

# 液状化判定と等価1自由度モデルを用いた 液状化地盤の挙動評価法の開発

坂井 公俊<sup>1</sup>・小島 謙一<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）  
E-mail: ksakai@rtri.or.jp

<sup>2</sup>正会員 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）  
E-mail: kojima@rtri.or.jp

等価1自由度モデルによる液状化地盤の地盤応答解析法を提案した。本手法はまず、地盤全体系の強度変化曲線と累積損傷度法を組み合わせることで、地盤全体系の強度変化を時々刻々評価する。続いて、この強度変化を等価1自由度モデルに導入することで、液状化に伴う地盤の長周期化、強度低下等の現象を直接考慮した応答評価を簡易に実施可能とする。

提案手法による地表面地震動は、詳細な有効応力解析による地表面地震動と調和的な結果となっている。また、提案法に必要な情報は、入力地震動、地盤の固有周期 $T_g$ 、地盤強度比 $K_f$ と地盤全体系の強度変化曲線のみであり、これらは柱状図等から比較的容易に推定可能である。そのため、本手法は液状化地盤上の一般的な構造物を設計する際の簡易な地表面地震動評価手法として活用が期待される。

**Key Words :** *earthquake ground motion, soil liquefaction, equivalent single degree of freedom method, evaluation of soil liquefaction potential*

## 1. はじめに

土木構造物の地震時安全性を把握する際の地盤挙動評価の重要性は言うまでもない。特に高有機質土や火山灰質粘性土といった特殊な地盤の非線形挙動や、地震動の繰り返し作用による水圧の上昇に伴う液状化は、地盤挙動、地表面地震動に大きな影響を与える可能性が高い。そのため、例えば鉄道構造物の耐震設計上を行う際に、これらに該当する地点は特に注意を要する箇所として挙げられている<sup>1)</sup>。そして、このような地盤を有する地点では、事前に詳細な調査を行うとともに、この結果を用いた地盤応答解析を実施することで、地点ごとの地盤挙動、地表面地震動を評価することが望ましい。

ここで、地盤の液状化に限定して議論を行うと、液状化の危険度を評価するためには、液状化抵抗率 $F_L$ <sup>2)</sup>や液状化指数 $P_L$ <sup>3)</sup>に基づく簡易な判定が設計実務において導入されている。これによって液状化の危険性が高いと判断された場合には、これを考慮した評価を別途実施することになる。これとは別に、地盤の繰り返し変形に伴う間隙水圧の上昇を直接モデル化し、動的解析によって地盤挙動を評価するという取り組みも古くから実施されている（例えば<sup>4)-7)</sup>。この有効応力解析を行うことで、直接的な

液状化評価が可能である一方で、煩雑なパラメータ設定や高度な解析技術が必要とされる。そのため、一般的な鉄道構造物の耐震設計において有効応力解析が採用されるケースは限られており、簡易に実施可能な液状化判定によって液状化の危険度が高いと判定された場合でかつ、特に重要もしくは特殊な構造物である場合に用いられるという現状がある。

一方で、有効応力解析によらず液状化時の地盤挙動を簡易に表現しようとする試みもいくつか行われている（例えば<sup>8)-11)</sup>。これらの手法は、等価線形解析を拡張したものである場合が多く、ひずみレベルの大きな事象に対する等価線形解析の適用性や、周波数領域の解析であるために時々刻々変化する水圧の影響を考慮することが困難である等の問題を有している。

こうした中で筆者らは、非液状化地盤の挙動を等価な1自由度モデルで表現する手法を提案するとともに、詳細な多層モデルによる地盤応答解析結果と比較することで、手法の有効性を確認している<sup>12)</sup>。さらに、この等価1自由度モデルから地盤全体としての強度に相当する指標（地盤強度比 $K_f$ ）を提案<sup>13)</sup>するとともに、この地盤強度比 $K_f$ と地盤の固有周期 $T_g$ を指標として地盤を表現することで、大規模地震時の地表面地震動を適切に分類可能

であることを示している<sup>14)</sup>. また、地盤の等価1自由度モデルを構築する際の静的非線形解析法を拡張することで、新たな液状化判定法の提案も行っている<sup>15)</sup>. これは、地震動の繰り返し載荷に伴う液状化の程度を地盤強度比  $K_f$  の変化率  $\beta$  という指標によって表現しており、結果として水圧上昇に伴う地表面地震動の変化の程度を定量的に把握可能としている. 本手法は、 $P_L$  値のような定性的な評価と比較して力学的により意味の持った評価となっている特長を有している. この液状化判定法<sup>15)</sup>では、地盤強度比  $K_f$  の変化を時々刻々評価することも可能である. そのため上述した地盤全体系の等価1自由度モデルにこれを導入することで、地震動の繰り返し作用を適切に考慮した地盤挙動の簡易評価の実現が期待される.

そこで、本検討では比較的簡易に実施可能な液状化判定の結果と等価1自由度モデルを組み合わせた液状化地盤の地表面地震動の評価手法を提案する. まず2章において本手法の概要を説明する. 続いて3章において、サンプル地盤に対して提案手法を適用するとともに、詳細な有効応力解析の結果と比較することで、提案法の有効性を確認する.

## 2. 地盤全体系の強度変化を考慮した等価1自由度モデルによる動的解析法

今回提案する等価1自由度モデルによる液状化地盤の動的解析法の手順を説明する. まず、対象とする地盤における各層の物性値を設定するとともに、既往の手法と同様の流れに従って、水圧の影響を無視した等価1自由度モデル<sup>12)</sup>、水圧の影響を考慮した地盤全体系の強度変化曲線<sup>15)</sup>を評価する. これとともに、想定する入力地震動を用いた液状化判定を実施することで、強度変化率  $\beta$  を算定しておく. この強度変化率  $\beta$  は、液状化判定を行う際には最終的な値の大小が重要となるが、本手法では時々刻々の変化  $\beta(t)$  を出力しておくこととする.

この強度変化率の時間変化  $\beta(t)$  を地盤の等価1自由度モデルによる動的解析に考慮する. ここで、地盤の等価1自由度モデルを支配する主要なパラメータとしては、地盤の1次固有周期  $T_g$  と地盤強度比  $K_f$  が挙げられる<sup>12),13)</sup>. そのため、この地盤強度比  $K_f$  が強度変化率の時間変化  $\beta(t)$  に応じて変化するモデルを用いることになる. この地盤強度比  $K_f$  は、規準変位  $\delta_r$  (地盤の固有周期が初期周期の  $(1/2)^{0.5}$  となる地表面変位) を用いて次式のようにあらわされる<sup>13)</sup>.

$$K_f = \frac{1}{T_g^2} \times \delta_r \quad (1)$$

そのため、地盤強度比  $K_f$  を強制的に変化させるためには、固有周期  $T_g$  (初期剛性) を変化させる方法と規準変

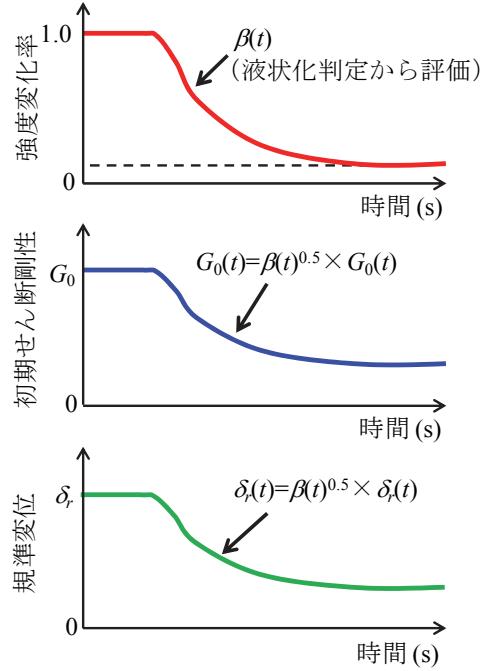


図-1 液状化の影響を考慮した等価1自由度モデルの概念

位  $\delta_r$  を変化させる方法が考えられる. 今回は、次式のように強度の変化を固有周期 (解析上は初期せん断剛性)、規準変位それぞれの0.5乗に比例すると仮定して簡易的に両者を変化させることとした (図-1) .

$$\frac{1}{T_g(t)^2} = \beta(t)^{0.5} \times \frac{1}{T_g(0)^2} \quad (2)$$

$$\delta_r(t) = \beta(t)^{0.5} \times \delta_r(0) \quad (3)$$

ここで、 $T_g(0)$ 、 $\delta_r(0)$ : 初期状態 (水圧上昇の影響を無視した状態) での固有周期、規準変位、 $T_g(t)$ 、 $\delta_r(t)$ : 時刻  $t$  での固有周期、規準変位、 $\beta(t)$ : 時刻  $t$  での強度変化率、である. その他の非線形特性、パラメータは基本的に時間変化によらず一定の値を取ることとする. ただし、履歴を制御する際に記憶している折り返し点の情報などは、骨格が変化したことに対応して修正を行う必要がある.

また、既往の検討による液状化判定<sup>15)</sup>では、地表位置の変位波形がゼロクロスしたタイミングで強度の変化率を算定している. これをそのまま  $\beta(t)$  として評価すると、この瞬間に強度が急激に変化するために、計算の収束性が悪くなったり、極端な加速度が発生する可能性が考えられる. そこで、このような状況を回避するために、動的解析を行う際の強度変化率  $\beta(t)$  は、前のゼロクロスから次のゼロクロスの間で直線的に変化することとした.

以上を踏まえ、液状化地盤の地表面地震動を実務的に算定する際の流れを以下に示すとともに、イメージを図

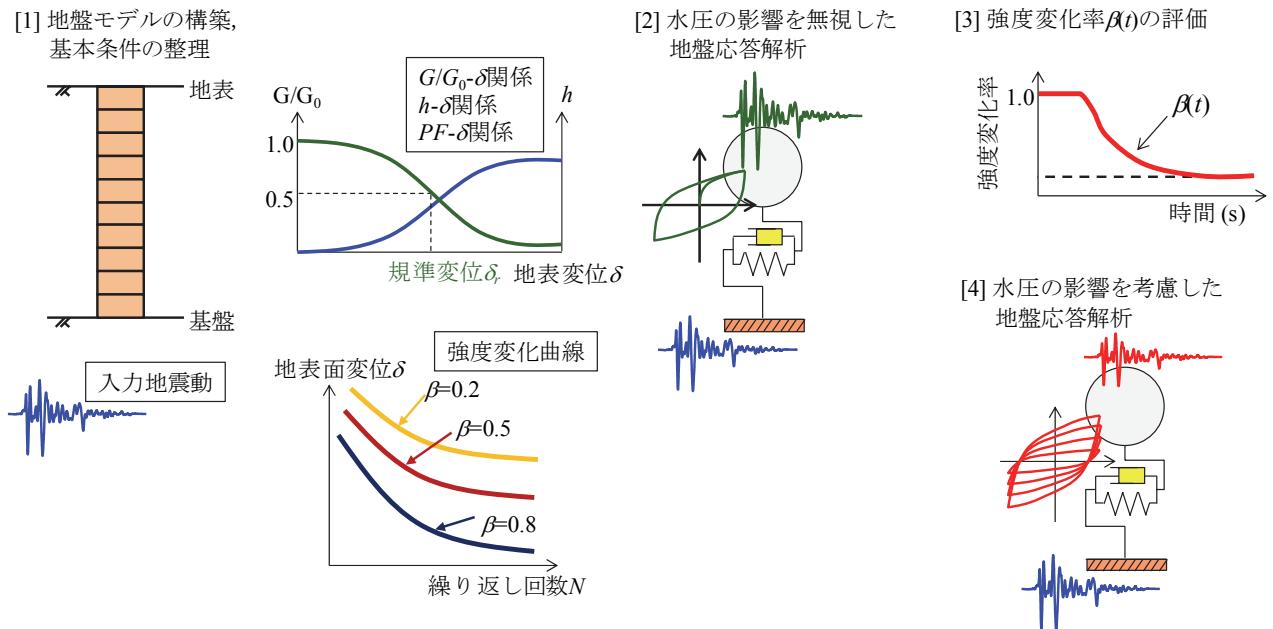


図-2 液状化の影響を考慮した等価1自由度モデルによる地表面地震動の評価の流れ

-2に示す。

[1] 地盤調査結果をもとに、工学的基盤面から地表面までの各深さ位置での物性値を整理する。これより、地盤の固有周期 $T_g$ 、地盤全体系の荷重-変位曲線を評価するとともに、この結果から規準変位 $\delta_s$ 、地盤強度比 $K_f$ を評価する<sup>12)</sup>。さらに、地盤全体系の強度変化曲線を算定する<sup>15)</sup>。これとともに、基盤位置の入力地震動を選択する。

[2] 上記[1]の $T_g$ 、 $\delta_s$ 、 $K_f$ から液状化の影響を無視した状態での地盤の等価1自由度モデルを構築するとともに、基盤位置の地震動を入力とした動的解析を実施することで、非液状化時の地表面地震動を推定する<sup>12)</sup>。

[3] 上記[1]の強度変化曲線と上記[2]の地表面地震動を用いて累積損傷度法を適用し、強度変化率の時間変化 $\beta(t)$ を算定する<sup>15)</sup>。

[4] 上記[2]の等価1自由度モデルに上記[3]の強度変化率 $\beta(t)$ を導入するとともに、基盤位置の地震動を入力とした動的解析を実施する。この時の等価1自由度モデルの時々刻々の変化は式(2)、式(3)による。これにより得られた応答を液状化の影響を考慮した地表面地震動として用いる。

### 3. 提案手法の有効性の検証

#### (1) 地盤条件の設定、地盤全体系の強度変化曲線の評価

提案法の有効性を確認するために、サンプル地盤を対象として詳細な有効応力解析を実施するとともに、提案

した等価1自由度モデルによる動的解析を実施し、両者の地表面地震動を比較する。検討対象とした地盤の地層構成、速度構造を図-3に示すが、 $V_s=400\text{m/s}$ の基盤層の上に、 $V_s=150\text{m/s}$ の堆積層が30m連続する比較的単純な模擬地盤を対象とした。基本的な構成土質は粘性土とし、深さ10m位置から砂質土層が5m堆積していると考えた。この地盤の固有周期は $T_g=0.80\text{s}$ であり、鉄道構造物の耐震設計時の地盤種別<sup>1)</sup>としてはG5地盤に相当する。なお本検討で用いる地盤は、既往の検討<sup>15)</sup>におけるサンプル地盤(a)と同一である。

表層地盤の各深さ位置での非線形構成則としては、せん断応力-せん断ひずみ関係をGHEモデル<sup>16,17)</sup>、ダイレイタンシー特性をおわんモデル<sup>7)</sup>によって表現することとし、各層に与えるパラメータは以下のように設定した。まず、水圧の影響を無視した状態でのせん断応力-せん断ひずみ関係を表すパラメータは、土質分類や拘束圧に応じて提案されている標準的なパラメータ<sup>18,19)</sup>を各層毎に算出した。続いてダイレイタンシー特性は、砂質土のみ設定することとし、鉄道の設計基準<sup>1)</sup>によって液状化対象層の中心深さ位置（深さ12.5m）での液状化強度曲線を算定し、これに適合するようなパラメータを試行錯誤的に決定した。

以上の手続きによって、水圧の影響を考慮した地盤の動的解析、静的非線形解析が実施可能な条件が全て揃った。この地盤条件を用いた静的繰り返し載荷解析によって、地盤全体系の強度変化曲線が評価されている<sup>15)</sup>。得られた結果を図-4に示すが、地表面位置の相対変位波形が存在すれば、この地盤全体系の強度変化曲線と累積損傷度法を用いることで、強度低下の時間変化を容易に評

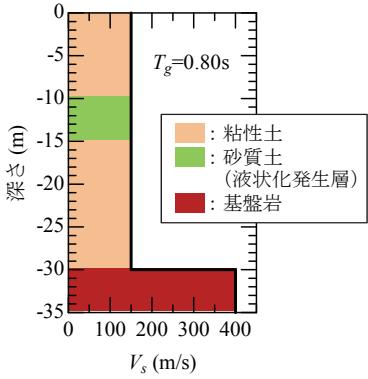


図3 試算に用いた地盤構造

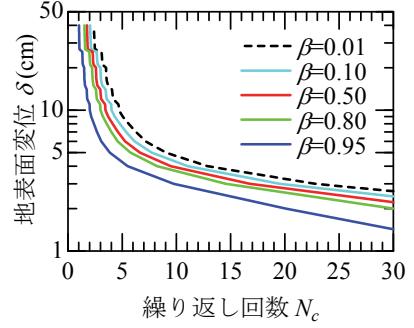


図4 地盤全体系の強度変化曲線の評価結果

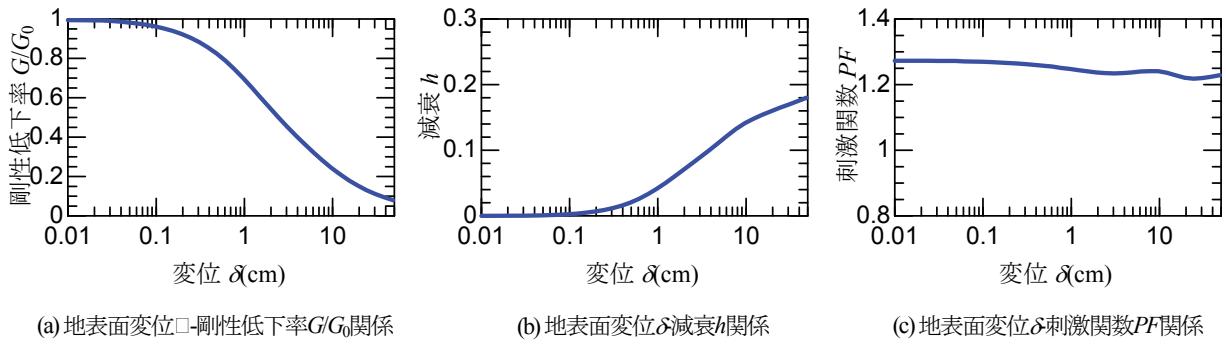


図5 地盤全体系を対象とした静的非線形解析の結果

価することが可能である。

## (2) 水圧の影響を無視した等価1自由度モデルの構築、地表面地震動の評価

上記(1)の地盤を用いて静的非線形解析を実施することで、液状化の影響を無視した場合の等価1自由度モデルを構築する。そのためこの解析時には水圧の影響を無視した検討を実施する。静的非線形解析を実施する際の条件としては、地表面位置に作用させる変位の刻み  $\Delta\delta=0.01\text{cm}$  とし、最終的な目標変位を50cmとして一方向に変位を作成させた。これによって得られた地表面変位  $\delta$  剛性低下率  $G/G_0$  関係、地表面変位  $\delta$  減衰  $h$  関係、地表面変位  $\delta$  刺激関数  $PF$  関係を図-5に示す。これを見ると地表面変位の増大に伴い剛性が低下し、減衰が増加している。一方で刺激関数は地表面変位の変化にそれほど影響を受けていないことが分かる。続いて、この結果を規準変位  $\delta$  で正規化した結果を図-6に示すとともに、等価1自由度モデルの非線形構成則にGHE-Sモデル、非線形パラメータとして表-1を用いることで得られる  $\delta\delta-G/G_0$  関係、  $\delta\delta-h$  関係も同図に示している。これより、今回設定した非線形パラメータを用いることで、地盤全体としての剛性低下、履歴減衰の増大を適切に表現できていることが分かる。

続いて、この等価1自由度モデルを用いた地盤応答解

析を実施することで、液状化の影響を無視した状態での地表面地震動を推定する。入力地震動は鉄道構造物の耐震設計に用いられているL2地震動スペクトル<sup>11)</sup>（図-7）を入力の最大加速度  $PBA$  が200galから1000galまで振幅調整して用いた。またこの入力地震動は基盤露頭波（2E波）として扱い、モデル下端にはダッシュポットを設けている。動的解析時の減衰は、地盤の初期固有周期で3%となるような剛性比例型減衰を設定した。

また、等価1自由度モデルによる応答評価の妥当性を確認するために、図-3の地盤をそのままモデル化した土柱モデル（詳細モデル）による応答評価も実施している。この時の砂質土層は水圧上昇の影響を無視しており、通常の全応力解析によって地表面応答を評価した。

以上の条件によって得られた地表面位置の応答波形を図-8に示す（上段：絶対加速度波形、中段：相対変位波形）。これらの結果を見ると、等価1自由度モデルによる地表面地震動は、詳細モデルによる評価結果と良好に一致していることが分かる。具体的には、地震動レベルが増大するにしたがって地盤非線形化の影響が顕著になり、加速度応答の低減、変位応答の増大、応答の長周期化等が生じているが、これらすべての傾向を適切に再現できていることが分かる。このような傾向は既往の検討<sup>12)</sup>においても確認されていることであるが、今回の結果によって、非液状化地盤を対象とした等価1自由度モ

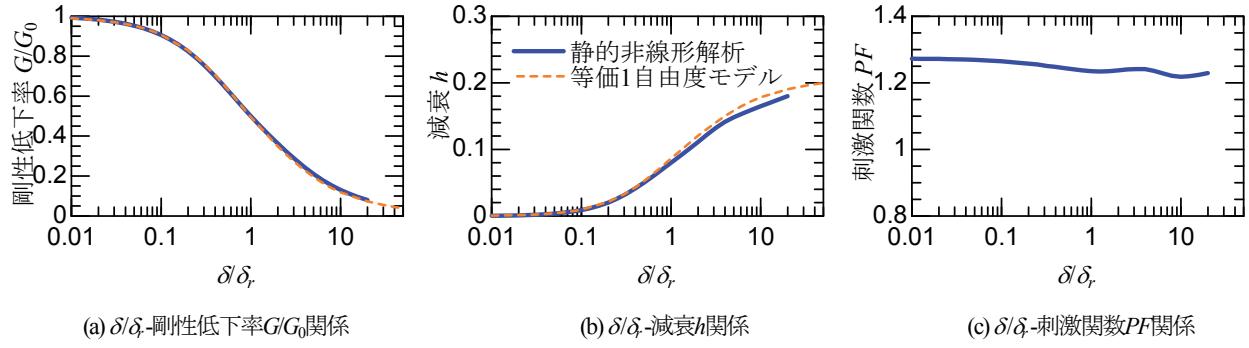


図-6 規準変位 $\delta_r$ で正規化した結果

表-1 等価1自由度モデルの非線形パラメータ

$\delta_r$ (cm)	$C_1(0)$	$C_2(0)$	$C_1(\infty)$	$C_2(\infty)$	$C_1(1)$	$C_2(1)$	$\kappa$	$h_{\max}$
2.43	1.00	1.00	0.15	2.50	0.87	1.15	1.3	0.21

ルによる応答評価の有効性が改めて確認された。

### (3) 強度変化率 $\beta(t)$ の算定

次に、上記(2)で得られた地盤の相対変位波形を対象に累積損傷度理論を適用することで、強度変化率 $\beta(t)$ を評価する。この時に用いる応答変位波形は、等価1自由度モデル、詳細モデルの両解析によって得られた地表面波形を用いることとし、地盤全体系の強度変化曲線は図-4の結果をそのまま用いることとした。これにより得られた結果を図-8の下段に示している。

この結果を見ると、地震動の繰り返し載荷に伴って $\beta(t)$ が徐々に低下していることが分かる。その傾向は入力地震動のレベルが大きなほど顕著であり、水圧上昇に伴って地盤全体としての強度が低下していることが想定される。また、等価1自由度モデルによる $\beta(t)$ の評価結果を詳細モデルによる結果と比較すると、時々刻々の強度低下の傾向、地震動レベルの変化に伴う顕著な強度低下の発生の傾向等は良好に一致していることが分かる。ただし、入力地震動の最大加速度 $PBA=500\text{gal}$ とした結果(図-8 (b))では最終的な強度変化率 $\beta(t)$ の評価結果に多少の差が見られる(等価1自由度モデル:  $\beta=0.38$ 、詳細モデル:  $\beta=0.70$ )。これは、図-4の地盤全体系の強度変化曲線を見ても分かる通り、強度変化率 $\beta$ が0.10~0.80程度の範囲では非常に近接しているために、等価1自由度モデルによる地表面地震動評価時の多少の差異が、最終的な強度変化率 $\beta$ に大きな影響を及ぼしたものと考えられる。ここで、既往の検討において、地表面地震動に大きな影響を及ぼす強度変化率の大きさとして $\beta=0.1$ を一つの指標として提案している<sup>15)</sup>が、 $PBA=500\text{gal}$ の結果では、詳細法、提案法とも $\beta=0.1$ を下回るほどの強度変化率とはなっていない。

以上の結果より、地盤全体系の強度変化曲線を用いた液状化評価を行う際の地表面地震動として、等価1自由

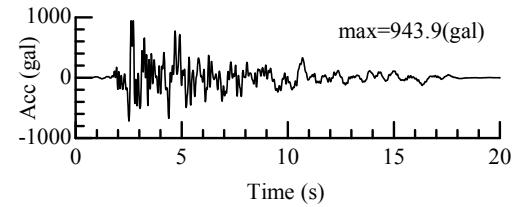


図-7 入力地震動の時刻歴波形<sup>1)</sup> (振幅調整前)

度モデルによる地表面地震動を用いたとして一定の精度を有していることが確認できた。

### (4) 水圧の影響を考慮した等価1自由度モデルの構築、地表面地震動の評価

上記(2)で構築した等価1自由度モデルに、上記(3)で得られた強度変化率 $\beta(t)$ を組み合わせることで、液状化時の応答評価を実施する。この時の解析条件としては、強度変化の影響を式(2)、式(3)で考慮する以外の部分は全て上記(2)と同様とした。ただし、正解値の位置づけとなる詳細モデルでは、各層の水圧上昇を考慮可能な形としている。

以上の条件によって得られた地表面位置の応答波形を図-9～図-12に示す(上段: 絶対加速度波形、中段: 相対変位波形)。これらの図にはいずれも水圧考慮の影響を把握するために、水圧の影響を無視した場合の地表面波形も重ね描いている。これらの結果を見ると、まず図-9の入力加速度 $PBA=200\text{gal}$ では、詳細モデル、等価1自由度モデルとも水圧の影響を無視した条件の応答とほぼ同一の応答となっている。これは図-8(a)下段の強度変化率を見ても分かる通り、この程度の地震動レベルでは水圧上昇がほとんど発生せず、水圧の考慮によらず地表面地震動に変動が見られなかったためである。

これに対して図-10～図-12では入力レベルの増大に伴

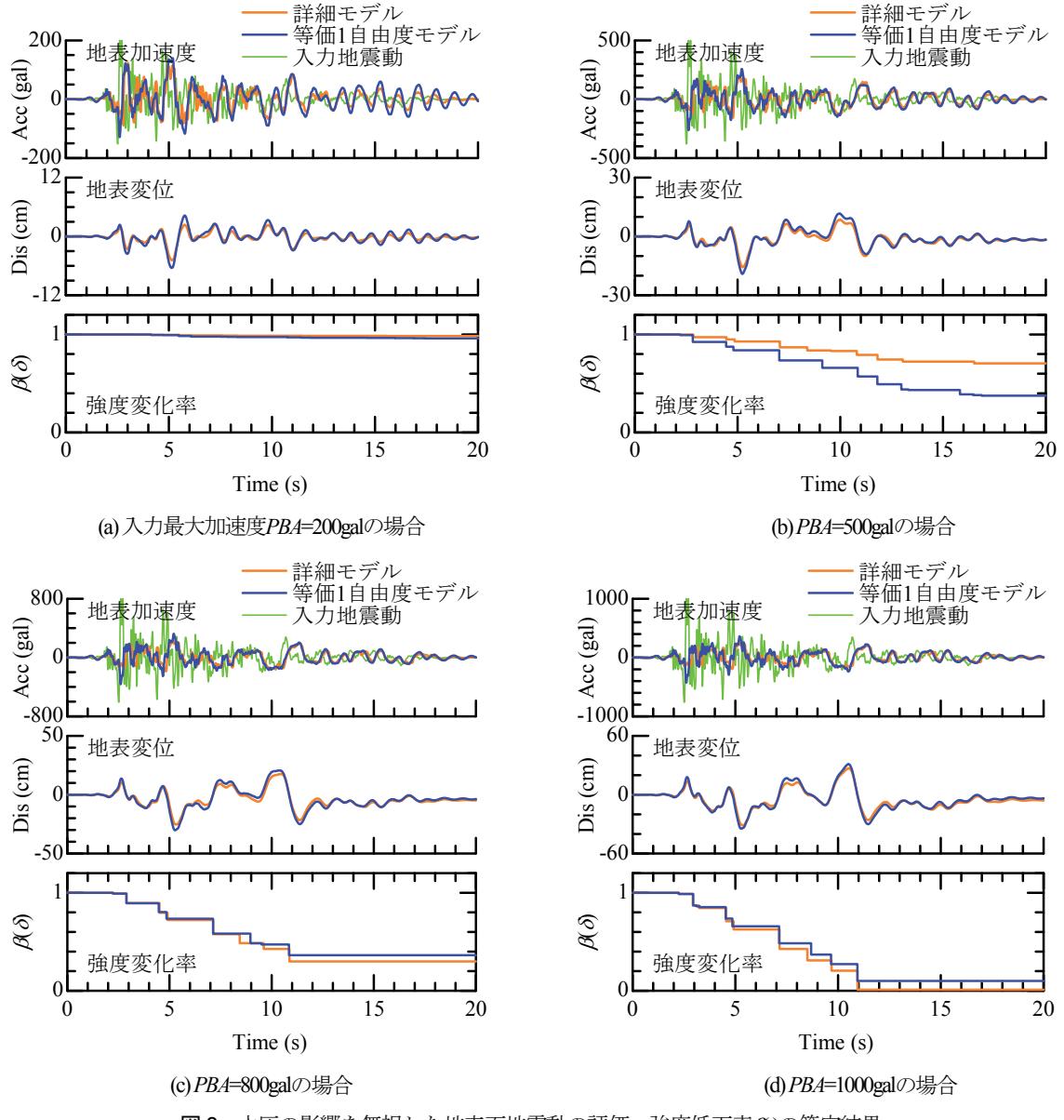


図-8 水圧の影響を無視した地表面地震動の評価、強度低下率 $\beta(t)$ の算定結果

った水圧の影響を考慮することによる地表面地震動の変化が顕著となっている。また当然のように地震動の繰り返しに伴って水圧が上昇するため、解析の初期段階では水圧考慮によらず概ね同様の応答となっているが、徐々に両者の応答に差が見られる。具体的には解析ステップが進むにつれて応答加速度の頭打ちの傾向、応答変位の増大、応答の長周期化といった液状化現象に見られる特徴が顕著になっている。このような傾向は詳細モデルだけでなく今回提案した等価1自由度モデルにも同様にみられており、今回的方法によって、時々刻々変化する地盤全体の強度低下を適切に表現できていると言える。ただし、提案手法を用いた場合の相対変位波形を見ると、入力レベルが大きくなるにしたがって、極端に大きな残留変位が発生しており、液状化の影響が顕著な場合の変位波形の予測といった観点での提案法の適用性について

は課題が残る結果となっている。

続いて、水圧の上昇が地上構造物に与える影響を簡易的に把握するために、各モデルによる地表面地震動波形を用いた弾性加速度応答スペクトルを算定するとともに、水圧考慮による影響 $R(t, h)$ を次式によって評価した。

$$R(t, h) = \frac{RA^L(t, h)}{RA^0(t, h)} \quad (4)$$

ここで、 $t$ ：固有周期(s)、 $h$ ：減衰定数（今回は0.05で固定）、 $RA(t, h)$ ：固有周期 $t$ (s)、減衰定数 $h$ の1自由度系の弾性加速度応答最大値、 $RA^L$ ：水圧の影響を考慮した条件での構造物応答、 $RA^0$ ：水圧の影響を無視した条件での構造物応答である。詳細モデルによる地表面地震動と等価1自由度モデルによる地表面地震動のそれぞれにおいて $R(t, h)$ を算出した結果を図-13に示す。まず、 $PBA=200\text{gal}$ とした場合は応答スペクトル比が概ね1.0とな

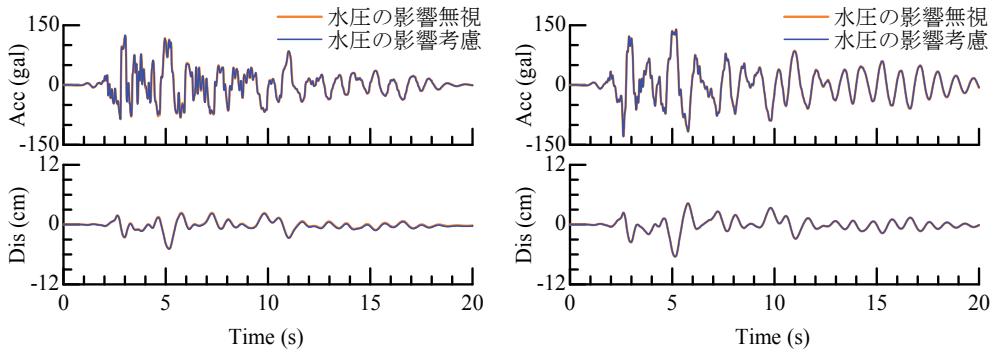


図-9 水圧の影響を考慮した地表面地震動の評価結果 ( $PBA=200\text{gal}$  の場合)

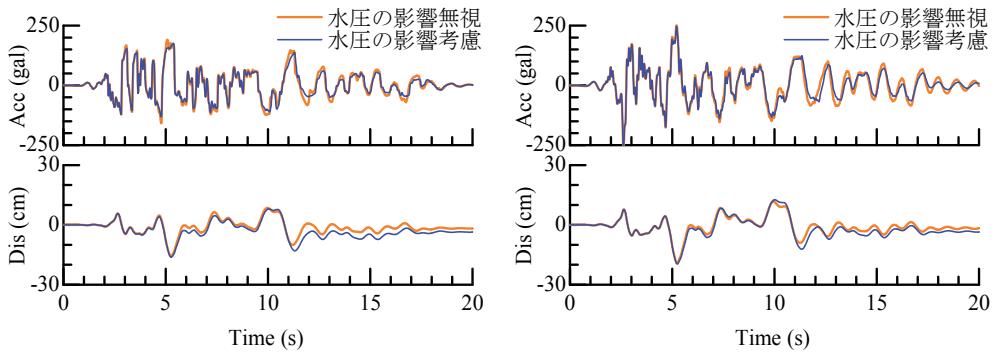


図-10 水圧の影響を考慮した地表面地震動の評価結果 ( $PBA=500\text{gal}$  の場合)

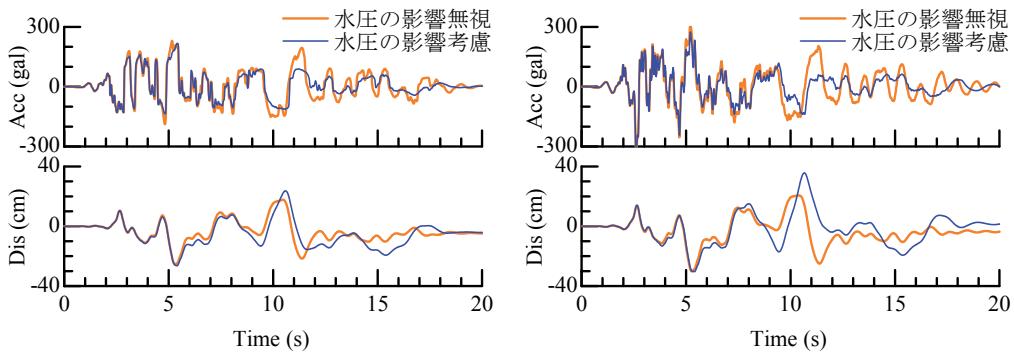


図-11 水圧の影響を考慮した地表面地震動の評価結果 ( $PBA=800\text{gal}$  の場合)

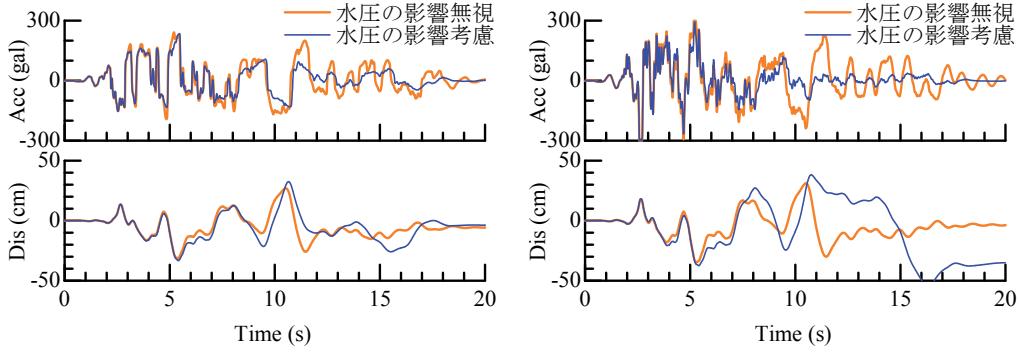


図-12 水圧の影響を考慮した地表面地震動の評価結果 ( $PBA=1000\text{gal}$  の場合)

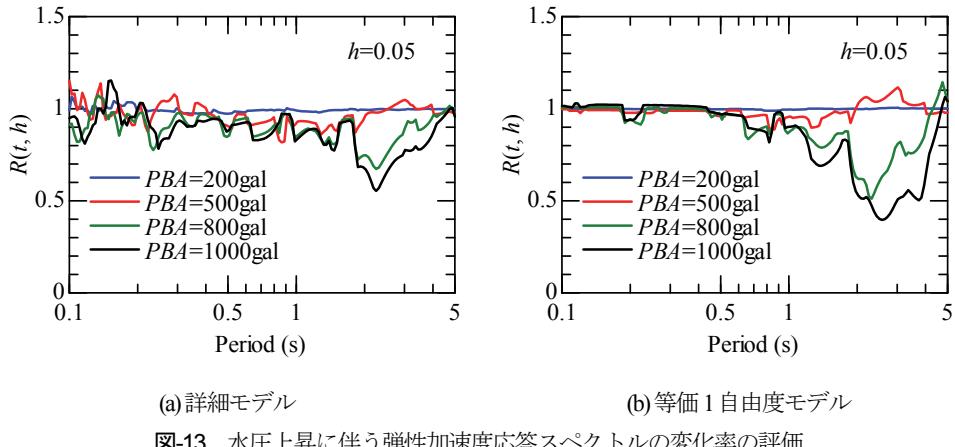


図-13 水圧上昇に伴う弾性加速度応答スペクトルの変化率の評価

っており、液状化の影響は提案法、詳細法とも見られない。これに対して地震動レベルが増大するにしたがって両手法とも応答スペクトル比に変化が見られる。特に水圧を考慮することによって周期1秒以上の応答が低減しているが、この傾向についても提案法、詳細法で同様にみられる。

以上の結果より、今回提案した等価1自由度モデルによる強度変化率の評価と、この時々刻々の強度変化を考慮した動的解析法は、液状化地盤を対象とした簡易な地表面地震動の評価手法として有効であると言える。

#### 4.まとめ

本検討では、等価1自由度モデルを用いた液状化地盤の簡易挙動評手法の提案を行った。具体的には、水圧の影響を無視した等価1自由度モデルによる応答評価を実施するとともに、これと地盤全体系の強度変化曲線を組み合わせた液状化判定を行うことで、時々刻々の強度変化 $\alpha(t)$ を評価する。この $\alpha(t)$ を地盤の等価1自由度モデルに導入することで、水圧上昇に伴う地盤性状の変化を時々刻々考慮した上で応答評価を可能とした。

提案手法の有効性を確認するために、サンプル地盤を対象として詳細な有効応力解析の結果との比較を実施した。その結果、入力レベルの増大に伴う強度低下の傾向や地表面地震動の変化の傾向を適切に表現できており、提案手法は簡易な液状化時の動的解析法として有効であると考えられる。

本手法の特長としては、地盤全体系の荷重一変位関係と強度低下曲線が存在すれば、(1) 等価1自由度モデルによる全応力解析、(2) 累積損傷度法を用いた強度低下の算定、(3) 強度低下を考慮した等価1自由度モデルによる動的解析、という手順により非液状化時の地表面地震動、液状化時の強度低下程度、液状化時の地表面地震動を簡

易に評価可能である点が挙げられる。つまり、等価1自由度モデルによる動的解析を2度実施することで、水圧の影響を無視した場合、考慮した場合の地表面地震動が算定されるため、例えば鉄道橋梁・高架橋の耐震設計で必要な地震作用<sup>10</sup>を評価可能となり、設計実務における地点ごとの簡易な地震動評価手法として活用が期待される。さらに本手法では、地震動の繰り返し載荷に伴う時々刻々の水圧の変化を適切に考慮することが可能であるため、従来の等価線形解析による簡易液状化解析法と比較して適用性が拡大しているとともに、詳細な有効応力解析の結果とも調和的な地表面地震動を算定可能である。

#### 参考文献

- 1) (公財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 2012.
- 2) Seed, H. B. and I. M. Idriss: Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol.97, No.9, pp.1249-1273, 1971.
- 3) 岩崎敏男, 龍岡文夫, 常田賢一, 安田進：砂質地盤の地震時流動化の簡易判定法と適用例, 第5回日本地震工学シンポジウム講演集, pp.641-648, 1978.
- 4) Analysis of Soil Deposits with Energy Transmitting Boundary Including Assessment of Liquefaction Potential, The University of British Columbia, Faculty of Applied Science, 1978.
- 5) 東畑郁生, 吉田望 : YUSAYUSA-2, 理論と使用法, 佐藤工業(株), 1991.
- 6) Iai, S.: A strain space multiple mechanism model for cyclic behavior of sand and its application, Earthquake Engineering Research Note No. 43, Port and Harbor Research Institute, Ministry of Transport, Japan, 1991.
- 7) 福武毅芳：土の多方向繰り返せん断特性を考慮した地盤・構造物系の三次元液状化解析に関する研究, 名古屋工業大学学位申請論文, 1997.
- 8) 星谷勝, 斎藤悦郎 : 液状化を伴う地盤の等価線形化, 土木学会論文報告集, No.340, pp.59-65, 1983.
- 9) 池田隆明, 森伸一郎, 三輪滋, 西川純一, 林宏親, 谷口啓二郎 : 液状化アレー観測記録に対する等価線

- 形法の適用性, 地震工学研究発表会講演論文集, Vol.24, pp.125-128, 1997.
- 10) 宇高竹和, 内田治, 田中典明, 佐藤博: 多重等価線形解析による液状化解析手法の提案, 土と基礎, Vol.48, No.8, pp.5-8, 2000.
  - 11) 小林素直, 林康裕, 新井洋: 1次元等価線形解析による簡易液状化解析法の提案, 日本建築学会技術報告集, Vol.21, No.48, pp.563-568, 2015.
  - 12) 坂井公俊, 室野剛隆: 地盤の等価 1 自由度モデルを用いた非線形動的解析法の提案, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.71, No.3, pp.341-351, 2015.
  - 13) 坂井公俊, 井澤淳, 室野剛隆, 日野篤志: 地盤全体系の強度指標の提案とその簡易推定法に関する検討, 日本地震工学会論文集, Vol.15, No.7, pp.22-33, 2015.
  - 14) 坂井公俊, 井澤淳, 室野剛隆: 地盤全体系の強度と固有周期を用いた耐震設計のための地盤分類法, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.73, No.2, pp.433-442, 2017.
  - 15) 坂井公俊, 小島謙一: 地盤全体系の強度低下を指標とした液状化判定法の提案, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 投稿中.
  - 16) Tatsuoka, F. and Shibuya, S.: Deformation characteristics of soils and rocks from field and laboratory tests, *Proc. 9th Asian Regional Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.2, pp.101-170, 1992.
  - 17) 室野剛隆, 野上雄太: S 字型の履歴曲線の形状を考慮した土の応力～ひずみ関係, 第 12 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.494-497, 2006.
  - 18) 安田進, 山口勇: 種々の不搅乱土における動的変形特性, 第 20 回土質工学研究発表会講演集, pp.539-542, 1985.
  - 19) 野上雄太, 室野剛隆: S 字型履歴曲線を有する土の非線形モデルとその標準パラメータの設定, 第 30 回土木学会地震工学研究発表会論文集, 論文 No.2-0014, 2009.

## NONLINEAR DYNAMIC ANALYSIS METHOD OF LIQUEFIED GROUND BY EQUIVALENT SINGLE DEGREE OF FREEDOM MODEL AND ASSESSING METHOD OF LIQUEFACTION POTENTIAL

Kimitoshi SAKAI and Kenichi KOJIMA

In this paper, the nonlinear dynamic analysis method of liquefied ground by equivalent single degree of freedom model was proposed. First, time history of the strength change of the whole ground were calculated by using the liquefaction strength curve of whole ground and cumulative damage rule. Second, by introducing this strength change into the equivalent single degree of freedom model, it is possible to easily calculate the ground response directly considering its nonlinear behaviors such as strength reduction and elongation of natural period due to liquefaction. It was verified through numerical simulations that the ground response evaluated using the proposed method generally agreed with that obtained by the effective stress analysis method. The proposed method is advantageous over other methods that only three parameters are necessary for calculation; natural period of ground, the strength of whole ground and the strength change curve of ground. These parameters can be easily evaluated from the soil boring log. The proposed method is effective as a simple evaluation method of earthquake motion in liquefied ground.