九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

排水機能を有するスパイラル羽根付き鋼管を打設した高速道路盛土の安定性評価

笠間, 清伸
東京工業大学環境・社会理工学院

浜崎, 智洋
西日本高速道路株式会社九州支社

伊藤, 裕孝
五洋建設株式会社

古川, 全太郎
九州大学大学院工学研究院社会基盤部門

他

https://hdl.handle.net/2324/7217566

出版情報：Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. C (Geosphere Engineering). 76 (1), pp.99-109, 2020. Japan Society of Civil Engineers
バージョン：
権利関係：© 2020 by Japan Society of Civil Engineers

KYUSHU UNIVERSITY

土木学会論文集C（地圏工学），Vol. 76, No. 1, 99-109, 2020.

排水機能を有するスパイラル羽根付き鋼管を打設した高速道路盛土の安定性評価

笠間　清伸[1]・浜崎　智洋[2]・伊藤　裕孝[3]・古川　全太郎[4]・松方　健治[5]

[1]正会員　東京工業大学准教授　環境・社会理工学院（〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1 M1-10）
E-mail: kasama.k.ab@m.titech.ac.jp

[2]正会員　西日本高速道路株式会社 九州支社（〒812-0013 福岡県福岡市博多区博多駅東3-13-15）
E-mail: t.hamasaki.aa@w-nexco.co.jp

[3]正会員　五洋建設株式会社（元九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻）
E-mail: mr.yasutaka.0819@gmail.com

[4]正会員　九州大学大学院助教　工学研究院 社会基盤部門（〒819-0395 福岡市西区元岡744）
E-mail: z.furukawa@civil.kyushu-u.ac.jp

[5]正会員　NEXCO西日本コンサルタンツ株式会社（〒733-0037 広島市西区西観音町17-17）
E-mail: k.matsukata@w-nexco-consul.co.jp

本論文では，排水機能を有するスパイラル羽根付き鋼管（以下，SDPRとよぶ）を試験施工した高速道路盛土を対象に，飽和・不飽和浸透流解析を用いて盛土の地下水位変動の再現を行い，降雨・地震時における安全率改善効果を数値解析的に調査し，適切な打設条件を検討した．得られた結論を以下に示す．(1) 比較的透水性の低い盛土では，長さ6mのSDPRを水平間隔3mで打設することで，無補強の場合と比較して降雨による安全率の低下を約40%に抑えることができ，降雨後3日において無降雨状態の安全率にまで急速に回復できる．(2) 降雨時に地下水位が上昇する高さである盛土の中段と下段にSDPRを打設することで高い安全率改善効果が得られる．(3) 降雨・地震時において最も効果的に盛土の安定性を改善するSDPRの長さは6～9m，水平間隔は3～5mとなる．

Key Words : *earth reinforcement, drainage pipe, seepage analysis, slope stability analysis*

1. はじめに

近年，大規模地震や異常降雨に起因して高速道路盛土の被災が発生し，高速道路の災害時における緊急輸送道路としての機能が確保できないなど，社会経済活動に深刻な影響を与えている事象が顕在化しつつある．例えば，2004 年 10 月に発生した新潟県中越地震では，地震前の集中的な降雨により盛土内水位が上昇した状態に地震動が加わったことで，飽和した盛土材料のせん断剛性が低下し，大規模な沈下・変形に至ったことが報告されている [1]．また，2009 年 8 月に発生した駿河湾を震源とする地震では，長期にわたる地下水の作用により盛土材料の透水性と強度が低下した結果，地下水位の上昇等が生じ，地震が誘因となってのり面崩落に至った事例も報告されている [2]．さらに，2011 年 3 月に発生した東北地方太平洋沖地震では，盛土材料の一部に液状化しやすい材料が使用され，その個所に水が供給され，かつ大きな地震動が加わったことで崩落に至ったことが報告されている [3]．このように，降雨や基礎地盤から盛土への浸透水が素因となり，地震が誘因となってさらに被害を拡大させている実態が明らかとなってきている．

これらの現状を踏まえ，著者らは盛土内の地下水位低下と間隙水圧発生抑制，サクションの早期回復，盛土の滑動抵抗力の増加を同時に得ることを期待した，排水機能を有するスパイラル羽根付き鋼管（以下，SDPR（Spiral bladed Drain Pipe Reinforcement）とよぶ）によるのり面補強工法の開発をおこなってきた [4]．前稿 [4]では，SDPR の現位置での施工状況や，盛土のり面の安定検討に必要な補強材と地盤との付着性能を明らかにするとともに，地下水位やサクションなどの現位置計測をもとに，盛土の安定性に重要な要素である降雨時における盛土内の地下水位と降雨後におけるサクションの回復に着目し，SDPR の排水性能を報告した．前稿で報告したように SDPR には，1) 盛土内地下水水位の低下，2) SDPR の引抜

き抵抗力による盛土の補強および 3) SDPR 打設箇所周辺の地盤が不飽和化するため強度増加が生じることが予想されるが，SDPR 補強による盛土の安定性の改善効果については定量的な評価に至っておらず，1)～3)に起因した改善効果を定量的に把握し，SDPR が適する盛土条件やより効率的な SDPR の打設条件などを明らかにする必要がある．

盛土や斜面への水平ボーリングの排水効果については，鵜飼ら[5]および西田ら[6]は3次元の飽和・不飽和浸透流解析において水平ボーリングのモデル化手法を検討し，せん断強度低減法による有限要素解析をもとに，水平ボーリングの長さ，間隔および打設角度の観点から，安全率の改善効果を細かく調査している．また，渡邉ら[7]は，排水管による盛土内の間隙水圧低減効果を飽和・不飽和浸透流解析により明らかにし，極限平衡法とせん断強度低減法による有限要素解析により，降雨による盛土の安全率の低下を 18%～30%防止できることを示している．

羽根付き鋼管の補強効果については，澤石ら[8]は無補強斜面と補強斜面の両方で掘削による実物大の除荷実験とその解析を行い，斜面の法尻が強度低下し，除荷状態になった場合に斜面の変位を抑制する効果があることを示している．また，Singh ら[9]は，遠心模型実験を通して，排水機能を有する鋼管を河川堤防に打設することで，堤防内水位の低下および浸透水を早期に排水させることができるため，河川水位の上昇に伴う河川堤防の不安定化を防止できることを検証している．

本論文では，SDPR を試験施工した高速道路盛土を対象に，飽和・不飽和浸透流解析を用いて盛土の地下水位変動の再現を行い，降雨・地震時を想定した盛土の安全率改善効果を数値解析的に調査した．さらに，高さ 10m 程度で透水係数が 10^{-6}m/s～10^{-5}m/s の比較的透水性が低い盛土を対象として，SDPR の長さ，打設位置および水平打設間隔に関するパラメトリックスタディを行い，想定した降雨量と地震動の条件に適切な打設条件を検討した．

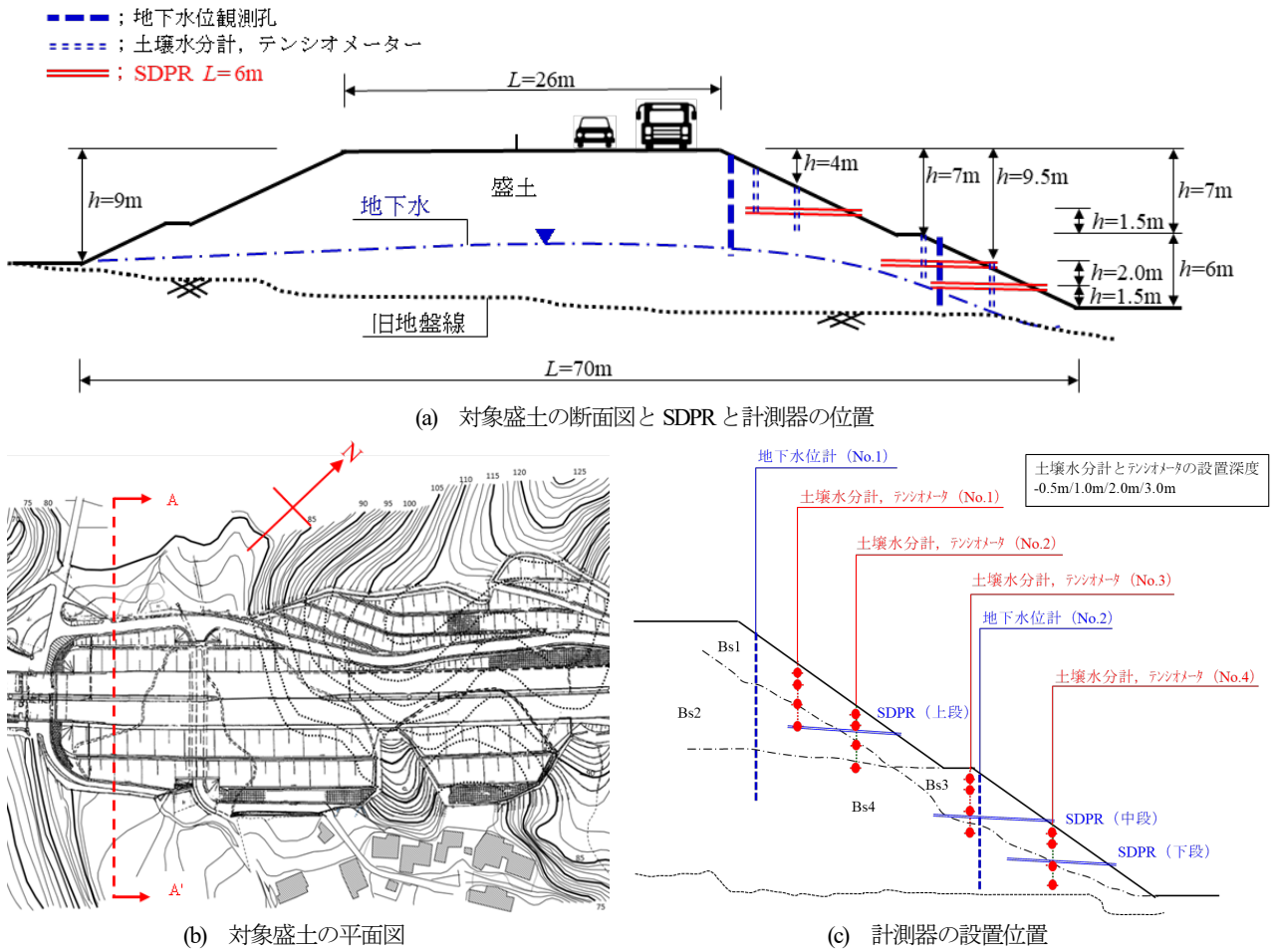
2. 解析概要

(1) 対象盛土および現地計測

本文で対象とした盛土は，佐賀県鳥栖市山浦町の長崎自動車道の 2 段盛土であり，**図-1** にその断面図，平面図および SDPR と計測器の設置位置を示す．**図-1**(a)と(b)に示すように北東から南西に走る高速道路の盛土であり，盛土天端が 26m，北側の盛土高さが 9m で南側の盛土の高さが 13m である．また，盛土の北側には自然斜面があり，また北側から南側に向かって若干傾斜していることから，降雨時には北側から表層水や地下水の流入がある．**図-1**(a)と(c)に示す位置に，SDPR，地下水位計，テンシオメーターおよび土壌水分計を設置した．テンシオメーターと土壌水分計は，ハンドドリルで穴を掘り計測器を埋め込む形で，地表から 0.5m，1.0m，2.0m，3.0m の深さに設置した．ここで，テンシオメーターと土壌水分計の測定値が相互に干渉しないように，全ての計測器の位置を**図-1**(c)の奥行方向に 50cm 離して設置した．盛土天端と小段で行った標準貫入試験と現地踏査の結果をもとに，盛土の土質は礫混じりシルト質砂であり，盛土上段ののり面の表層部と深部をそれぞれ Bs1 と Bs2，盛土下段ののり面の表層部と深部をそれぞれ Bs3 と Bs4 と区分した．SDPR は 2016 年 9 月 16 日に打設した．**図-2** に SDPR の形状を，**表-1** に SDPR の寸法を示す．試験施工した SDPR は，長さ 6m，鋼管外径 48.6mm であり，水平間隔 3～4m，盛土法尻から 1.5m と 3.5m の高さにそれぞれ 12 本と 10 本，小段から 1.5m の高さに 9 本の計 31 本打設した．詳しい SDPR の打設状況および引抜き抵抗力，SDPR による地下水位低下効果および盛土内サクションの現地計測結果などは，参考文献 4)を参照されたい．

(2) 飽和・不飽和浸透流解析

SDPR を試験施工した盛土を対象として地下水位変動を再現するために飽和・不飽和浸透流解析を行った．**図-3** に解析メッシュ図と境界条件を示す．解析対象は，南側の SDPR を試験施工した片側断面とした．盛土のり面から降雨浸透があるものとし，通常は降雨量に相当する流量が流入する境界条件としているが，盛土の浸透能以上の降雨は，表面流出するものとした．また，実際に盛土の右側の法尻付近において地下水の流出がみられたため，解析条件でも盛土法尻に浸出面を設定した．浸出面とは，節点の間隙水圧の値に応じて，不透水境界と既知の水頭境界を自動に切り換える境界条件である．つまり，浸出面でサクションが生じているときは不透水境界となり，正の間隙水圧が生じるときは圧力ゼロの既知の水頭を与える境界条件となる．また，左側の盛土や周囲の地山からの地下水の流入を想定し，左側から背面流を流入させた．なお，背面流の入力条件については，後で詳しく説明する．**表-2** に盛土の入力定数を示す．ここで，有効間隙率とは，土粒子への吸着水などの影響により土中のすべての空隙において地下水が流れるわけでないため，地下水位が流れることのできる有効な間隙の割合のことを意味し，数値解析上は飽和体積含水率から残留体積含水率を引いたものになる．比貯留係数および Irmay 型の比透水係数 k_r（不飽和透水係数と飽和透水係数の比）と有効飽和度 S_e の関係式（$k_r=S_e^n$）の係数 n 以外の入力定数は，現場で採取した試料を対象とした土質試験結果をもとに決定した．ここで，有効飽和度 S_e とは，有効間隙率と同様の理由により，地下水位が流れることのできる有効な間隙が飽和されている割合を示す指標である．盛土上段（Bs1 と Bs2）と下段（Bs3 と Bs4）の透水係数は，



(a)　対象盛土の断面図と SDPR と計測器の位置

(b)　対象盛土の平面図

(c)　計測器の設置位置

図-1　現場の模式図および SDPR と計測器の設置位置

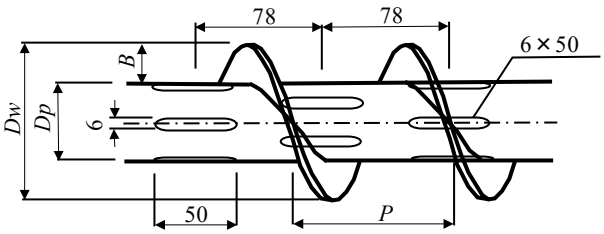


図-2　SDPR の概要（単位：mm）

表-1　SDPR の形状

羽根外径 D_w	鋼管外径 D_p	羽根幅 B	羽根間隔 P	羽根巻数
72 mm	48.6 mm	11.7 mm	72 mm	25 n/2m

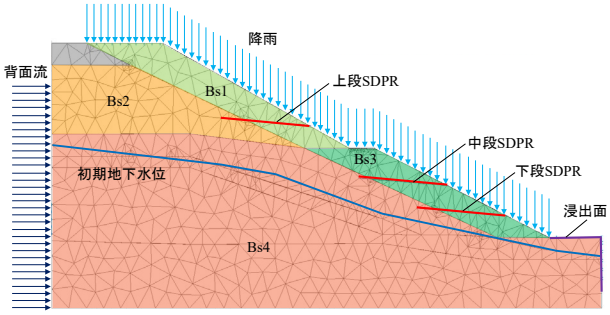


図-3　解析メッシュ図と境界条件

それぞれ 2.18×10^{-5}m/s と 1.30×10^{-6}m/s であり，盛土上段の透水係数が盛土下段に比べて約 17 倍大きいものの，全体として透水係数が小さい盛土となる．

比貯留係数は，参考文献 10)を参考に一般的な値として 1.0×10^{4}（1/m）とした．比透水係数 k_r と有効飽和度 S_e の関係式（$k_r=S_e^n$）の係数 n は，以下の西垣・楠見 [11]の式（$n=0.69-1.31\times\log_{10}k$，$k$ は透水係数）を用いて求めた．

図-4 に盛土のり面の表層部となる Bs1 と Bs3 を対象とした連続加圧法による保水性試験 [12),13)]により得られた水分特性曲線を示す．試験時における加圧速度は，0.1kPa/min で，最大加圧 100kPa まで連続加圧を行い，間隙空気圧と間隙水圧の計測を行った．飽和・不飽和浸透流解析では，得られた**図-4** のサクションと体積含水率の関係をそのまま入力して解析を実施した．

図-5 に解析に用いた時間降雨量と実効雨量を示す．解析期間には 2 つの主な降雨があり，9 月 18 日と 27 日の最大 1 時間雨量がそれぞれ 36 mm/h と 24mm/h であり，9 月 18 日と 9 月 28 日の日降雨量がそれぞれ 127.5mm/day と 114mm/day であった．予備解析として降雨のみを入力条件として解析した結果，地下水位の再現は困難であった

表-2　盛土の物性値

盛土区分		Bs1	Bs2	Bs3	Bs4
湿潤密度 (t/m³)		1.47		1.72	
乾燥密度 (t/m³)		1.10		1.33	
透水係数(m/s)		2.18×10^{-5}		1.30×10^{-6}	
比貯留係数(1/m)		1.00×10^{-4}			
有効間隙率		0.358		0.207	
$k_r=S_e^n$（比透水係数 k_r と有効飽和度 S_e）の関係式の係数 n		5.781		5.481	
強度定数（不飽和）	c(kN/m²)	14～64	30	14～64	30
	ϕ(°)	30			
強度定数（飽和）	c(kN/m²)	14	20	14	20
	ϕ(°)	30			

ため，降雨に加えて盛土の反対側や周囲からの地下水の流入を想定し，**図-3** の左側より背面流を流入させることを考えた．事前解析において，背面流を時間雨量，連続雨量，土壌雨量指数 [14]，半減期を変化させた実効雨量 [15] などの関数として仮定し，地下水位観測 No.1 と No.2 の地下水位について解析値と実測値の誤差が最小になるように背面流の関数と大きさを決定した．特に，対象盛土では，盛土内地下水位の変動と降雨の実効雨量との相関が高く [4]，実際に上記に示す様々な雨量指標を用いた事前解析の結果からも，背面流を半減期 T=72 時間の実効雨量の関数として入力する場合が最も地下水位の再現性が良好であり，背面流（m³/min）={半減期72時間とした実効雨量（mm）×10⁻⁶}とした．実効雨量が地下水位の変動とよい相関があることは田中ら [16]によっても確認されている．

数値解析の対象とした期間は，2016 年 9 月 1 日から 2016 年 10 月 1 日までとした．この期間を対象とした理由は，平成 2016 年において最も降雨量が大きい降雨が 9 月 18 日に発生したこと，また SDPR が 9 月 16 日に打設されたことから打設直後で目詰まりなど心配がない状態での地下水位の挙動が比較できると考えたためである．SDPR が設置される前の期間において 4 日～5 日に 26mm，7 日～8 日に 23.5mm，12 日～13 日に 96mm，14 日に 2.5mm および 15 日に 2mm の降雨があったが，これら先行降雨は小さいため，水位変動などの観測値に与える影響は小さかった．浸透流解析において SDPR の排水効果は，鈴木と石井の方法 [17]を参考に，SDPR の領域に節点を発生させ，各節点に排水管として周囲から水を集水するような水圧条件を設定することで模擬した．また，2 次元解析における SDPR の水平間隔の影響は，排水管を等価なスリットモデルで置き換えることでモデル化した．ここで，SDPR の各節点に設定する水圧は，周囲の地下水位の高さにより変化し，円形状の排水管から流出する理論的な水量と等しくなるように換算した水圧を与えている

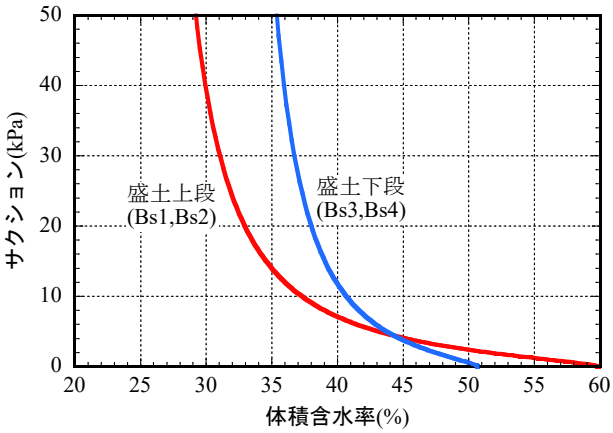


図-4　水分特性曲線

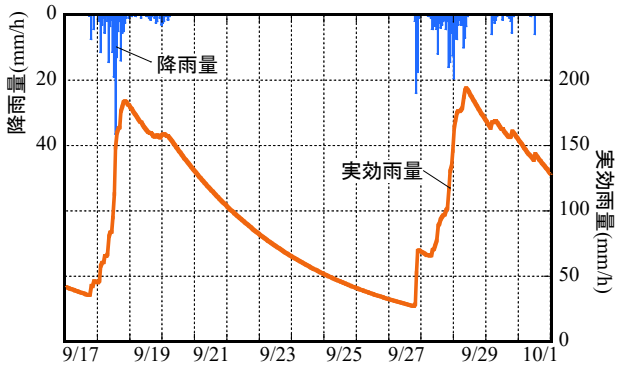


図-5　解析に用いた降雨データ

ため，実際の排水管と同様な水位低下を表現できる．

(3)　斜面安定解析と SDPR による改善効果

降雨時および地震時における盛土の安定性を評価するために，上記した飽和・不飽和浸透流解析で得られた間隙水圧および地盤の飽和度の状態を引き継いだ状態で修正フェレニウス法による斜面安定解析を実施することで，盛土の安全率を計算した．修正フェレニウス法を用いた円弧すべり極限釣り合い法では，スライス分割片に対して力の釣り合いを考え，間隙水圧をスライスに作用する浮力として取り扱った．式(1)および式(2)にそれぞれ常時と地震時における盛土の安全率の計算式を示す．

$$F_s=\frac{\sum\left(W'\cdot\cos\theta\cdot\tan\phi\right)+\sum\left(c\cdot l\right)+P_r}{\sum W\cdot\sin\theta} \tag{1}$$

$$F_s'=\frac{\sum\left\{\left(W'\cdot\cos\theta-k_h\cdot\sin\theta\right)\tan\phi\right\}+\sum\left(c\cdot l\right)+P_r}{\sum\left(W\cdot\sin\theta+h/k\cdot k_h\cdot W\right)} \tag{2}$$

ここに，F_s：常時の安全率，W：スライス片の全重量，W'：スライス片の有効重力，θ：各スライス片で切られたすべり面の中点とすべり円の中心を結ぶ直線と鉛直線のなす角，ϕ：すべり線のせん断抵抗角，c：すべり面の粘着力，l：スライス片のすべり面長，P_r：SDPR による抑止力である．また，F_s'：地震時の安全率，k_h：設計水

平震度，h：スライス片の重心とすべり円の中心との鉛直距離，r：すべり円の半径である．また，スライス片の有効重力 $W'=W-ub$（u：間隙水圧，b：スライス片の幅）として計算した．また，SDPR による抑止力 P_r は，以下の式で算定する．

$$
\begin{aligned}
P_r &= \sum_m T_m(\cos\theta' + \sin\theta' \tan\phi) \\
T_m &= \lambda \cdot T_{pa} / S \\
T_{pa} &= \min\left[T_{1pa}, T_{2pa}, T_{sa}\right] \\
T_{1pa} &= D_w \cdot L_1 \cdot \pi \cdot \tau_u \\
T_{2pa} &= D_w \cdot L_2 \cdot \pi \cdot \tau_u
\end{aligned}
\tag{3}
$$

ここに，T_m：SDPR の設計引張り耐力，m：すべり面上の SDPR の数，$\theta'=\theta+\alpha$：すべり面と SDPR のなす角度，θ：すべり面の傾斜角，α：SDPR の打設角度，T_{pa}：SDPR の許容設計引張り耐力，λ：低減係数（=0.7），S：SDPR の水平間隔，min[ ]：[ ]の最少値，T_{1pa}：SDPR がすべり土塊から受ける引抜き抵抗力，T_{2pa}：SDPRが安定土塊から受ける引抜き抵抗力，T_{sa}：SDPRの許容引張り耐力，D_w：SDPR の羽根外径，L_1：すべり土塊内にある SDPR の打設長さ，L_2：安定土塊内にある SDPR の打設長さ，τ_u：SDPR の極限周面摩擦抵抗である．

斜面安定解析では，盛土の飽和・不飽和状態における強度の変化を考慮するために，盛土材（Bs1 と Bs3）を対象として，飽和状態の三軸圧縮試験（CU 条件）ならびに排気非排水条件下での不飽和三軸圧縮試験[18]を行い，その結果をもとに不飽和状態における強度増加は主に粘着力の成分の増加として発現すると仮定し，**図-6** に示す飽和度と粘着力 c の関係を使用した．なお，不飽和三軸圧縮試験において排気・非排水条件を用いた理由は，集中降雨による盛土崩壊および地震時においては盛土内の間隙空気は常に大気圧と等しい排気条件と考え，間隙水はせん断中（崩壊時）に移動することはなく急速に破壊に至るため非排水条件と考えた．飽和時の 14kPa の粘着力は，飽和度が減少すると急激に増加し，飽和度 75%時の粘着力は 64kPa と飽和時の約 4.6 倍となった．せん断抵抗角については，飽和度が減少してもほぼ 30° 前後の値となるため一定値とした．

表-3 に SDPR に関する入力定数および解析の条件を示す．SDPR の引張応力度と極限周面摩擦抵抗は，実際の SDPR の引張試験と現位置における引抜き試験[4]より決定した．試験施工に合わせて，SDPR の打設条件は，高さの異なる 3 ヶ所（上中下段とよぶ）において，長さ 6m で水平間隔を 3m を基本ケースとした．さらに最適な SDPR の打設条件を検討するために，長さを 4m，9m，12m，水平間隔を 5m，7m に変え，打設位置を 1 段削減して 2 段（上段と下段，中段と下段，上段と中段）とした解析を行った．また，入力した降雨量と実効雨量は，

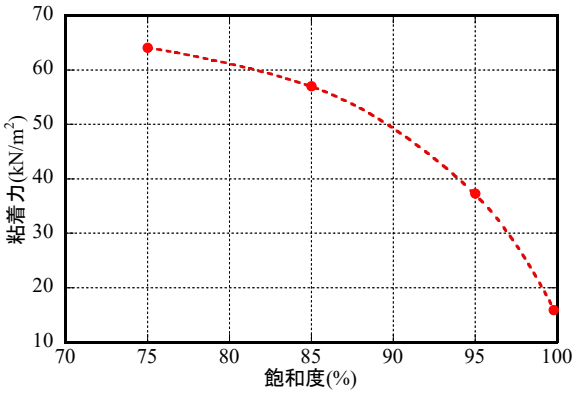


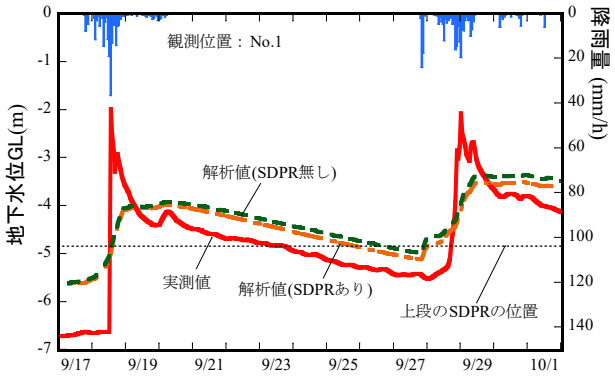
図-6 飽和度と粘着力関係

表-3 SDPR に関する入力定数および解析条件

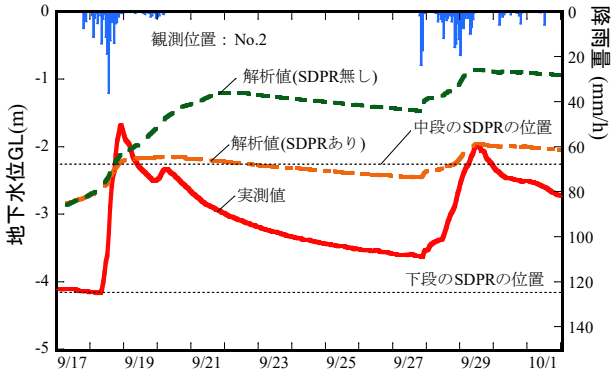
条件	降雨時	地震時
引張応力度 σ_{sa} (N/mm²)	115.0	170.0
打設角度 α(°)	5	
極限周面摩擦抵抗 τ_u (N/mm²)	0.050	
長さ L(m)	4，6，9，12	
水平間隔 S(m)	3，5，7	
打設位置	上中下段，上中段，上下段，中下段	
水平震度 k_h	0，0.3，0.5	
降雨量	降雨継続時間はそのままで降雨強度を 1 倍，1.5 倍，2 倍	

豪雨時を想定して実測値の降雨継続時間はそのままで降雨強度を 1.5 倍と 2 倍を入力条件とした．過去の佐賀のアメダス観測記録で判断すると，降雨 1 倍の条件での最大 1 時間雨量となる 36mm/h の再現期間は 2.1 年であり，1.5 倍と 2 倍の降雨強度の再現期間はそれぞれ 13.8 年と 52.9 年に相当する．さらに，降雨と同時に地震が複合して発生する場合を想定して水平震度 k_h=0.3 および 0.5 を与えたケースも解析を行った．水平震度の大きさは，熊本地震の本震において九州自動車道の高速道路盛土にほど近い K-net 熊本で得られた最大加速度 604gal を参考に決定した．

ここで SDPR による盛土の安全率の改善効果は，1) SDPR の排水効果（安全率を計算する際に SDPR による地下水位低下のみを考慮），2) SDPR の排水＋補強効果（SDPR の排水効果と引抜き抵抗力を考慮）および 3) SDPRの排水＋補強＋不飽和効果（SDPRの排水＋補強効果に加えて，SDPR の打設による地下水位低下により不飽和になった地盤について，その飽和度に応じて粘着力の増加を考慮）に分けて評価した．なお，SDPR の不飽和効果を考慮しない場合の Bs1 と Bs3 の粘着力は，**図-5** の飽和度 100%の粘着力に相当する 14kPa を用いた．また，SDPR がない無補強時の盛土の安全率については，盛土の不飽和度に応じた強度定数の変化を考慮しないため，不飽和状態における Bs1 と Bs3 の粘着力を 14kPa，Bs2 と Bs4 の粘着力を 30kPa として計算した．

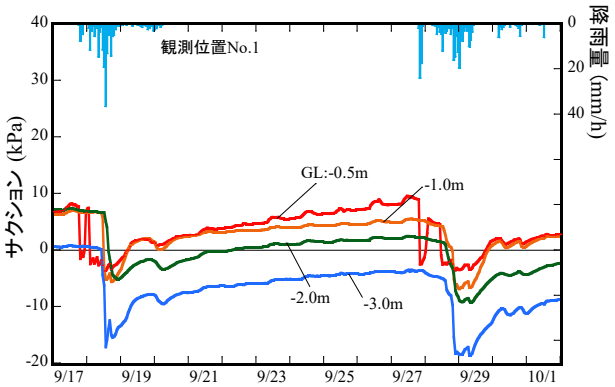


(a) 観測位置 No.1

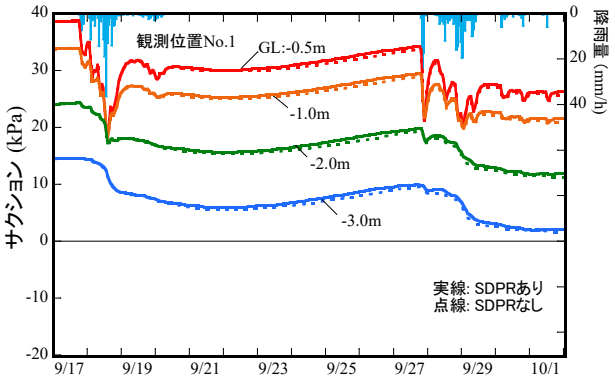


(b) 観測位置 No.2

図-7 地下水位の比較（6m の SDPR）



(a) 実測値



(b) 数値解析値

図-8 サクションの比較（6m の SDPR）

3. 解析結果

(1) 浸透流解析

飽和・不飽和浸透流解析による地下水位変動の再現性を確認するために，6m の SDPR を打設した盛土における観測位置 No.1 と No.2 の地点における地下水位の実測値と解析値を**図-7** に示す．図中には，観測位置 No.1 では盛土の天端を，観測位置 No.2 では小段の高さを基準として最も近くにある SDPR の設置高さを点線で示し，かつ SDPR の有無の違いによる解析結果も示している．地下水位の実測値は，9 月 17 日から 19 日の降雨によって一時上昇した後，徐々に低減していき，9 月 27 日から 29 日の降雨で再度上昇するような結果となった．解析値については，9 月 1 日の地下水位の実測値を初期値として解析を実施しているが，9 月 1 日から 16 日までに先行降雨があるため，9 月 17 日の地下水位が実測値と異なっている．また，観測位置 No.1 と No.2 によらず，9 月 19 日と 29 日における降雨直後の急激な地下水位の上昇を再現できていない．全体的な数値解析の結果は，実測値の大まかな挙動の傾向がとらえられているといえる．また，数値解析による地下水位の再現性は，観測位置 No.1 の方が No.2 よりも高かった．

浸透流解析による SDPR の有無による地下水位の変化に着目すると，上段の SDPR より水平方向に約 3m 離れている No.1 では，SDPR の有無による地下水位の変化は約 0.1m 程度でありほとんど差はない．しかしながら，SDPR が観測位置を横断する No.2 では，SDPR により地下水位は約 1m 程度低減した．9 月 19 日と 9 月 29 日において，SDPR の有無により地下水位の上昇の程度に差が生じたのは，9 月 19 日では Bs3 層が不飽和から飽和状態に変化するのに対して，29 日では先行降雨により Bs3 層がすでに飽和に近いことが理由である．これらの地下水位変動に関する解析結果は，参考文献 4)に示す実際の盛土内地下水位の変動の観測結果から，同じ実効雨量を受けた際の地下水位の高さが，SDPR の打設により 0.5m～1.0m 程度低下することと一致している．

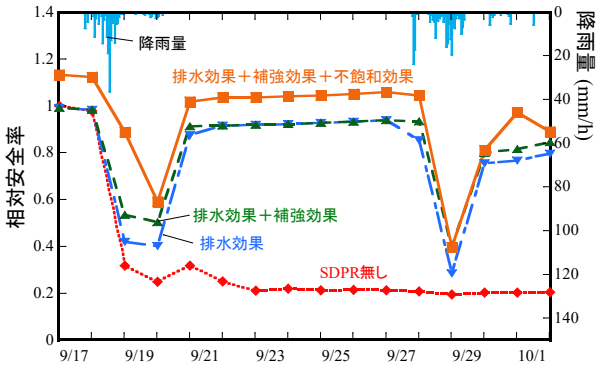


図-9 相対安全率と日降水量（6m の SDPR）

図-8 に観測位置 No.1 におけるサクションの実測値と

解析値を示す．サクションの実測値は，表層に近づくほど大きく，設置深度が深くなるにつれてサクションの値が減少し，設置深度-2.0m と-3.0m では正の水圧が観測されている．また，9 月 18 日と 28 日周辺のまとまった降雨により，深度の浅い方から先にサクションが減少していくような典型的な降雨浸透の挙動が観測された．解析値では，実測値のサクションの大きさそのものは再現できていないが，設置深度が増加するにつ入れてサクションが小さくなることや降雨浸透に伴い表層部からサクションが消失していく挙動を再現できている．

(2) 降雨時における SDPR の効果

降雨時における SDPR による盛土の安定性を調べるために，**図-9** に，6m の SDPR を水平間隔 3m で打設した盛土の相対安全率の経時変化を示す．ここで，相対安全率とは， SDPR の無い条件における安全率（最も地下水位が低下した 9 月 17 日の無補強・無降雨時の安全率）で正規化することで，初期安全率からの低減割合を示したものである．正規化の初期値とした 9 月 17 日の最小安全率となる円弧は，盛土最上段の車線を通過する大規模な盛土崩壊のケースであり(**図-10**)，その時の無補強時の安全率 F_s=1.7 程度であった．今回の安定計算は，計測期間中，最も地下水位が高い条件で行ったものであり，豪雨時でも SDPR 補強盛土は安定であることが解析上示されている．このことは，当該盛土で通行止めに至る大規模崩壊履歴がないことに符合すると考える．また，SDPR による相対安全率の改善効果を排水効果，排水＋補強効果，排水＋補強＋不飽和効果の 3 つに分けて評価した．

9 月 17 日の無降雨状態の安全率を比較すると，無補強，排水効果および排水＋補強効果の安全率が 1.0 と等しい．これは**図-10** で示すように 9 月 17 日では，SDPR の排水効果の有無によらず地下水位の位置がほど変化しないため，無補強と排水効果の安全率が等しくなるためである．さらに，安全率が最小となる盛土のすべり面は，盛土法尻付近から法肩付近を通過する非常に大きいものとなり，SDPR で補強した盛土でも下段の SDPR の先端を通過するため SDPR の補強効果が発揮されず，無補強と排水効果のみのすべり面と同じになるためこれらの安全率が等しくなる．ただし，不飽和効果を考慮すると盛土内の不飽和領域の粘着力が増加するため，9 月 17 日の安全率が若干大きい結果となった．

9 月 18 日以降の降雨時における SDPR の排水効果のみに着目すると，無補強時の盛土の相対安全率は，9 月 19 日に0.2付近まで低下したが，SDPRの排水効果により 18 日には0.4，3 日後の9月 21 日には0.9程度まで回復した．次に，排水効果に加えて補強効果を考慮すると，9 月 19 日と 20 日の相対安全率が 0.1 程度向上した．さらに，排水＋補強効果に加えて不飽和効果を考慮すると，相対安全率は降雨の有無によらず平均で 0.1 程度，最大で 0.35 程度向上した．

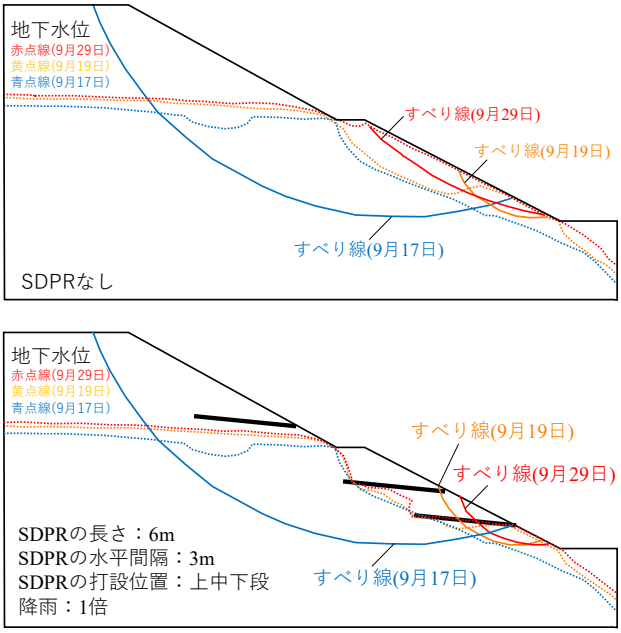


図-10 地下水位とすべり面

降雨および SDPR の有無による盛土内すべり面の形状を考察するために，**図-10** に**図-9** の条件における相対安全率が最低値となる 9 月 19 日と 29 日における盛土内の地下水位の解析値と最小安全率となるすべり面の位置を示す．地下水位が盛土の上段と下段の境界付近に存在するのは，Bs2 と Bs4 の透水係数の違いによるものである．また，左端の地下水位が右側に行くにつれて徐々に低下するものの小段付近で回復するのは，盛土のり面からの降雨浸透のためである．無降雨状態である 9 月 17 日においては，SDPR の有無によらず地下水位の位置とすべり面の大きさはほとんど同じとなった．無補強盛土における 9 月 17 日の地下水位は，盛土上段（Bs2）と下段（Bs4）の境界部を流れ，盛土のり面に近づくにつれて，盛土下段の深部（Bs4）と表層部（Bs3）の境界に位置する．無補強盛土のすべり面は，盛土法尻付近から法肩付近を通過する非常に大きいものであり，SDPR で補強した盛土でも下段の SDPR の先端を通過するため，SDPR の補強効果が発揮されないすべり面となった．

無補強盛土における降雨と不飽和領域の関係をみると，9 月 18 日の降雨によって，9 月 17 日には不飽和状態であった Bs3 層が飽和状態となり， 9 月 28 日から 30 日までの 2 回目の降雨にかかわらず，飽和状態のままであった．しかしながら，SDPR 補強盛土では，9 月 18 日と 9 月 28 日の降雨にかかわらず，SDPR の排水効果により，下段と中段の SDPR で囲まれた領域と中段の SDPR から小段

の領域が不飽和状態となり，地下水位が低下していることがわかる．

降雨に伴う地下水位と最小安全率となるすべり面の変化に着目すると，無補強盛土では，降雨によって盛土法尻から地下水位が徐々に増加し，9 月 29 日には盛土下段（Bs3）がほぼ地下水位で飽和するような結果となった．無補強盛土でのすべり面は，9 月 19 日では盛土法尻の飽和した範囲を通過するような小さなすべり面が形成され，9 月 29 日におけるすべり面は飽和した盛土下段（Bs3）全体を通過するようなすべり面に変化した．これは降雨に伴い Bs3 層内における飽和領域の拡大に伴って，Bs3 重量が増加しかつ Bs3 の間隙水圧が上昇したためである．一方，SDPR で補強した盛土では，9 月 29 日においても降雨に伴う盛土下段（Bs3）の飽和化を防止しており，得られるすべり面も法尻付近を通過する局所的に小さなものとなった．ここで，SDPR を通過するような小さなすべり面が得られているが，実際にはすべり面で SDPR が折れ曲がるのではなく，SDPR がすべり面を境に引き抜かれるような形で引抜き抵抗力を発現しながらすべりに抵抗することを意味する．

降雨量の大きさが SDPR で補強した盛土（水平間隔 3m で上中下段に打設）の安定性に与える影響を調べるために，**図-11** に降雨量を実測値の 1 倍，1.5 倍，2 倍に変えた際の相対安全率の比較示す．なお，図中の相対安全率は，SDPR の無い条件における安全率（最も地下水位が低下した 9 月 17 日の無補強・無降雨時の安全率）で正規化し，安全率が最も小さくなる 9 月 29 日で計算したもので，SDPR の排水効果，補強効果および不飽和効果のすべてを考慮したものである．SDPR の長さが 4m の場合，降雨量が 1.5 倍と 2 倍になると相対安全率が 0.2 低下した．SDPR が 6m になると，相対安全率の増加傾向が小さくなり，降雨 1.5 倍と 2 倍の場合では相対安全率はほとんど変化しない．降雨 1.0 倍の条件で，SDPR が 9m になると相対安全率が一度増加したが，12m では減少し SDPR が 6m の時と同じ相対安全率となった．これは SDPR が長くなることで，深部の地下水を斜面表層部に集まりやすくするため，相対安全率が小さくなったものと考えられる．また，降雨が 1.5 倍と 2 倍の条件では，SDPR が 6m 以上で大きな変化は見られない結果となった．その理由は，対象とした高速道路盛土の地下水位は，無降雨の状態においても**図-1** に示すように盛土中央部が高く法尻に行くにつれて徐々に減少していくような形状をしており，SDPR の打設長さが 12m となったときに，中段と下段の SDPR がこの平常時の地下水位面に到達する．これにより盛土深部の地下水が SDPR により取り込まれること，かつ雨量が大きくなる場合には降雨浸透水が SDPR に流入するため，地下水が SDPR に過剰に集まるためだと考えられる．このように斜面内に存在するパイプ流は，通常の降雨時には良好な排水システムとして機能し斜面の安全率を効率よく低下させるが，豪雨時などにパイプ流に許容量以上の過度な地下水が流入する場合には，斜面の危険度を上げてしまうことが内田ら [19] によりも指摘されている．したがって，降雨 2 倍の再現期間が 52.9 年であることも考慮して考えると，降雨の再現期間が 50 年程度の確率降雨量 50mm/h より小さい雨量の条件では SDPR の長さは 6m が最も効率性が良く，降雨による無補強時の盛土の安全率の低下を約 40%に抑えることができる程度と考えられる．

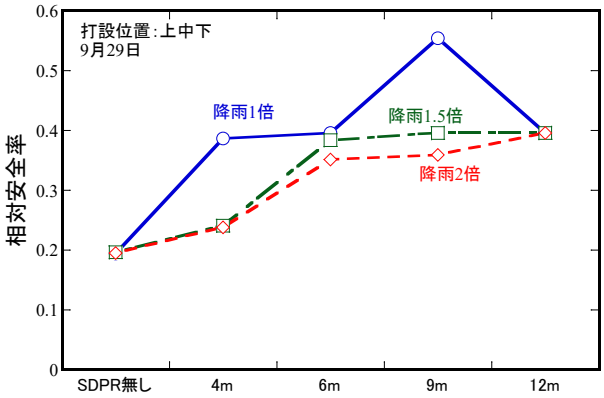


図-11　降雨時の相対安全率と SDPR の長さ

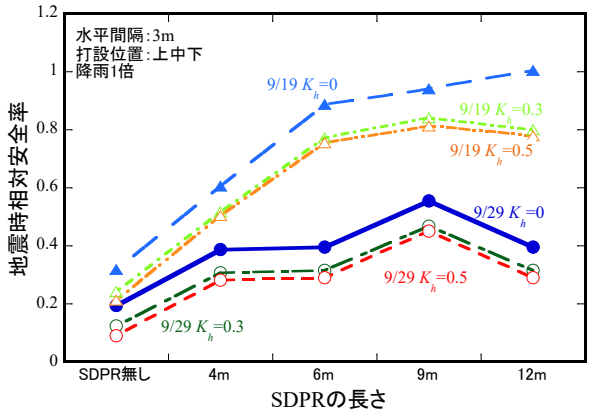


図-12　地震時相対安全率と SDPR の長さ

(3)　降雨・地震の複合時における SDPR の効果

地震時における SDPR 補強盛土の安定性を調べるために，**図-12** に，水平震度 k_h を 0，0.3，0.5 に設定し，SDPR 長さを 4, 6, 9, 12m にした際の地震時の相対安全率を示す．地震時の相対安全率は，SDPR の無い条件における水平震度ごとの地震時安全率（9 月 17 日の無補強・無降雨時で水平震度 k_h = 0，0.3，0.5 として計算したそれぞれの地震時安全率）で正規化することで，地震時の盛土の安全率を基準として，SDPR の改善効果を調べたものである．なお，地震時の相対安全率は，降雨により地下水位が上昇した条件で発生することを想定するため，盛土が降雨

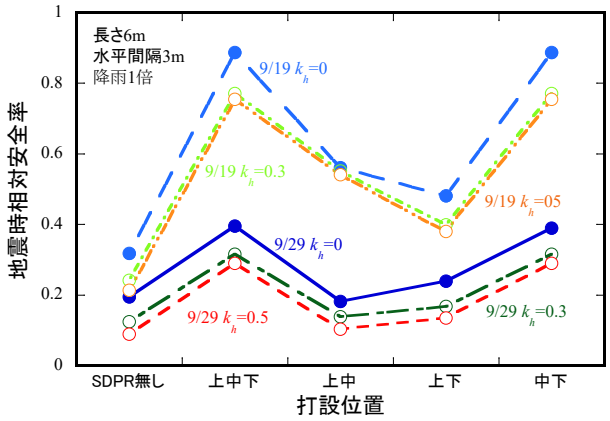


図-13　地震時相対安全率と SDPR の打設位置

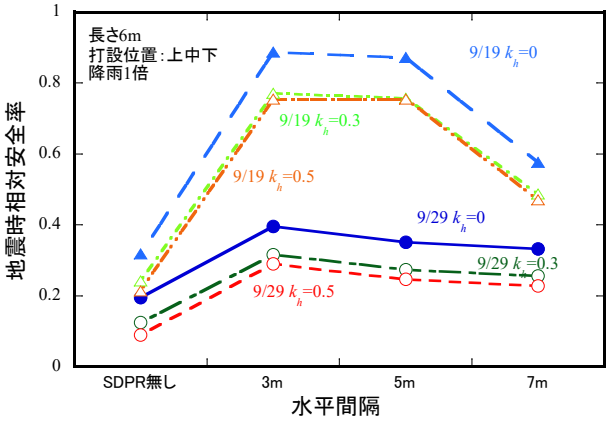
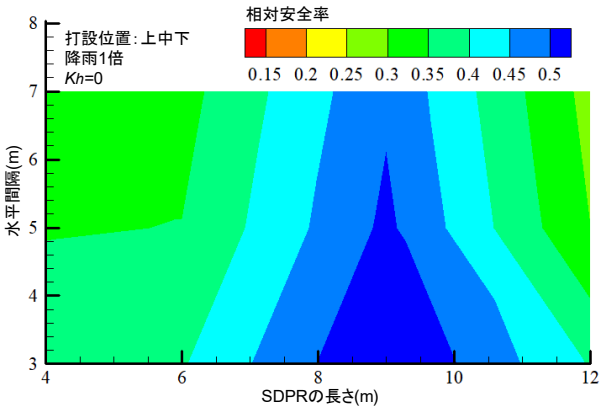
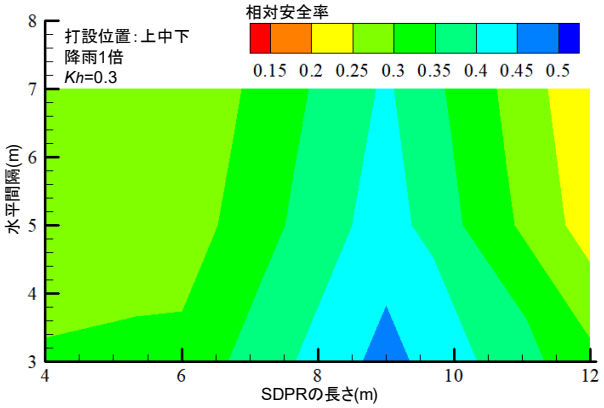


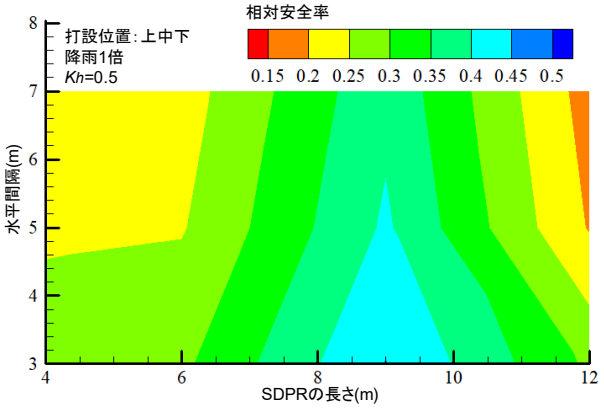
図-14　地震時相対安全率と SDPR の水平間隔



(a)　k_h=0（地震動なし）



(b)　k_h=0.3



(c)　k_h=0.5

図-15　相対安全率のコンター図（地震と降雨の複合作用時）

により不安定化する 9 月 19 日と 29 日で計算し，SDPR の排水，補強および不飽和効果の全てを考慮した値である．なお，地震時においても盛土の不飽和度に応じた強度定数の変化を考慮するため**表-2** と**図-6** に示す粘着力を設定した．図より，無補強時に比べて，SDPR の長さが増加するほど，地震時安全率の低減を改善でき，特に 6m～9m でも改善効果が高い．しかしながら，SDPR の長さが 12m の条件で安全率が低下するケースがあった．この理由も上記した SDPR への地下水と降雨浸透水の過剰な流入に起因して盛土表層付近の間隙水圧が上昇することが考えられる．以上より，降雨直後に水平震度 0.3 以上の地震が発生する場合を考えると，6～9m の SDPR を打設することで盛土の安全率の低下を最も防止できると考えられる．

SDPR の打設位置を検討するために，**図-13** に，6m の SDPR を水平間隔 3m で盛土の上中下段の 3 段，上中段，上下段，中下段の 2 段に打設した際の地震時相対安全率をそれぞれ示した．上中段と上下段の 2 段で SDPR を設置したときの安全率の改善効果が小さい．特に，9 月 19 日は上中段の相対安全率が大きく，29 日では上下段の相対安全率が大きい．これは**図-9** に示すように 9 月 19 日の降雨時のように盛土表層の Bs3 層のほとんどが不飽和な状態では，中段と下段の SDPR の効果があまり出ず，9 月 29 日のように Bs3 層の飽和している状態では，中段と下段の SDPR が効果を発揮するが，特に下段の排水効果が大きいためである．今回の場合，上中下段と中下段の相対安全率がほとんど変わらないことから，上段の SDPR の効果は小さいことが分かる．これは，**図-10** に示すように上段の SDPR の位置まで地下水位が上昇していないため，上段の SDPR の効果が小さいもとの考えられる．したがって，今回の解析条件では，盛土の中下段の SDPR が大きく効果を発揮したと考えられる．

SDPR の水平間隔を検討するために，**図-14** に，6m の

SDPR を盛土の上中下段に打設し，水平間隔を 3m，5m，7m に設定した際の相対安全率をそれぞれ示した．打設水平間隔は 3m と 5m では大きな差はみられなかった．しかし，例えば 9 月 19 日の水平震度 k_h=0 の場合，水平間隔 3m と 7m では相対安全率が前者の方が 0.3 大きくなるなど水平間隔 7m では相対安全率が大きく減少することとなった．このことから今回の解析条件においては，水平間隔は 3～5m が適切であると考えられる．

降雨・地震時の複合時における SDPR の安全率改善効果を評価するために，**図-15** に横軸に SDPR の長さ，縦軸に SDPR の水平間隔で相対安全率のコンター図を示した．**図-15** の相対安全率は，無補強・無降雨時の安全率で正規化したものである．**図-15**(a)，**15**(b)および **15**(c)は，それぞれ k_h = 0，0.3，0.5 の結果である．なお，解析条件は，SDPR を上中下段に打設し，降雨量は 1 倍の条件での 29 日の相対安全率を示している．安全率の改善効果が高い条件は SDPR の長さが 8m～9m で水平間隔が 3m～5m に存在する．地震動が無い降雨のみの条件では，SDPR の長さ 6～9m 付近で，水平間隔が 3～5m の条件で高い相対安全率が得られるが，地震動が複合して作用することを考えると SDPR の長さを 9m，水平間隔を 3m 程度に狭める必要があることを示唆する．これは降雨条件に加えて地震時を考慮する場合には，作用する地震時の水平加速度に抵抗するために SDPR をより長く密に打設する必要があることを示す．

4. 結論

本論文では，本地盤補強材を試験施工した高速道路盛土を対象に，飽和・不飽和浸透流解析を用いて盛土の地下水位変動の再現を行い，降雨・地震時における高速道路盛土の補強材による安全率改善効果を数値解析的に調査した．さらに，盛土高さ 10m 程度で透水係数が 10^{-6}m/s～10^{-5}m/s の比較的透水性が低い盛土を対象として，補強材の長さ，打設位置および水平打設間隔に関するパラメトリックスタディを行い，想定した降雨量と地震動の条件に適切な最適な打設条件を検討した．本論文にて得られた結論を以下に示す．

(1) 今回対象とした比較的透水性の低い道路盛土では，6m の SDPR を水平間隔 3m で打設することで，無補強の場合と比較して降雨による安全率の低下を約 40%に抑えることができ，降雨後 3 日において無降雨状態の安全率にまで急速に回復できる．

(2)降雨時に地下水位が上昇する高さである盛土の中段と下段に SDPR を打設することで高い安全率改善効果が得られる．

(3) 今回の解析条件では，降雨・地震時において最も効果的に盛土の安定性を改善する SDPR の長さは 6～9m，水平間隔は 3～5m となった．降雨時には最適な SDPR の長さは 6m，水平間隔は 3～5m となったが，降雨と地震の複合作用を考慮した場合には長さは 9m，水平間隔を 3m 程度にする必要があり，地震時には作用する水平加速度に抵抗するために SDPR をより長く密に打設する必要があることを示す．

以上の知見を実際の高速道路盛土の補強に当てはめると，比較的大きな 50mm/h 程度の降雨を想定する場合には，長さ 6m の SDPR を用いて水平間隔 3～5m で盛土を補強すべきことを示唆し，かつ水平震度 0.5 程度の大規模時な地震との複合作用を考えると長さ 9m の SDPR で水平間隔 3m 程度で盛土を補強すべきことを示唆する．

参考文献

1) 藤岡一頼，安田進，白鳥翔太郎：道路盛土材料の動的強度特性，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 65, No. 1, pp. 875-880, 2009.
2) 横田聖哉，石田誠幸，高木宗男：駿河湾の地震における高速道路盛土の被災調査報告，地盤工学会第 45 回地盤工学研究発表会講演集，No. 747, pp. 1493-1494, 2010.
3) 安部哲生，横田聖哉，日下寛彦，金田和男：東北地方太平洋沖地震における高速道路盛土の地震被害について－常磐自動車道那珂地区－，地盤工学会第 47 回地盤工学研究発表会講演集，No. 482, pp. 959-960, 2012
4) 浜崎智洋，笠間清伸，田山聡，前田良刀，松方健治，秋吉亮平：排水機能を有するスパイラル羽根付き鋼管を用いたのり面補強に関する原位置試験，土木学会論文集 C（地圏工学），Vol. 74, No. 1, pp. 20-33, 2018.
5) 鵜飼恵三，蔡飛，若井明彦，阪上最一：集水ボーリング工の効果に関する定量的評価手法の提案，地すべり，Vol. 35, No. 3, pp. 1-7, 1998.
6) 西田憲司，山上拓男，蒋景彩：三次元有限要素浸透流解析に基づく排水ボーリング効果の定量的評価法，地すべり，Vol. 37, No. 3 (通巻第 143 号), pp. 1-9, 2000.
7) 渡邉諭，浅野嘉文，杉山友康，西垣誠：排水パイプが打設された盛土の弾塑性 FEM を用いた安定性評価に関する一考察，第 48 回地盤工学研究発表会，No. 571, pp. 1141-1142, 2013.
8) 澤石正道，和田昌敏，菅野浩樹，上村健太，高橋章浩：盛土の斜面安定対策工としての小径羽根付き鋼管の補強効果に関する実大試験，地盤工学ジャーナル，Vol. 11, No. 3, pp. 215-228, 2016.
9) Singh, J., Horikoshi, K., Mochida, Y. and Takahashi, A. : Centrifugal tests on minimization of flood-induced deformation of levees by steel drainage pipes, *Soils and Foundations*, Available online 5 February 2019.
10) 地盤工学会編：不飽和地盤の挙動と評価，pp. 49, 2004.
11) 西垣誠，楠見和紀：不飽和土の浸透特性の評価に関する考察，土質工学会，不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム発表論文集，pp. 179-186, 1986.
12) 京野修，畠山正則，持田文弘，阿部廣史：連続加圧方式による新しい保水性試験法（その 7）－水分特性

曲線の密度依存について検証ー，第 52 回地盤工学研究発表会，No. 306, pp. 609-610, 2017.
13) 畠山正則，京野修，笹原克夫，阿部廣史：連続加圧方式による新しい保水性試験法，第 59 回地盤工学シンポジウム論文集，pp. 103-110, 2014.
14) 岡田憲治：土壌雨量指数，地盤工学会誌，Vol. 57, No. 8, pp. 56-57, 2009.
15) 地盤工学会編：豪雨時における斜面崩壊のメカニズムおよび危険度予測，pp. 113, 2006.
16) 田中悠暉，川尻峻三，橋本聖，川口貴之，中村大，山下聡：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，土木学会論文集C（地圏工学），Vol. 73, No. 3, pp. 276-281, 2016.
17) 鈴木誠，石井清：斜面安定対策工としての水平排水管設置の最適設計，土木学会論文集，第 370 号/III-5, pp. 209-215, 1986.
18) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説，pp. 625-630, 2009.
19) 内田太郎，小杉賢一朗，大手信人，水山高久：パイプ流が斜面安定に与える影響，水文・水資源学会誌，Vol. 9, No. 4, pp. 330-339, 1996.

(Received April 25, 2019)
(Accepted December 24, 2019)

STABILITY EVALUATION OF HIGHWAY EMBANKMENT REINFORCED WITH SPIRAL BLADED DRAIN PIPE REINFORCEMENTS

Kiyonobu KASAMA, Tomohiro HAMASAKI, Yasutaka ITO, Zentaro FURUKAWA and Kenji MATSUKATA

The purpose of this paper is to develop a new earth reinforcement technology called “The SDPR method” having both functions of a single earth reinforcement to increase the embankment strength and a drainage pipe to lower a ground water level in embankment at the same time. This paper summarizes the effectiveness of the SDPR method by means of unsaturated-saturated seepage analysis and slope stability analysis in terms of the drainage effect, reinforcement effect and unsaturation effect of SDPRs. The main conclusions are as follows: 1) SDPR is effective for improving the stability of embankment and particular recovering the safety factor just after rainfall. 2) From saturated-unsaturated seepage analysis, it is confirmed that the soil layer near SDPR becomes unsaturated condition and SDPR is also effective for lowering the groundwater level of the slope of embankment especially for the shallow area above the position of SDPRs. 3) Under current numerical conditions, it is proposed that the appropriate length of SDPR is 6m to 9m while the appropriate interval is 3m to 5m depending on the magnitude of rainfall and earthquake.