

8. 災害廃棄物再生利用促進に関する調査・研究 ＝土の水分保持特性が盛土の浸潤域形成に及ぼす影響について＝

中村吉男・青木悠馬

1. はじめに

地震や土砂災害および風水害等によって排出された廃棄物（災害廃棄物）は事業活動によって発生した廃棄物ではないことから「一般廃棄物」に該当し、その処理責任は地方公共団体（区市町村）に帰属する。今後発生することが確実視されている南海トラフ巨大地震では、太平洋沿岸の広範囲にわたり多量の災害廃棄物が発生されると予測されており、発生量¹⁾は東日本大震災の経験を基に推計すると約3億トンにおよび、この内約1億トンが土砂混合廃棄物であると想定されている。災害からの早期復旧・復興のためには、これら土砂混合廃棄物を復興資材（盛土材）として処理し、公共性の高い土地用途に積極的に利用することが不可欠である。一方、昨今、地球温暖化による気候変動により降雨の形態が変わり集中豪雨により土砂災害も頻繁に起こっている。熱海で起きた土砂災害は盛土の規制が不十分であったことが原因の一つとして挙げられ、全国的に盛土の見直しが必要とされ、盛土規制法²⁾が制定された。

本研究では、災害廃棄物を盛土材料として使用した場合を想定し、盛土の不安定化要因の一つである降雨浸透に伴う盛土の湿潤域の形成について、土の水分保持特性に着目し検討した。具体的には以下の項目について議論を進める。

- 1) 砂と粘土の水分保持特性の違いが盛土の湿潤域の形成に及ぼす影響。
- 2) 飽和透水係数と降雨強度が盛土の湿潤域の形成に及ぼす影響。
- 3) 降雨期間が盛土の湿潤域の形成に及ぼす影響。

2. 土の水分保持特性と斜面の安定性

2.1 水分保持特性

水分保持特性とは土の排水性と吸水性の観点から土の保水性を表現したものであり、排水性は飽和透水係数（ k_s ）で表され、空隙が大きいほど高い。また、吸水性はサクシオン（ ϕ ）で表され、空隙が小さいほど吸水性は高い。ここで、サクシオンとは不飽和土で生じる負の圧力であり、毛管作用により吸い上げられた水は表面張力によって周りの土粒子を互いに引きつける働きをする。すなわち、土のサクシオンは土の含水量が低下すると増大し、また、同じ含水量でも空隙径が小さいほどサクシオンは大きくなり、同じ土では飽和度が小さいほど大きくなる。図-1に代表的な砂と粘土の水分保持特性を例示する。なお図中、比透水係数（ k_r ）とは、不飽和透水係数（ k ）と飽和透水係数（ k_s ）の比で $k_r = k / k_s$ で定義される。

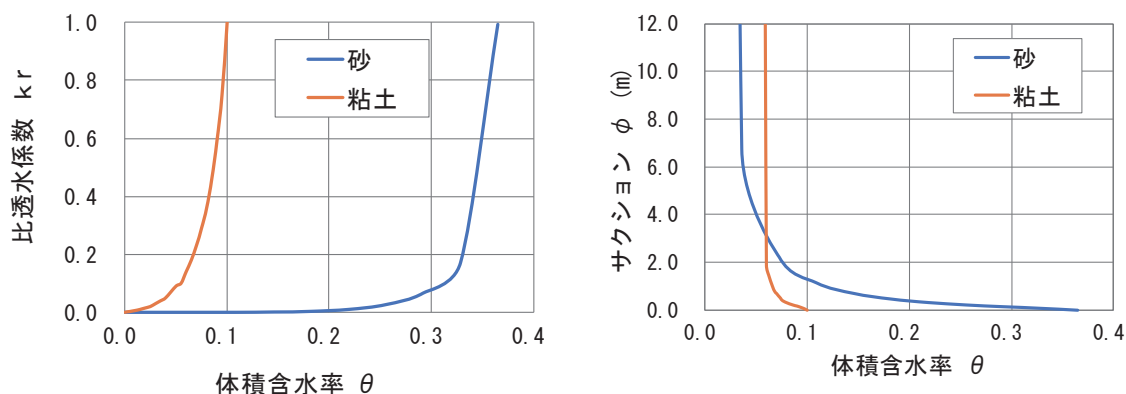


図-1 水分保持特性

2.2 浸潤域の形成による斜面の不安定化

図-2は傾斜角 β 、厚さ H の均質な無限斜面に、地表面に平行な浸透流（地下水面 H_1 ）がある場合を示したものである。無限斜面内の応力状態はどの鉛直面を見ても同じであるから、図のような帯片 $ABCD$ を考えたとき、両側面 AB 、 CD に作用する土圧及び水圧は左右バランスしている。したがって、土層のすべりはブロックすべりと同様に、帯片底面におけるせん断応力 τ とせん断抵抗 τ_f の比較で調べることができる。土の単位体積重量を地下水面より上で γ_t 、下で γ_{sat} とすれば、帯片の重量は $W = \{\gamma_t H_1 + \gamma_{sat} (H - H_1)\} \cdot L \cdot \cos \beta$ であり、これを底幅 L で除して底面に作用する (σ, τ) が求まる。一方、地表面に平行な浸透流の流線網は、互いに直交する実線の流線と破線の等ポテンシャル線で描かれるから、底面に作用する間隙水圧 u_b は作図 $E \rightarrow F \rightarrow G$ より縦距 EG に相当する水圧で与えられる。以上を整理すると、 $c' \phi'$ 法による安全率 (F_s) は(1)式で表される。

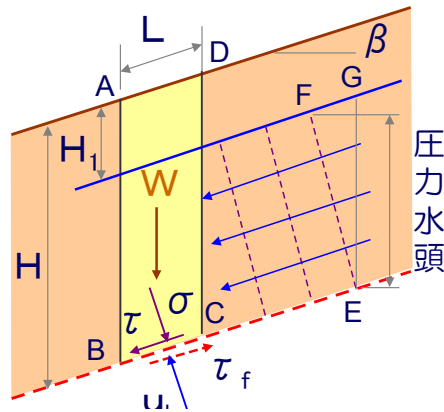


図-2 無限斜面のすべり破壊に対する安全性

$$F_s = \frac{c' + (\sigma - u_b) \tan \phi'}{\tau} \quad (1)$$

$$\sigma = \{\gamma_t H_1 + \gamma_{sat} (H - H_1)\} \cos^2 \beta \quad (2)$$

$$\tau = \{\gamma_t H_1 + \gamma_{sat} (H - H_1)\} \cos \beta \sin \beta \quad (3)$$

$$u_b = \gamma_w (H - H_1) \cos^2 \beta \quad (4)$$

砂地盤 ($c' = 0$) について $F_s > 1$ の条件を考えると、降雨の浸透により斜面が飽和し地下水面が地表面と一致する場合は、 $H_1 = 0$ で $\tan \beta < (\gamma' / \gamma_{sat}) \tan \phi'$ となる。ここで、砂地盤の代表値として、 $\gamma_{sat} = 18 \text{ kN/m}^3$ ($\gamma' = 8.2 \text{ kN/m}^3$) とすると、 $\tan \beta < 0.46 \tan \phi'$ となり、飽和域が形成された無限斜面では傾斜角 β を摩擦角 ϕ' の 4 割程度以下にしないと安定が保てないことになる。一方、飽和域が形成されない場合は $H = H_1$ として $\tan \beta < \tan \phi'$ または $\beta < \phi'$ となる。このことから斜面表層部が浸潤し、飽和域が形成されることによりすべり破壊に対する安定性は低下することになる。

3. 降雨浸透に伴う盛土の湿潤域の形成

3.1 解析条件

本研究では、図-3に示すような高さ15m、幅27m、盛土勾配1:1.8の盛土を想定し、有限要素法による飽和・不飽和非常浸透流解析(2D Flow(株)地層科学研究所)により降雨浸透に伴う盛土の浸潤状況について検討した。なお、有限要素網(メッシュサイズ)は3.2節で示す予備解析結果から0.2m幅としている。

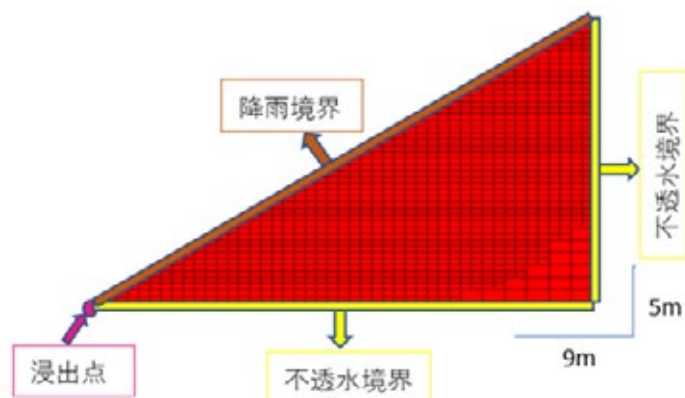


図-3 解析モデル

表-1 物性値

	砂	粘土
飽和透水係数 (k_s)	1.0×10^{-5} m/s	1.0×10^{-7} m/s
飽和体積含水率 (θ)	0.365	0.1
比貯留係数 (S_s)	0.0 (1/m)	0.001 (1/m)
最小含水量 (θ_r)	0.0	0.059

また、盛土は粘土および砂により構築されたものとし、それぞれの物性値は表-1に示すとおりであり、水分保持特性は図-1に示す関係を用いた。

3.2 予備解析

(1) 有限要素網 (メッシュ) サイズの検討

有限要素網 (メッシュ) の大きさが、降雨浸透の浸透により形成される浸潤域に及ぼす影響を調べるため、メッシュサイズを1.0m、0.5m、0.2mとし、砂地盤における比較解析を行った。図-4は降雨強度Rの条件を飽和透水係数と同値 ($R = 36\text{mm/h}$) とし、降雨継続時間480分 (8時間) での盛土内の飽和度分布を示したものである。図中青線は飽和域を示す浸潤線である。

図-4に示す通り、メッシュサイズ1.0mと0.5mでは浸潤線および飽和度分布に違いがみられ、さらに0.2mのメッシュサイズにすることによって、浸潤域が安定する。このことから、本研究では、0.2mのメッシュサイズで解析を進めることとした。なお、図-5～9における盛土内の飽和度分布の凡例 (区分) は、図-4に示すものと同様とする。

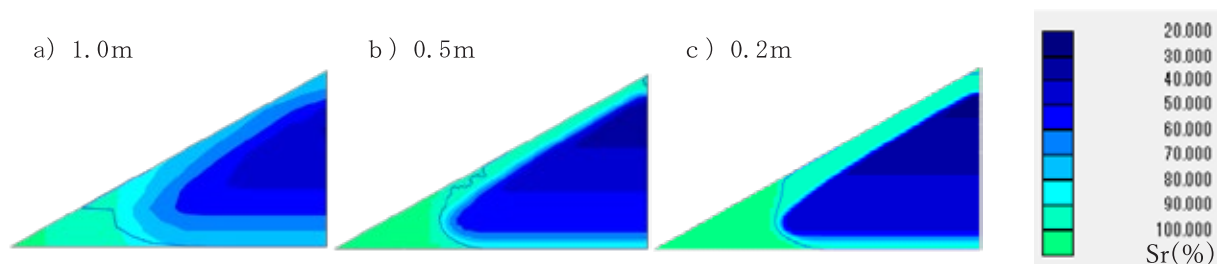


図-4 メッシュサイズの違いによる盛土の浸潤状況

(2) 定常解析および降雨浸透について

砂地盤と粘土地盤における定常状態での飽和度分布を図-5に示す。砂の最小容量 $\theta_r = 0$ を与えているので砂による盛土地盤内には飽和域は存在せず、飽和度は $S_r = 24.1 \sim 96.5\%$ の範囲とる。これに対し粘土地盤は、 $S_r = 59.7 \sim 100\%$ となり定常状態で飽和域が形成され、飽和度は砂地盤と同様に基盤の高さに平行して分布している。このことから、物性値と水分保持特性との対応が反映された解析結果が得られている。また、図-6は定常状態から降雨強度 2.1mm/h の降雨が $t = 480$ 分（8時間）継続した場合の飽和度分布を示したものである。いずれも、粘土による盛土は斜面の表層部において降雨の浸透により飽和域が斜面の表面とほぼ平行に形成されているのに対し、砂による盛土は基盤および斜面先部で飽和域が形成されているが、定常状態からの変化は僅少であることが分かる。この結果から、水分の保持特性が高い粘土地盤の方が飽和しやすいことが予測されるが、砂地盤と粘土地盤は透水係数に差があるため k_s と R の比を取ると、砂地盤では $R/k_s = 0.058$ 、粘土地盤では $R/k_s = 5.8$ となり、盛土の降雨浸透の状況を考察するためには、 R/k_s に着目した検討が必要であるものと考えられる。

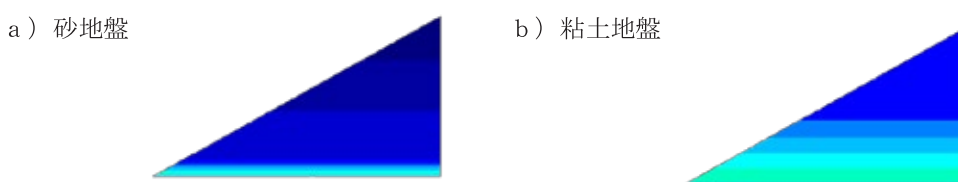


図-5 定常解析結果

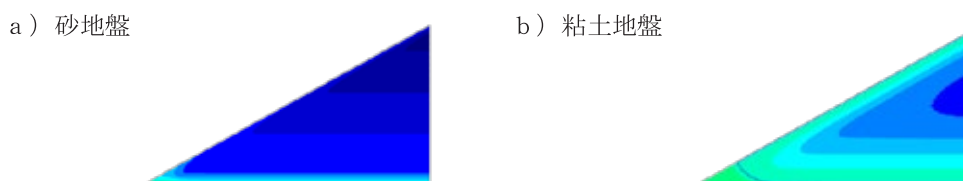


図-6 $R = 2.1\text{mm/h}$ における盛土内の飽和度分布 ($t = 480$ 分時点)

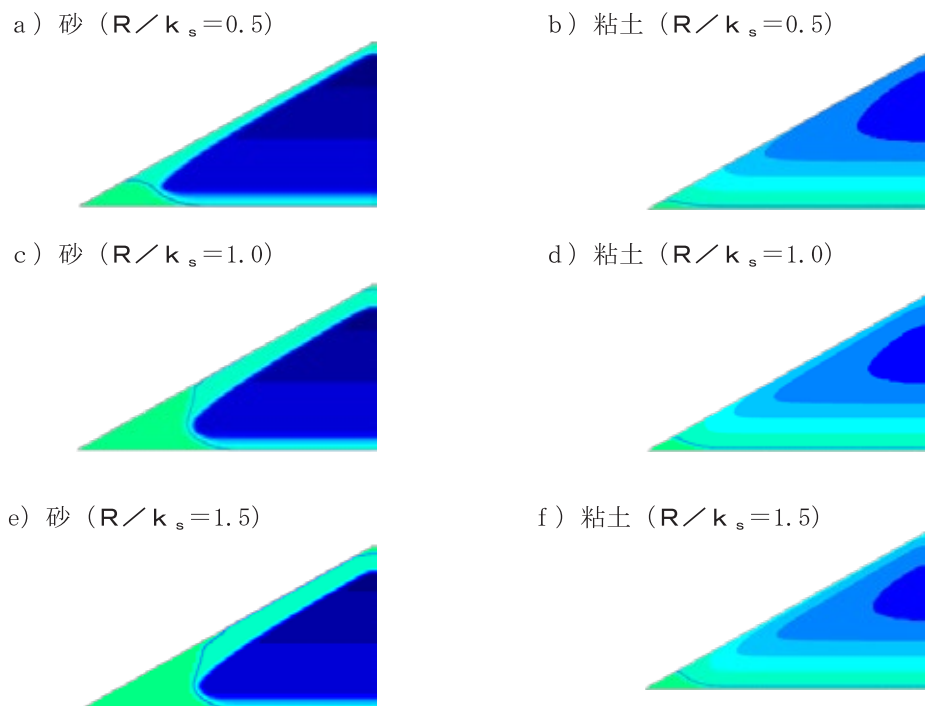
3.3 解析結果

(1) R/k_s が盛土の浸潤化に及ぼす影響について

降雨による盛土の浸潤化について、降雨強度 (R) と飽和透水係数 (k_s) による無次元量 R/k_s に着目し、表-2に示す $R/k_s = 0.5, 1.0, 1.5$ の3ケースについて盛土の浸潤状況を比較検討した。図-7は、降雨継続時間を3.2(2)節の解析と同様に480分（8時間）とし、降雨終了時点 ($t = 480$ 分) の盛土の浸潤状況を示したものである。図-7より、斜面先と基盤直上に飽和域（浸潤域）が形成され、斜面表層部は、砂においては飽和域が形成されるが粘土は湿潤化（飽和度の上昇）が進行するのみとなる。一方、盛土内部の湿潤域の形成は、砂においては定常状態を維持するのに対し、粘土は盛土内部の中標高部に向かって浸潤化が進行していることが分かる。なお、斜面表層の湿潤域は、降雨強度が高くなるに連れて、ほぼ斜面に平行に高くなる傾向が認められるが、 $R > k_s$ と $R = k_s$ では浸透状況の違いは僅少で、 $R < k_s$ との飽和度分布に差が生じている。このことから、降雨強度が透水係数よりも大きくなって過剰分の雨水は盛土内に浸透せず地表面を流れるため、盛土内部への浸透は抑制されていることが考えられる。また、降雨による浸潤域の形成は粘土に比べ砂の方が大きいことから、飽和域の形成が斜面のすべり破壊を助長するとの観点からその安定性を評価すると、砂質土による盛土の方がすべり破壊に対する安全性が低下することが示唆され、降雨時の防災調査において留意すべき事項であるものと考えられる。なお斜面表層に現れる浸潤線の高さは、砂・粘土ともに R/k_s が大きくなるにしたがって高くなる傾向がある。

表-2 R/k_sの設定

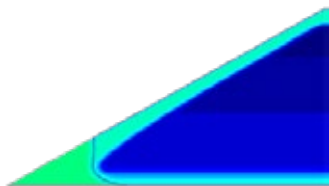
R/k _s	砂 (k _s =1.0×10 ⁻⁵ m/s)	粘土 (k _s =1.0×10 ⁻⁷ m/s)
0.5	R=18mm/h	R=0.18mm/h
1.0	R=36mm/h	R=0.36mm/h
1.5	R=54mm/h	R=0.54mm/h

図-7 R/k_sが浸潤域形成に及ぼす影響

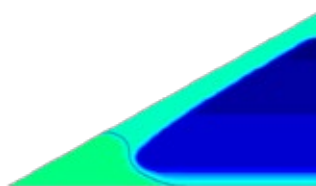
(2) 降雨継続期間について

前項では、降雨強度に着目して盛土の湿潤化について議論した。本項では降雨継続時間が盛土の湿潤化に及ぼす影響について検討した。検討ケースとしては、盛土の浸潤化は粘土に比べて砂の方が顕著であることから、砂においてR/k_s=1.0のR=36mm/hの降雨が10時間継続（総雨量360mm）する場合を基本とし、総雨量が等しいR=90mm/h（R/k_s=2.5）×4時間とR=15mm/h（R/k_s=0.417）×24時間を比較ケースとして選定した。図-8は降雨終了時点での盛土の飽和度分布を示したものである。図より、降雨継続期間が長いほど飽和度90~100%未満の分布域が斜面表層より深く発達し、盛土内部の飽和度20~90%未満の飽和度域が狭くなっている。このことから、盛土の飽和度を高める因子として、総雨量が同じならば、降雨強度よりも降雨継続時間の影響度は大きく、不安定化の要因となる。また、のり先部に形成される湿潤域は降雨期間が長いほど平坦な形状を呈し、斜面表層に現れる浸潤線の高さ降雨時間が短いほど高くなる傾向にある。ただし、浸潤線の高さは前節で示したように、R/k_sが大きくなるにしたがって高くなる傾向があることから、これについては、降雨継続時間よりも、降雨強度の影響が大きいものと考えられる。

a) 90mm/h×4時間



b) 36mm/h×10時間



c) 15mm/h×24時間

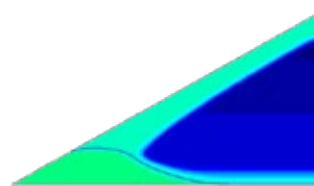


図-8 盛土の浸潤化に及ぼす降雨継続時間の影響

4. まとめ

本研究で得られた主な知見を以下に整理する。

- ① 高さ15m、幅27m、盛土勾配1：1.8の三角形断面を有する盛土の降雨浸透について、有限要素法による飽和・不飽和非定常浸透流解析により検討する場合、安定した解析解を得るためには有限要素網（メッシュサイズ）を0.2m程度とする必要がある。
- ② 降雨の盛土の浸透特性は、斜面先と基盤直上に飽和域（浸潤域）が形成され、斜面表層部は砂においては飽和域が形成されるが粘土は湿潤化（飽和度の上昇）が進行するのみとなる。浸潤化および浸潤域の形成は、降雨強度（ R ）と飽和透水係数（ k_s ）による無次元量 R/k_s に支配され、斜面表層の湿潤域は、降雨強度が高くなるに連れて、ほぼ斜面に平行に高くなる傾向が認められるが、 $R > k_s$ と $R = k_s$ では浸透状況の違いは僅少で、 $R < k_s$ との飽和度分布に差が生じている。このことから、降雨強度が飽和透水係数よりも大きくなっても過剰分の雨水は盛土内に浸透せず地表面を流れるため、盛土内部への浸透は抑制されていることが考えられる。また、降雨による浸潤域の形成は粘土に比べ砂の方が大きいことから、飽和域の形成が斜面のすべり破壊を助長するとの観点からその安定性を評価すると、砂質土による盛土の方がすべり破壊に対する安全性が低下することが示唆される。また、斜面表層に現れる浸潤線の高さは、砂・粘土ともに R/k_s が大きくなるにつれ高くなる傾向がある。
- ③ 降雨継続時間が砂盛土の湿潤化に及ぼす影響について、総雨量が同じならば、降雨継続時間が長いほど盛土全体の飽和度は高くなり、不安定化の要因となる。また、のり先部に形成される湿潤域は降雨期間が長いほど平坦な形状を呈し、斜面表層に現れる浸潤線の高さ降雨時間が短いほど高くなる傾向にある。ただし、浸潤線の高さは上記したように R/k_s が大きくなるにつれ高くなる傾向があることから、これについては、降雨継続時間よりも降雨強度の影響が大きいものと考えられる。

本研究では、降雨終了時の盛土の浸潤化について議論したが、降雨中の浸透状況についての吟味も必要と考えられる。

参考文献

- 1) 環境省：災害廃棄物の発生量の推計，平成25年度巨大地震発生時における災害廃棄物対策委員会第4回配布資料2，2014
- 2) 宅地防災：「宅地造成等規制法の一部を改正する法律」（盛土規制法）が公布されました～危険な盛土等を全国一律の基準で包括的に規制します！～国土交通省（mlit.go.jp）（参照 2023-02-03）