

曲げとせん断の 2 つの破壊モードを考慮した 地中構造物の地震時損傷確率評価

坂下 克之¹・志波 由紀夫²

¹正会員 大成建設株式会社 技術センター (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)
katsuyuki.sakashita@sakura.taisei.co.jp

²フェロー会員 大成建設株式会社 技術センター (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)
shiba@ce.taisei.co.jp

地中構造物を対象とした地震時フレンジー評価において、「曲げ破壊とせん断破壊のどちらかが起こる確率」は、それぞれの破壊モードに対して個別に評価した損傷確率よりは大きくなると考えられる。本論では、2つの破壊モードを同時に考慮した損傷確率の評価方法として、損傷確率評価指標を構造物の層間変形角で統一し、曲げおよびせん断の現実的耐力をまとめて1つの確率密度で評価する方法を提案し、設定した検討モデルに対して試算を行った。評価の結果、本提案手法による損傷確率は、曲げ破壊およびせん断破壊それぞれの単独の損傷確率よりは大きく、2つの破壊モードを独立事象とした場合の和事象確率よりは小さくなる、という結果が得られた。

Key Words : *Underground structure, Failure probability evaluation, Dynamic analysis, Failure mode*

1. はじめに

地中構造物を対象とした地震時フレンジー評価は従来、「曲げ破壊する確率」と「せん断破壊する確率」をそれぞれ個別に求めて評価しているが、「曲げ破壊とせん断破壊のどちらかが起こる確率」は、それぞれ単独

の損傷確率よりは大きくなると考えられる。本論では、曲げとせん断の2つの破壊モードを同時に考慮した損傷確率の評価方法を提案し、設定した検討モデルに対し試算を行う。

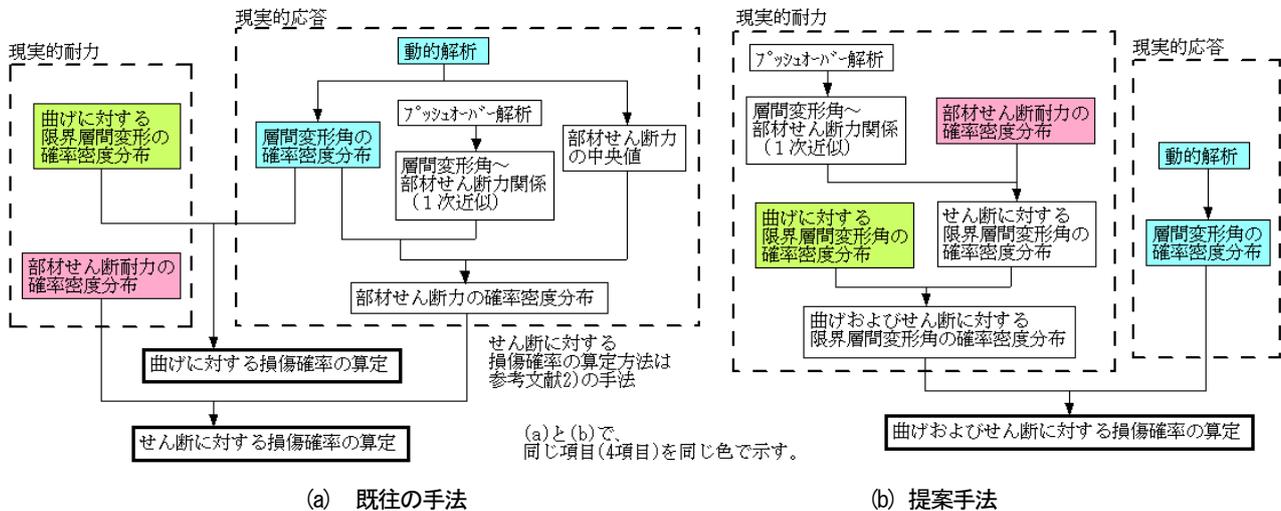


図-1 損傷確率評価フロー

2. 評価方法の概要

地震時フラジリティー評価方法は、参考文献1)における「現実的耐力と現実的応答による評価」とする。同評価方法では、いくつかの入力地震動レベルに対して動的解析等を実施して損傷確率を求め、それらの損傷確率を近似的につなげることによりフラジリティー曲線を設定する。各入力地震動レベルにおける損傷確率を算定する部分の手法について、既往の手法と提案手法の評価フローを図-1に示す。既往の手法では、損傷確率評価指標は、曲げは構造物の層間変形角、せん断は部材せん断力と異なるが、提案手法は、損傷確率評価指標を曲げ・せん断とも構造物の層間変形角で統一し、曲げおよびせん断の現実的耐力をまとめて1つの確率密度で評価する。

現実的耐力および現実的応答のばらつきの要因としては、地盤や構造物の物性のばらつき等に起因する偶然的な不確実性と、評価式や解析手法の精度に起因する認識論的不確実性に分けられるが、図-1に示す各入力地震動レ

ベルに対する損傷確率評価の段階では偶然的な不確実性を考慮し、認識論的不確実性は、フラジリティー曲線の評価の段階で考慮する。

3. 検討条件

(1) 検討対象構造物

検討対象構造物は、原子力発電所屋外重要土木構造物の取水ダクトを想定する。図-2に検討対象構造物の全体図を、図-3に構造物の配筋図を示す。せん断鉄筋については、幅止め筋程度の鉄筋比を想定する。

(2) 入力地震動

入力地震動は、-5.0mの岩盤における2E波として、図-4に示すコンクリート標準示方書³⁾に示されているレベル2地震動（内陸型）を適用する。各入力地震動レベルでの検討では、本波形を定数倍して入力する。鉛直地震力については、上記地震動の各入力レベルにおける最大加速度の1/2の値を静的下向きに作用させることで考慮する。

フラジリティー曲線を求めるために損傷確率を算定する入力地震動レベルは、表-1に示す3ケースとする。

(3) 物性値

a) 地盤物性値

地盤の物性値を表-2に示す。非線形特性は図-5に示すように、参考文献4)に示される設計条件をもとにR-0モデルで近似する。

現実的応答のばらつきの大きな要因となるのは、地盤物性値のばらつきであるが、「5. 現実的応答の評価」

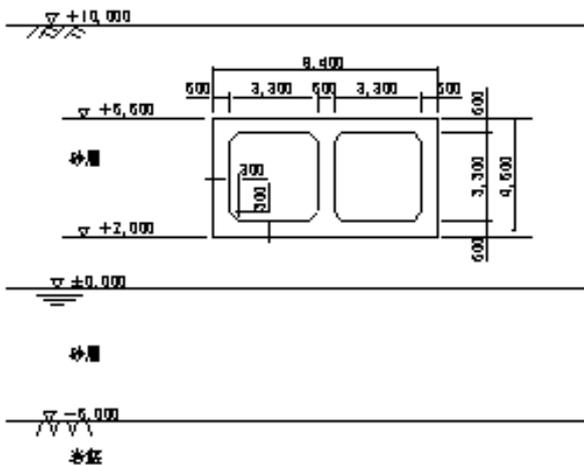


図-2 検討対象構造物

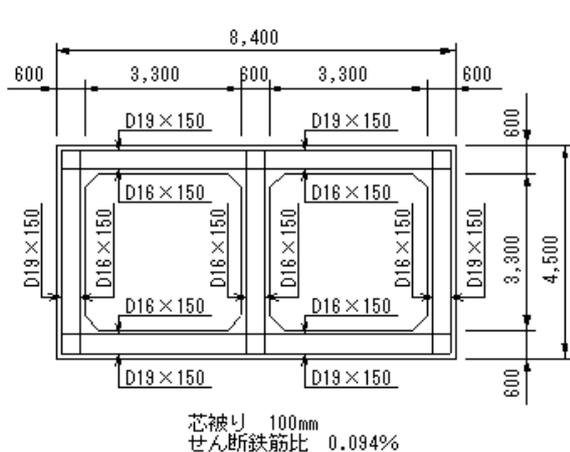


図-3 配筋図

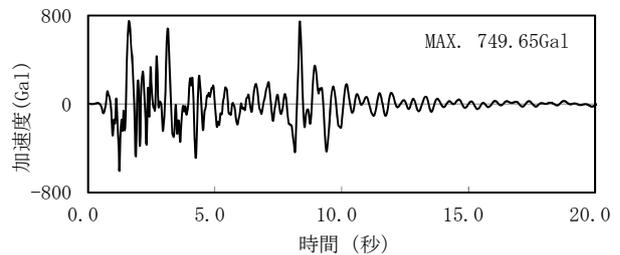


図-4 入力地震動

表-1 入力地震動レベル

元波形に乗じる係数	入力地震動レベル (Gal)
1.8	1349.4
2.0	1499.3
2.2	1649.2

表-2 地盤物性

	単位重量 γ (kN/m ³)	ポアソン比 ν	S波速度 V_s (m/s)	初期せん断 剛性 G_0 (kN/m ²)	初期減衰 h_0 (%)
砂層 地下水位以上	18.0	0.40	300	165,000	2.0
砂層 地下水位以下	20.0	0.48	300	184,000	2.0
岩盤	20.0	0.33	700	1,000,000	2.0

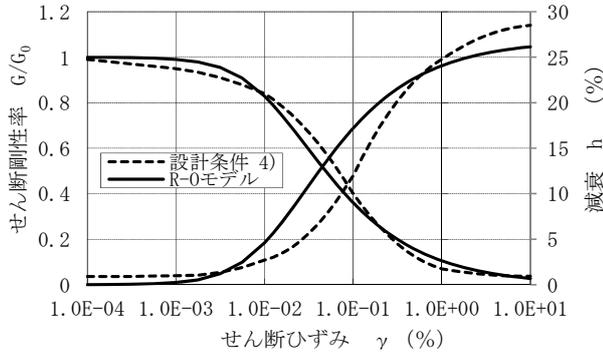


図-5 地盤の非線形特性

で後述するように、本論においては、現実的応答のばらつきは、既往の事例等を参考に仮定値を設定するため、地盤物性値のばらつきは具体的には設定しない。

b) 構造物物性値

構造物の物性値を表-3に示す。現実的応答評価および現実的耐力評価に用いる強度は、表中の設計強度ではなく実強度（コンクリート：圧縮実強度、鉄筋：降伏実強度）である。

構造物物性値のばらつきとしては、コンクリート強度のばらつきのみを考慮する。現実的応答のばらつきは前

表-3 構造物物性

材料	項目	物性値
コンクリート	設計基準強度	24 N/mm ²
	圧縮実強度 注1)	33.6 N/mm ²
	圧縮実強度の変動係数 注2)	0.13
	ポアソン比	0.20
	単位体積重量	23.0 kN/m ³
鉄筋	設計降伏強度	345 N/mm ²
	降伏実強度 注3)	379.5 N/mm ²
	ヤング係数	200.0 kN/mm ²
	ポアソン比	0.30
	単位体積重量	77.0 kN/m ³

注1) 参考文献1)より 設計基準強度×1.4
 注2) 参考文献1)より
 注3) 参考文献5)より 設計降伏強度×1.1

述したように仮定値を用いるため、本論においてコンクリート強度のばらつきが直接関係するのは現実的耐力評価のばらつきである。

解析上は、構造物はファイバーモデルでモデル化し、コンクリートの非線形特性はコンクリート標準示方書³⁾に示されるコンクリートの応力-ひずみ曲線にて、鉄筋の非線形特性はバイリニアモデルにてモデル化する。

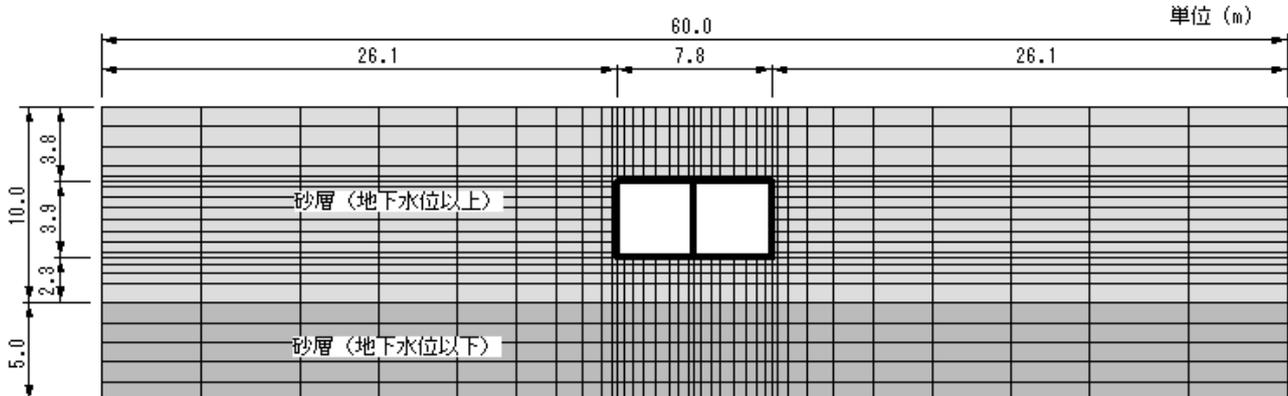
4. 地盤-構造物一体二次元解析

(1) 解析モデル

動的解析およびプッシュオーバー解析を、地盤-構造物一体二次元解析にて行う。

図-6に解析モデルを示す。

地盤と構造物間には、ジョイント要素等は設けていな



	側方境界	底面境界
自重解析・鉛直震度解析	鉛直ローラー	固定
動的解析	粘性境界	粘性境界 (岩盤物性)
プッシュオーバー解析	水平ローラー	固定

図-6 解析モデル

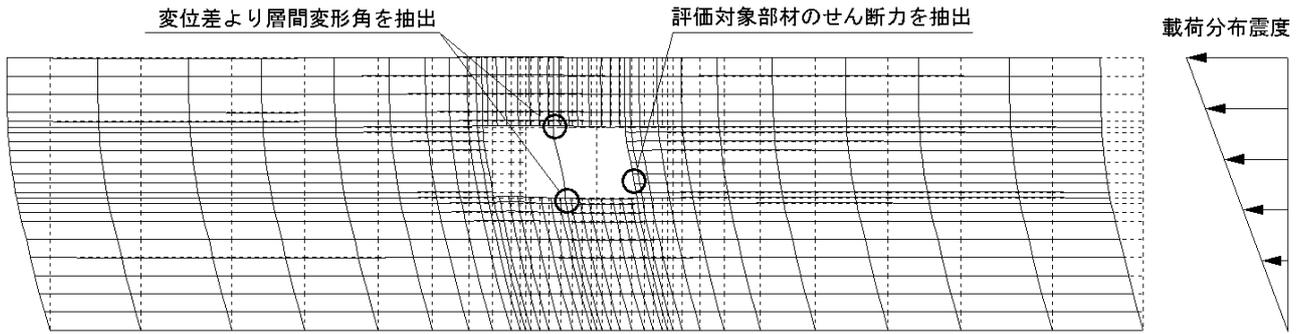


図-7 プッシュオーバー解析の概念図

い。

解析プログラムはTDAPⅢを使用する。

(2) 動的解析

動的解析の主な目的は、以下の2項目である。

- ①最も厳しい部材の選定
- ②各入力地震動レベルにおける現実的応答の中央値の評価

①最も厳しい部材の選定とは、曲げおよびせん断損傷確率評価を複数の部材を対象として実施するのは煩雑となるため、あらかじめ動的解析結果の部材照査より、曲げおよびせん断それぞれに対して最も厳しい部材を選定しておき、損傷確率評価はその部材を対象として行う、というものである。

照査は、構造物の層間変形角が最大となる時刻における断面力より、参考文献6)に示す限界層間変形角算定式およびせん断耐力式（等価せん断スパン比を考慮）を用いて実施する。

照査結果として、曲げに対しては、各入力地震動レベルとも隔壁が最も厳しいという結果となった。したがって曲げ損傷確率評価は隔壁を対象として行い、評価指標である層間変形角は、解析モデルの隔壁上下端節点の変位差を節点間距離で除した値とする。

せん断に対しては、各入力地震動レベルとも、構造物が左向きに変形した際の、右側壁の下端となった。したがってせん断損傷確率評価はこの部位を対象として実施する。

解析は、

自重解析 → 鉛直震度解析 → 動的解析
の順に実施し、各解析間で地盤および構造物要素のひずみと応力を受け渡す。

解析ケースは、表-1に示した入力地震動レベルの3ケースである。

表-4 現実的応答の評価 構造物の最大層間変形角

入力地震動レベル(Gal)	発生時刻(s)	変形の向き	構造物の最大層間変形角
1349.4	1.84	左向き	0.01090
1499.3	1.85	左向き	0.01376
1649.2	1.86	左向き	0.01687

(3) プッシュオーバー解析

せん断に対する現実的耐力算定において、構造物の層間変形角と評価対象部材のせん断力の関係を求めるためのプッシュオーバー解析は、層間変形角～部材せん断力関係が動的解析結果となるべく整合したものである必要があるため、通常行われる構造物の単体モデルへの点載荷ではなく、地盤構造物一体モデルに静的震度を漸増載荷することにより行う。静的震度についても、動的解析との整合度を上げるため、一様ではなく解析モデル下端から地表に向かって直線的に増加する分布とする。

解析は、

自重解析 → 鉛直震度解析 → プッシュオーバー解析
の順に実施し、各解析間で地盤および構造物要素のひずみと応力を受け渡す。

図-7にプッシュオーバー解析の概念図を示す。

5. 現実的応答の評価

本論における損傷確率評価指標は、曲げ・せん断とも構造物の層間変形角である。

構造物の層間変形角の現実的応答の中央値は、動的解析結果の構造物の最大層間変形角となる。各入力地震動レベルにおける構造物の最大層間変形角を表-4に示す。

地盤や構造物の物性のばらつきといった偶発的不確実さに起因する現実的応答のばらつきは、本来モンテカルロシミュレーション等の解析により求めるが、本論においては、既往の事例等を参考に、対数標準偏差「0.15」

という値を仮定値として設定する。

6. 現実的耐力の評価

前述したように本論においては、曲げ・せん断とも現実的耐力の偶然的不確実性の要因は、構造物のコンクリート強度のばらつきとする。コンクリート強度の確率密度分布は対数正規分布に従うとする。

(1) 曲げに対する限界層間変形角

曲げに対する現実的耐力（限界層間変形角）の評価は、コンクリート強度の確率密度分布を、参考文献6)に示される曲げに対する限界層間変形角算定式のコンクリート強度の平均値周りの1次近似式を介して、面積が等しく

なるように現実的耐力（限界層間変形角）の確率密度分布へ投影する。この投影の具体的イメージについては、次項（図-8）で述べる。

図-10の緑線に曲げに対する限界層間変形角の確率密度分布を示す。

(2) せん断に対する限界層間変形角

せん断に対する現実的耐力の評価は、まず、コンクリート強度の確率密度分布を、図-8に示すように、参考文献6)に示されるせん断耐式（等価せん断スパン比を考慮、用いる断面力は構造物の最大層間変形角発生時刻のもの）のコンクリート強度の平均値周りの1次近似式を介して、対応する値の確率（微小幅をとった時の面積）が等しくなるように対象部材のせん断耐力の確率密度分布へ投影する。なお同図では表記上、縦軸の値は部材せ

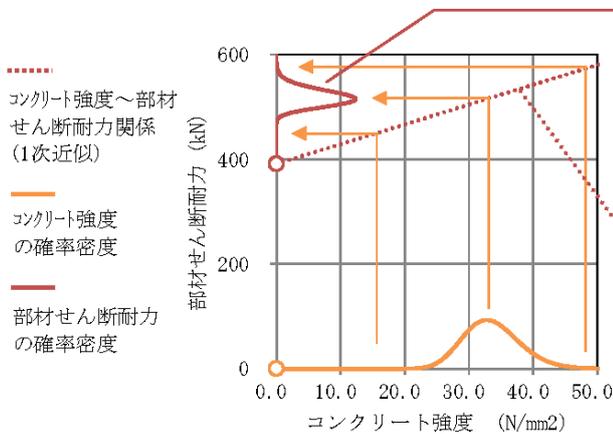


図-8 コンクリート強度と部材せん断耐力の関係

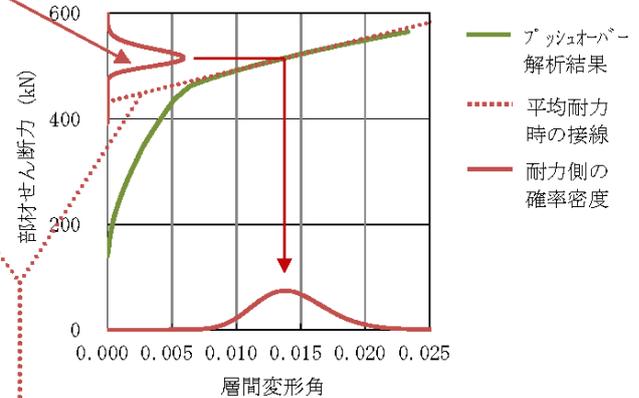


図-9 層間変形角と部材せん断耐力の関係

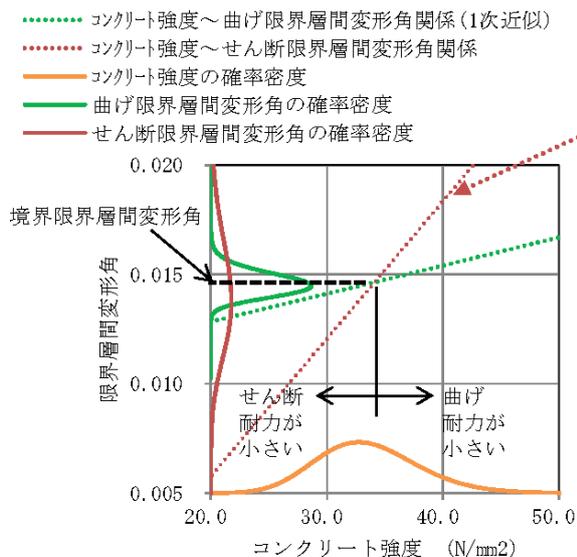


図-10 コンクリート強度と限界層間変形角の関係

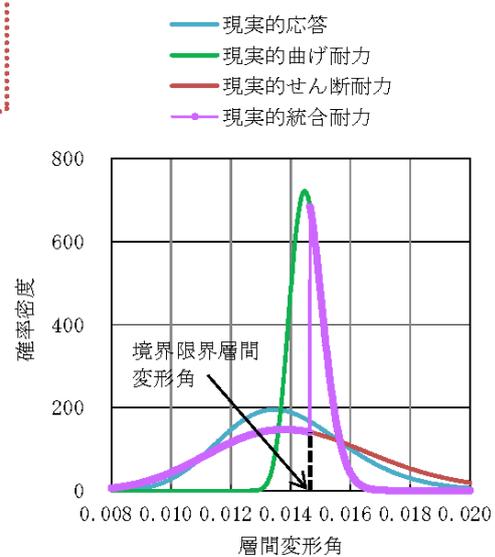


図-11 損傷確率の算定
(入力地震動レベル 1499.3Gal)

せん断耐力であり、コンクリート強度の確率密度分布（橙線）の確率密度値ではない。また横軸も同様に、部材せん断耐力の確率密度分布（赤線）の確率密度値ではない。このような表記は、図-9、図-10も同様である。

次に、上記で求めた対象部材のせん断耐力の確率密度分布を、プッシュオーバー解析結果の層間変形角～対象部材せん断力関係の平均せん断耐力周りの1次近似式（接線）を介して、面積が等しくなるようにせん断に対する限界層間変形角の確率密度分布へ投影する（図-9）。

本来厳密に言えば、プッシュオーバー解析はコンクリート強度を変化させた複数の解析を行い、図-9で部材せん断耐力からせん断に対する限界層間変形角に変換する際には、対応するコンクリート強度に対応するプッシュオーバー解析結果の点をつなげた曲線に対して変換を施す、という方法が正確であるが、本論においては、煩雑さを避けるため、プッシュオーバー解析はコンクリート強度の平均値を用いた1ケースのみを実施し、それに対して図-9の操作を行うこととする。

上記結果を曲げに対する限界層間変形角の確率密度分布に重ね書きすると図-10のようになる。

(3) 曲げとせん断の現実的耐力の統合

曲げに対する限界層間変形角とせん断に対する限界層間変形角のコンクリート強度に対する関係（図-10の破線）は、コンクリート強度の値により大小関係が逆転するところが生じ、これを「境界限界層間変形角」と呼ぶことにする。したがって、現実的耐力の確率密度は、境界限界層間変形角よりも小さな範囲ではせん断に対する限界層間変形角の確率密度分布を、境界限界層間変形角よりも大きな範囲では曲げに対する限界層間変形角の確率密度分布を適用してつなげたものとする。これを現実的統合耐力と呼ぶことにする（図-11の紫線）。

現実的曲げ耐力および現実的せん断耐力の確率密度分布は、コンクリート強度の確率密度分布を、コンクリート強度～耐力関係の1次近似式を介して、面積が等しくなるように投影したものであるため、現実的統合耐力の確率密度分布は、現実的曲げ耐力や現実的せん断耐力の確率密度分布と同様、積分すると1.0となる。

7. 損傷確率およびフラジリティー曲線の算定

図-11に、入力地震動レベル1499.3Galのケースにおける現実的応答と各現実的耐力の確率密度分布を示す。損傷確率は、現実的応答と現実的耐力の確率密度分布の畳込積分により求められる。

上記損傷確率の算定を入力地震動レベルごとに実施して算定した損傷確率およびフラジリティー曲線を図-12

に示す。ここまでの評価では認識論的不確実性は考慮していないので、これは偶然的な不確実性のみによる評価となる。以下に各プロットデータについて説明する。

「■ 曲げ」：図-11において「現実的応答」と「現実的曲げ耐力」を畳込積分して求めた損傷確率。「図-1 (a) 既往の手法」に示される方法による曲げ損傷確率と同じものである。

「■ せん断（層間変形角）」：図-11において「現実的応答」と「現実的せん断耐力」を畳込積分して求めた損傷確率。評価指標は層間変形角であるため、これは「図-1 (a) 既往の手法」に示される手法によって求められるせん断損傷確率（下記「▲ せん断（断面力）」）とは厳密には異なるが、本結果においてはほとんど重なっており、提案手法の過程で計算されるせん断損傷確率が、既往の手法によるものとほぼ整合が取れていることがわかる。

「▲ せん断（断面力）」：「図-1 (a) 既往の手法」に示される方法によって求められるせん断の損傷確率。

「× 統合」：図-11において「現実的応答」と「現実的統合耐力」を畳込積分して求めた損傷確率。すなわち提案手法による「曲げ破壊とせん断破壊のどちらかが起こる確率」。

「× 和事象確率」：曲げ破壊とせん断破壊を独立事象としたとき「曲げ破壊とせん断破壊のどちらかが起こる確率」。具体的には「■ 曲げ」の損傷確率をa、「■ せん断（層間変形角）」の損傷確率をbとしたとき、 $1 - (1 - a)(1 - b)$ で計算される確率。

「— (各色) 近似曲線*** (各項目)」：3つの入力地震動レベルで離散的に求められている各損傷確率値をなるべく通るように対数正規累積関数で近似したフラジリティー曲線。

これらの結果より、本提案手法による損傷確率は、曲げ破壊およびせん断破壊それぞれの単独の損傷確率よりは大きく、2つの破壊モードを独立事象とした場合の和事象確率よりは小さくなる、という結果が得られた。

曲げ破壊とせん断破壊は一般的には相関があると考えられるので、2つの破壊モードを独立事象とした場合の和事象確率は、評価としては最大の値と考えられる。したがって提案手法による評価は、定性的に妥当な結果となっているといえる。

次に、認識論的不確実性を考慮したコンポジットフラジリティー曲線を算定した結果を図-13に示す。プロット線のうち、「曲げ」「せん断」「統合」「和事象確率」は、図-12に得られている偶然的な不確実性のみを考慮した同項目（同色）のフラジリティー曲線に対し、対数正規累積関数の対数標準偏差の項に認識論的不確実性の対数標準偏差を足し込むことにより得られるものであ

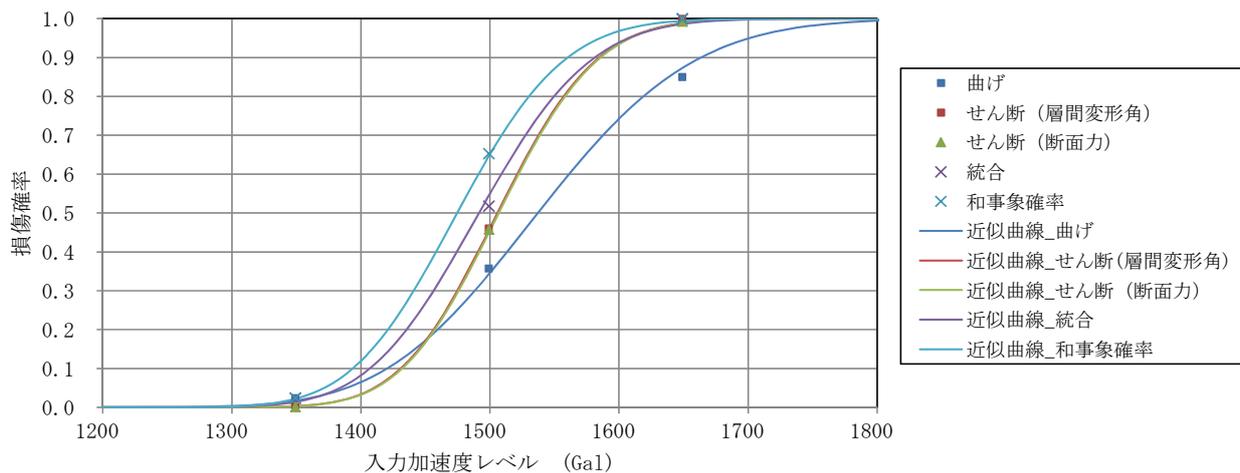


図-12 損傷確率およびフラジリティー曲線（偶然的な不確実性）

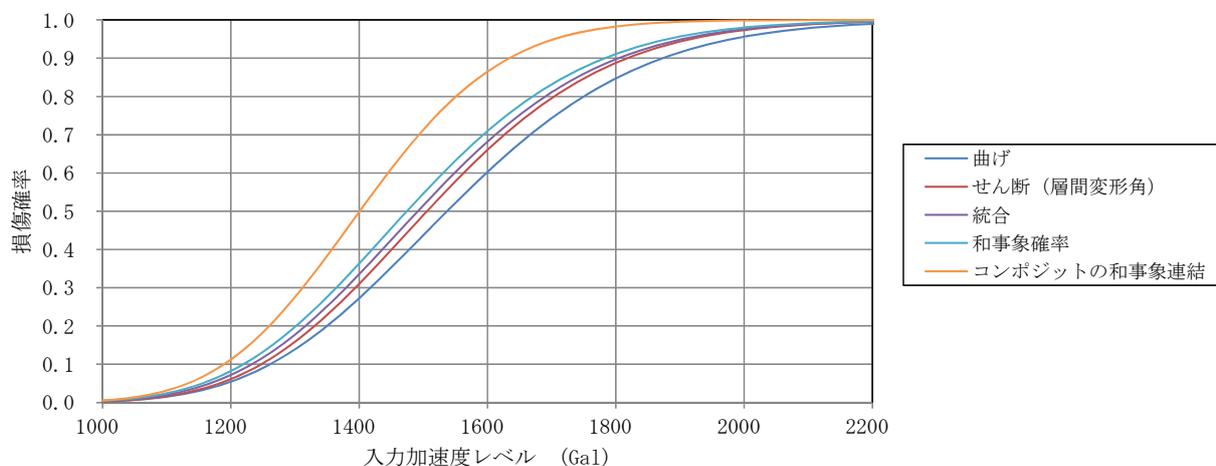


図-13 コンポジットフラジリティー曲線（認識論的不確実性も考慮）

る。ここでは、認識論的不確実性の対数標準偏差を、現実的応答・現実的耐力とも0.10と仮定した。

図-13の「コンポジットの和事象連結」とは「曲げ」と「せん断」のコンポジットフラジリティー曲線の各点に対して $1 - (1 - a)(1 - b)$ (a: 曲げ損傷確率、b: せん断損傷確率) で計算される値をつなげたものである。すなわちこれは対数正規累積分布ではない。

同図より、本提案手法による「曲げ破壊とせん断破壊のどちらかが起こる確率」（統合）は、曲げとせん断の単独確率や和事象確率との大小関係は変わらないが（曲げ・せん断単独 < 統合 < 和事象）、値としては曲げとせん断の単独確率に接近したものとなっている。

8. まとめと今後の課題

地中構造物を対象とした地震時フラジリティー評価に

おいて、「曲げ破壊とせん断破壊のどちらかが起こる確率」を評価するため、曲げとせん断の2つの破壊モードを同時に考慮した損傷確率の評価方法を提案し、設定した検討モデルに対し試算を行った。

検討の結果、損傷確率値は

曲げ・せん断単独 < 提案手法

< 曲げとせん断を独立事象としたときの和事象

となり、定性的に妥当な結果が得られることがわかった。

本論においては「6. 現実的耐力の評価」で述べたように、せん断に対する限界層間変形角の確率密度分布を求める際、構造物強度のばらつきを考慮した複数のプッシュオーバー解析を実施して算定するのが本来厳密であるところを、平均値を用いたプッシュオーバー解析結果のみを用いている点や、部材せん断耐力からの変換の際にプッシュオーバー解析結果の平均耐力周りの1次近似式で投影している点など、手法を簡略化している部分はいくつかあるが、これらの簡略化が評価結果に与える影

響については、今後確認していく必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 日本原子力学会：日本原子力学会標準 原子力発電所の地震を起因とした確率論的安全評価実施基準：2007, 2007.9
- 2) 原子力安全基盤機構：地震に係る確率論的安全評価手法の整備に関する報告書 =屋外重要土木構造物

- の耐力・損傷確率評価=, JNES/SAE05-105, 2005.12
- 3) 土木学会：2007 年度制定 コンクリート標準示方書設計編, 2007.12
 - 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・照査例 2005.6
 - 5) 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
 - 6) 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・マニュアル 2005.6

APPLICATION OF THE FAILURE PROBABILITY EVALUATION OF THE UNDERGROUND STRUCTURE CONSIDERING BENDING FAILURE AND SHEAR FAILURE

Katsuyuki SAKASHITA, Yukio SHIBA

In this paper, we propose the method to evaluate the failure probability under seismic motion of the underground structure considering bending failure and shear failure. In proposed method, the failure probability evaluation factor is the distortion angle of the structure, and the probability density functions of bending capacity and shear capacity are jointed. In the calculation result, it is verified that the failure probability by proposed method is greater than each failure probability of bending failure and shear failure, and less than the sum event probability assumed that bending failure and shear failure are stochastically independent.