

資料第 50 - 2 - 5 号

(資料第 50 C - 10 - 7 号改 2)

リサイクル燃料貯蔵株式会社
リサイクル燃料備蓄センター

第 50 部会 C グループ
コメント回答 (その 16)
(安定性評価関係 : 杭関係)

平成 22 年 4 月
原子力安全・保安院

No.	会合	コメント
1	第6回	杭の間隔について、原子力関係の設定方法があるか否かについて説明すること
2	第6回	SRモデルの地盤バネの設定方法について説明すること
3	第6回	杭の水平抵抗力算定の考え方を整理して説明すること
4	第6回	杭の押込み試験の杭先端の沈下量について説明すること

本資料は、核燃料安全専門審査会第 50 部会の求めに応じ作成したものであり、基本設計ないし基本的設計方針に係る内容以上の情報（申請者から必要に応じて聴取した情報等）が含まれている場合があります。

Q1.

杭の間隔について、原子力関係の設定方法があるか否かについて説明すること

申請者は、杭の間隔の設定方法について、以下のとおり説明している。

杭の間隔について、「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 JEAG4616-2003」⁽¹⁾の「7.4(3)場所打ちコンクリート杭の留意事項」に『杭の設計断面に基づいて（中略）、杭間隔などの「建築基礎構造設計指針（2001年版）」（日本建築学会）の諸規定を適用してよい』とあることから、杭間隔の最小値は、「建築基礎構造設計指針（2001）」⁽²⁾の「6.2節5.（4）杭の最小間隔」に記載のとおり、杭の施工性を考慮した、障害が生じにくい杭の最小間隔の目安値に基づいて設定するとしている。

削孔を伴う場所打ち杭については、打込み杭のような障害は生じないが、小さな杭間隔で施工すると削孔によって隣接杭の周辺地盤をゆるめやすく、削孔の鉛直精度を考慮に入れると、地盤中で杭が相互に接触する可能性があるなどの問題があるため、杭の最小間隔の目安値は「場所打ち杭：杭径の2倍以上かつ杭径に1mを加えた値以上」とされている。

ここで、杭径は1.5mであるので、

$$\text{杭径の2倍} = 1.5 \times 2 = 3.0 \text{ m}$$

$$\text{杭径に1mを加えた値} = 1.5 + 1.0 = 2.5 \text{ m}$$

杭の間隔は3.0m以上となるように設計するとしている。

また、杭の施工方法としては、杭の全長に渡って先行してケーシングを埋設し、場所打ちコンクリート杭を築造するオールケーシング工法を採用するとしている。この工法は、ケーシングを用いることにより、鉛

直度、杭径及び杭長を精度良く施工できるため、杭間隔の確保に問題はないと考えられるとしている。

なお、同じオールケーシング工法による場所打ち杭で、杭径 1.0～2.0 m、杭長 30～40m 程度の施工事例を見ると、最小の杭間隔が杭径の 2 倍となっている箇所はあるとしている。

以上のことから、杭の間隔については、原子力関係の設定方法に基づき、適切に設定される方針であることを確認した。

(参考文献)

- (1) 社団法人日本電気協会 原子力規格委員会：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 JEAG4616-2003、2003
- (2) 社団法人日本建築学会：建築基礎構造設計指針 第 2 版、2001

Q2.

SRモデルの地盤バネの設定方法について説明すること

申請者は、SRモデルの地盤ばねの設定方法について、以下のとおり説明している。

安定性評価のうち慣用法による評価において、基準地震動 S_s により貯蔵建屋基礎底面位置に作用する地震力が必要となる。そのため、建屋及び杭を基本設計段階での諸元を用いてモデル化し、地震応答解析により求まる基礎底面位置の群杭ばね反力から地震時作用力を設定している。

2.1 群杭基礎のモデル化

貯蔵建屋の地震応答解析においては、「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 JEAG4616-2003」⁽¹⁾（以下、「JEAG4616」という。）に基づき、第 2-1 図に示す通り、スウェイ・ロックイング (SR) モデル（以下、「SRモデル」という。）を用いるとしている。すなわち、貯蔵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 K_H 、回転ばね K_R 、鉛直ばね K_V ）を取り付けてモデル化している。ここで、基礎スラブの側方地盤は、安全側の評価となることから考慮しないとしている。

群杭ばねは、JEAG4616 に示される群杭ばねの評価法のうち、群杭係数を用いる近似解法⁽²⁾（以下、「群杭係数評価式」という。）により算定するとしている。すなわち、第 2-2 図に示す通り、群杭の複素剛性を一定の剛性（実部：静的な値 K^G ）と減衰係数（建屋－杭基礎－地盤連成系の一次固有円振動数 ω_1 に対応する虚部の値と原点を結ぶ直線の傾き C^G ）で近似している。

地盤は事業許可申請書の地盤調査結果に基づき、水平成層と仮定した地盤モデルを用いるとしている。また、地盤の材料減衰は無視し、 $h = 0\%$ としている。

2.2 群杭係数評価式による群杭ばねの評価

地盤及び群杭は、水平方向については基礎底面位置の水平ばねと回転ばねに、鉛直方向については鉛直ばねに置換するとしている。群杭ばねの剛性と減衰の算定フローを第 2-3 図に示す。

2.2.1 単杭の剛性と減衰係数

単杭の水平方向の杭頭位置での剛性 K_{HH}^S と減衰係数 C_{HH}^S は、杭を梁要素とし、これに杭周のばねとして地盤剛性と減衰係数を付加したモデルへの杭頭単位加振によって算定するとしている。

単杭の鉛直方向の杭頭位置での剛性 K_{VV}^S と減衰係数 C_{VV}^S は、杭を梁要素とし、これに杭周のばねとして地盤剛性と減衰係数を、杭先端のばねとして支持地盤への貫入部分の複素剛性を付加したモデルへの杭頭単位加振によって算定するとしている。

単杭の解析モデルを第 2-4 図に、地盤剛性等の算定に用いる地盤の物性値を第 2-1 表に示す。

杭頭の複素剛性 $K^*(\omega)_{\text{杭頭}}$ は、以下の通り定数化を行う。

$$K^*(\omega)_{\text{杭頭}} = \frac{\text{Re} [K^*(\omega)]}{\text{実 部}} + i \cdot \frac{\text{Im} [K^*(\omega)]}{\text{虚 部}}$$

ここに、単杭の杭頭剛性 K^S として $\omega = 0$ の値を採用し $\text{Re} [K^*(0)]$ 、単杭の減衰 C^S として $\omega = \omega_1$ の値を採用し $\text{Im} [K^*(\omega_1)] / \omega_1$ とするとしている。 ω_1 は、建屋－杭基礎－地盤連成系の固有値解析から得られるので、ここでは単杭の杭頭剛性のみを求めるとしている。求められた単

杭の杭頭剛性を第 2-2 表に示す。

2.2.2 群杭係数

群杭係数は、2層地盤を対象とした群杭係数評価式（水平方向については、土方ほか（2006）⁽³⁾を参照）により算定するとしている。2層地盤とは、表層地盤と支持地盤に区分することであり、具体的には表層の3層（ Tn_3 層、 Tn_2 層、 Sn_4 層）を1層に置換している。式 2-1 で求まる3層の表層地盤の卓越周期が、1層に置換した表層地盤のものと等しくなるようにS波速度を設定するとしている。S波速度以外の物性値（湿潤密度、ポアソン比）は Tn_3 層の値を用いる。

$$T_G = \sqrt{32 \sum_{i=1}^n \left\{ h_i \cdot \left(\frac{H_{i-1} + H_i}{2} \right) / V_{Si}^2 \right\}} \quad (2-1)$$

ここに、

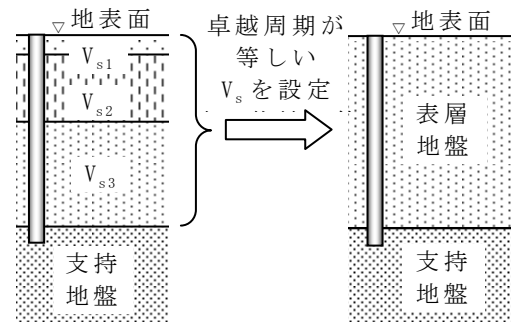
T_G : 表層地盤の卓越周期 (sec)

n : 表層地盤の層数

H_i : 地表面から層下面までの深さ (m)

V_{Si} : i 層のS波速度 (m/s)

h_i : i 層の層厚 (m)



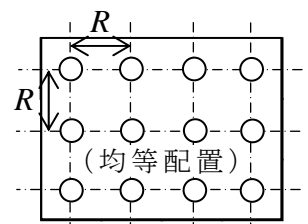
また、貯蔵建屋の杭配置は第 2-5 図 (a) に示す通り不均等な配置であるため、第 2-5 図 (b) に示す均等な矩形配置に置換してから群杭係数を算定するとしている。この時、杭中心間隔は式 2-2 に示すように、杭 1 本当たりの支配面積と同一面積の正方形の一辺の長さとしている。

$$R = \sqrt{Lx \times Ly / N} \quad (2-2)$$

ここに、 R : 杭中心間隔 (m)

Lx, Ly : 短辺方向、長辺方向の柱芯間隔 (m)

N : 杭本数 (本)



この杭中心間隔 R を用いて、杭を均等配置に置き換えるとしている。すなわち、短辺方向 1 列当たりの杭本数を x 、長辺方向 1 列当たりの杭本数を y とすると、 $x = Lx/R$ 、 $y = Ly/R$ となる (x 、 y は整数に丸める)。

群杭係数を算定する際は、杭が矩形配置 (短辺 x 本 < 長辺 y 本) されている場合、杭本数を以下のように仮定するとしている。

①短辺方向： $x \times x$ 本 (第 2-5 図(c)参照)

②長辺方向： $x \times y$ 本 (第 2-5 図(d)参照)

求められた群杭係数を、第 2-3 表に示す。

2.2.3 群杭の静的杭頭剛性

これまでに求めた単杭の剛性、群杭係数及び杭本数を用い、群杭の静的杭頭剛性を求めるとしている。群杭の静的杭頭剛性の算定式と算定結果を第 2-4 表に示す。ここでは、杭本数と回転ばね算定時の回転中心から杭までの距離 l_i は、杭を均等配置に置き換えた時の本数と距離を採用するとしている (第 2-6 図参照)。

2.2.4 建屋－杭基礎－地盤連成系の固有値解析

建屋－杭基礎－地盤連成系の固有値解析により、一次固有円振動数 ω_1 ($=2\pi f_1$ 、ここに f_1 は系の一次固有振動数) を求めるとしている。ここで、貯蔵建屋はキャスク満載時とし、諸元を第 2-7 図に示す。杭基礎－地盤は群杭の静的杭頭剛性を用いるとしている。第 2-7 図には、固有値解析結果を合わせて示しており、水平方向の f_1 は、EW 方向で約 4.0Hz、NS 方向で約 3.5Hz となっている。鉛直方向は、一次モードが受入エリア屋根鉄骨となっており、貯蔵建屋全体の一次振動数としては二次モードの振動数、すなわち、7.0Hz となるとしている。

2.2.5 単杭の減衰係数

2.2.1 で求めた杭頭複素剛性の虚部に ω_1 の値を採用し、その点と原点を結ぶ直線の傾きを、単杭の杭頭位置での減衰係数としている。求められた単杭の減衰係数を第 2-5 表に示す。

2.2.6 群杭の減衰係数

2.2.5 で求めた単杭の減数係数と杭本数を用い、群杭の減衰係数を求めるとしている。群杭の減衰係数の算定式と算定結果を第 2-6 表に示す。

2.2.3 と同様に、杭本数と回転ばね算定時の回転中心から杭までの距離 l_i は、杭を均等配置に置き換えた時の本数と距離を採用するとしている

なお、減衰係数に群杭係数を考慮していないのは、群杭の複素剛性の虚部に関しては、一般的に低振動数領域において群杭効果が現れにくいとされている。

2.2.7 群杭ばねの剛性および減衰

群杭ばね定数は、2.2.3 及び 2.2.6 により、第 2-7 表に示す通りとなる。

2.3 群杭ばねの確認

群杭係数評価式を用いて算定した群杭ばねと、精算解である三次元薄層法（以下、「薄層法」という。）を用いた杭頭インピーダンスの比較（水平、回転は NS 方向）を第 2-8 図に示す。

薄層法における地盤モデルは、安定性評価の地盤を成層化した地盤モデルとし、杭先端が位置する S_{n_4} 層から地表面までをモデル化している。なお、 S_{n_4} 層以深については S_{n_4} 層が半無限に続くものとしてモデル化する

る。また、薄層法では地盤の材料減衰として $h=3\%$ を考慮しており、杭の配置は基本設計段階での配置（不均等な配置）を反映させている。

群杭ばねの剛性に相当する 0 Hz 付近の実部に関しては、両者は良く対応しているとしている。

一方、群杭係数評価式による群杭ばねの虚部が薄層法を下回っているのは、薄層法が地盤の材料減衰を考慮しているのに対して、群杭係数評価式によるばねには地盤の材料減衰を考慮していないためであるとしている。

2.4 建屋応答の比較

参考に、SR モデルによる建屋の応答と、安定性評価における有限要素法モデル（以下、「FEMモデル」という。）による建屋の応答を比較している。

2.4.1 建屋の振動特性の比較

FEM解析に用いる解析用建屋モデルは、水平方向及び鉛直方向について設定された多質点系モデルからFEMモデルに変換することにより作成している。

第 2-9 図に解析用建屋モデル作成の概略手順を、第 2-8 表に固有値解析結果を示す。第 2-8 表より、FEMモデルの振動特性は多質点系単軸モデルと整合するとしている。

2.4.2 動的解析による建屋の応答

FEMモデルにおける建屋応答の着目位置を第 2-10 図に示す。また、SR モデルと FEMモデルにおける動的解析による建屋応答の対比を第 2-11 図に示す。

- SRモデルの最大加速度は、FEMモデルより大きい。

この主な要因としては、①各モデルに用いる入力地震動の設定条件の差異、②地盤ばねの影響の2点が挙げられるとしている。

【補足：主な差異の解説】

- ① FEMモデルでは杭をモデル化しているため、杭の影響が考慮されている。一方、SRモデルでは、自由地盤に対する等価地盤物性を用いた一次元線形解析に基づく基礎底面位置の応答波形を、モデルへの入力動としている。つまり、杭による地盤の抑制効果が考慮されないSRモデルへの入力動は、杭が地盤の挙動を抑制するFEMモデルにおける基礎底面位置の応答よりも大きめに設定される。ここで、SRモデルへの入力動は、一次元等価線形解析による応答値を包絡するように、地盤の等価な減衰定数（一定値）を設定して算定している。

具体的に、等価地盤物性を用いた一次元線形解析と建屋中心位置におけるFEMモデルとの地盤応答の比較を第2-12図に示す。等価地盤物性を用いた一次元線形解析の基礎底面位置（標高13.8m）における加速度は、FEMモデルより大きくなり、安全側の評価となるとしている。

なお、第2-11図の標高13.8mにおける建屋応答の最大加速度と、第2-12図の標高13.8mにおける地盤応答の最大加速度が、FEMモデルは一体のモデルであるため連続した数値となっているが、SRモデルによる建屋応答と等価地盤物性を用いた一次元線形解析による地盤応答の間には地盤ばねが介在するため、両者は連続した数値とならないとしている。

- ② SRモデルの地盤ばねを設定する際に、地盤の材料減衰を考慮していないことから、FEMモデルよりも応答が大きめに評価され

るとしている。

- ・ 建屋の各位置の最大加速度と建屋下端の最大加速度の比（以下、「応答倍率」という。）は、SRモデルとFEMモデルではほぼ同程度となっている。

なお、第2-11図(2)によると、 $y-y'$ 断面の標高43.50m～標高39.30mの応答倍率が、SRモデルとFEMモデルで異なっている。この要因として $y-y'$ 断面における標高43.50m～標高39.30m間のせん断断面積（せん断変形に抵抗する部分の断面積）が非常に小さく、応答の違いが現れやすいことが考えられるとしている。ただし、標高43.50mにおける建屋重量（ $2.51 \times 10^4 \text{kN}$ ）は、総重量（ $1.62 \times 10^6 \text{kN}$ ）の約2%弱であることから、FEMモデルに与える影響は小さいと考えられるとしている。

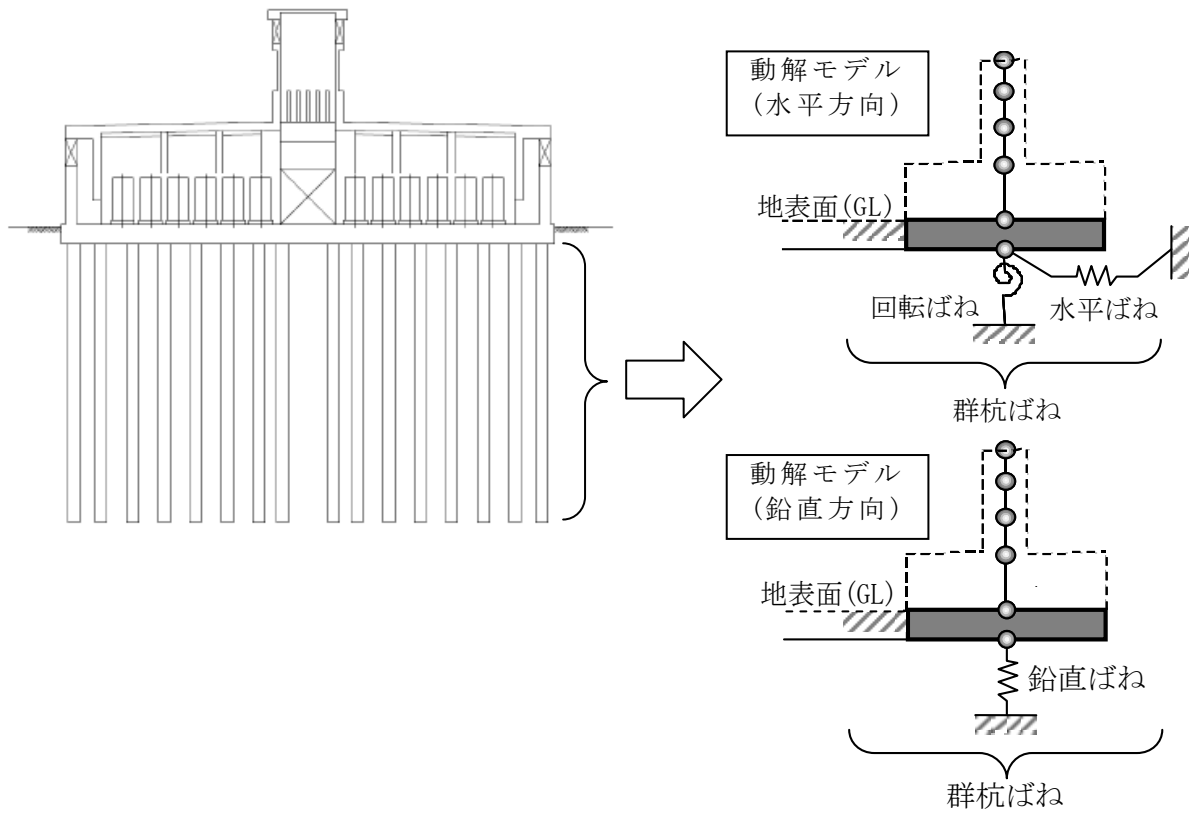
よって、動的解析において、SRモデルとFEMモデルの建屋の応答特性には、大きな差異はないものと考えられるとしている。

2.5 まとめ

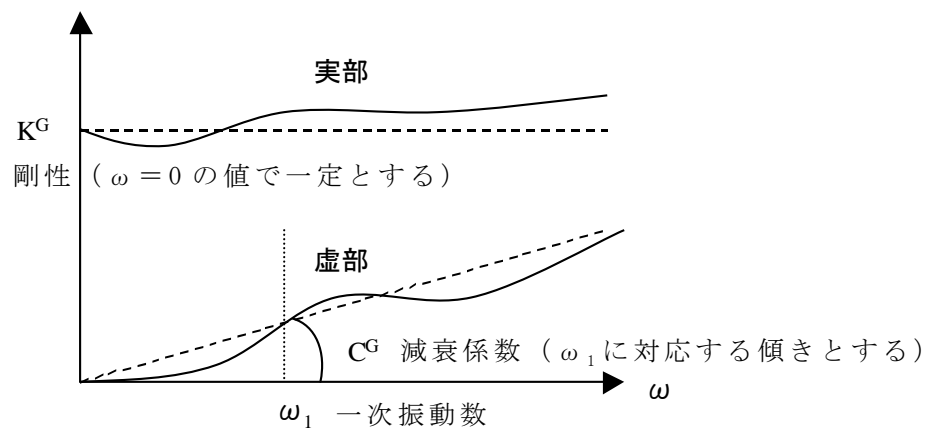
以上のことから、SRモデルの群杭ばねは、群杭係数評価法を用いることにより、群杭効果を適切に評価して設定されており、妥当なものとは判断した。

2.6 参考文献

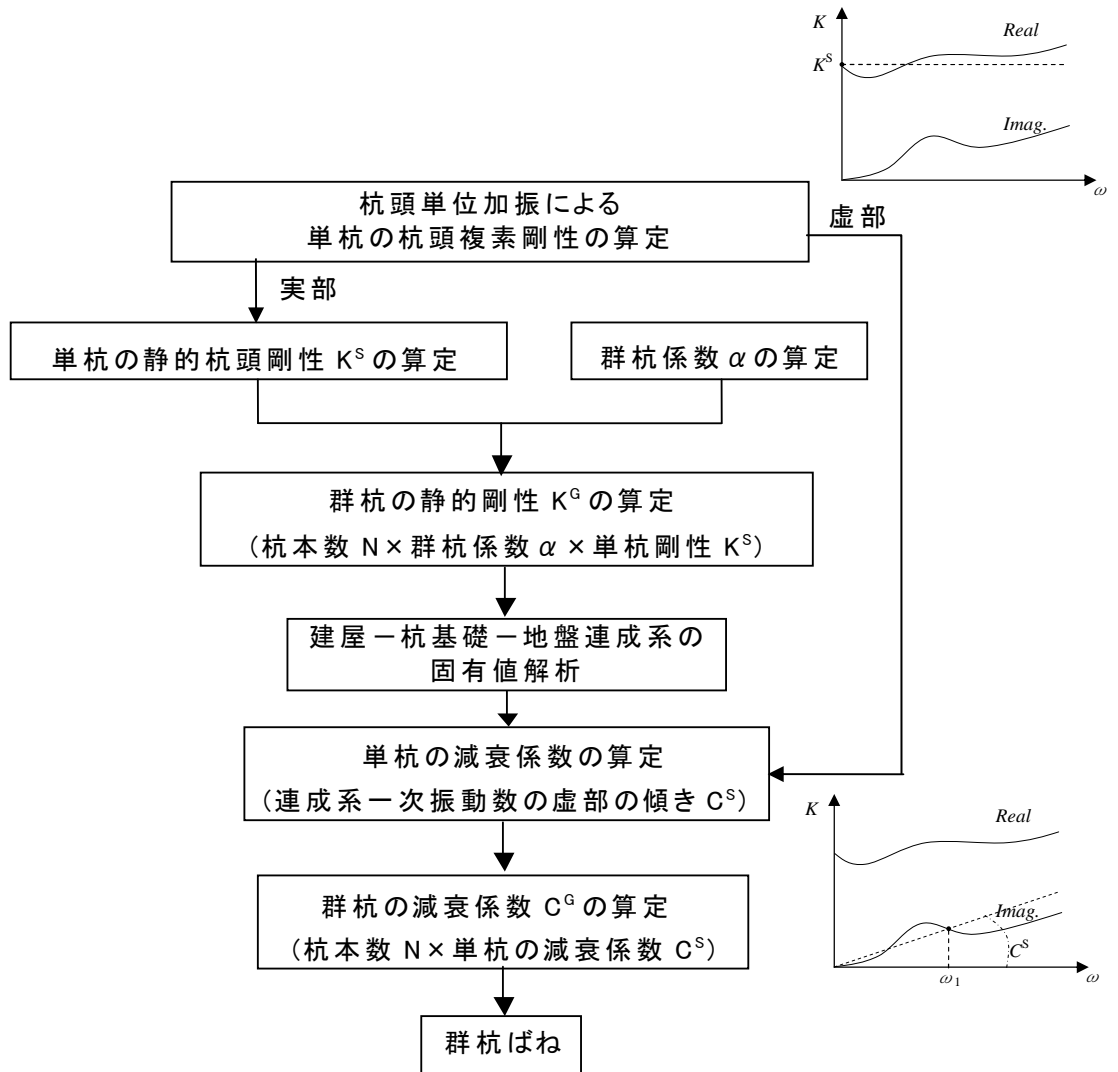
- (1) 社団法人日本電気協会 原子力規格委員会：乾式キャスク貯蔵建屋基礎構造の設計に関する技術指針 JEAG4616-2003、2003
- (2) 土方勝一郎、成川匡文、増田 彰、今村 晃、岸野泰章、佐藤隆文、柳下文雄、富井 隆、小山桂介（1997）：杭支持された火力発電所建屋の動的相互作用評価法、日本建築学会構造系論文集 第502号
- (3) 土方勝一郎、杉山達也、石田智昭、柳下文雄、間瀬辰也（2006）：2層地盤を対象とした水平方向の群杭係数評価式に関する研究、日本建築学会構造系論文集 第604号



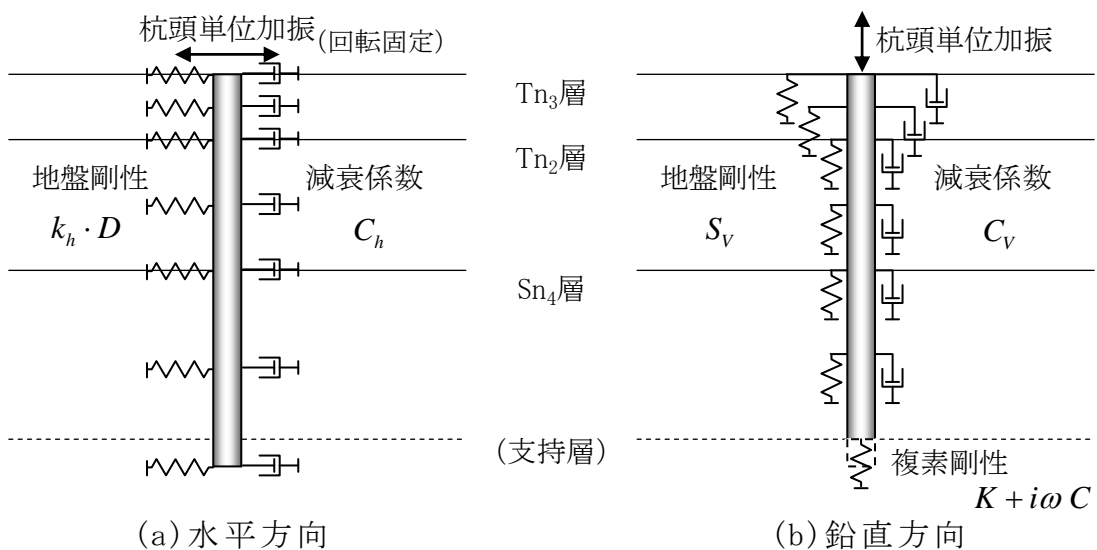
第 2-1 図 地盤・杭の群杭ばねの概念



第 2-2 図 群杭ばねの定数化



第 2-3 図 群杭ばねの杭頭剛性と減衰の算定フロー



第 2-4 図 単杭解析モデル

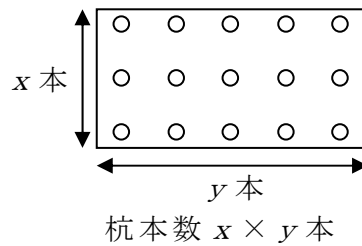
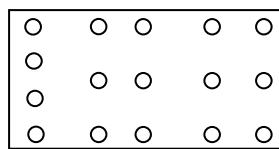
第 2-1 表 地盤の物性値

地層 区分	標高 Z (m)	層厚 h (m)	密度 ρ_t (g/cm ³)	ポアソ ン比 ν	初期せん断 弾性係数 G_0 (N/mm ²)	等価せん断 弾性係数 $G_{eq}^{2)}$ (N/mm ²)	S 波速 度 $V_s^{3)}$ (m/s)
Tn ₃ 層	13.8	0.3	1.91	0.47	284	256	370
Tn ₂ 層	13.5	6.5	1.92	0.45	376	301	400
Sn ₄ 層	7.0 -21.5	28.5	1.82	0.45	409 ¹⁾	286	400

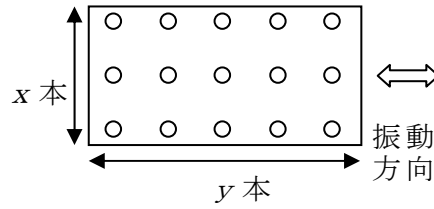
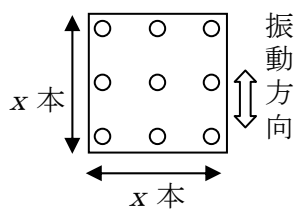
注記 1) $G_0 = 326 - 5.11 \cdot Z$ に Sn₄層の中心標高 (-16.25m) を代入した値
 2) 等価線形解析により求まるせん断弾性係数低下率を考慮した値
 3) $V_s = \sqrt{G_{eq}/\rho_t}$ より求まる値

第 2-2 表 単杭の静的杭頭剛性

		杭頭剛性
水平ばね	K_{HH}^S (kN/m)	2.48×10^6
鉛直ばね	K_{VV}^S (kN/m)	4.45×10^6



(a) 不均等な杭配置 (b) 等間隔な矩形配置に置換した杭配置



(c) 短辺方向の杭配置 (d) 長辺方向の杭配置

第 2-5 図 等間隔な杭配置への置換

第 2-3 表 群杭係数

		EW 方向	NS 方向
水平方向	α_{HH}	0.127	0.0936
回転方向	α_{RR}	0.414	0.328
鉛直方向	α_{VV}	0.199	

第 2-4 表 群杭の静的杭頭剛性

		EW 方向	NS 方向
水平ばね	K_{HH}^G (kN/m)	11.5×10^7	8.45×10^7
回転ばね	K_{RR}^G (kN·m/rad)	2.04×10^{11}	7.56×10^{11}
鉛直ばね	K_{VV}^G (kN/m)	3.22×10^8	

算定式

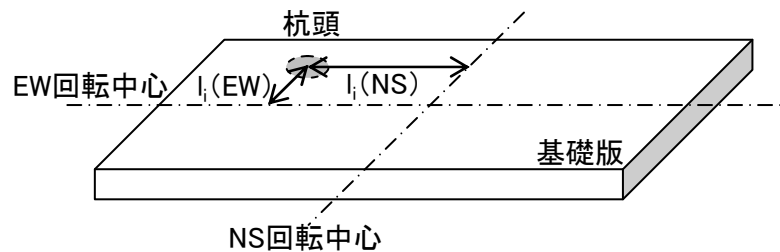
$$K_{HH}^G = \alpha_{HH} \cdot N \cdot K_{HH}^S$$

$$K_{RR}^G = \alpha_{RR} \sum_{i=1}^N (l_i^2 \cdot K_{VV}^S)$$

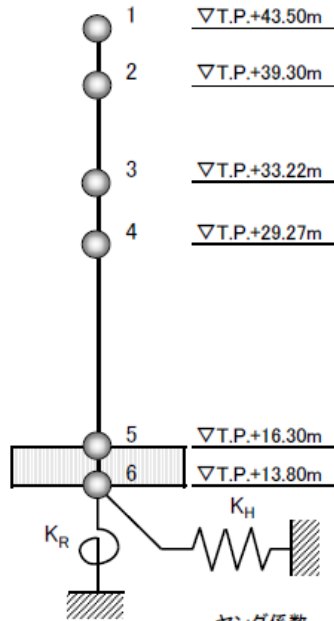
$$K_{VV}^G = \alpha_{VV} \cdot N \cdot K_{VV}^S$$

記号

- α : 群杭係数
- N : 杭本数
- K : 杭頭位置の静的剛性
- l_i : 回転中心から杭までの距離
- 下添字_{HH} : 水平方向
- 下添字_{RR} : 回転方向
- 下添字_{VV} : 上下方向
- 上添字^G : 群杭
- 上添字^S : 単杭

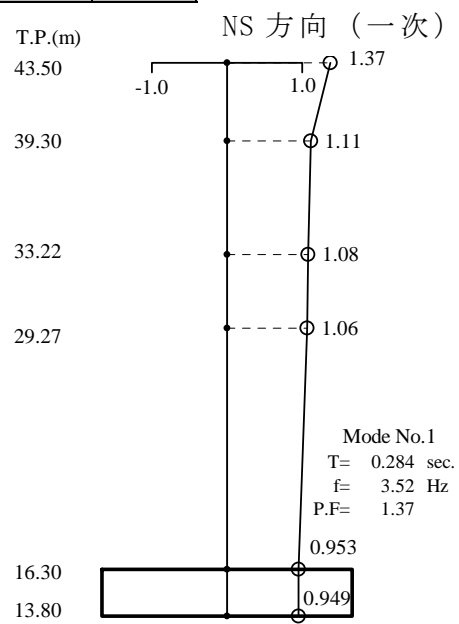
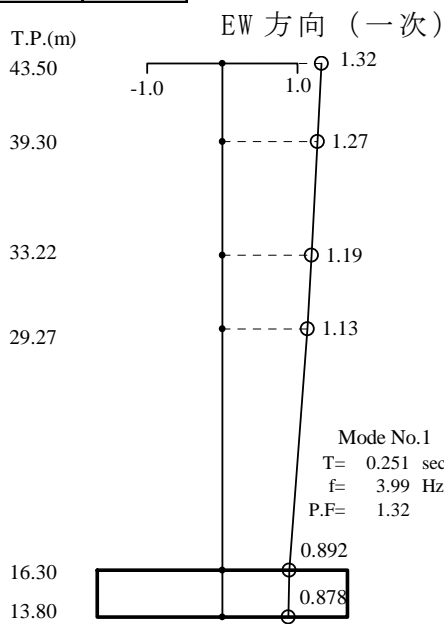


第 2-6 図 回転中心から杭までの距離

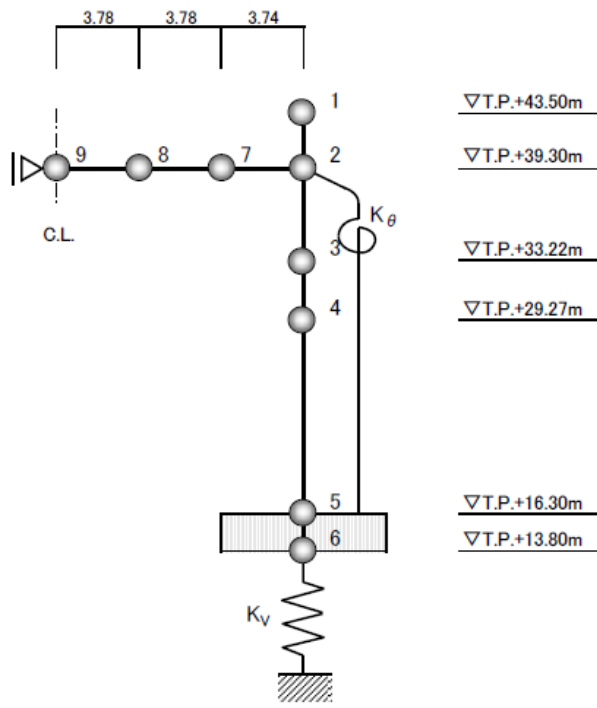


ヤング係数 $E_c = 2.52 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$ (建屋・基礎スラブ)
 せん断弾性係数 $G_c = 1.05 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$ (建屋・基礎スラブ)
 減衰定数 $h = 3\%$ (建屋・基礎スラブ)

レベル T.P.(m)	質点 番号	EW方向				レベル T.P.(m)	質点 番号	NS方向			
		重量 W ($\times \text{kN}$)	回転慣性 I_g ($\text{kN}\cdot\text{m}^2$)	せん断 断面積 $A_s(\text{m}^2)$	断面2次 モーメント $I(\text{m}^4)$			重量 W (kN)	回転慣性 I_g ($\text{kN}\cdot\text{m}^2$)	せん断 断面積 $A_s(\text{m}^2)$	断面2次 モーメント $I(\text{m}^4)$
43.50	1	2.51×10^4	2.11×10^5	—	—	43.50	1	2.51×10^4	2.47×10^7	—	—
39.30	2	6.01×10^4	1.28×10^7	5.20×10^1	4.33×10^2	39.30	2	6.01×10^4	8.07×10^7	2.70×10^0	∞
33.22	3	5.22×10^4	5.87×10^6	1.04×10^2	3.64×10^4	33.22	3	5.22×10^4	1.20×10^8	1.16×10^2	1.05×10^5
29.27	4	3.60×10^5	1.14×10^8	1.47×10^2	4.06×10^4	29.27	4	3.60×10^5	5.18×10^8	2.46×10^2	2.46×10^5
16.30	5	8.68×10^5	2.85×10^8	2.75×10^2	1.18×10^5	16.30	5	8.68×10^5	1.27×10^9	3.47×10^2	5.70×10^5
13.80	6	2.56×10^5	8.36×10^7	8.28×10^3	2.71×10^6	13.80	6	2.56×10^5	3.73×10^8	8.28×10^3	1.21×10^7
総重量		1.62×10^6				総重量		1.62×10^6			



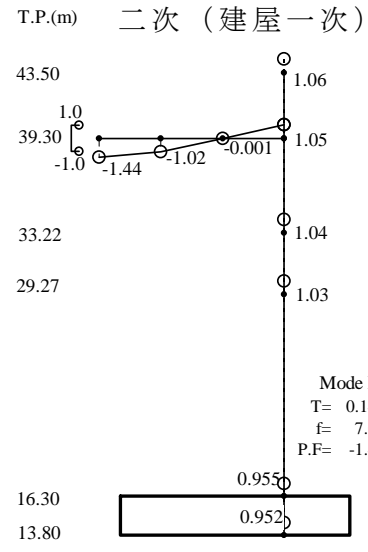
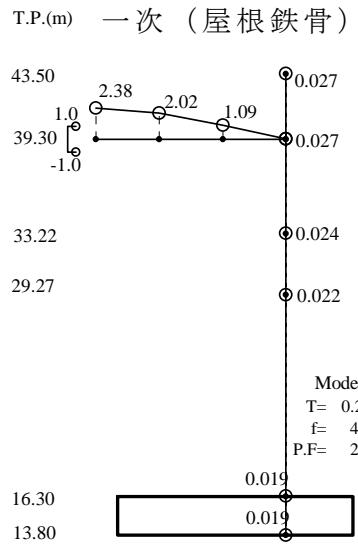
第 2-7 図(1) 建屋の振動諸元と固有値解析結果 (水平方向)



レベル T.P.(m)	質点 番号	建屋	
		重量 W (kN)	軸断面積 A (m ²)
43.50	1	2.51×10^4	—
39.30	2	4.09×10^4	7.69×10^1
33.22	3	5.22×10^4	2.40×10^2
29.27	4	3.60×10^5	3.82×10^2
16.30	5	8.68×10^5	6.57×10^2
13.80	6	2.56×10^5	8.28×10^3

レベル T.P.(m)	質点 番号	受入エリア屋根鉄骨				
		重量 W (kN)	回転慣性 I _g (kN·m ²)	せん断 断面積 A _s (m ²)	断面2次 モーメント I(m ⁴)	回転ばね K _θ (kN·m/rad)
39.30	2	—	—	6.40×10^{-1}	1.66×10^0	5.09×10^7 減衰定数3%
	7	7.71×10^3	3.69×10^4	6.40×10^{-1}	1.66×10^0	
	8	7.71×10^3	3.69×10^4	6.40×10^{-1}	1.66×10^0	
	9	3.86×10^3	4.78×10^3	—	—	
総重量		1.62×10^6				

ヤング係数 $E_c = 2.52 \times 10^7$ kN/m² (建屋・基礎スラブ)
 $E_s = 2.05 \times 10^8$ kN/m² (屋根鉄骨梁)
 せん断弾性係数 $G_c = 1.05 \times 10^7$ kN/m² (建屋・基礎スラブ)
 $G_s = 0.79 \times 10^8$ kN/m² (屋根鉄骨梁)
 減衰定数 $h = 3\%$ (建屋・基礎スラブ)
 $h = 2\%$ (屋根鉄骨)



第 2-7 図 (2) 建屋の振動諸元と固有値解析結果 (鉛直方向)

第 2-5 表 単杭の減衰係数

		EW 方向	NS 方向
水平ばね	C_{HH}^S (kN・sec/m)	6.75×10^3	6.67×10^3
鉛直ばね	C_{VV}^S (kN・sec/m)	1.74×10^4	

第 2-6 表 群杭の減衰係数

		EW 方向	NS 方向
水平ばね	C_{HH}^G (kN・sec/m)	2.46×10^6	2.43×10^6
回転ばね	C_{RR}^G (kN・m・sec/rad)	1.96×10^9	9.06×10^9
鉛直ばね	C_{VV}^G (kN・sec/m)	6.34×10^6	

算定式

記号

$$C_{HH}^G = N \cdot C_{HH}^S$$

$$C_{RR}^G = \sum_{i=1}^N (l_i^2 \cdot C_{VV}^S)$$

$$C_{VV}^G = N \cdot C_{VV}^S$$

N : 杭本数

C : 杭頭位置の減衰係数

l_i : 回転中心から杭までの距離

下添字_{HH} : 水平方向

下添字_{RR} : 回転方向

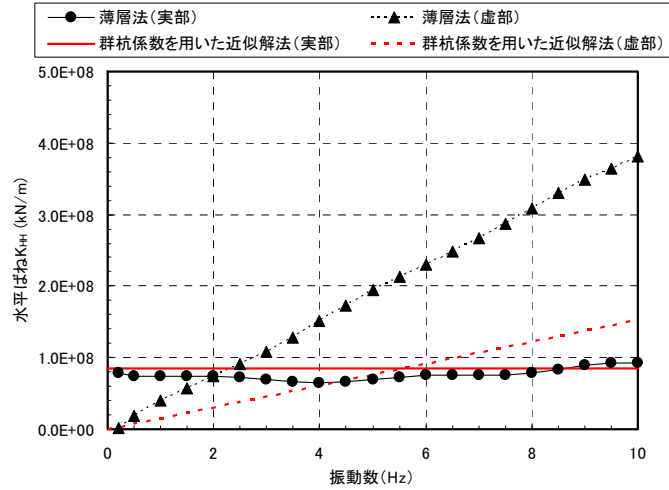
下添字_{VV} : 上下方向

上添字^G : 群杭

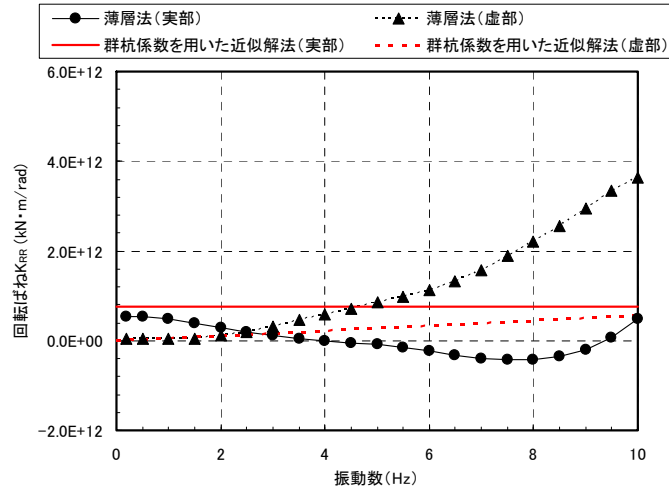
上添字^S : 単杭

第 2-7 表 群杭ばね定数

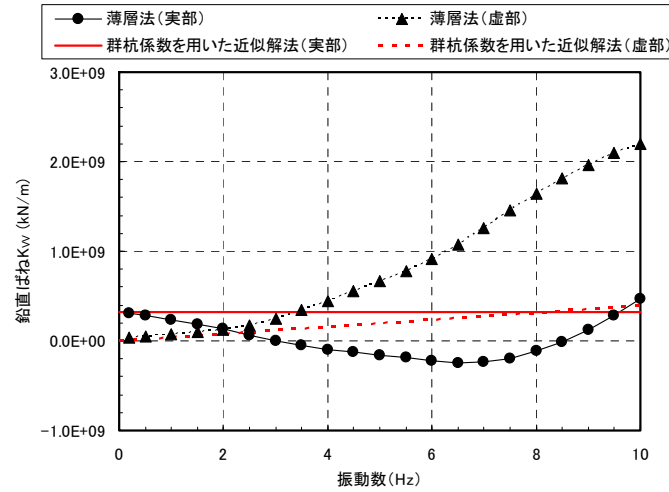
		EW 方向	NS 方向
水平ばね	K_{HH}^G (kN/m)	11.5×10^7	8.45×10^7
K_H	C_{HH}^G (kN・sec/m)	2.46×10^6	2.43×10^6
回転ばね	K_{RR}^G (kN・m/rad)	2.04×10^{11}	7.56×10^{11}
K_R	C_{RR}^G (kN・m・sec/rad)	1.96×10^9	9.06×10^9
鉛直ばね	K_{VV}^G (kN/m)	3.22×10^8	
K_V	C_{VV}^G (kN・sec/m)	6.34×10^6	



(a) 水平ばね K_{HH} (NS 方向)

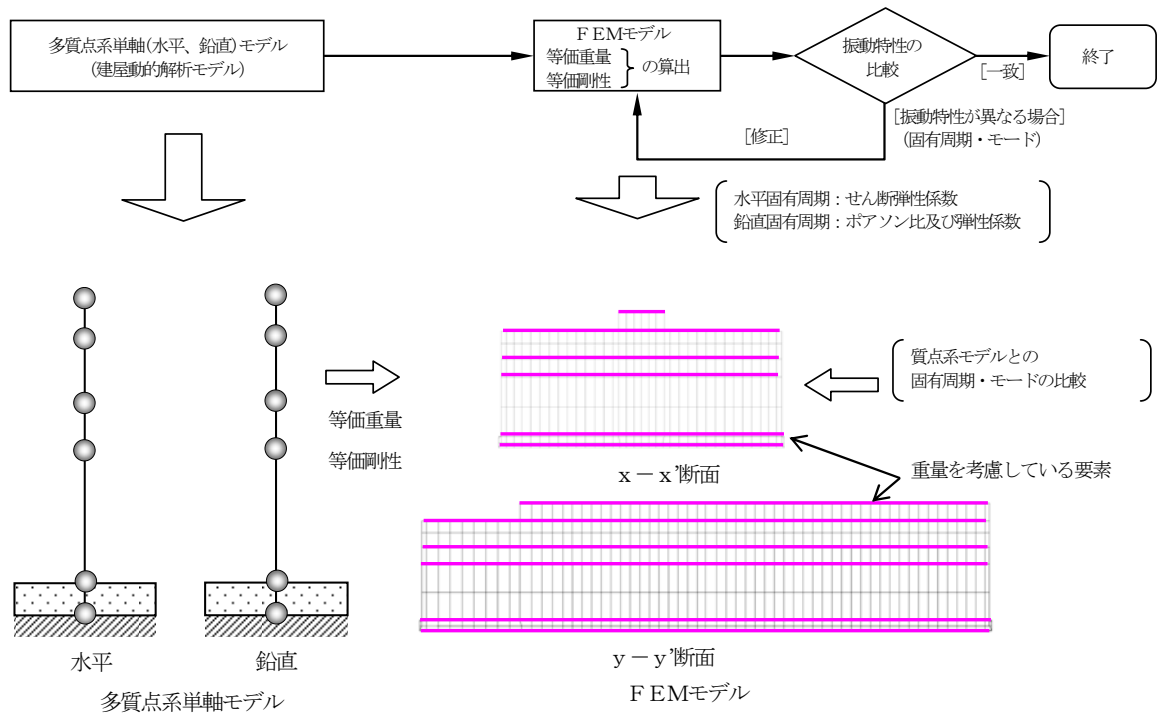


(b) 回転ばね K_{RR} (NS 方向)



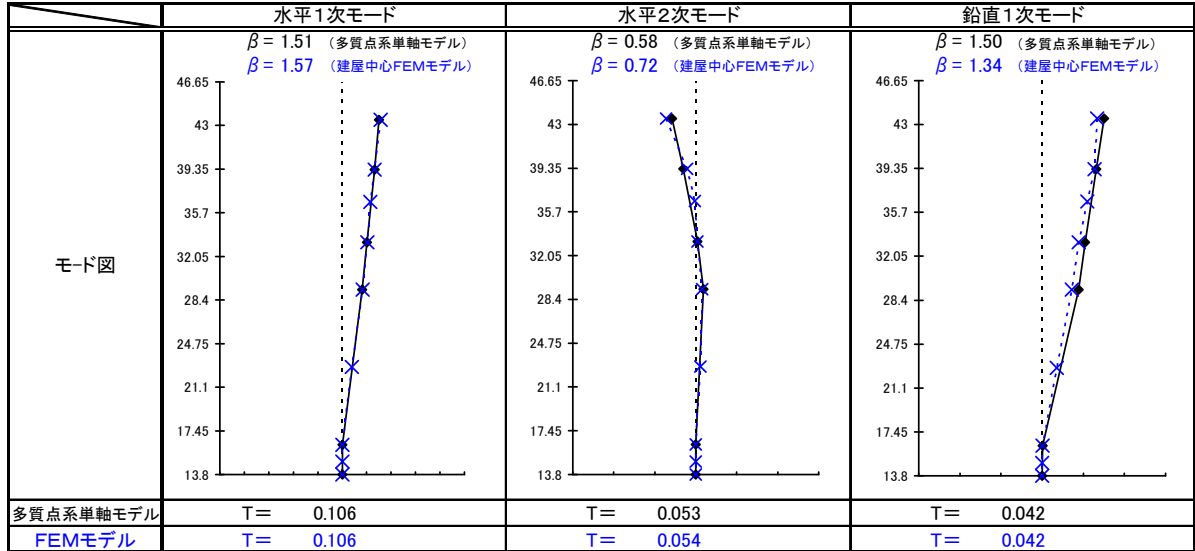
(c) 鉛直ばね K_{VV}

第 2-8 図 杭頭インピーダンスの比較



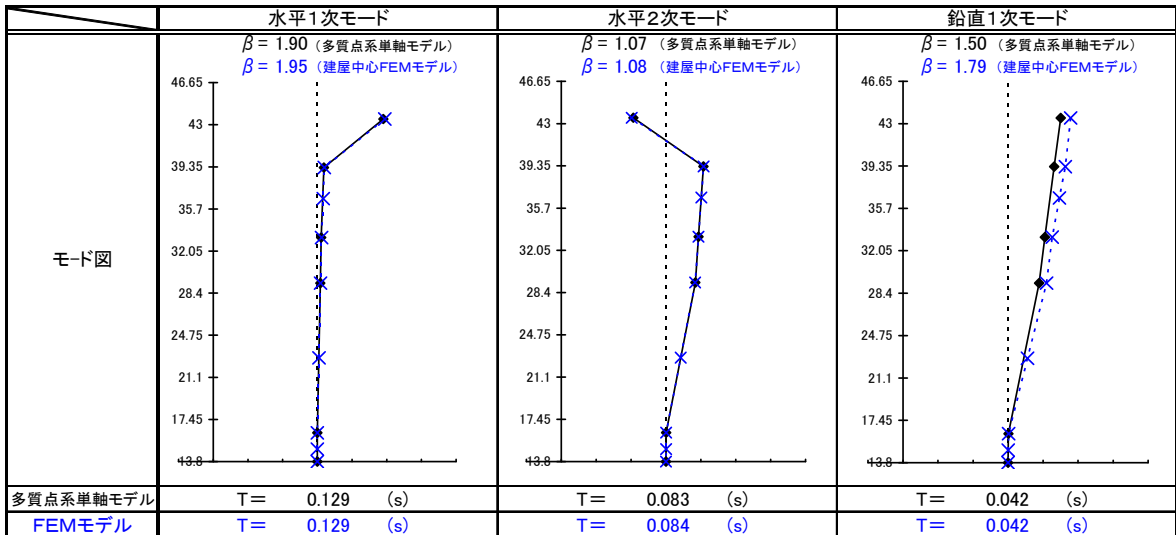
第 2-9 図 解析用建屋モデル作成の概略手順

第 2-8 表(1) 固有周期の比較 (x - x ' 断面)

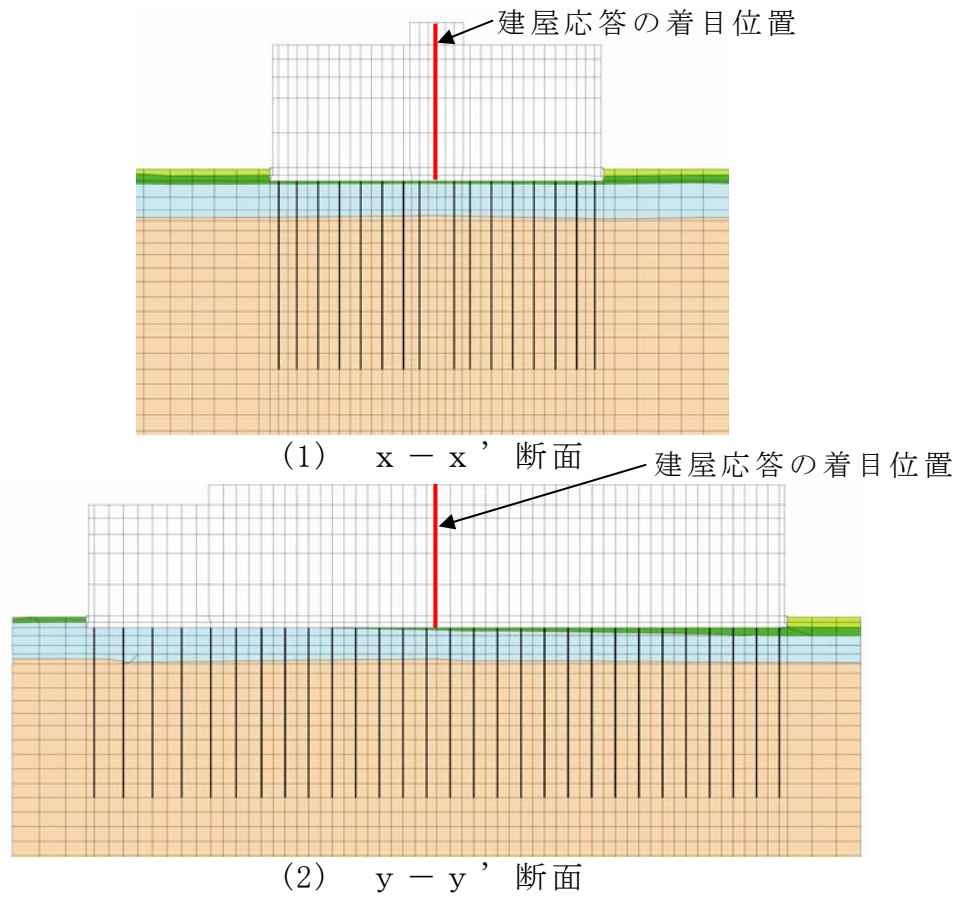


凡例
 —◆— : 多質点系単軸モデル
 - - - x - - : FEMモデル

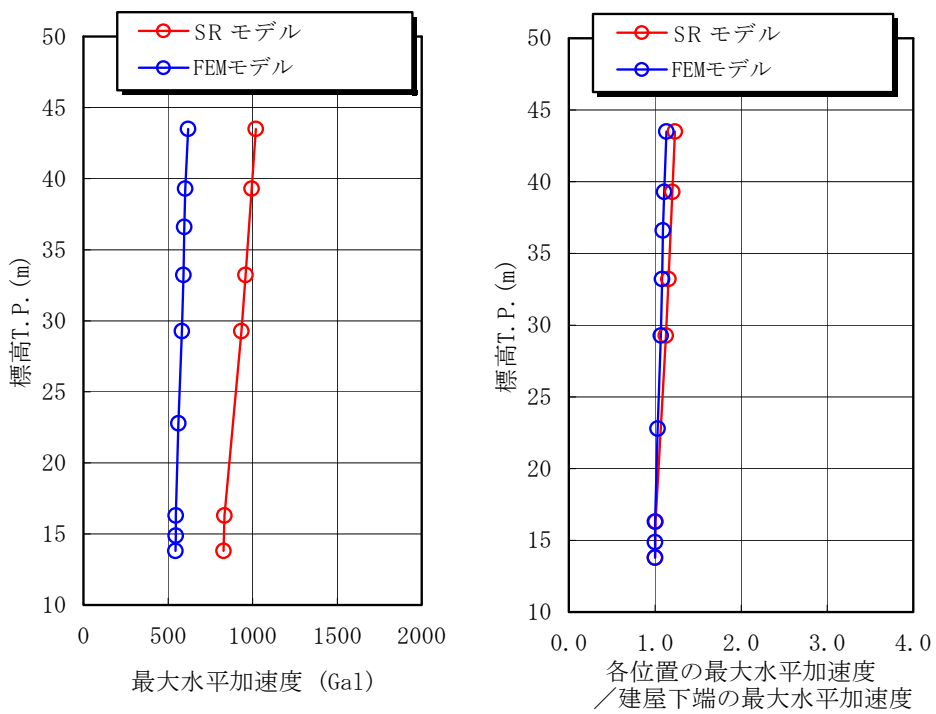
第 2-8 表(2) 固有周期の比較 (y - y ' 断面)



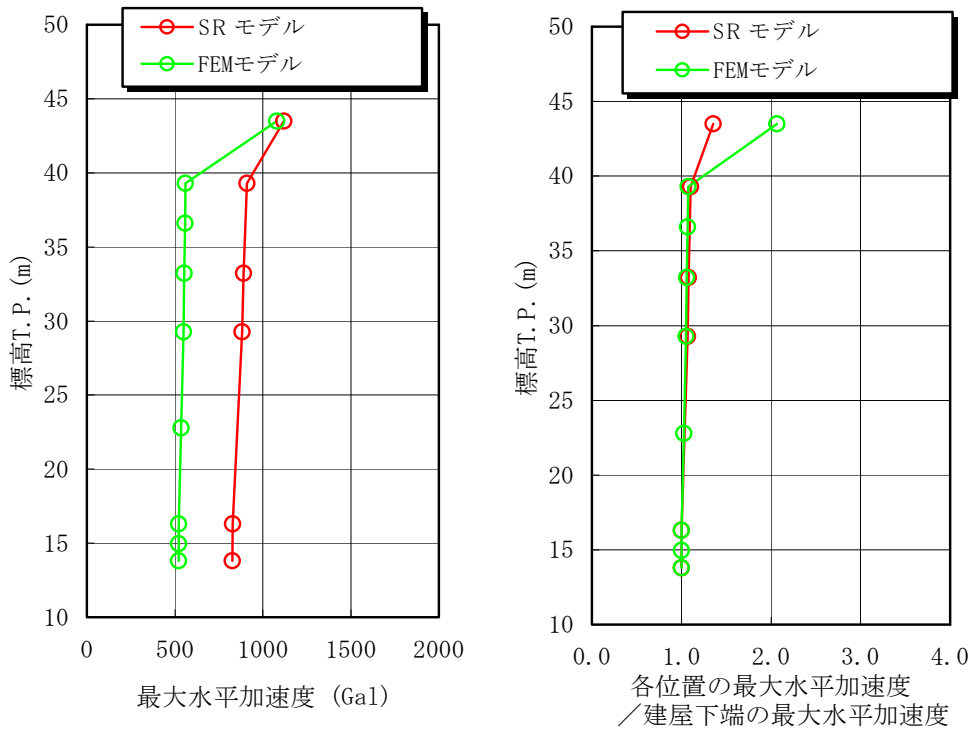
凡例
 —◆— : 多質点系単軸モデル
 - - - x - - : FEMモデル



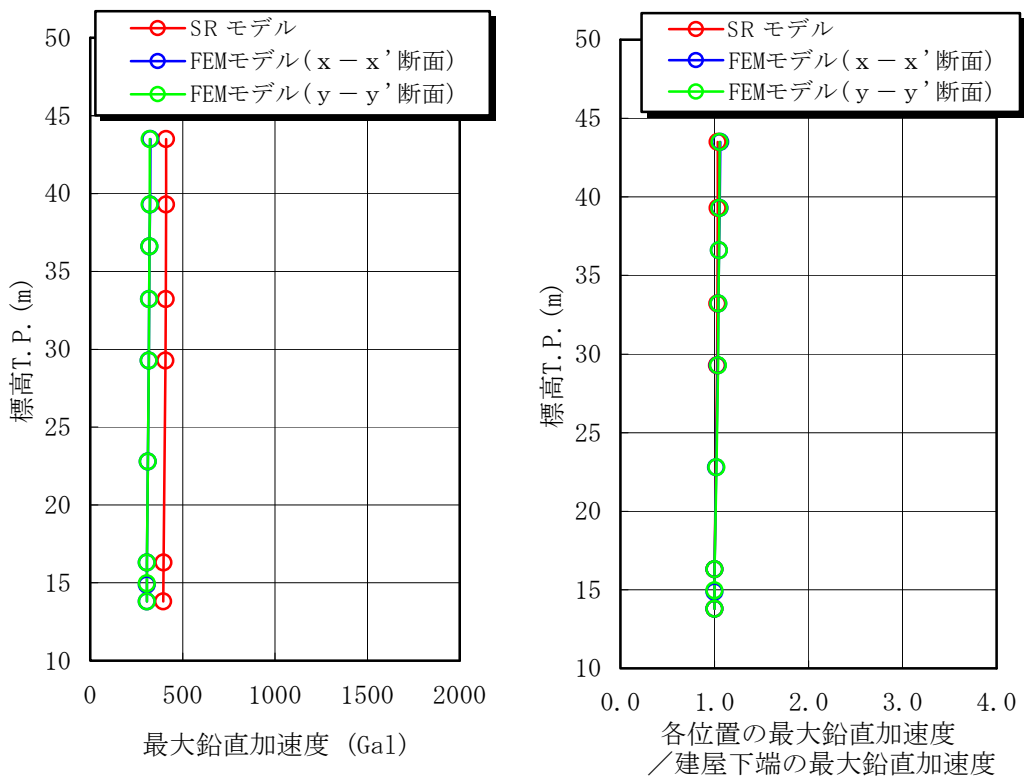
第 2-10 図 F E Mモデルにおける建屋応答の着目位置



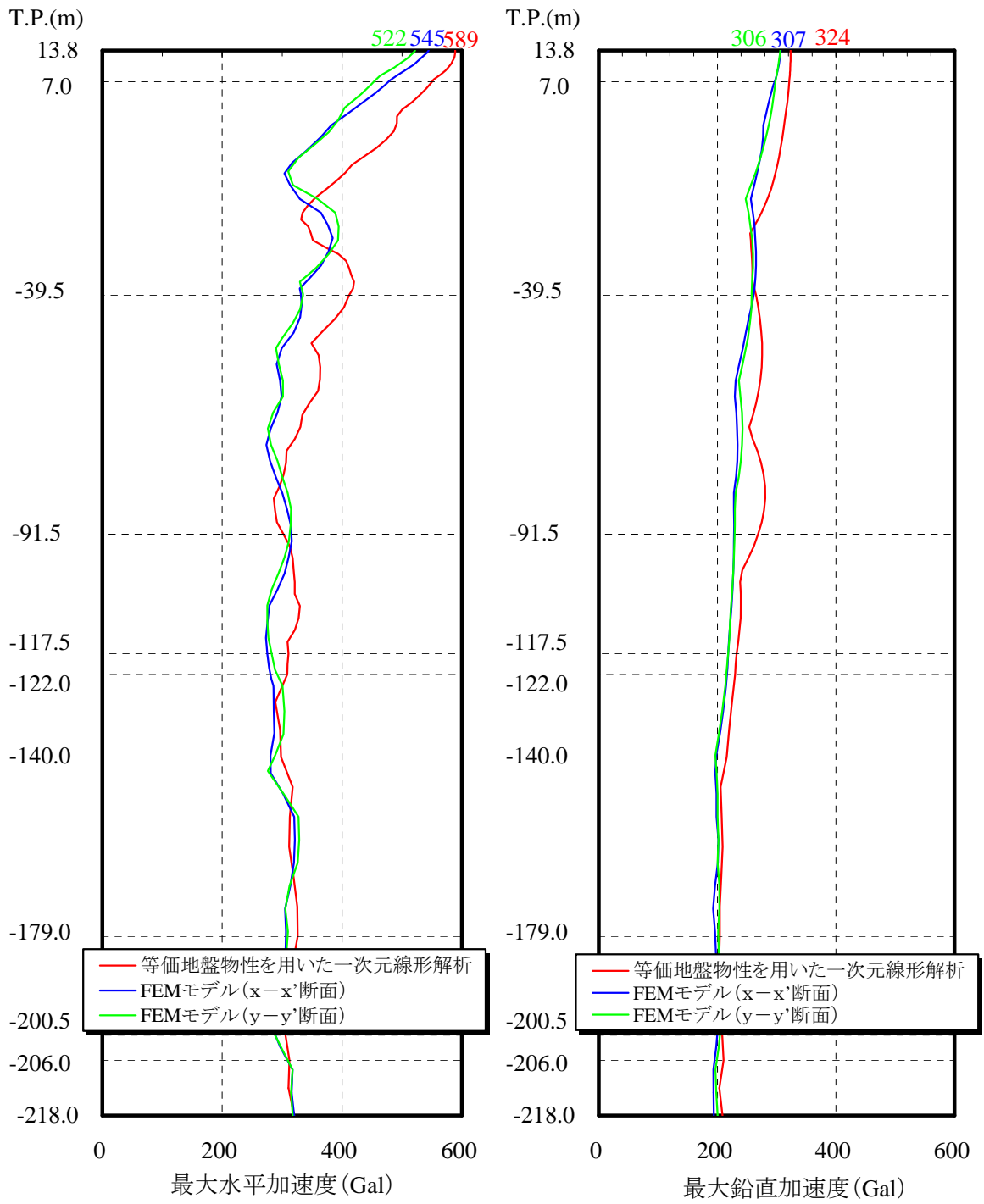
第 2-11 図(1) 動的解析による建屋応答の対比 (最大水平加速度)
(x - x' 断面、Ss-1、正 (水平)、正 (鉛直))



第 2-11 図(2) 動的解析による建屋応答の対比 (最大水平加速度)
($y - y'$ 断面、Ss-1、正 (水平)、正 (鉛直))



第 2-11 図(3) 動的解析による建屋応答の対比 (最大鉛直加速度)
($x - x'$ 断面、 $y - y'$ 断面、Ss-1、正 (水平)、正 (鉛直))



第 2-12 図 等価地盤物性を用いた一次元線形解析と F E Mモデルとの地盤応答の比較
 (x - x ' 断面、 y - y ' 断面、 Ss-1、正 (水平)、正 (鉛直))

Q3.

杭の水平抵抗力算定の考え方を整理して説明すること

申請者は、杭の水平抵抗力算定の考え方について、以下のとおり説明している。

杭の水平載荷試験の概要と、安定性評価における試験結果に基づく水平抵抗力の考え方について示し、また、「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 JEAG4616-2003」⁽¹⁾に基づく、詳細設計における水平抵抗の考え方もあわせて示すとしている。

3.1 杭の水平載荷試験の概要

原位置において、基本設計で設定した単杭の水平抵抗力を確認するために、杭の設置レベル、杭径、杭頭条件を満足するように杭の水平載荷試験を実施している。杭頭条件としては、十分な杭間隔を設けた2本杭の杭頭をフーチングで繋ぐことで、単杭としての杭頭固定を模擬するとしている。また、フーチング厚さは、貯蔵建屋の基礎スラブ厚さと同じ2.5mとしている。

2本組杭の水平載荷のため、載荷方向の前方杭（押込み側）は軸力増、後方杭（引抜き側）は軸力減の状態となり、第3-1図に示すように軸力に応じて杭体の曲げ剛性（割線剛性）が変化することにより、水平荷重の分担に差が生じている。

3.2 安定性評価における水平抵抗力の考え方

安定性評価（慣用法解析）においては、杭基礎全体としての水平抵抗力を確認することから、軸力の影響は考慮せず、試験における2本組杭

の最大水平荷重を2で除すことによって、平均的な単杭の水平抵抗力を算定しているとしている。

3.3 詳細設計における水平抵抗の考え方

詳細設計の内、基準地震動 S_s に対する検討では、杭の水平載荷試験による水平抵抗力は用いずに、杭体に生じる変形、応力が終局曲率、終局応力以下であることを確認している。以下に、杭の変形、応力の評価方法を示す。

- ① 一般に群杭基礎では、複数本杭の杭間の地盤ばねを介した相互作用が生じ、群杭全体の杭頭剛性が単杭の杭頭剛性の杭本数倍よりも低下する。そこで、詳細設計では、地震応答解析モデルにおいて群杭効果を考慮した地盤ばねを用いて貯蔵建屋の応答を評価し、杭基礎に作用する外力を算出する。さらに、地盤震動による影響を考慮するために、自由地盤の杭先端からの地盤変位を杭周地盤ばねを介して外力として作用させる。
- ② 杭応答は、杭を曲げせん断棒に、地盤を杭周地盤ばねとしてモデル化して評価する。ここで、杭周地盤ばねは、群杭を1本の曲げせん断棒として、群杭効果を考慮したばねを杭本数で除したものとする。作用力としては、地震応答解析結果による杭頭位置でのせん断力、転倒モーメント、鉛直力及び地盤変位を用いた応答変位法で評価する。
- ③ 応答変位法には、群杭を1本の曲げせん断部材にモデル化する杭基礎集約モデルと、群杭を二次元配置として多本数の曲げせん断部材にモデル化する杭基礎全体モデルがある。(第3-2図参照)
- ③-1 杭基礎集約モデルでは、杭の最大、最小軸力と、全体の杭頭水平力を杭本数で除した杭1本当たりのせん断力及び地盤変位を用いて、

軸力に応じた杭体の非線形性を考慮して応答評価する。この場合の許容限界は、杭体の曲率を、鉄筋降伏時の降伏曲率 ϕ_y の2倍以下とする。

- ③-2 杭基礎全体モデルでは、杭頭位置におけるせん断力、転倒モーメント、鉛直力及び地盤変位を用いて、変動軸力による剛性の変化を考慮できる。この場合の許容限界は、コンクリート縁圧壊状態での終局曲げモーメント M_u 以下かつ、終局曲率 ϕ_u 以下とする。

詳細設計の内、基準地震動 S_s に対する検討では、許容限界を「基準地震動 S_s により杭体に生じる曲率が鉄筋降伏時の曲率 ϕ_y の2倍以下」とする杭基礎集約モデルで評価するとしている。

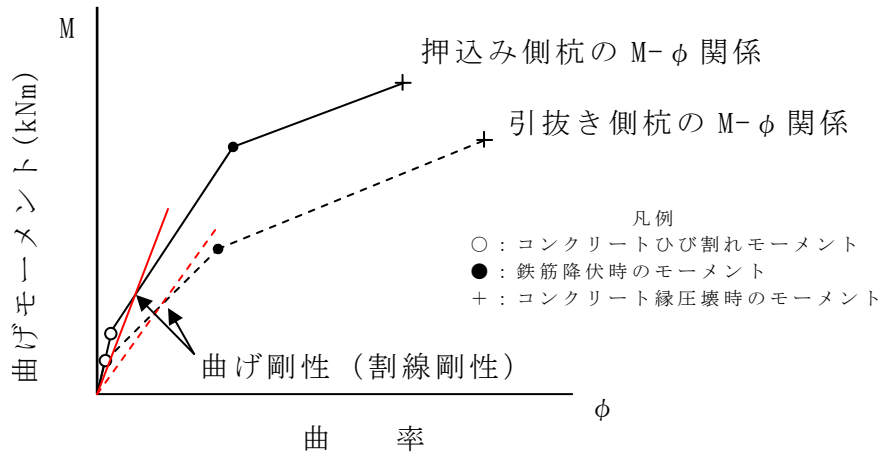
すなわち、杭の最大軸力、最小軸力に応じた杭体の非線形性を考慮して応答評価することとなる。

3.4 まとめ

以上のことから、杭の水平抵抗力について、安定性評価においては、杭基礎全体として確認するために、杭の水平載荷試験における2本組杭の最大水平荷重を2で除すことにより、平均的な水平抵抗力を算定していることは妥当なものと判断した。一方、詳細設計の内、基準地震動 S_s に対する水平抵抗の検討においては、群杭効果を適切に評価すると共に、杭位置によって異なる軸力に応じて杭体に生じる変形、応力を算定することを確認した。

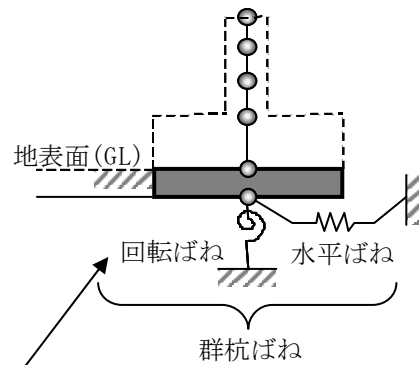
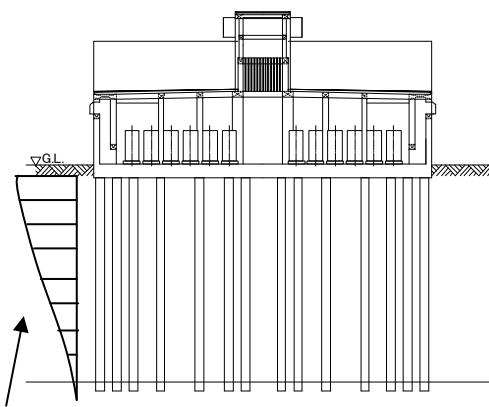
3.5 参考文献

- (1) 社団法人日本電気協会 原子力規格委員会：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 JEAG4616-2003、2003



第 3-1 図 変動軸力時の杭体の曲げ剛性の概念図

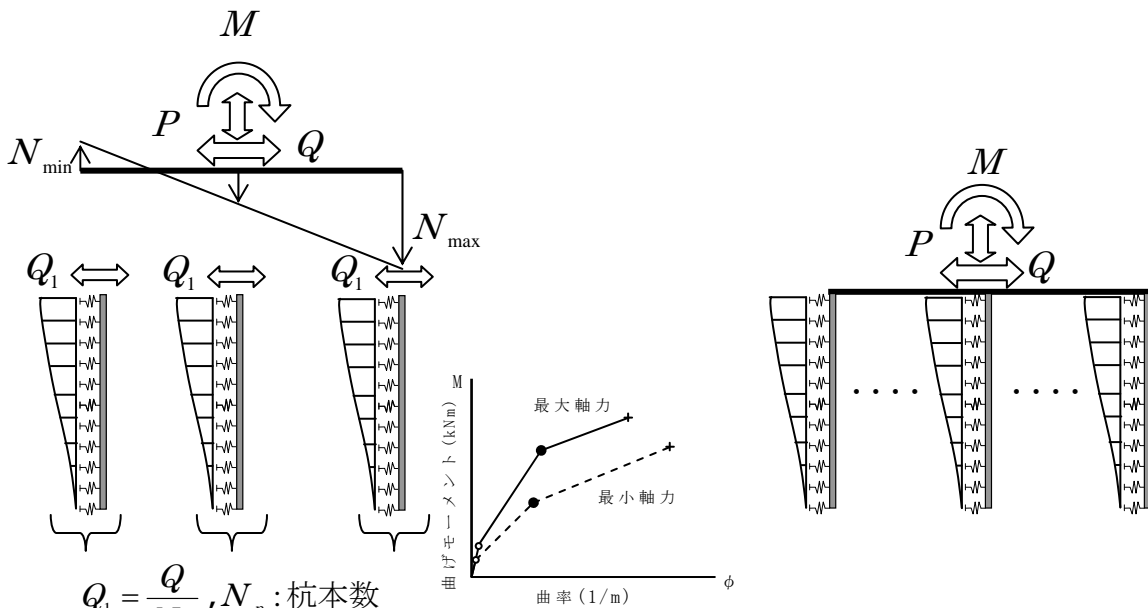
① 杭に作用する外力の算出



- 地盤震動による強制変位
 - ・ 自由地盤の地震応答解析による杭先端からの地盤変位

- 地震応答解析結果による地盤ばね反力
 - ・ せん断力 Q 、転倒モーメント M 、鉛直力 P

②、③ 応答変位法による杭応答評価



< 杭基礎集約モデルとして評価 >

< 杭基礎全体モデルとして評価 >

最大、最小軸力毎に応答評価

※ 杭周地盤ばねの非線形性及び軸力に応じた杭体の非線形性を考慮する。

第 3-2 図 群杭基礎と応答評価モデルの概念図

Q.4

杭の押込み試験の杭先端の沈下量について説明すること

申請者は、杭の押込み試験の杭先端の沈下量について、以下のとおり説明している。

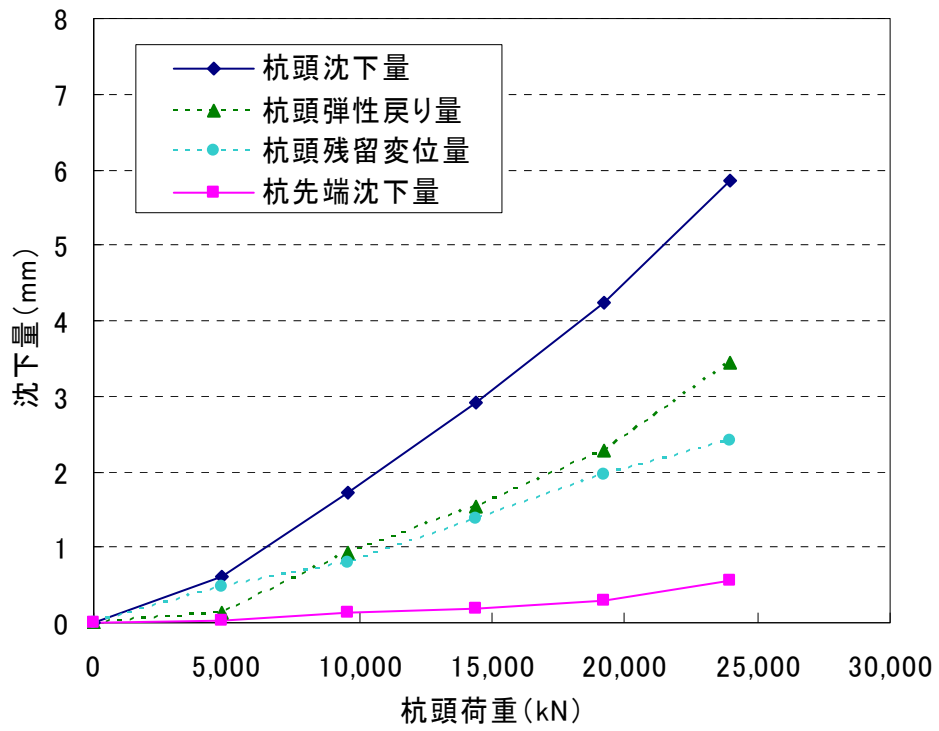
杭頭及び杭先端の沈下量を、第 4-1 表及び第 4-1 図に示す。杭先端の沈下量は、杭頭残留変位量に比べて十分小さい。杭頭沈下量のほとんどは杭体の弾性変形量であるが、塑性体である杭周地盤の下向きに働く摩擦力と、杭体の元に戻る力が釣り合うことで、杭頭荷重を除荷しても杭体に応力が掛かっていると考えられるとしている。そのため、弾性域の杭体にひずみが残りに、残留変位量として表れていると考えられるとしている。

なお、杭先端の残留変位量は 0.32mm 程度と、杭頭残留変位量の 1 割程度であり、杭頭残留変位量に対する杭先端地盤の沈下の影響は小さいと考えられるとしている。

以上のことから、杭の押込み試験の杭先端の沈下量は十分小さく、杭周地盤の摩擦力により杭体にひずみが残りに、杭頭残留変位量として表れているとしていることは、妥当なものと判断した。

第 4-1 表 杭頭及び杭先端の沈下量

荷重(kN)	4,800	9,600	14,400	19,200	24,000
杭頭沈下量(mm)	0.60	1.72	2.91	4.25	5.85
(杭頭弾性戻り量)(mm)	0.13	0.93	1.53	2.29	3.44
(杭頭残留変位量)(mm)	0.47	0.79	1.38	1.96	2.41
杭先端沈下量(mm)	0.02	0.12	0.18	0.29	0.55



第 4-1 図 杭頭及び杭先端の沈下量

(参考) 30 分間の荷重保持時の沈下量の変化についての考察

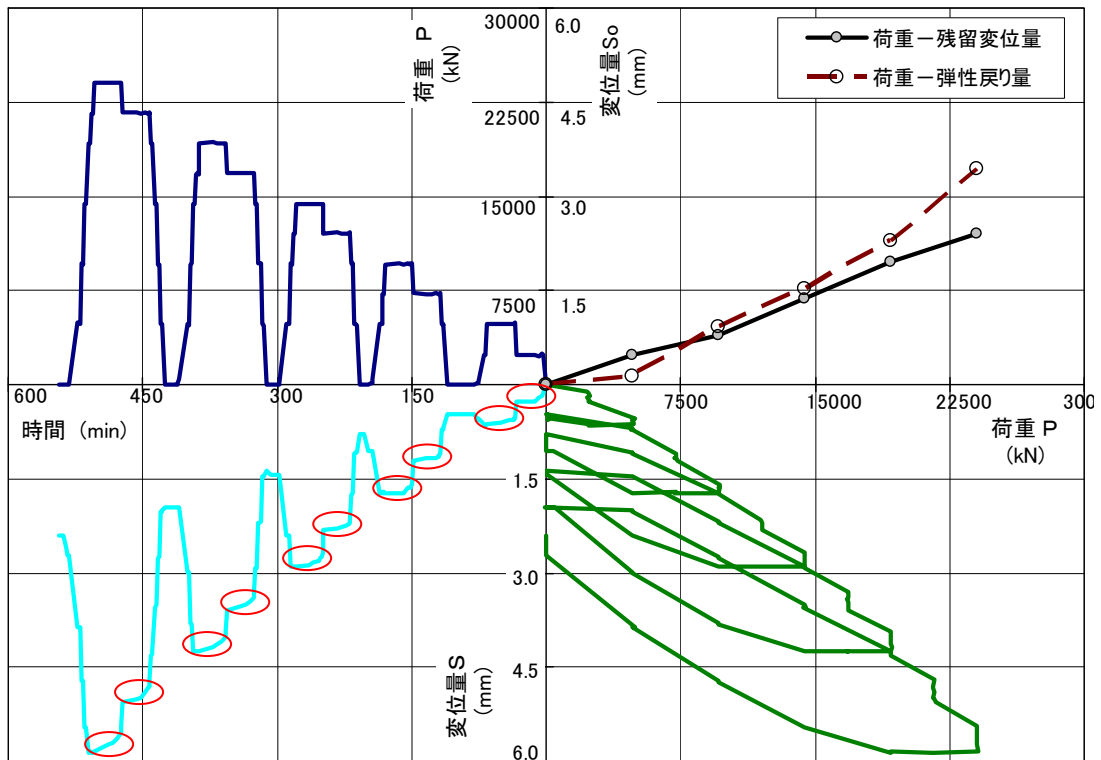
第 1 図に示す 30 分間の荷重保持時の沈下量を、第 1 表に示す。荷重保持時の沈下量と時間の関係について、第 2 図及び第 3 図に示す。

第 3 図の荷重～ $\Delta S / \Delta \log t$ はほぼ線形に推移しており、明瞭な折れ点が見られないことから第 1 限界抵抗力には達していないと考えられる。

なお、「杭の鉛直載荷試験方法・同解説」⁽¹⁾によれば『第 1 限界抵抗力に達したときには周面抵抗力がほぼ極限状態にある』とのことから、本試験では最大荷重時においても杭周の摩擦力により荷重が保持されていると考えられる。

(参考文献)

(1) 社団法人地盤工学会：杭の鉛直載荷試験方法・同解説 第一回改訂版、2002

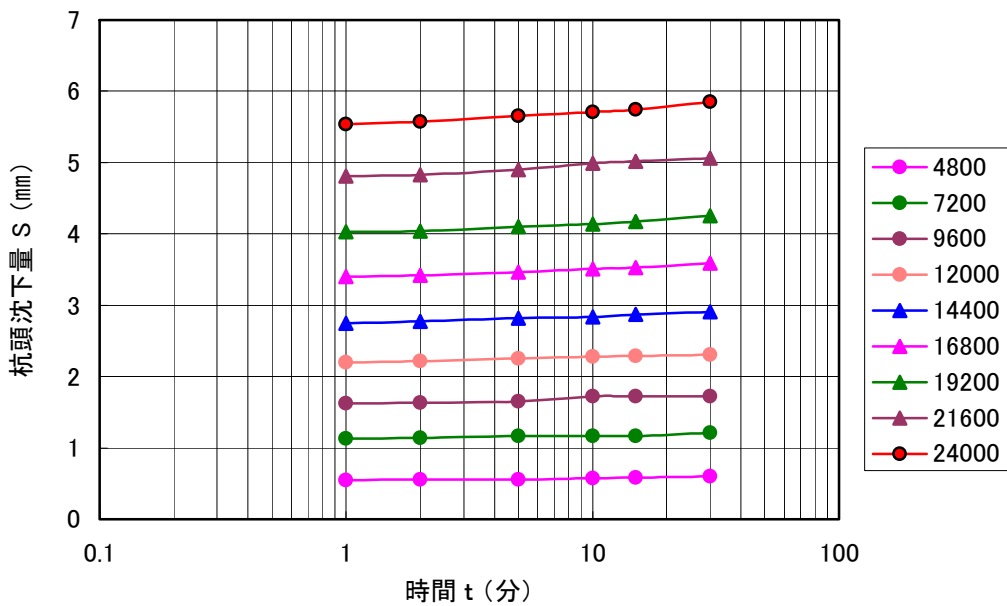


○ : 30 分の荷重保持時間

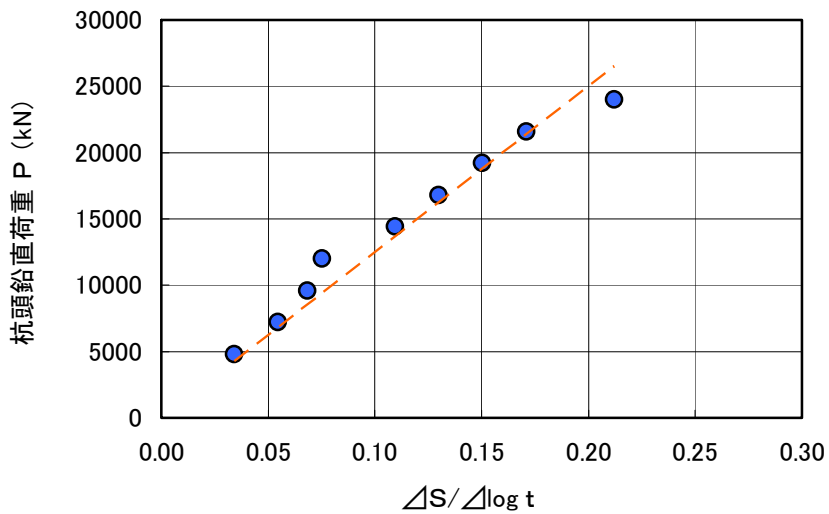
第 1 図 押し込み試験結果

第1表 荷重保持時間中の杭頭の沈下量

杭頭荷重 P (kN)	杭頭変位 (mm)			沈下変化率 $\Delta S / \Delta \log t$
	S_1	S_{30}	ΔS	
4800	0.55	0.60	0.05	0.03
7200	1.13	1.21	0.08	0.05
9600	1.62	1.72	0.10	0.07
12000	2.20	2.31	0.11	0.08
14400	2.75	2.91	0.16	0.11
16800	3.40	3.59	0.19	0.13
19200	4.03	4.25	0.22	0.15
21600	4.81	5.06	0.25	0.17
24000	5.54	5.85	0.31	0.21



第2図 沈下量 (S) と時間 (log t) の関係



第3図 荷重(P)と沈下量 (ΔS) / 時間 (Δ log t) の関係