

地震基盤深度を考慮したレベル2地震動の簡易評価

坂井 公俊¹・室野 剛隆²・澤田 純男³

¹正会員 工修 （財）鉄道総合技術研究所（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

²正会員 工博 （財）鉄道総合技術研究所（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

³正会員 工博 京都大学 防災研究所（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震以降、土木構造物の耐震設計は、2段階設計法が採用されている¹⁾。これは設計入力地震動として、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地震動という2つの地震動を設定し、それぞれの地震動に対して構造物に付与された性能を満足することを確認する、という流れで行われる。

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、土木学会などでは、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²⁾。しかし鉄道や道路などの線状構造物の設計を考えた場合、全建設地点においてシナリオ地震動を設定することは、コストなどの面から必ずしも合理的であるとは言いきれない。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として設定し、この標準地震動（レベル2標準地震動）に対して耐震設計を行っている（例えば34）。

近年の活発な地震活動によって得られた知見等を踏まえ、このレベル2標準地震動を見直そうといった研究が筆者らによって行われている³⁾。従来のレベル2標準地震動は主に兵庫県南部地震を包絡するように応答スペクトルが設定されているが、近年の地震では、そのスペクトル特性が大きく異なる観測記録が得られている。従来の標準地震動設定の考え方に基づくと、特性の異なる両者のスペクトルを包絡する必要があるが、こうして得られたスペクトルは、総エネルギーが非常に大きく不合理な地震動となっている可能性がある。そこで観測記録をその地点の

地震基盤深度に応じて大まかに2つに分類し、それぞれの区分の応答スペクトルを重ね描くことで、地震基盤深度によってスペクトル特性が分類できることを示している。地震基盤の深い地域では従来のレベル2標準地震動をそのまま用いることが概ね妥当であり、地震基盤が浅い地域では、短周期側では従来の標準地震動よりも大きくなるが、長周期側（主な構造物の周期帯域以上）では、従来の標準地震動よりも小さなスペクトルをレベル2標準地震動として設定できる可能性を指摘している。

しかしながら上記検討では、内陸活断層の地震による観測記録のみで検討されているだけであり、同様のことが海溝型地震においても適用できるのかは不明である。さらにレベル2標準地震動としてどの程度のスペクトルレベルを設定すればよいか、ということには言及されていない。そこで本研究では、内陸活断層による地震の記録の精査を行うとともに、海溝型地震においても同様の検討を行う。最終的にレベル2標準地震の応答スペクトルレベルの提案を行うことを目的としている。

2. 検討に用いた地震記録

(1) 観測記録の収集

本検討では、内陸活断層による地震（ $M_w=7.0$ 、断層直上）と海溝型地震（ $M_w=8.0$ 、断層最短距離60km）の応答スペクトルを算定する。対象とする地盤条件としては、工学的基盤（ $V_s=400\text{m/s}$ 程度）である。そのため、震源規模、震源距離が想定している地震動レベルと近く、地盤条件が良好である（工学的基盤までの深度が10m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表層地盤の非線形の影響を強く含んでいると考

表-1 本検討で用いた地震の一覧（内陸活断層による地震）

No.	地震名	発震日	Mj	Mw	記録数
1	兵庫県南部地震	1995. 01. 17	7.3	6.9	10
2	鳥取県西部地震	2000. 10. 06	7.3	6.8	34
3	新潟県中越地震	2004. 10. 23	6.8	6.7	22
4	新潟県中越地震(余震)	2004. 10. 23	6.5	6.4	24
5	福岡県西方沖地震	2005. 03. 20	7.0	6.7	30
6	能登半島地震	2007. 03. 25	6.9	6.7	10
7	新潟県中越沖地震	2007. 07. 16	6.8	6.6	22

計 152

表-2 本検討で用いた地震の一覧（海溝型地震）

No.	地震名	発震日	Mj	Mw	記録数
1	宮城県沖地震（1978年）	1978. 06. 12	-	7.57	2
2	北海道南西沖地震	1993. 07. 12	-	7.83	2
3	北海道東方沖地震	1993. 10. 04	-	7.58	2
4	芸予地震	2001. 03. 24	6.7	6.8	20
5	三陸南地震	2003. 05. 26	7.1	7.0	22
6	十勝沖地震（本震）	2003. 09. 26	8.0	8.0	22
7	十勝沖地震（余震）	2003. 09. 26	7.0	7.3	12
8	紀伊半島南東沖地震（前震）	2004. 09. 05	7.1	7.3	8
9	紀伊半島南東沖地震（本震）	2004. 09. 05	7.4	7.5	10
10	釧路沖地震（本震）	2004. 11. 29	7.1	7.0	16
11	釧路沖地震（余震）	2004. 12. 06	6.9	6.8	14
12	宮城県沖地震（2005年）	2005. 08. 16	7.2	7.1	20
13	茨城県東方沖地震	2005. 10. 19	6.3	6.3	4

計 154

えられる記録に関しては、検討対象記録から除いた。最終的に用いた地震、観測記録数を表-1、表-2に示す。

(2) 記録の補正

前節で選定された観測記録は、想定している地震レベルをある程度満足しているものの、地震規模、震源距離による違い、堆積層の増幅、減衰の影響等を多少含んでいるものと考えられる。そこで、記録に補正を施すことによって、これらの影響を除去する。補正の流れを図-1に示す。

収集された地震記録は、地盤条件が比較的良好な地盤である（工学的基盤深度10m以浅）。しかし今回選定した記録は加速度レベルの大きな記録であり、表層地盤の塑性化の影響を比較的多く含んでいる可能性がある。そこで、これらの記録に対して補正を施し、工学的基盤位置での地震記録に補正を行うこととした。補正には等価線形化法による一次元の地盤応答解析（FDEL⁶⁾）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深度5m以深の記録とし、基盤深度が0～5mの記録については、それをそのまま基盤位置での記録として取り扱った。

またこれらの記録は想定している地震とは、規模（マグニチュード）、震源距離が異なる。そのため

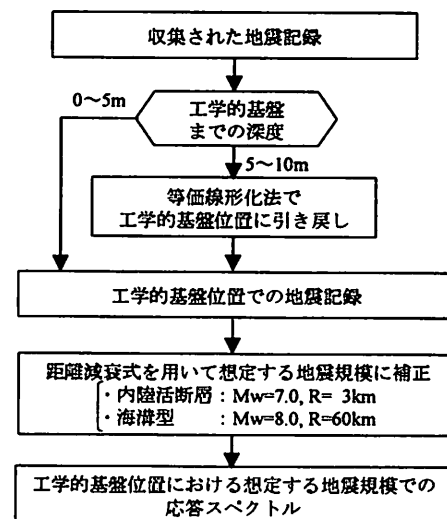
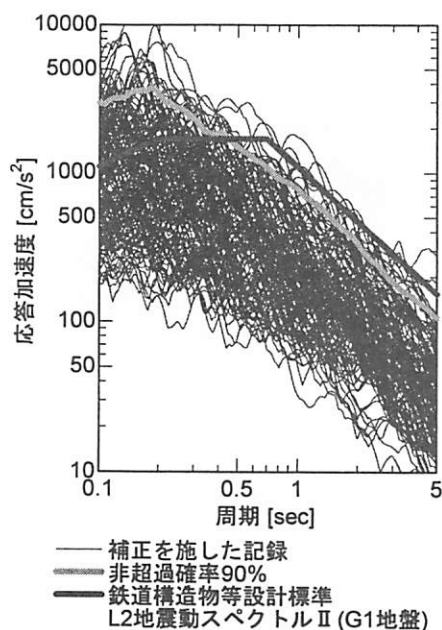
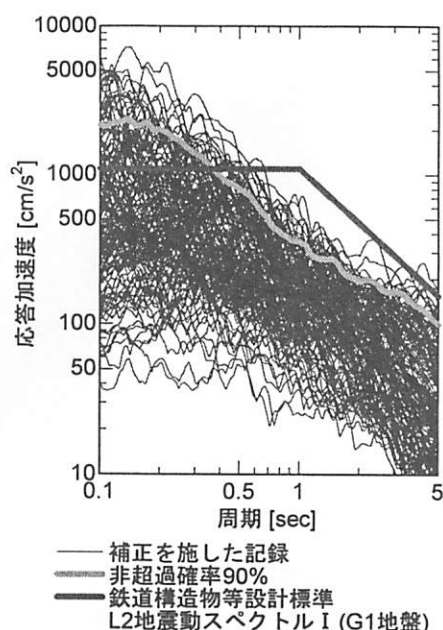


図-1 観測記録の補正フロー

観測記録に対して距離減衰式を用いて補正を施し、想定地震規模、想定震源距離の応答スペクトルを推定する。用いた補正式としては、内山・翠川による応答スペクトルの距離減衰式⁷⁾とした。なお震源断層から観測点までの断層最短距離を求める際の震源断層の位置、断層サイズは既往の震源インバージョンの結果を参考にしている。なお、内陸活断層による地震規模としては、Mw=7.0の地震が直下で発生した場合を想定しているが、断層最短距離を3kmと設定した。これは、地表面数kmには地震を起こし



(a) 内陸活断層による地震



(b) 海溝型地震

図-2 補正を施した観測記録

にくい領域があるとされており^{例え8)}、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指摘されていることを考慮したものである。

3. 地震基盤深度を考慮した応答スペクトル

(1) 補正を施した応答スペクトル

前節で示した手法を用いて、全観測記録の補正を行った。図-2に補正後の全観測記録の応答スペクトルをまとめて描く。これらの記録は全て同じ地震規模、震源距離、地盤条件に補正されているものの、スペクトルレベルでは、10倍以上のバラツキがあることが分かる。このバラツキの原因としては、断層最短距離を等しくしてはいるが、断層面内のアスペリティからの距離が大きく異なっていること、断層の破壊伝播の影響などを無視していること、表層地盤の非線形性の影響が完全に取り除けていないこと、工学的基盤よりも深部の地盤構造の影響により地盤増幅特性が異なること、などが考えられる。

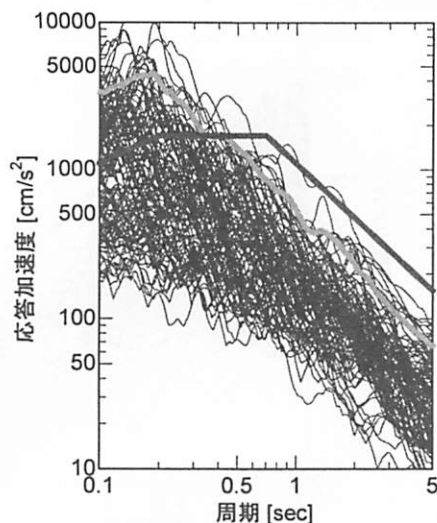
また図-2には現在の鉄道構造物のレベル2地震動の応答スペクトル⁴⁾も重ねて示してあるが、周期0.5秒以上においては観測記録をほぼ包絡していることが分かる。これとは逆に、周期0.5秒よりも短周期側では多くの観測記録がレベル2地震動を上回っている。このためもし現在と同様の考え方（過去の観測記録をある一定非超過確率で包絡する）でレベル2地震動を選定しなおした場合、図-2に示した非超過確率90%のスペクトル程度が選定される可能性が

ある。つまり現在のレベル2地震動とは極端に異なるスペクトルとなることが分かる。

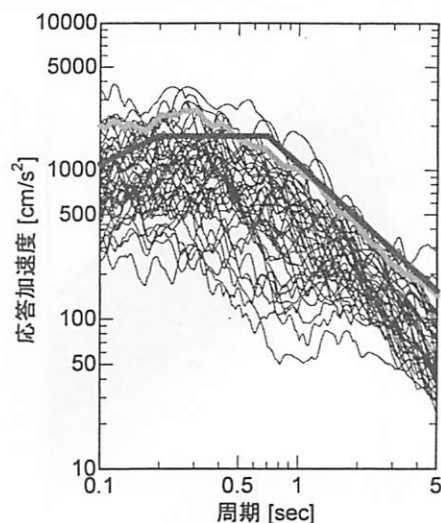
こういった現象が起こる原因の一つとして、筆者らは深部地下構造の影響を挙げている⁵⁾。現在の内陸活断層によるレベル2地震動（L2地震動スペクトルⅡ）は主に兵庫県南部地震の観測記録をもとにして設定されている。この地震の強震域は地震基盤と呼ばれるせん断弾性波速度が3km/sを超えるような地盤が非常に深いため、地震基盤から工学的基盤へ到達するまでに地盤増幅の影響を強く受けているものと考えられる。しかしながら山間部のような地震基盤深度が浅い地域では、同規模地震であっても、地盤の増幅特性が異なるために、地表面付近の地震動としては、兵庫県南部地震のような記録とは大きく異なることが予想される。これを確認するために、観測サイトにおける地震基盤の浅深によって、記録を大きく2つに分割し、それぞれの応答スペクトルを比較することで、この現象を確認している。本検討でも同様の手続きを経ることとする。

(2) 地震基盤深度を考慮した応答スペクトル

観測地点の地震基盤深度毎に記録を分類する。分類は、地震基盤深度が200～500m程度よりも浅い記録と深い記録で行った。ここで深度200～500mというある程度幅を持った分類を行ったのは、地震基盤までボーリングを行っている観測点では正確な深度が分かるのに対し、ボーリングが地震基盤まで実施されていない観測点では、全国の深部地下構造モデル⁹⁾を参考にして推定する必要があるため、推定精

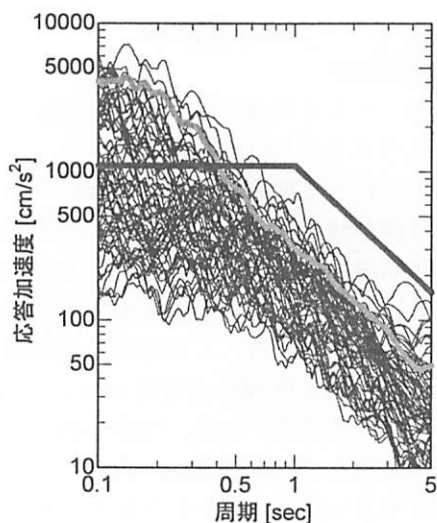


(a) 基盤深度 200～500m 以浅

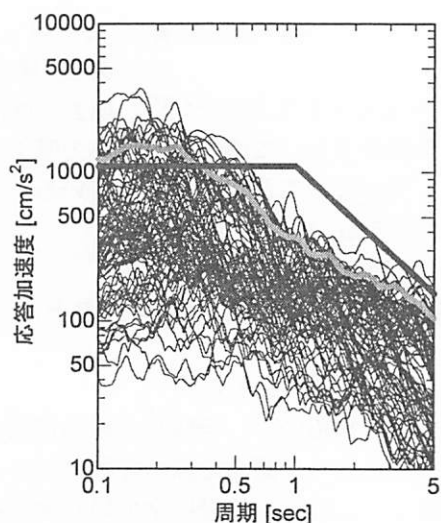


(b) 基盤深度 200～500m 以深

図-3 地震基盤深度で分類した記録（内陸活断層による地震）



(a) 基盤深度 200～500m 以浅



(b) 基盤深度 200～500m 以深

図-4 地震基盤深度で分類した記録（海溝型地震）

度にバラツキが生じるためである。このように大まかに2つに分類されたスペクトルを図-3, 4に示す。

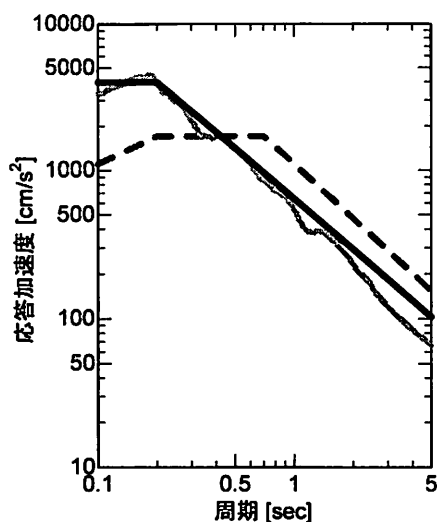
内陸活断層、海溝型の地震種別によらず、地震基盤深度の大まかな分類によって、応答スペクトルの特性が変化していることが分かる。つまり、地震基盤が浅い地点における応答スペクトルは、短周期側では大きく、周期が長くなるにつれて急激に応答が小さくなる。これとは対照的に、地震基盤が深い地域では、浅い地域のスペクトルと比較すると、短周期側での応答はそれほど大きくないが、長周期側において応答が大きくなっている。以上より、活断層、プレートといった地震発生種別によらず、地震基盤から工学的基盤までの地盤増幅率の差によってスペ

クトル形状が大きく変化していること、この増幅率の違いは地震基盤深度によって大まかに評価できることが確認された。

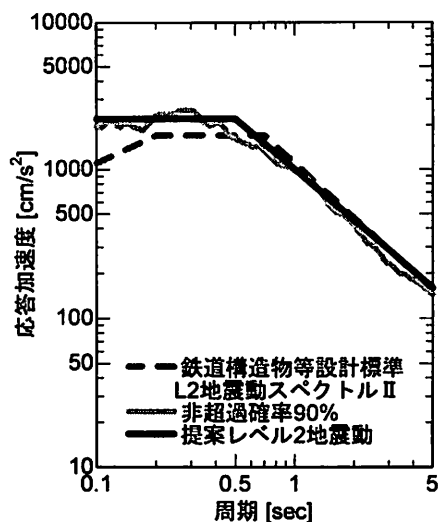
つまりレベル2地震動設定の際に、地震基盤深度による地盤増幅率の差を考慮することで、図-2のように全記録を包絡させるようなことは避けられるとともに、観測点の特性をより反映させた地震動の設定が可能となると考えられる。そこで次節において、新たなレベル2地震動の提案を行う。

(3) 地震基盤深度を考慮したレベル2地震動

図-3, 図-4に示したように、地震基盤深度を考慮することで、応答スペクトルの特性が大きく異なる

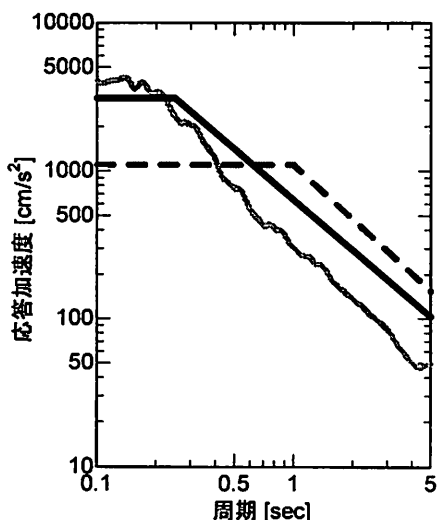


(a) 地震基盤が浅い地点

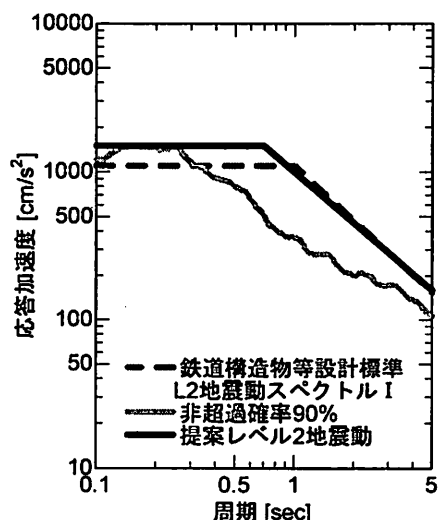


(b) 地震基盤が深い地点

図-5 提案するレベル2地震動（内陸活断層による地震）



(a) 地震基盤が浅い地点



(b) 地震基盤が深い地点

図-6 提案するレベル2地震動（海溝型地震）

ことが示された。そこで、これらの影響を考慮したレベル2地震動を設定すると、どの程度のレベルになるのか検討する。レベル2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を参考に、各分類ごとの観測記録を非超過確率90%で包絡するものとした¹⁰⁾。なお非超過確率90%のスペクトルを算出する際に、観測点から断層面までの距離、観測地震マグニチュードと想定している地震規模の差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つけて検討を行った。つまり、マグニチュード M_w^{obs} 、断層最短距離 R^{obs} [km] の観測記録に

対して、補正前後のスペクトル比の逆数

$$W_n(t) = \frac{1}{SA(t)[M_w^{obs}, D^{obs}, R^{obs}] / SA(t)[M_w^{all}, D^{obs}, R^{all}]}$$

を観測点番号 n 、周期 t [sec] での重みとして与える。ここで $SA(t)[M_w, D, R]$ は、地震規模 M_w 、震源深さ D [km] の地震が断層最短距離 R [km] の観測点において距離減衰式より想定される周期 t [sec] での応答加速度である。得られた非超過確率90%のスペクトルも図-3、図-4に示してある。

この結果より、地震基盤が500m程度よりも深い地域では、観測記録の非超過確率90%のスペクトル

が、現在の鉄道構造物におけるレベル2地震動と概ね一致していることが分かる。ただし図-4(b)の海溝型地震での結果のみに着目すると、周期1秒程度で、現在のレベル2地震動は、観測記録を大きく上回っている。この要因としては、記録がほとんど得られていないマグニチュードの大きな海溝型地震において顕著になると考えられる長周期地震動への配慮や、長周期側で内陸活断層によるレベル2地震動とスペクトルレベルを一致させるという設計上の配慮などが考えられる。以上を勘案すると、地震基盤が深い地域におけるレベル2地震動としては、現在用いられているものと同程度でよいことが分かる。

しかしながら地震基盤が浅い地域では、現在のレベル2地震動をそのまま用いることが適当ではないことが分かる。つまり内陸活断層、海溝型といった地震種別によらず、非超過確率90%のスペクトルは、短周期側では現行のレベル2地震動を大きく上回り、周期0.5秒よりも長周期側では、大きく下回るような結果となっている。この非超過確率90%の線を満足するようなスペクトルをレベル2地震動として設定することで、サイトの地盤特性を考慮した設計地震動とすることが可能である。

以上の結果を踏まえて、地震基盤深度を考慮したレベル2地震動を図-5、図-6に提案する。これは、各応答スペクトルについて非超過確率90%を満足する線をもとに、簡単な直線で描くことを基本に設定したものである。既に述べたことだが、地震基盤が深い地点では現行と同程度、浅い地域では短周期で大きく、長周期側で現行を下回っている。一般的な高架橋の周期帯（概ね周期0.5秒～1.0秒程度）を考えると、地震基盤が浅い地域でのレベル2地震動は、現行よりも小さくなっていることが分かる。つまり、山間部等のエリアでは、本スペクトルをレベル2地震動として扱うことにより、現在よりも合理的な設計が行える可能性がある。

4. まとめ

本検討では、これまで内陸活断層の記録のみで指摘されていた、地震基盤深度によるスペクトル形状の変化が海溝型地震についても見られることを確認した。さらにこれらの特性を考慮した新たなレベル2地震動の提案を行った。本検討によるスペクトルを用いることにより、建設地点の地盤増幅の影響をある程度考慮した合理的な設計が行えると考えられる。

ただし本検討は観測記録という限られた条件下での検討であるため、今後は数値計算に基づいた検討を行う必要がある。また、今回提案した地震動は、想定した地震レベル（内陸活断層による地震：Mw=7.0、断層直上、海溝型地震：Mw=8.0、断層最短距離60km）におけるスペクトルを示しただけである。よって東海地震や、中央構造線のように、大規模な地震が近傍で発生するような地点での地震動ではないことに注意が必要である。

7. 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：土木構造物の耐震設計法に関する特別委員会：土木構造物の耐震設計法等に関する第3次提言と解説，2000。
- 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）-耐震基準作成のための手引き-，委員会活動報告書，2001。
- 3) （社）日本道路協会：道路橋示方書・同解説（V 耐震設計編），2002。
- 4) （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。
- 5) 坂井公俊，室野剛隆，佐藤勉，澤田純男：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，土木学会地震工学論文集，第29巻，pp. 98-103，2007。
- 6) 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。
- 7) 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。
- 8) 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。
- 9) 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。
- 10) 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。