

鉄道盛土の地震時確率論的リスク評価

防衛大学校 学生会員 ○鉄本 聡大

防衛大学校 正会員 篠田 昌弘・宮田 喜壽

1. 背景と目的

現在の鉄道盛土の耐震設計では、地域別係数と二段階の地震動レベルを考慮することで、地震の発生頻度、規模、発生場所の不確定性を簡易に考慮している。小地震から大地震まで連続的に、地震の規模に応じた発生頻度を考慮して、構造物の耐震性能を評価する手法に、地震時確率論的リスク評価（Seismic Probabilistic Risk Assessment：以下、地震時 PRA と呼ぶ）がある。この手法は、地震ハザード評価と対象構造物のフラジリティ評価を実施して、対象構造物の地震による被害を確率論により定量的に表現するものである。本研究では、鉄道盛土（無補強・補強盛土）を対象に、地震ハザード評価を実施した後、PGV を指標とした地震フラジリティ推定式を用いて、地震の発生頻度・規模・発生場所を考慮した地震時 PRA を実施した。鉄道盛土の地震時リスクを全国マップにプロットして、鉄道盛土の地震時リスクの大きさと地域特性を明らかにする。

2. 検討方法と検討結果

(1) 解析モデル

検討対象とする鉄道盛土は、高さ 3m から 9m の無補強盛土と補強盛土である。盛土勾配は 1:1.5 で一定とした。例として解析に用いた補強盛土モデルを図-1 に示す。無補強盛土モデルは、図-1 に示した補強盛土モデルから全層敷補強材を除いたモデルとなる。盛土の単位体積重量の平均値は 18kN/m^3 、変動係数は 5% とした。盛土深部の内部摩擦角の平均値は、30 度から 50 度として、表層部の内部摩擦角は深部の内部摩擦角より 5 度低い値とした。盛土表層部と深部の粘着力の平均値は、それぞれ 3.0kN/m^2 だと 6.0kN/m^2 で固定とした。内部摩擦角と粘着力の変動係数は全て 10% とした。補強材破断強度の平均値は、0 kN/m から 120 kN/m までとして、変動係数は 5% とした。なお、既往の研究を参考にして、層厚管理材の破断強度は確定値とした。全ての確率変数は、対数正規分布として、互いに独立と仮定した。

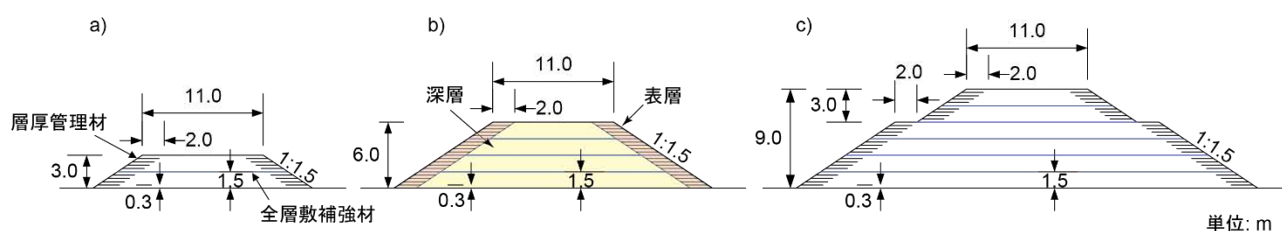


図-1 鉄道盛土の解析モデル

(2) 地震ハザード評価

本研究における地震ハザードは、地震ハザードの共通情報基盤として防災科研が一般に公開している 2020 年版全国地震動予測地図の確率論的地震動予測地図から得られるハザード情報（考慮した地震：全ての地震，確率ケース：平均ケース，経過年：30 年）を用いた。ハザード評価結果の一例として、図-2 に PGV を指標とした東京都中心部のハザード評価結果を示す。本研究では、地表面に建設された鉄道盛土の確率論的リスク評価を実施するため、工学的基盤から地表に至る最大速度の増幅率を乗じ、地表面におけるハザード評価結果を求めた。

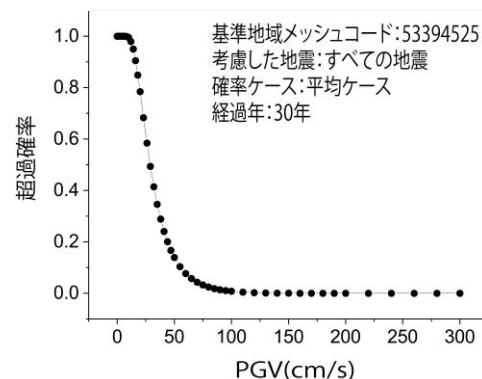


図-2 地震ハザード評価例

キーワード 盛土，フラジリティ評価，リスク評価，PGV

連絡先 〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20 防衛大学校

Tel : 046-841-3810(3512), E-mail : shinoda@nda.ac.jp

(3) 地震フラジリティ評価

文献 1)を参考に、PGV を指標とした鉄道盛土の地震時フラジリティ曲線の推定式を構築した。1996 年 3 月 16 日から 2019 年 12 月 31 日までの 400 Gal 以上の強震記録 (357 波) を収集して、地表面最大速度 (PGV) を指標としてスケーリングを行って強震データベースを作成した。この強震データベースを用いて、鉄道盛土を対象に、Newmark 法を用いた準モンテカルロ法 ²⁾により、地震時の無補強・補強盛土の限界状態超過確率を算定した。無補強・補強盛土のフラジリティ曲線推定のため、盛土高、内部摩擦角、補強材破断強度を変化させて感度解析を実施した。感度解析の結果、式 (1)に示す対数正規分布を用いることで、一般に設計で用いられる設計用値 (盛土高、盛土材の単位体積重量、内部摩擦角、粘着力、補強材破断強度) のみで無補強・補強盛土のフラジリティ曲線を推定できることが判明した。対数正規分布の位置母数 μ と尺度母数 σ は、式(2)と式(3)から推定し、式(2)と式(3)で用いるパラメータ A,B,C,D,E は、式(4)から式(8)と表-1 から求めことができる。

(4) 地震リスク評価

全国の地震ハザード情報と本研究で推定した鉄道盛土のフラジリティ曲線推定式を用いて、鉄道盛土の地震時 PRA を実施し、全国の鉄道盛土の地震リスクを算定した。図-3 に、算定した地震リスクを元に作成した鉄道盛土の全国地震リスクマップの一例を示す。北海道南東部や仙台平野の一部、首都圏、東海～四国地域の太平洋側及び糸魚川-静岡構造線断層帯の周辺地域などの地震リスクが高いことが分かる。このような箇所では、地震により被災する確率が高いため、被災後の復旧を見据えた検討が必要となる。

3. まとめ

本研究では、鉄道盛土を対象に地震ハザード評価と地震フラジリティ評価を実施して、地震時 PRA を実施した。検討の結果、地域特性に応じた鉄道盛土の地震時リスクを明らかにした。

参考文献：1) Shinoda et al., 2021. Practical seismic fragility estimation of unreinforced and geosynthetics-reinforced embankments in Japan,

Geosynthetics International 28(1), 48–64. 2) Shinoda M. Quasi-Monte Carlo simulation with low-discrepancy sequence for reinforced soil slopes. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE 2007;133;4;393–404. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2007\)133:4\(393\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:4(393))

$$P_e = \Phi\left(\frac{\ln I_A - \mu}{\sigma}\right) \tag{1}$$

$$\mu = \frac{A \cdot \frac{\gamma_{ave} \cdot H}{c_{ave}} + B}{\tan \phi_{ave}} + C \tag{2}$$

$$\sigma = \frac{D}{\tan \phi_{ave}} + E \tag{3}$$

$$A = \frac{A_1 \times (T_{ave}/T_r)}{A_2 \times (T_{ave}/T_r)^2 + A_3 \times (T_{ave}/T_r) + 1} \tag{4}$$

$$B = B_1 \times B_2^{T_{ave}/T_r} + B_3 \tag{5}$$

$$C = C_1 \times (T_{ave}/T_r) + C_2 \tag{6}$$

$$D = \frac{D_1 \times (T_{ave}/T_r) + D_2}{D_3 \times (T_{ave}/T_r)^2 + D_4 \times (T_{ave}/T_r) + 1} \tag{7}$$

$$E = \frac{E_1 \times (T_{ave}/T_r) + E_2}{E_3 \times (T_{ave}/T_r)^2 + E_4 \times (T_{ave}/T_r) + 1} \tag{8}$$

表-1 各種パラメータ

A_1	-0.0025	D_1	-0.0333
A_2	0.2172	D_2	-0.0252
A_3	-0.3066	D_3	0.7467
B_1	-0.2931	D_4	-0.2052
B_2	0.1488	E_1	0.8368
B_3	-0.4095	E_2	0.4454
C_1	0.1066	E_3	0.0332
C_2	5.1169	E_4	1.6713

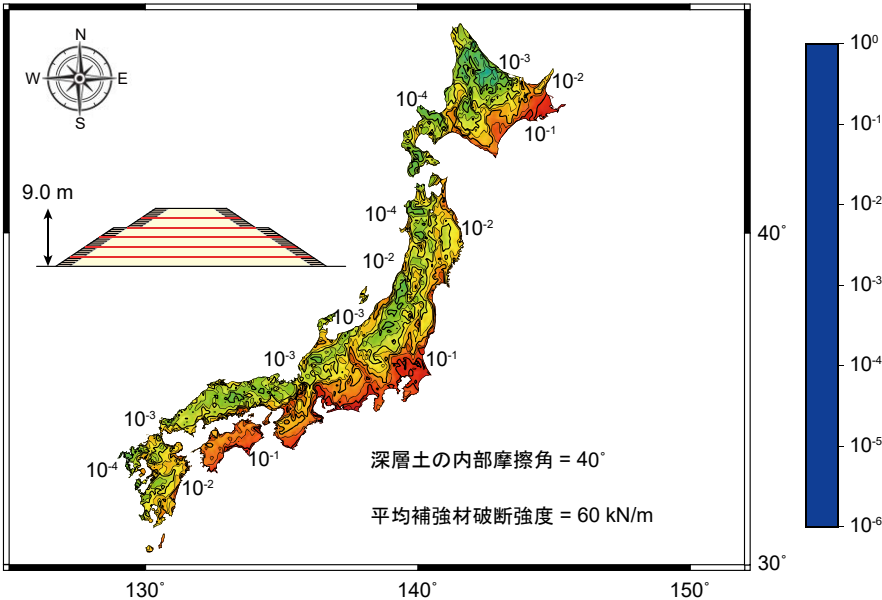


図-3 鉄道盛土の地震時リスク評価結果