鉄道盛土の降雨崩壊に及ぼす 法面上部被覆の効果

岡田勝也¹・杉山友康²・布川修²・太田直之²・土屋博幸³・岩崎昭治³

¹フェロー 国土館大学 工学部都市システム工学科(〒154-8515 東京都世田谷区世田谷 4-28-1)

E-mail: okadak@kokushikan.ac.jp

²正会員 (財)鉄道総合技術研究所 防災技術研究部(〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

³前・国土館大学大学院工学研究科(〒154-8515 東京都世田谷区世田谷 4-28-1)

鉄道盛土では、降雨時における浸食を防ぎ、法面崩壊を防止するために法面被覆工を施工することが多い。この法面被覆工は、浸食防止という機能以外にも、盛土本体の豪雨時の地下水上昇抑制効果もある。ここでは、砂質土からなる複線鉄道盛土を対象として、法面被覆工が法肩から法中腹にかけて、すなわち、法面上部に被覆されたときの盛土崩壊に及ぼす地下水位抑制効果と斜面安全率について検討した。盛土高さ、法面被覆工の施工長さなどをパラメーターに数値解析を行い、豪雨時の崩壊に及ぼす被覆工の効果を定量的に論じた。その結果、法面上部被覆は降雨時の盛土崩壊防止に寄与することが明らかになった。さらに、限界雨量による危険度評価手法へのこの結果の適用方法について具体的に示した。

Key Words : railway embankment, slope coverage, rainfall, unsaturated seepage flow analysis, slope stability analysis

1. まえがき

鉄道や道路などの線状構造物である盛土や切土は長雨や集中豪雨により崩壊することがあるが、このような崩壊は鉄道の安定輸送を阻害する原因のひとつになっている¹⁾。このため鉄道では連続雨量と時間雨量の組合せに基づく列車の運転規制基準を定めている。

しかし、運転規制値はもともと経験的な手法に基づいて決定されていた。これに対して、筆者らは過去の降雨による盛土・切土の災害データをもとに、連続雨量と時間雨量のべき乗を外的基準とする多変量解析を行い、限界雨量に基づく危険度評価手法を提案した^{2), 3), 4), 5)}。

この評価手法は、当初は、法面や施工基面に被覆や防護工のない盛土や切土に対するものであったが、後に簡易格子枠工や張ブロック工など、法面表面に簡易防護工を施工した効果を含めた限界雨量による評価手法に改良した^{6), 7)}。この評価手法を適用すれば、簡易な法面防護工の一つである張ブロック工などで法面被覆された盛土の限界雨量を求めることはできるが、法面の被覆長さなどの幾何学的パラメーターや降雨強度などの気象学的パラメーターはこの評価法には含まれていない。

そこで、筆者らはこれらのパラメーターの影響をより明確にし、盛土法面工の降雨崩壊に及ぼす影響について実験的、解析的な検討を行い、法先が被覆される場合の

限界雨量による危険度評価法の適用方法を提案した⁸⁾。

しかし、鉄道盛土の実態では、法肩から法先にかけて被覆される場合もあり、これに対する被覆工の影響については十分解明されていない。

当ノートでは、法面工が法肩から被覆される場合（以下、法面上部被覆と言う）を仮定し、法面工の被覆長さ、盛土高さや降雨強度を変化させた数値解析を行った。さらに、この解析結果を既往の限界雨量による盛土の危険度評価手法に適用する方法を提案した。

2. 法面上部被覆盛土の解析法と入力条件

(1) 法面上部被覆を有する盛土の降雨浸透・安定解析法の概要

鉄道盛土の法面被覆が法先から法中腹にかけて施工された、いわゆる下部被覆が降雨崩壊に及ぼす影響については、岡田らによる実験的、解析的研究⁸⁾がある。

そこでは、まず 1/5 模型盛土の散水実験を行って、盛土法面工の表面被覆効果について定性的な評価を行い、降雨浸透に及ぼす法面被覆の有効性を論じた。さらに、降雨によって円弧すべり崩壊を起こした実際の鉄道盛土に着目し、実降雨による地下水位変動測定データを解析して、定常地下水位・豪雨時地下水位と円弧すべり安全

図-1 被覆パターン

率の追跡シミュレーションを行った。得られた結果は実測値と十分一致することを確認した。

これを受けて、実際の鉄道盛土を対象として、図-1の caseD に示すような下部被覆に対して、被覆長さと降雨条件をパラメーターとした解析によって、法面被覆率と崩壊雨量の関係を提案した。なお、図-1 において、caseA は法面被覆のない状態、caseB は法面上部被覆、caseC は法面全面被覆を示す。

当ノートの解析では、鉄道盛土における豪雨時の降雨浸透と斜面崩壊の解析モデルと解析手法の妥当性が実験的・解析的に確認されている下部被覆に対する上述の方法⁸⁾を用いる。

(2) 法面上部被覆盛土解析のための入力条件

a) 標準的な盛土の構造

法面の被覆効果を解析するための盛土構造としては、鉄道盛土の基本的な土工定規も考慮して、複線鉄道の施工基面幅 10m、盛土高さ 8m、法勾配 1:1.5 を基本とした。過去に降雨によって崩壊した 67 例の鉄道盛土の平均高さは $H=7.4\text{m}$ (標準偏差は $\sigma=6.6\text{m}$) である³⁾ことを考慮して、 $H=8.0\text{m}$ を基本としたが、これに加えて、 $H=4\text{m}$ と 12m についても検討する。

b) 土質特性

上述の降雨によって崩壊した 67 例の鉄道盛土のうち、70%は砂質土であったので、本解析では砂質盛土を対象とした。

砂質土の力学特性としては、ここでは、粘着力は無視し、内部摩擦角 35° とした。また、法面に張ブロックが施工された砂質盛土 19 例についての湿潤重量と飽和重量の頻度分布の平均値をもとに、湿潤密度 $\rho_t=1.75\text{g/cm}^3$ と飽和密度 $\rho_{\text{sat}}=1.96\text{g/cm}^3$ を求めた。

上部被覆解析に用いる保水・透水特性曲線は下部被覆解析⁸⁾と同じものとした。これは、上述の張ブロックされた砂質盛土 19 例の保水性試験結果の平均値をもとに、Brooks-Corey 法により推定したものである。 $\theta-\Psi$ (体積含水率-圧力水頭) と $\theta-k_r$ (体積含水率-比透水係数) の関係を付図-1 に示した。これらの関係は土質材料の違いによって異なるが、鉄道盛土の平均的な値として代表させた。なお、飽和透水係数 k_s は、過去に降雨によって崩壊した砂質盛土 36 例の粒度分析をもとに Creager 式によって求めた値の平均値であり、 $k_s=$

図-2 法面上部被覆の概念図

$1.99 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ である。また、上述の湿潤密度と飽和密度に対応した体積含水率 θ について、保水・透水特性曲線を求める試験から得られた測定値の平均値は、それぞれ、0.27 と 0.32 であった。これは、降雨時の斜面安定性を議論する上で必要となる非常に湿潤した変化を捉えるという面では妥当なものと考えられる。

c) 降雨条件

外力として与える降雨は、鉄道盛土の崩壊時の実績が、平均が 30mm/h 、その標準偏差が 17.5mm/h である²⁾ことを考慮して、時間雨量 30mm/h を基準にしたが、 15mm/h と 45mm/h についても検討することにした。そして、これらの降雨を連続して与えた。

なお、この時間雨量を与える前に、盛土堤体部の定常地下水位を求めておく必要がある。盛土内の定常地下水位の計算でも、下部被覆⁸⁾と同様の手法を用いることにし、日降雨量 13.6mm/day とし、連続降雨日数 $n(\text{days})$ と連続無降雨日数 $2n(\text{days})$ を合わせた $3n(\text{days})$ を 1 サイクルとして繰り返し連続する降雨パターンにおいて、多雨期の定常地下水位を $n=1$ で与えた⁸⁾。

d) 被覆条件

盛土法面に設ける被覆長さとしては、図-1 に示した被覆が全くない caseA を基準にして、法肩から順次被覆長さを増加させ、法面 1/2 被覆した caseB を経て、法面全面被覆の caseC に到るものとした。この法肩からの法面被覆を上部被覆とした被覆形態の概念図を図-2 に示した。

このとき、降雨は、図-2 に示すように、被覆工によって遮水されるものとし、被覆されていない法面と施工基面である路盤からだけ浸透するものとした。また、底面・背面の境界条件としては浸入・浸出が無いものとした。なお上部被覆された部分の降雨は法面排水工などにより処理されて、法面下部には達しないものと仮定した。

図-3 盛土内地下水位の経時変化

法面被覆による被覆形態を被覆率 N_L で表すことにし、被覆率は、被覆工の被覆長さ L_C を法面長さ L_S で除した $N_L = L_C / L_S$ ($=0 \sim 1$) で与えることにした。上部被覆の場合には、 L_S は図-2 の AB の法面長さ、 L_C は AC の被覆工の被覆長さに相当する。

3. 法面上部被覆の被覆効果に関する解析

(1) 法面上部被覆による盛土の地下水位の断面形状

法面上部被覆工を施工した場合の盛土断面の地下水位分布の一例を示すと図-3 のようになる。図の上図は被覆の無い caseA (被覆率 $N_L=0$) の場合であり、下図は法面を上部 1/2 被覆した caseB (被覆率 $N_L=0.5$) の場合である。なお、盛土高さは 8m で、時間雨量は $r=30\text{mm/h}$ である。

図-3 において、上図の caseA (被覆率 $N_L=0$) と下図の caseB (被覆率 $N_L=0.5$) における初期水位を比較すると、後者の方が幾らかは地下水位が低いものの、ほぼ同じである。

しかし、降雨が進行した両図を比較してみると、法面被覆工の違いが地下水位形状に及ぼす影響が明らかになる。すなわち、法面が被覆されていない caseA (被覆率 $N_L=0$) の場合には、地下水位は法先から盛土の中央に行くにつれて、次第に上昇する傾向を示す。

それに比べて、被覆のある caseB (被覆率 $N_L=0.5$) 場合には、被覆工直下では降雨の浸透が遮断されるので、地下水位形状は平坦になる。特に、降雨初期の場合、例えば、10 時間経過したときの被覆面直下の地下水位形状は、法先と施工基面直下よりは低くなり凹形状を示し、法面被覆の影響が大きいことが判る。しかし、時間の経過につれて凹形状

 図-4 法先から $1/4L_S$ 点の地下水位 h と経過時間 t の関係

 図-5 安全率 F_s と経過時間 t の関係

は小さくなるものの、法面被覆による降雨遮断の影響で、caseA (被覆率 $N_L=0$) の地下水位ほどは高くないことが判る。

(2) 法面上部被覆による地下水位上昇の経時変化

ここでは、被覆率 N_L と地下水位 h の関係について考察する。被覆率 N_L をパラメーターに、法先から法面長さ L の $1/4$ の位置 (法先から $1/4L_S$ 点) における地下水位 h の時間的变化を描いてみると、図-4 のようになる。

被覆の無い $N_L=0$ の場合、地下水位は降雨の継続につれて急速に大きくなり、経過時間 t が 5000min を過ぎるとほぼ一定の水位になる。しかし、被覆率 N_L が大きくなるにつれて、水位上昇の立ち上がり勾配は小さくなっていく。全面被覆の $N_L=1$ の場合には、初めの 1000min は定常地下水位のままで、それ以降地下水位は緩やかに上昇していくのが判る。

このように法面を被覆することによって、特に降雨開始の時期には、地下水位上昇の速度を抑えることができる。

 図-6 被覆率 N_L と崩壊雨量 R_C との関係($H=4m$)

 図-7 被覆率 N_L と崩壊雨量 R_C との関係($H=8m$)

 図-8 被覆率 N_L と崩壊雨量 R_C との関係($H=12m$)

(3) 法面上部被覆による円弧すべり安全率の経時変化

盛土の地下水位上昇に伴って、円弧すべり安全率 F_s は低下する。 F_s の計算には修正フェレニウス法を用いたが、その概要は付録に示した。

図-5 は安全率 F_s と経過時間 t の関係を、被覆率 N_L をパラメーターにして、描いたものである。

被覆のない $N_L=0$ の場合には、地下水位の上昇が早いので、安全率 F_s の低下は急激である。 N_L が大きくなるにつれて、安全率 F_s の低下傾向は鈍化する。全面被覆の $N_L=1.0$ の場合には、経過時間 t が小さいときには F_s の低下はなく、その後緩やかに F_s が低下していく傾向を示す。

 図-9 被覆率 N_L と無次元崩壊雨量 N_{RC} との関係

(4) 法面上部被覆が崩壊雨量に及ぼす影響

降雨の継続によって安全率 F_s が低下し、 $F_s=1$ となったときの降雨開始からの累積雨量を崩壊雨量 R_C と定義する。実際には、この崩壊雨量の水位形成に至るまでに、表面浸食、パイピングなどで法面が崩壊することもあるが、ここではこのような現象については考えないことにした。

崩壊雨量 R_C と被覆率 N_L との関係を、盛土高さ H 別に描くと、図-6, 7 と 8 のようになる。 $H=4m$ に対する図-6 は時間雨量が $r=30mm/h$ の例であるが、 $H=8m$ の図-7 と $H=12m$ の図-8 はいずれも $r=15, 30$ と $45mm/h$ について描いたものである。これらの図から、被覆率 N_L が大きくなるにつれて崩壊雨量 R_C が高くなるのは、被覆による効果が大きくなることを示している。なお、それぞれの崩壊雨量 R_C は時間雨量 r の影響をほとんど受けないことも判る。

そこで、これらの図を時間雨量 $r=30mm/h$ における被覆のない ($N_L=0$) 場合の崩壊雨量を基準にして、それぞれの盛土高さ H について、無次元化を行ったのが、図-9 である。これによれば、被覆率 N_L と無次元崩壊雨量 N_{RC} の関係は、盛土高さ H にはあまり関係ないことが判る。この理由は、盛土高さ H を変化させても、法面被覆による雨水浸透を遮断する幾何学的な割合は同じであるからだと考えられる。

従って、この図を用いることにより、被覆の無い盛土 ($N_L=0$) の任意の時間雨量 r に対する崩壊雨量 R_C が判れば、任意の被覆長さに対する崩壊雨量を推定することが可能である。

4. 法面上部被覆の被覆率の盛土危険度評価法への適用

(1) 法面上部被覆に対する被覆効果率

鉄道盛土の危険度評価手法によれば、限界雨量は、連

図-10 被覆率 N_L と被覆効果率 P の関係

続雨量 R , 時間雨量 r に対して, $R^{0.3}r^{0.3}$ で表される. この限界雨量は, 法面が全く被覆されていない状態²⁾, あるいは張ブロックなどによって法面全体が被覆されている場合⁶⁾に限られる.

しかし, 現実には法面の下部あるいは上部だけが張ブロックなどで被覆されている箇所もある. ここでは, 3. の解析結果に基づいて, 法面上部に部分的な被覆工が施工されたときの危険度評価手法の適用について検討する.

そこで, 任意の被覆率 N_L に対する崩壊雨量の定量化を行うために, 下部被覆⁸⁾と同様に, 被覆効果率 P を次のように定義した.

$$P = \frac{R_{NL=i} - R_{NL=0}}{R_{NL=1} - R_{NL=0}} \quad (1)$$

すなわち, 3. の解析で得られた被覆率 $N_L=1$ における崩壊雨量 $R_{NL=1}$ と被覆率 $N_L=0$ における崩壊雨量 $R_{NL=0}$ との差を基準として, 任意の被覆率の崩壊雨量 $R_{NL=i}$ と $R_{NL=0}$ の差との比として定義した.

式(1)から求まる上部被覆に対する被覆効果率 P (上部被覆) を被覆率 N_L との関係で示すと図-10 (上部被覆) ようになる. なお, ここでは, 被覆率 N_L と無次元崩壊雨量 N_R の関係は, 図-6, 7 と 8 で示したように時間雨量 r にはほとんど関係ないので, 時間雨量 $r=30\text{mm/h}$ の場合について示した. しかし, 図-9 に示したように盛土高さ H に対して無時限崩壊雨量 N_{RC} は多少のばらつきがあるので, 図-10 の被覆効果率 P (上部被覆) も多少のばらつきを有することになるが, 図-10 のようなほぼ一つの非線形な関係で代表することができ, 次式で表される. すなわち, 被覆効果率 P (上部被覆) は,

$$P = -4.76 N_L^4 - 7.31 N_L^3 - 1.823 N_L^2 - 0.25 N_L \quad (2)$$

で与えられる.

式(2)によって, 任意の被覆率 N_L で盛土法面を上部被覆したときの被覆効果率 P (上部被覆) が決定できるので, そのときの限界雨量 $R^{0.3}r^{0.3}(N_L)$ は岡田ら²⁾の

の手法による被覆率 $N_L=0$ に対する限界雨量 $R^{0.3}r^{0.3}$ ($N_L=0$) と杉山ら⁶⁾の手法による被覆率 $N_L=1$ に対する限界雨量 $R^{0.3}r^{0.3}$ ($N_L=1.0$) を求めさえておけば, 容易に決定できることになる.

(2) 被覆効果率に対する上部被覆と下部被覆の比較

前述の(1)では, 法肩から被覆した場合の被覆効果率 P (上部被覆) を誘導した. ここでは, 法先から被覆された場合の被覆効果率 P (下部被覆) との比較について述べる.

下部被覆に対する被覆効果率 P (下部被覆) は,

$$P = 0.993 N_L^2 - 0.012 \quad (3)$$

で与えられている⁸⁾.

式(3)の関係を図-10 に点線 (下部被覆) として追加した. 下部被覆の場合には下に凸の放物線で近似できたのに, 上部被覆の場合には S 字曲線を示す. 被覆率が $N_L < 0.4$ の場合には, 両者の被覆効果率 P はほぼ同じである. しかし, 法肩近傍が被覆されることによって地下水位上昇が抑えられる効果が出てくるのは $N_L > 0.4$ の領域で, この場合には被覆効果率 P (上部被覆) の方が被覆効果率 P (下部被覆) よりも大きくなることが判る.

5. まとめ

盛土法面の上部被覆が降雨崩壊に及ぼす影響について述べた. その結果, 豪雨時の地下水位上昇に起因する盛土崩壊防止には, 法面上部の被覆による遮水工も有効であることが明らかになった. 得られた結果をまとめると次のようになる.

- (1) 砂質土からなる鉄道盛土を対象として, 法面被覆効果について解析した結果, 上部法面被覆は崩壊に至るまでの時間を長くし, その結果として崩壊雨量を大きくする.
- (2) 崩壊に至るまでの時間と崩壊雨量に及ぼす影響は, 被覆率 N_L が小さい場合には, 比較的小さい. しかし, 被覆率 N_L が 0.4 以上になるとその影響は急激に大きくなり, 0.8 より大きくなると鈍化する.
- (3) 被覆率 N_L を用いることによって, 被覆のない ($N_L=0$) 時の崩壊雨量 R_C から, 任意の被覆率 N_L に対する R_C を予測することができる.
- (4) 無次元崩壊雨量 N_{RC} と被覆率 N_L の関係は, 盛土高さ H と時間雨量 r にかかわらずほぼ一定である.
- (5) 上部被覆した法面工を有する盛土に限界雨量による危険度評価法を適用する場合, 式(2)に示す被覆効果率 P (上部被覆) を用いることができる.

付図-1 砂質盛土の保水・透水特性 (文献8) による

- (6) 被覆効果率 P (上部被覆) と被覆効果率 P (下部被覆) について比較すると, $N_L > 0.4$ の領域では上部被覆の方が下部被覆よりも被覆効果率が大きくなる。

付録

本論文で用いた保水・透水特性曲線の $\theta - \Psi$ (体積含水率-圧力水頭) と $\theta - k_r$ (体積含水率-比透水係数)⁸⁾ を付図-1 に示した。

また, 極限平衡法による斜面安定解析には, 次を示す修正フェレニウス法を用いた。すなわち,

$$F_s = \frac{\sum (cL + W' \cos \alpha \tan \phi)}{\sum W \sin \alpha}$$

(2006. 3. 31 受付)

EFFECT OF UPPER SURFACE COVERING OVER RAILWAY EMBANKMENT SLOPES ON RAIN-INDUCED SLOPE FAILURE

Katsuya OKADA, Tomoyasu SUGIYAMA, Naoyuki OTA, Osamu NUNOKAWA, Hiroyuki TUCHIYA and Shoji IWASAKI

It is common practice to cover railway embankment slopes with protective materials to prevent rain-induced slope failure. Although slope covering of this type is designed mainly for erosion control, it also has the effect of helping prevent the groundwater level rising through the embankment body in the event of heavy rain. This study investigates the groundwater level lowering effect of protective covering over the upper half of the slope of a railway embankment made of sandy material, and the factor of safety of the slope that can be achieved by such slope covering. A numerical analysis parameterizing such factors as embankment height and slope covering length is conducted, and the effect of slope covering on slope failure due to heavy rain is investigated quantitatively. The study has revealed that upper surface covering over an embankment slope helps prevent rain-induced slope failure. This paper also proposes a procedure for applying these results to a risk evaluation method based on critical rainfall.

ここに, F_s , W , W' , L , α , c と ϕ は, それぞれ, 円弧すべり安全率, スライスの全重量 (土, 水, 上載荷重の和), スライスの有効重量 (地下水位以下では水中重量), スライス底面の長さ, スライス底面が水平面となす角度と, 土の粘着力と内部摩擦角である。

参考文献

- 1) 日本国有鉄道土木課: 土木建造物取替の考え方, 日本鉄道施設協会, pp.1-823, 1974.
- 2) 岡田勝也, 杉山友康, 村石尚, 野口達雄: 統計的手法による鉄道盛土の降雨崩壊危険度評価法, 土木学会論文集, No.448/III-19, pp.25-34, 1992.
- 3) Okada, K., Sugiyama, T., Muraishi, H., Noguchi, T. and Samizo, M.: Statistical Risk Estimation Method for Rainfall on Surface Collapse of Cut Slope, *Soils and Foundations*, Vol.34, No.4, pp.48-58, 1994.
- 4) Sugiyama, T., Okada, K., Muraishi, H., Noguchi, T. and Samizo, M.: Statistical Rainfall Risk Estimation Method for Deep Collapse of Cut Slope, *Soils and Foundations*, Vol.35, No.4, pp.37-48, 1995.
- 5) 杉山友康: 降雨時の斜面崩壊防止のための危険度評価法に関する研究, 鉄道総研報告, 特別号 19 号, pp.1-239, 1997.
- 6) 杉山友康, 岡田勝也, 秋山保行, 村石尚, 奈良利孝: 鉄道盛土の崩壊限界雨量に及ぼす防護工の効果, 土木学会論文集, No.664/III-46, pp.161-171, 2000.
- 7) 岡田勝也, 杉山友康: 鉄道斜面 (盛土, 切取) の限界雨量による崩壊予測法とその適用, 土と基礎, Vol.49, No.7, pp.22-24, 2001.
- 8) 岡田勝也, 杉山友康, 太田直之, 布川修, 柴田英明: 鉄道盛土の法面被覆が降雨崩壊に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.778/III-69, pp.111-124, 2004.