長周期地震動の経験式の改良と2011年東北地方太平洋沖地震の 長周期地震動シミュレーション

佐藤智美¹⁾、大川出²⁾、西川孝夫³⁾、佐藤俊明⁴⁾

1) 正会員 大崎総合研究所、主席研究員 博士(工学)

e-mail : toshimi.satoh@shimz.co.jp

2) 正会員 建築研究所構造研究グループ、主席研究監 工博

e-mail : okawa@kenken.go.jp

3) 正会員 首都大学東京、名誉教授 工博

e-mail : tanishi@river.dti.ne.jp

4) 正会員 清水建設技術研究所、副所長 工博

e-mail : toshiaki.sato@shimz.co.jp

要 約

加速度応答スペクトルと群遅延時間の平均値・分散の経験式の改良を行ない、東北地方太平洋沖地震の長周期地震動シミュレーションを行った。経験式の主な改良点は、 M_w^2 項を応答スペクトルの経験式に導入したこと、太平洋プレートとフィリピン海プレートの地震に対して、距離減衰特性と、関東平野の堆積層の厚い観測点での地盤増幅率・サイト係数の違いを考慮したことである。東北地方太平洋沖地震に対しては、強震動生成領域に基づき3つの巨視的断層からなる震源モデルを設定した。この3連動震源モデルと改良経験式により、東北地方太平洋沖地震の1~10秒の長周期地震動がほぼ再現できることを示した。

キーワード： 2011年東北地方太平洋沖地震、長周期地震動、経験式、シミュレーション

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震では、東北地方、関東地方をはじめ、広範囲で大きな地震動にみまわれ、首都圏でも長周期地震動により、超高層建物にも大きな揺れが生じ、非構造部材の損傷等が報告されている^{例えは¹⁾}。この2011年東北地方太平洋沖地震の長周期地震動を再現することは、発生が危惧される南海トラフ沿いの巨大海溝型地震などの長周期地震動予測に向けて、重要な第一歩と考えられる。

筆者らは、超高層建物等の設計用長周期地震動策定に向けて、周期0.1~10秒の加速度応答スペクトルと位相スペクトル(群遅延時間)の経験式に基づく時刻歴波形作成手法を提案し^{2),3)}、いくつかの巨大海溝型地震に適用している^{2),3),4)}。また、東北地方太平洋沖地震直後から、この経験式と3連動震源モデルに基づき長周期地震動のシミュレーションを試みてきた^{5),6)}。その結果、周期5秒程度以上でやや過大評価となること、特に関東平野でその傾向が強いことがわかった。この原因として、以下の3つの可能性を指摘している。ひとつめは、3連動でモデル化してもモーメントマグニチュード M_w が外挿になる上、応答スペクトルの経験式が震源項として M_w の1次式のみで表現されているため、過大評価となっている可能性である。既往の研究では、震源スペクトルが ω^2 モデルで表されるとすると、 M_w が大きいと長周期帯域

で過大評価となることが指摘され、最大加速度や最大速度、応答スペクトルの距離減衰式に Mw^2 項も考慮した式が提案されている^{例えは7),8),9)}。ふたつめは、関東平野では、長周期地震動のスペクトルの増幅率が、到来方向により異なることやみかけ入射角と相関があることが指摘されているが^{10),11)}、応答スペクトルの経験式にはこのような現象が考慮されていないことである。関東平野では、継続時間も、到来方向により異なることが指摘されており¹²⁾、群遅延時間の経験式にもこのような特徴を考慮する必要があると考えられる。座間¹³⁾は、石油タンクの長周期地震動の設計用スペクトル策定にあたって、気象庁1倍強震計記録が得られている観測点において、地震の震源域を考慮して揺れやすさ係数を算出しており、長周期地震動を考える上で伝播特性の違いを考慮することは重要と考えられる。3つめは、震源のモデル化の問題である。筆者らの試算では^{5),6)}、周期10秒程度以上が主たる周期帯域である遠地実体波を用いた震源モデル¹⁴⁾に基づき、3連動震源モデルを設定している。しかし、周期10～20秒以下の短周期帯域の波を用いた震源モデルは、長周期帯域の波を用いた震源モデルと異なることが指摘されている^{例えは15)}。

そこで、本研究では、震源特性の改良として、応答スペクトルの経験式に Mw^2 項も考慮することとした。また、伝播特性、観測点固有のサイト特性の改良として、応答スペクトルと群遅延時間の経験式の両方で、太平洋プレートとフィリピン海プレートの地震の距離減衰特性、関東平野の堆積層の厚い観測点でのサイト特性(地盤増幅率とサイト係数)を区別することとした。これまで、筆者らの研究^{2),3)}も含め、長周期地震動をターゲットとした応答スペクトルの距離減衰式はいくつか提案されているが^{例えは、16～19)}、 Mw^2 項や太平洋プレートとフィリピン海プレートの地震の距離減衰特性・サイト特性の違いが考慮されているものではなく、この点が本研究における経験式の改良ポイントである。

東北地方太平洋沖地震の震源モデルも、経験的グリーン関数法に基づき推定された強震動生成領域²⁰⁾からなる震源モデルと、入倉²¹⁾に基づく地震調査研究推進本部²²⁾の強震動予測レシピを用いて、3つの巨視的断層から成る3連動震源モデルを設定する。そして、この改良した経験式と改良震源モデルに基づき東北地方太平洋沖地震の長周期地震動シミュレーションを行う。改良震源モデルは、 Mw がデータの最大 $Mw8.2$ を超えるため、データの範囲外で外挿する場合には、結果の信頼性が担保されない。そこで、東北地方太平洋沖地震の長周期地震動シミュレーションを通じて Mw の頭打ち(上限値)を導入する。また、 Mw がデータの範囲内である前震と最大余震の長周期地震動シミュレーションも行ない、改良した経験式の妥当性を検証する。

なお、佐藤・他²⁾の経験式の応答スペクトルの地盤増幅率と群遅延時間のサイト係数のみを、佐藤・他³⁾で改訂している。国土交通省²³⁾の超高層建築物等における長周期地震動への対策試案では、佐藤・他³⁾の地盤増幅率とサイト係数を周期1秒以下で工学的基盤補正係数³⁾で補正したものが、デジタル値として公表されている²³⁾。佐藤・他³⁾で改訂した地表での地盤増幅率とサイト係数は、建築研究所の報告書²⁴⁾でデジタル値が公表されている。佐藤・他³⁾で改訂した地表での地盤増幅率とサイト係数を用いた経験式を旧経験式と呼ぶものとし、本研究で改良する経験式を改良経験式と呼ぶものとする。

2. 改良経験式作成に用いるデータ

改良経験式作成には、佐藤・他²⁾の経験式で用いた1988年～2007年7月までの33個の海溝型地震に、この式作成後に発生した2011年5月までの19個の海溝型地震を加えた記録を用いた。本研究では、プレート境界地震、スラブ内地震、アウターライズ地震、日本海東縁の海域の地震を海溝型地震に分類している。追加した地震の諸元を表1に、全52地震の震央位置を図1に示す。追加した地震のうち、2009年駿河湾地震のみがフィリピン海プレートのスラブ内地震であり、他は太平洋プレートの地震である。日本海東縁の地震である1993年北海道南西沖地震は、太平洋プレートの地震に含めて経験式を作成した。2011年3月9日の前震と2011年3月11日15時8分の岩手県沖の地震は、気象庁の震源モデル^{25),26)}の地震モーメント M_0 と断層面を用いた。2009年駿河湾の地震は、鈴木・青井²⁷⁾の震源モデルの M_0 と断層面を用いた。その他の地震はF-netの M_0 を用い、気象庁の震源位置を点震源と仮定した。東北地方太平洋沖地震は、改良経験式作成のデータには含めず、シミュレーションによる Mw の頭打ちの値の設定にのみ用いる。これは、東北地方太平洋沖地震は、経験式で対象とする周期0.1～10秒の強震動を生成すると考えられる強震動生成領域からなる震源モデルからみると^{例えは20)}、連動型としてモデル化すべきと考えられるが、震源モデルの設定の違いにより、経験式の回帰係数が変動することになるためである。用いた観測点は、K-NET

観測点、KiK-net観測点(地表)、気象庁87型観測点と、2009年駿河湾の地震以前の地震の関東平野の1都6県、濃尾平野、大阪平野の気象庁95型観測点及び新宿・工学院大学1階の観測点である。追加した海溝型地震の記録の選択条件は、佐藤・他²⁾と同じで、以下の通りである。

- 1) 気象庁マグニチュード $M_J \geq 6.5$ 、震源深さ $\leq 60\text{km}$ 、震源距離 $\leq 400\text{km}$
- 2) 福島・田中²⁸⁾の最大加速度の距離減衰式で 2cm/s^2 以上となる距離以内の観測点
- 3) S波初動から観測されており、周期 $0.1 \sim 10$ 秒で信頼できる

用いる観測点を図2に、データの断層最短距離と M_w の分布を図3に示す。断層最短距離の最小値は 20km であり、 M_w の最大値は1994年北海道東方沖地震と2003年十勝沖地震の 8.2 である。

データの処理方法は佐藤²⁾と同じである。すなわち、S波部以降を対象とし、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と分散は水平2成分の算術平均値を用いる。S波部以降の波形は、

表1 本研究で追加した地震の諸元 (M_0 , M_w 以外は気象庁)

発震時			深さ km	M_J	地震名 震源域名	地震規模		
年	月日	時:分				M_0 [dyne・cm]	M_w	文献
2008	5月8日	1:45	50.6	7.0	茨城県沖	$1.97\text{E}+26$	6.8	F-net
2008	7月19日	11:39	31.6	6.9	福島県沖	$2.39\text{E}+26$	6.9	F-net
2008	9月11日	9:20	30.9	7.1	十勝沖	$1.97\text{E}+26$	6.8	F-net
2008	12月20日	19:29	0.0	6.6	関東東方沖	$4.30\text{E}+25$	6.4	F-net
2009	8月11日	05:07	23.3	6.5	駿河湾	$4.60\text{E}+25$	6.4	鈴木・青井(2009)
2009	8月13日	7:48	57.3	6.6	八丈島東方沖	$6.60\text{E}+25$	6.5	F-net
2010	3月14日	17:08	39.8	6.7	福島県沖	$6.83\text{E}+25$	6.5	F-net
2011	3月9日	11:45	8.3	7.3	宮城県沖	$1.34\text{E}+27$	7.4	気象庁(2011)
2011	3月10日	6:23	9.3	6.8	宮城県沖	$5.51\text{E}+25$	6.4	F-net
2011	3月11日	15:08	31.7	7.4	岩手県沖	$1.34\text{E}+27$	7.4	気象庁(2011)
2011	3月11日	15:15	43.2	7.7	茨城県沖	$5.66\text{E}+27$	7.8	F-net
2011	3月11日	20:36	24.0	6.7	岩手県沖	$8.33\text{E}+25$	6.5	F-net
2011	3月13日	10:26	11.2	6.6	茨城県沖	$2.02\text{E}+25$	6.1	F-net
2011	3月14日	15:12	7.0	6.5	宮城県沖	$1.03\text{E}+25$	5.9	F-net
2011	3月22日	16:18	28.0	6.7	茨城県沖	$3.43\text{E}+25$	6.3	F-net
2011	3月22日	18:44	0.4	6.5	三陸沖	$3.01\text{E}+25$	6.3	F-net
2011	3月28日	7:23	31.7	6.5	宮城県沖	$1.66\text{E}+25$	6.1	F-net
2011	3月29日	19:54	13.4	6.6	宮城県沖	$1.99\text{E}+25$	6.1	F-net

イタリックはフィリピン海プレートの地震

図1 用いる地震の震央位置

図2 用いる観測点の位置

図3 データの断層最短距離と M_w の分布

S波部の前3秒間、観測波形の最後の5秒前から5秒間にコサインテーパをつけて切り出している。群遅延時間の平均値と分散は、観測波形の時間刻みを0.02秒とし、前後に0をつけて1310.72秒とした波形から狭帯域のバンド幅を0.049Hzとして求めた。対象周期帯域は、周期0.1～10秒である。

3. 改良経験式のモデル化と解析方法

3.1 加速度応答スペクトルの改良経験式

周期 T の関数である減衰定数 5%の絶対加速度応答スペクトル $S_A(T)$ を、 M_w と断層最距離 $R[\text{km}]$ をパラメータとする(1)式で表現する。

$$\log_{10} S_A(T) = a_1(T) M_w + a_2(T) M_w^2 + be(T)R + bw(T)R - \log_{10}(R^p + d(T)10^{0.5M_w}) + c_0(T) + c_j(T) + cw_j(T) \quad (1)$$

T は、0.1～10.0秒で55ポイントで定義した²⁾。 a_1 、 a_2 、 be 、 bw 、 d 、 p 、 c_0 、 c_j 、 cw_j は回帰係数である。このうち、 a_1 、 a_2 は、震源特性を表現する回帰係数であり、この改良経験式では M_w^2 項を導入している。 be 、 bw は、太平洋プレート、フィリピン海プレートの地震の内部減衰に関する伝播特性を表す係数であり、地震によりいずれかの係数が選択され、選択外の係数は0となる。同様に、 c_j 、 cw_j は、 j 観測点でのサイト係数であり、周期1秒以上における 10^p 、 10^{cw} を地盤増幅率と呼ぶ。関東平野の1都6県にあるTz3.2が1秒以上の観測点において、フィリピン海プレートの地震を対象とする場合は、 cw_j を選択し、それ以外は c_j を選択する。ここで、Tz3.2は、地震調査研究推進本部²⁹⁾の地下構造モデルにおける、S波速度3.2km/sの地震基盤上面から工学的基盤(関東平野ではS波速度0.5km/sの層)上面までの、鉛直伝播するS波の伝播時間であり、地盤の固有周期の1/4に相当する指標である³⁰⁾。したがって、本研究では、関東平野の観測点のうち地盤の固有周期が4秒以上の観測点では、太平洋プレート、フィリピン海プレートの地震でサイト係数が異なると設定したことに相当する。Tz3.2が大きいほど地盤増幅率が大きくなることから³⁰⁾、地盤増幅率が大きい観測点で地盤増幅率の違いを考慮している。なお、Tz3.2が1秒以上の観測点でも、太平洋プレートとフィリピン海プレートの地震の両方が観測されていない観測点では、 c_j が用いられる。 c_0 は、基準としたFKSH19(都路)でのサイト係数である。FKSH19は、周期1秒以上では地震基盤相当であり、地震基盤からの地盤増幅がないとみなすことができる^{2),3)}。なお、 c_j 、 cw_j とも、旧経験式²⁾と同様に、地殻内地震に対して求められているサイト係数と地震数で重みづけ平均したものが最終的に用いられる。理想的には、海溝型地震のサイト係数のみを用いることが望ましいが、フィリピン海プレートの海溝型地震は少なく、特に関東平野の多くの観測点では、紀伊半島沖の地震と駿河湾の地震のみとなる。紀伊半島沖の地震は逆断層型のアウターライズの地震³¹⁾、駿河湾の地震はスラブ内地震²⁷⁾であり、プレート境界地震ではない。これらの地震の特性のみが強調されるのを避けるため、地殻内地震のサイト係数も用いた。なお、旧経験式は、 M_w^2 項が考慮されておらず、内部減衰に関連する伝播特性を表す係数とサイト係数に太平洋プレート、フィリピン海プレートの地震の違いが考慮されていない。

回帰分析手法は二段階回帰分析手法^{7),8)}であり、一段階目で、太平洋プレート、フィリピン海プレートの地震、それぞれのデータから、 be 、 bw を求める。二段階目で、全地震のデータを用いて、その他の回帰係数を求める。この際、関東平野の1都6県にあるTz3.2が1秒以上の観測点では、太平洋プレートの地震、フィリピン海プレートの地震で異なる2つのサイト係数 c_j 、 cw_j を求める。なお、 d は、0から0.02までを0.001刻みの21ポイント、 p は、0.5から1.0までを0.1刻みで6ポイントとした、グリッドサーチにより求める²⁾。

3.2 群遅延時間の平均値と分散の改良経験式

中心周波数 f の関数である群遅延時間の平均値 $\mu_{igr}(f)$ 、分散 $\sigma_{igr}^2(f)$ を $Z(f)$ とし、 $Z(f)$ を $M_0[\text{dyne-cm}]$ と震源距離 $X[\text{km}]$ をパラメータとする(2)式を仮定して回帰分析を行う。

$$Z(f) = A_{igr}(f)M_0^{1/3} + Be(f)X + Bw(f)X + C_j(f) + Cw_j(f) \quad (2)$$

ここで、 A_{igr} 、 Be 、 Bw 、 C_j 、 Cw_j は回帰係数であり、 C 、 Cw をサイト係数と呼ぶ。 Be 、 Bw 、 C_j 、 Cw_j の太

平洋プレート地震とフィリピン海プレート地震に対する扱いは、 be 、 bw 、 c_j 、 cw_j と同じである。なお、旧経験式には、伝播特性とサイト係数に太平洋プレート地震、フィリピン海プレート地震の違いが考慮されていない。

回帰分析手法は二段階回帰分析手法であり、一段階目に非負条件付き最小自乗法³²⁾により太平洋プレート地震、フィリピン海プレート地震、それぞれのデータから、 Be 、 Bw を求める。二段階目で、全地震のデータを用いて、その他の回帰係数を求める。

4. 改良経験式作成結果

4.1 加速度応答スペクトルの改良経験式作成結果

図4には、改良経験式の応答スペクトルの回帰係数を示す。以下では、それぞれの回帰係数について考察を加える。なお、 e は、(1)式の回帰誤差(回帰式の標準偏差)である。

伝播特性(距離減衰特性)に関する be 、 bw 、 d 、 p のうち、内部減衰に関連する be 、 bw についてみると、周期5秒以下では、フィリピン海プレート地震の方が太平洋プレート地震より減衰が大きく、周期5秒以上では同程度であることがわかる。また、 d の形状から、周期5秒以下では震源近傍でのスペクトルレベルの頭打ちはなく、周期5秒以上で Mw に依存して震源近傍で頭打ちがあることがわかるが、旧経験式と比べて、震源近傍での頭打ちの領域は小さい。幾何減衰に関する p は、周期2秒以下では1であり実体波の幾何減衰で説明可能である。周期2秒以上では0.6~1.0の間にあり、表面波の幾何減衰と分散性減衰^{8),33),34)}で解釈できる。図5には、 $Mw8.0$ の場合の地震基盤での旧経験式と改良経験式の擬似速度応答スペクトル pSv の距離減衰特性を示す。周期3秒では、改良経験式の方が旧経験式より距離減衰が大きい。スペクトルレベルは、改良経験式は旧経験式に比べ、断層最短距離50km以下では大きく、50km以上で

図4 改良経験式の S_A の回帰係数

図5 改良経験式と旧経験式の $Mw8.0$ の場合の地震基盤での pSv

図6 周期3秒での観測 pSv の距離減衰特性

は小さくなっている。遠方では、フィリピン海プレート地震の方が太平洋プレート地震よりスペクトルレベルが小さい。周期5秒では、旧経験式と改良経験式の距離減衰特性の違いは小さい。周期3秒で、旧経験式と改良経験式の距離減衰特性が異なるが、これは、主に距離による頭打ちに関する d の違いである。周期3秒での b は、旧経験式で-0.001722、改良経験式の太平洋プレートで-0.001197、フィリピン海プレートで-0.001783であるので、旧経験式の b は改良経験式の太平洋プレートとフィリピン海プレートの b の間にある。一方、周期3秒での d は旧経験式で0.0011、改良経験式で0である。このような回帰係数の違いの原因を考察するため、図6には、2009年駿河湾の地震と2003年十勝沖地震の周期3秒での擬似速度応答スペクトルの距離減衰特性を示す。2009年駿河湾の地震は、改良経験式で追加された地震であるが、震源近傍での距離減衰が小さい。図3でわかるように、断層最短距離50km以下のデータがほとんどないため、この追加された地震の寄与が震源近傍で大きくなっていると考えられる。太平洋プレートの地震では、2003年十勝沖地震で最も断層最短距離に近いデータが含まれているが、最短でも50km弱である。係数 d は全データから推定されるため、改良経験式では旧経験式より震源近傍での頭打ちが小さくなり、距離減衰特性に違いが生じたものと考えられる。

マグニチュード係数 a_1 、 a_2 を反映した震源特性の特徴をみるために、図7には、旧経験式と改良経験式の断層最短距離100kmにおける地震基盤での擬似速度応答スペクトル pSv を示す。 M_w 7.0、7.5、8.0、8.5の場合である。改良経験式の方が、長周期帯域での M_w の違いによるスペクトルの違いが大きくなっている。この特徴を考察するために、図8には、改良経験式作成に用いた地震のうち、スペクトルインバージョンにより短周期レベル A が推定されている31個の地震^{(17), (20), (35), (36), (37)}の M_0 [dyne・cm]と A [dyne・cm/s²]の関係を示す。アウターライズの地震である紀伊半島沖の地震群はスラブ内地震に分類している。既往の研究^{(例えば17), (38))}でも指摘されているように、スラブ内地震の方がプレート境界地震より A が大きい傾向がある。これらの31個の地震のデータを用いて A が $M_0^{1/3}$ に比例するとした場合と、 M_0 のべき乗項も推定した場合で回帰式を求めた結果、それぞれ、(3)式、(4)式が得られた。

$$\log_{10} A = (1/3) \log_{10} M_0 + 17.66 \quad (3)$$

$$\log_{10} A = 0.42 \log_{10} M_0 + 15.48 \quad (4)$$

(4)式は A が $M_0^{0.42}$ に比例するため、図8に示したように、 M_0 が大きいと(3)式より A が大きくなる。 ω^2 モデル

図7 改良経験式と旧経験式の断層最短距離100kmにおける地震基盤での pSv

図8 改良経験式で用いた地震の M_0 と A の関係と、佐藤⁽⁴⁰⁾の太平洋プレートのプレート境界地震の M_0 と A の関係

図9 (3)式と(4)式を用いた場合の地震基盤での ω^2 モデルに基づく加速度震源スペクトルの比較

ルを仮定すると、(3)式はBrune³⁹⁾の応力降下量が一定、(4)式は M_0 が大きいほどBruneの応力降下量が大きくなることを意味する。(4)式のような関係は、片岡・他¹⁷⁾により、プレート境界地震、スラブ内地震、地殻内地震でも指摘されている。(3)式と、佐藤⁴⁰⁾が太平洋プレートのプレート境界地震に対して A が $M_0^{1/3}$ に比例するとして求めた回帰式との違いは小さい。これは、改良経験式では、 $M_w 5.9 \sim 8.2$ のプレート境界地震とスラブ内地震の両方を用いているが、平均的な短周期レベルは $M_w 6.6 \sim 8.2$ の太平洋プレートのプレート境界地震⁴⁰⁾と同レベルになっていることを意味している。図9には、(3)式と(4)式を用いた場合の地震基盤での ω^2 モデルに基づく加速度震源スペクトルの比較を示す。(4)式を用いた方が長周期帯域で

図10 3つの平野における改良経験式の周期5秒での地盤増幅率 10° 分布と観測点位置

図11 10° と 10^{CW} の関係

図12 $T_{z3.2}$ と地盤増幅率の関係

△:本研究で追加した観測点
○:佐藤・他²⁾で用いた観測点
いずれも 10^{CW} が求められている観測点

図13 周期8秒での 10° と 10^{CW}

の M_w の違いによるスペクトルの違いが大きい。このように、 M_0 が大きいほどBrune³⁹⁾の応力降下量が大きくなる特徴が、回帰係数 a_1 と a_2 に反映されているものと考えられる。

図10には、関東平野、大阪平野、濃尾平野での周期5秒での地盤増幅率 10° の分布と観測点位置を示す。地盤増幅率分布は、観測点での地盤増幅率を図化の際に空間補間したものである。改良経験式では、佐藤・他²⁾に比べ図中の△で示した観測点が増えており、特に大阪平野の神戸付近で密になっている。

次に、図11には、地盤増幅率 10^{cw} が求められている関東平野の観測点での 10° と 10^{cw} を周期3秒、5秒、8秒で比較した結果を示す。 10° が大きい観測点では、 10^{cw} が 10° より大きい傾向がみられる。特に周期8秒では、この傾向が顕著であり、 10° が10倍程度の観測点では、 10^{cw} が20倍前後に大きくなっている。図12には、関東平野の1都6県の観測点での $Tz3.2$ と地盤増幅率の関係を示す。旧経験式の地盤増幅率に対しては、 $Tz3.2$ が0～3.3秒のデータに基づき、 $Tz3.2=1$ 秒を折れ曲がり点としたバイリニア型の回帰式を作成しているが³⁰⁾、改良経験式の地盤増幅率にも同様の関係がみられる。ただし、 $Tz3.2$ が3秒前後の観測点では、周期5秒と8秒で 10^{cw} が 10° より顕著に大きい。バイリニア型の回帰式は、観測点直下の一次元地下構造を用いたメディアムレスポンスを用いて定性的に解釈できることを指摘しており³⁰⁾、 10^{cw} がこの関係からずれるのは、三次元地下構造の影響が大きいためと考えられる。図13には、 10^{cw} が求められている観測点における周期8秒での 10^{cw} 分布と 10° 分布の比較を示す。 10^{cw} では 10° と比較して、地盤増幅率が大きい地域が広がっていることがわかる。

図4のeは、旧経験式のeより大きい。これは、旧経験式では、用いられている地震が1個のみの観測点が多く、この場合、この観測点での標準偏差が0となり、eが過小評価されていたためである。

4.2 群遅延時間の平均値と分散の改良経験式作成結果

図14、図15には、それぞれ、改良経験式、旧経験式の群遅延時間の平均値と分散の回帰係数を示す。平均的な伝播速度を意味する群遅延時間の平均値の $1/B$ は、改良経験式では太平洋プレートとフィリピン海プレートの地震でやや異なるが、旧経験式の $1/B$ はこの中間の値であり、リーズナブルな結果といえる。一方、群遅延時間の分散の A_{igr} も B も改良経験式の方が大きい。すなわち、改良経験式の方が旧経験式よ

図14 改良経験式の群遅延時間の平均値 μ_{tgr} と分散 σ_{tgr}^2 の回帰係数

図15 旧経験式の群遅延時間の平均値 μ_{tgr} と分散 σ_{tgr}^2 の回帰係数

り、規模が大きいほど、距離が遠いほど、継続時間が長くなることを意味する。これは、改良経験式では、気象庁95型の観測点と新宿・工学院大学の観測点の記録が追加されたが、これらの観測点での記録収録時間が、K-NETやKiK-netより長いためと考えられる。それでも、長周期地震動の継続時間からみると、十分とはいえない記録も多く、この点については検討の余地が残されている。

図16には、関東平野の観測点における $Tz3.2$ と改良経験式の群遅延時間の平均値 μ_{tgr} と標準偏差 σ_{tgr} のサイト係数の関係を示す。群遅延時間の平均値、標準偏差とも $Tz3.2$ が3秒程度の観測点で、 Cw がCより大きい特徴がみられる。特に、周期8秒でこの傾向が顕著であり、地盤増幅率の 10^{Cw} と 10^C の特徴と定性的に同じである。すなわち、関東平野では、地盤の固有周期の長い観測点では、長周期帯域では、フィリピン海プレートの地震の方が太平洋プレートの地震より地盤増幅率が大きく、継続時間が長いことが改良経験式では表現されているといえる。なお、回帰誤差Eが、改良経験式の方が旧経験式と比べて大きい原因は、応答スペクトルの回帰誤差eと同様の原因である。

5. 東北地方太平洋沖地震と前震及び最大余震の長周期地震動シミュレーション

旧経験式と改良経験式を用いて、3月9日の前震と3月11日の最大余震と東北地方太平洋沖地震の長周期地震動シミュレーションを行う。時刻歴波形は、群遅延時間の平均と分散の経験式に基づき位相スペクトルを作成し、経験式に基づく加速度応答スペクトルをターゲットとして、これにフィッティングするように作成する²⁾。

5.1 震源モデルの設定

前震については、気象庁²⁵⁾による震源モデルの M_0 と巨視的断層面を用いた。最大余震については、F-net

図 16 $Tz3.2$ と改良経験式の群遅延時間の平均値 μ_{tgr} と標準偏差 σ_{tgr} のサイト係数の関係

の M_0 、走向、傾斜角を用いて断層面を設定した。断層面積は、静的応力降下量 $3\text{MPa}^{41),42),43)}$ を仮定して計算し、正方形断層を仮定して断層長さとし幅を決めた。破壊開始点は、気象庁の震源位置とし、断層面の中心になるように断層面をおいた。表2に、これら2つの地震の震源パラメータをまとめて示す。なお、ここで用いた静的応力降下量の 3MPa という値は、世界の浅い地震の平均的値であり^{41),42)}、プレート境界地震に限ってもほぼこの値前後に分布している⁴²⁾。中央防災会議⁴³⁾の東海・東南海・南海地震の3連動地震の震源モデルでも 3MPa が使われている。

本震の震源モデルは、経験的グリーン関数法に基づく佐藤²⁰⁾の震源モデルと地震調査研究推進本部²²⁾の強震動予測レシピに基づき設定した。表3に設定した震源パラメータを示す。図17には、設定した3つの巨視的断層面と佐藤²⁰⁾の4つの強震動生成領域・破壊開始点を示す。また、観測波とシミュレーション波の比較を例示する6つの観測点位置と、改良経験式の周期3秒での地盤増幅率 10° の分布も示している。工学的には、地震動が大きくなる地点でのシミュレーション結果が重要であるため、周期1~10秒で地盤増幅率が比較的大きく、東北地方太平洋沖地震の長周期地震動も大きい観測点を選択した。

強震動予測レシピ²²⁾では、巨視的断層のパラメータを先に設定し、その後アスペリティのパラメータを設定するようになっている。本研究では、強震動予測レシピ²²⁾で使われている式を用いて、強震動生成領域のパラメータからカスケード的に巨視的断層のパラメータを設定する。強震動予測レシピ²²⁾には、地殻内地震については、「1つのセグメントに1つあるいは2つのアスペリティを設定する」と記述されているが、海溝型については、「アスペリティの個数は、アスペリティの位置が推定されている場合には、結果的に想定する震源域に含まれるアスペリティの数に相当する。」と記述されている。そこで、佐藤²⁰⁾の震源モデルの第3と第4強震動生成領域(図17の青と緑の矩形破線)は、ほぼ同じ時間に破壊している

表 2 前震と最大余震の震源パラメータ

パラメータ	単位	3月9日の前震	3月11日の最大余震
M_0	dyne・cm	$1.34\text{E}+27$	$5.66\text{E}+27$
M_w		7.4	7.8
面積	km^2	4900.0	5960.0
長さ	km	70.0	77.2
幅	km	70.0	77.2
走向	°	187.0	209.0
傾斜角	°	11.0	31.0

表 3 本震の震源パラメータ
(改良経験式ではカッコ内を使用)

	パラメータ	単位	本震
全体	M_0	dyne・cm	$2.97\text{E}+29$ ($1.20\text{E}+29$)
	M_w		8.9 (8.7)
	走向	°	200.0
	傾斜角	°	15.0
断層1	M_0	dyne・cm	$5.42\text{E}+28$
	M_w		8.4
	面積	km^2	26844.8
	長さ	km	163.8
	幅	km	163.8
断層2	M_0	dyne・cm	$2.27\text{E}+29$ ($5.01\text{E}+28$)
	M_w		8.8 (8.4)
	面積	km^2	69795.0
	長さ	km	349.0
	幅	km	200.0
断層3	M_0	dyne・cm	$1.58\text{E}+28$
	M_w		8.1
	面積	km^2	11815.5
	長さ	km	108.7
	幅	km	108.7

図 17 設定した 3 つの巨視的断層面(矩形実線)と佐藤²⁰⁾の 4 つの強震動生成領域(矩形破線)・破壊開始点(星印)と観測波とシミュレーション波の比較を例示する観測点位置(三角印)及び周期 3 秒での改良経験式の地盤増幅率 10° の分布

ことから、1つの巨視的断層に2つの強震動生成領域があると仮定した。また、第1強震動生成領域(図17の赤の矩形破線)、第2強震動生成領域(図17の黒の矩形破線)に対しては、それぞれ1つずつの巨視的断層を仮定した。3つの巨視的断層の破壊開始点と破壊開始時間差は、佐藤²⁰⁾の強震動生成領域1~3の破壊開始点、破壊開始時間差を用いて、3連動震源モデルを設定した。本研究では、予測ではなくシミュレーションを目的としているため、この地震以前に考えられていたセグメントの情報は用いない。

各断層のパラメータの設定方法は以下の通りである。佐藤²⁰⁾の震源モデルには背景領域がないため、背景領域は考慮しない。各断層の巨視的断層の面積 S は、静的応力降下量 $\Delta\sigma$ を 3MPa ^{(41),(42),(43)}と設定して、強震動生成領域の面積 S_a と応力降下量 $\Delta\sigma_a$ を用いて、次式により設定する⁽⁴⁴⁾。

$$\Delta\sigma S = \Delta\sigma_a S_a \quad (5)$$

断層3では、右辺は2つの強震動生成領域の $\Delta\sigma_a S_a$ の和となる。

図 18 前震(上段)と最大余震(下段)の観測とシミュレーションの周期 3 秒での擬似速度応答スペクトル分布[cm/s]

断層は正方形を基本とした。ただし、長周期波形を用いた震源インバージョンで用いられている断層幅が200km程度である(例えば15),45)ことから、巨視的断層の幅の上限は200kmに設定した。巨視的断層の位置は、長さ方向は強震動生成領域が中心となるように設定し、幅方向は、深さ60kmとなる位置まで陸側に接するように設定した。この際の走向、傾斜角は強震動生成領域と同じ、200°、15°とし、巨視的断層面上に強震動生成領域が載るように設定した。

巨視的断層の地震モーメント M_0 は、(6)式により計算する⁴⁶⁾。

$$M_0 = 16 / (7\pi^{3/2}) \Delta\sigma^{3/2} \quad (6)$$

経験式のデータの最大 M_w は8.2であることから、 M_w 8.2以上では外挿となる。 M_w^2 項が考慮されていても、 M_w 8.2以上での拘束がない。そのため、上述のように震源パラメータを設定した場合、断層2の M_w は8.8となり、改良経験式でも長周期帯域でスペクトルを過大評価する結果が得られた。そこで、応答スペクトルの改良経験式に M_w の頭打ちを8.2~8.8まで0.1刻みで与えてシミュレーションを実施した。

図 19 本震の観測とシミュレーションの周期 3 秒と 5 秒での擬似速度応答スペクトル分布[cm/s]

その結果、 $M_w8.4$ 程度で、本震の長周期地震動がほぼ説明できることから、改良経験式では断層2の M_w を8.4とした。司・他⁴⁷⁾は、東北地方太平洋沖地震($M_w9.0$)、2003年十勝沖地震($M_w8.3$)、2001年ペルー地震($M_w8.4$)、2010年チリ地震($M_w8.8$)の記録と司・翠川⁴⁸⁾の最大速度の距離減衰式を用いて、 $M_w8.3$ 程度で頭打ちをすることを示している。司・他⁴⁷⁾では、1枚の巨視的断層面を用いており、最大速度が対象であるが、本研究で推定した $M_w8.4$ はこの値に近い。

5.2 長周期地震動シミュレーション

図18には、前震と最大余震の周期3秒での擬似速度応答スペクトル分布を、観測と、改良経験式、旧経験式に基づくシミュレーションで比較した結果を示す。図中の丸印が、観測記録が得られているK-NET、KiK-net観測点である。いずれの図も、観測点での値を図化の際に空間補間した結果である。どちらの経験式もほぼ観測を再現しているが、旧経験式はやや過大評価である。

図19には、東北地方太平洋沖地震の周期3秒と周期5秒での擬似速度応答スペクトル分布を示す。前震と最大余震の結果と同様に、旧経験式ではやや過大評価であるのに対して、改良経験式は観測をほぼ再現している。旧経験式と改良経験式によるシミュレーション結果の違いをわかりやすくするため、図20には、周期3秒での観測に対するシミュレーションの擬似速度応答スペクトル比の分布を示す。周期3秒での回帰誤差 e から算出されるばらつきは、 $1/1.5 \sim 1.5$ 倍であるが、改良経験式ではほぼこのばらつきの範囲内にあるのに対して、旧経験式は平均的に過大評価となっていることが確認できる。

図17に示した6つの観測点における観測と改良経験式に基づく擬似速度応答スペクトル及び周期0.1～10秒の速度フィルター波の比較を図21、図22に示す。地盤の非線形性の影響が小さいと考えられる4つの観測点を図21に、影響が大きいと考えられる2つの観測点を図22に示している。

地盤の非線形性の影響が大きいと考えられる観測点では、以下のようにして、地盤の非線形性の影響を考慮したシミュレーションも行った。気象庁の震度発表観測点で震度7は、MYG004(築館)のみであったが、TCGH16(芳賀)も震度7相当である。TCGH16での水平2成分の最大加速度は、約 1200cm/s^2 、 800cm/s^2 であり、地盤の非線形性の影響があるものと考えられる。MYG006でも水平2成分の最大加速度は、 440cm/s^2 、 570cm/s^2 であり、地盤の非線形性の影響が指摘されている⁴⁹⁾。そこで、TCGH16では、本震の地表の水平成分の加速度応答スペクトルを地中-112mの水平成分の加速度応答スペクトルで除した H/H を求め、これを改良経験式作成に用いたデータの H/H の平均値で除した値で、シミュレーション波の加速度応答スペクトルを補正した。そして、シミュレーション波の位相スペクトルを用いて、地盤の非線形

図20 本震の観測に対するとシミュレーションの周期3秒での擬似速度応答スペクトル比分布

性を考慮したシミュレーション波を作成した。本震の地表の水平成分の加速度応答スペクトルを地表の上下成分の加速度応答スペクトルで除したH/Vでも、同様にして、地盤の非線形性を考慮したシミュレーション波を作成した。地表の観測点のみであるMYG006ではH/Vを用いて、地盤の非線形性を考慮したシミュレーション波を作成した。ただし、MYG006の観測波は、断層1と断層2から生成される2つの波群に分かれている。加速度が大きいのは、断層2から生成される波群であるため、断層2に対するターゲ

図 21 地盤の非線形性の影響がないと考えられる観測点における本震の観測と改良経験式に基づくシミュレーションの擬似速度応答スペクトル pS_v と速度波形

ットスペクトルをH/Vで補正することにより、地盤の非線形性を考慮したシミュレーション波を作成した。図23には、補正に用いたTCGH16での本震と本震以外のH/H、H/V、MYG006での本震と本震以外のH/Hを示す。本震では、ピークが長周期化しており、これは主に地盤の非線形性の影響と考えられる。

図21をみると、シミュレーション波は観測波をほぼ再現している。ただし、周期10秒付近で過大評価

図 22 地盤の非線形性の影響があると考えられる観測点における本震の観測と改良経験式に基づくシミュレーションの擬似速度応答スペクトル pS_v と速度波形

図 23 補正に用いた本震と本震以外の H/V 及び H/H (GL0/GL-112m)

図 24 最大余震の観測と改良経験式に基づくシミュレーションの擬似速度応答スペクトル pS_v

図 25 TKY018 での旧経験式と改良経験式の地盤増幅率の比較

の傾向がある。図22に示した、地盤の非線形性の影響があると考えられる観測点では、H/VやH/Hで補正することにより地盤の非線形を考慮したシミュレーション波のスペクトルは、観測をほぼ再現できるようになっている。波形の形状は、必ずしも再現性がよくないが、これは、位相スペクトルに、地盤非線形性を考慮していないためである可能性がある。

周期10秒付近で過大評価という結果について、考察を行う。図24には、SIT003とTKY018での最大余震の観測とシミュレーションの擬似速度応答スペクトルの比較を示す。最大余震の観測スペクトルと図21の本震の観測スペクトルと比べると、周期10秒付近では、両地点とも、20cm/s程度の同じレベルになっている。最大余震からの断層最短距離と本震の断層3からの断層最短距離の差は小さく、最大余震の M_w は7.8、断層3の M_w は8.1である。したがって、周期10秒付近で本震と最大余震のスペクトルレベルが同程度であるのは、本震は最大余震に比べて、地震規模のわりに周期10秒付近の長周期地震動の励起が小さかったものと考えられる。

最後に、図25には、TKY018での旧経験式と改良経験式の地盤増幅率の比較を示す。改良経験式のフィリピン海プレートの地震の増幅率 10^{cm} は太平洋プレートの地震の増幅率 10^{cm} の2倍以上大きく、旧経験式の地盤増幅率はこれらの中間にある。図4、図5で示したように、同じ規模で同じ距離の場合には、周期5秒以上では、地震基盤におけるスペクトルレベルが太平洋プレートの地震とフィリピン海プレートの地震でほぼ同じであり、周期2秒でも2倍の違いはない。したがって、TKY018では、フィリピン海プレートの地震の方が太平洋プレートの地震よりスペクトルが大きくなる。したがって、南海トラフ沿いの海溝型地震に対する長周期地震動予測では、このような特徴が反映されることになる。

6. まとめ

筆者らは、先に、超高層建物、免震建物等の設計用長周期地震動策定に向けて、減衰定数5%の加速度応答スペクトルと群遅延時間の平均値・分散の長周期地震動の経験式^{2),3)}を作成している。本研究では、この旧経験式を改良し、この改良経験式に基づき、2011年東北地方太平洋沖地震、前震、最大余震の長周期地震動シミュレーションを行った。なお、経験式は周期0.1～10秒の広帯域で適用可能であるが、主なターゲットは超高層建物、免震建物の固有周期に対応する周期1～10秒の長周期地震動である。以下に、本研究の結論をまとめる。

1) 改良経験式について

・データセットの改良点は以下の通りである。

- ① 旧経験式作成後に発生した、2007年8月から2011年5月までの東北地方太平洋沖地震を除く19個の海溝型地震を加え、合計52個の海溝型地震の記録を用いた。
- ② 2009年駿河湾の地震以前の地震については、関東平野1都6県、濃尾平野、大阪平野の気象庁95型

の観測点、及び新宿の工学院大学の記録を追加した。

・経験式の改良点は以下の通りである。

③ 応答スペクトルの経験式では、震源特性として Mw^2 項を導入した。

④ 太平洋プレートの地震とフィリピン海プレートの地震の伝播特性の違いを考慮した。

⑤ 関東平野の観測点のうち、 $Tz3.2$ が1秒以上、すなわち、地震基盤から工学的基盤までの地盤の卓越周期が4秒以上の観測点では、太平洋プレートの地震とフィリピン海プレートの地震の応答スペクトルの地盤増幅率および群遅延時間の平均値・分散のサイト係数の違いを考慮した。

①により、数が少なかったフィリピン海プレートの地震として2009年駿河湾の地震が追加されるとともに、多くの地震の記録が追加された。また、②により、3つの平野では観測点が密となるとともに、記録の継続時間の長い気象庁95型記録が追加されたため、改良経験式は旧経験式に比べ、群遅延時間の分散の震源特性、伝播特性依存性が大きくなり、 Mw が大きいほど、距離が遠いほど継続時間が長くなる特徴が、より反映されるようになった。

③により、 Mw が大きいほどBrune³⁹⁾の応力降下量が大きいというデータの特徴が反映された経験式となった。また、④、⑤により、太平洋プレートの地震とフィリピン海プレートの地震による伝播特性の違い、サイト特性の違いが反映された経験式となった。特に、関東平野の堆積層が厚い観測点では、フィリピン海プレートの地震の方が、地盤増幅率が大きく、継続時間が長いという特徴が反映されている。

2) 東北地方太平洋沖地震及び前震・最大余震の長周期地震動シミュレーションについて

本震については、経験的グリーン関数法に基づき推定されている強震動生成領域²⁰⁾から、強震動予測レシビ²²⁾に基づき、3つの巨視的断層からなる3連動震源モデルを作成した。この震源モデルでは、断層1、2、3の Mw が8.4、8.8、8.1となり、2つの断層で経験式のデータセットの最大 Mw である8.2の外挿となる。そこで、シミュレーションに基づき改良経験式に $Mw8.4$ での頭打ちを導入した。

東北地方太平洋沖地震及び前震($Mw7.4$)、最大余震($Mw7.8$)とも、旧経験式では応答スペクトルが過大評価の傾向があったが、改良経験式では観測スペクトルをほぼ再現できることを示した。なお、改良経験式でも本震の周期10秒付近では過大評価であったが、本震の断層3($Mw8.1$)と最大余震と断層最短距離が同じである関東平野の観測点では、周期10秒付近で観測スペクトルがほぼ同じであることから、これは本震固有の特徴と考えられる。

以上のように、本研究では、改良経験式により、東北地方太平洋沖地震及び前震、最大余震の長周期地震動がほぼ再現できることを示した。一方、南海トラフ沿いの巨大海溝型地震については、2011年3月末に、内閣府⁵⁰⁾により、以前の中央防災会議⁴³⁾の $Mw8.7$ の東海・東南海・南海地震と比べ、震源域が約2倍で $Mw9.0$ の震源域と震源パラメータが設定され、統計的グリーン関数法と経験式に基づく震度分布が計算されている。したがって、今後、改良経験式の南海トラフ沿いの地震に対する適用性の検証を行うとともに、内閣府⁵⁰⁾の新しい震源モデルと改良経験式に基づき、長周期地震動予測を行う予定である。また、改良経験式もデータセットに距離が近いデータが少ないため、関東地震などのフィリピン海プレートのプレート境界地震の震源近傍への適用性については、今後検討していく必要がある。

謝辞

本研究では、防災科学技術研究所のK-NET、KiK-net強震記録、F-netのメカニズム解、気象庁の87型強震記録、95型強震記録、震源情報、久田嘉章教授よりご提供頂きました新宿・工学院大学1階の強震記録を使用致しました。一部の図の作成には、GMT⁵¹⁾を使用しました。また、本研究は、国土交通省の平成23年度建築基準整備促進事業での検討結果であり、長周期地震動・応答WGの委員各位には、貴重なご意見を頂きました。記して感謝致します。

参考文献

- 1) Hisada, Y., T. Yamashita, M. Murakami, T. Kubo, J. Shindo, K. Aizawa, and T. Arata : Seismic response and damage of high-rise buildings in Tokyo, Japan, during the great east Japan earthquake, Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the Giant Earthquake, 2012, pp.1110-1119.
- 2) 佐藤智美、大川出、西川孝夫、佐藤俊明、関松太郎：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、2010年、pp.521-530.
- 3) 佐藤智美、大川出、西川孝夫、佐藤 俊明、関松太郎、久田嘉章：経験式に基づく海溝型地震に対する長周期時刻歴波形の作成と検証、第13回日本地震工学シンポジウム、2010年、OS6-Sat-PM(OS6)-5、pp.2632-2639.
- 4) 佐藤智美、大川出、西川孝夫、佐藤俊明、関松太郎：経験的手法に基づく巨大海溝型地震による長周期時刻歴波形の予測、第37回地盤震動シンポジウム、2009年、pp.23-34.
- 5) 佐藤智美：経験式に基づく 2011 年東北地方太平洋沖地震の長周期地震動の予測、土木学会全国大会第 66 回年次学術講演会、I-483、2011 年、pp.965-966.
- 6) 佐藤智美、大川出、西川孝夫、佐藤俊明：経験式に基づく 2011 年東北地方太平洋沖地震の長周期地震動シミュレーション、日本地震工学会・大会－2011 梗概集、2011 年、pp.430-431.
- 7) Joyner, W. B. and D. M. Boore : Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California earthquake, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.71, 1981, pp.2011-2038.
- 8) Joyner, W. B. and D. M. Boore : Measurement, characterization, and prediction of strong ground motion, in Earthquake Engineering and Soil Dynamics II, Proc. Am. Soc. Civil Eng. Geotech. Eng. Specialty Conf., June 27-30, 1988, pp.1-60.
- 9) 福島美光、翠川三郎：硬質岩盤における観測記録に基づく M_w^2 項を考慮した地震動応答スペクトルの予測式、日本建築学会構造系論文報告集、第447号、1993年、pp.39-49.
- 10) 吉田治雄、小林喜久二：堆積層による長周期地震動の励起特性と入射角の関係、第12回日本地震工学シンポジウム、2008年、pp.1450-1453.
- 11) 増井大輔、翠川三郎：地震観測記録から抽出した地盤増幅率とみかけ入射角との関係、土木学会論文集A、Vol.63、No.3、2007年、pp.552-560.
- 12) Ishii, T. : A study of response duration time spectra of earthquake motions in Tokyo, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 2008, Paper ID 02-0020.
- 13) 座間信作：石油タンクのスロッシングに係るやや長周期地震動の設計用スペクトル、第12回日本地震工学シンポジウム、2006年、pp.1550-1553.
- 14) 気象庁：「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」について(第28報)(オンライン)、<http://www.jma.go.jp/jma/press/1103/25b/kaisetsu201103251730.pdf>、2011.
- 15) Koper, K.D., A.R., Hutko, T. Lay, C. J. Ammon and H. Kanamori : Frequency-dependent rupture process of the 11 March 2011 M_w 9.0 Tohoku earthquake: Comparison of short-period P wave backprojection images and broadband seismic rupture models, Earth Planets Space, Vol.63, 2011, pp.599-602.
- 16) 佐藤俊明、宮腰淳一、佐藤智美、渡辺孝英、植竹富一、田中英朗：気象庁87型電磁式強震計記録の応答スペクトルの統計解析による各地気象台のやや長周期帯域(周期1～10秒)の揺れやすさ係数について、第9回日本地震工学シンポジウム、1994年、pp.607-612.
- 17) 片岡正次郎、松本俊輔、日下部毅明、遠山信彦：やや長周期地震動の距離減衰式と全国の地点補正倍率、土木学会論文集A、Vol.64、No.4、2008年、pp.721-738.
- 18) 湯沢豊、工藤一嘉：長周期帯域(1-15秒)における基盤地震動の経験的予測式、日本建築学会構造系論文集、第661号、2011年、pp.519-526.
- 19) 湯沢豊、工藤一嘉：長周期(1-15秒)地震動の全国揺れ易さ分布、日本地震工学会論文集、第11巻、第3号、2011年、pp.21-39.
- 20) 佐藤智美：経験的グリーン関数法に基づく2011年東北地方太平洋沖地震の震源モデル - プレート境界地震の短周期レベルに着目して -、日本建築学会構造系論文集、第675号、2012年、pp.695-704.
- 21) 入倉孝次郎：強震動予測レシピー大地震による強震動の予測手法一、京都大学防災研究所年報、47A、2004年、pp.25-45.
- 22) 地震調査研究推進本部：全国を概観した地震動予測地図2008年度版 付録3.震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピー」) 平成20年4月11日改訂(オンライン)、http://www.jishin.go.jp/main/chousa/08_yosokuchizu/a3.pdf、2009.

- 23) 国土交通省：「超高層建築物等における長周期地震動への対策試案について」に関するご意見募集について(オンライン)、<http://www.mlit.go.jp/report/press/house05_hh_000218.html>、2011.
- 24) 大川出、斉藤大樹、佐藤智美、佐藤俊明、北村春幸、鳥井信吾、辻泰一、北村佳久、藤田聡、関谷裕二、関松太郎：長周期地震動に対する超高層建築物等の安全対策に関する検討、建築研究資料、No.127号、2010年、(オンライン)、<<http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/publications/data/127/index.html>>
- 25) 気象庁：3月9日 三陸沖の地震－遠地実体波および近地強震波形による震源過程解析（暫定）－(オンライン)、<<http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/sourceprocess/event/20110309farandnear.pdf>>、2011.
- 26) 気象庁：3月11日 岩手県沖の地震－近地強震波形による震源過程解析（暫定）－(オンライン)、<<http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/sourceprocess/event/201103111508near.pdf>>、2011.
- 27) 鈴木亘、青井真：近地強震記録による平成21年(2009年)8月11日駿河湾の地震の震源インバージョン(オンライン)、<<http://www.hinet.bosai.go.jp/topics/suruga-bay090811/>>、2009.
- 28) 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、日本地震学会講演予稿集、No.2、1992年、p.116.
- 29) 地震調査研究推進本部：「長周期地震動予測地図」2009年試作版(オンライン)、<http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09_choshuki/index.htm>、2009.
- 30) 佐藤智美、大川出、西川孝夫、佐藤俊明：長周期応答スペクトルの地盤増幅率の経験的予測式とその理論的解釈、日本建築学会構造系論文集、第669号、2011年、pp.1905-1914.
- 31) Seno, T. : The September 5, 2004 off the Kii Peninsula earthquakes as a composition of bending and collision, Earth Planets Space, Vol.57, 2005, pp.327-332.
- 32) Lawson, C. L. and D. J. Hanson : Solving Least squares problems, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1974.
- 33) Ewing, W. M., W. S. Jardetzky and F. Press : Elastic waves in layered media, McGraw-hill Book Company, 1957, pp.1-358.
- 34) 佐藤俊明、佐藤智美、宮腰淳一、渡辺孝英、植竹富一、田中英朗：表面波が卓越する周期約2～20秒のやや長周期地震動の距離減衰特性に関する基礎的研究、距離減衰式の整理と理論地震動を用いた検討、日本建築学会構造系論文集、第463号、1994年、pp.39-49.
- 35) Satoh, T : High-stress drop interplate and intraplate earthquakes occurred off shore of Miyagi prefecture, Japan, Third International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Grenoble, France, 30 August - 1 September 2006, Paper Number 015, pp.689-698.
- 36) 佐藤智美：2009年駿河湾の地震の短周期レベルと距離減衰特性、日本地震学会大会、2009年、p.161.
- 37) 佐藤智美：スペクトルインバージョンと経験的グリーン関数法に基づく2009年駿河湾の地震の震源モデルの推定、日本建築学会構造系論文集、第658号、2010年、pp.2153-2162.
- 38) 笹谷努、森川信之、前田宜浩：スラブ内地震の震源特性、北海道大学地球物理学研究報告、第69号、2006年、pp.123-134.
- 39) Brune, J. N. : Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, J. Geophys. Res., Vol.75, pp.4997-5009, 1970.
- 40) 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、2010年、pp.923-932.
- 41) Kanamori, H. and D. L. Anderson : Theoretical basis of some empirical relations in seismology, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.65, 1975, pp.1073-1095.
- 42) Kanamori, H. and E. E. Brodsky : The physics of earthquakes, Rep. Prog. Phys. Vol.67, 2004, pp.1429-1496.
- 43) 中央防災会議 東南海・南海地震等に関する専門調査会：第16回、資料3図表集、pp.18-20. (オンライン)、<<http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai>>、2003.
- 44) Madariaga, R. : On the relation between seismic moment and stress drop in the presence of stress and strength heterogeneity, J. Geophys. Res., Vol.84, 1979, pp.2243-2250.
- 45) 鈴木亘、青井真、関口春子：近地強震記録を用いた2011年03月11日東北地方太平洋沖地震の震源インバージョン解析(2011/08/12改訂版) (オンライン)、<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/topics/TohokuTaiheiyo_20110311/inversion/>、2011.

- 46) Eshelby, J. D. : The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems, Proceedings of the Royal Society, A241, 1957, pp.376-396.
- 47) 司宏俊、瀨瀬一起、三宅弘恵、翠川三郎：超巨大地震への地震動最大値距離減衰式の適用について-2011年東北地震と海外の超巨大地震の観測データに基づく検討-、日本地震学会講演予稿集、2011年、p.63
- 48) 司宏俊、翠川三郎：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、第523号、1999年、pp.63-70.
- 49) Nagashima, F., H. Kawase, S. Matsushima, F. J. Sanchez-Sesma, T. Hayakawa, T. Satoh and M. Oshima : Application of the H/V spectral ratios for earthquake ground motions and microtremors at K-NET sites in Tohoku Region, Japan to delineated soil nonlinearity during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the Giant Earthquake, 2012, pp.361-370.
- 50) 内閣府 南海トラフの巨大地震モデル検討会：南海トラフの巨大地震による震度分布・津波高について(第1次報告)(オンライン)、< www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai_trough/1st_report.pdf>、2012.
- 51) Wessel, P. and W.H.F. Smith: New, improved version of Generic Mapping Tools released, EOS, AGU, 1998.

(受理：2012年4月1日)
(掲載決定：2012年8月24日)

Revisions of Empirical Ground Motion Models and the Simulations of Long-period Strong Motions of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake

SATO H Toshimi¹⁾, OKAWA Izuru²⁾, NISHIKAWA Takao³⁾, and SATO Toshiaki⁴⁾

1) Member, Principal Researcher, Ohsaki Research Institute, Dr. Eng.

2) Member, Senior Research Fellow, Dept. of Structural Eng., Building Research Institute, Dr. Eng.

3) Member, Professor Emeritus, Tokyo Metropolitan University, Dr. Eng.

4) Member, Deputy Director, Inst. of Technology, Shimizu Corp., Dr. Eng.

ABSTRACT

We revise the empirical relations for acceleration response spectra and average and variance of group delay time of long-period ground motions. The M_w^2 term is added in the revised relation for response spectra. In addition the differences between the Pacific plate earthquakes and the Philippine Sea plate earthquakes are considered into their attenuation and the site coefficients. We set the 3-connected source model composed of three outer-faults based on strong motion generation areas of the Tohoku earthquake. Finally we show that the long-period strong motions of the Tohoku earthquake are reasonably simulated well using the revised attenuation relations and the 3-connected source model.

Key Words: The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Long-period strong motions, Empirical regression relation, Simulation