

5. まとめと今後の課題

本報告では、設計実務に活用しやすい想定地震の震源モデルの設定手法及び地震動の推定手法を提案するとともに、提案手法に基づくレベル2地震動の試算を行った結果を示した。

まず、震源パラメータ間の関係式やアスペリティに関する最新の知見をもとに、内陸地震と海溝型地震のそれぞれについて震源モデルの設定手法を示した。研究事例が少ないアスペリティの大きさや応力降下量の設定についても、適宜判断を行った上で設定手法に取り入れることにより、最新の知見に基づく実用的な手法を提案した。

次に、設定した震源モデルを用いて統計的グリーン関数法により地震動を推定する手法を示した。ここでは統計的グリーン関数を作成するために、K-NET観測点のうちI種地盤で得られた強震記録（水平2成分、S波初動部とそれ以降）を用いて加速度応答スペクトルと振幅包絡線の推定式を作成した。地震のタイプ別の特性を反映するために、内陸地震と海溝型地震それぞれについての推定式を作成した。また、地点補正係数の平均値をこれらの推定式に乗じることにより、S波速度700[m/s]層における加速度応答スペクトルと振幅包絡線の推定式を作成した。この推定式から算出した加速度応答スペクトルと振幅包絡線にフィッティングさせることで統計的グリーン関数を作成し、震源モデルに従って重ね合わせることで対象地震の地震動を推定することができる。ここで提案した地震動の推定手法は、対象地震の震源破壊過程に加え、地震基盤で浅地の地盤構造や表面波の影響も取り入れ、工学的基盤における地震動を推定するための実務的な手法と考えられる。

最後に、提案した震源モデルの設定手法、地震動の推定手法を用いて、想定したレベル2対象地震に対するレベル2地震動の試算を行った。内陸地震への適用例として、2000年鳥取県西部地震の震源モデルを用いた地震動の推定を行い、再現できなかった観測点はあるものの、強震記録の加速度応答スペクトルと全般的によく一致する結果を得るとともに、表層地盤の影響がない周期帯域では、強震記録の加速度応答スペクトルが、81ケースの震源モデルを用いた推定地震動の変動幅に含まれることを確認した。

海溝型地震への適用例として、1923年関東地震の震源モデルを用いた地震動の推定を行い、時刻歴波形など再現できなかった部分はあるものの、最大速度の距離減衰式及び既往の研究による推定地震動の加速度応答スペクトルとよく一致する結果を得た。1923年関東地震の推定

地震動の加速度・速度応答スペクトルおよび地震危険度解析により得られた100年超過確率2, 5, 10%に対応する加速度応答スペクトルは、135ケースの震源モデルを用いた想定関東地震の推定地震動の変動幅に含まれることを確認した。

これらのことから、本報告の手法を用いて将来発生が予想される内陸地震、海溝型地震の地震動を推定することにより、過去の強震記録や既往の研究結果とも整合のとれたレベル2地震動を設定することができると考えられる。

また、これらの検討を行う過程で明らかとなった今後の課題としては、以下のような事項が挙げられる。

①震源パラメータ評価

将来発生する地震を対象とした震源パラメータの設定手法については、最近になって研究が始められたばかりである。特に、アスペリティの位置、大きさ、応力降下量などは推定地震動に大きな影響を及ぼすパラメータであるため、地震調査研究推進本部等における最新の調査研究を十分にとり入れる必要がある。

②位相特性の評価

本報告では、加速度波形の振幅包絡線をモデル化することにより小地震の位相を設定したが、特に断層のごく近傍においてはフィッティングが困難であり、また振幅包絡線の推定式のばらつきも大きい。今後は、群遅延時間によるモデル化等による位相特性の評価法についても検討する必要がある。

③放射特性の評価

将来発生する地震については、断層面上でのすべり方向を予測することは一般に困難であるため、本報告では放射特性を評価することなく地震動の推定を行った。しかし、最近になって、GPSによる観測データに基づき、南海地震や南海地震についてはすべり方向が 6° の幅で推定される（地震調査研究推進本部、2001）ような例もある。したがって、放射特性を考慮することにより、将来発生する地震による地震動をより精度良く推定することができる可能性があるため、今後、本報告に示した地震動推定手法にも取り入れていく必要がある。

④深部地盤構造の影響評価

本報告した地震動推定手法においては、震源域から対象とする工学的基盤面までの地盤構造の影響は、加速度応答スペクトルの推定式によって考慮されているため、平均化されたものとなっている。しかし、1995年兵庫県南部地震のいわゆる震災の帯については、深部地盤構造が大きく影響していることが指摘されて

おり、地盤構造が複雑な地点における地震動を推定するためには、補正係数や理論的手法の適用等について、今後検討していく必要がある。

⑤レベル2地震動の設定

2. でも述べたように、将来発生する地震については、震源断層の破壊過程を一意的に決定できないため、本報告でも震源モデルを様々に変化させてレベル2地震動の試算を行った。また、地震危険度解析結果との比較も行っているが、試算した地震動に幅があるなかで、レベル2地震動を設定する際の基準は現時点では明確ではない。これらの点については、今後も継続して総合的な検討を行っていく必要がある。

謝辞

本研究の実施に当たっては、国土交通省国土技術政策総合研究所に設置された「レベル2地震動の設定手法に関する技術検討会（座長：大町達夫東京工業大学教授）」において、ご指導、ご助言を賜った。また、本研究では防災科学技術研究所によるK-NET、KiK-net強震記録を使用した。ここに記して、深甚なる謝意を表する。

参考文献

Boatwright, J. (1988): The seismic radiation from composite models of faulting, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 78, 489-508.

Boore, D. M. (1983): Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 73, 1865-1894.

Brune, J. N. (1970): Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 75, 4997-5009.

Brune, J. N. (1971): Correction, *J. Geophys. Res.*, 76, 5002.

壇一男・佐藤俊明 (1998): 断層の非一様すべり破壊を考慮した半経験的波形合成法による強震動予測, 日本建築学会構造系論文集, 509, 49-60.

壇一男・渡辺基史・佐藤俊明・宮腰淳一・佐藤智美 (2000): 統計的グリーン関数法による1923年関東地震 ($M_{JMA}7.9$) の広域強震動評価, 日本建築学会構造系論文集, 530, 53-62.

壇一男・渡辺基史・佐藤俊明・石井透 (2001): 断層の非一様すべり破壊モデルから算定される短周期レベルと半経験的波形合成法による強震動予測のための震源断層のモデル化, 日本建築学会構造系論文集, 545, 51-62.

Day, S. M. (1982): Three-dimensional finite difference simulation of fault dynamics: rectangular faults with fixed rupture velocity, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 72, 705-727.

土木学会レベル2地震動研究小委員会 (2001): レベル2地震動の明確化に向けて, 土木学会論文集, 675/I-55, 15-25.

Eshelby, J. D. (1957): The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems, *Proc. Royal Soc. of London, Series A*, 241, 376-396.

池田隆明・三輪滋・釜江克宏・入倉孝次郎 (2000): 1923年関東地震を想定した東京での地震動評価, 土木学会第55回年次学術講演会講演概要集, I-B, 606-607.

池田隆明・釜江克宏・三輪滋・入倉孝次郎 (2002): 経験的グリーン関数法を用いた2000年鳥取県西部地震の震源のモデル化と強震動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, 561, 37-44.

Irikura, K. (1986): Prediction of strong acceleration motions using empirical Green's function, *Proc. 7th Japan Earthq. Eng. Symp.*, 151-156.

入倉孝次郎・香川敬生・関口春子 (1997): 経験的グリーン関数を用いた強震動予測方法の改良, 日本地震学会講演予稿集, No. 2, B25.

入倉孝次郎・三宅弘恵・岩田知孝・釜江克宏・宮腰研・香川敬生 (2001): 周期帯域に応じた強震動評価法の高精度化, 地震災害軽減のための強震動予測マスターモデルに関する研究, 平成12年度科学技術振興調整費研究成果報告書, 209-233.

地震調査研究推進本部 (2001): 南海トラフの地震の長期評価について, *SEISMO*, Vol. 5, No. 11, pp. 7-12.

片岡正次郎・田村敬一 (2000): 断層モデルを用いた震源近傍における地震動の推定, 土木技術資料, Vol. 42, No. 8, pp. 44-49.

加藤研一・武村雅之・八代和彦 (1998): 強震記録から評価した短周期震源スペクトルの地域性, *地震* 2, 51, 123-138.

釜江克宏 (1996): 1946年南海地震のシミュレーション, 第24回地盤震動シンポジウム, 81-90.

釜江克宏・入倉孝次郎・福知保長 (1991): 地震のスケールリング則に基づいた大地震時の強震動予測, 日本建築学会構造系論文報告集, 430, 1-9.

釜江克宏・入倉孝次郎 (1997): 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, 500, 29-36.

Kamae, K., Irikura, K. and Pitarka, A. (1998): A technique for simulating strong ground motion using hybrid Green's

- function, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 88, 357-367.
- 金森博雄 (1991): 地震の物理, 279p., 岩波書店.
- 菊地正幸・山中佳子 (2001): 既往大地震の震源過程=アスペリティの同定, *サイスモ*, 5, 6-7.
- 建設省土木研究所 (2000): 広帯域におけるレベル2地震動の試算, 第4回レベル2地震動の設定手法に関する技術検討会資料.
- 松田時彦・塚崎朋美・萩谷まり (2000): 日本陸域の主な起震断層と地震の表-断層と地震の地方別分布関係-1, *活断層研究*, 19, 33-54.
- 三宅弘恵・岩田知孝・入倉孝次郎 (1999): 経験的グリーン関数法を用いた1997年3月26日 (M_{JM} 6.5) 及び5月13日 (M_{JM} 6.3) 鹿児島県北西部地震の強震動シミュレーションと震源モデル, *地震* 2, 51, 431-442.
- Miyakoshi, K., Kagawa, T., Sekiguchi, H., Iwata, T. and Irikura, K. (2000): Source characterization of inland earthquakes in Japan using source inversion results, *Proc. 12th World Conf. Earthq. Eng.*, 1850, 8p. (CD-ROM)
- 永野正行・加藤研一・武村雅之 (2001): 2000年鳥取県西部地震時の震源断層近傍における基盤地震動の推定-1995年兵庫県南部地震との比較-, *日本建築学会構造系論文集*, 550, 39-46.
- 中村洋光・宮武隆 (2000): 断層近傍強震動シミュレーションのためのすべり速度時間関数の近似式, *地震* 2, 53, 1-9.
- 中尾吉宏・日下部毅明・村越潤・田村敬一 (2003): 確率論的な地震ハザードマップの作成手法, *国土技術政策総合研究所研究報告*, 16, 37p.
- 佐藤智美・川瀬博・佐藤俊明 (1994): ボアホール観測記録を用いた表層地盤同定手法による工学的基盤波の推定及びその統計的経時特性, *日本建築学会構造系論文集*, 461, 19-28.
- 佐藤智美・川瀬博・松島信一 (1998): 1996年8月秋田・宮城県境付近の地震群の K-NET 強震記録から推定した震源・伝播・サイト特性, *地震* 2, 50, 415-419.
- 佐藤智美・片岡正次郎・奥村俊彦 (2002): K-Net 強震記録に基づく工学的基盤における加速度応答スペクトルと経時特性の推定式の検討, 第11回日本地震工学シンポジウム, pp.615-620.
- Shimazaki, K. (1986): Small and large earthquakes: The effect of the thickness of seismogenic layer and the free surface, *Earthquake Source Mechanics, Am. Geophys. Union, Geophys. Monogr.*, 37, 209-216.
- 司宏俊・翠川三郎 (1999): 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, *日本建築学会構造系論文集*, 523, 63-70.
- Somerville, P. G., Sato, T. and Ishii, T. (1998): Characterizing subduction earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, *American Geophysical Union 1998 Fall Meeting*, F658.
- Somerville, P. G., Irikura, K., Graves, R., Sawada, S., Wald, D., Abrahamson, N., Iwasaki, Y., Kagawa, T., Smith, N. and Kowada, A. (1999): Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, *Seism. Res. Letters*, 70, 59-80.
- Takahashi, T., Kobayashi, S., Fukushima, Y., Zhao, J. X., Nakamura, H. and Somerville, P. G. (2000): A spectral attenuation model for Japan using strong motion data base, *Proc. 6th Int. Conf. on Seismic Zonation*, 6p. (CD-ROM)
- 武村雅之 (1990): 日本列島およびその周辺地域に起こる浅発地震のマグニチュードと地震モーメントの関係, *地震* 2, 43, 257-265.
- 武村雅之 (1998): 日本列島における地殻内地震のスケールリング則-地震断層の影響および地震被害との関係-, *地震* 2, 51, 211-228.
- 山田雅行・平井俊之・岩下友也・釜江克宏・入倉孝次郎 (1999): 兵庫県南部地震の震源モデルの再検討, *日本地震学会講演予稿集*, 秋季大会, A14.
- Wald, D. J. and Somerville, P. G. (1995): Variable-slip rupture model of the great 1923 Kanto, Japan, earthquake: Geodetic and body-waveform analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 85, 159-177.
- Wells, D. L. and Coppersmith, K. J. (1994): New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84, 974-1002.