

R C地中構造物の塑性挙動に 及ぼす上下動の影響評価

松井 淳¹・大友敬三²・佐藤浩章³・堀江正人⁴

¹工修 (財) 電力中央研究所 我孫子研究所材料構造部 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)
²博(工) (財) 電力中央研究所 我孫子研究所地盤耐震部 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)
³工修 (財) 電力中央研究所 我孫子研究所地盤耐震部 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)
⁴関西電力株式会社 土木建築室 (〒530-8270 大阪府大阪市北区中之島3-3-22)

The effect of vertical ground motion on seismic performance of a underground RC structure is studied based on numerical analysis. Fluctuation arising from time-lag between horizontal and vertical peak ground motion is also discussed. As a result, seismic load associated with vertical ground motion has a minor effect on flexural response of the structure. On the other hand, this brings a slight increase of axial force on upward columns. In addition, structure response stay almost constant regardless of applied ground motions having different time-lag between horizontal and vertical peak values.

Key Words : underground RC structure, vertical ground motion, seismic performance verification

1. はじめに

従来、設計実務では、上下動は静的に取り扱われてきた。しかし、1995年兵庫県南部地震を契機に、各種土木構造物に関する耐震性能照査法の高度化が図られ、上下動についても時刻歴波形で評価する趨勢となってきた。本研究では、開削系RC製地中構造物の応答に対する上下動の影響を評価する。ここでは、発電所における取水ピットの実規模構造モデルを対象として、①強震観測記録に対する地震応答解析、②①に基づいた時刻歴波形の位相特性（水平動・上下動の最大値の発生時刻差）が構造物の応答に及ぼす影響について検討する。地震応答解析は、地盤を全応力・履歴依存型のRamberg-Osgoodモデルで、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による時刻歴非線形有限要素解析を実施し、主にその塑性挙動などに及ぼす影響を検討した。

2. 解析の概要

(1) 解析モデル

図-1に示すような取水ピットの実規模構造モデルを対象とした。構造物は8連のRCボックスカルバートであり、岩盤上に設置された半地下形式の地中構造物である。地盤は構造物に適切な応答が生じることを目的に砂層のせん断波速度を250m/s

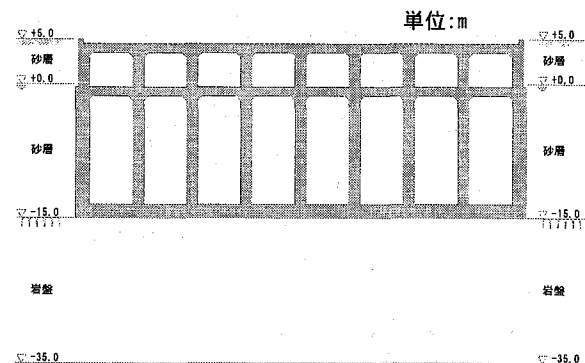


図-1 取水ピットと周辺の地盤条件
に設定していることを除き、参考文献1)と同一の条件である。

(2) 構造物の概要

表-1および図-2に材料物性と各部材の部材諸元を示す。

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

断面	部材高 H (cm)	主筋配筋 A _s (cm ²)	補強筋配筋 A _w (cm ²)
①	150	D16@100=19.86	D16@500(=3.97)
②	150	D25@100=50.67	D25@500(=10.13)
③	120	D22@100=38.71	D16@500(=3.97)
④	120	D25@100=50.67	D16@500(=3.97)
⑤	120	D19@100=28.65	D16@500(=3.97)
⑥	100	D16@100=19.86	D16@500(=3.97)
⑦	150	D29@100=64.24	D25@500(=10.13)
⑧	100	D19@100=28.65	D16@500(=3.97)

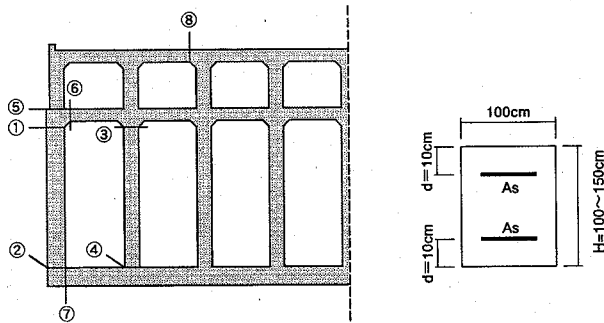


図-2 各部材の断面諸元

(3) 解析に用いた入力加速度波形

1995年兵庫県南部地震において、神戸大学が取得した観測記録のNS成分およびUD成分を基本とした²⁾。図-3にその時刻歴波形を示す。

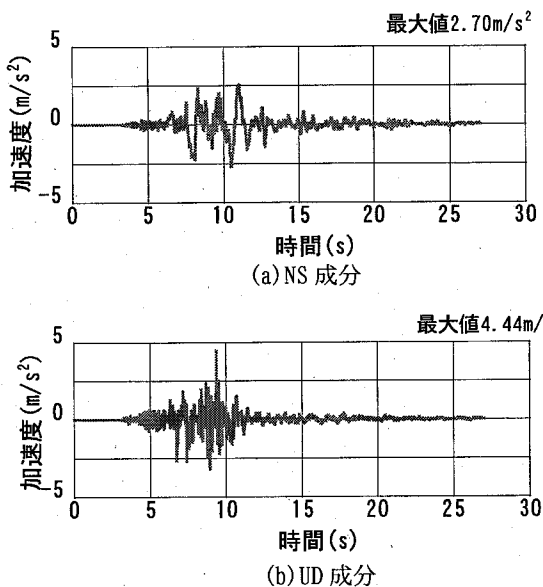


図-3 解析に用いた入力加速度波形

ここで、NS成分とUD成分において、加速度が最大値を記録する時間は、それぞれ10.48(s)および9.39(s)であり、1.09(s)の時間差が生じている。しかるに、水平成分と上下成分の最大値が同時に生じた場合、構造物においてより応答が進むことも考えられるため、UD成分の時刻歴を調整し、同一の時刻(10.48(s))に最大値が発生する時刻歴波形を作成した。さらに、加速度波形の位相の影響を検討することを目的に、UD成分において最大値を含む

波形の1/4周期分(最大値を記録した時刻から加速度が0に低下するまでの時間部分の波形)を3等分し、それぞれの区分(ここでは0.09(s))において上下成分の加速度が最大を記録する、すなわち、上下成分の最大加速度の発生時間が、10.57(s)、10.66(s)、10.75(s)となるように調整し、二つの成分の最大値の発生時刻差が構造物の応答に及ぼす影響を調べるための入力加速度波形とした。

(4) モデル化の概要

図-4に解析に用いた有限要素分割図を示す。ここで、側方および底部境界は粘性境界とした。

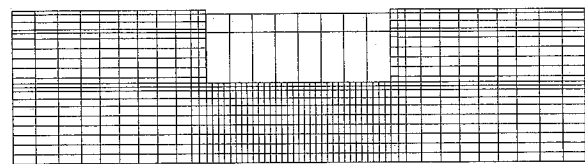


図-4 解析に用いた有限要素分割図

地下水面以下の飽和地盤においては、地下水の影響を考慮するために、体積弾性係数を一定とした^{3), 4)}。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モデルを用いた。ここでは、予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、発生が想定される地盤のせん断ひずみの最大値を把握し、これから、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^{5), 6)}。

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

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

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

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

構造物のモデル化としては、RC部材の曲げに関する非線形性を考慮した軸力変動型トリリニアモデル^{8), 9)}を用いた。復元力特性としては、「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、特性点の値を逐次改訂するものである(図-5)。

曲げモーメント

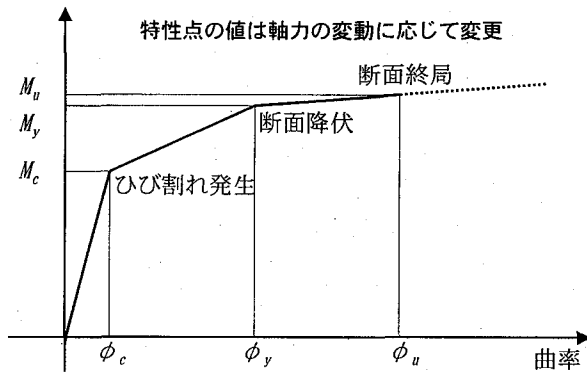


図-5 RC部材の復元力特性

また、履歴特性としては、式(4)のような Takeda モデル⁷⁾において提案されている履歴特性に対して、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

ϕ_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－構造物間では、地震動の特徴、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・相対変位などの複雑な現象が生じる場合がある。よって側壁－地盤間において、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。ここでは粘着力は0、摩擦係数は地盤の内部摩擦角の値(38度)とした。

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

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

ϕ ：摩擦角

時刻歴応答解析は、(3)で示した入力加速度をモデル下面から入力することにより実施した。減衰にはあらかじめ実施した初期の全体剛性行列に対する固有値解析の結果をもとに、一次モード減衰比1.0%とした剛性比例型のRayleigh減衰を考慮している。時間積分法には、Newmarkの β 法($\beta=1/4$)を用いた。その際の数値積分の時間刻みは1/3000(s)とし、1/100(s)間隔で応答値の取り出しを行った。

3. 解析結果

(1) 上下動を時刻歴波形で与える時の応答特性

ここでは、上下動を時刻歴で与えた場合の応答特性について考察することを目的に、別途実施した水平動のみを作用させた応答解析結果との比較による評価を行った。

a) 地盤の動的応答特性

図-6および図-7に、構造物から十分離れた遠方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、上下動が水平方向の応答にはほとんど影響を及ぼしていないこと、また、応答加速度は表層付近で2倍程度に増幅する結果となっているものの、変位への影響は水平方向のそれに比べて非常に小さいことが分かる。

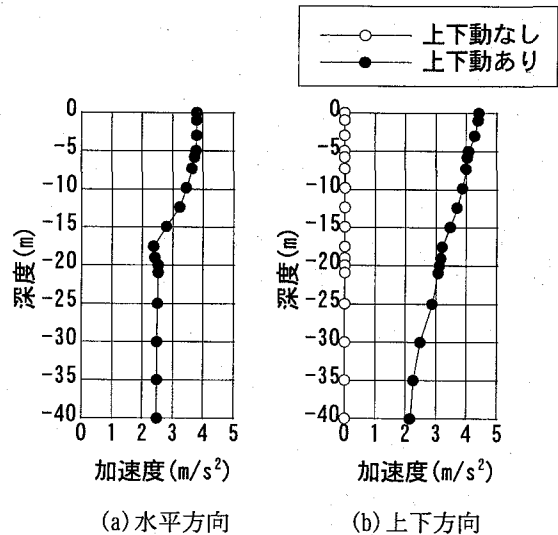


図-6 地盤の最大加速度深度分布

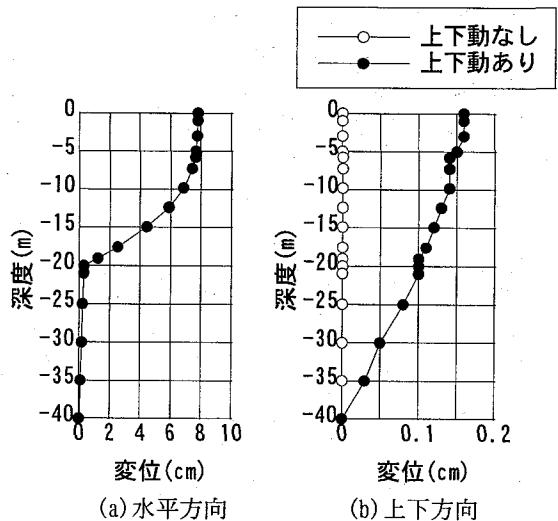


図-7 地盤の最大変位深度分布

b) 躯体慣性力への影響

図-8に、躯体中に発生した慣性力の時刻歴を比較して示す。ここで、躯体慣性力は、構造物中に発生した応答加速度に躯体の質量を乗じて算出するもので、土被りのない半地下形式の地中構造物にとって卓越したせん断変形要因である⁹⁾ことか

ら、これに及ぼす上下動の影響について着目したものである。これから、上下動がこれらの慣性力に及ぼす影響が明瞭に確認できる。まず、慣性力の水平成分は、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る地震荷重成分であることが確認できる。

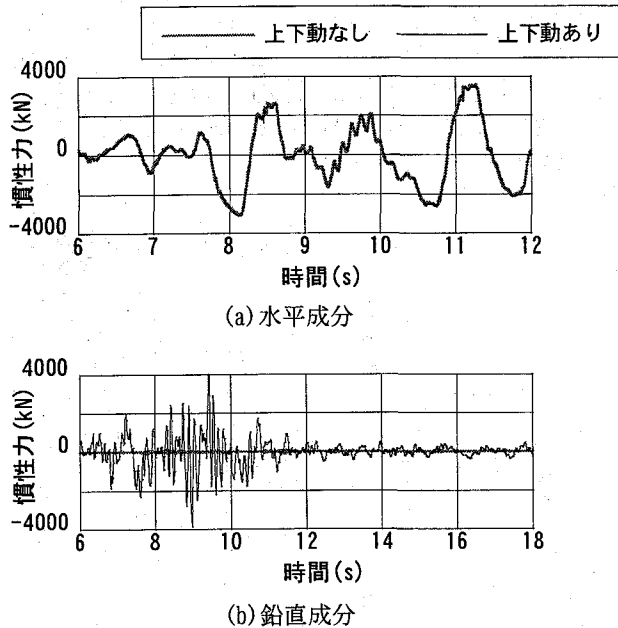


図-8 躯体慣性力の時刻歴

c) 層間変位への影響

図-9に構造物全体のせん断変形を評価し、また参考文献1)において、耐震性能照査時に用いる物理量（曲げ破壊）と位置づけた層間変位（頂版－底版間相対変位）の時刻歴を比較したものを示す。位相および振幅のいずれについても、上下動の影響が見受けられないことがわかる。

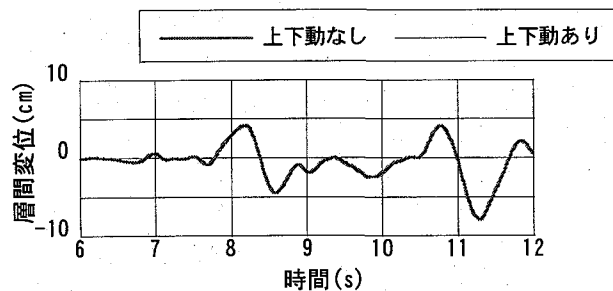


図-9 水平層間変位の時刻歴

d) 断面力・曲率への影響

ここでは、曲げ耐力などに対する軸力の影響を考慮して、曲げモーメントは降伏曲げモーメントで、せん断力はせん断耐力で、曲率は降伏曲率でそれぞれ除し、軸力については軸力比に換算し、それらの最大値を全ての要素について抽出した。これらの結果を部材の種類別に分類して示したものが、図-10である。横軸には水平動のみの場合の

解析結果に対する最大降伏曲げモーメント比 (M_H^*)、最大せん断耐力比 (S_H^*)、最大軸力比 (N_H^*) および最大降伏曲率比 (ϕ_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（それぞれ、同様に M_{H+V}^* 、 S_{H+V}^* 、 N_{H+V}^* 、 ϕ_{H+V}^* ）をプロットしている。また、これとのフィッティングの程度を定量的に比較するために、相関係数の値も示した。これから、RC部材の曲げおよびせん断変形に対する影響は小さく、また部材の種別による傾向の相違も見出されない。一方、軸力に対しては、やや影響が見られ、特に鉛直方向部材（側壁、隔壁）に対しては、圧縮力が増加する傾向にある。

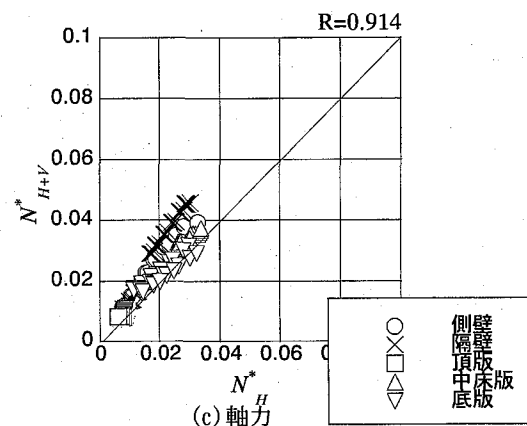
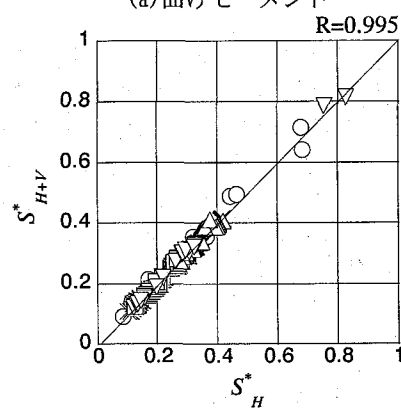
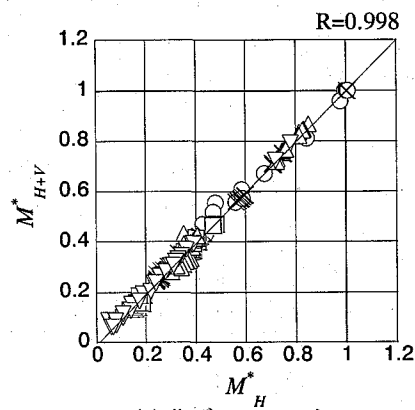


図-10 断面力・曲率に及ぼす影響

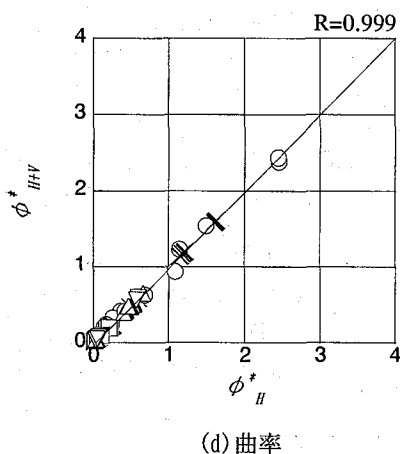


図-10 断面力・曲率に及ぼす影響 (続き)

また、図-11は、最も軸力が変動した隔壁（中央部材の下端で降伏した要素）の軸力の動的増分値（応答値から初期軸力を差し引いた値）と慣性力の鉛直成分（図-8(b)を再掲）の時刻歴波形を比較して示した。これらの結果より、慣性力と軸力の増分値の両者の位相は、全時間帯にわたって、良く一致していることが分かる。このことから、上下動は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に対して影響を及ぼすことが分かる。さらに、軸力の動的増分値を軸応力に換算すると、 $0.3 \sim 0.4 \text{ N/mm}^2$ 程度と微小な範囲にある。また、この種の地中構造物の軸力のレベルは低く、一般に軸力比で0.1未満¹⁾であることから、たとえ上下動による軸力の増加が認められたとしても、この程度の軸力の変動では、それが部材の耐力などの影響は小さい。したがって、断面の耐荷性能から判断して、上下動が地中構造物の耐震性能に与える影響はほとんどないといえる。

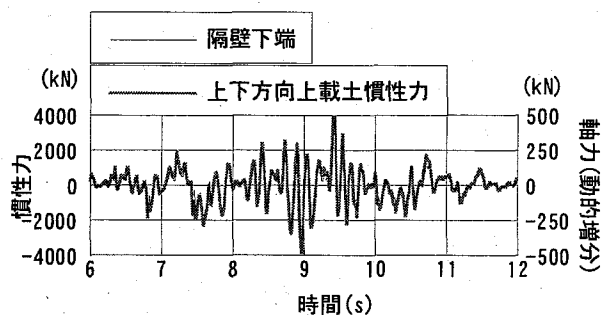


図-11 上下方向躯体慣性力と軸力の動的増分の比較

(2) 水平動と上下動の最大値の発生時刻差の影響評価

(1)の結果を踏まえ、同様に最大降伏曲げモーメント比などを算出して、これらに対する発生時刻差の影響を調べた。図-12にその結果を示す。横軸には上下動として神戸大学観測波のUD成分を用いた場合の解析結果に対する最大降伏曲げモーメント比など（同様にそれぞれ、 M_{H+Vobs}^* , S_{H+Vobs}^* , N_{H+Vobs}^* , ϕ_{H+Vobs}^* ）を、縦軸には、発生時刻差を0.0(s)から0.27(s)まで0.09(s)刻みで変動させた場合

の解析結果に対する最大降伏曲げモーメント比など（同様に、それぞれ発生時刻差0.0(s)の場合； $M_{H+Vpeak0.0}^*$, $S_{H+Vpeak0.0}^*$, $N_{H+Vpeak0.0}^*$, $\phi_{H+Vpeak0.0}^*$ 、発生時刻差が0.09(s)の場合 $M_{H+Vpeak0.09}^*$, $S_{H+Vpeak0.09}^*$, $N_{H+Vpeak0.09}^*$, $\phi_{H+Vpeak0.09}^*$ 、発生時刻差が0.18(s)の場合； $M_{H+Vpeak0.18}^*$, $S_{H+Vpeak0.18}^*$, $N_{H+Vpeak0.18}^*$, $\phi_{H+Vpeak0.18}^*$ 、発生時刻差が0.27(s)の場合； $M_{H+Vpeak0.27}^*$, $S_{H+Vpeak0.27}^*$, $N_{H+Vpeak0.27}^*$, $\phi_{H+Vpeak0.27}^*$ ）をプロットしたものである。

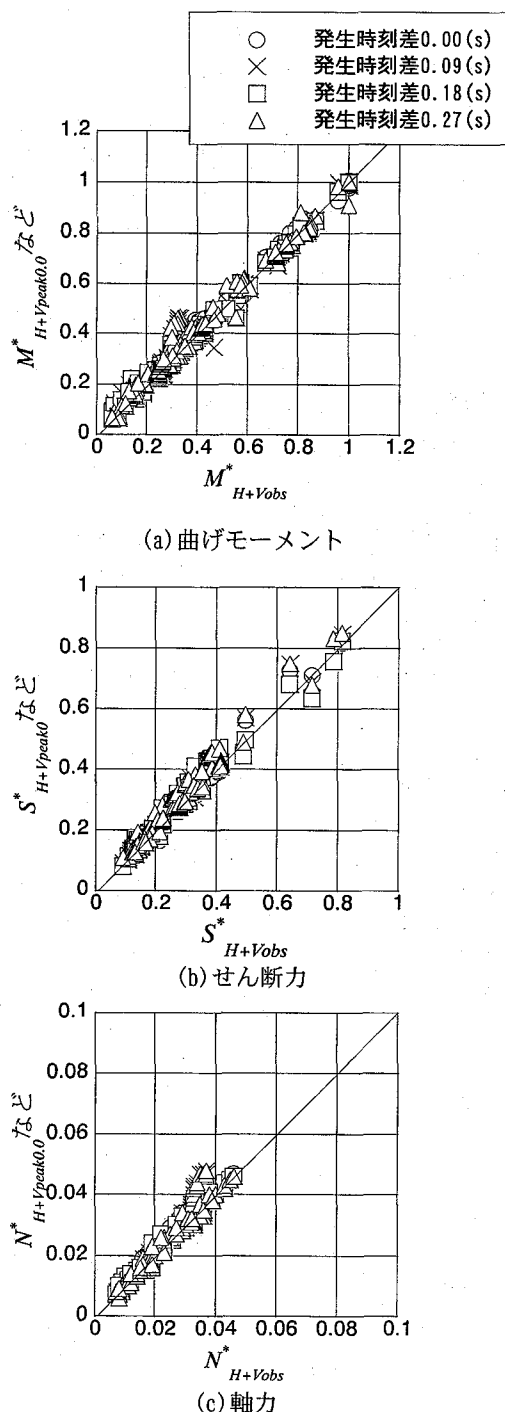


図-12 水平動・上下動の加速度の発生時刻差が断面力・曲率に及ぼす影響

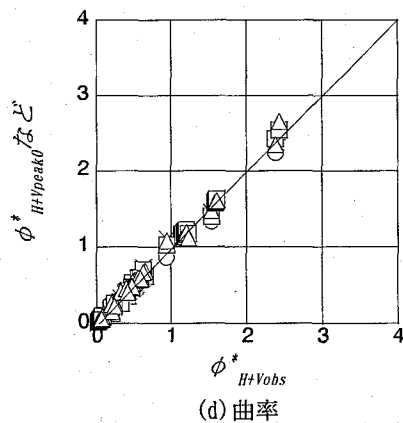


図-12 水平動・上下動の加速度の発生時刻差が断面力・曲率に及ぼす影響 (続き)

これらから、以下のような傾向が見出される。

各断面の曲げ変形に対する影響（曲げモーメントおよび曲率）はほとんど認められず、発生時刻差による応答の変動はほとんど見られない。特に曲率は、最大降伏曲率比が1.0以上の塑性域においても影響が認められず、発生時刻差の相違が局部的な曲げ破壊を促進する要因にはなっていないことが示唆される。

せん断力に対する影響も、曲げに対する場合と同様であり、発生時刻差による影響は認められず、この種の脆性的な破壊を促進する要因にはなっていないことが示唆される。

上下動の影響の直接に被る軸力については、他の断面力および曲率と比較するとわずかに影響が認められ、発生時刻差によって応答がやや変動する結果となっている。特に軸力比0.03以上の領域ではその他の応答値に比べて一見したところ発生時刻差の影響を受けて、圧縮力が若干大きくなる傾向になる。しかしながら、先に示したように、上下動の影響による軸力の増加は軸応力に換算すると、極めて微小な範囲にあることから、水平動・上下動の発生時刻差によって、断面耐力に影響を及ぼすような軸力の変動は生じないものと判断できる。

4. まとめ

本研究での結論をまとめると以下のようなものである。

- (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。構造物の全体変形（層間変位）への上下動の影響はほとんど見受けられない。

- (2) 上下動の影響は躯体慣性力の上下成分に影響を及ぼし、隔壁などの鉛直方向部材の軸力へやや影響を及ぼす。
- (3) この種の地中構造物の軸力のレベルは概ね軸力比が0.1未満であるため、軸力への影響が見受けられる部材があるものの、それが断面耐力などを大きく左右する程度のものではない。
- (4) (1)～(5)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に及ぼす影響を検討した。これが断面力および曲率に及ぼす影響は小さく、これらの影響を考慮する必要は乏しいものと考えられる。

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) (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＜照査例＞，土木学会，2002.5
- 2) 関西地震観測研究協議会における観測記録。
- 3) 金谷 守，石川博之，金戸俊之：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，CD-ROM，2002.11
- 4) 金谷 守，石川博之，金戸俊之：水平・上下動の同時入力に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-117,2003.9
- 5) 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，pp.697-704,1978.
- 6) 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，U02018，2003.1
- 7) 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講演集，pp.357-364,1970.
- 8) 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.
- 9) (社) 土木学会 原子力土木委員会 地盤部会 地盤の耐震設計分科会：原子力発電所地盤と屋外重要土木構造物の耐震性評価手法，土木学会論文集，No.356/I-3，1985.4