

# 非線形パラメタと有効応力解析を併用した 強震動評価手法

野津 厚<sup>1</sup>

<sup>1</sup> (独) 港湾空港技術研究所 地盤・構造部 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail: nozu@pari.go.jp

既往の研究において著者らは断層モデルを用いた強震動評価における多重非線形効果の重要性を指摘し、その影響を加味して簡便に強震動評価を行うための手法として、「非線形パラメタ」を用いて経験的グリーン関数を補正する方法を提案してきた。本研究では、この方法を既存の有効応力解析手法と組み合わせることにより、表層地盤の非線形性の影響をより適切に反映できる手法とすることを試みた。1995年兵庫県南部地震によるポートアイランドの鉛直アレー観測記録および1993年釧路沖地震による釧路港の鉛直アレー観測記録を対象として提案法による強震動シミュレーションを実施し、提案法の適用性を確認した。

**Key Words :** multiple nonlinear effects, empirical Green's function method, effective stress analysis, the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, the 1993 Kushiro-oki earthquake

## 1. はじめに

断層モデルを用いた強震動評価において、表層地盤の非線形挙動の影響を適切に考慮することは重要である。この点に関して、著者らは、表層地盤の非線形挙動の影響が「多重非線形効果」という形を取りうることを指摘し、その影響を考慮して強震動評価を簡便に実施するための方法の提案を行ってきた<sup>1),2),3)</sup>。多重非線形効果の概念を図-1に示す。この図に波線を示すように、堆積層内にトラップされた地震波は、直達S波を除けば、表層地盤を複数回横切ってからサイトに到達する。従って、大地震の際に表層地盤が非線形挙動を示せば、地震波はその波線経路において非線形挙動の影響を複数回受けることになる。このことを著者らは多重非線形効果と呼んでいる。なお、図-1は地震基盤上面での反射を想定した図になっているが、反射の生じる面は地震基盤上面以外のインピーダンス比の高い面であっても良い。

多重非線形効果の影響を考えれば、サイトの工学的基盤に下方から入射する地震波は、図-1に示すように、直達S波を除けば、表層地盤の非線形挙動の影響をすでに受けていることになる。従って、断層モデルを用いた強震動評価において広く用いられている方法、すなわち、線形性を仮定して地表で合成された波をいったん工学的基盤まで引き戻し、表層地盤の非線形計算を実施して地

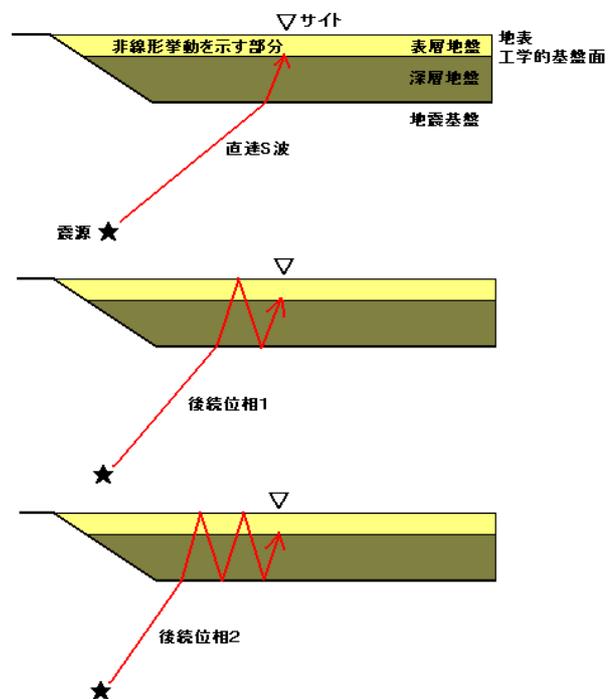


図-1 多重非線形効果の概念図

表での波形を求める方法では、表層地盤の非線形挙動の影響を完全には考慮できていないことになる。

これに対し、著者らは、多重非線形効果の影響を考慮

して強震動評価を簡便に実施するための方法の提案を行ってきた<sup>1),2),3)</sup>。これは、表層地盤と深層地盤を含む堆積層における平均的なS波速度の低下率 ( $v_1$ ) および堆積層における平均的な減衰定数の増分 ( $v_2$ ) を用い(これらを「非線形パラメタ」という)、波形合成に用いる経験的グリーン関数(地表で得られたもの)に対してあらかじめ補正を加えておくという方法である。この方法を2000年鳥取県西部地震<sup>1)</sup>、1993年釧路沖地震<sup>2)</sup>および2001年Nisqually地震<sup>3)</sup>に適用したところ、非線形パラメタとして適切な値を用いれば、非線形性の影響を受けた観測波形をかなり良好に再現できるところまで確認できている。

さて、上記の方法は、サイト直下の表層地盤の非線形挙動の影響のみならず、多重非線形効果を考慮できるという点に特徴があるが、サイト直下の非線形挙動の取り扱いの詳細さという点では、有効応力解析をはじめとする非線形の地震応答計算<sup>(例えば4)</sup>に及ぶものではない。従って、例えば1995年兵庫県南部地震によるポートアイランドの観測記録のように、表層地盤の極めて強い非線形挙動の影響を受けた記録に対して上記の方法を適用した場合、良好な結果が得られないという問題点がある(この点については2.で詳しく述べる)。このことに加え、強震動評価の実務においては、サイト直下の表層地盤の非線形挙動については、地盤調査結果に基づく非線形の地震応答計算により評価する方法がすでに定着しており、サイト直下の非線形挙動の取り扱いの詳細さという点で見劣りがする上記の方法は受け入れられにくいという問題点もある。

こうした問題点を解消するため、ここでは、非線形パラメタを用いる方法と有効応力解析を併用する強震動評価手法を新たに提案する。すなわち、サイト直下の非線形挙動については有効応力解析により評価し、工学的基盤への入射波に対する多重非線形効果の影響のみ、非線形パラメタを用いる方法で評価する。この方法の適用性を確認するため、1995年兵庫県南部地震によるポートアイランドの鉛直アレー観測記録、および1993年釧路沖地震による釧路港の鉛直アレー観測記録を対象に、強震動シミュレーションを実施する。

## 2. 非線形パラメタを用いる方法の問題点

ここでは、非線形パラメタを用いる方法が十分な適用性を示さない事例を示す。

図-2および図-3に、山田他<sup>5)</sup>による1995年兵庫県南部地震の特性化震源モデルを示す。図-2には平面図を、図-3には断面図(神戸側部分)を示す。この震源モデルを用いて、経験的グリーン関数法<sup>6)</sup>で神戸大学(KBU)およ

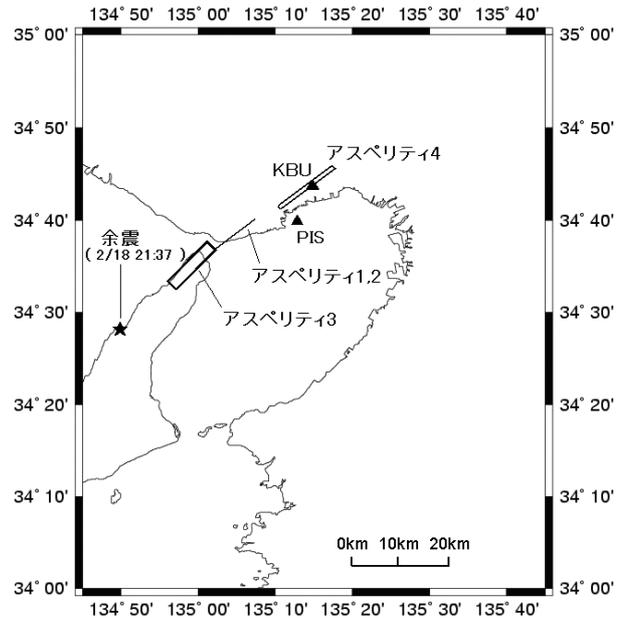


図-2 山田他<sup>5)</sup>による兵庫県南部地震の震源モデル

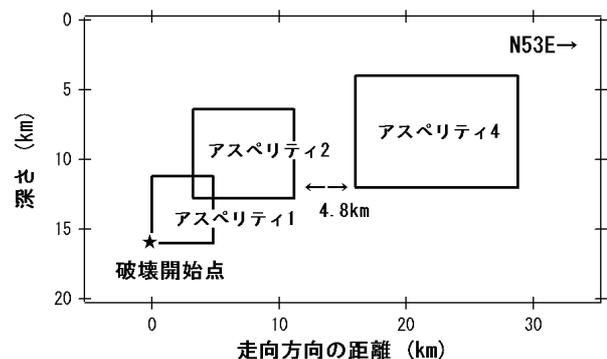


図-3 山田他<sup>5)</sup>による震源モデルの神戸側部分

表-1 波形合成に用いたパラメタ

	アスペリティ		
	アスペリティ1	アスペリティ2	アスペリティ4
走向(度)	N53E	N53E	N233E
傾斜(度)	90	90	85
長さ(km)	4.8	8.0	12.8
幅(km)	4.8	6.4	8.0
NL×NW×ND	3×3×3	5×5×5	7×7×7
C	2.7	1.8	1.0
ライズタイム(s)	0.4	0.5	0.6
破壊開始時刻(s)	0.0	1.8	6.9
破壊開始点	南西下端	南西下端	南西下端
破壊伝播様式	同心円状	同心円状	同心円状
破壊伝播速度(km/s)	2.8	2.8	2.8

びポートアイランド(PIS)の地表における本震の速度波形を計算した。KBUとPISの位置を図-2に示す。KBUは風化花崗岩上のトンネル内の観測点であり<sup>(例えば7)</sup>、表層の非線形挙動の影響は無視しようと仮定した。PISは埋立地にあり、本震時には表層地盤が強い非線形挙動を示していたことがわかっている<sup>(例えば8)</sup>。ポートアイランドに対して最も影響の大きいアスペリティ1, 2と余震との位置関係を考慮し、1995年2月18日21時37分に発生し

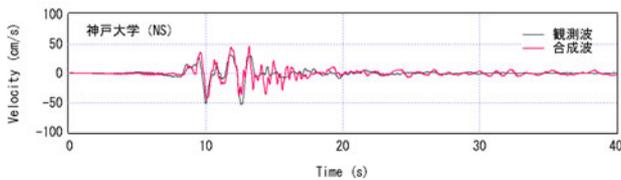


図-4 神戸大学における波形合成結果

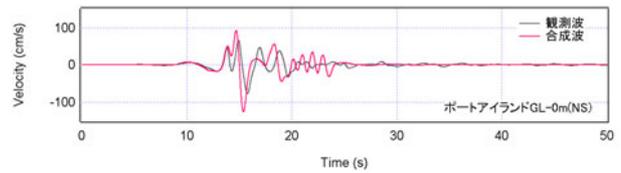
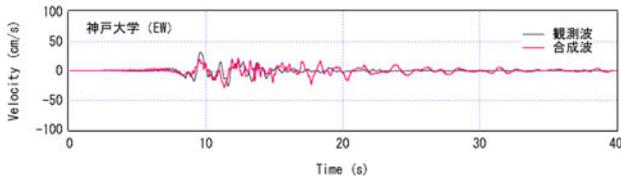


図-6 ポートアイランドにおいて非線形パラメタ ( $\nu_1=0.85$ ,  $\nu_2=0.20$ ) を用いて波形合成を行った結果 (0.1-2Hz)

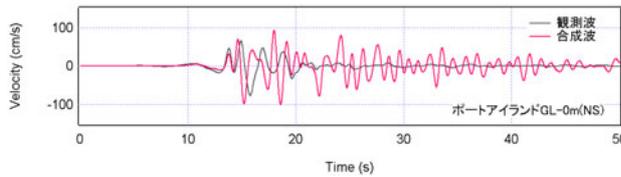
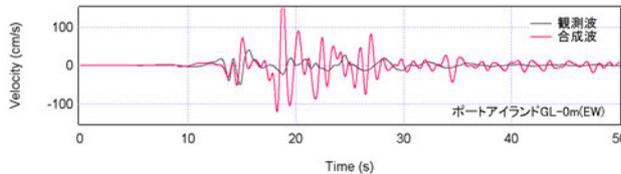


図-5 ポートアイランドにおいて地盤の非線形挙動を  
考量せず波形合成を行った結果 (0.1-2Hz)



た余震 (M5.0) の記録を経験的グリーン関数として用いることにした。波形合成に用いたパラメタを表-1に示す。山田他<sup>9)</sup>の研究に対して用いる余震が変更されているので、重ね合わせのパラメタであるNL, NW, NDおよびCについては、KBUでの速度波形が再現されることを念頭において今回新たに設定した。

図-4および図-5に結果を示す。これらの図に示すように、神戸大学での波形を再現できるような震源モデルを用いると、ポートアイランドでの波形は大幅に過大評価される。これは表層地盤の非線形挙動によるものと考えられる。過大評価は波形後半で著しいものとなっており、本震の観測波形は多重非線形効果の影響を受けている可能性がある。

そこで、非線形パラメタを導入することにより、ポートアイランドにおける波形合成結果を改善できるかどうか検討した。ここでは、波形合成結果が観測波形に近づくように、試行錯誤により非線形パラメタの値を決定した ( $\nu_1=0.88$ ,  $\nu_2=0.20$ とした)。図-6に結果を示す。この結果は、表層地盤の非線形挙動を考慮しない波形合成結果 (図-5) と比較すれば大幅に改善されている。しかし、波形の一致度は、2000年鳥取県西部地震や1993年釧路沖地震を対象とした既往の研究結果<sup>1), 2)</sup>と比較して、十分に満足いくものとはなっていない。この結果が得

られた理由としては、非線形パラメタによる方法が、表層地盤の非線形挙動に関して簡便な取り扱いを行っており、ポートアイランドの表層地盤に生じたような強い非線形挙動を十分には考慮できないためであると考えられる。

### 3. 本稿で提案する方法

以上の問題点に対処するため、ここでは、非線形パラメタと有効応力解析を併用する方法を新たに提案する。提案法は以下に述べる通りである。

従来は、地表で得られた経験的グリーン関数 (小地震記録) に対して、式(1)に示すような補正を行い、補正後のグリーン関数を重ね合わせるにより波形合成を行っていた。

$$g_n(t) = g(t) \quad (t < t_0)$$

$$g_n(t_0 + (t - t_0) / \nu_1) = g(t) \exp(-\nu_2 \omega(t - t_0)) \quad (t > t_0) \quad (1)$$

ここに $g(t)$ は補正前のグリーン関数、 $g_n(t)$ は補正後のグリーン関数、 $t_0$ はグリーン関数上での直達S波到来時刻、 $\nu_1$ は堆積層における平均的なS波速度の低下率、 $\nu_2$ は堆積層における平均的な減衰定数の増分を表す。

提案法では式(1)を、地表におけるグリーン関数ではなく、工学的基盤におけるグリーン関数 (2E波) に適用する。そして、補正後のグリーン関数を重ね合わせるにより、工学的基盤における大地震時の地震動を計算し、これを入力した表層地盤の有効応力解析を行うことにより、大地震時の地表における地震動を計算する。

なお、式(1)の右辺を計算する際、グリーン関数に含まれる振動数成分が狭帯域であれば、その振動数に対応した $\omega$ を用い、広帯域であれば、まず $g(t)$ から帯域通過フィルタにより特定の帯域 (バンド幅 $f_b$ ) をとりだし、この時間関数に $\exp(-\nu_2 \omega(t - t_0))$ を乗じた上で、すべての帯域について加え合わせる。この点は従来通りである。

バンド幅 $f_b$ は本研究の応用例ではすべて0.02Hzとした。

#### 4. 1995年兵庫県南部地震によるポートアイランド鉛直アレー観測記録への適用

提案法の適用性を確認するため、ここでは1995年兵庫県南部地震によるポートアイランド鉛直アレー観測記録への適用を行う。提案法では有効応力解析が必要となるので、まず(1)において有効応力解析用の表層地盤モデルの適用性の確認を行う。次に(2)において提案法による強震動シミュレーションを実施する。

##### (1) 有効応力解析用の表層地盤モデル

1995年兵庫県南部地震の際、ポートアイランドの鉛直アレー観測地点 (PIS) では、GL-0m, -16m, -32m, -83mの4つの深度で強震記録が得られている(例えば<sup>4)</sup>。ここではPISを対象に作成した有効応力解析用の表層地盤モデルに対し、GL-83mにおける観測波 (NS成分) を入力した地震応答計算を行い、他の深度 (GL-0m, -16m, -32m) における波形を計算し、観測波との比較を行うことにより、地盤モデルの適用性を検討した。

解析には有効応力解析プログラムFLIP<sup>8)</sup>の公開版であるVer.3.3を用いた。解析に必要な土質定数は表-2のものを用いた。表-2の土質定数のうち-32m以浅のものは神戸港の岸壁を対象とした2次元の有効応力解析<sup>9)</sup>に用いられた土質定数と同じもので、-32m以深の土質定数は今回新たに設定した。

結果を図-6に示す。ここでは0.2-2.0Hzの速度波形を示す。観測波形の再現性は非常に良好であり、このことから、表-2の地盤モデルは、対象地点における地盤の動的特性を表現するモデルとして適切であると考えられる。そこで、以下に述べる解析ではこの地盤モデルを用いることとした。なお、以下に述べる解析では2E波を入力するため、地盤モデルの下端に粘性境界を設定する。

##### (2) 提案法による強震動シミュレーション

ポートアイランドの鉛直アレー観測地点を対象とし、提案法による強震動評価を実施するため、まず、1995年2月18日21時37分に発生した余震 (M5.0) の地表における記録を線形の重複反射理論で引き戻し、工学的基盤 (GL-83m) におけるグリーン関数 (2E波) を求めた。これを図-8に示す。この波形から、直達S波の到来時刻 $t_0$ を10.6sと読みとった (図中の縦棒)。

次に、2.と同様の震源モデルを用いてこのグリーン関数を重ね合わせることにより、工学的基盤における大地震時の波形 (2E) を計算し、これを上述の地盤モデルに入力することにより、各深度における観測波形と比

表-2 ポートアイランドにおける有効応力解析用の地盤モデル

層厚 (m)	材料	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	初期せん断剛性 (kPa)	基準有効拘束圧 (kPa)	内部摩擦角 (度)
3.4	まさ土	1.8	79380	63	36
4.6	まさ土	1.8	79380	63	36
1.0	シルト	1.7	74970	143	30
8.0	まさ土	1.8	79380	63	36
13.0	粘性土	1.7	74970	143	30
30.0	砂質土	1.8	79380	63	36
23.0	粘性土	1.7	74970	143	30

\*第2層と第4層では過剰間隙水圧の発生を考慮しており、そのパラメータは変相角28度, W1=6.0, P1=0.5, P2=0.8, C1=2.43, S1=0.005。  
\*レーレー減衰定数 $\beta$ は0.002。

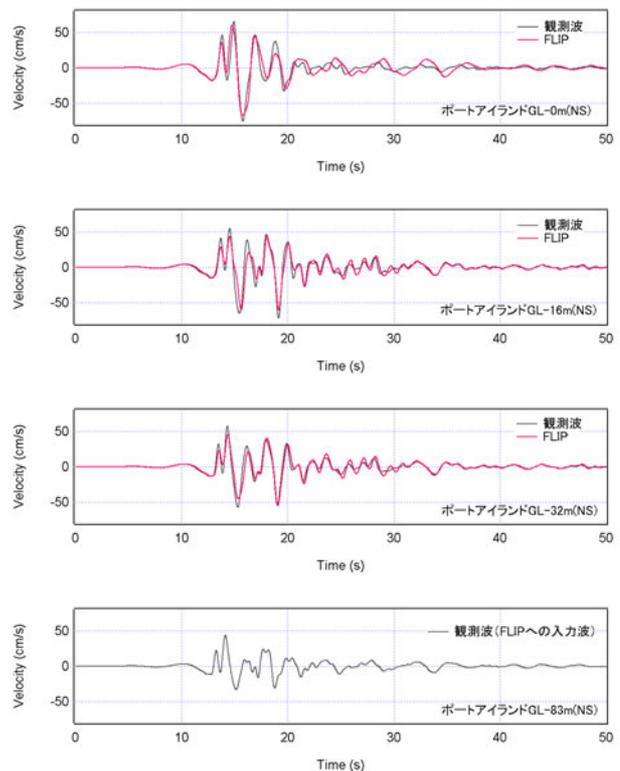


図-7 GL-83mの観測波を入力した有効応力解析の結果

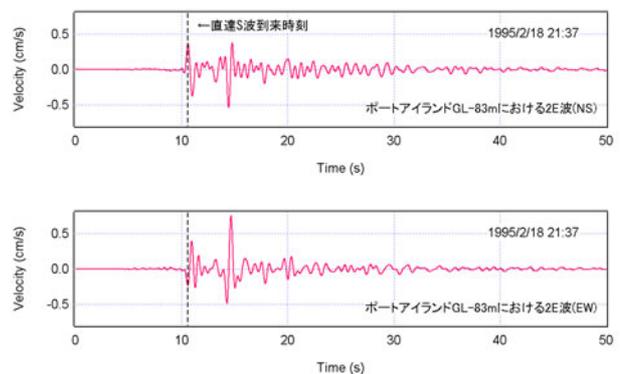


図-8 工学的基盤におけるグリーン関数 (2E波)

較可能な合成波形を計算した。

波形合成に用いる非線形パラメータは、グリッドサーチにより、各深度における観測波と合成波が最も良い一致を示すように設定した。具体的には、 $v_1$ の変域を1.00-0.90 (0.01刻み)、 $v_2$ の変域を0.00-0.10 (0.01刻み)と

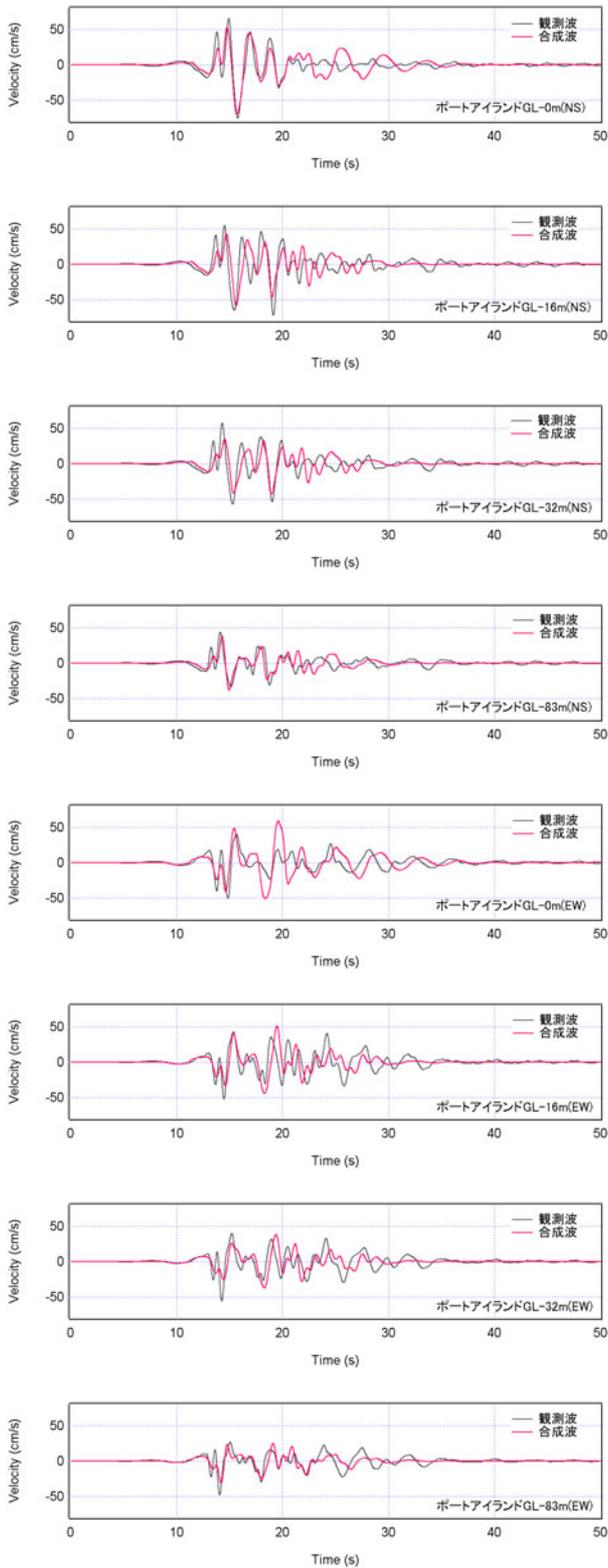


図-9 最適な非線形パラメタ ( $\nu_1=0.91$ ,  $\nu_2=0.06$ ) を用い、有効応力解析も併用して強震動評価を行った結果

し、121通りの  $\nu_1$  と  $\nu_2$  の組み合わせに対して各深度における速度波形のNS成分 (0.1-2.0Hz) を計算し、10s-20sの範囲で観測波との残差の自乗和を計算し、その合計が最小となるような  $\nu_1$  と  $\nu_2$  の組み合わせとして、 $\nu_1=0.91$ ,  $\nu_2=0.06$  を選定した。

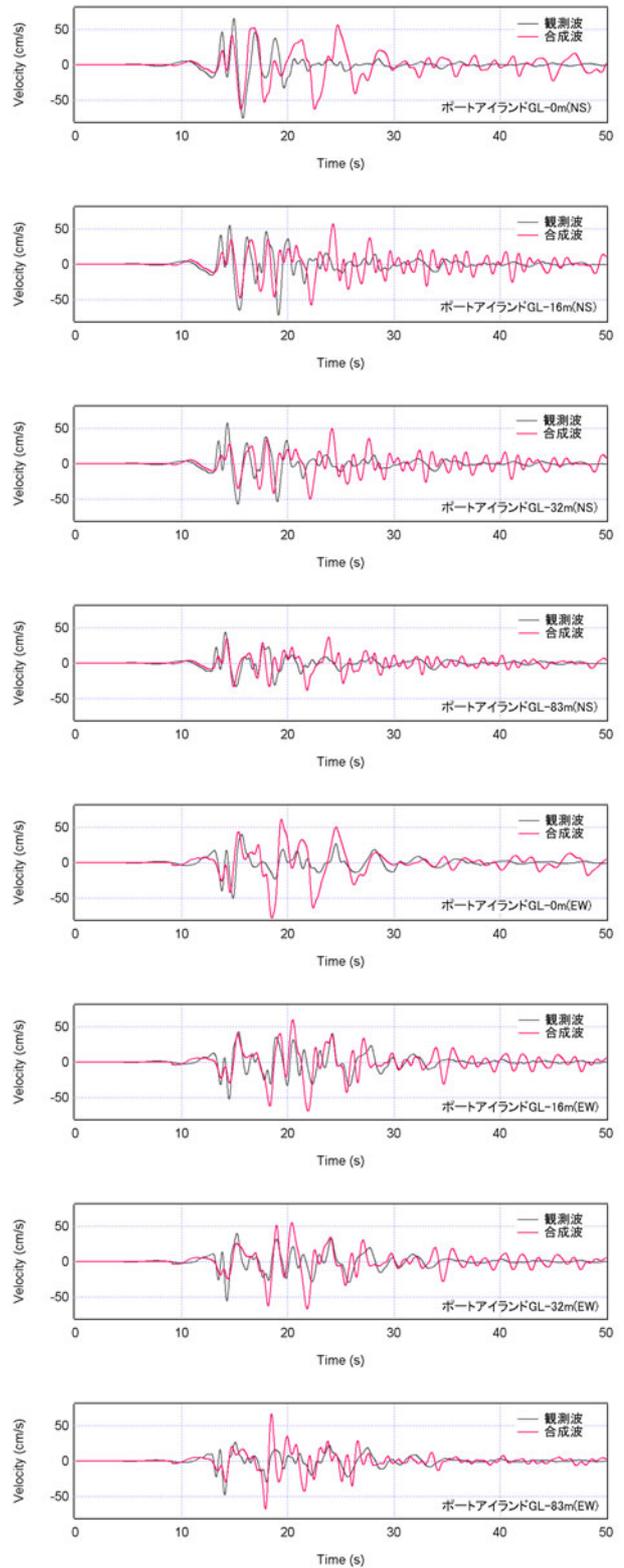


図-10 非線形パラメタを用いず、サイト直下の表層地盤の非線形挙動のみ有効応力解析により評価した結果

最適な非線形パラメタを用いた場合の波形合成結果を図-9に示す。ここでは各深度におけるNS成分とEW成分、合計8つの波形について比較を行っている。地表のEW成分はまだ誤差があるが、それ以外については概ね観測波形を再現できている。ここで、比較のため、非線形パラ

メタを用いず、サイト直下の表層地盤の非線形挙動のみ有効応力解析で評価した結果（すなわち多重非線形効果を見逃した場合の結果）を図-10に示す。この場合、直達S波はほぼ再現できているが、波形後半は大きく過大評価されている。この誤差は、多重非線形効果を考える立場からすれば、後続位相の波線経路（図-1）における減衰定数の増加の影響を見逃したために生じていると解釈される。また、GL-83mのNS成分（図-9および図-10の上から4段目）の18s付近の位相を見ると、多重非線形効果を見逃したケース（図-10）では、位相の到来するタイミングが早すぎる。この誤差は、多重非線形効果を考える立場からすれば、後続位相の波線経路（図-1）におけるS波速度の低下の影響を見逃したために生じていると解釈される。多重非線形効果を考慮したケース（図-9）では、この点が再現されている。このように、非線形パラメタと有効応力解析を組み合わせる方法は、有効応力解析だけを用いる場合よりも良好な結果を与える。

## 5. 1993年釧路沖地震による釧路港鉛直アレー観測記録への適用

提案法の適用性をさらに確認するため、ここでは1993年釧路沖地震による釧路港の鉛直アレー観測記録<sup>10)</sup>への適用を行う。まず(1)において断層モデルを準備し、(2)において有効応力解析用の表層地盤モデルの適用性の確認を行う。最後に(3)において提案法による強震動シミュレーションを実施する。

### (1) 震源モデル

釧路沖地震の震源モデルについてはすでに前報<sup>2)</sup>でも検討を行っているが、ここではそれに若干の改良を加えた。前報では、釧路地方気象台の地表観測点（KSR）で得られたSMAC-MD型強震計の記録、根室（NEM）と浦河（URA）の気象庁87型強震計の記録を用い、Harzell and Heaton<sup>11)</sup>のマルチタイムウインドウ法に基づき、波形インバージョンにより震源におけるすべりの時空間分布を求めた。その際、1993年2月4日23時43分に発生した最大余震（M4.9）の記録を経験的グリーン関数として用いた。今回は、その際に用いる破壊フロントの拡大速度を、合成波と観測波の残差を最小とする値として設定し、2.1km/sとした。それ以外の計算条件は前報と同様である。

波形インバージョンで仮定した断層面の位置を図-11に、波形インバージョンで得られた最終すべり量分布（最大余震のモーメントマグニチュードが気象庁マグニチュードに等しいと仮定して求めたおおまかなもの）を図-12に、インバージョンに用いた観測点における合成波と観測波の比較を図-13に示す。

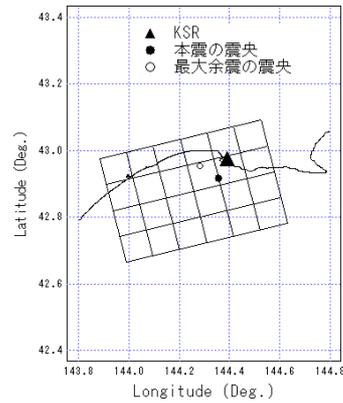


図-11 波形インバージョンで仮定した断層面

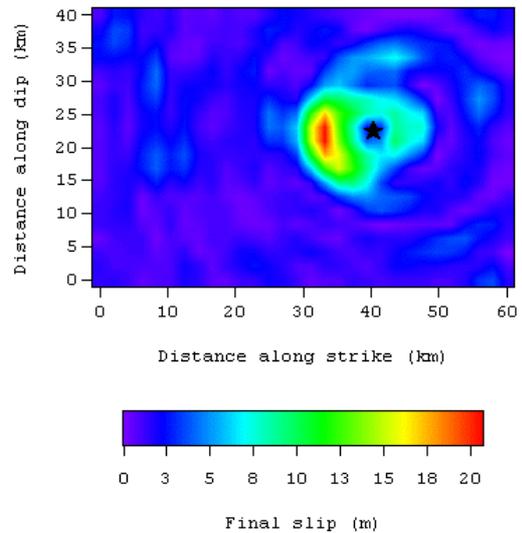


図-12 最終滑り量の分布

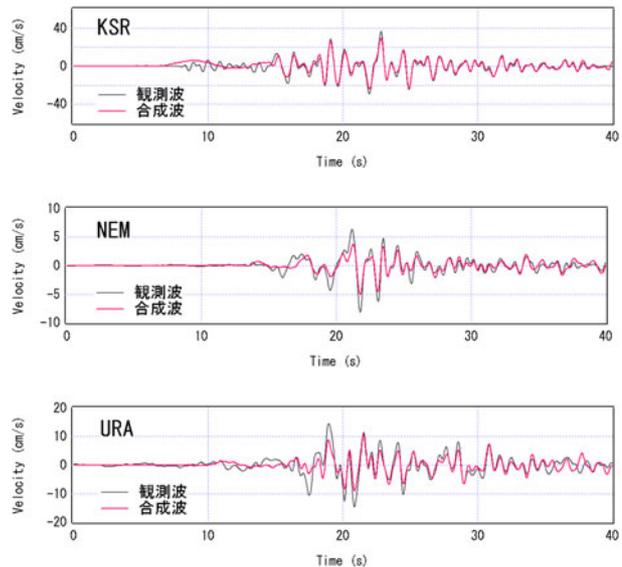


図-13 波形インバージョンによる合成波と観測波の比較

### (2) 有効応力解析用の表層地盤モデル

釧路港の鉛直アレー観測地点を対象とした有効応力解析用の表層地盤モデルとしてIai et al.<sup>10)</sup>のモデルがある。

表-3 釧路港における有効応力解析用の地盤モデル

層厚 (m)	材料	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	初期せん断剛性 (kPa)	基準有効拘束圧 (kPa)	内部摩擦角 (度)
2.0	砂質土	1.54	106600	37	40
7.0	砂質土	1.72	106600	37	40
14.0	砂質土	1.98	210400	98	48
9.0	砂質土	1.73	121500	164	37
4.0	砂質土	1.76	204700	195	44
8.0	砂質土	1.70	139100	224	44
8.0	砂質土	2.00	182400	269	45
25.0	砂質土	1.73	201200	354	44

\*第2層と第3層では過剰間隙水圧の発生を考慮しており、そのパラメータは第2層が変相角28度、W1=12.0, P1=0.3, P2=0.3, C1=3.97, S1=0.01. 第3層が変相角28度、W1=6.0, P1=0.3, P2=0.3, C1=3.68, S1=0.01.  
\*レーレー減衰定数 $\beta$ は0.0005.

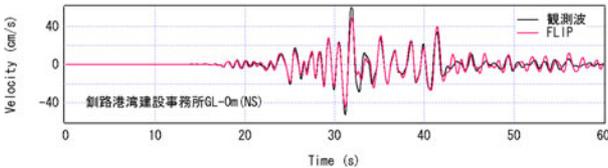


図-14 地中の観測波を入力した有効応力解析の結果

ここでは、本震時の速度波形をさらに精度良く再現することを念頭におき、Iai et al.<sup>10)</sup>の地盤モデルに対して微修正を加え、表-3に示す地盤モデルを設定した。なお、Iai et al.のモデルから変更されているのは第2層および第3層のW1, P1およびP2の値である。

1993年釧路沖地震の際、釧路港の鉛直アレー観測地点では、地表と地中 (GL-77m) で観測記録が得られている。そこで、作成した表層地盤モデルに対し、地中における観測波 (NS成分) を入力した地震応答計算を行い、地表における波形を計算し、観測波との比較を行うことにより、地盤モデルの適用性を検討した。解析には、兵庫県南部地震の場合と同様、FLIP<sup>8)</sup>の公開版であるVer.3.3を用いた。結果を図-14に示す。ここでは0.2-2.0Hzの速度波形を示す。観測波形の再現性は非常に良好であり、このことから、表-3の地盤モデルは、対象地点における地盤の動的特性を表現するモデルとして適切であると考えられる。そこで、以下に述べる解析ではこの地盤モデルを用いることとした。なお、以下に述べる解析では2E波を入力するため、地盤モデルの下端に粘性境界を設定する。

### (3) 提案法による強震動シミュレーション

釧路港の鉛直アレー観測地点を対象とし、提案法による強震動評価を実施するため、まず、最大余震の地表における記録を線形の重複反射理論で引き戻し、工学的基盤 (GL-77m) におけるグリーン関数 (2E波) を求めた。これを図-14に示す。この波形から、直達S波の到来時刻 $t_0$ を9.45sと読みとった (図中の縦棒)。

次に、(1)で求めた震源モデルを用いてこのグリーン関数を重ね合わせるにより、工学的基盤における大地震時の波形 (2E) を計算し、これを上述の地盤モデ

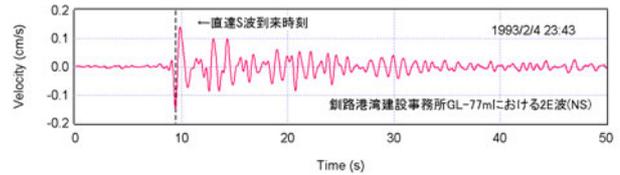


図-15 工学的基盤におけるグリーン関数 (2E波)

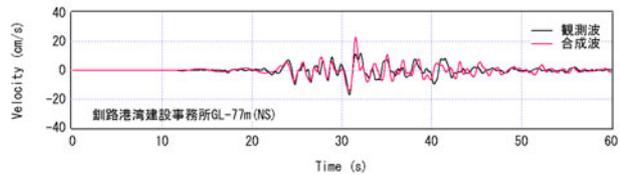
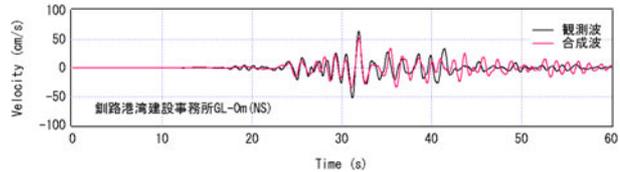


図-16 最適な非線形パラメタ ( $\nu_1=0.86$ ,  $\nu_2=0.01$ ) を用い、有効応力解析も併用して強震動評価を行った結果

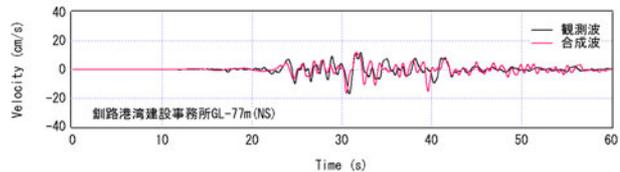
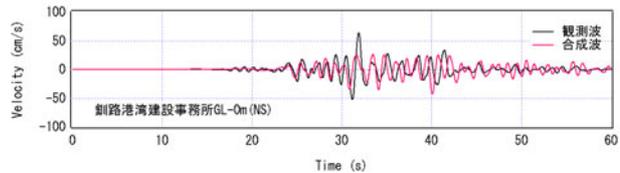


図-17 非線形パラメタを用いず、サイト直下の表層地盤の非線形挙動のみ有効応力解析により評価した結果

ルに入力することにより、観測波形と比較可能な合成波形を計算した。

波形合成に用いる非線形パラメタは、グリッドサーチにより、地表における観測波と合成波が最も良い一致を示すように設定した。具体的には、 $\nu_1$ の変域を0.90-0.80 (0.01刻み)、 $\nu_2$ の変域を0.00-0.10 (0.01刻み) とし、121通りの $\nu_1$ と $\nu_2$ の組み合わせに対して地表における速度波形のNS成分 (0.2-2.0Hz) を計算し、振幅の大きい15s-25sの範囲で観測波との残差の自乗和を計算し、その値が最小となるような $\nu_1$ と $\nu_2$ の組み合わせとして、 $\nu_1=0.86$ ,  $\nu_2=0.01$ を選定した。

最適な非線形パラメタを用いた場合の波形合成結果を図-16に示す。ここでは地表および地中 (GL-77m) におけるNS成分の比較を行っているが、観測波形の再現性は良好である。参考のため、非線形パラメタを用いず、

サイト直下の表層地盤の非線形挙動のみ有効応力解析で評価した結果（すなわち多重非線形効果を無視した場合の結果）を図-17に示す。この場合、地表における振幅が過小評価となっており、一方地中では、振幅は良好であるが、主要動の到来時刻にはずれがある。全体として、非線形パラメタを用いる場合の結果（図-16）の方が良好である。

## 6. まとめ

本研究では、断層モデルを用いた強震動評価において、表層地盤の非線形挙動の影響をより適切に反映するため、非線形パラメタと既存の有効応力解析手法を組み合わせる方法を新たに提案した。提案法は、サイト直下の非線形挙動については有効応力解析により評価し、工学的基盤への入射波に対する多重非線形効果の影響のみ、非線形パラメタを用いて評価するものである。1995年兵庫県南部地震および1993年釧路沖地震による強震記録を対象として提案法による強震動シミュレーションを実施し、提案法の適用性を検討した。その結果、①多重非線形効果を表す非線形パラメタの設定が適切であること、②サイト直下の表層地盤の非線形応答の評価が適切であること、以上の2つの条件が満たされれば、提案法により、表層地盤の非線形挙動の影響を受けた強震記録を良好に再現できることが確認された。

本研究は既往の強震記録を対象に提案法の適用性を検討したものであるが、工学的にはこれをいかに「予測」に結びつけていくかが重要である。そこで、「予測」という観点から、上の2つの条件をどうすれば満足させることができるかを考えてみる。まず②については、当然ではあるが、サイト直下の表層地盤の動的特性について十分な調査を行うことが重要であろう。一方、①に関しては、土質調査によるアプローチは困難を極めることが予想される。なぜなら、図-1に示すように、堆積層内にトラップされた地震波は、サイトからかなり離れた場所で表層地盤の非線形挙動の影響を受ける可能性があり、その位置を特定することは一般には容易でないと考えられるためである。むしろ、より多くの地震観測記録を対象に、本研究のような解析例を蓄積し、その結果を踏まえて、非線形パラメタに関する経験則を構築するといった帰納的アプローチが有望ではないかと考えている。

謝辞：本研究では関西地震観測研究協議会、神戸市開発局（当時）、建設省建築研究所（当時）および気象庁が取得した強震記録を使用しています。記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 野津 厚, 盛川 仁: 表層地盤の多重非線形効果を考慮した経験的グリーン関数法, 地震2, 第55巻, pp.361-374, 2003.
- 2) 野津 厚: 表層地盤の非線形挙動を考慮した1993年釧路沖地震の強震動シミュレーション, 地震工学論文集Vol.27 (CD-ROM), 2003.
- 3) Nozu, A. and H. Morikawa: Assessment of soil nonlinearity using empirical Green's function method, *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, No.2368, 2004.
- 4) Yoshida, N. and S. Iai: Nonlinear site response and its evaluation and prediction, *The effects of Surface Geology of Seismic Motion*, pp.71-90, 1998.
- 5) 山田雅行, 平井俊之, 岩下友也, 釜江克宏, 入倉孝次郎: 兵庫県南部地震の震源モデルの再検討, 日本地震学会講演予稿集, A14, 1999.
- 6) 入倉孝次郎, 香川敬生, 関口春子: 経験的グリーン関数を用いた強震動予測方法の改良, 日本地震学会講演予稿集, No.2, B25, 1997.
- 7) 釜江克宏, 入倉孝次郎: 1995年兵庫県南部地震の断層モデルと震源近傍における強震動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, 第500号, pp.29-36, 1997.
- 8) Iai, S., Y. Matsunaga and T. Kameoka: Strain space plasticity model for cyclic mobility, *Soils and Foundations*, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992.
- 9) 一井康二, 井合 進, 森田年一: 兵庫県南部地震におけるケーソン式岸壁の挙動の有効応力解析, 港湾技術研究所報告, Vol.36, No.2, pp.41-86, 1997.
- 10) Iai, S., Morita, T., Kameoka, T., Matsunaga, Y. and Abiko, K.: Response of a dense sand deposit during the 1993 Kushiro-oki Earthquake, *Soils and Foundations*, Vol.35, No.1, pp.115-131, 1995.
- 11) Hartzell, S.H. and Heaton, T.H.: Inversion of Strong Ground Motion and Telesismic Waveform Data for the Fault Rupture History of the 1979 Imperial Valley, California, Earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.73, pp.1553-1583, 1983.

(2007. 4.6 受付)

# STRONG MOTION SIMULATION USING BOTH NONLINEAR PARAMETERS AND EFFECTIVE STRESS ANALYSIS

Atsushi NOZU

In conventional papers, the author pointed out the importance of the role of multiple nonlinear effects in strong motion prediction and proposed a simple method to take into account the effects by correcting empirical Green's functions using "nonlinear parameters". In the present article, it is proposed that the method using nonlinear parameters should be convined with conventional effective stress analysis to consider the effects of soil nonlinearity more appropriately. The convined method is applied to strong motion records from the 1995 Hyogo-ken Nanbu (Kobe) and the 1993 Kushiro-oki earthquakes and its validity is investigated.