

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

浜崎, 智洋
西日本高速道路株式会社九州支社

笠間, 清伸
九州大学大学院工学研究院社会基盤部門

田山, 聡
西日本高速道路株式会社本社

前田, 良刀
NEXCO西日本コンサルタンツ株式会社

他

<https://hdl.handle.net/2324/7218206>

出版情報 : Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. C (Geosphere Engineering). 74 (1), pp.20-33, 2018. Japan Society of Civil Engineers

バージョン :

権利関係 : © 2018 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 を用いたのり面補強に関する原位置試験

浜崎 智洋¹・笠間 清伸²・田山 聡³・前田 良刀⁴・松方 健治⁵・秋吉 亮平⁶

¹正会員 西日本高速道路株式会社 九州支社 (〒812-0013 福岡市博多区博多駅東3-13-15)
E-mail: t.hamasaki.aa@w-nexco.co.jp

²正会員 九州大学准教授 大学院工学研究院社会基盤部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)
E-mail: kasama@civil.kyushu-u.ac.jp

³正会員 西日本高速道路株式会社 本社 (〒530-0003 大阪市北区堂島1-6-20)
E-mail: s.tayama.aa@w-nexco.co.jp

⁴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: y.maeda.ac@w-nexco-consul.co.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

⁶正会員 日本地研株式会社 (〒812-0894 福岡市博多区諸岡5-25-25)
E-mail: r-akiyoshi@chiken.co.jp

近年、異常降雨や大規模地震に起因する高速道路の被災事象が顕在化しつつあるなかで、降雨や地震などによる複合災害に効果的に対処する予防保全対策の確立が喫緊の課題となっている。そこで、この課題を解決するために、排水ボーリングの材料として鋼管を用い、その周面にスリット形状の水抜き孔とスパイラル形状の“羽根”を設けることにより、排水効果と地盤補強効果を同時に期待したのり面補強工法の開発・実用化に向けた原位置試験をおこなった。その結果、設計に必要な鋼管と地盤との付着性能を明らかにするとともに、のり面安定の重要な要素である降雨時における盛土内水位の上昇抑制ならびに降雨後の地盤に生じるサクシジョンの回復に着目して、鋼管の排水性能を定量的に検証することができた。

Key Words : *ground reinforcement, drainage pipe, slope disaster prevention*

1. はじめに

高速道路盛土（以下、「盛土」という）は、本来、適切な排水処理や締固め管理の徹底により密実で安定したものが構築されており、それらの状態が長期的に保持されている場合、良好な耐震性能を有していることが示されてきた¹⁾。しかしながら、近年、大規模地震や異常降雨に起因して盛土の被災が発生し、高速道路の定時性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みられるように、地震前の集中的な降雨により盛土内水位（以下、「地下水位」という）が上昇し、地震動により飽和した盛土材料のせん断強度が低下した結果、大規模な沈下・変形に至った事例が報告されている²⁾。また、2009年8月に発生した駿河湾を震源とする地震でみられ

るように、長期の地下水の作用により盛土材料の強度や透水性が低下した結果、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³⁾。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、そこに水が供給され大きな地震動が加わった結果、崩落に至った事例が報告されている⁴⁾。このように、降雨や基礎地盤からの浸透水が素因となり、盛土のせん断強度が低下し、地震が誘因となつて被害を拡大させている実態が見受けられるようになってきている。

一方、高速道路延長の約4割が供用開始から30年を超え、老朽化や劣化が顕著となりつつあるなかで、高速道路の健全性を永続的に確保し、高速道路ネットワークの機能を将来にわたり維持していくために、「高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会」の提言を受け⁵⁾、“高速道路リニューアルプロジェ

クト”が計画されている⁶⁾。その中で、盛土材料がスレーキング性の高い材料、粘性系や砂質系の材料で地下水位が高いなどの高含水比状態の盛土を対象に、排水対策や補強対策といった大規模な修繕を予定している⁷⁾。

降雨によるのり面崩壊の主な要因は、断続的な雨水の浸透に起因した地下水位と飽和度の上昇による盛土（地盤）の強度低下である⁸⁾。つまり、繰り返しの降雨による盛土の飽和化と地下水位の上昇に伴い、のり面を形成する盛土（地盤）のサクシジョンの消失に伴う強度低下や、間隙水圧の上昇に伴う浸透破壊の発生などが具体的な要因である。また、降雨時だけでなく、降雨後に一定時間を経て地震などを誘因としてののり面崩壊に至るケースもある。したがって、このような大規模地震と異常降雨による複合災害に効果的に対処するには、それぞれを対象にした対策だけではなく、両者を総合的に考慮した対策が必要となってくる⁹⁾。

そこで、排水対策による地下水位や間隙水圧の抑制、サクシジョンの早期回復、補強対策による盛土（地盤）の強度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、「鋼管」という）によるのり面補強工法（以下、「SDPR（Spiral bladed Drain Pipe Reinforcement method）」という）の開発および実用化に向けた検討をおこなってきた。

本稿は、模型実験や解析等の既往の研究成果^{10), 11), 12)}を踏まえ、盛土におけるSDPRの実施工を通じて、原位置試験、地下水位観測やサクシジョン計測ならびに解析等により、のり面の安定検討に必要な鋼管と地盤との付着性能を明らかにするとともに、のり面安定の重要な要素である降雨時における地下水位の上昇抑制と降雨後におけるサクシジョンの回復に着目し、排水性能の効果検討を実験的に行ったものである。

2. のり面災害の実態

既往の研究¹³⁾によると、降雨のり面災害件数の約50%は盛土が飽和に近い高含水比状態になったことが要因であり、約40%は排水溝等の排水施設の不備が要因であることが報告されている。また、地形的な要因の影響も大きく、1件あたりの平均崩壊土量が約400m³程度なのに対し、傾斜地盤上の盛土では5,000m³以上の大規模崩壊の発生も報告されている。

図-1は、平成5～24年度に発生した九州・沖縄の高速道路における降雨による盛土のり面災害規模の実態をとりまとめたものである。そのうち、降雨のり面災害の規

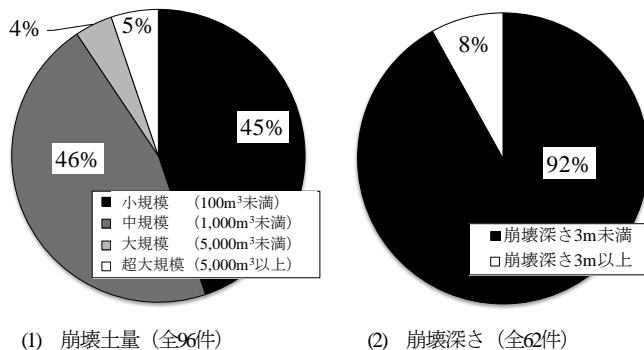


図-1 降雨のり面災害規模の実態

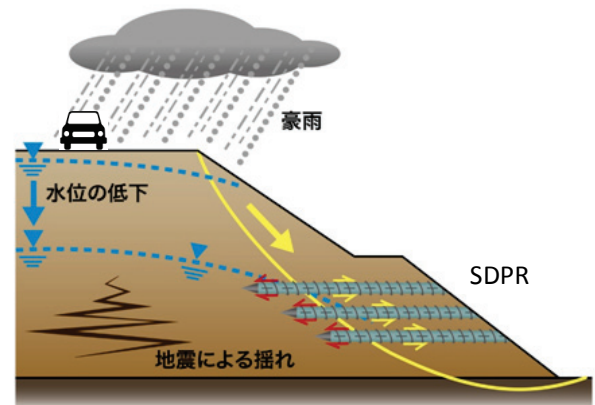


図-2 SDPRの概要



(1) 遠景



(2) 近景

写真-1 SDPRの施工状況

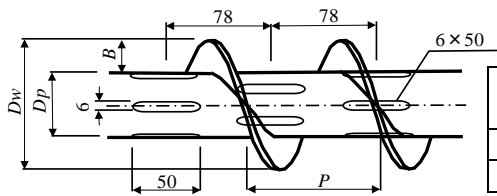


図-3 鋼管の概要図 (単位: mm)

表-1 鋼管の形状 (寸法)

鋼管種類	羽根外径 (Dw:mm)	鋼管外径 (Dp:mm)	羽根幅 (B:mm)	羽根間隔 (P:mm)	羽根巻数 (n/2m)	摘要
type I	72	48.6	11.7	72	25	標準タイプ
type II	148	48.6	50.0	148	13	幅広タイプ

模は、崩壊土量が $1,000\text{m}^3$ 未満および崩壊深さが 3m 未満となる中規模崩壊が、それぞれ全体の約 90%程度を占めていることがあきらかとなった。つまり、のり面災害を未然に防ぐにあたっては、あらかじめ崩壊深さ 3m 程度の中規模崩壊を対象とした対策を実施することが、高速道路などの線状構造物における大部分の盛土の安定性向上に寄与することとなる。

SDPR は、主としてこれらの中規模崩壊を対象としたのり面補強工法である。

3. SDPR の概要

(1) SDPR の特長

SDPR は、鋼管の周面に水抜き孔を設け、盛土内への表面水や地下水等の浸入による地下水位や間隙水圧の上昇を抑制するとともに、スパイラル形状の羽根を介して鋼管と地盤との全面接着による一体化を期待した、排水機能を兼ね備えたのり面補強工法である。SDPR の概要を図-2に、施工状況を写真-1に示す。

SDPR に用いられる鋼管は、既に構造物基礎等の支持杭として使用されている回転杭¹⁴⁾を応用したものであり、既往の模型実験等による研究^{15), 16)}により、のり面補強効果に関する成果が得られている。

また、排水ボーリングが設置された盛土は間隙水圧や地下水位が低減され、盛土の安定性向上が図られることが解析的に評価されている^{17), 18)}。

(2) 鋼管の形状および仕様

図-3 に鋼管の概要図、および表-1 にその形状 (寸法) を示す。鋼管は、JIS G 344 に規定される STK400 (一般構造用炭素鋼鋼管、外径 = 48.6mm、板厚 = 3.5mm) を使用し、羽根は、JIS G 3101 に規定される SS400 (一般構造用圧延鋼材、板厚 = 4.5 ~ 2.2mm) を使用した。

鋼管周面には、地盤と鋼管との付着を確保するため、スパイラル形状の羽根を全長にわたり装着した。鋼管種類 “type I” は羽根外径 (Dw) / 鋼管外径 (Dp) = 1.5 の標準タイプ、鋼管種類 “type II” は羽根外径 (Dw) / 鋼管外径 (Dp) = 3.0 の幅広タイプである。

また、補強対策に用いた鋼管には、水抜き孔として

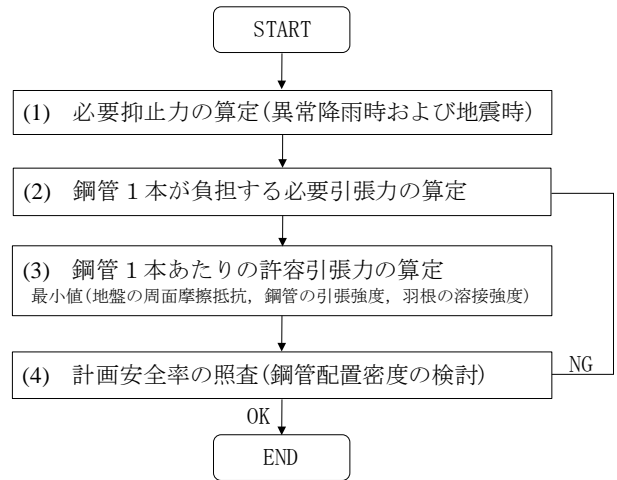


図-4 設計フロー (要旨)

6×50mm の長孔 (スリット形) を開口率 10% となるように鋼管周面の全長にわたり配置するとともに、JIS H 8641 に規定される 2 種 45 (HD Z 45) の溶融亜鉛めっき処理を防錆として施した。

(3) 設計フロー

SDPR を適用したのり面の安定検討にあたっては、切土補強土工法設計・施工要領¹⁹⁾を準用し、図-4 に示す手順において実施することとした。具体的には、異常降雨時および地震時においてそれぞれの必要抑止力を算定し、鋼管が負担する引張力をもとに所定の安全率を満足するよう鋼管の配置長さおよび配置密度を計算する。ここで、鋼管が負担する引張力は、鋼管と地盤との周面摩擦抵抗、鋼管の引張強度および羽根と鋼管の溶接強度等の最小値により決定される。したがって、必要な引張力の算定にあたっては、鋼管と地盤との付着性能に係る周面摩擦抵抗を把握することが肝要となる。

(4) 施工

鋼管の施工にあたっては、鉄筋挿入工やロックボルト工などに用いられるエアモータ・チェーン方式のボーリングマシン (最大トルク 1,230N・m) をベースマシンとして用いた。これに鋼管を回転させるための治具を装着し、必要に応じて強制振動を与えながら振じ込み方式により鋼管の圧入を行うこととした。その結果、これまでに $L=17\text{m}$ の施工実績を得ることができた。

なお、鋼管は、これらの施工に必要なねじり強度を有

することが必要となる。

4. 地盤との付着性能に関する検討

(1) 引抜き抵抗試験

a) 試験の概要

鋼管の施工方法や鋼管の形状が地盤との付着性能に及ぼす影響ならびに周面摩擦抵抗を把握することを目的に、引抜き抵抗試験を実施した。引抜き抵抗試験は、のり面表層部の含水比が高く、脆弱化していると考えられる5箇所の盛土において実施した。

盛土材料の物性等諸元は表-2に示すとおりであり、代表N値とは、試験箇所の調査により得られたN値の平均値である。

なお、鋼管の試験体長さは5~6mを標準とし、礫等の介在により鋼管の圧入が困難となった場合は、圧入できた長さに応じて引抜き抵抗値を評価した。

b) 試験方法

引抜き抵抗試験は、ロックボルト引抜き試験方法(JGS 3731-2012)に準じて実施した。試験にあたっては、鋼管に特殊加工した治具を取付けテンションバーと接続させ、それを介して油圧ジャッキにて載荷を行った(写真-2および図-5参照)。

(2) 引抜き抵抗試験結果

図-6に引抜き抵抗試験により得られた代表的な荷重-変位曲線を示す(図中の凡例に示す番号は、表-3中の番号等に対応する)。最大荷重時の引抜き変位量は試験体長さの0.3~1%程度であった。

表-3に試験体長さおよび鋼管種類の諸元に基づく極限周面摩擦抵抗(τ)の算出結果を示す。引抜き抵抗荷重は、荷重-変位曲線における最大荷重とした。その結果、代表N値=3の場合(試験箇所D)において $\tau = 45\text{kN/m}^2$ 、代表N値=8の場合(試験箇所C)において $\tau = 97\text{kN/m}^2$ が得られた。また、試験箇所AおよびBにおいて、type IIは、type Iと比較して極限周面摩擦抵抗(τ)が10~30%程度高くなる傾向が得られた。

図-7に、代表N値と極限周面摩擦抵抗(τ)との関係をプロットした(図中の凡例に示す記号は、表-3中の試験箇所および鋼管種類に対応する)。この結果、両者はかなり強い相関関係(相関係数 $r=0.92$)にあり、代表N値を用いて極限周面摩擦抵抗(τ)を $\tau = 10 \cdot N + 13$ で推定できる結果が得られた(図-7中の実線)。

さらに、切土補強土工法に用いられる粘性土の極限周面摩擦抵抗(τ)の推定値(図-7中の破線)と比較を行った。この場合 $\tau' = 0.8c$ (ここに、 c :粘着力)で推定され、粘着力(c)は各種提案されている推定式のなかで $c =$

表-2 引抜き抵抗試験箇所の物性等諸元

試験箇所	盛土材料分類	$F_c(\%)$	l_p	代表N値※
A	火山灰質粘性土(V)	63.2	10.7	4
B	粘性土(Cs)	80.5	17.1	5
C	砂質土(S)	20.4	10.5	8
D	砂質土(S)	41.2	57.3	3
E	砂質土(S)	40.3	16.5	5

※ 代表N値は、試験箇所の標準貫入試験および簡易動的コーン貫入試験により算出。



写真-2 引抜き抵抗試験状況

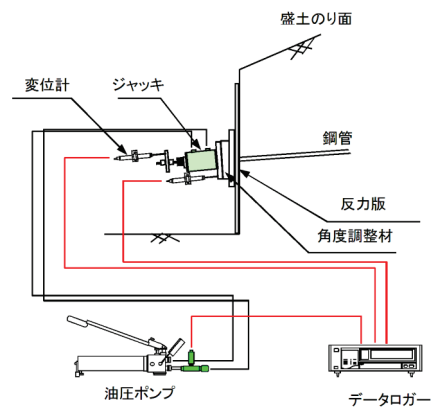


図-5 引抜き抵抗試験の概要

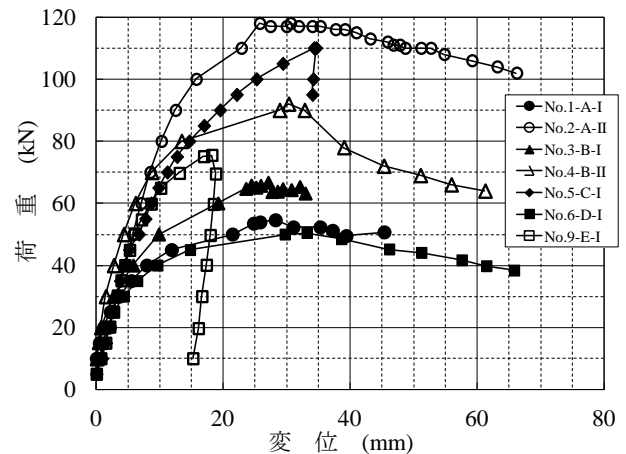


図-6 荷重-変位曲線

10・N²⁰を引用した。その結果、SDPR で得られた極限周面摩擦抵抗 (τ) は、切土補強土工法において想定されている場合と同等以上の付着性能を期待できることが示された。

5. 地下水の動態からみた排水性能

(1) SDPR による補強対策事例（その 1）

図-8 に示すような集水地形に位置する片切片盛構造の腹付け盛土（表-2 中の試験箇所 D に該当）において、SDPR による補強対策を行った。盛土は火砕流堆積物のしらす岩域に分布する台地の低地に位置しており、礫混じり火山灰質砂を主体とした高さ 12m 程度の 2 段盛土である。対象盛土の土質特性を表-4 に示す。

のり面の安定検討にあたっては、過去の近傍における降雨によるのり面崩壊事例を参考に、盛土内に異常降雨等による最高水位を設定し、常時と地震時のそれぞれの計画安全率を満足するか否かの検討を行った。次に、鋼管を配置したことによる地下水位の低下（GL-3.5m：鋼管配置高さに相当）を想定し、計画安全率を満足するよう鋼管の配置密度の検討を行った。その結果、下方から 1 段目ののり面上段および下段に、それぞれ $L = 11\text{m}$ および $L = 9\text{m}$ の鋼管を 3m 間隔（のり面配置密度：1 本/9 m^2 ）で配置することとした。

(2) 地下水位観測

SDPR による排水性能を検討するにあたり、SDPR による補強対策を行った箇所（以下、「SDPR 有」という）と無対策箇所（以下、「SDPR 無」という）における地下水位の動態について検証をおこなった。

地下水位観測は、図-8 に示すのり面小段付近で No.1 観測孔（SDPR 有）と、隣接した No.2 観測孔（SDPR 無）において実施した。検討対象の観測期間は、2015 年 4 月 11 日から 2016 年 12 月 11 日までとした。

図-9 に、観測期間における雨量と地下水位の観測結果を示す。観測期間中の最大日雨量は 167mm であり、カンパロットのプロットイングポジション公式²⁰⁾により再現期間 2 年の年最大日雨量に相当する。また、2015 年 4 月 11 日から 1 年間の年間降水量は 3,627mm であり、同様に再現期間 25 年の年間降水量に相当する。

地下水位は No.1 観測孔で GL-5.9～-2.4m、No.2 観測孔で GL-6.0～-1.5m の変動があった。No.1 観測孔では、一時的に GL-3.5m を超過する降雨があったものの、No.2 観測孔と比較して、地下水位は速やかに低下する傾向を示した。一方、No.2 観測孔では、50mm/日を超える降雨により定常的に GL-3.5m を超過する傾向を示した。また、観測期間中の No.1 観測孔と No.2 観測孔の水位差は最大

表-3 極限周面摩擦抵抗 (τ) の算出結果

No.	試験箇所	鋼管種類	試験体長さ (L:m)	引抜き抵抗荷重 (P:kN)	極限周面摩擦抵抗 (τ :kN/m ²)
1	A	type I	5	54	48
2	A	type II	4	118	63
3	B	type I	5	66	58
4	B	type II	3	92	66
5	C	type I	5	110	97
6	D	type I	5	51	45
7	D	type I	5	51	45
8	D	type I	5	50	44
9	E	type I	6	75	55
10	E	type I	6	73	54
11	E	type I	6	81	60
12	E	type I	6	90	66

※極限周面摩擦抵抗(τ)は、引抜き抵抗荷重を試験体長さおよび羽根外径周長で除した値： $\tau=P/L(D_w\pi)$

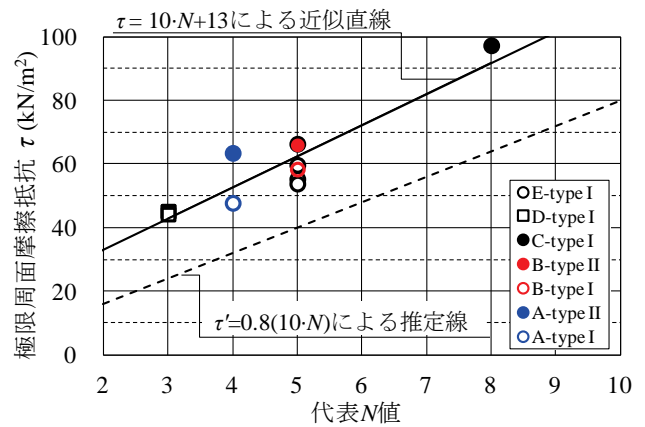


図-7 代表N値と極限周面摩擦抵抗との関係

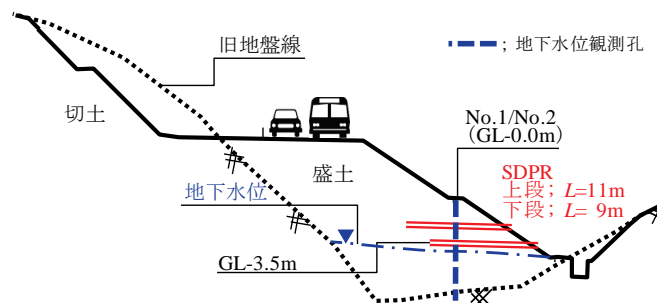


図-8 SDPRによる補強対策の概要

表-4 盛土の物理的土質特性（その1）

湿潤密度 ρ_w (g/cm^3)	乾燥密度 ρ_d (g/cm^3)	間隙比 e (-)	自然含水比 ω_n (%)	透水係数 k_s $\times 10^3(\text{m/s})$
1.44	0.81	2.38	81.0	5.4~8.4

で 1.1m (2016/6/27) であり、100 mm /日を超える降雨のときは、地下水上昇は最大で 1.0m (2016/5/10) 抑制された。このように、SDPR による地下水位の動態に大きな差異があることが確認できた。

なお、2016 年 9 月 4 日の前後において、地下水位は

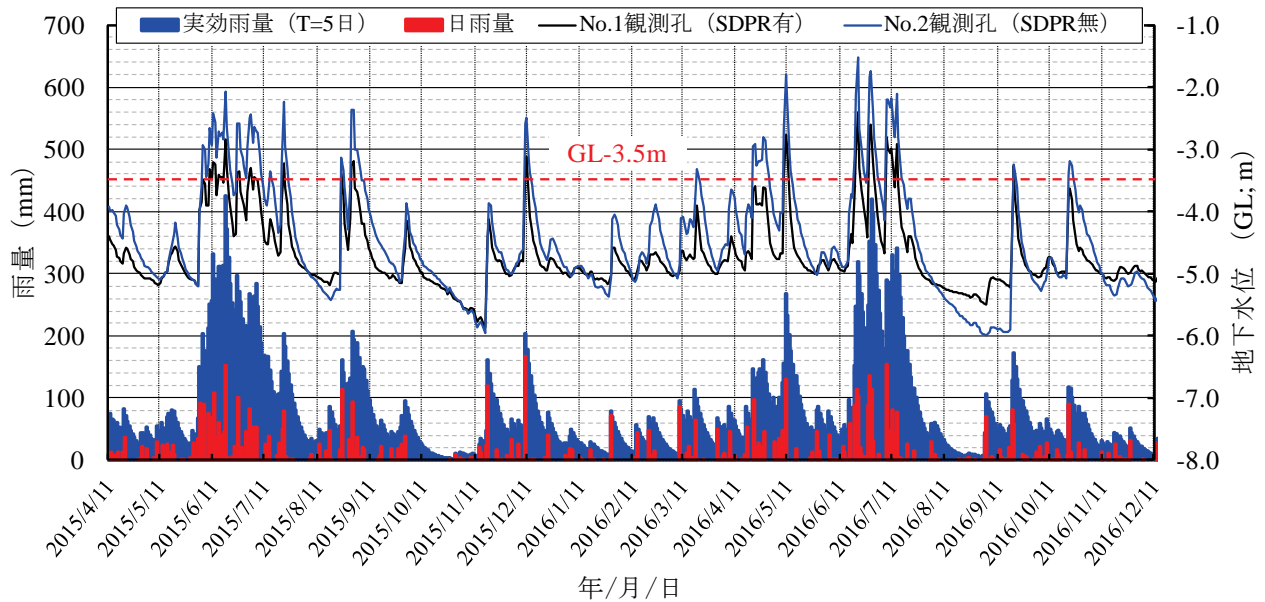


図-9 雨量と地下水位の観測結果 (その1)

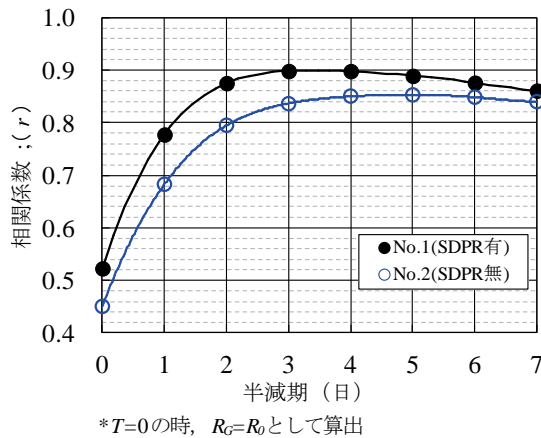
*T=0の時, $R_G=R_0$ として算出

図-10 半減期ごとの相関係数 (その1)

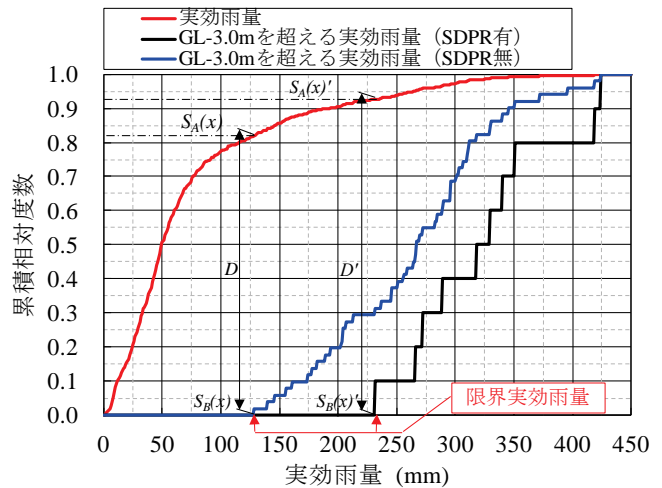


図-11 実効雨量 (T=5日) の累積相対度数

No.1 観測孔より No.2 観測孔が低くなっているが、鋼管配置高さ (GL-3.5m) 以深のり尻 (GL-5.5m) 付近に位置する地下水位であるため、SDPR の排水性能や盛土の安定に影響を及ぼすような変動ではない。

(3) 実効雨量を用いた地下水位の動態評価

排水性能を定量的に検討するために、地下水位の動態とあわせて、先行雨量の影響を考慮した実効雨量に着目した評価を試みた。実効雨量²⁰⁾とは、それまでに降った雨量が地中にどれ位残存しているかを便宜的に示した値であり、次式 (1) で算出される。また、半減期は残存している雨量が降雨量の半分になるまでの時間の長さを表している。

$$R_G = R_0 + \sum R_n \cdot (0.5)^{n/T} \quad (1)$$

ここに、 R_G : 実効雨量 (mm), R_n : n 日前の雨量 (mm),

T : 半減期 (日)である。

図-10は、2015年4月11日から2016年12月11日までの地下水位と、日雨量から式 (1) により算出した実効雨量との相関係数を、次式 (2) を用いて計算した結果である。図-10の横軸は実効雨量を算出するのに用いた半減期の値であり、相関係数が最大となる、つまり地下水位の動態をうまく表現できる半減期が存在することがわかる。

$$r = \frac{\sum_m \left[W_i - \frac{1}{m} \sum_m W_i \right] \cdot \left[R_{Gi} - \frac{1}{m} \sum_m R_{Gi} \right]}{\sqrt{\sum_m \left[W_i - \frac{1}{m} \sum_m W_i \right]^2 \cdot \sum_m \left[R_{Gi} - \frac{1}{m} \sum_m R_{Gi} \right]^2}} \quad (2)$$

ここに、 r : 相関係数, W_i : i 日における地下水位, R_{Gi} : i 日における実効雨量 (半減期 T 日), m : 観測日数で

ある。

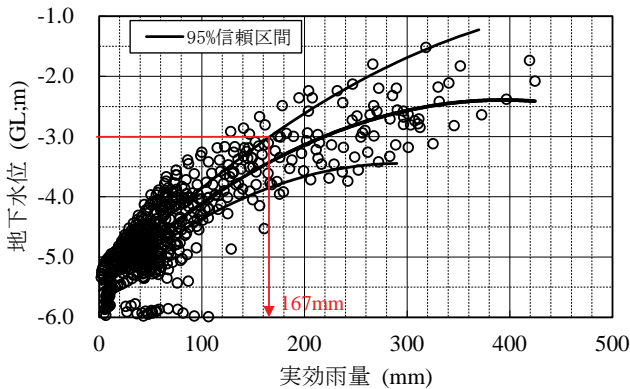
地下水位の動態と最も相関がよい実効雨量の半減期は、No.2 観測孔では半減期 $T = 5$ 日(相関係数 $r = 0.85$)だったのに対し、No.1 観測孔では半減期 $T = 3$ 日(相関係数 $r = 0.90$)となり、SDPR により半減期が短縮できることが示された。あわせて、図-9に半減期 $T = 5$ 日の場合の実効雨量の推移を示すと、地下水位の動態と相関が高いことがうかがえる。

(4) 限界実効雨量による排水性能の評価

ここでは、SDPR の排水性能による耐降雨性の向上を定量的に把握するために、限界実効雨量の算出を行った。ここで限界実効雨量とは、「SDPR 無の場合の降雨時に、安全率が $F_s = 1.05$ となる地下水位 (GL-3.0m) を超過する実効雨量」と定義した。

算出にあたっては、以下のような手順で実施した。まず、半減期 $T = 5$ 日の同一条件下において、SDPR 有・無ごとに観測期間中の実効雨量と地下水位 GL-3.0m を超過した時の実効雨量について、それぞれの度数を集計した。次に、図-11 に示すように、両者の累積相対度数の差が最大となる実効雨量を限界実効雨量として採用した。それらについては、次式 (3) に示すコルモゴロフスミルノフ検定²⁹⁾により、有意水準 5% で検定を行った。

$$D = \max |S_A(x) - S_B(x)| \geq 1.36 / \sqrt{N} \quad (3)$$



ここに、 D : KS 検定統計量、 S_A : 実効雨量の累積相対度数、 S_B : GL-3.0m を超える実効雨量の累積相対度数、 x : 実効雨量 (mm)、 N : GL-3.0m を超える実効雨量の度数である。

その結果、限界実効雨量は SDPR 無の場合で 127mm ($S_A = 0.82$, $S_B = 0.00$, $N = 51$)、SDPR 有の場合で 232mm ($S_A' = 0.93$, $S_B' = 0.00$, $N = 10$) となり、SDPR により 105mm 増加する結果が得られた。

また、図-12に示すような実効雨量 ($T = 5$ 日) と地下水位との関係から回帰係数の 95% 信頼区間を計算し、それにより得られた近似曲線の上限值が地下水位 GL-3.0m となる限界実効雨量を推定した。その結果、限界実効雨量は SDPR 無の場合で 167mm、SDPR 有の場合で 274mm となり、SDPR により 107mm 増加する結果が得られた。

このように、SDPR により、一定水位の上昇に対して実効雨量が増加していることが確認でき、先行雨量を含めた耐降雨性の向上を期待できることが示された。

6. 盛土内サクシンの動態からみた排水性能

(1) SDPR による補強対策事例 (その2)

図-13 に示すような丘陵地の集水地形に位置する盛土 (表-2 中の試験箇所 E に該当) において、SDPR による

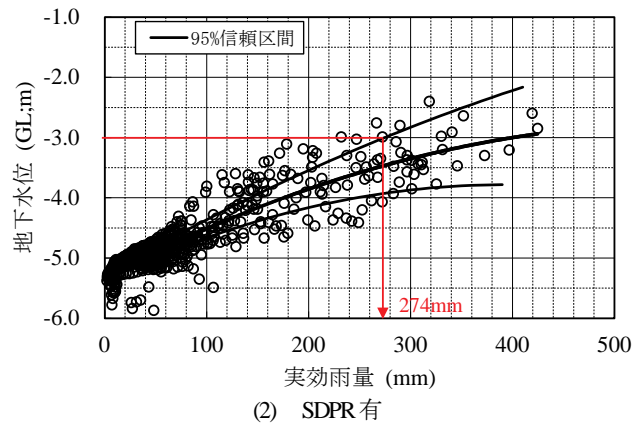


図-12 実効雨量 ($T = 5$ 日) と地下水位との関係。

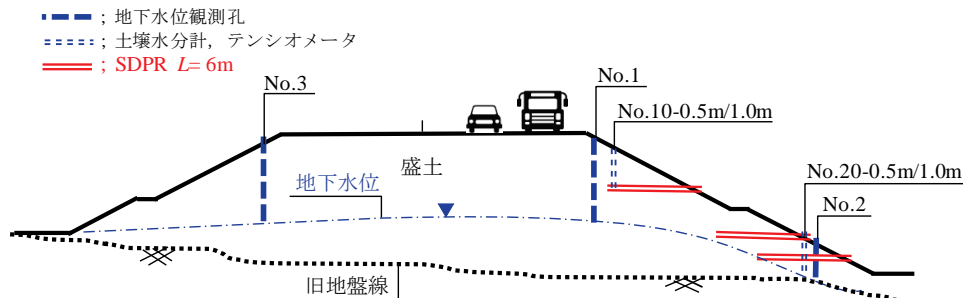


図-13 SDPR による補強対策と機器の設置概要

補強対策を行った。盛土は花崗岩類を基盤とし、礫混じり粘性土質砂を主体とした高さ 13m 程度の 2 段盛土である。対象盛土の土質特性を表-5 に示す。

のり面の安定検討にあたっては、前述したように盛土内に異常降雨等による最高水位を設定し、常時と地震時の計画安全率を満足するよう鋼管の配置密度の検討を行った。その結果、 $L=6\text{m}$ の鋼管をのり面配置密度が 1 本/9 m^2 となるよう 3 段配置した。

(2) 観測概要

サクシオンおよび土壌水分の動態を観測するために、図-13 および表-6 に示すように、地下水位観測孔 (No.1 ~No.3)、テンシオメータ (No.10 および No.20)、土壌水分計 (No.10 および No.20) および雨量計を設置した。テンシオメータおよび土壌水分計は、鋼管と鋼管の間に位置するのり面表層から 0.5m および 1.0m の深度にそれぞれ設置した。なお、地下水位計の No.3 観測孔は、無対策箇所を設置した。

ここでは、これらの観測結果を用いて、降雨後の土の有効応力の回復による地盤の強度特性の評価に大きな影響を与えるサクシオンに着目して、SDPR による排水性能の検討を試みた。

(3) 地下水位観測と半減期

地下水位観測は、図-13 に示すのり肩とりのり尻付近の No.1~No.3 観測孔において実施した。検討対象の観測期間は、2016 年 6 月 1 日から 12 月 31 日までとした。なお、2016 年 9 月 11 日までは SDPR による補強対策前 (以下、「SDPR 無」という)、9 月 17 日以降は、SDPR による補強対策後 (以下、「SDPR 有」という) の観測となっ

ている。

図-14 に観測期間中における雨量と地下水位の観測結果を示す。観測期間中の最大日雨量は 257mm であり、カナンプロットのプロットングポジション公式により再現期間 23 年の年最大日雨量に相当する。

地下水位の動態は、No.1 および No.3 観測孔で GL-7.0m 以浅、No.2 観測孔で GL-4.0m 以浅で推移しているが、No.3 観測孔にみられるように、250mm/日を超える降雨 (2016/6/22) に伴い最大で 6.6m の水位上昇が確認された。また、のり肩付近に設置した No.1 観測孔では、9 月 17 日以降、No.3 観測孔と比較して降雨に伴う水位上昇量は小さくなる傾向を示した。

図-15 は、それぞれの観測孔において、地下水位の動態と最も相関がよい実効雨量の半減期を式 (1) および式 (2) により算出した結果である。No.1 観測孔では、SDPR 無の場合が半減期 $T=7$ 日 (相関係数 $r=0.90$) だったのに対し、SDPR 有の場合は半減期 $T=3$ 日 (相関係数 $r=$

表-5 盛土の物理的土質特性 (その2)

湿潤密度 ρ_w (g/cm^3)	乾燥密度 ρ_d (g/cm^3)	間隙比 e (-)	自然含水比 ω_n (%)	透水係数 k_s $\times 10^9 (\text{m}/\text{s})$
1.97	1.58	0.70	232	1.2-4.7

表-6 観測・計測機器の設置状況

地点	設置箇所	設置深度(m)	観測・計測機器
No.1	のり肩	GL-8.0	地下水位計
No.2	のり尻	GL-3.35	
No.3	のり肩	GL-6.8	
No.10	のり肩	GL-0.5, GL-1.0	土壌水分計
No.20	のり尻		テンシオメータ
—	No.1 と No.2 のほぼ中央		雨量計

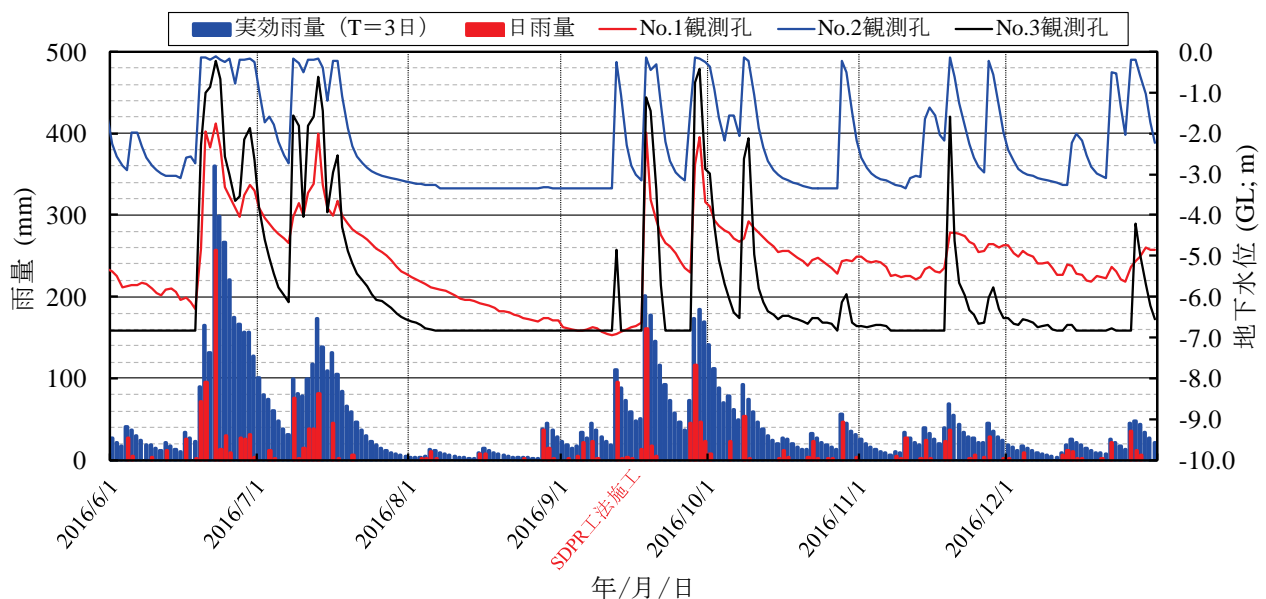


図-14 雨量と地下水位の観測結果 (その2)

0.83) が得られ、半減期が短縮していることが示された。

また、無対策箇所を設置したNo.3観測孔から算出した半減期は、 $T=3$ 日(相関係数 $r=0.85$)であった。これらの結果から、半減期が $T=3$ 日以上であることを想定し、以後の実効雨量については式(1)を用いた次式(4)により $T=72$ 時間で検討を行った。なお、図-14には算出した実効雨量の推移もあわせて示しており、地下水位の動態と相関が高いことがうかがえる。

$$R_{G72} = R_0 + \sum R_n \cdot (0.5)^{n/72} \quad (4)$$

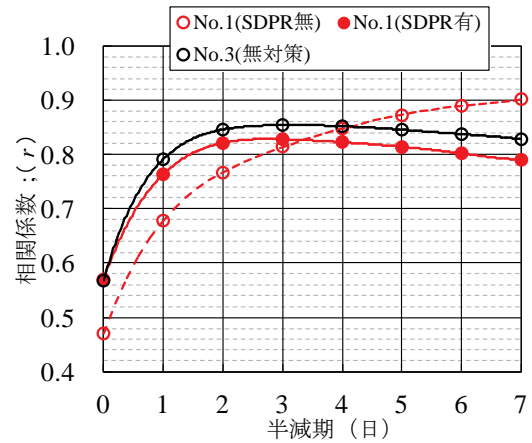
ここに、 R_{G72} : 72時間実効雨量 (mm), R_n : n 時間前の雨量(mm)である。

(4) 72時間実効雨量と地下水位

図-16 は、SDPR による排水性能の検討を具体的に実施するために、全観測期間から累積雨量と 72 時間実効雨量が同様な形態で推移している SDPR 無および SDPR

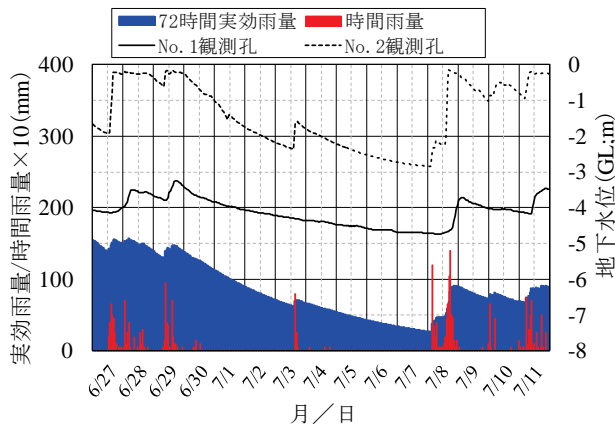
有の観測期間を抽出したものである。ただし、時間雨量については、10倍した数値で示している。

SDPR 無については、6月27日から7月11日までの15日間とし、この間の累積雨量は、229 mmであった。一方、SDPR 有については、9月19日から10月3日まで

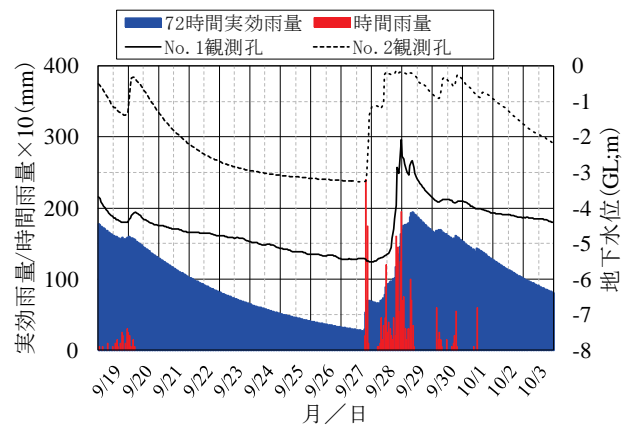


* $T=0$ の時、 $R_G = R_0$ として算出

図-15 半減期ごとの相関係数 (その2)

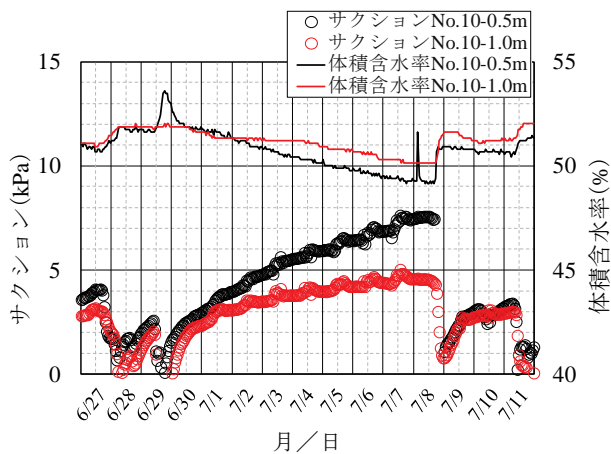


(1) SDPR 無(6/27~7/11)

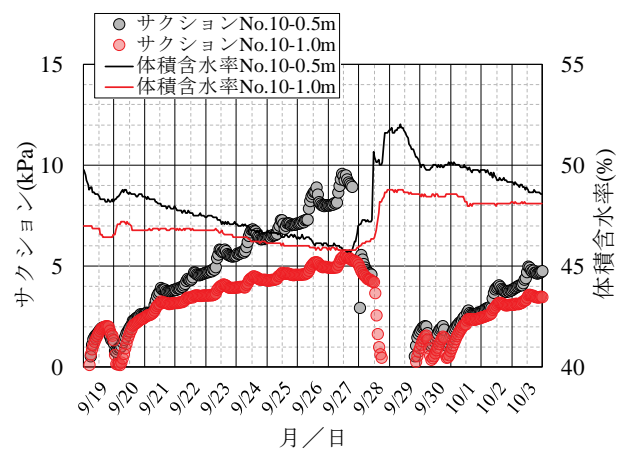


(2) SDPR 有(9/19~10/3)

図-16 雨量と地下水位の観測結果 (その3)

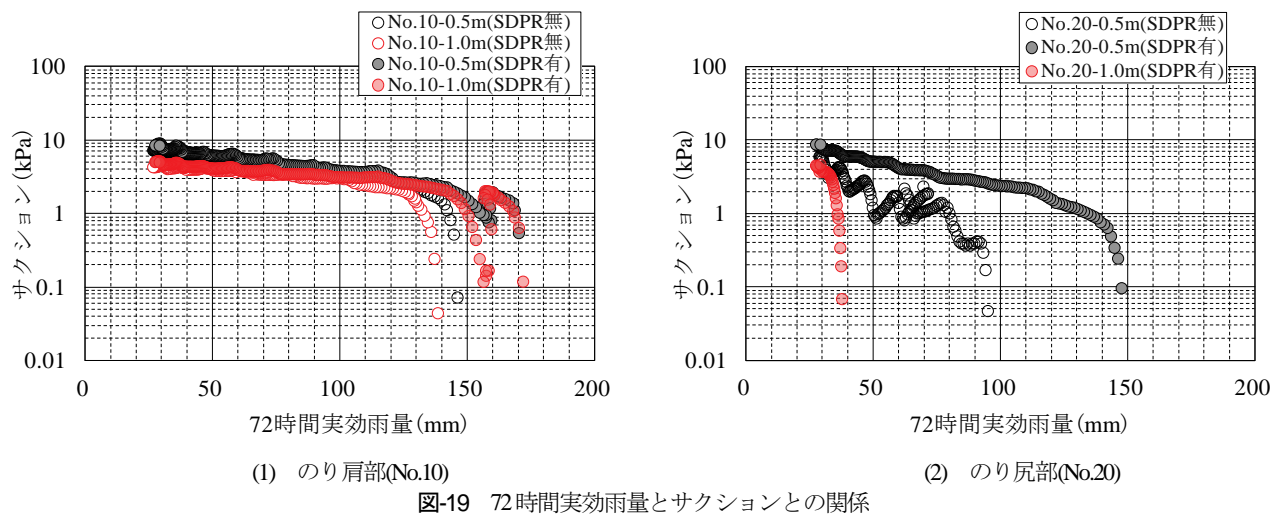
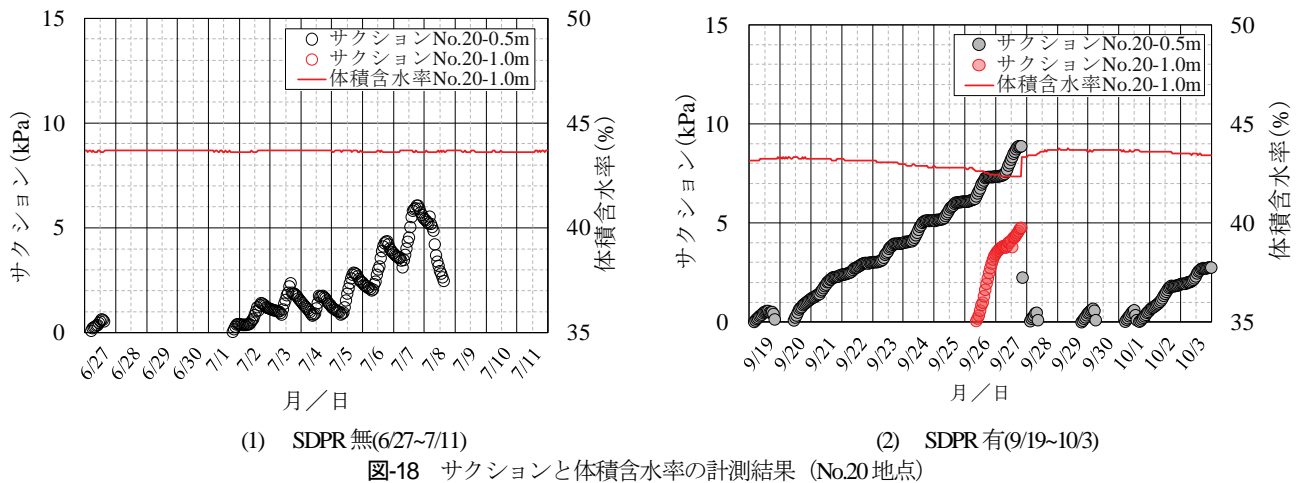


(1) SDPR 無(6/27~7/11)



(2) SDPR 有(9/19~10/3)

図-17 サクションと体積含水率の計測結果 (No.10地点)



の15日間とし、この間の累積雨量は、258 mmであった。No.2 観測孔（のり尻部）の地下水位（以下、「No.2 地下水位」という）は、No.1 観測孔（のり肩部）の地下水位（以下、「No.1 地下水位」という）より動態が激しく、降雨の繰り返しにより定常的に高くなる傾向を示した。また、No.1 地下水位および No.2 地下水位は、降雨後時間の経過とともに、それぞれ GL-5.0m および GL-3.0m 付近まで低下する傾向を示した。

地下水位の低下と72時間実効雨量(R_{72})の減少に着目した場合、SDPR 無では、72 時間実効雨量が 100mm 程度 (7/1 : $R_{72} = 113\text{mm}$, 7/9 : $R_{72} = 73\text{mm}$) に減少した時に、No.2 地下水位は GL-1.0m 以下となった。一方、SDPR 有では、72 時間実効雨量が 150mm 程度 (9/19 : $R_{72} = 165\text{mm}$, 9/20 : $R_{72} = 137\text{mm}$, 10/2 : $R_{72} = 123\text{mm}$) に減少した時に、No.2 地下水位は GL-1.0m 以下となった。また、No.1 地下水位が GL-4.0 m 以下となる時の72 時間実効雨量についても、SDPR 無では 100mm 程度、SDPR 有では 150mm 程度となり、No.2 地下水位と同様な傾向が得られた。

このように、一定水位の低下に要する72 時間実効雨量に差異があることは、SDPR により地中に残存してい

表-7 モデル関数のパラメータ

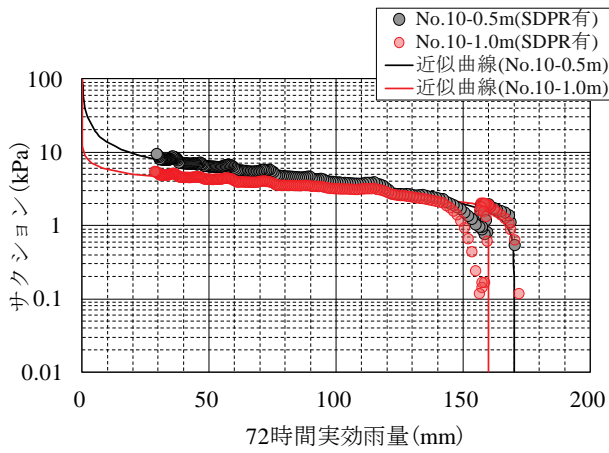
地点	No.10 -0.5m	No.10 -1.0m	No.20 -0.5m	No.20 -1.0m
飽和時72時間 実効雨量(R_s :mm)	170	160	150	40
最小72時間 実効雨量(R_m :mm)	0	0	0	0
α	0.03	0.03	0.055	0.02
n	3.0	6.0	2.0	2.0
m	$1-1/n$			

る雨量が早く排出できていることを裏付けるものであり、SDPR により一定水位の低下に対して降雨後からの経過時間が減少していることが示された。

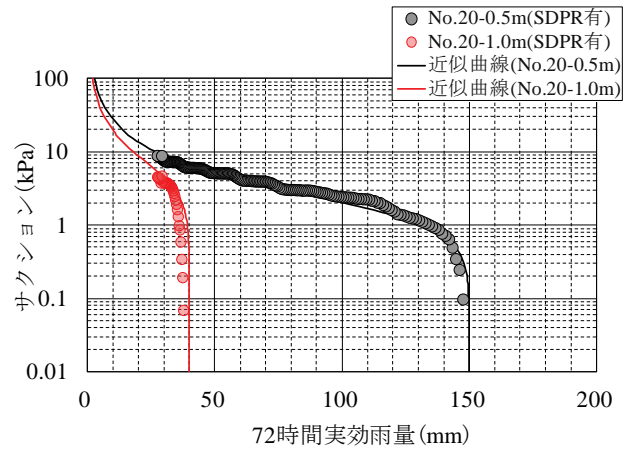
(5) サクションと体積含水率

図-17 および図-18 は、サクションと体積含水率の計測結果をとりまとめたものである。ただし、のり尻部の深度 0.5m に設置した土壤水分計で計測した体積含水率 No.20-0.5m は、データの異常および欠損が確認されたため記載していない（図-18 参照）。

図-17（凡例の番号等は表-6 中の番号等に対応）に示すのり肩部（No.10 地点）の SDPR 無では、体積含水率



(1) のり肩部(No.10)



(2) のり尻部(No.20)

図-20 72時間実効雨量とサクシヨンとの関係 (近似曲線)

はのり面表層に近い No.10-0.5m で 53.5%~49.2%の範囲で変動し, 51.9%~50.2%の範囲で変動した No.10-1.0m よりも土壌水分の排水・吸水の動態が大きいことがわかる。

また, 降雨後に体積含水率は徐々に低下し, それにあわせて No.10-0.5m のサクシヨンは 7.6kPa まで上昇している。サクシヨンの上昇は, のり面表層に近い No.10-0.5m の方が顕著となっている。しかし, 7月8日の降雨にみられるように, サクシヨンは急激に低下している。

一方, SDPR 有でも, SDPR 無と同様, 体積含水率はのり面表層に近く 51.7%~45.8%の範囲で変動している No.10-0.5m の方が変動範囲は大きく, No.10-1.0m は 48.7%~45.8%の範囲であった。また, 降雨後に体積含水率は徐々に低下するのに伴い, のり面表層に近い No.10-0.5m のサクシヨンは 9.6kPa まで上昇し, SDPR 無よりサクシヨンの上昇は大きくなる傾向を示した。しかし, 9月28日の降雨にみられるように, SDPR 無の場合と同様, サクシヨンは急激に低下している。

次に図-18 (凡例の番号等は表-6 中の番号等に対応) に示すのり尻部 (No.20 地点) の SDPR 無では, 降雨後にのり面表層に近い No.20-0.5m のサクシヨンが 6.1kPa まで上昇している。しかしながら, No.20-1.0m の体積含水率は降雨後も 43.7%のほぼ一定で推移しており, No.20-1.0m ではサクシヨンの回復は確認されていない。

一方, SDPR 有では, のり面表層に近い No.20-0.5m のサクシヨンが 8.9kPa まで上昇している。また, No.20-1.0m の体積含水率が 42.3%まで低下するのに伴い, サクシヨンは 4.7kPa まで上昇していることが確認された。このように SDPR 有では, 降雨の影響で特に地下水位の変動が著しいのり尻部においても体積含水率の低下に伴いサクシヨンが回復する効果が確認でき, サクシヨンの回復力が高いことが示された。

また, 図-17 および図-18 と図-16 を対比したときに, 体積含水率と地下水位の動態は 72 時間実効雨量の推移

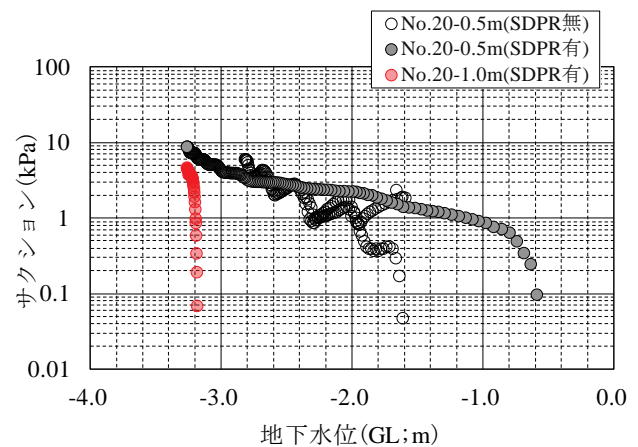


図-21 地下水位とサクシヨンとの関係 (のり尻部)

との相関が高いことがうかがえる。

(6) 72 時間実効雨量とサクシヨン

図-17 および図-18 に示したように, サクシヨンは降雨の発生とともに急激に低下し消失している。ここでは, 消失したサクシヨンが降雨後に回復する動態を捉え, その後のサクシヨンの上昇に着目して検討を行った。まず, 消失していたサクシヨンが回復し, その後の降雨により再度サクシヨンが減少するまでの排水過程イベントを抽出した。

図-19 は, のり肩部 (No.10 地点) とのり尻部 (No.20 地点) のそれぞれの 72 時間実効雨量 (R_{G72})とサクシヨンとの関係をプロットしたものである。SDPR 無については, 6月29日から年7月8日までを対象とし, SDPR 有については, 9月19日から9月27日までを対象とした。

のり肩部の SDPR 無では, No.10-0.5m および No.10-1.0m において, サクシヨンはそれぞれ $R_{G72} = 146\text{mm}$ および $R_{G72} = 138\text{mm}$ で回復した。その後サクシヨンは, 72 時間実効雨量の減少に伴い上昇し, $R_{G72} = 30\text{mm}$ の時に

No.10-0.5m で 7.6kPa, No.10-1.0m で 5.0kPa に達した。

また, SDPR 有では, No.10-0.5m および No.10-1.0m において, サクシオンはそれぞれ $R_{G72} = 170\text{mm}$ および $R_{G72} = 172\text{mm}$ で回復した。その後サクシオンは, SDPR 無と同様, 72 時間実効雨量の減少に伴い上昇し, $R_{G72} = 29\text{mm}$ の時に No.10-0.5m で 9.6kPa, No.10-1.0m で 5.5kPa に達した。

一方, のり尻部の SDPR 無では, サクシオンは No.20-0.5m において $R_{G72} = 95\text{mm}$ で回復し, $R_{G72} = 29\text{mm}$ の時に 6.1kPa に達したが, No.20-1.0m ではサクシオンの回復は確認されなかった。

また, SDPR 有では, No.20-0.5m および No.20-1.0m において, サクシオンはそれぞれ $R_{G72} = 147\text{mm}$ および $R_{G72} = 38\text{mm}$ で回復した。サクシオンは, その後のり肩部と同様, 72 時間実効雨量の減少に伴い上昇し, $R_{G72} = 29\text{mm}$ の時に No.20-0.5m で 8.9kPa, No.20-1.0m で 4.7kPa に達した。

このように, 72 時間実効雨量が減少するとサクシオンが回復し, さらにサクシオンは上昇する結果が得られた。サクシオンは, SDPR の有・無にかかわらずのり面表層に近い方が大きくなる傾向を示し, またのり尻部よりのり肩部の方が早期に回復しやすい傾向を示した。さらに SDPR 有のサクシオンは, SDPR 無と比較して 72 時間実効雨量が大きい時点で回復しており, 降雨の影響で地下水位の変動が著しいのり尻部においては, SDPR 有のみにサクシオンの回復が確認され, 体積含水率の低下の場合と同様, サクシオンの回復力が高いことが示された。

(7) 実効雨量を用いたサクシオンの推定

のり面の安定性を検討するには, 先行雨量の影響や降雨特性とあわせて, 降雨による地盤内部の土壌水分やサクシオンの動態を明らかにし, それを正確に表現できる手法を確立する必要がある。

ここでは, SDPR の排水効果によるサクシオンの回復および上昇過程を 72 時間実効雨量により予測することを試みた。図-16~図-18 に示したように, 72 時間実効雨量の推移は地下水位や体積含水率の動態と同様な傾向を示すことから, 先行雨量の影響を考慮した 72 時間実効雨量によるサクシオンの推定は, 降雨後のサクシオンの回復を簡便に評価する手法として期待できる。

次式 (5) に示すように, 不飽和・飽和浸透解析の水分特性曲線を求めるモデル関数として一般的に用いられている van Genuchten 式²⁴⁾のモデル関数を参考に, 表-7 に示すパラメータを用いて, 図-20 に示す近似曲線へのフィッティングを試みた。

$$\frac{R_{G72} - R_r}{R_s - R_r} = \frac{1}{\left\{1 + (10 \cdot \alpha \cdot S)^n\right\}^m} \quad (5)$$

ここに, R_{G72} : 72 時間実効雨量 (mm), R_s : 飽和時 72 時間実効雨量 (mm), R_r : 最小 72 時間実効雨量 (mm), S : サクシオン (kPa), $\alpha \cdot m \cdot n$: 定数である。

飽和時 72 時間実効雨量 (R_s) は, それぞれの計測地点・深度においてサクシオンが回復したときの 72 時間実効雨量とし, 最小 72 時間実効雨量 (R_r) は, 72 時間実効雨量とサクシオンに関するデータが限定的であるので, 便宜的に $R_r = 0\text{mm}$ とした。

図-20 に示すように, 近似曲線は土壌水分の排水過程におけるサクシオンの発生ならびに 72 時間実効雨量の減少に伴うサクシオンの上昇が適切に表現可能となっている。また, それぞれのサクシオンの実測値と近似曲線によるサクシオンの推定値の相関係数は $r = 0.95 \sim 0.99$ が得られ, 両者にはかなり強い相関があり, 降雨後のサクシオンの動態を推定できることが示された。

(8) 地下水位とサクシオン

図-21 は, 降雨イベント後の排水過程におけるサクシオンの動態のうち, SDPR により排水効果が顕著であったのり尻部における地下水位とサクシオンとの関係をプロットしたものである。ここで, のり尻部の地下水位は, No.2 観測孔により観測された地下水位であり, SDPR 無については, 前述した期間のうち 7 月 1 日から 7 月 7 日までを対象とし, SDPR 有については, 9 月 20 日から 9 月 27 日までを対象とした。

SDPR 無では, サクシオンは No.20-0.5m において地下水位が GL-1.6m で回復したが, No.20-1.0m においては, 図-16 に示すように地下水位が GL-2.9m まで低下してもサクシオンの回復は確認されなかった。

一方, SDPR 有では, No.20-0.5m および No.20-1.0m のサクシオンは, それぞれ地下水位が GL-0.6m および GL-3.2m で回復した。サクシオンは, その後の地下水位の低下により上昇しているが, 地下水位が GL-3.0m 以下となると急激に上昇することが確認できた。

このように, SDPR 有は特に地下水位の変動が著しいのり尻部において, サクシオンの動態で SDPR 無とあきらかな差異を示した。

7. まとめ

本稿では, 排水機能を有するスパイラル羽根付き鋼管の原位置試験を通じて, のり面の安定検討に必要な鋼管と地盤との付着性能や, 地下水位およびサクシオンの動

態からみた排水性能について、下記の知見が得られた。

- (1) 代表 N 値= 10 程度以下の地盤であれば、エアモータ・チェーン方式のボーリングマシンを用いた振り込み方式の施工により、鋼管の圧入が可能である。
- (2) 鋼管は、地盤との全面接着による一体化が期待でき、地盤の代表 N 値と相関がよい付着性能を示し、極限周面摩擦抵抗 (τ) は地盤の代表 N 値により推定が可能である。
- (3) 先行雨量の影響を考慮した実効雨量の推移と地下水位の動態はよい相関を示し、SDPR により地下水位の上昇を抑制できるとともに、地盤に浸み込み残存している雨量の指標となる実効雨量の半減期を縮減できる。
- (4) コルモゴロフスミルノフ検定および回帰分析により、一定の水位上昇に対する限界実効雨量が増大することを明らかにでき、SDPR による耐降雨性の向上を定量的に評価できた。
- (5) サクションは降雨後の実効雨量が減少するとともに回復し、一定の実効雨量に達すると急激に増加する。また、SDPR によりその経過過程が早くなる。
- (6) 降雨に伴い地下水位が上昇し地盤強度の低下が著しいのり尻付近においては、SDPR によりサクションの回復力が高い。
- (7) サクションは実効雨量の推移と強い相関関係にあり、水分特性曲線のモデル構成式により推定可能となり、降雨後ののり面安定検討に活用できる可能性がある。

8. おわりに

本稿では、SDPR の実施工を通じた原位置試験、地下水位観測およびサクション計測にもとづく検討により、鋼管と地盤との付着性能、地下水位の上昇抑制やサクションの動態について、SDPR による付加的効果を実験的に検証することができた。

今後は、飽和-不飽和浸透流解析等を用いた鋼管の最適な配置密度や配置長さなどの検討を行い、SDPR による予防保全対策の合理的設計システムの構築を目指していきたい。

参考文献

- 1) 大窪克己, 浜崎智洋, 北村佳則, 稲垣太浩, 濱野雅裕, 佐伯宗大, 龍岡文夫: 高速道路盛土の大規模地震時の耐震性検討(その 2)~変位量による耐震性能評価法の検討~, 第 39 回地盤工学研究発表会講演集, No. 882, pp. 1761-1762, 2004.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会: 報告書, 2014.
- 6) 西日本高速道路(株): <http://corp.w-nexco.co.jp/corporate/release/hq/h28/0330c/>, 2016.3.
- 7) 松坂敏博, 森山陽一, 小笹浩司, 太田秀樹, 藤野陽三, 宮川豊章, 西村和夫: 高速道路の構造物における大規模更新および大規模修繕の導入と課題, 土木学会論文集 F4 (建設マネジメント), Vol. 73, No. 1, pp. 1-18, 2017.
- 8) 下間英, 前田賢悟, 本多剛, ORENSE P. Roland, 東畑郁生: 降雨による斜面崩壊の予測に関する模型実験, 第 37 回地盤工学研究発表会講演集, No. 1084, pp. 2159-2160, 2002.
- 9) 地盤工学会: 地震と豪雨・洪水による地盤災害を防ぐために-地盤工学からの提言-, 2009.
- 10) 鶴飼恵三, 祭飛, 若井明彦, 坂上最一: 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.
- 11) 秋田剛, 常田賢一: 既設道路盛土の安定性向上のための排水パイプの適用性の検証, 近畿地方整備局研究発表会, 防災・安全部門, No. 22, 2012.
- 12) 渡邊論, 西田幹嗣, 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講演集, No. 571, pp. 1141-1142, 2013.
- 13) 藤岡一頼, 大窪克己: 高速道路土工部における降雨災害分析, 第 27 回日本道路会議, 2007.
- 14) 土木学会: 回転圧入鋼管杭(NS エコスバイラル)の設計施工法に関する技術評価報告書, 技術推進ライブラリーNo. 7, 2015.
- 15) 荒井昭浩, 森川脩之, 竹山智英, 日下部治, 佐伯英一郎, 澤石正道: 高地下水面を有する盛土構造物の崩壊機構の把握と鋼管杭を応用した耐震性改善の提案, 第 46 回地盤工学研究発表会講演集, No. 551, pp. 1107-1108, 2011.
- 16) 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実験, 地盤工学ジャーナル, Vol. 11, No. 3, pp. 215-228, 2016.
- 17) 中村大樹, 笠間清伸, 浜崎智洋, 古川全太郎: 穴あきパイプを挿入した盛土の浸透流解析, 第 7 回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp. 217-222, 2014.
- 18) 古川全太郎, 笠間清伸, 浜崎智洋, 中村大樹: 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, 第 8 回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp. 235-240, 2016.
- 19) 西日本高速道路(株): 切土補強土工法設計・施工要領, pp. 33, 2007.
- 20) 地盤工学会: 地盤調査の方法と解説, pp. 310, 2013.
- 21) 気象庁: 確率降水量の推定方法, http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/riskmap/cal_qt.html, 2017.3.

- 22) 地盤工学会：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.
- 23) Ang, A. H.-S. and Tang, W. H. : *Probability Concepts in Engineering*, John Wiley & Sons, 2007. (伊藤學, 亀田弘行, 能島暢呂, 阿部雅人 訳：土木・建築のための確率・統計の基礎, pp. 361-364, 丸善, 2007.)
- 24) van Genuchten, M. Th. : A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 44, pp. 892-898, 1980.

(2017. 4. 11 受付)

FIELD TEST FOR EMBANKMENT REINFORCEMENT USING SPIRAL BLADED DRAIN PIPES

Tomohiro HAMASAKI, Kiyonobu KASAMA, Satoshi TAYAMA, Yoshito MAEDA,
Kenji MATSUKATA and Ryohei AKIYOSHI

The purpose of this study is to develop a new earth reinforcement technology using spiral bladed drain pipes called “SDPR method”, which has both functions of an earth reinforcement to increase a pulling resistance with the spiral shape blades and a drainage pipe to lower a ground water level in the embankment.

This paper summarizes the field test results of pull-out test and the observation of water retention characteristics for the expressway embankment with SDPRs. The pull-out test confirms that the friction resistance between the single SDPR and ground can be provided for the stability design of the embankment with SDPRs. The field observation of suction and volumetric water content in the embankment with/without SDPRs confirms the effectiveness of the SDPR method about the drainage performance, lowering of the ground water level and the quick restoration of the suction.