

有効応力法に基づく軟弱地盤—構造物系の動的応答解析手法に関する研究

近藤 司

(大崎研究室)

楠本 太

(大崎研究室)

§ 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、大型重量構造物や長大線状構造物などの立地が数多く検討されている。これらの構造物の耐震安全性を論ずるためには、地盤の動的挙動を適切に評価した検討が必要である。

一般に、地盤は強い非線形性を示す材料といわれており、実験結果などから明らかのように地盤の動特性はダイレタンシーによる体積変化や、発生するせん断ひずみに依存して変化する。これらのメカニズムにより地盤は顕著な非線形性を示し、例えば飽和砂地盤では地盤が軟化し最終的には液状化が発生する。過去の地震でも、地盤の液状化により大きな被害を被っていることはよく知られていることである。このような観点より、有効応力法に基づく解析の重要性が指摘されるようになってきている。有効応力法解析とは、時々刻々変化する間隙水圧を追跡して、各時刻における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り、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。

成層地盤を対象とした一次元有効応力解析に関する研究として、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、これに間隙水圧モデルを併設することにより、液状化過程を時刻歴で追跡することが可能であることを示しており、全応力解析に比べ有効応力解析では応答加速度が小さくなることも指摘している。

上記の一次元有効応力解析を二次元に拡張するためには、二つの領域での検討が必要となってくる。一つは地盤に適用する運動方程式の問題であり、他の一つは地盤の構成則の問題である。

運動方程式については、地盤中の間隙水にも着目することから、地盤を土粒子骨格部分と間隙水部分の二相で

モデル化する多孔質体として設定する必要がある。この多孔質体理論は、Biot³⁾により作成されたものであり、Ghaboussi⁴⁾やZienkiewicz⁵⁾などにより有限要素法に定式化されている。しかし、Biotの理論式をそのままの形で定式化し解析することは困難であることにより、両者とも間隙水および間隙水圧の取扱いに仮定を設定している。この段階で複数の方程式が考えられるが、いずれの方程式にしても運動に関するものと透水に関するものを連成させて解析すること、および通常の動的解析では用いない地盤パラメータとして間隙率や透水係数などが必要となることなどから、弾性状態の運動方程式について検討しその特性を明らかにしておく必要がある。著者ら⁶⁾⁷⁾⁸⁾は、すでに方程式の特性や地盤パラメータの影響について検討を行っており、幾つかの知見を得ている。また、柳沢ら⁹⁾は弾性範囲と推定される観測記録を用いて方程式の検討を行っている。

次に、地盤の構成則の問題である。構成則については実験結果に基づいて数多くのものが発表されており、実験・経験式によるモデル、Endochronicモデル、粒状体理論に基づくモデル、弾塑性理論に基づくモデルなどがある。このなかで、弾塑性理論に基づくモデルが現在最も多用されているが、地盤の地震時挙動を満足させる構成則は確立されていない。例えば、弾塑性理論に基づくモデルでは降状関数、塑性ポテンシャル関数、硬化関数の3関数を必要とするが、これらは応力の不偏量で定義されることより、せん断方向の反転効果や主応力軸の回転の影響を適切に評価することが基本的には困難であり、現在幾つかの改善¹⁰⁾の試みがなされている状況である。著者らも既に幾つかの構成則を取り上げ数値実験を行ってきたが、不十分な点も多くあり、ここではそれらの結果を踏まえて改善を試みたものを報告する。

二次元領域の有効応力法に基づく動的解析は現在多くの研究者が研究開発に携っており、Zienkiewiczら¹¹⁾、田中ら¹²⁾、柳沢ら¹³⁾、塩見ら¹⁴⁾、西ら¹⁵⁾の研究がある。運動方程式としてはいずれもBiotの多孔質体理論を用

いているが、各々用いている構成式が異なっており、実験結果との比較などを行なっている。

本研究も二次元有効応力法の開発を目指したものであり、地盤を有効応力法に基づいて解析し、地盤の軟化や過剰間隙水圧などが構造物応答に与える影響について検討することを目的としたものである。

本報告では、§2.で運動方程式、§3.で構成則について述べ、§4.では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り上げ、地盤応答への影響について検討する。§5.では、本解析手法の適用例として摩擦杭をもつ構造物および地盤改良上の構造物を取り上げ、地盤、構造物の応答について検討する。

§ 2. 運動方程式

2.1 飽和多孔質体の基礎方程式

地盤を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。

本研究では、図に示すように単位面積当たりの土粒子骨格と間隙水の平均的挙動に対して別々の自由度を設定し、式(1)で表わされる有効応力と間隙水圧を同時に算定する。

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

ここで、 σ_{ij} は全応力、 σ'_{ij} は有効応力、 P は間隙水圧である。

Biotの多孔質体理論によれば、二相地盤に対する基礎方程式は次に示すものである。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2項が土粒子骨格部分と間隙水部分の相互作用を表わす項であり、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

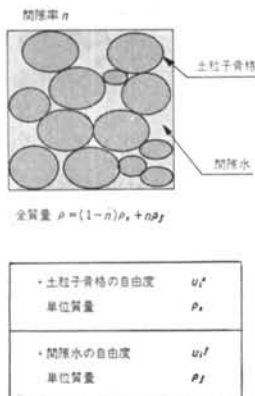


図-1 二相地盤モデル

する。また、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、この剛性マトリックス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)により算定する。この式から分かるように、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。

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

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

$$\sigma'_{ij} = D_{ijkl}(u_{k,t}^s + u_{k,t}^f)/2 - \delta_{ij}P \quad \dots\dots(4)$$

$$-nu_{i,t}^f = (1-n)u_{i,t}^s + \frac{1}{K_0}P \quad \dots\dots(5)$$

ここで、添字 s は土粒子骨格部分、 f は間隙水部分を示す。 ρ は質量、 σ'_{ij} は有効応力、 P は間隙水圧、 b は Dracy 則より $b = n^2/k$ で与えられるものであり、 n は間隙率、 k は透水係数である。また、 K_0 は土粒子および間隙水の体積圧縮係数 K_s 、 K_f を用いて式(6)より算定する。

$$\frac{1}{K_0} = \frac{1-n}{K_s} + \frac{n}{K_f} \quad \dots\dots(6)$$

2.2 有限要素法による離散化

2.1で示した方程式の有限要素法への離散化を考える。まず、骨格部分と間隙水部分の変位 u_i^s と u_i^f を次のように離散化する。

$$u_i^s = N_k^s u_k^{(s)k} \quad u_i^f = N_k^f u_k^{(f)k} \quad \dots\dots(7)$$

N_k^s 、 N_k^f は土粒子と間隙水に対する形状関数である。

次に、式(2)~(5)をガラーキン法を用いて有限要素法に定式化する。このとき、間隙水は非圧縮性であると仮定すると、式(8)の形に定式化することができる。式(8)は、剛性マトリックスの項より分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の項において、透水係数 k および体積圧縮係数 K_0 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。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}^s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}^f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}^s \\ \dot{u}^f \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_R + \mathbf{C}^{ss} & \mathbf{C}^{sf} \\ \mathbf{C}^{fs} & \mathbf{C}^{ff} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u^s \\ u^f \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u^s \\ u^f \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}^s \\ \mathbf{F}^f \end{Bmatrix} \quad \dots\dots(8)$$

ここで、 \mathbf{M} は質量、 \mathbf{K} は剛性、 \mathbf{C} は透水係数および体積変化にかかわるマトリックスであり、下記の式で表わされる。また、 \mathbf{C}_R は Rayleigh 減衰、 \mathbf{F} は外力ベクトルである。

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{M}^s &= \int_V N_k^s (1-n) \rho_s N_j^s dV \\ \mathbf{M}^f &= \int_V N_k^f n \rho_f N_j^f dV \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(9)$$

$$C^{ss} = \int_V N_i^s \left(\frac{n^2}{k} \right) N_j^s dV + \int_V N_{i,k}^s (1-n)^2 K_0 N_{j,i}^s dV \quad \dots\dots(10)$$

$$C^{sf} = C^{fs} = - \int_V N_i^s \left(\frac{n^2}{k} \right) N_j^f dV + \int_V N_{i,k}^s n(1-n) K_0 N_{j,i}^f dV \quad \dots\dots(11)$$

$$C^{ff} = \int_V N_i^f \left(\frac{n^2}{k} \right) N_j^f dV + \int_V N_{i,k}^f n^2 K_0 N_{j,i}^f dV \quad (12)$$

$$K = \int_V N_{m,j}^s D_{ijkl} N_{n,i}^s dV \quad \dots\dots(13)$$

過剰間隙水圧は、式(14)により算定する。

$$P = K_0 \{ (1-n) u_{i,t}^s + n u_{i,t}^f \} \quad \dots\dots(14)$$

なお、時間軸方向の数値解析は Newmark's β 法を用いている。

§ 3. 地盤の構成則

3.1 弾塑性論に基づく構成則

地盤の構成則として、動的三軸試験結果などに基づいて数多くの構成則が提案されている。著者らも、これまでに Kinematic Cap モデル¹⁶⁾、Hardin-Drnevich モデルの二次元拡張モデル¹⁷⁾などを用いて検討してきたが、地盤の挙動を表現するには不十分なモデルであった。そこで、ここでは弾塑性論に基づく構成則を取り上げることとした。弾塑性論を用いる場合、降伏関数、塑性ポテンシャル関数、硬化関数が必要であり、以下にそれらの関数について説明する。

3.1.1 降伏関数¹⁸⁾

降伏関数 f は、応力比一定の式(15)に示すものとする。

$$f = Q - \eta R(\theta) P \quad \dots\dots(15)$$

ここで、 P は一般応力の 1 次不偏量、 Q は偏差応力の 2 次不偏量であり、 $\sqrt{2} J_2$ に対応したものである。 η は降伏応力比 $(Q/P)_0$ である。 $R(\theta)$ はモール・クーロンの規準に基づいて Lode パラメータ θ を式(16)で定義し、式(17)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。

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{3}(\sigma_2' - \sigma_3')}{2\sigma_1' - \sigma_2' - \sigma_3'} \right) \quad \dots\dots(16)$$

$$R(0) = \frac{3 + \sin \phi_f}{3 - \sin \phi_f}, \quad R(\pi/3) = 1.0 \quad \dots\dots(17)$$

ここで、 ϕ_f は内部摩擦角である。

3.1.2 塑性ポテンシャル関数¹⁹⁾

塑性ひずみ増分方向を与えるポテンシャル関数 θ は、

非関連流れ則とし、式(18)に示すものとする。上式を有効応力で微分すると、式(19)に示すものとなる。

$$g = Q - \frac{\eta_f}{1 - \alpha^*} \left\{ 1 - \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{1 - \alpha^*}{\alpha^*}} \right\} P \quad \dots\dots(18)$$

$$\frac{\partial g}{\partial \sigma'_{ij}} = \frac{1}{3P} \left\{ \frac{S_{ij}}{Q} + \frac{1}{\alpha^*} \left(\eta_f - \frac{Q}{P} \right) \delta_{ij} \right\} \quad \dots\dots(19)$$

剛性マトリックスを作成するときには、この微分した形のものを用いることになるが、この関数に含まれるパラメータ α^* については動的解析の場合有効に設定できる方法がまだないことから、ここでは $\alpha^* = 1$ として用いることとしている。ここで、 S_{ij} は偏差応力であり、 η_f は破壊時の応力比である。

3.1.3 硬化関数²⁰⁾

硬化関数は双曲線表示のものを用いることとし、式(20)に示すものとする。

$$\eta - \eta_0 = \frac{(\eta_f - \eta_0) S}{(\eta_f - \eta_0) + S} \quad \dots\dots(20)$$

ここで、 η_0 は載荷除荷の折り返しの応力比である。 S は、初期せん断剛性を初期応力で除したものと塑性せん断ひずみの積をとったものであり、地盤の塑性状態のせん断応力に対応したものである。

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二次元平面ひずみの仮定のもとにマトリックス表示する。弾塑性論によれば、塑性域での応力～ひずみ関係は式(21)で与えられる。

$$\{d\sigma'\} = \left[\begin{array}{c} [D^e] \left\{ \frac{\partial g}{\partial \sigma'} \right\} \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma'} \right\}^T [D^e] \\ [D^e] - \frac{\left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma'} \right\}^T [D^e] \left\{ \frac{\partial g}{\partial \sigma'} \right\} - \left\{ \frac{\partial f}{\partial \varepsilon^p} \right\} \left\{ \frac{\partial g}{\partial \sigma'} \right\}}{\left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma'} \right\}^T [D^e] \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma'} \right\} - \left\{ \frac{\partial f}{\partial \varepsilon^p} \right\} \left\{ \frac{\partial g}{\partial \sigma'} \right\}} \end{array} \right] \{d\varepsilon\} \quad \dots\dots(21)$$

ここで、 $d\sigma'$ は有効応力増分、 $d\varepsilon$ はひずみ増分であり、 ε^p は塑性ひずみである。 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次の条件が付加してある。

① 塑性挙動は載荷時に発生するものとし、除荷時は弾性挙動とする。

② 西ら²⁰⁾の提案する平衡状態を設定する。平衡状態曲線は式(22)で示される。

$$\eta^* = a \eta_f \sqrt{\frac{P_Y(\text{ocr})^\kappa}{P}} - 1 \quad \dots\dots(22)$$

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、 P_Y は先行圧密応力、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

ここでは、一次元の地盤モデルを取り上げ、透水係数と過圧密比が地盤応答や過剰間隙水圧の蓄積に与える影響について検討する。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 $V_s=100$ m/s の一層飽和地盤であり、各要素の初期減衰は2.0%とした。入力地震動は EL CENTRO, N-S 成分とし、最大加速度は100 Gal, 継続時間は7.0秒, 時間刻みは0.005秒とした。また、初期応力は単位重量と地盤深さより算定した。

4.1 透水係数

地盤の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なう。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に従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。

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}

表-2 解析ケース

図-3に、3ケースの地表面での加速度、変位および要素2の間隙水圧波形の重ね書きを示す。この図より、まず透水係数の大きいケース1はケース2、3と異なった傾向を示していることが分かる。加速度、変位ともに応答は小さく、間隙水圧の蓄積はほとんど見られない。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。次に、ケース2、3を比較してみる。ケース3はほぼ非排水状態である。ケース3の間隙水圧の蓄積をみると単調増加の状態にある。これに対し、ケース2では蓄積と消散を繰り返していることが分かる。ケース3の場合、水圧の蓄積に従って加速度は応答が抑えられた形状を示すようになり、変位振幅は次第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、水圧の消散が見られないことより有効応力に基づく地盤剛性の低下が一面的となり、強い非線形性を示した結果である。これに対しケース2は、塑性領域の水圧の発生はケース3と同レベルであるが、除荷時において消散が発生することにより地盤剛性の復

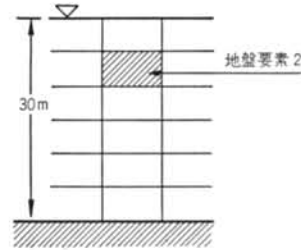


図-2 解析モデル

運動方程式にかかわる定数		構成則にかかわる定数	
土粒子重量 γ_s	2.6 t/m ³	圧縮指数 λ	0.02
間隙水重量 γ_f	1.0 t/m ³	膨潤指数 κ	0.004
せん断剛性 G (せん断波速度) (100 m/s)	1900 t/m ²	弾性範囲設定 パラメータ α	0.20
ポアソン比 ν	0.45	内部摩擦角 ϕ_f	45
間隙率 n	0.40	—	—

表-1 地盤定数

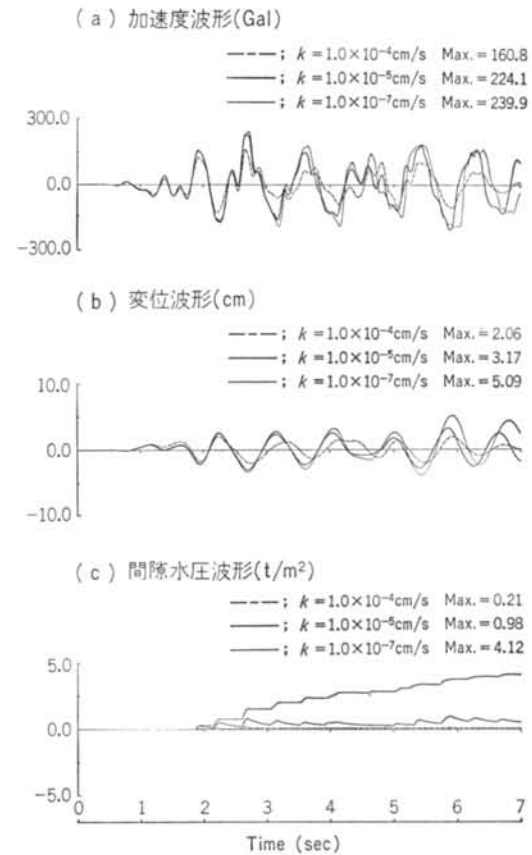
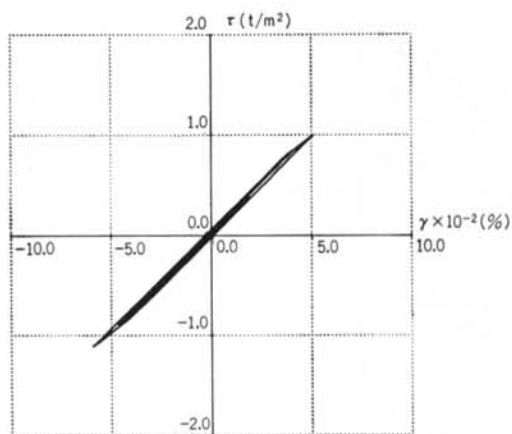
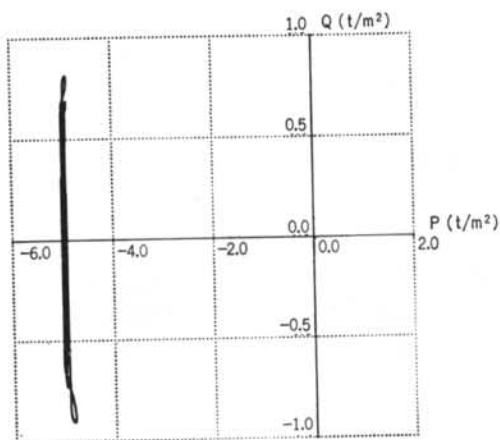


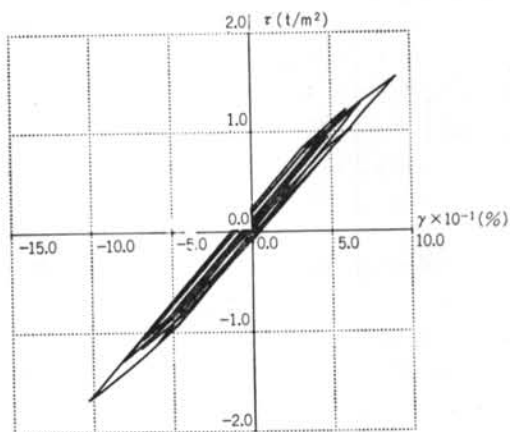
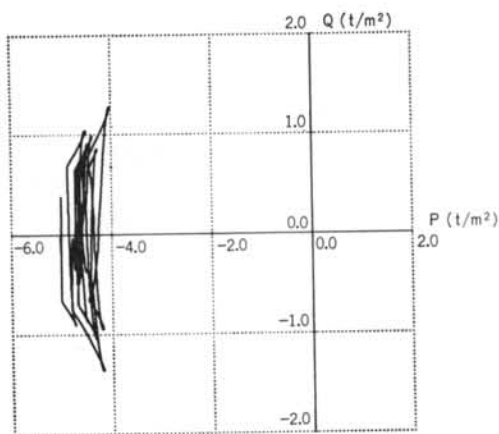
図-3 応答波形

帰がみられ、その結果ケース3に比べ非線形性が小さくなったものと考えられる。

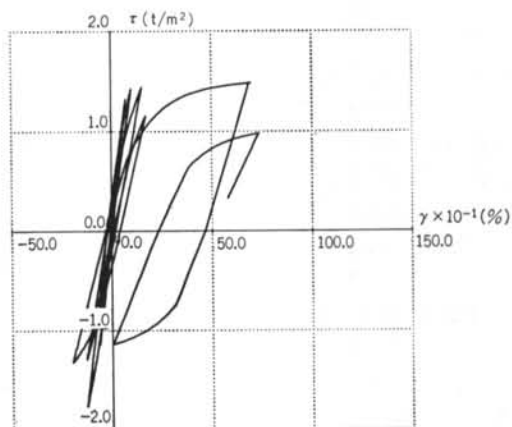
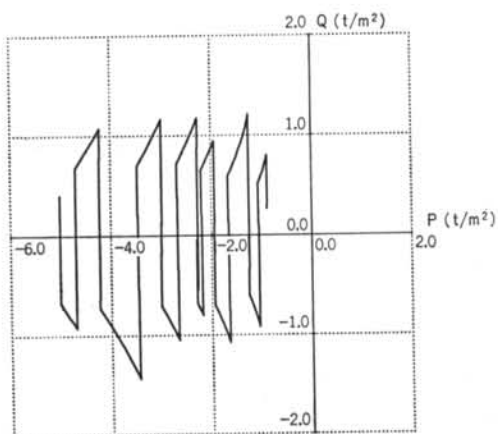
図-4に、要素2の有効応力経路、せん断応力～せん



(a) ケース 1 : $k = 1.0 \times 10^{-4} (\text{cm/s})$



(b) ケース 2 : $k = 1.0 \times 10^{-5} (\text{cm/s})$



(c) ケース 3 : $k = 1.0 \times 10^{-7} (\text{cm/s})$

図一四 有効応力経路とせん断応力～せん断ひずみ関係

断ひずみ関係を示す。有効応力経路は、前述したようにケース1では水圧の発生が見られず、応力～ひずみ関係もほぼ弾性状態にある。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形状のループを描いている。ケース3は水圧の一方的な増加により、履歴ループの劣化とともにループ形状が大きくなっていくことが分かる。

4.2 過圧密比

地盤の初期応力状態が動的挙動に及ぼす影響をみるために、過圧密比 (Over Consolidation Ratio; OCR) をパラメータとして検討する。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。なお、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、先行圧密応力 P_y と初期応力 P_0 との関係をつなげるものである。本手法では、図-5の破線で示す西らの提案した平衡状態の概念を用いており、この曲線の内部は弾性領域と規定している。正規圧密状態で $P_y = P_0$ 、過圧密比が大きくなれば図に示す初期応力 P_0 が原点に近づくことになり、応答に占める弾性領域が大きくなる。また、平衡状態曲線は式(2)に示すものであり、この曲線も過圧密比が大きくなると膨らみが大きくなるものである。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、過剰間隙水圧波形を示す。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従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見られるが、過圧密比が大きくなるに従って非線形性は小さくなること分かる。さらに、透水係数の場合と同様に図-7に有効応力経路およびせん断応力～せん断ひずみの関係を示す。これらの結果についても前述と同様なことがいえる。ケース1の正規圧密状態では、水圧の蓄積とともに応力～ひずみの関係に強い非線形性が見られるが、圧密比が大きくなるに従ってその傾向は小さくなる。

4.3 検討結果のまとめ

透水係数と過圧密比をパラメータとした解析結果より本解析手法は、一般的な実験結果などに対応した妥当な結果を与えていることが分かる。本章での検討結果は、次のものである。

(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見られず、土粒子骨格

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

表-3 解析ケース

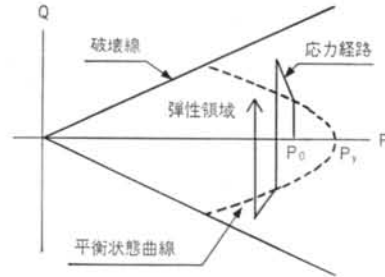


図-5 応力経路の概念図

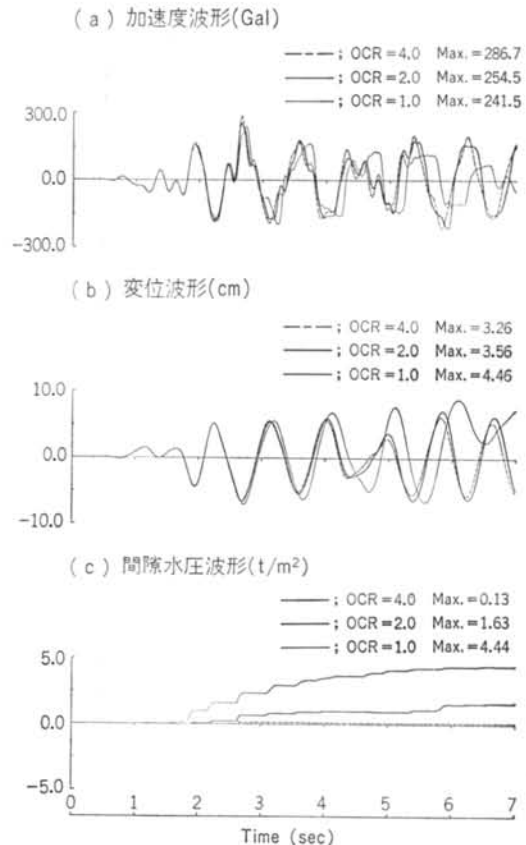
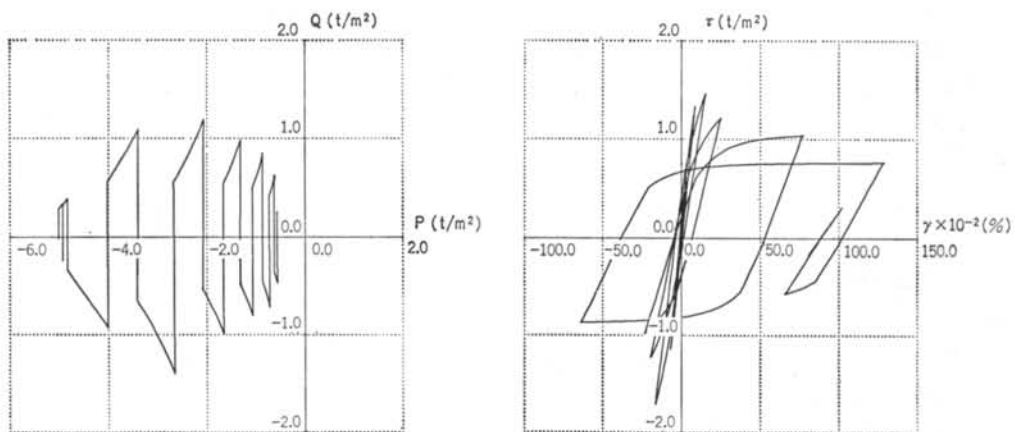
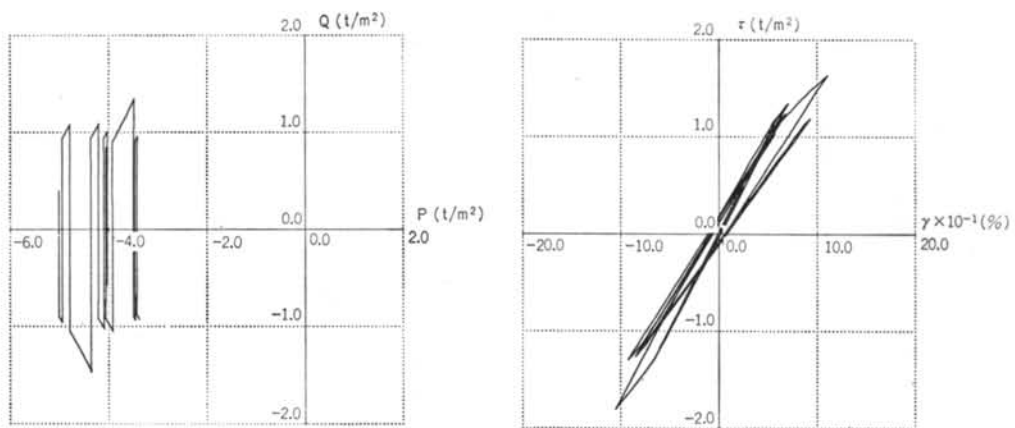


図-6 応答波形

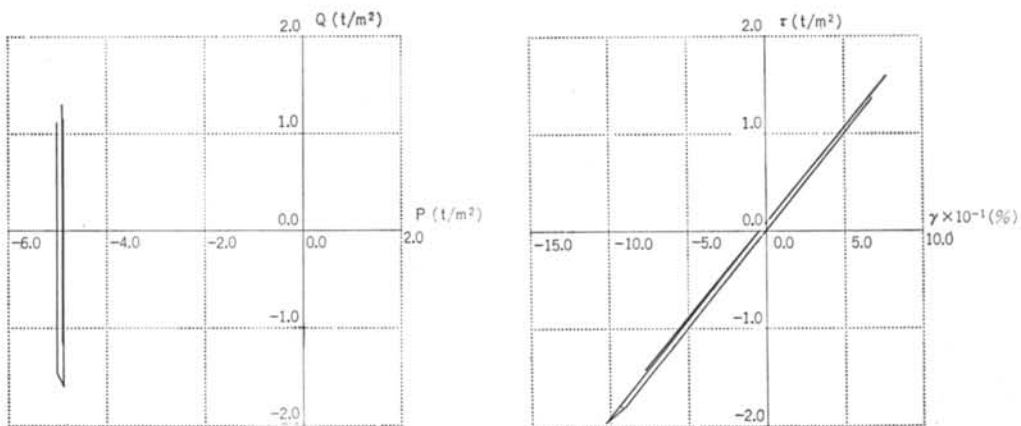
と間隙水の相対速度に起因する減衰効果により応答も小さくなる。それに対し透水性の小さい、いわゆる非排水状態では間隙水圧は一方的に蓄積し、地盤は強い非線形性を示す。この中間にある地盤では、間隙水圧は蓄積と消散の両方の現象が発生する。



(a) ケース 1 : OCR = 1.0



(b) ケース 2 : OCR = 2.0



(c) ケース 3 : OCR = 4.0

図一七 有効応力経路とせん断応力～せん断ひずみ関係

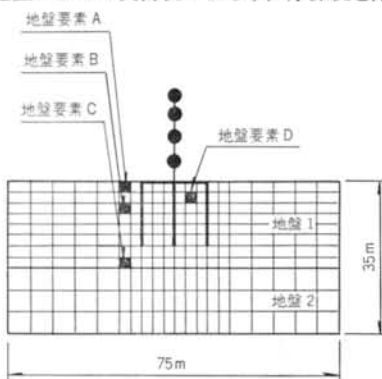
(2)地盤の初期応力状態が正規圧密か、過圧密かによる影響も透水性同様に大きい。ここで示したケースでは、過圧密比が2.0程度で正規圧密に比べ水圧の蓄積は半分程度であり、過圧密比が4.0程度になれば地盤の挙動はほぼ弾性とと考えてよい。

§ 5. 解析手法の適用例

ここでは、本解析手法の適用例として軟弱地盤中に摩擦杭をもつ構造物と地盤改良上の構造物について応答解析を行ない、地盤の過剰間隙水圧の蓄積や地盤剛性の低下が構造物の応答に与える影響について検討する。

5.1 摩擦杭をもつ構造物の応答解析

軟弱地盤において支持杭によらず、摩擦杭を用いた中



図—8 解析モデル（摩擦杭）

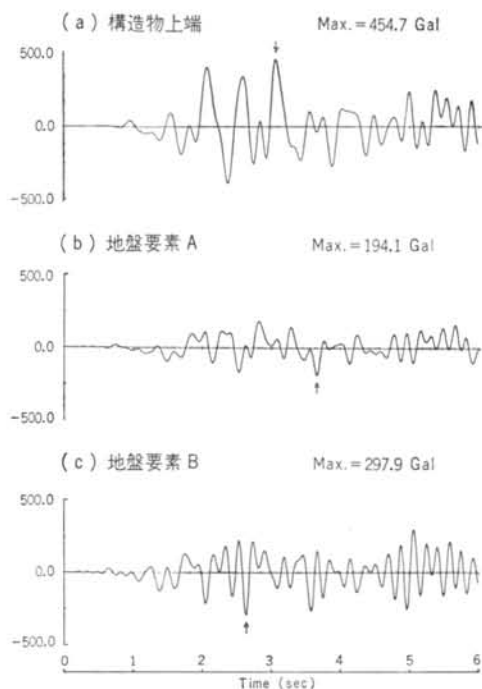
質点	重量 t	バネ定数 (t/m)	杭定数
①	350	15,000	ヤング率 $E=2.5 \times 10^6 \text{ t/m}^2$ 断面積 $A=3.5 \text{ m}^2$ 2次モーメント $I=2.0 \text{ m}^4$
②	400	25,000	
③	500	35,000	
④	600	45,000	
B	1,200		

表—4 構造物・杭の定数

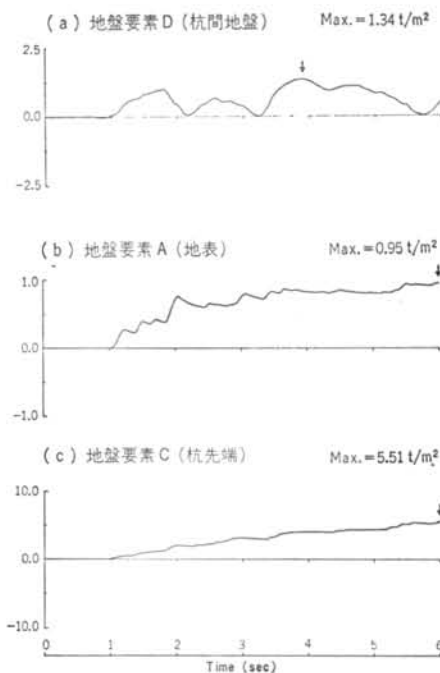
運動方程式にかかわる定数		構成則にかかわる定数	
土粒子重量 γ_s	2.6 t/m	圧縮指数 λ	0.02
間隙水重量 γ_f	1.0 t/m	膨潤指数 κ	0.004
せん断剛性 G (せん断波速度)	1,900 t/m ² (100 m/s)	弾性範囲設定 パラメータ α	0.20
ポアソン比 ν	0.45	内部摩擦角 ϕ_f	45
間隙率 n	0.40	過圧密比	1.5
透水係数 k	$1.0 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$	—	—

表—5 地盤1の地盤定数

低層の構造物が建設されている。これらの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減や



図—9 加速度波形



図—10 過剰間隙水圧波形

杭先端の挙動および過剰間隙水圧の消散に伴う地盤の沈下など検討しておく項目は多くみられる。そこで、適用例の一つとしてこのようなモデルの応答解析例を示す。

5.1.1 解析モデルおよび解析条件

解析モデルを図-8に示す。構造物は高さ20mの中層建物を対象とし、摩擦杭として杭長15mの場所打ちRC杭を3列配置した。地盤は、表層とその下の比較的硬い地盤の2層とし、摩擦杭の先端は表層の軟弱地盤内にある形状とした。構造物と地盤の定数を表-4, 5に示す。なお、地盤2は弾性地盤とし、せん断波速度 $V_s=$

350 m/s, 透水係数 $k=1.0 \times 10^{-6}$ cm/s, ポアソン比 $\nu=0.4$, 地盤の単位重量は地盤1と同様とした。入力地震動は EL CENTRO, N-S 成分, 最大加速度 150.0 Gal, 継続時間は 6.0 秒, 時間刻みは 0.005 秒とした。構造物の減衰は 5.0%, 地盤の初期減衰は 2.0% とし, 地盤の初期応力は構造物の重量を考慮せず, 単位重量と地盤深さより算定した。

5.1.2 解析結果

構造物上端と杭周辺地盤の加速度波形を, 図-9に示す。この図より, 地盤要素Cの加速度波形に対し地盤要素Aおよび構造物上端では長周期成分が卓越する傾向を示していることが分かる。これは, 地盤1がそもそも軟弱であること, および地盤の非線形性による剛性低下により周期が長周期側に移行した結果である。図-10に地盤要素A, Cおよび杭間地盤Dの間隙水圧波形を示す。要素Aは, EL CENTRO 波の主要動がある 2.0 秒付近で水圧上昇がみられ, その後の蓄積は小さい。それに対し, 杭先端の要素Cでは, 水圧が時間とともに蓄積される傾向を示しており, 地盤深さにより水圧の蓄積に差異があることが分かる。また, 杭間地盤Dの水圧は杭の影響により蓄積と消散を繰り返す複雑な傾向を示している。

図-11と12に 6.0 秒時の過剰間隙水圧分布と流速分布を示す。これらの図より, 間隙水圧の蓄積が杭先端で見られること, それに対応して流速の変化が杭先端で大きいことが読み取れる。この結果より, 地震時においては杭先端地盤の安定性に注意する必要があると考えられる。さらに, 図-13に地盤要素BとCのせん断応力へせん断ひずみの関係と有効応力経路を示す。地盤要素A, Bともに間隙水圧の蓄積, すなわち有効応力の低減と, それに対応した応力ひずみの履歴形状がみられる。

次に, 基礎を摩擦杭から地盤改良に代えたケースについての応答解析結果

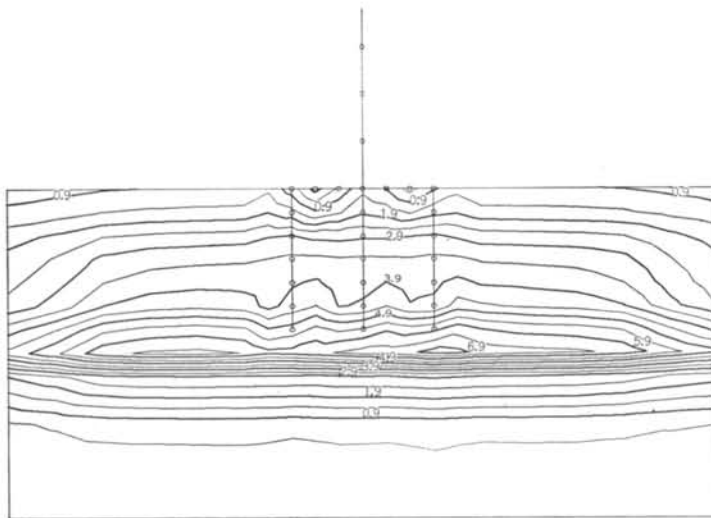


図-11 過剰間隙水圧分布(t/m^2 ; $t=6.0$ 秒)

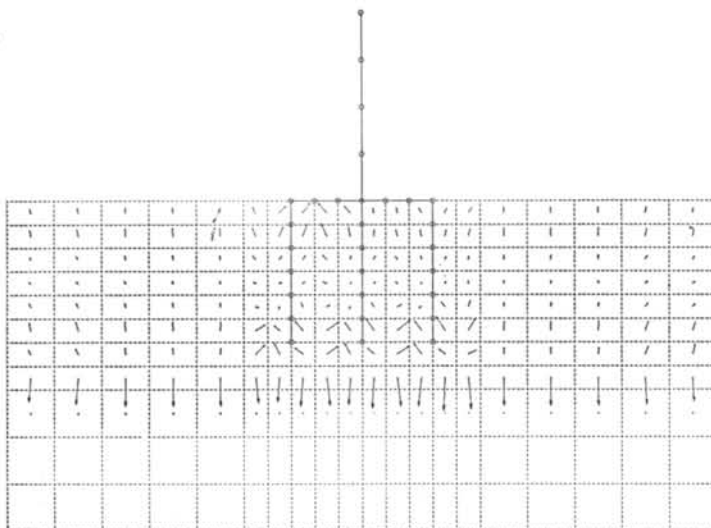
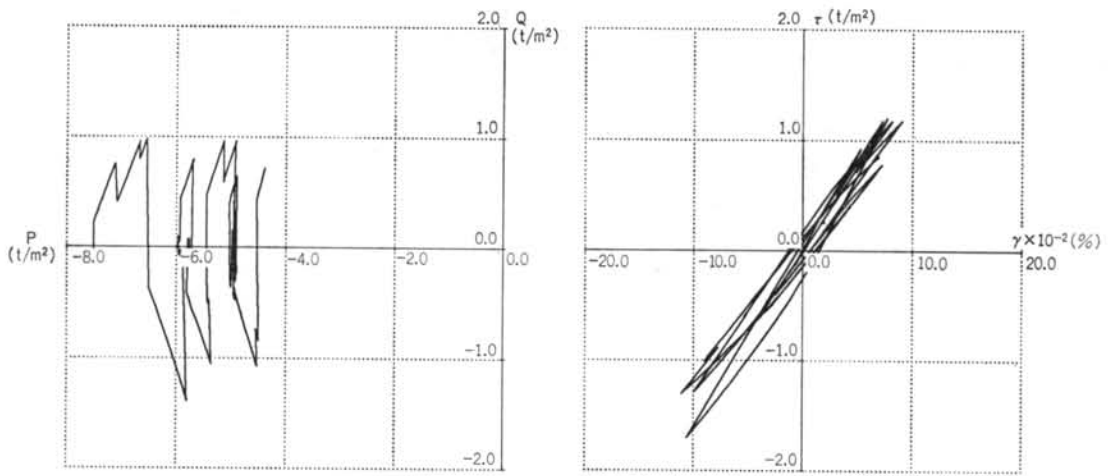


図-12 流速分布(m/s ; $t=6.0$ 秒)

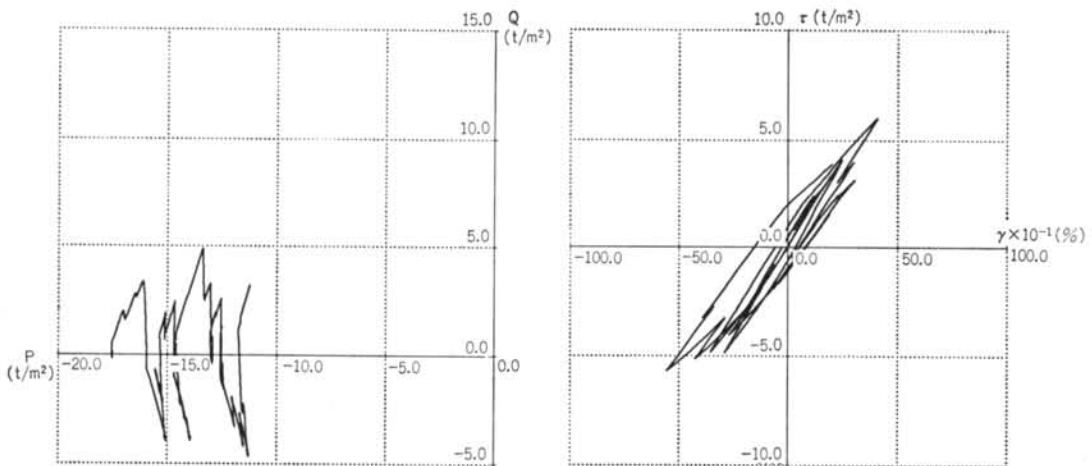
→ : $1.46 \times 10^{-3} m/s$

5.2 地盤改良上の構造物の応答解析

次に, 基礎を摩擦杭から地盤改良に代えたケースについての応答解析結果



(a) 地盤要素 B



(b) 地盤要素 C

図-13 有効応力経路とせん断応力～せん断ひずみの関係を示す。

5.2.1 解析モデルおよび解析条件

構造物と地盤および入力地震動は、摩擦杭モデルの場合と同様とする。地盤改良部分は $V_s=250$ m/s の弾性地盤とし、改良域は地盤 2 までとする。図-14 に解析モデルを示す。

5.2.2 解析結果

構造物上端と地盤要素 A, C の加速度波形を図-15 に示す。構造物と地盤の加速度波形は摩擦杭の場合とほぼ同様な形状を示しているが、最大値は摩擦杭の場合に比べ大きくになっている。これは、改良部分の地盤剛性の影響であると考えられる。図-16 に、地盤要素 B と C の間

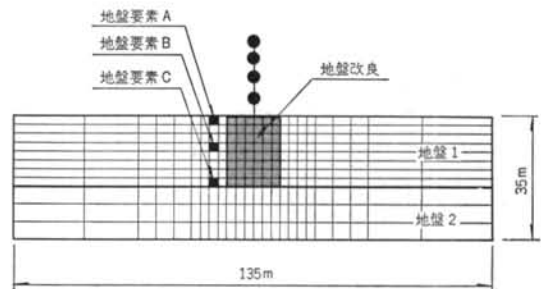


図-14 解析モデル (地盤改良)

隙水圧波形を示す。いずれも、時間の経過とともに間隙水圧が蓄積されていく傾向を示している。図-17 と図-1

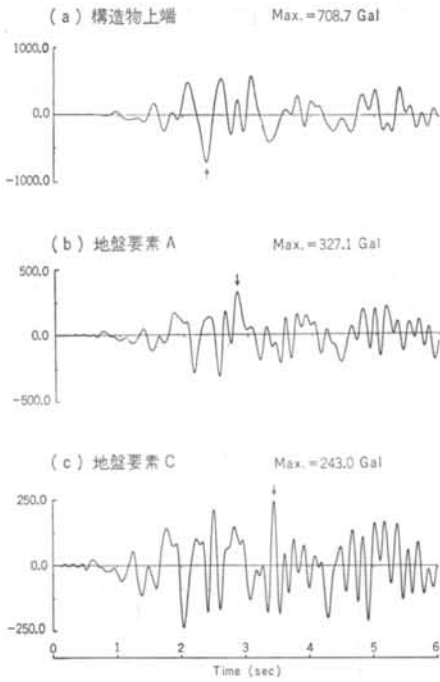


図-15 加速度波形

18に、6.0秒時の過剰間隙水圧分布と流速分布を示す。これらの図より、間隙水圧の蓄積が改良域の側方でみられ、それに対応して流速分布は改良域方向に向かう傾向を示していることが分かる。よって、地盤改良については改良域と原地盤の境界部分に注意を払う必要がある。

図-19に、地盤要素BとCのせん断応力～せん断ひずみ

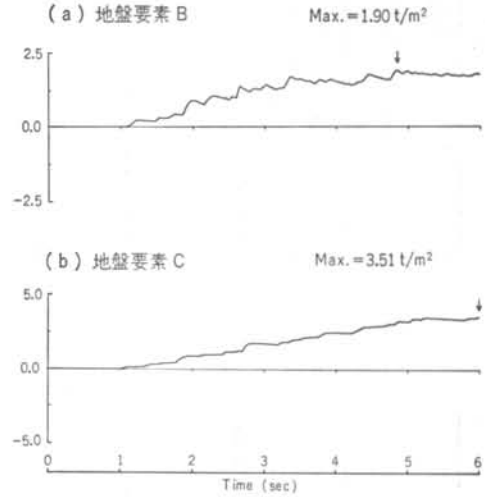


図-16 過剰間隙水圧波形

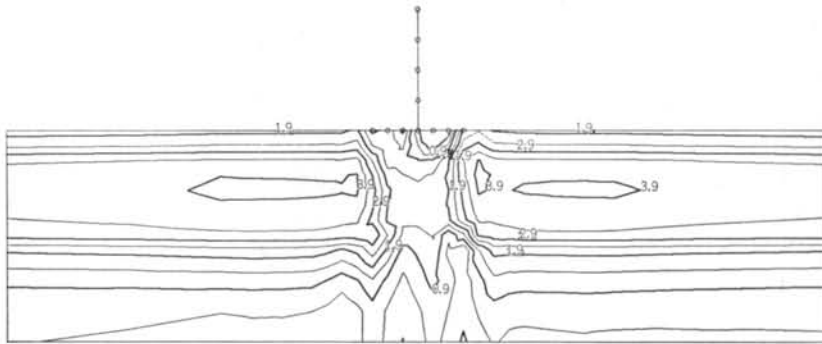


図-17 過剰間隙水圧分布(t/m^2 ; $t=6.0$ 秒)

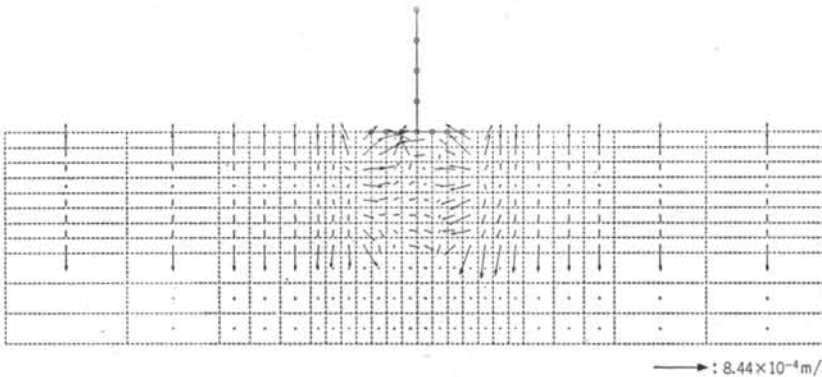
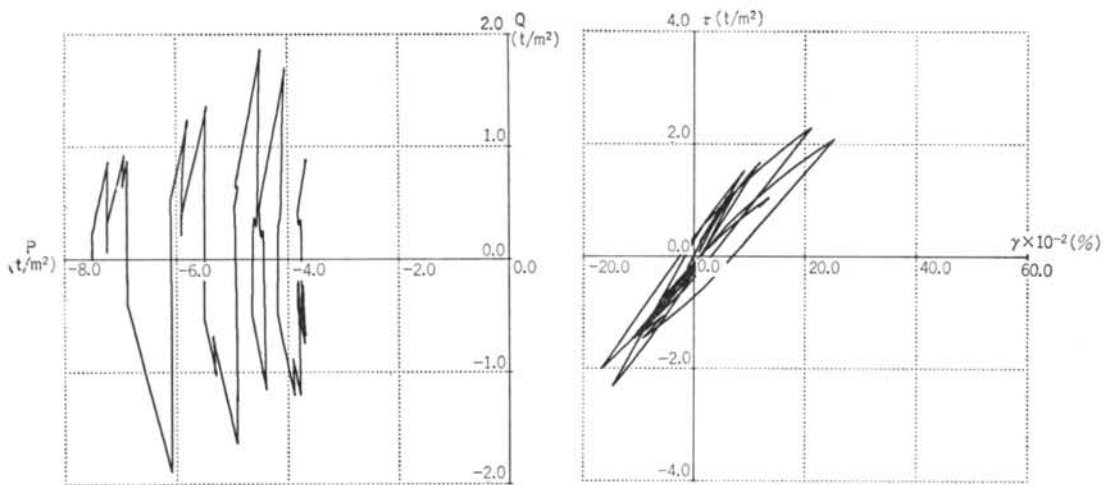
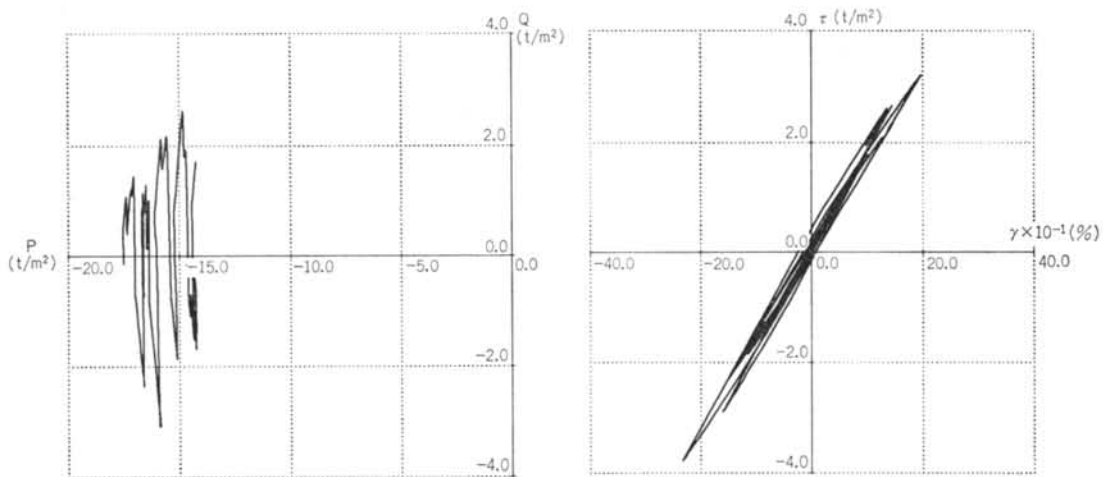


図-18 流速分布(m/s ; $t=6.0$ 秒)



(a) 地盤要素 B



(b) 地盤要素 C

図-19 有効応力経路とせん断応力～せん断ひずみの関係の関係と有効応力経路を示す。これらの形状は、摩擦杭の場合とほぼ同様である。

§ 6. 結論

有効応力法に基づく構造物—地盤の動的応答解析手法について報告した。まず、地盤を多孔質体とし、土粒子骨格部分と間隙水部分の二相でモデル化し、その有限要素法への定式化を示した。さらに、地盤の非線形モデルとして弾塑性理論による構成則を取り上げ運動方程式に組み込むと同時に、解析に必要な地盤定数である透水係

数と過圧密比をパラメータとした解析を行ない本手法の特性を示した。また、本手法の適用例として軟弱地盤に摩擦杭をもつ構造物と地盤改良上の構造物の応答解析を行ない、これらの地震時挙動について検討した。なお、本手法によれば地震終了後の過剰間隙水圧の消散に伴う圧密解析も可能であり、今後検討していく予定である。

本解析手法のように非線形問題を扱う解析では、その解析精度を確認することが特に重要な課題である。本来は、観測記録とのシミュレーションを行ないその精度を確認すべきであるが、間隙水圧をも同時に記録した比較的大きな地震記録は得られていないのが現状である。しかし、本手法の実際面への適用を図っていくためには、

何らかの方法で精度を確認する必要がある。そこで、著者らは現在、振動模型実験を計画しており、実験結果に
対しシミュレーション解析を行ない、精度の確認を行なう予定である。

<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 Series, No.38 (1978)
- 3) 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
- 4) J. Ghaboussi & L. Edward: "Variational Formulation of Dynamics of Fluid-Saturated Porous Elastic Solids" J. Eng. Mech. Div., ASCE, Vol.98, No.EM4 (1972) pp.947~963
- 5) 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
- 6) 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年) pp.731~734
- 7) 近藤司, 楠本太, 渡辺浩平: "二相系地盤モデルによる圧縮性, 非圧縮性についての検討" 土木学会第40回年次学術講演会講演概要集 (1985年) pp.747~748
- 8) 近藤司, 楠本太, 渡辺浩平: "二相系地盤モデルにおけるカップリングの検討" 土木学会第40回年次学術講演会講演概要集 (1985年) pp.749~750
- 9) 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年) pp.751~752
- 10) H. Sekiguchi & H. Ota: "Induced Anisotropy and Time Dependency in Clays" Constitutive Equations of Soil; Preprints of Specialty Session 9, 9th ICSMFE (1977) pp.229~238
- 11) O.C. Zienkiewicz, & T. Shiomi: "Dynamic Behaviour of Saturated Porous Media" Num. & Analy. Meth. in Geomech., Vol.8 (1984) pp.71~96
- 12) 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年) pp.725~726
- 13) 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年) pp.925~926
- 14) 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年) pp.921~922
- 15) 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年) pp.1~40
- 16) 近藤司, 楠本太, 渡辺浩平: "有効応力法による2次元動的弾塑性解析" 第20回土質工学研究発表会発表講演集 (1985年) pp.735~736
- 17) 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年) pp.1087~1092
- 18) H.B. Poorooshasb & S. Pietruszczak: "Modeling of Liquefaction and Cyclic Mobility Effects in Sand" Numerical Methods in Geomechanics; Proc. of 5th Int. Conf., Nagoya, 1985.
- 19) K. Akai, et al.: "Constitutive Equations for Geomechanical Materials based on Elasto-Viscoplasticity" Constitutive Equations of Soil; Preprints of Specialty Session 9, 9th ICSMFE(1977) pp.1~10
- 20) 西好一: "非排水繰り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 No.319 (1982年) pp.115~128

