

有効応力法による摩擦杭基礎構造物の動的応答解析

DYNAMIC RESPONSE ANALYSIS OF STRUCTURE WITH FRICTION PILES
BASED ON EFFECTIVE STRESS THEORY

近藤 司* 楠本 太*

By Tsukasa KONDO and Futoshi KUSUMOTO

The object of this paper is to show a dynamic response of structure with friction piles based on the effective stress theory. The nonlinear behavior of the soft soil is expressed by allowing for continuous modification of soil properties with increasing pore pressure.

In the first part of this paper, the equation of motion for two-phase media is formulated within the framework of the finite element method and a nonlinear model based on elastoplastic theory is introduced to the above finite element system. Secondly, effects of permeability and over-consolidation ratio of soils on their response are studied. Finally, this method is employed in a structure model with friction piles and the dynamic behavior is studied.

1. はじめに

近年、湾岸地域の再開発や臨海部埋立地などの軟弱地盤を対象として各種構造物の立地が検討されている。これらの構造物の基礎としては支持杭基礎とする方法が一般的であると考えられるが、軟弱層が厚い場合や上部構造物が比較的軽量な場合などでは摩擦杭基礎を用いることが多い。この摩擦杭基礎を用いた構造物では長期的な沈下が最大の関心事となっているが、地震時においても地盤の剛性低下による杭と地盤の摩擦力の低下、軟弱地盤中に止められている杭先端の挙動およびその挙動との相互作用による地盤の有効応力の変化、さらにはその変化による過剰間隙水圧の発生・消散など検討しておくべき項目は多い。

これら軟弱地盤にある構造物の動的解析は構造物～地盤系の相互作用として解析する必要があり、地盤の顕著な非線形性を適切に考慮するためには地盤を多孔質体とし土粒子骨格と間隙水部分の二相でモデル化する有効応力法に基づく解析が必要である。有効応力法解析とは時々刻々変化する有効応力と過剰間隙水圧を算定し有効応力に適合した物性を用いて解析する手法であり、地盤の非線形挙動や液状化などを評価することが可能である。また、間隙水の消散を考慮に入れていることより地震によって生じる沈下量についても予測可能な手法である。この手法に関する研究としては、まず、成層地盤を対象として質点系モデルによる石原ら¹⁾、Finnら²⁾の研究が挙げられる。これらの研究は、せん断応力～せん断ひずみ関係として履歴関数モデルを用い、これに過剰間隙水圧モデルを併設することにより非線形挙動や液状化過程を時刻歴で追跡しており、有効応力解析の妥当性を示した。

* 工修 清水建設(株)大崎研究室 研究員 (〒100 東京都千代田区内幸町2-2-2富国生命ビル)

この手法を構造物～地盤系の相互作用解析に拡張するためには、つぎの2つの項目での検討が必要であり現在多くの研究^{3)～7)}が行われている。検討項目の1つは二相系地盤モデルの有限要素法への適用の問題であり、他の1つは非線形挙動を表現する構成則の問題である。二相系地盤モデルでは運動方程式と透水方程式を連成させて解析すること、地盤定数として通常の動的解析では用いない透水係数や間隙率などを用いることなど方程式の特性を検討しておく必要がある。これらについて数値的検討^{8)～9)}や地震観測記録¹⁰⁾との対応がなされており、その特性が示されつつある。構成則については実験結果に基づいて数多くのモデルが提案されており、せん断方向の反転効果や主応力軸の回転の影響などの問題点はあるが、基本的な地震時挙動は表現できる段階にあると判断される。著者らもいままでに幾つかの構成則を二相系地盤モデルに組み込み検討¹¹⁾しており、地震時の非線形挙動を表現することが可能であることを確認している。

本研究は、上述の検討項目を踏まえて有効応力法に基づく解析により軟弱地盤にある摩擦杭基礎構造物の挙動を検討することを目的としたものである。本報告では、まず、解析手法の概要を述べるとともに解析に必要な地盤定数の中から、透水係数、過圧密比をパラメータとして取上げ、これらのパラメータによる地盤応答への影響について検討する。つぎに、摩擦杭基礎構造物を取上げ支持杭基礎構造物との比較より、その動的挙動を検討する。

2. 運動方程式

土粒子骨格と間隙水の二相でモデル化するときの地盤モデルを図-1に示す。図中の添字 s は土粒子骨格部分、 f は間隙水部分を示す。本研究では図に示すように土粒子骨格と間隙水に対し別々の自由度を設定し、式(1)で表される有効応力と過剰間隙水圧を同時に算定する。

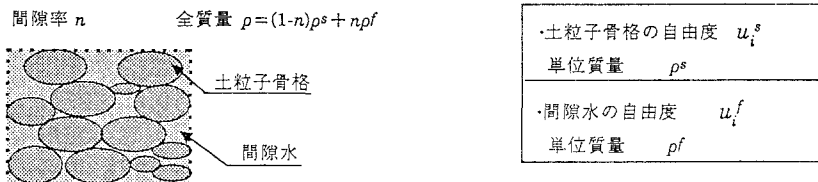


図-1 二相系地盤モデル

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} - \delta_{ij} p \quad (1)$$

ここで、 σ_{ij} は全応力、 σ'_{ij} は有効応力、 p は過剰間隙水圧、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタである。

Biot¹²⁾の多孔質体理論によれば、二相系地盤に対する基礎方程式はつぎのものとなる。式(2)が土粒子骨格部分、すなわち有効応力に対応するものであり、式(3)が間隙水部分である。両式の左辺第二項が土粒子骨格部分と間隙水部分の相互作用を表す項であり、間隙水の流れを準静的な流れとみなしDarcy則を適用することより設定し両者の速度差に依存して減衰力が作用する形となっている。両式を加算すれば従来の地盤の方程式となる。式(4)は骨格部分の構成関係であり、この地盤剛性に後述する地盤の構成則を適用する。過剰間隙水圧は、土粒子骨格および間隙水部分の体積ひずみを用いて式(5),(6)により算定する。この式から分かるように過剰間隙水圧を発生させるため通常用いられる体積ひずみゼロの条件はここでは必要ない。

$$(1-n)\rho^s u_{i,tt}^s + b(u_{i,t}^s - u_{i,t}^f) = \sigma'_{ij,j} \quad (2)$$

$$n\rho^f u_{i,tt}^f - b(u_{i,t}^s - u_{i,t}^f) = -np_{,i} \quad (3)$$

$$\sigma'_{ij} = D_{ijkl} (u^s_{k,l} + u^s_{l,k})/2 - \delta_{ij} p \quad (4)$$

$$-n u^f_{i,i} = (1-n) u^s_{i,i} + \frac{1}{K_v} p \quad (5) \quad \frac{1}{K_v} = \frac{1-n}{K_s} + \frac{n}{K_f} \quad (6)$$

ここで、 b はDracy則より $b = n^2/k$ であり、 n は間隙率、 k は透水係数である。 D_{ijkl} は地盤剛性、 K_s, K_f は土粒子および間隙水の体積弾性係数である。また、コンマ記号は微分を示し、足添字 t は時刻である。

つぎに、式(2)~(5)より過剰間隙水圧 p を消去しガラーキン法を用いて離散化し有限要素法に定式化する。この定式化は文献³⁾に示されているものであり、間隙水の取扱いを非圧縮性であると仮定する、すなわち式(5),(6)の K_v をPenalty法のpenalty numberと位置付けると式(7)の形に定式化することができる。式(7)は剛性マトリックスの項よりわかるように間隙水の剛性を考慮せず、その挙動は減衰マトリックスに相当する項において透水係数およびpenalty numberと位置付けた係数を介して土粒子骨格部分との相互作用により規定する形となっている。なお、時間軸方向の数値解析はNewmark's β 法を用いている。

$$\begin{bmatrix} M^s & 0 \\ 0 & M^f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}^s \\ \dot{u}^f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_R + C^{ss} & C^{sf} \\ C^{fs} & C^{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u^s \\ u^f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u^s \\ u^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F^s \\ F^f \end{bmatrix} \quad (7)$$

ここで M は質量、 K は剛性、 C は透水係数および体積変化に関わるマトリックスであり、下記の式で表される。また、 C_R はRayleigh減衰、 F は外力ベクトルである。

$$\begin{aligned} M^s &= \int_V N_i^s (1-n) \rho^s N_j^s dV & C^{ss} &= \int_V N_i^s \left(\frac{n^2}{k} \right) N_j^s dV + \int_V N_{i,k}^s (1-n)^2 K_v N_{j,l}^s dV \\ M^f &= \int_V N_i^f n \rho^f N_j^f dV & C^{ff} &= \int_V N_i^f \left(\frac{n^2}{k} \right) N_j^f dV + \int_V N_{i,k}^f n^2 K_v N_{j,l}^f dV \\ K &= \int_V N_{m,j}^s D_{ijkl} N_{n,l}^s dV & C^{sf} = C^{fs} &= - \int_V N_i^s \left(\frac{n^2}{k} \right) N_j^f dV + \int_V N_{i,k}^s n (1-n) K_v N_{j,l}^f dV \end{aligned} \quad (8)$$

N^s, N^f は土粒子骨格と間隙水部分に対する形状関数であり、ともに4節点アイソパラメトリック要素を用いている。

3. 地盤の構成則

3.1 弾塑性論に基づく構成則

地盤の構成則はPoorooshasbら¹³⁾、西ら¹⁴⁾が提案しているものに基づいて設定する。これらの構成則は非関連流れ則を用い弾塑性論に必要な3関数の基本的な関数形として、降伏関数は応力比一定、塑性ポテンシャル関数は対数関数、硬化関数は双曲線表示としている。以下に、用いた降伏関数、塑性ポテンシャル関数、硬化関数の3関数について説明する。

3.1.1 降伏関数

降伏関数 f はモール・クーロンの規準に対応するものとして、式(9)に示す関数とする。

$$f = Q - \eta_y R(\theta) P \quad (9)$$

ここで、 η_y は降伏応力比(Q/P)であり、 P は一般応力の1次不変量、 Q は偏差応力の2次不変量である。 $R(\theta)$ はモール・クーロンの規準に対応するものであり、Lodeパラメータ θ を式(10)で定義し、式(11)で示す三軸圧縮状態 $R(0)$ と三軸伸張状態 $R(\pi/3)$ の値を補間して算定する。

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{3}(\sigma'_2 - \sigma'_3)}{(\sigma'_1 - \sigma'_3)} \right) \quad (10) \quad R(0)=1.0, \quad R(\pi/3) = \frac{3 - \sin \phi_f}{3 + \sin \phi_f} \quad (11)$$

ここで、 $\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3$ は主応力、 ϕ_f は内部摩擦角である。

3.1.2 塑性ポテンシャル関数

ポテンシャル関数 g は塑性ひずみ増分方向を与えるものである。Poorooshasbら、西らともに対数関数を用いて表示しているが、ここでは赤井・足立らの提案する指数関数タイプの式(12)に示すものとする¹⁵⁾。その理由としてはパラメータの数は1つ増えるが地盤特性をより詳細に規定することが可能であると同時にそのパラメータ a^* を1.0とすると西らのポテンシャル関数と同様な表現となり適用面での応用性が高いと考えられる。なお、ここでは $a^*=1.0$ としている。

$$g = Q - \frac{\eta_f R(\theta)}{1 - a^*} \left\{ 1 - \left(\frac{P}{P_y} \right)^{\frac{1-a^*}{a^*}} \right\} P \quad (12)$$

ここで、 P_y は先行圧密応力、 η_f は破壊時の応力比、 a^* は地盤特性によるパラメータである。

3.1.3 硬化関数

塑性ひずみの大きさを規定する硬化関数は応力比および塑性ひずみより、式(13)に示す双曲線表示のものとする。

$$\eta - \eta_0 = \frac{(\eta_f R(\theta) - \eta_0)(r_Q^p - r_{Q0}^p)}{\frac{(\eta_f R(\theta) - \eta_0)}{A} + (r_Q^p - r_{Q0}^p)} \quad (13)$$

ここで、 η_0 は圧縮領域・伸張領域において同じ領域で連続的に載荷－除荷－載荷の場合の載荷から除荷への折返し応力比、 r_Q^p は偏差ひずみの2次不変量、 r_{Q0}^p は応力比と同様な折返し点でのひずみである。Aは定数であり、塑性ひずみ $r_Q^p \rightarrow 0$ の $\eta \sim r_Q^p$ の勾配を示し、 $A = 2G_0/P_0$ で与えられる。 G_0 は初期せん断剛性である。

3.2 弾塑性論によるマトリックス表示

以上の3関数を弾塑性論に適用し、応力増分とひずみ増分の関係を2次元平面ひずみの仮定のもと式(14)によりマトリックス表示する。

$$\{d\dot{\sigma}\} = \left[[D^e] - \frac{[D^e] \left\{ \frac{\partial g}{\partial \sigma'} \right\} \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma'} \right\}^T [D^e]}{\left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma'} \right\}^T [D^e] \left\{ \frac{\partial g}{\partial \sigma'} \right\} - \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma'} \right\} \left\{ \frac{\partial g}{\partial \sigma'} \right\}} \right] \{d\epsilon\} \quad (14)$$

ここで、 $d\dot{\sigma}$ は有効応力増分、 $d\epsilon$ はひずみ増分であり、 D^e は弾性マトリックスである。

さらに、ここで用いる構成則には式(15)に示す西らの提案する「ダイレイタンシー限界」¹⁴⁾に相当する平衡状態を設定し、この領域内は弾性挙動とする。

$$\eta^* = a \eta_f R(\theta) \sqrt{\frac{P_y(OCR)^{-\frac{\kappa}{\lambda}}}{P} - 1} \quad (15)$$

ここで、 η^* は弾性範囲上限の応力比、 a は平衡状態の大きさを規定するパラメータ、 OCR は過圧密比、 λ は圧縮指数、 κ は膨潤指数である。

4. パラメータ解析

次節で摩擦杭基礎構造物について検討するが、ここでは透水係数と過圧密比をパラメータとした解析を行い軟弱地盤の基本的な挙動について検討する。解析モデルを図-2に、透水係数と過圧密比以外の地盤定数を表-1に示す。解析モデルはせん断波速度 $V_s=100\text{m/s}$ の一層飽和地盤である。入力地震動はEL-CENTRO,N-S成分とし、最大加速度は 100gal 、継続時間は 7.0秒 、時間刻みは 0.005秒 とする。

表-1 地盤定数

地盤定数			
運動方程式に関わる定数		構成則に関わる定数	
土粒子重量 γ_s	2.6t/m^3	圧縮指数 λ	0.02
間隙水重量 γ_f	1.0t/m^3	膨潤指数 e	0.004
せん断波速度	100m/s	弾性パラメータ α	0.20
ボアソン比 ν	0.45	内部摩擦角 ϕ	45
間隙率 n	0.40	—	—

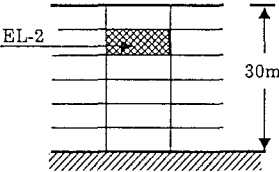


図-2 解析モデル

表-2 解析ケース

ケース	透水係数 cm/s
ケース1	1.0×10^{-4}
ケース2	1.0×10^{-5}
ケース3	1.0×10^{-7}

4.1 透水係数

透水性が地盤応答に与える影響をみるために透水係数をパラメータとして検討を行う。透水係数は表-2に示す3ケースとする。ケースの設定はケース1からケース3にしたがって地盤の透水性が小さくなる、すなわち非排水状態になるようにした。また、この検討では過圧密比を1.5とした。

図-3に3ケースのEL-2の有効応力経路とせん断応力～せん断ひずみ関係を示す。なお、図中の2次不変量 Q はせん断応力 τ_{xy} と同符号で表示した。透水係数の大きいケース1では有効応力経路よりわかるように間隙水圧の発生がほとんどみられず、応力～ひずみ関係もほぼ線形状態にある。ケース2は水圧が蓄積と消散を繰り返し、応力～ひずみ履歴もほぼ同様なループを描いており、非線形レベルが進展していかない状況にある。それに対し非排水状態であるケース3は水圧の一方的な蓄積により履歴ループの劣化とともにループ形状が大きくなり強く非線形性が発揮されていることがわかる。図-4に3ケースの地表面での加速度・変位およびEL-2の過剰間隙水圧波形の重ね書きを示す。

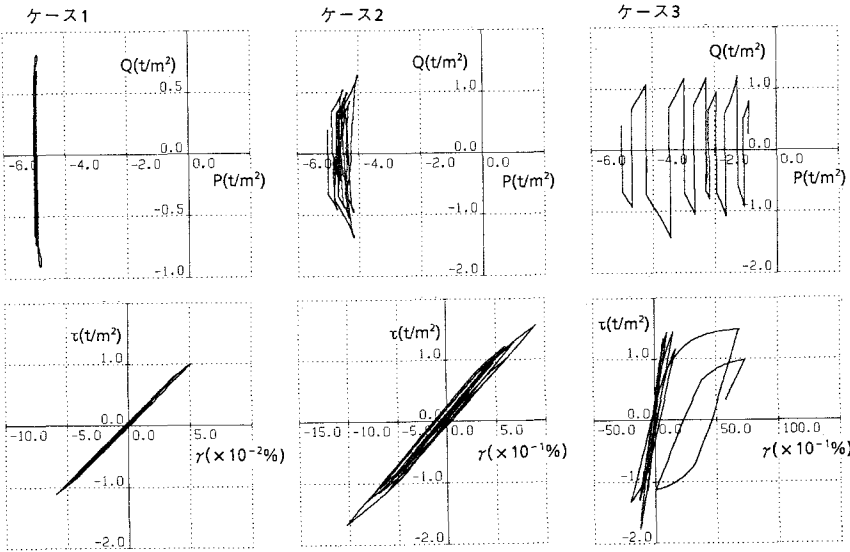


図-3 有効応力経路とせん断応力～せん断ひずみ

この図より、まずケース1はケース2,3と異なった傾向を示していることがわかる。前述のしたように間隙水圧の蓄積はほとんど見られないが、加速度、変位ともに応答は小さくなっている。これは地盤の透水性により地震エネルギーが消費されていることに対応したものと考えられる。すなわち、透水性が大きいとは土粒子骨格と間隙水の相対速度が大きいことを示しておりこれが減衰として作用したものと考えられる。つぎに、ケース2,3を比較してみる。ケース3の間隙水圧は単調増加の状態にあり、加速度は応答が抑えられた形状を示すようになるとともに変位は振幅がしだいに大きくなっていく傾向を示している。また、周期も延びる傾向を示している。これは有効応力の減少に対応して非線形レベルが大きくなった結果である。これに対し、ケース2では非線形領域ではケース3と同レベルの水圧が発生するが除荷時での間隙水圧の消散がみられることより地盤剛性の低下が一方的に進まず、ケース3ほどの非線形性が発揮されていないものと考えられる。

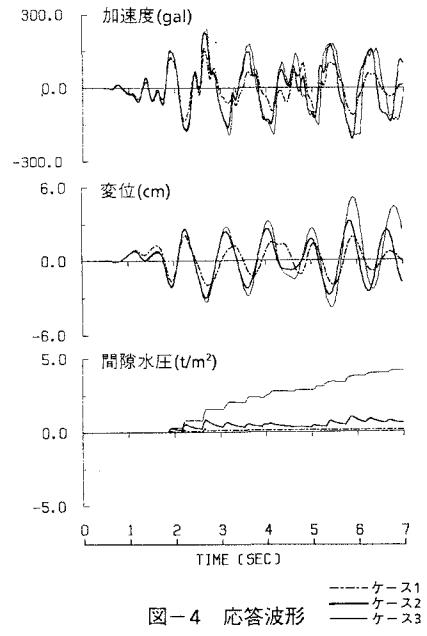


図-4 応答波形

表-3 解析ケース

ケース	過圧密比
ケース1	1.0
ケース2	2.0
ケース3	4.0

4.2 過圧密比

地盤の初期応力状態が動的挙動におよぼす影響をみるために過圧密比をパラメータとして検討する。なお、この過圧密比の検討は文献16)においても実施されている。過圧密比は表-3に示す正規圧密状態($OCR=1.0$)と過圧密状態($OCR=2.0, 4.0$)の3ケースとした。透水係数は $1.0 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ とし非排水状態とした。過圧密比は図-5に示すように先行圧密応力 P_y と初期応力 P_0 との関係を結び付けるものであり、正規圧密で $P_y=P_0$ 、過圧密比が大きくなれば図に示す P_0 が P_y に対し相対的に原点に近づくことになり弾性範囲上限の応力比が大きくなる。また、平衡状態曲線は式(15)に示すものであり、この曲線も過圧密比が大きくなれば弾性範囲上限の応力比が大きくなる。このようなことを踏まえて解析結果について検討する。図-6に、3ケースの加速度・変位波形および過剰間隙水圧波形を示し、図-7に有効応力経路とせん断応力～せん断ひずみ関係を示す。これらの図より、ケース1の正規圧密状態から過圧密比が大きくなるにしたがって間隙水圧の蓄積は小さくなること、正規圧密状態では加速度、変位ともに水圧の蓄積による非線形性がみられるが過圧密比が大きくなるにしたがって非線形性の影響は小さくなることわかる。

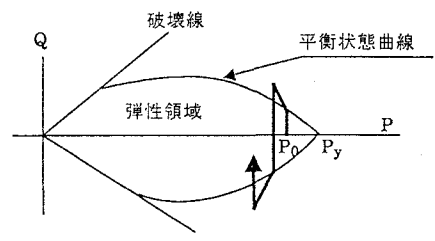


図-5 応力経路の概念図

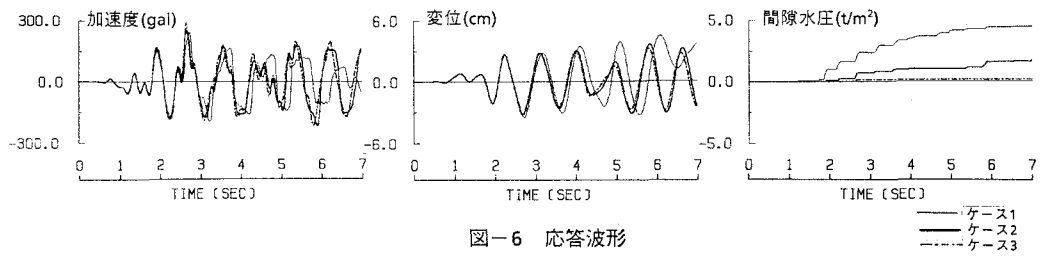


図-6 応答波形

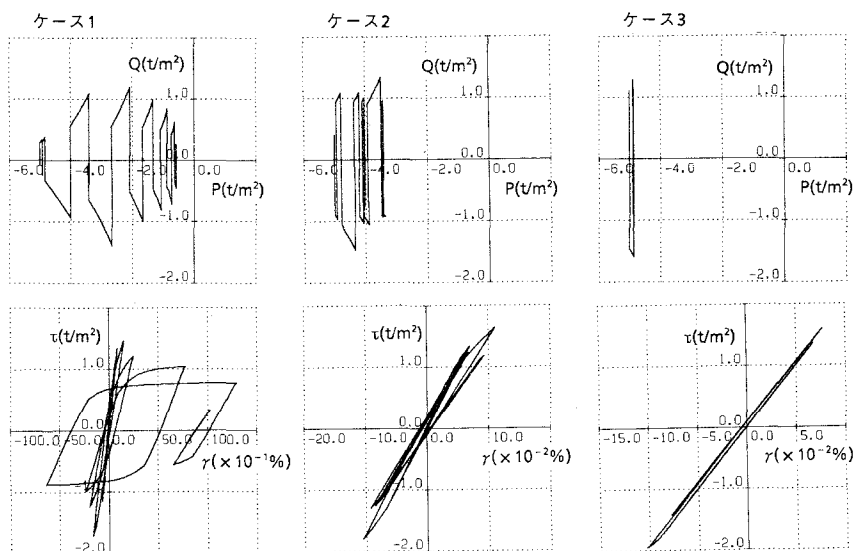


図-7 有効応力経路とせん断応力～せん断ひずみ

5. 摩擦杭基礎構造物の動的解析

ここでは、前節のパラメータ解析で用いた地盤定数から、地盤定数を1ケース設定し摩擦杭基礎構造物の基本的な動的挙動について検討する。

5.1 解析モデルおよび解析条件

構造物モデルは高さ20mの中層建物とし、地盤は表層の軟弱地盤とその下の支持地盤の2層とした。杭はRC杭を3列配置するが、杭先端の位置により解析ケースとしてつぎの2ケース設定する。1つは杭長15mとしその先端が表層の軟弱地盤内にある摩擦杭基礎のケース(以下、摩擦杭モデル)と他の1つは支持杭として杭先端が支持地盤にあるケース(以下、支持杭モデル)の2ケースとする。図-8に摩擦杭モデルを示す。杭長以外の解析条件は同一とする。構造物と杭の定数を表-4に示す。地盤定数は4.パラメータ解析で用いたものと同様である。ただし、透水係数は $k=1.0 \times 10^{-5}$ cm/s、過圧密比は1.5とした。なお、支持地盤は弾性地盤とし、せん断波速度 $V_s=350$ m/s、透水係数 $k=1.0 \times 10^{-7}$ cm/s、ポアソン比 $\nu=0.4$ 、地盤の単位重量は表層地盤と同様とした。入力地震動はEL-CENTRO,N-S成分、最大加速度150.0gal、継続時間は6.0秒とした。

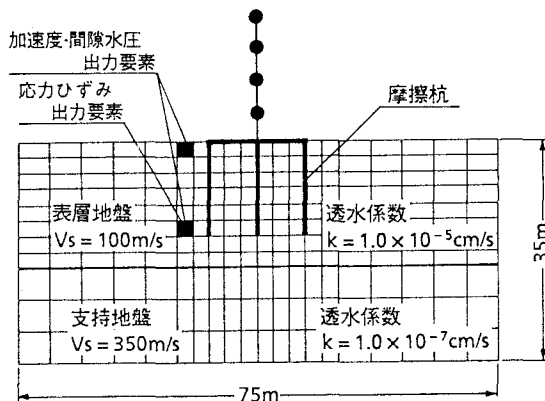


図-8 摩擦杭モデル

表-4 構造物・杭の定数

質点	重量 t	バネ定数 t/m	杭定数 t/m
①	350	15 000	ヤング率 $E=2.5 \times 10^6$ t/m ² 断面積 $A=3.5$ m ² 2次モーメント $I=2.0$ m ⁴
②	400	25 000	
③	500	35 000	
④	600	45 000	
B	1200		

5.2 解析結果

図-9に2ケースの地震終了時の過剰間隙水圧分布を示す。支持杭モデルでは地盤全体にわたり深さに応じた間隙水圧の発生がみられ局所的な集中はみられない。それに対し摩擦杭では杭先端周辺地盤で間隙水圧の集中がみられる。これは摩擦杭先端の挙動の影響によるものと考えられる。また、図-10に地表と摩擦杭先端周辺地盤の加速度波形と間隙水圧波形を示す。加速度波形より両地点ともに主要動以降に差異がみられ摩擦杭モデルの方が振幅は小さく、周期も長い傾向にあることがわかる。また、間隙水圧波形より地表部分ではほぼ同じ水圧量を示しているが地中部では摩擦杭モデルの方が2倍程度の水圧量となっており、これらのことより支持杭モデルにくらべ摩擦杭モデルの方が地中の非線形レベルが大きいと推定されるが、このことを確認するために図-11に地中部のせん断応力～せん断ひずみ関係を示す。これらの図の履歴ループ形状や発生しているせん断ひずみからも摩擦杭の方が非線形性が高いことが分かる。

つぎに、構造物～杭系の応答について検討する。図-12に構造物上端の加速度・変位波形を示す。これらの図は両モデルの結果を重ね書きしてある。さらに、図-13に構造物のせん断力分布および杭の軸力と曲げモーメントを示す。なお、構造物のせん断力分布は摩擦杭モデルの値を支持杭モデルの値で除した比率で示してある。

これらの図より、加速度は主要動以降摩擦杭モデルの方が振幅は小さく、振動周期も長い傾向が認められるが、変位波形では両者はほぼ同様な形状を示しており、両モデルともに変位挙動は地盤に支配されていると考えられる。また、せん断力よりみた地震荷重では摩擦杭モデルの方が支持杭モデルにくらべ8割程度の値となっている。これは、摩擦杭モデルの杭先端の条件および杭先端に入力する加速度が地盤の非線形性の影響により小さくなること(支持杭モデル=347gal、摩擦杭モデル=300gal)によるものと考えられる。

杭の軸力については支持杭は杭全体にわたってほぼ同じ軸力が発生しており、軸力が支持地盤まで伝達されている。それに対し摩擦杭は杭下方にしたがって軸力が小さくなる分布をしており周辺地盤に軸力が伝達されていることがわかる。このことは地震時の全体転倒モーメントにより発生する軸力についても周辺地盤との摩擦力に見込んでおく必要があることを示しており、地盤の非線形による剛性低下を考慮して構造物の安定性の検討が必要である。また、最大値でみた場合

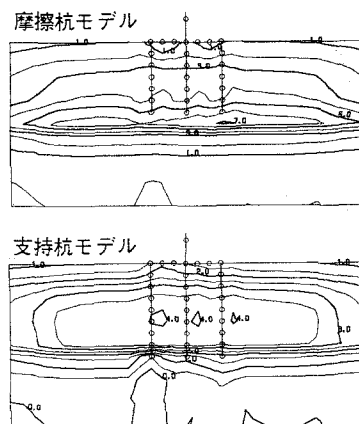


図-9 過剰間隙水圧分布

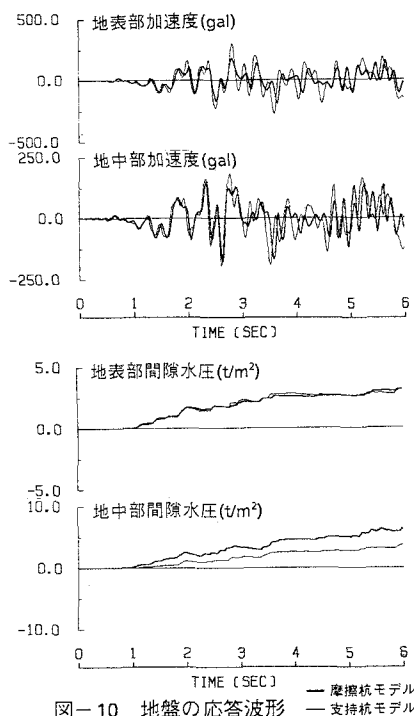


図-10 地盤の応答波形

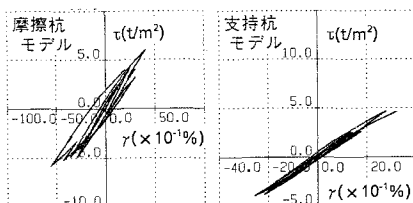


図-11 せん断応力～せん断ひずみ

構造物と同様に軸力・曲げモーメントとともに摩擦杭モデルの方が小さくなっている。

以上のことより摩擦杭の挙動については、つぎのことが言える。杭先端部分の地盤は過剰間隙水圧の蓄積により強い非線形挙動を示し摩擦杭に入力する加速度を低減すると同時に杭先端の支持条件もあわせた効果により構造物・杭に発生する断面力は小さくなる。しかし一方では杭の軸力分布からわかるように杭の支持は周辺地盤に依存していることから地盤剛性の低下を考慮した構造系の全体安定性の確認が必要となってくる。

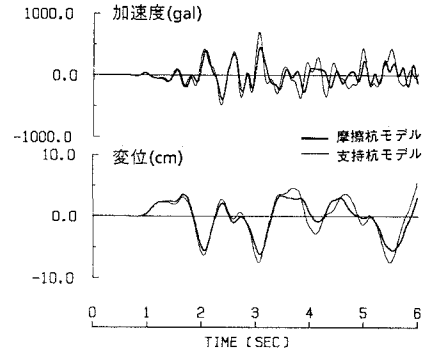


図-12 構造物の応答

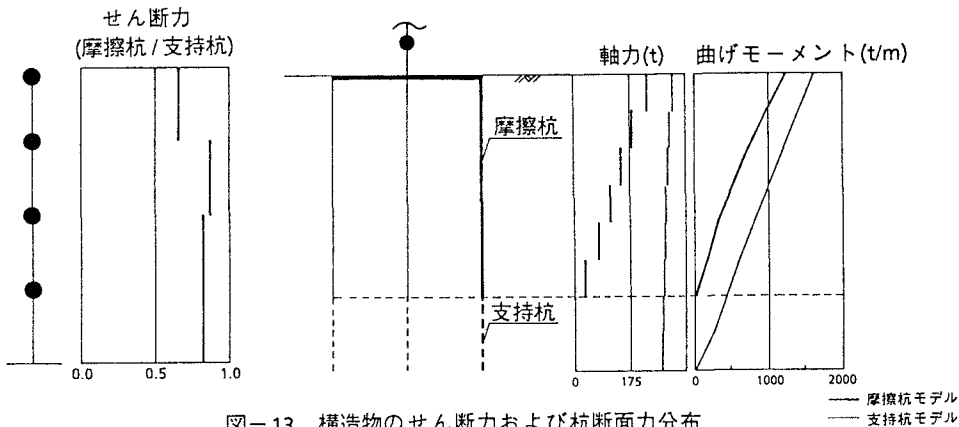


図-13 構造物のせん断力および杭断面力分布

6. 結論

有効応力法に基づいて摩擦杭基礎構造物の動的挙動について検討した。得られた結論はつぎのものである。

- ① 地盤の透水性が応答に与える影響は大きく、透水性の良い地盤では間隙水圧の蓄積はみられず、土粒子骨格と間隙水の相対速度差に起因する減衰効果により応答は小さくなる。それに対し、透水性の小さい、いわゆる非排水状態では間隙水圧は一方向的に蓄積し地盤は強い非線形性を示す。この中間にある地盤では間隙水圧は蓄積と消散の両方の現象が発生する。
- ② 地盤の初期応力状態が正規圧密か過圧密かによる影響も透水性同様に大きい。ここで示したケースでは過圧密比が2.0程度で正規圧密に比べ水圧の蓄積は半分程度であり、過圧密比が4.0程度になれば地盤の挙動はほぼ弾性と考えるとよい。
- ③ 摩擦杭構造物は支持杭構造物にくらべ構造物・杭に発生する地震荷重は小さいが、地震時に杭に発生する軸力は周辺地盤に依存する分布を示しており、地盤剛性の低下による地盤・杭の摩擦力の低減には注意する必要がある。

著者らは、現在、摩擦杭基礎構造物の模型実験を実施しており、実験結果に対しシミュレーション解析を行い、本解析手法の精度の確認および摩擦杭基礎構造物の動的挙動の検討を引続き行う予定である。

参考文献

- 1) K.Ishihara & I.Towhata :“Dynamic Response Analysis of Level Ground based on the Effective stress model” Soil Mechanics-Transient and Cyclic Loads,Wiley (1982) pp.133~172
- 2) W.D.L.Finn & K.W.Lee :“Dynamic Effective Stress Response Analysis of Soil Deposits with Energy Transmitting Boundary including Assessment of Liquefaction Potential” Univ. of British Columbia, Dept. of Civil Eng., Soil Mechanics Serises, No.38 (1978)
- 3) O.C.Zienkiewicz, & T.Shiomi :“Dynamic Behaviour of Saturated Porous Media” Num. & Analy. Meth. in Geomech. , Vol.8 (1984) pp.71-96
- 4) 田中忠次、安中正実、谷 茂 :“八郎潟干拓堤防の液状化解析” 第20回土質工学研究発表会発表講演集(1987) pp.725~726
- 5) 利波宗典、柳沢栄司、青木照幸 :“二相系地盤モデルによる砂層の液状化解析” 第23回土質工学研究発表会発表講演集(1988) pp.925~926
- 6) 田中芳行、塩見忠彦、鈴木善雄 :“有効応力解析における土の構成式に関する研究” 第23回土質工学研究発表会発表講演集(1988) pp.921~922
- 7) 西 好一 :“砂の構成式とその地震時安定性問題への適用” 「工学材料における構成則—理論と応用」に関するシンポジウム , 講演概要集 (1988) pp.1~40
- 8) O.C.Zienkiewicz & P.Bettess “Soil and other Saturated Media under Transient, Dynamic Conditions ; General Formulation and the Validity of Various Simplifying Assumptions” Soil Mechanics-Transient and Cyclic Loads ,Wiley (1982) pp.1~16
- 9) 楠本 太、近藤 司、渡辺浩平 :“二相系地盤モデルの動的解析に及ぼす地盤定数の影響について” 第20回土質工学研究発表会発表講演集(1985) pp.731~734
- 10) 柳沢栄司、大宮宏之、利波宗典 :“アレー観測記録に基づく表層地盤および間隙水圧の地震応答解析” 第22回土質工学研究発表会発表講演集(1987) pp.751~752
- 11) 近藤 司、楠本 太 :“二相系非線形地盤—構造物の動的相互作用解析”, 第7回日本地震工学シンポジウム講演集 (1986) pp1087~1092
- 12) M.A.Biot :“Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid” J.Acoustic Soc. Am.,Vol. 28 No.2 (1956) pp.168~178
- 13) H.B.Poorooshasb & S.Pietruszczak :“On Yielding and Flow of Sand ; A Generalized Two-Surface Model” Computer and Geotechnics, Vol.1 No.1 (1985) pp33~58
- 14) 西 好一 :“非排水繰返し荷重下における飽和砂の弾—塑性挙動と構成式” 土木学会論文報告集 ,No319 (1982) pp.115~128
- 15) K. Akai & T. Adachi : “Constitutive Equations for Geomechanical Materials based on Elasto-Viscoplasticity” Constitutive Equations of Soil ; Preprints of Specialty Session 9, 9th ICSMFE(1977) PP1~10
- 16) 関口宏二、岡二三生、大石博 :“過圧密を考慮した砂地盤の液状化解析” 第21回土質工学研究発表会発表講演集(1986) E-8,243, pp.639~640

(1988年10月12日受付)