

動力学モデルに基づく 兵庫県南部地震の3次元シミュレーション

吉見雅行¹・東原紘道²

¹学生会員 工修 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤工学専攻 (〒113-0032 東京都文京区弥生1-1-1)

²正会員 工博 東京大学教授 地震研究所地球計測部門 (同上)

動力学モデルに基づく震源導入方法を用いた、兵庫県南部地震の3次元差分シミュレーションを行った。須磨断層に3つのアスペリティを仮定し、フォワードモデリングによってアスペリティ位置を求め、解析に使用した。最大速度分布は被害分布と、西宮市域を含め、整合するものであった。また、観測点以外の計算波形に対する考察も行った。さらに、明石海峡直下での断層を考慮したシミュレーションを行い、断層近傍域への影響を考察した。

Key Words : *finite difference method, Hyogo-ken Nanbu Earthquake, strong motion*

1. はじめに

兵庫県南部地震は断層近傍の大都市神戸に壊滅的な被害を及ぼした。地下構造や震源インバージョン結果を利用したシミュレーションが盛んにおこなわれ、観測波形の再現や、構造物被害の著しい带状地域の出現に対する定性的な説明の試みがなされている¹⁾⁴⁾。しかしながら、西宮地区の被害説明や、工学的に重要な波形そのものの議論はほとんど行われていない。本研究では、まず兵庫県南部地震の西宮における被害を地震学・工学的観点から突き止める目的で、3次元差分法を用いたシミュレーションをおこなう。

一般に震源過程の後期過程に関する情報は、先行過程の波で乱されてしまうため、インバージョンの精度は悪くなる。西宮に最も近い五助橋断層の破壊は後期過程に当たるため、フォワードモデリング手法による検討が必要である。

さらに、最近、明石海峡直下で、従来検出されていたものとは別の断層破壊が存在したことが明らかにされた^{5),6)}。インバージョン結果では滑り量の大きな領域が地表近くにあるため、近傍の地表に大きな地動をもたらした可能性がある。事実、当時建設中であった明石海峡大橋主塔への入力地震動に大きな寄与を与えたとされている。そこで、この断層がもたらした地動をシミュレートし評価する。

2. 解析手法

シミュレーションには宮武隆氏の3次元差分コードを改良して用いた。これは断層滑りを動力学モデ

ル⁷⁾で表現し、Virieux and Madariaga⁸⁾の3次元差分法を空間4次精度にしたもの⁹⁾を用いて波動計算するものである。自由表面以外の非物理境界からの反射波を消すために、吸収境界を用いた。また、自由表面には応力フリー境界を用いた。動力学モデルは断層滑りを自然に表現するモデルである。

3. 強震動シミュレーション

前述の3次元差分法を用いて、兵庫県南部地震の強震動シミュレーションを実行した。計算領域は淡路島北部から大阪府北部に至る85km×30kmの範囲である。表-1に計算に用いた地下構造の速度構造を、図-1に基盤最上面の構造を示す。基盤構造は、重力調査等の結果¹⁰⁾を参考にして作成した。この基盤最下面は海水面から3.2kmである。地下構造は、基盤3層(表-1(b))と堆積層3層(表-1(a))からなるものとした。この物性値は文献11)を参考にした。

表-2に、計算パラメータを示す。断層モデルを表-3に、断層の概形およびアスペリティ位置と応力降下値を図-3に示す。アスペリティ中の矢印は、滑り方向である。また、他の領域は純粋な右横ずれとした。須磨断層系の傾斜角は85°であるが、動力学考察に基づく断層条件導入法を用いる制約上、それを90°とした。また、破壊伝播速度は一律に2.6km/secとした。これらの断層パラメータ(明石海峡断層を除く)は文献4)と同様であり、波形の精度等については議論済みである。ただし、五助橋断層についてはフォワードモデリングによる検討を加えアスペリティ位置を決定した。明石海峡断層の走向は、須磨

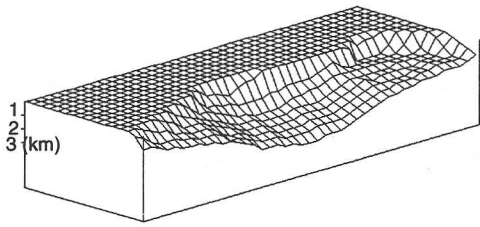


図-1 基盤最上面の構造

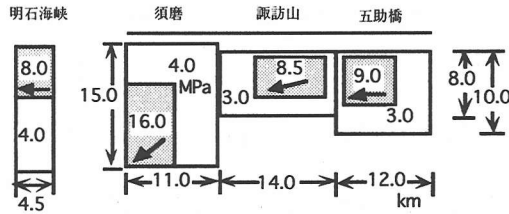


図-2 断層モデル図

表-1(a) 速度構造 (堆積層)

	Vp(km/sec)	Vs(km/sec)	ρ (gt/cm ³)	最大層厚(km)
第1層	2.2	0.5	2.0	0.4
第2層	2.8	1.5	2.2	0.4
第3層	3.5	2.0	2.25	0.4

表-1(b) 速度構造 (基盤)

	Vp(km/sec)	Vs(km/sec)	ρ (gt/cm ³)	最大層厚(km)
第4層	4.25	2.85	2.3	1.2
第5層	5.7	3.2	2.5	4.0
第6層	6.0	3.46	2.8	∞

表-2 計算パラメータ

格子間隔(km)	0.2
計算時間刻み(sec)	0.01
最大 P 波速度 (km/sec)	6.0
最小 S 波速度 (km/sec)	0.5
最小密度 (g/cm ³)	2.0
グリッド数	151×425×150
計算ステップ数	3000
1 ステップあたり計算時間 (sec)	16

表-3 断層モデル

断層名	走向(deg)	Dip (deg.)	深さ(km)	長さ(km)
須磨	N53°E	90°	15.0	11.0
諏訪山	N53°E	90°	8.0	14.0
五助橋	N53°E	90°	10.0	12.0
明石海峡	N98°E	90°	14.0	4.5

断層系のそれと 45°をなすよう設定した。

すべての計算結果には 0.5Hz のローパスフィルターをかけた。

(1) 最大速度の空間分布

計算領域のうち、神戸側については、これまでになされた研究を検証する立場で記述する。

図-3 に最大水平速度分布を示す。水平成分の最大

速度が大きな領域の分布は、神戸の西部と東部に二分されており、実際の震度7の分布、および被害分布とよく一致する。この分布を断層位置と比較すると、速度の大きい領域は堆積層(図の下)側、および北東(図の右)側に偏って分布していることがわかる。この傾向はそれぞれ、堆積層内での地震波増幅、および断層破壊の指向性(ディレクティビティ)効果として説明される。また、堆積層部で速度の特に大きいところは基盤と堆積層の境界から少し(1~3km)離れた場所であることもわかる。

西宮付近に焦点を絞る。40cm/sec 前後の最大速度が現れた地域は、堆積層と基盤露出地域との境界に沿って分布していることがわかる。また、特に速度の大きい部分は西宮で被害の大きかった地域とほぼ一致する。

図-4に各々の断層がもたらす地表最大速度分布を示す。図-3では神戸の南西部で速度の特に大きな一帯がみられたが、これは破壊開始点のアスペリティによる効果であることがわかる。また、神戸中部では須磨断層と諏訪山断層のアスペリティの影響が大きい。西宮西部では諏訪山+五助橋、西宮東部および宝塚では五助橋断層による影響が顕著であることがわかる。

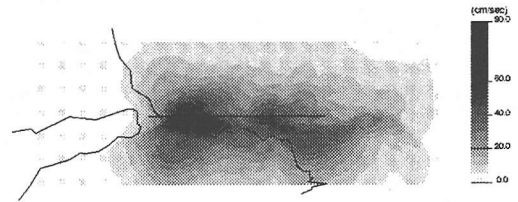


図-3 最大水平速度分布

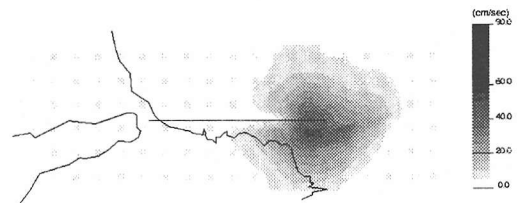
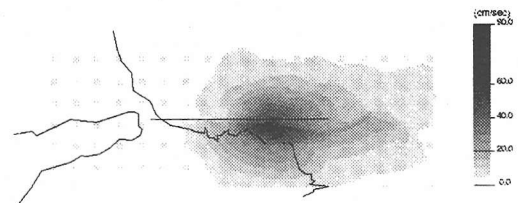
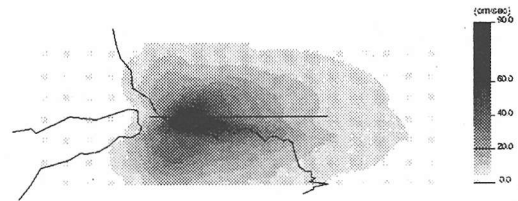


図-4 各々の断層による最大速度分布
上から、(a)須磨断層、(b)諏訪山断層、(c)五助橋断層

(2) 計算速度波形

前節で示したような最大速度分布は、地震動増幅のマクロな把握に大いに有効である。しかし、これらの知見を工学的に有用なものにするためには、はじめに述べたように、計算波形そのものを提示する必要がある。

図-5に鷹取駅付近、西宮市満池谷付近、西宮市仁川付近の断層直交成分計算速度波形を地図と併せて示す。西宮市満池谷付近は阪急電鉄の高架橋倒壊などがあり、西宮の中でも被害の大きい地点である。また、仁川は大規模な地滑りが発生した地点であり、ここも地動が大きかったと推定されている。

計算波形には0.5Hzのローパスフィルターをかけてある。このようなやや長周期の波も、固有周期の短い低層建物など一般の建築物の被害に直接関わったといわれているが、完全には解明されていない。しかし、空間的な広がりを持った長大構造物や高層建物、免震構造物の耐震設計においては0.5Hzよりも低周波の波も重要である。

図-5-1に鷹取駅周辺の計算速度波形を示す。鷹取駅周辺は、本解析で最も地動速度の大きな地点であり、その最大速度は80cm/secを超えた。計算波形は周期3秒程度の大きなパルスで特徴づけられる。

西宮市満池谷の水平2成分の波形を図-5-2に示す。波形は、大きなパルスである点で前述の2点と同様である。しかし、その周期は4秒ほどであり、これは明らかに他と異なる性質を持った波であると言える。地動の卓越方向は南北方向であることが読みとれる。

次に西宮市仁川の水平2成分の波形を図-5-3に示す。ここでも波形は周期の長いパルスとなっている。また地動の卓越方向は東西方向であることが読みとれる。

図-5-4にこれまでに示した測点の位置を示した。仁川と満池谷は直線距離にして3kmほどしか離れていないにも関わらず、卓越方向が異なる。図-1と併せて考察すると、卓越方向の違いは基盤-堆積層境界の形状の影響であると考えられる。一方、長周期パルスは、アスペリティの配置とプロセスの関連で、ディレクティビティの見かけ上の周期が伸びたために引き起こされたものと考えられる。

(3) 明石海峡の表層断層を取り入れたシミュレーション

断層モデル及び断層パラメータは既に図-2および表-3に示してある。図-6に明石海峡断層のみが及ぼす水平最大速度分布を示す。また、図-7にすべての

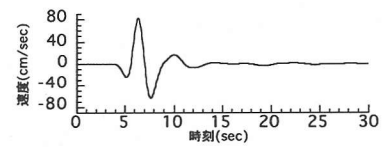


図-5-1 鷹取駅付近の速度計算波形(N37W)

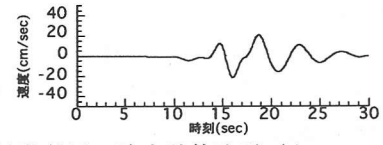
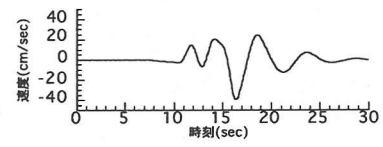


図-5-2 満池谷付近の速度計算波形 (上 N37W 下 N53E)

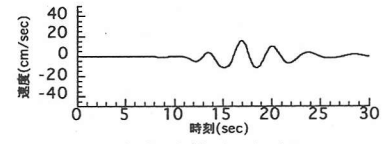
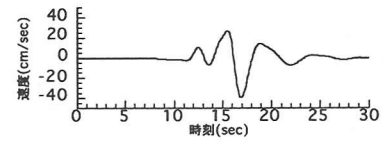


図-5-3 仁川付近の速度計算波形 (上 N37W 下 N53E)

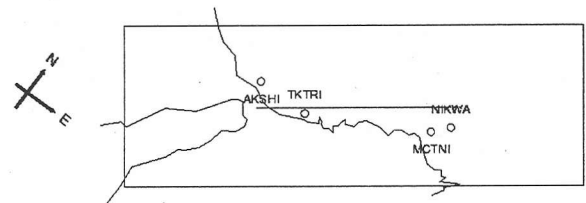


図-5-4 波形を提示した地点

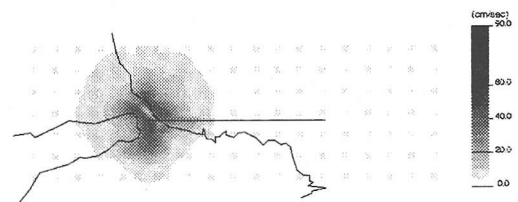


図-6 明石海峡表層断層の寄与

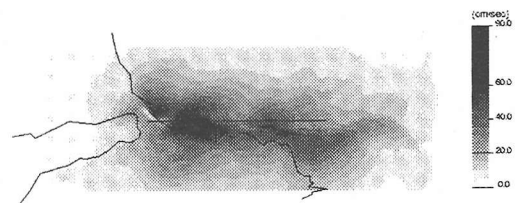
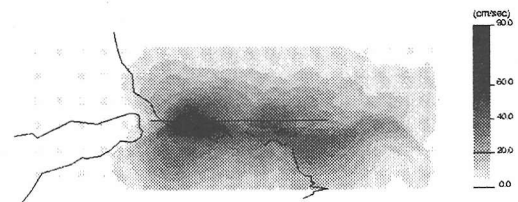


図-7 水平最大速度分布の変化
上：断層導入前，下：断層導入後

断層を含めた水平最大速度分布の変化を示す。図-6、図-7より、この断層の寄与が大きな地域は断層近傍に限られていることがわかる。しかしながら、近傍における最大速度は40cm/secを超えており、構造物に被害を及ぼしかねない地動もたらされている。

明石市付近の地動速度を図-8に示す。明石市の場所は(AKSHI)として、図-5-4に示してある。

図より、時刻4秒で須磨断層の破壊による地動が伝わり、その直後である時刻5秒過ぎに、明石海峡断層による地動が伝わってきたことがわかる。またその波形はアスペリティを強く反映したパルス状となっている。従って、長さ数kmの小さな断層でさえ、それが地下浅い場所にあれば、極近傍に大断層と同様の地動を及ぼしうると言える。

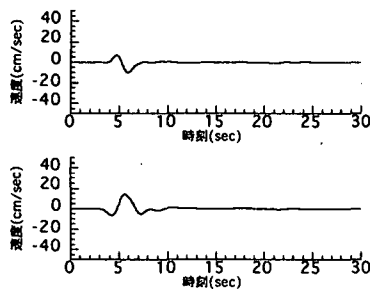


図-8-1 明石の速度波形 (上 N37W 下 N53E)
明石海峡直下断層なし

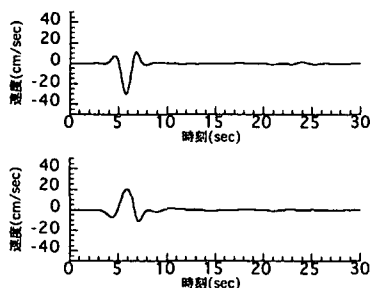


図-8-2 明石の速度波形 (上 N37W 下 N53E)
明石海峡直下断層あり

5.まとめ

西宮市域の被害分布の地震学・工学的考察をおこなうため、動力学的考察に基づいた断層モデルを用いて、神戸から西宮以西を含む広い範囲にわたる、1995年兵庫県南部地震の3次元シミュレーションをおこなった。震源断層は3つ仮定し、これらのアスペリティをフォワードモデリングによって求めた。

まず、最大地動速度分布の考察をおこない、得られた分布が実際の被害域と西宮市域も含め整合する

ことを確かめた。次に、アスペリティ各々の影響を検討した。

西宮地域で実際に大被害があった地点を選び、その地点における速度波形の考察をおこなった。波形は、地下構造の影響とアスペリティの影響が大きいことがわかった。

さらに、明石海峡直下での断層破壊が、近傍の地動に及ぼした影響を考察した。最大速度分布と速度波形の考察により、明石海峡近傍にはこの断層による地動が卓越した場所があったことを示した。

謝辞：地震研究所宮武助教授には有用な助言をいただきました。本研究のために、東京大学地震研究所地震予知センターの計算機システムを利用しました。

参考文献

- 1) Pitarka et al.: Modeling 3D surface topography by finite-difference method: Kobe-JMA station site, Japan, case study, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 23, 1996.
- 2) Pitarka et al.: Three-dimensional simulation of the near-fault ground motion for the 1995 Hyogo-ken Nanbu (Kobe), Japan, earthquake, *BSSA.*, Vol. 88, 1998.
- 3) 入倉：阪神・淡路大震災—防災研究への取り組み—阪神大震災を引き起こした強震動, 京都大学防災研究所年報, 39A, 1996.
- 4) Gurler: 3D Simulation of Near Field Strong Ground Motion During 1995 Kobe Earthquake - Effects of Irregularity of Underground Structure and Complexity of Rupture Process, *Tokyo Univ.*, Doctoral Thesis, 1997.
- 5) Megawati: Study of rupture process beneath the Akashi Strait during the Hyogo-ken Nanbu earthquake, based upon near-source data, *Tokyo Univ.*, Doctoral Thesis, 1997.
- 6) Koketsu et al.: A fault model of the 1995 Kobe earthquake derived from the GPS data on the Akashi Kaikyo Bridge and other database, *Earth Planets Space*, 50, 1998.
- 7) 島田ら：動力学モデルによる断層近傍の地震動—1984年長野県西部地震—, *地震*, 49, 1996.
- 8) Virieux et al.: Dynamic faulting studied by a finite difference method, *B.S.S.A.*, Vol. 72, 1982
- 9) Graves: Simulating Seismic Wave Propagation in 3D Elastic Media Using Staggered-Grid Finite Differences, *BSSA.*, 86, 1996.
- 10) 慈道ら：重力と脈動からみた甲陽断層周辺の基盤構造, 京大防災研研究集会「兵庫県南部地震の強震動はすべてわかったのか?」研究発表資料集, 1997.
- 11) 石田ら：神戸市街地直下における基盤岩震度分布の推定—やや長周期微動の水平/上下スペクトル比に基づく評価—, 日本建築学会構造系論文集, 第485号, 1996.