

2022年5月26日規制庁ヒアコメントに対する回答

リサイクル燃料貯蔵(株)

① 基礎マットの新旧応力比較(同じ要素)

旧設工認と今回申請の設工認における基礎マットの代表要素の応力は以下のとおりである。選定要素は、設計配筋に対する軸力及び曲げにより決まる必要鉄筋の比、若しくは、せん断力の許容値に対する検討応力の比のいずれかについて、余裕度が最も厳しくなる箇所を選定している。

要素番号	方向	応力	旧設工認	今回設工認
834 (旧設工認 選定要素)	X	軸力N (kN/m)	-1209	-1324
		曲げモーメントM(kN・m/m)	3300	4060
		面外せん断力Q (kN/m)	1244	1486
	Y	軸力N (kN/m)	-659	-705
		曲げモーメントM(kN・m/m)	1153	1330
		面外せん断力Q (kN/m)	1648	1910
2103 (今回設工認 選定要素)	X	軸力N (kN/m)	441	364
		曲げモーメントM(kN・m/m)	5342	7343
		面外せん断力Q (kN/m)	1140	1353
	Y	軸力N (kN/m)	-1218	-1364
		曲げモーメントM(kN・m/m)	1224	1517
		面外せん断力Q (kN/m)	816	836

注：軸力の符号は圧縮側を正とする。

② 杭の応力の内訳（軸力と転倒モーメントの組合せ）

杭の応力は、常時作用する軸力と地震応答解析から求めた転倒モーメントによる軸力の組合せで決定している。その結果は以下のとおりである。

最大軸力

	旧設工認	今回設工認
軸力 (常時荷重)	4496	4496
軸力 (地震時鉛直震度)	2194 (0.4)	2725 (0.4)
付加軸力 (転倒モーメント)	2752 (1.0)	3198 (1.0)
合計	8126	8784

最小軸力

	旧設工認	今回設工認
軸力	3286	3286
軸力 (地震時鉛直震度)	-1604 (0.4)	-1991 (0.4)
付加軸力 (転倒モーメント)	-2752 (1.0)	-3198 (1.0)
合計	-108	-708

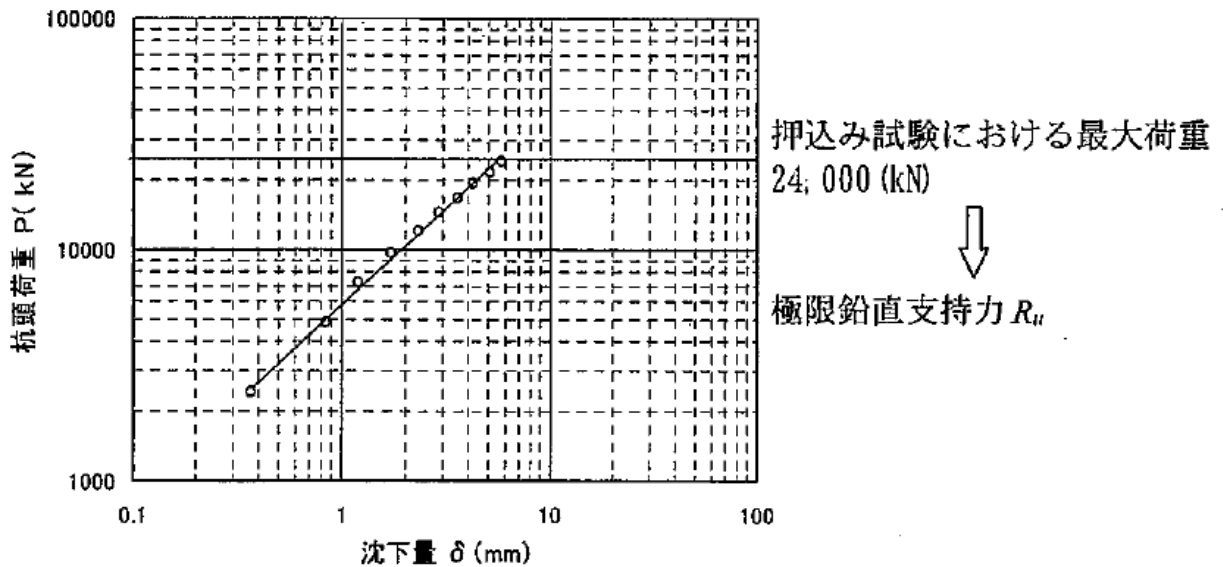
注：カッコ内の数字は、地震時水平力と鉛直力の組合せ係数法（1.0：0.4）で用いた係数を示す。また、表中の値は、組合せによる大きい方の値を表示。

③ 試験杭による許容荷重の定め方

杭の許容鉛直支持力および終局鉛直支持力は、「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（JEAC4616-2009）」に示される鉛直裁荷試験を行う場合の考え方に基づいて以下のように定めている。

許容鉛直支持力		長期荷重	短期荷重	Ss 地震時荷重	備考
		長期許容鉛直支持力 (R_a)	短期許容鉛直支持力 (R_s)	終局鉛直支持力 (R_{ua})	
設定方法					
鉛直裁荷試験を行う場合	鉛直裁荷物験結果により得られる極限鉛直支持力 R_u 又は第2限界抵抗力 R_{ul} に基づいて求める。	$R_a = 1/3 \times R_u$ 又は $R_a = 1/3 \times R_{ul}$	$R_s = 2/3 \times R_u$ 又は $R_s = 2/3 \times R_{ul}$	$R_{ua} = 1/1.2 \times R_u$ 又は $R_{ua} = 1/1.2 \times R_{ul}$	R_{ua} において第2限界抵抗力を超えて鉛直支持力が上昇する場合には、1.2で除さなくてもよい。

杭の鉛直載荷試験による第1限界抵抗力は、試験杭による値から以下のように定めるが、下図においては最大荷重 (=24,000kN) を載荷した状態においても明瞭な折れ点は現れておらず、第1限界抵抗力以内の荷重値である。そこで、鉛直載荷試験における最大荷重 24,000 (kN) を地盤の極限鉛直支持力 R_u としている。



上記の試験結果を用いて、杭の許容支持力を以下の通り求めている。

- 長期許容鉛直支持力 : $R_a = 1/3 \times R_u = 24,000/3 = 8,000$ (kN)
- 短期許容鉛直支持力 : $R_s = 2/3 \times R_u = 24,000 \times 2/3 = 16,000$ (kN)
- 終局鉛直支持力 : $R_{ua} = 1/1.2 \times R_u = 24,000/1.2 = 20,000$ (kN)

④ 地震応答解析の杭周面地盤ばねの算定方法（コメント回答再掲）

リサイクル燃料貯蔵株式会社	
提出日	2022年3月9日
管理表No.	0209-70 改訂00

項目	コメント内容
耐震 (第7条)	解放基盤から建屋基礎底盤での入力地震動の作成にあたり、SHAKEによる一次元波動理論に基づく評価を行っているが、基礎杭の拘束効果は考慮されているのか。先行施設での評価例等も確認の上、影響の有無について説明すること。

(回 答)

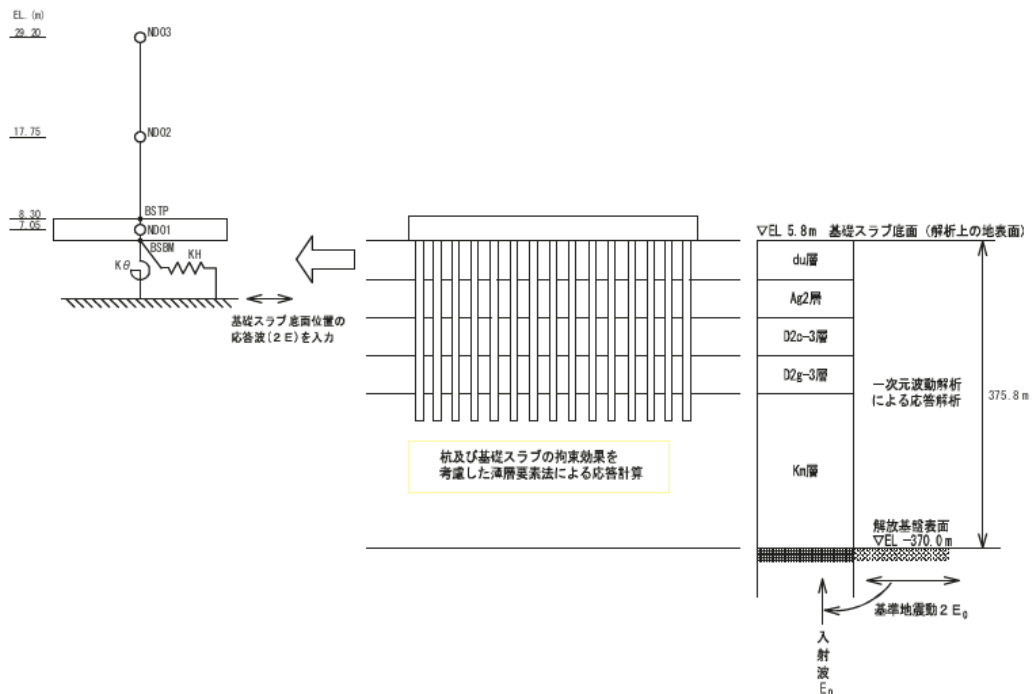
当社の地盤の地震応答解析ではSHAKEを用いているが、杭による拘束効果（群杭効果を考慮した基礎底版の地盤ばね）については、貯蔵建屋地震応答解析モデルの地盤ばねにて考慮している。設工認には、以下のような記載をしている。

「水平ばね、回転ばね及び鉛直ばねは群杭効果を考慮して評価している。いずれのばねも振動数に依存した複素剛性として得られるが、図 8.2-19 に示すようにばね定数として実部の代表値 (K_c) を、また、減衰係数 (C_c) として建屋 1 次形の固有円振動数に対応する虚部の値と原点を結ぶ直線の傾きを採用することにより近似する。」

(添付 5-2 使用済燃料貯蔵建屋の耐震性に関する説明書 8.2.3 地震応答解析モデル (1)地震応答解析モデルの概要) ※

※ 群杭効果を考慮した地盤ばねの算定方法は別添 1 を参照

一方、日本原子力発電東海第二発電所の貯蔵建屋においては、地震応答解析モデルの地盤ばねの算定において、三次元薄層法を用いた地盤ばねの算定を行っている。



日本原子力発電東海第二発電所 工事計画認可申請書 添付資料
V-2-2-4 使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答計算書より抜粋

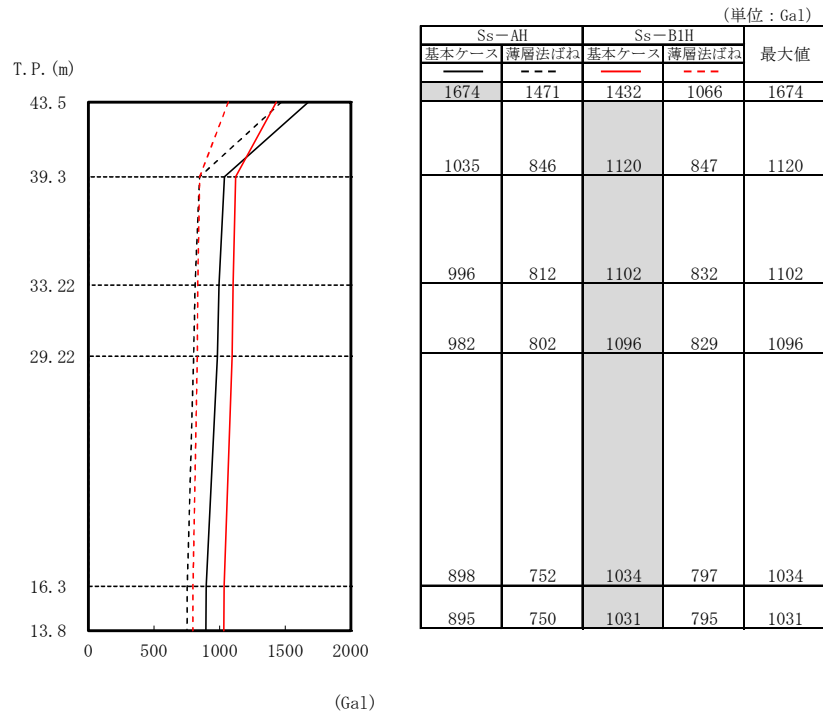
当社の手法による地震応答解析モデル（群杭係数を用いた地盤ばね）と、日本原子力発電が用いている地震応答解析モデル（薄層法[※]を用いた地盤ばね）を用いた地震応答解析を比較する。

検討で用いた地震動は、地震応答解析において最大応答を与える基準地震動 S_s-A および S_s-B1 を用いている。

※ 薄層法による地盤ばねの算出方法は別添2を参照。

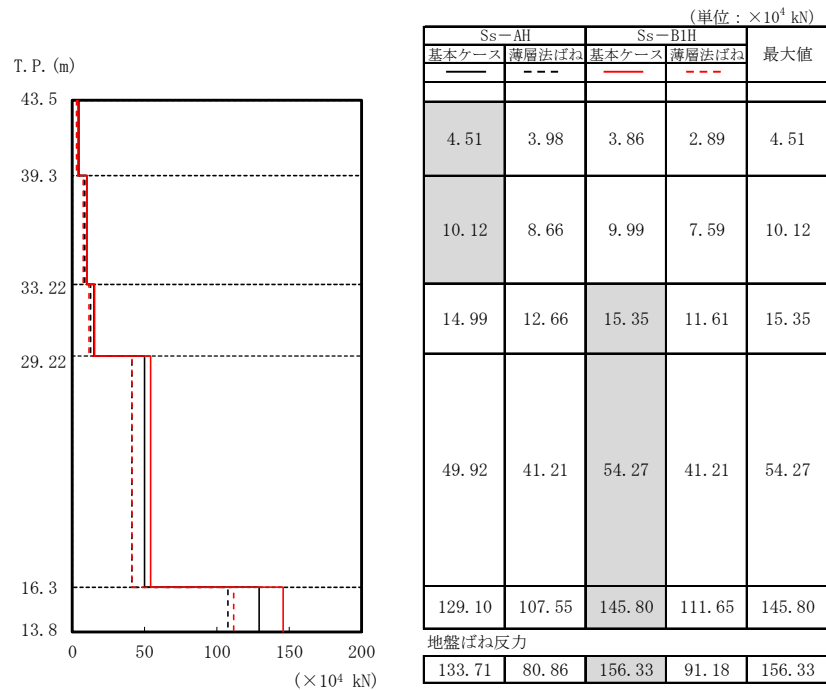
群杭係数法を用いた地盤ばねによる地震応答解析結果（基本ケース）と、薄層法を用いた地盤ばねによる地震応答解析結果を図1に示す。

両者の応答の比較から、群杭係数を用いた地盤ばねを用いた地震応答解析結果の方が、薄層法を用いた地盤ばねによる地震応答解析結果より大きな応答となることから、現状の地盤ばねの設定方法は保守的な評価を与えることとなる。



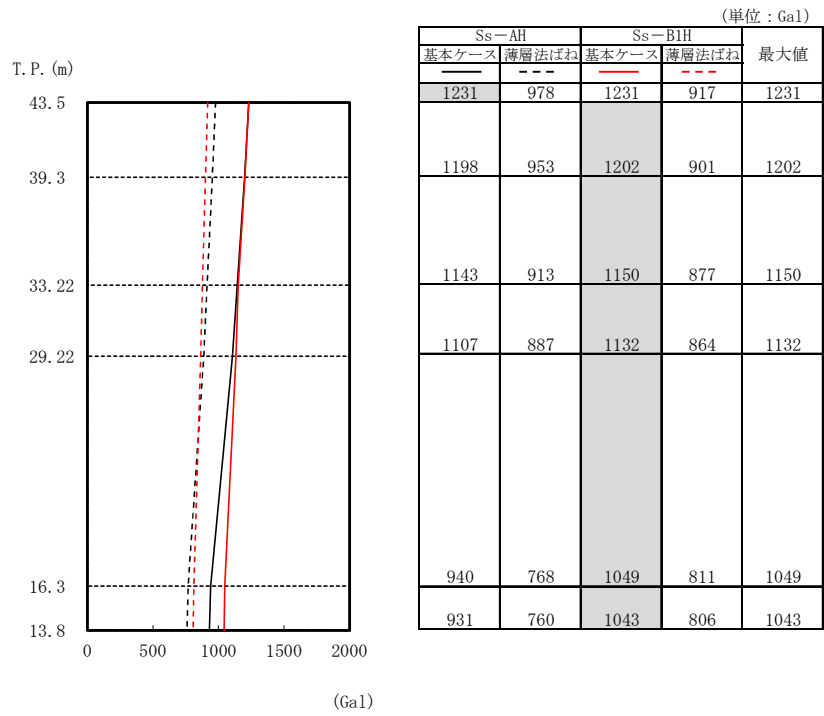
注：網掛けは最大値を示す。

図1(1) 建屋の最大応答加速度の比較 (Ss-A 及び Ss-B1, NS 方向)



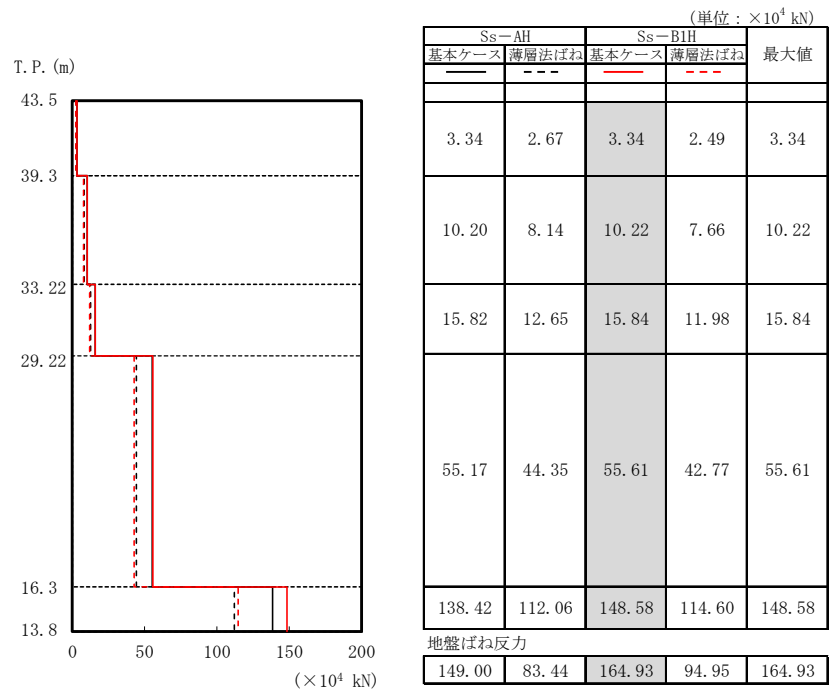
注：網掛けは最大値を示す。

図1(2) 建屋の最大応答曲げモーメントの比較 (Ss-A 及び Ss-B1, NS 方向)



注: 網掛けは最大値を示す。

図1(3) 建屋の最大応答加速度の比較 (Ss-A 及びSs-B1, EW方向)



注: 網掛けは最大値を示す。

図1(4) 建屋の最大応答せん断力の比較 (Ss-A 及びSs-B1, EW方向)

以上

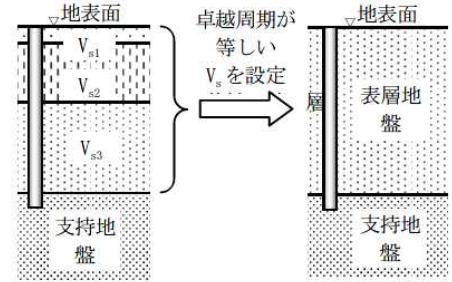
群杭効果を考慮した地盤ばねの算定

群杭係数は、地盤を表層地盤と支持地盤の2層に区分し、それぞれの物性値を用いて評価する。表層地盤は、 Tn_3 層、 Tn_2 層、 Sn_4 層の3層を1層に置換する。具体的には、式(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。S波速度以外の物性値（湿潤密度，ポアソン比）は第1層となる Tn_3 層の値を用いる。

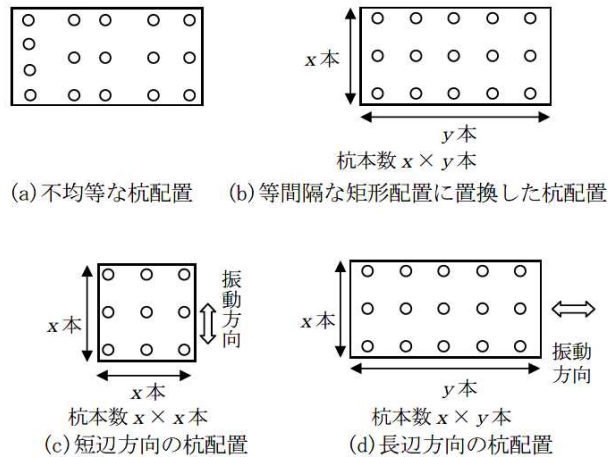
$$T_G = \sqrt{32 \sum_{i=1}^n \left\{ h_i \left(\frac{H_{i-1} + H_i}{2} \right) \right\} / V_{Si}^2} \quad (1)$$

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下図に示す通り不均等な配置であるため、均等な矩形配置に置換してから群杭係数を算定する。



この時、杭中心間隔は式(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。

$$R = \sqrt{L_x \times L_y / N} \quad (2)$$

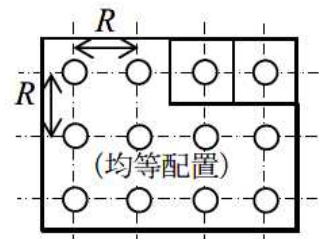
ここに

- R : 杭中心間隔 (m)
- L_x, L_y : 短辺方向, 長辺方向の柱芯間隔 (m) (均等配置)
- 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。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、 $x = L_x / R$ 、 $y = L_y / R$ 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。

- ① 短辺方向 : $x \times x$ 本
- ② 長辺方向 : $x \times y$ 本



求められた群杭係数を，表1に示す。

表1 群杭係数

		EW 方向	NS 方向
水平方向	α_{HH}	0.126	0.0928
回転方向	α_{RR}	0.411	0.325
鉛直方向	α_{VV}	0.197	

以上

薄層法を用いた地盤ばねの算定

薄層法モデルのイメージを図1に示す。薄層法は、地盤を薄い水平成層に分割したモデルにより水平方向に無限に広がる地盤をモデル化することによって、振動が地盤内を3次元的に伝播する現象を評価する手法である。

薄層法モデルの主な特徴は以下の通りである。

- 地盤を薄い水平成層にモデル化し、層毎に物性値を与える
- 杭は設計における杭配置に応じてモデル化し (X, Y, Z) の3次元的に節点座標を与える
- 基礎スラブは無質量な剛基礎にモデル化する

なお、薄層法モデルでは杭の支持層 (S_{n4} 層) が杭先端以深に半無限状に続いていると仮定する。

① 杭及び地盤のモデル化

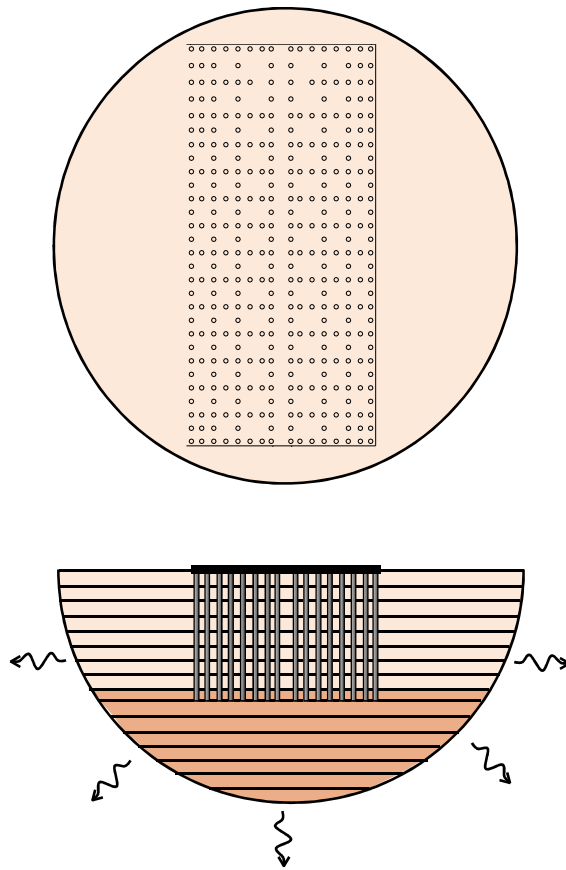


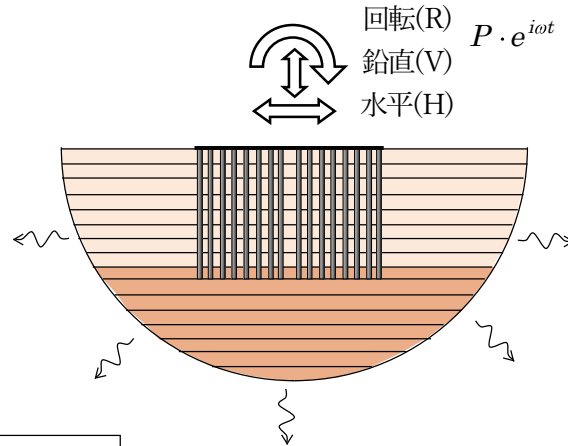
図1 薄層法モデルのイメージ

薄層法モデルを用いた杭頭加振解析により群杭ばねを算出する手順を以下に示す。薄層法による杭頭剛性（複素インピーダンス）は水平・回転・鉛直方向について円振動数 ω ごとに与えられる。

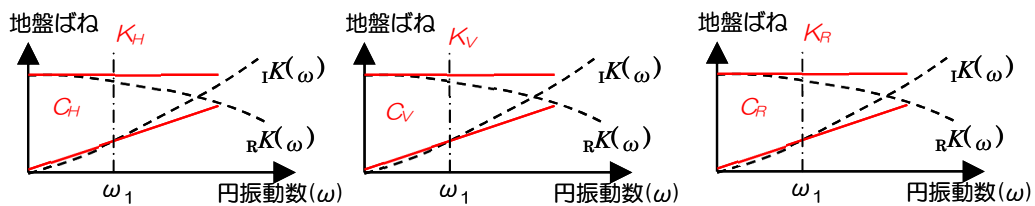
このとき、群杭ばねのばね剛性 K は円振動数 $\omega \approx 0$ におけるインピーダンス実部の値とする。

減衰係数 C は原点と建屋連成系の一次振動数 ω_1 におけるインピーダンス虚部の値を通る ω の一次式の傾きとする。

② 杭頭加振解析



③ 杭頭インピーダンスの出力



④ 群杭ばね値の算出

- ばね剛性 K は、円振動数 $\omega \approx 0$ におけるインピーダンス実部の値 $R K(\omega)$
- 減衰係数 C は、インピーダンス虚部の値 $I K(\omega)$ 及び建屋の一次固有円振動数 ω_1 より次式で算出する。

$$C = IK(\omega)/\omega_1$$

上記の方法で算出した群杭ばねの値を以下に示す。

表1 薄層法に基づく群杭ばね（水平方向）

		群杭ばね		C算定時の固有振動数
N S 方向	水平ばね	K_{HH}^G (kN/m)	7.959E+07	3.43
		C_{HH}^G (kN · sec/m)	5.997E+06	
	回転ばね	K_{RR}^G (kN · m/rad)	5.420E+11	
		C_{RR}^G (kN · m · sec/rad)	2.071E+10	
E W 方向	水平ばね	K_{HH}^G (kN/m)	8.792E+07	3.54
		C_{HH}^G (kN · sec/m)	6.124E+06	
	回転ばね	K_{RR}^G (kN · m/rad)	1.598E+11	
		C_{RR}^G (kN · m · sec/rad)	4.498E+09	

表2 薄層法に基づく群杭ばね（鉛直方向）

	群杭ばね			C算定時の固有振動数
UD方向	鉛直ばね	K_W^G (kN/m)	3.040E+08	6.88
	回転ばね	C_W^G (kN・sec/m)	2.789E+07	

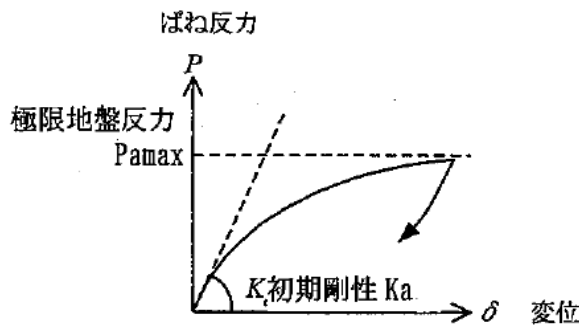
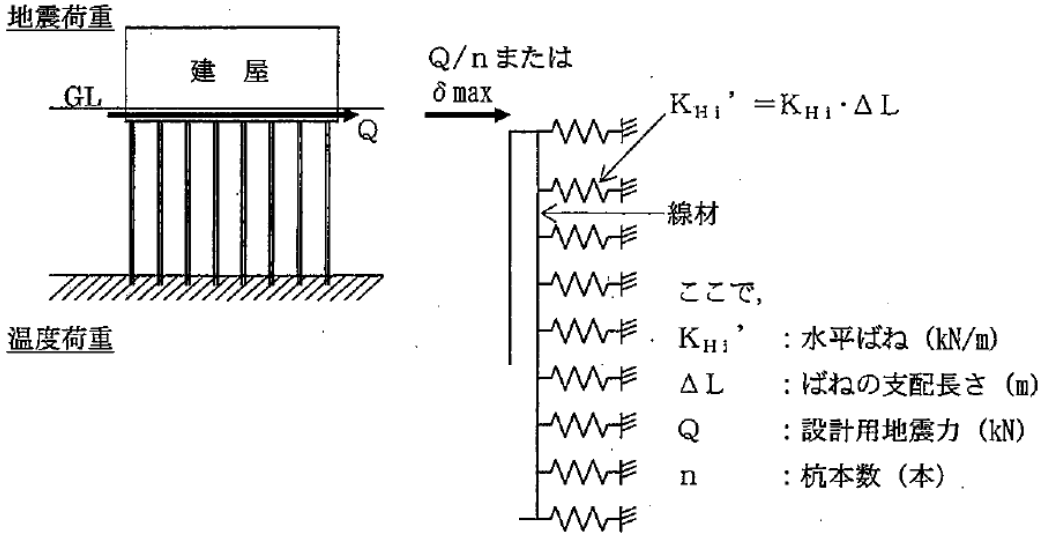
以上

⑤ 杭応力算定モデルのばね値の定め方

杭応力の算定に用いる杭周地盤ばねは、「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 (JEAC4616-2009)」に示される方法に基づき、群杭効果を考慮して評価している。

モデルは下図に示す弾性支承ばりモデルであり、モデルの水平ばねは(1)式で評価する。地盤ばねの非線形性は下図の双曲線モデルによって考慮する。

(水平地盤ばね)



$$K_{Hi} = \alpha_{HH}^{4/3} \cdot k_h \cdot D = \alpha_{HH}^{4/3} \cdot \frac{1.3E_s}{(1-\nu^2)} \cdot \left(\frac{E_s \cdot D^4}{E_s \cdot I_p} \right)^{\frac{1}{12}} \quad (1) \text{式}$$

ここで、

- | | | |
|-----------------|---|-----------------------------------|
| K_{Hi} | : | 単位長さあたりの水平ばね (kN/m ²) |
| α_{HH} | : | 杭頭における水平ばねの群杭係数 |
| $k_h \cdot D$ | : | Francis のばね (kN/m ²) |
| E_s | : | 地盤のヤング係数 (kN/m ²) |
| ν | : | 地盤のポアソン比 |
| D | : | 杭径 (m) |
| $E_p \cdot I_p$ | : | 杭体の曲げ剛性 (kN・m ²) |
| G | : | 地盤のせん断弾性係数 (kN/m ²) |

(せん断地盤ばね)

剛性： $K_{b(G)} = N_p \cdot K_{b(S)}$

$$K_{b(S)} = \frac{G \cdot A_{S(S)}}{\ell}$$

$$\frac{A_{S(S)}}{A_{S0(S)}} = \frac{\ell}{1.25D} \quad \left(\frac{\ell}{D} > 1.25 \text{のとき} \right)$$

$$\frac{A_{S(S)}}{A_{S0(S)}} = 1.0 \quad \left(\frac{\ell}{D} \leq 1.25 \text{のとき} \right)$$

$$\frac{A_{S0(S)}}{D^2} = 2.15 \left(\frac{V_s}{V_p} \right)^{-0.35}$$

$$\frac{V_s}{V_p} = \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}}$$

減衰係数： $C_b = 0$

ここで、 G : 地盤のせん断弾性係数 (kN/m²)

N_p : 杭本数

V_s : 地盤のS波速度 (m/s)

ℓ' : 杭の質点の支配長さ (m)

V_{La} : Lysmerの波動速度 (m/s)

ℓ : 杭の質点間距離 (杭要素の長さ) (m)

ν : 地盤のポアソン比

α_{HH} : 杭頭における水平ばねの群杭係数

ρ : 地盤の密度 (t/m³)

$\alpha_{HH}^{\frac{4}{3}}$: Francisのばねに考慮する群杭効果

$E_p \cdot I_p$: 杭体の曲げ剛性 (kN・m²)

$K_{b(G)}$: 群杭のせん断地盤ばね剛性 (kN/m)

$K_{b(S)}$: 単杭のせん断地盤ばね剛性 (kN/m)

$A_{S(S)}$: 単杭の等価土柱面積 (m²)

$A_{S0(S)}$: 単杭の等価土柱面積の下限值 (m²)

D : 杭径 (m)

V_p : 地盤のP波速度 (m/s)

⑥ 杭応力の入力変位の考え方（コメント回答再掲）

リサイクル燃料貯蔵株式会社	
提出日	2022年4月12日
管理表No.	0325-08 改訂01

項目	コメント内容
耐震 (第7条)	<p>杭の機能維持検討に用いる応力分布について、地震応答解析結果に基づく杭の応力分布と比較して、妥当性及び保守性について説明すること。</p> <p><4/7 追加コメント></p> <ul style="list-style-type: none"> ・杭の応力として配筋量の少ない下部杭の耐力と応力の余裕度についても言及すること。 ・地震応答解析においても地盤～杭の連成系の地盤ばねを用いていることを明記すること。

(回答)

検討用地震力により生じる杭応力には、建屋の地震応答解析モデルにより求めた上部構造による地震力（建屋からのせん断力）と、地盤の地震応答解析（SHAKE）により算定した地盤の変形により生ずる応力を考慮している。なお、建屋の地震応答解析モデルの基礎底面ばね（水平および回転）は、群杭効果を考慮した地盤～杭連成系のばねと等価なばねを取り付けており、地盤及び杭の効果を含んだばねとなっている。

杭に作用する上部構造による地震力は、上部構造のせん断力をすべての杭が均等に負担することとして1本あたりのせん断力を算出している。

上部構造による地震力については、不確かさを含めたすべての基準地震動 S_s による地震力に余裕を見た検討用地震力とし、地盤の変形により生ずる応力を求める際に用いる地盤の変位は、すべての基準地震動 S_s に対する地盤の地震応答解析結果のうち、杭先端位置に対する地盤の相対変位の包絡値を採用している。（図-2 参照）

計算にあたっては、図-1に示すように、杭1本あたりの建屋からのせん断力の最大値と地盤変形の最大値を重ね合わせて杭応力を求めており、建屋からのせん断力は貯蔵建屋の基礎版位置から作用させ、地盤変形は「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（J E A C 4 6 1 6 -2009）」に示される方法に基づき、群杭効果を考慮した地盤ばねを介して入力している。

上記のように、すべての地震応答解析結果の最大値をカバーした値に余裕をみた建屋からのせん断力と地盤変形を考慮しているため、実際の地震応答解析結果よりも大きな値を入力することになり、個々の基準地震動による応答とは一致しないが保守的な荷重（変位）設定となっている。

先述のように、地震応答解析モデルの底面ばねには、地盤～杭連成系の地盤ばねを取り付けており、杭支持構造物の特性を取り入れた解析を実施している。先行プラントでも、当社と同様に杭基礎を考慮した底面ばねを用いた例や、地盤を有限要素法でモデル化してその中に杭を取り込んだ例等があるが、いずれの例も当社と基本的考え方は同じであり、上部構造の地震力と地盤の変形を同時に考慮して杭の設計を行っている考え方についてもその考え方は当社と同じである。

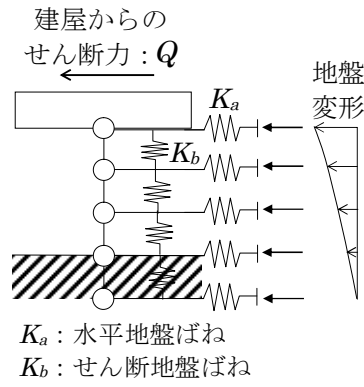


図-1 応答変位法による杭応力の算定方法 (概念図)

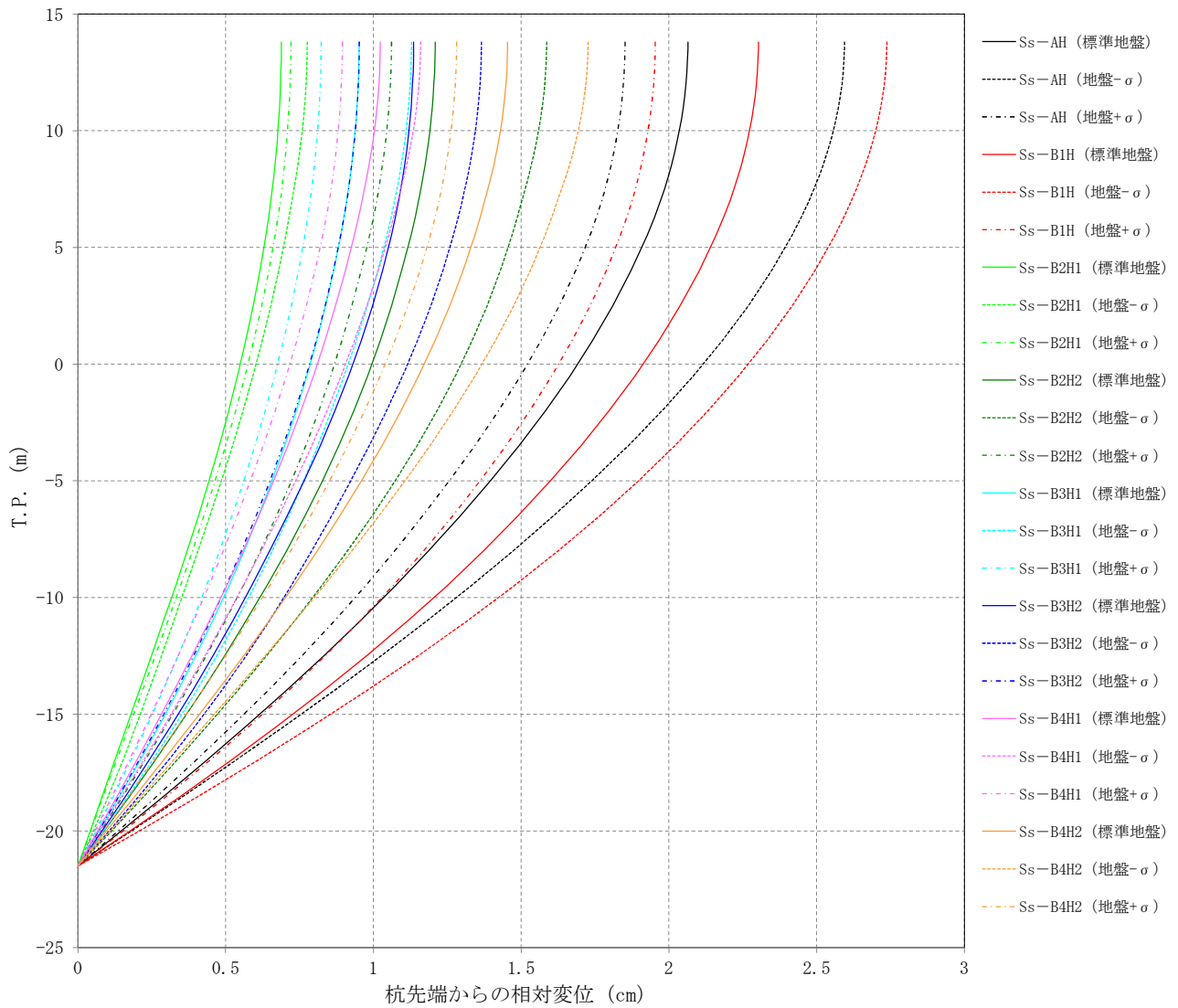
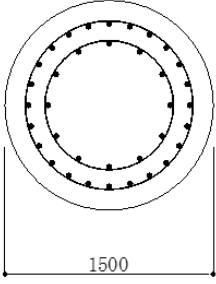
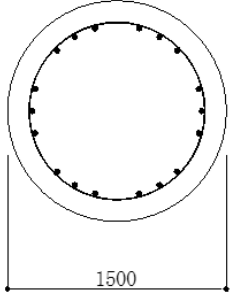


図-2 地盤応答解析による杭先端から相対変位の重ね書き (基準地震動 S s)

貯蔵建屋の杭に関する諸元は以下のとおりである。(添付 5-2-1 使用済燃料貯蔵建屋の耐震性に関する計算書参照)

	上杭	下杭
配筋図		
杭深度(m)	T. P. 13.8 m ~ T. P. 6.3 m	T. P. 6.3 m ~ T. P. -20.0m
設計配筋	36-D38	18-D38
断面積	41040	20520
帯筋	2-D19@100	D19@100
Pw (%)	0.85	0.14

上記の杭に対して、短辺方向 (EW 方向) の応力解析結果が、「図 8.6-2 杭の応力解析結果 (EW 方向)」に示している。

この応力を用いて杭の断面検討を行った結果は以下のとおりである。

表 1.1-2 杭体の曲げモーメントと終局曲げ強度の比較 (EW 方向)

荷重ケース		位置	検討用地震力による 曲げモーメントM (kN・m/本)	終局曲げ強度 M _u (kN・m/本)	M _u /M
最大 軸力時	C	上杭	5932	9856	1.66
		下杭	715	7607	10.63
最小 軸力時	C'	上杭	4163	6866	1.64
		下杭	706	3724	5.27

表 1.1-3 杭体のせん断力と終局せん断強度の比較 (EW 方向)

荷重ケース		位置	検討用 せん断力 _D Q* (kN/本)	終局せん断強度 Q _u (kN/本)	Q _u / _D Q
最大 軸力時	C	上杭	4200	6304	1.50
		下杭	183	2884	15.75
最小 軸力時	C'	上杭	4972	6450	1.29
		下杭	195	2027	10.39

注記* : 検討用せん断力_DQは、検討用地震力によるせん断力Qの1.25倍 (荷重ケースC'の上杭についてはM_u/M=1.64倍) として算定

表 1.1-4 杭体の曲率と鉄筋降伏時の曲率の比較 (EW 方向)

荷重ケース		位置	検討用地震力による 曲率 ϕ ($\times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$)	鉄筋降伏時の 曲率 ϕ_y ($\times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$)	ϕ / ϕ_y
最大 軸力時	C	上杭	1.77	2.73	0.65
		下杭	0.12	2.68	0.05
最小 軸力時	C'	上杭	2.95	2.11	1.40
		下杭	0.11	1.92	0.06

検討用地震力により杭体に生じる曲げモーメント及びせん断力は、それぞれ終局強度以下となり、検討用地震力により杭体に生じる曲率 ϕ の鉄筋降伏時の曲率 ϕ_y に対する比は 2 以下となる。

以上