

# 兵庫県南部地震における 神戸の楔型沖積地盤の非線形増幅特性

竹宮宏和\*

アダム マヘール\*\*

著者らは兵庫県南部地震による神戸の震度VIIの震災ベルトの形成について、楔型の表層地盤による地震波の伝播性状と増幅が大きく関与したことについて2次元FEM-BEMの線形解析からの知見を発表しているが、同地の表層地盤の堆積過程で海側と山側で大きく差があり、本研究では、地盤物性の不規則分布と強震時の地盤の非線形性を考慮した解析を行った。その結果、同地盤の短周期成分による増幅は線形時と同様に震度VIIのゾーンで見られ、海側の応答は地震時の形跡から実状と整合する最大値分布となった。併せて等価線形解析の応答値も示した。

## 1. まえがき

兵庫県南部地震（1995.1.17）において、神戸の地盤の地震時の挙動として特徴付けられることは、

(1) 海岸から少し入った距離において「震度7の震災の帯」が出現した。この領域内では大きな加速度が出たと思われる。現にこの帯内に位置する本山小学校に設置されていた強震計は振り切れた。

(2) 海岸寄りでは被害は却って減少した。もちろん海岸線では液状化現象が多発した。

(3) 六甲山麓においては被害はそれほど出なかった。著者らは、このことに関して、神戸の地形・地盤の特徴を踏まえたまでの解明に従事してきている。<sup>1)</sup>

<sup>2)</sup> 神戸の表層地盤に視点を置くと、六甲山側から海岸に向かって深さが漸増する楔型の不整形地盤に単純化される。しかし、その生成過程において概略的に2種類のものが考えられる。河川の氾らんによる砂、砂礫を含む土砂の流出が堆積した六甲山寄りの部分と縄文海進により海成粘土の堆積した海岸寄りの部分である（図1）。これらの動的物性値には差がある。

地震波の増幅を考える場合、もちろんの深層地盤構造も考慮する必要がある。それについては、別論文<sup>3)</sup>を発表している。

キーワード：不規則表層地盤、地震動の非線形増幅

\* 岡山大学環境理工学部、086-251-8146

\*\*岡山大学大学院自然科学研究科博士課程

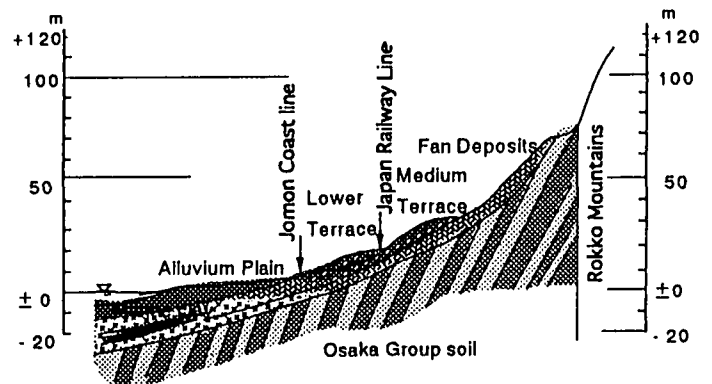


図1 神戸の南北方向の地質断面

著者らの以前の表層地盤内の地震波の伝播シュミレーション<sup>1, 2)</sup>では、一様な軟弱表層を仮定して地震波の増幅、位相特性を調べた。その際、沖積層厚が10m前後で大きな加速度の増幅作用が見られ、これは震災の帯に相当した。それと同時に海岸部においてもそれを上回る増幅効果が見られた。後者については、現実には液状化現象が発生したことを考慮すると、加速度の増幅は見られないはずである。また、液状化に至らなかったとしても深い軟弱層は非線形挙動をしたはずである。それは加速度応答の非増幅となったと思われる。この方向に整合したシュミレーションとなるためには、上述した沖積平野部の生成過程に基づいた不規則な表層地盤のモデル化の非線形解析をしなければならない。

## 2. 定式化

本研究では不規則な地盤慮域をFEMで、それを取り囲む半無限遠の基盤をBEMでモデル化したハイブリッド離散化手法をとった。これに基づいて地盤振動の地震応答シュミレーションするに際して、土の応力-歪 ( $\tau$ - $\gamma$ ) の非線形履歴特性をFEM領域内において導入する。代表的な特性式として、修正Hardin-Drevichモデルがある。同モデルは土のせん断剛性と材料減衰の歪み依存性を良好に近似し得るものとして、地盤の地震応答解析(もっぱら一次解析であるが)よく用いられる。このスケルトン曲線は

$$\tau = \tau_c + G_{\max} (\gamma - \gamma_c) \left[ \frac{1}{1 + \frac{|\gamma - \gamma_c|}{n \gamma_r}} \right] \quad (1)$$

として記述される。ここで下添字cは履歴反転時の値を指す。履歴を特性付ける分枝曲線にはMasing則が仮定される。ここで $\gamma_r$ は基準歪みで、初期状態における最大せん断歪み $\tau_{\max}$ とそれに対応した初期接線剛性 $G_{\max}$ から決定される

$$\gamma_r = \frac{\tau_{\max}}{G_{\max}} \quad (2)$$

2次元FEM(平面モデル)における上記の非線形に対する制御法に関しては竹宮・石山<sup>4)</sup>に詳述している。

非線形時のFEM-BEM領域の支配方程式は増分形式で表現される。ただし、FEMの時間刻み $\Delta t_f$ にはBEMでの時間刻みをN等分しているので、時間ステップ $K + \frac{i}{N}$  ( $i=1, \dots, N$ ) に対して

$$[\mathbf{K}_0] \Delta \mathbf{U}_j^{K+\frac{i}{N}} = \{ \Delta \mathbf{F} \}^{K+\frac{i}{N}} + \{ \Delta \mathbf{R}_j \}^{K+\frac{i}{N}} \quad (3)$$

ここで下添え字jはj番目のイテレーションを意味する。 $\mathbf{K}_0$ は初期実行剛性マトリックスで

$$[\mathbf{K}_0] = \mathbf{M} + \gamma \Delta t_f \mathbf{C} + \beta \Delta t_f^2 \mathbf{K} + \alpha \Delta t_f^2 \mathbf{K}_{BB} \quad (4)$$

ただし、 $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{K}$ は全体系の剛性、減衰及び剛性マトリックスを表している。 $\mathbf{K}_{BB}$ は遠地盤に対する動的剛性マトリックスで、FEMとBEMのインターフェイス節点に関してBEMより計算される。

$\{ \Delta \mathbf{F} \}^{K+\frac{i}{N}}$ は各時間刻みごとの入力で

$$\begin{aligned} \{ \Delta \mathbf{F} \}^{K+\frac{i}{N}} &= [\mathbf{X}\mathbf{M}_1] \mathbf{U}^{K+\frac{i-1}{N}} + [\mathbf{X}\mathbf{M}_2] \mathbf{U}^{K+\frac{i-2}{N}} \\ &+ \left( \beta - \gamma - \frac{1}{2} \right) \Delta t_f^2 \{ \mathbf{R}\mathbf{N}_1 \} + \left( \gamma - \beta - \frac{1}{2} \right) \Delta t_f^2 \{ \mathbf{R}\mathbf{N}_2 \} \\ &+ \alpha \Delta t_f^2 \mathbf{F}_{BB}^{K+\frac{i}{N}} + (1 - \alpha) \Delta t_f^2 \mathbf{F}_{BB}^{K+\frac{i-1}{N}} \end{aligned} \quad (5)$$

ただし  $\alpha = 0.5, \beta = 0.25, \gamma = 0.5$

$$[\mathbf{X}\mathbf{M}_1] = \mathbf{M} + (1 - \gamma) \Delta t_f \mathbf{C} - \Delta t_f^2 \mathbf{K}_{BB} \quad (6.a)$$

$$[\mathbf{X}\mathbf{M}_2] = -\mathbf{M} + (1 - \gamma) \Delta t_f \mathbf{C} \quad (6.b)$$

$\{ \mathbf{R}\mathbf{N}_1 \}$  と  $\{ \mathbf{R}\mathbf{N}_2 \}$  は要素応力とつり合う節点力を与え

$$\{ \mathbf{R}\mathbf{N}_1 \} = \sum_{\text{elements}} \int_v [\mathbf{B}]^T \{ \sigma_{n1} \}^{K+\frac{i-1}{N}} dv \quad (7.a)$$

$$\{ \mathbf{R}\mathbf{N}_2 \} = \sum_{\text{elements}} \int_v [\mathbf{B}]^T \{ \sigma_{n1} \}^{K+\frac{i-2}{N}} dv \quad (7.b)$$

$\{ \Delta \mathbf{R}_j \}^{K+\frac{i}{N}}$  はカーレントタイムでのj番目のイテレーションにおける不釣り合い節点力をであり、次式から計算される。

$$\{ \Delta \mathbf{R}_j \}^{K+\frac{i}{N}} = \sum_{\text{elements}} - \int_v [\mathbf{B}]^T \{ \Delta \sigma_{n1} \}_j^{K+\frac{i}{N}} dv \quad (8)$$

ただし $[\mathbf{B}]$ は歪み-変位関係マトリックスを定義している。 $\{ \sigma_{n1} \}$ は非線形時の応力ベクトル、 $\{ \Delta \sigma_{n1} \}_j$ はカーレントタイムでのj番目のイテレーションにおける不釣り合い応力である。

## 3. 数値計算と結果の考察

### (1) モデル化

図2はここでのシュミレーションの対象モデルである。表1に現地のボーリング・データ<sup>5)</sup>をもとに算定した物性を示す。履歴減衰に加えて、内部減衰として、以下の仮定で導入した。

有限要素ごとに与えた内部減衰はレーリ型で、要素質量 $\mathbf{m}$ と要素剛性 $\mathbf{k}$ に比例させた形である。

$$\mathbf{c} = \mathbf{a}\mathbf{m} + \mathbf{b}\mathbf{k} \quad (9)$$

地盤応答では、一般に、第一次モード(振動数 $\omega_1$ )が支配的な貢献をするので同モード減衰定数 $\zeta$ より係数a、bを決定する。そのとき

$$\zeta = a/2\omega_1 + b\omega_1/2 \quad (10)$$

$$\text{よって} \quad a = \zeta\omega_1 \quad b = \zeta/\omega_1 \quad (11)$$

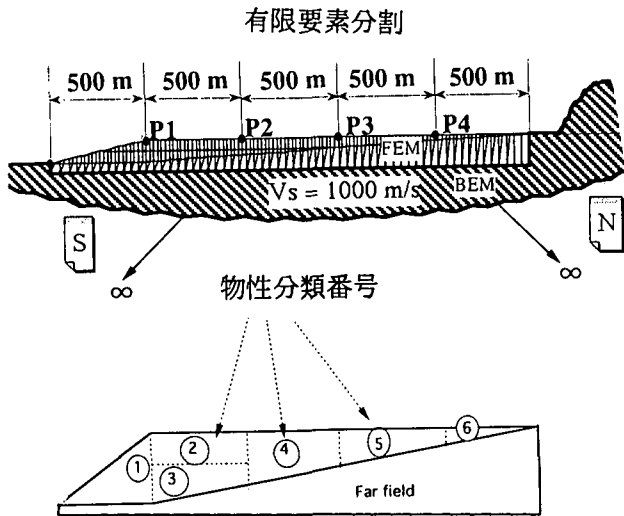


図2 FEM-BEM モデル

Table 1 地盤物性値

Material No.	Density (t/m <sup>3</sup> )	Shear wave velocity (m/s)	Reference strain $\gamma_r$
1	1.7	120	0.00060
2	1.7	140	0.00080
3	1.8	160	0.00080
4	1.8	180	0.00150
5	1.8	200	0.00200
6	1.8	220	0.00250

(2) シミュレーション結果の考察

入力地震波には、ここでは、堆積層の震動特性を把握するために、まずリッカー波の入射を仮定し、その周期を変えた場合のシミュレーションを行った。そのときの地表面の応答加速度の時刻歴が 図3 である。入射波の波長の長い（周期が2秒のとき）は入射波とその地表面での反射波の合成された波のみが現れるが、波長が短くなる（周期0.5秒）と、地表面には水平に伝播する表面波が顕著に見られる。これは鉛直方向の伝播波の増幅をさらに大きくしている。この傾向は線形地盤の場合と同じである。そして入射波の周期に応じて特定の沖積層厚のところでは増幅効果が見られる。しかし海岸寄りの地盤応答

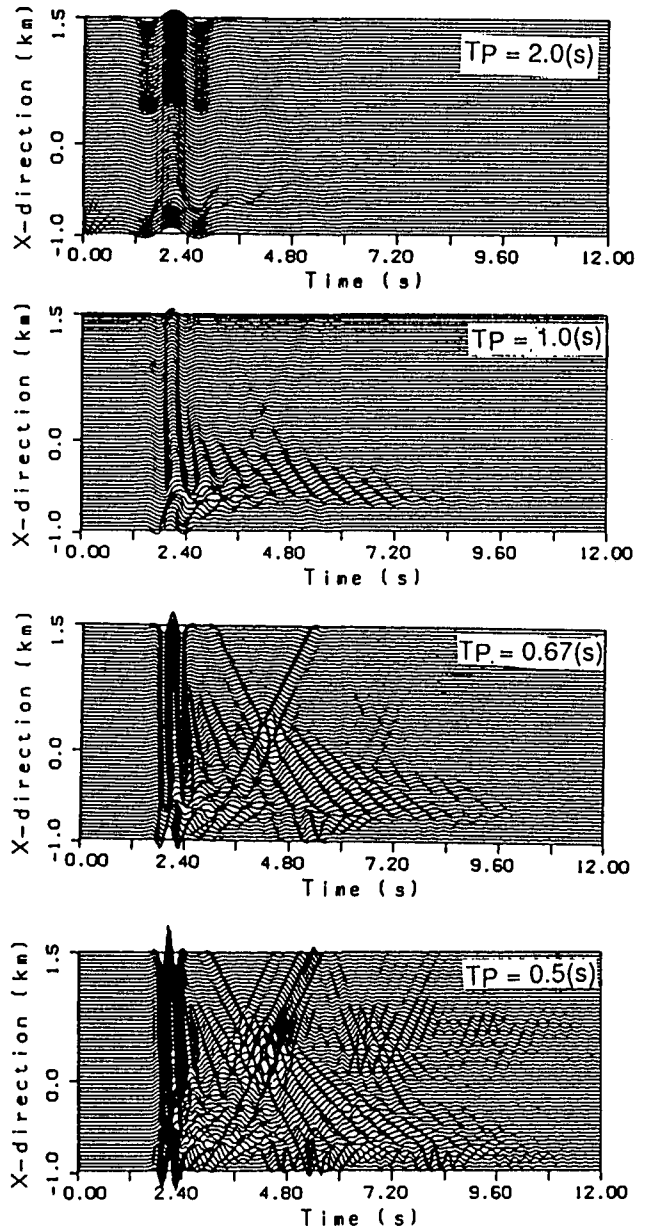


図3 リッカー波に対する表層沖積地盤の非線形時刻歴応答

図3 リッカー波入射に対する地表面の最大応答

は線形系とは異なって返って大きく減少している。それは 図4 の最大応答値を描くと明瞭である。非線形応答による履歴効果は海岸寄りの地盤に大きく現れているが、六甲山寄りの沖積層ではそれほど現れていないのは実状に合っている。よって神戸に起こった震度 VII の説明として、沖積層による地震動の増幅が短周期成分で生じたと推論することは妥当であろう。

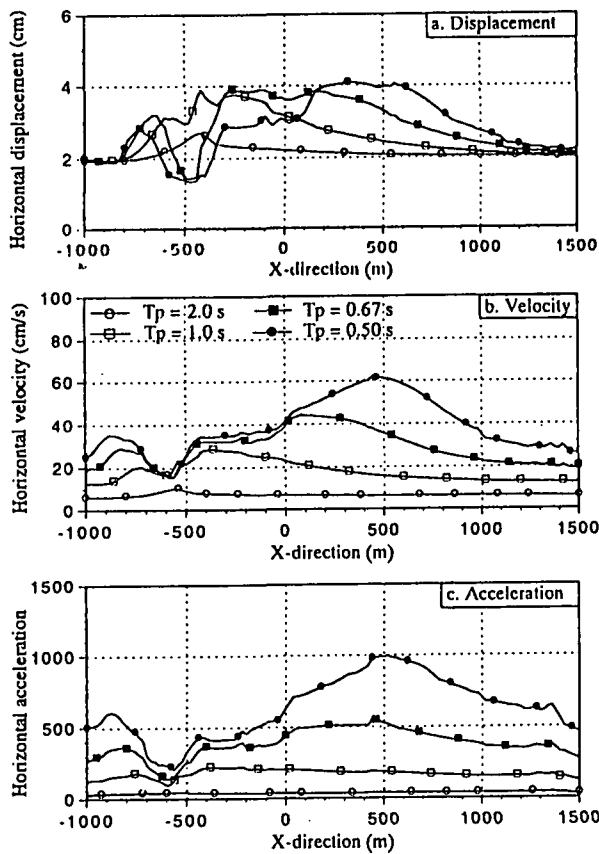


図4 リッカー波に対する表層沖積地盤の非線形最大応答

ところでその後の耐震解析に神戸の海洋気象台と神戸大学地下の記録波形が代表的に使われているので、ここでもこれらをSV波の入射と仮定して用いた。前者は沖積層上の記録として0.3 - 0.7 秒の帯域に卓越周期成分があり、一方、後者は堅い基盤の上の記録であるが浅い断層の破壊を反映して1秒を越す長周期成分の特徴を持っている。

非線形応答解析をするに当り、入力強度が適切に与えられなければならない。本解析対象モデルでは、六甲山寄りほとんど線形挙動をするように基本歪を与えているので、深層モデル解析結果<sup>1)</sup>からの知見を基に入力強度を決定する。

図5 はこれらの地震波と、それぞれを模擬した短周期成分から成る波と長周期成分から成る波を入

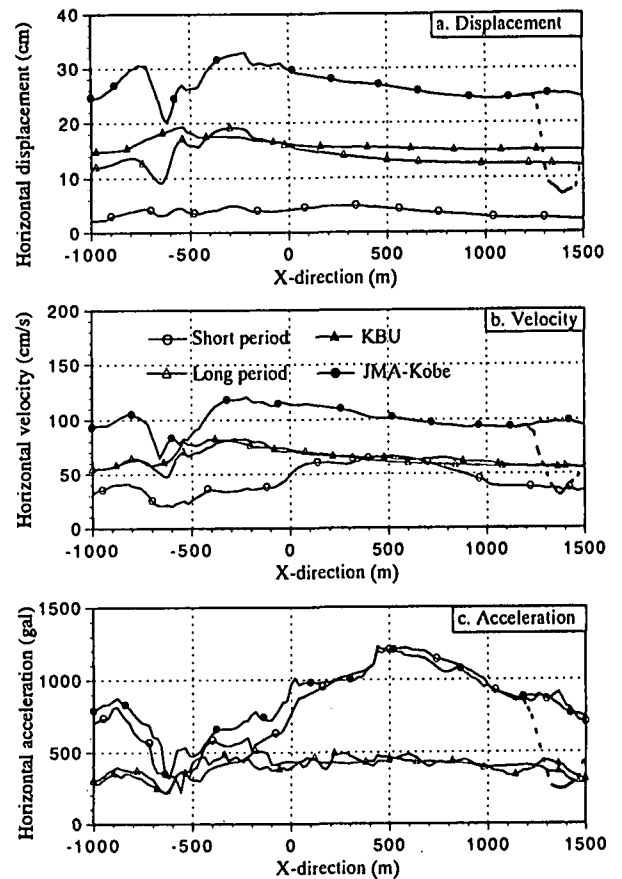


図5 異なる地震波入射に対する表層沖積地盤の非線形最大応答

射波としたときの最大応答をそれぞれ変位、速度、加速度に関してプロットしたものである。海洋気象台の記録 (JMA-Kobe) (基盤面引き戻し波) に対する地表面の加速度応答値においては、海岸寄りを除いては線形時とほぼ同程度の応答となっている。つまり、震度 VII の帯域においては、1,200 gal にも達し、これは被害と符合する。そして海岸寄りの異常に増幅されていた線形時の傾向は現れて来ない。これは地盤応答において強い非線形応答が起り、履歴減衰で加速度応答が抑えられたためである。短周期成分の模擬地震動もほぼ同様な応答値を示している。神戸大学地下記録 (KBU) は短周期成分を含まないため沖積層の応答の増幅は当然見られない。長周期成分の模擬地震波も同じある。

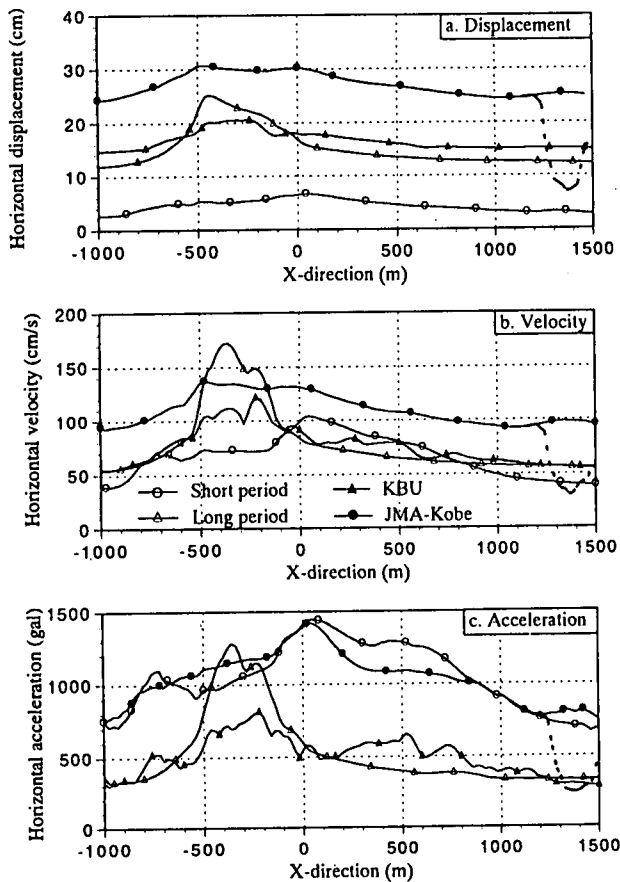


図6 異なる地震波入射に対する表層沖積地盤の等価線形最大応答

つぎに、履歴面積から等価粘性減衰を評価<sup>6)</sup>して線形解析した。有限要素ごとにおける等価粘性減衰定数 $\xi$ は、まず入射波形を選定し、その強度を変えて、地盤応答にいて低歪み状態 ( $10^{-5}$ 程度)となる場合と高歪み状態 ( $10^{-2}$ 程度)となる場合の2通りの予備計算をし、それぞれから得られる最大履歴面積から決定した。それらの値は内部減衰定数 $\zeta$  (1%を仮定)に加算される。その結果、等価粘性減衰定数 $\xi$ は、海岸寄りでは歪みのオーダーが  $10^{-4}$  での5%から  $10^{-2}$ のオーダーでの25%まで変化する。その他の場所では3%から10%までの範囲である。図6は上で用いた入射波に対する線形解析結果である。非線形解析結果と比較して、等価線形解析結果は海岸寄りで大きな増幅応答を示しているが、線形応答ほどではない。

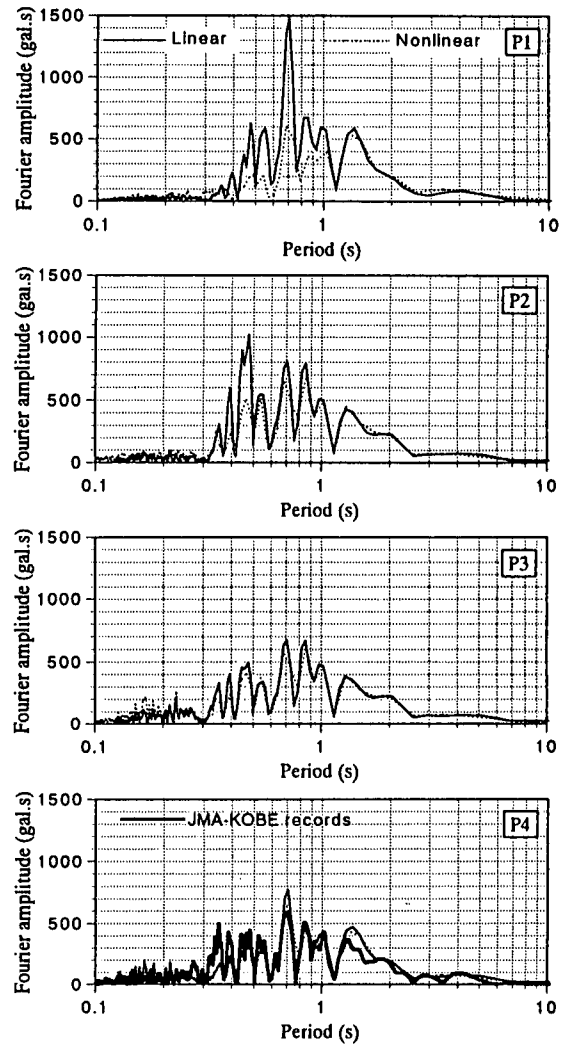


図7 非線形応答と等価線形応答のフーリエ・スペクトル 神戸海洋気象台記録

入力地震動強度において、神戸海洋気象台記録 (JMA-Kobe) と神戸大学地下記録 (KBU) の整合性を持たせるために、六甲山麓の断層の落差からくる不整形基盤面を考慮した場合の非増幅効果<sup>1)</sup>を導入すると、前者の結果は山側では図5、6において破線で修正したようになる。

非線形応答と等価線形応答の周期成分を調べるために、それぞれのフーリエ・スペクトルをとった。図7は神戸海洋気象台記録 (JMA-Kobe) に対する結果で、図2に示す代表点に関して描いたものである。海岸寄りのP1位置では、等価線形応答に比べて非線形応答において1秒以下の周期成分が大きく減少して、長周期成分が卓越する応答性状となっている。そして山側に向かって、地盤の非線形特性による応答の長周期化は生じなくなることが判る。

#### 4. むすび

兵庫県南部地震の神戸の特異な地震動を解明するために、本研究では、同地の楔型の軟弱表層地盤の物性の分布とその非線形特性に注目して、2次元BEM-FEMによるシミュレーションから地震波の増幅効果を調べた。その結果、

(1) 神戸海洋気象台記録を入射波にとった場合、沖積層の厚さが10m前後の場所で、震度VIIの分布と符合する加速度の増幅が得られた。一方、海岸寄りでは地盤の強い非線形応答のため、以前の線形応答結果と比べて加速度応答は減少し、しかし変位応答は増加している。神戸大学地下記録は基盤での波形であり、表層下の堆積層の影響を含まないことより表層沖積層への入射波としては適切でないと思われる。

(2) 地盤の生成仮定と被害の状況からは、強い非線形応答は海岸寄りに限られ、それ以外の場所では弱い非線形応答であったと考えているのが妥当である。

(3) 非線形解析結果に基づいて、等価線形化モデルを作成し、これによる非線形応答の近似度について調べたが、これによる結果は非線形応答と線形応答の中間的な値となった。

(4) 非線形応答のフーリエ・スペクトルからは、大きな加速度応答の増幅は1秒以下の短周期成分が関係し、震度VIIの被害は構造物が共振したことにより生じたものと思われる。

#### 参考文献

- 1) 竹宮・アダム、兵庫県南部地震における神戸の揺れを不整形地盤振動から捉える、阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集151-166, 1996. 1.
- 2) Takemiya, H. and Adam, M.: Why the heaviest damages occurred in Kobe during the Hyogo-ken Nanbu Earthquake, Japan 1995, The Kobe Earthquake: Geodynamical aspect,, edited by Brebbia, C.A., Computational Mechanics Publication, Southampton, UK, pp.39-58, 1995.
- 3) 竹宮・川東、深層地盤構造の不整形性による地震波の増幅特性、阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集、1997.1.
- 4) 竹宮・石山、不整形・非線形を考慮した沖積地盤の地震応答性状、土木学会論文集、No.477/I-25, 73-81, 1993.10
- 5) 神戸市: 神戸の地盤 1982.
- 6) Marsh, J., Larkin, T., Haines, A. and Benites R.: Comparison of linear and nonlinear responses of two-dimensional alluvial basins, Bulletin of Seis. Soci. of America, Vol. 85, No. 3, pp 874-889, 1995

### NONLINEAR SOIL BEHAVIOR IN KOBE DURING THE HYOGO-KEN NANBU EARTHQUAKE

Hirokazu TAKEMIYA and Maher ADAM

The Hyogo-ken Nanbu Earthquake (Jan.17, 1995) caused devastating damages in and around Kobe city. Noteworthy is the fact that the heaviest damages of JMA intensity 7 were centered in the so-called "disaster belt zone" along the coast. The authors, focusing on the geological features in Kobe, have performed the computer simulation of the seismic wave propagation based on the FEM-BEM hybrid modeling. The nonlinear soil behavior was taken into account besides the spatial distribution of soil irregularity for the better interpretation of the seismic wave amplification by the soft alluvium at the site. The equivalent linear analysis with scaled damping was also conducted for the comparison.