

盛土に打設した排水性補強材の 降雨・地震時の安全率改善効果

STABILITY EVALUATION FOR ENBANKMENT REINFORCED WITH SPIRAL

BLADED DRAIN PIPES DURING THE EARTHQUAKE AND RAINFALL

古川 全太郎¹・笠間 清伸²・浜崎 智洋³・中村 大樹⁴

Zentaro FURUKAWA, Kiyonobu KASAMA, Tomohiro HAMASAKI and Daiki NAKAMURA

¹九州大学大学院工学研究院 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)

E-mail: z.furukawa@civil.kyushu-u.ac.jp

²九州大学大学院工学研究院 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)

E-mail: kasama@civil.kyushu-u.ac.jp

³西日本高速道路株式会社九州支社 (〒818-0131 福岡県太宰府市水城 2-25-1)

E-mail: t.hamasaki.aa@w-nexco.co.jp

⁴九州大学大学院工学府建設システム工学専攻 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)

E-mail: nanohfate@gmail.com

Key Words: drain pipe, permeability, water pressure, seepage analysis

1. 研究背景と目的

近年, ゲリラ豪雨や地震等による斜面崩壊が多々発生しており, 平成 24 年 7 月に発生した九州北部豪雨での斜面崩壊は大きな被害をもたらした¹⁾. このような背景から, 局所的な豪雨や想定外の地震動など狂暴化する自然外力に対して, 既存の盛土や切土のり面を補強する技術が希求されている²⁾. そこで, 本研究では, 斜面や盛土に排水性を有する補強材を敷設することで豪雨時や地震時に発生する地盤内の間隙水圧を低減させ, かつ補強材の引抜き抵抗力により地盤の安定性を向上させる排水性補強材(写真-1)の開発を行った³⁾. さらに排水性補強材の有効性を検証するために, 排水性補強材を試験的に敷設した盛土を対象に, 降雨・地震時における斜面安定解析を行い, 排水性補強材による安全率の改善効果を検討した.

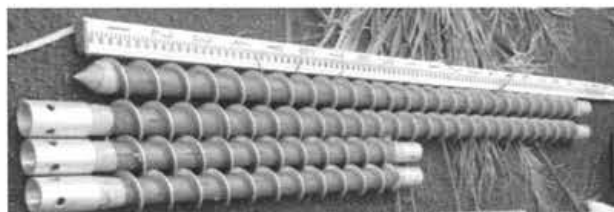


写真-1 排水性補強材

2. 試験盛土の概要

図-1 は排水性補強材を敷設した宮崎自動車道の盛土の概略図である。盛土の法高は 6 m で, 段数は 2 段, 小段幅 2 m, 法勾配は 1:1.84 であった。排水性補強材の打設間隔は 1.5 m, 打設長は上段が 11 m で下段が 9 m であり, 敷設勾配は 1:12 であった。地下水位は, モデルの下端に一致するとし, 盛土上面は道路区間を想定し, 不透水条件とした。図中の Bs₁, Bs₂, Bs₃, および Bs₄ は, それぞれ火山灰質粘性土を主体とする地盤である。地下水位を計測するために No. 1 と No. 2 の位置に観測井戸を設置している。

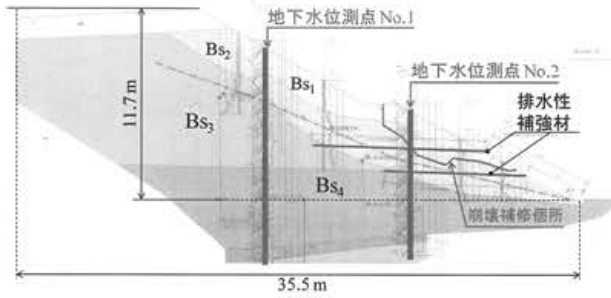


図-1 試験盛土の概略図

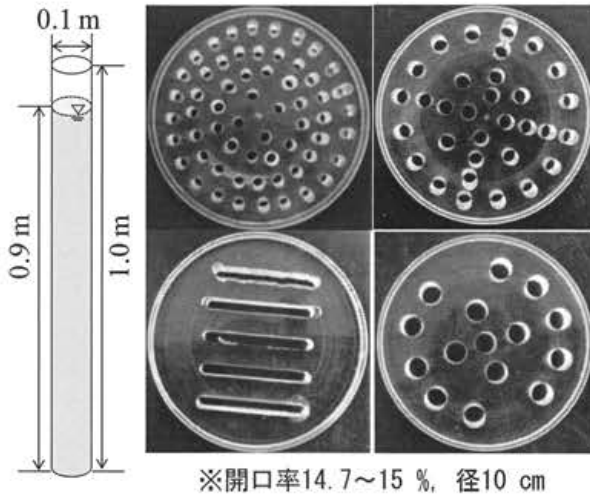


図-2 変水位透水試験装置の概略図と開孔の形状

3. 排水性補強材を模擬した変水位透水試験

排水性補強材が必要とされる透水性と開口部の形状の関係を調べるために、排水性補強材の開口部を模擬した円盤を用いた変水位透水試験を行った。実験装置の概略図を図-2 左部に示す。長さ 100 cm、直径 10 cm の透明な円柱を使用し、初期水位は 90 cm とした。この装置の下部に、厚さ 1 cm で開口率と穴の形状の異なる亚克力円盤を装着することにより開口率、穴の形状と透水係数の関係を実験的に求めた。穴の直径は 5, 7, 10 mm、開口率は 5, 10, 15, 20%、穴の形状は、円形と 5×50 mm のスリットとした。図-2 右部に亚克力円盤の一例を示す。実験装置上部 (90 cm) まで水を入れ、水が亚克力円盤の上部まで排水される時間を計測し、3 回の実験の平均値を透水係数とした。透水係数は、変水位透水係数の式によって算出した。

透水係数と開口率の関係を図-3 に示す。穴の大きさや形状によらず透水係数は開口率の増加とともに直線的に増加した。同じ開口率での透水係数の違いは最大でも $4.0 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 程度で、穴の直径、形状によ

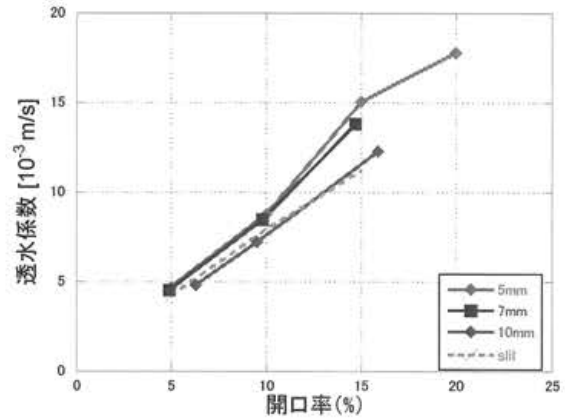


図-3 開口率と透水係数の関係

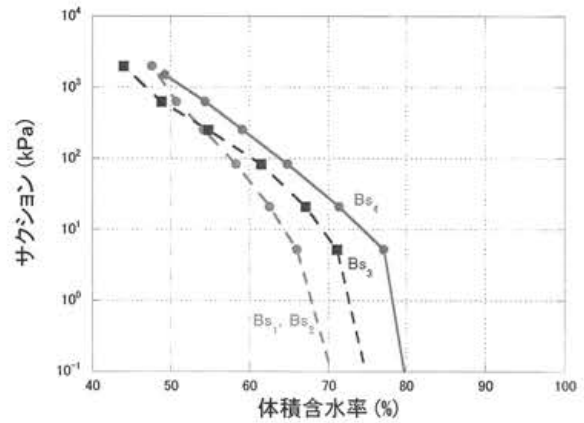


図-4 盛土の水分特性曲線 (排水過程)

表-1 排水性補強材の材料定数

透水係数 (m/s)	1.0×10^{-2}
付着強度 (kN/m ²)	46
引張強度 (kN/m ²)	10

表-2 盛土の材料パラメータ

	Bs ₁ , Bs ₂	Bs ₃	Bs ₄
透水係数 (m/s)	8.4×10^{-5}	5.4×10^{-5}	1.0×10^{-5}
粘着力 (kN/m ²)	8	39	23
内部摩擦角 (°)	29	17	24
飽和単位体積重量 (kN/m ³)	14.5	15.5	15.5
飽和体積含水率	0.4	0.4	0.4
残留体積含水率	0.1	0.1	0.1
α	0.1	0.1	0.1
n	2	2	2
m	2	2	2

る透水係数の大きな違いは見られなかった。試験施工で使用する排水性補強材の開口部は、スリット状で開口率 10% とした。排水性補強材の材料定数を表-1 に示す。補強材の付着強度は、原位置引抜き試験により決定した。

さらに、飽和不飽和浸透流解析で必要となる透水係数と土の水分特性曲線を測定するために、遠心法による保水性試験を行った。遠心法によって得られた水分特性曲線(排水過程)を図-4に示す。図には、 B_{s1} ~ B_{s4} それぞれの曲線を示している。図-4の特性曲線を Van Genuchten の式により近似し⁴⁾、解析に必要なパラメータを得た。

盛土の材料パラメータをまとめたものを表-2に示す。飽和単位体積重量、粘着力、内部摩擦角は現地で採取された試料を対象に室内実験により求めた。

4. 解析概要

排水性補強材の排水効果およびに補強効果を調べるために飽和・不飽和浸透流解析および斜面安定解析を行った。図-1の断面を簡易化し、図-5のような盛土断面を解析場とした。必要な定数は、表-1および表-2を使用した。初期の地下水位は、モデルの下端に一致するとし、盛土上面は道路区間を想定し、不透水条件とした。解析においても同様に、排水性補強材の排水効果は、透水係数を $1.0 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ として、透水性の良い要素として表現した。図-6に宮崎県小林にある観測所の2014年7月1日から2014年7月19日までのデータとNo.2の位置における地下水位の経時変化を示す。降雨量はこれを参考に入力した。さらに、降雨後の現場の地下水位と解析条件を一致させるために、盛土の背後から流入する背面流を考慮し、左側面から降雨量の30倍の水が流入する境界条件を与えた。背面流の大きさは、試験施工が行われた現場の地下水位とのデータと比較し、実効雨量を7倍したものが背面流として流入すると仮定して入力値を定めた。実効雨量は、以下の式(1)及び(2)によって表される。

$$R_G = R_0 + \alpha_1 \cdot R_1 + \alpha_2 \cdot R_2 + \dots + \alpha_n \cdot R_n \dots (1)$$

$$\alpha_1 = (0.5)^{1/T} \dots (2)$$

ここに、 R_G : 実効雨量、 R_n : n 日目の雨量、 α : 1日単位の減少係数 ($0 < \alpha < 1$)、 T : 半減期(日)

なお、半減期は4日とした。地震による外力は、震度法で入力し、鉛直方向に0、水平方向に0.1~0.5の大きさで与え、排水効果と補強効果を考慮して安全率を求めた。また、関東大震災の際の最大震度は0.3と言われており、II種地盤である対象の盛土の水平設計震度は、最大でも0.2を用いることが望まし

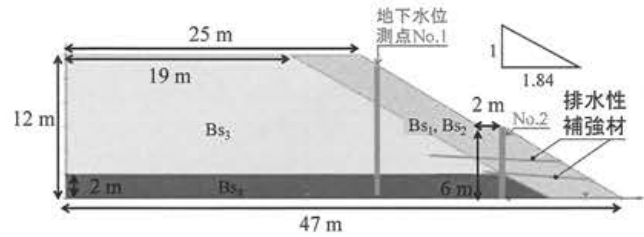


図-5 解析断面

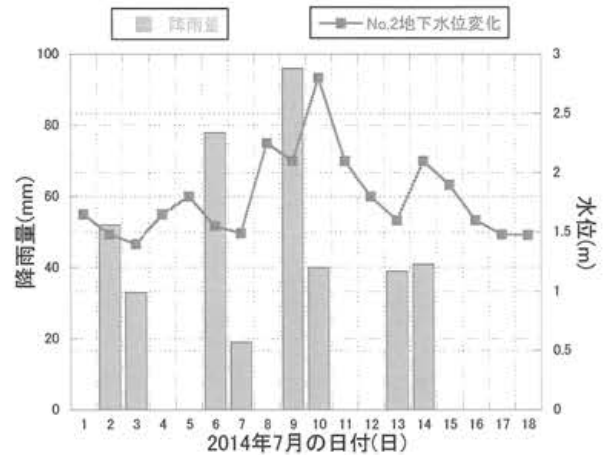


図-6 降雨量と地下水位(宮崎県小林観測所, 2014年7月)

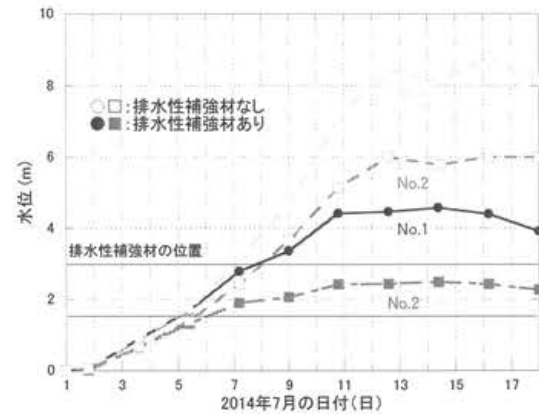


図-7 降雨による地下水位変化の解析図(2014年7月)

いと言われている⁵⁾。

5. 解析結果と考察

排水性補強材の排水効果を調べるために図-1の赤枠に囲まれたNo.1, No.2の地点において地下水位の経時変化を解析によって求めた。

図-7は、浸透流解析によるNo.1, No.2の地下水位の経時変化である。No.1, No.2それぞれ、排水性補強材の有無による検討を行った。グラフ中の黒の実線はそれぞれ排水性補強材の敷設された高さを示す。2014年7月1日から降り続いた雨によってNo.1

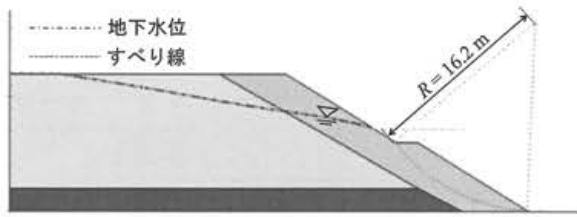


図-8 無補強のすべり線

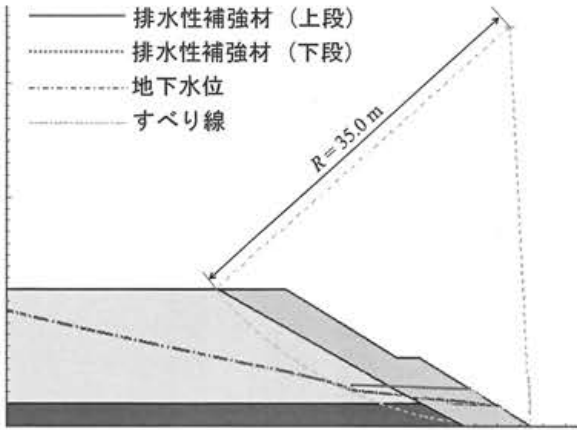


図-9 補強後のすべり線

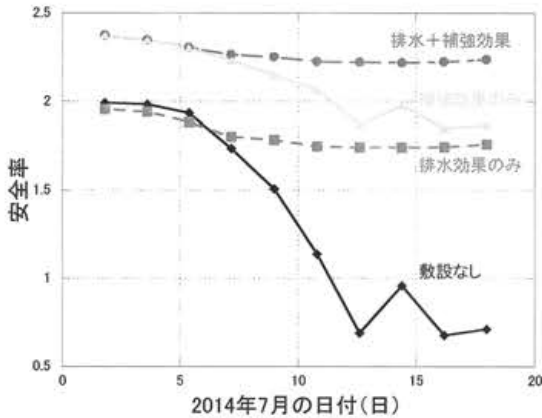


図-10 降雨時の安全率経時変化

と No.2 の地下水位は上昇し、盛土の法肩付近である No.1、小段付近にある No.2 の両地点で、排水性補強材の有無により最大地下水位に大きな違いが見られ、結果として、最大地下水位を盛土法肩付近で 60%程度、盛土小段付近で 50%程度低減した。特に No.2 の地点においては上方に敷設された排水性補強材を超えないような地下水位の変位が見られた。地下水位の上昇した後の水位低下に関して完全に表現できたとは言えないが、最大地下水位の低減に関しては概ね表現できたといえる。

図-7 の浸透流解析で得られた水圧分布を用いて安定解析を行った。図-8、図-9 に最小安全率を示した際の無補強と補強後のすべり線と地下水位を示す。排水性補強材を敷設しない場合のすべり線について、解析対象とした宮崎自動車道で過去、斜面崩壊が発

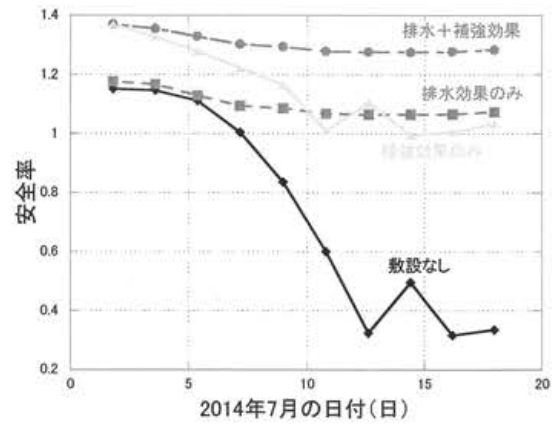


図-11 降雨・地震時の安全率経時変化

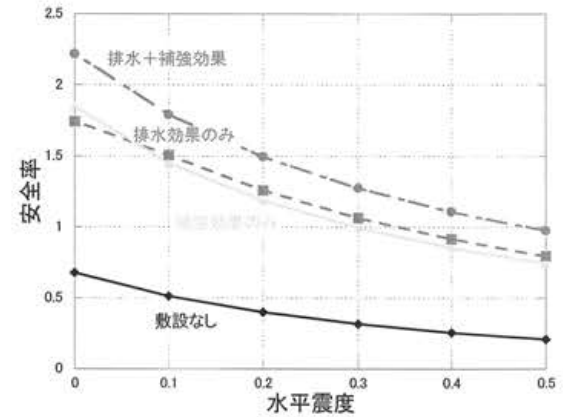


図-12 水平震度と安全率の関係

生しており、その際のすべり線と一致が見られた。地下水位は盛土小段を超えるほど上昇した。排水性補強材を敷設した図-9 を見ると、すべり線が排水性補強材の背面に出現していることが分かり、すべり線が深く、長くなり抵抗が大きくなったことにより安全率が大きく上昇した。地下水位は、上段の排水性補強材の末端をなぞるような形になり、排水性補強材の排水効果が視覚的に分かる。

図-10 に同様の解析の結果を安全率の日付の経時変化として示す。無補強の場合、排水性補強材の排水効果のみを考慮した場合、補強効果のみを考慮した場合、そしてその両方を考慮した場合の 4 つのパターンで安全率を算出した。安全率の変化の傾向として、無補強と補強効果のみを考慮した場合が同じで、排水効果を考慮することで、安全率の変化が緩やかになることが分かった。安全率の上昇率は、無補強の場合と比べ、排水効果のみ、補強効果のみ、両方を考慮した場合でそれぞれ最大で 61%、63%、70%上昇した。

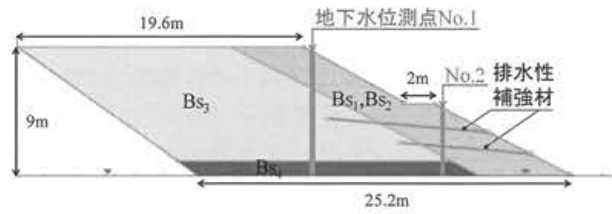
先行降雨の後に地震が発生した場合の安全率の変化を調べるために、地震時の安全率について解析した。図-11 に鉛直震度 0、水平震度 0.3 で解析を行った場合の安全率の変化を示す。すべり線は、無補強

と排水効果のみの場合は図-8、補強効果のみの場合と排水補強効果の両方を考慮した場合は図-9 と一致した。また、安全率の変化の傾向は図-10 によって得られた結果と同様の結果となった。安全率の上昇率も同じように算出すると、無補強の場合と比べ、排水効果のみ、補強効果のみ、両方を考慮した場合でそれぞれ最大で 70%、70%、75% 上昇した。排水効果と補強効果の両方を考慮した場合の最小安全率は 1.275 となり、現在の耐震設計のうち最大の設計水平震度でも崩壊しないという結果となった。地震を考慮していない場合に比べ、排水効果による安全率の上昇率が相対的に大きくなった。しかし、初期の安全率は、補強効果のみの場合が排水効果のみの場合に比べ、15% 程度大きくなり、単純な安全率の向上には補強効果が大きく作用していると考えられる。

図-12 に最小安全率と水平震度の関係を示す。安全率を排水性補強材の有無で比較すると、最大で 1.279 上昇させることが出来た。それぞれの場合の安全率の平均上昇率（各震度での安全率の上昇率を平均したもの）は排水効果と補強効果両方の場合が 75% で数値としては 0.99、排水効果のみの場合が 70%、補強効果のみの場合では 68% となり、わずかではあるが補強効果よりも排水効果の方が安全率改善効果は高くなった。また、震度が大きくなるとともに安全率は小さくなり、水平震度 0.4 では、排水、補強効果のみでは安全率は 1.0 を下回ったが、効果を併せることにより安全率は 1.0 よりも大きくなり、安全率が 1.0 を下回ることを防止出来た。以上のように、今回開発を行った排水性補強材は、降雨と地震が同時に発生するような条件において盛土の安定改善効果が高いと考えられる。

6. 地山の形状を考慮したモデルにおける解析

盛土と排水性補強材の材料定数は変えずに、背面の地山の形状を考慮したモデルでの解析を行った。解析モデルを図-13 に示す。図-5 とは異なり、地山の形状を考慮することにより、背面流の流入による地下水位変化をより正確に観測できるモデルとした。図-14 に解析で使用した 2015 年 6 月 12 日～6 月 29 日までの降雨データと、排水性補強材を敷設していない状態での地下水位変動データを用いるため、No.2 から西に 20 m 程離れた、No.3 の位置における地下水位の変化を示す。背面流は、実効雨量を基準として現場データとの比較で決定し、実効雨量の 1.5 倍が背面流として流入するものとした。



※地下水位計 No.3 は断面奥行方向に 20 m の場所にある。

図-13. 地山を考慮した解析モデル

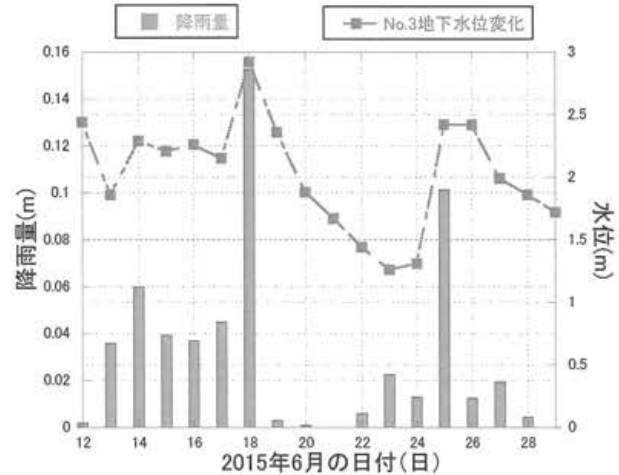


図-14 降雨量と地下水位

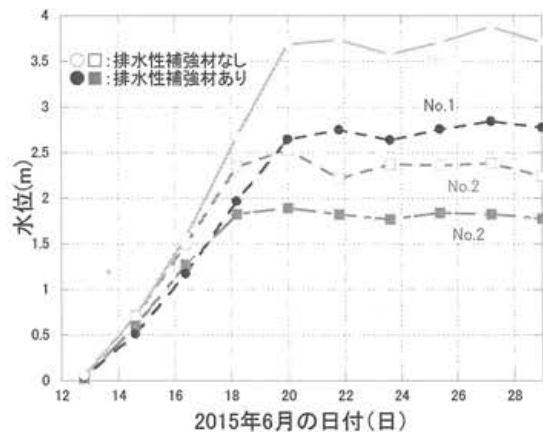


図-15 地下水位経時変化

決定された背面流の値を入力条件とし、排水性補強材の排水効果を調べるために赤枠で示された No.1, No.2 の地点において地下水位の経時変化を解析によって求めた。図-15 は排水性補強材の有無の条件で解析した地点 No.1, No.2 の地下水位の変化である。排水性補強材の有無で比較すると、地下水位は No.1 で最大 4 割、No.2 で最大 35% 程度軽減した。モデル変更前の解析結果と比べると、入力した降雨データが異なるため一概には言えないが、軽減率は 10% ～ 20% 小さくなった。

不飽和浸透流解析で得られた結果を用いて、先行降雨の後に地震が発生した場合の安全率の変化を調べるために、地震時の安全率について解析した。

水平震度を 0.3、鉛直震度を 0 で固定して地震時の安全率経時変化を求めた。排水性補強材を敷設することで地下水位は低減され、安全率が大きくなった。解析によって得られた結果をグラフにしたものを図-16 に示す。排水性補強材を敷設することで、安全率の上昇率は最大で 89% で、数値としては 0.736、排水効果のみでは 37%、数値としては 0.306、補強効果のみでは 74% で、数値は 0.61 であった。変更前のモデルでの結果に比べ、補強効果による安全率の上昇が大きい。補強効果の安全率上昇値は排水効果の安全率上昇値の 2 倍になった。また、変更前のモデルでは見られた排水効果による安全率の変化量の低減効果があまり見られなかった。

震度の大きさによる安全率の変化を見るために解析を行った。図-17 に最小安全率と水平震度の関係を示す。安全率を排水性補強材の有無で比較すると、最大で 77%、数値は 1.231 上昇させることが出来た。それぞれの場合の安全率の平均上昇率（各震度での安全率の上昇率を平均したもの）は排水効果と補強効果両方の場合が 77%、排水効果のみの場合が 30%、補強効果のみの場合では 64% となり、補強効果の方が排水効果よりも安全率改善効果は 2 倍以上高くなった。震度が大きくなるとともに安全率は小さくなったが、水平震度 0.5 においても効果を併せることにより安全率は 1.0 よりも大きくなり、安全率が 1.0 を下回ることを防止することができた。全体的に安全率の値は非常に大きなものとなり、一部現実に即していないのではないかと考えられる。今回の解析において適用した条件は、変更前のモデルに合わせて設定したもので今回のモデルに焦点を当てた条件を試行錯誤していく必要がある。

7. 結論

- (1) 試験盛土の飽和・不飽和浸透流解析から、排水性補強材の設置により、最大地下水位を盛土法肩付近で 60%、盛土小段付近で 50% 程度低減させることを確認できた。
- (2) 盛土の安定解析から、盛土に発生するすべり線は、無補強の場合では、過去対象とした斜面で発生した斜面崩壊と一致した。補強を行うことですべり線は深くなり、安全率は上昇した。
- (3) 排水性補強材の補強効果により、無補強の場合に比べ安全率を平均で 68%、排水効果により 70%

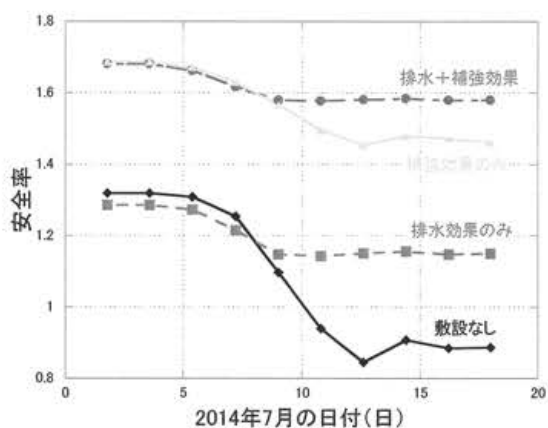


図-16 水平震度 0.3 での安全率経時変化

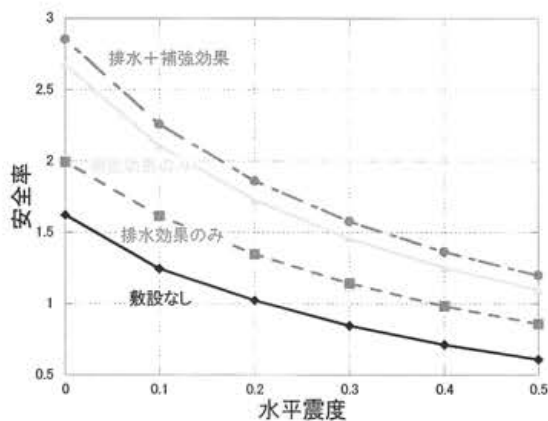


図-17 水平震度と最小安全率の関係

上昇させることが出来た。さらに排水、補強効果の両方を考慮すると、安全率は平均で 75% 上昇し、水平震度 0.4 の場合では盛土の安全率が 1.0 を下回ることを防止することが出来た。

参考文献

- 1) (公社) 地盤工学会 平成 24 年 7 月九州北部豪雨による地盤災害調査団: 平成 24 年 7 月九州北部豪雨による地盤災害調査報告書, 2013.
- 2) 三木博史: ジオテキスタイルを用いた補強土工法 高含水比粘性土を用いた盛土の補強工法, 土と基礎, 第 41 巻, No.9, pp.69-76, 1993.
- 3) 中村大樹・笠間清伸・陳光斉・浜崎智洋: 穴あきパイプの打設間隔と透水性について, 自然災害研究協議会 西部地区部会報研究論文集, Vol.38, pp.61-62, 2014.
- 4) Van Genuchten, M.Th.: A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil Sci.Soc. Am.J., 44,892-898, 1980.
- 5) 社団法人 日本道路協会 道路橋司法書・同解説 5 耐震設計編 2002 年改訂版, pp. 18, 27, 2002.

(2016. 5. 31 受付)