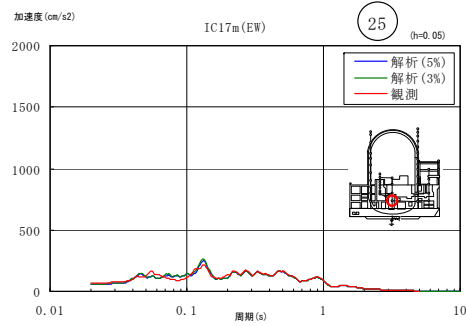


NS方向

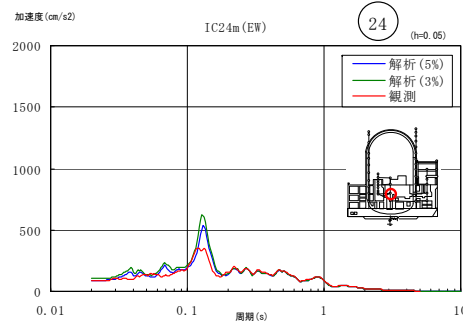


UD方向

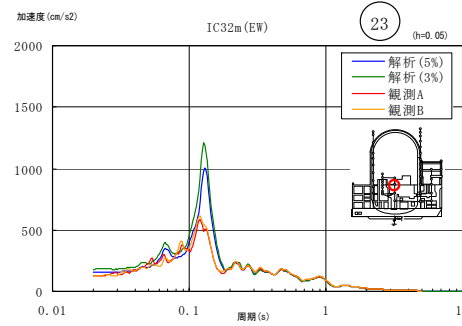
応答解析結果と観測記録 (床応答スペクトル:EW方向)



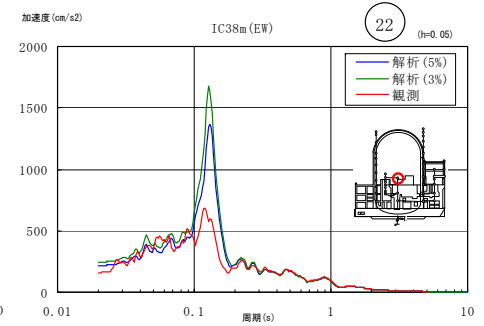
内部コンクリート(EL.+17m)



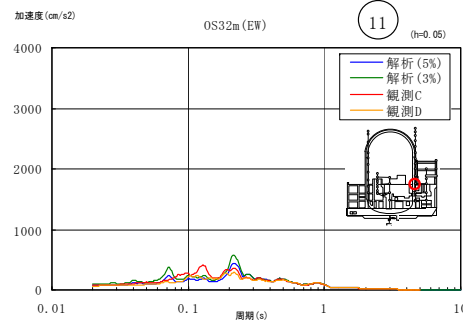
内部コンクリート(EL.+24m)



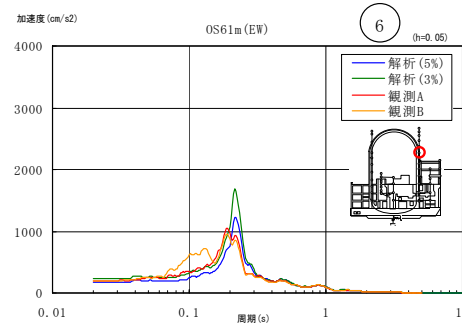
内部コンクリート(EL.+32m)



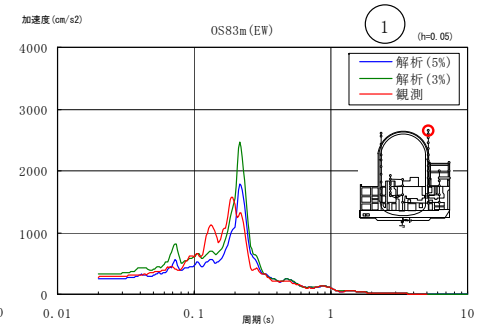
内部コンクリート(EL.+38m)



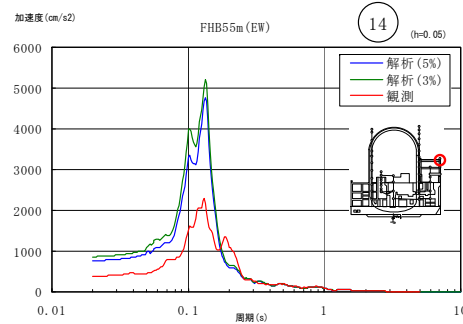
外周コンクリート壁(EL.+32m)



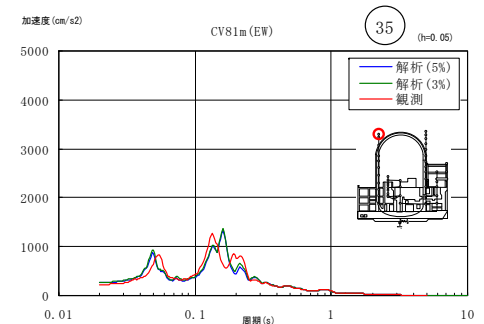
外周コンクリート壁(EL.+61m)



外周コンクリート壁(EL.+83m)

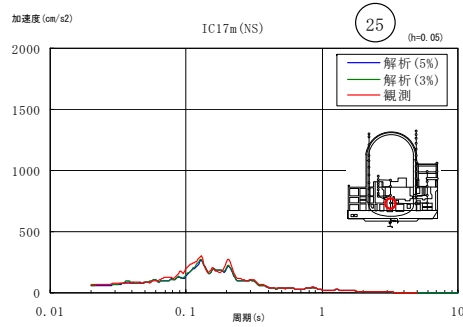


燃料取扱棟(EL.+55m)

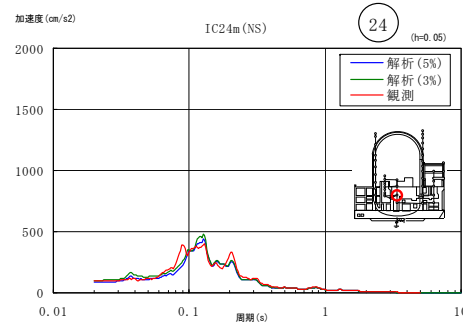


原子炉格納容器(EL.+81m)

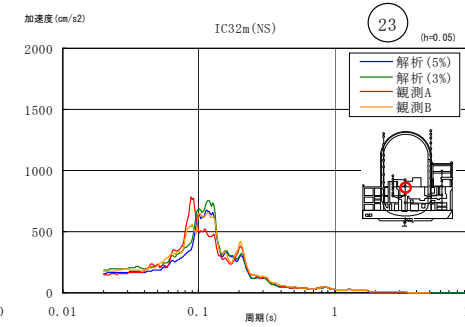
応答解析結果と観測記録 (床応答スペクトル: NS方向)



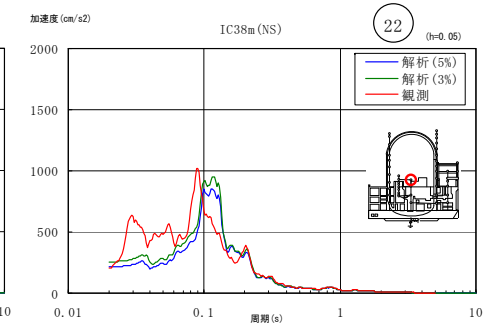
内部コンクリート(EL.+17m)



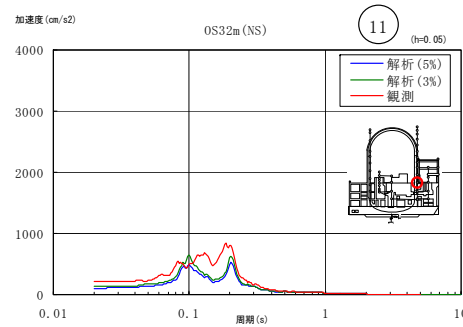
内部コンクリート(EL.+24m)



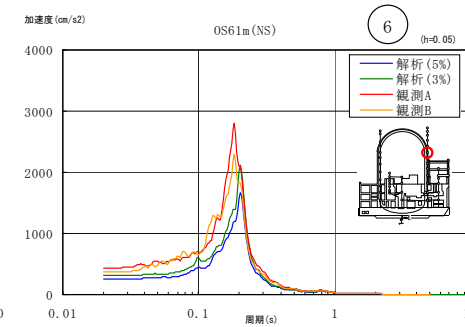
内部コンクリート(EL.+32m)



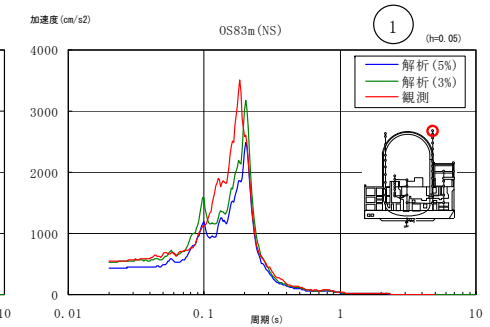
内部コンクリート(EL.+38m)



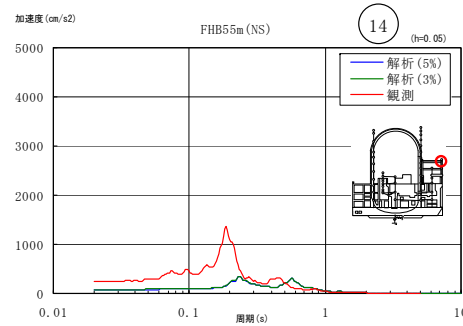
外周コンクリート壁(EL.+32m)



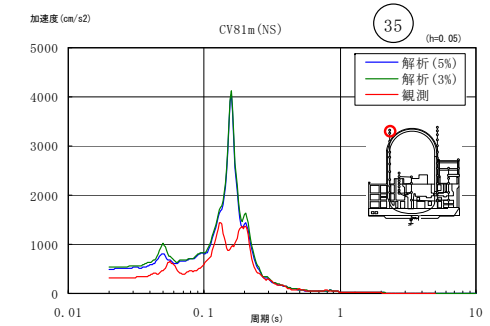
外周コンクリート壁(EL.+61m)



外周コンクリート壁(EL.+83m)

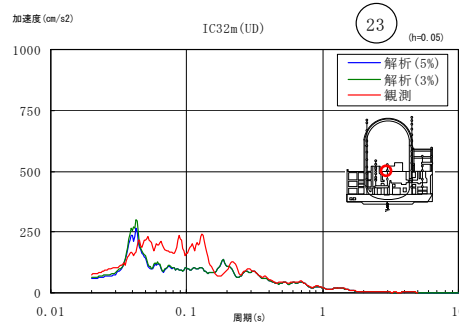


燃料取扱棟(EL.+55m)

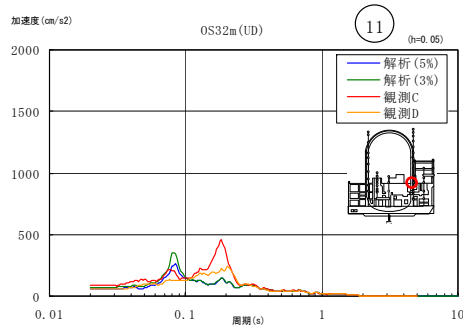


原子炉格納容器(EL.+81m)

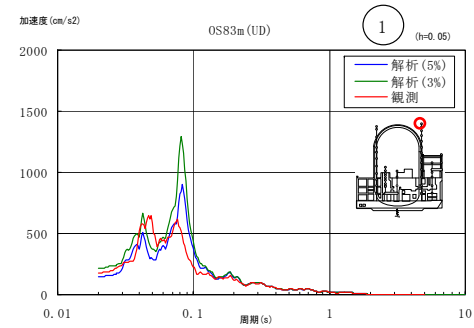
応答解析結果と観測記録 (床応答スペクトル:UD方向)



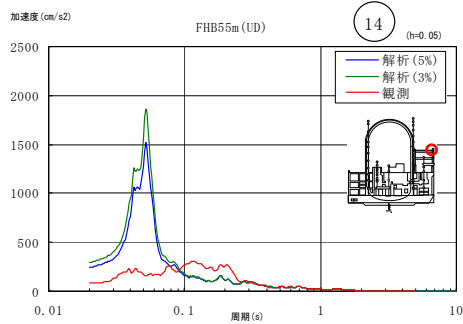
内部コンクリート(EL.+32m)



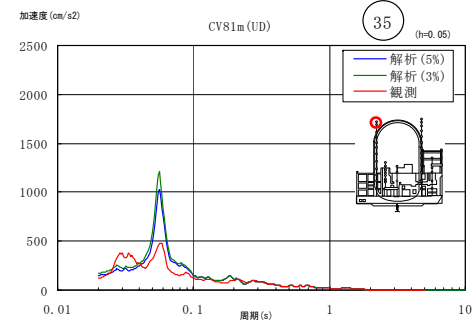
外周コンクリート壁(EL.+32m)



外周コンクリート壁(EL.+83m)



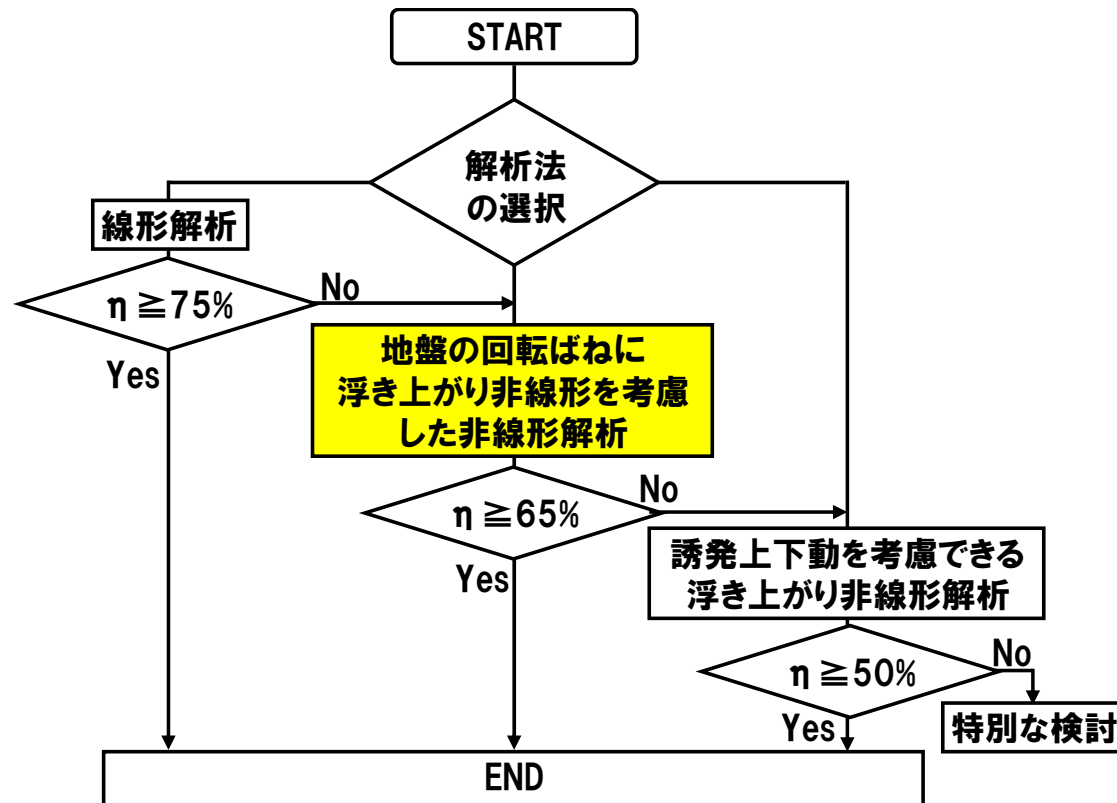
燃料取扱棟(EL.+55m)



原子炉格納容器(EL.+81m)

＜参考＞基礎浮き上がり(接地率)に応じた地震応答解析法の適用

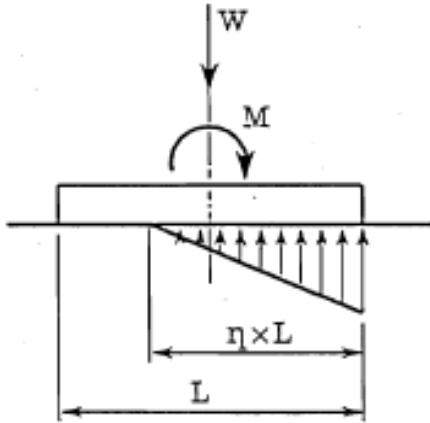
- 地震時に基礎が浮き上がる場合には、基礎浮き上がりによる幾何学的非線形を考慮しなければならない。
- スウェイ・ロッキング(SR)モデル等の質点系モデルを用いる場合には、基礎底面の回転ばねの剛性及び減衰に非線形を考慮する。
- この場合、基礎の接地率 η に応じて以下の評価法を適用する。



(原子力発電所耐震設計技術規程 JEAC4601-2008 より引用)

<参考>基礎浮き上がり(接地率)に応じた地震応答解析法の適用

- 基礎の接地率 η は地震応答解析結果の最大転倒モーメントを用いて評価する。



$$\eta = \frac{1}{2} \left(3 - \frac{M}{M_0} \right) = 3 \left(\frac{1}{2} - \frac{M}{WL} \right)$$

ここに、

η : 接地率

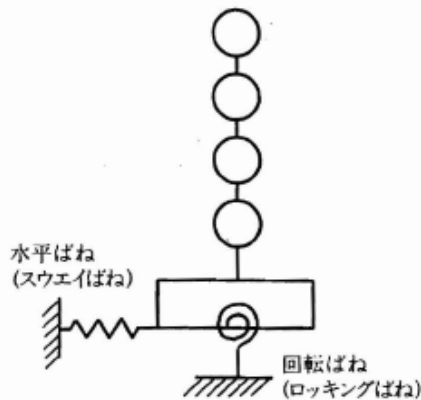
M : 最大転倒モーメント (基礎下端の最大応答モーメント)

M_0 : 浮き上がり限界転倒モーメント $M_0 = \frac{WL}{6}$

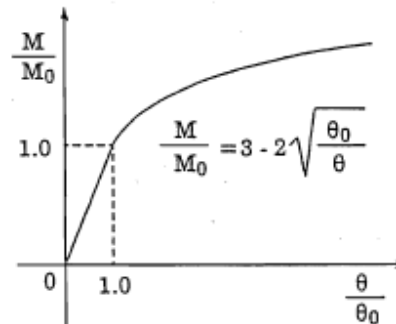
W : 建屋総重量

L : 加振方向の基礎長さ

- 地盤の回転ばねに浮き上がり非線形を考慮した非線形解析においては、基礎底面回転ばねの剛性および減衰を以下の方法により評価する。



SRモデル概念図



回転ばねの非線形特性

減衰係数は、剛性と同じ低下率で変化させる。

3. 基礎地盤安定解析

コメント
原子炉建屋直下の端趾部地盤に破壊要素が見られるが支持性能の検討はどのようになされているのか。 (岡村委員)

地盤の安定解析における評価の基本方針

発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針(原子力安全委員会)における記載内容

Sクラスの各施設は、基準地震動 S_s による地震力に対してその安全機能が保持できること。

「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」に照らした既設発電用原子炉施設等の耐震安全性評価における評価手法及び確認基準(経済産業省原子力安全・保安院)における記載内容

3) 安定性評価の概要

- ・原子炉建屋基礎地盤の安定性評価は、動的解析を主体に検討を行なうこととする。
- ・解析は2次元モデルを基に、周波数応答解析法による線形または等価線形解析により検討を行うことを基本とし、水平地震動と鉛直地震動による応答を考慮する。

7) 耐震安全性評価

- ・地震時の支持性能は、「すべり安全率」により評価することを基本とする。「すべり安全率」は有限要素法等を用いて行う動的解析及び静的解析による評価において想定したすべり面上の応力状態をもとに、すべり面上のせん断抵抗力の和をすべり面上のせん断力の和で除して求める。



伊方発電所原子炉建屋基礎地盤の安定解析においては等価線形解析による評価を行い支持性能については、「すべり安全率」による評価を行っている。

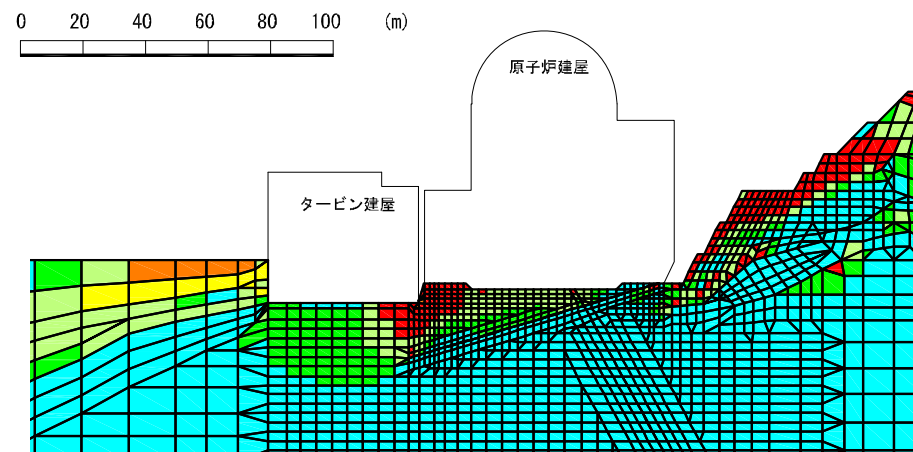
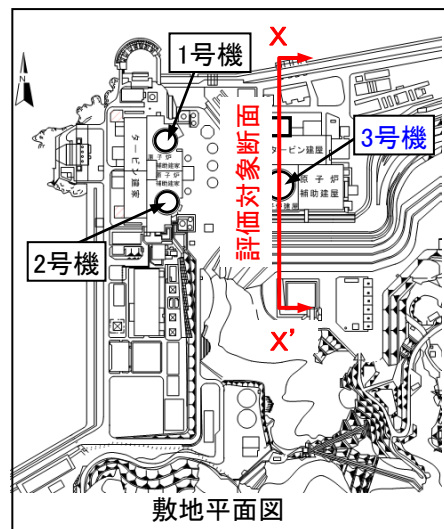
今回コメントの経緯

原子炉建屋基礎地盤の安定性評価における要素ごとの安全係数を示した図（基準地震動Ss-1入力時におけるすべり安全率が最小となる時刻T=17.08秒）に、建屋隅角部や地表に破壊された要素が見られる。破壊された要素の評価はどのようにしているのか。

伊方発電所の原子炉建屋基礎地盤安定解析は等価線形化法を用いた有限要素解析により実施しており、建屋と地盤については接点を共有して一体となった解析を行い、支持性能はすべり安全率により評価している。

すべり安全率の評価は、局所安全係数図やモビライズド面等を考慮して想定すべり面を設定したうえで実施しており、引張応力が発生した要素や、せん断強度に達した要素について、評価に用いる強度は、次ページに示す方法により安全側の評価となるよう健全強度から低下させて設定している。

なお、下記に示した図はT=17.08秒における瞬間的(1/100秒)な応力状態を示したものである。



基準地震動Ss-1入力時におけるすべり安全率が最小となる時刻
(T=17.08秒)における局所安全係数図

最小すべり安全率:2.0
(評価基準値 1.5以上)

- : 引張応力が発生した要素
- : せん断強度に達した要素
- : 引張応力が発生し、せん断強度に達した要素
- : $1.0 \leq \text{局所安全係数} < 1.5$
- : $1.5 \leq \text{局所安全係数} < 2.0$
- : $2.0 \leq \text{局所安全係数}$

※各要素の応力状態よりせん断応力に対する安全率と引張応力に対する安全率を比較し、小さい方の値を要素の局所安全係数として表示

すべり安全率評価における強度の取り扱い

安定解析の結果において

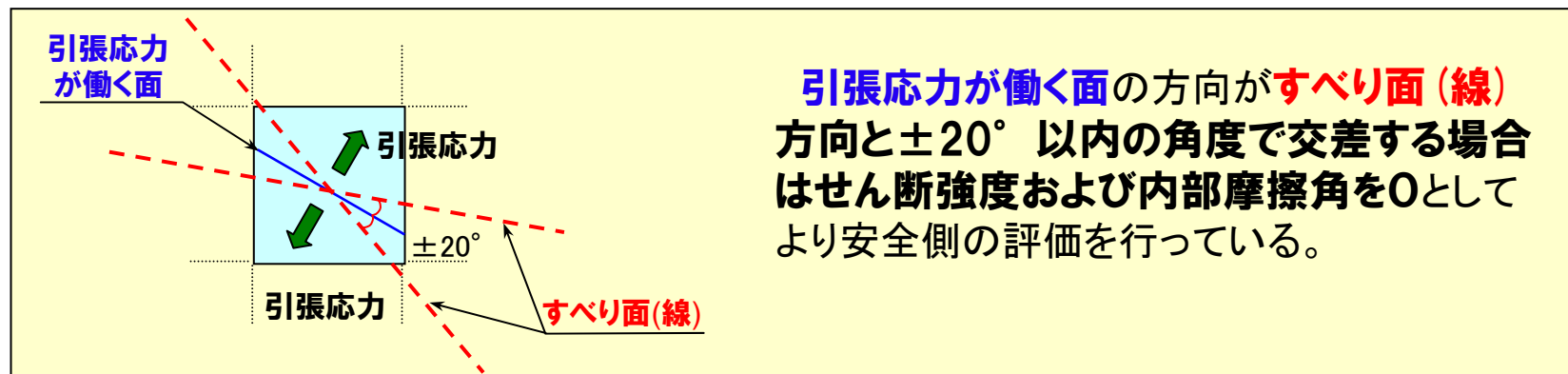
- ・引張応力が発生した要素
- ・せん断強度に達した要素
- ・引張応力が発生し、せん断強度に達した要素

については、すべり安全率の評価において**その強度に残留強度を採用して健全強度より低下させることで安全側の評価を実施している。**

		I 級岩盤	II 級岩盤	III 級岩盤	固結断層	未固結断層
健全強度	せん断強度(kN/m ²)	981	490	39	324	78
	内部摩擦角(°)	50	41	17	34	24
残留強度	せん断強度(kN/m ²)	569	0	0	0	0
	内部摩擦角(°)	43	41	17	34	24

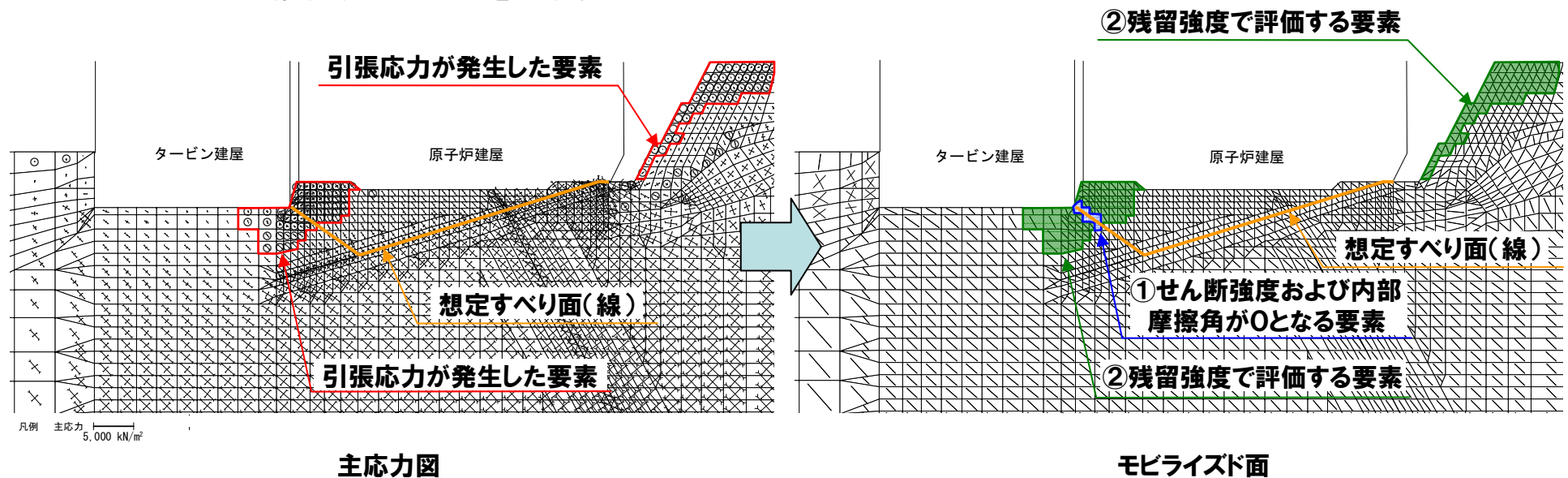
※残留強度についてはI級岩盤は原位置せん断試験結果を採用し、その他の岩盤および断層はせん断強度を0として設定

さらに引張応力が発生した要素については



すべり安全率が最小となる時刻($T=17.08$ 秒)における応力状態

基準地震動Ss-1入力時において安全率が最も小さくなる時刻である $T=17.08$ 秒における応力状態およびモビライズド面（潜在すべり面）を示す。



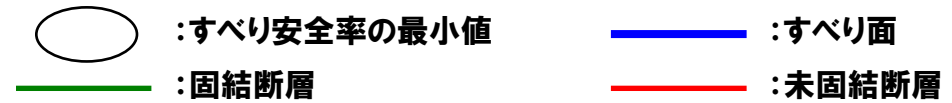
この時刻においては、

- ① 建屋基礎地盤の隅角部では引張応力の働く面が、想定したすべり面（線）に対して $\pm 20^\circ$ 以内で交差するため各要素のせん断強度および内部摩擦角は0として評価
- ② 斜面法肩部の要素は引張応力が発生しているものの、斜面方向にすべり面（線）を想定して評価した場合、引張応力が働く面が斜面の方向とほぼ直交するため、評価に用いる強度は残留強度とする

上記に示すように強度を低下させるような安全側の評価を行ったうえで支持性能を評価する「すべり安全率」を評価した結果、最小すべり安全率は2.0と評価基準値である1.5以上を確保しており、原子炉建屋基礎地盤の耐震安全性は確保されている。

各すべり面(線)ごとのすべり安全率

すべり安全率(基礎地盤)



	すべり面形状	基準地震動 Ss-1におけるすべり安全率
1	原子炉建屋底面のすべり 	4.0
2	未固結断層沿いのすべり 	2.0
3	モビライズド面(潜在すべり面) 	2.2
4	未固結断層および固結断層沿いのすべり 	3.2
5	未固結断層沿いのすべり 	2.7

まとめ

伊方発電所3号機の原子炉建屋基礎地盤の安定性評価においては、等価線形化法を用いた有限要素解析を実施し、その支持性能については、すべり安全率による評価を行っている。

すべり安全率の評価においては、引張応力が発生した要素やせん断強度に達した要素について、各応力状態や想定したすべり面の関係から強度を低下し安全側の評価を実施している。その結果、最小すべり安全率が2.0であり、評価基準値（すべり安全率1.5以上）を満足していることから原子炉建屋基礎地盤については基準地震動Ssによる地震力対して十分な支持性能を持つことを確認した。

54kmアスペリティ正面モデル

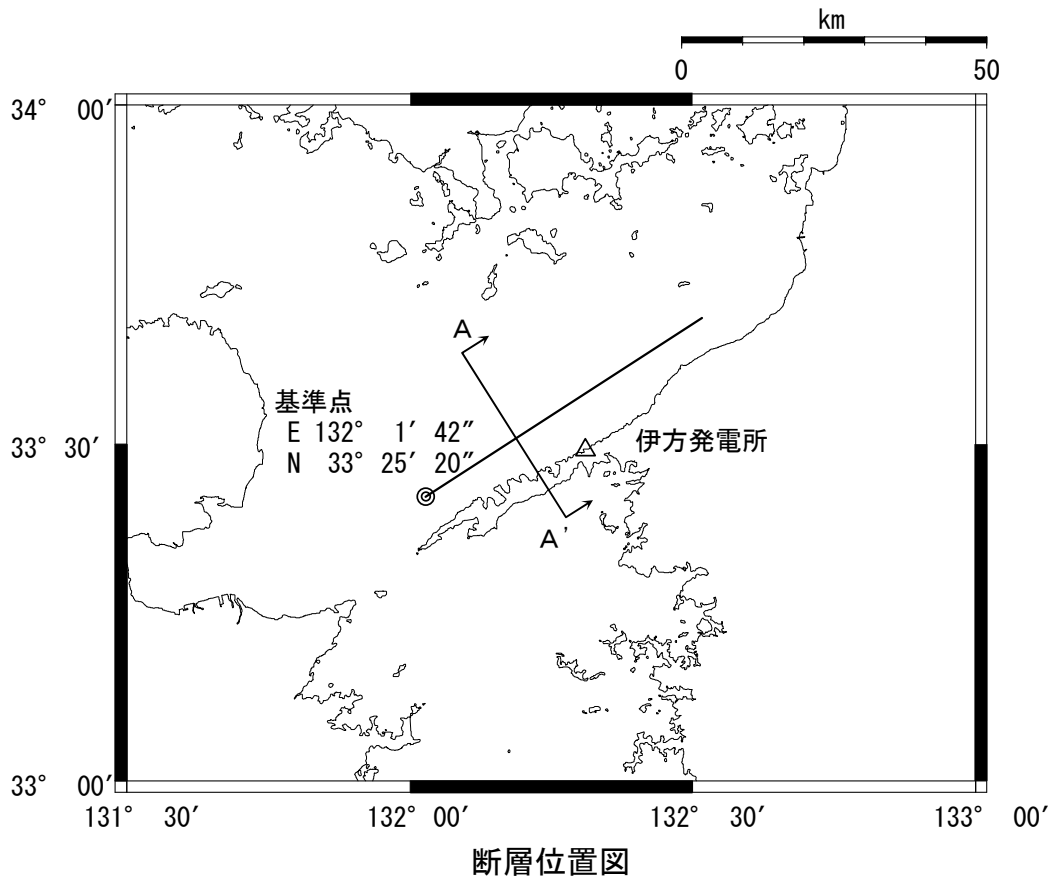
報告の趣旨

42km・90度を基本震源モデルとしたケースにおいて、第一アスペリティを敷地正面に配置したケースの検討を行うべきとの以前のご指摘(森委員)を踏まえ、54km・90度を基本震源モデルとしたケースにおいても同様の検討を実施したので報告する。

54km・90度・アスペリティ正面モデル

【断層諸元】

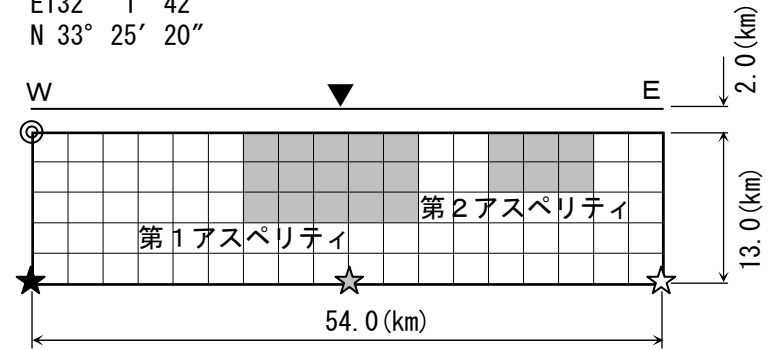
- ・断層長さ : 54km
- ・断層傾斜角 : 90°
- ・アスペリティ位置 : 上端
- ・破壊開始点 : 断層西下端, 中央下端, 東下端



基準点

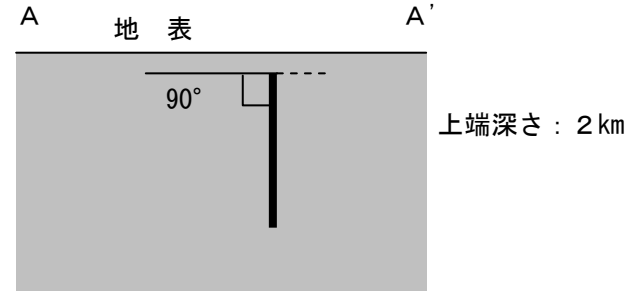
E 132° 1' 42"

N 33° 25' 20"

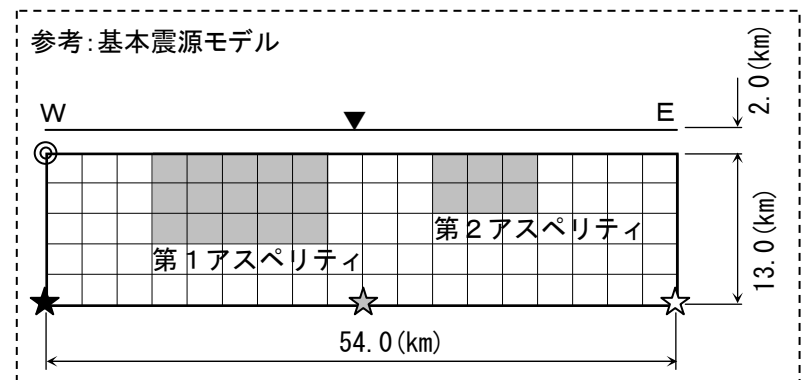


☆☆☆ : 破壊開始点

断層モデル図



(A-A' 断面図)



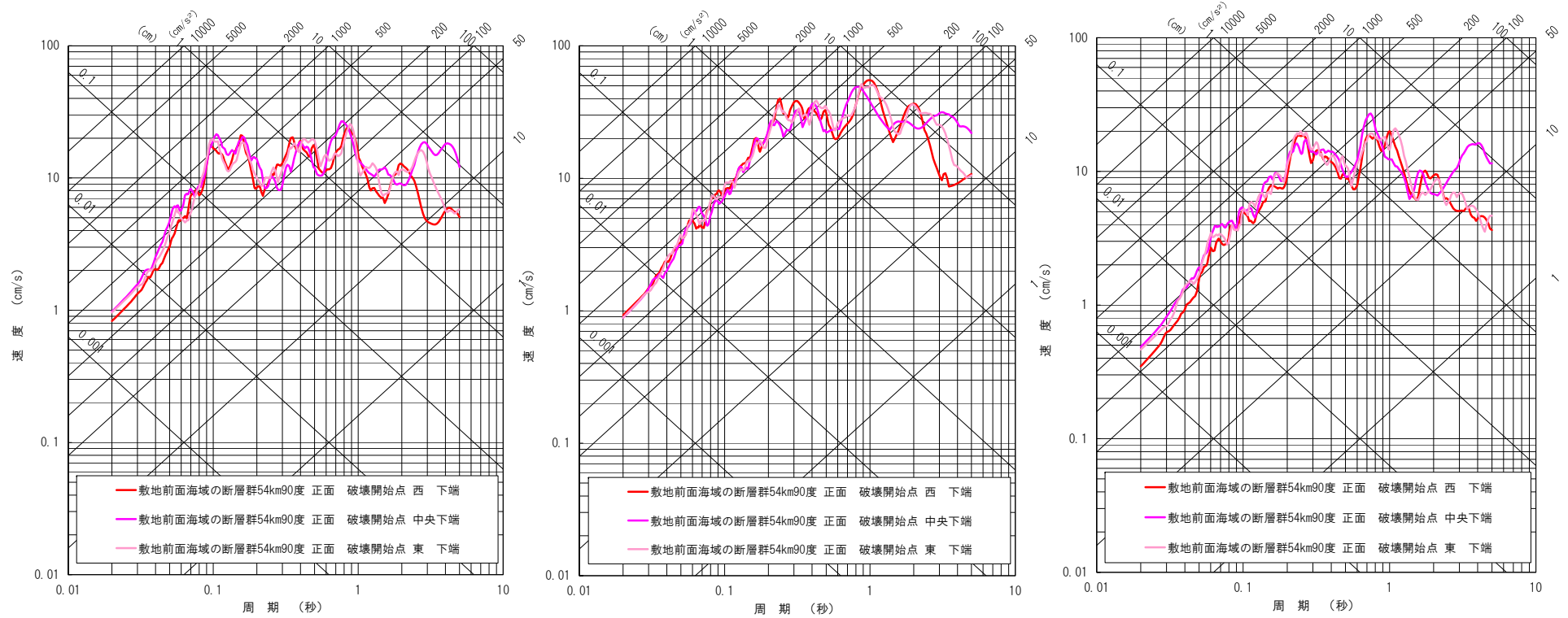
パラメータ表

断層パラメータ	記号	54km90度	根拠
断層位置	—	東経: 132° 1' 42" 北緯: 33° 25' 20"	
走向	θ	N57E	
傾斜角	δ	90°	
断層長さ	L	54.0 km	
断層幅	W	13.0 km	
断層面積	S	702.0 km ²	
断層上端深さ	H	2.0km	
破壊伝播形式	—	同心円状	
応力降下量	$\Delta \sigma$	2.6MPa	楕円クラック
地震モーメント	M_0	2.74×10^{19} N·m	入倉・三宅(2001)
モーメントマグニチュード*	M_W	6.9	Kanamori(1977)
気象庁マグニチュード*	M_J	7.3	武村(1998)
剛性率	μ	4.0×10^{10} N/m ²	
平均すべり量	D	98 cm	$D=M_0/(\mu S)$
S波速度	β	3.5 km/s	
破壊伝播速度	V_R	2.5 km/s	Geller(1976)
短周期レベル	A'	1.36×10^{19} N·m/s ²	$4\pi(S/\pi)^{1/2} \cdot \Delta \sigma \cdot \beta^2$

断層パラメータ	記号	54km90度	根拠	
全アスペリティ	地震モーメント	M_{0a}	1.21×10^{19} N·m	$M_{0a} = \mu D_a S_a$
	面積	S_a	154.4 km ²	$S_a = S \times 22\%$
	平均すべり量	D_a	195 cm	$D_a = 2.0 \times D$
	応力降下量	$\Delta \sigma_a$	11.8 MPa	$\Delta \sigma_a = \Delta \sigma / 0.22$
第1アスペリティ	地震モーメント	M_{0a1}	9.81×10^{18} N·m	$S^{1.5}$ 比で配分
	面積	S_{a1}	112.3 km ²	$S_{a1} = S \times 16\%$
	平均すべり量	D_{a1}	218 cm	$D_{a1} = M_{0a1} / (\mu S_{a1})$
	実効応力	σ_{a1}	11.8 MPa	$\sigma_{a1} = \Delta \sigma_a$
第2アスペリティ	地震モーメント	M_{0a2}	2.25×10^{18} N·m	$S^{1.5}$ 比で配分
	面積	S_{a2}	42.1 km ²	$S_{a2} = S \times 6\%$
	平均すべり量	D_{a2}	134 cm	$D_{a2} = M_{0a2} / (\mu S_{a2})$
	実効応力	σ_{a2}	11.8 MPa	$\sigma_{a2} = \Delta \sigma_a$
背景領域	地震モーメント	M_{0b}	1.54×10^{19} N·m	$M_{0b} = M_0 - M_{0a}$
	面積	S_b	547.6 km ²	$S_b = S - S_a$
	平均すべり量	D_b	70 cm	$D_b = M_{0b} / (\mu S_b)$
	実効応力	σ_b	2.4 MPa	$\sigma_b = 0.2 \times \Delta \sigma_a$

検討結果①

地震動評価結果を，破壊開始点3ケースについて示す。
 (経験的グリーン関数法により評価した)



NS方向

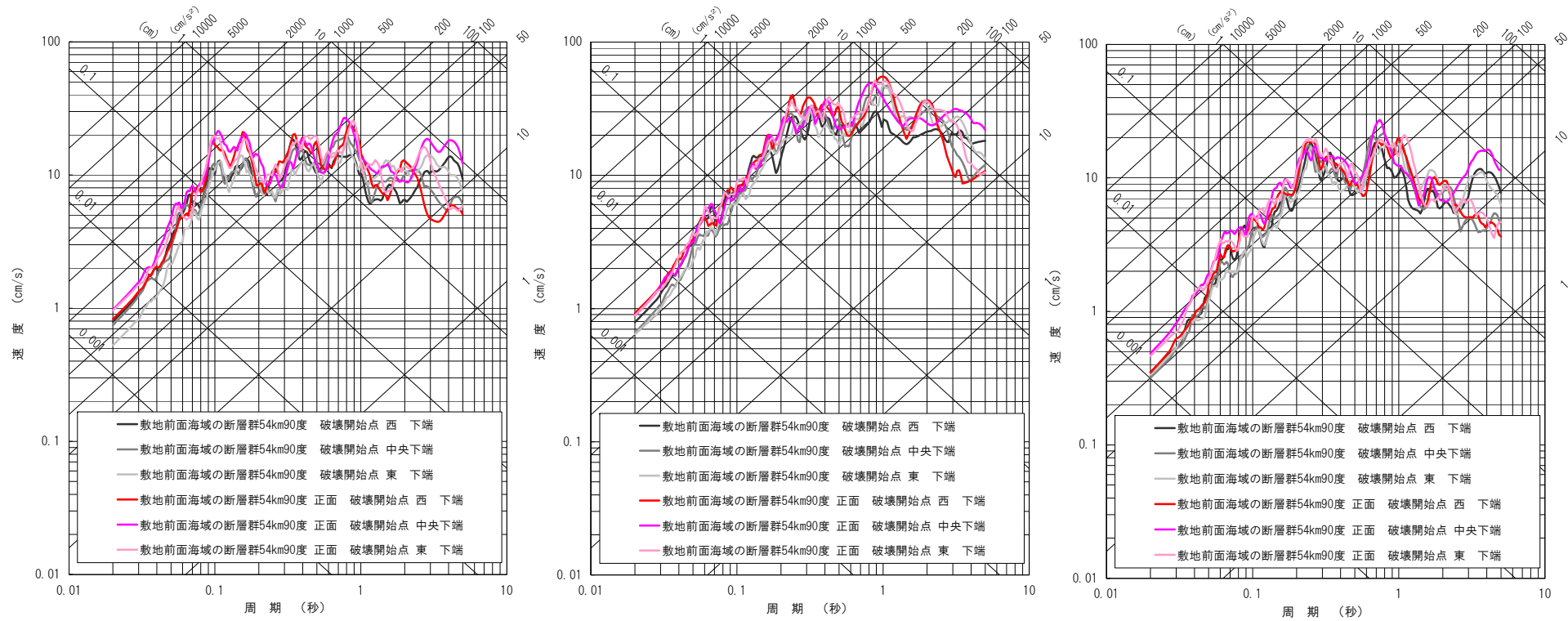
EW方向

UD方向



検討結果② [基本震源モデルとの比較]

アスペリティ正面モデルの地震動評価結果を、基本震源モデルの結果と比較して示す。



NS方向

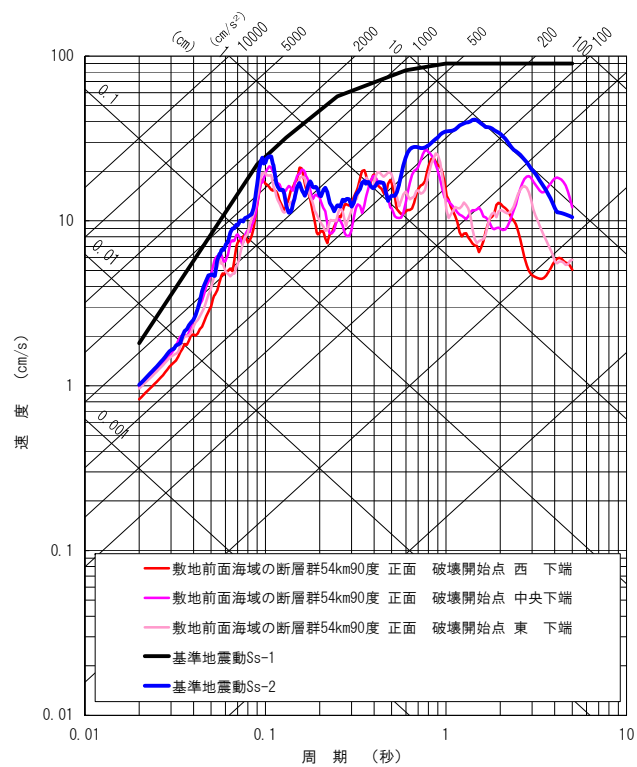
EW方向

UD方向

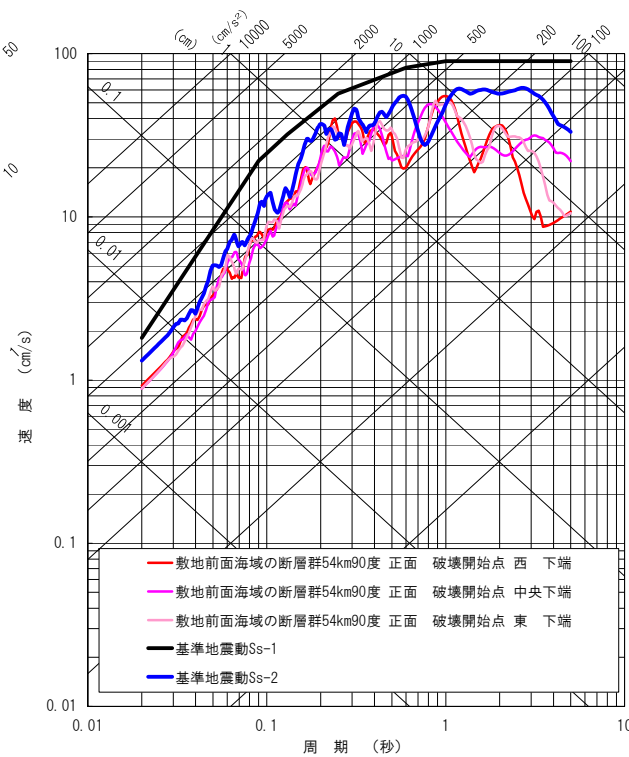
検討結果③ [基準地震動との比較]

基準地震動とアスペリティ正面モデルの地震動評価結果を比較する。

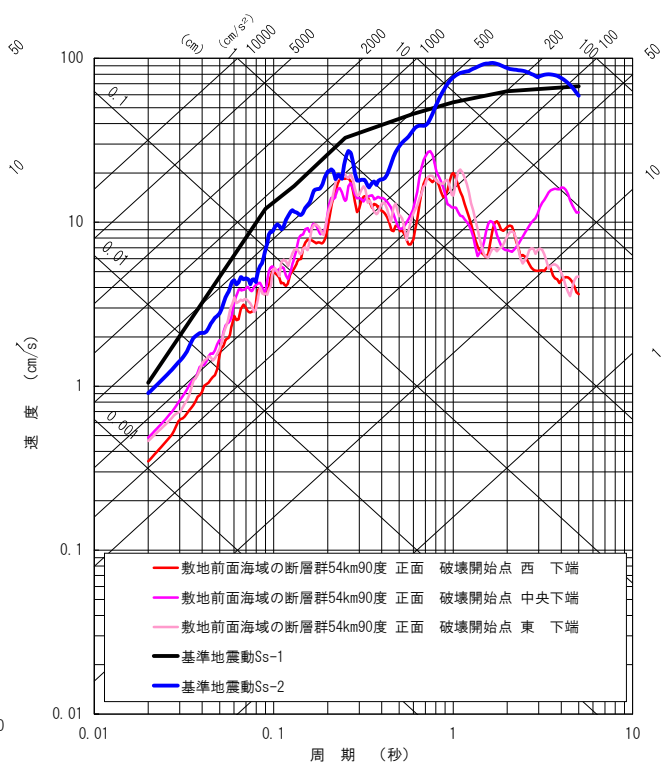
アスペリティを発電所の正面に配置したケースは基準地震動S_s-1に包絡されること、基準地震動S_s-2と同程度以下であることを確認した。



NS方向



EW方向



UD方向

【参考】 75km連動モデル

報告の趣旨

愛媛県議会において、「伊方沖と隣の伊予セグメントの2つの活断層が一斉に動いた場合に一番大きな被害が起こると考えられる。伊方沖と隣の伊予セグメントの2断層、75kmが一体として動いたときを想定するべきではないか。」との議論があったことに鑑み、説明を行うものである。

当初の評価: 敷地前面海域の断層群42km + 伊予セグメント33km = 75km



現在の評価: 敷地前面海域の断層群54km + 伊予セグメント33km = 87km

以降では、連動する区間の長さを87kmとして取り扱うこととする

断層モデルのパラメータ算定方針

敷地前面海域の断層群と伊予断層を合わせた87km区間において、スケーリング則を用いてパラメータの設定を行う。

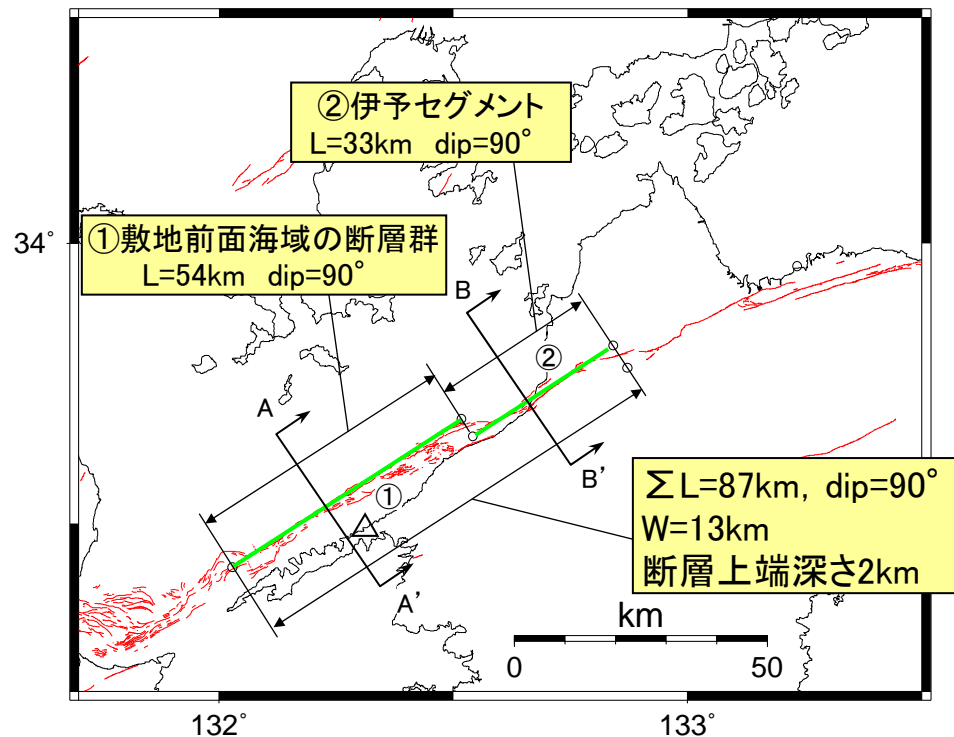
パラメータの設定にあたっては、

○応力降下量は楕円クラック式を用いて算定する

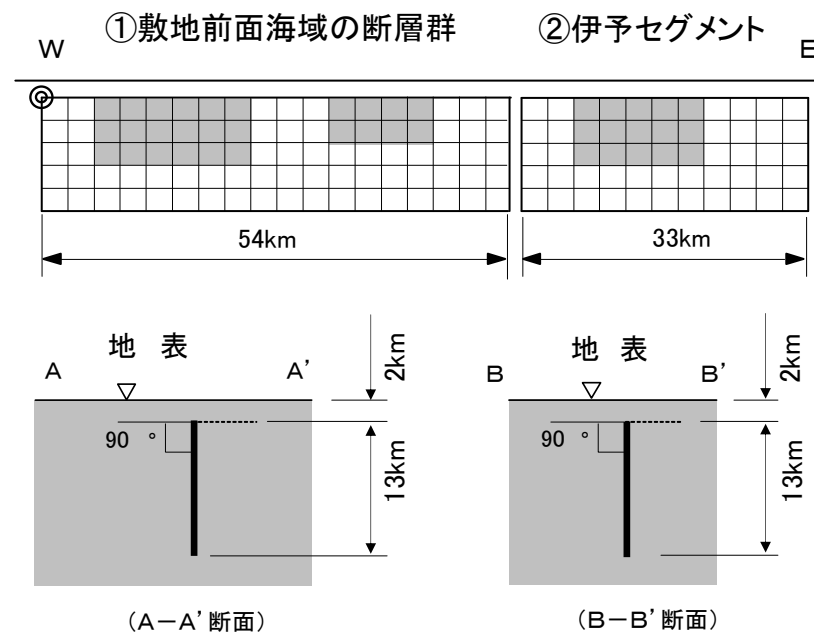
(断層長さが長い場合には無限長クラック式の適用が適切と考えられるが、ここでは仮に楕円クラックを適用して検討を行う)

○短周期レベルが壇・他(2001)の式に一致するように、アスペリティ面積比を設定する

(短周期レベルを一致させるのは、130km連動スケーリングモデルと同じ考え方であり、地震本部のレシピに準拠したもの)



— : 断層トレース
— : 断層モデル上端線



アスペリティ面積比率を27%として設定

パラメータ試算結果

断層パラメータ	記号	87km連動モデル	130km連動モデル (スケーリング)	基本震源モデル (54km90度)	不確かさ考慮① ($\Delta\sigma$ 1.5倍)	不確かさ考慮② (54km30度)	不確かさ考慮③ (69km90度)	
断層位置	—	東経:132° 1' 42" 北緯:33° 25' 20"	東経:132° 1' 42" 北緯:33° 25' 20"	東経:132° 1' 42" 北緯:33° 25' 20"	東経:132° 1' 42" 北緯:33° 25' 20"	東経:132° 1' 42" 北緯:33° 25' 20"	東経:131° 56' 34" 北緯:33° 22' 32"	
走向	θ	N57E	N57E	N57E	N57E	N57E	N57E	
傾斜角	δ	90°	90°	90°	90°	北傾斜30°	90°	
断層長さ	L	87 km	126 km	54 km	54 km	54 km	69 km	
断層幅	W	13 km	13 km	13 km	13 km	26 km	13 km	
断層面積	S	1131 km ²	1638 km ²	702 km ²	702 km ²	1404 km ²	897 km ²	
断層上端深さ	H	2.0km	2.0km	2.0km	2.0km	2.0km	2.0km	
破壊伝播形式	—	同心円状	同心円状	同心円状	同心円状	同心円状	同心円状	
応力降下量	$\Delta\sigma$	3.7MPa	4.5 MPa	2.6MPa	2.6MPa × 1.5	3.6MPa	3.1MPa	
地震モーメント	M_0	7.12×10^{19} N·m	1.49×10^{20} N·m	2.74×10^{19} N·m	2.74×10^{19} N·m	1.10×10^{20} N·m	4.48×10^{19} N·m	
モーメントマグニチュード [*]	M_w	7.2	7.4	6.9	6.9	7.3	7.0	
気象庁マグニチュード [*]	M_J	7.6	7.9	7.3	7.3	7.8	7.5	
剛性率	μ	4.0×10^{10} N/m ²	4.0×10^{10} N/m ²	4.0×10^{10} N/m ²	4.0×10^{10} N/m ²	4.0×10^{10} N/m ²	4.0×10^{10} N/m ²	
平均すべり量	D	157 cm	228 cm	98 cm	98 cm	195 cm	125 cm	
S波速度	β	3.5 km/s	3.5 km/s	3.5 km/s	3.5 km/s	3.5 km/s	3.5 km/s	
破壊伝播速度	V_R	2.5 km/s	2.5 km/s	2.5 km/s	2.5 km/s	2.5 km/s	2.5 km/s	
短周期レベル	A'	2.19×10^{19} N·m/s ² ※1	2.81×10^{19} N·m/s ² ※2	1.36×10^{19} N·m/s ²	2.04×10^{19} N·m/s ²	2.66×10^{19} N·m/s ²	1.83×10^{19} N·m/s ²	
全 ア ス ペ リ テ ィ	地震モーメント	M_{0a}	3.84×10^{19} N·m	1.00×10^{20} N·m	1.21×10^{19} N·m	1.21×10^{19} N·m	4.82×10^{19} N·m	1.97×10^{19} N·m
	面積	S_a	305.4 km ²	550.4 km ²	154.4 km ²	154.4 km ²	308.9 km ²	197.3 km ²
	平均すべり量	D_a	314 cm	456 cm	195 cm	195 cm	391 cm	250 cm
	応力降下量	$\Delta\sigma_a$	13.7MPa	13.3MPa	11.8 MPa	17.7 MPa	16.3 MPa	14.0MPa
背 景 領 域	地震モーメント	M_{0b}	3.28×10^{19} N·m	4.90×10^{19} N·m	1.54×10^{19} N·m	1.54×10^{19} N·m	6.14×10^{19} N·m	2.51×10^{19} N·m
	面積	S_b	825.6 km ²	1087.6 km ²	547.6 km ²	547.6 km ²	1095.1 km ²	699.7 km ²
	平均すべり量	D_b	100 cm	113 cm	70 cm	70 cm	140 cm	90 cm
	実効応力	σ_b	2.7MPa	2.7MPa	2.4 MPa	3.5 MPa	3.3 MPa	2.8MPa

※1 前面海域54km区間のみの短周期レベルを抽出すると: 1.72×10^{19} N·m/s²

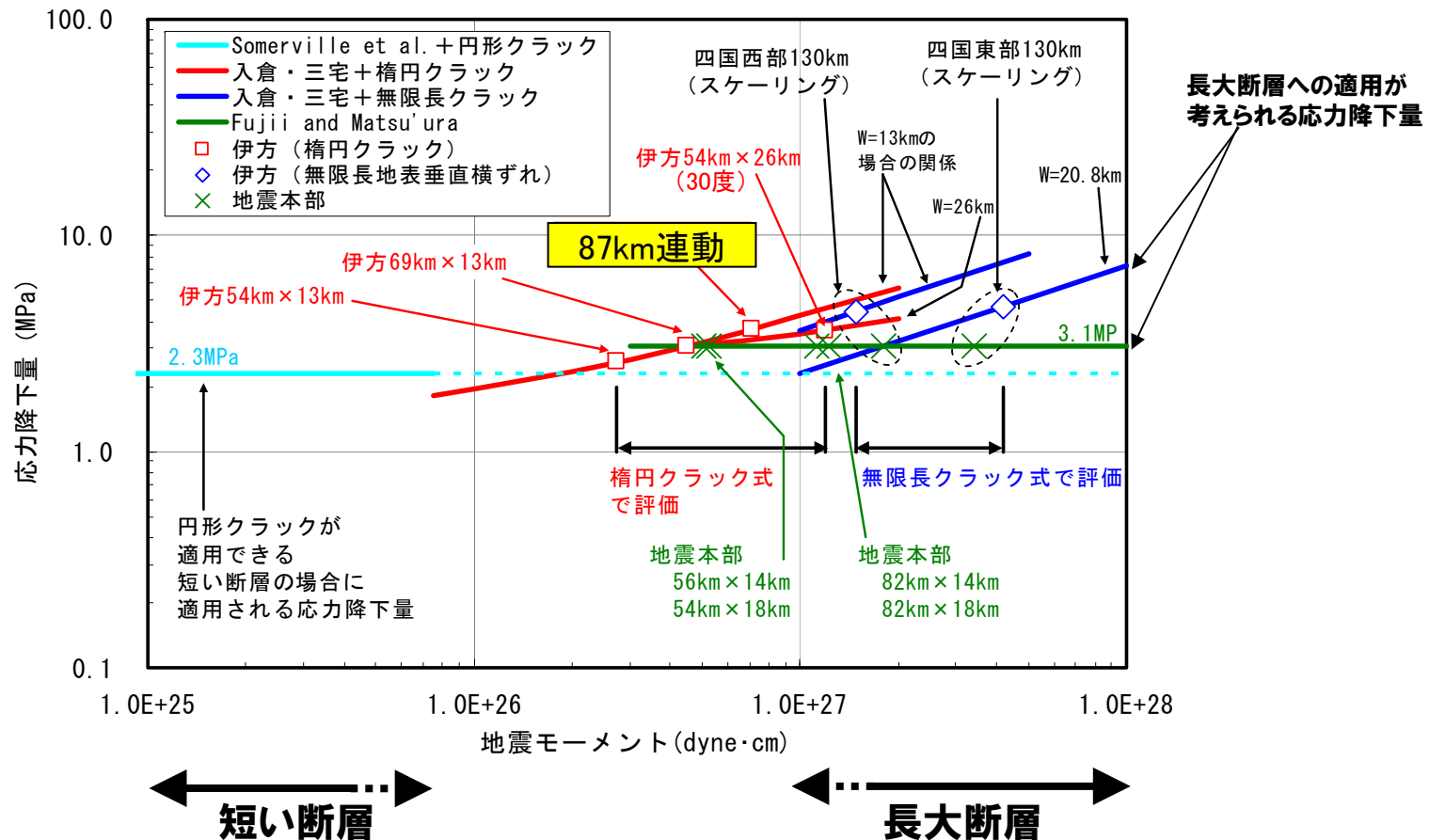
※2 前面海域54km区間のみの短周期レベルを抽出すると: 1.84×10^{19} N·m/s²

応力降下量の比較

中央構造線断層帯の種々のケースに想定される断層全体の平均応力降下量を比較する。

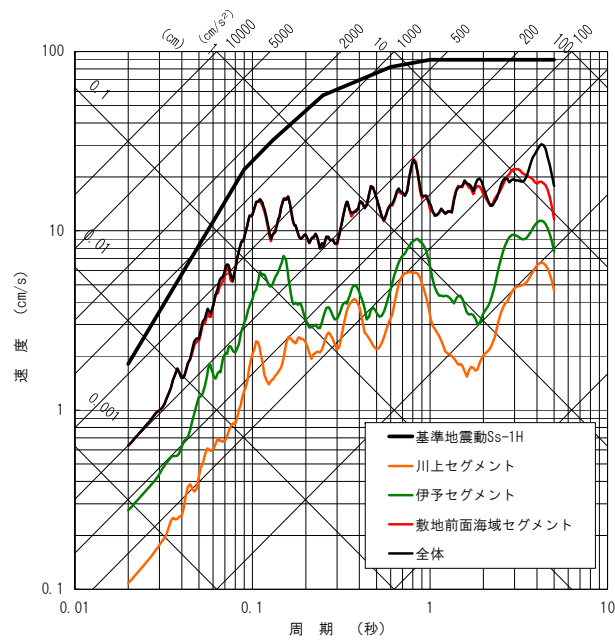
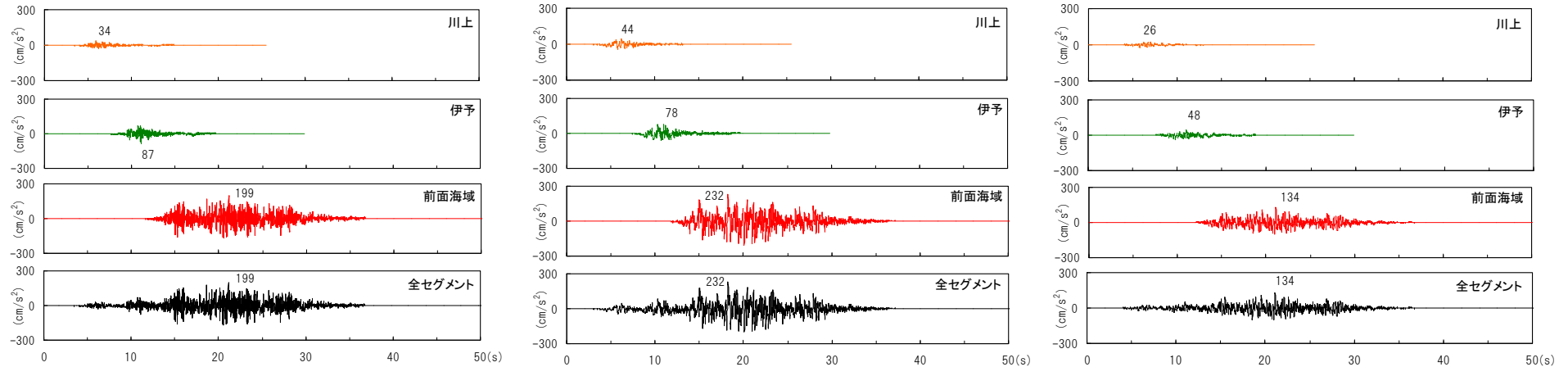
→ 87km連動モデルは、54km・30度ケースや応力降下量1.5倍ケースと同程度の応力降下量である

54km・90度	69km・90度	54km・30度	87km連動モデル (スケーリング)	応力降下量1.5倍	130km連動モデル (スケーリング)
2.6MPa	3.1MPa	3.6MPa	3.7MPa	2.6MPa × 1.5 (3.9MPa)	4.5MPa
楕円クラック	楕円クラック	楕円クラック	楕円クラック	楕円クラック × 1.5	無限長クラック

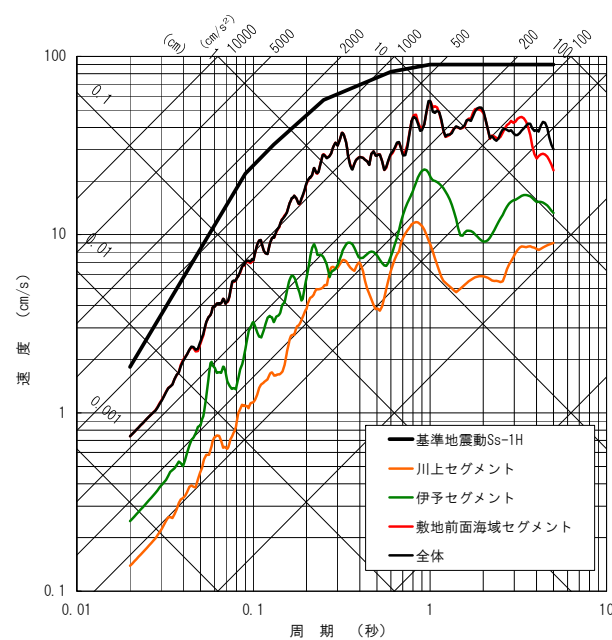


地震動レベルの検証①

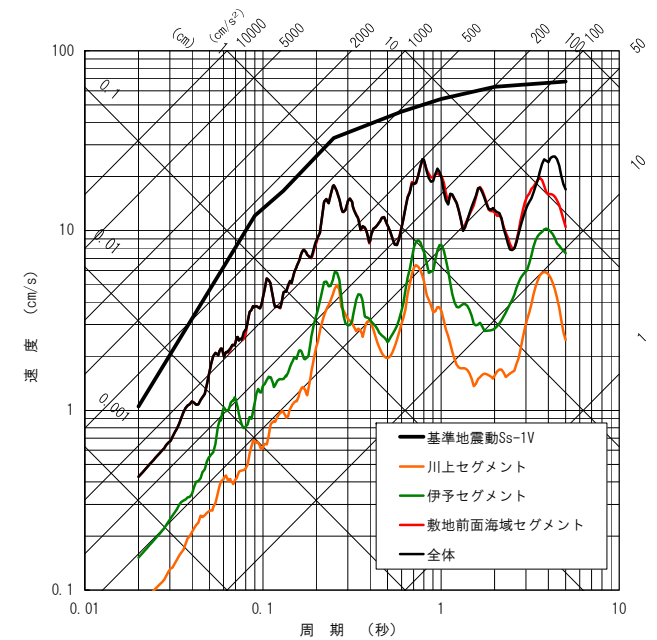
130km連動モデル(スケーリング)における検討結果より, 敷地での地震動は, 前面海域セグメントによる地震動が支配的であることがわかる。そこで, 前面海域セグメントにおける設定値で比較を行う。



NS方向



EW方向



UD方向

地震動レベルの検証②

短周期地震動に大きく影響を与えるパラメータである、短周期レベルとアスペリティの応力降下量を、54km区間に設定される値と比較すると、87km連動モデルの設定値は、130km連動モデル(スケーリング)とほぼ同程度であること、および応力降下量1.5倍のケースよりも小さいことから、基準地震動の策定には影響はないと考えられる。

	54km・90度	87km連動モデル (スケーリング) (54km区間のみの値)	130km連動モデル (スケーリング) (54km区間のみの値)	54km・90度 応力降下量1.5倍	54km・30度
短周期レベル ($N \cdot m/s^2$)	1.36E+19	1.72E+19	1.84E+19	2.04E+19	2.66E+19
アスペリティの 応力降下量 (MPa)	11.8	13.7	13.3	17.7	16.3

