M9クラス巨大地震の強震動評価

田中清和 野畑有秀

Estimation of Strong Ground Motion during Huge Earthquake

Kiyokazu Tanaka Arihide Nobata

Abstract

After the Great East Japan earthquake in 2011, the importance of seismic disaster mitigation and seismic countermeasures has been recognized. In particular, because this earthquake was a huge earthquake of magnitude 9.0, seismic countermeasures for huge earthquakes in the near future along the Nankai Trough have gained attention. In this study, we performed a general survey on the seismic ground motion characteristics of the 2011 Great East Japan earthquake and simulated its seismic ground motions around Tohoku and near Tokyo to verify the applicability of strong ground motion estimation methods. Adopting the estimated strong ground motions to both seismic-resistant structural design and damage potential estimation, such as for BCP (Business Continuity Plan), will enable effective preparation for expected great earthquakes.

概 要

東日本大震災の発生以降,地震防災や地震対策への意識が高まっている。特に,東日本大震災をもたらした 2011年東北地方太平洋沖地震がM9の巨大地震であったことで,近い将来の地震発生が懸念されている南海トラ フ沿いの巨大地震への耐震対策が注目されている。本論文では,まず東北地方太平洋沖地震における地震動の 特徴について整理し,次に,巨大地震を対象とした地震動評価技術の検証として,2011年東北地方太平洋沖地 震による東北〜東京地域での地震動シミュレーション解析結果を示す。強震動評価手法とその予測波形を,構 造設計やBCP等の被害想定へ適用し,展開をはかることによって,より効果的な巨大地震への備えが可能となる。

1. はじめに

2011年3月11日に発生したマグニチュード9.0(以下M9 と称する)の東北地方太平洋沖地震は、広範囲にわたって 大きな被害をもたらし、巨大地震の深刻な脅威を教訓と して残した。これらの教訓を来たるべき巨大地震に対し て、有効に活用することが社会から求められており、近 い将来の地震発生が懸念されている南海トラフ沿いの巨 大地震への耐震対策が注目されている。南海トラフ沿い の地震に関しては、今回の地震を受け、内閣府が幾つか の領域が連動しM9クラスの地震が発生する可能性や沈 みこんだプレートの深い部分でも強震動を生成する可能 性を指摘しており,被害想定を行う上で,これらの想定 を反映した強震動評価が重要となっている。さらには、 建設業にとっても構造物の安全性、機能被害を照査する 上で,巨大地震の強震動予測は必須の課題となっている。 一方, 1995年の阪神大震災以降, 急速に普及してきた強 震動予測手法は、その後発生した内陸活断層地震や海溝 型地震に適用されてきた。しかしながら、巨大地震で多 数の検証用強震記録が得られているのは、M8クラスでは 2003年十勝沖地震, M9クラスでは今回の地震の2例に過 ぎず、必ずしも巨大地震に対しての有用性が十分に確認

できているという状態ではない。従って、M9クラスの東 北地方太平洋沖地震の強震動シミュレーションを行い、 その有用性や課題を把握しておくことが重要である。こ の地震については、有限差分法単独による長周期成分の シミュレーションや経験的手法による評価は幾つか報告 されているが、短周期〜長周期までを評価する際に多用 される強震動予測手法、即ち、統計的波形合成法と有限 差分法により同時に解析した例は殆どない。

本論文では,東北地方太平洋沖地震の強震動の特徴を 観測記録から簡単に紹介するとともに,シミュレーショ ン解析を行った結果について報告する。

2. 2011年東北地方太平洋沖地震の地震動の 特徴

Fig. 1 に震度分布を示す。今回の地震では広い範囲で 強い揺れが観測されている。震度分布は過去の東北地方 の太平洋側で発生した地震と同様に南北に広がる分布を 示しているが、広域な断層面に呼応するように関東北部 においても震度6弱となる領域が見られる。

防災科学技術研究所で観測しているK-NET, KiK-net 観測記録を用いて,減衰5%の加速度応答スペクトルを計







Fig. 3 既往の強震記録と2011年東北地方太平洋沖地震の記録の比較 Comparison Seismic Records of Past Earthquakes and the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake

算し、その周期0.2秒と5秒または4秒の距離減衰特性を Fig.2 に示す。同図には、M8クラスの海溝型地震を含む 観測記録から作成された加速度応答スペクトルの距離減 衰式の代表的な例として, Kanno et al.(2006)¹⁾または Youngs et al.(1997)²⁾による距離減衰式の予測結果を併せ て示す。前者の距離減衰式は日本国内を主とする4979地 震約92500記録から水平成分ベクトル合成最大値を対象 に、後者は世界の沈み込み帯の164地震480記録から水平2 成分の幾何平均値を対象に作成されたものである。計算 に用いたマグニチュードは、両距離減衰式の適用範囲の 外挿となるモーメントマグニチュード(Mw)9.0の場合に 加えて,マグニチュードに頭打ち傾向がみられるという 最近の検討例を参考にMw8.2(両距離減衰式の適用上限 Mw値)の場合を併せて示す。周期0.2秒,即ち加速度を決 定づける周期帯の減衰特性は距離減衰式に比べて急激に 減衰する傾向, または距離の短い地点では観測値の方が 大きくなる傾向がみられる。周期5秒または4秒では、観測 値よりも距離減衰式の方が大きい傾向が見られ、今回の 地震のやや長周期帯の地震動の励起は少なかったものと 考察される。

Fig. 3 に近年の被害地震の代表的な強震記録(1995年 兵庫県南部地震(M7.3)のJR鷹取, 2003年十勝沖地震 (M8.0)のK-NET大樹, 2004年新潟県中越地震(M6.8)の JMA川口, 2007年新潟県中越沖地震(M6.8)のK-NET柏崎) と今回震度7を観測したK-NET築館とKiK-net芳賀の強震 記録を比較して示す。波形は加速度でNS成分であり、時 間軸と加速度軸は概略揃えて示している。今回の地震の 特徴は継続時間が非常に長いことがあげられる。同じ海 溝型の2003年十勝沖地震(Mw=8.3)と比較してもかなり 長く、振幅の大きな時間が3分間程度継続している。 K-NET築館においては最大加速度も大きく2.7Gの加速度 を記録している。擬似速度応答スペクトルをみると,2.7G を記録したK-NET築館では周期0.3秒が卓越しており、短 周期成分の卓越が大きいのがわかる。同様にKiK-net芳賀 においても、周期0.7秒以下の短周期成分の卓越が大きい。 参考として同図には建築基準法の告示スペクトルの工学 的基盤での極稀地震のスペクトルを示すが、この2つの観 測記録とも,周期1秒以上では工学的基盤の極稀レベル以 下の地震動強さとなっている。一方、既往の観測記録に おいては、周期1秒~3秒の卓越が大きく、告示スペクト ルのレベルを大きく上回っている。

3. 東北地方太平洋沖地震の強震動シミュレー ション

3.1 波形合成法(グリーン関数法)による評価

巨大地震を対象とした地震動評価法の検証として, 2011年東北地方太平洋沖地震を対象とする統計的波形合 成法および経験的波形合成法による強震動シミュレーションを実施した。



Fig. 4 強震動生成領域の震源モデル (赤:釜江・川辺モデル,青:入倉・倉橋モデル) Fault Models of Strong Motion Generation Areas (red: Kamae and Kawabe, blue: Irikura and Kurahashi)

Table 1 釜江・川辺(2011)モデルの震源パラメータ Source Parameters of Kamae and Kawabe(2011) Model

	Asp1	Asp2	Asp3	Asp4	Asp5
走向角(゜)	195	195	195	195	195
傾斜角(゜)	13	13	13	13	13
面積 (km ²)	40×40	50×50	20×20	30×30	30×30
地震モーメ ント(Nm)	4.93E+20	1.10E+21	8.8E+19	1.19E+20	2.58E+20
応力降下量 (MPa)	18.9	21.6	27.0	10.8	23.1
ライズ タイム(sec)	3.6	4.5	1.8	2.7	2.7
破壞開始 時間(sec)	0.0	35.0	57.0	87.0	102.0
経験的グリ	2011.3/10	2011.3/10	2011.3/10	2011.3/10	2005.10/13
ーン関数と	3:16	3:16	3:16	3:16	20:44
した地震	M6.4	M6.4	M6.4	M6.4	M6.3

Table 2 入倉・倉橋(2011)モデルの震源パラメータ Source Parameters of Irikura and Kurahashi(2011) Model

	SMGA1	SMGA2	SMGA3	SMGA4	SMGA5
走向角(°)	193	193	193	193	193
傾斜角(°)	10	10	10	10	10
面積 (km ²)	62.4×41.6	41.6×41.6	93.6×52.0	38.5×38.5	33.6×33.6
地震モーメ ント(Nm)	2.31E+21	7.05E+20	4.34E+21	3.83E+20	3.99E+20
応力降下量 (MPa)	41.3	23.6	29.5	16.4	26.0
破壞開始 時間(sec)	15.64	66.42	68.41	109.71	118.17

3.1.1 評価の方法 統計的波形合成法による地震動 の計算では、サイト直下の地震基盤における地震動を統 計的波形合成法により算定し、求めた地震基盤波(水平 動)を一次元平行成層地盤に鉛直入射して非線形時刻歴 応答解析により地表面での地震波を算定した。波形合成 法には壇ほか³⁾の方法を採用し、地震基盤における要素 断層波の包絡形は佐藤ほか(1994)⁴⁾による統計的経時特 性を使用した。経験的波形合成法の計算では、評価位置

(地表または地中)での地震観測記録をバンドパスフィル ター処理(0.1~10sec)した波形をグリーン関数として用 いて、地表面または地中での波形を入倉⁵⁾の方法により 合成した。

3.1.2 震源モデル 東北地方太平洋沖地震について は多くの研究者により震源のすべり分布モデルや震源過 程モデルが提案されている。本検討では,主として周期 10秒以下を対象とした強震動波形解析により求められた



Fig. 5 統計的波形合成法による地震動シミュレーション波形(釜江・川辺モデル) Calculated Ground Motion by Stochastic Green Function Method (Kamae and Kawabe Model)



Fig. 6 経験的波形合成法による地震動シミュレーション波形(釜江・川辺モデル) Calculated Ground Motion by Empirical Green Function Method (Kamae and Kawabe Model)



Fig. 7 統計的波形合成法による地震動シミュレーショ ン波形(入倉・倉橋モデル)





Fig. 8 差分モデル化範囲と地震基盤構造の等深度線図 Region of Finite-Difference Modeling and Depth Contours for the Sediment-Bedrock Interface

強震動生成領域から成る震源モデルのうち, 釜江・川辺 (2011)^{6),7)}と入倉・倉橋(2011)⁸⁾によるモデルを採用し た。Fig. 4 に各震源モデルの強震動生成領域の位置を, Table 1~2 に震源パラメータを示す。各強震動生成領 域は約10km四方の要素断層に分割して計算に用いた。 3.1.3 地盤構造モデル 深い地盤構造については,防 災科学技術研究所が地震調査研究推進本部の全国地震動



予測地図(2009年版, 2010年版)^{9), 10)}を作成するために 構築した深部地盤構造モデル¹¹⁾に基づいて設定した。表 層地盤には,評価地点に選定したK-NET, KiK-net観測地 点で公表されている地盤速度構造を適用し,工学的基盤 以浅の各層の動的変形特性として砂質土,粘性土の種別 に応じて古山田ほか(2003)¹²⁾による特性を割当てた。

波形合成法に用いる地殻(地震波の伝播経路)は Vs3.8km/s(または3.93km/s)とし,減衰Q値に地震調査研究 推進本部・地震調査委員会による宮城県沖地震および三 陸沖北部地震の強震動評価^{13),14)}に使用された設定 (Q=110f^{0.69} (f>1Hz), Q=110 (f<=1Hz), [f:周波数])を用い た。

3.1.4 計算結果 地震動評価を実施した複数地点の うちの例として, K-NET日立(IBR003)とKiK-net都路 (FKSH19)を評価対象サイトとした場合について示す。

釜江・川辺モデルに基づき統計的波形合成法により算 定した結果をFig.5 に,経験的波形合成法により算定し た結果をFig.6 に示す(図中の波形は観測と計算で絶対 時刻は一致させていない)。統計的波形合成法の計算にお いては,要素断層波作成時の震源放射特性係数を,S波 の全震源球面での平均値¹⁵⁾である0.63を水平成分の自 乗和平均と考えて√2で除した値0.445にて等方的に与え た場合(uniRAD)と,周波数依存型の放射特性として,短 周期域では同様にS波全震源球面平均値に基づき等方的 に0.445を与え,長周期域では理論放射特性値¹⁶⁾を与え ることとして,これらの値が振動数3Hz~6Hz間¹⁷⁾で両 対数軸上で線形に遷移するように与えた場合(f-depRAD) の2通りを計算した。

釜江・川辺モデルに基づく統計的波形合成法の結果で は、波形振幅を比較すると観測記録に比べて計算波がか なり小さい。応答スペクトルでみると、周期1~2秒程度 以上の長周期帯域では観測と計算が概ね同等の振幅レベ ルとなっているが、短周期域では計算波が大きく下回っ ており、そのために波形振幅が小さくなっていることが 分かる。経験的波形合成法の結果においてもこの傾向は 同様で、短周期域では計算が観測を下回っている。この ことは震源モデルに短周期成分の説明能力が不足してい るとも解釈できるが、この他のサイト(例えば、KiK-net +王IBRH14、いわき東FKSH14、等)での経験的波形合成 法結果では観測と計算波の短周期レベルが良く一致して いる場合もあり単純には判断できない。

統計的波形合成法における震源放射特性の設定による 差違に関しては、IBR003のNS成分、FKSH19のNS,EW成 分では等方型,周波数依存型ともに計算波は観測と同程 度の応答振幅レベルであるが,IBR003のEW成分では観 測は等方型と周波数依存型の計算波の中間のレベルとな っており,等方型の方がやや過大であるが安全側の評価 結果である。

Fig. 7 には、入倉・倉橋モデルに基づく統計的波形合 成法の算定結果を示す。計算時の震源放射特性係数は等 方的に与えた場合のみとした。応答スペクトルによれば、 周期1~2秒程度以上の長周期帯域ではやや過大評価の部 分もあるが観測と計算で概ね同等の振幅レベルとなって いる。短周期域については釜江・川辺モデルの場合に比 べて振幅が大きく、比較的良い振幅レベルの一致を示す が、やや過小評価であることは同様の傾向である。 以上の検討結果から、巨大地震の波形合成法による強 震動評価については、特に短周期成分の評価において震 源設定の影響が大きく、今後の研究・改良の余地がある と考えられる。また、本検討には含まれないが、K-NET 築館MYG004サイト等における地盤増幅特性に関する既 往研究を鑑みると、地盤増幅の考慮方法についてもより 精度の高い評価に向けて改善の余地ありと思われる。

3.2 三次元有限差分法による評価

巨大地震を対象とした長周期地震動の評価法の検証と して,2011年東北地方太平洋沖地震を対象に,三次元有 限差分法による長周期地震動のシミュレーション解析を 実施した。



Fig. 10 三次元有限差分法による地震動シミュレーション波形の擬似速度応答スペクトル(釜江・川辺モデル) Pseudo-velocity Response Spectra of Calculated Ground Motion by 3-D Finite Difference Method (Kamae and Kawabe Model)

大林組技術研究所報 No.76 M9クラス巨大地震の強震動評価

	5. Obs IWTH27 NS	MAX = 0.461E+01 kine	
kine	0.E-VWWWWwwww	~~~~	kine
ne	Sin IWTH27 NS	MAX = -0.402E+01 kine	ne
Ξ	-5.E	MAX = 0.7205+01 kins	Ξ
ine	0. WWWWWwwwww	MAX = -0.739E+01 kine	ne
×	-8 Sim MYGH12 NS	MAX = 0.399E+01 kine	¥.
kine	0. My		kine
	10. C Obs MYG013 NS	MAX = -0.150E+02 kine	-
kine	0. E		kine
ne	10: Sim MY01013 NS	MAX = -0.402E+01 kine	ре
. <u>s</u> -			Ξ.
ne	6. ODS FRSHIT NS	MAX = -0.801E+01 kine	ne
ž	-6 Sim FKSH17 NS	MAX = -0.310E+01 kine	ž
kine	0		kine
	4. Obs FKSH19 NS	MAX = -0.381E+01 kine	
kine	0. E	for your	kine
ne	The sim FKSH19 NS	MAX = -0.344E+01 kine	ne
z		MAX - 04545-001	. <u>s</u>
ne	0	MAX = -0.151E+02 kine	ne
×-	18 Sim IBR003 NS	MAX = 0.515E+01 kine	×.
kine	0		kine
-	^{10.} C ^{Obs} IBR011 NS	MAX = 0.862E+01 kine	-
kine		n/h/h/h/h/h/h/h/h/h/h/h/h/h/h/h/h/h/h/h	kine
ne	18: Sim IBRUTT NS	MAX = 0.589E+01 kine	ne
. <u> </u>		MAX = 0.1045 (00 bins	. <u>s</u>
ine	0	MAX = 0.124E+02 kine	ne
<u> </u>	12. 12. Sim IBR016 NS	MAX = -0.800E+01 kine	×.
kine	0		kine
	^{20.} C ^{Obs} CHB009 NS	MAX = 0.192E+02 kine	
'ki	0.	while	, ki
ne	0	MAX = -0.115E+02 kine	ine
- ×	-20.E	MAX = -0 151E+02 kine	×-
vine	0	hmham	éine.
	15. 5. 5. 5. 5. 5. 5. 5. 5. 5. 5. 5. 5. 5	MAX = 0.963E+01 kine	
- ki	0	Marana and a second sec	kine
e	15. Obs SIT010 NS	MAX = 0.147E+02 kine	Ð
ż.	15. Sim SIT010 NS	MMM/In-14 MAX = 0.134F+02 kine	, ki
kine	0.	han the second second	áne
	15.C 12 – Obs KYS NS	MAX = 0.129E+02 kine	-
kine	0. E	homen	kine
e	12 Sim KYS NS	MAX = 0.959E+01 kine	۔ ف
ż.	.12.E	A. A. A. A. Marine and a second second	, ki
Je		MAX = -0.156E+02 kine	ЭС
. <u>.</u>	15 Sim JMA TOK NS	MAX = -0.134E+02 kine	Ē.
kine	0WMMM	MMMmmmm	kine
-	15 15 Obs TKY007 NS	MAX = -0.112E+02 kine	-
kine		http://www.h	kine
Pe	15: Sim TKY007 NS	MAX = -0.158E+02 kine	he
. <u>z</u>			Ē.
ne	15. ODS KNGUUT NS	MAX = -0.151E+02 kine	ne
×-	15. Sim KNG001 NS	MAX = -0.113E+02 kine	×.
kine	0.E	Mar Martine Mar	kine
<i></i>	15. Obs KNG002 NS	MAX = -0.164E+02 kine	~
- ki		William a construction	, kin
ne.		MAX = 0.098E+01 kine	ne.
<u> </u>	15.Ľ	+	×.
	0. 100. 200. TIMF (300. 400. 500.	
		*	

_{6.} ⊂ Obs IWTH27 EW	MAX = 0.578E+01 kine
o Mr Mp daran	w^
6:	MAX = 0.293E+01 kine
_6.⊑ 10 – Obs MYGH12 EW	MAX = -0.136E+02 kine
0 May Margan	~~
-18:- Sim MY&H12 EW	MAX = -0.626E+01 kine
-10.E 10_Obs MY6013 EW	MAX = 0.178E+02 kine
0.Emm	
-10: Sim MY0013 EW	MAX = -0.480E+01 kine
-10.E	MAX = 0.7245+01-1
0.E-VW/WWW	MAX = 0.734E+01 kine
⁻⁶ ^L Sim FKSH17 EW	MAX = 0.284E+01 kine
6. Obs FKSH19 EW	MAX = -0.546E+01 kine
^{-6.L} ^{6.L} Sim FKSH19 EW	MAX = 0.521E+01 kine
0.E	
	MAX = -0.864E+01 kine
-18: Sim IBR003 EW	MAX = -0.657E+01 kine
0	
10. Obs IBR011 EW	MAX = -0.114E+02 kine
-18:- Sim IBR011 EW	MAX = -0.527E+01 kine
0	
^{12.} Cobs IBR016 EW	MAX = -0.143E+02 kine
0	MAX = 0.819E+01 kine
-12.└ 18.┌ Obs CHB009 EW	MAX = 0.188E+02 kine
	Juny Marker Contractor
	MAX = -0.151E+02 kine
-18.C 12. Obs TKY025 EW	MAX = -0.128E+02 kine
0	handhar
0. Sim TKY025 EW	MAX = 0.113E+02 kine
-12.E 12 - Obs SIT010 EW	MAX = -0.112E+02 kine
	w/wp.hom
- 12: Sim SIT010 EW	MAX = 0.103E+02 kine
-12.E 12 _ Obs KYS EW	MAX = -0.114F+02 kine
0	phyleMenter man
Sim KYS EW	MAX = -0.118E+02 kine
	MAX = -0.186E+02 kine
	WWWWWWWWW
-18 Sim JMA TOK EW	MAX = 0.119E+02 kine
	MAX = 0.111E-0011
	MAX = 0.111E+02 kine
-14 E Sim TKY007 EW	MAX = -0.142E+02 kine
0.E	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~
0. Obs KNG001 EW	MAX = 0.980E+01 kine
-10 E 10 E 10 E Sim KNG001 EW	MAX = 0.870E+01 kine
0.E	M.M.M.M.M.M.M.M.M.M.M.M.M.M.M.M.M.M.M.
	MAX = -0.122E+02 kine
-12 E	NERI MANAR
¦ź:⊤ Sim KNG002 EW	MAX = 0.728E+01 kine
12:	MAX = 0.728E+01 kine
12:	HYPINWY MAX = 0.728E+01 kine HYVNYNMMAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA

_{7.} Obs IWTH27 UD	MAX = 0.407E+01 kine
.≝ o. E~nMMm mm	~~
	MAX = 0.708E+01 kine
.≣ _7.E	
₀ ^{10.} E Obs MYGH12 UD	MAX = -0.878E+01 kine
	~~
	MAX = -0.125E+02 kine
10. Obs MYG013 UD	MAX = -0.115E+02 kine
	MAX - 0.614E+01 kine
	MAX - 0.014E+01 kine
[™] -10.E	
2 0 E MAMAdahanan	MAX = 0.718E+01 kine
-7 Sim FKSH17 UD	MAX = -0.464E+01 kine
. So Myymm	
	MAX = -0.587E+01 kine
.º. E-MAAMM	~~~~
[→] -8 Sim FKSH19 UD	MAX = 0.759E+01 kine
_ ₈ _ Obs IBR003 UD	MAX = 0.861E+01 kine
.= 0.=NMMM	~
8 E Sim IBR003 UD	MAX = 0.470E+01 kine
. <u>ē</u> o. 	
-8.⊏ 6.⊏ Obs IBR011 UD	MAX = 0.519E+01 kine
. <u>e</u> 0. <u>-</u>	m
6. E Sim IBR011 UD	MAX = -0.439E+01 kine
.≝_o.⊨/////////////////////////////	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~
6. C Obs IBR016 UD	MAX = -0.575E+01 kine
	happend
6. Sim IBR016 UD'	MAX = 0.338E+01 kine
.≣ 0.E	·/····
^{8.} E ^{Obs CHB009 UD}	MAX = 0.817E+01 kine
	hally for the state of the stat
	MAX = 0.541E+01 kine
e ^{6.} Obs TKY025 UD	MAX = 0.558E+01 kine
.5 0 VW WWW	MAX = 0.4725+01 kine
	where 0.4732+01 kine
[⊥] _6.Ε	
	MAX = -0.684E+01 kine
	MAX = 0.438E+01 kine
	1. 1911. 19-1-1-1-1-1
	MAX = 0.625E+01 kine
.º 0 AMAMM	high high high provide the second
⁻ - ⁶ . ⊂ Sim KYS UD	MAX = 0.405E+01 kine
	famina
–6.∟ 10. – Obs JMA TOK UD	MAX = -0.110E+02 kine
	HIMM-1111-440000000
-10 E 10 Sim JMA TOK UD	MAX = 0.492E+01 kine
	www.
-10 8. _C Obs TKY007 UD	MAX = -0.741E+01 kine
	Manufra-
-8. Sim TKY007 UD	MAX = 0.627E+01 kine
.≘ 0.⊨/\/\/\/\/\/\/\/\/\/\/\/\/\/\/\/\/	ht half and all have a second and a second
6.E Obs KNG001 UD	MAX = -0.671E+01 kine
.≝_o.⊨WWWW	hheme here
Sim KNG001 UD [™]	MAX = 0.437E+01 kine
.≅E	Lotal Addition to the second
	MAX = 0.828E+01 kine
.≣ 0. -8. -8. -8. -8. -8. -8. -8. -8. -8.	tretal types of the second
	MAX = -0.618E+01 kine
	. I
	+ + +
0. 100. 200.	300. 400. 500.



3.2.1 評価の方法 解析手法には不等間隔格子のス タッガードグリッドを用いた空間4次時間2次精度の三次 元有限差分法^{18),19)}を用いた。解析モデル範囲は,東西 410km,南北515km,深さ100kmの領域である。Fig.8に モデル化範囲を示す。地震動の評価位置は解放工学的基 盤面上(Vs500m/s層上面)とした。解析に当たっては時間 刻みを0.011秒,差分メッシュ間隔は水平0.3km,上下 0.2km~0.6kmとし,最小S波速度500m/sの層において周 期3.0秒以上の帯域で計算精度が確保されるように設定 した。減衰の考慮についてはGraves¹⁸⁾による手法を用い ることとし,リファレンス周期T₀=5秒で所定の値となる ように設定した。

3.2.2 震源モデル 震源は釜江・川辺(2011)^{6),7)}によるモデルを採用した。Fig. 8 中に震源モデルの強震動生成領域の位置を示す。強震動生成領域は10km四方に分割した各要素断層を点震源でモデル化し、各点震源の震源時間関数については、中村・宮武(2000)²⁰⁾によるすべり速度時間関数に要素断層内でのユニラテラル破壊仮定時の破壊伝播効果を加えた震源時間関数を作成し、これを複数のCosine型関数で近似して設定した。すべり角については川辺ほか²¹⁾に倣い90度とし、要素震源深さを太平洋プレート上面(海洋性地殻第2層Vs=2.8km/s上面)の深さと同じになるように変更して用いた。

3.2.3 地盤構造モデル 地盤構造については,地震調 査研究推進本部が長周期地震動予測地図 2012年試作版²²⁾ のために構築した地下構造モデルに基づき設定すること とし,最表層Vs350m/s層の地盤定数はVs500m/s層の値へ 置換して用いた。設定した地下構造モデルの地震基盤 (Vs3.2km/s層上面)の深度分布をFig.8 に示す。

3.2.4 計算結果 地震観測サイト16地点(K-NET 10 地点, KiK-net 4地点, 気象庁1地点(TOK), 大林組1地点 (KYS))について, 三次元有限差分法により計算した長周 期地震動の速度成分波形を観測記録と比較してFig. 9 に 示す。波形には3~20秒のバンドパスフィルター処理を施 した。Fig. 10 には観測と計算波の応答スペクトルを示す。

シミュレーション計算結果と観測記録とを比較すると, K-NET取手(IBR016)よりも震源寄りの東北地方の各サイ トでは計算波が観測よりもやや過小評価になる傾向が見 られる(例えばK-NET仙台MYG013,等)。また,IWTH27 からMYG013までのサイトでは計算波に観測波よりも前 に出現するフェーズが認められる。フェーズについては 震源モデルに起因する可能性が高いが,振幅過小につい ては地盤構造の精度に原因がある可能性があり,この地 域あるいは評価サイト周辺での地盤モデルの妥当性につ いて吟味する必要性を示唆している。

一方で,IBR016以降の関東平野内の各サイトでは,観 測と計算の波形が概ね同等の振幅レベルで形状も同様と なっており,継続時間が長く続く点についても再現でき ている。細かく見ると波形の個々のフェーズがずれたり 異なっていたりスペクトルの卓越形状がやや違っていた りするが,スペクトル振幅やスペクトル形状は概ね各サ イトで観測と同様となっていることから,関東平野での 長周期地震動の考慮は概ね妥当であると判断できる。

4. まとめ

2011年東北地方太平洋沖地震の強震動の特徴を観測記 録から概観した後に、M9クラスの巨大地震に対する強震 動予測手法の適用性の検証として、統計的波形合成法お よび三次元有限差分法によるシミュレーション解析を実 施した。その結果、統計的波形合成法では震源モデルに 依存する部分はあるものの観測をある程度再現できるこ と、有限差分法では関東平野部での長周期地震動を概ね 妥当に考慮できることを示した。また、短周期成分の地 震動評価には震源モデルの影響が大きく巨大地震の妥当 な震源モデル評価法について、より一層の研究が必要で あるという課題が明らかになった。

今後,このような強震動予測手法による予測地震動を 耐震設計やBCP(事業継続計画)等における被害想定へ適 用し,展開を計ることによって,より精度の高い巨大地 震への備えが可能となるものと期待される。具体的には 南海トラフ巨大地震を対象とした強震動予測に適用し, 超高層や免震などの長周期構造物の設計や工場建屋等の 一般耐震構造物の耐震性検討に資する予定である。

謝辞

防災科技研K-NET,KiK-netおよび気象庁の観測記録デ ータ,GMTを使用させて頂きました。また,地震動計算 を実施するに当たり,京都大学・川辺秀憲助教より提供 して頂いた有限差分法プログラムを利用させて頂きまし た。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- Kanno, T., et al. : A new attenuation relation for strong ground motion in Japan based on recorded data, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.96, No.3, pp.879-897, (2006)
- Youngs, R. R. et al. : Strong ground motion attenuation relationships for subduction zone earthquakes, Seismological Research Letters, Vol.68, No.1, pp.58-73, (1997)
- ¹ 壇一男,他:統計的グリーン関数法による1923年関 東地震(Mjma7.9)の広域強震動評価,日本建築学会構 造系論文集,No.530, pp.53-62, (2000)
- 4) 佐藤智美,他:ボアホール観測記録を用いた表層地 盤同定手法による工学的基盤波の推定及びその統計 的経時特性,日本建築学会構造系論文集,No.461, pp.19-28,(1994)
- Irikura, K.: Estimation of near-field ground motion using empirical Green's function, Proc. of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto,

Japan, Vol.8, pp.37-42, (1986)

- 6) 釜江克宏,川辺秀憲:2011年東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0)の震源のモデル化(強震動生成域)(第1報),ht tp://www.rri.kyoto-u.ac.jp/jishin/eq/tohoku1/Tohoku-ver 1-rev20110601.pdf,(2011)
- 川辺秀憲,他:2011年東北地方太平洋沖地震の震源 モデル,日本地震学会2011年秋季大会予稿集,B22-05, (2011)
- 入倉孝次郎,倉橋奨:2011年東北地方太平洋沖地震 の強震動生成のための震源モデル(2011年8月17日修 正版), http://www.kojiro-irikura.jp/pdf/tohoku_irikura2 0110816.pdf, (2011)
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会:全国地震動 予測地図, http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09_yoso kuchizu/index.htm, (2009)
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会:全国地震動 予測地図2010年版, http://www.jishin.go.jp/main/chous a/10_yosokuchizu/index.htm, (2010)
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会:4.4.2節 深 い地盤構造のモデル,4章 震源断層を特定した地震 動予測地図,「全国地震動予測地図-地図を見て 私の街の 揺れを知る-」技術報告書(2009), http:// www.jishin.go.jp/main/chousa/09_yosokuchizu/index.ht m, (2009)
- 古山田耕司,宮本裕司,三浦賢治:多地点での原位 置採取試料から評価した表層地盤の非線形特性,第 38回地盤工学会研究発表会,pp.2077-2078,(2003)
- 13) 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),平成17年12 月,(2005)

- 14) 地震調査研究推進本部地震調査委員会:三陸沖北部の地震を想定した強震動評価,平成16年5月,(2004)
- Boore, D. M. and Boatwright, J. : Average body-wave radiation coefficients, Bull. Seism. Soc. Am., 74, 5, pp.1615-1621., (1984)
- 16) Aki, K. and P. G. Richards : Quantitative Seismology, Theory and Methods (Vol. I, Chap. 4, Section 4.5), W. H. Freeman and Company, San Francisco, (1980)
- 佐藤智美: KiK-net強震記録に基づく鳥取県西部地 震とその余震のラディエーションパターン及びfmax の評価,日本建築学会構造系論文集,556, pp.25-34, (2002)
- 18) Graves, R. W. : Simulating seismic wave propagation in 3D elastic media using staggered-grid finite differences., Bull. Seism. Soc. Am., Vol.86, No.4, pp.1091-1106, (1996)
- Pitarka, A. : 3D elastic finite-difference modeling of seismic motion using staggered grids with nonuniform spacing, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.89, No.1, pp.54-68, (1999)
- 20) 中村洋光,他:断層強震動シミュレーションのための滑り速度時間関数の近似式,地震第2輯,第53巻, pp.1-9,(2000)
- 21) 川辺秀憲,他: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,第39回地盤震動シンポ ジウム,pp.35-42,(2011)
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会:「長周期地 震動予測地図」2012年試作版, http://www.jishin.go.j p/main/chousa/12_choshuki/index.htm, (2012)