

# 確率論的リスク評価に基づく地中RC構造物の地震時復旧性能評価

副 島 紀 代      堤 内 隆 広      江 尻 讓 嗣  
渡 辺 伸 和      足 立 高 雄      吉 田 伸 一  
(本社土木本部)      (本社原子力本部)      (本社原子力本部)

## Evaluation of Seismic Recovery Performance Based on Probabilistic Risk Assessment for Underground Reinforced Concrete Structure

Michiyo Soejima      Takahiro Tsutsumiuchi      Joji Ejiri  
Nobukazu Watanabe      Takao Adachi      Shinichi Yoshida

### Abstract

This research focused on an evaluation of the seismic recovery performance of an underground reinforced concrete culvert. When an unexpectedly earthquake occurs, it is necessary to maintain or quickly recover the minimum functionality of infrastructures to ensure business continuity, even if they have some damage. Thus, it is necessary to evaluate the seismic fragility according to the individual required performance level. On the other hand, the seismic responses of underground structures are very complicated because of their nonlinear behavior. Parametric studies using the nonlinear dynamic analysis programs “FINAL-GEO” and “FINAL” have been conducted to calculate the seismic fragility according to each required performance. In addition, the seismic recovery performances of structures can be evaluated using their fragilities.

### 概 要

近年、設計地震動を上回る大きな地震動に対してもその影響を把握した上で、適切な備えを行うことが社会的に求められている。設計を超える地震動に対しては構造物にある程度の損傷が想定されるが、事業継続の観点からは損傷しても最低限の機能を保持できる性能、あるいは早期に復旧できる性能が要求される場合があることから、評価に際してこのような要求性能に対応した損傷確率評価が求められる。一方で、設計地震動を上回る大きな地震動に対する地中構造物の挙動は、構造物と地盤それぞれの非線形性の影響と両者の相互作用により、非常に複雑なものとなる。そこで、地中RCボックスカルバートを対象として、高度な解析プログラムを利用した非線形時刻歴応答解析によるパラメータスタディを実施することで、復旧性能に応じた損傷レベルに対する限界値の設定や地震応答の評価が可能であることを示し、損傷確率に基づく構造物の復旧性能評価の考え方を述べた。

## 1. はじめに

東日本大震災以降、設計地震動を上回る大きな地震動に対しても「想定内」としてその影響を把握した上で、適切な備えを行うことが社会的に求められている。設計を超える任意の大きさの地震動で壊れるか壊れないかは、構造物や施設・設備がその地震動に対してどの程度の余力を有しているかで決まってくるが、その余力の程度を表す一つの指標が損傷確率である。

同じ設計地震動を満足するように設計された構造物でも、余力が等しいとは限らない。ある地震動に対応する損傷確率を計算した場合に、余力が十分なものは損傷確率が小さな値となるが、余力があまりない場合には損傷確率が大きくなる。よって、損傷確率が算定できれば、任意の大きさの地震動に対する余力の大きさを評価することができる。

複数の構造物に対して、余力の小さいものから優先的に対応を行うことで、適切な備えを目的とした優先順位付けを行うこともできる。電気・ガス・水道・交通といっ

たライフラインや工場の生産ラインなどの一連のネットワークシステムにおいては、そのシステム全体の耐震信頼性を向上させるためにも、このような個々の要素の優先順位の判断は重要である。

一方で、ライフラインシステムを構成する主要な要素の一つである地中構造物は、構造物と地盤それぞれの非線形性が相互作用により互いに影響し合うため、大規模地震時の挙動が非常に複雑なものとなる。また、地上構造物と異なり周囲を地盤に支えられた構造であるという特徴から、損傷して大きく変形しても所定の機能(たとえば通水機能)は維持できる場合もあり、地震後の復旧のしやすさ(=復旧性能)を評価するには、要求される機能に応じた許容損傷レベルを把握する必要がある。そのために、地盤-構造物連成系の高度な非線形動的解析を行い、設計を超える大きな地震動に対する地中構造物の損傷状況を的確に予測することが求められる。

ここでは、鉄道・道路・共同溝などの社会基盤施設の一部として幅広く利用されている地中RCボックスカルバートを対象として、高度な2次元非線形FEM解析を実

施して地震時損傷確率を算定するとともに、その結果から構造物の復旧性能を評価する手法について提案した。検討フローをFig. 1に示す。

## 2. 確率論的リスク評価手法の概要

### 2.1 損傷確率の概念

確率論的リスク評価手法とは、確定的に設計された構造物に対し、現実の構造物が有するさまざまな不確かさを考慮して損傷リスク(=損傷確率)を評価する方法である。構造物に作用する外力(荷重)や構造物を構成する部材の力学的特性等には、偶然的な不確かさと呼ばれる物理現象固有のばらつき(例:コンクリートや鉄筋の強度など)や、認識的不確かさと呼ばれる情報不足などから生じるばらつき(例:評価に用いる地盤データの不足や解析モデルによる差異など)がある<sup>2)</sup>。このようなばらつきを考慮した上で算定されるのが損傷確率である。

構造物が本来持っている耐力( $R$ )や、ある外力を与えられたときに生じる応答( $S$ )は、現実にはFig. 2に示すようにばらつきをもって確率的に分布している。これを現実的耐力、現実的応答と呼ぶ。損傷とは現実的応答の値が現実的耐力の値を超えた時に発生する事象であり、Fig. 2に示す各々の確率密度関数 $f_s$ ,  $f_R$ からその確率を算出することで損傷確率が求められる<sup>1)</sup>。一方、与えられた外力(地震動の強さなど)と損傷確率との関係を示すものが損傷確率曲線(フラジリティ曲線)である(Fig. 3)。

### 2.2 損傷確率の算定方法

2.1より、損傷確率を算出するには現実的耐力ならびに現実的応答を求める必要がある。本検討では、Fig. 4に示す地中RCボックスカルバート<sup>2)</sup>をモデルとして、現実的耐力はRCボックスカルバート単体でモデル化し、2次元非線形FEMモデルによる静的解析を実施して求めた。一方、現実的応答を求めるために、RCボックスカルバートと周囲の地盤を一体としてモデル化し、地盤-構造物連成2次元非線形FEMモデルによる時刻歴応答解析を実施した。

現実的応答では偶然的な不確かさによるばらつきの主変動パラメータとして、参考文献<sup>1)</sup>を参考に構造物のコンクリート強度( $f_c$ )および地盤のせん断波速度( $V_s$ )を考慮した。地盤については、Fig. 4に示す上部地盤のAs層と下部地盤のTs層は独立したばらつきを有するものとした。そのため、パラメータの数は計3つとなる。一方、現実的耐力の算定においては構造物単体の解析であるため、偶然的な不確かさによるばらつきの主変動パラメータはコンクリート強度( $f_c$ )のみとした。またコンクリート強度から算定される弾性係数や引張強度、地盤のせん断波速度から算定されるせん断剛性等の物性値については、主変動パラメータに完全相関すると仮定して該当する主変動パラメータから算出した。必要な算定式をTable 1に示す。

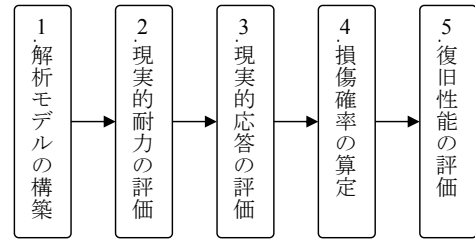


Fig. 1 検討フロー  
Flow of Evaluation

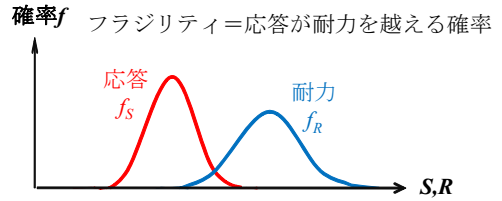


Fig. 2 損傷確率の概念図  
Probability Density Function of Response and Strength

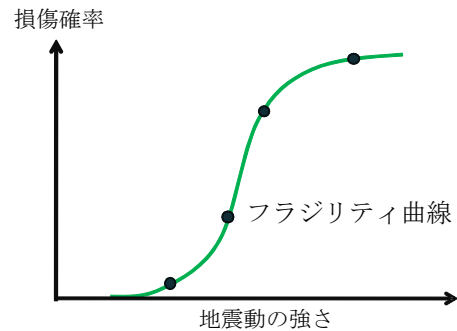


Fig. 3 地震時損傷確率曲線の例  
Seismic Fragility Curve

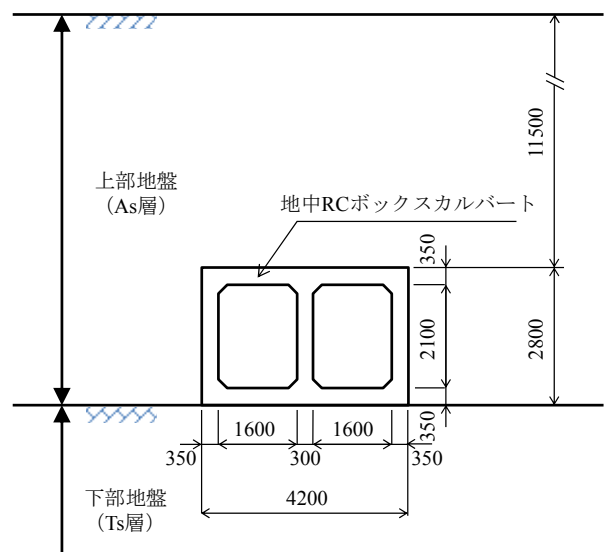


Fig. 4 検討対象モデル  
Section of Culvert Model

不確かさの評価を行うための確率論に基づくサンプリング法には、2点推定法、モンテカルロ法、実験的計画法などの手法がある<sup>1)</sup>が、ここでは実験的計画法の一つであるラテンハイパーキューブサンプリング法(以下、LHS法)を用いて損傷確率を算出した<sup>3)</sup>。LHS法は考慮する $n$ 個のパラメータについて、その確率密度関数を各々が等確率になるよう $N$ 個の区間に分割し、それぞれの区間からパラメータのサンプル値をサンプリングした上でランダムに組み合わせる手法である。モンテカルロ法などのランダムサンプリングより少ないサンプリング数でも、不確かさを十分に考慮した確率評価が可能な手法となっている。今回はLHS法に従い、サンプリング数を10ケースとして、コンクリート強度( $f_c$ )、地盤 $A_s$ 層・地盤 $T_s$ 層の各せん断波速度( $V_s$ )という3つのパラメータについて、ばらつきが対数正規分布に従うと仮定した上で、各10個のサンプル値を抽出しランダムに組み合わせることで、Table 2に示す通りばらつきを設定した。

### 3. 現実的耐力の算定

#### 3.1 復旧性能に応じた損傷レベルの設定

損傷確率を算定するには、ばらつきを考慮した現実的耐力の算定が必要である。設計時には耐力値として曲げ耐力やせん断耐力といった部材断面耐力が一般的に用いられているが、設計を超える大きな地震動に対しては機能保持の観点から、復旧性能に応じた複数の損傷レベルを考慮する必要がある。例えば地中構造物は周囲を地盤に支えられているため、耐力を超えて大きく変形しても内空確保機能が維持できればよいという場合には、変形限界などによる損傷レベルを設定する試みも行われている<sup>4)</sup>。そこで、コンクリート標準示方書・設計編<sup>5)</sup>に示されたRC構造物の損傷レベルの定義を参考に、ここでは「無被害」「小破」「中破」「大破」という4つの損傷レベルを設定することとした。「無被害」～「中破」は上記示方書中に示された損傷レベル1～3にはほぼ対応している。さらに地中RCカルバートとしての特性を踏まえ、全体として内空を確保できなくなる損傷レベルを「大破」と設定した。各損傷レベルと限界値、および復旧性能の観点から見た構造物の状態をTable 3に示す。

#### 3.2 解析モデルおよび解析手法

3.1で設定した各損傷レベルを判断できる損傷指標とその限界値を求めるために、Fig. 4のモデル中に示された1層2連の地中RCボックスカルバート単体をモデル化して2次元非線形FEMモデルによる静的解析を実施した。Fig. 5にカルバートの構造図、Table 4に材料モデル一覧をそれぞれ示す。なお、Table 4に示すコンクリート強度は基本モデルの値(平均値： $f_c=27.0\text{N/mm}$ )であり、損傷確率評価の際にはTable 2に示すようにばらつき(変動係数：0.13)を考慮して変化させるものとする。また主変動パラメータと完全相関を仮定した他の諸元についても

Table 1 主変動パラメータから算定する物性値  
Physical Properties Calculated by Main Parameters

コンクリート強度 $f_c$ から算出する物性値 (コンクリート標準示方書 <sup>5)</sup> に準拠)	引張強度 $f_t$ (N/mm <sup>2</sup> ) $f_t=0.23f_c^{2/3}$
	ヤング係数 $E_c$ ( $\times 10^4$ N/mm <sup>2</sup> ) $E_c=2.2+(f_c-18) \cdot 0.05$ 【 $f_c<30$ 】 $E_c=2.8+(f_c-30) \cdot 0.03$ 【 $30 \leq f_c$ 】
地盤のせん断波速度 $V_s$ から算定する物性値	初期せん断剛性 $G_0$ (N/m <sup>2</sup> ) $G_0=\gamma/g \cdot V_s^2$ $\gamma$ : 単位体積重量 (kg/m <sup>3</sup> ) $g$ : 重力加速度 (=9.8m/s <sup>2</sup> )

Table 2 LHS法による主変動パラメータ一覧  
Main Parameters of Each Case by LHS Method

	コンクリート 圧縮強度 $f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	地盤 $A_s$ 層 せん断波速度 $V_s$ (m/s)	地盤 $T_s$ 層 せん断波速度 $V_s$ (m/s)
基本モデル (平均値) (変動係数)	27.0 (0.13)	200.0 (0.10)	470.0 (0.10)
LHS法による 各パラメータのサンプル値	model-1	20.5	175.5
	model-2	22.7	201.0
	model-3	24.8	223.7
	model-4	25.3	190.0
	model-5	26.3	161.9
	model-6	27.1	207.9
	model-7	28.3	196.1
	model-8	29.8	239.4
	model-9	31.2	216.2
	model-10	34.0	187.5

Table 3 限界値と損傷レベル  
Critical Situation and Damage Level

限界値	損傷レベル	構造物の状態
a.鉄筋降伏開始点→	無被害	構造物の応答が弾性域で収まり、補修を必要としない損傷レベル
	小破	鉄筋降伏が始まり、構造物の応答が弾性域から塑性域に入るが、無補修もしくは軽微な補修で早期復旧可能な損傷レベル
b.設計耐力到達点→	中破	部材に破壊が生じ耐力が低下することから、補修が必要であるが、軸力は保持しており、内空は確保できる損傷レベル
	大破	軸力保持機能を喪失し、内空が確保できなくなり、復旧には大規模な補修あるいは再構築が不可欠な損傷レベル
c.終局限界到達点→		

Table 4 カルバートの要素モデル  
Profile of Culvert Model

	コンクリート	鉄筋
要素タイプ	四辺形平面ひずみ要素	トラス要素
ヤング率[N/mm <sup>2</sup> ]	$2.65 \times 10^4$	$2.06 \times 10^5$
強度[N/mm <sup>2</sup> ]	$f'_c=27.0$ $f_t=2.07$	$\sigma_y=343$
ポアソン比	0.167	0.3
非線形構成則	圧縮側：修正Ahmadモデル 引張側：出雲モデル(C=1.0)	バイリニア (二次剛性1/100)

Table 1の式を用いて同様に変化させる。

解析にはFEM非線形解析コードFINAL<sup>6)</sup>を使用した。常時荷重を作用させた上で頂版左端(Fig. 5参照)に水平変位を与え、Table 3に示す各損傷レベルに対する限界値をそれぞれTable 5に示す通り設定し、その時の層間変形角を損傷指標として解析上でモニターした。層間変形角は、底版中央に対する頂版中央の相対変位量を構造物の高さ(頂底板の厚さ中心間の距離: 2450mm)で除したものである。なお、解析上の荷重方法として、通常このような場合によく用いられているプッシュオーバー解析を実施した。

### 3.3 プッシュオーバー解析結果

Fig. 6にプッシュオーバー解析により得られた基本モデル(平均値を用いたモデル)の荷重-変位関係を示す。図中には3.2で設定した損傷レベルの限界値(鉄筋ひずみ=1665 $\mu$ 、コンクリート圧縮ひずみ=2000 $\mu$ または最大耐力到達点、コンクリート圧縮ひずみ=3500 $\mu$ または最大耐力到達点)に対応する点をプロットした。またFig. 7には各限界値における構造物の変形図とひび割れ状況を示す。

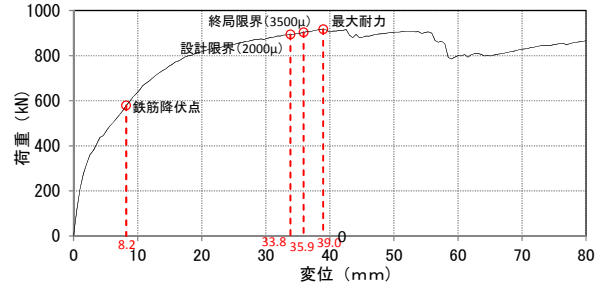


Fig. 6 プッシュオーバー解析による荷重-変位関係 (基本モデル: 平均値)  
Relation between Shear Force and Displacement on Pushover Analysis (Average Model)

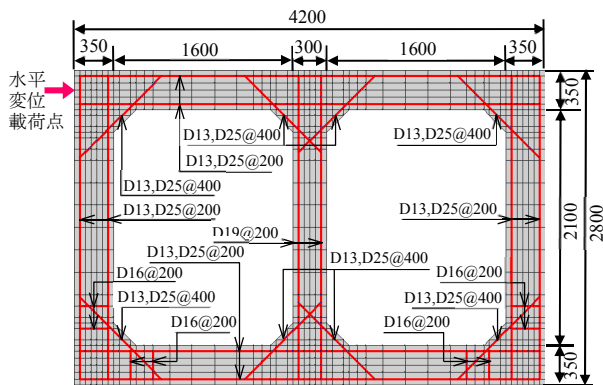
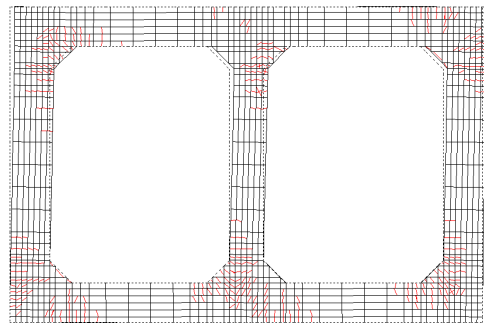
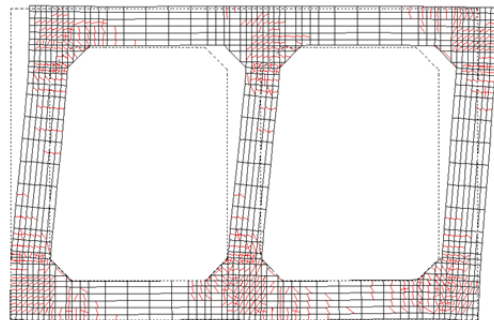


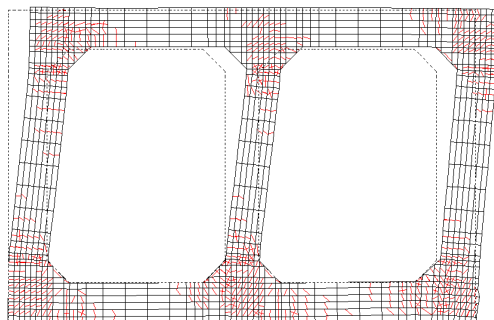
Fig. 5 カルバート構造図  
Details of Culvert Model



(a)鉄筋降伏開始時(小破)



(b)設計耐力到達時(中破)



(c) 終局耐力到達時(大破)

Fig. 7 各限界状態における変形およびひび割れの状況 (基本ケース)  
Deformation and Crack Pattern on Each Damage Level

Table 5 各損傷レベルに対する限界値  
Critical Point at Each Damage Level

損傷状態	限界値
a.無被害→小破	鉄筋降伏開始点 (鉄筋ひずみ=1665 $\mu$ )
b.小破→中破	設計耐力到達点 (コンクリート圧縮ひずみ=2000 $\mu$ ) ※先に最大耐力に達した場合は 最大耐力到達点 (作用荷重=最大耐力)
c.中破→大破	終局限界到達点 (コンクリート圧縮ひずみ=3500 $\mu$ ) ※先に最大耐力に達した場合は 最大耐力到達点 (作用荷重=最大耐力)

なお、限界値はコンクリート強度のばらつきに影響されると考えられるため、ばらつきを考慮した10ケース(model-1～model-10)のプッシュオーバー解析も実施した。各ケースの荷重-変位関係をFig. 8に示す。また限界値となる層間変形角をTable 6(プッシュオーバー解析による限界値(層間変形角))に示す。どのケースも変位が増大するにつれて荷重の変動が大きくなるが、これは構造物の非線形化が進み解析が不安定になっている状態と考えられるため、限界値はその影響を受けない範囲から設定した。Fig. 8やTable 6から、小破の限界値(鉄筋降伏開始点)はコンクリート強度のばらつきによる差が小さいが、中破(設計耐力到達点)、大破(終局限界到達点)はいずれもコンクリート強度のばらつきによる差が大きく、概ね強度の増大とともに限界値も大きくなる傾向がみられる。また、解析で得られた結果の変動係数は、もともと設定したコンクリート強度の変動係数に対して大きい値となっている。

#### 4. 現実的応答の算定

##### 4.1 解析モデルおよび解析手法

3章で述べた2連地中RCボックスカルバートが地震時に地中でどのような応答をするのかを把握するために、地盤-構造物連成2次元非線形FEMモデルによる時刻歴応答解析を実施した。解析にはFEM非線形解析コードFINAL-GEO<sup>7)</sup>を用い、逐次非線形動的解析を行った。Fig. 9に全体の解析モデルを示す。表層地盤はカルバート底面より上部のAs層およびそれ以深のTs層からなり、基盤層上に成層に分布している。基本的な地盤物性をTable 7に、表層地盤の非線形特性( $G \sim \gamma$ ,  $h \sim \gamma$ )をFig. 10に示す。なお、地盤・構造物とも、2.2のTable 2に示した通りばらつきを考慮して解析を行った。また3章の現実的耐力の算定時と同様に、主変動パラメータと完全相関を仮定した他の諸元についても同様に变化させるものとした。

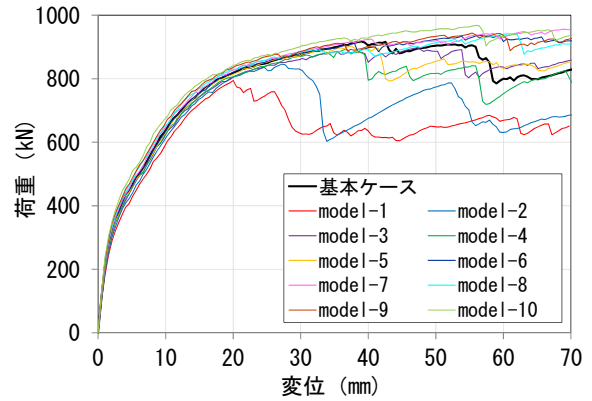


Fig. 8 コンクリート強度のばらつきを考慮した荷重-変位関係 (プッシュオーバー解析)  
Relations between Shear Force and Displacement on Pushover Analysis in Consideration of Variation of  $f'c$

Table 6 損傷レベルに対応する各ケースの層間変形角の限界値  
Critical Deformation Angles according to Each Damage Level

	コンクリート 圧縮強度 $f'c$ ( $N/mm^2$ )	プッシュオーバー解析による 限界値 (層間変形角, $\times 10^{-2}$ )			
		小破	中破	大破	
基本モデル (平均値) (変動係数)	27.0 (0.13)	0.33 (0.09)	1.38 (0.30)	1.47 (0.22)	
LHS法による 各パラメータのサンプル値	model-1	20.5	0.38	0.86	0.96
	model-2	22.7	0.38	0.65	1.11
	model-3	24.8	0.38	0.90	1.17
	model-4	25.3	0.36	1.26	1.30
	model-5	26.3	0.31	0.80	1.53
	model-6	27.1	0.31	0.84	0.98
	model-7	28.3	0.33	0.92	1.53
	model-8	29.8	0.31	1.26	1.40
	model-9	31.2	0.31	1.70	1.86
	model-10	34.0	0.29	1.05	1.59
平均値		0.34	1.02	1.34	
標準偏差		0.03	0.31	0.29	
対数標準偏差		0.09	0.29	0.21	

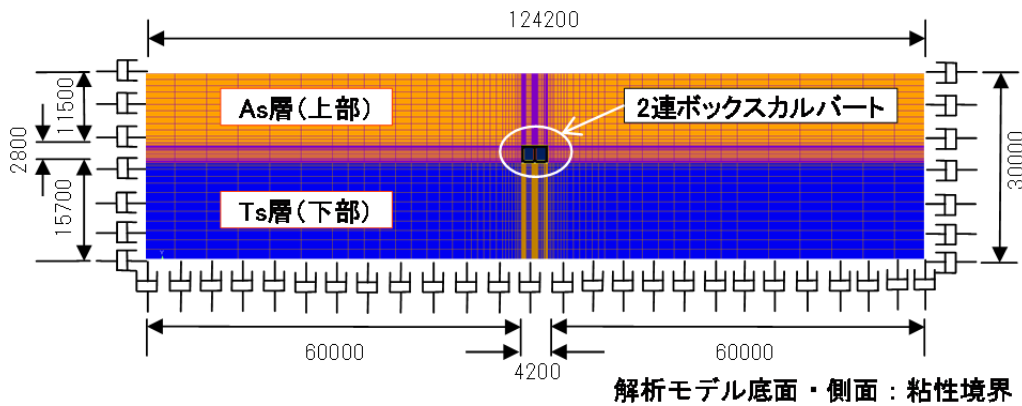


Fig. 9 地盤-構造物連成系解析モデル全体図  
Simulation Model for the Dynamic Analysis



### 4.2 入力地震動レベル

入力地震動は、1995年兵庫県南部地震ポートアイランド基盤波を基準に、最大加速度の値を400, 800, 1200, 1500, 2000Galの5段階に振幅調整したものを基盤入力波(2E)として解析モデル底面に入力した。Fig. 11に最大加速度800Galの基盤入力地震動波形を示す。各入力レベルに対して、それぞれ基本モデル(平均値)およびばらつきを考慮した10ケース(model-1~model-10)の計11ケースに対する動的解析を実施した(全55ケース)。

### 4.3 解析結果

各解析ケースで得られた構造物の応答値(構造物の最大層間変形角)をTable 8に示す。入力地震動レベルが上がるのに応じて、どのケースにおいても最大層間変形角の値が比例的に大きくなっていることがわかる。基盤入力最大加速度1200Galからは各ケースの応答値に幅が生じ、ばらつきの影響が顕著に表れている。

ただし応答値の変動係数は、当初設定した各主変動パラメータの変動係数より全体的に小さくなっている。これは、Fig. 10に示す表層地盤の非線形特性により、地震動の増大に伴い地盤に生じるせん断ひずみが大きくなり、地盤剛性がある一定値に収束していくことが一因と考えられる。

最大層間変形角が全ケースで最も大きくなったのは、model-1の入力地震動レベル2000Galのケースで、最大層間変形角は $1.12 \times 10^{-2}$ となった。このケースにおける全時刻でのコンクリートの最大圧縮応力分布図(Fig. 12)からは、隔壁の上端および下端にこのモデルケースの圧縮強度である $f_c = 20.5 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ を超える応力が発生しており、隔壁部で損傷が生じていることがわかる。

Table 7 地盤物性一覧  
Soil Parameters for Dynamic Analysis

	As層(上部)	Ts層(下部)	Ts層(基盤)	
せん断波速度Vs (m/s)	200	470	750	
単位体積重量 $\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	17.6	17.0	17.5	
修正R-Oモデル パラメータ	$\gamma_y$	7.421E-04	8.799E-04	— (線形)
	$h_{max}$	2.000E-01	1.690E-01	

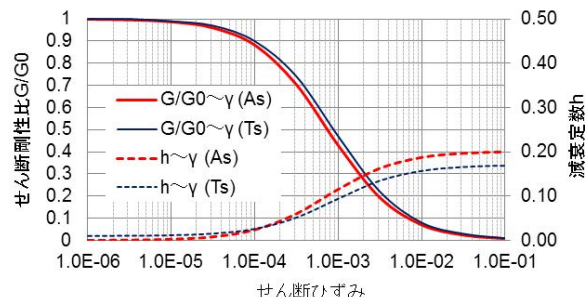


Fig. 10 表層地盤の非線形特性  
G/G0 and h of Surface Soil

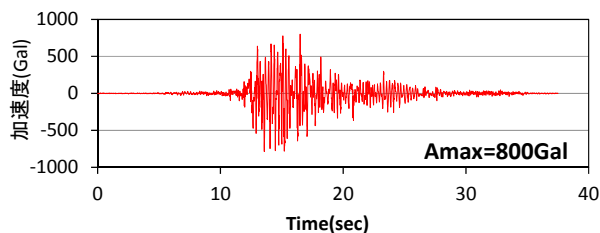


Fig. 11 基盤入力地震動波形  
Time History of Input Motion of Bedrock

Table 8 各ケースの現実的応答 (構造物の最大層間変形角)  
Main Parameters of Each Case and the Results

	コンクリート 圧縮強度 $f'c$ (N/mm <sup>2</sup> )	地盤As層 せん断波速度 $V_s$ (m/s)	地盤Ts層 せん断波速度 $V_s$ (m/s)	応答値 (構造物の最大層間変形角, $\times 10^{-2}$ )					
				Case1 (400Gal)	Case2 (800Gal)	Case3 (1200Gal)	Case4 (1500Gal)	Case5 (2000Gal)	
				(0.087)	(0.050)	(0.078)	(0.063)	(0.060)	
基本モデル (平均値) (変動係数)	27.0 (0.13)	200.0 (0.10)	470.0 (0.10)	0.12 (0.087)	0.31 (0.050)	0.52 (0.078)	0.65 (0.063)	1.00 (0.060)	
LHS法による 各パラメータのサンプル値	model-1	20.5	175.5	440.5	0.13	0.30	0.59	0.79	<b>1.12</b>
	model-2	22.7	201.0	508.2	0.13	0.33	0.53	0.68	1.00
	model-3	24.8	223.7	562.8	0.11	0.32	0.56	0.73	0.99
	model-4	25.3	190.0	525.9	0.13	0.31	0.50	0.65	1.07
	model-5	26.3	161.9	472.3	0.11	0.32	0.55	0.70	1.07
	model-6	27.1	207.9	412.4	0.12	0.31	0.52	0.67	0.96
	model-7	28.3	196.1	380.2	0.12	0.31	0.47	0.67	1.03
	model-8	29.8	239.4	448.3	0.10	0.29	0.52	0.68	0.98
	model-9	31.2	216.2	460.9	0.11	0.31	0.53	0.69	0.92
	model-10	34.0	187.5	488.5	0.12	0.28	0.45	0.66	1.04

※太字は最大値

## 5. 損傷確率に基づく復旧性能評価

### 5.1 損傷確率の算定

3章で求めた現実的耐力，および4章で求めた現実的応答の結果から，損傷確率を求めることができる。まず，入力地震動レベルごとにそれぞれのばらつきの場合について，各損傷レベルに対する耐力値(=応答値を該当する損傷レベルの限界値で除したもので，1.0を超えるとその損傷レベルを超えたと判断する)を計算する。耐力値は中央値を1.0，対数標準偏差をTable 6に示す各ケースの限界値から得られた値とする対数正規分布に従うと仮定し，各入力地震動レベルの損傷確率を算定した。損傷確率の値をTable 9に，それらを最小二乗法を用いて対数正規分布にフッティングさせた損傷確率曲線として表したものをFig. 13に示す。

### 5.2 構造物の復旧性能評価

構造物の復旧性能は，5.1で示した損傷確率に基づき評価することができる。例えば4章で現実的応答を計算した入力地震動800Galのケースの場合，基本モデルによる計算では最大層間変形角が $0.31 \times 10^{-2}$ となり，小破の限界値 $0.33 \times 10^{-2}$ を超えないため，照査結果は「損傷なし」となる。しかしFig. 13の損傷確率曲線からは，800Galでも小破の確率が23.5%，中破の確率が0.2%となり，一定の損傷リスクを有することがわかる。逆の見方をすれば，この構造物は800Galの入力地震動に対して，約75%の確率で無被害だと評価することもできる。このように確率的に評価することで，個々の構造物がある一定の損傷レベル以下に留まる確率を評価することができる。

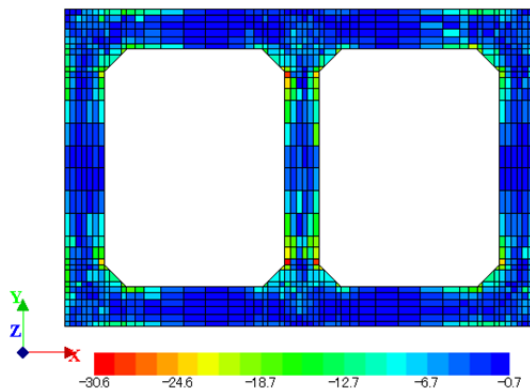


Fig. 12 コンクリートの最大圧縮応力分布 (model-1・2000Gal・全時刻最大値)  
Maximum Compressive Stress Distribution of Concrete

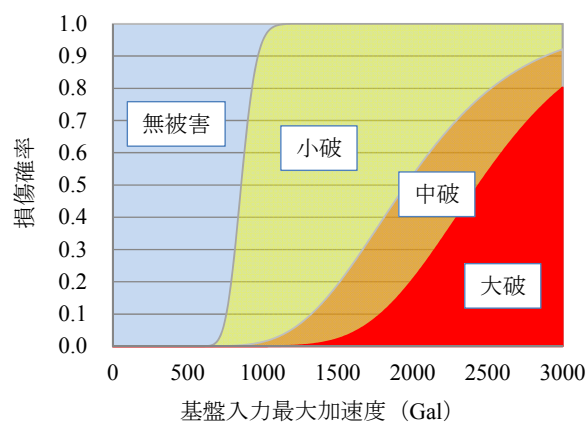


Fig. 13 地震時損傷確率曲線  
Seismic Fragility Curve

Table 9 各損傷レベルの損傷確率  
Seismic Fragility of Each Damage Level

損傷レベル	耐力値 (応答値/限界値)															
	小破					中破					大破					
耐力値が従う対数正規分布	中央値=1.0															
	対数標準偏差=0.09					対数標準偏差=0.29					対数標準偏差=0.21					
入力地震動レベル (Gal)	Case1 (400)	Case2 (800)	Case3 (1200)	Case4 (1500)	Case5 (2000)	Case1 (400)	Case2 (800)	Case3 (1200)	Case4 (1500)	Case5 (2000)	Case1 (400)	Case2 (800)	Case3 (1200)	Case4 (1500)	Case5 (2000)	
LHS法による各パラメータのサンプル値	model-1	0.35	0.79	1.56	2.10	2.96	0.15	0.35	0.68	0.92	1.30	0.14	0.31	0.61	0.82	1.16
	model-2	0.34	0.88	1.41	1.82	2.64	0.20	0.51	0.82	1.05	1.53	0.12	0.30	0.48	0.62	0.90
	model-3	0.28	0.84	1.50	1.93	2.62	0.12	0.35	0.63	0.81	1.10	0.09	0.27	0.48	0.62	0.84
	model-4	0.36	0.87	1.39	1.83	3.00	0.10	0.25	0.39	0.52	0.85	0.10	0.24	0.38	0.50	0.82
	model-5	0.35	1.03	1.74	2.22	3.40	0.14	0.40	0.69	0.88	1.34	0.07	0.21	0.36	0.46	0.70
	model-6	0.38	1.00	1.67	2.12	3.04	0.14	0.38	0.62	0.80	1.14	0.12	0.32	0.53	0.68	0.97
	model-7	0.36	0.91	1.41	1.99	3.08	0.13	0.33	0.51	0.72	1.12	0.08	0.20	0.31	0.44	0.68
	model-8	0.31	0.91	1.66	2.17	3.11	0.08	0.23	0.41	0.54	0.78	0.07	0.20	0.37	0.48	0.70
	model-9	0.35	0.98	1.69	2.19	2.92	0.07	0.18	0.31	0.41	0.54	0.06	0.17	0.29	0.37	0.49
	model-10	0.40	0.96	1.54	2.25	3.54	0.11	0.27	0.43	0.63	0.99	0.07	0.18	0.28	0.41	0.65
平均値	0.35	0.92	1.56	2.06	3.03	0.12	0.32	0.55	0.73	1.07	0.09	0.24	0.41	0.54	0.79	
標準偏差	0.03	0.07	0.13	0.16	0.29	0.04	0.10	0.16	0.20	0.29	0.03	0.06	0.11	0.14	0.19	
変動係数	0.10	0.08	0.08	0.08	0.09	0.31	0.30	0.29	0.28	0.27	0.28	0.24	0.27	0.26	0.24	
中央値	0.35	0.91	1.55	2.05	3.02	0.12	0.31	0.53	0.70	1.03	0.09	0.23	0.39	0.52	0.77	
対数標準偏差	0.10	0.08	0.08	0.08	0.09	0.30	0.29	0.29	0.27	0.27	0.27	0.23	0.27	0.26	0.24	
信頼性指標 B	7.79	0.72	-3.50	-5.89	-8.29	5.08	2.82	1.56	0.89	-0.08	7.01	4.60	2.72	1.95	0.82	
損傷確率 $P_f$	0.0%	23.5%	100.0%	100.0%	100.0%	0.0%	0.2%	6.0%	18.7%	53.1%	0.0%	0.0%	0.3%	2.6%	20.5%	

それぞれの損傷レベルに応じて復旧に要する期間やコストが異なり、一般的には損傷の度合いが小さいほど復旧が容易であることから、小さな損傷レベル以下に留まる確率が大きいほど復旧性能が高いと評価できる。

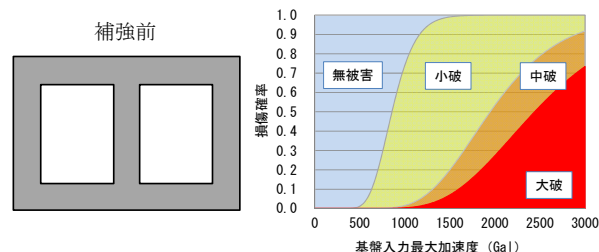
この考え方を個別の構造物に対する対策効果の評価にも利用することができる。Fig. 14に補強前後の復旧性能を損傷確率曲線で比較した例を示した。(a)の補強前では、基盤入力最大加速度のレベルが1000Galを超えると、中破・大破の損傷確率が急激に大きくなるが、(b)の補強後では、1000Galを超える範囲での中破・大破の損傷確率の増加が緩やかに抑えられている。このことは、対策の結果、地震動が大きくなってでもできるだけ小破のレベルにとどめ、早期復旧を図ることのできる確率が高くなったことを示している。また工場や社会基盤施設など、1つのシステムを構成する複数の構造物に対して各々の損傷確率を比較することで、損傷確率の高いものから対策を実施しシステム全体の復旧性能を高めるという、対策の優先順位づけにも役立てることができる。

## 6. まとめ

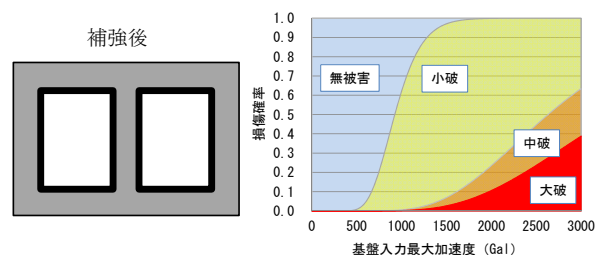
地中RCボックスカルバートを対象として、高度な2次元非線形FEM解析を実施して地震時損傷確率を算定するとともに、その結果から構造物の復旧性能を評価する手法について提案した。

- 1) 地中RCボックスカルバートに対応した3つの損傷レベル(小破・中破・大破)を設定し、それぞれの評価の根拠となる限界値を設定した。
- 2) コンクリート強度( $f_c$ )と地盤のせん断波速度( $V_s$ )のばらつきを考慮し、LHS法による10ケースのサンプル値の組合せを用いて、層間変形角を指標とした現実的耐力ならびに現実的応答を求める2次元非線形FEM解析を実施した。
- 3) 解析で得られた現実的耐力と現実的応答から、それぞれの損傷レベルに応じた損傷確率曲線を算出することができた。
- 4) 損傷をどのレベルに留めるかは個々の構造物に要求される機能に応じて異なるため、その構造物が構成する全体のシステムの機能を考慮し、対象構造物の用途や重要度に見合った損傷の限界値を設定することが重要である。
- 5) 細かな損傷レベルに対応した損傷確率を求めるには、今回用いたFINALやFINAL-Geoのように、現実的な応答や耐力を適切に評価できる高度な解析技術が不可欠である。

個々の構造物の損傷確率は、地震後の復旧の容易さや対策効果を判断する指標として活用することができる。またシステム全体の復旧性能評価にもつなげることができ、地震後の早期復旧を実現できる社会基盤システムの構築に寄与することが期待される。



(a)補強前の損傷確率曲線



(b)補強後の損傷確率曲線

Fig. 14 損傷確率による耐震信頼性評価の例  
Example of Evaluation of Seismic Reliability  
Based on Seismic Fragility

## 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) 曾良岡, 足立, 本田, 田中：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, Vol.23, No.3, pp.1123-1128, 2001.6
- 3) 副島, 渡辺, 足立, 吉田：地中ボックスカルバートの地震時挙動と損傷確率評価(その2), 土木学会第66回年次学術講演会, 2011.9
- 4) 田村, 伊達, 永井, 渡辺：地中構造物の要求性能に応じた限界変位の検討, 土木学会第67回年次学術講演会, 2012.9
- 5) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書[設計編], p.279, 2013.3
- 6) 米澤, 穴吹, 江尻：大規模・高速化非線形FEM解析ソフト「FINAL-GEO」, 大林組技術研究所報, No.75, 2011.12, CD-ROM
- 7) Naganuma, K., Yonezawa, K., Kurimoto, O. and Eto, H.: Simulation of Nonlinear Dynamic Response of Reinforced Concrete Scaled Model Using Three Dimensional Finite Element Method, 13th WCEE, Paper No.586, 2004.8