

場所打ちコンクリート杭の杭頭半剛接合に関する解析的研究

地盤-杭-建物連成系の時刻歴応答解析

田畑 卓* 西原 寛*

Analysis Study on Semi-Rigid Connection on the Cast-in-Place Concrete Pile Head

Dynamic response analysis of the soil-pile-building system

by Taku TABATA and Hiroshi NISHIHARA

Abstract

As for the evaluation of the earthquake resistance performance of pile foundations, it is important to take the influence of ground displacement into consideration, as well as suitable consideration of the inertia power of the building. We examined the influence of the pile head joint condition and the analysis method for the response result, via dynamic and static analysis. Consequently, bending moment and shear stress at the pile head was found to decrease by the use of a semi-rigid pile head connection. The pile stress calculated by static analysis corresponded well mostly to the result of dynamic analysis, though the influence of a difference in phase of the ground and the building was admitted.

要 旨

杭基礎の耐震性能の評価においては、上部建物の慣性力のほか、地盤変形の影響を適切に考慮することが重要である。本報では杭頭接合条件および解析手法が応答結果に及ぼす影響を調べるために、建物・杭・地盤連成系モデルによる時刻歴応答解析および静的解析を行った。その結果、杭頭半剛接合工法は、杭頭固定の場合に対して杭頭曲げモーメントおよび杭頭せん断力を低減可能であること、杭頭接合条件が上部建物の応答に及ぼす影響は小さいこと、応答変位法では建物と地盤の位相差の影響があるもの、時刻歴解析の応答結果と概ね等しい杭応力を与えることが認められた。

キーワード：杭基礎／応答解析／質点系モデル／2D-FEM モデル／応答変位法

1. はじめに

前報[1]では、場所打ちコンクリート杭の杭頭固定度を低減する杭頭半剛接合工法「HRパイル工法」について、上部建物の慣性力を杭頭に載荷する形式の分離モデルによる静的解析を行い、本工法の性能と有用性を検討した。

一方、地震時の杭基礎の構造性能については近年、上部建物の慣性力のほかに地盤変形による影響を考慮した検討が行われている。これらは、慣性力は杭頭近傍の応力増大を生じさせるのに対し、地盤変形を考慮した場合は、地盤剛性の急変する箇所では杭応力が増大する傾向を示す。杭頭半剛接合工法に

よる杭頭曲げモーメントの低減効果は、地盤が軟弱な場合ほど大きくなるが、これらは地盤変形の影響が増大する条件でもある。

また、建物慣性力と地盤変形の影響を考慮した応力解析としては、両者の影響を静的に足し合わせる応答変位法のほか、上部建物、杭、地盤の連成系一体モデルによる方法があるが、現状では各解析手法の対応が必ずしも明確となっていない。

本報では杭および地盤の非線形性を考慮した、連成系一体モデルによる時刻歴応答解析を行い、杭頭接合条件が杭、建物に及ぼす影響、並びに解析手法が応答結果に及ぼす影響について検討を行った。

* 技術研究所構造研究室

2. 解析手法および解析モデル

地盤-杭-建物連成系一体モデルの時刻歴応答解析は、建物、杭、付加地盤系を質点-梁系の1本棒に置換し、これを自由地盤系と相互作用ばねで連結した修正Penzienモデル、および建物を質点系、地盤を平面歪み要素、杭を梁要素にそれぞれ置換した2D-FEMモデルを用いて行う。杭応力の検討にあたっては併せて応答変位法も行う。

2.1 対象建物および地盤

解析対象の建物および地盤は文献[2]によった。上部建物は地上6階地下なしのRC板状建物で、基礎固定時の弾性1次固有周期は0.36秒である。当該建物は全14本の場所打ちコンクリート杭で支持されており、杭軸径は1.2m、杭頭レベルはGL-1.8mである。地盤は第2種地盤相当のSOIL1(文献では地盤2)と第3種地盤相当のSOIL2(文献では地盤4)の2ケースとし、杭頭接合条件としてはHRパイル工法(杭頭半剛接合

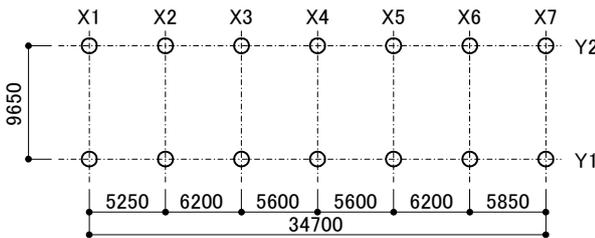


図1 杭伏せ

表1 建物諸元

階	階高 (cm)	重量 (kN)	せん断特性(X方向)				
			K1 (kN/m)	K2 (kN/m)	K3 (kN/m)	Q1 (kN)	Q2 (kN)
6	285	4681	2.22E+06	3.13E+05	2.50E+03	1567	3536
5	285	4902	2.42E+06	3.50E+05	1.27E+04	2403	5598
4	285	4902	2.47E+06	4.07E+05	3.19E+04	2819	6949
3	285	5096	2.58E+06	4.77E+05	4.44E+04	3319	8239
2	285	5096	2.36E+06	4.83E+05	5.06E+04	4530	9514
1	345	5100	3.05E+06	5.10E+05	3.50E+04	5062	11383
基礎		7792					

表2 地盤条件

SOIL1						
層No.	深度 D (m)	層厚 H (m)	密度 ρ (t/m ³)	S波速度 Vs (m/s)	P波速度 Vp (m/s)	土質
1	4.5	4.5	1.8	90	1360	粘性土
2	9.0	4.5	1.6	150	1560	砂質土
3	16.0	7.0	1.8	210	1560	砂質土
4	17.5	1.5	1.7	150	1560	粘性土
5	24.0	6.5	1.8	260	1560	砂質土
工学的基礎			1.8	390	1700	

SOIL2						
層No.	深度 D (m)	層厚 H (m)	密度 ρ (t/m ³)	S波速度 Vs (m/s)	P波速度 Vp (m/s)	土質
1	6.3	6.3	1.6	90	1420	粘性土
2	14.0	7.7	1.8	120	1470	砂質土
3	31.3	17.3	1.8	120	1380	粘性土
4	46.5	15.2	1.7	200	1510	粘性土
工学的基礎			1.9	350	1630	

表3 杭断面諸元

杭軸部	杭頭接合		半剛(HR)	完全固定
		断面径	1200mm	←
杭軸部	コンクリート強度	27N/mm ²	←	←
	主筋(SOIL1)	16-D29	←	←
	主筋(SOIL2)	26-D32	←	←
杭頭接合部	断面径	840mm	杭軸部と同じ	杭軸部と同じ
	コンクリート強度	42N/mm ²	杭軸部と同じ	杭軸部と同じ
	主筋(芯鉄筋)	8-D41	杭軸部と同じ	杭軸部と同じ

D29、D32はSD390 D41はUSD685

工法)を用いた場合、杭頭固定とした場合を想定する。また、地震動は建物桁行き方向を対象とし、地盤はいずれも液状化を生じないものとする。表1に上部建物諸元、表2に地盤条件を示す。また杭諸元を表3に示す。

2.2 地震波および地盤応答解析

入力地震動は、告示の極めて稀に発生する地震動レベルの標準加速度応答スペクトルにフィッティングさせた乱数位相による模擬地震波であり、解放工学的基盤波(2E)として設定する。図2に加速度時刻歴波形を示す。また、図3に1次元波動論の等価線形解析(SHAKE)による地盤応答結果、図4に加速度応答スペクトルを示す。土の非線形特性は告示による G/G_0 - γ 関係および h - γ 関係に則った。

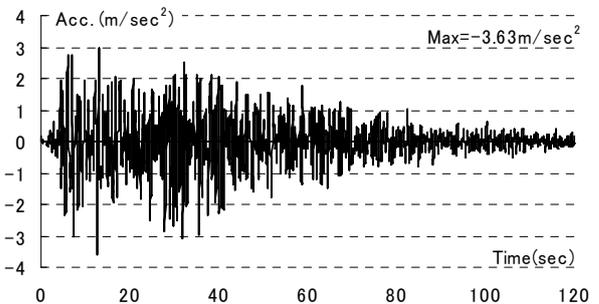


図2 入力地震動(解放工学的基盤)

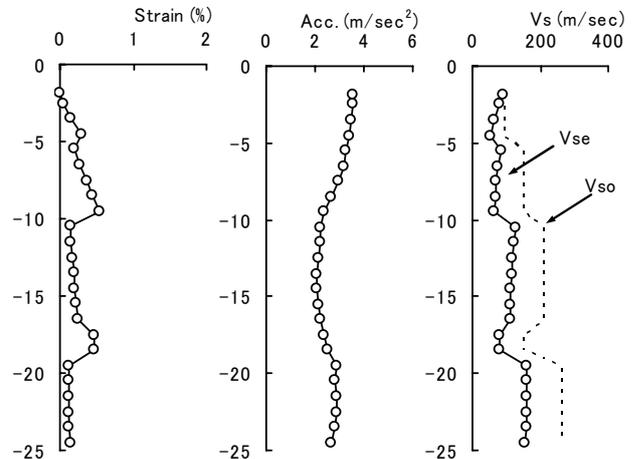


図3(a) SOIL1の地盤応答解析結果

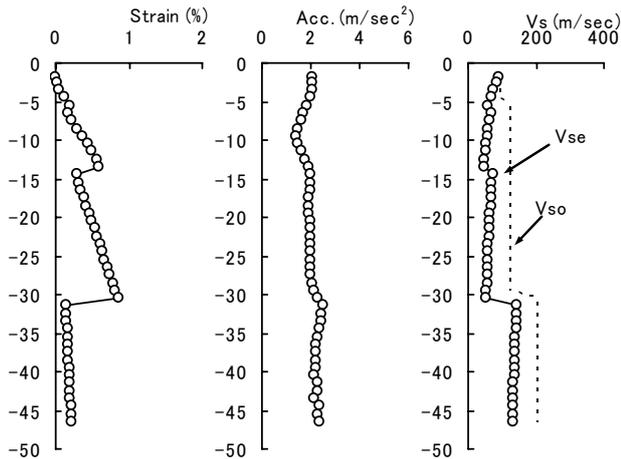


図 3 (b) SOIL2 の地盤応答解析結果

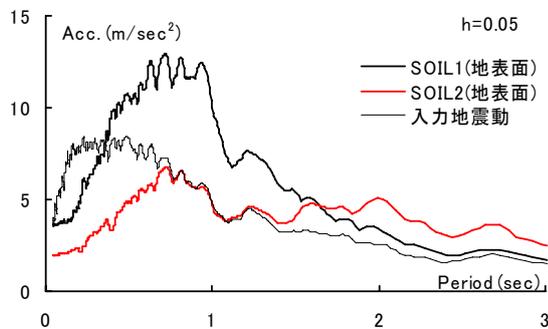


図 4 加速度応答スペクトル

2.3 解析手法および解析モデル

a. 修正Penzienモデル

図5に解析モデルを示す。上部建物は履歴特性を武田モデルとする等価せん断型モデルで与える。地盤は基礎の根入れ効果を見捨てるものとしてGL-1.8m以深を考慮し、また基礎(1F)の回転を拘束する。杭の曲げ特性は長期軸力時の断面曲げ解析結果に基づき非線形性を考慮する。杭軸部は武田モデルによるTri-linear型の $M-\phi$ 関係で与え、HRパイル工法を想定する場合には、杭頭接合部に原点指向型のTri-linear型の回転ばね($M-\theta$ 関係)を設定する。

杭と自由地盤とを繋ぐ相互作用ばね、および付加地盤系の質量とせん断ばねは本来、薄層法などから求められるが、ここでは簡略的な方法として相互作用ばねをFrancisの式およびGazetasの式に基づき評価することとする。この場合、付加地盤系を別途仮定する必要があるが、文献[3]によれば、その質量が応答結果に大きく影響するわけではないので、基礎底面積の0.5倍の断面積を有するせん断土柱を想定して[4]、付加地盤系の質量とせん断特性を設定する。また、自由地盤系は応答波形を直接的に相互

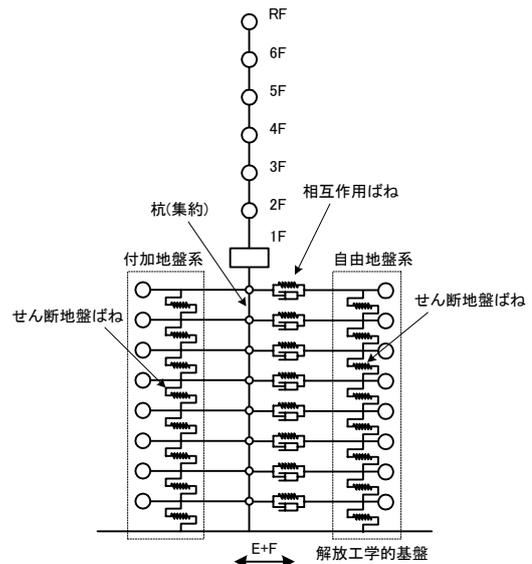


図 5 質点系モデル(修正 Penzien モデル)

作用ばねを介して入力する方法でなく、質点・ばねモデルとして全体モデルに組み込むことで考慮する。その際、自由地盤系が杭-建物系の影響を受けないように付加地盤の1000倍の断面積の土柱を想定する。

相互作用ばねは履歴特性にMasing則を適用した双曲線モデルを用いて非線形性を考慮する。双曲線モデルによるばね反力 P と変位 δ の関係を式(1)に示す。極限地盤反力(P_{max})はBromsの式で評価し、初期剛性(K_o)は前述した通り初期せん断波速度に基づいてFrancisの式から算出する。

$$P = \frac{K_o \cdot \delta}{1 + \delta/\delta_r} \quad (\delta_r = P_{max}/K_o) \quad (1)$$

$$K_o = (k_h \cdot B \cdot H) \cdot N_p \cdot \alpha \quad (2)$$

$$k_h \cdot B = \frac{1.3E_s \left(\frac{E_s \cdot B^4}{E_p \cdot I_p} \right)^{1/2}}{1 - \nu_s} \quad (3)$$

ここに、 B : 杭軸径、 N_p : 杭本数、 E_s : 地盤のヤング係数、 E_p : 杭のヤング係数、 I_p : 杭の断面2次モーメント、 ν_s : 地盤のポアソン比、 α : 群杭係数 ($\alpha = N_p^{-0.5}$)、 H : 要素高さ、 ρ : 土の単位体積重量である。

また、Gazetasの式に基づく相互作用ばねの減衰係数は下式で表される。

$$C = (c \cdot H) \cdot N_p \quad (4)$$

$$c' = 1.57 \rho \cdot B(V_{La} + V_s) \tag{5}$$

$$V_{La} = \frac{3.4V_s}{\pi(1-\nu_s)} \tag{6}$$

一方、付加地盤および自由地盤のせん断ばねにはROモデルを適用する。この場合、せん断力(Q)と接点間相対変位(δ_s)の関係は式(7)で表される。ここに、A: 土柱断面積、H: 要素高さである。係数 α および β 、 Q_r は告示のG/G_o- γ 関係、h- γ 関係にフィッティングするように設定する。

$$\delta_s = \frac{Q}{K_{so}} \left\{ 1 + \alpha \cdot \left(\frac{Q}{Q_r} \right)^\beta \right\} \tag{7}$$

$$K_{so} = \frac{G_o \cdot A}{H} \tag{8}$$

上部建物の減衰は弾性1次固有周期に対して3%の瞬間剛性比例型とし、杭および地盤の内部減衰は0%とする。入力地震動はSHAKEから求めた杭先端レベルのE+F波とした。

b. 2D-FEMモデル

図6に解析モデルを示す。上部建物は修正Penzienモデルの場合と同じ特性の質点系せん断モデルである。杭は梁要素とし、奥行き方向に並ぶ2本の杭を1本に集約する。各杭の非線形特性は建物の転倒モーメントによる杭軸力を予め想定し、断面曲げ解析結果に基づき与え、その履歴特性には武田モデルを適用する。基礎梁は剛梁要素とし、修正Penzienモデルと同様に基礎の回転を拘束する。地盤はGL-1.8m

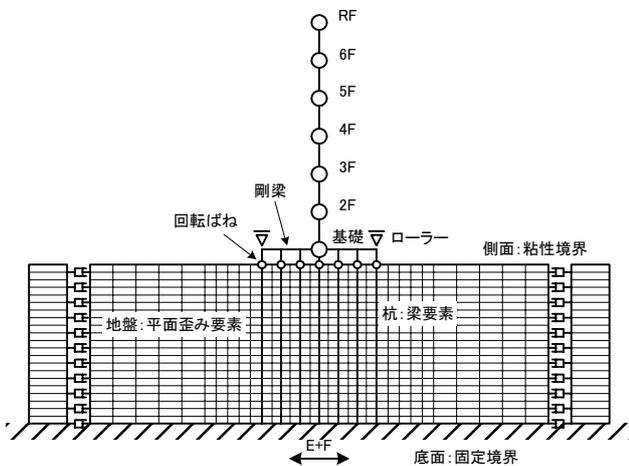


図6 2D-FEMモデル

以深を考慮する。また、杭頭固定の場合は基礎梁と杭とを剛結し、HRパイル工法の場合は杭頭部に回転ばねを設ける。地盤の解析領域は基礎幅の4倍とし、側面を粘性境界、底面を固定境界とする。地盤は平面歪み要素に置換し、非線形特性は修正Penzienモデルと同様ROモデルを適用する。入力地震動はSHAKEから求めた杭先端レベルのE+F波とする。

c. 応答変位法

図7に解析モデルを示す。基礎梁は剛として回転変形を拘束する。杭頭部に回転ばねを設け、杭先端はピン支持とする。杭軸部および杭頭回転ばねは2D-FEMの場合と同様の非線形特性を与える。水平地盤ばねは前述の修正Penzienモデルに準拠した場合のほか、基礎指針[5]に則る場合も考える。前者は群杭の水平地盤ばねを杭本数で除して求め、後者は下式(9)および(10)より算出する。よって、両者は初期剛性ととも非線形特性も異なることになる。ここで、 E_o : 地盤の変形係数、B: 杭径、P: ばね反力、y: 水平変位、 \underline{B} および \underline{y} : 無次元化杭径および水平変位(cm単位で表した無次元値)である。

$$k_{ho} = \alpha \cdot E_o \cdot \underline{B}^{-0.75} \tag{9}$$

$$\frac{P}{y} = k_{ho} \cdot B \cdot \underline{y}^{-1/2} \tag{10}$$

本検討では外力として用いる建物慣性力および地盤変位は、修正Penzienモデルの最大応答解析結果から評価する。設計的な立場からは、建物慣性力を分離モデルの応答結果、地盤変形を地盤応答解析の結果とするのが一般的と思われるが、ここでは解

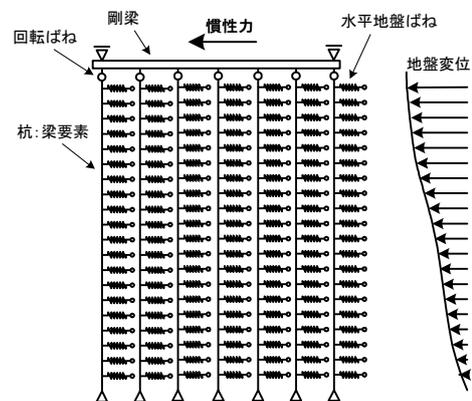


図7 応答変位法

析手法の影響を把握することに主眼を置き、地盤特性の評価方法の影響(SHAKE：等価線形，修正Penzien：逐次非線形)や、慣性力における動的相互作用の影響(入力低減効果，逸散減衰)を排除する方針とした。解析にあたっては先ず杭頭部に所定の慣性力を与え、この応力を保持した状態で水平地盤ばね先端から自由地盤変位を強制変位として入力する。

3. 解析結果

3.1 杭の性状

a. 修正Penzienモデル

図8に杭の最大応答解析結果を示す。ここで、せん断力と曲げモーメントは杭1本当当たりの値に換算して示している。せん断力分布においては、本工法は杭頭固定に比べてGL-7m以浅で応力が幾分小さくなる傾向がみられるが、杭頭せん断力は杭頭接合条件によらずほぼ等しい。このことは、本工法は杭頭水平変位が生じ易いため、建物慣性力に対しては地盤の負担せん断力が増して杭応力が軽減される傾向となるが、本解析では基礎の根入れ効果を無視しているために杭頭接合条件の影響が表れなかったと推測できる。別途、根入れ効果を考慮した解析を行ったところ、本工法の杭頭せん断力が杭頭固定の場合の60~70%に低下することが認められた。

本工法における杭頭曲げモーメントはSOIL1，SOIL2ともに杭頭固定に対して6~7割程度に低下している。既報[1]による建物慣性力を対象とした静的解析によれば、本工法では杭頭曲げモーメントが杭頭固定の場合に対して低減されるとともに、地中部曲げモーメントが増大することになるが、図8においてはこのような性状は明確にはみられない。杭頭接合条件に係わる曲げモーメントの差異はGL-5m程度までに留まっている。また、本解析条件においては、SOIL1では杭頭部で曲げモーメントが最大となるが、SOIL2では地盤剛性の急変するGL-30m付近で曲げモーメントが増大する結果を示している。

本工法の杭頭水平変位は、杭頭固定の場合より大きくなる傾向がみられるが、その違いはさほど顕著ではない。杭頭水平変位の大部分は自由地盤変位によって生じていることがわかる。

b. 2D-FEMモデル

図9に2D-FEMモデルによる杭の最大応答曲げモーメント分布を示す。各杭では杭頭軸力に係わる杭曲げ剛性の違いによって、杭頭部，地中部共に圧縮

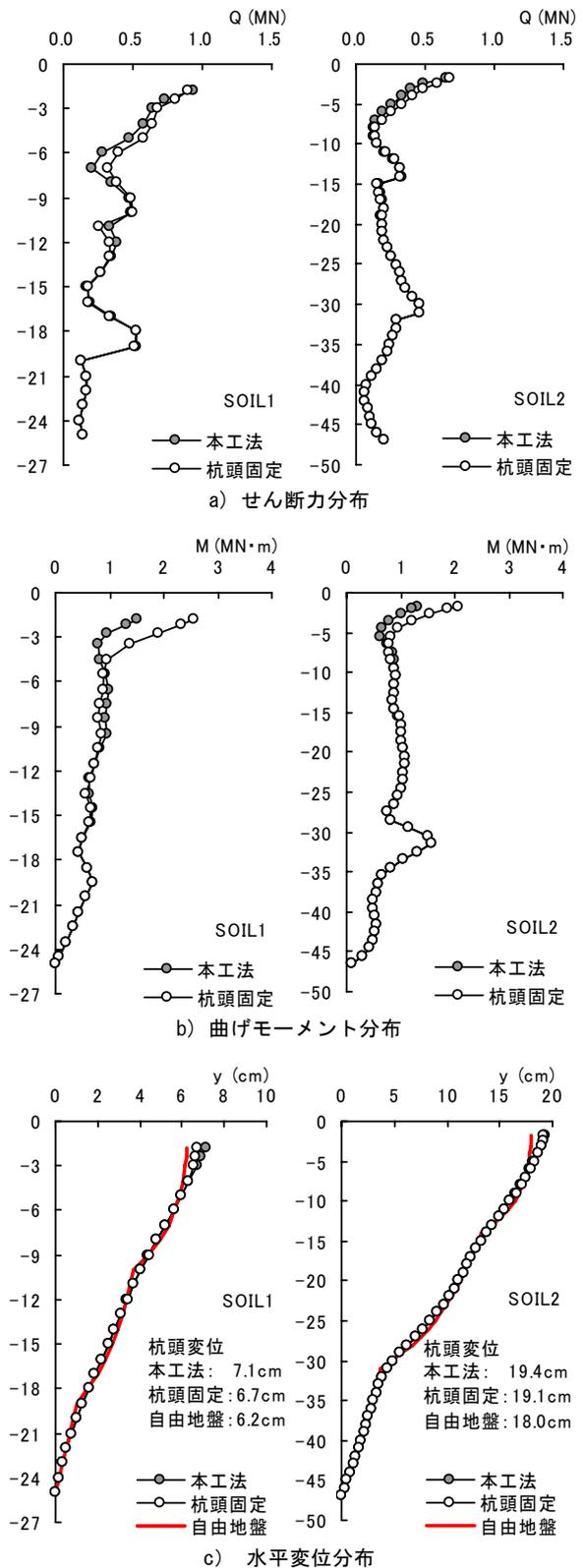


図8 修正 Penzien モデルによる最大応答

側杭の負担する応力が増大していることがわかる。また、同図中に併せて示した修正Penzienモデルの結果と比較すると、SOIL1では杭頭曲げモーメントが小さい反面、地中部(特に地盤剛性の急変する箇

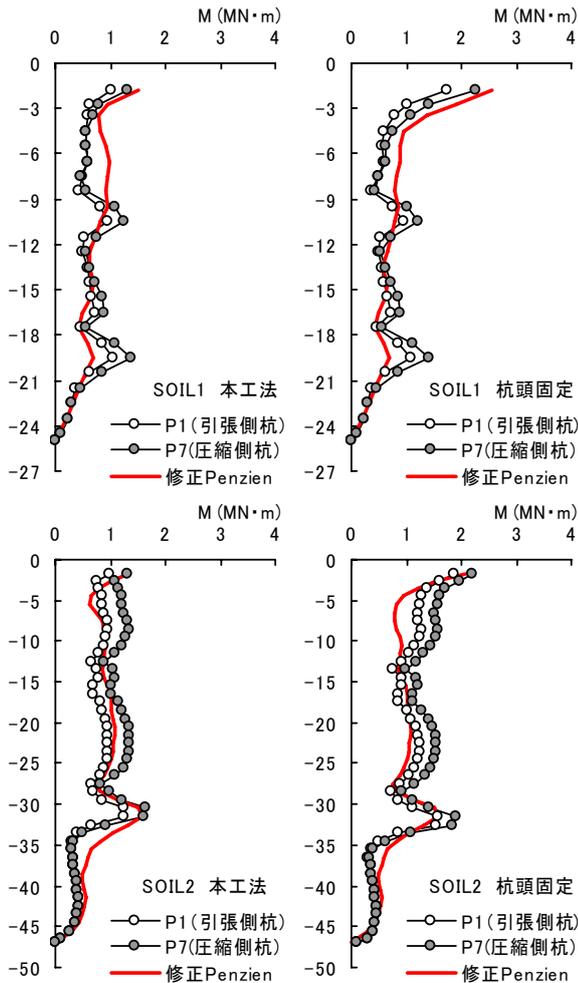


図9 曲げモーメント分布 (2D-FEMモデル)

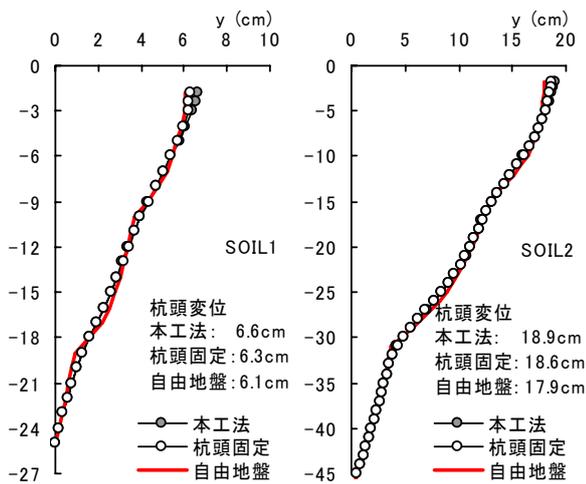


図10 水平変位分布 (2D-FEMモデル)

所)の曲げモーメントが大きめに評価される傾向にある。これは2D-FEMモデルによる場合は修正Penzienモデルの相互作用ばねに相当する地盤ばねが硬めに評価されることを示唆している。SOIL2の地盤剛性の急変する箇所においては、

SOIL1の場合よりも解析手法による影響は小さい。図10によれば、SOIL2はSOIL1に対して杭と自由地盤の変形差が小さく、結果的に修正Penzienモデルにおける相互作用ばねの影響が顕著にならなかったと判断される。

c. 応答変位法

建物慣性力と地盤変形による影響の重ね合わせにあたっては、両者の位相ずれを適切に考慮する必要がある。本解析条件では後述するように、地盤の1次固有周期が建物のそれと同程度か長い条件であり、従って、建物慣性力と地盤変形とが同時に同方向で最大となることが予想される。ところで、杭および地盤を線形モデルで評価する場合は、建物慣性力による杭応力と地盤変形による杭応力とを個別に求めた上で、その絶対値を足し合わせる方法が採られる。このことは、本解析のように杭、地盤を非線形モデルとした場合は、外力条件による足し合わせとなるため、建物慣性力と地盤変形とを同方向に入力しただけでは、両者によって杭応力が増大する箇所と打ち消し合う箇所が生じることになり、絶対値和に相当する解が得られない。このようなことから、本検討では建物慣性力と地盤変形とが同方向に作用する場合と、逆方向に作用する場合の解析を行った。

図11に地盤ばねをFrancisの式で評価した場合の応答変位法によるせん断力分布、図12に曲げモーメント分布を示す。同図は桁行き方向中央(X4通り)の杭の結果である。まず、せん断力分布に着目すると、杭応力はSOIL1でGL-15m以深、SOIL2でGL-25m以深において、建物慣性力と地盤変形との入力方向によらず同程度となっており、建物慣性力の影響が及んでいるのはこれ以浅であることがわかる。建物慣性力と地盤変形とを同一方向に作用させた場合は、建物慣性力による地中部最大応力点付近(SOIL1ではGL-10m付近、SOIL2ではGL-13m付近)で両外力による杭応力の相殺が生じる結果となり、この部分においては逆方向入力による場合の方が杭応力が高めに評価されている。修正Penzienモデルの応答結果に対しては、建物慣性力と地盤変形の同方向入力、逆方向入力のそれぞれから求めたせん断応力の最大包絡線を用いることにより良好な適合性を示すことがわかる。

なお、SOIL1ではGL-19m付近の地盤剛性が急変する箇所のせん断力が修正Penzienモデルの応答結果より幾分小さめに評価されている。本解析では地

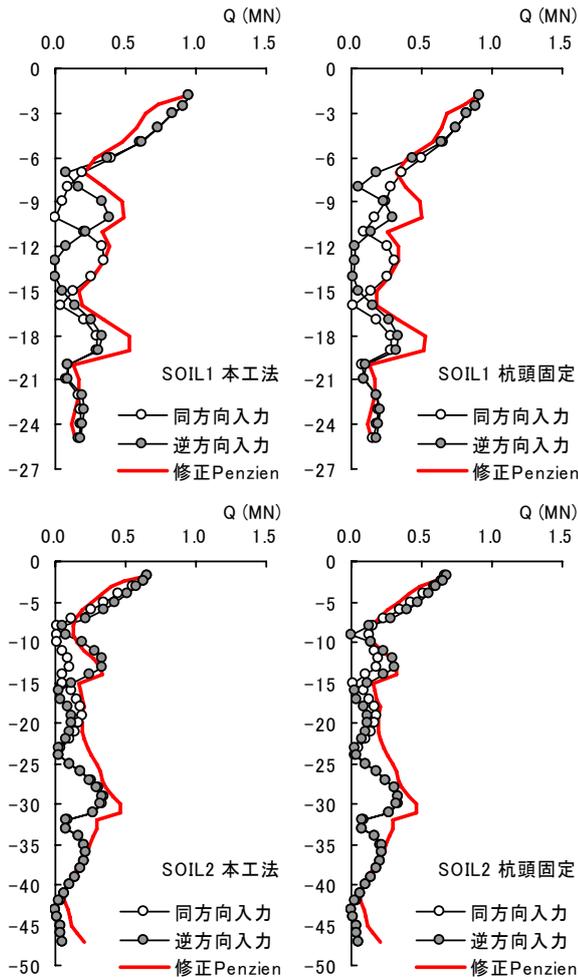


図 11 せん断力分布 (応答変位法 : Francis)

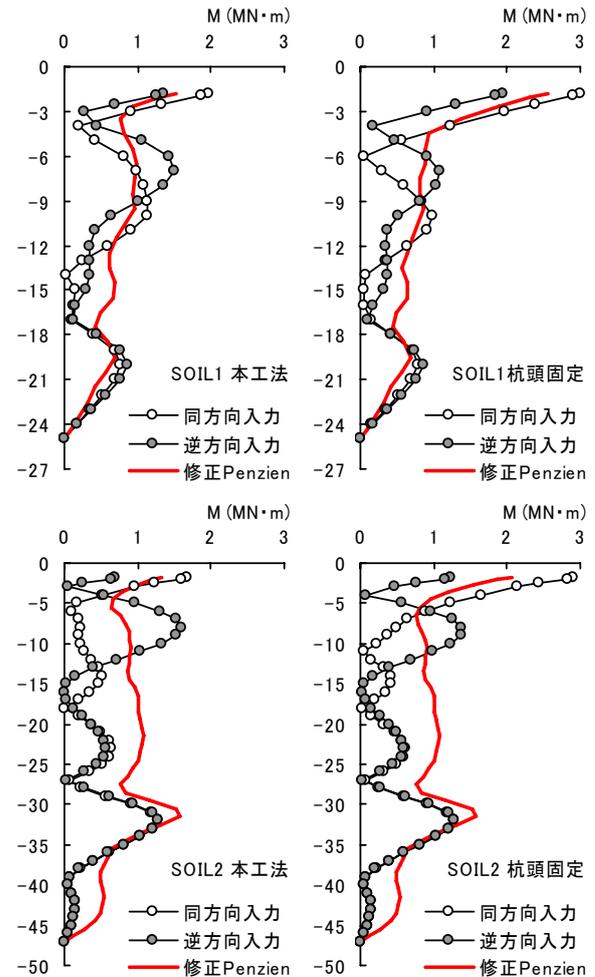


図 12 曲げモーメント分布 (応答変位法 : Francis)

盤変形として最大地盤変位を用いているが、SOIL1では各層の最大せん断変形を合算して求めた変位もこれと殆ど変わらないことを確認しており、従って、本検討における応答変位法では修正Penzienモデルにおけるせん断地盤ばねが考慮されていないことが影響したと思われる。SOIL2ではこの傾向は殆どみられない。

続いて図12に示した曲げモーメント分布に着目する。応答変位法の結果によると、杭頭部では建物慣性力と地盤変形とを同方向で入力した場合の方が、また、慣性力により地中部最大曲げモーメントを生じる高さ付近では逆方向に入力した場合の方がそれぞれ、他方の载荷条件を上回る値を示している。それ以深では载荷条件による違いは小さい。双方の载荷方向を考慮した応答変位法による曲げモーメントは、地中部も含めて修正Penzienモデルの応答結果を概ね表現できているものと判断されるが、せん断力の場合に比べると、建物慣性力と地盤変形が同時に最大となる状態を想定していることの影響が大き

く、杭応力を幾分過大評価する傾向が認められる。これらは分布形状から推測すると特に慣性力の影響が過大なようであり、文献[6]でも指摘されるごとく建物慣性力の低減の余地が窺える。

図13は本工法について、地盤ばねを基礎指針で評価した場合の応答変位法の結果である。ここで、杭応力は建物慣性力と地盤変形が同一方向に作用する場合についてのみ示した。また、水平地盤ばねを求める際の変形係数(E_o)は、道路橋示方書[7]に基づき各層の V_s からN値を逆算して $E_o=700N$ より算出している。これらは前述のFrancisの式による場合と比べて剛性を小さく評価するため、杭の曲げモーメントに及ぼす建物慣性力の影響が増大することになる。結果として、同図では修正Penzienモデルの応答結果に対して杭頭曲げモーメントがSOIL1、SOIL2とも2倍程度に達し、SOIL1では更に地中部最大モーメント(GL-1010m付近)も非常に大きく評価されている。また、せん断力分布においては、特に地盤剛性が急変する箇所の応力の増大傾向を表現し切れて

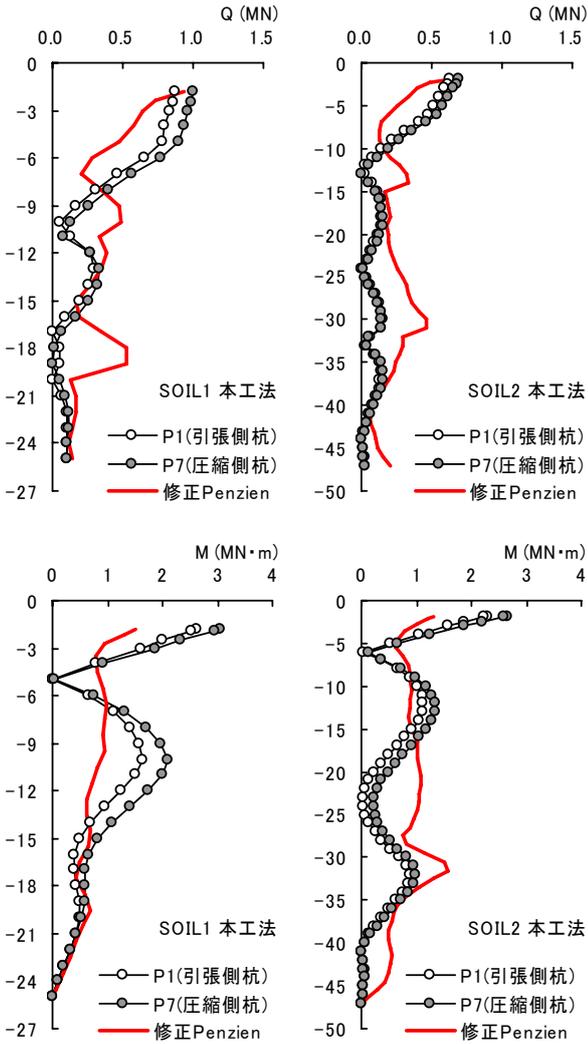


図13 せん断力分布および曲げモーメント分布 (応答変位法：基礎指針)

いない。基礎指針による地盤ばねは静的応力下での特性を考慮したものであり、杭断面設計においてはこのような解析結果の違いをどのように考慮するのか検討すべき課題であるといえる。

3.2 上部建物の応答

表4に地盤および連成系の固有周期を示す。弾性1次固有周期に着目すれば、SOIL1、SOIL2ともに基礎固定時の上部建物の周期に対して地盤の周期が長い。また、図14は修正Penzienモデルの応答結果から求めた本工法に関するフーリエスペクトル比である。同図より、SOIL1では上部建物(RF/1F)、地盤(GL/杭先端)ともに塑性化が進行し、上部建物と地盤の卓越周期がほぼ一致する結果となっている。SOIL2においても建物の塑性化の影響はみられるが、依然として建物の卓越周期は地盤のそれより短く、慣性の相互作用効果(地下逸散減衰効果)を生じ易い

表4 地盤および連成系の固有周期

	SOIL1		SOIL2		
	1次	2次	1次	2次	
上部建物(基礎固定)	0.360	0.125	0.360	0.125	
地盤	初期剛性	0.451	0.184	1.171	0.415
	等価線形	0.841	0.187	2.190	0.771
修正Penzien (連成系)	本工法	0.490	0.449	1.170	0.530
	固定	0.461	0.445	1.170	0.494
2D-FEM (連成系)	本工法	0.544	0.451	1.250	1.170
	固定	0.525	0.451	1.240	1.170

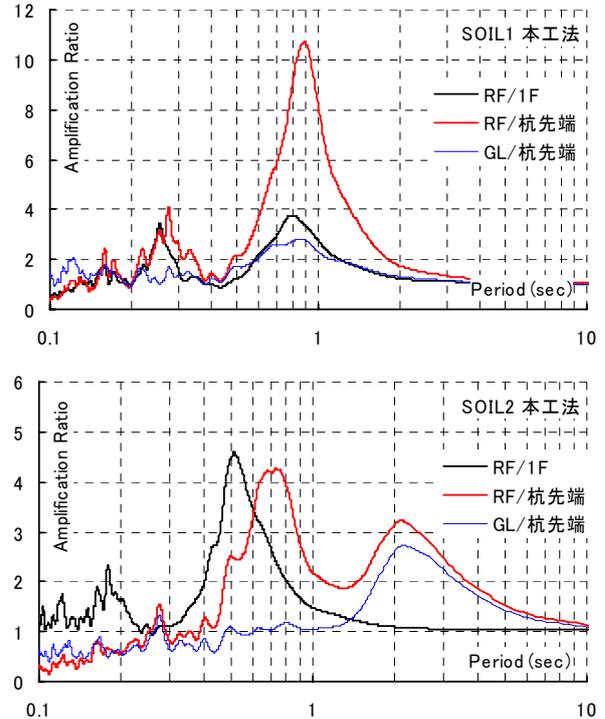


図14 フーリエスペクトル比

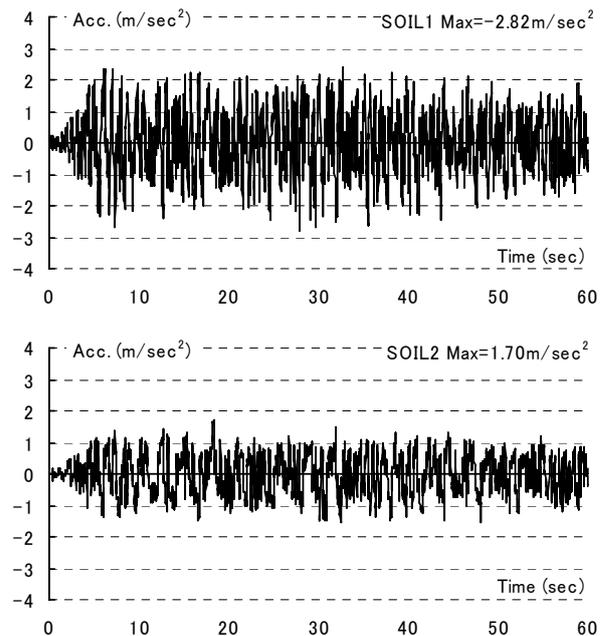


図15 地表面加速度時刻歴波形(地盤：逐次非線形)

条件であることがわかる。

図15に自由地盤を逐次非線形モデルで与えた場合の地表面の加速度時刻歴波形を示す。SHAKE(等価線形)による地表面の最大応答加速度は、SOIL1で 3.56m/sec^2 、SOIL2で 2.07m/sec^2 であり、地盤を逐次非線形とした場合にはこれらより応答振幅が小さくなっている。

図16に上部建物の最大応答を示す。図中では基礎固定について、SHAKE(等価線形解析)による地表面加速度応答波形を用いた場合(地震波1)と、逐次非線形モデルによる地表面波形を用いた場合(地震波2)の結果も併せて示している。連成系モデルの応答値は、SOIL1では基礎固定(地震波2)と同程度かやや増大する結果であるが、SOIL2では相互作用による明らかな応答値の低減効果が認められる。本工法と杭頭固定の場合とは、SOIL1で中間階の応答に幾分違いがみられるが、全体応答としては杭頭接合条件による影響は小さい。一方で、基礎質点の最大加速度応答から求めた基礎水平震度は、表5に示すように本工法では杭頭固定を若干上回る性状が認められた。

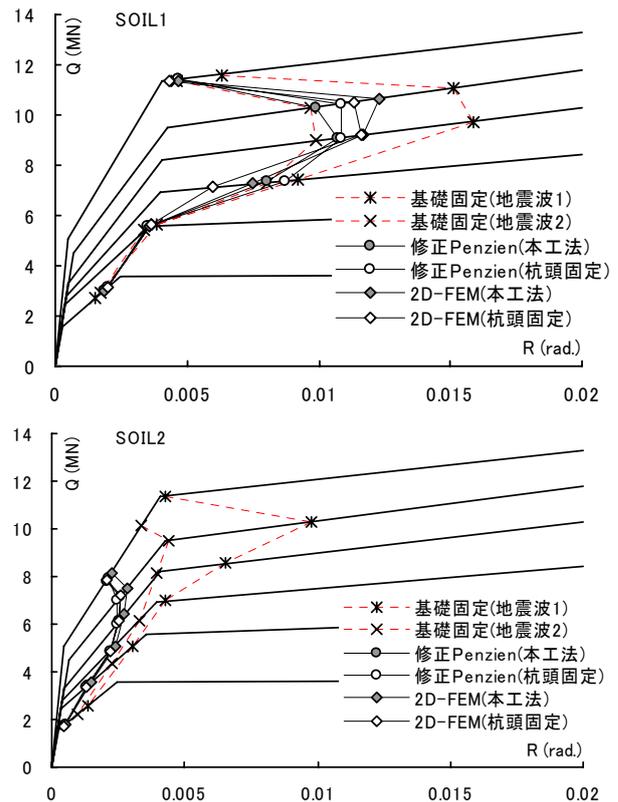


図 16 上部建物の最大応答

表 5 基礎水平震度

解析モデル	SOIL1		SOIL2	
	本工法	杭頭固定	本工法	杭頭固定
修正Penzien	0.337	0.321	0.232	0.218
2D-FEM	0.372	0.331	0.215	0.192

4. 結論

杭頭接合条件および解析手法が杭ならびに上部建物の応答に及ぼす影響を調べるため、上部建物・杭・地盤による連成系一体モデルの時刻歴応答解析を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) 本工法を用いることで、杭頭固定の場合よりも杭頭曲げモーメントは低下する。また、基礎の根入れ効果を考慮した際にはさらに杭頭せん断力も低下する。
- 2) 動的解析による杭水平変位の最大応答は、自由地盤の変形が支配的であり、杭頭接合条件に係わる差異はさほど大きくない。
- 3) 地盤を平面歪み要素でモデル化した場合は、相互作用ばねを考慮する質点系モデルに比べて、やや水平地盤ばねが硬めに評価される可能性がある。その結果、杭応力は杭頭付近で小さく、地中部の地盤剛性が急変する箇所で大きめに評価される傾向となる。
- 4) 応答変位法は静的解析であるため、上部建物と地盤変形の位相を適切に考慮する必要がある。また、地盤ばねを基礎指針で評価した場合には、地盤剛性の急変する箇所のせん断力を過小評価する可能性があり注意が必要である。

- 5) 杭頭接合条件が上部建物の応答に及ぼす影響は小さい。ただし、本工法では杭頭固定に比べ基礎水平震度が若干増大する傾向がある。

参考文献

- [1] 田畑卓, 西原寛: 場所打ちコンクリート杭の杭頭半剛接合に関する解析的研究(杭頭接合条件と解析モデルの影響), 安藤建設技術研究所報, Vol.12, pp53-62, 2006
- [2] 日本建築学会: 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, 2006.2
- [3] 日本建築学会: 入門・建物と地盤との動的相互作用, 1996.3
- [4] 藪内彰夫, 田中英朗, 石田智昭, 宮本裕司, 酒向裕司: 原子力施設杭基礎の動的耐震設計法に関する研究(その3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.425-426, 2000.9
- [5] 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針, 2001.10
- [6] 運輸省鉄道局監修 鉄道総合研究所 編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物・杭土

圧構造物, 1999.3

[7] 日本道路橋会：道路橋示方書・同解説 V耐震
設計編, 2002.3.