

## 論文 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

茂木 寛之<sup>\*1</sup>・瀬下 雄一<sup>\*2</sup>・柳沢 賢<sup>\*3</sup>・足立 正信<sup>\*1</sup>

要旨：RC 地中構造物の実規模気中載荷実験結果に基づき，RC 地中構造物の破壊モードを考慮した確率論的耐震安全性評価を行った。この検討では，実験結果を精度良く模擬できる材料非線形を考慮した解析と地盤～構造物連成を考慮した二次元地震応答解析を行い，構造物が破壊モードに至る時の限界基盤加速度評価式を構築した。この評価式を用いて材料強度および地盤物性値のばらつきを考慮したモンテカルロシミュレーションを行い，RC 地中構造物の地震強度に対する損傷度を評価した。

キーワード：RC 地中構造物，実規模気中載荷実験，確率論，損傷度曲線

## 1. はじめに

構造物の耐震安全性を明確にするために，建物や一般土木構造物を対象とした研究が多く実施されている。一般に，地中は地上に比べ，地震動の増幅による影響を大きく受けにくい。さらに，従来，RC 地中構造物は，地震による被害報告が少なかったことから比較的安全であると考えられていた。しかし，1995年に発生した兵庫県南部地震では，RC 地中構造物である神戸高速鉄道大開駅は，中間の柱がせん断破壊して駅舎全体が大きく陥没する損傷を受けた。このことから兵庫県南部地震を契機に，RC 地中構造物に対しても耐震性能照査の重要性が指摘されるようになった<sup>1)</sup>。一方，土木学会では，兵庫県南部地震を契機として，土木構造物の耐震設計等に関する提言を行ってきており，この中で耐震性能照査を行う際，レベル1地震動の他にレベル2地震動を考慮するように提言している。現段階では，レベル2地震動は想定地震によって評価することを原則としているが，将来的には，地震危険度レベルとの関係や発生頻度の曖昧さを解決するために，確率指標を用いてレベル2地震動の地震力を設定することも有効であるとしている<sup>2)</sup>。

このように，確率論的に地震力が評価された場合，今後，構造物の耐震性能についても確率指標を用いて耐震安全性を評価することが重要になると考えられる。

これまでに，安藤ら<sup>3)</sup>は RC 地中構造物である海水管ダクト及び取水ピットを対象として耐震安全性を確率論に基づいて評価している。しかし，この確率論的耐震安全性評価は，構造物の限界値を部材のせん断・曲げ耐力で定義しており，構造全体系の破壊モードを対象としたものではない。

そこで，本検討では RC 地中構造物が崩壊に至る時の破壊モードに対して確率論的な耐震安全性の評価を試みると共に，不確定要因が構造物の耐震安全性に与える影響について検討した。

## 2. 不確定要因の抽出

構造物の耐荷性能を確率指標で表すためには，耐荷性能に関わる不確定性を抽出する必要がある。構造物の耐荷性能に影響を及ぼす不確定要因には，構造物の材料強度に関するもの，荷重に関するものおよびモデル化・システム表現に関するものが挙げられる<sup>4)</sup>。

本検討では，構造物の材料強度に関する不確

\*1 東電設計(株) 技術開発本部土木技術部(正会員)

\*2 東電設計(株) 技術開発本部土木技術部

\*3 東京電力(株) 原子力技術部土木調査グループ 工修

表-1 地盤・構造関係の不確定要因

	不確定要因	平均値	標準偏差	設定根拠
地盤関係	単位体積重量	16.8 ~ 18.2 kN/m <sup>3</sup>	0.84 ~ 0.91 kN/m <sup>3</sup>	地盤調査結果
	せん断波速度	200 ~ 600 m/s	10 ~ 120m/s	
	地盤剛性の地盤歪み依存特性	図-1 参照	0.05	
	減衰の地盤歪み依存特性	図-1 参照	2 ~ 5%	
構造物関係	部材厚	図-2 参照	0.01m	施工データ
	単位体積重量	24kN/m <sup>3</sup>	0.12kN/m <sup>3</sup>	文献 5
	コンクリート弾性係数	1386N/mm <sup>2</sup>	166N/mm <sup>2</sup>	施工データ
	コンクリート圧縮強度	31.2N/mm <sup>2</sup>	3.43N/mm <sup>2</sup>	施工データ 文献 6
	鉄筋降伏応力度	396.5N/mm <sup>2</sup>	18.5N/mm <sup>2</sup>	文献 7

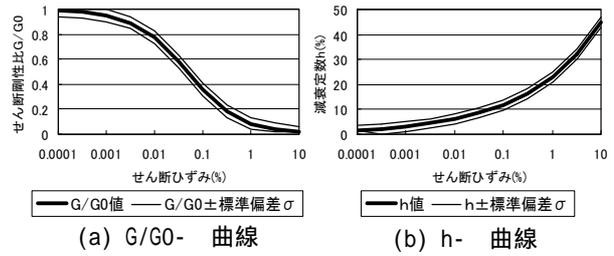


図-1 歪み依存曲線のばらつきの方

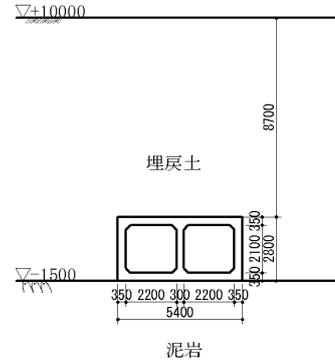


図-2 対象とした RC 地中構造物(単位:mm)

定要因と、地盤応答特性に寄与する地盤や構造物の物性値に関わる不確定要因を抽出した。これらの不確定要因の統計モデルは、地質調査結果、施工情報や文献<sup>5),6),7)</sup>に基づいて設定した。表-1 に不確定要因の抽出結果と確率量を示す。地盤構造については、2層地盤を対象に表-1 に示す物性値を確率量とした。地盤の歪み依存特性については、図-1 に示すような曲線に対するばらつきを設定した。荷重については、地震ハザードで種々の不確定要因を考慮する。モデル化・システム表現については、後述する限界基盤加速度評価式のばらつきを考慮した。施工誤差に伴う部材厚を除き、構造物の形状や配筋、地層構成等の形状については決定論的に取り扱った。

### 3. 確率論的耐震安全性評価

#### 3.1 評価方法

構造物の確率論的耐震安全性評価は、構造物の損傷度曲線と地震危険度を用いて行う。構造物の損傷度曲線は、構造物の破壊モードに至る時の限界基盤加速度の確率分布関数であり、ある地震力が作用したときの構造物の損傷度を示している。限界基盤加速度の確率密度関数を加

速度  $x$  を用いて  $f_F(x)$  と表すと、限界基盤加速度の確率分布関数  $F_F(x)$  は(1)式のように表せる。

$$F_F(x) = \int_{-\infty}^x f_F(z) dz \quad (1)$$

この損傷度曲線と、基盤入力地震動の最大加速度の確率分布関数  $f_H(x)$  である地震危険度から式(2)を用いて損傷確率  $P_f$  を算出し、この損傷確率  $P_f$  で構造物の耐震安全性を定量的に評価することができる。

$$P_f = \int_{x=0}^{\infty} F_F(x) f_H(x) dx \quad (2)$$

本検討では、RC 地中構造物の損傷度を評価するにあたり、構造物の限界状態は部材耐力の喪失ではなく構造体としての破壊モードを対象とした。破壊モードの評価は、曾良岡ら<sup>8)</sup>が行った RC 地中構造物の実規模気中載荷実験(以下、気中実験)の結果に基づいた。この気中実験は、図-2 に示す RC 地中構造物を対象として実施されており、図-3 に示すように水平荷重を頂版端部から載荷することで地震時のせん断変形を模擬している。結果として、層間変形角 20/1000 程度のせん断変形を生じさせても鉛直荷重を保持することが確認されている。本検討では図-4 に示す水平荷重のピークを構造物全体系の破壊モードとした。この水平荷重と層間変形角の関

係は、図-4 が示すように前川ら<sup>9)</sup>によって提案されているコンクリートの材料非線形を考慮したシミュレーション解析(以下、コンクリートの非線形解析)で十分再現できることから、本検討では、このシミュレーション解析と同様の解析で、コンクリートや鉄筋の材料強度と構造物の耐荷性能との関係性を評価した。

また、損傷度曲線を基盤入力地震動の最大加速度の関数として示すために、地盤～構造物の連成作用を考慮した二次元地震応答解析(以下、地盤～構造物の相互作用を考慮した連成解析)を行い、気中状態で求めた構造物の耐荷性能と基盤最大加速度との関係で評価した。これらの検討結果に基づいて、構造物の限界基盤加速度評価式を設定し、この評価式を用いて材料強度等の不確定性を考慮したモンテカルロシミュレーションを行い、RC 地中構造物の損傷度曲線を評価した。

### 3.2 検討断面

検討断面は、前述した既往の気中実験で対象とした RC 地中構造物の断面とした。この断面は深さ 196m にある基盤面での最大加速度 270gal に対して許容応力度法で設計されたものである。

### 3.3 限界基盤加速度の評価

本検討では、限界基盤加速度は、せん断波速度 700m/s 以上の地震工学上の基盤面における地震動の最大加速度とした。想定地震により後述するスペクトル形状の地震動があることを前提として、限界基盤加速度は、気中実験のシミュレーションを行うコンクリートの非線形解析と地盤～構造物の相互作用を考慮した連成解析から評価している。両者の解析結果からコンクリートや鉄筋の材料強度と基盤加速度を関係づけるために、構造物に作用するせん断力を用いた。このせん断力は、水平力作用時に側壁と隔壁に生じるせん断力の総和とした。

まず、コンクリートの非線形解析では、材料強度をパラメータとした気中実験の解析を行い、

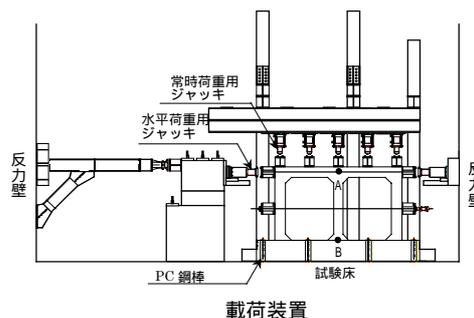


図-3 既往の実規模載荷実験装置<sup>8)</sup>

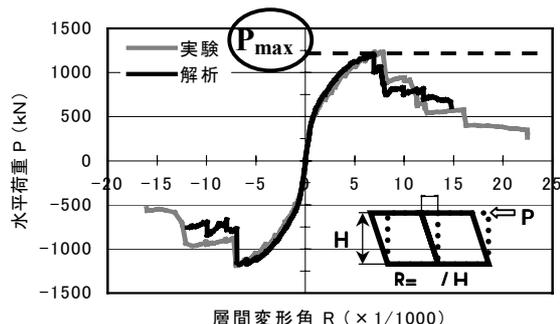


図-4 気中実験及びコンクリートの非線形解析の水平荷重-変位履歴<sup>8)</sup>

構造物の限界せん断力と材料強度の関係を求めた。なお、構造物の限界せん断力は、気中実験の解析で得られる最大荷重点に相当するものである。構造物の限界せん断力と材料強度の関係は、いくつかの関数形のうち、材料強度の指数関数が最も誤差が小さくなることから式(3)のように構造物の限界せん断力と材料強度の関係を評価した。

$$P_u = a_1 \times C^{a_2} + a_3 \times Y^{a_4} + \varepsilon_{a_0} \quad (3)$$

ここに、 $P_u$ (kN/m)は構造物の限界せん断力、 $C$ (N/mm<sup>2</sup>)と  $Y$ (N/mm<sup>2</sup>)はそれぞれコンクリート圧縮強度と鉄筋の降伏応力である。係数  $a_1, a_2, a_3, a_4$  は、 $P_u$  の解析結果から最小二乗法より算定した。 $\varepsilon_{a_0}$  は回帰式に対する誤差を表している。上式のうち、確率変数は  $C$  と  $Y$  と  $\varepsilon_{a_0}$  となる。図-5 に解析値  $P_u$  と回帰曲線の比較を示す。

次に、地盤～構造物の相互作用を考慮した連成解析を行った。この解析で用いた構造物の剛性は、終局限界状態時での構造物の損傷による剛性低下を考慮した。この剛性は、地中構造物の塑性変形能に着目し、最大荷重点以降軟化しないものと考え、気中実験で得られた終局変形

レベルである層間変形角 20/1000 時点での割線剛性で評価した。地盤の歪依存性は等価線形で考慮した。解析は、基盤入力加速度波形の最大値をパラメータとして、基盤加速度と構造物に作用するせん断力の関係を求めると共に、地震応答特性に寄与する各不確定要因が、構造物作用せん断力に及ぼす感度を検討した。構造物作用せん断力と基盤加速度の関係は、いくつかの関数形のうち、基盤加速度の指数関数が最も誤差が小さくなることから式(4)のように構造物作用せん断力～基盤加速度の関係を評価した。

$$P = b_1 \times A^{b_2} + \varepsilon_{b_0} + \varepsilon_{b_1} + \varepsilon_{b_2} \quad (4)$$

ここに、 $P$ (kN/m)は構造物の作用せん断力、 $A$ (gal)は基盤加速度である。 $b_0$ は回帰式に対する誤差を表している。 $b_1$ は埋戻土のせん断波速度のばらつきによる $P$ のばらつきを、 $b_2$ は埋戻土せん断波速度以外の不確定要因のばらつきによる $P$ のばらつきを表す。埋戻土のせん断波速度のばらつきは、構造物の応答に与える影響が大きいとのことから、埋戻土のせん断波速度のばらつきは他要因と区分して評価している。図-6に解析値 $P$ と回帰曲線の比較を示す。

式(3)、式(4)を用いて、構造物作用せん断力 $P$ が限界せん断力 $P_u$ に達した時の限界基盤加速度 $A_u$ (gal)の評価式を構築した。評価式を式(5)に示す。

$$A_u = \left\{ \left[ a_1 \times C^{a_2} + a_3 \times Y^{a_4} + \varepsilon_{a_0} - (\varepsilon_{b_0} + \varepsilon_{b_1} + \varepsilon_{b_2}) \right] / b_1 \right\}^{1/b_2} \quad (5)$$

### 3.4 RC 地中構造物の損傷度曲線

式(5)の限界基盤加速度評価式を用いてモンテカルロシミュレーションを行った。モンテカルロシミュレーションで考慮する確率変数は、 $C$ 、 $Y$ 、 $a_0$ 、 $b_0$ 、 $b_1$ 、 $b_2$ であり、これらの確率変数は、統計的に独立であると仮定してそれぞれ正規分布を仮定した。試行回数は100000回とした。モンテカルロシミュレシ

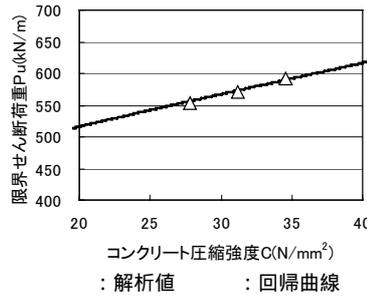


図-5 解析値  $P_u$  と回帰曲線 ( $Y$ ,  $a_0$ :平均値)の比較

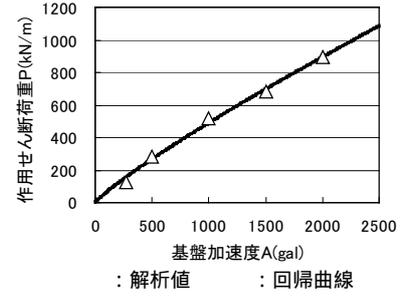


図-6 解析値  $P$  と回帰曲線 ( $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ :平均値)の比較

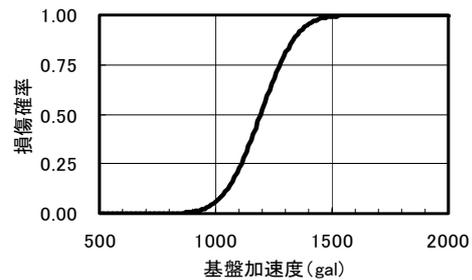


図-7 RC 地中構造物の損傷度曲線

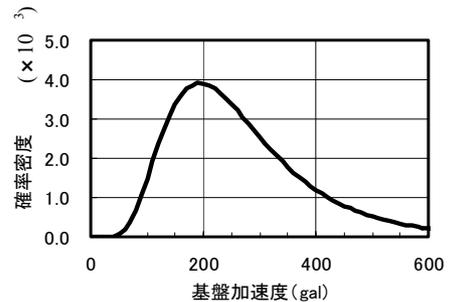


図-8 地震動の確率密度関数

ンで得られた限界基盤加速度の平均値は1196gal、標準偏差は123galとなった。この平均値は、材料と地盤の平均的な物性値を用いて入力地震動の振幅をパラメータとしたコンクリートの非線形解析による地盤～構造物連成解析で、限界状態に達する入力加速度レベルと同程度であった。限界基盤加速度の確率密度関数を積分した結果、図-7に示すようにRC地中構造物の損傷度曲線を得ることができた。

### 3.5 RC 地中構造物の耐震安全性

RC地中構造物の耐震安全性を評価するために、図-8に示すような地震動のばらつきを想定した。RC地中構造物の設計用地震動は270galであることから、地震動の確率密度関数の平均値を270galとした。そして、変動係数はこれまでの地震観測記録に基づいて0.5とし、対数正

規分布に従うものとしている。図-7の損傷度曲線より、式(2)を用いてRC地中構造物の損傷確率  $P_f$  を算出した。算出結果は、 $5.18 \times 10^{-4}$  となった。一般的に交通事故による年間死亡率は日本の場合で  $1 \times 10^{-4}$  程度であり、算出結果は同程度となっている。

#### 4. 不確定要因による耐震安全性への影響

##### 4.1 材料強度のばらつきによる影響評価

コンクリートや鉄筋の材料強度のばらつきが、構造物の損傷度曲線や損傷確率  $P_f$  にどのような影響を与えるのか検討した。3章の検討で用いた材料強度のばらつきをもとに、標準偏差を2倍とした場合(ケース1)と1/2倍した場合(ケース2)を想定し、構造物の損傷度曲線と損傷確率  $P_f$  を試算した。損傷度曲線の試算は、式(5)を用いたモンテカルロシミュレーションで行った。両ケースの損傷度曲線を図-9に示す。同図より、材料強度を大きくばらつかせても損傷度曲線は大きくは変わらない。次に、図-8に示す地震確率分布を用いて損傷確率  $P_f$  を試算した結果を表-2に示す。同表が示すように、材料強度のばらつきを1/2~2倍に変化させても、損傷確率  $P_f$  のオーダー  $10^{-4}$  は変わらない。

##### 4.2 地震動最大振幅のばらつきの影響評価

地震動最大振幅のばらつきの違いがRC地中構造物の耐震安全性にどのような影響を与えるのか検討した。損傷度曲線は図-7を用いた。地震動のばらつきを評価する最大基盤加速度の確率密度関数の平均値は、270galとした。変動係数は上記までの検討で用いた0.5の半分の値を用いた。耐震安全性評価結果を表-3に示す。同表が示すように、基盤加速度のばらつきが半分になると、損傷確率  $P_f$  は  $5.18 \times 10^{-4}$  から  $2.00 \times 10^{-8}$  と大きく変化する。想定する地震動のばらつきがRC地中構造物の耐震安全性評価結果に大きく影響することが確認できる。

##### 4.3 検討地震波形の違いによる影響評価

上記の耐震安全性評価に関する検討は、図-10

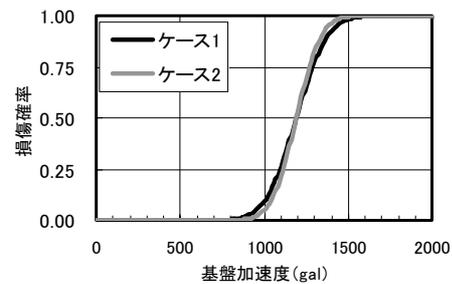


図-9 損傷度曲線の比較

表-2 損傷確率の比較

	3章の検討で用いた材料強度の標準偏差に対して	損傷確率 $P_f$
ケース1	2倍	$5.94 \times 10^{-4}$
ケース2	1/2倍	$4.97 \times 10^{-4}$
参考	1倍(基本ケース)	$5.18 \times 10^{-4}$

表-3 損傷確率の比較

基盤加速度レベル	変動係数	損傷確率 $P_f$
270gal	0.5	$5.18 \times 10^{-4}$
	0.25	$2.00 \times 10^{-8}$

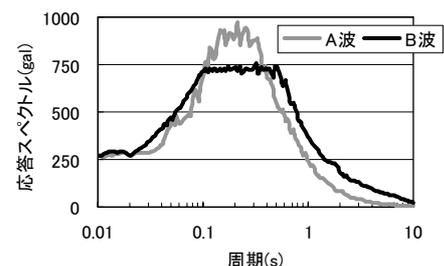


図-10 応答スペクトルの比較  
(max=270gal, h=5%)

に示すA波の応答スペクトルを用いて行った。しかし、地震動の最大加速度が等しくても作用地震力の周波数特性が異なれば地盤の応答値は変化する。その影響により地盤・構造物の相互作用が変化し、よって限界基盤加速度が変わると考えられる。そこで、地震波形の違いが損傷度曲線と耐震安全性評価結果にどのような影響を与えるのか検討した。新たに用いた地震波形は、A波とは0.1s~1.0sで異なる周期特性を示す図-10の応答スペクトルのB波とした。これらの地震動を用いて算出した損傷度曲線の比較を図-11に示す。B波がA波より小さい限界基盤加速度を示すのは、図-12に示す埋戻土の固有周期0.6s~0.7sの範囲で図-10に示すようにB波の応答スペクトルがA波よりも大きく、そ

の結果構造物に作用するせん断力が大きくなるためである。図-11 の損傷度曲線を用いて耐震安全性評価結果を表-4 に示す。地震波形が違っていると地震の応答特性が変わり、その影響により限界基盤加速度が大きく変わるため損傷確率  $P_f$  も  $5.18 \times 10^{-4}$  から  $1.73 \times 10^{-2}$  と大きく変わることがわかった。応答スペクトルの周波数特性によっては、耐震安全性評価結果に与える影響は大きいと考えられる。

### 5. まとめ

本研究では、構造物全体系の破壊モードを対象として、限界基盤加速度の評価式を構築すると共に、この評価式を用いて、材料強度のばらつきや評価式の誤差を考慮したモンテカルロシミュレーションを行い構造物の損傷度曲線を求めた。そして、この損傷度曲線と地震危険度より算出した損傷確率  $P_f$  で RC 地中構造物の耐震安全性評価結果を確率指標で定量的に評価した。

本検討で得られた知見は以下の通りである。

地震動のばらつきとして設計入力地震動の最大加速度 270gal を平均値とし、そのばらつきを変動係数 0.5 として、RC 地中構造物の耐震安全性評価を行った結果、 $10^{-4}$  オーダーの損傷確率  $P_f$  が得られた。

RC 地中構造物の損傷確率  $P_f$  は、材料物性のばらつきを 1/2 ~ 2 倍に変化させても、 $10^{-4}$  のオーダーは大きくは変わらない。

想定した地震動最大振幅のばらつきを半分に変えた場合、損傷確率  $P_f$  のオーダーは大幅に小さくなる。想定する地震動のばらつきが RC 地中構造物の耐震安全性に大きく影響することが確認できる。

入力地震動の最大値が同じでも地震波形違いにより損傷確率  $P_f$  のオーダーは大きくなり、応答スペクトルの周波数特性によっては、耐震安全性に与える影響は大きいと考えられる。

本検討で扱った地盤 ~ 構造物の相互作用を考

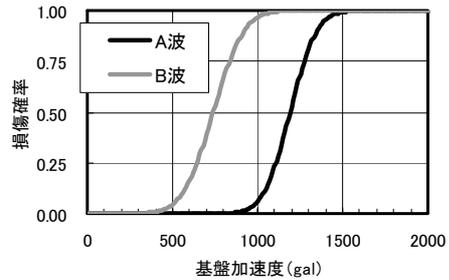


図-11 損傷度曲線の比較

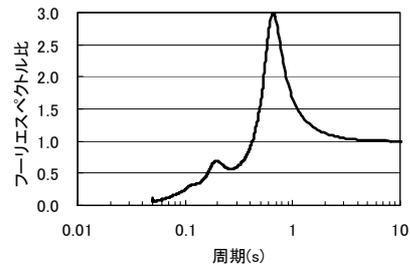


図-12 埋戻土の伝達関数

表-4 損傷確率の比較

波形	損傷確率 $P_f$
A 波	$5.18 \times 10^{-4}$
B 波	$1.73 \times 10^{-2}$

慮した連成解析では等価線形を用いており、大きな地震動に対しては地盤歪みが 1% を越えている。このことから、大きな地震動に対してはこの地盤の非線形性をより精度よく表現する解析を用いて、RC 地中構造物の耐震安全性評価を行う必要があると考えている。また、今後は、構造形状、土被りの影響等をパラメータとし検討を行い、これらの影響が RC 地中構造物の耐震安全性に与える影響についても検討していきたい。

### 参考文献

- 1) 濱田政則：阪神・淡路大震災の教訓，理工ジャーナル，早稲田大学，1996
- 2) 土木学会：土木構造物の耐震設計等に関する第 3 次提言と解説，2000.6
- 3) 安藤和博，蛭沢勝三他：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，pp76 ~ 81，1996.6
- 4) 星谷勝，石井清：構造物の信頼性設計法，鹿島出版会，1997
- 5) 土質工学会：土質データのばらつきと設計，pp69，1988
- 6) 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・同解説，1999
- 7) 土木学会：コンクリートライブラリー52 号，1983
- 8) 曾良岡宏他：地中ボックスカルバートの変形性能に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，第 23 巻，第 3 号，pp1123 ~ 1128，2001
- 9) 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