



震源のモデル化の違いによるスラブ内地震の予測地 震動の比較

福島, 康宏

長尾, 賀

尾茂, 淳平

末富, 岩雄

(Citation)

土木学会論文集A1, 74(4):1035-1044

(Issue Date)

2018

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

©2018 公益社団法人 土木学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90006793>



震源のモデル化の違いによる スラブ内地震の予測地震動の比較

福島 康宏¹・長尾 肇²・尾茂 淳平³・末富 岩雄⁴

¹正会員 株式会社エイト日本技術開発 災害リスク研究センター 地震防災グループ
(〒164-8601 東京都中野区本町5-33-11)
E-mail: fukushima-ya@ej-hds.co.jp

²正会員 神戸大学教授 都市安全研究センター (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)
E-mail: nagao@people.kobe-u.ac.jp

³正会員 株式会社エイト日本技術開発 災害リスク研究センター 地震防災グループ
(〒164-8601 東京都中野区本町5-33-11)
E-mail: oshige-ju@ej-hds.co.jp

⁴正会員 株式会社エイト日本技術開発 災害リスク研究センター 地震防災グループ
(〒164-8601 東京都中野区本町5-33-11)
E-mail: suetomi-i@ej-hds.co.jp

「港湾の施設の技術上の基準・同解説」など土木構造物の設計基準類において震源モデルの設定方法が示されていないスラブ内地震について、地震調査研究推進本部による最新の強震動予測レシピに準拠した特性化震源モデルを適用した場合と、疑似点震源モデルを適用した場合の工学的基盤における地震動の比較を行った。

その結果、山田ほかによる提案手法による疑似点震源モデルを適用した場合、レシピ準拠の特性化震源モデルを適用した場合に比べて予測される地震動が大きくなり、安全側の推定となることが分かった。

Key Words : predicted ground motions, intra-slab earthquake, recipe for strong-motion prediction, characterized source model, pseudo point-source model

1. はじめに

地震動は震源依存かつ地点依存であることを踏まえて設定する必要がある¹⁾。震源依存・地点依存の地震動を評価する手法として様々な手法が考えられるが、高度な方法のひとつとして強震動シミュレーションがある。これは設計の実務にも取り入れられており、その例として「港湾の施設の技術上の基準・同解説(以下、港湾基準と略す)」²⁾が挙げられる。

この手法を適用するにあたっては、震源モデルを適切に設定する必要がある。一般に知られた方法として、特性化震源モデルを用いる方法がある。特性化震源モデルの概念を図-1に示すが、このモデルは、断層面を小断層に分割し、それぞれの小断層からの地震動を重ね合わせることにより大地震による地震動を合成するものである。重ね合わせにより、断層面内での破壊伝播の影響が考慮される。特性化震源モデルのパラメータ設定の方法

は、例えば地震調査研究推進本部の「震源断層を特定した地震の強震動予測手法」(「レシピ」)^{3), 4), 5)}に示されている。上述の港湾基準でも内陸地殻内地震についてはレシピなどの文献を参考に設定されている。

このほかの震源モデルとして、特性化震源モデルよりも少ないパラメータで単純化する目的で提案された、疑似点震源モデルが挙げられる。疑似点震源モデルの概念を図-2に示すが、このモデルでは、断層面を小断層に分割しないため、破壊伝播の影響は考慮されないが、単純化された簡便なモデルとなっている。断層面におけるすべりの時空間分布を精緻に表現することには限界があるが、東北地方太平洋沖地震などのプレート間の巨大地震について適用性があることが、野津⁶⁾などによって確認されている。

最近では、内陸地殻内地震やプレート間地震以外にスラブ内地震(沈み込んだ海洋プレートの内部で発生する地震)についても設計地震動として評価する必要性が指

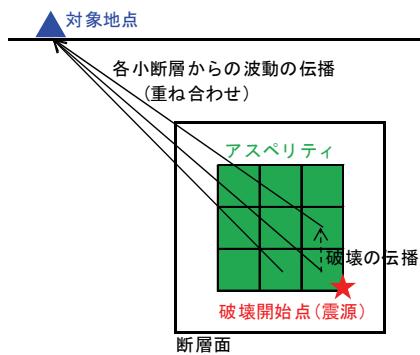


図-1 特性化震源モデルの概念

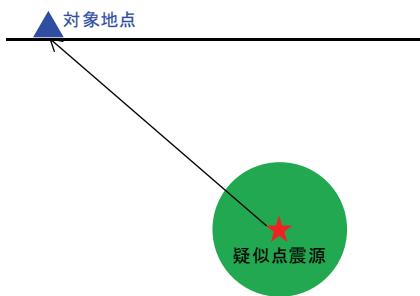


図-2 疑似点震源モデルの概念

摘されている。例えば、内閣府 首都直下地震モデル検討会では平成 25 年に「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」⁷⁾を公表しており、首都直下の M7 クラスの地震としては、内陸地殻内地震のみならずフィリピン海プレート内地震が想定地震となっており、地域によっては、スラブ内地震は無視することができない地震となっている。近年の被害地震においても、平成 5 年(1993 年)釧路沖地震(M7.5)や、平成 13 年(2001 年)芸予地震(M6.7)により広範囲に被害が生じている⁸⁾。

特性化震源モデルについて、従来のレシピ³⁾ではスラブ内地震の震源パラメータの考え方示されていなかつた。建築分野において用いられている、「最新の地盤運動研究を活かした強震波形の作成法」⁹⁾では、内陸地殻内地震やプレート間地震について、レシピに準拠した特性化震源モデルの震源パラメータの設定方法が示されており、スラブ内地震についてはプレート間地震のレシピ³⁾での震源パラメータ設定方法を準用しつつ、アスペリティ総面積と地震モーメントの関係、短周期レベルと地震モーメントの関係については笹谷ほか¹⁰⁾の知見を取り入れている。その後、平成 28 年 6 月に改定されたレシピ⁴⁾では、新井ほか¹¹⁾による知見を取り入れ、震源パラメータ設定の考え方示されたが、土木構造物の設計基準類に具体的な震源モデルの設定方法に言及したものはない。

一方、疑似点震源モデルについては、山田ほか¹²⁾によ

りパラメータ設定方法が提案されており、首都直下のフィリピン海プレート内地震や安芸灘地域のプレート内地震を対象として妥当性の検討が行われている。

そこで、本研究では、特性化震源モデルと疑似点震源モデルの 2 つの方法による地震動設定結果の違いを把握する目的で、安芸灘のプレート内地震(M_w7.4)、首都直下のフィリピン海プレート内地震(M_w7.3)、千島海溝沿いのやや深いプレート内地震(M_w7.5)を対象として、レシピ(最新の平成 29 年 4 月改訂版⁵⁾)による特性化震源モデルを適用した場合と、山田ほか¹²⁾の方法による疑似点震源モデルを適用した場合の工学的基盤における地震動の比較を行った。

2. 震源パラメータの設定方法

(1) 特性化震源モデルでの震源パラメータの設定

レシピ⁵⁾におけるスラブ内地震の項目では、震源パラメータ設定手順の一部の記述が省略されているが、省略部分は活断層で発生する地震やプレート間地震の項目と同様と考えると、対象地震の地震モーメントからアスペリティ全体の面積、アスペリティ全体の地震モーメントを求める流れは以下のようになる。なお、レシピではスラブ内地震については「強震動生成域」という用語が用いられているが、本稿では「アスペリティ」で統一する。

[1] 笹谷ほか¹⁰⁾による式(1)により地震モーメント M_0 (N・m)から短周期レベル A (N・m/s²)を求める。

$$A=9.84 \times 10^{10} \times (M_0 \times 10^7)^{1/3} \quad (1)$$

ただし、新井ほか¹¹⁾に基づき、フィリピン海プレート内の地震についてはこの値の 0.5 倍とする。

[2] アスペリティの面積の震源断層の面積に対する比 γ は式(2)で求める。

$$\gamma = \frac{16A^2 S_a^2}{49\pi^4 \beta^4 M_0^2} \quad (2)$$

ここで、 β は震源域における S 波速度(km/s)である。また、 S_a^* (km²) および A^* (N・m/s²) は 笹谷ほか¹⁰⁾による式(3)(4)の組み合わせ

$$S_a^* = 1.25 \times 10^{16} \times (M_0 \times 10^7)^{2/3} \quad (3)$$

$$A^* = 9.84 \times 10^{10} \times (M_0 \times 10^7)^{1/3} \quad (4)$$

または、壇ほか¹³⁾による式(5)(6)による組み合わせにより得られる。

$$S_a^* = 1.71 \times 10^{16} \times (M_0 \times 10^7)^{2/3} \quad (5)$$

$$A^* = 1.13 \times 10^{11} \times (M_0 \times 10^7)^{1/3} \quad (6)$$

これより、 γ は地震規模 M_0 によらず一定であると仮定していることとなる。本研究においては、 笹谷ほか¹⁰⁾による式(3)(4)の組み合わせを用いている。

[3] 断層面積 S (km²) はアスペリティモデルの関係式から

式(7)で求める。

$$S = \frac{7\pi^2 \beta^2 M_0}{4A\gamma^{0.5}} \quad (7)$$

[4] アスペリティの面積 S_a (km²)は式(8)で求める。

$$S_a = \gamma \cdot S \quad (8)$$

[5] 平均すべり量 D (m)は式(9)で求める。

$$D = \frac{M_0}{\mu \cdot (S \times 10^6)} \quad (9)$$

ここで、 μ は剛性率(N/m²)である。

[6] アスペリティの平均すべり量 D_a (m)は式(10)で求める。

$$D_a = 2D \quad (10)$$

[7] アスペリティの地震モーメント M_{0a} (N・m)は式(11)で求める。

$$M_{0a} = \mu \cdot D_a \cdot (S_a \times 10^6) \quad (11)$$

(2) 疑似点震源モデルでの震源パラメータの設定

山田ほか¹²⁾により提案されている対象地震の地震モーメントからアスペリティ面積、アスペリティ全体の地震モーメントを求める流れは以下のようになる。

[1] アスペリティの面積 S_a (km²)は笛谷ほか¹⁰⁾による式(12)で求める。

$$S_a = 1.25 \times 10^{16} \times (M_0 \times 10^7)^{2/3} \quad (12)$$

[2] 短周期レベル A (N・m/s²)は笛谷ほか¹⁰⁾による式(1)により求める。

[3] アスペリティのコーナー周波数は Brune^{14), 15)}による式(13)で求める。

$$f_c = \frac{0.66\beta}{\sqrt{S_a}} \quad (13)$$

[4] アスペリティの地震モーメント M_{0a} (N・m)は式(14)で求める。

$$M_{0a} = \frac{A}{(2\pi f_c)^2} \times 10^{-7} \quad (14)$$

3. 安芸灘のプレート内地震の地震動の推定

地震調査研究推進本部の長期評価¹⁶⁾によると、安芸灘～伊予灘～豊後水道における、フィリピン海プレートの沈み込みに伴う地震として推定されている地震規模はM6.7～7.4とされている。本研究では、松山港地点を対象に、直下で発生するスラブ内地震としては最大規模と考えられる M_w 7.4の地震の地震動推定を行う。

(1) 地震動推定の条件

a) 震源特性

レシピに準拠した特性化震源モデルの震源パラメータおよび疑似点震源モデルによる震源パラメータを表-1

表-1 安芸灘のプレート内地震の震源パラメータ

パラメータ	単位	設定値	
		特性化震源モデル 山田ほかの提案手法	疑似点震源モデル 短周期レベル 0.5倍
断層上端深さ	(km)	37.0	37.0
走向	(°)	180.0	—
傾斜角	(°)	55.0	—
マグニチュード	M	7.4	7.4
モーメントマグニチュード	M_w	7.4	7.4
地震モーメント	M_0 (N・m)	1.58E+20	1.58E+20
短周期レベル	A (N・m/s ²)	5.74E+19	1.15E+20
震源域における密度	ρ (kg/m ³)	3300	3300
震源域におけるS波速度	β (km/s)	4.0	4.0
剛性率	(N/m ²)	5.28E+10	5.28E+10
断層面積	S (km ²)	1715.5	—
断層長さ	L (km)	41.4	—
断層幅	W (km)	41.4	—
震源断層全体の平均すべり量	D (m)	1.75	—
アスペリティ全体の面積	S_a (km ²)	339.8	169.9
アスペリティの個数	個	3	1
アスペリティの平均すべり量	D_a (m)	3.50	—
アスペリティの地震モーメント	M_{0a} (N・m)	6.28E+19	7.08E+19
各アスペリティの面積	S_{ai} (km ²)	113.3	—
各アスペリティの長さ	L_{ai} (km)	10.6	—
各アスペリティの幅	W_{ai} (km)	10.6	—
各アスペリティの平均すべり量	D_{ai} (m)	3.50	—
各アスペリティの地震モーメント	M_{0ai} (N・m)	2.09E+19	—
破壊開始点深さ	(km)	37.0 54.0 70.9	54.0
破壊伝播速度	V_r (km/s)	2.88	—
各アスペリティのライズタイム	τ_{ai} (s)	1.85	—
高周波遮断周波数	f_{max} (Hz)	13.5	—
コーナー周波数(アスペリティ)	f_c (Hz)	—	0.20
アスペリティの分割数		3x3x3	1x1x1

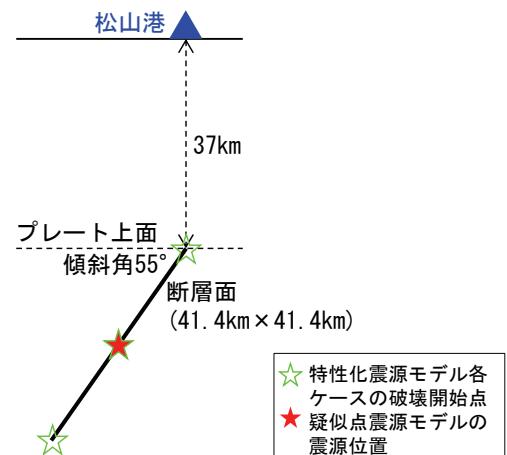
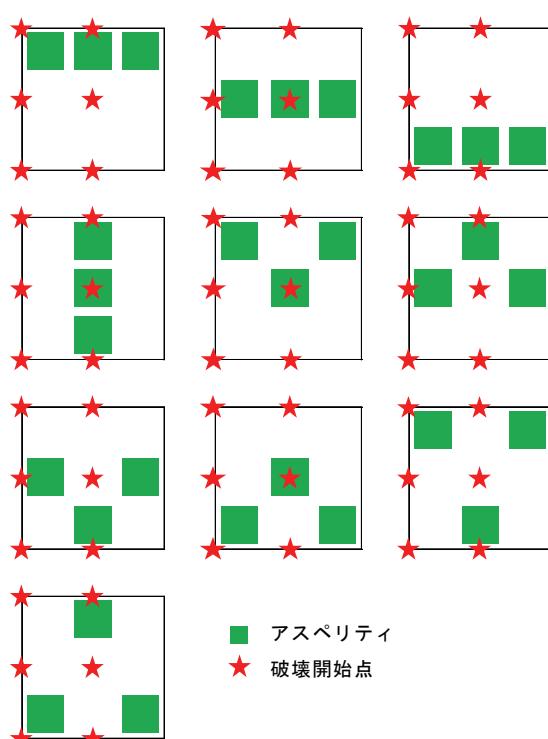


図-3 安芸灘のプレート内地震の断層面と松山港地点の位置関係

に示す。また、断層面と松山港地点との位置関係を図-3に示す。

断層上端深さは、地震調査研究推進本部の「全国1次地下構造モデル(暫定版)」¹⁷⁾の第18層上面の松山港付近での深さ37kmとした。断層走向および傾斜角は、防災科学技術研究所「地震ハザードステーション J-SHIS」¹⁸⁾2013年版(モデル1)の確率論的地震動予測地図の断層形状データ(安芸灘～伊予灘～豊後水道のプレート内地震)で用いられている値とした。また、震源域の密度、S波速度は山田ほか¹²⁾と同じ値を用いている。

特性化震源モデルでは、 M_w 7～8であるので、アスペリティの個数はレシピに従い3個とした。3つのアスペ



リティの面積の配分については、アスペリティ全体の面積を等配分した。アスペリティと破壊開始点の配置については、図-4に示す、破壊開始点位置 6 ケース × アスペリティ 10 ケースの合計 60 ケースを考慮した。アスペリティの配置については、過去の地震の震源モデルに基づいて設定することも考えられるが、設計地震動を作成する観点から、断層面上にバランス良く配置することとし、左右対称となるように設定した。

一方、疑似点震源モデルでは、特性化震源モデルの断層面の中心に震源を設定した。山田ほか¹²⁾の提案手法の通りパラメータを設定した場合と、フィリピン海プレート内の地震であるため短周期レベルを式(1)で得られる 0.5 倍とした場合の両方検討した。

b) 伝播経路特性

伝播経路特性を示す Q 値については、Petukhin et al.¹⁹⁾による式(15)を用いた。

$$Q=180\times f^{0.7} \quad (15)$$

c) サイト特性

サイト增幅特性については、野津・長尾²⁰⁾に基づき、国土交通省 国土技術政策総合研究所 港湾研究部 港湾施設研究室のウェブサイト²⁰⁾で公開されている松山港(松山G)の地震基盤から工学的基盤までの增幅特性(図-5 参照)を用いる。また、サイト位相特性の補正には、松山G観測点で得られている 2001 年 3 月 26 日 5 時 40 分の地震(M5.2)の強震記録²²⁾を、表-2 の表層地盤モデル²¹⁾を用

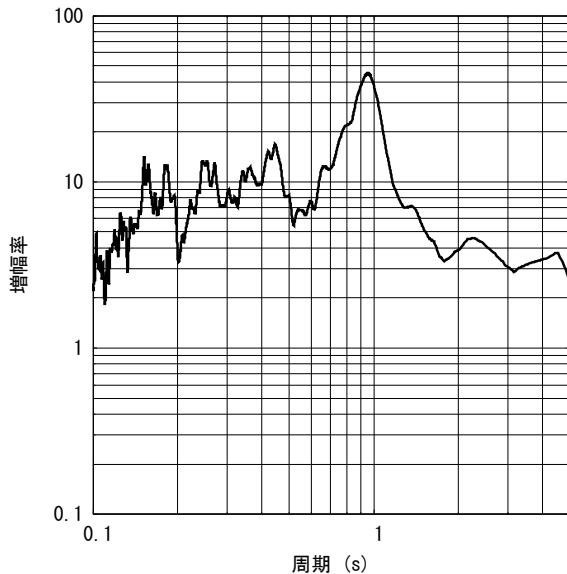


図-5 松山港地点のサイト增幅特性
(地震基盤～工学的基盤)

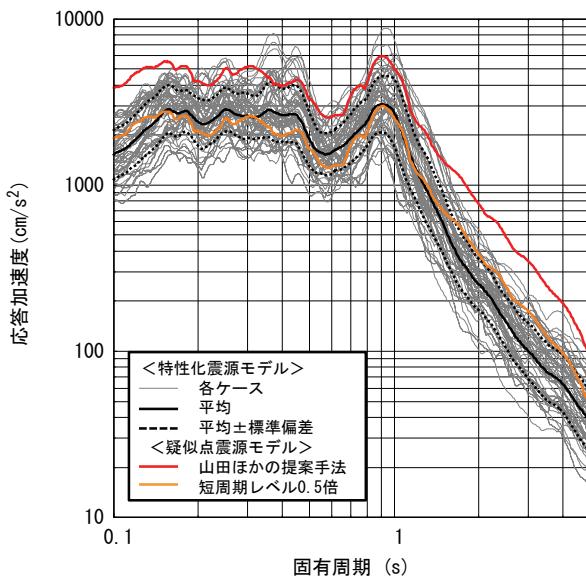
表-2 松山G観測点で得られている強震記録を
工学的基盤に引き戻す際の表層地盤モデル

層番号	層厚 (m)	密度 (g/cm ³)	S波速度 (m/s)	減衰定数
1	1.0	1.80	170	0.030
2	1.0	1.80	140	0.030
3	1.0	1.90	180	0.030
4	2.0	1.90	190	0.030
5	1.0	1.90	210	0.030
6	1.0	1.90	230	0.030
7	1.0	1.90	240	0.030
8	1.0	1.90	230	0.030
9	1.0	1.90	210	0.030
10	1.0	1.90	200	0.030
11	1.0	1.90	210	0.030
12	1.0	1.90	190	0.030
15	1.0	1.60	190	0.030
16	1.0	1.80	240	0.030
17	1.0	1.90	220	0.030
18	1.0	1.90	210	0.030
19	1.0	1.90	180	0.030
20	3.0	1.63	190	0.030
22	1.0	1.80	260	0.030
23	2.0	1.80	250	0.030
24	2.0	1.80	230	0.030
25	1.0	1.70	210	0.030
26	1.0	1.80	250	0.030
27	1.0	1.80	240	0.030
28	1.0	1.90	320	0.010

いて線形の重複反射理論により工学的基盤に引き戻した地震動を用いた。

(2) 地震動推定結果

以上の条件を用いて、経験的サイト增幅・位相特性を考慮した統計的グリーン関数法^{23), 24)}により地震動を推定した。本研究では、アスペリティによる寄与のみ考慮し、背景領域の影響は無視している。また、ラディエーション係数については、全方位への平均値 0.63、地震動のエネルギーを水平方向の 2 成分に分配する効果を表す係数



は0.71を用いた。

推定した地震動の加速度応答スペクトル(水平2成分合成)を図-6に示す。赤色で示した山田ほか¹²⁾の提案手法で疑似点震源モデルのパラメータ設定を行った場合は、ほぼ全周期帯にわたって特性化震源モデルのを適用した60ケースの平均+標準偏差を上回っている。山田ほか¹²⁾の提案手法により設定する場合のほうがレシピに基づき設定する場合よりアスペリティの地震モーメントが1割程度大きくなっていることや、疑似点震源モデルではアスペリティの分割数を1×1×1としているが特性化震源モデルでは分割数を3×3×3としていることが影響していると考えられる。

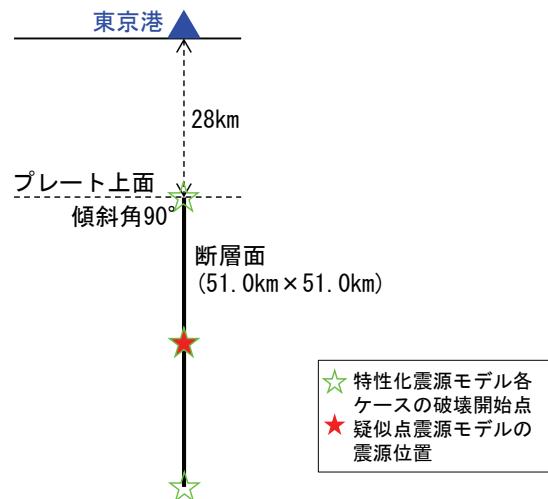
図-6で橙色で示した短周期レベルを式(1)で得られる0.5倍とした場合は、山田ほか¹²⁾の提案手法により設定する場合と比べてアスペリティの地震モーメントも0.5倍となるため、推定地震動も赤色で示した0.5倍となっているが、特性化震源モデルを適用した60ケースの平均土標準偏差の範囲に入っている。

4. 首都直下のフィリピン海プレート内地震の地震動の推定

内閣府では、前述の通り、「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」⁷⁾において、フィリピン海プレート内の地震としてM_w7.3を想定している。また、地震調査研究推進本部の長期評価²⁵⁾によると、相模トラフ沿いの地震活動のうち、プレートの沈み込みに伴う地震の規模についてM7程度(M6.7~

表-3 首都直下のフィリピン海プレート内地震の震源パラメータ

パラメータ	単位	設定値	
		特性化震源モデル	疑似点震源モデル
断層上端深さ	(km)	28.0	28.0
走向	θ (°)	111.0	—
傾斜角	δ (°)	90.0	—
マグニチュード	M	7.3	7.3
モーメントマグニチュード	M_w	7.3	7.3
地震モーメント	M_0 (N・m)	1.12E+20	1.12E+20
短周期レベル	A (N・m/s ²)	5.11E+19	1.02E+20
震源域における密度	ρ (kg/m ³)	3200	3200
震源域におけるS波速度	β (km/s)	4.7	4.7
剛性率	μ (N/m ²)	7.07E+10	7.07E+10
断層面積	S (km ²)	2597.3	—
断層長さ	L (km)	51.0	—
断層幅	W (km)	51.0	—
震源断層全体の平均すべり量	D (m)	0.61	—
アスペリティ全体の面積	S_a (km ²)	269.9	135.0
アスペリティの個数	個	3	1
アスペリティの平均すべり量	D_a (m)	1.22	—
アスペリティの地震モーメント	M_{0a} (N・m)	2.33E+19	3.63E+26
各アスペリティの面積	S_{ai} (km ²)	90.0	—
各アスペリティの長さ	L_{ai} (km)	9.5	—
各アスペリティの幅	W_{ai} (km)	9.5	—
各アスペリティの平均すべり量	D_{ai} (m)	1.22	—
各アスペリティの地震モーメント	M_{0ai} (N・m)	7.77E+18	—
破壊開始点深さ	(km)	53.5 79.0	53.5 53.5
破壊伝播速度	V_r (km/s)	3.38	—
各アスペリティのライズタイム	τ_{ai} (s)	1.40	—
高周波遮断周波数	f_{max} (Hz)	13.5	—
コーナー周波数(アスペリティ)	f_c (Hz)	—	0.27
アスペリティの分割数		3×3×3	1×1×1



M7.3)としている。本研究では、東京港地点を対象に、直下で発生するスラブ内地震としては最大規模と考えられるM_w7.3の地震の地震動推定を行う。

(1) 地震動推定の条件

a) 震源特性

レシピに準拠した特性化震源モデルの震源パラメータおよび疑似点震源モデルによる震源パラメータを表-3に示す。また、断層面と東京港地点との位置関係を図-7に示す。

断層上端深さは、地震調査研究推進本部の「全国1次

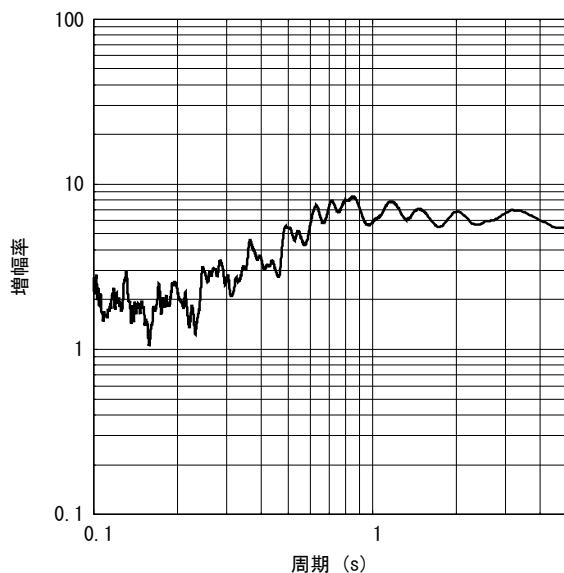


図-8 東京港地点のサイト增幅特性
(地震基盤～工学的基盤)

表-4 品川-G観測点で得られている強震記録を工学的基盤に引き戻す際の表層地盤モデル

層番号	層厚 (m)	密度 (g/cm ³)	S波速度 (m/s)	減衰定数
1	1.0	1.60	100	0.037
2	1.0	1.60	130	0.037
3	1.0	1.60	110	0.037
4	2.0	1.53	90	0.037
5	1.0	1.53	120	0.037
6	2.0	1.71	110	0.037
7	1.0	1.66	130	0.037
8	2.0	1.75	150	0.037
9	2.0	1.77	140	0.037
10	1.0	1.70	180	0.037
11	1.0	1.96	210	0.037
12	1.0	1.96	230	0.037
13	1.0	1.96	240	0.037
14	1.0	1.96	250	0.037
15	1.0	1.96	260	0.037
16	1.0	1.70	190	0.037
17	1.0	1.90	440	0.010

地下構造モデル(暫定版)¹⁷⁾の第18層上面の東京港付近での深さ28kmとした。防災科学技術研究所「地震ハザードステーション J-SHIS」¹⁸⁾2016年版の確率論的地震動予測地図の断層形状データ(フィリピン海プレートのプレート内の震源を予め特定しにくい地震)のうち東京港付近のモデルで用いられている値とした。また、震源域の密度、S波速度は山田ほか¹²⁾と同じ値を用いている。

特性化震源モデルでは、3.と同様に、アスペリティは3個とし、面積は等分配とした。アスペリティと破壊開始点の配置についても3.と同様に60ケース設定した。

一方、疑似点震源モデルでは、特性化震源モデルの断層面の中心に震源を設定した。3.と同様に、山田ほか¹²⁾の提案手法の通りパラメータを設定した場合と、フィリピン海プレート内の地震であるため短周期レベルを式(1)で得られる0.5倍とした場合の両方検討した。

b) 伝播経路特性

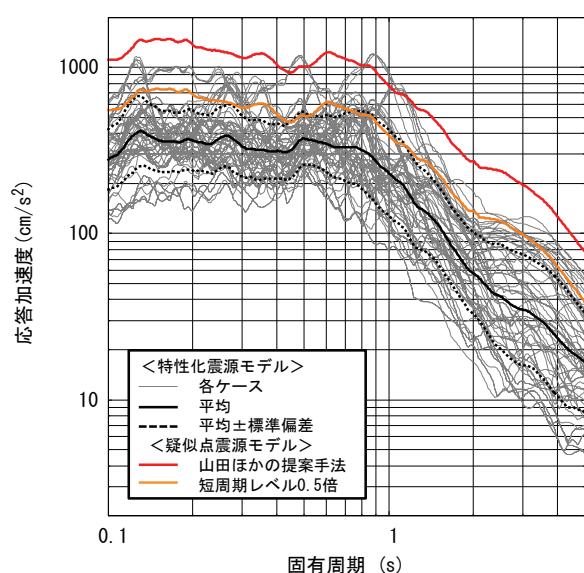


図-9 推定地震動の加速度応答スペクトルの比較(首都直下のフィリピン海プレート内地震、東京港地点)

伝播経路特性を示すQ値については、長坂・野津²⁰⁾による2005年千葉県中部の地震を対象とした検討で地震動の再現精度が良い設定となっている式(16)を用いた。

$$Q=110\times f^{1.0} \quad (16)$$

c) サイト特性

サイト增幅特性については、東京港(ゾーン1)の地震基盤から工学的基盤までの增幅特性(図-8参照)²¹⁾を用いる。また、サイト位相特性の補正には、品川-G観測点で得られている2005年6月1日19時39分の地震(M4.1)の強震記録²²⁾について、表-4の表層地盤モデル²¹⁾を用いて線形の重複反射理論により工学的基盤に引き戻した地震動を用いた。

(2) 地震動推定結果

以上の条件を用いて、経験的サイト增幅・位相特性を考慮した統計的グリーン関数法^{23), 24)}により推定した地震動の加速度応答スペクトルを図-9に示す。赤色で示した山田ほか¹²⁾の提案手法で疑似点震源モデルのパラメータ設定を行った場合は、ほとんどの周期で特性化震源モデルの各ケースを上回っている。図-9でオレンジ色で示した短周期レベルを式(1)で得られる0.5倍とした場合は、山田ほか¹²⁾の提案手法により設定する場合と比べてアスペリティの地震モーメントも0.5倍となるため、推定地震動も赤色で示した0.5倍となっている。このスペクトルは、特性化震源モデルを適用した60ケースの平均+標準偏差と同程度かやや大きくなっている。山田ほか¹²⁾の提案手法により設定する場合のほうがレシピに基づき設定する場合より大きな地震動となっていることについては、3.と同様の理由が考えられるが、この地震では、山田ほか¹²⁾の提案手法のほうがアスペリティの地震モーメント

表-5 千島海溝沿いのやや深いプレート内地震の震源パラメータ

パラメータ	単位	設定値	
		特性化震源モデル	疑似点震源モデル
断層上端深さ	[km]	100.0	100.0
走向	θ [°]	245.0	—
傾斜角	δ [°]	0.0	—
マグニチュード	M	7.5	7.5
モーメントマグニチュード	M_w	7.5	7.5
地震モーメント	M_0 [N · m]	2.24E+20	2.24E+20
短周期レベル	A [N · m/s ²]	1.29E+20	1.29E+20
震源域における密度	ρ [kg/m ³]	3400	3400
震源域におけるS波速度	β [km/s]	4.6	4.6
剛性率	μ [N/m ²]	7.19E+10	7.19E+10
断層面積	S [km ²]	1888.6	—
断層長さ	L [km]	43.5	—
断層幅	W [km]	43.5	—
震源断層全体の平均すべり量	D [m]	1.65	—
アスペリティ全体の面積	S_a [km ²]	213.9	213.9
アスペリティの個数	[個]	3	1
アスペリティの平均すべり量	D_a [m]	3.30	—
アスペリティの地震モーメント	M_{0a} [N · m]	5.07E+19	7.57E+26
各アスペリティの面積	S_{ai} [km ²]	71.3	—
各アスペリティの長さ	L_{ai} [km]	8.4	—
各アスペリティの幅	W_{ai} [km]	8.4	—
各アスペリティの平均すべり量	D_{ai} [m]	3.30	—
各アスペリティの地震モーメント	M_{0ai} [N · m]	1.69E+19	—
破壊開始点深さ	[km]	100.0	100.0
破壊伝播速度	V_p [km/s]	3.31	—
各アスペリティのライズタイム	r_{ai} [s]	1.27	—
高周波遮断周波数	f_{max} [Hz]	13.5	—
コーナー周波数(アスペリティ)	f_c [Hz]	—	0.21
アスペリティの分割数		3×3×3	1×1×1

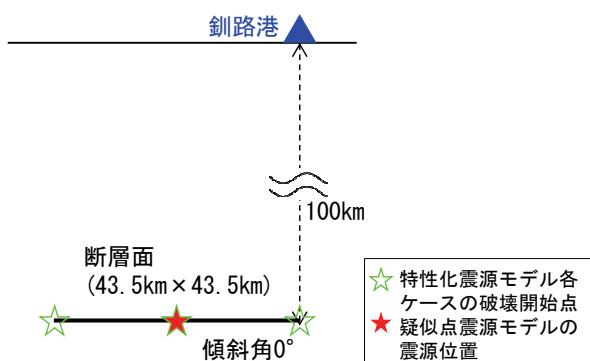


図-10 千島海溝沿いのやや深いプレート内地震の断層面と釧路港地点の位置関係

ントが 5 割以上大きく、3 で示した安芸灘のプレート内地震よりその影響が大きくなっている。

5. 千島海溝沿いのやや深いプレート内地震の地震動の推定

地震調査研究推進本部の長期評価²⁷⁾によると、千島海溝沿いのスラブ内地震について、「沈み込んだプレート内のやや浅い地震」(深さ 50km 程度, M8 程度)と「沈み込んだプレート内のやや深い地震」(深さ 100km 程度, M7.5 程度)に区別している。本研究では、釧路港地点を対象に、直下で発生する $M_w7.5$ のやや深いプレート内地震の地震動推定を行う。

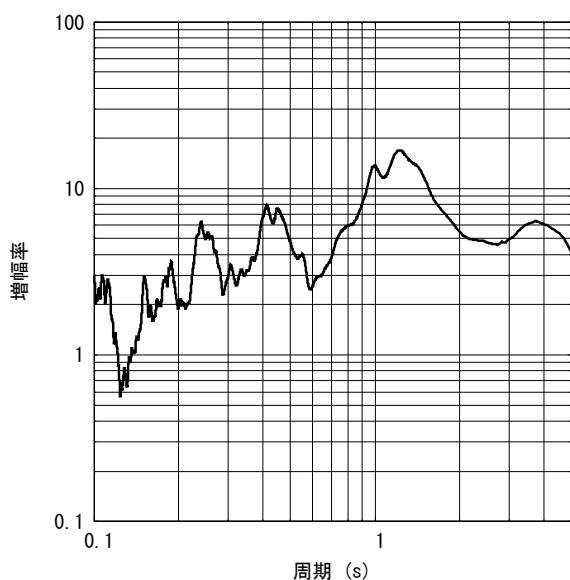
図-11 釧路港地点のサイト增幅特性
(地震基盤～工学的基盤)

表-6 釧路-G観測点で得られている強震記録を工学的基盤に引き戻す際の表層地盤モデル

層番号	層厚 (m)	密度 (g/cm ³)	S波速度 (m/s)	減衰定数
1	5.0	1.80	146	0.030
2	1.0	1.95	355	0.010

(1) 地震動推定の条件

a) 震源特性

レシピに準拠した特性化震源モデルの震源パラメータおよび疑似点震源モデルによる震源パラメータを表-5 に示す。また、断層面と釧路港地点との位置関係を図-10 に示す。

断層上端深さや断層走向および傾斜角は、防災科学技術研究所「地震ハザードステーション J-SHIS」¹⁸⁾2013 年版(モデル 1)の確率論的地震動予測地図の断層形状データ(千島海溝沿いの沈み込んだプレート内のやや深い地震)の釧路港付近のモデルで用いられている値とした。また、震源域の密度、S 波速度は地震調査研究推進本部の「全国 1 次地下構造モデル(暫定版)」¹⁷⁾の第 23 層の値を用いた。

特性化震源モデルでは、3. や 4. と同様に、アスペリティは 3 個とし、面積は等配分とした。アスペリティと破壊開始点の配置についても 3. や 4. と同様に 60 ケース設定した。

一方、疑似点震源モデルでは、特性化震源モデルの断層面の中心に震源を設定した。太平洋プレート内の地震であるため、短周期レベルを式(1)で得られる 0.5 倍とした場合については考慮していない。

6. まとめ

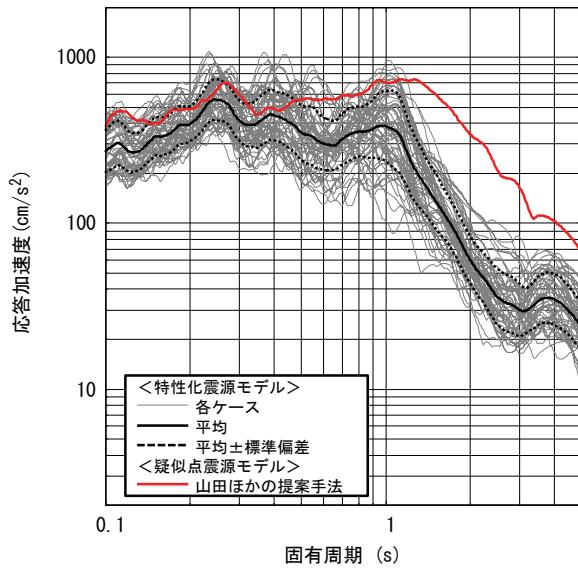


図-12 推定地震動の加速度応答スペクトルの比較(千島海溝沿いのやや深いプレート内地震, 釧路港地点)

b) 伝播経路特性

伝播経路特性を示す Q 値については、川瀬・松尾²⁸⁾により地震ごと、領域ごとに推定されているが、釧路地域を含む領域3のプレート内地震での式(17)を用いた。

$$Q=149\times f^{0.73} \quad (17)$$

c) サイト特性

サイト増幅特性については、釧路港の地震基盤から工学的基盤までの増幅特性(図-11参照)²⁹⁾を用いる。また、サイト位相特性の補正には、釧路-G 観測点で得られている1997年6月15日13時54分の地震(M5.1)の強震記録²²⁾を、表-6の表層地盤モデルを用いて工学的基盤に引き戻した地震動を用いた。

(2) 地震動推定結果

以上の条件を用いて、経験的サイト増幅・位相特性を考慮した統計的グリーン関数法^{23), 24)}により推定した地震動の加速度応答スペクトルを図-12に示す。赤色で示した山田ほか¹²⁾の提案手法で疑似点震源モデルのパラメータ設定を行った場合は、周期0.3秒程度以下では特性化震源モデルの60ケースの平均+標準偏差と同程度の大きさで、周期1.2秒程度以上では、特性化震源モデルの各ケースを大きく上回っている。この理由としては、3.や4.と同様に、山田ほか¹²⁾の提案手法により設定する場合のほうがレシピに基づき設定する場合よりアスペリティの地震モーメントが5割程度大きいことや、疑似点震源モデルではアスペリティの分割数を1×1×1としているが特性化震源モデルでは分割数を3×3×3としていることが影響していると考えられる。

本研究では、特性化震源モデルと疑似点震源モデルの2つの方法による地震動設定結果の違いを把握するため、安芸灘のプレート内地震($M_w7.4$)、首都直下のフィリピン海プレート内地震($M_w7.3$)、千島海溝沿いのやや深いプレート内地震($M_w7.5$)を対象に、レシピによる特性化震源モデルを適用した場合と、山田ほか¹²⁾の方法による疑似点震源モデルを適用した場合の工学的基盤での地震動を比較した。

その結果、山田ほか¹²⁾の提案手法で震源パラメータを設定した疑似点震源モデルを適用したほうが、レシピに基づき震源パラメータを設定した特性化震源モデルを適用した場合と比べて推定される地震動が大きくなり、安全側の予測となることがわかった。

その要因のひとつとして、震源モデルの違いによって、設定されるアスペリティの地震モーメントが異なることが挙げられる。特性化震源モデルの設定において、地震モーメントと短周期レベルやアスペリティ面積の関係式に笠谷ほか¹⁰⁾を用いた場合には、レシピで設定するほうが山田ほか¹²⁾の提案手法で設定するのと比べアスペリティの地震モーメントが $14.181/\beta^2$ 倍となることから、震源域のS波速度 β が3.76km/s以上の場合、前者のほうが後者より小さくなり、 β が大きくなるほど両者の乖離が大きくなることとなる。

それ以外の要因としては、疑似点震源モデルではアスペリティの分割数が $1\times1\times1$ であるのに対し、本研究での特性化震源モデルでは分割数を $3\times3\times3$ としており、地震動の重ね合わせによる中間周波数帯域でのスペクトルの落ち込み²⁹⁾が生じていると考えられる。

本研究では、2つの手法による地震動の比較を行ったが、その検証には至っていないことから、特性化震源モデル、疑似点震源モデルとも、過去の地震の強震記録の再現性や震度分布との整合性などから、震源パラメータ設定の妥当性を検証する必要があると考えられる。

また、震源モデルの違いにより設定されるアスペリティ面積に違いが生じることに起因するコーナー周波数の違いの推定地震動への影響や、疑似点震源モデルにおいてもレシピで示されているプレートによる短周期レベルを補正の可否の検討なども今後の課題であると考えている。

謝辞：(株)ニュージェック 山田雅行博士には、疑似点震源モデルの震源パラメータ設定に関してご教授いただきました。また、港湾地域強震観測による観測記録を使用しました。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会 構造工学委員会 土木構造物共通示方書改訂小委員会: 2016年制定 土木構造物共通示方書 性能・作用編, 丸善出版, 441p., 2016.
- 2) 国土交通省港湾局監修, (社)日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2007.
- 3) 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」) 平成 21 年 12 月 21 日改訂, 2009, http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09_yosokuchizu/g_furoku3.pdf (平成 29 年 8 月 31 日閲覧)
- 4) 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」) 平成 28 年(2016 年) 6 月(12 月修正版), 2016, http://www.jishin.go.jp/main/chousa/16_yosokuchizu/recipe.pdf (平成 29 年 8 月 31 日閲覧)
- 5) 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」) 平成 29 年(2017 年)4 月, 2016, http://www.jishin.go.jp/main/chousa/17_yosokuchizu/recipe.pdf (平成 29 年 8 月 31 日閲覧)
- 6) 野津厚: 強震動を対象とした海溝型巨大地震の震源モデルをより単純化する試み—疑似点震源モデルによる 2011 年東北地方太平洋沖地震の強震動シミュレーション—, 地震 第 2 輯, Vol. 65, No. 1, pp. 45-67, 2012.
- 7) 内閣府 首都直下地震モデル検討会: 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, http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/shutochokkajishinmodel/pdf/dansoumodel_01.pdf, http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/shutochokkajishinmodel/pdf/dansoumodel_02.pdf (平成 29 年 8 月 31 日閲覧)
- 8) 宇佐美龍夫, 石井寿, 今村隆正, 武村雅之, 松浦律子: 日本被害地震総覧 599-2012, 724p., 2013.
- 9) 日本建築学会: 最新の地盤震動研究を活かした強震波形の作成法, 163p., 2009.
- 10) 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, No. 69, pp. 123-134, 2006.
- 11) 新井健介, 壇一男, 石井透, 花村正樹, 藤原広行, 森川信之: 強震動予測のためのスラブ内地震の断層パラメータ設定方法の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第 80 卷, 第 716 号, pp. 1537-1547, 2015.
- 12) 山田雅行, 伊藤佳洋, 野津厚, 長尾毅: 設計入力地震動作成のためのプレート内地震の震源のモデル化手法, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 71, No. 2, pp. I_718-I_723, pp. 2015.
- 13) 壇一男, 武藤尊彦, 宮腰淳一, 渡辺基史: スラブ内地震による強震動を予測するための特性化震源モデルの設定方法, 日本建築学会構造系論文集, 第 71 卷, 第 600 号, pp. 35-42, 2006.
- 14) Brune, J. N.: Tectonic stress and the spectra of seismic shear wave from earthquake, *J. Geophys. Res.*, Vol. 75, pp. 4997-5009, 1970.
- 15) Brune, J. N.: Correction, *J. Geophys. Res.*, Vol. 76, pp. 5002, 1971.
- 16) 地震調査研究推進本部地震調査委員会: 日向灘および南西諸島海溝周辺の地震活動の長期評価について, 2004, http://www.jishin.go.jp/main/chousa/kaikou_pdf/hyuganada.pdf (平成 29 年 8 月 31 日閲覧)
- 17) 地震調査研究推進本部: 全国 1 次地下構造モデル(暫定版), http://www.jishin.go.jp/main/chousa/12_choshuki/choshuki2012_a2.pdf (平成 29 年 8 月 31 日閲覧)
- 18) 防災科学技術研究所: 地震ハザードステーション JSHIS, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/> (平成 29 年 8 月 31 日閲覧)
- 19) Petukhin, A., Irikura, K., Ohmi, S. and Kagawa, T.: Estimation of Q-values in the seismogenic and aseismic layers in the Kinki region, Japan, by elimination of the geometrical spreading effect using ray approximation, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 93, No. 4, pp. 1498-1515, 2003.
- 20) 野津厚, 長尾毅: スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等の強震観測地点におけるサイト増幅特性, 港湾空港技術研究所資料, No. 1112, 2005.
- 21) 国土交通省 国土技術政策総合研究所 港湾研究部 港湾施設研究室 ウェブサイト, <http://www.ysk.nilim.go.jp/kakubu/kouwan/sisetu/sisetu.html> (平成 29 年 8 月 31 日閲覧)
- 22) 港湾地域強震観測ウェブサイト, <http://www.mlit.go.jp/kowan/kyosin/eq.htm> (平成 29 年 8 月 31 日閲覧)
- 23) 古和田明, 田居優, 岩崎好規, 入倉孝次郎: 経験的サイト増幅・位相特性を用いた水平動および上下動の強震動評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 514 号, pp. 97-104, 1998.
- 24) 野津厚, 菅野高弘: 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法—因果性と多重非線形効果に着目した改良—, 港湾空港技術研究所資料, No. 1173, 2008.
- 25) 地震調査研究推進本部地震調査委員会: 相模トラフ沿いの地震活動の長期評価(第二版)について, 2014, http://www.jishin.go.jp/main/chousa/kaikou_pdf/sagami_2.pdf (平成 29 年 8 月 31 日閲覧)
- 26) 長坂陽介, 野津厚: 疑似点震源モデルのスラブ内地震への適用性に関する検討—2005 年千葉県中部の地震を例に—, 港湾空港技術研究所資料, No. 1323, 193p., 2016.
- 27) 地震調査研究推進本部地震調査委員会: 千島海溝沿いの地震活動の長期評価(第二版)について, 2004, http://www.jishin.go.jp/main/chousa/kaikou_pdf/chishima_2.pdf (平成 29 年 8 月 31 日閲覧)
- 28) 川瀬博, 松尾秀典: K-NET, KiK-net, JMA 震度計観測網による強震記録から分離したサイト増幅特性と S 波速度構造との対応, 日本地震工学会論文集, 第 4 卷, 第 4 号, 2004.
- 29) 野津厚: 経験的グリーン関数法で中間周波数帯域の落ち込みが生じる原因の再吟味, 第 38 回地盤工学研究発表会発表講演集(CD-ROM), 2003.

(2017.11.7 受付, 2018.1.26 修正, 2018.2.17 受理)

COMPARISON OF THE PREDICTED GROUND MOTIONS TARGETING INTRA-PLATE EARTHQUAKE BY DIFFERENT SOURCE MODELS

Yasuhiro FUKUSHIMA, Takashi NAGAO, Jumpei OSHIGE and Iwao SUETOMI

Source modeling method for strong ground motion prediction targeting intra-plate earthquake has not been established in the technical standards for civil engineering works yet. In this study, authors applied two kinds of source model that are likely to be introduced to the practical design. One is characterized source model in accordance with the latest recipe for strong-motion prediction shown by the Headquarters for Earthquake Research Promotion and the other is pseudo point-source model proposed by Yamada et al.. Results of the study showed that pseudo point-source model gives conservative earthquake ground motions compared with the characterized source model.