

3次元盆地構造を考慮した大阪湾岸部における 入力地震動の検討

秦 健作¹・足立幸郎²・徳林宗孝³・香川敬生⁴

¹正会員 工修 阪神高速道路公団工務部設計課 調査役（〒541-0056大阪府中央区久太郎町4-1-3）

²正会員 工修 阪神高速道路公団工務部設計課 技術係長（〒541-0056大阪府中央区久太郎町4-1-3）

³正会員 工修 阪神高速道路公団湾岸管理部保全課 課長補佐（〒552-0007大阪府港区弁天1-2-1-1900）

⁴正会員 工修（財）地域地盤環境研究所 技術コンサルタント部（〒550-0012大阪府西区立売堀4-3-2）

1. はじめに

阪神高速道路公団では、橋梁の耐震設計に用いる入力地震動の設定が一つの課題となっている。そこで、耐震補強が計画されている、阪神高速道路4号湾岸線の港大橋を対象に、内陸直下型地震による設計入力地震動の検討を実施した。入力地震動の検討にあたっては、短周期帯域に統計的グリーン関数合成法の一つを用い、長周期帯域には3次元差分法による数値計算法を用いて、それぞれの計算結果を合成するハイブリッド法を用いた。震源断層としては上町断層系を想定し、兵庫県南部地震以後の最新の地質データに基づき断層特性を設定した。また、対象地点に近い強震観測記録から経験的なサイト増幅特性を導くとともに、堆積層2層と基盤の3層で大阪堆積地盤構造をモデル化して長周期の3次元地盤応答を考慮した。本報告では、この設計入力地震動の検討結果について報告する。

2. 検討手法

地震動の計算は、図-1に示すフローに従って実施した。短周期帯域は、経験的なサイト増幅特性を考慮した人工小地震波を作成し、各小断層ごとに周波数依存型の放射特性を導入し、これらをグリーン関数として重ね合わせることで、計算した。一方、理論的な波動伝播計算が可能である長周期帯域は、震源断層の破壊伝播を導入した3次元差分法で計算を実施した。こうして求めた短周期帯域と長周期帯域の地震波を、ハイブリッド合成して、目的とする地震波を求めた。

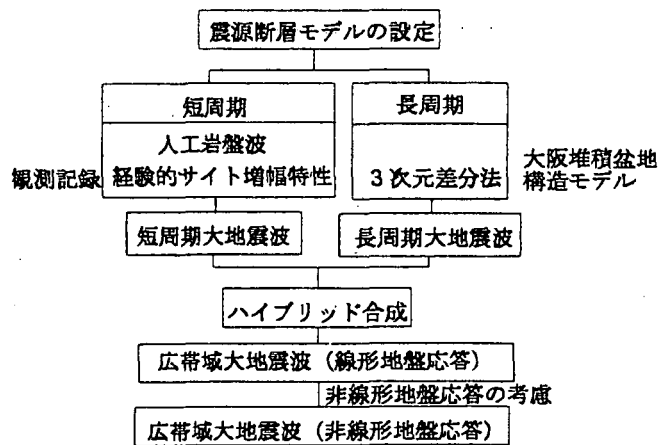


図-1 強震動評価のフロー

(1) 短周期帯域の計算手法

短周期地震動の評価には統計的グリーン関数合成法の一つを用いた。これは、対象地点あるいはそのこと同等の地盤応答特性を有する地点における中小地震観測記録によるスペクトルと理論基盤スペクトルを用いて地点の地盤増幅特性を求め、これに対象地震の理論的な基盤スペクトルを付加して位相特性を考慮することにより作成した中小地震記録を、想定した断層破壊進行に従って足し合わせることでより大地震波形を作成するものである。

(2) 長周期帯域の計算手法

長周期地震動は、大阪盆地の地盤構造を3次元的にモデル化し、そこを伝播する地震波動場を3次元差分法による数値計算手法によって評価した。これにより得られた長周期波動を先の短周期波動と合成し（ハイブリッド法）、広い周波数帯域に適合する地震動を得た。

(3) 表層地盤の非線形応答の考慮

この手法で得られた地表面地震動は、小地震と大地震での地盤の増幅特性が変わらないものと仮定して、小地震動から導いたサイト増幅特性を用いているため、表層地盤について線形応答が仮定されていることになる。実際は、地震動が大きくなり地盤ひずみが大きくなるにつれて、地盤剛性は低下し減衰が大きくなる非線形応答となる。そこで、地表面地震動を線形応答で基盤波に戻し、非線形応答を考慮して再度地表面に持ち上げることで、現実的な大地震波形を得た。非線形地盤応答の計算には、基本的に等価線形手法を用いた。

3. 震源断層の想定と断層パラメータの設定

(1) 震源断層の想定

大阪府域には、人口密集地を南北に貫いて上町断層系と称される活断層が存在する。従来は、主に地表地形の判読結果に基づき、北部は仏念寺断層に連結し南部は長居断層に接続する断層系とされてきた。兵庫県南部地震以後の調査により、従来考えられていたより南方へ連続していること、並びに、西に分岐する形で汐見橋撓曲及び住之江撓曲が存在することが確認されている。

これらの最新知見から上町断層系を設定すると、北部の仏念寺断層系から大阪市域の上町断層へと続き、坂本断層から久米池断層の南部上町断層へと40 Kmにわたって連続している。南部上町断層は地表面で分岐したもので地下では1つに収斂していると仮定し、一体のものとして設定した。また、汐見橋、住之江の撓曲構造が大きく大阪湾より分岐しており、これらの撓曲構造も起震断層に取り入れた。

図-2に今回想定した上町断層系を、表-1に断層諸元を示す。

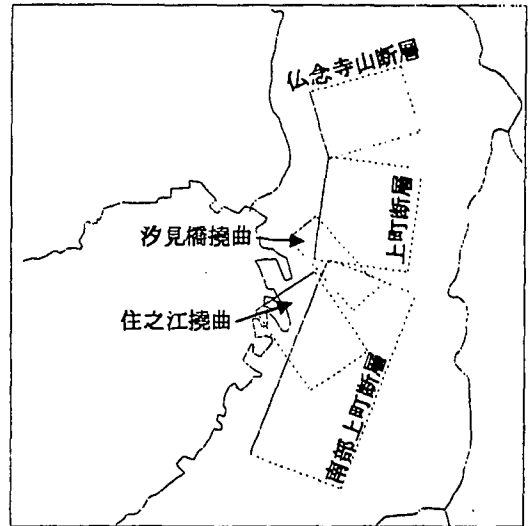


図-2 設定した上町断層系

(2) 断層パラメータの設定

上町断層系の特性を表すパラメータとして、断層破壊の非一様性（アスペリティ）のモデル化、断層傾斜角、破壊開始点の組み合わせケースについて、パラメトリック・スタディを行い、着目点に大きな影響を及ぼすケースを求めた。

アスペリティのモデル化は最新知見に基づき、全断層面積に占めるアスペリティ部の面積率を約23%、断層全体の平均すべり量に対してアスペリティ部のすべり量を約2倍、非アスペリティ部のすべり量を0.7倍とした。図-3に設定したアスペリティモデルを示す。このアスペリティモデルに対し、パラメトリックスタディに基づき、断層傾斜角75度、破壊開始点はアスペリティ中央としたモデルを用いることとした。

表-1 上町断層系の断層諸元

断層	長さ (Km)	幅 (Km)	走向 (度)	すべり角 (度)	地震モーメント ($\times 10^{17}$ N·m)	立ち上がり時間 (秒)	断層タイプ
仏念寺断層	8	2.2	163.8	90	0.58	1.5	逆断層
上町断層	12	2.2	187.4	90	0.86	1.5	逆断層
南部上町断層系	24	2.2	201.4	90	1.72	1.5	逆断層
汐見橋撓曲	4	2.2	228.4	90	0.29	1.5	逆断層
住之江撓曲	6	2.2	235.8	90	0.44	1.5	逆断層

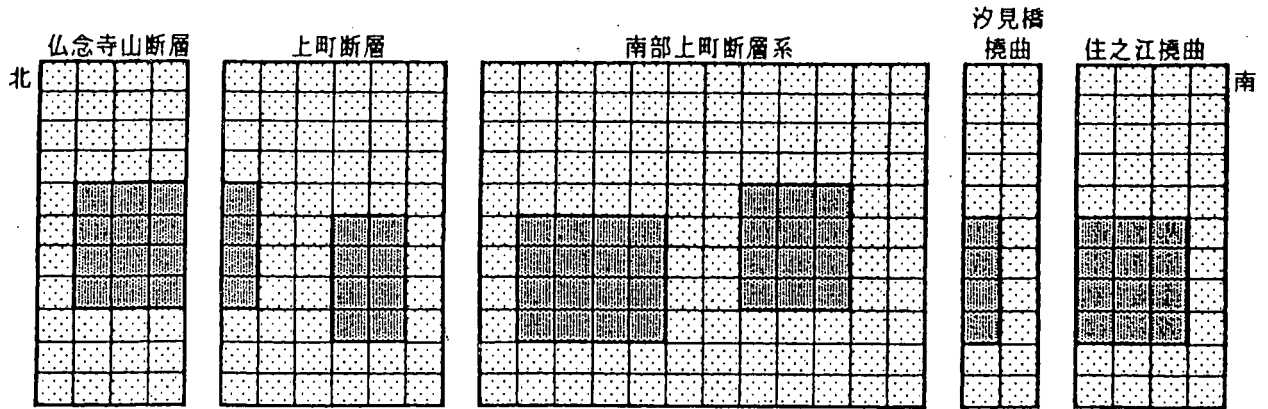


図-3 上町断層系のアスペリティモデル

4. 地盤モデル

(1) 浅層地盤モデルと経験的サイト増幅特性

港大橋地点で実施されたボーリングデータに基づき、対象地点の浅部地震応答解析用の地盤モデルを構築した。また、港大橋と同種の地盤分類となる天保山大橋における地震観測記録を用いて、経験的な地盤増幅特性を導出した。

港大橋では建設時に調査ボーリングが実施されており、深度70m程度までの詳細地盤構造が把握されている。このボーリング結果およびボーリング孔を用いて実施されたP S検層結果に基づき、また、既往知見による深層地盤構造も参照し、港大橋地点の標準的な地盤構造モデルを表-2に示すように設定した。

港大橋地点では解析に用いるべき地震観測記録に乏しいため、同様の地盤区分に属する天保山大橋地点の地表面の地震観測記録を用いて、経験的なサイト増幅特性を求めた。

表-2 港大橋地点の標準的な地盤構造モデル

深度(m)	V _s (m/s)	密度
0~14	230	1.65
14~28	130	1.60
28~37	230	1.65
37~46	360	1.70
46~57	200	1.65
57~330	350	1.70
330~800	550	1.80
800~1690	1000	2.10
1690~	3200	2.70

計算にあたっては、既に経験的サイト増幅特性が求められている硬質地盤である神戸大学観測点の記録と天保山大橋地点の観測記録のスペクトル比を求め、これに神戸大学観測点の経験的サイト増幅特性をかけることによって、天保山大橋地点でのサイト増幅特性を導いた。図-4に、以上により求めた

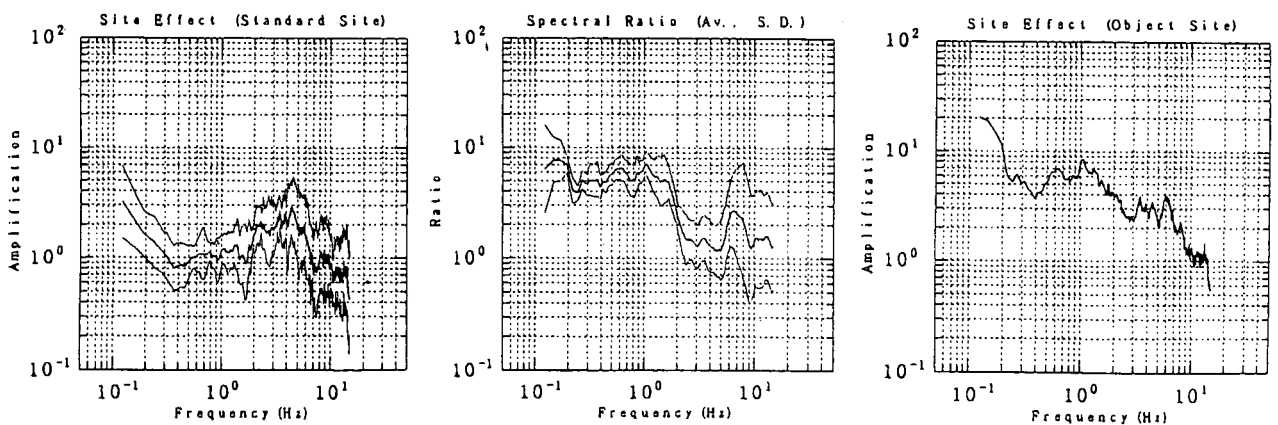


図-4 天保山大橋地点におけるサイト増幅特性の導出

天保山大橋地点でのサイト増幅特性を示す。このとき用いた地震記録を表-3に示すが、これらはいずれも兵庫県南部地震の余震記録である。

表-3 天保山大橋地点のサイト増幅特性導出に用いた地震諸元

発震時	震央緯度	震央経度	震源位置	深さ (Km)	M
1995.01.23. 21:44:15.4	34.792	135.315	兵庫県 南東部	16	4.2
1995.01.25. 23:15:57.1	34.788	135.307	兵庫県 南東部	15	5
1995.02.02. 16:19:27.8	34.690	135.142	兵庫県 南東部	13	4.1

表-2に示す港大橋地点の標準的な地盤モデルから計算されるサイト増幅特性を求め(図-5)、天保山大橋地点での経験的サイト増幅特性と比較したところ、全体的な傾向は類似しており、大差ないことを確認した。

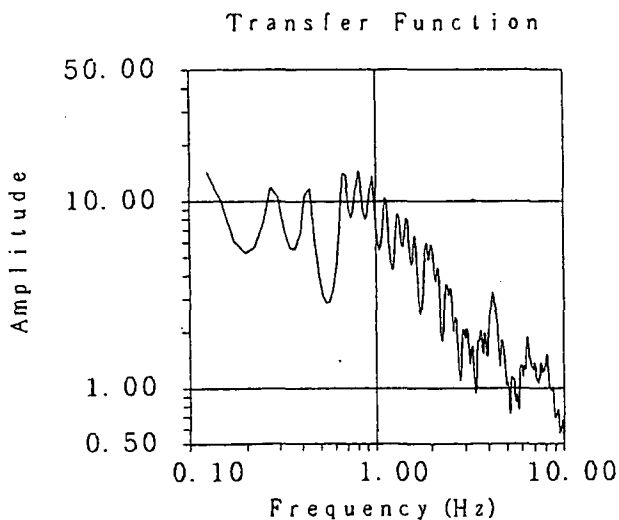


図-5 港大橋地点の標準的な地盤構造モデルによるサイト増幅特性

(2) 3次元地盤応答計算に用いる深層地盤モデル

3次元地盤応答計算には、大阪湾堆積盆地の基盤岩深度構造を深層地盤の調査結果に基づいてモデル化した上で、さらに堆積層を2層化したモデルを用いた。

基盤深度構造を図-6に、堆積層地盤物性を表-4に示す。

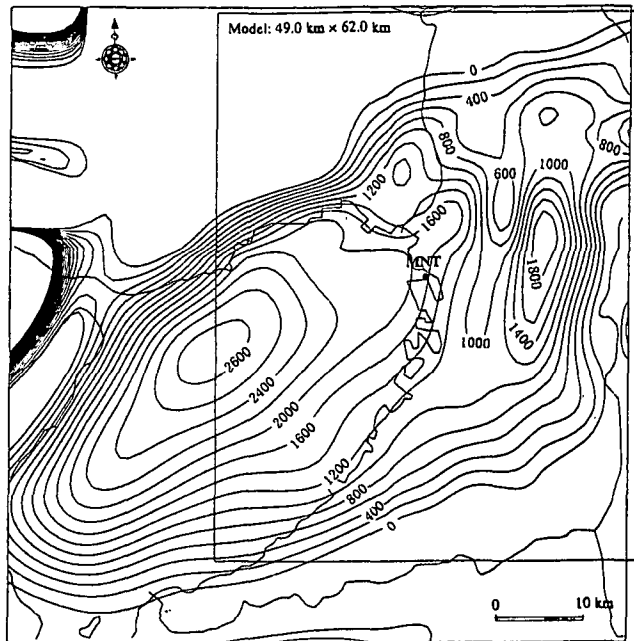


図-6 3次元応答計算に用いる基盤岩深度モデル

表-4 3次元差分計算で設定した地盤モデル

地盤種類	Vp (Km/s)	Vs (Km/s)	密度 (kg/m ³)	Q
表層	1.80	0.55	1.80	100
堆積層	2.30	1.00	2.30	120
基盤	5.40	3.20	2.60	300

このモデルを用いて実際の小地震(兵庫県南部地震の余震)を想定した計算を行い、実際の観測記録と比較することで、再現性を検証した。その結果、最大振幅幅と波形の相対的な特徴は良く再現されることが確認された。

5. 港大橋地点の地震動の計算

短周期帯域については、3. で述べた断層設定に基づき、統計的グリーン関数合成法によって地震基盤における地震動を計算し、天保山大橋のサイト増幅特性を港大橋地点のもののみなして掛け合わせ、港大橋地点における地表面地震動を作成した。

長周期帯域については、断層設定は短周期帯域と同様とし、3次元地盤差分法により、計算した。

この際、3次元差分計算では断層破壊の進行を同時に計算した。この手法はパラメトリックスタディには不向きであるが、小断層要素からの寄与がそれぞれ異なる地震動を用いることができ、より現象を忠実に再現できると考えられる。

このようにして求めた短周期域と長周期域の地震波に、遷移周波数帯域を0.5~1.0Hzとしたフィルターをかけ、波形の時間ずれを調整し、ハイブリッド合成し、地震動を求めた結果を図-7に示す。

さらに、表層の非線形地盤応答の影響を考慮するために、図-7の結果を $V_s=0.55\text{km/s}$ 層上面まで線形地盤応答で戻し、その後地表面層の非線形性を考慮して地表面波形を計算した。その結果を図-8に示す。求められた地震波の加速度応答スペクトル図には、道路橋示方書V耐震設計編⁵⁾に規定された、地震時保有水平耐力法に用いるタイプII地震III種地盤の設計水平震度を示すが、ほぼ同程度の値が得られている。

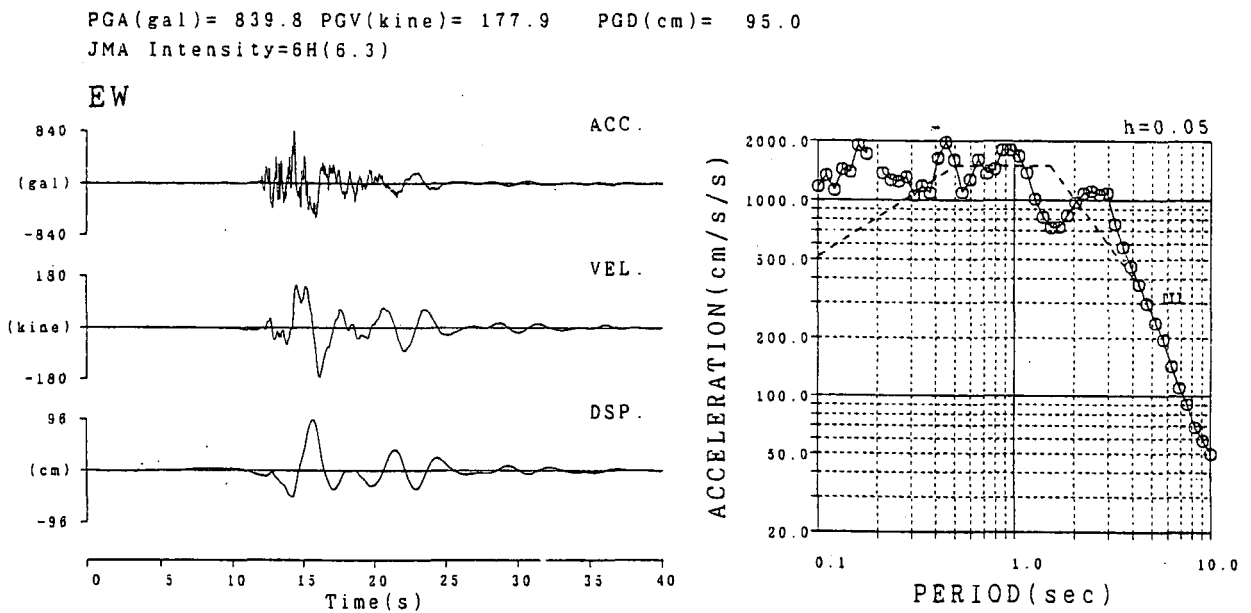


図-7 港大橋地点で計算された上町断層系による地震動（ハイブリッド合成後）（東西方向）

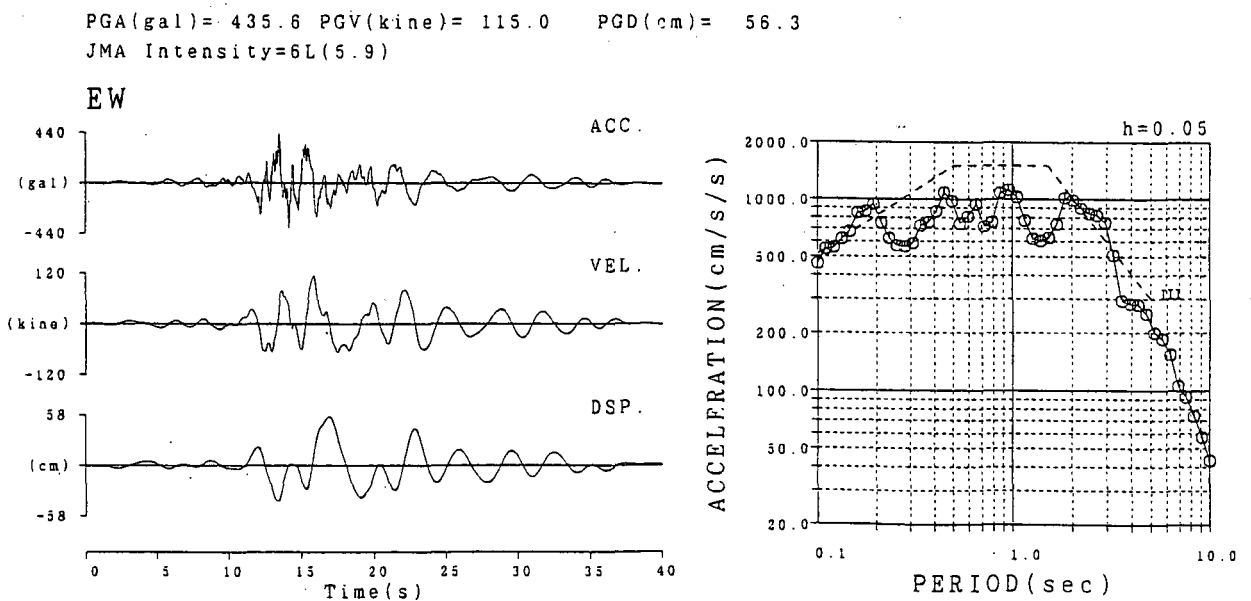


図-8 非線形地盤応答を考慮した港大橋地点の計算された上町断層系による地震動（東西方向）

6. 結論

阪神高速道路4号湾岸線の港大橋を対象に、内陸直下型地震による設計入力地震動の検討を以下により実施した。

- 震源断層として上町断層系を想定し、最新の地質データに基づき断層特性を設定した。
- 対象地点に近い強震観測記録から、経験的なサイト増幅特性を導いた。
- 堆積層2層と基盤の3層で大阪堆積地盤構造をモデル化し、長周期の3次元地盤応答を考慮した。

その結果、道路橋示方書V耐震設計編に規定された、地震時保有水平耐力法に用いるタイプII地震Ⅲ種地盤の設計水平震度と、ほぼ同程度の加速度応答スペクトルを持つ地震波を得た。

なお、地盤構造及び断層モデルについては、急速に研究の進んでいる分野であるので、今後も新たな知見を盛り込み、精度の向上を図っていきたいと考えている。また、この手法を、他の既設橋梁及び新設橋梁の設計入力地震動の検討に拡張していきたいと考えている。

謝辞：本研究の実施にあたっては、阪神高速道路公団技術審議会耐震設計分科会（主査：土岐憲三京都大学教授）の御指導をいただいた。同分科会の委員各位及び御助言をいただいた阪神高速道路公団の関係各位に心より謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 徳林，澤田，香川，宮越，鶴来：3次元盆地構造を考慮した大阪湾岸部における強震動評価，土木学会第54回年次学術講演会，I-B154，1999.9.
- 2) 徳林，澤田，古池，香川，宮越：3次元盆地構造を考慮した大阪湾岸部における強震動評価(2)，土木学会第55回年次学術講演会，I-B311，2000.9.
- 3) 阪神高速道路公団，(財)大阪土質試験所：活断層特性を考慮した入力地震動策定及び検討業務報告書，1999.3.
- 4) 阪神高速道路公団，(財)大阪土質試験所：活断層特性を考慮した入力地震動策定及び検討業務報告書(その2)，2000.3.
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，1996.12.