強震観測記録に基づく相模トラフ沿いの地震の 長周期・長時間地震動の予測式

LONG-PERIOD AND LONG-DURATION GROUND MOTION PREDICTION EQUATIONS FOR EARTHQUAKES ALONG THE SAGAMI TROUGH BASED ON STRONG MOTION RECORDS

佐藤 智美^{*1}, 中川 博人^{*2}, 小山 信^{*3}, 佐藤 俊明^{*4}, 藤堂 正喜^{*5}

*Toshimi SATOH, Hiroto NAKAGAWA, Shin KOYAMA,
Toshiaki SATO and Masanobu TOHDO*

We develop long-period and long-duration ground motion prediction equations for earthquakes along the Sagami Trough based on strong motion records. The site factors are estimated at the engineering bedrock by using shallow structure models developed by NIED. The obtained amplification factors are smaller than those for earthquakes along the Nankai Trough. The developed equations are applied to the 1923 Taisho Kanto type earthquake and the hypothesized south Tokyo metropolitan earthquake. The ground motions predicted for the 1923 Taisho Kanto type earthquake are consistent to a record observed at Hongo and ones predicted by 3D-FDM by HERP.

Keywords: Sagami Trough, Long-period and long-duration ground motions,
Prediction equation, The 1923 Taisho Kanto earthquake, Tokyo metropolitan earthquake
相模トラフ, 長周期・長時間地震動, 予測式, 1923 年大正関東地震, 首都直下地震

1. はじめに

2003 年十勝沖地震(M_J8.0)や 2011 年東北地方太平洋沖地震(M_w9.0)では、堆積層の厚い平野部を中心に、広範囲で長周期・長時間地震動が観測された。2011 年東北地方太平洋沖地震では、関東地域の鉄筋コンクリート系の超高層建築物が、本震時の初期状態から 1 次固有振動数が 2~4 割低下し、記録終了まで初期状態に戻らずに低下したままとなっていることが報告されている¹⁾。このような背景を踏まえ、筆者らは、発生確率が高い²⁾南海トラフ沿いの地震の長周期・長時間地震動の予測式を作成し^{3),4)}、超高層建築物の設計用地震動策定に向けた検討⁵⁾を行った。これに基づき、国土交通省⁶⁾が、「超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策について」を公表し、2017 年 4 月以降に超高層建築物等を新築する際の大正認定の運用が強化されている。

しかし、この予測式は、相模トラフ沿いの地震は適用範囲外であり³⁾、他の研究でも同地震に適用できる長周期・長時間地震動の経験的予測式はない。M8 クラスの相模トラフ沿いの地震の 50 年以内の発生確率はほぼ 0~10%²⁾であるが、ひとたび発生すれば、超高層

建築物が多数立地している⁵⁾関東地方で大きな長周期・長時間地震動が生じることが懸念される。また、プレートの沈み込みに伴う M7 クラスの地震の 50 年以内の発生確率は 80%²⁾と高い。そこで、本研究では、M8 クラスの相模トラフ沿いの地震とプレートの沈み込みに伴う M7 クラスの首都直下地震に対する超高層建築物の設計用地震動策定を目指し、長周期・長時間地震動の予測式を作成した。そして、大正関東地震、内閣府⁷⁾が想定しているフィリピン海プレートのスラブ内地震である都心南部直下地震への適用を行ない、大正関東地震の復元波⁸⁾や、既往の計算波^{7),9)}との比較を行った。

作成した予測式は、南海トラフ沿いの地震の長周期・長時間地震動の予測式³⁾と同様に、強震記録に基づくものであるが、減衰定数 5%の加速度応答スペクトルの予測式に関しては、主に以下の点で異なっている。ひとつめは、南海トラフ沿いの地震の予測式では、M_J ≥ 6.5 の海溝型地震を用いていたが、相模トラフ沿いの地震の予測式では、それに加え、想定震源域では M_J ≥ 4.0 の地震も対象とした。これは、震源位置により長周期地震動の振幅や卓越周期が異なるという知見を踏まえ、伝播経路特性、地盤増幅特性に相模トラフ沿い

^{*1} (株)大崎総合研究所 リサーチフェロー・博士(工学)

^{*2} (国)建築研究所構造研究グループ 主任研究員・博士(工学)

^{*3} 国土交通省国土技術政策総合研究所
建築新技術統括研究官・博士(工学)

^{*4} (株)大崎総合研究所 所長・工博

^{*5} (株)大崎総合研究所 主席研究員・博士(工学)

Research Fellow, Ohsaki Research Institute, Dr.Eng.

Senior Research Engineer, Dept. of Structural Eng., Building Research Institute, Dr.Eng.
Research Managing Coordinator for Advanced Building Technology, National Institute
for Land and Infrastructure Management, Dr.Eng.

Director, Ohsaki Research Institute, Dr.Eng.

Principal Researcher, Ohsaki Research Institute, Dr.Eng.

の地震の地域性を反映させるためである。これに伴い、広い範囲のマグニチュードのスケールリングに対応するため、NGA-WEST2の地震動予測式で用いられているヒンジマグニチュード^{10),11)}も導入した二段階回帰とした。2 つめは、フィリピン海プレートの上端深さは神奈川県西部で 10km 以下⁷⁾と浅いため、震源近傍での地震動レベルの飽和の係数の推定に、地殻内地震の強震記録も加えた。3 つめは、プレート境界地震とスラブ内地震の違いを考慮し、それぞれに対して震源深さをパラメータとしたモデル化を行ったことである。これにより、地震タイプによる短周期レベルの違いや、深さによる表面波の励起特性の違いを反映できる。4 つめは、工学的基盤で浅の 1 次元的地盤増幅をはざとり、工学的基盤で評価したことである。長時間地震動を表現する群遅延時間の平均値・分散の予測式に関しても、ほぼ同じ条件のデータを用いて、プレート境界地震とスラブ内地震を区別し、工学的基盤で評価している。

2. データと手法

(1) 予測式作成用データ

予測式作成には、1987 年～2016 年 4 月の全国の $M_J \geq 6.5$ の海溝型地震と、相模トラフ沿いの地震の震源域の $M_J \geq 4.0$ の海溝型地震の強震記録を用いた。海溝型地震はプレート境界地震とスラブ内地震であり、スラブ内地震は想定する首都直下地震の深さに鑑み、震源深さ $H \leq 75\text{km}$ とした。震源に近い関東地方での予測を重要視し、断層最短距離 R_{rup} は 250km 以下とした。後述する二段階回帰分析の一段階目では、全国の $M_J \geq 6.0$ 、 $R_{\text{rup}} \leq 200\text{km}$ の地殻内地震と関東地方の $M_J \geq 4.0$ の地殻内地震の強震記録も用いた。強震観測記録は、K-NET、KiK-net(地表と地中)、気象庁 87 型、気象庁 95 型、工学院大学の記録の他、首都直下地震である 1987 年千葉県東方沖地震($M_J 6.7$)の記録¹²⁾である。また、福島・田中¹³⁾の距離減衰式で 3cm/s^2 以上となる距離以内の記録という条件も付与した。プレート境界地震は 55 個、スラブ内地震は 52 個、地殻内地震は 53 個選択されている。

Fig.1 には、震央位置(気象庁)・CMT 解(F-net, Global CMT)及び観測点位置を示す。Fig.2 には、 M_w と R_{rup} の関係を示す。 M_w は 3.7～8.2、 R_{rup} は 1.2～250km の範囲にある。佐藤・他¹⁴⁾、Sato et al.³⁾で、用いられている地震以外は 15)～21)の文献の断層モデルの M_w 、 R_{rup} を用いた。震源深さ H は、地震モーメントで重みづけし

た断層中心深さである。断層モデルがない地震の、震源位置は気象庁の一元化震源情報とし、 M_w は F-net、F-net がいない地震は Global CMT の値を用いた。解析では S 波部以降の波を対象としている。群遅延時間の平均値・分散の予測式作成では、S 波部以降の波の観測継続時間が 80 秒以下の記録と絶対時刻が不明の記録は除いた。そのため、データはやや減少している。減衰定数 5%の加速度応答スペクトルは、水平 2 成分の幾何平均、群遅延時間の平均値・分散は水平 2 成分の算術平均を用いた。超高層建築物の設計用入力地震動策定に用いることを目指しているため、主たる対象は周期 1～10 秒であるが、同じ考え方で周期 0.1～1 秒も検討している。

(2) 予測式作成手法

固有周期 T での減衰定数 5%の加速度応答スペクトル $S_A(T)$ を、(1)～(4)式でモデル化する。

$$\log_{10} S_A(T) = \text{Sou}(T) + b(T) R_{\text{rup}} - \log_{10} (R_{\text{rup}}^2 + (d(T) 10^{0.25 M_w})^2)^{0.5} + c_0(T) + c_j(T) \quad (1)$$

ここで、震源項 $\text{Sou}(T)$ は、

$$\text{Sou}(T) = a_1(T) M_w + a_4(T) P \log_{10} H + a_5(T) S \log_{10} H \quad M_w \leq M_h(T) \quad (2)$$

$$= a_1(T) M_w + a_2(T) (M_w - M_h(T)) + a_4(T) P \log_{10} H + a_5(T) S \log_{10} H \quad M_h(T) \leq M_w \leq M_{h2}(T) \quad (3)$$

$$= a_1(T) M_w + a_2(T) (M_w - M_h(T)) + a_3(T) (M_w - M_{h2}(T)) + a_4(T) P \log_{10} H + a_5(T) S \log_{10} H \quad M_w \geq M_{h2}(T) \quad (4)$$

ここで、 P 、 S は、ダミー変数(プレート境界地震で $P=1$ 、 $S=0$ 、スラブ内地震で $P=0$ 、 $S=1$)であり、震源深さ H 依存のモデル化とした。 M_h 、 M_{h2} はヒンジマグニチュード^{10),11)}である。その他の小文字の係数が回帰係数であり、 c_j は j 観測点でのサイト係数である。 c_0 は、TKYH13(椛原南)での地盤同定結果に基づく、地震基盤相当のサイト係数である。 10^j を地震基盤から地表までの地盤増幅率と呼ぶ。震源近傍での飽和に関する(1)式第 3 項は、Atkinson and Silva²²⁾や Yenier and Atkinson²³⁾に基づきモデル化した。相模トラフ沿いのプレート境界地震、スラブ内地震の Q 値がほぼ同じと推定されている²⁴⁾ため、プレート境界地震とスラブ内地震で b の区別はしない。

回帰係数は、二段階回帰分析とグリッドサーチにより求めた。一段階目では、(1)式を用いて、地殻内地震のデータも含め、地殻内地震と海溝型地震それぞれの b とその他の項を推定する。地殻内地震のデータに対しては、距離が $R_{\text{lim}}(T)$ より遠いところで、減衰が小さくなる特徴をモデル化するため、 $R_{\text{rup}} > R_{\text{lim}}(T)$ では、 R_{rup} の代わりに

Fig.1 Locations of strong motion stations (green), the epicenters (JMA) with CMT solutions (F-net or Global CMT) of interplate (red), intraplate (blue), and crustal (black) earthquakes

Fig.2 Relation between M_w and fault distance R_{rup}

$(R_{rup} \times R_{lim}(T))^{0.5}$ として²⁵⁾。既往の研究^{3),25)}に基づき、 d は 0~0.8 まで 0.05 刻み、 R_{lim} は 50~100km まで 10km 刻みのグリッドサーチにより求めた。観測の震源項 Sou に基づき、 M_h は 5.5~6.5、 M_{h2} は 6.5~7.5 の範囲を 0.1 刻みとしたグリッドサーチにより求めた。二段階目では、海溝型地震のデータのみを用い、一段階目で得られた観測の震源項 Sou を(2)~(4)式でモデル化し、(1)式に代入して回帰分析を行った。なお、1987 年千葉県東方沖地震の記録は、1 地点を除き、他の地震の記録が得られていないが、首都直下地震として重要であることから、(1)式のこの地震の観測の震源項 Sou を用いて c_j を求め直した。

群遅延時間の平均値・分散 $Z(T)$ は、Satoh et al.³⁾の式に A_2 を加えた、(5)式でモデル化し、非負条件付き最小二乗法²⁶⁾により回帰係数を推定した。

$$Z(T) = A_1(T)M_0^{1/3} - A_2(T) + B(T)X + C_j(T) \quad (5)$$

ここで、 M_0 は地震モーメント、 X は震源距離である。 A_1 、 A_2 、 B 、 C_j が回帰係数であり、 C_j は j サイトのサイト係数である。群遅延時間の標準偏差のサイト係数は $C_j^{0.5}$ である。 A_2 はスラブ内地震の係数であり、プレート境界地震では 0 である。佐藤²⁴⁾で、相模トラフ沿いの中規模地震記録の分析から、周期 1 秒以上ではスラブ内地震の方がプレート境界地震より後続波の励起が小さく、0.1~1 秒では同程度であることを指摘していることを踏まえて、 $-A_2$ としている。

3. 予測式の回帰係数

Fig.3 には、 S_A の回帰係数を標準偏差 e とともに示す。深さに関する回帰係数 a_4 、 a_5 は、長周期で負となっている。例えば、周期 1 秒では $a_4 = 0.13$ であり、これを(1)~(4)式に代入すると、 $H=20\text{km}$ での S_A は $H=50\text{km}$ の 0.89 倍となる。周期 10 秒での $a_4 = -0.23$ を用いると、 $H=20\text{km}$ での S_A は $H=50\text{km}$ の 1.23 倍となる。これは、

Fig.3 Regression coefficients of S_A

Fig.4 Attenuation of pSv at FKSH19 for a Mw8.0 interplate earthquake with $H=20\text{km}$ by Satoh et al.(2014) and this study

Fig.5 Source term of data for interplate earthquakes and the regression lines with depths of 20 and 50 km at 2 s

長周期で卓越する表面波が、浅いほど励起が大きいと考えられる。短周期で a_5 の方が a_4 より大きいのは、スラブ内地震の短周期レベルの深さ依存性²⁷⁾が反映されたものと考えられる。 M_h は、周期 1 秒以上で 5.7 から 6.3 まで遷移しており、 $Mw3.0 \sim 7.9$ の地殻内地震のデータを用いている Boore et al.²⁸⁾より遷移域が長周期である。これは、本研究の方が Mw の大きいデータが多いためと考えられる。飽和の係数 d は、周期 1 秒以上では周期が長いほど大きくなり、周期 4~10 秒でほぼ一定となる。すなわち、周期 4~10 秒では、周期 1~4 秒に比べて、震源から遠いところから飽和する。Fig.4 には、 $Mw8$ 、 $H=20\text{km}$ のフィリピン海プレートの地震に対する Satoh et al.³⁾と本研究の式の周期 2 秒と 5 秒での距離減衰の比較を示す。Satoh et al.³⁾の式の基準観測点である FKSH19(都路)での例である。本研究と Satoh et al.³⁾の式では予測式のモデル化が若干異なっているが、距離減衰の違いは小さい。

Fig.5 には、周期 2 秒でのプレート境界地震に対する観測とモデルの震源項 Sou を示す。 M_h 、 M_{h2} を導入したことにより、観測の震源項 Sou が広い Mw の範囲で良くモデル化されていることがわかる。 $H=20\text{km}$ と 50km の場合のモデルを示しているが、 a_4 が周期 2 秒でほぼ 0 である(Fig.3)ため重なっている。

Fig.6 には、群遅延時間の平均値・分散に対する回帰係数と回帰の標準偏差 E を示す。南海トラフ沿いの地震に対する Satoh et al.³⁾の式の回帰係数も Fig.6 に示した。本研究の群遅延時間の平均値の A_1 は周期 1 秒付近で極小値を持ち、Satoh et al.³⁾とやや異なるが、この違いの原因は不明である。この A_1 の周期 1 秒での違いについて、 $Mw7$ を例に考えると、(5)式の震源項 $A_1M_0^{1/3}$ の周期 1 秒と 10 秒での差が本研究では 7.5 秒であるのに対して Satoh et al.³⁾では 5.1 秒となり、本研究の方が震源項での周期による波群の伝播時間の違い

Fig.6 Regression coefficients of average and variance of group delay time obtained in this study (bold red lines) and Satoh et al.³⁾(dashed lines)

が大きく継続時間が伸びる方向に寄与する。しかし、関東平野内での群遅延時間の平均値のサイト係数 C_j は概ね 30 秒程度以上であるため、群遅延時間の平均値 $Z(T)$ に対する影響は小さい。群遅延時間の平均値の A_2 は長周期ほど大きく、これは、スラブ内地震の方がプレート境界地震より長周期成分の波群の重心が前にあることを意味している。群遅延時間の分散の A_2 も長周期ほど大きく、これは、スラブ内地震の方が長周期成分の波群の広がりが短いことを意味している。これらの特徴は、スラブ内地震の方がプレート境界地震より震源深さが深く、表面波の励起が小さいことを反映していると考えられる。

4. サイト特性

予測式作成に用いた関東地域の観測点間隔は、Fig.1(b)に示したように、東京都東部を除き 10km 前後である。そこで、SK-net²⁹⁾のデータを追加し、サイト係数 c_j 、 C_j の算出地点を密にした。予測式作成に用いたデータと同じ条件で選択した SK-net²⁹⁾のデータを用いて、3.で得られた予測式のサイト係数以外の回帰係数から得られる SK-net 観測点でのサイト係数 c_j 、 C_j を、各観測点で平均することにより算出している。S_A の予測式作成に用いた海溝型地震の地震観測点ペア数は約 13000、地殻内地震は約 11000 であるのに対して、SK-net の海溝型地震の地震観測点ペア数は約 12000 である。Fig.7 には、SK-net 観測点を加えた全観測点での、周期 2 秒での地震基盤から地表までの地盤増幅率を示す。Fig.1(b)と比べ、観測点が密になっていることがわかる。

次に、地表での観測波形から、防災科学技術研究所の 1 都 6 県での約 250m メッシュの浅部・深部統合地盤モデル^{30),31)}と、モデル作成に用いられている K-NET, KiK-net 直下での浅部地盤モデルを用いて、工学的基盤での波形を 1 次元波動理論に基づき算出した。そして、各観測点において、地表での応答スペクトルと工学的基盤での応答スペクトルの比の平均値で、地表での地盤増幅率を補正して、工学的基盤での地盤増幅率を算出した。本研究では、S 波速度 $V_s=400\text{m/s}$ 層を工学的基盤と定義している。Q 値は、 $V_s/10^{0.44}$ (周波数 $f>5\text{Hz}$ で一定)³¹⁾とした。なお、浅部・深部統合地盤モデルは、地震本部(HERP)³²⁾から公開されているモデルとは若干異なる。

Fig.8 には、浅部・深部統合地盤モデルの工学的基盤から地表までの各層の層厚と V_s から 1/4 波長則に基づき算出した、浅部地盤の略算の固有周期 T_s を示す。図中の観測点は、地盤増幅率の例を示す観測点である。固有周期が 1 秒以上の地域が広がっており、周期 1 秒以上の長周期でも浅部地盤の増幅特性の影響があることがわかる。Fig.9 には、周期 2 秒での工学的基盤での地盤増幅率を示す。 T_s が長い領域で、地表(Fig.7)に比べて工学的基盤の地盤増幅率が面的にやや平坦になっている。浅部地盤が寄与する表面波の影響は取り除けないが、S 波の一次元地盤増幅が取り除かれているためである。

Fig.10 には、TKY007(新宿)と KNG002(横浜)における地表と工学的基盤での応答スペクトルの地盤増幅率と、3 種類の一次元理論地盤増幅率を示す。TKY007 では、工学的基盤から地表までの理論地盤増幅率の最大ピーク周期が約 0.15 秒であるため、周期 1 秒以上では地表と工学的基盤での地盤増幅率はほぼ同じである。

Fig.7 Amplification factors at the surface at 2 s

Fig.8 Predominant periods from the engineering bedrock to the surface (T_s)

Fig.9 Amplification factors at the engineering bedrock at 2 s

Fig.10 Empirical and theoretical amplification factors

Fig.11 Amplification factors at the engineering bedrock in this study and by Satoh et al.³⁾

TKY007 での T_s は 0.47 秒であるが、一次元波動理論ではインピーダンスコントラストが大きい極浅部の地盤の増幅により最大ピークが生じている。KNG002 では、工学的基盤から地表までの理論地盤増幅率の 1 次卓越周期が約 1 秒であるため、工学的基盤での応答スペクトルの地盤増幅率は 1 秒を中心に地表より小さくなっている。

Fig.11 には、本研究と Satoh et al.³⁾の南海トラフ沿いの地震に対する予測式の、工学的基盤での地盤増幅率の比較を示す。Satoh et al.³⁾の関東平野での地盤増幅率は、フィリピン海プレート地震と太平洋プレート地震を区別しており、ここに示したのはフィリピン海プレート地震に対するものである。また、地殻内地震の地盤増幅率との地震数による重み付き平均である。本研究の地盤増幅率は、Satoh et al.³⁾に比べて小さく、周期依存性も小さい。このような特徴が、関東地域の他の観測点でもみられた。藤原・他³³⁾は、複数のシナリオの相模トラフ沿いの地震に対する三次元有限差分法による地盤増幅率や、相模トラフ沿いの中規模地震の観測記録に基づく地盤増幅率を求め、Satoh et al.³⁾の地盤増幅率より小さいことを示している。藤原・他³³⁾の地盤増幅率は本研究の地盤増幅率とほぼ同レベルであり、周期特性が小さい特徴も類似している。また、藤

原・他³³⁾は、大正関東地震の震源域より北側の中規模地震の記録を用いた分析ではあるものの、震源位置により長周期の増幅率が異なることも指摘している。したがって、本研究も藤原・他³³⁾の地盤増幅率も、種々の方向から伝播する地震に対する平均的なものであり、周期特性が平滑化されている可能性がある。また、本研究と Satoh et al.³⁾の違いも、震源位置の違いによる表面波の励起特性の違いを反映したものと考えられる。本研究の地震動予測式では、巨視的断層面を用いているため、平均的な地盤増幅率は有効であると考えられるが、ばらつきを如何に取り込むかについては課題である。

群遅延時間の平均値・標準偏差に対しても、同様にして工学的基盤でのサイト係数を算出したが、地表と工学的基盤でのサイト係数の違いはほとんどなかった。Fig.12 には、周期 5 秒における工学的基盤での地盤増幅率 C^E と群遅延時間の平均値・標準偏差のサイト係数 C_{gr}^E を示す。(a)の周期 5 秒の地盤増幅率は、Fig.9 の周期 2 秒の地盤増幅率と類似の分布をしており、振幅レベルの違いも小さい。(b)の群遅延時間の平均値のサイト係数は、Fig.8 の浅部地盤の固有周期 T_s が 1 秒以上の領域で大きい傾向がある。(c)の群遅延時間の標準偏差のサイト係数にも、顕著ではないが同様の傾向がみられる。

Fig.12 Site coefficients at the engineering bedrock at 5 s

Fig.13 T_z from the seismic bedrock to the engineering bedrock (Circles indicate Tokyo metropolitan government and Kanagawa prefectural government shown in Fig.18)

Fig.14 Model site coefficients at 5s

Fig.15 pSv predicted for T1-type earthquake (Mw7.9) at 2 s and 5 s (Bold lines denote fault model⁹⁾. Stars denote the epicenter⁹⁾. A triangle indicates Hongo. Circles indicate Tokyo metropolitan government and Kanagawa prefectural government.)

Fig.13 には、浅部・深部統合地盤モデルに基づく、 $V_s=3.2\text{km/s}$ の地震基盤から工学的基盤までの T_z を示す。図中には、後述の大正関東地震に対する計算地点も示している。佐藤・他¹⁴⁾は、 C_E 、 C_{tgr}^E を T_z でモデル化しているが、 C_{tgr}^E は T_z のみでのモデル化では十分でないと考えられる。

そこで、 C_{tgr}^E は T_z と T_s を用いて、(6)式でモデル化を行った。 $C_{\text{tgr}}^E(T)=r_0(T)+r_1(T)T_z+r_2(T)T_s$ $0.2 \leq T_z \leq 2.77$ (6) ここで、 $T_z < 0.2\text{s}$ では $T_z=0.2\text{s}$ の値で一定である。千葉県のみとなる $T_z > 2.77\text{s}$ では C_{tgr}^E がほぼ一定であったため、 $T_z=2.77\text{s}$ の値で一定とした。 r_0 、 r_1 が回帰係数である。加速度応答スペクトルの C_E は T_z を用いて(7)、(8)式でモデル化を行なった。

$$\log_{10} C_E(T) = p_0(T) + p_1(T)T_z \quad 0.2 \leq T_z \leq 1.0 \quad (7)$$

$$= p_0(T) + p_1(T) + p_2(T)(T_z - 1.0) \quad 1.0 < T_z \leq 3.51 \quad (8)$$

ここで、 $T_z < 0.2\text{s}$ では $T_z=0.2\text{s}$ の値で一定であり、観測の T_z の最大値 3.51s 以上では $T_z=3.51\text{s}$ の値で一定であるとした。 p_0 、 p_1 、 p_2 が回帰係数である。なお、 C_E は、周期 3 秒以下は直下の地盤モデルを用いている K-net、KiK-net 観測点のみを用い、3 秒より長周期では全観測点のデータを用いた。 C_{tgr}^E は、地表と工学的基盤でのサイト係数の差がほとんどないことから全観測点のデータを用いた。

Fig.14 には、周期 5 秒におけるモデル化された C_{tgr}^E を示す。Fig.12 の観測 C_{tgr}^E が、 T_z と T_s を用いた(6)式でほぼ再現できることがわかる。(6)~(8)式を用いることにより、浅部・深部統合地盤モデルを用いて、1 都 6 県では、約 250m 間隔で予測が可能となった。観測 C_{tgr}^E が T_s と相関が高いのは、浅部地盤の固有周期より長い周期でも、表面波が深部地盤と浅部地盤の影響を受けて、波群の重心が遅れて到達し、継続時間が伸びるためと考えられる。Hatayama et al.³³⁾は、2003 年十勝沖地震の K-NET 苫小牧付近での周期 7 秒の卓越に $V_s=800\text{m/s}$ 層が浅が寄与した表面波の影響を指摘している。Hatayama et al.³³⁾の指摘は、振幅に対するものであるが、最大値指標である S_A より継続時間の方が表面波の影響を受けやすいため、 C_{tgr}^E に浅部地盤の影響が強く表れたと考えられる。この結果は、工学的基盤以深の地下構造モデルを用いた三次元有限差分法では、このような浅部地盤の影響が反映できないことを意味している。

Fig.16 Comparison of pSv observed⁹⁾ at Hongo and predicted at five stations near Hongo for T1-type earthquake in this study

Fig.17 Comparison of velocity waveforms observed at Hongo (Arrows indicate unrestored portions⁸⁾ and predicted at a station near Hongo for T1-type earthquake in this study

5. 予測式の適用

(1) 大正関東地震

地震本部⁹⁾が三次元有限差分法で長周期地震動を計算している大正関東地震タイプの震源モデルを用いて、本研究の予測式により時刻歴波形を作成した。 S_A と群遅延時間の平均値・分散の予測式から時刻歴波形を作成する手法は、佐藤・他¹⁴⁾と同じである。地震本部は、T1 タイプで、本郷での復元波の速度応答スペクトルをほぼ再現することを示していることから、本研究でも、T1 タイプ (Mw7.9, $M_0=8.7 \times 10^{20}\text{Nm}$) の巨視的断層面で、大正関東地震に相当する破壊開始点を用いて計算を行った。 $H=17.5\text{km}$ である。

Fig.15 には、周期 2 秒と 5 秒での擬似速度応答スペクトル pSv 分布を用いた断層面と破壊開始点とともに示す。震源近傍では、周期 2 秒の方が 5 秒より大きい。Fig.9、Fig.12(a) で示したように周期 2 秒と 5 秒での地盤増幅率の違いは小さく、Fig.4 で示した震源近傍での距離減衰の違いが表れている。周期 2 秒では、神奈川県の一部や千葉県南部の一部で 100cm/s を超えるが、周期 5 秒では超えないレベルである。Fig.16 には大正関東地震の本郷での復元波 ($E13^\circ \text{N}$ 成分)⁹⁾と、本郷から 3km 以内の 5 観測点での、予測式の平均および平均 + 標準偏差 e の pSv の比較を示す。1 観測点のみ大きいのは本郷(東大地震研究所)の観測点であり、これは、1987 年千葉県東方沖地震の地震のみで地盤増幅率が算出されているためと考えられる。復元されていない $N13^\circ \text{W}$ 成分は、余震記録の分析等から $E13^\circ \text{N}$

成分の 1.5 倍程度と推定されている⁸⁾ことを考慮しても予測式で対象としている水平 2 成分の幾何平均は、1.2 倍程度である。Fig.3 からわかるように、周期 1~10 秒で $e=0.2\sim0.23$ であるため、 S_A の平均+e は平均の 1.6~1.7 倍で、標準偏差の範囲内となる。Fig.17 には、復元波と、1 地点での周期 0.5~10 秒の速度波形の平均および平均+標準偏差の計算波の比較を示す。標準偏差は、 S_A 、群遅延時間の平均値・分散の全てに対して考慮している。なお、復元波の矢印の 2 か所の欠落部は修復されていない⁸⁾。本震後に多数の余震が発生しており、気象庁の一元化震源では、11 時 58 分 31.7 秒の本震 ($M_J7.9$) 発生後、相模湾付近で 12 時 1 分に $M_J6.5$ 、12 時 3 分に $M_J7.3$ の余震が推定されている。武村³⁴⁾は、岐阜測候所での観測波形から、本震の約 3 分後に東京湾北部付近で $M7.2$ の余震が発生したと推定している。この観測波と推定震源位置を考えると、Fig.17 の復元波の 150~180 秒付近以降に余震の影響が含まれているものと考えられる。また、 $Mw7.9$ としているが、 $Mw8.0$ と推定している研究もあり⁷⁾、 $Mw8.0$ では、計算波の周期 1~10 秒での pSv は、 $Mw7.9$ の場合の 1.2~1.3 倍となる。以上のことを考慮すると、本研究の計算波は復元波をほぼ再現しているといえる。

Fig.18 には、東京都庁と神奈川県庁での地震本部⁹⁾の T タイプの公開計算波と、その地点から 1~3km 以内の強震観測点での本研究の計算波の pSv の比較を示す。地震本部の計算波は精度が良いとさ

Fig.18 Comparison of pSv predicted in this study and HERP⁹⁾ for the average (upper) and the average + standard deviation (lower) for the 1923 Taisho Kanto type earthquake

Fig.19 Velocity waveforms predicted at TKY007(Shinjuku) for T1-type earthquake in this study

れている 2 秒以上を示した。地震本部⁹⁾の T タイプの平均、平均+標準偏差の波は、T1 タイプ($Mw7.9$)と T2 タイプ($Mw8.0$)の複数のシナリオによる計算波のうち速度応答スペクトルが平均、平均+標準偏差に最も近い波の NS 成分と EW 成分である。本研究は T1 タイプの平均、平均+標準偏差の波である。また、地震本部の計算波は $Vs=350m/s$ 以上の層での計算波であるのに対して、本研究の計算波は $Vs=400m/s$ 以上の層での計算波である。このような違いも鑑みると、地震本部⁹⁾と本研究の計算波のスペクトルレベルは、おおむね対応しているといえる。東京都庁では、平均、平均+標準偏差ともほぼ告示レベル以下である。神奈川県庁では、平均は周期 2 秒以下で告示よりやや大きく、平均+標準偏差では周期 3 秒以下で告示より大きく、3 秒以上では告示レベルである。東京都庁に近い TKY007(新宿)における、本研究の T1 タイプの平均、平均+標準偏差の周期 0.1~10 秒の速度波形を Fig.19 に示す。最大速度は、平均で 18cm/s、平均+標準偏差で 30cm/s である。なお、地震本部の公開計算波の破壊開始点は不明のため比較を行っていない。

上述のように、相模トラフ沿いの中規模地震のデータを多数用いることにより、伝播経路特性、サイト特性に相模トラフ沿いの地震の特徴を反映させている。しかし、予測式のデータセットに M8 クラスの相模トラフ沿いの地震がないため、震源特性は、主として太平洋プレートの地震に基づいてモデル化されている。そこで、予測式の M8 クラスの相模トラフ沿いの地震への適用性について、短周期レベル A を用いて考察する。 $Mw8$ クラスの地震では、コーナー周期が 10 秒程度以上となり、周期 1~10 秒の加速度震源スペクトルはほぼ A で説明できると考えられるため、これを S_A の震源項 Sou に援用して考察を行う。Fig.20 には、震度をターゲットとして推定されている大正関東地震の A と M_0 の関係³⁵⁾、地震本部⁹⁾の T1 タイプ、T2 タイプの A(各タイプの 2 種類の震源モデルの A の幾何平均値)と M_0 の関係を、白抜きシンボルで示す。Fig.20 には、太平洋プレートのプレート境界地震に対する M_0 -A 関係式³⁶⁾も示している。佐藤³⁶⁾の M_0 -A 関係式で用いられている震源の S 波速度 β 、密度 ρ は、 $4.0km/s$ 、 $3.0g/cm^3$ であるが、大正関東地震³⁵⁾や地震本部⁹⁾では、これらより小さい値が用いられている。そこで、以下のようにして、この違いを補正した値を色塗りのシンボルで示した。

スペクトルインバージョンでは、加速度フーリエスペクトルの震源項 $S(f)$ は(9)式でモデル化される(例えば³⁶⁾。

Fig.20 M_0 -A relations for interplate earthquakes

Fig.21 pSv predicted for the hypothetical south Tokyo metropolitan earthquake at 2 s in this study with locations of TKY007 (triangle), the fault⁷⁾ (red line) and the rupture starting point⁷⁾ (star).

$$S(f) = \frac{c}{4\pi\rho\beta^3} \sqrt{\frac{\rho\beta}{\rho_z\beta_z}} M(f) \quad (9)$$

ここで、加速度震源スペクトル $M(f)$ は、(10)式である。

$$M(f) = \frac{(2\pi f)^2 M_0}{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2} \quad (10)$$

A は(10)式のコーナー周波数 f_0 より高周波数での一定レベルである。定数 c と地震基盤での β_z , ρ_z は、各地震で共通であるため、地震による $S(f)$ のスペクトル一定レベルの違いは A の $(\rho\beta)^{0.5}/(\rho\beta^3)$ 倍の違いとなる。また、(2)式で求められる各地震の震源項 Sou は、(9)式の S に対応する。そこで、佐藤の M_0 -A 関係式³⁶⁾で用いられている ρ , β に対応するように、A を $(\rho\beta)^{0.5}/(\rho\beta^3)$ の比で媒質補正した。地震本部⁹⁾の ρ , β は、T1 タイプのパラメータから剛性率を算出し、 $\beta = 3.8\text{km/s}$, $\rho = 2.8\text{g/cm}^3$ と仮定した。媒質補正後の大正関東地震、地震本部⁹⁾の T1, T2 タイプとも、佐藤³⁶⁾の M_0 -A 関係とほぼ合っている。この結果は、本研究の計算波が、本郷での復元波や地震本部の計算波とほぼ同レベルとなった結果と整合しており、予測式の M8 クラスの相模トラフ沿いの地震への適用性をサポートするものである。

(2) 都心南部直下地震

内閣府⁷⁾の都心南部直下地震($M_w7.3$, $H=43\text{km}$)に対する統計的グリーン関数法による計算波との比較を行った。Fig.21 には、用いた内閣府⁷⁾の巨視的断面(鉛直断面)と破壊開始点、本研究のスラブ内地震に対する予測式(平均)に基づく周期 2 秒の pSv を示す。ごく一部の観測点で 100cm/s を超える程度である。周期 5 秒では、ほぼ 50cm/s 以下であった。Fig.22 には、TKY007(新宿)での本研究と内閣府⁷⁾の計算波の pSv の比較を示す。内閣府⁷⁾の計算波は、水平 2 成分の幾何平均値も示した。内閣府⁷⁾の計算波は、周期 3 秒以下が有効である。内閣府⁷⁾は、スラブ内地震の平均的な強震動生成域の応力降下量の 1.2 倍の 62MPa を用いて計算を行っているが、統計的グリーン関数法であるため表面波は考慮されていない。本研究の計算波が、内閣府⁷⁾の水平 2 成分の平均値よりやや大きい原因として、本研究の予測式では経験的に表面波が考慮されていることが考えられる。予測式のデータセットに M_w7 以上のフィリピン海

Fig.22 Comparison of pSv predicted at TKY007 for the hypothetical south Tokyo metropolitan earthquake predicted in this study and by Cabinet Office⁷⁾

Fig.23 Comparison of velocity waveforms predicted at TKY007 for the hypothetical south Tokyo metropolitan earthquake in this study and by Cabinet Office⁷⁾

レートのスラブ内地震は含まれていないが、1987 年千葉県東方沖地震($M_w6.7$)や 1855 年安政江戸地震($M_w7.1$)の A が、太平洋プレートのスラブ内地震に対する深さ依存の M_0 -A 関係²⁸⁾とほぼ整合していること³⁷⁾からも、M7 クラスの首都直下地震にも適用できる式となっていると考えられる。Fig.23 には、TKY007(新宿)での本研究と内閣府⁷⁾の計算波の周期 0.1~10 秒の速度波形を示す。表面波の影響も含まれている本研究の方がやや継続時間が長い。

6. まとめ

本研究では、相模トラフ沿いの地震に対する長周期・長時間地震動(水平成分)の予測のため、国内の強震記録に基づき、減衰定数 5% の加速度応答スペクトル S_A と群遅延時間の平均値・分散の予測式を作成した。そして、大正関東地震タイプ($M_w7.9$), M7 クラスの想定首都直下地震である都心南部直下地震($M_w7.3$)に適用した。周期 1~10 秒が主たる対象であるが、周期 0.1~1 秒も同じ考え方で予測式を作成している。本研究で得られた結論は以下の通りである。

- 1) 相模トラフ沿いの地震については、 $M_J \geq 4$ の多数の記録をデータセットに含め、伝播経路・サイト特性の地域性を考慮した。その結果、本研究で得られた S_A の地盤増幅率は、南海トラフ沿いの地震の予測式の地盤増幅率より小さく、周期依存性も小さい傾向が得られた。震源位置により表面波の励起特性が異なることが反映されたものと考えられる。
- 2) 震源近傍での S_A の飽和の係数の推定に、全国の地殻内地震の記録も含め、震源近傍も含む断層最短距離 $1.2 \sim 250\text{km}$ での予測を可能とした。震源近傍での S_A の飽和は、周期 1 秒以上で周期が長いほど強くなり、周期 4~10 秒でほぼ一定となる。
- 3) $M_w3.7 \sim 8.2$ の広い範囲のスケールリングを表現するため、NGA-WEST2 のヒンジマグニチュードをパラメータとしたモデル化を導入した結果、観測の震源項が良くモデル化された。
- 4) プレート境界とスラブ内地震(深さ 75km 以下)を区別し、 S_A の予測式では、それぞれに対する震源深さ依存性を考慮した。 S_A は深くなるほど長周期では小さくなり、表面波の特徴がモデル化されている。短周期では、特にスラブ内地震で深くなるほど大きくなる傾向が顕著で短周期レベルの特徴が反映されている。
- 5) 1 都 6 県の浅部・深部統合地盤構造モデルとモデル構築の際に

- 用いられた K-NET, KiK-net 観測点直下の地盤モデルに基づき、工学的基盤で浅の一次元的地盤増幅をはざとり、工学的基盤での地盤増幅率を算出した。S_A の地表での地盤増幅率は、周期 1 秒程度でも広い範囲で浅部地盤の増幅があったが、工学的基盤ではその影響が除かれた。
- 6) 工学的基盤での群遅延時間の平均値・標準偏差のサイト係数は、工学的基盤から地表までの地盤の固有周期 Ts より長周期でも、Ts との相関がみられた。表面波が浅部地盤の影響も受け、継続時間が伸びていることを反映したものと考えられる。この結果は、工学的基盤で深の地下構造を用いた三次元有限差分法などでは、このような影響を反映できないことを意味している。
 - 7) プレート境界地震である大正関東地震に予測式を適用し、本郷での復元波や地震本部の三次元有限差分法の計算波とほぼ同レベルとなることを示した。これは、大正関東地震や、地震本部の震源モデルが、本研究のデータセットの多くを占める太平洋プレートでの地震の地震モーメントと短周期レベルの関係で説明できると整合する結果である。
 - 8) スラブ内地震である都心南部直下地震に予測式を適用したところ、内閣府の統計的グリーン関数法の計算波と比べ、スペクトルはやや大きく、継続時間はやや長い波形が計算された。統計的グリーン関数法では表面波が考慮されていないことを考慮すると、整合する結果となっている。

謝辞

本研究は、平成 28～29 年度の国土交通省建築基準整備促進事業による成果である。大川出博士には、貴重なお意見を頂いた。1 都 6 県での浅部・深部統合地盤モデルと K-NET, KiK-net 観測点直下の地盤モデルは、防災科学技術研究所との共同研究協定に基づき、先名重樹博士からご提供いただいたものである。また、地震本部から関東地震の断層モデルのデータをご提供頂くとともに、公開計算波形を用いました。本研究では、防災科学技術研究所の K-NET, KiK-net の記録、F-net の CMT 解、気象庁の 87 型、95 型震度計の記録、一元化震源情報、建築学会が収集した各機関の 1987 年千葉県東方沖地震の記録、工学院大学の地震記録を用いました。東京大学地震研究所が首都圏の自治体等の協力を得て運営している SK-net の強震記録も用いました。また、内閣府が公開している震源モデル、計算波形を用いました。なお、一部の図の作成には、GMT³⁸⁾を用いました。記して、感謝致します。

参考文献

- 1) Nagano, M. et al.: Dynamic Characteristics of Super High-rise Residential Buildings in Kanto and Kansai Areas Based on Strong Motion Records During the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Journal of JAEE, pp. 65-79, 2012. 9 (in Japanese)
永野正行ほか 9 名: 2011 年東北地方太平洋沖地震時の強震記録に基づく関東・関西地域に建つ超高層集合住宅の動特性, 日本地震工学会論文集, 第 12 巻, 第 4 号, pp. 65-79, 2012. 9
- 2) Headquarters for Earthquake Research Promotion: On Update of Earthquake Probabilities by Long-Term Evaluation, from https://www.jishin.go.jp/evaluation/long_term_evaluation/chousa_18feb_kakuritsu_index/ (accessed 2018. 7. 16) (in Japanese)
地震本部: 長期評価による地震発生確率値の更新について, 入手先, https://www.jishin.go.jp/evaluation/long_term_evaluation/chousa_18f

- eb_kakuritsu_index/ (参照 2018. 7. 16)
- 3) Satoh, T. et al.: Revisions of Empirical Ground Motion Models and the Simulations of Long-period Strong Motions of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Journal of JAEE, Vol. 14, No. 6, pp. 1-20, 2014. 12
 - 4) Satoh, T. et al.: Prediction of Long-period Ground Motions for the Nankai Trough Mega-earthquakes Using Site-specific Empirical Relations, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No. 695, pp. 37-46, 2014. 1 (in Japanese)
佐藤智美ほか 4 名: サイト固有の特性を反映した経験式に基づく南海トラフ沿いの巨大地震に対する長周期地震動予測, 日本建築学会構造系論文集, 第 695 号, pp. 37-46, 2014. 1
 - 5) Nakagawa, H.: Development of Design Input Motion for High-rise Buildings Against Megathrust Earthquakes, Proc. the 12th Japan-China Structural Engineering Workshop, 10pp. 2017. 9 (in Japanese)
中川博人: 海溝型巨大地震に対する設計用長周期地震動の作成に関する検討, 第 12 回日中建築構造技術交流会論文集, 10pp., 2017. 9
 - 6) Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism: On Countermeasures Against Long-period Ground Motions of Nankai Trough Mega-earthquakes for High-rise Buildings, from http://www.mlit.go.jp/report/press/house05_hh_000620.html, (accessed 2018. 7. 16) (in Japanese)
国土交通省: 超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策について, 入手先, http://www.mlit.go.jp/report/press/house05_hh_000620.html (参照 2018. 7. 16)
 - 7) Cabinet Office: Reports on Fault Model, Seismic Intensity and Tsunami Height of M7-class Tokyo Metropolitan Earthquakes and M8-class Sagami Trough Earthquakes, from <http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/shutochokkajishinmodel/> (accessed 2018. 7. 16) (in Japanese)
中央防災会議(事務局内閣府)首都直下モデル検討会: 首都直下の M7 クラスの地震及び相模トラフ沿いの M8 クラスの地震等の震源断層モデルと震度分布・津波高等に関する報告書, 入手先, <http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/shutochokkajishinmodel/> (参照 2018. 7. 16)
 - 8) Yokota et al.: Estimation of Long-Period Ground Motion of the 1923 Great Kanto Earthquake, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No. 401, pp. 35-45, 1989. 7 (in Japanese)
横田治彦ほか 3 名: 1923 年関東地震のやや長周期地震動, 今村式 2 倍強震計記録による推定, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 401 号, pp. 35-45, 1989. 7
 - 9) Headquarters for Earthquake Research Promotion: Evaluation of Long-period Ground Motions, the 2016 Trial Version, Sagami Trough Mega-earthquakes, from https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/lpshm/16_choshuki/ (accessed 2018. 7. 16) (in Japanese)
地震本部: 長周期地震動評価 2016 年試作版一相模トラフ巨大地震の検討, 入手先, https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/lpshm/16_choshuki/ (参照 2018. 7. 16)
 - 10) Boore, D. M. et al.: NGA-West2 Equations for Predicting PGA, PGV, and 5%-Damped PSA for Shallow Crustal Earthquakes, Earthquake Spectra, Vol. 30, No. 3, pp. 1057-1085, 2014. 8
 - 11) Campbell, K. W. and Bozorgnia, Y.: NGA-West2 Ground Motion Model for the Average Horizontal Components of PGA, PGV, and 5% Damped Linear Acceleration Response Spectra, Earthquake Spectra, Vol. 30, pp. 1087-1115, 2014. 8
 - 12) Architectural Institute of Japan: Digitized Strong-motion Earthquake Records in Japan, Vol. 1, The off East Coast of Chiba Prefecture Earthquake, December 17, 1987, CD-ROM, 1992
 - 13) Fukushima, Y. and Tanaka, T: Revision of Attenuation Relation of Peak Ground Accelerations Using New Dataset, Program and Abstracts, Seismological Society of Japan, p.116, 1992. 10 (in Japanese)
福島美光, 田中貞二: 新しいデータベースを用いた最大加速度の距離減衰式の改訂, 地震学会講演予稿集, No. 2, 1992. 10
 - 14) Satoh et al.: Prediction of Waveforms of Long-period Ground Motions

- for Hypothetical Earthquakes Using Empirical Regression Relations of Response Spectra and Phase Spectra, *Journal of Structural and Construction Engineering* (Transactions of AIJ), No. 649, pp. 521-530, 2010. 3 (in Japanese)
- 佐藤智美ほか 4 名: 応答スペクトルと位相スペクトルの経験式に基づく想定地震に対する長周期時刻歴波形の作成, *日本建築学会構造系論文集*, 第 649 号, pp. 521-530, 2010. 3
- 15) Okada, Y. and Kasahara, K.: Earthquake of 1987, off Chiba, Central Japan and Possible Triggering of Eastern Tokyo Earthquake of 1988, *Tectonophysics*, Vol. 172, pp. 351-364, 1990. 2
 - 16) Asano, K. et al.: Source Modeling and Strong Ground Motion Simulation of the off Miyagi Intralab Earthquake of May 26, 2003, *Zisin*, Ser. 2, Vol. 57, pp. 171-185, 2004. 12 (in Japanese)
浅野公之ほか 2 名: 2003 年 5 月 26 日に宮城県沖で発生したスラブ内地震の震源モデルと強震動シミュレーション, *地震 第 2 輯*, 第 57 巻, pp. 171-185, 2004. 12
 - 17) Suzuki, W. et al.: Rupture Process of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku, Japan, Earthquake Derived from Near-source Strong-motion Records, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 100, pp. 256-266, 2010. 2
 - 18) Hikima, K.: Rupture Process of the April 11, 2011 Fukushima Hamadori Earthquake (Mj7.0) – Two Fault Planes Inferred from Strong Motion and Relocated Aftershocks –, *Zisin*, Ser. 2, Vol. 64, pp. 243-256, 2012. 8 (in Japanese)
引間和人: 2011 年 4 月 11 日福島県浜通りの地震(Mj7.0)の震源過程: 強震波形と再決定震源による 2 枚の断層面の推定, *地震 第 2 輯*, 第 64 巻, pp. 243-256, 2012. 8
 - 19) Kubo, H. et al.: Source-Rupture Process of the 2011 Ibaraki-oki, Japan, Earthquake (Mw 7.9) Estimated from the Joint Inversion of Strong-Motion and GPS Data: Relationship with Seamount and Philippine Sea Plate, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 40, pp. 3003-3007, 2013. 5
 - 20) Asano, K. and Iwata T.: Source Rupture Processes of the Foreshock and Mainshock in the 2016 Kumamoto Earthquake Sequence Estimated from the Kinematic Waveform Inversion of Strong Motion Data, *Earth Planets Space*, Vol. 68: 147, doi:10.1186/s40623-016-0519-9, 2016. 8
 - 21) Japan Meteorological Agency: Results of Source Inversion Analysis of Memorable Earthquakes in Japan, from <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/sourceprocess/> (accessed 2016. 10. 12) (in Japanese)
気象庁: 国内で発生した顕著な地震の震源過程解析結果, 入手先, <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/sourceprocess/> (参照 2016. 10. 12)
 - 22) Atkinson, G. M. and Silva, W.: Stochastic Modeling of California Ground Motions, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 90, pp. 255-274, 2000. 4
 - 23) Yenier, E. and Atkinson G. M.: Regionally Adjustable Generic Ground-motion Prediction Equation Based on Equivalent Point-source Simulations: Application to Central and Eastern North America, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 105, pp. 1989-2009, 2015. 8
 - 24) Satoh, T.: Stochastic Green's Functions Considering Surface Waves and Scattering Waves Using Strong Motion Records of Moderate-sized Intraplate Earthquakes Along the Sagami Trough, *Journal of JAEI*, Vol. 15, No. 1, pp. 116-135, 2015. 2 (in Japanese)
佐藤智美: 相模トラフ沿いの中規模スラブ内地震記録に基づく表面波と散乱波を考慮した統計的グリーン関数, *日本地震工学会論文集*, 第 15 巻, 第 1 号, pp. 116-135, 2015. 2
 - 25) Satoh, T. and Tatsumi, Y.: Source, Path, and Site Effects for Crustal and Subduction Earthquakes Inferred from Strong Motion Records in Japan, *Journal of Structural and Construction Engineering* (Transactions of AIJ), No. 556, pp. 15-24, 2002. 6 (in Japanese)
佐藤智美, 異蒼樹: 全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性, *日本建築学会構造系論文集*, 第 556 号, pp. 15-24, 2002. 6
 - 26) Lawson, C. L. and Hanson, R. J.: Solving Least Squares Problems, Prentice-Hall, New York, 1974
 - 27) Satoh, T.: Short-period Spectral Level, f_{max} and Attenuation of Outerrise, Intralab and Interplate Earthquakes in the Tohoku District, *Journal of Structural and Construction Engineering* (Transactions of AIJ), No. 689, pp. 1227-1236, 2013. 7 (in Japanese)
佐藤智美: 東北地方のアウトターライズ地震, スラブ内地震, プレート境界地震の短周期レベルと f_{max} 及び距離減衰特性, *日本建築学会構造系論文集*, 第 689 号, pp. 1227-1236, 2013. 7
 - 28) Boore, D. M. et al.: NGA-West2 Equations for Predicting Response Spectral Accelerations for Shallow Crustal Earthquakes, *PEER Report* 2013/05, pp. 1-106, 2013. 5
 - 29) Takano, K. and Uehara, M.: Current Status of Data Collection in the Seismic Kanto Strong Motion Network in Metropolitan Area, Technical Research Report, Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, No. 20, pp. 1-10, 2014 (in Japanese)
鷹野澄, 上原美貴: 首都圏強震動総合ネットワーク SK-net におけるデータ収集の現状, *東京大学地震研究所技術研究報告*, No. 20, pp. 1-10, 2014
 - 30) Senna, S. et al.: Modeling of the Subsurface Structure from the Seismic Bedrock to the Ground Surface for a Broadband Strong Motion Evaluation, *Journal of Disaster Research*, Vol. 8, No. 5, pp. 889-903, 2013. 1
 - 31) Headquarters for Earthquake Research Promotion: Modeling of the Subsurface Structure Subsurface Structure from the Seismic Bedrock to the Ground Surface in the Kanto Area, from https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/underground_model/integration_model_kanto/ (accessed 2018. 7. 16) (in Japanese)
地震本部: 関東地方の浅部・深部統合地盤構造モデル, 入手先, https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/underground_model/integration_model_kanto/ (参照 2018. 7. 16)
 - 32) Fujiwara et al.: Study on Application of Hazard Assessment of Long-period Ground Motions, from https://www.jishin.go.jp/main/chousakenkyuu/choshuki_shien/h27/h27_3-4.pdf (accessed 2018. 7. 15) (in Japanese)
藤原広行ほか 3 名: 長周期地震動ハザード評価結果の活用の検討等, 入手先, https://www.jishin.go.jp/main/chousakenkyuu/choshuki_shien/h27/h27_3-4.pdf (参照 2018. 7. 15)
 - 33) Hatayama, K. et al.: Control Factors of Spatial Variation of Long-period Strong Ground Motions in the Yufutsu Sedimentary Basin, Hokkaido, During the Mw 8.0 2003 Tokachi-oki, Japan, Earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 97, pp. 1308-1323, 2007. 9
 - 34) Takemura, M.: Great Kanto Earthquake, Knowing Ground Shaking in Greater Tokyo Area. Kajima Institute Publishing, pp. 1-139, 2003. 5 (in Japanese)
武村雅之: 関東大震災 大東京圏の揺れを知る, 鹿島出版会, pp. 1-139, 2003. 5
 - 35) Satoh, T.: Estimation of Strong Motion Generation Areas and Strong Motions During the 1923 Kanto Earthquake Using Revised Stochastic Green's Function Method, *Journal of Structural and Construction Engineering* (Transactions of AIJ), No. 719, pp. 39-49, 2016. 1 (in Japanese)
佐藤智美: 改良統計的グリーン関数法に基づく 1923 年関東地震の強震動生成域と強震動の推定, *日本建築学会構造系論文集*, 第 719 号, pp. 39-49, 2016. 1
 - 36) Satoh, T.: Scaling Law of Short-period Source Spectra for Crustal Earthquakes in Japan Considering Style of Faulting of Dip-slip and Strike-slip, *Journal of Structural and Construction Engineering* (Transactions of AIJ), No. 651, pp. 923-932, 2010. 5 (in Japanese)
佐藤智美: 逆断層と横ずれ断層の違いを考慮した日本の地殻内地震の短周期レベルのスケーリング則, *日本建築学会構造系論文集*, 第 651 号, pp. 923-932, 2010. 5
 - 37) Satoh, T.: Estimation of Broadband Source Model of the 1855 Ansei-Edo Earthquake and the Strong Motions in the Tokyo Metropolitan and Regional Area Using the Empirical Green's Function Method, *Journal of Structural and Construction Engineering* (Transactions of AIJ), No. 727, pp. 1423-1433, 2016. 9 (in Japanese)
佐藤智美: 経験的グリーン関数法に基づく 1855 年安政江戸地震の広帯域震源モデルと首都圏及び広域での強震動の推定, *日本建築学会構造系論文集*, 第 727 号, pp. 1423-1433, 2016. 9
 - 38) Wessel, P. and Smith, W. H. F.: New, Improved Version of Generic Mapping Tools Released, *EOS, AGU*, 1998

LONG-PERIOD AND LONG-DURATION GROUND MOTION PREDICTION EQUATIONS FOR EARTHQUAKES ALONG THE SAGAMI TROUGH BASED ON STRONG MOTION RECORDS

*Toshimi SATOH^{*1}, Hiroto NAKAGAWA^{*2}, Shin KOYAMA^{*3},
Toshiaki SATO^{*4} and Masanobu TOHDO^{*5}*

^{*1} Research Fellow, Ohsaki Research Institute, Dr.Eng.

^{*2} Senior Research Engineer, Dept. of Structural Eng., Building Research Institute, Dr.Eng.

^{*3} Research Managing Coordinator for Advanced Building Technology, National Institute for Land and Infrastructure Management, Dr.Eng.

^{*4} Director, Ohsaki Research Institute, Dr.Eng.

^{*5} Principal Researcher, Ohsaki Research Institute, Dr.Eng.

We develop long-period and long-duration ground motion prediction equations for earthquakes along the Sagami Trough based on strong motion records to utilize the equations to design input motions for high-rise buildings. Equations of 5%-damped acceleration response spectra S_A and the average and variance of group delay time in the period range of 0.1 to 10 s are developed. Mw range of dataset is 3.7 to 8.2. The fault distance range is 1.2 to 250 km. The main features of the equations are as follows.

- 1) Since the strong motion records of big Sagami Trough earthquakes are rare, many records of earthquakes with $M_J \geq 4.0$ along the Sagami Trough are added to records of big subduction-zone earthquakes ($M_J \geq 6.5$) in whole Japan. The amplification factors for S_A tend to be smaller than those for earthquakes along the Nankai Trough obtained by our previous paper. This result is the same result showed by 3-D FDM by Fujiwara et al..
- 2) Records of crustal earthquakes are used only to estimate a coefficient which represents the saturation effect to S_A near fault regions because the upper depth of the Philippine Sea plate in south western part of Kanagawa prefecture is less than 10 km. The saturation effect is stronger than that for earthquakes along the Nankai Trough obtained by our previous paper.
- 3) Magnitude coefficients for wide Mw range data are modeling well by introducing hinge magnitudes used in S_A equations of NGA-WEST2.
- 4) Differences between interplate and intraplate earthquakes are modeling by using dummy valuables as fault depth dependency coefficients for S_A . The S_A is larger as the depth is shallower in the long period range. This tendency reflects feature of surface waves.
- 5) Site coefficients of S_A and group delay time obtained at the surface are converted to site coefficients at the engineering bedrock with an S-wave velocity of 400 m/s based on 1-D wave propagation theory using shallow structures modeled by National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED). Even at a period of 1 s amplification factors for S_A at the surface were affected by shallow structures in the wide region around the center of the Kanto plane but the effects are removed in amplification factors at the engineering bedrock.
- 6) Site coefficients of group delay time at the engineering bedrock become longer by shallow structures even in the periods longer than the predominant periods of shallow structures. This result means that 3-D FDM using the subsurface structure under the engineering bedrock cannot simulate these effects on duration by shallow structures.

The developed equations are applied to the 1923 Taisho Kanto (Mw7.9) type earthquake using fault models by the Headquarters for Earthquake Research Promotion (HERP). The long-period ground motion predicted near Hongo is consistent to the observed and restored record there. Predicted S_A are comparable to those predicted by 3-D FDM by HERP. This result is reasonable because the scaling relation of spectral level of the 1923 Taisho Kanto earthquake and the source models by HERP almost agrees with the previous empirical relation for earthquakes along the Pacific plate which are major dataset of our equations. We also applied the developed equations to the hypothetical south Tokyo metropolitan earthquake (Mw7.3) using fault models by Cabinet Office. The predicted S_A is a little larger and duration is a little longer than those predicted by stochastic Green's function method by Cabinet Office. This result is reasonable because surface waves are not considered in the stochastic Green's function method.

(2018年9月7日原稿受理, 2019年1月11日採用決定)