

## 活断層特性を考慮した入力地震動の検討

工務部 設計課 秦 健 作  
湾岸管理部 保全課 徳 林 宗 孝  
工務部 設計課 水 谷 治 弘

### 要 旨

本論文は、阪神高速道路4号湾岸線の港大橋地点を対象に、活断層特性を考慮した設計入力地震動について実施した検討結果について報告するものである。入力地震動の計算にあたっては、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。

検討の結果、道路橋示方書・同解説V耐震設計編に規定される地震時保有水平耐力法に用いるタイプII地震動のIII種地盤の設計水平震度と比較して、ほぼ同程度の加速度応答スペクトルを持つ地震波が得られた。

キーワード：入力地震動、活断層、上町断層系、アスペリティ

### 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。平成8年に改訂された道路橋示方書<sup>1)</sup>では、平成7年に発生した兵庫県南部地震において地盤上で観測された加速度強震記録に基づき、内陸直下型地震としてタイプII地震動が規定されている。しかし、内陸直下型地震については、個々の活断層の特性を直接設計に反映することが望ましいと考えられる。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

は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、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。

### 1. 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。

断層における地震動の放射が正確にモデル化でき、伝播経路およびサイトの地盤構造を完全に数値化できれば、地震動を理論的に評価することは可能である。しかし、実際の震源破壊および地盤構造は複雑であり、理論的な計算も計算機の性能等からその適用には限界がある。

そこで、理論的な波動伝播計算が可能な長周期帯域では理論的なアプローチで不整形地盤応答を考慮し、短周期帯域では平均的なサイト増幅特性を反映しそれぞれの計算結果を合成するハイブリッド法を採用した。具体的には、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ハイブリッド合成する。

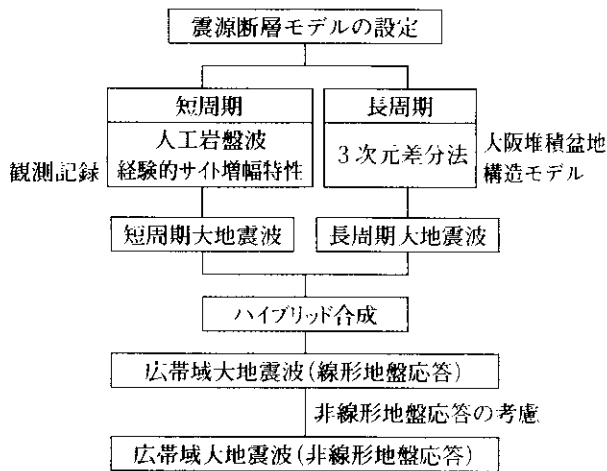


図-1 強震動評価のフロー

### 1-1 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(重ね合せ)法の一つを用いた。本手法の概念図を図-2に示す。

本手法ではまず、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(図-2中の③、以下同じ)と理論基盤スペクトル(②)を用いて地点の地盤増幅特性(経験的サイト増幅特性(④))を求める。そして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し、周波数依存型の放射特性を導入して作成した中小地震波形(⑥)を作成する。さらに想定した断層破壊進行(断層破壊の伝播と断層変位の蓄積による時間遅れ)に従ってこれら中小地震波形を足し合わせるにより大地震波形を作成する。

この手法によれば地震動を構成する要因である震源特性、伝播経路特性、サイト増幅特性を全て反映することができ、重ね合わせにあたって断層面上の非一様すべり(アスペリティモデル)の導入も比較的容易となる。

### 1-2 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動を3次元差分法による数値計算手法によって評価した。また、本検討の3次元差分計算では断層破壊をも同時に実行する方法を採用した。この手法の概念図を図-3に示す。

この方法は、断層破壊様式を変化させたパラメトリックスタディには不向きであるが、断層面からの地震動を厳密に評価することができる。また、

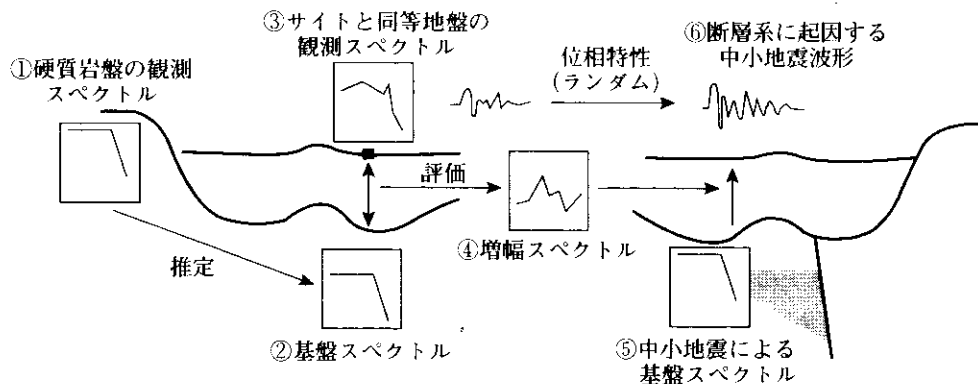


図-2 統計的グリーン関数合成法の概念

小断層要素からの寄与がそれぞれ異なる地震動が導入できる。

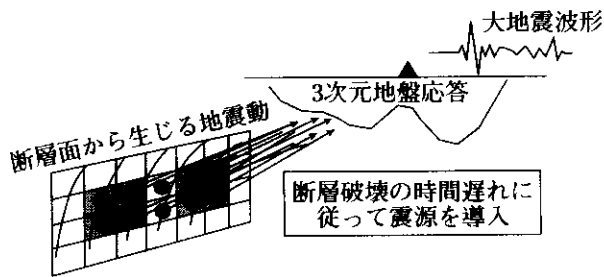


図-3 3次元差分法の概念

### 1-3 ハイブリッド合成

統計的グリーン関数法で求めた短周期帯域の波形と3次元差分法により求めた長周期帯域の波形に、遷移周波数帯域を0.5~1.0Hzとしたフィルターをかけハイブリッド合成する。これにより、低周波数から高周波数まで実用的な周波数帯域で十分な精度を持った設計入力地震動が得られる。

### 1-4 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。しかし現実的には、地震動が大きく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。したがって、軟弱な堆積層における大地震動を評価するには、このような非線形応答特性を考慮する必要がある。

そこで、地表面地震動を線形地盤応答を仮定して基盤面に戻し、再度非線形地盤応答を仮定して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、SHAKEにひずみの周波数依存性を導入した等価線形化手法

(FDEL) を用いた。

## 2. 震源断層と断層パラメータの設定

### 2-1 震源断層の設定

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、北部は仏念寺山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。しかし、兵庫県南部地震以後の調査により、上町断層系が従来考えられていたより南方へ連続していること、なら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。

ここでは、これらの最新の知見から上町断層系を設定した。図-4に今回設定した上町断層系を示すが、北部の仏念寺山断層系から大阪市域の上町断層へと続き、坂本断層から久米田池断層で構成される南部上町断層へと40km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

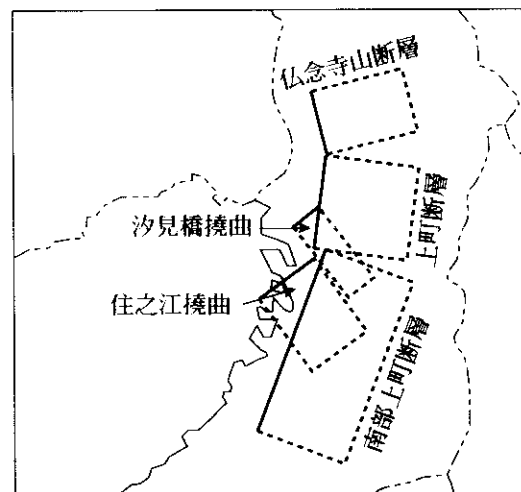


図-4 設定した上町断層系

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 (N・m)         | 総地震モーメント (N・m)        | 立ち上がり時間 (秒) | 断層タイプ |
|---------|---------|--------|--------|----------|-----------------------|-----------------------|-------------|-------|
| 仏念寺山断層  | 8       | 22     | 163.8  | 90       | $0.58 \times 10^{19}$ | $3.89 \times 10^{19}$ | 1.5         | 逆断層   |
| 上町断層    | 12      | 22     | 187.4  | 90       | $0.86 \times 10^{19}$ |                       | 1.5         | 逆断層   |
| 南部上町断層系 | 24      | 22     | 201.4  | 90       | $1.72 \times 10^{19}$ |                       | 1.5         | 逆断層   |
| 汐見橋撓曲   | 4       | 22     | 228.4  | 90       | $0.29 \times 10^{19}$ |                       | 1.5         | 逆断層   |
| 住之江撓曲   | 6       | 22     | 235.8  | 90       | $0.44 \times 10^{19}$ |                       | 1.5         | 逆断層   |

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寄りに分岐しており、これらの撓曲構造も起震断層に取り入れた。表-1に断層諸元を示す。

### 2-2 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に関しては最新の知見に基づき、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-5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<sup>2)</sup>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。

## 3. 地盤モデル

### 3-1 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。

表-2 港大橋地点の標準的な地盤構造モデル

| 深度 (m)   | Vs (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 |

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。このボーリング柱状図およびボーリング孔を用いて実施されたPS検層結果から港大橋地点の浅層部はほぼ水平成層構造と考えてよいことが明らかとなった。この浅層地盤情報および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。

次に、港大橋地点を対象として経験的なサイト増幅特性を導出した。ただし、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における地表面での地震観測記録を用いて経験的サイト増幅特性を求めた。

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

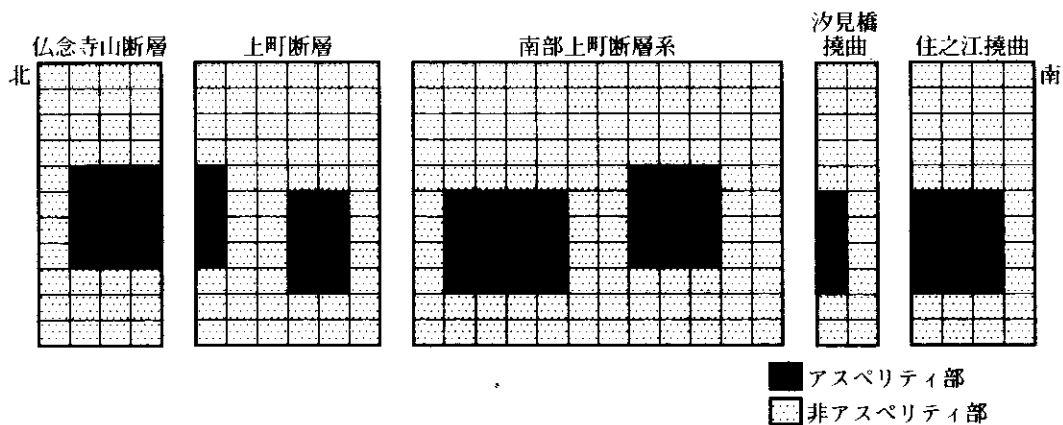


図-5 上町断層系のアスペリティモデル

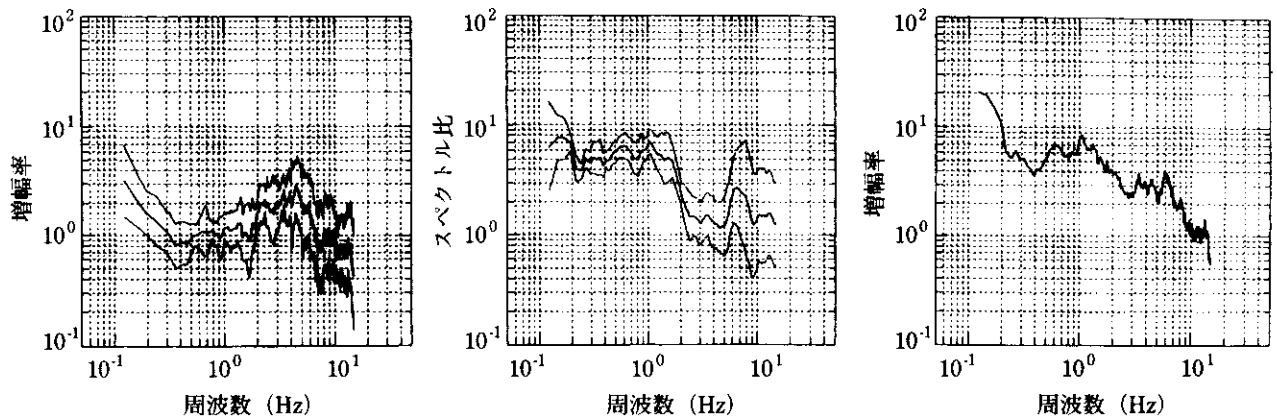


図-6 天保山大橋地点におけるサイト増幅特性の導出

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-6にその様子を示す。左が神戸大学の経験的サイト増幅特性、中央が神戸大学に対する天保山地点のスペクトル比である。これら2つを掛け合わせるにより、右に示す天保山地点の経験的サイト増幅特性を得た。こ

のとき用いた地震記録の諸元を表-3に示す。これらはいずれも兵庫県南部地震の余震記録である。

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-7)、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、ここで求めた天保山地点の経験的サイト増幅特性が港大橋地点の経験的サイト増幅特性としても妥当であることを確認した。

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.<br>21:44:15.4 | 34.792 | 135.315 | 兵庫県<br>南東部 | 16      | 4.2 |
| 1995.01.25.<br>23:15:57.1 | 34.788 | 135.307 | 兵庫県<br>南東部 | 15      | 5   |
| 1995.02.02.<br>16:19:27.8 | 34.690 | 135.142 | 兵庫県<br>南東部 | 13      | 4.1 |

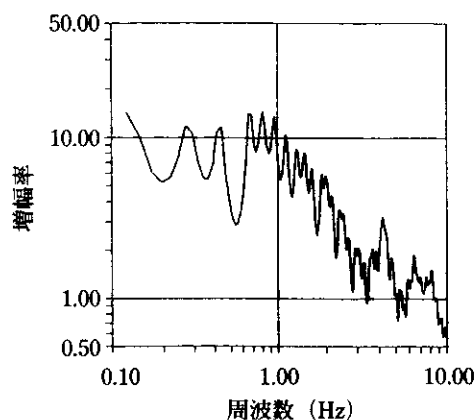


図-7 港大橋地点の標準的な地盤構造モデルによるサイト増幅特性

### 3-2 3次元地盤応答計算に用いる深層地盤モデル

大阪堆積盆地では、基盤岩に至る深層地盤構造によって複雑な地震動を示す。そこで、3次元地

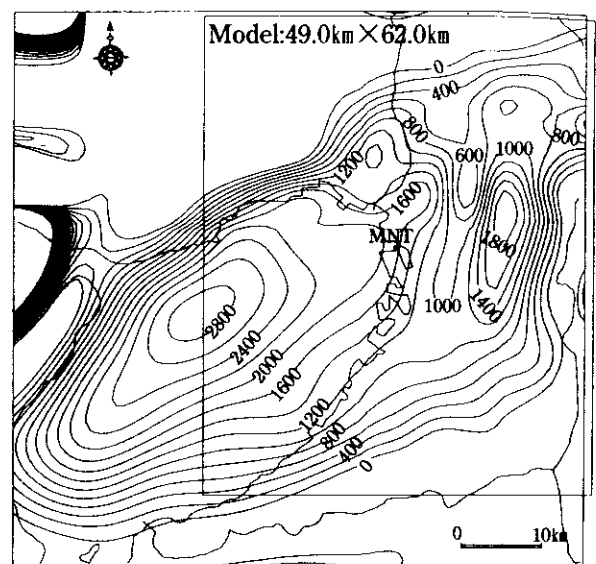


図-8 3次元地盤応答計算に用いた基盤深度モデル

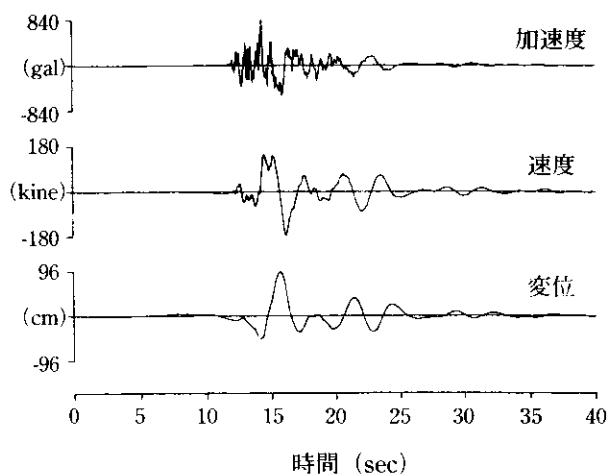
盤応答計算には、大阪湾堆積盆地の基盤岩深度構造を深層地盤の調査結果に基づいてモデル化した上で、さらに堆積層を2層化したモデルを用いた。

基盤深度構造を図-8に、堆積層地盤物性を表-4に示す。

表-4 3次元地盤応答計算に用いた地盤モデル

| 地盤種類 | Vp(km/s) | Vs(km/s) | 密度(kg/m <sup>3</sup> ) | 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、最大振幅値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。



#### 4. 港大橋地点の地震動の計算

短周期帯域については、2. で述べた断層設定に基づき統計的グリーン関数合成法の一つによって地震基盤における地震動を計算し、天保山大橋の経験的サイト増幅特性を港大橋地点のものとなして掛け合わせ、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-9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、図-9の結果を表-2のVs=0.55km/s

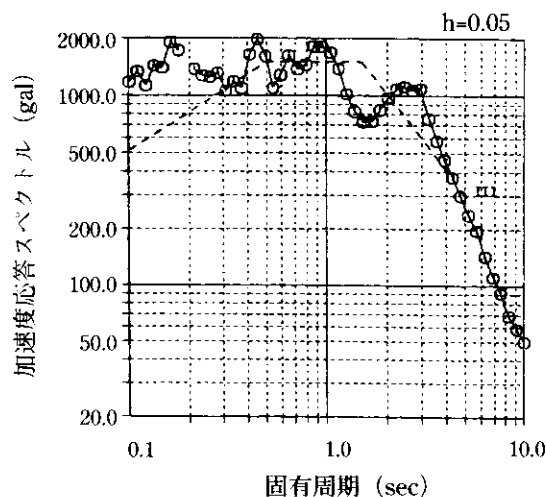
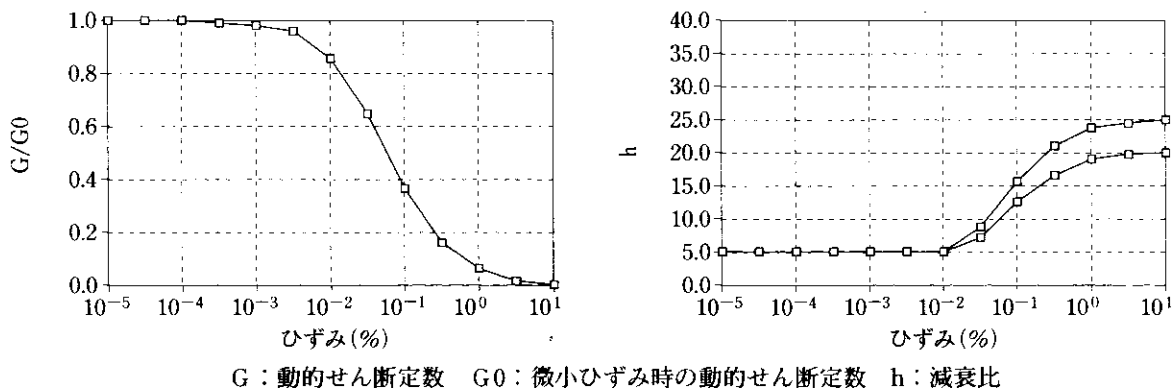


図-9 港大橋地点で計算された上町断層系による地震動(ハイブリッド合成後)(東西方向)



G: 動的せん断定数 G0: 微小ひずみ時の動的せん断定数 h: 減衰比

図-10 非線形地盤応答特性

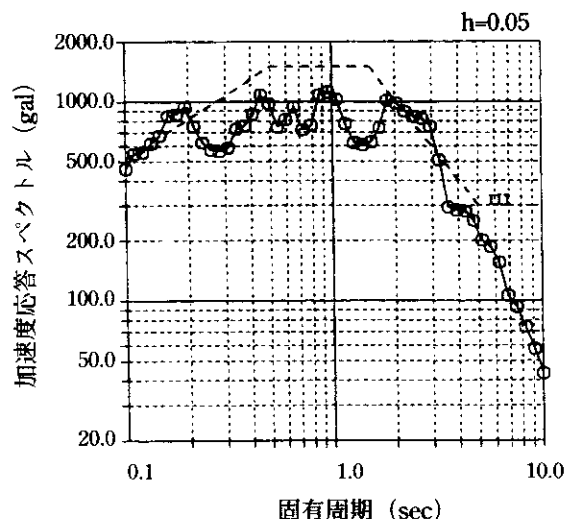
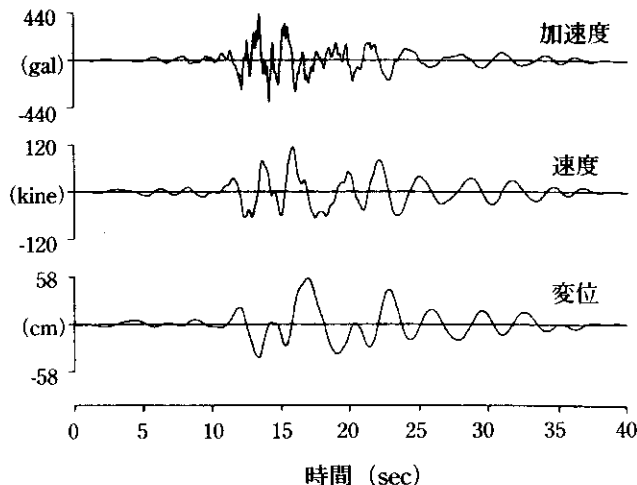


図-11 非線形地盤応答を考慮した港大橋地点の計算された上町断層系による地震動（東西方向）

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。非線形地盤応答特性 ( $G-\gamma$ ,  $h-\gamma$ ) については、南港火力発電所の調査結果をもとに図-10に示すものを用いた。これは砂と粘土で異なる特性を持つため、計算では層の構成物に応じてこれらの特性を使い分けた。

非線形応答を考慮した計算結果を図-11に示す。図中には、道路橋示方書・同解説V耐震設計編<sup>1)</sup>に規定される地震時保有水平耐力法に用いるタイプII地震動のⅢ種地盤に対する設計水平震度を点線で示すが、計算結果はこれとほぼ同程度の値が得られた。

## 5. 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層で大坂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・同解説V耐震設計編<sup>5)</sup>に規定される地震時保有水平耐力法に用いるタイプII地震動のⅢ種地盤に対する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が得られた。

なお、地盤構造および断層モデルに関しては、急速に研究の進んでいる分野であり、今後も新たな知見を盛り込み精度の向上を図っていく必要があるものと考えられる。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：本検討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(財)地域地盤環境研究所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) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震編，1996. 12.
- 2) 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.

- 3) 阪神高速道路公団, (財)地域地盤環境研究所: 活断層特性を考慮した入力地震動策定及び検討業務(その2)報告書, 2000. 3.
- 4) 徳林, 澤田, 香川, 宮腰, 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.
- 5) 徳林, 澤田, 古池, 香川, 宮腰: 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), 土木学会年次学術講演会 I - B311, 2000. 9.

**Use of input seismic wave data to investigate of active fault characteristics.**

**Kensaku Hata, Munetaka Tokubayashi, Haruhiro Mizutani**

Here we report the results of an investigation carried out concerning design and input seismic wave data in consideration of local active fault characteristics for the Minato Ohashi (bridge) of Hanshin Expressway Wangan Route No. 4. For the calculation of the short cycle frequency band input seismic wave, we used a type of statistical Green composite function method, for long cycle frequency band, we used a hybrid method that integrated values derived from a composite numerical method with values derived from three-dimensional differential calculus. We assumed the Uemachi fault line to be the source of the seismic wave and set up the fault characteristics using the latest geological data from the Nanbu earthquake in Hyogo. We also factored in data from monitoring recorders near the site of the bridge and empirical site transfer characteristics. Taking into consideration the three-dimensional ground response to the long cycle frequency band, composed of two sedimentary and two basement layers, we made a model of the Osaka ground structure.

Our results allowed us to model a seismic wave that has a type of acceleration response spectrum for comparison with the lateral seismic factor in the design, which is for a type II seismic ground motion in type III ground. This data can be used for revising the highway road bridge specification in line with its V earthquake resistant design principles and making alterations to the design according to horizontal stress-proofing methods.

**Keywords:** input seismic wave, active fault, Uemachi fault line, asperity