1923年関東地震による首都圏 での広域広帯域強震動予測

BROADBAND STRONG MOTION SIMULATION OF THE GREAT 1923 KANTO EARTHQUAKE IN THE TOKYO METROPOLITAN AREA

松島信一 — * 1 渡辺基史 — * 1
壇 一男 — * 1 佐藤俊明 — * 1
宮腰淳一 — * 1

Shinichi MATSUSHIMA — * 1 Motofumi WATANABE — * 1
Kazuo DAN — * 1 Toshiaki SATO — * 1
Jun'ichi MIYAKOSHI — * 1

キーワード：
1923年関東地震, 首都圏, 広帯域強震動予測, ハイブリッド合成法

Keywords :
The great 1923 Kanto earthquake, Tokyo metropolitan area, Broadband
strong motion simulation, Hybrid method

The broadband strong motions by large magnitude subducting earthquakes need to be estimated accurately to promote rational and effective earthquake resistant design of large structures or plans for counter measures of seismic disaster in urban area. We simulated the broadband strong motions in the Tokyo metropolitan area during the great 1923 Kanto earthquake by hybrid method. The distribution of seismic intensity calculated from the simulated strong motions fits the distribution of ratio of collapsed houses during the Kanto earthquake. From this result, the simulated broadband strong motion time histories can be applied to the earthquake resistant design of structures and the plans for counter measures of seismic disaster.

1. はじめに

大型構造物の耐震設計や都市の地震防災策づくりを合理的かつ効果的に推進するには、大規模地震が発生した際の揺れ（強震動）をできるだけ正確に予測することが必要である。この観点から、首都圏において、過去に大きな被害を与えた1923年の関東地震に代表される、フィリピン海プレートとユーラシアプレートとの境界で繰り返し発生するマグニチュード8クラスの巨大地震による強震動を広域に精度よく予測することが重要となる。また、首都圏では固有周期が1秒以下の一般的な中低層構造物のみならず、超高層ビルや免震構造物などの固有周期の長い構造物も多数建設されているため、広い周期帯域を含む精度のよい強震動の予測が必要となる。そこで、著者らは1923年関東地震（ M_{JMA} 7.9）について、首都圏全域における広帯域強震動の予測を試みた。

2. 広帯域強震動の予測手法

広帯域強震動の予測手法としてはハイブリッド合成法¹⁾を用い、関東平野を0.4kmメッシュに分割した合計23万メッシュを対象として、工学的基盤において、周期数秒以上の長周期成分の波形と周期数秒以下の短周期成分の波形に周期4秒のマッチングフィルタを施した上で時刻暦において足し合わせた。長周期成分は、Sato *et al.* (1998b)²⁾に倣い計算を行った。Sato *et al.* (1998b)²⁾では、Sato *et al.* (1998a)³⁾が1990年の神奈川県西部の地震（ M_{JMA} 5.1）の観測波形を再現することによりチューニングを行った三次元地盤構造とWald and Somerville (1995)⁴⁾が波形インバージョンにより同定した1923年関東地震の断層での非一様すべり破壊モデルを用いて、東京大学

地震学教室（本郷）における観測波形の長周期成分を再現できることを示している。一方、短周期成分については、壇・他(2000)⁵⁾に倣い計算を行った。壇・他(2000)⁵⁾で推定した、1990年の神奈川県西部の地震の断層パラメータ、 Q 値および放射特性 F を用いて0.4kmメッシュ全点において統計的グリーン関数を作成し、それらを用いた波形合成により1923年関東地震の地震波形を合成した。壇・佐藤(1998)⁶⁾では、1990年の神奈川県西部の地震の東京大学地震研究所（弥生）での観測波形を経験的グリーン関数として用いて1923年関東地震時の波形を合成し、本郷での観測波形と震度の再現ができることを示している。壇・他(2000)⁵⁾では、統計的グリーン関数法による推定波形が壇・佐藤(1998)⁶⁾による経験的グリーン関数法による合成波形とよく対応すること、東京、横浜の気象台での震度とよく対応することを示している。統計的グリーン関数は、まず地震基盤上面で合成波形を計算した。次に、0.4kmメッシュごとにSato *et al.* (1998a)³⁾の三次元地盤構造から地震基盤から工学的基盤までの一次元地盤構造を作成した。この一次元地盤モデルを用いて、 S 波の一次元重複反射理論により工学的基盤の合成波形を計算した。

ハイブリッド合成法により、上述した2つの異なる手法により予測された地震動を合成し、工学的基盤において周期0.1秒弱から20秒まで含む広帯域地震動を予測した。

計算に用いた断層モデルを、図1に示す、Wald and Somerville (1995)⁴⁾が波形インバージョンにより同定した最終すべり量分布に基づき作成した。断層長さは100km、断層幅は70kmで、要素断層は10km四方である。最大最終すべり量は、約8mである。小田原付近の☆印が破壊開始点を示す。

*1 清水建設㈱技術研究所
(〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17)

*1 Institute of Technology, Shimizu Corporation

図1 Wald and Somerville (1995)⁴⁾ が波形インバージョンにより同定した 1923 年関東地震の最終すべり量分布(☆印は破壊開始点位置)

3. 予測された広帯域強震動

2. で示したハイブリッド合成法により予測された工学的基盤における 1923 年関東地震の時の最大速度分布を図 2 と図 3 に示す。図 2 が南北(NS)成分、図 3 が東西(EW)成分で震動の方向により最大速度の分布が異なることがわかる。図中に示す矩形と☆印は、図 1 の断層面と破壊開始点を示す(図 2 以降も同様)。図 4 には、地震基盤から工学的基盤までの三次元地盤構造から求めた 0.4km メッシュごとの地盤の一次卓越周期を示す。

地表における震度分布を計算するために、次の要領で工学的基盤から地表までの震度増分を求めた。まず、ハイブリッド合成法により求めた工学的基盤における波形の NS 成分と EW 成分の水平 2 成分を用い、上下動成分は 0 として、計測震度⁷⁾を求めた。これを便宜的に工学的基盤上の計測震度とし、最大速度と計測震度の経験的関係式⁸⁾と表層 30 m の平均 S 波速度(AVS30)⁹⁾から推定される最大速度増幅率¹⁰⁾から工学的基盤から地表までの震度の増分を次式により求めて加えることにより、地表における計測震度を求めた。

$$\begin{aligned}
 I_i &= 1.72 (\log PGVs - \log PGVe) \\
 &= 1.72 \log(PGVs/PGVe) = 1.72 \log R \quad (1)
 \end{aligned}$$

ここに、 I_i は計測震度の表層増分、 $PGVs$ は地表における最大速度(cm/s)、 $PGVe$ は工学的基盤における最大速度(cm/s)、 R は最大速度の増幅率を示す。

図 5 には、工学的基盤から地表までの震度増分の算定に用いた最大速度増幅率の分布を示す。これは、まず 0.4km メッシュごとの表層の微地形区分から AVS30 を求め、次に AVS30 と最大速度増幅率の経験的関係¹⁰⁾から求めている。図 6 に、図 5 の最大速度増幅率を用いて式(1)により求められた工学的基盤から地表までの震度増分の分布を示す。図 7 に、推定された地表での震度分布を示す。

図2 工学的基盤における最大速度分布 (NS 成分)

図3 工学的基盤における最大速度分布 (EW 成分)

図中の波形は、本郷 (HNG)、川崎 (KWS)、横浜気象台 (JYK)、千葉 (CHB) での工学的基盤における EW 成分の速度波形を示す。図 8 は、諸井・武村(2002)¹¹⁾による 1923 年関東地震の際の木造住宅全潰率を示す。図 7 と図 8 を比較から、予測された計測震度は木造住宅全潰率とよく対応することがわかる。特に、震度 7 の領域は木造住宅全潰率 30%以上の領域よく対応する。また、工学的基盤における速度波形は、東京湾沿岸の 4 地点でも震源との位置関係や地震基盤から工学的基盤までの地下構造の違いにより、震動性状が異なることがわかる。

図4 地震基盤から工学的基盤までの一次卓越周期

図6 工学的基盤から地表までの震度増分

図5 工学的基盤から地表までの最大速度増幅率

図7 推定された地表での震度分布（波形は、HNG、CHB、KWS、JYKの工学的基盤におけるEW成分の速度波形）

以上から、ハイブリッド合成法により予測した1923年関東地震の強震動波形と工学的基盤から地表までの震度増分による地表での震度分布は、1923年関東地震時のものを再現していると推測される。

図9には、JYKとCHBの工学的基盤におけるNSとEW成分の速度および加速度波形を示す。JYKでは震源からの距離が近いために主要動の振幅が大きくなる。一方、CHBでは震源からの距離と地下構造の影響により主要動と同程度の振幅の後続動がみられる。

図10には、JYKとCHBの工学的基盤におけるNSとEW成分の

減衰5%擬似速度応答スペクトルを告示スペクトルと比較して示す。JYKでは、全周期帯域において極めて稀に起こる地震の告示スペクトルと同等の応答スペクトルとなっている。一方、CHBでは周期5秒よりも短周期域では極めて稀に起こる地震と稀に起こる地震の告示スペクトルの間にあるが、周期5秒以上では極めて稀に発生する地震による告示スペクトルを上回ることがわかる。また、JYKとCHBの震度を比較すると、短周期成分の大きいJYKの方が震度6強で震度6弱のCHBより大きい、応答スペクトルを比較すると

図8 1923年関東地震の際の木造住宅全潰率(諸井・武村, 2002)¹¹⁾

図9 JYKとCHBの工学的基盤におけるEWとNS成分の速度波形および加速度波形

図10 JYKとCHBの工学的基盤におけるNSとEW成分の減衰5% 擬似速度応答スペクトルと告示スペクトルとの比較

周期10秒前後で両者は同程度である。したがって、長周期成分については震度からだけでは推測できないので注意が必要であることが示唆される。

4. おわりに

首都圏におけるマグニチュード8クラスの地震による広帯域強震動の予測事例として、1923年関東地震を対象にハイブリッド合成法により首都圏全域の予測を行った。予測された震度分布は、観測震度分布とよく対応し、この手法が広帯域強震動を予測するのに効果的であることを示した。また、首都圏においては、地震基盤から工学的基盤までの地盤構造により地盤増幅が場所により大きく異なり、広帯域強震動を予測する際には、深い地盤構造を考慮することが不可欠であることがわかった。

謝辞

2名の査読者のご意見は、本検討の結果をよりわかりやすくするのに役立った。図8は鹿島小堀研究室武村雅之氏にご提供いただいた。図の作成にはGMT¹²⁾を用いた。記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 佐藤俊明, 堀一男, R. W. Graves, and P. G. Somerville: 1923年関東大地震 ($M_s 8.2$)の断層の非一様すべり破壊を考慮した3次元有限差分法と半経験的手法のハイブリッドによる東京の広帯域強震動シミュレーション, 第10回日本地震工学シンポジウム, Vol. 1, 679-684, 1998.
- 2) T. Sato, R. W. Graves, P. G. Somerville, and S. Kataoka: Estimates of regional and local strong motions during the great 1923 Kanto, Japan, earthquake ($M_s 8.2$). Part 2: Forward simulation of seismograms using variable-slip rupture models and estimation of near-fault long-period ground motions, BSSA, 88(1), 206-227, 1998b.
- 3) T. Sato, D. V. Helmberger, P. G. Somerville, R. W. Graves, and C. K. Saikia: Estimates of regional and local strong motions during the great 1923 Kanto, Japan, earthquake ($M_s 8.2$). Part 1: Source estimation of a calibration event and modeling of wave propagation paths, BSSA, 88(1), 183-205, 1998a.
- 4) David J. Wald and Paul G. Somerville: Variable-slip rupture model of the great 1923 Kanto, Japan, earthquake: Geodetic and body-waveform analysis, BSSA, 85, 159-177, 1995.
- 5) 堀一男, 渡辺基史, 佐藤俊明, 宮腰淳一, 佐藤智美: 統計的グリーン関数法による1923年関東地震($M_{JMA} 7.9$)の広帯域強震動評価, 日本建築学会構造系論文集, 530, 53-62, 2000.
- 6) 堀一男, 佐藤俊明: 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, 1998.
- 7) 気象庁監修: 震度を知る, ぎょうせい, 1996.
- 8) 翠川三郎, 藤本一雄, 村松郁栄: 計測震度と旧気象庁震度および地震動強さの指標との関係, 地域安全学会論文集, Vol. 1, 51-56, 1999.
- 9) 松岡昌志, 翠川三郎: 国土数値情報とサイスミックマイクロゾーニング, 第22回地盤震動シンポジウム資料集, 23-34, 1994.
- 10) 藤本一雄, 翠川三郎: 日本全国を対象とした国土数値情報にも基づく地盤の平均S波速度分布の推定, 日本地震工学会論文集, 第3巻, 第3号, 13-27, 2003.
- 11) 諸井孝文, 武村雅之: 関東地震(1923年9月1日)による木造住宅被害データの整理と震度分布の推定, 日本地震工学会論文集, 第2巻, 第3号, 35-71, 2002.
- 12) Wessel, P. and W. H. F. Smith: New, improved version of Generic Mapping Tools released, EOS, AGU, 1998.

[2007年4月20日原稿受理 2007年7月26日採用決定]