

# 耐震補強を考慮した地中構造物の地震時損傷確率評価に関する検討

浦野和彦<sup>\*1</sup>・西村 毅<sup>\*1</sup>・前田博司<sup>\*2</sup>・足立有史<sup>\*3</sup>

地中構造物に対して構造物周辺地盤の固化改良による耐震補強が最近行われているが、改良体には品質のばらつきが存在するため、その影響を把握することが重要である。また、東日本大震災以降、想定以上の地震動に対して、決定論ではなく確率論での耐震安全性評価を求められる機会が増えている。

本報では、ボックスカルバートを対象とした地盤-構造物連成の2次元FEMによる非線形地震応答解析を実施し、地震時損傷確率評価（フラジリティ評価）を行った。本評価では、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用いて損傷確率曲線を作成し、ばらつきを考慮しても十分な耐震補強効果を有していることを確認した。

キーワード：地中構造物，損傷確率，耐震補強，モンテカルロシミュレーション

## 1. はじめに

東日本大震災を契機に、構造物の耐震補強工事が順次進められている。地中構造物についても、図-1に示すように、大規模地震を想定した地盤改良等による耐震補強が最近行われている。著者らは、既設の地中構造物の耐震補強に地盤改良工法を適用した場合の補強効果についてこれまで検討を行ってきた<sup>1)</sup>。しかし、高圧噴射工法により造成される固化改良体には品質のばらつきが存在し、そのばらつきが補強効果に与える影響について把握することは重要である。また、震災以降、重要構造物に関しては、設計地震動より大きな想定以上の地震動も含めて、決定論ではなく確率論で耐震安全性評価を行うことが求められるようになってきている。

本検討では、地盤改良体や構造物周辺の地盤の物性値のばらつきを考慮した場合の地中構造物の耐震補強効果について検討するため、モンテカルロシミュレーションを用いた2次元FEMによる非線形動的解析を実施した。この動的解析結果に基づき実施した地震時損傷確率評価（フラジリティ評価）や耐震補強効果に関する検討結果について報告する。

## 2. 地震時損傷確率評価の概要

地震時損傷確率評価（フラジリティ評価）とは、地震動の大きさに応じた構造物の壊れやすさを確率論的に評価するもので、図-2に示すように応答の確率分布が耐力の確率分布と重なる割合をもとに評価する<sup>2),3)</sup>。

損傷確率曲線（フラジリティ曲線）は、地震動強さと構

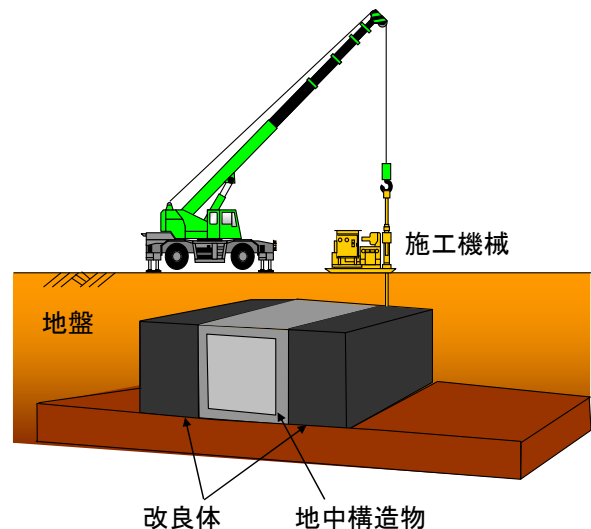


図-1 地中構造物の耐震補強の概要

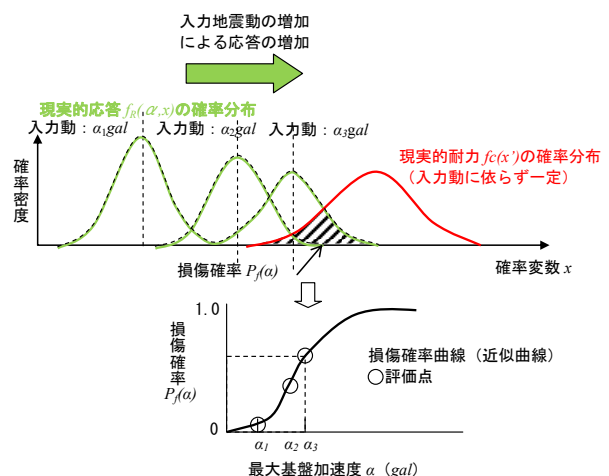


図-2 地震時損傷確率評価の概要

造物, 機器等の損傷確率の関係を表したものである。損傷確率は, 地震動強さ  $\alpha$  における応答が耐力を上回る時の条件付き損傷確率である。応答及び耐力は, 設計値ではなく“現実的な応答”及び“現実的な耐力”として, それぞれを確率分布で表す。

損傷確率  $P_f(\alpha)$  は“現実的な応答”及び“現実的な耐力”を用いて式-1のように表される。

$$P_f(\alpha) = \int_0^{\infty} f_R(\alpha, x) \left\{ \int_0^x f_c(x') dx' \right\} dx \quad (1)$$

ここで,  $f_R(\alpha, x)$  は現実的な応答の確率分布,  $f_c(x')$  は現実的な耐力の確率分布を表し, 一般的に対数正規分布に従うと仮定される。

図-2の横軸に記載される損傷評価のための指標である確率変数  $x$  とは, 構造物, 機器等の地震時における損傷評価のための応答の物理量(力, 応力, 加速度, 変位及びひずみ等)のことであり, 評価対象物の損傷モードに対応したものである。

損傷確率曲線は, 図-2に示すように, 幾つかの地震動強さについて離散的に求めた損傷確率に対して, その確率分布が対数正規分布に従うと仮定すると, 最小二乗法等により近似的に求めることができる<sup>4)</sup>。

### 3. 解析方法

#### 3.1 対象構造物と解析モデル

図-3に示すように, 検討対象とした地中構造物は鉄筋コンクリート製の単ボックスの共同溝とし, 曲げ破壊先行型の構造物とした。構造物の側壁, 頂版, 底版ともに壁厚 40cm, 配筋は D16@150mm (引張鉄筋比 0.44%) である。また, ボックスは剛性の高い支持層(洪積砂質土 Ds 層)に着底し, ボックス周辺の地盤は剛性の小さい埋戻土(沖積粘性土 Ac 層)とした。

図-4に示すように, 構造物の横断方向を対象に, 構造物は梁要素, 地盤及び固化改良体は平面ひずみ要素でモデル化した。また, モデルの境界条件は, 底面粘性境界及び側方水平ローラーとし, 側方境界の影響を小さくするためモデル幅は 100m とした。ここで, 構造物と地盤の間には剥離・滑動を考慮したジョイント要素等は設置していない。

#### 3.2 地盤条件

地盤及び固化改良体(高さ 3.4m × 幅 2m)の物性を表-1に示す。地盤及び固化改良体の非線形性は図-5に示す R-0 モデルを用いて表現した。R-0 モデルのパラメータを

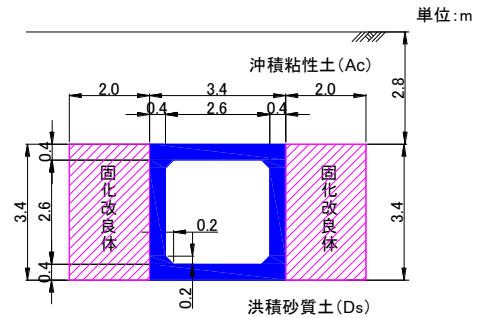


図-3 検討対象構造物

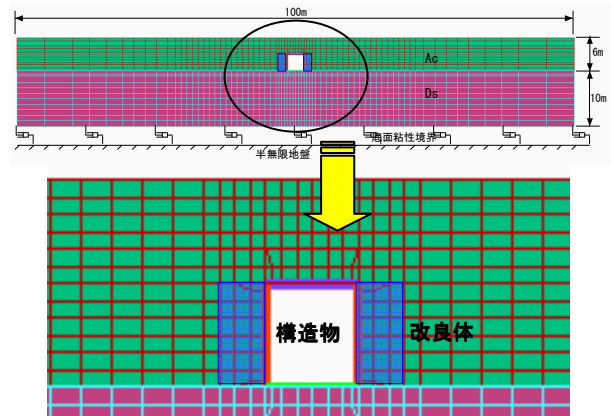


図-4 解析モデル図(補強時)

表-1 地盤及び固化改良体の物性

土質	平均 N 値	ポアソン比	単位体積重量 $\gamma_t(\text{kN/m}^3)$	せん断波速度 $V_s$		$G_0(\text{kN/m}^2)$ 平均値
				平均値(m/s)	変動係数	
Ac	2	0.49	16.5	130	0.10	28000
Ds	50	0.49	20.0	300	-	183000
改良体		0.35	16.5	316	0.25	168000

初期せん断剛性  $G_0 = \frac{\gamma_t}{g} V_s^2$   
 ここで,  $g$ : 重力加速度

表-2 地盤及び固化改良体の R-0 モデルパラメータ

土質	基準ひずみ $\gamma_{0.5}$	減衰定数 $h_{max}$
Ac	0.0010	0.20
Ds	0.0005	0.25
改良体	0.0007	0.20

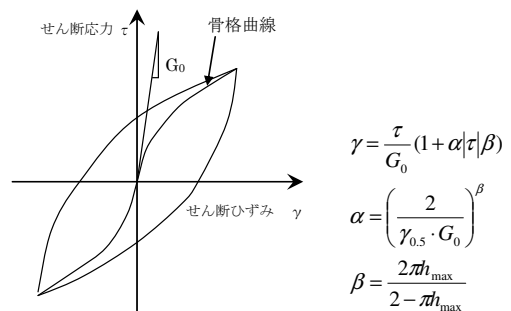


図-5 地盤の非線形モデル (R-0 モデル)

表-2に示す。ここで, 固化改良体は図-4に示すように構造物に近接する範囲とし, その変形特性 ( $G/G_0 \sim \gamma, h \sim \gamma$  関係) は, 文献5で得られた関係を用いた。また, 固

化改良体の初期せん断剛性（平均値）は、高压噴射工法における一軸圧縮強さ  $q_u$  とせん断剛性  $G$  の関係（ここでは、 $G_0=120q_u$  に設定）から算定した。

### 3.3 構造物条件

構造物の物性を表-3に示す。構造物については非線形梁要素でモデル化し、構造物の隅角部については剛域（断面二次モーメントを100倍）を考慮した<sup>6)</sup>。

構造物の非線形モデルは、図-6に示すように、コンクリートのひびわれ、鉄筋降伏を考慮することができるトリリニア型の曲げモーメント  $M$  - 曲率  $\phi$  関係とし、履歴モデルとしては修正武田モデルを用いた。ただし、軸力変動による影響は考慮していない。

### 3.4 ばらつきの評価方法

地中構造物では、構造物の応答が地盤の応答に大きく依存すると考えられるため、本検討では応答のばらつきは地盤物性値のばらつきのみ依存するとして解析を行う<sup>7)</sup>。

表-1に示すように、地盤の剛性に関するせん断波速度  $V_s$  について  $A_c$  層及び固化改良体においてばらつきを考慮した。 $A_c$  層の変動係数は文献2を参考に0.1を採用した。また、固化改良体のばらつきは  $A_c$  層と比較して大きいと考えられることから、当社で実施した試験結果等を参考に変動係数は0.25を採用した。

$V_s$  に関するばらつきは、式(2)に示す対数正規分布に従うと仮定した。定数  $\mu$ 、 $\sigma$  に対し、確率変数  $x$  の確率密度関数  $f(x)$  が

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

で与えられるとき、確率変数  $x$  は対数正規分布に従うという。ここで、確率変数  $x$  は  $0 < x < \infty$  となり、正規分布と異なり、0以下の確率は厳密に0となる。

なお、平均  $E(x)$  及び分散  $V(x)$  は、それぞれ式(3)、式(4)で与えられる。

$$E(x) = e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}} \quad (3)$$

$$V(x) = e^{2\mu + 2\sigma^2} (e^{\sigma^2} - 1) \quad (4)$$

確率分布を対数正規分布と仮定し、ラテンハイパーキューブサンプリング法（LHS法）<sup>8)</sup>により、図-7に示す20ケースの解析ケースを設定した。ここで、LHS法とは、図-8に示すように、パラメータの値のとり得る範囲を格子状に分割し、その中で乱数を用いてサンプリングする方法である。同じ行・列でサンプリングしないように

表-3 構造物の物性

	ポアソン比	単位体積重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	ヤング係数 $E$ (kN/m <sup>2</sup> )
RC構造	0.2	24.0	$2.5 \times 10^7$

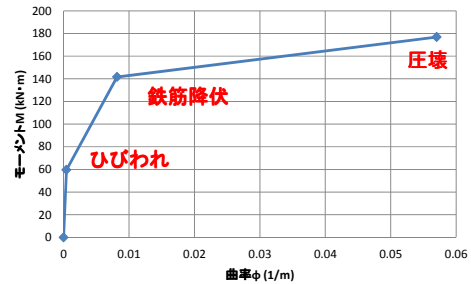


図-6 構造物の非線形モデル（M -  $\phi$  関係）

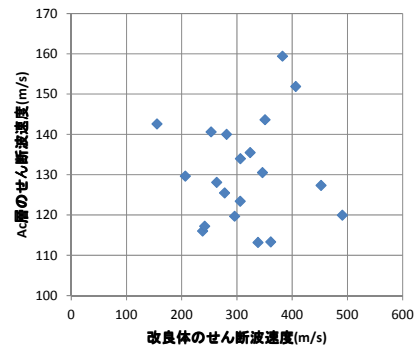


図-7 解析ケース

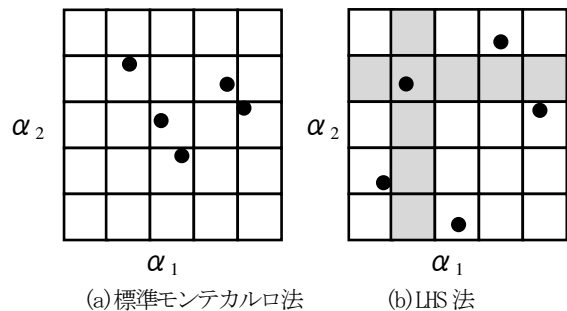


図-8 サンプリング法の比較

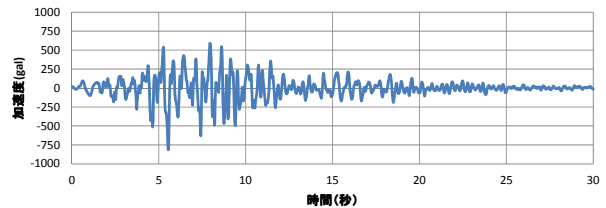


図-9 入力地震動（道路橋示方書レベル2地震動）

し、サンプリングの偏りを防ぐことにより、標準的なモンテカルロシミュレーションと比較して試行回数を少なくすることが可能になる。

### 3.5 入力地震動と解析方法

入力地震動は、図-9に示す道路橋示方書<sup>9)</sup>のレベル2地震動（タイプII、兵庫県南部地震の神戸海洋気象台地盤上の波形、最大加速度812gal）とし、解析モデル下端の基盤面での最大加速度の値を600, 800, 1000, 1200gal

の4通りに振幅調整した地震動を水平方向に入力した。

解析はNewmark-β法による直接積分法(β=1/4, 解析時間間隔Δt=0.002秒)で実施した。また, 減衰としてRayleigh減衰を採用し, その係数は剛性比例型で地盤の固有振動数に対して2%の減衰を考慮した。

常時荷重については, 地震応答解析に先立ち初期応力解析(常時解析)を実施し, 考慮した。

#### 4. 解析結果

##### 4.1 応答の比較

無補強時と補強時の最大変形図及びせん断ひずみ分布図(1200gal入力時, Vs平均値)を図-10に示す。せん断ひずみの分布状況からAc層下部のDc層との境界部において3%近くの卓越したせん断ひずみ(図中の赤い部分)を生じており, 剛性の小さいAc層で変位が卓越していることが確認できる。

無補強時と補強時の比較では, 補強時は固化改良体の存在により, 構造物周辺(側方)でせん断ひずみが小さくなっており, 変形図からも改良体により構造物の変位が抑制されていることが確認できる。しかし, 結果を記載していない最大加速度分布も含めて構造物周辺以外の地盤の応答にほとんど差は見られない。

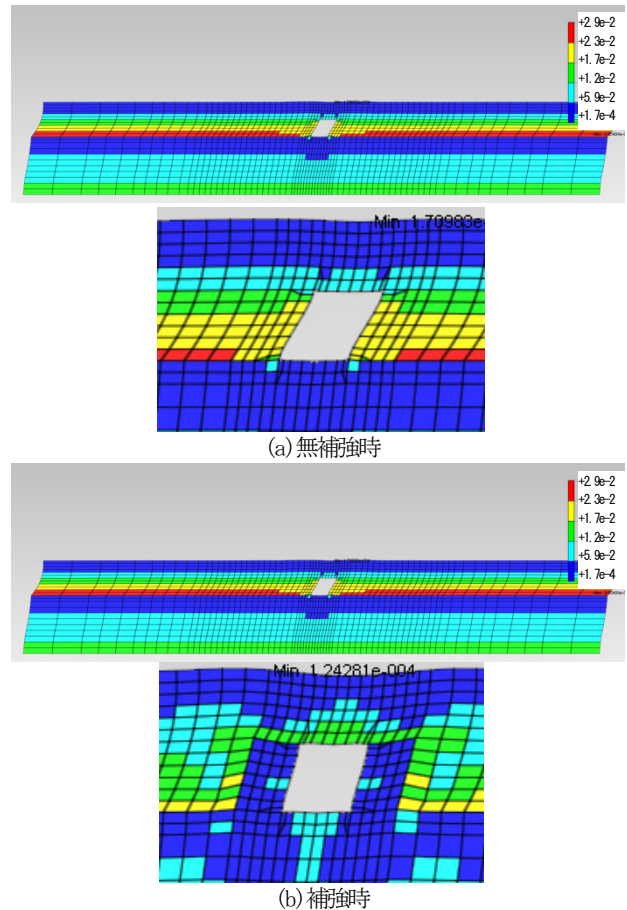


図-10 最大変形図及びせん断ひずみ分布図(1200gal入力時, Vs平均値)

##### 4.2 構造物の照査

今回の検討では構造物については曲げ破壊を照査対象とし, 損傷指標としては層間変形角(限界値:1%)とした。

図-11に構造物の層間変形角の時刻歴波形(1200gal入力時, Vs平均値)を示すが, 補強により無補強時の半分程度に低減しており, 改良体による補強効果が確認された。

図-12に無補強時及び補強時の構造物の層間変形角に関する fragility curves を示す。この fragility curves は, 離散的に求めた損傷確率が対数正規分布に従うと仮定して最小二乗法により作成した。

無補強時には800galで損傷確率が0.5を超え, 1200galでは損傷確率が1.0となっている。一方, 補強時には1000galまではほとんど損傷確率は増加せず, 1200galにおいても損傷確率は0.3程度であり, 改良体のばらつきを考慮しても十分な補強効果があることが確認された。

図-13に設計地震動の最大加速度812galとほぼ同じであり, 無補強時に損傷確率が増加し始める800galにおける鉄筋降伏発生位置を示すが, 補強により鉄筋降伏発生位置(図中の●)がなくなっていることがわかる。

図-14に補強時の地盤物性値Vsと層間変形角の関係を示す。最大層間変形角の大きさは最小0.5%~最大1.3%

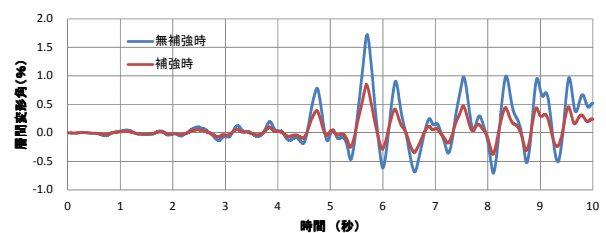
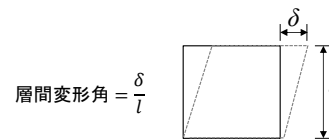


図-11 層間変形角の時刻歴波形(1200gal入力時, Vs平均値)

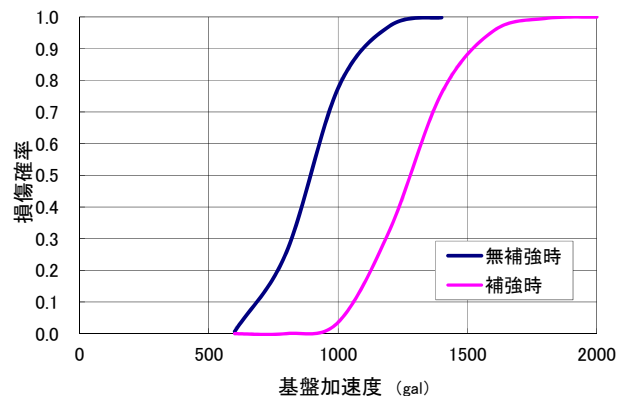


図-12 フラジリティ曲線(構造物の層間変形角)



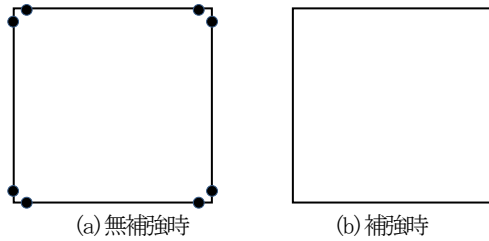


図-13 鉄筋降伏発生位置 (800gal 入力時, Vs 平均値)

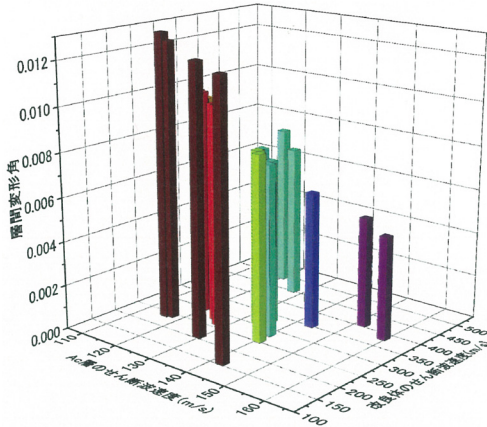


図-14 補強時の地盤物性値と層間変形角の関係 (1200gal 入力時)

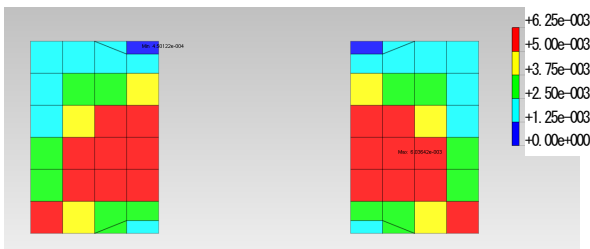


図-15 固化改良体の最大せん断ひずみ分布図 (1200gal 入力時, Vs 平均値)

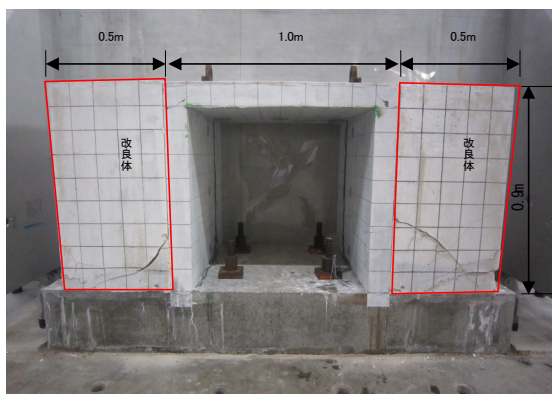


図-16 载荷試験による改良体の損傷状況

となっており, Ac 層及び改良体の Vs の値が小さいほど層間変形角は大きくなっている。

### 4.3 改良体の照査

改良体の損傷指標はせん断ひずみとし, 三軸試験の結果等から限界値は 0.5% とした。図-15 に改良体の最大

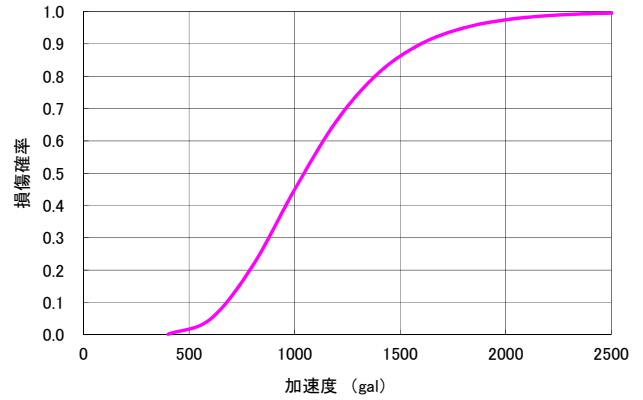


図-17 フラジリティ曲線 (改良体のせん断ひずみ)

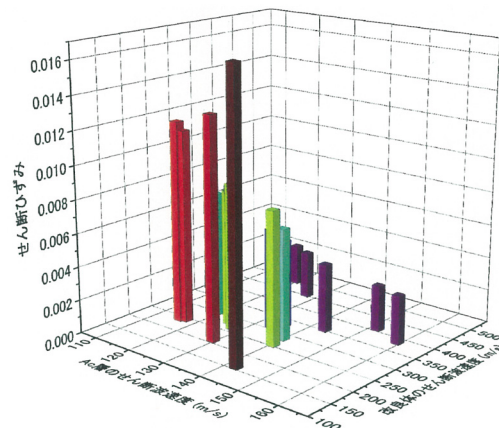


図-18 地盤物性値と改良体のせん断ひずみの関係 (1200gal 入力時)

せん断ひずみ分布図 (1200gal 入力時, Vs 平均値) を示す。図中の赤い部分が限界値 0.5% を越えており, 図-16 に示す筆者らが実施した地中構造物の土槽载荷試験<sup>10)</sup>での改良体のひびわれ (損傷) 発生領域と類似している。

図-17 に改良体のせん断ひずみに関するフラジリティ曲線を示す。800gal から損傷確率が増加し始め, 1200gal では損傷確率は約 0.65 となっており, 改良体は部分的に損傷を受けていると考えられる。しかし, 前記の地中構造物の土槽载荷試験では改良体が損傷を受けても構造物の層間変形角 1% 程度までは十分補強効果を維持できることを確認しており, 今回も層間変形角の大きさから判断して補強効果は維持していると考ええる。

図-17 に地盤物性値 Vs と改良体のせん断ひずみの関係を示す。せん断ひずみの大きさは最小 0.3% ~ 最大 1.7% となっており, Vs の値が小さいほど, 特に改良体の Vs の値が小さいほどせん断ひずみは大きくなっている。

## 5. まとめ

地盤改良体を利用した地中構造物の耐震補強効果を確認するため, モンテカルロシミュレーションを用いた 2 次

元動的 FEM 解析による地震時損傷確率評価を実施した。

得られた知見を以下に示す。

- ①地中構造物に対して、地盤及び改良体の剛性のばらつきを考慮した曲げ破壊を照査項目としたフラジリティ曲線を作成し、耐震安全性を確認した。
- ②地盤及び改良体の剛性のばらつきを考慮しても、固化改良体による耐震補強が地中構造物に対して十分な補強効果を有していることを確認した。
- ③地盤改良体のせん断破壊を照査項目としたフラジリティ曲線を作成し、土槽載荷試験結果との比較等から、耐震安全性を確認した。

本検討では構造物の曲げ破壊に対する検討を行ったが、せん断等他の照査項目についても検討を進めていく予定である。また、今回は入力地震動として内陸直下型の地震動のみを対象としたが、地震動の特性の影響についても今後検討を進めていく予定である。

#### 参 考 文 献

- 1) 木村誠, 三反畑勇, 浦野和彦, 足立有史: 繊維混合改良土による地下構造物の耐震補強効果の検討 (その 2 改良範囲低減効果), 土木学会第 67 回年次学術講演会, III -276, 2012.
- 2) 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.
- 3) 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, No. 2, pp. 1123-1128, 2002.
- 4) 堤英明, 蛭沢勝三, 中村晋: 原子力施設における地中構造物の実用的な損傷確率評価手法の提案, 土木学会論文集 A, Vol. 63, No. 4, pp. 704-715, 2007.
- 5) 山田淳夫, 三反畑勇, 足立有史, 浦野和彦: 繊維混合改良土の静的・動的力学特性に関する基礎的検討, 第 45 回地盤工学研究発表会, No. 421, 2010.
- 6) 土木学会: 2012 年制定コンクリート標準示方書設計編, 2012.
- 7) 坂下克之, 畑明仁, 志波由紀夫: モンテカルロシミュレーションによる地中構造物の地震時損傷確率評価及び評価手法の簡易化の検討, 第 33 回地震工学研究発表会講演論文集, pp. 1-18, 2013.
- 8) 吉田郁政, 鈴木修一: 限界地震動指標を用いた損傷確率の効率的な算定方法, 構造工学論文集, Vol. 49A, pp. 201-206, 2003.
- 9) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2012.
- 10) 浦野和彦, 足立有史, 西村毅, 大部哲哉, 河邑眞: 粘性土改良体を用いた地下構造物の耐震補強効果に関する土槽載荷試験による検討, 土木学会論文集 C, Vol. 68, No. 4, pp. 720-731, 2012.

---

### A Study of the Probability of Seismic Failure for Underground Structures Using Earthquake-resistant Reinforcement

Kazuhiko URANO, Tsuyoshi NISHIMURA, Hiroshi MAEDA and Yuji ADACHI

Underground structures are recently being reinforced against earthquakes by the ground solidification body method. After the Great Eastern Japan Earthquake, the evaluation of seismic safety using the probability theory for seismic motions beyond the assumed design parameters is seen as an important tool in determining uncertain quality in the ground solidification body.

In this report, the nonlinear earthquake response analysis of a box culvert by a two-dimensional FEM was conducted and a fragility analysis was performed. The influence of the ground reinforcement effect on the underground structure was discussed using the Monte Carlo simulation, which considers the uncertainty of the soil properties in the evaluation of the probability of seismic failure.

---