

博 士 論 文

農業用水路用補修材の耐久性評価に関する研究

2022年3月

石川県立大学大学院

生物資源環境学研究科 自然人間共生科学専攻

松田 展也

# 農業用水路用補修材の耐久性評価に関する研究

## - 目 次 -

第1章 序 論 .....	1
1.1 研究の背景と目的.....	1
1.2 他分野のコンクリート構造物の補修・補強工法に関する動向.....	8
1.3 農業水利施設コンクリート構造物の補修・補強工法に関する動向.....	10
1.4 本論文の構成 .....	10
第2章 若材齢時に背面水圧が作用する水路用シーリング材の止水性評価.....	15
2.1 緒 論 .....	15
2.2 試験内容 .....	18
2.2.1 試験材料 .....	18
2.2.2 硬化確認試験の供試体作製と試験方法.....	19
2.2.2.1 引張接着性試験.....	19
2.2.2.2 深部硬化確認試験.....	21
2.2.2.3 内部硬化確認試験.....	22
2.2.3 耐水圧試験の供試体作製と試験方法.....	23
2.3 試験結果 .....	26
2.3.1 硬化確認試験.....	26
2.3.1.1 引張接着性試験.....	26
2.3.1.2 深部硬化確認試験.....	28
2.3.1.3 内部硬化確認試験.....	29
2.3.1.4 硬化確認試験の考察.....	30
2.3.2 耐水圧試験.....	30

2.4 結 論 .....	34
第3章 水路用シーリング材の長期水中耐久性評価.....	37
3.1 緒 論 .....	37
3.2 試験内容 .....	40
3.2.1 試験材料と供試体の作製.....	40
3.2.2 供試体の養生と試験方法.....	42
3.3 試験結果 .....	46
3.3.1 耐水性試験.....	46
3.3.2 引張試験 .....	50
3.3.3 引張接着性試験.....	54
3.4 結 論 .....	61
第4章 衝撃摩耗に対するモルタル系補修材の耐久性評価.....	63
4.1 緒 論 .....	63
4.2 落下衝撃試験 .....	66
4.3 試験内容.....	68
4.3.1 試験材料と供試体の作製.....	68
4.3.2 試験方法 .....	70
4.4 試験結果.....	72
4.4.1 単材供試体.....	72
4.4.2 被覆供試体（10 mm 厚） .....	76
4.4.3 被覆供試体（30 mm 厚） .....	79
4.5 結 論 .....	81
第5章 石礫による転がり摩耗に対するモルタル系補修材の耐久性評価.....	83
5.1 緒 論 .....	83

5.2	転がり摩耗試験機.....	85
5.3	試験内容 .....	89
5.3.1	試験材料と供試体の作製.....	89
5.3.2	試験方法 .....	91
5.4	試験結果 .....	95
5.4.1	モルタル系補修材.....	95
5.4.2	コンクリート.....	98
5.5	結 論 .....	101
第6章	結 論 .....	103
6.1	若材齢時に背面水圧が作用する水路用シーリング材の止水性評価（第2章） ..	104
6.2	水路用シーリング材の長期水中耐久性評価（第3章） .....	105
6.3	衝撃摩耗に対するモルタル系補修材の耐久性評価（第4章） .....	105
6.4	石礫による転がり摩耗に対するモルタル系補修の耐久性評価（第5章） .....	106
6.5	照査方法および管理手法の提案.....	107
6.5.1	シーリング材の硬化性照査.....	107
6.5.2	シーリング材の止水性照査.....	108
6.5.3	シーリング材の水中耐久性照査.....	109
6.5.4	モルタル系補修材の衝撃および転がり摩耗に対する照査.....	109
6.5.5	石礫が流下する落差工に適用するモルタル系補修材の被覆厚さ .....	110
	本研究の要約 .....	111
	著者発表リスト .....	114
	謝 辞	

# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景と目的

農業水利施設は、戦後から高度成長期にかけて、ダム、頭首工、農業用排水路などが全国各地で建設されてきた。これらの施設の多くは、戦後の食糧増産の時代や高度経済成長期に整備されており、現在までに国営・都道府県営土地改良事業により建設された受益面積100 ha以上の基幹的な農業水利施設は、2018年度末時点で、ダム、頭首工、用排水機場などが7,632カ所、農業用排水路が5万1,454 kmに達する（農林水産省、2020）。さらに、支線水路を含めた用排水路の総延長は約40万 kmにのぼり、総資産価値は再建設費ベースで32兆円と試算されている。これらの農業水利施設は、安定的な用水の供給や排水の改良など、農業生産の基盤であるばかりでなく、地下水の涵養や洪水被害の軽減、地域用水として農村の景観を形成し、生態系を保全するなど多面的機能を発揮している社会資本である。しかし、これらの施設の多くは標準耐用年数を超過してきており、施設の老朽化によって突発事故や経年劣化などによる変状が増加し施設の機能低下が著しくなっている。農業水利施設の突発事故の発生状況を Fig. 1-1 に示す。現在までに、既に標準耐用年数を超過している基幹的な水利施設は再建設費ベースで5.2兆円であり、全国全体の27%を占めている。さらに、今後10年のうちに標準耐用年数を超過する施設を加えると再建設費ベースで約8.0兆円であり、全国全体の41%を占めると試算されている（農林水産省、2020）。基幹的農業

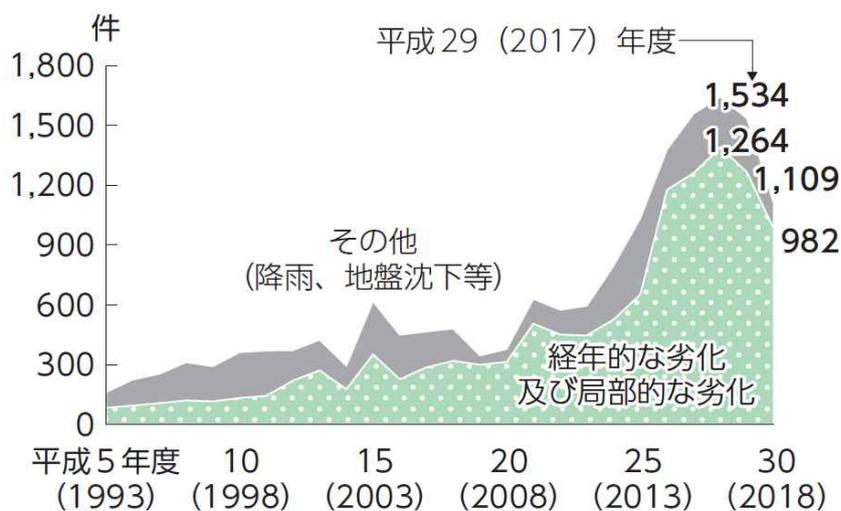


Fig. 1-1 突発事故発生状況（農林水産省、2019）

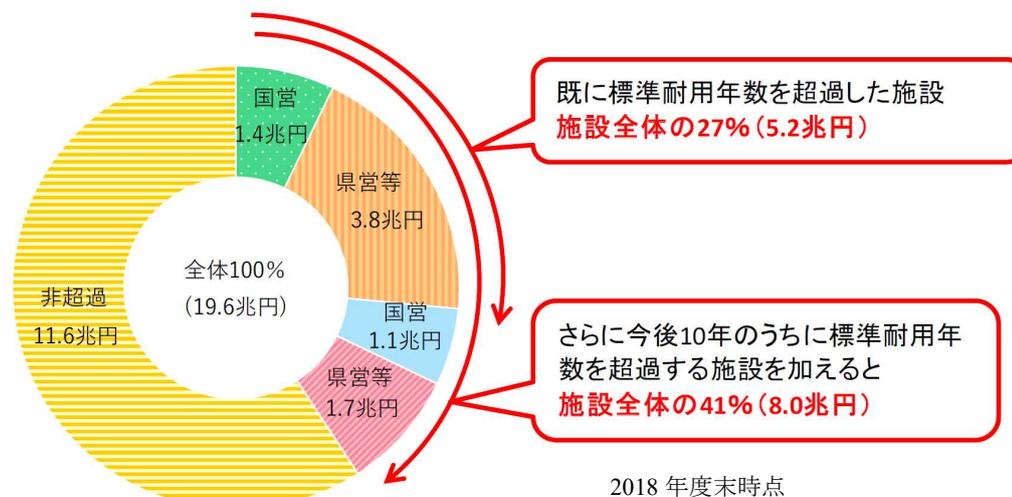


Fig. 1-2 基幹的農業水利施設（受益面積 100 ha 以上の農業水利施設）の資産価値（再建設費ベース）（農林水産省，2020）

水利施設の再建設費ベースの資産価値を Fig. 1-2 に示す。

今までの農業水利施設の機能保全は、劣化の進行に伴う施設性能の著しい低下や営農形態の変化などに伴う施設改良の必要が生じた時点で、全面的な更新整備により行うことが一般的であった。しかし、老朽化施設のストック量の増加に対応し、機能保全コストの一層の削減が求められていることから、予防保全（施設の性能低下を許容し得る下限の水準を下回る前に適切な補修・補強・更新の対策を行い、耐用年数を効率的に延伸させる方法）の手法を取り入れたストックマネジメントの取り組みが行われつつある。「農業水利施設の機能保全の手引き」（以下、「機能保全の手引き」という）（農林水産省農村振興局整備部水資源課施設保全管理室，2015）では、ストックマネジメントを、「施設の管理段階から、機能診断を踏まえた対策の検討・実施とその後の評価，モニタリングまでをデータベースに蓄積された様々なデータを活用しつつ進めることにより，リスク管理を行いつつ施設の長寿命化とライフサイクルコストの低減を図るための技術体系及び管理手法の総称」と定義している。また，ストックマネジメントは，「①施設管理者による日常管理，②施設造成者などによる定期的な機能診断，診断結果に基づく劣化予測，効率的な対策工法の比較検討，③機能保全計画の策定，④施設監視計画に基づく施設監視，⑤機能保全計画および監視結果を踏まえた関係機関などにおける情報共有と役割分担による対策工事の実施，⑥調査・検討の結果や対策工事に係るデータの蓄積」を段階的，継続的に実施する手順によって構成されている。

ストックマネジメントの推進により、全国の農業水利施設では、施設の劣化状況を踏まえた健全度評価に基づく機能保全対策が行われている。機能保全対策には、施設保全対策として用いる工法や対策時期は個々の施設により異なるが、性能低下がかなり進んでから事後的な保全対策を行う方法と、性能低下の初期において予防的な保全対策を実施する方法がある。健全度指標を活用した施設の機能保全と機能保全コストのイメージを Fig. 1-3 に示す。これらの機能保全対策は、施設の変状を把握し、計画的かつ効率的に補修・補強や更新などを実施して、施設の長寿命化とライフサイクルコストの低減を図ることを目的としている。しかし、農業水利施設に発生する変状は多種存在し、施設や使用環境によっても変状の形態が異なるため、これらの変状に対して適切に施設の機能保全を行う必要がある。このため、機能保全の手引きが2007年に策定された。その後、パイプライン、開水路、頭首工、頭首工（ゲート設備、ゴム堰）、水路トンネル、ポンプ場、除塵設備、電気設備、水管理制御設備の各工種編が策定され、施設ごとに機能診断と機能保全計画が行われている。さらに、補修・補強に関しては、適切な工事を行うために「農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル（案）」（以下、「補修・補強マニュアル」という）が策定されており、現在では、開水路補修編、パイプライン編、鋼矢板水路腐食対策（補修）編、鋼管等腐食対策編、水路トンネル編が取りまとめられている。補修・補強マニュアルでは工法や材料に対して、役割

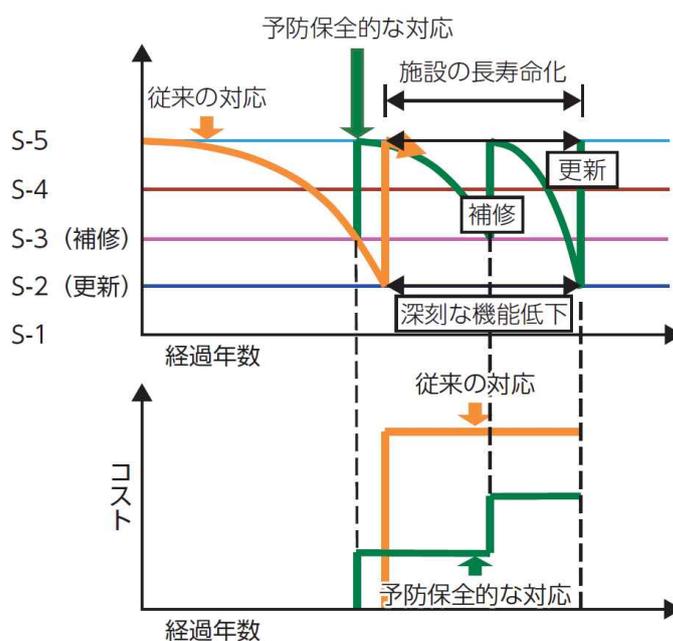
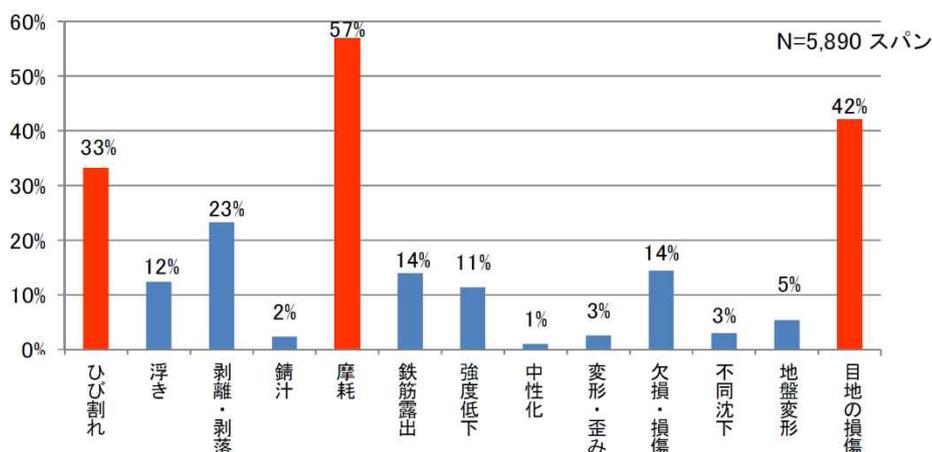


Fig. 1-3 健全度指標を活用した施設の機能保全と機能保全コストのイメージ  
 (農林水産省農村振興局整備部水資源課施設保全管理室, 2015)

や要求性能などが定められており、施設の機能を十分に考慮した上で工法や材料を選定し、施工を実施しなければならないとされている。また、開水路補修編、鋼矢板水路腐食対策（補修）編、水路トンネル編で用いられる工法や材料には、期待される耐用年数目標も定められている。このように、機能保全対策は、策定された機能保全の手引きや補修・補強マニュアルに沿って計画的に行われている。

コンクリート水路の変状は、国営造成水利施設保全対策指導事業における機能診断調査結果によれば、躯体に発生する変状割合は、摩耗が半数以上、ひび割れは3割程度を占めるとされている。また、躯体以外に発生する主な変状としては目地の損傷が多い傾向にあると報告されている（農林水産省農村振興局整備部設計課，2015）。国営造成水利施設保全対策指導事業におけるコンクリート水路の変状割合を Fig. 1-4 に、変状の発生例を Fig. 1-5 に示す。このような調査結果を踏まえ、コンクリート水路の機能保全対策では、摩耗によって粗骨材が露出した躯体表面や大きく欠損した部位などの保護や通水機能を回復することを目的に、表面被覆工法や断面修復工法によって補修が行われている。表面被覆工法には、無機系被覆、有機系被覆、パネル、シートに分類される工法がある。断面修復工法は、主成分がセメント材料で構成されるポリマーセメントモルタルなどのモルタル系補修材（無機系）や結合材にエポキシ樹脂などを用いたポリマーモルタル（有機系）の補修材がある。目地の変状に対しては、目地材の耐久性、止水性、伸縮性の回復を目的として目地補修工法による補修が行われている。目地補修工法には、不定形シーリング材（以下、「シーリング材」とい



※重複して発生している変状があるため各変状割合の合計値は100%を超過している。  
 ※平成25年度関東農政局調べ

Fig. 1-4 指導事業におけるコンクリート水路の変状割合  
 （農林水産省農村振興局整備部設計課，2015）



Fig. 1-5 コンクリート水路に発生した変状 (例)

う)を充填する目地充填工法, 樹脂材料やシート材などで被覆する目地被覆工法, 工場で成型加工されたゴム材を目地部に挿入する目地成型ゴム挿入工法などがある。

このように補修で使用される工法や材料は多種多様に存在し, 実水路で適用が進められているが, 施工後の調査によって補修後に変状が発生することが確認されている。補修後の変状を確認した事例では, 三上 (2010) は, 東北地区の凍害を受けて天端部のコンクリートが剥離したコンクリート水路に躯体表面を保護する工法で補修施工が行われた区間の調査を行った結果, 施工4年経過で31工法のうち22工法で変状が確認されたことから, 施工された各工法の耐用年数に疑問が残るとしており, 全国各地で行われている試験施工などのデータを収集し, 解析することが今後必要となると報告している。高橋・仁科 (2015) は, 中四国地区のコンクリート水路に行われた試験施工 (29工法, 有機系被覆工法, 無機系被覆工法, パネル工法, シート工法, 表面含浸工法) の区間を調査した結果, ①補修材に発生

したひび割れの 95%は母材ひび割れ部に発生している，②補修材の浮きは無機系被覆工法が最も発生が少ない，③無機系被覆工法はひび割れ部周辺に，パネル工法は全面接着方式の工法にはがれが発生していると報告しており，これらを踏まえて各工法の適用に関して留意点を述べている．また，瀬川・藤井（2018）は，無機系被覆工法によって補修が行われた 12 箇所の落差工で現地調査を行った結果，許容流速を超える箇所で補修材に顕著な摩耗が確認されたことから，落差工などの流速が速く乱流が発生する箇所に適用する場合は，補修材の耐摩耗性について検証する必要があると報告している．表面被覆工法に発生した変状の例を Fig. 1-6 に示す．

コンクリート水路の目地補修工法について変状を確認した事例では，渡嘉敷ら（2010）は，目地充填工法によって補修施工された 2 地区の水路において現地調査を行った結果，施工を行ったシーリング材に界面剥離，凝集破壊，材料の変質，膨れ，穿孔，植物の貫通の 6 種類の変状が確認されたと報告しており，それぞれの変状に対するメカニズムを解明するとともに，その対策についても検討することが必要であると述べている．また，官民連携新技術研究開発事業における研究成果報告書では，3 地区のコンクリート 2 次製品水路を現地調



Fig. 1-6 表面被覆工法の変状発生 (例)

査した結果、シリコン系シーリング材で施工された A 水路では、870 本の目地に対し 31% が剥離、ポリウレタン系シーリング材で施工された B 水路では、520 本の目地に対し 47% が剥離、C 水路では 694 本の目地に対し 45% が剥離しており、さらに、B 水路および C 水路ではシーリング材の表面にひび割れが確認されたと報告している（農林水産省農村振興局整備部設計課施工企画調整室，2013）。目地補修工法に発生した変状の例を Fig. 1-7 に示す。

コンクリート水路の表面被覆工法や断面修復工法では、経済性や施工後の変状発生割合が少ないなどの観点からポリマーセメントモルタルなどのモルタル系補修材が最も多く使用されている。目地補修工法では、取扱いの容易さや経済性などの観点からシーリング材を用いた目地充填工法による補修が多く、大小規模の工事で使用されている。これらの工法に使用する材料は、補修・補強マニュアルの開水路補修編（以下、「開水路補修・補強マニュアル」という）の性能照査項目で性能が確認されたものが使用されている。しかし、製品によっては材料自身にひび割れや剥離、脱落などの変状が早期に発生し、期待されている耐用年数目標に届かないものがある。また、予期していない水の湧出などによって材料の硬化が



Fig. 1-7 目地補修工法の変状発生（例）

阻害され、十分な性能を発揮する前に膨れや破断といった変状が生じるものや、外力の作用によって材料が消失してしまい、施工後早期に再補修などの対策を講じなければならない場合がある。

実水路での補修工事は、使用されている環境条件下で行われるため、施工時に制約を受ける場面が多くあり、施工環境や養生時間などが確保できない状況で施工が行われると、補修材の耐久性に影響を与えることになる。また、施工後に変状が確認される材料は、その要因や発生現象を確認し、対策に必要な性能を有しているかなどを再検証する必要がある。現在の開水路補修・補強マニュアルは、「現時点で得られている知見を基に取りまとめたものであり、現場データに基づいた持続的な研究・開発の成果を得ながら段階的に整備、充実を図る」とされている。このため、補修工事で使用される材料については、実施工で得られたデータを反映させ、実際に使用される環境に近似した条件や試験によって耐久性を確認する必要がある。さらに、補修の効果が持続的に発揮されるために、性能照査や品質管理手法などの追加や再検討が必要である。

以上のような背景を踏まえ、本研究では農業水利施設の水路補修に用いるシーリング材とモルタル系補修材に焦点を当て、以下のことを目的に研究を行う。

- ① 若材齢時に背面水圧が作用する水路用シーリング材の止水性評価
- ② 水路用シーリング材の長期水中耐久性評価
- ③ 衝撃摩耗に対するモルタル系補修材の耐久性評価
- ④ 石礫による転がり摩耗に対するモルタル系補修材の耐久性評価

## 1.2 他分野のコンクリート構造物の補修・補強工法に関する動向

コンクリート構造物が用いられている他の分野として、道路施設や港湾施設、下水道施設などがある。これらの施設で用いられているコンクリート構造物は使用環境が異なるため、様々な劣化が発生する。例えば、道路施設の橋梁では、中性化、塩害、凍害、アルカリシリカ反応、疲労などの劣化が環境条件の違いによって発生している。また、港湾施設では塩害、下水道施設においては化学的腐食などの劣化が顕著である。これらの構造物の多くは鉄筋コンクリートで形成されているため、劣化に対する補修工法は、コンクリート保護を目的とした工法と鉄筋の腐食防止を目的とした工法に分類される。コンクリートの保護を目的とした工法には、表面被覆工法、含浸材塗布工法、断面修復工法などがある。これらの工法に用いられる主な材料は、樹脂材やポリマーセメントモルタル材などであり、劣化因子の遮断

性やコンクリートとの接着性に優れた材料が使用されている。また、近年の橋梁やトンネルなどでは、第三者への災害防止を目的として、劣化したコンクリート片の落下を樹脂材や繊維シート材などで防止するコンクリート片剥落防止工法の使用が多くなっており、使用する樹脂材などに劣化因子を遮断する性能や、劣化の進行を確認するために可視性（透明色）を持たせた工法も開発されている。なお、上述した表面被覆工法、含浸材塗布工法、断面修復工法は、農業水利施設に適用されているものもある。鉄筋の腐食防止を目的とした工法では、電気化学的補修工法があり、港湾施設や海岸沿いの橋梁などで使用されている。電気化学的補修工法の一つである電気防食工法は、陽極材の設置後に外部電源を設けて内部鉄筋に常時通電させる外部電源方式と、内部鉄筋よりイオン化傾向の大きい亜鉛などの金属を鉄筋と導通させることにより防食電流を確保する流電陽極方式に大別される。外部電源方式は供用期間を通じて防食電流を供給する必要があるため、定期的な点検と陽極材の長期耐久性が求められる。また、コンクリート中に内在する塩化物イオンを外部電極と鉄筋との間に直流電流を流し、コンクリートの外に電気泳動させて取り除く脱塩工法や、アルカリ性溶液を含んだ陽極材に直流電流を流してコンクリートのアルカリ性を回復させる再アルカリ化工法などがある。脱塩工法と再アルカリ化工法は、一時的な通電処理で補修が完了するが、処理後の耐久性が確認できないことや、アルカリシリカ反応の促進問題、PC鋼材の水素脆弱化問題などがあり、適用には注意を要する工法である。

補強工法に関しては、コンクリート部材の耐荷力や変形性能改善を目的として補強材を追加する、増厚工法、接着工法、巻立て工法などがある。橋梁床版の増厚工法では、鋼繊維補強コンクリートを床版上部に打設する上面増厚工法や、ポリマーセメントモルタルを床版下面に吹付けや左官で塗布する下面増厚工法などがある。上面増厚工法は、床版の押抜きせん断に対する耐荷性の向上を目的としたものであり、中立軸の上昇に伴い曲げ耐力の向上も期待できる。また、下面増厚工法は、主に曲げ耐力の向上を目的として実施される補強工法である。接着工法は、鋼板や連続繊維シートを接着剤によりコンクリートと一体化させる工法であり、橋梁床版での鋼板接着工法は曲げおよびせん断補強、連続繊維シート接着工法は主に曲げ補強に適用される。巻立て工法は、耐震補強対策として用いられることが多く、橋脚などのコンクリート構造物に対して補強材を巻立てることで耐荷力を向上させる工法であり、鋼板や連続繊維シートを接着して巻立てるものや、補強鉄筋を追加してコンクリートやポリマーセメントモルタルの増厚材を用いて巻立てるものがある。また、近年では、補強部材の劣化や新基準の耐震対策などに対応するため、部材ごと取り替える工法が多くな

っている。例えば、鋼道路橋梁の RC 床版では、疲労などで劣化したコンクリート床版を撤去し、工場で作製されたプレキャストコンクリート版に取り替える工法や、コンクリート部材とは異なるが、橋梁の鋼製支承を新基準の地震力に対応したゴム製支承に取り替える耐震工法も多く行われている。なお、これらの取り替え工法も補強工法に分類されている（日本コンクリート工学会，2021）。

### 1.3 農業水利施設コンクリート構造物の補修・補強工法に関する動向

農業水利施設においても、近年、様々な補修・補強工法が開発されている。コンクリート水路の補修工法の一つである表面被覆工法では、凍結融解作用に対して耐久性を有する高炉スラグを混入させたポリマーセメントモルタルを用いた無機系被覆工法の研究開発が行われている（石神ら，2020）。さらに、吹付けや左官などで人力によって行われていた従来の施工方法を、作業人員の削減と品質の安定化を目的とした機械化する工法も開発されている（西谷内ら，2020）。パネル系被覆工法では、グラウト材の代わりに緩衝材を用いて FRPM 板をアンカー材で固定するパネル工法が開発されている（佐藤ら，2013）。目地補修工法の目地充填工法では、強度発現性と深部硬化性が早く、耐水・耐熱性に優れた多成分形のシリコーン系シーリング材が開発されている（西谷ら，2017）。コンクリート材料では、超高強度繊維補強コンクリートをパネル化した製品でトンネル内面を施工した事例も報告されている（坂下ら，2007）。近年では、蒸気養生が必要のため工場での生産が必須であった超高強度繊維補強コンクリートに対して、常温でも硬化する材料が開発されている（石関ら，2014）。

補強工法に関しては、例えば、水路トンネルの覆工面にすだれ状の炭素繊維ストランドシートを貼り付ける補強工法が開発されている（石井ら，2019）。

これらの工法は、開発後に適用が進められているが、施工や適用に関して条件設定が必要なものもあり、補修後の状態を把握することが今後の課題である。

### 1.4 本論文の構成

本研究では、農業水利施設の水路補修に用いるシーリング材とモルタル系補修材に焦点を当て、以下のことを目的に研究を行った。

- ① 若材齢時に背面水圧が作用する水路用シーリング材の止水性評価
- ② 水路用シーリング材の長期水中耐久性評価

### ③ 衝撃摩耗に対するモルタル系補修材の耐久性評価

### ④ 石礫による転がり摩耗に対するモルタル系補修材の耐久性評価

本論文は、これらの研究結果をまとめたものであり、第1章の序論から第6章の結論まで全6章で構成されている。各章の内容を以下に示す。

第1章では、研究の背景と目的について述べる。老朽化した農業水利施設を適切に保全するためにストックマネジメントが導入され、全国の農業水利施設で機能保全対策が実施されている。しかし、機能保全対策で実施されている補修材料の中には、策定された性能照査項目を満たしていても施工後に変状が発生するものがある。このため、実施工で得られたデータを反映させ、使用される環境に近似した条件や試験によって補修材の耐久性を確認し、補修の効果が持続的に発揮されるために、性能照査や品質管理手法などの追加や再検討を行う必要が課題にあることを述べている。

第2章では、若材齢時に背面水圧が作用する水路用シーリング材の止水性評価について述べる。シーリング材の充填施工を行ったコンクリート水路では、背面水圧の影響を受けて施工後早期にシーリング材に変状が発生する事例が確認されている。シーリング材の種類は多数存在するが、施工後の硬化状態を確認した研究事例や施工数日後に背面水圧を与えた研究事例は見当たらない。そこで、本研究では、目地充填工法に使用されるシーリング材を対象に、温度条件の違いによるシーリング材の硬化状態を確認した。次に、養生7日以内の若材齢のシーリング材に背面から水圧を与える試験を行い、変状の発生と止水性への影響について確認を行うとともに、今後の課題について考察する。

第3章では、水路用シーリング材の長期水中耐久性評価について述べる。農業用水路に用いられる水路用シーリング材は湿潤状態や水中環境下に置かれても、長期間の耐久性が求められるが、製品によっては施工後数年でひび割れや剥離などの変状が発生して耐久性が低下する材料がある。シーリング材の長期水中条件での耐久性研究は、養生を十分に行ったシーリング材を用いて行われており、ほとんどが建築用シーリング材を対象として行われている。しかし、実水路のように十分な養生期間を確保できず、施工後数日で水中下に置かれるシーリング材の耐久性や、近年開発されているシリコン系シーリング材や変成シリコン系シーリング材などを対象にした研究事例は見当たらない。そこで、本研究では、農業用水路の目地補修に用いられている各種の水路用シーリング材を対象に、従来の性能照査条件よりも長い時間水中浸漬させた条件や、短い気中養生期間後に水中浸漬させた条件で各種試験を行い、シーリング材の長期水中耐久性の評価を行うとともに、今後の課題につ

いて考察する。

第4章では、衝撃摩耗に対するモルタル系補修材の耐久性評価について述べる。急峻な地形に位置するコンクリート水路には多数の落差工が設置されているが、これらの落差工では、河川から流入した石礫の影響で躯体コンクリートに大きな摩耗が発生している。衝撃が加わる摩耗についての研究は、コンクリートやモルタル系補修材単体に対して数多く行われているが、コンクリートに薄く被覆したモルタル系補修材に対しての研究事例は見当たらない。そこで、本研究では、断面修復工法や表面被覆工法に用いるモルタル系補修材を対象に、石礫を模擬した鋼球を落下させる衝撃試験を行い、モルタル系補修材の耐衝撃摩耗性や耐剥離性について被覆厚さの違いによる評価を行い、今後の課題について考察する。

第5章では、石礫による転がり摩耗に対するモルタル系補修材の耐久性評価について述べる。モルタル系補修材で補修を行った落差工では、流入した石礫の転がりによって発生したと考えられる摩耗が確認されている。このため、落差工で使用するモルタル系補修材の性能照査は、水中条件で石礫の転がりを再現した試験方法で評価することが望まれるが、既存の摩耗試験機を用いた方法では試験条件が異なることや、台数が少なく試験自体を行うことが困難であるなどの問題点があった。そこで、本研究では、水中条件で石礫を模擬した摩耗材を転がす簡易的な転がり摩耗試験機を作製した。次に、作製した摩耗試験機を用いて、モルタル系補修材の耐久性評価を行うとともに、今後の課題について述べる。

第6章では、本研究における成果を統括し、結論を述べる。次に、得られた知見から照査方法と管理手法の提案を述べる。

## 引用文献

- 石神暁郎, 西田真弓, 南 真樹, 金沢智彦, 緒方英彦, 濱 幸雄 (2020) : 超高耐久性断面修復・表面被覆技術の開発 (その 1) - 予定供用期間中のメンテナンスフリーを目指した工法 -, 農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 99-100.
- 石井将幸, 上野和広, 小森篤也, 堀越直樹, 西須 稔 (2019) : FRP シートと側壁基部アンカーの併用による水路トンネルの補強効果, 農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 504-505.
- 石関嘉一, 相良光利, 玉滝浩司, 西平宣嗣 (2014) : 常温硬化型超高強度繊維補強コンクリートの水流摩耗防止部材への適用, コンクリート工学年次論文集, **36**(1), 1966-1971.
- 三上俊助 (2010) : 農業用コンクリート水路補修工法と経年劣化について, 農業農村工学会材料施工研究部会, **48**, 23-30.
- 日本コンクリート工学会 (2021) : コンクリート診断技術 '21 [基礎編]
- 西谷啓太郎, 上條達幸, 松田展也, 森 丈久 (2017) : 強度発現性, 耐水・耐熱性に優れたシリコン系シーリング材の開発, 農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 576-577.
- 西谷内龍司, 南 真樹, 石神暁郎, 緒方英彦, 濱 幸雄 (2020) : 超高耐久性断面修復・表面被覆技術の開発 (その 3) - 機械化施工『左官アシスト工法』における検討 -, 農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 541-542.
- 農林水産 (2019) (参照 2021.09.21) : 令和元年度食料・農業・農村白書, (オンライン), 入手先 < : [https://www.maff.go.jp/j/wpaper/w\\_maff/r1/attach/pdf/zenbun-2.pdf](https://www.maff.go.jp/j/wpaper/w_maff/r1/attach/pdf/zenbun-2.pdf) >
- 農林水産 (2020) (参照 2021.09.21) : 令和 2 年度食料・農業・農村白書, (オンライン), 入手先 < : [https://www.maff.go.jp/j/wpaper/w\\_maff/r2/pdf/zentaiban.pdf](https://www.maff.go.jp/j/wpaper/w_maff/r2/pdf/zentaiban.pdf) >
- 農林水産省農村振興局整備部水資源課施設保全管理室 (2015) : 農業水利施設の機能保全の手引き
- 農林水産省農村振興局整備部設計課 (2015) : 農業水利施設の長寿命化のための手引き
- 農林水産省農村振興局整備部設計課施工企画調整室 (2013) (参照 2021.9.30) : 官民連携新技術研究開発事業完了した研究開発課題番号 56 成果報告書, pp.17-19, (オンライン), 入手先 < [https://www.maff.go.jp/j/nousin/sekkei/kanmin/pdf/ka055\\_02.pdf](https://www.maff.go.jp/j/nousin/sekkei/kanmin/pdf/ka055_02.pdf) >
- 坂下雅司, 石川高志, 横尾彰彦, 片桐 誠 (2007) : 超高強度繊維補強コンクリート製品の

水路トンネル補修工事への適用, 農業土木学会誌, **75(1)**, 29-30.

佐藤 智, 石神暁郎, 金田敏和 (2013): FRPM 板と緩衝材を用いた表面被覆工法の寒冷地での耐久性およびコンクリート開水路に対する凍結融解作用抑制効果, コンクリート工学年次論文集, **35(1)**, 1675-1680.

瀬川 学, 藤井三志郎 (2018): 補修工法を実施した落差工における著しい摩耗現象の原因究明に向けた基礎研究 一手取川七ヶ用水富樫用水を事例として, 農業農村工学会京都支部研究発表会講演要旨集, 144-145.

高橋良明, 仁科真治 (2015): 五條幹線水路における補修工法試験施工のモニタリング結果, 農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 684-685.

渡嘉敷 勝, 森 充広, 中矢哲郎, 森 丈久, 幸光新太郎, 山下浩平, 橋向秀治, 杉山真貴 (2010): 農業用水路におけるシーリング目地材の劣化, 農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 412-413.

## 第2章 若材齢時に背面水圧が作用する水路用シーリング材の止水性評価

### 2.1 緒論

現在供用されているコンクリート水路は、経年劣化などによって各種の変状が発生しており、施設の機能低下が懸念されている。国営造成水利施設保全対策指導事業におけるコンクリート水路の機能診断調査結果によると、最も多かった変状は摩耗で、調査箇所全体の57%で確認されており、次いで多かった変状が目地の損傷で、調査箇所全体の42%で発生が確認されている（農林水産省農村振興局整備部設計課，2015）。目地の変状には、破断や変形といった目地材の劣化によるものや、周縁コンクリートのひび割れや欠損といった変状があり、これらの変状は目地の機能を低下させ、漏水が発生する要因となっている。水路からの漏水は水理機能を低下させるだけでなく、田畑や周辺環境に悪影響を与える要因となるため、漏水対策は重要な問題点とされている。

近年、変状の発生したコンクリート水路の目地部には、漏水防止や劣化抑制などを目的とした様々な目地補修工法（目地充填工法，目地被覆工法，目地成型ゴム挿入工法）が開発され、適用が進められている。これらの目地補修工法の1つである目地充填工法は、施工性と経済性の観点から、大規模補修から簡易補修工事まで多岐に亘り使用されている工法である。目地充填工法に使用するシーリング材には、1成分形や多成分形といった硬化形態が異なる材料が存在する。補修工事で使用されている1成分形シーリング材の多くは、硬化成分が空気中の水分と反応して硬化する湿気硬化タイプである。硬化反応はシーリング材表面から進行するため、内部が均一硬化するまで時間がかかる特徴がある。あらかじめ調整されている1液材料のため、一定の品質が確保でき、開封後すぐに使用が可能である。製品形態は、シーリングガンに装着して使用する容量の少ないカートリッジタイプ、吸込み式シーリングガンなどを使用して充填する容量の大きい缶タイプがあり、施工規模に応じて使い分けられている。多成分形シーリング材は、基剤と硬化剤などを一定量練り混ぜることによって硬化する混合反応硬化タイプである。硬化反応はシーリング材全体がほぼ均一に硬化する特徴がある。基剤と硬化剤の2液を配合する2成分形が主流であるが、基剤と硬化剤に加え、低温硬化や強度発現を速める促進剤を配合する3成分形がある。施工前に現場での混合作業が必要であり、混合後の材料は使い切る必要がある。コンクリート水路の目地補修工事では、現場での混合作業を省略することで日当り施工量の増加や施工機材の軽減ができること、また、取り扱いが容易であることから1成分形シーリング材が使用されることが多い。しかし、1成分形シーリング材は施工数日後に膨れや破断、背面からの湧水といった変



Fig. 2-1 シーリング材の膨れ



Fig. 2-2 膨れて破断したシーリング材

状が生じることがある。1成分形シーリング材の施工箇所に生じた膨れの例を Fig. 2-1 に、膨れて破断した例を Fig. 2-2 に示す。Fig. 2-1 は、山裾に隣接した水路の底版部に施工を行った目地充填部である。施工の3日後に降雨があり、降雨の翌日にシーリング材表面に複数の膨れが発生していた。膨れの表面は硬化している状態であったが、内部はペースト状の未硬化状態であり、シーリング材に膨れを発生させたと考えられた湧水も存在していた。Fig. 2-2 は、道路に隣接した水路で、側壁（高さ 0.6 m）に施工を行った目地充填部である。施工翌日の降雨後に膨れを伴った破断および湧水が確認されている。膨れの表面は硬化している状態であったが、内部はペースト状の未硬化部があり、未硬化部を押しつけて背面から水が湧き出ている状態であった。変状が発生したいずれの目地部とも施工時に湧水は確認されておらず、乾燥状態を保って施工が完了した部位である。変状は、施工後の雨水の影響で地下水位が上昇し、シーリング材の背面側から直接水圧が作用したことで発生したと考えられる。これらの変状は、シーリング材が完全に硬化する前の施工後数日で発生する傾向があり、止水性や通水性に影響を与えることになる。

目地充填工法で使用されるシーリング材の多くは、開水路補修・補強マニュアルで定められた、性能照査項目によって耐久性が確認されている（農林水産省農村振興局整備部設計課施工企画調整室，2015）。照査試験でのシーリング材の養生条件は、例えば付着性試験や形状安定性試験では、1成分形で  $23 \pm 2$  °C、 $50 \pm 5\%RH$  の温湿度条件で前養生 14 日間、 $30 \pm 2$  °C の後養生 14 日間の計 28 日間、2成分形は  $23 \pm 2$  °C、 $50 \pm 5\%RH$  の温湿度条件で前養生 7 日間、 $50 \pm 2$  °C で後養生 7 日間の計 14 日間、止水性試験では、 $23 \pm 2$  °C、 $50 \pm 5\%RH$  の温湿度条件で各製品の硬化に要する養生期間を与えることになっている。このため、照査試験では、硬化に必要な養生を与えた後のシーリング材に対して耐久性を確認することに

なる。しかし、実際の現場で確認されている変状の中には、施工後に背面側からの水の影響を受けて、照査試験で規定された養生期間よりも短い時間で発生している事例もみられる。このように、実際の水路で施工されたシーリング材は、現在の性能照査で想定されていない環境に晒される場合がある。このことから、シーリング材の照査試験には、実際の使用環境や変状事例などを参考にした試験条件の設定が必要であることが示唆された。

シーリング材の止水性に関しては、加納ら（2012）が海水中におけるシーリング材（シリコーン系および変成シリコーン系シーリング材）は、アクリル水槽窓、既設シリコーン系シーリング材および躯体 FRP 防水面への接着性や硬化性が良好であるため、止水性が期待できると報告している。海外では、Lacasse et al.（2009）が建築用 1 成分形ポリウレタン系シーリング材で充填した 20 mm 幅の目地部に、雨風を想定した最大 2 kPa の水噴霧試験を実施した結果、接着界面に亀裂が発生すると述べている。その他の研究では、藤山ら（2013）が定形ゴムシーリング材である水膨張性ゴム材に対して、水路内水側からの水圧を想定した最大 0.1 MPa の水圧を与える室内試験を実施し、目開き量が初期値から+2 mm まで止水可能であることを解明している。また、小林ら（2010）は、非膨張性ゴムと水膨張ゴムの複合形状とした定形ゴムシーリング材に対して耐水圧試験を実施し、最大 3.85 MPa まで止水性に問題がないと報告している。しかし、これらの先行研究は、接着性試験や雨風を想定した試験からの止水性評価または定形ゴムシーリング材に対しての止水性評価であり、硬化が不十分な施工後早期に水圧の影響を受けるシーリング材に着目した水圧試験や止水性評価の研究報告は行われていない。

そこで本研究では、目地充填工法に使用されるシーリング材を対象に、硬化状態を把握するための引張接着性試験と深部硬化および内部硬化確認試験を実施し、温度条件の違いによるシーリング材の硬化状態を確認した。また、シーリング材が施工後早期に背面水圧の影響を受け、変状が発生している事例があることから、養生 7 日以内の若材齢のシーリング材に背面から水圧を与える耐水圧試験を実施し、変状の発生と止水性への影響について確認した。

## 2.2 試験内容

### 2.2.1 試験材料

本試験に使用したシーリング材は、1成分形ポリウレタン系シーリング材（以下、「PU-1」という）、1成分形シリコーン系シーリング材（以下、「SR-1」という）、2成分形ポリウレタン系シーリング材（以下、「PU-2」という）、2成分形シリコーン系シーリング材（以下、「SR-2」という）、3成分形シリコーン系シーリング材（以下、「SR-3」という）をそれぞれ1種類ずつ用意した。Table 2-1 に使用したシーリング材の一覧を示す。PU-1, SR-1, SR-3 については、農業用水路の目地充填工法に用いられている材料であり、開水路補修・補強マニュアルの品質規格に適合した、50%モジュラス（以下、「 $M_{50}$ 」という）が  $0.2\text{ N/mm}^2$  以上の材料である。ここで、 $M_{50}$  は、シーリング材を元の長さから 50%伸ばした時の引張強度を示す。PU-2 と SR-2 は、新設の 2 次製品水路や建築、土木構造物などに使用されている材料であり、 $M_{50}$  が  $0.2\text{ N/mm}^2$  未満のものである。硬化機構については、1 成分形シーリング材の PU-1 と SR-1 は、湿気硬化タイプ、2 成分および 3 成分形シーリング材の PU-2, SR-2, SR-3 は混合反応硬化タイプである。なお、各シーリング材には、専用のコンクリート用プライマーがあるため、それらも同時に用意した。

Table 2-1 試験に用いたシーリング材

種類	材料名	種類	成分形	硬化機構
PU	PU-1	ポリウレタン	1成分	湿気反応
	PU-2	ポリウレタン	2成分	混合反応
SR	SR-1	シリコーン	1成分	湿気反応
	SR-2	シリコーン	2成分	混合反応
	SR-3	シリコーン	3成分	混合反応

## 2.2.2 硬化確認試験の供試体作製と試験方法

### 2.2.2.1 引張接着性試験

引張接着性試験の供試体は、JIS A 1439 : 2016「建築用シーリング材の試験方法」の引張接着性試験を参考に、ISO 形モルタル被着体（幅 25 mm，長さ 75 mm，厚さ 12 mm）を使用して、幅 12 mm，長さ 50 mm，厚さ 12 mm の寸法でシーリング材を充填した。供試体の形状を **Fig. 2-3** に示す。シーリング材の充填に際し、各材料とも接着性を向上させるため、モルタル被着体の接着面をサンドペーパーで研掃し、それぞれの専用プライマーを塗布した。供試体数は、シーリング材の材齢と温度条件ごとにそれぞれ 3 体とした。

試験方法は、JIS A 1439 : 2016「建築用シーリング材の試験方法」を参照し、精密万能試験機（島津製作所，オートグラフ AG-X plus）を用いて、50 mm/min の载荷速度で試験を行った。なお、型枠から供試体を取り外す段階で、シーリング材充填部にペースト状の未硬化部が確認できる、またはシーリング材が型枠に粘着し、充填断面が変形して断面計測ができない供試体は、試験不可とした。

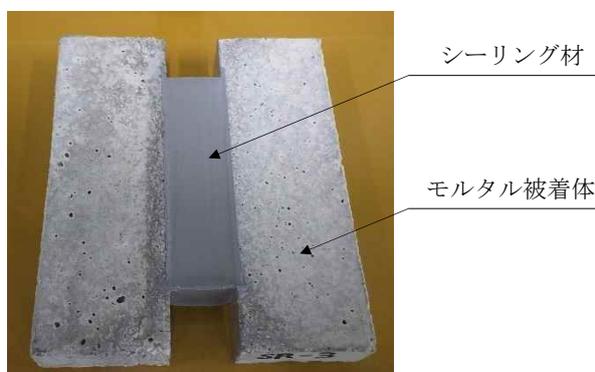
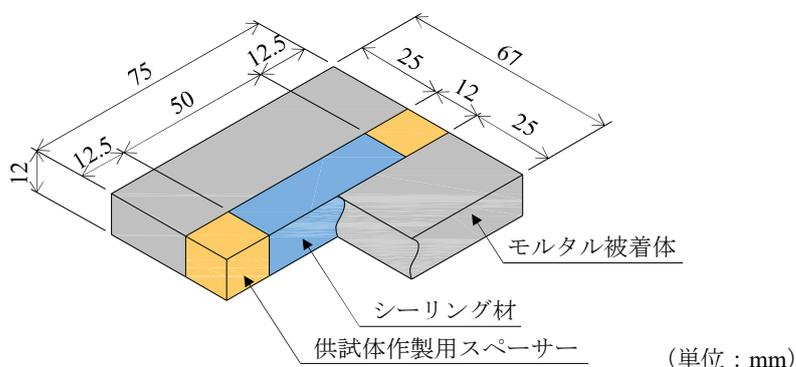


Fig. 2-3 引張接着性試験の供試体形状

計測項目は、 $M_{50}$  (N/mm<sup>2</sup>)、最大引張強度（以下、「 $T_{\max}$ 」という）(N/mm<sup>2</sup>)、破断時伸び率（以下、「 $E_{\max}$ 」という）(%)を確認した。 $M_{50}$ 、 $T_{\max}$ 、 $E_{\max}$ は、式(2-1)、(2-2)、(2-3)によりそれぞれ算出した。

$$M_{50} = \frac{P_{50}}{A} \quad (2-1)$$

$$T_{\max} = \frac{P_{\max}}{A} \quad (2-2)$$

$$E_{\max} = \frac{L_{\max}}{L} \times 100 \quad (2-3)$$

ここで、 $P_{50}$ ：目地間の伸び率が50%のときの荷重(N)、 $P_{\max}$ ：最大荷重(N)、 $A$ ：シーリング材の接着面積(600 mm<sup>2</sup>)、 $L_{\max}$ ：最大荷重時の目地間伸び(mm)、 $L$ ：試験前の目地幅(mm)である。引張接着性試験の試験状況を Fig. 2-4 に示す。



Fig. 2-4 引張接着性試験の試験状況

### 2.2.2.2 深部硬化確認試験

深部硬化確認試験は、ポリカップ容器（内径 37 mm，深さ 60 mm，容量 50 ml）を用意し，容器内にシーリング材を充填したものを供試体とした．供試体数は，シーリング材の材齢と温度条件ごとにそれぞれ 3 体とした．

試験方法は，各材齢経過後の供試体から見掛け硬化したシーリング材を取り出し，表面からの見掛け硬化深さを計測する方法で行った．深部硬化確認供試体と計測時の状況を **Fig. 2-5** に示す．ここで，見掛け硬化とは，シーリング材の硬化反応が進んで流動性が消失し，固形化している状態を示す．計測方法は，デジタルノギスを用いて直交する 2 方向の最大厚さを計測し，3 体の平均値を見掛け硬化深さとした．他方，シーリング材の硬化がポリカップ容器の底部まで到達し，容器から全て抜き取れる場合は，見掛け硬化深さを 60 mm とした．



深部硬化確認供試体



硬化部計測（デジタルノギスによる計測）



抜き取れた供試体（見掛け硬化深さ 60 mm）

**Fig. 2-5** 深部硬化確認供試体と計測時の状況

### 2.2.2.3 内部硬化確認試験

内部硬化確認試験は、実際の目地寸法で内部硬化がどのように進行するかを把握するために行った。供試体はモルタル板で幅 30 mm、深さ 20 mm の寸法で枠組みを行い、シーリング材を充填したものを使用した。内部硬化確認の供試体形状と寸法を **Fig. 2-6** に示す。なお、供試体のシーリング材充填幅および深さは、耐水圧試験で使用する供試体の目地断面寸法と同一とした。シーリング材の充填に際し、モルタル板の接着面をサンドペーパーで研掃し、それぞれの専用プライマーを接着面に塗布した。供試体数は温度条件ごとにそれぞれ 1 体とした。

試験方法は、各材齢経過後に供試体充填部をカッターナイフで切断し、シーリング材切断面の硬化厚さを計測した。切断はモルタル板接続部に沿って行い、表層面の硬化厚さはデジタルノギスで計測した。内部まで硬化が進行し、未硬化部が確認されない場合は、硬化完了とした。なお、硬化確認試験に用いた供試体は、0 °C の恒温器内 (**Fig. 2-7**) および 23 °C の室内で、1 日、3 日、7 日、14 日、28 日の材齢まで養生を行い、各材齢で試験を行った。

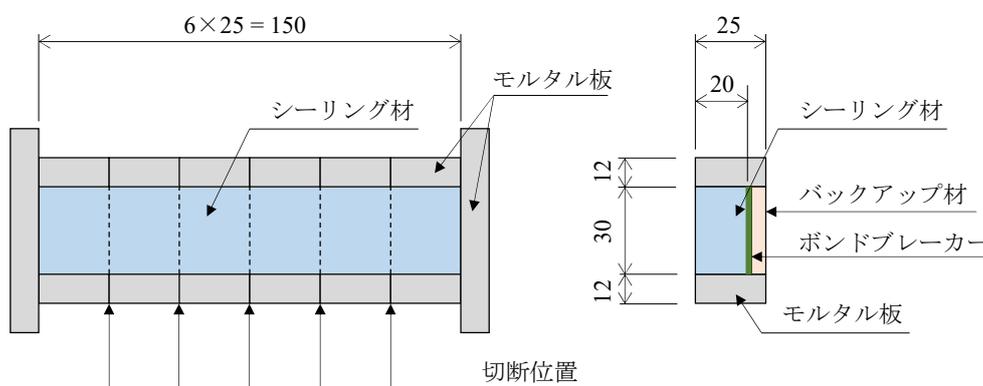


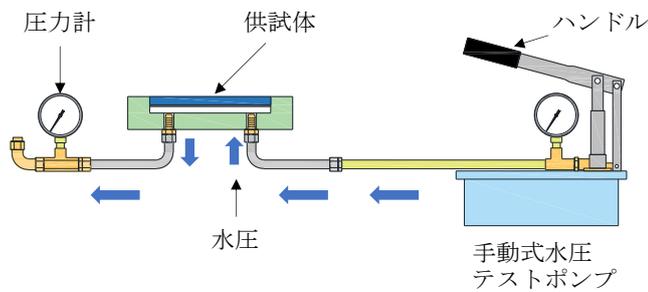
Fig. 2-6 内部硬化確認の供試体形状



Fig. 2-7 恒温器 (アズワン, CHI-178) を用いた養生状況 (硬化確認試験体, 0 °C)



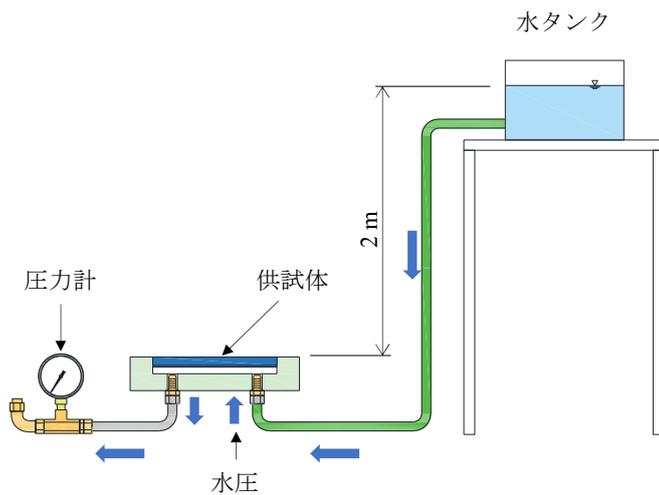
期条件は、供試体表面からの水面高さが2 m（水圧 0.02 MPa）となる位置に供試体を設置して、3 日および7 日間水圧を与える試験方法で行った。耐水圧試験の概略図と試験時の状況を Fig. 2-10 に示す。各条件の試験は、シーリング材打設後、3 日および7 日の材齢経過後に行った。なお、2 条件の共通水圧である 0.02 MPa は、比較的規模の大きな水路の壁高が 2 m 程度あると想定して設定した。短期条件の水圧 0.1 MPa は、開水路補修・補強マニュアルの目地充填工法の止水性試験方法（案）における評価水圧であるため、短期条件のみに適用した。



概略図（短期条件）



試験時（短期条件）



概略図（長期条件）



試験時（長期条件）

Fig. 2-10 耐水圧試験の概略図と試験時の状況

試験後の変状確認は、水圧を与えた状態で漏水の有無を目視で確認するとともに、レーザー式凹凸測定器を用いて充填部長辺方向の高さを計測した。膨れ高さの計測状況を Fig. 2-11 に、膨れ高さ測定図を Fig. 2-12 に示す。ここで、レーザー式凹凸測定器の測定精度は、1 mm/1 測点である。測点数は、供試体作製時に充填端部が盛り上がる箇所が存在したため、両端部から 5 mm 控除した 210 mm の長さ、211 点とした。測定は 1 体当たり 3 回行い、1 測点の値は 3 回の平均値とした。なお、各測点の高さは試験前に計測した初期値からの差分によって求めた。各測点の高さを求めた後、1 体当りの平均値と最大値を算出した。各シーリング材の膨れ高さは、3 体の平均値を平均膨れ高さ、3 体の最大値を最大膨れ高さとした。試験終了後は水を抜いて減圧し、試験終了 1 週間後に膨れ後の復元性を確認するため、膨れ高さを計測した。



Fig. 2-11 膨れ高さの計測状況

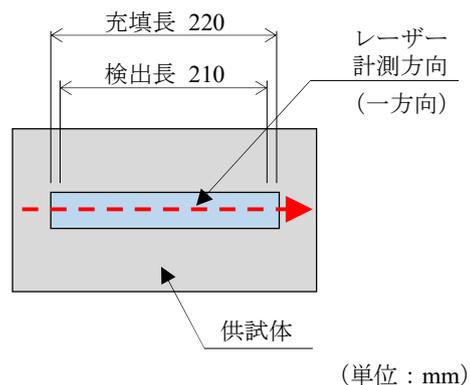


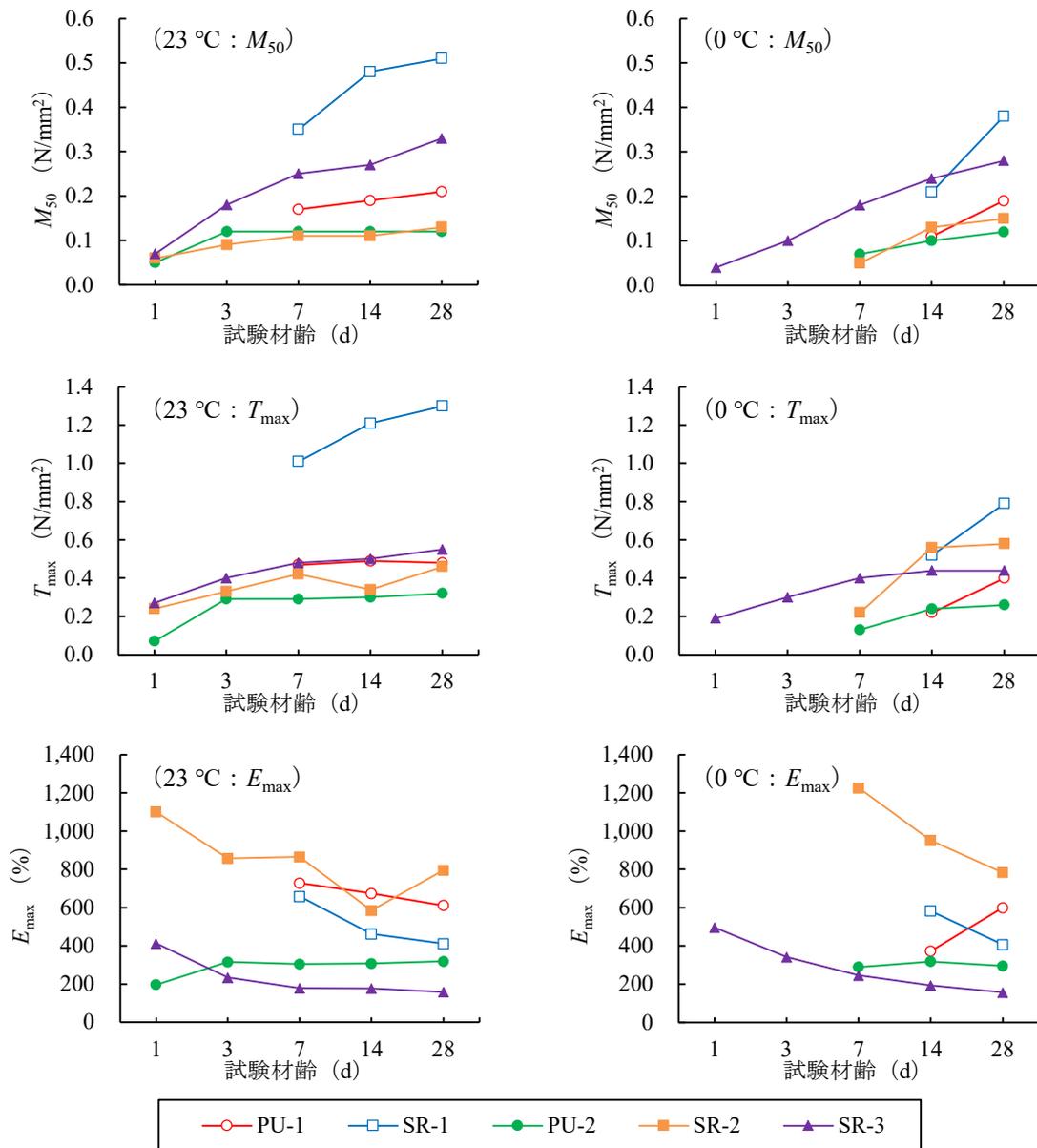
Fig. 2-12 膨れ高さ測定図

## 2.3 試験結果

### 2.3.1 硬化確認試験

#### 2.3.1.1 引張接着性試験

引張接着性試験の結果を **Fig. 2-13** に示す. 型枠から外した段階で供試体内部にペースト状の未硬化部が確認されたため, 23 °Cでは1成分形のPU-1とSR-1が材齢3日まで, 0 °Cでは材齢7日まで試験不可とした. 2成分形のPU-2とSR-2は, 0 °Cの材齢3日まで型枠にシーリング材が粘着し, 充填断面が大きく変形したため, 試験不可とした. 0 °C供試体の未



**Fig. 2-13** 引張接着性試験結果



Fig. 2-14 供試体の未硬化状況 (0 °C)

硬化状況を Fig. 2-14 に示す.  $M_{50}$  および  $T_{max}$  は, 材齢に伴い各シーリング材の強度が上昇する傾向を示したが, 0 °Cでは 23 °Cよりも低い値であった. PU-2 と SR-2 は,  $M_{50}$  が 0.2 N/mm<sup>2</sup> 未満の材料であるため, 23 °Cおよび 0 °Cともに 0.2 N/mm<sup>2</sup> 以上に達していなかった.  $M_{50}$  が 0.1 N/mm<sup>2</sup> 以上となった材齢は, 23 °Cで PU-1, SR-1, SR-2 が 7 日, PU-2 が 3 日であったのに対し, 0 °Cで PU-1, SR-1, SR-2, PU-2 は 14 日であった.  $M_{50}$  が 0.2 N/mm<sup>2</sup> 以上となった材齢は, SR-1 が 23 °Cで 7 日, 0 °Cで 14 日であった. PU-1 は 23 °Cで 28 日であったが, 0 °Cでは 28 日経過しても 0.2 N/mm<sup>2</sup> に達していなかった. SR-3 については, 0.2 N/mm<sup>2</sup> 以上となった材齢は, 23 °Cで 7 日, 0 °Cで 14 日であった. このため, 各シーリング材は低温になると強度発現性は低下し, 23 °Cと 0 °Cを比較すると 0 °Cの方が 1~2 週間程度, 強度発現が遅延することが分かった. 本試験に使用した材料の中では SR-2 が最も伸び率が大きい結果であった. 試験後の破断形態は材料によって異なり, SR-3 を除く 4 材料は薄層および接着面での破壊が多数を占め, ばらついた試験結果であった. SR-2 は, 14 日以降, 0 °Cの方が 23 °Cよりも  $M_{50}$  および  $T_{max}$  が高くなる傾向を示した. 一方, SR-3 については全ての材齢および温度条件で凝集破壊となり, 安定した接着性を示した. なお, PU-1 の 0 °C, 材齢 14 日での最大伸び率は 373%であり, 材齢 28 日の 600%よりも低い値であった. これは, 他の材料では, 材齢の経過に伴って強度増加があり, 材料が硬くなることで伸びが低下する傾向を示したが, 硬化が遅い PU-1 は, 材齢 14 日では供試体内部に未硬化部が存在していたため, 低荷重で供試体が破断し, 伸びが小さくなったと考えられる.

### 2.3.1.2 深部硬化確認試験

深部硬化確認試験の結果を Fig. 2-15 に示す。0 °C の PU-1, PU-2, SR-2 は、材齢 3 日まで未硬化状態であったため、深部硬化の計測が不可能であった。23 °C での見掛け硬化深さは、材齢 28 日で PU-1 は 21.7 mm, SR-1 は 12.0 mm と深部硬化が遅い結果であった。0 °C では、両材料とも材齢 28 日で 10 mm 以下となり、23 °C と比較すると、PU-1 は材齢 28 日で 64%, SR-1 は 50% の硬化速度であった。ポリカップ容器から抜き取れるほど底部まで硬化した材料は、PU-2, SR-2, SR-3 であり、23 °C では PU-2 が材齢 1 日, SR-2 が材齢 3 日で底部まで硬化した。0 °C では、PU-2 が材齢 7 日, SR-2 は材齢 14 日で底部まで硬化した。SR-3 は 23 °C および 0 °C とともに材齢 1 日で底部まで硬化しており、温度による硬化速度の違いはなかった。試験後の 23 °C, 材齢 7 日の PU-1 と 0 °C, 材齢 1 日の SR-3 を Fig. 2-16 に示す。

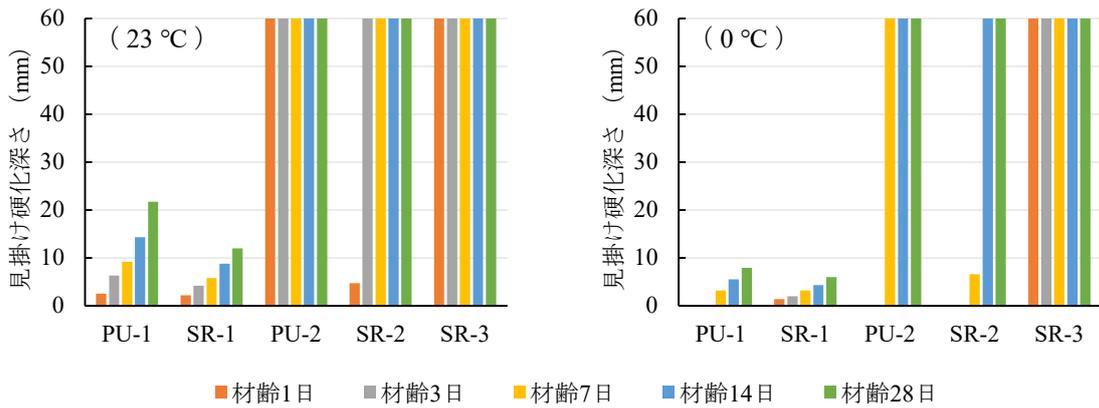
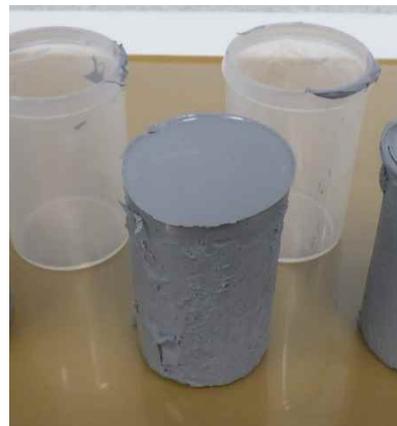


Fig. 2-15 深部硬化確認試験結果



PU-1 (23 °C, 材齢 7 日)



SR-3 (0 °C, 材齢 1 日)

Fig. 2-16 試験終了後の供試体

### 2.3.1.3 内部硬化確認試験

内部硬化確認試験の結果を **Table 2-2** に示す。内部硬化の状態は、深部硬化確認試験同様に SR-3 が最も早く、23 °C および 0 °C とともに材齢 1 日から内部全体が硬化していた。PU-2 と SR-2 は、0 °C の材齢 3 日および材齢 7 日で切断は可能であったが、内部全体がまだ柔らかい粘土状であり、半硬化の状態であった。0 °C での PU-1 と SR-1 は、材齢 28 日を経過しても内部に未硬化部が存在する状態であった。全てのシーリング材で内部が完全に硬化したのは、23 °C の材齢 28 日である。23 °C、材齢 3 日の PU-1 と 0 °C、材齢 3 日の SR-2 の内部硬化状況を **Fig. 2-17** に示す。ここで、1 成分形の硬化形態は、湿気硬化のため表層面から硬化が進行すると想定していたが、モルタル板との接着側面からも硬化が進行していることが分かった。また、内部側面の硬化厚さは、表層の硬化厚さと同程度であった。

**Table 2-2** 内部硬化確認試験結果

(単位 : mm)

	23 °C					0 °C				
	1 日	3 日	7 日	14 日	28 日	1 日	3 日	7 日	14 日	28 日
PU-1	2.6	5.5	10.1	○	○	—	—	3.2	5.2	8.4
SR-1	2.5	4.1	7.0	12.4	○	1.5	1.9	3.8	5.1	8.7
PU-2	○	○	○	○	○	—	△	△	○	○
SR-2	○	○	○	○	○	—	△	△	○	○
SR-3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

※ — : 未硬化, △ : 柔らかい粘土状, ○ : 内部硬化 を示す。



PU-1 (23 °C, 材齢 3 日)



SR-2 (0 °C, 材齢 3 日)

**Fig. 2-17** 内部硬化状況

### 2.3.1.4 硬化確認試験の考察

以上の試験結果から、本試験に使用したシーリング材は、低温条件下で硬化速度が低下し、23℃と0℃で1～2週間程度、強度発現に時間差があることが分かった。ここで、目地充填工法の標準的な施工断面（幅15～30mm、深さ10～20mm）に対し、PU-1は完全硬化するまで2週間～1ヶ月以上、SR-1は1～2ヶ月程度の期間を要すると考えられる。このため、1成分形シーリング材は完全硬化する前に背面水圧が作用すると、硬化厚さが薄いため膨れや破断が発生しやすくなると考えられる。一方、本試験に用いたシーリング材の中では、SR-3が23℃および0℃の温度条件で最も硬化速度が速い結果であった。各シーリング材の硬化速度を比較するとSR-3>PU-2>SR-2>PU-1>SR-1の順で硬化が速いことが分かった。

### 2.3.2 耐水圧試験

短期条件の試験結果をTable 2-3に示す。短期条件の0.02MPaでは、加圧により各材齢でシーリング材全体に膨れが発生した。材齢1日の供試体は、0.02MPaに達した後に加圧を行うと途中でシーリング材の膨れが増大して減圧したため、0.1MPaまで加圧することができなかった。このため、材齢1日の0.1MPaは、圧力保持ができた段階で加圧を停止し、3分間圧力保持後に測定した値である。保持可能であった最大圧力は、PU-1が0.035MPa、SR-1が0.045MPa、PU-2が0.085MPa、SR-2が0.05MPa、SR-3が0.09MPaであった。最大圧力保持中に、PU-1、SR-1、SR-2で風船状の膨れが発生した。この風船状の膨れは、終

Table 2-3 耐水圧試験結果（短期条件）

		(単位：mm)									
材齢	圧力	PU-1		SR-1		PU-2		SR-2		SR-3	
		平均	最大	平均	最大	平均	最大	平均	最大	平均	最大
1日	0.02 MPa	11.2	12.6	6.8	8.4	3.0	3.9	4.4	5.3	1.8	3.7
	0.1 MPa 未満 <sup>※1</sup>	27.4	54.3	18.5	53.0	22.6 <sup>※2</sup>	29.5 <sup>※2</sup>	19.7	44.6	19.1	28.1
	終了1週間後	2.9	14.5	4.1	19.1	3.6	5.1	2.1	7.4	1.2	2.4
3日	0.02 MPa	1.7	2.8	0.8	1.7	0.3	1.1	0.7	1.3	0.0	0.2
	0.1 MPa	21.7 <sup>※3</sup>	51.4 <sup>※3</sup>	16.2	39.9	10.8	14.0	15.4	20.0	4.1	5.9
	終了1週間後	4.9	12.8	0.6	8.6	0.2	0.5	0.4	1.0	0.0	0.3
7日	0.02 MPa	0.8	1.4	0.0	0.3	0.4	0.6	0.4	0.9	0.0	0.2
	0.1 MPa	6.9	8.3	2.9	3.8	11.8	14.8	17.3	20.1	1.9	3.4
	終了1週間後	0.1	0.8	0.0	0.5	0.4	0.7	0.5	1.0	0.0	0.3

※1：0.1MPaまで加圧ができなかった供試体。※2：破断していない1体の数値。※3：破断していない2体の数値。

了後減圧しても風船状に膨れた部位が凸状に残る結果であった。PU-1, SR-1, SR-2 の材齢 1 日の膨れ経過写真を Fig. 2-18 に示す。PU-2 は風船状の膨れは発生しなかったが、2 体が最大圧力保持 2 分程度で、接着面付近から小さな穴が開き破断漏水した。このため、PU-2 の平均および最大値は 1 体の計測値である。PU-2, 材齢 1 日の破断状況を Fig. 2-19 に示す。SR-3 については、0.02 MPa で平均 1.8 mm, 最大圧力が 0.09 MPa で平均 19.1 mm であったが、破断や風船状の膨れが発生することがなく、他のシーリング材よりも膨れが小さい結果であった。材齢 3 日の供試体では、PU-1 の 0.1 MPa で圧力保持直後に風船状の膨れが発生し、1 体で破裂が生じた。このため、残り 2 つの供試体は風船状の膨れが生じた段階で膨れ

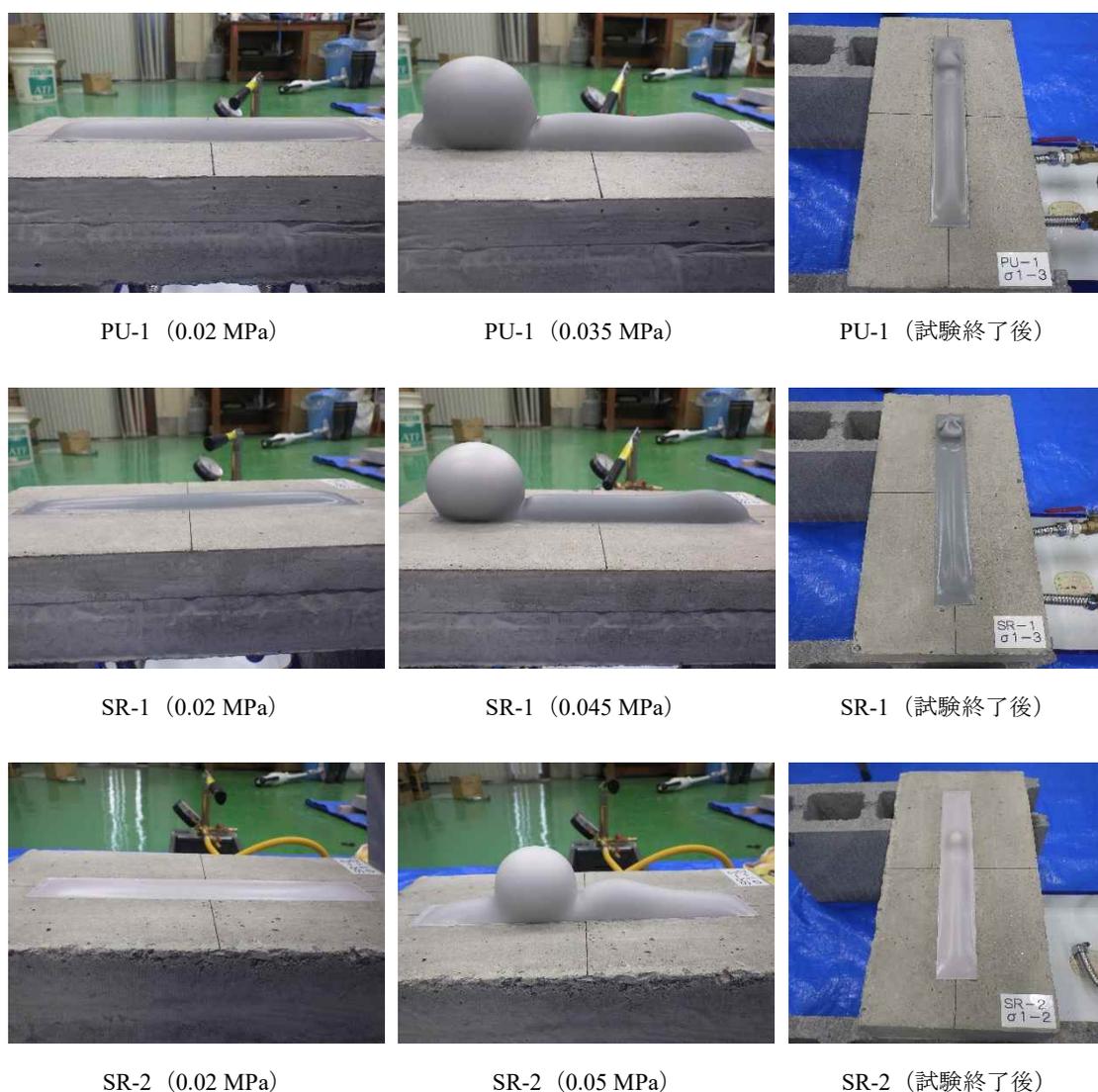


Fig. 2-18 シーリング材の膨れ (材齢 1 日)

を計測した。Table 2-3 の PU-1, 0.1 MPa は 2 体での計測値を示している。SR-1 についても圧力保持 2 分程度で風船状の膨れが発生したため、その段階で膨れを計測した。材齢 3 日, 0.1 MPa 試験後のシーリング材の膨れを Fig. 2-20 に示す。材齢 7 日の供試体では, PU-2 と SR-2 の 0.1 MPa で他のシーリング材よりも膨れが大きくなった。これは PU-2 と SR-2 の  $M_{50}$  が  $0.1 \text{ N/mm}^2$  程度の低モジュラス材料であるため、膨れが大きくなったと考えられる。

長期条件の試験結果を Table 2-4 に示す。保持時間 3 日から 7 日による膨れの増加率は、

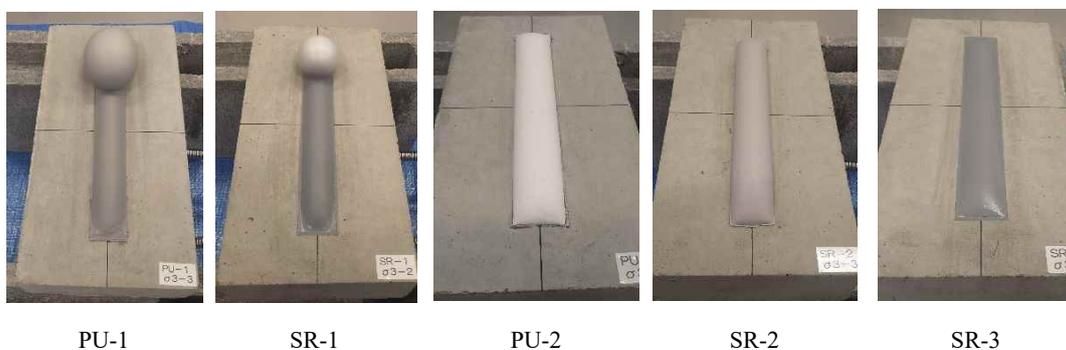


PU-2 供試体 (No.1)



PU-2 供試体 (No.3)

Fig. 2-19 シーリング材の破断 (PU-2, 材齢 1 日)



PU-1

SR-1

PU-2

SR-2

SR-3

Fig. 2-20 試験後のシーリング材の膨れ (材齢 3 日, 0.1 MPa)

使用材料の中で最も伸び率の大きいSR-2が最も大きく、材齢3日の平均で約26%、材齢7日の平均で約19%増加していた。他のシーリング材は、保持時間の経過による膨れの増加がほとんどなかった。他方、短期条件の0.02 MPa (Table 2-3) と比較した場合、3分から3日の時間経過で、材齢3日および7日ともに各シーリング材の膨れは増加する結果であった。材齢3日の平均でPU-1が1.6 mm, SR-1が2.3 mm, PU-2が1.4 mm, SR-2が5.7 mm, SR-3が1.4 mmの増加であった。なお、本研究で実施した耐水圧試験では、短期条件の材齢1日最大圧力0.085 MPaで破断したPU-2の2体、材齢3日0.1 MPaで風船状の膨れが破断したPU-1を除き、試験中の供試体に接着面からの漏水は確認されなかった。

以上の試験結果から、いずれのシーリング材においても各材齢で0.02 MPa程度の水圧が作用しても膨れが生じるのみであり、破断や漏水といった変状は発生しないことが分かった。しかし、0.02 MPaよりも高い水圧になると、材齢1日では、PU-1, SR-1, SR-2は局所的な風船状の膨れが発生しやすくなり、PU-2は風船状の膨れがなくても破断しやすくなることが分かった。また、材齢3日では、0.1 MPaの水圧作用でPU-1とSR-1は風船状の膨れが生じて破断しやすくなることが分かった。一方、3日間加圧を継続すると、各シーリング材の膨れは増加する傾向にあり、特に低モジュラスで伸び率が高い材料は、膨れの増加率が大きいことが分かった。本試験に使用した材料の中では、SR-3が材齢1日でも風船状の膨れや破断といった変状はなく、各材齢で他のシーリング材よりも膨れが小さいことから、水圧による変形に対して抵抗性が高いことが分かった。

Table 2-4 耐水圧試験結果 (長期条件)

(単位: mm)

材齢	保持時間	PU-1		SR-1		PU-2		SR-2		SR-3	
		平均	最大	平均	最大	平均	最大	平均	最大	平均	最大
3日	3日	3.3	4.4	3.1	4.1	1.7	2.1	6.4	8.0	1.4	3.1
	7日	3.4	4.5	3.0	3.9	2.1	2.6	8.1	10.0	1.5	3.2
	終了1週間後	2.3	3.2	3.0	3.8	0.7	1.0	6.5	8.1	1.4	3.0
7日	3日	1.2	1.8	0.5	0.8	1.8	2.1	5.3	6.7	0.4	2.3
	7日	1.3	1.8	0.5	0.8	2.0	2.4	6.3	7.8	0.6	2.3
	終了1週間後	0.2	0.7	0.5	0.9	0.4	0.6	4.0	5.1	0.4	1.7

## 2.4 結論

本研究では、目地充填工法に使用されるシーリング材を対象に、硬化状態を把握するための引張接着性試験と深部硬化および内部硬化確認試験を実施し、温度条件の違いによるシーリング材の硬化状態を確認した。また、背面水圧の影響を受けて施工後早期にシーリング材に変状が発生する事例があることから、若材齢のシーリング材に背面から水圧を与える耐水圧試験を実施し、変状の発生と止水性への影響について確認した。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) 各シーリング材は低温条件下で硬化速度が低下し、0℃の低温下では23℃よりも1～2週間程度強度発現が遅くなることが分かった。
- (2) 多成分形シーリング材は、1成分形シーリング材よりも強度発現と硬化速度が速く、各シーリング材の硬化速度を比較するとSR-3>PU-2>SR-2>PU-1>SR-1の順であった。
- (3) 材齢1日から7日の若材齢で0.02 MPa程度の水圧が作用しても膨れが生じるのみであり、破断や漏水は生じないことが分かった。しかし、作用水圧が0.02 MPaよりも高くなると、1成分形および2成分形シーリング材は風船状の膨れや破断が生じることが分かった。
- (4) 各シーリング材の膨れは、長時間水圧が作用し続けると、増加することが分かった。特に、低モジュラスで伸び率が大きいシーリング材は、膨れの増加率が大きくなる傾向であった。
- (5) 今回の試験に用いた材料の中では、硬化速度が最も速いSR-3が水圧作用時の膨れが最も小さく、水圧による変形に対して抵抗性が高いことが分かった。

一般的に農業用水路の補修工事は、非灌漑期の冬季に行われることが多く、防寒対策などを行った上ででの施工が必要とされている。しかし、目地の補修箇所が多い水路では施工延長が長大になり工期もかかるため、製造メーカーが推奨する温度（一般に5℃）以上での施工や必要な強度が発現するまでの養生を行うことが困難な場合がある。また、住宅に隣接した水路などでは、暖房器具の騒音問題などにより夜間に暖気養生などの防寒対策が行えない場合もある。本研究の結果から、0℃の低温条件下では、23℃の温度条件よりも硬化が遅くなり、接着強度も低下するものが見られたことから、冬季施工で適切な温度管理が行えない場合を考慮した低温条件下での試験項目が必要であると考えられる。また、現在の開水路補修・補強マニュアルの止水性試験では、23±2℃、50±5%RHで各製品の硬化に要する養生

期間を与えた状態で性能照査が行われており、「漏水がないこと」のみが規定されている。本研究で使用したシーリング材の中には、若材齢時に水圧が作用する場合、シーリング材は膨れや破断が生じやすくなり、長期間水圧が作用すると膨れは増大し、減圧後に元に戻らない材料があることが確認された。同様の事態が実際の水路で発生した場合、通水阻害を引き起こしたり、砂礫などの衝突によって破断し漏水が生じることが想定される。このため、性能照査項目に、若材齢時に発生する膨れや破断に対する抵抗性などを加える必要がある。さらに、目地の伸縮など背面水以外に起因する変状に対しての評価手法の検討が今後の課題であると考えられる。

## 引用文献

- 藤山 宗, 渡部直人, 長野浩一, 伊藤夕樹, 樽屋啓之, 中田 達 (2013) : コンクリート開水路を対象とした水膨張性ゴムによる目地補修工法の止水性と耐久性, 農業農村工学会論文集, **285**, 75-76.
- 加納伸悟, 秋本雅人, 大澤 悟, 平野竜行 (2012) : 海水水槽改修工事におけるシーリング材適応性に関する研究, 日本建築仕上学会 2012 年大会学術講演会研究発表論文集, 40-43.
- 小林正典, 大江郁夫, 増田祐一, 真鍋孝次 (2010) : 高水圧対応シール材の研究, 土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集, VI-242, 483-484.
- Lacasse, M., Miyauchi, H. and Hiemstra, J. (2009) : Water Penetration of Cladding Components—Results from Laboratory Tests on Simulated Sealed Vertical and Horizontal Joints of Wall Cladding, *Journal of ASTM International*, 6(6), 1-21.
- 農林水産省農村振興局整備部設計課 (2015) : 農業水利施設の長寿命化のための手引き  
農林水産省農村振興局整備部設計課施工企画調整室 (2015) : 農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル【開水路補修編】(案)

## 第3章 水路用シーリング材の長期水中耐久性評価

### 3.1 緒論

第2章で述べたように、変状の発生したコンクリート水路の目地部には、目地材の劣化や脱落などにより漏水などを生じている目地を補修する目地補修工法（目地充填工法，目地被覆工法，目地成型ゴム挿入工法）が開発され，適用が進められている．目地補修工法の1つである目地充填工法は，施工時はペースト状であるシーリング材を用いて目地部に充填施工を行う工法である．目地充填工法は施工性と経済性の観点から，大小規模の補修工事に限らず，新設工事の目地部にも使用されている．また，使用するシーリング材は，充填施工後に硬化が進行することで止水機能を発揮する状態に変化し，硬化後はゴム状の弾性体となって部材の膨張や伸縮などの挙動に追従する特徴がある．シーリング材には硬化機構や主成分が異なる種類があり，水路の目地補修に使用されているシーリング材は，ポリウレタン系，変成シリコン系，シリコン系を主成分とした材料が主である．小規模な水路の目地補修では，多面的機能支払交付金による共同活動などにより農家や地域住民の手で簡易補修が行われており，「水路の簡易補修マニュアル」（農研機構農村工学研究所水利施設機能研究室，2008）や「簡易な水路補修の手引き」（全国水土里ネット，2010）では，塗り重ねが可能な建築用1成分変成シリコン系シーリング材の使用が推奨されている．他方，公共事業で行われている目地補修では，開水路補修・補強マニュアルの「目地充填工法に使用する材料・工法の品質規格（例）」において性能が確認されたシーリング材が使用されている（農林水産省農村振興局整備部設計課施工企画調整室，2015）．

建築用シーリング材では，目地の大きな動きに追従させることを目的として， $M_{50}$  が  $0.2 \text{ N/mm}^2$  以下の低モジュラス品が一般的に使用されている．しかし，シーリング材の中には水没状態で吸水膨張するものや背面からの圧力で膨れるものがあることから，開水路補修・補強マニュアルでは，形状安定性に優れた  $M_{50}$  が  $0.2 \text{ N/mm}^2$  以上の中モジュラス以上のシーリング材を用いるとされている．また，要求性能では形状安定性の他に，伸縮追従性，耐候性，標準・水中・低温条件での接着性，長期の水没状態を想定した耐水性（吸水性）の性能照査項目が規定されている．しかし，シーリング材の中には，これらの性能照査項目で品質が確認されていても，施工後数年でひび割れや剥離などの変状が発生する場合がある．シーリング材のひび割れと剥離の例を **Fig. 3-1** に示す．水路に用いられるシーリング材の使用環境は，最低でも灌漑期の約半年間は水没状態となるため，シーリング材の性能は水中環境下でも長期的に維持されることが求められる．特にシーリング材の接着力が低下すると剥



シーリング材のひび割れ



シーリング材の剥離

Fig. 3-1 シーリング材のひび割れと剥離

離する可能性が高くなり、止水性が低下する要因となることから、水中下でも安定した接着性が求められる。開水路補修・補強マニュアルでは、水中下での使用を想定した性能照査項目として、水中浸漬させた供試体に対して、耐水性と接着性試験が行われており、耐水性については吸水率が 10%以下、接着性については伸び率が 60%以上とした規格値が定められている。これらの試験は、作製した供試体を気中条件で、1 成分形シーリング材は  $23 \pm 2$  °C で 14 日、 $30 \pm 2$  °C で 14 日の合計 28 日間、多成分形シーリング材は  $23 \pm 2$  °C で 7 日、 $50 \pm 2$  °C で 7 日の合計 14 日間の養生を行った後、水中に 28 日間浸漬させた条件で行われている。しかし、実際の使用環境は、通水前に必要な養生期間が確保できない場合があり、さらに性能照査の水中条件よりも長い時間水中下に置かれるため、養生時間を短くした場合や 28 日以上水中浸漬でも性能が維持されるかを確認する必要がある。

水中浸漬を 28 日以上行っているシーリング材の耐久性研究に関して、久保田ら (2011) は、外装タイル張りに使用する 1 成分形変成シリコン系接着剤の試験体に対して、「20 °C の水中に 5 時間浸漬 → -20 °C の気中に 19 時間設置 → 80 °C の気中に 18 時間設置」を 1 サイクルとした温冷繰返し試験を 300 サイクル (水中浸漬累計 62.5 日、-20 °C 気中設置累計 237.5 日、80 °C 気中設置累計 225 日) 実施し、銘柄によらず引張接着強度は 100 サイクルで上がり、300 サイクルで下がる傾向があると報告している。また、片岡・小川 (2015) は、20 °C と 60 °C の水温条件で 91 日間の水中浸漬を行い、外装タイル用の建築用 1 成分形変成シリコン系接着剤は、長期的に引張強さと伸び率が低下する傾向にあり、水温が高いほど顕著になると報告している。これらの先行研究では、主に建築用外装タイル張りに用い

る変成シリコン系シーリング材に着目して耐久性の確認が行われており、他の種類のシーリング材についての研究は行われていない。

一方、森（2019）は、農業用水路の目地補修に着目し、建築用 1 成分形変成シリコン系シーリング材、建築用 1 成分形ポリウレタン系シーリング材、土木用 1 成分形ポリウレタン系シーリング材を用いて作製した供試体について 1 年間の水中浸漬後に引張接着性試験を行った結果、建築用 1 成分形変成シリコン系シーリング材は引張接着強度、 $M_{50}$ 、伸び率が水中浸漬前の値の 10%以下まで低下したと報告している。また、変成シリコン系シーリング材の短期間における水中浸漬の影響を確認するため、3 種類の建築用 1 成分形変成シリコン系シーリング材と 1 種類の 2 成分形変成シリコン系シーリング材を用いて作製した供試体について、7～56 日の水中浸漬後に引張接着性試験や引張試験を行った結果、試験に用いたすべての建築用 1 成分形変成シリコン系シーリング材が水中浸漬後 7 日で引張接着強度、 $M_{50}$ 、引張強度が水中浸漬前の値の 50～60%程度まで低下し、付着性能の低下やシーリング材自体の劣化が急激に進んだと報告している。しかし、この研究では、供試体の水中浸漬前の気中養生期間を 28 日としているが、実水路のように十分な気中養生期間を確保できず、施工後数日で水中下に置かれる場合のシーリング材への影響について検討が行われていない。また、研究の対象のほとんどが建築用シーリング材であり、近年水路の目地補修用に開発されたシリコン系シーリング材や変成シリコン系シーリング材などを対象にした耐久性に関する研究は行われていない。

そこで本研究では、現在水路補修に用いられている各種の水路用シーリング材を対象に、従来の性能照査条件よりも長い時間水中浸漬させた条件や短い気中養生期間後に水中浸漬させた条件で各種試験を行った。開水路補修・補強マニュアルでは、シーリング材は吸水によって膨張すると水の流れの妨げになるとともに、水や砂によって削り取られるおそれがあるとされていることから、耐水性試験を実施し、吸水率とともにシーリング材の体積変化を確認した。また、長期間の水中浸漬によるシーリング材自体の劣化状況を確認するための引張試験やシーリング材の接着性の変化を確認するための引張接着性試験を行い、シーリング材の水中耐久性を評価した。

## 3.2 試験内容

### 3.2.1 試験材料と供試体の作製

本試験に使用したシーリング材は、水路の目地充填工法に使用されている、1成分形変成シリコーン系シーリング材（以下、「MS-1」という）、2成分形変成シリコーン系シーリング材（以下、「MS-2」という）、1成分形シリコーン系シーリング材（以下、「SR-1」という）、3成分形シリコーン系シーリング材（以下、「SR-3」という）、1成分形ポリウレタン系シーリング材（以下、「PU-1」という）、2成分形ポリウレタン系シーリング材（以下、「PU-2」という）をそれぞれ1種類ずつ用意した。なお、各シーリング材は $M_{50}$ が $0.2\text{ N/mm}^2$ 以上の中モジュラス以上の製品を用いた。試験材料の一覧を **Table 3-1** に示す。

耐水性試験の供試体は、開水路補修・補強マニュアルで規定されているダンベル状2号形（以下、「ダンベル供試体」という）で作製した（**Fig. 3-2 (b)**）。作製に用いた型枠は、2mm厚の平板を幅170mm、長さ250mmの長方形に組み上げたものを使用した。各シーリング材の充填は、幅広のヘラを2mm厚の平板に押し付けて平滑に均して充填した。充填したシーリング材は3日後に型枠から取り外し、専用の形状刃を用いて押し抜いて供試体を作製した。供試体は、各シーリング材の材齢と水中浸漬条件ごとに3体ずつ作製した。ここで、ダンベル供試体は厚さ2mmと薄い形状であるため、保有する水中質量計測器の皿上でたわみ、水槽内面に接触するため、水中下での質量計測ができなかった。このため、体積変化の確認用の直方体供試体を幅12mm、長さ50mm、厚さ5mmの寸法で作製した（**Fig. 3-2 (a)**）。直方体供試体の作製では、長さ1,000mm、厚さ5mmの角材2本を12mmの間隔で平行に設置した型枠を使用した。各シーリング材の充填後、3日後に型枠から取り外し、カッター

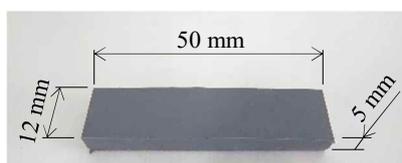
**Table 3-1** 試験材料

種類	材料名	主成分	形式	硬化機構
MS	MS-1	変成シリコーン	1成分	湿気反応
	MS-2	変成シリコーン	2成分	混合反応
SR	SR-1	シリコーン	1成分	湿気反応
	SR-3	シリコーン	3成分	混合反応
PU	PU-1	ポリウレタン	1成分	湿気反応
	PU-2	ポリウレタン	2成分	混合反応

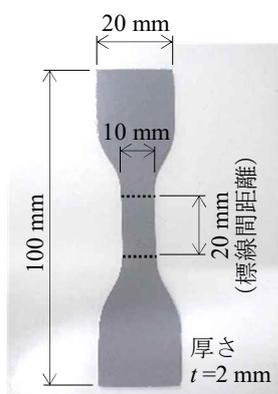
ナイフで長さ 50 mm ごとに切断して供試体を作製した。供試体は、各シーリング材の材齢ごとに 3 体ずつ作製した。

引張試験の供試体は、シーリング材自体の引張特性を確認するため、JIS K 6251 : 2017「加硫ゴム及び熱可塑性ゴム-引張特性の求め方」のダンベル状試験片より、ダンベル状 2 号形とした (Fig. 3-2 (b))。ここで、供試体の形状は、開水路補修・補強マニュアルの耐水性試験で用いられる供試体がダンベル状 2 号形であるため、同形状を参考に選定した。なお、本試験の供試体は、上述の耐水性試験用ダンベル供試体を兼用した。

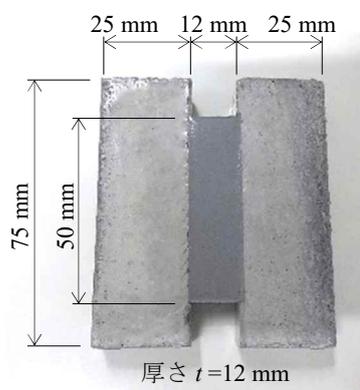
引張接着性試験の供試体は、JIS A 1439 : 2016「建築用シーリング材の試験方法」の引張接着性試験を参考に、ISO 形モルタル被着体 (幅 25 mm, 長さ 75 mm, 厚さ 12 mm) を用いて幅 12 mm, 長さ 50 mm, 厚さ 12 mm の寸法でシーリング材を充填して作製した (Fig. 3-2 (c))。シーリング材の充填前にモルタル被着体の接着面をワイヤーブラシで研掃を行い、各シーリング材の専用プライマーを塗り残し防止のため 2 回塗布した。その後、モルタル被着体 2 枚を幅 12 mm, 厚さ 12 mm のスペーサーを用いて固定し、シーリング材を充填して供試体を作製した。スペーサーの取り外しは、各材齢の水中浸漬前に行った。供試体は、各シーリング材の材齢と水中浸漬条件ごとに 3 体ずつ作製した。



(a) 耐水供試体 (直方体)



(b) 耐水・引張供試体



(c) 引張接着供試体

Fig. 3-2 供試体の形状

### 3.2.2 供試体の養生と試験方法

いずれの試験においても、供試体は室内気中で3、7、14、28日間の材齢まで硬化養生を行った後に、耐水性試験、引張試験、引張接着性試験を行い、水中浸漬前の初期値とした。次に、各材齢経過後に耐水性試験、引張試験、引張接着性試験の供試体を水張りしたバット内に完全に水没した状態で静置し、3、7、14、28、56、91、182、364日後に水から引き上げて各試験を行った。供試体の水中浸漬状況を **Fig. 3-3** に示す。水中浸漬には水道水を用い、バット内の水の温度は  $20 \pm 5$  °C の範囲で室温に応じて変化している。また、バット内の水は、一定の水位になるように都度注ぎ足しを行った。なお、水上げ後から試験完了までの時間は、耐水性試験については10分以内、引張試験および引張接着性試験については1時間以内とした。



耐水・引張供試体



引張接着供試体

**Fig. 3-3** 供試体の水中浸漬状況

耐水性試験では、精密デジタル秤（島津製作所，AP324X，最小表示 0.1 mg）を用いて供試体の質量計測を行い，初期値からの変化率を算出することにより吸水性と体積変化を確認した．吸水性については，水中浸漬後の供試体質量を計測して初期値からの変化量を求め，式（3-1）により吸水率を算出した．体積変化については，精密デジタル秤に専用の簡易比重測定器具（島津製作所，SMK-601）を設置して，供試体の空气中質量と水中質量との差を求め，初期値からの体積変化率を式（3-2）により算出した．なお，体積変化を確認する供試体形状はダンベル供試体と異なるため，体積変化を確認する供試体についても吸水率を算出した．

$$\Delta m = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (3-1)$$

$$\Delta V = \frac{(m_2 - m_4) - (m_1 - m_3)}{m_1 - m_3} \times 100 \quad (3-2)$$

ここで， $\Delta m$ ：吸水率（%）， $\Delta V$ ：体積変化率（%）， $m_1$ ：空气中で計測した水中浸漬前の供試体質量（g）， $m_2$ ：空气中で計測した水中浸漬後の供試体質量（g）， $m_3$ ：水中で計測した水中浸漬前の供試体質量（g）， $m_4$ ：水中で計測した水中浸漬後の供試体質量（g）である．試験の計測値は供試体 3 体の平均値で算出した．耐水性試験における質量計測状況を **Fig. 3-4** に示す．



**Fig. 3-4** 耐水性試験における質量計測状況

引張試験については、試験開始前に伸び計測で使用する標線を供試体に罫書き、標線間3点の平均厚さを求めて計測に用いる断面積を算出した。引張試験の載荷速度は JIS K 6251 : 2017「加硫ゴム及び熱可塑性ゴム-引張特性の求め方」に準じて、500 mm/min の速度で行った。計測項目は、 $M_{50}$  (N/mm<sup>2</sup>),  $T_{\max}$  (N/mm<sup>2</sup>),  $E_{\max}$  (%) を確認した。 $E_{\max}$  の計測は、軟質材用長ストローク接触式変位計（島津製作所, DSES-1000, 最大移動距離 1,000 mm, 相対精度±0.2%）を用いて標線間の伸びを計測した。引張試験の  $M_{50}$ ,  $T_{\max}$ ,  $E_{\max}$  は、式 (3-3), (3-4), (3-5) によりそれぞれ算出した。

$$M_{50} = \frac{P_{50}}{A_1} \quad (3-3)$$

$$T_{\max} = \frac{P_{\max}}{A_1} \quad (3-4)$$

$$E_{\max} = \frac{L_{\max1}}{L_{s1}} \times 100 \quad (3-5)$$

ここで、 $P_{50}$  : 標線間の伸び率が 50% のときの荷重 (N),  $P_{\max}$  : 最大荷重 (N),  $A_1$  : 標線間の供試体断面積 (mm<sup>2</sup>),  $L_{\max1}$  : 最大荷重時の標線間伸び (mm),  $L_{s1}$  : 試験前の標線間距離 (20 mm) である。試験の計測値は供試体 3 体の平均値で算出した。

引張接着性試験は、JIS A 1439 : 2016「建築用シーリング材の試験方法」に準じて 50 mm/min の載荷速度で試験を行った。計測項目は、 $M_{50}$ ,  $T_{\max}$ ,  $E_{\max}$  と破断時の破壊形態を確認した。引張接着性試験の  $M_{50}$ ,  $T_{\max}$ ,  $E_{\max}$  は、式 (3-6), (3-7), (3-8) によりそれぞれ算出した。

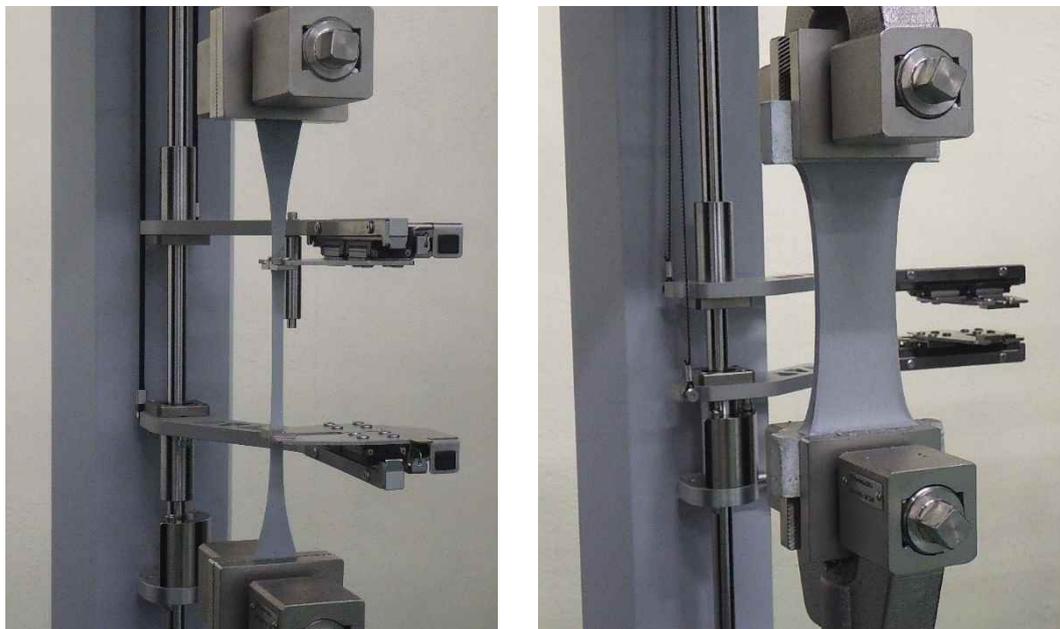
$$M_{50} = \frac{P_{50}}{A_2} \quad (3-6)$$

$$T_{\max} = \frac{P_{\max}}{A_2} \quad (3-7)$$

$$E_{\max} = \frac{L_{\max 2}}{L_{s2}} \times 100 \quad (3-8)$$

ここで、 $P_{50}$ ：目地間の伸び率が50%のときの荷重 (N)、 $P_{\max}$ ：最大荷重 (N)、 $A_2$ ：シーリング材の接着面積 (600 mm<sup>2</sup>)、 $L_{\max 2}$ ：最大荷重時の目地間伸び (mm)、 $L_{s2}$ ：試験前の目地幅 (mm) である。試験の計測値は供試体3体の平均値で算出した。また、 $E_{\max}$  が50%以下となり、 $M_{50}$  の算出ができない場合は、 $T_{\max}$  の計測値を  $M_{50}$  に用いた。引張試験と引張接着性試験の状況を **Fig. 3-5** に示す。なお、引張試験と引張接着性試験は、精密万能試験機（島津製作所、オートグラフ AG-X plus）を用いて行った。

破断時の破壊形態は、シーリング材の内部で破断する「凝集破壊」(以下、「CF」という)、モルタル被着体の表面にシーリング材が薄く残って破断する「薄層凝集破壊」(以下、「TCF」という)、モルタル被着体の界面で剥離する「界面破壊」(以下、「AF」という) の3種類で判定し、接着面積に占める破壊形態の割合で評価した。



引張試験

引張接着性試験

**Fig. 3-5** 試験時の状況

### 3.3 試験結果

#### 3.3.1 耐水性試験

Fig. 3-6 にダンベル供試体における耐水性試験の結果を、Fig. 3-7 に直方体供試体における耐水性試験の結果を示す。なお、Fig. 3-7 に示した材齢3日のSR-1, SR-3, PU-1, PU-2は初期値計測時から硬化反応によって質量が減少したため、吸水率と体積変化率がマイナス側で推移した。水中浸漬後の各シーリング材は時間経過によって吸水率と体積変化率が大きくなり、ほとんどのシーリング材で養生材齢日数が長いほど吸水率と体積変化率が大き

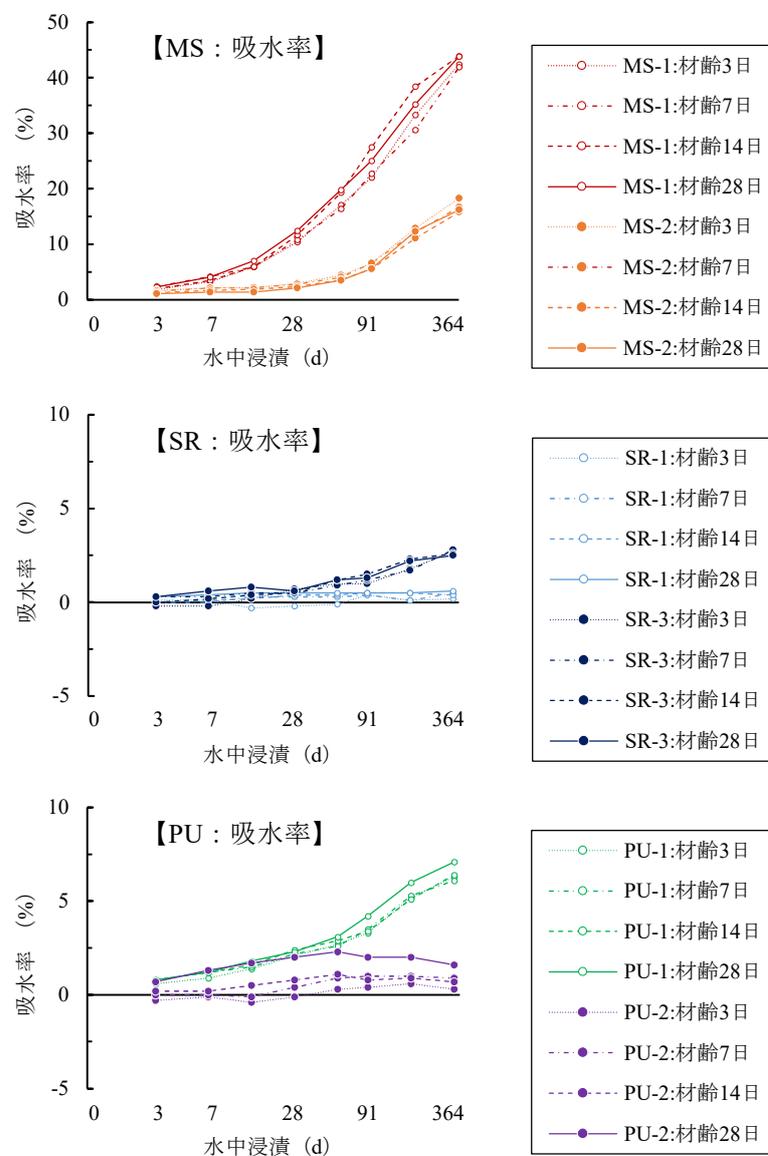


Fig. 3-6 ダンベル供試体の耐水性試験結果

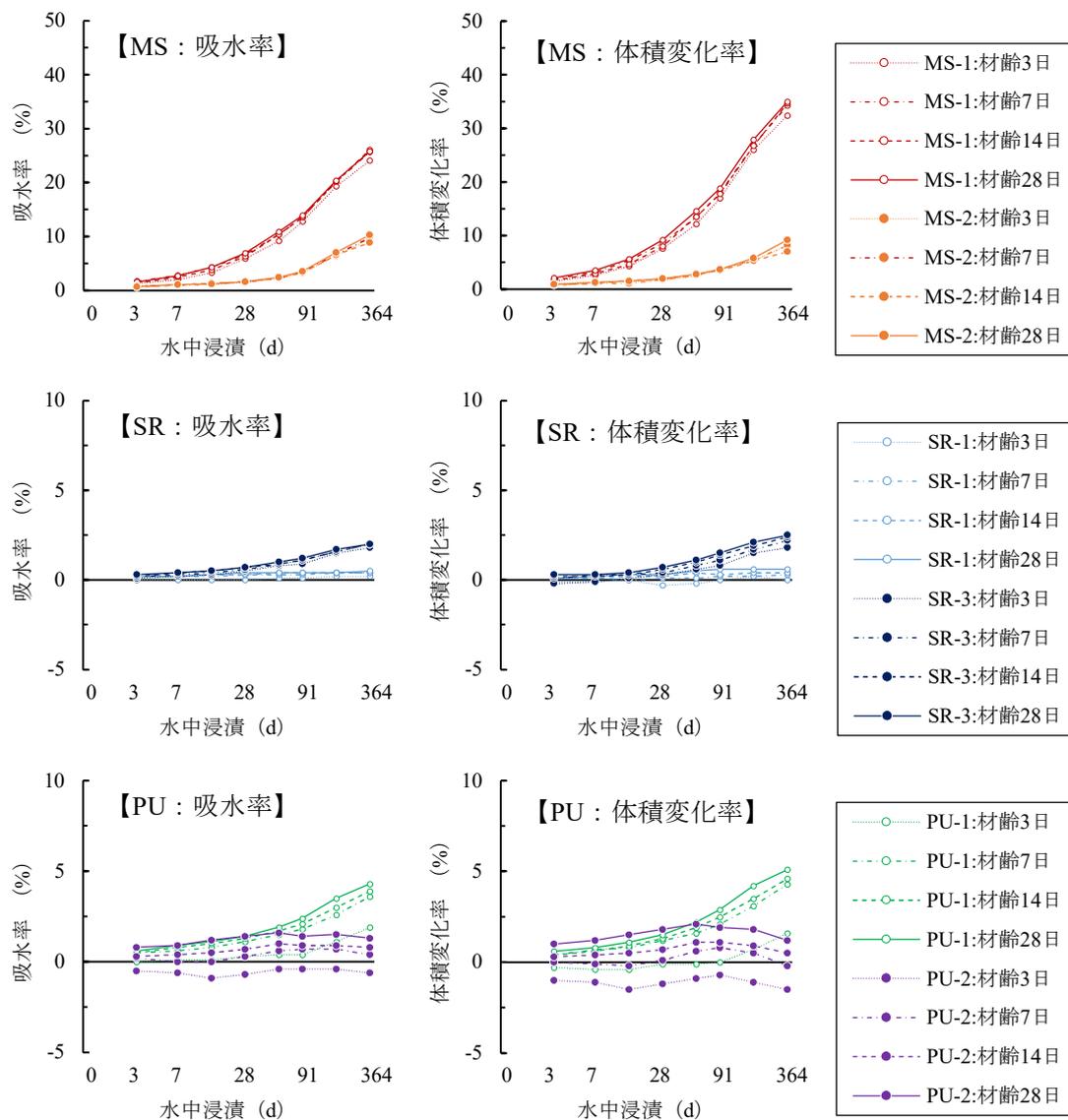


Fig. 3-7 直方体供試体の耐水性試験結果

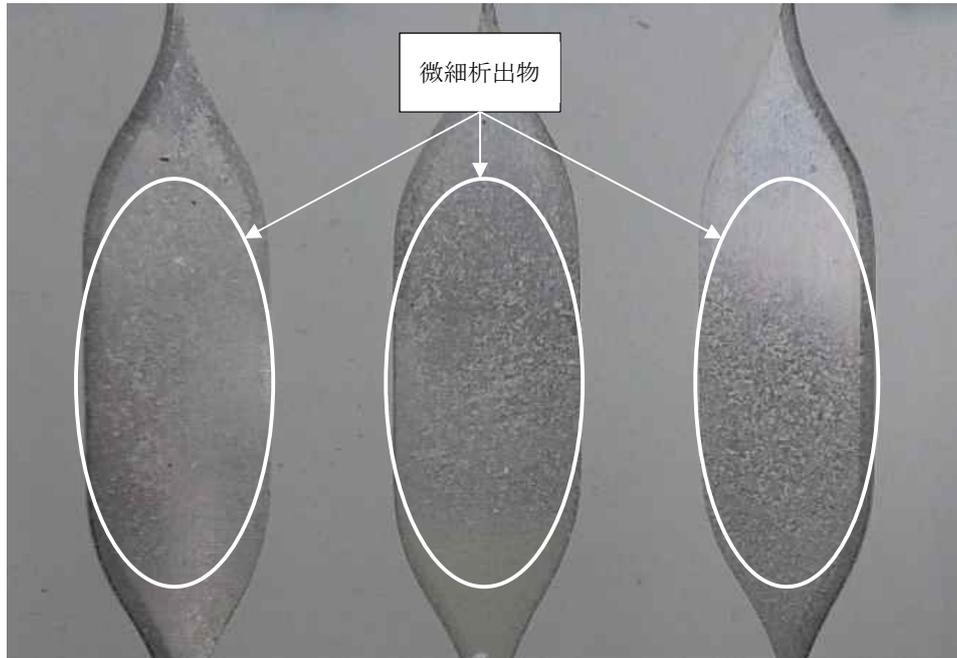
くなる傾向が見られた。また、吸水率は供試体形状の違いで異なり、各シーリング材ともダンベル供試体で計測した吸水率の方が大きくなった。種類別では、変成シリコーン系 (MS) の吸水率と体積変化率が最も大きく、次いでポリウレタン系 (PU)、シリコーン系 (SR) の順であった。MS-1 のダンベル供試体では、各材齢とも水中浸漬 28 日で吸水率が 10%以上となり、開水路補修・補強マニュアルの規定値を上回る結果であった。さらに、364 日経過後の吸水率は 40%以上となり、供試体の形状は全体が大きく膨らみ、長さが 10 mm 以上伸長した。Fig. 3-8 に 364 日経過後の MS-1 の長さ変化を示す。また、直方体供試体では水中



Fig. 3-8 ダンベル供試体の長さ変化 (MS-1)

浸漬 364 日で吸水率は 20%以上，体積変化率は 30%以上となった．MS-2 のダンベル供試体では，吸水率は各材齢とも 182 日経過後に 10%を上回った．さらに，364 日経過後は 15%以上となり，供試体の形状は長さが 5 mm 以上伸長した．直方体供試体では水中浸漬 364 日で吸水率は 9%以上，体積変化率は 7%以上となった．SR-1，SR-3，PU-2 は吸水率が小さく，ダンベル供試体では各材齢とも SR-1 は 1.0%以下，SR-3 は 3.0%以下，PU-2 は 2.0%以下であった．直方体供試体での吸水率および体積変化率は，いずれも SR-1 は 1.0%以下，SR-3 は 2.5%以下，PU-2 は 2.5%以下であった．PU-1 は，SR-1，SR-3，PU-2 よりも吸水率が大きく，水中浸漬 364 日でダンベル供試体は 7.5%程度に，直方体供試体の吸水率と体積変化率は 5.0%程度となった．

一方，PU-2 の吸水率は，水中浸漬 56 日までは各供試体とも増加したが，91 日経過後からわずかではあるが徐々に低下し，体積変化率も同様に低下した．これは，PU-2 を静置したバット内の水が，時間経過によって白色に濁り，Fig. 3-9 に示す微細な白い析出物が多数確認されたことから，材料内の成分が加水分解していると思われ，吸水量より成分の分解量が大きいため質量が減少したと考えられる．同様に水の変色はMS-1 と PU-1 にも確認され，茶褐色に変色していた．また，MS-2 と PU-1 は透明なゲル状成分が供試体全体に付着して



**Fig. 3-9** 水中の微細な析出物 (PU-2)

いたことから、水の影響で材料内の成分が分解されて溶出したと考えられる。

以上の試験結果から、本試験に用いた2種類の変成シリコン系シーリング材は、長期間の水中浸漬で吸水率が大きくなり、他の材料よりも耐水性に劣ることが分かった。特にMS-1は体積変化率もかなり大きくなる傾向が確認されたことから、実際の水路で使用した場合、水路の流水面側に凸状に膨張する可能性があり、水流の妨げやシーリング材自体の損傷につながることを考えられる。

### 3.3.2 引張試験

Fig. 3-10 に変成シリコン系 (MS), Fig. 3-11 にシリコン系 (SR), Fig. 3-12 にポリウレタン系 (PU) の引張試験の結果を示す. 各グラフ横軸の水中浸漬 0 日は, 水中浸漬前の

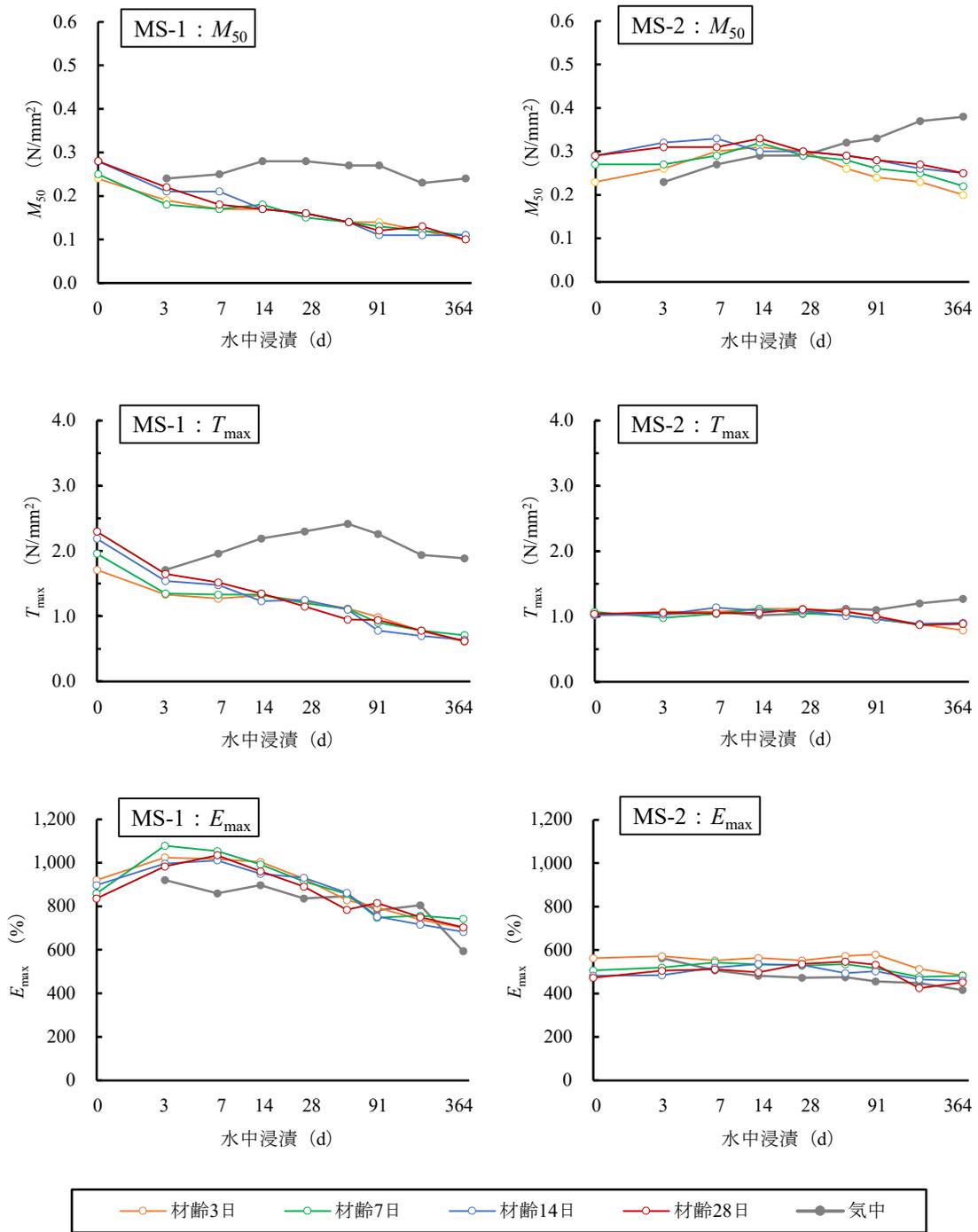


Fig. 3-10 変成シリコン系シーリング材 (MS) の引張試験結果

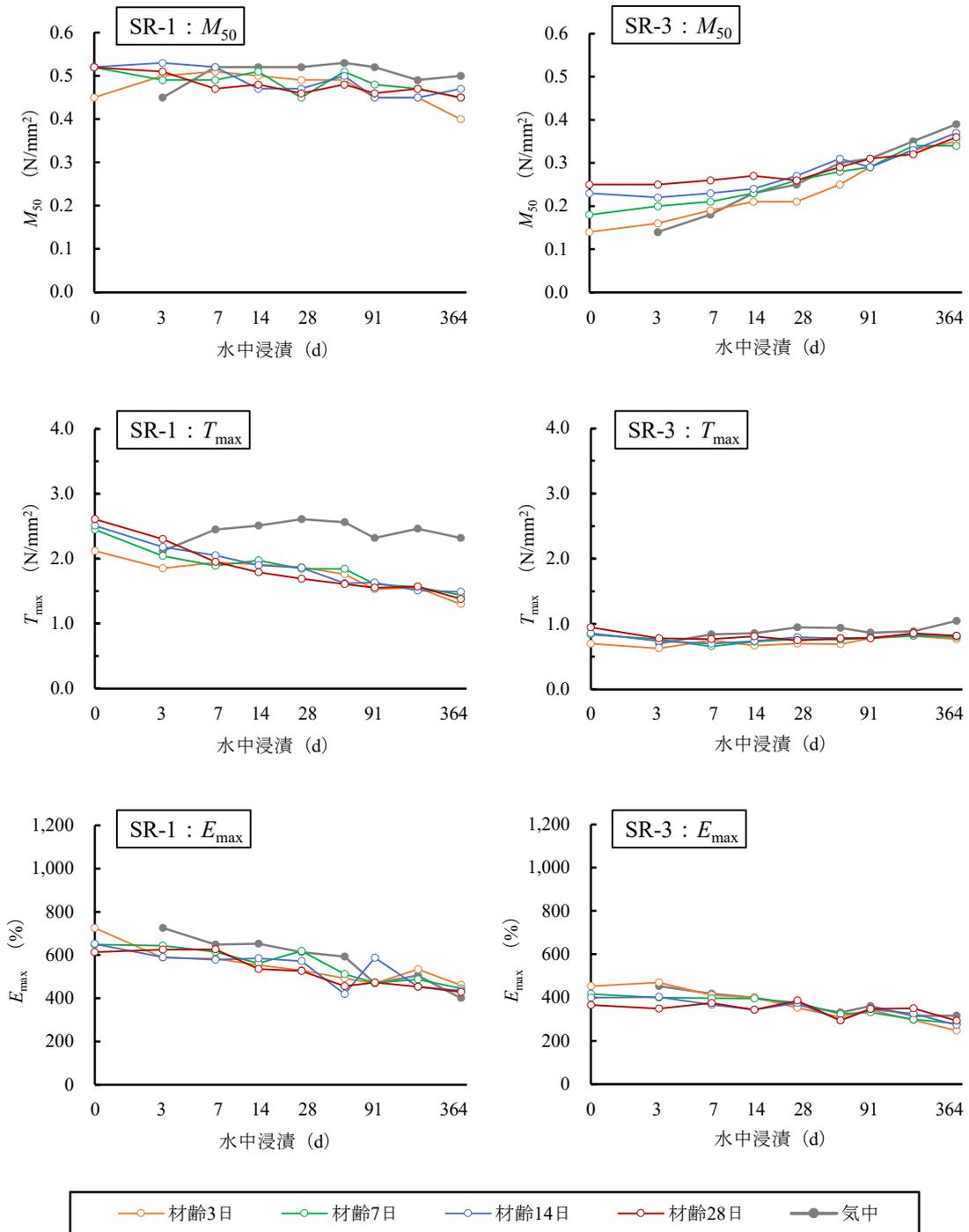


Fig. 3-11 シリコン系シーリング材 (SR) の引張試験結果

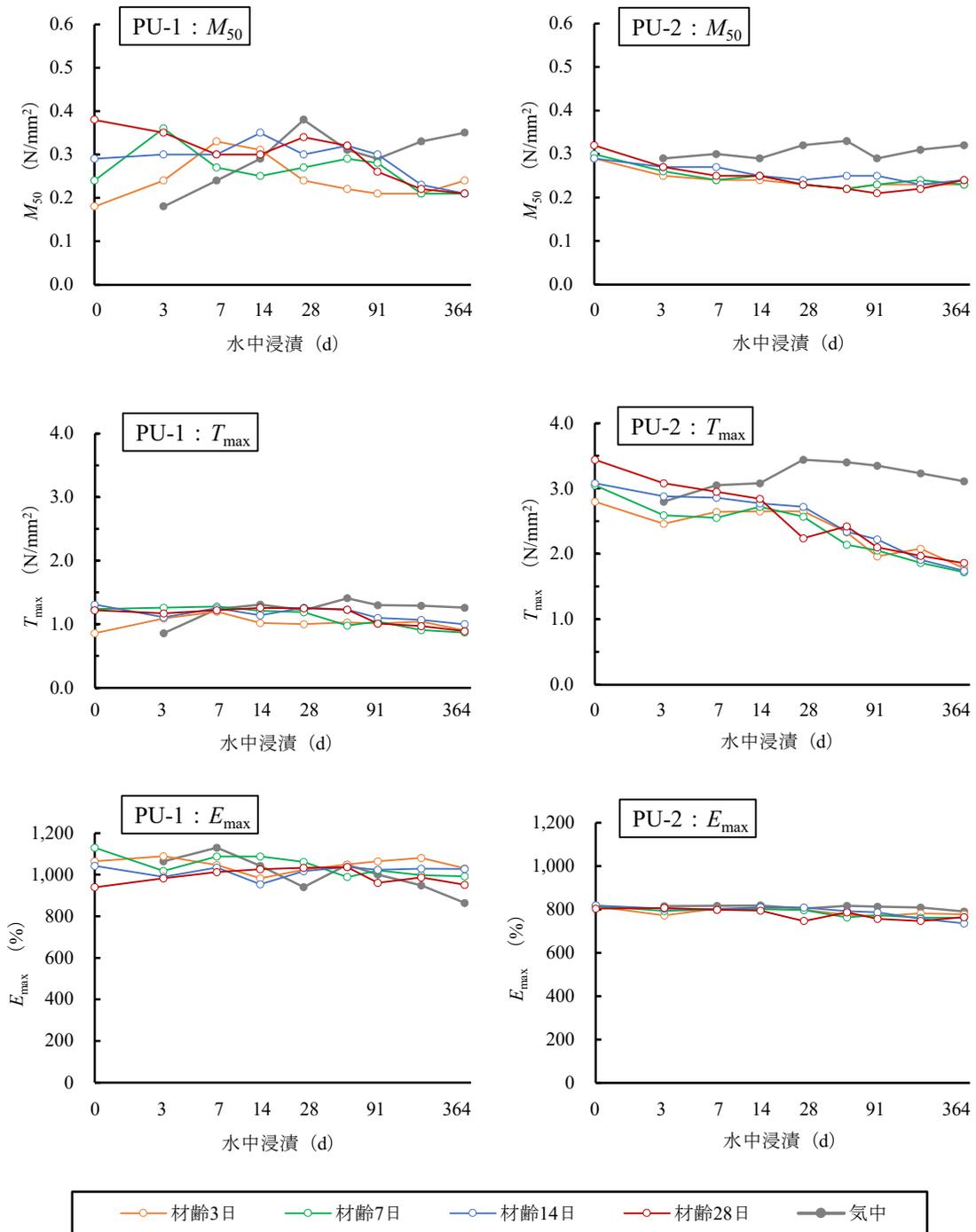


Fig. 3-12 ポリウレタン系シーリング材 (PU) の引張試験結果

試験値を、凡例の「気中」は気中条件で、3, 7, 14, 28, 56, 91, 182, 364 日の養生を行った供試体で、各材齢経過後に引張試験を行った試験値を示す。各シーリング材とも、養生材齢日数が短い供試体は、水中浸漬後の  $M_{50}$  と  $T_{max}$  は小さくなり、 $E_{max}$  は大きくなる傾向を示した。MS-1 と PU-2 は、水中浸漬後から  $M_{50}$  と  $T_{max}$  が徐々に低下した。特に、MS-1 の低下は大きく、各材齢とも  $M_{50}$  は水中浸漬 14 日で  $0.2 \text{ N/mm}^2$  以下となり、364 日経過後は  $0.1 \text{ N/mm}^2$  程度まで低下した。また、 $T_{max}$  も大きく低下し、水中浸漬前に  $2.0 \text{ N/mm}^2$  程度あった引張強さが、364 日経過後には  $0.6 \text{ N/mm}^2$  程度まで低下した。PU-2 は、 $T_{max}$  の低下が大きく、水中浸漬前に  $3.0 \text{ N/mm}^2$  程度あったが、364 日経過後に  $1.8 \text{ N/mm}^2$  程度まで低下した。MS-2 の  $M_{50}$  と  $T_{max}$  は、水中浸漬 28 日まで横這いに推移したが、56 日以降から徐々に低下した。SR-3 は水中浸漬後も  $M_{50}$  が増加したが、 $T_{max}$  は水中浸漬の初期段階で低下した。しかし、その後の  $T_{max}$  は横這いに推移する結果となり、変化が少ない結果であった。Table 3-2 に引張試験における材齢 28 日供試体の水中浸漬 364 日後の引張特性の低下率を示す。なお、低下率は、水中浸漬後の試験値から水中浸漬前の初期値を差し引きして得られた値を初期値で除して算出した。

供試体の伸びについては、気中条件よりも伸びが小さくなるものと、伸びが大きくなるものに分かれた。耐水性試験において吸水率が小さかった SR-1, SR-3, PU-2 は、気中条件と比較すると伸びは若干小さくなった。一方、吸水率の大きい MS-1, MS-2, PU-1 は気中条件よりも伸びが若干大きくなる傾向を示した。しかし、いずれも気中条件と比較して伸びの変化はわずかであり、長期間の水中浸漬が伸び性能に与える影響は少ないと考えられる。

Table 3-2 引張試験における水中浸漬後の低下率  
(材齢 28 日, 水中浸漬 364 日)

材料名	$M_{50}$	$T_{max}$	$E_{max}$
MS-1	-64%	-73%	-16%
MS-2	-14%	-14%	-4%
SR-1	-13%	-47%	-30%
SR-3	+44%	-14%	-20%
PU-1	-45%	-27%	+1%
PU-2	-25%	-46%	-5%

### 3.3.3 引張接着性試験

Fig. 3-13 に変成シリコン系 (MS), Fig. 3-14 にシリコン系 (SR), Fig. 3-15 にポリウレタン系 (PU) の引張接着性試験の結果を示す. 各グラフ横軸の水中浸漬 0 日は水中浸漬

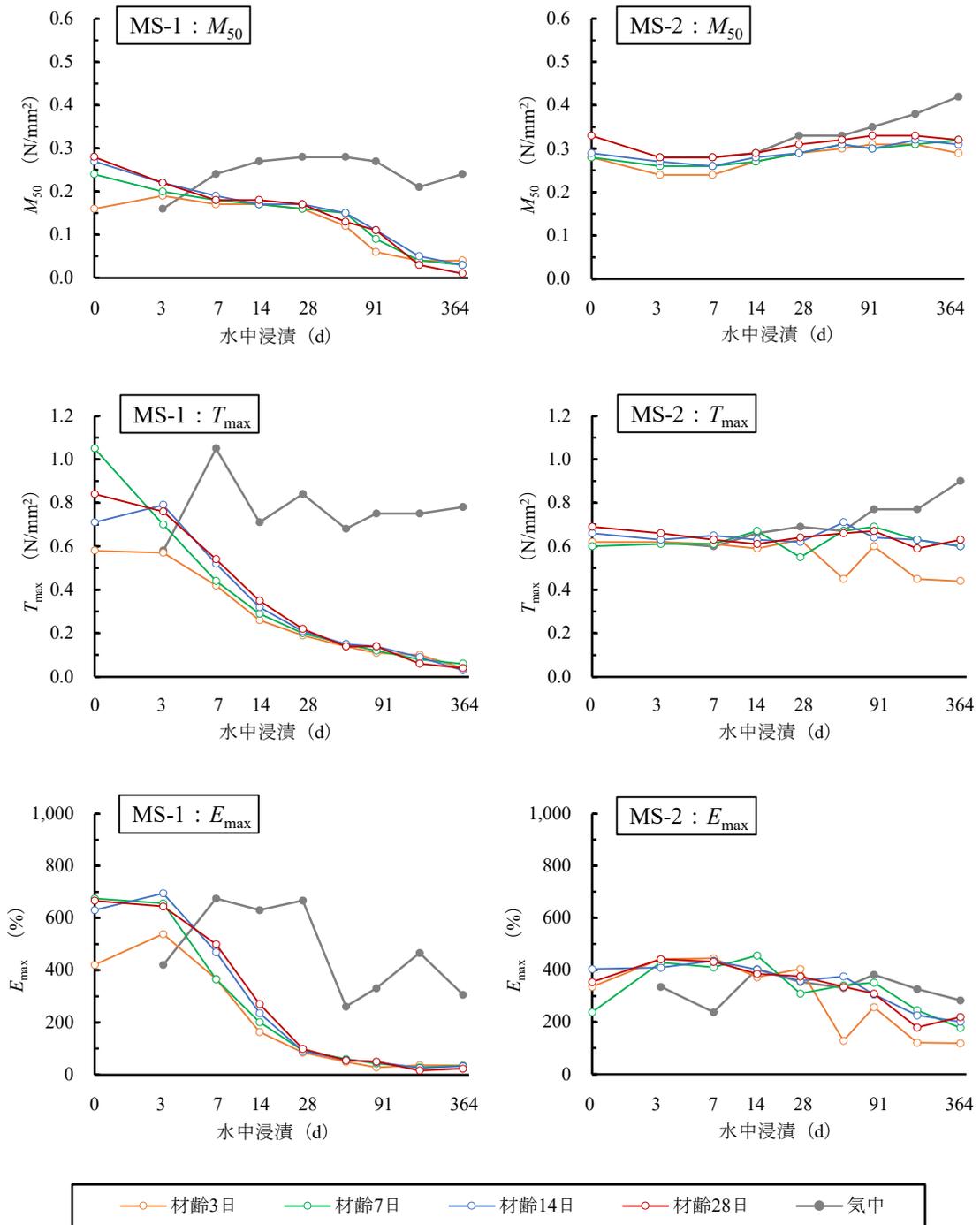


Fig. 3-13 変成シリコン系シーリング材 (MS) の引張接着性試験結果

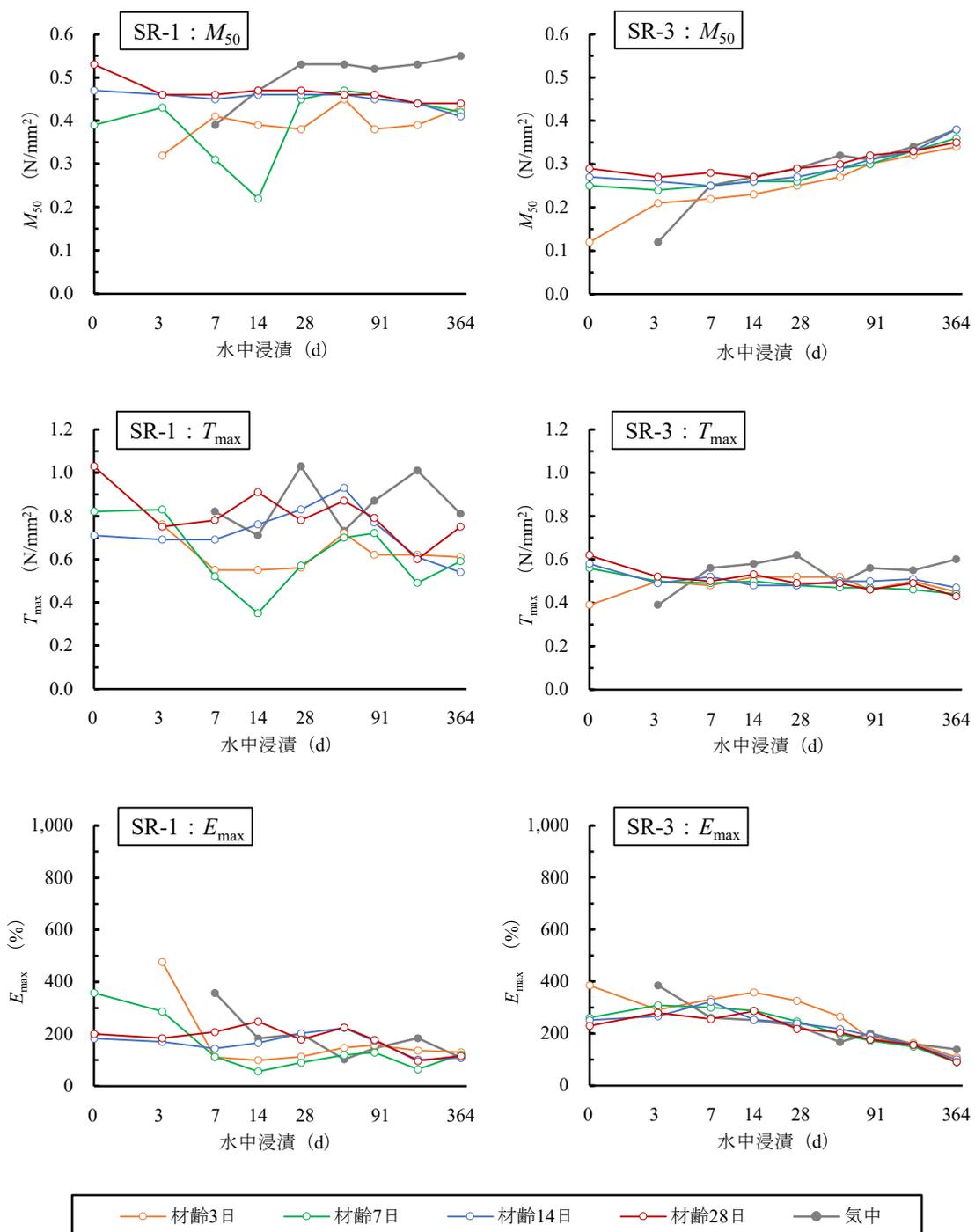


Fig. 3-14 シリコン系シーリング材 (SR) の引張接着性試験結果

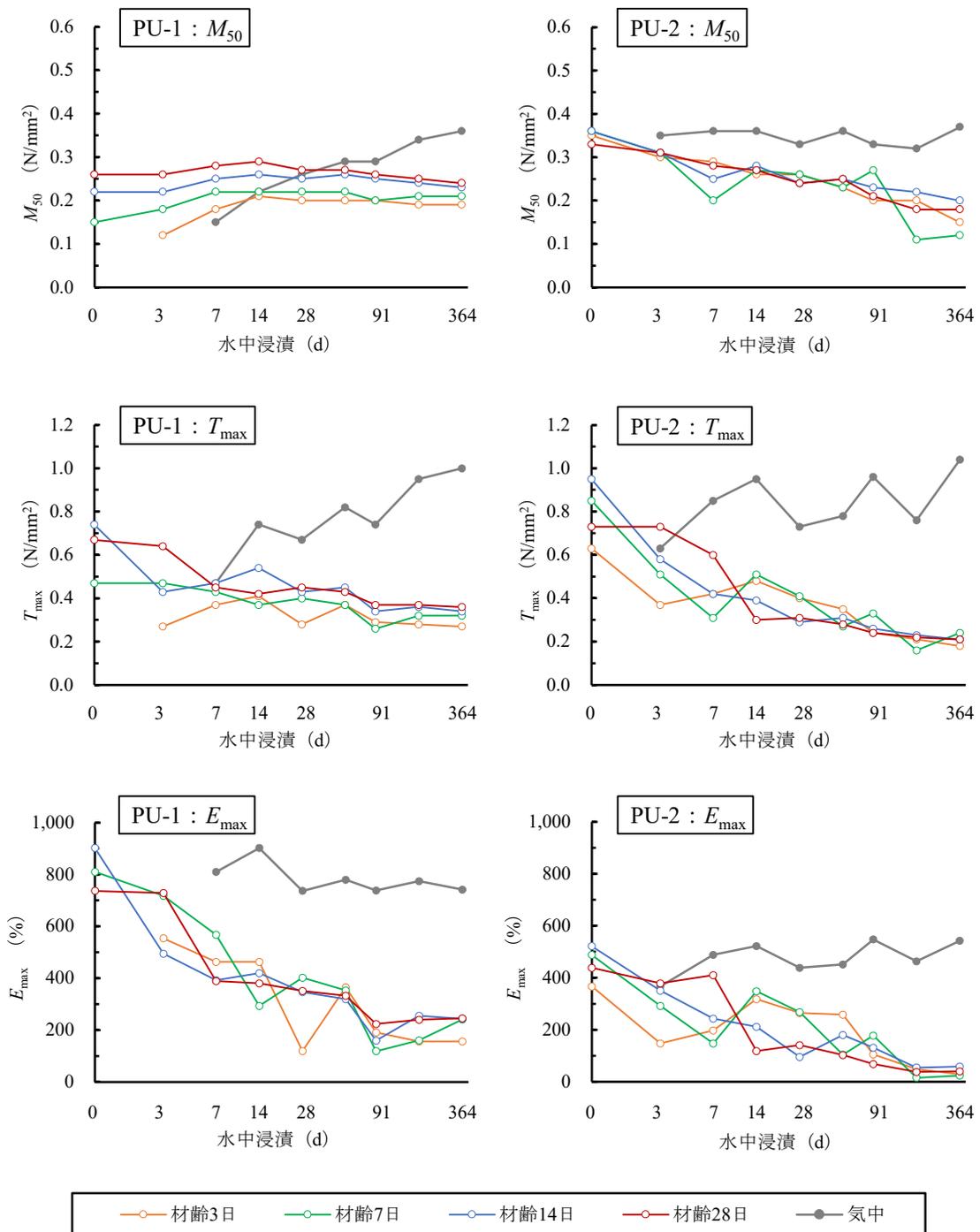


Fig. 3-15 ポリウレタン系シーリング材 (PU) の引張接着性試験結果

前の試験値を、凡例の「気中」は気中条件で、3, 7, 14, 28, 56, 91, 182, 364 日の養生を行った供試体で、各材齢経過後に引張接着性試験を行った試験値を示す。なお、SR-1 と PU-1 は、材齢 3 日の段階では未硬化状態であったため、水中浸漬前の試験を行うことができなかった。

各シーリング材について、養生材齢日数が短い供試体は、水中浸漬後の  $M_{50}$  と  $T_{max}$  は小さくなる傾向を示した。MS-1 と PU-2 は、水中浸漬後から  $M_{50}$  と  $T_{max}$  が徐々に低下した。特に MS-1 の低下が大きく、各材齢とも  $M_{50}$  は水中浸漬 7 日、 $T_{max}$  は水中浸漬 56 日で  $0.2 \text{ N/mm}^2$  以下となった。また、MS-1 は、各材齢とも 182 日経過で  $E_{max}$  は 50%以下となり、 $M_{50}$  と  $T_{max}$  が  $0.1 \text{ N/mm}^2$  以下まで低下した。PU-2 は、水中浸漬 182 日で  $E_{max}$  が 50%以下となる供試体があり、 $M_{50}$  が  $0.2 \text{ N/mm}^2$  程度まで低下した。さらに、364 日経過で  $M_{50}$  は  $0.2 \text{ N/mm}^2$  以下となり、 $T_{max}$  は  $0.2 \text{ N/mm}^2$  程度まで低下した。MS-1 と PU-2 の水中浸漬前からの低下率は他の材料と比較して大きく、材齢 28 日の供試体では、MS-1 は  $M_{50}$  が-96%、 $T_{max}$  が-95%、PU-2 は  $M_{50}$  が-45%、 $T_{max}$  が-71%となり、長期間の水中浸漬で  $M_{50}$  と  $T_{max}$  が大きく低下する結果であった。Table 3-3 に引張接着性試験における材齢 28 日供試体の水中浸漬 364 日後の引張接着特性の低下率を示す。一方、PU-1 は水中浸漬後も  $M_{50}$  が徐々に増加する傾向を示したが、28 日経過後から緩やかに低下したため、 $M_{50}$  の低下率は-8%と小さい値となった。しかし、 $T_{max}$  は水中浸漬後から低下を続け、364 日経過で-46%まで低下した。MS-2, SR-1, SR-3 は、水中浸漬後から  $M_{50}$  と  $T_{max}$  が低下する傾向を示したが、その後は横這いに推移し変化が小さい結果であった。

Table 3-3 引張接着性試験における水中浸漬後の低下率  
(材齢 28 日, 水中浸漬 364 日)

材料名	$M_{50}$	$T_{max}$	$E_{max}$
MS-1	-96%	-95%	-97%
MS-2	-3%	-9%	-38%
SR-1	-17%	-27%	-42%
SR-3	+21%	-31%	-60%
PU-1	-8%	-46%	-67%
PU-2	-45%	-71%	-91%

供試体の伸びについては、MS-1 と PU-2 の  $E_{max}$  は、各材齢とも MS-1 は水中浸漬 56 日、PU-2 は水中浸漬 182 日で開水路補修・補強マニュアルの規格値 60% を下回る結果であった。材齢 28 日の供試体の水中浸漬前からの  $E_{max}$  の低下率は、Table 3-3 に示すとおり、MS-1 は -97%、PU-2 は -91% となり、長期間の水中浸漬で伸びが大きく低下する結果であった。また、PU-1 の  $E_{max}$  の低下率は -67% まで低下し、気中条件と比較すると伸びの低下が大きくなった。一方、MS-2、SR-1、SR-3 の  $E_{max}$  の低下率は、MS-2 は -38%、SR-1 は -42%、SR-3 は -60% であったが、気中条件の  $E_{max}$  も同様に低下する傾向を示しており、水中浸漬による接着力への影響は小さいと考えられる。

Fig. 3-16 に変成シリコン系 (MS)、Fig. 3-17 にシリコン系 (SR)、Fig. 3-18 にポリウレタン系 (PU) の破断割合を示す。MS-1、PU-1、PU-2 の破断形態は、水中浸漬後からほぼ AF となり、14 日経過後から各材齢とも破断面に水が介在する破壊となった。Fig. 3-19 に MS-1、PU-1、PU-2 の水中浸漬 364 日での水が介在した破断面の状況を示す。水中浸漬時間の経過とともに破断面の水の量は多くなり、364 日経過後には、MS-1 と PU-2 は破断面全体に水が確認される状態となったことから、水の浸入により接着力の低下が大きくなっ

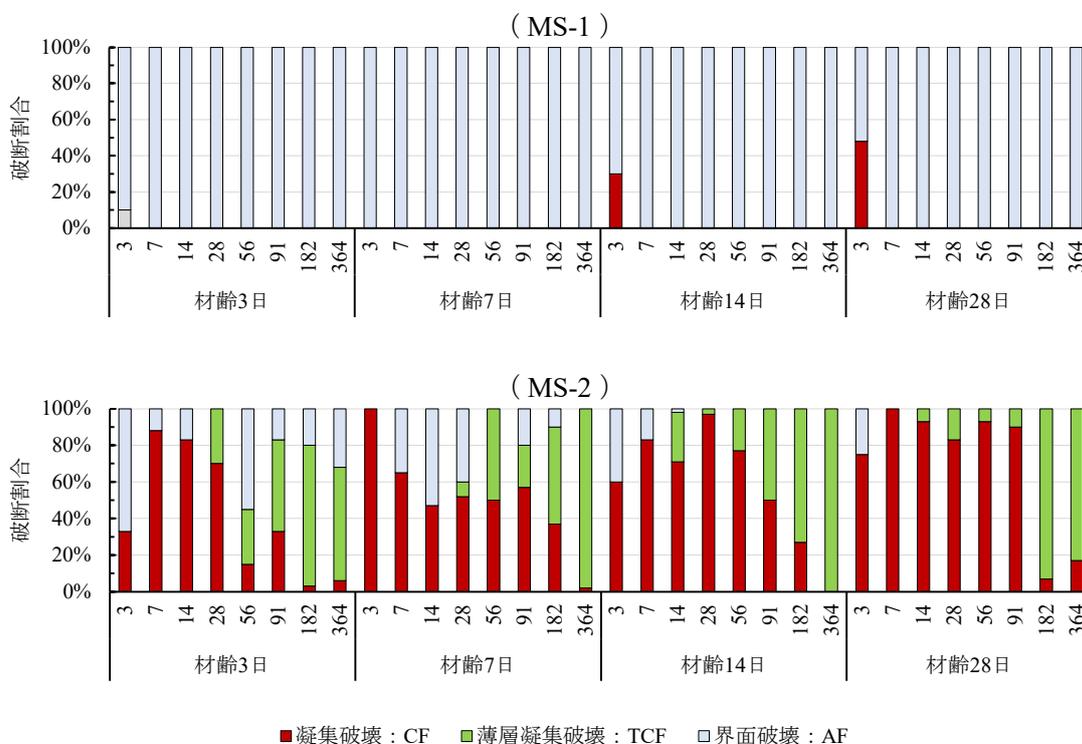


Fig. 3-16 変成シリコン系シーリング材 (MS) の破断割合

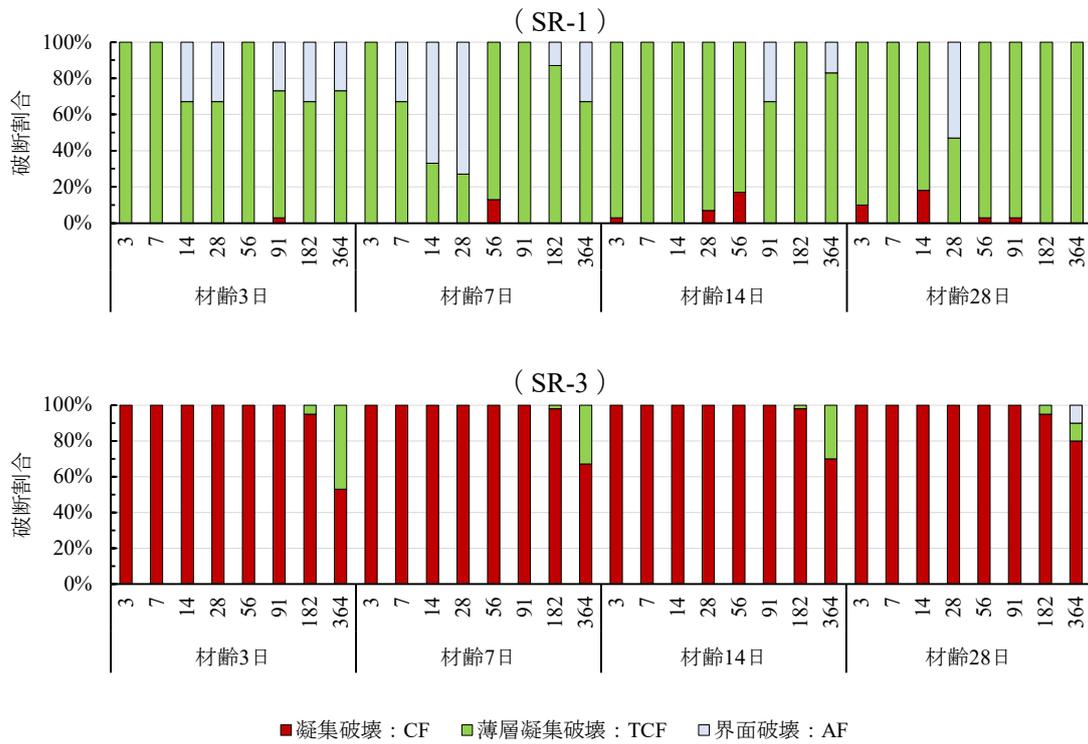


Fig. 3-17 シリコン系シーリング材 (SR) の破断割合

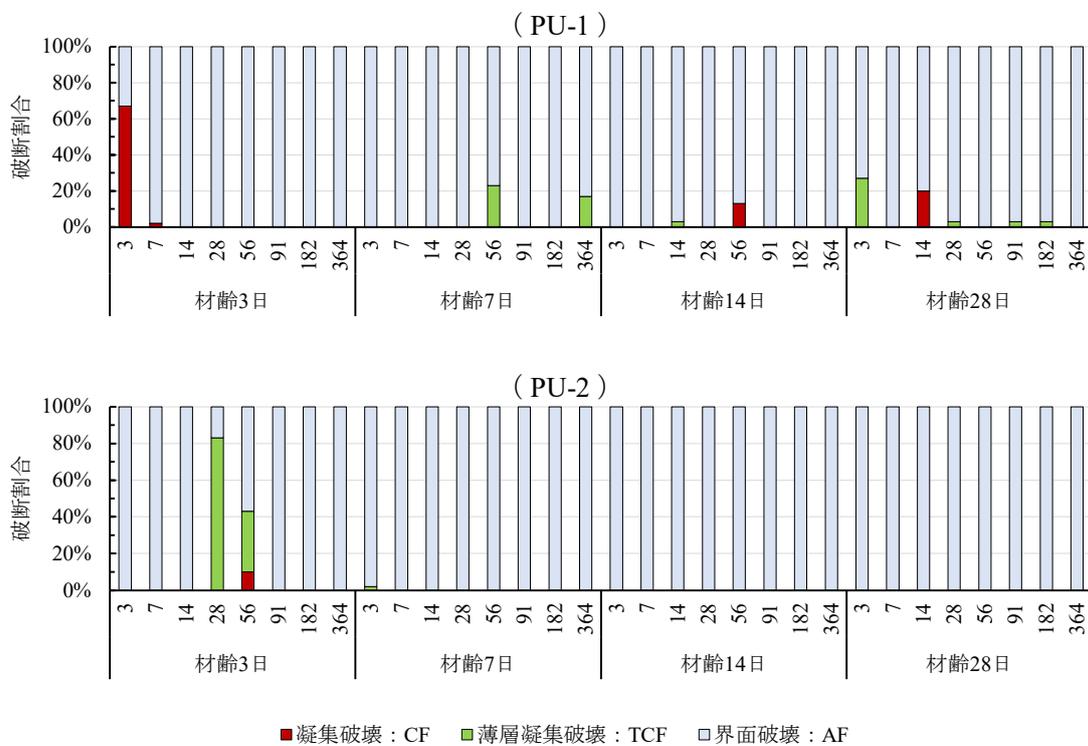


Fig. 3-18 ポリウレタン系シーリング材 (PU) の破断割合

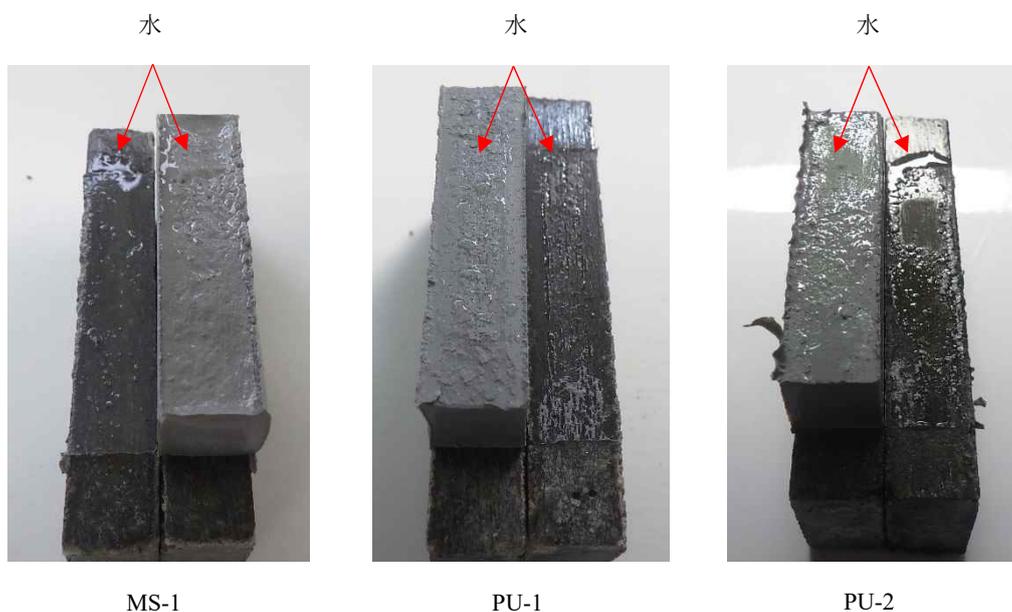


Fig. 3-19 水が介在した破断面の状況（水中浸漬 364 日）

たと考えられる。MS-2 は水中浸漬後も  $T_{max}$  が横這いに推移し、CF 率が高い状態であった。しかし、水中浸漬日数が長くなるにつれて TCF 率が高くなり、364 日経過でほぼ TCF となった。SR-1 は水中浸漬前から TCF 率が高く、水中浸漬日数が長くなるにつれて TCF と AF が混在する状態に変化した。特に材齢 3 日と材齢 7 日の供試体は AF が混在する率が高い結果であった。SR-3 は各材齢で、水中浸漬後も CF100%が継続する状態であったが、182 日経過後から TCF が混在する状態となり、364 日経過で TCF 率が大きくなった。

以上の試験結果から、各シーリング材は水中浸漬時間の経過とともに破断形態が変化し、引張接着強度と伸びが低下することが分かった。特に MS-1, PU-1, PU-2 は短期間で材料の劣化が進む傾向があり、さらに長期間の水の影響で接着性が大きく低下することが分かった。また、各シーリング材は、養生材齢日数が短い供試体は、養生材齢日数が長い供試体よりも水中浸漬後の引張強度と引張接着強度が低く推移する傾向があることが分かった。このことから、シーリング材の性能確保の観点から、施工後の硬化養生を十分に行うことの重要性が明らかとなった。

### 3.4 結論

本研究では、従来の性能照査条件よりも長い時間水中浸漬させた各種の水路用シーリング材を対象に、耐水性試験によって吸水率と体積変化率の変化を確認した。また、長期間の水中浸漬によるシーリング材の物性の変化を確認するため、最長 1 年間の水中浸漬後に引張試験と引張接着性試験を実施して、水路用シーリング材の水中耐久性を評価した。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) 供試体形状によって、各シーリング材の吸水性は異なるが、変成シリコン系はシリコン系およびポリウレタン系よりも吸水率と体積変化率が大きく、耐水性に劣る結果であった。
- (2) 本研究に用いたシーリング材の中には水中浸漬時間の経過とともに材料自体の引張強度と伸び率が低下するものがあり、特に MS-1 は短期間で材料自身が劣化し、低下が顕著であった。
- (3) 本研究に用いたシーリング材の中では、水中浸漬時間の経過による MS-1, PU-1, PU-2 の接着性の低下が顕著であった。
- (4) 養生材齢日数が短い状態で水の影響を受けると、引張強度と引張接着強度が低く推移する傾向があるため、硬化養生を十分に行う必要がある。

現在の開水路補修・補強マニュアルの接着性は、水中浸漬 28 日の条件で伸び率のみが規定されている。本研究で使用した材料の中には、1 年間の水中浸漬で引張接着性試験における  $M_{50}$ ,  $T_{max}$ ,  $E_{max}$  の低下率が-90%以上になる材料が確認された。このような材料を使用した場合、開水路補修・補強マニュアルに規定された性能照査項目に適合していても使用環境によっては、施工後数年で剥離を起こす可能性が高くなる。さらに、吸水性が大きい材料は、接着面に水が介在して剥離する可能性が高いことから、伸び率のみで接着性を確認するのではなく、引張接着強度の低下率や破壊形態の変化なども確認する必要がある。また、水中浸漬後に質量が低下する材料や水が変色する材料は、接着性が低下することが確認されたことから、浸漬水の色の変化や水中浸漬後に質量の減少が起こらないかなどを確認する必要がある。他方、表面被覆などの他工種と併用して行われる目地補修工事では、施工後期に行われることが多くあり、シーリング材の硬化養生を十分に行えない場合がある。このような場合は、シーリング材の性能を十分に発揮できない状態で供用されることになるため、成分形ごとにシーリング材の硬化養生日数を施工管理項目に追加するなどの検討が今後の課題であると考えられる。

## 引用文献

- 片岡弘安，小川晴果（2015）：外装タイル張り用有機系接着剤の耐久性に関する研究，大林組技術研究所報，79.
- 久保田 浩，高橋愛枝，佐々木晴夫，山宮輝夫，川上俊夫，橋爪慶介（2011）：有機系接着剤による外壁タイル張り工法の耐久性に関する評価 その1 温冷繰返し試験，日本建築学会学術講演梗概集，867-868.
- 森 丈久（2019）：変成シリコン系シーリング材の水路目地充填工法適用上の課題，JAGREE，97，50-55.
- 農研機構農村工学研究所水利施設機能研究室（2008）：「農地・水・環境保全向上対策」支援テキストー水路の簡易補修マニュアル，農山魚村文化協会，p.9.
- 農林水産省農村振興局整備部設計課施工企画調整室（2015）：農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル【開水路補修編】（案）
- 全国水土里ネット（2010）：簡易な水路補修の手引き，62-63.

## 第4章 衝撃摩耗に対するモルタル系補修材の耐久性評価

### 4.1 緒論

石川県の手取川右岸に位置する七ヶ用水は、急峻な地形のため落差工が多数存在している。七ヶ用水にある落差工の現地調査を行った結果、河川から流入したと思われる石礫が著しく堆積しているものがあり、中には300 mmを超える粒径の石もあった。落差工に堆積した石礫の状況を Fig. 4-1 に示す。このように大量の石礫が流下する落差工では、流水のみならず石礫が落下したときの衝撃などによって底版部が大きく摩耗しており、中には摩耗深さが100 mm以上に達している部分もあった。Fig. 4-1 とは別の落差工における摩耗した底版部の状態を Fig. 4-2 に示す。



石礫の堆積



粒径 300 mm 以上の石礫

Fig. 4-1 落差工に堆積した石礫



底版コンクリートの摩耗



100 mm 以上の摩耗深さ

Fig. 4-2 落差工底版部の摩耗

近年、コンクリート水路の補修工事ではさまざまな補修材料が使用されており、摩耗によってコンクリートが粗面化した水路内面や断面が欠損した部位には、ポリマーセメントモルタルなどのモルタル系補修材が主に使用されている。モルタル系補修材の摩耗に対する耐久性は、開水路補修・補強マニュアル（農林水産省農村振興局整備部設計課施工企画調整室，2015）で定められた、表面被覆材の水砂噴流摩耗試験（案）によって耐摩耗性が確認されている。水砂噴流摩耗試験は、キャビテーションが生じない比較的流速の遅い流水環境下で供用される水利コンクリート構造物が、流水や流水中の砂によるすり磨きおよび衝撃により、表面から順次、比較的脆弱なモルタル部分が選択的に切削される「選択的摩耗」を模擬する試験方法とされている（長束ら，2010）。このため、水砂噴流摩耗試験でのモルタル系補修材の耐摩耗性は、流水や砂礫による摩耗に対して確認されている。一方、落差工のような水利施設では、砂よりもはるかに大きな質量を持つ石礫の影響で摩耗が発生しているため、モルタル系補修材を落差工に使用する場合は、石礫による落下衝撃などの摩耗に対して耐久性を確認する必要がある。

コンクリートやモルタル系補修材の衝撃摩耗に関しては、小柳ら（1988）が、普通コンクリート、鋼繊維コンクリートに対して鋼球落下試験を行い、乾燥状態におけるコンクリートの衝撃摩耗性は、普通コンクリートにおいては、強度を増加させることよりも鋼繊維補強とすることにより大きく改善され、湿潤状態においてはコンクリートに鋼繊維を混入することよりも強度を増加させることにより大きく改善されることを明らかにしている。また、豊福ら（1998）は、普通コンクリート、岩石、補修材に対して鋼球落下試験を行い、衝突速度の大きさが摩耗量に対する影響が大きく、圧縮強度が高いほど耐摩耗性が向上することを明らかにしている。さらに、松田ら（2005）は、消波ブロックの耐摩耗性向上を目的として、コンクリートを高強度化した場合と天然骨材の代わりに重量骨材を使用したコンクリートに対して鋼球落下試験を実施し、天然骨材を使用した強度の高いコンクリートが耐摩耗コンクリートとして適していることを明らかにしている。海外では、Song et al.（2005）が、ナイロン繊維補強コンクリート、ポリプロピレン繊維補強コンクリートおよび普通コンクリートでそれぞれ作製した円柱供試体に対して重錘落下試験を行い、耐衝撃性はポリプロピレン繊維補強コンクリート>ナイロン繊維補強コンクリート>普通コンクリートであったことを報告している。また、Murali et al.（2014）は、鋼繊維の添加割合をそれぞれ0.5%、1.0%、1.5%として作製した鋼繊維補強コンクリート製円柱供試体に対して重錘落下試験を行い、鋼繊維の添加量が増加するにつれて耐衝撃性が向上し、破壊パターンが脆性モードか

ら延性モードに変化することを明らかにしている。しかし、これらの先行研究においては、コンクリートやモルタル系補修材単体に対して耐摩耗性の評価を行っており、農業用水路で用いられる補修材のように、コンクリート母材に薄く被覆するという形態を想定していない。このため、補修材の被覆厚さの違いによる耐衝撃摩耗性や耐剥離性に関する検討はなされていない。

そこで本研究では、コンクリート水路に生じた摩耗の断面修復や表面被覆に用いるモルタル系補修材を対象に、石礫を模擬した鋼球を落下させる衝撃試験を行った。落下衝撃試験では、モルタル系補修材単体で作製した供試体のほかに、水路補修で一般的に用いられる2通りの被覆厚さでモルタル系補修材をそれぞれコンクリート上に施工した供試体を使用し、被覆厚さの違いによる耐衝撃摩耗性や耐剥離性について検証した。

## 4.2 落下衝撃試験

コンクリートやモルタル系材料の落下衝撃試験に用いられる試験方法としては、繊維補強コンクリートの物性測定のために ACI Committee 544 (1999) が規定した重錘落下試験がある。この試験は、供試体の上に鋼球をあらかじめ固定し、この鋼球上に一定の高さからハンマーを落下させ、供試体に目視確認できる最初のひび割れが発生するまでと供試体が破断するまでのハンマー落下回数から材料の耐衝撃性を評価するものである。つまり、この試験では、鋼球が供試体に直接衝突するのではなく、ハンマーの落下による衝撃力が鋼球を通じて間接的に供試体に作用し、鋼球は供試体に接したままの状態でも供試体に損傷を与える仕組みになっている。しかし、本研究では、石礫が落差工底版に繰り返し衝突することにより、徐々にコンクリート表面をはつきながら摩耗させる仕組みを再現することを目的としている。落下衝撃試験には落差工内で採取した石礫を用いる方法もあるが、実際の石礫は形状が不整形であるため、衝突時の接触面が毎回変化し、供試体に作用する衝撃力がばらつくという問題がある。また、繰り返し衝突させることにより、石礫自体が破損してしまうことも考えられる。このため、本研究における落下衝撃試験は、繰り返し衝突しても形状や質量にほとんど変化が生じず、毎回一定の衝撃力を与えることができる鋼球を直接供試体に衝突させる方式とした。

試験に用いた落下衝撃試験装置の概要を **Fig. 4-3** に示す。試験装置は 1 m の塩化ビニル管内に鋼球を落下させ、下端に設置した供試体に鋼球が垂直に衝突するようにした簡易的な試験装置である。鋼球を落下させる高さは、七ヶ用水にある 164 ヲ所の落差工の落差高平均値がおおよそ 1.3 m であったことから、この値を本試験における鋼球の落下高さとした。鋼球は、落差工の現地調査で確認できた石礫の大きさが 2~200 mm 程度であり、質量は最大長 100 mm 以上のもので 0.4~2 kg 程度であったことから、最大長 100 mm 以上の石礫の平均質量と類似する、直径 69.85 mm、質量 1.386 kg のものを使用した。落差工で採取した石礫と試験に用いる鋼球の寸法を **Fig. 4-4** に示す。

供試体は、水平で平滑な床面に設置し、鋼球が供試体中央部に落下するように所定位置に固定した後、落下衝撃試験装置を設置する。供試体は、供試体形状に加工した止め金具を供試体両端部に沿わせて設置し、あらかじめ床面に埋め込んだアンカーにボルトと金具で移動しないよう固定した。なお、鋼球の落下は人の手によって行い、塩化ビニル管の上段位置から落下させる方式とした。

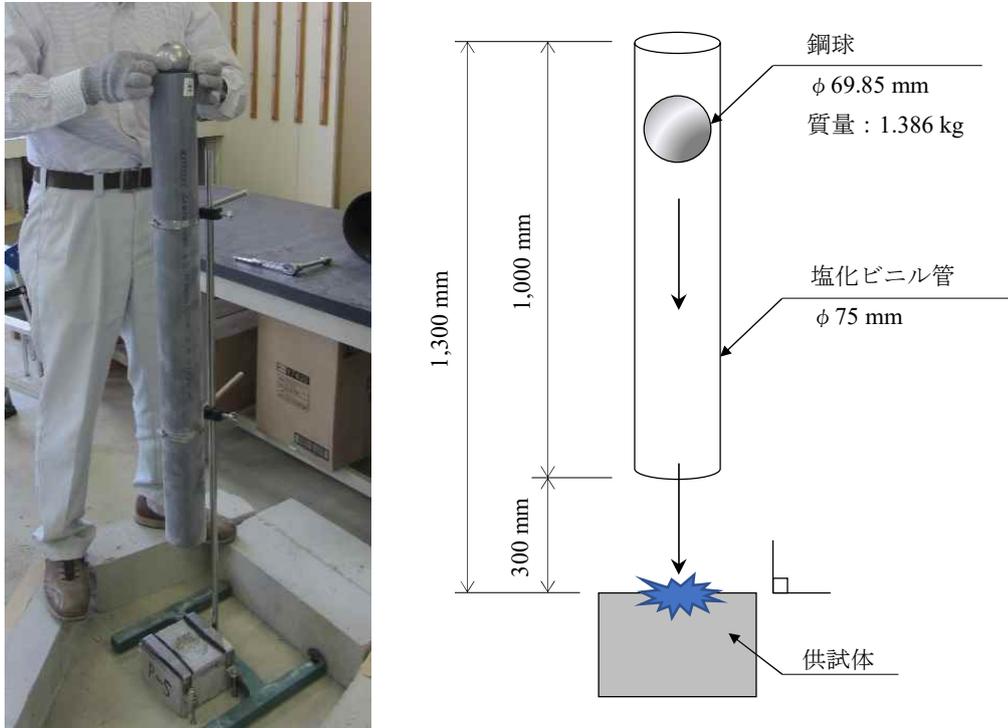


Fig. 4-3 落下衝撃試験装置の概要

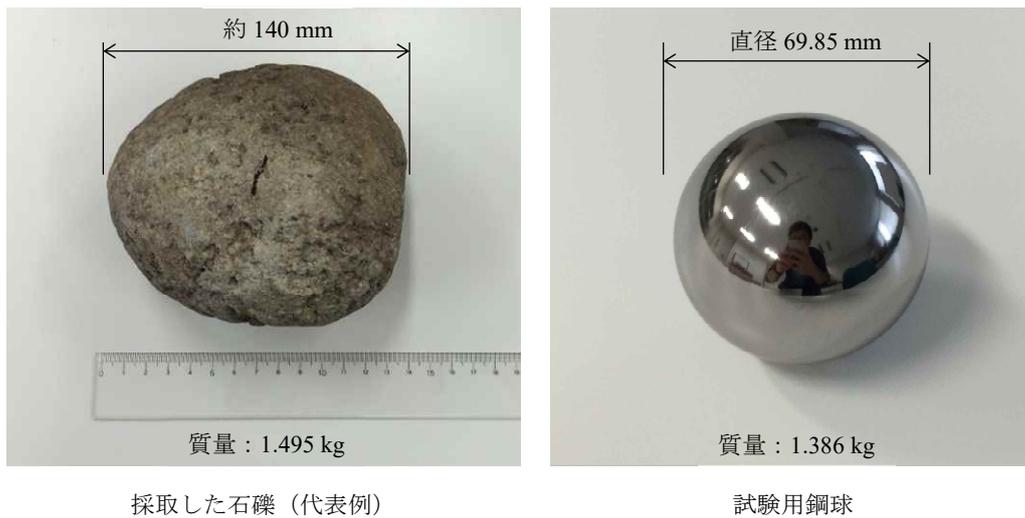


Fig. 4-4 落差工で採取した石礫と試験に用いる鋼球の寸法

### 4.3 試験内容

#### 4.3.1 試験材料と供試体の作製

本研究では、落差工の材料として用いられるコンクリート（以下、「Co」という）と水路補修で表面被覆材もしくは断面修復材として使用されているポリマーセメントモルタル（以下、「PCM」という）と繊維補強系のポリマーセメントモルタル（以下、「FRC」という）の3種類の材料を用いて供試体を作製した。供試体の形状と寸法を Fig. 4-5 に示す。

供試体は Co, PCM, FRC を幅 150 mm, 長さ 150 mm, 厚さ 100 mm の寸法で作製した供試体（以下、「単材供試体」という）と、同寸法の Co 単材供試体の上に、PCM と FRC を厚さ 10 mm, 30 mm で被覆した供試体（以下、「被覆供試体」という）をそれぞれ各 3 体作製した。Co 単材供試体の配合を Table 4-1 に示す。Co 単材供試体は試験期間を短縮するため早強セメントを使用し、脱型後 21 日間で水中養生を終了した。

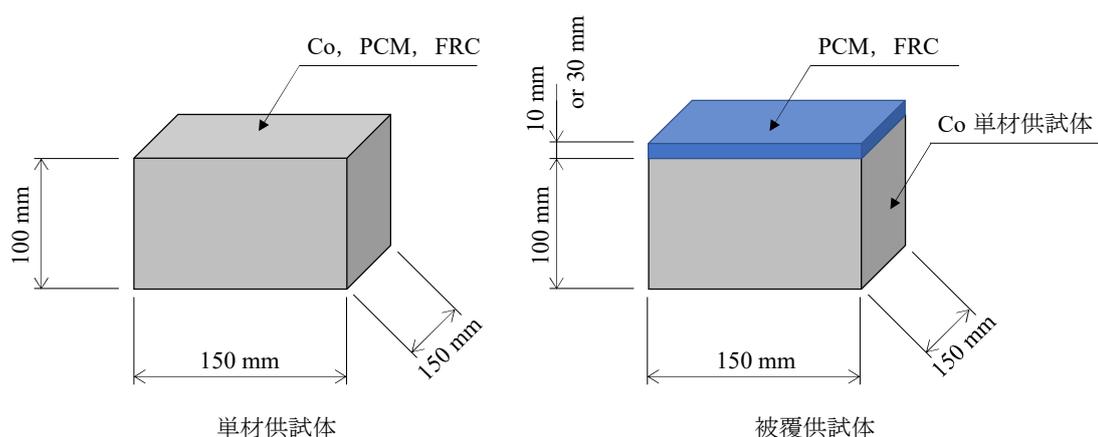


Fig. 4-5 供試体の形状および寸法

Table 4-1 Co 単材供試体の配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 W/C (%)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)
25	8	47.5	5	43.7
単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
水 W (kg)	セメント C (kg)	細骨材 S (kg)	粗骨材 G (kg)	混和剤 A (g/m <sup>3</sup> )
154	324	788	1,021	810

PCM と FRC の諸元を **Table 4-2** に示す。PCM はポリアクリル酸エステル系 (PAE 系)、FRC は酢酸ビニルビニルバーサテート系 (VAVeOvA 系) のポリマー混和剤を使用しており、含有量はともに 5%以下、繊維量は PCM が 0.2 vol%、FRC が 3.0 vol%混入された材料である。PCM と FRC の単材供試体は、メーカー推奨値の水セメント比で練混ぜ、脱型後 28 日間気中養生を行った。Co 単材供試体の上に被覆した PCM と FRC の被覆供試体の作製は、水中養生を終了した Co 単材供試体の表面をワイヤーブラシで研磨した後、10 mm、30 mm 厚の型枠を設置した。その後、プライマーを塗布して各モルタル材を被覆した。被覆後の供試体は、型枠脱型後、28 日間室内気中養生を行った。なお、被覆供試体の被覆厚さは、コンクリート水路に使用されている表面被覆材の標準的な被覆厚さが 10 mm であること、流速が速く摩耗が懸念される場合や断面欠損部に使用される断面修復材の最小被覆厚さが 30 mm 程度であることから、同等の被覆厚さが落差工に使用される場合もあると想定して被覆厚さを設定した。

本試験に用いた供試体の種類を **Table 4-3** に示す。供試体に使用した各材料の圧縮強度は、Co が材齢 21 日で 44.0 N/mm<sup>2</sup>、材齢 28 日で PCM は 50.0 N/mm<sup>2</sup>、FRC は 45.0 N/mm<sup>2</sup> であった。

**Table 4-2** 補修材諸元

補修材	ポリマー種類	P/C (%)	W/C (%)	単位質量 (kg/m <sup>3</sup> )	繊維量 (vol%)
PCM	PAE 系	5 以下	13.6	2,180	0.2
FRC	VAVeOVA 系	5 以下	17.5	1,960	3.0

**Table 4-3** 供試体の種類

供試体	記号	単材供試体	被覆供試体		圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
			厚さ 10 mm	厚さ 30 mm	
Co	C	C1~C3	—	—	44.0
PCM	P	P1~P3	P4~P6	P7~P9	50.0
FRC	F	F1~F3	F4~F6	F7~F9	45.0

### 4.3.2 試験方法

落下衝撃試験の鋼球の落下回数は、1 供試体につき最大 500 回までとし、20 回ごとに供試体の変状を計測した。試験条件は、①鋼球の落下回数が 500 回に達する、②供試体に貫通したひび割れが発生する、③被覆材が剥離する、のいずれかの条件を満たした段階で終了することとした。落下衝撃試験を行う上で鋼球を鉛直に落下させた場合、跳ね返った鋼球が再び供試体上に落下することが考えられた。この現象は実際の落差工においても起こるものであると考え、本試験においては 1 回の鋼球の落下において、跳ね返り後の衝突が生じたとしても鋼球の落下回数には加算しないこととした。

変状の計測に関しては、規定落下回数ごとに鋼球の落下衝撃によって生じた摩耗部分の最大深さと体積を計測した。摩耗深さの計測には型どりゲージを用いた。型どりは、あらかじめ供試体中心に直交する線を罫書き、規定回数ごとに直交線上にゲージを押し当て摩耗部分の型どりを行い、その後、方眼紙上にゲージを置いて最大摩耗深さを読み取り計測した。なお、以降の本文中における摩耗深さは、すべて上記の方法で計測した最大摩耗深さを意味する。型どりゲージを用いた摩耗深さの計測状況を **Fig. 4-6** に示す。なお、型どりゲージを用いた計測方法は、「水路摩耗における健全度評価と構造的機能に関する考察」で報告されている、型どりゲージを用いた現地基礎調査の方法（本間ら，2008）を参考にした。



型どり時の状況



方眼紙を用いた摩耗深さの計測

**Fig. 4-6** 摩耗深さの計測（型どりゲージ）

摩耗体積の計測は、スポイトを用いて摩耗部分に水を注ぎ、供試体表面まで満たした段階で使用した水の質量を計測することにより行った。摩耗体積の計測状況を **Fig. 4-7** に示す。なお、摩耗体積は水の密度を  $1 \text{ g/cm}^3$  として算出した。この計測手法は、「コンクリートの衝撃摩耗特性に関する研究」で報告されている、鋼球を用いた落下衝撃試験における体積計測の際に用いられた方法（豊福ら，1998）を参考にした。



**Fig. 4-7** 摩耗体積の計測

## 4.4 試験結果

### 4.4.1 単材供試体

単材供試体における鋼球落下回数と摩耗深さおよび摩耗体積の関係を Fig. 4-8 に示す。Co 供試体の C1 は 130 回、C2 は 200 回、C3 は 210 回で、供試体の上下に貫通するひび割れが生じ最終的に破断したため、その時点で試験を終了した。PCM 供試体の P1~P3、FRC 供試体の F1~F3 は、落下回数が 500 回に達したため試験を終了した。試験終了時の単材供試体を Fig. 4-9 に示す。

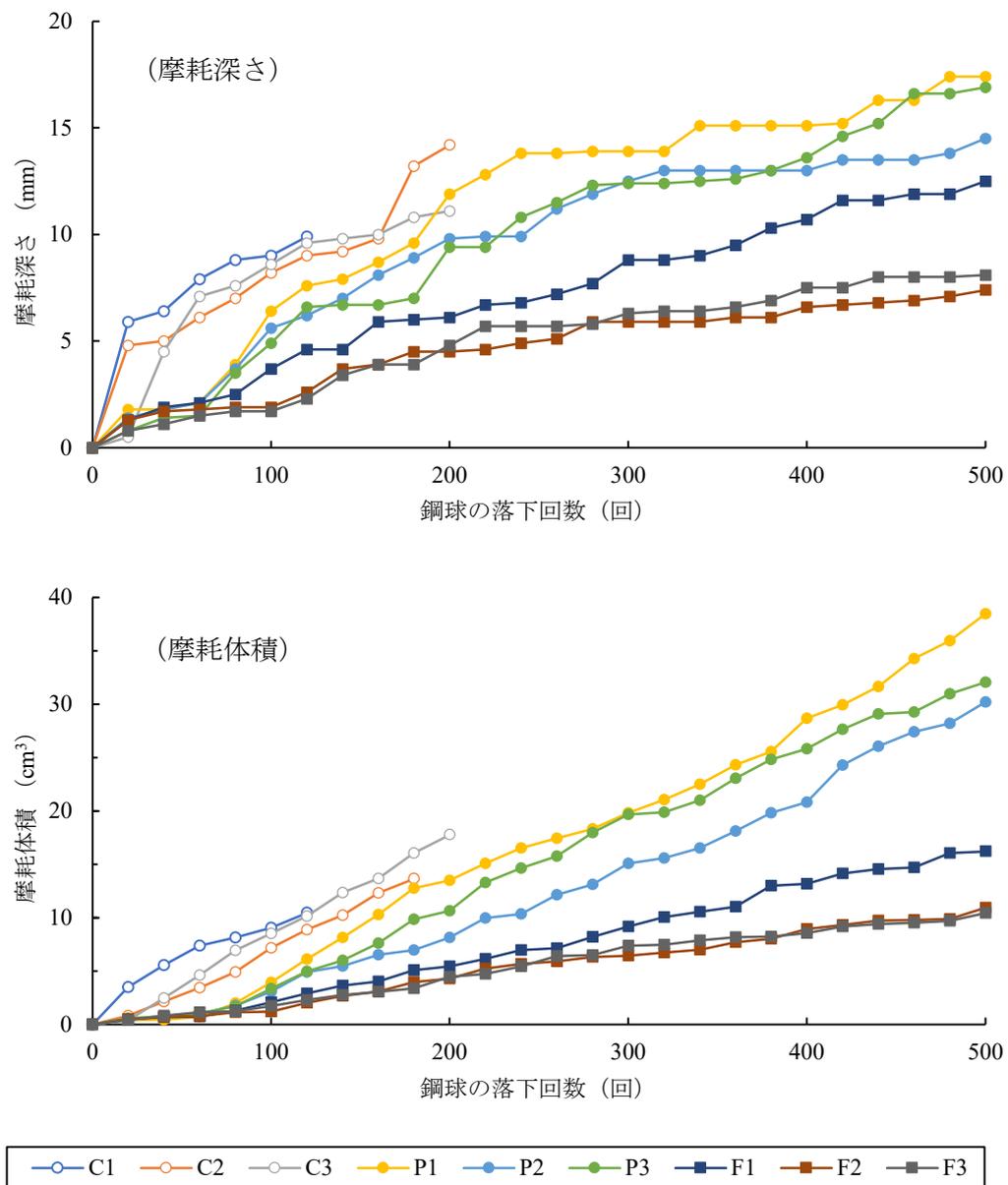


Fig. 4-8 単材供試体の摩耗量の推移



(1) C3 供試体



(2) P1 供試体



(3) F3 供試体



(4) 摩耗部の繊維露出 (F3)

Fig. 4-9 試験終了時の単材供試体

落下回数 100 回時点での摩耗深さは、Co 供試体の C1～C3 が 8.2～9.0 mm (平均 8.6 mm)，PCM 供試体の P1～P3 が 4.9～6.4 mm (平均 5.6 mm)，FRC 供試体の F1～F3 が 1.7～3.7 mm (平均 2.4 mm) であった。500 回終了時点では、PCM 供試体の P1～P3 が 14.5～17.4 mm (平均 16.2 mm)，FRC 供試体の F1～F3 が 7.4～12.5 mm (平均 9.3 mm) であった。摩耗体積は、試験 100 回終了時点で Co 供試体の C1～C3 が 7.2～9.0 cm<sup>3</sup> (平均 8.2 cm<sup>3</sup>)，PCM 供試体の P1～P3 が 3.1～3.9 cm<sup>3</sup> (平均 3.5cm<sup>3</sup>)，FRC 供試体の F1～F3 が 1.2～2.1 cm<sup>3</sup> (平均 1.7 cm<sup>3</sup>) であった。500 回終了時点では、PCM 供試体の P1～P3 が 30.2～38.5 cm<sup>3</sup> (平均 33.6 cm<sup>3</sup>)，FRC 供試体の F1～F3 が 10.4～ 16.2 cm<sup>3</sup> (平均 12.5 cm<sup>3</sup>) であった。単材供試体の平均摩耗量を Table 4-4 に示す。

100 回時点での Co 供試体の摩耗量の平均値を 1.0 とし、PCM 供試体および FRC 供試体と比較した場合、摩耗深さは、PCM 供試体が 0.65、FRC 供試体が 0.28、摩耗体積は、PCM 供試体が 0.43、FRC 供試体が 0.21 である。500 回終了時点では、PCM 供試体の平均値を 1.0 として FRC 供試体の平均値と比較した場合、FRC 供試体の摩耗深さは 0.57、摩耗体積は 0.37 である。単材供試体の摩耗比を **Table 4-5** に示す。

Co 供試体については、摩耗深さが落下回数 20～60 回の早い段階で急激に増加するが、摩耗体積はほぼ一定量ごとに増加する傾向にあった。これは、試験開始初期の段階では表層のモルタル部分が塊状に剥離し、剥離した断片が供試体の深さ方向に卓越した形状をしていたため、摩耗深さと摩耗体積の増加傾向に差が生じたと推察される。その後は、摩耗深さの増加が緩やかになっているが、これは、落下回数が増加すると供試体表面の摩耗部が大きく広がり鋼球の接触面積が増加したため、摩耗体積はほぼ一定で増加するものの、落下時の衝撃力が分散されて薄く削られるようになり摩耗深さの増加が緩やかになったのではないかと考えられる。

**Table 4-4** 単材供試体の平均摩耗量

落下回数	計測項目	Co	PCM	FRC
100 回	摩耗深さ (mm)	8.6	5.6	2.4
	摩耗体積 (cm <sup>3</sup> )	8.2	3.5	1.7
500 回	摩耗深さ (mm)	—※1	16.2	9.3
	摩耗体積 (cm <sup>3</sup> )	—※1	33.6	12.5

※1. 供試体破断のため、未計測。

**Table 4-5** 単材供試体の摩耗比

落下回数	計測項目	Co	PCM	FRC
100 回	摩耗深さ	1.0	0.65	0.28
	摩耗体積	1.0	0.43	0.21
500 回	摩耗深さ	—	1.0	0.57
	摩耗体積	—	1.0	0.37

※ 100 回時は、Co を基準として、200 回時は PCM を基準として比を算出。

PCM 供試体と FRC 供試体については、試験開始初期の段階では摩耗深さや摩耗体積の増加が Co 供試体よりも小さい傾向にあった。これは、Co 供試体へ鋼球を落下させた場合、初期段階から鋼球が大きく跳ね返りモルタル片が剥離していったが、PCM 供試体と FRC 供試体は、初期段階には鋼球の跳ね返りが小さく、表面が窪むだけでモルタル片の剥離が生じなかったためではないかと考えられる。また、PCM と FRC の各供試体にばらつきが生じる結果であった。これは、供試体作製時に入念に締め固めを行ったが、供試体の厚さが大きいこと、内在する空気が抜けきらずに気泡溜りが生じたことや、繊維が均等に分散せず繊維密度にムラがあり、脆弱な箇所が存在したことが考えられる。また、摩耗体積は一定で増加しているものの、摩耗深さが横ばいに推移した部分がある。これは、Fig. 4-9 (2) に示すように、試験途中で衝突位置が供試体の中心からずれて横方向に広がってしまったためであると考えられる。

FRC 供試体は、摩耗深さ、摩耗体積ともに Co 供試体や PCM 供試体よりも小さい傾向にあった。試験終了時の摩耗部分を Fig. 4-9 (4) に示すが、繊維がモルタルを覆うようにして多数存在していることから、繊維の露出によって衝撃力が吸収・分散されたことと、繊維の拘束によりモルタルの剥離を抑制したため、3 種類の供試体の中で摩耗量が最も小さくなったと考えられる。

さらに、落下回数が 500 回に達しても破断しなかった PCM 供試体と FRC 供試体に対して、破断に至る落下回数を把握するため、P1 と F1 を用いて追加で試験を行った。その結果、P1 は 793 回で、F1 は 5,155 回で破断した。Co 供試体の中で最も耐久性の高かった C3 を基準に比較すると、破断に対する耐久性は PCM が約 4 倍、FRC が約 25 倍高いことが分かった。

以上の結果から、本研究に用いた単材供試体および試験方法での衝撃摩耗に対する耐久性は、FRC>PCM>Co であることが分かった。

#### 4.4.2 被覆供試体 (10 mm 厚)

被覆供試体 (10 mm) における鋼球落下回数と摩耗深さおよび摩耗体積の関係を Fig. 4-10 に示す。PCM 供試体は、落下回数が P4 は 170 回、P5 は 200 回、P6 は 40 回で母材 Co 面が露出したために試験を終了した。P6 が低回数の落下で母材露出した原因としては、供試体作製時に被覆厚さが不足していた可能性が考えられる。FRC 供試体は、F4 のみ落下回数 200 回で母材 Co 面が露出したが、F5 は 110 回、F6 は 140 回に達した時点で母材 Co 面が現れる

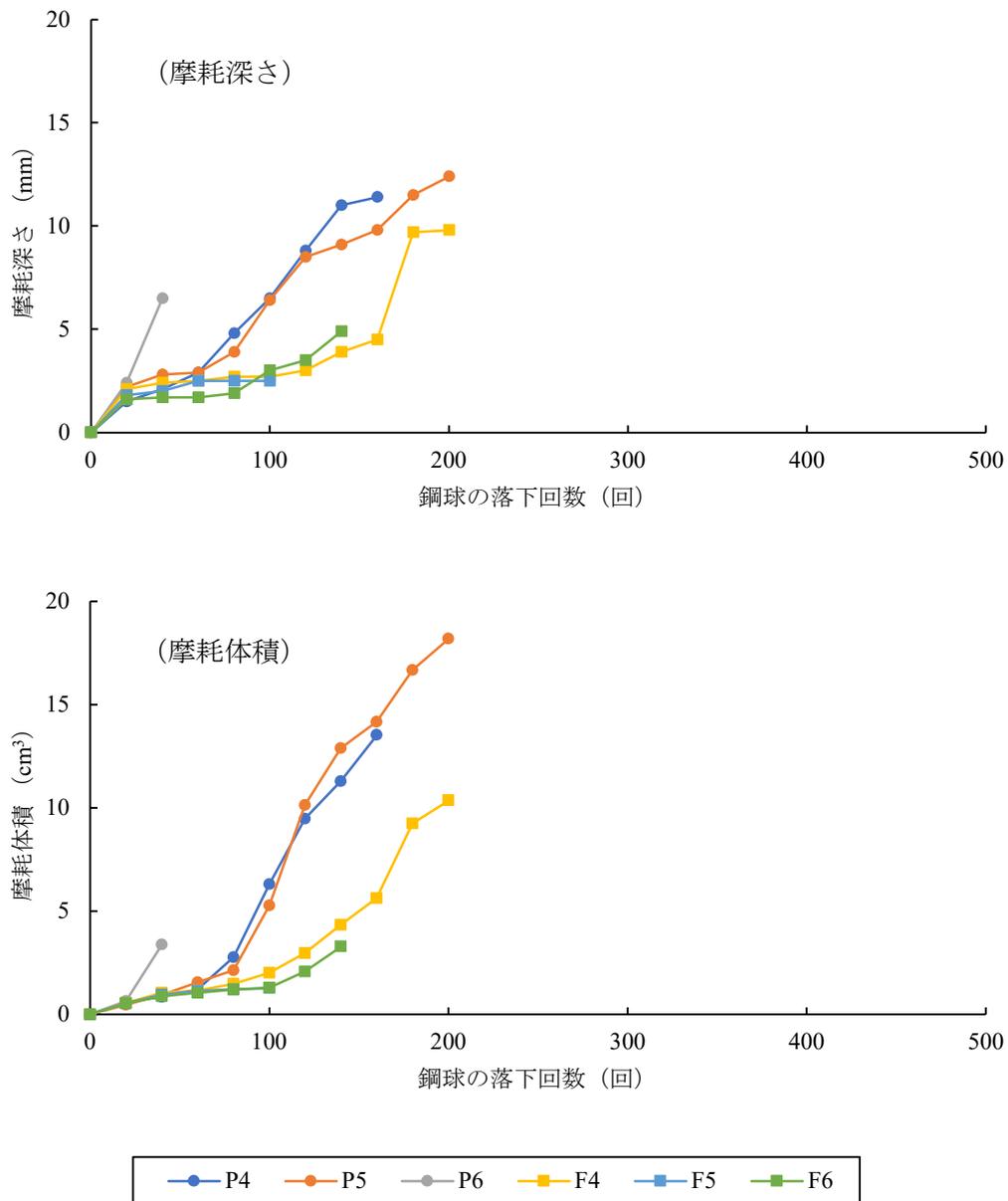


Fig. 4-10 被覆供試体 (10 mm) の摩耗量の推移

前に被覆材と母材 Co に大きなひび割れが生じたため試験を終了した。試験終了時の被覆供試体 (10 mm) を Fig. 4-11 に, FRC 供試体に発生したひび割れを Fig. 4-12 に示す。なお, 試験終了時の FRC 供試体は, 被覆材と母材 Co との接着界面部に浮きや剥離は生じておらず, 一体性を保っている状態であった。

落下回数 100 回時点の摩耗深さは, PCM 供試体の P4~P5 が 6.4~6.5 mm (平均 6.5 mm), FRC 供試体の F4~F6 が 2.5~3.0 mm (平均 2.7 mm) であった。摩耗体積は, PCM 供試体の P4~P5 が 5.3~6.3 cm<sup>3</sup> (平均 5.8 cm<sup>3</sup>), FRC 供試体の F4~F6 が 1.3~2.0 cm<sup>3</sup> (平均 1.5 cm<sup>3</sup>) であった。



P6 供試体



F5 供試体

Fig. 4-11 試験終了時の被覆供試体 (10 mm)



Fig. 4-12 被覆供試体 (F5) に発生したひび割れ

100 回時点での PCM 供試体の摩耗量の平均値を 1.0 として FRC 供試体の平均値と比較した場合、FRC 供試体の摩耗深さは 0.42、摩耗体積は 0.26 である。200 回終了時点の摩耗深さは、PCM 供試体の P5 が 12.4 mm、FRC 供試体の F4 が 9.8 mm であり、摩耗体積は、PCM 供試体の P5 が 18.2 cm<sup>3</sup>、FRC 供試体の F4 が 10.4 cm<sup>3</sup>であった。200 回終了時点での PCM 供試体の摩耗量を 1.0 として FRC 供試体の摩耗量と比較した場合、FRC 供試体の摩耗深さは 0.79、摩耗体積は 0.57 である。被覆供試体（10 mm）の平均摩耗量を **Table 4-6** に示す。

試験の結果、FRC 供試体は PCM 供試体よりも摩耗量は小さいものの、母材 Co が露出する前にひび割れが生じる傾向が見られた。これは、FRC 供試体においては、摩耗を受けて厚みが減少していくと、被覆材から母材 Co に伝達される衝撃力が徐々に増加し、弱い母材 Co 側からひび割れが生じた後、一体化している被覆材にもひび割れが生じたのではないかと推察される。

本研究に用いたモルタル系補修材および試験方法においては、補修材の違いによって低回数で被覆材が摩耗を受けて母材が露出、また被覆材と母材 Co にひび割れが生じる結果になったことから、被覆厚さ 10 mm では母材に対しての保護効果は初期段階には期待できるが、長期的な耐久性は期待できないことが分かった。

**Table 4-6** 被覆供試体（10 mm）の平均摩耗量

落下回数	計測項目	PCM <sup>※1</sup>	FRC <sup>※2</sup>	PCM を基準とした比
100 回	摩耗深さ (mm)	6.5	2.7	0.42
	摩耗体積 (cm <sup>3</sup> )	5.7	1.5	0.26
200 回	摩耗深さ (mm)	12.4	9.8	0.79
	摩耗体積 (cm <sup>3</sup> )	18.2	10.4	0.57

※1. 100 回時は P4 と P5 の 2 体の平均値、200 回時は P5 の計測値を示す。

※2. 100 回時は F4～F6 の 3 体の平均値、200 回時は F4 の計測値を示す。

#### 4.4.3 被覆供試体 (30 mm 厚)

被覆供試体 (30 mm) における鋼球落下回数と摩耗深さおよび摩耗体積の関係を Fig. 4-13 に示す。被覆厚さ 30 mm とした供試体では、PCM および FRC 供試体とも、落下回数が 500 回に達したため試験を終了した。試験終了時の摩耗深さは、PCM 供試体の P7~P9 が 18.6~20.0 mm (平均 19.2 mm), FRC 供試体の F7~F9 が 10.1~10.7 mm (平均 10.5 mm) であった。摩耗体積は、PCM 供試体の P7~P9 が 36.0~41.1 cm<sup>3</sup> (平均 38.7 cm<sup>3</sup>), FRC 供試体の F7~F9 が 16.5~19.9 cm<sup>3</sup> (平均 18.4 cm<sup>3</sup>) であった。試験終了時の PCM 供試体の平均値を 1.0 として FRC 供試体の平均値と比較した場合、FRC 供試体の摩耗深さは 0.55, 摩耗体積は 0.48 である。試験終了時の被覆供試体 (30 mm) の平均摩耗量を Table 4-7 に示す。両供

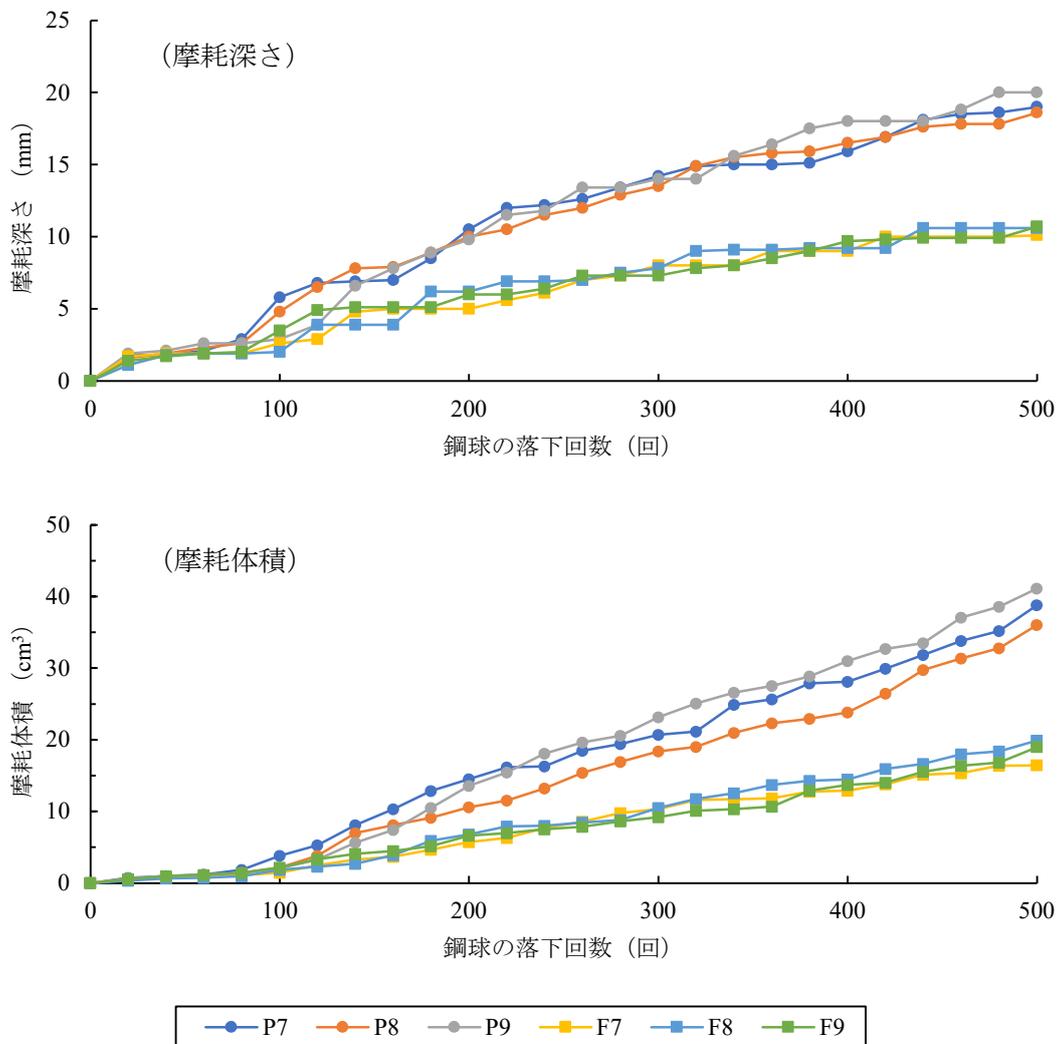


Fig. 4-13 被覆供試体 (30 mm) の摩耗量の推移

試体とも 200 回程度までは単材供試体と同程度の摩耗量を示しているが、500 回終了時点で  
の摩耗量は単材供試体と比較すると耐衝撃性は劣る結果であった。

試験終了時の被覆供試体 (30 mm) を **Fig. 4-14** に示す。両供試体とも摩耗による母材 Co  
の露出やひび割れ、被覆材と母材 Co との接着界面に剥離は発生しなかった。このことから、  
本研究に用いたモルタル系補修材および試験方法においては、被覆材の被覆厚さを 30 mm  
に設定することで、母材 Co への保護効果が期待できることが分かった。

**Table 4-7** 被覆供試体 (30 mm) の平均摩耗量

落下回数	計測項目	PCM	FRC	PCM を基準とした比
500 回	摩耗深さ (mm)	19.2	10.5	0.55
	摩耗体積 (cm <sup>3</sup> )	38.7	18.4	0.48

※ PCM は P7~P9, FRC は F7~F9 の平均値を示す。



P8 供試体



F8 供試体

**Fig. 4-14** 試験終了後の被覆供試体 (30 mm)

#### 4.5 結論

本研究では、落差工のように、石礫の落下によって衝撃摩耗を生じる部位にモルタル系補修材を使用した場合の耐久性を評価するため、室内において石礫を模擬した鋼球を落下させる衝撃試験を行い、材料を単材で作製した供試体、Co 供試体に 10 mm および 30 mm で被覆した供試体を用いてモルタル系補修材の耐衝撃摩耗性や耐剥離性について被覆厚さの違いによる評価を行った。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) 鋼球を用いた落下衝撃試験の結果、 $FRC > PCM > Co$  の順で衝撃摩耗に対する耐久性が高いことが分かった。
- (2) 補修材の被覆厚さを 10 mm とした場合、低回数 of 衝撃で母材 Co の露出や、母材 Co および被覆材にひび割れが生じることがあり、長期的な耐久性は期待できないことが分かった。
- (3) 落差工のように、石礫の落下による衝撃摩耗を受けた構造物にモルタル系補修材を適用する場合、補修材の被覆厚さを 30 mm 以上とすることで母材 Co への保護効果が期待できることが分かった。

試験に用いた衝撃試験機は、人力によって鋼球を落下させるため、衝突位置が若干ばらつくなどの課題点があるが、簡易的に行う試験方法としては有効であると考えられる。本研究の結果から、FRC は PCM よりも衝撃摩耗に優れるが、表面被覆工法で適用されている厚さ 10 mm で被覆した場合、衝撃の作用によって母材 Co および被覆材自体にひび割れが発生することが明らかとなった。このため、石礫が流下する落差工の補修検討を行う場合は、使用する補修材の選定に加え、補修材の厚さを十分に確保する必要がある。

## 引用文献

- ACI Committee 544 (1999) : Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete, American Concrete Institute, 6-7.
- 本間新哉, 北村浩二, 加藤 敬 (2008) : 水路摩耗における健全度評価と構造的機能に関する考察, 農村工学研究所技報, **207**, 1-11.
- 小柳 洽, 六郷恵哲, 河合 敦, 近藤吉信 (1988) : コンクリートの耐衝撃摩耗特性に及ぼす各種要因の影響, コンクリート工学年次論文報告集, **10(2)**, 463-468.
- 松田哲夫, 佐藤 彰, 坂本 淳, 渡邊芳春 (2005) : 耐摩耗コンクリートの配合特性およびライフサイクルコスト評価方法に関する研究, コンクリート工学, **43(3)**, 28-36.
- Murali, G., Santhi, A.S. and Ganesh, G.M. (2014) : Impact Resistance and Strength Reliability of Fiber Reinforced Concrete Using Two Parameter Weibull Distribution, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 9(4), 554-559.
- 長束 勇, 上野和広, 渡嘉敷 勝, 石井将幸 (2010) : 水砂噴流摩耗試験機の試作とその性能評価, 農業農村工学会論文集, **266**, 25-31.
- 農林水産省農村振興局整備部設計課施工企画調整室 (2015) : 農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル【開水路補修編】(案)
- Song, P.S., Hwang, S. and Sheu, B.C. (2005) : Strength properties of nylon- and polypropylene-fiber-reinforced concretes, Cement and Concrete Research, 35, 1546-1550.
- 豊福俊泰, 宮川邦彦, 豊福俊英 (1998) : コンクリートの衝撃摩耗特性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, **20(2)**, 835-840.

## 第5章 石礫による転がり摩擦に対するモルタル系補修材の耐久性評価

### 5.1 緒論

第4章で述べたように、七ヶ用水には多数の落差工が設置されている。七ヶ用水の落差工は大部分が水クッション型であり、上流からの水流を下流側水クッションに突入させ、攪乱させることで流速を抑える構造になっている。これらの落差工の中には河川から流入したと思われる石礫が堆積し、底版や側壁のコンクリートが大きく摩耗しているものがある。落差工底版部に生



Fig. 5-1 落差工に生じた摩耗

じた摩耗を Fig. 5-1 に示す。このように落差工に大きな摩耗が生じる1つの原因として考えられるのは、流下する石礫である。石礫が落差工内に落下するとき生じる衝撃や、落差工内に留まった石礫が繰り返し転がることにより、底版コンクリート表面が徐々に削られ、摩耗が進行すると考えられる。石礫による摩耗イメージを Fig. 5-2 に示す。

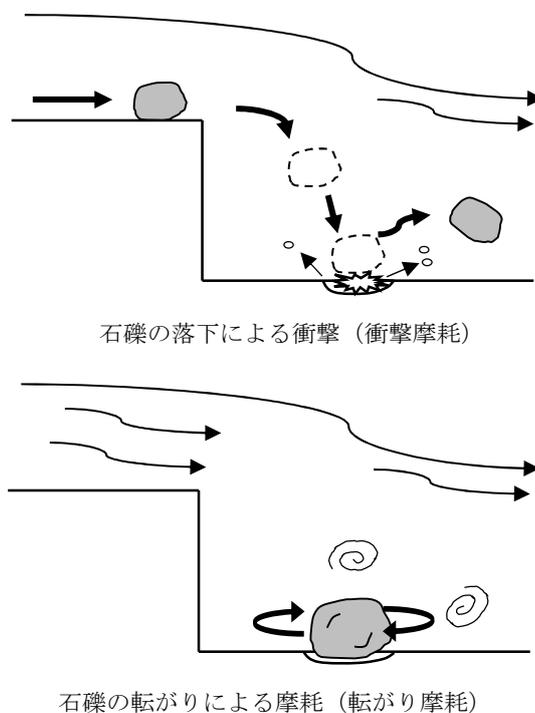


Fig. 5-2 石礫による摩耗イメージ

一般的なコンクリート水路では、摩耗により粗面化した表層部の補修にポリマーセメントモルタルなどのモルタル系補修材が主に用いられている。補修材の摩耗に対する耐久性は、開水路補修・補強マニュアルの規定により、水砂噴流摩耗試験（案）によって確認することになっており、ポリマーセメントモルタルの場合は、標準供試体に対する平均摩耗深さの比が 1.5 以下とされている（農林水産省農村振興局整備部設計課施工企画調整室, 2015）。一方、石礫が流下する落差工のような水利施設については、摩耗に対する補修材の品質規格値や照査方法が定まっていない状況にある。このため、落差工の補修対策においても、一般的なコンクリート水路と同様のモルタル系補修材が用いられているが、モルタル系補修材で補修を行った落差工で、石礫の転がりにより発生したと考えられる摩耗が確認されている。モルタル系補修材の摩耗を Fig. 5-3 に示す。このように、石礫が流下する落差工では、コンクリート水路で想定していない石礫の作用により摩耗が発生しているため、石礫による摩耗に対してモルタル系補修材の耐久性の確認が必要である。

そこで本章では、石礫により落差工底板部に生じる転がり摩耗に着目して簡易的な転がり摩耗試験機を作製し、石礫を模擬した摩耗材を用いてモルタル系補修材の耐久性を確認した。



石礫の堆積

摩耗の発生状況

Fig. 5-3 モルタル系補修材の摩耗（落差工底板部）

## 5.2 転がり摩耗試験機

コンクリートやモルタル系材料に用いられる摩耗試験はいくつか存在している。その中でも **Fig. 5-4** に示すテーバー式摩耗試験は、「プラスチックー摩耗輪による摩耗試験方法」(JIS K 7204 : 1999), 「塗料一般試験方法ー塗膜の機械的性質ー耐摩耗性 (摩耗輪法)」(JIS K 5600-5-9 : 1999), 「建築材料及び建築構成部分の摩耗試験方法 (研磨紙法)」(JISA 1453 : 2015) など多くの分野で規定されている方法である。この試験は、供試体の表面に2個の摩耗輪を乗せ、荷重を作用させて注水を加えずに摩耗摺動させることで、すり磨き作用による摩耗現象を再現する試験方法である。測定する供試体によって摩耗輪の種類や載荷荷重, 回転数は規定されており, 気中条件において短時間で測定できるという特徴がある。このことから, テーバー式摩耗試験を用いた研究は国内で多数行われており, 各研究機関で保有されている台数も多くある。しかし, 小柳ら (1988, 1989) は, 湿潤状態にあるコンクリートは乾燥状態にあるものよりも耐摩耗性が低下すると報告している。このため, モルタル系補修材も同様に乾湿状態が摩耗性状に大きく影響する可能性があり, 現地での使用環境を考えれば, 水を用いた試験方法とすることが必要であると考えられる。

試験時に水を用いる摩耗試験としては, 例えば, 国内では, 奥田式 (O 式) すりへり試験 (**Fig. 5-5 (a)**) や O 式摩耗試験 (**Fig. 5-5 (b)**) などがある。奥田式 (O 式) すりへり試験は, ドラム内に供試体と PC 鋼棒 ( $\phi 22 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ ) を 20 個入れ, 中心部のパイプから 20 L/min の水シャワーを供試体に浴びせながらドラムを縦回転させ, PC 鋼棒がドラム内で落下と転がりを繰り返すことで, 衝撃と転がり摩耗を供試体に与える試験方法である。奥田式 (O 式) すりへり試験を用いた研究では, 中川ら (2005) は, ポーラスコンクリートの剥脱



**Fig. 5-4** テーバー式摩耗試験機



Fig. 5-5 水を用いる摩耗試験機 (例)

耐性は、本試験機を用いることにより、ある程度の評価が可能であると報告している。また、取違ら (2008) は、炭酸化養生を行った炭酸化コンクリートは、水の作用を受ける状況での耐摩耗性に優れることから、水利構造物の耐摩耗性向上に有効であると報告している。次に、O 式摩耗試験は、内径 1,000 mm、深さ 300 mm の大型ドラム内に供試体と砂利 10 kg (骨材粒径 30~40 mm)、水 70 L を入れ、密封したドラムを縦回転させ、水と砂利の回転によって衝撃と転がり摩耗を供試体に与える試験方法である。O 式摩耗試験を用いた研究では、柴田ら (2009) は、海岸や河川などの水流と砂礫の複合作用による摩耗環境下において、超高強度繊維補強コンクリート (UFC) は、設計基準強度  $50 \text{ N/mm}^2$  の高強度コンクリートよりも約 2.2~2.8 倍の摩耗抵抗性を有していると報告している。

他方、海外では米国 ASTM 規格として、ASTM C 1138 「コンクリートの耐摩耗性標準試験方法 (水中法)」がある。この試験は、水中環境下で鋼球が水流に乗り、転がりながら流れる様を規格化した試験方法である。砂利をイメージした鋼球、 $\phi 25.3 \text{ mm}$  を 10 個、 $\phi 19 \text{ mm}$  を 35 個、 $\phi 12.6 \text{ mm}$  を 25 個用い、スクリュウの回転によって水槽内の水を横回転させて鋼球を供試体上で転がす方式である (Fig. 5-5 (c))。高野ら (2009) は、ASTM C 1138 に規定される試験機を用いて水中環境下のコンクリートや超高強度繊維補強モルタルパネル材に対して耐摩耗性を確認しており、高強度コンクリートならびに超高強度繊維補強モルタルパネルは、普通強度コンクリートよりも摩耗量は小さくなると報告している。また、有田ら (2020) は、ASTM C 1138 のメカニズムに基づき試験装置を大型化した回転式水中摩耗機を試作しており、コンクリートや超高強度繊維補強コンクリート (UFC) などに対して、

水砂噴流摩耗試験と同様に選択的摩耗を再現できる試験方法である報告している。しかし、上述した試験に用いる摩耗試験機は、いずれも国内での保有台数が極めて少なく、入手するのも困難であるため、試験を実施すること自体が難しい状況にある。

そこで、水流を利用して摩耗材を転がす、簡易的な転がり摩耗試験機を作製した。作製した簡易的な転がり摩耗試験機を Fig. 5-6 に示す。作製した転がり摩耗試験機は、供試体を設

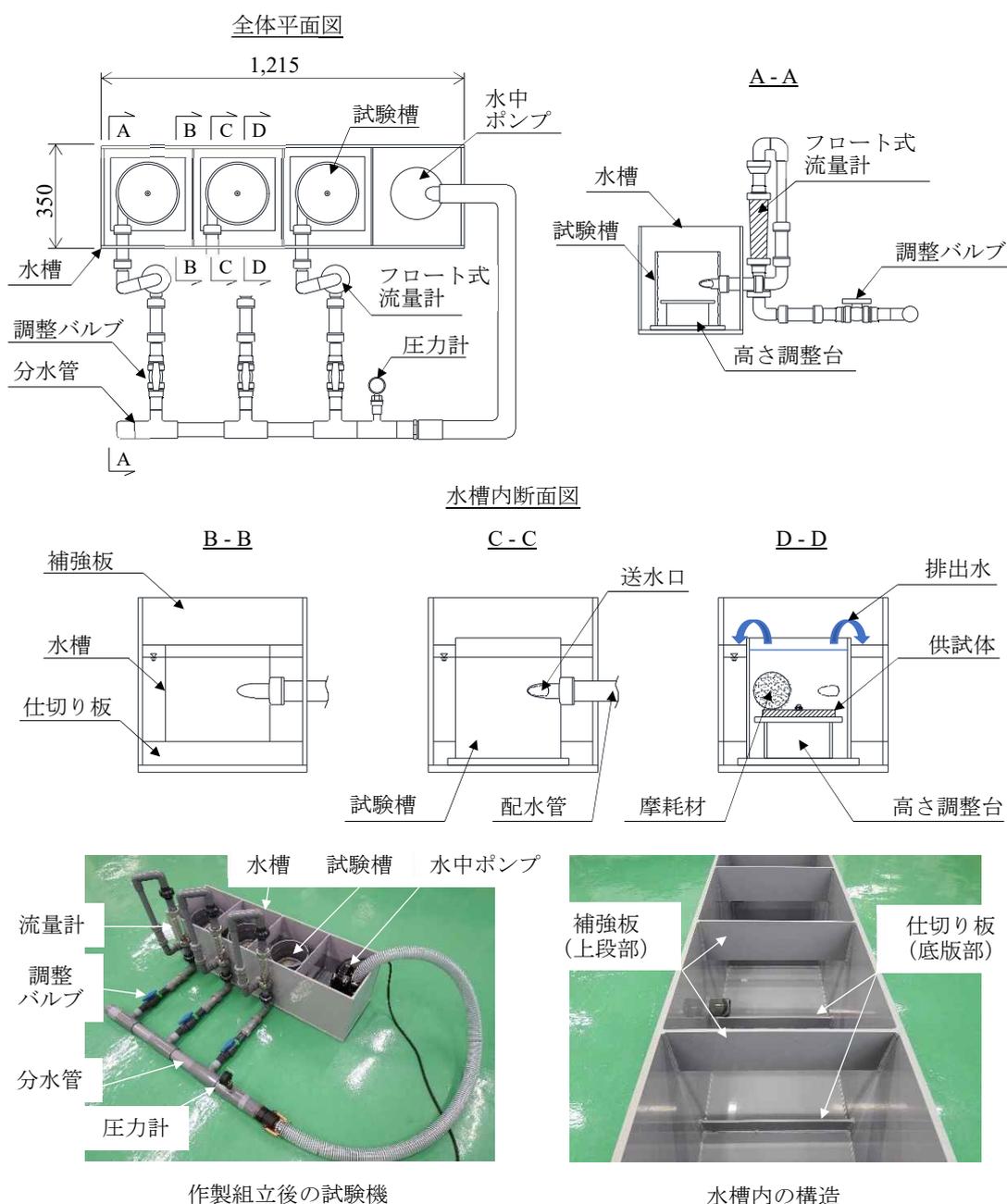


Fig. 5-6 作製した簡易的な転がり摩耗試験機

置する内径 200 mm の円筒状の試験槽 3 基と配水管を接続した水槽および水中ポンプで構成される。試験槽の側面横側に送水口を設け、水中ポンプで吸い上げた水を送水口に供給し、試験槽内に渦状の水流を発生させて摩耗材を一定の水量で押し回して転がす方式である。摩耗材の転がりを Fig. 5-7 に示す。水中ポンプから供給する水量の調整は、配水管部に設置したフロート式流量計（最大水量 70 L/min）および調整バルブで行い、使用水は水槽内に設置した水中ポンプから吸い上げ、循環させて使用する。試験槽および水槽などの主な材質は、配水管などに使用されているポリ塩化ビニル樹脂である。試験槽内には供試体の厚さ変更に対応するため、高さ調整台を設けている。水槽は試験槽を 3 基設置できる形状とし、摩耗によって除去された砂やモルタル分が水中ポンプ側へ流出しないように、底板部に仕切り板を設置している。なお、水中ポンプは、工事などで一般的に使用されている口径 50 mm、揚程 10 m、最大吐出量 260 L/min の汚泥用水中ポンプである。

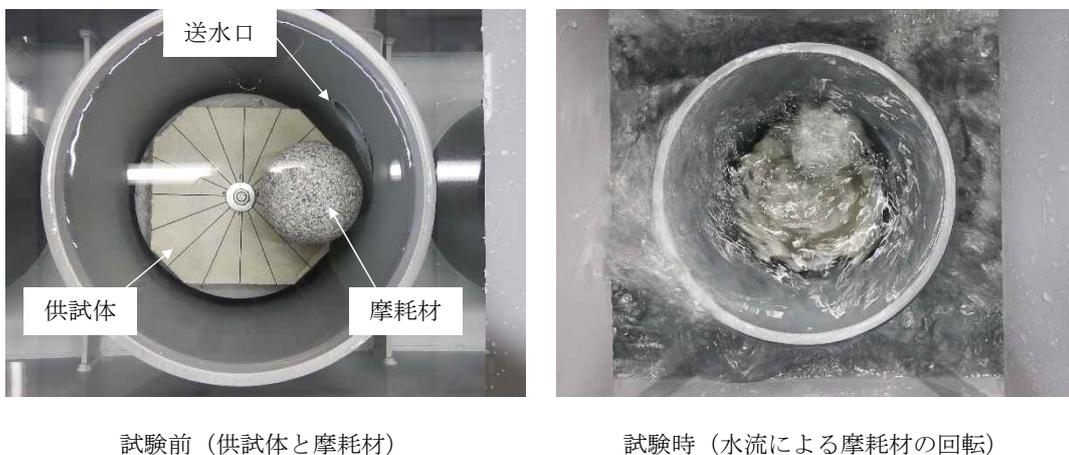
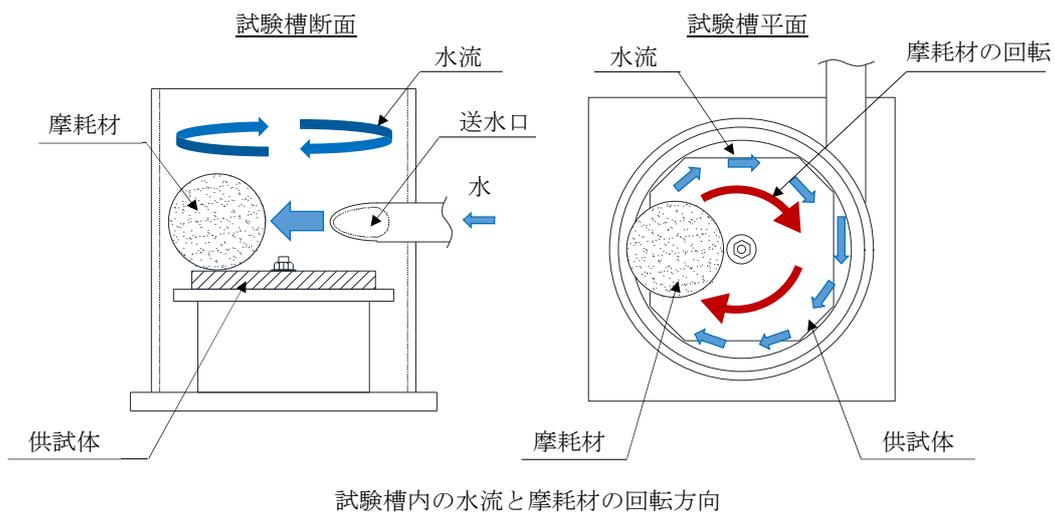


Fig. 5-7 摩耗材の転がり

### 5.3 試験内容

#### 5.3.1 試験材料と供試体の作製

本研究では、コンクリート水路で断面修復材もしくは表面被覆材として用いられている水路用のモルタル系補修材とコンクリートを用いて供試体の作製を行った。本試験に用いたモルタル系補修材の種類を **Table 5-1** に、コンクリートの種類と配合を **Table 5-2** に示す。モルタル系補修材の供試体は、普通セメントを用いたポリマーセメントモルタルを 2 材料（以下、「PCM1」、「PCM2」という）、早強セメントを用いたポリマーセメントモルタルを 2 材料（以下、「PCM3」、「PCM4」という）、樹脂系短繊維を 3.0 vol%混入させた繊維補強系のポリマーセメントモルタルを 1 材料（以下、「FRC」という）の 5 材料を用意して作製を行った。また、比較材として JIS モルタル（以下、「JM」という）も作製した。各ポリマーセメントモルタルは、メーカー推奨値の水セメント比で作製した。JM は JIS R 5201 : 2015 「セメントの物理試験方法」に規定されるモルタル配合に準じて、セメント 1、標準砂 3、水 0.5 の質量比で作製した。なお、標準砂は一般社団法人セメント協会のセメント強さ試験用標準

**Table 5-1** モルタル系補修材の種類

材料名	材料の種類	水セメント比 W/C (%)
JM	JIS モルタル	50.0
PCM1	ポリマーセメントモルタル	13.6
PCM2	ポリマーセメントモルタル	16.0
PCM3	早強ポリマーセメントモルタル	15.0
PCM4	早強ポリマーセメントモルタル	16.0
FRC	繊維補強ポリマーセメントモルタル	17.5

**Table 5-2** コンクリートの種類と配合

材料名	設計基準 強度 (N/mm <sup>2</sup> )	粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 W/C (%)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
							水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和材 A (g/m <sup>3</sup> )
Co15-1	24	15	8	50	5	47.1	170	337	821	936	842.5
Co15-2	30	15	8	43	5	45.7	170	393	774	936	982.5
Co25-1	24	25	8	50	5	42.1	160	317	751	1049	792.5
Co25-2	30	25	8	43	5	40.7	160	370	710	1049	925.0

砂を使用した。コンクリートは強度差と粗骨材の大きさによる摩耗の違いを確認するため、設計基準強度  $24 \text{ N/mm}^2$  と  $30 \text{ N/mm}^2$  の強度で配合を行い、粗骨材に  $15 \text{ mm}$  と  $25 \text{ mm}$  の粒径のものをそれぞれ使用して4種類のコンクリート供試体（以下、「Co 供試体」という）を作製した。

供試体は幅  $150 \text{ mm}$ 、高さ  $150 \text{ mm}$  の寸法で隅角部が  $40 \text{ mm}$  面となる型枠を用いて、モルタル系補修材の供試体厚さは  $15 \text{ mm}$ 、Co 供試体の厚さは  $60 \text{ mm}$  の寸法で作製した。ここで、PCM1、PCM2、PCM3、PCM4、FRC の供試体表面は、各材料の専用仕上げ養生材を散布して表面を平滑に仕上げた。供試体は各材料3体ずつ作製を行い、モルタル系補修材の供試体は28日間室内気中で、Co 供試体は28日間水中養生を行った。養生完了後、供試体表面に計測補助線を罫書き、次いで供試体の中心部に  $8.5 \text{ mm}$  径のコンクリートドリルビットで削孔を行い固定用の穴を設けた。供試体の形状寸法を Fig. 5-8 に示す。

作製したモルタル系補修材の圧縮強度は、JIS R 5201 : 2015 「セメントの物理試験方法」に示されている  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$  の角柱供試体を作製し、JIS A 1171 : 2016 「ポリマーセメントモルタルの試験方法」に準じて試験を行った。コンクリートの圧縮強度は、JIS A 1132 : 2020 「コンクリートの強度試験用供試体の作り方」に示されている手順で  $\phi 100 \times 200 \text{ mm}$  の円柱供試体を作製し、JIS A 1108 : 2018 「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準じて試験を行った。各材料の材齢28日経過後の圧縮強度を Table 5-3 に示す。

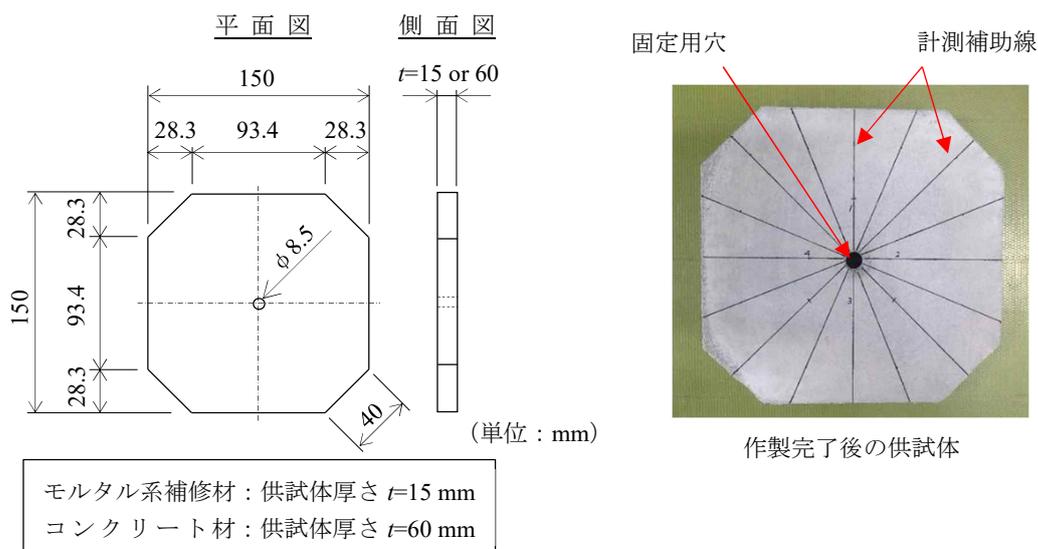


Fig. 5-8 供試体の形状と寸法

**Table 5-3** 各材料の圧縮強度（材齢 28 日）

種類	材料名	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
モルタル系補修材	JM	60.9
	PCM1	55.7
	PCM2	31.4
	PCM3	74.7
	PCM4	59.6
	FRC	66.5
コンクリート	Co15-1	30.5
	Co15-2	38.9
	Co25-1	27.3
	Co25-2	37.0

### 5.3.2 試験方法

本試験に用いる摩耗材は、落差工底版部に摩耗を生じさせる石礫と同様の材質で転がりやすい形状のものを選定する必要がある。また、質量については、七ヶ用水の落差工で確認された石礫が最大長 100 mm 以上のもので 0.4~2 kg 程度の質量があったことから、ある程度の質量を持ったものが望まれる。そこで、摩耗材は花崗岩を球状に加工した直径約 80 mm、質量 0.66



**Fig. 5-9** 摩耗材の形状寸法

±0.02 kg の石球を用意した。摩耗材の形状寸法を Fig. 5-9 に示す。試験を実施する水量は流量計の最大値 70 L/min で行った。なお、供試体は吸水状態によって質量が変動するため、モルタル系補修材の供試体は試験開始の 7 日前から、Co 供試体は固定用穴の削孔完了後から水中浸漬を行い、十分に吸水させた供試体を用いて転がり摩耗試験を行った。

転がり摩耗試験の試験時間は最大 12 時間までとし、試験開始から 6 時間までは 1 時間ごと、6 時間以降は 2 時間ごとに供試体の摩耗質量および摩耗深さの計測を行った。計測後に摩耗体積、平均摩耗深さ、最大摩耗深さをそれぞれ求めた。転がり摩耗試験時の状況を Fig. 5-10 に示す。

摩耗体積は、試験後に供試体の見掛け密度を式 (5-2) より算出し、式 (5-1) から求めた。

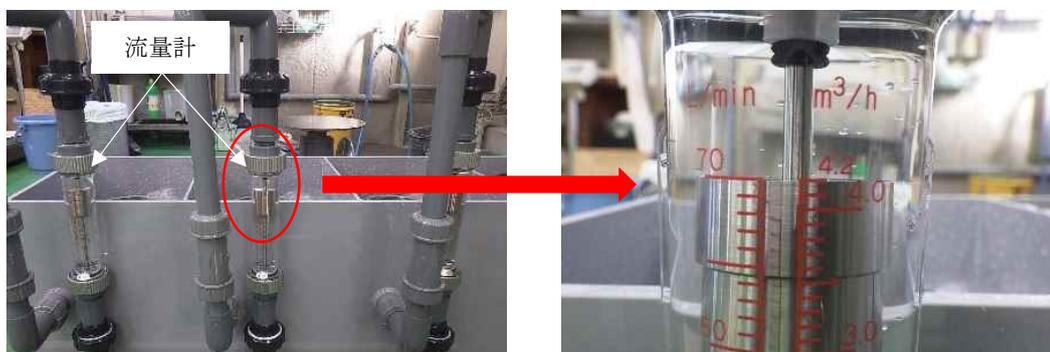
$$\Delta V = \frac{m_1 - m_2}{\rho} \quad (5-1)$$

$$\rho = \frac{m_2}{m_2 - m_3} \times (\rho_0 - \rho_L) + \rho_L \quad (5-2)$$

ここに、 $\Delta V$ : 供試体の摩耗体積 ( $\text{cm}^3$ )、 $m_1$ : 試験前の供試体の空気中質量 (g)、 $m_2$ : 試験後の供試体の空気中質量 (g)、 $m_3$ : 試験後の供試体の水中質量 (g)、 $\rho$ : 供試体の見掛け密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )、 $\rho_0$ : 水温ごとの水密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )、 $\rho_L$ : 空気密度  $0.0012$  ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) である。



試験時 (同一材料, 3 体)



試験時水量 (70 L/min)

Fig. 5-10 転がり摩耗試験時の状況

平均摩耗深さは、摩耗体積  $\Delta V$  を算出後、式 (5-3) より算出した。

$$D_{\text{ave}} = \frac{\Delta V}{\Delta A} \times 10 \quad (5-3)$$

ここに、 $D_{\text{ave}}$ ：供試体の平均摩耗深さ (mm)、 $\Delta A$ ：供試体の摩耗面積 (cm<sup>2</sup>) である。摩耗面積  $\Delta A$  については、供試体をデジタルカメラで撮影し、CAD ソフト (Autodesk, AutoCAD2021) を用いて縮尺を合わせた写真画像から摩耗痕をトレースして求めた。供試体の写真画像は、供試体に対して正対に一定の高さに固定したデジタルカメラから撮影を行った。写真撮影時の状況を Fig. 5-11 に示す。その後、CAD ソフトで実寸法の縮尺で写真画像を取り込み、摩耗痕の境界線上をトレースした。CAD ソフト上に書き加えた線や囲み範囲は、寸法属性を持つことから、トレースした範囲内の網掛けを行い、網掛けした属性から摩耗面積  $\Delta A$  を検出した。Fig. 5-12 に CAD ソフトを用いた摩耗面積  $\Delta A$  の検出状況を示す。

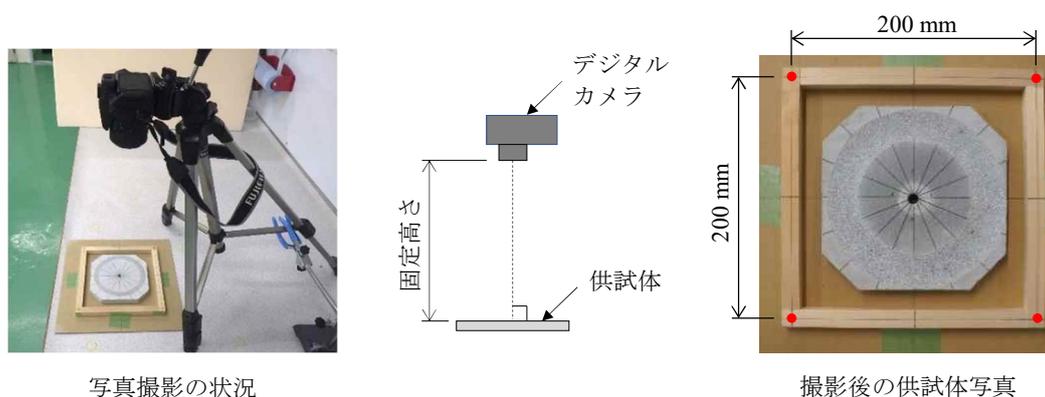


Fig. 5-11 デジタルカメラによる写真撮影

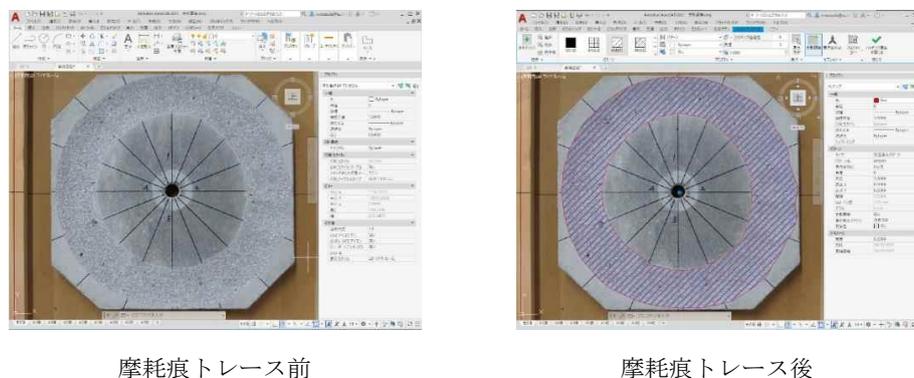
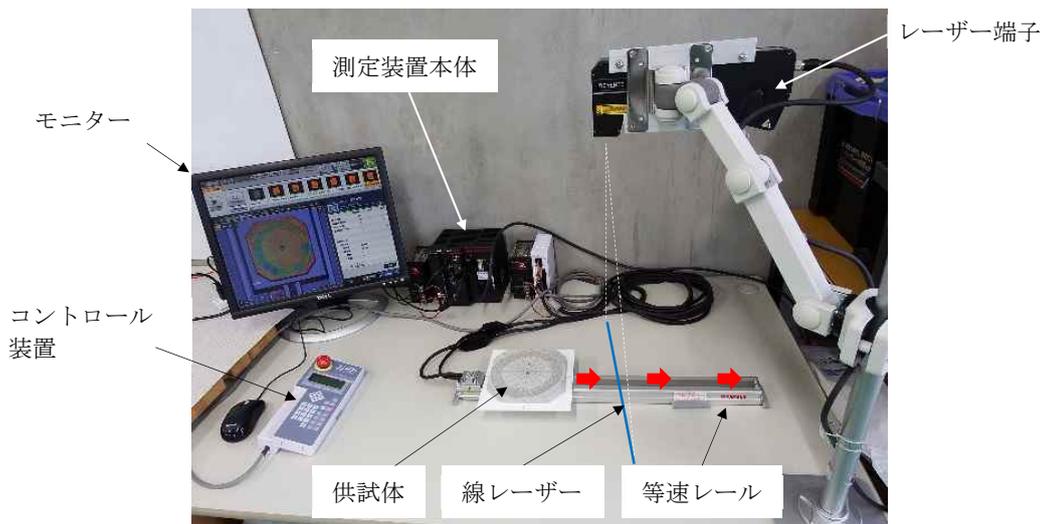
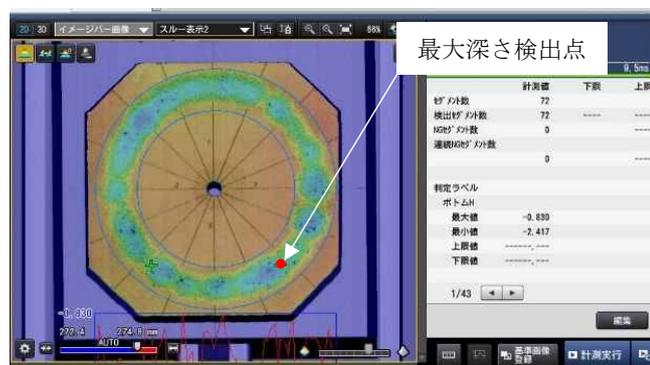


Fig. 5-12 CAD ソフトを用いた摩耗面積  $\Delta A$  の検出

最大摩耗深さは、最大 720 mm の幅で測定できる線レーザー式の 3D 測定器 (KEYENCE, LJ-X8900, 測定精度 深さ 10  $\mu\text{m}$ , 幅 25  $\mu\text{m}$ ) を用いて摩耗痕全体の深さ計測を行い、最大点となる深さを検出して求めた。線レーザー式 3D 測定器による計測方法は、一定速度で往復稼働するようにプログラミングした等速レール (ヤマハ発動機, 単軸ロボット FLIP-X) 上に供試体を乗せ、照射したレーザー線 (スキャン周期 1,000 回/秒) を通過させて供試体全面のデータを計測する。その後、計測後のデータは測定装置本体側で自動合成され、モニター上で最大点となる深さを検出することが可能である。本手法を用いて最大摩耗深さを検出した。線レーザー式 3D 測定器と最大深さの検出画像を Fig. 5-13 に示す。なお、試験は材料ごとに 3 体ずつ行い、3 体の平均値で各計測値を算出した。



レーザー測定器一式



最大深さ検出画像

Fig. 5-13 線レーザー式 3D 測定器と最大深さ検出画像

## 5.4 試験結果

### 5.4.1 モルタル系補修材

モルタル系補修材の転がり摩耗試験の結果を Fig. 5-14 に示す。各材料の摩耗は、いずれもセメントペースト分と細骨材が均一に削られている状態であり、時間経過とともに摩耗面積が徐々に大きくなっていった (Fig. 5-15)。供試体の摩耗面は、補修を行った落差工で確認されたモルタル系補修材の摩耗面と近似した滑らかな面であった。摩耗は、試験開始初期の段階では大きくなり、その後は緩やかになる傾向を示した。このような傾向は、先行研究において、モルタル系の断面修復材は表面付近のセメントペースト分が除去された後、モルタル中の比較的大きな細骨材が露出し始めるのと同時に摩耗の進行速度は小さくなったと報告されていることから (石神ら, 2006)、本試験においても、摩耗材によって表面のセメントペースト分が削られた後に耐摩耗性の大きい細骨材が露出することで摩耗の進行速度が小さくなったと考えられる。一方、試験開始初期段階に大きく摩耗した後の摩耗の進行

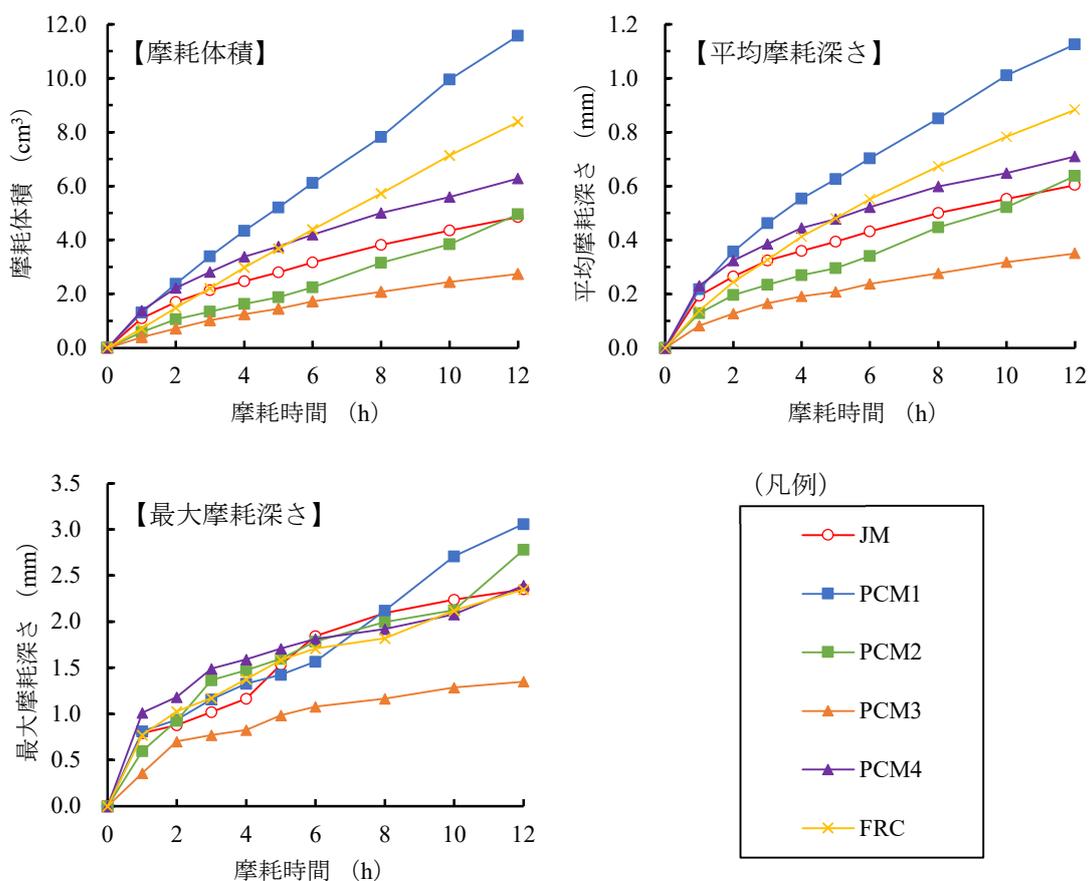


Fig. 5-14 モルタル系補修材の転がり摩耗試験結果

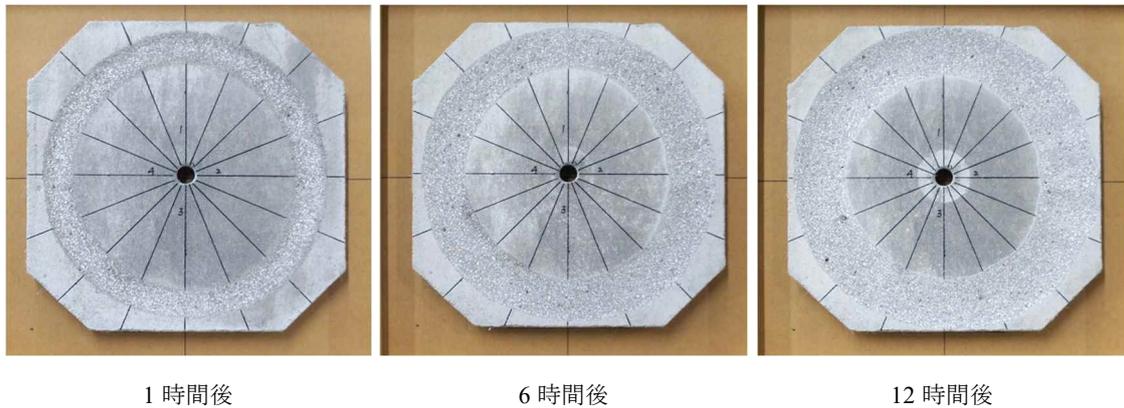


Fig. 5-15 時間経過による摩耗の進行 (PCM1)

Table 5-4 JM を基準にしたモルタル系補修材の摩耗比 (12 時間後)

計測項目	JM	PCM1	PCM2	PCM3	PCM4	FRC
摩耗体積	1.00	2.39	1.02	0.57	1.30	1.73
平均摩耗深さ	1.00	1.86	1.06	0.58	1.18	1.46
最大摩耗深さ	1.00	1.52	1.29	0.62	1.05	1.06

形態は材料によって異なり、摩耗量が一定の割合で増加するもの、緩やかに増加するもの、緩やかに増加した後に急激に増加するものに分かれた。特に試験の材料の中で、摩耗体積と平均摩耗深さが大きくなった PCM1 と FRC は、摩耗体積と摩耗時間の関係図がほぼ直線となった。これは、細骨材に削られやすい材料が使用されているため、セメントペースト分と同時に削られることで、摩耗体積が一定の割合で増加したと考えられる。また、摩耗体積が直線的に増加しているのに対して平均摩耗深さは緩やかに増加しているが、これは、摩耗材の転がり位置が分散し、摩耗が横方向に広がって摩耗面積が拡大したためと考えられる。

耐摩耗性について JM を基準にして比較した場合、12 時間後の摩耗体積、平均摩耗深さ、最大摩耗深さの比は Table 5-4 のようになり、使用した材料の中で圧縮強度が最も高い PCM3 が転がりに対する摩耗の進行速度が小さく、摩耗体積と平均摩耗深さは、 $PCM3 < JM < PCM2 < PCM4 < FRC < PCM1$  の順となった。一方、PCM2 は使用した材料の中で圧縮強度が最も低い材料であったが、PCM2 より圧縮強度が高い PCM1、PCM4、FRC よりも摩耗体積と平均摩耗深さが小さくなった。モルタル系断面修復材の摩耗は、細骨材量が少ないほど摩耗の進行速度は大きくなると報告されていることから (石神ら, 2006)、材料に配合されて

いる細骨材量や骨材の種類の違いによって摩耗の進行速度に差が生じたと考えられる。しかし、PCM2は6時間経過後から時間当たりの摩耗体積と平均摩耗深さは徐々に大きくなった。さらに、最大摩耗深さは10時間経過後に急激に大きくなる傾向を示し、12時間経過後の最大摩耗深さは、PCM3<JM<PCM4<FRC<PCM2<PCM1の順となった。PCM2の摩耗部を観察すると、骨材が抜け落ちて発生した窪みが多数確認されたことから、骨材周辺のセメントペースト分が削られることで結合力が低下し、骨材が脱落して摩耗が大きくなったと考えられる。また、粒径が大きい骨材が抜け落ちた部位は、窪みが発生して周辺のセメントペースト分は削られやすくなる。これが繰り返し起こることで摩耗が促進されたと考えられる。PCM2の骨材の抜け落ち状況を Fig. 5-16 に示す。

FRCは最大摩耗深さがJMと同程度で推移する結果であったが、摩耗体積と平均摩耗深さは大きくなった。FRCは他の材料よりも繊維を多く含む（一般的なポリマーセメントモルタルは0.5 vol%以下、PCM5は3.0 vol%の割合で樹脂系短繊維が混入）という特徴がある。繊維がモルタル中に多数配置されることで、衝撃などによる剥離や欠損によるモルタル分の脱落やひび割れなどを防ぐ効果が期待されるが、繊維はセメントペーストや骨材よりも柔らかい材質であるため、研磨されるような摩耗には弱いと考えられる。試験開始初期の段階では供試体表面に繊維が多数存在していたが、時間の経過とともに消失し、回転する摩耗材によって繊維が剥ぎ取られるように抜け落ちている状態が確認されたことから、大きい質量を持った摩耗材が転がる摩耗に対しては耐久性が低いと考えられる。FRCの繊維の抜け落ち状況を Fig. 5-17 に示す。さらに、FRCに配合されている細骨材は粒径が0.6 mmと他の材料に比べて小さいものが使用されているため、繊維が消失した後の摩耗は大きくなったと考えられる。

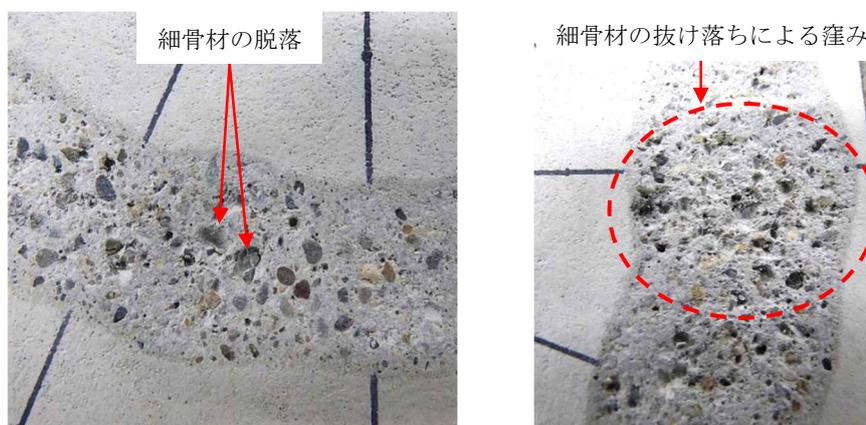


Fig. 5-16 骨材の抜け落ち (PCM2)

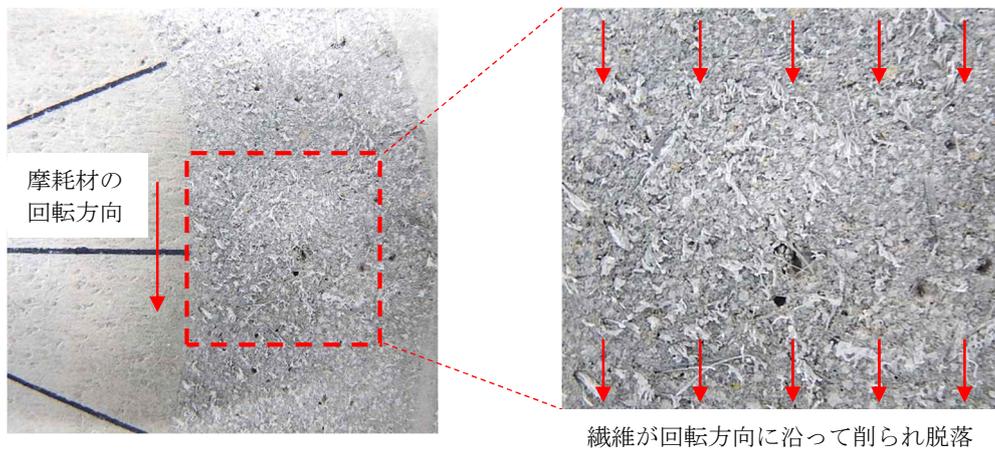


Fig. 5-17 繊維の抜け落ち (FRC)

#### 5.4.2 コンクリート

コンクリートの転がり摩耗試験の結果を Fig. 5-18 に示す。コンクリートの摩耗は、いずれもセメントペースト分と細骨材が均一に削られた後に、粗骨材が徐々に露出し、時間経過

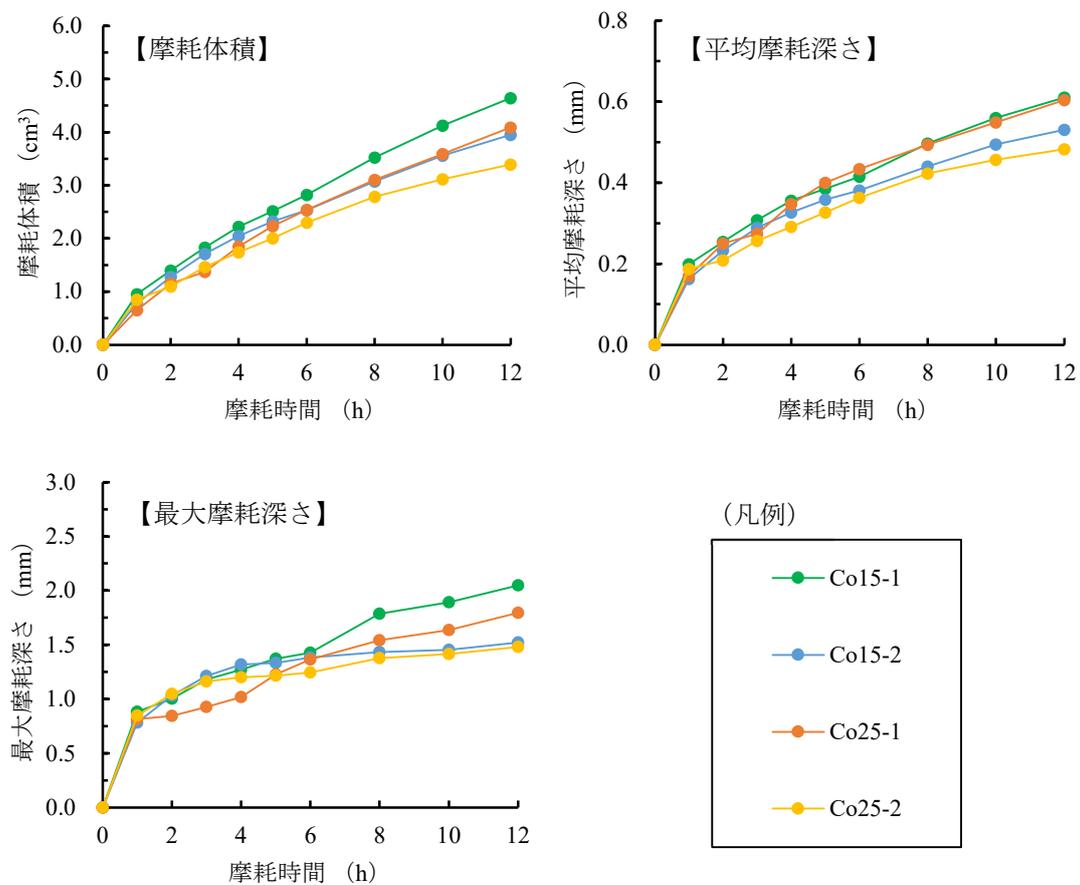


Fig. 5-18 コンクリートの転がり摩耗試験結果

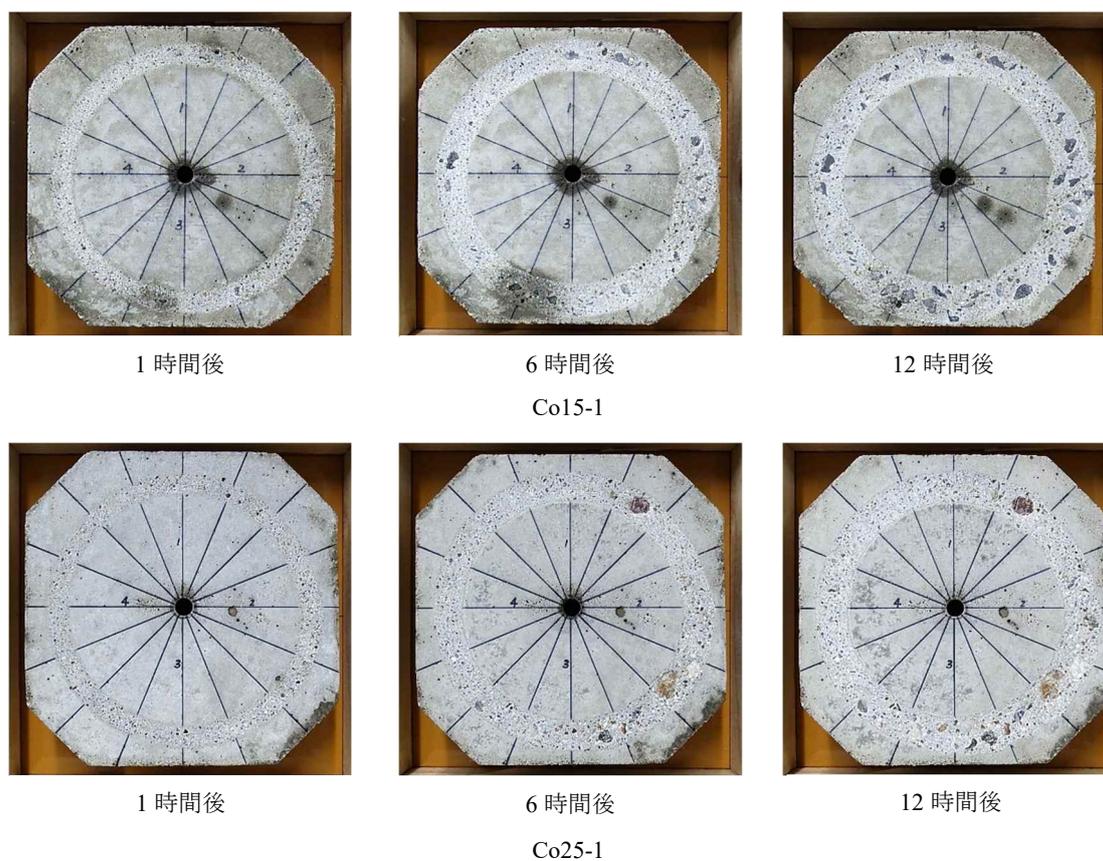


Fig. 5-19 時間経過による摩耗の進行 (Co 供試体)

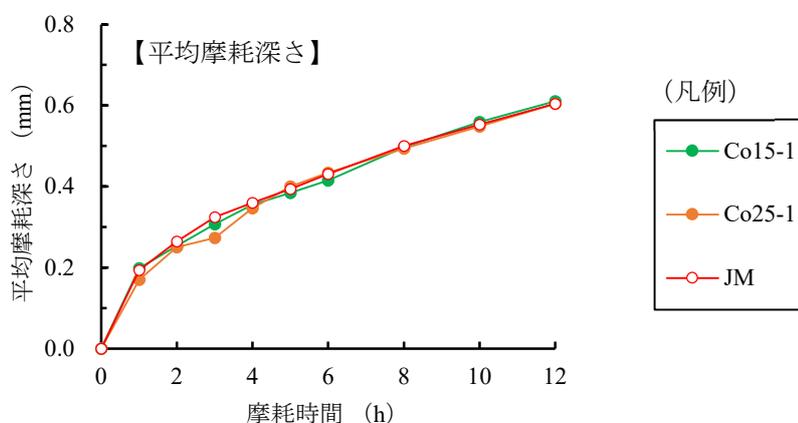
とともに摩耗が大きくなると、粗骨材の露出頻度が大きくなった (Fig. 5-19)。また、粗骨材の表面は、摩耗材によって平滑に削られて摩耗が進行する形態となり、全体の摩耗面は滑らかな面になることが分かった。摩耗は試験開始初期の段階では大きくなり、時間経過とともに緩やかになる傾向を示した。これは、モルタル系補修材同様に、表面付近のセメントペースト分が除去された後、モルタル中の比較的大きな細骨材が露出し始めることで、摩耗の進行速度が小さくなったと考えられる。粗骨材の露出に伴う摩耗抵抗の増加により摩耗量は減少し、中低強度コンクリートほど早期に摩耗量が低下すると報告されていることから (松尾ら, 1992)、粗骨材の露出面積が増えることで抵抗が大きくなり、摩耗が緩やかになったと考えられる。摩耗の進行速度は、粒径が大きく圧縮強度が高い Co25-2 が最も小さい結果となり、各供試体の摩耗体積と平均摩耗深さは、Co25-2 < Co15-2 < Co25-1 < Co15-1 の順となった。このことから、コンクリートの転がりに対する摩耗は、粗骨材の粒径が大きいほど、圧縮強度が大きいほど摩耗の進行速度は小さくなることが分かった。

最大摩耗深さについて、Co15-1 は 6 時間から、Co25-1 は 4 時間から深さが大きくなった。摩耗面を確認すると、粗骨材とモルタルが接触する境界部に窪みが発生していた。これは、粗骨材を覆っていたセメントペースト分と細骨材が削られて薄くなることで粗骨材との結合力が弱まり、周辺のモルタルが剥離しやすくなったためと考えられる。さらに、摩耗材の転がりによって粗骨材に振動が加わり、モルタルがブロック状に脱落して摩耗深さが大きくなったと考えられる。

耐摩耗性についてモルタル系補修材で試験を行った JM を基準にして比較した場合、12 時間後の摩耗体積、平均摩耗深さ、最大摩耗深さの比は **Table 5-5** のようになり、Co15-1 と Co25-1 の平均摩耗深さの比は、ほぼ 1.00 となった。また、JM と Co15-1、Co25-1 の時間当りの平均摩耗深さは、近似した推移となった (**Fig. 5-20**)。このことから、設計基準強度 24 N/mm<sup>2</sup> で配合したコンクリートの平均摩耗深さの進行速度は、JM と同程度であることが示唆され、コンクリートとの対比は JM との平均摩耗深さで検討できると考えられる。

**Table 5-5** JM を基準にしたコンクリートの摩耗比 (12 時間後)

計測項目	JM	Co15-1	Co15-2	Co25-1	Co25-2
摩耗体積	1.00	0.96	0.81	0.84	0.70
平均摩耗深さ	1.00	1.01	0.88	1.00	0.80
最大摩耗深さ	1.00	0.94	0.69	0.76	0.65



**Fig. 5-20** JM とコンクリートの平均摩耗深さ

## 5.5 結論

本研究では、石礫により落差工底板部に生じる転がり摩耗に着目して簡易的な転がり摩耗試験機を作製し、石礫を模擬した摩耗材を用いて水中条件下での水路用モルタル系補修材の耐久性を確認した。また、圧縮強度および粗骨材粒径の異なるコンクリートを用いて転がり摩耗に対するコンクリートの耐久性を確認した。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) 本研究に用いた5種類のモルタル系補修材の中では、圧縮強度が最も高いポリマーセメントモルタルが転がり摩耗に対する耐久性が高いことが分かった。しかし、他の4材料については、細骨材や繊維の配合量の違いによって摩耗の進行は異なり、圧縮強度が大きくても転がり摩耗に対する耐久性が劣るものがあった。このため、石礫が転がる落差工底板部に適用する補修材については、本試験で行ったような転がり摩耗試験による耐久性の照査が必要であると考えられる。
- (2) コンクリートは粗骨材粒径が大きいほど、圧縮強度が高いほど転がり摩耗に対する抵抗性が高くなることが分かった。
- (3) 設計基準強度が  $24 \text{ N/mm}^2$  のコンクリートの平均摩耗深さは、JIS R 5201 : 2015「セメントの物理試験方法」に規定されているセメント砂比が 1 : 3 の配合で作製したモルタルと近似した進行速度で推移することが分かった。このため、落差工のコンクリートに発生する石礫の転がりによる摩耗は、JIS 規定のモルタル材で評価できることが示唆された。
- (4) 作製した転がり摩耗試験機によるモルタル系補修材の摩耗は、落差工で確認されたモルタル系補修材の摩耗面と近似した摩耗表面となることが分かった。また、コンクリートに配合されている粗骨材は、摩耗材の転がりによって平滑に削られる摩耗形態になることが分かった。

本研究に用いた摩耗材は石材を加工したものであるため、石礫と同様の摩耗作用が得られているものと考えられる。しかし、加工品質の誤差や少量であるが摩耗材自体も削れて（質量が初期値から最大で約 0.7%減少）、表面の粗さが失われていくなどの問題点があるため、摩耗材材質の再検討が必要である。また、作製した転がり摩耗試験機の摩耗速度と現地での摩耗速度の比較検証が今後の課題である。

## 引用文献

- 有田淳一，金森拓也，川邊翔平，青柳邦夫，浅野 勇，河端俊典（2020）：回転式水中摩耗試験機を用いた水利施設の促進摩耗試験法，農業農村工学会大会講演会講演要旨集，535-536.
- 石神暁郎，渡嘉敷 勝，森 充広，増川 晋（2006）：農業用コンクリート水路における断面修復材の耐摩耗性評価，コンクリート工学年次論文集，**28**(1)，1739-1744.
- 小柳 洽，六郷恵哲，河合 敦，近藤吉信（1988）：コンクリートの耐衝撃摩耗特性に及ぼす各種要因の影響，コンクリート工学年次論文報告集，**10**(2)，463-468.
- 小柳 洽，六郷恵哲，齋藤保則（1989）：コンクリートの衝撃摩耗におよぼす乾湿条件および衝撃角度について，コンクリート工学年次論文報告集，**11**(1)，265-270.
- 松尾久幸，丸山武彦，村上俊夫，豊島憲明（1992）：高強度コンクリートの耐衝撃摩耗特性に関する一考察，コンクリート工学年次論文報告集，**14**(1)，475-480.
- 中川武志，犬飼利嗣，三島直生，畑中重光（2005）：すりへり試験によるポーラスコンクリートの剥脱耐性評価のための基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，**27**(1)，1261-1266.
- 農林水産省農村振興局整備部設計課施工企画調整室（2015）：農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル【開水路補修編】（案）
- 柴田辰正，小幡浩之，田中秀樹，石川高志（2009）：超高強度繊維補強コンクリートのO式磨耗試験機による磨耗試験，土木技術資料，**51**(2)，62-65.
- 高野智宏，寺田哲美，山中 誠（2009）：水中環境下のコンクリートならびにモルタルの耐摩耗性について，コンクリート工学年次論文集，**31**(1)，709-714.
- 取違 剛，渡邊賢三，横関康祐，盛岡 実（2008）：コンクリートの炭酸化による耐摩耗性向上に関する研究，コンクリート工学年次論文集，**30**(1)，573-578.

## 第6章 結論

現在までに国営・都道府県営土地改良事業により建設された受益面積 100 ha 以上の基幹的な農業水利施設は、2018 年度末時点で、ダム、頭首工、用排水機場などが 7,632 ヲ所、農業用排水路が 5 万 1,454 km に達する。さらに、支線水路を含めた排水路の総延長は約 40 万 km にのぼり、総資産価値は再建設費ベースで 32 兆円と試算されている。しかし、これらの施設の多くは標準耐用年数を超過してきており、施設の老朽化によって突発事故や経年変化による変状が進行し施設の機能低下が著しくなっている。現在までに、既に標準耐用年数を超過している基幹的な水利施設は再建設費ベースで 5.2 兆円であり、全国全体の 27% を占めている。さらに、今後 10 年のうちに標準耐用年数を超過する施設を加えると再建設費ベースで約 8.0 兆円であり、全国全体の 41% を占めると試算されている。

このような背景の下、老朽化施設のストック量の増加に対応し、施設の長寿命化とライフサイクルコストの低減を図るための手法を取り入れた「ストックマネジメント」が導入され、全国で農業水利施設の機能保全対策が実施されている。しかし、機能保全対策で実施されている対策工法の中には、施工後に変状が発生するものがあり、これらの工法が持続的に効果を発揮するかについては明らかにされていない。

本研究では農業水利施設の水路補修に用いるシーリング材とモルタル系補修材に焦点を当て、以下のことを目的に研究を行った。

- ① 若材齢時に背面水圧が作用する水路用シーリング材の止水性評価
- ② 水路用シーリング材の長期水中耐久性評価
- ③ 衝撃摩耗に対するモルタル系補修材の耐久性評価
- ④ 石礫による転がり摩耗に対するモルタル系補修材の耐久性評価

具体的には、第 2 章では、目地充填工法に使用されるシーリング材を対象に、23 ℃と 0 ℃の温度条件で各シーリング材の硬化確認試験を行うとともに、養生 7 日以内の若材齢シーリング材に背面から水圧を与える試験を行い、発生する変状が止水性に及ぼす影響について評価した。第 3 章では、水路用シーリング材を対象に、従来の性能照査条件よりも長い時間（最長 1 年間）水中浸漬させた条件で、耐水性試験を行い吸水率と体積変化率の変化を確認した。さらに、長期間の水中浸漬による物性の変化を確認するため、引張試験と引張接着性試験を実施して、各シーリング材の水中耐久性が長期間持続するか評価を行った。第 4 章では、石礫が流下する落差工の補修に用いるモルタル系補修材を対象に、鋼球を落下させる衝撃試験を行い、材料単材で作製した供試体、Co 供試体に 10 mm および 30 mm で被覆し

た供試体を用いてモルタル系補修材の耐衝撃摩耗性や耐剥離性について被覆厚さの違いによる評価を行った。第5章では、落差工で補修を行ったモルタル系補修材に石礫の転がりによる摩耗が確認されたことから、水流で石礫を模擬した摩耗材を押して転がす簡易的な転がり摩耗試験機を作製し、水中条件での石礫の転がりに対するモルタル系補修材の耐久性を評価した。

以下に、これらの研究結果を要約し、本研究の結論をまとめる。

### 6.1 若材齢時に背面水圧が作用する水路用シーリング材の止水性評価（第2章）

第2章では、若材齢時に背面水圧が作用する水路用シーリング材の止水性について評価した。水路用シーリング材は、施工後の背面水の影響によって早期に膨れや破断、漏水といった変状が生じることがある。本研究では、水路用のシーリング材を対象に、23℃と0℃の温度条件で各シーリング材の硬化確認試験を実施し、シーリング材の硬化状態を把握した。さらに、養生7日以内の若材齢シーリング材を用いて背面から水圧を作用させる耐水圧試験を実施し、若材齢シーリング材に発生する変状が止水性に及ぼす影響について評価した。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) 各シーリング材は低温条件下で硬化速度が低下し、0℃の低温下では23℃よりも1～2週間程度強度発現が遅くなることが分かった。
- (2) 多成分形シーリング材は、1成分形シーリング材よりも強度発現と硬化速度が速く、各シーリング材の硬化速度を比較するとSR-3>PU-2>SR-2>PU-1>SR-1の順であった。
- (3) 材齢1日から7日の若材齢で0.02MPa程度の水圧が作用しても膨れが生じるのみであり、破断や漏水は生じないことが分かった。しかし、作用水圧が0.02MPaよりも高くなると、1成分形および2成分形シーリング材は風船状の膨れや破断が生じることが分かった。
- (4) 各シーリング材の膨れは、長時間水圧が作用し続けると、増加することが分かった。特に、低モジュラスで伸び率が大きいシーリング材は、膨れの増加率が大きくなる傾向であった。
- (5) 本研究に用いた材料の中では、硬化速度が最も速いSR-3が水圧作用時の膨れが最も小さく、水圧による変形に対して抵抗性が高いことが分かった。

## 6.2 水路用シーリング材の長期水中耐久性評価（第3章）

第3章では、水路用シーリング材の長期水中耐久性を評価した。開水路補修・補強マニュアルの照査項目を満たしたシーリング材で補修が行われていても、シーリング材の中には、施工後数年でひび割れや剥離といった変状が生じて、止水性が低下する材料がある。本研究では、従来の性能照査条件よりも長い時間水中浸漬させた各種の水路用シーリング材を対象に、耐水性試験によって吸水率と体積変化率の変化を確認した。また、長期間の水中浸漬によるシーリング材の物性の変化を確認するため、最長1年間の水中浸漬後に引張試験と引張接着性試験を実施して、水路用シーリング材の水中耐久性を評価した。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) 供試体形状によって、各シーリング材の吸水性は異なるが、変成シリコン系はシリコン系およびポリウレタン系よりも吸水率と体積変化率が大きく、耐水性に劣る結果であった。
- (2) 本研究に用いたシーリング材の中には水中浸漬時間の経過とともに材料自体の引張強度と伸び率が低下するものがあり、特にMS-1は短期間で材料自身が劣化し、低下が顕著であった。
- (3) 本研究に用いたシーリング材の中では、水中浸漬時間の経過によるMS-1、PU-1、PU-2の接着性の低下が顕著であった。
- (4) 養生材齢日数が短い状態で水の影響を受けると、引張強度と引張接着強度が低く推移する傾向があるため、硬化養生を十分に行う必要がある。

## 6.3 衝撃摩耗に対するモルタル系補修材の耐久性評価（第4章）

第4章では、衝撃摩耗に対するモルタル系補修材の耐久性を評価した。モルタル系補修材は、流水や流水中の砂によって摩耗した部位に使用されているが、落差工のように石礫の落下衝撃によって摩耗した水利構造物に対する適用事例は少なく、衝撃摩耗に対する耐久性を確認する必要がある。本研究では、モルタル系補修材を落差工のような衝撃摩耗を受ける部位に使用した場合の耐久性を確認するため、石礫を模擬した鋼球を落下させる衝撃試験を行い、材料を単材で作製した供試体、Co供試体に10mm、30mmで被覆した供試体を用いてモルタル系補修材の耐衝撃摩耗性や耐剥離性について被覆厚さの違いによる評価を行った。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) 鋼球を用いた落下衝撃試験の結果、FRC>PCM>Coの順で衝撃摩耗に対する耐久性

が高いことが分かった。

- (2) 補修材の被覆厚さを 10 mm とした場合、低回数 of 衝撃で母材 Co の露出や、母材 Co および被覆材にひび割れが生じることがあり、長期的な耐久性は期待できないことが分かった。
- (3) 落差工のように、石礫の落下による衝撃摩耗を受けた構造物にモルタル系補修材を適用する場合、補修材の被覆厚さを 30 mm 以上とすることで母材 Co への保護効果が期待できることが分かった。

#### 6.4 石礫による転がり摩耗に対するモルタル系補修材の耐久性評価（第 5 章）

第 5 章では、石礫による転がり摩耗に対するモルタル系補修材の耐久性を評価した。石礫の衝突や転がりにより摩耗が発生した落差工では、水路用のモルタル系補修材を用いて補修が行われている。しかし、落差工では通常の水路では想定していない石礫により摩耗が発生するため、水路用のモルタル系補修材を落差工に適用した場合の耐摩耗性を確認する必要がある。本研究では、石礫により落差工底版部に生じる転がり摩耗に着目して簡易的な転がり摩耗試験機を作製した。さらに、石礫を模擬した摩耗材を用いて水中条件下での水路用モルタル系補修材の耐久性を確認した。また、圧縮強度および粗骨材粒径の異なるコンクリートを用いて転がり摩耗に対するコンクリートの耐久性を確認した。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) 本研究に用いた 5 種類のモルタル系補修材の中では、圧縮強度が最も高いポリマーセメントモルタルが転がり摩耗に対する耐久性が高いことが分かった。しかし、他の 4 材料については、細骨材や繊維の配合量の違いによって摩耗の進行は異なり、圧縮強度が大きくても転がり摩耗に対する耐久性が劣るものがあつた。このため、石礫が転がる落差工底版部に適用する補修材については、本試験で行ったような転がり摩耗試験による耐久性の照査が必要であると考えられる。
- (2) コンクリートは粗骨材粒径が大きいほど、圧縮強度が高いほど転がり摩耗に対する抵抗性が高くなることが分かった。
- (3) 設計基準強度が 24 N/mm<sup>2</sup> のコンクリートの平均摩耗深さは、JIS R 5201 : 2015 「セメントの物理試験方法」に規定されているセメント砂比が 1 : 3 の配合で作製したモルタルと近似した進行速度で推移することが分かった。このため、現地落差工のコンクリートに発生する石礫の転がりによる摩耗は、JIS 規定のモルタル材で評価できるこ

とが示唆された。

- (4) 作製した転がり摩耗試験機によるモルタル系補修材の摩耗は、落差工で確認されたモルタル系補修材の摩耗面と近似した摩耗表面となることが分かった。また、コンクリートに配合されている粗骨材は、摩耗材の転がりによって平滑に削られる摩耗形態になることが分かった。

## 6.5 照査方法および管理手法の提案

### 6.5.1 シーリング材の硬化性照査

一般的に農業用水路の補修工事は、非灌漑期の冬季に行われることが多く、防寒対策などを行った上での施工が必要とされている。しかし、目地の補修箇所が多い水路では施工延長が長大になり工期もかかるため、製造メーカーが推奨する温度（一般に 5℃）以上での施工を行うことが困難な場合がある。また、表面被覆などの他工種と併用して行われる目地補修工事では、施工後期に行われることが多くあり、シーリング材の硬化養生を十分に確保できない場合がある。このような場合は、シーリング材の性能を十分に発揮できない状態で供用されることになるため、耐久性に大きく影響を与えることになる。開水路補修・補強マニュアルの低温条件での照査項目は、5℃の温度で28日間養生を行うことになっている。しかし、第2章の結果から、0℃の低温条件下では、23℃の温度条件よりも硬化が遅くなり、接着強度も低下するものが見られたことから、冬季施工で適切な温度管理が行えない場合などを考慮し、5℃以下の温度条件についても硬化性や強度発現性を確認する必要があると考える。付着性（低温条件）および硬化性の照査方法の提案を **Table 6-1** に示す。さらに、第3章の試験結果から、硬化養生時間の短いシーリング材は、水中浸漬後の引張強度、引張接着性が低く推移する傾向が確認された。このため、硬化養生を十分に行えない補修工事に

**Table 6-1** 付着性（低温条件）および硬化性照査方法の提案

性能項目	開水路補修・補強マニュアル 照査方法	照査方法（案）
付着性 （低温条件）	5℃で28日間養生後、JISA 1439の5.20の「引張接着性試験」	0℃で28日間養生後、JISA 1439の「引張接着性試験」
硬化性※	記載なし	標準（+23℃）、低温（0℃）条件で14日、28日後の内部硬化深さ

※ 硬化性は、個別的性能に分類

においてもシーリング材の性能が十分に発揮されるように、成分形および種類ごとにシーリング材の硬化養生日数を施工管理項目に追加するなどの対応が必要である。また、硬化が遅い 1 成分形シーリング材を用いる場合は、十分な養生時間を確保する工程計画や工期設定が必要であると考えられる。

### 6.5.2 シーリング材の止水性照査

現在の開水路補修・補強マニュアルの止水性試験では、 $23 \pm 2$  °C、 $50 \pm 5\%$ RH で各製品の硬化に要する養生期間を与えた状態で性能照査が行われており、「漏水がないこと」のみが規定されている。第 2 章の結果から若材齢時に水圧が作用する場合、0.02 MPa 程度の水圧が作用しても膨れが生じるのみであるが、0.02 MPa よりも高い水圧が作用すると膨れや破断が生じやすくなり、長期間水圧が作用すると膨れは増大し、減圧後に元に戻らない材料があることが確認された。同様の事態が実際の水路で発生した場合、通水阻害や砂礫などの衝突によって破断し漏水が生じることが想定される。このため、止水試験の確認項目に、試験時の膨れ高さや減圧後の復元性を追加する検討が必要である。止水性試験における品質規格値の提案を **Table 6-2** に示す。さらに、施工数日後に降雨や融雪がある場合は、シーリング材に変状が発生していないか点検を行い、膨れや破断が確認される場合は再補修を必ず行うなどを施工管理項目に追加する必要があると考えられる。現場施工における管理項目の提案を **Table 6-3** に示す。

**Table 6-2** 止水性試験，品質規格値の提案

性能項目	開水路補修・補強マニュアル 品質規格値	品質規格値（案）
止水性	漏水がないこと	風船状の膨れや破断，漏水がないこと 終了時（減圧後）に膨れがないこと

**Table 6-3** 現場施工における管理項目

管理項目	開水路補修・補強マニュアル 管理基準項目	管理基準項目（案）
外観	施工面にむらがなく，剥がれ，浮き，ひび割れ，硬化不良がないこと	施工面にむらがなく，剥がれ，浮き，ひび割れ，膨れ，破断，硬化不良がないこと

### 6.5.3 シーリング材の水中耐久性照査

現在の開水路補修・補強マニュアルの接着性は、水中浸漬 28 日の条件で伸び率のみが規定されている。第 3 章で使用した材料の中には、1 年間の水中浸漬で引張接着性試験における  $M_{50}$ ,  $T_{max}$ ,  $E_{max}$  の低下率が-90%以上になる材料が確認された。このような材料を使用した場合、開水路補修・補強マニュアルの照査項目に適合していても使用環境によっては、施工後数年で剥離を起こす可能性が高くなる。さらに、吸水性が大きい材料は、接着面に水が介在して剥離する可能性が高いことから、伸び率のみで接着性を確認するのではなく、引張接着強度の低下率や破壊形態の変化などを性能照査項目に追加する必要がある。また、水中浸漬後に質量が低下する材料や水が変色する材料は、接着性が低下することが確認されたことから、浸漬水の色の変化や水中浸漬後に質量の減少が起こらないかなども確認項目に追加する対応が必要であると考え。付着性（水中条件）および耐水性試験の品質規格値の提案を **Table 6-4** に示す。

**Table 6-4** 付着性（水中条件）と耐水性試験、品質規格値の提案

性能項目	開水路補修・補強マニュアル 品質規格値	品質規格値（案）
付着性（水中条件）	伸び 60%以上	伸び 60%以上 浸漬前からの引張接着強度の低下率が-30%以上 凝集・薄層凝集破壊から界面破壊に変化しないこと
耐水性	吸水率 10%以下	吸水率 10%以下、かつ供試体の長さ変化が +1 mm 以内であり、質量減少がないこと 浸漬水のにごりや色の変化がないこと

※ 照査方法は、+23 °C の水中で 28 日間浸漬後

### 6.5.4 モルタル系補修材の衝撃および転がり摩耗に対する照査

開水路補修・補強マニュアルの摩耗に対する照査は、水や砂礫の影響を模擬した摩耗試験方法によって行われている。一方、石礫が流下する落差工底版部では、石礫の落下衝突や堆積して転がり続けることで摩耗が著しくなっており、開水路補修・補強マニュアルで想定されている作用条件と異なる作用によって摩耗が生じている。このため、石礫が流下する落差工にモルタル系補修材を適用する場合は、石礫の作用を想定した試験方法や照査項目の検討が必要であり、補修材の耐久性を確認する必要がある。第 4 章、第 5 章で作製した摩耗試験機および試験方法は、改良や実際の水路で発生している摩耗との検証が今後必要である

と考えられる。しかし、コンクリートや JIS モルタルを基準とした対比評価は可能であるため、石礫の影響による摩耗に対しての簡易的な照査手法として有効であると考え。耐摩耗性の照査方法の提案を **Table 6-5** に示す。

**Table 6-5** 耐摩耗性の照査方法の提案

項目	水流や砂礫が作用	石礫の落下や衝撃作用が想定される場合	石礫の転がり作用が想定される場合
試験方法	水砂噴流摩耗試験	落下衝撃摩耗試験	転がり摩耗試験

#### 6.5.5 石礫が流下する落差工に適用するモルタル系補修材の被覆厚さ

コンクリート表面を被覆保護する工法で用いられるモルタル系補修材の厚さは、5～15 mm 程度が一般的な厚さである。これは、水や砂礫に対する摩耗に対して検証されている厚さである。しかし、石礫が流下し衝撃が作用するような落差工底版部については厚さの検討が行われておらず、コンクリートを保護するために必要な厚さを設定する必要がある。第4章の試験結果から、モルタル系補修材を厚さ 10 mm で被覆した場合、衝撃の作用によって母材 Co および被覆材自体にひび割れが発生することが明らかとなった。このため、石礫が流下する落差工の補修検討を行う場合は、使用する補修材の選定に加え、補修材の厚さを十分に確保する検討が必要である。モルタル系補修材の被覆厚さの提案を **Table 6-6** に示す。さらに、適用に際しての留意点や石礫の影響を考慮した試験項目を性能照査項目に追加する必要があると考える。

**Table 6-6** モルタル系補修材の被覆厚さ

項目	一般的な水路 (側壁, 底版)	落差工底版部に適用する場合の厚さ
被覆厚さ	5～15 mm	30 mm 以上

## 本研究の要約

農業水利施設の老朽化施設を適切に保全するためにストックマネジメントが導入され、全国の農業水利施設で機能保全対策が実施されている。しかし、機能保全対策で実施されている補修材料の中には、策定された性能照査項目を満たしていても施工後に変状が発生するものがあり、これらの補修材料が持続的に耐久性を有しているか確認する必要がある。そこで、本研究では、農業水利施設の水路補修に用いるシーリング材とモルタル系補修材に焦点を当て、①若材齢時に背面水圧が作用する水路用シーリング材の止水性評価、②水路用シーリング材の長期水中耐久性評価、③衝撃摩耗に対するモルタル系補修材の耐久性評価、④石礫による転がり摩耗に対するモルタル系補修材の耐久性評価の研究を行った。本研究により得られた知見を以下の通り概括する。

### 1) 若材齢時に背面水圧が作用する水路用シーリング材の止水性評価（第2章）

農業用水路の目地補修工法では、施工の容易さや経済性の観点から水路用シーリング材を用いた目地充填工法が多く採用されている。しかし、シーリング材は施工後の背面水の影響によって早期に膨れや破断、漏水といった変状が生じる事例が確認されていることから、水路用のシーリング材を対象に、23℃と0℃の温度条件で各シーリング材の硬化確認試験を実施し、シーリング材の硬化状態を確認した。さらに、硬化材齢が7日以内の若材齢シーリング材を用いて背面から水圧を作用させる耐水圧試験を実施し、シーリング材に発生する変状が止水性に及ぼす影響について評価した。その結果、各シーリング材は低温条件下で硬化速度が低下し、1成分形シーリング材の硬化速度が最も遅くなることが分かった。また、硬化材齢が1日～7日の若材齢では、0.02 MPa程度の水圧が作用しても膨れが生じるのみであるが、作用水圧が0.02 MPaより高くなると、1成分形および2成分形シーリング材は風船状の膨れや破断が生じて止水性が低下し、長時間作用し続けると膨れは増加することが明らかになった。このように若材齢時に変状が発生すると、止水性が低下する要因となるため、性能照査項目に膨れや破断に対する抵抗性を加える必要があると考えられ、評価手法の検討が今後の課題である。

### 2) 水路用シーリング材の長期水中耐久性評価（第3章）

農業用水路の目地充填工法に用いられる水路用シーリング材は、性能照査項目で品質が確認されたものが使用されている。しかし、シーリング材の中には、施工後数年でひび割れ

や剥離などの変状が生じて、止水性が低下する材料があることから、従来の性能照査条件よりも長い時間（最長1年間）水中浸漬させた各種の水路用シーリング材を対象に、耐水性試験、引張試験、引張接着性試験を実施して、シーリング材の水中耐久性を評価した。その結果、変成シリコン系シーリング材は、吸水による体積変化が大きく、他のシーリング材と比較して耐水性に劣ることが分かった。また、1成分形変成シリコン系シーリング材は水中浸漬後、短期間で接着性の低下が顕著となり、1成分形および2成分形ポリウレタン系シーリング材は長期間の水中浸漬で接着面に水が介在し、接着性が低下することが分かった。さらに、硬化材齢日数が短い状態で水の影響を受けると、引張強度と引張接着強度が低く推移することが明らかになった。このため、使用する材料の選定には注意を要するとともに、性能照査項目に接着強度の低下率や破壊形態などを確認する項目が必要であることが示唆された。また、シーリング材の耐久性確保のため、成分形ごとに硬化養生日数を施工管理項目に追加するなどの検討が今後の課題にあることが分かった。

### 3) 衝撃摩耗に対するモルタル系補修材の耐久性評価（第4章）

コンクリート水路などの摩耗した部位には、表面被覆や断面修復などの工法によって補修が行われており、これらの工法に使用される材料は、主にモルタル系補修材が用いられている。モルタル系補修材の耐摩耗性は、性能照査で定められた水や砂礫による摩耗を想定した試験によって確認されている。一方、急峻な地形に位置する落差工では、河川から流入した石礫の影響によって大きく摩耗している。落差工のように石礫の落下衝撃によって摩耗した水利構造物に対してモルタル系補修材を適用した事例は少なく、施工における厚さも明らかにされていない。そこで、モルタル系補修材を落差工のような衝撃摩耗を受ける部位に使用した場合の耐久性を確認するため、石礫を模擬した鋼球を落下させる衝撃試験を行い、材料を単材で作製した供試体やコンクリートで作製した供試体に10 mm、30 mmで被覆した供試体を用いてモルタル系補修材の耐衝撃摩耗性や耐剥離性について被覆厚さの違いによる評価を行った。その結果、単材では繊維補強ポリマーセメントモルタル>ポリマーセメントモルタル>コンクリートの順で衝撃摩耗に優れることが分かった。また、補修材の被覆厚さを10 mmとした場合、低回数の衝撃で基板コンクリートが露出し、被覆材や基板コンクリートにひび割れが生じたことから、保護効果が期待できるのは30 mm程度必要であることが分かった。このため、石礫が流下する落差工の補修検討を行う場合は、使用する補修材の選定に加え、補修材の厚さを十分に確保する計画が必要であることが示唆された。

#### 4) 石礫による転がり摩耗に対するモルタル系補修材の耐久性評価 (第5章)

石礫の衝突や転がりによって摩耗が発生した落差工では、水路用のモルタル系補修材を用いて補修が行われている。しかし、補修施工が行われた落差工で石礫の転がりによって発生したと考えられる摩耗が確認されたことから、石礫による転がり摩耗に着目した簡易的な転がり摩耗試験機を作製し、石礫を模擬した摩耗材を用いてモルタル系補修材の耐久性を確認した。その結果、圧縮強度が最も高いポリマーセメントモルタルが転がり摩耗に対する耐久性が高い結果であったが、細骨材や繊維などの配合量の違いによって摩耗の進行は異なり、圧縮強度が大きくても転がり摩耗に対する耐久性が劣るものが確認された。このことから、モルタル系補修材の転がりに対する耐摩耗性は圧縮強度に比例しないことが分かった。一方、コンクリートは粗骨材粒径が大きいほど、圧縮強度が高いほど転がり摩耗に対する抵抗性が高くなり、転がりに対する耐摩耗性は圧縮強度に比例する。さらに、設計基準強度が  $24 \text{ N/mm}^2$  のコンクリートの平均摩耗深さは、JIS 規定のモルタル材と近似した進行速度で推移することが分かった。このため、落差工のコンクリートに発生する石礫の転がりによる摩耗は、JIS 規定のモルタル材で評価できることが示唆された。また、作製した転がり摩耗試験機によるモルタル系補修材の摩耗は、落差工で確認されたモルタル系補修材の摩耗面と近似した摩耗表面となることから、簡易的な照査手法として有効であると考えられる。しかし、安定した試験を行うために摩耗材材質などの検討や現地との摩耗速度の比較検証などが今後の課題である。

## 著者発表リスト

### 投稿論文

松田展也, 宮村和孝, 森 丈久 (2018) : 衝撃摩耗に対するモルタル系水路補修材の耐久性評価, 農業農村工学会論文集, **86**(1), 27-34.

松田展也, 森 丈久 (2020) : 若材齢時に背面水圧が作用する農業用水路用シーリング材の止水性評価, 農業農村工学会論文集, **88**(2), 49-58.

松田展也, 森 丈久 (2021) : 農業用水路用シーリング材の長期水中耐久性評価, 農業農村工学会論文集, **89**(2), 85-95.

松田展也, 森 丈久 (2021) : 石礫による転がり摩耗に対するモルタル系補修材の耐久性評価, 農業農村工学会誌, **90**(4), 29-32.

### 口頭発表

2016.8.30-9.1 平成 28 年度 農業農村工学会大会講演会

松田展也, 宮村和孝, 森 丈久 (2016) : 衝撃荷重に対する水路補修材料の耐久性評価, 農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 797-798.

2019.11.27-28 第 76 回農業農村工学会京都支部研究発表会

松田展也, 森 丈久 (2019) : 背面水圧が作用する水路用シーリング材の止水性評価, 農業農村工学会京都支部研究発表会講演要旨集, 132-133.

2020.12.18-2021.3.31 第 77 回農業農村工学会京都支部研究発表会(オンデマンド Web 発表)

松田展也, 森 丈久 (2020) : 農業用水路用シーリング材の水中耐久性評価, 農業農村工学会京都支部研究発表会講演要旨集, 89-90.

## - 謝 辞 -

本論文をまとめるにあたり、懇切丁寧な御指導と貴重な御教示を賜りました、生物資源環境科学部環境科学科教授 森 丈久 先生に深甚なる感謝の意を表します。森 丈久 先生には、お忙しい中、研究内容について何度も打合せを行っていただきました。また、私の遅筆、乱筆にも関わらず、論文執筆に対し親切、丁寧に何度も御指導いただきましたこと、重ねて衷心より感謝の意を表します。

本研究の遂行にあたり、供試体の作製や実験などの御協力を賜りました地域施設学研究室の歴代同窓生の皆さんに感謝の意を表します。

本論文を執筆する機会を与えて下さいました、田中シビルテック株式会社 田中 正孝 代表取締役会長、湯本 聡 代表取締役社長、川名 章 専務取締役、田中 和孝 取締役、吉田 正治 取締役に心より感謝の意を表します。特に、湯本 聡 代表取締役社長には、博士学位の取得を勧めていただいたこと、研究に必要な資機材などを快く導入していただきました。また、業務中でも論文執筆の時間と叱咤激励をいただきましたこと、重ねて感謝の意を表します。様々な御支援を賜りました、田中ホールディングス株式会社、田中シビルテック株式会社の社員の方々に対して厚く御礼申し上げます。