

# 側方が片側のみ傾斜した地盤中のRC地中 構造物の応答に及ぼす上下動の影響評価

松井 淳<sup>1</sup>・大友敬三<sup>2</sup>・堀江正人<sup>3</sup>

<sup>1</sup> (財) 電力中央研究所 地球工学研究所 構造工学領域 主任研究員  
(〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

E-mail: j-matsui@criepi.denken.or.jp

<sup>2</sup> (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  
(〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

E-mail: ootomo@criepi.denken.or.jp

<sup>3</sup> 関西電力(株) 土木建築室 原子力土木建築グループリーダー  
(〒530-8505 大阪府大阪市北区中之島3-3-22)

E-mail: horie.masato@d3.kepco.co.jp

側方が片側のみ傾斜した地盤中における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を評価することを目的に、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、観測地震動に対する時刻歴の非線形有限要素解析を実施した。

その結果、地盤の不整形の影響による反射・屈折によって上下動が励起されるものの、基盤から入射される地震動の鉛直成分が卓越することから、上下動は成層地盤の場合とほぼ同様な機構により、構造物の応答にわずかに影響を及ぼすことが確認された。

**Key Words :** *underground structure, reinforced concrete, vertical ground motion, inclined ground, seismic performance verification*

## 1. はじめに

各種土木構造物を対象に、性能照査型設計の概念を導入した耐震設計法の高度化が進められている。ここでは、地震時に構造物に課せられる機能を直接検証することを基本的な考え方としていることから、構造物の地震時の挙動を厳密に評価する解析手法の開発が必要である。構造物の地震応答解析の実施にあたって、設計用地震動の鉛直成分（以後、上下動）については、従来水平成分（以後、水平動）の最大加速度振幅の1/2を鉛直震度に換算し、これを静的な地震力として考慮してきた。しかし、上記の性能照査型の設計手法の導入のためには、上下動も動的に考慮することが望ましく、これが構造物の応答に及ぼす影響を把握することは、耐震設計法の高度化のための重要な研究課題の一つであると考えられる。

表層地盤における上下動には、i) 基盤面から入射される上下動、ii) 基盤不整形の影響による反射・屈折によって生成される上下動の2種類が考えられ

ることから、地中構造物の応答に及ぼす動的上下動の影響に関する研究も、これに対応して二つに大別される。i)は、成層地盤中に埋設される場合が想定され、1995年兵庫県南部地震を契機に様々な研究が実施されている。上西ら<sup>1)</sup>は、函型トンネルを対象に、その損傷の機構を理論的に解明することを試み、地震動の周波数特性と地盤条件との関連を指摘している。伊東<sup>2)</sup>は、原子力発電所の海水管ダクト<sup>3)</sup>などを対象に、動的上下動が地中構造物に及ぼす影響を検討している。Anら<sup>4)</sup>や(社)土木学会コンクリート委員会311委員会(阪神淡路大震災被害分析小委員会)<sup>5)</sup>では、構造物を詳細な構成則<sup>6)</sup>で定義した非線形モデルなどを用い、1995年兵庫県南部地震における神戸高速鉄道の大開駅での損壊事例を対象に、構造物の終局状態までの挙動に及ぼす上下動の影響を解析的に検討している。さらに、著者ら<sup>7)</sup>は、二種の鉄筋コンクリート製(以後、RC)地中構造物を対象に、動的上下動が構造物の応答に及ぼす機構や水平動・上下動の最大加速度の発生時刻差が応答に及ぼす影響を検討している。

一方、ii)については、知見が乏しいのが現状である。しかし、実構造物は、基盤が不整形な地盤中に埋設される場合も多いことから、このような条件下での構造物の応答に及ぼす上下動の影響を把握することは、耐震設計法の高度化のためには有用であると考えられる。

そこで、本研究では、側方が片側のみ傾斜した地盤中に埋設されたRC地中構造物について、観測地震動に対する地震応答解析を実施し、その応答に及ぼす上下動の影響を評価することとした。

## 2. 解析の概要

### (1) 解析対象

2連のRCボックスカルバートを検討の対象とした。図-1に、その形状および寸法を示す。図-2には、周辺の地盤条件を示す。構造物は、岩盤A（せん断波速度：700m/s）上に設置された後、深さ5m位置に地下水水面を有する砂地盤（せん断波速度：100m/s）中に埋設されている。さらに、右側方には60°に傾斜した岩盤B（せん断波速度：300m/s）が位置する地盤条件とした。

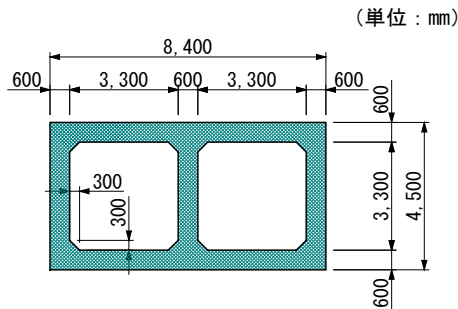


図-1 ボックスカルバートの構造

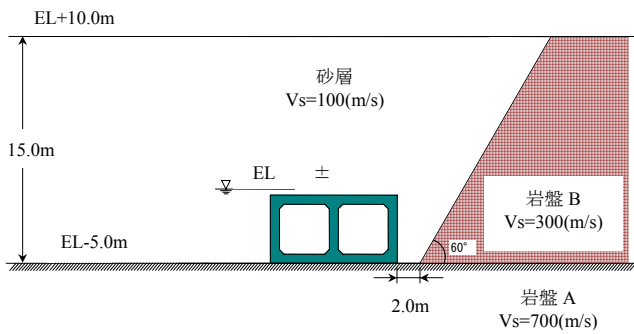


図-2 ボックスカルバートの埋設条件

### (2) 構造物の概要

ボックスカルバートを構成するRC部材の材料物性値および部材諸元を、それぞれ表-1および表-2に示す。

表-1 コンクリートおよび鉄筋の材料特性

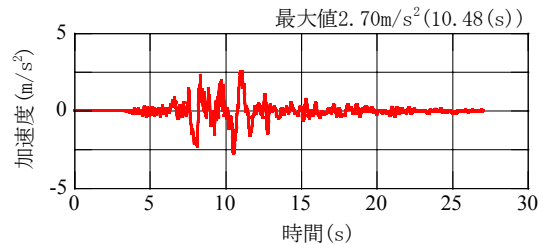
材料		物性	
コンクリート	圧縮強度	(N/mm <sup>2</sup> )	24
	ヤング係数	(kN/mm <sup>2</sup> )	25
鉄筋	SD345	圧縮強度	(N/mm <sup>2</sup> )
		ヤング係数	(kN/mm <sup>2</sup> )

表-2 部材の断面諸元（全部材で共通）

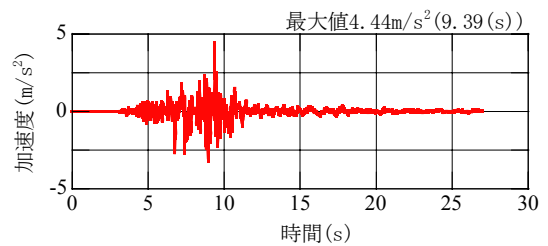
部材厚さ	(cm)	60
かぶり	(cm)	10
部材高さ	(cm)	100
主鉄筋	配筋	D19@150
	鉄筋量(cm <sup>2</sup> )	19.1
補強筋	配筋	D16@150
	鉄筋量(cm <sup>2</sup> )	13.3

### (3) 解析に用いた検討用地震動

水平動の最大加速度よりも大きな上下動の最大加速度が生じた強震観測記録の一つとして、1995年兵庫県南部地震における神戸大学での観測記録のうち、水平成分としてNS成分、上下成分としてUD成分を検討用地震動とした<sup>8)</sup>（図-3）。



(a)NS成分



(b)UD成分

図-3 兵庫県南部地震における神戸大学観測記録<sup>8)</sup>

### (4) 解析モデル

解析に用いる有限要素分割図の作成にあたっては、側方および底部境界には粘性要素を定義した。地盤は、構造物を支持する岩盤A中で地震波の波動を伝播させるため、ここでは5mまでの深さの領域をモデル化した。

地下水水面以深の飽和地盤では、上下動は間隙水中を伝播する。このような現象をモデル化するために、既往の研究成果<sup>9),10)</sup>に基づき、せん断剛性の低下にかかわらず、その体積弾性係数を一定とした。さらに、地盤の構成則には、全応力-履歴依存モデルのうち、せん断応力-せん断ひずみに関する非線形性を考慮したRamberg-Osgoodモデル<sup>11)</sup>を用いた。ここでは、あらかじめ実施した一次元重複反射理論による等価線形解析の結果に基づき、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 $\alpha$ 、 $\beta$ を定めた<sup>12)</sup>。

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

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

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

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

ここに、 $\gamma_f$ ：想定されるせん断ひずみの最大値、 $h$ ：減衰比、 $G_0$ ：初期せん断弾性係数、 $G$ ：せん断弾性係数

構造物は、部材の有効高さの1.0倍程度で要素分割したはり要素でモデル化した。RC部材の構成則には、RC部材の曲げに関する非線形性を考慮した軸力変動型のトリリニアモデルを用いた<sup>13)</sup>。ここでは、3つの特性点を、「曲げひび割れ発生」、「断面降伏」および「断面終局」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-5）。

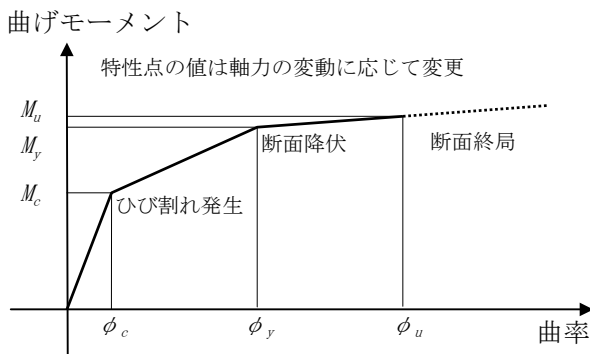


図-5 RC部材の復元力特性

履歴特性には、式(4)に示すようなTakedaモデル<sup>14)</sup>で提案されている履歴則について、軸力の変動を考慮したものを用いた。

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

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、 $\phi_c$ ：ひび割れ発生時の曲率、 $\phi_{\max}$ ：最大曲率、 $p$ ：除荷剛性係数

地盤－構造物間においては、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－地盤間において、式(5)で示すようなMohr-Coulomb則に従うジョイント要素<sup>15)</sup>を用いて、その影響を簡便に評価した。

ここに、 $\tau_f$ ：破壊せん断応力、 $\sigma$ ：ジョイント要素中の直応力、 $c$ ：粘着力(=0)、 $\phi$ ：摩擦角(=地盤の内部摩擦角 $38^\circ$ )

動的解析の実施にあたって、粘性減衰特性は、あらかじめ実施した固有値解析の結果に基づき一次モード減衰比 $h=1.0\%$ に相当する剛性比例型のRayleigh減衰を考慮した。これは、 $h$ を相対的に小さくすることにより、比較的高次の振動モードとなる上下動応答を数値減衰的に抑えることを避けるためである。また、運動方程式の直接積分には、Newmarkの $\beta$ 法( $\beta=1/4$ )を用いた。

### 3. 解析結果

解析結果の評価は、水平動のみを入力した場合と水平動・上下動を同時入力した場合の結果を比較・考察することにより行う。

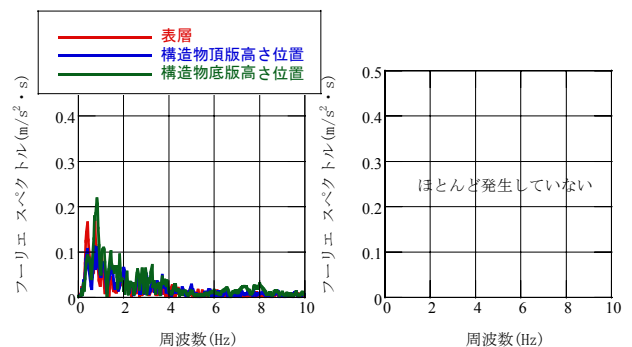
#### (1) 全体応答

地盤条件や上下動の影響を概観するため、左側方境界部近傍（自由地盤に相当）および構造物中央断面位置における応答加速度の周波数特性を検討する。全てのケースについて、①表層、②構造物頂版高さ位置(-11.1m)、③構造物底版高さ位置(-15.0m)における応答加速度のフーリエスペクトルを算出した（図-6～9）。これらから、以下のような傾向が見出される。

#### a) 水平動のみを入力した場合（図-6、7）

##### ① 水平成分

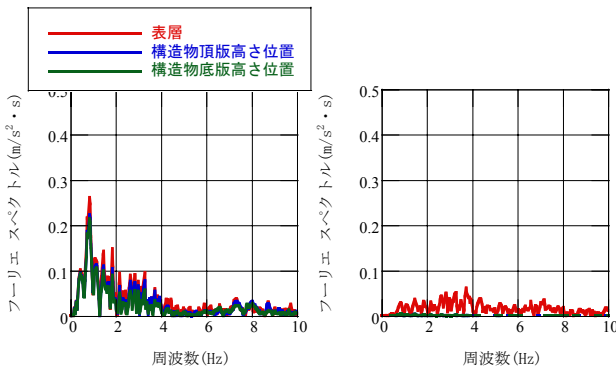
構造物頂版高さ位置までは、自由地盤に相当する左側方境界付近の地盤と構造物中央断面位置の間でほとんど相違は見られず、側方の岩盤の影響は見られない。一方、これより上方の地盤（構造物上載土）では、左側方境界付近の地盤では、低周波数成分がわずかに卓越してくるのに対して、構造物中央断面位置では、周波数特性がほとんど変化していない。これは、右側方の岩盤の影響によるものと考えられる（図-6(a)、図-7(a)）。



(a) 水平成分

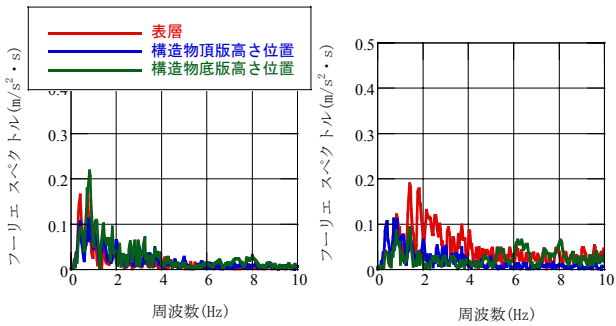
(b) 鉛直成分

図-6 左側方境界部近傍の加速度の周波数特性（水平動のみ）



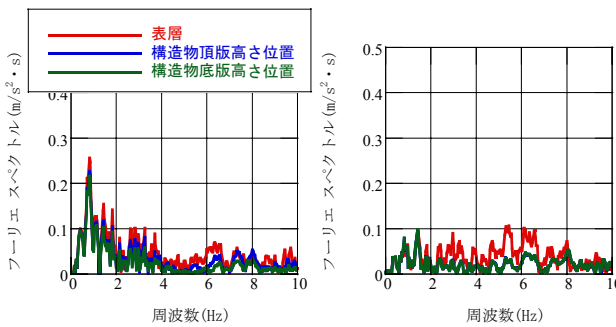
(a) 水平成分 (b) 鉛直成分

図-7 構造物中央断面の加速度の周波数特性 (水平動のみ)



(a) 水平成分 (b) 鉛直成分

図-8 左側方境界部近傍の加速度の周波数特性 (水平動・上下動同時入力)



(a) 水平成分 (b) 鉛直成分

図-9 構造物中央断面の加速度の周波数特性 (水平動・上下動同時入力)

## ②鉛直成分

鉛直成分についても相違が見られる。左側方境界付近の地盤では、鉛直方向の応答はほとんど発生していない。一方、構造物中央断面では、構造物頂版高さから表層にかけて、右側方の岩盤の影響により波動が反射・屈折したものと考えられる鉛直方向の応答の励起が見られる (図-6 (b), 図-7 (b))。

## b) 水平動・上下動同時入力の場合 (図-8, 9)

### ①水平成分

a) の水平動のみを入力した場合と同様な傾向が見出される。すなわち、構造物頂版高さ位置までは、左側方境界付近の地盤と構造物中央断面位置の間で相違は見られない。一方、これより上方の地盤では、左側方境界付近の地盤では、低周波数成分がやや卓越してくるのに対して、構造物中央断面位置では、右側方の岩盤の影響により、周波数特性がほとんど変化していない (図-8 (a), 図-9 (a))。

### ②鉛直成分

鉛直成分に対しても、水平成分と同様、右側方の岩盤の影響による相違が見られる。すなわち、構造物頂版高さよりも上方の地盤においては、左側方境界付近の地盤に比べ、構造物中央断面位置の方が、やや高周波数成分が卓越する傾向が認められる (図-8 (b), 図-9 (b))。

さらに、水平動のみの場合と水平動・上下動同時入力の場合を比較すると以下のような傾向が見出される。

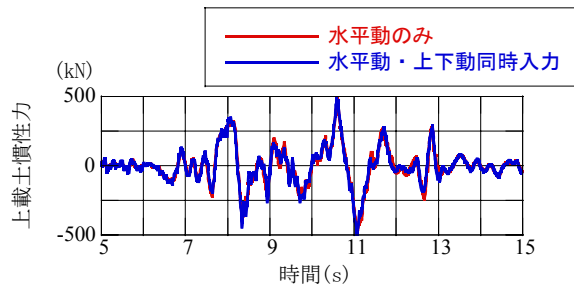
- ・応答加速度の水平成分については、左側方境界付近、構造物中央断面位置のいずれにおいても、ほとんど相違は見られない (図-6 (a), 図-8 (a) および 図-7 (a), 図-9 (a))。すなわち、水平方向の応答に対して、上下動の影響はほとんど見られない。

- ・応答加速度の鉛直成分については、水平動のみを入力した場合、構造物中央断面位置では、右側方の岩盤の影響による鉛直方向の応答が認められる。しかし、基盤面から入射される上下動も併せて入力される水平動・上下動同時入力の場合には、特に構造物頂版位置において、スペクトルの値が大きく増加している。このことから、本研究で用いた地盤条件と検討用地震動の組み合わせでは、基盤面から入射される上下動が卓越することが予想される (図-7 (b) と 図-9 (b))。

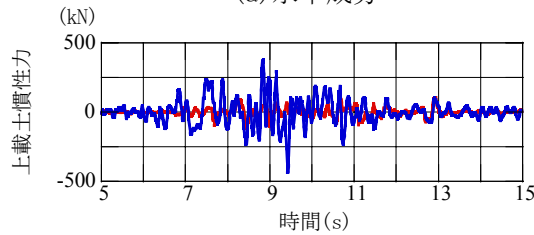
## (2) 荷重および全体変形

ここでは、構造物に作用する地震荷重および全体変形について考察する。まず、主たる地震荷重である上載土慣性力 (構造物上方の地盤の応答加速度に地盤の質量を乗じたもの)<sup>16)</sup> の時刻歴を 図-10 に示す。その水平成分は両者でほぼ同一であり、水平動がこの荷重成分の支配的要因であることが示される。一方、鉛直成分は、(1) で推察した通り、主に基盤から入射される上下動によってもたらされる結果となっている。さらに、隔壁下端の軸力の動的増分の時刻歴と比較したものを 図-11 に示す。10(s) 付近から、軸力は残留値が発生しているものの、両者の位相は、ほぼ対応していることが分かる。





(a) 水平成分



(b) 鉛直成分

図-10 上載土慣性力時刻歴の比較

このことから、本研究で対象とした地盤条件と検討用地震動の組み合わせでは、水平動のみを入力しても右側方の岩盤の影響により、鉛直方向の応答が励起されるものの、基盤から入射される上下動成分の方が卓越することから、これが主に上載土慣性力の鉛直成分を生成していることから、成層地盤の場合<sup>1)</sup>と同様な機構で鉛直部材の軸力の変動をもたらすと考えることができる。

さらに、荷重-変位曲線を比較したものを図-12に示す。ここで荷重として上載土慣性力の水平成分とほぼ等価な頂版に接する地盤要素のせん断応力の合力を、変位として層間変位（頂版-底版間相対変位）を用いた。これから、構造系全体のせん断変形は、水平動により生成し、上下動は構造系全体のせん断変形にほとんど寄与しないことが確認される。

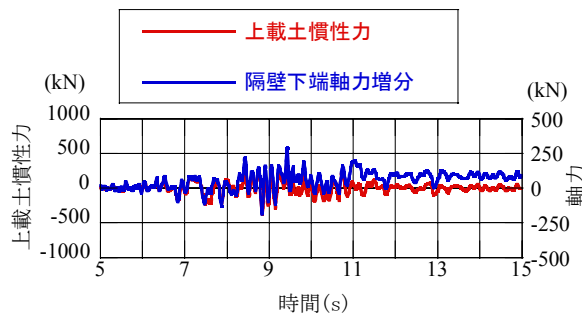


図-11 上載土慣性力の鉛直成分と隔壁下端における軸力の動的増分の時刻歴の比較

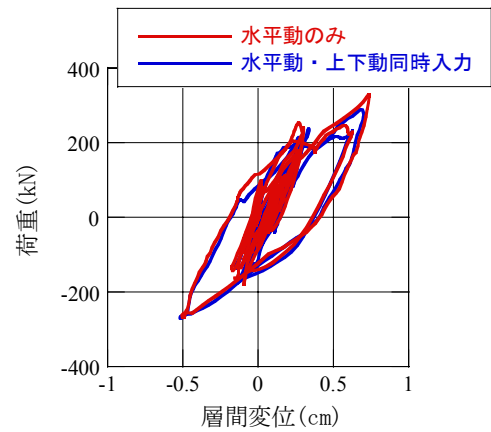


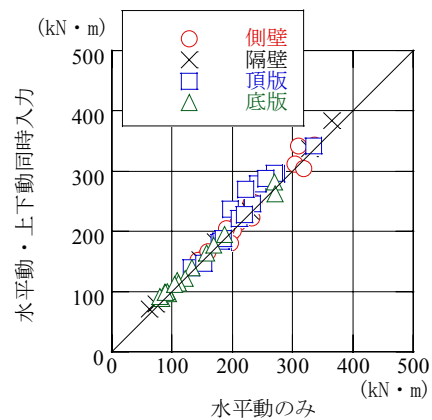
図-12 荷重-変位曲線の比較

### (3) 断面力

ここでは、より局所的な視点に立ち、断面力に対する影響を考察する。構造物を構成する全要素について、断面力の最大値を抽出し、部材の種別毎に分類して比較したものを図-13に示す。横軸には水平動のみの場合を、縦軸には水平動・上下動同時入力の場合をプロットしている。これらから、以下のような傾向が見出される：

- ・構造物は降伏直前まで応答しているが（降伏曲げモーメント：420kN・m程度）、曲げモーメントは水平動のみの場合と水平動・上下動同時入力の場合で両者の相違はほとんどみられない。
- ・せん断力は、最大でせん断耐力の60%程度の応答を示しているが（せん断耐力：1000kN程度）、曲げモーメント同様、相違はほとんどみられない。
- ・軸力については、隔壁においてやや増加が認められるが、応力に換算すると0.3N/mm<sup>2</sup>程度と小さい範囲である。また軸力のレベルも低い（軸力比に換算して0.1未満）ことから、軸力の変動に依存するせん断耐力などに及ぼす影響は小さいといえる。

以上の結果は、(1)、(2)の結果と明確に対応している。すなわち、構造系全体のせん断変形に起因する断面力（曲げモーメント、せん断力）に対して上下動によるゆらぎは極めて小さい。一方、軸力については、鉛直部材（隔壁）においてわずかに増加する結果となっている。



(a) 曲げモーメント

図-13 最大断面力の比較

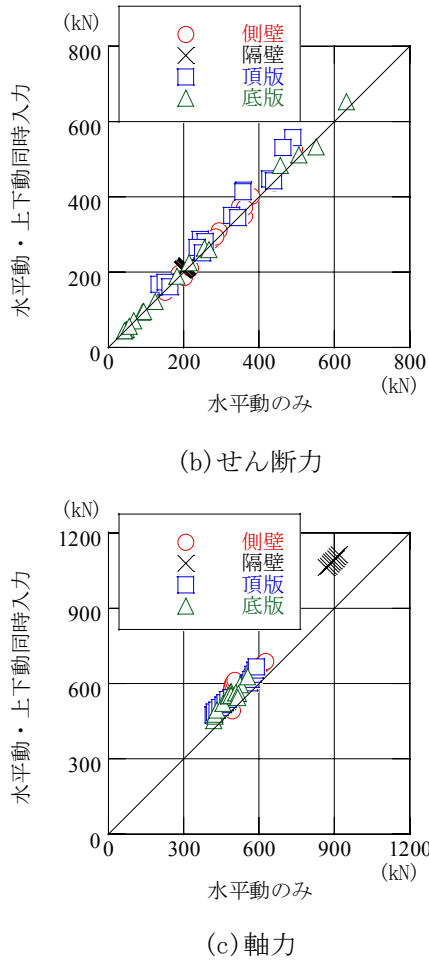


図-13 最大断面力の比較 (続き)

#### (4) 限界値

(3)の結果から、上下動が構造物の応答に及ぼす影響は、成層地盤の場合と同様、隔壁などにおける軸力の変動に集約される結果となった。そこで、本項では、軸力に依存する限界値のうち、せん断耐力への影響について検討する。

ここでは、コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕<sup>17)</sup>で定めるせん断耐力において軸力の影響を考慮する項 ( $\beta_n$ ) に対する影響として評価する。 $\beta_n$ は、解析中に時々刻々変動する曲げモーメントおよび軸力を参照して算出されることから、(3)で示した軸力の変動の影響を受ける可能性がある。そこで応力が集中する部位である隅角部近傍の要素を対象に、せん断耐力比が最大となる時間において、水平動のみの場合および水平動・上下動同時入力の場合の  $\beta_n$  を比較して示した (図-14)。横軸は、発生せん断力の程度を示すために、最大せん断耐力比としている。

これから、 $\beta_n$ の変動幅はきわめて小さく、両者間の値の相違が、最大でも0.09程度に過ぎないことが分かる。また、一部軸力が引張に転じていることにより、 $\beta_n$ が1を下回っている要素が見られる。しかし、これは水平動のみを入力した場合にも生じて

おり、上下動の影響ではなく、右側方の岩盤の影響によるものといえる。むしろ、軸力が引張域の要素についても、圧縮域の要素と同様に上下動の影響は大きくないことが示された結果といえる。

以上の検討より、本研究で実施した範囲内では、上下動によるせん断耐力の変動はきわめて小さい範囲内であるといえる。

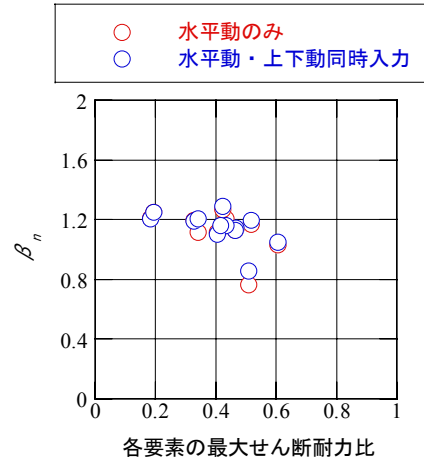


図-14 せん断耐力に対する影響

#### 4. まとめ

本研究では、側方が片側のみ傾斜した地盤中に埋設された地中構造物の応答に対する上下動の影響について評価した。その結果をまとめると、以下のようである。

- (1) 本研究で対象とした地盤モデルでは、右側方の傾斜した岩盤の影響により、波動の反射・屈折による上下動が生起されるものの、基盤面から入射される上下動の方が卓越する。さらに、これらの上下動は水平方向の応答にほとんど寄与していない。
- (2) (1)より、地中構造物の主たる地震荷重である上載土慣性力のうち、その水平成分に対して、上下動によるゆらぎは見られないこと、一方、鉛直成分は、ほぼ基盤から入射される上下動によって生起されることが分かった。
- (3) (2)より、構造系全体のせん断変形 (層間変位) やそれに起因する断面力 (曲げモーメント、せん断力) に対しては、上下動はほとんど寄与していない。一方、構造物の鉛直部材 (隔壁) に対しては、基盤から入射される上下動による変動がみられるものの、その変動の範囲は小さく、また軸力のレベルも低い (軸力比0.1未満) ことから、これが断面耐力などに及ぼす影響は極めて小さい。

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。関係各位に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 上西幸司, 溝口俊介, 櫻井春大輔: 上下動を受ける地中構造物の力学挙動に関する理論的研究, 第30回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, (社)土木学会, 自由投稿論文(1), pp.43-47, 2000.
- 2) 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.
- 3) (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に関する安全性照査マニュアル, 第3編 例示設計編, 1992
- 4) An X., Maekawa K.: Failure analysis of underground RC frame subjected to seismic actions, Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements, JSCE, No.574/V-36, pp.251-267,1997.
- 5) (社)土木学会: 阪神淡路大震災の被害分析に基づくコンクリート構造物の耐震性能照査方法の検証—解析手法の適用と比較—, コンクリート技術シリーズ No.49, 2002.
- 6) 岡村 甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1991.
- 7) 原子力土木委員会 耐震性能評価部会: 委員会報告 原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震設計における動的上下動の影響評価, 土木学会論文集, No.760/V-63, pp.1-12, 2004.
- 8) 関西地震観測記録研究協議会における観測記録.
- 9) 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論文集, pp.757-762, 2002.
- 10) 金谷 守, 石川博之, 金戸俊道: 水平・上下動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, III-117, 2003.
- 11) 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.
- 12) 河井 正, 金谷 守, 大友敬三, 松井 淳, 松尾豊史: 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.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 三浦房紀: 強震時における剛構造物の耐震安定性の評価, 第6回 日本地震工学シンポジウム論文集, pp.1785-1792, 1982.
- 16) 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/I-62, pp.157-175, 2003.
- 17) 土木学会: コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕, 2002年制定, 2002.

(2005. 3. 15 受付)

## Effect of vertical ground motion on response of RC underground structures embedded in layered ground with irregular topology

Jun MATSUI, Keizo OHTOMO and Masato HORIE

The objective of this study is to evaluate effect of vertical ground motion on dynamic response of underground RC structures embedded in horizontally layered ground with inclined bedrock at the right side. Because of irregular topology of ground some extent of vertical response is occurred by only horizontal ground shaking, and frequency characteristics of acceleration response near the structure scarcely fluctuated. Then horizontal and vertical components of seismic load is roughly caused by respective component of ground motion. As far as the effect of ground motion, is concerned, horizontal component plays a rules on global shear deformation and vertical one brings a slight fluctuation of axial force on upward columns.