補強盛土の常時荷重条件における限界状態超過確率

複合技術研究所　正会員　石塚真記子
鉄道総合技術研究所　正会員　篠田昌弘
防衛大学校　正会員　宮田喜壽

はじめに

現在多くの機関で許容応力度法を用いた設計から限界状態設計法への移行が進んでいる．限界状態設計法は，性能設計を行う際に有効な設計法ではあるものの，潜在的ばらつきを有した土質材料や補強材料を定量的に評価する際には限界がある．

本研究では，補強盛土の性能を定量的に評価することを目的として信頼性解析を実施した．具体的には，標準的な鉄道盛土（文献 1，P.384 の想定仕様）の，性能ランク，形状，材料物性を設定し，近似解法である First-order reliability method (FORM)を用いて限界状態超過確率を算定した．常時荷重条件における盛土の限界状態超過確率を提示し，安全率と比較した．

解析方法

①安全率の算定：安全率 FS は修正フェレニウス法により次式のように算定した．

$$FS = \frac{M_{rw} + M_{rc} + M_{rt} - k_h M_{rk}}{M_{dw} + k_h M_{dk}} \tag{1}$$

ここで，k_hは水平震度，M_{dw}は自重による滑動モーメント，M_{rw}は自重による抵抗モーメント，M_{rc}は粘着力による抵抗モーメント，M_{rt}は補強材力による抵抗モーメント，M_{dk}は単位地震慣性力の基準滑動モーメントの増分，M_{rk}は単位地震抵抗力による抵抗モーメントの減少分である．本研究では荷重条件を常時と限定しているため，水平震度の項は考慮していない．また，補強材の引き抜きに関する部分安全係数や補強材破断強度に関する部分安全係数は文献1）に準じた．

②安全性指標と限界状態超過確率の算定：FORM は，設計点が一つで性能関数が線形であれば，短時間で精度の良い解が得られるが，複数の設計点で性能関数が非線形の場合には大きな誤差が生じる．本検討では，安定な地盤上に構築された盛土を対象とすることから，設計点が一つで性能関数が線形と仮定できる．

設計用値を X_1 ～X_n を有する関数を g とし，性能関数の値を Z とする．限界状態超過の生起は以下のように判定できる．

$$Z = g(X_1, X_2, \cdots, X_n) > 0 : \quad \text{安全} \tag{2}$$

$$Z = g(X_1, X_2, \cdots, X_n) \le 0 : \quad \text{危険} \tag{3}$$

ここで，性能関数 Z は，以下のように設定した．

$$Z = FS - 1 \tag{4}$$

性能関数 Z はほとんどの場合複雑な関数となり，限界状態超過確率を厳密に求めることは困難である．そこで，性能関数 Z をテーラー展開し，級数を一次の項で打ち切り，線形化を行うことで限界状態超過確率の算定を行う．FORM では，性能関数がゼロとなる点（設計点）のまわりでテーラー展開する．すなわち，性能関数 Z を基本確率変数の設計点 x_j^*まわりでテーラー展開すると以下の式が得られる．

$$Z \approx g(x_1^*, x_2^*, \cdots, x_n^*) + \sum_{j=1}^{n} (X_j - x_j^*) \left. \frac{\partial g}{\partial x_j} \right|_{x_j^*} \tag{5}$$

性能関数 Z の平均値μ_Zと分散はσ_Z以下のように求められる．

$$\mu_Z \approx \sum_{j=1}^{n} \left(\left. \frac{\partial g}{\partial x_j} \right|_{x^*} \right) \cdot (\mu_{X_j} - x_j^*) \tag{6}$$

$$\sigma_Z \approx \sqrt{\sum_{j=1}^{n} \left(\left. \frac{\partial g}{\partial x_j} \right|_{x^*} \right)^2 \cdot {\sigma_{X_j}}^2} \tag{7}$$

式(6)および式(7)を用いて，以下のように安全性指標βを求めることができる．

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} \tag{8}$$

基本確率変数が互いに独立で正規分布関数に従い，性能関数が基本確率変数の線形関数であらわされる特別の場合には，安全性指標と限界状態超過確率 P_f ($Z \le 0$)には以下の関係がある．

$$P_f = \Phi(-\beta) \tag{9}$$

ここに，Φは標準正規確率分布関数であり，安全性指標βは，危険状態の点（$Z = 0$）から平均値μ_Zが相対的にどの程度離れているのかを示す尺度である．すなわち，性能関数 Z の平均値が大きく標準偏差が小さいほど安全性指標βは大きくなり，安全性に余裕がある．また，性能関数 Z の平均値が大きくても,標準偏差が大きければ安全であるとは言えない．この点が従来の設計法との大きな相違点である．

解析モデル

検討対象は全層敷補強材を敷設した「補強盛土」（**図１**），敷設していない「無補強盛土」（**図２**）の 2 種類である．盛土高さは 3，4.5，6，9 m の 4 種類．性能ランクは新幹線の軌道を想定した性能ランクⅠ（盛土勾配 1:1.8），在来線の軌道を想定した性能ランクⅡ・Ⅲ（盛土勾配は 1:1.5）の 3 種類である．設計基準[1)]では，盛土高さが 6 m 以上の場合，犬走り（小段）を設ける規定があるため，盛土高さ 9 m のケースでは幅 2.0 m の犬走りを設けた．また，補強材の敷設位置や土質材料の設計用値（**表１**）の適用上，**図３**のように盛土断面は盛土表層部

キーワード：補強盛土，信頼性解析，FORM
連絡先　〒190-0001 東京都千代田区飯田橋 4-6-9 ﾛｯｸﾌｨｰﾙﾄﾞﾋﾞﾙ 6F，TEL：03-5276-5276，FAX：03-5276-5309

（以下表層）と盛土深部（以下深部）の2つに区分[1]される．補強材（**表２**）は，層厚管理材と全層敷補強材の2種類とし，層厚管理材の敷設間隔は0.3 m，全層敷補強材の敷設間隔は1.5 mである．

上載荷重[1]を**表３**に，適用した変動係数[3),4)]を**表４**に示す．ここで，土質定数[1)]ならびに補強材定数[3)]の確率分布は正規分布かつ互いに独立とした．

解析結果

計算結果を**図４**に示す（図中，限界状態超過確率が1×10^{-19}より小さい場合は表示されない）．

限界状態超過確率は，値が小さいほど盛土の安定性が高いことを示す．性能ランクⅠ～Ⅲにおいて，盛土高が増すほどに安定性が低下する．ところが，性能ランクⅡ・Ⅲでは盛土高9mにおいて比較的高い安定性を示す．これは犬走りを設けたことで断面形状が変化し，盛土の安定性が増したためであると考えられる．

安全率に着目すると，性能ランクⅠ・Ⅱにおいて盛土高が増すほどに安定性が低下するが，性能ランクⅢでは盛土高3mよりも盛土高4.5mの安定性が若干高く，盛土高6mの安定性は低いことがわかる．しかし，盛土高9mにおいて高い安定性を示す傾向は限界状態超過確率と同様である．

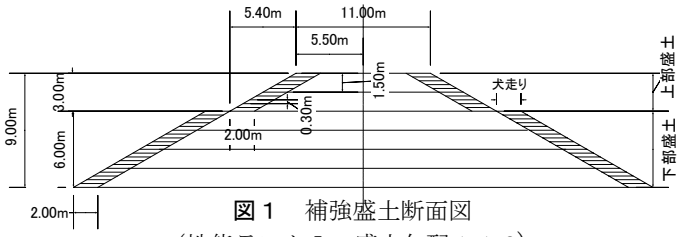

図１　補強盛土断面図
（性能ランクⅠ，盛土勾配1:1.8）

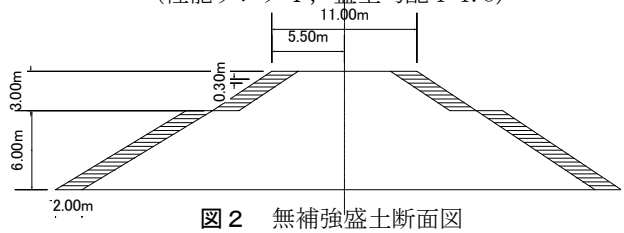

図２　無補強盛土断面図
（性能ランクⅡ・Ⅲ，盛土勾配1:1.5）

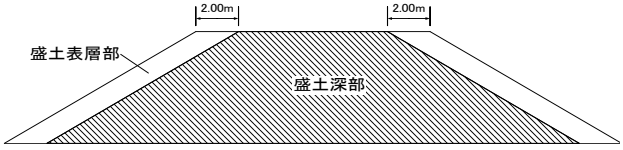

図３　盛土表層と深部の区分け

表１　土質定数（平均値）

材料		単位	土質1	土質2	土質3
単位体積重量γ_t		kN/m^3	18	17	16
表層	粘着力c	kN/m^2	3	3	3
	内部摩擦角Φ	deg.	40	35	30
深部	粘着力c	kN/m^2	6	6	6
	内部摩擦角Φ	deg.	45	40	35

表２　補強材定数（平均値）

材料	単位	平均値
全層敷補強材	kN/m	30
層厚管理材	kN/m	2

表３　上載荷重

性能ランク	軌道構造	単位	荷重値
Ⅰ	省力化軌道	kN/m^2	15
Ⅱ・Ⅲ	有道床軌道	kN/m^2	10

表４　各種定数の変動係数

単位体積重量	0.05
粘着力	0.10
内部摩擦角	0.10
補強材	0.05
層厚管理材	0.05

まとめ

鉄道の設計基準[1)]に基づき，常時荷重条件における盛土高さ3，4.5，6, 9 mの補強盛土と無補強盛土の限界状態超過確率と安全率を算定したところ，盛土高が増すと安定性が低下する傾向は概ね一致した．ところが，犬走りのある盛土高さ9 mのケースは他の盛土高とは別の傾向が見られたため，犬走りを含むケースの検討は今後の課題である．本研究では荷重条件を常時のみとしたが，今後，列車載荷時や地震時などの検討を行い，総合的に補強盛土の信頼性を評価する予定である．

文献

1) 鉄道総合技術研究所編：「鉄道構造物等設計標準・同解説: 土構造物」, 丸善, 2007.
2) 石塚真記子, 篠田昌弘,宮田善壽: 補強盛土の常時荷重条件における限界状態超過確率, ジオシンセティックス論文集, Vol. 22, pp. 125-131, 2007.
3) 原健二，桝尾孝之: ISOジオテキスタイル試験規格におけるジオグリッドの引張強度のバラツキ評価, ジオシンセティックス論文集, 第20巻, pp. 287-294, 2005.
4)渡辺健治, 大木基裕, 篠田昌弘, 小島謙一, 舘山勝: 盛土の安定性照査に用いる設計強度定数に関する三軸圧縮試験, 鉄道総研報告, 第19巻, 第3号, pp.29-34, 2005.

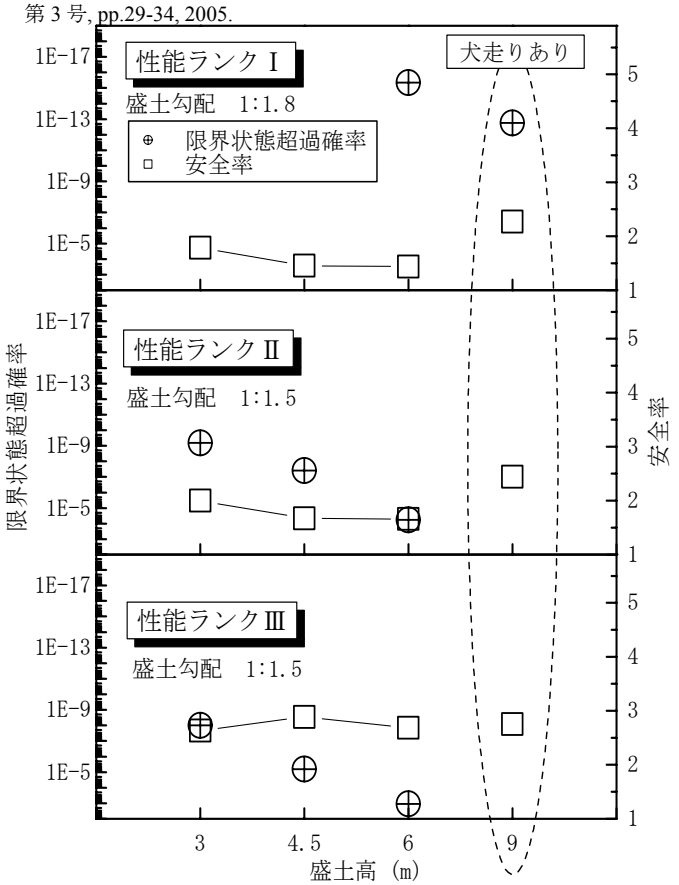

図４　盛土高に対する限界状態超過確率と安全率