

# ディスロケーションから工学的基盤地震動の評価へ —地質・地形構造を考慮して—

竹宮 宏和<sup>1</sup>・宮河 元<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 岡山大学教授 環境理工学部 環境デザイン工学科 (〒700-8530 岡山県岡山市津島中3)

<sup>2</sup>正会員 工修 元岡山大学大学院 春本鐵工所 (〒104-0033 東京都中央区新川2)

本研究は、断層地震動の発生から工学基盤面地震動の評価を地質・地形構造を考慮して試みたものである。兵庫県南部地震(1995年)以来、断層近傍の地震動の予測は都市の地震危険度評価の観点からより重要性を増してきている。ここでは、同地震を対象として、最初に多層地盤内の断層モデルによる強震動シミュレーションを行った。つぎに神戸の急峻な傾斜基盤上の深層堆積層の効果を評価するため FEM-BEM のハイブリッド法による地震波の伝播解析を行った。

**Key Words :** dislocation theory ,kinematic model, seismic wave propagation, layered soils, deep soil effect, engineering base motion

## 1. まえがき

1995年の兵庫県南部地震(Mw=6.9)は最も甚大な被害をもたらした都市直下地震である。それを反映して、構造物の耐震解析・設計面から内陸型地震に対する工学的基盤地震動の評価法の確立が急務となってきた。

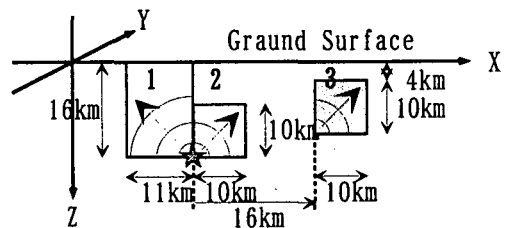
本研究では、兵庫県南部地震を対象として、まず運動学的断層モデルによる強震動発生を3次元シミュレーション<sup>1)</sup>から行った。その際、複数のアスペリティの因果性と多層地盤内の地震波の伝播を考慮するために、薄層要素法を適用した時間領域グリーン関数を導入した。

つぎに神戸市域直下に見られる六甲山からの基盤面の急峻な落ち込み(500m~2Km)とその上の深層堆積層内の波動増幅を解析するため、後者を有限要素で、その周辺を境界要素でモデル化したハイブリッド解析<sup>2)</sup>を行った。解析モデルは2次元であるため上記の断層解析で得られた波形を入射動とするに際して、観測波(KBU)との対比でNS, UD成分を水平、鉛直成分で、それぞれSV波、P波と仮定した。

以上のシミュレーションをとおして、ここでは断層地震動の発生から工学的基盤面の地震動の評価を地質・地形構造に留意して試みた。

## 2. シミュレーション

兵庫県南部地震に対する断層モデルを釜江・入倉<sup>3)</sup>によるインバージョンを参考にして、表-1の震源パラメ



.....[明石海峡].....[神戸市域].....  
図-1 兵庫県南部地震の断層モデル

表-1 震源パラメータ

セグメント	時間(sec)	M <sub>0</sub> ( $\times 10^{19}$ Nm)	スラック, ディップ, $\nu$ (度)	面積(km <sup>2</sup> )	スリップ(m)
1	0~72	1.00	(233, 85, 175)	11*16	1.6
2	0~5.0	0.34	(233, 110, 30)	10*10	0.9
3	6.2~11.2	0.18	(233, 100, 60)	10*10	0.5
総合	0~11.2	1.52			
破壊進行速度 (V <sub>r</sub> )=2.8 (km/sec) ライズタイム=0.6(sec)					

表-2 地盤パラメータ

層番号 No.	層厚(km)	S波速度 V <sub>s</sub> (km/sec)	ポアソン比 $\mu$	密度 $\rho$ ( $\times 10^9$ t/km <sup>3</sup> )
1	0.7	1.40	0.272	1.8
2	1.2	2.30	0.253	2.0
3	1.5	3.00	0.251	2.4
最下層	半無限	3.50	0.242	2.8

ータを設定した。地盤モデルは、震災後の地盤探査データなどを基に表-2に示す4層構造とした。

以下、観測点として震源近傍である神戸大学の地下道記録(KBU)に対してシミュレーションを行い、比較検

討を行う。

兵庫県南部地震の断層モデルは3個のアスペリティ分布からなっており、それぞれにおいて震源からのラジアル進行破壊を仮定した(図-1)。アスペリティ1は断層面北東下端で破壊が発生し、淡路島側に広がる。アスペリティ2は断層面南西下端で破壊が発生し、神戸側に広がる。アスペリティ3は神戸直下に位置し、断層面南西下端で破壊が発生し、破壊が広がる。神戸大学(KBU)の位置を、アスペリティ1, 2の走向線上よりも南東側に、3の走向線上よりも北西側にそれぞれ走向直交方向に0.5Kmのオフセットで仮定した。

数値シミュレーションのために使用した離散パラメータの設定は、基盤までの深さを109kmとして基盤面からの反射波の影響がない半無限地盤を仮定し、断層破壊進行方向の伝播波の基本長204.8km, 最大振動数18rad/s, 最大波数4.6rad/kmまで考慮して、時間刻み0.1sの時間ステップ数300までを計算した。また比較に際して、観測記録, シミュレーション波形に0.12~23Hzのバンドパスフィルターを適用した。KBUの記録波形から、神戸側の2つのアスペリティによるパルス状の波形が分離されていることにより、本シミュレーションでは、アスペリティ2と3の間に10秒間の破壊停止時間を想定した。

以上のモデルにより計算された解析波形と観測波形との比較を図-2, 図-3に示す。本解析では、震源関数には一様な傾斜関数あるいはコストロフ(Kostrov)関数を仮定して計算した。後者のモデルによる解析結果を南北(NS), 鉛直(UD)方向の変位, 速度, 加速度成分について示している。

断層の破壊進行を一様な傾斜関数(すべり率一定)のラジアル進行を想定した場合は、各水平2成分の変位, 速度, 加速度波形は振幅, 位相ともに観測波形に概略良く似ているが、鉛直成分に関しては波形の形状は異なっている。鉛直成分の振幅値を検討してみると、解析結果は観測記録に比べて明らかに過小評価となっており、特に加速度に関しては非常に小さい振幅となっている。一方、コストロフ関数モデルの場合の解析結果は、一様な傾斜関数モデルを考慮した場合に比べて変位は若干小さいものの、速度, 加速度に関しては差が見られなかった。コストロフ関数モデルによる速度応答のフーリエスペクトルの図-4を見ると、コストロフ関数を考慮した場合は、鉛直成分を除くと、より高周波数領域まで観測結果に対して高い一致を見せている。観測波形の鉛直速度のフーリエスペクトルには水平2成分に見られない1Hzより高い振動数成分が存在している。したがって時刻歴の結果と併せて明らかに鉛直成分には、断層の破壊過程以外の要因が予想される。これに関しては次節で取り扱われる。

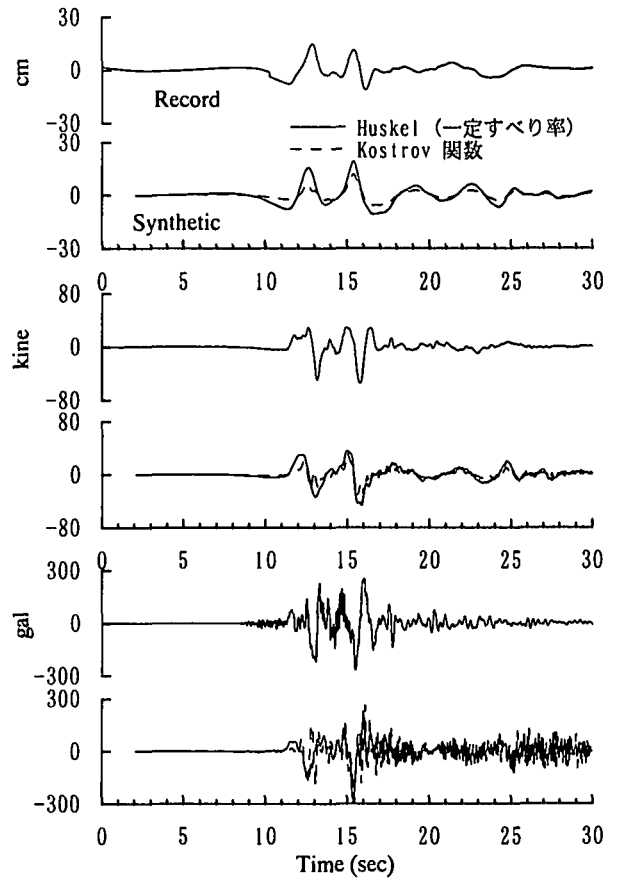


図-2 KBUにおける解析波形と観測波形の比較(NS成分)

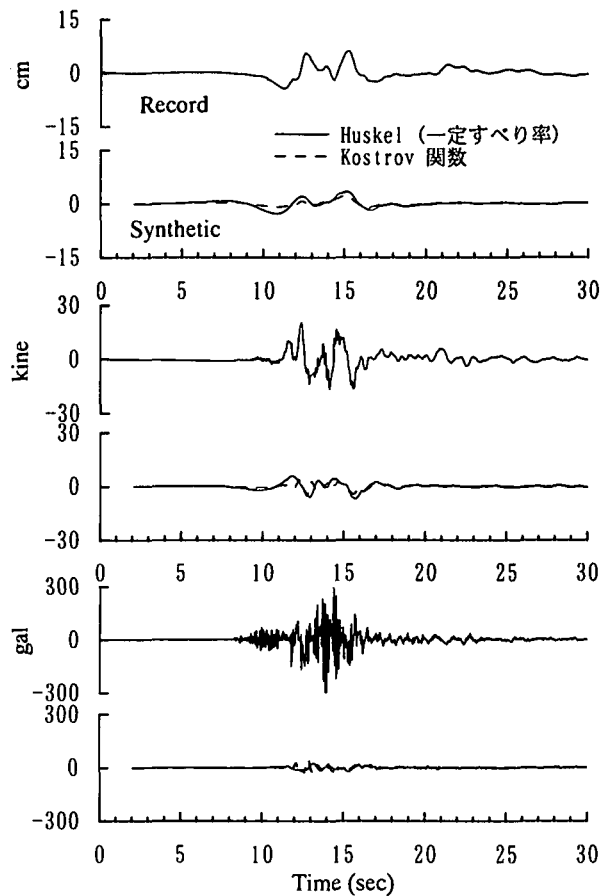


図-3 KBUにおける解析波形と観測波形の比較(UD成分)

図-5 に対象地盤の分散特性を描いた。同図によると、面内波動場では、0.8Hz 付近にエアリー相が見られ、この波動場が上記の図-4 の卓越振動数成分の0.6~0.8Hz に相当しているといえる。0.5Hz より低い振動数の卓越は、前述したように、断層アスペリティーの破壊開始時間差より生じたものである。

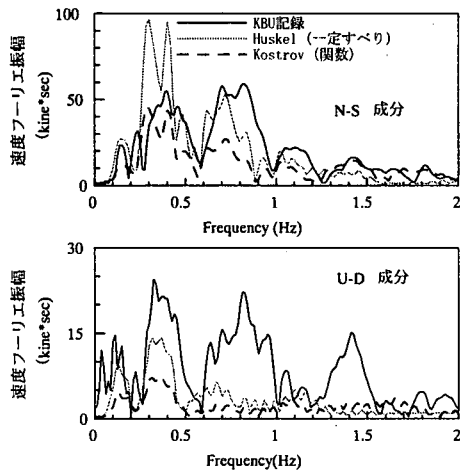


図-4 速度応答(図-3)のフーリエ・スペクトル

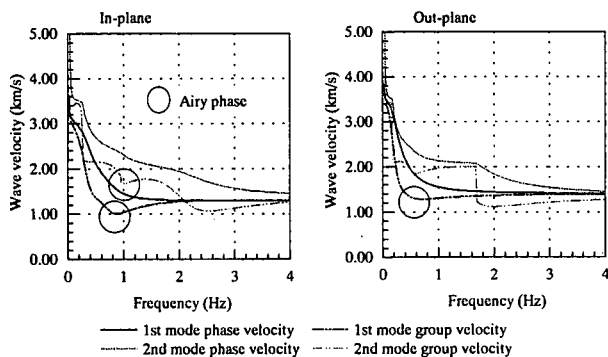


図-5 神戸サイトの地盤(表-1)の波動分散特性

### 3. 不整形深層堆積層の影響

神戸の急峻な傾斜基盤上の堆積層に対する FEM モデル化を図-6に、その各層の地盤物性値を表-2に示した。工学的基盤面として、ここではせん断波速度で  $V_s=500$  m/s 程度を想定した。入射波には、前節のディスロケーションモデルからの表面応答を露頭波として、振幅を1/2して使用した。解析は時間領域 FEM-BEM ハイブリッド手法<sup>3)</sup>による面内波動場である。

図-7 は堆積層上の各点の水平、鉛直時刻歴応答から最大応答値分布を描いたものである。傾斜基盤による反射・散乱に励起された鉛直成分波が傾斜基盤付近に顕著に現れることが分かった。堆積層の影響は、応答において増大させる傾向にあるが、速度、加速度においてはピー

ク値を与える水平距離があるのが指摘できる。水平成分では、震度7の「震災の帯」が始まる距離0.7~0.8kmの増幅が理解できる。さらに鉛直成分では、不整形基盤で励起された高振動数の波のため加速度応答が水平成分を上まわっている。これはKBUでの観測事実と符号する。しかし、重要なことは、応答の増大につながった振動数帯域である。そのため時刻歴応答のフーリエ振幅を描いた

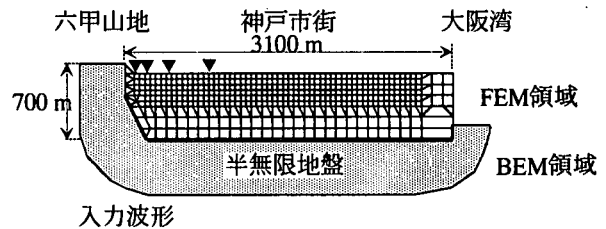


図-6 ハイブリッド解析モデル図

表-2 ハイブリッド解析での堆積層の物性値

領域	せん断波速度 $V_s$ (m/s)	密度 $\rho$ ( $t/m^3$ )	ポアソン 比 $\nu$	減衰定数 $h$
FEM I	500	2.0	0.33	0.05
FEM II	800	2.2	0.30	0.02
FEM III	1000	2.2	0.30	0.02
FEM IV	2000	2.2	0.25	0.02
BEM	2000	2.2	0.25	—

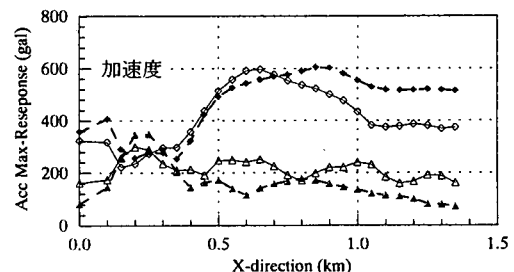
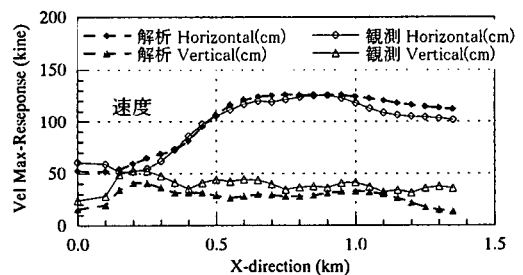
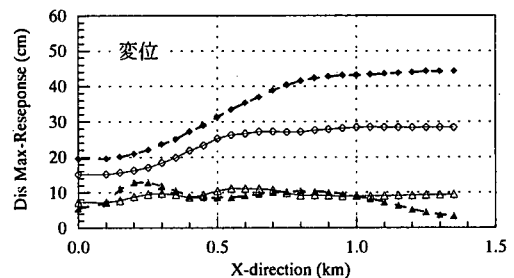
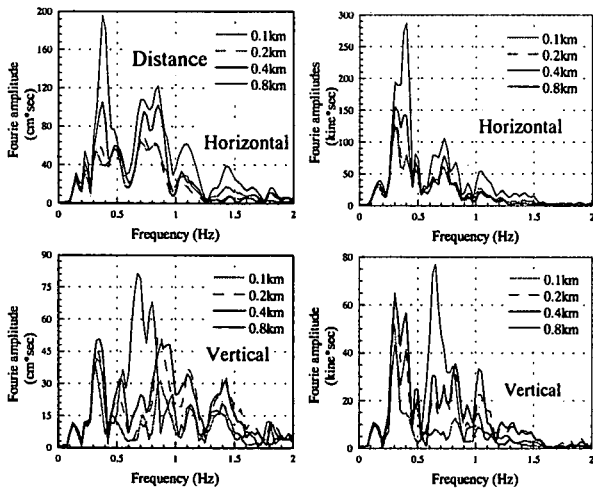


図-7 深い堆積層上面の最大分布



(a) KBU 観測波の入射 (b) シミュレーション波の入射  
 図 - 8 露頭面の速度応答のフーリエスペクトル振幅

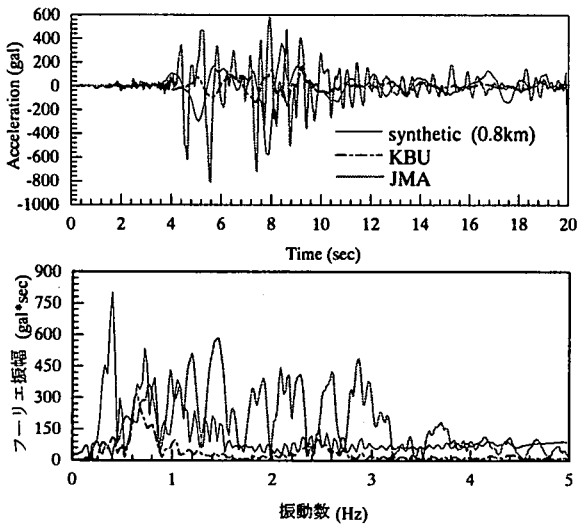


図 - 9 堆積層上の基盤地震動と地表面水平地震動 (加速度)

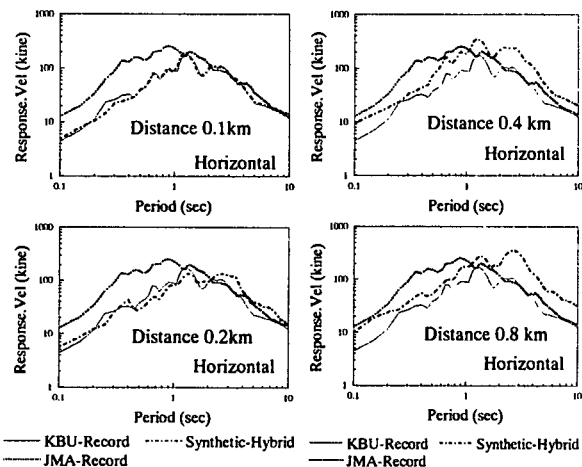


図 - 10 速度応答スペクトル図 (5%減衰)

のが図 - 8 である。同図より、水平速度に関しては、0.3~0.4Hz が、鉛直速度に関しては 0.6~0.7Hz が卓越している。加速度になると、図 - 9 に見られるように後者の振動数帯域が支配的となる。同図には比較のため JMA 観測波

形も描いているが、1~3Hz の振動数帯域が卓越しており、これは浅い表層地盤内のせん断波による共振現象の結果と見ることができる。

応答スペクトルで不整形境界からの距離ごとの特徴をみたのが図 - 10 である。同図には、KBU, JMA 観測波形に対する応答も併せて記入してある。KBU と水平距離ごとに対応した応答には差がそれ程なく、これらは基盤面スペクトルと見なすことができる。一方、JMA に対応したものは地表面スペクトルであり、基盤面スペクトルからの差は表層軟弱層の寄与と判断される。それは 1Hz より高い振動数帯域である。著者らの既発表<sup>4)</sup>によると、リッカー波入射の振動数帯域が 1.5Hz ~2Hz で 2~3 倍の速度増幅、2~4 倍の加速度増幅が見られた。それは JMA 記録波とも同程度であった。これを考慮にいと、表層地盤の応答を妥当に推定することが可能である。

#### 4. むすび

本研究は、工学的基盤動の評価をディスロケーションモデルと 2 次元 FEM-BEM 解析から目指し、兵庫県南部地震による神戸市域の地盤震動を再現を試みたものである。知見として

1. 成層地盤モデルによる断層破壊メカニズムから、水平地震動は概略説明できるが、鉛直地震動は過小評価となった。
2. 深層堆積層の不整形境界面からの波動の生成は、境界近傍では水平応答よりも鉛直成分への寄与が大きい。
3. 深層堆積層の効果は、堆積層表面の応答の増幅となって現れ、ピーク値を与える場所が不整形境界からの水平距離において特定され「震災の帯」とほぼ一致する。しかし、これは振動数帯域で水平速度応答では 0.3~0.4Hz に、鉛直速度応答で 0.6Hz 付近に卓越している。
4. JMA 観測加速度記録波に見られる地表面応答の卓越振動数は 1~3Hz にあり、これを説明するのは浅い表層軟弱層による増幅である。

#### 参考文献

- 1) 竹宮宏和 合田和哉：ディスロケーション・モデルによる層状地盤内の波動伝播特性，第 24 回地震工学研究発表会講演論文集，21-24，1997.7.
- 2) Takemiya, H. & Tomono, T.: Topographical site response for harmonic and pseudo-earthquake motions, 10WCEE, 1992, 929-934.
- 3) 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，29-36，1997.
- 4) Takemiya, H. & Adam, M.: 2D nonlinear seismic ground analysis by FEM-BEM: The case of Kobe in the Hyogoken Nanbu Earthquake JSCE, No.584/1-42, 19-27.