

【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

EFFECTS OF VERTICAL GROUND MOTION ON SEISMIC PERFORMANCE OF UNDERGROUND RC STRUCTURES OF NUCLEAR POWER STATIONS

原子力土木委員会・耐震性能評価部会
 Sub-Committee on Seismic Performance Verification,
 Committee on Nuclear Civil Engineering

Key Words : nuclear power plant, underground RC Structure, vertical ground motion, seismic performance verification

原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査技術の高度化にあたり、鉄筋コンクリート製地中構造物への地震時上下動の影響についての検討を行った。代表的な屋外重要土木構造物である海水管ダクトおよび取水ピットに対して、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、①動的上下動が構造物の応答に及ぼす影響、②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に及ぼす影響などについて分析し、これらの構造物の耐震性能照査における上下動の取り扱いについて考察した。

1. はじめに

耐震性能評価部会（主査：丸山久一、長岡技術科学大学副学長表-1）は、(社)土木学会 原子力土木委員会（委員長：加藤正進、電力中央研究所常務理事）の下に設置され、平成9年度から活動を続けている。

原子力発電施設は、地震により主要設備が被害を受けると公衆の放射線障害をひき起こすことが想定されるため、高い耐震安全性を確保できるように、耐震設計法に特別の配慮がなされている。

一方で、1995年に発生した兵庫県南部地震以降、耐震設計に対する関心が高まるとともに、諸基準類の見直しも行われており、原子力施設についても、近年の耐震設計研究の進展を踏まえ、より一層の信頼性向上が望まれている。

そこで、当部会では、原子力発電所の屋外重要土木構造物である鉄筋コンクリート製（以降、RCという）地中構造物の耐震性能照査法の高度化ならびに体系化を目的に、電力共通研究「原子力発電所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研究」の成果に対する審議を行い、平成14年5月には「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」¹⁾（以降、「指針・マニュアル」という）を発刊した。「指針・マニュアル」発刊以降も更なる高度化を目指して、地中構造物の耐震安全性に与える動的上下動の影響などを明らかにするため、鋭意活動を継続している。本報告では、平成15年度に

表-1 耐震性能評価部会委員（平成16年3月現在）

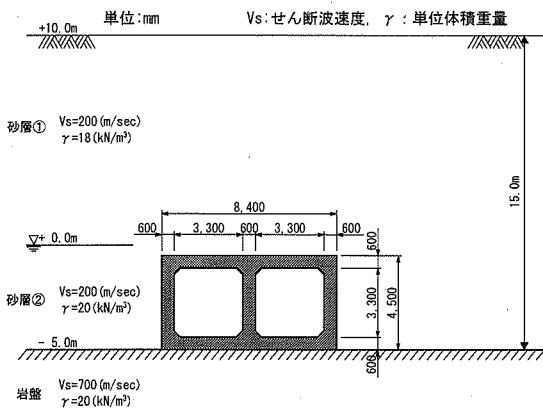
主査	丸山久一			
委員	浅野彰洋	井合 進	伊藤 裕	入佐伸夫
	岩佐英昭	大友敬三	梶田卓嗣	金谷 守
	金津 努	金谷賢生	川原修司	河村精一
	小長井一男	酒井俊朗	澤田純男	島 弘
	東畑郁生	当麻純一	富樫勝男	中村 晋
	中村 光	二羽淳一郎	伴 一彦	前川 功
	前川宏一	松井 淳	松蔭茂男	睦好宏史
幹事	大鳥靖樹	河井 正	福本彦吉	堀江正人
	松尾豊史	松村卓郎	宮川義範	

実施した上下動の影響評価についての成果を紹介する。

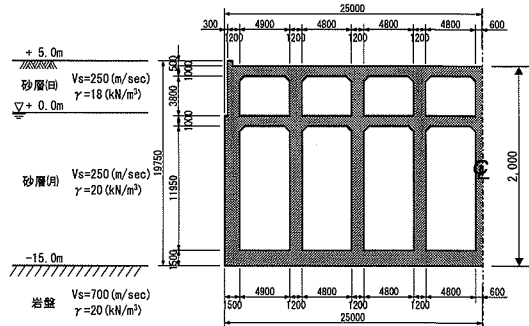
なお、当部会の活動内容などの詳細については、土木学会ホームページの部門/委員会活動 調査研究部門 原子力土木委員会 耐震性能評価部会 (<http://www.jsce.or.jp/committee/ceofnp/concrete.html>) を参照いただきたい。

2. 研究内容

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、地震力を次のように考慮している²⁾。すなわち、水平方向には、基準地震動 S_1 または S_2 に基づく動的地震動を、上下方向には、基準地震動の最大水平加速度振幅の 1/2 を鉛直震度に換算して、これを静

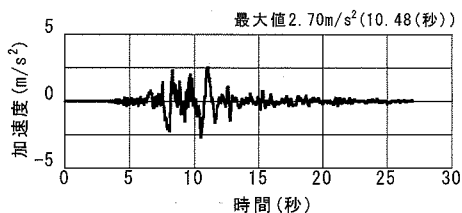


(a) 海水管ダクト

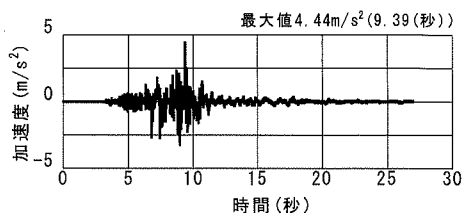


(b) 取水ピット

図-1 評価の対象とした構造物の概要



(a) NS成分



(b) UD成分

図-2 兵庫県南部地震における神戸大学の観測記録⁴⁾

的な地震力として考慮している。

本報告では、実際の地震動を模擬することとし、上下動も動的に取り扱うことを検討した。この中で、

①動的上下動が構造物の応答に及ぼす影響

②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に及ぼす影響

について地震応答解析結果を分析し、考察を行った。

3. 研究成果

(1) 評価の対象とした構造物

代表的な原子力発電所屋外重要土木構造物である海水管ダクトおよび取水ピットを検討の対象とした。構造物とその周辺の地盤条件の概要を図-1に示す。これは、別途実施した予備検討結果に基づき、構造物に適切な塑性領域の応答を生じさせることを目的に「指針・マニュアル」で提示した照査例³⁾において、表層地盤のせん断波速度の値を若干変更した実規模構造モデルである。同図(a)の海水管ダクトは、岩盤上に設置され、地下水位以下の砂層中に埋設されている。埋

設深さは、実際の構造物の埋設条件から、その上限に近い値とし、その影響が最も顕著に現れるようにした。同図(b)の取水ピットは、同図(a)と同様に岩盤上に設置されているが、上載土を有していない半地下式の地中構造物である。

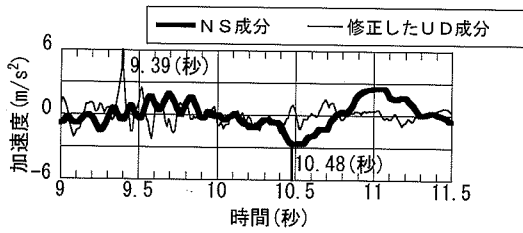
これらの構造物の地震時における目標性能は、地震中・地震後に構造物が崩壊しないことである。そこで、「指針・マニュアル」では、現時点で適用できる地震応答解析手法を考慮し、上記の目標性能を満足するため、これら構造物における照査指標として、断面力および構造物の層間変位を設定した¹⁾。なお、これら構造物が支持する機器・配管系への影響については取扱わない。

(2) 解析の概要

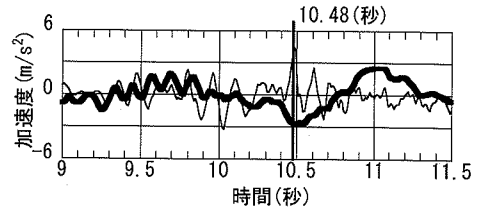
a) 検討用地震動

①動的上下動が構造物の応答に及ぼす影響の検討で用いた地震動

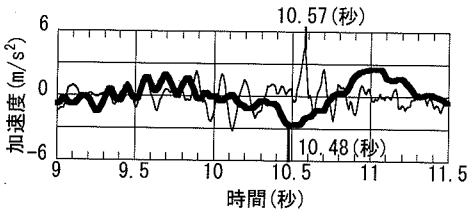
1995年兵庫県南部地震において、神戸大学で観測されたNS成分(水平成分)およびUD成分(上下成分)の地震波形を用いた⁴⁾。若松らの解析結果^{5),6)}



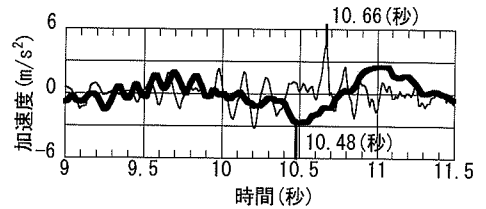
(a) 実観測記録 (発生時刻差 1.09(秒))



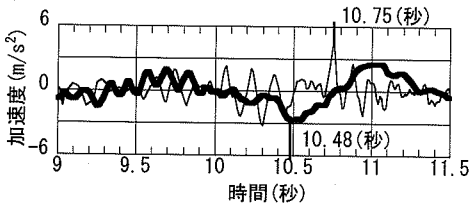
(b) 発生時刻差が 0.00(秒) の場合



(c) 発生時刻差が 0.09(秒) の場合



(d) 発生時刻差が 0.18(秒) の場合



(e) 発生時刻差が 0.27(秒) の場合

図-3 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に与える影響の検討に用いる地震動

によれば、この上下動の最大加速度の生起時刻は S 波の主要動部であり、かつ S 波よりも短周期成分を多く含んでいる。これから、構造物の応答に及ぼす上下動の影響を検討する上では、①水平成分と上下成分の最大値が同時刻帯に生じた場合に構造物の応答がより大きくなる可能性があること、②一般に RC 部材の軸方向剛性は高く、短周期成分を多く含んだ地震波に対してより大きく応答する可能性があること、などの特徴から、本報告における検討に対して適した観測記録の一つであると判断した。図-2 にその加速度時刻歴波形を示す。これら水平・上下地震動を同時に鉛直下方から入力することは、入力波の波動特性として水平動は S 波、上下動は P 波とみなしたことに相当する。

②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に及ぼす影響の検討で用いた地震動

図-2 の兵庫県南部地震の神戸大学観測記録の NS 成分と UD 成分では、最大加速度の発生時刻は、それぞれ 10.48(秒)および 9.39(秒)であり、1.09(秒)の時間差が生じている(以降、この時間差に関する議論

についてのみ、数値を小数点以下 2 桁で示す)。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^{5),6)}。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 成分の時刻歴を調整し、NS 成分の最大値の発生と同一の時刻(10.48(秒))に最大加速度が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の違いの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(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帯の波形)を 3 等分した地震動を作成することとした。つまり、それぞれの区分(ここでは 0.09(秒))で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刻が、それぞれ 10.57(秒)、10.66(秒)および 10.75(秒)となるように調整した。このような操作により、NS 成分および UD 成分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を検討するための地震動とした(図-3)。

表-2 「指針・マニュアル」で提案した非線形モデル
(指針・マニュアルの解説 図5.2-1 から抜粋)

項目	非線形解析	
材料モデル	地盤	全応力あるいは有効応力に基づく非線形モデル
	構造物	RC 部材としての非線形性を考慮した履歴依存マクロモデル コンクリートおよび鉄筋の非線形性を考慮した材料構成則モデル
解析により求められる応答値	曲げ	<ul style="list-style-type: none"> ・曲げモーメント ・軸力 ・曲率 ・層間変位
	せん断	<ul style="list-style-type: none"> ・せん断力 ・せん断ひずみ

曲げモーメント

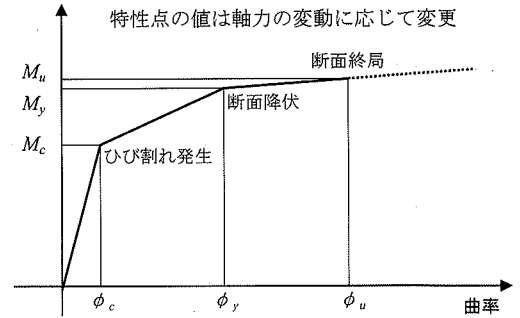
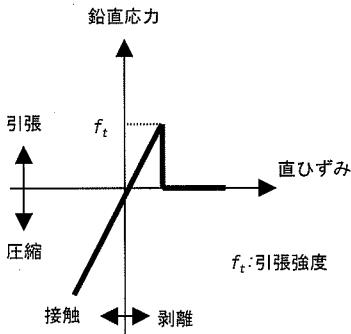
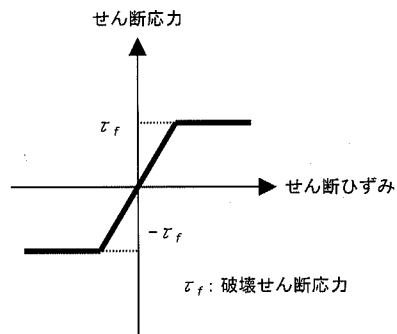


図-4 RC 部材の復元力特性



(a) 境界面法線方向



(b) 境界面接線方向

図-5 ジョイント要素の概念図

b) 解析モデル

「指針・マニュアル」では、図-1 に示す評価の対象とした RC 地中構造物の耐震性能照査を行う際の標準的な非線形モデルを複数提案している (表-2)。ここでは、以下のモデルを適用した。

①地盤：Ramberg-Osgood モデル^{7),8)}

地盤のモデルとしては、せん断応力-せん断ひずみに関する非線形性を考慮した全応力・履歴依存型のモデルの一つである、Ramberg-Osgood モデルを用いた。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参考にして、応力-ひずみ関係のフィティングパラメータを定めた^{7),8)}。また、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、体積弾性係数を一定とし、地下水面より上方の不飽和地盤ではポアソン比を一定とした^{12),13)}。

②構造物：軸力変動型トリリニアモデル^{9),10)}

構造物のモデルとしては、RC 部材の曲げに関する

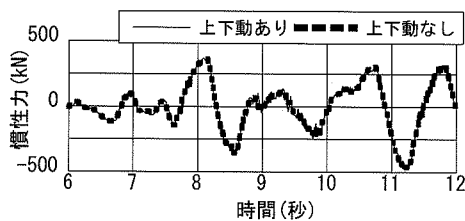
非線形性を考慮した軸力変動型トリリニアモデル^{9),10)}を用いた。復元力特性は、「曲げひび割れ発生」、「断面降伏」および「断面終局」の3つを特性点とし、解析中の軸力の変動に応じて、特性点の値を逐次変更するものである (図-4)。履歴特性としては、Takeda モデル⁹⁾において提案されている履歴特性に対して、軸力の変動を考慮したものを用いた¹⁰⁾。

③地盤-構造物間：ジョイント要素

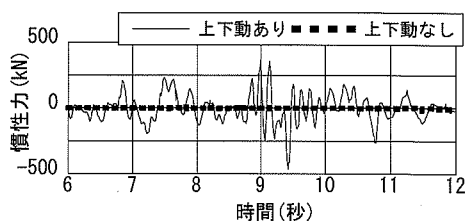
地盤-構造物間では、地震動強度、地盤および構造物の剛性の大小関係などにより、境界面において剥離・相対変位などの幾何学的な非線形現象が生じる場合がある。そこで、側壁-地盤間および頂版-地盤間 (海水管ダクトの場合のみ) において、Coulomb の摩擦則に従うジョイント要素¹¹⁾を適用し、その影響を簡便に評価した (図-5)。

④時刻歴応答解析の実施

時刻歴応答解析は、(1)で示した地震動をモデル下面から入力することにより実施した。粘性減衰特性は、あらかじめ実施した初期の全体剛性行列に対する

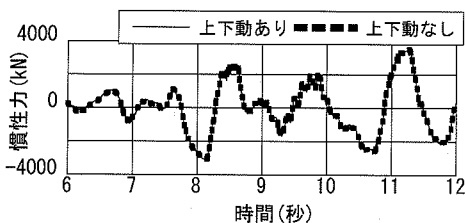


(a) 水平方向

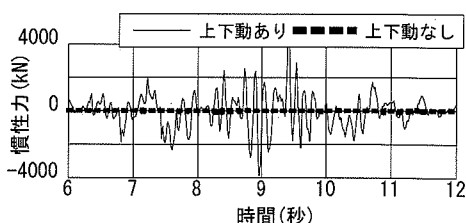


(b) 鉛直方向

図-6 海水管ダクトに対する上載土慣性力の比較



(a) 水平方向



(b) 鉛直方向

図-7 取水ピットに対する躯体慣性力の比較

固有値解析の結果をもとに、一次モード減衰比を1.0%とした剛性比例型のRayleigh減衰を考慮している。運動方程式の直接積分法には、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(秒)とし、1/100(秒)間隔で応答値の取り出しを行った。

(3) 動的上下動が構造物の応答に及ぼす影響

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。ここでは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って、その評価を行った。

a) 主たる地震荷重に対する影響

構造物の応答に対する評価に先立ち、図-1で示した地中構造物の主たる地震荷重に対する上下動の影響について検討した。

海水管ダクトのような土被りを有する地中構造物においては、構造物直上の上載土中に発生する慣性力(上載土中に発生した応答加速度にその質量を乗じたもの；以降、上載土慣性力という)は、構造物上版の摩擦を介して作用し、構造物全体のせん断変形の主たる荷重となることが解明されている¹⁴⁾。そこで、海水管ダクト(図-1(a))に対する応答解析結果からは、上載土慣性力の水平および鉛直成分をそれぞれ比較することとする(図-6；ここでは、地震継続時間内の6(秒)~12(秒)の間を示す。以下、同様)。

一方、取水ピットのような、重量構造物で土被りのない半地下形式の地中構造物においては、構造物中に発生する慣性力(構造物中に発生した応答加速度にその質量を乗じたもの；以降、躯体慣性力という)が、構造物全体のせん断変形の主たる荷重として作用する¹⁵⁾。そこで、取水ピット(図-1(b))に対する応答解析結果では、躯体慣性力の水平および鉛直成分をそれぞれ比較する(図-7)。

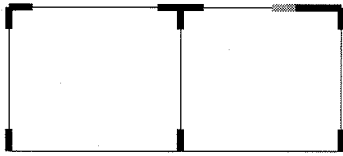
図-6, 7から、上下動がこれらの慣性力に及ぼす影響を明瞭に確認することができる。まず、両慣性力の水平成分は、上下動のあり/なしは、図上でほとんど重なって相違がみられず、上下動は構造物全体のせん断変形にほとんど寄与しないことがわかる。また、両慣性力の鉛直方向については、上下動あり/なしの影響は明らかであり、鉛直成分は上下動のみによってもたらされる地震荷重成分であることが確認できる。

これから両慣性力の水平成分によって引き起こされる構造物全体のせん断変形には上下動の影響はなく、一方、鉛直成分によって、構造物の各部材の軸力などには、影響が現れることが推察される。

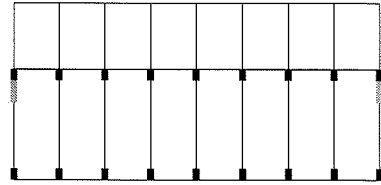
b) 構造系全体のせん断変形に対する影響

ここでは、構造系全体のせん断変形に対する影響について検討する。図-8に、構造物の損傷分布として、降伏した部位の分布を示す。海水管ダクトでは全ての隅角部において、取水ピットでは隔壁や側壁の隅角部の多数の断面が降伏に至っており、構造物は塑性変形

— 水平動のみおよび水平動・上下動同時入力の際れの場合も降伏
 - - - 水平動のみの場合に降伏

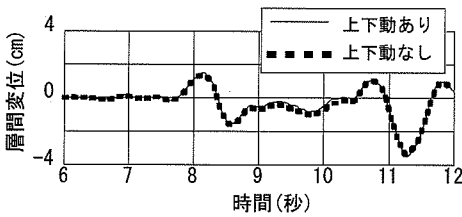


(a) 海水管ダクトの場合

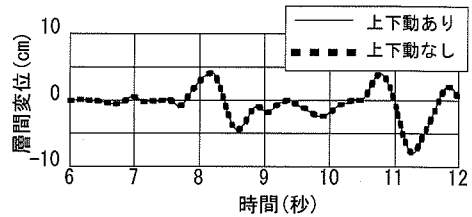


(b) 取水ピットの場合

図-8 構造物の損傷分布



(a) 海水管ダクトの場合



(b) 取水ピットの場合

図-9 層間変位の時刻歴の比較

領域に達している。降伏した部位の分布は、上下動のあり/なしで、ほぼ同一であることがわかる。取水ピットの側壁の中床版近傍の隅角部などのように、上下動のあり/なしで、非降伏/降伏が別れた要素についても、発生曲げモーメントの相違は、降伏曲げモーメント比に換算して0.03未満であった。以上のことから、断面降伏に対して上下動の影響はほとんど認められないことがわかる。

次に、構造物全体のせん断変形の程度を表し、かつ曲げ破壊を照査する際に用いられる層間変位（頂版—底版間相対変位）について検討する。図-9にその時刻歴を比較して示す。層間変位の位相については、変位が最大値を記録し、複数の断面が降伏した11.2(秒)付近、およびそれ以外の時間帯のいずれにおいても、上下動あり/なしは図上でほとんど重なって相違が認められず、上下動の影響はほとんど見出されていない。また、最大値についても、海水管ダクトの場合には、上下動ありの場合に3.50 cm、上下動なしの場合に3.38 cm、取水ピットの場合に上下動ありの場合に7.86 cm、上下動なしの場合に7.93 cmであり、相違はほとんど認められない。したがって、a)で推察されたように、上下動は構造系のせん断変形に対してはほとんど無視し得る荷重成分であることがわかる。

c) 断面力および曲率に対する影響

より詳細に上下動の影響を検討するために、構造物

の各要素の断面力および曲率に対する影響について検討した。時刻歴応答計算においては、時々刻々と部材の軸力が変動し、それに伴って断面耐力などの値も変動する。このことから、ここでは、解析モデル中の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、曲率は降伏曲率でそれぞれ除し、さらに軸力については軸応力に換算した後、コンクリートの圧縮強度で除して軸力比を算出し、それらの最大値を抽出して（以降、それぞれ最大降伏曲げモーメント比、最大せん断耐力比、最大軸力比、最大降伏曲率比）、その傾向について検討した。

この結果を部材の種類（頂版、中床版（取水ピットの場合のみ）、底版、側壁、隔壁）に分類して示したものが、図-10および図-11である。横軸には水平動のみの場合の解析結果における最大降伏曲げモーメント比($M_{\#}^*$)、最大せん断耐力比($S_{\#}^*$)、最大軸力比($N_{\#}^*$)および最大降伏曲率比($\phi_{\#}^*$)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 $M_{\#+v}^*$, $S_{\#+v}^*$, $N_{\#+v}^*$, $\phi_{\#+v}^*$)をプロットしている。さらに、両者の対応関係をみるために、相関係数 R により示した。最大降伏曲げモーメント比および最大降伏曲率比については、図中で値が1.0未満の範囲を着色して区別し、弾性域/塑性域での傾向の相違の有無についても考察を行った。

これらから、以下のような傾向が見出される。

- ① 地中構造物の各断面の曲げ変形に対する上下動あ

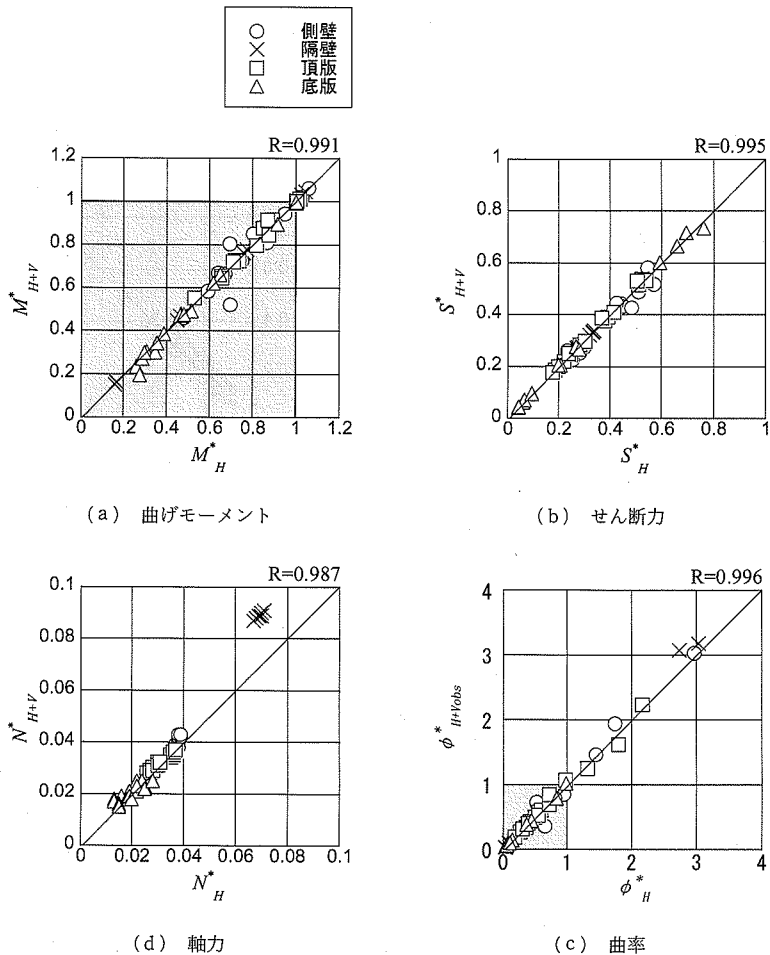


図-10 断面力・曲率に及ぼす影響 (海水管ダクト)

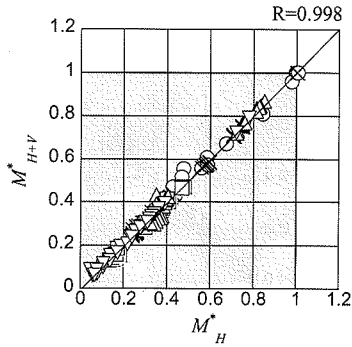
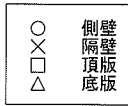
り/なしの影響 (最大曲げモーメント比, 最大曲率比) はほとんどなく, 相関係数 R はほぼ 1 に近い値となっている。構造物や部材の種別による傾向の相違も見出されない。特に, 曲率については, 最大降伏曲率比が 1.0 以上の塑性域においても, 上下動の影響は認められない。これは, 上下動が RC 部材の局部的な曲げ破壊を促進する要因にはなっていないことを示唆している。

②せん断力 (最大せん断力比) に対する影響も, 曲げ変形に対する場合と同様であり, 構造物や部材の種別による傾向の相違はなく, 上下動が RC 部材のこのような脆性的な破壊を促進する要因にはなっていないことを示唆している。

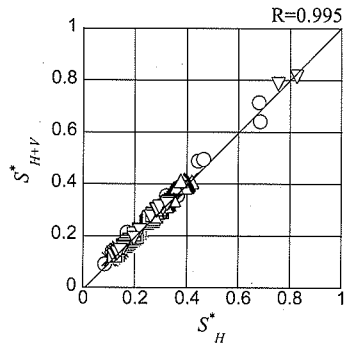
③最大軸力比については, 上下動の影響が認められ, 特に鉛直方向部材 (側壁, 隔壁) に対しては, 圧縮力の値がやや増加する傾向にある。

これらの結果を踏まえると, 鉛直方向部材の軸力が

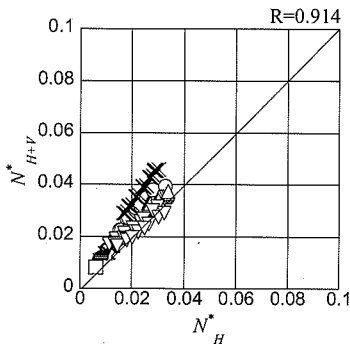
増加した要因として, 先に示した上載土慣性力または躯体慣性力の鉛直成分が挙げられる。このことを検証するため, 図-12 および図-13 に, 海水管ダクトと取水ピットのそれぞれにおいて, 軸力が最も変動した隔壁 (取水ピットの場合は中央の隔壁; ともに下端部で降伏している) の軸力の動的増分値 (応答値から初期軸力を差し引いた値) と上載土/躯体慣性力の鉛直方向成分 (図-6 (b) および図-7 (b) を再掲) の時刻歴波形を比較して示した。これから, 上載土/躯体慣性力と軸力の増分値の両者の位相は, 全時間帯にわたって, 良く一致していることがわかる。このことから, 上下動は上載土/躯体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。また, 上載土/躯体慣性力と軸力の増分値の間では, 時刻歴波形が相似形である。このことから, 上下動の影響は, 今後様々な地震動と地盤条件の組み合わせに対するこの種の検討を積み重ね



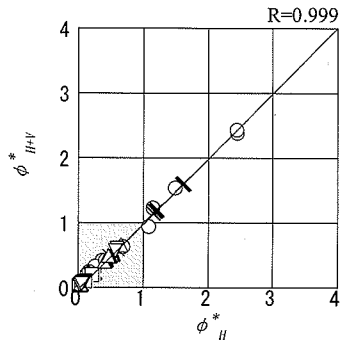
(a) 曲げモーメント



(b) せん断力



(c) 軸力



(d) 曲率

図-11 断面力・曲率に及ぼす影響 (取水ピット)

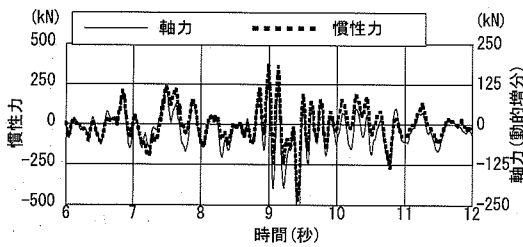


図-12 隔壁の軸力増分と上載土慣性力の鉛直成分との比較 (海水管ダクトの場合)

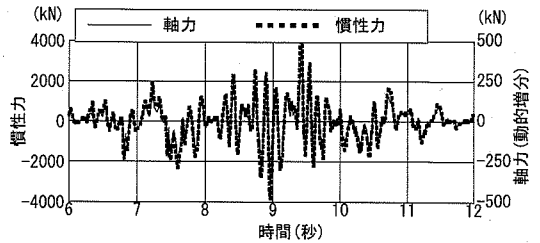


図-13 隔壁の軸力増分と躯体慣性力の鉛直成分との比較 (取水ピットの場合)

ることにより、軸力の動的増分の最大値から、鉛直震度などの静的荷重によって概略推定することが可能であることも示唆している。

図-12ならびに図-13に示した軸力の動的増分値を軸応力に換算すると、0.3~0.4 N/mm²程度と微小な範囲にある。また、図-1で示した地中構造物の軸力

のレベルは低く、一般に軸力比で0.1未満¹⁾である。このことから、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が部材の耐力に及ぼす影響は今回の検討条件の範囲内では無視できる程度である。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。

(4) 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に及ぼす影響

(3)の結果を踏まえ、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に及ぼす影響について検討する。ここでは(3)と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-14、図-15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(観測結果をそのまま入力した場合)の解析結果に対する最大降伏曲げモーメント比(M_{H+Vobs}^*)、最大せん断耐力比(S_{H+Vobs}^*)、最大軸力比(N_{H+Vobs}^*)、最大降伏曲率比(ϕ_{H+Vobs}^*)をプロットした。縦軸には、発生時刻差を0.0(秒)から0.27(秒)まで0.09(秒)刻みで変動させた場合の解析結果に対して、同様に最大降伏曲げモーメント比などをプロットした。以下に記号を説明する。

①発生時刻差が0.0(秒)の場合；

$$M_{H+Vpeak0.0}^*, S_{H+Vpeak0.0}^*, N_{H+Vpeak0.0}^*, \phi_{H+Vpeak0.0}^*$$

②発生時刻差が0.09(秒)の場合；

$$M_{H+Vpeak0.09}^*, S_{H+Vpeak0.09}^*, N_{H+Vpeak0.09}^*, \phi_{H+Vpeak0.09}^*$$

③発生時刻差が0.18(秒)の場合；

$$M_{H+Vpeak0.18}^*, S_{H+Vpeak0.18}^*, N_{H+Vpeak0.18}^*, \phi_{H+Vpeak0.18}^*$$

④発生時刻差が0.27(秒)の場合；

$$M_{H+Vpeak0.27}^*, S_{H+Vpeak0.27}^*, N_{H+Vpeak0.27}^*, \phi_{H+Vpeak0.27}^*$$

これらから、以下のような傾向が見出される。

①各断面の曲げ変形(最大曲げモーメント比および最大曲率比)に対する最大加速度の発生時刻差の影響はほとんど認められず、応答の変動はほとんど見られないことがわかる。特に最大降伏曲率比は、その値が1.0以上の塑性域においてもほとんど影響が認められない。

②各断面のせん断力(最大せん断力比)についても、最大加速度の発生時刻差の相違による影響は認められず、そのばらつきの範囲も最大曲げモーメント比のそれと比べて小さい。

③上下動の影響を直接に被る最大軸力比については、他の最大断面力比および最大曲率比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、最大軸力比0.03以上の領域ではその他の応答値に比べて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、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。

これらの結果を相関係数Rにて評価し、発生時刻差との関連としてまとめたのが図-16である。これか

ら、いずれの構造物の断面力と曲率においても、相関係数Rはいずれも1に非常に近い値となっていることが確認される。言い換えれば、水平動と上下動の最大加速度の発生時刻差が、ほとんど影響していないことがここでも確認される結果となっている。

以上のことから、少なくとも今回の検討範囲では、水平動と上下動の最大加速度の発生時刻差によって、断面耐力など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. 動的上下動の適用に伴う設計の取り扱いについて

(1) 動的上下動の応答値への影響について

代表的な屋外重要土木構造物を対象に、動的上下動が応答値に及ぼす影響を検討した。本検討においては、実観測記録が実体波として鉛直下方から入力されることを前提として、成層地盤中に設置された地中構造物の実観測記録に対する応答を、地盤-構造物連成系の非線形解析で評価した。地盤は全応力・履歴依存型モデル(Ramberg-Osgoodモデル)、構造物は軸力変動型トリリニアモデルを用いた。

解析結果から得られた知見の中で最も重要なことは、上下動は、弾性域から塑性域(最大層間変形角：0.8%，最大せん断耐力比：0.8，曲率応答塑性率：4.0)に至るまで、構造物全体のせん断変形に対してほとんど影響を与えず、隔壁などの鉛直方向部材の軸力がわずかに変動を与えたことである(図-8~11)。

別途実施された、阪神大震災における神戸高速鉄道大開駅の被災分析¹⁶⁾によれば、大開駅の場合も本報告で紹介した事例と同様に、上下動が構造物全体のせん断変形に影響を及ぼさないことが示されている。本検討ならびにこの研究事例を合わせれば、上下動は地中構造物の鉛直部材に軸力変動を与えるものの、せん断変形に及ぼす影響は、無視できる程度であると判断される。

また、地中構造物に作用する上載土慣性力(上載土を有する場合)または躯体慣性力(上載土がない場合)の鉛直成分と鉛直方向部材の軸力の動的増分の時刻歴波形を比較(図-12, 13)すると、両者の位相は良く一致し、上載土/躯体慣性力と軸力の増分値との間に比例関係が認められた。このことは、鉛直方向部材の動的軸力の最大値を静的な鉛直地震力によって概略推定が可能なることを示唆している。本検討においては、このような静的鉛直地震力の評価については、取扱っていない。しかしながら、例えば、重複反射理論に基づき、上下動のみに対する成層地盤の一次元等価

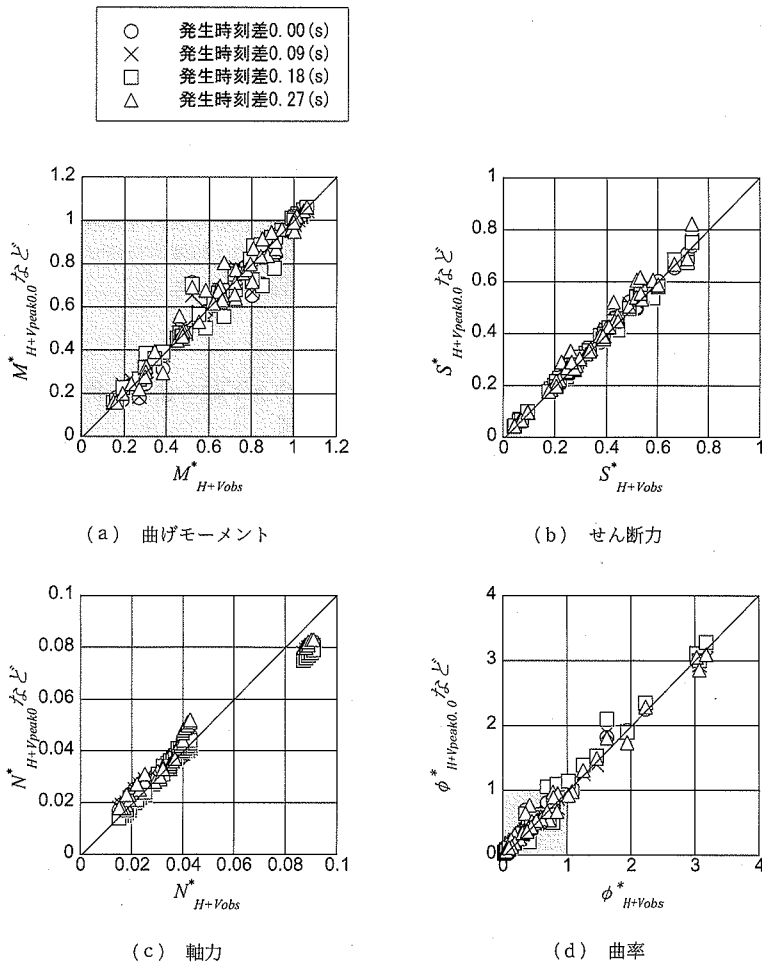


図-14 断面力・曲率に及ぼす影響 (海水管ダクト)

線形解析を行い、鉛直方向の応答加速度に当該部分の要素の質量を乗じることで、静的な地震力を比較的簡易に評価することができると考えられる。

以上の考察から、「指針・マニュアル」で示したように、上下動の影響を鉛直震度で考慮することはもちろんのこと、上下動を動的な地震荷重と見なすことによっても、地中構造物の地震時応答挙動を評価することができる。

(2) 水平動と上下動の最大加速度の発生時刻差が応答値に与える影響について

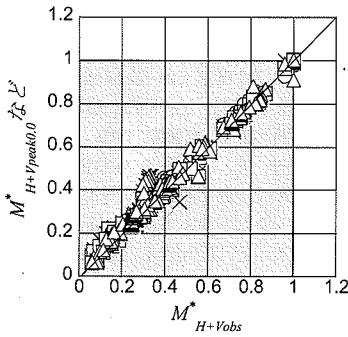
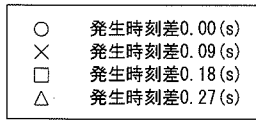
観測地震動を用いて、水平動と上下動の最大加速度の発生時刻の相違が地中構造物の応答挙動に与える影響を検討した。その結果、最大加速度の発生時刻差のゆらぎは、地中構造物の変形性能 (関連変位) および断面耐力に対してほとんど影響しないことを確認した (図-14~16)。したがって、水平動と上下動それぞれ

の最大加速度の発生時刻差については、特段の配慮の必要はなく、同時に入力する方法により地中構造物の応答値を評価してよいと判断される。

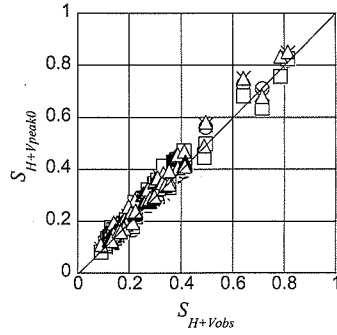
5. 結語

当部会にて刊行した「指針・マニュアル」では、上下動は水平動の最大加速度振幅の1/2の値を鉛直震度として評価している。しかし、原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査技術のさらなる高度化を目指して、本報告では動的上下動の影響についての基本的な検討結果を紹介した。これをまとめると以下のようである。

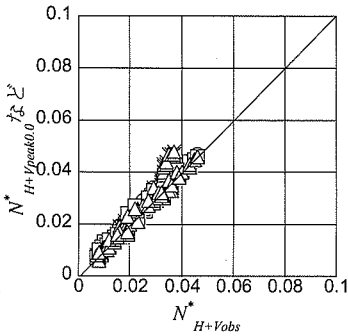
(1) 地中構造物において、その全体的なせん断変形に大きく寄与する地震荷重の水平成分には、上下動はほとんど影響を及ぼさないため、層間変



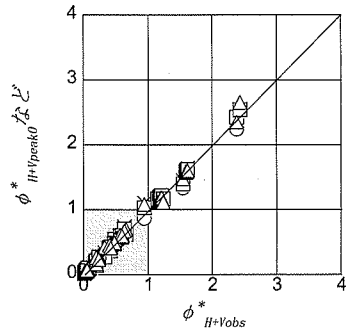
(a) 曲げモーメント



(b) せん断力

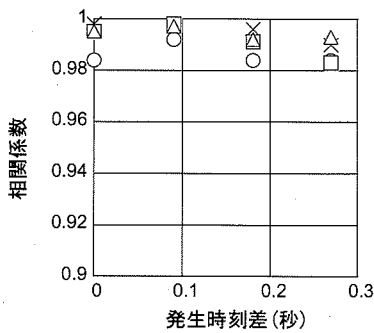


(c) 軸力



(d) 曲率

図-15 断面力・曲率に及ぼす影響 (取水ピット)



(a) 海水管ダクトの場合

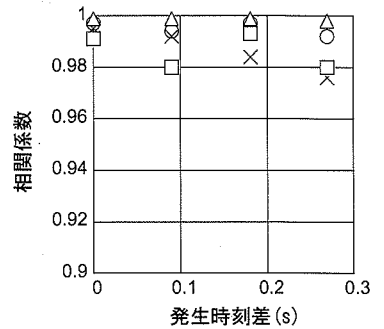
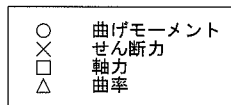


図-16 相関係数のまとめ

位や部材の曲げモーメント、曲率およびせん断力は、水平動のみの応答とほぼ同一である。

(2) 地震荷重の鉛直成分には、上下動による動的応

答が認められ、隔壁などの構造物の鉛直方向部材に対するわずかな軸力の増加として影響を及ぼす。しかし、今回検討の対象とした地中構造

物の軸力のレベルは概ね軸力比が0.1未満と小さいため、部材耐力などへの影響はほとんど認められない。

- (3) (1), (2)の結果を踏まえ、水平動・上下動における最大加速度の発生時刻差が構造物の応答に及ぼす影響を検討した。その結果、断面力および曲率などの変動は無視できる程度に小さく、水平動と上下動を同時に入力して照査しても問題ないと考えられる。

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・同マニュアル, 2002.
- 2) (社)日本電気協会：原子力発電所耐震設計技術指針, JEAG 4601, 1987.
- 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の耐震性能照査指針〈照査例〉, 2002.
- 4) 関西地震観測研究協議会における観測記録.
- 5) 若松邦夫：震源域での強震動, 日本建築学会 第23回地盤震動シンポジウム講演概要集, pp. 3-5~3-14, 1995.
- 6) 若松邦夫, 江尻讓嗣, 野畑有秀, 奥田 暁：兵庫県南部地震の強震記録にみられる地震動特性, 大林組技術研究所報, pp. 3-5~3-23, 1996.
- 7) 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.
- 8) 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)一密な乾燥砂地盤・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一, 電力中央研究所報告, 研究報告U 02018, 2003.

- 9) Takeda T., Sozen A. and Nielsen N.: 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.
- 10) 江戸宏彰, 武田寿一, 表祐一郎：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, 1989.
- 11) 例えば, (社)土木学会：動的解析と耐震設計[第2巻]動的解析の方法, 技報堂, 1989.
- 12) 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CD-ROM論文集, pp. 757-762, 2002.
- 13) 金谷 守, 石川博之, 金戸俊之：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, III-117, 2003.
- 14) 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.
- 15) (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能評価手法, 土木学会論文集, No. 356/ I -3, pp. 11-24, 1985.
- 16) 松本敏克, 大友敬三, 入江正明, 坂田 勉：被災した地中RC構造物の耐震性能評価に基づく鉛直地震動の影響について, 土木学会 地震工学論文集, Vol. 27, 2003.

(2004.4.2 受付)

EFFECTS OF VERTICAL GROUND MOTION ON SEISMIC PERFORMANCE OF UNDERGROUND RC STRUCTURES OF NUCLEAR POWER STATIONS

Sub-Committee on Seismic Performance Verification, Committee on Nuclear Civil Engineering

To enhance current seismic performance verification measures on crucial civil engineering structures in nuclear power plants, we examined the effects of vertical ground motions on seismic performance of reinforced concrete underground structures. For this purpose, computational works using nonlinear FEM analysis were performed for representative structures such as circulating water pipe supporting duct and water inlet pit. Emphasis was placed on the response nature of these structures subjected to simultaneous horizontal and vertical ground motions and the response fluctuation arising from peak value time lag of respective ground motion. Finally, the handling of vertical ground motion in terms of a seismic load in the seismic verification system was discussed.