

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



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、地震が誘因となつ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、地震が誘因となつてさらに被害を拡大させている実態が明らかとなつてきている。

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、サクシジョンの早期回復、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つてきた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、地下水位やサクシジ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ジ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、鶴飼ら⁹⁾および西田ら⁹⁾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、渡邊ら⁹⁾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⁹⁾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 $10^{-6}\text{m/s} \sim 10^{-5}\text{m/s}$ 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

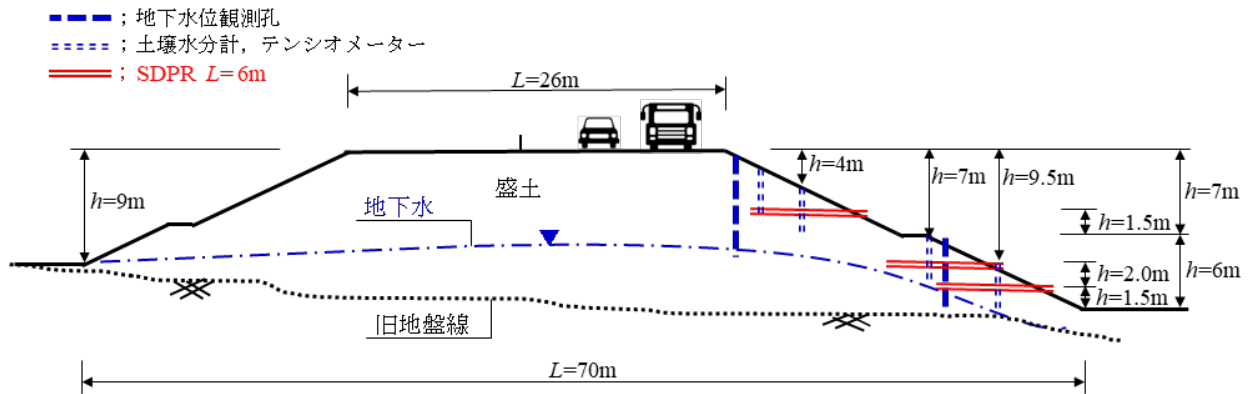
(1) 対象盛土および現地計測

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

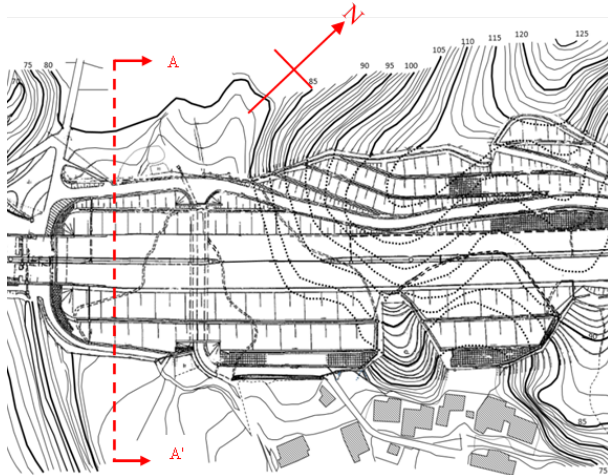
ターと土壌水分計は、ハンドドリルで穴を掘り計測器を埋め込む形で、地表から0.5m、1.0m、2.0m、3.0mの深さに設置した。ここで、テンシオメーターと土壌水分計の測定値が相互に干渉しないように、全ての計測器の位置を図-1(c)の奥行方向に50cm離して設置した。盛土天端と小段で行った標準貫入試験と現地踏査の結果をもとに、盛土の土質は礫混じりシルト質砂であり、盛土上段ののり面の表層部と深部をそれぞれBs1とBs2、盛土下段ののり面の表層部と深部をそれぞれBs3とBs4と区分した。SDPRは2016年9月16日に打設した。図-2にSDPRの形状を、表-1にSDPRの寸法を示す。試験施工したSDPR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ジ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

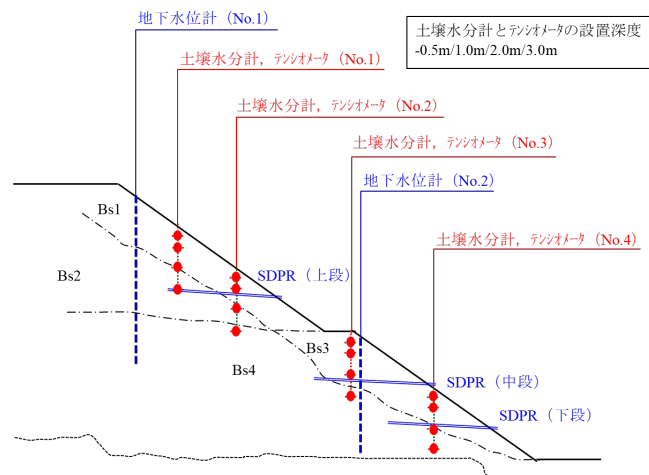
SDPR を試験施工した盛土を対象として地下水位変動を再現するために飽和・不飽和浸透流解析を行った。図-3に解析メッシュ図と境界条件を示す。解析対象は、南側のSDPRを試験施工した片側断面とした。盛土のり面から降雨浸透があるものとし、通常は降雨量に相当する流量が流入する境界条件としているが、盛土の浸透能以上の降雨は、表面流出するものとした。また、実際に盛土の右側の法尻付近において地下水の流出がみられたため、解析条件でも盛土法尻に浸出面を設定した。浸出面とは、節点の間隙水圧の値に応じて、不透水境界と既知の水頭境界を自動的に切り換える境界条件である。つまり、浸出面でサクシジョンが生じているときは不透水境界となり、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Imay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

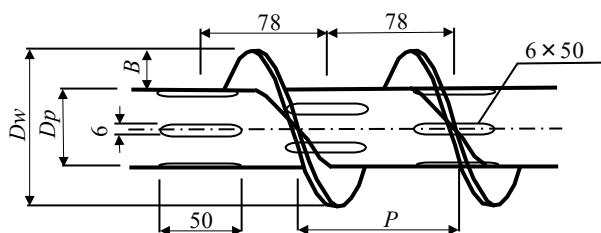


図-2 SDPRの概要(単位:mm)

表-1 SDPRの形状

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

それぞれ $2.18 \times 10^5 \text{ m/s}$ と $1.30 \times 10^6 \text{ m/s}$ 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

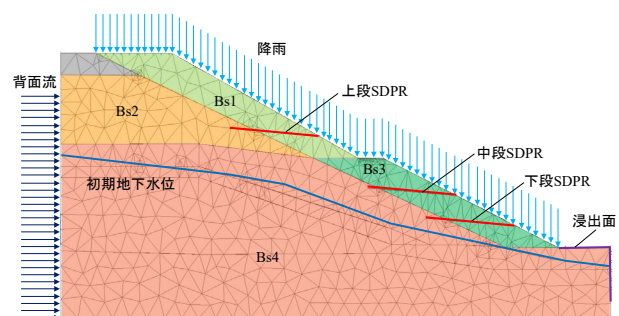


図-3 解析メッシュ図と境界条件

分特性曲線を示す。試験時における加圧速度は、 0.1 kPa/min で、最大加圧 100 kPa 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のサクシオ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 24 mm/h であり、9月18日と9月28日の日降雨量がそれぞれ 127.5 mm/day と 114 mm/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/m ³)	1.47		1.72		
乾燥密度 (t/m ³)	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		
$k=S_e^n$ (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)	$c(\text{kN/m}^2)$	14～64	30	14～64	30
	$\phi(^{\circ})$	30			
強度定数 (飽和)	$c(\text{kN/m}^2)$	14	20	14	20
	$\phi(^{\circ})$	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 (m^3/min) = {半減期72時間とした実効雨量 (mm) $\times 10^6$ }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多い降雨が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。

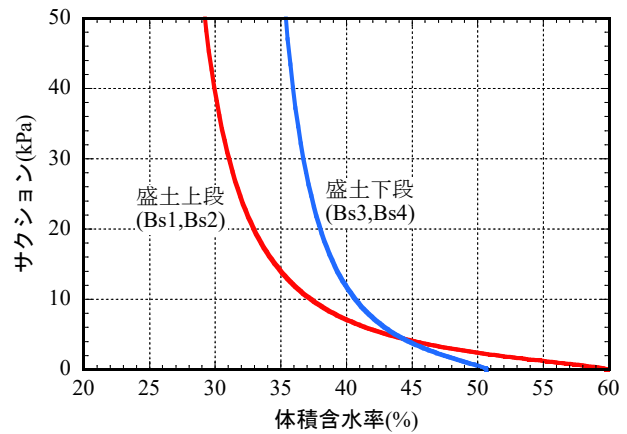


図-4 水分特性曲線

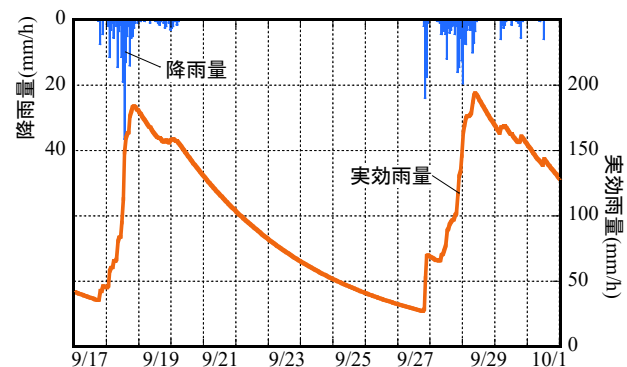


図-5 解析に用いた降雨データ

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。

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

$$F'_s = \frac{\sum \{(W' \cdot \cos \theta - k_h \cdot \sin \theta) \tan \phi\} + \sum (c \cdot l) + P_r}{\sum (W \cdot \sin \theta + h/k \cdot k_h \cdot W)} \quad (2)$$

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.

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

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¹⁰⁾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)に移動することで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,

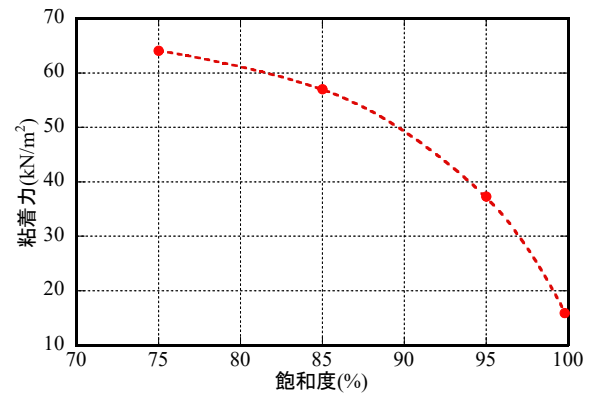


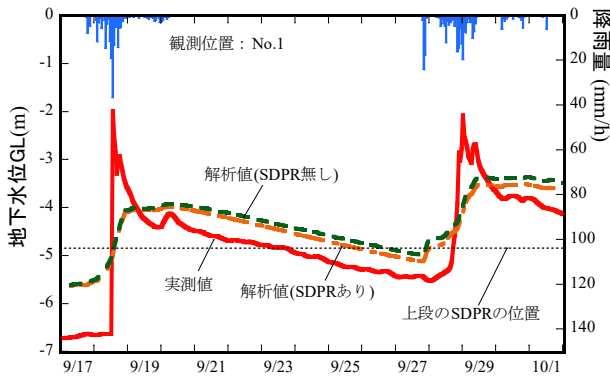
図-6 飽和度と粘着力関係

表-3 SDPR に関する入力定数および解析条件

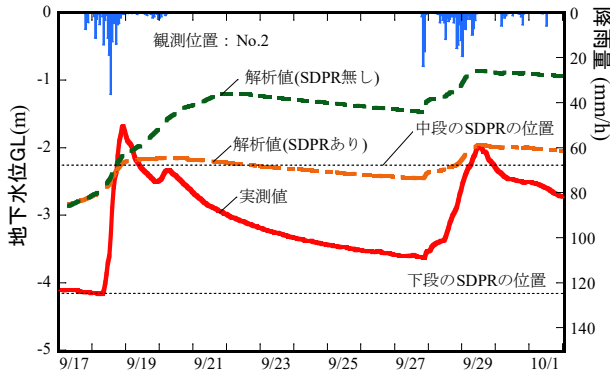
条件	降雨時	地震時
引張応力度 σ_a (N/mm²)	115.0	170.0
打設角度 α (°)	5	
極限周面摩擦抵抗 τ_u (N/mm²)	0.050	
長さ L (m)	4, 6, 9, 12	
水平間隔 S (m)	3, 5, 7	
打設位置	上中下段, 上中段, 上下段, 中下段	
水平震度 k_h	0, 0.3, 0.5	
降雨量	降雨継続時間はそのまま降雨強度を 1 倍, 1.5 倍, 2 倍	

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的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.

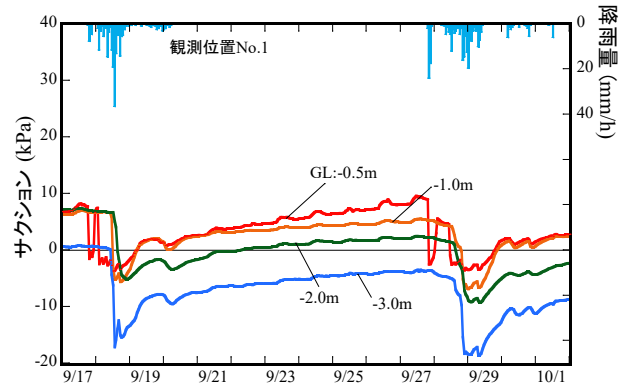


(a) 観測位置 No.1

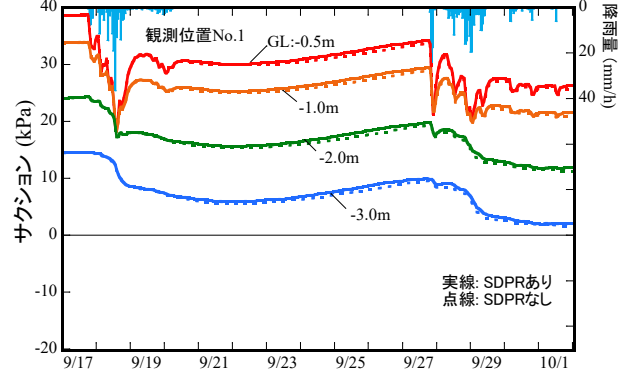


(b) 観測位置 No.2

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

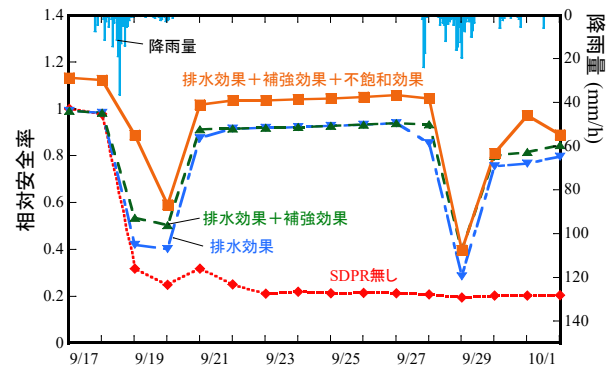


図-9 相対安全率と日降水量 (6mのSDPR)

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-8に観測位置 No.1におけるサクシヨンの実測値と

解析値を示す。サクシジョンの実測値は、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ジョンの値が減少し、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ジ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、実測値のサクシジ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れてサクシジ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ジ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とんど変化しないため、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

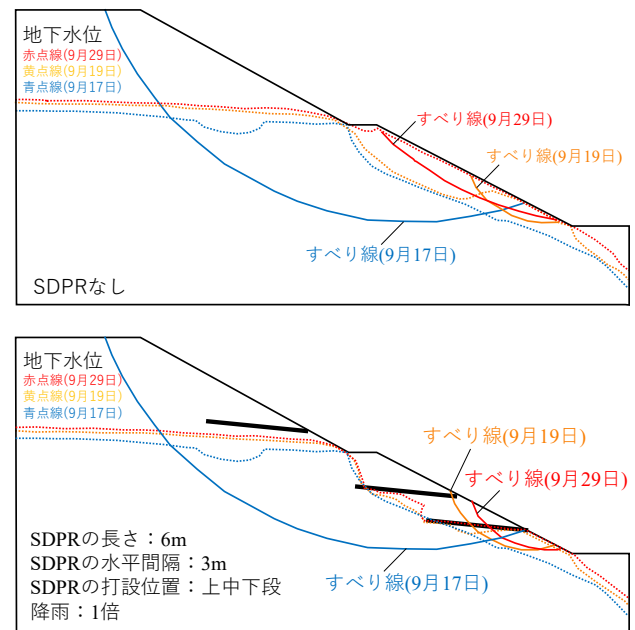


図-10 地下水位とすべり面

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。

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日に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を示す。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

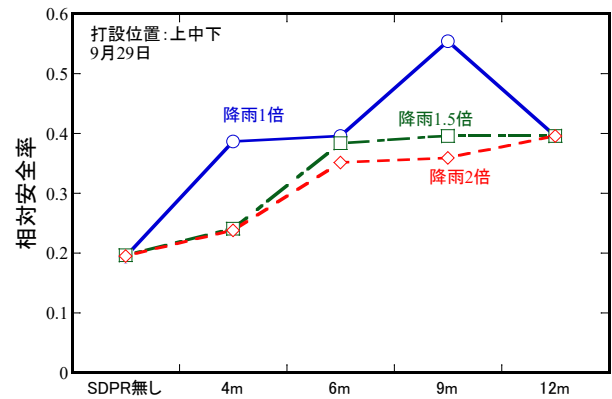


図-11 降雨時の相対安全率とSDPRの長さ

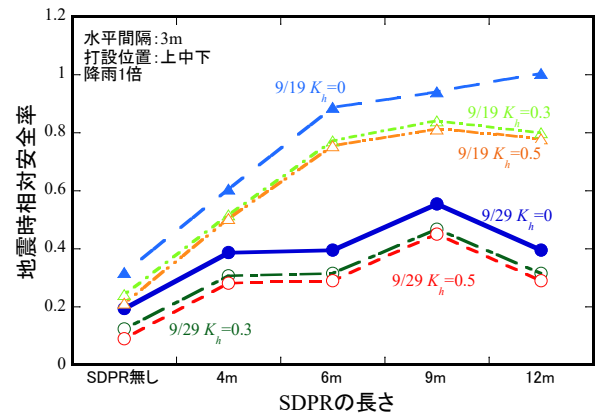


図-12 地震時相対安全率とSDPRの長さ

イブ流は、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。

(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

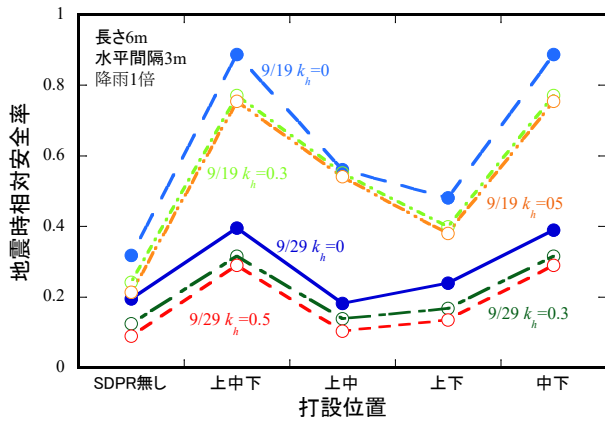


図-13 地震時相対安全率と SDPR の打設位置

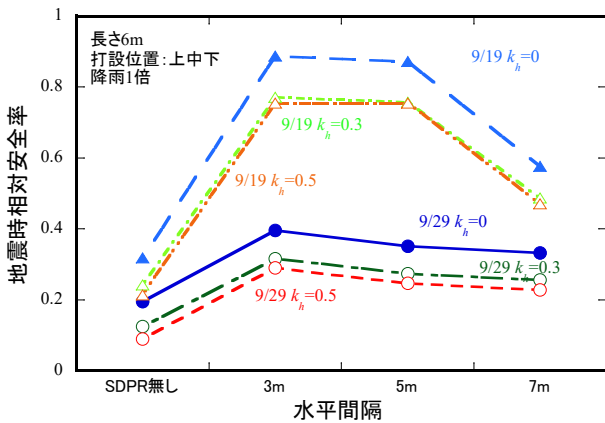


図-14 地震時相対安全率と SDPR の水平間隔

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、

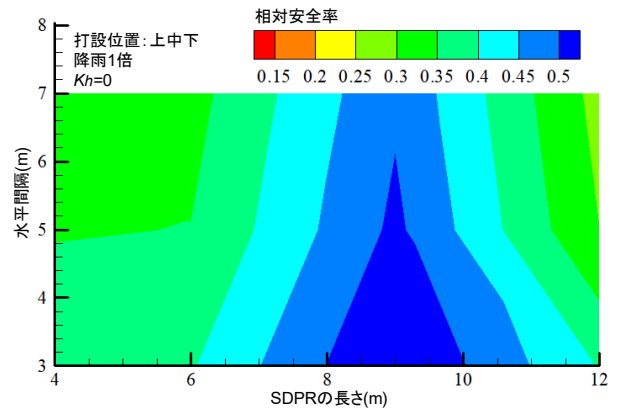
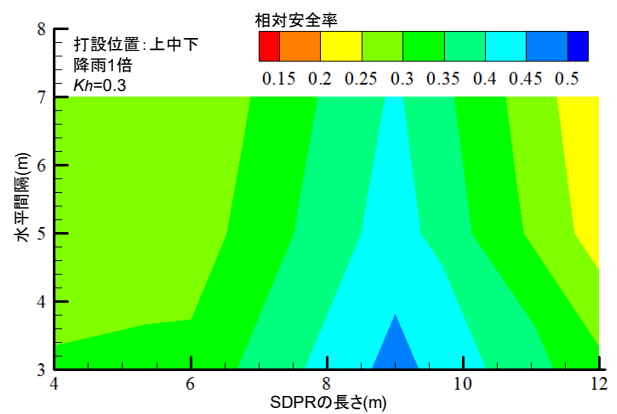
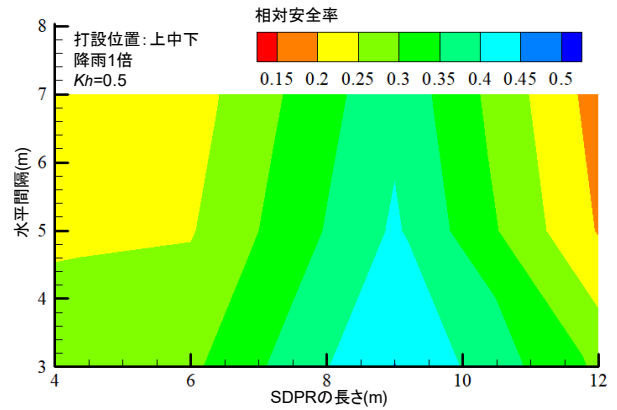

(a) $k_h=0$ (地震動なし)

(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)

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の効果が小さいものと考えられる。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ー常磐自動車道那珂地区ー, 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) 鶴飼恵三, 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, 蔣景彩: 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) 渡邊諭, 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) ー水分特性

- 曲線の密度依存について検証一, 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.