

本資料のうち、枠囲みの内容は、機密事項に属しますので公開できません。

柏崎刈羽原子力発電所第7号機 工事計画審査資料	
資料番号	KK7 補足-025-3 改3
提出年月日	2020年5月27日

コントロール建屋の地震応答計算書に関する補足説明資料

2020年5月

東京電力ホールディングス株式会社

1. 工事計画添付書類に係る補足説明資料

V-2-2-9「コントロール建屋の地震応答計算書」の記載内容を補足するための資料を以下に示す。

別紙 1 地震応答解析における既工認と今回工認の解析モデル及び手法の比較

別紙 2 地震応答解析における耐震壁のせん断スケルトン曲線の設定

別紙 3 地震応答解析における材料物性の不確かさに関する検討

下線：今回ご提示資料

別紙1-2-1 Novakばねの適用性について

目 次

1. 概要	1
2. 辺長比が1.4である矩形建屋へのNovakばねの適用性	2
3. 3面が地盤に接している建屋へのNovakばねの適用性	20

1. 概要

コントロール建屋は地盤に埋め込まれていることから，周辺の地盤状況を考慮した上で側面地盤ばねとして，Novakばねを採用している。Novakばねは円形基礎を仮定したばねであるのに対し，コントロール建屋は図1-1に示すように42.0m (NS) × 59.0m (EW)の矩形の平面形状であり，辺長比が1.4となっている。また，コントロール建屋の西側には廃棄物処理建屋が位置しているため，建屋が地盤に接しているのは3面である。

このことから，本資料では次の2点に着目して，コントロール建屋へのNovakばねの適用性について検討する。

- ① 辺長比が1.4である矩形建屋へのNovakばねの適用性
- ② 3面が地盤に接している建屋へのNovakばねの適用性

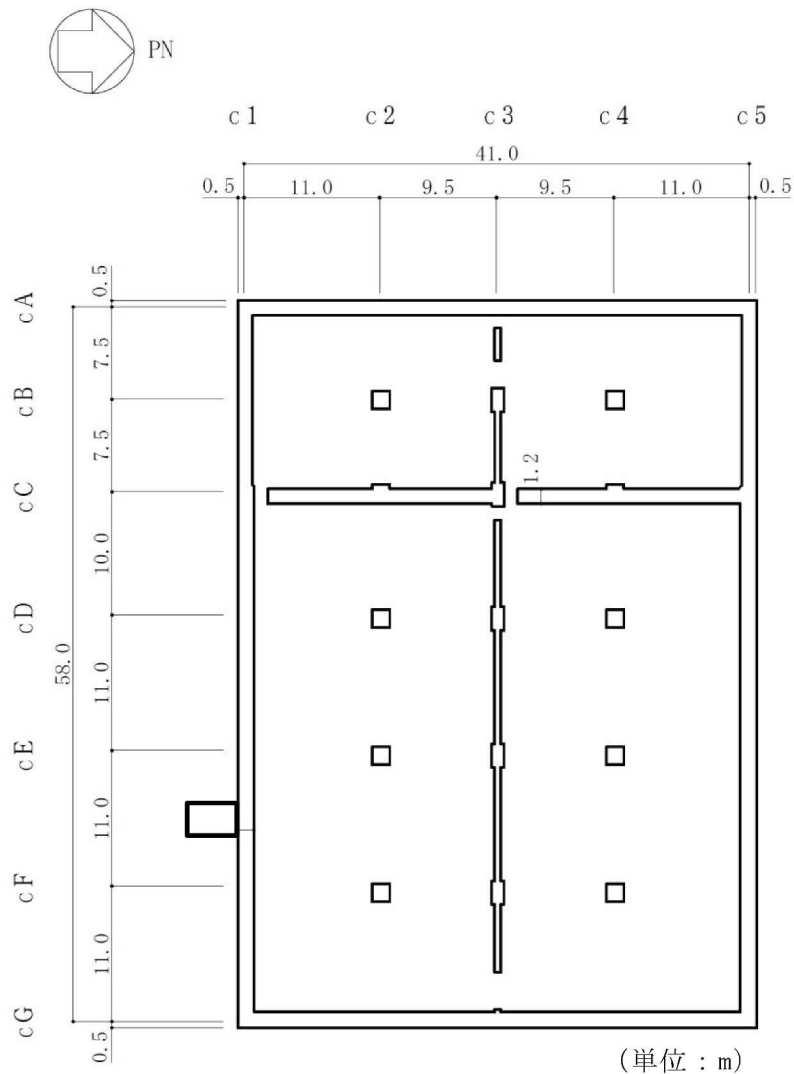


図1-1 コントロール建屋地下部分の平面図 (T.M.S.L. -2.7m)

2. 辺長比が 1.4 である矩形建屋への Novak ばねの適用性

矩形建屋への Novak ばねの適用性については，J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版において引用されている原子力発電耐震設計特別調査委員会調査報告書 Vol. 12 「建屋埋込み効果の評価法の標準化に関する調査報告書」（昭和 62 年 6 月）（以下「標準化報告書」という。）及び既往の文献で検討されていることから，これを概観した上で，コントロール建屋にも同様の解析を実施し，円形仮定の妥当性について検討する。

(1) 「標準化報告書」の内容

Novak の側面ばねは建屋の平面形が円形として導かれたものであるのに対し，一般に建屋は矩形のものが多いことから，「標準化報告書」では，平面形が矩形の建屋への適用性について検討を実施している。具体的には，矩形平面に関する地盤ばねを二次元境界要素法（BEM）で計算し，このばねの値と面積が等価な円半径（等価円半径）を用いた地盤ばねの値とを比較・検討している。

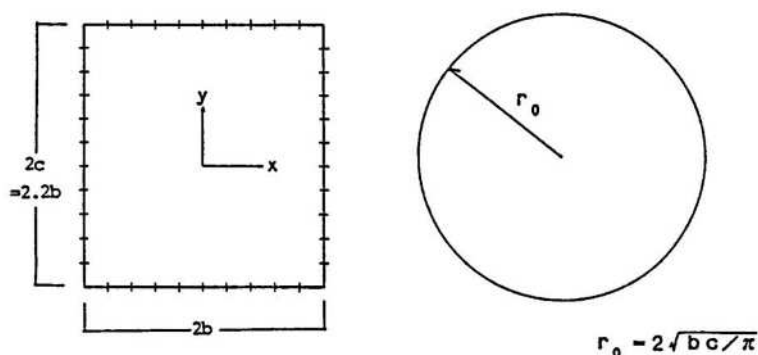
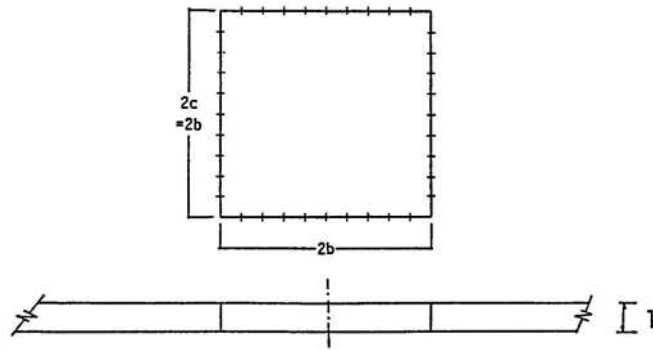


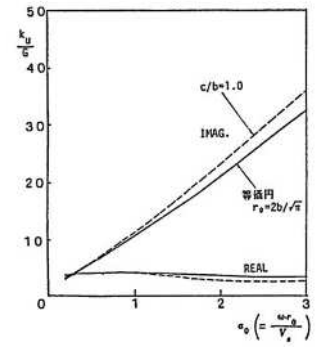
図2-1 矩形平面と等価円半径

「標準化報告書」における，正方形平面の場合と等価円の場合を比較して図2-2に示す。この結果より，正方形平面の地盤ばねの虚部が等価円の場合の虚部より若干大きくなる傾向にあるが，正方形平面の地盤ばねを，等価円半径を用いて Novak の方法により算定しても実用上問題ないものと考えられるとしている。

「標準化報告書」において，長辺と短辺が異なり正方形でない場合での等価円半径を用いた Novak の側面ばねの適用性について検討した結果を図2-3，図2-4に示す。この結果より長辺と短辺の比（辺長比）が 1.1 程度の長方形平面であれば，等価円半径を用いて地盤ばねを算定しても実用上ほぼ問題ないものと考えられるとしている。

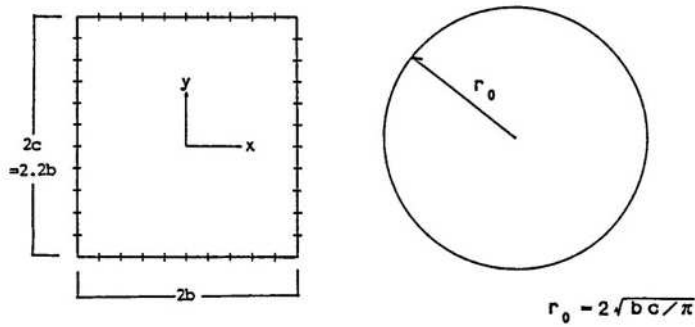


(a) 解析対象 (BEM)

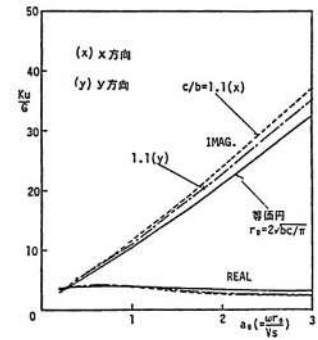


(b) 解析結果

図2-2 正方形平面と等価円の比較 (「標準化報告書」に加筆)

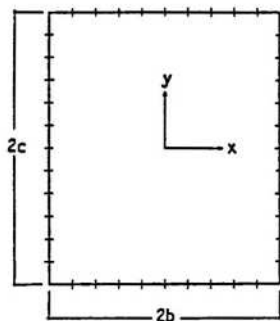


(a) 解析対象 (BEMとNovak)

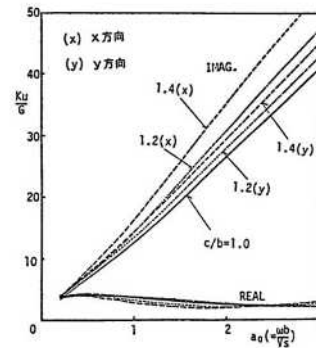


(b) 解析結果

図2-3 長方形平面と等価円の比較 (辺長比1.1の場合) (「標準化報告書」に加筆)



(a) 解析対象 (BEM)

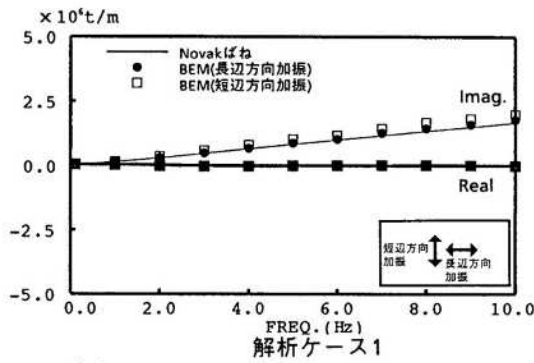


(b) 解析結果

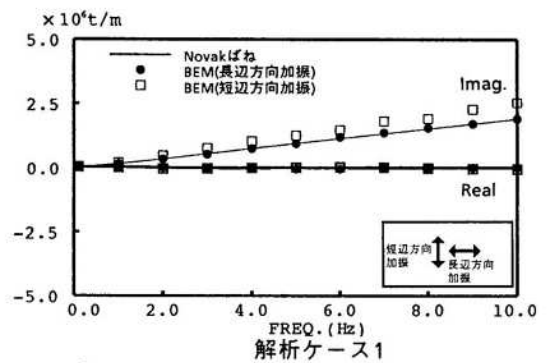
図2-4 辺長比に関する検討事例 (「標準化報告書」に加筆)

(2) 既往文献の内容

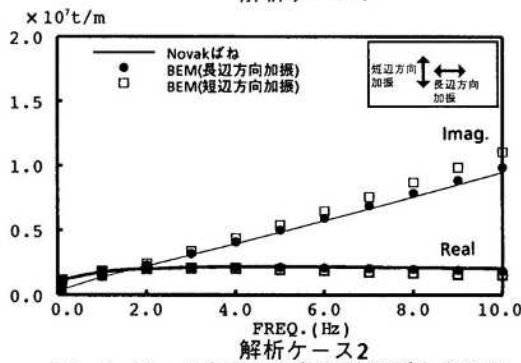
滝田 博章ほか「埋込まれた矩形建物の側面地盤ばねの検討」(日本建築学会学術講演梗概集1995年8月)では、図2-5に示すように主要周期帯が5Hz以下の建屋を設計する場合には、辺長比1.7程度まで等価円を用いてNovakの方法を用いてよいとしている。



解析ケース1

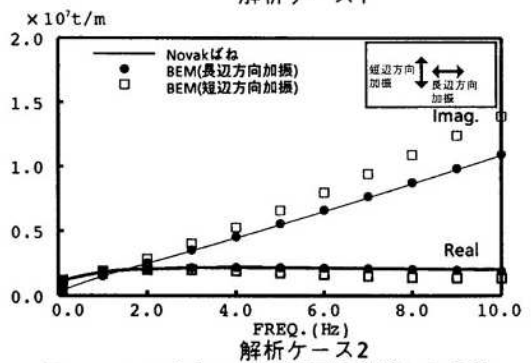


解析ケース1



解析ケース2

図-3 NovakとBEMの側面地盤ばねの比較 (辺長比1.3の場合)



解析ケース2

図-4 NovakとBEMの側面地盤ばねの比較 (辺長比1.7の場合)

図2-5 辺長比に関する検討事例 (辺長比1.3, 1.7の場合) (滝田 博章ほか「埋込まれた矩形建物の側面地盤ばねの検討」(日本建築学会学術講演梗概集1995年8月)より)

(3) コントロール建屋に対する検討

コントロール建屋は辺長比が1.4であり「標準化報告書」の検討範囲外となっているため、コントロール建屋の平面形状及び地盤条件に対して、NovakばねとBEMによる地盤ばねを計算し比較検討する。

a. 解析条件

辺長比の影響を確認するため、側面地盤ばねの違いによる影響に着目することから、入力地震動は弾性設計用地震動Sd-1を用いる。なお、基礎浮上り及び建屋非線形性の影響を確認するため、基準地震動Ss-1に対しても同様の検討を実施する。表2-1にBEMの解析で用いた地盤物性（古安田層）と矩形孔寸法を示す。

表2-1 BEMの解析で用いた地盤物性（古安田層）と矩形孔寸法

地震動	単位体積重量 (kN/m ³)	S波速度 (m/s)	ポアソン 比	単位層厚 (m)	矩形孔寸法 (m)
弾性設計用 地震動 Sd-1	17.3	267	0.462	1.0	42.0(NS)×59.0(EW) コントロール建屋の 平面
基準地震動 Ss-1	17.3	239	0.462	1.0	42.0(NS)×59.0(EW) コントロール建屋の 平面

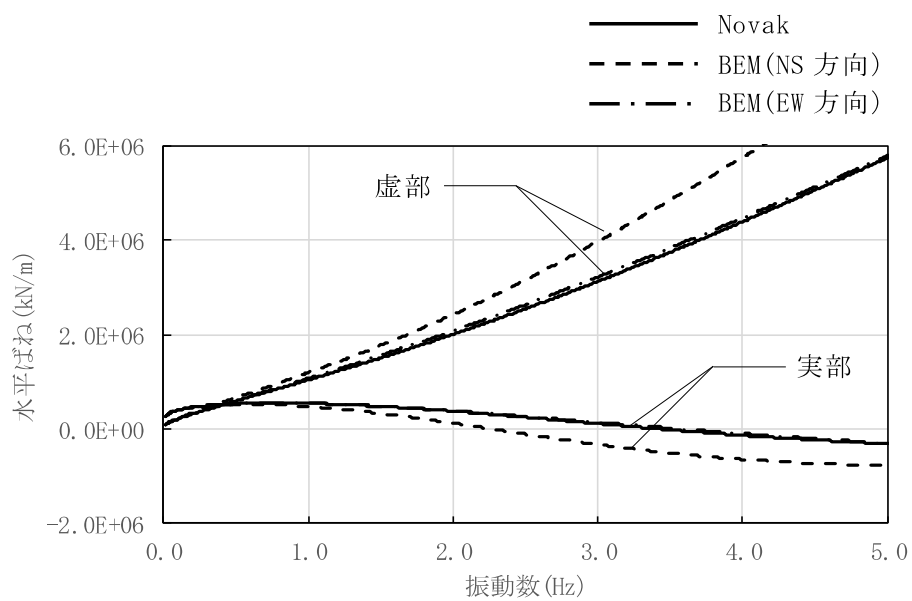
b. 解析結果

NovakとBEMの地盤ばね（水平ばね、回転ばね）の比較を図2-6及び図2-7に示す。

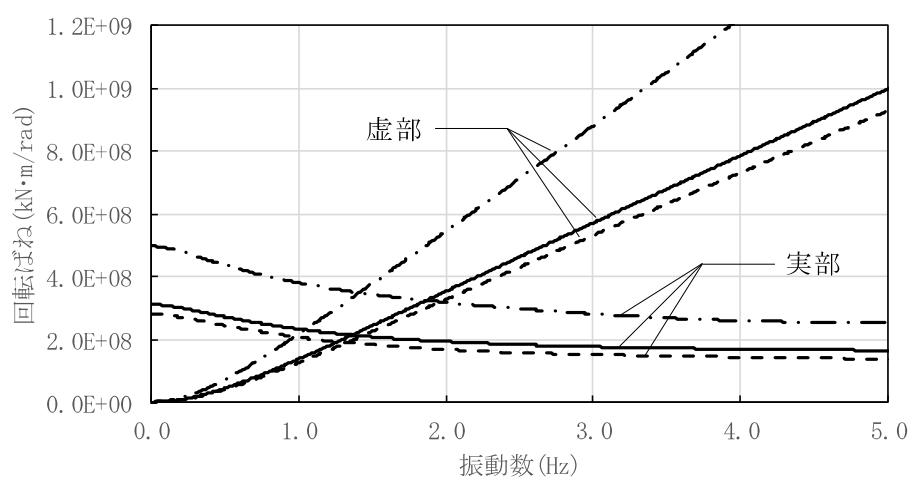
水平ばねについては、コントロール建屋の長辺方向であるEW方向では、NovakとBEMの地盤ばねはほぼ同等となる結果であり、短辺方向であるNS方向では、振動数が高くなるにつれ、NovakとBEMの地盤ばねに差が見られる。この短辺方向の差異は滝田ほか(1995)と同様の傾向である。

一方、回転ばねについては、コントロール建屋の短辺方向であるNS方向では、NovakとBEMの地盤ばねはほぼ同等となる結果が得られたが、長辺方向であるEW方向では、Novakと比較してBEMの地盤ばねは大きな値となっている。これは、図2-8に示すように等価な円形で地盤ばねを求めるNovakと建屋形状をそのままに地盤ばねを求めるBEMとで、算定条件（孔の形状）が異なるためと考えられる。つまり、円形及び矩形の断面係数の大小関係は、BEM（長辺EW方向）>Novak（円形）≒BEM（短辺NS方向）となっており、図2-6及び図2-7の回転ばねの大小関係と対応している。

なお、地盤ばねの虚部の値については、水平ばね・回転ばねともにNovakの地盤ばねがBEMの地盤ばねに比べて、同等もしくは小さく評価していることがわかる。

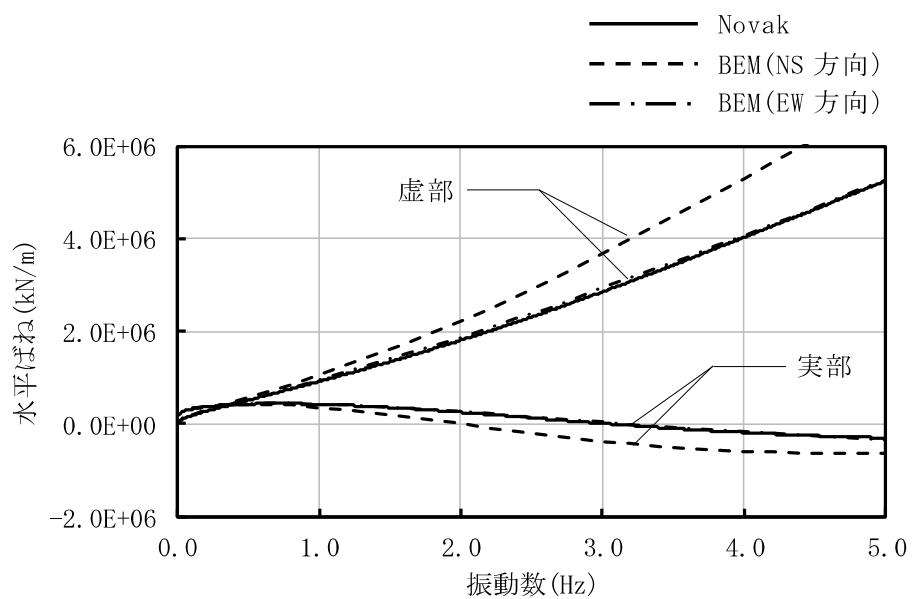


(a) 水平ばね

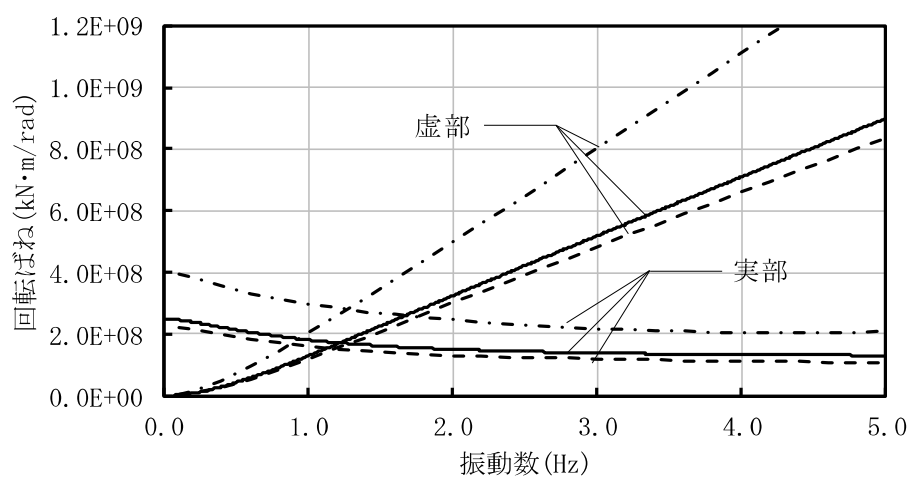


(b) 回転ばね

図2-6 コントロール建屋におけるNovakとBEMの側面地盤ばねの比較 (Sd-1)

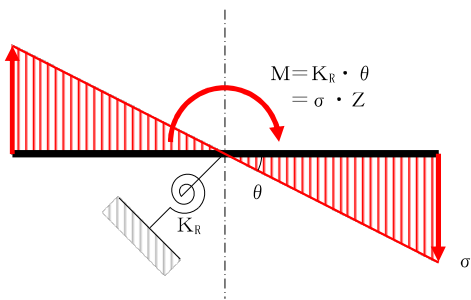
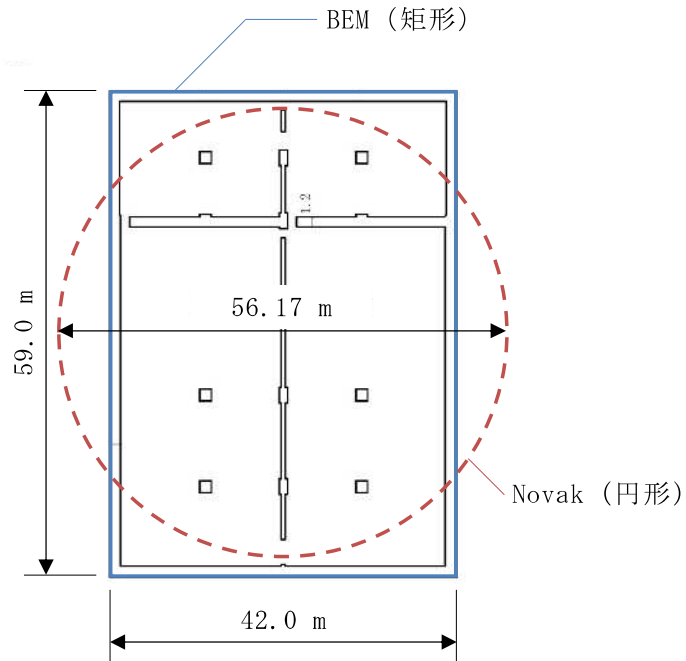


(a) 水平ばね



(b) 回転ばね

図2-7 コントロール建屋におけるNovakとBEMの側面地盤ばねの比較 (Ss-1)



M : モーメント (kN・m)
 K_R : 回転ばね (kN・m/rad)
 θ : 回転角 (rad)
 Z : 断面係数 (m³)
 σ : 縁応力 (kN/m²)

断面係数の計算		比率*
$Z_{\text{円形}}$	$= \frac{\pi \cdot D^3}{32} = 1.74 \times 10^4 \text{ (m}^3\text{)}$	1.00
$Z_{\text{矩形 NS}}$	$= \frac{L_{\text{EW}} \cdot L_{\text{NS}}^2}{6} = 1.73 \times 10^4 \text{ (m}^3\text{)}$	0.99
$Z_{\text{矩形 EW}}$	$= \frac{L_{\text{NS}} \cdot L_{\text{EW}}^2}{6} = 2.44 \times 10^4 \text{ (m}^3\text{)}$	1.40

ここで、

$Z_{\text{円形}}, Z_{\text{矩形 NS}}, Z_{\text{矩形 EW}}$: 断面係数 (m³)
 D : 等価な円の直径 (m)
 (= 56.17 (m))
 L_{NS} : NS方向の躯体寸法 (m)
 (= 42.0 (m))
 L_{EW} : NS方向の躯体寸法 (m)
 (= 59.0 (m))

注記* : 円形の断面係数に対する比率

図2-8 NovakとBEMの側面地盤ばね算定条件(形状)の違いについて

c. 地震応答解析による影響検討

b. 解析結果で求めたNovakとBEMの側面地盤ばねをコントロール建屋の振動モデルに適用し、地震応答解析を実施することにより、側面地盤ばねの相違が建屋応答に与える影響を検討する。なお、地盤ばねは表2-2に示すように近似法により定数化した地盤ばねとする。

図2-9に解析モデルの概要を示す。

弾性設計用地震動Sd-1Hに対する地震応答解析結果の比較を図2-10～図2-12に、基準地震動Ss-1Hに対する地震応答解析結果の比較を図2-13～図2-15に示す。これらの図より、地震動のレベルに係らず、NovakとBEMの側面地盤ばねによる応答差はほとんどないことが分かる。

表2-2 地盤ばね定数と減衰係数 (Sd-1)

(a) NS方向

ばね 番号	質点 番号	地盤ばね 成分	Novak (今回工認)		BEM	
			ばね定数* ¹	減衰係数* ²	ばね定数* ¹	減衰係数* ²
K1	5	側面・並進	2.65×10^6	8.47×10^5	2.56×10^6	1.11×10^6
K2	5	側面・回転	1.51×10^9	1.51×10^8	1.36×10^9	1.41×10^8
K3	6	側面・並進	1.77×10^6	5.68×10^5	1.71×10^6	7.43×10^5
K4	6	側面・回転	1.01×10^9	1.01×10^8	9.14×10^8	9.44×10^7
K5	7	側面・並進	7.64×10^5	2.45×10^5	7.38×10^5	3.20×10^5
K6	7	側面・回転	4.36×10^8	4.37×10^7	3.94×10^8	4.07×10^7
K7	7	底面・並進	6.54×10^7	2.23×10^6	6.54×10^7	2.23×10^6
K8	7	底面・回転	3.71×10^{10}	3.44×10^8	3.71×10^{10}	3.43×10^8

注記*1 : K1, K3, K5, K7はkN/m K2, K4, K6, K8はkN・m/rad

注記*2 : K1, K3, K5, K7はkN・s/m K2, K4, K6, K8はkN・m・s/rad

(b) EW方向

ばね 番号	質点 番号	地盤ばね 成分	Novak (今回工認)		BEM	
			ばね定数* ¹	減衰係数* ²	ばね定数* ¹	減衰係数* ²
K1	5	側面・並進	2.65×10^6	8.58×10^5	2.65×10^6	8.72×10^5
K2	5	側面・回転	1.51×10^9	1.52×10^8	2.41×10^9	2.38×10^8
K3	6	側面・並進	1.77×10^6	5.75×10^5	1.77×10^6	5.84×10^5
K4	6	側面・回転	1.01×10^9	1.02×10^8	1.62×10^9	1.59×10^8
K5	7	側面・並進	7.64×10^5	2.48×10^5	7.64×10^5	2.52×10^5
K6	7	側面・回転	4.36×10^8	4.39×10^7	6.97×10^8	6.86×10^7
K7	7	底面・並進	6.35×10^7	2.10×10^6	6.35×10^7	2.10×10^6
K8	7	底面・回転	6.12×10^{10}	8.03×10^8	6.12×10^{10}	8.05×10^8

注記*1 : K1, K3, K5, K7はkN/m K2, K4, K6, K8はkN・m/rad

注記*2 : K1, K3, K5, K7はkN・s/m K2, K4, K6, K8はkN・m・s/rad

表2-3 地盤ばね定数と減衰係数 (Ss-1)

(a) NS方向

ばね 番号	質点 番号	地盤ばね 成分	Novak (今回工認)		BEM	
			ばね定数*1	減衰係数*2	ばね定数*1	減衰係数*2
K1	5	側面・並進	2.12×10^6	7.71×10^5	2.05×10^6	1.01×10^6
K2	5	側面・回転	1.21×10^9	1.36×10^8	1.09×10^9	1.27×10^8
K3	6	側面・並進	1.42×10^6	5.17×10^5	1.37×10^6	6.80×10^5
K4	6	側面・回転	8.11×10^8	9.15×10^7	7.32×10^8	8.51×10^7
K5	7	側面・並進	6.12×10^5	2.23×10^5	5.91×10^5	2.93×10^5
K6	7	側面・回転	3.49×10^8	3.94×10^7	3.15×10^8	3.66×10^7
K7	7	底面・並進	6.18×10^7	2.17×10^6	6.18×10^7	2.17×10^6
K8	7	底面・回転	3.50×10^{10}	3.34×10^8	3.50×10^{10}	3.34×10^8

注記*1 : K1, K3, K5, K7はkN/m K2, K4, K6, K8はkN・m/rad

注記*2 : K1, K3, K5, K7はkN・s/m K2, K4, K6, K8はkN・m・s/rad

(b) EW方向

ばね 番号	質点 番号	地盤ばね 成分	Novak (今回工認)		BEM	
			ばね定数*1	減衰係数*2	ばね定数*1	減衰係数*2
K1	5	側面・並進	2.12×10^6	7.81×10^5	2.12×10^6	7.90×10^5
K2	5	側面・回転	1.21×10^9	1.37×10^8	1.93×10^9	2.14×10^8
K3	6	側面・並進	1.42×10^6	5.23×10^5	1.42×10^6	5.30×10^5
K4	6	側面・回転	8.11×10^8	9.19×10^7	1.30×10^9	1.44×10^8
K5	7	側面・並進	6.12×10^5	2.25×10^5	6.12×10^5	2.28×10^5
K6	7	側面・回転	3.49×10^8	3.96×10^7	5.58×10^8	6.19×10^7
K7	7	底面・並進	6.00×10^7	2.04×10^6	6.00×10^7	2.04×10^6
K8	7	底面・回転	5.77×10^{10}	7.79×10^8	5.77×10^{10}	7.81×10^8

注記*1 : K1, K3, K5, K7はkN/m K2, K4, K6, K8はkN・m/rad

注記*2 : K1, K3, K5, K7はkN・s/m K2, K4, K6, K8はkN・m・s/rad

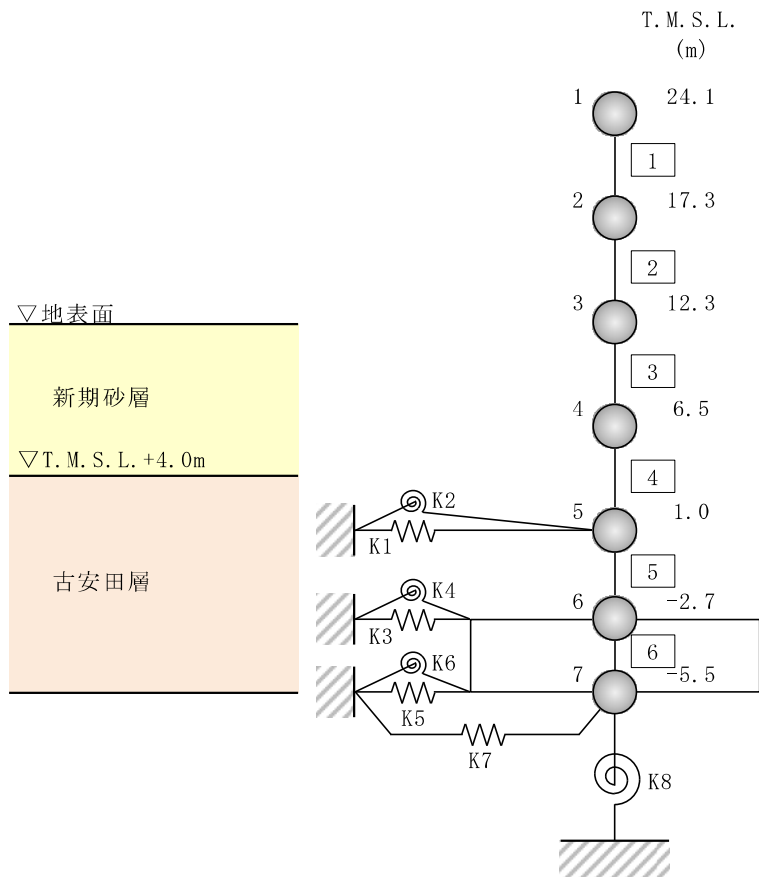
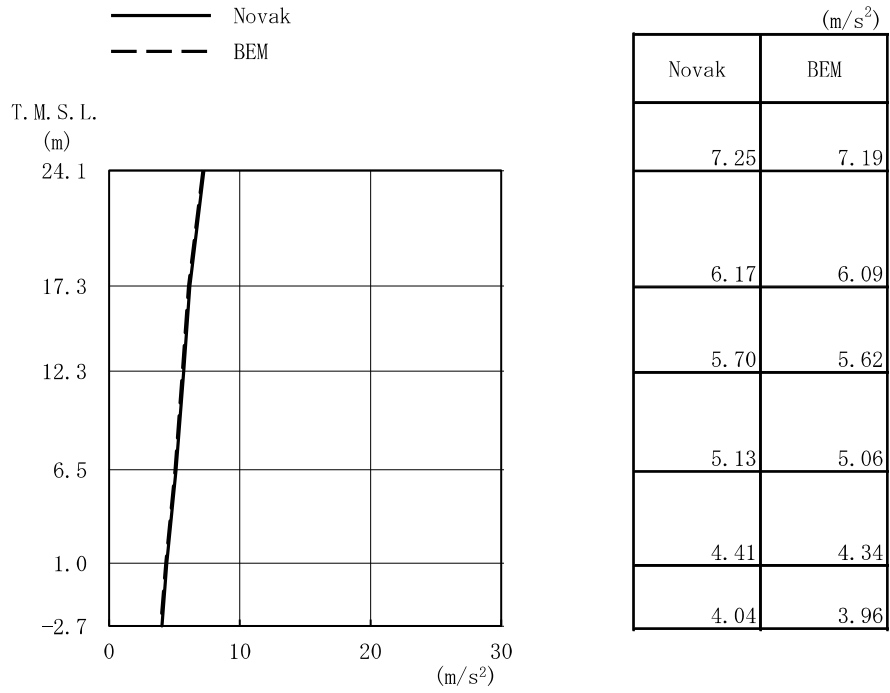
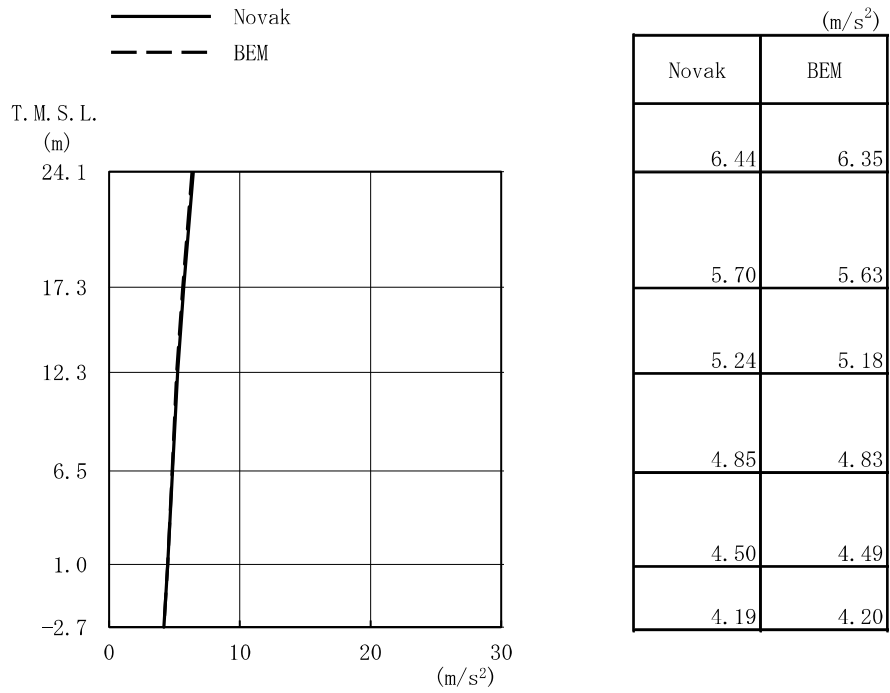


図2-9 コントロール建屋 解析モデルの概要

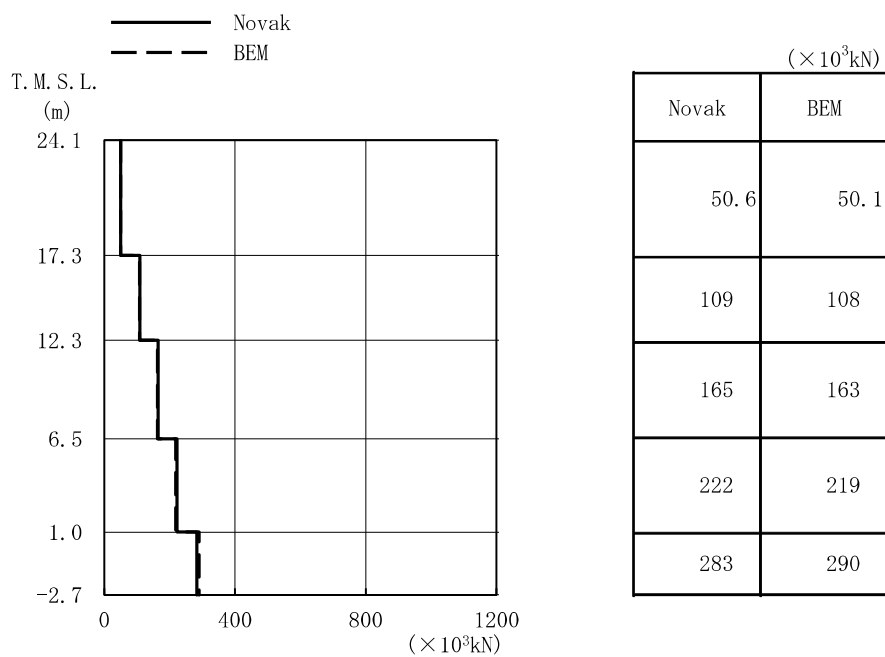


(a) NS方向

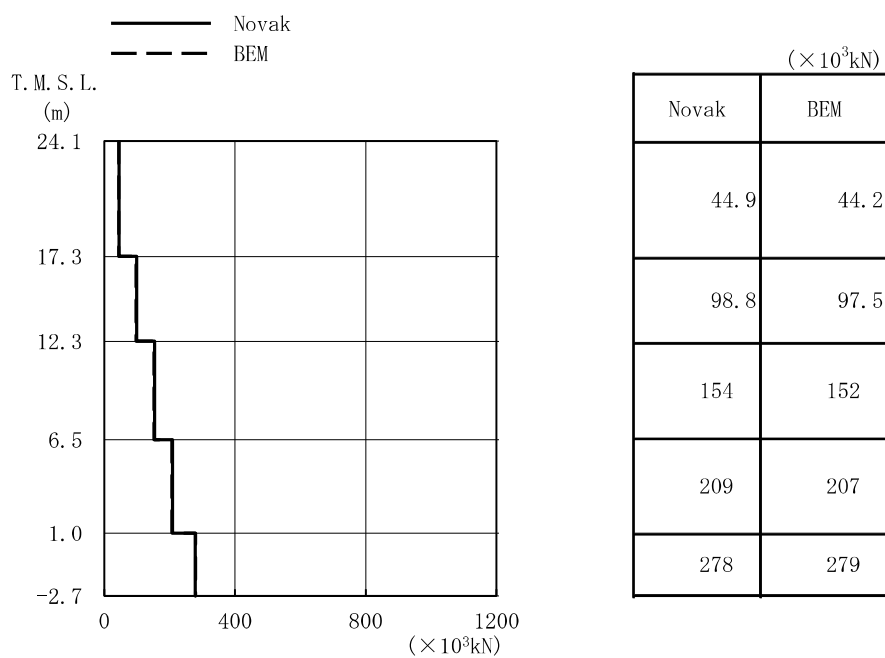


(b) EW方向

図2-10 コントロール建屋の地震応答解析結果
(加速度, 弾性設計用地震動Sd-1H)

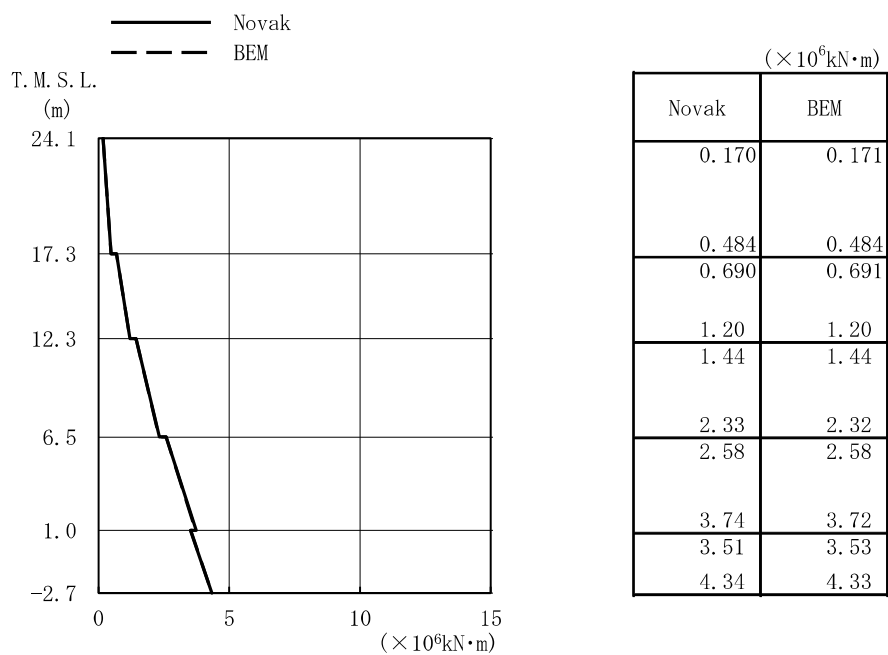


(a) NS方向

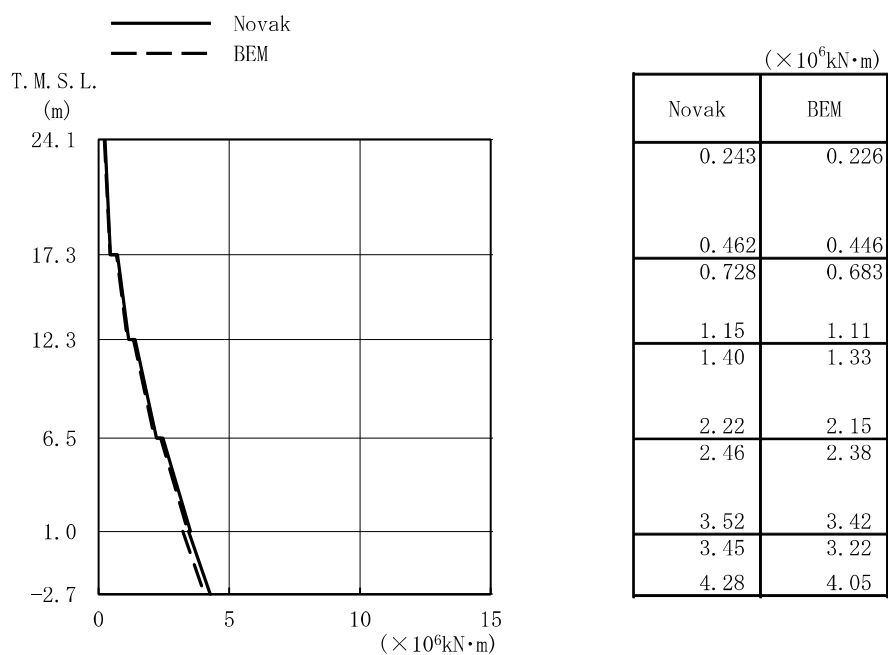


(b) EW方向

図2-11 コントロール建屋の地震応答解析結果
(せん断力, 弾性設計用地震動Sd-1H)

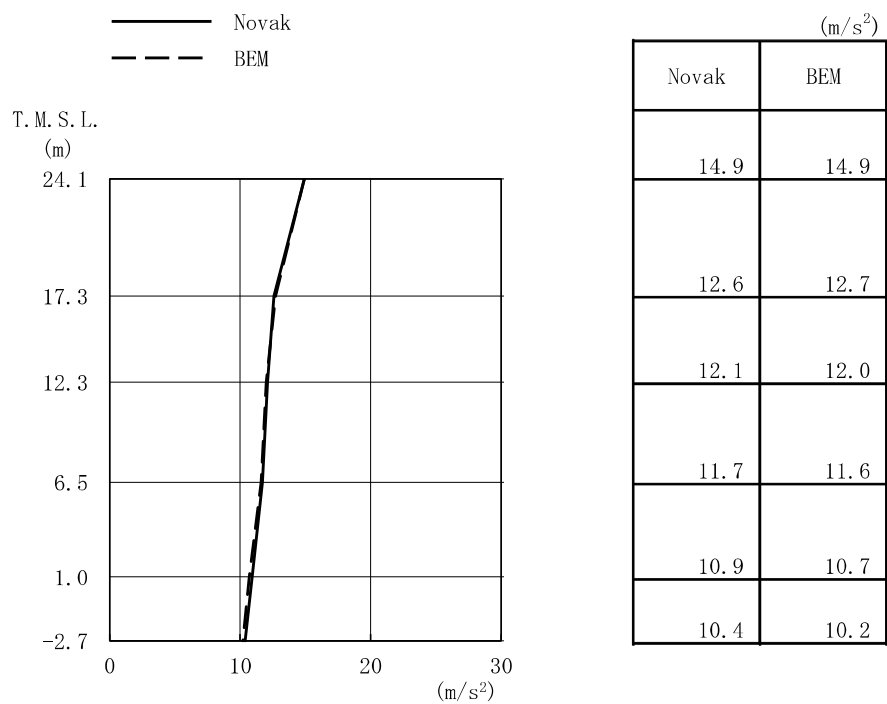


(a) NS方向

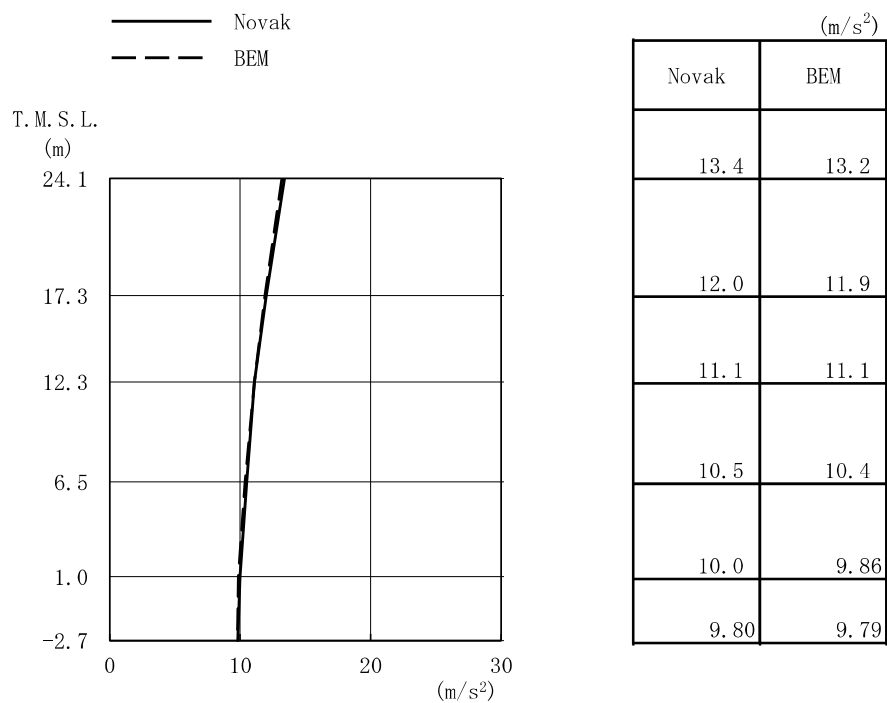


(b) EW方向

図2-12 コントロール建屋の地震応答解析結果
(曲げモーメント, 弾性設計用地震動Sd-1H)

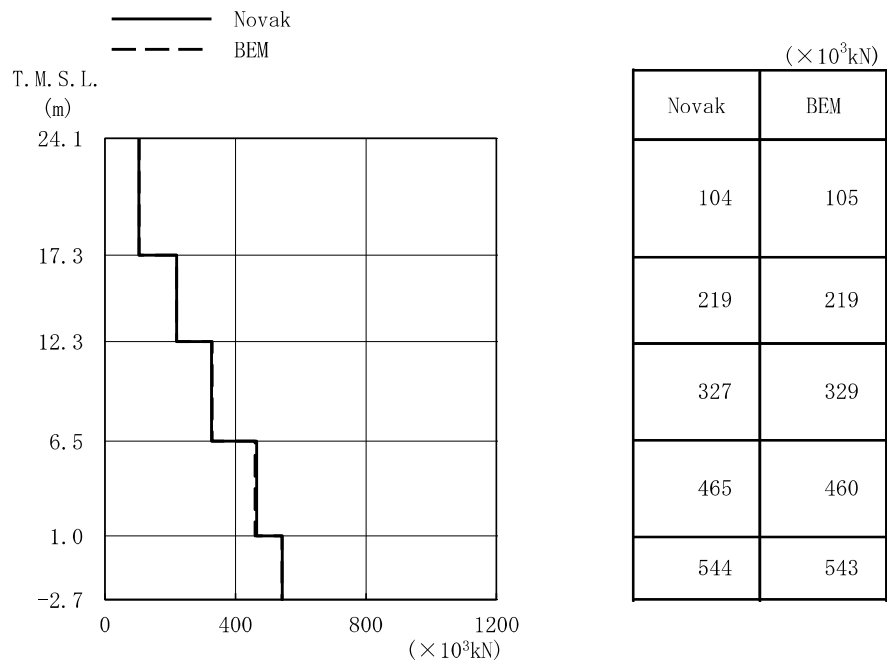


(a) NS方向

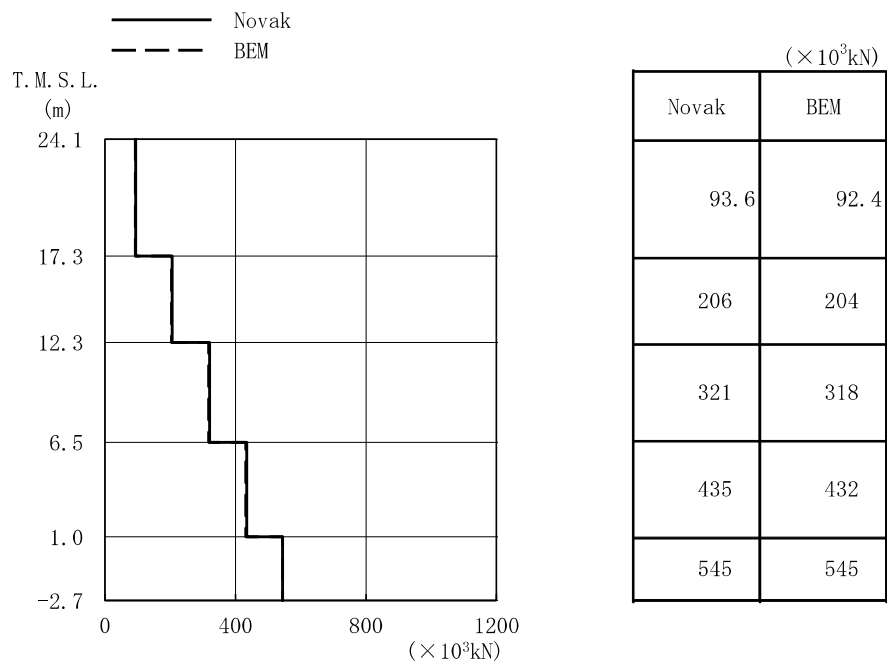


(b) EW方向

図2-13 コントロール建屋の地震応答解析結果
(加速度, 基準地震動Ss-1H)

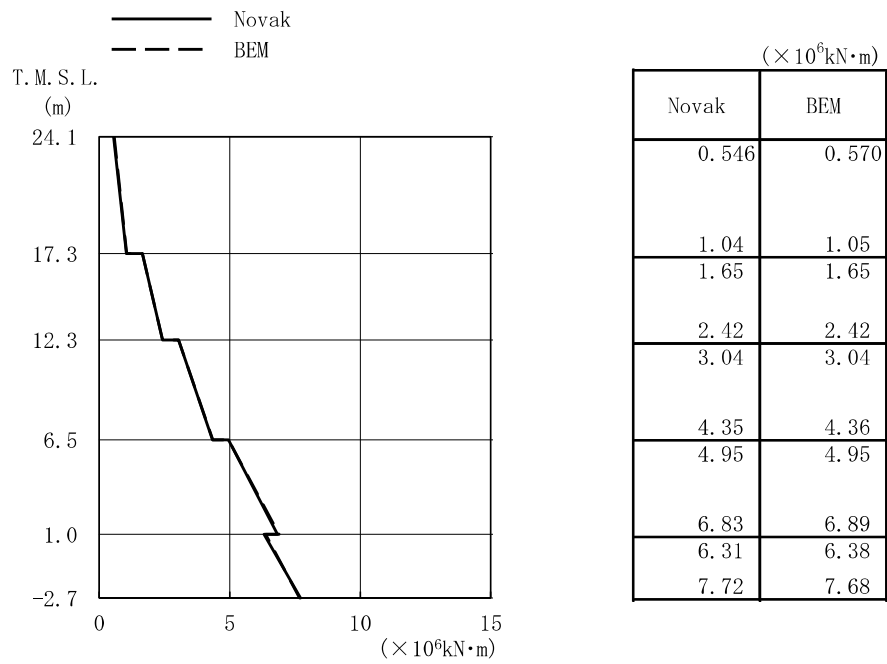


(a) NS方向

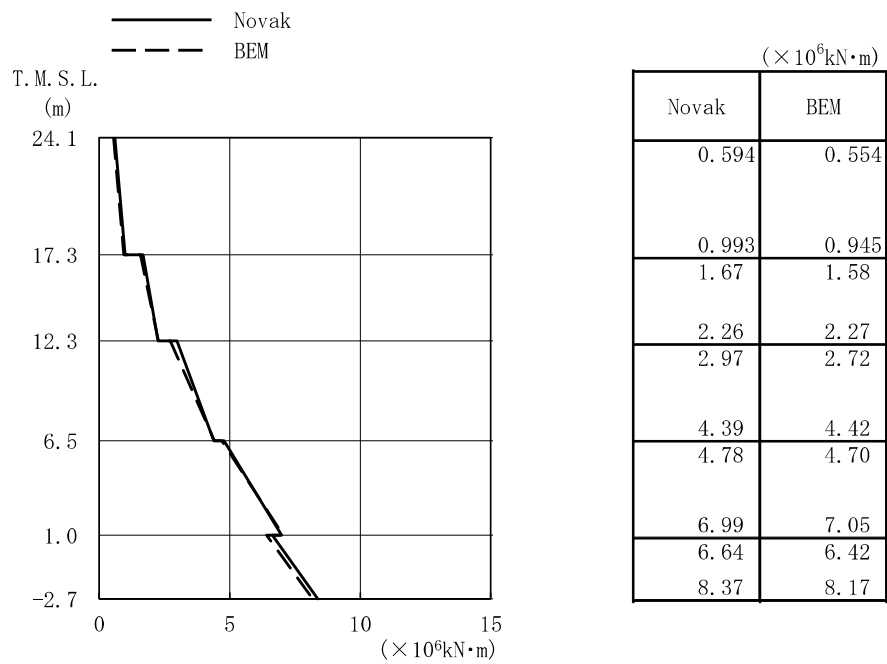


(b) EW方向

図2-14 コントロール建屋の地震応答解析結果
(せん断力, 基準地震動 S_s-1H)



(a) NS方向



(b) EW方向

図2-15 コントロール建屋の地震応答解析結果
(曲げモーメント, 基準地震動Ss-1H)

(4) まとめ

Novakの側面地盤ばねと境界要素法（BEM）の側面地盤ばねを比較した結果、水平地盤ばねは短辺方向（NS方向）で若干差異が認められるという既往の文献と同様の傾向となっていることを確認した。また、回転地盤ばねは長辺方向（EW方向）でやや大きな差異が認められたが、Novakの側面地盤ばねはBEMの側面地盤ばねに比べて減衰をほぼ同等もしくは小さめに評価していることを確認した。これは、Novakの側面地盤ばねを採用することが地震応答解析結果の保守的な評価につながるものと考えられる。

Novakの側面地盤ばね及びBEMの側面地盤ばねを用いて地震応答解析を実施したところ、建屋応答の差は僅かであり、コントロール建屋に対しNovakの側面地盤ばねを適用することは妥当であることを確認した。なお、弾性設計用地震動Sd-1と基準地震動Ss-1の地震応答解析結果は同様の傾向が得られていることから、側面地盤ばねの違いで基礎浮上り及び建屋非線形性が建屋応答に及ぼす影響は小さいことを確認した。

3. 3面が地盤に接している建屋への Novak ばねの適用性

図3-1に示すように、コントロール建屋の西側には廃棄物処理建屋が設置されており実際に地盤とは接触していない。なお、コントロール建屋の東側にはサービス建屋が隣接しているが、サービス建屋基礎下端レベルはT.M.S.L.+5.1mであり、今回工認モデルで側面地盤ばねとして考慮している古安田層上面レベルT.M.S.L.+4.0mより浅いレベルに位置していることから、東側は全て地盤に接していると考えられる。

以上のことから、建屋側面の地盤ばねの剛性が単純に3/4倍に低減すると仮定し、低減した地盤ばねを考慮した地震応答解析を行い、その影響について考察する。

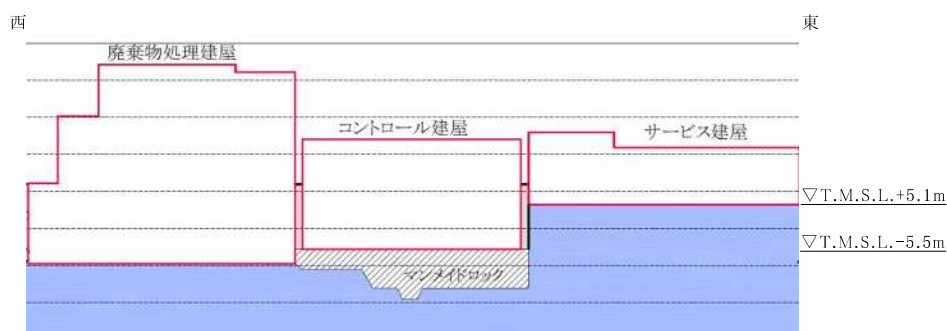


図3-1 コントロール建屋周辺の東西断面

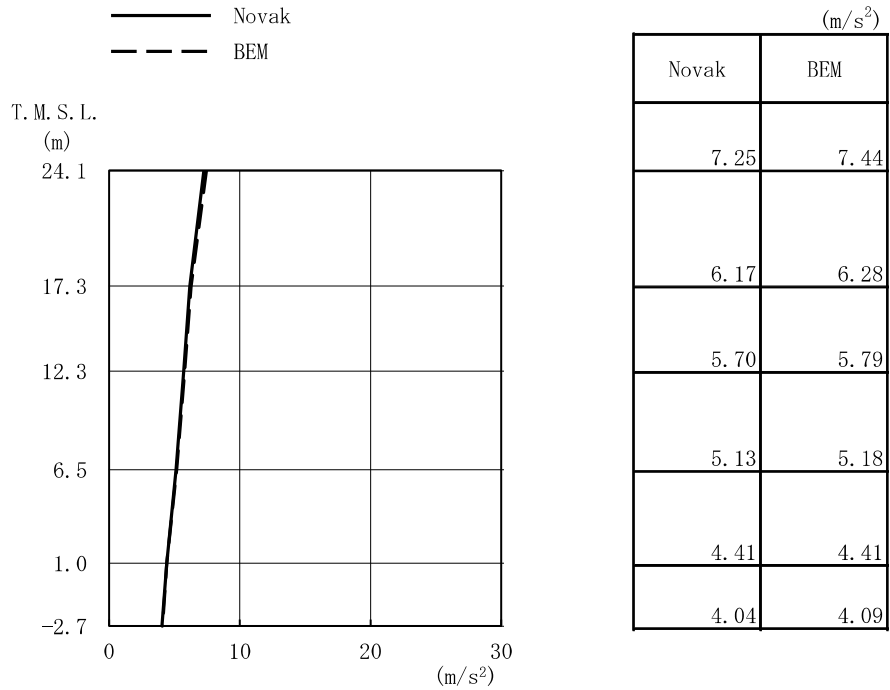
(1) 地盤ばねの設定

周辺地盤との接触状況を踏まえ、75%に低減したBEMの地盤ばねを設定する。なお、低減したBEMの地盤ばねは前章「2. 辺長比が1.4である矩形建屋へのNovakばねの適用性」で算定した地盤ばね（図2-6）を0.75倍したものを近似法により定数化したばねとする。

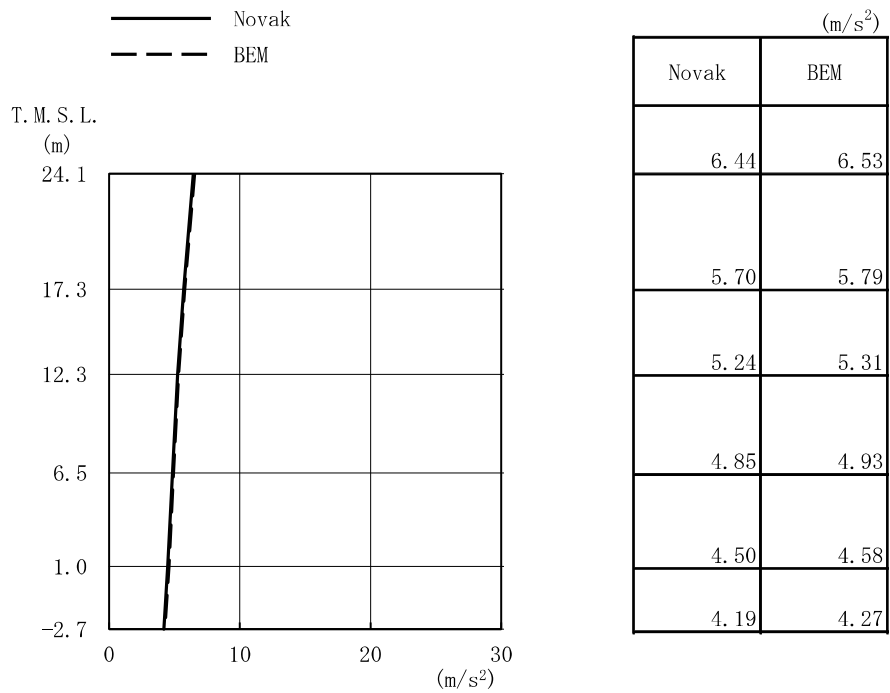
(2) 地震応答解析結果

入力地震動は弾性設計用地震動Sd-1Hとした。地震応答解析結果の比較を図3-2～図3-4に示す。図において「Novak」が今回工認で採用している地盤ばねによる結果で、「BEM」が前章で求めたBEMによる地盤ばねを0.75倍した地盤ばねによる結果である。

これらの図より、今回工認モデルの地震応答解析結果とBEMによる地盤ばねを低減した結果は、ほぼ同等であることが分かる。

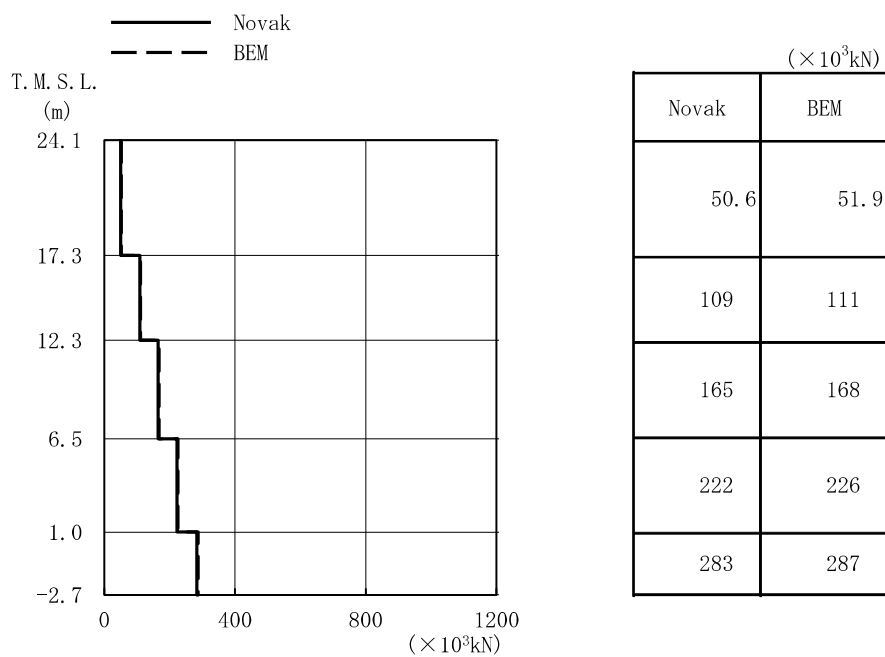


(a) NS方向

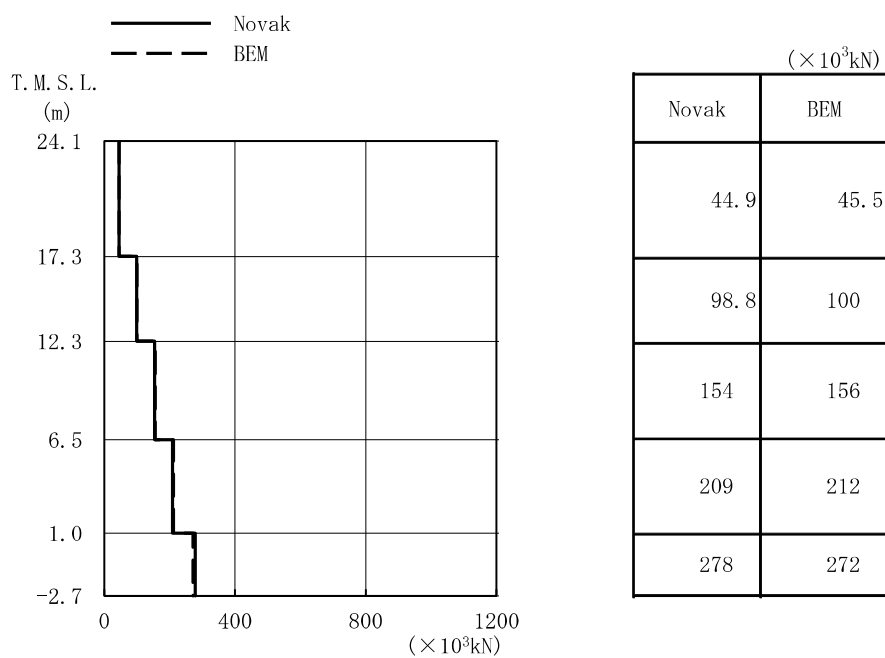


(b) EW方向

図3-2 コントロール建屋の地震応答解析結果
(加速度, 弾性設計用地震動Sd-1H)

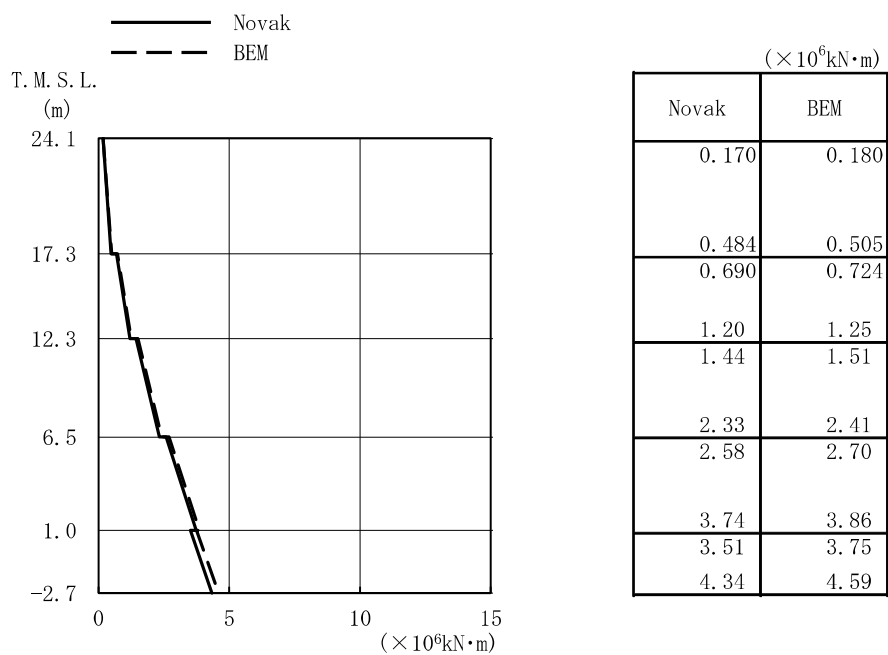


(a) NS方向

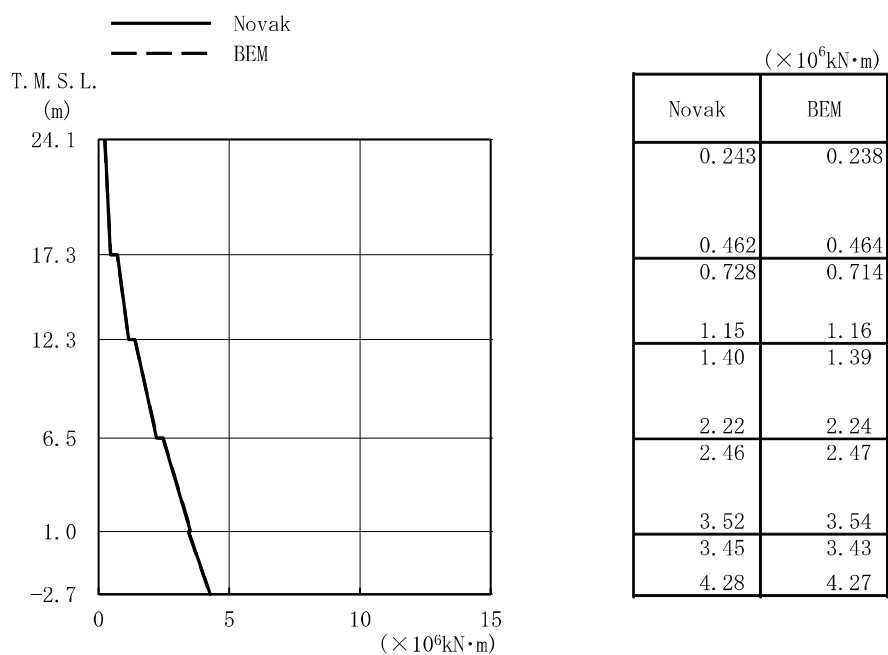


(b) EW方向

図3-3 コントロール建屋の地震応答解析結果
(せん断力, 弾性設計用地震動Sd-1H)



(a) NS方向



(b) EW方向

図3-4 コントロール建屋の地震応答解析結果
(曲げモーメント, 弾性設計用地震動Sd-1H)

(3) まとめ

コントロール建屋地下外壁の地盤との接触状況を踏まえ側面地盤ばねを低減させた地震応答解析結果が、今回工認モデルの地震応答解析結果とほぼ同等であることから、コントロール建屋の地震応答解析においてNovakの側面地盤ばねを採用した埋込みSRモデルを用いることは妥当であることを確認した。