

ペーパースラッジの農業水利施設補修材への
利活用とその実用化

阿部 孝行

目次

| | |
|--------------------------------------|----|
| 第1章 序論 | 1 |
| 1.1 緒言 | 1 |
| 1.2 研究の目的 | 3 |
| 1.3 本論文の構成 | 4 |
| 第2章 ペーパーセラッジの物理化学的性質 | 7 |
| 2.1 概説 | 7 |
| 2.2 製紙産業の現状および環境負荷低減の取り組み | 8 |
| 2.3 製紙工場の分布、ペーパーセラッジの排出工程および排出量 | 10 |
| 2.3.1 製紙工場の分布 | 10 |
| 2.3.2 ペーパーセラッジの排出工程 | 11 |
| 2.3.3 ペーパーセラッジの排出量 | 13 |
| 2.4 ペーパーセラッジに関する既往の研究 | 15 |
| 2.5 ペーパーセラッジの物理化学性 | 17 |
| 2.5.1 ペーパーセラッジの外観、組成および品質変動 | 17 |
| 2.5.2 ペーパーセラッジに含まれる繊維の長さ、直径および主要化学成分 | 21 |
| 2.5.3 ペーパーセラッジに含まれる無機質の化学組成 | 23 |
| 2.5.4 ペーパーセラッジの環境安全性 | 24 |
| 2.6 ペーパーセラッジの腐敗対策 | 27 |
| 2.7 ペーパーセラッジを用いたセメントミルクの物性 | 30 |
| 2.7.1 材料および試験方法 | 30 |
| 2.7.2 結果および考察 | 32 |
| 2.8 まとめ | 38 |
| 第3章 ペーパーセラッジの気泡モルタルへの適用 | 39 |
| 3.1 概説 | 39 |
| 3.2 材料および試験方法 | 41 |
| 3.2.1 使用材料 | 41 |
| 3.2.2 試験配合および供試体の作製方法 | 41 |
| 3.2.3 試験項目および試験方法 | 42 |
| 3.3 結果および考察 | 44 |
| 3.3.1 フレッシュモルタルの性状と強度特性 | 44 |
| 3.3.2 乾湿繰り返し試験 | 46 |

| | | |
|-------|---------------------------|----|
| 3.3.3 | 凍結融解試験 | 47 |
| 3.3.4 | 材料分離抵抗性試験 | 49 |
| 3.4 | セメントの種類による環境負荷 | 52 |
| 3.5 | 実証試験 | 53 |
| 3.5.1 | 農業用水路の補修・改修工事 | 53 |
| 3.5.2 | ボックスカルバートの充填閉塞工事 | 59 |
| 3.6 | まとめ | 63 |
| | | |
| 第4章 | ペーパースラッジのソイルセメント地中連続壁への適用 | 64 |
| 4.1 | 概説 | 64 |
| 4.2 | 材料および試験方法 | 65 |
| 4.2.1 | 使用材料 | 65 |
| 4.2.2 | 配合設計および供試体の作製方法 | 65 |
| 4.2.3 | 試験項目および試験方法 | 67 |
| 4.3 | 結果および考察 | 69 |
| 4.3.1 | 材料分離抵抗性試験 | 69 |
| 4.3.2 | フロー試験 | 73 |
| 4.3.3 | 湿潤密度, 空気量および細孔分布 | 75 |
| 4.3.4 | ブリーディング試験 | 79 |
| 4.3.5 | 一軸圧縮試験 | 80 |
| 4.3.6 | 透水試験 | 81 |
| 4.4 | 施工事例 | 82 |
| 4.5 | まとめ | 85 |
| | | |
| 第5章 | ペーパースラッジの法面緑化基盤材への適用 | 86 |
| 5.1 | 概説 | 86 |
| 5.2 | 材料および試験方法 | 88 |
| 5.2.1 | 使用材料および配合 | 88 |
| 5.2.2 | 供試体の作製方法 | 90 |
| 5.2.3 | 試験項目および試験方法 | 90 |
| 5.3 | 結果および考察 | 91 |
| 5.3.1 | 緑化基盤材の圧縮量および三相分布 | 91 |
| 5.3.2 | 保水性試験および透水性試験 | 93 |
| 5.3.3 | 耐降雨浸食性試験 | 95 |
| 5.3.4 | 植生試験 | 97 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 5.4 | フィールド試験 | 100 |
| 5.5 | まとめ | 104 |
| 第6章 | ペーパーセラミックの流動モルタルおよびセメントベントナイトへの適用 | 105 |
| 6.1 | 概説 | 105 |
| 6.2 | 流動モルタルへの適用（一軸圧縮強さのばらつき） | 107 |
| 6.2.1 | 材料および試験方法 | 107 |
| 6.2.2 | 結果および考察 | 109 |
| 6.3 | 流動モルタルへの適用（靱性） | 117 |
| 6.3.1 | 材料および試験方法 | 117 |
| 6.3.2 | 結果および考察 | 119 |
| 6.4 | セメントベントナイトへの適用 | 130 |
| 6.4.1 | 材料および試験方法 | 130 |
| 6.4.2 | 結果および考察 | 131 |
| 6.5 | まとめ | 134 |
| 第7章 | 総括 | 136 |
| 7.1 | 本研究のまとめ | 136 |
| 7.2 | 今後の研究課題と展望 | 138 |
| | 本研究の関連査読論文および発表論文 | 139 |
| | 謝辞 | 141 |
| | 引用文献 | 142 |
| | SUMMARY | 151 |

第 1 章

序論

第 1 章 序論

1.1 緒言

わが国はアジアモンスーン地帯の地理的、気候的条件を生かし、古代から水田・稲作を中心に地域社会や都市を形成してきた。この水稻栽培において、水の安定供給は必要不可欠であり、先人の知恵のもとに多くの水利施設が構築されている。とくに国土の 75%を山地が占めるわが国の河川は急流であり、同時に洪水も多く、利水および治水は困難を極めるものであった。そこで、貯水ダムやため池、頭首工、用水路などの農業水利施設を整備することにより、安定した農業用水を確保してきた。現在、これら農業水利施設が我が国の 4,496,000 ha の耕地を潤し¹⁻¹⁾、27,870,000 トンの食糧生産を可能にしている¹⁻²⁾。つまり、農業水利施設は我々の食糧生産を支える大動脈であり、圃場と並び最も重要な基盤となっている。さらに、農業水利施設は食糧生産の基盤としての機能だけにとどまらず、洪水防止や地下水かん養などの国土保全機能、水質浄化や生態系の維持・回復などの環境保全機能および美しい田園風景や親水空間の提供などのアメニティ機能など、国民全体に便益を供給する社会的共通資本としての役割を担っている。

わが国の農業水利施設は 1949 年に土地改良法が制定されて以降、国や都道府県により大規模な整備が行われてきた。2009 年度末において、ダム、頭首工、用排水機場等の施設は約 7,000 箇所、農業用排水路は約 400,000km、そのうち基幹的水路は 49,000km にのぼり¹⁻³⁾、農業水利施設の総資産価値は再建設費ベースで 32 兆円にも及ぶ¹⁻⁴⁾。

しかし、これらの農業水利施設の多くは第 2 次世界大戦後から高度成長期にかけて集中的に整備されてきており、近年では老朽化が進行し、標準耐用年数を迎える施設が急増している。2019 年までに標準耐用年数を超過する施設は全体の 31%、再建設費ベースで約 5.6 兆円となる¹⁻³⁾¹⁻⁴⁾。また、施設の老朽化に伴い、パイプラインの破裂や道路陥没などの突発事故が増加するなど、問題が顕在化しつつある¹⁻⁵⁾。そのため、これら農業水利施設の早急な整備補修や更新が求められている。

さらに、農業を取り巻く社会環境も変化しており、2015 年 10 月、米国のアトランタで行われた環太平洋パートナーシップ (TPP) 閣僚会合において、大

筋合意に至り、農業の競争力を高めるための農地および農業水利施設の整備もこれまで以上に強化することが求められている。

このような状況の中、農林水産省は2012年に新たな土地改良長期計画を策定した。この計画では、農を「強くする」、国土を「守る」、地域を「育む」を政策課題とし、農業水利施設の長寿命化対策や防災・減災対策の推進などが重点的な取組に含まれている¹⁻⁶⁾。

とくに、施設の長寿命化を目的としたストックマネジメントの取組を本格化させている。ストックマネジメントの推進には、インフラデータベースの構築、効率性・信頼性の高い点検・診断技術などが必要となるが、とくに効果的な補修・補強技術の開発が必要である。

例えば、老朽化した用排水路や既設管の補修工法の一つであるFRPパネル工法の背面部の空洞充填、パイプインパイプ工法（既設管に対する非開削更新工法）の中込充填などでは材料分離抵抗性が高く、かつ流動性が高い気泡モルタルの開発が求められている^{1-7) 1-8)}。

また、防災・減災対策に含まれる老朽化したため池の補修工法の一つにソイルセメント地中連続壁工法があるが、ここで使用されるソイルセメントには流動性と材料分離抵抗性の両方を確保することが必要となる¹⁻⁹⁾。

さらに、ダム、水路および農道等の法面の崩壊や地滑りを防ぐ工法として法面を植生で被覆する法面緑化工法があるが、緑化基盤材の降雨に対する耐久性向上のために、繊維補強などの対策が必要となる¹⁻¹⁰⁾。

以上のような背景から、本研究では、パルプ・紙製造業から発生する産業廃棄物（ペーパースラッジ）を用いて、補修工法や防災・減災工法として用いられる気泡モルタル、ソイルセメントおよび緑化基盤材における物性向上を目的とした。ペーパースラッジには、多量の微細繊維が含まれており、建設資材として利用することで、気泡モルタルおよびソイルセメントの材料分離抵抗性、緑化基盤材の耐降雨浸食性の向上効果が期待できると考えた。

同時に、ペーパースラッジを建設資材として用いることは、産業廃棄物の減量化に繋がり、我が国の循環型社会の構築へも貢献するものである。

1.2 研究の目的

本研究の目的は、パルプ・紙製造業から排出されるペーパースラッジの建設資材としての利用について検討するものである。とくに、補修および防災工事に用いられる気泡モルタル、ソイルセメントおよび緑化基盤材における物性向上について検討するものである。

ペーパースラッジには微細な繊維が多量に含まれていることから、建設資材として利用することにより、様々な特性が発揮される可能性があると考えた。本研究では、まずセメント系の混和材としての利用について考え、低強度の気泡モルタルおよびソイルセメントの混和材としての利用について検討している。次に、ペーパースラッジに含まれる微細繊維が木材由来である点に着目し、法面緑化工法に用いる緑化基盤材の添加材としての利用について検討している。さらに、ソイルセメントと性状が類似している流動モルタル、気泡モルタルと同様に充填材として利用されているセメントベントナイトへの利用の可能性についても検討している。

ペーパースラッジの建設資材としての有効利用はパルプ・紙製造業の産業廃棄物の削減につながる。また、ペーパースラッジの発生量は古紙の再利用に伴い増加するため、産業廃棄物の削減と同時に、古紙のリサイクルの推進にも影響を及ぼす。さらに、古紙のリサイクルは、資源の有効利用につながるため、持続的な森林経営を補助することになり、環境面に与える影響も大きい。

循環型社会の構築には、廃棄物の有効利用について、異なる産業間が連携・協力し、それぞれ適材適所の用途について考えることが重要である。

本研究は、産業廃棄物を資材として考えることにより、建設資材の物性を向上させると同時に、異なる産業間における廃棄物の有効利用方法の1つを実験的検討から証明するものである。

1.3 本論文の構成

本論文は序論を含め以下の7章から構成されている。

第1章 序論

第2章 ペーパースラッジの物理化学的性質

第3章 ペーパースラッジの気泡モルタルへの適用

第4章 ペーパースラッジのソイルセメントへの適用

第5章 ペーパースラッジの法面緑化基盤材への適用

第6章 ペーパースラッジの流動モルタルおよびセメントベントナイトへの適用

第7章 総括

本論文の内容を各章ごとに以下に概説する。

第1章では、本研究の背景および目的について概説するとともに、論文構成内容を紹介している。

第2章では、製紙産業の現状について述べ、本論文で取り上げているペーパースラッジの物理化学的性質および安全性について室内試験により確認している。また、ペーパースラッジを建設資材として安定した品質で利用するための腐敗対策について確認している。さらに、ペーパースラッジを異なる比率で混合したセメントミルクの物性について室内試験を行い、そのフレッシュ性状および硬化後の物性について評価している。

第3章では、ペーパースラッジを混和材として用いた気泡モルタルの物性について、室内試験および施工現場により評価している。室内試験では、ペーパースラッジを用いた気泡モルタルの基本物性および耐久性について評価している。また、ペーパースラッジを用いた気泡モルタルの材料分離抵抗性について、既存の気泡モルタルと比較・検討している。施工現場においては、農業用水路の補修・改修工事および不要となったボックスカルバートの充填閉塞工事にペーパースラッジを用いた気泡モルタルを適用し、その物性および施工性について評価している。

第4章では、ペーパースラッジを用いた砂質土ソイルセメントの物性について、室内試験と施工現場により評価している。室内試験では、ペーパースラッジを異なる比率で用いた砂質土ソイルセメントのフレッシュ性状および基本物性について評価している。また、施工現場においては、シールド用発

進立坑の土留め壁にペーパースラッジを適用し，その物性および施工性について評価している。

第 5 章では，ペーパースラッジを用いた緑化基盤材の物性について，室内試験およびフィールド試験により評価している。室内試験では，ペーパースラッジを異なる比率で用いた緑化基盤材の耐降雨浸食性，保水性，透水性および植物の生育状況について評価している。また，フィールド試験においては施工性について検討するとともに，長期的な植物の生育状況について調査している。

第 6 章では，ペーパースラッジを用いた流動モルタルおよびセメントベントナイトの室内試験を行い，利用の可能性について検討している。流動モルタルの室内試験では，一軸圧縮強さのばらつき抑制および靱性の向上効果について検討しており，セメントベントナイトの室内試験では，ブリーディングの減少効果について検討している。

第 7 章では，本論文の総括と今後の研究の課題について述べている。

各章の相互の関連は **Fig. 1-1** に示すとおりである。

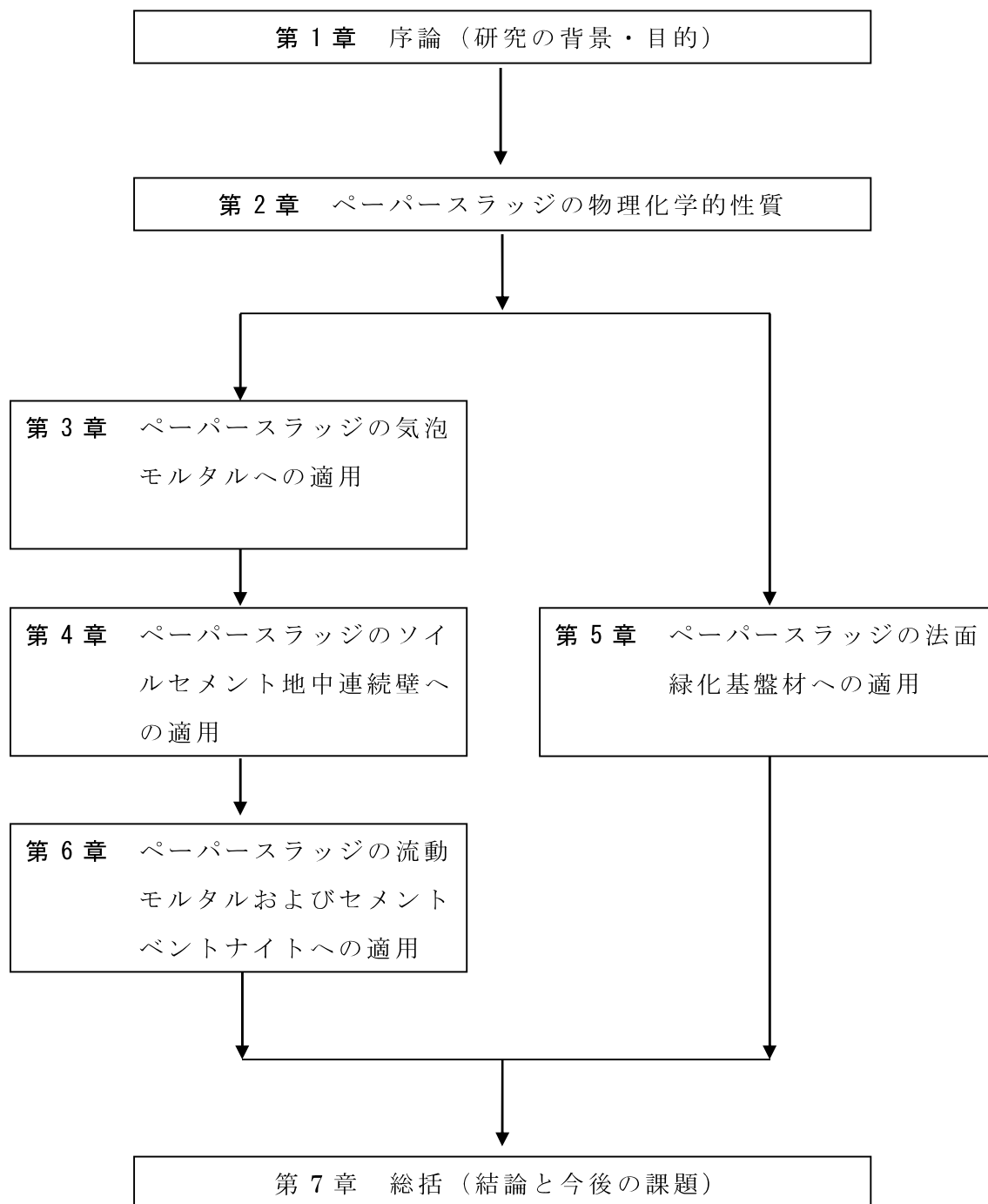


Fig. 1-1 本論文の構成

第2章

ペーパースラッジの物理化学的性質

第 2 章 ペーパースラッジの物理化学的性質

2.1 概説

パルプ・紙製造業（製紙産業）は、化学、鉄鋼に続くわが国第 3 位のエネルギー多消費型産業²⁻¹⁾であり、わが国に及ぼす影響は正、負の両者において大きい。製紙産業において発生する産業廃棄物の約 7 割がペーパースラッジと呼ばれる有機性汚泥である²⁻²⁾。そのため、製紙産業における産業廃棄物対策の主体は、このペーパースラッジの削減および有効利用である。また、製紙産業では資源の有効利用の観点から、古紙のリサイクルにも積極的に取り組んでおり、古紙回収率および古紙利用率は世界でもトップクラスの数値である²⁻³⁾。今後、更なる古紙のリサイクル率向上を目指し、古紙の回収システムの整備および再生技術の向上に力を注いでいる。しかし、紙の製造において、古紙を原料とした場合、木材を原料とするよりもペーパースラッジの発生量が増加する²⁻⁴⁾。そのため、古紙のリサイクル推進の観点からもペーパースラッジの削減および有効利用は重要な課題である。

現在、その主な処理方法は焼却による熱回収であるが、焼却後に発生する焼却残渣の処理に課題が残っている。焼却残渣の大部分はセメント原料として再利用されているものの、近年、公共工事の縮減などによりセメント使用量は減少しており²⁻⁵⁾、それにかかる費用も膨大である。また、排出直後のペーパースラッジは高水分で低発熱量のため熱源としての利用価値が少ないこと^{2-6) 2-7)}および焼却による二酸化炭素排出などの環境面を考慮すると、排出されたペーパースラッジそのままの価値を見出し使用することが効率的であると考えられる。

本研究では、ペーパースラッジに含まれる微細繊維を活かした建設資材としての有効利用を目的としている。そこで本章では、ペーパースラッジの物理化学的性質および安全性について確認している。また、腐敗しやすいペーパースラッジを安定的な品質で建設資材として利用するための腐敗対策の方法について確認している。さらに、ペーパースラッジを異なる比率で混合したセメントミルクの物性について室内試験を行い、フレッシュ性状および硬化後の物性について評価している。

2.2 製紙産業の現状および環境負荷低減の取り組み

製紙産業は新聞用紙，コピー用紙，段ボール原紙，包装用紙およびトイレットペーパー等の様々な紙を生産・供給することで家庭生活や産業活動を下支えしている産業である。2012年，紙・パルプ・紙加工品産業の製品出荷額は約6.8兆円，従業員数は約19万人である²⁻³⁾。また，2013年時点で日本における紙の生産量は年間約2,600万t，国民1人あたりの消費量は214.6kgである²⁻³⁾。国際的に見ると，わが国は2013年において，中国，アメリカに次ぐ第3位の紙・板紙生産国であり，世界の中でも上位の規模を有している²⁻³⁾。また，世界の主要企業による2013年の紙・パルプ関連売上高の上位20社中，日本の企業は4社含まれており，世界に対する存在感も大きい。

一方，製紙産業では紙が再生に適した素材であることから，一度使った紙を回収してまた紙にするという，古紙のリサイクルの流れを作りあげた。製紙産業において古紙のリサイクルが本格的に行われるようになったのは，戦後1950年代からであり，最初は段ボールなどの板紙であった。その後，1980年代になって新聞，雑誌などのリサイクルが行われるようになり，以降，都市部の紙ゴミ問題，国民の環境意識およびリサイクル技術の発達により古紙のリサイクルは年々上昇してきた。2014年，わが国の古紙利用率は63.9%，古紙回収率は80.8%に至っており²⁻⁸⁾，世界でもトップクラスの数値である。

1992年に「環境と開発に関する国連会議（地球サミット）」が開催され，「森林に関する原則声明（森林原則声明）」が183ヶ国参加のもと合意された。森林原則声明は，15項目からなり，法的拘束力はないものの，森林に関する最初の世界的合意である。その第2項では，「森林資源及び林地は，現在及び将来の世代の人々の社会的，経済的，生態学的，文化的，精神的な必要を満たすため持続的に経営されるべきである。これらの必要は，木材，木製品，水，食糧，飼料，医薬品，燃料，住居，雇用，余暇，野生生物の生息地，景観の多様性，炭素の吸収源・貯蔵源のような森林の財及びサービス及びその他の林産物に対するものである。」と記載されている²⁻⁹⁾。製紙産業では，この理念のもと伐採分を植林する持続的な森林経営を行っている。植物は光合成により，二酸化炭素と水を原料として酸素を放出する一方，呼吸により酸素を取り込み，二酸化炭素を放出する。若木から成木に至る成長過程では二酸化炭素の固定量のほうが，呼吸による二酸化炭素量より多いが，成木となると呼吸により放出する二酸化炭素量が固定量を上回る²⁻¹⁰⁾。そのため，製紙産業の伐採分

を植林する持続的な森林経営は、再生産可能な有機素材として利用が可能であるとともに、地球温暖化の主な原因であるとされる CO₂ の吸収源としての役割も担うことになる。

また、製紙産業はエネルギー多消費産業として、古くからエネルギー対策に関する様々な取り組みについて積極的に行っている。製紙各社では省エネルギー対策として、熱回収設備や抄紙設備など、少しでもエネルギー利用効率の高い設備やシステムの順次導入を行っており、1997年度以降、年平均で約200億円規模を投資している²⁻³⁾。また、積極的に可燃性廃棄物を燃料として利用し、重油や石炭などの化石エネルギーの使用を削減している。利用する可燃性廃棄物は、同産業内から出る黒液、木くずはもちろん、他産業の廃プラスチックからなるRPFや廃タイヤなども積極的に利用しており、廃棄物の循環に関しても一躍を担っている。その結果、2014年、製紙産業における使用エネルギー構成比のうち約53%が化石エネルギー以外の可燃性廃棄物が占めるに至っている²⁻³⁾。

2.3 製紙工場の分布，ペーパースラッジの排出工程および排出量

2.3.1 製紙工場の分布

日本における製紙工場の分布図を **Fig. 2-1** に示す。日本の製紙工場は日本製紙連合会に所属する工場だけでも約 90 工場あり，日本全国に点在している。そのため，各製紙工場から排出されるペーパースラッジが建設資材として有効利用することができれば，日本全国の建設現場へ対して低コストでの材料供給が可能であると考えられる。

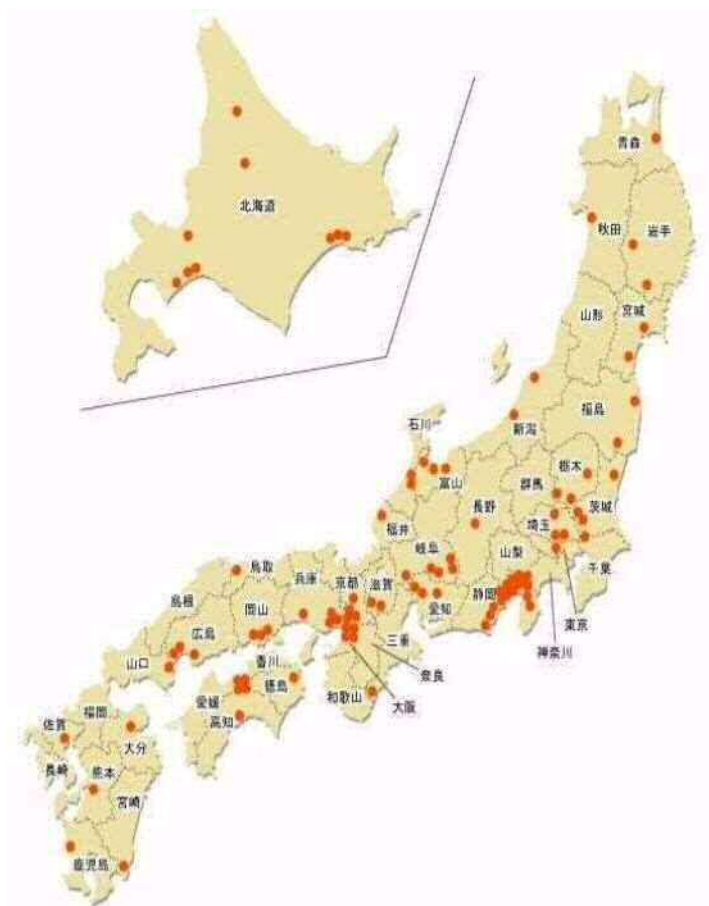


Fig. 2-1 製紙工場の分布図（日本製紙連合会ホームページより抜粋）

Distribution map in a paper mill

2.3.2 ペーパーラッジの排出工程

ペーパーラッジの排出工程を **Fig. 2-2** に、排出状況を **Fig. 2-3** に示す。ペーパーラッジはパルプ製造工程内の煮沸、溶解、洗浄および漂白などから出る排水を集め、脱水した残渣として排出され、紙になり切れない微細な繊維、顔料および填料等を含んだものである。ペーパーラッジは木材、古紙どちらを原料とした工程からも排出されるものの、その排出量は古紙を原料とした工程の方が木材を原料とした工程よりも多くなる。また、古紙を原料とした工程では木材を原料とした工程よりも、化石燃料の使用量や薬品使用量が増えるというデメリットもある。そのため、古紙のリサイクルはそのメリット、デメリットの双方をふまえ、バランスを図りながら行う必要がある。

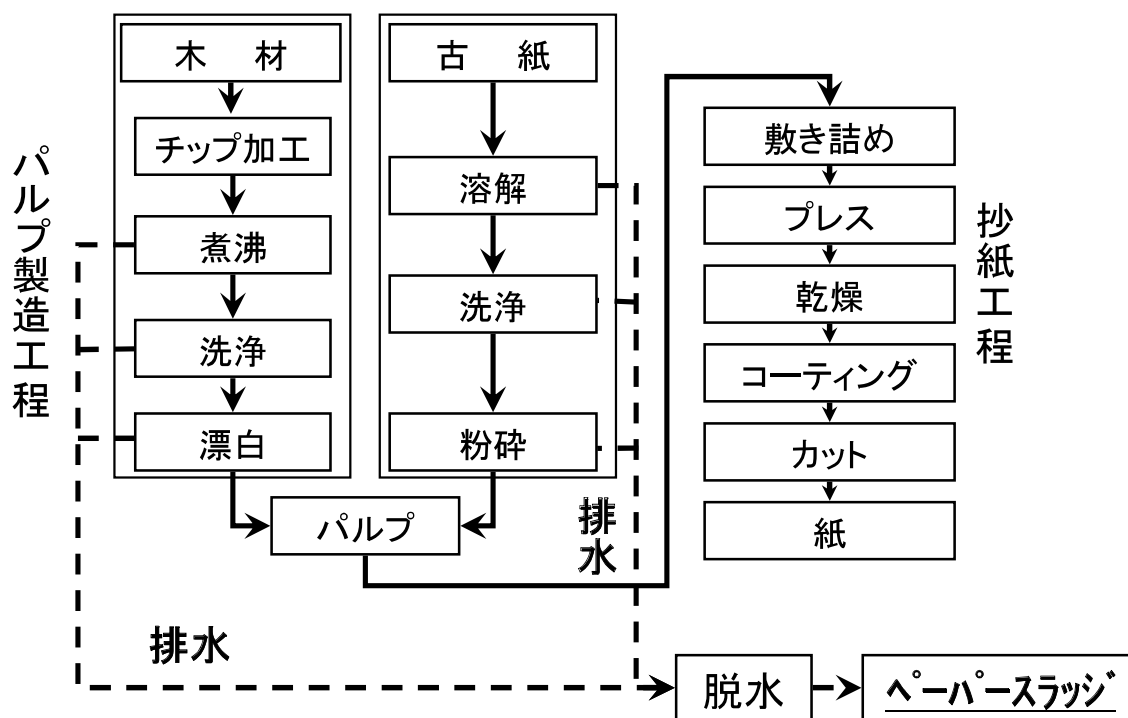


Fig. 2-2 ペーパーラッジの排出工程

Discharge process of a paper sludge



Fig. 2-3 ペーパースラッジの排出状況

The discharge situation of a paper sludge

2.3.3 ペーパーラッジの排出量

製紙産業における2010～2014年の産業廃棄物の発生量を Fig. 2-4 に、2014年の産業廃棄物発生量の内訳を Fig. 2-5 に示す。2010～2014年の5年間に於ける産業廃棄物の発生量は500万t前後で横ばい状態であり、最終処分量は2010年の26.8万tから2014年には15.3万tと減少傾向である²⁻²⁾。

産業廃棄物の内訳からわかるように、産業廃棄物全体のうち約7割をペーパーラッジが占めている。そのため、製紙産業における産業廃棄物の発生源対策の主体はペーパーラッジの削減であり、各工場において、抄紙工程での微細繊維の歩留向上や抄紙工程および古紙パルプ工程の排水からのパルプ回収等、原料の流出防止等に取り組んでいる。

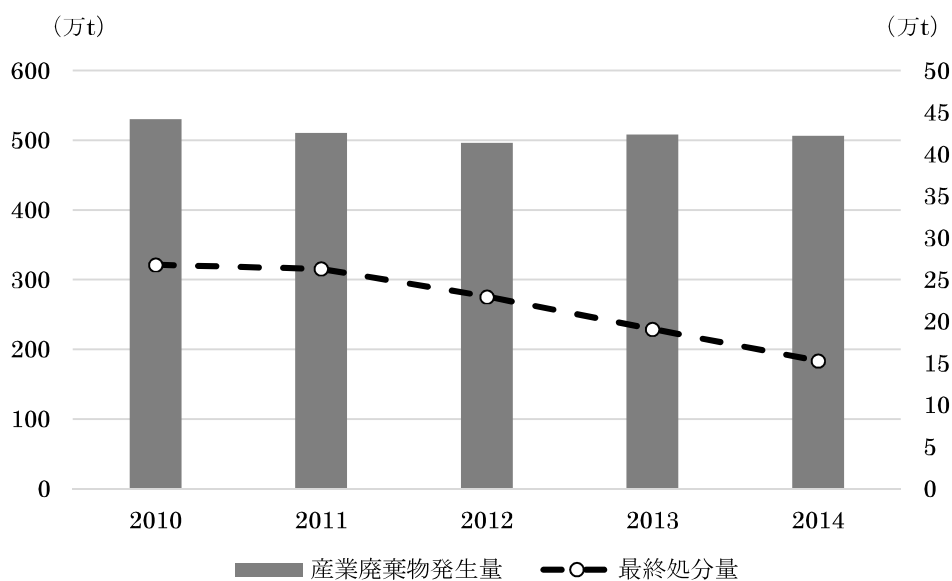


Fig. 2-4 産業廃棄物発生量と最終処分量

(2015年度「環境行動計画(廃棄物対策)」フォローアップ調査結果)

The industrial waste emission rate and the final disposal amount

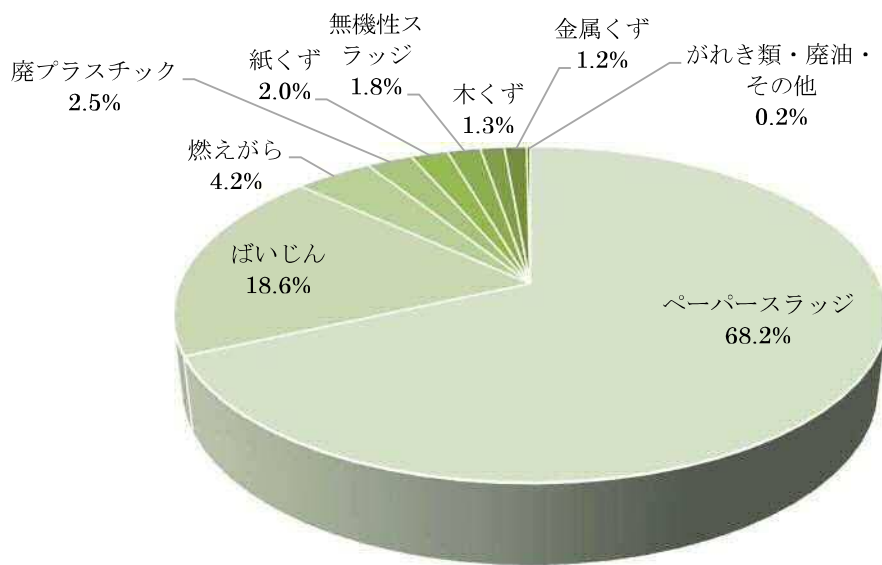


Fig. 2-2 産業廃棄物の内訳

(2015年度「環境行動計画(廃棄物対策)」フォローアップ調査結果)

The details of the industrial waste

2.4 ペーパースラッジに関する既往の研究

現在、ペーパースラッジの主な処理方法は焼却によって熱回収を行い、焼却後に発生する焼却残渣（ペーパースラッジ灰）をセメント原料として利用する方法である。そのため、製紙業界ではペーパースラッジに加えて、木くず、廃プラスチック固形燃料（RPF）、廃タイヤなど各種廃棄物を燃料にできるバイオマスボイラを導入している工場が多い。バイオマスボイラの導入により、重油からバイオマス燃料にエネルギー転換することで、化石エネルギー起源の二酸化炭素排出量の削減やコスト削減などが期待できる。

しかしながら、焼却後に発生するペーパースラッジ灰の利用用途は大半がセメント原料である。近年、公共工事の縮減などによりセメント使用量は減少しており、それにかかる費用も膨大である。また、ペーパースラッジは高水分および低発熱量であり、熱源としての利用価値も少ない。そのため、ペーパースラッジおよびペーパースラッジ灰の新たな有効利用方法の研究開発が重要である。また、製紙産業は、化学、鉄鋼に続くわが国第3位のエネルギー多消費型産業であり、ペーパースラッジの有効利用促進のための研究開発を行う意義は大きい。

例えば、経済産業省において平成17年度から20年度までの4年間、予算総額43億円をかけた「エネルギー使用合理化ペーパースラッジ有効利用技術開発」が実施された²⁻¹¹⁾。これは、日本製紙株式会社や王子製紙株式会社など主要製紙会社4社がプロジェクトリーダーとなり、ペーパースラッジ灰を低温で水熱固化し土壌環境基準をクリアする土壌改良材製造技術（ペーパースラッジ灰水熱固化処理技術）、ペーパースラッジを高温で自燃させ熱エネルギーを回収し、得られた焼成物を板紙の内填材に再利用する技術（ペーパースラッジ灰再生紙利用技術）およびペーパースラッジをガス化し、エネルギー源として活用する技術（ペーパースラッジガス化技術）などの技術開発を行ったものである。各開発テーマにおいて良好な成果が得られているものの、実用化にはまだいくつかの課題がある。

ペーパースラッジの有効利用に関する技術開発として数多く研究されているのは、焼却後に発生するペーパースラッジ灰の有効利用である。例えば、ペーパースラッジ灰に含まれるカルシウム、ケイ素、アルミニウム、鉄等の酸化物に着目したペーパースラッジ灰の機能材料化に関する研究が報告されている。安藤らおよび村山らは、ペーパースラッジ灰のゼオライト原料としての利用²⁻¹²⁾ ²⁻¹³⁾について評価しており、福垣内らはペーパースラッジ灰からの機能性粘土鉱物の合成、可視光応答型

光触媒の創製および微粒子酸化チタンの創製²⁻¹⁴⁾について報告している。また、建設業界においては、藤原らがペーパースラッジ灰に含まれるシリカ、アルミナによるポゾラン反応に着目し、ペーパースラッジ灰を材料として用いたコンクリートブロックの開発²⁻¹⁵⁾について、木下らが造粒化したペーパースラッジ灰のコンクリート²⁻¹⁶⁾およびモルタル用骨材としての利用²⁻¹⁷⁾について検討している。さらに、重松らはペーパースラッジ灰の吸水性に着目し、軟弱地盤の安定材として用いた場合の安定処理効果²⁻¹⁸⁾について明確にしている。その他、閉鎖性海域の底質改善材としての利用²⁻¹⁹⁾、堤体補修材料の助剤としての利用²⁻²⁰⁾および廃水の凝集固化剤としての利用²⁻²¹⁾などの研究も行われている。

ペーパースラッジに関する海外研究では、Shiqin Yanらが、脱水前のペーパースラッジ水をセメントモルタルの練混ぜ水として使用することにより、セメントモルタルのワーカビリティおよびコンシステンシーが改善されること²⁻²²⁾、ペーパースラッジをセメントモルタルに混合することにより流動特性が低下し凝結時間を増加させること²⁻²³⁾、ペーパースラッジがジオポリマーコンクリートの補助添加材として使用できる可能性があること²⁻²⁴⁾などを報告している。また、Asghar Taramianらは、ペーパースラッジのパーティクルボードへの適用²⁻²⁵⁾について、Rahim Yadollahiらは、ペーパースラッジとセメントの複合建設部材²⁻²⁶⁾について研究している。

ペーパースラッジおよびペーパースラッジ灰の有効利用に関する研究は、国内外において数多く行われているものの、実用化に至っている研究は少なく、セメント原料用途以外の有効利用率は低い。また、廃棄物であるペーパースラッジの利用には技術的な開発に加えて、国の関係機関の積極的な関与が必要となる。

ペーパースラッジの有効利用を推進するには、業界や企業だけでは解決できないような問題も多々あるため、国のバックアップにより社会的意義や可能性をより深めながら、政策面における検討を行うことも必要である。

2.5 ペーパースラッジの物理化学性

本研究で使用したペーパースラッジについて、研究当初は宮城県内の A 工場より排出されたものを使用していたが、2011 年の東日本大震災において工場が被災したため、それ以降は宮城県内の B 工場のもを使用した。第 2 章のセメントミルク、第 3 章の気泡モルタルおよび第 6 章の流動モルタル、セメントベントナイトでは A 工場のペーパースラッジを、第 5 章のソイルセメントおよび第 6 章の法面緑化基盤材では B 工場のペーパースラッジを使用した。

2.5.1 ペーパースラッジの外観，組成および品質変動

本研究に用いたペーパースラッジの外観を **Fig. 2-3** に、組成を **Table 2-1** に示す。ペーパースラッジの外観は灰褐色であり、紙粘土のような状態である。また、拡大写真を見ると、微細な繊維が含まれているのがわかる。ペーパースラッジの組成は、A 工場のもが水分 48.9%，無機質分 30.3%，有機質分 20.8%，B 工場のもが水分 40.3%，無機質分 25.9%，有機質分 33.8%であった。A 工場と B 工場のペーパースラッジを比べると、B 工場のペーパースラッジの方が含水率は低く、有機質分は多い。2 工場から排出されるペーパースラッジの組成割合の違いは、それぞれの工場において使用される機械の性能および材料として使用する古紙の種類などの違いによるものであると考えられる。

ペーパースラッジの密度、含水率および強熱減量の年間変動のうち、A 工場のもを **Fig. 2-4** に、B 工場のもを **Fig. 2-5** に示す。前述したように、製紙工場毎に組成の違いはあるものの、同じ工場から排出されるペーパースラッジの組成比は年間を通じて概ね一定であることがわかる。



Fig. 2-3 ペーパーラッジ（左：外観，右：拡大）

The situation of the paper sludge (left : appearance, right : macrophotography)

Table 2-1 ペーパーラッジの組成

Constitution of a paper sludge

| | | A 工場 | B 工場 |
|-----|----------------------|-------|-------|
| 外観 | (—) | 灰褐色粒状 | 灰褐色粒状 |
| 密度 | (g/cm ³) | 2.10 | 2.01 |
| 含水率 | (%) | 48.9 | 40.3 |
| 有機質 | (%) | 20.8 | 33.8 |
| 無機質 | (%) | 30.3 | 25.9 |

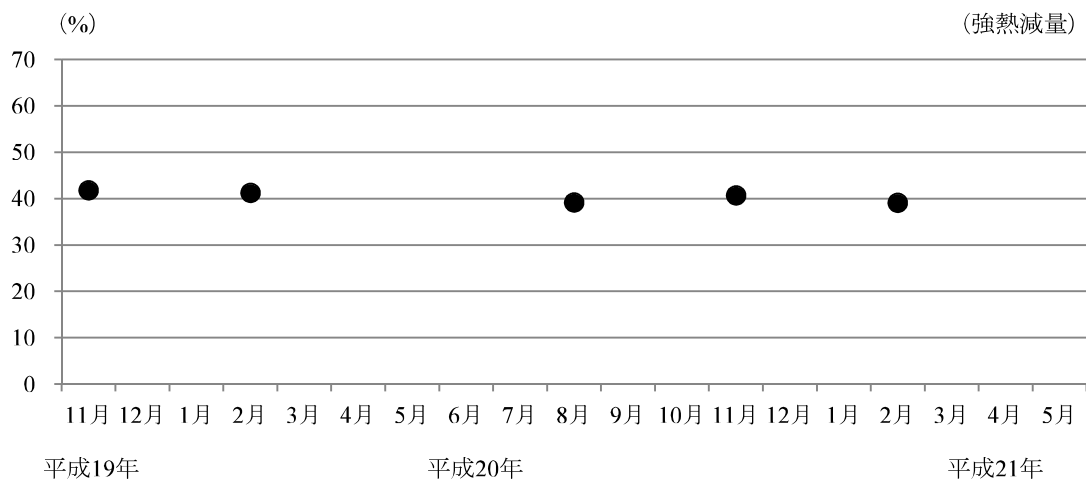
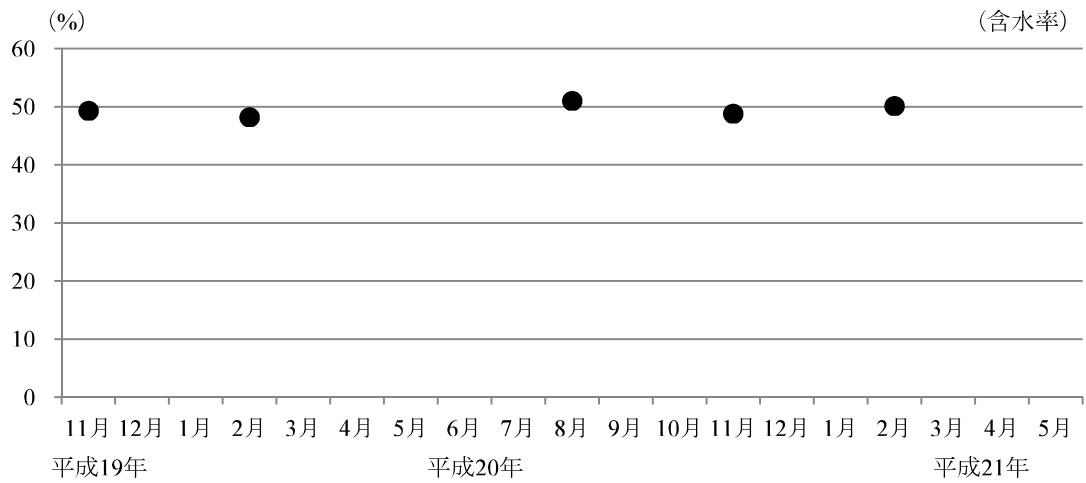
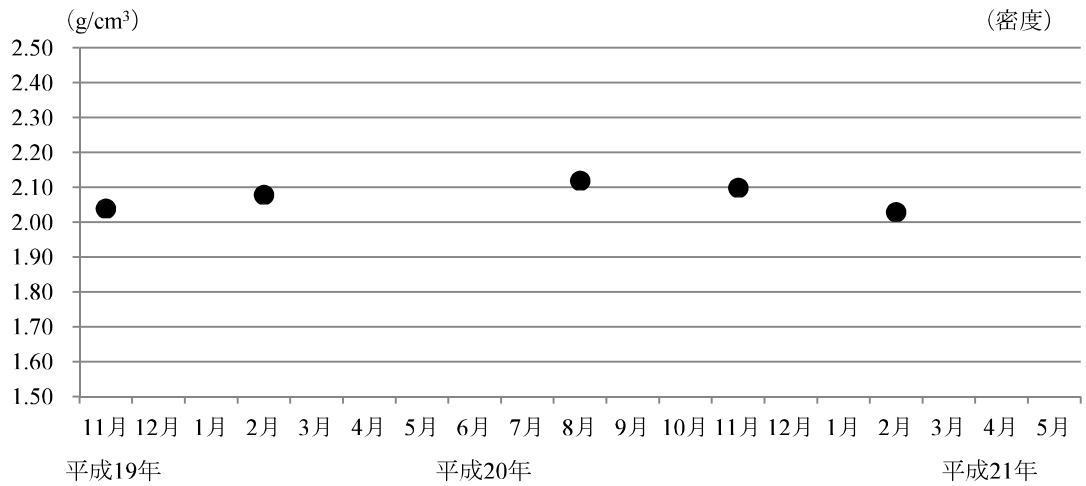


Fig. 2-4 ペーパーラッジ組成の変動（上：密度，中：含水率，下：強熱減量）

(A工場)

Fluctuation of constitution of a paper sludge (A paper mill)

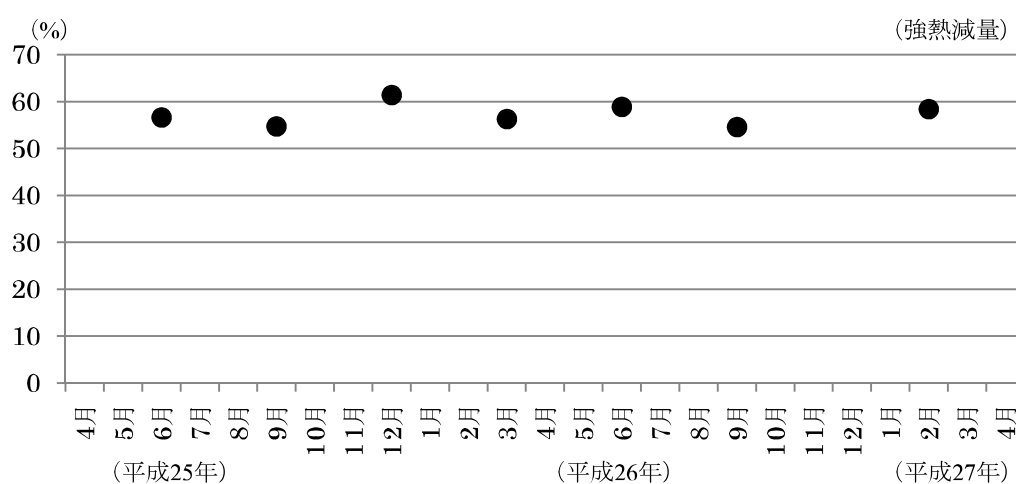
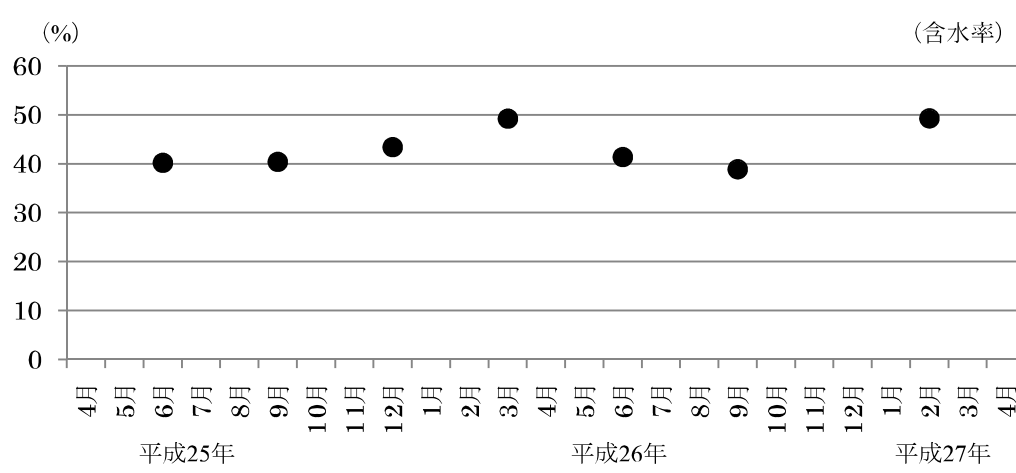
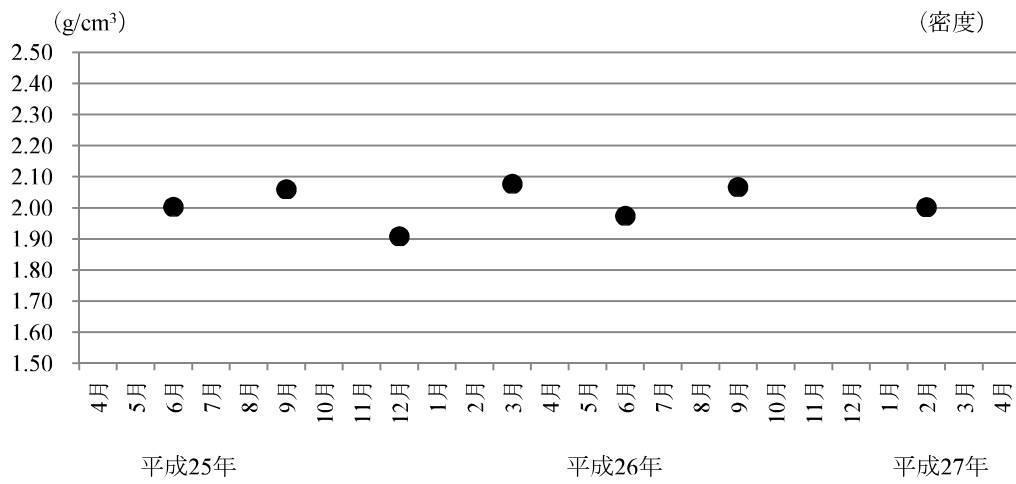


Fig. 2-5 ペーパーラッジ組成の変動 (上：密度，中：含水率，下：強熱減量)

(B工場)

Fluctuation of constitution of a paper sludge (B paper mill)

2.5.2 ペーパースラッジに含まれる繊維の長さ、直径および主要化学成分

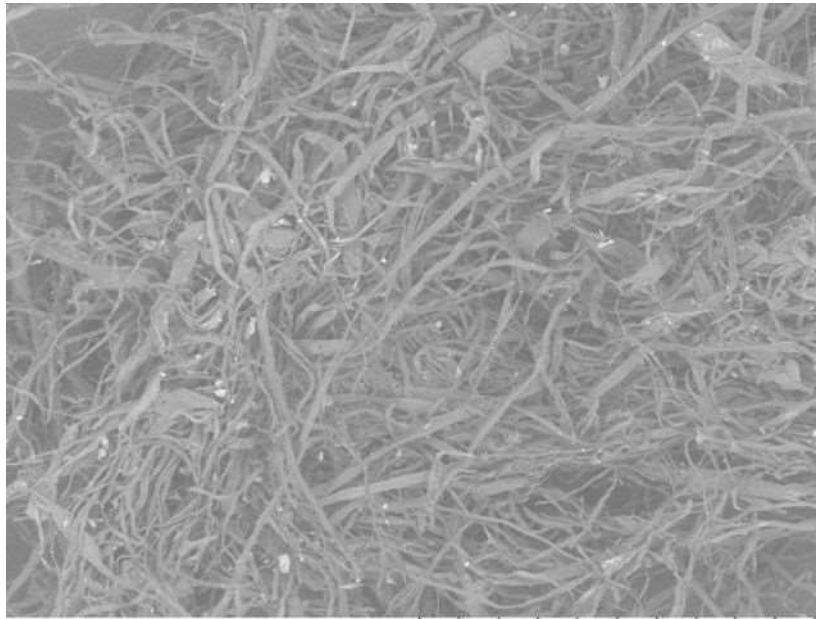
ペーパースラッジに含まれる繊維の長さ、直径および主要化学成分を **Table 2-2** に、ペーパースラッジに含まれる微細繊維の電子顕微鏡写真を **Fig. 2-6** に、ペーパースラッジの電子顕微鏡写真を **Fig. 2-7** に示す。ペーパースラッジに含まれる繊維は、A 工場のものが平均値で長さが 3.2mm、直径が 17 μ m、B 工場のものが平均値で長さが 2.5mm、直径が 14 μ m と、いずれの工場のもものも短く細いものがほとんどであった。**Fig. 2-6** より、ペーパースラッジには多くの微細な繊維が含まれているが排出時は **Fig. 2-7** に示すように、填料などの粘土分に絡まっている状態である。つまり、ペーパースラッジに含まれる微細な繊維を有効に活用するためには、使用する際に填料などの粘土分に絡まっている繊維を解きほぐす必要がある。

一方、ペーパースラッジに含まれる繊維の主要化学成分は木材由来のセルロースおよびリグニンであり、A 工場のもものはセルロースが 4.7%、リグニンが 4.3%、B 工場のもものはセルロースが 8.3%、リグニンが 5.7%含まれている。セルロースおよびリグニンの含有量は、各製紙工場における抄紙工程での微細繊維の歩留や抄紙工程および古紙パルプ工程の排水からのパルプ回収能力によって違いが生じると考えられる。

Table 2-2 ペーパースラッジに含まれる繊維の長さ、直径および主要化学成分

The length, diameter and main chemical ingredient of the fiber included in the paper sludge

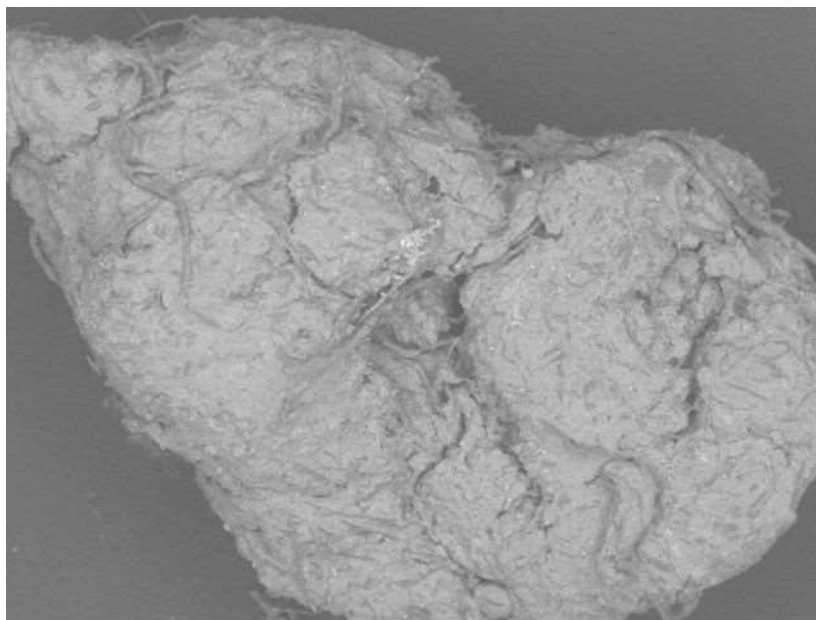
| 項目 | | 単位 | A 工場 | B 工場 | 備考 |
|------------|-------|------------|------|------|--|
| 繊維長 | | (mm) | 3.2 | 2.5 | ノギスでの計測 (20本の平均値) |
| 繊維径 | | (μ m) | 17 | 14 | 顕微鏡での計測 (20本の平均値) |
| 主要化学 成分 | セルロース | (%) | 4.7 | 8.3 | P.J.Van soest らの方法 (Proc.Nutr.Soc.,32,123,1973) |
| | リグニン | (%) | 4.3 | 5.7 | |



Miniscope0721 2012/01/07 13:58 NL x80 1 mm

Fig. 2-6 ペーパースラッジに含まれる微細繊維

Fine fiber included in the paper sludge



Miniscope0726 2012/01/07 14:17 NL x50 2 mm

Fig. 2-7 ペーパースラッジの顕微鏡写真

Micrograph of the paper sludge

2.5.3 ペーパーセラッジに含まれる無機質の化学組成

ペーパーセラッジに含まれる無機質の化学組成を **Table 2-3** に示す。ペーパーセラッジに含まれる無機質には CaO 、 SiO_2 および Al_2O_3 が多いことがわかる。紙に白さや不透明性、表面の平滑性や柔軟性を与えるための填料および顔料に使用される主な原料は石灰石（炭酸カルシウム、 CaCO_3 ）である²⁻²⁷⁾。石灰石を構成する成分には CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO および Fe_2O_3 などが含まれている。つまり、ペーパーセラッジに含まれる無機質の多くは、紙の原料として使用される古紙の填料や顔料由来のものだと推察される。

Table 2-3 ペーパーセラッジに含まれる無機質の化学組成（B工場）

Mineral chemical composition included in the paper sludge (B paper fill)

| | 化学組成 (%) |
|--------------------------------|----------|
| 強熱減量 | 56.6 |
| CaO | 23.0 |
| SiO ₂ | 9.8 |
| Al ₂ O ₃ | 5.3 |
| MgO | 1.4 |
| Fe ₂ O ₃ | 0.3 |
| その他 | 3.6 |

2.5.4 ペーパースラッジの環境安全性

ペーパースラッジを燃焼したペーパースラッジ灰そのものは、環境基準を満たしていることが多い²⁻²⁸⁾。しかし、熱回収のための焼却には、同時に化石燃料などを使用するため、排出されるペーパースラッジ灰には、微量の重金属が含まれており、土壤環境基準をクリアすることができないケースがある²⁻⁴⁾。

ペーパースラッジが建設資材として利用されるためには、その品質とともに安全性が確保されなければならない。すなわち、有害物質の溶出量が環境基準値以下でなければならない。**Table 2-4** および **Table 2-5** にペーパースラッジの溶出試験結果を示す。環境基準として、土壤環境基準（環境庁告示第46号）を判定基準とし表記した。実験に使用したペーパースラッジは、すべての項目において基準値以下であり、環境へ与える負荷は極めて小さいといえる。

Table 2-4 ペーパーズラッジからの有害物溶出試験結果

Toxic substance eluted test outcome from a paper sludge

| 計量物質 | 単位 | ペーパーズラッジ (A工場) | | | 土壌環境基準 |
|------------------|-------------|----------------|-----------|-----------|-----------|
| | | 平成 19 年 | 平成 20 年 | 平成 21 年 | |
| カドミウム | mg/l | 0.005 未満 | 0.005 未満 | 0.005 未満 | 0.01 以下 |
| 全シアン | mg/l | 0.01 未満 | 0.01 未満 | 0.01 未満 | 検出されないこと |
| 有機燐 | mg/l | 0.1 未満 | 0.1 未満 | 0.1 未満 | 検出されないこと |
| 鉛 | mg/l | 0.001 未満 | 0.001 未満 | 0.001 未満 | 0.01 以下 |
| 六価クロム | mg/l | 0.01 未満 | 0.01 未満 | 0.01 未満 | 0.05 以下 |
| 砒素 | mg/l | 0.004 未満 | 0.004 未満 | 0.004 未満 | 0.01 以下 |
| 総水銀 | mg/l | 0.0005 未満 | 0.0005 未満 | 0.0005 未満 | 0.0005 以下 |
| アルキル水銀 | mg/l | 0.0005 未満 | 0.0005 未満 | 0.0005 未満 | 検出されないこと |
| PCB | mg/l | 0.0005 未満 | 0.0005 未満 | 0.0005 未満 | 検出されないこと |
| ジクロロメタン | mg/l | 0.002 未満 | 0.002 未満 | 0.002 未満 | 0.02 以下 |
| 四塩化炭素 | mg/l | 0.0002 未満 | 0.0002 未満 | 0.0002 未満 | 0.002 以下 |
| 1,2-ジクロロエタン | mg/l | 0.0004 未満 | 0.0004 未満 | 0.0004 未満 | 0.004 以下 |
| 1,1-ジクロロエチレン | mg/l | 0.002 未満 | 0.002 未満 | 0.002 未満 | 0.02 以下 |
| トリス-1,2-ジクロロエチレン | mg/l | 0.004 未満 | 0.004 未満 | 0.004 未満 | 0.04 以下 |
| 1,1,1-トリクロロエタン | mg/l | 0.0005 未満 | 0.0005 未満 | 0.0005 未満 | 1 以下 |
| 1,1,2-トリクロロエタン | mg/l | 0.0006 未満 | 0.0006 未満 | 0.0006 未満 | 0.006 以下 |
| トリクロロエチレン | mg/l | 0.002 未満 | 0.002 未満 | 0.002 未満 | 0.03 以下 |
| テトラクロロエチレン | mg/l | 0.0005 未満 | 0.0005 未満 | 0.0005 未満 | 0.01 以下 |
| 1,3-ジクロロプロペン | mg/l | 0.0002 未満 | 0.0002 未満 | 0.0002 未満 | 0.002 以下 |
| チウラム | mg/l | 0.0006 未満 | 0.0006 未満 | 0.0006 未満 | 0.006 以下 |
| シマジン | mg/l | 0.0003 未満 | 0.0003 未満 | 0.0003 未満 | 0.003 以下 |
| チオベンカルブ | mg/l | 0.0003 未満 | 0.0003 未満 | 0.0003 未満 | 0.02 以下 |
| ベンゼン | mg/l | 0.001 未満 | 0.001 未満 | 0.001 未満 | 0.01 以下 |
| セレン | mg/l | 0.001 未満 | 0.001 未満 | 0.001 未満 | 0.01 以下 |
| フッ素 | mg/l | 0.11 | 0.20 | 0.10 | 0.8 以下 |
| ホウ素 | mg/l | 0.1 未満 | 0.1 未満 | 0.1 未満 | 1 以下 |
| 砒素及びその化合物 | mg/kg 乾量 | 0.05 未満 | 0.08 | 0.44 | 15 未満 |

Table 2-5 ペーパーセラッジからの有害物溶出試験結果

Toxic substance eluted test outcome from a paper sludge

| 計量物質 | 単位 | ペーパーセラッジ (B 工場) | | | 土壌環境基準 |
|-------------------|-------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|
| | | 平成 25 年 | 平成 26 年 | 平成 27 年 | |
| カドミウム | mg/l | 0.005 未満 | 0.005 未満 | 0.005 未満 | 0.01 以下 |
| 全シアン | mg/l | 0.01 未満 | 0.01 未満 | 0.01 未満 | 検出されないこと |
| 有機燐 | mg/l | 0.1 未満 | 0.1 未満 | 0.1 未満 | 検出されないこと |
| 鉛 | mg/l | 0.001 未満 | 0.001 未満 | 0.001 未満 | 0.01 以下 |
| 六価クロム | mg/l | 0.01 未満 | 0.01 未満 | 0.01 未満 | 0.05 以下 |
| 砒素 | mg/l | 0.004 未満 | 0.004 未満 | 0.004 未満 | 0.01 以下 |
| 総水銀 | mg/l | 0.0005 未満 | 0.0005 未満 | 0.0005 未満 | 0.0005 以下 |
| アルキル水銀 | mg/l | 0.0005 未満 | 0.0005 未満 | 0.0005 未満 | 検出されないこと |
| PCB | mg/l | 0.0005 未満 | 0.0005 未満 | 0.0005 未満 | 検出されないこと |
| ジクロロメタン | mg/l | 0.002 未満 | 0.002 未満 | 0.002 未満 | 0.02 以下 |
| 四塩化炭素 | mg/l | 0.0002 未満 | 0.0002 未満 | 0.0002 未満 | 0.002 以下 |
| 1,2-ジクロロエタン | mg/l | 0.0004 未満 | 0.0004 未満 | 0.0004 未満 | 0.004 以下 |
| 1,1-ジクロロエチレン | mg/l | 0.002 未満 | 0.002 未満 | 0.002 未満 | 0.02 以下 |
| トランス-1,2-ジクロロエチレン | mg/l | 0.004 未満 | 0.004 未満 | 0.004 未満 | 0.04 以下 |
| 1,1,1-トリクロロエタン | mg/l | 0.0005 未満 | 0.0005 未満 | 0.0005 未満 | 1 以下 |
| 1,1,2-トリクロロエタン | mg/l | 0.0006 未満 | 0.0006 未満 | 0.0006 未満 | 0.006 以下 |
| トリクロロエチレン | mg/l | 0.002 未満 | 0.002 未満 | 0.002 未満 | 0.03 以下 |
| テトラクロロエチレン | mg/l | 0.0005 未満 | 0.0005 未満 | 0.0005 未満 | 0.01 以下 |
| 1,3-ジクロロプロペン | mg/l | 0.0002 未満 | 0.0002 未満 | 0.0002 未満 | 0.002 以下 |
| チウラム | mg/l | 0.0006 未満 | 0.0006 未満 | 0.0006 未満 | 0.006 以下 |
| シマジン | mg/l | 0.0003 未満 | 0.0003 未満 | 0.0003 未満 | 0.003 以下 |
| チオベンカルブ | mg/l | 0.0003 未満 | 0.0003 未満 | 0.0003 未満 | 0.02 以下 |
| ベンゼン | mg/l | 0.001 未満 | 0.001 未満 | 0.001 未満 | 0.01 以下 |
| セレン | mg/l | 0.001 未満 | 0.001 未満 | 0.001 未満 | 0.01 以下 |
| フッ素 | mg/l | 0.30 | 0.20 | 0.19 | 0.8 以下 |
| ホウ素 | mg/l | 0.1 未満 | 0.1 未満 | 0.1 未満 | 1 以下 |
| 砒素及びその化合物 | mg/kg 乾量 | 0.05 未満 | 0.05 未満 | 0.05 未満 | 15 未満 |

2.6 ペーパースラッジの腐敗対策

排出直後のペーパースラッジは有機質と 30～60%の水分を含んでいるため、そのまま放置すると数日で腐敗が始まってしまい、悪臭の発生および品質変化が生じてしまう。ペーパースラッジを建設資材として安定的に利用するには、製紙工場より排出され、建設現場において使用するまで、建設資材としての品質を保持する必要がある。そこで本研究では、ペーパースラッジの建設資材としての品質保持を目的として、高温蒸気および消石灰を用いた腐敗対策を講じた。

ペーパースラッジの腐敗対策は、ペーパースラッジを 80～100℃の高温蒸気により 20 分間殺菌し、消石灰をペーパースラッジ質量に対して 2.5%添加した。ペーパースラッジの腐敗対策状況を **Fig. 2-8** に示す。

ペーパースラッジの腐敗対策前と対策後の組成を **Table 2-6** に示す。腐敗対策前と対策後のペーパースラッジの組成は消石灰を添加するために、若干密度が高くなり、無機質分が増加しているが、それぞれの値に大きな違いはないことがわかる。

本研究では、ペーパースラッジの殺菌効果について、一般細菌数、カビ数および強熱減量により評価を行った。ペーパースラッジの一般細菌数、カビ数および強熱減量について、排出直後、腐敗対策後および 1 年後の値を **Table 2-7** に示す。1 年後の値は、ペーパースラッジを腐敗対策後に袋詰めしたものおよび排出直後にそのまま袋詰めしたものを室内において常温で保存したものをを用いた。

排出直後のペーパースラッジの一般細菌数は 4.8×10^9 個/g、カビ数は 4.8×10^9 個/g であり、大量の一般細菌およびカビが含まれているのがわかる。腐敗対策後のペーパースラッジの一般細菌数は 4.8×10^4 個/g、カビ数は 30 個/g であり、腐敗対策による殺菌効果が高いことがわかる。また、一年後の数値を比べると、腐敗対策を講じたペーパースラッジの一般細菌数は 300 個以下/g、カビ数は陰性/0.1g、腐敗対策を講じていないペーパースラッジの一般細菌数は 1.9×10^9 個/g、カビ数は 3.1×10^7 個/g であり、腐敗対策によりペーパースラッジの一般細菌数およびカビ数が一年後にも増加していないのがわかる。また、一年後の強熱減量についてみると、腐敗対策を講じたペーパースラッジの強熱減量は 54.0% であり、排出直後とほとんど変化がないのに対して、腐敗対策を講じていないペーパースラッジは 49.5% であり、約 5% 有機質分が減少しているのがわかる。よって、本研究で用いた腐敗対策により、ペーパースラッジを安定した品質で建設資材として利用することが可能であると判断できる。



Fig. 2-8 ペーパーズラッジの腐敗対策状況

The corruption measure situation of the paper sludge

Table 2-6 ペーパーズラッジの組成

Composition of paper sludge

| 項目 | | A 工場 | | B 工場 | |
|-----|----------------------|------|------|------|------|
| | | 対策前 | 対策後 | 対策前 | 対策後 |
| 密度 | (g/cm ³) | 2.10 | 2.12 | 2.01 | 2.03 |
| 含水率 | (%) | 48.9 | 50.0 | 40.3 | 38.7 |
| 有機質 | (%) | 20.8 | 18.5 | 33.8 | 32.7 |
| 無機質 | (%) | 30.3 | 31.5 | 25.9 | 28.6 |

Table 2-7 ペーパーセラッジの一般細菌数，カビ数および強熱減量

The state of paper sludge; for example number of general bacteria, mold and ignition loss

| 項目 | 排出直後 | 腐敗対策後 | 1年後 | | 方法 |
|----------------|-------------------|-------------------|----------|-------------------|-------------------------------|
| | | | 腐敗対策あり | 腐敗対策なし | |
| 一般細菌数 (個/g) | 4.8×10^9 | 3.6×10^4 | 300 以下/g | 1.9×10^9 | 標準寒天平板培養法 |
| カビ数 (個/g) | 4.0×10^3 | 30 | 陰性/0.1g | 3.1×10^7 | ホ°テトテ°キストロース (10%) 寒天平板培養法 |
| 強熱減量 (%) | 54.6 | 53.8 | 54.0 | 49.5 | JIS A 1226 |

2.7 ペーパーラッジを用いたセメントミルクの物性

建設資材として多く使用されるセメントに混合した際の物性について確認する目的で、ペーパーラッジを混合したセメントミルクの物性について室内試験により確認した。

2.7.1 材料および試験方法

1) 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント（密度 3.16 g/cm^3 ）を用いた。ペーパーラッジは前述した腐敗対策を講じたものを使用した（土粒子の密度 2.12 g/cm^3 ， $\text{pH}10.8$ ，含水率 50.0% ）（以下，腐敗対策を講じたペーパーラッジを PS という）。なお，本研究に用いた PS は「土壌の汚染に係る環境基準」（環境庁告示第 46 号）によりその安全性を確認した後，実験に用いている。

2) 配合設計および試験方法

セメントミルクの配合を **Table 2-8** に示す。配合設計では，PS に含まれる水分を練り水として計算し，水セメント比を一定とした。PS は 1 m^3 あたり $0,20,40,60,80$ および 100kg 混合した。

試験項目は湿潤密度試験（JIS A 1116），流動性試験（JSCE-F521），ブリーディング試験（24h 後）（JSCE-F522），圧縮強度試験（材齢 7，28 日）（JIS A 1108），曲げ強度試験（材齢 28 日）（JIS A 1106）および引張強度試験（材齢 28 日）（JIS A 1113）である。圧縮強度および引張強度試験用の供試体は $\phi 50 \times 100 \text{ mm}$ の円柱とし，曲げ強度試験は $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ の角柱供試体とした。脱型は打設翌日に行い，養生はすべて 20°C の恒温室における気中養生とした。

練混ぜ方法は，練り水に PS を投入し，1 分間攪拌して分散させたあと，セメントを投入し 3 分間攪拌した。

Table 2-8 セメントミルクの配合 (1 m³あたり)

Mix proportion of cement milk

| 配合名 | セメント | PS | 水 | W/C |
|-------|------|-----|-----|------|
| PS0 | 1230 | 0 | 611 | 49.7 |
| PS20 | 1224 | 20 | 598 | 49.7 |
| PS40 | 1218 | 40 | 585 | 49.7 |
| PS60 | 1212 | 60 | 572 | 49.7 |
| PS80 | 1206 | 80 | 559 | 49.7 |
| PS100 | 1201 | 100 | 547 | 49.7 |

2.7.2 結果および考察

1) セメントミルクのフレッシュ性状

湿潤密度試験の結果を **Fig. 2-9** に示す。いずれの配合においても湿潤密度に大きな差はみられなかったが、PS の混合量が増えるに伴い粘性が増し、空気の取り込みが多くなる傾向がみられた。本研究においては、打設後のバイブレーションにより、排除することができたが、余分な空気の取り込みは強度に大きな悪影響を与えるため注意が必要である。

流動性試験の結果を **Fig. 2-10** に、流動性試験の状況を **Fig. 2-11** に示す。PS を用いたセメントミルクは、PS 混合量の増加に伴い P 漏斗流下時間は長くなり、流動性が低下する傾向を示した。とくに、PS 混合量が 60 kg/m^3 を越えてから P 漏斗流下時間を表す曲線の勾配が急になり、 80 kg/m^3 では急激に時間が長くなった。また、 100 kg/m^3 では漏斗からセメントミルクが落下せず、測定不能となった。これは、PS の高い吸水性および保水性により、セメントミルクの粘性が増加したためだと考えられる。セメントミルクの粘性の増加による流動性の低下は、ポンプ圧送や型枠打設を困難にするため、配合設計の際は用途に合わせて、PS の混合量を設定する必要がある。

ブリーディング試験の結果を **Fig. 2-12** に示す。PS20 では若干増加したものの、全体的に PS 混合量の増加に伴い、ブリーディング率は減少傾向にあった。PS100 のブリーディング率は PS0 の半分以下に減少した。これは、PS に含まれる繊維の高い吸水性および親水性により、セメントミルク内の水の移動を抑制したためと考えられる。セメントミルクの過度のブリーディングは、打設上層部分の水セメント比増加による強度低下や上昇した水が水みち（毛細管空隙）を形成し、外部からの水、炭酸ガス、塩化物等の侵入を容易にするなど、セメントミルクにとっては有害である²⁻²⁹⁾。また、それによって寒冷地においては重要な耐凍害性が低下する可能性も高い。そのため、品質の良いセメントミルクをつくるには、ブリーディングの防止は必要不可欠である。

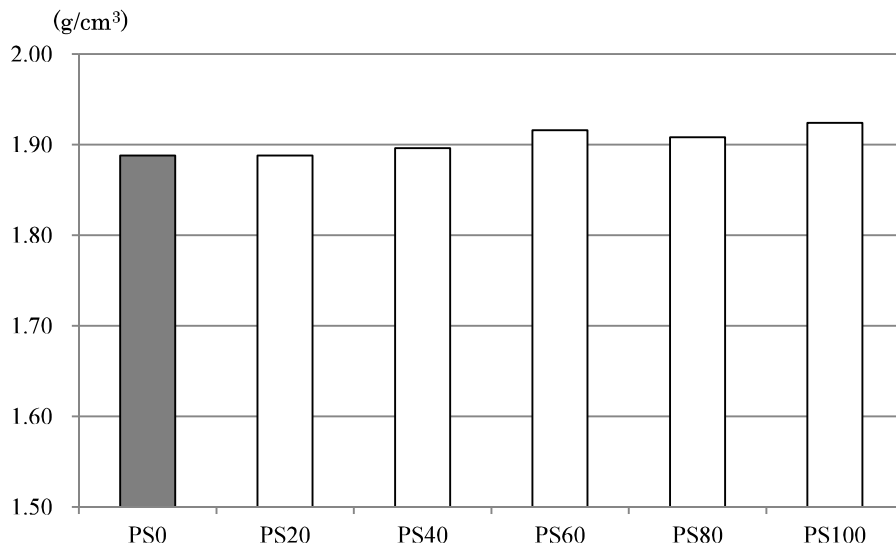


Fig. 2-9 湿潤密度試験結果
Wet density test result

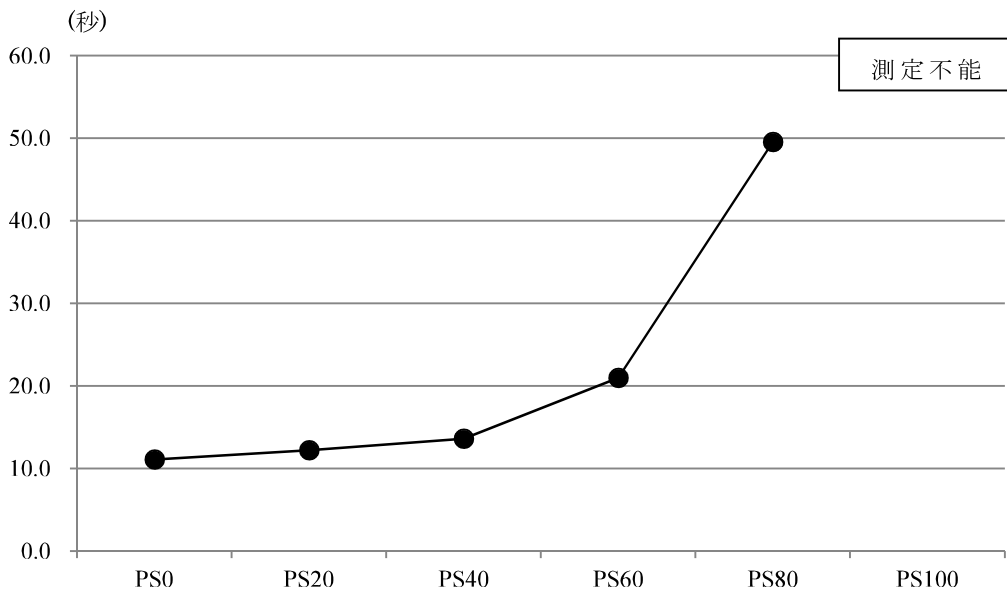


Fig. 2-10 流動性試験結果
Flowability test result



Fig. 2-11 流動性試験の状況
The situation of the flowability test

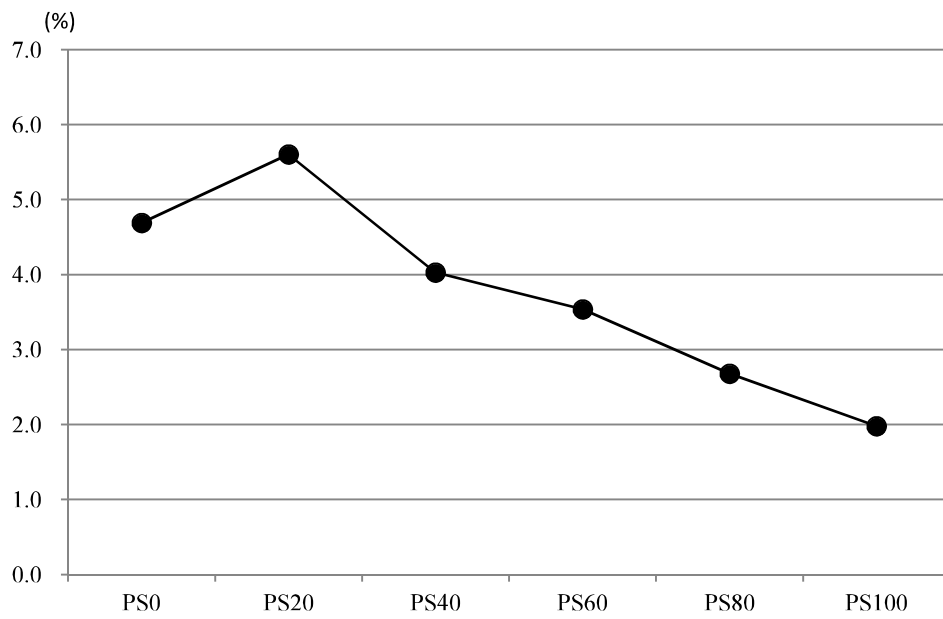


Fig. 2-12 ブリーディング試験結果
Bleeding test result

2) 硬化セメントミルクの強度特性

材齢 7 および 28 日の圧縮強度試験結果を **Fig. 2-13** に示す。PS20, PS40, PS60 および PS80 の圧縮強度は、材齢 7, 28 日ともに PS0 と同等か若干の強度増加がみられた。一方、PS100 の圧縮強度は PS0 と比べて、材齢 7, 28 日ともに若干の強度低下がみられた。本研究のセメントミルクの配合においては、PS の混合量が 80 kg/m³ までであれば強度低下はみられず、PS0 と同等であると判断できる。しかし、PS の混合量が 100 kg/m³ 以上のセメントミルクでは強度が低下する可能性があることがわかった。木材系の有機質繊維を含む PS をセメントミルクに混合することにより、少ない配合量から強度低下または強度発現の遅れが生じると想定していたが、水セメント比を一定とした配合では PS の混合量が 80 kg/m³ までであれば、強度低下や強度発現の遅れはみられないことが確認された。これは、PS に含まれる有機質繊維はセメントとの親和性が高いためであると推察される。

曲げ強度試験における曲げ/圧縮強度比を **Fig. 2-14** に、引張強度試験における引張/圧縮強度比を **Fig. 2-15** に示す。通常、セメントミルクに繊維を混合すると曲げ強度および引張強度の増加が期待できるが、本研究における曲げ強度試験および引張強度試験においては、PS の混合量による大きな変化はみられなかった。これは、PS に含まれる繊維が短く細い繊維であることおよび繰り返し利用された繊維のため表面のひだがり減っていること⁴⁾などの理由により、圧縮強度が 40N/mm² 以上であるセメントミルクの曲げ・引張強度に影響がなかったのではないかと考えられる。

PS0 および PS60 における圧縮強度試験の供試体の破壊状況を **Fig. 2-16** に示す。PS0 では、破壊時に供試体表面が大きく剥離しているのに対して、PS60 ではひび割れを起こしているものの、大きな供試体表面の剥離はみられなかった。その他の PS を混合した配合においても、破壊時の表面剥離は少なかった。前述したように、PS を混合したセメントミルクには、曲げ強度および引張強度の値に表れるような靱性の向上はみられなかったが、供試体の破壊状況からは、PS に含まれる繊維による脆性的性質の改善効果が示唆された。

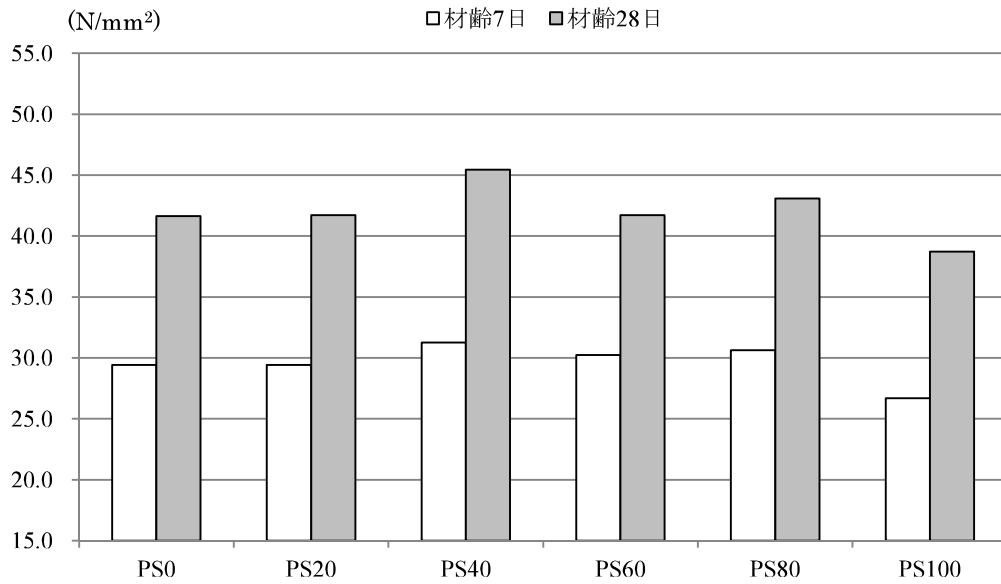


Fig. 2-13 圧縮強度試験（材齡 7,28 日）

Compressive strength test result ($\sigma_{7,28}$)

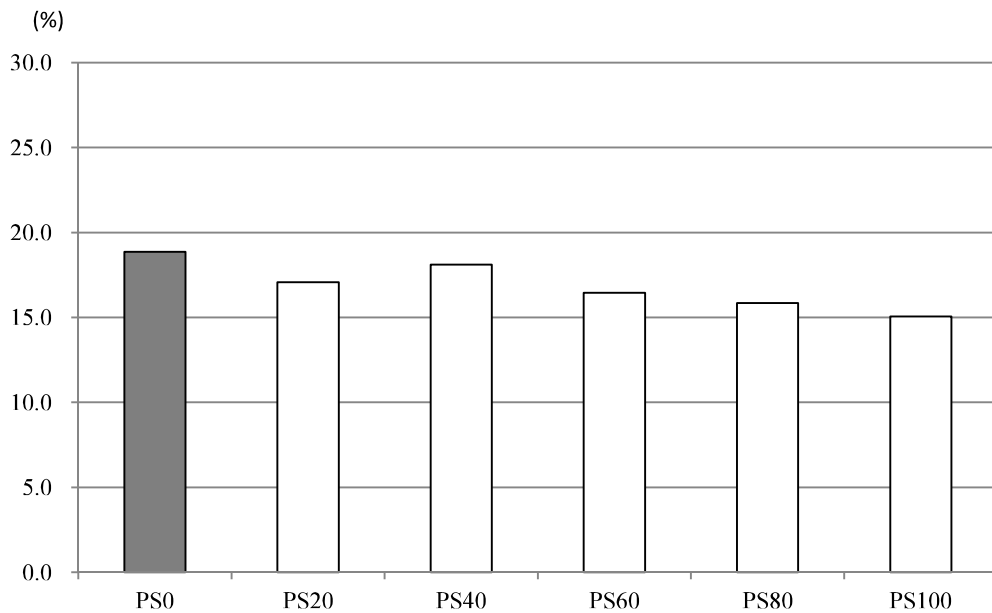


Fig. 2-14 曲げ／圧縮強度比

The ratio of bending strength and the compressive strength

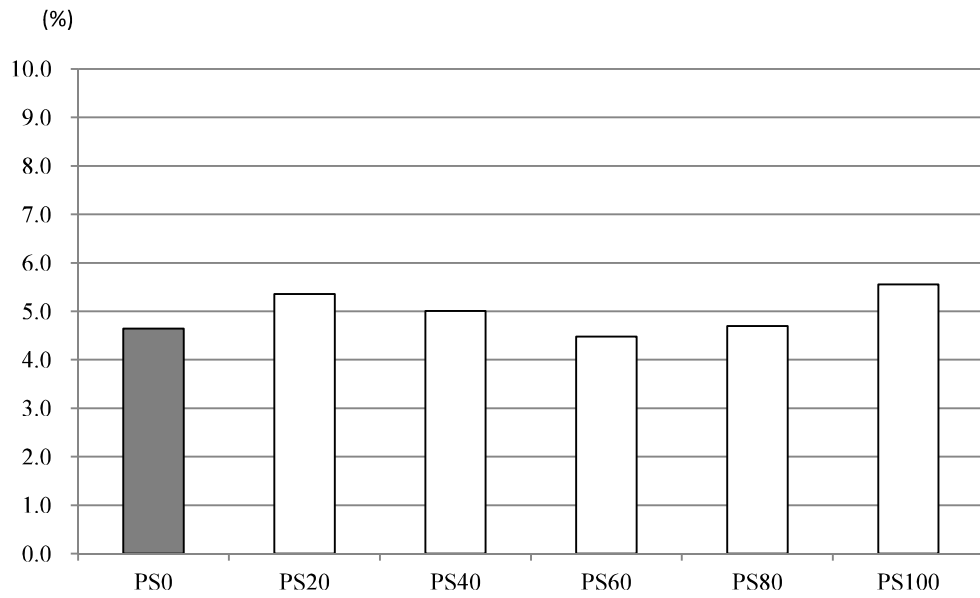


Fig. 2-15 引張／圧縮強度比

The ratio of pulling strength and the compressive strength



Fig. 2-16 圧縮強度試験（左：PS10，右：PS60）

Specimen after the compressive strength

2.8 まとめ

ペーパースラッジの物理化学性および PS を混合したセメントミルクの物性について室内試験により確認した。本章の結果を要約すると以下ようになる。

(1) ペーパースラッジの物理化学性

- ① ペーパースラッジは、セルロースやリグニンなどの有機質、填料や顔料に使用される炭酸カルシウムなどの無機質および水分が混合されたものである。
- ② 本研究で使用したペーパースラッジについて、同工場から排出されるペーパースラッジの組成比は、年間を通じて概ね一定であった。
- ③ ペーパースラッジは、重金属等の溶出試験においてすべての項目で土壤環境基準値以下であり、安全性は高い。
- ④ ペーパースラッジに高温蒸気および消石灰による腐敗対策を講じることにより、一般細菌数およびカビ数の増加を防ぐことが可能である。

(2) PS を用いたセメントミルクの物性

- ① PS 混合量の増加に伴い、セメントミルクの流動性は低下し、ブリーディング量は減少する傾向が確認された。
- ② PS 混合量が 80 kg/m³までのセメントミルクは、材齢 7 および 28 日における圧縮強度の低下は確認されなかった。但し、PS 混合量が 100 kg/m³を超えると強度低下の可能性がある。
- ③ PS の混合によるセメントミルクの曲げ強度および引張強度への大きな影響はない。
- ④ PS を混合したセメントミルクには、供試体破壊時の表面剥離が軽減される傾向がみられた。

第3章

ペーパースラッジの気泡モルタルへの適用

第3章 ペーパースラッジの気泡モルタルへの適用

3.1 概説

気泡モルタルとは、セメント、水および気泡を混合したものであり、必要によっては細骨材が混合される。その特性は軽量性や流動性に優れていることであり、単位体積重量 0.3 という超軽量気泡モルタルも報告されている³⁻¹⁾。

気泡モルタルの主な用途は充填材や軽量盛土材である。例えば、既設トンネルの補修工事における裏込め充填材、パイプ・イン・パイプ工法（老朽化した既設管の非開削更新工法）の中込充填材、不要となった水路および上下水道管の中込充填材など、多くの農業水利施設におけるストックマネジメント事業においても利用されている。また、Foamed Cement Banking Method (FCB工法) は気泡モルタルを盛土工に用いることにより、軽量化され、道路建設において数多くの施工実績がある³⁻²⁾。

近年、リサイクルや環境負荷低減の観点から、廃棄物を利用した気泡モルタルも研究されている。例えば、廃 EPS（発泡スチロール）粉砕品³⁻³⁾³⁻⁴⁾、瓦廃材、熔解ダスト、掘削汚泥焼成材³⁻⁵⁾³⁻⁶⁾および木材の廃材や植林間伐材を材料としたセラミック炭³⁻⁷⁾などを用いた気泡モルタルの研究が報告されている。また、気泡モルタルに繊維を添加した研究として、ビニロン繊維を添加した研究³⁻⁸⁾³⁻⁹⁾³⁻¹⁰⁾などが報告されているが、ペーパースラッジを添加した気泡モルタルの研究は行われていない。

他方、気泡モルタルには独立した微細な気泡と、その分散性および安定性が必要である。しかし、現状では気泡の一部が混合時や圧送時に消えてしまうため、その低下分を見込んで気泡の割増施工を行っている³⁻²⁾。これらの割増された気泡は打設後においても圧力の影響を受け固化するまでに体積変化を起こす³⁻¹¹⁾ため、再充填や打設高さの制限が発生する。さらに、降雨時には、一旦発泡したものが雨水圧により消滅し、流動性が失われ打設することが困難となる。つまり、現状の気泡モルタルは混入している気泡により軽量性や流動性といった特徴を有する反面、練混ぜ、圧送時や自重による圧力および降雨や滞水に対して気泡量を維持できないという課題がある。

本章では、気泡モルタルの材料分離の抑制を目的として、ペーパースラッジを混和材として用いた気泡モルタルの物性について、室内試験により確認

し、利用の可能性について検証している。また、施工現場における実証試験を行い、施工性について評価している。室内試験では、ペーパースラッジを用いた気泡モルタルを作製し、フレッシュ時の性状、強度特性、乾湿繰り返しおよび凍結融解抵抗性について評価している。とくに、ペーパースラッジによる気泡の分離低減効果について着目し、一般に気泡モルタルとして使用されるエアミルクおよびエアモルタルと比較・検討している。施工現場においては、農業用水路の補修・改修工事および不要となったボックスカルバートの充填閉塞工事にペーパースラッジを用いた気泡モルタルを適用し、その物性および施工性について評価している。

3.2 材料および試験方法

3.2.1 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント（密度 3.16 g/cm^3 ）を用いた。ペーパースラッジ（以下、PS という）は含水率 54% のもの（密度 2.12 g/cm^3 ）を用いた。細骨材には山砂（表乾密度 2.58 g/cm^3 ）を用いた。起泡剤は特殊蛋白質加水分解物を主成分としたエアミルクおよびエアモルタル用の剤（密度 1.16 g/cm^3 ）を用いた。

3.2.2 試験配合および供試体の作製方法

本研究における配合設計では、材料分離抵抗性を重視し、予備試験結果から PS の混合量を 1m^3 あたり 100kg とした。PS を用いた気泡モルタル（以下、PS 気泡モルタルという）、比較したエアミルクおよびエアモルタルの配合を **Table 3-1** に示す。

PS 気泡モルタルの練混ぜ方法は、はじめに PS を練混ぜ水に投入し 1 分間攪拌、その後、セメントを投入し 3 分間攪拌、最後に発泡装置から独立気泡を投入した。エアミルクの練混ぜ方法は、セメントを練混ぜ水に投入し 3 分間攪拌、その後、発泡装置から独立気泡を投入した。エアモルタルの練混ぜ方法は、セメントと細骨材を 1 分間攪拌、その後、練混ぜ水を投入し 3 分間攪拌、最後に発泡装置から独立気泡を投入した。圧縮強度、乾湿繰り返し試験および凍結融解試験の供試体は $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱、曲げ強度試験の供試体は $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ の角柱とした。圧縮強度および曲げ強度試験の供試体は、試験材齢毎に 3 本ずつ作製した。乾湿繰り返しおよび凍結融解試験の供試体は、12 本ずつ作製し、所定サイクルの圧縮強度試験に 3 本ずつ使用した。

Table 3-1 モルタルの配合

Mix proportion of mortar

| 配合名 | W/C (%) | 空気量 (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | |
|-----------|------------|------------|--------------------------|-----|-------------|-----|
| | | | セメント | PS | 細骨材 (山砂) | 水 |
| PS 気泡モルタル | 67.8 | 35 | 600 | 100 | - | 407 |
| エアミルク | 67.8 | 35 | 600 | - | - | 441 |
| エアモルタル | 50.7 | 35 | 600 | - | 532 | 271 |

3.2.3 試験項目および試験方法

試験項目は、湿潤密度試験（重量法）、フロー試験（JHS A 313）、ブリーディング試験（JSCE-F522）、沈下量試験（φ150×300mm 型枠に充填して測定）、圧縮強度試験（JIS A 1108）、曲げ強度試験（JIS A 1106）、乾湿繰り返し試験（「建設汚泥の高度処理 利用技術の開発」試験法に準拠）、凍結融解試験（JHS 215「突固めたセメント安定処理混合物の凍結融解試験方法」）である。なお、一般にコンクリートの凍結融解試験では、水中凍結水中融解（JIS A 1148）を 300 サイクル行われるが、気泡モルタルの場合、軽量盛土工法で用いられることが多く、その際の試験法は JHS 215 法となっていることから、本研究においても JHS 215 法とした³⁻¹¹⁾。

また、材料分離抵抗性は **Fig. 3-1** に示す滞留水中における施工を想定した実験により確認した。内径 100mm、高さ 1,000mm の塩化ビニル製容器に予め 2L の水を入れ、容器の中心に内径 30mm のトレミー管を容器の底まで挿入し、トレミー管を少しずつ上昇させながら約 8L のモルタルを充填した。硬化後、長さ 200mm 間隔に切断し、それぞれについて見掛け密度、圧縮強度を測定した。比較実験として、PS 気泡モルタルの他に、水セメント比と空気量を一定としたエアミルクおよび空気量を一定とし、セメント砂比を 1 : 1 としたエアモルタルの 2 配合の供試体も作製した。

乾湿繰り返し試験の乾湿条件は、40℃乾燥2日、20℃水に浸せき1日の合計3日を1サイクルとし、10サイクル繰り返した。凍結融解試験の凍結融解条件は-23℃凍結24h、20℃水中融解24hの合計2日を1サイクルとし、12サイクル繰り返した。乾湿繰り返しおよび凍結融解の試験条件およびサイクル数はそれぞれの規格に準じた。

ブリーディング試験および沈下量試験は、それぞれ3、20h後に実施し、圧縮強度試験、曲げ強度試験に関しては材齢7、28日に行った。乾湿繰り返し試験、凍結融解試験は材齢28日の供試体を使用した。脱型は各試験前日に行い、養生はすべて20℃の恒温室における気中とし、水分の蒸発を防ぐために、供試体はポリ塩化ビニリデンフィルムで試験材齢まで密封養生とした。

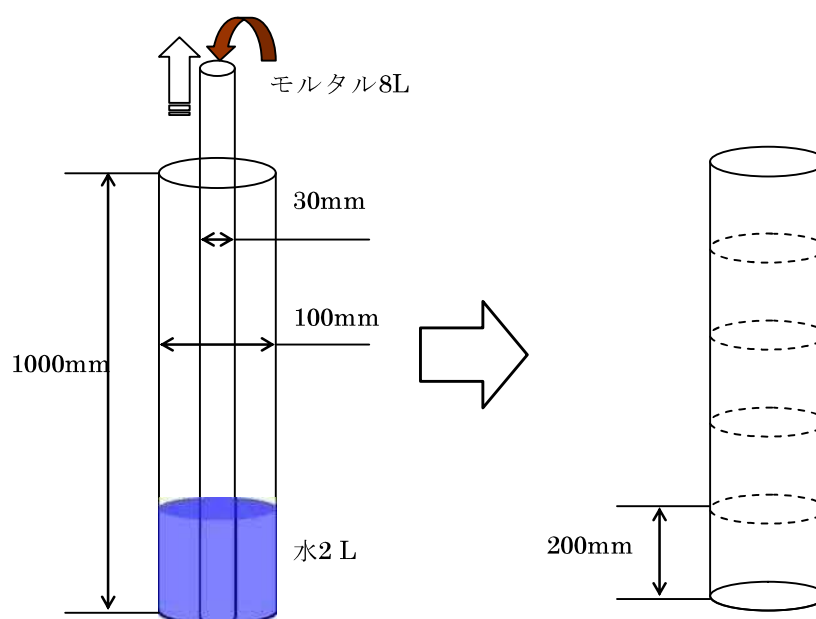


Fig. 3-1 材料分離抵抗性試験方法

Segregation test method

3.3 結果および考察

3.3.1 フレッシュモルタルの性状と強度特性

PS 気泡モルタルのフレッシュ性状を **Table 3-2** に、PS 気泡モルタル、エアミルクおよびエアモルタルの強度特性を **Table 3-3** に示す。ブリーディングが著しい場合、上部が多孔質になり弱層を形成するなど、均一性を求められるモルタルには致命的な欠陥となる。PS 気泡モルタルでは 3 および 20h 後ともにブリーディングは見られなかった。その理由として、吸水率が大きく親水性が高い繊維質がモルタル内の水の移動を抑制したためと考えられる。また、硬化に伴う収縮も認められず体積変化はないと判断された。

PS 気泡モルタルの圧縮強度は、同じ水セメント比のエアミルクと比較して 4 割程度小さくなった。これは、有機質に含まれている水分が練混ぜ水として供給され、水セメント比が高くなることによると考えられる。一方、エアミルクおよびエアモルタルの曲げ強度は圧縮強度の 3 割程度だったのに対して、PS 気泡モルタルの曲げ強度は圧縮強度の 4 割近くの数値を示した。これは、PS に含まれる繊維質による曲げ靱性が付与されたためと考えられる。

Table 3-2 PS 気泡モルタルのフレッシュ性状

Properties of fresh mortar of paper sludge air mortar

| 試験項目 | 試験値 | | | |
|-------------------------|------|---|-------|---|
| 密度 (g/cm ³) | 1.13 | | | |
| フロー値 (mm) | 222 | | | |
| ブリーディング率 (%) | 3h 後 | 0 | 20h 後 | 0 |
| 凝結沈下量 (%) | 3h 後 | 0 | 20h 後 | 0 |

Table 3-3 PS 気泡モルタル, エアミルクおよびエアモルタルの圧縮強度および曲げ強度試験結果

Compressive strength and flexural strength test result of paper sludge air mortar,
air-milk and air mortar

| 試験項目 | | PS 気泡モルタル | エアミルク | エアモルタル |
|------------------------------|---------|-----------|-------|--------|
| 圧縮強度 (N/mm ²) | 材齢 7 日 | 2.76 | 4.56 | 6.04 |
| | 材齢 28 日 | 4.30 | 7.21 | 8.24 |
| 曲げ強度 (N/mm ²) | 材齢 7 日 | 1.16 | 1.53 | 2.08 |
| | 材齢 28 日 | 1.64 | 2.16 | 2.46 |

3.3.2 乾湿繰り返し試験

気泡モルタルの用途によっては、降雨、乾燥などの気象作用による細粒化現象や地下水などによる浸食等を受けることが想定される。これらの作用に対する抵抗性を把握するために、乾湿繰り返し試験を行った。

PS 気泡モルタルの各サイクルでの見掛け密度と 3, 7 および 10 サイクルにおける圧縮強度試験結果を **Fig. 3-2** に示す。見掛け密度および圧縮強度の低下も認められないことから、乾湿繰り返しによる劣化は少ないと判断される。乾湿繰り返しによる劣化は、乾燥工程における気泡モルタル間隙中の水分蒸発により、収縮が生じ、表面からクラックが入ることにより強度が大きく低下するためである³⁻¹²⁾。

PS 気泡モルタルが、乾湿繰り返しによる劣化が少なく高い耐久性を示すのは、保水性の高い PS に含まれる繊維質が水分の蒸発を抑制することおよび PS に含まれる繊維質が複雑に絡み合い、架橋効果により靱性を高め、クラック発生を抑制していることが推察される。

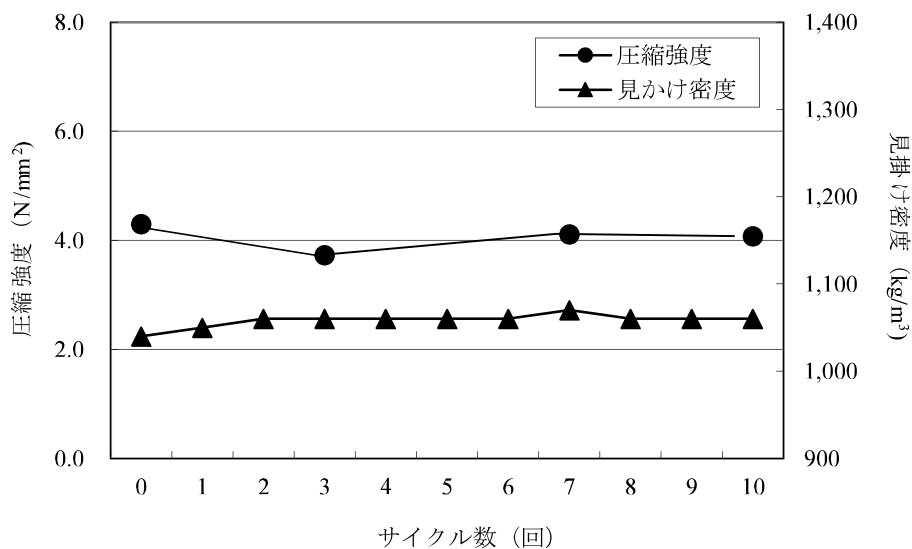


Fig. 3-2 PS 気泡モルタルの乾湿繰り返し試験結果

Test result of the dry-wet resistance of paper sludge air mortar

3.3.3 凍結融解試験

寒冷地における冬季環境下の凍結融解の繰り返し作用による体積変化（膨張・収縮）を把握するために、凍結融解試験を行った。

PS気泡モルタルの各サイクルでの見掛け密度と4, 8および12サイクルにおける圧縮強度試験結果をFig. 3-3に、試験終了後のPS気泡モルタルの供試体をFig. 3-4に示す。Fig. 3-3から、見掛け密度には変化がみられなかったが、圧縮強度はやや増加傾向にあった。これは、セメントの水和反応が試験中においても進行したものと考えられ、凍結融解の繰り返しによる膨張収縮作用による強度低下は少ないと判断される。

凍結融解による気泡モルタルの劣化は、間隙中の水分が凍結することに伴い、体積膨張が起こり、間隙中の未凍結の水が凍結していない内部へと移動し、この静水圧が高まることによりひび割れが発生するためである³⁻¹³⁾。コンクリートにおいては、その対策としてAE剤を使用し、コンクリート内部に5%程度の微細なエアを含有させ、静水圧を緩和している。PS気泡モルタルは、35%のエアを含んでいるため同様の理由により、凍結融解による劣化が認められなかったと推察される。

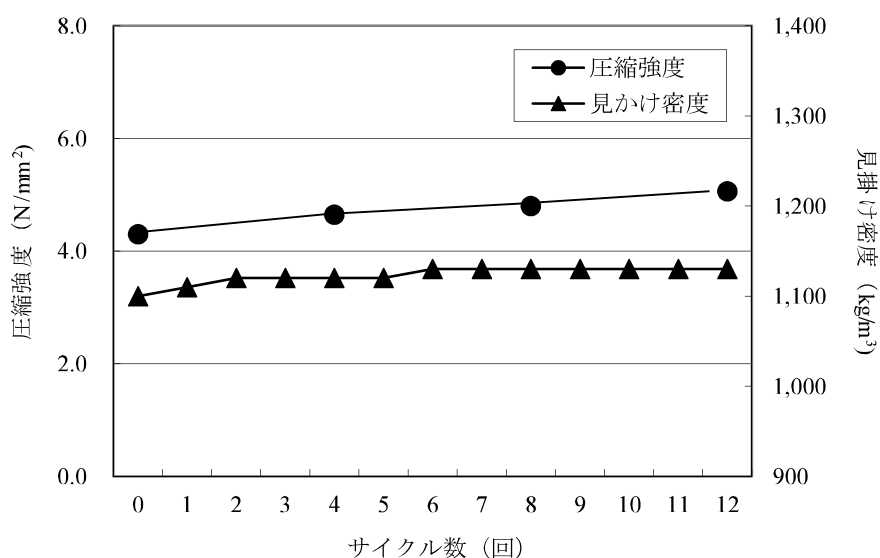


Fig. 3-3 PS気泡モルタルの凍結融解試験結果

Test result of the freeze-thaw resistance of paper sludge air mortar



Fig. 3-4 PS 気泡モルタルの凍結融解試験後の供試体

Specimen after the freeze-thaw resistance of paper sludge air mortar

3.3.4 材料分離抵抗性試験

充填材としての使用を考慮した場合，充填箇所は主に地下水位以下の場所が多く，水が滞留していることが想定される。そのため，滞留水中における施工を想定した材料分離抵抗性試験を行った。

硬化後の状況を **Fig. 3-5** に，見掛け密度の結果を **Fig. 3-6** に，圧縮強度試験の結果を **Fig. 3-7** に示す。エアミルクにおいては，水との接触により上部に気泡ブロックが形成されていることが確認できる。また，材料分離も大きく，高さ毎の見掛け密度，圧縮強度は上方ほど小さく，充填物が不均一であることがわかる。エアモルタルは，材料の密度の違いにより，砂やセメントが沈殿したため，最下部の見掛け密度および圧縮強度が大きくなっており，エアミルクと同様に，充填物は不均一である。これに対して，**PS** 気泡モルタルは，高さ毎の見掛け密度，圧縮強度のいずれも均一な値が得られた。このことから，一般の気泡モルタルと比較して **PS** を混入することにより材料分離抵抗性が著しく高まることがわかった。これは，**PS** に含まれる繊維質が水との接触および打設高さによるエアの消滅を抑制したためだと推察される。

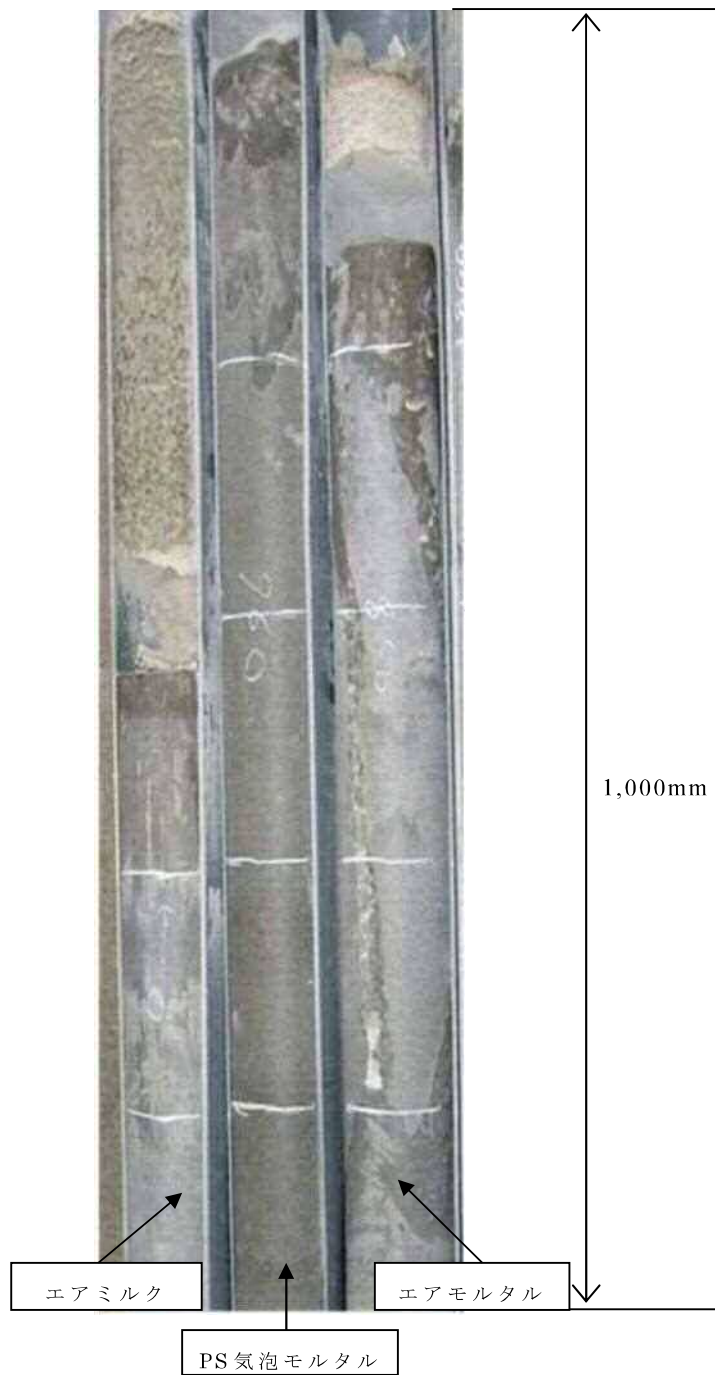


Fig. 3-5 硬化後の状況

(左：エアミルク，中：PS気泡モルタル，右：エアモルタル)

The situation after hardening

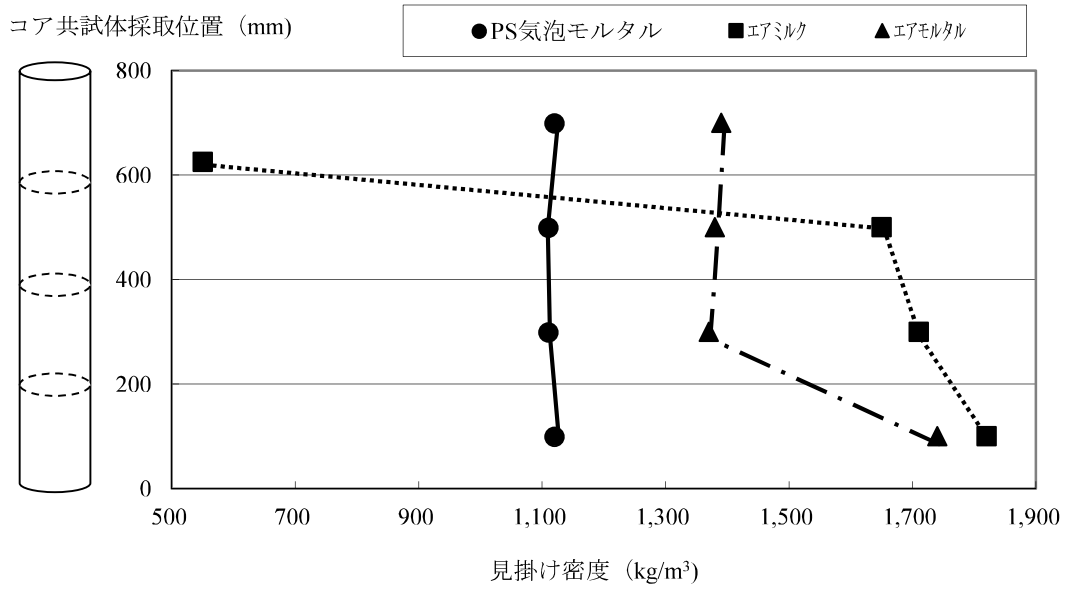


Fig. 3-6 見掛け密度と充填高さの関係

Relationship between the appearance density and the filling height

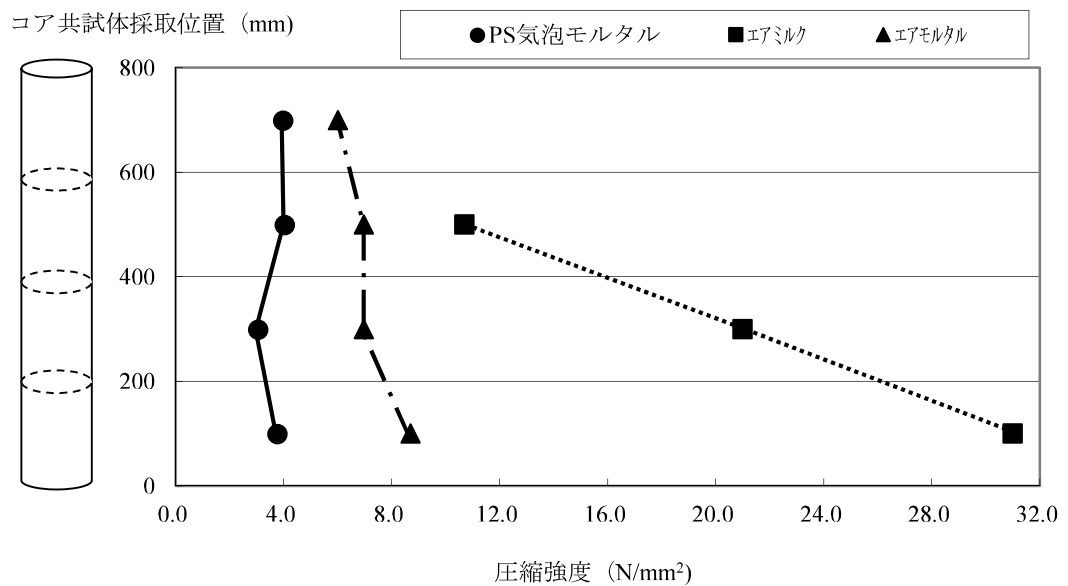


Fig. 3-7 圧縮強度試験と充填高さとの関係

Relationship between the compressive strength and the filling height

3.4 セメントの種類による環境負荷

セメントは、豊富な石灰石資源を背景に大量に生産され、わが国の社会基盤建設・整備に重要な役割を果たしてきた。近年では、社会基盤整備の充実と公共工事縮減などの理由により、減少傾向をたどるものの、2014年、わが国のセメント生産量は約5,600万tであり、うち約75%がポルトランドセメント、残りの25%を混合セメントが占めている。混合セメントはポルトランドセメントの一部を混和材で置き換えたものであり、高炉セメント、シリカセメント、フライアッシュセメントがJISで規定されている³⁻¹⁴⁾。

高炉セメントは、普通ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末で置き換えた混合セメントであり、高炉スラグの分量によって、A種、B種およびC種に分類される。A種は高炉スラグの分量が5%を超え30%以下、B種は30%を超え60%以下、C種は60%を超え70%以下であり、わが国で流通する高炉セメントの大部分はB種である³⁻¹⁵⁾。高炉セメントは、鉄鋼業の副産物である高炉スラグの有効利用や使用する石灰石の節約に加え、製造工程で排出されるCO₂排出量も少なく、普通ポルトランドセメントと比較して約40%削減することが可能である^{3-16) 3-17)}。そのため、国としても2001年、高炉セメントをグリーン購入法の指定調達品目とし、その利用促進を図っている³⁻¹⁵⁾。

一方、普通ポルトランドセメントには、土壤環境基準項目である六価クロムが含まれており、コンクリートに使用する場合には、構造物からの溶出の可能性は低いものの、ブリーディング水やコンクリート解体材を細かく砕いた試料からの溶出が確認されている³⁻¹⁸⁾。また、セメントを使用した地盤改良や固化処理に利用される場合には、使用する土や固化材との組み合わせなどにより、土壤への溶出の可能性も指摘されている³⁻¹⁸⁾。高炉セメントは、六価クロム溶出が少ない土壤環境に優しい固化材として^{3-15) 3-19)}、地盤改良工事などにも使用され、安全性の面からも利用増進が図られている。

3.5の実証試験、第4章のソイルセメントおよび第6章の流動モルタル、セメントベントナイトでは、環境面と安全面を考慮して、セメントに第3章の室内試験で使用した普通ポルトランドセメントではなく、高炉セメントB種を使用した。

3.5 実証試験

3.5.1 農業用水路の補修・改修工事

農業用水路をはじめとした三面水路のコンクリート構造物は、施工後数十年を経た施設も多く、経済性、施工性および耐久性に優れた補修・改修が必要とされている。その補修・改修工法の一つとして、軽量で高強度かつ自由な長尺成形が可能な FRP 板を老朽水路に貼り付け、全く新しい水路に蘇らせる方法がある。その際、FRP 板と既存の水路の隙間を充填する必要がある。この充填材として求められる性能は、小さな隙間でも充填できる流動性、また FRP 板に浮力のかからない軽量性、水に触れても分離し難い安定性、硬化後は乾湿劣化に強いことなどが望まれる。

本工事は山形県新庄地区の農業用水路の改修工事（2005 年）である。この工事では、農業用水路の老朽化が著しい箇所の内側に FRP 板を設置し、既存の水路と FRP 版の隙間に PS 気泡モルタルを充填した。工事中も水路の水を流す必要があることから、片側半分の流水を止めた状態での作業となり、FRP 板の底板部分は常に満水状態であった。

充填箇所の断面図を **Fig. 3-8** に示す。充填方法は、下流側の FRP 板の底板部分に確認孔を二つ設け、上流側の FRP 板の上部開放部分から注入を行い、確認孔から PS 気泡モルタルがブローした後、確認孔を塞ぐ。その後、上部から PS 気泡モルタルがブローするまで注入を行った。

施工の状況を **Fig. 3-9** に、充填箇所を **Fig. 3-10**, **3-11** に、PS 気泡モルタルの設計数量および実施数量を **Table 3-4** に示す。PS 気泡モルタルで充填を行った結果、PS 気泡モルタルの充填開始と同時に確認孔から水が噴き出し (**Fig. 3-12**)、その後、確認孔および上部からの PS 気泡モルタルのブロー (**Fig. 3-13**) が目視により確認された。また、PS 気泡モルタルの材料ロス率から水に対する材料分離は少ないことが確認された。さらに、工事の翌日、FRP 板の表面からプラスチックハンマーを用いて、打音法により充填状況を確認したところ、充填不足の空洞箇所は認められなかった。補修前の水路の状況を **Fig. 3-14** に、補修後の水路の状況を **Fig. 3-15** に示す。これらのことから、時間経過と共に経過を確認していく必要性もあるが、悪条件においても十分な施工性があることが確認された。

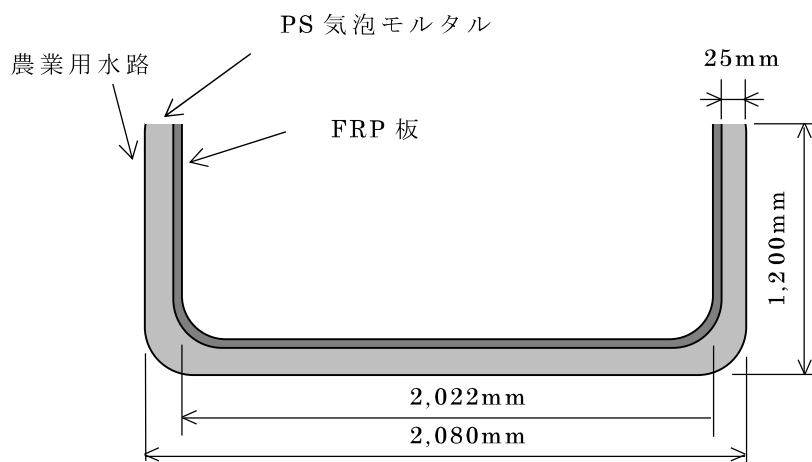


Fig. 3-8 充填箇所の断面図

Filling point section



Fig. 3-9 施工の状況

The situation of the installation



Fig. 3-10 充填箇所

Filling point



Fig. 3-11 充填箇所 (拡大)

Filling point (macrophotography)

Table 3-4 PS 気泡モルタルの設計数量と実施数量

Design quantity and the implementation quantity of paper sludge air mortar

| | PS 気泡モルタル |
|------------------------|-----------|
| 設計数量 (m ³) | 0.560 |
| 実施数量 (m ³) | 0.571 |
| 材料ロス率 (%) | 1.96 |

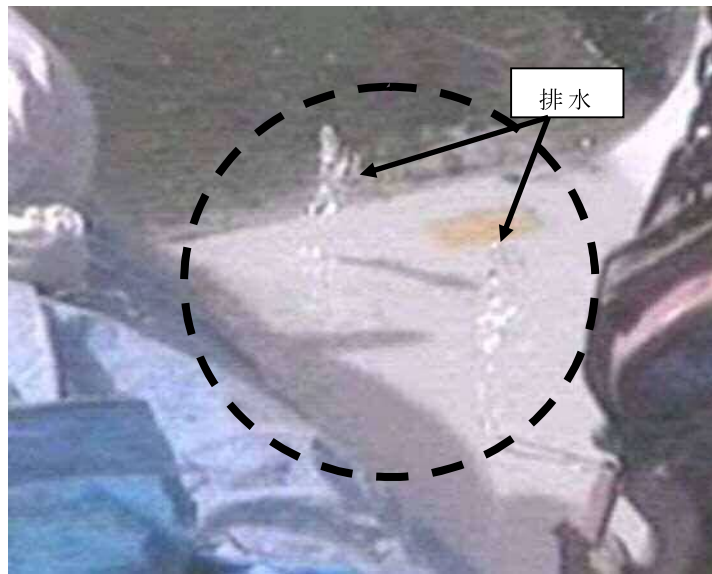


Fig. 3-12 噴出する水の状況

The situation of the blowout water



Fig. 3-13 噴出する PS 気泡モルタルの状況

The situation of the blowout paper sludge air mortar



Fig. 3-14 補修前の水路の状況

The situation of the channel before a repair



Fig. 3-15 補修後の水路の状況

The situation of the channel after a repair

3.5.2 ボックスカルバートの充填閉塞工事

施工を行った場所は、神奈川県厚木地区のサイホン撤去工事（2005年）である。ここではボックスカルバートの撤去困難な箇所にPS気泡モルタルを使用し充填閉塞を行った。その概要図を **Fig. 3-16**、断面図を **Fig. 3-17** に示す。

このサイホンは、昭和24～33年度にかけて農業用水の安定供給を図るため建設された延長約18.4 kmの幹線用水路の一部である。この用水路は現在も約1,400haの田畑を灌漑する重要な役割を担っており、今後も安定した農業用水を供給するために、昭和61年度から農林水産省の補助事業により、用水路の改修を順次進めている。

充填箇所は1,300×1,500mmの大型断面であり、地下水位より低い場所にあるためカルバート内が常時満水状態となる悪条件の工事現場であった。この充填材として求められる性能は、水中打設であるため湿潤密度が水よりも重いこと、水中においても分離し難いことである。

配管図を **Fig. 3-18** に示す。充填方法は、ボックス内に注入管と水抜きおよび充填確認管を設置し、充填材が充填確認管からブローするまで充填材を圧送する方法で行った。また、近くに河川があるために水質環境を配慮し、六価クロムの溶出が少ない高炉セメントB種を使用した³⁻²⁰⁾。六価クロムは、モルタルやコンクリートのようにセメント水和反応が十分進行し硬化するものからはほとんど溶出がないことが確認されている³⁻²⁰⁾。そこで、本研究においても事前に試験練りを行い、圧縮強度（JIS A 1108）および六価クロム溶出試験（「土壌の汚染に係る環境基準」（環境庁告示第46号））を行った。PS気泡モルタルの試験練り配合および圧縮強度試験結果を **Table 3-5** に示す。PS気泡モルタルからの六価クロム溶出量は、0.01mg/L以下であった。施工中は、毎日現場下流の河川水をサンプリングし、pH計測管理を行った。

PS気泡モルタルの製造プラントを **Fig. 3-19** に、河川水のpH測定結果を **Table 3-6** に、PS気泡モルタルの設計数量および実施数量を **Table 3-7** に示す。通常、主な充填材であるエアミルク、エアモルタルでは滞留水により材料分離することから、材料ロスを30%程度見込む必要がある。また仮設作業として止水処理を確実に行う必要もある。PS気泡モルタルで行った結果、仮設作業は配管と端部の処理程度であり、ボックスカルバート内の水を押し出しながら、入れ替わるように充填することができた。また、河川水のpH測定値は、すべて河川の規格値内（pH6.5～8.5）であり、周辺の水質環境に与える影響

は確認されなかった。材料ロス率は、水に対する希釈が少なかったために、設計範囲である 3%を下回る 0.73%であった。その結果、実施工においても室内試験で得られた結果と同様に材料分離抵抗性を確認することができた。

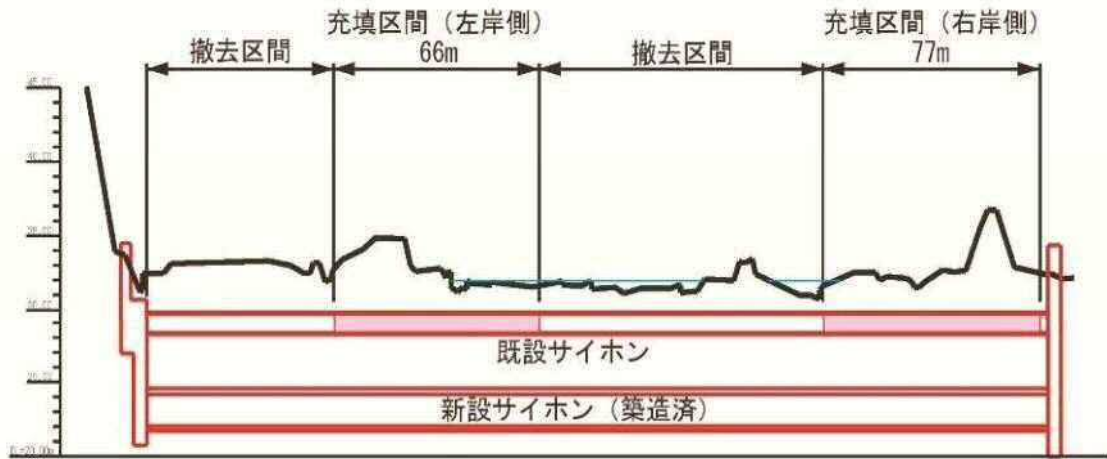


Fig. 3-16 充填工事の概要図

Schematic of filling construction

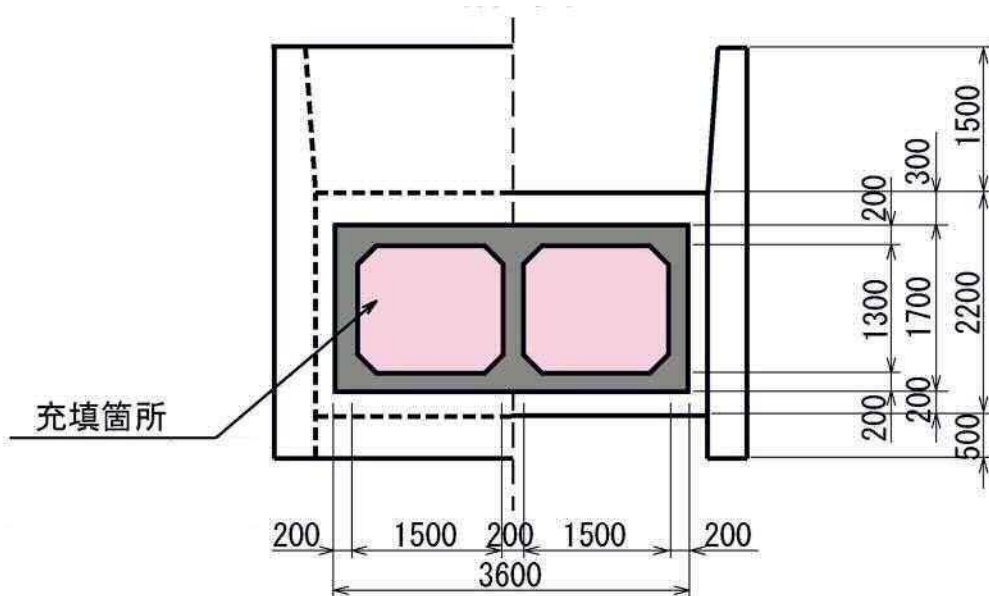


Fig. 3-17 ボックス断面図

Box section

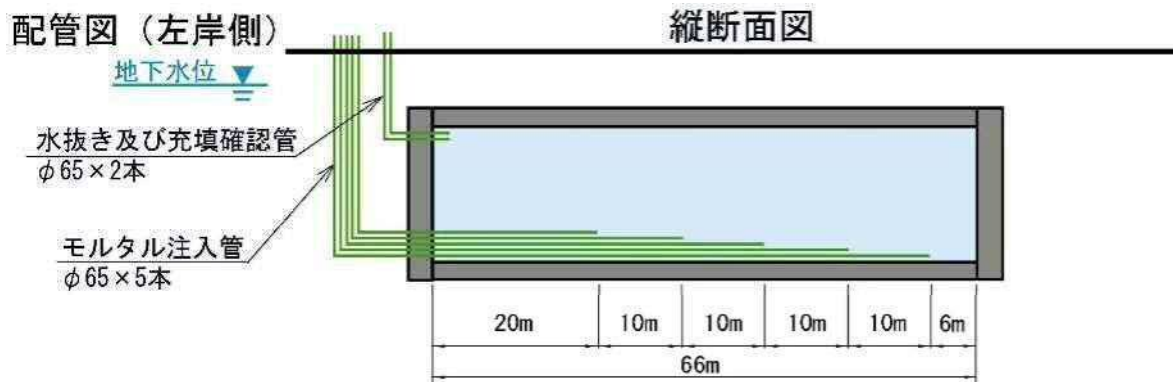


Fig. 3-18 配管図

Piping diagram

Table 3-5 PS 気泡モルタルの試験練り配合および圧縮強度試験結果 (材齢 28 日)

Mix proportion of mixing test and Compressive strength test result of paper sludge air mortar

| | W/C (%) | 空気量 (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | 圧縮強度 (N/mm ²) |
|-----------|---------|---------|--------------------------|-----|-----|---------------------------|
| | | | 高炉セメント B 種 | PS | 水 | |
| PS 気泡モルタル | 67.0 | 35 | 600 | 100 | 402 | 4.23 |



Fig. 3-19 PS 気泡モルタルの製造プラント

Manufacturing plant of paper sludge air mortar

Table 3-6 河川水の pH 測定の結果

The result of pH measurements of river water

| 施工日 | pH 測定値 (規格 pH6.5~8.5) | |
|------|--------------------------|-----|
| | A.M | P.M |
| 1 日目 | 7.5 | 7.5 |
| 2 日目 | 7.5 | 7.6 |
| 3 日目 | 7.4 | 7.5 |
| 4 日目 | 7.6 | 7.6 |
| 5 日目 | 7.7 | 7.6 |
| 6 日目 | 7.4 | 7.4 |
| 7 日目 | 7.5 | 7.7 |

Table 3-7 PS 気泡モルタルの設計数量と実施数量

Design quantity and the implementation quantity of paper sludge air mortar

| | 右岸側 | 左岸側 | 合計 |
|------------------------|------|------|------|
| 設計数量 (m ³) | 288 | 257 | 545 |
| 実施数量 (m ³) | 291 | 258 | 549 |
| 材料ロス率 (%) | 1.04 | 0.39 | 0.73 |

3.6 まとめ

PS を混和材として用いた気泡モルタルの物性評価および施工現場での施工性の評価について検討を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) PS 気泡モルタルは、ブリーディングおよび凝結硬化時の沈下がなく、体積変化が小さい。
- (2) PS 気泡モルタルの圧縮強度は、同じ水セメント比のエアミルクと比較して 4 割程度小さくなるが、曲げ強度は含有繊維の影響から若干増加する。
- (3) PS 気泡モルタルは、盛土材として想定される乾湿繰り返しおよび凍結融解作用に対して高い抵抗性を有する。
- (4) PS 気泡モルタルは、エアミルクおよびエアモルタルと比較して、高い材料分離抵抗性を有する。
- (5) 実施工では、水が滞留している 25mm の隙間を材料ロス率 1.96%で充填することができた。また、満水状態の大口径ボックスカルバートの充填においては、高い材料分離抵抗性により、材料ロス率 0.73%で充填することができた。

PS を用いた気泡モルタルは、充填材としての性能を満足し、さらに気泡モルタルの欠点である材料分離に対して高い抵抗力を示した。また、施工現場においてもその性能を発揮し、施工性の向上がみられた。

第4章

ペーパースラッジの ソイルセメント地中連続壁への適用

第4章 ペーパースラッジのソイルセメント地中連続壁への適用

4.1 概説

ソイルセメント地中連続壁工法は、原位置土にセメント系懸濁液を機械的に混合攪拌し、地中連続壁を構築する工法である。主な用途は、土留め壁や止水壁⁴⁻¹⁾であり、例えば、地下鉄、地下道路および地下構造物を建築する際の土留め壁、地下ダムを建設する際の止水壁、ため池の補修・補強における止水壁および最終処分場の遮水壁などに利用されている。また、近年では新たなソイルセメント地中連続壁工法の開発も行われている。例えば、流動化剤を用いることによりセメントミルクの注入量を低減し排出汚泥を削減した低注入工法⁴⁻²⁾、ビニロン繊維を用いることでソイルセメントの引張性能の向上を図った繊維補強ソイルセメント⁴⁻³⁾、廃タイヤを裁断したタイヤチップを用いることで靱性効果が向上するソイルセメント⁴⁻⁴⁾などが報告されている。

ソイルセメント地中連続壁のうち、土留め壁として適用される場合には、原位置土を混合攪拌した後にH形鋼などの芯材を建込むことが基本となる。そのため、原位置土にセメント系懸濁液を混合したソイルセメントには、H形鋼を円滑に挿入するための流動性が必要となる。ソイルセメントの流動性を向上させる方法として、一般的にセメント系懸濁液の水量を増やす方法や分散剤・減水剤などの混和剤を使用する方法があるが、砂質土地盤におけるソイルセメントにおいては、材料分離や品質のばらつきが生じる原因となる⁴⁻⁵⁾。また、砂質土地盤におけるソイルセメントに材料分離が生じると、礫や砂などが沈降し、アースオーガの引き抜きや芯材の建込みが困難になるなどの施工不良を生じる場合がある。このため、砂質土地盤におけるソイルセメントは、施工や芯材挿入に必要な流動性を確保しつつ、材料分離を出来る限り小さくする必要がある。

そこで本章では、砂質土地盤におけるソイルセメントのフレッシュ性状の改善を目的とし、砂質土地盤を想定した試料土を用いたソイルセメントに、ペーパースラッジを異なる比率で添加した際の材料分離特性、流動性および基本物性について、室内試験により評価している。さらに、施工現場においてはシールド用発進立坑の土留め壁にペーパースラッジを適用し、その物性および施工性についても検証している。

4.2 材料および試験方法

ソイルセメントのフレッシュ性状および硬化後の物性は、原位置土の土質条件による影響が大きい。とくに、改良土のコンシステンシー特性には、粘土分の影響が大きいことが報告されている^{4-6) 4-7)}。そこで、本研究においては、ソイルセメントのフレッシュ性状に対する粘土分含有量の影響を確認するため、砂試料に粘土分試料を所定量混合し、室内試験に使用する試料土を作製した。

4.2.1 使用材料

試料土に用いた砂試料は珪砂 5 号(土粒子の密度 2.66 g/cm^3 , $D_{50} = 0.51 \text{ mm}$), 粘土分試料は安中粘土(土粒子の密度 2.33 g/cm^3 , $w_L = 94.1\%$, $I_P = 65.6\%$)である。セメントは高炉セメント B 種(密度 3.04 g/cm^3 , 比表面積 $3,750 \text{ cm}^2/\text{g}$), 混和材はベントナイト(土粒子の密度 2.60 g/cm^3 , 膨潤力 $13 \text{ mL}/2\text{g}$)を用いた。ペーパースラッジは前述した腐敗対策を講じたものを使用した(土粒子の密度 2.03 g/cm^3 , $\text{pH}10.8$, 含水率 38.7%) (以下, 腐敗対策を講じたペーパースラッジを PS という)。なお, 本研究に用いた PS は「土壌の汚染に係る環境基準」(環境庁告示第 46 号)によりその安全性を確認した後, 実験に用いている。

4.2.2 配合設計および供試体の作製方法

ソイルセメントの配合を **Table 4-1** に示す。配合設計は、試料土 1m^3 に対して、外割でセメント量を 280kg 、ベントナイト量を 10kg とし、PS の混合量を $0, 5, 10$ および 15kg の 4 種類とした(以下, P0, P5, P10 および P15 という)。また、試料土は珪砂 5 号と安中粘土を混合し、粘土分含有率を質量比で $0, 5$ および 10% とした 3 種類を用いた(以下, 粘土分含有率 0% 試料土を C0, 粘土分含有率 5% 試料土を C5, 粘土分含有率 10% 試料土を C10 という)。なお, C0, C5 および C10 の含水比は、それぞれ $10, 12$ および 14% となるように加水調整した。珪砂 5 号(C0), 安中粘土, C5 および C10 の粒径加積曲線を **Fig. 4-1** に示す。セメント系懸濁液の水セメント比 (W/C) は、PS を混合しない配合 (C0-P0, C5-P0, C10-P0) において、ソイルセメントのフロー値が 160mm となるように調整した。

ソイルセメントの作製方法は、安定処理土の締固めをしない供試体作製方

法（JGS 0821-2000）に準じて行った。電動ミキサーを用いて、まず所定量の
 珪砂 5 号，安中粘土および水を十分練り混ぜて試料土を作製する。そして，
 所定の配合になるように，水，ベントナイト，PS，セメントの順で練り混ぜ
 てセメント系懸濁液を作製する。最後に，セメント系懸濁液を試料土に投入
 し 10 分程度攪拌した。

Table 4-1 ソイルセメントの配合

Mix proportion of soil cement

| 記号 | 珪砂 (kg) | 粘土 (kg) | W/C (%) | セメント (kg) | ベントナイト (kg) | PS (kg) |
|---------|------------|------------|------------|--------------|----------------|------------|
| C0-P0 | 2,099 | 0 | 90 | 280 | 10 | 0 |
| C0-P5 | | | | | | 5 |
| C0-P10 | | | | | | 10 |
| C0-P15 | | | | | | 15 |
| C5-P0 | 1,904 | 100 | 110 | 280 | 10 | 0 |
| C5-P5 | | | | | | 5 |
| C5-P10 | | | | | | 10 |
| C5-P15 | | | | | | 15 |
| C10-P0 | 1,725 | 192 | 140 | 280 | 10 | 0 |
| C10-P5 | | | | | | 5 |
| C10-P10 | | | | | | 10 |
| C10-P15 | | | | | | 15 |

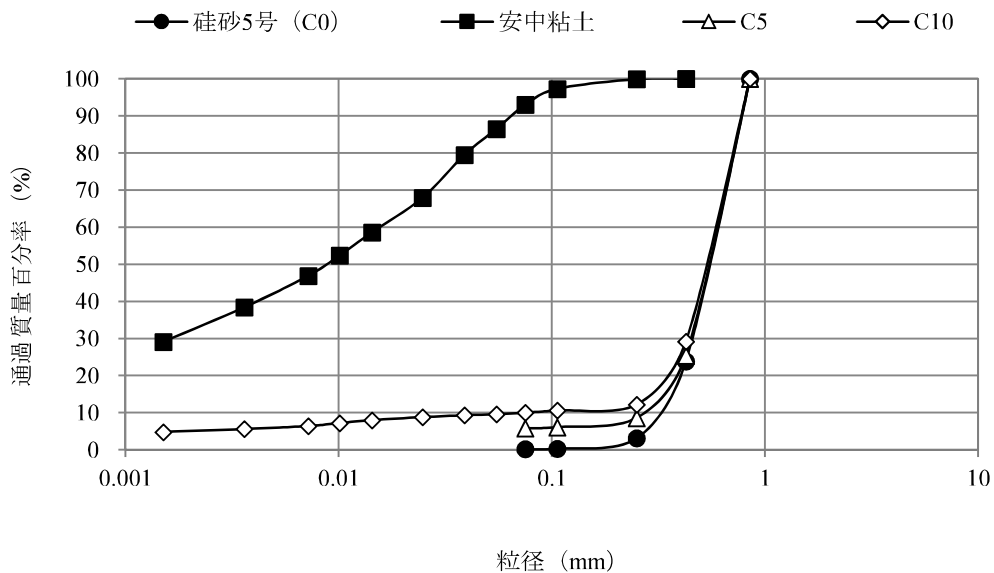


Fig. 4-1 粒径加積極性

Grain size accumulation curve

4.2.3 試験項目および試験方法

試験項目は、湿潤密度試験（JIS A 1116）、フロー試験（JIS R 5201）、空気量測定（モルタルエアメーターを用いた方法）、ブリーディング試験（JSCE-F522）、ベーンせん断試験（JGS 1411）、細孔分布測定（水銀圧入法）、一軸圧縮試験（JIS A 1216）、透水試験（三軸圧縮装置を用いた変水位透水試験）である。

本研究においては、ソイルセメントの材料分離抵抗性を定量的に測定する手段としてベーンせん断試験を用いた。ソイルセメントに材料分離が生じた場合、ソイルセメント中に含まれる礫や砂が沈降し、ソイルセメントの上部と下部のせん断強さに違いが生じると考えられる。そこで、本研究ではソイルセメントの上部および下部のせん断強さを測定し、比較・検討することによりソイルセメントの材料分離抵抗性を評価した。ベーンせん断試験はφ44mm×125mm 円柱容器を使用し、測定は容器上面および底面よりそれぞれ10mm の位置で行った（Fig. 4-2）。測定時間は、ソイルセメント作製直後、10、20 および 30 分後とした。

ブリーディング試験は 24 時間後に、一軸圧縮試験は材齢 7 および 28 日に行った。細孔分布測定および透水試験は材齢 28 日に行った。一軸圧縮試験および透水試験用の供試体は φ50mm×100mm の円柱供試体とした。脱型は各試験前日に行い、養生はすべて 20℃ の恒温室における気中とし、水分の蒸発を防ぐために供試体はポリ塩化ビニリデンフィルムで試験材齢まで密封養生とした。

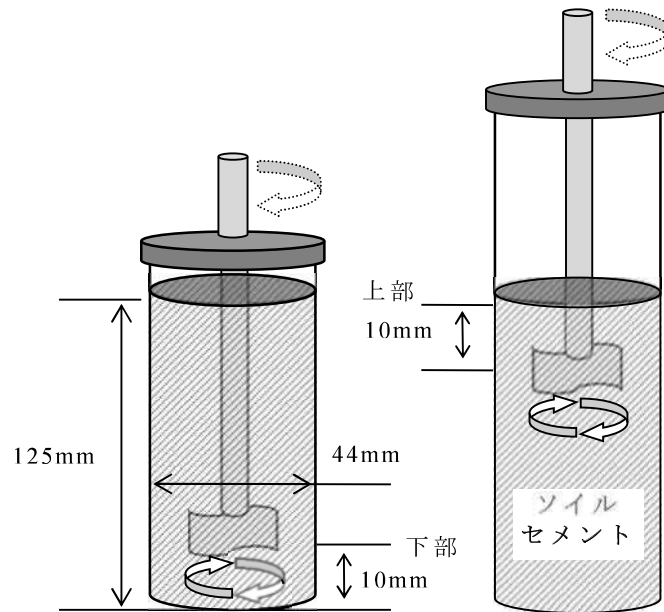


Fig. 4-2 ベーンせん断試験方法

Vane shear test method

4.3 結果および考察

4.3.1 材料分離抵抗性試験

ベーンせん断試験は、シャフトの先端にあるベーンの回転抵抗からせん断強さを求める試験である。気泡掘削により等厚式ソイルセメント地中連続壁を造成する AWARD-Hsm 工法においては、ソイルセメントのせん断強さでフレッシュ時の施工性を評価している⁴⁻⁸⁾。本研究においては、円柱容器に充填したソイルセメントの上部と下部の最大せん断強さを測定し、その値の違いによりソイルセメントの材料分離抵抗性を評価した。

C0-P0, C5-P0, C10-P0 における経過時間と最大せん断強さの関係を **Fig. 4-3** に示す。なお、C0-P0 の 20 および 30 分後の下部の最大せん断強さは、使用した機器の測定限界値を超えたため試験値は表記していない。C0-P0, C5-P0 および C10-P0 は、いずれも流動性を評価するフロー値が 160mm と同じであるにもかかわらず、供試体上部および下部の最大せん断強さに違いが生じた。ソイルセメントの最大せん断強さは C10-P0 < C5-P0 < C0-P0 の順で大きく、粘土分含有率が低いほど最大せん断強さが大きい。また、供試体の上部と下部の最大せん断強さを比べると、C10-P0 においては大きな違いはないものの、C0-P0 および C5-P0 においては、供試体上部の最大せん断強さよりも供試体下部の最大せん断強さが大きく、その強度差は C5-P0 よりも C0-P0 の方が大きい。つまり、ソイルセメントに含まれる粘土分含有率が低いほど、ソイルセメントの上部および下部の最大せん断強さは大きくなり、かつその強度差も大きくなることが確認された。

この理由としては、粘土分含有率が低いソイルセメントにおいては、土粒子間の潤滑性が低く、砂粒子の噛み合いが大きくなること、また、砂粒子が時間の経過とともに沈降することが考えられる。

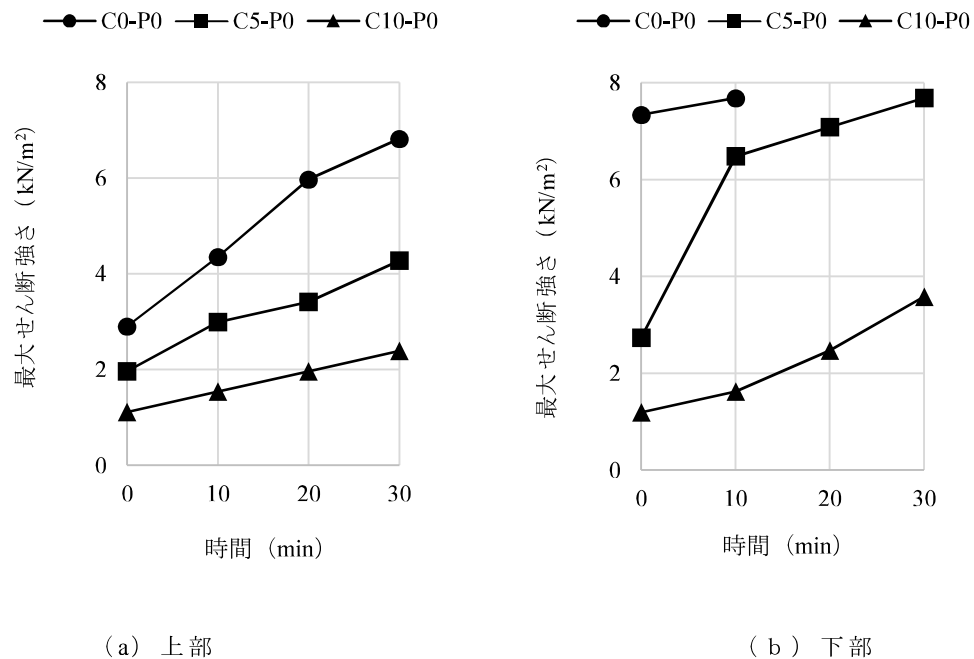


Fig. 4-3 粘土分含有率の異なるソイルセメントの最大せん断強さと経過時間の関係
Relationship between the maximum shear stress of the soil cement different in the clay content and elapsed time

PS 混合量の異なるソイルセメントの経過時間と最大せん断強さの関係のうち、C0 を用いたソイルセメントを **Fig. 4-4** に、C5 を用いたソイルセメントを **Fig. 4-5** に、C10 を用いたソイルセメントを **Fig. 4-6** に示す。

Fig. 4-4 より、PS を用いたソイルセメント（以下、PS ソイルセメントという）における、供試体上部および下部の最大せん断強さは、C0-P0 と比べて小さい。また、その傾向は若干ではあるが、PS 混合量が多いほど大きい。

Fig. 4-5 においても、**Fig. 4-4** と同様に PS ソイルセメントの最大せん断強さは、C5-P0 と比べて供試体上部、下部ともに小さくなっている。また、PS 混合量による違いは小さいものの、供試体上部と下部の最大せん断強さの違いは、C0 を用いたソイルセメントよりも小さくなっているのがわかる。

一方、**Fig. 4-6** をみると、PS ソイルセメントと C10-P0 の最大せん断強さは、供試体上部、下部ともに違いが認められない。

これらのことから、C0 および C5 を用いたソイルセメントは、供試体上部および下部の最大せん断強さに違いが生じるものの、PS を 5~15kg 混合することにより、供試体上部および下部の最大せん断強さは小さくなり、かつその強度差も小さくなることが確認された。第 3 章において、PS を混合した気泡モルタルにおける材料分離抵抗性の向上効果が確認されている。本章研究においても、PS の混合によるソイルセメントの材料分離抵抗性の向上効果が確認された。これは、PS がソイルセメント内の砂粒子の沈降を抑制したためと考えられる。

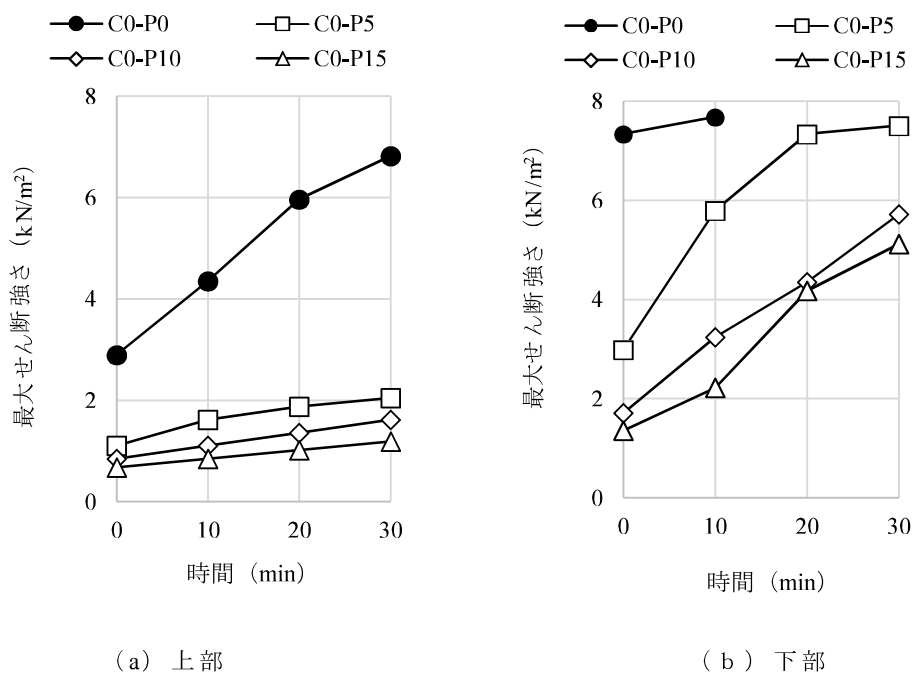
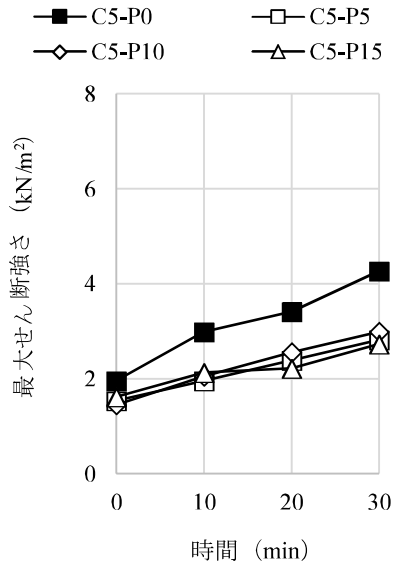
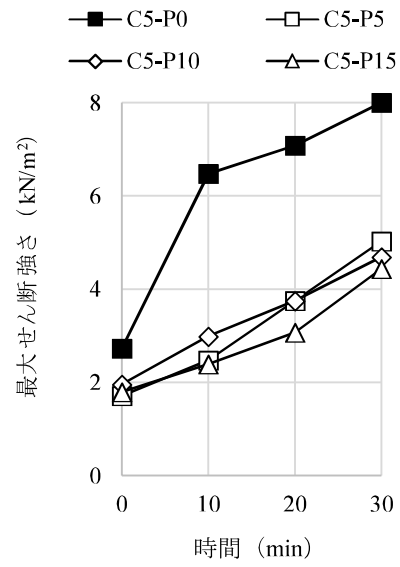


Fig. 4-4 CO を用いたソイルセメントの最大せん断強さと経過時間の関係

Relationship between the maximum shear stress of the soil cement using C0 and elapsed time



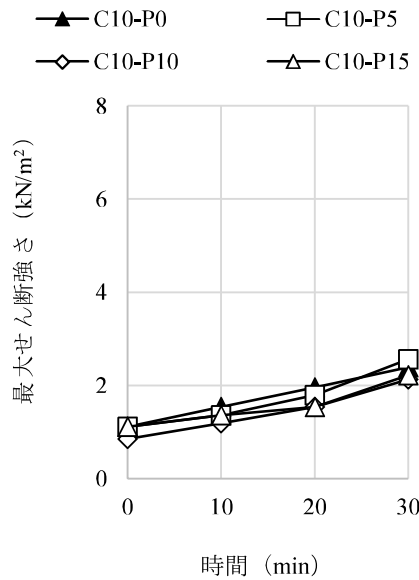
(a) 上部



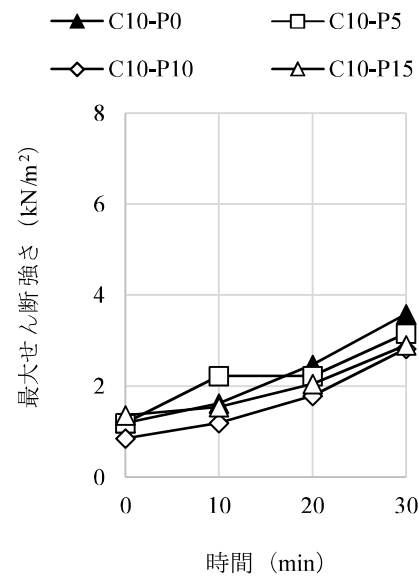
(b) 下部

Fig. 4-5 C5 を用いたソイルセメントの最大せん断強さと経過時間の関係

Relationship between the maximum shear stress of the soil cement using C5 and elapsed time



(a) 上部



(b) 下部

Fig. 4-6 C10 を用いたソイルセメントの最大せん断強さと経過時間の関係

Relationship between the maximum shear stress of the soil cement using C10 and elapsed time

4.3.2 フロー試験

フロー試験は、ソイルセメント地中連続壁工法における室内配合試験の流動性試験として用いられており、一般的にフロー値は200mm前後が適当とされている^{4-2) 4-9)}。また、芯材が自重で挿入可能なソイルセメントのフロー値は約160mm以上であると報告されている⁴⁻²⁾。

C0、C5およびC10を用いたソイルセメントについて、PS混合量とフロー値の関係をFig. 4-7に、C0-P0およびC0-P10のフロー試験の状況をFig. 4-8に示す。

Fig. 4-7より、C0およびC5を用いたソイルセメントにおいては、PSの混合によりフロー値が増加しているのがわかる。ただし、PS混合量が10kgをピークにフロー値はわずかに減少する。また、フロー値の増加量はC5よりもC0の方が大きい。一方、C10においては、PSの混合によるフロー値の増加はなく、C0およびC5と同様にPS混合量が15kgにおいてフロー値がわずかに減少した。

つまり、粘土分含有率5%以下の試料土を用いたソイルセメントに、PSを10kg程度混合することにより、フロー値が大きくなり、流動性が向上することが確認された。また、その効果は、試料土の粘土分含有率が低い方が顕著である。

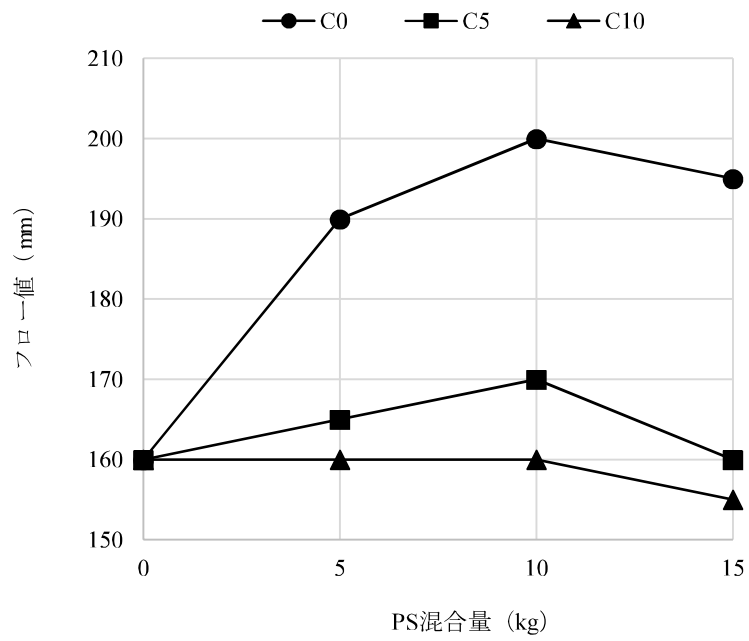


Fig. 4-7 PS 混合量とフロー値の関係

Relationship between the mixed quantity of PS and flow value



Fig. 4-8 フロー試験の状況 (左 : C0-P0, 右 : C0-P10)

The situation of the flow test (left:C0-P0, rightC0-P10)

4.3.3 湿潤密度，空気量および細孔分布

C0, C5 および C10 を用いたソイルセメントについて，PS 混合量と湿潤密度の関係を Fig. 4-9 に示す。すべてのソイルセメントにおいて，PS の混合量が増えるに伴って，湿潤密度が小さくなる傾向にある。そして，湿潤密度が小さくなる傾向は，粘土分含有率が低い試料土を用いたソイルセメントの方が大きい。

PS ソイルセメントの湿潤密度が小さくなった要因の一つとして，PS の混合によるソイルセメント内への気泡の導入が考えられる。そこで，ソイルセメントのフレッシュ時の空気量について，モルタルエアメーター（株式会社丸東製作所製）を用いて測定した。

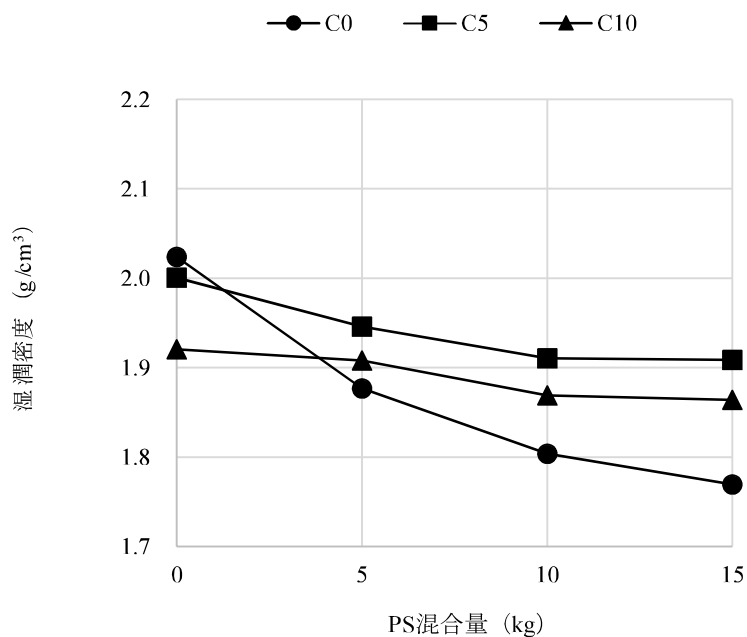


Fig. 4-9 PS 混合量と湿潤密度の関係

Relationship between the mixed quantity of PS and wet density

C0, C5, C10 を用いたソイルセメントについて、PS 混合量と空気量の関係を **Fig. 4-10** に示す。すべてのソイルセメントにおいて、PS の混合量が増えるにしたがって、空気量が多くなる傾向にある。また、空気量が多くなる傾向は粘土分含有率が低い試料土を用いたソイルセメントの方が大きく、C0 を用いたソイルセメントにおいては、PS の混合により C0-P0 と比べて 6~10% 空気量が増えている。

近藤ら（2008）、栗橋ら（2009）は細粒分含有率の低いソイルセメントに気泡を添加することにより、ソイルセメントの流動性が向上することを報告している^{4-9) 4-10)}。つまり、前述した PS ソイルセメントのフロー値の増加は、PS の混合に伴いソイルセメント内に導入された気泡によって、ソイルセメントに含まれる土粒子間の摩擦が低減されることによるものと推察される。すなわち、ボールベアリング効果が付加されたと考えられる。しかし、PS は微細な繊維を含むため、PS 混合量 10kg 程度まではソイルセメント内に導入された気泡によってフロー値が増大するものの、PS 混合量が 15kg 程度になると、ソイルセメント内の繊維分が過剰になってソイルセメントの粘性が増加し、フロー値が減少したものと考えられる（**Fig. 4-7**）。

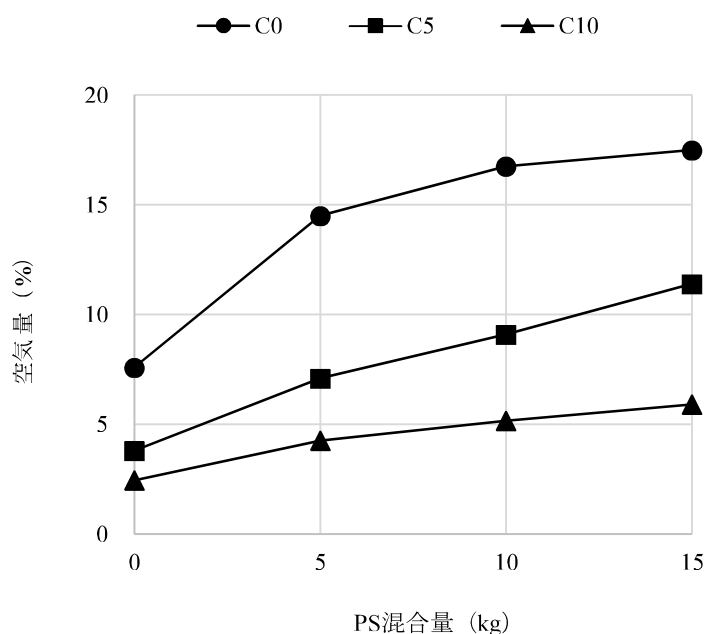


Fig. 4-10 PS 混合量と空気量の関係

Relationship between the mixed quantity of PS and air content

C0 を用いたソイルセメントの細孔直径における細孔容積割合を **Fig. 4-11** に、C0-P10 の材齢 28 日における供試体の電子顕微鏡写真を **Fig. 4-12** に示す。細孔容積割合は、各細孔直径の容積を全細孔容積で除して算出した。**Fig. 4-11** より、C0-P0 においては細孔容積の約 60%が 150~200 μm の範囲であるのに対して、PS ソイルセメントにおいては細孔容積の約 70%が 0~50 μm の範囲であることがわかる。また、**Fig. 4-12** からも、PS を混合したソイルセメントには 0~50 μm の独立した細孔が存在することが確認できる。

このような微小な独立気泡は、連行空気と呼ばれコンクリートの分野では耐凍結融解性やフレッシュコンクリートの流動性の向上を目的として、導入されている。また、この効果を発揮する連行空気の直径は 10~100 μm 程度とされている⁴⁻¹¹⁾。

コンクリート中に微小な独立気泡を分散させるために用いる界面活性剤を AE 剤と呼び、リグニンスルホン酸塩もその機能を有する代表的な混和剤である⁴⁻¹²⁾。PS に含まれるリグニンは、パルプ製造工程においてスルホン化されていると考えられるため、フレッシュ時には連行空気が分散し、ボールベアリング効果が増強したことにより、流動性が高められたと推察される。

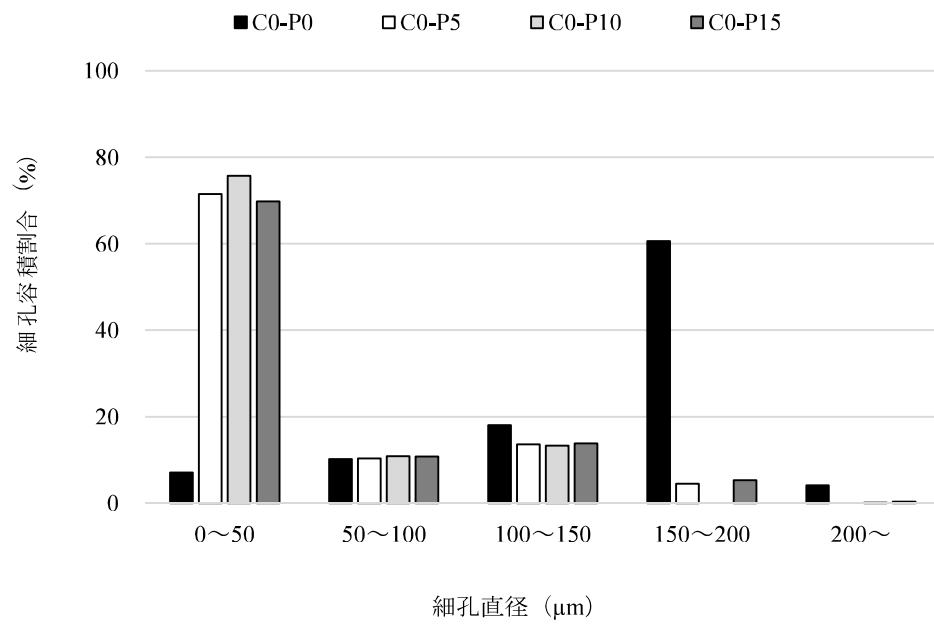


Fig. 4-11 PS 混合量の異なるソイルセメントにおける細孔直径の容積割合

The capacity rate of pore diameter in soil cement by the difference in the mixed quantity of PS

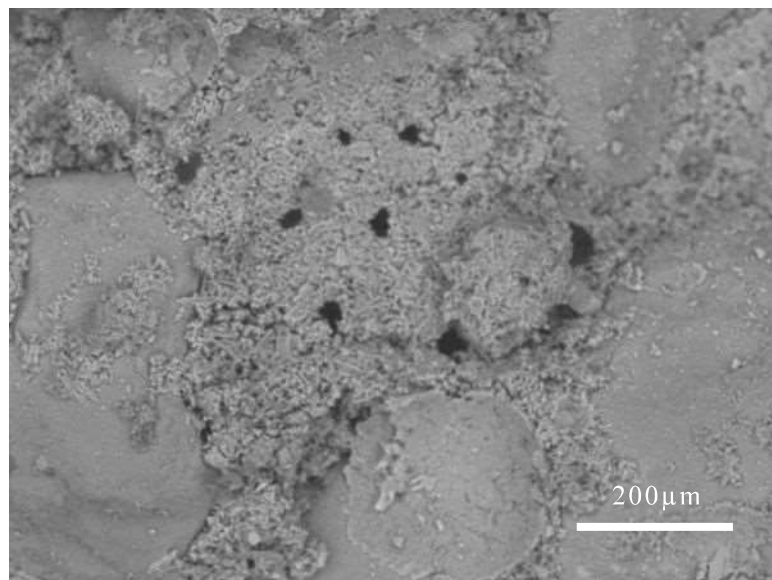


Fig. 4-12 PS を混合したソイルセメントの細孔状況 (C0-P10)

The pore situation of the soil cement which mixed PS (C0-P10)

4.3.4 ブリーディング試験

C0, C5 および C10 を用いたソイルセメントについて, PS 混合量とブリーディング率の関係を **Fig. 4-13** に示す。すべてのソイルセメントにおいて, 一般的にブリーディング率の目標値とされる 3.0%未満⁴⁻⁵⁾を満足している。また, すべてのソイルセメントにおいて PS の混合によるブリーディング率への大きな影響はみられない。

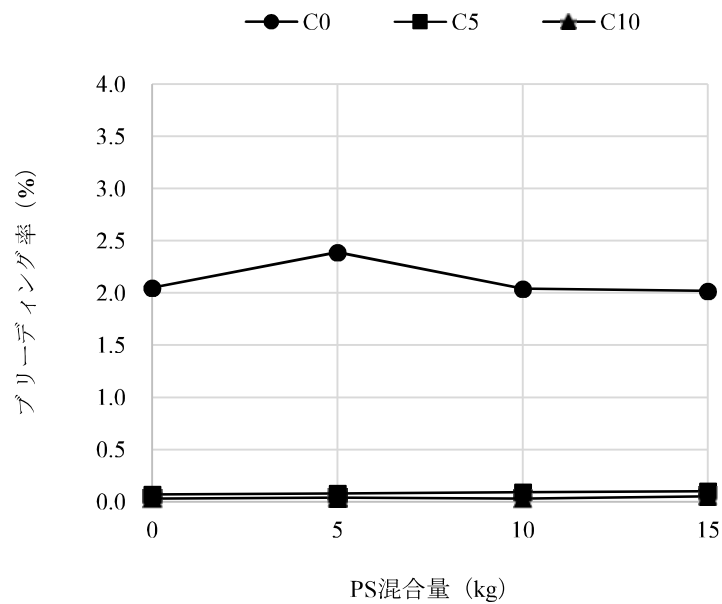


Fig. 4-13 PS 混合量とブリーディング率の関係

Relationship between the mixed quantity of PS and bleeding

4.3.5 一軸圧縮試験

ソイルセメントの流動性および材料分離抵抗性の向上が確認された C0 および C5 を用いたソイルセメントについて、一軸圧縮試験を行った。

PS 混合量と最大圧縮強さの関係を Fig. 4-14 に示す。ソイルセメントの最大圧縮強さは、PS の混合によって、C0 においては 20~30%、C5 においては 10~20% の低下が確認された。

コンクリートにおいては、空気量 1% あたり圧縮強度が 4~6% 減少すると言われており⁴⁻¹¹⁾、本研究においても、一軸圧縮強さの低下の原因は、PS の混合によってソイルセメント内に導入された気泡の影響であると考えられる。しかしながら、一般的にソイルセメントに必要とされる一軸圧縮強さは、材齢 28 日において 0.5~3.0 N/mm² 程度⁴⁻⁵⁾であるのに対し、本研究の配合においては、ソイルセメントに PS を 10kg 程度混合しても 3.1~5.2 N/mm² の強度発現が確認されていることから、強度面における問題は小さいと考えられる。

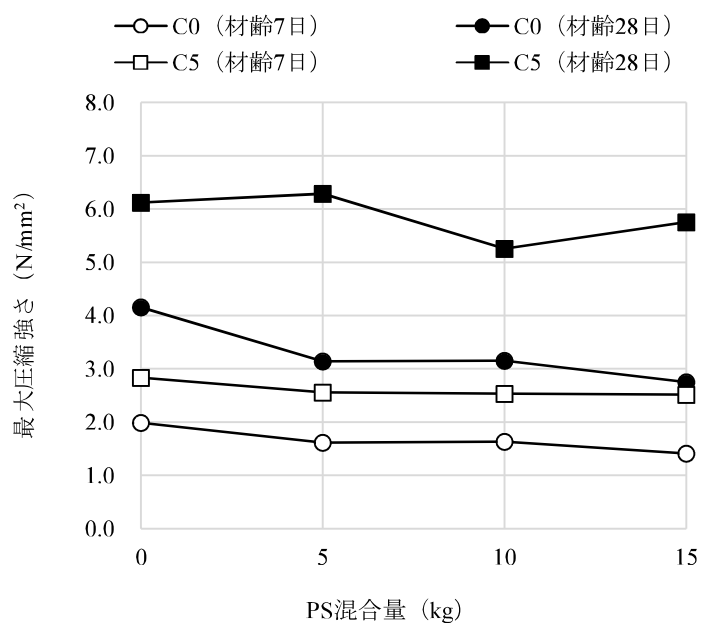


Fig. 4-14 PS 混合量と最大圧縮強さの関係

Relationship between the mixed quantity of PS and maximum compressive strength

4.3.6 透水試験

一般的にソイルセメントに必要な透水係数は $10^{-7} \sim 10^{-9}$ m/s であるが⁴⁻⁵⁾、砂質土地盤におけるソイルセメントにおいては、透水係数の増加をもたらす場合がある⁴⁻¹³⁾。そこで、PS を混合したソイルセメントの遮水性への影響を確認するため、C0-P0 および C0-P10 において、透水試験を行った。C0-P0 および C0-P10 の透水係数を **Table 4-2** に示す。

C0-P10 は、C0-P0 と比べて 9%程度空気量が多いため透水係数の増加が懸念されたが、透水係数は C0-P0 と同等であり、一般的な目標値を満足した。これは、4.3.3 で示したように、PS の混合によってソイルセメント内に導入される気泡は、連続空隙ではなく、微小な独立気泡であるため、透水係数への影響は小さかったと推察される。

Table 4-2 C0-P0 および C0-P10 の透水係数
Permeability coefficient of C0-P0 and C0-P10

| 配合 | C0-P0 | C0-P10 |
|---------------|----------------------|----------------------|
| 透水係数 (m/s) | 3.0×10^{-9} | 2.7×10^{-9} |

4.4 施工事例

本適用例はシールド用発進立坑の土留め壁（2010年）に適用されたものである。発進立坑の大きさは、内径 13.2m×16.0m、深度 35.7m であったが、深度 35m 前後の層におけるボイリング防止のために、深度 61m までソイルセメント地中連続壁を構築する必要があった。一般的なソイルセメント地中連続壁においては、最大深度が 35～45m⁴⁻⁵⁾であることから、本工事は大深度のソイルセメント地中連続壁であるといえる。

施工位置における代表的なボーリング柱状図および立坑の平面図を **Fig. 4-15** に示す。代表的な土質は深度 44.6m までが細砂およびシルトであり、深度 44.6～63.3m が礫混じり細砂、砂礫および砂礫混じり中砂である。また、*N* 値は深度 30.7m までが 2～13、深度 30.7～63.3m が 50 以上である。本工事では、砂質土地盤における大深度のソイルセメント地中連続壁の造成であることから、材料分離による施工不良が懸念されたため、材料分離防止材として PS を混合することとした。配合設計は、事前に施工現場から採取した試料土を用いた予備室内試験により、ソイルセメントのフレッシュ性状、強度および経済性を考慮して行った。また、ソイルセメント地中連続壁工法において、深度が浅く、土質が大きく変わらない場合には 1 種類の配合により施工することが多い。しかし、本工事の配合設計では、大深度のソイルセメント地中連続壁の造成であること、深度 30.7m より土質および *N* 値が変わることから、深度 0～30.7m を配合①、深度 30.7～63.3m を配合②の 2 種類の配合を用いた。配合①は試料土 1m³ に対して、外割でセメント量を 200kg、ベントナイト量を 5kg、PS 量を 5kg、*W/C* を 250%とした。配合②は試料土 1m³ に対して、外割でセメント量を 260 kg、ベントナイト量を 5 kg、PS 量を 5kg、*W/C* を 138%とした。なお、PS はいずれの配合においても室内試験と同一のものとし、ソイルセメントの練混ぜ水に混合させて用いた。施工の状況を **Fig. 4-16** に示す。

施工においては、掘削時および芯材挿入時にアースオーガの引き抜き不良や芯材の挿入不良などは確認されなかった。また、造成したソイルセメント地中連続壁の品質を確認するため、造成日の異なる 2 壁面のソイルセメント地中連続壁における、深度 5.0、20.0 および 34.5m より採取した供試体を用いて一軸圧縮試験を実施した（壁面 A および B）。結果を **Fig. 4-17** に示す。深

度ごとの材齢 28 日における一軸圧縮強さは $1.16 \sim 1.78 \text{ N/mm}^2$ とばらつきは比較的小さく，すべての供試体において本工事の所要強度である 1 N/mm^2 を満足した。

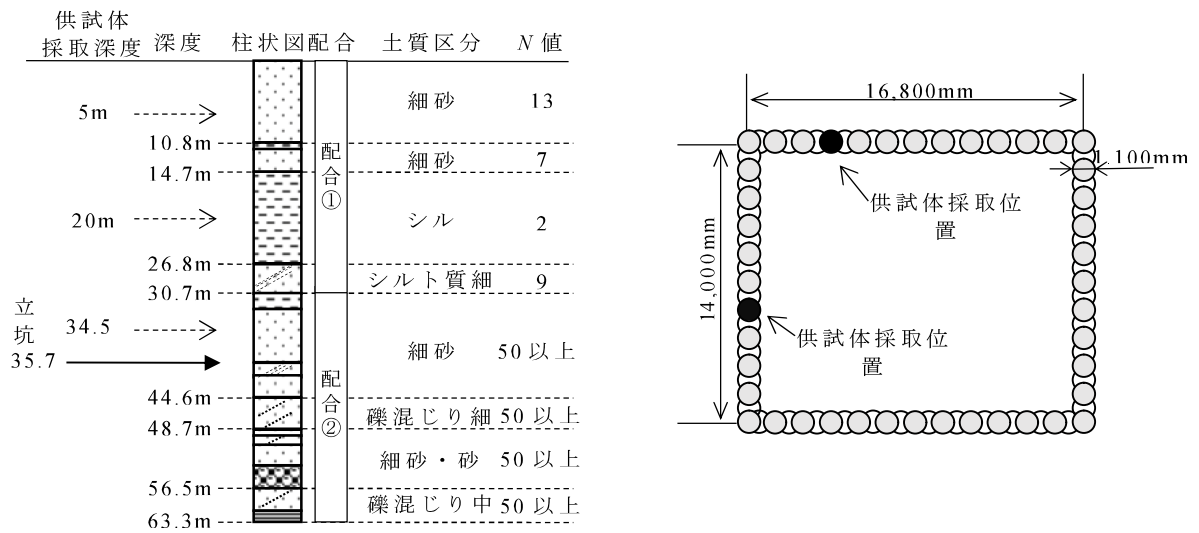


Fig. 4-15 柱状図（左）および平面図（右）

The geologic columnar section and plane figure



Fig. 4-16 施工の状況

The situation of the installation

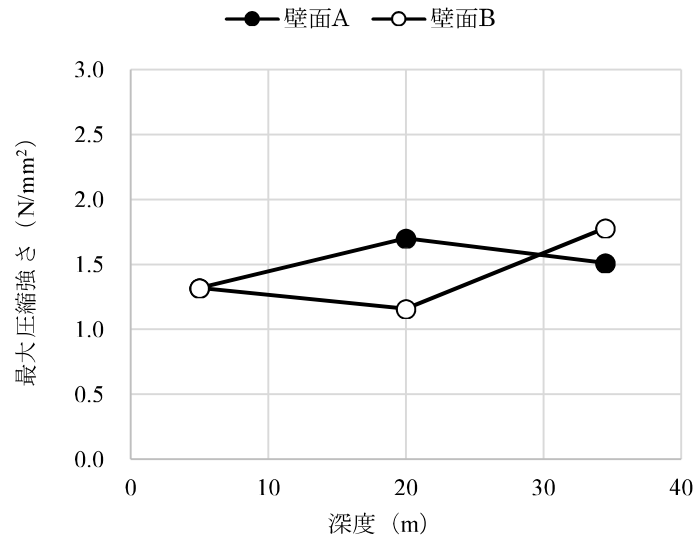


Fig. 4-17 深度と最大圧縮強さの関係 (材齢 28 日)

Relationship between the depth and maximum compressive strength (Age: 28d)

4.5 まとめ

砂質土地盤を想定したソイルセメントに、PSを混合した際のフレッシュ性
状および物性について、室内試験および施工現場により検討を行った。その
結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 粘土分含有率 5%以下の試料土を用いたソイルセメントに PS を 10kg 程
度混合することにより、ソイルセメントの上部および下部の最大せん断
強さが小さくなり、かつ強度差も小さくなった。このため、PSにはソイ
ルセメントの材料分離を低減させる効果があることがわかった。
- (2) 粘土分含有率 5%以下の試料土を用いたソイルセメントに PS を 10kg 程
度混合することにより、フロー値が大きくなり、流動性の向上が確認さ
れた。
- (3) ソイルセメントに PS を 5～15kg 混合することにより、ソイルセメント
内に微細な気泡が導入され、その気泡の約 7 割は直径 50 μ m 以下のもの
である。
- (4) ソイルセメントに PS を 10kg 程度混合することにより、強度は 10～30%
低下するものの、透水係数を増大させる可能性は小さい。
- (5) PS を混合したソイルセメントは、実施工においてもフレッシュ時にお
ける施工不良は確認されなかった。また、深度 5.0, 20.0 および 34.5m か
ら採取した供試体による強度のばらつきは小さかった。

PSを用いた砂質土地盤ソイルセメントは、微細繊維および微細な気泡の混
入により、材料分離抵抗性の向上とともに、流動性の向上が確認された。ま
た、施工現場においても強度のばらつきが小さく、良好な施工性が確認され
た。

第5章

ペーパースラッジの法面緑化基盤材への適用

第5章 ペーパースラッジの法面緑化基盤材への適用

5.1 概説

法面緑化工法は、法面を植生で被覆することにより、法面の浸食・崩壊を防止する工法であり、道路工事などによる自然環境への影響緩和や景観の向上など、環境を改善する働きを有している⁵⁻¹⁾。主な用途は、切土や盛土によって生じた人工的な法面の安定化および土砂崩れの危険がある斜面の保護などであり、例えば、農業用ダム、ため池、水路および農道などの斜面崩壊や地滑りを防ぐ目的で用いられる。また、最近では持続可能な開発という概念のもと、自然を再生し、生物多様性の保全を実現するものとしての期待も大きい⁵⁻¹⁾。

近年、リサイクルや環境負荷低減の観点から、植物性廃材やリサイクル資材を用いるものなど、さまざまな付加価値を有する緑化基盤材が開発されている。例えば、建設工事で発生する資源では、現地発生土⁵⁻²⁾、伐採木や伐根材などの木質系建設廃棄物を爆砕法によりチップ化したもの⁵⁻³⁾⁵⁻⁴⁾およびダムや貯水池に堆積した泥土を緑化基盤材に利用した研究⁵⁻⁵⁾が報告されている。また、建設工事以外では電解処理した上水汚泥⁵⁻⁶⁾、石炭火力発電所で発生するクリンカアッシュ⁵⁻⁷⁾、貝殻廃棄物⁵⁻⁸⁾および廃ガラス材⁵⁻⁹⁾を緑化基盤材に利用した工法などが報告されている。

この法面緑化工法で使用される緑化基盤材は、植物の発芽・生育に適していることに加えて、植物が生育するまでの耐久性が求められる。とくに、法面緑化工法は施工直後の降雨による緑化基盤材および種子の流亡が多く、緑化基盤材の降雨に対する耐久性が重要である。また、現在、緑化基盤材として主に使用されているのはパーク堆肥とピートモス (*Peat moss*) である。このうちピートモスは、湿性植物のミズゴケが湿地などで堆積し変質してできたもので、土壌の保水性、通気性および保肥性の改善効果に優れた土壌改良材である⁵⁻¹⁰⁾。しかし、ピートモスの主な産地であるカナダ、ロシアおよび北海道などではピートモスが大量に掘り起こされることにより土地が乾燥する等、環境問題が懸念されている⁵⁻⁴⁾。

ペーパースラッジはピートモスと同様に微細な繊維を含んでいることから、降雨に対する耐久性向上のための補強材およびピートモスの代替物となる可

能性を有すると考えられる。仮に、ペーパースラッジがピートモスの代替物として利用できれば、ピートモス採取地域の保全につながるばかりではなく、パルプ・紙製造業の産業廃棄物を削減し環境への負荷を低減することが期待できる。

そこで本章では、ペーパースラッジを用いた緑化基盤材の物性について、室内試験およびフィールド試験により評価している。室内試験では、ペーパースラッジを異なる比率で用いた緑化基盤材の耐降雨浸食性、透水性および植物の生育状況について評価している。また、フィールド試験においては、ペーパースラッジを用いた緑化基盤材の施工性について確認し、長期的な植物の生育状況について調査している。

5.2 材料および試験方法

5.2.1 使用材料および配合

使用材料の理化学性を **Table 5-1** に，緑化基盤材の配合を **Table 5-2** に示す。基盤材はバーク堆肥（70%）およびピートモス（30%）の混合物，接合材は高分子系樹脂を用いた。これらは，法面緑化資材として広く利用されている。肥料は市販の高度化成肥料を用いた。種子はトールフェスク（*Festuca arundinacea*）を使用し，発芽期待本数が 500 本/m²となるように緑化基盤材の中に混合した。

ペーパースラッジは高温蒸気および消石灰により腐敗対策を講じ，土粒子の密度 2.03 g/cm³，含水率 38.7%に調整後適用した（以下，腐敗対策を講じたペーパースラッジを PS という）。PS の理化学性を **Table 5-3** に示す。なお，本研究に用いた PS は「土壌の汚染に係る環境基準」（環境庁告示第 46 号）によりその安全性を確認した後，実験に用いている。PS の混合量は基盤材に対して，外割で 0，4，6，8 および 10%の 5 種類とした（以下，Base，PS4，PS6，PS8 および PS10 という）。

Table 5-1 使用材料の理化学性

Physical and chemical properties of used material

| 項目 | | 基盤材 | 肥料 |
|---------------------------------------|---------|------|----|
| 強熱減量 | (%) | 72 | — |
| 全窒素 (N) | (%) | 2.0 | 10 |
| 全リン酸 (P ₂ O ₅) | (%) | 2.2 | 10 |
| 全カリ含量 (K ₂ O) | (%) | 0.99 | 10 |
| C/N 比 | — | 17 | — |
| pH | — | 6.9 | — |
| 陽イオン交換容量 (CEC) | me/100g | 95 | — |
| 含水率 (水分) | (%) | 58 | — |

Table 5-2 緑化基盤材の配合

Mix proportion of greening base material

| 記号 | PS (L) | 基盤材 (L) | 接合材 (kg) | 肥料 (kg) | 種子 (g) |
|------|-----------|------------|-------------|------------|-----------|
| Base | 0 | 2,000 | 1 | 3 | 86.8 |
| PS4 | 80 | | | | |
| PS6 | 120 | | | | |
| PS8 | 160 | | | | |
| PS10 | 200 | | | | |

Table 5-3 PS の理化学性

Physical and chemical properties of paper sludge

| 項目 | | 試験値 |
|--------------------------------|-----|------|
| pH | — | 10.8 |
| 含水率(水分) | (%) | 38.7 |
| 強熱減量 | (%) | 53.4 |
| CaO | (%) | 25.8 |
| SiO ₂ | (%) | 10.7 |
| Al ₂ O ₃ | (%) | 5.3 |
| MgO | (%) | 1.5 |
| Fe ₂ O ₃ | (%) | 0.3 |
| その他 | (%) | 3.0 |

5.2.2 供試体の作製方法

法面緑化工法における緑化基盤材は，施工現場において吹付けする際に体積が約 50%に圧縮される⁵⁻¹¹⁾。そこで，各試験に使用する供試体は，電動ミキサを用いて各材料を十分に混合した後，Base が約 50%に圧縮される締固めエネルギーにより作製した。各配合の圧縮量は 5.3.1 に後述する。

5.2.3 試験項目および試験方法

試験項目は，圧縮量試験，土粒子の密度試験（JIS A 1202），乾燥密度試験（JIS A 1225），保水性試験（JGS 0151-2009），変水位透水試験（JIS A 1218），耐降雨浸食性試験，植生試験，pH 測定（ガラス電極法）である。

圧縮量試験はφ 50×100 mm 円柱容器に，押込まないように高さ 100mm まで緑化基盤材を投入し，2.5kg ランマーを用いて，材料上部から締固め作業を行い，高さの変化率から圧縮量を算出した⁵⁻¹²⁾。

耐降雨浸食性試験の供試体は，348×265×77 mm 育苗コンテナに緑化基盤材を厚さ 50mm になるように締固めて作製した。供試体作製後，24 時間室内にて静置し耐降雨浸食性試験を実施した。耐降雨浸食性試験は，供試体を 1 割勾配となるように調整して設置し，129 mm/h（メスシリンダーによる実測値）の人工降雨を 1 時間おこない，水と共に流れ落ちた基盤材を 15 分おきに回収し，乾燥重量により耐降雨浸食性を検証した。

植生試験は，265×183×77 mm 育苗コンテナに緑化基盤材を厚さ 50mm になるように締固めて作製した後，雨水がかからない屋外に静置し，適宜かん水を行った。試験開始後 40 日目に，植物の生育本数，地上部の新鮮重量および草丈を測定した。

5.3 結果および考察

5.3.1 緑化基盤材の圧縮量および三相分布

各配合における緑化基盤材の圧縮量を **Fig. 5-1** に、三相分布を **Fig. 5-2** に示す。三相分布は、各配合の緑化基盤材における土粒子の密度、乾燥密度および含水比を測定し、算出した。

Fig.5-1 より、Base の圧縮量が 51% の際の PS4, PS6, PS8 および PS10 の圧縮量は、それぞれ 46, 42, 39 および 35% であった。この結果から PS 混合量の増加に伴い、圧縮量は減少する傾向であることが明らかとなった。

Fig.5-2 の三相分布をみると、気相率は Base の 29.4% に対して、PS4, PS6, PS8 および PS10 では、それぞれ 30.6, 31.3, 32.1 および 38.0% と、PS 混合量の増加に伴い増加する傾向を示した。つまり、PS を混合した緑化基盤材は気相率が増加し、締固めによる圧縮量が減少することがわかった。これは、緑化基盤材内において、PS に含まれる微細繊維がクッションとなり、締固めエネルギーが吸収されにくいためであると推察される^{5-13) 5-14)}。

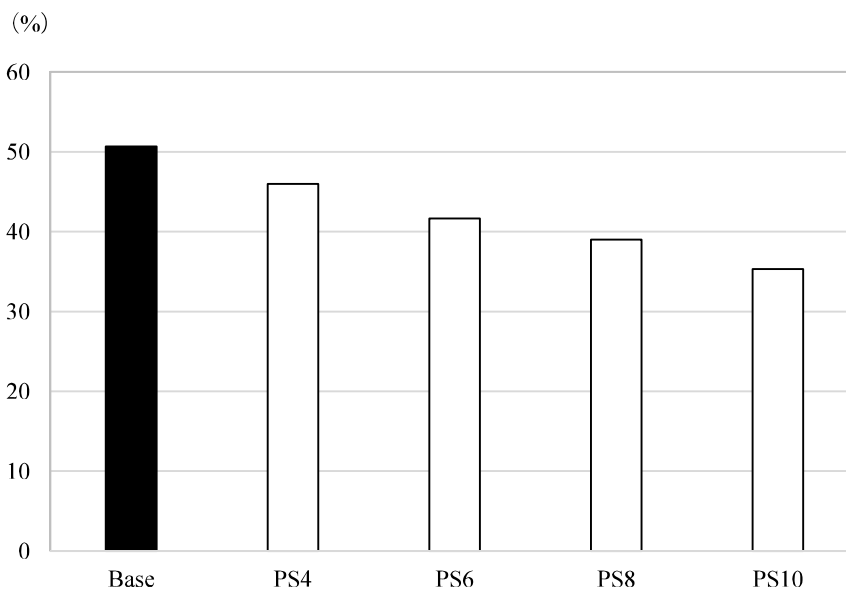


Fig. 5-1 圧縮量試験結果

Consolidation amount

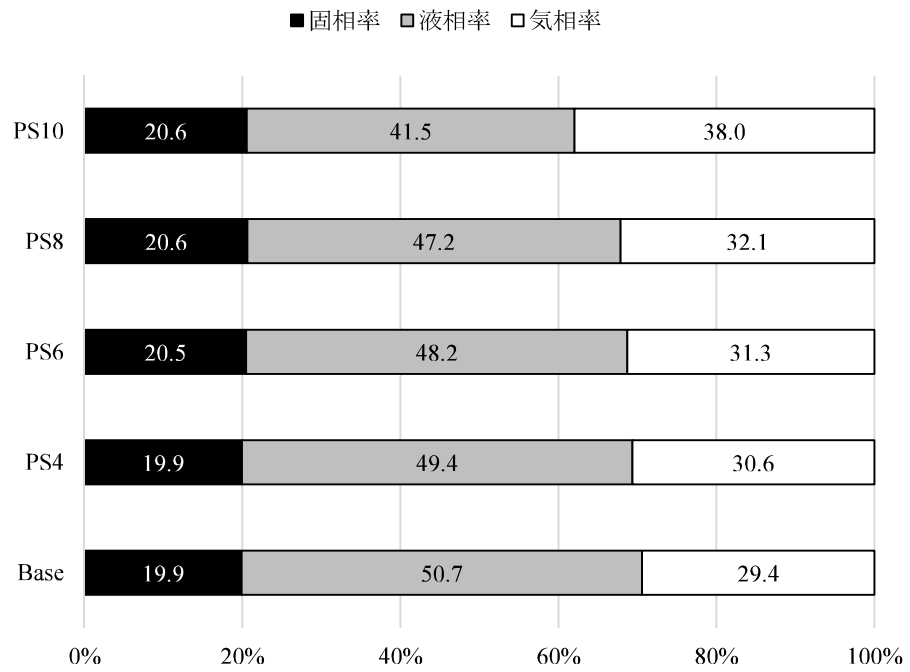


Fig. 5-2 三相分布

Three phase composition

5.3.2 保水性試験および透水性試験

各配合における緑化基盤材の水分特性曲線を **Fig. 5-3** に、透水係数を **Fig. 5-4** に示す。水分特性曲線は pF 値と体積含水率の関係を示したものであり、pF1.8 と pF3.0 の水分量の差が正常生育有効水分と呼ばれ、植物が吸収できる水分量の目安となる。また、pF1.8 は最小含水量と呼ばれ、緑化基盤材が飽和したのちに重力により余分な水が流去した後の水分量である^{5-15) 5-16)}。

Fig. 5-3 より、Base と PS を用いた緑化基盤材の水分特性曲線を比べると、PS を用いた緑化基盤材は pF1.0 にかけて Base よりも体積含水率の低下が大きい。また、Base と PS を用いた緑化基盤材の正常生育有効水分 (pF1.8 - pF3.0) はほとんど変化がない。また、**Fig. 5-4** より、緑化基盤材の透水係数は PS 混合量の増加に伴い、若干ではあるが増加傾向にある。

以上の結果から、PS を用いた緑化基盤材において増加した孔隙は保水性に影響するものではなく、排水性や透水性に寄与する重力水孔隙であると推察される。

従来の緑化基盤材として用いられるバーク堆肥とピートモスのうち、バーク堆肥のみを吹付機を使用して吹付けた場合には空気圧により圧縮され、形成される緑化基盤は硬くなり通気性や保水性が乏しくなる。そのため、バーク堆肥にピートモスを 30～50%併用することにより、緑化基盤材に空気を含みやすくし、通気性や保水性を確保している⁵⁻¹⁷⁾。また、伐採木や伐根チップ爆砕物は繊維化することにより、ピートモスの代替物として利用できる可能性が高いことが報告されている⁵⁻⁴⁾。

つまり、木材由来の微細な繊維を含む PS は、緑化基盤材の保水性への影響は小さいものの、排水性や透水性の向上を目的に、ピートモスの代替物として利用できる可能性が高いと考えられる。

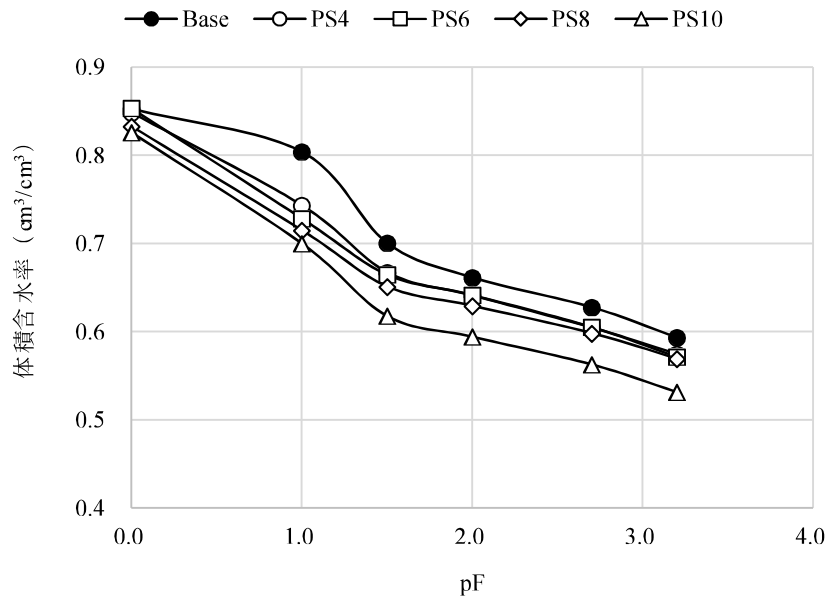


Fig. 5-3 水分特性曲線

Water retention curve

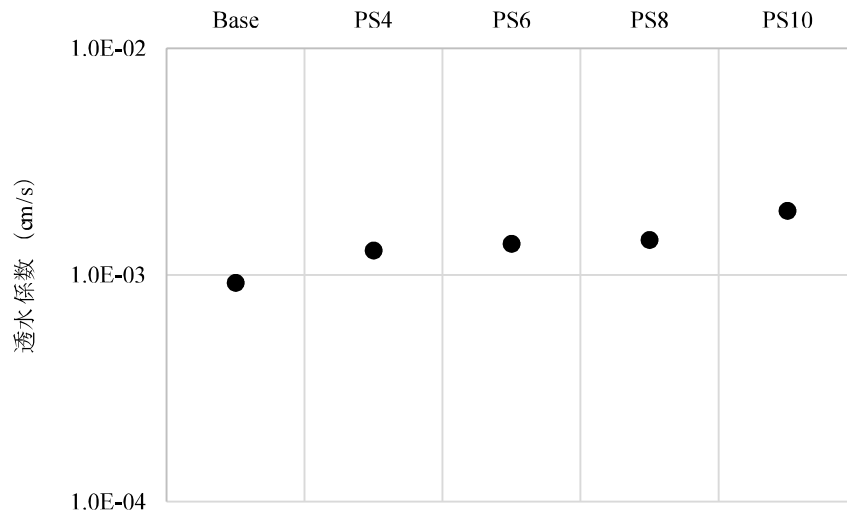


Fig. 5-4 透水試驗結果

Permeability coefficient

5.3.3 耐降雨浸食性試験

耐降雨浸食性試験の結果を **Fig. 5-5** に示す。緑化基盤材の60分後の流出割合は、**Base > PS4 > PS6 > PS8 > PS10** の順で小さくなっており、PS混合量の増加に伴い緑化基盤材の流出割合が小さくなっていることがわかる。また、緑化基盤材の流出割合が小さくなる傾向は、**PS6**、**PS8** および **PS10** において顕著に表れている。つまり、緑化基盤材にPSを6~10%混合することにより、耐降雨浸食性が向上することが確認された。

短繊維の混合による緑化基盤材の耐降雨浸食性の向上効果は、大坪ら(2014)や池田ら(2012)によっても報告されている^{5-3) 5-18)}。また、緑化基盤材の降雨による浸食は、土壌侵食の考え方で論じられている⁵⁻¹⁸⁾。つまり、雨滴が緑化基盤材の表面に当たるとその衝撃により、緑化基盤の構造が破壊され、水中に分散し、流下水とともに緑化基盤材が流れることにより、浸食が起こる⁵⁻¹⁹⁾。

よって、PSを用いた緑化基盤材の耐降雨浸食性が向上した理由は、以下の2つの原因が考えられる。一つ目は、PSに含まれる微細な繊維が緑化基盤材内で相互に絡み合い、雨滴の衝撃や流下水に対する抵抗力が大きくなったことである。二つ目は、PSを用いた緑化基盤材内の重力水孔隙が増加することにより、雨水の緑化基盤材への浸透水量が多くなり(**Fig. 5-3** および **Fig. 5-4**)、表面流下水の発生を抑制したことである。

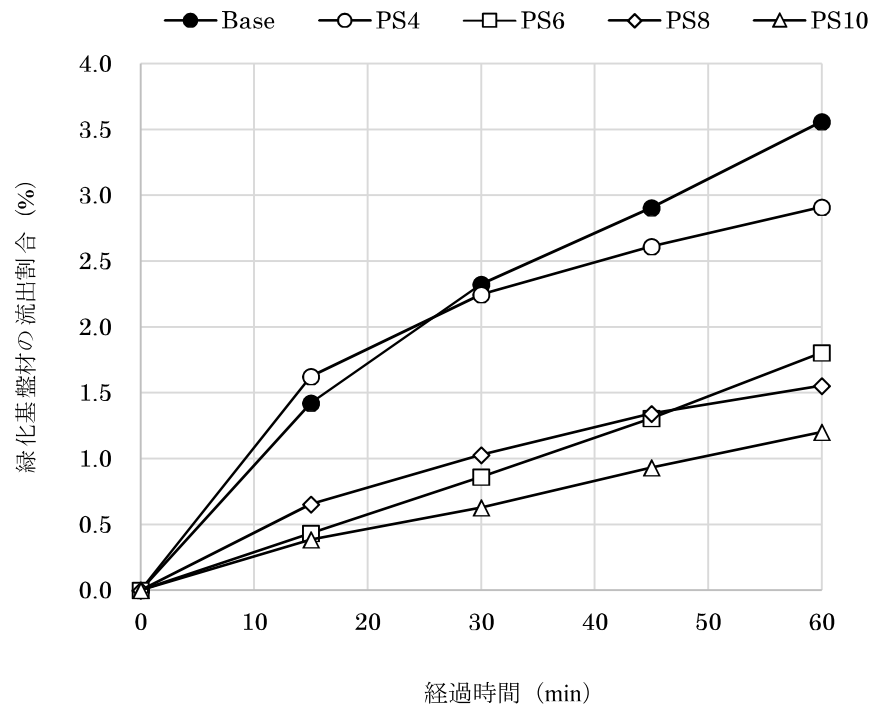


Fig. 5-5 人工降雨による緑化基盤材の流出割合

The outflow percentage of the greening base material by artificial precipitation

5.3.4 植生試験

各配合におけるトールフェスクの40日後の生育本数を **Fig. 5-6** に、新鮮重量を **Fig. 5-7** に、草丈を **Fig. 5-8** に示す。本研究の配合設計におけるトールフェスクの発芽期待本数 500 本/m²を、植生試験で用いた供試体の面積に換算すると約 24 本となる。

Fig. 5-6 より、すべての配合において 24 本以上の生育本数が確認されており、トールフェスクの生育は良好であるといえる。**Fig. 5-6** および **Fig. 5-7** より、PS6, PS8 および PS10 の生育本数および新鮮重量は Base と比べて高い数値を示している。また **Fig. 5-8** より、トールフェスクの草丈についても PS6, PS8 および PS10 は Base と比べて 2~3 割長いことがわかる。

本試験では、供試体数が少ないことから、PS の混合によるトールフェスクの生育促進効果の優位性を判断することは難しいが、少なくとも PS の混合によるトールフェスクへの生育障害の可能性は小さいと判断できる。

PS は腐敗対策として消石灰を混合しているため、**Table 5-3** に示すように pH が 10.8 と弱アルカリ性を示している。そのため、供試体作製直後と 40 日後の緑化基盤材の pH を測定し、確認した。その測定結果を **Table 5-4** に示す。植物の生育に適した pH は、その植物の種類によっても異なるが、緑化基盤材の良好な pH の範囲は 4.5~8.0 とされている⁵⁻²⁰⁾。PS を混合した緑化基盤材の pH は供試体作製直後においては若干 8.0 を上回るものの、40 日後においてはすべての配合において 8.0 を下回り、植物が正常に生育できる範囲であった。

植生試験および pH 測定結果より、PS を用いた緑化基盤材の pH は Base と比べて若干高い数値となるものの、PS の混合量が 10% までであれば植物の生育に与える悪影響は小さいと考えられる。

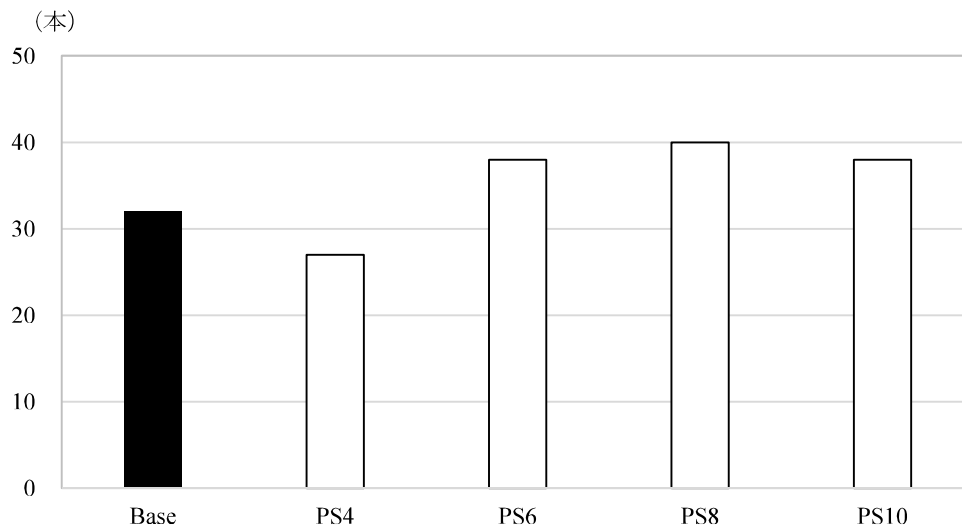


Fig. 5-6 トールフェスクの生育本数

The growing number of tall fescue

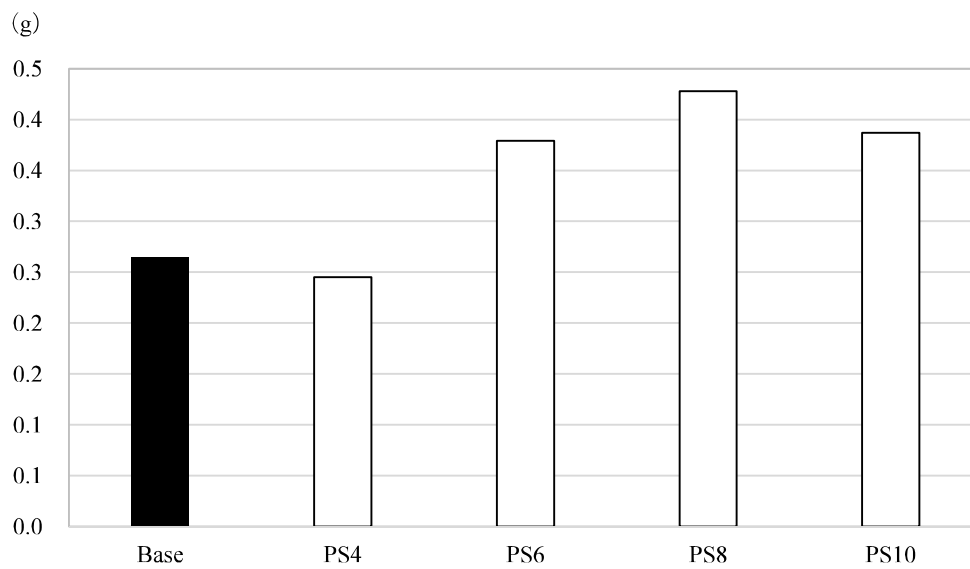


Fig. 5-7 トールフェスクの新鮮重量

The fresh weight of tall fescue

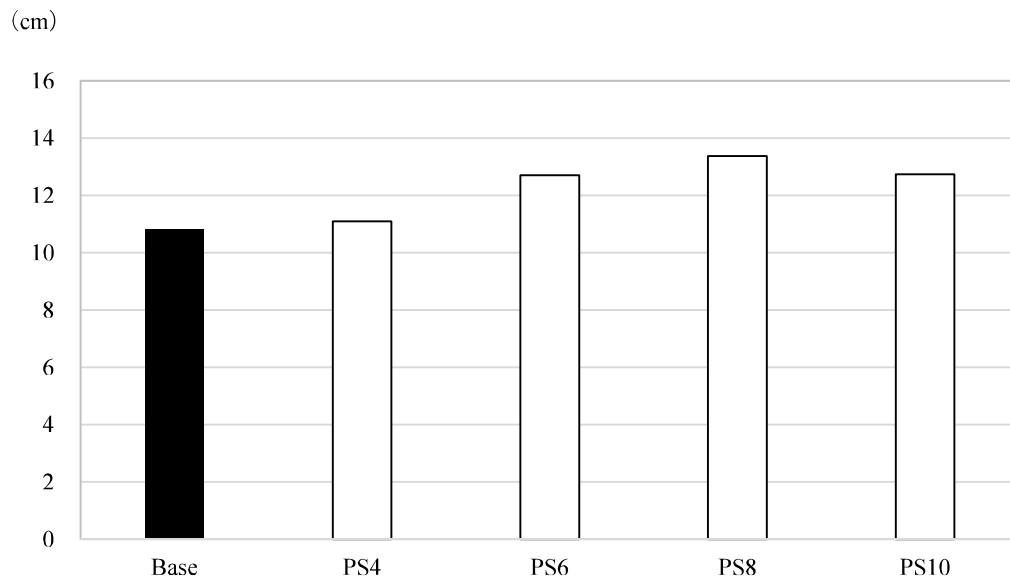


Fig. 5-8 トールフェスクの草丈

The height of plant of tall fescue

Table 5-4 緑化基盤材の pH 測定値

The pH measure of the greening base material

| | pH 測定値 | | | | |
|---------|--------|------|------|------|------|
| | Base | PS4 | PS6 | PS8 | PS10 |
| 供試体作製直後 | 7.81 | 8.24 | 8.35 | 8.42 | 8.46 |
| 40 日後 | 7.21 | 7.50 | 7.74 | 7.80 | 7.90 |

5.4 フィールド試験

室内試験結果が良好であったので、フィールド試験において PS を用いた緑化基盤材の施工性および長期的な植物の生育状況について確認した。

フィールド試験（2009年）は山形県新庄市にて行った。法面緑化工の概略図を **Fig. 5-9** に示す。フィールド試験では、法面の整形を行った後、F200（1,500×1,200 mm）のフレームを用いて 12,200×8,600 mm の法枠を作製し、一般に施工現場で使用する吹付機を用いて、法枠内に緑化基盤材を吹付けた。法枠の中心から左半分は既存の緑化基盤材を、右半分に PS を 6% 混合した緑化基盤材を吹付けた。接合材は高分子系樹脂を、肥料は化成肥料を用いた。種子はトールフェスク、クリーピングレッドフェスク（*Festuca rubra*）およびケンタッキーブルーグラス（*Poa pratensis* L）を発芽期待本数が 500 本/m² となるように、メドハギ（*Lespedeza cuneata*）を発芽期待本数が 200 本/m² となるように緑化基盤材の中に混合した。

緑化基盤材の吹付け状況を **Fig. 5-10** に示す。緑化基盤材の吹付け工法を適用する場合、緑化基盤材をホースで空気により圧送し、ノズルガンから法面に吹付ける。そのため、緑化基盤材がホースを閉塞させてしまうような場合、著しく施工性が低下することになる。また、緑化基盤材によるホースの閉塞に起因して生じる圧力により、ノズルガンが吹き飛ばされるという作業上の危険性が発生する。PS を用いた緑化基盤材は、このようなホースの閉塞等の施工トラブルもなく、良好な施工性が確認できた。

施工直後の法面の状況を **Fig. 5-11** に、2ヶ月後の法面の状況を **Fig. 5-12** に、14ヶ月後の法面の状況を **Fig. 5-13** に、6年後の法面の状況を **Fig. 5-14** に示す。

法面の生育状況について、目視により観察したところ、施工から2ヶ月後（**Fig. 5-12**）、14ヶ月後（**Fig. 5-13**）および6年後（**Fig. 5-14**）において、既存の緑化基盤材と PS を用いた緑化基盤材の生育状況に大きな差はみられず、どちらの緑化基盤材も植物の生育は良好である。

また、法面の植生は施工後、1、3、5年後を目安とした植生モニタリング調査を実施することが望ましいとされている⁵⁻²¹⁾。本研究のフィールド試験における、PS を用いた緑化基盤材は6年後においても良好な生育状況が確認されており、長期的な植物の生育についても大きな問題はないと判断できる。

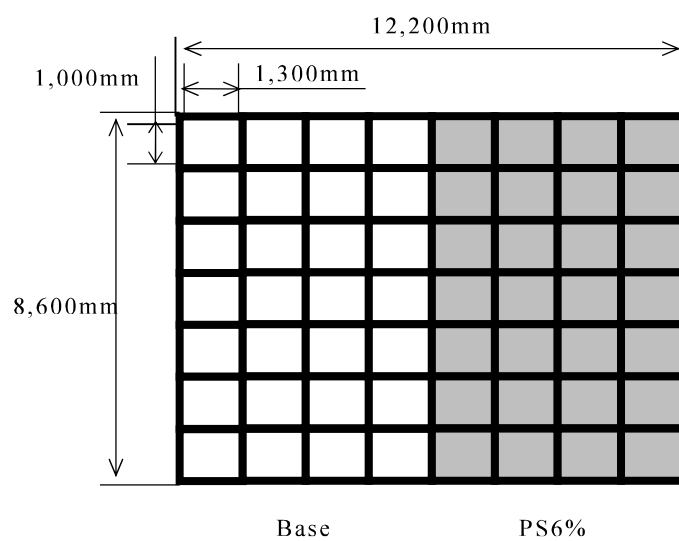


Fig. 5-9 法面緑化工の概略図

Schematic of slope greening method



Fig. 5-10 緑化基盤材の吹付け状況

The situation of spraying of greening base material

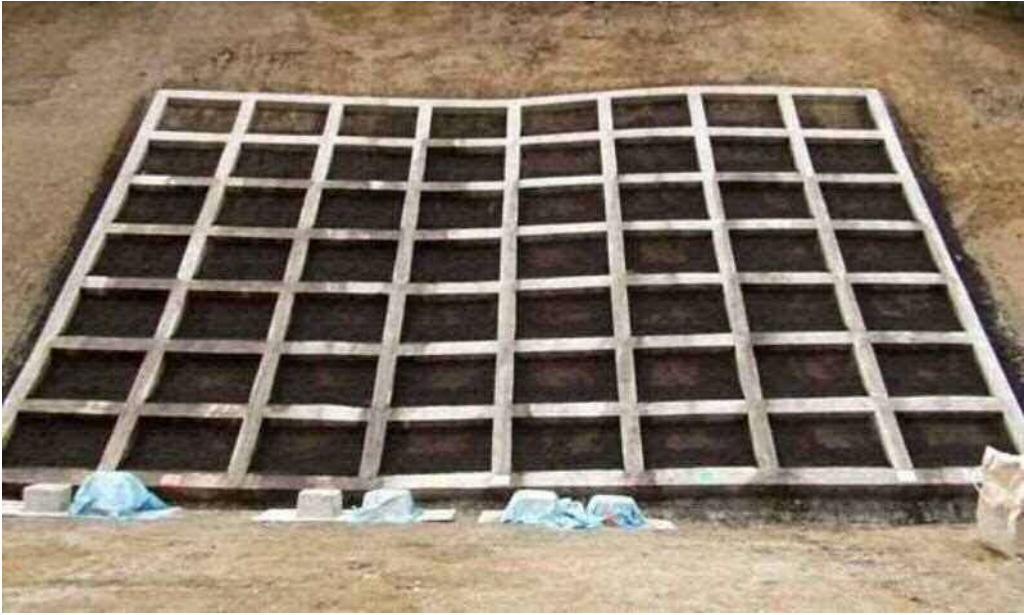


Fig. 5-11 施工直後の法面の状況

The situation of slope for just after the construction



Fig. 5-12 2ヶ月後の法面の状況

The situation of slope of two months later



Fig. 5-13 14ヶ月後の法面の状況

The situation of slope of fourteen months later



Fig. 5-14 6年後の法面の状況

The situation of slope of six years later

5.5 まとめ

PS を用いた緑化基盤材の物性および植物の生育状況について、室内試験およびフィールド試験により検討を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) PS を用いた緑化基盤材は圧縮量が減少し、気相率が増加することがわかった。
- (2) PS を用いた緑化基盤材は孔隙が増え、通気性や透水性が向上する可能性が示唆された。但し、保水性への影響はほとんどない。
- (3) 緑化基盤材に PS を 6～10%混合することにより、耐降雨浸食性が向上することが確認された。
- (4) 室内試験により、PS を用いた緑化基盤材におけるトールフェスクの生育は既存の緑化基盤材と比べて同等であり、PS の混合量が 10%までであれば、発芽および生育に対する悪影響は小さい。
- (5) フィールド試験により、PS を用いた緑化基盤材の施工不良は確認されなかった。また 6 年後の植物の生育状況も良好であった。

PS を用いた緑化基盤材は、通気性や透水性に及ぼす影響が大きい孔隙の増加が認められた。また、既存の緑化基盤材と比べて耐降雨浸食性が向上し、植物の生育は良好であった。さらに、フィールド試験により、施工性および長期的な植物の生育も良好であることが確認された。

第6章

ペーパースラッジの流動モルタルおよび
セメントベントナイトへの適用

第 6 章 ペーパーラッジの流動モルタルおよび セメントベントナイトへの適用

6.1 概説

流動モルタルとは、山砂や現地発生土などの細骨材に固化材、水、必要によっては混和剤などを混合し流動性を高めたモルタルである。流動モルタルはポンプ圧送が可能であり自硬性もあるため、埋戻しや締固めが困難な箇所への施工および圧密沈下や液状化現象の防止に有効な材料である。また、流動モルタルの細骨材として現地発生土を利用する場合には建設副産物の削減につながることから、環境・リサイクルの観点からも注目されている。例えば、流動化処理工法は建設発生土を有効利用する目的で開発され⁶⁻¹⁾、数多くの施工実績がある⁶⁻²⁾。また、建設発生土以外の産業廃棄物を建設資材として有効利用する研究も数多く報告されている。例えば、建設廃棄物では解体コンクリート塊⁶⁻³⁾および建設汚泥⁶⁻⁴⁾を細骨材として用いたもの、建設廃棄物以外では安定処理碎石微粉末⁶⁻⁵⁾、一般廃棄物熔融スラグ⁶⁻⁶⁾、下水汚泥焼却灰⁶⁻⁷⁾および石炭火力発電所から発生する石炭灰⁶⁻⁸⁾を細骨材に用いたものなどが報告されている。

流動モルタルは普通コンクリートやモルタルと比較して強度のばらつきが大きくなる傾向にある⁶⁻³⁾⁶⁻⁹⁾。特に、不均一な産業廃棄物を材料として使用する場合には、強度のばらつきが大きくなるため、配合強度を高く設計することになり不経済である。そのため、産業廃棄物を材料として有効利用した流動モルタルを安定的な品質で安価に提供するためには、強度のばらつきを抑制することが必要である。

また、流動モルタルの物性は、使用する山砂や建設発生土などの細骨材の物性に大きく左右され、とくに、細粒分の量が大きく影響する⁶⁻¹⁾。川砂のように細粒分が少ないものの場合には、材料分離が起こり易くなる。材料分離を抑制するため、水セメント比の調整や増粘剤の使用によって粘性を増加した場合、流動性が阻害されてしまうため、使用用途によっては効果的ではない。一方、粘性土のように細粒分の多いものの場合には、流動性および強度確保のために練り水とセメント量が増えるため、低密度で脆性的な挙動を示し耐震性能が低下してしまう⁶⁻¹⁰⁾。このような、脆性的な性質改善のために

は補強材を添加する必要があるが、古紙の繊維質材料⁶⁻¹¹⁾、ポリプロピレン繊維材⁶⁻¹²⁾、ジオグリッドおよび寸切りボルト⁶⁻¹³⁾⁶⁻¹⁴⁾などを使用することで改善効果が認められている。

他方、セメントベントナイトはセメントにベントナイトを混合したものであり、低価格で高い流動性を持つ埋戻しおよび充填材の一つである。セメントベントナイトは1 m³当たりの材料使用量が少ないことから、運搬費や材料費の削減効果が期待でき、骨材等の材料が不足している被災地の復旧・復興工事での使用にも有効である⁶⁻¹⁵⁾。また、漏水対策に効果的であることから、農業用ダムやため池の止水材としての利用されている。さらに、高濃度放射能汚染物質を封じ込める際に使用する固化材としての検討も行われている⁶⁻¹⁶⁾。

しかし、セメントベントナイトの物性はベントナイトの膨潤特性に大きく左右されるため、施工現場において、練混ぜ時間不足や計量ミスによりベントナイトの膨潤が不十分となると、過剰なブリーディングや強度低下を引き起こすことがある。また、セメント量が多い場合には脆性破壊によりクラックが発生し、水密性が低下する場合もある。

本章の研究は、第3章～第5章で明らかになったペーパースラッジを混合することによる特性が、流動モルタルおよびセメントベントナイトの物性改善にも効果があると考え着手した。本章では、ペーパースラッジを異なる比率で混合した流動モルタルおよびセメントベントナイトの物性について室内試験により評価し、その利用の可能性について検討している。流動モルタルの室内試験においては、一軸圧縮強さのばらつきおよび靱性について検討しており、セメントベントナイトの室内試験においては、ブリーディングの減少効果について検討している。

6.2 流動モルタルへの適用（一軸圧縮強さのばらつき）

6.2.1 材料および試験方法

1) 使用材料

セメントは高炉セメント B 種（密度 3.04 g/cm^3 ），細骨材は山砂（表乾密度 2.58 g/cm^3 ，吸水率 2.29%）および市販の粘土（密度 2.50 g/cm^3 ，膨潤力 3.3 24hrsg/g ）を用いた。ペーパースラッジは前述した腐敗対策を講じたものを使用した（土粒子の密度 2.12 g/cm^3 ，含水率 50.0%）（以下，腐敗対策を講じたペーパースラッジを PS という）。なお，本研究に用いた PS は「土壤の汚染に係る環境基準」（環境庁告示第 46 号）によりその安全性を確認した後，実験に用いている。

2) 配合設計

実験に使用した流動モルタルの配合を **Table 6-1** に示す。セメント量は 1 m^3 あたり 50kg（以下，C50 という），100kg（以下，C100 という）の 2 水準とし，PS の混合量は 1 m^3 あたり 0，10 および 20kg の 3 水準とした。なお，PS に含まれる水は練り水の一部とみなした。細骨材は細粒分率が質量比で 20% になるように山砂と粘土を混合した。流動モルタルの物性は使用する細骨材の細粒分率に大きく影響され，細粒分が少ない場合には材料分離が起こり易くなる⁶⁻¹⁾。そのため，本研究の配合設計では，流動モルタルの材料分離を小さくするため，予備試験結果から細粒分率を 20% とした。また，PS を混合した流動モルタル（以下，PS 流動モルタルという）は水セメント比を一定として PS を混合した配合（以下，水セメント比一定条件という）およびフロー値を一定として PS を混合した配合（以下，フロー値一定条件という）の 2 条件で配合設計を行った。

Table 6-1 流動モルタルの配合

Mix proportion of flowing mortar

| PS 混合方法 | 記号 | W/C (%) | 細粒 分率 (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | |
|---------------------------------|---------|------------|-----------------|--------------------------|----|-----|-------|-----|
| | | | | 高炉セメント B種 | PS | 細骨材 | | 水 |
| | | | | | | 山砂 | 粘土 | |
| — | C50B | 1048 | 20 | 50 | — | 942 | 236 | 524 |
| | C100B | 500 | 20 | 100 | — | 958 | 240 | 500 |
| 水 — セ メ ン ト 比 | C50P1W | 1048 | 20 | 50 | 10 | 938 | 234.5 | 519 |
| | C50P2W | 1048 | 20 | 50 | 20 | 933 | 233.5 | 514 |
| | C100P1W | 500 | 20 | 100 | 10 | 953 | 238.5 | 495 |
| | C100P2W | 500 | 20 | 100 | 20 | 948 | 237.5 | 490 |
| — フ ロ ー 値 | C50P1F | 1068 | 20 | 50 | 10 | 917 | 229 | 529 |
| | C50P2F | 1078 | 20 | 50 | 20 | 902 | 226 | 529 |
| | C100P1F | 510 | 20 | 100 | 10 | 932 | 233 | 505 |
| | C100P2F | 520 | 20 | 100 | 20 | 907 | 227 | 510 |

3) 供試体の作製方法および試験項目

流動モルタルの練混ぜ方法は、はじめにセメント、細骨材をミキサで1分間空練りし、その後、練混ぜ水を投入し3分間攪拌した。なお、PS流動モルタルのPSは細骨材と同時に投入した。

試験項目は、湿潤密度試験（重量法）、フロー試験（JHS A 313）、ブリーディング試験（JSCE-F522）、一軸圧縮試験（JIS A 1216）である。ブリーディング試験は20h後に実施し、一軸圧縮試験は材齢7、28日に行った。一軸圧縮試験用の供試体はφ50×100mmの円柱供試体とし、試験材齢毎に10本ずつ作製した。脱型は試験前日に行い、養生は20℃の恒温室における気中養生とした。なお、養生中の供試体は水分の蒸発を防ぐために、ポリ塩化ビニリデンフィルムで密封養生とした。

6.2.2 結果および考察

1) 流動モルタルのフレッシュ性状

流動モルタルの湿潤密度について、設計値と実測値を **Fig. 6-1** に示す。PS 流動モルタルは、すべての配合で湿潤密度の実測値が設計値よりも小さい値を示した。これは、PS の混合により流動モルタルの練混ぜ時に、流動モルタル内に空気を取り込み易くなるためであると推察される。

PS 流動モルタルの湿潤密度について、設計値と実測値から算出した湿潤密度の減少率を **Fig. 6-2** に示す。湿潤密度の減少率は、PS 混合量が 10 kg/m^3 よりも 20 kg/m^3 の方が大きいことがわかる。また、単位セメント量で比べると、C50 の配合よりも C100 の配合の方が湿潤密度減少率は小さく、PS 混合量の増加による影響も小さい。これは、単位セメント量の増加に伴い、空気の連行性が弱まるためだと推察される⁶⁻¹⁷⁾。

水セメント比一定条件の流動モルタルについて、PS 混合量とフロー値の関係を **Fig. 6-3** に示す。水セメント比一定条件の流動モルタルのフロー値は、PS 混合量の増加に伴い小さくなる傾向を示した。これは、PS に含まれる繊維に PS 流動モルタル中の水分や空気などが吸着することにより、PS 流動モルタルの粘性が高まるためであると推察される。流動モルタルを埋戻し材や充填材に用いる場合のフロー値はポンプ圧送性や施工性を考慮して 160mm 以上とすることが多い⁶⁻¹⁾。本研究では、すべての配合で 160mm 以上であるため流動性の条件は満足しているが、PS を混合する際にはフロー値の低下を考慮し、使用用途に適した配合設計を行う必要がある。

流動モルタルのブリーディング試験の結果を **Fig. 6-4** に示す。ブリーディング率は材料分離抵抗性を評価するものであり、過剰なブリーディングが生じると圧送ポンプの閉塞、体積変化および強度低下などを招く場合がある。流動モルタルの用途として埋戻し材や充填材を想定した場合、ブリーディング率は 3%未満とし、1%を目標値とすることが望ましいとされている^{6-18) 6-19)}。**Fig. 6-4** より、本研究の流動モルタルのブリーディング率は 0.2~1.2%の範囲であり、すべての配合で材料分離が小さく、安定した流動モルタルであると判断できる。

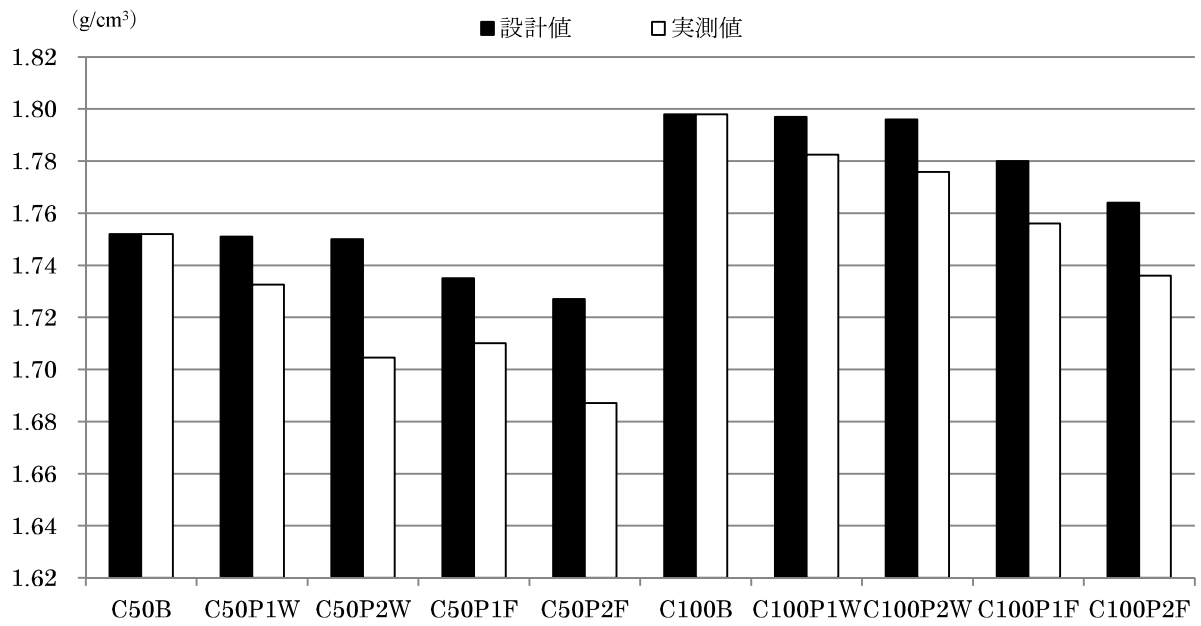


Fig. 6-1 流動モルタルの湿潤密度

Wet density of flowing mortar

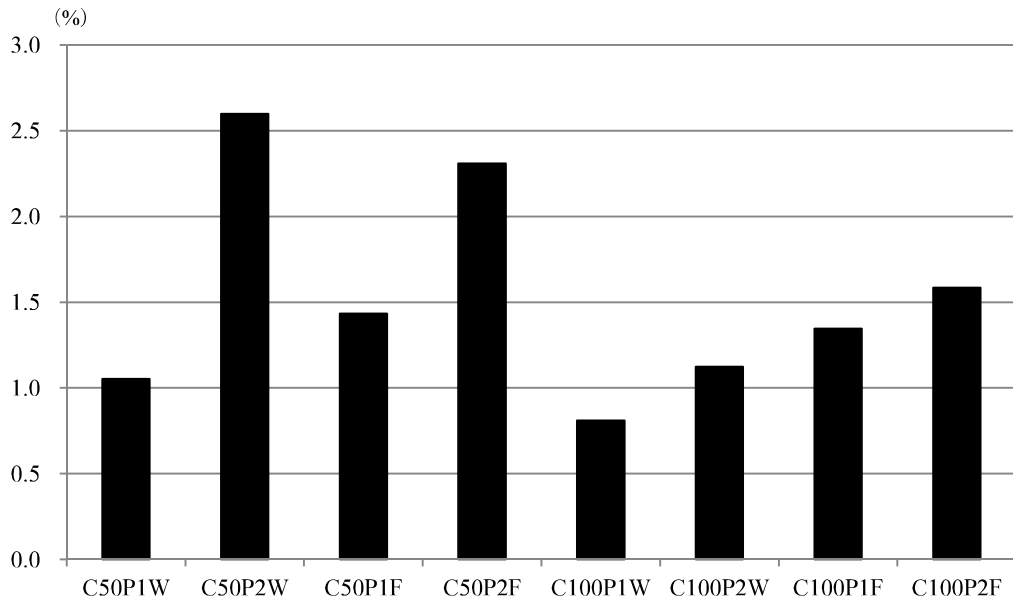


Fig. 6-2 PS 流動モルタルの湿潤密度減少率

Wet density decrease rate of paper sludge flowing mortar

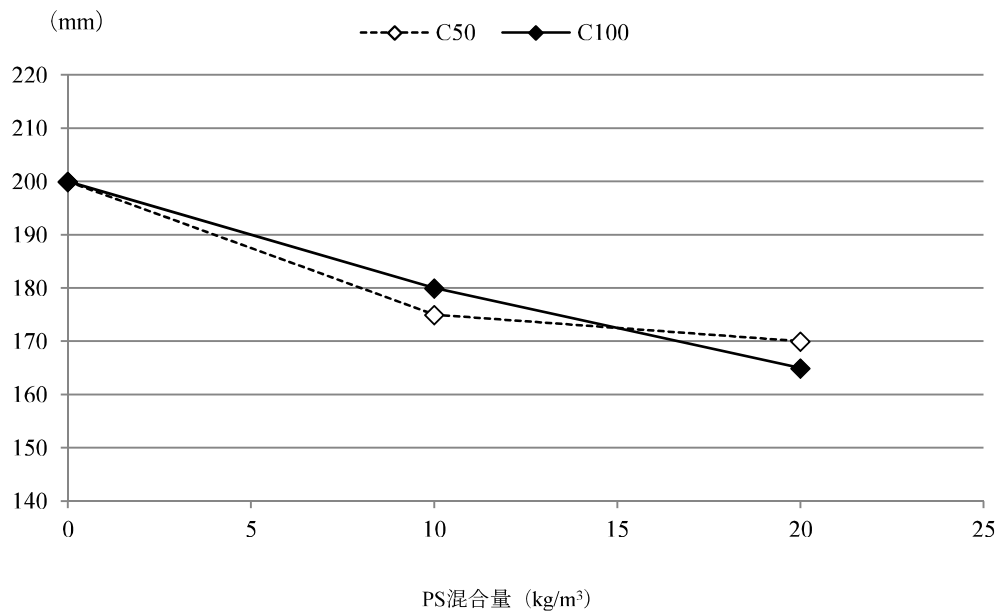


Fig. 6-3 PS 混合量とフロー値の関係

Relationship between paper sludge mixed quantity and flow value of flowing mortar

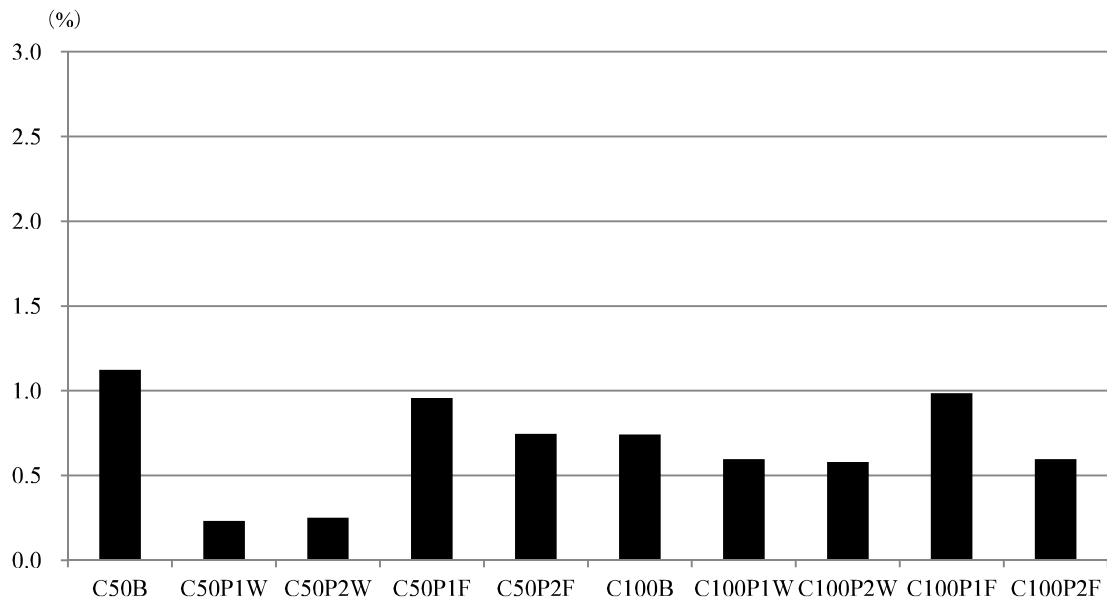


Fig. 6-4 ブリーディング試験結果

Test result of bleeding of flowing mortar

2) 一軸圧縮試験

C50 の配合について、PS 混合量と一軸圧縮強さの関係を Fig. 6-5 に示す。水セメント比一定条件の一軸圧縮強さは材齢 7 日、28 日ともに PS 混合による大きな影響は認められず、同等の強度であることがわかる。一方、フロー値一定条件の一軸圧縮強さは、PS 混合量の増加に伴い低下する傾向を示した。ここで、Fig. 6-6 に示すフロー値一定条件におけるセメント水比と一軸圧縮強さの関係について見ると、セメント水比と一軸圧縮強さの間には高い相関関係が成立している。したがって、フロー値一定条件における一軸圧縮強さの低下は、PS の混合に伴う水セメント比の増加が大きな要因であると推察される。

C100 の配合について、PS 混合量と一軸圧縮強さの関係を Fig. 6-7 に示す。材齢 7 日における一軸圧縮強さは、C50 と同様、水セメント比一定条件では同等であり、フロー値一定条件では PS 混合量の増加に伴い低下する傾向を示した。一方、材齢 28 日の一軸圧縮強さは、水セメント比一定条件およびフロー値一定条件ともに、PS 混合量の増加に伴って増加する傾向を示し、PS を混合しない流動モルタルと比べて、10～17%の強度増加が確認された。ここで、Fig. 6-8 に示すフロー値一定条件におけるセメント水比と一軸圧縮強さの関係を見ると、材齢 7 日では C50 の配合と同様に、セメント水比と一軸圧縮強さの間に高い相関関係が成立しているものの、材齢 28 日では負の相関関係を示した。つまり、C100 の配合の PS 流動モルタルにおいては、PS の混合を要因とした材齢 28 日強度の増進効果があることがわかる。これは、PS が流動モルタル内の材料の分散性および均一性に影響を及ぼしたことおよび PS に含まれるシリカ、アルミナによるポゾラン反応などが原因と考えられるが、詳細は不明である。

以上の結果から、PS 流動モルタルの一軸圧縮強さに影響を与える主な配合要因は水セメント比であり、PS 混合量が 20 kg/m^3 までは一軸圧縮強さに悪影響を及ぼさないことが確認された。

また、前述において、PS 流動モルタルの湿潤密度の減少は空気の混入が原因であると考察した。コンクリートにおいては、水セメント比を変えずに空気量が 1%増えると圧縮強度が 4～6%減少する⁶⁻¹⁷⁾が、本研究の流動モルタルでは、混入した空気による一軸圧縮強さへの大きな影響は確認されなかった。

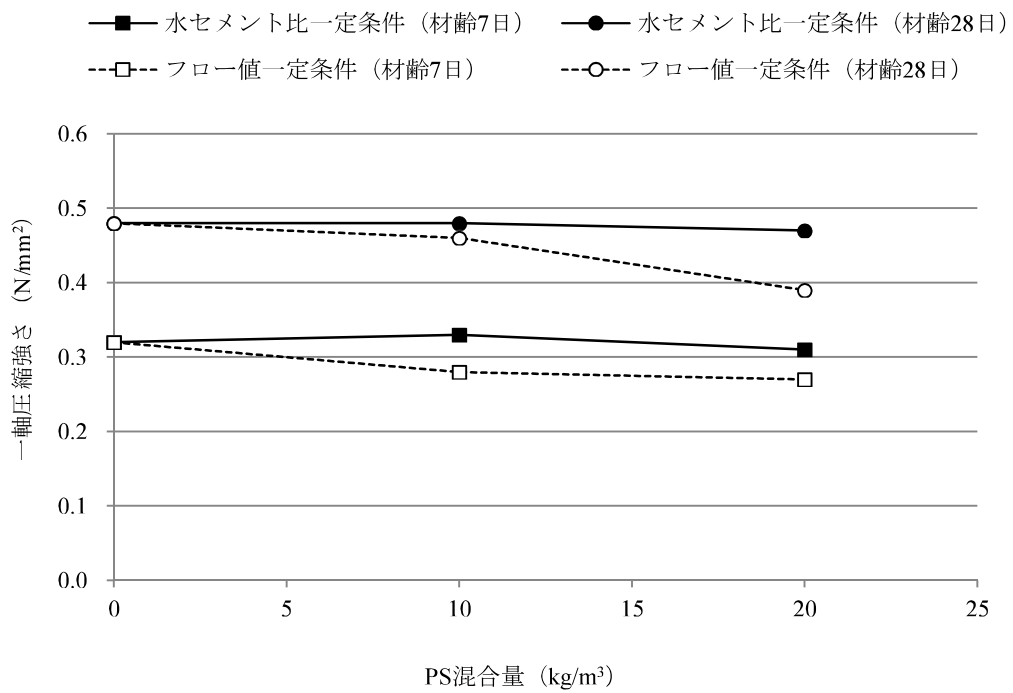


Fig. 6-5 PS 混合量と一軸圧縮強さの関係 (C50)

Relationship between paper sludge mixed quantity and unconfined compression of flowing mortar

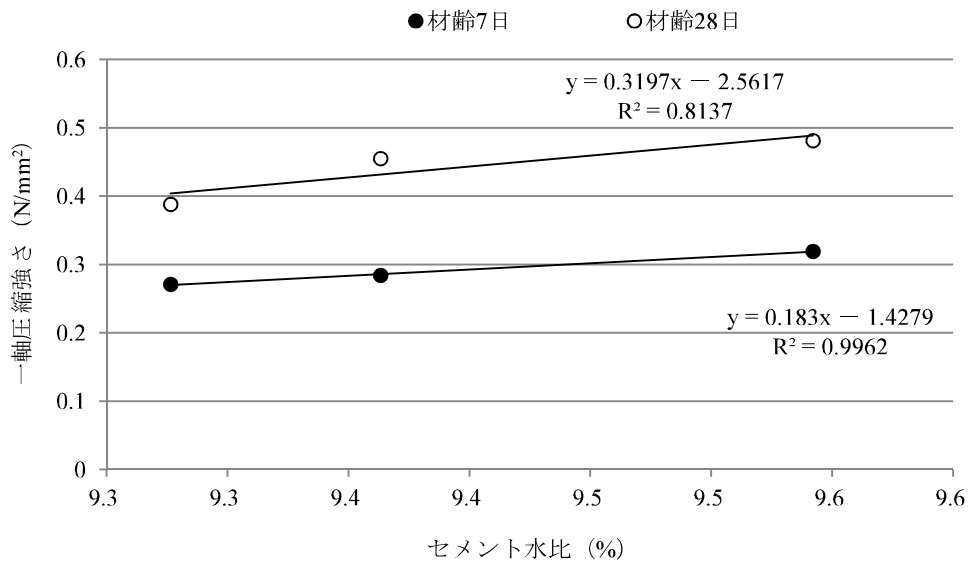


Fig. 6-6 セメント水比と一軸圧縮強さの関係 (C50) (フロー値一定条件)

Relationship between cement-water ratio and unconfined compression of flowing mortar

(Flow value constant condition)

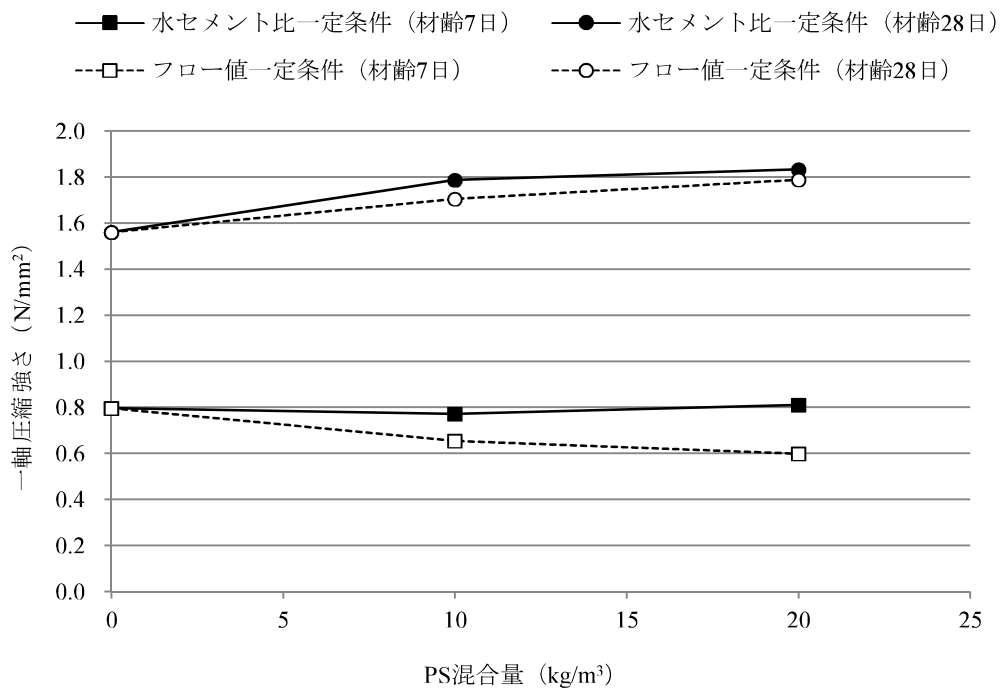


Fig. 6-7 PS 混合量と一軸圧縮強さの関係 (C100)

Relationship between paper sludge mixed quantity and unconfined compression of flowing mortar

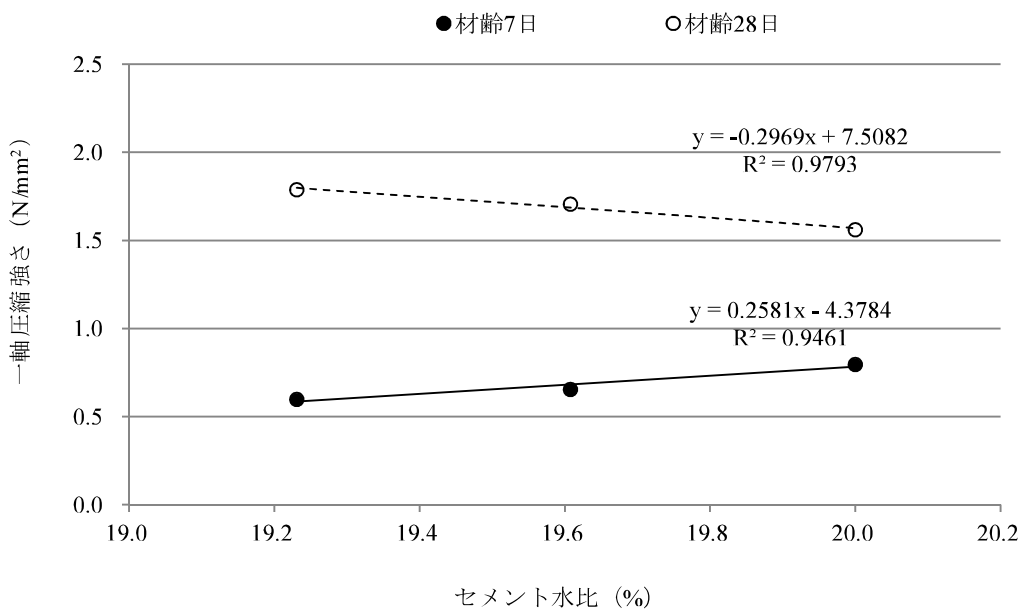


Fig. 6-8 セメント水比と一軸圧縮強さの関係 (C100) (フロー値一定条件)

Relationship between cement-water ratio and unconfined compression of flowing mortar

(Flow value constant condition)

2) 一軸圧縮強さのばらつき

PS 流動モルタルの一軸圧縮強さのばらつきについて、PS 混合量と一軸圧縮強さの変動係数（以下、変動係数という）の関係から論述する。なお、変動係数は材齢 7 および 28 日の変動係数の平均値を用いた。

C50 の配合について、PS 混合量と変動係数の関係を **Fig. 6-9** に示す。フロー値一定条件の変動係数は、PS を混合しない配合の 7.0% と比べて、PS 混合量が 10 kg/m^3 では 3.9%、 20 kg/m^3 では 4.7% であり、それぞれ約 44%、33% 小さい。また、水セメント比一定条件の変動係数は、PS を混合しない配合の 7.0% と比べて、PS 混合量が 10 kg/m^3 では 5.6%、 20 kg/m^3 では 6.7% であり、それぞれ約 20.0%、4.0% 小さい。このように、変動係数はすべての条件において、PS の混合によって小さくなる傾向を示した。ただし、変動係数は PS 混合量では 10 kg/m^3 よりも 20 kg/m^3 の方が、混合条件ではフロー値一定条件よりも水セメント一定条件の方が大きくなった。これは、PS の過剰混合および PS 混合に伴うフロー値の低下によって、PS 流動モルタル内の材料の分散性や均一性が低下したためであると推察される。

つぎに、C100 の配合について、PS 混合量と変動係数の関係を **Fig. 6-10** に示す。フロー値一定条件の変動係数は、PS を混合しない配合の 8.0% と比べて、PS 混合量が 10 kg/m^3 では 4.4%、 20 kg/m^3 では 4.9% であり、それぞれ約 45%、39% 小さい。また、水セメント比一定条件の変動係数は、PS を混合しない配合の 8.0% と比べて、PS 混合量が 10 kg/m^3 では 4.0%、 20 kg/m^3 では 3.7% であり、それぞれ約 50%、54% 小さい。このように、変動係数は、PS の混合によって小さくなる傾向を示し、その低下割合は C50 の配合と比べて大きい。また、C100 の配合では PS 混合量および混合条件による変動係数の大きな変化は認められなかった。

以上の結果より、PS 流動モルタルの変動係数は PS を混合しない流動モルタルの変動係数より小さく、PS の混合による一軸圧縮強さのばらつき抑制効果が確認された。なお、一軸圧縮強さのばらつき抑制効果は PS 混合量に比例して大きくなるのではなく、PS 混合量 10 kg/m^3 程度が適量であり、C50 の配合よりも C100 の配合の方が抑制効果は大きいことがわかった。

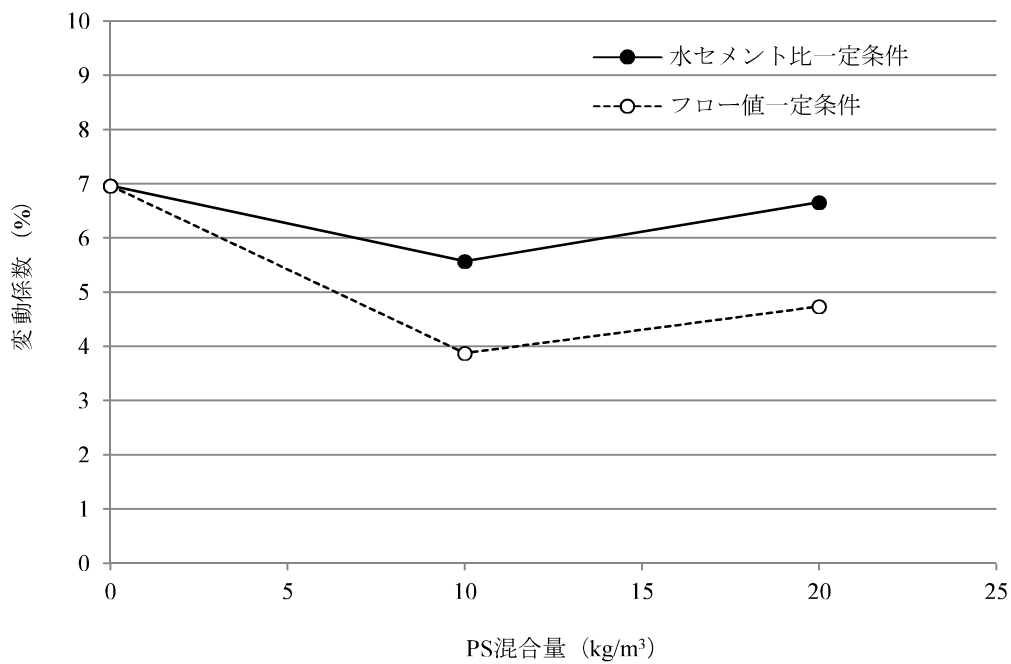


Fig. 6-9 PS 混合量と一軸圧縮強さの変動係数の関係 (C50)

Relationship between paper sludge mixed quantity and coefficient of variation

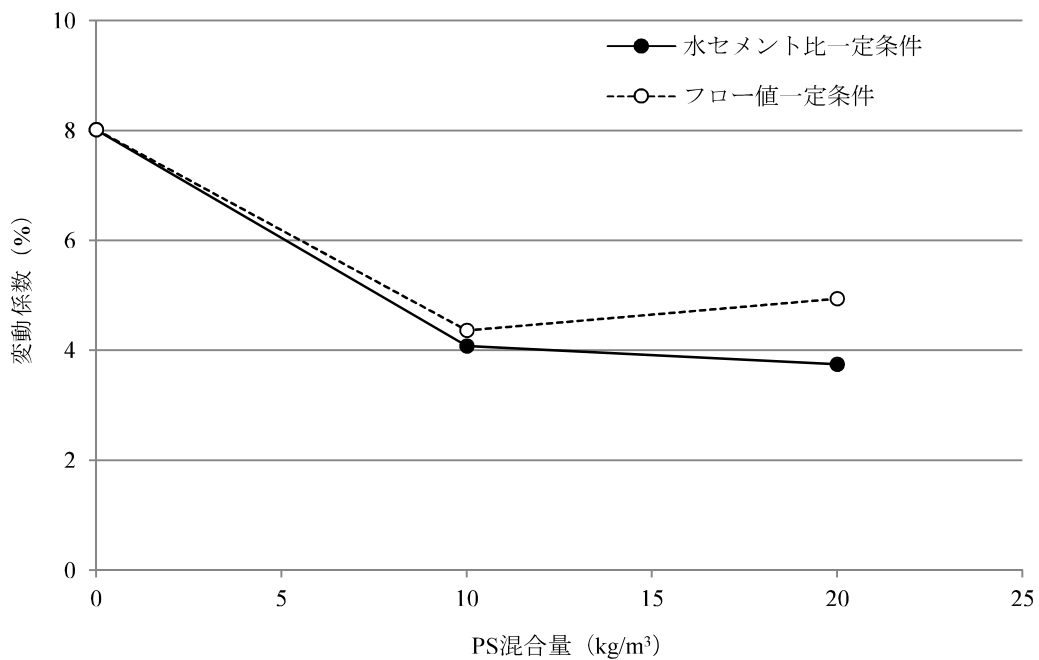


Fig. 6-10 PS 混合量と変動係数の関係 (C100)

Relationship between paper sludge mixed quantity and coefficient of variation

6.3 流動モルタルへの適用（靱性）

6.3.1 材料および試験方法

1) 使用材料

セメントは高炉セメント B 種（密度 3.04 g/cm³）を用いた。ペーパーセラッジは前述した腐敗対策を講じたもの（含水率 50%，密度 2.12g/cm³）を用いた（以下，腐敗対策を講じたペーパーセラッジを PS という）。また，ブリーディング防止目的に通常用いられる混和材としてベントナイト（密度 2.60g/cm³，膨潤力 22.5ml/2g）を用いた。細骨材には山砂（表乾密度 2.55g/cm³）および市販のシルト（密度 2.30 g/cm³）を用いた。

2) 配合設計

流動モルタルの配合表を **Table 6-2** に示す。配合設計では，山砂の単位水量を一定とし，PS の配合量を 1 m³あたり 0，10，20，30 および 40kg 添加した 5 配合とした。また，細骨材は材料分離を起こしやすく使用が困難な細粒分 5% 以下の発生土を想定し，細粒分 2% 程度になるように山砂とシルトを混合した。

Table 6-2 配合（1m³当たり）

Mix proportion of flowing mortar

| 配合名 | セメント | | 細骨材 | | ベント ナイト | ペーパー セラッジ | 水 | 配合含水比 (W/S) |
|------|------------|------|------|------|------------|--------------|------|----------------|
| | 高炉セメント B 種 | 山砂 | シルト | | | | | |
| | (kg) | (kg) | (kg) | (kg) | (kg) | (kg) | (%) | |
| PS0 | 100 | 1452 | 30 | 10 | 0 | 381 | 26.2 | |
| PS10 | 100 | 1449 | 30 | 10 | 10 | 375 | 26.2 | |
| PS20 | 100 | 1446 | 30 | 10 | 20 | 370 | 26.3 | |
| PS30 | 100 | 1445 | 30 | 10 | 30 | 364 | 26.2 | |
| PS40 | 100 | 1441 | 30 | 10 | 40 | 359 | 26.3 | |

3) 供試体の作製方法および試験項目

練混ぜ方法は、はじめにセメント、細骨材、ベントナイトおよび PS をミキサで 1 分間空練りし、その後、水を投入し 3 分間練混ぜた。

試験項目は、湿潤密度試験（重量法）、フロー試験（JHS A 313）、ブリーディング試験（24h）（JSCE-F522）、一軸圧縮試験（材齢 7, 28 日）（JIS A 1216）、曲げ強度試験（材齢 28 日）（JIS A 1106）、引張強度試験（材齢 28 日）（JIS A 1113）および三軸圧縮試験（JGS 0520）である。

三軸圧縮試験は、非圧密非排水（UU）条件で 0.1, 0.2 および 0.3MPa の 3 種類の側圧（拘束圧）の下でおこなった。側圧を加え一定とした後、毎分 1% の軸ひずみが生じる割合で圧縮し、荷重計の読みが最大となってから引き続き軸ひずみが 3%以上生じるか、荷重計の読みが最大値の 2/3 程度に減少するか、または軸ひずみが 15%に達した時点のいずれかの条件まで、軸応力と軸ひずみを測定した。圧縮強度試験、引張強度試験および三軸圧縮試験用の供試体は $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の円柱とし、曲げ強度試験の供試体は $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ の角柱供試体とした。脱型は各試験前日におこない、養生はすべて 20°C の恒温室において、養生中の水分の蒸発を防ぐために容器に入れ、密封状態での養生とした。

6.3.2 結果および考察

1) 流動モルタルのフレッシュ性状

湿潤密度試験結果を **Fig. 6-11** に示す。PS の混合量が増加するに伴い、湿潤密度は小さくなる傾向にあった。これは、PS に含まれる微細な繊維が空気を連行するためだと推察される。AE 剤のような微細な空気の連行は、ワーカビリティおよび凍害に対する抵抗力を向上させるが、不均一で制御のできない空気の混入は強度低下や耐久性の低下を及ぼす危険があるため注意が必要である⁶⁻¹⁷⁾。

フロー試験結果を **Fig. 6-12** に、測定状況を **Fig. 6-13**, **Fig. 6-14** および **Fig. 6-15** に示す。PS0 では、すぐに細骨材が沈降し水が流れ出たため、フロー値が小さく、十分な流動性を確保することができなかった。PS を混合したものは、いずれの配合においても材料分離はみられず、PS0 と比較してフロー値が大きく流動性を確保することができた。これは、PS が細骨材の沈降を抑制したためと推察される。しかし、PS10 以降では、PS の混合量の増加に比例して、フロー値が小さくなる傾向を示した。これは、PS の混合により流動モルタルの粘性が増加したためだと推察される。流動モルタルの粘性の増加はポンプ圧送の際の圧送圧力に影響が出ることも考えられるため、配合設計の際には使用用途を考慮して混合量を決定する必要がある。

通常、細粒分の少ない土を細骨材として使用する場合には、セメント量を増加する、もしくは水セメント比を下げ、フロー値を小さくすることで分離を抑制する。しかし、フロー値が小さくなると流動性が阻害されるため、ポンプによる圧送が困難になり、実際の現場では使用が困難である。また、セメント量を増やした場合、コンクリートのような脆性的な性質になってしまう。よって、本研究の結果として得た、PS による材料分離低減効果は、第 4 章のソイルセメントと同様に、細粒分の少ない土を細骨材として使用する場合に、効果的であると考えられる。

ブリーディング試験結果を **Fig. 6-16** に示す。PS の混合量が増加するに伴いブリーディング率は小さくなる傾向がみられた。これは、吸水率が大きく親水性が高い繊維質がモルタル内の水の移動を抑制したためと考えられる。PS の混合量を増加することにより、ブリーディング量を減少させることができるが、前述したように、粘性によってフロー値にも影響を与えるため、PS の混合量は必要な性質や使用用途を考慮し決定する必要がある。

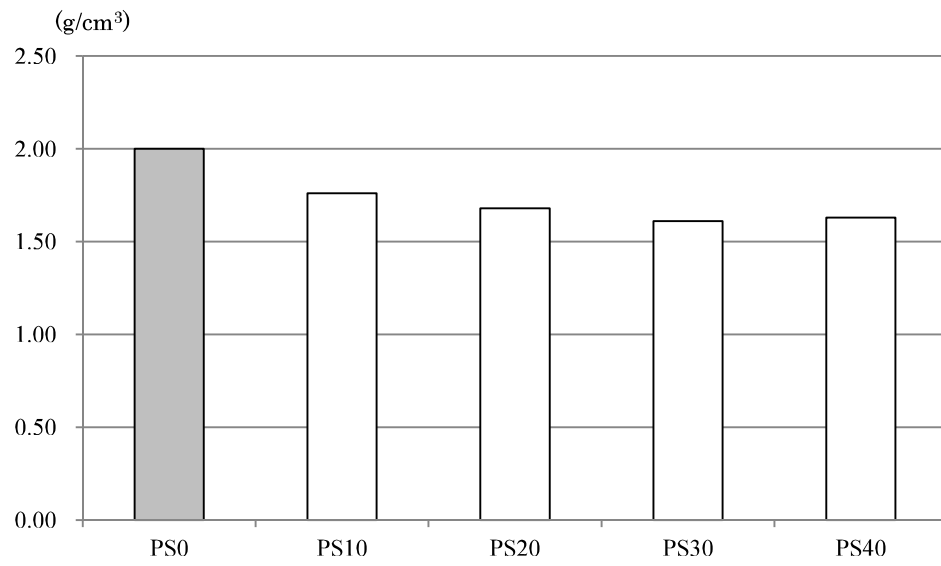


Fig. 6-11 流動モルタルの湿潤密度

Wet density of flowing mortar

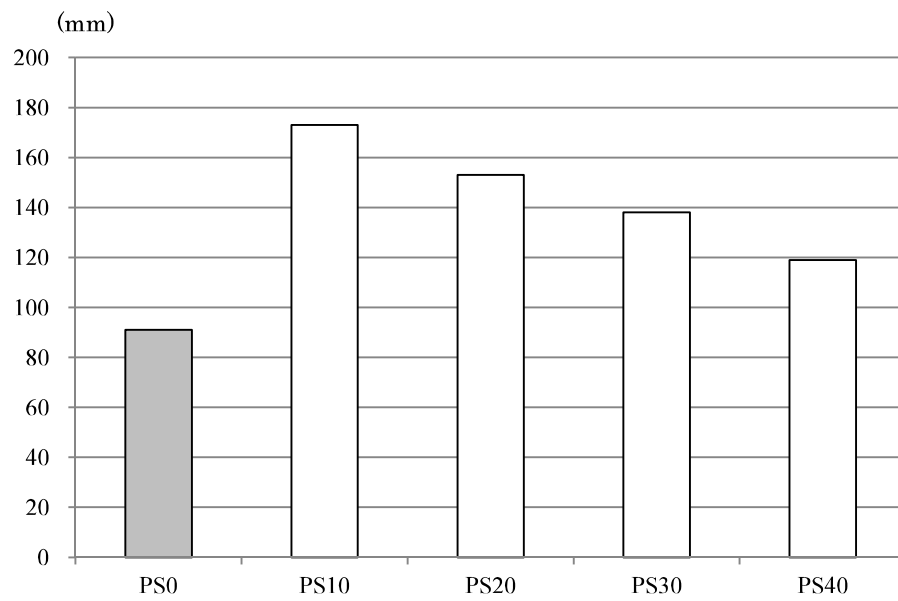


Fig. 6-12 流動モルタルのフロー値

Flow value of flowing mortar



Fig. 6-13 フロー試験状況(左 : PS0 拡大, 右 : PS0)

The situation of flow test (left: Expansion PS0, right: PS0)



Fig. 6-14 フロー試験状況(左 : PS10, 右 : PS20)

The situation of flow test (left: PS10, right: PS20)



Fig. 6-15 フロー試験状況(左 : PS30, 右 : PS40)

The situation of flow test (left: PS30, right: PS40)

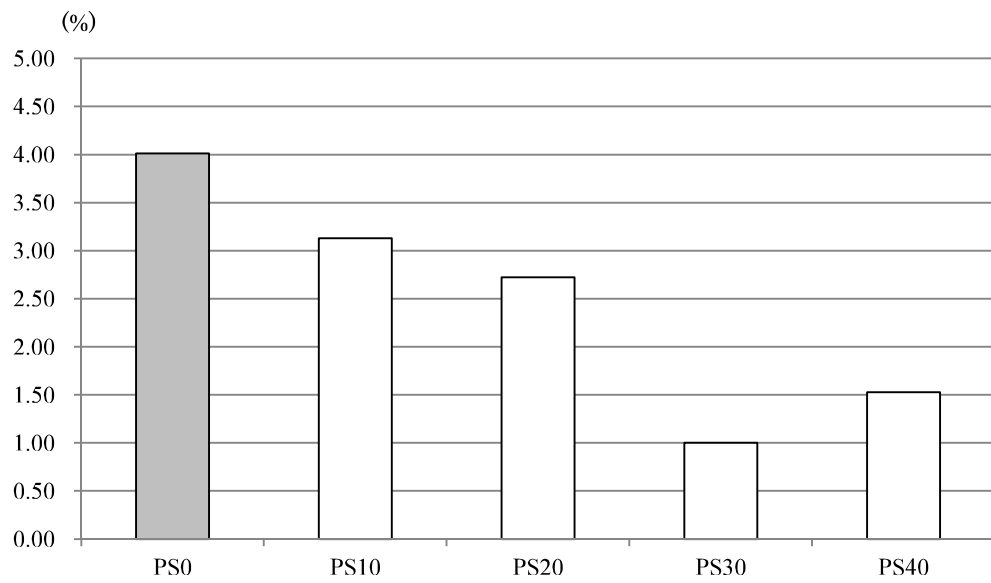


Fig. 6-16 流動モルタルのブリーディング率

Test result of bleeding of flowing mortar

2) 一軸圧縮試験

流動モルタルの応力－ひずみ曲線のうち，材齢 7 日を **Fig. 6-17**，材齢 28 日を **Fig. 6-18** に示す。PS0 は材料分離により水が分離したことで，水セメント比が下がり最大圧縮強さが設計値よりも高くなった。PS を混合したものは，どの配合においても材齢 7，28 日ともに最大圧縮強さに大きな差はみられなかった。また，PS を混合したものは PS0 と比較して曲線の傾きが緩やかであり，ひずみ量が増大した。とくに，供試体崩壊寸前の残留ひずみに顕著にあらわれた。

PS30 における供試体破壊時のひび割れ部分の拡大写真を **Fig. 6-19** に示す。PS の繊維がひび割れ部分に架かり，ひび割れの増大を抑制しているのがわかる。よって，前述したひずみ量の増大はこの繊維の架橋効果によるものと推察される。

PS に含まれる繊維はほとんどが細く短いものであるため，高強度のコンクリートやモルタルの靱性向上には効果が期待できないが，低強度のモルタルにおいては靱性の向上や崩壊寸前の剥離防止効果に有効であると考えられる。

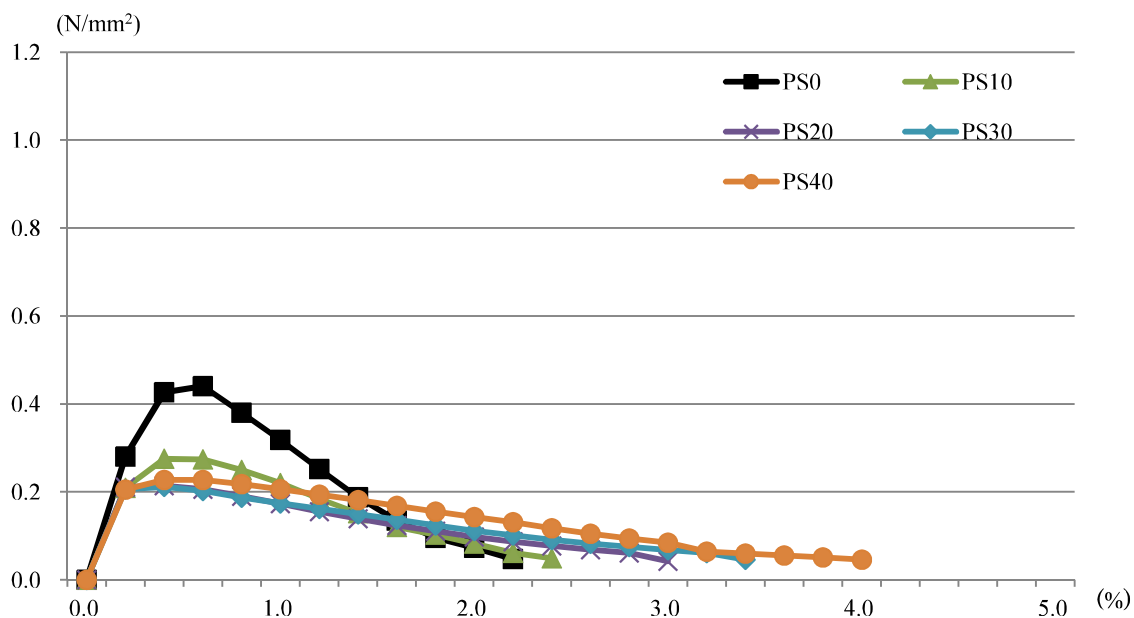


Fig. 6-17 応力－ひずみ曲線（材齢 7 日）

Stress-strain curve (age 7)

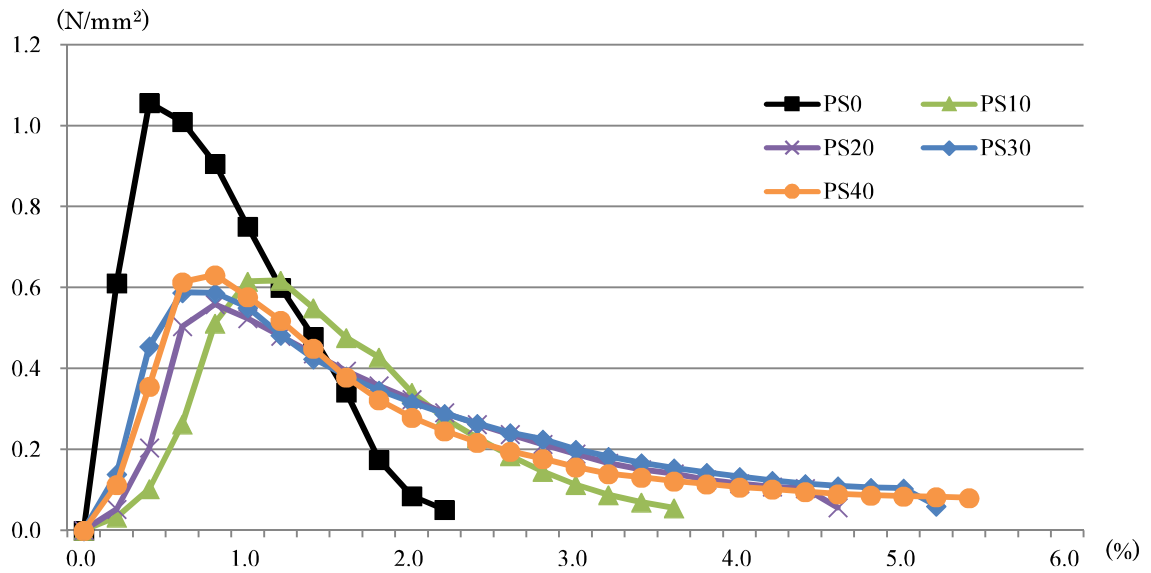


Fig. 6-18 応力-ひずみ曲線 (材齢 28 日)

Stress-strain curve (age 28)



Fig. 6-19 供試体破壊時のひび割れ部分

The situation of Crack at the time of test piece destruction

3) 三軸圧縮試験

前述したように一軸圧縮試験により，PSによる靱性の向上について比較検討してきたが，より正確にその効果について確認するために三軸圧縮試験を行った。本研究における三軸圧縮試験では軸差応力-軸ひずみ曲線，供試体の破壊状況により比較検討を行った。

三軸圧縮試験機を **Fig. 6-20** に，0.1，0.2 および 0.3MPa の側圧による各配合の軸差応力-軸ひずみの関係をそれぞれ **Fig. 6-21**，**Fig. 6-22**，**Fig. 6-23**，**Fig. 6-24** および **Fig. 6-25** に示す。PS0 では，最大強度に達した後，軸ひずみの増加に伴い，軸差応力が急激に減少しているのがわかる。一方，PSを混合した流動モルタルでは，最大強度に達した後も軸差応力の急激な減少はみられず，軸ひずみが大きく伸びている。そして，その傾向はPS混合量の増加に伴い顕著にあらわれている。また，PSを混合したもので比較すると，同程度の最大軸差応力におけるひずみ量の増大が確認できる。これらのことから，PSを混合することで，流動モルタルの脆性的性質の改善効果が期待できることが確認された。

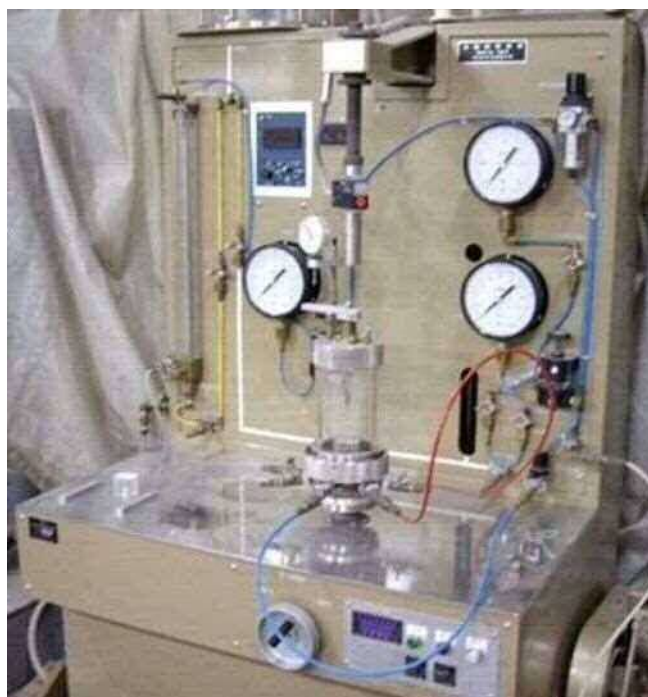


Fig. 6-20 三軸圧縮試験機

Triaxial compression apparatus

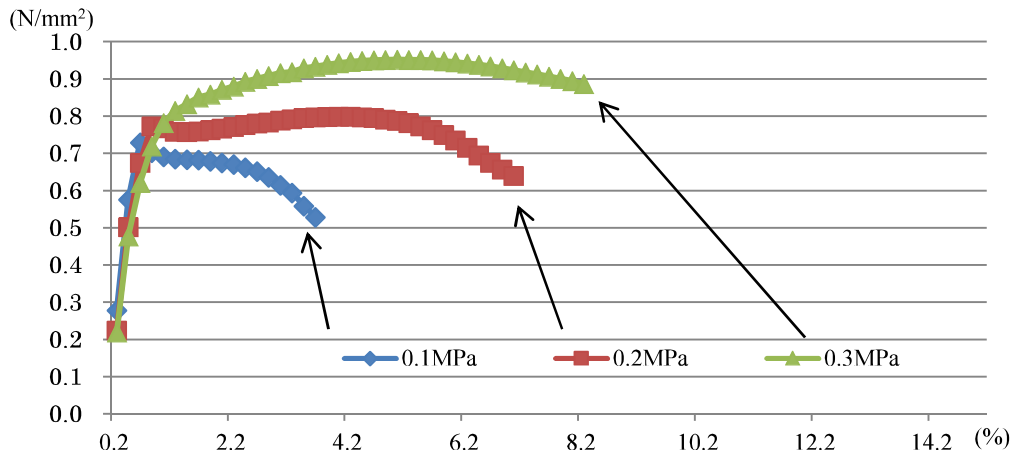


Fig. 6-21 軸差応力-軸ひずみ曲線 (PS0)

Axial stress-axial strain curve (PS0)

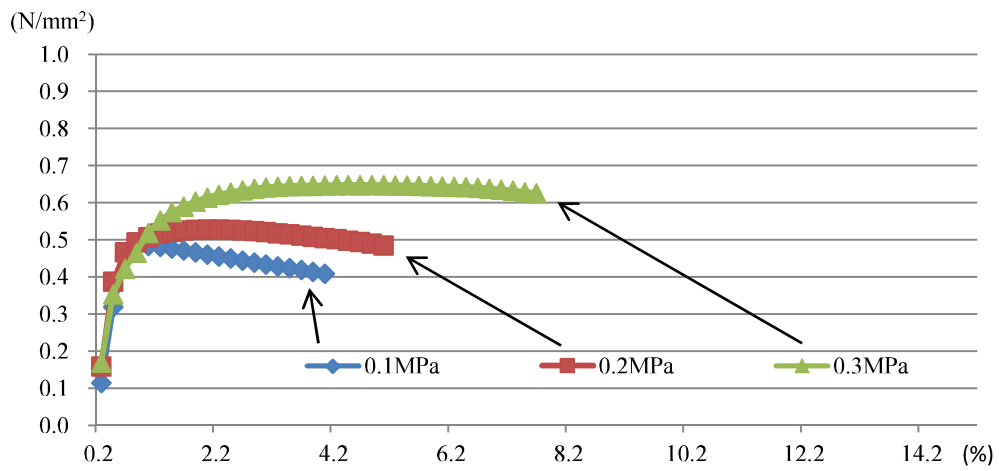


Fig. 6-22 軸差応力-軸ひずみ曲線 (PS10)

Axial stress-axial strain curve (PS10)

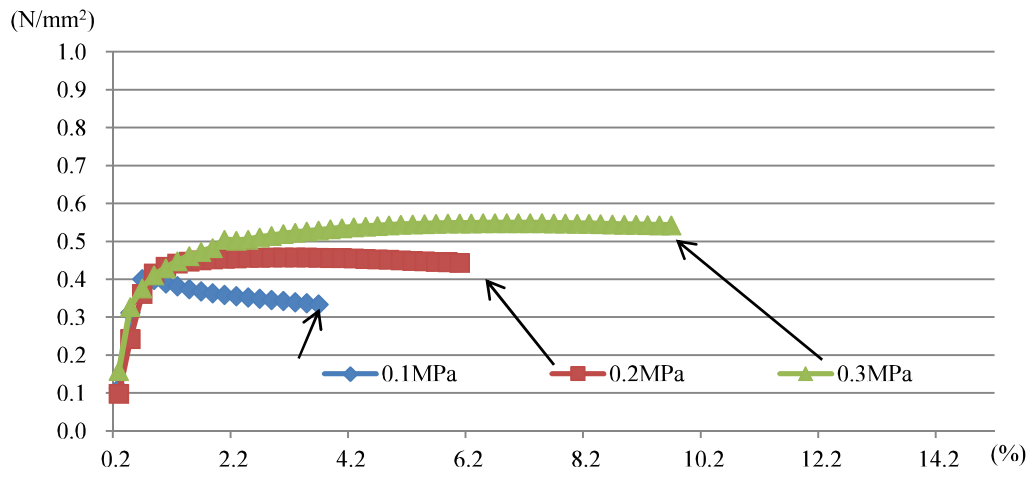


Fig. 6-23 軸差応力-軸ひずみ曲線 (PS20)

Axial stress-axial strain curve (PS20)

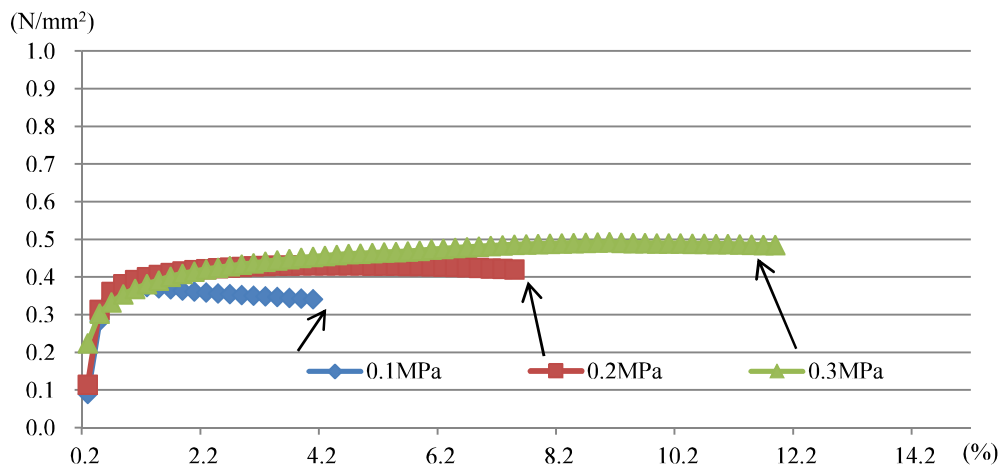


Fig. 6-24 軸差応力-軸ひずみ曲線 (PS30)

Axial stress-axial strain curve (PS30)

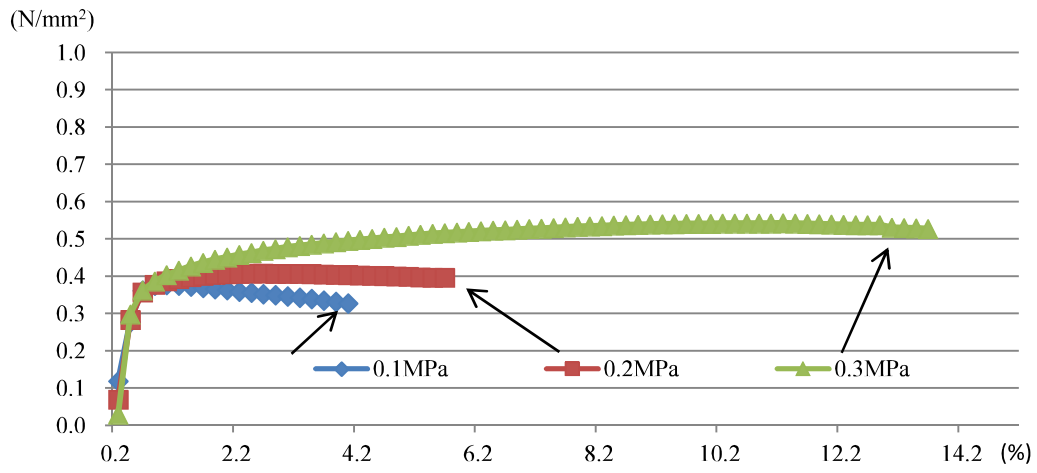


Fig. 6-25 軸差応力-軸ひずみ曲線 (PS40)

Axial stress-axial strain curve (PS40)

三軸圧縮試験後の供試体の破壊状況のうち PS0 を Fig. 6-26, PS20 を Fig. 6-27 に示す。PS0 では、供試体の破壊面がはっきりと線となって浮き出ているのがわかる。PS20 は、破壊面は見えなく、樽型変形しているのがわかる。供試体の破壊状況からも、ペーパースラッジの添加に伴い脆性が改善され、靱性が向上しているのが確認できる。

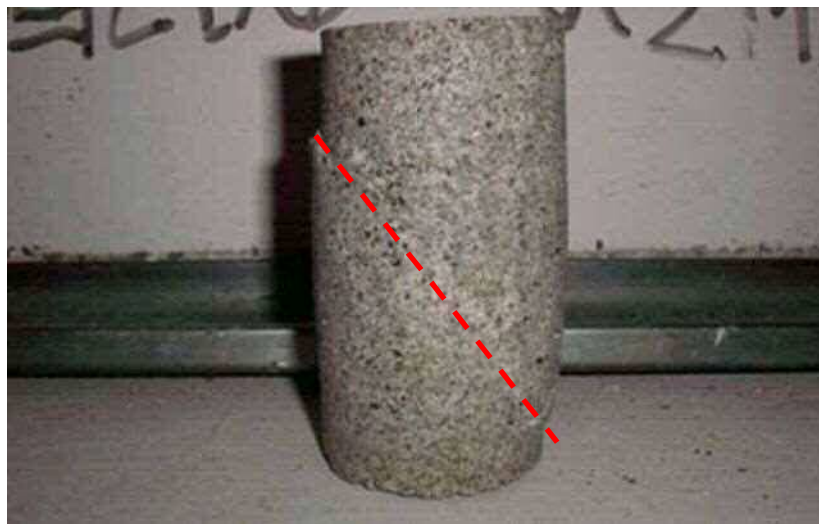


Fig. 6-26 PS0 供試体の破壊状況

The destruction situation of the PS0 test piece

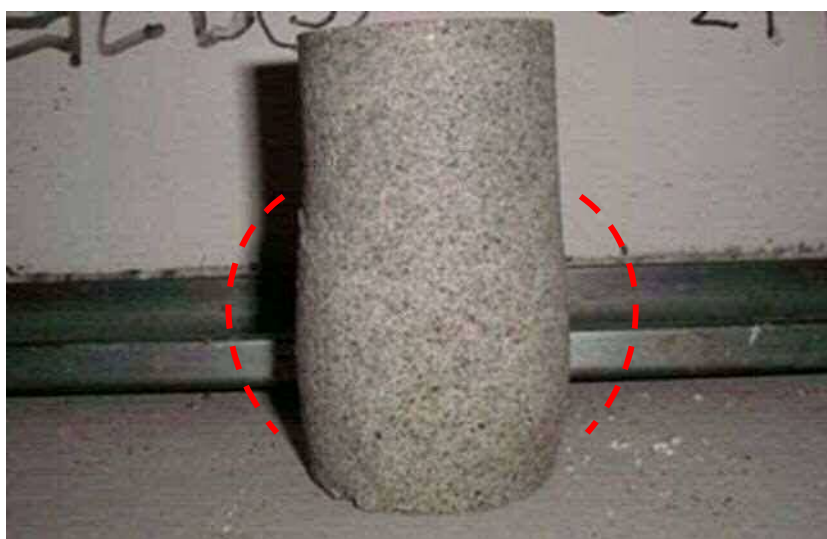


Fig. 6-27 PS20 供試体の破壊状況

The destruction situation of the PS0 test piece

6.4 セメントベントナイト（CB）への適用

6.4.1 材料および試験方法

1) 使用材料

セメントは高炉セメント B 種（密度 3.04 g/cm^3 ）を用いた。ペーパーセラッジは前述した腐敗対策を講じたもの（密度 2.08 g/cm^3 ，含水率 45%）を用いた（以下，腐敗対策を講じたペーパーセラッジを PS という）。ベントナイトは市販の Na 型ベントナイト（密度 2.60 g/cm^3 ，膨潤力 18 ml/2g 以上）を用いた。

2) 配合設計

配合表を **Table 6-3** に示す。配合設計は単位セメント量を 300 kg/m^3 ，ベントナイトを 40 および 50 kg/m^3 の 2 水準，PS を 0，10 および 20 kg/m^3 の 3 水準の計 6 配合とした。

3) 供試体の作製方法および試験項目

練混ぜ方法は，はじめにベントナイト，PS および水を投入し，ハンドミキサ（850 回転/分）で 2 分間練り混ぜ，その後，セメントを投入し 1 分間練り混ぜた。

試験項目は，流動性試験（P 漏斗による方法，JSCE-F521），ブリーディング試験（24h）（JSCE-F522），圧縮強度試験（材齢 7，28 日）（JIS A 1108）である。

Table 6-3 セメントベントナイトの配合

Mix proportion of cement bentonite

| 配合名 | 水セメント比 (%) | 単位量 (kg/m^3) | | | |
|------|---------------|-------------------------|--------|----|-----|
| | | 高炉セメント B 種 | ベントナイト | PS | 水 |
| B4P0 | 295 | 300 | 40 | 0 | 886 |
| B4P1 | 293 | 300 | 40 | 10 | 879 |
| B4P2 | 291 | 300 | 40 | 20 | 872 |
| B5P0 | 294 | 300 | 50 | 0 | 882 |
| B5P1 | 282 | 300 | 50 | 10 | 875 |
| B5P2 | 289 | 300 | 50 | 20 | 868 |

6.4.2 結果および考察

1) CB のフレッシュ性状

CB の P 漏斗流下時間を **Fig. 6-28** に示す。流動性を評価する P 漏斗流下時間は、PS の混合により若干長くなる傾向にあるものの、その値は小さく、本研究の PS 混合量においては流動性への影響は小さいといえる。

CB のブリーディング率を **Fig. 6-29** に示す。ブリーディング量は PS の混合に伴い減少する傾向にあった。また、ベントナイト量 40 kg/m^3 と 50 kg/m^3 の配合で比べると、PS を混合しない配合ではブリーディング率が約 2 倍に増加したのに対して、PS を混合した配合ではブリーディング率の大きな増加は確認されなかった。これにより、PS の混合によってベントナイトの膨潤が不十分な際の過剰なブリーディングの抑制および使用するベントナイト量の減少が可能であると考えられる。

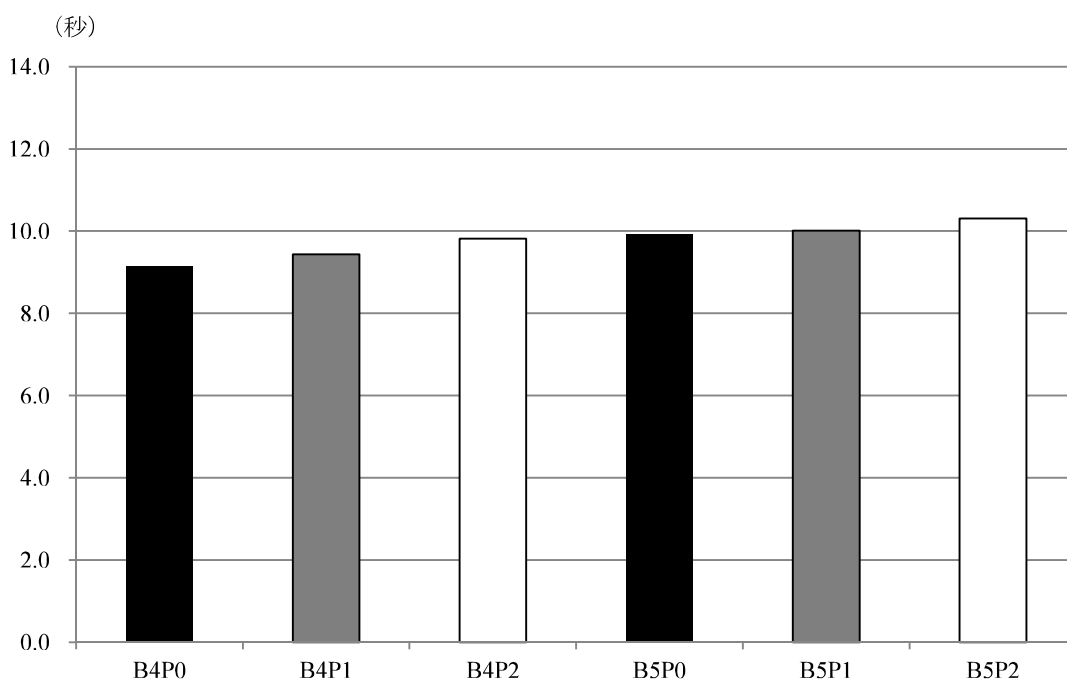


Fig. 6-28 セメンベントナイトの P 漏斗流下時間

Flowability test result of cement bentonite

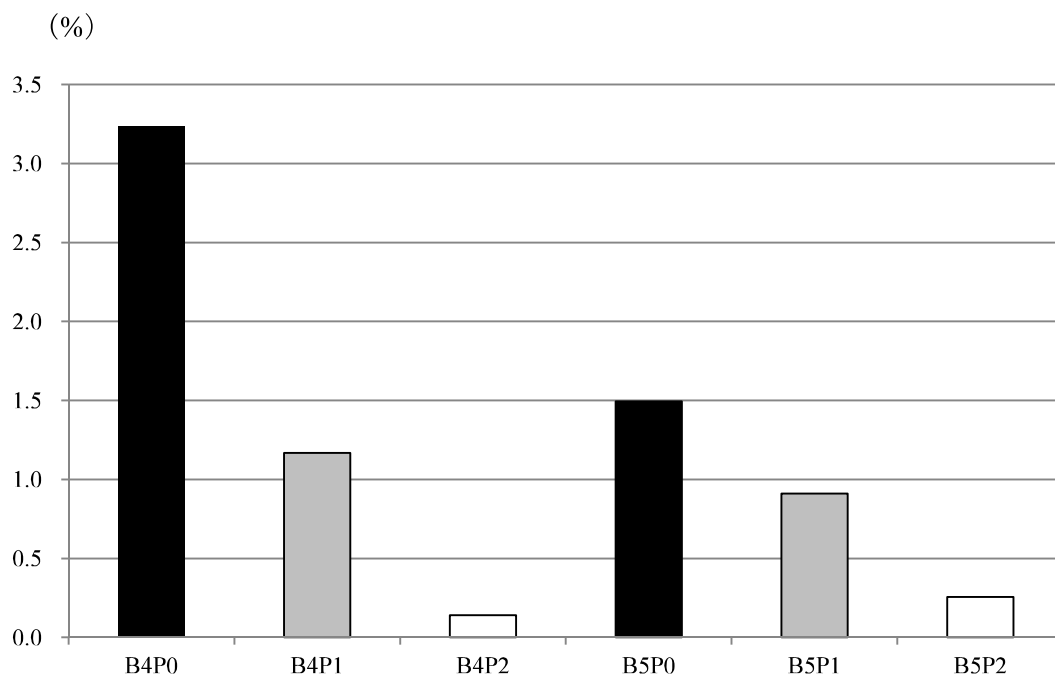


Fig. 6-29 セメントベントナイトのブリーディング率

Test result of bleeding of cement bentonite

2) CBの一軸圧縮試験

一軸圧縮強さを **Fig. 6-30** に示す。一軸圧縮強さは、PSの混合により若干の強度低下が認められた。これは、PSの混合により、練混ぜ時に空気が混入しやすくなるためだと推察される。

一軸圧縮試験における B5P0 および B5P2 の供試体破壊状況を **Fig. 6-31** に示す。B5P0 は供試体軸方向に発生したひび割れが直線的に進展し破壊に至った。一方、B5P2 はひび割れが分散して発生し、ひび割れの大きな進展は確認されなかった。これは、PSに含まれる繊維により CB の靱性が向上し、ひび割れの進展を抑制したためだと考えられる。

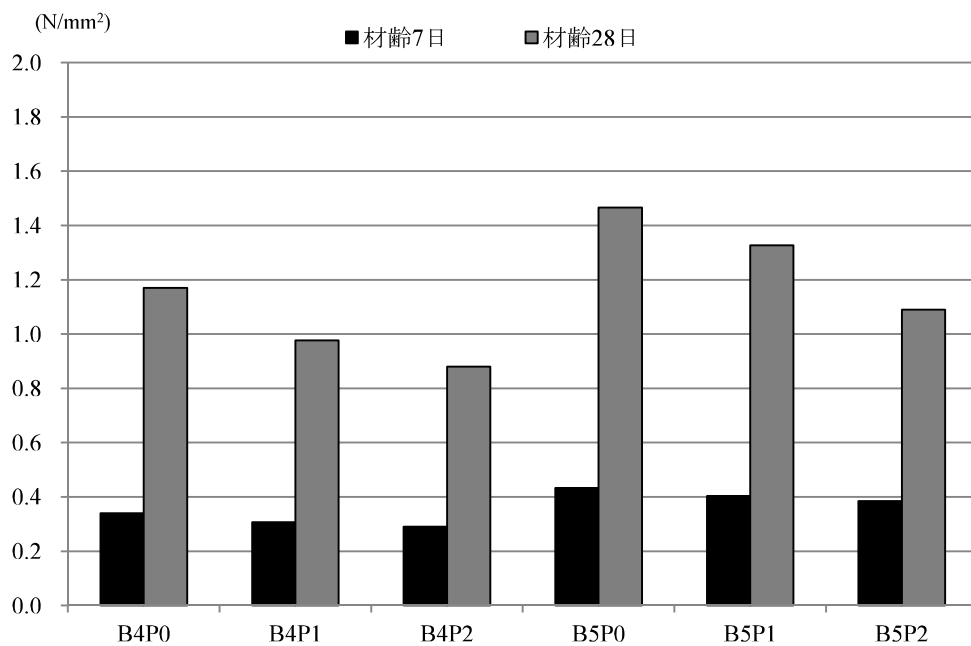


Fig. 6-30 セメントベントナイトの圧縮強度
Compressive strength of cement bentonite



Fig. 6-31 供試体の破壊状況 (左 : B5P0, 右 : B5P2)
The destruction situation of the test piece (left: B5P0, right: B5P2)

6.5 まとめ

PS を混和材として用いた流動モルタルおよびセメントベントナイトの物性について、室内試験により検討を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) PS を混合した流動モルタルにおける湿潤密度の実測値は、設計値よりも小さくなる傾向にあり、PS 混合量の増加に伴い小さくなる。
- (2) 砂質土の細骨材を用いた流動モルタルに PS を混合することにより、材料分離抵抗性が向上し、砂の沈降を抑制することで流動性が向上した。しかし、PS を多量に混合すると流動モルタルの粘性が増加しフロー値は小さくなる。
- (3) PS の混合量の増加に伴い、流動モルタルのブリーディング量が減少する傾向が確認された。
- (4) PS を混合した流動モルタルの一軸圧縮強さは、水セメント比による影響が大きく、水セメント比一定条件において、PS 混合量が 20 kg/m^3 までであれば強度低下は認められない。また、PS を混合したセメント量が 100 kg/m^3 の流動モルタルでは、材齢 28 日において、PS の混合による強度増加が確認された。
- (5) PS を混合した流動モルタルの一軸圧縮強さの変動係数は、PS を混合しない流動モルタルと比べて小さく、一軸圧縮強さのばらつき抑制効果が確認された。とくに、セメント量が 100 kg/m^3 の PS 流動モルタルでは、通常の流動モルタルと比べて、変動係数が 39～54%小さくなり、PS の混合条件の違いによる影響も小さい。
- (6) PS を混合した流動モルタルのひずみ量は通常の流動モルタルと比べて大きい。とくに、供試体の崩壊寸前のひずみ量に顕著にあらわれた。また、

三軸圧縮試験により、PSを混合した流動モルタルの脆性的性質の改善効果が確認された。さらに、供試体の破壊状況からもその効果が示唆された。

(7) PSを混合したセメントベントナイトはブリーディングを抑制する効果が確認された。

(8) PSを混合したセメントベントナイトは、若干一軸圧縮強さが低下するものの、靱性の向上が示唆された。

PSを混和材として用いた流動モルタルは、埋戻し材や充填材としての性能を満足し、一軸圧縮強さのばらつきに対する抑制効果および靱性の向上効果が確認された。また、PSを混和材として用いたセメントベントナイトは、ブリーディングの抑制効果および靱性向上効果の可能性が示唆された。

第7章

総括

第 7 章 総括

7.1 本研究のまとめ

近年，わが国の食料生産を支えてきた農業水利施設は老朽化が進行し，標準耐用年数を迎える施設が急増するとともに，それに伴う突発事故も増加している。また，TPP の大筋合意など農業を取り巻く社会環境も変化しており，農地および農業水利施設の整備強化が重要な課題である。このため，農業水利施設の長寿命化対策や防災対策を含めたストックマネジメントの推進が重要であり，効果的な補修・補強技術の開発が求められている。

本研究の目的は，パルプ・紙製造業から排出されるペーパースラッジの建設資材としての利用について検討するものである。とくに，補修および防災工事に用いられる気泡モルタル，ソイルセメントおよび緑化基盤材における物性向上について検討するものである。

ペーパースラッジが建設資材として大量に利用できれば，産業廃棄物の減量化の一助となり，我が国の循環型社会の構築へも貢献するものである。

以下に本研究で得られた主な結論と要約を述べ，本研究のまとめとする。

第 1 章では，本研究の社会的背景および目的について概説し，論文構成内容を紹介した。

第 2 章では，ペーパースラッジの物理化学的性質および安全性について室内試験により確認し，ペーパースラッジを建設資材として安定した品質で利用するための腐敗対策について確認した。さらに，ペーパースラッジを異なる比率で混合したセメントミルクの物性について室内試験により評価した。その結果，ペーパースラッジはセルロースやリグニンなどの有機質分，顔料や填料由来の CaO や SiO_2 などの無機質分が含まれており，重金属等の溶出は土壤環境基準値以下であった。また，ペーパースラッジに高温蒸気および消石灰を用いた腐敗対策は，一般細菌およびカビの発生抑制に効果的であることが確認された。ペーパースラッジを用いたセメントミルクはブリーディングの減少が確認された。また，ペーパースラッジの混合量が 80 kg/m^3 までは，セメントミルクの圧縮，曲げおよび引張強度への影響は小さいことがわかった。

第 3 章では，ペーパースラッジを混和材として用いた気泡モルタルの物性

について、室内試験および施工現場により評価した。その結果、ペーパースラッジを用いた気泡モルタルは、充填材としての性能を満足し、さらに気泡モルタルの欠点である材料分離に対して高い抵抗力を示した。また、施工現場においてもその性能を発揮し、施工性の向上がみられた。

第4章では、ペーパースラッジを用いた砂質土ソイルセメントの物性について、室内試験と施工現場により評価した。その結果、砂質土1m³に対して、ペーパースラッジを10kg程度混合したソイルセメントは、微細な独立気泡および繊維がソイルセメント内に導入され、流動性および材料分離抵抗性が向上することを明らかにした。また、施工現場においても、強度のばらつきが小さく、良好な施工性が確認された。

第5章では、ペーパースラッジを用いた緑化基盤材の物性について室内試験およびフィールド試験により検討した。その結果、ペーパースラッジを用いた緑化基盤材は、通気性や透水性に及ぼす影響が大きい孔隙の増加が認められ、植物の生育も良好であった。また、ペーパースラッジを6~10%混合した緑化基盤材は耐降雨浸食性が向上することが確認された。さらに、フィールド試験により、施工性および6年後の植物の生育状況も良好であることが確認された。

第6章では、ペーパースラッジを用いた流動モルタルおよびセメントベントナイトの室内試験を行い、利用の可能性について検討した。その結果、ペーパースラッジを用いた流動モルタルでは、一軸圧縮強さのばらつき抑制効果および靱性の向上効果が示唆された。また、ペーパースラッジを用いたセメントベントナイトではブリーディングの抑制効果が示唆された。

7.2 今後の研究課題と展望

本研究は、パルプ・紙製造業で排出されるペーパースラッジの建設資材として利用について検討したものであった。研究の結果、ペーパースラッジは気泡モルタル、ソイルセメントおよび緑化基盤材の混和材として利用できることを証明した。しかし、全国的な実用化については解決すべき課題が多々残されている。その中で、最も重要な課題を以下に示す。

- (1) ペーパースラッジの物理化学的性質は、古紙の配合比率、製造する紙の種類および製紙工場の製造設備などにより異なることが考えられる。よって、全国に点在する製紙工場のペーパースラッジを使用する際には、各製紙工場から排出されるペーパースラッジについて同様な試験を行う必要がある。
- (2) ペーパースラッジを用いた気泡モルタルおよびソイルセメントの経年変化および長期的な安全性について把握する必要がある。
- (3) 建設現場においてペーパースラッジを利用するためには、ペーパースラッジ排出者（製紙業界）、その利用者（建設業界）および発注者（主に自治体）の連携と合理的なペーパースラッジの品質基準の設定が必要である。
- (4) ペーパースラッジの流動モルタルおよびセメントベントナイトへの適用については、フィールド試験により施工性を確認するとともに、実用化に向けた検討が必要である。

現在、ペーパースラッジを用いた気泡モルタル、ソイルセメントおよび緑化基盤材については実用化に至っており、年間 1,000t 程度のペーパースラッジが建設資材として有効利用され、補修工事や減災工事などに採用されている。しかし、老朽化した農業水利施設は全国に数多く存在する。社会的共通資本である農業水利施設を良好な状態で、次世代に継承していくことは、現代を生きる農業土木技術者にとっての責務である。前述した課題について解決していくことにより、本研究がその一助となるよう期待したい。

本研究の関連査読論文および発表論文

本研究の関連査読論文および発表論文

○ 本研究の関連査読論文

- 1) 阿部孝行、北辻政文「ペーパースラッジの気泡モルタル用混和材としての利用に関する研究」、『農業農村工学会論文集』、第 278 号、pp47-55、2012
- 2) 阿部孝行、北辻政文「砂質土地盤に適用したソイルセメントのフレッシュ性状に与えるペーパースラッジの効果」、『農業農村工学会論文集』、第 297 号、pp63-71、2015

○ 本研究の関連研究報告（国内学会における発表（口頭発表 査読無し））

- 1) ○阿部孝行、北辻政文「ペーパースラッジを用いた植生基盤製品の試作」、『農業農村工学会』、第 52 回研究発表会講演要旨集、pp76-77、青森、2009 年 10 月
- 2) ○阿部孝行、北辻政文「流動化埋め戻し材へのペーパースラッジの利用に関する基礎的研究」、『農業農村工学会』、第 53 回研究発表会講演要旨集、pp76-77、盛岡、2010 年 11 月
- 3) ○阿部孝行、北辻政文「ペーパースラッジおよび震災ヘドロを用いた流動化モルタルの実験的研究」、『農業農村工学会』、第 54 回研究発表会講演要旨集、pp100-103、鶴岡、2011 年 11 月
- 4) ○阿部孝行、北辻政文「ペーパースラッジを用いた流動化モルタルの強度のばらつきに関する研究」、『農業農村工学会』、平成 24 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集、pp808-809、札幌、2012 年 9 月
- 5) ○阿部孝行、北辻政文「ペーパースラッジを用いたセメントベントナイトの基礎的研究」、『農業農村工学会』、第 55 回研究発表会講演要旨集、pp42-43、秋田、2012 年 10 月
- 6) ○阿部孝行、北辻政文「津波堆積物洗浄砂のプレキャストコンクリート用細骨材としての利用に関する研究」、『農業農村工学会』、平成 25 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集、pp792-793、東京、2013 年 9 月

- 7) ○阿部孝行、北辻政文「ペーパースラッジの法面緑化工法における浸食防止効果に関する実験的研究」、『農業農村工学会』、第56回研究発表会講演要旨集、pp130-131、青森、2013年10月
- 8) ○阿部孝行、北辻政文「竹チップを利用した法面保護工法における防草基材の開発」、『農業農村工学会』、平成26年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集、pp714-715、新潟、2014年9月
- 9) ○阿部孝行、北辻政文「ペーパースラッジを用いたソイルセメントの流動特性」、『農業農村工学会』、第57回研究発表会講演要旨集、pp118-119、仙台、2014年10月
- 10) ○阿部孝行、北辻政文「ソイルセメントの流動性および材料分離抵抗性に与えるペーパースラッジの効果」、『農業農村工学会』、平成27年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集、pp764-765、岡山、2015年9月
- 11) ○阿部孝行、北辻政文「ペーパースラッジを用いた緑化基盤材における植物の生育」、『農業農村工学会』、第58回研究発表会講演要旨集、pp174-175、福島、2015年10月

○ その他（受賞歴）

- 1) 阿部孝行、北辻政文・・・「平成23年度農業農村工学会東北支部賞 奨励賞」、2012年10月
- 2) 阿部孝行、北辻政文・・・「平成25年度農業農村工学会東北支部賞 奨励賞」、2014年10月

謝辭

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、終始懇切なるご指導、ご助言を賜りました本学の北辻政文教授をはじめとする諸先生方に心から感謝の意を表します。

山形大学農学部食料生命環境学科教授 奥山武彦博士および本学の富樫千之教授には本論文の審査をお引き受け下さり、ご指導、ご助言賜りました。心より感謝いたします。

仙台高等専門学校の権代由範博士には、実験に使用する機器を貸して頂きました。心より感謝の意を表します。

本研究の始まりである明興防水株式会社において、共に研究を行った同僚に深く感謝いたします。特に、佐藤真哉氏には研究当初から本論文をまとめるまで、長期にわたり研究の相談および精神的な支えになって頂き、心より感謝の意を表します。

本研究の遂行にあたり、研究当初からペーパースラッジに関して有益なるご意見やご指導頂いた日本製紙株式会社の庵原初夫氏に心から感謝申し上げます。

沼田建設株式会社、株式会社加地和組には本研究に対して多大なるご協力を頂きました。心より感謝の意を表します。

株式会社立花マテリアル、株式会社マノールには、試験に使用する材料を提供して頂きました。心より感謝の意を表します。

株式会社丸德基業、陽光建設株式会社、エースコン工業株式会社には、本研究における実施工およびフィールド試験についてご協力を頂きました。心より感謝の意を表します。

株式会社ダイワ技術サービスには、本研究における土質試験についてご協力を頂きました。特に、試験室の方々には多大なるご協力を頂きました。心より感謝の意を表します。

研究にあたり、実験を手伝ってくれた本学建設環境材料学研究室卒業生の皆様、また、共に博士論文の作製に苦勞した本学同期の鬼島直子さんに心から感謝申し上げます。

最後に、これまで長年に渡り支えてくれた父 由二、母 純子、兄弟達、親戚一同、兼平家の方々に心から感謝します。誠に有り難うございました。

引用文献

引用文献

第 1 章

- 1-1) 農林水産省大臣官房統計部 (2015): 農林水産統計, 1-20
- 1-2) 農林水産省大臣官房食料安全保障課 (2015): 食料需給表, 4-6
- 1-3) 農林水産省 (1995): 「基幹水利施設整備状況調査」及び補足調査による推計
- 1-4) 農林水産省 (2009): 農業水利施設の再建設費ベースによる評価算定
- 1-5) 農林水産省農村振興局整備部水利整備課施設保全管理室 (2011): 施設の管理者 (国, 都道府県, 市町村, 土地改良区等) に対する聞き取り調査
- 1-6) 農林水産省農村振興局整備部設計課計画調整室 (2012): 土地改良長期計画, 1-41
- 1-7) 吉田安廣, 島田英樹, 笹岡孝司, 松井紀久男, 一ノ瀬政友, 藤田修一, 峯下政一, 水沼達也 (2008): フライアッシュセメントと界面活性剤の混合材料を用いた菅更生用中込材の開発, *Journal of MMIJ*, **124**, 794-800
- 1-8) 石山陽介, 宇治公隆, 上野 敦, 大野健太郎 (2011): 間隙充填モルタルの充填性に影響を及ぼす要因とその評価手法, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.33 No.1, 1367-1372
- 1-9) 中澤重一, 佐竹啓一 (1994): ソイルセメント柱列壁工法の設計・施工関連基準, *基礎工*, **22**(5), 26-35
- 1-10) 中山覺博, 平沢秀男, 堀家茂一, 横塚享, 笹原城六 (1990): 連続繊維緑化基礎工の開発, *土木学会論文集*, **421**(13), 73-74

第 2 章

- 2-1) 環境省総合環境政策局環境計画課 (2015): 環境統計集平成 27 年度版, 環境省
- 2-2) 日本製紙連合会: 2015 年度「環境行動計画 (廃棄物対策)」フォローアップ調査結果 (2014 年度実績), 日本製紙連合会発表資料, 1-2
- 2-3) 日本製紙連合会 HP: <http://www.jpaa.gr.jp/>
- 2-4) 株式会社日本製紙グループ本社 CSR 室 (2006): 日本製紙グループ サステナビリティ・レポート 2006, 株式会社日本製紙グループ本社, 36-39
- 2-5) 社団法人セメント協会 (2010): セメント需給実績 2015 年 9 月度, 1-9

- 2-6) 熊谷一成 (2005): PS 焼却炉発電ボイラーの操業経験, 紙パ技協誌, **59**(1), 94-99
- 2-7) 寺澤良則, 白幡竹彦, 高橋英二, 永富学, 横式龍夫, 山崎亮 (2005): リサイクル燃料焚き高温高压流動床ボイラーの実缶運転状況, 三菱重工技報, **42**(4), 167-171
- 2-8) 経済産業省大臣官房調査統計グループ (2015): 経済産業省生産動態統計月報, 114-115
- 2-9) 小澤普照 (1997): 森林持続政策論, 財団法人東京大学出版会, 6-15
- 2-10) 磯貝明 (2001): セルロースの材料科学, 財団法人東京大学出版会, 152-156
- 2-11) 産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会 (2010): エネルギー使用合理化ペーパースラッジ有効利用技術開発事後評価報告書 (案), 1-74
- 2-12) 安藤生大, 齋藤将人, 村松重緒, 日吉公男, 春名淳介, 松枝直人, 逸見彰男, 嶋田修治 (2004): ゼオライト原料としてのペーパースラッジ (PS) の評価 (第3報) -PS 化学組成の週変化とゼオライト原料としての適性-, 紙パ技協誌, **58**(2), 98-106
- 2-13) 村山憲弘, 石本弘治, 芝田隼次 (2000): 製紙スラッジ焼却灰からのゼオライトの水熱合成とその物性評価, 資源と素材, **116**, 31-36
- 2-14) 福垣内暁, 永島孝作, 松枝直人, 逸見彰男 (2011): 製紙スラッジ焼却灰 (PS ash) から微粒子酸化チタンの創製, 紙パ技協誌, **65**(2), 54-63
- 2-15) 藤原浩己, 丸岡正知, 川島 颯, 鯉渕 清 (2009): リサイクル材料を用いた軽量コンクリートブロックの開発に関する研究, セメント・コンクリート論文集, **63**, 570-576
- 2-16) 木下尚樹, 川口 隆, 松尾 暁, 安原英明 (2012): 製紙スラッジ焼却灰造粒材料のコンクリート用骨材としての適用性評価, Journal of MMIJ, **128**, 576-583
- 2-17) 木下尚樹, 川口 隆, 松尾 暁, 本田美紀, 安原英明 (2012): 製紙スラッジ焼却灰造粒材料を用いたモルタルのプレキャスト材料としての適用性評価, Journal of MMIJ, **128**, 611-619
- 2-18) 重松宏明, 出村禧典, 藤原慶美 (2010): 製紙スラッジ混合による軟弱地盤の安定化に及ぼす活性度の影響評価, 土木学会論文集 C, **66**(4), 695-705
- 2-19) 増田龍哉, 久保田健, 志村吉彦, 寺澤一雄, 小野 裕司, 福岡大造,

- 五十嵐学, 滝川 清 (2012): ペーパースラッジ灰造粒物の現地適用性に関する検討, 土木学会論文集 B3, **68**(2), 492-497
- 2-20) 佐藤研一, 藤川拓朗, 田中浩之, 横田季彦 (2010): ため池底泥を用いた堤体補修材料の基礎的研究, 材料, **59**(1), 50-55.
- 2-21) 江草清行, 金子 聡, Ahmed H Dabwan, 勝又英之, 鈴木透, 太田清久 (2010): ペーパースラッジ焼却灰凝集固化剤による廃水の凝集効果改善, 生活衛生, **54**(4), 330-335.
- 2-22) Shiqin Yan, Kwesi Sagoe-Crentsil, Gretta Shapiro (2011): Properties of Cement Mortar Incorporating De-inking Waste Water from Waste Paper Recycling, Construction and Building Materials, **29**(4), 51-55
- 2-23) Shiqin Yan, Kwesi Sagoe-Crentsil, Gretta Shapiro (2011): Reuse of de-inking sludge from wastepaper recycling in cement mortar products, Journal of Environmental Management, **92**(8), 2085-2090
- 2-24) Shiqin Yan, Kwesi Sagoe-Crentsil (2012): Properties of wastepaper sludge in geopolymer mortars for masonry applications, Journal of Environmental Management, **112**, 27-32
- 2-25) Asghar Taramian, Kazem Doosthoseini, Sayyed Ahmad Mirshokraii, Mehdei Faezipour (2007): Particleboard manufacturing: An innovative way to recycle paper sludge, Waste Management, **27**(12), 1739-1746
- 2-26) Rahim Yadollahi, Yahya Hamzeh, Alireza Ashon, Shademan Pourmousa, Mohammad Jafari, Kambiz Rashedi (2012): Reuse of waste sludge from papermaking process in cement composites, Polymer Engineering & Science, **53**(1), 183-188
- 2-27) 桂 徹 (1990): 製紙用填料, 石膏と石灰, **228**, 60-66
- 2-28) 岩原昭次 (2007): ペーパースラッジ灰を大規模に再生利用した床スラブの開発に関する研究その1 全体計画と硬質 PS 灰塊の圧縮強度など, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), 177-178
- 2-29) 村田二郎, 国府勝郎, 辻幸和 (2003): コンクリート工学 (I) 施工, 株式会社彰国社, 100-101

第 3 章

- 3-1) 古谷俊明 (1989) : 軽量盛土材としての気泡モルタル, 社団法人地盤工学会誌「土と基礎」, **37(2)**, 73-77
- 3-2) 日本道路公団 (1996) : 気泡混合軽量土を用いた軽量盛土工法の設計・施工指針, 1-58
- 3-3) 福島誠司, 長谷川聖史, 伊藤祐二, 笠井哲郎 (2006) : 廃 EPS 粉砕品を用いた軽量モルタルの諸物性, コンクリート工学年次論文集, **28(1)**, 1583-1588
- 3-4) 福島誠司, 長谷川聖史, 森爵之, 笠井哲郎 (2007) : 廃 EPS 熱処理粉砕材を用いた軽量モルタルの力学的諸物性, コンクリート工学年次論文集, **29(2)**, 517-522
- 3-5) 山本浩平, 小野博宣, 長尾拓樹 (2002) : 各種副産物のコンクリートへの有効利用 (気泡モルタルへの適用性), 中部大学工学部紀要, **38**, 1-6
- 3-6) 長尾拓樹, 小野博宣, 山本浩平 (2002) : 数種の産業廃棄物を用いた気泡モルタルの断熱性と吸放湿特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), 297-298
- 3-7) 西澤卓史, 小野博宣, 長尾拓樹 (2003) : 環境負荷低減を目指したセラミック炭混入気泡モルタルの性能評価, 中部大学工学部紀要, **39**, 1-6
- 3-8) 長谷川聖史, 伊達重之, 末森寿志, 笠井哲郎 (2006) : ビニロン繊維補強軽量モルタルの耐衝撃特性, コンクリート工学年次論文集, **29(1)**, 365-370
- 3-9) 山本基由, 本田賀久, 武藤功治, 六郷恵哲 (2005) : 複数ひび割れを生じる PVA 短繊維補強軽量気泡モルタル, コンクリート工学年次論文集, **27(1)**, 271-276
- 3-10) 長谷川聖史, 伊達重之, 笠井哲郎 (2007) : PVA 繊維を添加した超軽量モルタルの特性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, **29(1)**, 423-428
- 3-11) 三島信雄, 益村公人 (2000) : FCB 工法—気泡混合軽量土を用いた軽量盛土工法, 理工図書株式会社, 1-194
- 3-12) 小林嘉章, 新舎 博, 渡邊雅哉, 藤井二三夫 (2005) : 短繊維入り気泡混合土の強度特性, 土木学会第 60 回年次学術講演会, 579-580.
- 3-13) 和泉意登志, 井上和政, 竹田宣典, 鳥取誠一, 長尾覚博, 中野正一, 二村誠二, 濱 幸雄, 前田敏也, 横関康祐 (2009) : コンクリートの劣化と

- 補修がわかる本，セメントジャーナル社，52-53.
- 3-14) 深谷泰文・露木尚光（2003）：セメント・コンクリート材料科学，技術書院，1-21
- 3-15) 鐵鋼スラグ協会（2009）：鐵鋼スラグの高炉セメントへの利用，1-11
- 3-16) 社団法人セメント協会（2010）：セメントの LCI データの概要，2-7
- 3-17) 藤井卓（2001）：環境にやさしいコンクリートーエコマテリアルをめざしてー，鹿島出版会，243-251
- 3-18) セメント系固化処理土検討委員会（2003）：セメント固化処理土に関する検討最終報告書(案)
- 3-19) 鐵鋼スラグ協会（2010）：鐵鋼スラグを使用し CO₂ 削減に寄与する高炉セメントーグリーン購入法指定調達品目ー，2-4
- 3-20) セメント系固化処理土検討委員会（2003）：セメント系固化処理土に関する検討最終報告書（案），14-38.

第 4 章

- 4-1) セメント協会（2003）：セメント系固化材による地盤改良マニュアルー第 3 版ー，技報堂出版，122-133.
- 4-2) 佐藤英二，米澤敏男，木之下光男，玉木伸二（2008）：流動化剤を用いた低注入ソイルセメント壁工法の研究，日本建築学会構造系論文集，73(633)，1975-1983.
- 4-3) 實松俊明，持田 悟，田中俊平，閑田徹志（2004）：じん性能を付加した繊維補強ソイルセメント固化体の強度特性，材料，53(1)，17-20.
- 4-4) 坂野 彰，村上 哲，小峯秀雄，塚田義明，牧田晃介（2011）：タイヤチップ混合ソイルセメントの強度変形特性，地盤工学会誌，59-7(642)，26-29.
- 4-5) 地盤工学会（2004）：地中連続壁工法，（地盤工学・実務シリーズ 20），289-336.
- 4-6) 青山 要，宮森建樹，脇山哲也，菊池大輔（2002）：土の物理化学的性質が改良土の初期性状と強度に及ぼす影響，土木学会論文集，721(57)，207-219.
- 4-7) 岩田進午（1985）：土の物理化学と土質工学への応用，土と基礎，33(5)，69-75.

- 4-8) 気泡工法研究会 (2014) : AWARD-Hsm 工法 (気泡掘削による等厚式ソイルセメント地中連続壁の造成) 技術・積算マニュアル (案) 平成 26 年度版, 14-15.
- 4-9) 栗橋優太, 赤木寛一, 近藤義正, 印南修三, 森 桂一, 土屋敦雄 (2009) : 気泡を用いたソイルセメント壁工法用掘削安定液の流動特性, 土木学会第 64 回年次学術講演会, 715-716.
- 4-10) 近藤義正, 仲山貴司, 赤木寛一 (2008) : 掘削土砂に気泡と水を添加した地盤掘削用安定液の開発と適用, 土木学会論文集 C, **64**(3), 505-518.
- 4-11) 小林一輔 (2002) : 最新コンクリート工学—第 5 版—, 森北出版, 26-27.
- 4-12) 笠井芳夫, 坂井悦郎 (2007) : 新セメント・コンクリート用混和材料, 技術書院, 163-188.
- 4-13) 勝見 武, 渡部允人, 住永 巖, 深川良一 (2002) : 連続地中壁に適用されるソイルセメントの遮水性能と配合条件, 材料, **51**(1), 19-24.

第 5 章

- 5-1) 吉川勝秀, 三木博史, 和田 正, 上野将司, 門間敬一, 藤原宣夫, 三浦裕二 (2006) : 生態学的な斜面・のり面工法—これからの緑化技術—, 山海堂, 43-87.
- 5-2) 石黒勇次, 杉山好司 (1998) : 現場発生土を緑化基盤材として利用するための改質材の検討, 土木学会第 53 回年次学術講演会, 340-341
- 5-3) 池田 桂, 松崎隆一郎, 長 信也, 大内公安 (2012) : 伐採木を有効利用した資源循環型短繊維混入植生基材吹付工による野芝吹付事例, 日本緑化工学会誌, **38**(1), 176-179.
- 5-4) 牧 孝憲, 高橋 徳, 舛田智江, 根本健児, 落 修一 (2006) : 木質爆砕物の法面緑化資材としての利用, 土木学会論文集, **62**(2), 220-228.
- 5-5) 清水香代, 山寺喜成, 楊 喜田, 宮崎敏孝 (2002) : 堆積泥土の緑化基盤材としての利用方法に関する研究, 日本緑化工学誌, **28**(1), 204-207.
- 5-6) 大沢吉範, 大木宜章, 石田哲朗, 関根 宏 (1999) : 電解処理した上水汚泥の法面緑化基盤材への適用, 土木学会論文集, **629**(12), 47-55.
- 5-7) 鈴木武志, 坂 文彦, 渡辺郁夫, 井汲芳夫, 藤嶽暢英, 大塚紘雄 (2009) : クリンカアッシュの緑化基盤としての利用が樹木へ及ぼす影響, 日本緑化

- 工学会誌, **35**(2), 325-331.
- 5-8) 吉田 寛, 吉田智昭, 福永健司 (2003): 貝殻廃棄物を利用した酸性雨・強酸性土壌地の緑化, 日本緑化工学会誌, **28**(4), 512-519.
- 5-9) 横尾磨美, 鬼塚克忠, 原裕, 吉武茂樹, 岡部弘幸 (1998): 廃ガラス材の工学的特性と斜面緑化への試み, 土木学会第 53 回年次学術講演会, 478-479
- 5-10) 藤原俊六郎, 安西徹郎, 小川吉雄, 加藤哲郎 (1998): 土壌肥料用語事典, 社団法人農山漁村文化協会, 238-246.
- 5-11) 日本岩盤緑化工協会技術委員会 (2000): 有機質系厚層基材吹付工技術資料, 日本岩盤緑化工協会, 35-38.
- 5-12) 河野道弘, 水元浩一, 藤本 充 (2010): 木くず等を利用した地産地消型グラウンドカバー工法の研究開発, 愛媛県産業技術研究所研究報告, **48**, 36-39.
- 5-13) 矢橋晨吾 (1982): 泥炭系土壌の締固め特性—低平泥炭地の農地工学的改良に関する研究 (Ⅲ) —, 農業土木学会論文集, **97**, 16-24.
- 5-14) 佐々木徹, 赤坂英則, 鈴木良子, 藤井克己 (2008): 有機資材混入による黒ボク土の物理的性質の変化, 農業農村工学会論文集, **255**, 77-82.
- 5-15) 八幡敏雄, 田淵俊雄, 中野政詩, 雨宮 悠 (1984): 土壌物理実験改訂版, 東京大学出版会, 71-99.
- 5-16) 宮崎 毅, 長谷川周一, 粕淵辰昭 (2005): 土壌物理学, 朝倉書店, 18-27.
- 5-17) 藤原宣夫, 石坂健彦, 石曾根敦子, (2001): 下水汚泥および植物発生材のリサイクルに関する調査, 下水道関係調査研究年次報告書集, 243-248.
- 5-18) 大坪政美, 杉本 晃, 古野勝久, 辻 博基, 東 孝寛 (2014): 竹繊維を利用した法面緑化基盤材の耐浸食性, 九大農学芸誌, **69**(2), 47-54.
- 5-19) 日本粘土学会 (2009): 粘土ハンドブック第三版, 技報堂出版, 810-823.
- 5-20) (社) 日本造園学会緑化環境工学研究委員会 (2000): 緑化事業における植栽基盤整備マニュアル, ランドスケープ研究: 日本造園学会誌, **63**(3), 224-241.
- 5-21) 国土交通省国土技術政策総合研究所 (2013): 地域生態系の保全に配慮したのり面緑化工の手引き, 国総研資料, **722**, 61-71.

第 6 章

- 6-1) 久野悟朗 (1997) : 土の流動化処理工法, 技報堂出版, 7-44
- 6-2) 基礎工編集委員会 (2010) : 基礎工, 総合土木研究所, **38**(4), 2-5
- 6-3) 大西智晴, 野津光夫, 友住博明, 宮田章, 赤池唯志, 澤尻弘之, 日高襄 (2005) : 解体コンクリート塊を骨材として有効利用した流動化処理工法その 1 事前確認試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), **785-786**
- 6-4) 背戸利偉, 鬼丸和彦, 田中英次, 豊田新二, 三ツ井達也, 安田知之 (2006) : 流動化処理工法の産業廃棄物利用に関する一考察 (建設汚泥を利用した流動化処理工法の現場実証の報告), 土木学会第 61 回年次学術講演会, **113-114**
- 6-5) 瓦川善三, 鈴木昭彦, 堀圭一, 小林修 (2004) : 安定処理碎石微粉末を用いた流動化処理土の施工, 土木学会第 59 回年次学術講演会, **1113-1114**
- 6-6) 田口智則, 林泰弘, 鈴木敦巳, 北園芳人 (2005) : 一般廃棄物溶融スラッグの流動化処理土への適用, 土木学会第 60 回年次学術講演会, **145-146**
- 6-7) 神谷雄三, 山口洋志, 辻雅行, 川野政廣, 赤木寛一 (2005) : 下水汚泥焼却灰を利用した流動化処理土の強度特性と配合設計, 土木学会第 60 回年次学術講演会, **747-748**
- 6-8) 小池章久, 嶋田隆一, 前川太, 松本文浩 (1998) : 建設発生土に石炭灰を混合した流動化処理土の現場実証試験, 土木学会第 53 回年次学術講演会, **624-625**
- 6-9) 永松静也 (1976) : モルタル・コンクリート強度の統計的性質—均一性係数 β と変動係数について—, 日本建築学会論文報告集, **240**, 10-19.
- 6-10) 木幡行宏, 市川昌嗣, Nguyen Cong Giang, 加藤勇一 (2007) : 繊維補強した流動化処理土の三軸せん断に伴う損傷特性の検討, ジオシンセティックス論文集, **22**, 55-62
- 6-11) 久野悟郎, 関口昌男 (1999) : 繊維質材料を混合した流動化処理土, 土木学会第 54 回年次学術講演会, **460-461**
- 6-12) 今井五郎, 石川知弘, 神田政幸 (2002) : 矩形繊維シート片の混入による流動化処理土の強度および靱性能に関する研究, 土木学会第 57 回年次学術講演会, **227-228**
- 6-13) 河端俊典, 花澤貴文, 毛利栄征, 泉明良, 柏木歩 (2009) : 補強材を用いた流動化処理土の脆性改善に関する曲げ試験, ジオシンセティックス論文集, **24**, 91-96

- 6-14) 河端俊典, 柏木歩, 毛利栄征, 奥野哲史 (2009): 補強流動化処理土を用いたパイプラインのスラスト防護工法に関する水平載荷模型実験, ジオシンセティックス論文集, **24**, 171-176
- 6-15) 財団法人経済調査会 (2012): 東日本大震災災害復旧資材供給情報 復旧・復興工事に関わる建設資材等の需給動向
- 6-16) 独立行政法人国立環境研究所 (2011): 事故由来放射性物質に汚染された一般廃棄物の飛灰封込固形化実証試験
- 6-17) 小林一輔 (2002): 最新コンクリート工学—第5版—, 森北出版, 58-67.
- 6-18) 独立行政法人土木研究所 (2007): 流動化処理土利用技術マニュアル, 技報堂出版, 50-52.
- 6-19) 下水道未普及解消検討委員会事務局 (2009): 下水道未普及解消技術利用ガイド (案) —流動化処理土の管きょ施工への利用編—, 8-17.

Practical Study on Utilization of Paper Sludge for Repair Materials of Irrigation and Drainage Facilities

Takayuki Abe

*Graduate School of Food, Agricultural and Environmental Sciences, Miyagi University,
2-2-1 Hatatate, Taihaku-ku, Miyagi 982-0215, JAPAN*

SUMMARY

Japanese agriculture has adopted a rice-paddy cultivation having high productivity since Yayoi period, and we have built a number of agricultural facilities for water utilization and control. These agricultural facilities has heavily affected not only food production but also a regional culture and history. Especially, thanks to the establishment of Agricultural Basic Act in 1961 and a construction of agricultural facilities such as large dams and head works as part of improvement ground works for agricultural productivity, its productivity improved largely. In addition, Food, Agriculture and Rural Areas Basic Act was established in 1999, and it has four basic principle – Securing of Stable Food Supply, Sustainable Agricultural Development, Development of Rural Areas and Exertion of Agriculture and Rural of multi-functionality-, and agricultural facilities are expected to serve many functions such as not only food product but also preservation of the natural environment, formation of a good landscape, dissemination of culture and so on, and to contribute to the stabilization and improvement of the life of the citizens and the sound development of the national economy.

In 2009, the number of our agricultural facilities was about 7000, and the length of agricultural drainage canals was about four hundred thousand, and these asset value can come up to 32 trillion yen. Since many of these agricultural facilities built in the high economic growth period, however, these become deteriorated and the rapidly increase the facilities which reach standard working life. For these reasons, it is important to promote stock management, including a longer life and accident prevention measurement of irrigation facilities, and to develop an effective repair and reinforcement technology.

Since many of these agricultural facilities adopt construction method of concrete or soil structure, air mortars and soil cements are used mostly as repairing materials, and greening base materials are often used as slope protection materials. However, air mortars and soil cements have a problem of segregating materials easily during construction. Regarding the greening base

materials, they have a problem of easily flowing by rain immediately after construction, and the countermeasure technique is needed.

This study focused on a paper sludge (PS) generated from pulp and paper factory as materials of measures methods. That is, since PS include much of fine cellulose fiber, we can expect that it has high segregation resistance and rainfall erosivity resistance by the cross-linking effect. Moreover, if we can utilize PS in large quantities as construction materials, this attempt also helps to reduce industrial waste, and contributes to construct a recycled-based society in Japan.

This study investigated the effect of utility of air mortars, soil cements and greening base materials used for repair work of agricultural water facilities as mixture material, and validated the implementation of theses as mixture with PS.

The main conclusion and summary are shown below.

In Chapter 1 Introduction, we showed an outline of social background and the purpose of this study, and introduced the contexture of this article.

In Chapter 2, we confirmed a physic-chemical quality and environmental safety of PS by indoor experiments. In the results, we showed that PS has a high availability as construction materials of fiber system because it included 33.8 percent of organic matter like a cellulose and so on, and showed that the PS could be utilized safely as construction materials because all elution amount of 27-point heavy metals or the like met the soil environment reference value. Moreover, we confirmed that PS using high temperature vapor and slack lime was utilized as construction materials in stable quantity.

In Chapter 3, through examinations at indoor and construction site, we evaluated the physical properties of PS mixed air mortars, which were utilized as gap filling material FRP (fiber reinforced plastics) lining method that was repair method for a decrepit agricultural three-sided waterway, and were used as rear back-filling filter for a decrepit aqueduct tunnel. As a result, we found that the air mortars mixed PS met the demanded performance as filling materials, and they remedied the defect of air mortars, that was “segregation”. Since similar characteristic was demonstrated in the construction site, we confirmed the improvement of workability, too.

In Chapter 4, through examinations at indoor and construction site, we evaluated the physical properties of PS mixed soil cement in sandy land board, which was one of soil cement underground continuous wall construction method used for leakage control of an agricultural irrigation pond and used as water barrier wall for a underground dam. When material segregation of soil cement in sandy land board occurred, there was a possibility of construction defect that it was difficult to

pull out an earth auger and to erect a core material because a stone and sand settled out and shearing strength was higher. In this chapter, we demonstrated that, when soil cement were mixed with about 10kg paper sludge per sandy soil of 1m³, its characteristics of both flowability and segregation improved because paper sludge produced tiny closed cells and fibers into the soil cement, and we verified the good workability. We supposed that tiny closed cells was something to air-training made during sulfonating of lignin contained in PS.

In Chapter 5, through examinations at indoor and field, we evaluated the physical properties of PS as a greening base materials, which was utilized as slope greening methods preventing from slope failure and landslide of agricultural dam, storage reservoir, water way, farm road and so on. As a result, when a base material for greening slope was mixed a paper sludge, we found the increase in the number of pore (0.3 - 3.0mm) related strongly to an air permeability and permeability, and confirmed the favorable growth condition of plant. Moreover, we showed that mixing ratio of PS was more than 6% in order to improve rainfall erosivity resistance for greening base materials. In addition, as a results of the test field, we found showed good workability and excellent growth of plant after six year from the execution.

In Chapter 6, through examinations at indoor, we evaluated the physical properties of PS as a flowing mortar, which was utilized as a back-fill material in an agricultural tube waterway backfilling method, and cement bentonite, which was utilized as a water stop material of an agricultural dam and pond. The results showed that the strength of unconfined compression had a little variability, and the toughness enhanced. Moreover, the results showed that cement bentonite using PS had the inhibitory effects on the bleeding. For these reasons, we implied the high availability of mixing materials of PS as an air mortal and cement bentonite.

In Chapter 7, we showed summary of this paper and future research tasks.

From the above, we showed the improvement in physical properties and workability when air mortar was utilized as repairing materials of agricultural water conservancy facilities and PS was utilized as mixing materials for soil cement and greening basic materials. Moreover, our results could help to reduce industrial wastes generated from pulp and paper factory.