

周辺地盤の液状化および杭の非線形性を考慮した杭支持建物の地震応答解析

栗本 修 藤森 健史
安井 謙

Seismic Response of Pile-supported Structure Considering Nonlinearity of Superstructure and Pile, and Liquefaction of Surrounding Ground

Osamu Kurimoto Takeshi Fujimori
Yuzuru Yasui

Abstract

Recent earthquake disasters have revealed the importance of countermeasures against soil liquefaction in seismic design. In particular, the 1995 Hyogoken Nanbu earthquake caused several types of severe damages to pile foundations. This paper describes an analysis method for soil liquefaction using simple parameters such as SPT- N values and seismic response analyses for the pile-supported structure to consider soil-structure interaction effects and soil non-linearity using a modified Penzien model. It is important to find a way to determine the region of surrounding soil whose behavior is identical to that of piles. This paper adopts the thin layer element method to systematically determine the volume of the surrounding soil. The responses of pile-supported structure are similar, whether soil liquefaction and nonlinearity of pile are considered or not. However, the bending moment of pile become large as to soil liquefaction, and small as to nonlinearity of pile.

概要

近年の地震災害のなかで地盤の液状化は、耐震設計上の対策課題として重要になってきている。特に、兵庫県南部地震では杭基礎に種々の被害パターンがみられ、今後の設計に多くの教訓を残した。

本研究ではまず、構造物の設計時に液状化を考慮した動的解析を簡便にできるようにパラメータを少なくし、かつ通常のボーリング調査で得られるデータから液状化の検討ができる手法について示した。解析手法の検証として神戸ポートアイランドの観測記録のシミュレーションを行い、比較的良好な対応を得ることができた。

次に、修正Penzienモデルを用いて建物、杭、地盤(液状化を含む)各部の非線形性を考慮した杭支持建物の地震時挙動を検討した。ポートアイランド地区に立つ6階建および15階建の杭支持建物を想定した地震応答解析を行い、地盤の液状化と杭体の非線形性により以下の影響があることを確認した。(1)構造物-杭系の応答は、地盤の液状化を考慮すると杭のモーメントが大きくなり、杭体が非線形化するとモーメントが小さくなる。(2)地質が変化する(砂層と粘土層)部分では液状化の有無によって最大応答値の分布が大きく異なる。(3)杭体の非線形化は上部構造の応答への影響は小さい。

1. はじめに

近年の地震災害のなかで地盤の液状化は、耐震設計上の対策課題として重要になってきている。特に、兵庫県南部地震でみられたように従来液状化はしないとされていた礫質土の埋立て地盤でも液状化を生じたことは今後の設計に大きな影響を与えた。

地盤の液状化にいたる挙動に関する研究はさかんに行われており、多くの研究機関で液状化特性の解明とそれを追跡する手法が提案されている。その成果はFEMなどの解析プログラムに組み込まれ、液状化挙動を詳細に検討できるようになっている。しかし、これらの解析手法では設定すべき液状化パラメータが多く、液状化解析特有の室内試験が必要となっている。

本論では、構造物の設計時に液状化を考慮した動的解析を簡便にできるよう、パラメータを少なくし、なおかつ通常のボーリング調査で得られるデータから液状化の検討ができる手法について述べる。また、解析手法の検証として神戸ポートアイランドの観測記録のシミュレーションを行い、比較的良好な対応を得ることができた。

次に、杭支持構造物の地震時挙動は上部構造体だけでなく杭や地盤の非線形特性も考慮する必要がある。杭支持構造物の非線形挙動の検討ではPenzien系モデルが取り扱い易さの点で有利である。Penzien系モデルでは杭と地盤をつなぐ相互作用ばねをどのように評価するかが解析結果に大きく影響する。そのため近年、薄層要素法などにより群杭基礎のインピーダンスを求め、これをリダクションすることにより杭と自由地盤をつなぐ軸ばねと周

辺地盤深さ方向のせん断ばねを求めるという方法^{1), 2)}が用いられている。一方、周辺地盤の質量を実体のあるモデルとして扱うので物理的に理解しやすい修正Penzienモデルと呼ばれる方法もある。しかし、周辺地盤の領域の設定方法によってはやはり応答に大きなばらつきを生じる。本研究では、藤森ほか²⁾の方法を取り入れ、修正Penzienモデルの周辺地盤の合理的な設定方法を提案し、周辺地盤の液状化を含む地盤-杭支持構造物連成系の各部非線形性が地震応答におよぼす影響について検討した。

2. 液状化解析に用いるパラメータの簡易評価

2.1 液状化抵抗

液状化抵抗あるいは液状化強度比と呼ばれるせん断力比 τ/σ_0 と繰返し回数 N の関係を次式で表わす。

$$\frac{\tau}{\sigma_0} = R_{20} \left(\frac{N}{20} \right)^C \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 σ_0 は初期平均有効拘束圧、 R_{20} はサイクリックモビリティがない状態で繰返し回数20回で過剰間隙水圧比が100%に至るせん断応力比、 C はサイクリックモビリティがない状態で両対数軸表示におけるせん断応力比と繰返し回数関係の勾配である。 C は-0.2~-0.3の値をとり、通常は-0.25とする。Fig.1に $C=-0.20, -0.25, -0.30$ としたときの液状化抵抗を示す。ただし、液状化抵抗が R_{20} にほぼ等しいことから R_{20} で基準化して示してある。

建築基礎構造設計指針³⁾では液状化抵抗 τ_ℓ/σ'_z を以下の式で与えている。

$$\frac{\tau_\ell}{\sigma'_z} = aC_r \left[\frac{16\sqrt{N_a}}{100} + \left(\frac{16\sqrt{N_a}}{C_s} \right)^n \right] \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $a = 0.45, C_r = 0.57, n = 14, C_s = 80.72$ であり、 N_a は以下のように定められる。

$$N_a = N_1 + \Delta N_f, N_1 = C_N N, C_N = \sqrt{10/\sigma'_z}$$

N_a : 補正 N 値, N_1 : 換算 N 値

ΔN_f : 細粒土含有率 $FC(\%)$ に応じた補正 N 値増分

$$\Delta N_f = \begin{cases} 0 & FC \leq 5 \\ 1.2FC - 6 & 5 \leq FC \leq 10 \\ 0.2FC + 4 & 10 \leq FC \leq 20 \\ 0.1FC + 6 & 20 \leq FC \end{cases}$$

C_N : 換算 N 値係数, σ'_z の単位は tf/m^2

ここに、 N_a は補正 N 値、 N_1 は有効上載圧 1kgf/cm^2 相当に換算した N 値、 N は標準貫入試験から得られる N 値、 FC は粒径 $75\mu\text{m}$ 以下の土粒子の通過質量百分率 $(\%)$ である。ただし、換算 N 値 N_1 の算定では鉛直上載圧 σ'_z が小さい場合 $(\sigma'_z < 1.0\text{tf/m}^2)$ に過大評価する可能性があるため、本報

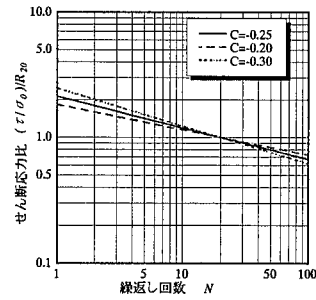


Fig. 1 液状化抵抗と繰返し回数の関係 Relationships between Cyclic Stress Ratio and Number of Cycles Required to Cause Liquefaction

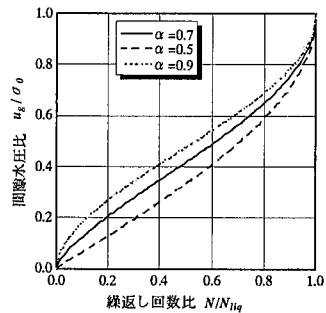


Fig.2 繰返し単純せん断試験による過剰間隙水圧と繰返し回数比の関係 Rate of Pore Water Pressure Buildup in Cyclic Simple Shear Tests

の解析検討では道路橋示方書⁴⁾に示されている $N_1 = 1.7N / (0.1\sigma'_z + 0.7)$ を用いる。

また、(2)式は有効上載圧に対する液状化抵抗を表わし、(1)式の R_{20} は等方応力状態の値なので以下の補正を行う。

$$R_{20} = \frac{1 + 2K_0}{3} \frac{\tau_\ell}{\sigma'_z}$$

ここで、静止土圧係数 K_0 は0.5とする。

2.2 過剰間隙水圧の上昇

Seed et al.⁵⁾は飽和砂に対する非排水繰返しせん断試験結果を整理して下式の関係を得た。

$$\frac{u_g}{\sigma_{0i}} = \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left(\frac{N}{N_{liq}} \right)^{2\alpha} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 u_g は過剰間隙水圧、 N/N_{liq} は液状化にいたるまでの繰返し回数比、 α は砂の種類や試験方法による係数で、通常は $\alpha = 0.7$ とする。Fig.2に $\alpha = 0.5, 0.7, 0.9$ としたときの関係を示す。

次に、社本ほか⁶⁾と同様に、累積損傷度の概念を応用して、せん断に伴う過剰間隙水圧の上昇量を地震応答のよ

うな不規則な繰返しせん断に適用できるように(3)式を改良する。まず、土のせん断応力(τ)－せん断ひずみ(γ)の非線形関係を、骨格曲線をRamberg-Osgoodモデル、履歴曲線をMasing則により表現する。

(骨格曲線)

$$\gamma = \frac{1}{G} \tau \left(1 + \alpha |\tau|^\beta \right) \dots \dots \dots (4)$$

(履歴曲線)

$$\frac{\gamma - \gamma_a}{2} = \frac{1}{G} \frac{\tau - \tau_a}{2} \left(1 + \alpha \left| \frac{\tau - \tau_a}{2} \right|^\beta \right) \dots \dots \dots (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \beta &= \frac{2\pi h_{max}}{2 - \pi h_{max}}, \quad \alpha = \left(\frac{2}{G \gamma_r} \right)^\beta \\ G &= G_0 \left(\frac{\sigma'}{\sigma'_0} \right)^m, \quad \gamma_r = \gamma_{r0} \left(\frac{\sigma'}{\sigma'_0} \right)^m \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (6)$$

ここに、 G_0 は初期せん断剛性、 h_{max} は最大減衰定数、 γ_{r0} はせん断剛性が初期せん断剛性の1/2となるせん断ひずみである。 m はせん断剛性、基準ひずみの拘束圧依存性を表現する定数で通常は0.5とする。また、 (τ_a, γ_a) は履歴曲線の反転する点である。 σ' は平均有効主応力、 σ'_0 は初期平均有効主応力である。

時刻歴応答の*i*ステップにおける間隙水圧を次式で算定する。

$$\frac{u_{gi}}{\sigma_{0i}} = \frac{2}{\pi} \sin^{-1} R_i^{2\alpha} \dots \dots \dots (7)$$

ここに、 $R_i = \sum (1/N_i - 1/N_{i-1})$ 、 N_i は(1)式を変形して、

$$N_i = 0.5 \cdot 20 \left(R_{20} \frac{\tau_i - \tau_a}{\sigma_0} \right)^{\frac{1}{C}} = 10 \left(R_{20} \frac{\tau_i - \tau_a}{\sigma_0} \right)^{\frac{1}{C}} \dots \dots (8)$$

ただし、 τ_a は履歴ループが反転した時のせん断応力である。また、履歴ループが反転した時は $1/N_{i-1}=0$ とする。 R_i はFig.3のA点からB点にあるいはB点からC点にせん断応力が変化するときの間隙水圧の上昇への寄与をあらわしたものである。

(7)～(8)式の基本的な概念は、Fig.1を金属材料でよく用いられる疲労曲線とみなすものである。不規則振幅の時刻歴応答のうち任意のせん断応力比 τ_a/σ_0 が1サイクル作用しているとすると、間隙水圧の上昇に対する寄与は $1/N_i$ で表わされる。したがって、 τ_a/σ_0 が作用したときの N_i をFig.1から求めればよいことがわかる。また、この概念は等振幅の繰返し応力を考えているので不規則な繰返しでは、片振幅ごとに損傷度を累積することになる。すなわち、(8)式において係数0.5を乗じていることがこれに相当する。

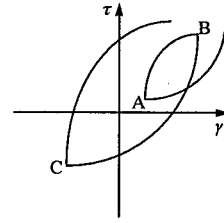


Fig.3 R-Oモデルにおける履歴ループ Hysteretic Curve in Ramberg-Osgood Model

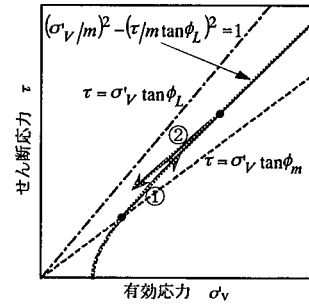


Fig.4 有効応力経路 Effective Stress Path

2.3 サイクリックモビリティが生じているときの過剰間隙水圧の変化

ここでは、Ishihara et al.⁷⁾によって開発されたYUSA YUSAの方法を用いる。せん断応力(τ)－有効応力(σ'_v)平面上ではMohr-Coulombの破壊条件($\tau = \sigma'_v \tan \phi_L$)で規定される。サイクリックモビリティは $\tau/\sigma'_v > \tan \phi_m$ となるときに生じる。このとき $\tau = \sigma'_v \tan \phi_m$ を変相線と呼ぶ。ここに、 ϕ は通常の内摩擦角、 ϕ_L は有効応力が小さいときの内部摩擦角($\tan \phi_L \approx 1.4 \tan \phi$)、 ϕ_m は変相角($\tan \phi_m \approx 0.875 \tan \phi$)である。

Fig.4にMohr-Coulombの破壊条件と変相線の関係、および以下の有効応力経路①、②の状態を模式的に示す。

1) 有効応力経路①： τ/σ'_v が $\tan \phi_m$ を越え、さらにせん断応力が増加するときの応力経路を双曲線で表現する。このとき、間隙水圧は減少する。

$$\left(\frac{\sigma'_v}{m} \right)^2 - \left(\frac{\tau}{m \tan \phi_L} \right)^2 = 1 \dots \dots \dots (9)$$

また、 m はせん断応力－有効応力平面上の双曲線の位置を決めるパラメータである。 m の設定は以下のようにする。 $\tan \phi_m$ を越える時の τ, σ'_v の値を各々 τ_a, σ'_{va} とすると、 $\sigma'_{va} \tan \phi_m = \tau_a$ が成り立つ。これを(9)式に代入すると、

$$\left(\frac{\tau_a}{m \tan \phi_m} \right)^2 - \left(\frac{\tau_a}{m \tan \phi_L} \right)^2 = 1 \dots \dots \dots (10)$$

となり、

$$m = \sqrt{\left\{ \left(\frac{1}{\tan \phi_m} \right)^2 - \left(\frac{1}{\tan \phi_L} \right)^2 \right\} \tau_a \dots\dots\dots (11)}$$

が得られる。

2) 有効応力経路②: せん断応力が減少するとき、それまでたどってきた双曲線の接線上を移動するものとする。このとき、間隙水圧は上昇する。

2.4 要素レベルの非線形液状化特性の検討

1要素モデルに繰り返しひずみを与えることにより、2.1節から2.3節において設定したR-Oモデルによる非線形特性と液状化特性を検討した。

Fig.5にR-Oモデルによる非線形性と間隙水圧の上昇を考慮した全応力解析とサイクリックモビリティを考慮した有効応力の結果を示す。全応力解析の場合は間隙水圧の上昇が急激に発生し液状化にいたるが、有効応力解析では間隙水圧が漸増し液状化にいたるまでの繰返し回数が多くなっている。サイクリックモビリティを考慮した場合は変相線を越えると間隙水圧が減少し剛性が復活することがわかる。また、履歴ループが逆S字型になる特性が表れている。

2.5 ポートアイランド観測記録の解析

兵庫県南部地震では埋立て地盤を中心に液状化が生じた。神戸ポートアイランドにおいてこの液状化現象を含む貴重な観測記録が得られた。そこで、前述の解析手法を用いて、この観測記録のシミュレーションを行った。以下の(1)~(5)に解析条件を、(6)に解析結果と考察を述べる。

(1) 地盤モデル 地震観測位置はポートアイランド北西部にある。建物周辺は地盤改良がされていたが、地震計が埋設されていた地盤周辺は対策がされていなかったため、液状化が発生したと推定される。

神戸市開発局⁸⁾が行った地盤調査・地震計設置報告書から地盤柱状図、地震計設置位置をTable1に示す。

(2) 地盤材料の非線形パラメータ R-Oモデルにおけるパラメータは基本的には γ_{ro} と h_{max} である。室内試験等の詳細なデータが不明なケースを考え、ここでは以下の値を用いた。

深さ	規準ひずみ	最大減衰定数
G.L. 0.0m ~ G.L.-27.0m	$\gamma_{ro}=5 \times 10^{-4}$	$h_{max}=0.2$
G.L.-27.0m ~ G.L.-83.0m	$\gamma_{ro}=1 \times 10^{-3}$	$h_{max}=0.2$

(3) 地盤材料の液状化パラメータ 液状化パラメータは基本的にN値、細粒土含有率FCおよび内部摩擦角 ϕ である。N値は上記の平均N値を用い、FCは10%とした。内部摩擦角 ϕ はN値の関数として建築基礎構造設計指針³⁾では大崎の式($\phi = \sqrt{20N + 15}$)を示しているが、ここではMeyerhofの式($0.25N + 32.5$)より求めた。

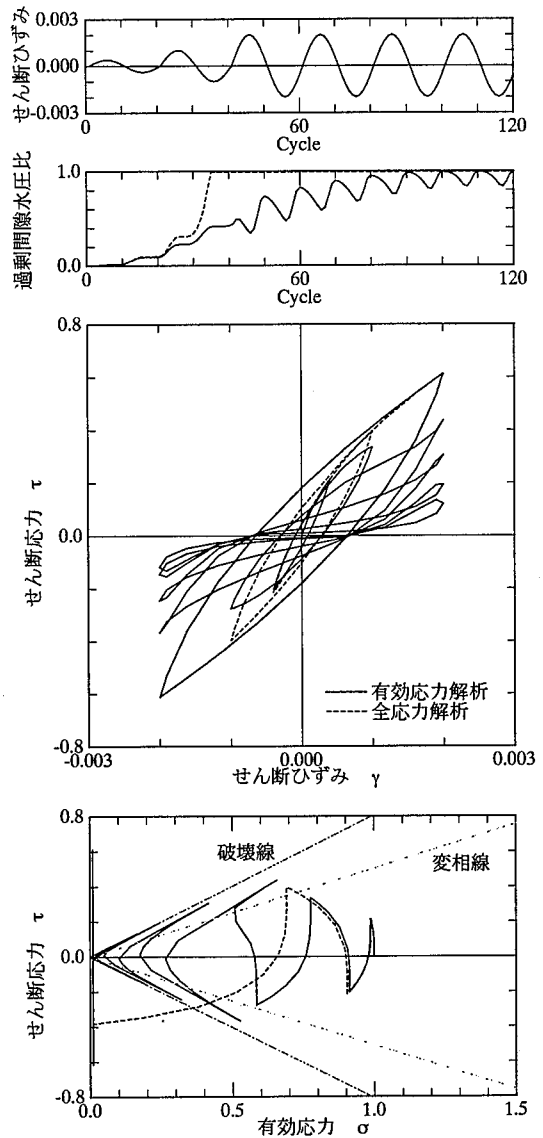


Fig.5 1要素モデルにおける応答特性
Response Characteristics of 1 Element Model

Table1 ポートアイランド地盤定数
Soil Properties of Kobe Port Island for Analysis

地震計 設定位置 G.L. (m)	深度 G.L. (m)	主な土質	V _p (m/s)	V _s (m/s)	平均 N値	密度 (tf/m ³)
0.0m	0.0~2.0	埋立て土	260	170	5.2	1.80
	2.0~5.0					
	5.0~12.6					
-16m	12.6~19.0	礫混り砂	1480	210	6.5	1.80
	19.0~27.0	粘土	1180	180	3.5	1.50
-32m	27.0~33.0	砂	1330	245	13.5	1.50
	33.0~50.0	礫混り砂, 砂	1530	305	36.5	1.85
	50.0~61.0	砂				
-83m	61.0~79.0	粘土	1610	303	11.7	1.85
	79.0~85.0	礫混り砂	2000	320	68.0	1.85

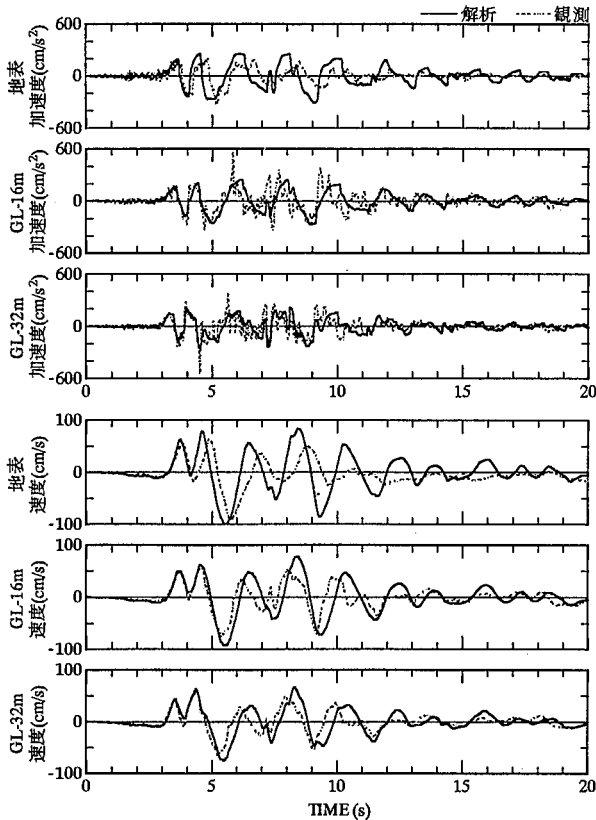


Fig.6 ポートアイランド観測記録の非線形解析
Nonlinear Soil Response of Port Island Vertical Array

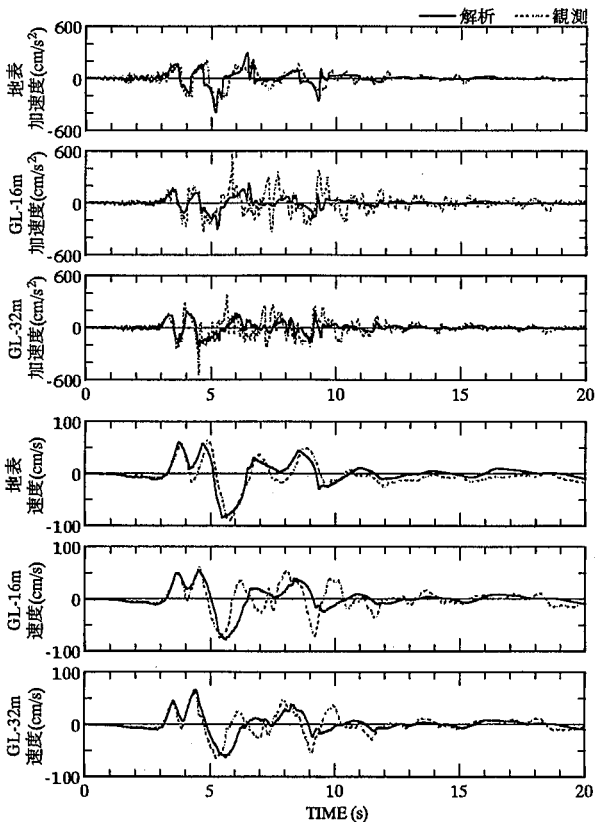


Fig.7 ポートアイランド観測記録の有効応力解析
Effective Stress Analysis of Port Island Vertical Array

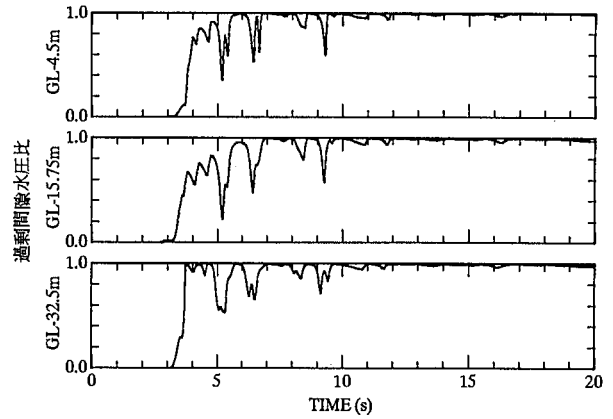


Fig.8 過剰間隙水圧比の時刻歴応答
Time History of Excess Pore Water Pressure Ratio

(4) 地盤の減衰 地盤の内部減衰としてRayleigh減衰で1次, 2次の固有振動数に対し2%を与えた。

(5) 入力波 兵庫県南部地震においてGL-83mで観測された記録⁹⁾のNS成分を入射波(E+F)として用いた。

(6)解析結果 まず, R-Oモデルの非線形性のみ考慮した場合の応答波形の比較をFig.6に示す。観測波形の速度は加速度から積分して求めたものである。波形の初動部分は加速度, 速度ともよく対応している。G.L.-32mの位置では波形全体の対応もよい。しかし, 地表の波形では後半部分で解析のほうが過大評価になっている。これは, 観測記録では液状化により下方からの波動の伝播が失われたため応答が小さくなっているためと考えられる。

次に, Fig.7にサイクリックモビリティを考慮した有効応力解析の結果を示す。地表における観測記録の傾向をよく捉えている。特に, 速度応答は非常によい対応を示している。一方, G.L.-32mではやはり液状化を考慮しない場合に比べそれほど対応がよくない。Fig.8は間隙水圧上昇の時刻歴応答を示したものである。各層で3.5秒あたりで急激に水圧上昇がみられ4秒付近で初期液状化に達している。その後はサイクリックモビリティにより水圧の低下と上昇を繰り返しているが10秒あたりでほぼ完全液状化にいたっている。

3. 地盤-杭支持構造物連成系の各部非線形性を考慮した地震応答解析

3.1 修正Penzienモデルの周辺地盤の設定方法

まず, 杭基礎-地盤の振動数依存の複素インピーダンスをリング加振解を用いた薄層要素法¹⁰⁾により求める。次に, 変位モードを仮定し軸ばねとせん断ばねに分離し, さらに, 振動数の2次式に近似して定数ばね, ダッシュポット, 付加質量に置換する。このせん断ばねが周辺地盤に対応するとして等価土柱面積を求める。この手順により修正Penzienモデルの周辺地盤を合理的に設定することができる。

3.2 解析モデル

ポートアイランド地区に立つ6階建および15階建杭支持建物²⁾を想定した。上部構造は等価高さ、等価質量の1質点に置換した。地下階底面はGL-6mであり、杭頭と地下階は剛接合とした。

杭は6階建では杭径1300mmで主鉄筋はD-29を20本、15階建では杭径1900mmで主鉄筋はD-29を36本とし、各々6mピッチで36本配置し、GL-51mの洪積層に支持させた。

上部構造はせん断ばねにTrilinearの非線形性を与えた。

杭体のM-φ関係はfiberモデルによりひび割れ発生時を第1折れ点、鉄筋降伏時を第2折れ点、コンクリート圧壊時を終局点としてTrilinearの非線形特性を対応する長期軸力(自重解析による軸力)ごとに与えた。杭のせん断力および周辺地盤と自由地盤をつなぐ軸ばねは線形とした。地盤はR-Oモデルによる非線形性とCyclic Mobilityを含めた液状化を考慮した。解析モデルの概要をFig.9に示す。杭先端位置における入力地震動は兵庫県南部地震のポートアイランドの地表面観測記録から地盤のみの等価線形解析により算定されたGL-51mにおける加速度波²⁾を用いた。

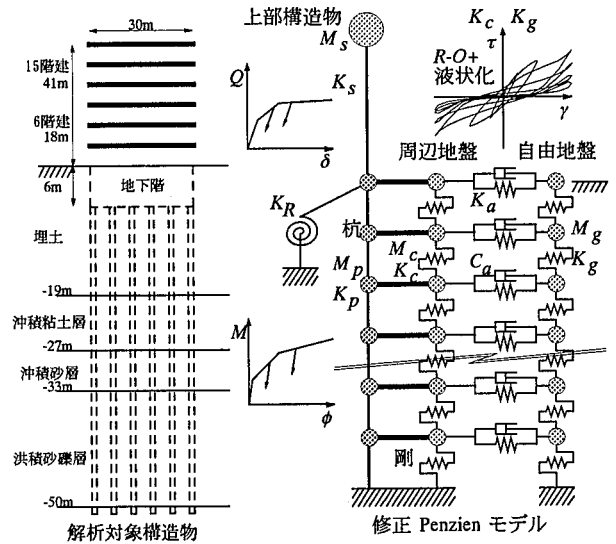


Fig.9 解析モデル概要

A Pile-Supported Structure and its Penzien Model

3.3 解析結果と考察

修正Penzienモデルの周辺地盤の等価面積をせん断ばねに等価とした場合と付加質量と等価した場合を

$$\left. \begin{aligned} A_K &= \sum A_{Ki} \ell_i / \sum \ell_i, \quad A_{Ki} = K_{bi} \ell_i / G_i \\ A_M &= \sum A_{Mi} \ell_i / \sum \ell_i, \quad A_{Mi} = M_{ai} / \ell_i \rho_i \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

により求め、Fig.10に示す。ここに、 A_K : 周辺地盤の等価面積、 K_{bi} : 薄層要素法によるインピーダンスから得られた*i*層のせん断ばね、 ℓ_i : *i*層の層厚、 G_i : *i*層のせん断剛性、 ρ_i : *i*層の質量である。薄層要素法によるせん断ばねと等価にするには基礎面積よりかなり小さな領域を周辺地盤土柱とする必要があることがわかる。

次に、連成系モデルの地震応答解析結果を示す。解析ケースはTable2に示すように地盤液状化の有無と杭体の非線形性の有無による4ケースである。本節では地盤の液状化と杭体の非線形性による構造物-杭系の応答への影響について、6階建モデル、15階建モデルについて検討する。

Fig.11, 12に上部構造物-杭系の応答波形、速度応答スペクトル、最大値分布を示す。加速度・変位の最大値分布では地盤の液状化を考慮すると加速度、変位のいずれも応答値が大きくなっている。上部質点の速度応答スペクトルも最大値分布と同様に液状化考慮の有無によってスペクトル形状に相違が見られるが杭体の非線形性による差はほとんど見られない。これらの加速度・速度・変位応答に関する傾向は6階建モデル、15階建モデルとも同様である。

Fig.13, 14には杭1本あたりの最大曲げモーメント・せん断力分布を示す。モーメント分布は粘土層(GL-19m

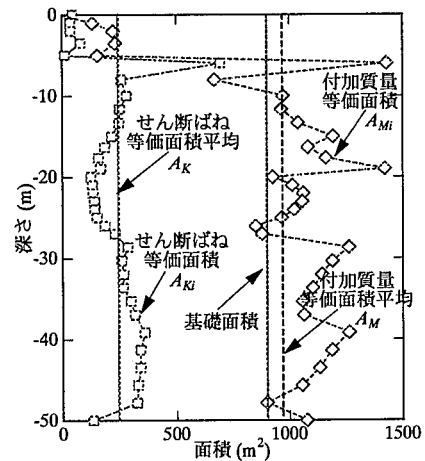


Fig.10 周辺地盤の等価土柱面積
Equivalent Area for Modified Penzien Model

Table2 解析ケース
Analysis Case

地盤	非線形	液状化
杭体	R-Oのみ	考慮
線形	CASE 1	CASE 2
非線形	CASE 3	CASE 4

~27m)の上下で傾向が異なる。GL-19m以浅では大小関係がCASE 2 > CASE 1 > CASE 4 > CASE 3となっている。すなわち、地盤の液状化を考慮するとモーメントが大きくなり、杭体が非線形化するとモーメントが小さくなる。GL-27m~40mでは液状化の有無によって分布が大きく異なり、その影響が大きい。せん断力分布ではGL-33m以深では加速度などと同様に杭体の非線形化による影響は小さい。

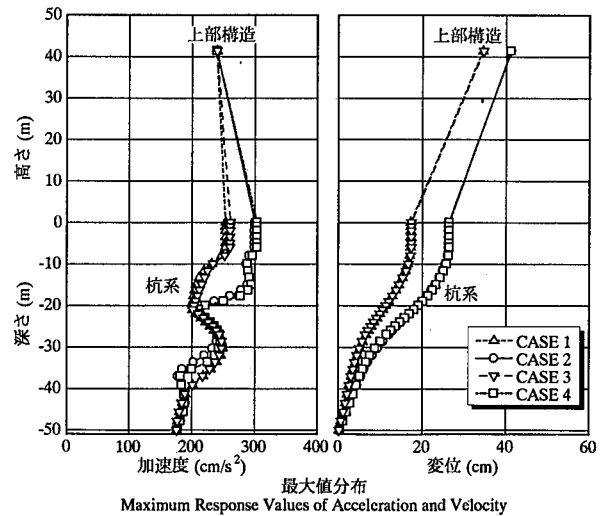
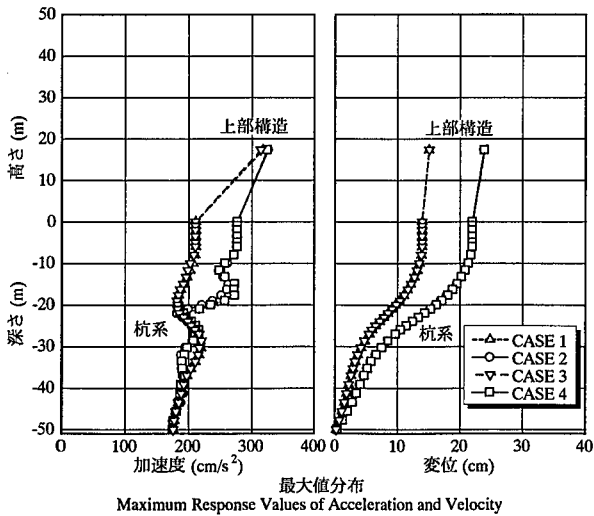
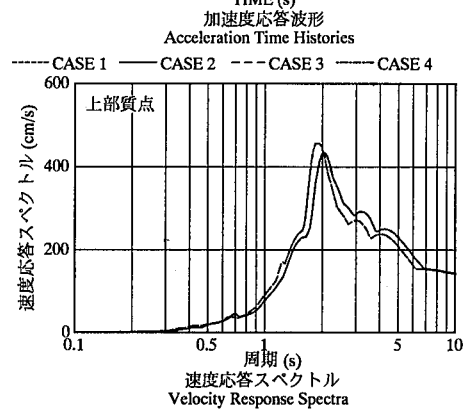
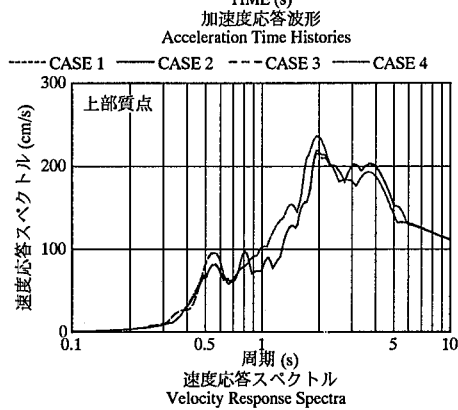
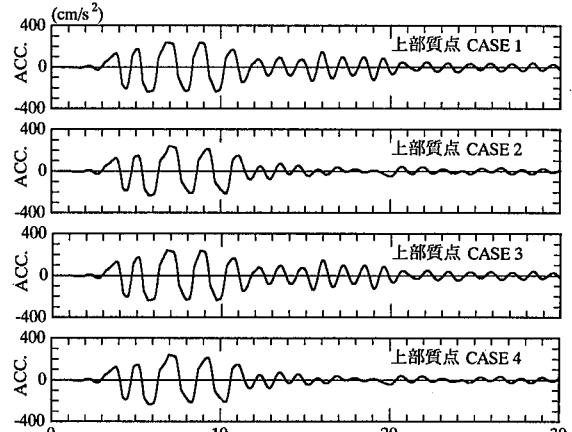
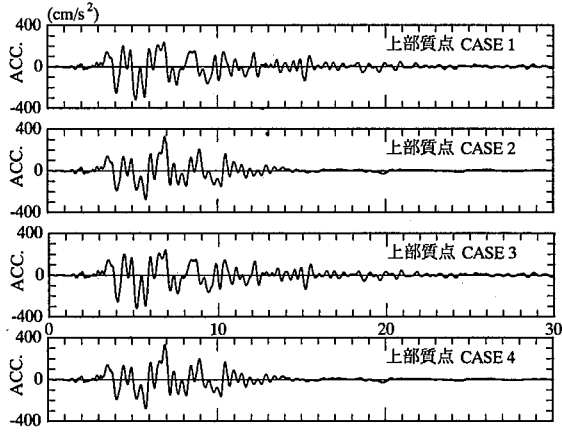


Fig.11 上部構造-杭系の応答(6Fモデル)
Responses of 6 Story Structure

Fig.12 上部構造-杭系の応答(15Fモデル)
Responses of 15 Story Structure

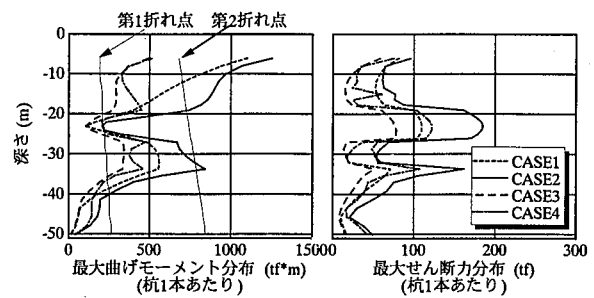
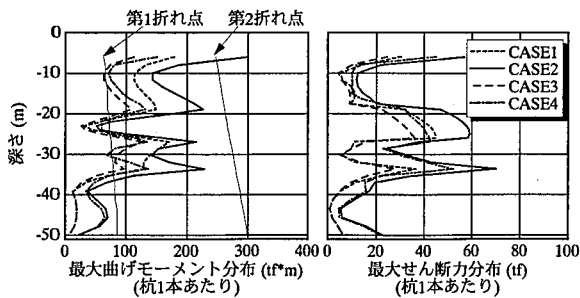


Fig.13 杭の応答(6Fモデル)
Responses of Piles that support 6 Story Structure

Fig.14 杭の応答(15Fモデル)
Responses of Piles that support 15 Story Structure

GL-33m以浅ではモーメント分布と同様の傾向となっている。

6階建モデル、15階建モデルの比較では、最大値の分布形状は類似しているがコンクリートのひび割れモーメントや鉄筋降伏モーメントとの関係では異なっている。15階建モデルでは杭全体に大きなモーメントが生じ、ひび割れモーメントを越える部位が多くなっている。杭の非線形性を考慮した場合は第1折れ点(コンクリートのひび割れ発生時)を越え変形が進むとともにモーメントが抑えられている。塑性化の程度は本検討の範囲では第2折れ点(鉄筋降伏時)までは進展していない。

4. まとめ

本報では、液状化を考慮できる解析手法を示すとともに、神戸ポートアイランドの観測記録のシミュレーション解析によりその妥当性を検証した。

本報で示した解析手法は液状化解析のパラメータとしては N 値を基本にし、詳細な室内試験がない場合でも液状化特性の考慮が可能である。観測記録のシミュレーションを目指したのではなく精度という観点からは詳細な解析手法には及ばないが、設計時にできるだけ簡便に液状化の特性をパラメトリックに検討できる手法となっている。

地盤の液状化を考慮した杭支持構造物の地震応答解析により得られた知見をまとめると以下の通りである。

- 1) 自由地盤応答の応答は、液状化を考慮した場合は加速度振幅が非常に小さくなり履歴曲線は逆Sループを描き塑性化が進んでいる。また、粘土層と埋土の層境界付近で加速度の変動が大きくなっている。
- 2) 地盤の液状化と杭体の非線形性による構造物-杭系の応答への影響は、地盤の液状化を考慮すると杭のモーメントが大きくなり、杭体が非線形化するとモーメントが小さくなる。地質が変化する(砂層と粘土層)部分では液状化の有無によって最大応答値の分布が大きく異なる。しかし、地盤の液状化、杭体の非線形化は上部構造の応答には影響は小さいことがわかった。

今後の検討課題として以下の項目があげられる。

- 1) 群杭効果と地盤の非線形性
本検討で用いたように3次元薄層要素法によれば群杭地盤の相互作用ばねや群杭効率が精度よく求められる。しかし、地盤を線形材料と仮定しており、地盤の非線形性が進んだ場合の群杭効果は不明である。
- 2) 杭の軸力-モーメント-曲率関係
地震時には上部構造からのモーメントにより端部の杭には軸力変動が生じ、杭の耐力低下につながる。また、解析手法の妥当性を確認するための観測記録を用いた検証が重要である。

参考文献

- 1) 宮本ほか：1995年兵庫県南部地震の観測記録を用いた液状化地盤における杭基礎構造物の応答に関する解析的検討，日本建築学会構造系論文集，No.493，pp.23~30，(1997)
- 2) 藤森ほか：動的ばねの周波数依存性を考慮した群杭基礎構造物の非線形地震応答解析法，大林組技術研究所所報，No.56，pp.9~14，(1998)
- 3) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，430p.，(1988)
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V耐震設計編，pp.94-95，(1996)
- 5) Seed, H. B. et al. : Pore-pressure changes during soil liquefaction, ASCE, Vol.102, GT4, pp.323~346, (1976)
- 6) 社本ほか：一次元有効応力解析の実地盤に対する適用性，日本建築学会構造系論文報告集，No.433，pp.113~119，(1992)
- 7) Ishihara, K. et al. : One-dimensional soil response analysis during earthquakes based on effective stress method, Journal of the faculty of engineering, University of Tokyo, Vol.35, No.4, pp.656~699, (1980)
- 8) 神戸市開発局：ポートアイランド土質調査及び地震計設置業務報告書，(1991)
- 9) 神戸市開発局：ポートアイランド地震観測記録，(1995)
- 10) 高野ほか：埋込みを有する群杭基礎の動的応答解析，第9回日本地震工学シンポジウム論文集，Vol.1，pp.1195-1120，(1994)