

飽和砂地盤の動的有効応力解析の簡易手法

A SIMPLIFIED METHOD FOR DYNAMIC EFFECTIVE STRESS ANALYSIS
OF SATURATED SAND DEPOSITS

兵動正幸*・山内豊聡**・橋詰順一郎***

By Masayuki HYODO, Toyotoshi YAMANOCHI and Junichiro HASHIZUME

Presented is a simplified procedure for performing the dynamic effective stress analysis. The proposed method is an extension of the method of equivalent linear dynamic response analysis which has been used in the total stress analysis. It is assumed, in this method, that the variations of the shear modulus and damping factor due to the magnitude of strain and reduction of effective stress are independent each other. That is, at first, the total stress analysis is done in order to obtain the shear moduli and damping factors corresponding to the specified strains, called effective strains. Secondly, the effective stress analysis is carried out and the moduli are varied due to the variation of the effective stress only. In this way, by applying the simplified stress-strain relation to the effective stress analysis, it becomes possible to reduce plenty of calculating time of the effective stress analysis.

1. ま え が き

従来、一般に液状化の検討といえは、地表面における地震波の最大加速度から地中のせん断応力を類推し、室内実験で得られたその地盤の液状化抵抗と比較して、液状化の可能性を論ずるものであった^{1)~4)}。このような考え方は、現行の耐震設計指針⁵⁾にも取り入れられ、種々の地盤条件や地震規模に応じて評価できるように、実務上の対応が可能な形としてまとめられている。しかしながら、この方法では、液状化に至るまでの過渡的な地盤挙動を調べることはできず、液状化過程における地中構造物などの耐震性を正しく評価することができない。

近年になって、液状化過程を表現し得る解析法として有効応力解析法が開発され、種々の構成式を用いて解析が行われるようになった^{6)~10)}。現在もこれに類する研究がかなり活発になされているが、この種の方法の今日における問題点は、解析に用いられる動的な構成式がまだ完全なものとはいいがたく、またあらゆる砂質土に適用

可能という検証も乏しいことである。さらに、新潟地震以来今日まで、多方面で実験が行われ蓄積されてきた、いわゆる液状化抵抗を表わす実験データが、この種の構成式においては全く役に立たないことも現実と隔たりを感じさせる問題点の一端であろう。また、これまでには、構成式によらず上記実験データを用いた方法も示されているが、現在行われている有効応力解析法は、非線形の応答解析を要するため、操作が難しく膨大な計算量を伴うことも実用に支障を及ぼすものと思われる。

このような有効応力解析法が、実務設計等実用に供されるようになるためには、次のような条件が必要であると思われる。まず、あらゆる地盤について、さまざまな初期条件に対して適用が可能であること、そして計算が比較的簡単であることなどであろうと考えられる。

本論文は、このような点を踏まえ、有効応力法の特長を生かしながら、手法の一般化と簡易化を目指したものである。すなわち、種々の地盤条件への対応を容易にするために、液状化を表わす実験結果として、最も表現が一般的であり、データ量も豊富な、液状化抵抗・繰返し回数関係を用いている。さらに、有効応力法における計算量を減ずるために、間隙水圧の評価回数を減らし、かつ応力・ひずみ関係の単純化をはかっている。ここでは全応力法で用いられている等価線形化法の概念を有効応

* 正会員 工博 東海大学助教授 福岡校舎
(〒811-41 宗像市大字田久)

** 正会員 工博 九州大学教授 工学部水工土木学科
(〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)

*** 正会員 工修 九州大学大学院 (現・㈱日本鋼管技術研究所) (〒514-03 津市雲出鋼管町1)

方法に適用することにより、計算時間の大幅な短縮を可能とし、より自由度の高い2次元問題への拡張も容易なものにしている。なお、本解析では地震継続時間中の間隙水圧の消散は小さいものとみなしてこれを考慮していない。

2. 地盤の材料非線形性の評価

繰返し載荷時の土の応力・ひずみ曲線は、応力・ひずみ関係の非線形性とエネルギー消散についてのメカニズムを表わしている。土の非線形挙動を数式化しモデル化する試みは、これまでに数多く行われいくつかのモデルが提案されているが、土の剛性と強度を少ないパラメーターでうまく表現できるとして Hardin-Drnevich モデル¹¹⁾がよく使われている。また、同モデルでは、応力がひずみの関数形として与えられていることも、一般の応答解析においては、使用上有利な点である。Hardin-Drnevich モデルは、本来骨格曲線のみが定義され定式化されたものであるが、これを基準として Masing 則に従う非線形ループを表現すると次式のようなになる。

$$\tau - \tau_a = \frac{G_0(\gamma - \gamma_a)}{1 + \left| \frac{\gamma - \gamma_a}{n\gamma_r} \right|} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 G_0 は初期せん断剛性率、 (γ_a, τ_a) は折り返し点の座標（ただし、骨格曲線の場合は、 $\gamma_a = \tau_a = 0$ ）、 n は骨格曲線と履歴曲線を判別する指数（ $n=1$ ：骨格曲線、 $n=2$ ：履歴曲線）、 γ_r は規準ひずみ（ $\gamma_r = \tau_r / G_0$ 、 τ_r ：せん断強さ）である。本解析では、応力・ひずみ関係としてこの双曲線モデルを用いた。

式（1）の初期接線係数は、地盤の微小ひずみ域における剛性率を表わすが、これは次に示される Richart の式¹²⁾により求めた。

$$G_0 = 3300 \frac{(2.97 - e)^2}{1 + e} \sqrt{\sigma'_m} \text{ (単位: kN/m}^2\text{)} \dots\dots\dots (2)$$

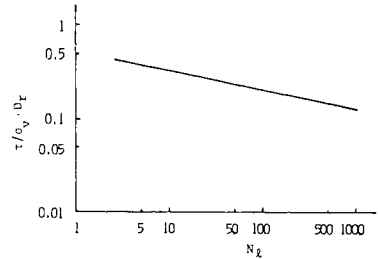
ここに、 σ'_m は平均有効主応力、 e は間隙比である。式（2）は、有効応力の平方根に比例する関数形で表わされており、初期には地盤の深さ方向へのせん断剛性率の分布形状を放物線状に与えるが、液状化過程における有効応力の変動に従い修正される。すなわち、有効応力変化率の平方根の割合で G_0 が変化していくことになる。また、せん断強さ τ_r は次式で表わされるが、これは有効応力に比例して変化することになる。

$$\tau_r = \frac{\sigma'_v}{2} \sqrt{(1 + K_0)^2 \sin^2 \phi - (1 - K_0)^2} \dots\dots\dots (3)$$

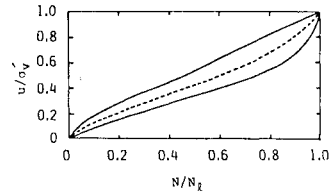
ここに、 σ'_v は鉛直有効応力、 K_0 は静止土圧係数、 ϕ はせん断抵抗角である。

3. 間隙水圧上昇量の算定方法

間隙水圧上昇量の算定には、非排水繰返しせん断試験



図一 液状化に至るに必要な応力比繰返し回数関係



図二 液状化過程における間隙水圧上昇径路 (Seed ら¹⁵⁾による)

より得られる図一、二の関係をそれぞれ使用した。図一は、液状化を起こすに必要な応力比と繰返し回数の関係を示したものである。Seed ら¹³⁾によりまとめられた単純せん断試験結果を両対数図上に表わすと図のように直線化が可能である。さらに、所定の繰返し回数で液状化に至らしめる応力比の大きさは、特に密な状態を除けば相対密度に比例することが知られているので、相対密度で規準化し定式化すると次のようになる。

$$N_s = \frac{0.038}{\left(\frac{\tau}{\sigma'_v D_r} \right)^{4.97}} \dots\dots\dots (4)$$

相対密度が80%程度を超えた密詰め状態では、この比例関係が成り立たないことが指摘されている¹⁴⁾ので、式（4）の適用範囲は相対密度80%以下と考えるのが妥当と思われる。図二は、非排水試験時の間隙水圧上昇を表わすものであるが、Seed ら¹⁵⁾により次のような定式化が行われている。

$$\frac{u}{\sigma'_v} = \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left(\frac{N}{N_s} \right)^{\delta b} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 u は過剰間隙水圧、 δ は曲線の形状を規定する係数（図中の破線の場合 $\delta = 0.7$ ）である。現在まで、液状化の実験結果はこれらの形でまとめられており、種々の砂および初期状態についてのデータの蓄積もなされている。さまざまな問題に対して、それぞれの場合に応じて、式（4）、（5）の係数を調整することにより対応が可能である。

いま、土中に図一3に示されるようなせん断応力の波が作用する場合を考える。波形はランダムであっても、間隙水圧の上昇は波が時間軸を横切るごとに生ずるもの

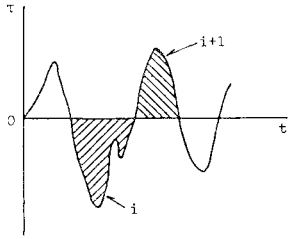
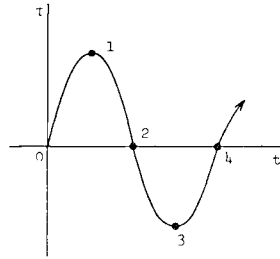


図-3 土中のせん断応力概念図



(a) 応力・時間関係

とする。すなわち、間隙水圧の評価に対しては、時間軸で区切られた1つ1つの波が対象となり、これらはそれぞれの大きさをもった応力の半サイクル成分ととらえることができる。発生する間隙水圧の大きさは、半サイクル内でのせん断応力の最大値により決定されるものとする。図-3において、最初から数えて*i*番目の半サイクルの波の最大値を τ_i とし、この大きさの波が一様に作用した場合、液状化を起こすに必要なサイクル数を N_{li} とすると、この N_{li} は式(4)より計算される。この大きさの応力の1サイクルの作用に対して、式(5)における N/N_{li} の値が、 $1/N_{li}$ だけ増加するものと仮定すると、半サイクルの応力の作用に対しては $1/2 N_{li}$ だけ増加が考えられる。したがって、第1番目から第*m*番目までの半サイクルの応力の作用に対して、

$$\frac{N}{N_{li}} = \sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{2 N_{li}} \right) \dots\dots\dots (6)$$

となり、これを式(5)に代入することにより任意の半サイクル終了時点における間隙水圧が算定される。このようにして半サイクルの応力変動ごとに間隙水圧が計算され、それに応じてせん断剛性率およびせん断強さが低下する。各半サイクルで生じた間隙水圧は、次の半サイクルにおいてこれらの値を低下させるものとし、半サイクル内での変動はないものとする。

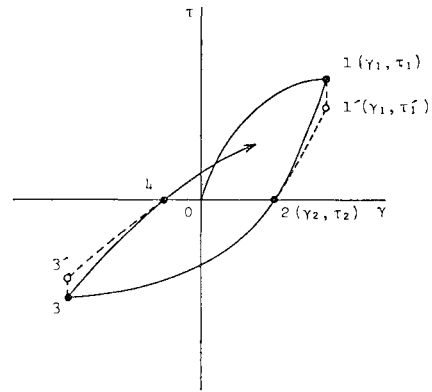
4. 有効応力法

(1) 非線形解析法

ここで取り扱う非線形有効応力解析手法は、他の同種の解析法に比べると、計算がいくぶん簡易である。すなわち、他の有効応力解析法はほとんどが、それぞれの構成式を用いて各時間ステップごとに有効応力の変動もしくは間隙水圧の上昇を計算する仕組みになっているのに対し、本解析法では、前節の間隙水圧算定方法に従い応力の半サイクルごとに間隙水圧の発生量が計算される。したがって、本法では半サイクル内の時間ステップにおいては有効応力の変動はなく、普通の非線形解析が行われているだけである。

ここで用いる運動方程式は次に示すとおりである。

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = M\ddot{u}_g(t) \dots\dots\dots (7)$$



(b) 応力・ひずみ関係

図-4 非線形解析における応力・ひずみ概念図

ここに、 M 、 C 、 K はそれぞれ質量、減衰、剛性マトリックス、 u は地盤の変位ベクトルである。剛性マトリックス K において応力・ひずみ関係の非線形性が考慮されるので、接線剛性 K_t を用いることにより式(7)の $Ku(t)$ は以下のように増分型で表わされる。

$$Ku(t) = K_t \Delta u(t) + R(t - \Delta t) \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 $R(t - \Delta t)$ は内部の抵抗力のベクトルであり、前回の積分ステップにおける応力から計算される。式(7)は直接積分法により、各時間ごとに積分される。この式では、減衰は、せん断ひずみの履歴による履歴減衰と速度に依存する粘性減衰が評価されるが、計算では粘性減衰マトリックス C は省略している。

有効応力の変動を伴う土中要素のせん断応力・ひずみ関係は、以下のようになるものとする。図-4に、土中要素の応力・時間および応力・ひずみ関係の概念図を示している。まず、原点を出発する応力・ひずみ曲線は骨格曲線となり、式(1)を用いて、

$$\tau = \frac{G_0 \gamma}{1 + \left| \frac{\gamma}{\gamma_r} \right|} \dots\dots\dots (9)$$

で表わされる。ピーク1のひずみおよび応力を (γ_1, τ_1) とすれば、これを起点とする除荷の曲線は履歴曲線となり

$$\tau - \tau_1 = \frac{G_0(\gamma - \gamma_1)}{1 + \left| \frac{\gamma - \gamma_1}{2\gamma_r} \right|} \dots\dots\dots(10)$$

となる。この曲線が γ 軸を横切るとき、すなわち 2 において、最初の半サイクルは終了したとみなされ、前節の方法により間隙水圧上昇量が算出される。したがって、次の半サイクルでは有効応力の低下を伴い、式 (10) 中のせん断剛性率 G_0 は式 (2) により修正される。ここで修正された新しいせん断剛性率を G'_0 とする。2 において曲線の接線勾配が変化するが、このような曲線はもはや式 (10) で表わすことが不可能となり次式が導入される。ただし 2 におけるひずみと応力を (γ_2, τ_2) とする。

$$\tau - \tau'_1 = \frac{G'_0(\gamma - \gamma_1)}{1 + \left| \frac{\gamma - \gamma_1}{2\gamma_r} \right|} \dots\dots\dots(11)$$

ここに、

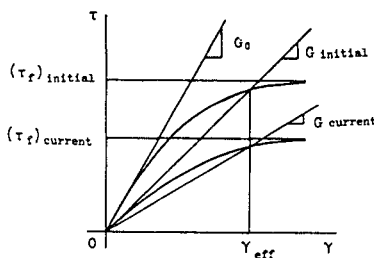
$$\tau'_1 = \tau_2 - \frac{G'_0(\gamma_2 - \gamma_1)}{1 + \left| \frac{\gamma_2 - \gamma_1}{2\gamma_r} \right|}$$

式 (11) は 1' を起点とした履歴曲線とみなされ、2 における G_0 の変化と応力、ひずみの連続条件に対処したものである。さらに、曲線は 3 において G'_0 の接線勾配で折り返し、4 でひずみ軸を横切るに伴い再び間隙水圧の上昇が評価され、以下同様の手順となる。

(2) 等価線形解析法

有効応力解析において計算量を減らすための最も有効な手段は、応力・ひずみ関係を単純化することであると思われる。ここで、Hardin-Drnevich モデルに基づく双曲線型の応力・ひずみ曲線に代わり、原点と曲線上の点とを結んだ割線を用いて表わしてみる。つまり応力・ひずみ関係を直線で近似し、各時間ステップでの剛性率の変動を避けるのがその目的である。このような方法は等価線形解析法と呼ばれている。本法は、従来全応力法で用いられてきた等価線形解析法を有効応力法へ拡張することを試みたものであるが、その方法は以下のとおりである。

等価線形解析において、応力・ひずみ関係を規定する剛性率の主な支配要因は、有効応力とひずみレベルであるが、本法ではそれらによる剛性率への影響はそれぞれ



図一五 等価線形解析における応力・ひずみ概念図

独立であるという仮定を設ける。本法における応力・ひずみ関係の概念を図一五に示す。まず、初期の接線係数 G_0 と減衰定数 h を与えて全応力解析を行い、応答せん断ひずみの大きさに応じた剛性率および減衰定数を決定する。これらの定数が続いて行われる有効応力解析の初期定数となる。このときの剛性率を $G_{initial}$ とすると、式 (1) を用いて、

$$G_{initial} = \frac{G_0}{1 + \frac{\gamma_{eff}}{\gamma_r}} \dots\dots\dots(12)$$

となる。ここに、 γ_{eff} は有効せん断ひずみであり、最大応答せん断ひずみにより決定される。次に有効応力解析を行うが、剛性率および減衰定数はその後ひずみによる変動はないものとし、有効応力の変動のみによって変化させる。間隙水圧の上昇が生じた現時点の剛性率を $G_{current}$ とすると、

$$G_{current} = \frac{G_0 \sqrt{\frac{\sigma'_v}{\sigma'_{v0}}}}{1 + \frac{\gamma_{eff}}{\gamma_r} \sqrt{\frac{\sigma'_{v0}}{\sigma'_v}}} \dots\dots\dots(13)$$

となる。ここに、 σ'_{v0} は初期鉛直有効応力である。式 (13) は、初期剛性率と規準ひずみがともに有効応力の低下率の平方根に比例して低下していくことを示している。

等価線形解析における運動方程式は式 (7) と同じであるが、応力・ひずみ関係が直線となりループを描かないために履歴減衰は存在しない。そこで、本解析による結果を非線形解析による結果と対応させるためには、履歴減衰による減衰量を粘性減衰項で表わすことが必要である。粘性減衰項における減衰マトリックスは、Rayleigh 型とし、次式によった。

$$C = h\omega_1 M + \frac{h}{\omega_1} K \dots\dots\dots(14)$$

ここに、 ω_1 は地盤の 1 次の固有円振動数であり、有効応力の変化に伴い変動する。減衰定数は、Hardin-Drnevich モデルにおける履歴減衰を表わす次式¹⁶⁾より求めた。

$$h = \frac{4}{\pi} \left[\frac{G'_0}{G_{current}} \left\{ \frac{\gamma'_r}{\gamma_{eff}} - \left(\frac{\gamma'_r}{\gamma_{eff}} \right)^2 \cdot \ln \left(1 + \frac{\gamma_{eff}}{\gamma'_r} \right) \right\} - \frac{1}{2} \right] \dots\dots\dots(15)$$

ここで、 $G'_0 = G_0 \sqrt{\sigma'_v / \sigma'_{v0}}$ 、 $\gamma'_r = \gamma_r \sqrt{\sigma'_v / \sigma'_{v0}}$ であり、有効応力の変化により式中 G'_0 、 $G_{current}$ 、 γ'_r が変動する。

本法による解析手順をまとめると、図一六のフローチャートようになる。図の左半分は、既往の全応力法そのものである。これは、有効応力解析のための初期定数を決定するだけのものであるから、応答解析は、時間、周波数のいずれの領域で行ってもよい。続く有効応力解析では時系列の応答解析が必要であるが、非線形解析と異なり定数の修正は応力波形の半サイクルごとでよいこ

となる。この分の演算の節約が本法の利点である。

5. 解析結果

(1) 1次元問題

上述の有効応力法を用いて1次元問題の解析を行った。解析は、非線形、等価線形の両解析をともに行った。等価線形解析は、非線形解析の簡便法ではあるが、これまで全応力法において、非線形解析とは多少異なった結果を与えることが指摘されてきた¹⁷⁾。それは、等価線形解析の場合、全応答過程において地盤の動的定数があるひずみレベルに着目して一定なものとみなしてしまうので、入力のある特定の周波数成分との反応を強めるためと考えられる。

そこで、ここに提案する等価線形有効応力解析が、どの程度非線形有効応力解析を近似できるか調べてみる必要があると思われる。等価線形解析では、ランダム波の適用に対して、まず全応答過程を代表する有効せん断ひずみ γ_{eff} が決定される。これは、応答せん断ひずみレベルに応じた定数の決定に必要であり、通常、最大せん断ひずみに係数を掛けた形で表わされている。すなわち、

$$\gamma_{eff} = \alpha \gamma_{max} \dots\dots\dots (16)$$

係数 α は、ひずみ低減係数と呼ばれるもので、全応力法では0.65とする場合が多い。この有効せん断ひずみの大きさすなわち α の値のとり方によって応答に違いが生じ、非線形解析結果ともかなりの差が生じることが知られている¹⁸⁾が、実際にはほとんど検討がなされないまま解析が行われている。本法では、図-6のフローチャートに示すように、有効せん断ひずみを全応力法で求め、これをそのまま有効応力法に適用するので、有効

表-1 地盤の土質定数

G_s	e	D_r	K_0	ϕ
2.65	0.80	50 %	0.5	35°

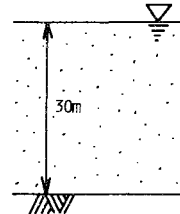


図-7 飽和砂水平地盤

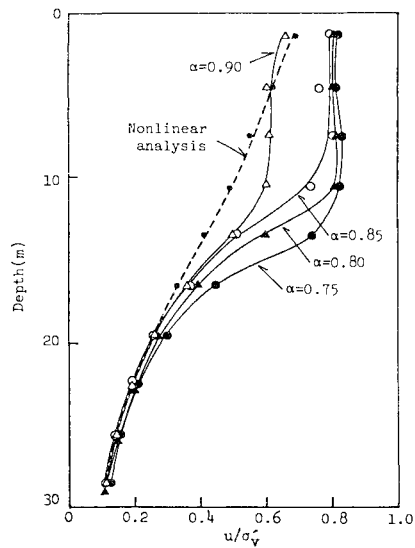


図-8 非線形および等価線形解析による間隙水圧の地中分布 ($\alpha_{max}=0.1 g$)

せん断ひずみのとり方について検討を加えてみたい。ここでは非線形解析結果と比較して、式(16)中の α の値を調節してみる。

解析対象地盤として、図-7に示す厚さ30mの均質な飽和砂地盤を想定する。地盤の物性値は表-1のとおりとする。入力波として、El Centro (1940) 波 N-S 成分を最大値0.05g、0.1g、0.15gに縮小したものをそれぞれ20秒間入射した。

図-8は、最大値0.1gの波を入射した場合の地盤内の間隙水圧上昇量の深さ方向分布を表わしている。図中、実線が等価線形解析による結果であり、破線は非線形解析によるものである。等価線形

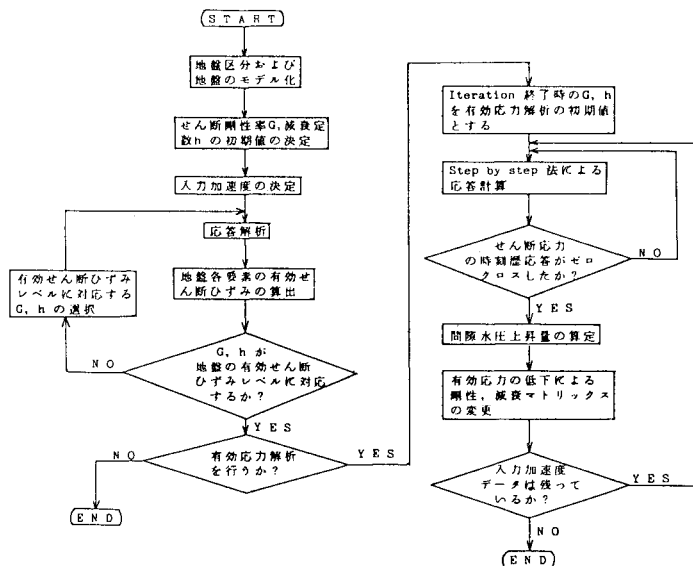


図-6 等価線形有効応力解析法のフローチャート

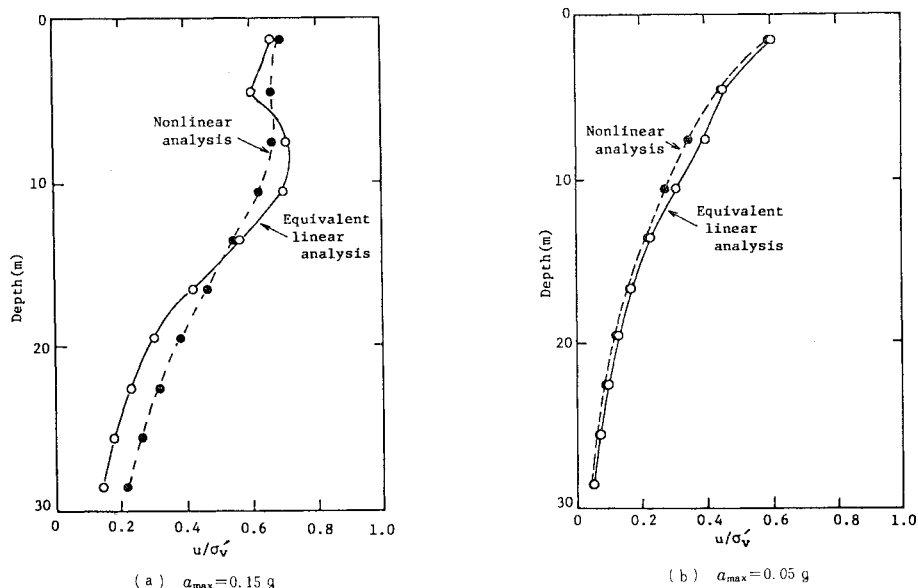


図-9 間隙水圧の地中分布

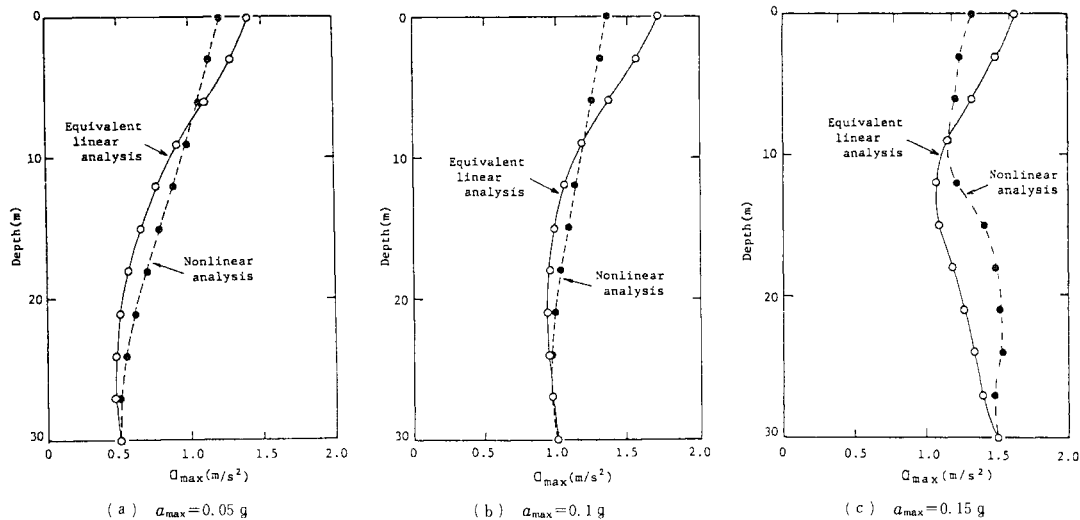


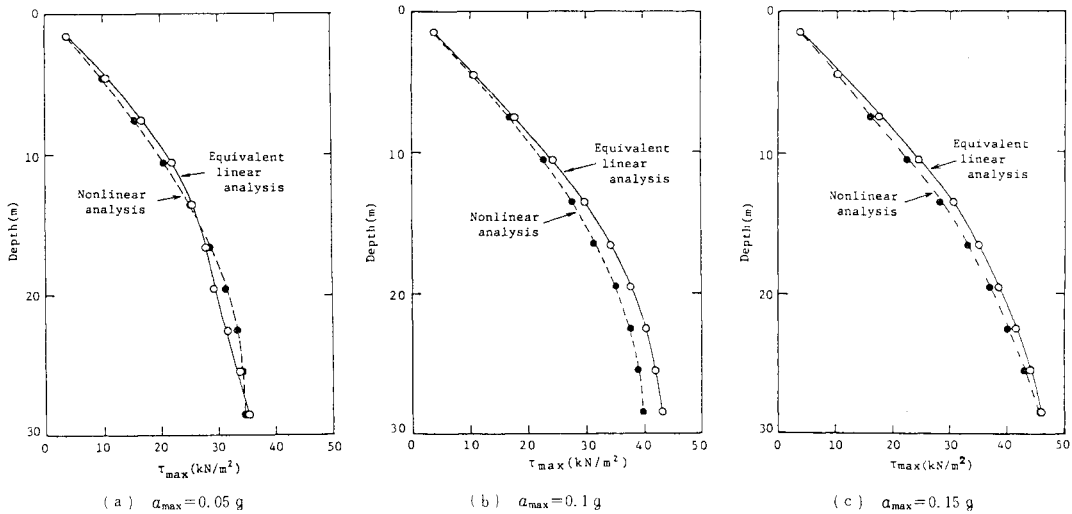
図-10 最大応答加速度の地中分布

解析結果は式 (16) で表わされる有効せん断ひずみを、 α の値を変えることにより変化させたものである。図のように、 α の値の違いにより間隙水圧の上昇傾向はかなり異なり、 α が大きくなるほど間隙水圧の上昇量は低下する傾向がみられる。非線形解析の結果と比較してみると $\alpha=0.9$ の場合に両解析法による結果は比較的近いようである。

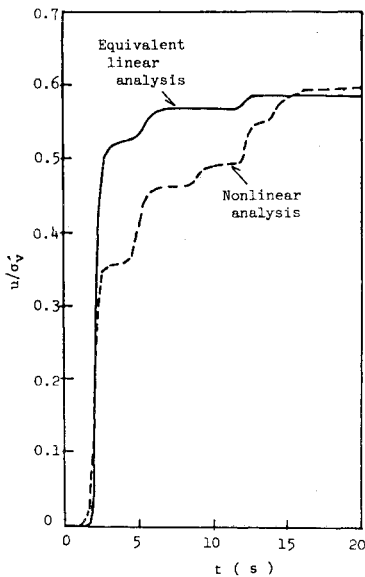
図-9 に、最大値 0.05 g と 0.15 g の波を入射した場合の最終的な間隙水圧上昇量の深さ分布が示されている。いずれも等価線形解析は $\alpha=0.9$ としたときの結果であり、非線形解析の結果とかなりよく一致しているこ

とが認められる。上記の結果もあわせると、両解析法による結果は入力レベルの違いにもかかわらず比較的よく一致することがいえるようである。このように、本解析ケースについては、間隙水圧の上昇量において、 $\alpha=0.9$ とした場合の等価線形解析結果は、非線形解析結果を近似できるものと考え、以下 $\alpha=0.9$ の場合について取り扱う。

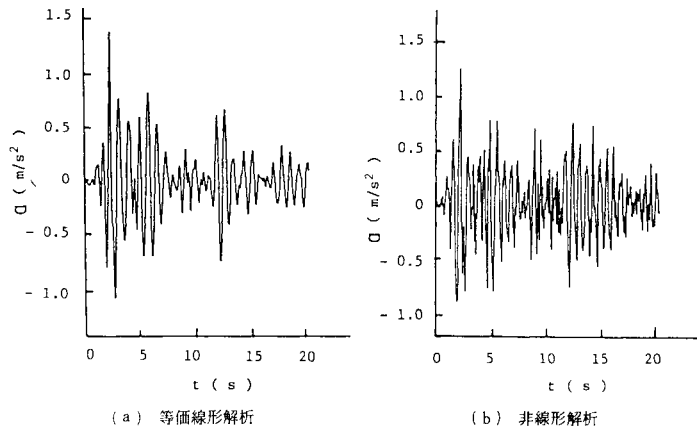
図-10, 11 に、最大応答加速度および最大せん断応力の深さ分布がそれぞれ示されている。いずれも入力最大値 0.05 g , 0.1 g , 0.15 g のそれぞれの解析結果が記されているが、等価線形解析の結果は非線形解析の結果



図一11 最大応答せん断応力の地中分布



図一12 表層最上層における間隙水圧の時間変化 ($a_{max}=0.05 \bar{g}$)

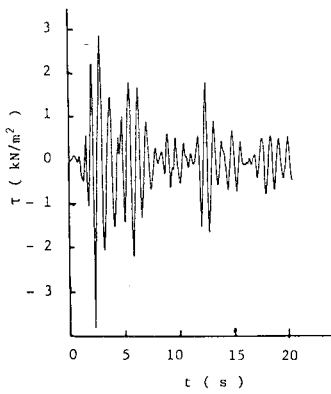


図一13 地表面応答加速度の時刻歴 ($a_{max}=0.05 \bar{g}$)

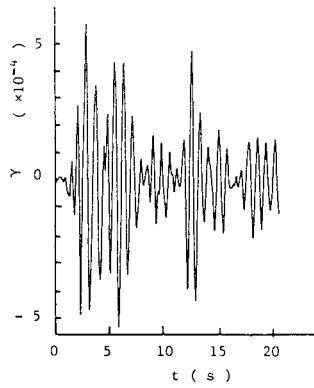
とかなりよく一致している。以上は応答の最大値についての記述であるが、次に応答の時刻歴について調べてみる。

図一12は、表層地盤最上層における間隙水圧上昇量の時間的変化を表わしたものである。等価線形解析と非線形解析の結果を比較すると、前者の場合、間隙水圧がある時刻で急上昇する形であるのに対し、後者の場合は徐々に増加していく傾向が認められる。最終的には両者の結果はほぼ等しくなるが、途中ではかなり異なっている。

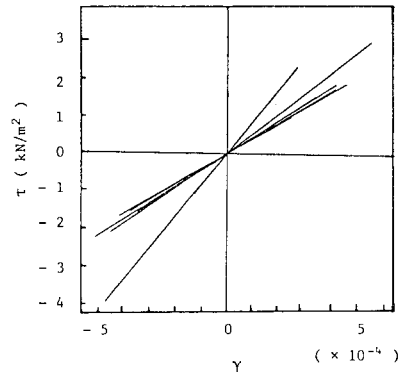
図一13には、地表面における応答加速度の時刻歴が示されている。等価線形解析における応答波形は、非線形解析のそれに比べ、全体的になめらかなのが特徴的である。また、最大値は等価線形解析による方が大きい。時間の経過に伴う応答の低下も激しいようである。これは、等価線形解析においては地盤系の固有振動数が一義的に定まり、初期には入力波の特定の周波数成分が増幅されるが、有効応力の減少に伴い固有振動数の低下が生じ、しだいに入力波の増幅される成分が少なくなるためと考えられる。



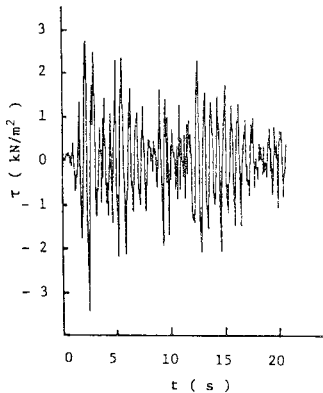
(a) 等価線形解析



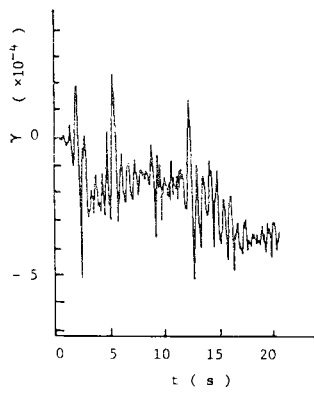
(a) 等価線形解析



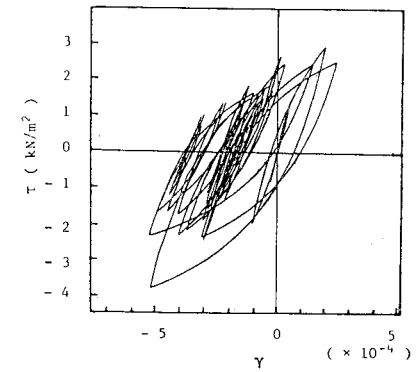
(a) 等価線形解析



(b) 非線形解析



(b) 非線形解析



(b) 非線形解析

図一14 在層最上層における応答せん断応力の時刻歴 ($a_{max}=0.05 g$)

図一15 表層最上層における応答せん断ひずみの時刻歴 ($a_{max}=0.05 g$)

図一16 表層最上層における応力・ひずみ関係 ($a_{max}=0.05 g$)

図一14, 15は、最上層のせん断応力とせん断ひずみの時刻歴をそれぞれ示したものである。せん断応力の応答結果は加速度応答とほぼ同一の傾向を示している。せん断ひずみは、加速度、せん断応力と異なり有効応力の低下によって減衰せず、むしろ最終時刻付近でも大きな振幅を有している。また、せん断ひずみの応答は、等価線形解析においては原点を通る水平軸を中心に振動しているが、非線形解析では片側に残留ひずみが現われている。この相違は、等価線形解析の応力・ひずみ関係が原点を通る直線で表わされているのに対し、非線形解析では半サイクルごとの有効応力と剛性の低下に伴い、正負両側のせん断応力の総計がかなり異なってくるためと考えられる。

図一16には、最上層における両解析法による応力・ひずみ関係が描かれている。等価線形解析の場合は、原点を通る直線の勾配がしだいに緩くなる形で剛性の低下の様相が現われている。非線形解析の方は、ループの形がしだいに変化してゆき、残留ひずみが生じた片側に

移行する形になっている。

以上の結果から、等価線形解析法による応答結果は、時刻歴においては非線形解析の結果と若干の相違がみられるが、応答の最大値、間隙水圧の最終値はよく一致することが認められる。ただし、この場合適切な有効ひずみの設定が必要である。

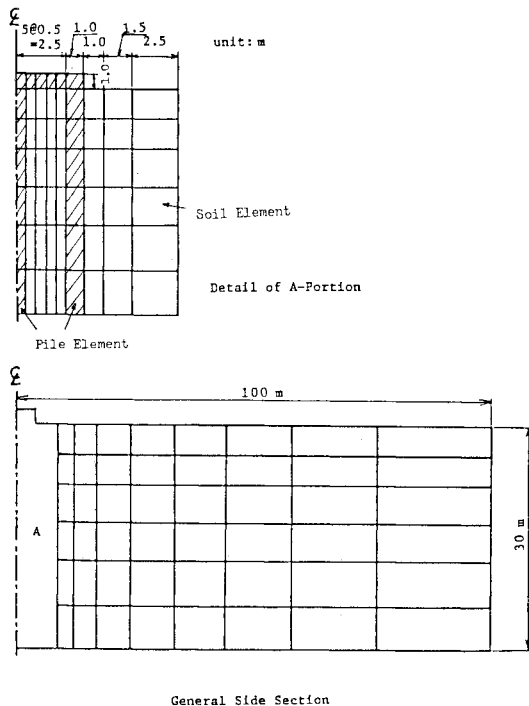
本解析では数値積分は、非線形、等価線形の両解析ともにNewmark β 法 ($\beta=1/4$) によった。この方法は陰解法であるから、時間刻目は比較的粗くてもよいが逆マトリックスの計算を必要とし、ここで多くの時間を消費する。等価線形解析においては、各時間ステップでの逆マトリックスの演算が不要となり応力の半サイクルごとにある程度の間隙水圧の変動が生じたときのみ行えばよいことになる。このように、非線形解析に比べ、かなりの計算時間の短縮が可能である。

(2) 2次元問題

等価線形解析法を用いてより自由度の高い2次元の有限要素解析を行った。解析対象は、図一17に示される

杭・地盤系である。ここでは、5.(1)と同じ水平地盤に杭が打設された場合を想定しており、地盤の物性は表一1と同じである。杭は、先端が基盤に剛結され上部にフーチングを有する支持杭である。フーチングの重量はすべて杭が支持するものと仮定すると、このような条件下では地盤の初期条件は5.(1)と同じ K_0 状態と考えることができる。これに水平方向の地震外力を考えた場合、応力状態のとらえ方は5.(1)と同様に取り扱うことができる。

杭は、直径が1 m でヤング率 $E=2.36 \times 10^7$ kN/m²,



図一17 杭・地盤系要素図

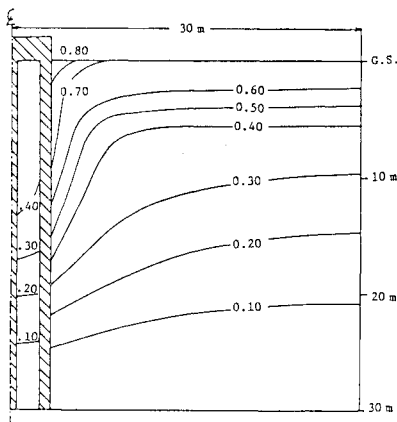
ポアソン比 $\nu=0.25$, 密度 $\rho=3.10$ t/m³ の物性をもつ材料とし、水平、奥行き方向に2 m 間隔で各3本、計9本が配置されている。なお、杭のヤング率は、奥行き方向の配置を考慮して1/3に低下させた。入力波はEl Centro波を最大値0.1 gに調整し、0.02秒刻みで基盤より10秒間加えた。数値積分はNewmark β 法($\beta=1/4$)によった。このような条件で杭・地盤系の解析を行い、ここでは、間隙水圧上昇に及ぼす杭の影響について調べてみた。

解析領域は、中心線より両側に100 mが設けられているが、この条件では杭周辺30~40 mの範囲では境界の影響が現われないことがまず確認された。図一18は、杭周辺地盤の間隙水圧上昇量の分布を示したものである。杭の存在により、杭近傍において間隙水圧の分布形状に顕著な変化が認められる。また、杭近傍でも群杭の外側と内側ではその様相は異なっている。杭の外側では間隙水圧のコンターが下部へ食い込み間隙水圧が高く出ているのに対し、杭間では他の部分に比べかなり低い水圧値である。すなわち、間隙水圧上昇に及ぼす杭の影響は、杭外側で水圧上昇が促進され、杭間では逆に抑止される形として現われるようである。この結果は、本解析ケースの結果であり、一般論として言及することはできないが、少なくとも地盤内の間隙水圧上昇に対して、杭基礎等地中構造物の影響が現われることは事実のようである。やはり、構造物を含めた地盤の有効応力解析が必要なことは当然であるが、その際、かなり自由度の多い問題も出てくるものと考えられる。ここで提案する等価線形有効応力解析法を用いると、計算時間の大幅な短縮化が可能である。

6. 結 論

本研究は、地震時における飽和砂地盤の有効応力解析法の簡易化を目指して行ったものである。これまでの有効応力解析法が、必ずしも実用的にとらえられ得ない原因の中に、用いられる構成式の適用上の問題と非線形の運動方程式を解析する際の膨大な計算量があると思われる。ここでは、間隙水圧上昇量の評価法として、現状最もなじみが深くデータ量も豊富なSeed式を用いた。さらに、計算時間の短縮化をはかるために、等価線形有効応力解析法の提案を行った。この解析法による結果の精度は、非線形有効応力解析結果と比較することによって検証された。1次元および2次元問題を対象とした具体的な数値計算の結果、以下の事項が明らかとなった。

(1) 等価線形有効応力解析法は、適切な有効せん断ひずみ量を与えることにより、応答加速度、せん断応力の最大値および間隙水圧上昇量の最終値などで、非線形解析法を近似できる。



図一18 杭周辺地盤における u/σ'_v の分布状況

(2) 等価線形解析による応答の時刻歴は、非線形解析結果に比べると全体的に波形がなめらかであり、特定の周波数成分が選択された様子が認められる。等価線形解析による加速度、せん断応力の波形は、最大値は大きく現われるが、間隙水圧の上昇に伴い、減衰していく傾向も顕著である。

(3) 杭・地盤系の2次元問題を解析することにより、杭近傍の地盤が特異な間隙水圧分布を呈すことが認められた。すなわち、間隙水圧上昇に及ぼす杭の影響が現われ、杭外側で水圧上昇が促進され、杭間では逆に抑制される結果が得られた。

参考文献

- 1) Seed, H.B. and Idriss, I.M. : Analysis of soil liquefaction : Niigata earthquake, Proc. ASCE, Vol.93, No. SM 3, pp.83~108, 1967.
- 2) Lee, K.L. and Chan, K. : Number of equivalent significant cycles in strong motion earthquakes, Proc. International Conference on Microzonation for Safer Construction Research and Application, pp.609~627, 1972.
- 3) Seed, H.B. and Idriss, I.M. : Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential, Proc. ASCE, Vol.97, No. SM9, pp.1249~1273, 1971.
- 4) Lee, K.L. and Focht, J.A., Jr. : Liquefaction potential at the Ekoffisk Tank in the North Sea, Proc. ASCE, Vol.101, No. GT1, pp.1~18, 1975.
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V. 耐震設計編, pp.16~22, 1980.
- 6) Finn, W.D.L., Lee, K.W. and Martin, G.R. : An effective stress model for liquefaction, Proc. ASCE, Vol.103, No. GT6, pp.517~533, 1977.
- 7) Ghaboussi, J. and Dikmen, U.S. : Liquefaction analysis of horizontally layered sands, Proc. ASCE, Vol.104, No. GT3, pp.341~357, 1978.
- 8) Zienkiewicz, O.C., Chang, C.T. and Hinton, E. : Non-linear seismic response and liquefaction, Int. Jour. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol.2, pp.381~404, 1978.
- 9) 石原研而・東畑郁生：動的間隙水圧を考慮した地盤の応答解析, 第14回土質工学研究発表会講演集, pp.1305~1308, 1979.
- 10) 紫田 徹・佐藤忠信・小坂正明：砂地盤の液状化解析例, 第14回土質工学研究発表会講演集, pp.1313~1316, 1979.
- 11) Hardin, B.O. and Drnevich, V.P. : Shear modulus and damping in soils : Design equations and curves, Proc. ASCE, Vol.98, No. SM7, pp.667~691, 1972.
- 12) Richart, F.E., Hall, J.R. and wood, R.D. : Vibrations of soil foundations, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1970.
- 13) Seed, H.B., Martin, P.P. and Lysmer, J. : Pore-water pressure changes during soil liquefaction, Proc. ASCE, Vol.102, No. GT 4, pp.323~346, 1976.
- 14) Tatsuoka, F., Muramatsu, M. and Sasaki, T. : Cyclic undrained stress strain behavior of dense sands by torsional simple shear test, Soils and Foundations, Vol.22, No.2, pp.55~70, 1982.
- 15) Seed, H.B. and Booker, J.R. : Stabilization of potentially liquefiable sand deposits using gravel drains, Proc. ASCE, Vol.103, No. GT 7, pp.757~768, 1977.
- 16) 国生剛治・桜井彰雄：Modified Hardin-Drnevich モデルについて, 第33回土木学会年次学術講演会講演概要集, III, pp.253~254, 1978.
- 17) 藤野陽三・伯野元彦：地盤の非線形性を考慮した地震動特性, 土木学会論文報告集, 第240号, pp.1~9, 1975.
- 18) Bieber, R.E. and Hovland, H.J. : Seismic dynamic response by approximate methods, Proc. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.8, pp.41~53, 1980.

(1983.8.22・受付)