

第3章 剛性行列による地震波動場解析の数値計算例

3.1 まえがき

本章では、1つの横ずれ断層を想定し、第2章に示した剛性行列による地震波の定式に基づく数値計算例を示し、露頭波や断層永久変位を含む断層近傍の地表面地震動の変位・速度・加速度波形に及ぼす表層地盤の厚さの影響を調べることにする。ここで示すような順解析による断層永久変位を含む断層近傍の地表面地震動の特徴に関する試算例は、観測加速度波形の積分によって推定される速度・変位波形の精度には注意が必要であることや、断層近傍の橋梁や幹線等の重要ライフライン施設の非線形応答解析では、多地点の変位・速度・加速度波形を必要とすること等の理由により、断層近傍の構造物の非線形応答挙動から耐震性を検討する際の工学的情報となる。また、将来的には逆解析により、地表面での多数の観測地震動から震源断層特性と表層地盤特性を推定する時の基礎情報として利用することが期待できる。

3.2 解析に用いる4つの震源断層・地盤系モデル

図3.2.1に示すような断層長さ8.5km、断層幅8.5kmの大きさの矩形鉛直横ずれ断層を含む4つの震源断層・地盤系モデル（Model Aは表層地盤が存在せず、地表に震源断層が現れる地表断層の場合、Model Bは厚さ0.5kmの表層地盤がある場合、Model Cは厚さ1.5kmの表層地盤がある場合、Model Dは厚さ5.0kmの表層地盤がある場合）を想定する。

表3.2.1、3.2.2に震源断層パラメータおよび半無限地盤と地盤の物性値を示す。この計算では、振動数2.0Hzまでの低振動数領域の地震動波形を合成した。なお、断層の平均すべり量 $D=1.0m$ とし、表3.2.3に示すような3重離散フーリエ変換のパラメータを用いて波形を合成した。表3.2.1に示した震源断層パラメータのType1とは、断層左端から右方向に一樣な破壊速度で断層破壊が伝播する破壊様式を示す。これは3.4で使うBouchon (1979)¹⁾と同じ破壊様式である。

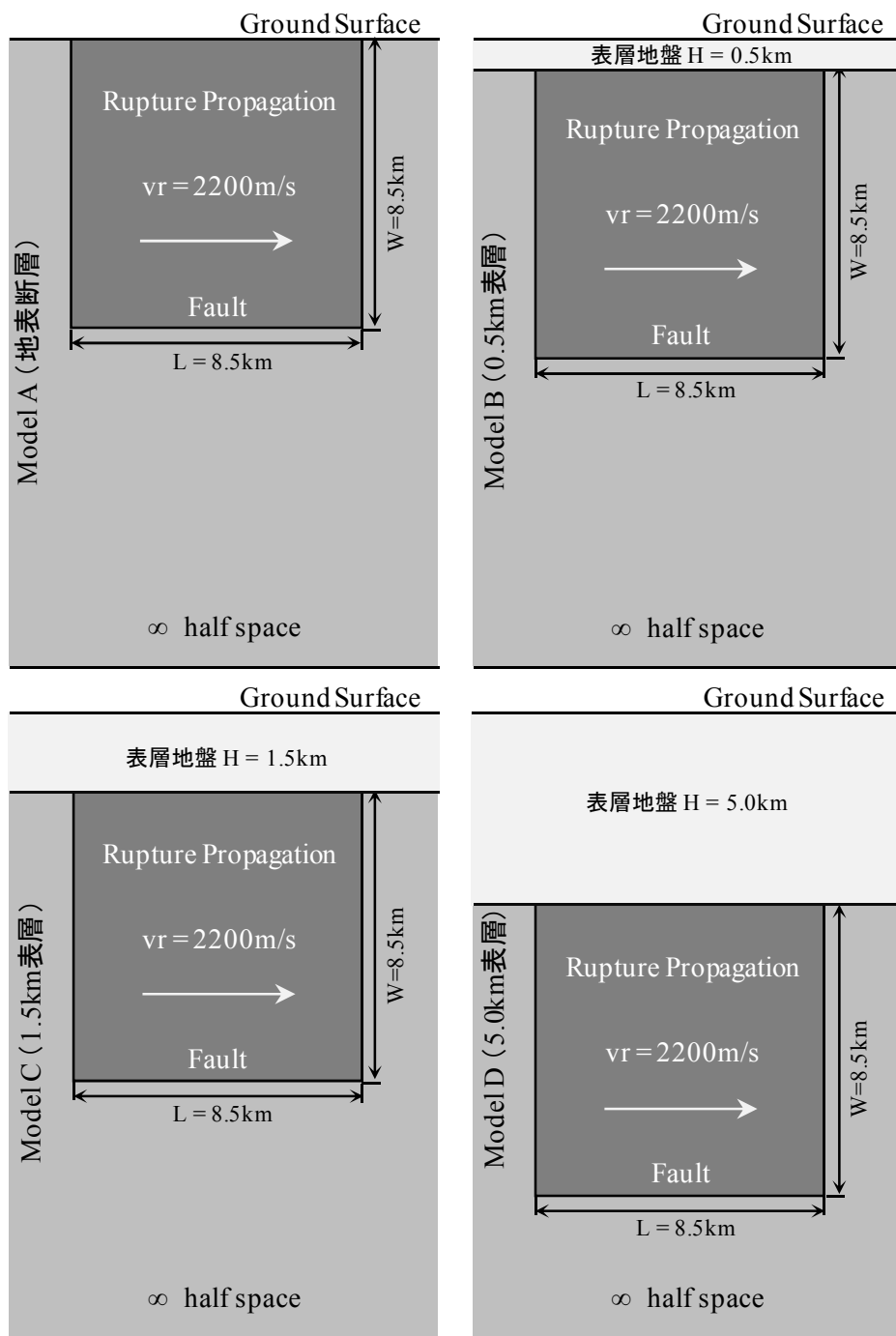


図 3.2.1 表層地盤の厚さが違う 4 つの震源断層・地盤系モデル

表 3.2.1 震源断層パラメータ

地震モーメント M_0 ($N \cdot m$)	2.23×10^{10}
立ち上がり時間 τ (s)	0.3
断層の長 L (km)	8.5
断層の幅 W (km)	8.5
断層破壊速度 v_r (km/s)	2.2
断層の走行方向 ϕ (°)	0
断層面の傾斜角 δ (°)	90
すべり方向 λ (°)	0
すべりタイプ	Type1

表 3.2.2 解析で用いた地盤物性値

物性値	表層地盤				半無限地盤
	Model A	Model B	Model C	Model D	
表層地盤厚さ (km)	0	0.5	1.5	5.0	—
P 波速度 (km/s)	2.8				6.0
S 波速度 (km/s)	1.6				3.5
密度 (kg/m^3)	2300				2800
Q 値	150				400

表 3.2.3 3重離散フーリエ変換のパラメータ

遮断円振動数 ω_{max} (rad/s)	31.4
x 方向の遮断波数 κ_{xmax} (rad/s)	$\pm 6.28 \times 10^{-3}$
y 方向の遮断波数 κ_{ymax} (rad/s)	$\pm 6.28 \times 10^{-3}$
振動数領域の分割数 N_ω	1024
波数領域の分割数 N_κ	1024
時間間隔 Δt (s)	0.1
x 方向の空間間隔 Δx (m)	500.0
y 方向の空間間隔 Δy (m)	500.0

3.3 解放工学基盤波の変位・速度・加速度波形に及ぼす表層地盤の厚さの影響

ここでは、図3.3.1に示すように震源断層から0.5km離れた断層破壊終了付近8km地点（A地点）の地震動波形を取り上げて、地震動波形に及ぼす表層地盤の厚さの影響を観察する。主に以下のような2つの理由から、ここでは地震動として変位・速度・加速度波形を例示することとした。

断層永久変位を含む地震動を用いた構造物の多点入力による非線形応答解析では、絶対変位に関する運動方程式が必要となり、この運動方程式の入力地震動には変位・速度・加速度波形を必要とする。観測加速度波形の積分によって推定される速度・変位波形の精度には注意が必要であるため、構造技術者からは精度の高い断層永久変位を含む地震動の変位・速度・加速度波形が求められている。また、地震動速度・加速度波形の正負の最大値が片側で大きい片寄りのある地震動波形と断層永久変位の影響も求められている。図 3.3.2～図 3.3.4 は、それぞれ、表層地盤の厚さが違う 4 つの震源断層・地盤系モデルによる変位・速度・加速度波形を示す。

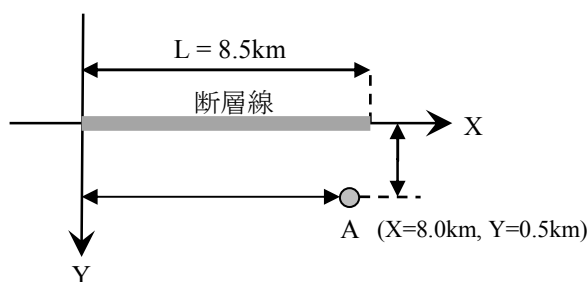


図 3.3.1 真上から見た計算地点 A と断層線の位置関係

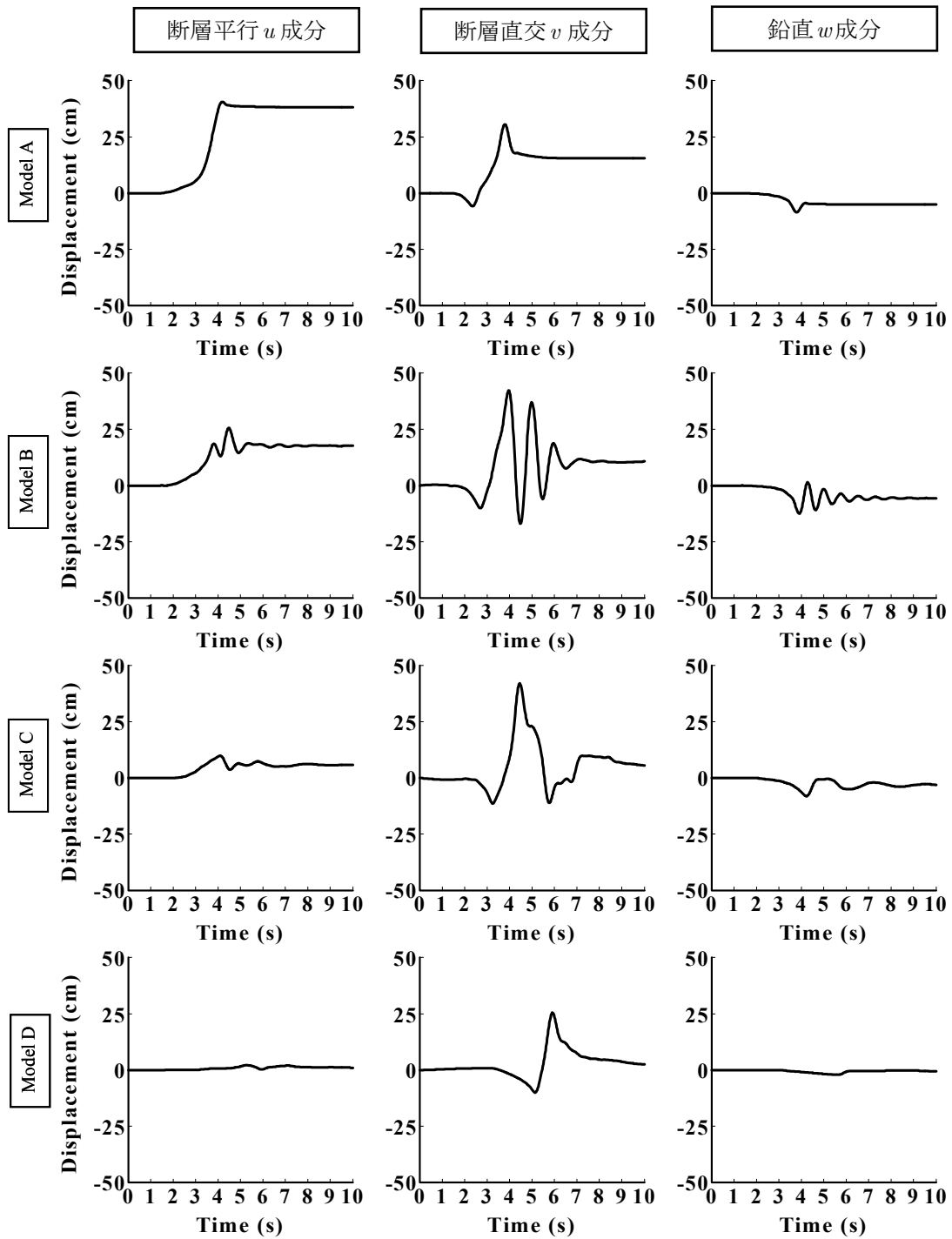


図 3.3.2 表層地盤の厚さが違う 4 つの震源断層・地盤系モデルによる地点 A の変位波形

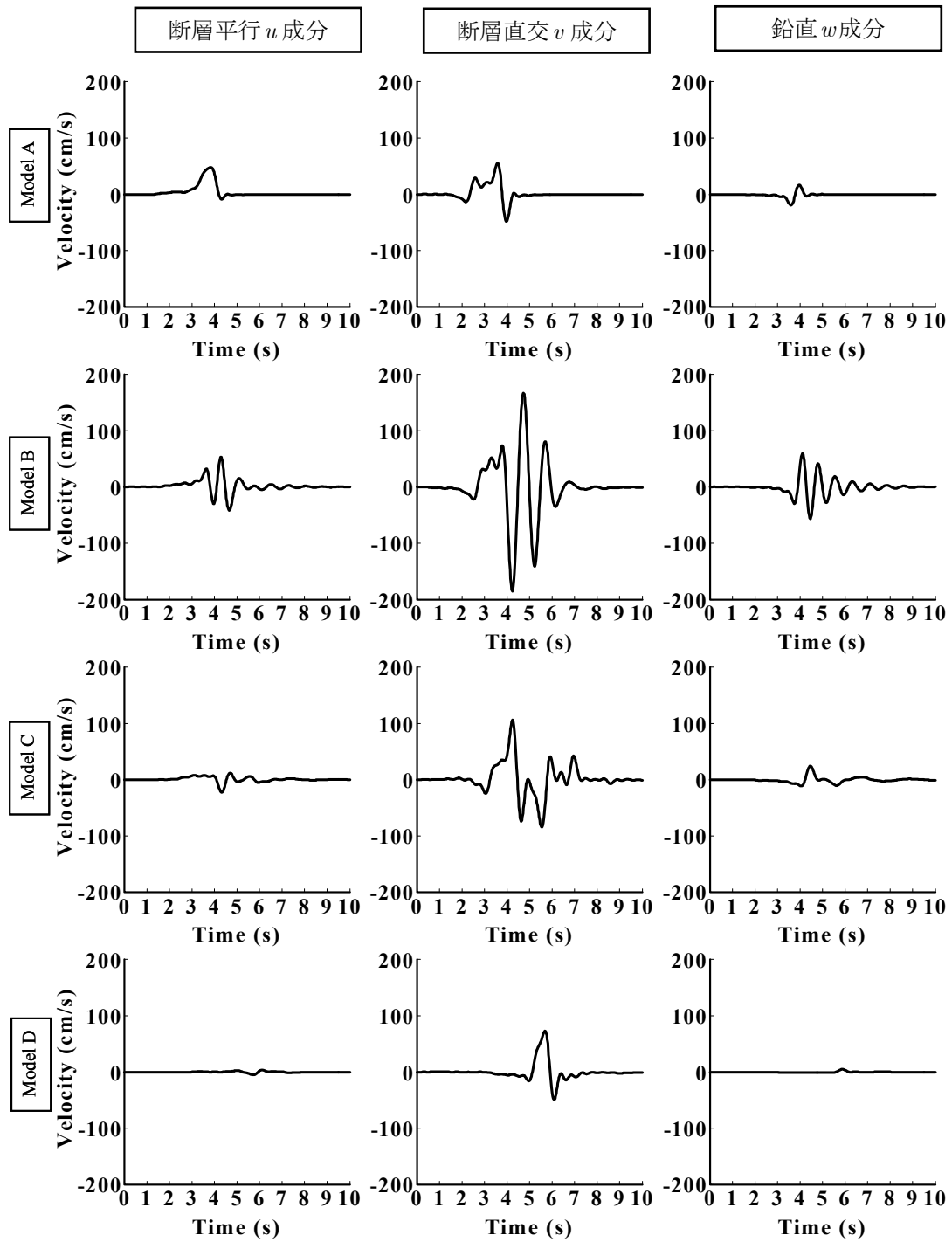


図 3.3.3 表層地盤の厚さが違う 4 つの震源断層・地盤系モデルによる地点 A の速度波形

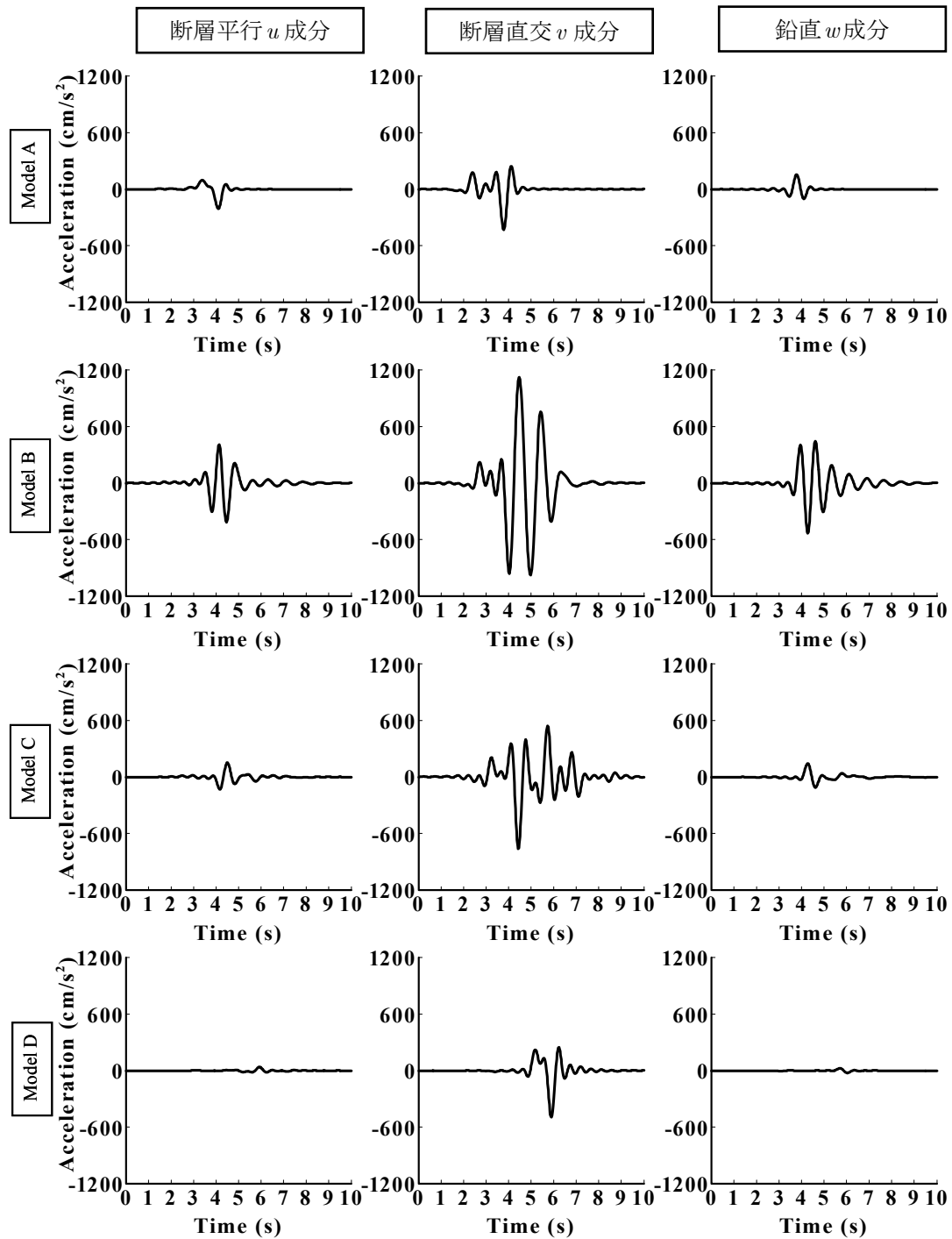


図 3.3.4 表層地盤の厚さが違う 4 つの震源断層・地盤系モデルによる地点 A の加速度波形

図3.3.2に示す変位波形からは、地表断層のModel Aで、断層平行方向の変位波形が圧倒的に大きく、最大約40cmの変位と横ずれ断層による大きな永久変位が観られる。本モデルでは横ずれ断層の平均すべり量 $D = 1m$ を仮定しているため、断層線を跨ぐ2地点の相対永久変位は100cm で図3.3.1のA点側の断層線近傍の地盤は右に50cm永久変位する。A点は断層線から500m離れているので50cmより小さい約40cmの永久変位が得られたものと思われる。表層地盤が存在するModel B, Model CとModel Dでは、断層直交方向の変位が大きいですが、Model Aの場合に比べると、永久変位は小さい。半無限地盤には固有振動数の様な地盤固有の振動数特性は存在しないので、半無限地盤のModel Aでの変位波形には、地盤固有の振動数特性は含まれない。しかし、Model B, Model CとModel Dの変位波形には、震源断層からの地震波の振動数特性に加え表層地盤の振動数特性が含まれる。表層地盤の振動数特性の影響を受けて、Model Aの変位波形に比べ、Model B, C, Dの変位波形の振幅・振動数特性が大きく変わっている。

図3.3.3と図3.3.4に示す速度と加速度波形からは、地表断層Model Aの場合、表層地盤が存在するケースよりも小さくなっていることがわかる。また、表層地盤が有る場合と無い場合の全てのケースで、断層直交方向の速度と加速度が大きいのが特徴である。

図3.3.2～図3.3.4に示すように表層地盤の厚さが、波形の振幅と位相特性および、振動数特性に大きく影響することがわかった。その原因は、表層地盤の振動数応答特性と震源断層からの地震波の振動数特性の2つの特性が影響し、両者の特性が一致すると、いわゆる共振によって地震動が大きくなる。

また、断層近傍の変位・速度・加速度波形には、断層永久変位の影響が現れて、正側と負側の最大振幅が違う、いわゆる片寄りのある波形が得られることがわかった。観測された片寄りの無い波形と片寄りの有る波形を用いた構造物の解析からは、非線形応答挙動に大きな違いがあることも明らかにされてきているため（丸橋ら 2005 や丸橋・市之瀬 2006）^{2), 3)}、本論文のような理論的方法から求められる断層近傍の地震動を用いた検討も有用であると思われる。

3.4 断層近傍の観測波形の再現性

1966年 Parkfield 地震 ($M_s 6.5$) の際に、断層破壊終了付近から約 80m 地点の地表面 (Station2) で、断層とほぼ直交する方向 (COMP N65E) の加速度記録が観測された。

ここでは、この記録を本論文で示した剛性行列による波形合成法と、順解析的手法ではあるが、3.3 で示したような震源断層近傍の地震動に及ぼす表層地盤の影響を考慮して再現する。

この地震に関しては、すでに断層モデルによる多くの研究論文がある（例えば、岩田 1991）⁴⁾。これらの既往の研究では、地盤モデルとして、無限地盤や半無限地盤を仮定したものが多く。しかし、Bouchon (1979) ¹⁾は1層の表層地盤モデルを仮定し、妥当な断層パラメータのもとで記録の再現をしている。

そこでまず、Bouchon (1979) ¹⁾が使った震源断層パラメータと地盤モデルを使って波形計算した。

変位波形に関しては観測波形と同じような結果が得られたが、速度や加速度波形は観測波形と違うことがわかっている（原田ら 1999の図-6）⁵⁾。この違いの原因としては、断層すべりなどの不均質性等の震源特性が考えられるが、3.3で示したように地震動の変位・速度・加速度波形に及ぼす表層地盤の厚さの影響が大きいことを考慮して、ここでは、Bouchon (1979)¹⁾が使った震源断層パラメータはそのままにして、表層地盤の厚さと物性値を以下のような観点から変化させて、観測波形再現の改善を試みた。

図 3.4.1 の下段に示すような下側に片寄った特徴的な変位波形で、かつ、正の最大変位の後に 2 番目の山が現れる変位波形の特徴は、3.3 の図 3.3.2 の Model B と Model C の中間的な特徴を有しているため、厚さを Model C より薄い 1.0km とし、物性値を変化させ、最終的に図 3.4.1 のような再現性のよい結果を得ることができた。このときの断層パラメータと地盤構造と物性値は表 3.4.1、3.4.2 に示すようである。ただし、表 3.4.2 の括弧内の数値は Bouchon (1979)¹⁾モデルの値を示す。表 3.4.2 に示す物性値においては Bouchon モデルとほぼ同じであるが、表層地盤の厚さが 1.5km から 1.0km へと変わっている。この地震の余震分布のデータ (Eaton et al 1970)⁶⁾からは、断層上端は南東で 2km 程度と深く、再現を試みた Station2 では約 1km と北西に徐々に浅くなり北西部の地表に断層線が現れている断層部分での余震は地表付近に分布している。したがって、断層上端深さを 1km とするモデルは余震分布からは妥当な範囲のモデルであろう。

今後は、逆解析手法を使い、観測波形を説明できる断層パラメータと地盤構造と物性値を決めることができるかについて検討する。

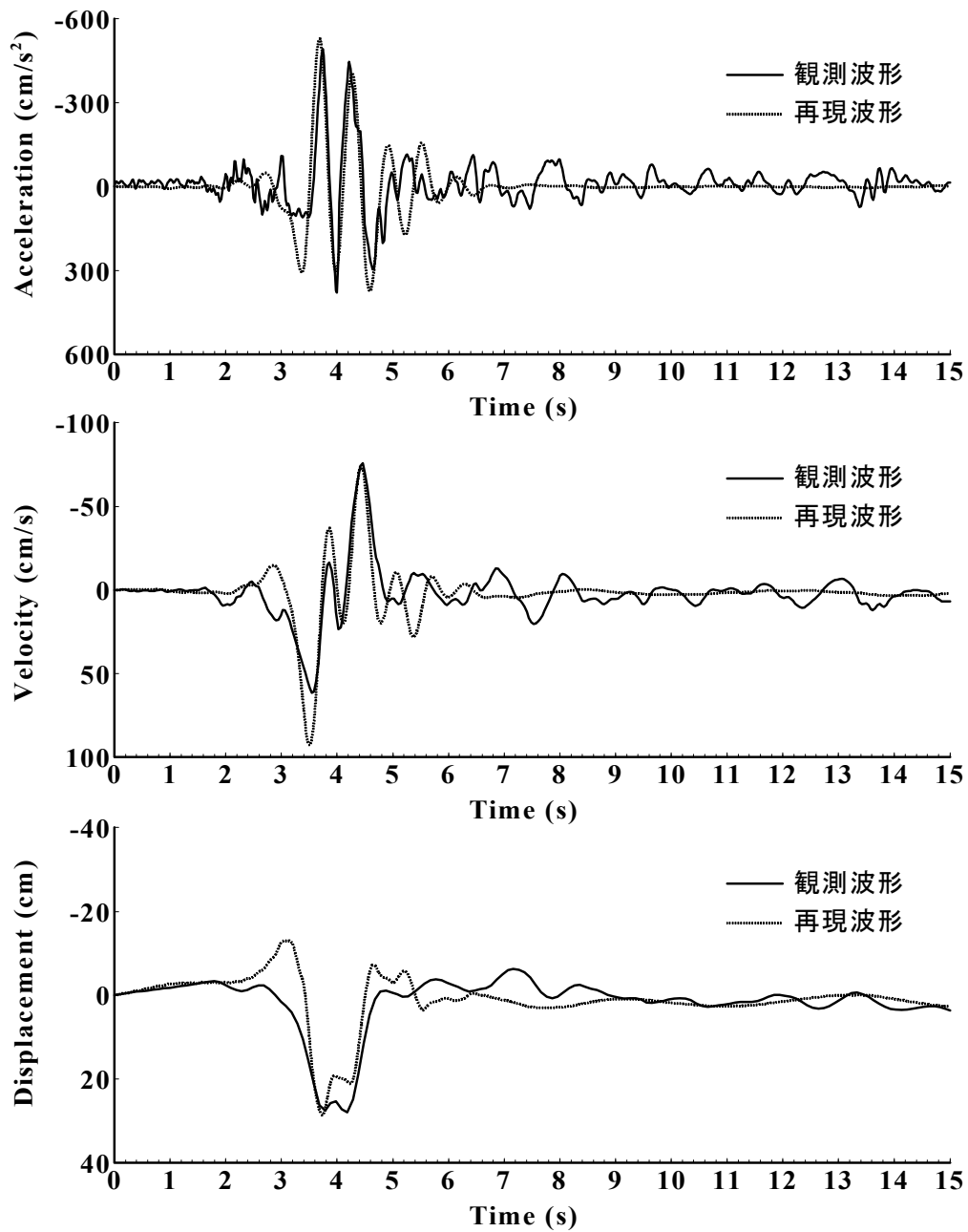


図 3.4.1 1966 年 Parkfield 地震の観測波形と計算波形の比較（上段：加速度波形，中段：速度波形，下段：変位波形）

表 3.4.1 1966 年 Parkfield 地震の断層パラメータ

地震モーメント M_0 ($N \cdot m$)	2.23×10^{10}
立ち上がり時間 τ (s)	0.3
断層の長 L (km)	8.5
断層の幅 W (km)	8.5
断層破壊速度 v_r (km/s)	2.2
断層の走行方向 ϕ (°)	0
断層面の傾斜角 δ (°)	90
すべり方向 λ (°)	0
すべりタイプ	Type1

表3.4.2 Parkfield地震波形の再現に使った地盤モデル
(表の括弧内の数値はBouchonモデルの値を示す)

物性値	表層地盤	半無限地盤
表層地盤厚さ (km)	1.0 (1.5)	—
P 波速度 (km/s)	3.0 (2.8)	5.715 (6.0)
S 波速度 (km/s)	1.74 (1.6)	3.23 (3.5)
密度 (kg/m^3)	2300 (2300)	2800 (2800)
Q 値	150 (150)	400 (400)

3.5 まとめ

剛性行列による地震波の定式に基づく数値計算例として、断層の永久変位を含む断層近傍の地震動の変位・速度・加速度波形を計算し、地震動に及ぼす表層地盤の厚さの影響が大きいことを示した。これらの断層近傍の地震動の振幅は片側に大きい、いわゆる片寄りのある波形となることを示した。また、順解析的手法ではあるが、表層地盤特性を変化させ、1966年 Parkfield 地震の断層近傍の変位・速度・加速度波形を再現し、剛性行列による地震動波形合成法が精度よく地震動を再現できることを示した。

参考文献

- 1) Bouchon M.: Predictability of ground displacement and velocity near an earthquake fault, An example: The Parkfield Earthquake of 1966, *Journal of Geophysical Research*, Vol.84, No.B11, pp.6149-6156, 1979.
- 2) 丸橋奈々子, J.L.D.コスタ, M.P.ニールセン, 市之瀬敏勝: 剛塑性モデルを用いた地震応答の非対称性に関する基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集, 日本建築学会, 第 598 号, pp.75-80, 2005.
- 3) 丸橋奈々子, 市之瀬敏勝: 完全弾塑性モデルの地震応答の片寄り, 日本建築学会構造系論文集, 日本建築学会, 第 609 号, pp.75-80, 2006.
- 4) 岩田知孝: 断層近傍の強震動とそれを用いた震源過程の推定, 地震第 2 輯, 第 44 巻, pp.315-327, 1991.
- 5) 原田隆典, 大角恒雄, 奥倉英世: 3 次元直交座標系における波動場の解析解とその地震動波形作成への応用, 土木学会論文集, 土木学会, No.612/1-46, pp.99-108, 1999.
- 6) Eaton J.P., O'Neill E. and Murdock J.N.: Aftershocks of the 1966 Parkfield -Cholame, California, Earthquake: A detailed study, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 60, No. 4, pp.1151-1197, 1970.