

## 空間的ばらつきを有する地盤に埋設された地中 RC 構造物の地震時挙動

Seismic response of box-type reinforced-concrete structures under the stochastic ground with spatial dispersion

松本敏克\*, 澤田純男\*\*, 杉浦邦征\*\*\*, 坂田 勉\*\*\*\*, 渡邊英一\*\*\*\*\*

Toshikatsu MATSUMOTO, Sumio SAWADA, Kunitomo SUGIURA, Tsutomu SAKATA, Eiichi WATANABE

\*工博, (株)ニュージェック, 技術開発グループ (〒531-0074 大阪市北区本庄東 2-3-20)

\*\*工博, 京都大学教授, 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

\*\*\*Ph.D., 京都大学助教授, 大学院工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

\*\*\*\*(株)ニュージェック, 技術開発グループ (〒531-0074 大阪市北区本庄東 2-3-20)

\*\*\*\*\*Ph.D., 工博, 京都大学名誉教授, (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

Seismic response of box-type RC structures under the stochastic ground with 2-dimensional dispersion of material properties is discussed to investigate the stochastic characteristics of it in this paper. As a case study, accurate earthquake response analysis is carried out for Daikai Station severely damaged during the Great Hanshin Earthquake (1995), which is able to consider interaction effect and non-linear behavior of Soil-Structure Interaction-system. Monte Carlo simulation is carried out in the same way as a case study. As a result, the variation of seismic response of in-ground RC structure has not so intensive sensitivity as the spatial dispersion of the soil properties.

Key Words: In-ground RC structures, Seismic performance, Non-linear analysis, Monte Carlo simulation

キーワード: 地中 RC 構造物, 耐震性能, 非線形解析, モンテカルロ・シミュレーション

## 1. はじめに

最近, 構造物の耐震性に関わるリスク評価や信頼性設計が現実的な問題として採り上げられるようになり, 構造物の損傷確率が必要とされる局面が多くなってきている。地中構造物についても耐震設計において確率的評価が試みられている<sup>1)~3)</sup>。これらは, 応答変位法や等価線形解析による動的解析手法等の比較的簡便で実用的な耐震設計手法を用いている。そして, 確率的評価については, 応答や耐力の簡易な評価曲線や簡単な構造モデルに対する解析を用いることで解析負荷を小さくしてモンテカルロ・シミュレーションを適用している。

しかし, 最近の地中構造物の耐震設計では, 実務設計においても, ①地盤・構造物連成系としての取り扱い, ②地盤および構造物の非線形性の考慮, ③時間領域の地震応答解析手法の適用, 等が前提となりつつある<sup>4), 5)</sup>。そのような非線形問題の系のばらつきに対する確率的手法としては, モンテカルロ法の適用が望まれるところであるが, 解析容量, 解析時間や解の安定性等の問題により, 非線形地震応答解析を用いたモンテカルロ法の適用は困難であり, 現実には敬遠されてきた。

このような問題に対する現実的な取り組みとしては, 非線形地盤応答解析手法と構造物の簡易応答評価モデルの組合せに対してモンテカルロ法を適用する方法<sup>6)</sup>, 実務にて要求される構造解析の精度を確保するも数少ない

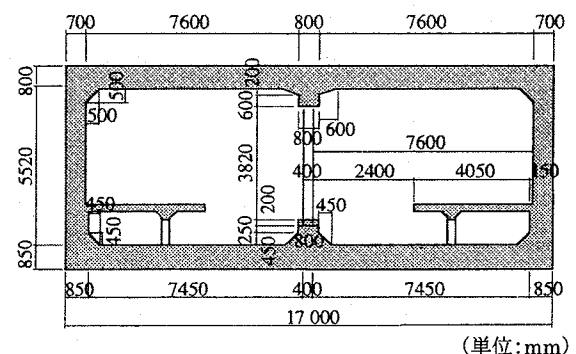


図-1 大開駅構造図

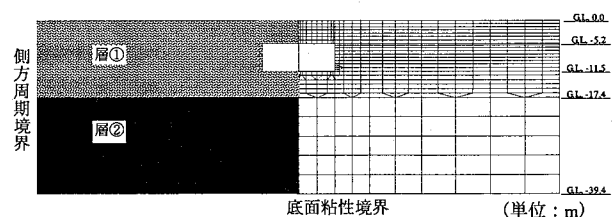
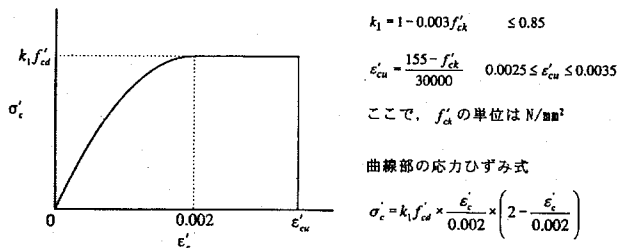
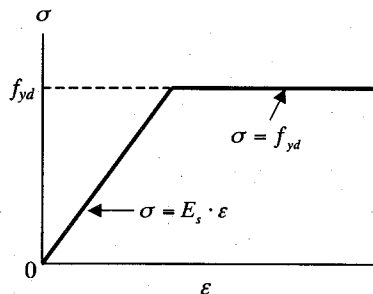


図-2 地盤と地中 RC 構造物のモデル

演算により効率的に応答の確率分布を推定する方法等が採用されている<sup>7), 8)</sup>。このような場合, 地盤を 1 次元モデルに近似したり, あるいは, 地盤を均質な媒体と仮定したりして, 地盤情報を簡素化してモデル化しているのが実情である。そのため, 空間的に (多次元的に) ばら

表-1 中柱の構造諸元

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

図-3 コンクリートの応力-ひずみ曲線<sup>13)</sup>図-4 鉄筋の応力-ひずみ曲線<sup>13)</sup>

つきを有する比較的軟弱な地盤が構造物にどのような影響を及ぼしているかを詳細には把握できていないという問題があった。

一方で、基礎地盤や斜面の地震時安定性の検討では、地盤の空間的なばらつきを考慮した研究が行われており<sup>9),10)</sup>、地盤・斜面の地震時挙動やばらつきの影響が明らかにされつつある。これらは、2次元的な地盤のばらつきを考慮しているが、地盤のみを対象としている。

以上より、現状では、地中構造物が地盤の空間的なばらつきにより受ける影響は解明されていないと言っても過言ではない。そこで本論では、2次元的にばらつきを有する地盤中に埋設された地中 RC 構造物の地震時挙動の確率的特性を把握することを目的として、地盤・構造物連成系の非線形地震応答解析を用いて、モンテカルロ・シミュレーションを実施した。

## 2. 地震応答解析の概要

強震動が作用した場合の大ひずみ・大変形領域での構造物の動的挙動を把握するために、兵庫県南部地震により大きな被害を受けた神戸高速鉄道の大開駅を対象とし

表-2 モデル地点の地盤の初期物性

| 地層区分 | 深度 (GL.m) | 単位体積重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | せん断波速度 $V_s$ (m/sec) | せん断弾性係数 $G_0$ (N/mm <sup>2</sup> ) | ポアソン比 $\nu$ |
|------|-----------|--------------------------------------|----------------------|------------------------------------|-------------|
| 層①   | 17.4      | 19.0                                 | 200                  | 77.0                               | 0.494       |
| 層②   | 39.4      | 20.0                                 | 330                  | 222.0                              | 0.487       |
| 基盤   | —         | 21.0                                 | 500                  | 535.0                              | 0.470       |

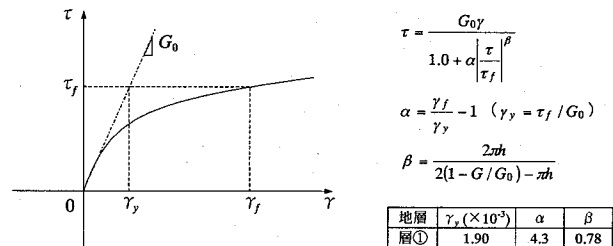
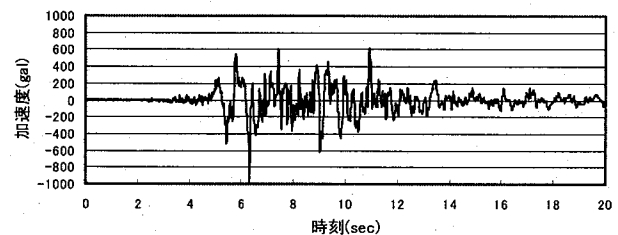


図-5 地盤の応力-ひずみ曲線 (R-O モデル)

図-6 入力地震動<sup>14)</sup>

た解析モデルを作成し、地震応答解析を行うものとする (図-1,2 参照)。この構造物は、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。中柱の曲げせん断破壊により構造系全体の崩壊に至ったとされている<sup>11),12)</sup>。ここでは、地中構造物の基本的な動的挙動を確認するため、均質な地盤モデルを対象として地震応答解析を実施する。

### 2.1 解析条件

地盤・構造物の動的な相互作用を考慮するために、2次元 FEM モデルを用いて連成系としてモデル化した。そして、地盤および構造部材の非線形性を考慮して、時間領域での地震応答解析を実施した。地盤を平面ひずみ要素、構造物をファイバー要素でモデル化した。側方境界については、モンテカルロ・シミュレーションにおいて地盤の空間的なばらつきを考慮することを想定して周期境界を用いた。詳細は 3.2 で後述する。図-2 に解析モデルを示す。解析条件の詳細は以下のとおりである。

#### (1) 構造条件

中柱の諸元を表-1 に示す。RC 部材の材料特性は、コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]<sup>13)</sup> の鉄筋およびコンクリートの応力-ひずみ曲線を用いた。なお、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。また、隅

角部には剛域を設けた。

## (2) 地盤条件

地盤は簡単のために2層地盤とした。速度構造や物性は既往の研究<sup>11)</sup>を基に設定した。地盤の初期物性を表-2に示す。基本的には弾性波探査結果に基づいて平均化したものである。 $V_s=330\text{m/sec}$ の層②については線形弾性体としてモデル化した。 $V_s=200\text{m/sec}$ の層①については、非線形性を考慮するものとし、R-Oモデルにより表現した。なお、非線形パラメータの設定にあたっては、大ひずみ領域での応力-ひずみ履歴を精度良く表現するために、ひずみ1%時のひずみ依存特性<sup>11)</sup>にフィットさせるものとした。また、GL-39.4m以深にせん断波速度 $V_s=500\text{m/sec}$ 程度の洪積層が存在し、これを基盤と考えモデル底面とした。なお、地盤と構造物の境界面については、滑り・剥離の影響は考慮していない。

## (3) 入力地震動

入力地震動は、大開地点の基盤条件を考慮して、洪積層における地中の地震波に相当すると考えられるポートアイランドのGL-83.0mにおける観測波に基づいて設定した。観測地点の地盤表層部の非線形化の影響を考慮して、時間領域にて上昇波E・下降波Fの分離処理がされている<sup>14)</sup>。図-6に露頭波としての加速度波形(2E波)を示す。これを底面粘性境界を介して入力した。

## 2.2 地盤・構造物連成系の応答状況

図-7は最大変形図である。1次のせん断変形モードが卓越しており、表層地盤が大きく変形し、自由地盤での地表面変位は20cm程度となっている。図-8は、構造物の頂底版間の層間変形と同一深度の自由地盤変形を表す変形角の時刻歴であるが、これらはほぼ一致している。このように、構造物の変形は地盤変形に追従している様子が伺える。また、構造物の層間変形角の最大値は0.0105である。層間変形角は頂底版間の水平相対変位を構造物高さで除したものである。建築物の指針<sup>15)</sup>や原子力設備の地中RC構造物の指針<sup>4)</sup>では、条件にもよるが、層構造形式の構造物の限界変形角は、0.01~0.02程度であることから、限界状態に近いことがわかる。

図-9は構造物頂版および解析モデル底面の応答加速度のフーリエスペクトルを示している。非線形解析であるが故に系の伝達関数が陽には得られないが、両フーリエスペクトルを比較することにより、この系の増幅特性をおおよそ把握することができる。これによれば、構造物頂版のスペクトルは、モデル底面(基盤面)におけるスペクトルを包絡し、1Hz前後の卓越する周波数帯での基盤面に対する頂版の増幅率も2~4程度と大きいので、当該構造物はほぼ共振状態にあると考えられる。

## 2.3 構造物の損傷状況

図-10は断面力の分布状況を示している。ラーメン構造であり、かつ、分布荷重(土圧)が作用しているため、

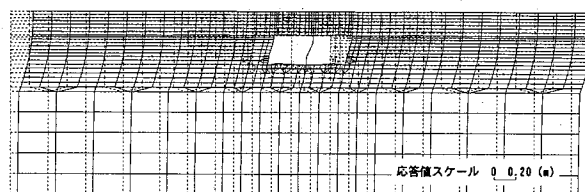


図-7 最大変形図

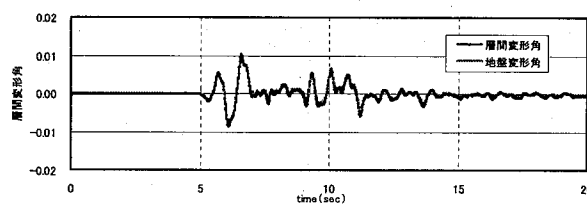


図-8 層間変形角の時刻歴

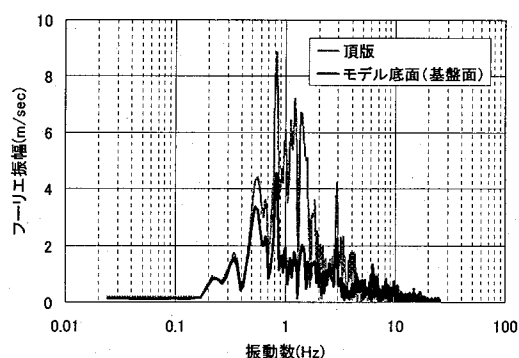


図-9 連成系の増幅特性(フーリエスペクトル)

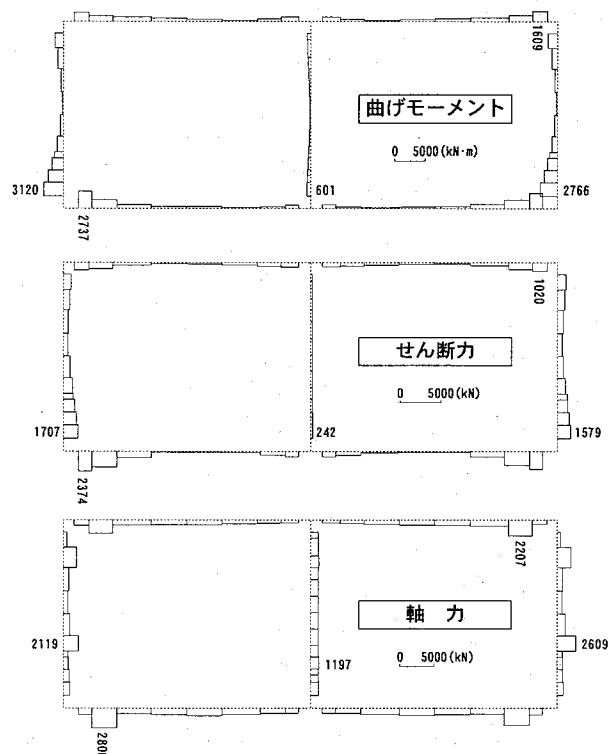


図-10 断面力の最大値分布

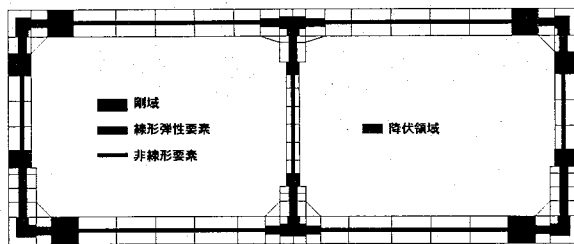


図-11 塑性ヒンジの生成状況

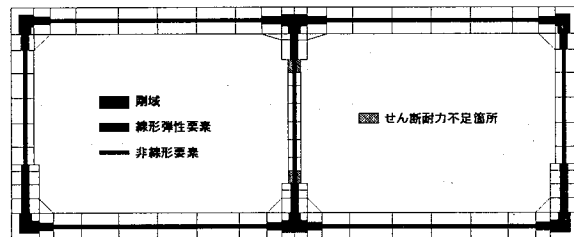


図-12 せん断耐力不足箇所

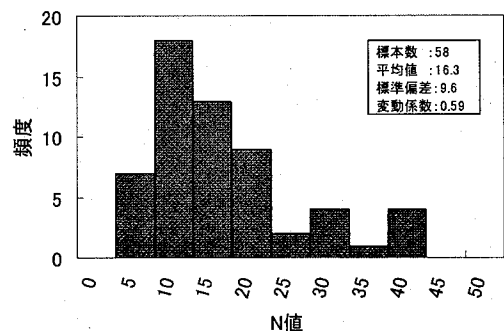
隅角部で曲げモーメントやせん断力が大きく、高次の分布形状となっている。箱型地中構造物特有の断面力分布形状と考えられる。軸力については、局部的に大きくなっている箇所が存在するが、塑性化して曲率が大きいところと対応する。これは、ファイバー要素の使用により曲げと軸力が連成すること、圧縮側と引張側で非対称な非線形特性を与えていることにより、大きな曲率に応じた軸力が発生することがその理由である。ただし、中柱については、土被りの影響でほぼ全断面が圧縮状態であり、材料の非対称性の影響は小さく、この限りではない。

図-11は部材の鉄筋降伏の状況を示している。水平部材と鉛直部材が接合するすべての隅角部で鉄筋が降伏し塑性ヒンジが形成されており、多くの箇所では曲げ耐力を超えている。構造系全体としての残存剛性は小さくなっており、図-7.8に示したように、構造物の変形が地盤変形に追従することを裏付ける結果となった。図-12は発生せん断力に対してせん断耐力が不足する箇所を示している。中柱の上下端部がそれに該当している。なお、曲げ耐力は、コンクリートの圧縮緑ひずみが $3500\mu$ となる耐力、せん断耐力はコンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕<sup>13)</sup>の耐力式により定義した。

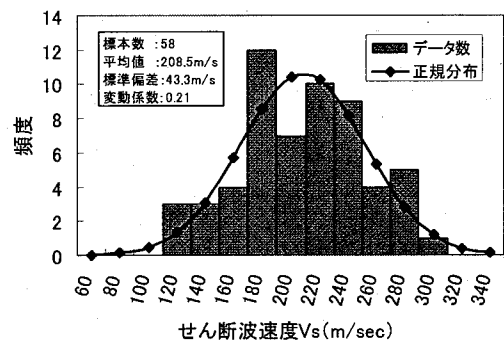
以上より、中柱は曲げおよびせん断の両方の破壊基準を超えており、曲げせん断破壊に至る可能性があることが確認された。

#### 2.4 解析モデルの妥当性

簡単な2層構造の地盤とした解析モデルではあるが、構造物の損傷状況は大開駅の被災状況を概ね再現できるものであった。また、入力地震動に対してほぼ共振状態に至っていることも解析的に明らかになった。したがって、構造物の限界状態に近い、大ひずみ・大変形領域での動的挙動を確認することが可能なモデルと考えられる。



(a) N 値の頻度分布



(b) せん断波速度  $V_s$  の頻度分布

図-13 N 値より換算したせん断波速度  $V_s$  の統計量

### 3. モンテカルロ・シミュレーション

地中構造物を地盤・構造物連成系として取り扱い、地震応答解析により応答の確率分布を推定する場合には、解析容量や解析時間等の解析技術上の制約から、地盤情報を簡素化してモデル化しているのが実情であることは先に述べた。そのため、空間的に（多次元的に）ばらつきを有する地盤が構造物にどのような影響を及ぼしているかを詳細に検討する必要がある。

そこで、極端な場合として、一様にランダムな物性分布を有する地盤モデルを想定し、多数の解析ケースについて地盤・構造物連成系の非線形地震応答解析を実施し、地中構造物の地震時挙動の確率的特性を把握するためにモンテカルロ法を適用する。

#### 3.1 材料のばらつき

地盤および構造物に関わる系のばらつきには、材料特性、寸法諸元、破壊性状、等が挙げられるが、ここでは材料特性に着目した。また、地盤材料と構造材料では、地盤材料のばらつきが地中構造物の応答に与える影響が支配的であることが、既往の研究により明らかになっている<sup>7),8)</sup>。そこで、ここでは地盤材料のばらつきのみを考慮して解析的検討を行った。

地盤のばらつきとしては、構造物の応答に直接的に影響する表層地盤(層①)のせん断波速度  $V_s$  に着目した。弾性波探査が行なわれてはいたが、 $V_s$  の確率分布を定義するには標本数が十分ではないため、原位置における N

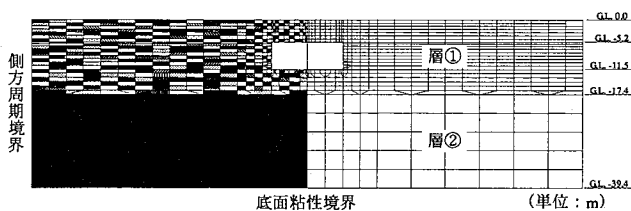


図-14 モンテカルロ法の解析モデルのイメージ

表-3 モンテカルロ法の解析ケースの概要

|                        |                           |
|------------------------|---------------------------|
| 表層地盤 (層①) の平均物性        | $V_s = 200 \text{ m/sec}$ |
| 均質物性モデル                | 1 ケース<br>(層①の物性は平均値)      |
| ランダム物性モデル              | 99 ケース<br>(層①の変動係数は 0.2)  |
| 層①のせん断波速度 $V_s$ の変動範囲* | 97 m/sec<br>~ 303 m/sec   |

※ 層別サンプリング法を用いた場合のせん断波速度  $V_s$  の下限値と上限値

値データ<sup>11)</sup>を  $V_s$  に換算し、統計処理することとした。層①は砂質土や粘性土により構成されているが、換算にあたっては、土質ごとに以下に示す式を用いた<sup>16)</sup>。

$$\begin{aligned} V_s &= 80.6N^{0.331} \quad (\text{砂質土}) \\ V_s &= 102N^{0.292} \quad (\text{粘性土}) \end{aligned} \quad (1)$$

その結果を図-13に示す。 $N$  値の変動係数は 0.59 と大きく、ばらついた結果となっているが、 $V_s$  に換算すると、変動係数は 0.21 と比較的小さい。また、分布状況は正規分布に近くなっている。なお、 $V_s$  の平均値は、 $V_s = 200 \text{ m/sec}$  程度であり、表-2の弾性波探査に基づく設定とも整合する結果となっている。

### 3.2 解析手法および解析条件

解析手法は、2.と同一とした。ばらつきを想定したのは表層部分 (層①) であり、FEM 解析モデルの各有限要素ごとに地盤物性がランダムにばらついた場合を想定した。解析モデルのイメージを図-14に示す。側方境界については、粘性境界とすると半無限の自由地盤が相対的に占める領域の割合が大きく、ランダムな物性を与えた主解析領域の応答は自由地盤の物性に大きく影響を受ける可能性があるため、ここでは周期境界を用いることとした。ちなみにこの系の応答のひずみレベルは大きく 2~3% 程度であり、地盤の履歴減衰が大きく、周期境界上で反射する水平動は減衰して系の応答に与える影響は小さいと考えられる。また、解析的にもその状況を確認している。

地盤材料のばらつきについては、3.1 に基づいて設定した。基本ケースについては、表層地盤の平均的なせん断波速度  $V_s = 200 \text{ m/sec}$  に対して、変動係数 0.2 とした。地盤剛性はせん断波速度の 2 乗に比例するので、変動係

累積分布関数  $F_X(x)$

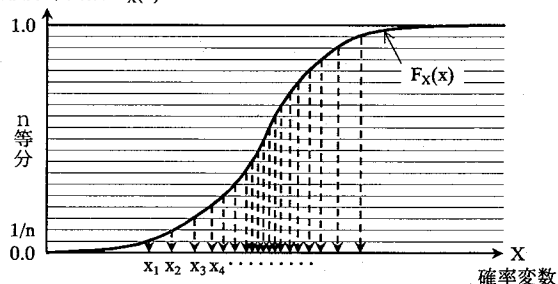


図-15 層別サンプリングの概念

数は 0.4 程度となり、地盤剛性の観点からは比較的大きなばらつきを想定していることになる。なお、ばらつきの分布形状は正規分布を仮定し、960 個の表層地盤の各要素に対してランダムな  $V_s$  を与えた。また、解析ケースは、均一な地盤モデル 1 ケースとランダムにばらつかせた地盤モデル 99 ケースの合計 100 ケースとした。解析ケースの概要を表-3に示す。

### 3.3 サンプリング手法

地中構造物の地震応答解析にモンテカルロ法を適用するために、解析容量、解析時間等の解析負荷を軽減することとした。すなわち、解析ケースを合理的に減らすべく、層別サンプリング法を用いることとした<sup>17)</sup>。この方法は、確率密度の低い分布の裾野部分の標本があまり発生しない通常のモンテカルロ法の欠点を補うため、入力変数の累積分布曲線で等確率となるように領域を分割し、それぞれの領域での代表値を標本として採用する方法である (図-15 参照)。したがって、出現しにくい裾野部分の標本も効率的に発生させることができる。ここでは、領域を 100 分割することとした。また、等確率化された各領域の代表値の抽出には一様乱数を発生させたが、これには自由度 9 の  $\chi^2$  分布を用いて頻度検定を行った<sup>18)</sup>。

## 4. 解析結果および考察

### 4.1 地盤応答のばらつき

#### (1) 地盤の加速度および変位の分布状況

図-16 は、地表面における水平加速度をすべての解析ケースについて示したものである。構造物中央を基準位置として出力位置ごとに整理している。構造物周辺では、地表面加速度は多少小さくなるものの、おおむね  $12 \sim 14 \text{ m/sec}^2$  程度の一定の値となっている。平均的な加速度の大きさに比べて加速度のばらつきは大きくはない。

この現象を定量的に把握するために、図-17には各深度における加速度の平均値分布とばらつきを示している。各深度の測線上で、各測点での平均加速度分布とその値からの変動分として  $\pm 1\sigma$  ( $\sigma$  は標準偏差) の範囲をバーチャートとして示している。平均的な加速度は、構造物

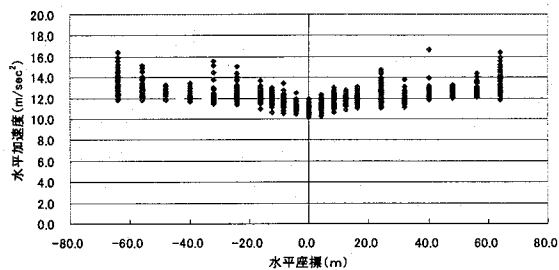


図-16 地表面における水平加速度応答

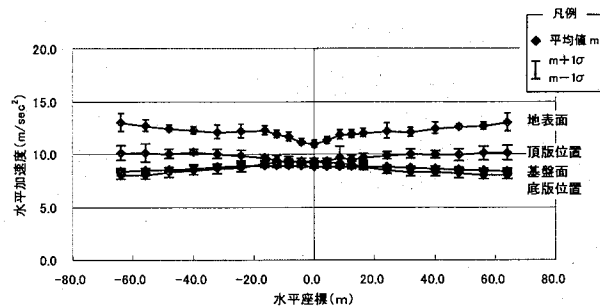


図-17 各深度における加速度の平均値分布とばらつき

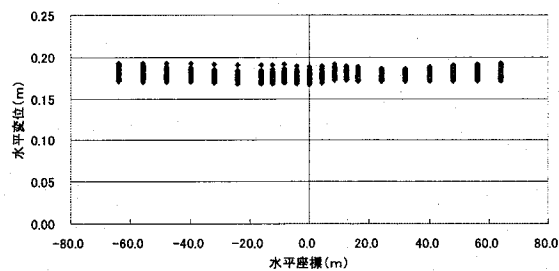


図-18 地表面における水平変位応答

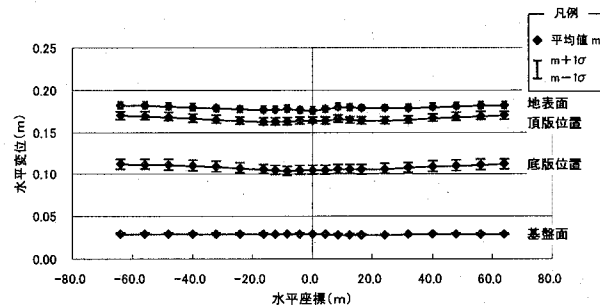
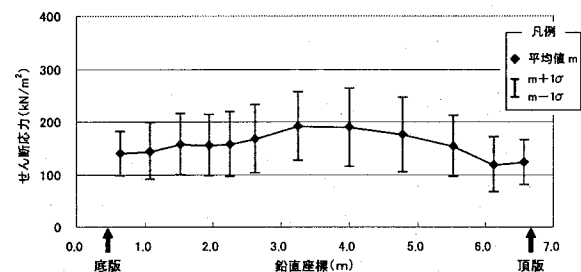
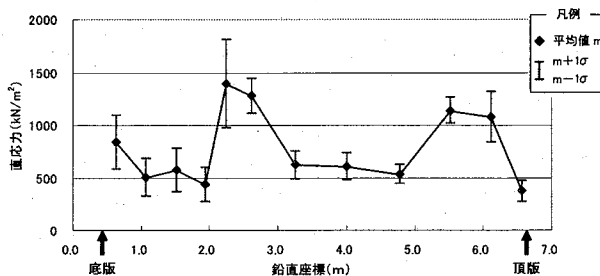


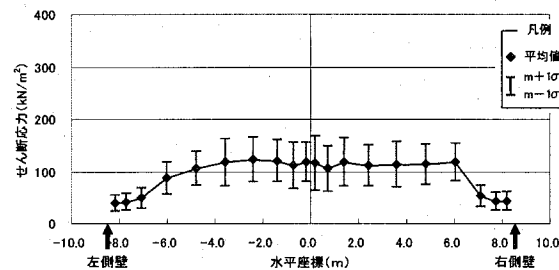
図-19 各深度における変位の平均値分布とばらつき



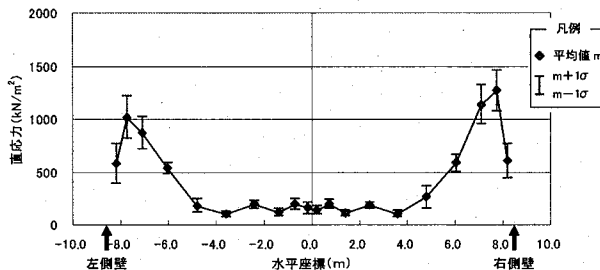
(a)側壁に作用するせん断応力



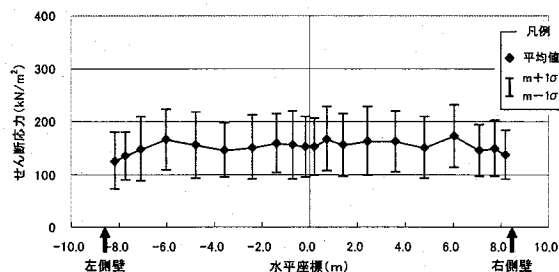
(a)側壁に作用する直応力



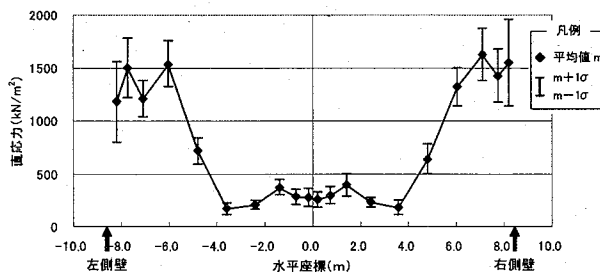
(b)頂版に作用するせん断応力



(b)頂版に作用する直応力



(c)底版に作用するせん断応力



(c)底版に作用する直応力

図-20 地盤のせん断応力の平均値分布とばらつき

図-21 地盤の直応力の平均値分布とばらつき

周辺で多少応答は乱れるものの、深度によらずほぼ一定の値を示しており、水平成層地盤特有の応答となっている。基盤面から底版位置までの加速度増幅はほとんどない。また、深度によらず、どの測点も加速度の平均値からの変動量は小さく、側方境界部分を除けば変動係数にして概ね 0.05 以内であることが明らかになった。また、地盤剛性の変動係数が 0.4 程度であることを考慮すると、地盤加速度の変動係数は 1/10 程度であり、ばらつきは小さいと考えられる。

地盤変位についても同様な整理を行った。図-18 および図-19 に結果を示す。深度の比較的浅いところではばらつきは小さく、底版深度では若干ばらつきが大きくなったが、変動係数で 0.05 前後の議論であり、基本的な傾向は地盤加速度と同様と解釈できる。また、深度によらず平均的な応答量がほぼ一定となる傾向は、地盤変位の方が強くなっている。また、地盤剛性の変動係数が 0.4 程度であることを考慮すると、地盤変位のばらつきも小さいと考えられる。

このように、地盤の加速度および変位は、水平成層地盤特有の応答となっており、地盤物性の空間的ばらつきが系全体の振動モードに大きな影響を与えるものではないと考えられる。また、地盤加速度および変位の地盤剛性の変動に対する感度は、小さいものと考えられる。

## (2) 地盤内応力の分布状況

構造物周辺の地盤内応力についても同様の整理を行った。図-20 には各部材に作用する地盤のせん断応力の平均値分布と標準偏差を示す。鉛直部材の平均値分布は部材中央付近で多少大きくなる分布となっているが、水平部材については部材端部を除き一様分布に近い。この違いは加振方向と関連するものと考えられる。しかし、せん断応力のばらつきは大きく、変動係数で 0.4 程度となっている。

図-21 には、地盤の直応力の平均値分布と標準偏差を示す。鉛直部材、水平部材ともに、部材が塑性化している箇所の近傍で直応力の平均値およびばらつきともに大きくなっている。側壁では 2.5m 付近でピークが見られるが、これはホーム直上の変断面部分であり、この部分が塑性化している。塑性化部分はどれも隣接部分に比べて、曲率が 5 倍程度に大きくなっており、変形が集中し屈曲している。これが地盤の直応力成分に影響しているものと考えられる。変動係数は 0.3~0.4 程度である。

このように、地盤内応力の変動係数は 0.4 程度であり、加速度や変位に比べて大きい。地盤剛性と直接的に関係するので、地盤剛性の変動係数とほぼ整合するものと考えられる。ただし、本論で用いた解析モデルには地盤・構造物境界面にジョイント要素を設けておらず、滑り・剥離の影響を考慮していない。実現象ではこれらの影響により、地盤・構造物間の相互作用が多少とも緩和されると考えられるので、地盤内応力の局所的な集中や変動は小さくなるものと考えられる。

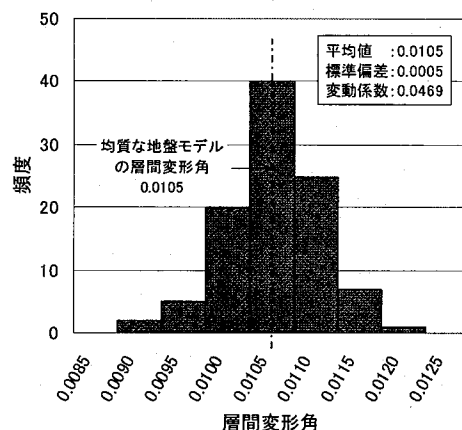


図-22 構造物の層間変位の頻度分布

## 4.2 構造物応答のばらつき

### (1) 層間変形のばらつき

図-22 には、構造物の層間変形角の頻度分布を示している。平均値は 0.0105、標準偏差は 0.0005 である。変動係数は 0.047 である。地盤剛性の変動係数に比べて 1/10 程度であり、地盤の応答変位のばらつきとほぼ同程度である。これは、図-7 や図-8 のように、構造物変形が地盤変形に追従して挙動するという現象と調和的な結果であると考えられる。このように、構造物の変形の地盤剛性の変動に対する感度は、小さいものと考えられる。

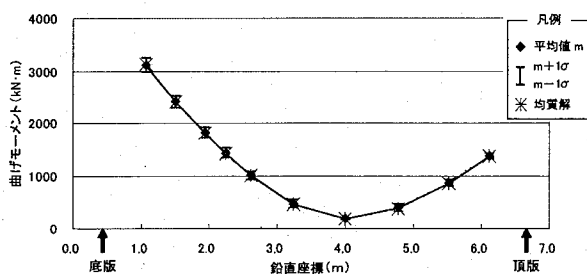
また、層間変形角の平均値 0.0105 は、均質な地盤モデルの場合の解析結果 0.0105 と一致するものである。すなわち、空間的にばらついた地盤における構造物の変位応答の平均値は、平均的な物性により均質化した地盤モデルでの変位応答と一致することを示している。

### (2) 部材断面力の分布状況

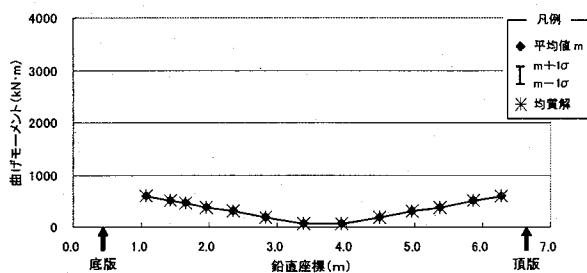
構造物の部材断面力についても地盤応答と同様の整理を行った。さらに、平均的な物性を用いて均質化した地盤モデルでの解析結果もあわせて示している。

図-23 には、各部材の曲げモーメントの平均値分布と標準偏差を示す。曲げモーメントの平均値分布は典型的な地中箱型構造物の曲げモーメント分布となっている。変動係数は概ね 0.1 未満であり、ばらつきも小さい。また、曲げモーメントの平均値分布は、平均化した均質な地盤モデルの場合の曲げモーメント分布に良く一致している。

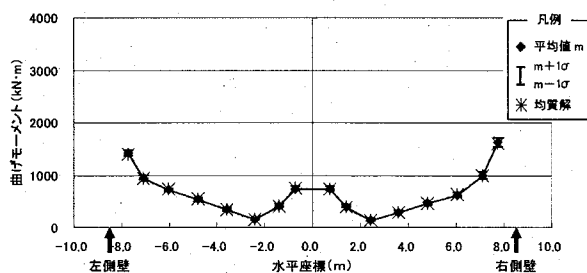
図-24 には、せん断力の平均値分布と標準偏差を示す。平均値の分布形状は地中箱型構造物特有のものである。ばらつきは、照査対象となるようなせん断力が大きい部位の変動係数は、曲げモーメントに比べて多少ばらつきが大きい程度であり、ばらつきの大きな側壁の場合でも 0.15 に満たない。また、中柱についてはほとんどばらついていない。これは、中柱が地盤に接しておらず、構造物の変形に伴い材端部分から力が伝達される部材であるにもかかわらず、中柱の上下端部が塑性化し、発生曲げ



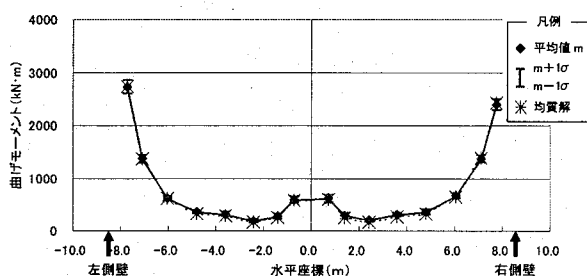
(a)側壁



(b)中柱

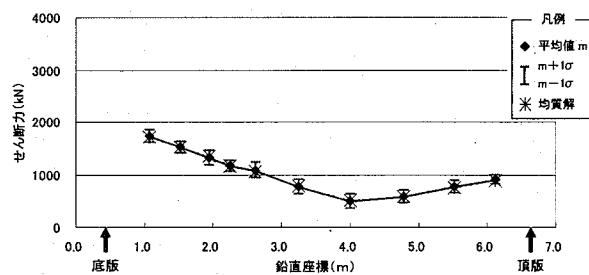


(c)頂版

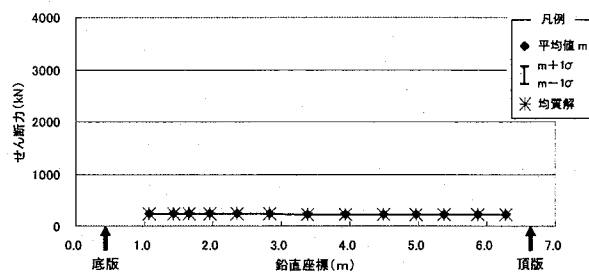


(d)底版

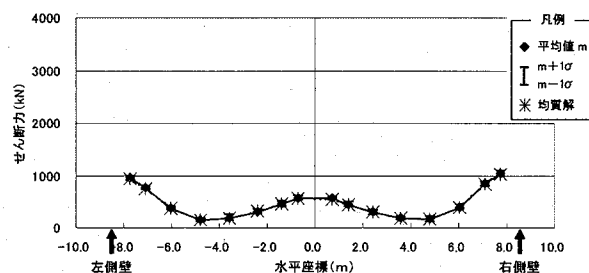
図-23 曲げモーメントの平均値分布とばらつき



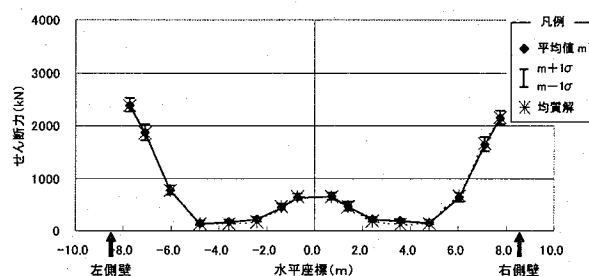
(a)側壁



(b)中柱



(c)頂版



(d)底版

図-24 せん断力の平均値分布とばらつき

モーメントが降伏モーメントで頭打ちになることで、モーメント勾配すなわちせん断力があり変動しなかったことがその理由と考えられる。また、せん断力の平均値分布は、平均化した均質な地盤モデルの場合のせん断力分布に良く一致している。

図-25には、軸力の平均値分布と標準偏差を示す。塑性化により曲率が大きくなったところに大きな軸力が発生しており、ばらつきも大きくなっている。そのような場合でも、変動係数は0.15に満たない。また、軸力の平均値分布は、平均化した均質な地盤モデルの場合の軸力

分布に良く一致している。

このように、地盤剛性の変動係数が0.4程度であり、地盤内応力の変動係数も同程度であることを考慮すると、部材断面力の変動係数はその1/3~1/4程度であり、地盤剛性の変動に対する感度は小さいと考えられる。また、部材断面力の平均値分布は、均質な地盤モデルの場合の解析結果と一致するものである。すなわち、空間的にばらついた地盤における構造物の断面力応答の平均値は、平均的な物性により均質化した地盤モデルでの断面力応答と一致することを示している。

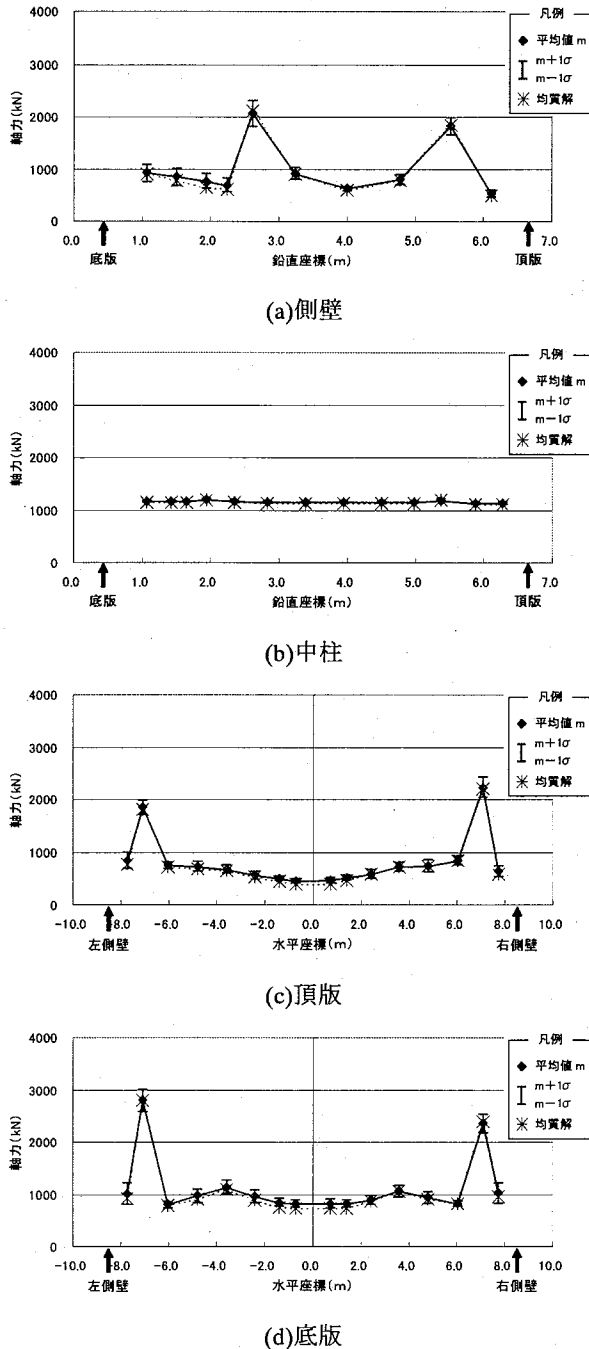


図-25 軸力の平均値分布とばらつき

## 5. おわりに

本論では、2次元的にばらつきを有する地盤中に埋設された地中RC構造物の地震時挙動とその確率的特性を把握することを目的として、兵庫県南部地震により被災した神戸高速鉄道大開駅を対象として解析モデルを作成し、多数の地盤・構造物連成系の非線形地震応答解析によるモンテカルロ・シミュレーションを実施した。その結果、ケース・スタディーの範囲内ではあるが、以下のことが明らかになった。

- ① 対象としたモデルは、実構造物の破壊形態を適切に再現できるものであり、入力地震動に対してほぼ共振状態にあることが確認された。したがって、大ひずみ・大変形領域の地中構造物の動的挙動を把握するには適切なモデルであると考えられる。
- ② 地盤の加速度や変位は構造物周辺で多少応答は乱れるものの、平均値分布は深度によらずほぼ一定の値を示しており、水平成層地盤特有の応答となっている。したがって、地盤物性の空間的ばらつきが系全体の振動モードに大きな影響を与えるものではないと考えられる。また、地盤剛性の変動係数に比べて、加速度や変位の応答のそれは1/10程度の大きさであり、地盤剛性のばらつきに対する感度は小さいと考えられる。
- ③ 地盤のせん断応力の平均値分布は水平部材の場合はほぼ一様であり、鉛直部材の場合も深さ方向に多少変化する程度である。部位によらずばらつきには程度の違いは見られない。地盤の直応力の平均値分布は、構造物の塑性化した部位の近傍で大きくなる傾向があり、ばらつきも大きい。これらの分布状況の違いは加振方向と応力の作用方向に関連するものと思われる。また、ばらつきの大きさは、地盤内応力が地盤剛性に直接的に関係するため、地盤剛性の変動係数と同程度の値となっている。
- ④ 構造物の層間変形の変動係数は、地盤剛性の変動係数に比べて1/10程度であり、地盤剛性のばらつきに対する感度は小さいと考えられる。また、地盤の変位応答のばらつきとほぼ同程度である。これは、構造物が地盤変形に追従して挙動するという現象と調和的な結果である。
- ⑤ 断面力の平均値分布は、箱型地中構造物特有の断面力分布となっている。曲げモーメントよりも、せん断力や軸力の方がばらつく傾向にある。ばらつきの程度は部材ごとに異なっているが、最もばらつく側壁の場合でも、せん断力や軸力の変動係数は地盤剛性の変動係数の1/3~1/4程度である。また、地盤に接しない部材についてはより小さくなった。
- ⑥ 空間的にばらつきを有する地盤における地中構造物の変位や断面力の応答の平均値は、平均的な物性により均質化した地盤モデルでの構造物の応答と一致することが確認された。

このように、構造物変形については、地盤の全体的な変形挙動に支配されるため、地盤物性の空間的なばらつきに対する感度は大きくはない。しかし、部材断面力については、地盤内応力の影響も強く受けるため、その影響が局所化し易い傾向にあると考えられる。とくに、塑性化が進展した部位周辺の応力状態については、境界面の滑り・剥離現象の考慮も含めて更なる検討や評価が必要と考えられる。さらに、系の剛性や塑性化程度により

ばらつきの程度が変わると考えられ、これについての検討が必要と考えられる。また、本論では、物性の空間的ばらつきの状態は一樣にランダムな状態を想定している。応答のばらつきの程度と物性のばらつきの状況についての因果関係については明らかになっていない。今後、このような課題を明らかにする必要があると考えている。

#### 謝辞

本研究においては、日本大学 中村 晋教授、(財)電力中央研究所 大友敬三上席研究員、大鳥靖樹主任研究員、宮川義範主任研究員には貴重な助言をいただいた。また、(株)ニュージェック 西村 昇主任には解析作業のご支援をいただいた。関係各位に深甚な謝意を表する次第である。

#### 参考文献

- 1) 安藤和博, 蛭沢勝三, 神野邦彦, 伊東 守: 地震動下における原子力地下構造物の損傷確率評価, 第14回材料・構造信頼性シンポジウム, pp.76~81, 1996.6.
- 2) 茂木寛之, 瀬下雄一, 柳沢 賢, 足立正信: RC 地中構造物の破壊モードに対する確率論的耐震安全性評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, 2002.7.
- 3) 吉田郁政, 原田光男, 福本幸成, 鈴木修一, 安中正: LCCに基づく地中 RC 構造物の耐震設計に関する研究, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.267-275, 2001.3.
- 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.
- 5) 土木学会: トンネルライブラリー第9号, 開削トンネルの耐震設計, 1998.10.
- 6) 宮川義範: 鉄筋コンクリート製地中構造物の非線形性を考慮した損傷度解析法に関する提案, 電力中央研究所報告 U03003, 2003.5.
- 7) 松本敏克, 澤田純男, 大鳥靖樹, 渡邊英一: 地中 RC 構造物の耐震性能評価における損傷確率の実務的評価法第5回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム (JCROSSAR 2003) 論文集 2003.11.
- 8) 松本敏克, 澤田純男, 渡邊英一: 被災した地中構造物の耐震性能に関わる損傷度評価, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.51A, pp.1553-1564, 2005.3.
- 9) 大鳥靖樹, 村神通章, 石川博之, 武田智吉: 土構造物の地震時信頼性評価システムの構築, 第5回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム (JCROSSAR 2003) 論文集, pp.691-694, 2003.11.
- 10) 中村 晋: 地盤媒質の2次元不均質性が非線形地震応答に及ぼす影響とモデル化, 第5回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム (JCROSSAR 2003) 論文集, pp.665-670, 2003.11.
- 11) 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, 1996.4.
- 12) 土木学会: コンクリート技術シリーズ第49号, 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, pp.277-299, 2002.12.
- 13) 土木学会: コンクリート標準示方書 [構造性能照査編], 2002.3.
- 14) 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, 1999.1.
- 15) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針 (案)・同解説, 1997.
- 16) Imai, T.: P-and S-wave velocities of the ground in Japan, Proc. of the 9th Int. Conf. ICSMFE, Vol.2, pp.257-260, 1977.
- 17) 日本建築学会: 応用力学シリーズ 6, 構造物系の非線形・不確定モデリング, pp.136, 1998.12.
- 18) 三根 久他: 現代応用数学講座 4, モンテカルロ法・シミュレーション, コロナ社, pp.43, 1994.7.

(2005 年 9 月 10 日受付)