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

山田 雅行¹・伊藤 佳洋²・野津 厚³・長尾 毅⁴

¹ 正会員 (株) ニュージェック技術開発グループ (〒531-0074 大阪市北区本庄東 2-3-20)
E-mail: yamadams@newjec.co.jp

² 正会員 (株) ニュージェック技術開発グループ (〒531-0074 大阪市北区本庄東 2-3-20)
E-mail: itoys@newjec.co.jp

³ 正会員 (研) 港湾空港技術研究所地震防災研究領域 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)
E-mail: nozu@pari.go.jp

⁴ 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

「港湾の施設の技術上の基準・同解説」に震源モデルの設定方法が示されていない、沈み込んだ海洋プレート内部で発生するプレート内地震(スラブ内地震)のうち、首都圏直下の $M_w7.3$ プレート内地震と安芸灘プレート内地震について、震源のモデル化手法を提案した。震源のモデル化は、①想定地震の地震モーメントの設定、②アスペリティ総面積の算定、③短周期レベルの算定、④技術基準に基づいてその他のパラメータの算定、⑤疑似点震源モデルを適用、⑥震源位置は対象施設直下に設定、⑦断層上端深さを海洋プレート上面深度に設定、⑧歴史地震の震度や内閣府による予測震度との整合性を確認、の手順で行うことを提案した。この手順を $M_w7.3$ プレート内地震と安芸灘プレート内地震に適用し、妥当性の確認を行った。

Key Words : design ground motion, intra-plate earthquake, source model, the Tokyo capital region, Aki-Nada sea

1. はじめに

港湾構造物の設計入力地震動の作成において、震源特性、伝播経路特性、サイト増幅特性(周波数ごとの応答倍率)を考慮した統計的グリーン関数法が用いられている^{1,2)}。内陸地殻内地震(活断層)やプレート境界型地震については、その震源のモデル化手法が「港湾の施設の技術上の基準・同解説(以下、技術基準と略す)」¹⁾に示されているが、沈み込んだ海洋プレート内部で発生するプレート内地震(以下、スラブ内地震という)については震源モデルの設定方法が規定されていない。

そこで本稿では、「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(内閣府首都直下地震モデル検討会、平成25年12月)」³⁾において検討対象とされたフィリピン海プレート内の地震($M_w7.3$)(以下、 $M_w7.3$ プレート内地震と略す)と平成13年(2001年)芸予地震などこれまで数多くの被害をもたらしてきた安芸灘地域のプレート内地震⁴⁾(以下、安芸灘プレート内地震と略す)を対象に、スラブ内地震の震源のモデル化の手順を提案し、

その妥当性について検討した。

2. スラブ内地震

(1) スラブ内地震

スラブ内地震とは、図-1に模式図を示すように、大陸プレートの下に沈み込んだ海洋プレートの内部で発生する地震である。一方、沈み込む前の海洋プレートの内部で発生する地震はアウターライズ地震と呼ばれる。

スラブ内地震は一般に震源が深く、このため大きな揺れが広範囲に及ぶことが多い。また、地下深部の高応力下で発生するため、内陸地殻内地震などと比べて、震源距離の割には大きな揺れを生じることが特徴である。

最近では、平成5年(1993年)釧路沖地震⁵⁾、平成13年(2001年)芸予地震^{7,8)}がスラブ内地震として挙げられる。平成5年(1993年)釧路沖地震($M_j7.5$)は、深さ101kmであったが、釧路で最大震度6を記録したほか、帯広、広尾、浦河などで震度5を記録した。平成13年(2001年)芸予地震($M_j6.7$)は、深さ46kmであったが、広島県で最大震度6弱

図-1 スラブ内地震の模式図

を記録したほか、広島、山口、愛媛県において震度5強を記録した。両地震とも、死者を含む広範囲にわたる多くの被害をもたらした。このほか、2011年4月7日に宮城県東方沖で発生した地震(東北地方太平洋沖地震の余震でMj7.2、深さ66km)もスラブ内地震であり、最大震度6強を観測した。

(2) スラブ内地震の震源パラメータ

技術基準¹⁾ではスラブ内地震の震源モデルの設定方法に関する規定が無いが、建築分野ではスラブ内地震に関する研究の蓄積があり、「最新の地盤震動研究を活かした強震波形の作成法(建築学会, 2009)」⁹⁾に震源パラメータ設定方法が示されている。ただし、この設定方法は国内の11地震(1993～2003年)を元に推定されたもの¹⁰⁾であり、この方法で震源パラメータを設定した場合の地震動の計算結果が、歴史地震の震度分布や内閣府による予測震度分布と調和的なものになるとは限らない。

そこで、ここでは、施設設計を念頭において、建築分野で提案されている既往の経験式⁹⁾を活用して震源モデルを設定し、当該震源モデルにより各地の地震動を計算した上で、歴史地震の震度分布や内閣府による予測震度分布との整合性を確認する（必要ならば震源パラメータの調整を行う）という一連の震源パラメータ設定手順を新たに提案する。

文献9)によると、“アスペリティ総面積”と“短周期レベル”がプレート内地震に特徴的なパラメータである。スラブ内地震の地震モーメントに対するアスペリティ総面積は、内陸地殻内地震や海溝型プレート境界地震に比べて極めて小さいことがわかっているため、内陸地殻内地震に対する経験式の1/4とする式(1)が提案されている。

$$S_a = 1.25 \times 10^{-16} \times M_0^{2/3} \quad (1)$$

ここに、 S_a : アスペリティ総面積(km²)、 M_0 : 想定地震の地震モーメント(dyne・cm)である。

また、短周期レベルは内陸地殻内地震や海溝型プレート境界地震に比べて大きく、内陸地殻内地震に対する経験式の4倍とする式(2)が提案されている。

$$A = 9.84 \times 10^{17} \times M_0^{1/3} \quad (2)$$

ここに、 A : 短周期レベル(dyne・cm/s²)である。

これらより、アスペリティのコーナー周波数と地震モーメントはそれぞれ式(3)(4)で求めることができる。

$$f_c = 0.66 V_s / S_a^{0.5} \quad (3)$$

$$M_{0a} = A / (2\pi f_c)^2 \quad (4)$$

ここに、 f_c : コーナー周波数 (Hz)、 V_s : S波速度(km/s)、 M_{0a} : アスペリティの地震モーメント(dyne・cm)である。

3. 疑似点震源モデル¹¹⁾

本研究では、地震動の計算を行う場合、アスペリティの分割数を1×1としたモデル、すなわち、疑似点震源モデルを用いる。本章ではこのモデルについて説明する。

疑似点震源モデルは、強震動評価のための震源モデルをより単純化したもので、強震動の生成に関わる各々のサブイベント(アスペリティまたはSPGA)に対し、その内部におけるすべりの時空間分布を詳細にはモデル化せず、各々のサブイベントが生成する震源スペクトルのみをモデル化するものである。すなわち、

- ①サブイベントの破壊に起因する震源スペクトル $S(\omega)$ はオメガスクエアモデルに従うと仮定。
- ② $O(\omega) = S(\omega) \cdot P(\omega) \cdot G(\omega)$ により予測地震動のフーリエ振幅を算定
- ③②と対象地点における中小地震記録のフーリエ位相を組み合わせ、フーリエ逆変換することにより、サブイベントからの地震動の時刻歴波形を算定
- ④すべてのサブイベントについて和をとるという手順をとる。

元来、このような単純化を行う理由は次の2点であった¹⁰⁾。(1)地震動のフーリエ位相は伝播経路特性とサイト特性で決まっている場合が多く、サブイベントの破壊がフーリエ位相特性に及ぼす影響の詳細を評価する必要性は小さい。(2)サブイベントを小断層に分割し、その小断層からの地震動を重ね合わせることで算定した地震動のフーリエスペクトルには、サブイベントのサイズや小断層のサイズに起因する山谷が生じるが、海溝型巨大地震の際に岩盤サイトで実測された地震動のフーリエ振幅に山谷が少ないことに合致しない。むしろサブイベント全体からの地震動が単純なオメガスクエアモデルに従うと考えた方が観測との誤差が小さくなる可能性が考えられる。

この疑似点震源モデルは2003年5月26日宮城県沖の

図-2 $M_w7.3$ スラブ内地震のアスペリティの分割と地表面での地震動の関係

地震¹²⁾や2005年7月23日千葉県中部の地震¹³⁾などのスラブ内地震にも適用されている。これらの研究では、疑似点震源モデルによる波形およびフーリエスペクトルの再現性は、特性化震源モデルを用いた場合と同等またはそれ以上であることが示されている。

通常の震源モデルに対する疑似点震源モデルの特性は上述の通りであるが、それに加え、本研究で疑似点震源モデルを用いる理由として以下のことが挙げられる。通常の特性化震源モデルではディレクティビティの影響によって図-2に示すようにある特定の方向に強い地震動が生じる。それに対して、疑似点震源モデルによる計算では、比較的広い範囲がまんべんなく揺れることになる。第4章で述べる歴史地震の震度分布や内閣府による予測震度の分布においては、特定の方向に強い揺れが生じる傾向は顕著ではない。第2章で述べたように、本研究での最終的な目標は、歴史地震

の震度分布や内閣府による予測震度分布と調和的な震源モデルを作成することである。この場合においては、通常の特化震源モデルを用いるよりも、疑似点震源モデルを用いる方が有利である。以上のことから、本研究では地震動の計算に疑似点震源モデルを用いる。

4. $M_w7.3$ プレート内地震と安芸灘プレート内地震の震源のモデル化

(1) $M_w7.3$ プレート内地震

$M_w7.3$ プレート内地震は、内閣府首都直下地震モデル検討会³⁾によって示された、首都直下のフィリピン海プレート内で発生する震源位置を特定できない地震である。内閣府首都直下地震モデル検討会³⁾では、都心直

表-1 $M_w7.3$ プレート内地震の主要パラメータ

東経	139.715 °
北緯	35.595 °
深さ	41 km
地震モーメント M_0	1.10×10^{27} dyne·cm
アスペリティ総面積 S_a	133 km ²
短周期レベル A	1.02×10^{27} dyne·cm/s ²
密度	3.2×10^3 kg/m ³
S波速度	4.7 km/s
コーナー周波数 f_c	0.269 Hz
アスペリティ地震モーメント M_{0a}	3.56×10^{26} dyne·cm
アスペリティ応力降下量 $\Delta \sigma_a$	56.4 MPa

下、横浜市直下、羽田空港直下など、首都圏主要都市および重要施設位置の直下に地震を想定している。

港湾構造物の設計において、 $M_w7.3$ プレート内地震について検討を行う上で以下の前提を設定した。

- ・想定地震のマグニチュード： $M_w7.3$
(M_w ：モーメントマグニチュード)
- ・想定地震の地震モーメント： $M_0 = 1.10 \times 10^{27}$ dyne·cm
(以上、内閣府首都直下地震モデル検討会³⁾)
- ・震源位置：施設直下
- ・断層上端深さ：海洋プレート上面深度

式(1)、(2)より、アスペリティ総面積 $S_a = 133$ km²、短周期レベル $A = 1.02 \times 10^{27}$ dyne·cm/s²、を求め、アスペリティのコーナー周波数と地震モーメントはそれぞれ式(3)(4)で求めた。表-1には $M_w7.3$ プレート内地震の主要パラメータを示す。なお、以下に述べる震度の検証では、震央は施設の位置ではなく、内閣府の都心南部直下地震³⁾と一致させている。

本手法を用いて算定した $M_w7.3$ プレート内地震の予測震度と内閣府の予測震度の比較を図-3に示す。本手法では技術基準の方法¹⁾で個別の地点のサイト増幅特性を詳細に考慮しているのに対し、内閣府の予測震度は個別の地点の特性を詳細に考慮したものではないため、個々の地点で震度が1:1に対応することが期待できるものではない。例えば、サイト増幅特性の大きい埼玉県東部では本手法の方が震度が大きめに算定されている。しかしながら、震度5強と震度6弱の境界など広域における震度分布の傾向は両者で良く一致していることから、震源パラメータの設定は妥当なものとは判断される。

(2) 安芸灘プレート内地震

地震調査研究推進本部⁴⁾や愛媛県¹⁴⁾では、安芸灘プレート内地震として $M6.7 \sim 7.4$ の地震を想定している。一

■ ■ ■ ■ ■ ■ : 本パラメータによる予測結果

背景の着色：内閣府の予測結果

図-3 $M_w7.3$ プレート内地震に対する予測震度の比較
(内閣府 首都直下地震モデル検討会³⁾に加筆)

表-2 安芸灘プレート内地震の主要パラメータ

東経	132.5 °
北緯	34.1 °
深さ	55 km
地震モーメント M_0	1.39×10^{26} dyne·cm
アスペリティ総面積 S_a	33.6 km ²
短周期レベル A	5.10×10^{26} dyne·cm/s ²
密度	3.3×10^3 kg/m ³
S波速度	4.0 km/s
コーナー周波数 f_c	0.456 Hz
アスペリティ地震モーメント M_{0a}	6.22×10^{25} dyne·cm
アスペリティ応力降下量 $\Delta \sigma_a$	77.9 MPa

方、参考文献9)では、震源断層を特定したスラブ内地震の想定が現時点では困難であり、過去に近傍で発生したスラブ内地震をもって想定地震とすることが推奨されている。

過去に当該地域で発生した最大の地震は1854年の地震($M7.4$)であるが、この地震は安政南海地震の2日後に発生したため両地震による被害が分離できないとされている¹⁵⁾。次点の地震は1857年安芸灘の地震($M7.25$)、次いで1905年芸予地震($M7.2$)である。

そこで安芸灘プレート内地震の震源のモデル化の対象としては、1857年安芸灘の地震($M7.25$)と1905年芸予地震($M7.2$)の両者を取りあげ、両者の震度分布を包絡できる震源モデルの設定を試みる。なお、古い地震に

図-4 1905年芸予地震の震度分布と震度予測結果の比較

図-5 1857年安芸灘の地震の震度分布と震度予測結果の比較

については、参考文献中にマグニチュードの種類が明記されていないため、本論文でも同じ表記を用いた。

港湾構造物の設計において、安芸灘プレート内地震について検討を行う上で以下の前提を設定した。

- ・想定地震のマグニチュード： $M_j 7.2^{15)}$
(M_j ：気象庁マグニチュード)
- ・想定地震の地震モーメント： $M_0 = 1.39 \times 10^{26} \text{ dyne} \cdot \text{cm}$
(M_j と M_0 の関係¹⁶⁾より算定)
- ・震源位置：施設直下
- ・断層上端深さ：海洋プレート上面深度

ただし、上で述べた諸条件のうち M_j と M_0 の関係¹⁶⁾については、本来は内陸地殻内地震に対して提案されている式であることから、この式を用いて設定された震源

パラメータの妥当性は、以下で述べる震度の比較を行うことにより初めて担保される。

式(1)、(2)より、アスペリティ総面積 $S_a = 33.6 \text{ km}^2$ 、短周期レベル $A = 5.10 \times 10^{26} \text{ dyne} \cdot \text{cm/s}^2$ を求め、アスペリティのコーナー周波数と地震モーメントはそれぞれ式(3)(4)で求めた。表-2には安芸灘プレート内地震の主要パラメータを示す。なお、以下に述べる震度の検証では、震央は施設の位置ではなく、1905年芸予地震の震央位置¹⁴⁾としている。

本手法を用いて算定した安芸灘プレート内地震の予測震度と1905年芸予地震の震度分布および被害分布¹⁵⁾との比較を図-4に示す。この場合、予測震度における震度5強と6弱の境界がほぼ1905年芸予地震の震度分布のIVとVの境界に該当しており、予測震度の方が震度5の範囲が大きい。しかしながら、1857年安芸灘の地震の震度分布との比較(図-5)では、震度5の範囲の面積はほぼ一致している。従って、1857年安芸灘の地震と1905年芸予地震の両者の震度分布を包絡できる震源モデルを設定することができたと判断される。

5. おわりに

技術基準に示されていない、沈み込んだ海洋プレートの内部で発生するプレート内地震(スラブ内地震)のうち、首都圏直下の $M_w 7.3$ プレート内地震と安芸灘プレート内地震について、震源のモデル化手法を提案した。震源のモデル化は、

- ① 想定地震の地震モーメントの設定
- ② アスペリティ総面積の算定(式(1))
- ③ 短周期レベルの算定(式(2))
- ④ 技術基準に基づいてその他のパラメータの算定
- ⑤ 疑似点震源モデルを適用
- ⑥ 震源位置は対象施設直下に設定
- ⑦ 断層上端深さを海洋プレート上面深度に設定
- ⑧ 歴史地震の震度や内閣府による予測震度との整合性を確認

の手順で行うことを提案した。

$M_w 7.3$ プレート内地震は内閣府から公表された震度分布との比較を行い、震度5強と震度6弱の境界など広域における震度分布の傾向は両者で良く一致していることから、設計に用いる震源のモデル化の妥当性を確認した。安芸灘プレート内地震は1905年芸予地震および1857年安芸灘の地震の震度分布との比較を行い、両地震の震度分布を包絡できることから、設計に用いる震源モデルとして妥当であることの確認を行った。また、平成13年(2001年)芸予地震においても、時刻歴波形、フーリエスペクトル、PSI値を用いて、設計上安全

側の予測になることを確認している。

スラブ内地震は、地震観測記録も少なく、研究が十分とはいえない。今後、新たな知見が得られた場合には、本提案法の検証を行うなどのフォローが重要であると考えられる。また、今回対象とした地域以外についても、本提案法の適用性を確認することも重要である。

謝辞: 本研究は科研費 26420458 の助成を受けたものです。防災科学技術研究所の K-NET, KiK-net のデータを使用しました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 土木学会地震工学委員会耐震基準小委員会: 土木構造物の耐震設計ガイドライン(案)ー耐震基準作成のための手引きー, 2001.
- 3) 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/>, 2013.
- 4) 地震調査研究推進本部: 安芸灘～伊予灘～豊後水道のプレート内地震, http://www.jishin.go.jp/main/yosokuchizu/kaiko/k26_aki_jyo_bungo.htm.
- 5) 気象庁: 強震波形(平成 5 年(1993 年)釧路沖地震), <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/ku-sirooki/>.
- 6) 北海道: 過去に発生した道内各地域の主な地震被害, <http://www.pref.hokkaido.lg.jp/kn/ksd/jisshinhigai.htm>.
- 7) 気象庁: 強震波形(平成 13 年(2001 年)芸予地震), http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/010324_geiyo/index.html.
- 8) 内閣府: 平成 13 年芸予地震(3 月 24 日 15 時 28 分頃)について(第 13 報), <http://www.bousai.go.jp/kohou/oshirase/h13/akinada1.html>, 2001.
- 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, pp.28-29, 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) 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ー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ー, 地震 2, Vol.65, pp.45-67, 2012.
- 12) 若井淳, 長坂陽介, 野津厚: 疑似点震源モデルによる 2003 年 5 月 26 日宮城県沖スラブ内地震の強震動シミュレーション, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.70, No.4, pp.818-829, 2014.
- 13) 長坂陽介, 野津厚, 若井淳: 疑似点震源モデルによる 2005 年 7 月 23 日千葉県中部の地震の強震動シミュレーション, 第 14 回日本地震工学シンポジウム, 2014.
- 14) 愛媛県: 愛媛県地震被害想定調査結果(最終報告)について, <https://www.pref.ehime.jp/bosai/higaisoutei/higa-isoutei25.html>, 2013.
- 15) 宇佐美龍夫: 最新版日本被害地震総覧[416]-2001, 東京大学出版会, 2003.
- 16) 武村雅之: 日本列島およびその周辺で起こる浅発地震のマグニチュードと地震モーメントの関係, 地震 2, Vol.43, pp.257-265, 1990.

SOURCE MODELING METHOD OF INTRA-PLATE EARTHQUAKES FOR DESIGN GROUND MOTION

Masayuki YAMADA, Yoshihiro ITO, Atsushi NOZU and Takashi NAGAO

Source modeling method of intra-plate earthquakes in the subducting oceanic plate has not been established for the design method of port and harbour facilities. In this paper, we proposed a method to construct a source model for the intra-plate earthquake of $M_w 7.3$ occurring below the Tokyo capital region and the earthquake below Aki-Nada sea. The proposed source modeling method applies the following procedure; (1)setting seismic moment for scenario earthquake, (2)calculating total area of asperities, (3)calculating short period level, (4)setting other parameters based on the technical standards, (5)applying the pseudo point source model, (6)setting depth of upper edge of the fault at the depth of plate boundary, and (7)verifying the source parameters using the predicted or observed seismic intensity distribution.

The validity of the proposed source model of the intra-plate earthquake of $M_w 7.3$ below the Tokyo capital region was verified in view of the seismic intensity published by the cabinet office, government of Japan. The validity of the proposed source model of the intra-plate earthquake below Aki-Nada sea was also verified in view of the seismic intensity observed during the 1905 and 1857 Geiyo earthquake.