

波数積分法を用いた地震動評価に関する一考察 — すべり速度関数の違いが地震動特性に与える影響 —

境 茂樹^{*1}・仲野健一^{*2}

想定地震に対する設計用入力地震動の作成において、強震動予測手法として波数積分法が用いられる場合がある。波数積分法は、平行成層地盤を仮定した周期1秒以上のやや長周期地震動の評価に使用され、震源断層の破壊伝播効果を反映した地震動評価が可能で計算時間も短い。本研究では、久田他によるベンチマークテストを参考にして、波数積分法を用いたパラメトリック・スタディを行い、震源のすべり速度関数の設定が地震動特性に与える影響について検討した。また、解析結果を2005年千葉県北西部の地震(Mj = 6.0)の観測記録と比較して、すべり速度関数の設定による観測記録との整合性と、波数積分法の適用についての課題を示した。

キーワード：設計用入力地震動、波数積分法、すべり速度関数、地震動特性、2005年千葉県北西部の地震

1. はじめに

想定地震に対する設計用入力地震動を作成する際、強震動予測手法として波数積分法や統計的グリーン関数法、経験的グリーン関数法などが用いられている。波数積分法は、平行成層地盤を仮定した周期1秒以上のやや長周期地震動の評価に用いられ、震源断層の破壊伝播効果(ディレクティブティ効果)を適切に考慮できる地震動評価手法である^{1),2)}。

久田他は、多数の研究者による同じ震源・地盤の条件下でベンチマークテスト^{3)~12)}を実施して、強震動予測手法の違いや震源・地盤モデルの設定によって予測結果が大きく変動する要因を明らかにし、予測結果のばらつきの程度を把握して、その一連の研究成果をホームページに公開している¹³⁾。

本研究では、このベンチマークテストを参考にして、強震動予測手法として波数積分法を取り上げ、震源パラメータであるすべり速度関数に着目し、それによる地震動特性への影響を把握するとともに、強震記録との整合性を検討し手法の課題について考察した。

2. 波数積分法による強震動評価の概要

波数積分法は平行成層地盤を仮定し周期1秒以上のやや長周期地震動の評価に用いられ、計算時間も早く震源断層のディレクティブティ効果を反映した地震動を評価することができる。久田他は、想定首都直下地震を対象としたベンチマークテスト(STEP8)を行うにあたり、

予測手法の妥当性確認の前段階(STEP7)として、2005年千葉県北西部の地震(Mj = 6.0)の強震動計算と観測記録の比較分析から、計算手法と震源・地盤モデルの検証を行った^{9)~11)}。本検討では、このベンチマークテスト(STEP7)を参考にし、波数積分法を用いた強震動計算を行い、震源のすべり速度関数の設定が地震動特性に与える影響について、2005年千葉県北西部の地震の観測記録と比較して検討を行った。

2.1 震源パラメータの設定

石川他はベンチマークテスト(STEP7)で、額・三宅による2005年千葉県北西部地震の震源メカニズム¹⁴⁾に基づき強震動計算を実施した¹⁰⁾。この場合、震源は点震源を仮定し、すべり速度関数を図-1(Case-0)に示すような、継続時間が1秒の二等辺三角形(以下、三角形関数と称す)で設定し、各種理論解析手法の比較検討を行っているが、すべり速度関数の設定根拠については特に言及されていない。

本論文では、このすべり速度関数に着目し、図-1に示す三角形関数として設定する場合、すべり速度関数の継続時間を変化させたパラメトリック・スタディを実施した。その際、地震モーメントから決定されるすべり量(三角形の面積)は同一とし、石川他¹⁰⁾が設定したすべり速度関数の継続時間 t を1秒としたケースを基本ケース(Case-0)とし、これより継続時間を短くしたCase-1(0.6秒)、長くしたCase-2(1.4秒)、Case-3(2.0秒)の4ケースについて計算を行った。なお、地震調査研究本部の「レ

*1 建築研究部 *2 技術管理部

シペ¹⁵⁾では、すべり速度関数について中村・宮武の式¹⁶⁾が示されているが、ここでは三角形関数による検討を行った。設定した震源パラメータを表-1に示す。

2.2 計算地点と地盤構造

計算地点は図-2に示すように、震源のごく近傍の観測点を含む東京湾周辺の5点を選択した。計算地点の地盤構造モデルは、深部地盤構造は地震調査研究推進本部の長周期地震動予測地図2012年版¹⁷⁾を、表層地盤の地盤物性値は防災科学技術研究所のK-NET¹⁸⁾の地盤調査結果を参考にして、工学的基盤以深をモデル化した(表-2)。周期1秒以上の長周期成分を主体に検討するため、工学的基盤より浅い表層地盤は考慮していない。

3. 強震動の計算結果

3.1 すべり速度関数の違いによる地震動特性

すべり速度関数の違いが地震動特性に与える影響について検討するため、震源のごく近傍の観測点であるCHB009(千葉)を対象にフーリエ振幅スペクトルを計算した。

表-1 各種設定条件

対象地震	2005年千葉県北西部の地震(Mw=5.8)						
震源モデル	東大地震研(点震源)						
	緯度	経度	深さ(km)	走向(°)	傾斜(°)	すべり角(°)	地震モーメント(Nm)
	35.6	140.1	70	25.5	63.1	67.8	5.8E+17
地盤モデル	長周期地震動予測地図2012年度試作版+K-net地盤モデル(工学的基盤まで)						
すべり速度関数	三角関数(Case0~4)			使用プログラム		grflt12sx1~v13.exe	
波形処理	1.0Hzのローパスフィルター			評価地点		5地点	

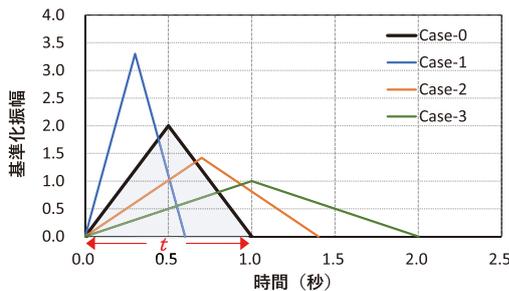


図-1 すべり速度関数

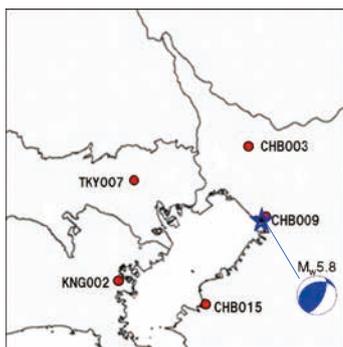


図-2 2005年千葉県北西部の地震の震央位置と計算地点(★:震央, ●:計算地点)

表-2 計算地点の地盤構造

CHB003						
層番号	密度 ρ (t/m ³)	P波速度 V _p (m/s)	P波のQ値 Q _{p0}	S波速度 V _s (m/s)	S波のQ値 Q _{s0}	層厚 (m)
1	1.95	1800	1000	500	500	429
2	2.10	2300	1800	900	900	610
3	2.25	3000	3000	1500	1500	610
4	2.65	5500	4000	3200	2000	5649
5	2.70	6000	4000	3530	2000	10948
6	2.80	6700	4000	3940	2000	15543
7	3.20	7800	5000	4600	2500	8143
8	3.20	8000	5000	4700	2500	-

CHB009						
層番号	密度 ρ (t/m ³)	P波速度 V _p (m/s)	P波のQ値 Q _{p0}	S波速度 V _s (m/s)	S波のQ値 Q _{s0}	層厚 (m)
1	1.95	1800	1000	500	500	403
2	2.10	2300	1800	900	900	1453
3	2.25	3000	3000	1500	1500	1453
4	2.65	5500	4000	3200	2000	3476
5	2.70	6000	4000	3530	2000	10178
6	2.80	6700	4000	3940	2000	14040
7	2.90	6800	3000	4000	1500	4424
8	3.20	8000	5000	4700	2500	-

CHB015						
層番号	密度 ρ (t/m ³)	P波速度 V _p (m/s)	P波のQ値 Q _{p0}	S波速度 V _s (m/s)	S波のQ値 Q _{s0}	層厚 (m)
1	1.95	1800	1000	500	500	316
2	2.10	2300	1800	900	900	1154
3	2.25	3000	3000	1500	1500	1963
4	2.65	5500	4000	3200	2000	3248
5	2.70	6000	4000	3530	2000	10022
6	2.80	6700	4000	3940	2000	7003
7	2.90	6800	3000	4000	1500	5549
8	3.20	8000	5000	4700	2500	-

KNG002						
層番号	密度 ρ (t/m ³)	P波速度 V _p (m/s)	P波のQ値 Q _{p0}	S波速度 V _s (m/s)	S波のQ値 Q _{s0}	層厚 (m)
1	1.95	1800	1000	500	500	321
2	2.10	2300	1800	900	900	1370
3	2.25	3000	3000	1500	1500	1913
4	2.65	5500	4000	3200	2000	3073
5	2.70	6000	4000	3530	2000	12405
6	2.90	6800	3000	4000	1500	8812
7	3.20	8000	5000	4700	2500	-

TKY007						
層番号	密度 ρ (t/m ³)	P波速度 V _p (m/s)	P波のQ値 Q _{p0}	S波速度 V _s (m/s)	S波のQ値 Q _{s0}	層厚 (m)
1	1.95	1800	1000	500	500	413
2	2.10	2300	1800	900	900	1392
3	2.25	3000	3000	1500	1500	1392
4	2.65	5500	4000	3200	2000	4750
5	2.70	6000	4000	3530	2000	11921
6	2.80	6700	4000	3940	2000	13885
7	2.90	6800	3000	4000	1500	4536
8	3.20	8000	5000	4700	2500	-

*Q値は振動数依存モデルとし、 $Q_p(f) = Q_{p0} \cdot f$, $Q_s(f) = Q_{s0} \cdot f$ と設定。f:振動数(Hz), Q_{p0} , Q_{s0} はf=1Hzの時のQ値。

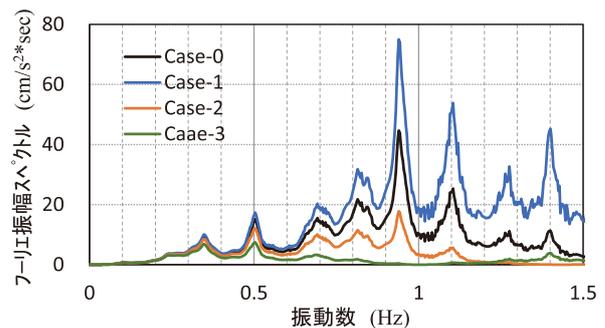


図-3 フーリエ振幅スペクトル(CHB009, EW成分)

結果を図-3に示す。フーリエ振幅スペクトルには各ケース共通に地盤構造によるピークが見られるが、スペクトルの振幅値は、すべり速度関数の継続時間 t が短いケースほど 0.7Hz 以上の高振動数成分（短周期）が励起し、振幅が大きくなる。図-3には EW 成分のみ示しているが、NS 成分、UD 成分のフーリエ振幅スペクトルも同様の傾向を示した。

3.2 観測記録と解析結果との比較

次に、CHB009（千葉）の加速度時刻歴波形と擬似速度応答スペクトルについて、すべり速度関数による地震動の特性の違いを観測記録と対比して分析した。加

速度波形を図-4に、擬似速度応答スペクトルを図-5に示す。なお、解析結果は 1.5Hz 以上の短周期成分の精度が低いため、1Hz 以上をカットする（1Hz から低下し 2Hz で 0）ローパスフィルターを掛けている。このため、観測記録の加速度波形にもローパスフィルターを施し、周期 0.5 秒以下の短周期成分のスペクトル値は示していない。

図-4の加速度波形の結果から、先に述べたフーリエ振幅の結果と同様に、すべり速度関数の継続時間 t が 1 秒以下のケース（Case-0, Case-1）の振幅が大きく、1 秒より大きい Case-2, Case-3 の振幅が小さいことがわかった。また、観測記録と比較すると、 t の小さいケー

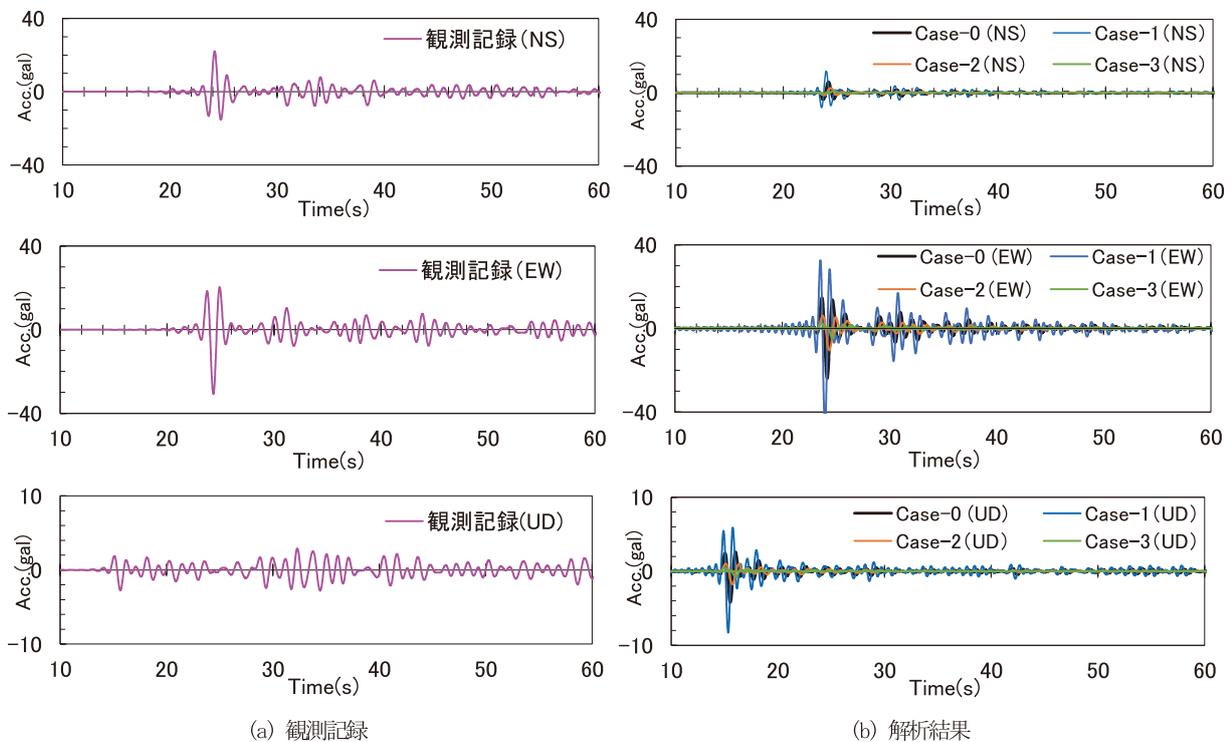


図-4 加速度波形（CHB009）

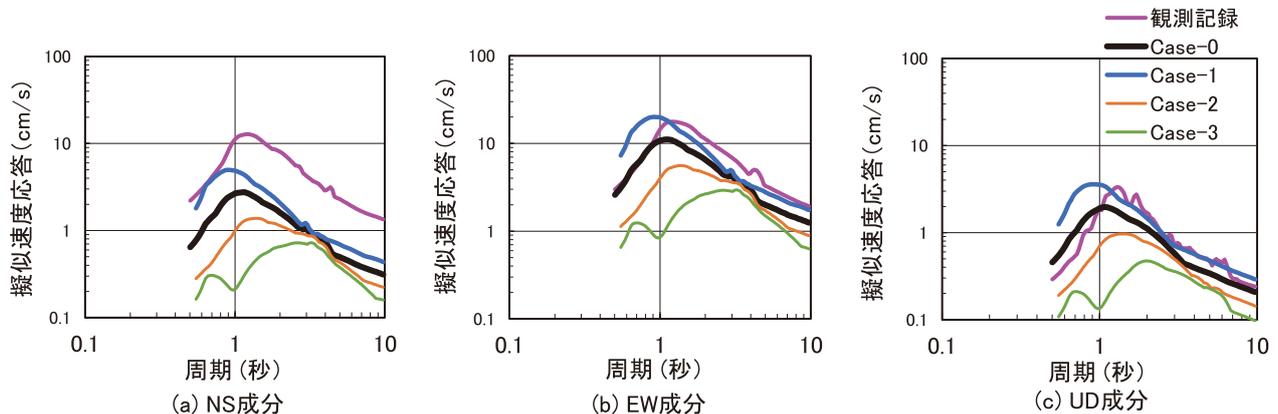


図-5 擬似速度応答スペクトル pSV（減衰 5%）（CHB009）

ス (Case-0, Case-1) が観測記録と対応してくるが, NS成分については, 過小評価となった。また, 図-5からすべり速度関数の継続時間 t が大きくなるケースほど解析結果の応答スペクトルの卓越周期は長くなり, スペクトルの振幅は小さくなる傾向を示した。Case-0を基準にすると, Case-1は振幅が2倍に, Case-3, Case-4では1/5~1/3となった。

観測記録と解析結果を比較すると, スペクトルの振幅レベルはCase-0または1が整合するが, NS成分では過小評価となっている。図-2に示した震源位置と震源メカニズム(震源球)から, CHB009(千葉)では震源球の軸直交方向に近いEW成分の振幅が大きくなると予想されるが, 観測記録ではNS成分も比較的大きい結

果となっている。

CHB009以外の震源から離れた4つの観測点について, 観測記録と解析結果(Case-0, 1)を比較して図-6に示す。加速度波形の振幅レベルや応答スペクトル値の全体的な傾向から, 解析結果は観測記録と良く整合するが, CHB003(白井)では過大評価, CHB015(木更津)ではNS方向が過小評価となっている。

また, 東京湾周辺のCHB015(木更津)とKNG002(横浜)については, 加速度波形(EW成分)の観測記録の主要動以降に後揺れの振幅(図中の青い点線枠)が認められ, 解析では十分に表現できていないことがわかる。図-6の擬似速度応答スペクトルでは, この後揺れの差が明確に現れていないため, 図-7にエネルギースペクトル V_e

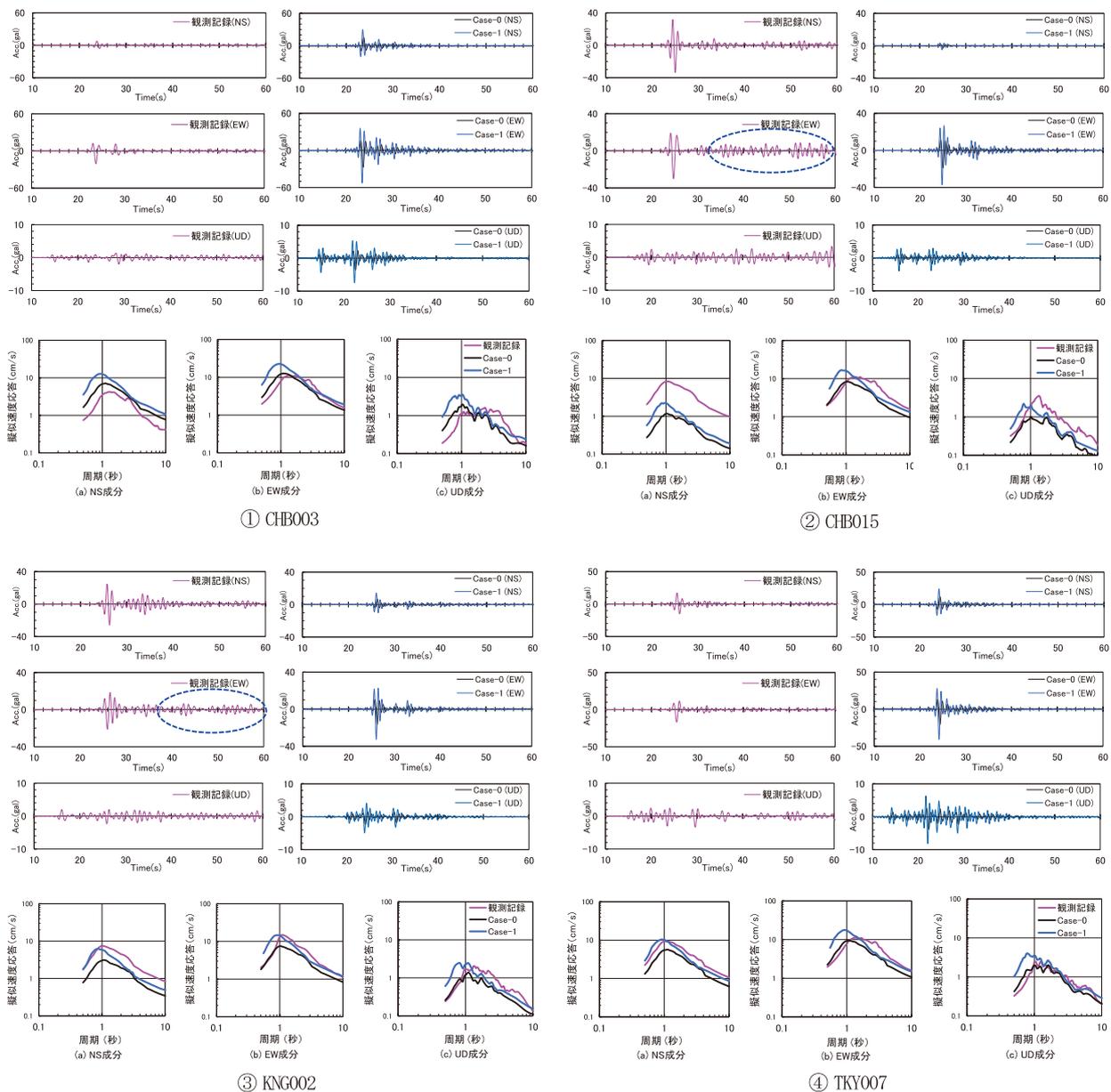


図-6 観測記録と解析結果の比較(上3段:加速度波形, 下段:擬似速度応答スペクトル(減衰5%))

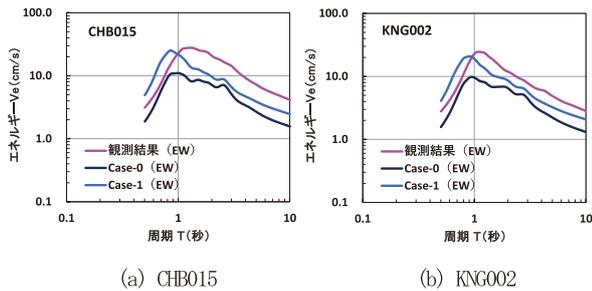


図-7 エネルギースペクトル V_e (減衰 10%) の比較

を示した。その結果、エネルギースペクトルは周期 1 秒以上の長周期域で、観測記録が解析結果に比べてより大きいことが分かった。この差は、解析手法に用いた波数積分法が平行成層地盤を仮定しているため、東京湾周辺の深い地盤構造¹⁹⁾による地震動の 3 次元の複雑な波動伝播現象を十分に評価できていないことが原因と考えられる。

4. まとめ

久田他のベンチマークストを参考に、波数積分法を用いた強震動評価を行い、震源のすべり速度関数の違いが地震動特性に与える影響を分析し、2005 年千葉県北西部地震の観測記録と比較して検討した。すべり速度関数を三角形関数で与え、その継続時間 t を 0.6 秒～2.0 秒まで変化させてパラメトリック・スタディを行った。その結果を以下に示す。

- ・フーリエ振幅スペクトル (振動数 0.5Hz 以上) と加速度波形の振幅はすべり速度関数の継続時間 t が短いほど大きくなった。
- ・擬似速度応答スペクトルは、すべり速度関数の継続時間 t が大きくなるほど応答スペクトルの卓越周期は長く、スペクトルの振幅は小さくなる傾向を示した。継続時間 1 秒を基準にすると、 $t=0.6$ 秒ではスペクトルの振幅が 2 倍に、 $t=1.4$ 秒や 2 秒では $1/5 \sim 1/3$ となった。
- ・観測記録と解析結果を比較すると、すべり速度関数の継続時間 t が 0.6 秒、1.0 秒のケースの解析結果が観測記録と整合するが、CHB009 (千葉) や CHB015 (木更津) の観測点では NS 成分が過小評価となった。
- ・また、CHB015 (木更津)、KNG002 (横浜) の観測点では、観測記録の加速度波形 (主に EW 成分) に後続波形が認められ、エネルギースペクトルも大きくなり、波数積分法による解析では後続波形が十分に

表現できないことが分かった。

以上の結果から、関東平野などの堆積平野において想定地震の強震動評価を行う際に、震源パラメータとなるすべり速度関数の設定は、加速度波形や応答スペクトルの振幅や卓越周期に影響する重要なパラメータであることをあらためて確認した。したがって、今後想定地震に対する強震動を計算する際には、震源のすべり速度関数の設定法について十分な知見が必要である。また、波数積分法による強震動評価では、堆積平野の 3 次元地盤構造によって生じる波動伝播の影響を受けやすい場所については、後続波形を適切に評価することが課題であり、波数積分法を適用する際に注意が必要である。

参考文献

- 1) Y. Hisada: An Efficient Method for Computing Green's Functions for a Layered Half-Space with Sources and Receivers at Close Depths (Part 2), Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 85, No. 4, pp. 1080-1093, 1995.
- 2) 久田嘉章: 成層地盤における正規モード解及びグリーン関数の効率的な計算法, 日本建築学会構造系論文集 第 501 号, pp. 49-56, 1997.
- 3) 久田嘉章, 永野正行, 野津厚, 宮腰研: 強震動予測に関するベンチマークテスト-理論的手法の場合 (その 1), 日本建築学会技術報告集, 第 35 号, pp. 43-48, 2011
- 4) 久田嘉章, 永野正行, 野津厚, 宮腰研, 中川太郎, 浅野公之, 松本俊明: 強震動予測に関するベンチマークテスト-理論的手法の場合 (その 2), 日本建築学会技術報告集, 第 38 号, pp. 101-106, 2012
- 5) 松本敏明, 久田嘉章, 永野正行, 野津厚, 浅野公之, 宮腰研, 田辺朗仁: 強震動予測に関するベンチマークテスト-理論的手法の場合 (その 3), 日本建築学会技術報告集, 第 41 号, pp. 71-76, 2013
- 6) 加藤研一, 久田嘉章, 川辺秀憲, 大野晋, 野津厚, 野畑有秀, 森川淳, 山本優: 強震動予測手法に関するベンチマークテスト 統計的グリーン関数法の場合 (その 1), 日本建築学会技術報告集, 第 17 巻, 第 35 号, pp. 49-54, 2011
- 7) 加藤研一, 久田嘉章, 大野晋, 野畑有秀, 森川淳, 山本優: 強震動予測手法に関するベンチマークテスト 統計的グリーン関数法の場合 (その 2), 日本建築学会技術報告集, 第 18 巻, 第 38 号, 67-72, 2012
- 8) 加藤研一, 久田嘉章, 大野晋, 野畑有秀, 森川淳, 山本優: 強震動予測手法に関するベンチマークテスト 統計的グリーン関数法の場合 (その 3), 日本建築学会技術報告集, 第 19 巻, 第 41 号, 37-42, 2013
- 9) 田邊朗仁, 久田嘉章, 野畑有秀, 山本優, 眞鍋俊平, 長坂

- 陽介：首都直下地震を対象とした強震動予測手法に関するベンチマークテスト-その1：2005年千葉県北西部地震を対象とした統計的手法と観測記録との比較-, pp.307-308, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2014.
- 10) 石川理人, 久田嘉章, 永野正行, 中川博人, 早川崇：首都直下地震を対象とした強震動予測手法に関するベンチマークテスト-その2：千葉県北西部地震を対象とした理論・数値解析手法と観測記録との比較-, pp.309-310, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2014.
- 11) 仲野健一, 石川理人, 久保智弘, 境茂樹, 田辺朗仁, 久田嘉章：首都直下地震を対象とした強震動予測手法に関するベンチマークテスト-その3：2005年千葉県北西部地震における変位オービットによる比較-, pp.309-310, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2014.
- 12) 久田嘉章, 石川理人, 野畑有秀, 山本優, 眞鍋俊平：首都直下地震を対象にした強震動予測手法に関するベンチマークテスト-その1：都心南部地震を対象とした統計的手法を用いた強震動予測, pp.131-132, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2015
- 13) 久田嘉章：強震動予測のベンチマークテストなどの公開
<http://kouzou.cc.kogakuin.ac.jp/Open/StrongMotionSimulation>
- 14) 額田一, 三宅弘恵：2005年千葉県北西部の地震-震源メカニズム・強震動-, 2005.8.6
<http://taro.eri.u-tokyo.ac.jp/saigai/chiba/>
- 15) 地震調査研究推進本部：震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」）, 2020.
https://www.jishin.go.jp/main/chousa/20_yosokuchizu/recipe.pdf
- 16) 中村洋光, 宮武隆：断層近傍強震動のシミュレーションのためのすべり速度関数の近似式, pp.1-9, 地震2, 53巻, 2000.
- 17) 地震調査研究推進本部：「長周期地震動予測地図」2012年試作版, https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/lpshm/12_choshuki/
- 18) Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (国立研究開発法人防災科学技術研究所), NIED K-NET, KiK-net, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2019, doi:10.17598/NIED.0004
- 19) 国立研究開発法人産業総合技術研究所:産総研 TODAY, トピックス, 7月号, 2005.

Study on seismic motion evaluation by wavenumber integration method
 - Effect of slip velocity function on seismic motion characteristics -

Shigeki SAKAI, Kenichi NAKANO

The wavenumber integration method is sometimes used to predict a strong ground motion for an assumed earthquake. The wavenumber integration method is used to evaluate long-period ground motions with a period of 1 second or longer assuming multi-layered half-space ground, and it is possible to evaluate ground motions that reflect the rupture effect of the earthquake source fault, and the calculation time is short. In this study, referring to the benchmark test by Hisada et al., we conducted a parametric study using the wavenumber integration method, and investigated the effects of the setting of the hypocenter slip velocity function on seismic ground motion characteristics, comparing them with the observation records. Then, we analyzed the influence of the slip velocity function on the amplitude and period characteristics of the acceleration waveform and the response spectrum, and considered the problems in applying the wavenumber integration method.