親水性ポリウレタン樹脂を用いた有機系スラリーによる 浸透固化処理砂の耐紫外線性評価および制御に関する実験的研究[†]

呉 智 仁* 岩 下 健太郎**
呉 智 深*** 稲 垣 廣 人*

Experimental Study on Evaluation and Control of Ultraviolet Resistance of Sand Stabilized with Organic Slurry Containing Hydrophilic Polyurethane

by

Zhiren Wu*, Kentaro IWASHITA**, Zhishen Wu*** and Hirondo INAGAKI*

Slurry scattering technique has been widely accepted to fix moving sand. By using organic slurry that has high water retention capacity, it seems that the vegetation on the desert may be realized. However, the organic material in the slurry, for example hydrophilic polyurethane, is easily decomposed by ultraviolet irradiation. In addition, the strength of ultraviolet ray is extremely strong on the desert. This paper is to examine the ultraviolet resistance of sand stabilized with organic slurry containing hydrophilic polyurethane in terms of its strength and decomposition rate. Ultraviolet resistance of the stabilized sand is improved by the addition of emulsified asphalt. Although all the asphalt emulsions used in the experiment have similar improving effects, the nonion emulsified asphalt is considered to be one of the best solution due to its neutrality. It is confirmed that the nonion emulsified asphalt is one of the best solution with neutrality. Moreover, the ultraviolet resistance of the stabilized sand can be controlled by changing the mixing ratio of emulsified asphalt. By mixing the emulsified asphalt in the slurry with the ratio of 5%, 6-8%, and 9%, the weight loss rate due to the ultrasonic irradiation was 1.5–1.8times, 2.1–5.4times, and 4.7–18.2times smaller respectively.

Key words: Desert landscape, Organic slurry, Hydrophilic polyurethane, Ultraviolet resistance, Emulsified asphalt

1 緒 言

世界各地の牧草地や市街地で移動砂漠が発生し、急速に拡大してきており、生活圏の縮小や気候の変動といった深刻な問題が生じている。このような移動砂漠の拡大を防止するためには、まず、飛砂による砂の移動や植物の根の露出を防止することが重要である。現在、移動砂漠における飛砂を防止する技術として、砂丘の周囲に植林する方法や、藁や石を格子状に設置する方法、そして疎水性粒子からなる疎水層を地表から所定の深さに設置する方法などが主流となっている。^{1), 2)}しかし、最前者の方法では豊富な地下水を必要とすること、後2者では風食が激しい地域においては完全に風食を食い止めることができないこと、そして最後者の方法では施工性と経済性の観点から広大な砂漠への適用には難があることといった深刻な問題がある。そこで、著者らは土壌安定剤や飛砂防止剤などを地表面に散布することにより砂を固めて飛びにくくする方法(覆砂工と呼ばれる)に着目し、親水性ポリウレタン樹脂を用いた有機系スラリーを覆砂材に用いることで高度化した覆砂技術を開発した。³⁾親水性ポリウレタン樹脂を用いた有機系スラリーを散布することで砂の表面に一定以上の厚み(例えば5～50mm)の固

化層が形成され、風食に対する表面硬度を確保できる。また、固化層は多孔質な性状となるため、例えば地下水が豊富になく、風食が激しい地域であっても保水性が確保され、植生緑化が可能となる。さらに、砂粒の移動メカニズムを究明した河田ら^{3), 4)}の研究によると、粒径、密度、そして含水比が高いほど飛砂が防止されるとされており、理に適っている。一方、表面強度および経済性に関する検討により、有機系スラリーに占める親水性ポリウレタン樹脂濃度は固化層の強度確保の観点から最小2%、経済性の観点から最大7%に設定した。この場合、多孔質な固化層には植生緑化を行う上で十分な空隙が確保されるため、かなり大きな保水性が得られ、工程や散布装置の工夫によって種子吹きつけによる簡便で急速な植生緑化が可能になっている。また、親水性ポリウレタン樹脂のような有機材料は砂漠のように極めて紫外線照射量が大きい地域では時間の経過とともに分解されるため、植生緑化が完了した後で取り除く必要がないということも特長の一つである。ただし、植生緑化が完了する以前に分解しないように耐紫外線性を制御することは本技術において重要な前提条件である。そこで、本研究では、親水性ポリウレタン樹脂を用いた有機スラリー固化処理砂

[†] 原稿受理 平成20年2月12日 Received Feb. 12, 2008 ©2008 The Society of Materials Science, Japan

* JCK(株) 〒446-0071 安城市今池町, JCK Co., Ltd., Imaike-cho, Anjo, 446-0071

** 茨城大学大学院理工学研究科 VBL 〒316-8511 日立市中成沢町, Dept. of Urban & Civil Eng., Ibaraki Univ., Nakanarusawa-cho, Hitachi, 316-8511

*** 正会員 茨城大学工学部都市システム工学科 〒316-8511 日立市中成沢町, Dept. of Urban & Civil Eng., Ibaraki Univ., Nakanarusawa-cho, Hitachi, 316-8511

の耐紫外線性を促進紫外線照射試験により評価し、紫外線耐久時間を明確に示した。また、アスファルト乳剤をスラリーに混入することで固化砂の表面色を黒に近づけることで耐紫外線性の制御を図った。最後に、以上の知見に基づき、砂漠の覆砂材として適した親水性ポリウレタン樹脂の有機系スラリーへの混入率およびアスファルト乳剤の種類および混入率を提案した。

2 実験方法

2・1 使用材料

砂試料としては豊浦砂を、水としては水道水をそれぞれ用いた。また、有機系スラリー作製に使用する親水性ポリウレタン樹脂としては、親水性プレポリマーを主成分とし、加水反応型、親水性で、土粒子への浸透性に優れており、比較的安価で土壌安定剤や湧水・漏水防止剤として一般に用いられているものを用いた。⁵⁾さらに、アスファルト乳剤⁶⁾には一般にアスファルト粒子の電荷(ノニオン系, カチオン系), 用途(浸透用, 混合用), そして改質(ゴム入りなど)の是非の観点で分類されており、このうち下記の4種類を選定して実験を行った。

- ① PKR (カチオン系, 浸透用, 改質(ゴム入り))
- ② PK3 (カチオン系, 浸透用)
- ③ MK2 (カチオン系, 混合用)
- ④ MN1 (ノニオン系, 混合用)

なお、『アスファルト乳剤の基礎と応用技術』(日本アスファルト乳剤協会)⁷⁾によれば、カチオン系の乳剤は電荷を持っており酸性であり、ノニオン系の乳剤は電荷を持たず中性である。

2・2 試験体の詳細

試験体の寸法は直径 50mm × 高さ 50mm とした。作製方法は、① モールド(直径 50mm × 高さ 100mm)の内面に離型フィルムを設置し、やや多めに砂試料を充填する。そして、周囲を軽く打撃して締め固める(間隙比は 40% を基準)。② 所定量のアスファルト乳剤と水を事前に混ぜ合わせておき、これに、所定量の親水性ポリウレタン樹脂を混ぜ合わせて完成した有機系スラリーをモールド内に注入する(7.5l/m² にあたる量を注入)。③ 30 分程度経過し、硬化状態で試験体質量は 150g ± 1g になった。なお、NEDO 報告書⁹⁾によれば、中国青海湖周辺モデル地域での試験施工においては固化層の強度や経済性を考慮して単位面積あたりの散布量を 3l/m² としており、この場合に平均的に 20mm 程度の深さで浸透するとされているが、本研究では注入量を増加させたために、試験体の下面まで完全に浸透した。ここで、深さ 50mm の試験体であることから 1m² あたりの体積は 50l、そしてこの内の空隙分は 20l であり、有機系スラリー注入分の体積(7.5l)を差し引いて 12.5l が残留した空隙量となるため、完成した試験体の間隙比は 25% となる。一方、実験のパラメータは ① 混入するアスファルト乳剤の種類、② 混入するアスファルト乳剤の濃度とした。試験体の作製に使用した有機系スラリーに占める親水性ポリウレタン樹脂とアスファルト乳剤の種類と量を Table 1 に、試験体の外観写真を Fig. 1 にそれぞれ示す。

Table 1 Summary of test soil stabilized with hydrophilic polyurethane and emulsified asphalt.

No.	Mass content of hydrophilic polyurethane (%)	Type of emulsified asphalt	Mass content of emulsified asphalt (%)
P3%-A0%	3	None	None
P5%-A0%	5	None	None
P5%-APR2%	5	PKR	2.0
P5%-APR2.5%	5	PKR	2.5
P5%-APR3.3%	5	PKR	3.3
P5%-APR5%	5	PKR	5.0
P5%-APR6%	5	PKR	6.0
P5%-APR7%	5	PKR	7.0
P5%-APR8%	5	PKR	8.0
P5%-APR9%	5	PKR	9.0
P5%-APR10%	5	PKR	10.0
P5%-APK5%	5	PK3	5.0
P5%-APK6%	5	PK3	6.0
P5%-APK7%	5	PK3	7.0
P5%-APK8%	5	PK3	8.0
P5%-APK9%	5	PK3	9.0
P5%-AMK5%	5	MK2	5.0
P5%-AMK6%	5	MK2	6.0
P5%-AMK7%	5	MK2	7.0
P5%-AMK8%	5	MK2	8.0
P5%-AMK9%	5	MK2	9.0
P5%-AMN5%	5	MN1	5.0
P5%-AMN6%	5	MN1	6.0
P5%-AMN7%	5	MN1	7.0
P5%-AMN8%	5	MN1	8.0
P5%-AMN9%	5	MN1	9.0
P2%-AMN7%	2	MN1	7.0
P3%-AMN7%	3	MN1	7.0
P4%-AMN7%	4	MN1	7.0
P6%-AMN7%	6	MN1	7.0

Fig. 1 Test Soil Stabilized with Hydrophilic Polyurethane and emulsified asphalt, MN1.

2・3 紫外線照射および水噴霧の方法

促進耐候性試験には CO.FO.ME.GRA 社製の強エネルギー型キセノンウェザーメータ Solarbox1500e⁸⁾を用いた。この試験装置は高光エネルギー可変型であり、通常のキセノンウェザーメータの放射照度より大きな 1000w/m^2 の放射照度が確保できるため、試験の促進性に優れている。供試体を試験機に設置した状況を Fig. 2 に示す。放射照度を 1000w/m^2 、設定雰囲気温度を 50°C （紫外線照射開始から 10 分程度経過後に 54°C で安定化した）とした。一方、分解の促進性向上を目的として、24 時間ごとに紫外線照射を停止し、 2m^2 量の水を噴霧した。ここで、中国青海省水利水電科学研究所の（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）、平成 19 年度提案型開発支援研究協力事業報告書⁹⁾によれば、中国青海湖周辺の移動砂漠における年間紫外線照射量は $607 \sim 720\text{kJ/cm}^2$ である。この値を 12 で除して 1 箇月分に換算すると $50.6 \sim 60.0\text{kJ/cm}^2$ である。一方、促進紫外線照射装置で 1000w/m^2 の放射照度で照射すると、24 時間の照射で 8.64kJ/cm^2 である。よって、 $140.6 \sim 166.7$ 時間の促進紫外線照射は移動砂漠での 1 箇月分に相当する。

2・4 計測、評価項目

試験開始から 24 時間ごとに試験機を停止し、供試体表面の砂に還元された箇所を粉塵吸引機で吸引したうえで質量を計測し、質量の減少量を計測した。ここで、試験体の促進試験前の質量は 150g となるように調整しつつ作製しており、この値で質量の減少量を除した値を質量減少率 (%) として評価指標の一つとした。また、山中式土壤硬度計を用いて各供試体で 3 回の計測を行い、その平均値を土壤硬度として評価指標の一つとした。

3 実験結果と考察

3・1 親水性ポリウレタン樹脂を用いた有機系スラリー固化体の耐紫外線性的実験的評価

親水性ポリウレタン樹脂を用いた有機系スラリー固化体の促進紫外線照射試験結果より、P3%-A0%、P5%-A0%、そして PKR アスファルト乳剤を用いた試験体に関する質量の減少率と紫外線照射時間の関係を Fig. 3 および Fig. 4 に示す。まず、P3%-A0% の試験結果において、25 時間経

Fig. 2 Accelerated ultraviolet irradiation testing machine (Solarbox1500e⁸⁾).

Fig. 3 Relationships between ultraviolet irradiation time up to 125h and weight loss of specimens with PKR.

Fig. 4 Relationships between ultraviolet irradiation time up to 424h and weight loss of specimens with PKR.

過後は定時間ごとの質量の減少量はほぼ一定となっており、試験体の表面から親水性ポリウレタンが分解され、質量が減少する速度はほぼ一定であることが明らかになった。次に、P5%-A0% を比較して、質量の減少速度が同レベルであることから、3～5% に設定した本研究の範囲では親水性ポリウレタン樹脂濃度は紫外線分解速度に影響しないことが実験的に明確となった。一方、Fig. 4 における P5%-A0% における試験結果より、移動砂漠での 1 箇月にあたる基準の 168 時間経過時に質量減少率は 19.7% であり、移動砂漠における 1 箇月程度に相当する紫外線照射時間であっても親水性ポリウレタン樹脂はかなり分解されることが明確となった。

3・2 アスファルト乳剤を混入した有機系スラリー固化体の耐紫外線性的実験的評価

まず、Fig. 3 において PKR アスファルト乳剤を 3.3% 以下しか含まない試験体においてはアスファルト乳剤混入の効果はほとんど得られないが、5% の場合に耐紫外線性が大きく向上し、10% の場合に飛躍的に向上しているこ

とがわかる。次に、Fig. 4において、その傾きから PKR 濃度が 5% の場合に耐紫外線性が 1.8 倍、6 ~ 8% の場合に耐紫外線性が 3.9 倍、PKR 濃度が 9% および 10% の場合に 7.7 倍になっていることがわかる。一方、山中式表面硬度低下率と照射時間の関係を Fig. 5 に示す。ここで、紫外線照射前の山中式表面硬度計により測定された密度は PKR 濃度が 0% の場合に 21 ~ 23mm、5 ~ 6% の場合に 23 ~ 24mm、そして、PKR 濃度が 7 ~ 10% の場合に 26 ~ 28mm であり、アスファルト乳剤濃度が大きいほど密度がやや大きくなることが実験的に示された。また、照射時間の増加とともに表面硬度が低下する傾向が確認され、表面硬度の低下率は PKR 濃度が 7 ~ 8% の場合に 50% 程度、PKR 濃度が 9 ~ 10% の場合に 30% 程度に抑制されることが実験的に示された。ただし、試験体の寸法がかなり小さいため、表面硬度の低下率がかなり増加してくると 2 つに割れてしまうため、正確に表面硬度を測定できなくなる。よって、本研究で用いたように小寸法の固化体で耐紫外線性を長期的に検討する場合の評価指標に表面硬度は適していないことが明確になった。

3・3 混入するアスファルト乳剤の種類と有機系スラリー固化体の耐紫外線性の関係に関する実験的検討

親水性ポリウレタン樹脂濃度を 5% で一定とし、アスファルト乳剤の種類の異なる試験体について、質量の減少率と紫外線照射時間の関係を Fig. 6, Fig. 7 および Fig. 8 に、168 時間経過時の質量減少率を Table 2 にそれぞれ示す。まず、P5%-A0% 試験体に関しては、アスファルト乳剤の種類ごとに改めて行っており、試験の再現性として、質量減少率において 5% 程度のばらつきがあることが確認された。次に、アスファルト乳剤の種類に関わらず、PKR を混入した試験体の場合と同様に質量の減少速度はほぼ一定であり、濃度が 5% で若干傾きが緩やかになっており、6 ~ 8% 濃度の場合により大きな効果が見られ、9% 濃度の場合に飛躍的に耐紫外線性が向上することが明らかになった。定量的には、Table 2 より、砂漠の 1 箇月分に当たる 168 時間経過時の質量減少率はそれぞれ

Fig. 5 Relationships between ultraviolet irradiation time and hardness degradation of specimens with PKR.

Fig. 6 Relationships between ultraviolet irradiation time and hardness degradation of specimens with PK3.

Fig. 7 Relationships between ultraviolet irradiation time and hardness degradation of specimens with MK2.

Fig. 8 Relationships between ultraviolet irradiation time and hardness degradation of specimens with MN1.

Table 2 Weight loss of specimens at ultraviolet irradiation time of 168h.

Type of emulsified asphalt	Content of emulsified asphalt (%)				
	5	6	7	8	9
	Weight loss (%)				
PKR	11.2	3.7	4.7	4.4	3.7
PK3	11.9	6.8	8.4	5.7	1.1
MK2	13.3	8.7	9.0	9.0	2.3
MN1	11.3	9.3	9.7	9.7	4.3

れ、アスファルト乳剤5%濃度で11.2～13.3%、6～8%濃度で3.7～9.7%、そして9%濃度で1.1～4.3%、そして、アスファルト乳剤を混入しない試験体と比べて、それぞれ56～69%、19～48%、そして、6～21%に制御されており、親水性ポリウレタン樹脂を含む有機系スラリーの耐紫外線性を飛躍的に向上させた上、かなり制御することができた。ただし、本研究は時間的な制約により短期間での検討に留まっており、今後の研究で、より長期間での検討を行い、以上の耐紫外線性をより詳細に検証することが重要である。一方、アスファルト乳剤の種類ごとの山中式表面硬度低下率と照射時間の関係を Fig. 9, Fig. 10, そして Fig. 11 に示す。これらの図より、アスファルト乳剤の種類に関わらず、照射時間の増加とともに表面硬度が低下する傾向が確認され、アスファルト乳剤濃度が大きいほど表面硬度の低下率が小さくなっているように見える。ただし、試験体の寸法がかなり小さく、表面硬度の低下率がかなり増加してくると2つに割れてしまうため、正確に表面硬度を測定できなくなる傾向はここでも確認された。

3・4 覆砂材として適したアスファルト乳剤の種類および混合量の提案

まず、アスファルト乳剤の種類については、以上の研

Fig. 9 Relationships between ultraviolet irradiation time and hardness degradation of specimens with PK3.

Fig. 10 Relationships between ultraviolet irradiation time and hardness degradation of specimens with MK2.

Fig. 11 Relationships between ultraviolet irradiation time and hardness degradation of specimens with MN1.

究成果により、アスファルト乳剤の種類は耐紫外線性の向上効果に影響しないことが明らかになったが、将来的に有機系スラリーに植物の種子や肥料を混入させて植物を生育させることが考えられるため、電荷を持たず、化学的中性のノニオン系のアスファルト乳剤（本研究ではMN1）が移動砂漠の覆砂材として適していると考えられる。次に、上記の実験的研究より、アスファルト乳剤を混入することにより、耐紫外線性が大いに抑制され、混入濃度を変化させることにより耐紫外線性をかなり制御できることがわかった。一方、植物がある程度生育した後では、固砂剤は分解された方が以後の植物の育成には優位であると考えられる。そこで、植物の生育時間に関する研究も進め、紫外線耐久時間と植物の生育時間を連動して最適化することで、より高度な砂漠緑化技術を構築できるものと考えられる。ただし、本研究は時間的な制約により短期間での検討に留まっており、今後の研究で、より長期間での検討を行い、より詳細な実験的検討を進めることが重要である。

4 結 論

本研究では、親水性ポリウレタン樹脂を用いた有機系スラリー固化処理砂およびアスファルト乳剤の混入により紫外線耐候性を制御した有機系スラリー固化処理砂の耐紫外線性を実験的に評価したうえで、覆砂材として適した有機系スラリーに占める親水性ポリウレタン樹脂の割合およびアスファルト乳剤の種類および混入量を提案した。本研究で得られた主な知見を以下に示す。

(1) 促進紫外線照射試験結果より、中国青海省青海湖周辺の移動砂漠における1箇月にあたる168時間経過時に質量減少率は19.7%であり、移動砂漠における1箇月程度に相当する紫外線照射時間であっても親水性ポリウレタン樹脂はかなり分解されることが明確となった。

(2) 親水性ポリウレタン樹脂濃度3%と5%の場合で比較した結果、紫外線耐久時間は同程度であることが実験的に示された。よって、有機系スラリーに占める親水性ポリウレタン樹脂濃度は3～5%の範囲で耐紫外線性にほとんど影響しないことが実験的に明確となった。

(3) アスファルト乳剤を5%濃度で混入することで、質量減少率がアスファルト乳剤を混入しない場合の56～69%、6～8%濃度で19～48%、そして9%濃度で6～21%に抑制されており、親水性ポリウレタン樹脂を含む有機系スラリーの耐紫外線性を飛躍的に向上させた上、かなり制御することができた。

本研究は時間的な制約により短期間での検討に留まっており、今後の研究でより長期間での検討を行い、より詳細な実験的検討を進めることが重要である。また、今後は親水性ポリウレタン樹脂の改質や、アスファルト乳剤の混入濃度をより大きくするなどの方法により、より耐紫外線性を向上させるとともに、植生に関する研究との連動により砂漠緑化技術の高度化を図りたいと考えている。

本研究の遂行にあたり、(独)新エネルギー・産業技術

総合開発機構(NEDO)の補助を受けた。また、東邦化学工業(株)には親水性ポリウレタン樹脂を、ニチレキ(株)には各種アスファルト乳剤をご提供いただいた。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) Chemical Society of Japan, "Desertification prevention research as interdisciplinary science", Chemistry & industry, Vol.61, No.2, pp.103-107 (2008).
- 2) K. Yoshikawa, N. Yamanaka and N. Ohte, "Nature and vegetation in the dry areas", (2004) Kyoritsu shuppan co., ltd..
- 3) Y. Kawata and Y. Tsuchiya, "Influence of water content on the threshold of sand movement and the rate of sand transport in blown sand", Journal of the Japan Society of Civil Engineers, No.249, pp.95-100 (1976).
- 4) Y. Tsuchiya and Y. Kawata, "Mechanism of motion of sand grains by wind (1) -Experiments on the initiation for movement of sand grains-", Annuals of Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, No.13, pp.217-232 (1970).
- 5) TOHO Chemical Industry, "Technical manual of Hydrophilic polyurethane" (2007).
- 6) NICHIREKI co. ltd., "Technical manual of emulsified asphalt" (2007).
- 7) CO.FO.ME.GRA.s.r.l. co. ltd., Italy, "Instruction manual of Solarbox1500e (Document code : 06520104E-1/1999 and 06520101. 1E-1/2001)" (1999 and 2001).
- 8) Japan emulsified asphalt association, "Basis and Practical techniques of emulsified asphalt" (2006).
- 9) Institute of water resources and hydropower of Qinghai province, Technical report of New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) (2008).