

論文 耐震性能概略評価式を用いた RC 地中構造物の損傷確率評価

茂木 寛之^{*1}・井出 周治^{*2}・曾良岡 宏^{*3}・瀬下 雄一^{*4}

要旨：地震動に対する RC 地中構造物の損傷確率評価は、地盤～構造物連成の非線形解析を実施して評価するのが望ましいが、多大な時間と費用を要する。そこで、本検討では、RC 地中構造物の限界変形角および応答変形角の概略評価式を用いて、構造物に地震力が作用した場合の損傷度を評価する手法を提案した。また、本手法により、RC 地中構造物の地震時損傷確率を設計上同等もしくは安全側のレベルで評価できることを確認した。

キーワード：RC 地中構造物、損傷度曲線、耐震性能概略評価式、モンテカルロ法

1. はじめに

原子力施設のように極めて高い信頼性が要求される構造物では、決定論的に設定した設計用基準地震動を上回る地震動の可能性を考慮して、確率論的手法により構造物の地震時信頼性評価手法を整備することが必要であると考えられている¹⁾。

地震による確率論的安全評価²⁾（以下、地震 PSA）は、評価対象の立地点において、どの程度の強さの地震動がどの程度の頻度で発生するかを評価する「地震ハザード評価」、それぞれの強さの地震動に対して、構造物の応答挙動のばらつきや耐力のばらつき等を考慮して損傷確率を評価する「損傷確率評価」、さらに、これらの解析結果に基づき、地震による構造物の損傷確率から事故シナリオの発生確率・頻度やその影響を分析し、対象構造物の耐震安全性を定量的に評価する「事故シーケンス評価」から構成される。このうち、「損傷確率評価」について、筆者ら³⁾は、RC 地中構造物を対象に、地盤～構造物連成の非線形解析を用いた損傷確率評価方法（以下、詳細評価法と呼ぶ）を提案しているが、その計算には多大な時間と費用を要していた。今後、地震 PSA をより実用的なものとしていく

ために、評価の一環である RC 地中構造物の損傷確率評価をより簡易に実施できるようにしていくことは、非常に有用であると考えられる。

そこで、本検討では、稲垣ら⁴⁾が提案した RC 地中構造物の耐震性能概略評価式を用いて、簡易的にかつ実用的に十分な精度をもって、損傷確率を評価する手法（以下、簡易評価法と呼ぶ）を提案し、その適用性を評価するとともに、不確定要因が構造物の損傷確率に与える影響について検討した。

2. 損傷確率の簡易評価法の提案

2.1 簡易評価法の概要

地震動に対する RC 地中構造物の損傷確率評価は、構造物の材料強度や地盤物性値のばらつきを考慮した地盤～構造物連成の非線形解析によるモンテカルロシミュレーションを実施して評価するのが最も精度が高く望ましいと考えられる。しかしながら、地盤～構造物連成の非線形解析は、モデル作成の手間と多大な計算時間を要するため、モンテカルロシミュレーションのような計算回数を必要とする評価手法への適用は難しい。そこで、本検討では、図-1 に示す簡易評価法を提案する。作業の簡略化と計算時

*1 東電設計(株) 土木本部耐震技術部 (正会員)

*2 東電設計(株) 土木本部都市土木部 工修

*3 東京電力(株) 原子力技術・品質安全部土木グループ 工修

*4 東電設計(株) 土木本部耐震技術部 GM (正会員)

間の短縮のため、現実的耐力・応答評価に、稲垣らが提案した耐震性能概略評価式を用いることとする。稲垣らが提案した RC 地中構造物の耐震性能評価法は、構造諸元、地盤条件、入力地震動を基に、地盤～構造物連成の非線形解析などの煩雑な数値解析を実施することなく構造物の限界変形、限界耐力、および地震時の応答変形を推定し、両者を比較することで耐震安全性を評価する簡易法である。ただし、構造物全体系の性能を直接評価しているわけではなく、耐震性能上重要となる鉛直部材にのみ着目し、それらの性能をもって構造物全体系の性能に代替している。

このうち、限界変形角・限界耐力を算出する概略評価式は、表-1 に示すように RC 地中構造物の限界状態を明確にした上で、信頼度の高い非線形有限要素解析⁵⁾を用いて部材の変形性能に影響を及ぼす因子によるパラメータスタディを実施し、それらの解析結果に基づいて作成された精度の高い近似式である。この評価式は概略評価式でありながら、構造物の破壊モードをわけて評価することができる。評価式の一例として、せん断補強筋無(補強鉄筋比 0.15%未満に適用)の場合を図-2, 3 に示す。図中のプロット点は、前述したパラメータスタディの解析結果であり、これらを回帰することで概略評価式が得られている。また、これらを基に、式のばらつきの評価も可能である。

応答変形角を算出する概略評価式は、図-4 に示すような応答変位法⁶⁾の概念に基づき、地盤～構造物連成の非線形解析を実施することなく、自由地盤の応答変形角 δ_g に変位伝達係数 α_r を乗じることによって構造物の応答変形角 δ_s を評価するものである(式(1))。

$$\delta_s = \alpha_r \times \delta_g \quad (1)$$

変位伝達係数 α_r は、地盤と構造物のせん断剛性比(G_g/G_s)などによって生じる自由地盤変形と構造物変形の差を修正する係数で、せん断剛性比の他、構造形状および地盤条件から算定される。ここで、 δ_g と G_g は一次元地震応答解析よ

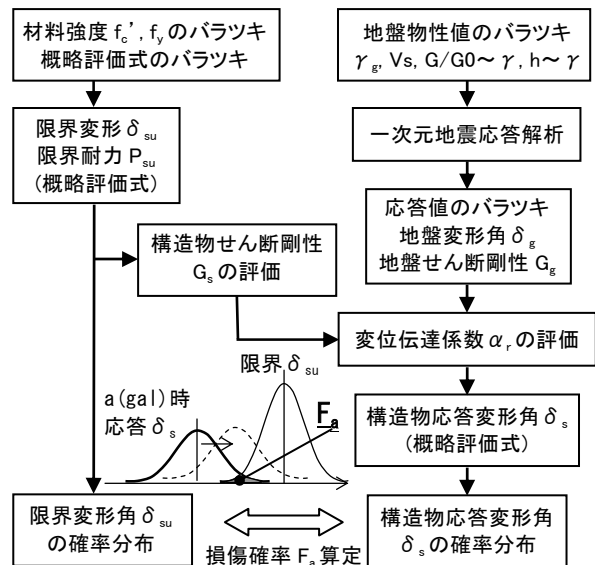
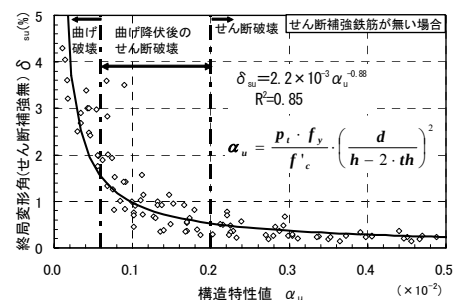


図-1 簡易評価法のフロー

表-1 RC 地中構造物の限界状態

	限界状態
曲げ破壊	圧縮側コンクリートのひずみが急増して荷重が低下(圧縮ひずみが 10,000 μ)
せん断破壊	せん断ひずみが急増し、かつ、水平荷重が低下



(p_t : 鉄筋率 (%), f_y : 鉄筋降伏点強度, f'_c : コンクリート圧縮強度, 有効高: d (mm), 高さ: h (mm), ハンチ寸法: th (mm))

図-2 せん断補強筋無の限界変形角概略評価式

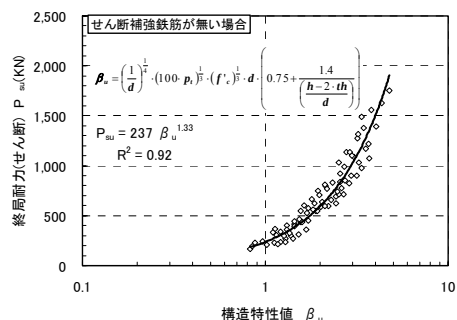


図-3 せん断補強筋無の限界耐力概略評価式

り、また、 G_s は前述した限界変形角と限界耐力の概略評価式を用いて設定する。この評価式は、地盤～構造物連成による非線形解析結果とほぼ同一の精度で応答変形角を推定することができる⁴⁾。

前述のとおり、稲垣らの耐震性能概略評価式

は近似式としての精度が高く、曲げ破壊とせん断破壊の両者に適用可能であること、また、後述する地盤・構造物の不確定要因を変数としても十分評価できることから、本検討では、稲垣らの耐震性能概略評価式を現実的耐力・応答を評価する手法として選定した。

簡易評価法の流れとして、まず、限界変形角・限界耐力の概略評価式に対し、コンクリートや鉄筋の材料強度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実施し、構造物の限界変形角の確率分布を算出する。次に、基盤加速度ごとに、地盤物性値のばらつきを考慮した一次元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、得られた自由地盤の応答結果と応答変形角の概略評価式から構造物の応答変形角の確率分布を算出する。ここで、基盤加速度とは、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のことである。

モンテカルロシミュレーションの試行回数は、一般的に、損傷確率 10^{-m} 単位の要求精度に対して 10^{m+1} オーダー回数が目安とされている⁶⁾。本検討では、損傷確率の目標精度を 10^{-2} オーダーとして、試行回数を 1000 回とした。

各基盤加速度レベルで算出された構造物の応答変形角がその限界変形角を上回る場合の条件付き確率、すなわち、対象構造物の損傷確率は限界変形角と応答変形角の中央値と対数標準偏差から式(2)を用いて算出する。本検討では、各基盤加速度レベルで算出した損傷確率が対数正規分布であると仮定している。

$$F_a = \phi \left[-\ln \left(\frac{\bar{R}}{\bar{S}} \right) / \sqrt{\varsigma_R^2 + \varsigma_S^2} \right] \quad (2)$$

ここに、 F_a : 損傷確率

$\phi(\)$: 標準正規確率分布関数

$\bar{R}$: 限界変形角の中央値

ς_R : 限界変形角の対数標準偏差

$\bar{S}$: 応答変形角の中央値

ς_S : 応答変形角の対数標準偏差

なお、本検討では、稲垣らの研究にならい、水

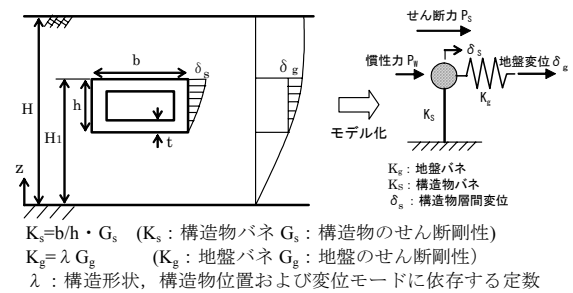


図-4 応答変位法 の概念

表-2 地盤・構造関係の不確定要因

	不確定要因	平均値	対数標準偏差	設定根拠
地盤関係	単位体積重量: γ_s	16.8~18.2 kN/m ³	0.05	地盤調査結果
	せん断波速度: Vs	200~600m/s	0.10~0.20	
	地盤剛性の地盤歪み依存特性: $G/G_0 \sim \gamma$	回帰平均曲線	(回帰上限・下限曲線)	
	減衰の地盤歪み依存特性: $h \sim \gamma$	回帰平均曲線	(回帰上限・下限曲線)	
構造物関係	部材厚	図-5 構造物壁厚・底版厚	0.0	施工データ ⁸⁾ 重要度
	単位体積重量: γ_s	24kN/m ³	0.005	試験結果 ⁹⁾
	コンクリート圧縮強度: f_c'	31.2~35.3 N/mm ²	0.11	施工データ 試験結果 ¹⁰⁾
	鉄筋降伏点強度: f_y	396.5N/mm ²	0.0467	試験結果 ¹¹⁾

平部材は鉛直部材に荷重を伝達する機能のみを有すると考え、鉛直部材のみに着目して RC 地中構造物の耐震性能を評価する。

2.2 不確定要因の抽出

構造物の損傷確率評価を実施するためには、構造物の耐荷性能に影響する不確定要因を抽出する必要がある。不確定要因としては、(a)構造物あるいは部材強度に関するもの、(b)荷重に関するもの、(c)モデル化・システム表現に関するものが挙げられる⁷⁾。

本検討では、(a)の構造物に関する不確定要因の他、対象が地中構造物であることから、地盤応答特性に寄与する地盤物性に関する不確定要因も抽出した。構造物の形状や配筋、地層構成は、決定論的に取り扱った。ただし、部材厚は施工誤差によるばらつきがあると考えられることから、部材厚は確率量とした。各特性値の平均と標準偏差は、地盤調査結果、施工情報や文献⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾に基づいて設定し、これらの特性値は対数正規分布に従うものとした。表-2 に不確定要因の抽出結果と確率量を示す。地盤の歪み依存特性のばらつきについては、動的せん断試験

表-3 簡易・詳細評価法の比較

	簡易評価法	詳細評価法
入力地震動	地震危険度解析結果より作成	
不確定要因	地盤・構造物関係より抽出	
確率量	現実的な値で評価	
限界状態	部材レベルの破壊	構造系の崩壊
耐力の評価方法	概略評価式	2次元材料非線形 FEM 解析
応答の評価方法	1次元地震応答解析・概略評価式	2次元地震応答 FEM 解析

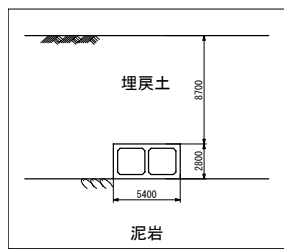


図-5 せん断破壊型構造物(せん断補強筋無)

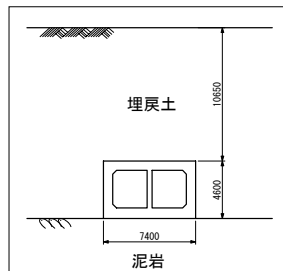


図-6 曲げ破壊型構造物(せん断補強筋有)

結果より得られた地盤剛性・減衰の回帰曲線の上限・下限を平均+標準偏差、平均-標準偏差とした。(b)の地震荷重については、地震ハザード評価の段階で種々の不確定要因を考慮していることから、本検討では地震荷重のばらつきは考慮しなかった。(c)については、RC 地中構造物の限界変形角・限界耐力の耐震性能概略評価式のばらつきを考慮した。

3. 簡易評価法の詳細評価法との比較

3.1 簡易評価法と詳細評価法の違い

簡易・詳細評価法の比較を表-3に示す。簡易評価法は、鉛直一部材での破壊を限界状態としているのに対し、詳細評価法は、地震後複数の鉛直部材のせん断破壊により上載荷重を保持できない状態を構造物全体系の崩壊と定義し、その状態を限界状態としていることから、簡易評価法は詳細評価法に比べ安全側の評価となる。また、簡易評価法における耐力・応答の評価は、概略評価式や一次元地震応答解析を用いて実施するのに対し、詳細評価法では、地盤～構造物連成の非線形解析および材料非線形を考慮した構造物のプッシュオーバー解析を実施しなければならない。これにより、簡易評価法の作業・計算時間は詳細評価法に比べて大幅に短縮され

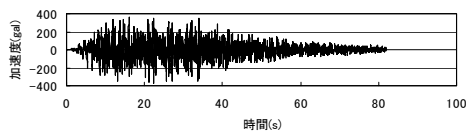
ることになる。

3.2 評価結果の比較

提案した簡易評価法を用いて、2.2で抽出した構造物・地盤関係の不確定要因のばらつきを考慮したRC地中構造物の損傷確率評価を行い、詳細評価法による結果と比較した。対象とした構造物は、せん断補強筋が配置されておらず破壊モードがせん断破壊型となる構造物(図-5)と十分なせん断補強筋により曲げ破壊型となる構造物(図-6)の2種類とした。検討に用いた入力地震動は、地震ハザード評価で得られた一様ハザードスペクトルを基に作成した模擬地震動で、図-7に示すとおりである。簡易・詳細評価法により算定した損傷度曲線の比較を、せん断破壊型構造物については図-8に、曲げ破壊型構造物については図-9に示す。損傷度曲線とは、構造物が限界状態に至る時の基盤加速度(限界基盤加速度)の累積確率密度分布であり、ある地震力が作用した時の構造物の損傷確率を示す曲線である。横軸は、詳細評価法、簡易評価法それぞれの限界基盤加速度を、簡易評価法で算出した限界基盤加速度中央値(損傷確率50%時の基盤加速度)で基準化した数値としている。

基準化した限界基盤加速度中央値で比較すると、せん断破壊型では両者は約1.76倍異なっているが、曲げ破壊型では同程度となっている。せん断破壊型の評価で両者が異なるのは、簡易評価法で着目する鉛直一部材のせん断破壊が、必ずしも詳細評価法で着目する複数の鉛直部材のせん断破壊による構造物全体系の崩壊に一致するわけではないからである。一方、今回の曲げ破壊型構造物で詳細評価法と簡易評価法が一致したのは、簡易評価法が想定する曲げ破壊型構造物の限界状態、すなわち、鉛直部材の終局変形時(≒圧縮ひずみ10000 μ)が、構造物全体系の終局変形時と一致していたことを表している。

ばらつき β_r (損傷度曲線の傾き)は、せん断破壊型では両者ともに同程度となっているが、曲げ破壊型では簡易評価法が詳細評価法に比べて



図－7 検討に用いた入力地震動

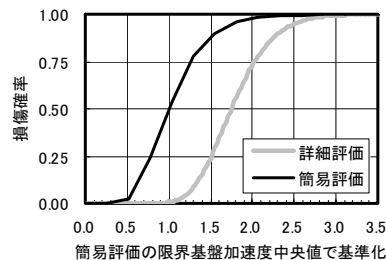
大きくくなっている。本検討では、変位伝達係数を算出する際、地盤と構造物のせん断剛性比 (G_g/G_s) を用い

ており、 G_s は前述した限界変形角・限界耐力の概略評価式を用いて設定している。この時、評価式の不確実さとして、せん断補強筋の有無による限界耐力のばらつきを対数標準偏差としてそれぞれ 2.452 と 1.582 で考慮しているが、せん断補強筋有のばらつきは、無い場合に比べ 1.55 倍大きくくなっている。評価式のばらつきは、変位伝達係数、構造物の応答変形角のばらつきに影響を及ぼす(4.3 で検討)ことから、せん断補強筋有の評価式のばらつきを考慮した簡易評価法による曲げ破壊型のばらつき β_r は、せん断破壊型の場合と異なり、詳細評価法に比べ大きくなったものである。

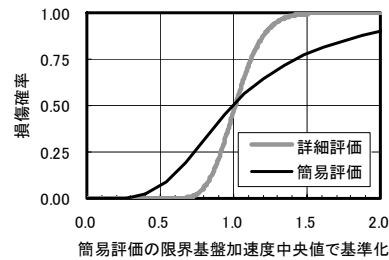
以上より、簡易評価法と詳細評価法による限界基盤加速度中央値の大小関係は、部材レベルの破壊時と構造物全体系の崩壊時との関係と整合していることから、簡易評価法による結果は妥当であると判断できる。また、部材レベルの破壊に着目した簡易評価法による結果は、構造物全体系の崩壊に着目した詳細評価法に比べ、設計上同等もしくは安全側の評価となる。簡易評価法は計算効率にも優れていることから、特に多数の構造物の損傷確率評価を行い耐震性の大小関係を判断するのに非常に有効である。

4. 不確定要因による損傷度曲線への影響

不確定要因による損傷度曲線への影響検討を行った。対象構造物は、3.2 の検討で用いたせん断破壊型構造物 (図-5) とし、地盤・構造物の物性値の確率量や入力地震動は 3.2 と同様とした。損傷度曲線の横軸は、基本ケース(3.2 で実施したせん断破壊型構造物の検討)の限界基



図－8 せん断破壊型の場合の比較



図－9 曲げ破壊型の場合の比較

盤加速度中央値で基準化した数値とする。

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に与える影響を検討した。

2.2 で設定した材料強度のばらつきを基に、対数標準偏差を 2 倍とした場合(ケース 1)と 1/2 倍した場合(ケース 2)に対して、損傷度曲線を試算した結果を図-10 に示す。同図より、材料強度をばらつかせても損傷度曲線は大きく変わらない、すなわち、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に影響を及ぼさない。

4.2 地盤物性値のばらつきによる影響評価

地盤のせん断波速度は地中構造物の応答に影響を及ぼすと考えられる。そこで、埋戻土のせん断波速度のばらつきが構造物の損傷度曲線に与える影響を検討した。2.2 で設定したばらつきを基に、対数標準偏差を 2 倍とした場合(ケース 3)と 1/2 倍した場合(ケース 4)に対して、損傷度曲線を試算した結果を図-11 に示す。同図より、本検討で用いた対象地盤では、埋戻土のせん断波速度のばらつきは、損傷度曲線の勾配にほとんど影響しないことがわかる。

4.3 概略評価式のばらつきによる影響評価

概略評価式の作成にあたり、評価式の精度は、使用する非線形解析ツールにより異なってくると考えられる。そこで、限界変形角の概略評価式や構造物のせん断剛性を算出する際用いる限界耐力の概略評価式のばらつきが構造物の損傷度曲線に与える影響を検討した。3.2 に示した評価式のばらつきをもとに、対数標準偏差を 2 倍(ケース 5)と 1/2 倍(ケース 6)とした場合に対して損傷度曲線を試算した結果を図-12 に示す。

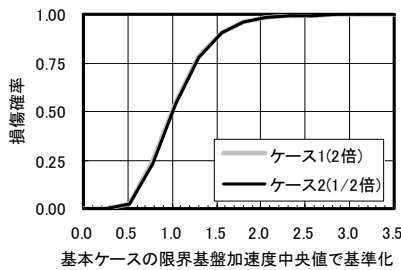


図-10 材料強度のばらつきの影響

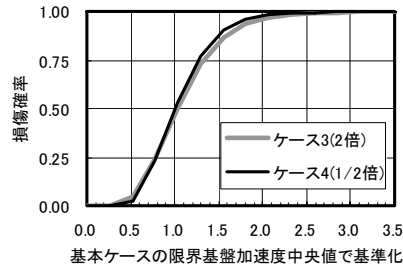


図-11 埋戻土せん断波速度のばらつきの影響

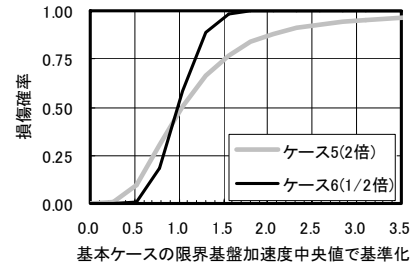


図-12 概略評価式のばらつきの影響

同図より、評価式のばらつきは、限界基盤加速度中央値は変化しないものの、損傷度曲線の勾配に影響を及ぼすことがわかる。このことから、損傷度曲線の精度を高めるために、評価式の精度向上を図る必要があると考えられる。

5. まとめ

本研究では、RC 地中構造物の耐震性能概略評価式を用いて、材料強度、地盤物性値および評価式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、簡易的にかつ実用的に損傷度曲線を算定する手法を提案した。

本検討の範囲内で得られた知見は以下の通り。

- (1) RC 地中構造物の限界変形角および応答変形角の概略評価式を用いて、損傷度曲線を算定する簡易評価法を提案した。詳細評価法に比べ、簡易的に扱うことができ、さらに設計上同等もしくは安全側の評価が可能であることを確認した。
- (2) RC 地中構造物の損傷度曲線は、構造物の材料強度のばらつきを 1/2～2 倍に変化させても大きく変わらない。つまり、材料強度のばらつきは損傷確率に影響を及ぼさない。
- (3) 埋戻土のせん断波速度のばらつきは、本検討で用いた対象地盤では、損傷度曲線の勾配にほとんど影響しない。
- (4) 概略評価式のばらつきは、限界基盤加速度中央値は変化しないものの、損傷度曲線の勾配に影響を及ぼす。損傷度曲線の精度を高めるために、評価式の精度向上を図る必要があると考えられる。

なお、本検討は、構造物の耐震性能のみに着

目したことから、ハザード曲線の不確定性を考慮せずに、損傷度曲線への影響のみの感度解析を行ったものである。

参考文献

- 1) 杉野英治ほか：原子力機器の構造信頼性評価のための地震動評価コードの開発，日本原子力学会 和文論文誌，vol.5，No.2，p.118-124，2006
- 2) 例えば，原子力安全研究協会：地震時の確率論的安全評価実施手順の作成，2004.3
- 3) 茂木寛之ほか：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，No.2，pp1123～1128，2002.6
- 4) 稲垣宏和ほか：地中 RC ボックスカルバートの実用的な耐震性照査手法，電力土木，No.316，2005.3
- 5) 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
- 6) 室津義定他：システム信頼性工学，共立出版，1996
- 7) 星谷勝，石井清：構造物の信頼性設計法，鹿島出版会，1997
- 8) 土木学会：コンクリート標準示方書【施工編】，2002
- 9) 土質工学会：土質データのばらつきと設計，pp69，1988
- 10) 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
- 11) 土木学会：コンクリートライブラリー52号，1983