

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

松本敏克¹・大友敬三²・入江正明³・坂田 勉⁴

¹株式会社ニュージェック 技術開発部 (〒542-0082 大阪市中央区島之内1-20-19)

E-mail: matsumotots@osaka.newjec.co.jp

²財団法人電力中央研究所 地盤耐震部 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

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

³ジャパン・ザイペックス株式会社 技術部 (〒107-0062 東京都港区南青山2-22-3)

E-mail: irie@xypex.co.jp

⁴株式会社ニュージェック 技術開発部 (〒542-0082 大阪市中央区島之内1-20-19)

E-mail: sakatatt@osaka.newjec.co.jp

阪神・淡路大震災で被災した鉄筋コンクリート製地中構造物の被害事例の解析的分析を通じて、構造物の耐震性能評価の観点から鉛直地震動の影響について考察を行った。とくに、当該地点においては地震動の観測記録が得られていないことから、当該地点を対象とした複数の推定地震動を用いて、地盤・構造物連成系の非線形地震応答解析を行い、鉛直地震動の有無による変形、断面力、損傷形態等の相違を検討することで鉛直地震動の影響を評価した。

Key Words : vertical ground motion ,in-ground structure, seismic performance, dynamic analysis

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震は、地下鉄等の地中構造物に未曾有の被害をもたらした地震であると同時に、内陸活断層近傍の大きな鉛直地震動が観測された地震でもあった。鉛直地震動の地中構造物への影響については、これまでのいくつかの研究により、部材断面力等に影響があることが明らかにされてきた¹⁾²⁾。しかしながら、地震動の選定や、軸力と曲げの相関を考慮した断面力の評価方法等に関する課題が残されている。

一方、筆者らは、阪神・淡路大震災で被災した鉄筋コンクリート製地中構造物の被害事例の解析的分析と検証を行ってきた³⁾。本論では、その際に用いた耐震性能評価手法により、鉛直地震動の影響を評価することを試みた。このような地震被害分析は、構造物の実被害状況との対比が可能であるという点で有用と考えられる。ここでは、震災で大きな損傷を受けた神戸高速鉄道大開駅を代表地点として採り上げ、とくに、当該地点を対象として推定された複数の地震動を用いて、地盤・構造物連成系の非線形地震応答解析を行い、極端な場合ではあるが、鉛直地震動の有無による変形、断面力、損傷形態等の相違を検討することで鉛直地震動の影響を評価した。

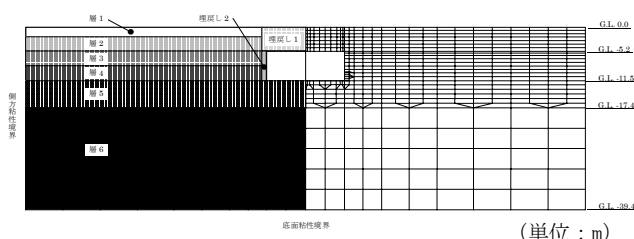


図-1 対象構造物の概要図

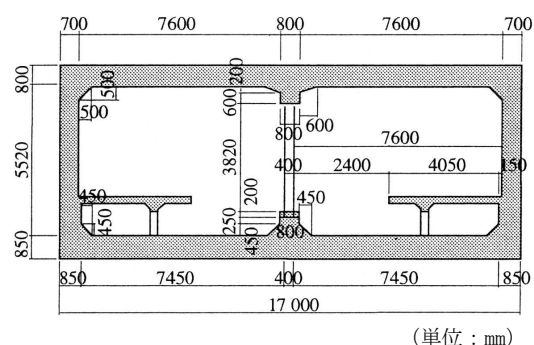
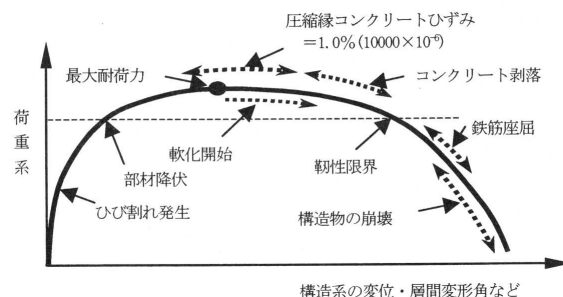


図-2 大開駅横断面図

表-1 大開駅中柱の構造諸元

寸法	B40cm×D100cm×H382cm
引張鉄筋量 (引張鉄筋比)	88.6cm ² (2.6%)
せん断補強筋量 (せん断補強筋比)	4.5cm ² (0.13%)
コンクリート圧縮強度 (設計基準強度)	38.7N/mm ² (24.5N/mm ²)
鉄筋降伏強度 (許容応力度)	318N/mm ² (143N/mm ²)

図-3 地中RC構造物の限界状態の例⁴⁾

2. 対象構造物の概要

大開駅の崩壊部分の構造は、図-1, 2に示すような1層の2連ボックスラーメン構造であり、約5mの土被りを有している。また、奥行き方向に3.5mの間隔で中柱が配置されている。中柱の諸元を表-1に示す。

3. 構造物の耐震性能と評価指標

鉛直地震動の地中構造物への影響について評価する場合、地震時において想定される構造物の限界状態に近い状態で評価を行う方が、合理的で適切な評価が可能と考えられる。

原子力施設の地中構造物に関する耐震性能照査指針⁴⁾では、巨大地震時における構造物の限界状態が明示されている。すなわち、一般の土木構造物の耐震設計に用いられるレベル2地震動をはるかに超える基準地震動 S_2 に対する限界状態としては、構造物の崩壊を回避することとしている（図-3参照）。コンクリートの剥落を回避することで、限界状態に至らないことが担保されるが、実務的にはさらに安全側に、①応答の水平層間変形角の制限、②部材のせん断耐力の確保、等を規定している。

ここでは、原子力施設の地中構造物の限界状態を参考にして、層間変形角とせん断力に関する評価を行うこととする。

4. 地震応答解析の概要

構造物の動的挙動を把握するために、地盤・構造物連成系としてモデル化し、地盤および構造部材の非線形性を考慮したFEMによる地震応答解析を実施した。解析モデルは、地盤を平面ひずみ要素、構造物をはり要素とし、底面粘性境界、側方粘性境界を用いた。解析モデルは図-1のとおりである。解析条件の詳細を以下に示す。

a) 地盤条件

地盤の速度構造や物性は既往の研究⁵⁾と同一とした。地盤の初期物性を表-2に、せん断剛性低下率と減衰定数のひずみ依存特性を図-4に示す。GL-39.4m以深にせん断波速度 $V_s = 500\text{m/sec}$ 程度の大坂層群が存在すると仮定し、この層の上面を工学的基盤と考え、モデル底面とした。表層の土質材料の非線形性は、R-Oモデルにより表現し、大ひずみ領域の地盤の応力-ひずみ履歴を精度よく表現するために、

表-2 大開地点の地盤の初期物性⁵⁾

地層区分	深度 (GL.m)	土質	単位体積重量 γ (kN/m ³)	せん断波速度 V_s (m/sec)	せん断弾性係数 G_0 (N/mm ²)	ポアソン比 ν
層1	2.1	シルト	19.0	140	38.0	0.333
層2	5.2	砂質土	19.0	140	38.0	0.488
層3	8.4	砂質土	19.0	170	56.0	0.493
層4	11.5	粘性土	19.0	190	70.0	0.494
層5	17.4	粘性土	19.0	240	112.0	0.490
層6	39.4	礫	20.0	330	222.0	0.487
基盤	—	礫	21.0	500	535.0	0.470

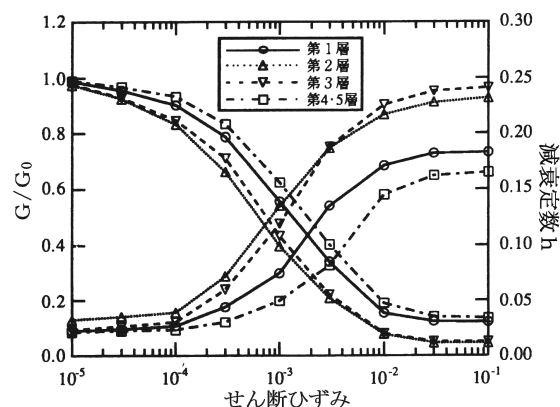
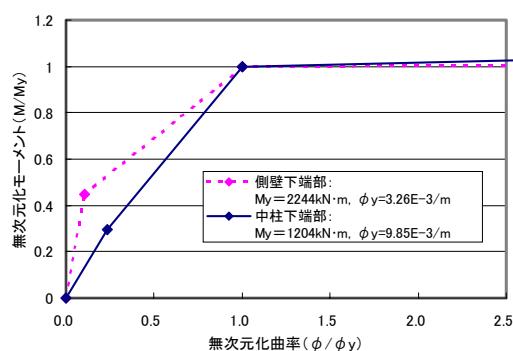
図-4 地盤材料のひずみ依存特性⁵⁾

図-5 部材の非線形特性

$G/G_0 \sim \gamma$, $h \sim \gamma$ 曲線上で、1%ひずみ時の G/G_0 , h を参照して非線形パラメータを設定した。また、鉛直動の波動伝播を考慮するため、ひずみレベルによらず地盤の体積弾性係数は一定とした。層6については線形弾性体としてモデル化した。

b) 構造条件

RC部材の非線形性はトリリニア型の $M-\phi$ 曲線

表-3 入力地震動の概要

ケース	地震動名	概要
Wave1	大阪層群の地中観測記録に基づく地震動 ⁶⁾	水平動については、ポートアイランドの地中 GL-83.0m における観測波を時間領域で分離した波。鉛直動については、同地点における観測波そのもの。
Wave2	スペクトル適合法による地震動 ³⁾	阪神淡路大震災の断層モデルと気象庁 87 型計強震記録を用いて作成した JMA 最短距離式から、検討対象地点の基盤面における応答スペクトルを推定し、地点近傍で観測された強震記録の位相を用いて、模擬地震動を作成する方法。
Wave3	非定常スペクトル合成法による地震動 ³⁾	工学的基盤上の地震マグニチュードと震源距離に対する非定常性を有する強震動モデルを、断層の広がりや破壊伝播方向を考慮した非定常パワースペクトルの重ね合わせによる強震動推定法に拡張したもの。

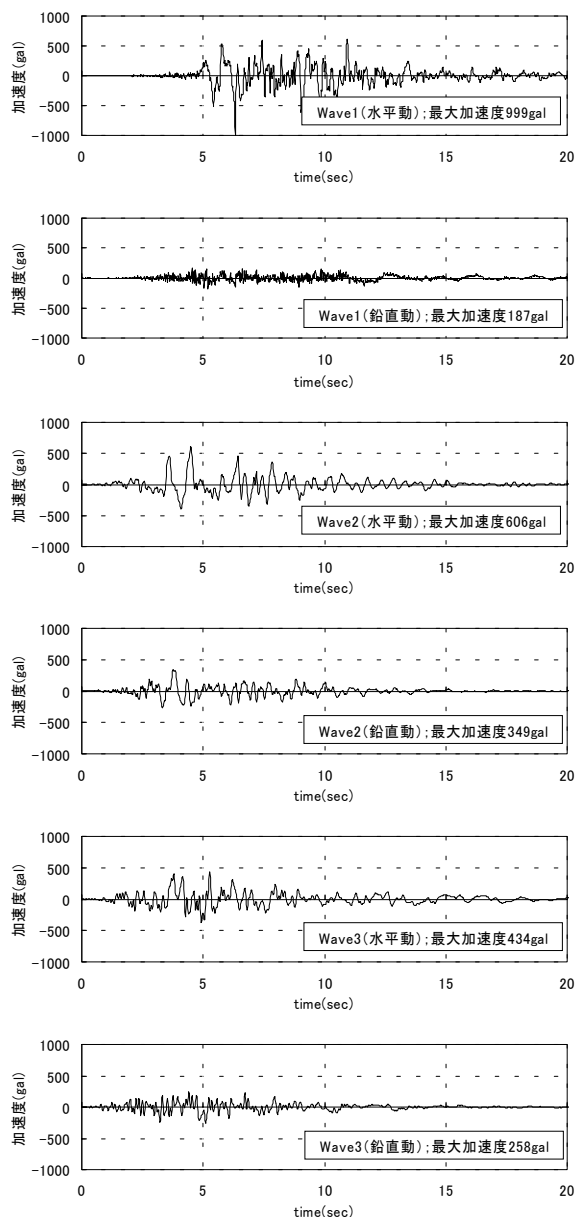


図-6 入力地震動の時刻歴波形

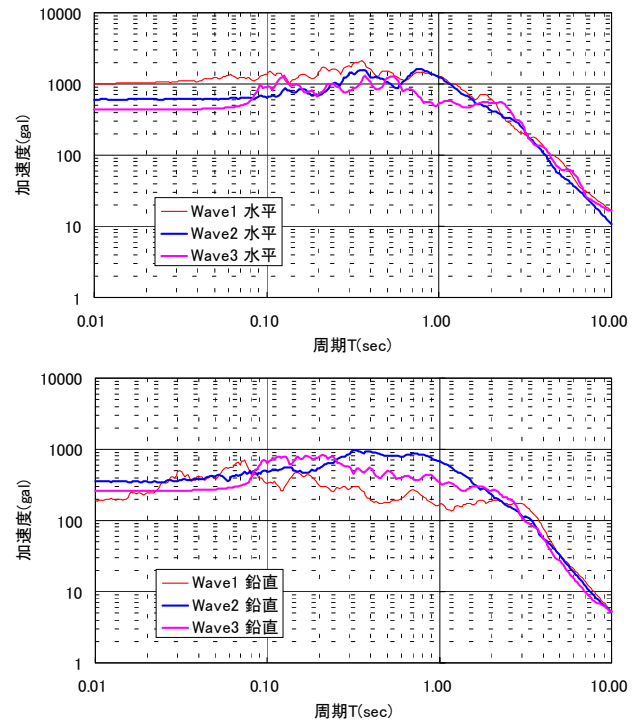


図-7 入力地震動の加速度応答スペクトル (h=5%)

(武田モデル)を用いることとした。各勾配は、ひび割れ、鉄筋降伏、終局の各特性点を結ぶものとして定義した。図-5に解析に用いたM- ϕ モデルの一例を示す。なお、隅角部には剛域を設け、側壁のホーム下・中柱上下端部の断面急拡大部分は、密な配筋状況も勘案して、弾性要素として扱った。

c) 入力地震動

入力地震動は、当該地点におけるサイト特性を考慮して推定した3つの地震動とした^{6),3)}。それら地震動の概要を表-3に示す。図-6に入力地震動の時刻歴波形を、図-7に応答スペクトルを示す。また、入力の方法は底面粘性境界に2E波として入力した。この場合、鉛直動はP波を想定していることになる。

5. 解析結果と考察

(1) 地盤および構造物変形

水平層間変形が最も大きなWave1についての最大変形図を図-8に示す。礫層との境界面 (GL-17.4m) を境に、表層地盤が大きく変形しており、地表面変位は30cm程度である。1次のせん断変形モードが卓越しているようであり、構造物の変形は地盤変形に追随している様子が伺える。また、その他のケースについても同様な変形モードを示している。

構造物の水平層間変形角の時刻歴を図-9に示す⁷⁾。この構造物は中柱に変形が集中する傾向にあるため、中柱の変形角にて評価している。鉛直地震動の有無に依らず変形角に差がほとんど見受けられないことから、地盤のせん断変形に伴う構造物の変形は、水平地震動の影響が支配的であり鉛直地震動の影響は小さいと考えられる。

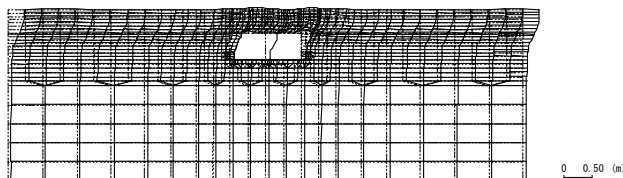
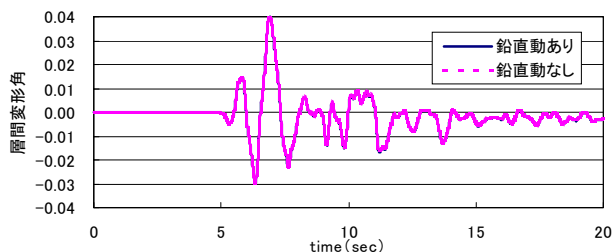
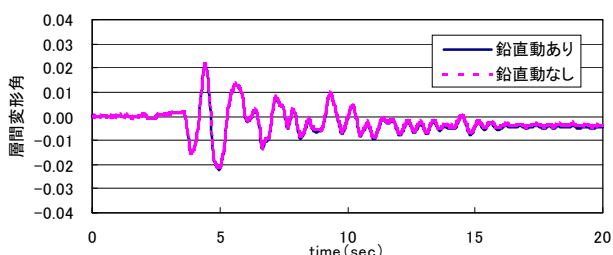


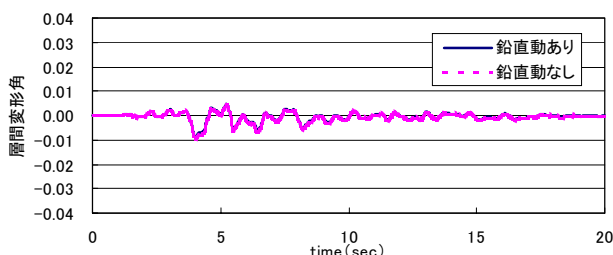
図-8 最大変形図 (Wave1の場合)



(a) Wave1の場合



(b) Wave2の場合



(c) Wave3の場合

図-9 水平層間変形角の時刻歴波形

入力波形に応じて層間変形角の最大応答は異なるが、これについては以下のように考察することができる。非線形地震応答解析を行っているので、対象とする系の伝達関数を陽な形で算定することはできない。そこで、特定点の応答加速度時刻歴よりの応答スペクトルを算定して、入力地震動の応答スペクトルと比較対比することにより、増幅特性を知ることとした。すなわち、図-10に示した頂版中央部（中柱上端部）の水平応答加速度に対する応答スペクトルは、 $T=0.3\sim 0.4\text{sec}$ 、あるいは、 $1\sim 2\text{sec}$ にてピークを有している。これらの卓越周期における応答スペクトルの大小と、層間変形角の大小が符合する結果となっている。

また、文献4)では、構造物の崩壊の目安として、限界の層間変形角0.01を示している。本検討では、いずれの入力地震動に対しても、応答がこの値と同程度かそれ以上であり、崩壊の可能性があり、限界状態に近い状態にあると考えられる。

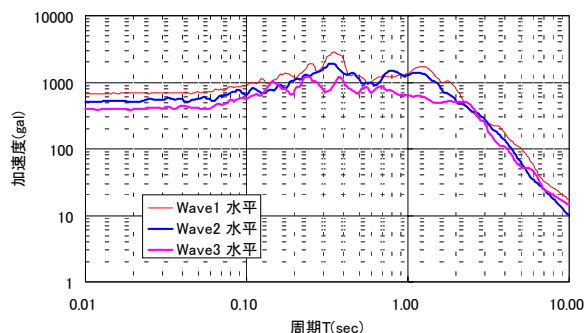


図-10 水平応答加速度の応答スペクトル (h=5%)
(頂版中央部分)

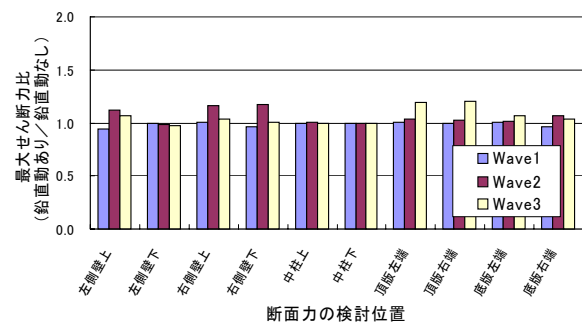
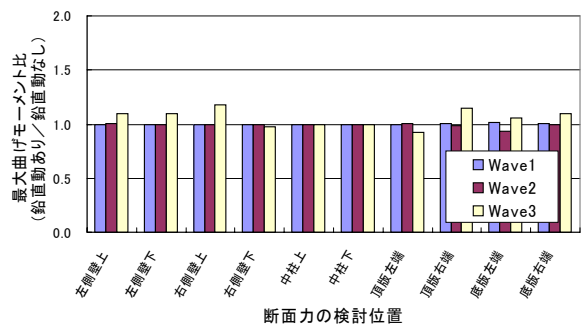
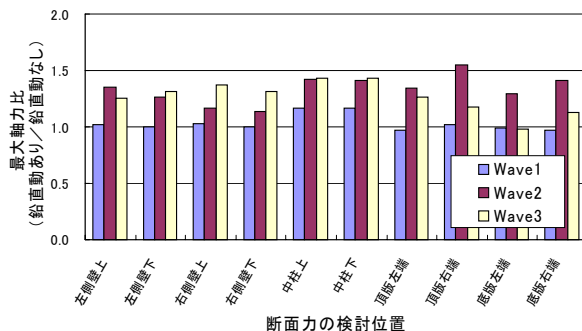


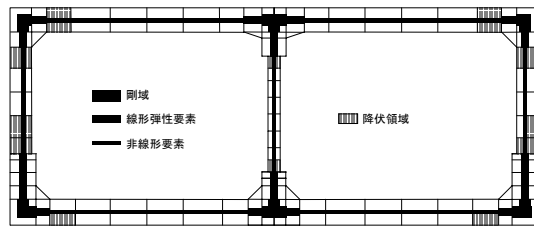
図-11 塑性化が進展した部位の最大断面力の変動量

(2) 断面力の最大応答

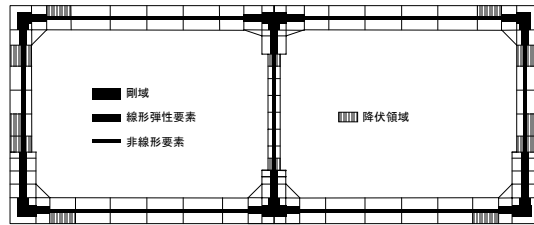
各部材の最大断面力の変動を図-11に示す。各部材での評価位置は、塑性化が進展した位置とした。塑性化の状況は次節で示す。水平・鉛直動同時入力の場合の最大断面力を水平動のみ入力の場合のそれと除して無次元化している。

軸力については、部材毎にばらつきは認められるが、総じて変動量が大きくなっている。また、その大きさは入力波形により異なるが、鉛直地震動の最大加速度値の大小とほぼ対応している。

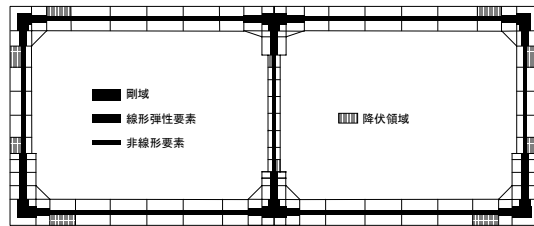
曲げモーメントおよびせん断力については、地盤



(a) Wave1の塑性状況



(b) Wave2の塑性状況



(c) Wave3の塑性状況

図-12 塑性ヒンジの生成状況

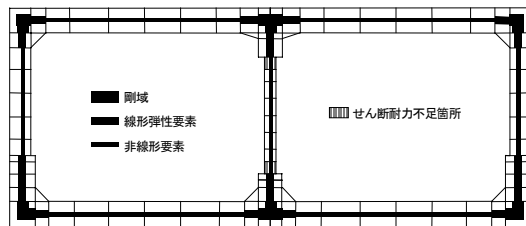
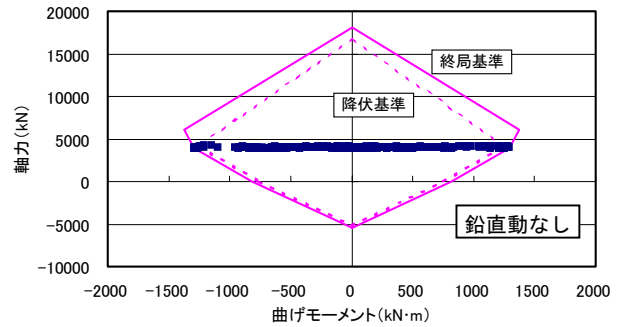
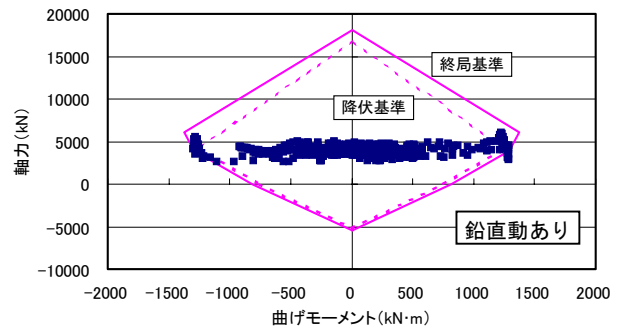


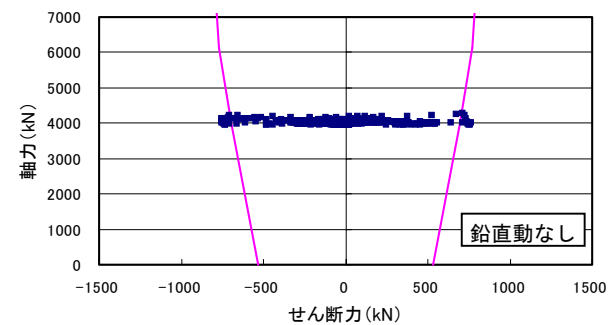
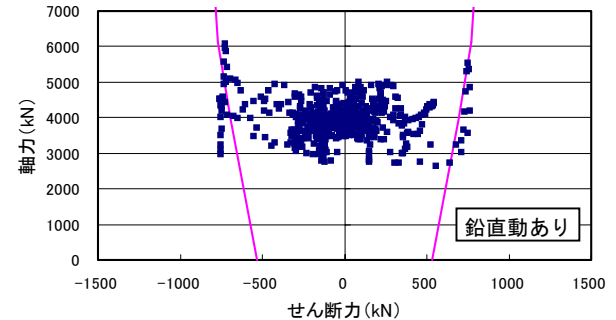
図-13 せん断耐力不足箇所 (Wave1~3)

と接する側壁、頂版、底版部分で変動しているが、変動量は軸力よりも小さくなっている。これは、部材が降伏して塑性化が進展し、曲げモーメントが上限に達してしまったことが原因と考えられる。せん断力はモーメント勾配に相当するのでその影響を受けたものと考えられる。入力波形により変動量に差が生じているが、Wave1の場合は、鉛直地震動の波形、応答スペクトルが他の波よりも小さいので、断面力の変動量が小さくなったものと考えられる。Wave3の場合は、層間変形が小さめであり、塑性化の程度も小さい。そのため、部材の残存剛性も大きく、荷重変動に対する断面力応答の感度が大きかったものと考えられる。

頂版の曲げモーメントやせん断力、側壁や中柱の軸力の変動については、鉛直地震動の影響により、土被り部分に作用する鉛直慣性力が変動したことがその原因と考えられる。また、側壁の曲げモーメントやせん断力、頂版や底版の軸力の変動量については、側方地盤に作用する鉛直慣性力によるポアソン効果分が寄与しているものと考えられる。Wave2は鉛直動が大きく、その傾向が顕著に見受けられる。



(a) 曲げモーメントと軸力の履歴



(b) せん断力と軸力の履歴

図-14 断面力の履歴 (中柱下端部)

(3) 構造物の損傷状況

図-12に鉄筋降伏箇所を示す。入力地震動によらず、ほぼすべての隅角部に塑性ヒンジが発生している状況にある。波形ごとに塑性化の程度に差異が見られたが、層間変形角の大小と傾向が一致している。しかし、鉛直動の有無による差は見られなかった。せん断耐力の不足箇所については、図-13に示すように、中柱上下端部のみであり、波形の違い、鉛直地震動の有無による差異は見られなかった。

(4) 断面力の相関

せん断耐力が不足し、損傷の進展した中柱部材下端部の断面力履歴を図-14に示す。曲げおよびせん

断に関する破壊基準も同時に示している。破壊基準の算定には耐力式の安全係数をすべて1とした。なお、とくに断面力変動が大きいWave2のケースを示している。

図-14(a)は曲げモーメントと軸力の相関図であり、降伏および終局の破壊基準を併記している。鉛直地震動の有無に依らず、中柱は終局に至っており曲げ破壊に至ったと判定される。しかも、ほぼ釣合破壊の状態にあり、引張鉄筋が降伏すると同時に圧縮縁のコンクリートも破壊するという脆性的な挙動となることが予想される。

図-14(b)はせん断力と軸力の相関図であり、せん断の破壊基準も併記している。破壊基準はコンクリート標準示方書の耐力式とした。鉛直地震動の有無に依らず、中柱はせん断破壊に至ったと判定される。このように、対象構造物は曲げ破壊／せん断破壊の区別が明確でない状況であったと考えられる。

また、曲げモーメントやせん断力の変動範囲は鉛直地震動の有無に依らずあまり影響を受けていないが、軸力の増減に応じて曲げ耐力やせん断耐力も多少増減するので、軸力の変動量如何では破壊判定が微妙に異なる可能性があることを示している。

6. おわりに

阪神・淡路大震災で被災した鉄筋コンクリート製地中構造物の地震被害分析を通じて、構造物の耐震性能評価の観点から鉛直地震動の影響について分析した。損傷の程度が大きい構造物を対象としたケース・スタディーではあるが、その範囲内で以下のことが明らかになった。

- ① 構造物の水平層間変形については鉛直地震動の影響をほとんど受けない。
- ② 鉛直地震動の作用により部材によらず軸力の変動が生じた。曲げモーメントやせん断力については、地盤と接する部材に変動が生じたが、その変動量は軸力に比べて小さくなる傾向にある。
- ③ 部材の残存剛性（あるいは損傷程度）により、鉛直地震動の作用による断面力の変動量が変化する。残存剛性が大きいと断面力の変動量も大きくなる傾向にある。

また、塑性化が進展し損傷程度が大きな部位については、曲げモーメント等が上限に達し、軸力が多少変動しようとも、断面力に基づく破壊判定には影響が及ぶことはなかった。しかし、塑性化の程度が十分でない場合には、断面力の変動量が大きくなるとともに、軸力の変動如何により部材耐力が増減するので、破壊判定が変化する可能性がある。今後は、損傷程度と断面力の変動量とのかかわりを明らかにするとともに、他の形式の構造物にも適用し、事例の充実を図ることが望まれる。

謝辞：本研究においては、土木学会コンクリート委員会阪神・淡路大震災被害分析小委員会の委員の方々には多くの助言をいただいた。また、防災科学技術研究所地震防災フロンティア研究センターの酒井久和研究員には、ポートアイランドの基盤面地震動をご提供をいただいた。岐阜大学古本吉倫助手には、応答評価にあたって貴重な助言をいただいた。関係各位に深甚な謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 伊東守，大塚久哲，豊永臣悟：地下構造物の断面力に与える鉛直地震動の影響について，構造工学論文集 Vol.46A, pp. 1757-1763, 2000.
- 2) 中村敏晴，佐俣千載，竹内幹雄，水口和彦，栗本雅裕：地中構造物に対する鉛直地震動の影響，第57回年次学術講演会講演概要集，pp.1381-1382, 2002
- 3) コンクリート技術シリーズ49，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，2002.
- 4) 土木学会：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.
- 5) 矢的照夫，梅原俊夫，青木一二三，中村 晋，江崎順一，末富岩雄：兵庫県南部地震による神戸高速鉄道・大開駅の被害とその要因分析，土木学会論文集，No.537, pp. 303-320, 1996.
- 6) 酒井久和，澤田純男，土岐憲三：ポートアイランドにおける時間領域での基盤入力地震動の推定，土木学会論文集，No.612, pp. 373-378, 1999.
- 7) 松本敏克，大友敬三，酒井久和，坂田 勉，池澤市郎：地中構造物の耐震性能評価における鉛直地震動の影響について，第58回年次学術講演会講演概要集，2003.

(2003. 7. 10 受付)

EFFECT OF VERTICAL GROUND MOTION ON SEISMIC BEHAVIOR OF DAMAGED IN-GROUND STRUCTURE BASED ON NUMERICAL SIMULATION

Toshikatsu MATSUMOTO, Keizo OHTOMO, Masaaki IRIE and Tsutomu SAKATA

The paper discussed the effect of vertical ground motion on seismic behavior of the damaged in-ground RC structure during the Great Hanshin earthquake, in January 1995, based on numerical simulation. Several case studies are carried out using appropriate ground motions of the target site. In this calculation, interaction between soil and structure, material non-linearity, dynamic behavior, etc., are considered. Finally, effects of vertical ground motion for in-ground structures are discussed in terms of dynamic responses such as deformation, member forces and damage index of yielding and shear failure.