

深部地下構造を考慮した 内陸活断層型地震の経験的評価

坂井 公俊¹・室野 剛隆²・佐藤 勉³・澤田 純男⁴

¹ (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:ksakai@rtri.or.jp

² (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:murono@rtri.or.jp

³ (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:ben@rtri.or.jp

⁴ 京都大学防災研究所 地震災害研究部門教授 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail:sawada@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

現行の道路や鉄道の設計の際に一般的に用いられている安全性照査地震は、主に兵庫県南部地震の記録をもとに策定されている。しかし兵庫県南部地震の強震域は地震基盤深度が非常に深く、そこで得られた記録は地盤の増幅の影響を強く含んでいる。そのため地震基盤が浅い地域においてもこのような設計地震動を適用することは合理的でないことが想定される。そこで本研究では地震基盤深度を大まかに2つに分類し、それぞれの基盤深度における内陸活断層型地震の応答スペクトルの比較を行った。その結果、比較的地震基盤が浅い地域では、深い地域と比較すると、構造物の一般的な周期帯である0.5~1.0秒において、3割程度応答スペクトルレベルが小さくなる可能性が示唆された。山間部等地盤の良好な地域では、このスペクトルを用いて安全性照査を行うことにより、現在よりも合理的な構造物の設計が可能となる。

Key Words : *Engineering Bedrock, Seismic Bedrock, Response Spectra for the Level 2 Earthquake*

1. はじめに

耐震設計を行う際の入力地震動の設定は非常に重要である。土木学会では、設計入力地震動として2つのレベルの地震動を考慮することを提案している¹⁾。構造物の復旧性を視野に入れたレベル1地震動と、構造物の終局状態を考えたレベル2地震動についてそれぞれ照査を行う2段階設計法である。

このうちレベル2地震動は、「構造物の損傷過程に立ち入って安全性を照査するための地震動であり、現在から将来にわたって当該地点で考えられる最大級の強さを持つ地震動」と定義され、構造物の建設地点ごとに対象となる断層や地下構造を考慮した上で地震動を選定することを原則としている。またISO23469²⁾では、「地震時および地震後の地震安全性照査のための地震動」としており、以降ではこれを安全性照査地震動と呼ぶことにする。近年の地震動に関する調査・研究の結果、理論的・経験的手法を用いてSite specificの地震波をある程度の精度で予測することは可能となってきた^{例えば3)}。しか

し道路や鉄道などの線状構造物の設計を考えた場合、設計地点毎にシナリオ地震を作成するのはコストの面などから合理的であるとは言えない。多くの場合、日本全体で起こりうる最大級の地震を安全性照査のための標準地震動として設定し、この標準地震動に対して耐震設計を行っている⁴⁾⁵⁾。

鉄道における安全性照査のための標準応答スペクトルとしては、性質の異なる海溝型地震と内陸活断層型地震に分類し、それぞれの地震について照査を行っている。海溝型地震としてはマグニチュード8、震源距離40km程度、内陸活断層型地震としてはマグニチュード7程度、断層直上を想定し、それぞれの地震に対して工学的基盤上で観測されたスペクトルをある一定非超過確率で包絡するものを設定しており、道路に関してもほぼ同様の手続きがとられている。しかしながら内陸活断層による安全性照査地震のスペクトルレベルは主に1995年兵庫県南部地震における記録を中心にして検討された結果であり、これをそのまま全国の標準地震動に用いてもよいのかという部分については疑問が残る。深部地下構造の影

表-1 本検討で用いた地震の一覧

No.	地震名	発震日	M _j ^①	M _w ^②	記録数
1	兵庫県南部地震	1995.01.17	7.3	6.9	10
2	鹿児島県北西部地震	1997.03.26	6.6	6.1	4
3	鳥取県西部地震	2000.10.06	7.3	6.8	34
4	宮城県北部地震	2003.07.26	6.4	6.1	40
5	新潟県中越地震	2004.10.23	6.8	6.7	22
6	新潟県中越地震(余震)	2004.10.23	6.5	6.4	24
7	福岡県西方沖地震	2005.03.20	7.0	6.7	30
8	能登半島地震	2007.03.25	6.9	6.7	10

響で強い増幅を受けた兵庫県南部地震のような地震は、山間部等地盤の良好な地域においては到底起りえない地震であり、これを標準地震動とすることにより不経済設計になる可能性が指摘されている¹⁾。設計地震動を策定する際に、深部地下構造の違いを考慮に入れることによって、より合理的な設計が行えると考えられる。

近年の地震観測網の急激な発展と活発な地震活動の結果、内陸活断層による大地震の記録が多数観測されている。また深層ボーリングや各種物理探査の結果を統合した全国の深部地下構造もある程度把握されてきており、深部地下構造を考慮に入れた標準地震動を設定するだけの材料は揃いつつあると言える。そこで本研究では、深部地下構造の影響を考慮した内陸活断層型地震の応答スペクトルレベルについて観測記録に基づいた検討を行う。まず断層近傍で得られた地震記録に対して距離減衰式を用いて断層直上での記録を推定する。この記録を地震基盤深度によって大きく2つに分類し、それぞれを一定非超過確率で包絡するスペクトルの設定を行う。

2. 検討に用いる地震記録

(1) 観測記録の収集

本研究では、内陸活断層型地震の断層直上による工学的基盤 ($V_s = 400 \text{ m/s}$ 程度) での応答スペクトルレベルについて検討を行う。よって検討に用いる観測記録もこれらの条件に当てはまるものである必要がある。具体的には、内陸活断層による、 $M_j \geq 6.4$ 、震源距離がある程度近い、地盤条件が良好である(工学的基盤までの深度が10 m以内)、大きな加速度が得られている記録を収集した。今回の地震動選定条件に適合しているものの、スペクトル形状などから地盤の非線形性の影響等が特に大きいと考えられる記録に関しては検討対象地震記録から除き、計174記録を用いて検討を行う。最終的に検討に用いる地震、観測記録数を表-1に示す。

(2) 記録の補正

前節で得られた地震記録はそれぞれ観測サイトの地盤

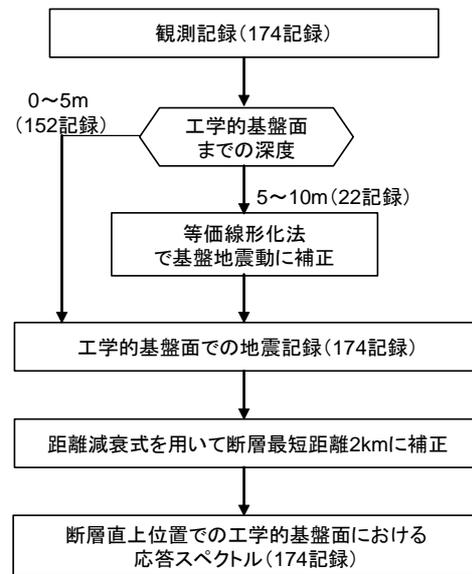


図-1 観測記録の補正の流れ

条件、地震の震源距離が異なるため、種々の補正を行い、断層直上位置での工学的基盤における応答スペクトルを求める。図-1に補正の流れを示す。

選定された地震記録は比較的地盤の良好なサイト(工学的基盤までの深度が10 m以内)における記録であるが、堆積層上で得られた記録は地盤の非線形性の影響を含んでいると考えられる。これらの記録に対して補正を施し、工学的基盤面相当の地震動を求めることとした。補正には等価線形化法による一次元の地震応答計算(FDEL⁷⁾)を用いた。なお解析手法、地盤のモデル化の不確定性などを鑑みて、補正を行う記録は工学的基盤までの深さが5 m以深の記録(22記録)に限定した。

また地震動の大きさは一般に震源から遠く離れるほど小さくなる(距離減衰特性)。そのため観測記録に対して距離減衰式を用いて補正を施し、断層直上の応答スペクトルの推定を行う。応答スペクトルの距離減衰式としては、内山・翠川^⑧による式を用いた。断層最短距離を求める際の地震断層の位置は、過去の震源インバージョンの結果等を参考に決定した^{⑨~⑭}。観測記録の断層最短距離分布を図-2に示す。また、地表面数kmには地震を

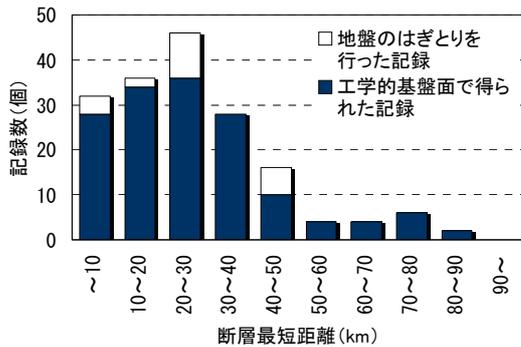


図-2 観測記録の断層最短距離分布

起こしにくい領域があるとされており^{例えば15)}、地表に断層面が現れている場合でも、この範囲では応力降下がほとんど発生していないことが分かってきているため、断層最短距離の補正目標は2kmに設定した。

3. 深部地下構造の影響を考慮した内陸活断層型地震の応答スペクトル

(1) 観測スペクトルと現行の耐震標準スペクトルの比較

各種補正を行った結果得られた断層直上での工学的基盤における観測応答スペクトルを図-3に示す。観測された応答スペクトルは全体の傾向として、短周期側ほど大きくなっている。図-3には一般的な道路・鉄道の耐震設計の際に用いられている内陸活断層による安全性照査標準地震の応答スペクトル（以降、耐震標準スペクトルと呼ぶ）⁴⁵⁾も重ねて示してあるが、耐震標準スペクトルは0.7秒より短周期側では頭打ちの傾向を示している。さらに短周期側（道路で0.3秒、鉄道で0.2秒）では応答値が小さくなっていることが分かる。この結果、観測記録と耐震標準スペクトルを比較すると、0.5秒より長周期側では耐震標準スペクトルが一部を除いて観測記録をほぼ包絡しているのに対し、0.5秒以下では逆に大半の強震記録を過小評価している。この原因について検討するため、本検討に用いた記録のうち、兵庫県南部地震、鳥取県西部地震によって得られた観測記録のみを図-4にそれぞれ描いた。耐震標準スペクトルは主に兵庫県南部地震の記録をもとにして策定されているため、当然のように兵庫県南部地震の記録は耐震標準スペクトルによってほぼ包絡されている。しかし鳥取県西部地震の記録に対して耐震標準スペクトルは短周期側で過小評価、長周期側で過大評価していることが分かる。兵庫県南部地震では、工学的基盤以深の深部地下構造の影響を受けて、周期1秒前後の速度パルスが増幅されたことが確認され

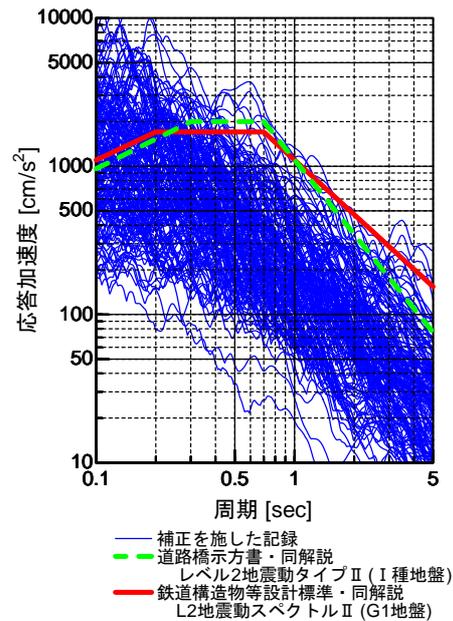


図-3 断層直上に補正した全観測記録と耐震標準スペクトルの比較

ている¹⁶⁾。これに対し鳥取県西部地震の強震域は、工学的基盤以深の構造が比較的良好なために地震動が短周期で卓越し、結果として被害が軽微に抑えられたとされている¹⁷⁾。つまり両者の地震動特性が異なる理由のひとつとして、地震基盤から工学的基盤までの深部地下構造の違いが考えられる。このため図-3のように全観測スペクトルを重ねて描くと、兵庫県南部地震から得た耐震標準スペクトルは長周期側では合理的だが、短周期側においては過小であるという結果となる。

(2) 深部地下構造を考慮した耐震標準スペクトル

現在の耐震標準スペクトル設定時の基本的な考え方（過去の観測記録をある一定非超過確率で包絡）においては、深部地下構造の影響は特に考慮されていない。よってこの考えに基づいて新たな耐震標準スペクトルを設定する際には、図-3の観測記録を全周期帯域において包絡するものとなる。しかし前節の検討にもあるように、工学的基盤以深の深部地下構造の影響により地震動の特性が大きく変化することが確認されている。つまり地震基盤深度が浅い地域では短周期が卓越し、深い地域では長周期成分が増幅される。よって観測記録を全周期帯域で包絡させたスペクトルは、地震基盤が浅い地域では長周期側で、深い地域では短周期側でそれぞれ過大評価であり、このスペクトルを用いて設計された構造物は不経済となる恐れがある。そこでここでは地震基盤深度毎に記録を分けた場合、スペクトル特性がどのように異なるのかについて確認し、地点ごとに適切な耐震標準スペク

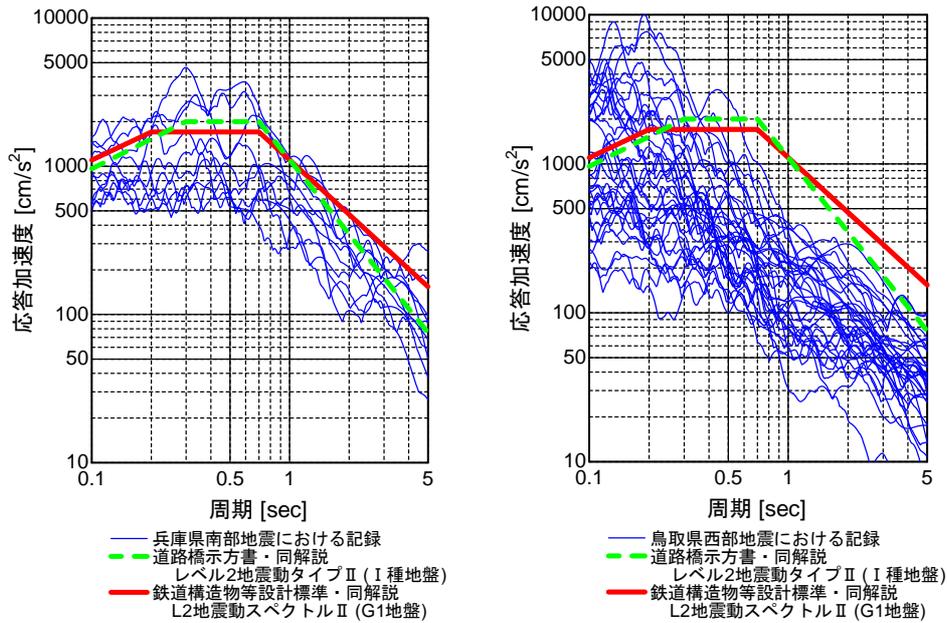


図-4 兵庫県南部地震（左）・鳥取県西部地震（右）における記録（断層直上に補正済み）と耐震標準スペクトルの比較

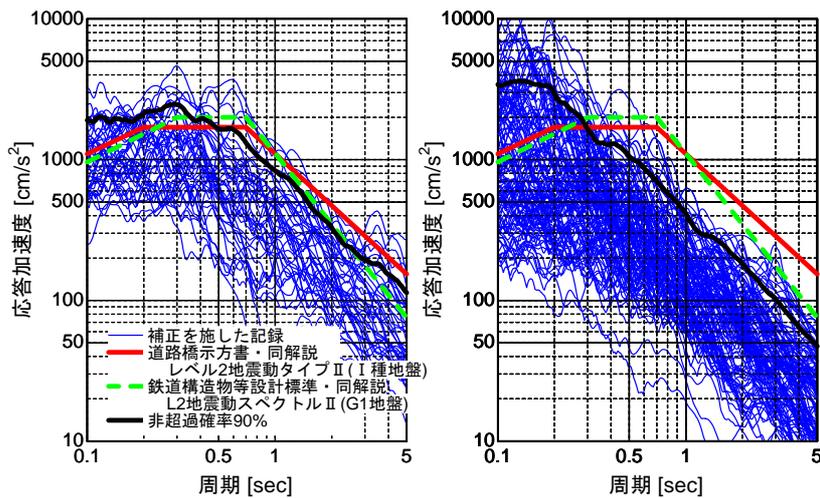


図-5 地震基盤深度 500m以深（左）・以浅（右）における記録（断層直上に補正済み）の比較

トルのレベルについて検討を行う。

観測点ごとの地震基盤深度はボーリングデータや全国の深部地盤構造モデルを参考に決定した¹⁸⁾。現在得られている全国の地震基盤深度は精度がまだ十分であるとは言えず、観測点ごとに正確な地震基盤深度を求められるまでには至っていない。よってここでは全観測点について、 $V_s = 3000 \text{ m/s}$ 程度の層までの深度が 500 m より浅いものと深いもの大きく2つに分類した。地震基盤深度ごとの観測応答スペクトルを重ねたものを図-5 に示す。これを見ると、大まかな地震基盤深度の区分によっても、スペクトル形状の違いをよく表現できていることが分かる。地震基盤深度 500 m 以深の記録は耐震標準スペクトルによってほぼ包絡されており、0.5 秒より短周期では

フラットになっている。これに対し、地震基盤深度 500 m 以浅の記録は短周期ほど応答が大きくなっていて、耐震標準スペクトルと比較すると 0.5 秒より短周期では過小、長周期では過大の設計となっている。

次にこのような地震基盤深度ごとの分類を行った場合に耐震標準スペクトルを設定すると、どの程度のレベルになるか試算を行う。安全性照査地震動の定義としては、その地点で考えられる最大級の地震動とあるが、最大級の定義としては既往の研究¹⁹⁾を参考に、地震基盤深度毎に全観測スペクトルを非超過確率 90 % で包絡するものとした。なお、観測点と断層面の最短距離が大きい観測記録に関しては、距離減衰式による補正誤差をより多く含んでいると考えられるため、補正倍率に対して重みを

付けて解析を行った。つまり、断層最短距離 r_n [km] の記録に対して、補正前後のスペクトル比の逆数

$$W_n(t) = \frac{1}{SA(t)[R=r_n, M, D] / SA(t)[R=2, M, D]} \quad (1)$$

を観測点番号 n ，周期 t [sec] での重みとして与える。

ここで $SA(t)[R=r_n, M, D]$ はマグニチュード M ，断層深さ D [km] の地震に対して断層最短距離 r_n [km] の観測点において距離減衰式から推定される周期 t [sec] の応答加速度である。

この結果得られた地震基盤深度ごとの非超過確率 90% の応答スペクトルを図-5 に黒線で示す。これを見ると地震基盤深度が大きい地点での非超過確率 90% のスペクトルは、一般的な道路や鉄道の設計に用いられている耐震標準スペクトルとほぼ等しい。つまり地震基盤が深い地域では現行の耐震標準スペクトルを用いることが妥当であるが、山間部等地震基盤の浅い地域では、図-5右のスペクトルを安全性照査のための標準地震動として扱うことにより、合理的な設計が行える可能性がある。

2つのスペクトルの差が地震規模によるものではないことを確認するために、(1)式を用いてモーメントマグニチュードの加重平均を地震基盤深度の分類毎に求めたところ、地震基盤の浅い記録では 1.3×10^{19} [N-m]，深い記録では 2.2×10^{19} [N-m] となった。これはそれぞれ $M_w = 6.7$ ， 6.8 に相当し、両者の地震規模はほぼ等しいと考えてよい。よってこれらのスペクトル形状の差は地震レベルの違いではないことが示された。

4. まとめ

本研究では、より合理的な安全性照査のための標準地震動の設定を目的として、設計地点の地震基盤深度によって内陸活断層型地震の応答スペクトルレベルがどのように異なるのかについて観測記録に基づいた検討を行った。その結果、地震基盤が浅い地域では、深い地域と比較して短周期側で大きく、長周期側で小さい応答となることが確認された。さらに、ある程度地震基盤が深い地域 ($V_s = 3000$ m/s の層が 500 m 以深の地域) では現行の安全性照査のための標準応答スペクトルを設計地震動として用いることが妥当であるが、地震基盤の浅い地域では、長周期側で3割程度小さいスペクトルを安全性照査地震動として設定可能であることが示された。つまり本スペクトルを安全性照査のための標準スペクトルとすることで、山間部等地震の良好な地域では、現在よりも合理的な設計が可能となる。

しかし本研究では限られた記録の中でのみ検討を行っているため、これを最大級の地震動として設定することがふさわしいかについては未だ議論の余地がある。今後は本検討の妥当性を確認するために、数値解析による検討を行う予定である。

謝辞：本検討では、防災科学技術研究所の K-NET，KiK-net の観測記録を使用させていただきました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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) -耐震基準作成のための手引き-，委員会活動報告書，2001。
- 2) ISO TC 98/SC3/WG10：Basis for design of structures - Seismic actions for designing geotechnical works, 2005。
- 3) 例えば，理論地震動研究会編著：地震動その合成と波形処理，鹿島出版会，1994。
- 4) (社)日本道路橋会：道路橋示方書・同解説 (V 耐震設計編)，2002。
- 5) (財)鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説耐震設計，1999。
- 6) 気象庁ホームページ，<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>。
- 7) 杉戸真太，合田尚義，増田民夫：周波数特性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察，土木学会論文集，493/III-27，pp.49-58，1994。
- 8) 内山泰生，翠川三郎：震源深さの影響を考慮した工学的基盤における応答スペクトルの距離減衰式，日本建築学会構造系論文集，No.606，pp.81-88，2006。
- 9) 三宅弘恵，岩田知孝，入倉孝次郎：経験的グリーン関数法を用いた 1997 年 3 月 26 日 ($M_{IMA}6.5$) および 5 月 13 日 ($M_{IMA}6.3$) 鹿児島県北西部地震の強震動シミュレーションと震源モデル，地震第 2 輯，Vol. 51，No. 4，pp.431-442，1999。
- 10) 池田隆明，釜江克宏，三輪滋，入倉孝次郎：経験的グリーン関数法を用いた 2000 年鳥取県西部地震の震源のモデル化と強震動シミュレーション，日本建築学会構造系論文集，No. 561，pp.37-45，2002。
- 11) 青井真，関口春子，功刀卓，本田亮，藤原広行：近地強震動記録による宮城県北部(2003/07/26, 7:13)の地震の震源インバージョン (暫定)，http://www.kyoshin.bosai.go.jp/k-net/topics/miyagi_200307260713/，2003。
- 12) Hikima, K. and K. Koketsu：Rupture processes of the 2004 Chuetsu (mid-Niigata prefecture) earthquake, Japan: A series of events in a complex fault system, Geophys. Res. Lett., Vol. 32, No. 18, L18303, 10.1029/2005GL023588, 2005。
- 13) Asano, K. and T. Iwata：Source process and near-source ground motions

of the 2005 West Off Fukuoka Prefecture earthquake, Earth Planets Space, 58, pp. 93-98, 2006.

14) 山中佳子：EIC 地震学ノート， No. 185， http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/2007/EIC185.html

15) 武村雅之：日本列島における地殻内地震スケーリング則 - 地震断層の影響および、地震被害との関連 - ，地震第 2 輯， Vol.51, No.2, pp.211-228, 1999.

16) 川瀬博，林康裕：兵庫県南部地震時の神戸市中央区での基盤波の逆算とそれに基づく強震動シミュレーション，日本建築学会構造系論文集， No.480, pp.67-76, 1996.

17) 林康裕，北原昭男，平山貴之，鈴木祥之：2000 年鳥取県西

部地震の地震動強さの評価，日本建築学会構造系論文集， No. 548, pp.35-41, 2001.

18) 藤原広行，河合伸一，青井真，先名重樹，大井昌弘，松山尚典，岩本鋼司，鈴木晴彦，早川譲：強震動評価のための深部地盤構造初期モデル，第 12 回日本地震工学シンポジウム論文集， No.0340, pp.1466-1469, 2006.

19) 王海波，西村昭彦，長縄卓夫：基盤入力地震動の考え方と応答スペクトルの設定，鉄道総研報告， Vol. 13, No. 2, pp. 11-18, 1999.

(2007.4.6 受付)

EVALUATION OF THE LEVEL 2 EARTHQUAKE CONSIDERING THE EFFECTS OF SEISMIC BEDROCK

Kimitoshi SAKAI, Yoshitaka MURONO, Tsutomu SATO and Sumio SAWADA

In designing road or railway facilities, the Level 2 earthquake is evaluated mainly from the records observed in the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake. These records were observed at the site, where the strong motion was largely amplified because of the influence of the deep seismic bedrock. However, the ground motion is not so much amplified at the site with the shallow bedrock. We, therefore, propose the response spectra for the Level 2 earthquake considering the depth of the seismic bedrock. In the area of shallow bedrock, we can make the designed spectra about 30 percent smaller than that in the deep area at the longer period. Using these proposed spectra, structures can be constructed more reasonably on the stiff ground in the mountain side etc.