

地中構造物の地震時損傷確率評価に関する一検討

浦野和彦^{*1}・西村 毅^{*1}・吉田郁政^{*2}

地中構造物についても大規模地震を想定した地盤改良による耐震補強が行われているが、品質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が重要である。しかし、地中構造物を対象とした地震時損傷確率評価では、地盤-構造物連成の2次元動的FEMが必要となるため、膨大な計算ケース、計算時間を要することもあり、設計業務への適用が難しい状況である。本報では、最小限のモンテカルロシミュレーションを用いた簡易的な損傷確率評価法を提案し、ボックスカルバートを対象とした地震時損傷確率評価を実施した。評価結果に基づき簡易法と従来法の比較を実施し、簡易法の適用性を確認した。

キーワード：地中構造物、損傷確率、モンテカルロシミュレーション、耐震補強

1. はじめに

地中構造物についても大規模地震を想定した図-1に示すような地盤改良による耐震補強が東日本大震災以降行われている。筆者らも補強効果の検討¹⁾等を行っているが、高圧噴射工法により造成される固化改良体には品質に大きなばらつきが存在し、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。しかし、地中構造物を対象とした地震時損傷確率評価では、地盤-構造物連成の2次元 FEM モデルを用いた従来のモンテカルロシミュレーション（以下「MCS」という）による方法が必要となり、膨大な計算ケース、計算時間を要することもあり、設計業務への適用が難しい状況である。

本報では、最小限の MCS を用いた簡易的な損傷確率評価法を提案し、耐震補強を想定したボックスカルバートを対象に地震時損傷確率評価を実施した。評価結果に基づき実施した簡易法と従来法の比較や簡易法の適用性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（ fragility 評価）²⁾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ある。通常は図-2に示すような多数の加速度レベルでの MCS から安全率を満足できない割合を算定し、 fragility 曲線を求める。そのため、膨大な計算が必要となり、例えば 10 の加速度レベルでそれぞれ 100 ケースの MCS を行った場合には全体で 1000 ケースの計算が必要となる。

今回提案する最小限の MCS を用いた簡易的な損傷確率評

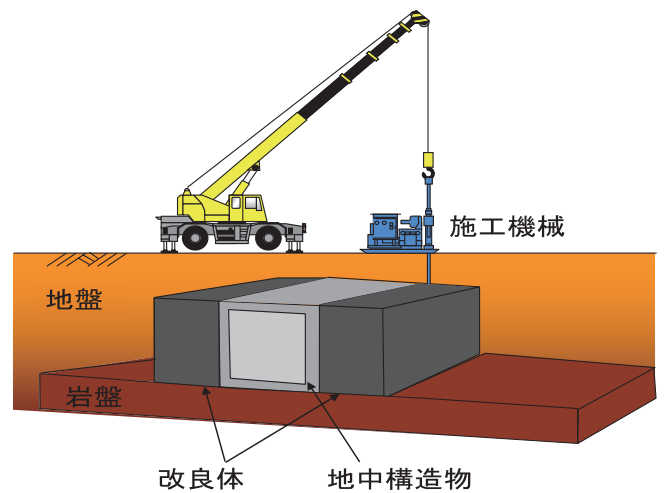


図-1 地中構造物の耐震補強の概要

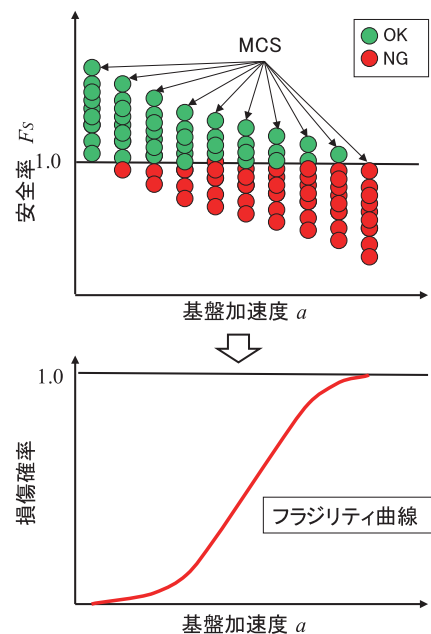


図-2 地震時損傷確率評価の概要

*1 土木研究部 *2 東京都市大学

価法（以下「簡易 MCS」という）は、**図-3**に示すように、以下の手順で fragility 曲線の算定を行う。

- ① 確率変数の中央値で各加速度レベルの安全率（青実線）を算定（これを「裕度曲線」という）
- ② 裕度曲線で安全率 1.0 となる加速度（赤実線）で MCS を実施
- ③ MCS で求めた各安全率まで裕度曲線を上下に平行移動した曲線（青波線）を算定
- ④ ③の各曲線について安全率 1.0 との交点から限界加速度を算定
- ⑤ 限界加速度のばらつきを累積分布から fragility 曲線（損傷度曲線）を作成

従来法では多くの加速度レベルで MCS を実施する必要があるが、簡易 MCS では 1 つの加速度レベルの MCS だけで fragility 曲線を算定することが可能であり、大幅な計算ケース、計算時間の低減が期待できる。

3. 解析条件

3.1 対象構造物と解析モデル

図-4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（沖積砂質土 As 層）とした。

図-5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、地盤およ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、底面粘性境界および側方水平ローラーとした。

3.2 地盤条件

地盤および高圧噴射工法による固化改良体（一軸圧縮強度 $qu=3\text{MN/m}^2$ ）の物性を表-1に示す。また、地盤および改良体の非線形性は、標準的な砂質土および固化改良体の動的変形特性を基に R-0 モデル³⁾を用いて表現しており、今回使用した R-0 モデルのパラメータを表-2に示す。ここで、基準ひずみ $Y_{0.5}$ はせん断剛性 G が初期せん断剛性 G_0 の 50% に低下するせん断ひずみである。補強のための改良体は**図-4**に示すように構造物の両側面に接する位置（高さ 3.4m × 幅 2m）に配置する。

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）⁴⁾を考慮した。

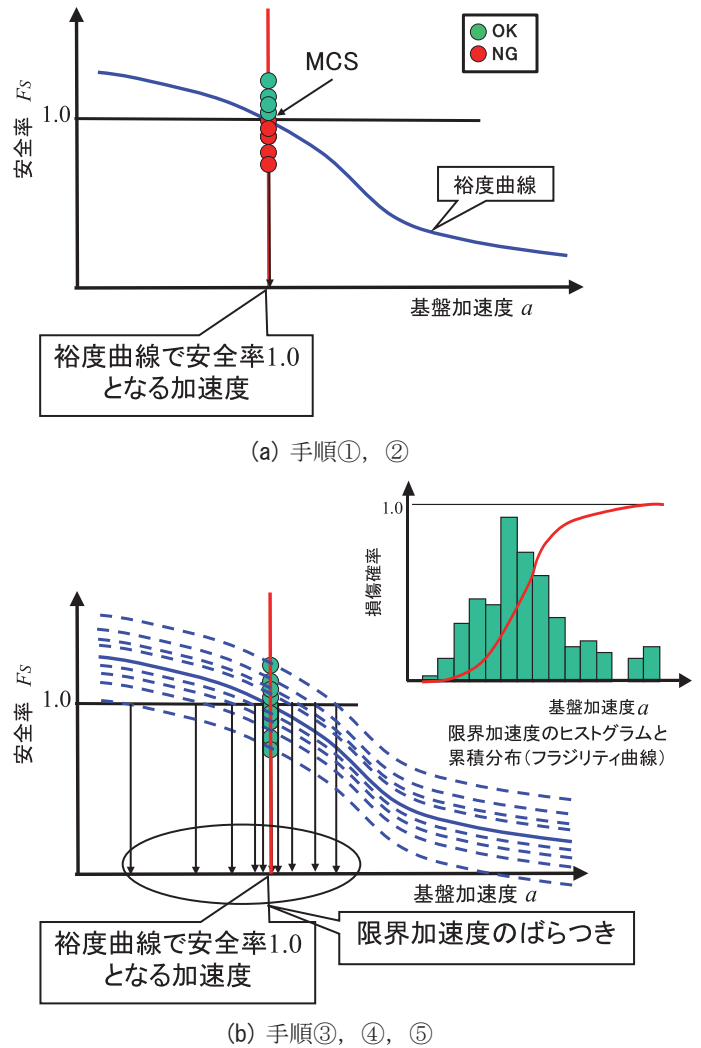


図-3 簡易的な損傷確率評価法の概要

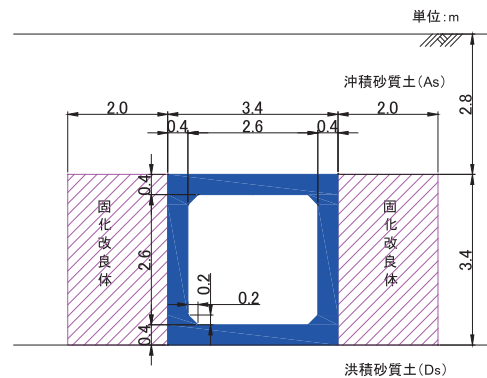


図-4 検討対象構造物

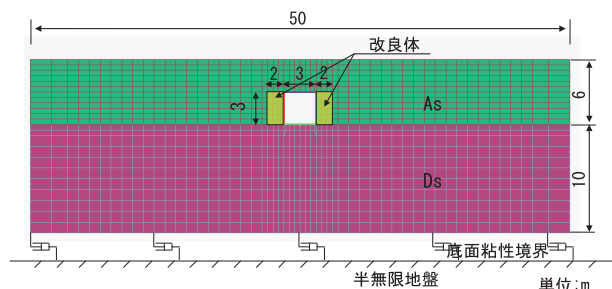


図-5 解析モデル図（補強時）

構造物の非線形モデルは、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 ϕ 関係⁴⁾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

本検討では、地中構造物の応答に影響が大きいと考えられるAs層および固化改良体の剛性（せん断波速度Vs）、コンクリートの圧縮強度f'cと鉄筋の降伏強度fyの4項目についてばらつきを考慮した。

表-1に示すように、地盤については地盤の剛性に関係するせん断波速度Vsにおいてばらつきを考慮した。As層の変動係数は文献5を参考に0.1を採用した。また、固化改良体のばらつきはAs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⁶⁾や文献7等を参考に変動係数0.25を採用した。

表-3に示すように、構造物についてはコンクリートの圧縮強度f'cと鉄筋の降伏強度fyにばらつきを考慮し、変動係数は文献5を参考に設定した。また、コンクリートの引張強度と弾性係数は圧縮強度と連動して変化することとした。

地盤材料および構造材料のばらつきは対数正規分布に従うと仮定し、ラテンハイパーキューブサンプリング法(LHS法)²⁾により、図-6に示す100通りの地盤材料および構造材料のばらつきを設定した。本検討ではそれぞれのばらつきに対応した解析ケースを作成し、全部で100ケースの解析ケースを設定した。

3.5 入力地震動と解析方法

入力地震動は、図-7に示す道路橋示方書⁸⁾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400～1700gal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（ $\beta=1/4$ 、解析時間間隔 $\Delta t=0.002$ 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（補強効果の確認）

表-1 地盤および固化改良体の物性

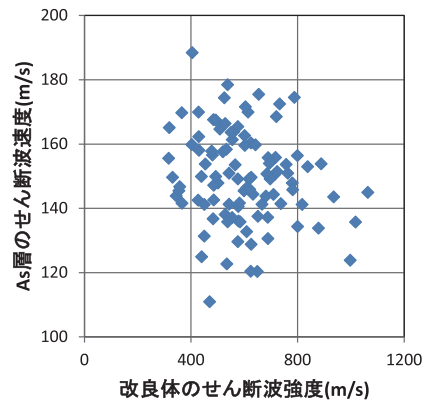
土質	ポアソン比	単位体積重量 γ (kN/m ³)	せん断波速度 Vs		G ₀ (kN/m ²) 平均値
			平均値 (m/s)	変動係数	
As	0.49	18.0	150	0.10	41300
Ds	0.49	20.0	300	-	183000
改良体	0.40	18.0	600	0.25	661000

表-2 地盤材料のR-0モデルパラメータ

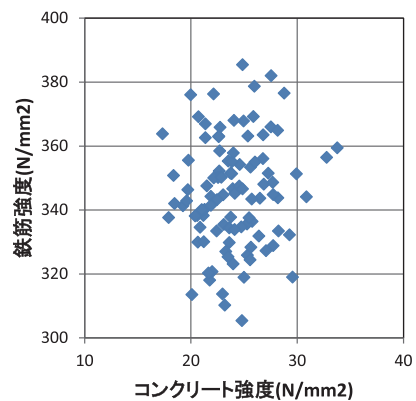
土質	基準ひずみ $\gamma_{0.5}$	減衰定数 h_{max}
As, Ds	0.0005	0.25
改良体	0.0010	0.20

表-3 構造物の材料特性

材料特性		単位	平均値	変動係数
コンクリート	圧縮強度f'c	N/mm ²	24	f'cから示方書 ⁴⁾ より算定
	引張強度ft	N/mm ²	1.91	
	弾性係数Ec	kN/m ²	2.5E+07	
鉄筋	降伏強度fy	N/mm ²	345	0.05
	弾性係数Es	kN/m ²	2.0E+08	



(a) 地盤材料のばらつき



(b) 構造材料のばらつき

図-6 解析ケース（材料のばらつき）

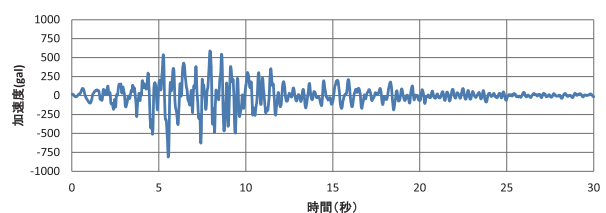


図-7 入力地震動（神戸海洋気象台）

無補強時と補強時の最大変形図およびせん断ひずみ分布図（1100gal 入力時、平均物性値）を図-8に示す。せん断ひずみの分布状況からAs層下部のDs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）が生じており、剛性の小さいAs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、ここでは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-9に構造物の層間変形角の時刻歴波形（1100gal 入力時、平均物性値）を示すが、無補強時の約2%の層間変形角（層間変位60mm）が補強により半分以上に低減しており、改良体による補強効果が確認された。

図-10に改良体の最大せん断応力（1700gal 入力時、平均物性値）を示す。図中の赤い部分で最大516kN/m²のせん断応力が発生しているが、これは改良体のせん断強度1500kN/m²以下であり、1700gal 入力時においても改良体による補強効果は維持されていると考える。また、筆者らが実施した地中構造物の土槽載荷試験¹⁾でも構造物の層間変形角1%程度までは改良体による補強効果が十分維持できていることを確認している。

4.2 フラジリティ曲線の比較

今回の検討では、構造物が曲げ破壊先行型であるため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に簡易MCSに用いる裕度曲線を示す。安全率が1.0となる加速度は無補強時700gal、補強時1350galと補強時は無補強時の約2倍の値となっている。簡易MCSではこの加速度レベルのみMCSを実施し、図-3(b)の手順③、④、⑤に従いフラジリティ曲線の算定を行った。

図-12に無補強時および補強時の構造物の層間変形角に関するフラジリティ曲線を示す。ここで、従来法(MCS)では10程度の加速度レベルで損傷確率の計算を行った。

無補強時には600galで損傷確率が増加し始め、1100galでは損傷確率が1.0となっている。一方、補強時には1100galまでほとんど損傷確率は発生せず、1300galにおいても損傷確率は0.5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確認された。

簡易MCSと従来法のフラジリティ曲線の比較では、無補強時、補強時ともに良い一致を示しており、簡易MCSの妥当性が確認された。

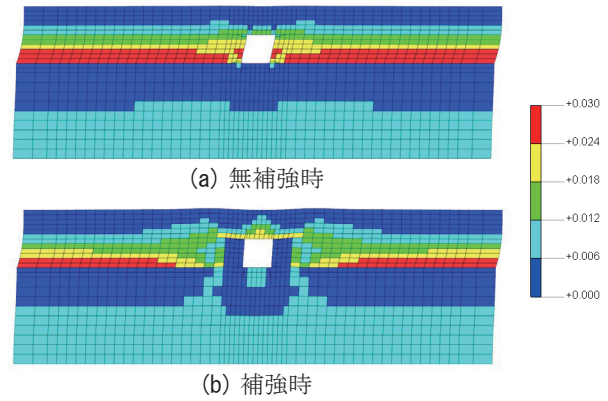


図-8 最大変形図およびせん断ひずみ分布図 (1100gal 入力時、平均物性値)

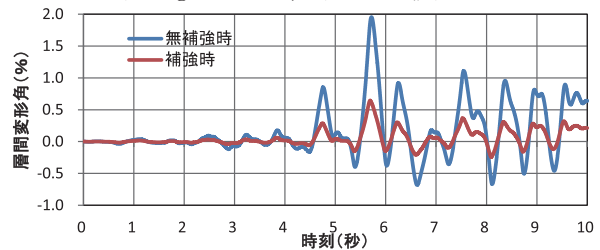


図-9 層間変形角の時刻歴波形 (1100gal 入力時、平均物性値)

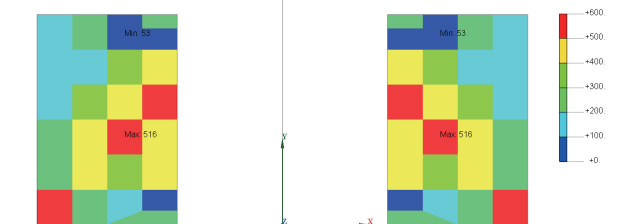


図-10 改良体の最大せん断応力 (kN/m²) (1700gal 入力時、平均物性値)

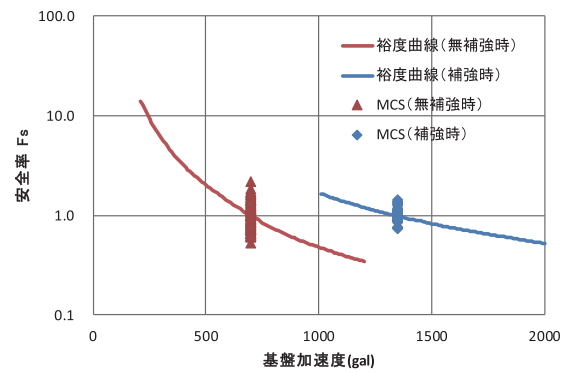


図-11 裕度曲線

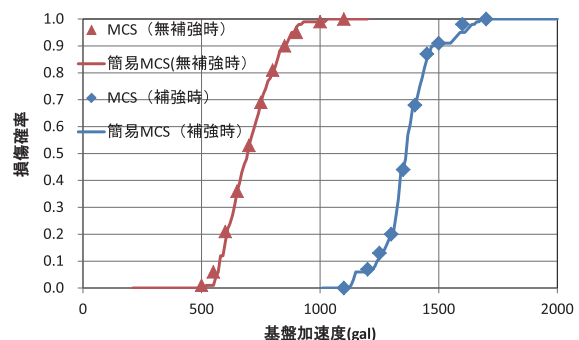


図-12 フラジリティ曲線

4.3 年損傷確率 Pf の比較

地震に対する確率論的安全性評価(地震 PSA)に用いられる年損傷確率 Pf ⁹⁾ は、建設サイトに影響のある全ての地震を考慮した1年間当たりの損傷確率であり、図-13に示すように、以下の手順で算定される。

- ① 地震ハザード曲線より得られる任意の基盤加速度 α についての年超過確率 $P_A(\alpha)$ は、式(1)より発生確率 $p_A(\alpha)$ に変換することができる。

$$p_A(\alpha) = -\frac{d}{d\alpha} P_A(\alpha) \quad (1)$$

- ② 任意の基盤加速度 α における条件付き損傷確率を $pf(\alpha)$ とすると、ある α が発生し対象構造物に与える損傷量の期待値、すなわち年損傷確率の地震動強度に関する密度(年損傷確率密度 $ed(\alpha)$) は、式(2)のようになる。

$$ed(\alpha) = p_A(\alpha) \cdot pf(\alpha) \quad (2)$$

- ③ 年損傷確率 Pf は年損傷確率密度の累計(図-13(c)の斜線部分の面積)となるため、式(3)のようになる。

$$\begin{aligned} Pf &= \int_0^{\infty} ed(\alpha) d\alpha = \int_0^{\infty} p_A(\alpha) \cdot pf(\alpha) d\alpha \\ &= \int_0^{\infty} \left(-\frac{d}{d\alpha} P_A(\alpha) \right) \cdot pf(\alpha) d\alpha \end{aligned} \quad (3)$$

図-14に示す文献10を参考に設定した地震ハザード曲線と図-12の脆弱性曲線を用いて前記の手順に基づき算定した年損傷確率 Pf を表-4に示す。ここで、図-14のハザード曲線①は宮崎県等の地震発生頻度のあまり高くないエリア、ハザード曲線②は静岡県等の地震発生頻度の高いエリアの地震ハザード曲線を参考にして作成した。

表-4の比較より、補強時の年損傷確率 Pf は無補強時の1/5以下の値に減少している。このように年損傷確率 Pf から補強効果を確認することができた。

また、 Pf の簡易 MCS と従来法の差は、ハザード曲線①、②の両方において無補強時、補強時ともに4%以下と良い一致を示しており、簡易 MCS の妥当性が Pf から確認された。

5. まとめ

本報では、ボックスカルバートを対象とした地震時損傷確率評価を実施し、提案した簡易 MCS と従来法の比較より簡易 MCS の妥当性と地盤改良による耐震補強効果について検討を行った。

提案した簡易 MCS と従来法の比較より得られた知見を以下に示す。

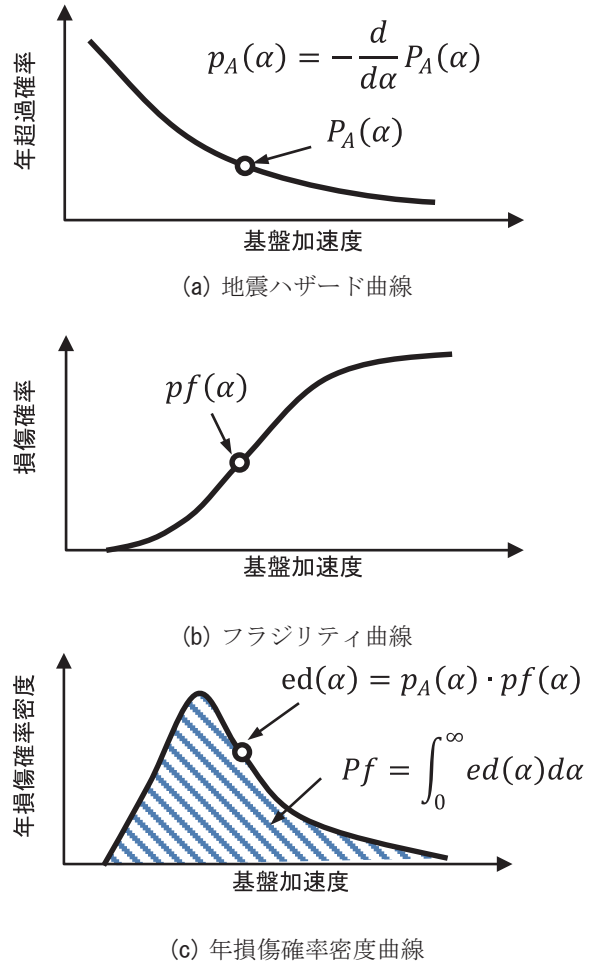


図-13 年損傷確率 pf の算定方法

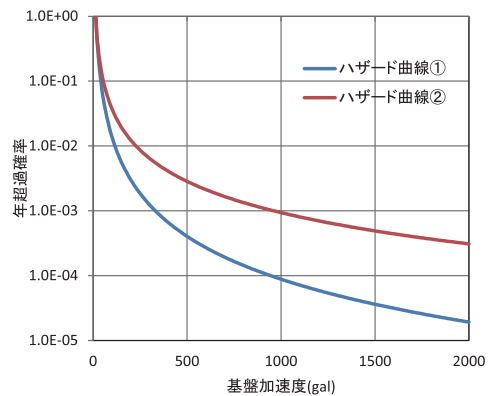


図-14 地震ハザード曲線

表-4 年損傷確率 Pf の比較

ハザード曲線	算定法	無補強時	補強時
①	従来法(MCS)	1.89E-04	2.55E-05
	簡易MCS	1.82E-04	2.58E-05
	簡易MCS/従来法	0.96	1.01
②	従来法(MCS)	1.42E-03	2.55E-04
	簡易MCS	1.39E-03	2.64E-04
	簡易MCS/従来法	0.97	1.03

- ① フラジリティ曲線の比較において、無補強時および補強時ともに従来法と良い一致を示しており、簡易MCSの妥当性が確認された。
- ② 年損傷確率 Pf の比較において、無補強時、補強時ともに従来法との差は4%以下と良い一致を示しており、簡易MCS法の妥当性が確認された。
- 以上のように、今回の検討によって提案した簡易MCSを用いることにより、従来法の約1/10の計算ケース、計算時間で従来法と同等の計算結果を得ることができていることを確認した。
- また、フラジリティ曲線、年損傷確率 Pf 等の無補強時と補強時の比較から、地盤改良による地中構造物の耐震補強は高い補強効果を有していることを再確認することができた。
- 今後はより複雑な解析モデルに関する検討やMCSのケース数をさらに減らすことが可能な方法について検討を行う予定である。また、今回は曲げ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。
- 参 考 文 献**
- 1) 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, No4, pp. 720-731, 2012.
 - 2) 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.
 - 3) 地盤工学会: 地盤の動的解析—基礎理論から応用まで—, pp. 56-57, 2007.
 - 4) 土木学会コンクリート委員会: 2017年制定コンクリート標準示方書【設計編】, 2017.
 - 5) 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.
 - 6) 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.
 - 7) 岩崎結子, 島村淳: 高圧噴射攪拌工法(JETCRETE工法)の改良体品質について その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 707-708, 2013.
 - 8) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, 2017.
 - 9) 岩本篤, 青戸拓起, 吉川弘道: RC橋脚の損傷期待値算定に関する一手法, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, No. 1, pp. 427-432, 1999.
 - 10) 安中正, 矢代晴実: 大地震の発生サイクルを考慮した日本列島の地震危険度解析モデル, 第10回日本地震工学シンポジウム, pp. 489-494, 1998.

A Study on the Seismic Failure Probability Evaluation for the Underground Structure

Kazuhiko URANO, Tsuyoshi NISHIMURA and Ikumasa YOSHIDA

Seismic reinforcement is also performed for underground structures by ground improvement assuming a large-scale earthquake, but it is important to understand the effects of quality variations on the reinforcement effect. However, earthquake damage probability assessment for underground structures requires a two-dimensional FEM of ground-structure interaction, which may require enormous numbers of calculation cases and calculation time and is difficult to apply. In this paper, a simple damage probability evaluation method using the minimum Monte Carlo simulation is proposed, and damage probability evaluation during an earthquake was conducted for box culverts. Based on the evaluation results, we compared the simplified method with the conventional method, and confirmed the applicability of the simplified method.
