

液状化過程の地盤震動に及ぼす入力地震動とRayleigh減衰の影響

Effect of Input Earthquake Motion and Rayleigh Damping on Ground Shaking in Liquefaction Process

中村 晋*・吉田 望**

Susumu NAKAMURA and Nozomu YOSHIDA

*正会員 工博 日本大学助教授 工学部土木工学科(〒963-8642 郡山市田村町徳定字中河原1)

**正会員 工博 佐藤工業主席研究員 中央技術研究所(〒103-8639 東京都中央区日本橋本町4-11-20)

This paper presents several indices to evaluate the behavior of ground that are going to liquefy by using the behavior of Port Island during the 1995 Hyogoken-nambu earthquake. Waves were separated into narrow frequency range by means of wavelet transform in order to discuss the behavior with respect to frequency. An amplification factor differentiated by a wave velocity is found to be a good index to evaluate an important frequency range for the nonlinear behavior of individual layers. A product of an peak acceleration and peak velocity is proposed to be a good index of the ground motion in order to evaluate the behavior on the process to liquefaction. The importance of Rayleigh damping on evaluating the behavior of ground on the process to liquefaction is pointed out because higher frequency response suppressed very much by Rayleigh damping.

Key Words: Liquefaction, Ground Shaking, Input Earthquake Motion, Rayleigh Damping

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震以降、各種構造物の耐震設計法は、二段階設計法の導入や動的解析の活用など大幅な見直しが実施された¹⁾。ここで、レベル2地震動に対する耐震設計、特に、飽和砂質地盤を支持地盤とする構造物の耐震設計では、有効応力解析などの動的解析を用い液状化の発生や変形挙動を推定することも必要となっている。有効応力解析は、液状化過程を評価するための地盤材料の構成モデルの改良、さらにそれらを組み込んだ解析コードを用いた液状化挙動解析への適用などにより、ある程度実用のレベルに達している²⁾。

一方、設計という観点では、従来液状化対策を実施するか否かを判断するための発生予測が液状化過程の主要な評価対象であった。設計法の見直しにより液状化後の構造物の性能を評価することも必要となり、有効応力解析などの動的解析には結果に対する精度も要求されるようになっていく。その精度には地盤材料の構成則、数値解析の手法、運動方程式中の減衰項などが影響を及ぼすものの、地盤の震動過程が適切に評価されることがその保証の前提となる。解析手法や構成則については、解析結果と地震観測記録³⁾や振動実験⁴⁾との比較に基づき検証が試みられている。しかし、液状化過程における地盤震動や減衰項の影響については、解析結果または実挙動そのものに内在していることから、精度保証の陽な因子として意識されていなかった。その2つの因子は、有効応力解析による精度を保証する上で他の因子と同様に重要であることはいうまでもないことである。その2つの因子の

影響を明らかにするために必要なデータ、例えば高密度の鉛直アレー観測記録の様な詳細な地盤震動に関する記録は得られていない。しかし、これまでに十分議論されていない液状化過程での地盤震動の変化性状、それに及ぼす入力地震動の周波数特性の影響という地盤震動の基本的性質を有効応力解析に基づいて評価することは有用であると考えられる。ただし、その解析には、実被害や地震観測記録などとの比較に基づく従来の分析により地盤構造や地盤材料の構成則の有意性が確認されているモデルを用いることが前提となる。

地盤の震動性状は地盤と入力地震動の両者の周波数特性の相対関係に依存するということが、振動の基本事項として認識されている。しかし、周波数特性とは周波数ごとに地震動の振幅レベルが異なるという性質の包括的表現であり、単一の評価指標で表すことは困難である。このことから、入力地震動の大きさの程度を表すために最大加速度や速度の様な最大振幅、またはSI値のようなある周波数帯における平均応答速度を表す指標が用いられてきた。さらに、地震動特性の評価は応答と関連づける試み⁵⁾を通じて行われているが、震動の増幅に伴う非線形挙動の影響が含まれる応答と入力地震動との間には強い非線形関係が生じることになる。このことが、地盤の強非線形挙動を支配する地震動特性の評価を困難にしている要因の一つであり、応答との関連と異なる視点でその特性因子を評価することが重要であると考えられる。

有効応力解析などの地盤の震動解析に用いる解析手法において、運動方程式中の減衰項は一般にRayleigh減衰が用いられ、解析上の安定および初期減衰特性の付与とい

表-1 解析に用いた基本的地盤構造および地盤物性

No.	層厚 (m)	土質	微小ひずみ時のせん断剛性 (Pa)	強度定数 (C(Pa), ϕ)	単位体積重量 (kN/m^3)
1	3	埋立て土	$G_m = 100\sigma_m^{0.5}$	$\phi = 25.5^\circ$	17.3
2	15				20.4
3	10	沖積粘性土	$G_m = 44.8\sigma_m^{0.5}$	$C = 0.72 \log G_m - 2.56$	17.3
4	4.4	沖積砂礫	$G_m = 83.1\sigma_m^{0.5}$	$\phi = 32.3^\circ$	20.4

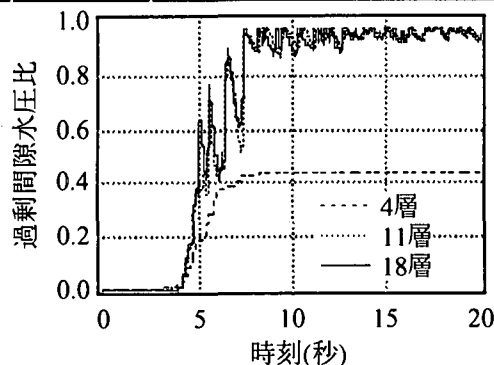


図-1 各層の過剰間隙水圧時刻歴

う観点でそのパラメーターが設定される。しかし、液状化の様な強度低下を伴う強非線形応答に及ぼす影響については明確となっていない。このことは、その減衰パラメーターの有意性が検証されていない地盤で実施された有効応力解析の解析結果の有意性は保証されていないことを意味する。

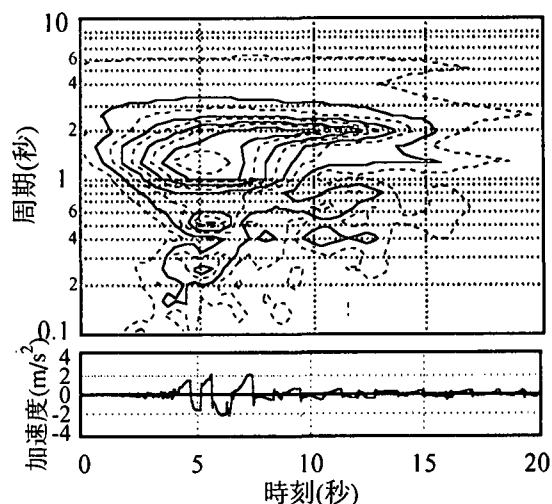
ここでは、地盤の液状化過程に及ぼす入力地震動の周波数特性の影響、さらに地盤の液状化解析に及ぼすRayleigh減衰の影響を明らかにすることを目的とし、まず、有効応力解析に基づき液状化過程における地盤の震動性状を示す。次に、地盤の液状化過程のうち非線形化に及ぼす入力地震動の周波数帯域の評価手法を示す。さらに、ウェーブレット変換・逆変換を用い周波数帯域ごとに分離された入力地震動を用い、地盤の液状化に至る過程と周波数特性、さらにその過程を評価するための地震動因子について検討を行う。その際、入力地震動の特性を表す因子として、最大加速度と最大速度の積で表されるエネルギー的な指標を提案し、その有意性を示す。最後に、Rayleigh減衰の設定に応じ有効応力解析による応答解析結果が異なることとその要因を明らかにする。

2. 液状化過程における地盤の震動性状

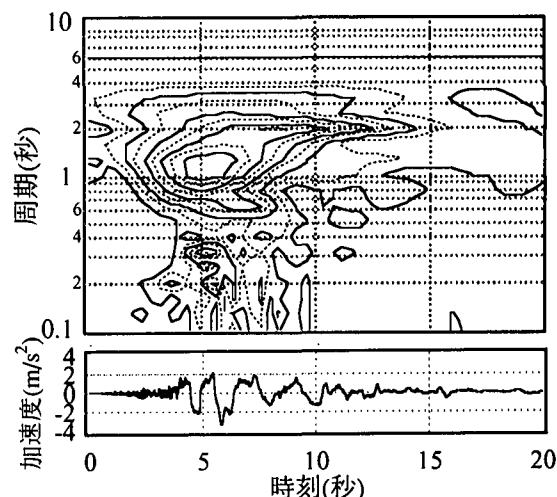
2.1 解析地盤モデル及び条件

解析の対象とする地盤は、1995年兵庫県南部地震において、液状化による著しい被害を受けたポートアイランドにおいて地震観測記録の得られた地盤である。

ここで用いる解析上の地盤構造および地盤物性モデルは、すべて吉田ら⁶⁾によりその有意性が示された地表から



a) 観測記録



b) 解析結果

図-2 地表面における地震観測記録及び解析結果の非常スペクトル

沖積砂礫地盤内の地震計設置位置 (GL-32.4m) までのモデルである。対象地盤の地層は水平成層構造を有し、その構成は液状化の対象となる埋立て土層 (マサ土) がGL-3mから18m、その下に沖積粘性土、沖積砂礫層と続いているとした。それら地層の基本的な動的地盤物性を表-1に示す。有効応力解析には解析コードYUSAYUSA2⁷⁾、地盤材料の非線形特性には双曲線モデルを用いた。Rayleigh減衰のパラメーターは初期地盤モデルの1次モード (周波数: 1.64Hz) の減衰定数が2%となるように設定した。

2.2 地盤の震動性状

図-1に示す液状化対象層の最表層 (4層: GL-3~4m)、中間層 (11層: GL-10~11m) および最下層 (18層: GL-17.2~18m) の過剰間隙水圧比の時刻歴から、対象地盤では約4秒より過剰間隙水圧が発生し、約7秒にて最表層 (4層) を除き液状化に至った。

液状化過程における地盤の震動性状を把握するため、まず、地表面における観測記録及び有効応力解析により得られた応答加速度の非常スペクトルを図-2と比較する。ここで、非常スペクトルは神山による手法⁸⁾により

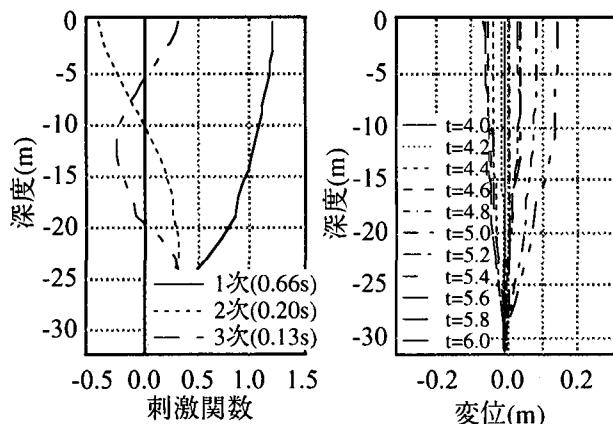


図-3 固有値解析および有効応力解析による
過剰間隙水圧発生直後の変位分布の比較

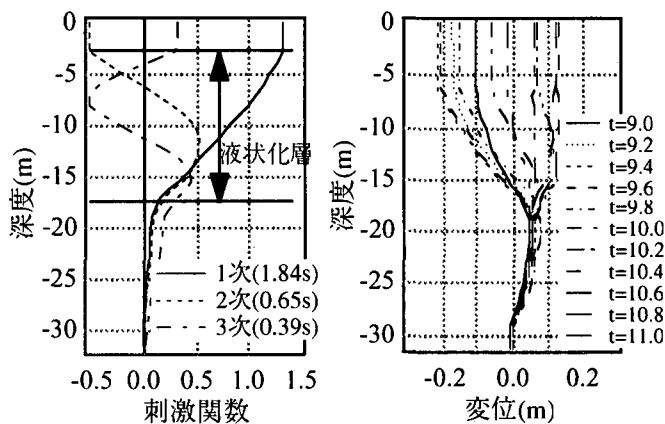


図-4 固有値解析および有効応力解析による
液状化時変位分布の比較

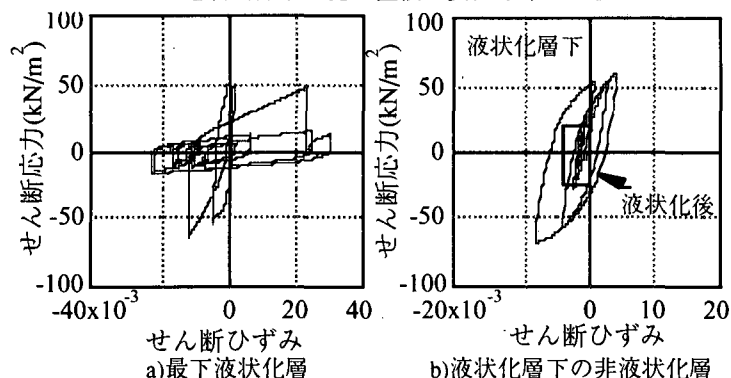


図-5 応力-ひずみ関係の比較

算出した。地震観測記録より、時刻4から5秒より7秒にかけて、過剰間隙水圧の発生、言い換えれば地盤の非線形化に起因し、周期1.2秒近傍の成分が周期2.0秒近傍へ移動し、その後、その成分(2.0秒)の卓越した震動を示している。この傾向は解析結果も同様であることが分かる。

次に、液状化過程における地盤の深度方向の震動性状を把握するため、まず初期地盤モデルを対象とした固有値解析(非減衰)により得られた1から3次モードまでの刺激関数の深度分布と、有効応力解析により得られた応答変位の深度分布のうち、過剰間隙水圧の発生直後2秒間の変位分布の経時変化を合わせて図-3に示す。これより、液状化に至る過程では、概ね初期の1次モードの刺激関数と同様の変位分布を示していることが分かる。次に、液状化対象層が全層液状化することにより剛性が一様に初期剛性の1/30程度に低下したと仮定し、その地盤モデルの固有値解析(非減衰)より得られた1から3次モードまでの刺激関数の深度分布と、液状化時(9秒から11秒)における変位分布の経時変化を合わせて図-4に示す。これより、液状化が発生すると、その層以深の非液状化層の変位応答は著しく低下し、液状化層下端を基準面とする1次モードの変位分布を示していることが分かる。その様な振動性状の変化のうち、刺激関数の変化は液状化対象層とその下層との剛性比の著しい低下に起因し、全体の変形に占める非液状化層の変形の割合が低下したことにより生じている。解析結果では、液状化層の変形は、その層の剛性低下とそれに起因する固有周期の長周期化による入

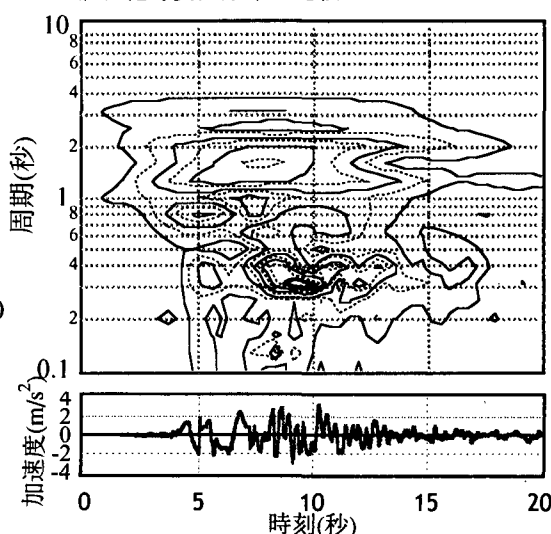


図-6 液状化層最下面上の加速度応答時刻歴の
非定常スペクトル

力地震動の卓越周期成分との対応により増大している。一方、図-5に示した最下液状化層とその直下の非液状化層における応力-ひずみ関係を比較すると、液状化層の下層では、液状化層の強度低下による発生応力の低下により応力の連続条件を満足するよう応答応力の低下をもたらしている。その結果、液状化層下の応答ひずみ、言い換えれば変形が著しく低下し、図-4に示した様に液状化層下の変形の経時変化が小さいという状態に至ったものと考えられる。さらに、図-6に示した液状化層下面における応答加速度の非定常スペクトルより、液状化後に認められる周期0.3秒の卓越成分が図-2に示した地表面の非定常スペクトルには存在していないことから、その周期成分を含み液状化層の振動に寄与しない成分は液状化層で急激に減衰したことを示している。

3. 液状化過程の地盤震動に影響を及ぼす入力地震動の特性

3.1 地盤材料の非線形化に影響を及ぼす入力地震動の周波数特性

地盤の液状化には地盤材料が弾性状態から非線形状態

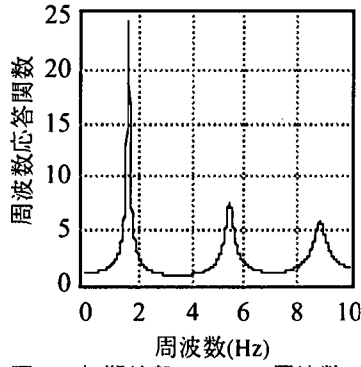


図-7 初期地盤モデルの周波数
応答関数

に推移する、つまり地盤材料の非線形化の発生を前提とし、それが発展することが必要となる。ここで、地層各位置の非線形化は地盤の振動モード、つまり地盤の周波数応答特性と入力地震動の周波数特性の係に支配される。このことから、各層の非線形化が地盤の周波数応答特性に影響を及ぼす周波数帯域を把握できれば、それはその層の非線形化に影響を及ぼす入力地震動の周波数帯域ということが出来る。

本論では、ある層の非線形化の影響を、式(1)に示すS波重複反射理論に基づく地盤の周波数応答関数 $U(\omega, V_1, \dots, V_i, \dots, V_n)$ を対象層のせん断波速度 V_i で偏微分することにより得られた非線形化影響関数 $DU_i(\omega)$ により評価する。この関数は、沢田⁹⁾によるある層のせん断波速度の変化に応じた周波数応答関数の変化量を表す影響度係数うち、せん断波速度に依存しない変化率を表す偏導関数に着目したものである。その関数は、ある層のせん断波速度の変化をその層の非線形化と見なし、それによる地表と基盤間の地盤の周波数応答関数の変化率を示している。その値の大きな周波数帯は、その周波数帯における振動モードおよび入力地震動がその層の非線形化に影響を及ぼすことを示す。ここで、 ω は円振動数を表す。

$$DU_i(\omega) = \left| \frac{\partial U(\omega, V_1, \dots, V_i, \dots, V_n)}{\partial V_i} \right| = \left| \frac{\partial}{\partial V_i} \left(\frac{1}{|R(1,1)|} \right) \right| \quad (1)$$

ここで、式(1)中の $[R]$ は式(2)に示す様に層マトリックス $[S]_i$ の積である。また、 k_i は i 層の波数 ($=\omega/V_i$)、 G はせん断弾性、 h_i は i 層の層厚を表す。

$$[R] = [S]_n \cdots [S]_i \cdots [S]_1 \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} S(1,1)_i &= 0.5 \{ \exp(ik_i h_i) + \exp(-ik_i h_i) \} \\ S(1,2)_i &= 0.5 \left\{ \frac{i(-\exp(ik_i h_i) + \exp(-ik_i h_i))}{G_i k_i} \right\} \\ S(2,1)_i &= 0.5 \{ i G_i k_i (\exp(ik_i h_i) + \exp(-ik_i h_i)) \} \\ S(2,2)_i &= 0.5 \{ \exp(ik_i h_i) + \exp(-ik_i h_i) \} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

非線形化の発生に影響を及ぼす入力地震動の周波数帯に着目すると、式(1)において偏微分の対象となる周波数応答関数は、表-1に示した初期地盤モデルより得られ、図-7に示すとおりとなる。図より、1から3次固有周波数は

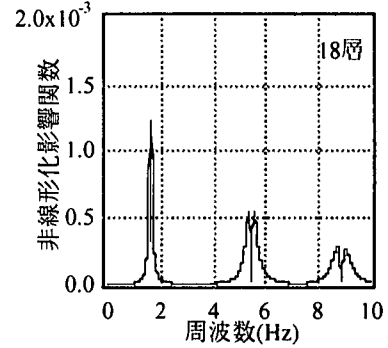
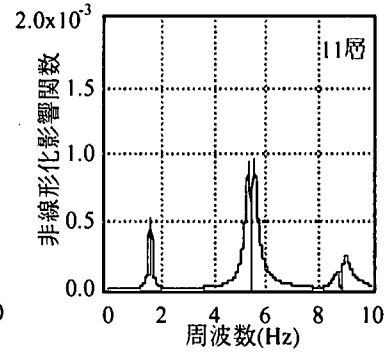
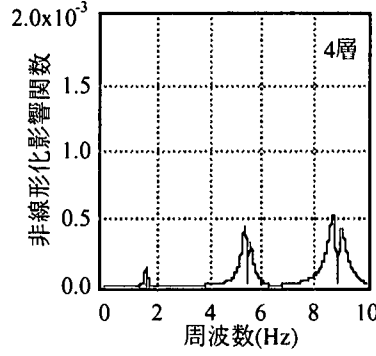


図-8 各層の非線形化影響関数

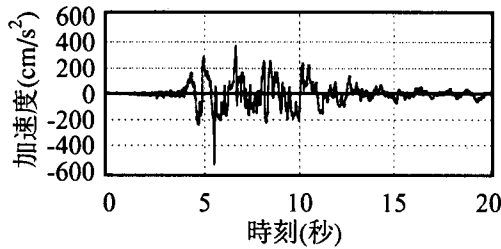
1.63, 5.45, 8.87Hzとなっている。次に、非線形化影響関数を液状化層の上、中、下層(4, 11, 18層)を対象とし算出し、図-8に示す。これより、各層の非線形化の発生に影響を及ぼす入力地震動の周波数帯のうち、最も影響の大きい周波数は液状化層上層にて8.87Hz、次いで5.45Hz、中層にて5.45Hz、下層にて1.63Hzとなっている。これらの周波数はいずれも地盤の固有周波数に対応し、上層から下層に対象モードが低次化していることが分かる。

3.2 ウェーブレット変換に基づく液状化過程に及ぼす 入力地震動の周波数特性の影響

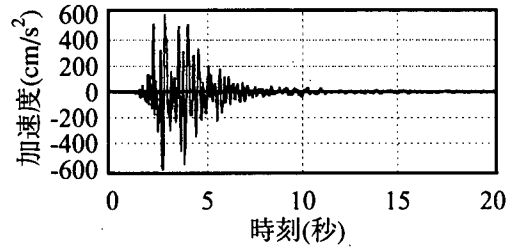
入力地震動の周波数特性が液状化過程に及ぼす影響を把握するため、まず、離散化ウェーブレット変換および逆変換¹⁰⁾を用い、入力地震動として用いる加速度時刻歴 $x(t)$ を対象とするサポート区間の成分波 $x(t)_j$ に分解する。ここで、加速度時刻歴のウェーブレット変換は式(4)、各サポート区間の成分波 $x(t)_j$ は式(5)の逆変換により得られる。ここで、 $\alpha_{j,k}$ はウェーブレット係数、 j は対象とする周波数サポート区間の次数、 $N (=2^M)$ は時刻歴データ数、 j は0から $M-1$ である。対象とする j 次サポート区間の周波数帯域は式(6)より得られ、 T は継続時間 (秒) である。また、式(7)中の φ は周波数、時間領域で局在する基底、つまりアナライジングウェーブレットであり、ここではMeyer¹¹⁾のアナライジングウェーブレットを用いた。

$$a_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_{j,k}^*(t) \bullet x(t) dt \quad (4)$$

$$x_j(t) = \sum_k a_{j,k} \bullet \varphi_{j,k}(t) \quad (5)$$



a)ポートアイランド地中地震観測波(NS成分)



b)岩手県内陸北部地震による地表観測波

図-9 入力地震動の加速度時刻歴の比較

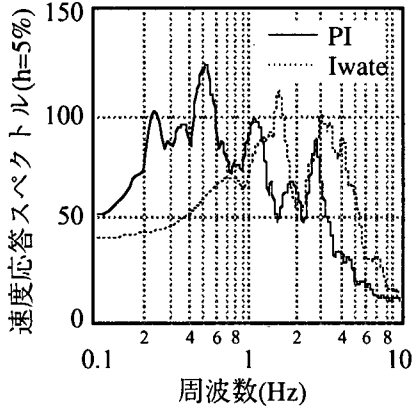


図-10 速度応答スペクトルの比較

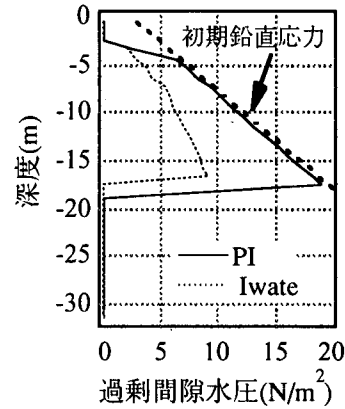


図-11 最大過剰間隙水圧の深度分布

$$\frac{2^j}{3T} \leq f \leq \frac{2^{j+2}}{3T} \quad (6)$$

$$\varphi_{j,k}(t) = \frac{2^{j/2}}{\sqrt{T}} \varphi\left(\frac{2^j t}{T} - k\right) \quad (7)$$

対象とするサポート区間は、3次 ($j=3$; 0.13-0.531Hz) から8次 ($j=8$; 4.27-17.07Hz) の加速度時刻歴を入力地震動とした。 $j=5, 7, 8$ はそれぞれ概ね対象地盤の1, 2, 3次固有周波数近傍の帯域を有意に含む次数である。

ここでは、入力地震動の差異、特に周波数特性の差異が、地盤の液化化過程に及ぼす影響を把握するため、兵庫県南部地震により観測された記録に加え、1998年岩手県内陸北部地震により震度6弱を記録した震源近傍での観測記録も入力地震動として用いた。それらの加速度時刻歴を図-9、速度応答スペクトル($h=5\%$)を図-10、さらに両地震動に対する有効応力解析により得られた過剰間隙水圧の深度分布を図-11に示す。1998年岩手県内陸北部地震の記録は兵庫県南部地震による記録に比べ高周波数成分(1.7また3Hz近傍)が卓越し、地盤は液化化していない。これら2つの入力地震動に対して先に示した離散化ウェーブレット変換及び逆変換により得られた6種類の周波数帯域の入力地震動の最大加速度および最大速度を変化させながら有効応力解析を実施した。ここで、最大加速度は0.2m/s²間隔での増加を基本とし、液化化発生時近傍では0.1m/s²間隔で変化させた。また、最大速度は、分離された各次の原加速度波形を数値積分することにより得られた速度の最大値と最大加速度の比を各加速度に乘じることに求めた。地盤の非線形化の尺度として過剰間隙水圧比(過剰間隙水圧と初期鉛直有効応力との比)に着目し、液化化対象層の上(4層)、中(11層)及び下層(18層)における入力地震動の最大加速度と最大速度との関係を図-12、13に

示す。図中●は抽出された周波数帯毎の原入力加速度波形に対する応答を示す。さらに、入力地震動の最大加速度と最大速度を乗じた指標と過剰間隙水圧比の関係も合わせて図-14に示す。その指標の物理的意味は以下のとおりである。まず、地震動の運動エネルギーは式(8)に示すように速度Vの二乗に質量を乗じたものとして表される。ここで、mは質量、Cは波動伝播速度、 Δt は伝播時間を表す。その最大値について変形すると、最大運動エネルギーは式(9)の様に最大加速度と最大速度と地震動の中心周期 T_{av} ¹²⁾および質量の積、言い換えれば地震動の最大値指標(最大加速度と最大速度の積)と周波数特性指標(中心周期)に分離されることを示している。ここで用いた最大加速度と最大速度との積は地震動の最大運動エネルギーと関連のある地震動の最大値指標を意味している。

$$E = \frac{1}{2}(\rho \cdot C \cdot \Delta t) \cdot V^2 = \frac{1}{2} m \cdot V^2 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} E_{\max} &= \frac{1}{2} m V_{\max}^2 = \frac{1}{2} m \cdot A_{\max} \cdot V_{\max} \frac{V_{\max}}{A_{\max}} \\ &= \frac{1}{4\pi} m \cdot A_{\max} \cdot V_{\max} \cdot (2\pi \frac{V_{\max}}{A_{\max}}) \\ &= \frac{1}{4\pi} m \cdot A_{\max} \cdot V_{\max} \cdot T_{av} \end{aligned} \quad (9)$$

まず、入力地震動の最大加速度と過剰間隙水圧比の関係についてみると、最大加速度が1.0m/s²までは、地層位置によらず $j=5$ に対する過剰間隙水圧の発生量が他の入力より大きく、それ以上の入力レベルに対しては $j=4$ の入力に対して過剰間隙水圧が急増するという傾向を示している。過剰間隙水圧がほぼ1.0つまり液化化に至る入力レベ

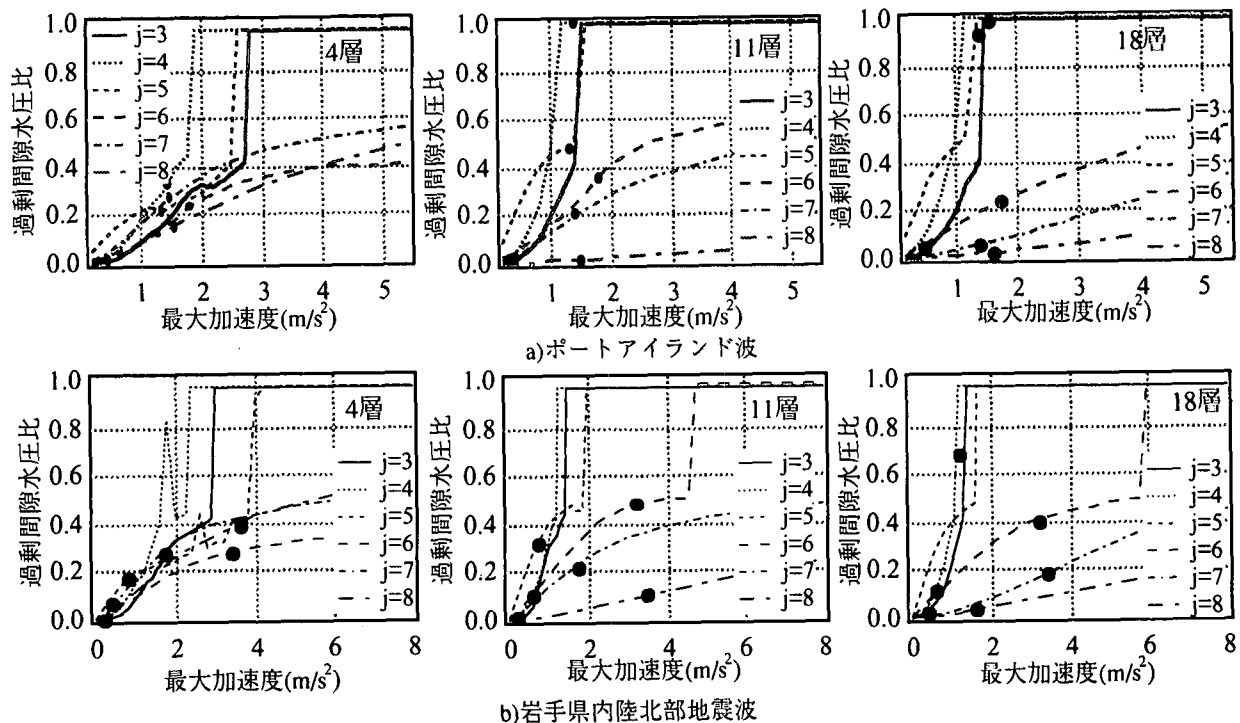


図-12 入力地震動の最大加速度と過剰間隙水圧比の関係

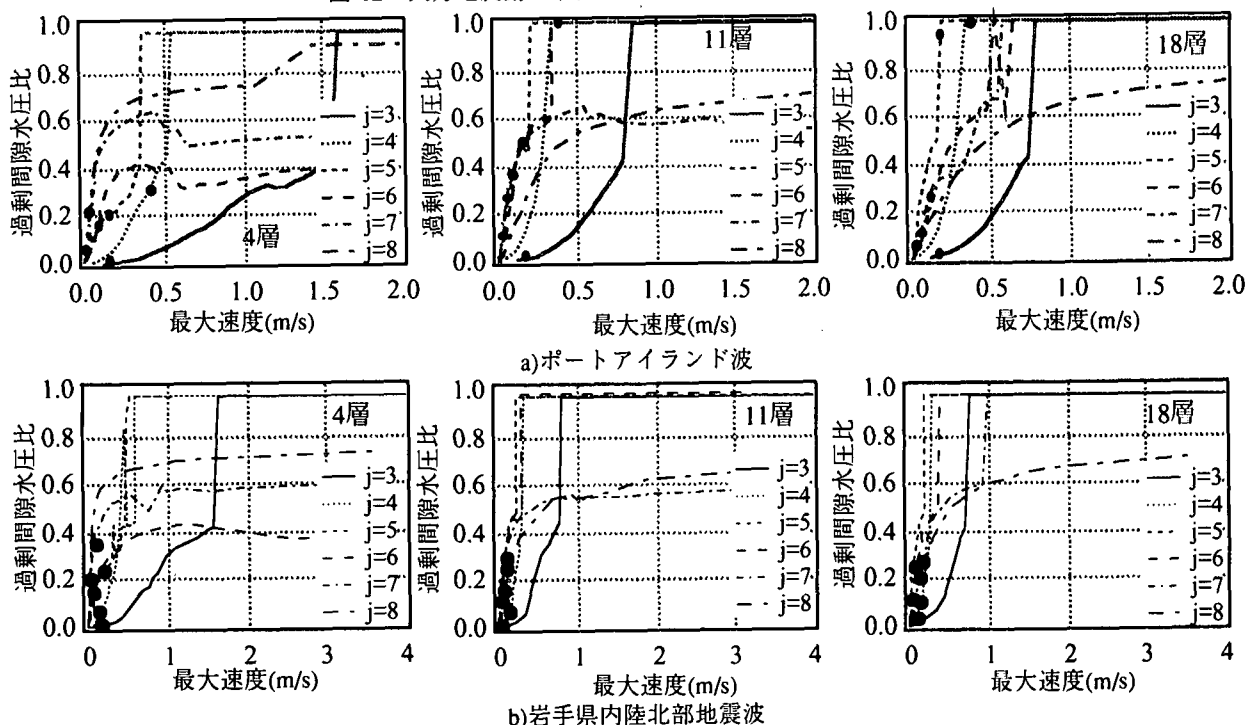


図-13 入力地震動の最大速度と過剰間隙水圧比の関係

ルは地層位置によって異なるものの、ほぼ $j=4$, $j=5$, $j=3$ の順になっている。この傾向は2つの入力地震動に対して共通している。一方、入力地震動の最大速度についてみると、最大速度が0.2から0.4m/s程度までの過剰間隙水圧の発生過程では、4層では入力 $j=7$ と8、11層では $j=5$ と7、18層では $j=5$ の入力に対する過剰関係水圧の発生量が他の入力より大きな値となっている。このことは、図-8の非線形化影響関数で示された非線形化に影響を及ぼす入力の周波数帯域と過剰間隙水圧の発生量の大きくなる入力地震動の周波数帯が良く対応していることを示して

いる。液状化の発生という観点では、いずれの地層も共通に初期地盤モデルの1次固有周波数より低周波数成分を含む入力 $j=5$, $j=4$ の順に液状化に至っている。11層、18層ではそれら入力について、それより高次、また低次周波数の入力に対して液状化が発生している。これらの傾向は、最大加速度と同様に入力地震動によらず共通している。次に、入力地震動の最大値指標についてみると、過剰間隙水圧の発生過程では、入力地震動によらず最大速度と同様の傾向を示している。また、液状化に至るレベルでは両地震動とも、まず $j=4$, 5にてほぼ同程度のレベ

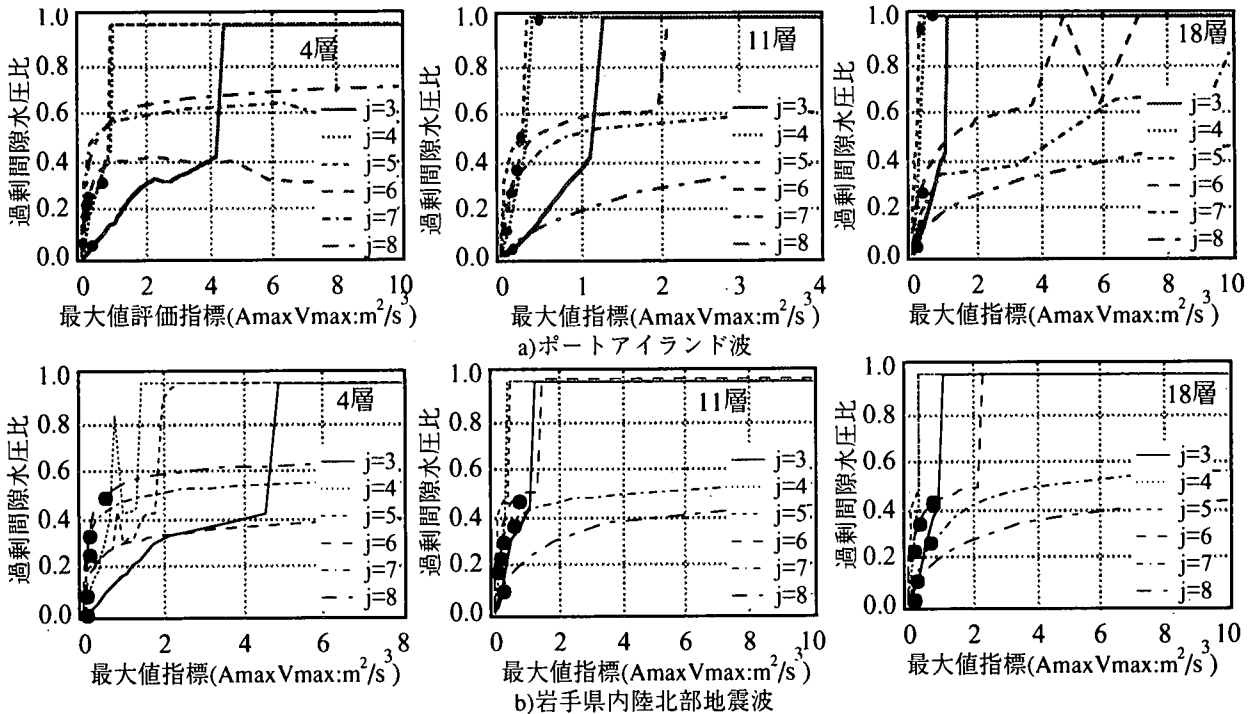


図-14 入力地震動の最大値指標と過剰間隙水圧比の関係

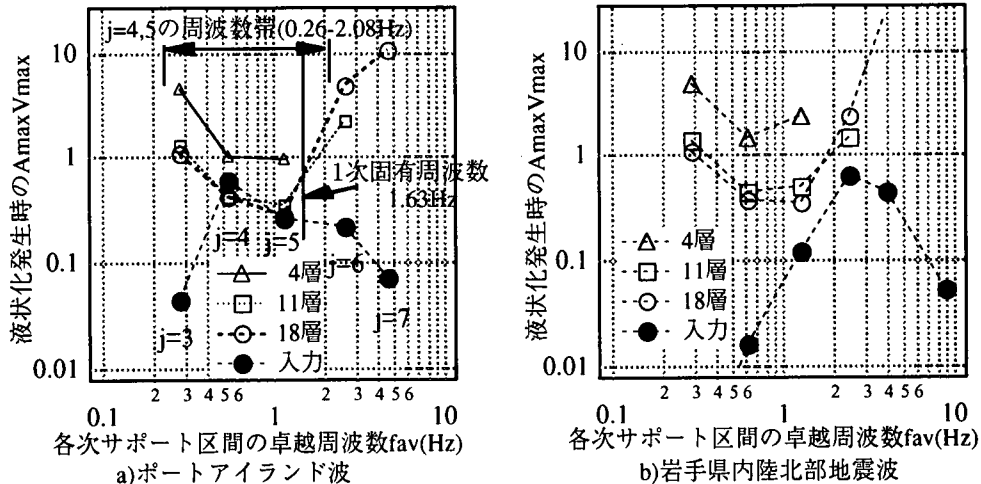


図-15 液状化時における入力地震動の最大値指標と原入力地震動の最大値指標の比較

ルで液状化に至っている。他の周波数サポート区間の入力では、最大速度と同様にそれ以上の入力レベルに対し、液状化が発生している。液状化過程を地盤材料の非線形化の発生過程と有効応力の著しい低下を伴う発展過程に分けると、非線形化の発生過程には地層各位置の非線形化に影響を及ぼす周波数帯域での地震動特性が関与し、有効応力の著しい低下を伴う発展過程には初期地盤モデルの1次固有周波数より低周波数帯域での地震動特性が関与していることが明らかとなった。

最後に、液状化の発生に影響を及ぼす周波数帯域を明らかにするため、各層の液状化発生時における入力の周波数帯域毎の最大値指標と入力地震動の最大値指標とを比較する。そのため、周波数帯域ごとの入力地震動の最大値指標と周波数指標である最大速度と最大加速度比より得られる中心周波数¹²⁾ ($f_{av,j} = 1/T_j : T_j = 2\pi V_{max,j} / A_{max,j}$) との関係を図-15に示す。図より、原地震動の差異によらず、入力地震動に関する各層の液状化の発生時における

最大値指標と周波数指標の関係はほぼ同程度となっていることが分かる。また、岩手県内陸北部地震では、入力地震動の最大値指標はいずれの周波数帯域でも液状化発生時の最大値指標以下であり、兵庫県南部地震ではj=4の入力地震動の最大値指標が11、18層で液状化が発生する最大値指標以上となり、4層では液状化していないという解析結果とも対応している。これらのことは、地盤に液状化発生をもたらす入力地震動の最大値指標は地盤に固有であり、それと原入力地震動の最大値指標との比較、つまり入力地震動のエネルギー的指標間の比較により液状化の評価を行うことが可能であることを示している。

4. 有効応力解析に及ぼすRayleigh減衰の影響と考察

4.1 Rayleigh減衰の影響

有効応力解析を含む地盤の逐次非線形解析では、減衰項のモデルとして、低ひずみ時における減衰特性の付加、

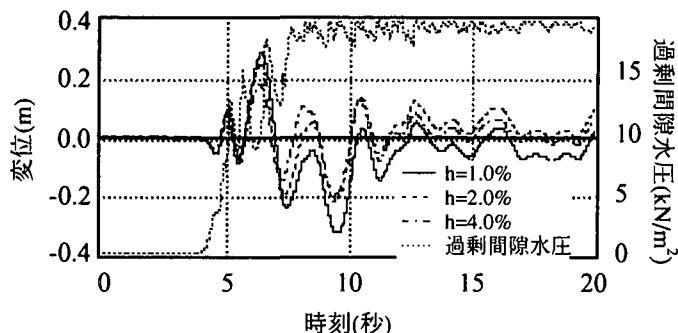


図-16 減衰定数に応じた有効応力解析による地表面応答変位時刻歴の比較

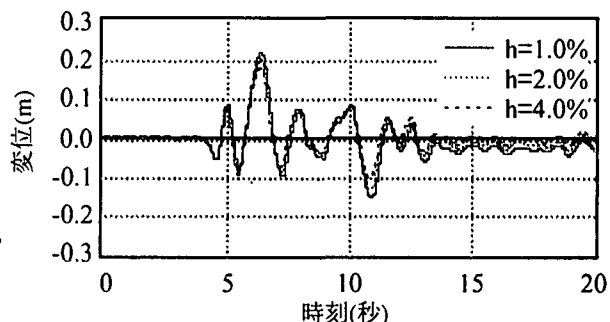


図-17 減衰定数に応じた全応力解析による地表面応答変位時刻歴の比較

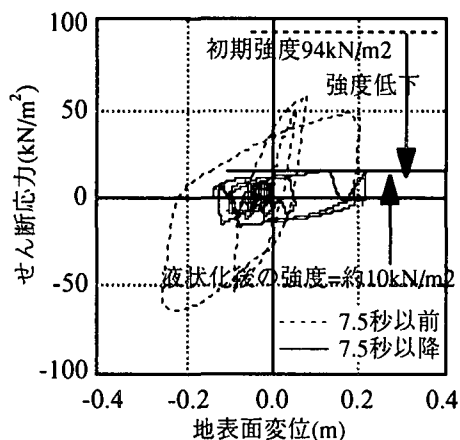


図-18 液化化層下面上の地盤の復元力特性 (地表面変位と最下液化化層のせん断応力の関係)

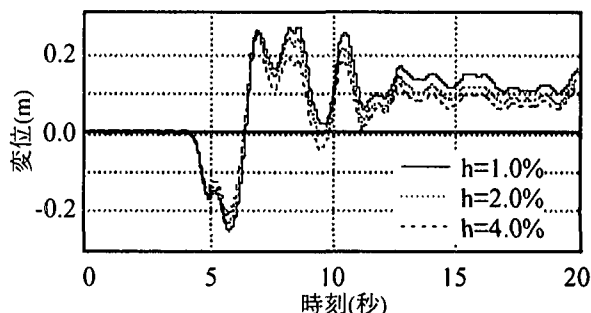


図-19 完全弾塑性型復元力モデルによる1自由度系の応答変位時刻歴

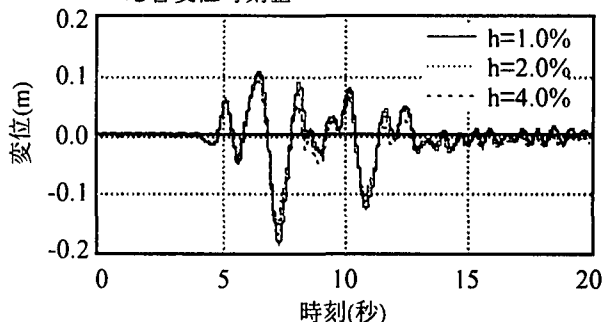


図-20 bi-linear型復元力モデルによる1自由度系の応答変位時刻歴

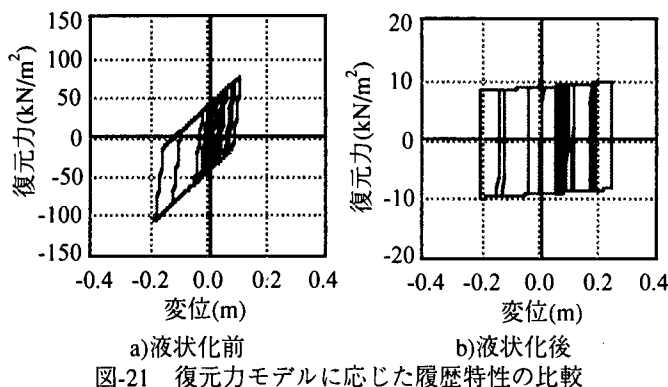
および高周波振動成分に対する解析上の安定性を確保するため、一般にRayleigh減衰が用いられる。Rayleigh減衰は、運動方程式中の速度比例項つまり減衰項を質量と剛性マトリックスの1次結合として表す減衰モデルである。前者の目的のためには、初期構造モデルの有する低次モードに対する減衰定数とその構造系の有する初期減衰定数となるように設定される。後者の目的では数%の値が用いられることが多い。一方、地盤の液化化は地盤材料の強度低下、さらに剛性低下を伴う強非線形応答解析であり、減衰についても地震前の値がそのまま保持されるとは考え難い。しかし、初期地盤モデルに対して設定した減衰項が応答解析結果にどのような影響を及ぼすかは明らかになっていない。

その影響を把握するため、初期地盤モデルの1次モード(周波数:1.64Hz)の減衰定数が1%、2%及び4%となるようにRayleigh減衰のパラメーターを設定し、有効応力解析を実施することにより得られた地表面の応答変位時刻歴を図-16に示す。ここで、Rayleigh減衰のパラメーターである質量比例定数と剛性比例定数は、1次モードの減衰定数がモード減衰定数の極小値となるための条件である両項が均等に減衰を分担することに基づき設定した。また、図-16には、液化化層の最下層における過剰間隙水圧の時刻歴も合わせて示す。さらに、同じ解析条件のもとで全応力解析を実施し、得られた地表面変位の時刻歴を図-17に示す。この結果、有効応力解析は全応力解析に比べ、Rayleigh減衰の値による応答変位の差異、特に液化化が発

生した時刻(約7.5秒)以降の差異が大きいことが分かる。先に述べたように、Rayleigh減衰は、低ひずみ時における減衰の付加などを目的として設定されているにも関わらず、有効応力解析により得られる液化化時以降の高ひずみ時の応答(図-5参照)に大きく影響を及ぼしている。

4.2 液化化地盤の復元力モデルに基づく考察

液化化が生じた後の地盤の震動モードは図-3に示した様に、液化化層下端を規準面とする1次モードの震動が卓越している。ここで、その規準面以浅の地盤を1自由度の振動系とみなすと、その振動系の復元力特性は図-18に示す地表面変位と規準面上の地盤要素のせん断応力の関係を用いて表すことができる。図より、その復元力特性は、破線で示した液化化の発生過程では地盤材料特性と同様双曲線型を示している。また、液化化発生後の特性は、実線で示したようにほぼ完全弾塑性型を示していることが分かる。さらに、液化化の発生に伴う有効応力の低下により、せん断強度、つまり振動系の復元力特性における復元力は著しく低下していることが分かる。ここで、



そのせん断強度を単位土柱当たりのせん断力と見なすと、その層上の地盤の重量との比より降伏震度が得られる。これより、液状化の発生後の降伏震度は概ね0.025となり、初期地盤のせん断強度より推定される初期降伏震度0.25に対し、液状化により10%程度に低下したことが分かる。

次に、液状化前後の復元力特性の差異に着目し、液状化層下面上の地盤を1自由度の振動系とした非線形地震応答解析を実施し、Rayleigh減衰が応答に及ぼす影響を検討する。ここで、Rayleigh減衰は弾性時における減衰定数が1, 2, 4%の3種類となるようにパラメータを設定した。また、振動系の質量は規準面上地盤の全質量、入力地震動は有効応力解析により得られた液状化層下端の加速度時刻歴とした。液状化後、つまり完全弾塑性型の復元力特性は、弾性剛性を図-18中の変位が小さい場合の勾配、降伏変位を0.00269mとした。液状化前また全応力解析に相当する地盤のせん断強度つまり復元力の低下しない場合の復元力特性は図-18の初期双曲線部分をbi-linear型に近似し、その初期剛性は完全弾塑性型モデルの初期剛性と同じ値、降伏変位は0.0135m、第2剛性は初期剛性との剛性比が0.1となるように設定した。両復元力特性に対して得られた応答変位時刻歴は図-19, 20に示すとおり有効応力解析および全応力解析による応答変位挙動を概ね表現している。このことから、1自由度の振動系の挙動に基づいた考察は、地盤モデルの応答に及ぼすRayleigh減衰の影響を検討する上で有意であると考えられる。両図を比較すると、bi-linear型復元力モデルでは、隣り合う変位ピーク間の変位差が減衰定数の増加に伴い低下している。一方、完全弾塑性型復元力モデルでは、時刻4秒から6.5秒までの急激な塑性化過程では隣り合う変位ピーク間の変位差は、bi-linear型復元力モデルと同様に減衰定数の増加に伴い低下している。しかし、それ以降、応答変位の差異の著しいものの、隣り合う変位ピーク間の変位差が減衰定数の増加によらず同程度となっている。つまり、その応答変位の差異は、時刻6.5秒から8.5秒間の減衰定数に応じた応答変位の差異によって生じている。

最後に、図-21に示す減衰定数2%の復元力モデルに応じた履歴特性の履歴減衰に着目すると、完全弾塑性型の復元力モデルでは応答塑性率が10以上となることから、減衰定数は1.0以上つまり過減衰状態となっている。また、bilinear型復元力モデルでは応答塑性率に依存するものの

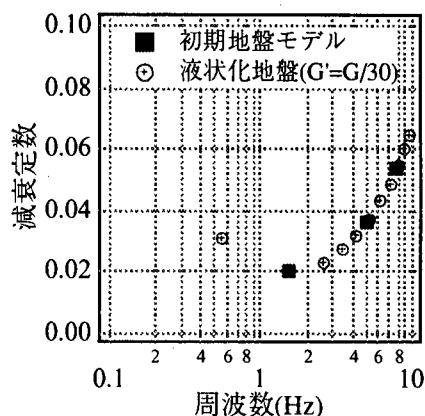


図-22 液状化によるモード減衰定数の変化

柴田¹³⁾による応答塑性率と減衰定数の関係によれば最大でも0.4程度となる。ここで、各復元力モデルの減衰定数は、柴田によるbi-linear型の復元力モデルを等価な複素剛性モデルに置き換えた際の等価減衰定数¹³⁾を示す。一方、減衰項の減衰特性を表すモード減衰定数は、初期地盤モデルに対するRayleigh減衰（1次固有周波数における $\eta=2.0\%$ ）の質量・剛性比例定数を用い、初期地盤および液状化層の剛性が初期剛性および初期剛性の1/30とした地盤モデルについて算出し、周波数10Hz以下について図-22に示す。これより、減衰項の減衰定数は液状化時においても約0.06以下であり、履歴減衰に比べ小さな値となっている。このことは、液状化状態では、復元力特性が極低復元力を有する完全弾塑性型の履歴特性を示し、その履歴減衰がRayleigh減衰の値より極めて大きい過減衰状態にあることから、Rayleigh減衰の差異は応答に影響を与えないということの意味し、前述の液状化時における変位ピーク間の挙動とも対応する。すると、Rayleigh減衰の影響は、液状化への移行過程で非線形つまりすべり状態に至る際の初期条件である加速度、速度などがRayleigh減衰に応じて異なることにより、応答変位に差異が生じたものと推定される。よって、応答変位、特に残留変形量を有効応力解析により評価するためには、初期減衰という観点ではなく解析上の安定という観点で小さな値を用いるか、実験また実被害現象などを評価可能なRayleigh減衰のパラメータ設定を試行錯誤的に行うなどの配慮が必要であると考えられる。

5. あとがき

ここでは、地盤の液状化過程に及ぼす入力地震動の周波数特性の影響、さらに地盤の液状化解析に及ぼすRayleigh減衰の影響を明らかにすることを目的とし、1995年兵庫県南部地震により液状化による著しい被害を受けたポートアイランドの地震観測点を対象地盤とした有効応力解析に基づき、地盤の液状化過程に及ぼす入力地震動の周波数特性とその過程を支配する地震動特性因子を明らかにした。その検討には、ウェーブレット変換及び逆変換により分離された狭周波数帯域の入力地震動を用

いた。さらに、Rayleigh減衰が有効応力解析に及ぼす影響とその要因を明らかにした。ここで得られた結果を纏めると以下のとおりである。

- (1)地盤の液状化により、地盤の変形は液状化層に集中し、液状化層下の変形は著しく低下する。
- (2)地盤の非線形化の発生に影響を及ぼす周波数帯は、非線形影響関数により評価できる。その非線形化の進展による液状化の発生には、その周波数帯の内低次の周波数帯が関与する。
- (3)狭周波数帯域における入力地震動の最大加速度と最大速度の積で表される運動エネルギーと関連した最大値指標は、地盤の液状化に至る非線形化過程を支配する地震動特性として有意である。
- (4)液状化が発生する際の入力地震動の最大値指標は地震動特性によらず、地盤に固有である可能性がある。このことは、入力の状態量としての最大値指標と原入力地震動の最大値指標との比較により、液状化発生を評価できる可能性があることを示唆している。
- (5)Rayleigh減衰は、液状化後の地盤材料強度の著しい低下に伴う過減衰な震動挙動に起因し応答変位に有意な影響を及ぼす。

参考文献

- 1) 土木学会編：土木学会耐震基準等に関する提言集，1996
- 2) Nozomu Y., Susumu I. : Nonlinear site response and its evaluation and prediction, Proc. of The Effect of Surface Geology on Seismic Motion,, pp.71-90, 1998
- 3) 例えば, Susumu I., Koji I., Hanlong L., Toshikazu M. : Effective Stress Analysis of Port Structures, Special Issue of SOILS AND FOUNDATION, pp.97-114, 1998

- 4) 例えば, 恩田邦彦, 関口宏二, 長山秀昭, 中川茂 : 矢板締切り工を施した盛土地盤の動的有効応力解析, 液状化メカニズム・予測法と設計法に関するシンポジウム発表論文集, pp.457-462, 1999
- 5) 末富岩雄, 澤田純男, 吉田望, 土岐憲三 : 地震動の上限値と地盤のせん断強度の関係, 土木学会論文集, No.654/I-52, pp.195-206, 2000
- 6) 吉田望, 中村晋, 末富岩雄 : 1995年兵庫県南部地震における地盤の非線形挙動とその予測, 第23回地盤震動シンポジウム, pp.39-52, 1995
- 7) 吉田望, 東畑郁生 : YUSAYUSA-2 理論と使用法, 1991
- 8) 神山真 : 強震地震動の非定常スペクトルの算出法に関する一考察, 土木学会論文報告集, 第245号, pp.55-62, 1976
- 9) 沢田勉 : 地震動の工学的諸特性の解析とその応用に関する研究, 京都大学博士論文, 1988.8
- 10) 佐々木文夫, 前田達哉, 山田道夫 : ウェーブレット変換を用いた時刻歴データ解析, pp.9-20, 構造工学論文集, Vol.38B, 1992
- 11) Meyer Y. : Orthonormal Wavelets, in Wavelets, Springer, pp.21-37, 1989
- 12) M. Kamiyama : Spectral Characteristics of Strong Ground Motions in Terms of Peak Values, J. Struct. Mech. Earthquake Eng. (J.S.C.E.), No.531/I-34, pp.35-49, 1996
- 13) 柴田明徳 : 最新耐震構造解析, 森北出版, pp.20-129, 1986

(2001年4月20日受付)