

論文 鉄筋コンクリート製地中構造物の塑性挙動に及ぼす上下動の影響

松井 淳^{*1}・大友 敬三^{*2}・金谷 賢生^{*3}

要旨：本論文では，鉄筋コンクリート製地中構造物の応答に及ぼす上下動の影響について評価する。ここでは，地盤を Ramberg-Osgood モデル，構造物を軸力変動型のトリリニアモデルで評価した地盤 - 構造物連成系モデルを用い，兵庫県南部地震における神戸大学の観測記録などに対する時刻歴非線形有限要素解析を実施した。その結果，隔壁などの鉛直方向部材における軸力を除いては顕著な影響は見受けられず，本論文で検討した範囲内では，上下動が構造物の応答に及ぼす影響は小さいことを確認した。

キーワード：地中構造物，上下動，耐震設計，動的相互作用，有限要素解析

1. はじめに

従来，原子力発電所の屋外重要土木構造物の耐震設計では，静的に取り扱われてきた上下地震動を時刻歴波形で評価する趨勢となってきた。しかし，地中構造物の応答に及ぼす上下動の影響についての検討例¹⁾は少なく，特に構造物が塑性応答を示す領域での上下動の影響を明らかにする必要がある。そこで本研究では，鉄筋コンクリート製（以下，RC）地中構造物の応答に対する影響を検討する。ここでは，地盤を Ramberg-Osgood モデル²⁾，構造物を軸力変動型トリリニアモデル^{3), 4)}で評価した地盤 - 構造物連成系モデルによる時刻歴非線形有限要素解析を実施し，上下動が構造物の塑性挙動などに及ぼす影響について評価する。すなわち，実観測記録に対する地震応答解析を行い，上下動を時刻歴波形で与えるときの構造物の応答特性，時刻歴波形の位相特性（水平動・上下動が最大値を記録する時刻差）の影響を検討した。

2. 解析の概要

2.1 解析モデル

(1) 解析対象

図 - 1 に示す海水管ダクトの実規模構造モデル

を対象とした⁵⁾。構造物は，RC ボックスカルパートで，応答塑性率 4 程度の塑性領域の応答が生じるように砂層のせん断波速度を 200m/s に低下させることによってそのせん断剛性を低減させたことを除いて，参考文献⁵⁾と同一である。

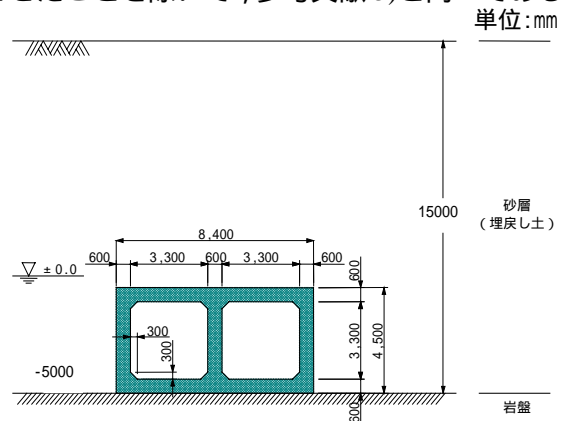


図 - 1 海水管ダクトとその周辺の地盤条件

(2) 構造物の概要

構造物は，RC 部材で構成されている。表 - 1 および表 - 2 に材料物性値と部材諸元を示す。

表 - 1 コンクリートおよび鉄筋の材料特性

材料		物性	
コンクリート	圧縮強度	(N/mm ²)	24
	ヤング係数	(kN/mm ²)	25
鉄筋	SD345	圧縮強度	(N/mm ²) 345
		ヤング係数	(kN/mm ²) 200

*1 (財)電力中央研究所 地球工学研究所 構造工学領域 工修 (正会員)

*2 (財)電力中央研究所 地球工学研究所 構造工学領域リーダー 博(工) (非会員)

*3 関西電力(株) 土木建築室 マネージャー 工修 (非会員)

表 - 2 部材の断面諸元(全ての部材で共通)

部材厚さ	(cm)	60
かぶり	(cm)	10
部材高さ	(cm)	100
主鉄筋	配筋	D19@150
	鉄筋量(cm ²)	19.1
補強筋	配筋	D16@150
	鉄筋量(cm ²)	13.3

(3) 解析に用いた入力加速度波形

1995年兵庫県南部地震にて、神戸大学の観測記録のNS成分およびUD成分⁶⁾を基本とし、図-2にその加速度時刻歴波形を示す。

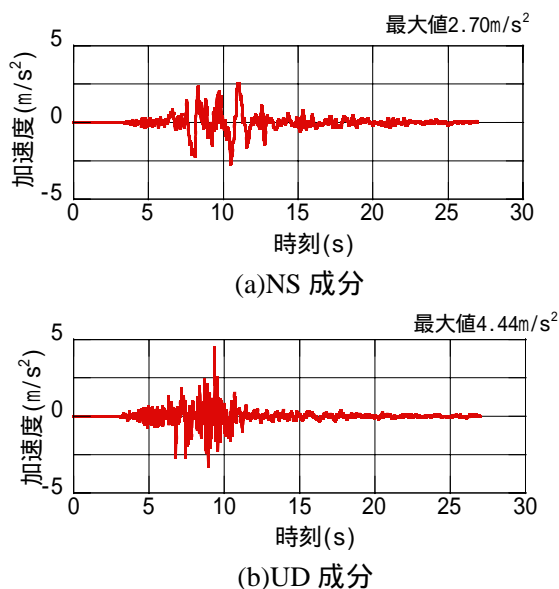


図 - 2 解析に用いた入力加速度波形

NS成分とUD成分において、加速度が最大を記録する時刻は、それぞれ10.48(s)および9.39(s)であり、1.09(s)の時刻差が生じている。ここで、上下動成分の最大加速度の発生要因は、断層破壊時のマルチプルショックに伴うSP変換波と直達P波の重畳によるものと解釈されている⁷⁾。そこで、先ずこのマルチプルショックが同時に生じたと仮定し、UD成分の時刻歴のデジタルデータの先頭に値が0のデータを1.09(s)分追加し、後ろの1.09(s)分のデジタルデータを除去(値はほぼ0)し、水平成分と上下成分の最大値が同時に発生する時刻歴波形を作成した。

さらに、水平動と上下動の最大加速度の発生時刻差が構造物の応答へ及ぼす影響を検討することを目的に、NS成分において最大加速度を含む波形の1/4周期分(加速度が最大から0まで低下するまでの時間帯)を3等分した区間でUD成分が最大となる地震動を作成することとした。すなわち、それぞれの区分(ここでは、0.09(s)間隔)で上下成分の加速度が最大を記録するように、先頭および後方のデジタルデータを調整し、上下成分の加速度が最大を記録する時刻が、それぞれ10.57(s)、10.66(s)および10.75(s)となるように時刻歴波形を作成した。

(4) モデル化の概要

図-3に、解析に用いた有限要素分割図を示す。側方および底部境界は粘性境界としている。地盤は、岩盤内での地震波の波動伝播の影響を考慮するため、5mまでの深さの領域をモデル化している。

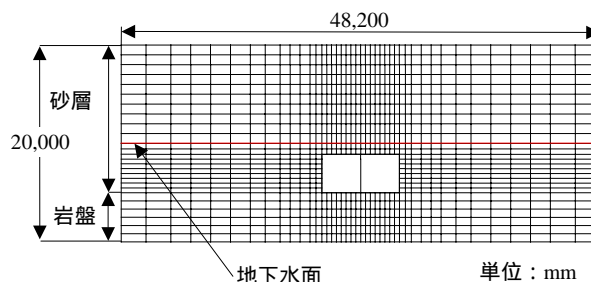


図 - 3 解析に用いた有限要素分割図

地下水面以下の飽和地盤では、間隙水中を伝播する上下動の影響を適切に考慮するために体積弾性係数を一定とした^{8),9)}。また、せん断応力-せん断ひずみに関する非線形性を考慮するために全応力・履歴依存型モデルの一つであるRamberg-Osgoodモデル²⁾を用いた。ここでは、あらかじめ実施した次元重複反射理論による等価線形解析結果に基づき、想定される地盤のせん断ひずみの最大値を把握し、式(1)とせん断弾性係数および減衰比のひずみ依存性が一致するように、式(2),(3)によって、パラメータ α 、 β を定めた¹⁰⁾。

$$\tau = \frac{G_0}{1.0 + \alpha \left| \frac{\tau}{\tau_f} \right|^\beta} \gamma \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{\tau_f}{\tau} - 1 \quad (\text{ただし } \gamma_f = \tau_f / G_0) \quad (2)$$

$$\beta = \frac{2\pi h}{2(1 - G/G_0) - \pi h} \quad (3)$$

ここに、 γ_f ：想定されるせん断ひずみの最大値，
 h ：減衰比， G_0 ：せん断弾性係数

構造物は、有効高さの 1.0 倍程度で要素を分割したはり要素でモデル化した。ボックスカルバートやラーメン橋脚などでは、水平動のみを作用した場合でも、時刻歴応答解析中に、時々刻々、部材の軸力は変動する。しかし、その変動の範囲は一般に小さいことから^{例えは⁵⁾}、必ずしも軸力の変動を考慮した構成則を適用する必要はない。本研究では、上下動の影響をできるだけ正確に評価することを目的としているため、RC 部材の曲げに関する非線形性を考慮した軸力変動型トリリニアモデル⁴⁾を用いた。ここでは、「曲げひび割れ発生」、「断面降伏」および「断面終局」の 3 つを特性点とし、解析中の軸力の変動に応じて、特性点の値を逐次変更している（図 - 4）。

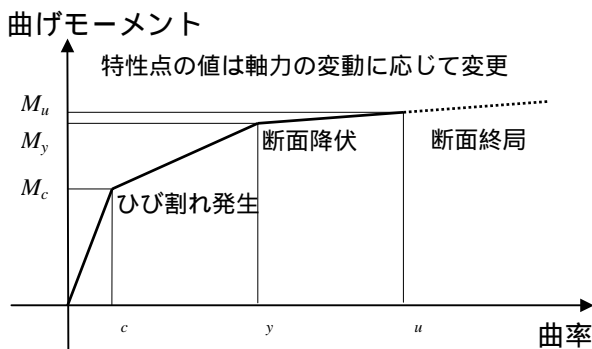


図 - 4 RC 部材の復元力特性

また、履歴特性は、式(4)のような Takeda モデル³⁾で提案されている履歴則に対して、軸力の変動を考慮したものを⁴⁾を用いた。

$$K_d = \frac{M_c}{\phi_c} \left| \frac{\phi_{\max}}{\phi_c} \right|^p \quad (4)$$

ここに K_d ：除荷時の曲げ剛性

M_c ：ひび割れ発生時の曲げモーメント

ϕ_c ：ひび割れ発生時の曲率

ϕ_{\max} ：最大曲率

p ：除荷剛性係数

地盤 - 構造物間では、地盤および構造物の剛性の大小関係などにより、境界面において剥離・相対変位などの幾何学的な現象が生じる場合がある。そこで、側壁および頂版 - 地盤間に、式(5)に示すようなジョイント要素を用いて、その影響を簡便に評価した。

$$\tau_f = c - \sigma \tan \phi \quad (5)$$

ここに、 τ_f ：破壊せん断応力

σ ：ジョイント要素中の直応力

c ：粘着力 (=0)

ϕ ：摩擦角 (=地盤の内部摩擦角 38°)

3. 解析結果

3.1 上下動を時刻歴波形で与える時の応答特性

ここでは、水平動・上下動を同時入力した場合（上下動は実観測記録；最大値は 10.48(s)）と水平動のみを与えた応答解析結果とを比較した。

(1) 地盤の動的応答特性

図 - 5、6 に、構造物から十分離れた地盤の加速度および変位の最大値の深度分布を示す。これから、水平方向の応答へはほとんど影響しない、上下方向では、応答加速度が表層付近で 2 倍程度に増幅しているが、変位への影響は水平方向に比べて非常に小さいことがわかる。

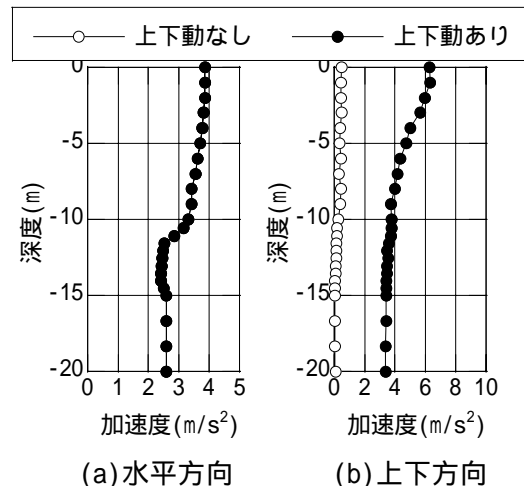


図 - 5 地盤の最大加速度深度分布

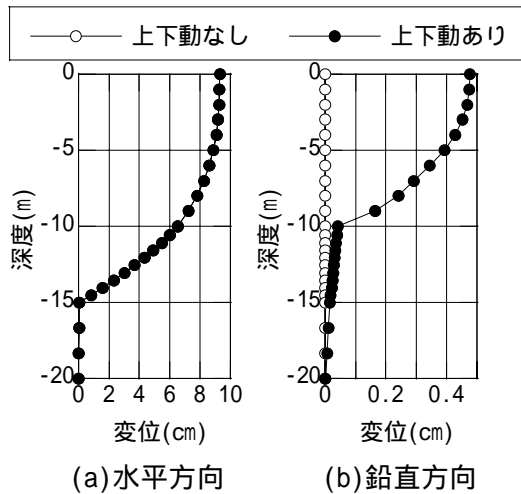


図 - 6 地盤の最大変位深度分布

(2) 上載土慣性力への影響

図 - 7 に上載土慣性力の時刻歴のうち 6~12(s) の時間帯を示す。ここで、上載土の慣性力は、構造物上方の埋設地盤中に発生する応答加速度に地盤の質量を乗じて算出するもので、土被りを有する地中構造物では、構造物全体のせん断変形の主たる荷重として作用する¹¹⁾。まず、水平成分は、上下動のあり/なしでほとんど変わらず、上下動が構造物全体のせん断変形に寄与する割合が極めて小さいことが示唆される。一方、鉛直成分は上下動のみによってもたらされていることが確認され、構造物の各部材の軸力などに影響が及ぼされることが推察される。

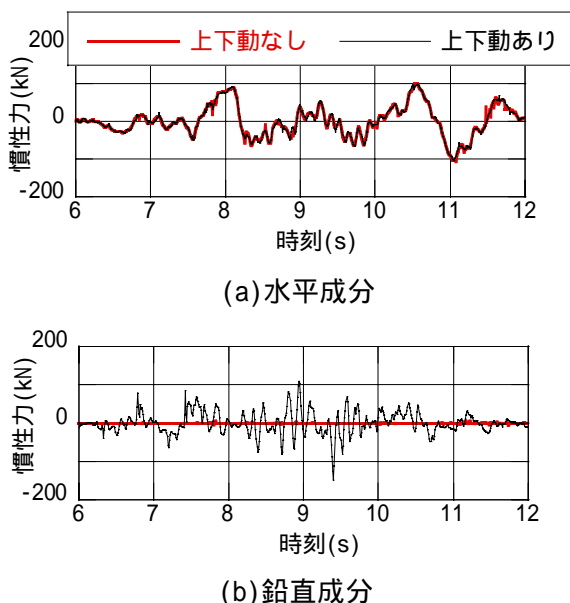


図 - 7 上載土慣性力の時刻歴

(3) 層間変位への影響

参考文献 5)で、耐震性能照査時に用いる照査項目と位置付けた層間変位(頂版 - 底版間相対変位)の時刻歴を図 - 8 に示す。位相および振幅(最大値)のいずれについても、上下動の影響がほとんど見受けられないことがわかる。

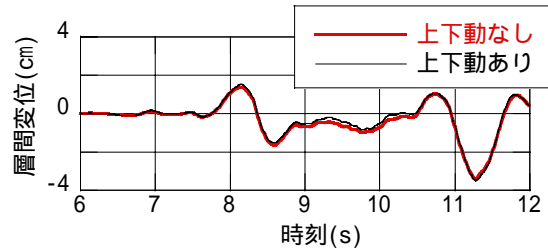


図 - 8 層間変位の時刻歴

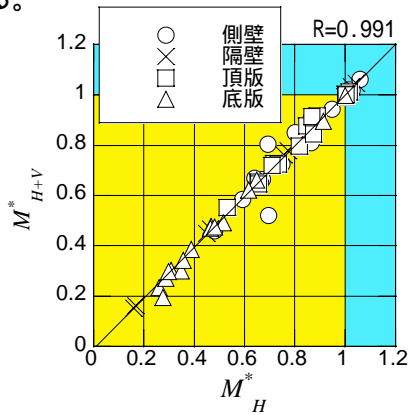
(4) 断面力・曲率への影響

ここでは、断面力および曲率に及ぼす影響を評価する。全ての要素について、曲げモーメントは降伏曲げモーメント、せん断力はせん断耐力、曲率は降伏曲率で除し、さらに軸力は軸応力に換算した後にコンクリートの圧縮強度で除して(軸力比)、それらの最大値を抽出した。降伏曲げモーメントなどの算出に際して、軸力はその時刻での値を参照している。ここで降伏曲げモーメントなどで除したのは、応答に及ぼす軸力の影響を考慮するためである。これらの結果を部材の種類別に分類した後、図化したものが図 - 9 および図 - 10 である。横軸には上下動を考慮しない場合の最大降伏曲げモーメント比(M^*_H), 最大せん断力比(S^*_H), 最大軸力比(N^*_H) および最大降伏曲率比(κ^*_H)を、縦軸には上下動を考慮した場合の最大降伏曲げモーメント比など(同様にそれぞれ、 M^*_{H+V} , S^*_{H+V} , N^*_{H+V} , κ^*_{H+V})をプロットしたものである。さらに、両者に関する 1:1 の関係を実線で示している。また、両者の相関の程度を定量的に比較するために回帰分析で用いられた相関係数の値も付記した。これらから、以下のような傾向が見出される。

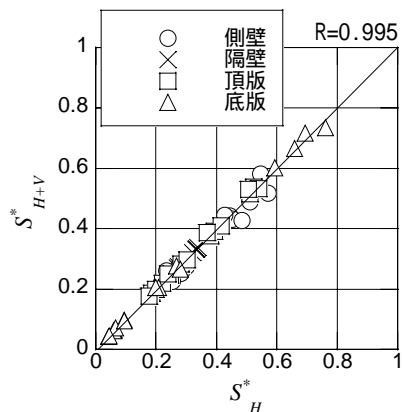
- ・部材の曲げ変形およびせん断力に対する影響は小さく、部材による傾向の相違もない。また、弾性域から塑性域に至るまでその傾向は同様である。相関係数も全て 1.0 に近い値となっている。

一部側壁での曲げモーメントにやや影響が見られた要素があるが、これは上下動の影響を適切に評価するため、減衰を小さく設定したため、隣接するジョイント要素において、一時的にスパイク状の応答が発生したことによる。

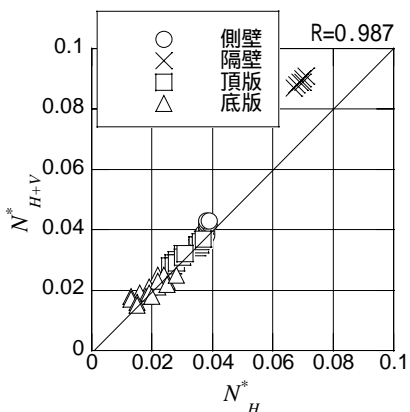
・軸力については、隔壁に対してやや影響が見受けられ、圧縮力が増加する傾向が見られ、相関係数も他の場合に比べてやや小さい値となっている。



(a) 曲げモーメント



(b) せん断力



(c) 軸力

図 - 9 断面力に及ぼす影響

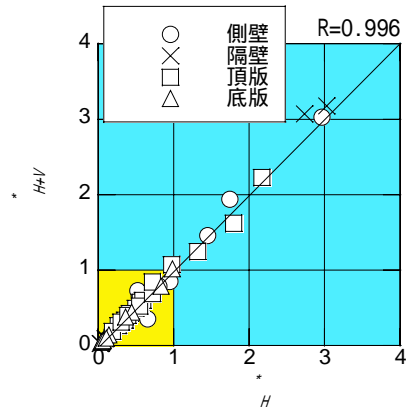


図 - 10 曲率に及ぼす影響

さらに、図 - 11 は、隔壁下端部の軸力の動的増分値（初期軸力を差し引いた値）と上載土慣性力の鉛直成分の時刻歴（図 - 7 (b)）を比較して示したものである。これから、両者の位相は良く一致しており、上下動は上載土慣性力の鉛直成分に影響を及ぼすことにより、主に鉛直方向部材の軸力の変動をもたらすことがわかる。しかし、軸力の動的増分値は軸応力に換算すると、 0.3N/mm^2 程度であり、上下動による軸力の変動の範囲はきわめて小さいことから、部材耐力などへの影響も微小であるといえる。

以上の結果から、本論文で検討した事例の範囲内では、上下動が構造物の応答に及ぼす影響は極めて小さいといえる。

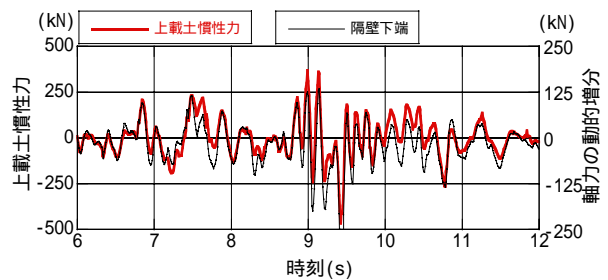


図 - 11 上下方向上載土慣性力と軸力の動的増分の比較

3.2 水平動と上下動の最大値の発生時刻差の影響評価

3.1 の結果を踏まえ、水平動・上下動が最大値を記録する時刻差が応答値に及ぼす影響について、相関係数を用いて、同様な評価を行った（図 - 12）。相関係数は全て 1.0 に非常に近い値であり、発生時刻差が応答に及ぼす影響はほとんど認められないことが分かった。

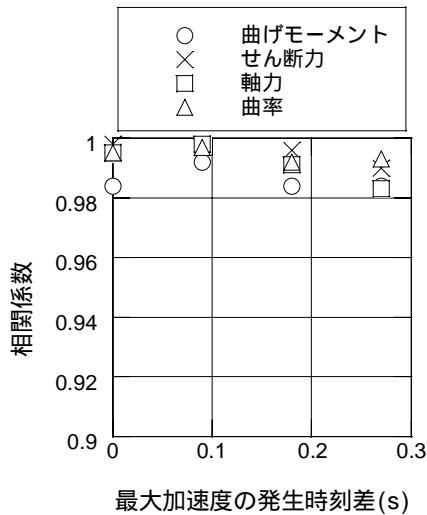


図 - 12 水平動・上下動の最大加速度の発生時刻差が断面力・曲率に及ぼす影響

4. まとめ

本研究の結果をまとめると以下のようである。

- (1) 上下動が地盤の水平方向の応答に及ぼす影響はほとんど見受けられない。このため、構造物全体のせん断変形に起因する応答(層間変位, 曲げモーメント, せん断力, 曲率)への影響は認められない。
- (2) 上下動は上載土慣性力の鉛直成分に影響を及ぼし, 隔壁などの鉛直方向部材の軸力がわずかに変動する。
- (3) (2)より, 軸力の変動の範囲が小さいことから, 部材耐力などへは大きな影響を及ぼさない。
- (4) 水平・上下動の最大加速度の発生時刻差が構造物の応答に及ぼす影響はほとんど認められない。

謝辞: 本研究は, 電力9社, 日本原子力発電(株) および電源開発(株) による電力共通研究の一部として実施した。本研究の関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 伊東 守: 上下地震動の地中構造物に与える影響評価と耐震設計に関する研究, 九州大学学位申請論文, 2003.
- 2) 大崎順彦, 原 昭夫, 清田芳治: 地盤振動の

ための土の動力学モデルの提案と解析例, 第5回 日本地震工学シンポジウム論文集, pp.697-704, 1978.

- 3) Takeda T., A. Sozen and N. Nielsen: Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, 第3回 日本地震工学シンポジウム論文集, pp.357-364, 1970.
- 4) 江戸宏彰, 武田寿一, 表 佑一郎: 3層1スパン鉄筋コンクリート骨組の動的破壊実験(その2. 実験結果の検討), 日本建築学会関東支部 第44回研究報告集, pp.45-48, 1973.
- 5) (社)土木学会 原子力土木委員会: 原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・同マニュアル・同照査例・同技術資料, 土木学会, 2002.
- 6) 関西地震観測研究協議会における観測記録.
- 7) 若松邦夫: 震源域での強震動, 日本建築学会第23回 地震震動シンポジウム講演概要集, pp.3-5 ~ 3-14, 1995.
- 8) 金谷 守, 石川博之, 金戸俊道: 等価線形解析を用いた地盤の上下動応答解析に関する一考察, 第11回 日本地震工学シンポジウムCD-ROM 論文集, 2002.
- 9) 金谷 守, 石川博之, 金戸俊道: 水平・上下動の同時入力を伴う等価線形解析における体積弾性係数の設定, 土木学会 第58回 年次学術講演会講演概要集, -117, 2003.
- 10) 河井 正ら: 鉄筋コンクリート製地中構造物の耐震性能照査法の高度化(その2) 密な乾燥砂地盤・構造物連成系解析における地盤非線形モデルの適用性評価, 電力中央研究所報告, 研究報告 U02018, 2003.
- 11) 大友敬三, 末広俊夫, 河井 正, 金谷賢生: 強震時における鉄筋コンクリート製地中構造物横断面の塑性変形に関する実証研究, 土木学会論文集, No.724/ -62, pp.157-175, 2003.