

締固め度を変化させた盛土の 降雨による崩壊形態と実効雨量

田中 悠暉¹・川尻 峻三²・橋本 聖³・川口 貴之⁴・中村 大⁵・山下 聡⁶

¹正会員 北見工業大学大学院 工学研究科社会環境工学専攻 (〒090-8507 北海道北見市公園町165号)
E-mail: m1652200105@std.kitami-it.ac.jp

²正会員 北見工業大学助教 工学部社会環境工学領域 (〒090-8507 北海道北見市公園町165号)
E-mail: skawajiri@mail.kitami-it.ac.jp

³正会員 寒地土木研究所 寒地地盤チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号)
E-mail: qiaoben@ceri.go.jp

⁴正会員 北見工業大学准教授 工学部社会環境工学領域 (〒090-8507 北海道北見市公園町165号)
E-mail: kawa@mail.kitami-it.ac.jp

⁵正会員 北見工業大学准教授 工学部社会環境工学領域 (〒090-8507 北海道北見市公園町165号)
E-mail: dnaka@mail.kitami-it.ac.jp

⁶正会員 北見工業大学教授 工学部社会環境工学領域 (〒090-8507 北海道北見市公園町165号)
E-mail: yamast@mail.kitami-it.ac.jp

鉄道や道路の降雨時運転・通行規制の雨量指標として、地盤内の水分状態を間接的に表現する実効雨量を用いる事例がある。しかし、密度が異なる土構造物内の水分挙動と実効雨量との関係性や、崩壊発生時の実効雨量について検討した例は少ない。そこで本研究では、締固め度を変化させた2つの試験盛土が降雨によって崩壊した際の飽和度と実効雨量の経時変化の整合性を検討した。その結果、飽和度上昇によって進行性破壊を呈した低密度盛土では、飽和度と小さい半減期を採用して算出した実効雨量との整合性を確認できた。一方、主だった崩壊形態がガリ浸食であった高密度盛土では、飽和度と実効雨量との関連性は確認できなかった。このことから、飽和度上昇に起因しない崩壊の発生を実効雨量を用いて予測することは困難であると予想される。

Key Words : *degree of compaction, embankment, failure mode, effective rainfall*

1. はじめに

鉄道や道路では、降雨時の土構造物や自然斜面区間における安全な運行や交通を確保するためのソフト対策として、降雨時運転・通行規制（以下、雨量規制とする）を行う。雨量規制に用いられる雨量指標としては、時間雨量 r と連続雨量 R の組み合わせによるもの¹⁾や、先行降雨および土中水の貯留を表現できる実効雨量¹⁾、土壌雨量指数²⁾などがある。例えば、鉄道において降雨時の地盤災害による被害が減少傾向にある状況³⁾を鑑みると、ハード対策を施せない区間では災害発生前に適切な運行停止措置が行われていると判断できる。このことから、多くの研究実績をもとに決定された各雨量指標の妥当性は担保されていると言える。一方、各雨量指標が設定された時代と比較して、昨今では降雨量や降雨形態が変化

し、深刻な人的被害が発生する事例⁴⁾もある。このような背景から、現在利用されている雨量指標を近年の気候変動に伴う降雨形態の変化に対応可能な指標に発展させることは、今後の地盤防災・減災に関するソフト対策の充実化として重要な課題の一つである。そのためには、近年の降雨履歴に対する地盤内水分挙動に関するデータを取得し、雨量指標との関連性を改めて検証することが求められる。しかし、地盤の破壊や浸透挙動を支配する基礎的なパラメータの一つである乾燥密度の違いによる透水性の違いが、近年の降雨条件下での土構造物内の水分挙動や崩壊形態に及ぼす影響について実物大スケールで検討した例は少ない。また、既存の研究成果^{5,6)}では、河川堤防での締固め度 D_c は 90 ~ 104% の範囲でバラつきを持つものの、比較的均質な状態にあると報告されている。これは機械化施工や設計・施工基準の導入によって

盛土の品質が向上した成果である。しかし、相対的に耐降雨性が低い盛土は、機械化施工や設計・施工基準の導入前に施工された盛土であり、このような盛土はより低密度な状態にあることは容易に想像できる。

ここで、観測降雨をインプットデータとして地盤内水分挙動を表現する雨量指標として実効雨量がある。実効雨量は、指数関数を用いて地盤内への雨水浸透、貯留および排水の時間遅れを表現する手法である。適切なパラメータを選択することで地盤内へ浸透した雨水の影響度合いを間接的に表現できる。このため、降雨による表面浸食、浅層部での崩壊、深層部での崩壊などの土構造物の崩壊形態と実効雨量は対応が取れるとされており、すでに実務で用いられている¹⁾。今後は雨量指標としてより高度な実効雨量の利用方法の検討が期待される。

以上の背景から本研究では、締固め度を変化させた2つの試験盛土が、試験盛土の施工箇所付近におけるAMeDASの運用開始以来、最大の累積雨量を観測した降雨イベントで崩壊した際の実効雨量と地盤内水分挙動の関連性について検討する。具体的には、締固め度が異なる盛土の崩壊形態の違いを考察し、盛土崩壊に至るまでの飽和度と実効雨量の経時変化について比較検討する。

2. 試験盛土の概要

試験盛土の施工箇所は、北海道東部の美幌町である。

図-1 は本研究で対象とする試験盛土の概要図である。試験盛土の仕様は、高さ 3.0m、のり面勾配 1:1.5、天端幅 3.0m、延長 39.0m であり、盛土断面は標準的な鉄道単純盛土や道路一般盛土を想定している。また、盛土中央部(延長 19.5m 地点)で低密度盛土と高密度盛土に分かれている。試験盛土に使用した盛土材料は、土質分類では礫質砂(SG)に相当し、土粒子密度 $\rho_s = 2.627\text{g/cm}^3$ 、最大粒径 $D_{\max} = 53\text{mm}$ 、平均粒径 $d_{50} = 1.2\text{mm}$ 、均等係数 $U_c = 4.82$ 、曲率係数 $U_c = 0.62$ であった。また、A-b法で行った突き固め試験から最適含水比 w_{opt} は 21.5%、最大乾燥密度 ρ_{dmax} は 1.56g/cm^3 となった。試験盛土の施工は、仕上がり厚が 0.3m となるように転圧を行った。低密度盛土は、最適含水比付近の試料をまき出し後、意図的に締固め度を低くするため、まき出しに使用したバックホウで転圧を1回のみ行った。高密度盛土は、試料のまき出し後、バックホウによる1回の転圧に加えて振動ローラーで4回の転圧を行った。なお、試験盛土の施工には実施工で使用される重機を用い、散水による含水比調整などについても実施工と同様の手法を採用した。また、1, 3, 5, 7, 9層目の数箇所ではRI密度水分計によって乾燥密度 ρ_d と含水比 w を取得し、転圧状態の確認を行った。図-2 は、代表的な例として図-1 中の A および B 点にお

ける深度方向の ρ_d と w を示している。5層目の一点を除くと、この地点での低密度盛土の ρ_d は約 $1.2 \sim 1.5\text{g/cm}^3$ 、 w は約 21~24%で、高密度盛土の ρ_d は約 $1.3 \sim 1.6\text{g/cm}^3$ 、 w は約 22~25%の範囲で深度方向に分布している。すべての測定点での ρ_d と含水比 w の結果として、低密度盛土の ρ_d と w は測点数 119 の平均値で $\rho_d = 1.30\text{g/cm}^3$ 、 $w = 20.5\%$ となり、締固め度 $D_c = 83\%$ であった。高密度盛土の ρ_d と w は測点数 87 の平均値で $\rho_d = 1.47\text{g/cm}^3$ 、 $w = 20.7\%$ となり、 $D_c = 94\%$ であった。平均値ではあるものの含水比の違いは極めて小さく、2つの盛土は乾燥密度(締固め度)のみが異なる盛土であると判断できる。ここで、バックホウおよび振動ローラーによる転圧は各層ののり肩直近まで行ったことで、盛土完成時ののり面に相当する各層ののり肩付近においても所定の D_c が得られていることを確認している。また、のり面はバックホウに装着した平バケットで最終的な表面整形を行っているが、転圧は行っていない。なお、表面整形は盛土幅よりやや広く盛土材料を余盛し、丁張りに合うように削り取る手法とした。このため、のり面の表面整形による大きな密度変化は発

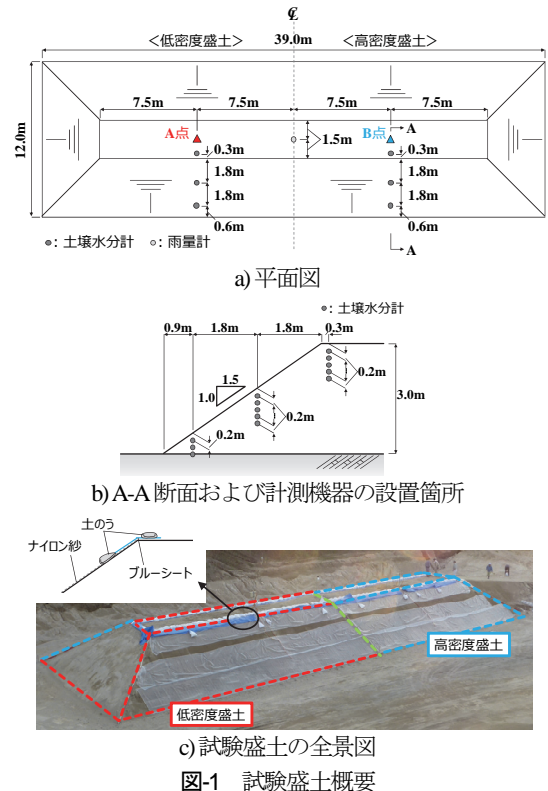
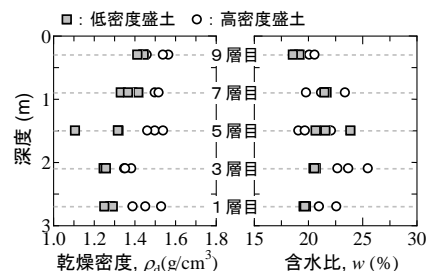


図-1 試験盛土概要



生しておらず、後述するのり面崩壊には大きな影響を与えていないと判断した。なお、 w_{gr} および ρ_{dmax} は最大粒径を 19mm に調整した試料で行った突固め試験結果であるため、 $D_{\text{max}} = 53\text{mm}$ の原粒度で施工された試験盛土の真の D_c は上述の値よりもやや小さくなると予想される。また、本研究での低密度盛土は、現在の実務で取り入られている設計・施工体系が確立される前に施工された締固め程度の低い低密度状態の盛土を想定している。試験盛土には降雨の雨滴による浸食崩壊を防止するため、農業用のナイロン紗をのり面に敷設した。また、のり肩のガリ浸食を防ぐため、図-1c)の挿絵にあるようにブルーシートと土のうを敷設した。

計測項目は体積含水率 θ (m^3/m^3) と雨量である(図-1参照)。低密度盛土および高密度盛土のそれぞれの中央部を測線として土壌水分計を埋設した。設置した土壌水分計は地盤材料の誘電率が含水量に比例する特性を利用して、あらかじめ検定して取得した誘電率と体積含水率の関係式より地盤内の体積含水率を測定できる。なお、測定精度は $\pm 0.03 \text{ m}^3/\text{m}^3$ である。雨量計は低密度盛土と高密度盛土の中間地点の天端に設置した。雨量計は転倒ます式であり、転倒ますの一転倒雨量は 0.2mm である。

3. 試験盛土の崩壊状況

(1) 盛土の崩壊時の降雨イベント

2015年10月8日に北海道の東海上を台風第23号と台風から変わった低気圧が北上したことで、試験盛土を施工した美幌町では記録的な降雨となった。AMeDAS地点「美幌」(試験盛土施工箇所から3km程度南東)での積算雨量 R_c は144.0mmとなり、AMeDAS運用開始以来の最大値を観測した。また、最大時間雨量 r_{max} は13.5mm/hであった。当該試験盛土に設置した雨量計での観測値は $R_c = 150.4 \text{ mm}$ 、 $r_{\text{max}} = 13.8 \text{ mm/h}$ となり、 R_c 、 r_{max} ともにアメダス地点よりもやや大きい値となった。

(2) 盛土崩壊の過程

図-3は試験盛土を俯瞰できる位置に設置した定点カメラから得られた代表的な時間での試験盛土の状況である。なお、図中の画像ではのり面に敷設したナイロン紗は風によって剥がされている。まず、8:46での盛土の崩壊形態を見ると、高密度盛土では盛土天端から筋状の崩壊が確認でき、これはガリ浸食であると考えられる。また、のり尻には土砂流出が確認できる。一方、崩壊の初期段階として低密度盛土では、過去に実施されている模型盛土への散水実験⁷⁾で確認されているような、のり尻付近での小規模なすべり破壊が発生している。ここで、図-4は試験盛土のり尻における飽和度 S_r の経時変化を示し

ている。なお、 S_r は土壌水分計より得られた θ と、試験盛土竣工からの ρ_d の変化は小さいと仮定して、先述した ρ_d の平均値を用いて算出した。低密度盛土ののり尻では、雨水浸透に伴う飽和度 S_r の上昇が顕著であり、 $S_r \approx 1.0$ の高飽和度状態にまで上昇している⁸⁾。図-3に示した崩壊が発生した2015年10月8日の降雨時においてものり尻では $S_r \approx 1.0$ まで上昇しており、さらに後述の図-7で示すように低密度盛土ではのり面中腹においても S_r が上昇している。このようなのり尻からのり面中腹での領域における S_r の上昇によるせん断強度の低下が、のり尻付近の不安定化に起因していると予想される。次に10:46の画像を見ると、低密度盛土の小規模なすべり破壊はのり尻から天端方向に進展する進行性破壊を呈している。高密度盛土でも進行性破壊の発生を確認できるものの、ガリ浸食箇所の増加が顕著化している。降雨イベント中二番目の大きさの時間雨量を観測した後(後述の図-6参照)である12:46の画像からは、低密度盛土ののり肩部でスプーン状の崩壊が発生している様子が伺える。高密度盛土では、ガリ浸食部や進行性破壊箇所からの土砂流出が継続し、のり尻部には多量の土砂が堆積している。

図-5は降雨後の10月9日に撮影した試験盛土の状況と代表的な位置での崩壊状況のスケッチを示している。なお、のり肩部のブルーシートと土のうは撤去している。低密度盛土では、盛土天端からのガリ浸食の発生は確認

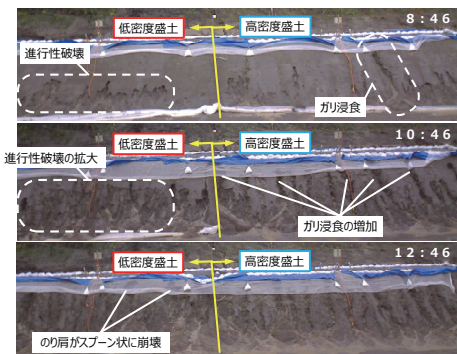


図-3 盛土の崩壊過程

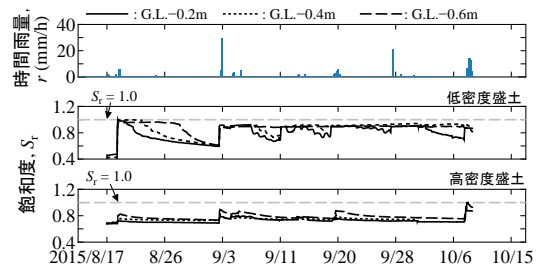


図-4 竣工後からのり尻における飽和度の経時変化

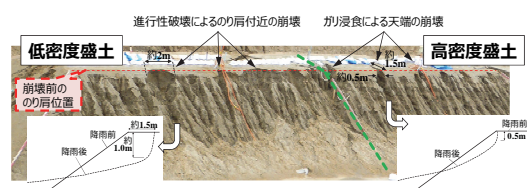


図-5 盛土の主な崩壊状況と代表断面のスケッチ

できないものの、天端を含むのり肩部で最大幅2m程度、深さ0.5m程度のスプーン状の崩壊が発生した。また、のり面での進行性破壊の崩壊深は概ね0.2m～0.5m程度であった。高密度盛土では、のり尻からの進行性破壊も確認できるが、主たる崩壊形態は筋状のガリ浸食であり、その大きさは最大で奥行きが盛土天端の半分程度、崩壊深1.0m程度、幅0.5m程度であった。

以上のように、降雨時における崩壊形態は盛土の締固め度によって大きく異なることが分かった。その要因は以下のように考えることができる。低密度盛土を想定して $D_c = 83\%$ となるように供試体（最大粒径9.5mm、直径50mm、高さ50mm）を作製し、定水位透水試験を行った。得られた飽和透水係数 k_{sat} は $k_{sat} = 4.2 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ であった。一方、高密度盛土を想定した $D_c = 94\%$ の供試体では変水位透水試験を行った。この場合には $k_{sat} = 2.0 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ となり、飽和透水試験に用いた試料は粒度調整を行っているため参考値ではあるものの、締固め度による k_{sat} の違いは約100倍であった。このことから低密度盛土と比較して高密度盛土では、 k_{sat} が小さいため雨水が土中へ浸透せずに表流水が発生し、ガリ浸食が顕著化したと考えられる。一方、低密度盛土では、高密度盛土よりも k_{sat} が大きいので、土中への雨水浸透が比較的円滑に行われ、飽和度および盛土内水位が上昇し、有効土被り圧が小さいのり尻部から進行性破壊が進展したと推察される。また、乾燥密度の違いは水分特性にも影響を与えることから、4.で後述するように k_{sat} のみならず飽和・不飽和浸透特性の違いが崩壊形態に影響していると思われる。以上に示したように盛土の締固め度（乾燥密度）によって崩壊形態は大きく異なるものの、最終的には両盛土ともにのり肩と天端を含む崩壊が発生した。よって、本研究の範囲内では、列車や車の運行や通行へ与える盛土崩壊の影響は、締固め度に依らず同程度であると考えられる。

4. 実効雨量と地盤内水分挙動の相関

土中への雨水浸透・排水挙動は、時間遅れを伴う現象であり、その程度は対象となる土構造物の密度条件や先行降雨の有無によっても異なる。また、雨量指標を用いて降雨時における土構造物の不安定化を予測するために

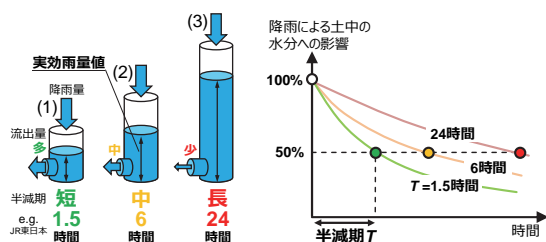


図-6 実効雨量の概念図と半減期の考え方

は、雨量指標と地盤内水分挙動との経時的な連動性が高いほど正確な予測が可能となる。このことから地盤内の水分挙動を間接的に表現する雨量指標は、先行降雨や時間遅れの影響を表現できることが望ましい。本研究では、地盤に浸透した雨水の影響度合いに左右される崩壊形態を間接的に表現可能な実効雨量に着目し、降雨時の地盤内水分挙動との関連性や、盛土崩壊時の傾向を考察した。

ここで、実効雨量 R_t とは式(1)および図-6に示す概念で表される雨量指標である。モデルの概念は、図に示したように1つの流出孔を有するタンクモデルである。

$$R_t = \alpha r_0 + \alpha^2 r_1 + \dots + \alpha^{n+1} r_n \quad (1)$$

$$\alpha = (0.5)^{1/T} \quad (2)$$

ここで、 α : 1時間単位の減少係数、 r_n : n時間前の時間雨量、 T : 半減期（時間）である。なお、式(2)と図-5から T は地盤に浸透した雨水の貯留量が半減するのに要する時間であると理解できる。

R_t は T の値によって地盤内に浸透した雨水の貯留度合いを間接的に表現できる。言い換えると、図-5に示すように T の大きさによって地盤内水分状態の違いを表現できると解釈できる。このことから、表流水やわずかな浸透水の影響による表層浸食や小規模な崩壊には、地盤内に貯留される雨水の影響が小さい状況を表現する T が小さい場合の R_t に対応すると考えることができる。一方、 T が大きい場合の R_t は、地盤内の水分が十分に貯留される状況を表現しているため、地下水位が十分に高い状態で発生する土砂災害に対応していると解釈できる。一部の鉄道事業者では、上述の災害形態との対応性や、時間雨量と連続雨量を用いた従来手法の雨量規制手法と比較して安全性（警報漏れ頻度）を低下させること無く規制時間を短縮できる¹⁾ことから、すでに実際の雨量規制に R_t を採用している。本研究では、高密度盛土ではガリ浸食が主だった崩壊形態であったことを勘案し、すでに提案されている $T=1.5$ 時間、6時間、24時間の実効雨量に加えて、 $T=0.5$ 時間での R_t を算出した。また、降雨時における試験盛土の水分応答挙動として、 S_t に着目して R_t との関連性について検討した。

図-7は観測降雨量から算出した R_t と試験盛土内の S_t の経時変化である。なお、 R_t はそれぞれの T で算出した値の最大値である R_{tmax} で正規化した R_t / R_{tmax} である。 S_t は盛土のり面中腹での経時変化を代表値として記載している。なお、土壌水分計より得られた体積含水率 θ と、試験盛土竣工からの ρ_d の変化は小さいと仮定して先述した ρ_d の平均値を用いて S_t を算出した。

R_t / R_{tmax} の経時変化を見ると、 $T=0.5$ 時間および1.5時間の R_t / R_{tmax} は地盤内の雨水の貯留時間が短いため、降雨履歴の経時変化と良く対応しており、 r_{max} を観測した10816:00付近で R_t / R_{tmax} が最大値を示す。一方、 $T=6$ 時間および24時間の R_t / R_{tmax} は、降雨観測初期では増加傾向が緩慢

ではあるが、 T の値が大きいほど地盤内での雨水の貯留を表現するため、 r_{\max} を観測した10/8 16:00以降で R_t/R_{\max} が最大値($T=6$ 時間では18:00、 $T=24$ 時間では22:00に最大値となった)を示した。次に S_t に着目すると、降雨イベント前では、締固め度に依らず含水比が同程度であるため、低密度盛土では $S_t=45\sim55\%$ 程度、高密度盛土では $S_t=70\sim80\%$ 程度となった。降雨時の経時変化を見ると、低密度盛土では盛土表層ほど S_t が増加し始める時間が早く、降雨がのり面深部へ浸透している状況が伺える。特に盛土表層から0.4m(図中の黒色実線のG.L.-0.2mと黒色破線のG.L.-0.4m)までに着目すると、10/8の6:00~7:00の間に S_t が顕著に増加する傾向にあり、これは進行性破壊の崩壊深と概ね整合する。低密度盛土では、降雨前の飽和度は高密度盛土よりも低いものの、乾燥密度が小さいことから飽和・不飽和透水係数は降雨強度と比較して相対的に大きいため、盛土内に雨水が浸透して S_t が上昇したと考えられる。このことから模型盛土への散水実験⁷⁾などで確認されている結果と同様に、本試験盛土における雨水浸透に伴う進行性破壊の発生は、図-4および図-6で示したようなのり尻からのり面中腹の範囲での S_t の増加が起因していると考えられる。一方、高密度盛土の結果を見ると、低密度盛土よりも S_t の増加は低密度盛土と比較して緩慢である。高密度盛土では保水性が良いため、盛土竣工時の飽和度($S_t=70\sim80\%$ 程度)が保持されており、低密度盛土と比較すると不飽和透水係数は飽和透水係数に近い状態にある。しかし、降雨強度に対する飽和・不飽和透水係数の値が相対的に小さいことから、雨水浸透と飽和度上昇が緩慢になったと考えられる。このことから、雨水の多くは表流水となり、ガリ浸食が顕著になったと判断できる。なお、高密度盛土では2015年10月8日の降雨初期段階で深度と関係無く S_t が増加しており、 S_t の増加傾向は先述した低密度盛土とは異なっている。これには以下の理由が考えられる。すなわち、硬質な計器ケーブルの養生管(合成樹脂製)の周囲の地盤では、水みちが形成し易い状態⁹⁾にあると予想される。高密度盛土では表流水によって盛土表層でガリ浸食が発生したことから、養生管周辺で水みちが形成されて流水が作用した場合には浸食が発生し易い状況にあると考えられ、浸食された養生管周辺地盤から集中的に雨水が流入することで短時間に深部でも S_t が上昇したと思われる。一方、低密度盛土では高密度盛土と比較して透水係数が高いため雨水が円滑に浸透し、水みちの形成によって浸食が発生してもその程度は小さく、表層からの雨水浸透によって S_t が上昇する傾向を計測できたと予想される。以上に示したように、締固め度によって S_t の経時変化は大きく異なり、このような地盤内水分挙動の違いが崩壊形態に影響していると推察される。

次に R_t/R_{\max} と S_t の経時変化の整合性について検討する。

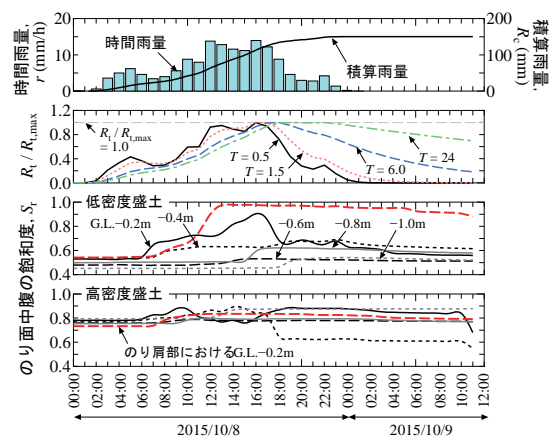


図-7 降雨イベント時の実効雨量および飽和度の経時変化

低密度盛土では $T=0.5$ 時間および1.5時間の R_t/R_{\max} とG.L.-0.2mにおける S_t との経時変化の整合性は高い。このことから、今回の降雨イベントでは $T=0.5$ 時間および1.5時間の比較的短時間の T を設定した R_t によって地盤内水分挙動を間接的に表現できそうである。なお、先述したように崩壊形態は、 k_{sat} や水分特性などに依存すると考えられる。例えば、細粒分の多い盛土材料を対象した場合には、保水性が良いために盛土内水位が上昇して崩壊規模や形態が異なると予想される。また、崩壊に至るまでの盛土内の水分挙動は、先行降雨の有無などの降雨パターンにも影響されると考えられる。細粒分が多く盛土材料で構成された盛土が先行降雨を受けた場合には、降雨によって飽和度が上昇して保水性が良いため、不飽和透水係数が飽和透水係数に近い状態を保持できる。これによって先行降雨後には少ない雨量でも顕著な水位上昇が発生すると予想される。すなわち、適切な T は盛土材料の物性や密度、降雨パターンに応じて変化すると考えられる。次に、列車や車両の通行に支障を来すと考えられるのり肩部の崩壊が発生した時間である12:30付近(図-3参照)の R_t/R_{\max} に着目すると、 $T=0.5$ 時間の経時変化の傾向は他の T の傾向とは異なり、崩壊発生時間付近でピーク値に近い値を示している。以上の検討から、今回の降雨イベントによる崩壊を予測するための R_t は、 $T=0.5$ 時間や $T=1.5$ 時間程度を用いると適当であると言える。なお、図中にはのり肩での代表的な S_t としてG.L.-0.2mの結果を示しているが、12:30付近から $S_t=1.0$ 程度の値となっており、 R_t/R_{\max} との整合性が確認できるとともに、のり肩においてのり面での進行性破壊が進展して規模の大きい崩壊が発生した事実を裏付ける結果となっている。

一方、高密度盛土では、 R_t/R_{\max} と S_t の経時変化や、最初のガリ浸食の発生(図-3中の08:30付近)と S_t の上昇開始時間に有意な整合性は確認できない。ここでガリ浸食は、盛土天端のわずかな勾配の違いなど、微地形的な要因による表流水の集中によって発生すると考えられる。この結果から、雨水浸透時の地盤内水分挙動を間接的に

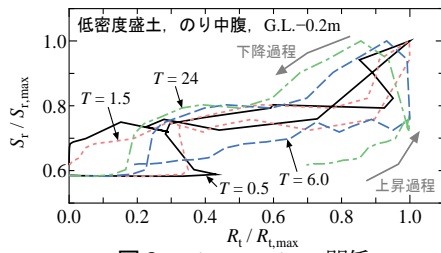


図-8 $R_t/R_{tmax} \sim S_r/S_{rmax}$ 関係

表現する実効雨量を用いてガリ浸食の発生を予測することは困難であることが示唆される。

図-8に飽和度と実効雨量の関係を示す。図中の飽和度は低密度盛土のG.L.-0.2mにおける結果であり、飽和度は降雨イベント中の最大値である S_{rmax} で正規化した S_r/S_{rmax} を用いて、 R_t/R_{tmax} との関係を整理した。 $R_t/R_{tmax} \sim S_r/S_{rmax}$ 関係の線形性に着目すると、各 T に対する $R_t/R_{tmax} \sim S_r/S_{rmax}$ 関係を線形近似した際の決定係数 R^2 は、 $T=0.5$ で0.685、 $T=1.5$ で0.773、 $T=6.0$ で0.601、 $T=24$ で0.137となった。このことから、今回の検討範囲では $T=0.5$ および $T=1.5$ 時間が、盛土内の飽和度上昇を実効雨量で間接的に再現するためのパラメータとして適切であると言える。

5. まとめ

降雨時における盛土の崩壊形態は、低密度盛土ではのり尻から盛土のり面表層の進行性破壊が進展し、最終的にはのり肩部が崩壊した。高密度盛土では盛土天端からのガリ浸食が顕著であった。崩壊に至るまでの飽和度変化は、低密度盛土では盛土表層部での顕著な飽和度上昇が確認できた。高密度盛土では透水係数が低く、雨水浸透が困難なため飽和度上昇が緩慢であった。低密度盛土の盛土表層における飽和度と半減期を小さくした場合の実効雨量の増減は概ね整合し、のり肩崩壊発生時に実効雨量がピークを示す挙動となった。一方、高密度盛土で

は飽和度と実効雨量の増減には整合性が確認できなかった。このことから、地盤内の水分量増加に起因しないガリ浸食のような崩壊形態の予測に対し、現状での実効雨量を用いることは困難であると予想される。

謝辞：本研究の一部は平成27年度 道路保全地盤技術向上の調査・研究助成事業助成（公益社団法人 地盤工学会）を受けた。また、盛土の構築に際して美幌貨物自動車株式会社の協力を得た。記して深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) 梶谷宣弘, 外狩麻子, 関玲子, 友利方彦: 実効雨量指標を用いた降雨に対する運転規制方法について, 地盤工学会誌, Vol. 60, No. 3, pp. 20-23, 2012.
- 2) 岡田憲治: 土壌雨量指数による土砂災害発生危険度予測の現状, 土と基礎, Vol.55, No.9, pp.4-6, 2007.
- 3) 太田直之, 杉山友康: 災害の推移と今後の防災, 日本鉄道施設協会誌, Vol.47, No.6, pp.453-455, 2009.
- 4) 山本晴彦, 小林北斗: 2014年8月20日に広島市で発生した豪雨と土石流災害の特徴, 自然災害科学, Vol.33, No.3, pp.293-312, 2014.
- 5) 上本雄也, 澁谷啓, 川尻峻三, 高橋正和: 築堤中に採取したある河川堤防盛土材の締固め特性について, 建設工学研究所論文報告集, No.52, pp.67-72, 2010.
- 6) 古関潤一, 田實渉, 並河努: 築堤工事における締固め度のばらつきと自己相関分析, 土木学会第66回年次講演会, pp.513-514, 2011.
- 7) 川尻峻三, 布川修, 太田直之: 亀裂が散水時の模型盛土内の水分挙動に及ぼす影響, 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.71, No.3, pp.204-217, 2015.
- 8) 田中悠暉, 川尻峻三, 橋本聖, 川口貴之, 中村大, 佐藤厚子, 山田充: 締固め条件を変えた試験盛土の降雨前後におけるS波速度分布の変化に関する研究, 地盤工学会北海道支部技術報告集, Vol.56, pp.329-338, 2016.
- 9) 佐藤真理, 桑野玲子: 地中埋設物が水みちと土砂流出時の空洞形成に及ぼす影響, 地盤工学ジャーナル, Vol.10, No.1, pp.113-125, 2015.

(2016. 1. 26 受付)

FAILURE MODE BY RAINFALL AND EFFECTIVE RAINFALL ON EMBANKMENT OF CHANGING DEGREE OF COMPACTION

Yuki TANAKA, Shunzo KAWAJIRI, Hijiri HASHIMOTO,
Takayuki KAWAGUCHI, Dai NAKAMURA and Satoshi YAMASHITA

In this study, the degree of saturation and the effective rainfall amount were reviewed in terms of the consistency of their time-dependent changes when two experimental embankments having different degree of compaction were collapsed by rainfalls. As a result, the consistency with the effective rainfall amount calculated with the use of the degree of saturation and a small half-value period was confirmed for the low density embankment, which presented progressive failure due to the increased saturation level. On the other hand, the relationship between the degree of saturation and the effective rainfall amount could not be confirmed for the high density embankment where dominant collapse form was gully erosion.