

柏崎刈羽原子力発電所3/4号機 原子炉建屋の解析モデルに関する検討

平成22年10月25日

東京電力株式会社



東京電力

本日のご説明内容

1. 検討の背景
2. これまでの検討のまとめ
3. 健全性評価に用いる地盤-建屋連成モデルの検討
4. 3/4号機健全性評価における解析モデル（案）

1. 検討の背景

1. 検討の背景

- ◆中越沖地震後の健全性評価においては、中越沖地震時に原子炉建屋の基礎版上で得られた観測記録を用いてシミュレーション解析を行い、中間階の観測記録との整合性を確認している。
- ◆柏崎刈羽原子力発電所3・4号機原子炉建屋の場合、建屋を一軸質点系とした埋込み考慮のSRモデルによるシミュレーション解析では、解析結果と観測記録の整合性が十分ではない部分がある。
- ◆4号機については、平成20年7～9月に検討が行われ（第17～19回構造ワーキンググループ）、
 - ①床の柔軟性を考慮すること
 - ②地盤ばねの低減を行うことにより、観測記録との整合が図れることが確認できている。
- ◆ただし、3号機についての検討は行われておらず、4号機と同様の対応により観測記録との整合が図れるかどうかは課題として残っている。

2. これまでの検討のまとめ

2. 1 これまでの検討のまとめ(概要)

- ◆1～7号機のシミュレーション解析結果の報告（平成19年10月23日：第6回構造WG）
 - ・1～7号機原子炉建屋の床剛モデルによる解析結果と観測記録の応答スペクトルの適合性について報告した。3、4号機については整合性が十分でない周期帯が存在した。

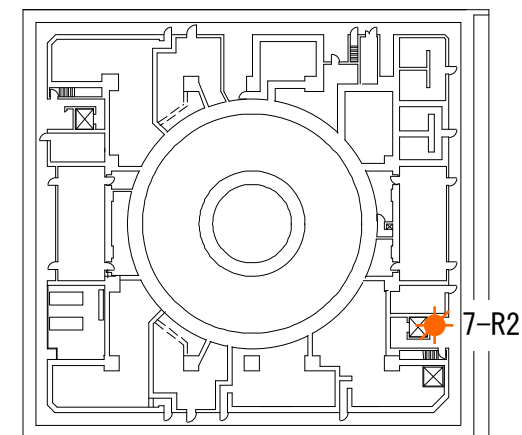
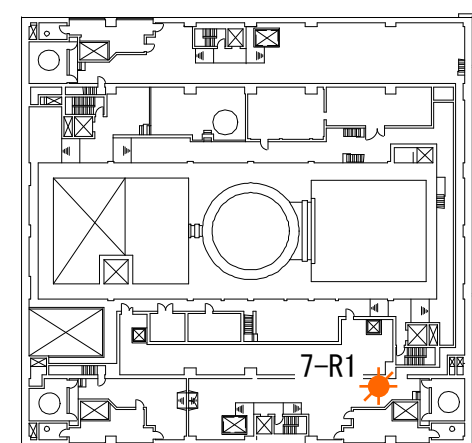
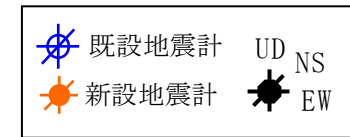
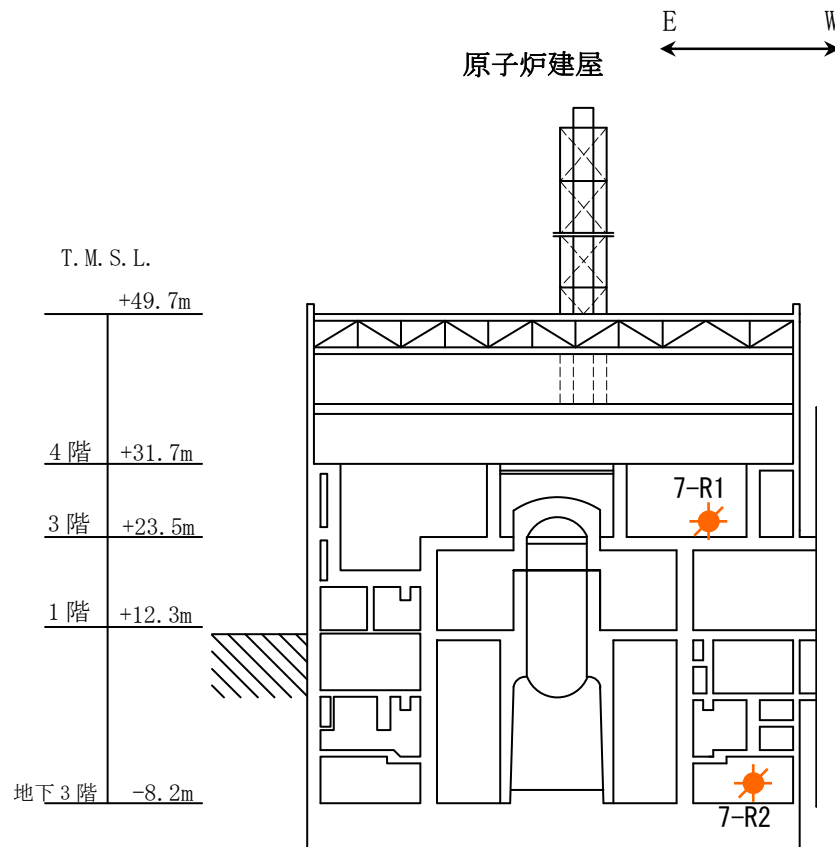
- ◆7号機の健全性評価
 - ・7号機の審議の中で、4号機原子炉建屋の適合性向上検討が実施された。詳細な三次元FEMモデルによる検討を実施し、その結果を踏まえて、床の柔軟性を考慮した多軸モデルの採用と側面地盤ばねの値を低減することにより、4号機の記録を再現できることが確認された。
 - ・4号機の検討を踏まえ、原子力安全・保安院から、事業者に対して、「床などの柔軟性を考慮した検討」を求める指示文書が出された。（平成20年9月4日）
 - ・7号機は床剛モデルでも解析結果と観測記録が整合していたものの、念のため、4号機同様に床の柔軟性を考慮した検討を実施し、床の柔軟性が応答に与える影響が無いことが確認された。

- ◆6, 1, 5号機の健全性評価
 - ・床剛モデルの解析結果と観測記録が整合していたものの、保安院からの指示文書を踏まえ、念のために床の柔軟性を考慮した検討を実施し、床の柔軟性が応答に与える影響が無いことが確認された。

2. 2 質点系モデルによる検討

(1) 7号機の地震計設置位置

◆7号機の地震計設置位置を示す。

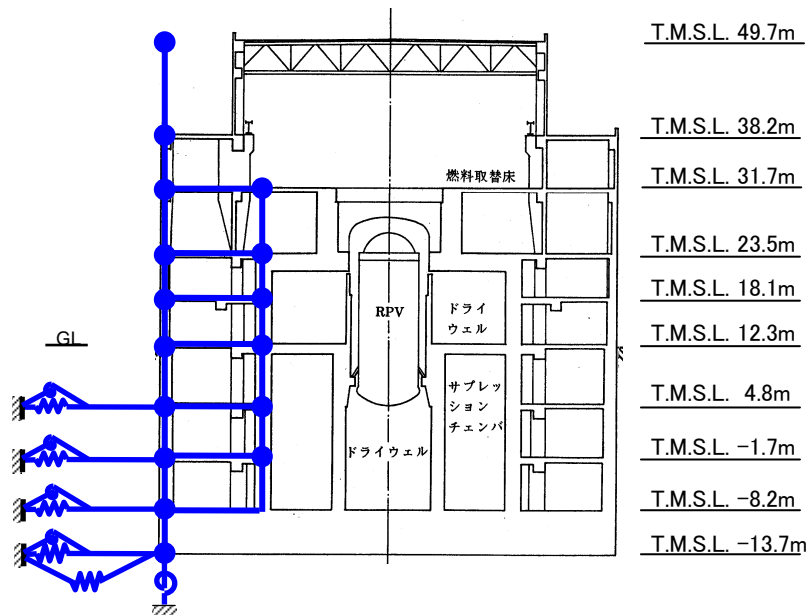


2. 2 質点系モデルによる検討

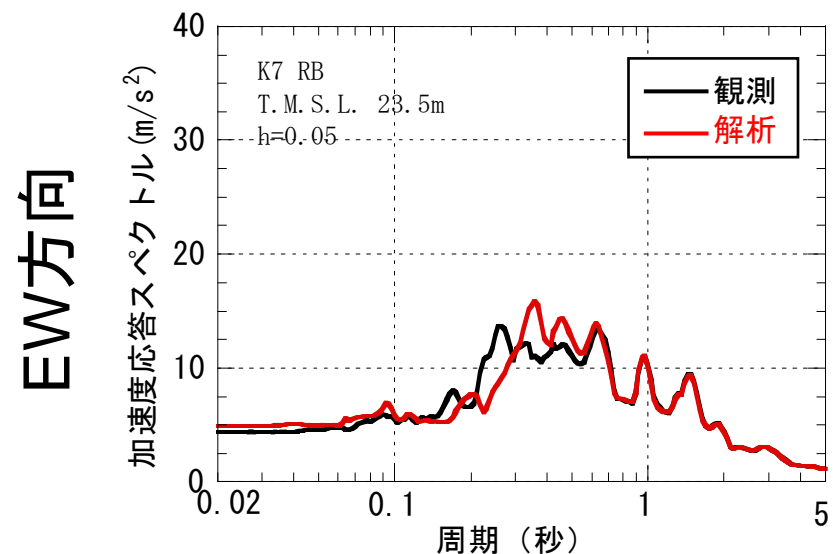
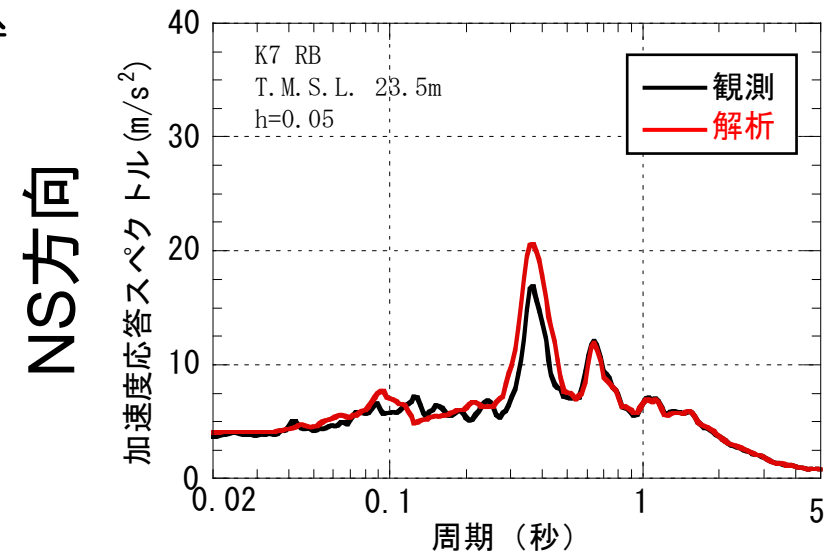
(2) 二軸床剛質点系モデルによる解析結果（7号機）

◆建屋二軸床剛質点系モデル（埋め込みSRモデル）によるシミュレーション解析を実施

⇒観測記録と解析結果の整合性が良い。



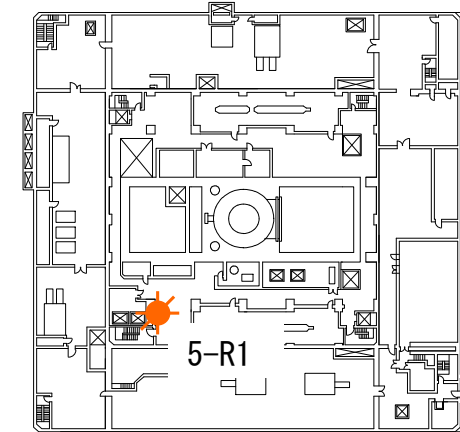
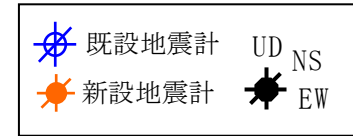
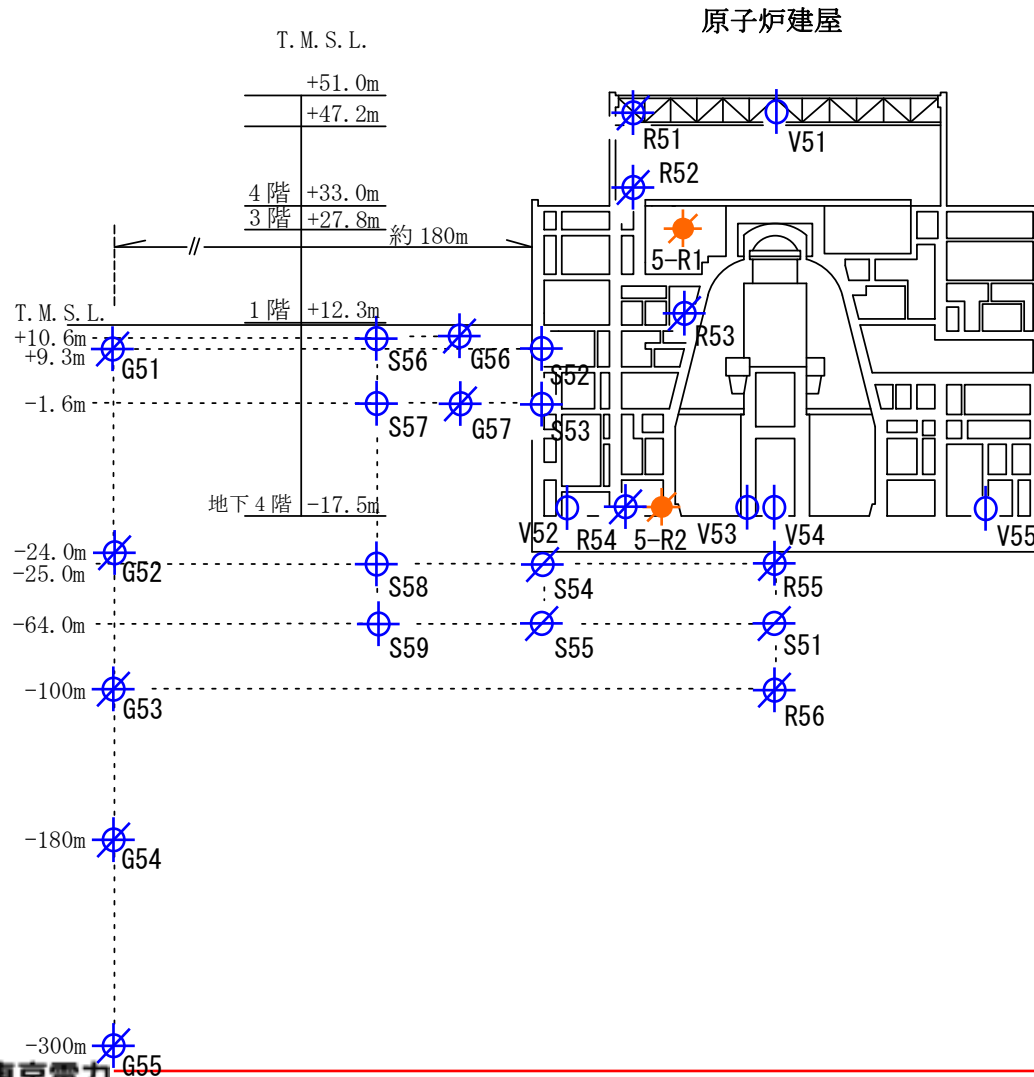
7号機原子炉建屋解析モデル



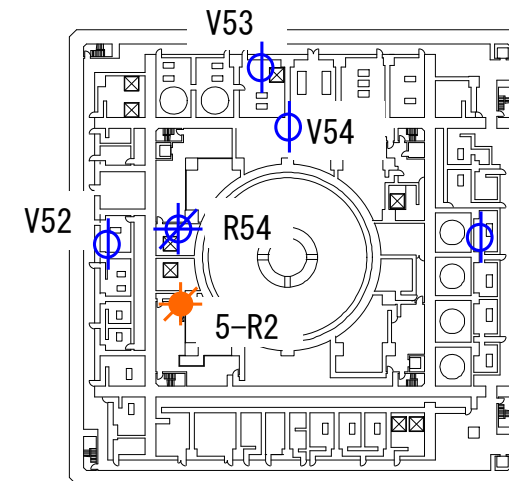
2. 2 質点系モデルによる検討

(3) 5号機の地震計設置位置

◆ 5号機の地震計設置位置を示す。



3階 (T. M. S. L. +27. 8m)



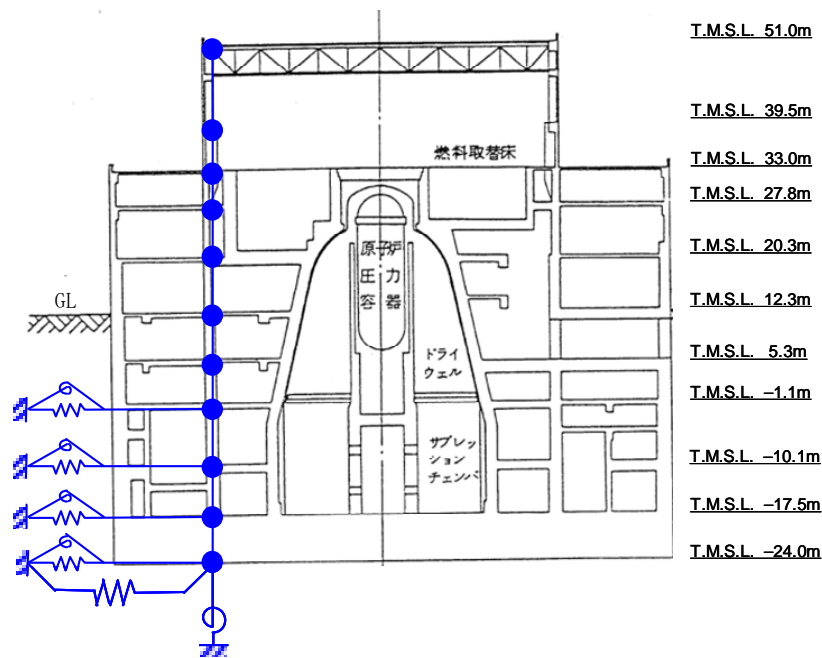
地下4階 (基礎版上)
(T. M. S. L. -17. 5m)

2. 2 質点系モデルによる検討

(4) 一軸床剛質点系モデルによる解析結果 (5号機)

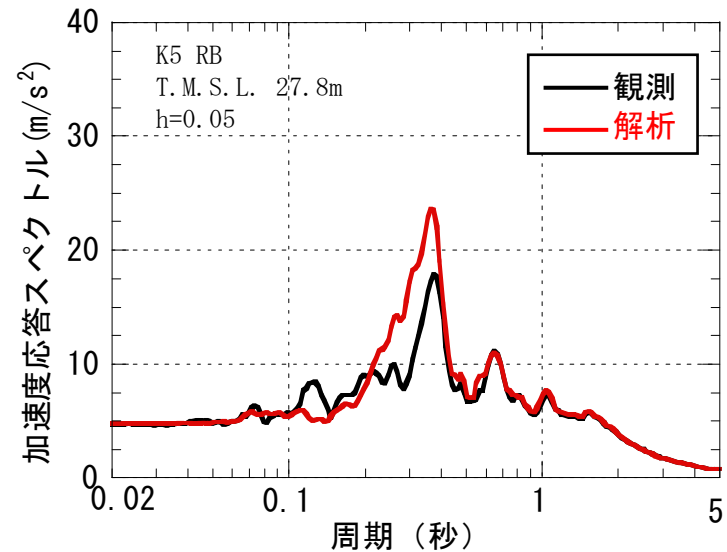
◆建屋一軸床剛質点系モデル (埋め込みSRモデル) によるシミュレーション解析を実施

⇒観測記録と解析結果の整合性が良い。

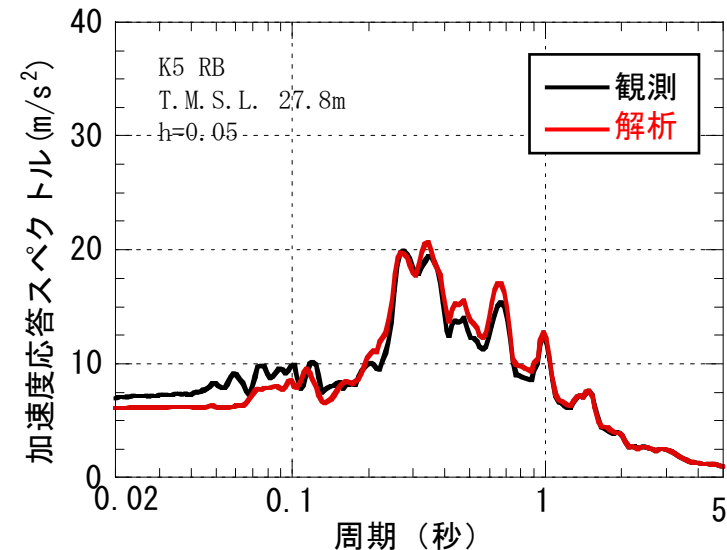


5号機原子炉建屋解析モデル

NS方向



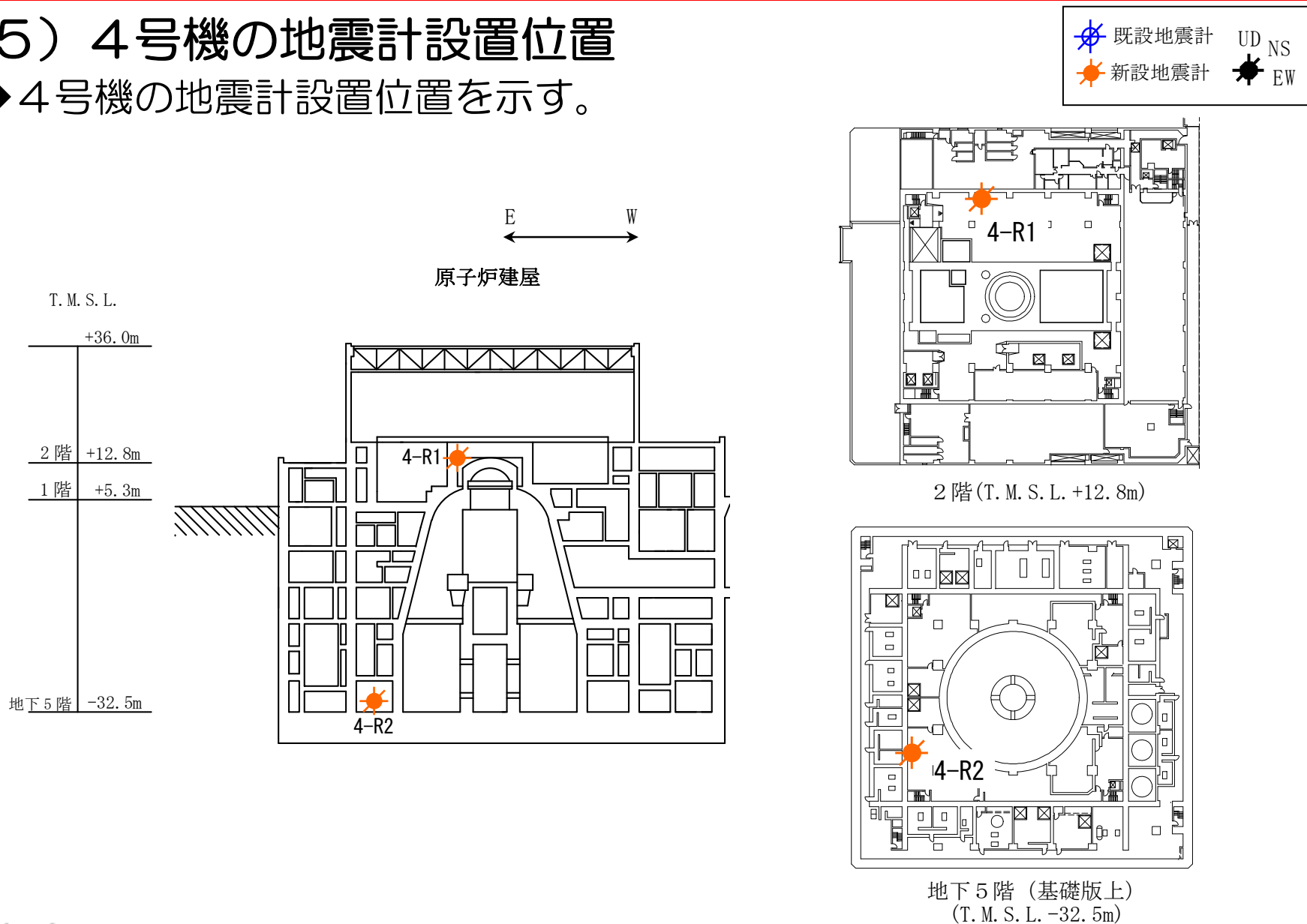
EW方向



2. 2 質点系モデルによる検討

(5) 4号機の地震計設置位置

◆ 4号機の地震計設置位置を示す。

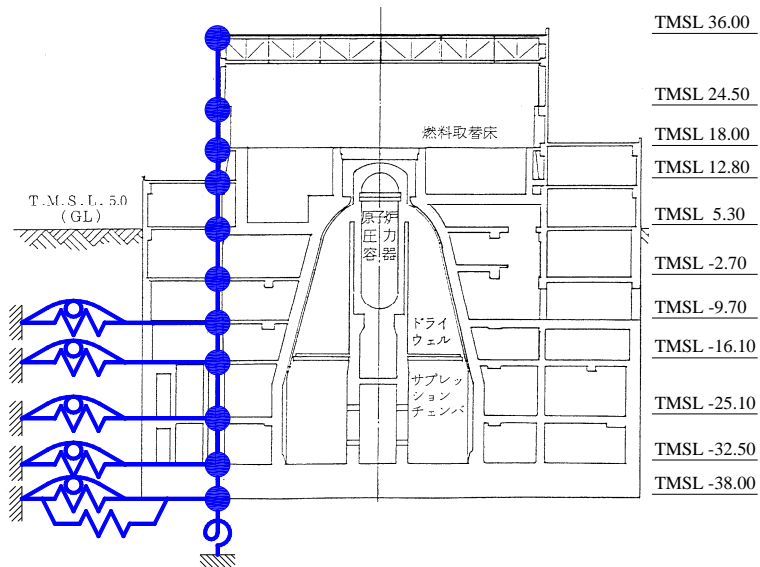


2. 2 質点系モデルによる検討

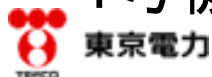
(6) 一軸質点系モデルによる解析結果（4号機）

◆建屋一軸質点系モデル（埋め込みSRモデル）によるシミュレーション解析を実施

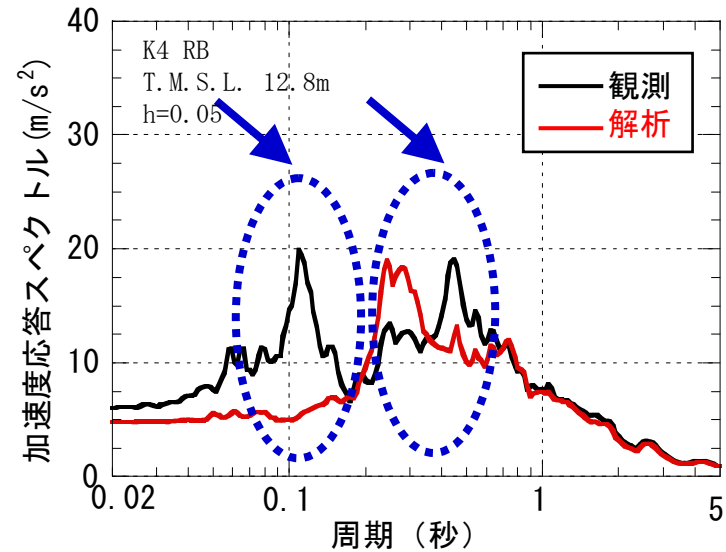
⇒NS方向の観測記録と解析結果の整合が十分でない。
（周期 0.1秒, 0.5秒）



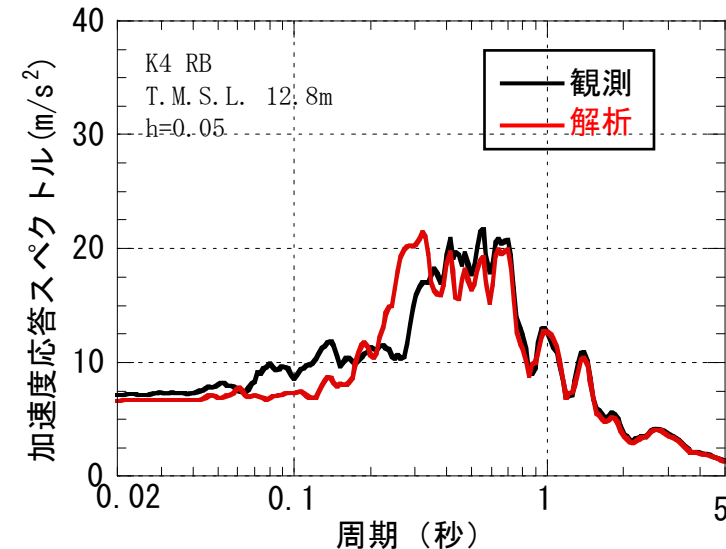
4号機原子炉建屋解析モデル



NS方向



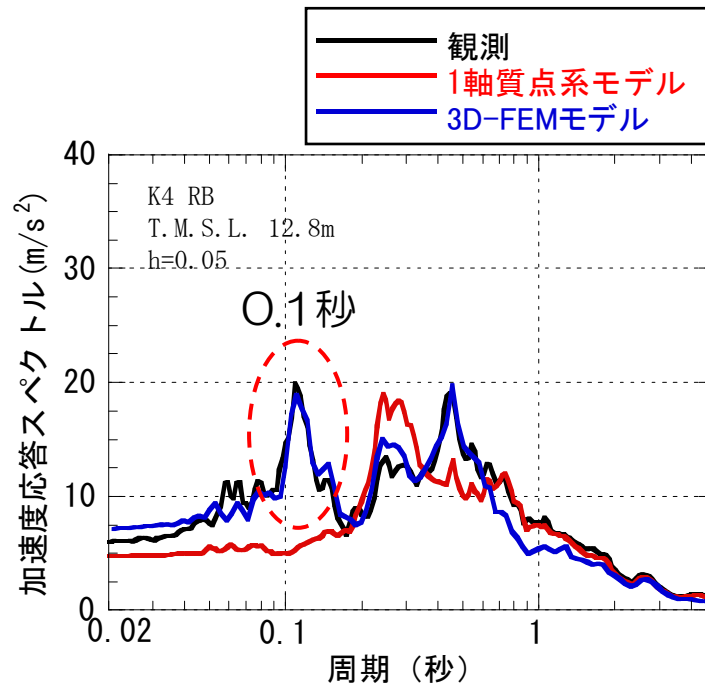
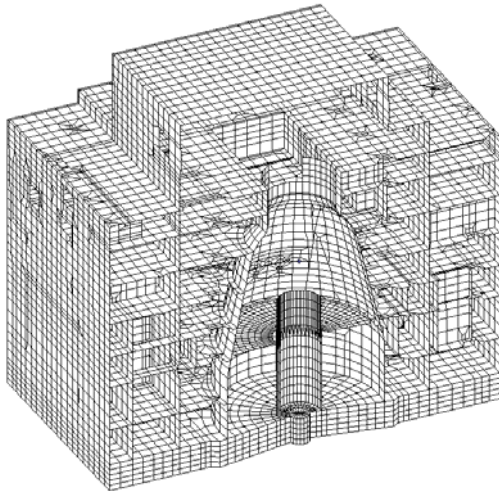
EW方向



2. 3 4号機の検討

(1) NS方向の解析精度向上のための検討 (建屋を3次元FEMモデルとした検討)

◆3次元FEMモデルによる詳細解析を実施し、局所的な応答を表現することで、NS方向の0.1秒のピークは再現できた。(安田層部分の側面地盤ばねは25%としている)

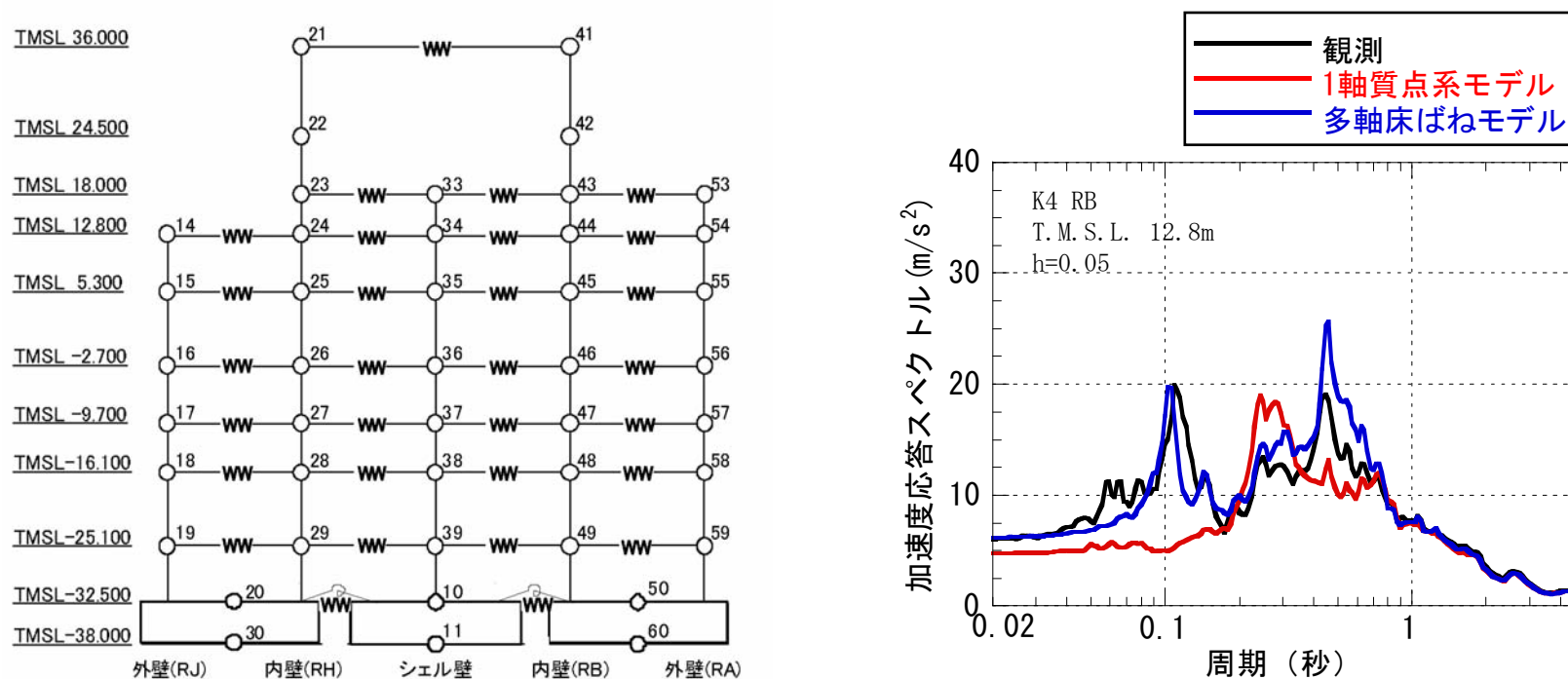


既検討モデル (建屋3次元FEMモデル)

2. 3 4号機の検討

(2) NS方向の解析精度向上のための検討 (建屋を多軸床ばねの質点系モデルとした検討)

◆3次元FEMモデルによる検討を踏まえて、床の柔性による局所的な応答の影響を確認するために、建屋を多軸床ばねの質点系モデルとした埋込みSRモデルによる解析を実施した。その結果、NS方向の0.1秒のピークは再現できた。(安田層部分の側面地盤ばねは25%としている)



既往検討モデル (多軸床ばねの質点系モデル)

2. 3 4号機の検討

(3) 原子力安全・保安院からの指示文書

4号機で観測された0.1秒のピークは、「建屋を3次元FEMモデル」又は「建屋を多軸床ばねとした質点系モデル」により、表現することができた。

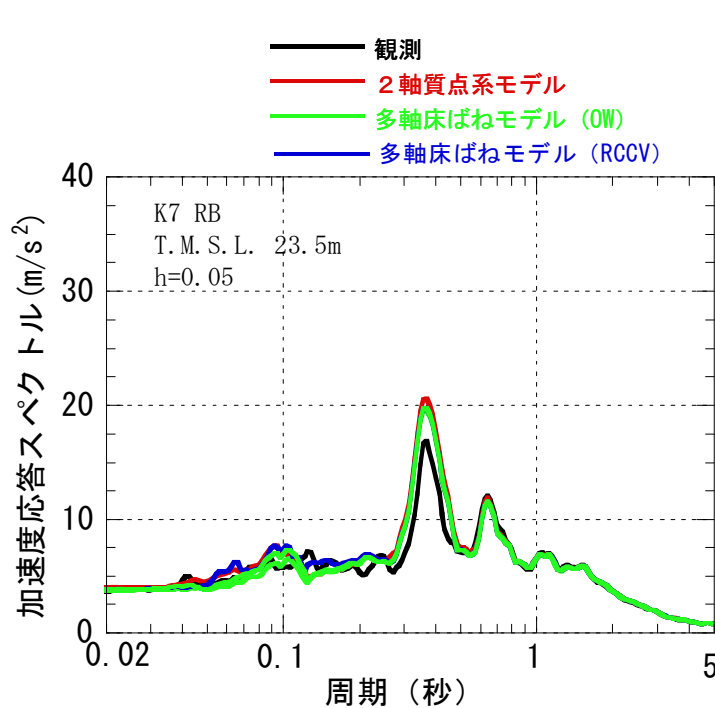


上記の知見を踏まえて、平成20年9月4日に原子力安全・保安院から「新潟県中越沖地震を踏まえた原子力発電所等の耐震安全性評価に反映すべき事項について」とし、念のため床などの柔性を考慮した解析あるいは地震観測記録に基づいた解析などにより検討を行い、耐震安全性の評価に問題がないことを確認することが原子力事業者等に通知された。

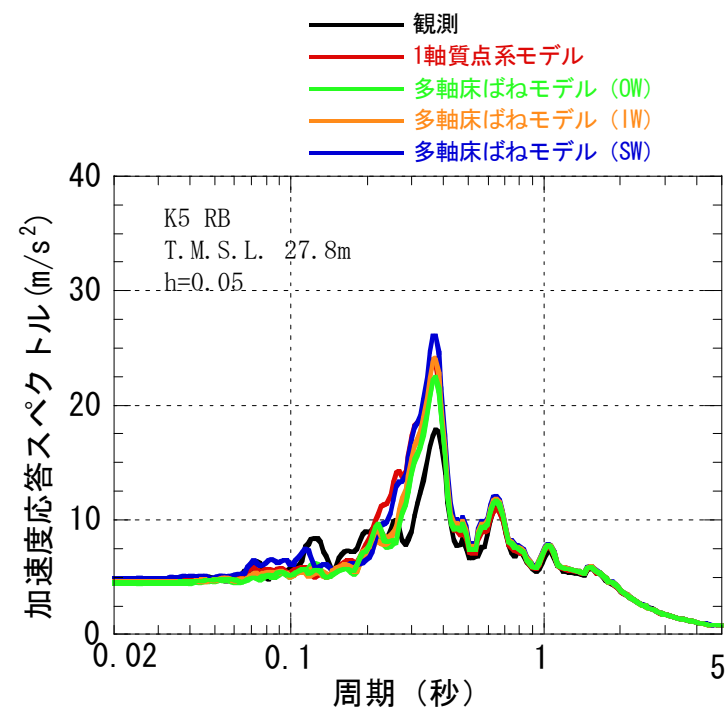
2. 3 4号機の検討

(4) 指示文書を踏まえた検討結果（7、6、1、5号機）

前述の指示事項に従い，7、6、1、5号機原子炉建屋においては，念のために床などの柔性を考慮した新潟県中越沖地震本震に対するシミュレーション解析を実施し，地震観測記録との対応から床などの柔性の影響が小さいことを確認している。



7号機原子炉建屋の例



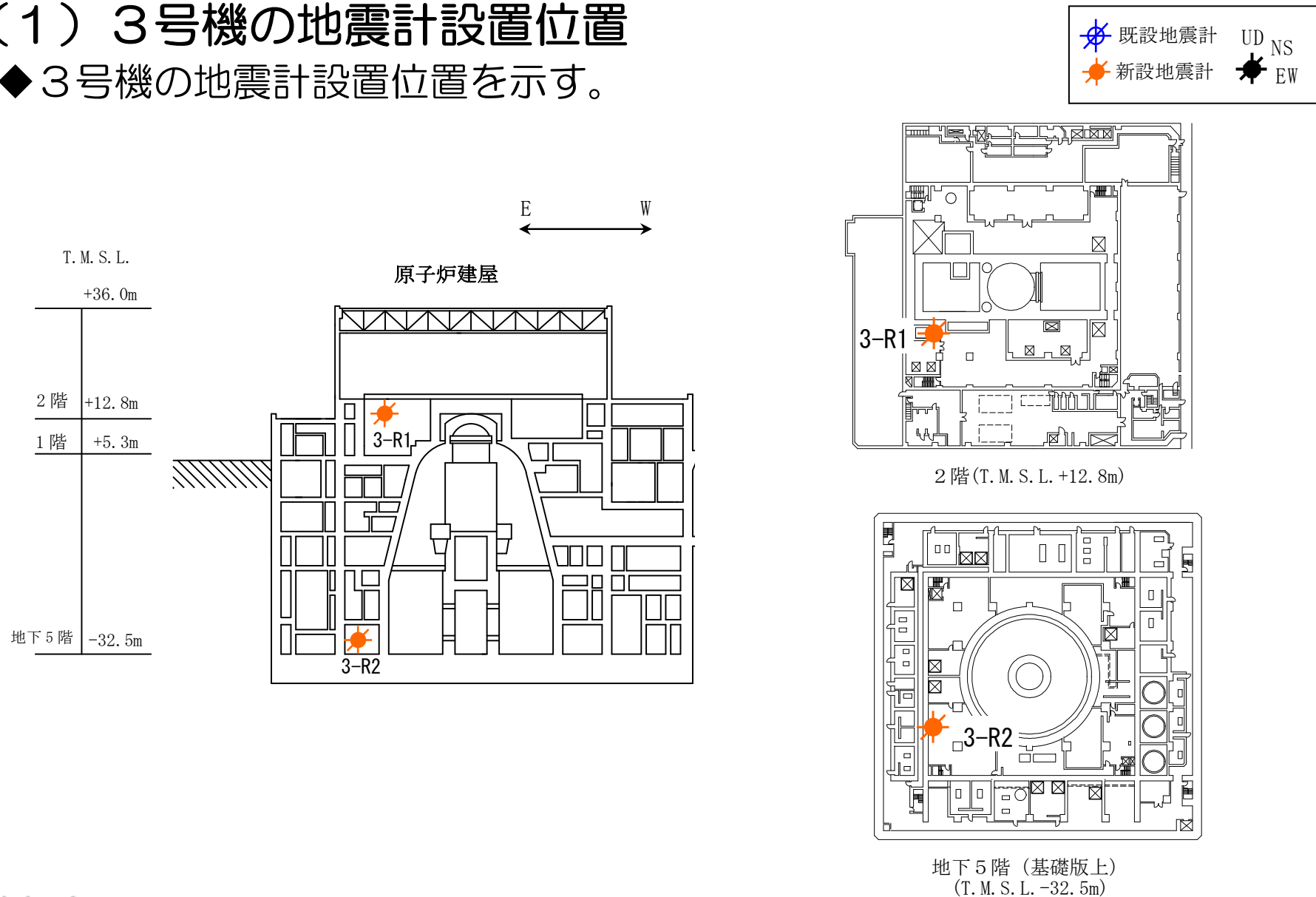
5号機原子炉建屋の例

3. 健全性評価に用いる地盤-建屋連成モデルの検討

3. 1 3号機の検討

(1) 3号機の地震計設置位置

◆ 3号機の地震計設置位置を示す。

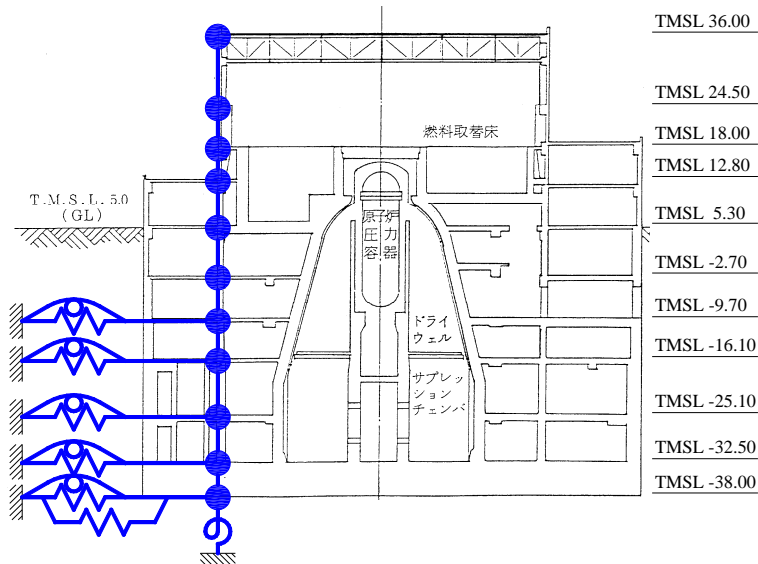


3. 1 3号機の検討

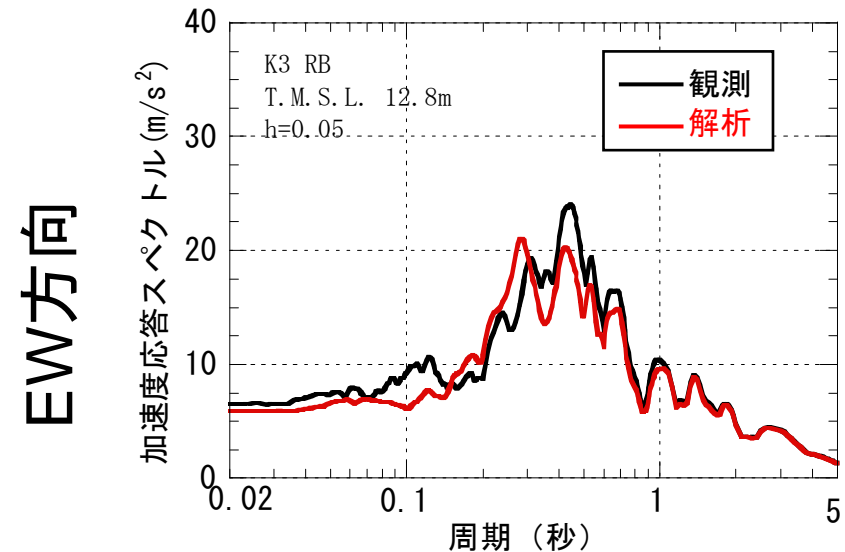
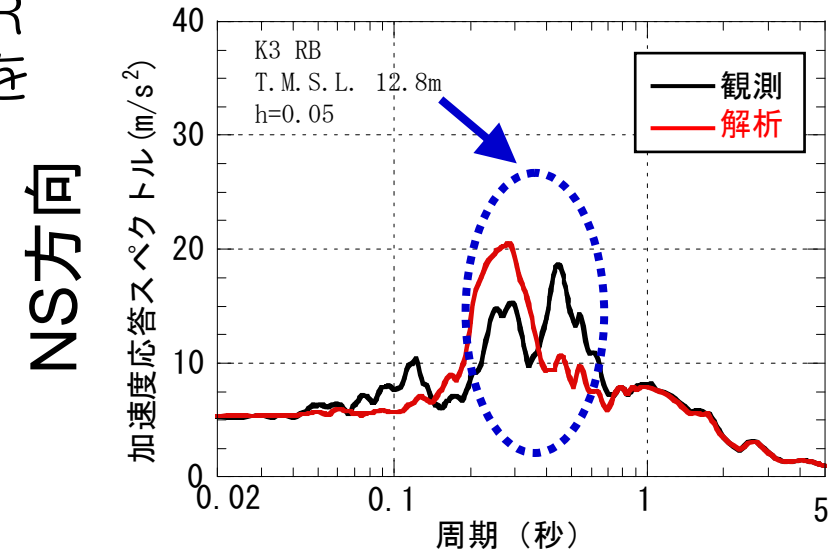
(2) 一軸質点系モデルによる解析結果 (3号機)

◆建屋一軸質点系モデル (埋め込みSRモデル) によるシミュレーション解析を実施

⇒NS方向の観測記録と解析結果の整合が十分でない。
(周期 0.3~0.5秒)



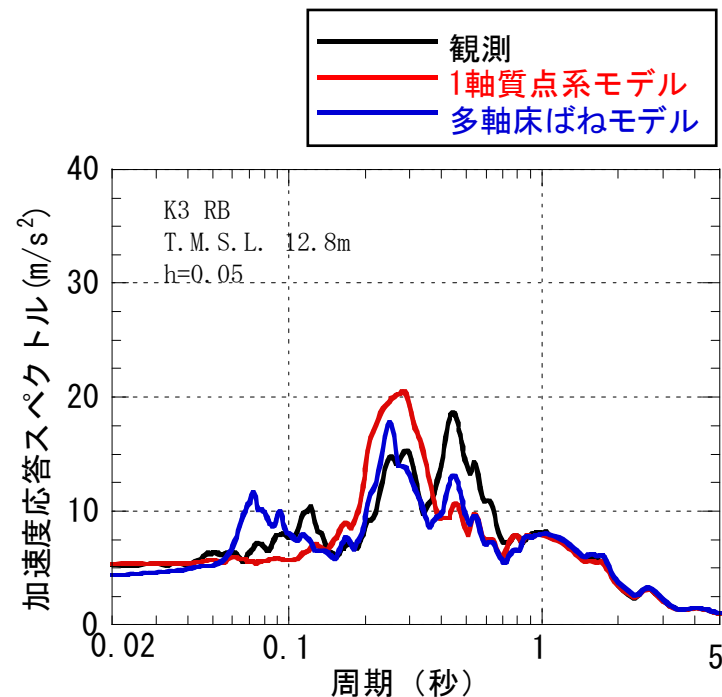
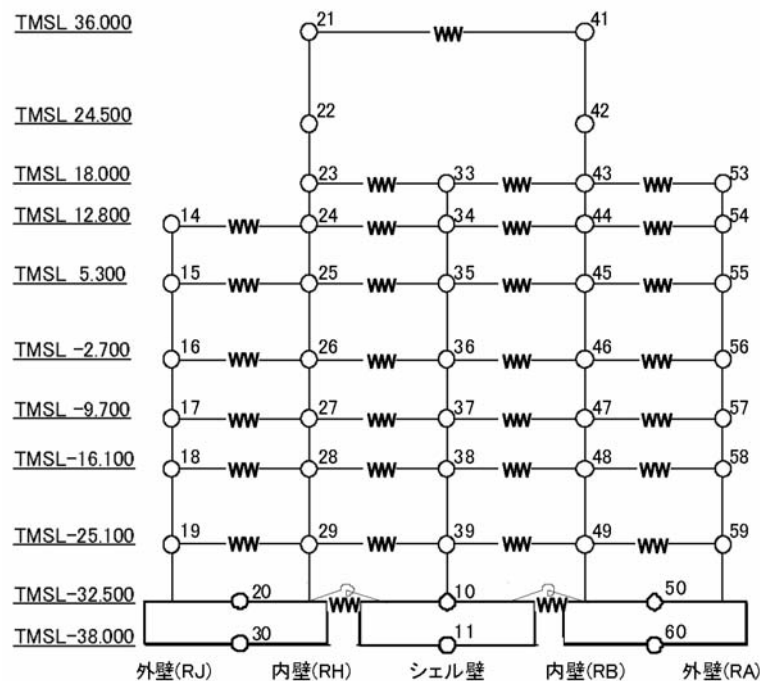
3号機原子炉建屋解析モデル



3. 1 3号機の検討

(3) NS方向の解析精度向上のための検討 (建屋を多軸床ばねの質点系モデルとした検討)

◆ 4号機での検討と同様に、安田層部分の側面地盤ばねを25%とした多軸床ばねモデルによる解析を実施した。しかし、4号機での傾向とは異なり、観測記録との整合性は改善されなかった。



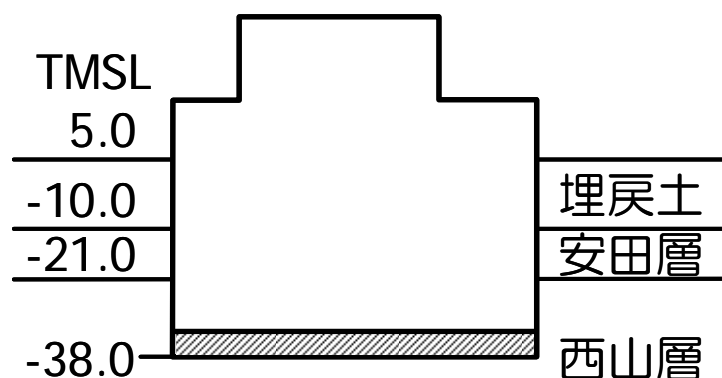
既往検討モデル (多軸床ばねの質点系モデル)

3. 1 3号機の検討

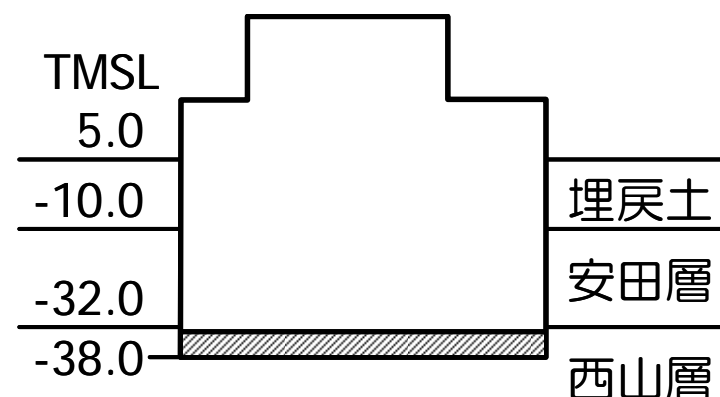
(4) 3, 4号機側面地盤の比較

◆3号機の建屋側面に接する地盤としては、T.M.S.L.-10.0mから-21.0mまでの10mにわたって、安田層が分布しており、T.M.S.L.-21.0m以深は西山層となっている。

◆一方、4号機の建屋側面に接する地盤としては、T.M.S.L.-10.0mから-32.0m（ほぼ基礎版上レベルに相当）まで安田層が分布しており、T.M.S.L.-32.0m以深が西山層となっており、3号機と4号機で側面地盤の分布状況に違いがある。



3号機



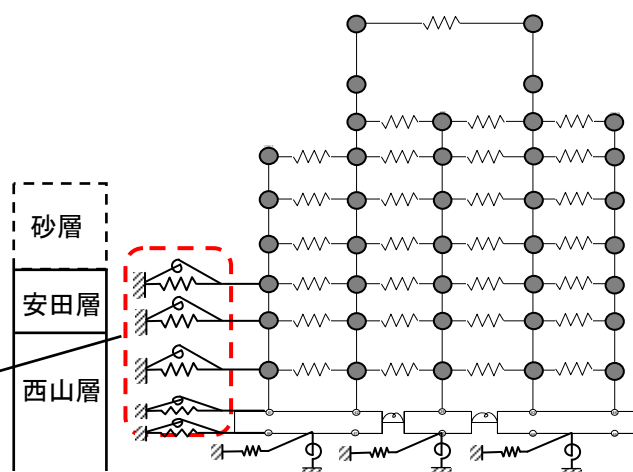
4号機

3. 2 側面地盤ばねのパラメータスタディ

(1) 検討の概要

- ◆4号機では、安田層部分の側面地盤ばねを25%に低減することで観測記録を再現できたが、地盤ばねを低減することのメカニズムは解明されていない。
- ◆3号機でも4号機と同様の検討を実施したが、一軸質点系モデルの結果と比較して、整合性は向上しなかった。
- ◆3号機と4号機の建屋側面の地盤の分布状況は異なっている。
- ◆ここでは、3号機と4号機において、一律に地盤ばねを低減した場合のパラメータスタディを行う。
- ◆地盤ばねを低減する（＝建屋－地盤の相互作用効果を低減する）ことのメカニズムを解明するために建屋と地盤の剥離の有無を解析により検討する。

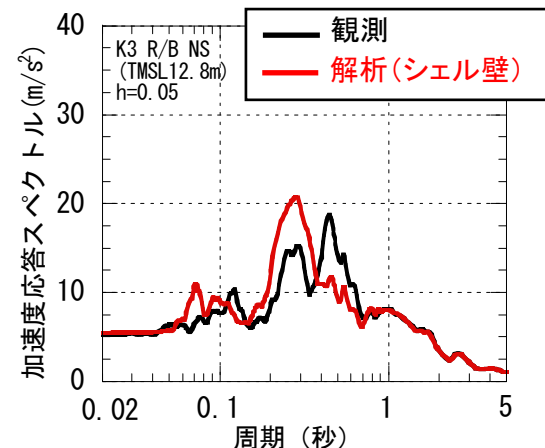
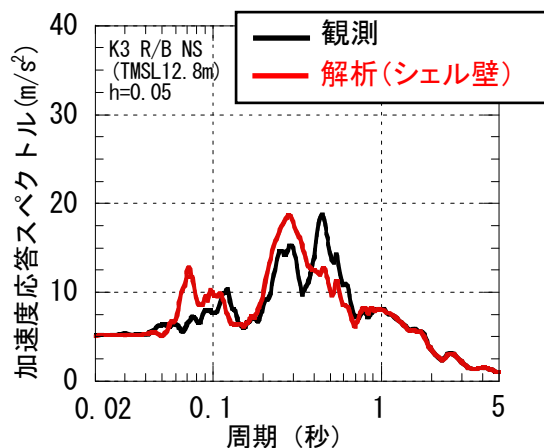
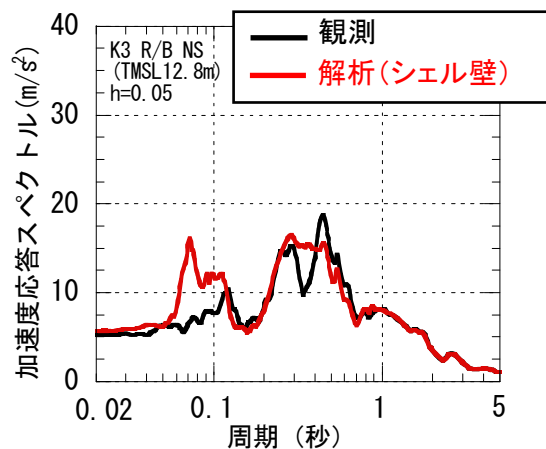
地盤ばねの低減率：
25%, 50%, 75%



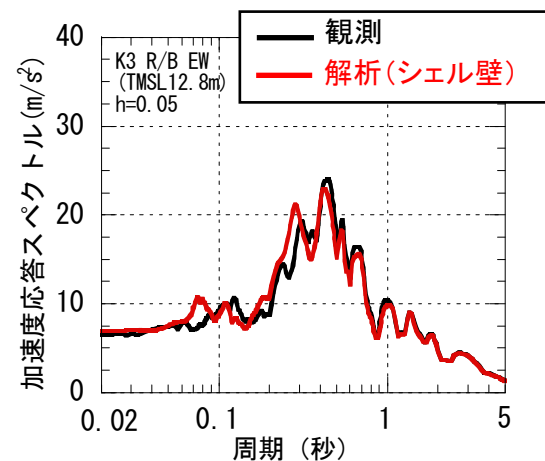
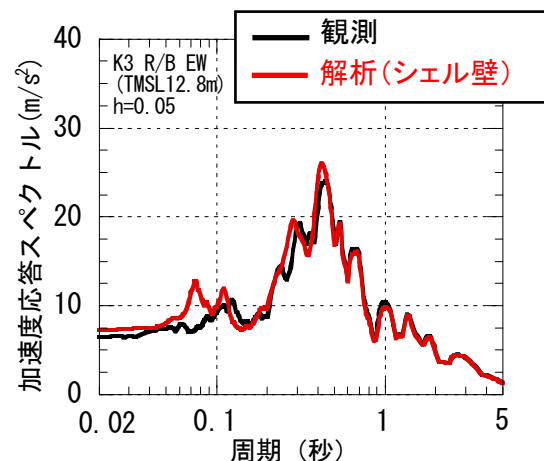
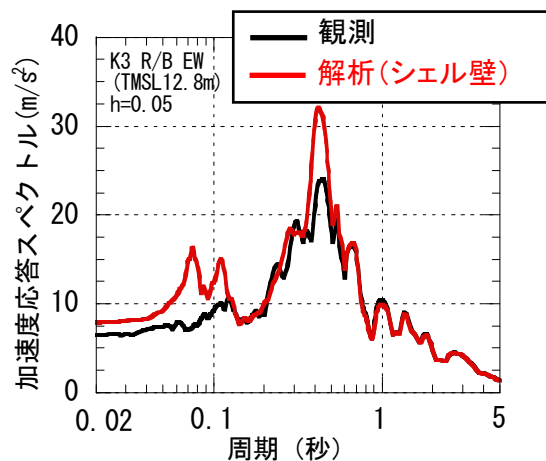
3. 2 側面地盤ばねのパラメータスタディ

(2) 側方地盤をパラメータとした検討結果 (K3-R/B)

NS方向



EW方向



ばね定数低減率
25%

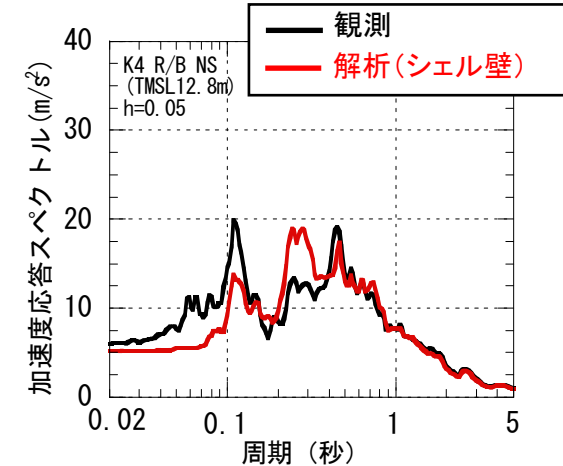
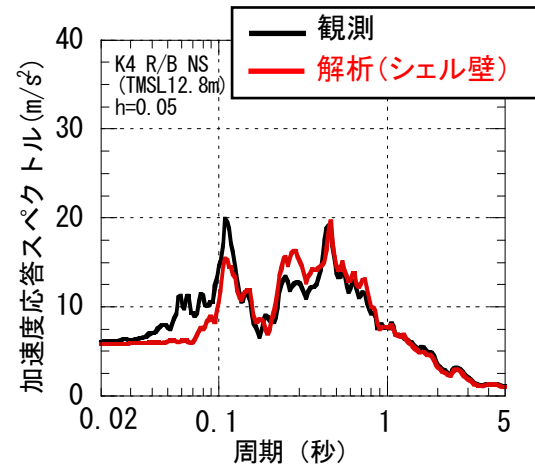
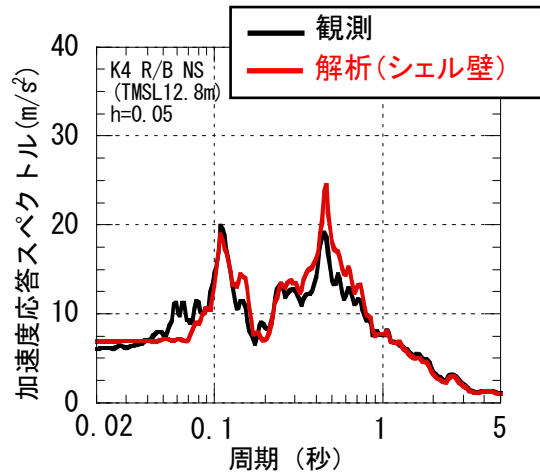
ばね定数低減率
50%

ばね定数低減率
75%

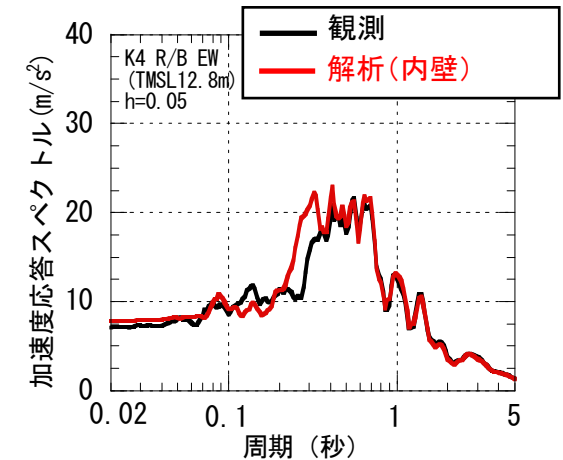
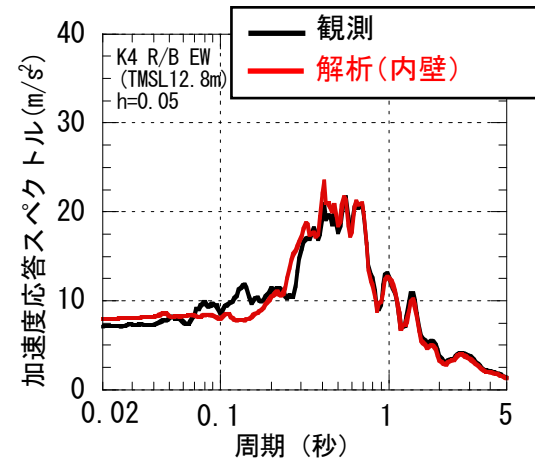
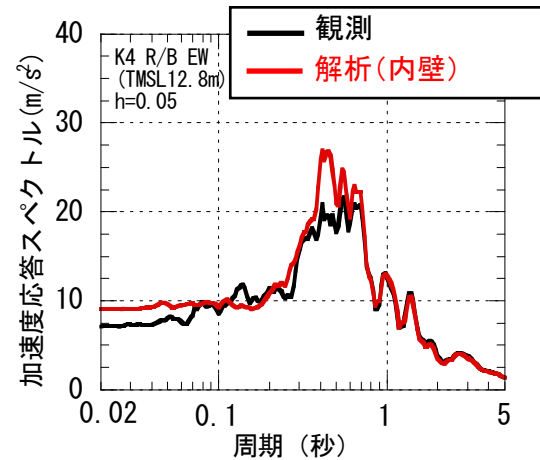
3. 2 側面地盤ばねのパラメータスタディ

(3) 側方地盤をパラメータとした検討結果 (K4-R/B)

NS方向



EW方向



ばね定数低減率
25%

ばね定数低減率
50%

ばね定数低減率
75%

3. 2 側面地盤ばねのパラメータスタディ

(4) 側方地盤をパラメータとした検討結果（考察）

◆3号機での検討

【NS方向】

各ケースで一長一短があるが、総合的には50%のケースの整合性が高いと考えられる。

【EW方向】

50%、75%のケースの整合性が良い結果であった。

◆4号機での検討

【NS方向】

周期0.1秒のピークとの整合性という観点では25%のケースが最も良いが、周期0.5秒のピークについては、50%の方が整合しており、総合的に見ると25%も50%も同等である。

【EW方向】

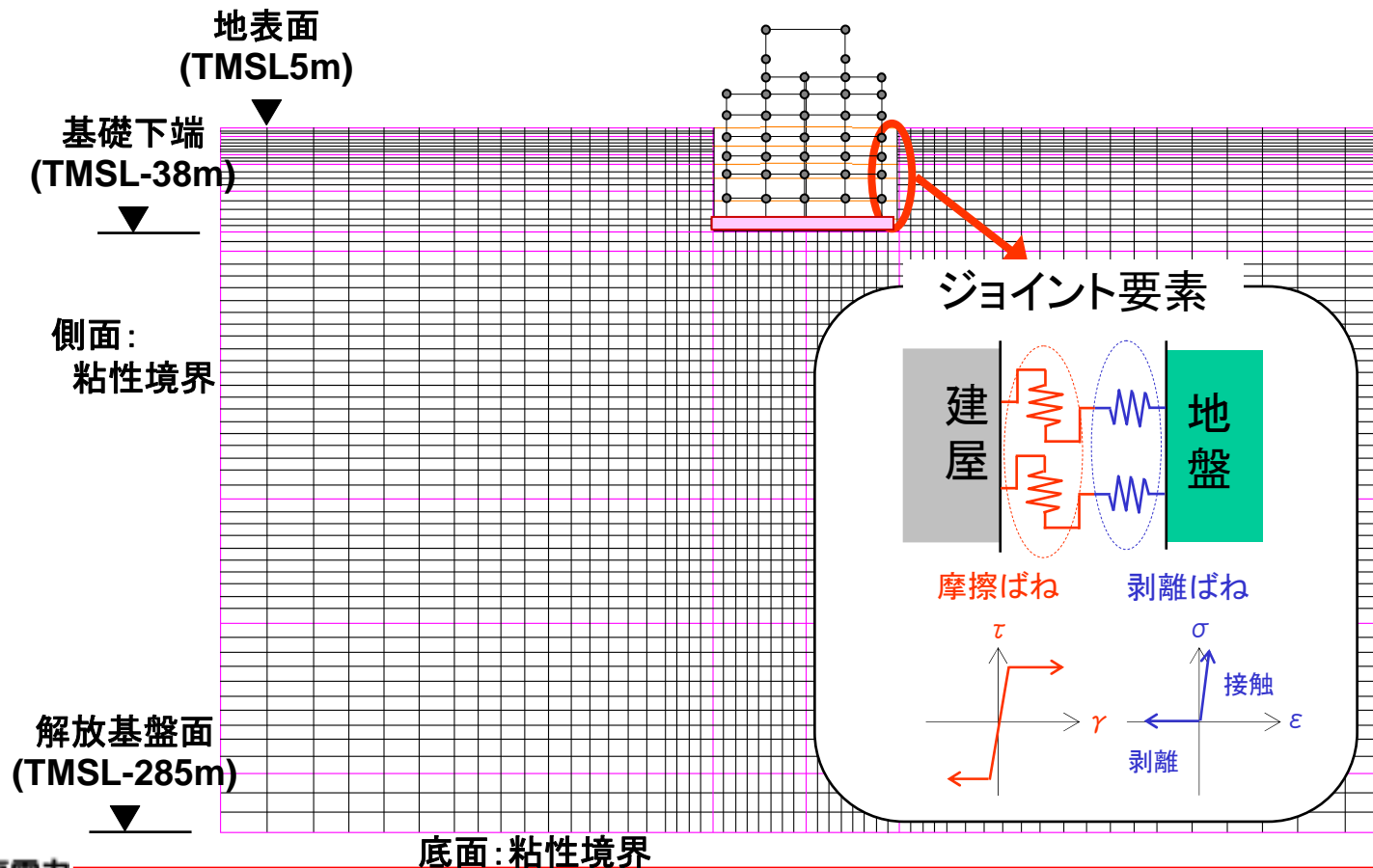
50%、75%のケースが比較的整合性がよい。

◆3, 4号機のNS方向・EW方向の検討結果を総合的に判断すると、ばね定数の低減率は50%とすることにより、観測記録との整合性が高いと考えられる。

3. 3 2次元FEMによる側方地盤に着目した検討

(1) 建屋-側方地盤間の剥離・摩擦のモデル化

- ◆ 建屋-地盤間の相互作用を詳細に評価するため、建屋と地盤の境界面に剥離・摩擦を考慮したジョイント要素を用いて解析を実施する。

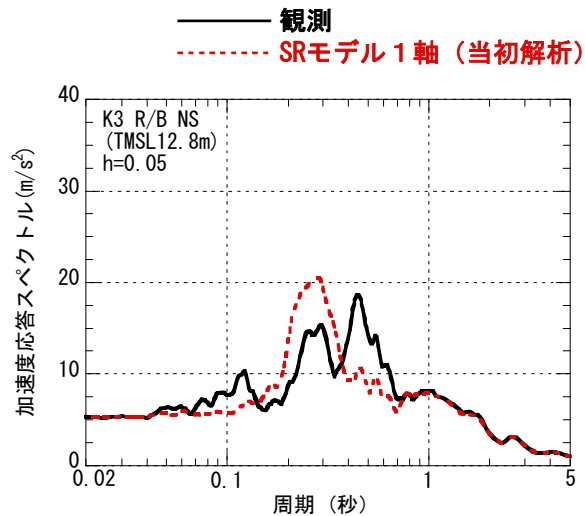


3. 3 2次元FEMによる側方地盤に着目した検討

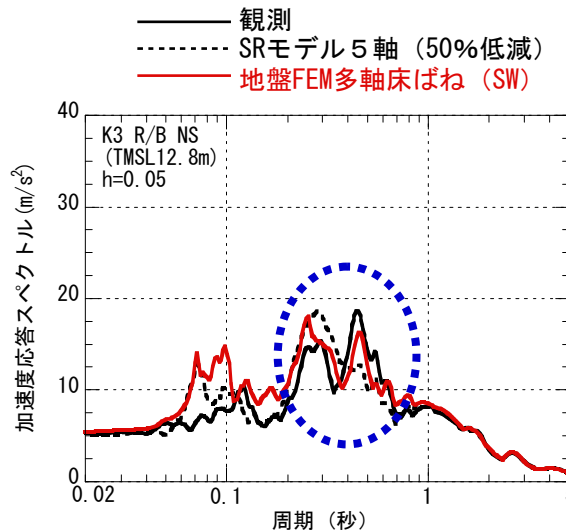
(2) 側方地盤の剥離を考慮した解析結果 (3号機)

◆側方地盤については、埋戻土だけでなく、安田層や西山層でも剥離が生じている。

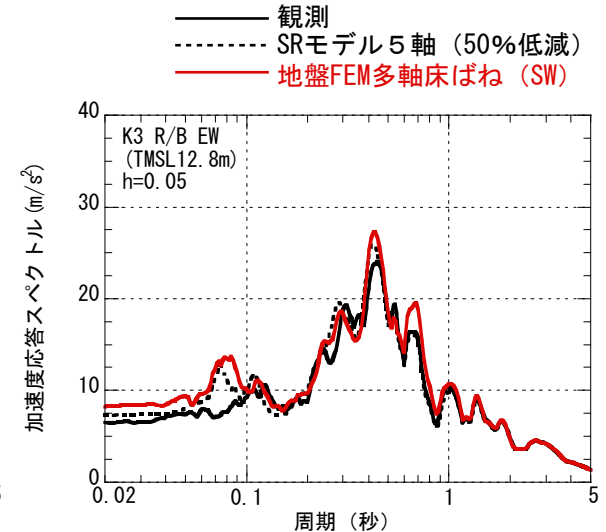
埋込みSRモデル
(建屋1軸モデル, NS)



2次元FEMモデル
(建屋多軸床ばねモデル, NS)



2次元FEMモデル
(建屋多軸床ばねモデル, EW)



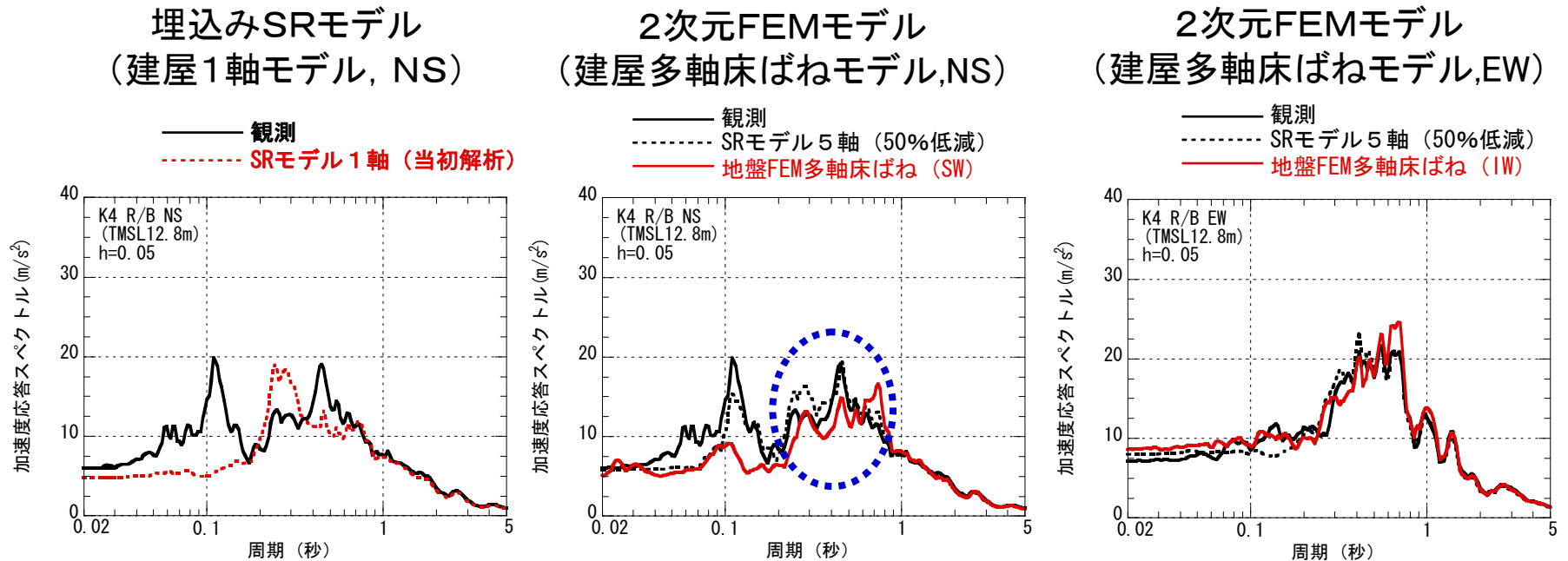
		最大剥離量 (mm)	側方地盤の接触率	最大剥離量 (mm)	側方地盤の接触率
埋戻土	——	0.9	(0%)	1.8	(0%)
安田・西山層	——	0.2	(43%)	0.2	(28%)

接触率は、最大剥離時の値(引張側)

3. 3 2次元FEMによる側方地盤に着目した検討

(3) 側方地盤の剥離を考慮した解析結果 (4号機)

◆側方地盤については、埋戻土だけでなく、安田層や西山層でも剥離が生じている。



	最大剥離量 (mm)	側方地盤の接触率 (%)	最大剥離量 (mm)	側方地盤の接触率 (%)
埋戻土	1.3	(0%)	2.6	(0%)
安田・西山層	0.1	(6%)	0.2	(7%)

接触率は、最大剥離時の値(引張側)

3. 3 2次元FEMによる側方地盤に着目した検討

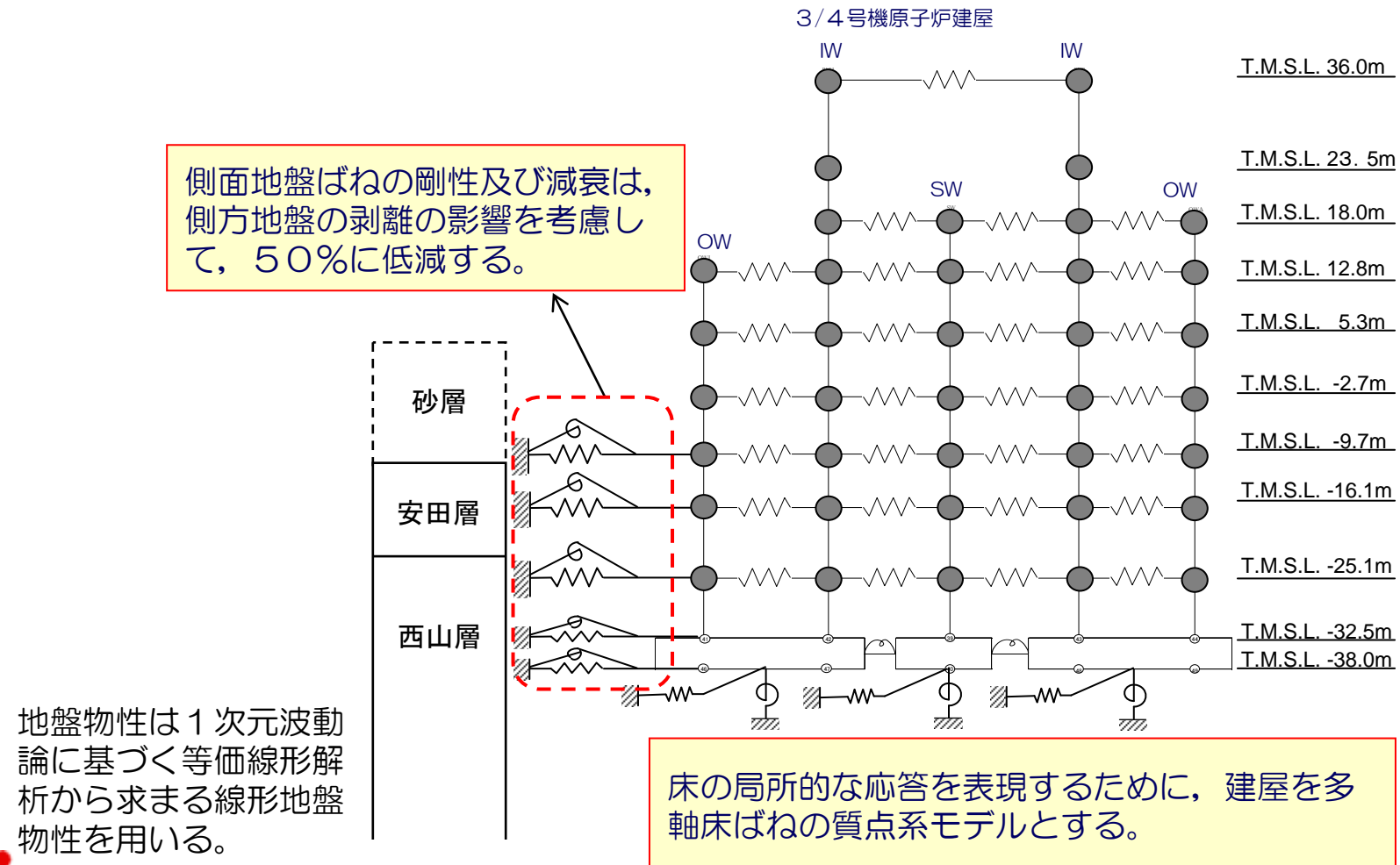
(4) 側方地盤の剥離を考慮した検討結果（考察）

- ◆観測記録との対応から、剥離・摩擦を考慮した2次元FEMによる地震応答解析を用いることで、周期0.5秒近傍の挙動は概ね説明できる。
- ◆剥離・摩擦を考慮した2次元FEMの地震応答解析の結果、3・4号機共に、埋戻土だけでなく、安田層や西山層でも側面地盤の剥離が生じており、地盤ばねの値が低減（建屋—地盤の相互作用効果が低減）されているものと考えられる。
- ◆埋込みSRモデルによる解析を実施する際に、地盤ばねを低減することにより、側方地盤の剥離の影響を考慮できるものと考えられる。
- ◆以上のことと側方地盤をパラメータとした検討結果の結果から、側方地盤に剥離が生じた際は、側面地盤ばねを簡易的に一律低減することにより、周期0.5秒近傍の建屋応答を概ね再現できるものと考えられる。

4. 3/4号機健全性評価における解析モデル（案）

4. 3/4号機健全性評価における解析モデル（案）

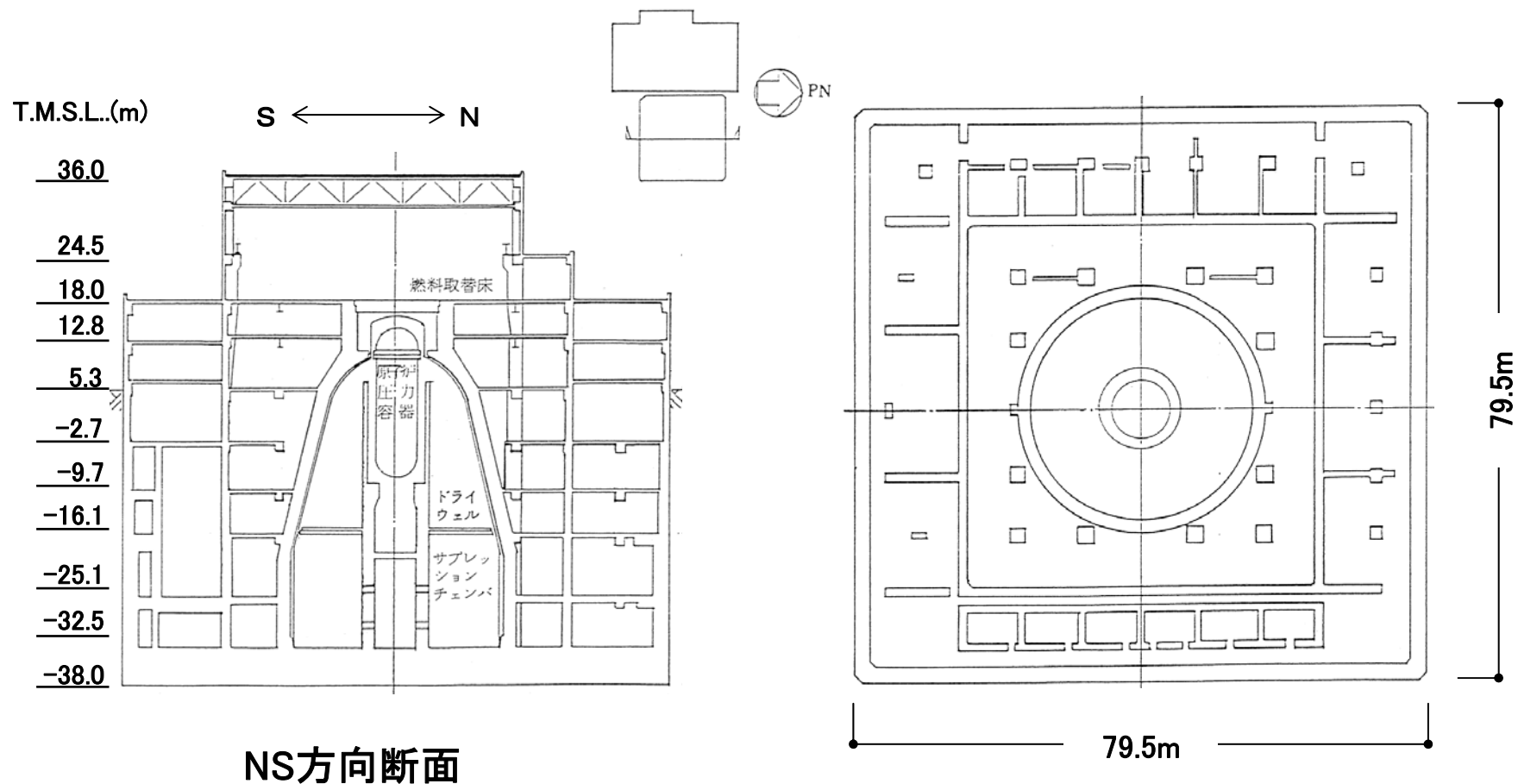
埋め込みSRモデルの側面地盤ばねのパラメータスタディや2次元FEMモデルによる剥離の有無に関する検討結果を踏まえ、「3/4号機の健全性評価に用いる解析モデル」を以下とすることとしたい。



付録.

- 付1. 3号機の原子炉建屋の概要
- 付2. 3号機の建屋モデル
- 付3. 各号機の地盤条件（中越沖地震時）

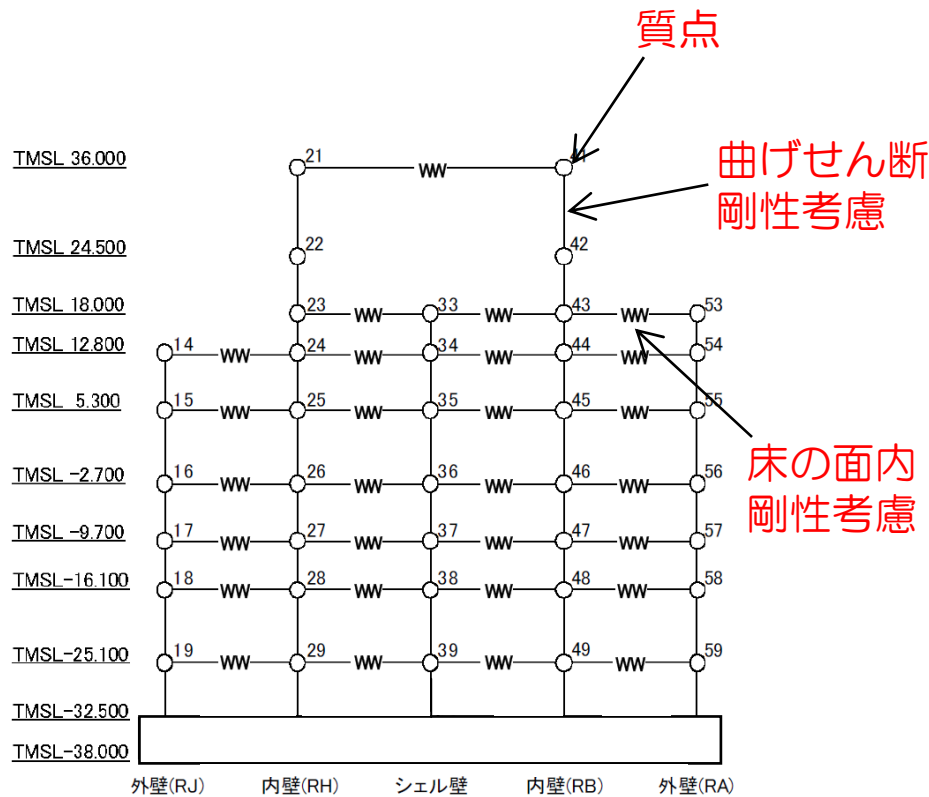
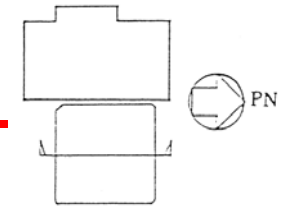
付1. 3号機の原子炉建屋の概要



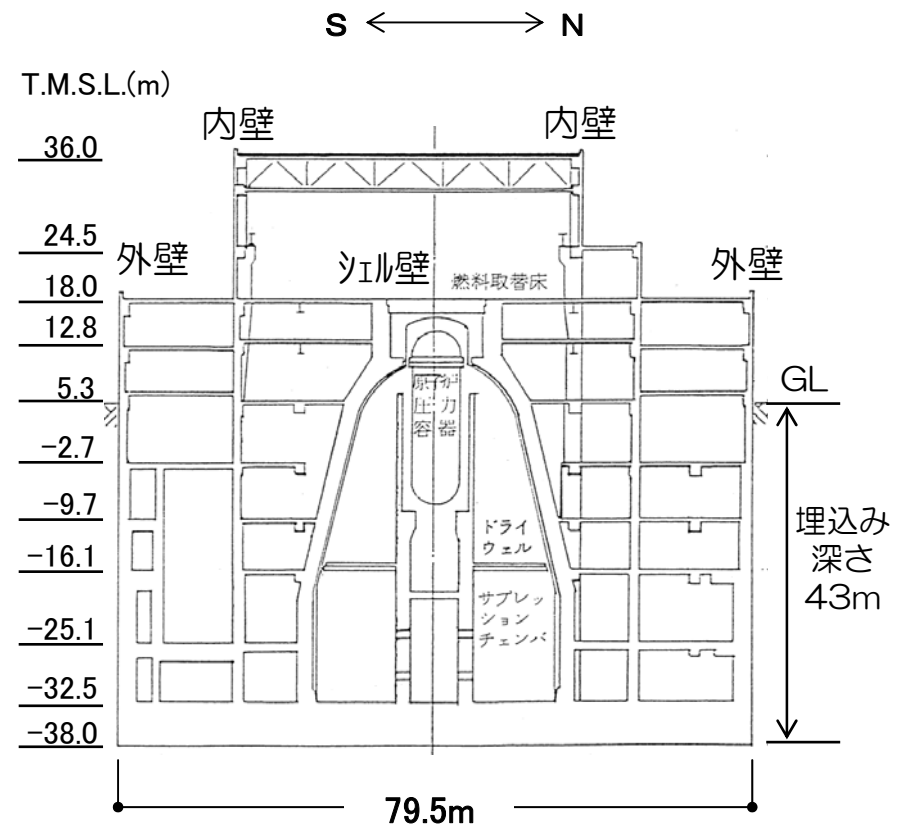
基礎上平面 (T.M.S.L.-32.5m)

階数 : 地上3階・地下5階
 構造 : RC+S

付2. 3号機の建屋モデル



多軸床ばね質点系モデル



NS方向断面

付3. 各号機の地盤条件の比較

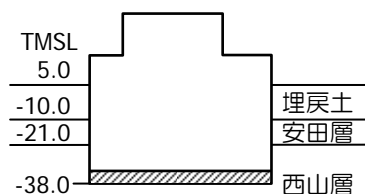
各号機の地盤条件は、以下に示すとおりである。

① 1号機			② 2号機			③ 3号機			④ 4号機			⑥⑦ 6/7号機			⑤ 5号機				
地盤レベル (T.M.S.L.) (m)	地層 区分	せん断波 速度 Vs(m/s)	地盤レベル (T.M.S.L.) (m)	地層 区分	せん断波 速度 Vs(m/s)	地盤レベル (T.M.S.L.) (m)	地層 区分	せん断波 速度 Vs(m/s)	地盤レベル (T.M.S.L.) (m)	地層 区分	せん断波 速度 Vs(m/s)	地盤レベル (T.M.S.L.) (m)	地層 区分	せん断波 速度 Vs(m/s)	地盤レベル (T.M.S.L.) (m)	地層 区分	せん断波 速度 Vs(m/s)		
5.0	埋戻土	-	5.0	表層	300	5.0	埋戻土	-	5.0	埋戻土	-	12.0	砂層	150	12.0	表層	300		
-21.2			基礎下	3.0	安田層	280			-6.2			安田層		340	8.0	200	6.0	安田層	330
-62.0	西山層	540	-15.0	西山層	500	-10.0	安田層	350	-10.0	安田層	340	-6.0	西山層	490	-9.0	西山層	310		
-77.0		590	基礎下		530	基礎下	420	基礎下	450	-33.0	530	基礎下		490	60.0		西山層	560	
-103.0		620	-70.0		530	-46.0	530	-66.0	490	-90.0	530	-100.0		610	-60.0		西山層	560	
-128.0		650	-100.0		560	-148.0	570	-103.0	560	-136.0	650	-155.0		720	-134.0		解放基盤	710	
-192.0		670	-150.0		630	-199.0	650	-248.0	620	-192.0	690	-285.0		710	-285.0		解放基盤	710	
-284.0		解放基盤	730		-200.0	660	-261.0	690	-285.0	解放基盤	710	-285.0		解放基盤	710		-285.0	解放基盤	710
					-250.0	解放基盤	700	-285.0	解放基盤	710	-285.0	解放基盤		710	-285.0		解放基盤	710	

図-1 各号機の地盤条件

付3. 各号機の地盤条件の比較

1. 3号機の地盤条件（中越沖地震時）

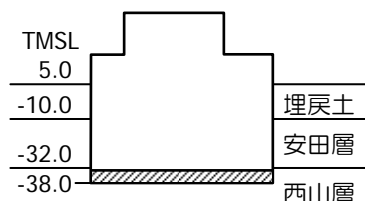


標高 TMSL (m)	地質	S波 速度 Vs (m/s)	単位体積 重量 γt (kN/m ³)	ポアソン 比 ν	初期せん断 弾性係数 Go (kN/m ²)	剛性低下率 G/Go	せん断弾性 係数 G (kN/m ²)	剛性低下後 S波速度 Vs (m/s)	剛性低下後 P波速度 Vp (m/s)	減衰定数 h (%)
5.0	埋戻土	110	18.6	0.333	21,000	0.35	7,350	62	124	18
1.3		170	18.6	0.333	53,200	0.35	18,600	99	198	18
-6.2		200	18.6	0.333	77,500	0.35	27,100	120	240	18
-10.0	安田層	350	18.0	0.472	225,000	0.85	191,000	323	1,400	3
-21.0	西山層	420	15.8	0.460	284,000	0.95	270,000	409	1,500	3
-46.0		530	16.2	0.445	464,000	0.95	441,000	517	1,640	3
-148.0		570	16.2	0.436	537,000	0.95	510,000	556	1,650	3
-199.0		650	17.3	0.426	745,000	0.95	708,000	634	1,770	3
-261.0		690	17.8	0.415	864,000	0.95	821,000	673	1,770	3
-285.0	解放基盤	710	17.5	0.409	900,000	1.00	900,000	710	1,810	—

地盤の剛性低下率及び減衰定数は地盤の室内試験結果により確認している。

付3. 各号機の地盤条件の比較

(2) 4号機の地盤条件（中越沖地震時）



標高 TMSL (m)	地質	S波速度 Vs (m/s)	単位体積 重量 γ_t (kN/m ³)	ポアソン 比 ν	初期せん断 弾性係数 Go (kN/m ²)	剛性低下率 G/Go	せん断弾性 係数 G (kN/m ²)	剛性低下後 S波速度 Vs (m/s)	剛性低下後 P波速度 Vp (m/s)	減衰定数 h (%)
5.0	埋戻土	110	18.6	0.333	21,000	0.30	6,300	58	116	19
1.3		170	18.6	0.333	53,200	0.30	16,000	92	184	19
-6.2		200	18.6	0.333	77,500	0.30	23,300	111	222	19
-10.0	安田層	340	18.1	0.475	213,000	0.80	170,000	303	1,390	4
-32.0	西山層	450	15.6	0.456	322,000	0.95	306,000	439	1,540	3
-66.0		490	15.8	0.452	387,000	0.95	368,000	478	1,620	3
-103.0		560	16.9	0.441	540,000	0.95	513,000	546	1,680	3
-150.0		620	17.4	0.433	682,000	0.95	648,000	604	1,760	3
-248.0		670	17.3	0.420	792,000	0.95	752,000	653	1,760	3
-285.0	解放基盤	710	17.8	0.408	915,000	1.00	915,000	710	1,800	—

地盤の剛性低下率及び減衰定数は地盤の室内試験結果により確認している。