疑似点震源モデルによる2003年5月26日宮城県 沖のスラブ内地震の強震動シミュレーション

若井 淳1・長坂陽介2・野津 厚3

 1 (独) 港湾空港技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1) E-mail: wakai-a@pari.go.jp
 2 (独) 港湾空港技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1) E-mail: nagasaka-y@pari.go.jp
 3 (独) 港湾空港技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1) E-mail: nozu@pari.go.jp

最近の研究で,既往の特性化震源モデルをさらに単純化した疑似点震源モデルが提案され,2011年東北 地方太平洋沖地震への適用性が確認されている。単純化の要点は,強震動の生成に関わる各々のサブイベ ントに対し,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という点である。今後,疑似点震源モデルの活用を目指す場合, 他の代表的な地震への適用性を検証することは重要である。本検討では,2003年5月26日に発生した宮城 県沖のスラブ内地震を例に,疑似点震源モデルの適用性を検討した。その結果,波形およびフーリエスペ クトルともに特性化震源モデルと同等の再現性を有することを確認した。

Key Words : pseudo point-source model, intraslab earthquake, strong ground motion

1. はじめに

近年,実務において強震動の評価や予測を行う際 に良く用いられる震源モデルとして,特性化震源モ デル¹⁾(矩形のサブイベントの組み合わせから構成 される震源モデル)がある.その大きな理由の一つ としては,モデルパラメターを適切に設定すれば, その単純さにも関わらず,かなり精度良く強震動を 再現できることが多くの事例^{例えば1)}で確認されてい ることが挙げられる.

一方,最近の研究において,従来の特性化震源モ デルよりもさらに単純化された疑似点震源モデルが 提案されている²⁾. その検討の中で,2011 年東北地 方太平洋沖地震を対象に疑似点震源モデルの適用性 が調べられており,波形については特性化震源モデ ルと同等の観測波形の再現結果が,また,スペクト ルについては特性化震源モデルよりも良好な観測ス ペクトルの再現結果が得られていることが示されて いる.

将来的に,疑似点震源モデルを強震動の評価や予 測に活用していくことを見据えたとき,まずは,過 去に発生した代表的な海溝型地震,内陸地殻内地震 やスラブ内地震などに対して,その適用性を検証し ていくことが重要である.

本検討では、スラブ内地震への適用性検証の一環として、岩手県内における鉄道高架橋橋脚の損傷な

どの構造物被害が発生し、工学的に重要であると考 えられる2003年5月26日に発生した宮城県沖の地震 (M₁7.1)を対象として、疑似点震源モデルの適用 性について調べる.具体的には、まず、当該地震を 対象に構築された既存の特性化震源モデル³⁰に基づ いて疑似点震源モデルを構築する.次に、得られた 疑似点震源モデルを用いた強震動シミュレーション を行い、再現された速度波形およびフーリエスペク トルと特性化震源モデルで再現されたそれらを、観 測結果と比較し、双方の震源モデルによる再現程度 をそれぞ和にな合と比べて、疑似点震源モデルを 用いた場合に観測結果の再現程度がどのようになる のかを検証する.

2. 疑似点震源モデルの概要

本章では,疑似点震源モデルの概要について述べる.

疑似点震源モデルでは,強震動の生成に関わる 各々のサブイベントに対し,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.このような単純化を行う動機は次の二点で ある.第一に,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 ベント内部の破壊過程がフーリエ位相に及ぼす影響 を詳細に評価する必要性は小さい.第二に,大地震 の際に岩盤サイトで観測されている地震動のフーリ エ振幅は山谷の少ない形状をしている.特性化震源 モデルで地震動を計算した場合,計算結果のフーリ エ振幅には種々の要因による山谷が生じるのが普通 であり,むしろ,サブイベント全体からの地震動が 単純なスペクトルモデルに従うと考えた方が,観測 との誤差を小さくできる可能性がある.

疑似点震源モデルでは、サブイベントの破壊に起 因する震源スペクトルはオメガスクエアモデル40に 従うと仮定する.これに伝播経路特性とサイト増幅 特性50を乗じることにより対象地点での地震動のフ ーリエ振幅が計算され、これ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 の時刻歴波形が得られる.さらに、複数のサブイベ ントからの地震動を重ね合わせることにより地震動 の全体が計算される.

疑似点震源モデルにおけるモデルパラメターの数 は、サブイベント1個あたり、東経・北緯・深さ・ 破壊時刻・地震モーメント・コーナー周波数の6個 であり、従来の震源モデルに比べ大幅に少なくなっ ている.

3. 宮城県沖のスラブ内地震への適用

本章では、2003年5月26日に発生した宮城県沖の スラブ内地震を対象として、疑似点震源モデルを構 築し、それに基づいた強震動シミュレーションを行 い、その適用性について検討する.

(1) 疑似点震源モデルの構築

本検討では、最近の研究³で提案されている当該 地震の特性化震源モデルに基づいて、3つのサブイ ベントから構成される疑似点震源モデルを作成した.

それぞれのサブイベントの位置と破壊時刻として は、対応するアスペリティの破壊開始点座標と破壊 開始時刻を用い、破壊開始時刻については観測波形 の再現性を考慮して修正を加えた.また、それぞれ のサブイベントの地震モーメントとして、対応する アスペリティの地震モーメントを初期値として与え、 観測波形の再現性を考慮して修正を加えた.各サブ イベントのコーナー周波数fcは、対応するアスペリ ティの面積Sから次式⁶⁷⁷より算定した.

$$f_c = \sqrt{7/16} (V_s / \sqrt{S})$$
 (1)

ここに、*V*_sは震源域のS波速度である.そして、震 源域のS波速度は3.9km/s⁸⁾⁹⁾とした.以上により設定



図-1 2003年5月26日宮城県沖のスラブ内地震に対 する疑似点震源モデル(赤色の○と×を組み合わせた 記号). △は検討対象地点(18地点),青色の☆は地 震動の位相特性を考慮するために用いた中小地震の震 央.下図は、上図の緑色枠内の領域を拡大したもの.

表-1 疑似点震源モデルのパラメター. M₀は地震モー メント, f_cはコーナー周波数を示す.

	subevent1	subevent2	subevent3
Rupture time (s)	0.0	1.2	4.0
Longitude (deg.)	141.650	141.648	141.648
Latitude (deg.)	38.820	38.793	38.847
Depth (km)	72	72	78
M ₀ (Nm)	1.5E+18	1.5E+18	6.0E+18
f _c (Hz)	1.29	1.29	0.51

された疑似点震源モデルのサブイベントの位置を図 -1に、震源パラメターを表-1に示す.

(2) 強震動シミュレーション

前節で構築された疑似点震源モデルに基づき,それぞれの対象地点における地震動の評価を行った. このとき,震源域における煤質の密度は 3.1×10³kg/m³とした⁸⁾⁹⁾.ラディエーション係数は, 全方位への平均値である0.63を用いた.また,地震 動のエネルギーが水平方向の2成分に分散する効果 を表す係数であるPRTITNは,各対象地点において, 水平2成分の自乗和が1となる条件の下で、できるだけ観測結果を再現する値を用いた. 伝播経路特性におけるQ値は東日本の海溝型地震に対して評価されている値(Q=114f^{0.92})¹⁰⁾を用いた. この値はもともと海溝型地震に対して求められたものであるが、当該地震に対して適用可能であることが佐藤¹¹⁾により確認されている. 経験的サイト増幅特性としては、既往の研究⁵⁾で得られているものを用いた. また、対象地点において、サブイベントに起因する地震動の位相特性を考慮するための中小地震記録としては、サブイベント3に比較的近い位置で発生した2003年5月27日 00:44の余震(Mj4.9)の記録を用いることにした.

検討対象地点については、図-1に示すように、当該地震の特性化震源モデル³⁾構築の際に用いられていた岩手県中部から宮城県北部にかけての18地点とした.その理由は、本検討の目的の一つが、当該地震の観測速度波形および観測された地震動のフーリエスペクトルに対して、特性化震源モデルおよび疑似点震源モデルに基づき計算された速度波形およびフーリエスペクトルの再現性を比較することにあるためである.

本稿末尾には、当該地震の観測記録の地表フーリ エスペクトルと線形時サイト増幅特性の比較を図-A として示している.この図に基づいて、表層地盤の 非線形性を受けていると考えられる対象地点につい ては、非線形性を考慮して計算を行った.具体的に は、表層地盤の多重非線形効果を考慮してグリーン 関数を補正する方法¹²⁾を用いた.堆積層のおける平 均的なS波速度の低下率v1と堆積層における平均的 な減衰定数の増分v2については、文献3)と同じ条件 で比較を行うため、文献3)と同じ値を設定した.そ の際、文献3)と同様、サブイベント3に対応する地 震動に対して非線形性を考慮した.

なお,速度波形の対象周波数帯域は,工学的に重 要である0.2~2.0Hz,フーリエスペクトルの対象周 波数帯域は0.2~10Hzとする.

各対象地点において観測された速度波形(0.2-2.0Hz)と前節で構築した疑似点震源モデルに基づ いて計算された速度波形(0.2-2.0Hz)を比較した結 果を図-2に示す.全体としては、比較的良好に観測 波形の特徴が再現されていることが分かる.ただし、 より詳細に見ると観測波形の特徴がうまく再現され ていない地点も見受けられる.MYG006やMYG010 では、全体的に過大評価となっているが、その原因 としては、非線形性を表すパラメターの設定に改善 の余地がある可能性が考えられる.

図-3は、各対象地点において観測された地震動の フーリエスペクトル(0.2-10Hz)と疑似点震源モデ ルから計算された地震動のフーリエスペクトル

(0.2-10Hz)を比較したものである.ここで、フー リエスペクトルは、水平2成分を合成し、バンド幅 0.05HzのParzenウィンドウを適用したものである. 全体としては、概ね良好に再現されていることが分 かる.より詳細に調べると、ピーク周波数のシフト や振幅レベルの過大評価が見受けられる地点がある が、この原因については、先述の通り、非線形性を 表すパラメターの設定に改善の余地があるためと考 えている. それ以外に、すべての対象地点において、 大きな谷が周期的に現れていることが確認できる. これは、同程度の規模の点震源が並んでいる場合、 それらに対応するインパルスが相応の時間間隔で現 れ、そのフーリエスペクトルは理論上、周期的にゼ ロとなることと対応していると考えられる.実際, 3つのサブイベントについて、それぞれに対応する 地震動のフーリエスペクトルを個別に計算すると, 周期的な比較的大きな谷は現れないことを確認して いる.

4. 特性化震源モデルとの再現程度の比較

本章では,前章で構築した疑似点震源モデルによる計算結果と既存の特性化震源モデル³⁾による計算 結果を比較することで,疑似点震源モデルの妥当性 を検証する.

(1) 特性化震源モデルによる計算結果

検討対象地点のうち代表的な地点について、当該 地震で観測された速度波形と既存の特性化震源モデ ル3に基づいて計算された速度波形を比較した結果 を図-4に、観測された地震動のフーリエスペクトル と計算された地震動のフーリエスペクトルを比較し た結果を図-5に示す.なお、特性化震源モデルを用 いた地震動の計算は,疑似点震源モデルを用いた場 合と同じ条件で計算を行うため、ラディエーション 係数は疑似点震源モデルの場合と同じものを与えた. これ以外に、位相特性の評価に用いた中小地震記録 や非線形性を表すパラメターについても疑似点震源 モデルと同様のものを用いているので、震源モデル の相違以外については同じ条件で計算を行っている ことになる. 図-5を見ると、速度波形およびフーリ エスペクトルともに,疑似点震源モデルの場合と比 べて、それほど大きな差異は見られない.

(2) 再現性の定量的評価

特性化震源モデルおよび疑似点震源モデルによっ て計算された速度波形(0.2-2.0Hz)およびフーリエ スペクトル(0.2-10Hz)に関する計算誤差を客観的 に把握するため、それぞれの震源モデルによる計算 結果と観測結果との誤差を以下の式により定量的に 評価した.



図-2 図-1 で示した 18 対象地点における本震の観測速度波形(黒)と疑似点震源モデルによる合成速度波形(赤)の比較. 左図が EW 成分,右図が NS 成分.対象周波数帯域は 0.2-2.0Hz.







- 6 -



図-4 図-1 で示した 18 対象地点のうち,代表 2 地点に おける,当該地震の観測速度波形(黒実線)と特性化 震源モデルによる計算速度波形(赤実線)の比較.左 図が EW 成分,右図が NS 成分.対象周波数帯域は 0.2-2.0Hz.



図-5 図-1 で示した 18 対象地点のうち,代表 2 地点に おける,当該地震の観測結果のフーリエスペクトル (黒実線)と特性化震源モデルによる計算結果のフー リエスペクトル(赤実線)の比較.フーリエスペクト ルは,水平 2 成分の合成をとり,バンド幅 0.05Hz の Parzen ウィンドウを適用.

$$\frac{\int (v_{syn}(t) - v_{obs}(t))^2 dt}{\int v_{obs}^2(t) dt}$$
(2)

$$\int (\log_{10} FS_{syn}(f) - \log_{10} FS_{obs}(f))^2 d(\log_{10} f)$$
(3)

ここに、*v*_{syn}(*t*)は速度波形の計算結果、*v*_{obs}(*t*)は速度 波形の観測結果、*FS*_{syn}(*f*)はフーリエスペクトルの計



図-6 疑似点震源モデルと特性化震源モデルによる計 算結果について,観測結果の再現性に関する誤差評価 結果.上図が速度波形,下図がフーリエスペクトルの 結果.

算結果, FSobs(f)はフーリエスペクトルの観測結果を 表す.式(2)における時間区間は各対象地点で10-60s の50秒間,式(3)における周波数区間は各対象地点で 0.2-10Hzとする.なお,式(3)で用いるフーリエスペ クトルは,水平2成分を合成し,バンド幅0.05Hzの Parzenウィンドウを適用したものである.

誤差評価の結果を図-6に示す.ここで、速度波形 に対する誤差は水平2成分の平均値を表している. まず, 速度波形に対する誤差評価の結果については, 対象地点ごとに双方の誤差の大小が入れ替わってい る. そこで、対象となる18地点すべての誤差に関し てその平均をとると,疑似点震源モデルの場合は 2.42であり、 特性化震源モデルの場合は2.70となる. よって、疑似点震源モデルの方がやや(約10%程度) 再現性が良いと言える. 次に、フーリエスペクトル の結果については、対象地点ごとの誤差の大小関係 は、やはり地点毎に入れ替わっている、そして、全 18地点の誤差の平均をとると、疑似点震源モデルの 場合は0.15、特性化震源モデルの場合は0.16となり、 特性化震源モデルとほぼ同様な(厳密には疑似点震 源モデルの方が約5%程度小さい)再現性を有して いることを示している.

疑似点震源モデルの特徴として,特にフーリエス ペクトルに関しては,特性化震源モデルよりも山谷 が小さくなることが考えられ,観測結果との誤差の 比較に関して,ある程度明確な形で,より小さくな ることが期待されたが,ここではそのような結果と なるまでには至らなかった.その要因としては,3 章第2節でも述べたように,計算された地震動のフ ーリエスペクトルにおいて,比較的大きな谷が周期 的に生じていたことが考えられる.この点について は,スムージングの際のバンド幅をもう少し大きめ にとることで,周期的な大きい谷が解消され,観測 結果との整合性がより明確になることが期待される.

5. まとめ

本検討では,従来の特性化震源モデルをさらに単純化した疑似点震源モデルについて,2003年5月26日に発生した宮城県沖のスラブ内地震を対象として,具体的にその震源モデルを構築し,それに基づいた強震動シミュレーションを行った.その結果,岩手県中部から宮城県北部の対象地点における速度波形(0.2-2.0Hz)およびフーリエスペクトル(0.2-10Hz)は,概ね観測結果を再現できることがわかった.また,既存の特性化震源モデル³に基づいた計算結果との比較を行ったところ,速度波形(0.2-2.0Hz)については疑似点震源モデルの方がやや再現性が良く,フーリエスペクトル(0.2-10Hz)についてはほぼ同等の再現性を有していることが分かった.

今後は,他のスラブ内地震について疑似点震源モ デルの適用性を検証していく予定である.

謝辞:本検討では、(独)防災科学技術研究所のK-NETおよびKik-netの強震観測記録を使用しています. 記して謝意を表します.

付録 検討対象地点の本震時地表フーリエスペ クトルと線形時サイト増幅特性

ここでは、検討対象地点に選定した18地点におけ る、サイト特性および表層地盤の非線形性を把握す るため、本震時の地表フーリエスペクトルおよび線 形時サイト増幅特性(地震基盤〜地表)の比較を行 い、その結果を図-Aに示す.対象周波数帯域は0.210Hzである. なお, ここでのフーリエスペクトルは, 水平2成分を合成し, バンド幅0.05HzのParzenウィン ドウを適用したものである.

参考文献

- 金江克宏,入倉孝次郎:1995年兵庫県南部地震の断層 モデルと震源近傍における強震動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集,500, pp. 29-36, 1997.
- 2) 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一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2,第65巻,pp.45-67,2012.
- 3)長坂陽介,若井淳,野津厚:北上盆地内の地震動の再現に着目した2003年5月26日宮城県沖スラブ内地震の震源モデル,土木学会地震工学研究発表会講演論文集,2013.
- Aki, K.: Scaling law of seismic spectrum, J. Geophys. Res, 72, pp.1217-1231, 1967.
- 5) 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.
- Brune, J.N.: Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 75, pp. 4997-5009, 1970.
- 7) Brune, J.N.: Correction, J. Geophys. Res., 76, pp. 5002, 1971
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会:宮城県沖地震 を想定した強震動評価手法について(中間報告),
 http://www.jishin.go.jp/main/kyoshindo/02oct_miyagi1/ind ex.htm>, 2002.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会:宮城県沖地震 を想定した強震動評価(一部修正版)について、
 http://www.jishin.go.jp/main/kyoshindo/05dec_miyagi/inde-x.htm>, 2005.
- 10) 佐藤智美,巽誉樹: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,556, pp. 15-24, 2002.
- 佐藤智美:強震記録に基づく2003年宮城県沖地震の大加速度の成因に関する研究,日本建築学会構造系論文集,581,pp.85-91,2004.
- 12) 野津厚,盛川仁:表層地盤の多重非線形効果を考慮した経験的グリーン関数法,地震2, pp.361-374,2003.

A PSEUDO POINT-SOURCE MODEL FOR OFF MIYAGI INTRASLAB EARTHQUAKE ON MAY 26, 2003

Atsushi WAKAI, Yosuke Nagasaka and Atsushi NOZU

In a recent research, a pseudo-point source model, which is a simplified version of the conventional characterized source model, was proposed and it was verified that the source model can be applied to the 2011 Tohoku earthquake, Japan. In the source model, the spatio-temporal distribution of slip within each subevent is not modeled. Instead, the source spectrum associated with a rupture of each subevent is modeled. For the future application of the source model, it is important to investigate its applicability to other destructive earthquakes.

In this study, the off Miyagi intraslab earthquake on May 26, 2003 is taken as an example, and the applicability of the pseudo-point source model is investigated. It was revealed that the source model can reproduce the waveforms and the Fourier spectra at least as well as the conventional characterized source model does.



- 9 -