

ポリオンコンプレックスを用いた新しい粉塵飛散防止材の開発

井 出 一 貴 千 野 裕 之 仲 谷 晋 吾
 宮 岡 修 二 青 山 裕 作 日 野 良 太
(東北支店土木現場) (東京機械工場技術開発課) (本社エンジニアリング本部)

Development of New Dust Scattering Prevention Material Using Polyion Complex

Kazuki Ide Hiroyuki Chino Shingo Nakaya
 Shuji Miyaoka Yusaku Aoyama Ryota Hino

Abstract

A new dust scattering prevention material using polyion complex is developed to prevent the diffusion of dust and the scattering of sediment during construction works. The polyion complex is a mixture of two polymers of positive and negative electric charges, respectively. It solidifies soil by the electrostatic action. Indoor tests were conducted to determine the polyion complex component and formulation ratios. Subsequently, dust scattering tests and rainfall durability tests were conducted in the outdoors. Workability was examined by conducting spraying tests and the preparation of polyion complex solution at the site. The experimental results on the durability against rainfall, and the dust suppression effect resulting from the polyion complex are reported.

概 要

工事中に発生する飛散土砂や粉塵に対して、ポリオンコンプレックス（以下、PICという）を用いた粉塵飛散防止材を開発した。PICは、正電荷を持つ高分子と負電荷を持つ高分子の混合物であり、電気的作用によって結合し、土壌を固結させる。ここでは、PICの種類や配合、散布量を配合選定試験で選定し、屋外試験において、粉塵飛散抑制効果や降雨耐久性などを調べた。また、試験結果等に基づいて選定した配合について、実規模の作液試験や散布試験を実施し、施工性を検討した。粉塵抑制効果や降雨に対する耐久性が認められたので、その結果について報告する。

1. はじめに

一般土木工事や今後本格化する中間貯蔵施設工事における土砂飛散防止として覆土、散水、シート掛けなどが行われている。これらの対策は施工手間や作業効率、コストなどの面で負担になっていた。そこで粉塵飛散防止材としてPICを用いた材料の開発を行った。PICは、土壌表層部の剥ぎ取りへの適用¹⁾や道路除染への適用が行われている。

PICは、正電荷を持つ高分子と負電荷を持つ高分子を水溶液中で混合した際の静電的作用によって形成される粘稠質の物質であり、これに塩などを加えることで粘性を調整でき、散布が容易となる。土壌に散布した後、降雨や散水によって除塩することで、結合し土粒子を固結する。Fig. 1にPICの結合時の模式図を示す。

PICには、天然系や合成系などの複数の材料が考えられるので、室内試験等で最適な配合の検討を行った。使用したPIC材料をTable 1に示す。ポリカチオン(陽イオン)とポリアニオン(陰イオン)の両方が天然系の材料の場合には高粘性になりすぎることがわかっていたので、本開発では、ポリアニオンを天然系、ポリカチオンを合成系としたハイブリッド系1種と、両方とも合成系とした合成系1種の検討を行った。塩は、高分子の荷電部位に入り、

高分子同士の結合を減らし、結果的に粘性を低減させる効果がある。塩は、散布後の土壌に影響を与えない窒素肥料として使用されている硫酸アンモニウムを使用した。

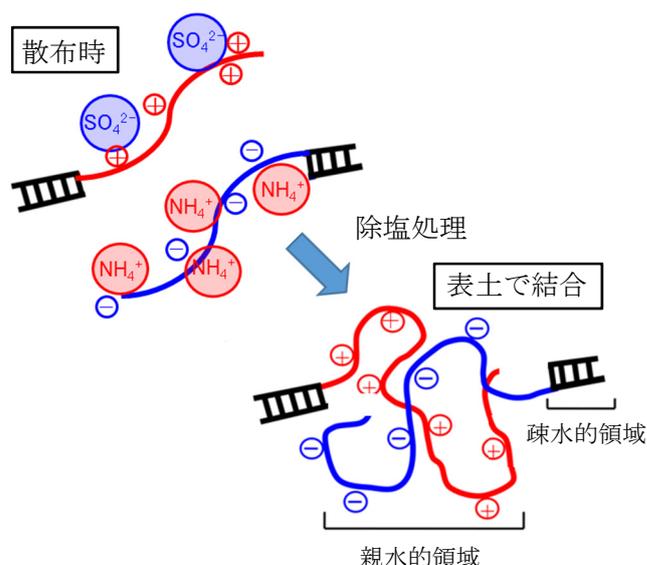


Fig. 1 PICの結合様式
 Bonding Form of Polyion Complex

2. 配合選定試験

2.1 粉塵飛散抑制試験

中間貯蔵施設に除去土壌を埋め立てる際に、強風に伴い放射性物質を含んだ粉塵が発生し、作業者の被ばくや周辺への放射性物質を飛散させるリスクがある。そこで粉塵飛散防止材を散布することで、粉塵の発生抑制が期待される。

試験に使用した土壌は、これまでに福島県内で行われた試験工事で得られた砂質土及び粘性土の粒度組成のデータに合わせて、市販の土砂を配合し、砂質土及び粘性土として試験に使用した。それぞれの粒度分布をFig. 2に示す。また、Table 2に供試土の土質試験結果を示す。砂質土の最大乾燥密度は1.872g/cm³で最適含水比は9.8%、粘性土の最大乾燥密度は2.010g/cm³で最適含水比は10.2%である。

粉塵飛散抑制試験の手順をFig. 3に示す。目的は最適なPICの種類、濃度、散布量の選定である。PICを散布して室内で2日間養生した後の試料(寸法：240mm×140mm×90mm)をコンテナ内に設置し、小型送風機を使用し、風速15m/s程度の送風を5分間行い、容器中の土砂の減量分から粉塵発生抑制効果を評価した。土質、PIC種類等を変えた24ケースを実施した。比較対照として、散水のみを2ケース実施した。

試験結果一覧をTable 3に、土質ごとの試験結果をFig. 4に示す。砂質土では、散水のみでは、39.07gの飛散がみられた。ハイブリッド系PICは、濃度0.25%、2L/m²でも0.72gの飛散で飛散抑制効果がみられた。ハイブリッド系では

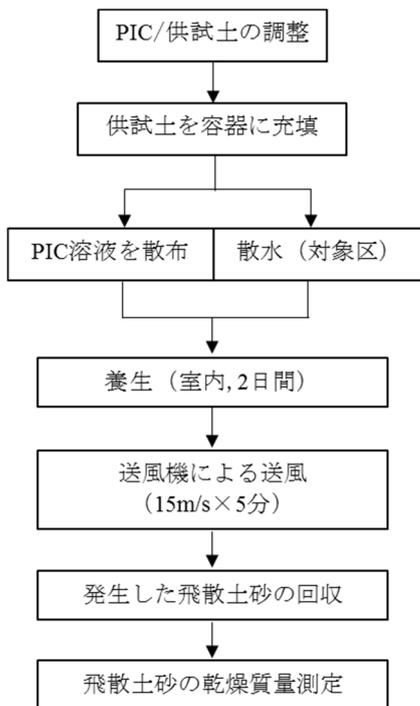


Fig. 3 粉塵抑制試験フロー
Dust Scattering Test Flow

Table 1 PIC の材料
Component of Polyion Complex

分類	陽イオン	陰イオン	塩
ハイブリッド系	ポリメタアクリル酸 エステル系アミド	カルボキシルメチル セルロース	硫酸アンモニウム
合成系	ポリジアルギメチル アンモニウムクロライド	ポリアクリル酸 ナトリウム	硫酸アンモニウム

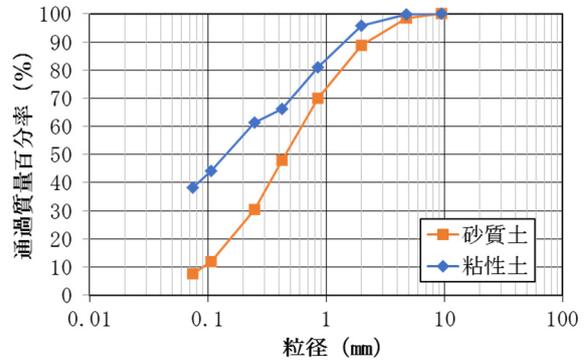


Fig. 2 供試土の粒度分布
Grain Size Distribution of Soil Samples

Table 2 供試土の性状
Physical Properties of Soil Samples

試験項目	単位	砂質土	粘性土	
土粒子の密度	g/cm ³	2.662	2.678	
粒度	礫分	%	11	1.6
	砂分	%	80.8	60.9
	シルト分	%	4.1	21.7
	粘土分	%	4.1	15.8
最大粒径	mm	9.5	4.75	
地盤材料の分類	-	細粒分礫 まじり砂	細粒分質 砂	
最大乾燥密度	g/cm ³	1.872	2.010	
最適含水比	%	9.8	10.2	

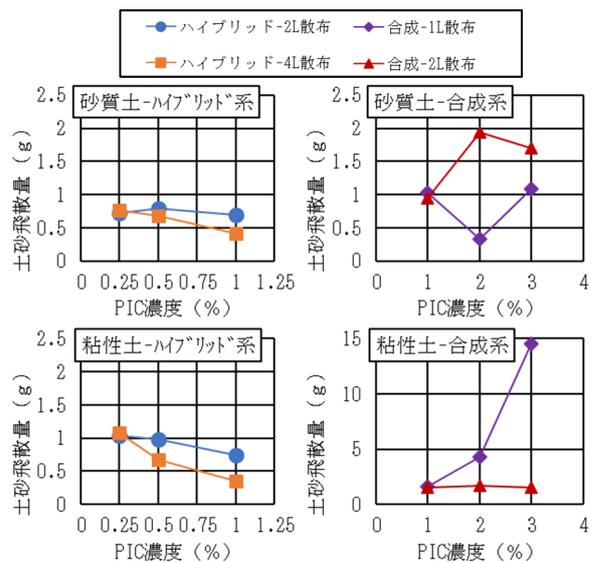


Fig. 4 粉塵飛散抑制試験結果
Dust Scattering Test Result

Table 3 粉塵飛散抑制試験結果
Result of Dust Scattering Test

No	土質条件	PIC種類	PIC散布量 (L/m ²)	PIC濃度 (%)	粉塵飛散量 (g)	No	土質条件	PIC種類	PIC散布量 (L/m ²)	PIC濃度 (%)	粉塵飛散量 (g)	
1	砂質土	散水のみ	1.0	-	39.07	14	粘性土	散水のみ	1.0	-	1.48	
2		ハイブリッド系	2.0	0.25	0.72	15		ハイブリッド系	2.0	0.25	1.04	
3				0.5	0.79	16				0.5	0.98	
4				1.0	0.70	17				1.0	0.75	
5				0.25	0.76	18				0.25	1.08	
6				0.5	0.68	19				0.5	0.67	
7				1.0	0.41	20				1.0	0.36	
8		合成系	1.0	1.0	1.03	21		合成系	1.0	1.0	1.60	
9				2.0	0.33	22				2.0	4.29	
10				3.0	1.08	23				3.0	14.5	
11				1.0	0.95	24				2.0	1.0	1.53
12				2.0	1.94	25					2.0	1.68
13				3.0	1.70	26					3.0	1.52

2L散布, 4L散布ともに濃度が高くなるにつれて飛散量が低減する傾向がみられた。合成系PICの場合も同様に飛散量は大きく低減し, 濃度1%でも抑制効果が見られ, 濃度3%, 2L/m²の場合は1.70gと, 散水のみ39.07gと比べて95%低減した。砂質土では, ハイブリッド系, 合成系を同濃度, 同散布量(1%, 2L/m²)で比較するとハイブリッド系の方が低減効果があった。

粘性土の場合, 散水のみ対照区でも飛散土砂量は1.48gと比較的少なかったが, PIC濃度1%, 2L/m²で飛散土砂量は0.75gと対照区の半分程度となった。合成系PICの場合, 低減効果は見られなかった。特にPIC濃度が3%では, 土壌にPIC薬液が十分含浸せず1L/m²では薬液が含浸していない場所からの土砂飛散が発生したため飛散量が増えたと考えられる。

Photo 1に試験終了後の供試体の表面の状態を示す。ハイブリッド系PIC濃度1%を2L/m²散布した場合, 土壌の固結が確認できた。これに対し, 散水のみの場合, 粘性土の表面は散水によってわずかに固まっていたが中はすぐに崩れ, 砂質土については表層も固結しなかった。



Photo 1 飛散試験終了後の様子
Situation after Dust Scattering Test

2.2 降雨耐久性試験

PIC散布後の土壌の降雨に対する耐久性を調べるために, 降雨耐久性試験を実施した。試験の手順をFig. 5に示す。粉塵飛散抑制試験と同様に, PICの種類, 濃度, 散布量を変えて試験を24ケース実施した。差異が明確に出るように100mm/hの降雨が1時間続く強雨条件で試験を実施した。PIC散布後の試験までの養生期間は1日とした。降雨耐久性を, 人工降雨によって発生した土砂懸濁液を回収し, 懸濁液中の土粒子を乾燥させた質量を降雨による土砂流出量として評価した。

試験体は, 土質試験で求めた供試土それぞれの最大乾燥密度を基に, 粘性土の場合は最大乾燥密度の85%, 砂質土の場合で同じく90%となるように容器(寸法: 400mm×220mm×120mm)に摺り切りまで充填し, PIC等を散布した。

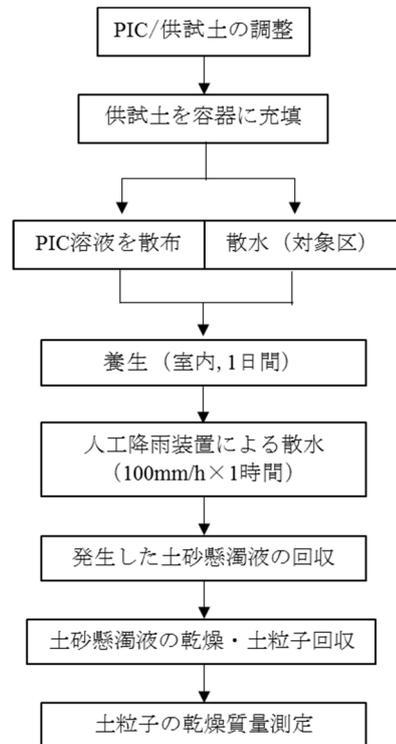


Fig. 5 降雨耐久性試験フロー
Flow of Rainfall Durability Test

Table 4 降雨耐久性試験結果
Result of Rainfall Durability Test

No	土質条件	PIC種類	PIC散布量 (L/m ²)	PIC濃度 (%)	流出土砂量 (g)	No	土質条件	PIC種類	PIC散布量 (L/m ²)	PIC濃度 (%)	流出土砂量 (g)		
1	砂質土	散水のみ	1.0	-	159.2	14	粘性土	散水のみ	1.0	-	123.2		
2		ハイブリッド系	2.0	0.25	125.2	15		ハイブリッド系	2.0	0.25	140.1		
3				0.5	32.3	16				0.5	68.8		
4				1.0	37.6	17				1.0	48.4		
5				4.0	0.25	47.6				18	4.0	0.25	179.7
6					0.5	21.5				19		0.5	120.8
7					1.0	13.5				20		1.0	125.4
8		合成系	1.0	1.0	172.7	21		合成系	1.0	1.0	164.8		
9				2.0	58.2	22				2.0	120.6		
10				3.0	53.1	23				3.0	98.9		
11				2.0	1.0	57.0				24	2.0	1.0	108.9
12					2.0	35.4				25		2.0	62.5
13					3.0	6.9				26		3.0	65.2

降雨試験の状況をPhoto 2に示す。人工降雨装置はノズルの先が振動しながら散水する仕組みになっており、振動方向の数mをカバーできるため、自然降雨に近い降雨強度で散水することができる。

容器から流出した土砂を全量回収し、その土粒子の乾燥質量を測定した。試験結果一覧をTable 4に、試験結果をFig. 6に示す。砂質土の場合、対照区の散水のみは、159.2gの土砂流出がみられた。比較して土砂の流出量は極めて少なく、耐久性が認められる。ハイブリッド系PICの1%溶液を2L/m²散布した場合、37.6gと対照区の約75%低減であり、1%溶液を4L/m²散布すると13.5gと約92%にさらに低減した。合成系PICで一番低減がみられたのは、3%溶液を2L/m²散布した場合で、6.9gと約95%低減となった。

一方、粘性土の場合、ハイブリッド系PICの1%溶液を2L/m²散布した場合、約70%低減した。ハイブリッド系4L/m²散布区では、いずれの濃度でも流出土砂量が多くなっており、これは散布量が多く、粘性土に含浸しにくい状況であった。このため、表面で固結した部分が多く、降雨によって剥がれやすい部分が多くなっていったと考えられる。合成系PICの3%溶液を2L/m²散布した場合、65.2gと約50%低減となった。

2.3 PICの配合選定

粉塵飛散抑制試験及び降雨耐久性試験からそれぞれのPIC種類について以下のことがいえる。

1) ハイブリッド系PICでは、砂質土、粘性土ともに濃度1%、2L/m²の散布量で粉塵飛散抑制、降雨耐久性があると考えられた。散布量については、4L/m²では、砂質土において低濃度でも降雨耐久性が認められたが、粘性土では対照区よりも流出土砂量が大きくなる傾向が認められ、PICが表層に塊状に固結したことが理由として考えられた。

2) 合成系PICでは砂質土は濃度3%、2L/m²の散布量で粉



Photo 2 人工降雨装置による試験状況
Test Situation of Artificial Rainfall Devices

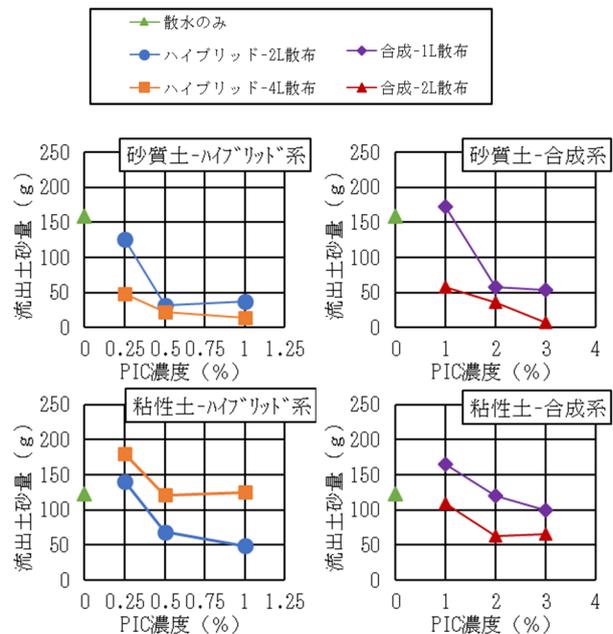


Fig. 6 降雨耐久性試験結果
Result of Rainfall Durability Test

塵飛散抑制効果, 降雨耐久性に効果があると考えられた。

以上の結果をもとに, 1m×1mの屋外確認試験を実施した。

3. 屋外確認試験

屋外で1m×1m試験区の粉塵飛散抑制試験および降雨耐久性試験を実施した。試験区および結果をTable 5に示す。供試土は室内試験と同様とし, 砂質土は最大乾燥密度90%程度, 粘性土は85%程度に設定した。1m×1mの土槽に厚さ0.15mで敷き均し, 表面にPIC等の散布を行った。散布後1日間養生を行い, 土槽に対して, 送風機による送風と人工降雨装置による散水をそれぞれ実施した。送風については, 土槽設置部で20m/sとなるように送風機の位置, 風量を調整し, 降雨については100mm/hとなるように雨量を調整した。試験装置の模式図をFig. 7とFig. 8に示す。

粉塵飛散抑制試験の結果をFig. 9に示す。砂質土の場合, ハイブリッド系PIC, 合成系PICのいずれも, 水だけ散布した対照区に比べて飛散土砂量を大幅に削減できた。ハイブリッド系PICの場合, 1%溶液の2L/m²散布で十分効果が表れた。一方, 粘性土の場合, 対照区との差はほとんどなく, いずれも土砂飛散の発生はわずかであった。配合選定試験で観察されたように, 散水するだけで表面が固結し, 土砂飛散が抑制されたと考えられる。

降雨耐久性試験の結果をFig. 10に示す。ハイブリッド系, 合成系PICいずれも, 対照区に比べて流出土砂量が低減した。砂質土では, ハイブリッド系PIC濃度1%溶液を4L/m²散布した試験区では流出はわずかであった。また, 合成系PIC濃度3%溶液を2L/m²散布した区では対照区の約50%に流出土砂量を低減できた。粘性土ではハイブリ

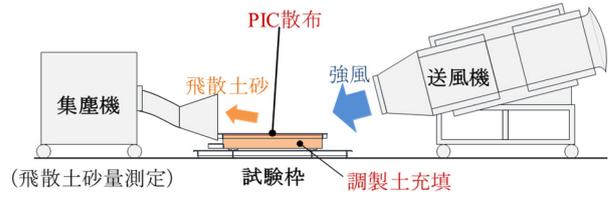


Fig. 7 送風機による試験状況
Situation of Scattering Test by Blower

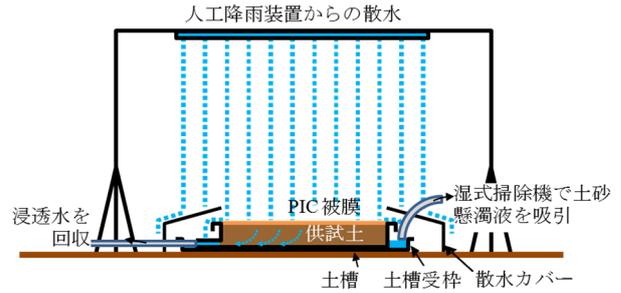


Fig. 8 人工降雨装置による試験状況
Test Situation of Artificial Rainfall Devices

Table 5 粉塵抑制試験および降雨耐久性試験の結果
Result of Rainfall Durability Test

No	土質条件	PIC種類	PIC濃度 (%)	PIC散布量 (L/m ²)	粉塵飛散量 (g)	流出土砂量 (g)
1	砂質土	散水のみ	-	2.0	9.5	597.2
2		ハイブリッド系	1.0	2.0	0.4	527.9
3				4.0	0.8	48.2
4		合成系	3.0	2.0	1.4	297.4
5	粘性土	散水のみ	-	2.0	0.4	1136.8
6		ハイブリッド系	1.0	2.0	0.5	666.5
7		合成系	3.0	2.0	0.4	139.3

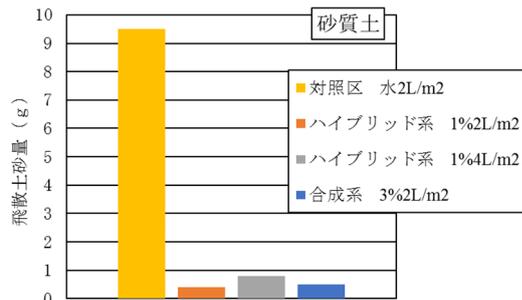


Fig. 9 粉塵抑制試験の結果
Result of Dust Scattering Test

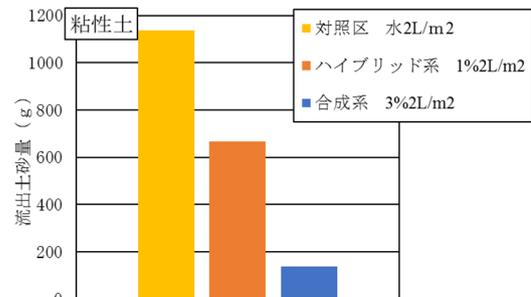
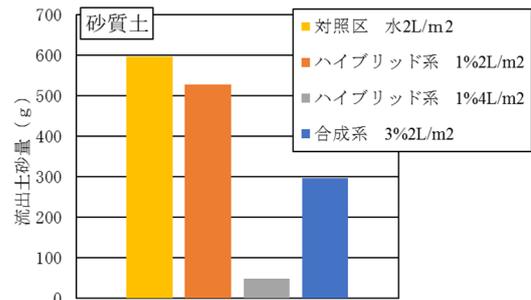


Fig. 10 降雨耐久性試験の結果
Result of Rainfall Durability Test

ッド系PIC濃度1%溶液を2L/m²散布した区でも流出土砂は対照区の半分程度に抑えられた。また、合成系PIC濃度3%溶液を2L/m²散布した区では、約88%低減でき、降雨耐久性が認められた。

配合選定試験及び屋外確認試験の結果および材料費等を考慮して、効果があり、施工費の低いPICの標準仕様を「ハイブリッド系PIC濃度1%溶液・2L/m²散布」とした。

4. 現場適用試験

4.1 目的

ハイブリッド系PICの作液方法及び散布方法等の施工性を確認するため、土木工事現場で、散布試験を実施した。

4.2 作液試験

ハイブリッド系PIC溶液を作製するため、1m³の水槽および2m³の水槽を用いて作液試験を実施した。

ポリアニオン溶液とポリカチオン溶液をそれぞれの水槽に0.5m³ずつ作製し、その後、ポリアニオン溶液を水中ポンプを用いて、ポリカチオン溶液に滴下しながら攪拌した。1時間程度で1m³溶液を作製できることを確認した。今回は手動で行ったが、薬剤の自動添加により、省力化と時間短縮ができると考えられる。作製状況をPhoto 3に示す。

4.3 散布試験

土木工事現場内に10m×10mの試験区を設定し、ハイブリッド系PICを2L/m²散布した。散布は、洗浄等で使用される散水機(ハイウォッシャー)を使用した。散布状況をPhoto 4に示す。10m×10mの試験区では、約7分で散布することができた。

PIC散布により被膜が形成され、土砂を塊状に一体化させていることが確認できた。

5. まとめ

工事での粉塵発生を抑制するためにポリイオンコンプレックスを用いた粉塵飛散防止材を開発し、さらに、室内試験及び屋外試験で飛散抑制効果と降雨耐久性を確認し、現場適用試験で施工性を検証した。得られた結果を以下に示す。

- 1) ハイブリッド系PIC及び合成系PICともに粉塵飛散抑制効果と降雨耐久性があり、特に砂質土ではその効果が大きかった。
- 2) 現場適用試験で、一般的な機械を用いてPICの作液と散布が問題なくできた。



Photo 3 PIC 作液状況
Preparation of Polyion Complex Solution



Photo 4 PIC 散布状況
Spraying of Polyion Complex Solution

謝辞

本研究を実施する機会を与えていただいた共同研究者の国立研究開発法人日本原子力開発機構及び日本製紙株式会社との関係各位に深謝致します。

参考文献

- 1) 長縄弘親, 熊沢紀之, 齊藤浩, 柳瀬信之, 三田村久吉, 永野哲志, 鹿嶋薫, 福田達也, 吉田善行, 田中俊一: ポリイオンコンプレックスを固定化剤として用いる土壌表層の放射性セシウムの除去, 日本原子力学会和文論文誌, Vol. 10, No. 4, p. 227・234, 2011
- 2) 千野裕之, 仲谷晋吾, 八塩晶子, 大熊史子: ポリイオンコンプレックスによる土砂の飛散抑制に関する試験, 土木学会第71回年次学術講演会, 2016.9
- 3) 千野裕之, 仲谷晋吾, 八塩晶子, 大熊史子: ポリイオンコンプレックスによる土砂の流出抑制に関する試験, 第60回粘土科学討論会, 2018.9