

疎水性安定処理材の土木分野への適用性について

A Study on the Application of Hydrofugal Ground Improvement to Civil Engineering Works

照井 秀幸 岡本 道孝¹⁾ 上本 勝広
三上 大道 川野 健一²⁾

要 約

我が国で固結工法による地盤安定処理を行う場合、一般にセメントや石灰などの固化材が用いられる。一方、土に疎水性を付与する新たな添加材（疎水性安定処理材）が開発されており、海外では、未舗装道路やあぜ道に対する路盤補強材として試験的な適用が進められている。この疎水性安定処理材に関する用途開発の一環として、地盤安定処理材、スレーキング抑制材、および法面保護材としての適用性について実験的に検討した。本報ではその検討結果を報告する。

目 次

- I. はじめに
- II. 安定処理工法
- III. スレーキング抑制工法
- IV. 法面保護工法
- V. おわりに

I. はじめに

我が国で固結工法による地盤安定処理を行う場合、一般にセメントや石灰などの固化材が用いられる。一方、土に疎水性を付与する新たな処理材（疎水性安定処理材）が開発されており、海外では未舗装道路やあぜ道などの路盤補強材として試験的な適用が進められている。この疎水性安定処理材（以下、当処理材とする）は、シリコン系化合物の一種であるカリウムメチルシリコネートを主成分とした液体であり、固体の処理材に比べ、土への散布や混合がしやすいことが特徴である。また、当処理材は、土との混合中に、空気中の二酸化炭素と反応して疎水性の架橋構造を形成する（Fig.1）。この架橋構造は、大気圧下では水滴を弾く疎水性を有する。なお、当処理材は使用前の液体状の時は強アルカリ性を示すが、架橋構造形成後は中性となる。この疎水性安定処理材に関する用途開発の一環として、我が国の、地盤安定処理材、スレーキング抑制材、および法面保護材としての適用性について実験的に検討した。

II. 安定処理工法

1. 概 要

当処理材は、これまでに海外で路盤道路の安定処理に用いられた実績がある。我が国で固化材を用いた安定処理土を強化路盤として

適用する場合における主な品質規格は、所定の強度を有することである。そこで、当処理材による安定処理土が我が国における強化路盤工法に必要とされる強度を確保可能かを実験的に検討した。

2. 疎水性能の確認

供試体は、当処理材の添加量を 0, 2, 4, 60 m^3 の 4 水準とし、締固めエネルギー1Ec で突固めて作製した。Photo 1 は、当処理材にて安定処理した購入砕石（C-40）供試体の下端 1cm を水浸させてから、5 時間が経過した後の状況である。供試体の観察状況から、添加量 0, 2, 40 m^3 では毛細管現象によって供試体が吸水していることが確認された（Photo 1 赤丸）。一方、添加量 60 m^3 の供試体で

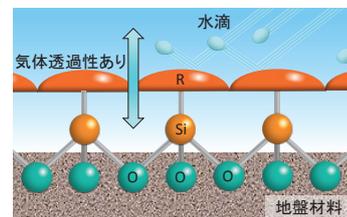


Fig.1 改質原理
(Improvement Principle)

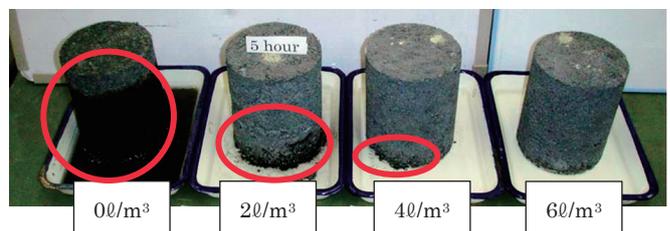


Photo 1 疎水処理供試体の吸水状況（5時間後）
(Water Absorption Status of Specimen (After the five hours))

1) 土木営業本部 Civil Engineering Business Development Division

2) 九州支店 Kyushu Branch

キーワード: 疎水性地盤安定処理材, 安定処理工法, スレーキング抑制工法, 法面保護工

Keywords: hydrofugal ground improvement, stabilization method, control method of slaking, slope protection work

はその色調から、供試体の吸水はほとんど認められない。このように当処理材との混合による疎水性の付与によって、土の吸水性を変化させられることが分かった。

3. 強度の確認

強度試験の条件を Table 1 に示す。供試体寸法を考慮して、最大粒径 26.5mm に粒度調整した碎石に所定量の疎水材、水を添加して安定処理土を作製した。その後、舗装調査・試験法 E011 (A 法) ¹⁾ に準拠し、φ100mm×h127.3mm のモールドを用いて、締固めエネルギー1Ec の突固めによって供試体を作製した。本検討では、水浸養生が強度に及ぼす影響を確認するため、7日間20℃で気中養生した供試体、ならびに6日間の20℃気中養生後に1日の20℃水浸養生を行った供試体を対象として、一軸圧縮試験を実施した。なお、後者は舗装調査・試験法 E013 (セメント安定処理土) ¹⁾ の養生方法を参考としている。試験結果を Fig.2 に示す。気中養生のみ実施したケースでは、6ℓ/m³ までは添加量増加に伴い一軸圧縮強さが増加したが、それより添加量を多くしても一軸圧縮強さに明確な変化はみられなかった。これは、母材である碎石の物理特性や供試体作製時の初期含水比 (5.5%) に応じて、固結に寄与する疎水材の添加量に上限値が存在し、それを上回る量の処理材を添加しても、処理材が固結に寄与しにくくなるためと考えられる。一方、6日気中養生後に1日水浸させた供試体では、添加量 20ℓ/m³ まで添加量の増加に従って一軸圧縮強さが増加した。ただし、7日気中養生した供試体と比べると一軸圧縮強さは総じて小さく、添加量が少ない領域では水浸の影響によって強度が低下したと考えられる。一方で、添加量を 20ℓ/m³ まで増加させると養生条件が強度に及ぼす影響はほとんど見られなくなった。また、添加量が 10ℓ/m³ 以上になるとセメント安定処理路盤の品質基準 (0.98N/mm²) を満足しており、当処理材による安定処理土は、安定処理路盤材料として求められる強度性能を確保できることが分かった。

4. 耐久性の確認

当処理材で安定処理した碎石の強度の耐久性を確認した。耐久性試験の試験条件を Table 2 に示す。試験試料は、供試体寸法 (φ50mm×h100mm) と前述の試験結果を踏まえ、最大粒径 9.5mm の碎石に当処理材を 10ℓ/m³ 添加して安定処理土を作製し、これを締固めエネルギー1Ec で突固めて供試体を作製した。本検討では、乾湿の耐久性を確認するため、7日間の水浸養生と気中養生を複数回、交互に繰返した供試体 (交換養生)、ならびに所定の日数まで 20℃の水中で養生を実施した供試体 (水浸養生) を対象として一軸圧縮試験を実施した。試験結果を Fig.3 に示す。なお、Fig.3 には、参考として 20℃気中養生を 7日間実施した供試体の試験結果も併せて記載した。水浸養生供試体の一軸圧縮強さは前述したように気中養生供試体より小さくなった。但し、交換養生供試体の一軸圧縮強さは、気中供試体とほぼ同等である。このことから、当処理材による安定処理土は、降雨などで一時的に間隙水が増加することで強度が低下しても、排水に伴い強度が回復し、強度低下は一時的なものと考えられる。

5. まとめ

当処理材により疎水を付与した安定処理土は、乾燥状態では安定処理路盤材料として十分な強度を有することが分かった。また、一時的に水浸した場合においても、排水に伴い強度は回復すると考えられる。

Table 1 一軸圧縮試験条件

(Test Condition of Unconfined Compression Test)

項目	内容
試験試料	碎石 (-26.5mm)
含水比	5.5% (作製時)
添加量	6条件 : 0,2,4,6,10,20ℓ/m ³
養生条件	2条件 20℃気中7日, 20℃気中6日+20℃水浸1日
試験数量	3試料/1条件
供試体寸法	φ100mm×h127.3mm

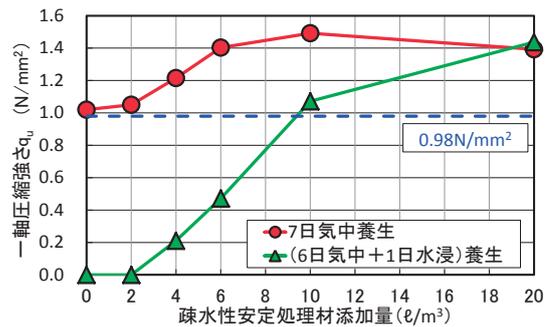


Fig.2 一軸圧縮試験結果

(Result of Unconfined Compression Test)

Table 2 耐久性確認試験条件

(Test Condition for Durability Check)

項目	内容
試験試料	碎石 (-9.5mm)
含水比	7.5% (作製時)
添加量	10ℓ/m ³
試験数量	3試料/1条件
養生条件	2条件 水浸養生 : 20℃水浸養生を実施し、 所定日数経過後に試験 交換養生 : 20℃水浸7日, 20℃気中7日を所定 日数まで繰返し、気中養生後に試験
供試体寸法	φ50mm×h100mm

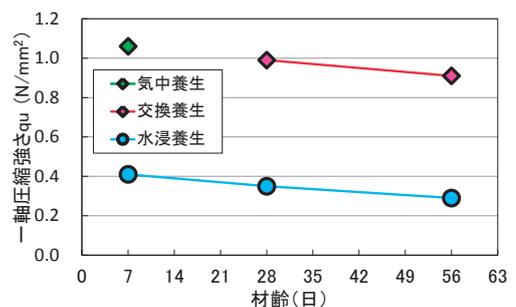


Fig.3 耐久性に関する一軸圧縮試験結果

(Result of Unconfined Compression Test for Durability)

Ⅲ. スレーキング抑制工法²⁾

1. 概要

脆弱な堆積岩などの軟岩が水浸すると土粒子の結合力が破壊されて泥状化、あるいは細粒化する現象をスレーキング現象と呼び、この対策としてモルタル吹付けによる表面保護などが実施される。これは、降雨による吸水と晴天による乾燥の影響を軽減するものだが、例えば、モルタル吹付けに代わり、表面に疎水性を付与することによって、その機能を代替できる可能性がある。そこで、脆弱岩へのスレーキング抑制を目的とした疎水処理の成立性について検討した。

2. 岩石の促進スレーキング試験

(1) 試験条件

当処理材によって疎水処理した試料を対象として、岩石の促進スレーキング試験 (JGS2125-2009)³⁾ を実施し、スレーキング現象の抑制効果について検討した。試験条件を Table 3 に、供試体作製方法を Fig.4 に示す。供試体は、試験試料である D 級泥岩を当処理材に 10 秒浸漬させた後、40℃の恒温庫で乾燥させて疎水処理した岩石 (50mm×50mm×20mm 程度) を供試体とした。当処理材の濃度は、希釈倍率 10 倍、2 倍、1 倍 (原液) の 3 条件とし、比較のために疎水処理を施していない試料についても試験を行った。また、供試体は試験試料のばらつきを考慮して 1 濃度につき 25 個用意し、全供試体に対して 5 回乾湿繰返し過程を付与した。なお、スレーキングの程度は、促進スレーキング試験で供試体の性状変化を表す指標として用いられる地盤工学会のスレーキング区分を用いた。スレーキング区分は、0 から 4 までの 5 つの区分があり、数字が大きいほど性状変化の程度が大きいことを表す。

(2) 試験結果

乾湿繰返し回数ごとのスレーキング区分一覧、およびスレーキング区分平均値を Fig.5 に、各濃度のスレーキング区分平均値のまとめを Fig.6 に示す。乾湿繰返し回数が増えるほどスレーキングは進行する。一方、当処理材の濃度が高いほど、スレーキングの進行を軽減できる (スレーキング抑制効果が高い) ことが分かった。

なお、当処理材の濃度が高い場合であっても、一部の供試体でスレーキング区分が大きくなる場合があった。このような供試体に共通する特徴として、初期の段階で供試体表面にクラックが入り、このクラックから崩壊が進行、スレーキング区分が大きくなっている。一方、クラック発生直後の供試体写真を確認すると、このクラック以外では疎水性を保持していることがわかる (Photo 2)。

当処理材を用いた疎水処理によって形成される架橋構造は雨滴などを弾く効果を有するが、一定の水圧が作用する条件では、水の浸透を防ぐことができない。このため、促進スレーキング試験における 24 時間の水浸過程において岩石中に水が浸透し、スレーキングが生じた可能性も考えられる。また、当処理材の粘性は水の約 50 倍であり、目視では確認が困難な潜在クラックに対して当処理材の浸透が不十分な可能性も考えられる。

Table 3 スレーキング試験条件
(Test Condition for Slaking)

項目	内容
試験試料	D 級泥岩
濃度	4 条件 無処理, 10 倍希釈, 2 倍希釈, 1 倍希釈 (原液)
試験数量	100 個, 25 個/1 条件
乾湿繰返し回数	5 回
評価方法	スレーキング区分

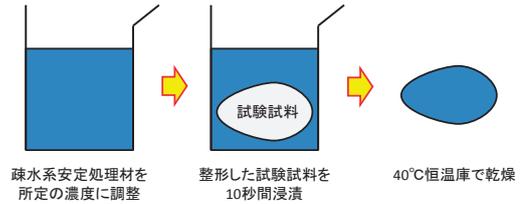


Fig.4 供試体作製方法
(Method for Manufacturing Specimen)

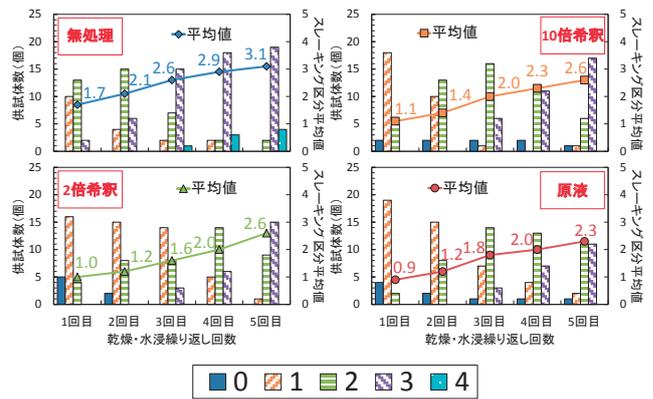


Fig.5 スレーキング区分
(Slaking Classification)

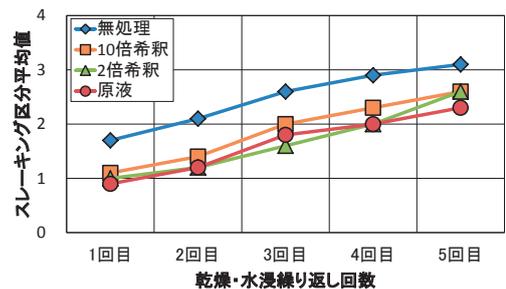


Fig.6 スレーキング区分平均値
(Mean of Slaking Classification)



Photo 2 スレーキング試験後供試体
(Specimen after Slaking Test)

Table 4 浸透厚さ確認試験条件
(Test Condition for Penetration Thickness Check)

項目	内容
試験試料	D 級泥岩
濃度	3 条件 (1/10, 1/2, 1/1 (原液))
試験試料の含水状態	2 条件 (表面飽和, 乾燥)
試験数量	18 個 3 個/1 条件×6 条件

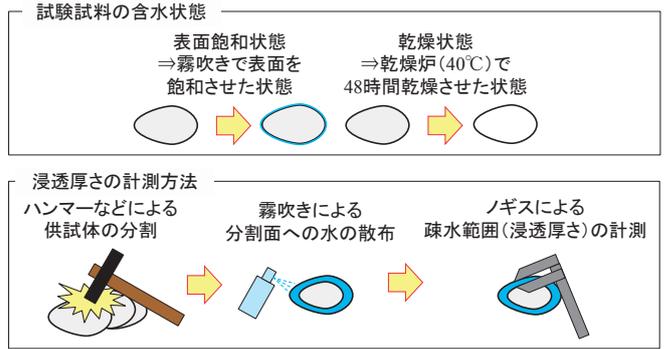


Fig.7 浸透厚さ確認試験

(Penetration Thickness Check Test)

3. 浸透厚さ確認試験

前述の試験結果を踏まえ、脆弱岩へのスレーキング抑制を目的とした疎水処理工として適当な条件を確認するため、脆弱岩への当処理材の浸透状況(浸透厚さ)について検討した。試験条件を Table 4, および Fig.7 に示す。試験試料は D 級泥岩とし、処理材の粘性が浸透厚さに及ぼす影響を確認するため、当処理材の濃度は Table 3 の無処理を除く、10 倍希釈、2 倍希釈、1 倍希釈(原液)の 3 条件とした。それぞれ、処理液の粘性は 5 倍、25 倍、50 倍となる。また、対象試料の含水状態により当処理材の浸透厚さが変化すると考え、対象試料の含水状態を、霧吹きで表面を飽和させた状態(表面飽和状態)、乾燥炉(40℃)で 48 時間乾燥させた状態(乾燥状態)の 3 条件で実施した。各条件で作製した供試体を、ハンマーやノミを用いて分割し、この分割面に霧吹きで水を散布して、疎水性を確認できる範囲の厚さをノギスで計測することで、当処理材の浸透厚さを計測した。なお、供試体の数量は、1 条件につき 3 個とした。各条件で計測した当処理材の浸透厚さ平均値を Table 5 に示す。これより当処理材の濃度を薄くすることで、浸透厚さが大きくなること分かる。これは、希釈により当処理材の粘性が小さくなった効果と考えられる。また、10 倍希釈のケースでは、浸透厚さが大きくなるが、処理材の粘性が大きいケース(2 倍希釈, 原液)では試料の含水状態に依存しない結果となった。浸透厚さは当処理材の粘性のみならず岩石そのものの透水性などにも依存すると考えられるが、今回実施した試験結果の範囲では、粘性の高い材料を用いて岩石で構成される法面の疎水処理を行う場合、処理面の乾燥工程は特に重要と判断される。

Table 5 浸透厚さ確認試験結果

(Test Result for Penetration Thickness Check)

		試験試料の含水状態	
		表面飽和状態	乾燥状態
濃度	原液	0.8 mm	0.8 mm
	2 倍希釈	1.0 mm	1.0 mm
	10 倍希釈	1.0 mm	1.3 mm



Photo 3 暴露試験

(Photo of Exposing Test)

4. 屋外暴露試験

スレーキング対策としての疎水効果の屋外耐久性を確認するため屋外暴露試験を行った。供試体は、「3. 浸透厚さ確認試験」のうち、当処理材がより浸透しやすいと考えられる乾燥状態の試験条件を対象に実施した。屋外暴露試験状況を Photo 3 に、暴露試験結果を Photo 8 に示す。10 倍希釈したケースにおいては、屋外暴露開始から 21 日後には疎水性が低下し、水が浸透していることがわかる。一方、2 倍希釈、および原液では、約 500 日まで疎水性を保持できていたが、徐々に疎水性が低下し、約 700 日経過後には岩石表面で水の浸透が生ずる結果となった。屋外での利用については、疎水性が継続的に低下する可能性を踏まえ、使用方法を検討する必要がある。

	暴露直後		時間経過後	
原液		疎水性あり		700日後 水が浸透
2 倍希釈		疎水性あり		700日後 水が浸透
10 倍希釈		疎水性あり		21日後 水が浸透

Photo 4 暴露試験結果

(Result of Exposing Test)

5. まとめ

脆弱岩のスレーキング対策を目的とした、疎水処理工の成立性について検討を実施した。本検討から、疎水性は条件を整えることで約 500 日保持できるが、紫外線の影響などにより疎水性が継続的に低下する傾向にあることから、当面は供用期間がある程度限られている仮設的な保護工としての適用が妥当と考えられる。

IV. 法面保護工法

1. 概要

近年、広域の土地改変を伴う造成工事において、ゲリラ豪雨などによる法面の侵食・崩壊や濁水発生の問題が顕在化している。当処理材を用いた対策として、例えば、法面に疎水処理した砂材材料で保護層を施工して、法面の表層を保護し、法面浸食・崩壊を抑制する方法が考えられる。この法面保護工の適用性について検討した。

2. 簡易実験

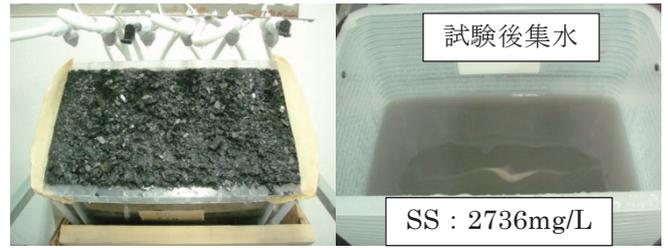
模擬法面を対象とした簡易実験によって当工法の成立性を確認した。模擬法面は、疎水処理した碎石（9.5mm以下）を締め固めエネルギー1Ecで突固めて作製した。この模擬法面に、災害復旧事業において異常な天然現象と定義される時間雨量 20mm/hr⁴⁾の降雨を1時間継続させ、法面の浸食状況を確認した。また、供試体表面を流れる水を集め、建設工事における環境管理値の一つである濁水の浮遊物質量SSを測定した。試験結果をPhoto 5に示す。Photo 5から、疎水処理を行うことで、降雨による供試体表面の浸食はほとんど見られず、また、法面流下水の浮遊物質量SSも大幅に減少することが分かった。

3. 屋外暴露試験

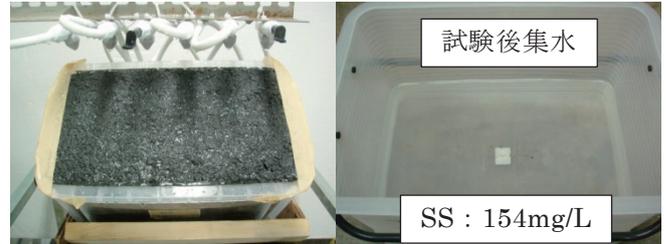
法面保護工としての耐久性を確認することを目的に、当処理材により疎水性を付与した山砂を締め固め度95% ($\rho_d = 1.616 \text{ g/cm}^3$)で突固めて供試体を作製し、屋外暴露試験を実施した。なお、山砂に対する当処理材の添加量は「III. 安定処理工法」において、養生条件が強度に及ぼす影響がないとした 20l/m³とし、水滴の接触角の経時変化、および目視による観察を実施した。なお、水滴の接触角とは、様々な材料に対する疎水性の判断指標として提案されているものであり、接触角 θ が90°以上であれば疎水性があると判断されている (Fig.8) ⁵⁾。暴露試験状況をPhoto 6に、水滴の接触角と暴露日数の関係をFig.9に示す。水滴の接触角は暴露日数の経過とともに下がる傾向を示すが、暴露日数が120日を経過しても接触角 θ の平均値は90°を上回っており、十分な疎水性を保持していることが分かった。また、放置期間中に遭遇した最大の雨量強度は11.5mm/hrであり、この程度の降雨などによる浸食の影響は確認できなかった。また、乾燥などによるひび割れの発生も確認できず一定の耐久性を有することを確認できた。

4. 模型降雨実験

疎水処理した山砂を用いて模型斜面を作製し、降雨の浸透、および降雨による侵食について確認した。模型斜面をFig.10に示す。模型斜面は、添加量 20L/m³で疎水処理した山砂を、1.0m×0.15mの型枠内に「3. 屋外暴露試験」と同密度 ($\rho_d = 1.616 \text{ g/cm}^3$)で突固めて作製した。また、浸透した水分量を計測するため、模型斜面の深さ5cm地点に、土壌水分計を複数設置した。この模型斜面を1:1.8勾配 (約29°)に傾け、国内観測史上最大雨量 (153mm/h, 千葉県香取, 1999年)と同程度の降雨を1時間継続させた。試験中の土壌水分計計測結果をFig.11に、降雨実験前後の模型斜面表面をPhoto 7に示す。降雨実験中、模型斜面内部に設置した土壌水分計が反応しておらず、雨水の浸透は認められないことが分かる。また、降雨によって表層の弱部が僅かに流出しているが、保護層厚が極端に変化するほどの侵食は生じていない。なお、暴露試験は約120日で終了しているが、「IV. 脆弱岩のスレーキング対策 4. 屋外暴



(a) 疎水処理を未実施の場合



(b) 疎水処理を実施した場合

Photo 5 侵食性確認実験結果 (Result of Erosion Check)

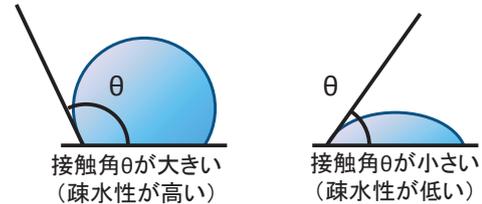


Fig.8 水滴の接触角 (Contact Angle of Water Drop)



Photo 6 暴露試験 (Photo of Exposing Test)

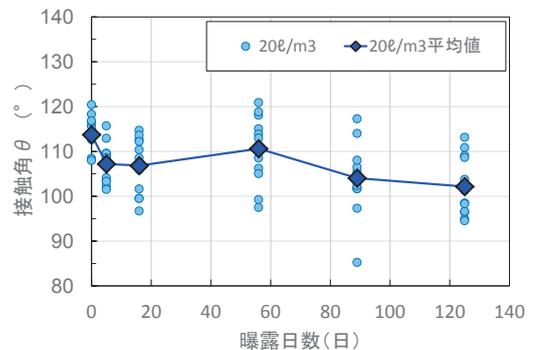


Fig.9 水滴の接触角確認結果 (Contact Angle Confirmation Result of Water Drop)

露試験」の結果を踏まえると、約 500 日目では疎水性を保持できる可能性がある。

5. まとめ

当処理材を用いた法面保護工として、疎水処理した砂層を法面に施工して、法面の浸食、および濁水対策として用いる工法を検討した。各種実験により、疎水処理した砂の耐久性、および耐浸食性を確認、法面保護工として適用可能性があることが分かった。

V. おわりに

地盤に疎水性を付与する新たな添加材（疎水性安定処理材）に対し、安定処理材、スレーキング抑制材、および法面保護工としての適用性について検討した。その結果、路盤の補強や仮設的な法面保護工などに対して一定の効果を有することが確認できた。今後は実施工への展開を図る予定である。

謝 辞

本検討を行うにあたり疎水性安定処理材の提供および貴重なご意見をいただいた旭化成ワッカーシリコン株式会社の方々に謝意を表します。

参考文献

- 1) 舗装調査・試験便覧 第 4 分冊, 社団法人日本道路協会, 2007, pp.29-32,pp.38-42.
- 2) 照井秀幸ほか, 撥水材による軟岩のスレーキング抵抗性の改善, 第 50 回地盤工学研究発表会 (札幌), 2015.9.
- 3) 地盤材料の試験と解説, 社団法人地盤工学会, 2009, pp.287-289.
- 4) 農林水産省 HP 「<http://www.maff.go.jp/index.html>」
- 5) Sergio et al., Processes in model slopes made of mixtures of wettable and water repellent sand, Engineering Geology No.196, 2015, pp.47-58.

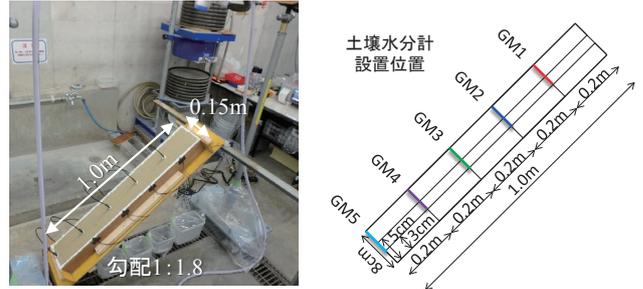


Fig.10 降雨実験模型
(Model of Rainfall Experiment)

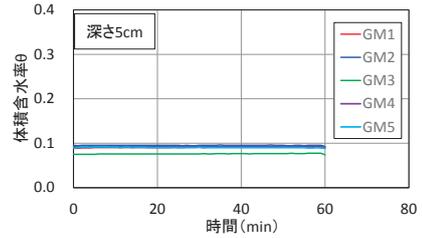


Fig.11 土壌水分計測定結果
(Result of Soil Moisture Meter)



Photo 7 降雨実験模型表面状況
(Surface Condition of Experiment Model)

A Study on the Application of Hydrofugal Ground Improvement to Civil Engineering Works

Hideyuki Terui, Michitaka Okamoto¹⁾, Katsuhiko Uemoto, Tomonori Mikami, and Kenichi Kawano²⁾

In Japan, to stabilize soil, solidifying materials such as cement and lime are generally used. The authors have developed a stabilizer that provides the soil with hydrofugal properties, and this is now being used in road improvement works overseas. This study of the applicability of this stabilizer to civil engineering works focused on its applicability as a ground stabilizer, a slaking inhibitor, and a slope-protecting material. The results of the study are described in this report.