

本資料のうち、枠囲みの内容は、商業機密あるいは防護上の観点から公開できません

TK-1-173 改0

平成30年2月27日

別紙－9

東海第二発電所

使用済燃料乾式貯蔵建屋の評価方針について

1. はじめに

本資料の構成は、以下の2項目から成る。

「Ⅰ 使用済燃料乾式貯蔵建屋の概要」には、使用済燃料乾式貯蔵建屋の概要を示す。また今回工認においては、既工認から地震応答解析モデルを変更するため、その内容について「Ⅱ 使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答解析モデルの既工認からの変更について」に示す。

Ⅰ 使用済燃料乾式貯蔵建屋の概要

Ⅱ 使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答解析モデルの既工認からの 変更について

I 使用済燃料乾式貯蔵建屋の概要

使用済燃料乾式貯蔵建屋の設置位置を第1-1図に示す。

使用済燃料乾式貯蔵建屋は、使用済燃料乾式貯蔵容器を24基収納する地上1階建の鉄筋コンクリート造（一部鉄骨鉄筋コンクリート及び鉄骨造）の建物である。

使用済燃料乾式貯蔵建屋に加わる地震時の水平力は、外周部に配置された耐震壁と柱及び梁（屋根トラス）からなるフレーム構造で負担する。耐震壁には、冷却空気取り入れのための開口がある。

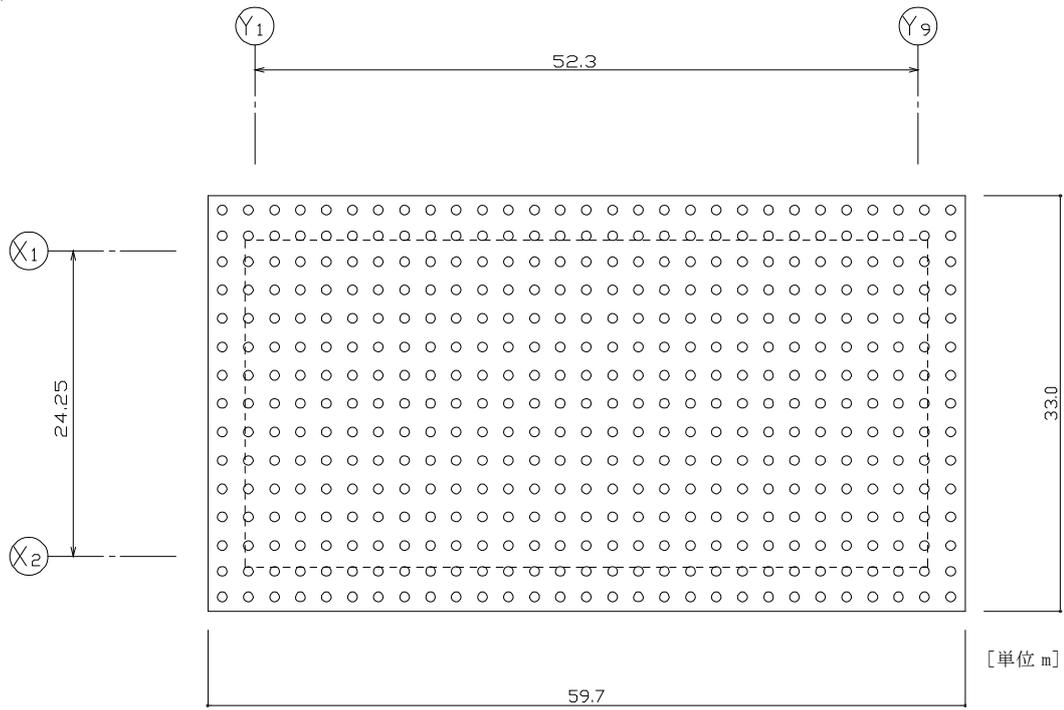
使用済燃料乾式貯蔵建屋の概要を第1-2図及び第1-3図に示す。

使用済燃料乾式貯蔵建屋は、地上1階建で平面が約52 m（南北方向）×約24 m（東西方向）の鉄筋コンクリート造（一部鉄骨鉄筋コンクリート造及び鉄骨造）の建物であり、適切に配置された耐震壁で構成された剛な構造としている。

使用済燃料乾式貯蔵建屋の基礎は、平面が約60 m（南北方向）×約33 m（東西方向）、厚さ約2.5 m（一部約2.0 m）で、鋼管杭を介して、砂質泥岩である久米層に岩着している。

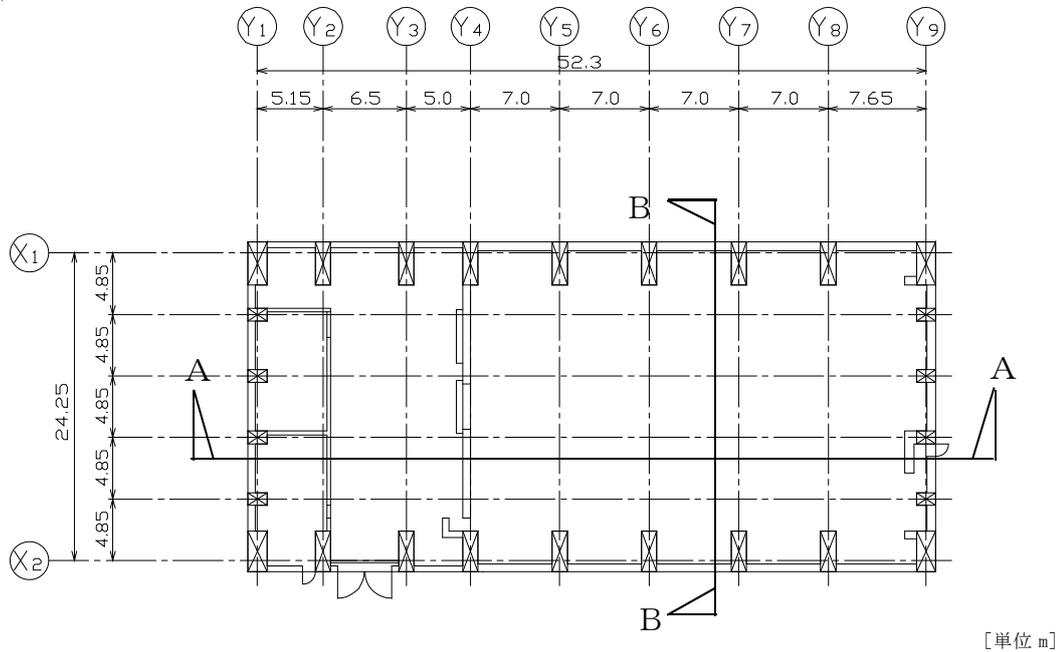


第1-1図 使用済燃料乾式貯蔵建屋の設置位置



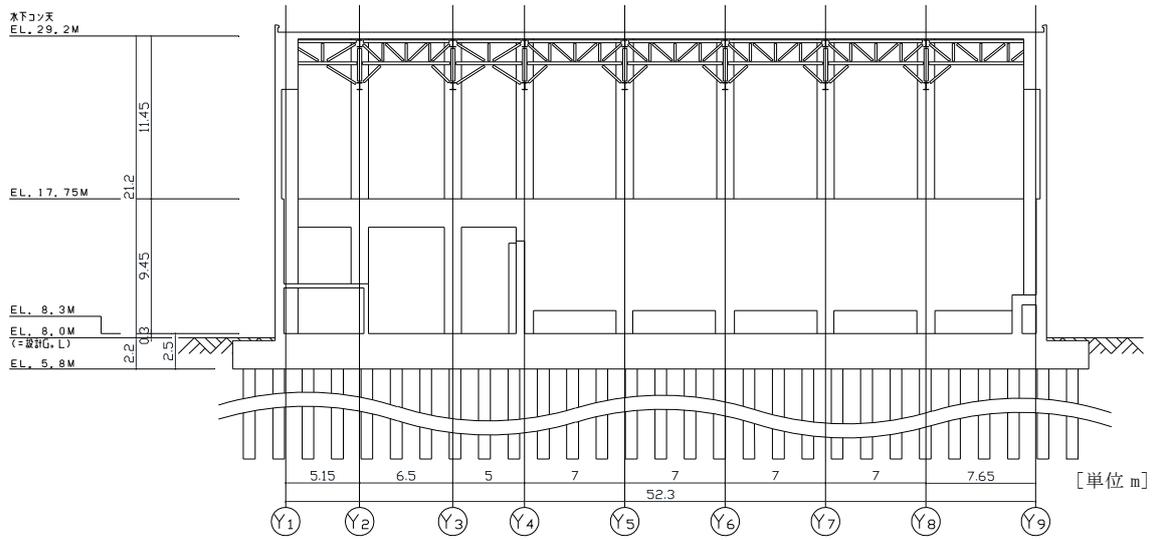
(杭伏図 : EL. -5.8 m)

杭仕様 : 鋼管杭 ϕ 812.8,
t = 16 (SKK400)

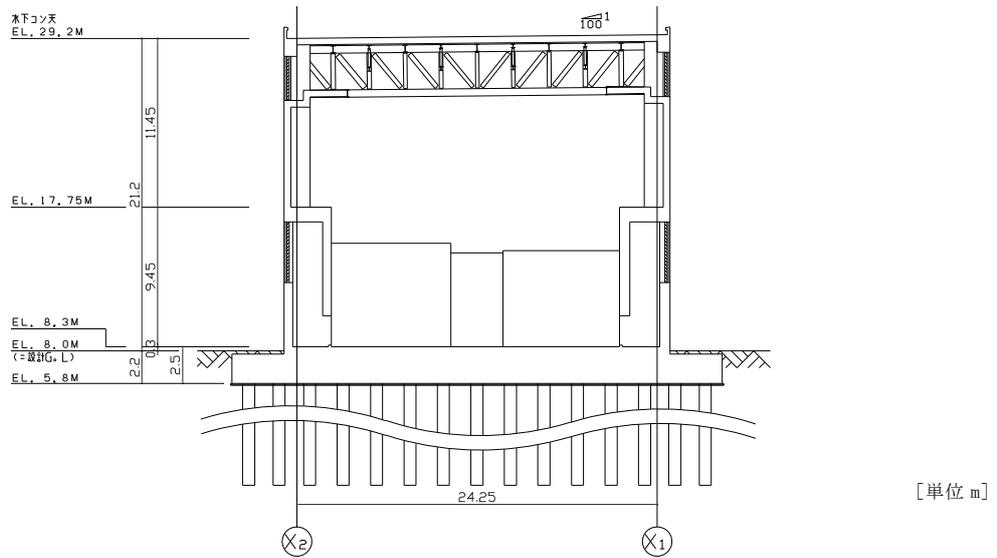


(1階平面図 : EL. 8.3 m)

第1-2図 使用済燃料乾式貯蔵建屋の概要 (平面図)



(NS方向, A-A断面)



(EW方向, B-B断面)

第1-3図 使用済燃料乾式貯蔵建屋の概要 (断面図)

Ⅱ 使用済燃料乾式貯蔵建屋の 地震応答解析モデルの既工認からの変更について

1. 使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答解析モデルの既工認からの変更

1.1 目的

今回工認に用いる使用済燃料乾式貯蔵建屋のSRモデルについて検討する。使用済燃料乾式貯蔵建屋はNS方向に細長い形状をしている。このような形状であるとEW方向振動に対して、中央部の振動を含め、1本棒モデルに集約するのは難しい。設計当時は1本棒モデルであるが、3次元FEMの1次固有周期（中央部振動の固有周期）に整合するように剛性を設定していた。これは、耐震壁の剛性を小さく見積もることであり、クライテリアをせん断ひずみとした場合には保守的な設定と言える。また、設計当時の基準地震動 S_2 に対しては、この保守的なモデルを用いても弾性範囲に収まっていたため、耐震壁の復元力特性を作成していない。

今回工認では基準地震動 S_s 入力に対し、非線形領域に入ることが予想されるため、耐震壁の復元力特性を設定する必要がある。

上記を背景に、NS方向も含め、より実情に近い建屋の振動性状を評価できる耐震壁の復元力特性を考慮した解析モデルを設定することを目的とする。

1.2 今回工認モデルの設定方針

地震応答解析モデルは、以下の方針に基づいて、建設当時の工認（以下「既工認」という。）のモデルから変更する。NS方向の耐震壁には、金属キャスク冷却のために大開口が設けられている。既工認モデルでは、開口の影響を考慮したはり理論による等価剛性を設定しており、既工認モデルでは、3次元全体FEMと1次固有周期は整合していたものの、上階の方が下階よりも剛性が大きく評価されていた。今回は、より詳細に開口の影響を考慮するために、3次元全体FEMモデルによる剛性評価を採用することに修正する。復元力特性は、原子力発電所耐震設計技術指針J E A G 4601-1991

追補版〔社団法人日本電気協会〕（以下「J E A G 4601-1991 追補版」という。）に基づいて設定する。

E W方向の既工認モデルは、「1.1 目的」に記載したように、保守的に1本棒のモデルを構築していた。基準地震動 S_s に対する今回工認では、非線形挙動を精度良く表現するために、妻側耐震壁と耐震壁間のフレーム部をそれぞれ1本棒でモデル化し、屋根スラブレベルで屋根スラブ剛性を模擬したせん断ばねで連結する2本棒多質点系モデルに変更する。

1.3 既工認との比較

地震応答解析モデルの変更点を第1-1表に示す。

既工認では、質点系モデルの基礎底面位置に杭と地盤との動的相互作用を考慮して評価したばね（水平ばね及び回転ばね）を取り付けてモデル化している。基礎底面ばねは、地盤の成層性と半無限性を考慮した三次元薄層要素法による加振解に基づく方法により算定している。

今回工認では、既工認から地盤ばね算出に用いていた三次元薄層要素法を入力動評価にも用いることにより、杭の拘束効果を考慮した。この入力動のことを以下「有効入力動」という。

第 1-1 表 (1/3) 地震応答解析モデルの変更点 (解析条件)

項目	既工認	今回工認
材料諸元	R C 部：ヤング係数 E ・せん断弾性係数 G (従来単位)	R C 部：R C - N 規準に基づくヤング係数 E ・せん断弾性係数 G
モデル形状 ^{※1}	N S 方向， E W 方向ともに 1 軸多質点系モデル	N S 方向： 1 軸多質点系モデル E W 方向： 建屋振動特性を考慮した 2 軸多質点系モデル 鉛直方向： モデルを新設
耐震剛性 ^{※1}	N S 方向： 剛床仮定に基づいた従来ベースの弾性剛性を設定 E W 方向： 3 次元 F E M モデルにより屋根スラブ剛性を考慮した等価剛性を設定 鉛直方向： モデル未設定	N S 方向： 3 次元 F E M モデルにより大開口の影響をより詳細に考慮した等価剛性を設定 E W 方向： 耐震壁と中間フレーム部を独立させ， それぞれ従来ベースの弾性剛性を設定 鉛直方向： 耐震壁配置に応じ従来ベースで剛性を設定 (単スパン集約モデル)
耐震重量	積雪荷重を未考慮	積雪荷重 30 cm×0.35 考慮 (30 tf 増)

第 1-1 表 (2/3) 地震応答解析モデルの変更点 (解析条件)

項目	既工認	今回工認
解析手法	建屋剛性は線形としてモデル化 (線形応答解析)	せん断及び曲げの非線形性を考慮 (復元力特性の設定による非線形 応答解析) ※鉛直方向は線形応答解析
入力 地震動	一次元波動論を用いた地盤応答解 析による基礎版底面レベルの応答 波	三次元薄層要素法による杭の拘束 効果を考慮した有効入力動

※1：解析モデルの妥当性は、観測記録シミュレーションより確認した。

第1-1表 (3/3) 地震応答解析モデルの変更点 (解析モデル形状)

	既工認	今回工認
N S 方向	<p>EL. (m)</p> <p>29.20</p> <p>17.75</p> <p>8.30</p> <p>7.05</p> <p>5.80</p>	<p>EL. (m)</p> <p>29.20</p> <p>17.75</p> <p>8.30</p> <p>7.05</p> <p>5.80</p>
E W 方向	<p>EL. (m)</p> <p>29.20</p> <p>17.75</p> <p>8.30</p> <p>7.05</p> <p>5.80</p>	<p>EL. (m)</p> <p>29.20</p> <p>17.75</p> <p>8.30</p> <p>7.05</p> <p>5.80</p>
鉛直 方向		<p>EL. (m)</p> <p>29.20</p> <p>17.75</p> <p>8.30</p> <p>7.05</p> <p>5.80</p>

【補足資料 1】 三次元薄層要素法とは

三次元薄層要素法とは，弾性地盤における正弦的な波動伝播を求めるのに際し，地盤を水平な薄層に分割して水平方向には均質な連続体とするが，深さ方向には分割面で離散的に扱う方法である。即ち，水平方向には弾性波動論，深さ方向には有限要素法で定式化したのが三次元薄層要素法である。三次元薄層要素法では，波動伝播の解が解析的に求められるため積分する必要がなく，計算効率の点で極めて有利となるため，地盤内部に多数の加振源を有する埋込み基礎や群杭の動的相互作用解析に広く適用されている。

【補足資料2】観測記録を用いた応答解析モデルの妥当性検討

建屋のモデル化における振動特性評価の妥当性確認として、2011年3月11日東北地方太平洋沖地震（以下「東北地方太平洋沖地震」という。）時の観測記録を用いたシミュレーション解析を実施した。

1. 地震計設置位置

使用済燃料乾式貯蔵建屋には、地震時の基本的な振動性状を把握する目的で基礎上端と屋根トラス上部に各1台の地震計を設置している。

使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震計設置位置を第1-1図に示す。

2. シミュレーション解析結果

既工認での地震応答解析の概要図を第2-1図に、今回の工認での評価の概要図を第2-2図に示す。観測記録を用いたシミュレーション解析は、既工認モデルと今回の工認モデルの両方を用いた。

東北地方太平洋沖地震のシミュレーション解析結果として、両者の最大応答加速度分布の比較を第2-3図に示す。今回工認モデルは既工認モデルとほぼ同等の応答となっており、観測記録に対しては両モデルともに観測記録よりも大きい結果となっている。

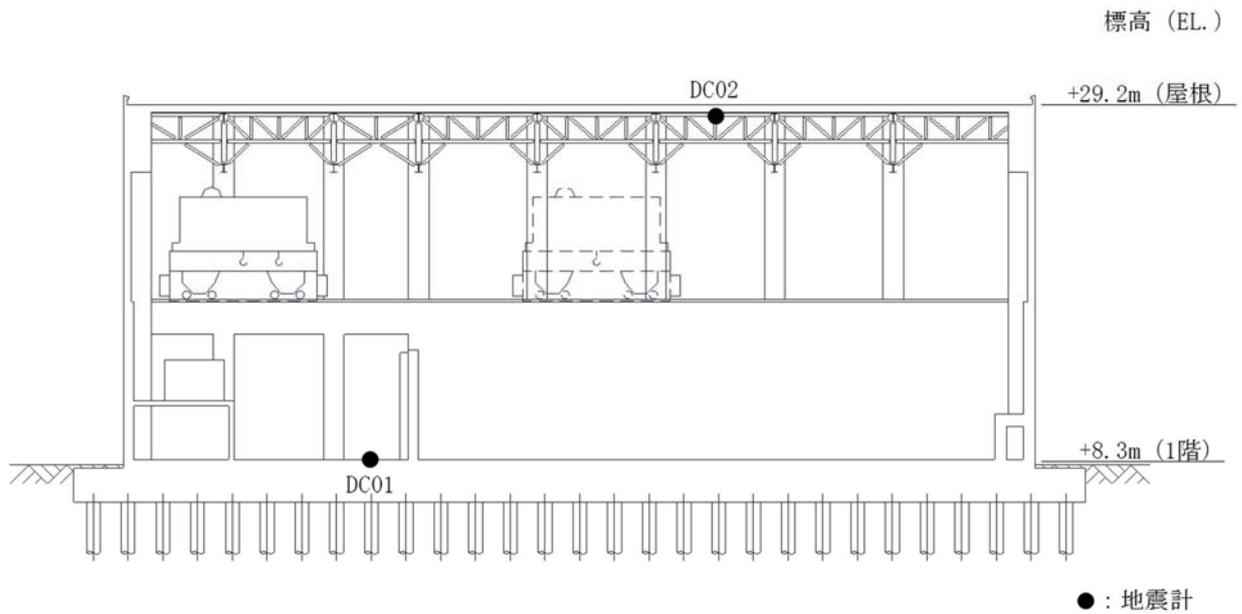
床応答スペクトルの比較を第2-4図に示す。観測記録、既工認モデル及び今回工認モデルのピークは、ほぼ同じ周期で生じていることから、建屋の剛性は適切に模擬できているものと考ええる。

3. 工認に用いる地震応答解析モデルの妥当性について

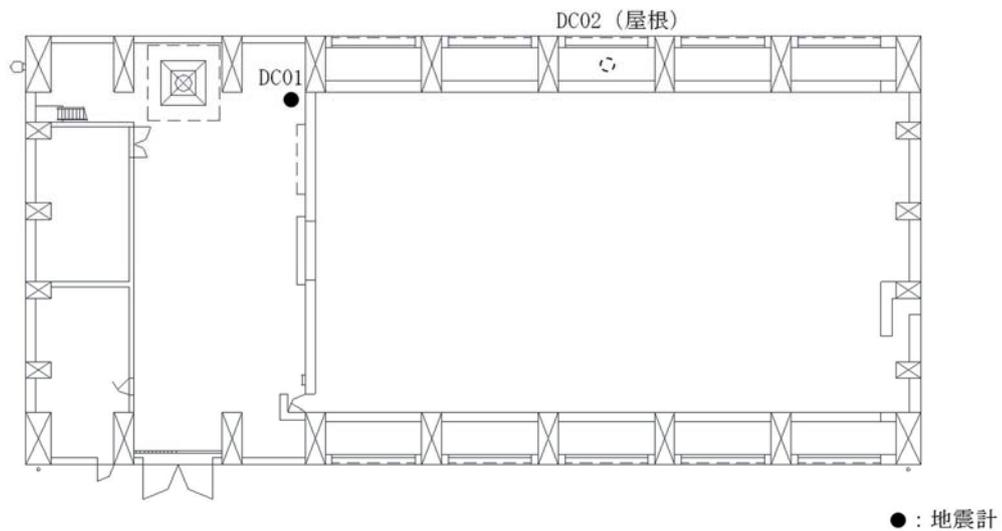
使用済燃料乾式貯蔵建屋が細長い形状をしていること等を考慮し、地震応答解析モデルを既工認から変更したが、東北地方太平洋沖地震のシミュレーション解析結果より、既工認モデルと今回工認モデルの観測記録の説明性は同程度であることを確認した。

以上の結果を踏まえ、使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答計算及び耐震計

算書に用いる応答解析モデルには、今回工認モデルを用いることとした。

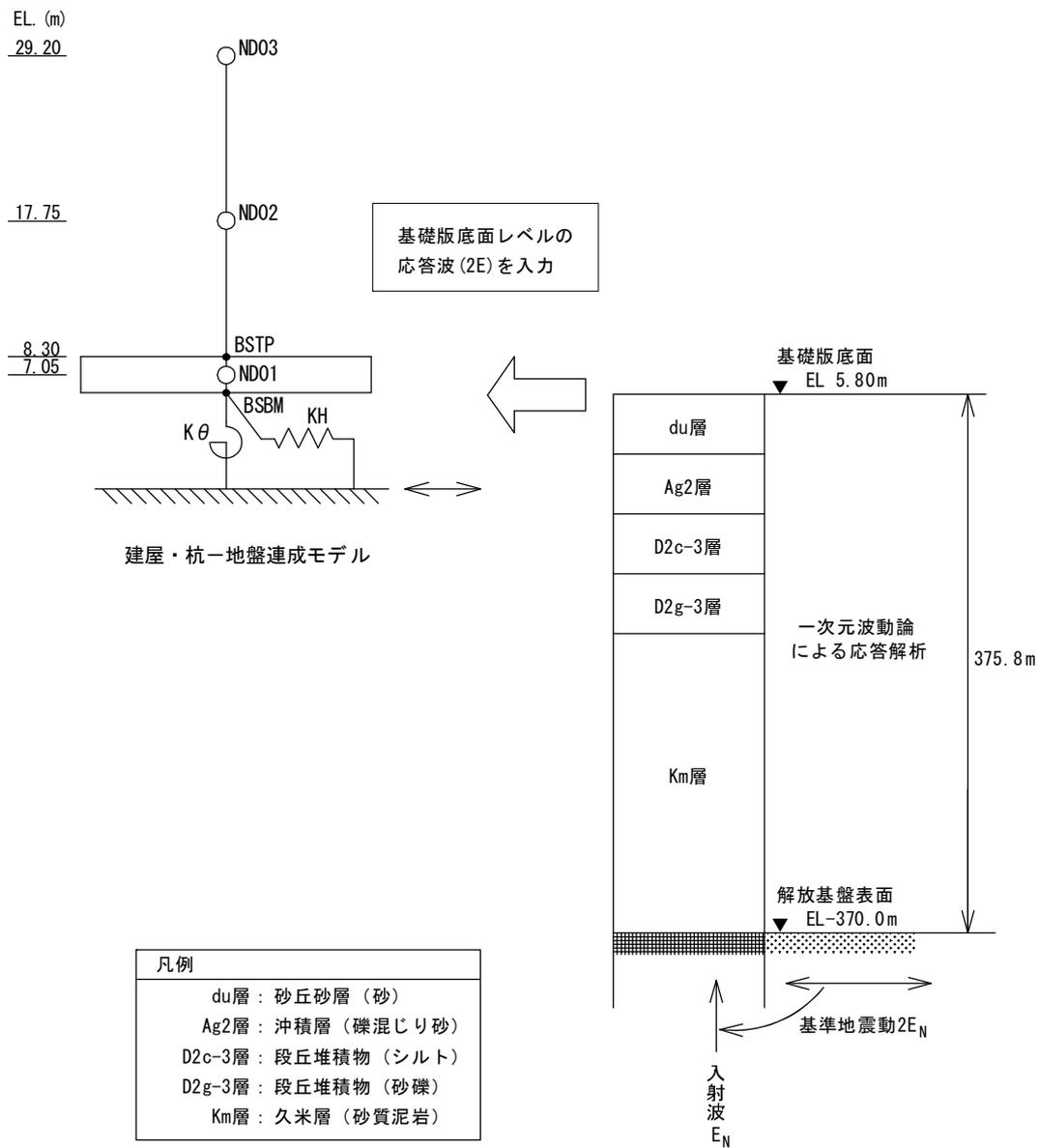


(a) 断面図

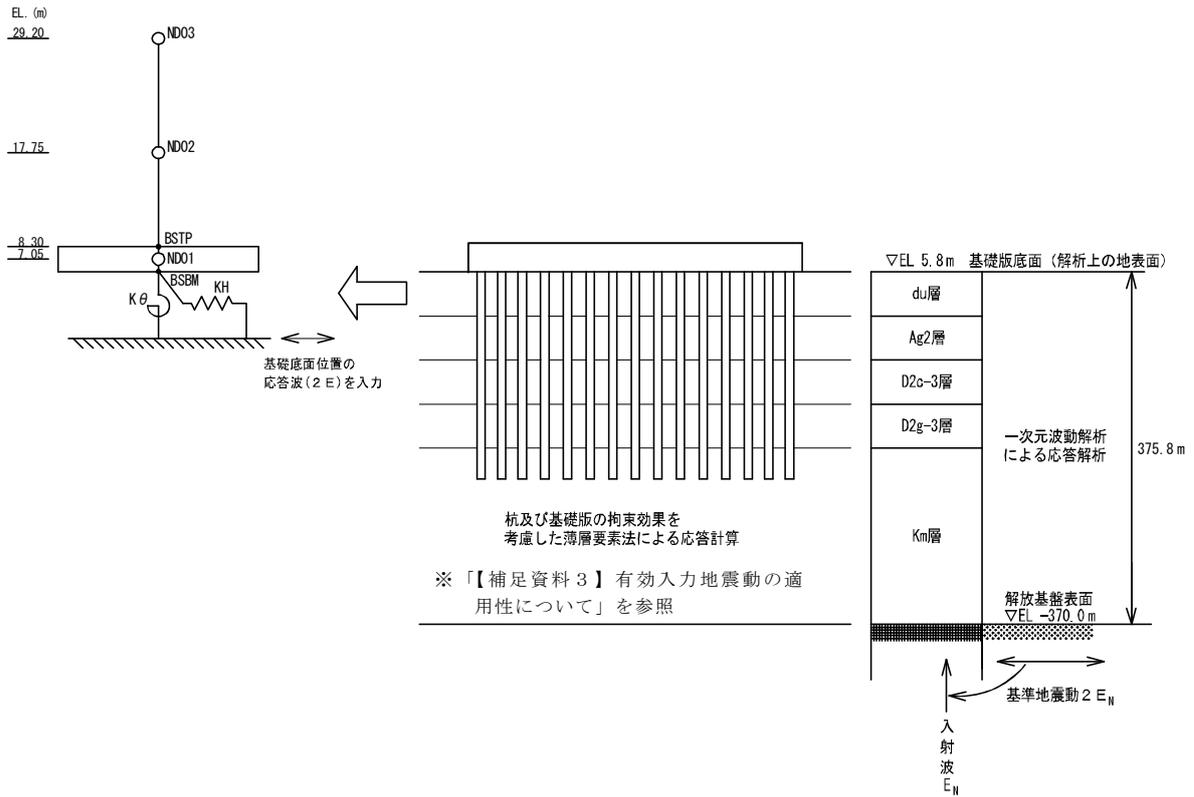


(b) 1階 (EL. 8.3 m) 平面図

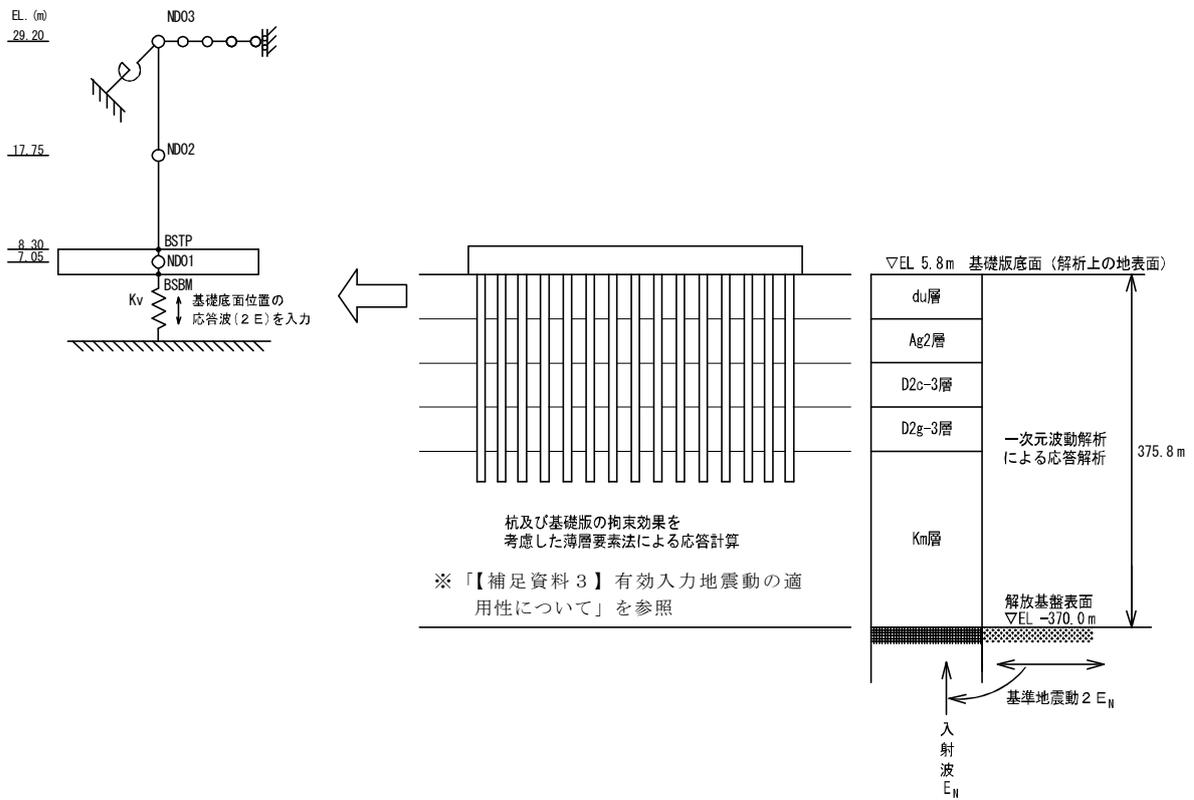
第1-1図 使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震計設置位置



第2-1図 地震応答解析の概要図 (既工認)

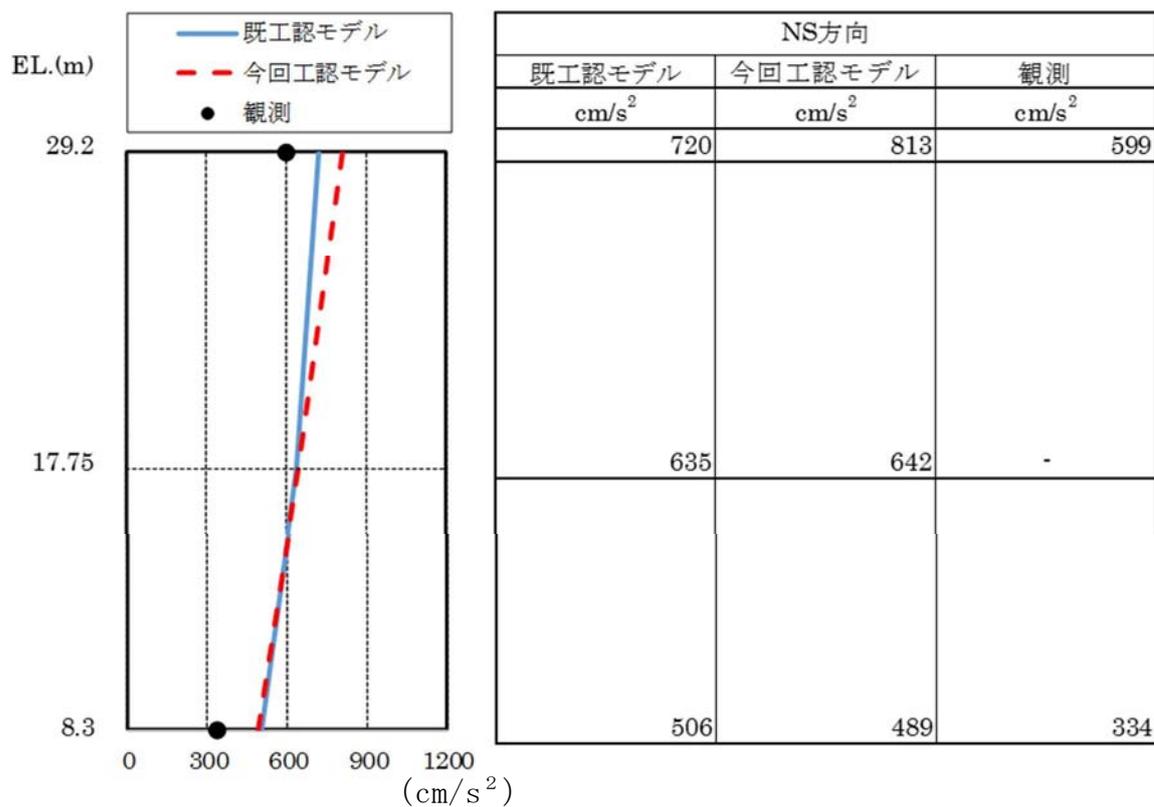


(水平方向)

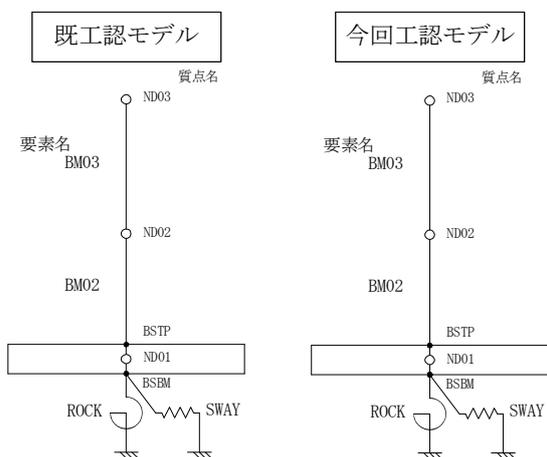


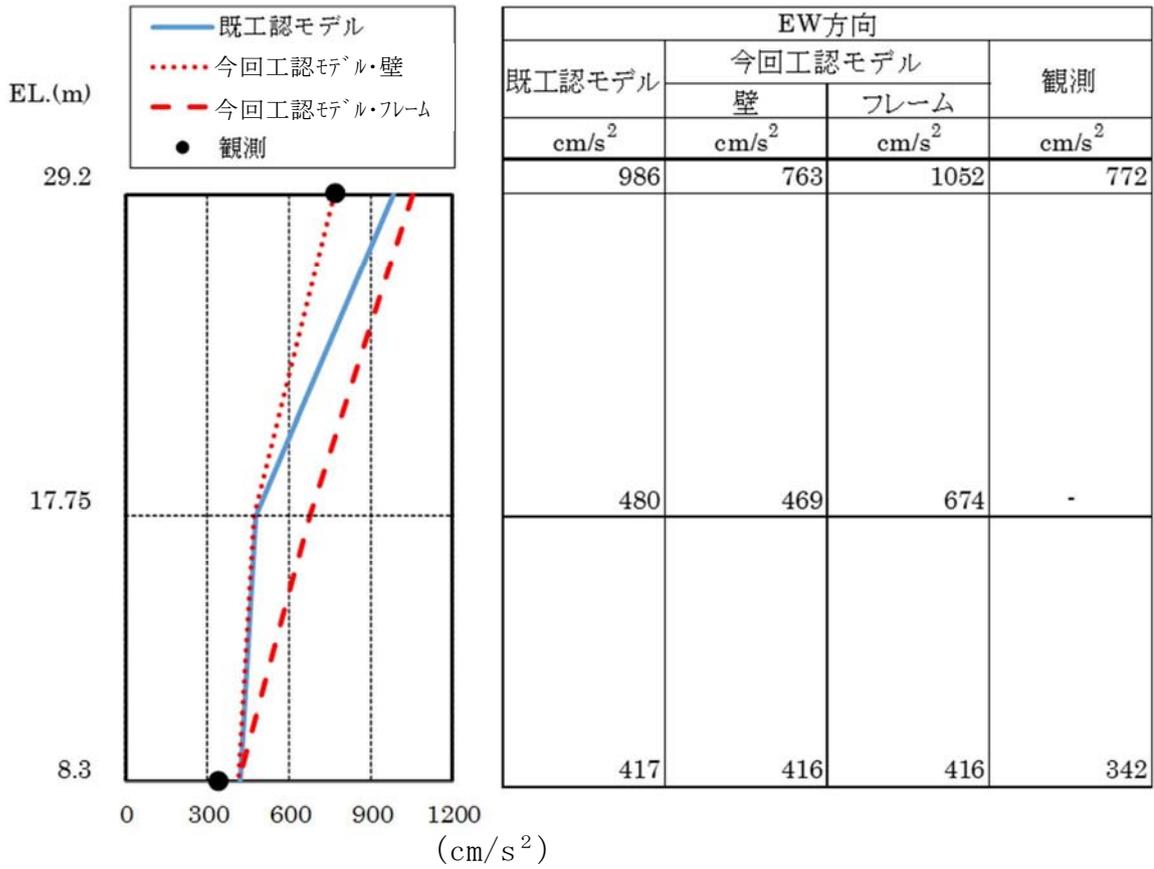
(鉛直方向)

第2-2図 地震応答解析の概要図(今回工認での評価)

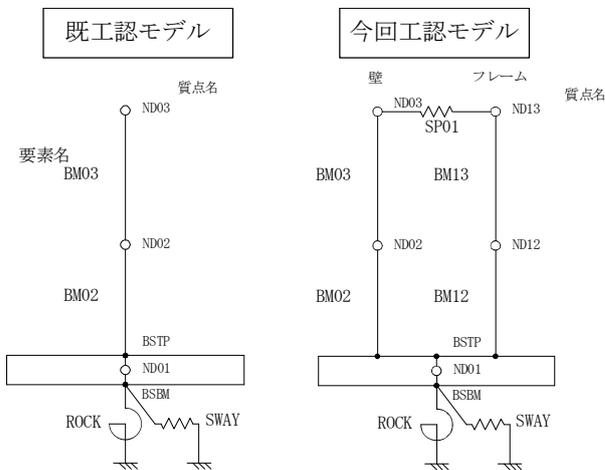


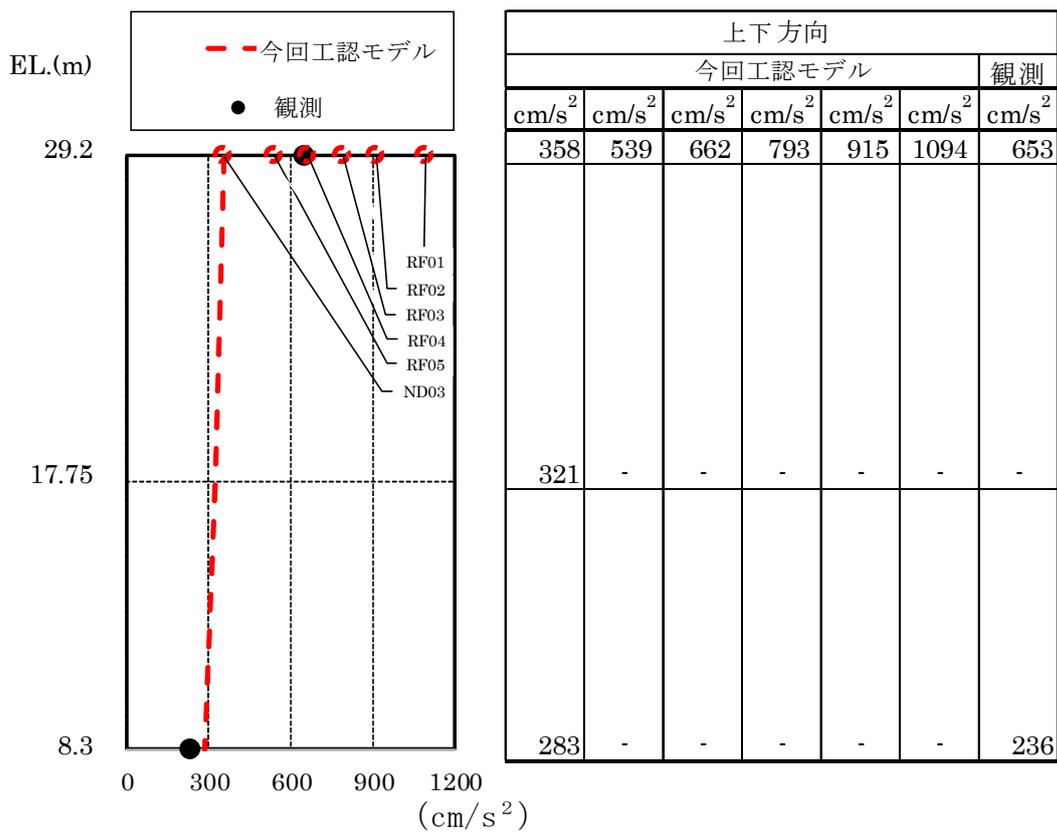
第2-3図 (1/3) 最大応答加速度分布の比較 (NS方向)



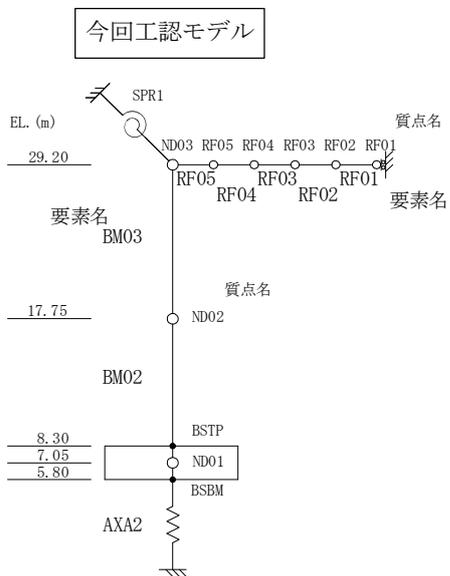


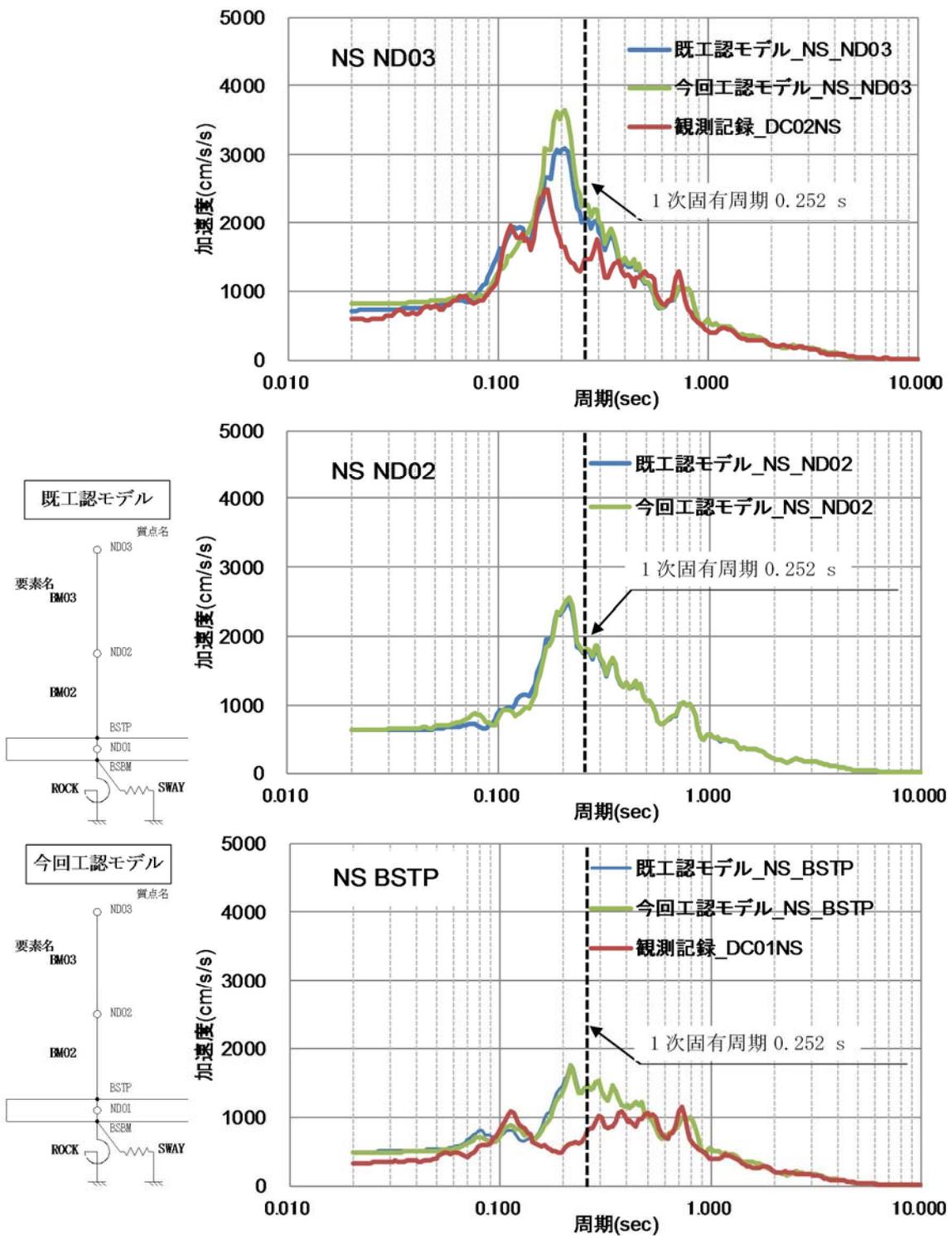
第2-3図 (2/3) 最大応答加速度分布の比較 (EW方向)



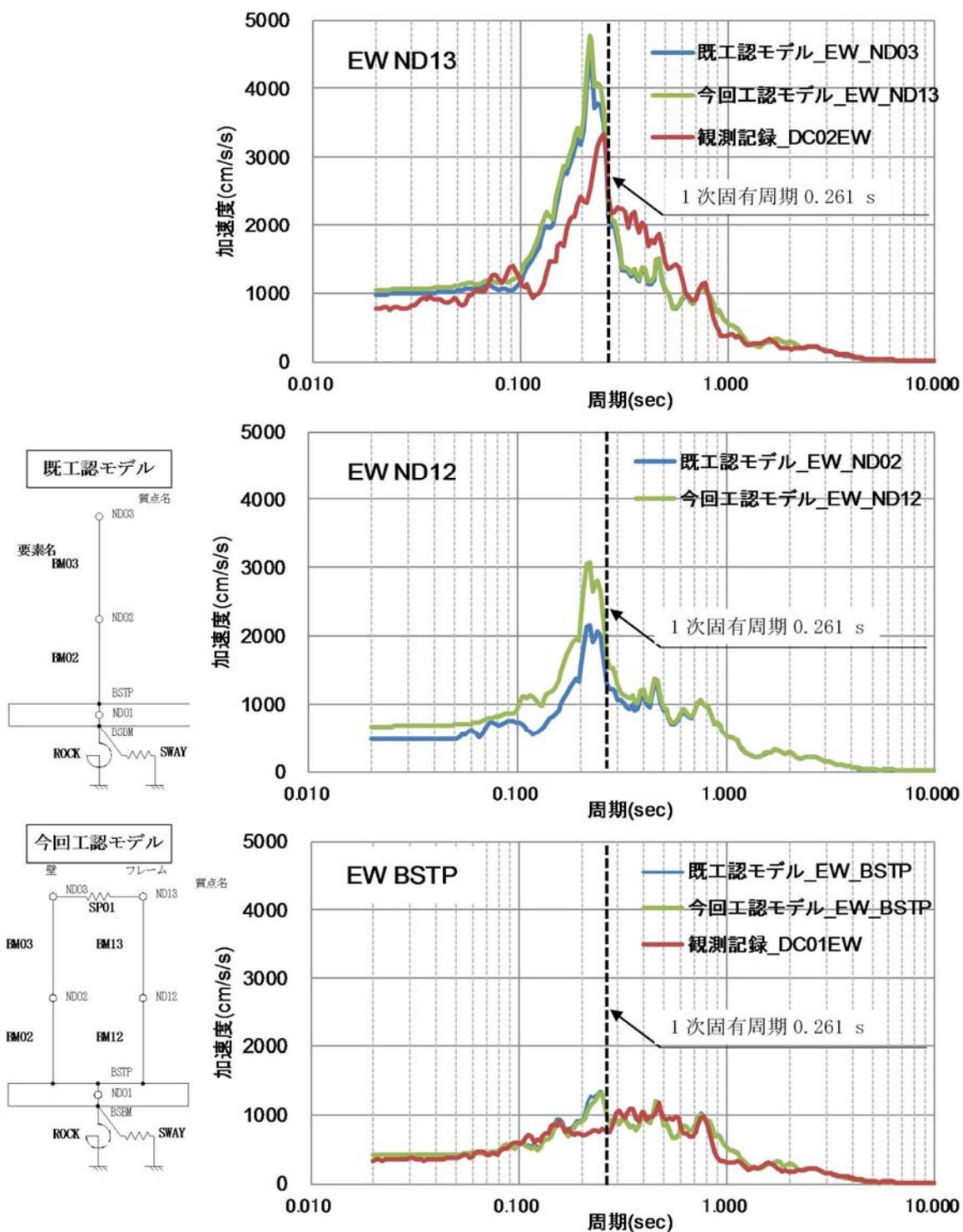


第2-3図 (3/3) 最大応答加速度分布の比較 (上下方向)

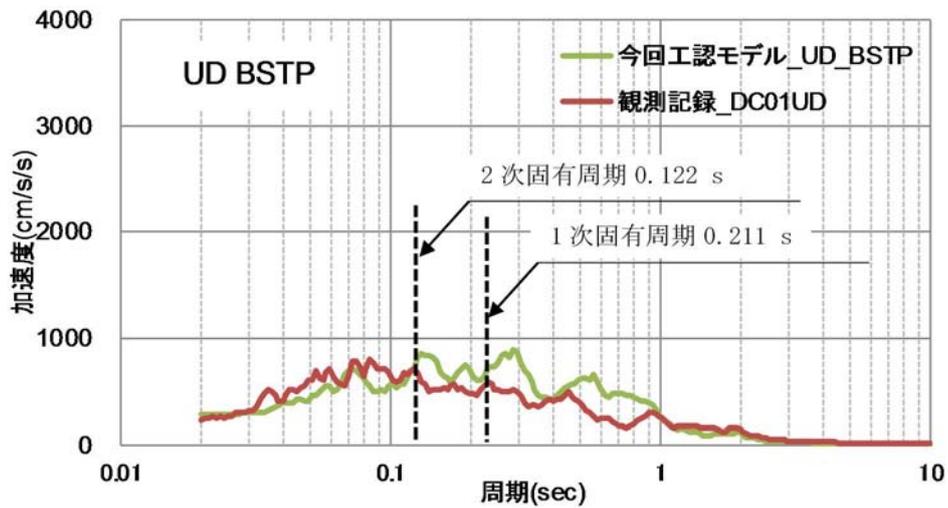
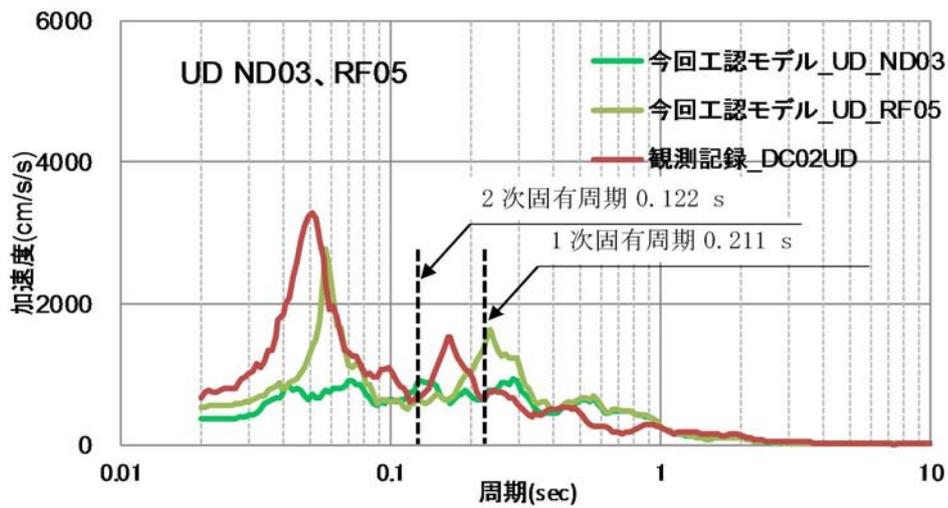




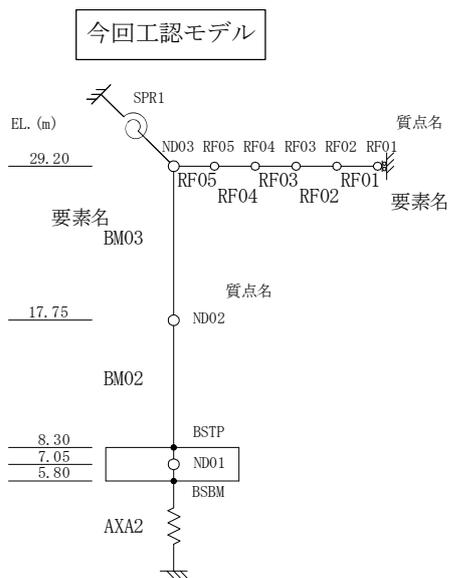
第2-4図 (1/3) 床応答スペクトルの比較 (NS方向, h = 5%)



第2-4図 (2/3) 床応答スペクトルの比較 (EW方向, h = 5%)



第2-4図 (3/3) 床応答スペクトルの比較 (上下方向, h = 5%)



【補足資料3】有効入力動の適用性について

1. 既工認と今回工認における地盤ばね及び入力地震動算出方法の比較

既工認では、杭を考慮した地盤ばね算出に三次元薄層要素法を用いていたが、建屋地震応答解析モデルへの入力動には基礎版底面レベルにおける露頭波を用いていた。三次元薄層要素法とは、水平方向には弾性波動論、深さ方向には有限要素法で定式化した解析手法である。

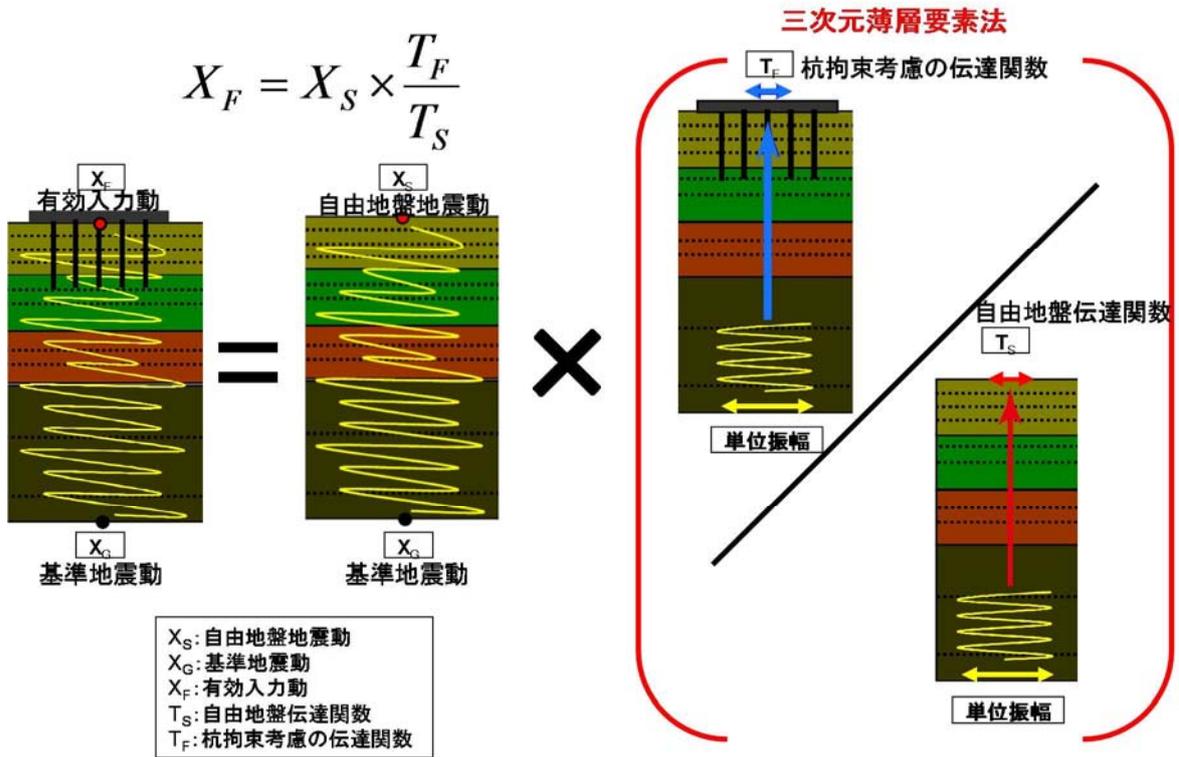
今回工認では、入力地震動評価にも同手法により杭の拘束効果を考慮した基礎版底面レベルにおける有効入力動を用いることにより、地盤ばねの設定との整合を図り、より実状に近い評価とする。第1-1図に既工認と今回工認における地盤ばね及び入力地震動算出方法の比較を示す。

	建屋モデル	①地盤ばね	②入力地震動
既工認		<p>三次元薄層要素法により杭を考慮した地盤ばねを算出</p> <p>杭の存在を考慮している範囲</p>	<p>一次元波動論により入力地震動を算出</p> <p>自由地盤地震動</p> <p>基準地震動</p>
今回工認		<p>三次元薄層要素法により杭を考慮した地盤ばねを算出</p>	<p>三次元薄層要素法により杭の拘束効果を考慮した入力地震動を算出</p> <p>有効入力動</p> <p>基準地震動</p>

第1-1図 既工認と今回工認における地盤ばね及び入力地震動算出方法の比較

2. 三次元薄層要素法による杭の拘束効果を考慮した有効入力動の算出方法

一次元波動論から算出される自由地盤地震動に三次元薄層要素法により算出した伝達関数比率を乗じて杭の拘束効果を考慮した有効入力動を算出する。算出方法を第2-1図に示す。

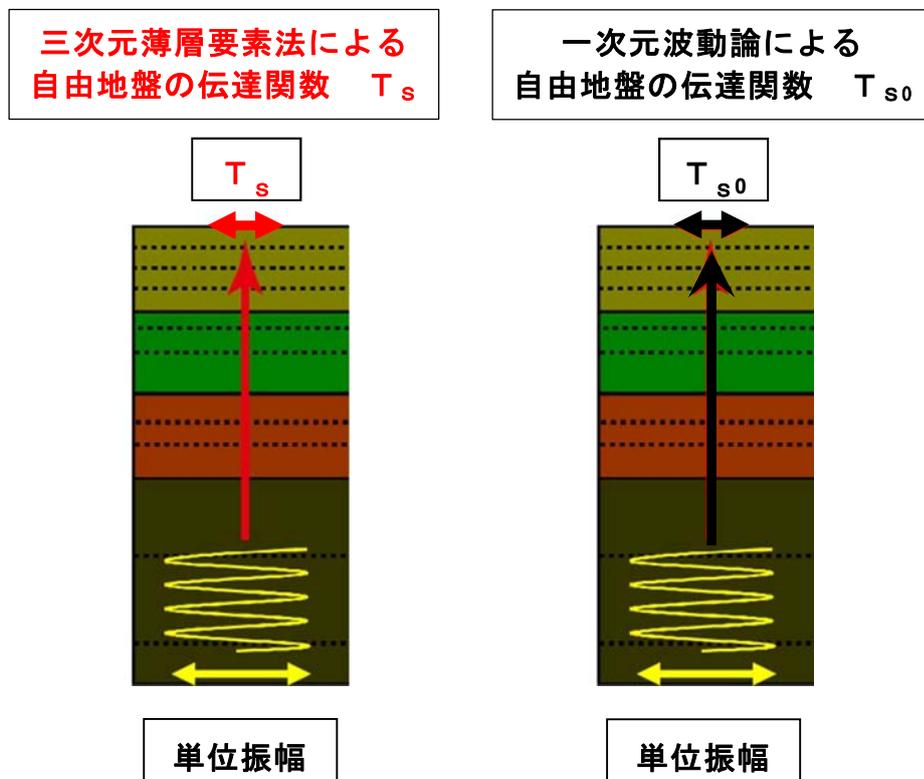


第2-1図 三次元薄層要素法による有効入力動の算出方法

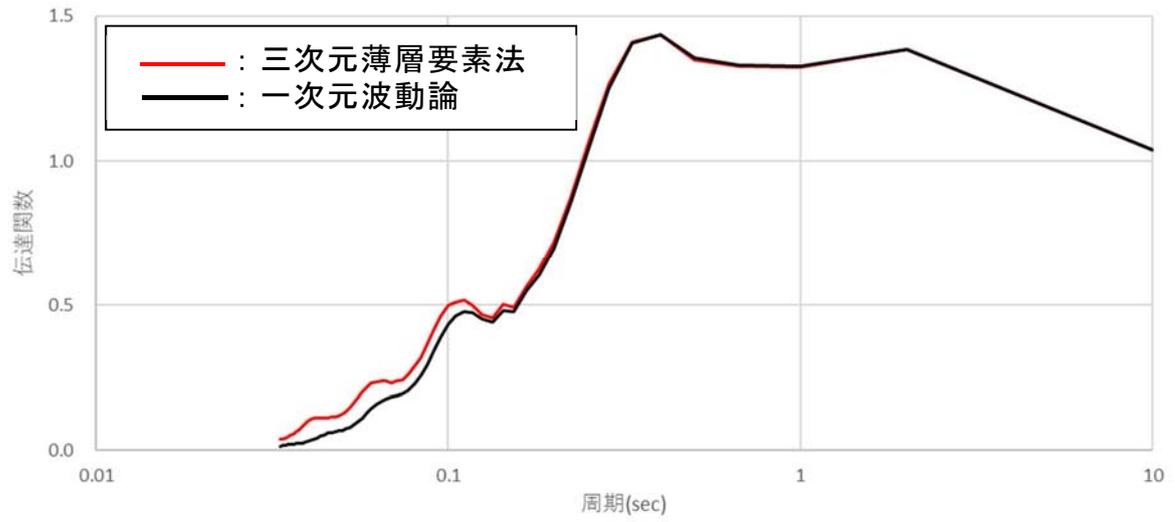
3. 三次元薄層要素法の妥当性確認

三次元薄層要素法による有効入力動の妥当性を規格基準等の記載より確認した。規格基準等には、杭基礎の拘束効果を考慮した有効入力動を設定すること及びその評価に三次元薄層要素法が用いられることが示されている。確認した規格基準等の抜粋を「補足資料4 規格基準等での有効入力動に関する記載」に示す。

また、三次元薄層要素法の妥当性を確認するため、三次元薄層要素法及び一次元波動論より算定した自由地盤の伝達関数を比較した。地盤物性は S_s —D1Hによる等価物性を代表として用いた。第3-1図に比較対象概要図、第3-2図に一次元波動論及び三次元薄層要素法による自由地盤の伝達関数を比較して示す。両者同様な結果が得られていることから三次元薄層要素法の妥当性を確認した。



第3-1図 比較対象概要図

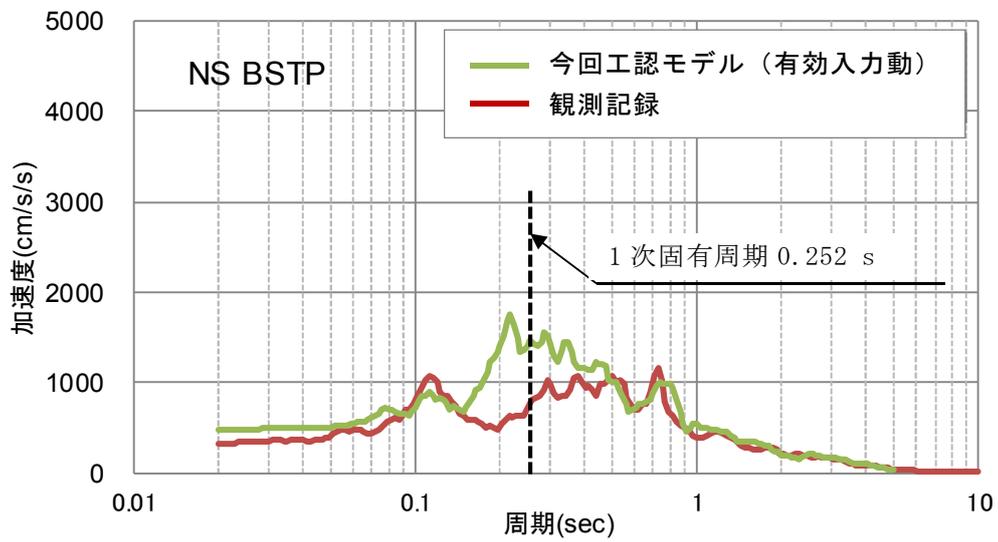
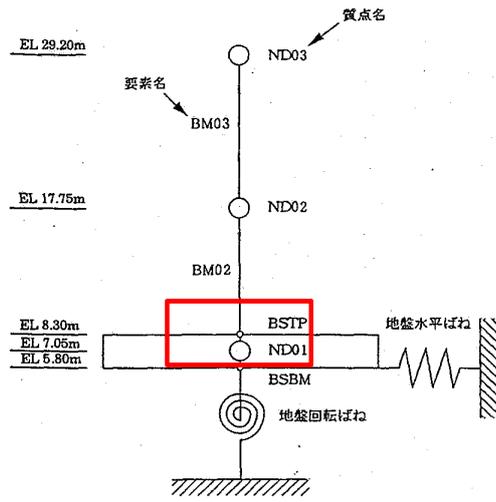


第3-2図 自由地盤伝達関数の比較

4. 杭の拘束効果を考慮した有効入力動の適用性の検討

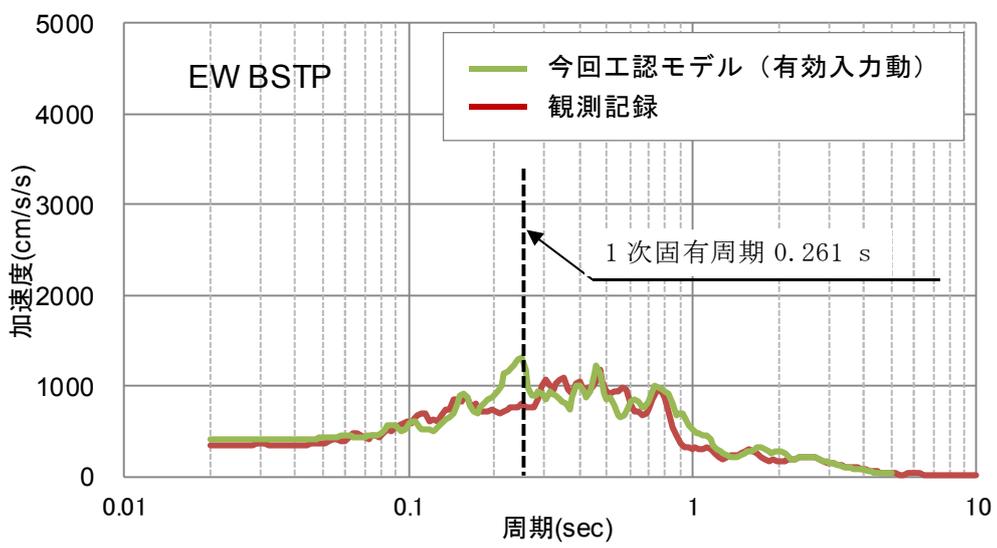
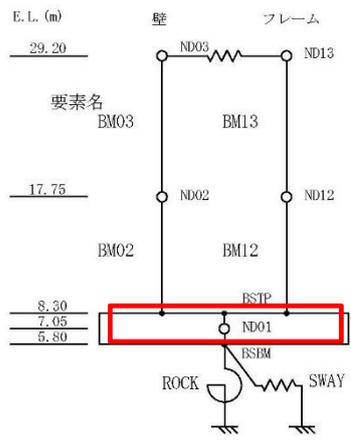
使用済燃料乾式貯蔵建屋への杭の拘束効果を考慮した有効入力動の適用性を確認するため、東北地方太平洋沖地震の観測記録を用いたシミュレーション解析を行った。地震観測記録と有効入力動を用いた解析結果の基礎上の床応答スペクトルの比較を第4-1図に示す。

有効入力動を用いた解析結果は、建屋の1次固有周期近傍で観測記録より大きいことより、使用済燃料乾式貯蔵建屋への杭の拘束効果を考慮した有効入力動の適用性を確認した。

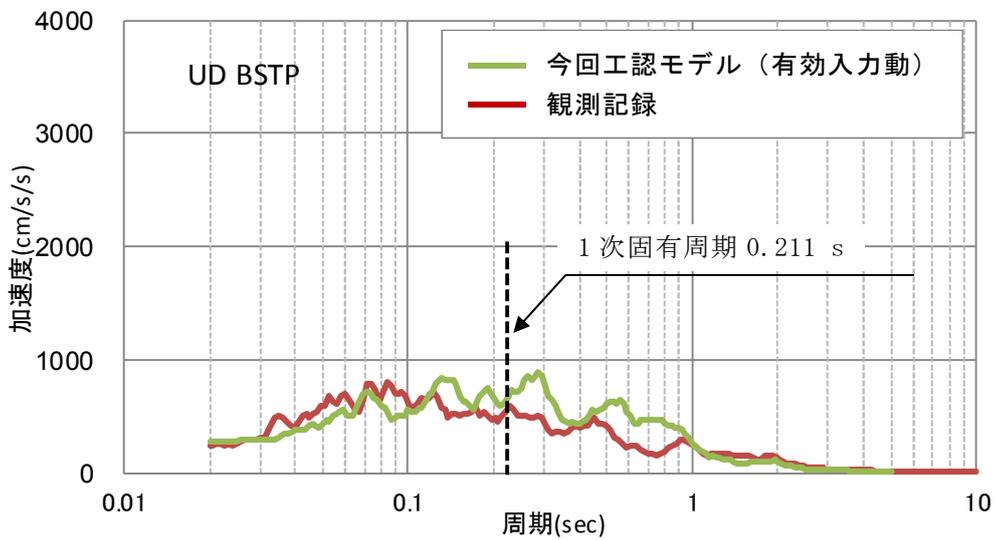
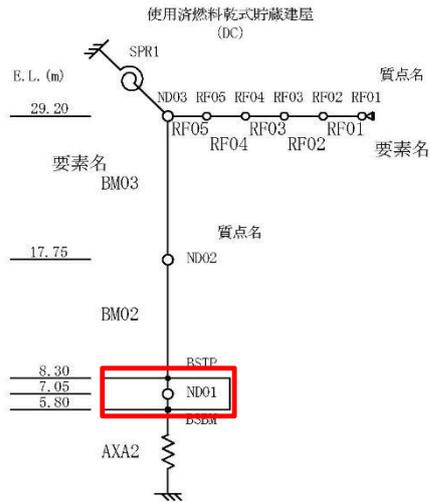


第4-1図 (1/3) 床応答スペクトルの比較

(NS方向, $h = 5\%$)



第4-1図 (2/3) 床応答スペクトルの比較
(EW方向, h = 5%)



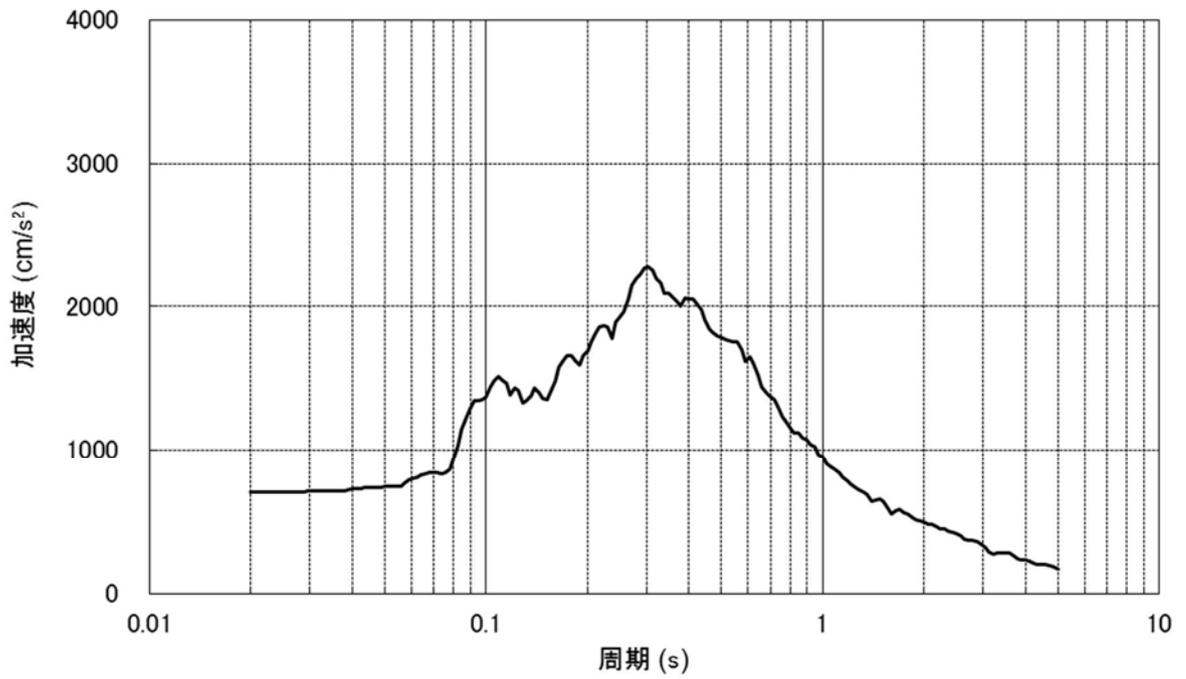
第4-1図 (3/3) 床応答スペクトルの比較 (上下方向, $h = 5\%$)

5. 基準地震動 S_s に対する有効入力動と自由地盤地震動の比較

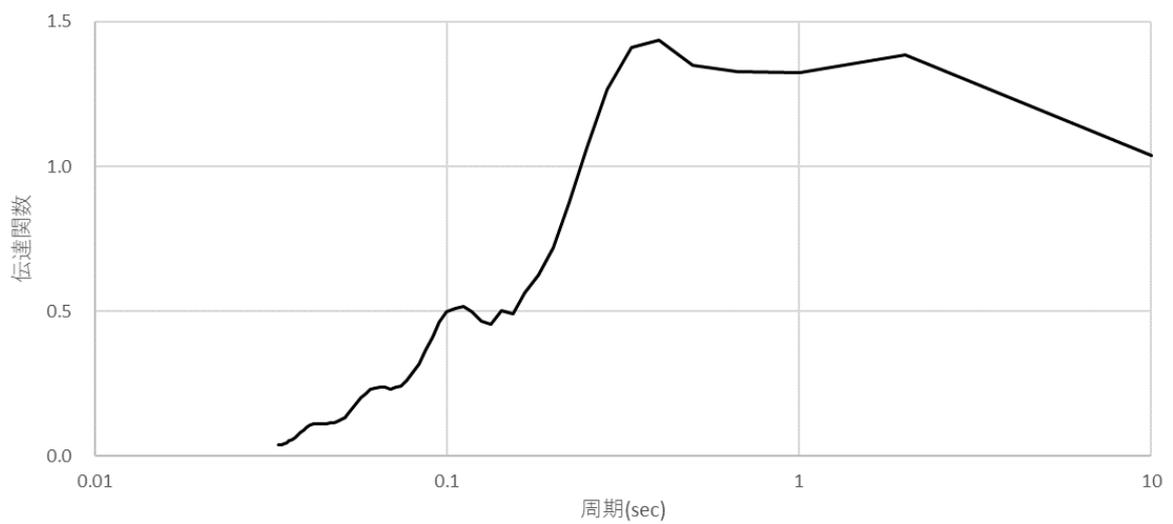
基準地震動 S_s に対する杭の拘束効果を考慮した有効入力動を既工認手法による自由地盤地震動と比較を行った。比較は代表として基準地震動 $S_s - D1H$ に対して行った。

第5-1図に一次元波動論により算定した自由地盤地震動 X_s の加速度応答スペクトルを示す。三次元薄層要素法により算定した自由地盤の伝達関数 T_s 、杭拘束考慮の伝達関数 T_F を第5-2図、第5-3図にそれぞれ示す。また、 T_s に対する T_F の比を第5-4図に示す。最終的に算定された、NS方向及びEW方向の有効入力動の加速度応答スペクトルを自由地盤地震動の加速度応答スペクトルと比較して第5-5図に示す。

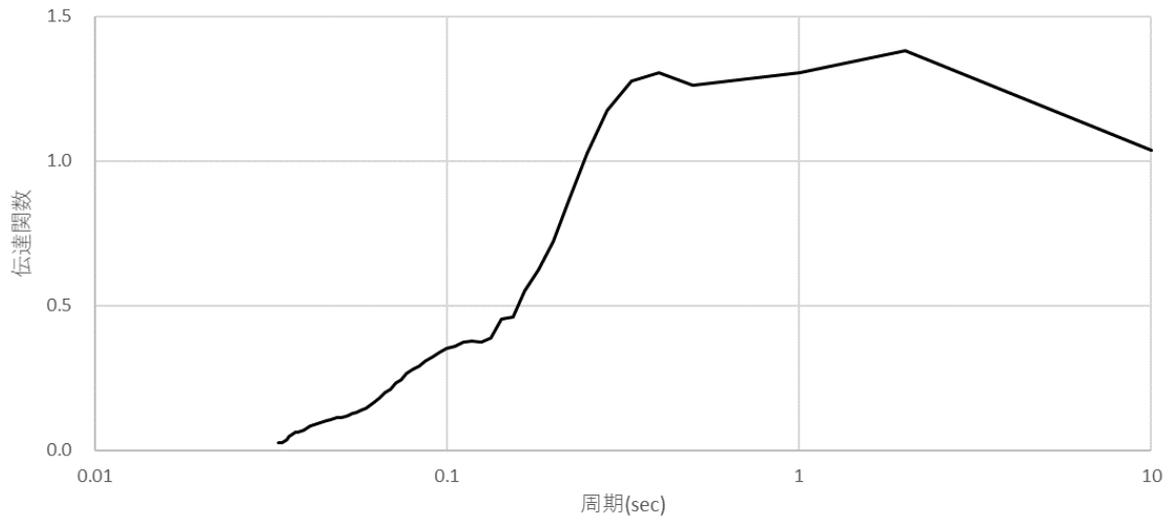
杭の拘束効果を考慮した有効入力動は自由地盤地震動よりやや小さいことを確認した。



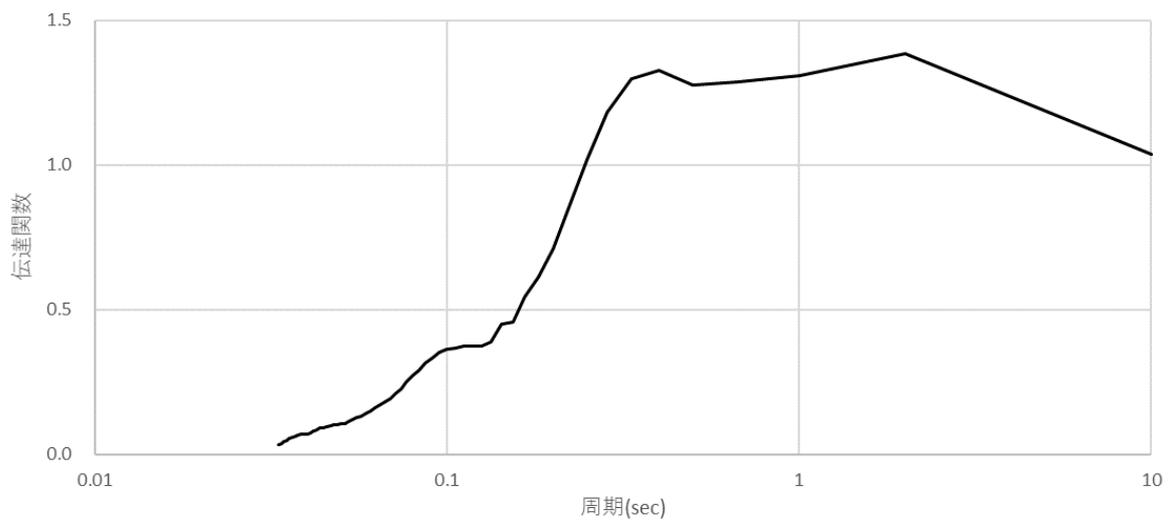
第5-1図 自由地盤地震動 (X_s) の加速度応答スペクトル
 ($S_s - D 1 H, h = 5\%$)



第5-2図 自由地盤伝達関数 (T_s)

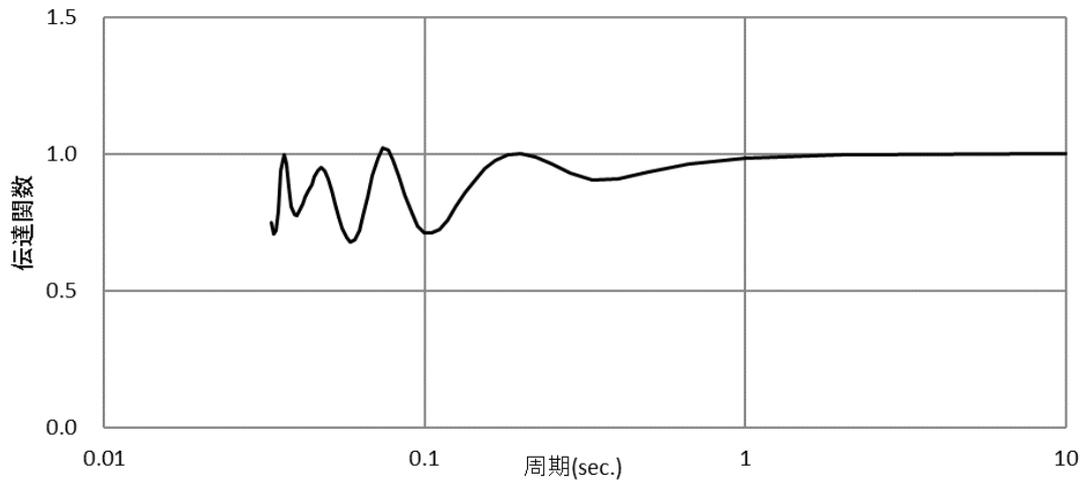


(a) N S 方向

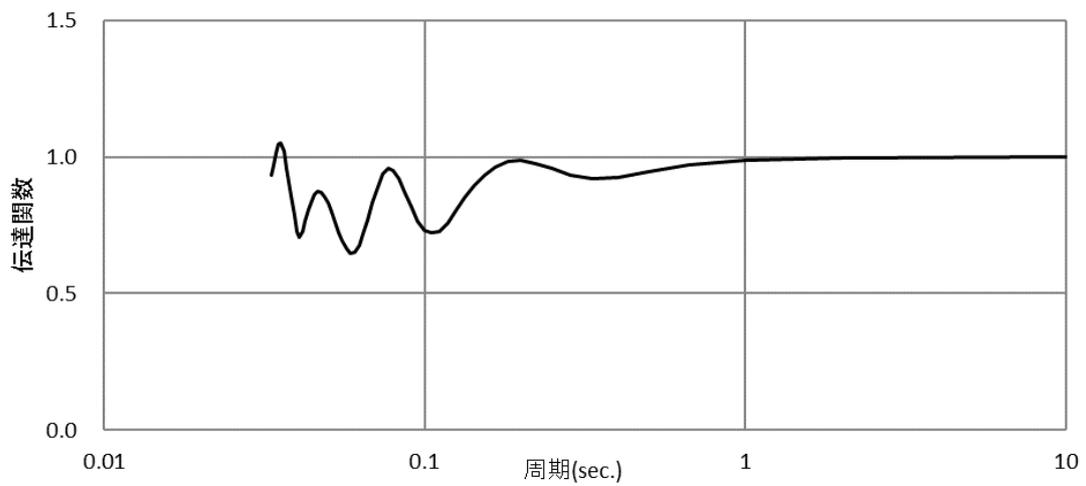


(b) E W 方向

第5-3図 杭拘束考慮の伝達関数 (T_F)

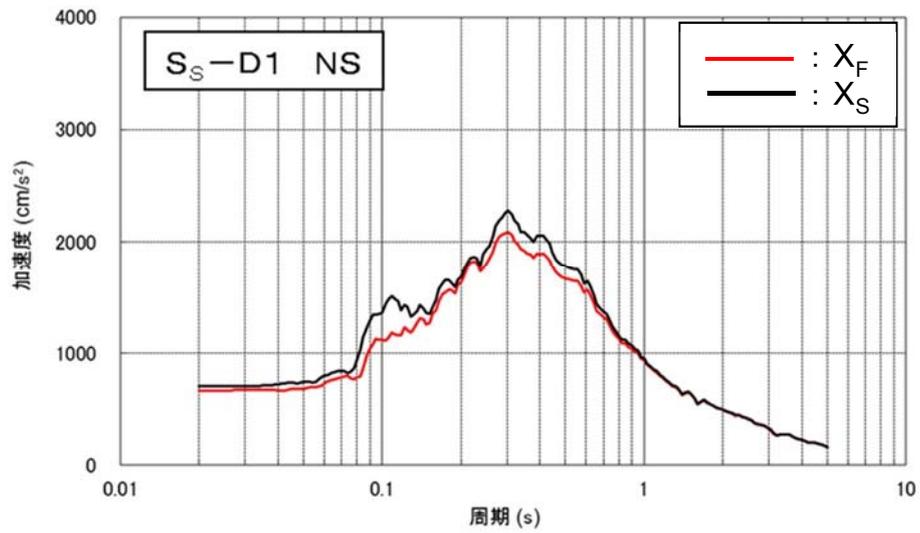


(a) N S 方向

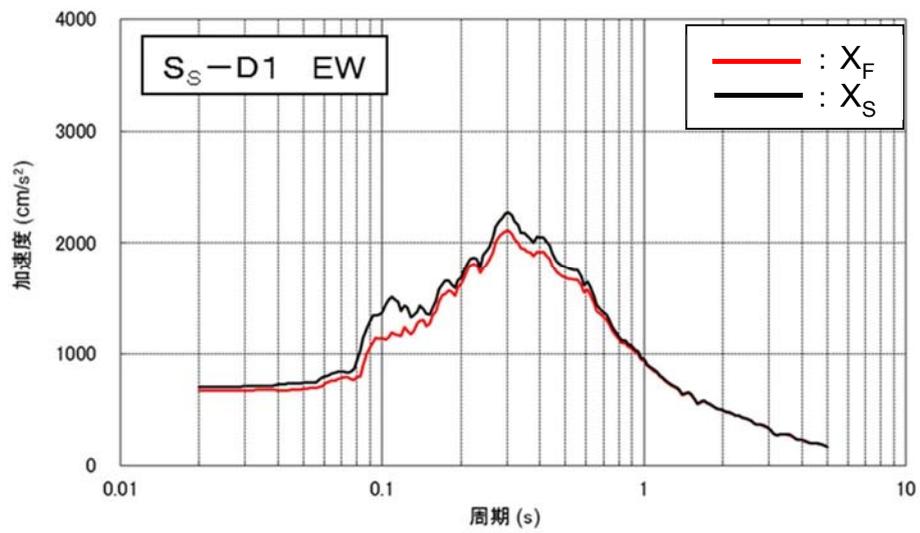


(b) E W 方向

第5-4図 T_S に対する T_F の比



(a) N S 方向



(b) E W 方向

第 5-5 図 加速度応答スペクトルの比較 (h = 5%)

【補足資料 4】規格基準等での有効入力動に関する記載

1. J E A G 4616-2003 乾式キャスク貯蔵建屋基礎構造の設計に関する技術指針（日本電気協会，2003）

b) FEM モデル

FEM モデルは、一般に地盤及び杭基礎を二次元にモデル化し、杭基礎全体モデルとして応答解析を行う。FEM モデルでは、地盤を平面ひずみ要素、杭を梁要素、建屋を質点系あるいは平面ひずみ要素にモデル化する。また、地盤を軸対称要素、群杭をリング杭要素にモデル化した軸対称 FEM モデル^(7.3.2-8)による応答解析も可能である。地盤モデルの側面と底面の境界には、波動エネルギーの逸散を考慮するため、エネルギー伝達境界あるいは粘性境界などを設けて地盤の半無限性を考慮する。FEM モデルでは、群杭と地盤を直接モデル化することが可能であり、群杭効果や埋込み効果を考慮できる。また、液状化対策などの目的で実施する地盤改良の効果を直接取り込むことができる。

杭体や地盤の非線形性は、それぞれの要素に非線形特性を組み込んだモデルによる時刻歴応答解析により考慮する。

なお、二次元 FEM モデルや軸対称 FEM モデルによる解析では、三次元的に配置されている群杭を適切に二次元又は軸対称にモデル化する必要がある。

c) SR モデル

SR モデルでは、建屋を質点系にモデル化し、基礎底面位置に群杭と地盤との動的相互作用を考慮して評価した群杭ばね（水平ばねと回転ばね）を取り付けてモデル化する。基礎底面の群杭ばねは、地盤の成層性と半無限性を考慮した三次元薄層法による加振解などを用いて、群杭効果を考慮して評価することができる。また、杭本数が多本数となる場合には、2本杭の柔性を重ね合わせる方法^{(7.3.2-9)、(7.3.2-10)}や群杭係数を用いる方法などの近似解法^{(7.3.2-11)、(7.3.2-12)、(7.3.2-13)}により求めることができる。貯蔵建屋に埋込みが有る場合の側面地盤ばねは、質点系モデルと同様に Novak の方法などにより評価する。群杭ばねは、基礎スラブを剛体として評価した場合、水平ばね、回転ばね、水平・回転連成ばねの3成分が算定されるが、水平・回転連成ばねの影響は小さいため、通常考慮しなくてもよい。

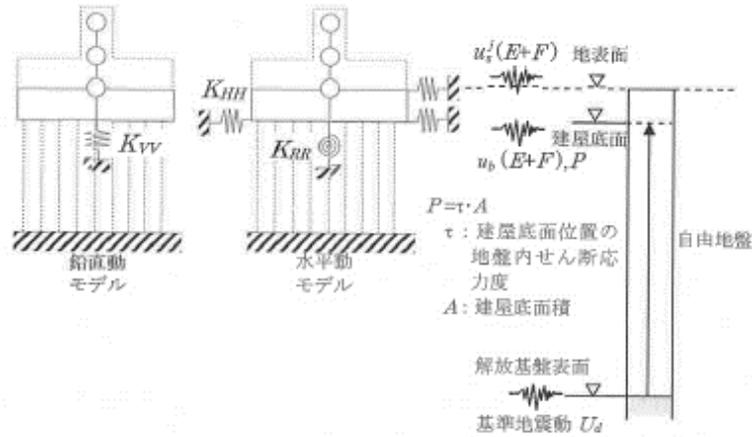
群杭ばねは、複素数として振動数に依存した形で求められるが、時刻歴応答解析に用いる場合は「原子力発電所耐震設計技術指針 追補版（JEAG 4601）」（日本電気協会）による近似法と同様に、地盤ばねの剛性に相当する実数部は振動数 $\omega = 0$ における値、すなわち、振動数に依存しない一定値として取扱うこととする。減衰に相当する虚数部は、建屋連成系の1次振動数 ω_1 における減衰定数 h_1 を通る ω の1次式とする。

なお、SR モデルによって地震応答解析を行う場合には、杭体の応力と変形は

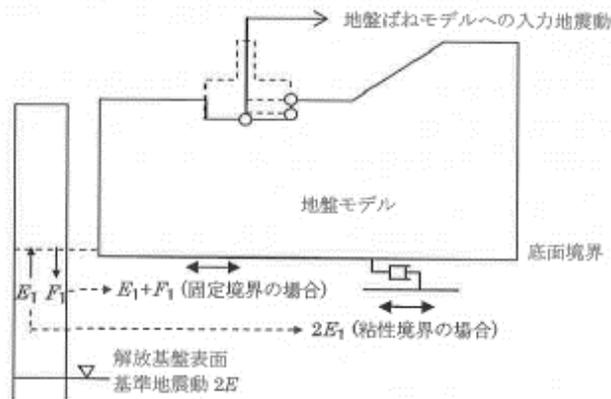
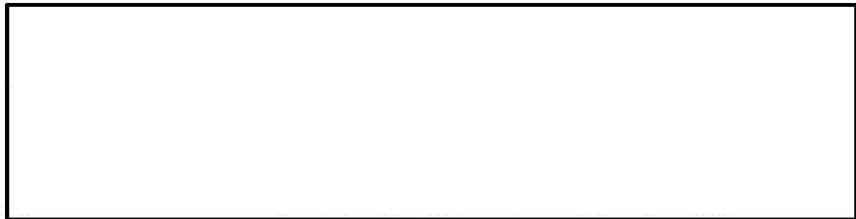
2. J E A C 4616-2009 乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵建屋の基礎構造の設計に関する技術規程（日本電気協会，2010）

る。このとき、補正水平力 P は建屋底面位置における地盤のせん断応力度と建屋底面積との積として求める。

杭応答は、応答変位法により評価する。杭に作用する変動軸力は地震応答解析から得られる建屋の最大応答転倒モーメントを適切な方法により杭位置に配分して求める。杭の最大・最小軸力は、変動軸力に長期荷重による軸力及び鉛直方向の地震応答解析による軸力を組み合わせて評価する。



附図2.6-5 地盤ばねモデルへの入力地震動（一次元波動論による場合）



附図2.6-6 地盤ばねモデルへの入力地震動（離散系モデルによる場合）

3. 入門・建物と地盤との動的相互作用（日本建築学会，1996）

3.3.3 基礎入力動

基礎入力動は基礎の剛性が地盤震動を拘束する効果を考慮した建物-基礎系への入力地震動であり、解析的には図 3.13 に示すごとく入力地震動を受けたときの無質量・剛体基礎の応答として求めることができる。鉛直入射 S 波 $E_0 \exp(i\omega t)$ に対する R1 基礎の基礎入力動を図 3.14 に示す。縦軸は基礎入力動の水平成分 Δ^* および回転成分 Φ^* に基礎の半幅 b を掛けた基礎端での上下変位 $\Phi^* b$ を地表面の応答振幅 U_S で基準化した値である。R1 基礎は地中梁程度の埋め込みを有する直接基礎であるが、埋め込みのない地表面基礎では水平の基礎入力動は振幅比 Δ^*/U_S が 1 で回転成分 Φ^* はゼロとなる。すなわち、基礎入力動は地表面の応答そのものになる。基礎が若干埋め込まれたことにより、上記の地表面基礎での基礎入力動の特性とは異なり、特に回転成分は振動数が高くなるにつれて大きくなる。水平成分の基礎入力動の振幅比は均質地盤 G1 においては振動数とともに減少するが、成層地盤 G2 と G3 においては地盤の固有振動数の影響を受けて波打ち、固有振動数付近では谷になる。これは地盤の固有振動数で共振する地盤の応答を基礎が拘束していることに起因する。

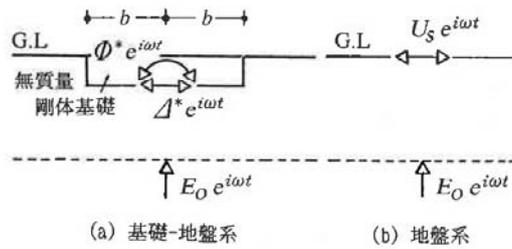


図 3.13 基礎入力動

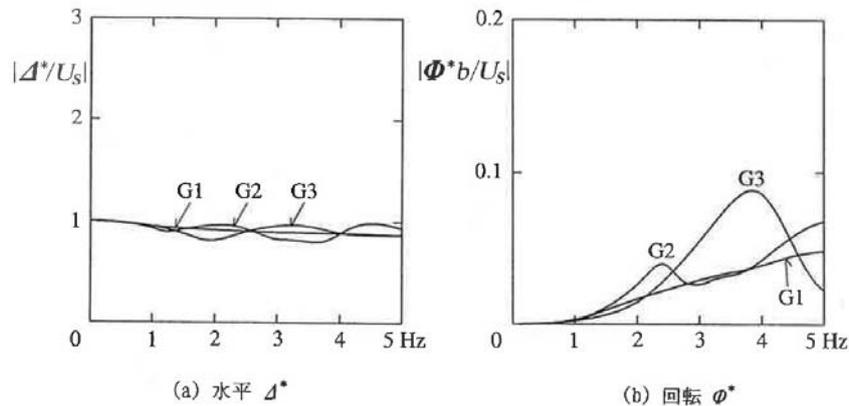


図 3.14 基礎入力動：R1 基礎

6.3.4 プログラムの流れ

図 6.3.6 に、直接境界要素法による動的相互作用解析プログラムの流れを示し、前 3 項の数式および留意点の参照箇所を位置付けた。まず、問題の定義において地盤物性、基礎形状、ならびに擾乱の種類が定義される。次に、境界要素法の要素積分とマトリックス解の評価が行われ、目的とする動的相互作用基本物理量が求められる。

境界要素積分の評価においては、対象振動数範囲に相応しい要素分割、使用するグリーン関数の選択と評価、ならびに境界要素特異積分および非特異積分の手法の選択が行われる。評価された影響関数（境界積分結果）にマトリックス演算を行う際には、外部問題において発生する内部固有値の取り扱いに注意が必要となる。

6.4 薄層要素法

薄層要素法または薄層法とは、弾性地盤における正弦的な波動伝播を求めるのに際し、地盤を水平な薄層に分割して水平方向には均質な連続体とするが、深さ方向には分割面で離散的に扱う方法に対して名付けられたものである¹⁷⁷⁾。当初、この方法は有限要素法の普及とも関係して、地盤を規則領域と不規則領域とに分けたとき、規則領域の無限の広がり代わるエネルギー伝達境界の設定に応用されてきた^{178)-181)等}。その後、同じ薄層モデルを用いて、任意節面上に正弦的な点加振を与えたときの波動伝播の解が解析的に導きだされた^{35), 182), 183)}。その結果、これを成層地盤のグリーン関数として用いることにより、サブストラクチャー法に基づいた三次元の動的相互作用解析が著しく簡易化されることになった。

一般に、弾性地盤における波動伝播の解は波数に関する無限積分で表され、その数値計算は極めて煩雑となる。しかしながら、薄層法ではこの無限積分が解析的に求められ、解がいわゆる Closed form で与えられる。したがって、計算効率の点で極めて有利となるため、

本節では、この薄層法について、その基礎方程式と導出される解の最終表現を示し、解の精度を検討して薄層モデル設定の際の注意点を述べる。また、薄層法の適用例として、ここでは群杭の動的相互作用問題をとりあげ、若干の数値解析例を紹介する。

6.4.1 薄層モデルにおける加振解

まず、図 6.4.1 のような半無限成層地盤に対し、薄層モデルを以下のように設定する。

- 1) 地盤の深さ方向にモデル化領域を定め、その成層状況および解析精度を考慮して多数の水平な薄層に分割する。ここに、各薄層は均質とし、層内では深さ方向の変位分布を直線に仮定する。
- 2) 各薄層節面に対し、その節面番号を地表面より順次 1, 2, …, N と付す。この番号は節面下の層要素についても共用する。
- 3) 地盤の半無限性を考慮するため、最下層（第 N 層）をダッシュポットまたは半無限要素でモデル化する [図 6.4.2 参照]。

(2) 薄層領域の精度

10層モデルを用いて、最下層がダッシュポットの場合と半無限境界の場合について薄層領域による解の精度を検討する。ただし、前述の薄層分割による精度を考え、ここでは $r/H \geq 3$ および $n \geq 5$ をほぼ満足するようにモデルを設定してある。 $r/L=1/2, 1$ の場合について、 $\omega L/V_s$ を変数として求めた変位関数の比較を図 6.4.7 に示す。ここでも同様に、せん断波の1波長： λ とモデル深さ： L の関係を考えて、

$$m = \frac{\lambda}{L} \rightarrow \frac{\omega L}{V_s} = \frac{2\pi}{m} \tag{6.4.21}$$

一般の離散化手法では、対象振動数に対してモデル深さを $m=1$ 程度に選ぶ。そこで、ここでも式 (6.4.21) から $0 < \omega L/V_s \leq 6.0$ の範囲を対象とし、図の横軸には上記の $m=\lambda/L$ も示した。

まず、 r/L に着目してモデルの設定深さを考えると、図からはダッシュポットモデルの場合に $r/L \leq 1/2$ 、半無限境界モデルでは $r/L \leq 1$ となるように薄層領域を設けるのが望ましいといえる。さらにこのとき、ダッシュポットモデルおよび半無限境界モデルとも、水平加振に対しては $m \leq 4$ ($\omega L/V_s \geq 1.5$)、上下加振に対しては少なくとも $m \leq 2$ ($\omega L/V_s \geq 3.0$) となるように設定することも必要である。結局、ここでも加振点—受振点間距離： r とせん断波の1波長： λ の両者に対するバランスが問題となる。

(3) 薄層モデルの設定方法

以上の精度検討をまとめると、薄層モデルを設定する際の指標として、薄層分割については表 6.4.1 が、薄層領域については表 6.4.2 が提唱できよう。もちろん、現実の地盤は層序が複雑なこともあって、このように単純には設定できない場合もある。しかしながら、同表は薄層モデル設定の際のめやすになろう。

表 6.4.1 薄層分割 (分割層厚) の設定指標

r/H		$\lambda/H (\omega H/V_s)$	
少なくとも	できれば	少なくとも	できれば
>3	≥ 4	$>5 (\leq 1.25)$	$\geq 6 (\leq 1.0)$

表 6.4.2 薄層領域 (モデル深さ) の設定指標

r/L		$\lambda/L (\omega L/V_s)$	
ダッシュポット	半無限境界	水平加振	上下加振
$\leq 1/2$	≤ 1	$\leq 4 (\geq 1.5)$	$\leq 2 (\geq 3.0)$

6.4.4 薄層モデルによる群杭の動的相互作用解析

計算効率や成層地盤への適用性などにより、薄層モデルは埋込み基礎や杭基礎の三次元的相互作用解析に広く用いられている。ここでは、最近注目されている群杭の動的相互作用解析について数値計算例を紹介する。

いま、図 6.4.8 (a) のような構造物—杭—地盤系を考え、サブストラクチャー法を適用して同

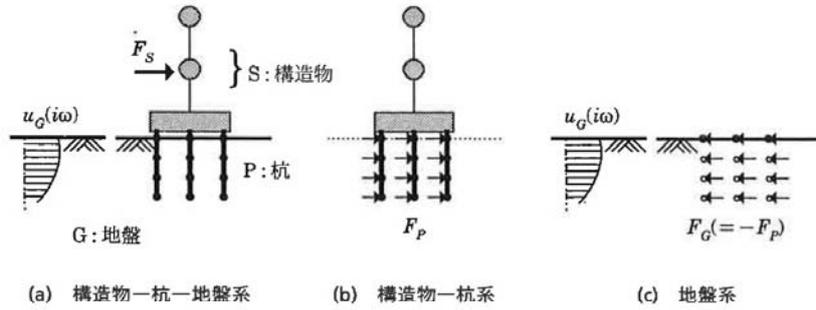


図 6.4.8 サブストラクチャー法による構造物—杭系と地盤系の分離

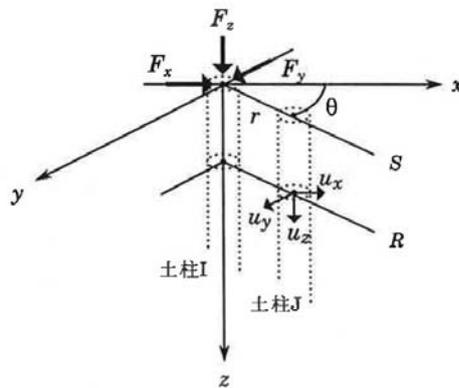


図 6.4.9 地盤系における加振力と変位の関係

図 (b), (c) のように構造物—杭系と地盤系に分離する。分離にあたっては、容積法を採用するのがこの場合には便利である。まず、同図 (c) の地盤系に着目して薄層モデルを設定し、杭と地盤とが連続する節点を薄層節面上に設ける。このように空間的に分布された節点群に対し、先の薄層解を適用して変位と加振力の関係式を求める。このとき、図 6.4.9 を参照して、杭と置き換わるすべての土柱に対し $I \neq J$ の場合には式 (6.4.8) を、 $I = J$ の場合には式 (6.4.11) または式 (6.4.13) を適用すると、変位と加振力の関係は次式で表す。

$$\begin{Bmatrix} \{u_x\} \\ \{u_y\} \\ \{u_z\} \end{Bmatrix} = [A(i\omega)] \begin{Bmatrix} \{F_x\} \\ \{F_y\} \\ \{F_z\} \end{Bmatrix} \quad (6.4.22)$$

または、これを簡単に $\{u\} = [A]\{F\}$ と表す。この関係式が求められていれば、以後はサブストラクチャー法に従って定式化すればよい。すなわち、図 6.4.8 を参照して相互作用力 F_P 、 F_G の釣合い条件と変位の連続条件を考慮すると、最終的な運動方程式は以下のように導かれる。

$$\left(\begin{bmatrix} [K_{SS}] & [K_{SP}] \\ [K_{PS}] & [K_{PP}] - [K_{PP}^G] + [A]^{-1} \end{bmatrix} - \omega^2 \begin{bmatrix} [M_S] \\ [M_P] - [M_P^G] \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} \{u_S\} \\ \{u_P\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F_S\} \\ \{F^*\} \end{Bmatrix} \quad (6.4.23)$$

ここに,

$$\{F^*\} = [A]^{-1} \{u_0\}$$

ただし, $[K_{SS}]$, $[K_{PP}]$, ... および $[M_S]$, $[M_P]$, ... は, それぞれ構造物: S と杭: P の離散化表示による剛性マトリックスと質量マトリックスを意味する. とくに, $[K_{PP}^0]$ と $[M_P^0]$ は杭と同体積の土柱の剛性マトリックスと質量マトリックスを表す. また, $\{F_S\}$ は構造物に外部から作用する加振力ベクトルで, $\{F^*\}$ は地震時に杭に作用するドライビングフォースベクトルである.

数値例¹⁵⁾として, 杭径: B に対する杭中心間隔: S の比が $S/B=2.5$ の場合について, 杭本数: N をパラメーターに求めた群杭の水平インピーダンスを図 6.4.10 に示す. 同図には参考のため単

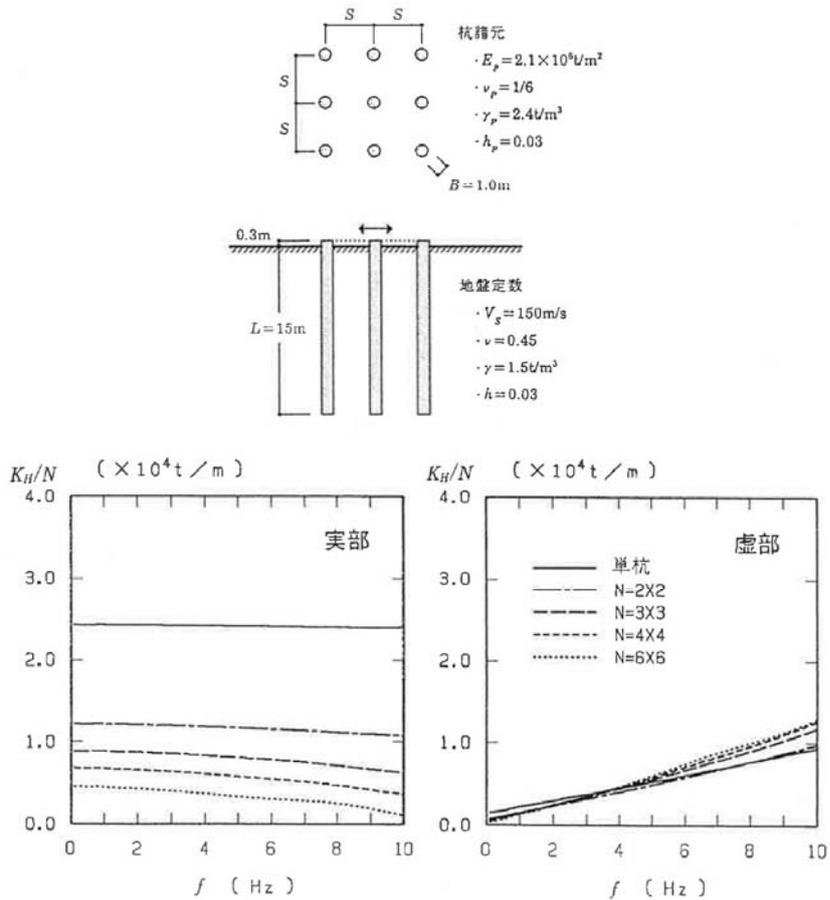


図 6.4.10 群杭の水平インピーダンス (杭間隔比: $S/B=2.5$)

4. 建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計（日本建築学会，2006）

1.2.3 慣性の相互作用と入力の相互作用

相互作用を理解するには、図1.2.4に示すように、建物と地盤とを分離して考えると分かりやすい。この考え方は、後に、動的サブストラクチャー法として解説されているが、ここでは導入部としてその概要を示しておく。

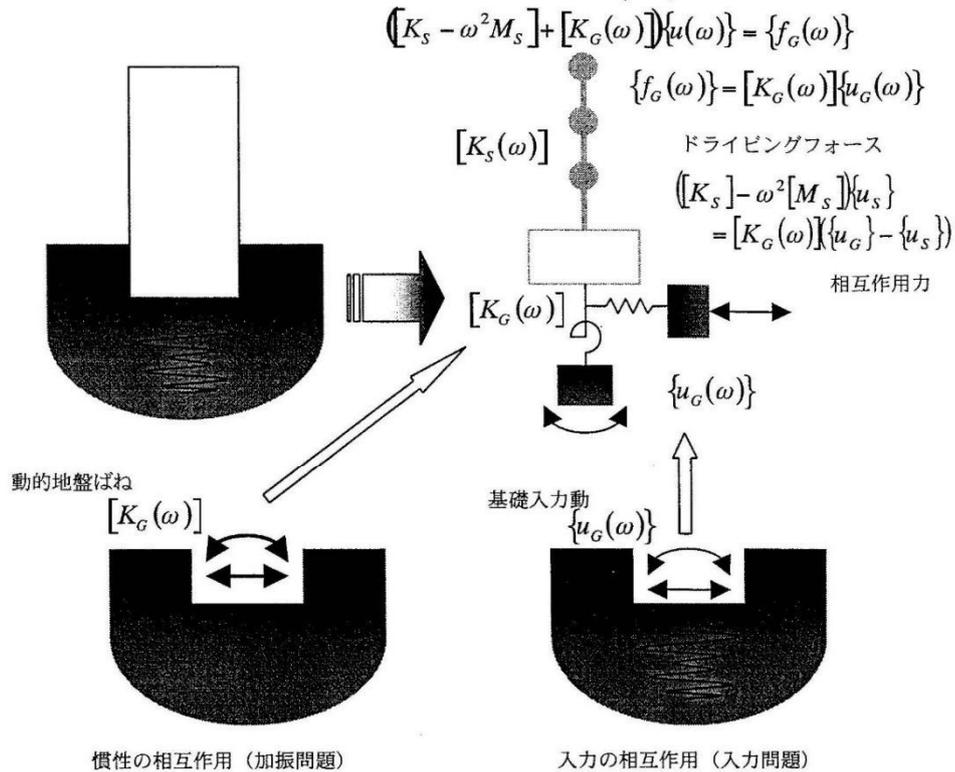


図 1.2.4 建物と地盤とを分離した解析

まず、建物が存在しない状態（建物部を切り欠いた地盤）を想定する。このときの建物と地盤との境界部での力-変位関係を、「動的地盤ばね」と呼んでいる（相互作用ばね、インピーダンスなどとも呼ぶ）。また、地震動が入射したときの建物-地盤境界部での動きを、「基礎入力動」と呼んでいる。基礎入力動は、地盤ばねを介して建物に作用する入力地震動に相当する。動的地盤ばねと基礎入力動を求める問題を、それぞれ、「加振問題」、「入力問題」と呼び、それぞれの相互作用効果を「慣性の相互作用」、「入力の相互作用」と呼ぶ。上に示した地盤ばねや地下逸散減衰は慣性の相互作用効果の一つ、入力損失は入力の相互作用効果の一つである。

動的地盤ばねと基礎入力動の積は「ドライビングフォース」と呼ばれる。ドライビングフォースは、地震動が入射したことによって生じた建物-地盤境界部の変位を、元に戻すために必要となる力である。この力が、作用・反作用の関係で上部構造に作用することになる。

したがって、上部構造物の運動方程式には、剛性行列に動的地盤ばねが加わり、外力ベクトルにドライビングフォースが与えられることになる。動的地盤ばねは、建物の存在の有無による変位差（基礎の応答変位と基礎入力動との相対変位）に比例した抵抗力を生み出す。これが建物と地盤との間でやりとりされる「相互作用力」である。

6.4 基礎入力動の評価

6.4.1 杭基礎の基礎入力動の特徴

杭基礎建物の入力動は、直接基礎のように表層地盤の地表面応答波がそのまま上部構造に入力されるのではなく、地盤内に存在する群杭が表層地盤の挙動を拘束するため、自由地盤の応答波とは異なる。図 6.4.1 は薄層法を用いて求めた杭基礎の基礎入力動を、自由地表面の応答に対する比（応答倍率）として示している。地盤モデルは 3 章の図 3.3.3 に示した地盤-2 の地盤モデル（支持層 GL-25m）であり、液状化層がない場合と考慮した場合である。杭径は 1200mm と 1500mm、杭間距離は 6m とし、杭本数は $2 \times 2 = 4$ 本と $6 \times 6 = 36$ 本としている。

地盤の 1 次固有振動数に相当する 1Hz 以下の低振動数では、基礎入力動の振幅は自由地表面を下回り、いわゆる「入力損失効果」が見られる。その低減効果は、群杭が表層地盤の挙動を拘束する効果に応じて杭本数が多く、杭径が大きくなるほど大きくなる。また液状化層を考慮した地盤では入力損失効果が顕著に見られるが、杭本数が多い杭基礎では 2Hz 付近の高振動数域で自由地盤に比べ大きくなる場合がある。これは、液状化層をもつ自由地盤では地盤の非線形化による減衰効果により増幅が抑えられるのに対し、杭基礎では杭の支持層地盤から直接杭体を伝わり上部構造に入力する地震動成分があるためである。このような杭基礎への基礎入力動の性状は、群杭効果と同様に杭径、杭長、杭間距離、地盤剛性によって異なる。杭基礎と上部構造をモデル化した一体型モデルを用いた応答解析ではこのような基礎入力動の影響は自動的に考慮されるが、分離型モデルでは別途基礎入力動を評価して SR モデルに入力する必要がある。

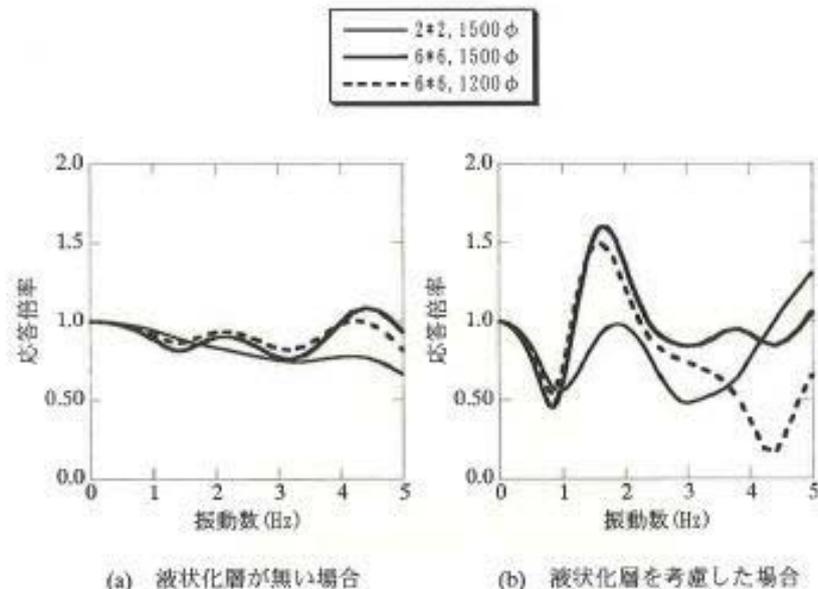


図 6.4.1 自由地表面の応答に対する杭基礎の基礎入力動の比