

# 統計的手法による鉄道盛土の降雨災害危険度の評価手法

岡田勝也\*・杉山友康\*\*・村石 尚\*\*\*・  
野口達雄\*\*\*\*

本報告は、多変量解析による豪雨時の鉄道盛土崩壊の評価法について述べるものである。限界雨量は連続雨量と時間最大雨量の積値で与えられる。さらに、限界雨量は盛土の構造・土質条件、基盤の構造・地質条件、集水・浸透条件、経験雨量条件等の変数で与えられる。提案する手法によって、盛土崩壊時の雨量の限界値を概ね予測することができる。

**Keywords** : embankment, rainfall, slope stability, multivariate analysis

## 1. まえがき

鉄道沿線の盛土は梅雨期の長雨や台風等による集中豪雨によって崩壊することがあり、これが列車の安全・安定輸送を阻害する。このような災害を防止するためには危険箇所の抽出とこれらの地域の防災対策を適切に実施する必要があることはもちろんであるが、線区の特性に見合った適正な運転規制が必要となる。このため鉄道の保守担当者にとっては、降雨による鉄道盛土の崩壊の危険性を精度良く予知でき、しかも現場の技術者が容易に活用できる危険度評価手法が必要となる。

のり面の崩壊危険度を求める一手法として土質力学的な斜面の安定計算があるが、このためには詳細な土質試験や現場計測によって土質定数を求めることが必要となるので、特定の斜面に限られる。したがって鉄道沿線の盛土のように細長い土構造物の沿線全体にわたってこのような安定計算を行うことは事実上不可能であり、マクロな危険度評価は過去の崩壊事例に基づく統計的手法による評価が主として切土に対しては従来から行われてきたが、盛土に対してはほとんどないのが実情である。

本論文は、盛土のり面の降雨による災害に関する全国実態調査の結果を基礎として、崩壊時の降雨量を外的基準とした統計的解析を実施し、連続雨量と時間雨量の積値として求まる崩壊時の限界雨量の予測式を求め、新しい盛土のり面の危険度評価手法を提案するものである。

## 2. 斜面災害の評価法に関する過去の研究

統計的手法による切取り面の危険度評価については

久保村、武井<sup>1)</sup>、小橋<sup>2)</sup>らが、鉄道沿線のデータを用いた判別分析からのり面採点表を提案した。これらの統計的な分析結果を基に、国鉄では土木建造物取替の考え方<sup>3)</sup>の中で切取り面の評価基準を示したが、盛土に関しては経験的な手法による評価基準にとどまっている。また、これらの評価結果は許容日雨量として示されるものであるが、森野<sup>4)</sup>は、地すべりの挙動に対して山田<sup>5)</sup>が導入した実効雨量の考え方をを用いて、散水模型実験と九州の鉄道沿線の災害事例に基づき3日間の降雨を考慮した残存係数を求めてのり面採点表の許容日雨量を修正した。

網干<sup>6)</sup>はマサ土の斜面崩壊と降雨の関係を2週間前の先行雨量と当日の降雨強度とを関連づけ、崩壊の規模と降雨量との関係を明らかにした。八木<sup>7)</sup>は先行雨量を1週間雨量として崩壊事例と比較し、春山<sup>8)</sup>はこれを一時間雨量として整理した。また奥田<sup>9)</sup>は累積雨量、一時間雨量、10分間雨量の3種の降雨要素から崩壊件数の分布を推定した。

南部・軽部ら<sup>10)</sup>は道路盛土の崩壊例をもとに、雨量を除く要因によって崩壊、非崩壊の判別分析を実施し、崩壊に寄与する度合いを定義し、これと崩壊時の(連続雨量×時間最大雨量)を説明変数とした重回帰分析により崩壊土量を求める式を提案した。

村上・筋内<sup>11)</sup>は道路斜面のデータをもとに数量化Ⅱ類による転落型落石の危険度評価法を提案している。

## 3. 降雨災害盛土の実態調査と盛土の崩壊形態

### (1) 降雨災害盛土の全国実態調査

昭和50年以降降雨により発生した鉄道盛土の崩壊事例を調査し、約150例のデータを収集した。

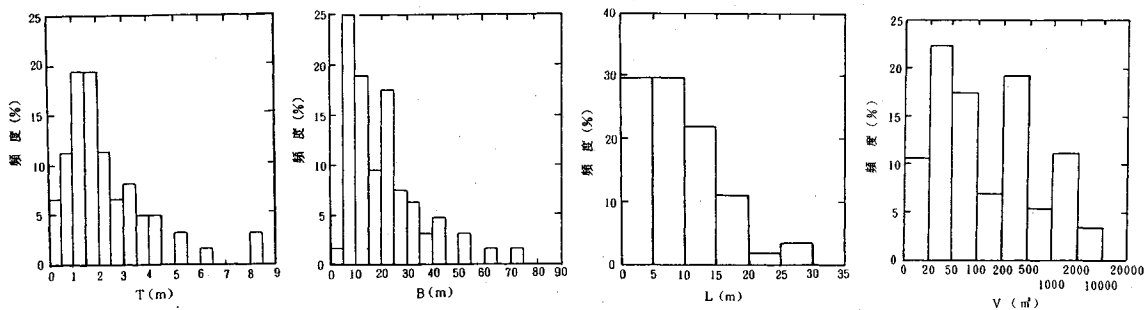
これらのデータは、崩壊状態、崩壊寸法、崩壊発生時の雨量(ただし、近傍の鉄道雨量計による)、盛土構造、のり面勾配、縦断形態、横断形態、災害履歴、のり面防

\* 工博(財)鉄道総合技術研究所 浮上式鉄道開発本部 土木部長(〒185 国分寺市光町2-8-38)

\*\* (財)鉄道総合技術研究所 地質・防災研究室 研究員

\*\*\* 同上 地質・防災研究室 主任研究員

\*\*\*\* 同上 JR部 JR課 課長



図一 鉄道盛土の崩壊厚さ  $T$ , 崩壊幅  $B$ , 崩壊長さ  $L$ , 崩壊土量  $V$  の頻度分布

護工, 位置略図, 横断略図などからなるが, 現場担当者へのアンケート様式で実施されたため, 斜面安定の力学的な要素である盛土の強度や土質についての情報は得られていない. そこでまず収集したデータを精査して統計データとして耐え得るデータを抽出した. その結果約 75 例のデータが得られたので, それらについて統計データの統一化と土質性状の把握のために, 災害箇所およびその周辺の踏査 (盛土構造, 環境条件等), 盛土材料の採取による土質試験, ならびにスウェーデン式, 簡易貫入試験機によるサウンディングを実施した. その結果, 67 例の災害データが統計解析の対象となり得るデータとなった.

(2) 盛土の崩壊形態

上述の 67 箇所の盛土崩壊事例の, 崩壊厚さ  $T$ , 崩壊土量  $V$ , 線路方向の崩壊幅  $B$ , のり面方向の崩壊長さ  $L$  に関する平均値と標準偏差を表一に, その頻度分布を図一に示す. 崩壊の規模については, 盛土の高さなどの盛土本体の大きさにも支配されるが, 表によると比較的小規模な崩壊から, 大規模な崩壊までのデータであり, かつ表層のガリー的な侵食崩壊から, 典型的な円弧すべりの崩壊までの種々の崩壊形態を含むものである. 特に崩壊厚さ  $T$  に着目すれば, 平均値+1 $\sigma$ である 3 m 未満の崩壊が 70% 以上となっており, 盛土表層部が崩壊する小規模な崩壊が多いといえる.

4. 盛土の崩壊に関する要因の抽出と統計量

(1) 盛土崩壊に関するアイテムの抽出

降雨時の盛土の安定性に関するポテンシャルは一般には斜面安定の理論から,

$$S=f(\beta, H, c, \phi, \gamma, u_w, \epsilon) \dots\dots(1)$$

などで表されることは周知のとおりである. ここに, 盛土の構造条件として,  $\beta$  は盛土勾配,  $H$  は盛土高さ, また土質条件として,  $c$  は盛土の粘着力,  $\phi$  は内部摩擦角,  $\gamma$  は単位体積重量,  $u_w$  は間隙水圧であり,  $\epsilon$  はその他の要因である.

式 (1) は盛土内崩壊に対するものであるが, 基盤を

表一 崩壊形状の平均値と標準偏差

	単位	平均値	標準偏差
崩壊厚さ $T$	m	1.9	1.1
崩壊幅 $B$	m	20.7	14.3
崩壊長さ $L$	m	9.5	7.4
崩壊土量 $V$	m <sup>3</sup>	474	1332

巻き込む基底崩壊を考えると, 基盤厚さ  $D$ , 基盤の地下水位  $h_B$ , 表層地盤の土質強度  $q_B$ , 基盤傾斜角  $\theta_B$  等が  $\epsilon$  として関係する.

また実際の鉄道盛土における降雨による崩壊の実態を考えると式 (1) の  $\epsilon$  は, 降雨の集水・浸透条件として, 線路上部の地形的な集水状態  $W_G$ , 線路方向の落ち込み勾配等で代表される盛土の縦断形態  $T_L$  や, 片切片盛などの盛土の横断形態  $T_H$  が崩壊に及ぼす要因になると考えられる.

さらに, 鉄道盛土として供用開始直後には土羽の締め固め不足部分が降雨侵食等の被害を受けたり, 供用中の長い期間には崩壊に至らないような小規模な被害を受けることがある. しかし, それらは定常的な保守の範囲で若干の修復が行われるため, 盛土が供用中に受ける経験雨量  $R_E$  が大きいほど, 小規模の補修を受ける確率が高く, 致命的な崩壊に対する盛土の耐降雨性が大きくなるものと考えられる. なおこの  $R_E$  については (3) e) で概説する.

したがって, 式 (1) の  $\epsilon$  は,

$$\epsilon=g(D, h_B, q_B, \theta_B, W_G, T_L, T_H, R_E) \dots\dots(2)$$

で表されることになる.

式 (1) と (2) は降雨による盛土崩壊に及ぼす要因として盛土・表層地盤の構造条件, 土質条件, 集水地形等の環境条件と経験的な雨量条件を示したものである. しかし, これらをもとに, 鉄道現場で実用的な評価を行うおうとする場合は, 用いる要因が簡易な試験と現場調査で得られるものである必要がある.

盛土の土質条件である  $c, \phi, \gamma$  は粘性土, 砂質土と礫質土の土質分類  $S_E$  と盛土の表層部の簡易貫入試験による貫入強度  $N_c$  によって代表させることにした. 盛土

の間隙水圧  $u_w$  の上昇に関係する要因としては大きくは土質分類によっても区分できるが, Hazen, Creager などが提案する粒度特性から得られる透水係数  $k$  を用いる。また盛土の構造条件のうち, 盛土勾配  $\beta$  は鉄道盛土ではほとんど一定である。すなわちここで用いたデータの平均値は 1:1.4 であり, その標準偏差は 1:0.2 であるので, この要因は割愛する。

盛土下の表層地盤を巻き込む基底崩壊はほとんど発生していないので, 基盤の構造・土質条件である  $D, h_B, q_B, \theta_B$  を要因とみなす必要はないが, 盛土内の水位の上昇は地下水位と密接に関係すると考えられるため, 表層地盤に関する要因として, 基盤傾斜角  $\theta_B$  と表層地盤の地質  $S_B$  (沖積層, その他) で代表させることにする。

なお式 (2) の中で盛土に与える降雨の集水・浸透に関係する  $W_G, T_L, T_H$  は現場調査により, また  $R_E$  は降雨の統計量により簡単に求められる。

したがって, 式 (1) と (2) から  $S$  は,

$$S=f(H, S_E, N_c, k, S_B, \theta_B, W_G, T_L, T_H, R_E) \dots \dots \dots (3)$$

で表されることになることになり, 本解析に使用するアイテムとしては式 (3) の右辺に示す 10 個の変数で代表させることにした。

(2) 盛土崩壊に関与する外的基準の抽出

盛土崩壊に関与する外的基準として降雨量を考えるが, どのような雨量概念を適用すべきかについては, 2. に示したように有効雨量, 先行雨量の考え方について多くの研究がある。

一方, JR グループでは斜面の危険度評価をもとに斜面の防災投資計画を検討しているが, その基本となるのり面採点表では日雨量を用いた評価を行っている。また運転規制に用いる雨量については一定線区内の過去の災害記録を基にした連続雨量と時間雨量の組合せを適用している。

本解析では, JR において従来から運転規制に用いられてきた経緯も考慮して, 時間雨量  $r$  と連続雨量  $R$  の積値による限界雨量を外的基準とするが, それぞれの雨量のべき乗 (定数  $m, n$ ) の積値とすることにし, 盛土の耐降雨ポテンシャルとして,

$$S=R^m r^n \dots \dots \dots (4)$$

で表されるものとした。  $m=1, n=1$  の場合は従来の運転規制に用いられる外的基準となり,  $m=1, n=0$  の場合には上記ののり面採点表で示される日連続雨量にほぼ相当する。

したがって, 式 (3) と式 (4) から,

$$R^m r^n=f(H, S_E, N_c, k, S_B, \theta_B, W_G, T_L, T_H, R_E) \dots \dots \dots (5)$$

となる。

なお時間雨量は災害発生時のものとせず, 24 時間以内の最大値とした。これはのり面侵食による崩壊だけでなく, 盛土内の間隙水圧の上昇による崩壊も考慮したためである。すなわち一降雨中の最大時間雨量を記録した後数時間して崩壊した事例もあり, また筆者ら<sup>12)</sup>が行った既設盛土における降雨と盛土内間隙水圧に関する計測結果でも同様の上昇傾向を示していることも考慮したものである。

また, 災害発生地点が既往の鉄道雨量計の設置地点や気象観測点とは一致しないため, その雨量を式 (5) に示す災害発生地点の雨量 ( $r$  と  $R$ ) の値として用いることはできない。そこで本解析では, 既往の雨量観測点の時間雨量  $r_{0i}$  から災害地の時間雨量  $r_D$  を推定する筆者ら<sup>13)</sup>によるアメダス補完法によって当該データの雨量を推定した。すなわち,  $p$  を既往の雨量観測地点数,  $D_i$  をそれと災害地との距離としたとき,

$$r_D = \frac{\sum_{i=1}^p [r_{0i}/D_i]^N}{\sum_{i=1}^p [1/D_i]^N} \dots \dots \dots (6)$$

で表され,  $r_D$  と  $r_{0i}$  の残差を最小にするように定数  $N$  と  $p$  を求めると  $N=0.96, p=3$  となる。

(3) 外的基準とアイテムの統計量

a) 崩壊時の雨量条件

崩壊までの連続雨量  $R$ , 時間雨量  $r$  の頻度分布を図—2 に示す。なお, 連続雨量とは降雨開始から災害発生時までの累積降雨量であるが, 途中 12 時間以上の降雨中断がある場合は中断後からの累積値とするものである。

b) 盛土の構造・土質条件 ( $H, S_E, N_c$ )

盛土の構造・土質条件のうち, 盛土高さ  $H$  の頻度分布を図—3 (a) に示すが, その平均値は 7.5 m である。また, 連続雨量  $R$  及び時間雨量  $r$  と盛土高さ  $H$  の関係を図—4 に示す。なお,  $R$  及び  $r$  は, 図—4 の横軸に示す  $H$  の範囲について, それぞれ平均値を表わしたものであるが,  $H$  が高くなると  $R$  と  $r$  は小さくなる傾向があり, 土質力学的な安定計算における傾向とほぼ一致するようである。

盛土の土質  $S_E$  については, のり面表層部 0.5 m~1.0 m の深さから採取した試料の粒度試験により分類した。これによると, 70% が砂質土であり, レキ質土 22%, 粘性土 8% であった。

従来, 鉄道の盛土強度については, スウェーデン式サウンディング試験機等によって求めることが多かったが, より簡易で短時間に多くの調査が可能となる斜面調査用簡易貫入試験機によって盛土強度を求めた。3. (2) によると崩壊事例の 70% 以上は崩壊厚さ 3 m 未満であり, 盛土表層部が崩壊する事例が多い。そこで盛土強度  $N_c$  は表層から深さ 3 m までの平均値とすることとした。崩壊箇所の盛土強度の頻度分布は図—3 (b) のとおりであり, 崩壊盛土の盛土強度の平均値は  $N_c=5.4$  であっ

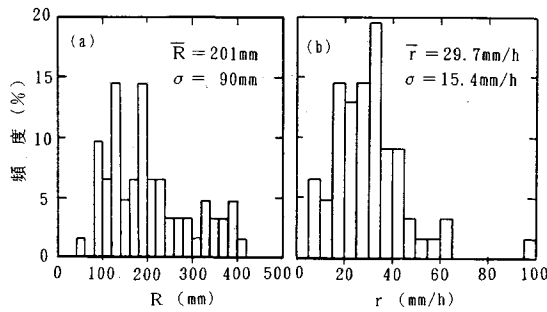


図-2 連続雨量  $R$  と時間雨量  $r$  の頻度分布

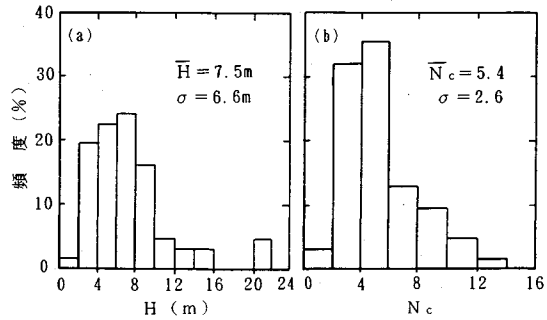


図-3 盛土高さ  $H$  と盛土強度  $N_c$  の頻度分布

た。また  $N_c < 6$  の盛土が全体の約70%を占めている。なお、従来から使用されてきたスウェーデン式サウンディング試験と簡易貫入試験との相関式は土質別に筆者ら<sup>14)</sup>によって与えられている。

c) 基盤の構造・土質条件 ( $S_B, \theta_B$ )

崩壊盛土のうち基盤傾斜角  $\theta_B$  が10度以上のいわゆる傾斜地盤上の盛土は全体の半数以上を占めており、基盤の傾斜が盛土の安定度に影響をもっていることがわかる。

盛土が構築される表層地盤  $S_B$  には、地質学的に多くの分類法があるが、できるだけ簡易に分類できる方法として地盤の軟弱さと地下水位を区分できる点から沖積層と洪積層、岩盤の3つに区分した。その頻度はそれぞれ23%、15%、24%である。

d) 集水・浸透条件 ( $W_G, k, T_L, T_H$ )

盛土への水の集中が崩壊に大きく寄与していることは過去の崩壊事例について常にいわれてきたことではあるが、集水地形条件  $W_G$  として崩壊側が集水地形、崩壊の反対側が集水地形、および非集水地形の3つに分類した。崩壊事例の中の約20%は、集水地形となっている。

盛土の縦断形態  $T_L$  としては、単勾配、落込勾配点、切盛境界等があるが、図-5 (a) によると雨水の集中が予想される切盛境界の崩壊が30%以上を占めている。

また図-5 (b) には横断形態  $T_H$  について、純盛、片盛 (片切片盛を含む)、腹付盛土別の頻度を示す。一種の片盛である腹付盛土を片盛に合わせて評価すると純

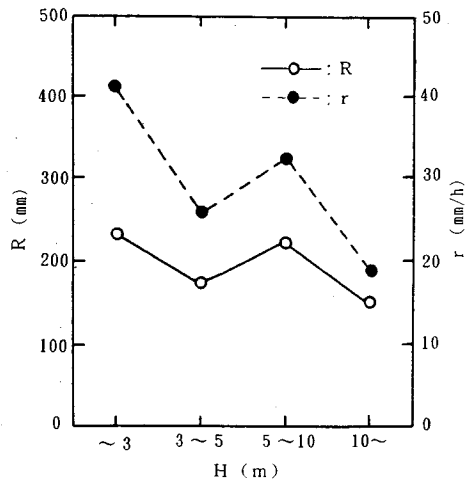


図-4 連続雨量  $R$  及び時間雨量  $r$  と盛土高さ  $H$  の関係

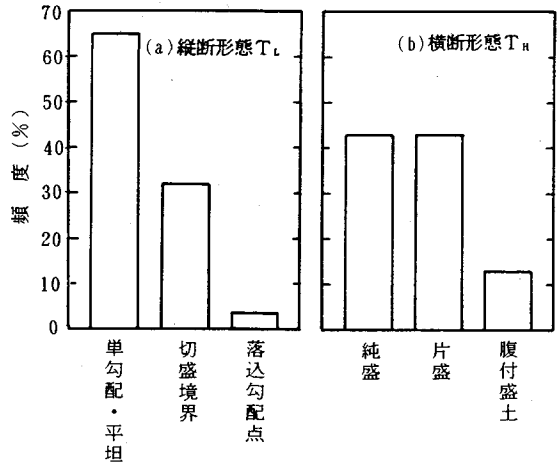


図-5 盛土の縦断形態  $T_L$  と横断形態  $T_H$  の頻度分布

盛よりも、崩壊事例が多くなっており、構造的に崩壊に対して弱点となることを示している。

e) 経験雨量条件 ( $R_E$ )

解析データは盛土建設後5年未満の比較的新しい盛土から90年以上の古いものまでほぼ均等に分布している。一方、図-6 (a) のように経年  $y$  と崩壊時の連続雨量  $R$ 、時間雨量  $r$  の関係を地域別に比較してみると、経年の小さな盛土は少ない降雨量で崩壊している。また図-6 (b) に示すように崩壊箇所近傍の気象観測所の年平均降雨量  $R_y$  が小さい地域の盛土も少ない雨量で崩壊している傾向が明らかである。すなわち年平均降雨量  $R_y$  が多い箇所では災害に至らないような小規模な被害をうける確率が高く、排水設備の充実やのり面工の施工等を行うので、年平均降雨量  $R_y$  が少ない地域の同じ条件の盛土よりも耐降雨量が向上していることがあるものと考えられる。このことは、災害に至らない降雨による被害を含めた盛土の被災件数を線路延長で除した被災率  $P$

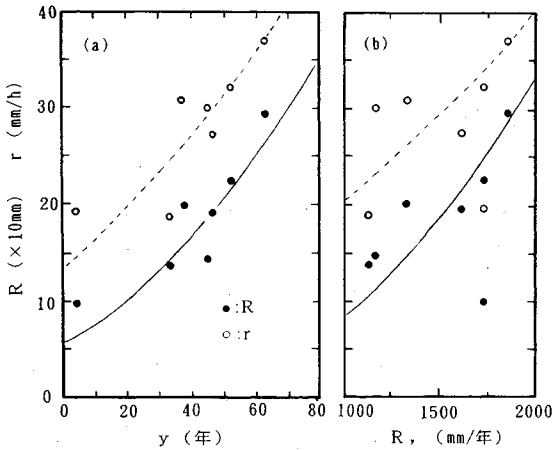


図-6 連続雨量  $R$ 、時間雨量  $r$  と経年  $y$ 、年平均雨量  $R_y$  の関係

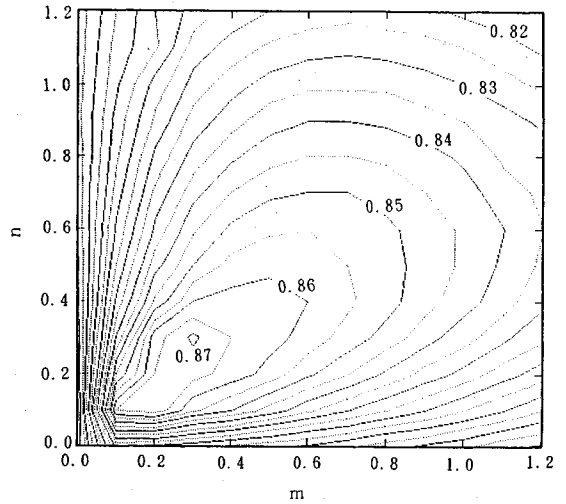


図-8 重相関係数  $r_0$  の等高線

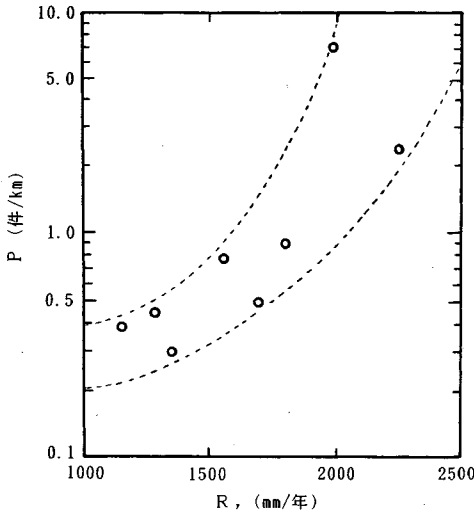


図-7 年平均雨量  $R_y$  と盛土被災率  $P$  の関係 (昭和44年~昭和61年)

を地域別に求め、これと年平均雨量  $R_y$  との関係を示した図-7からも推定できる。

このように耐降雨性には盛土の経過年数  $y$  と平均降雨量  $R_y$  の両者が互いに関係すると考えられるので、盛土が建設後から崩壊時までを受けた総降雨量に着目した経験雨量  $R_E$  という概念も導入することとした。

### 5. 数量化I類による限界雨量の予測

#### (1) 解析の実行

降雨による盛土崩壊の限界雨量を求めるにあたり、式(5)の右辺を一次展開した形で、4.(3)b)~e)を考慮し、表-2のようなカテゴリーについて数量化I類による多変量解析を実施した。

そのとき、式(5)の左辺に示すべき乗  $m, n$  を0.1のピッチで1.2まで順次変えて解析を行い、得られた重

相関係数  $r_0$  を補完して等高線を描くと図-8のようになる。図によれば、等高線は  $0.2 < m, n < 0.4$  の領域に  $r_0$  の高いところがあることを示しており、そのピークの位置は、 $m=n=0.3$  の時である。その時の重相関係数は  $r_0=0.87$  である。この  $r_0$  に対応する各カテゴリー毎のアイテムの偏相関係数とウェイトは、表-2のようになる。

限界雨量  $R^m r^n$  ( $m=n=0.3$ ) に対する予測値と観測値の関係は図-9のようであり、的中率は高いといえようである。

#### (2) 解析結果の総括

解析で得られた各アイテムの偏相関係数から、最も限界雨量に大きく寄与するアイテムから順位をつければ、 $R_E > W_G > \theta_B > N_C > T_L > H > k > S_E > S_B > T_H$  である。なお、表-2のカテゴリーウェイトから得られるレンジについて各アイテムの順位をつけると、偏相関係数から得られたものと比較して  $N_C, T_L, H$  については順位が相違するが、これは、前者のレンジが各アイテムの中で離散的なウェイトの絶対値の幅を示すのに対して、後者の偏相関係数はアイテム中の各カテゴリーに対する相関係数に相当する値を与えたものであり、これら両者に若干の順位の差を生じたものであると考えられる。

経年雨量  $R_E$  が大きくなるに従い、限界雨量は大きくなる傾向にあり、盛土崩壊の危険度は低くなる傾向となる。

盛土条件のうち、盛土高さ  $H$  については図-4とほぼ同じ傾向を示し、 $H$  が高くなると限界雨量は小さくなる傾向となる。盛土強度  $N_c$  については、頻度の小さい  $N_c > 8$  のアイテムを除いては強度が大きくなれば限界雨量は向上する傾向を示す。また盛土土質  $S_E$  については、砂質土の新設盛土の表層部は集中豪雨によって侵

表-2 偏相関係数とウェイト ( $m=n=0.3$ )

条 件		カテゴリー (上段) とウェイト (下段)					偏相関係数
		1	2	3	4	5	
盛土の 構 造 土 質	盛土高さ $H$	~3m 0.61	3~10 0.23	10~ -1.53			0.30835
	土 質 $S_B$	粘性土 -1.05	砂質土 0.07	礫質土 0.14			0.16532
	盛土強度 $N_c$	~4 -1.19	4~6 0.85	6~8 0.65	8~ 0.24		0.42678
基盤の 構 造 土 質	表層地盤地質 $S_B$	沖積層 -0.38	その他 0.22				0.14688
	基盤傾斜角 $\theta_B$	平坦 1.34	10度以上 -1.10				0.46086
集 水 浸 透	透水係数 $k$	~ $10^{-3}$ cm/s -0.17	$10^{-4}$ ~ $10^{-3}$ 0.26	$10^{-2}$ ~ $10^{-1}$ -0.41	$10^{-2}$ ~ 0.86		0.20688
	集水地形 $W_G$	無 0.52	崩壊側 -3.23	反対側 -1.83			0.48380
	縦断形態 $T_L$	切盛境界・ 落下勾配点 0.95	平坦・ 単勾配 -0.53				0.35043
	横断形態 $T_H$	純 盛 0.21	片切片盛・ 腹付盛土 -0.16				0.08093
経 験 雨 量	経験雨量 $R_B$ $\times 10^4$	~2 -2.83	2~5 -0.41	5~10 -0.15	10~15 2.47	15~ 3.13	0.73053
定 数 項		13.14					

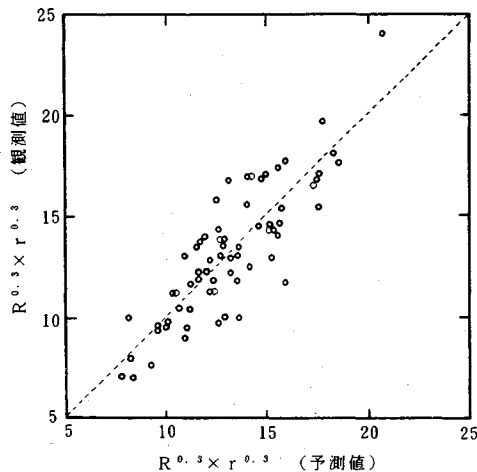


図-9 限界雨量  $Rr$  の観測値と予測値の相関

食崩壊しやすいといわれていたが、本解析では粘性土盛土のウェイトが負となっており、砂質土盛土よりも粘性土盛土の方が危険度は高くなる結果となった。これは間隙水圧の排出が砂質土や礫質土よりも抑制されることを示すものと考えられる。一方、透水係数  $k$  については  $k$  が  $10^{-3}$  cm/s のオーダーの時が最も危険であることを示している。池田<sup>15)</sup>は、わが国でよく降る 5~50 mm/h の強度の雨に対し、 $10^{-3}$  cm/s 前後の透水係数を持つ砂質盛土が最も盛土内水位が上昇しやすいとしているが、この傾向とはほぼ一致するものである。

基盤の構造・土質条件のうち、基盤傾斜角度  $\theta_B$  についてはこれが 10 度以上の場合であると危険度が高くなることを示しているが、これは経験的にいわれてきたことと一致する。表層地盤地質  $S_B$  については沖積層地盤の場合が、危険度が高いという結果となった。

集水・浸透条件のうち、集水地形  $W_G$  については崩壊側の集水地形が危険度が非常に高く、集水地形でない場合は安全側となっている。盛土の横断形態  $T_H$  については、片切片盛、腹付盛土のような条件であると危険度は高くなる結果となった。一方盛土の縦断形態  $T_L$  については、定説と異なり、切盛境界等の特殊な条件の場合が安全側という結果となった。このような条件の盛土は、あらかじめ排水対策などの処置がなされていたことが原因した結果といえる。

## 6. 盛土の危険度評価基準

### (1) 鉄道盛土における危険度評価基準の提案

数量化 I 類による解析で得たカテゴリーのウェイトに対して、5. (2) で述べた評価に加え鉄道盛土の実態に即した経験的、工学的な配慮を行い、表-3 に示す盛土の危険度評価基準を提案する。

この評価基準は基本点である 13.14 点に盛土条件、表層地盤条件、集水・浸透条件、経験雨量条件の該当する評価点の合計を加えて、連続雨量と時間雨量の積値  $R^m r^n$  (ただし、 $m=0.3, n=0.3$ ) を求めようとするものである。個々の盛土については式 (5) の右辺は定数

表一3 鉄道盛土の危険度評価基準

基本点		13.14				
条件		カテゴリー（上段）と評価点（下段）				
盛土の構造土質	盛土高さ $H$	~3m 0.61	3~10 0.23	10~ -1.53		
	土質 $S_B$	粘性土 -1.05	砂質土 0.07	礫質土 0.14		
	盛土強度 $N_c$	~4 -1.19	4~6 0.30	6~8 0.65	8~ 0.80	
基盤の構造土質	表層地盤地質 $S_B$	沖積層 -0.38	その他 0.22			
	基盤傾斜角 $\theta_B$	平坦 1.34	10度以上 -1.10			
集水浸透	透水係数 $k$	~ $10^{-4}$ cm/s -0.17	$10^{-4}$ ~ $10^{-8}$ 0.26	$10^{-3}$ ~ $10^{-2}$ -0.41	$10^{-2}$ ~ 0.86	
	集水地形 $W_G$	無 0.52	対象斜面側 -3.23	反対側 -1.83		
	縦断形態 $T_L$	切盛境界・ 落込勾配点 -0.30	平坦・ 単勾配 -0.53			
	横断形態 $T_H$	純盛 0.21	片切片盛・ 腹付け盛土 -0.16			
経験雨量	経験雨量 $R_E$	~2 -2.83	2~5 -0.41	5~10 -0.15	10~15 2.47	15~ 3.13
	$\times 10^4$					

となるので、限界雨量は  $R$  と  $r$  を変数とする双曲線で表されることになる。

ただし、盛土の条件によっては限界雨量が非常になくなる場合が生ずるが、この場合は分析に使用した崩壊事例の最低雨量が  $Rr = 635 \text{ mm}^2/\text{h}$  ( $R^{0.3}r^{0.3} = 6.93$ ) を下限値とする。この時、鉄道盛土の降雨に対する危険度評価の手法は図-10 のようになる。

まず、着目する盛土に対して踏査を行い、表-3 の危険度評価基準に示されるアイテムについて評価を行う。一般には盛土強度  $N_c$  を除けば踏査のみで十分な資料が得られる。盛土強度  $N_c$  については必要があれば簡易貫入試験によるサウンディングを行う。これらの評価データを表-3 に適合させ、 $R^m r^n$  の計算を実行する。限界雨量  $Rr$  が上述の下限値  $635 \text{ mm}^2/\text{h}$  以上であるかをチェックして、降雨災害に対する限界雨量を決定できることになる（図-10 の左のフロー）。

さらに、実際に降りつつある降雨量に対して、経時的な危険度評価を行う必要がある場合には（図-10 の右のフロー）、着目する盛土地点の経時的な雨量データが必須の条件となる。

なお、この時の時間雨量  $r$  は、4. (2) で定義したように、降りつつある現時点から過去 24 時間以内の最大時間雨量であるので、たとえ小雨になり、時間雨量が小さくなくても、過去 24 時間以内の最大値が時間雨量  $r$

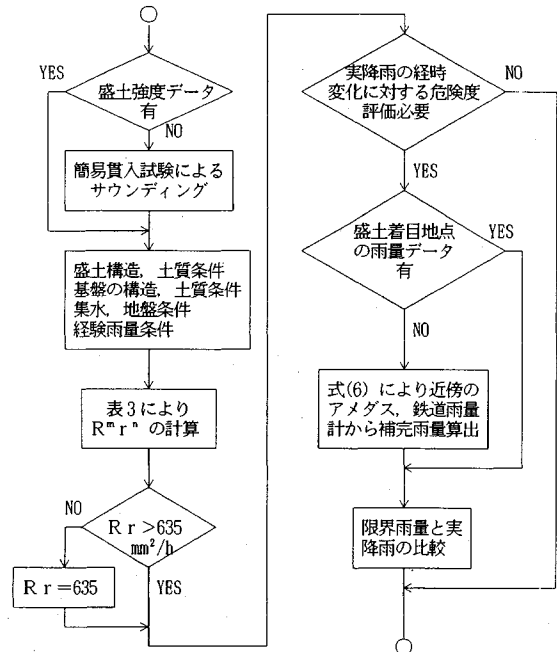
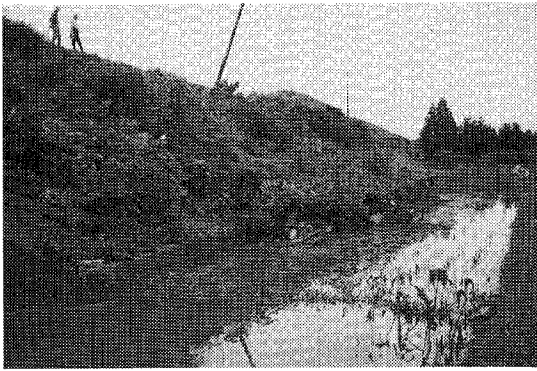
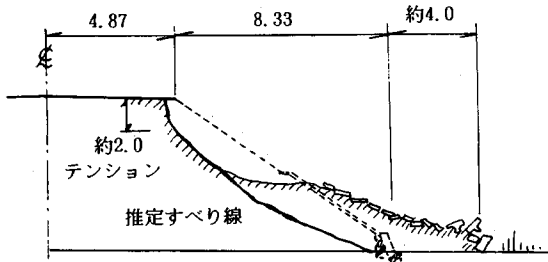


図-10 盛土の危険度評価フロー

として採用されることになる。一方、盛土のジャストポイントの雨量を適時把握することが困難な場合には近傍の雨量計のデータを式(6)に代入して補完する。これによって限界雨量  $Rr$  と実雨量との比較ができ、経時的



図一11 崩壊事例1の崩壊状況



図一12 崩壊事例1の盛土断面図

な危険度評価が可能となる。

(2) 典型的な崩壊事例に対する検証

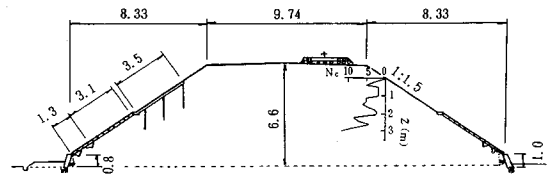
前項で示した危険度評価基準を盛土の崩壊事例に適用し、その精度の検証を試みる。

a) 崩壊事例1

昭和63年7月の三重県中・北西部を襲った梅雨末期の、最大時間雨量  $r=41.5$  mm/h、連続降雨量  $R=389.7$  mm に達する集中豪雨により、高さ  $H=6.6$  m の複線盛土の右側のり面が図一11に示すように施工基面を含むり肩から延長約50mにわたって崩壊した<sup>16)</sup>。その崩壊断面図は図一12のようである。

当崩壊地は沖積低地の中にあり、自然堤防の後背湿地となっており、周辺は水田として利用されている。軟弱層の厚さは3~4mである。のり面下部に高さ1mの腰土留があるが、根入れはなく厚さ30cmの栗石の上にある。のり面の下部は平板ブロック張りとなっているが、表面侵食防止程度の効果しか発揮できないものと考えられる。一方、崩壊地の反対側の左側のり面は、図一13のように右側のり面の構造に加えて平板ブロックの上方にさらに3.5mのプレキャスト格子枠工(鋼管杭1.5m)を施工していたために、崩壊を免れたものと考えられる。

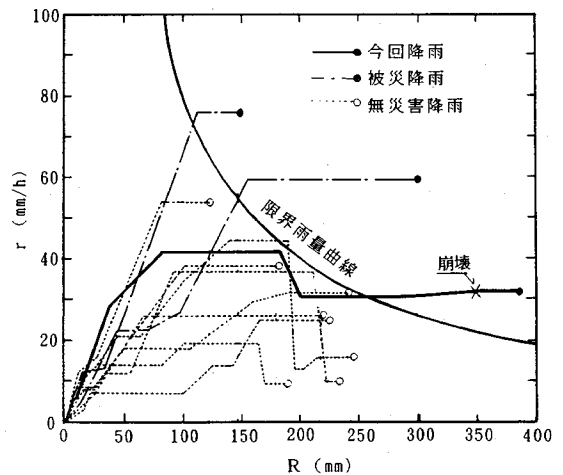
線路は終点方に向かって1.2‰の下り勾配で、粒度試験によって得られた土質は(SM)であり、透水係数  $k$  は  $10^{-3}$  cm/s のオーダーである。またのり面の深さ3mまでの平均盛土強度は  $N_c=5.0$  であった。



図一13 盛土断面形状と盛土強度  $N_c$

表一4 盛土の危険度評価基準の適用例

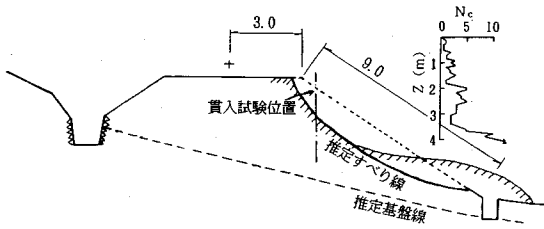
条 件		崩壊事例1		崩壊事例2	
基本点		13.14		13.14	
盛土の造質	盛土高さ $H$ (m)	6.6	0.23	5.0	0.23
	土質 $S_E$	砂質土	0.07	砂質土	0.07
	盛土強度 $N_c$	5.0	0.30	2.3	-1.19
基盤の造質	表層地盤地質 $S_B$	沖積層	-0.38	岩盤	0.22
	基盤傾斜 $\theta_B$	平坦	1.34	傾斜	-1.10
集水浸透	透水係数 $k$ (cm/s)	$10^{-4}$	0.26	$10^{-4}$	0.26
	集水地形 $W_c$	無	0.52	無	0.52
	縦断形態 $T_L$	一般	-0.53	切盛境	-0.30
	横断形態 $T_H$	純盛	0.21	純盛	0.21
経験雨量	経験雨量 $R_E$ ( $\times 10^4$ )	2.6	-0.41	8.5	-0.15
$R^{0.3} \times r^{0.3}$		14.75		11.91	
限界雨量 $R \times r$ ( $\text{mm}^2/\text{h}$ )		7870		3851	



図一14 崩壊事例1の限界雨量曲線

このような条件のもとでのり面の補強工が施工されていないために盛土崩壊を起こした線路右側について、提案した評価基準を適用した結果を表一4に示す。得られた限界雨量は  $Rr=7870$   $\text{mm}^2/\text{h}$  となり、限界雨量曲線と災害時の雨量との関係を示すと図一14のようになる。この崩壊は連続雨量  $R$  が約350mmの時に発生してい





図—15 崩壊事例2の断面図と盛土強度  $N_c$

ることから、予測値はこの災害時の雨量観測値と良く一致している。

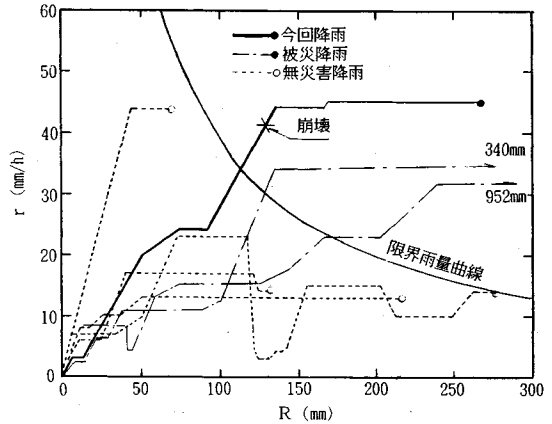
また、図には過去の降雨履歴10例についても示した。そのうち2例は付近の同じような条件の盛土が崩壊を起こしたものであるが、実測した降雨履歴は推定した限界雨量曲線を超え危険ゾーンに入っている。また残りの事例は崩壊を起こさなかったものであるが、ほぼ限界雨量曲線の下領域にある。したがって、推定値は実測値を十分満足するものと言えそうである。

b) 崩壊事例2

平成元年8月四国地方を襲った台風17号による集中豪雨により瀬戸内海側の鉄道沿線では、土石流による災害をはじめとして各所で斜面災害が発生した<sup>17)</sup>。これらの災害のうち、単線盛土が崩壊した事例に適用してみる。この盛土は和泉層群の砂岩・頁岩の互層からなる山腹に沿った傾斜地盤上の純盛土である。線路は終点方向に向かって12.5%の下り勾配であり、縦断的には起点方が切取区間の切盛境界にあたる。盛土材料は砂質土であり、盛土強度は図—15に示すように崩壊側である盛土右側ののり肩部で、表層から3mまでは  $N_c=2.3$  程度と非常に緩い状態である。このような条件のもと提案した評価基準に適用した結果を表—4に示す。得られた限界雨量は  $Rr=3851 \text{ mm}^2/\text{h}$  であり、推定した限界雨量曲線と災害時の実測雨量とは図—16のように良く一致していると言えそうである。なお、図には過去の代表的な降雨履歴6例についても示した。このうち、2例については限界雨量曲線を超え崩壊危険ゾーンに入っているが、これは昭和51年の台風17号、昭和54年の台風20号の記録であり、この時は全国の鉄道沿線で切取、盛土が数多く崩壊した災害を受けたものであり、当該盛土付近でも数箇所の災害が発生している。また、残りの降雨履歴は崩壊を起こさなかったものであるが、ほぼ限界雨量曲線の安全側の領域にあり、推定した限界雨量は実測値をほぼ満足するものと言える。

7. あとがき

本報告は、鉄道盛土の降雨による過去の崩壊事例をもとに、数量化Ⅰ類によって崩壊に至る限界雨量を連続雨量  $R$  と時間雨量  $r$  の積値によって予測する手法を提案



図—16 崩壊事例2の限界雨量曲線

したものである。この盛土の危険度評価手法を最近発生した典型的な鉄道盛土崩壊事例に適用したところ、予測値と実測値とは良く一致した。ここで提案した評価基準は、のり面工などの対策がされていない一般的な盛土の過去の崩壊事例にもとづき統計的に求めたものはあるが、崩壊を事前に予知する一つの手法として適用できるものと考えられる。

今後、のり面工など補強対策の効果も含め、実験的・理論的解析を行いながら深度化して行きたいと考えている。

当研究を進めるにあたり、災害箇所の現地調査では各JR会社の構造物検査センターの方々をはじめ多くの方に御世話になった。深甚なる謝意を表す次第です。

参考文献

- 1) 久保村主助・武井昌博：数量化による切取り面の安定度解析，土木学会論文報告集，No.194, 1971.
- 2) 小橋澄治：切取り面の安定度予測法の検討，鉄道技術研究報告，No. 895, 1974.
- 3) 日本国有鉄道施設局土木課：土木建造物取替の考え方，日本鉄道施設協会，1974.
- 4) 森野亮宏：斜面の災害危険度と崩壊発生の予測に関する研究，鉄道技術研究報告，No.1292, 1985.
- 5) 山田剛二：国鉄沿線に発生した地すべりの実態およびその分析，鉄道技術研究報告，No.719, 1970.
- 6) 網千寿夫：集中豪雨とマサ土斜面の崩壊，施工技術，Vol5, No.11, 1972.
- 7) 八木則男・矢田部龍一・櫻明潔：降雨時の斜面崩壊に対する限界降雨量，土木学会論文集，No. 415/Ⅲ-13, 1990.
- 8) 春山元寿：南九州シラス地帯の降雨による斜面崩壊，土と基礎，Vol.31, No.1, pp.105~110, 1983.
- 9) 奥田稔：降雨と斜面崩壊との関連に付いて，豪雨時における自然斜面の安定に関するシンポジウム論文集，土質工学会，1978.
- 10) 南部光宏・軽部大蔵・浅野雅行：統計的手法による道路用盛土のり面の安定度解析，土木学会論文報告集，

No. 241, 1975.

- 11) 村上幸利・箭内寛治：数量化法に基づく転落型落石の危険度評価基準について，土木学会論文集，No. 415, 1990.
- 12) 村石尚・杉山友康・垣尾徹・岡田勝也：既設鉄道盛土における間隙水圧，サクシヨンの長期計測，土木学会第 45 回年次学術講演会，1990. 9.
- 13) 村石尚・岡田勝也：アメダス補完法による斜面災害地雨量の推定方法，鉄道総研報告，Vol. 2, No. 8, 1988.
- 14) 岡田勝也・杉山友康・野口達雄・村石尚：盛土表層部の土質強度に関する異種のサウンディング試験結果の相関性：土と基礎，Vol. 40, No. 4, 1992.
- 15) 池田俊雄：地質学と土質工学の接点，応用地質，Vol. 31, No. 3, pp. 31~40, 1990.
- 16) 杉山友康・岡田勝也・岡村昌夫・沢木鯉太：集中豪雨による盛土崩壊の原因推定，日本鉄道施設協会誌，Vol. 28, No. 2, 1990.
- 17) 谷沢良一・秋山忠司：平成元年度災害の概要—JR 四国一，日本鉄道施設協会誌，Vol. 28, No. 6, 1990.

(1991. 5. 7 受付)

## STATISTICAL ESTIMATING METHOD OF RAILWAY EMBANKMENT DAMAGE DUE TO RAINFALL

Katsuya OKADA, Tomoyasu SUGIYAMA, Hisashi MURAISHI and Tatsuo NOGUCHI

This paper deals with a method of estimating the railway embankment collapse in times of heavy rainfall by means of a multivariate analysis. The critical rainfall is assumed as a continuous rainfall multiplied by the maximum hourly rainfall. Then the critical rainfall is given by variables of the embankment such as soil and structural properties, the surface ground geotechnical characteristics, the water collection and seepage, and the experienced rainfall. By use of the proposed method, we can approximately predict the critical value of rainfall to embankment collapse.