

南海トラフ巨大地震におけるJRきのくに線沿いの強震動評価

Strong motion estimation at permanent observation station sites along JR Kinokuni Line during a scenario earthquake with $M_w9.0$ along the Nankai Trough

秦吉弥¹, ○吉田武¹, 吉川登代子¹, 山田孝弘², 湊文博¹, 常田賢一¹, 飛田哲男³
 Yoshiya HATA¹, Takeshi YOSHIDA¹, Toyoko YOSHIKAWA¹, Takahiro YAMADA²,
 Fumihiro MINATO¹, Ken-ichi TOKIDA¹ and Tetsuo TOBITA³

¹ 大阪大学 大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Osaka University

² 西日本旅客鉄道(株) 構造技術室

West Japan Railway Company

³ 京都大学防災研究所 地盤防災解析分野

Disaster Prevention Research Institute

During a scenario earthquake with $M_w9.0$ along the Nankai Trough, strong ground motion is predicted in the focal area, Wakayama Prefecture, Japan. In order to simulate the seismic damage of railway structures, it is necessary to estimate strong motions at the site of interest with sufficient accuracy, taking into account local site effects. In this study, seismic waveforms at sites of permanent observation station along JR Kinokuni Line were predicted based on the SMGA models considering the empirical site amplification and phase effects. The predicted seismic waveforms will be useful for rational safety assessment of a railway structure.

Keywords : railway structure, strong motion, SMGA model, site effects, response spectrum

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震($M_w9.0$)では、巨大津波だけでなく強震動の作用による土木構造物の被災が数多く報告¹⁾されている。一方で、2011年東北地方太平洋沖地震の発生を受け、南海トラフにおいても $M_w9.0$ 程度の巨大地震が想定されていることから²⁾、南海トラフ巨大地震($M_w9.0$)に対する土木構造物の耐震性評価を実施していくことは非常に重要³⁾である。このような大規模地震に対する土木構造物の耐震性能照査を動的FEM解析などに基づいて実施する場合、入力地震動の設定が必要不可欠となる。この点に関して、著者らは、大阪市内^{4),5)}および神戸市内⁶⁾の鉄道盛土を対象サイトとした南海トラフ巨大地震による強震動予測を行っている。しかしながら、想定震源域に近い和歌山県南部の鉄道盛土を対象とした検討事例⁷⁾は数少ない。

そこで本稿では、南海トラフ巨大地震の想定震源域に近いJRきのくに線(新宮～和歌山:図-1参照)を対象とした強震動予測を実施した結果について報告する。具体的には、まず、図-2に示すJRきのくに線沿いに設置されている既存強震観測点((旧)JMA新宮⁸⁾, MLIT太地⁹⁾, CRIEPI串本¹⁰⁾の3観測点(ただし、先行研究⁷⁾において実施済みのK-NET田辺¹¹⁾を除く))を対象サイト(以後、対象観測点と呼ぶ)として選定した。図-3, 図-4, 図-5に示すように、(旧)JMA新宮, MLIT太地, CRIEPI串本は、JRきのくに線の近傍にいざれも設置されていることが読み取れる。次に、対象観測点で得られた地震記録に基づいてサイト増幅特性ならびにサイト位相特性を評価した。最後に、南海トラフ巨大地震のSMGAモデルと経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法を組み合わせて、南海トラフ巨大地震時に対象観測点に作用する強震動を予測・評価した。

2. 強震動評価手法

(1) 震源モデルと強震波形計算手法

南海トラフ巨大地震による地震動の予測には、内閣府南海トラフの巨大地震モデル検討会²⁾によるSMGAモデル(基本ケース)を採用した。図-1および図-2に静岡県駿河湾～宮崎県日向灘のサブイベント(12個のSMGAで構成)と対象観測点の位置関係を示す。モデルパラメータの詳細については、文献2)を参照されたい。なお、 Q 値については、Petukhinほかによる推定値¹²⁾を採用した。本稿では、図-1に示すとおり、先行研究^{4),5),6),7)}と同様に、串本沖に破壊開始点の位置を配置した。

本研究では、経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震波形計算手法^{13),14)}を適用した。この方法では、まず式(1)により統計的グリーン関数を生成する。

$$A(f) = S(f) \cdot P(f) \cdot G(f) \cdot \frac{O(f)}{|O(f)|_p} \quad (1)$$

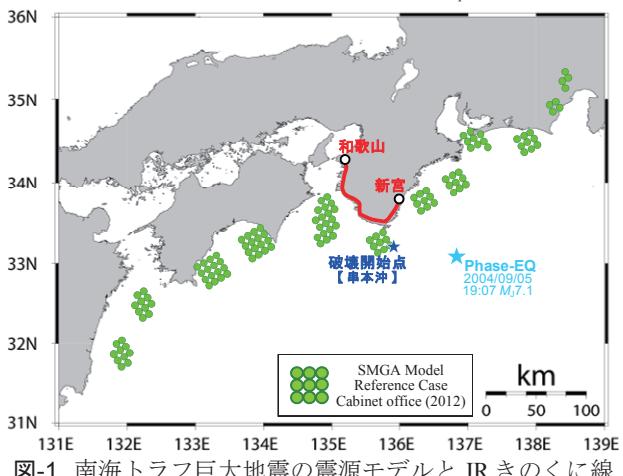


図-1 南海トラフ巨大地震の震源モデルとJRきのくに線

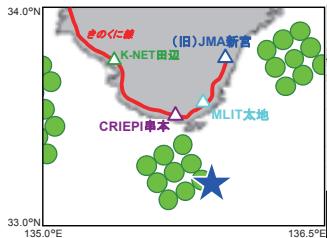


図-2 対象観測点の分布

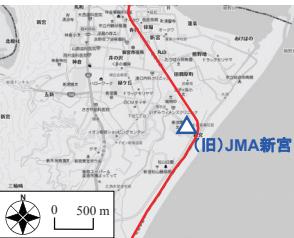


図-3 (旧)JMA 新宮



図-4 MLIT 太地

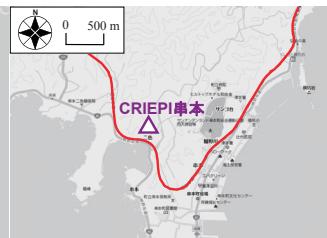


図-5 CRIEPI 串本

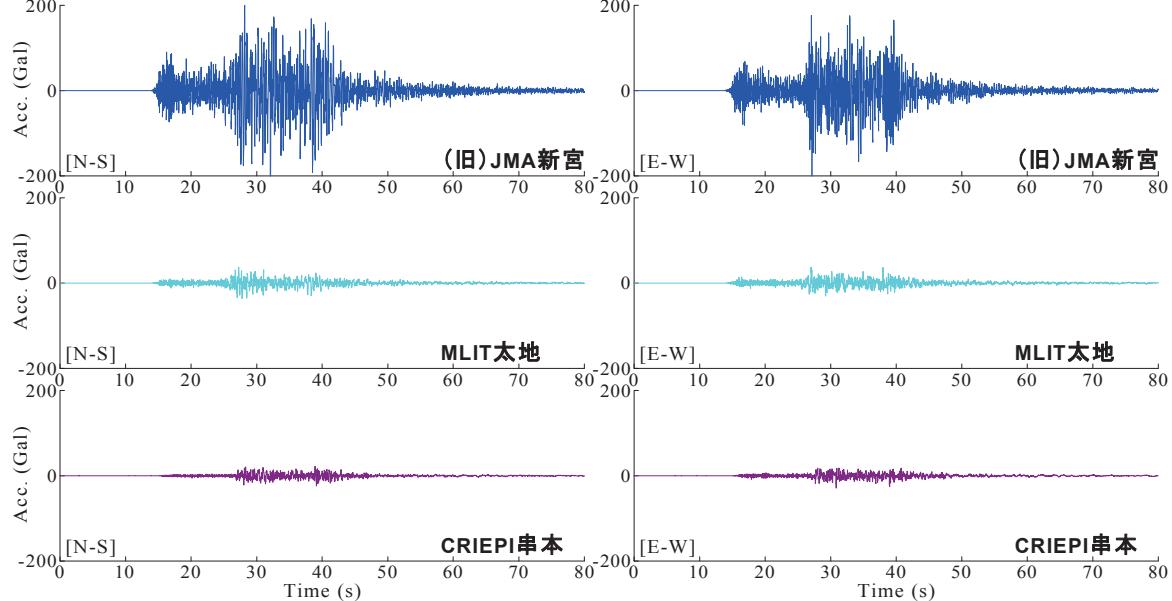
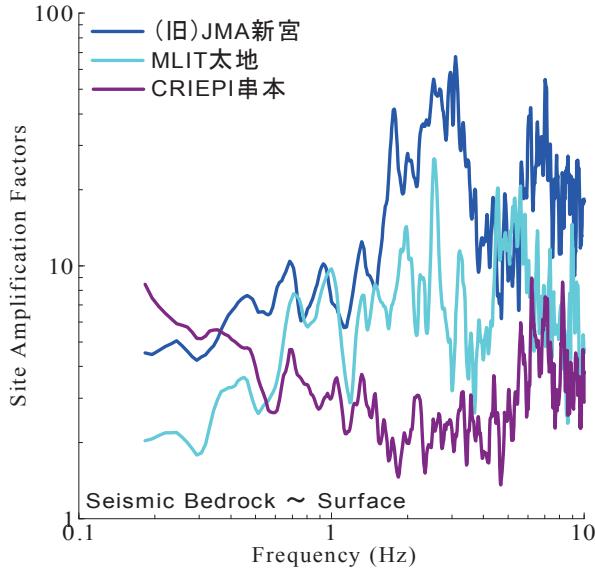
図-7 2004年9月5日19時7分に発生した三重県南東沖(東海道沖)を震源とする地震($M_J7.1$)による対象観測点での記録

図-6 サイト增幅特性(地震基盤～地表)の比較

ここに、 $A(f)$ は地表における統計的グリーン関数のフーリエ変換で複素数、 $S(f)$ は小地震の震源スペクトルで実数、 $P(f)$ は伝播経路特性¹⁵⁾で実数、 $G(f)$ は対象観測点のサイト增幅特性(2.(2)で詳述)で実数、 $O(f)$ は対象観測点のサイト位相特性(2.(3)で詳述)で複素数、 $|O(f)|_p$ はその絶対値に対してバンド幅 0.05Hz の Parzen Window を適用したものである。震源特性を計算する際、ラディエーション係数¹⁵⁾としては、全方位への平均値である 0.63 を用いた。また、地震動エネルギーの水平 2 成分への分散を表す係数である $PRTITN^{15)}$ 水平 2 成分ともに 0.71とした。

式(2)からわかるように、本手法では、統計的グリーン

関数のフーリエ振幅は震源特性・伝播経路特性・サイト特性の積として求め、統計的グリーン関数のフーリエ位相としては、現地で得られた地震記録のフーリエ位相を用いる。式(2)をフーリエ逆変換し、経験的グリーン関数法と同様の重ね合わせ¹⁶⁾を行うことで、大地震による波形が求まる。なお、Parzen Window(式(1)において添字 p で表示)は、因果性を満足する地震波を生成する目的で用いられている¹⁴⁾。

(2) サイト增幅特性の評価

図-6 は、対象観測点のサイト增幅特性を重ね合せたものである。ここに、本稿でのサイト增幅特性は、いずれも地震基盤～地表相当の地盤震動特性を表している。対象観測点におけるサイト增幅特性は対象観測点((旧)JMA 新宮, MLIT 太地, CRIEPI 串本)と基準観測点(K-NET 新宮, K-NET 太地, K-NET 串本)¹¹⁾で同時に得られた以下の中小地震による観測記録に基づいて評価した。具体的には、中小地震観測記録を対象に伝播経路特性^{12),15)}の違いを考慮したフーリエスペクトルの比率(対象観測点/基準観測点)を各地震記録に対して計算し、この比率(同時観測地震におけるスペクトル比の平均)を基準観測点における既存のサイト增幅特性¹⁷⁾に掛け合わせることによって、地震基盤～地表相当のサイト增幅特性を算定した。

図-6 に示すように、サイト增幅特性の特徴(各周波数での振幅値、ピーク周波数、スペクトル形状など)は、対象観測点において一様であるとは言い難い。これは、南海トラフ巨大地震時においてJR きのくに線に作用する強震動の特性にも大きな違いが生じる可能性が高いことを示唆するものである。

(3) サイト位相特性の評価

サイト位相特性(式(1)における地震観測記録のフーリ

工変換 $O(f)$ の取り扱いについては、入射角および back azimuth が各サブイベントとできるだけ共通となるように（堆積層が地震動の位相に及ぼす影響をより適切に考慮できるように）選定した。具体的には、図-1 に示すように、先行研究^{4),5),6),7)}により得られた知見を参考に、Phase-EQ (2004/09/05 19:07 38km 三重県南東沖(東海道沖)を震源とする地震($M_17.1$))によって対象観測点で得られた記録(図-7 参照)を採用した。ここに、既往の研究成果¹⁸⁾を参考に海溝型地震による波形の時間軸の伸縮補正是実施していない。

図-7 に示すとおり、対象観測点ごとに波形形状がまちまちとなっていることが読み取れる。図-6 および図-7 による比較結果によれば、対象観測点間にはサイト増幅特性のみならずサイト位相特性にも有意な差異が確認することができ、これは、サイト増幅特性とサイト位相特性の相関性¹⁹⁾を示唆するものである。

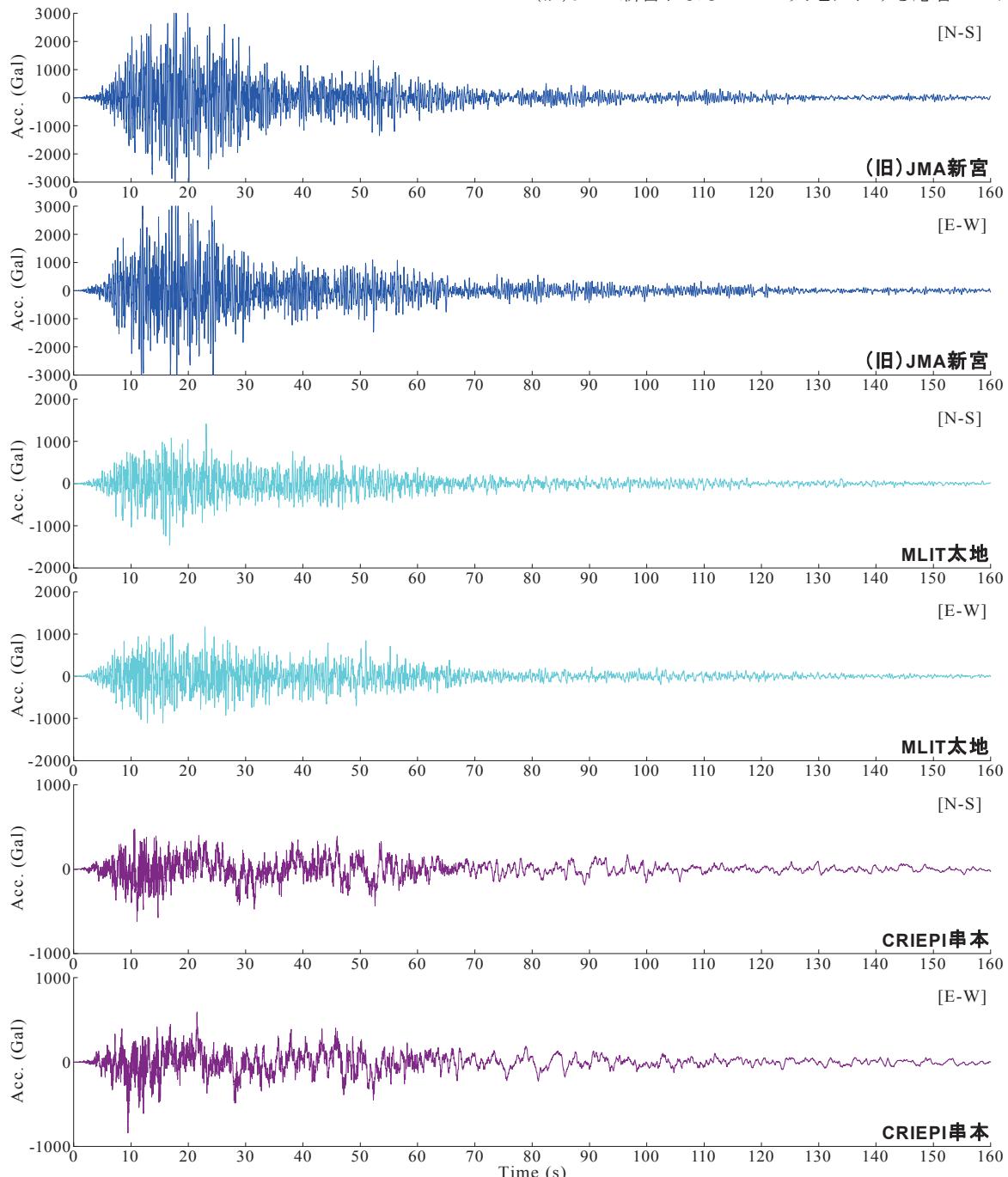


図-8 南海トラフ巨大地震における対象観測点での予測地震動の加速度時刻歴波形

3. 予測地震動の評価

図-8 は、南海トラフ巨大地震時における対象観測点での予測地震動の加速度時刻歴を水平二成分について示したものである。図-8 に示すように、サイト増幅特性の差異(図-6 参照)を主要因として、(旧)JMA 新宮、MLIT 太地、CRIEPI 串本の順で加速度振幅が大きくなっている。また、CRIEPI 串本では、当該地点での深部地下構造の影響²⁰⁾に起因した長周期成分の卓越により、加速度波形において明瞭な強震動パルスが生成されている。

図-9 は、対象観測点での予測地震動(図-8 参照)を入力波とした絶対加速度応答スペクトル(減衰定数 5%)を比較したものである。なお、図-9 には、鉄道構造物等設計標準・同解説[耐震設計編]によるレベル 2 地震動の弾性加速度応答スペクトル(スペクトル I ならびにスペクトル II)についても同時に示している。図-9 に示すように、(旧)JMA 新宮および MLIT 太地における応答スペクトル

[N-S]

(旧)JMA新宮

[E-W]

(旧)JMA新宮

[N-S]

MLIT太地

[E-W]

MLIT太地

[N-S]

CRIEPI串本

[E-W]

CRIEPI串本

[E-W]

は、ほぼ全周期帯域において設計標準スペクトルを上回る加速度応答を示している。一方で、CRIEPI 串本における応答スペクトルは、概ね周期 1 秒よりも長周期帯域において設計標準スペクトルを上回る加速度応答を示している。鉄道盛土等の土構造物の地震被災に大きな影響を及ぼす地震動の周期帯域(やや短周期帯域: 0.5~2s)に着目すると、対象観測点における加速度応答の最大値は、1G~2G 程度であることが読み取れる。

4.まとめ

本稿では、JR きのくに線沿いの強震観測点((旧)JMA 新宮, MLIT 太地, CRIEPI 串本)を対象に、南海トラフ巨大地震時に作用する強震動を予測・評価した。その結果、南海トラフ巨大地震において JR きのくに線に作用する強震動の特性には大きな差異があり、鉄道設計標準によるレベル 2 地震動と同等もしくはそれ以上の加速度応答を示す可能性が非常に高いことがわかった。今後は、予測地震動を入力波とした動的 FEM 解析などを行うことにより、対象とする鉄道構造物の耐震性評価を実施していきたいと考えている。その際、本稿で予測した強震動は、主に表層地盤の非線形挙動を無視した地表面相当波であるため、線形の重複反射理論などを適用して工学的基盤相当波を推定する必要があることを付記しておく。

謝辞：国土交通省 MLIT, (一財)電力中央研究所露頭岩盤上強震観測網 RK-net, 気象庁 JMA, (国研)防災科学技術研究所 K-NET で得られた地震観測データを使用させていただきました。(公社)地盤工学会関西支部南海トラフ巨大地震に関する被害予測と防災対策研究委員会の委員の皆様には、本研究の遂行に関して有意義なご意見をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、東日本大震災合同調査報告書編集委員会：東日本大震災合同調査報告—共通編 3 地盤災害—, 45p., 2014.
- 2) 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モデル検討会(第二次報告)，強震断層モデル編—強震断層モデルと震度分布について—，内閣府防災情報ホームページ, 2012. (last accessed: 2015/08/19)
- 3) 野津厚, 一井康二：性能設計の発展型としての Evidence-Based Design の提案とその実現に向けた課題, 第 13 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.3073-3080, 2010.
- 4) 吉川登代子, 渡文博, 秦吉弥, 山田孝弘, 常田賢一, 飛田哲男：南海トラフ巨大地震における大阪市内の鉄道盛土の耐震性評価事例, Kansai Geo-Symposium 2015 論文集, 地盤工学会, 2015. [in press]
- 5) 吉川登代子, 渡文博, 秦吉弥, 山田孝弘, 常田賢一, 飛田哲男：各種 Newmark 法に基づく鉄道盛土の耐震性評価—南海トラフ巨大地震における大阪市街地を例として—, 地域安全学会梗概集, No.36, 2015. [in this issue]
- 6) 吉川登代子, 魚谷真基, 秦吉弥, 常田賢一, 土井達也, 嶋川純平：経験地震を考慮した南海トラフ巨大地震による鉄道盛土の残留変形量の評価, 平成 27 年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集, No.0302, 2015.
- 7) 吉川登代子, 魚谷真基, 秦吉弥, 常田賢一：南海トラフ巨大地震(M_w 9.0)による土構造物の耐震性評価事例, Kansai Geo-Symposium 2014 論文集, 地盤工学会, pp.89-94, 2014
- 8) Nishimae, Y.: Observation of seismic intensity and strong ground motion by Japan Meteorological Agency and local governments in Japan, *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.75-78, 2004.
- 9) Uehara, H. and Kusakabe, T.: Observation of strong earth-quake motion by National Institute for Land and Infra-structure Management, *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.90-96, 2004.
- 10) Shiba, Y. and Yajima, H.: Observation network for strong motions operated by CRIEPI, *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.108-111, 2004.
- 11) Aoi, S., Kunugi, T., and Fujiwara, H.: Strong-motion seismograph network operated by NIED: K-NET and KiK-net, *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.65-74, 2004.
- 12) 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.
- 13) 古和田明, 田居優, 岩崎好規, 入倉孝次郎：経験的サイト增幅・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, No.512, pp.97-104, 1998.
- 14) 野津厚, 長尾毅, 山田雅行：経験的サイト增幅・位相特性を考慮した強震動評価手法の改良—因果性を満足する地震波の生成—, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.3, pp.808-813, 2009.
- 15) Boore, D. M.: Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of theradiated spectra, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.73, No.6A, pp.1865-1894, 1983.
- 16) 入倉孝次郎, 香川敬生, 関口春子：経験的グリーン関数を用いた強震動予測方法の改良, 日本地震学会秋季大会講演予稿集, No.2, B25, 1997.
- 17) 野津厚, 長尾毅, 山田雅行：スペクトルインバージョンに基づく全国の強震観測地点におけるサイト增幅特性とこれを用いた強震動評価事例, 日本地震工学会論文集, Vol.7, No.2, pp.215-234, 2007.
- 18) 長尾毅, 山田雅行, 野津厚：設計用入力地震動評価における位相特性の補正方法に関する研究, 土木学会論文集 A1, Vol.68, No.4, pp.I_13-19, 2012.
- 19) 澤田純男, 盛川仁, 土岐憲三, 横山圭樹：地震動の位相スペクトルにおける伝播経路・サイト特性の分離, 第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp. 915-920, 1998.
- 20) 芝良昭, 佐藤浩章：紀伊半島沖で発生する地震群の震源特性および伝播経路特性の解明, 電力中央研究所報告, 研究報告 : N07007, 2007.

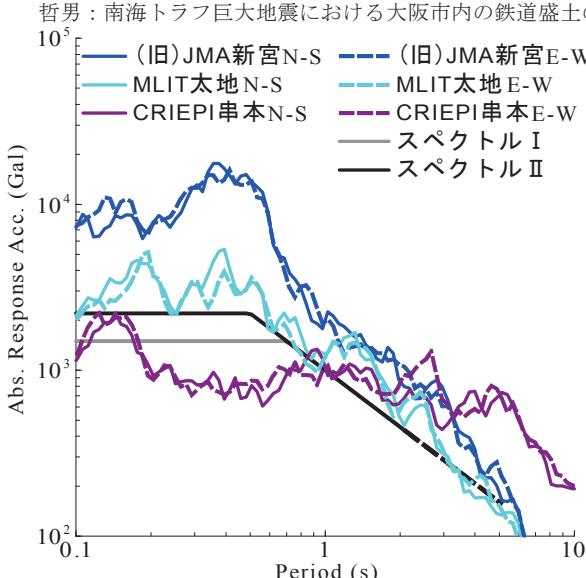


図-9 予測地震動による加速度応答スペクトルの比較