TK-1-1078　改 0
平成 30 年 6 月 25 日
日本原子力発電株式会社

原子炉建屋改造工事に伴う評価結果への影響について

目次

1. 概要 1
2. 検討方針 2
3. 検討条件 3
4. 地震応答解析結果 10
5. 原子炉建屋の地震応答解析による評価に与える影響 21
6. まとめ 33

1. 概要

本資料は,原子炉建屋において,補強等に伴う重量の増加分を考慮した地震応答解析を実施し,「原子炉建屋の地震応答解析による評価」に与える影響について確認するものである。

2.　検討方針

今回工認評価に用いている質点系モデル（以下，「今回工認モデル」という。）と補強等に伴う重量の増加分を考慮したモデル（以下，「補強反映モデル」という。）を比較することにより，重量変更による建屋応答への影響を確認する。

なお，影響検討は，応答倍率を用いた手法により行うことから，応答倍率の算出のための「補強反映モデル」を用いた地震応答解析は，位相特性の偏りがなく，全周期帯において安定した応答を生じさせる基準地震動Ｓ$_{s}$－Ｄ１に対して実施することとする。

3.　検討条件

(1)　補強等に伴う増加重量

補強等に伴う増加重量と補強後の変更となる補強反映モデルの振動諸元を表3－1に示す。なお，補強等の変更箇所は耐震壁の変更を伴わないことより，地震応答解析モデルの諸元の変更箇所は質点重量と回転慣性重量のみである。

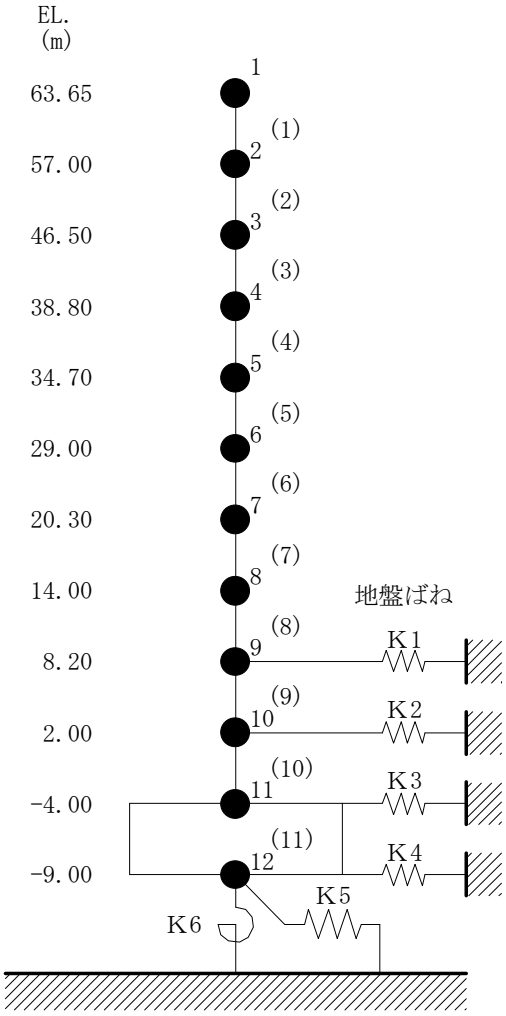
表 3－1　増加重量と補強後の振動諸元

標高 EL. (m)	質点番号	今回工認モデル			増加重量 (kN)	補強反映モデル		
		質点重量 (kN)	回転慣性重量 ($\times 10^5$kN・m^2)			質点重量 (kN)	回転慣性重量 ($\times 10^5$kN・m^2)	
			NS方向	EW方向			NS方向	EW方向
63.65	1	15870	35.7	31.5	0	15870	35.7	31.5
57.00	2	16160	51.2	44.7	1750	17910	56.7	49.5
46.50	3	67320	120.3	104.7	620	67940	121.4	105.6
38.80	4	97130	161.6	99.8	1330	98460	163.9	101.2
34.70	5	83270	113.0	68.7	1950	85220	115.6	70.3
29.00	6	122370	348.8	250.5	3010	125380	357.5	256.8
20.30	7	161820	488.7	543.9	3100	164920	498.0	554.2
14.00	8	234650	720.8	779.6	2470	237120	728.7	788.2
8.20	9	199260	893.0	886.8	3400	202660	908.2	901.9
2.00	10	220710	832.4	830.7	1540	222250	838.2	836.5
-4.00	11	439290	1724.6	1712.1	1620	440910	1731.5	1718.9
-9.00	12	275090	1081.4	1073.5	0	275090	1081.4	1073.5
総重量		1932940			20790	1953730		

(2)　解析モデル

水平方向の地震応答解析モデルを図3－1に，地盤ばね定数を表3－2に示す。また，UD方向の地震応答解析モデルを図3－2に，地盤ばね定数を表3－3に示す。

また，重量増分に伴うせん断及び曲げスケルトンへの影響は軽微であるため「今回工認モデル」の諸元を用いる。



・数字は質点番号を示す。

・（　）内は要素番号を示す。

図 3－1　地震応答解析モデル（水平方向）

表３－２（1／2）　地盤ばね定数と減衰係数（Ｓ$_s$－Ｄ１，NS 方向）

(a)　補強反映モデル

ばね番号	地盤ばね成　分	ばね定数 K_c	減衰係数 C_c
K1	側面・水平	5.46×10^5　(kN／m)	2.48×10^5　(kN･S／m)
K2	側面・水平	1.22×10^6　(kN／m)	4.20×10^5　(kN･S／m)
K3	側面・水平	6.64×10^6　(kN／m)	9.07×10^5　(kN･S／m)
K4	側面・水平	1.92×10^7　(kN／m)	8.69×10^5　(kN･S／m)
K5	底面・水平	6.41×10^7　(kN／m)	3.44×10^6　(kN･S／m)
K6	底面・回転	9.26×10^{10}　(kN･m／rad)	1.58×10^9　(kN･m･s／rad)

(b)　今回工認モデル

ばね番号	地盤ばね成　分	ばね定数 K_c	減衰係数 C_c
K1	側面・水平	5.46×10^5　(kN／m)	2.50×10^5　(kN･s／m)
K2	側面・水平	1.22×10^6　(kN／m)	4.18×10^5　(kN･S／m)
K3	側面・水平	6.64×10^6　(kN／m)	9.11×10^5　(kN･S／m)
K4	側面・水平	1.92×10^7　(kN／m)	8.70×10^5　(kN･s／m)
K5	底面・水平	6.41×10^7　(kN／m)	3.45×10^6　(kN･s／m)
K6	底面・回転	9.26×10^{10}　(kN･m／rad)	1.59×10^9　(kN･m･s／rad)

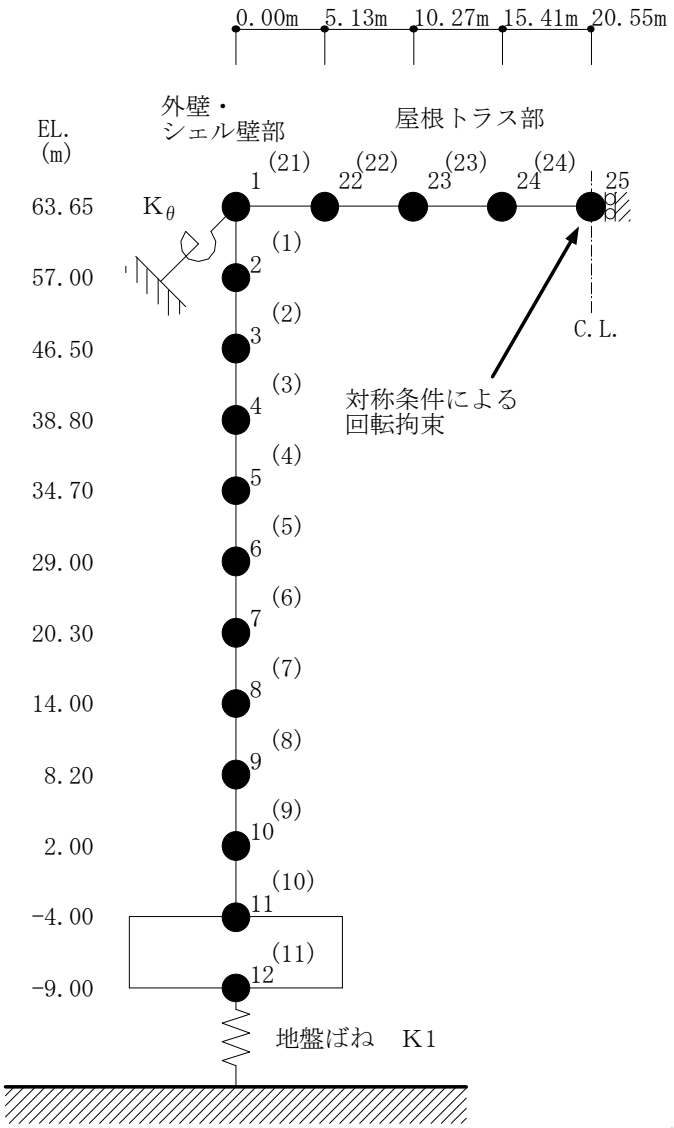
表３－２（2／2）　地盤ばね定数と減衰係数（Ｓ$_s$－Ｄ１，EW 方向）

（c）　補強反映モデル

ばね番号	地盤ばね成　分	ばね定数 K_c	減衰係数 C_c
K1	側面・水平	5.46×10^5　(kN／m)	2.46×10^5　(kN･S／m)
K2	側面・水平	1.22×10^6　(kN／m)	4.21×10^5　(kN･S／m)
K3	側面・水平	6.64×10^6　(kN／m)	9.05×10^5　(kN･S／m)
K4	側面・水平	1.92×10^7　(kN／m)	8.68×10^5　(kN･S／m)
K5	底面・水平	6.42×10^7　(kN／m)	3.45×10^6　(kN･S／m)
K6	底面・回転	9.17×10^{10}　(kN･m／rad)	1.56×10^9　(kN･m･s／rad)

（d）　今回工認モデル

ばね番号	地盤ばね成　分	ばね定数 K_c	減衰係数 C_c
K1	側面・水平	5.46×10^5　(kN／m)	2.49×10^5　(kN･s／m)
K2	側面・水平	1.22×10^6　(kN／m)	4.19×10^5　(kN･S／m)
K3	側面・水平	6.64×10^6　(kN／m)	9.09×10^5　(kN･S／m)
K4	側面・水平	1.92×10^7　(kN／m)	8.69×10^5　(kN･s／m)
K5	底面・水平	6.42×10^7　(kN／m)	3.45×10^6　(kN･s／m)
K6	底面・回転	9.17×10^{10}　(kN･m／rad)	1.57×10^9　(kN･m･s／rad)



・数字は質点番号を示す。

・（　）内は要素番号を示す。

図 3－2　地震応答解析モデル（UD 方向，補強反映モデル）

表 3－3　地盤ばね定数と減衰係数（UD 方向，Ｓ$_s$－Ｄ１）

(a)　補強反映モデル

ばね番号	地盤ばね成　分	ばね定数 K_c	減衰係数 C_c
K1	底面・鉛直	1.08×10^8　(kN／m)	8.20×10^6　(kN･s／m)

(b)　今回工認モデル

ばね番号	地盤ばね成　分	ばね定数 K_c	減衰係数 C_c
K1	底面・鉛直	1.08×10^8　(kN／m)	8.21×10^6　(kN･s／m)

4.　検討結果

(1)　固有値解析結果

「補強反映モデル」と「今回工認モデル」の固有値解析結果(固有周期及び固有振動数)の比較を表4－1に示す。

「補強反映モデル」の固有周期は，補強による重量増加の影響により「今回工認モデル」の結果に比べてわずかに大きくなるものの，ほぼ同程度となることを確認した。

表 4－1　固有値解析結果

(a)　NS 方向

次　数	固有周期(s)		固有振動数(Hz)	
	工認モデル	補強反映モデル	工認モデル	補強反映モデル
1	0.409	0.413	2.44	2.42
2	0.202	0.203	4.96	4.93
3	0.104	0.105	9.60	9.51
4	0.085	0.086	11.77	11.66
5	0.064	0.064	15.65	15.51
6	0.052	0.053	19.15	18.96

(b)　EW 方向

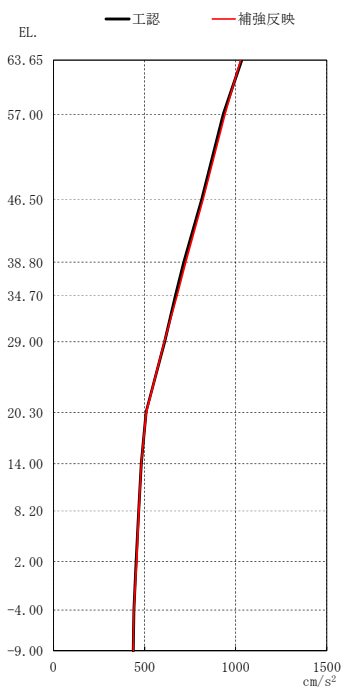
次　数	固有周期(s)		固有振動数(Hz)	
	工認モデル	補強反映モデル	工認モデル	補強反映モデル
1	0.411	0.415	2.43	2.41
2	0.202	0.203	4.96	4.93
3	0.107	0.108	9.32	9.22
4	0.086	0.087	11.59	11.49
5	0.064	0.065	15.53	15.40
6	0.051	0.051	19.76	19.52

(c)　UD 方向

次　数	固有周期(s)		固有振動数(Hz)	
	工認モデル	補強反映モデル	工認モデル	補強反映モデル
1	0.399	0.399	2.50	2.50
2	0.274	0.275	3.65	3.63
3	0.093	0.093	10.79	10.79
4	0.060	0.060	16.72	16.58
5	0.057	0.057	17.64	17.64
6	0.048	0.048	20.70	20.70

(2)　最大応答値

基準地震動Ｓ$_s$－Ｄ１による最大応答値を図 4－1～図 4－11 に，最大せん断ひずみを表 4－2 に示す。「補強反映モデル」の最大応答値は，「今回工認モデル」の結果と概ね整合することを確認した。



(単位：cm/s^2)

工認	補強反映
1,033	1,028
933	941
813	820
715	725
669	678
611	608
508	509
481	482
467	469
454	456
441	442
437	438

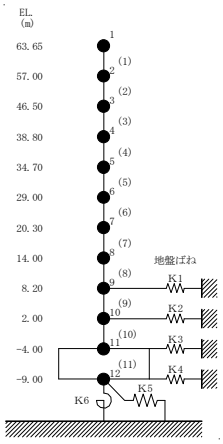
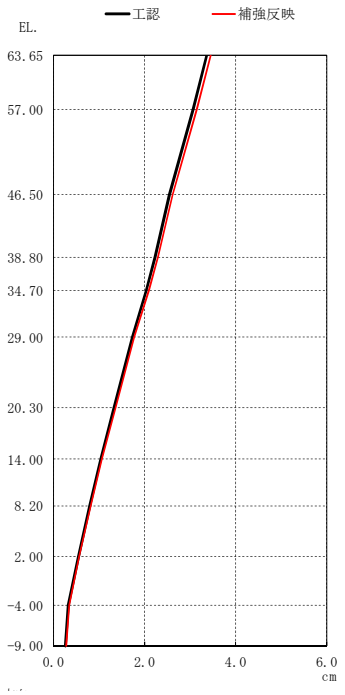


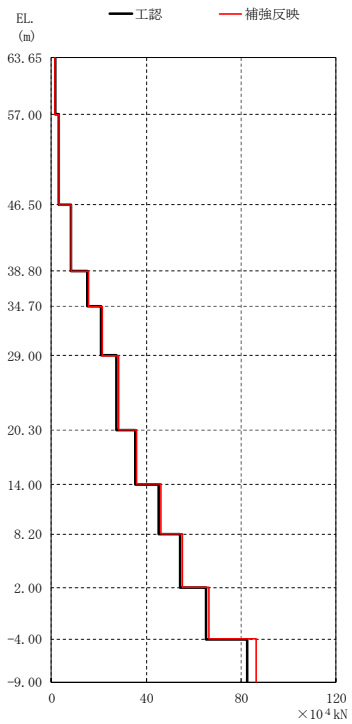
図 4－1　最大応答加速度（Ｓ$_s$－Ｄ１，NS 方向）



(単位：cm)

工認	補強反映
3.36	3.45
3.06	3.15
2.55	2.62
2.23	2.29
2.03	2.09
1.73	1.77
1.33	1.36
1.04	1.06
0.80	0.82
0.55	0.57
0.33	0.34
0.26	0.28

図 4－2　最大応答変位（Ｓ$_s$－Ｄ１，NS 方向）



(単位：×10⁴kN)

工認	補強反映
1.66	1.64
3.13	3.32
8.21	8.5
15.2	15.6
20.9	21.4
27.5	28.2
35.3	36.0
45.4	46.1
54.2	55.2
65.3	66.3
82.7	86.3

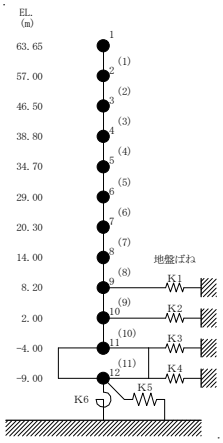
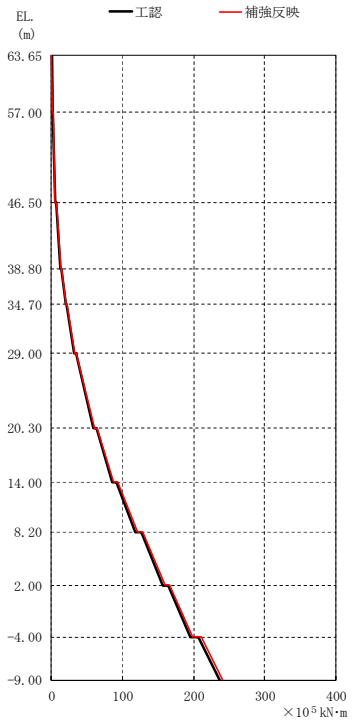


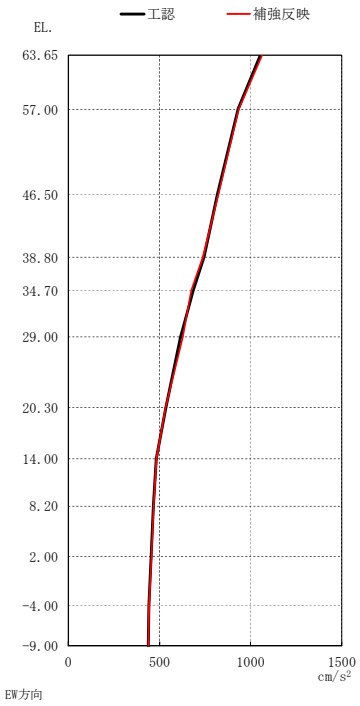
図 4－3　最大応答せん断力（Ｓ$_s$－Ｄ１，NS 方向）



(単位：×10⁵kN·m)

工認	補強反映
0.572	0.575
1.48	1.50
2.29	2.40
5.24	5.50
6.77	7.08
12.5	13.0
14.3	14.8
19.9	20.5
21.0	21.7
32.1	33.0
35.0	35.8
58.9	60.3
63.3	64.6
85.5	87.2
92.1	94
118	121
126	128
157	160
164	166
195	198
207	211
237	241

図 4－4　最大応答曲げモーメント（Ｓ$_s$－Ｄ１，NS 方向）



(単位：cm/s^2)

工認	補強反映
1,054	1,063
931	936
818	822
744	737
685	673
615	627
535	533
482	483
466	468
455	456
442	443
438	438

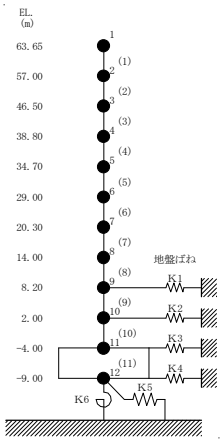
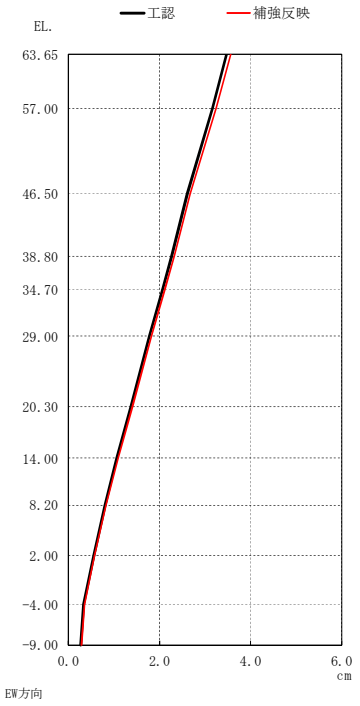


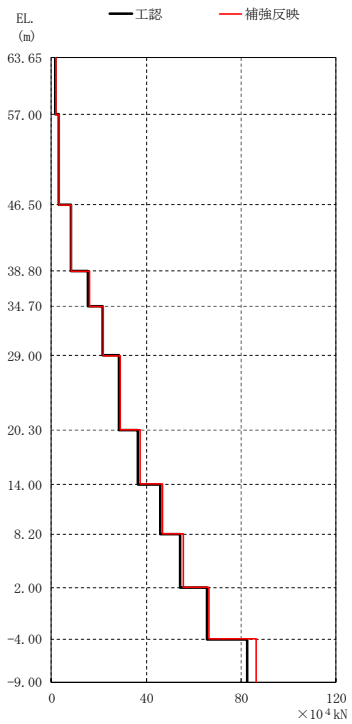
図４－５　最大応答加速度（Ｓ$_s$－Ｄ１，EW 方向）



(単位：cm)

工認	補強反映
3.47	3.56
3.16	3.24
2.61	2.67
2.27	2.32
2.07	2.12
1.78	1.82
1.37	1.41
1.06	1.09
0.81	0.83
0.56	0.57
0.34	0.35
0.27	0.29

図４－６　最大応答変位（Ｓ$_s$－Ｄ１，EW 方向）



(単位：×10⁴kN)

工認	補強反映
1.72	1.73
3.26	3.45
8.30	8.6
15.6	15.9
21.5	21.8
28.7	29.0
36.6	37.3
46.1	47.0
54.4	55.4
65.4	66.4
82.6	86.4

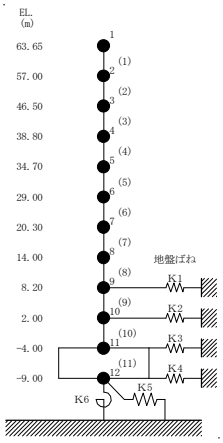
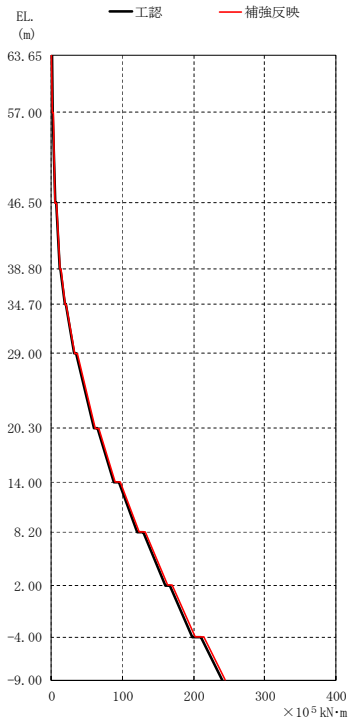


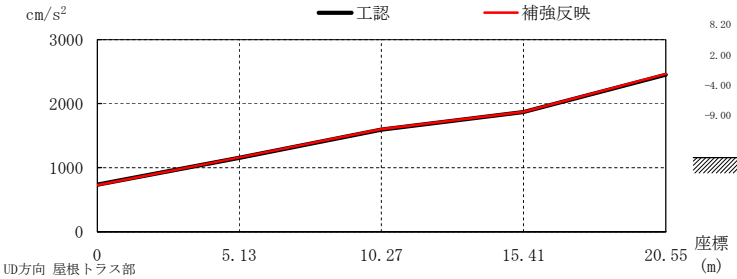
図 4－7　最大応答せん断力（S_s－D１，EW 方向）

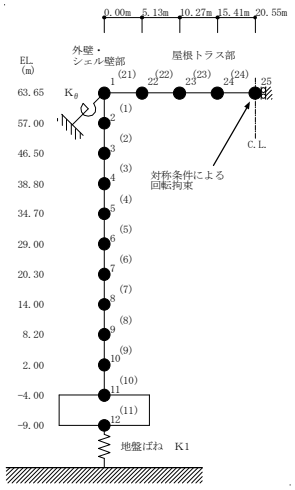


(単位：×10⁵kN·m)

工認	補強反映
0.529	0.532
1.47	1.49
2.22	2.32
5.32	5.58
6.63	6.92
12.3	12.7
13.4	13.8
19.5	20.1
20.2	20.9
32.2	33.1
34.9	36.0
59.8	61.3
65.2	66.9
87.9	89.8
94.8	97
121	124
129	132
160	163
166	170
198	202
210	214
240	244

図 4－8　最大応答曲げモーメント（S_s－D１，EW 方向）

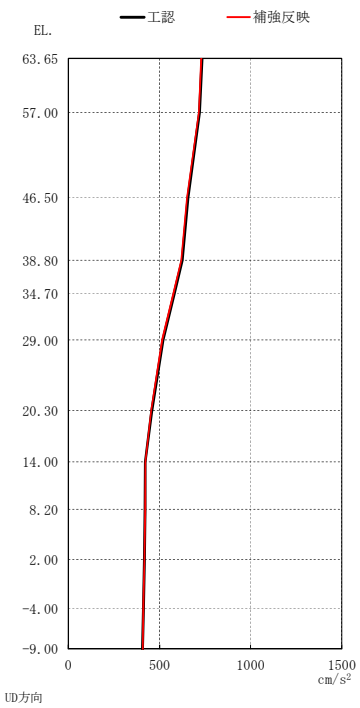




(単位：cm/s^2)

工認	734	1153	1594	1868	2450
補強反映	729	1159	1603	1872	2464

(a) 屋根トラス部

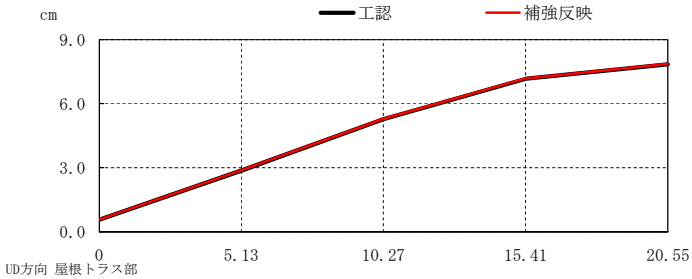


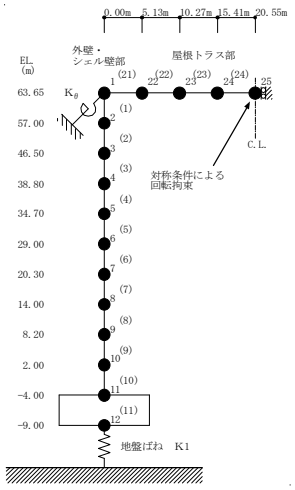
(単位：cm/s^2)

工認	補強反映
734	729
719	715
657	650
625	619
581	576
519	515
458	454
422	422
421	421
417	417
411	411
407	408

(b) 外壁及びシェル壁

図 4－9　最大応答加速度（Ｓ$_s$－Ｄ１，UD 方向）

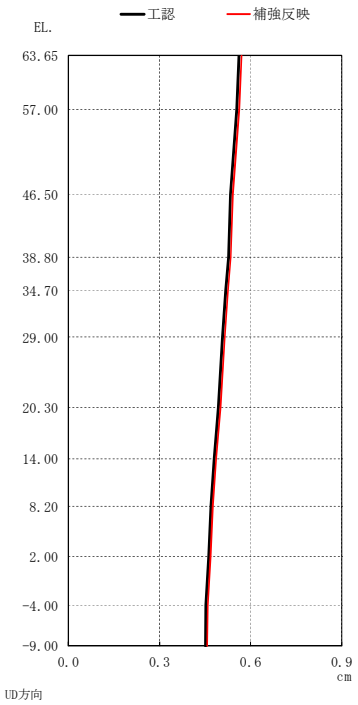




(単位：cm)

工認	0.56	2.87	5.26	7.16	7.84
補強反映	0.57	2.88	5.28	7.18	7.87

(a) 屋根トラス部

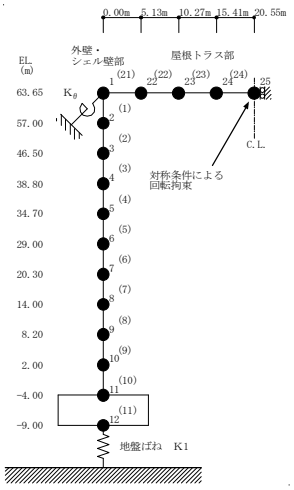


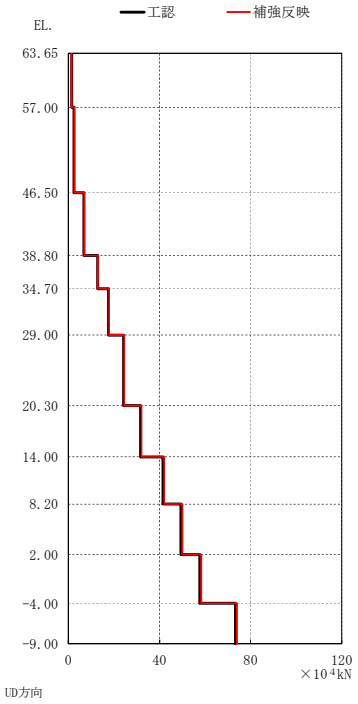
(単位：cm)

工認	補強反映
0.56	0.57
0.55	0.56
0.53	0.54
0.53	0.53
0.52	0.53
0.51	0.51
0.49	0.50
0.48	0.49
0.47	0.48
0.46	0.47
0.45	0.46
0.45	0.46

(b) 外壁及びシェル壁

図 4－10　最大応答変位（S_s－D１，UD 方向）





(単位：×10⁴kN)

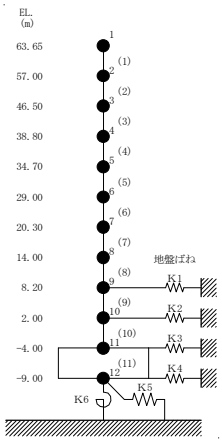
工認	補強反映
1.39	1.40
2.49	2.62
6.82	6.93
12.8	12.9
17.7	17.9
24.2	24.5
31.7	32.1
41.5	42.0
49.4	50.0
57.6	58.3
73.3	74.0

図 4－11　最大応答軸力（S_s－D１，UD 方向）

表4－2　最大せん断ひずみ

(a)　NS方向

部材番号	最大せん断ひずみ（×10^{-3}）（Ｓｓ－Ｄ１）		③応答比（②/①）
	①今回工認モデル（基本ケース）	②補強反映モデル	
(1)	0.07	0.07	1.00
(2)	0.13	0.14	1.08
(3)	0.05	0.05	1.00
(4)	0.13	0.13	1.00
(5)	0.25	0.28	1.12
(6)	0.14	0.15	1.08
(7)	0.16	0.17	1.07
(8)	0.13	0.13	1.00
(9)	0.13	0.13	1.00
(10)	0.16	0.16	1.00



(b)　EW方向

部材番号	最大せん断ひずみ（×10^{-3}）（Ｓｓ－Ｄ１）		③応答比（②/①）
	①今回工認モデル（基本ケース）	②補強反映モデル	
(1)	0.08	0.08	1.00
(2)	0.14	0.15	1.08
(3)	0.06	0.07	1.17
(4)	0.13	0.13	1.00
(5)	0.15	0.16	1.07
(6)	0.14	0.14	1.00
(7)	0.21	0.23	1.10
(8)	0.15	0.15	1.00
(9)	0.14	0.14	1.00
(10)	0.16	0.16	1.00

5.　原子炉建屋の地震応答解析による評価に与える影響

補強等に伴う重量の増加分を考慮した地震応答解析結果を踏まえ，重量増加が，原子炉建屋の地震応答解析による評価に与える影響について確認する。

5.1　せん断ひずみに対する影響

(1)　検討方法

検討は，以下の通り，保守的な評価とする。

最大せん断ひずみの検討として，地盤物性のばらつきを考慮した最大せん断ひずみ（基準地震動Ｓ$_s$－Ｄ１～Ｓ$_s$－３１に対する包絡値）に，基準地震動Ｓ$_s$－Ｄ１に対する「補強反映モデル」と「今回工認モデル」の応答比（「補強反映モデル」／「今回工認モデル」）を乗じた値の最大値が許容限界を超えないことを確認する。

(2)　検討結果

最大せん断ひずみの検討における原子炉建屋の応答比及び応答比を乗じた最大せん断ひずみを表5－1に示す。

表5－1より，最大せん断ひずみに応答比を乗じた値の最大値が許容限界（2.0×10^{-3}）を超えないことを確認した。

5.2　床応答に対する影響

基準地震動Ｓ$_s$－Ｄ１における今回工認モデルの床応答スペクトルと補強反映モデルの床応答スペクトルとの比較を図 4－12 に示す。図 4－12 に示すとおり，補強反映モデルの床応答スペクトルは，今回工認モデルの床応答スペクトルと同等の応答を示すことを確認した。

表5－1（1／2）　原子炉建屋に生じる最大せん断ひずみに最大応答比を乗じた値

(a)　NS方向

部材番号	最大せん断ひずみ（×10^{-3}）（Ｓｓ－Ｄ１）		③応答比（②/①）	最大せん断ひずみ（×10^{-3}）（Ｓｓ－Ｄ１～Ｓｓ－３１）	
	①今回工認モデル（基本ケース）	②補強反映モデル		④地盤物性のばらつき考慮モデル	応答比を乗じた値（③×④）
(1)	0.07	0.07	1.00	0.11	0.11
(2)	0.13	0.14	1.08	0.20	0.22
(3)	0.05	0.05	1.00	0.06	0.06
(4)	0.13	0.13	1.00	0.25	0.25
(5)	0.25	0.28	1.12	0.60	0.68
(6)	0.14	0.15	1.08	0.31	0.34
(7)	0.16	0.17	1.07	0.43	0.47
(8)	0.13	0.13	1.00	0.18	0.18
(9)	0.13	0.13	1.00	0.17	0.17
(10)	0.16	0.16	1.00	0.21	0.21

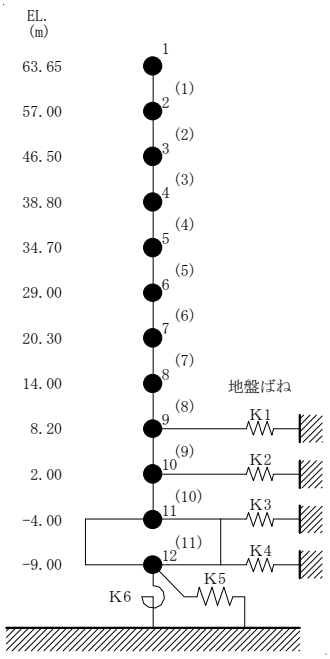
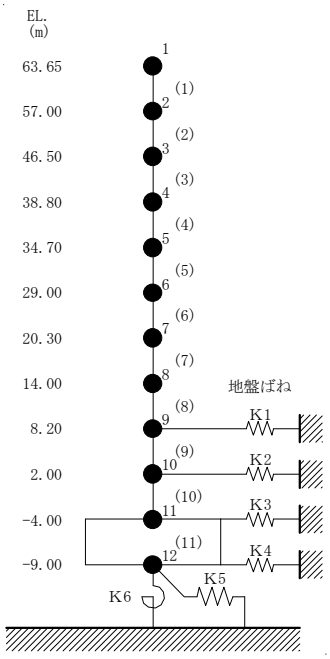


表5－1（2／2）　原子炉建屋に生じる最大せん断ひずみに最大応答比を乗じた値

(b)　EW方向

部材番号	最大せん断ひずみ（×10^{-3}）（Ｓｓ－Ｄ１）		③応答比（②/①）	最大せん断ひずみ（×10^{-3}）（Ｓｓ－Ｄ１～Ｓｓ－３１）	
	①今回工認モデル（基本ケース）	②補強反映モデル		④地盤物性のばらつき考慮モデル	応答比を乗じた値（③×④）
(1)	0.08	0.08	1.00	0.11	0.11
(2)	0.14	0.15	1.08	0.21	0.23
(3)	0.06	0.07	1.17	0.08	0.10
(4)	0.13	0.13	1.00	0.15	0.15
(5)	0.15	0.16	1.07	0.36	0.39
(6)	0.14	0.14	1.00	0.31	0.31
(7)	0.21	0.23	1.10	0.56	0.62
(8)	0.15	0.15	1.00	0.30	0.30
(9)	0.14	0.14	1.00	0.18	0.18
(10)	0.16	0.16	1.00	0.22	0.22



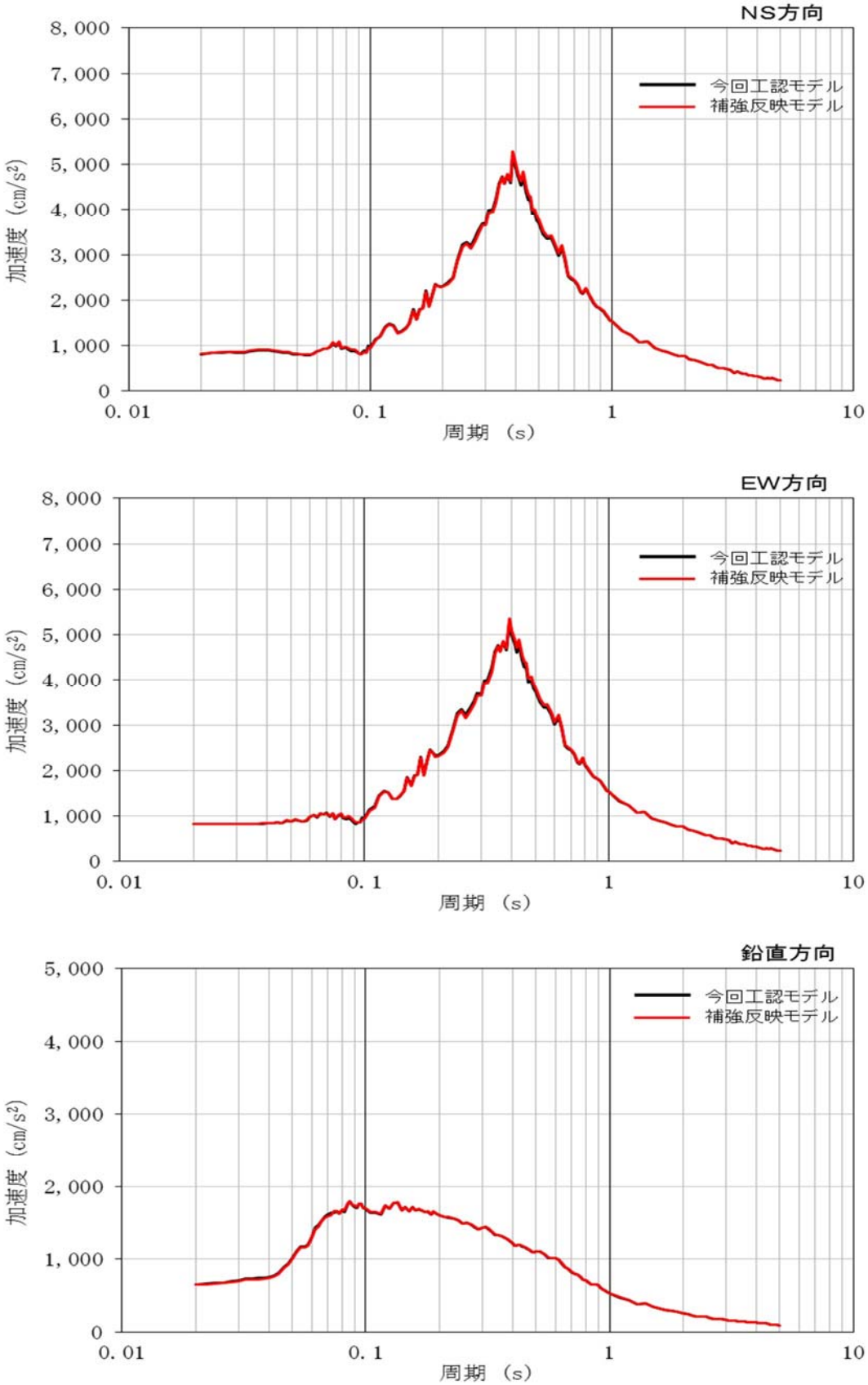


図４－12(1) 基準地震動Ｓ$_s$－Ｄ１の床応答スペクトル比較（EL.+46.5m h=1.0%）

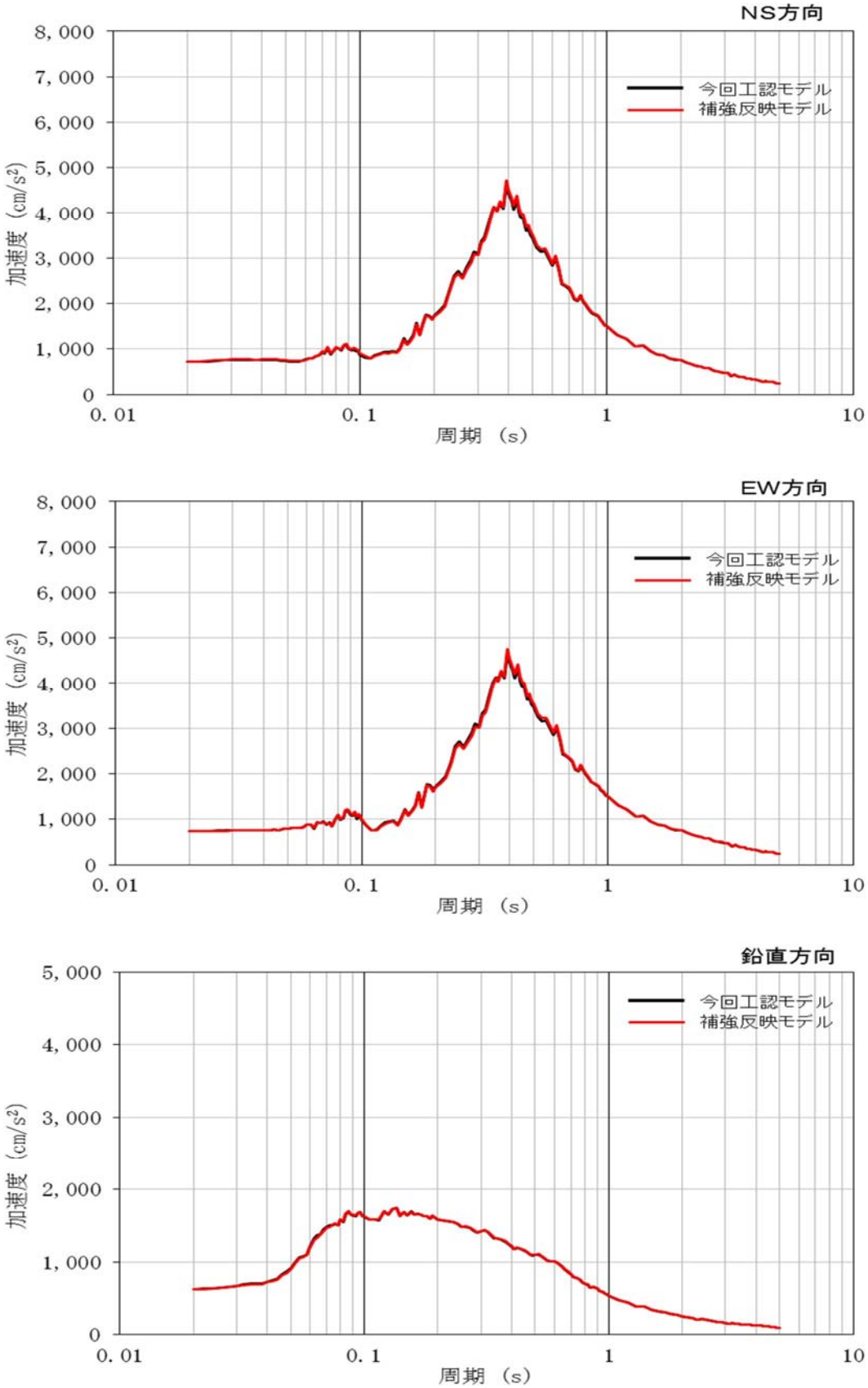


図 4－12(2) 基準地震動Ｓ$_s$－Ｄ１の床応答スペクトル比較（EL.+38.8m h=1.0%）

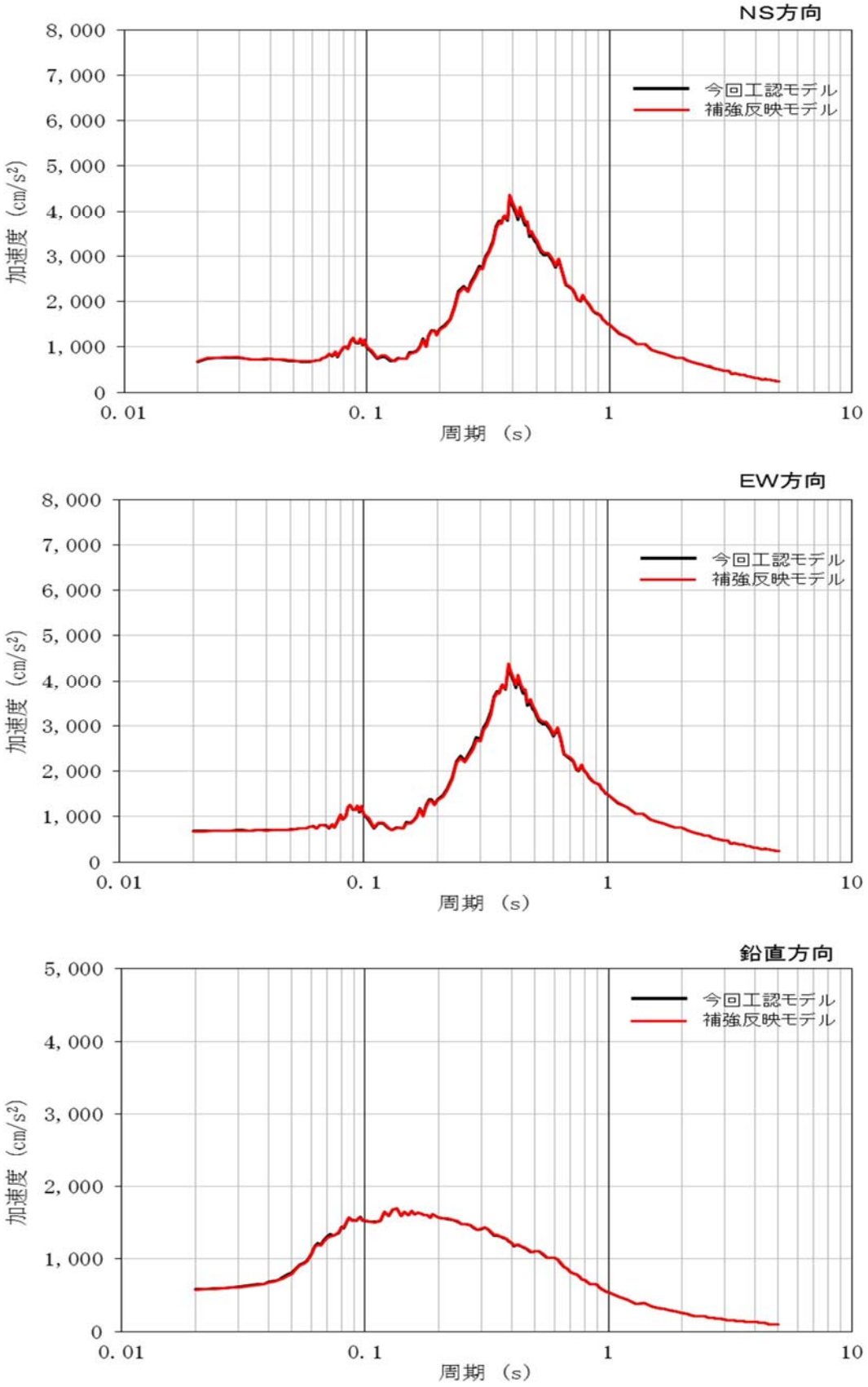
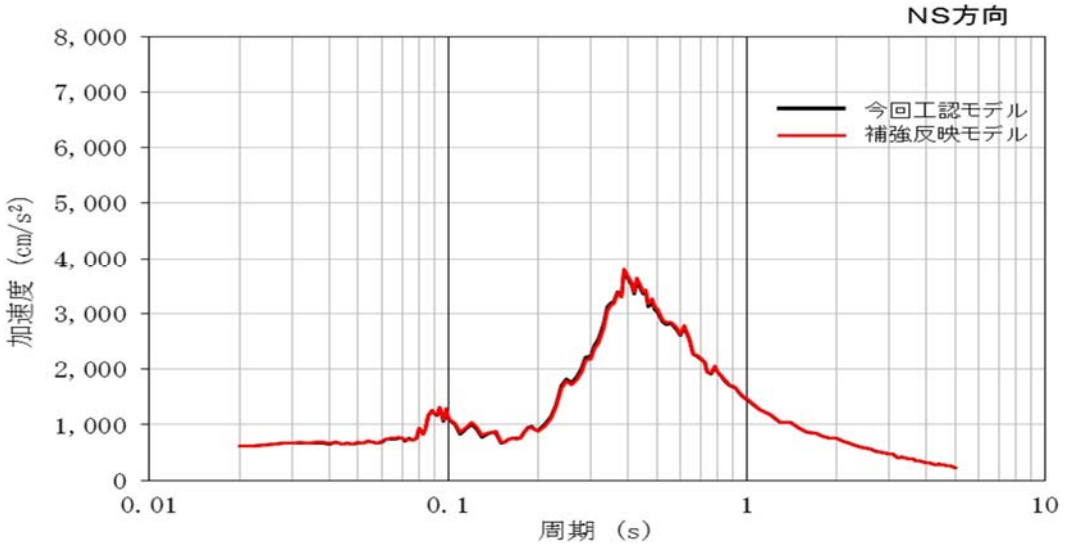
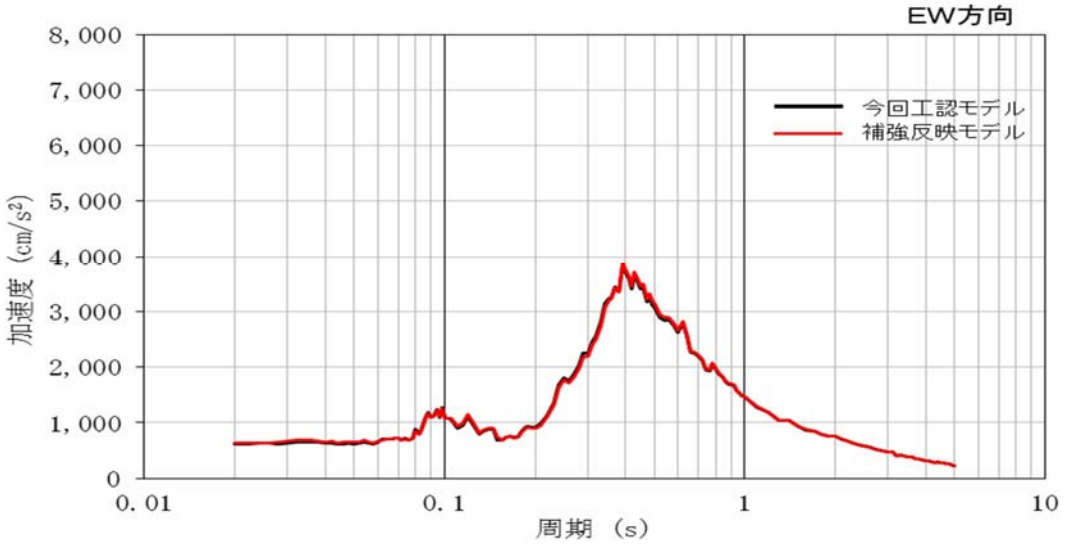


図４－12(3) 基準地震動Ｓ$_s$－Ｄ１の床応答スペクトル比較（EL.+34.7m h=1.0%）





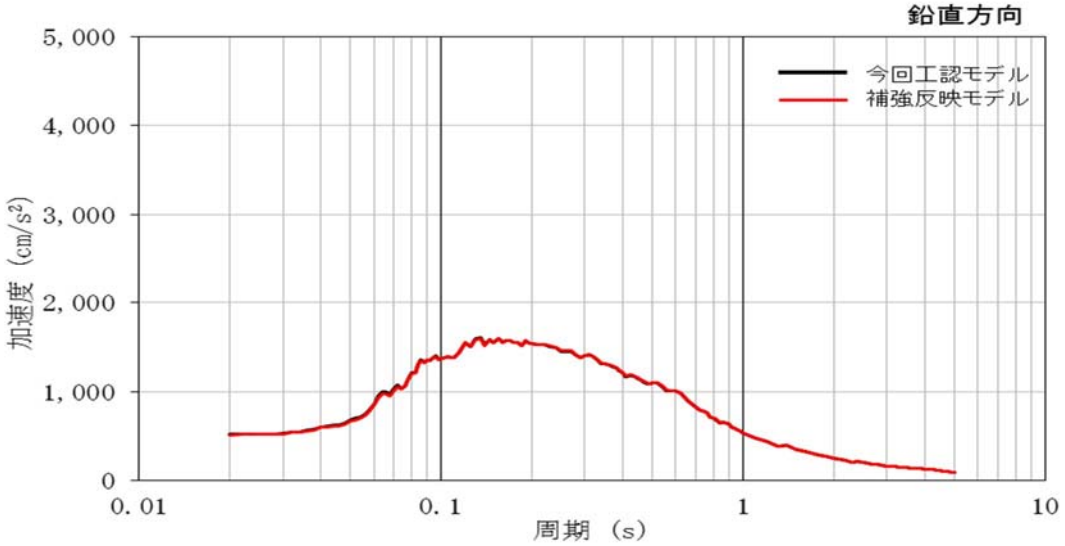


図４－12(4) 基準地震動Ｓ$_s$－Ｄ１の床応答スペクトル比較（EL.+29.0m h=1.0%）

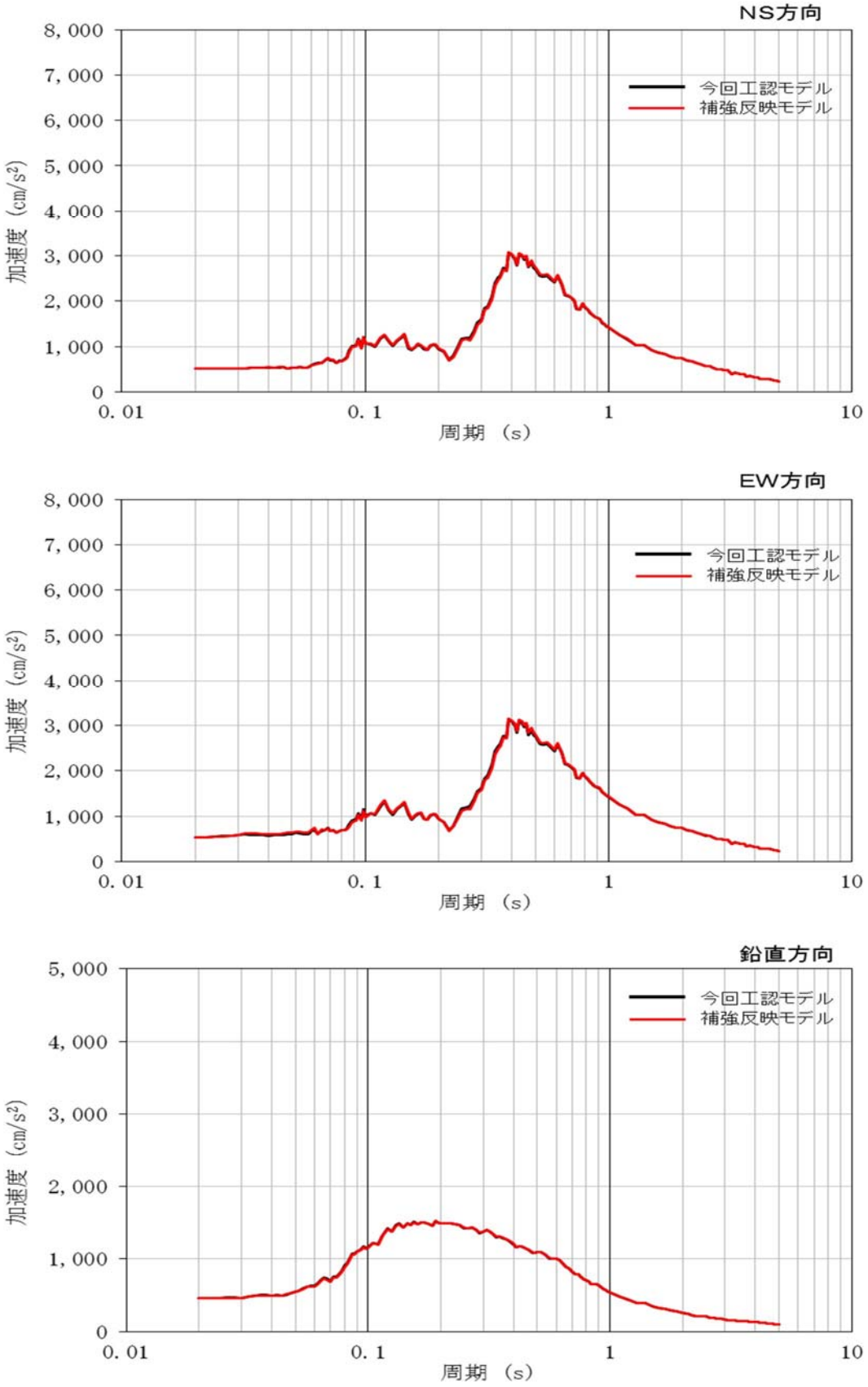


図４－12(5) 基準地震動Ｓ$_s$－Ｄ１の床応答スペクトル比較（EL.+20.3m h=1.0%）

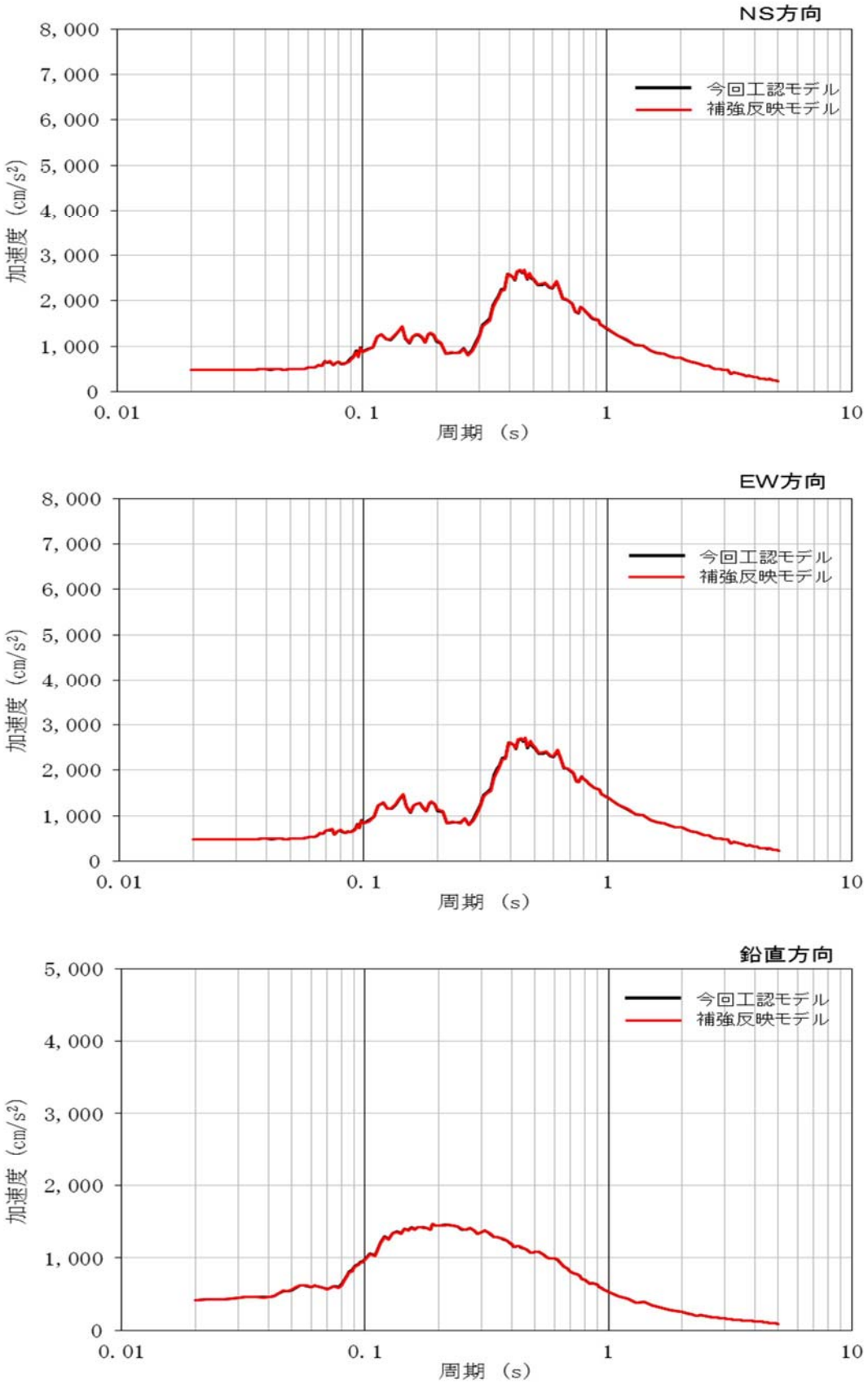
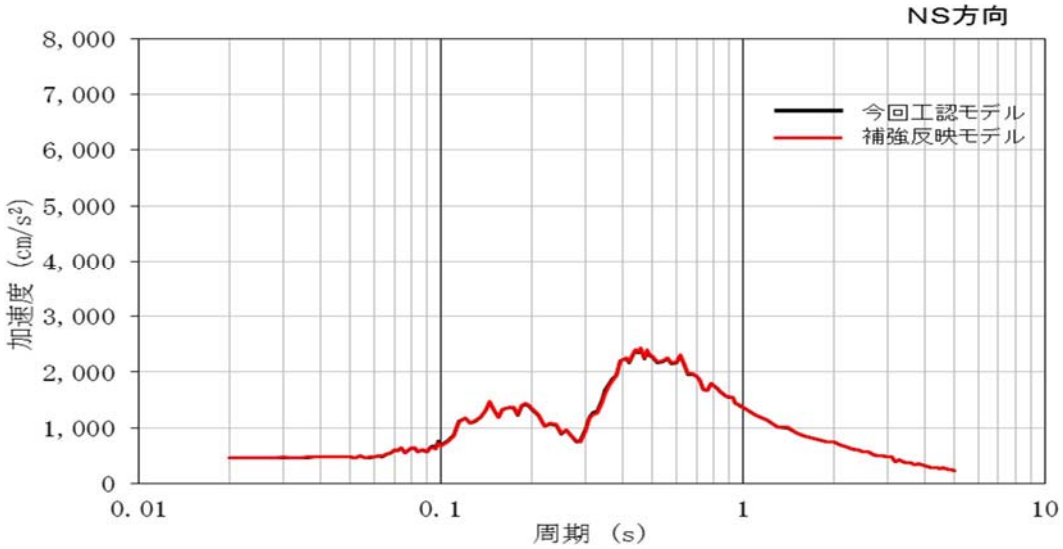
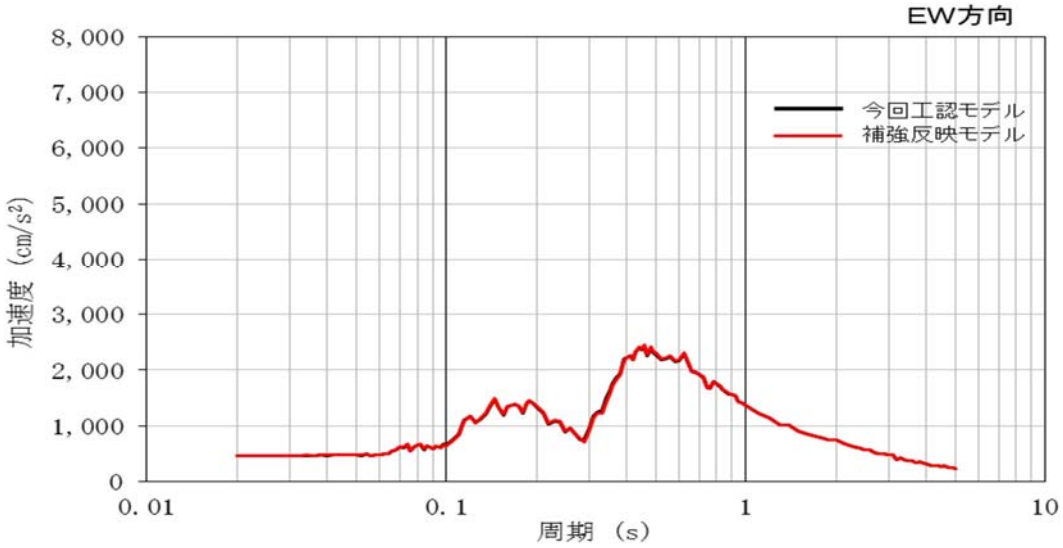


図４－12(6) 基準地震動Ｓ$_s$－Ｄ１の床応答スペクトル比較（EL.+14.0m h=1.0%）





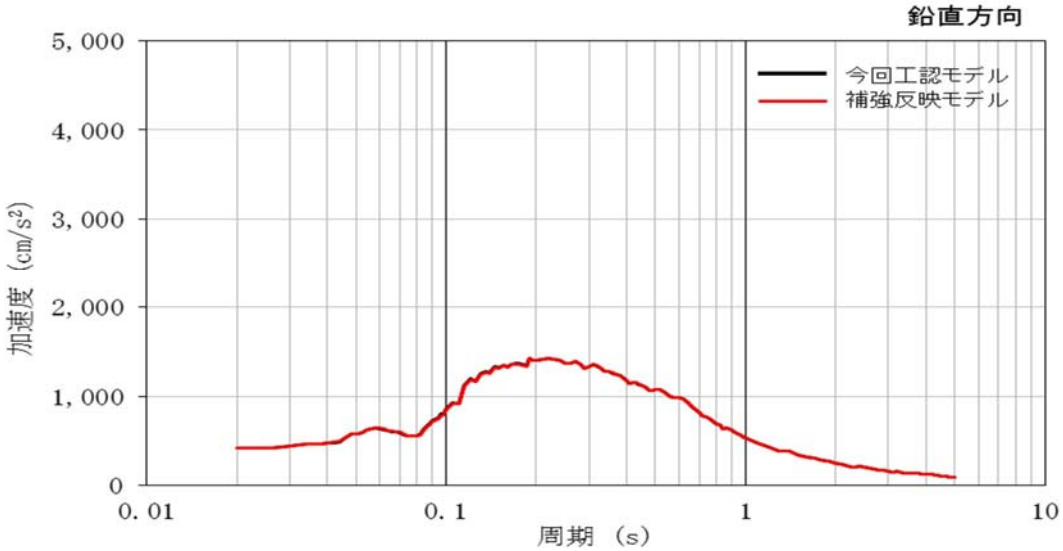
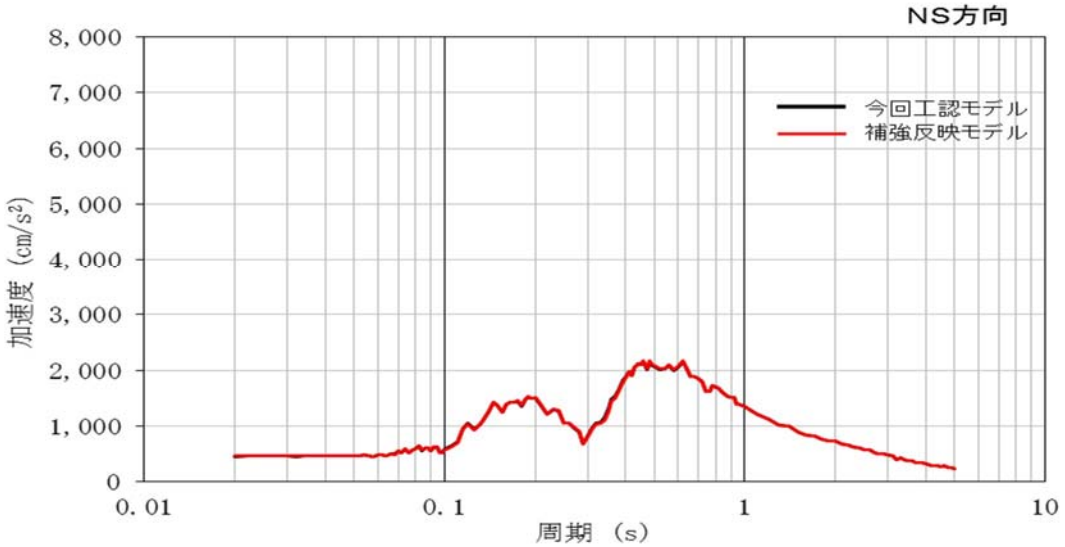
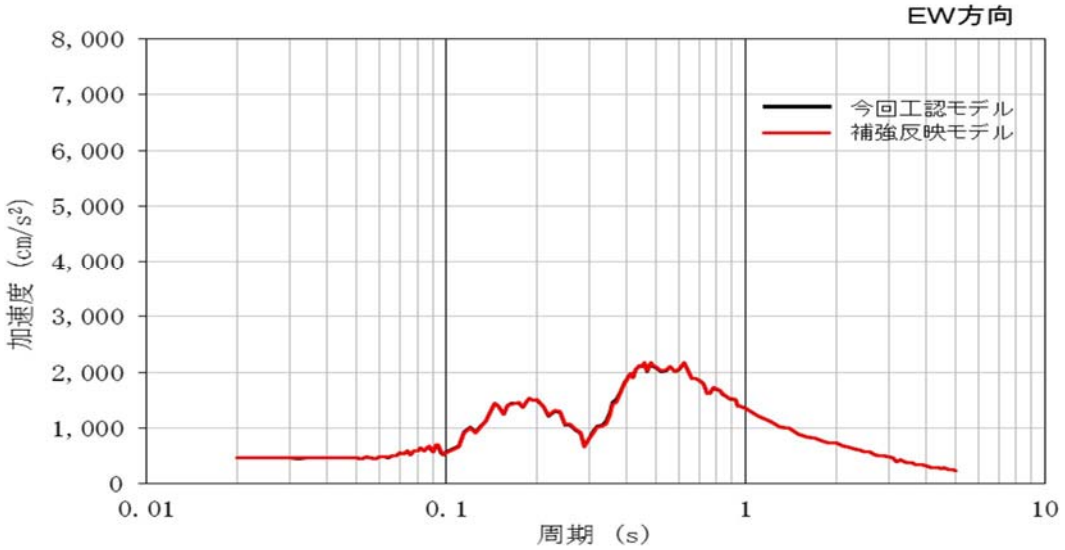


図４－12(7) 基準地震動Ｓ$_s$－Ｄ１の床応答スペクトル比較（EL.+8.2m h=1.0%）





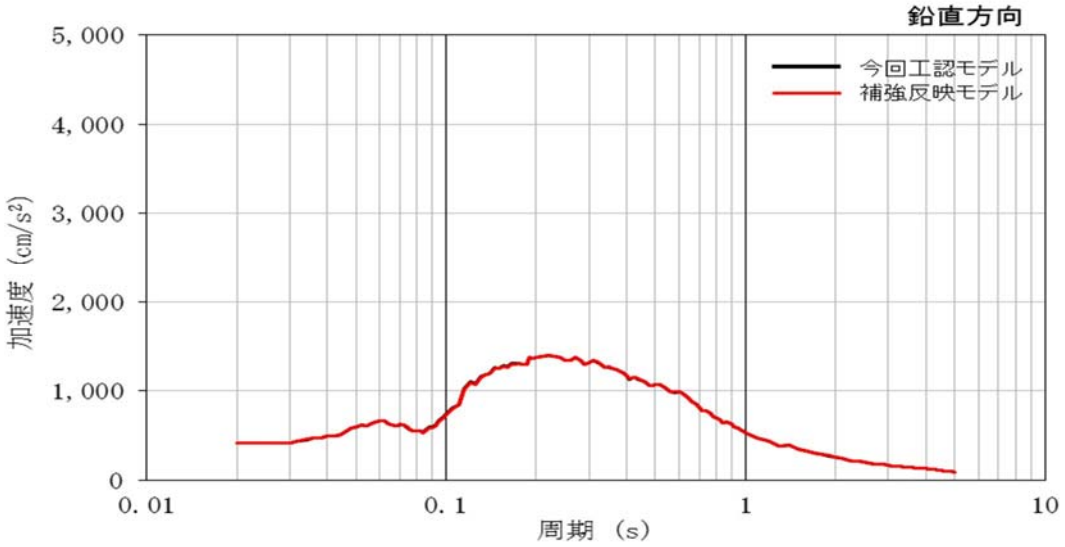


図４－12(8) 基準地震動Ｓ$_s$－Ｄ１の床応答スペクトル比較（EL.+2.0m h=1.0%）

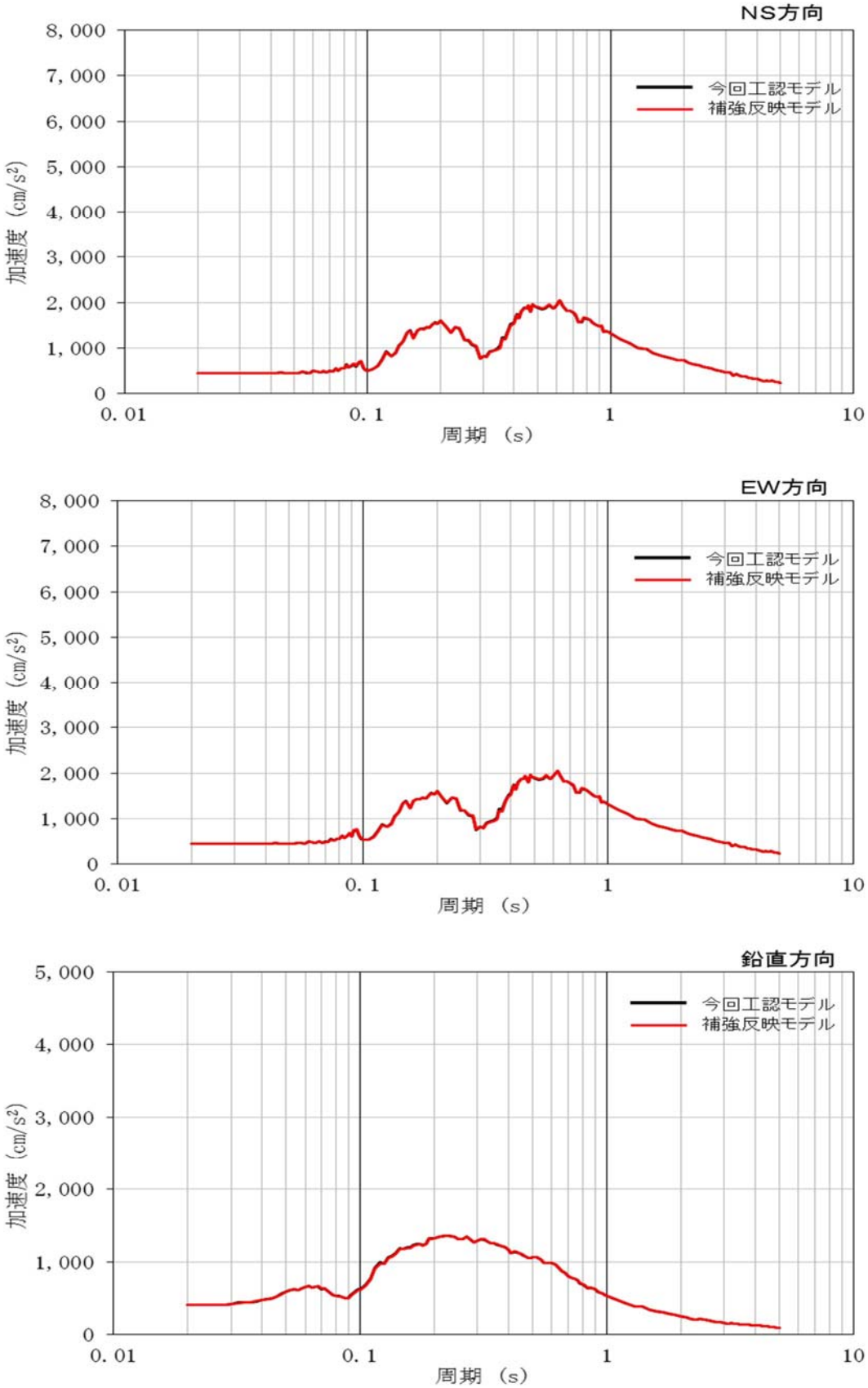


図４－12(9) 基準地震動Ｓ$_s$－Ｄ１の床応答スペクトル比較（EL.-4.0m h=1.0%）

6. まとめ

補強等に伴う重量の増加分を考慮し，「補強反映モデル」を用いて，基準地震動Ｓ$_s$－Ｄ１に対する地震応答解析を実施し，「今回工認モデル」を用いた結果と比較した。

その結果，「補強反映モデル」の固有周期は，重量を増加させた影響により「今回工認モデル」の結果に比べてわずかに大きくなるものの，ほぼ同程度となることを確認し，最大応答値は，「今回工認モデル」の結果と概ね整合することを確認した。さらに，原子炉建屋に生じる最大せん断ひずみ（地盤物性のばらつきを考慮した基準地震動Ｓ$_s$－Ｄ１～Ｓ$_s$－３１に対する包絡値）に，基準地震動Ｓ$_s$－Ｄ１に対する「補強反映モデル」と「今回工認モデル」の応答比（「補強反映モデル」／「今回工認モデル」）の最大値を乗じた値が許容限界を超えないことを確認した。