

高速ウェーブレット変換を用いた 地盤の非定常地震応答解析

風間 基樹¹・岡田 直仁²・中村 晋³

¹ 正会員 博士(工学) 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06)

² 正会員 工修 前田建設工業(株) 北陸支店 (〒930-0858 富山市牛島町18-7)

³ 正会員 工博 日本大学工学部土木工学科 (〒963-8642 郡山市田村町徳定字中河原1)

強震動を受け強非線形化した地盤の地震時挙動を解析するため、高速ウェーブレット変換を用いた時間一周波数領域の非定常地震応答解析手法を提案した。提案手法は地震動が入力されてから非定常に変化する地盤のせん断剛性と減衰定数を、その時点までに地盤が受けた累積損失エネルギーと最大ひずみレベルに基づいて規定する方法を示している。この方法の特長は、地盤の時々刻々の剛性低下が陽な形で計算結果として出力されることであり、一種の非線形解析となっている。また、提案手法を用いて神戸ポートアイランドで観測された強震記録を対象とし、液状化による剛性低下を伴う地盤の強震時挙動解析に対する適用性を検討した。

Key Words : seismic response analysis, wavelet transform, non-stationary, dissipation energy, liquefaction

1. 研究の背景と目的

地盤の地震応答解析は、地盤上及び地中に構築される構造物に対する入力地震動の算定あるいは地盤の液状化判定などのために行われる。実務で用いられている地震応答解析法は様々であるが、次元問題では重複反射理論による周波数領域での等価線形解析が最もよく用いられる方法である。等価線形解析法に必要な動的変形特性は要素試験から容易に決定されるとともにデータの蓄積も豊富であるため、使用者によらずほぼ同等の解析結果が得られる。この方法は地盤内に生じるせん断ひずみレベルが 10^2 程度までの問題に関して実務に利用されているが、それ以上の大ひずみが生じる場合には、砂質土の液状化や粘性土の軟化に伴う非線形挙動が卓越するため、その適用が困難とされている¹⁾。このように線形解析が地盤の強非線形化に伴う非定常挙動を表現できないのは、地盤物性が地震継続時間中一定であるとして解析していることに起因している。これまで、等価線形解析プログラムSHAKE²⁾の改良を目指した研究³⁾⁴⁾も行なわれているが、物性が非定常に変化する現象を解析するには、フーリエ変換を用いた定常不規則過程としての改良では原理的に限界がある。一方、非定常な地盤の挙動を再現するため、土の履歴変形特性を考慮した時間領域での逐次積分法も用いられているが、構成則の選択やパラメータの設

定には付加的な土質試験を要することが多い。このため、物理的に厳密な解析を行なっても、結果的に精度がそれほど向上しない状況にある。

近年、地盤物性が非定常に変化するような現象に対して、周波数領域でのいくつかの解析法が提案されている。宇高ら⁵⁾は、累積損傷度理論により液状化による地盤物性の急激な変化が生じる時刻を決定し、その時刻を境に地盤動特性をいくつかの時刻グループに分けて与えた後、それぞれに対してフーリエ変換を用いた周波数領域の応答計算を行い、それぞれの応答波形を重ね合わせる「多重等価線形解析法」を提案している。しかし、入力時刻歴上のグルーピング方法および各グループ毎の動的物性の規定には検討の余地が残されている。神山ら⁶⁾は、観測記録の非定常性を非定常スペクトルにより確認するとともに、求めた応力およびひずみ時刻歴にコンプレックスエンベロップ法を適用することにより、連続的な剛性および減衰の時間変動を計算する手法を示している。また、中村はベクトルスペクトルの概念⁷⁾を用いて、周波数領域での動的物性の特徴を検討すると伴にこれに基づく解析法を提案している⁸⁾。

本研究では、このような地盤物性の時間的な変化を合理的に評価できるものとして、ウェーブレット変換を利用する。ウェーブレット変換がフーリエ変換と異なる点は、基底関数が時系列軸上に一様に広がるも

のではなく、時間と周波数の両方の領域で程度よく局在しているため、現象が生じた時刻に関する情報を効率的に捉えられることである。実際、信号の時間一周波数解析に対するウェーブレット変換の有効性は数多くの研究で示され^{(10),(11),(12)}、その数学的基礎も体系化されている^{(例えば13),(14),(15)}。

ここでは、時間一周波数領域のウェーブレット変換を用いた地震応答解析手法を提案するが、ここで提案する解析手法は、一次元水平成層地盤の基盤面から鉛直方向に地震波が伝播する場合を解析するためのものであり、その大きな特長として次の二点が挙げられる。

第一は、高速ウェーブレット変換を用いて入力地震波をあらゆる時間一周波数情報を持ったウェーブレットに分解し、分解波に対して重複反射理論に基づいた線形応答計算を行なうという点にある。それぞれの分解波は、時間軸上に局在しているため、その代表時刻における物性値を用いた応答計算を行なうことで、地盤物性が非定常的に変動する場合の地震応答解析を可能としている。

第二は、地盤のせん断剛性の低下や減衰定数の増加を地盤に生じたせん断応力一ひずみ履歴により評価している点である。ここでは剛性や減衰定数の変化を規定する内部変数として、地盤が消費する累積損失エネルギーとその時点までの最大せん断ひずみを考えている。具体的に言えば、地盤に作用するせん断応力およびせん断ひずみ時刻歴が与えられたとき、履歴ループから得られる累積損失エネルギーの時刻歴やその時点までの最大せん断ひずみ量が算定できる。これらの変化量と剛性あるいは減衰定数の関係をあらかじめ要素試験から求めておけば、内部変数の時間変化を剛性や減衰定数の時間変化に変換することが可能となる。なお、累積損失エネルギーから過剰間隙水圧の発生特性を規定して時刻歴有効応力解析を行う方法もすでに提案されている^{(16),(17)}が、本提案手法は、繰返し载荷による有効応力の減少や過剰間隙水圧の発生等を直接的に考慮しないものの、液状化による物性変化を考慮した一種の非線形解析を実現している。以下、この二つの概念を説明するとともに、実際の解析例から適用性を検討する。

2. 提案する非定常解析

(1) 解析手順

図一は提案する地震応答解析手法のフローである。図中の番号と対応させてその流れを示すと、
① 高速ウェーブレット変換により入力波を各ウェーブ

レットに分解する。

- ② 各ウェーブレットに対しそれぞれの中心時刻に対応した地盤物性を用いた線形応答計算を行なう。(後出、(6)にて詳述する)
 - ③ 各ウェーブレットの応答波形の重ね合わせにより各層上面における加速度応答波形を求める。
 - ④ 加速度応答波形から各層中央深さにおけるせん断応力一ひずみ時刻歴を求める。
 - ⑤ せん断応力一ひずみ時刻歴から各層の正規化累積損失エネルギーとその時刻までに経験した最大せん断ひずみの時刻歴を求める。
 - ⑥ 累積損失エネルギーと最大せん断ひずみの時刻歴を各層のせん断剛性・減衰定数の時刻歴に変換する。(後出、(4)、(5)にて詳述する)
 - ⑦ 地震動終了時刻におけるせん断剛性・減衰定数の値から、収束判定を行なう。
 - ⑧ 収束条件を満足しなければ新しいせん断剛性・減衰定数の時刻歴を設定し②へ。
- 収束条件を満たせば終了となる。

(2) 高速ウェーブレット変換

連続関数 $f(t)$ に対する、マザーウェーブレット $\psi(t)$ による離散ウェーブレット変換および逆変換は次式で表わされる⁽¹⁸⁾。

$$d_k^{(j)} = 2^j \int_{-\infty}^{\infty} \overline{\psi(2^j t - k)} f(t) dt \quad (1)$$

$$f(t) \sim \sum_j \sum_k d_k^{(j)} \overline{\psi(2^j t - k)} \quad (2)$$

ここで、 $\overline{\psi(t)}$ は $\psi(t)$ の複素共役、整数 j, k はそれぞれ周波数および時間の情報を与えるパラメータである。上式は信号処理におけるデジタルフィルタバンクで表現され、高速な演算が可能のため高速ウェーブレット変換とも呼ばれる。式(1)により得られたウェーブレット係数 $d_k^{(j)}$ のうち、ある j, k に対応する成分に対し式(2)の逆変換を行なうことで、時刻 $(2^j t - k)$ に局在するウェーブレット分解波を得ることができる。

(3) マザーウェーブレットの選択

高速ウェーブレット変換に用いるマザーウェーブレットによる解析結果の差は無視できない。一般的に、時間軸上のサポート区間が短い、すなわち、時間分解能のよいウェーブレットは時間軸上に局在するため、パルス波の生起時刻を厳密に特定することが可能である。しかし、それは周波数帯域の分解能が悪いことを意味し、時間領域と周波数領域の分解能はトレードオフの関係がある。ここでは、本解析法に適切なマザーウェーブレットを選定するにあたり、以下のもの

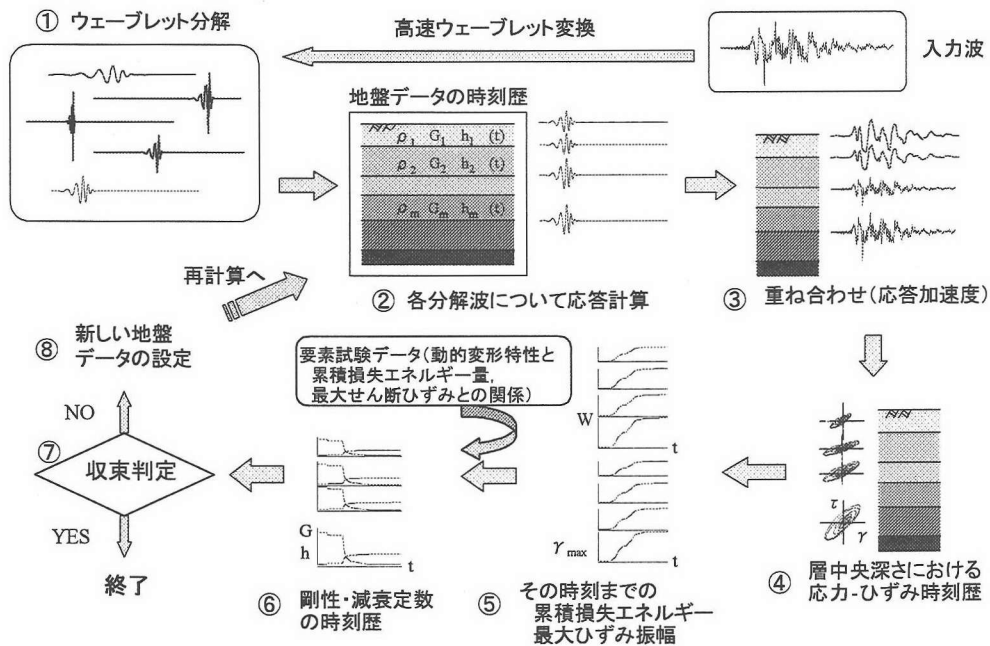


図-1 提案手法の解析手順

を検討対象とした。

a) Haarウェーブレット

Haarウェーブレットは最も簡単な形で表現されるウェーブレットで、分解波の時間軸方向の広がりに対応するセルの時間幅に完全に一致する、すなわち、他のマザーウェーブレットではセルの時間幅以外の情報も含むことになるが、周波数の帯域分解能は非常に悪い。

b) Daubechiesウェーブレット

直交基底を作る連続かつサポートコンパクト、すなわち、関数値がゼロでない区間が有限なウェーブレットとして最初に提案されたものである。このウェーブレットでは自然数 N によって番号付けられた一連のスケール関数とそれに対応するマザーウェーブレットがある。 N を大きくすることによって関数の滑らかさが増し、周波数領域での局在性はよくなるものの、その反面時間軸上のサポート区間が広がって時間領域での局在化の程度が悪くなる。 $N=1$ のとき、DaubechiesウェーブレットはHaarウェーブレットに一致する。ここでは、代表として $N=2, 6, 10$ の場合をマザーウェーブレットとしての検討対象とした。

c) Meyerウェーブレット¹⁹⁾

周波数領域でサポートコンパクトな直交ウェーブレットである。サポート区間は、

$$\{2^{j+1}\pi/3 \leq |\omega| < 2^{j+3}\pi/3\} (j=1, 2, \dots)$$

これは対数

等間隔となっており、ある振動数は必ず2つの分割帯域に含まれ、それ以外の帯域には含まれない。時間領域における局在性は高いが、サポートコンパクトではなく時間軸上に無限の広がりをもつ。

上記三種類、合計5つのマザーウェーブレットの本解析法への適用性を検討するため、サイン波の周期が徐々に短くなっていくスイープ波とサイン波の1周期分をパルス的に与えた波形に対して高速ウェーブレット変換を行なった。前者は、周波数分解能を検討するため、後者は時間軸上での局在性を検討するためである。図-2にその代表例として、Meyerのアナライジングウェーブフォームとそれをを用いた変換結果(ウェーブレット係数のプロット)を示す。図中の縦軸は高速ウェーブレット変換の周波数帯域分割のレベルを表すもので、次数が小さいほど長周期の帯域成分を表している。

本解析において重要と考えられるウェーブレット変換の特性は時間軸上の分解という点にある。しかし、時間分解能が高く周波数分解能が低いHaarのようなマザーウェーブレットを用いた場合、演算量の低減のための周波数カットオフが使えず、演算時間の点で不利になる。逆に、周波数帯域分割をより厳密に行なうDaubechiesのようなマザーウェーブレットは時間軸上の広がりが大きく、急激に地盤物性が変動するような場合にうまく対処できない。以上から、検討対象とした5つのマザーウェーブレットのう

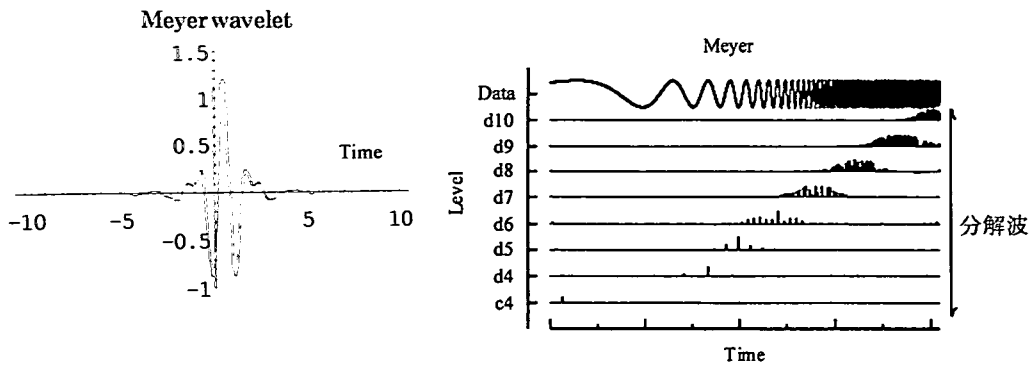


図-2 Meyer wavelet の特性とその検討例

ち、時間および周波数分解能のバランスがよいという観点からはDaubechies $N = 6$ またはMeyerウェーブレットが適切であると判断した。この二つのうち、本解析では時間軸上で対称な形状を持つMeyerウェーブレットを採用することとした。

(4) せん断剛性の時間変化の規定方法

地震によってせん断応力を受けた地盤は、その応答としてせん断ひずみを生じるが、土はひずみレベルが大きくなるとせん断剛性が低下する。また、地下水面下の砂質土がある大きさ以上の繰返しせん断応力を受けて過剰間隙水圧が上昇した場合、いわゆる液状化によって土の剛性が低下することも良く知られているとおりである。すなわち、地震動継続時間中の土のせん断剛性は、その時点までのひずみレベルや液状化程度などの履歴に左右される。

a) 砂質土の繰返しせん断による剛性低下や粘性土の繰返し軟化を考慮する場合

あるひずみレベル以上の繰返しせん断応力を受けた土は塑性化するため接線剛性が低下するが、これは地盤に入力され波動エネルギーが多いほど著しいものと考えられる^{20), 21)}。このような地震波のエネルギー的評価として、累積損失エネルギー、すなわち、地盤内に生じたせん断応力-ひずみ履歴ループの描く面積の累積値を指標とした研究が行われている。著者ら²²⁾は、粘性土から砂質土まで様々な土について定ひずみ非排水繰返し三軸試験を実施し、土の蓄えうる累積損失エネルギーの値を比較した。結果、液状化に伴い剛性が急激に低下する砂質土は剛性低下に伴って徐々に1サイクル毎に蓄積する損失エネルギーが小さくなるのに対し、極端な剛性低下がない粘性土はエネルギー吸収性能が保たれることを示した。ここでは、これら研究成果を基にして地下水面下の地盤で繰返しせん断応力によって大きく剛性低下する可能性のある地層の土に対しては、累積損失エネルギーを介して地盤の剛性低

下を評価することとした。

例えば、図-3はそれぞれ軸ひずみ片振幅0.15%、0.33%、0.54%として行なったまさ土の非排水定ひずみ繰返し三軸試験結果である。この図は土が一定ひずみ振幅の繰返し载荷を受けた場合の有効拘束圧で正規化した1ループ毎の正規化累積損失エネルギーと割線せん断剛性の関係を示している²²⁾。なお、正規化累積損失エネルギーとは、累積損失エネルギーを初期平均主応力で除した値である。図からわかるように、与えるせん断ひずみ振幅の大きさにより割線せん断剛性の低下傾向が異なることがわかる。そこで本解析法では、土の剛性低下が過去に受けた最大せん断ひずみ振幅と累積損失エネルギーに依存するものと考えた。具体的にある層のある時刻の剛性を求めるときには、まず着目する地盤のせん断ひずみ時刻歴からその時刻までに受けた最大せん断ひずみ振幅を、応力-ひずみ関係から同じくその時刻までに蓄積された累積損失エネルギーを求める。最大ひずみと累積損失エネルギーが決まれば、図-3の3本の曲線の間を線形補間することにより、剛性が決定できる。すなわち、剛性は正規化累積損失エネルギーと最大ひずみ振幅履歴に応じて連続的に低下する量として規定できることになる。ただし、図-3からもわかるように、累積損失エネルギーと割線せん断剛性の関係は、振幅レベルによって異なることからこれについては検討の余地がある。

b) 繰返しせん断による剛性低下を考慮しない場合

a) で述べたように、ある時刻までにその土が経験したせん断ひずみの最大値から、すでにデータの蓄積されている既往のひずみ依存曲線を用いてせん断剛性の時間変化を規定する。

c) 繰返しせん断による剛性低下を考慮しないひずみレベル

土に繰返しせん断応力が作用しても、せん断ひずみレベルが小さい場合、土の塑性化には寄与せずほとん

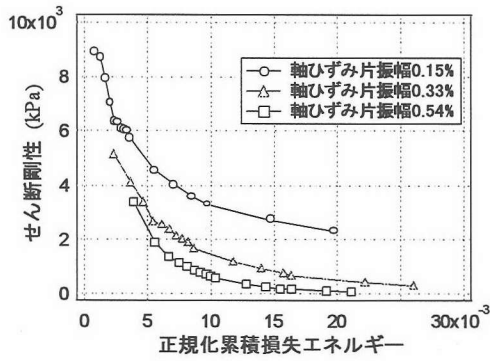


図-3 非排水一定ひずみ繰返し三軸試験による正規化累積損失エネルギーとせん断剛性の関係²²⁾

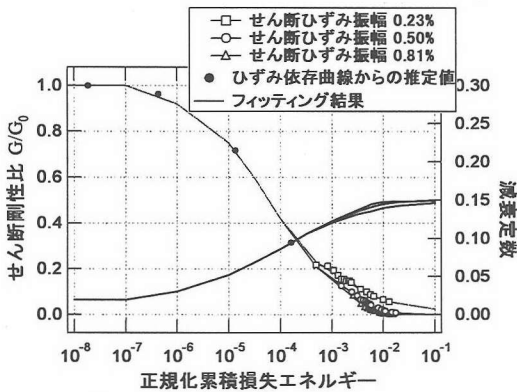


図-4 正規化累積損失エネルギーとせん断剛性比・減衰定数の関係

ど弾性に見なせる挙動をすると考えられる。すなわち、あるひずみレベル以下では、すべての土の剛性がb)で示した方法から評価できる。

なお、図-3に示した結果を、さらに動的変形特性試験結果を用いてエネルギーの小さい領域まで拡張することも可能である。すなわち、既往のせん断剛性 G と減衰定数 h のひずみ依存曲線を用いて一般的な減衰定数の定義式

$$h = 1/4\pi \cdot \Delta W / W \quad (3)$$

から1ループの損失エネルギー ΔW が逆算できる。すなわち、あるひずみレベルにおけるせん断剛性と減衰定数が決まれば、そのひずみレベルでの弾性エネルギー $W = 1/2 \cdot G \cdot \gamma_{\max}^2$ が求められ、式(3)より、 ΔW を算定することができる。図-4は、こうして求めた初期せん断剛性比と正規化累積損失エネルギーの関係である。図は、繰返しせん断による剛性低下を考慮しないひずみレベルを0.1%とし、上記の方法で求めた関係に図-3の関係を加えて示している。なお、図の凡例中のせん断ひずみは、弾性論でポアソン比を0.5、す

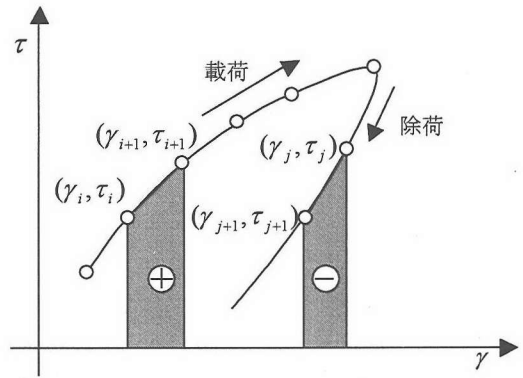


図-5 累積損失エネルギーの算定方法の概念図

なわち飽和非排水条件とした場合のせん断ひずみと軸ひずみの関係を用いて、三軸試験の軸ひずみをせん断ひずみに換算して示したものである。なお、図中には減衰定数も示されているが、これについては後述する。

(5) ウェーブレット各サポート区間における物性評価方法

一般に、ランダムなひずみ履歴を受けたときの応力-ひずみ関係は、一定振幅の繰返しせん断履歴を受けた場合と異なって、1サイクルの履歴ループは閉じた形とならないため、要素試験のように1サイクル毎の損失エネルギーを明瞭に規定できない。本研究でも、ランダムな地震荷重に対する応力-ひずみ関係を対象とすることから、ある時刻までの繰返しによる累積損失エネルギーの時刻歴 $\Delta W(t)$ はせん断応力-ひずみ履歴ループの線積分値として次式から求めている。

$$\Delta W(t) = \oint \tau(t) d\gamma = \sum_{i=0}^{i=1} \frac{\tau_{i+1} + \tau_i}{2} (\gamma_{i+1} - \gamma_i) \quad (4)$$

ここに i は、時間ステップである。例えば図-5に示すように、载荷時はエネルギーが蓄積され、除荷時はエネルギーが減少して行く。すなわち、この値は時間軸上で弾性ひずみエネルギーを含む塑性ひずみエネルギーの蓄積と弾性ひずみエネルギーの開放を繰返ししながら徐々に上昇していく。そのため対応するせん断剛性および減衰定数の値も弾性ひずみエネルギー分だけ上下しながら変動するため、時間軸上の平均的な値と局所的な値とが異なる可能性がある。そこで、ウェーブレット分解波の中心時刻に対応するせん断剛性および減衰定数の算出にあたっては、累積損失エネルギーの時間軸上の局所的な値ではなく、ウェーブレット変換による時間軸上のサポート区間の平均値を用いることとした。例えば、図-2のMeyerウェーブレットの

表-1 解析に用いた層分割と地盤物性

層番号	標高 K.P.(m)	地盤種別	層厚 (m)	密度 (t/m^3)	Vs (m/s)
1	4	埋立 地盤	2.0	1.7	143
2	2		2.0	1.7	188
3	0		1.0	2.0	180
4	-1		1.0	2.0	186
5	-2		1.0	2.0	191
6	-3		1.0	2.0	196
7	-4		1.0	2.0	201
8	-5		1.0	2.0	205
9	-6		2.0	2.0	211
10	-8		2.0	2.0	218
11	-10		2.0	2.0	225
12	-12	1.4	2.0	230	
13	-13.4	沖積 粘土	2.6	1.6	175
14	-16		2.0	1.6	178
15	-18		2.0	1.6	180
16	-20		2.0	1.6	183
17	-22	2.2	1.6	185	
18	-24.2	洪積 砂礫	1.8	2.0	234
19	-26		2.0	2.0	242
20	-28	基盤		2.0	305

場合、時間軸上のサポート区間は図の0-1である。

また、地震波の伝播にはせん断波速度に応じた時間がかかる。そのため入力波をウェーブレット変換により各ウェーブレットに分解した後、全層に渡ってその中心時刻における地盤物性値を用いた応答計算を行なうと誤差が生じる可能性がある。ここでは時間遅れによる誤差を極力抑えるために、直達波が各層に到達するまでの伝播時間だけサポート区間ごとにシフトした時間幅のせん断剛性および減衰定数の平均値を用いて各ウェーブレットに対する応答計算を行なう。

(6) 収束判定

本解析では等価線形解析と同様せん断剛性および減衰定数の値から収束判定を行なう。地盤の初期物性を用いた第一回目の解析から、新たにせん断剛性や減衰定数の変化が時刻歴として算定される。二回目以降の計算では、直前の計算から新たに求められたせん断剛性や減衰定数の時刻歴をもとにして再計算を行う。新たな計算から算定されたせん断剛性や減衰定数の経時変化が仮定した経時変化とある誤差の範囲内で一致していれば、計算が収束したと言える。しかし、すべての層で時間的に変化している物性を全継続時間に渡って細かく算定するのは、計算の簡便さを考えると得策ではない。いくつかの例で、収束性を検討したところ、地震終了時刻における値が仮定した値に収束した際には全時刻に渡ってほぼ収束しているものとみなすことができることがわかった。そこで本解析では使用したせん断剛性および減衰定数の地震動終了時刻における

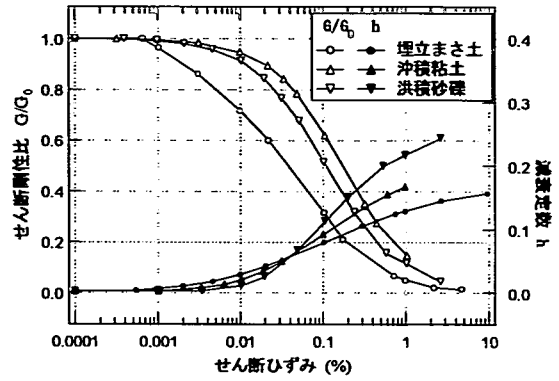


図-6 解析に用いた動的変形特性

値と、得られた応答結果から算定した各時刻歴の最終時刻における値との差が全層とも5%以内に収まった場合をもって収束と判定することとした。

3. 適用事例解析と考察

(1) 解析対象地盤および入力地震波の諸元

1995年兵庫県南部地震の際の神戸ポートアイランドのアレー観測地点を解析対象地盤とした。解析にはK.P.-28m以浅の地盤を表-1のようにモデル化して用いた。なお、初期せん断剛性の値は、PS検層からの推定値を基準に平均有効拘束圧の0.5乗に比例するよう深さ方向に遷移させている。なお、平均有効拘束圧を求める際の K_0 値は、Hatanaka, et.al⁽²³⁾の研究を参考に0.4とした。

入力地震動には、K.P.-28mにおける基盤入射波(2E)を使用した。これは、K.P.-12mと-28mにおけるアレー記録およびその間の地盤データのみを用いて重複反射理論に基づいて求めたものである²¹⁾。この算定法においては-12m以浅の液状化に伴う剛性低下の激しい層の物性曲線を使わないため、埋立層の非線形挙動に左右されない入射波が算定できるものである。解析で対象としたのは初動から主要動、液状化状態の記録を含む18秒間である。

(2) 解析条件

演算量を軽減する目的から解析振動数は0.2Hzから12.5Hzとした。すなわち、高速ウェーブレット変換による帯域分割振動数 f_D はナイキスト振動数を f_N として

$$f_D = f_N \cdot 2^{-j} \quad (j=0,1,2,\dots) \quad (5)$$

と規定されるので、この場合 50×2^{-8} Hzから $50 \times$

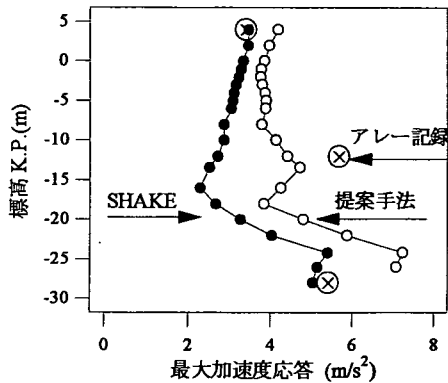


図-7 最大応答加速度の深さ方向分布

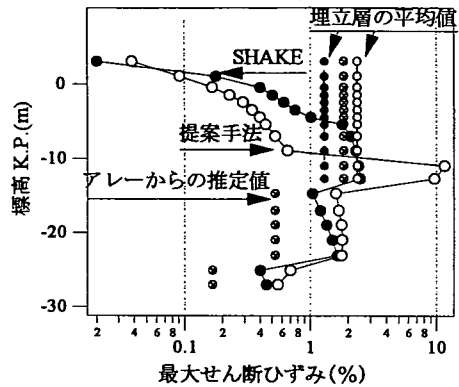


図-8 最大せん断ひずみの深さ方向分布

2²Hzの帯域成分について応答計算を行なっていることになる。しかし、高速ウェーブレット変換による帯域分割特性は用いたマザーウェーブレットによって異なり、フーリエ変換によるフィルタリングのように厳密にその周波数成分が遮断されるわけではないことに注意が必要である。なお、後述の解析例では高速ウェーブレット変換におけるリンク効果の影響を防ぐために、加速度データの前部および後部にゼロを加え全体で8192で計算した。

(3) 設定した地盤物性

先に示したように、地盤物性は従来のひずみレベル依存型の動的変形特性を与える場合と新たに提案した累積損失エネルギーと最大ひずみに依存する形の動的変形特性を与えることができる。この解析対象地盤のうち、要素試験データのある埋立まき土層(海面下、層番号3-12)を後者の考え方で規定した。すなわち、図-4の累積損失エネルギーとのせん断剛性および減衰定数の関係を用いた。

一方、非液状化層である埋立土層(海面上、層番号1, 2)および沖積粘土層(層番号13-17)、洪積砂礫層(層番号18, 19)については各時間帯において過去に受けた最大ひずみ振幅の絶対値の平均から、ひずみ依存曲線を用いてせん断剛性および減衰定数を求めることとした。図-6に各層のひずみ依存曲線²⁴⁾を示す。これは、これら土層の繰返しせん断に対するデータが無かったことに加え、埋立まき土層以外については、繰返しせん断の影響が液状化層ほど大きくないと判断し、従来型のひずみ依存の物性曲線を用いたものである。

なお、減衰定数については、せん断剛性の場合と同様の考え方によって規定することが可能である。しかし、この例においては非排水一定ひずみ繰返し三軸試験の結果からは過剰間隙水圧の上昇によって極端に大きくなるような結果が得られなかったため、本解析で

は双曲線モデルやRamberg-Osgoodモデルにおいて成り立つ減衰と剛性比の関係を参考に次式から減衰定数とせん断剛性の関係を定義することとした。

$$h = (h_{\max} - h_{\min})(1 - G/G_0) + h_{\min} \quad (6)$$

ここで、 h_{\max} および h_{\min} はそれぞれ減衰定数の下限値と上限値でありそれぞれ0.15および0.03とした。式(6)によれば、各層の減衰定数は先に決めた各層の剛性比に対して一意に決まる。ただし、式(6)の関係が過剰間隙水圧上昇時にも成立するか否かについては、現時点で実験的に確認されていない。

(4) 提案手法の適用性の考察

図-7は、最大応答加速度の深さ方向分布を示したものである。図中には、提案手法で用いたものと同じ動的変形特性を使ったSHAKEの結果とアレー記録の値も示した。なお、SHAKEの解析パラメータに用いる最大ひずみを有効ひずみに換算する係数は、一般的に使われる0.65を用いている。提案手法では全般にSHAKEより大きな加速度応答を与えており、アレーの記録と対比すれば、地表ではSHAKEの方が、また地中(K.P.-12m)では提案手法の方が一致度が高いように見える。また、両者に共通して言えるのは、アレーの観測点間での減衰・増幅特性はやや複雑に変化している。したがって、最大加速度のみから適否を論じるのは限界がある。

図-8は、最大せん断ひずみの深さ方向分布を示したものである。図中には、アレー記録から推定された平均的なせん断ひずみも示してある。また、この推定された値と比較できるように、埋立層については深さ方向のせん断ひずみを平均化したものも示してある。まず、沖積粘土層と洪積砂礫層の最大ひずみを見ると、提案手法とSHAKEの差はそれほど顕著でないが、

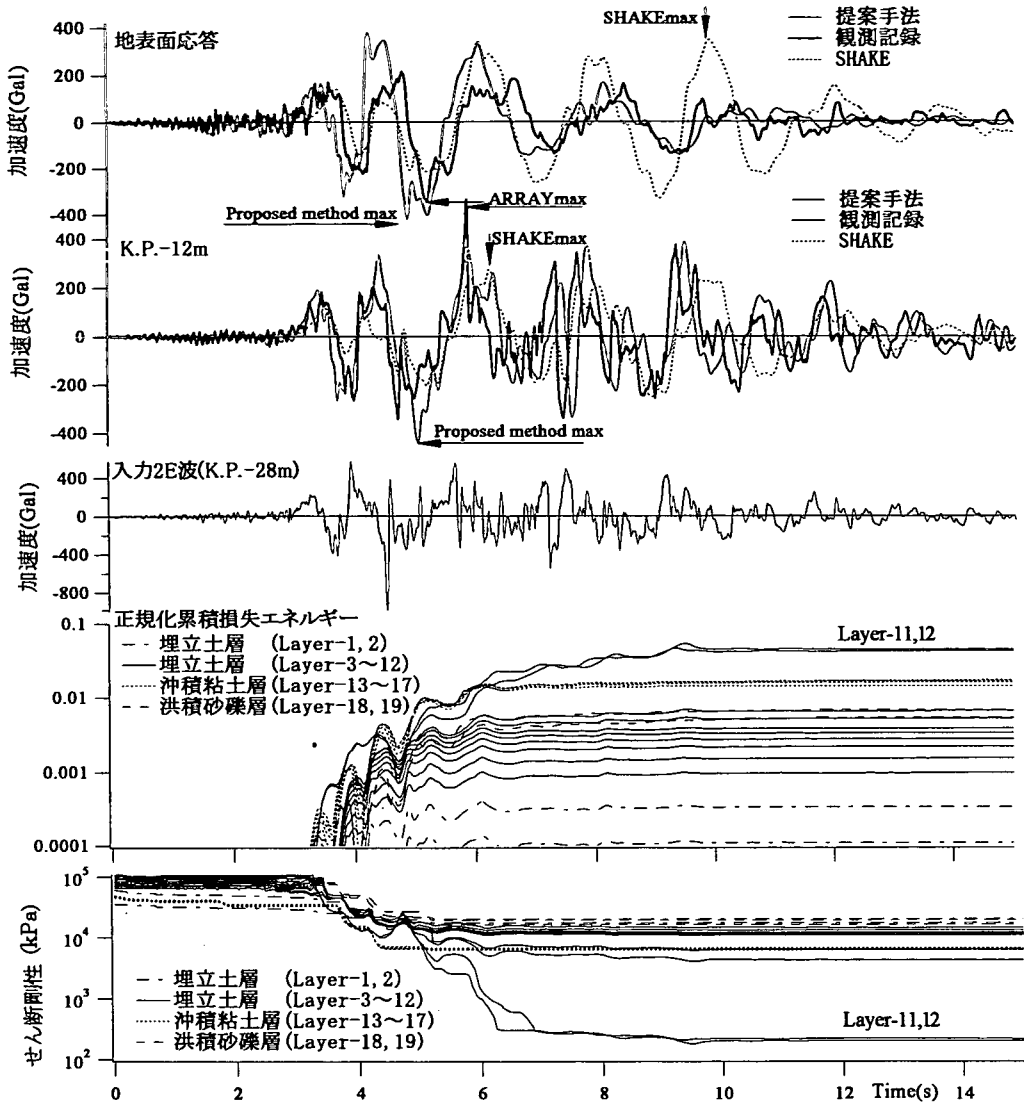


図-9 応答加速度，正規化累積損失エネルギー，せん断剛性の時刻歴

ひずみが三倍ほど大きく評価されていることから、どちらも原位置の物性より軟らかめの物性評価になっていることがうかがえる。次に、埋立層を見れば、提案手法では沖積粘土層の直上第11層と第12層で約10%程度の最大ひずみが発生し、それより上部の埋立層の最大ひずみは1%以下となっているのに対して、SHAKEでは8層目から12層目にかけて2-3%程度の最大ひずみが発生し、それより上部の層で徐々に小さくなる傾向がある。このようにインピーダンス比の大きなところにひずみが集中する定性的傾向は、理論的にも実験的^{26), 27)}にも首肯できるものであるが、問題はその大きさである。図中に示したアレーからの推定値をよりどころにするとすれば、この推定値²⁵⁾が、1.2Hz

のローパスフィルターをとったものであり、実際の値よりも小さめに評価されていると考えられることから、この値よりやや大きめの値を与えている提案手法の方が現実に近いものと判断される。

図-9はK.P.+4mおよび-12mの応答加速度とアレー観測記録およびSHAKEとの比較、計算の結果得られた正規化累積損失エネルギーおよびせん断剛性の時刻歴を示したものである。SHAKEの計算結果が全時間を通して短周期成分が無く²⁾、3-5秒付近以降の後半部分の振幅、位相とも観測結果とかなり違うのに対して、提案手法により求めた加速度応答は、初期3秒付近までの短周期が表現されていると同時に7秒以降の後半部分の振幅・周期ともSHAKEより一致度が高い。以

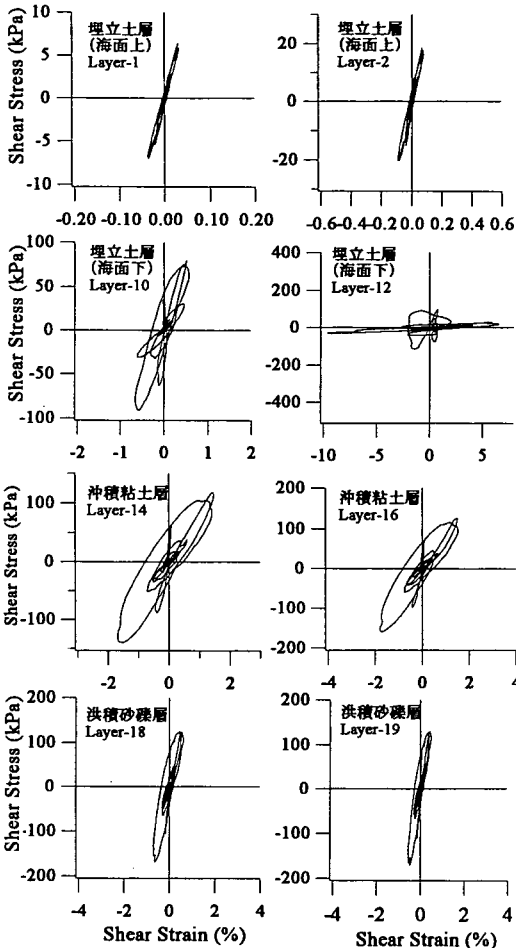


図-10 解析から求めたせん断応力-ひずみ関係

上から、提案手法が目的とした地震応答の非定常性は表現されていることが確認できる。また、主要動の始まり付近を境として埋立層に液状化による急激な剛性低下があったと推定されているが、本解析のせん断剛性の時刻歴からも明らかである。図によれば、埋立層は初期剛性から、1から2オーダー程度低下したことになる。本手法の最大の有用性はこのようにせん断剛性の経時変化を陽な形でとらえることができる点にある。

しかしながら、4秒から7秒付近までの変化を十分にとらえているとはいいがたく、-12mの結果では観測記録と位相差も見られる。この原因は、次ぎのように考えられる。4秒付近の地表記録の解析と観測の違いに着目すれば、主要動の最初の一波で、液状化による急激な剛性低下があったものと推測できる。すなわち、地盤は複数回の繰返しせん断というよりもむしろ、大きなせん断応力での単調せん断によって急激に軟化したものと考えられる。ここで、提案手法のせん断剛性の時刻歴を見ると、第11、12層では、4-5秒付

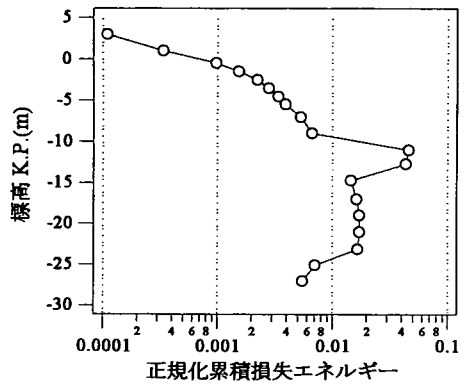


図-11 正規化累積損失エネルギーの深さ方向分布

近で剛性が一時回復しているのがわかる。また、この付近で算定された累積損失エネルギーも増減している。これは埋立土層の損失エネルギーを計算するに当たって、弾性エネルギー分も加算していることに起因するものであり、解析上せん断剛性を大きめに低下させてしまうことを意味している。その結果、第11、12層のひずみが大きく発達し、それより上層の剛性低下が進展しなかったものと理解される。このように外力の時刻歴に振幅の大きな長周期成分が含まれている場合、損失エネルギーの評価を工夫する必要がある。しかし、ある周期の外力に対して、物性評価のための時間軸上のサポート区間をその周期より短くすることは物理的な意味を曖昧にするため、現時点ではこのような場合に提案手法の限界があることを認識するにとどめる。

図-10に、提案手法から得られた代表的な層のせん断応力-ひずみ関係を示す。図は、縦軸と横軸の比率が同じになるように描いてあり、図からせん断剛性の大小関係が読み取れる。本手法から計算されるせん断応力-ひずみ履歴は基本的に非線形であり、見かけ上の軟化過程が表現されている。図から、埋立土層最下部にあたる第12層では約10%のひずみが生じ、剛性低下が著しいことがわかる。図-11に、提案手法から得られた正規化累積損失エネルギーの深さ方向分布を示す。既往の研究によると²⁰⁾埋立まき土層が剛性を失うまでに費やすことのできる正規化累積損失エネルギーは、約0.02程度であることがわかっている。これを勘案すれば、提案手法で求められた第11、12層のその値は、2.5倍程度大きくなっており、この層の累積損失エネルギーを過大評価しているものと考えられる。その結果、この層のせん断剛性の低下が実際より過大に評価され、すでに図-7に示したようにせん断ひずみが大きく発達したのものと考えられる。このようにせん断ひずみの算定は、計算で用いたいわゆる大ひずみ時の

物性に大きく依存するため、最大せん断ひずみの予測精度を上げるためには、それ相当の物性評価が必要と考えられる。この大ひずみ時の変形特性を把握するための試験法はレベル2地震動に対する設計法と関連して現在研究中であり、今後の研究成果を待つところが大きい。現時点では、本提案手法を最大せん断ひずみの予測に用いると言うよりむしろ、剛性低下に基づいて液状化危険度の高い層を決定したり、杭などの設計に用いる地盤剛性の算定に利用するのが有効であると考えられる。

4. 結論

本研究では以下に示す二つの新しい概念を導入した地震応答解析手法を提案した。

- ①高速ウェーブレット変換を用いて入力波を時間軸上に局在するウェーブレットに分解し、それぞれの中心時刻付近に対応する地盤物性値を用いた線形応答を重ね合わせることで、地盤物性の非正常な変動を考慮する。
- ②地震動入力に伴う地盤のせん断剛性および減衰定数の変動を、地盤内で消費される累積損失エネルギーとその時点までの最大ひずみレベルから規定する。また、兵庫県南部地震の際に神戸ポートアイランドで観測されたアレー記録を用いた事例解析を行い、解析の適用性を検討した。その結果、提案手法が液状化を伴う地盤物性の非正常な変化を表現できることを示した。言い換えれば、本提案法は時間領域の逐次積分非線形解析で得られる非正常挙動を時間一周波数領域で表現したものと解釈することもできる。

謝辞：本研究の入力波の算定解析は(株)アーク情報サービスから出されているプログラムArk-Quakeの機能追加によって実現したものであり、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 吉田 望：実用プログラムSHAKEの適用性、軟弱地盤の地震動増幅シンポジウム発表論文集、pp.14-31, 1994.
- 2) Schnabel,P.B., Lysmer, J.and Seed, H.B.: SHAKE a computer program-for earthquake response analysis of horizontally layered sites, *EERC report* 72-12, 1972.
- 3) 杉戸真太, 合田尚義, 増田民夫：周波数特性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察, 土木学会論文集, No.493/Ⅲ-27, pp.49-58, 1994.
- 4) 吉田 望, 小林 悟, 三浦均也：大ひずみ領域を考慮した等価線形地震応答解析手法, 第25回地震工学研究発表会, pp.297-300, 1999.
- 5) 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.
- 6) 神山 真, 吉田 勝：鉛直アレー強震記録による地盤剛性ならびにダンピングの非正常変動の解析, 土木学会論文集, No.647/Ⅰ-51, pp.379-394, 2000.
- 7) 神山 真, 松川忠司, 福地桂一：地盤物性の非正常性を考慮した非線形地震応答解析, 第1回日本地震工学研究発表・討論会梗概集, p.36, 2001.
- 8) 中村 晋：ベクトルスペクトルによる地震動の増幅特性評価とその適用, 土木学会論文集, No.519/Ⅰ-32, pp.161-173, 1995.
- 9) 中村 晋：2.2周波数領域での動的物性に基づく非線形解析, レベル2地震に対する土構造物の耐震設計シンポジウム, (社)地盤工学会, pp.138-153, 2000.
- 10) 佐々木文夫, 前田達哉：データ解析におけるウェーブレット変換の基本的性状の検討, 日本建築学会構造系論文報告集, 第453号, pp.197-206, 1993.
- 11) 宮脇幸治郎, 土岐憲三：ウェーブレット解析の地震波特性に関する一考察, 土木学会論文集, No.525/Ⅰ-33, pp.261-274, 1995.
- 12) Chakraborty, A.and Okaya, D.: Frequency-time decomposition of seismic data using wavelet based methods, *Geophysics*, Vol.60, No.6, pp.1906-1916, Nov.-Dec.1995.
- 13) Chui, C.K.: *Introduction to wavelets*, Academic Press, New York, 1992.
- 14) 桜井 明, 新井 勉 訳：数理科学 ウェーブレット入門, 東京電機大学出版局, 1993.
- 15) Daubechies I.: *Ten Lectures on Wavelets*, SIAM, Philadelphia, 1992.
- 16) 榊原 進：数理科学 ウェーブレットビギナーズガイド, 東京電機大学出版局, 1995.
- 17) Yamazaki, F., Towhata, I. and Ishihara, K.: Numerical model for liquefaction problem for under multi-directional shearing on horizontal plane, *5th Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics*, Vol.1, pp.339-406, 1985.
- 18) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, *Soils and Foundations*, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992.
- 19) Meyer, Y.: *Wavelets: Algorithms and Applications*, SIAM, Philadelphia, 1993.
- 20) 風間基樹, 鈴木崇弘, 柳澤栄司：地盤に入力された累積損失エネルギーの評価法と液状化予測への適用, 土木学会論文集, No.631/Ⅲ-48, pp.161-177, 1999.
- 21) 国生剛治, 本山隆一：地震波の上昇波と下降波の分離による表層地盤でのエネルギー収支, 土木学会論文集, No.652/Ⅲ-51, pp.257-267, 2000.
- 22) 風間基樹, 増田昌昭, 山口 晶, 柳澤栄司：ポートアイランドまさ土層の液状化強度の推定, 第24回地震工学

- 研究発表会講演会論文集, pp.465-468, 1997.
- 23) Hatanaka, M., Uchida, A. and Taya, Y.: Estimating K_v -value of in-situ gravelly soils, *Soils and Foundations*, Vol.39, No.5, pp.93-101, 1999.
- 24) 善 功企, 山崎浩之: 埋立地に用いたまさ土の液状化特性, 土と基礎, 第44巻, 第2号, pp. 60-63, 1996.
- 25) 風間基樹, 柳沢栄司, 稲富隆昌, 菅野高弘, 稲垣紘史: アレー観測記録から推定した神戸ポートアイランドの地盤の応力-ひずみ関係, 土木学会論文集, No.547/III-36, pp.171-182, 1996.
- 26) 山口 晶, 風間基樹, 日下部 伸: 神戸沖合人工島地盤のオンライン地震応答実験, 土木学会論文集, No.701/III-58, pp.181-195, 2002.
- 27) Yamaguchi, A., Kazama, M., Toyota, H., Kitazume, M. and Sugano, T.: Effects of the stiffness of soft clay layer on strong motion response, *Soils and Foundations*, Vol.42, No.1, pp.17-33, 2002.
- 28) Kazama, M., Yamaguchi, A. and Yanagisawa, E.: Liquefaction from a ductility viewpoint, *Soils and Foundations*, Vol.40, No.6, pp.47-60, 2000.

(2002. 2. 19 受付)

NONSTATIONARY SEISMIC GROUND RESPONSE ANALYSIS USING FAST WAVELET TRANSFORM

Motoki KAZAMA, Naohito OKADA and Susumu NAKAMURA

For studying non-stationary seismic ground response subjected to a strong earthquake motion, a new method is proposed. The method is time-frequency domain analysis using a fast wavelet transform, and non-stationary variation of shear stiffness and damping ratio are determined by dissipation energy and maximum shear strain amplitude. Most valuable point of the method is that the deterioration of shear stiffness can be obtained explicitly as a result of analysis. Applicability of the method to practical problem is studied by the case history of the seismic array observation site of Kobe Port Island in the 1995 Kobe earthquake.