共同研究報告書
整理番号第349号

下水処理施設のコンクリート補修材料に関する共同研究報告書

平成１８年７月

独立行政法人土木研究所
材料地盤研究グループ新材料チーム
住友大阪セメント株式会社
太平洋マテリアル株式会社
日鐵セメント株式会社
三井化学産資株式会社
日本ペイント株式会社
日本ジッコウ株式会社
株式会社奥村組
福井ファイバーテック株式会社
東レ株式会社
日鉄コンポジット株式会社
三菱化学産資株式会社
社団法人日本チタン協会

Copyright © (2006) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

共同研究報告書
第349号　平成18年7月

下水処理施設のコンクリート補修材料に関する共同研究報告書

材料地盤研究グループ新材料チーム		上席研究員	西崎　到	
		研究員	冨山　禎仁	
住友大阪セメント株式会社	若杉三紀夫	榊原　弘幸	杉浦　章雄	
太平洋マテリアル株式会社	松林　裕二	佐伯　俊之		
日鐵セメント株式会社	金沢　智彦	工藤　篤志		
三井化学産資株式会社	稗田　省三	小林　和保		
日本ペイント株式会社	大島　敏幸	上中　章三		
日本ジッコウ株式会社	藤澤　健一			
株式会社奥村組	東　邦和 向　広吉	石井　敏之	廣中　哲也	
福井ファイバーテック株式会社	大川　義人	小宮　巖		
東レ株式会社	近藤富士夫			
日鉄コンポジット株式会社	斉藤　誠			
三菱化学産資株式会社	久部　修弘	佐藤　正一	石川　敏彦	
社団法人日本チタン協会	伊藤　均	山本　孝美	大沢　治男	

要　旨

下水処理施設の長寿命化や維持管理負担の軽減のためには、下水管渠内の腐食環境を緩和させる一方で、鉄筋コンクリートの改良等により構造物の耐食性を向上させる必要がある。そこで、耐食性に優れた新素材とその性能評価方法を検討し、これらを活用した既設下水処理施設の新しいコンクリート補修技術を確立することを目標とし、平成14年度から平成16年度にかけて、独立行政法人土木研究所、民間11社および公益法人1団体の間で共同研究を実施した。本報告は、その成果を取りまとめたものである。

キーワード：下水処理施設、腐食環境、耐食性、補修材料、新素材、性能評価

まえがき

下水処理施設においては、硫化水素・硫酸塩還元細菌および硫黄酸化細菌が関与するコンクリート腐食が起こりやすい。このため耐食性に優れた新しい材料の導入による、防食性能の向上が期待されている。下水道の整備率は平成16年度で処理人口比68%と進みつつあることから、今後は維持管理の比重が高まってくるものと考えられる。このため、下水処理施設を構築するコンクリート構造物についても、補修の重要性が高まりつつある。コンクリートの補修は、劣化部の除去、断面の復元、再劣化防止が主な工程である。良好な補修効果は材料と施工によるところが大きいが、良好な施工条件の確保が困難な場合もある。このためコンクリート補修材料には、施工性、耐食性、コンクリートとの接着性、コストなどの点で、改善が望まれていた。

このような状況から、独立行政法人土木研究所新材料チームは、平成13年度より国土交通省国土技術政策総合研究所から、下水処理施設コンクリート補修材料への新素材の導入やそれに対応する施工技術の研究を委託された（「下水道施設への新素材の活用技術の開発」（平成13～16年度））。土木研究所ではこれを受けて研究に着手し、新しい材料によるコンクリート補修材料の技術開発を図るため、補修材料を製造・開発する民間会社との共同研究を実施することとし、「下水処理施設のコンクリート補修材料に関する共同研究」（平成14ー16年度）を提案し、参加希望会社を公募した。その結果、11社1団体（住友大阪セメント(株)、太平洋マテリアル(株)、日鐵セメント(株)、三井化学産資(株)、日本ペイント(株)、日本ジッコウ(株)、(株)奥村組、福井ファイバーテック(株)、三菱化学産資(株)、東レ(株)、日鉄コンポジット(株)、（社）日本チタン協会）の参加を得て、共同研究を実施した。

本共同研究では、様々な下水処理施設コンクリート補修材料を対象とした。耐酸モルタルについては、その耐酸性能を的確に評価するための試験方法を検討するとともに、補修に当たっての適用条件を提案した。また、被覆系ライニング材との組み合わせによる耐久性向上効果を調べた。現在の補修材料の主流である被覆系ライニング材については、最新の材料の性能とその評価方法について検討するとともに、施工条件・時期と被覆の性能の関係についての研究を行った。炭素繊維シートを始めとする連続繊維補強材は、コンクリート補強工法として既に確立しているが、本研究では下水処理施設環境での適用性と適用方法について検討を行った。シートライニング材については比較的安価な費用で実施可能な２種類のシートライニング材を開発した。

本報告書は、これらの共同研究の成果をとりまとめたものである。本報告書が下水処理施設の維持管理の高度化に役立てば幸いである。

共同研究の概要

1．共同研究の目的

わが国の下水道整備は年々進んでおり、下水道処理人口普及率（総人口に対する下水道処理区域内人口の割合）は既に 70%近くとなっている[1)]。今日では下水環境における防食指針類が整備されたことも一因となって、新設構造物の防食性能については以前に比べ大幅に改善されている。しかしながら、過去に建設された施設については環境に適した十分な防食性能を有していないものも多く、施設の機能維持を脅かすようなコンクリート腐食劣化事例が顕在化してきた。東京都内だけを例にとっても、コンクリートの腐食劣化が原因となった陥没事故は年間約 1,400 件も発生していると報告されている[1)]。これらの劣化事例は主に戦前に敷設された管きょが中心であるが、今後 10 年もしないうちに、高度成長期以降に整備された大量の施設が老朽化してくるものと考えられており、下水道事業では既設構造物の維持管理、とりわけ補修技術の重要性が益々高まってきている。

これらの背景から本共同研究では、下水処理施設補修の効率化・低コスト化をめざして、耐食性に優れた新素材とその性能評価手法を検討し、これらを活用した下水処理施設の新しいコンクリート補修技術を確立することを目的とした。要求性能を満たす材料・補修技術が開発できる組織・機関を公募し、民間 11 社（住友大阪セメント㈱、太平洋マテリアル㈱、日鐵セメント㈱、三井化学産資㈱、日本ペイント㈱、日本ジッコウ㈱、㈱奥村組、福井ファイバーテック㈱、東レ㈱、日鉄コンポジット㈱、三菱化学産資㈱）および公益法人 1 団体（㈳日本チタン協会）の参加を得て、平成 14 年度から平成 16 年度までの期間に実施した。

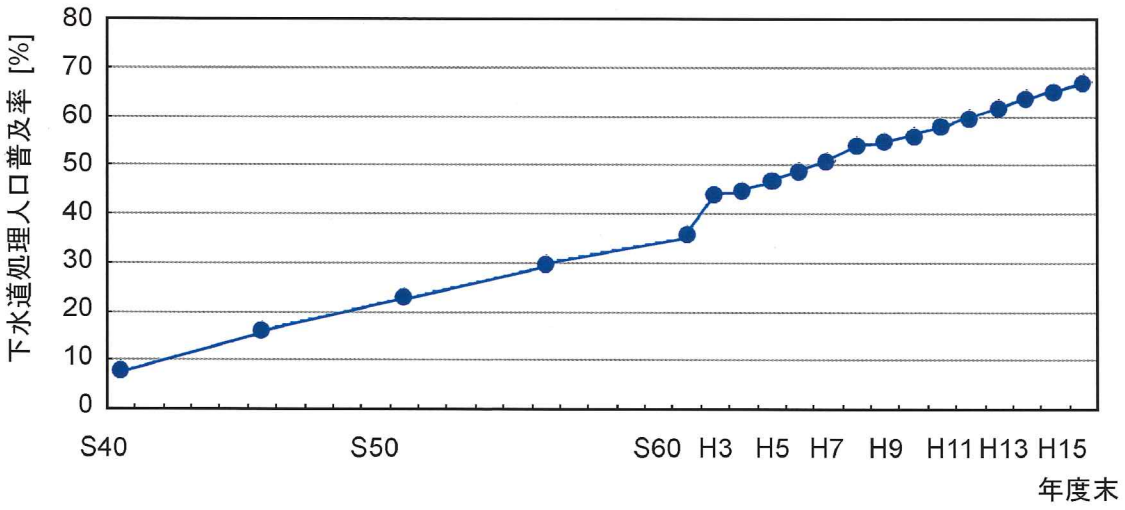


図 1　下水道処理人口普及率の推移[1)]

参考文献：1) 国土交通省 都市・地域整備局 下水道部ホームページ http://www.mlit.go.jp/crd/city/sewerage/

２．共同研究の項目

下水処理施設におけるコンクリート構造物は、微生物によって生成される硫酸等の腐食性物質により腐食劣化する。構造物の健全性を所定の耐用年数まで維持させるためには、腐食環境の緩和や、耐食性の高い材料による補修など、適切な対策を講じる必要がある。

一般に、下水処理施設のコンクリート構造物の補修では、劣化部を除去して構造断面を修復した後、防食被覆（ライニング材）によりコンクリート面を腐食環境から遮断する手法がとられている。防食被覆工法に関して現在普及している規格には、日本下水道事業団編纂の「下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術指針・同マニュアル（平成 14 年 12 月）」や、（社）日本下水道協会編纂の「下水道管路施設腐食対策の手引き（案）（平成 14 年 5 月）」等がある。これらのマニュアルでは、腐食環境の厳しさや点検・改築の難易に応じ最適な防食被覆工法が分類・整理されていると共に、各種工法の品質管理、性能保証、検査等の方法について規定されている（表１参照）。

表１　腐食環境や点検・補修・改築の難易に応じた防食材料の分類と本研究の技術開発の方向

腐食環境分類（日本下水道事業団による区分）	Ⅳ	$Ⅲ_1$	$Ⅲ_2$	$Ⅱ_1$	$Ⅱ_2$	$Ⅰ_1$	$Ⅰ_2$
硫化水素ガス年間平均値（日本下水道事業団による区分）	硫酸による腐食が殆ど生じない	10ppm 未満		10～50ppm		50ppm 以上	
10 年で到達する劣化状況（日本下水道協会による区分）	（設定無し）	コンクリート表面が荒れた状態		骨材が露出		鉄筋が露出	
点検・補修・改築の難易	易／難	易	難	易	難	易	難
対応する防食材料（日本下水道事業団）	塗布型ライニング材（A種）	塗布型ライニング材（B種）	塗布型ライニング材（C種）		塗布型ライニング材（D_1種）		シートライニング材（D_2種）
本研究の技術開発の方向	耐酸モルタルの適用性の検討		塗布型ライニング材の信頼性・性能の向上				シートライニング工法の施工性・経済性の向上

本共同研究では、表１の分類に応じ以下の防食材料や工法について開発・改良に取り組み、下水処理施設補修用材料としての適用性を評価した。また、上述のマニュアル等で規定されている試験評価方法に加え、いくつかの新しい試験方法の導入を試み、その妥当性について検証した。

① 耐酸性を有する断面修復材（耐酸モルタル）に関する検討

a) 耐酸モルタルの強度発現性、耐ひび割れ性、付着力などの特性を明らかにし、下水処理施設補修用材料としての適用性を評価するとともに、耐酸モルタルの品質に影響を与える要因について検討する。

b) 断面修復材の耐酸性を評価するために、実際の下水処理施設内により近い環境条件を再現するべく新たな試験方法を考案し、その妥当性について検証する。

c) 腐食環境の比較的穏やかな条件（硫化水素濃度 0～10ppm 程度）下で、塗布型ライニング材などの被覆を必要としない、すなわち「防食被覆を兼ねた」断面修復材としての耐酸モルタルの適用性について検証する。

d) 耐酸モルタルを塗布型ライニング材の下地として使用する場合における、従来の断面修復材に比べた優位性について検証する。

② 塗布型ライニング材に関する検討

a) 膨れを抑制する新しい塗装系を開発し、既存のマニュアル類に準拠した評価方法に基づき、下水処理施設におけるコンクリート補修への適用性を明らかにする。

b) 塗布型ライニング材の耐硫酸性を定量的に評価する手段として、塗膜の引張強度試験の有効性について検証する。

c) 温冷水繰返し浸せきを行うことにより塗布型ライニング材に膨れを意図的に発生させ、引き剥がし試験による塗膜の接着性評価の妥当性を検証すると共に、塗布型ライニング材の接着性と膨れ抑制効果との相関性について検討する。

③ シートライニング材に関する検討

従来のものに比べ施工性や経済性に優れた、新しいシートライニング材および工法の開発をめざし、以下の 2 項目について検討した。

a) 引抜成形法により作製した繊維強化プラスチック（FRP）を活用した新しい防食被覆材料（パネル）とそれに対応する施工技術を開発し、下水環境における適用性を検証する。

b) 金属材料（純チタン板）を活用した新しい防食被覆工法を開発し、下水環境における適用性を検証する。

3．共同研究の概略

本共同研究では研究を効率的に進めるために、検討対象となる項目別に五つの班にわかれ作業を進めた。以下に各班の検討内容の概略をまとめた。

（1）耐酸モルタル班

耐酸モルタルの耐硫酸性試験方法には、硫酸溶液への浸せき試験と、硫化水素ガス中で硫黄酸化細菌を用いる試験がある。前者は溶液中の耐食性試験であり、主に気相部で起きる実際の劣化とは条件がかなり異なるため、寿命予測が困難である。一方、後者は実際の条件により近いが、特別な試験装置を使用しなければならない。そこで耐酸モルタル班では、壁面で微生物により生成される硫酸を模擬する簡便な試験方法として「硫酸滴下試験」を考案し、耐酸モルタルの耐硫酸性評価方法としての適性について検討した。また、本手法に基づき耐酸モルタルの耐硫酸性を評価し、実際の下水処理施設のコンクリート補修への適用性について検討した。

（2）塗布型ライニング材班

塗布型ライニング材班では、樹脂系の防食被覆工法に加え、炭素繊維シートを用いた補強工法についても検討した。

①塗布型ライニング材の信頼性に関する検討

塗布型ライニング材は多種製品が販売され、最も普及している補修材料である。塗布型ライニング材の主な劣化現象である“膨れ”の発生は、その付着力と密接な関係があることが知られている。しかし、従来その評価に用いられている付着強度試験（建研式）では、試験結果と膨れ抑制能力との間に明確な相関が認められないことが多く、十分な接着力の評価となっていない。そこで、膨れを抑制する新しい塗装系を開発しその硫酸遮断性および耐硫酸性を評価すると共に、膨れ抑制能力の新しい指標となる付着性能試験方法（引き剥がし試験）の適用性について検討した。耐硫酸性については、これまでは外観変化等により評価されてきたが、樹脂の劣化をより定量的に評価する手段として引張強度試験の有効性について検討した。

②炭素繊維シートによるコンクリート補強工法の下水処理施設への適用性に関する検討

炭素繊維シート工法は、炭素繊維を一方向に引き揃えた一方向シート、あるいは縦横二方向に織り込んだ二方向シートを、室温で硬化する樹脂によりコンクリート表面に含浸させながら接着させ、構造物を補修・補強する工法である。本工法は、コンクリート橋梁やトンネル等の耐震補強工法として既に確立しているが、下水道環境においても優れた耐食性を示す可能性があることから、防食効果と補強効果を兼ね備えたコンクリート補修工法として活用できるものと期待される。そこで、炭素繊維シートがコンクリートとの付着性能を特に要求される下水処理施設の床スラブや梁の曲げ補強を想定し、小型供試体を用いた曲げ強度試験によって硫酸環境下における炭素繊維シートの曲げ補強性能について検討した。

（3）耐酸モルタル・塗布型ライニング材合同班

下水処理施設の補修工事において塗布型ライニング材を使用する場合、劣化部を除去して断面修復を行った後、ライニング材を施工するのが通常である。このとき、施工するタイミングや施工時における断面修復材の表面水分量によって、塗布型ライニング材の品質は大きく左右される可能性がある。また、何らかの原因によりライニング塗膜の表面に傷やピンホールが発生した場合には、欠損部から浸透する硫酸によって塗膜の膨れやはがれに進展してしまう恐れもある。そこで耐酸モルタル・塗布型ライニング材合同班では、耐酸モルタル班および塗布型ライニング材班全社の参加を得て、以下の項目について検討した。

① 塗布型ライニング材の付着強度に及ぼす施工のタイミングの影響
② 塗布型ライニング材の付着強度に及ぼす断面修復材の表面水分量の影響
③ 塗布型ライニング材との併用時における耐酸モルタルの劣化抑制性能

（4）ＦＲＰシートライニング材班

繊維強化プラスチック（ＦＲＰ）はこれまでにもシートライニング材に用いられたことがある、耐食性に優れた素材である。ＦＲＰ単体でシートを作製することにより軽量化が図れ、現場における施工性を改善できるものと期待される。本研究では引抜成形法によるＦＲＰを使用した、比較的安価で高品質なシートライニング材の開発に取り組んだ。

（5）チタンシートライニング材班

チタンは pH 1 程度の硫酸には侵されず、酸の浸透もないため長寿命が期待できる。また薄板で用いれば十分に軽量であるため、現場における施工性も改善できるものと期待される。チタンを鋼材表面の防食に用いる防食技術の開発が進んでいるが、下水処理施設におけるコンクリート表面の防食には一部の用途を除き適用されていない。そこでチタンシートライニング材班では、チタン板を用いた新たなシートライニング工法を開発し、下水処理施設におけるコンクリート補修技術の確立を目指した。

４．共同研究の体制

本共同研究に参加した組織・機関は表２の通りである。

表２　「下水処理施設のコンクリート補修材料に関する共同研究」参加組織

班　名	参加組織
耐酸モルタル班	・住友大阪セメント株式会社 ・太平洋マテリアル株式会社 ・日鐵セメント株式会社
塗布型ライニング材班	・三井化学産資株式会社 ・日本ペイント株式会社 ・日本ジッコウ株式会社 ・東レ株式会社 ・日鉄コンポジット株式会社 ・三菱化学産資株式会社
耐酸モルタル・塗布型ライニング材合同班	・耐酸モルタル班、塗布型ライニング材班参加の各社
ＦＲＰシートライニング班	・株式会社奥村組 ・福井ファイバーテック株式会社
チタンシートライニング班	・社団法人日本チタン協会

５．共同研究の全体計画

本共同研究は、表３に示す計画で進めた。

表３　「下水処理施設のコンクリート補修材料に関する共同研究」全体計画

研究項目	研究細目	年次計画		
		Ｈ１４	Ｈ１５	Ｈ１６
１．要求性能とその評価方法	・要求性能 ・評価方法			
２．新材料・施工方法の開発	・材料開発 ・施工方法の開発			
３．性能評価	・室内試験 ・現場施工性試験			
４．結果のとりまとめ	・成果のまとめと報告書の作成			

共同研究参加者名簿

独立行政法人土木研究所	西崎　到、明嵐政司（～H16.3）、冨山禎仁（H16.4～）
住友大阪セメント株式会社	若杉三紀夫（～H16.9）、榊原弘幸、安藤重裕（～H16.9）、杉浦章雄（H15.1～）、内畠　忍（～H14.12）
太平洋マテリアル株式会社	副田孝一、斉藤　仁（～H15.10）、松林裕二（H15.10～）、佐伯俊之
日鐵セメント株式会社	下林清一（～H15.6）、武田正宏（H15.7～）、若杉伸一、工藤篤志、金沢智彦
三井化学産資株式会社	稗田省三、小林和保、山田康史（～H16.9）
日本ペイント株式会社	大島敏幸、金森　博（～16.3）、上中章三（H16.4～）
日本ジッコウ株式会社	藤澤健一
株式会社奥村組	東　邦和、石井敏之、松田敦夫（～H15.3）、廣中哲也、向　広吉（H16.4～）、田中雅彦（H15.4～H16.3）、高橋一成（～H16.3）
福井ファイバーテック株式会社	大川義人、小宮　巖
東レ株式会社	深川英明（～H16.4）近藤富士夫
日鉄コンポジット株式会社	斉藤　誠（H14.4～H15.11、H16.11～） 加治木俊行（H15.12～H16.10）
三菱化学産資株式会社	久部修弘、佐藤正一、石川敏彦
社団法人日本チタン協会	伊藤　均、山本孝美、大沢治男

「下水処理施設のコンクリート補修材料に関する共同研究報告書」　目次

第１編 下水処理施設の腐食環境に関する調査 1

１．概要 1

２．文献調査 1

２．１ 下水道環境下における構造物の劣化に関する一般論 1

２．１．１ コンクリート構造物の劣化機構 1

２．１．２ 既存基準類の腐食環境の分類 3

２．２ 既往の研究 7

２．２．１ 実際の下水処理施設における環境測定 7

２．２．２ 簡易的な手法による耐硫酸性試験 7

２．２．３ 微生物を用いる手法による耐硫酸性試験 8

２．２．４ 実際の下水道環境と室内における耐酸性試験との関係 11

３．各種防食材料の寿命に関する検討 12

３．１ 普通モルタル・コンクリートの寿命に関する検討 12

３．１．１ 硫酸による劣化機構 12

３．１．２ 寿命の定義 13

３．１．３ 寿命評価手法 13

３．２ 耐酸モルタル（無塗装）の寿命に関する検討 14

３．２．１ 硫酸による劣化機構 14

３．２．２ 寿命の定義 14

３．２．３ 寿命評価手法 15

３．３ 塗布型ライニング材の寿命に関する検討 16

３．３．１ 硫酸による劣化機構 16

３．３．２ 寿命の定義 16

３．３．３ 寿命評価手法 18

３．４ ＦＲＰシートライニング工法の寿命に関する検討 21

３．４．１ 硫酸による劣化機構 21

３．４．２ 寿命の定義 21

３．４．３ 寿命評価手法 22

３．５ チタンシートライニング工法の寿命に関する検討 24

３．５．１ 硫酸による劣化機構 24

３．５．２ 寿命の定義 25

３．５．３ 寿命評価手法 25

参考文献 27

第２編 耐酸モルタルの下水処理施設への適用性 29

１．概要 29

１．１ 目的 29

１．２ 耐酸モルタルとは 30

１．３ 耐酸モルタルの種類 31

２．耐酸モルタルの耐酸性評価方法に関する調査 31

２．１ 目的 31

２．２ 試験方法 32

２．２．１ 使用材料 32

２．２．２ 滴下試験方法 32

２．２．３ 浸せき試験方法 34

２．３ 試験結果 34

２．３．１ 滴下試験結果 34

２．３．２ 浸せき試験結果 39

２．４ 考察 40

２．５ まとめ 42

３．耐酸モルタルの性能に関する調査 43

３．１ 目的 43

３．２ 試験方法 45

３．２．１ 曲げおよび圧縮強度試験 45

３．２．２ 付着強度試験 45

３．２．３ 長さ変化試験 45

３．３ 試験結果 46

３．３．１ 曲げおよび圧縮強度試験結果 46

３．３．２ 付着強度試験結果 47

３．３．３ 長さ変化試験結果 48

３．４ まとめ 49

４．塗布型ライニング材との併用効果に関する調査 50

４．１ 目的 50

４．２ 使用材料 50

４．２．１ 基材 50

４．２．２ 防食材 50

４．２．３ 供試体の作製 50

４．２．４ 試験溶液の調製 51

４．３ 試験方法 51

4．3．1 外観観察 51
4．3．2 質量変化の測定 52
4．3．3 中性化領域の測定 52
4．4 試験結果 52
4．4．1 外観観察 52
4．4．2 質量変化および中性化領域 54
4．5 まとめ 55
5．耐酸モルタルの品質に影響を与える要因 56
5．1 目的 56
5．2 使用材料 56
5．3 供試体 56
5．3．1 養生条件 56
5．3．2 供試体の概要 57
5．4 試験方法 58
5．4．1 水分計の機種による水分率 58
5．4．2 表面水分率の測定 58
5．4．3 表層引張試験 58
5．5 試験結果 58
5．5．1 水分計の機種による水分率（耐酸モルタルAおよび汎用モルタルDのみ） 58
5．5．2 モルタルの表面水分率の測定結果 61
5．5．3 モルタルの表層引張試験結果 64
5．5．4 養生条件と表層引張強さの測定結果 69
5．6 まとめ 70
6．断面修復材として必要な付着力に関する検討 71
6．1 目的 71
6．2 試験方法 71
6．2．1 試験の種類 71
6．2．2 供試体 73
6．2．3 試験条件 74
6．2．4 評価方法 75
6．3 試験結果 76
6．3．1 断面修復材の表層含水率および引張強さ 76
6．3．2 塗布型ライニング材の付着強さ 78
6．3．3 促進養生断面修復材の水分率と塗布型ライニング材の付着強さ 83
6．4 まとめ 83
7．本編のまとめ 84

参考文献 86

第３編 塗布型ライニング材の信頼性に関する検討 87

１．目的と概要 87

２．塗布型ライニング材塗膜の耐環境性および環境遮断性に関する検討 89

２．１ 目的 89

２．２ 試験方法 89

２．２．１ 試験条件 89

２．２．２ 試験材料 90

２．２．３ 供試体 94

２．２．４ 硫酸溶液浸せき方法 96

２．３ 評価方法 98

２．３．１ 外観観察 98

２．３．２ 質量変化測定 98

２．３．３ 硫黄浸入深さ測定 98

２．３．４ 引張強度試験 98

２．３．５ 引き剥がし試験 98

２．３．６ 付着強度試験 100

２．４ 試験結果 101

２．４．１ 外観観察結果 101

２．４．２ 質量変化測定結果 103

２．４．３ 硫黄浸入深さ測定結果 105

２．４．４ 引張強度試験結果 108

２．４．５ 引き剥がし試験結果 111

２．４．６ 付着強度試験結果 112

２．５ 考察 114

３．塗布型ライニング材塗膜の付着安定性についての検討 115

３．１ 目的 115

３．２ 試験方法 115

３．２．１ 試験条件 115

３．２．２ 試験材料 115

３．２．３ 供試体 116

３．２．４ 温冷水繰返し浸せき方法 117

３．３ 評価方法 118

３．３．１ 外観観察 118

３．３．２ 引き剥がし試験 119

３．３．３ 付着強さ試験 119
３．４ 試験結果 119
３．４．１ 外観観察結果 119
３．４．２ 外観変化と付着強さの関係 122
３．４．３ 外観変化と引き剥がし荷重の関係 122
３．４．４ 引き剥がし荷重と付着強さの関係 123
３．５ 考察 126
４．まとめ 127
参考文献 128
第４編 炭素繊維シートによるコンクリート補強工法の下水処理施設への適用性 129
１．炭素繊維シートによるコンクリート補強工法の概要 129
２．炭素繊維シートによるコンクリート補強工法の耐酸性の調査 129
２．１ 目的 129
２．２ 試験方法 130
２．２．１ 供試体 130
２．２．２ 試験条件 130
２．２．３ 載荷方法 131
２．３ 結果 131
２．３．１ 外観変化 131
２．３．２ 破壊性状 131
２．３．３ 補強効果 132
３．まとめ 134
参考文献 134
第５編 ＦＲＰ引抜成形材を用いた新しいシートライニング材の下水処理施設への適用性 135
１．目的と概要 135
２．ＦＲＰ引抜成形材の基本性能に関する検討 137
２．１ 目的 137
２．２ 方法 137
２．２．１ 概要 137
２．２．２ 固着試験 139
２．２．３ 透水試験 139
２．２．４ 硫黄浸入深さ試験 140
２．２．５ 耐薬品試験 141
２．３ 結果 144

２．３．１ 固着試験結果 144
２．３．２ 透水試験結果 145
２．３．３ 硫黄浸入深さ試験結果 146
２．３．４ 耐薬品試験結果 150
２．４ まとめ 157
３．ＦＲＰ引抜成形材の施工方法 158
３．１ 目的 158
３．２ ＦＲＰパネル工法の施工フロー 158
３．３ ＦＲＰパネル工法の出来形 160
３．４ ＦＲＰパネル組立て試験 161
３．５ まとめ 164
第６編 金属被覆材料を用いた新しいシートライニング材の開発 165
１．はじめに 165
２．チタンシートライニング工法の概要 165
３．チタンシートライニング工法の性能評価試験 167
３．１ 概要と試験項目 167
３．２ チタンシートライニングとコンクリート躯体との接着性に関する検討 168
３．２．１ 目的 168
３．２．２ 試験方法 168
３．２．３ 試験結果 171
３．３ チタンシートライニングの耐薬品性に関する検討 174
３．３．１ 目的 174
３．３．２ 純チタンの耐硫酸性に関する検討 174
３．３．３ 接着材料の耐アルカリ性に関する検討 176
３．４ 目地材料の硫酸遮断性に関する検討 179
３．４．１ 目的 179
３．４．２ 試験方法 179
３．４．３ 試験結果 180
３．５ 目地材料の遮水性に関する検討 181
３．５．１ 目的 181
３．５．２ 試験方法 181
３．５．３ 試験結果 182
４．まとめ 183
参考文献 183
第７編 各種補修材料の現場における施工性に関する検討 185

１．目的と概要 185
２．耐酸モルタルの現場施工性に関する調査 188
２．１ 方法 188
２．１．１ 使用した耐酸モルタル 188
２．１．２ 施工面 188
２．１．３ 施工 189
２．２ 結果および考察 193
２．３ 施工方法および品質管理方法 195
２．３．１ 施工手順 195
２．３．２ 品質管理 195
３．ＦＲＰ引抜成形材の現場施工性に関する調査 196
３．１ 方法 196
３．１．１ 施工対象 196
３．１．２ 施工手順 198
３．１．３ 作業工程 205
３．２ 施工性に関する考察 205
３．３ 施工方法および品質管理方法 205
３．３．１ 施工手順 206
３．３．２ 品質管理 206
４．チタンシートライニング工法の現場施工性に関する調査 207
４．１ 方法 207
４．１．１ 施工したチタンシートライニング工法 207
４．１．２ 施工対象 207
４．１．３ 施工手順 209
４．１．４ 作業工程 213
４．２ 施工性に関する考察 214
４．３ 施工方法および品質管理方法 214
４．３．１ 施工手順 214
４．３．２ 品質管理 214
５．まとめ 215
参考文献 216
第８編 各種補修材料の長期耐久性に関する調査（暴露試験） 217
１．概要 217
１．１ 目的 217
１．２ 暴露供試体設置方法 217

１．３ 吐出水槽および嫌気調整槽の暴露環境の測定 217
１．４ 試験項目および試験方法 217
２．耐酸モルタル（無塗装）の暴露試験 220
２．１ 方法 220
２．１．１ 供試体 220
２．１．２ 暴露方法 220
２．１．３ 試験項目および試験方法 222
２．２ 結果 224
２．２．１ 外観観察 224
２．２．２ 質量変化 226
２．２．３ 侵食深さ 226
２．２．４ 硫酸浸透深さ 227
２．３ 室内促進試験結果と暴露試験結果との相関性について 227
３．塗布型ライニング材の暴露試験 228
３．１ 方法 228
３．１．１ 供試体 228
３．１．２ 暴露方法 228
３．１．３ 試験項目および試験方法 228
３．２ 結果 230
３．３ 促進試験結果と暴露試験結果との相関性について 231
４．ＦＲＰ系シートライニング材の暴露試験 232
４．１ 方法 232
４．１．１ ＦＲＰパネル暴露供試体 232
４．１．２ 暴露方法 233
４．１．３ 試験項目および試験方法 233
４．２ 結果 234
４．２．１ 外観観察 234
４．２．２ 質量・厚さ測定 234
４．２．３ 曲げ特性 235
４．２．４ 硫黄浸入深さ試験結果 236
４．２．５ ＦＲＰ防食パネル工法の外観調査結果 238
４．２．６ 促進試験結果と暴露試験結果との相関性について 238
５．耐食金属系シートライニング材の暴露試験 240
５．１ 方法 240
５．１．１ 供試体 240
５．１．２ 暴露方法 240

５．１．３ 試験項目および試験方法 240
５．２ 結果 242
５．３ 促進試験結果と暴露試験結果との相関性について 243
第９編 まとめ 244
１．各材料の性能試験および促進試験 244
２．各補修材料の現場施工技術および暴露試験 245

第１編　下水処理施設の腐食環境に関する調査

１．概要

下水処理施設に用いられる材料に対する要求性能の中でも、材料の「耐硫酸性」は特に重要な項目である。各種防食材料の耐硫酸性を評価するためには、実際の環境条件や劣化因子の相関を把握した上で、個々の材料に適した試験方法や試験条件を設定する必要がある。これらについては既に、日本下水道事業団、日本下水道協会、日本農業集落排水協会などの機関によって提案され、指針・マニュアル化されたものが広く一般に利用されている[1),2),3)]。本共同研究では、開発した耐食性新素材の性能を評価するために、これらの指針・マニュアル類に準拠した試験方法を採用したが、補足が必要と思われるものについては別途考案した試験項目・方法を追加し検討した。

本編では、文献調査により下水処理施設の環境条件や劣化因子、実際の下水道環境を模擬した既往の材料試験等に関する情報を整理・概観するとともに、硫酸環境下における各種材料の劣化機構や寿命に対する考え方をまとめた。

２．文献調査

２．１　下水道環境下における構造物の劣化に関する一般論

２．１．１　コンクリート構造物の劣化機構

下水処理施設におけるコンクリート構造物は、施設内に生息する微生物の作用によって生成される硫酸により侵食劣化する。硫酸は上水、し尿、洗剤、または海水、工場排水、温泉水などから供給される硫酸塩（SO_4^{2-}）物質を起源としている。硫酸の生成からコンクリート構造物劣化までの機構や実態は、既に数多くの研究がなされ報告されている。例えば日本下水道事業団編纂の「下水道構造物に対するコンクリート腐食抑制技術及び防食技術の評価に関する報告書」に詳しくまとめられており[4)]、整理すると以下のようになる。

(1) 上水、し尿、洗剤などから下水に供給された硫酸イオン（SO_4^{2-}）が、嫌気性条件下にある圧送管や密閉された槽内などの下水もしくは汚泥中で、硫酸塩還元細菌の作用により硫化水素（H_2S）に還元される。→　図１－１①

(2) 下水もしくは汚泥の流れの乱れや攪拌などによって、硫化水素が液相から気相へ放散する。→　図１－１②

(3) 下水管内外の温度差で生じた結露水中や下水流下により湿った部分などへ溶け込んだ硫化水素が、好気性雰囲気中で活動する硫黄酸化細菌によって硫酸（H_2SO_4）へと酸化される。→　図１－１③

(4) 硫酸はコンクリート中の水酸化カルシウム（$Ca(OH)_2$）などのセメント水和物と反応し、二水石膏（$CaSO_4 \cdot 2H_2O$）を生成する。→　図１－１④

(5) 二水石膏はコンクリート中のセメント水和物であるモノサルフェート（$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$）や未水和セメント中のアルミネート（$3CaO \cdot Al_2O_3$）と反応し、エトリンガイト（$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot$

$3CaSO_4 \cdot 32H_2O$）を生成する。→　図１－１④

(6) エトリンガイトは pH 10 以上のアルカリ性環境では安定であるが、硫酸の供給により中性～酸性領域まで pH が低下したコンクリート表面では、再び二水石膏に分解する。

(7) 二水石膏は pH 1～2 の領域でパテ状になり、軽度の衝撃でもコンクリート表面から剥離する。

以上、(1)～(7) の繰返しにより、劣化は徐々にコンクリートの内部に進行していく。尚、硫黄酸化細菌は pH 12.5 程度のアルカリ性環境下では生息できないことから、この細菌の活動にはコンクリート表面の中性化が必要となる。下水処理施設の中でもビルピットや圧送管下流部、段落ち部、最初沈殿池、汚泥濃縮槽などの嫌気状態から好気状態に変化する箇所、または汚泥が長時間滞留する箇所などのコンクリート劣化が特に顕著であることが知られている。

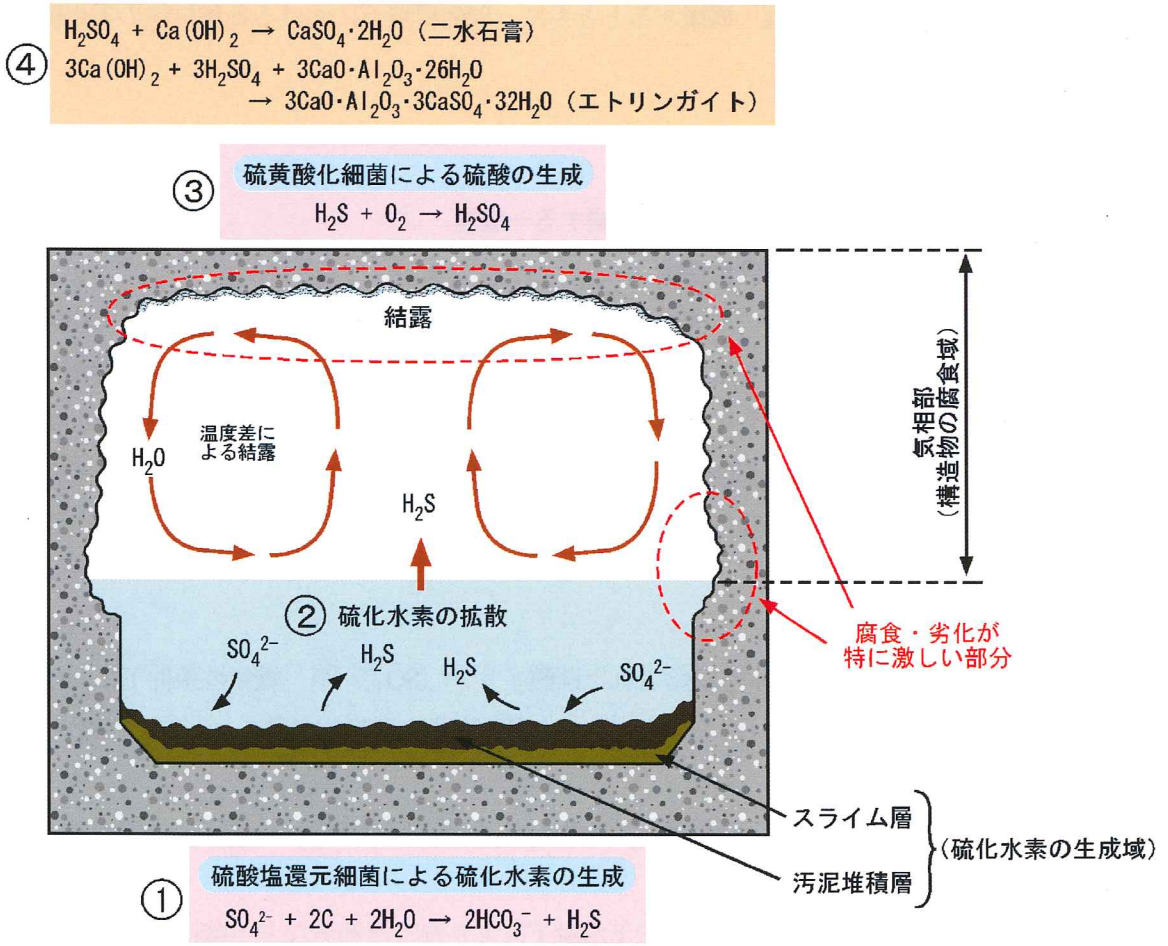


図１－１　下水処理施設における硫酸の生成とコンクリート劣化の機構

２．１．２　既存基準類の腐食環境の分類

下水処理施設におけるコンクリート構造物の健全性を維持し耐用年数をできるだけ長くさせるためには、腐食環境の緩和や、耐食性の高い材料にいよる補修など、適切な対策を講じる必要がある。

一般に、下水処理施設のコンクリート構造物の補修では、劣化部を除去して構造断面を修復した後、防食被覆（ライニング材）によりコンクリート面を腐食環境から遮断する手法がとられている。今日では様々な防食被覆工法が提案されているが、硫酸による構造物劣化への対策を確実にし、下水処理施設のライフサイクルコストを縮減するためには、対象箇所における腐食環境を十分に把握した上で、耐食性と経済性の双方を考慮し最適な工法を選択しなければならない[5),6),7)]。

腐食環境を決定する因子としては、下水あるいは汚泥の水温、気温、湿度、硫化水素ガス濃度、硫酸濃度などが挙げられる。現在、広く普及している基準類では、比較的容易にモニタリングできること、コンクリートの劣化速度とある程度の相関が見られること、などの理由からから、硫化水素ガス濃度を腐食環境の代表値と位置づけ、これに基づき腐食環境をいくつかのレベルに分類し、各レベルに応じて最適な防食被覆工法を選択するよう規定している。

例えば、日本下水道事業団編纂の「下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術および防食技術指針・同マニュアル」では、表１－１に示すように硫化水素ガスの発生濃度に応じて腐食環境をⅠ類～Ⅳ類までの４段階に分類し、さらに腐食環境の厳しいⅠ類～Ⅲ類を施設の点検、補修および改築の難易度に応じてそれぞれ表１－２のように分類している。

表１－１　日本下水道事業団による腐食環境分類[1)]

分類	腐　食　環　境
Ⅰ類	年間平均硫化水素ガス濃度が 50 ppm 以上で、硫酸によるコンクリート腐食が極度に見られる腐食環境。
Ⅱ類	年間平均硫化水素ガス濃度が 10～50 ppm で、硫酸によるコンクリート腐食が顕著に見られる腐食環境。
Ⅲ類	年間平均硫化水素ガス濃度が 10 ppm 未満ではあるが、硫酸によるコンクリート腐食が明らかに見られる腐食環境。
Ⅳ類	硫酸による腐食はほとんど生じないが、コンクリートに接する液相が酸性状態になり得る腐食環境。

表１－２　日本下水道事業団による設計腐食環境分類[1)]

年間平均硫化水素ガス濃度	点検、補修、改築時の難易※)	
	易	難
50 ppm 以上	$Ⅰ_1$類	$Ⅰ_2$類
10 ～ 50 ppm	$Ⅱ_1$類	$Ⅱ_2$類
10 ppm 未満	$Ⅲ_1$類	$Ⅲ_2$類

※) 防食設計の判断基準（点検、補修、改築の難易）

易：・代替施設があり、更新時に休止できる。
・仮施設が建設でき、総合的に経済的である。
・日常点検・定期点検が可能である。

難：・構築後、狭いため人が入りにくい。
・代替施設が無いので休止期間を長期間とれない。
・代替施設を建設するのが、総合的に不経済である。
・腐食環境の改善が困難である。
・日常点検・定期点検が困難である。

同指針では防食被覆工法の耐酸性に応じ、塗布型ライニング工法については A、B、C、D_1 種の 4 段階、シートライニング工法についてはD_2種のみ１段階に分類し、表１－１、１－２の腐食環境分類と対応させて、それぞれで満足すべき品質規格を規定している。腐食環境の分類と、それに対応する防食被覆工法の工法規格を表１－３に示す。

表１－３　日本下水道事業団が規定する設計腐食環境条件と工法規格との関係[1)]

設計腐食環境	工法規格	
	塗布型ライニング工法	シートライニング工法
I_2類	－	D_2種
I_1類、II_2類	D_1種	D_2種
II_1類、III_2類	C種	－
III_1類	B種	－
Ⅳ類	A種	－

一方、日本下水道協会編纂の「下水道管路施設腐食対策の手引き（案）」では、コンクリートの劣化度を下記の A～C の 3 ランクに分類し、腐食対策を実施せずに放置した場合に供用年数 10 年未満で劣化度 A、B、C になる環境をそれぞれⅠ種、Ⅱ種、Ⅲ種の腐食環境条件と設定している。既往の研究によって明らかとなっている平均硫化水素濃度とコンクリート腐食速度との関係を利用すると、この腐食環境分類と平均硫化水素ガス濃度との関係は表１－４のようになる。

（1）劣化度 A ランク：鉄筋が露出している状態

（2）劣化度 B ランク：骨材が露出している状態

（3）劣化度 C ランク：コンクリート表面が荒れた状態

表１－４　日本下水道協会による腐食環境分類[2)]

分類	腐食環境条件	摘要	平均硫化水素ガス濃度
Ⅰ種	硫化水素の発生要因近傍で、硫化水素ガスの滞留が多く、腐食が厳しい環境。（維持管理上、発生源対策を必要とする）	放置した場合、供用年数 10 年未満で劣化度 A ランクに達する腐食環境を想定。	平均硫化水素ガス濃度 50ppm 以上とする。
Ⅱ種	硫化水素の発生要因に近傍し、硫化水素ガスの滞留があり、腐食速度が緩やかな環境。（発生源対策を必要とする場合と必要としない場合がある）	放置した場合、供用年数 10 年未満で劣化度 B ランクに達する腐食環境を想定。	平均硫化水素ガス濃度 10～50ppm とする。
Ⅲ種	硫化水素の発生要因に近傍しているが、硫化水素ガスの滞留は少なく、腐食速度が小さい環境。	放置した場合、供用年数 10 年未満で劣化度 C ランクに達する腐食環境を想定。	平均硫化水素ガス濃度 10ppm 未満とする。

表１－５　腐食環境や点検・補修・改築の難易に応じた防食材料の分類と本研究の技術開発の方向

腐食環境分類	日本下水道事業団	Ⅳ類	$Ⅲ_1$類	$Ⅲ_2$類	$Ⅱ_1$類	$Ⅱ_2$類	$Ⅰ_1$類	$Ⅰ_2$類
	日本下水道協会	－	Ⅲ種		Ⅱ種		Ⅰ種	
硫化水素ガス年間平均値（日本下水道事業団による区分）		硫酸による腐食が殆ど生じない	10ppm 未満		10～50ppm		50ppm 以上	
10 年で到達する劣化状況（日本下水道協会による区分）		－	コンクリート表面が荒れた状態		骨材が露出		鉄筋が露出	
点検・補修・改築の難易（日本下水道事業団による区分）		易／難	易	難	易	難	易	難
対応する防食材料（日本下水道事業団による区分）		塗布型ライニング材（A種）	塗布型ライニング材（B種）	塗布型ライニング材（C種）		塗布型ライニング材（D_1種）あるいはシートライニング材（D_2種）		シートライニング材（D_2種）
本研究の技術開発の方向		耐酸モルタルの適用性の検討	塗布型ライニング材の性能向上 塗布型ライニング材の性能評価手法の信頼性向上					シートライニング材の施工性・経済性向上

表１－１～１－４を平均硫化水素ガス濃度に基づいて整理したものが表１－５である。本共同研究では表１－５の腐食環境分類を考慮し、以下の技術開発目標を設定した。

①腐食環境の比較的穏やかな条件（たとえば日本下水道事業団のⅣ、$Ⅲ_1$類など）で、耐酸モルタルの適用性を検討する。
②塗布型ライニング材のさらなる性能向上や、性能評価手法の信頼性向上を図る（日本下水道事業団の$Ⅲ_2$～$Ⅰ_1$類程度への適用を想定）。
③従来よりも経済的で施工性に優れたシートライニング材を開発する（日本下水道事業団の$Ⅰ_2$類への適用を想定）。

ここまで述べてきたように、下水処理施設の環境指標は硫化水素濃度に基づいて規定されており、各施設の環境モニタリングも硫化水素濃度を対象として行われている。しかしその一方で、下水環境で材料を劣化させる直接の因子は硫化水素ではなく、あくまでも硫酸であり、また、水溶液の方が気体よりも取り扱い易く試験が簡便に行えることなどの理由もあることから、各腐食環境レベルへの材料の適用可否を判定するためには、通常は硫酸水溶液を用いた評価試験が行われている。

実際の下水環境に適用した際の材料の耐用年数（寿命）を予測するためには、実際よりも厳しい環境条件で促進的に材料を劣化させて材料の各種特性の経時変化データを収集すると共に、試験環境条件と実環境条件との相関を明らかにする必要がある。しかしながら、実際の下水環境下で硫化水素が発生し硫酸が生成するまでのプロセスは、物理学的、化学的、生物学的現象が複雑に関与しつつ進行していくことから、構造物の部位によって生成される硫酸濃度は大きく異なり、実構造物で硫酸濃度に関する有用なデータを収集することは困難である。また、雰囲気中の硫化水素濃度から壁面に生成する硫酸水溶液の濃度を推定することも極めて困難である。それゆえ、硫酸水溶液を用いた室内試験

データは材料間の相対的な性能比較にとどまり、材料寿命の予測に直接利用することができないという問題がある。

そこで本共同研究では上述の状況を踏まえ、研究対象とした新材料について既存の基準類に準拠した方法による性能評価に加え、以下の①～③の項目についても取り組むこととした。

①既存の基準類に定められた評価試験方法をもう一度見直し、必要なものについては、下水処理施設における構造物の腐食環境や材料の劣化機構をより忠実に再現できる新たな試験方法を考案し、その方法でも材料の性能評価を行った。試験環境条件はなるべく複数設定し、材料の各種特性の経時変化に関するデータを可能な限り多く収集することとした。

②既存の基準類に定められた評価試験方法により、下水構造物の補修用として十分適用可能であると評価された材料については、実環境における試験施工あるいは供試体を用いた長期間の暴露試験を実施し、実環境下での各種特性の経時変化に関するデータを収集することとした。

③室内試験データおよび暴露試験データを照らし合わせてこれらの相関を見出し、実環境下における材料の寿命予測を試みることとした。

なお、②の暴露試験は最長で５年程度までとし、最終的な取りまとめの段階で③の検討を行う予定である。本報告書では、暴露半年後までの中間結果をまとめた。

２．２　既往の研究

２．２．１　実際の下水処理施設における環境測定

下水処理施設におけるコンクリート劣化に関与する環境因子には、下水や汚泥の水温、気温、硫化水素濃度、壁面 pH、硫酸濃度などが挙げられる。このうち、硫化水素濃度は比較的容易にモニタリングでき、コンクリートの劣化速度とある程度の相関が見られるため、下水道の環境指針として最も多く利用されている。従来は、硫化水素ガスの測定にガス検知管あるいはガス検知器が用いられていたが、これらの方法では硫化水素ガスの瞬間的な存在しか検知できない欠点があった。しかし近年、連続測定が可能な拡散式硫化水素測定器[8),9)]が開発され、一般的な腐食箇所における硫化水素ガス濃度の測定にも利用されつつある[10)]。硫化水素ガスの発生パターン（濃度の時間変動）は腐食箇所によって大きく異なるため、マンホール内のセンサー設置位置によっても測定濃度が異なることに留意する必要がある。

この他、壁面 pH を pH 試験紙により測定している事例もあるが、部位、状態、環境に対応し、定量的に測定するための方法は未だ確立されていない。

２．２．２　簡易的な手法による耐硫酸性試験

実際の下水道環境を模擬し、室内において材料の耐硫酸性を評価するために、様々な試験方法が提案されている。文献調査では、硫酸環境下におけるコンクリートあるいはモルタルの劣化挙動に焦点をあてた研究が多く見受けられた。

蔵重ら[11),12)]は、pH 0.5、1.0、1.5、3.0 に調製した硫酸にコンクリート供試体を浸せきし、環境液の交換時に供試体表面を洗浄して腐食生成物を除去する実験（以下、浸せき法）を検討している。境界条件を一定に保ち、供試体はペースト、モルタル、コンクリートを用いて、水セメント比などの配合条件も要因として 20℃の条件下で実験を実施しており、侵食状況として質量減少量、侵食深さ、中性化深さを測定している。その結果、pH が 0.5～1.5 程度の硫酸環境の場合、水セメント比が小さいほど質量減少量が大きく、侵食しやすいことを見出している。これは、水セメント比の低減による単位体積あたりのセメント水和物量の増加によって、硫酸との反応による腐食生成物の量が増大することと、さらに水セメント比の低減による空隙量の減少によって腐食生成物による体積増加を許容できる空間的な余裕も少ないことに起因するとしている。

一方、渡邉ら[13)]は硫酸への浸せき試験と平行して、硫酸をコンクリート面に塗布するように接触させる実験（以下、接触法）を行い、その侵食傾向の相違などについて検討している。pH 1.0 の硫酸への浸せき実験においては、W/C が小さい方が弾性係数の低下速度が大きくなり既往の結果と同じ傾向であったのに対し、pH 1.0 の硫酸の接触実験においては、W/C が大きいほうが弾性係数の低下速度が大きくなり、既往の結果と相反する結果となった。浸せき法においては境界の酸濃度が高い（約 pH 1.5 以下）場合、W/C の小さいコンクリートの方が侵食速度は大きくなることが提言されている一方で、接触法においては少なくとも pH 1.0 より大きい場合、W/C の小さいコンクリートの方が侵食速度は小さい結果となった。よって、下水処理施設を模擬した接触法による評価においては、コンクリートの W/C を小さくした方が耐久性に優れることが推測されている。

実験方法の相違はコンクリートの耐久性評価に大きな影響を及ぼすため、実構造物の曝される条件に適した実験方法を選定することが重要である。また、保護層のない普通モルタル・コンクリートの寿命を予測する場合には、配合を考慮しながら、実構造物の硫酸環境条件を模擬した接触法または浸せき法などの実験方法を選定することが重要となることがわかる。

２．２．３　微生物を用いる手法による耐硫酸性試験

下水処理施設における硫化水素および硫酸の生成は、物理的、化学的、微生物学的な現象が複雑に関連したプロセスよって進行する。そのため、下水道環境下における材料の耐酸性を評価するためには、実環境下での暴露試験が最も望ましい。しかしながら、同じ施設内でも供試体毎に全く同じ環境条件で暴露できるとは限らず、適正な評価ができない恐れがある。そこで、硫黄酸化細菌等の微生物を用い、実際の下水道環境を再現しようとする試みが行われている。

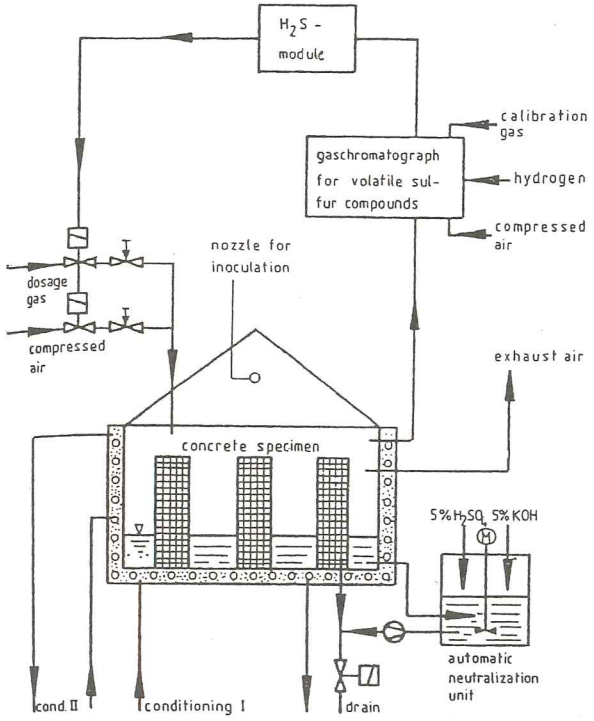
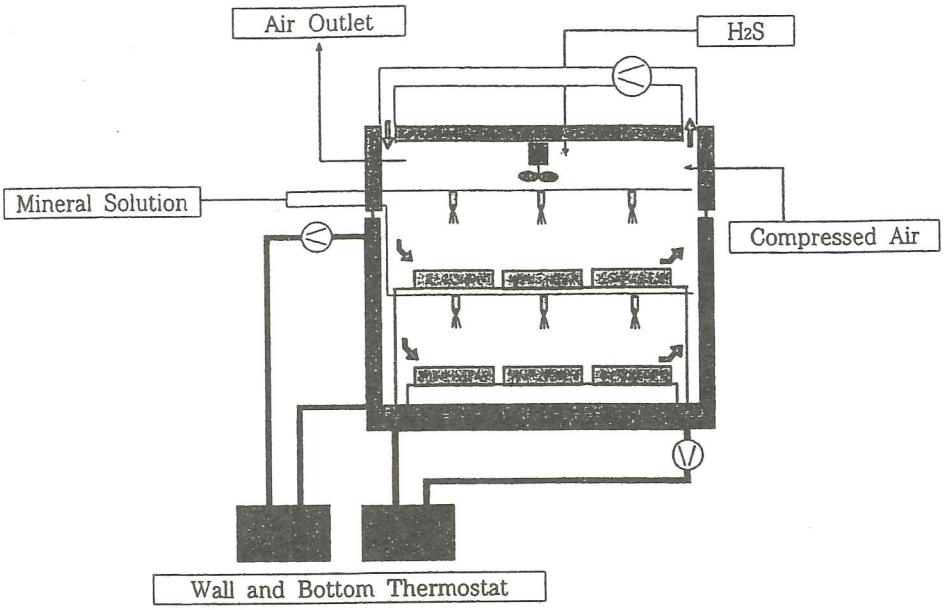


図１－２　Sand らが使用した試験装置の概略図[14)]

Sand ら[14)]は、温度 30℃、湿度 100%、硫化水素濃度 10±1ppm に調整したチャンバーに 30℃、pH 7 の水を貯め、その水中に 60×11×7cm のコンクリート供試体の下部 10cm を浸せきし、上部は気相部に露出させた実験を行っている（図１－２）。コンクリート表面には定期的に硫黄酸化細菌を噴霧し、下水処理施設の水面近傍の環境を再現しており、侵食状況としてコンクリート質量減少量、コンクリート表面の pH および硫黄酸化細菌の数を測定している。コンクリート表面の pH は、pH 試験紙をコンクリート表面に貼付し、2 週間ごとに交換して測定している。供試体には耐硫酸塩セメント、普通

セメント、高炉セメントを使用して実験を行ったところ、コンクリート表面の pH は約 50 日後には低下し始め約 110 日後には pH2 に到達し、その後はほぼそのまま推移した。セメント種類が硫黄酸化細菌の個体数に与える影響は大きく、耐硫酸塩セメント＜普通セメント＜高炉セメントの順番で侵食しやすくなる傾向があることを見出した。

一方 Ehrich ら[15),16)]は、Sand の試験機を改良し（試験槽 1m^3）、試料として普通セメント、耐硫酸塩セメント、高炉セメント（シリカ砂入）、カルコート、スーパーコートの 5 種類を用いて試験している（図１－３）。試験槽温度を 30℃、相対湿度を 98%、硫化水素濃度 10±5ppm に設定し、4 種類の硫黄酸化細菌を混合してモルタル表面に植えつけ試験した。細菌繁殖用に窒素とリンの溶液を噴霧した。その結果、90 日頃から pH が下がり始め、200 日程度で一定となった。普通セメント、耐硫酸塩セメント、高炉セメントの到達 pH はほぼ同じで、およそ 1 であった。



供試体は 6 つのプレートに 2 段になって置かれる。矢印は、最上部に組み込まれた換気循環装置による換気の流れを示す。その装置はPVC管で試験槽とつながっている。小さな換気装置が試験槽内にあり、水槽は底に置かれている。

図１－３　Ehrich らが使用した試験装置の概略図[15)]

吉本ら[17)]の研究では、さらに実構造物に近い環境を再現し試験を行っている。この試験装置は、図１－３に示すようにコンクリートヒューム管の一部を切断し、切断面を下にして使用する。上部外側を水槽として水で満たして冷やし、下部内面の空気を 10℃または 25℃に設定することにより、下部内面に結露を発生させる。下部内面に硫黄酸化細菌を植種し、空気中の硫化水素濃度を 50、200、800ppm の 3 水準に設定し、一定時間後における結露水の分析を行った。試験の結果から、結露水の pH は細菌を植種した場合 pH2、植種せずに放置しただけでも pH2～3 に到達し、80 日でほぼ一定となることが明らかとなった。実験の範囲内では、硫化水素濃度の違いによる差は認められなかった。

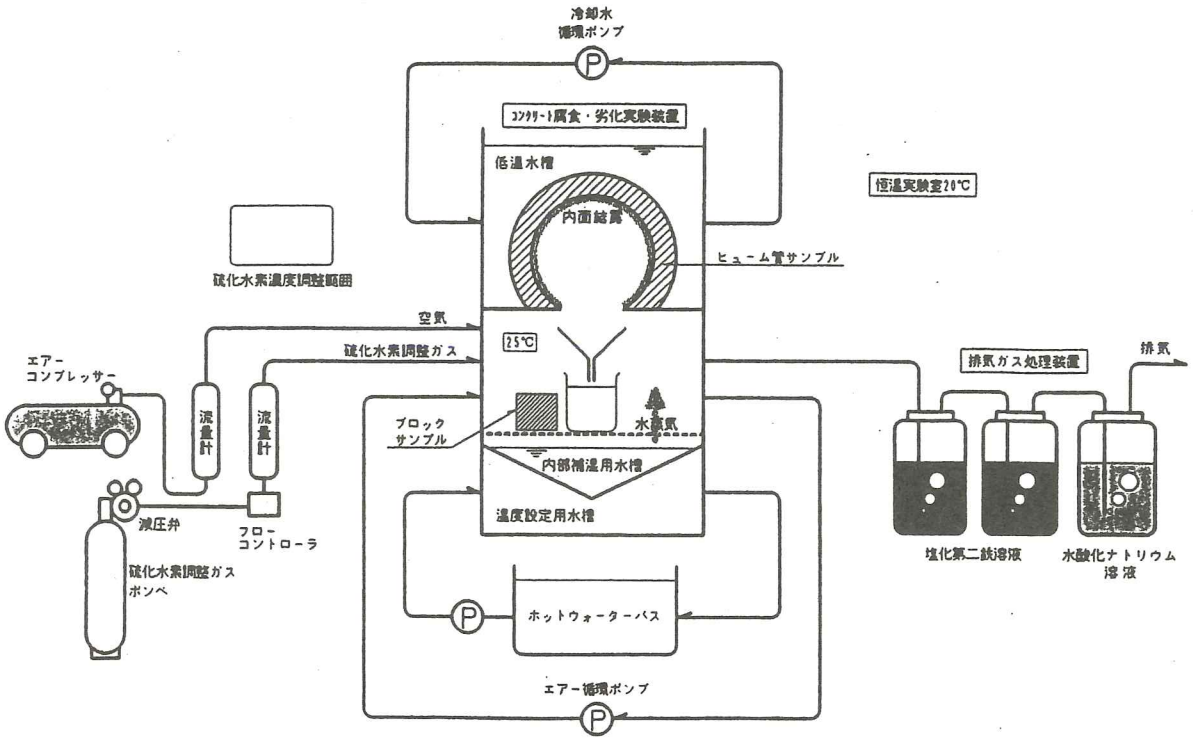


図１－４　吉本らが使用したコンクリート腐食・劣化実験装置の概略図[17)]

微生物を用いて行った以上３報の文献では、環境条件、配合条件などが同一ではないので一概には言えないが、普通モルタル・コンクリートの表面 pH が、試験開始後 50～100 日程度で低下し始め、以下のようにほぼ一定の pH に達することがわかった。

（1）Sand 110 日：pH 2

（2）Ehrich 150 日：pH 2、320 日：pH 1

（3）吉本 80 日：pH 2

これらの研究事例では、下水処理施設におけるコンクリート構造物の腐食環境をできる限り忠実に再現しようと試みられており、実現象に極めて近い侵食機構が得られるものと推測される。一方で、試験装置が大掛かりで汎用性に乏しいこと、定量評価が不十分であること、などが今後解決すべき課題として残っている。

２．２．４　実際の下水道環境と室内における耐酸性試験との関係

実際の下水道環境を模擬し、室内において材料の耐硫酸性を評価する様々な試験方法が提案され、利用されている。室内試験は比較的短期間で結果が得られ、材料どうしの相対的な優劣を判定するために有効な手段である。しかし実際の下水道環境では、硫化水素ガス濃度や温度、湿度といった環境要因は、いずれも大きな日間変動や季節変動を示す上に、構造物の部位によって pH や硫酸濃度が異なるという困難さから、室内試験結果を実環境下における材料の寿命予測に活用するための手法は未だ確立されていない。

そこで現状では、実際の下水処理施設を調査して収集された硫化水素ガス濃度、侵食深さ、供用年数等のデータに基づき、下水処理施設における構造物の侵食を予測するための様々な数式が提案され、利用されている（表１－６）。

表１－６　下水処理施設でのコンクリートの侵食深さの予測方法と適用例[18),19)]

予測対象	予測方法（予測式）	備　考
硫黄の浸透深さ	構造物と接触が予想される劣化因子とその濃度を用いて試験的に求める方法[20)]	コンクリート保護層（エポキシ樹脂系）の劣化予測に適用されている[21)]（pH＝2 に調製した硫酸溶液中に浸せきして浸透深さを測定）
	$y = b\sqrt{t}$ y：劣化因子の浸透深さ (mm) t：侵食物質にさらされる期間 (年) b：劣化因子の浸透速度係数 (mm/$\sqrt{}$年)	pH が低い場合（pH＝1～3 程度）に適用[20)] 10 年経過した下水道構造物の劣化因子の浸透深さから将来の浸透深さを予測する際に利用されている[21)] b＝20.9 (mm/$\sqrt{}$年)
侵食深さ	$d = 1.33 \times (C \times T)^{0.5}$ d：侵食深さ（中性化深さ）(mm) C：硫化水素濃度（ppm） T：稼動年数（年）	下水道管路施設および処理施設における侵食深さ（中性化深さ）と硫化水素濃度、経年数との関係より導出[22)]
	$y = 0.22x + 0.376$ x：硫化水素ガス濃度 (ppm) y：侵食速度 (mm/年)	硫化水素濃度を 0.1、1、10ppm と変えて行ったコンクリート実験から導出[23)] 侵食深さの定義は明確ではない
	$y = 0.0666x + 1.4292$ x：硫化水素ガス濃度 (ppm) y：侵食速度 (mm/年)	下水処理施設の硫化水素濃度（夏場に測定）とコンクリートの腐食深さの調査より導出[23)] 侵食深さの定義は明確ではない
	実施設内の平均硫化水素ガス濃度とモルタルの劣化速度との関係データを利用	劣化速度は硫黄の浸透速度あるいは脆弱部を除去後測定した侵食深さなどから導出

３．　各種防食材料の寿命に関する検討

３．１　普通モルタル・コンクリートの寿命に関する検討

３．１．１　硫酸による劣化機構

下水処理施設において微生物活動により生成した硫酸は、コンクリート表面から内部へと徐々に拡散浸透していく。硫酸はコンクリート中の成分と化学反応を起こし、やがてエトリンガイト（$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$）や二水石膏（$CaSO_4 \cdot 2H_2O$）を生成する。この機構の詳細については、「２．１．１　コンクリート構造物の劣化機構」を参照されたい。

硫酸によるコンクリート劣化反応の速度は、硫酸がコンクリート内部へ拡散する速度に比べて緩やかである。そのため、硫酸によって侵食劣化するコンクリート表面には、通常、図１－５に示すような劣化程度の異なる二つの領域が形成される。表面により近い層ではpHが2～3程度まで低下しており、生成した二水石膏がパテ状となって白色化している。この部分は軽度の衝撃でも容易に剥落し、骨材や鉄筋の露出に繋がることもある。一方、内側の層は外部から浸入してきた硫酸により、コンクリートが中性化している領域である。この領域では、二水石膏やエトリンガイトが混在している。硫酸がさらに供給され領域のpHが中性～酸性まで低下すると、エトリンガイトは二水石膏へと分解し、白色領域に変化する。硫酸はこの中性化領域よりも、さらに内部にまで浸入していることが多い。

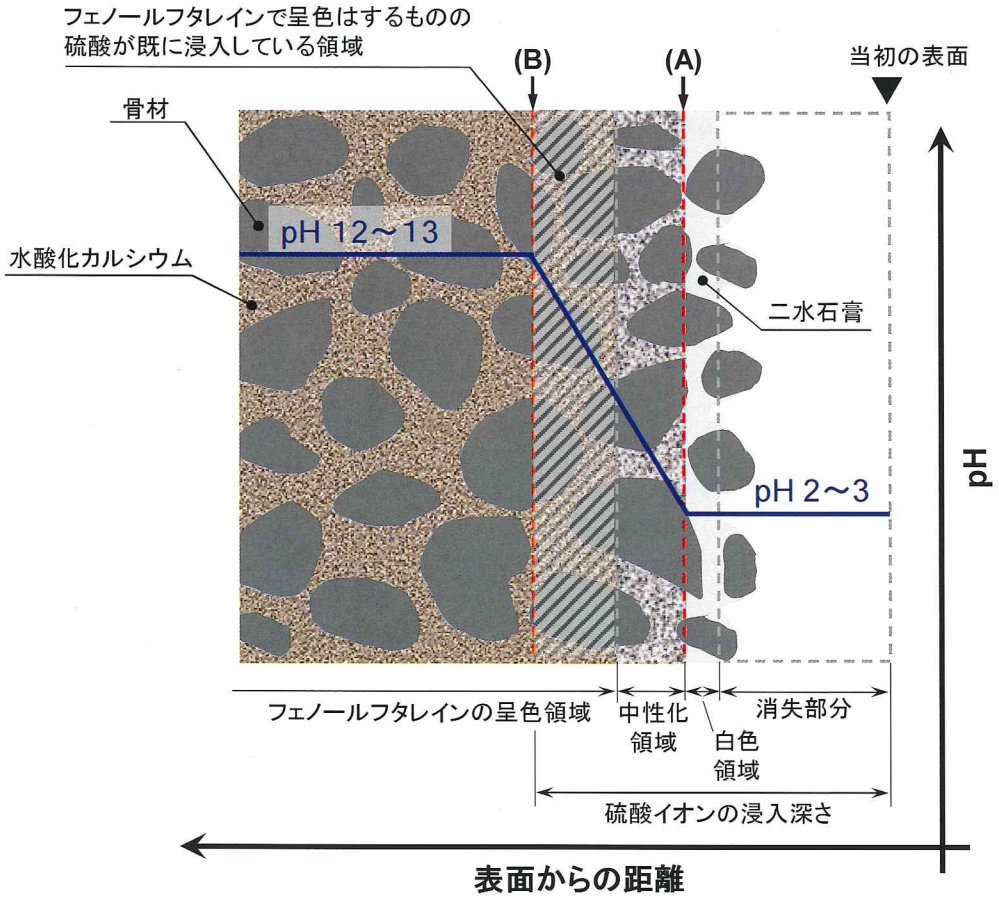


図１－５　硫酸により侵食劣化したコンクリート断面の模式図

３．１．２　寿命の定義

前項で述べたコンクリート劣化機構から検討すると、

（１）微生物活動により生成した硫酸によってコンクリート表面に白色化、軟化し、強度を失った層が形成され、これが剥落・消失することにより構造物の強度を大幅に低下させる状態。すなわち、図１－５に示した（A）のラインが徐々にコンクリート内部へと進行し、鉄筋の付着力低下を招く深さまで到達した状態。

（２）微生物活動により生成した硫酸がコンクリート内部へ拡散浸透し、二水石膏の生成や中性化を進めつつ、ついには鉄筋まで到達した状態。すなわち、図１－５に示した（B）のラインが徐々にコンクリート内部へと進行し、ついには鉄筋まで到達した状態。

等を、下水処理施設におけるコンクリート構造物の寿命として考えることができる。既述の通り、硫酸によるコンクリートの変質は、硫酸がコンクリート内部に拡散浸透した後に生じる現象であり、通常、硫酸はコンクリートが変質した部分よりもさらに内部にまで高濃度で到達していることが多い。したがって、図１－５に示した通り、一般には上記（１）の領域よりも（２）の領域の方が広いと考えられる。このため、コンクリートの劣化を未然に予測できること、さらには、元素分析などにより比較的容易に定量評価ができること、などの理由により（２）の状態をコンクリート構造物の寿命の定義とすることが妥当であると考えられる。

３．１．３　寿命評価手法

硫酸環境下における普通モルタル・コンクリートの寿命を評価する方法としては、従来「浸せき法」が広く利用されている[24),25)]。これは、硫酸水溶液に浸せきした後の供試体断面に対し、電子線マイクロアナライザー（Electron Probe Micro Analyzer, EPMA）等による元素分析やフェノールフタレイン水溶液の噴霧などを行い、硫酸イオンの浸透深さや中性化深さを求めるものである。浸せき法では、硫酸の濃度や温度とコンクリートの侵食速度との大まかな関係を比較的簡便に調べることができるが、厳密に言えば、コンクリート中のアルカリ成分により硫酸が中和されるため、コンクリート表面近傍における硫酸濃度が当初設定した濃度と異なってしまう可能性が考えられる。また、実際の劣化は表面が湿潤状態の気中で起きるのに対し、浸せき法は水溶液中の試験であり、環境条件が大きく異なるという問題もある。これらのことから、浸せき法は材料の耐酸性を相対的に評価するためには有効であるが、材料の寿命を検討するために適した手法とは言えない。

そこで本研究では、実際の下水処理施設により近い環境条件を設定でき、生成した二水石膏の影響も少ないと推測される「硫酸滴下試験」を考案し、浸せき法で得られた試験結果との比較により、硫酸環境下における普通モルタル・コンクリートの新たな寿命評価方法としての妥当性を検討した。なお、通常実施される浸せき法は5%程度の硫酸（約 pH0.4）が用いられるが、硫酸滴下試験では実際の下水処理施設（pH0～1 程度）と同等の環境条件で材料を評価することとした。

３．２　耐酸モルタル（無塗装）の寿命に関する検討

３．２．１　硫酸による劣化機構

セメントモルタルやポリマーセメントモルタルなどの、バインダーとしてセメントを用いるモルタルは、一般にセメントの水和反応によりアルカリ性の水酸化カルシウムを多く生成する。酸性環境下では、この水酸化カルシウムが酸と比較的容易に反応して腐食生成物を生成し、徐々に劣化が進行する。耐酸モルタルは、酸と水酸化カルシウムとの反応量をできるだけ低減させるために、① 水和反応によって生成される水酸化カルシウムの量を抑制すること、② 酸をモルタル内部に浸透させないように緻密な硬化体組織を形成すること、などの条件に基づいて材料設計されたモルタルであり、従来のセメントモルタルよりも耐酸性に優れた断面修復材として下水処理施設におけるコンクリート補修に適用できる。また、腐食環境の比較的穏やかな箇所では、塗布型ライニング材等の防食被覆を必要としない「簡易的な補修工法」としての利用にも期待が高まる。

硫酸による耐酸モルタルの劣化は通常のセメントモルタルと同様、硫酸とモルタル中の水酸化カルシウムとが反応して二水石膏（$CaSO_4 \cdot 2H_2O$）が生成されることが主な要因であり、その機構は前述した普通モルタル・コンクリートの場合とほぼ同一であると考えられる。

３．２．２　寿命の定義

下水処理施設におけるコンクリート補修を耐酸モルタルによる断面修復までで完了させる、すなわち、塗布型ライニング材などの防食被覆を適用しない場合、耐酸モルタル自体が下地コンクリートの防食被覆層として機能しなければならない。前述の通り下水環境下では、微生物活動により生成した硫酸が表層の耐酸モルタル内部へ拡散し、二水石膏の生成や中性化を進めつつ、次第により内部への浸透していく。これを図示すると図１－６のようになる。この拡散浸透は樹脂外部から硫酸の供給がある限り、時間の経過と共に徐々に進行し、やがて硫酸は下地コンクリートまで到達する。すなわち、この時点で下地コンクリートは硫酸と直接接することとなり、耐酸モルタル層はもはや防食被覆としての機能を失う。したがって、硫酸の拡散浸透が下地コンクリートまで到達したこの状態を、耐酸モルタルの寿命とすることが妥当であると考えられる。

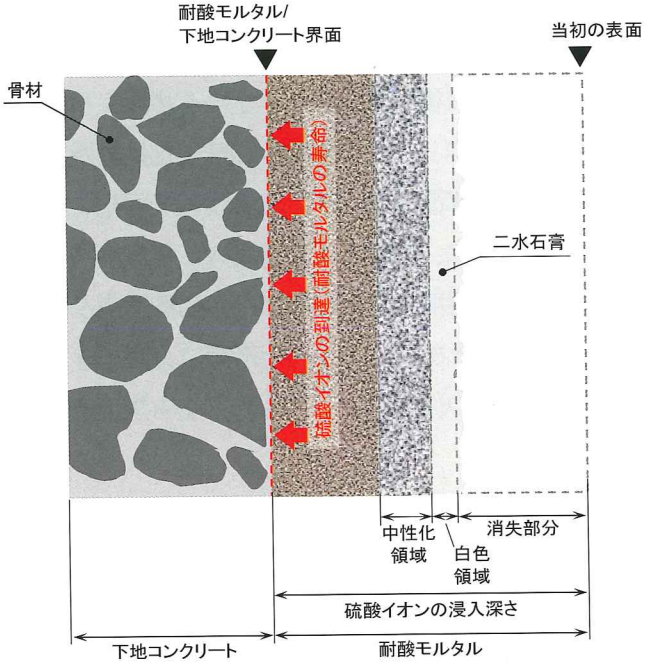


図１－６　硫酸による耐酸モルタルの侵食劣化の模式図

３．２．３　寿命評価手法

硫酸環境下における耐酸モルタルの寿命評価方法は普通モルタル・コンクリートと同様に、浸せき法および硫酸滴下試験により、硫酸イオンの浸入深さ、中性化深さ、あるいは侵食深さを測定するものとした。

３．３　塗布型ライニング材の寿命に関する検討

３．３．１　硫酸による劣化機構

塗布型ライニング材に用いられる合成樹脂材料は、エポキシ樹脂、不飽和ポリエステル樹脂、ビニルエステル樹脂、ポリウタレン樹脂、ポリウレア樹脂等の熱硬化性樹脂が主である。熱硬化性樹脂は周囲の環境液を吸収することにより、膨潤をはじめとする物理的劣化を生じる。さらに、環境液が酸やアルカリなど反応性を有する場合には、樹脂と内部に浸入した環境液とが化学反応を起こし、樹脂は次第に劣化する。その劣化形態は、環境液の樹脂内部への拡散速度と樹脂の分解反応速度との大小関係によって決まり、一部の例外を除き次のような劣化形態に分類できることが既往の研究で明らかとなっている[26),27)]。下水環境下で硫酸の作用によって生じる塗布型ライニング材の劣化も、このいずれかの形態をとるものと考えられる。

（１）表面反応型

樹脂が環境液によってかなり低分子量まで分解されると、分解生成物は水溶液に対して可溶となり、表面から溶出するため一様な減肉を示す。この場合、残存樹脂には環境液の浸入もなく劣化も生じていない。

（２）腐食層形成型

劣化生成物が不溶のまま樹脂表面に残り、色や質感の異なる変色層を形成するような劣化形態である。熱硬化性樹脂の酸・アルカリ環境下における劣化形態としては、最もよく観察される。この劣化形態では、環境液が浸入している層と浸入した環境液によって樹脂の劣化反応が生じている層が全く等しいことが大きな特徴である。

（３）全面浸入型

樹脂の場合には金属とは異なり、水や薬液が分子鎖の間に拡散浸透する。薬液の浸透速度が分解反応速度よりも大きいと、環境液が材料内部に十分浸入した後に、寸法変化や外観変化をほとんど伴わずに材料の全領域で分解反応が進行する場合がある。

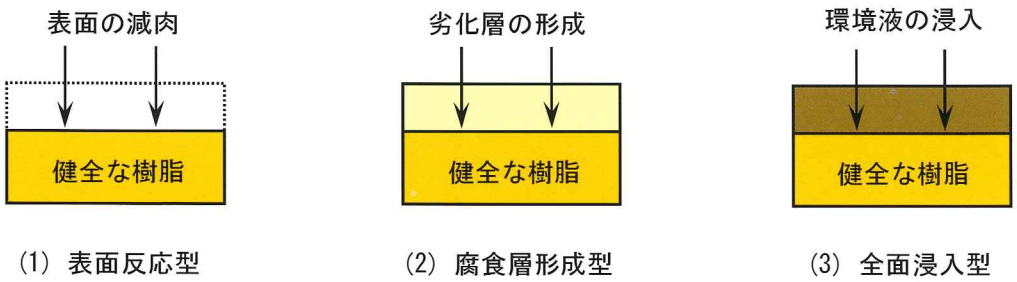


図１－７　酸・アルカリ環境下における熱硬化性樹脂の劣化形態

３．３．２　寿命の定義

コンクリート標準示方書［維持管理編］[20)]では、化学的侵食を受けるコンクリート構造物の劣化過程を、コンクリート保護層の変質（脆弱化、変色など）を経てコンクリートの変質が生じるまでの「潜

伏期」、コンクリートの変質が鋼材位置に達するまでの「進展期」、鋼材の腐食が進行する「加速期」、コンクリートの断面欠損や鋼材の断面減少などによって構造物の性能低下が顕著となる「劣化期」に区分している（表１－７）。硫酸による腐食環境に曝されたコンクリート構造物は「潜伏期」が極めて短く、劣化は直ちに「進展期」に至るものと考えられる。そこで、劣化因子（硫酸）とコンクリート構造物との直接的な接触を妨げるために、塗布型ライニング材等の防食被覆が適用される。

表１－７　化学的侵食を受けるコンクリート構造物の劣化過程の区分[20)]

劣化過程	定　　義	期間を決定する要因
潜伏期	コンクリートの変質が生じるまでの期間	コンクリート保護層中への劣化因子の浸透速度
進展期	コンクリートの変質が鋼材位置に達するまでの期間	コンクリート中への劣化因子の浸透速度
加速期	鋼材腐食が進行する期間	鋼材の腐食速度
劣化期	コンクリートの断面欠損・鋼材の断面減少などにより耐荷力の低下が顕著な期間	鋼材の腐食速度

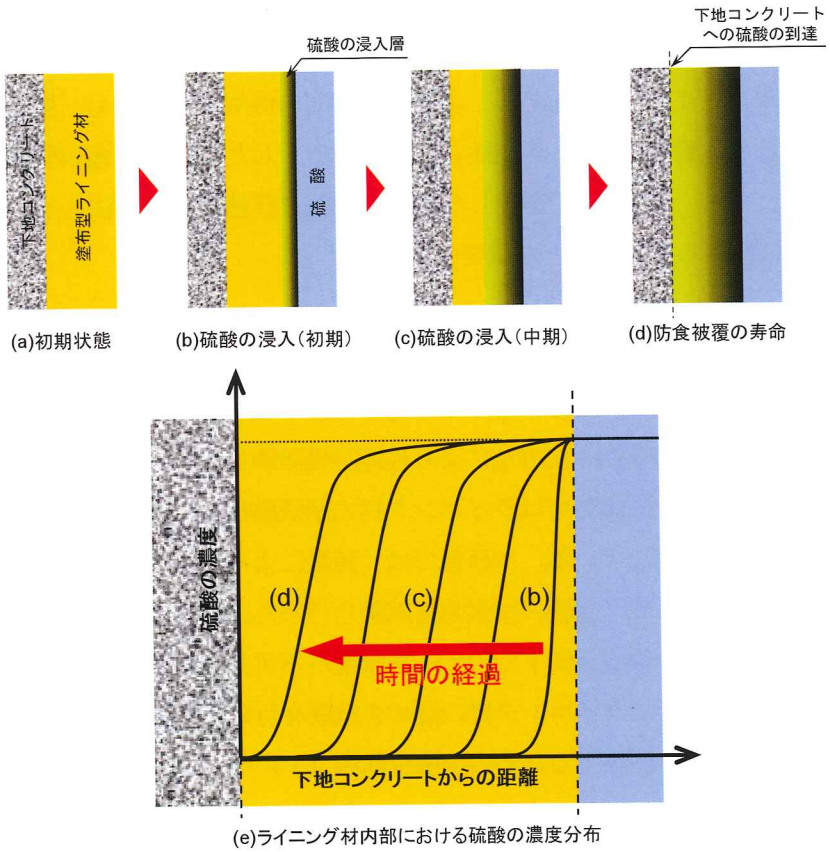


図１－８　塗布型ライニング材内部への硫酸の拡散浸透の模式図

塗布型ライニング材は前述の通り、コンクリートに比べて極めて緩やかな速度ではあるが、次第に劣化する。いずれの劣化形態を示す場合においても、劣化因子（硫酸）の遮断性が保てなくなる次のような状態を、「防食被覆層としての寿命」として定義することが妥当であると考えられる。

（１）劣化因子（硫酸）は図１－８に示すように、濃度勾配を駆動力として塗布型ライニング材内部へ拡散浸透する。これは一般にFickの理想拡散によって整理される場合が多い。ライニング材塗膜自体に損傷等が無い場合には、硫酸は樹脂表面から均一な厚さの層状に浸透していく。この拡散浸透は樹脂外部から硫酸の供給がある限り、時間の経過と共に徐々に進行し、やがて硫酸は下地コンクリートまで到達する。すなわち、この時点で下地コンクリートは硫酸と直接接することとなり、塗布型ライニング材はもはや防食被覆としての機能を失う。したがって、硫酸の拡散浸透が下地コンクリートまで到達したこの状態を、塗布型ライニング材の寿命とする。

（２）塗布型ライニング材は劣化因子（硫酸）の拡散浸透によって膨潤などの物理的劣化や、加水分解等の化学的劣化を生じる。これらの劣化によってライニング材の力学的性能が低下し、下地コンクリートとの付着性能が維持できなくなった状態を寿命とする。

（３）塗布型ライニング材は（２）で述べた物理的劣化や化学的劣化、あるいは何らかの外的要因によって膨れ、われ、はがれ等の部分的な損傷を生じ、この損傷部から硫酸が浸入するなど、下地コンクリートに悪影響を及ぼすことがある。この状態を塗布型ライニング材の寿命とする。

なお、ここで定義した３つの「寿命」は、必ずしも同じタイミングで訪れるわけではないことに留意すべきである。すなわち、樹脂自体の劣化（寿命（２））が顕著に現れる以前に、硫酸の拡散浸透が下地に到達する（寿命（１））場合もある。また、短期間の供用であっても、施工不良等により部分的な損傷が問題となる（寿命（３））可能性も考えられる。したがって、塗布型ライニング材の寿命を評価する際には、（１）～（３）で定義した寿命を的確に評価できる手法をそれぞれ選択し、全ての結果から総合的に検討していくことが重要である。

３．３．３　寿命評価手法

塗布型ライニング材の品質については、日本下水道事業団が表１－８に示す項目について規定している。本研究では、この規格に準拠した方法により性能評価試験を行い、塗布型ライニング材の下水環境への適用可否を検討した。同規格ではライニング材の耐硫酸性について、硫酸浸せき後の外観変化の有無や硫黄浸入深さで規定している。本研究では、硫酸によるライニング材自体の劣化をより定量的に評価するため、これらに加え塗膜の引張強度試験を行った。一方、塗布型ライニング材の寿命評価にあたっては、より多くの環境条件下でのデータ収集が不可欠であると考え、表１－９に示した温度・濃度の硫酸水溶液を用いてライニング材の浸せき試験を行い、各種特性の経時変化を求めた。

塗布型ライニング材の寿命を評価するための手法を前項（１）～（３）に応じて整理すると、それぞれ下記のようになる。

（１）塗布型ライニング材内部への硫酸の拡散浸透は、電子線マイクロアナライザー（Electron Probe Micro Analyzer, EPMA）等を用いた元素分析結果により評価した。これは塗布型ライニング材断面から検出される硫黄元素を硫酸イオンに起因するものとみなし、その分布状況から硫黄元素の浸入深さすなわち硫酸イオンの浸入深さを求めるものである。ライニング材として用いられる樹脂には、硫黄元素を元来含むものもあるため、これらの分析にはより厳密な定量分析が必要となる。

（2）塗布型ライニング材として用いられる樹脂の一種であるエポキシ樹脂などは、硫酸環境下で前述の「全面浸入型」のような劣化形態を示すことが知られている。これらは樹脂に著しい外観変化が認められなくても硫酸が十分拡散浸透していることがあり、その程度によってはさらに、樹脂が加水分解等の化学反応を起こし力学的性能の低下を生じている可能性もある。塗布型ライニング材の力学的性能の低下については、樹脂自体の引張強度試験を行うことにより定量的に評価した。また、下地コンクリートへの付着性能の低下は、付着力試験や引き剥がし試験により定量的に評価した。

（3）塗布型ライニング材の膨れ、われ、はがれ等の部分的な損傷の発生は、目視観察により定性的に評価した。

表１－８　日本下水道事業団が定める塗布型ライニング材の品質規格（耐硫酸性）[1)]

工法規格 / 項目	A種	B種	C種	D_1種
被覆の外観	被覆にしわ、むら、はがれ、われのないこと。	同　左	同　左	同　左
コンクリートとの接着性	標準状態　1.5MPa以上。 吸水状態　1.2MPa以上。	同　左	同　左	同　左
耐硫酸性	pH 3 の硫酸水溶液に30日間浸せきしても被覆に膨れ、われ、軟化、溶出がないこと。	pH 1 の硫酸水溶液に30日間浸せきしても被覆に膨れ、われ、軟化、溶出がないこと。	10%の硫酸水溶液に45日間浸せきしても被覆に膨れ、われ、軟化、溶出がないこと。	10%の硫酸水溶液に60日間浸せきしても被覆に膨れ、われ、軟化、溶出がないこと。
硫黄浸入深さ	－	－	10%の硫酸水溶液に120日間浸せきした時の浸入深さが設計厚さに対して10%以下であること、かつ、200μm以下であること。	10%の硫酸水溶液に120日間浸せきした時の浸入深さが設計厚さに対して5%以下であること、かつ、100μm以下であること。
耐アルカリ性	水酸化カルシウム飽和水溶液に30日間浸せきしても被覆にふくれ、われ、軟化、溶出がないこと。	同　左	水酸化カルシウム飽和水溶液に45日間浸せきしても被覆にふくれ、われ、軟化、溶出がないこと。	水酸化カルシウム飽和水溶液に60日間浸せきしても被覆にふくれ、われ、軟化、溶出がないこと。
透水性	透水量が0.30g以下。	透水量が0.25g以下。	透水量が0.20g以下。	透水量が0.15g以下。

表１－９　本共同研究で塗布型ライニング材の性能を評価した際の環境条件

温度	硫酸水溶液の濃度				
23±2℃	0％（≒pH 7）	0.05％（≒pH 3）	0.5％（≒pH 1.3）	3％（≒pH 0.4）	―
40±2℃	0％（≒pH 7）	0.05％（≒pH 3）	0.5％（≒pH 1.3）	3％（≒pH 0.4）	10％（≒pH 0）

３．４　ＦＲＰシートライニング工法の寿命に関する検討

３．４．１　硫酸による劣化機構

本研究では、従来のシートライニング工法における施工性や経済性を改善するため、引抜成形法により作製した繊維強化プラスチック（ＦＲＰ）パネルを用いた、新しいシートライニング工法の開発に取り組んだ。開発した工法は、工場製作されたＦＲＰパネルを現場に搬入して、施工部位にコンクリート型枠として設置し、既設コンクリートとの間隙にモルタルあるいはコンクリートを充填することによってＦＲＰパネルとコンクリートと一体化させる埋設型枠工法である。パネル間の継ぎ目（目地）部分には、図１－９に示すように耐食性に優れた樹脂を充填する。

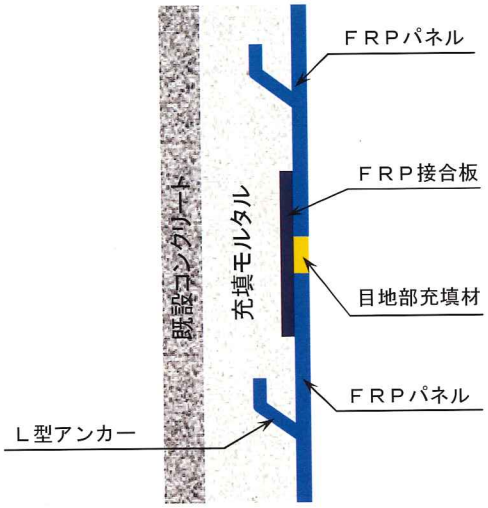


図１－９　ＦＲＰシートライニング工法の概略図

ＦＲＰシートライニング工法の硫酸環境下における品質は、ＦＲＰパネルと目地部の樹脂の双方の性能によって左右される。一般にＦＲＰ単体の耐食性は強化繊維と母材（マトリックス樹脂）とで異なるが、通常、強化繊維の耐食性はマトリックス樹脂に覆われている限り問題にならないため、マトリックス樹脂の耐食性が特に重要となる[28)]。マトリックス樹脂あるいは目地部の樹脂の硫酸による劣化機構は塗布型ライニング材と同様、樹脂内部への環境液の拡散浸透によって樹脂の膨潤や化学構造の変化が生じるものと考えられる。環境液の浸透が強化繊維まで達すると、強化繊維の劣化や繊維/樹脂界面の剥離が生じ、ＦＲＰの強度は著しく低下する。

３．４．２　寿命の定義

硫酸環境下におけるＦＲＰシートライニング工法の耐用年数（寿命）は、塗布型ライニング材の場合と同様に考えることができる。すなわち、防食被覆層内部への硫酸の拡散浸透により、下地コンクリート（モルタル）の健全性が脅かされる、次の様な状態が生じるまでを耐用年数の定義とする。

（１）劣化因子（硫酸）は、濃度勾配を駆動力としてＦＲＰの内部や目地材、あるいはＦＲＰと目地材との界面へ拡散浸透する。この拡散浸透は外部から硫酸の供給がある限り、時間の経過と共

に徐々に進行し、やがて硫酸は下地コンクリート（モルタル）まで到達する。すなわち、この時点で下地コンクリート（モルタル）は硫酸と直接接することとなり、ＦＲＰライニングはもはや防食被覆としての機能を失う。したがって、硫酸の拡散浸透が下地コンクリート（モルタル）まで到達したこの状態を、ＦＲＰライニング材の寿命とする。

（２）ＦＲＰのマトリックス樹脂は、劣化因子（硫酸）の拡散浸透によって膨潤などの物理的劣化や、加水分解等の化学的劣化を生じることがある。これらの劣化によってＦＲＰの力学的性能が低下し、下地コンクリート（モルタル）との固着性能が維持できなくなった状態をＦＲＰライニング材の寿命とする。

（３）ＦＲＰのマトリックス樹脂や目地材として用いられる樹脂は（２）で述べた物理的劣化や化学的劣化、あるいは何らかの外的要因によって膨れ、われ、はがれ等の部分的な損傷を生じ、この損傷部から硫酸が浸入するなど、下地コンクリート（モルタル）に悪影響を及ぼすことがある。この状態をＦＲＰライニング材の寿命とする。

なお、塗布型ライニング材の場合と同様、ここで定義した３つの「寿命」は、必ずしも同じタイミングで訪れるわけではないことに留意する必要がある。次項では、本研究において上記（１）～（３）の寿命を評価した手法について述べる。

３．４．３　寿命評価手法

シートライニング工法の品質については、日本下水道事業団が表１－１０に示す項目について規定している。本研究では、硫酸環境におけるＦＲＰシートライニング工法の寿命を評価する際に、硫酸によるＦＲＰパネル自体の劣化をより定量的に把握するために、表１－１０の項目に加えＦＲＰの質量、寸法、バーコル硬さおよび曲げ特性の経時変化を調べることとした。ＦＲＰシートライニング工法の寿命を評価するための手法を前項（１）～（３）に応じて整理すると、それぞれ下記のようになる。

（１）防食被覆層内部への硫酸の拡散浸透は、塗布型ライニング材の場合と同様、電子線マイクロアナライザー（Electron ProbeMicro Analyzer, EPMA）等を用いた元素分析結果により評価した。これは防食被覆層断面における硫黄元素の分布状況から、防食被覆層表面からの硫黄元素の浸入深さ（≒硫酸の浸入深さ）を求めるものである。ＦＲＰシートライニング工法では、繊維/樹脂界面やシート部/目地部界面において毛管現象により環境液の浸入が促進される場合もあるため、特に注意して分析した。

（２）ＦＲＰパネルと下地コンクリート（モルタル）との固着性能の低下は、固着試験結果により評価した。固着試験では、ＦＲＰパネルの表面に対し鉛直方向へ引張力を加えた時の最大引張荷重を求めた。

（３）硫酸によるＦＲＰパネルの劣化評価には、しわ、むら、はがれ、われなどの有無を目視により観察する定性的な手法と、質量、寸法、バーコル硬さおよび曲げ特性の変化を求める定量的な手法を用いた。

表１－１０　日本下水道事業団が定めるシートライニング工法の品質規格

項　　目		D_2種
被覆の外観		被覆にしわ、むら、はがれ、われのないこと。
コンクリートとの固着性		0.24MPa 以上。
耐硫酸性		10%の硫酸水溶液に 60 日間浸せきしても被覆に膨れ、われ、軟化、溶出がないこと。
硫黄浸入深さ	シート部	10%の硫酸水溶液に 120 日間浸せきした時の浸入深さが設計厚さに対して 1%以下であること。
	目地部	10%の硫酸水溶液に 120 日間浸せきした時の浸入深さが設計厚さに対して 5%以下であること、あつ 100μm 以下であること。
耐アルカリ性		水酸化カルシウム飽和水溶液に 60 日間浸せきしても被覆に膨れ、われ、軟化、溶出がないこと。
透水性		透水量が 0.15g 以下。

３．５　チタンシートライニング工法の寿命に関する検討

３．５．１　硫酸による劣化機構

本研究では、耐食金属の一つである純チタンを利用した、新しいシートライニング工法の開発に取り組んだ。開発した工法は図１－１０に示すように、両面粘着シート（テープ）あるいは接着剤を使用してチタン板をコンクリート面に接着させ、目地部をシリコーン系シーリング材でシールするものである。

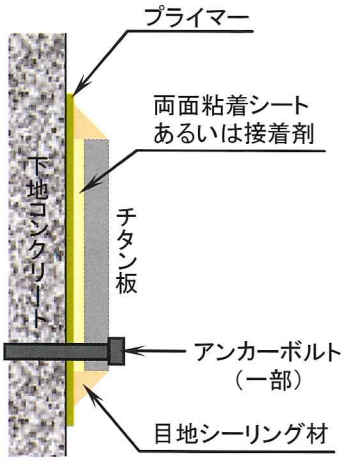


図１－１０　チタンシートライニング工法の概略図

表１－１１　チタンの硫酸浸せき試験の条件と試験結果（侵食度）

項　目			試験Ⅰ	試験Ⅱ	備　考
試験条件	環境液		硫酸水溶液	硫酸水溶液	pH 測定は pH 計を用いた
	濃　度		pH 0.5 (約 1.6wt%)	pH 1 (約 0.5wt%)	
	温　度		40℃	40℃	
	浸せき時間		1 ヶ月	1 ヶ月	
結　果	pH	試験前	0.5	1.0	
		試験後	0.5	0.5	
	侵食度 (mm/year)		1.05	0.001	

チタンシートライニング工法の硫酸環境下における劣化機構は、シート部（純チタン板）と目地部（シリコーン系シーリング材）とで大きく異なる。

純チタンは標準電極電位が低く活性の高い金属ではあるが、表面に緻密な二酸化チタン（TiO_2）等の不動態皮膜が容易に形成されるため、高い耐食性を示す[29]。表１－１０は本共同研究の中で行った、純チタンの浸せき試験結果である。純チタン表面に形成される不動態皮膜は pH＜1 の酸性側では不安

定となるため[30]、純チタンといえども全面腐食を生じてしまうが、pH１以上の環境においては侵食度が 0.001mm/year より小さくなるため、事実上、チタンの腐食劣化を考慮する必要がないものと思われる。

一方、目地部に使用するシリコーン系シーリング材は、原料の種類や配合、架橋密度などによっても異なるが、一般に比較的良好な耐薬品性を示すことが知られている[31]。しかし、強酸に対してはポリマーの解重合が生じ分解する傾向があるため、浸せき試験等により予め劣化挙動を確認しておく必要がある。

３．５．２　寿命の定義

硫酸環境下におけるチタンシートライニング工法の寿命は、下地コンクリート（モルタル）の健全性が維持できなくなる、次の様な状態が生じるまでと定義した（図１－１１）。

（１）硫酸の作用によりチタン板や目地材が腐食・消耗し、防食被覆としての機能が失われた状態。

（２）目地材あるいは、チタン板/目地材界面へ硫酸が拡散浸透し、下地コンクリート（モルタル）まで到達した状態。

（３）チタン板と下地コンクリート（モルタル）との固着性能が維持できない状態。

なお、塗布型ライニング材や FRP シートライニング工法の場合と同様、ここで定義した３つの「寿命」は、必ずしも同じタイミングで訪れるわけではないことに留意する必要がある。次項では、本研究において上記（１）～（３）の寿命を評価した手法について述べる。

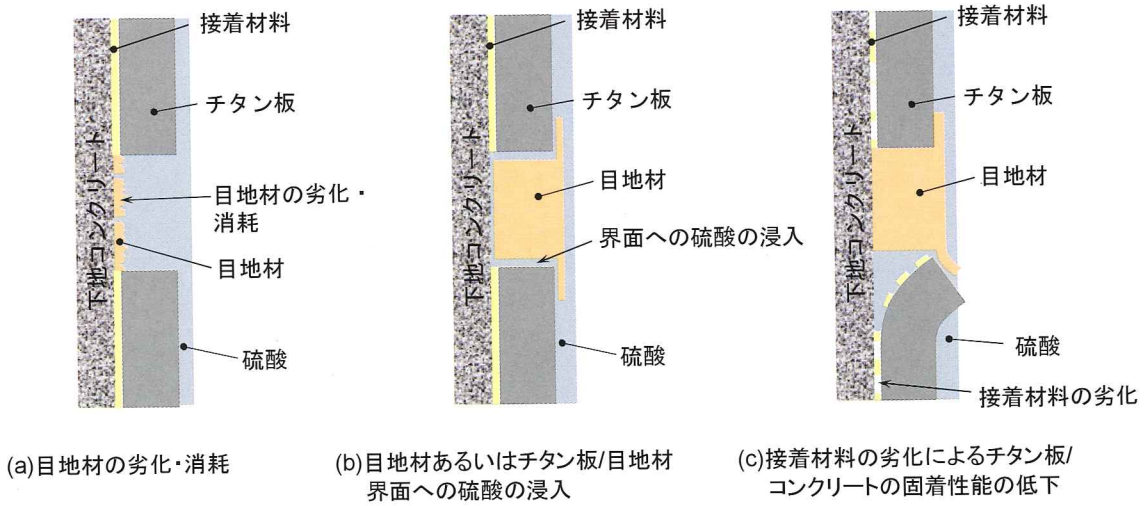


図１－１１　チタンシートライニング工法の寿命

３．５．３　寿命評価手法

前述の通り、通常の下水処理施設に見られるような pH 1.0 以上の環境では、仮にチタン板の厚さを 0.1mm とするとその寿命は 100 年以上となる。したがって現実的には、チタンシートライニング工法の寿命は目地材料あるいは接着材料の性能によって決定すると言っても過言ではない。本工法におけ

る目地材料および接着材料は高分子系材料の一種であるため、これらの硫酸環境下における劣化挙動は塗布型ライニング材と類似したものであると推測される。そこで、前項で定義した寿命を評価するために、塗布型ライニング材と同様、下記のような手法を用いた。

（１）硫酸による目地材料自体の劣化は、膨れ、われ、軟化などの有無を目視により観察し、定性的に評価した。また、目地部の環境遮断性の低下は、透水性試験結果により定量的に評価した。

（２）目地材あるいは、チタン板/目地材界面への硫酸の浸入は、電子線マイクロアナライザー（Electron ProbeMicro Analyzer, EPMA）等を用いた目地部断面の元素分析を行い、硫黄元素の分布状況から評価した。チタンシートライニング工法ではチタン板/目地材料界面からの硫酸の浸入が最も懸念されるため、この部分を重点的に分析した。

（３）チタン板と下地コンクリート（モルタル）との固着性能の低下、すなわち接着材料の健全性低下については、接着強度試験結果によって評価した。

参考文献

1) 日本下水道事業団: 下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術指針・同マニュアル, (2002)
2) 日本下水道協会: 下水道管路施設腐食対策の手引き（案）, (2002)
3) 日本農業集落排水協会: コンクリート防食設計指針・コンクリート防食施工指針, (2000)
4) 日本下水道事業団: 下水道構造物に対するコンクリート腐食抑制技術及び防食技術の評価に関する報告書, p.32, p.57 (2001)
5) 中沢均, "下水道コンクリート構造物の耐久性向上を目指して（改訂指針の概要とポイント）", セメント・コンクリート, No.674, pp.20-28 (2003)
6) 宇野祐一, "下水道施設の表面保護材としてのライニング材の有効性調査事例" コンクリート工学, **41** [9], PP.54-60 (2003)
7) 三品文雄, "下水道施設におけるコンクリートの微生物腐食とその対策", コンクリート工学, **41** [10], pp.8-14 (2003)
8) 田中修司, 岡本誠一郎, 加山慎一郎, "拡散式気相中硫化水素濃度連続測定器の開発", 第34回下水道研究発表会講演集, pp.1071-1073 (1997)
9) 加山慎一郎, "脱臭装置用硫化水素測定器の性能", 環境と測定技術, 21 [4], p.100 (1994)
10) 福田寛允, "管路の腐食と排水槽（２） 汚水ますにおける硫化水素濃度の連続測定", 月刊下水道, **21** [10], pp.58-64 (1998)
11) 蔵重勲, 魚本健人, "硫酸腐食環境におけるコンクリートの劣化特性", コンクリート工学年次論文集, **22** [1], pp.241-246 (2000)
12) 蔵重勲, 魚本健人, "硫酸の作用を受けるセメント硬化体の劣化予測手法に関する検討", コンクリート工学年次論文集, **24** [1], pp.615-620 (2002)
13) 渡邉賢三, 横関康祐, 坂田昇, 安田和弘, 三品文雄, "硫酸腐食によるコンクリート諸物性の変化について", コンクリート技術シリーズ, No.53, pp.215-220 (2003)
14) W. Sand, E. Bock and D. C. White, "Biotest System for Rapid Evaluation of Concrete Resistance to Sulfur - Oxidizing Bacteria", *Materials Performance*, **26** [3], pp.14-17 (1987)
15) S. Ehrich, E. Bock, R. Letourneux, L. Helard and J. Willocq, "モルタルの生物学的・化学的硫酸腐食 前編" 月刊下水道, **25** [3], pp.76-79 (2002)
16) S. Ehrich, E. Bock, R. Letourneux, L. Helard and J. Willocq, "モルタルの生物学的・化学的硫酸腐食 後編" 月刊下水道, **25** [5], pp.61-64 (2002)
17) 吉本国春, 西澤宏, "下水道施設における硫化水素によるコンクリートの劣化機構と防止対策に関する調査", 日本下水道事業団技術開発部報, Vol.1992, pp.77-86 (1992)
18) 斉藤裕司, 蔵重勲, 山田一夫, 河合研至, 大脇英司, 皆川浩, 安斎浩幸, 五十嵐秀明, 上田洋, "コンクリートの化学的侵食・溶脱に関する研究の現状 コンクリート委員会化学的侵食・溶脱研究小委員会 (323委員会) 報告", コンクリート技術シリーズ, No.53 (2003)

19) 久田　真, 坂井悦郎, “下水道の維持・補修 著しい早期劣化は社会問題に コンクリートの化学的侵食-下水道施設の事例、劣化機構の整理と課題-”, コンクリートテクノ, **23** [2], pp.71-75 (2004)
20) 土木学会コンクリート委員会コンクリート標準示方書改訂小委員会：2001 年制定 コンクリート標準示方書 維持管理編, pp.128-130 (2001)
21) 土木学会コンクリート委員会コンクリート標準示方書改訂小委員会: コンクリート標準示方書 2001 年制定維持管理編制定資料, p.67 および p.70 (2001)
22) 兵庫県, 大阪府, 日本下水道事業団: 89-017 技術開発部報告　猪名川流域下水道施設の防食設計に関する調査報告書, p.108 (1990)
23) 木下　勲ほか, “下水道環境における劣化予測と構造物の性能評価”, コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会報告, pp.105-106 (1998)
24) 東京都下水道局施設管理部: コンクリート改修技術マニュアル汚泥処理施設編 参考資料, p.14 (2003)
25) 浅上　修, 岡田昌巳, 五十嵐秀明, 米田俊一, “各種セメントの耐硫酸性に関する研究”, セメント・コンクリート論文集, No.50, pp.152-157 (1996)
26) 北條英光, 津田　健, 小笠原強, “耐食ＦＲＰ用樹脂の腐食形態と腐食速度”, 強化プラスチックス, **34** [2], pp.49-54 (1988)
27) 久保内昌敏, “熱硬化性樹脂の酸･アルカリ環境下における環境液の浸透と劣化の挙動” 材料の科学と工学, **39** [1], pp.8-12 (2002)
28) 社団法人強化プラスチック協会：だれでも使えるＦＲＰ‐ＦＲＰ入門ー, p.115 (2002)
29) 防錆・防食技術総覧編集委員会：防錆・防食技術総覧, pp.370-371 (2000)
30) 社団法人腐食防食協会：腐食防食協会ハンドブック, pp.327-328 (2000)
31) 伊藤邦雄: シリコーンハンドブック, pp.304-310 (1990)

第２編　耐酸モルタルの下水処理施設への適用性

１．概要

１．１　目的

下水処理施設内では、硫酸塩還元菌による硫化水素生成⇒硫黄酸化細菌による硫酸生成のプロセスによってコンクリート壁面表面に硫酸が生成し、腐食劣化が進行すると考えられている[1),2)]。実際の下水処理施設内の硫化水素濃度は0～1000ppm 以上と幅広く、生成する硫酸の量も硫化水素濃度や温度、湿度などに依存し、劣化損傷程度も硫酸の生成量に左右されると推測される。このことから下水処理施設コンクリート構造物の補修材料には、腐食環境の程度に応じた耐酸性が要求される。多くの塗布型ライニング材やシートライニング材は構造物中にほとんど硫酸を浸入させないほどの高い耐酸性有する。これらに比較すると、セメント系もしくはポリマーセメント系の耐酸モルタルの耐酸性はやや低いレベルではあるが、腐食劣化の穏やかな環境では耐酸モルタルを単独で使用した方が補修コストや耐用年数を考慮した場合、経済的に優れていることがあると考えられる。このため、耐酸モルタルの耐え得る環境（すなわち pH の程度）を把握することが必要となる。

また、腐食劣化が厳しい環境に曝されているコンクリート構造物では、通常、塗布型ライニング材やシートライニング材による工法により補修されるため、断面修復材がライニング材の下地となるのが一般的である[3)]。これらの工法によるライニング材にピンホールや何らかの理由による損傷などの欠陥が生じた場合、そこから硫酸が浸入し、塗膜の膨れなどを生じさせる可能性があるため、下地となる断面修復材にも耐酸性が必要となる[4)]。

断面修復材の耐酸性を評価する方法として一般的に行われているのは、5%希硫酸への浸せき試験（以下、浸せき試験と記す。）であるが[5),6)]、供試体表面で希硫酸に濃度勾配が生じやすい、供試体表面に生成した二水石膏層が硫酸との接触をある程度遮断するため[7), 8)]断面修復材の耐酸性評価に差が出にくいといった弱点が懸念されている。一方、下水処理施設内に生息する微生物と高濃度の硫化水素を用いて下水処理施設の環境条件を再現した促進試験方法も検討されている[9),10),11)]が、微生物を取り扱う方法であり、汎用的に行うには困難な面があると考えられる。このことから実際の下水処理施設内の環境に近い条件での新しい耐酸性評価方法の開発が必要であると考えられる。

さらに、耐酸モルタルは、記載されている基準類が限られているなど、比較的新しい材料であるため、一般に、その断面修復材としての特性が十分に理解されているとは言えないのが現状である。このため、劣化損傷した下水処理施設コンクリート構造物の断面修復材として耐酸モルタルを使用する場合、断面修復材としての要求される強度発現性、付着性、ひび割れ抵抗性などの性能が十分に満足するものであるかを確認する必要がある。

以上のことから、本編では、断面修復に使用する耐酸モルタルの耐酸性評価方法の開発および耐酸モルタルの性能評価、塗布型ライニング材との併用効果について検討することを目的とした。

１．２　耐酸モルタルとは

一般にセメントモルタルやポリマーセメントモルタル系の断面修復材では、バインダーとしてセメントを用いるモルタルであり、セメントの水和反応によりアルカリ性の高い水酸化カルシウムを多く生成する。耐酸性とはモルタルと酸との反応のしにくさ、すなわち水酸化カルシウムと酸との中和反応のしにくさであり、耐酸性を有するためには、モルタルの硬化時における水酸化カルシウムの生成量をできるだけ抑える必要がある。また、酸をモルタル内部に浸透させないような緻密な組織を形成する必要もある。

そこで、現在、開発されている耐酸モルタルでは、水酸化カルシウムの生成量をできるだけ抑制すること、緻密な硬化体組織を形成すること、下地コンクリートとの付着性に優れていることなどの条件に基づいて材料設計されている。ただし、一般の断面修復材においても、耐久性などの観点から緻密な硬化体組織を形成すること、下地コンクリートとの付着性に優れていることなどについては材料設計時に考慮されている。

具体的には、水和によって生成する水酸化カルシウムの生成量を抑制するために、

・ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末やシリカフュームなどのポゾラン物質を多量に添加したセメントを使用する

・セメントとしてアルミナセメントにポゾラン物質を添加したセメントを使用する

などが行われている。

また、酸をモルタル内部に浸透させないように緻密な組織を形成するために、

・セメントに高炉スラグ微粉末やシリカフュームなどのポゾラン物質を多量に添加したセメントを使用する

・セメント混和用ポリマーを添加したポリマーセメントモルタルにする

などが行われている。

１．３　耐酸モルタルの種類

本研究では３種類の耐酸モルタルを使用した。表２－１に、これらの耐酸モルタルの標準的な配合を示す。

表２－１　耐酸モルタルの標準的な配合

例	単位量 (kg/m^3)						備考[*4]
	プレミックス材料[*1]	水	セメント混和用ポリマー[*2]			硬化促進剤[*3]	
			エマルション	主剤	硬化剤		
A	1826	164	110	—	—	0～15	SBR 系ポリマーセメントモルタル。低温時（5～15℃）、温度により硬化促進剤を添加。
B	1757	281	—	—	—	—	アクリル系ポリマーセメントモルタル（再乳化形粉末樹脂配合）
C	1609	210	—	129	26	—	エポキシ系ポリマーセメントモルタル。

（注）*1：セメント、細骨材、混和材（剤）などを予め工場においてドライミックスした粉体材料

*2：エマルション（セメント混和用エマルション）、主剤（エポキシ樹脂エマルション）、硬化剤（エポキシ樹脂用硬化剤）

*3：低温時に硬化促進のために添加する無機塩

*4：いずれの耐酸モルタルもコンシステンシーは混練水量または流動化剤などで調整する。

２．　耐酸モルタルの耐酸性評価方法に関する調査

２．１　目的

現在、断面修復材の耐酸性を評価する方法として 5%希硫酸への浸せき試験（以下、浸せき試験と記す。）が一般的に行われているが[5), 6)]、供試体表面で希硫酸に濃度勾配が生じやすい。また、供試体表面に生成した二水石膏層が硫酸との接触をある程度遮断するため[7), 8)]、断面修復材の耐酸性評価に差が出にくいと考えられる。さらに、下水処理施設内に生息する微生物と高濃度の硫化水素を用いて下水処理施設の環境条件を再現した促進試験方法も検討されているが、微生物の繁殖に関わる方法であり、汎用的に行うには困難な面があると考えられる。そこで本共同研究では、断面修復材の耐酸性評価方法のひとつとして、実際の下水処理施設に近い環境条件を設定でき、生成した二水石膏の影響が少なく、侵食速度の検討に適用しやすいと考えられる希硫酸の滴下試験（以下、滴下試験と記す。）を考案し、浸せき試験との比較により、滴下試験の耐酸性評価方法としての適性について考察を行った。

２．２　試験方法

２．２．１　使用材料

(1) 希硫酸

試薬特級硫酸（濃度 96%以上）を上水道水を用いて希釈して耐酸性試験に使用した。文献調査の結果、硫化水素から硫酸を生成する硫黄酸化細菌を用いた微生物試験によれば、普通セメントモルタル表面の到達 pH は硫化水素濃度 10～800ppm の範囲で pH1 前後であった[9),10),11)]。このことから、試験に使用した希硫酸は、滴下試験ではｐH計を用いて pH0、1、2 に測定・調整し、浸せき試験では質量比 5%希硫酸（pH＝約 0.5）に調整した[2)]。

(2) 普通セメントモルタル

JIS R 5201「セメントの物理試験方法」に準じ、普通ポルトランドセメント、標準砂、上水道水を使用し、S/C＝3、W/C＝0.5 のモルタルを使用した。

(3) 耐酸性断面修復材

表２－１に示す練り混ぜ配合および物性を有する耐酸モルタル A、B、C の 3 種類を使用した。

(4) 供試体形状および作製方法

滴下試験に用いる供試体寸法を 70×70×20mm とした。モルタルの練り混ぜ方法、成形方法、養生方法は、JIS A 1171「ポリマーセメントモルタルの試験方法」に従った。成形後、20℃、90%RH の恒温室内で 48 時間経過した後、脱型し、20℃の水中で 5 日間養生し、さらに 20℃、60%RH の恒温室内で 21 日間養生して供試体とした。滴下試験に用いる供試体については、成形時仕上げ面 70×70mm を試験面とし、試験面と希硫酸の流下する下部 1 端面を除き、残りの 4 面を耐酸性を有する防食テープで被覆した。なお、普通セメントモルタルについては、JIS R 5201 に準じて成形・養生を行い、上記同様に防食テープで被覆した。

２．２．２　滴下試験方法

滴下試験装置の概要を図２－１および図２－２に示した。pH を調整した希硫酸を一定量で供給できるチューブポンプを用い、45° に傾斜させた供試体の試験面（成形時底面）に 35mm の高さから約 14ml/hr の速度で所定材齢まで希硫酸を滴下させた。滴下終了後、供試体から防食テープを取り除き、試験面をブラシおよびヘラを用いて水洗浄した後、20℃、65%RH の恒温恒湿槽内で 7 日間静置し、供試体の質量を測定して、試験前質量から試験後質量を差し引いた値を試験前質量で除し、滴下試験による質量減少率を算出した。また、図２－３に示すように供試体の厚みを定点（25 点）でマイクロメーターを用いて測定し、試験前の供試体厚みから試験後の供試体厚みを差し引いて、滴下試験による供試体の侵食深さとした。なお、滴下材齢は 1～8 週、試験温度は 10、20、30、40℃とした。また、滴下速度を 14～48ml/hr まで変化させた予備試験結果では浸食深さに大きな差は見られなかったため、本試験では 14ml/hr とした。

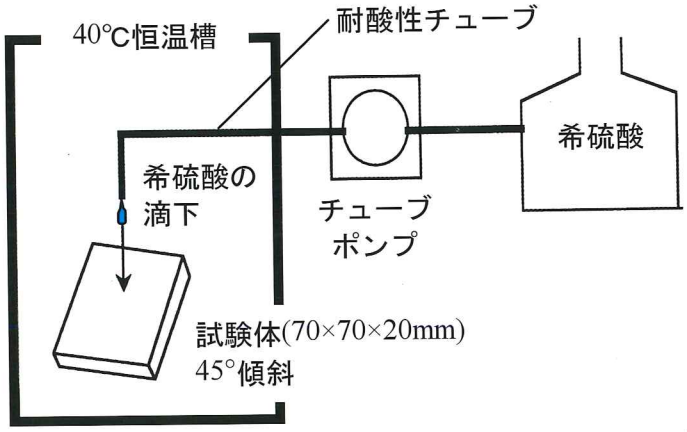


図２－１　滴下試験の概要

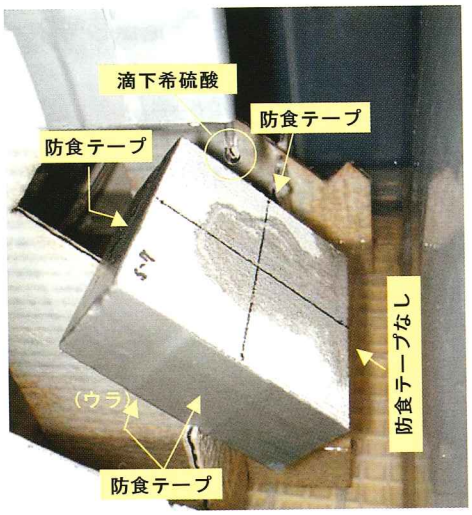
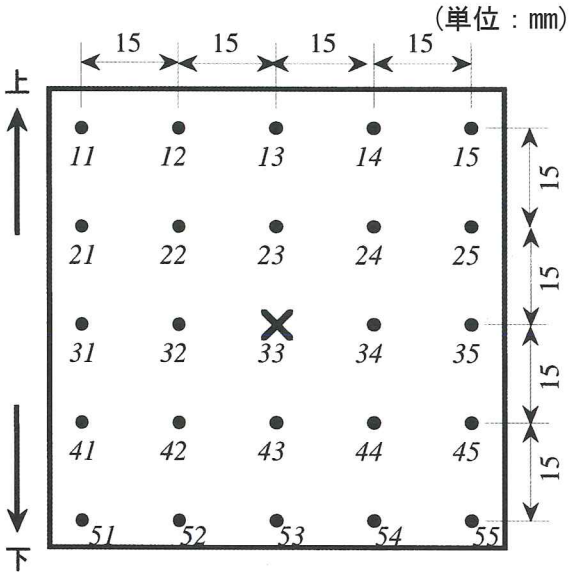


図２－２　滴下試験装置



試験体上の斜体数字は厚さ測定点番号
×：滴下点
（試験体滴下面より見た図）

図２－３　滴下試験における供試体侵食深さ測定位置

２．２．３　浸せき試験方法

20℃の恒温室において、1 供試体に対する 5%希硫酸の溶液比を 4.4 リットルとして 4 週間供試体を希硫酸に浸せきした。なお、浸せきする希硫酸は 1 週間毎に全量を交換した。浸せき終了後，供試体を引き上げ、水道水で供試体全面を 1 分間洗浄した後、質量を測定し，試験前質量から差し引いた値を試験前質量で除して質量変化率を算出した。また，供試体を高さ方向で 1/2 に切断し、切断面にフェノールフタレイン溶液を噴霧し、浸せき前の供試体寸法から呈色領域の寸法を差し引いた値の 1/2 を硫酸浸透深さとした[2)]。

２．３　試験結果

２．３．１　滴下試験結果

２．３．１．１　供試体の侵食状況

図２－４および図２－５に、試験温度 40℃、pH0、滴下 4 週の滴下試験による普通セメントモルタルおよび耐酸モルタル A の供試体侵食状況例を示した。普通セメントモルタルおよび耐酸モルタルのいずれも希硫酸の pH が低くなるほど侵食が激しくなった。pH 2 では、普通セメントモルタルおよび耐酸モルタルとも希硫酸が流下する部分に沿って侵食が進行し、普通セメントモルタルでやや侵食が

進行した。pH１では、普通セメントモルタルで試験面全面に侵食が進行し、特に希硫酸流下部で深さ方向に激しく侵食が進行した。これに対して耐酸モルタルではpH２よりも希硫酸流下部分の侵食が広範囲になったが、深さ方向にはあまり侵食が進行しなかった。pH０では、いずれのモルタルも侵食が進行した。普通セメントモルタルでは、供試体下部は完全に消失し、また、希硫酸流下部分の侵食が広範囲に、かつ深さ方向に著しく進行した。耐酸モルタルでは希硫酸流下部分の侵食はpH１とあまり変化が見られないが、滴下点よりも上部で広範囲にやや侵食が進行し、普通セメントモルタルとは異なる侵食状況を示した。他の２種類の耐酸モルタルも希硫酸による侵食程度に差はややあるものの類似の侵食状況を示した。

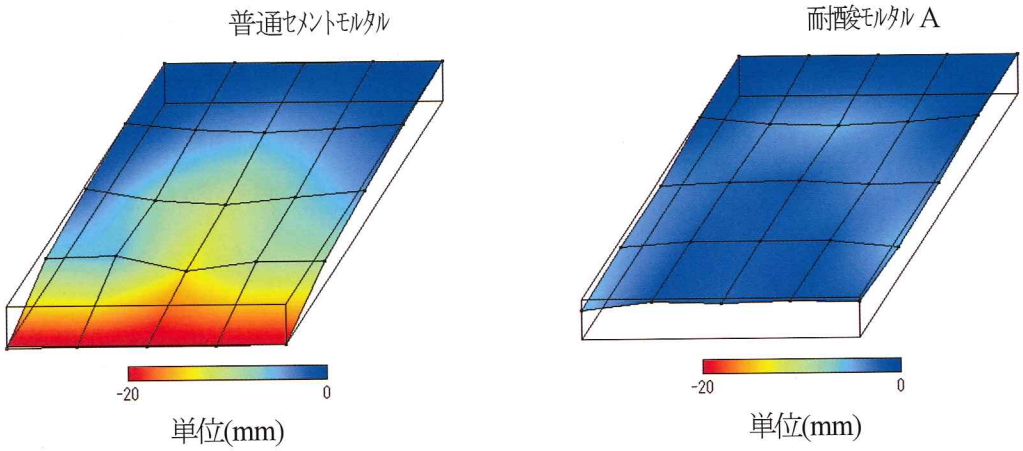


図２－４　滴下試験後の侵食状況（試験温度 40℃、pH0、滴下４週の場合）

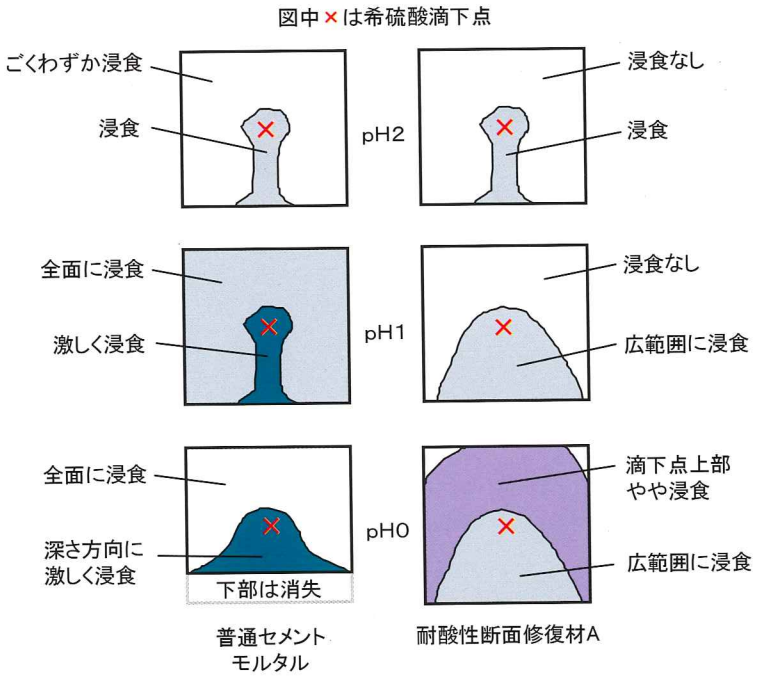
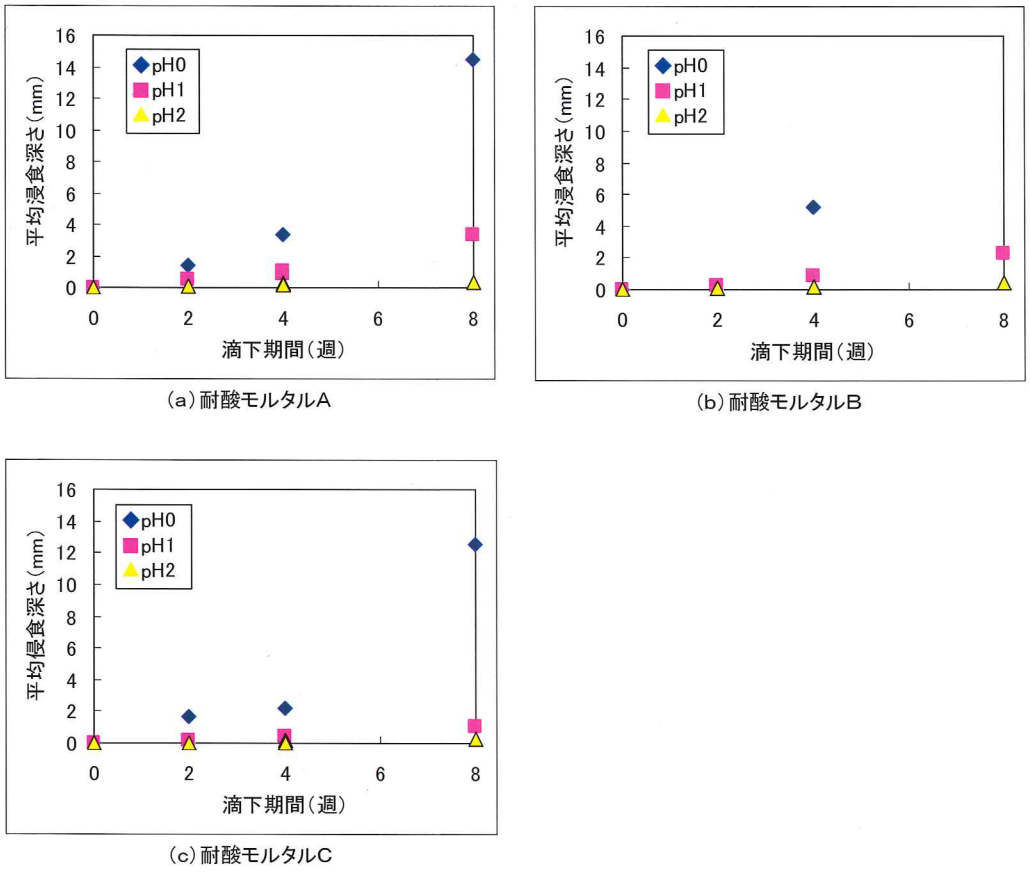


図２－５　滴下試験後の侵食状況例（滴下面：試験温度 40℃、pH0、滴下４週の場合）

図２－６に、試験温度 40℃、pH0～2 における滴下試験による耐酸モルタル 3 種類の平均侵食深さの測定結果を示した。いずれの耐酸モルタルも滴下期間が長くなるほど、滴下 pH が平均侵食深さが大きくなった。



（a）耐酸モルタルA　　（b）耐酸モルタルB

（c）耐酸モルタルC

図２－６　耐酸モルタルの滴下期間と平均侵食深さの関係
（試験温度 40℃）

２．３．１．２　侵食深さと質量変化率

図２－７に供試体の質量減少率と平均侵食深さの関係を示した。滴下試験後の質量減少率と平均侵食深さの間には相関係数 0.97 と強い相関が見られた。希硫酸による侵食範囲は、図２－４および図２－５に示すように、滴下点だけではなく、希硫酸流下部分の周囲にも及ぶため、ほぼ試験面全面の 25 点で測定している侵食深さの平均が質量減少率と相関が高くなっていると考えられる。このことから平均侵食深さが耐酸性の評価指標とすることが可能であると考えられる。

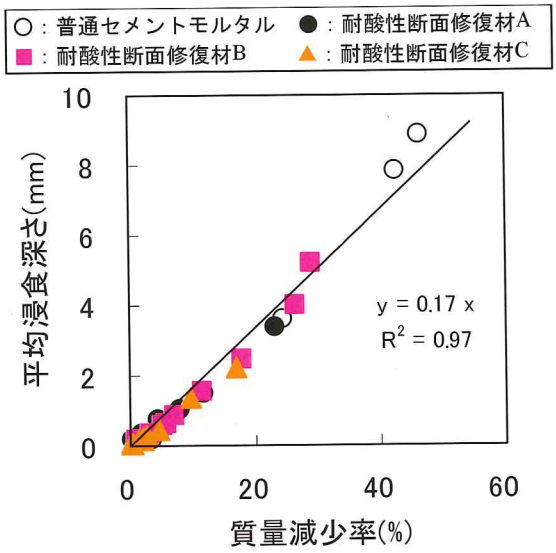


図２－７　滴下試験における質量減少率と平均侵食深さの関係（滴下４週）

図２－８に各温度における滴下する希硫酸の pH と平均侵食深さの関係を示した。また、合わせて硫酸浸せき試験方法によって測定した硫酸浸透深さも比較として示した。普通セメントモルタルの 20℃、pH 0 を除いて、いずれの材料も試験温度が高いほど、pH が低いほど平均侵食深さが大きくなった。これは希硫酸とセメント系材料の反応が酸とアルカリの中和反応であり、温度および酸の pH に依存するためであると考えられる。また、普通セメントモルタルの 20℃、pH 0 の平均侵食深さが 40℃のそれより大きくなっているが、この理由は、40℃、pH 0 の供試体では、完全に供試体下部が消失し、その部分での浸食深さが 20mm 以上大きくならなかったためと考えられる。耐酸モルタルは普通セメントモルタルと比較して、各温度および pH において平均侵食深さが小さく、滴下試験においても耐酸性が優れている結果となった。

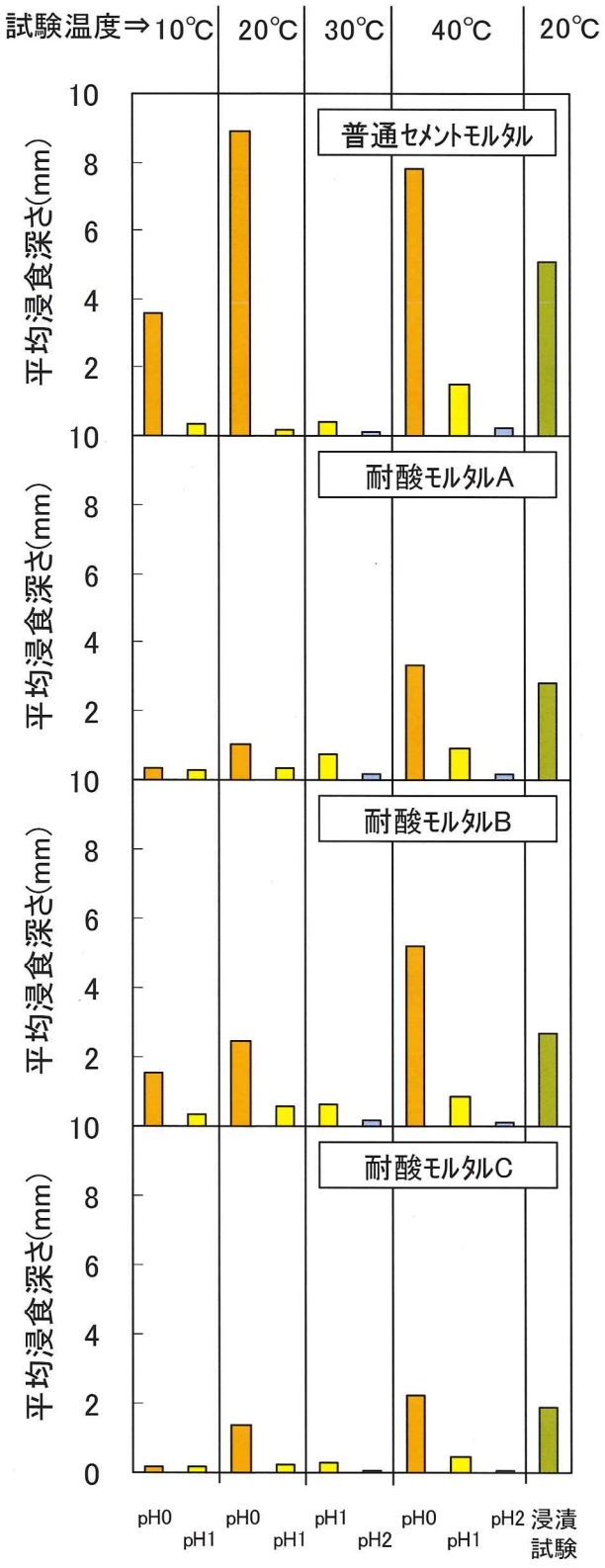


図２－８　各温度における滴下する硫酸のpHと平均侵食深さの関係

（滴下試験：滴下４週、浸漬試験：測定値は硫酸浸透深さ）

２．３．２　浸せき試験結果

表２－２、表２－３に硫酸浸せき試験結果を示した。いずれの耐酸モルタルも普通セメントモルタルに比較して質量減少率が約 1/7～1/30、硫酸浸透深さが約 1/3～1/2 であり、浸せき試験で高い耐酸性を示した。

表２－２　硫酸浸せき試験結果（質量変化率）

モルタルの種類		浸せき前質量 (g)	浸せき後質量 (g)	質量変化率 (%)	平均値
普通モルタル	①	1451	1036	-28.6	質量変化率 -28.2%
	②	1433	1036	-27.7	
A	①	1345	1330	-1.12	質量変化率 -1.11%
	②	1353	1338	-1.11	
	③	1345	1330	-1.12	
B	①	1439	1387	-3.61	質量変化率 -3.64%
	②	1449	1399	-3.45	
	③	1432	1377	-3.84	
C	①	1331	1317	-1.05	質量変化率 -1.03%
	②	1331	1317	-1.05	
	③	1330	1317	-0.98	

表２－３　硫酸浸せき試験結果（硫酸浸透深さ）

耐酸モルタル		フェノールフタレイン呈色領域(mm)						硫酸浸透深さ (mm)	平均値
		1	2	3	4	5	平均値		
普通モルタル	①	65.0	65.1	65.0	65.3	65.1	65.1	5.0	硫酸浸透深さ 5.1mm
	②	64.9	65.0	64.9	65.0	64.9	64.9	5.1	
A	①	69.1	69.0	69.0	70.2	70.1	69.5	2.8	硫酸浸透深さ 2.8mm
	②	70.4	69.4	68.6	70.1	71.9	70.1	2.5	
	③	67.9	69.3	68.3	69.2	68.6	68.7	3.2	
B	①	70.0	70.0	69.7	69.8	70.5	70.0	2.5	硫酸浸透深さ 2.7mm
	②	70.5	69.6	70.3	69.3	69.1	69.8	2.6	
	③	68.1	69.3	70.0	70.0	69.1	69.3	2.9	
C	①	71.3	71.3	72.4	71.0	71.2	71.4	1.8	硫酸浸透深さ 1.9mm
	②	71.2	70.6	70.6	71.1	71.6	71.0	2.0	
	③	70.2	71.1	71.1	72.0	71.2	71.1	1.9	

２．４　考察

比較にあたっては、同じ試験温度である20℃における滴下試験と浸せき試験を比較した。また、浸せき試験と滴下試験に使用した硫酸のpHに同じものがなく、浸せき試験の5%希硫酸のpHが約0.5であること、滴下試験のpH１ではいずれの供試体でも侵食が小さく大きな差が見られなかったことから、ここでは浸せき試験との比較をpH０の滴下試験結果と比較することとした。

滴下試験と浸せき試験の結果を比較し、滴下試験の優位性をまとめた結果を図２－９に示す。浸せき試験における普通セメントモルタルの硫酸浸透深さは約5mmに対して、滴下試験（硫酸pH０、滴下４週）における侵食深さが約9mmとおよそ２倍となり、滴下試験の方がより厳しい条件での耐酸性評価となっていることがわかる。また、耐酸モルタルでは浸せき試験での硫酸浸透深さが約2～3mm、滴下試験（硫酸pH０）での侵食深さが1～3mmとそれほど大きな差が見られない。この結果から、浸せき試験（硫酸pH 0.5）では耐酸モルタルの硫酸浸透深さが普通セメントモルタルのおよそ1/3～1/2であるのに対して、滴下試験（硫酸pH０）では耐酸モルタルの硫酸侵食深さが普通セメントモルタルのおよそ1/9～1/4であり、試験方法による耐酸性の評価結果に違いが認められる。これは、浸せき試験ではpH約0.5の希硫酸の交換が１週間毎であるのに対して、滴下試験では常に滴下点に新しいpH０の希硫酸が供給されること、生成する二水石膏の影響が少ない等が理由として考えられる。実際の下水処理施設における腐食劣化が，硫酸塩還元菌や硫黄酸化細菌が活発に繁殖する30～40℃付近で進行しやすく，また，硫黄酸化細菌が生成した硫酸による劣化が気相部コンクリート表面の結露水中で起こることなどから，滴下試験が下水処理施設コンクリート構造物の腐食環境により近い評価方法と考えられ，補修に用いられている断面修復材の耐酸性評価手法として適用できると考えられる。現在，稼動中の下水処理施設を用いて各種断面修復材の暴露試験を継続している。今後，滴下試験に関して，実際の腐食劣化との対比を行い，下水道処理施設に適用する補修材料の寿命予測について検討する予定である。

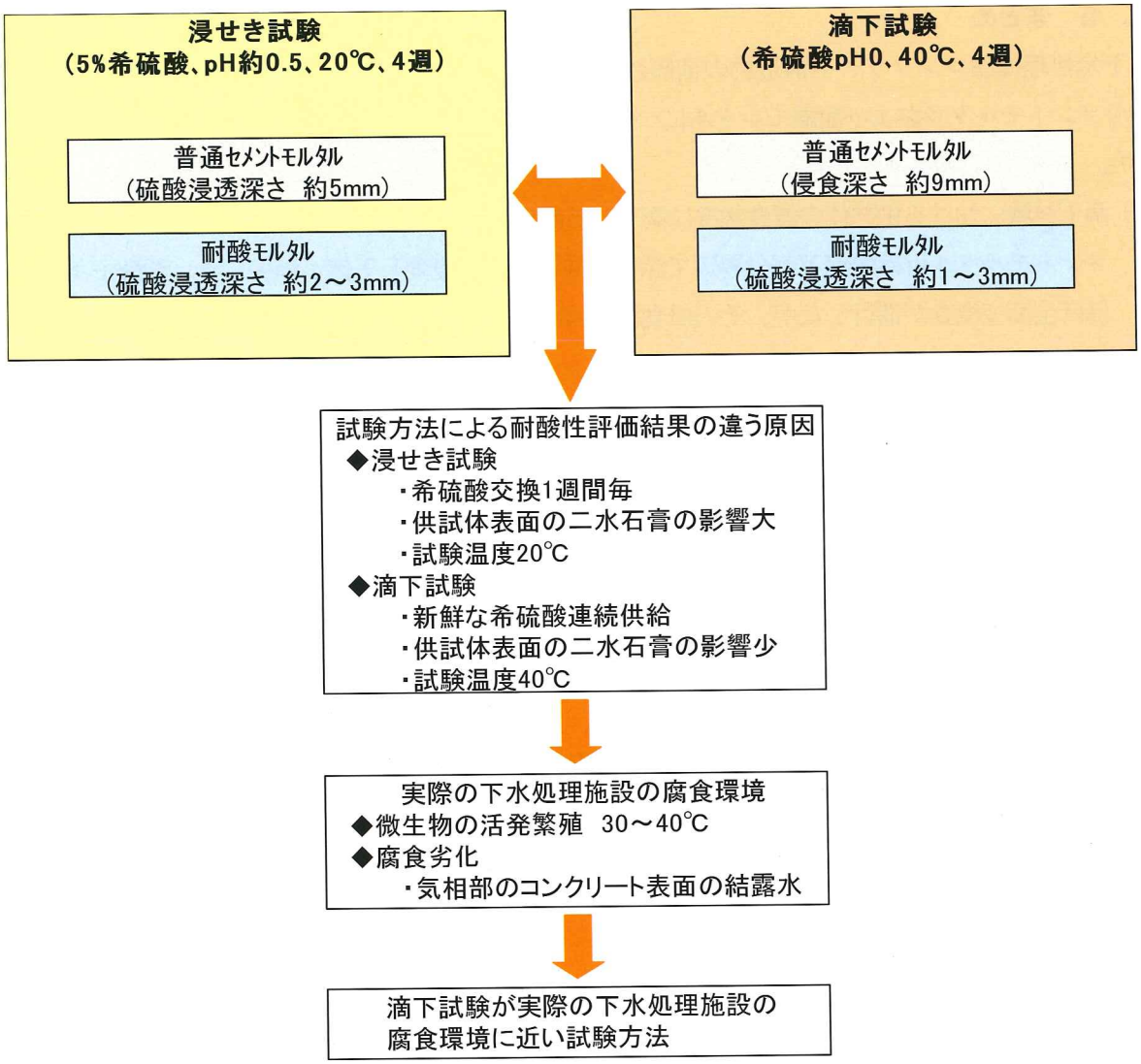


図２－９　滴下試験および浸漬試験と実際の下水処理施設の腐食環境の比較

2．5　まとめ

下水処理施設コンクリート構造物の補修に用いられている断面修復材の耐酸性評価手法として普通セメントモルタルおよび耐酸モルタルについて耐酸性試験を行った結果、以下のような知見が得られた。

(1) 滴下試験における供試体の侵食状況は滴下する希硫酸の pH に影響される。pH 0 において普通セメントモルタルは硫酸流下部分周辺で深さ方向に激しく侵食し下部が消失した。耐酸モルタルはほぼ全面で侵食が進行したが、その侵食深さは小さく、普通セメントモルタルと比較して高い耐酸性を示した。

(2) 滴下試験における供試体の質量変化率と平均侵食深さの間には高い相関が見られ、平均侵食深さが耐酸性の評価指標となると考えられた。

(3) 滴下試験では、試験温度が高いほど、また、pH が低いほど平均侵食深さが大きくなった。

(4) 耐酸モルタルは普通セメントモルタルと比較して、各温度および pH において平均侵食深さが小さく、浸せき試験と同様に滴下試験においても耐酸性が優れていることがわかった。

(5) 浸せき試験では 3 種類の耐酸モルタルの硫酸浸透深さに差があまり見られなかったが、滴下試験では侵食深さに差が認められた。

(6) 滴下試験が下水処理施設コンクリート構造物の補修に用いられている断面修復材の耐酸性評価手法として適用できる可能性があると考えられた。

３．　耐酸モルタルの性能に関する調査

３．１　目的

耐酸モルタルに関して、強度発現性、一体性、耐ひび割れ性などの諸物性の評価を目的とした。なお、参考として、現在、日本下水道事業団および東京都下水道局で規定している下水処理施設コンクリート構造物の補修材（耐酸モルタル）の性能規格[5),13)]を表２－４、２－５に示した。

表２－４　日本下水道事業団の修復モルタルの品質規格[13)]

項　目		品　質				備　考
		急硬タイプ		普通タイプ		
		厚塗り	薄塗り	厚塗り	薄塗り	
曲げ強度 (N/mm^2)	材齢１日	2.0 以上	2.0 以上	―	―	「修復モルタルの品質試験方法」による[13)]。 温度 20±2℃ 湿度 50%以上
	材齢７日	3.0 以上	3.0 以上	3.0 以上	3.0 以上	
	材齢 28 日	5.0 以上	5.0 以上	5.0 以上	5.0 以上	
圧縮強度 (N/mm^2)	材齢１日	10 以上	10 以上	―	―	
	材齢７日	21 以上	21 以上	15 以上	15 以上	
	材齢 28 日	24 以上	24 以上	24 以上	24 以上	
接着力 (N/mm^2)	材齢７日	1.2 以上	1.2 以上	―	―	
	材齢 28 日	1.5 以上	1.5 以上	1.5 以上	1.5 以上	
長さ変化率(%)材齢 28 日		-0.10 以上	―	-0.15 以上	―	

表２－５　東京都下水道局の断面修復材の要求性能指標[5)]

要求性能項目	性能指標	備　考
強度特性 (圧縮強度)	材齢 3 日：25N/mm^2 以上 材齢 28 日：45N/mm^2 以上	JIS R 5201
曲げ強度	材齢 3 日：3.0N/mm^2 以上 材齢 28 日：7.0N/mm^2 以上	JIS R 5201
密度特性 (浸透拡散抵抗性)	硫酸浸透深さ：3.0mm 以下	5%硫酸水溶液 28 日浸せき後のフェノールフタレイン非呈色深さ、硫酸水溶液は 7 日ごとに交換、供試体：φ7.5×15cm
無収縮性 (耐ひび割れ性)	(補修用モルタル) 長さ変化率：-0.1%以上	JIS A 1129 測長は保存期間４週までとする
	(補修用グラウト) 材齢７日で収縮がないこと	「(略称)JS 防食指針・同マニュアル」(平成 14 年 12 月)参考資料 4-12 試験方法
接着安定性 (コンクリート下地との接着性)	(コンクリート下地) 材齢 28 日：平均値 1.5N/mm^2 以上	建研式引張り試験
耐環境性 (耐硫酸性)	重量変化率 (補修用モルタル)±10%以内 (補修用グラウト)±15%以内	5%硫酸水溶液 28 日浸せき後、硫酸水溶液は 7 日ごとに交換、供試体：φ7.5×15cm
施工性	一回の塗り厚：2cm が可能なこと	

３．２　試験方法

３．２．１　曲げおよび圧縮強度試験

JIS A 1171「ポリマーセメントモルタルの試験方法」に準じて曲げおよび圧縮強度試験を行った。20℃、60%RH 以上の恒温室内において、耐酸モルタルを練混ぜ、寸法 40×40×160mm の供試体成形型枠に成形した。20℃、90%RH 以上の恒温室内で 48 時間養生した後、脱型し、20℃水中で 5 日間養生し、さらに 20℃、60±10%RH の恒温室内で 21 日間養生して曲げおよび圧縮強度試験に用いた。

３．２．２　付着強度試験

20℃、65%RH の恒温室内において、300×300×60mm のコンクリート平板に、耐酸モルタルを 20mm の厚さで塗布し、材齢 28 日まで養生した後、耐酸モルタル仕上げ面からコンクリート平板 2mm までディスクサンダーで 40×40mm の切込みを入れ、鋼製アタッチメントをエポキシ接着剤で接着し、建研式引張試験機により付着強さを測定した。

３．２．３　長さ変化試験

JIS A 1171「ポリマーセメントモルタルの試験方法」に準じて長さ変化試験を行った。20℃、60%RH 以上の恒温室内において、耐酸モルタルを練混ぜ、寸法 40×40×160mm の供試体成形型枠に成形した。20℃、90%RH 以上の恒温室内で 48 時間養生した後、脱型し、20℃水中で 5 日間養生した。基長を測定した後、20℃、60±10%RH の恒温室内で 28 日間養生して長さ変化を測定した。

３．３　試験結果

３．３．１　曲げおよび圧縮強度試験結果

表２－６に耐酸モルタルの曲げおよび圧縮強度試験結果を示す。試験に使用した耐酸モルタルは材齢28日において、圧縮強さで約50N/mm^{2}以上、曲げ強度で約8N/mm^{2}以上を発現する。

表２－６　耐酸モルタルの曲げおよび圧縮強度試験結果

耐酸ﾓﾙﾀﾙ		曲げ強度 (N/mm^2)	圧縮強さ (N/mm^2)	平均値	(参考)日本下水道事業団修復モルタルの品質規格	(参考)東京都下水道局断面修復材の要求性能指標
A	①	8.0	50.1	曲げ強度 8.6N/mm^2 圧縮強さ 51.7N/mm^2	材齢28日 曲げ強度 5N/mm^{2}以上 圧縮強度 24 N/mm^{2}以上	材齢28日 曲げ強度 7.0N/mm^{2}以上 圧縮強度 45 N/mm^{2}以上
	②	9.5	50.0			
	③	8.4	54.2			
	④		54.1			
	⑤		50.1			
	⑥		51.9			
B	①	9.2	89.4	曲げ強度 9.7N/mm^2 圧縮強さ 93.4N/mm^2		
	②	11.0	90.8			
	③	9.1	93.1			
	④		95.9			
	⑤		94.8			
	⑥		96.3			
C	①	8.2	56.8	曲げ強度 7.8N/mm^2 圧縮強さ 56.7N/mm^2		
	②	7.4	58.3			
	③	7.8	57.4			
	④		58.1			
	⑤		55.4			
	⑥		54.4			

３．３．２　付着強度試験結果

表２－７に耐酸モルタルの付着強度試験結果を示す。試験に使用した耐酸モルタルは、いずれもポリマーセメントモルタルであることから、材齢28日においてコンクリートとの付着強さが約2N/mm^{2}以上であり、コンクリートとの一体性に優れていると考えられる。

表２－７　耐酸モルタルの付着強度試験結果

耐酸ﾓﾙﾀﾙ		付着強さ (N/mm^2)	破断位置	平均値	(参考)日本下水道事業団修復モルタルの品質規格	(参考)東京都下水道局断面修復材の要求性能指標
A	①	1.84	耐酸ﾓﾙﾀﾙ破壊 100%	付着強さ 2.12N/mm^2	材齢28日 1.5N/mm^{2}以上	材齢28日 1.5N/mm^{2}以上
	②	1.88	耐酸ﾓﾙﾀﾙ表層破壊 100%			
	③	2.16	ｺﾝｸﾘｰﾄ破壊 100%			
	④	1.93	耐酸ﾓﾙﾀﾙ表層破壊 100%			
	⑤	2.81	ｺﾝｸﾘｰﾄ破壊 100%			
B	①	3.06	ｺﾝｸﾘｰﾄ破壊 60% 耐酸ﾓﾙﾀﾙ破壊 40%	付着強さ 3.17N/mm^2		
	②	3.38	耐酸ﾓﾙﾀﾙ破壊 100%			
	③	2.51	ｺﾝｸﾘｰﾄ破壊 60% 耐酸ﾓﾙﾀﾙ破壊 40%			
	④	3.27	ｺﾝｸﾘｰﾄ破壊 60% 耐酸ﾓﾙﾀﾙ破壊 40%			
	⑤	3.64	耐酸ﾓﾙﾀﾙ破壊 100%			
C	①	1.75	ｺﾝｸﾘｰﾄ破壊 100%	付着強さ 2.28N/mm^2		
	②	1.75	ｺﾝｸﾘｰﾄ破壊 100%			
	③	3.25	ｺﾝｸﾘｰﾄ破壊 100%			
	④	2.00	ｺﾝｸﾘｰﾄ破壊 100%			
	⑤	2.63	ｺﾝｸﾘｰﾄ破壊 100%			

３．３．３　長さ変化試験結果

表２－８に耐酸モルタルの長さ変化試験結果を示す。試験に使用した耐酸モルタルは、材齢 28 日において長さ変化率が 0.08%以下と小さく、耐ひび割れ性に優れていると考えられる。

表２－８　耐酸モルタルの長さ変化試験結果

耐酸ﾓﾙﾀﾙ		長さ変化率(%)	平均値	(参考)日本下水道事業団修復モルタルの品質規格	(参考)東京都下水道局断面修復材の要求性能指標
A	①	-0.038	長さ変化率 –0.037%	材齢 28 日 急硬タイプ -0.10%以上 普通タイプ -0.15%以上	材齢 28 日 -0.1%以上
	②	-0.037			
	③	-0.036			
B	①	-0.056	長さ変化率 –0.048%		
	②	-0.050			
	③	-0.038			
C	①	-0.080	長さ変化率 –0.080%		
	②	-0.080			
	③	-0.080			

3．4　まとめ

下水処理施設コンクリート構造物の補修に用いられている耐酸モルタルについて諸物性の評価試験を行った結果、以下のような知見が得られた。

(1) 試験に使用した耐酸モルタルは材齢 28 日において、圧縮強さで約 50N/mm^2 以上、曲げ強度で約 8N/mm^2 以上を発現する。

(2) 試験に使用した耐酸モルタルは、いずれもポリマーセメントモルタルであることから、材齢 28 日においてコンクリートとの付着強さが約 2N/mm^2 以上であり、コンクリートとの一体性に優れていると考えられる。

(3) 試験に使用した耐酸モルタルは、材齢 28 日において長さ変化率が 0.08%以下と小さく、耐ひび割れ性に優れていると考えられる。

４．　塗布型ライニング材との併用効果に関する調査

４．１　目的

塗布型ライニング材塗膜に欠損が生じた場合、欠損部から硫酸が断面修復材に浸透し、硫酸による腐食劣化が生じる。汎用の断面修復材はポルトランドセメントを主成分としているため、膨張性の二水石膏やエトリンガイトが生成される。その結果、塗膜を押し広げ欠損部はさらに大きくなり腐食劣化が促進される。一方、断面修復材が耐酸モルタルである場合、二水石膏は生成しにくく、腐食劣化は軽微になるとされている。

本調査では、下水処理施設の環境において塗布型ライニング材塗膜に何らかの理由で欠損部が生じたと想定した試験を実施し、汎用の断面修復材と耐酸モルタルの劣化状況の違いを調べ、耐酸モルタルに前述のようなメリットがあることの確認を目的とした。

４．２　使用材料

４．２．１　基材

表２－９に示すモルタルを用いて試験用の基材モルタル板を作製した。

表２－９　試験に使用したモルタル

供試体 No	ﾓﾙﾀﾙの種類[*1]	混練配合割合（質量比）	ﾓﾙﾀﾙの用途
耐酸ﾓﾙﾀﾙ A	SBR 系 PCM	粉体：混和液：水＝100：6：9	下水処理施設補修用
耐酸ﾓﾙﾀﾙ B	ｱｸﾘﾙ系 PCM[*2]	粉体：水＝100：16	
耐酸ﾓﾙﾀﾙ C	ｴﾎﾟｷｼ系 PCM	粉体：主剤：硬化剤：水＝100：8：1.6：12	
汎用ﾓﾙﾀﾙ E	CM	粉体：水＝100：16	汎用

（注）*1 ﾓﾙﾀﾙの種類／PCM：ﾎﾟﾘﾏｰｾﾒﾝﾄﾓﾙﾀﾙ　CM：ｾﾒﾝﾄﾓﾙﾀﾙ
*2　耐酸ﾓﾙﾀﾙ B／再乳化形粉末樹脂使用

４．２．２　防食材

エポキシ樹脂系ライニング材を使用した。

４．２．３　供試体の作製

４．２．３．１　基材モルタル板の寸法および数量

試験に用いた基材モルタル板の寸法および数量を表２－１０に示す。

表２－１０　基材モルタル板の寸法および数量

供試体 No	ﾓﾙﾀﾙの種類[*1]	供試体の寸法	供試体数量
耐酸ﾓﾙﾀﾙA	SBR 系 PCM	70×70×20mm	3 個
耐酸ﾓﾙﾀﾙB	ｱｸﾘﾙ系 PCM[*2]	70×70×20mm	3 個
耐酸ﾓﾙﾀﾙC	ｴﾎﾟｷｼ系 PCM	70×70×20mm	3 個
汎用ﾓﾙﾀﾙE	CM	70×70×20mm	3 個

（注）*1 ﾓﾙﾀﾙの種類／PCM：ﾎﾟﾘﾏｰｾﾒﾝﾄﾓﾙﾀﾙ　CM：ｾﾒﾝﾄﾓﾙﾀﾙ
*2　耐酸ﾓﾙﾀﾙ B／再乳化形粉末樹脂使用

４．２．３．２　供試体の作製方法

基材モルタル板は70×70×20mmとし、表２－９に示す配合で練り混ぜを行った。モルタルの練り混ぜ方法、成形方法、養生方法は、JIS A 1171「ポリマーセメントモルタルの試験方法」に従った。成形後、20℃、90%RHの恒温室内で48時間経過した後、脱型し、20℃の水中で5日間養生し、さらに20℃、60%RHの恒温室内で21日間養生して供試体とした。表面水分率が8%以下になったことをデジタル水分計で確認し、表２－１１に示す要領で直接エポキシ樹脂系ライニング材を塗布した。供試体上面のエポキシ樹脂系ライニング材に図２－１０に示すようにカッターで基材モルタル表面に達する切れ目を入れ、20℃，60%RHの恒温室で2週間養生した後、試験に用いた[12]。

表２－１１　エポキシ系ライニング材の塗布方法

配合比率（質量比）	塗布回数	塗布間隔	塗布厚さ
主剤：硬化剤=4：1	3回	24時間	0.4mm

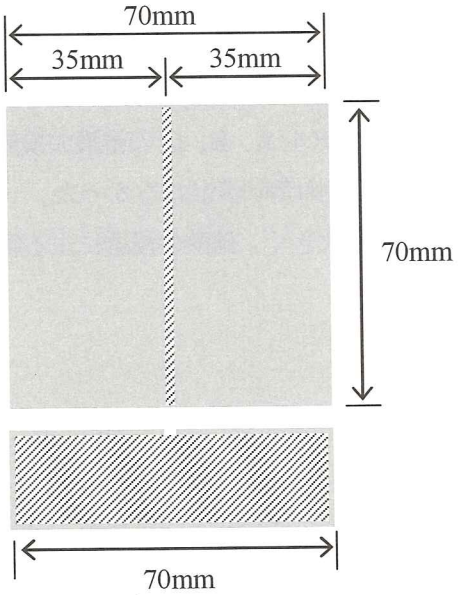


図２－１０　供試体の概要

４．２．４　試験溶液の調製

試験溶液は、JIS K 8951で規定した1級硫酸を使用し、5質量%濃度に上水道水で調整した。液温を20±2℃に調整した後にpHを測定し、0.4±0.1であることを確認し試験に用いた[5]。

４．３　試験方法

４．３．１　外観観察

5%硫酸溶液に4週間浸せきした供試体を目視観察し、エポキシ樹脂系ライニング材および基材モルタル板の膨れ、ひび割れ、剥離の有無を確認した[13]。

４．３．２　質量変化の測定

供試体の養生終了後、各供試体の質量を電子天秤で小数点以下１桁まで測定し、初期値とした。各供試体は、20℃の 5%硫酸溶液に 4 週間浸せきした。浸せき後、水洗し表面の水分を拭き取り、質量を電子天秤で小数点以下１桁まで測定し、浸せき後の供試体質量とした。質量変化率は、次式により求めた[5]。

$$\text{質量変化率（\%）} = \frac{\text{試験溶液浸せき後の供試体質量（g）} - \text{初期値（g）}}{\text{初期値（g）}} \times 100$$

４．３．３　中性化領域の測定

5%硫酸溶液に 4 週間浸せきした供試体を中央部で切れ目と垂直に切断し、１%フェノールフタレイン溶液を噴霧し、非呈色域の面積を測定した[5),9)]。

４．４　試験結果

４．４．１　外観観察

図２－１１～図２－１４は、5%硫酸溶液に 28 日間浸せきした後の耐酸モルタル A、B、C および汎用モルタル E の断面である。耐酸モルタル A、B、C の塗膜欠損部は僅かに中性化領域が認められたが、塗布型ライニング材に膨れ、ひび割れ等の変状はなかった。一方、汎用モルタル E の塗膜欠損部は中性化領域が耐酸モルタルに比べて大きく、硫酸の浸透による腐食劣化が進行し、塗布型ライニング材に膨れが発生していた。



図２－１１　耐酸モルタルＡの断面

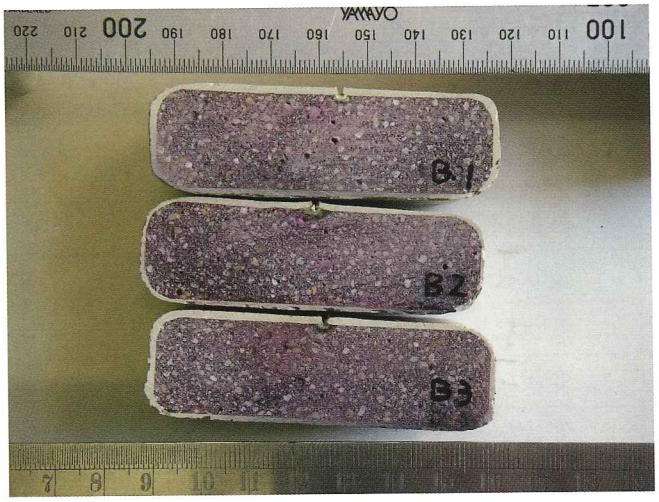


図２－１２　耐酸モルタルＢの断面

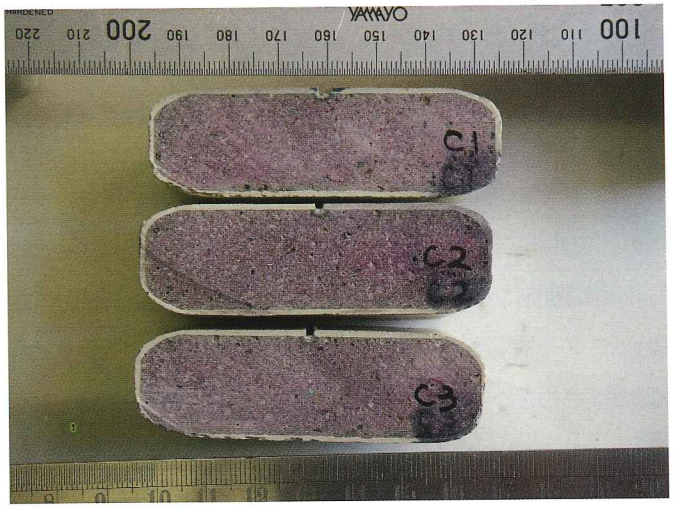


図２－１３　耐酸モルタルＣの断面



図２－１４　汎用モルタルＥの断面

４．４．２　質量変化および中性化領域

質量変化および中性化領域の測定結果を表２－１２に示す。

表２－１２　試験結果

試験 No	外観観察	質量変化率（%）		中性化領域(mm^2)	
耐酸ﾓﾙﾀﾙA	変状なし	0.25 *	0.10	8.3	7.5
	変状なし	0.10		6.0	
	変状なし	0.09		8.2	
耐酸ﾓﾙﾀﾙB	変状なし	0.11	0.12	3.8	3.8
	変状なし	0.12		4.6	
	変状なし	0.12		3.1	
耐酸ﾓﾙﾀﾙC	変状なし	0.19	0.18	2.4	2.9
	変状なし	0.19		3.0	
	変状なし	0.17		3.2	
汎用ﾓﾙﾀﾙE	欠損部に膨れ	0.76	0.50	37.6	24.3
	欠損部に膨れ	0.35		14.2	
	欠損部に膨れ	0.40		21.1	

(注)*塗膜欠損部の作製時に不具合が生じ、エポキシ樹脂系接着剤で補修。
接着剤の吸水により質量変化が大きくなったと考えられるため平均値
算出の際には削除した。

４．５　まとめ

汎用モルタルＥは塗膜欠損部の塗布型ライニング材に膨れが発生した。一方、耐酸モルタルＡ、Ｂ、Ｃは、塗膜欠損部の塗布型ライニング材に変状はなく、塗布型ライニング材との併用効果が認められた。耐酸モルタルは、少ない水酸化カルシウム生成量や緻密な硬化体組織を有するような配合設計により耐酸性を付与しており、欠損部に硫酸溶液が接触した場合においても二水石膏が生成されにくく、またモルタル中に硫酸が拡散しにくかったために、塗膜欠損部に変状が発生しなかったと考えられる。これに対して汎用モルタルは、水酸化カルシウムの生成量が耐酸モルタルに比べて多く、硫酸との反応により二水石膏を生成しやすいため、欠損部の塗膜を押し広げ、硫酸劣化を助長したと考えられる。

５．　耐酸モルタルの品質に影響を与える要因

一般的には、セメント系およびポリマーセメント系モルタルは、配合されたセメントの水和反応により凝結・硬化する材料である。セメントの水和反応は、セメントと水との化学反応であり、成形時および養生時の環境条件、特に温度、湿度の影響を大きく受けるため、例えば、低温時に凝結・硬化の遅れや乾燥時に水分の蒸発による表層の脆弱化などの現象（ドライアウト）が発生する場合がある。また、その影響度は、セメントの種類や反応硬化型ポリマーなどの有無（例えばエポキシ樹脂系ポリマーセメントモルタル）などによっても異なると考えられる。これは、耐酸モルタルに限らず汎用モルタルでも同様であると考えられる[14)]。

５．１　目的

耐酸モルタルの成形時および養生時の温度、湿度条件によって、その水分率および表層引張強さにどのような影響が生ずるかを確認し、耐酸モルタルの適切な養生条件を把握することを目的とした。

５．２　使用材料

表２－１３に示す材料を試験に使用した。

表２－１３　試験に使用した材料

試験 No	ﾓﾙﾀﾙの種類[*1]	混練配合割合（質量比）	ﾓﾙﾀﾙの用途
耐酸ﾓﾙﾀﾙ A	SBR 系 PCM	粉体：混和液：水＝100：6：9	下水処理施設補修用断面修復材
耐酸ﾓﾙﾀﾙ B	ｱｸﾘﾙ系 PCM[*2]	粉体：水＝100：16	
耐酸ﾓﾙﾀﾙ C	ｴﾎﾟｷｼ系 PCM	粉体：主剤：硬化剤：水＝100：8：1.6：12	
汎用ﾓﾙﾀﾙ D	CM	粉体：水＝100：19	汎用断面修復材
汎用ﾓﾙﾀﾙ E	CM	粉体：水＝100：16	
汎用ﾓﾙﾀﾙ F	CM	粉体：水＝100：16	

（注）*1 ﾓﾙﾀﾙの種類／　PCM：ﾎﾟﾘﾏｰｾﾒﾝﾄﾓﾙﾀﾙ　CM：ｾﾒﾝﾄﾓﾙﾀﾙ

*2　耐酸ﾓﾙﾀﾙ B／　再乳化形粉末樹脂使用

５．３　供試体

５．３．１　養生条件

各モルタルについて表２－１４に示す養生条件で、モルタルの成形および養生を行った。なお、試験用材料および混練水は、各養生条件で１日以上保管して温度を一定とした後、試験に使用した。

表２－１４　モルタルの養生条件

養生条件 No	成形および養生環境		表層引張試験の材齢	備　考
	温度	湿度		
①	5℃	60±5%RH	2d,3d,7d	
②	20℃	40±5%RH	1d,3d,7d	
③		60±5%RH		
④		90%RH 以上		ﾋﾞﾆｰﾙ袋封緘養生
⑤	30℃	60±5%RH		
⑥		90%RH 以上		ﾋﾞﾆｰﾙ袋封緘養生

５．３．２　供試体の概要

本試験に用いる供試体は、図２－１５に示す300×300×60mmのコンクリート平板に耐酸モルタルもしくは汎用モルタルを厚さ20mmに塗布したものとした。図中の白抜き箇所に鋼製アタッチメントをエポキシ樹脂接着剤で接着し、所定材齢において１材料３供試体で引張試験を行った。なお、モルタルへの切り込み深さは5mmとした[5),13)]。

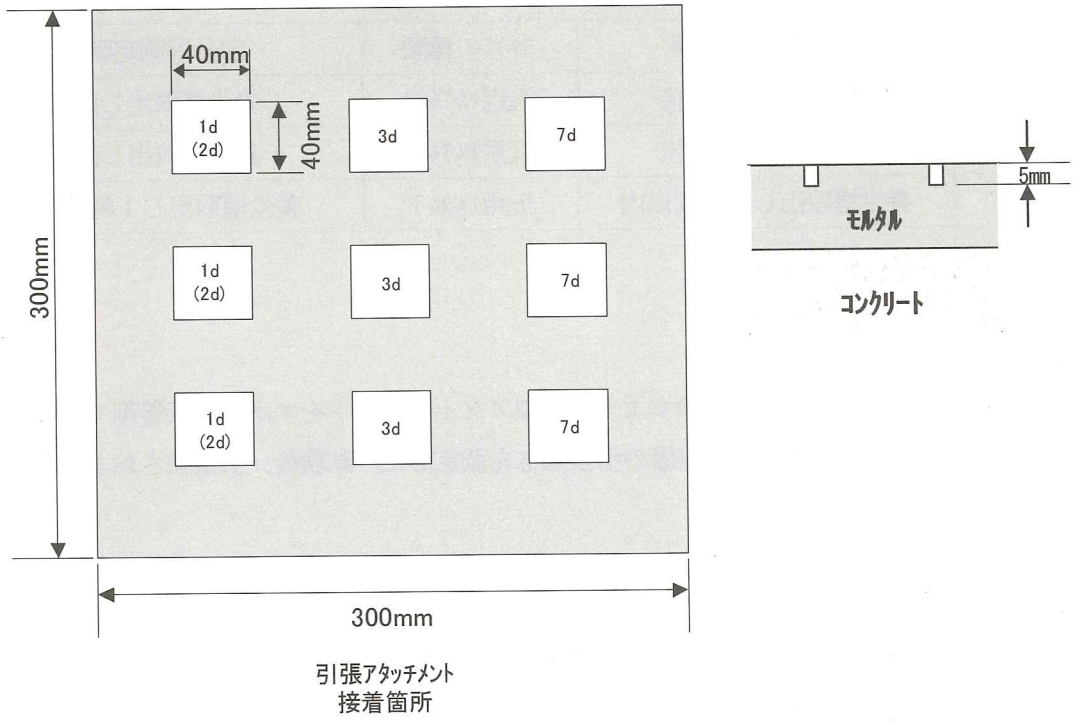


図２－１５　供試体の概要

５．４　試験方法

５．４．１　水分計の機種による水分率

耐酸モルタルＡおよび汎用モルタルＤの水分率を㈱サンコウ電子研究所製「モルタル・プラスタ水分計 PM-100i」（直流電気抵抗式：測定モード［MORTAR］）およびケット科学研究所製「コンクリート・モルタル水分計 HI-500」（高周波容量式：測定モード［モルタル］、厚さ補正ダイヤル［10mm］、温度補正ダイヤル［AUTO］）を用いて測定し、水分計の機種による水分率の違いを確認した。なお、本試験では、いずれの水分計もセメントモルタルに適用性しているものをポリマーセメントモルタルに流用している。

５．４．２　表面水分率の測定

所定材齢において、試験実施表面の水分率をサンコウ電子社製水分計およびケット社製水分計を用いて測定した。なお、表２－１５に各モルタルの水分率測定時期を示すが、耐酸モルタルＣおよび汎用モルタルＦについては、水分率測定までに表層部分が乾燥の影響を受けている可能性がある。また、養生温度 30℃の場合、養生槽を使用しており、養生槽から室内に取出して水分率を測定することから、その時点で表層の乾燥を受けている可能性がある。

表２－１５　各モルタルの水分率測定時期

ﾓﾙﾀﾙの種類	水分率測定時期	ﾓﾙﾀﾙの種類	水分率測定時期
耐酸ﾓﾙﾀﾙＡ	養生槽取出し直後	汎用ﾓﾙﾀﾙＤ	養生槽取出し直後
耐酸ﾓﾙﾀﾙＢ	養生槽取出し直後	汎用ﾓﾙﾀﾙＥ	養生槽取出し直後
耐酸ﾓﾙﾀﾙＣ	養生槽取出し１時間以内	汎用ﾓﾙﾀﾙＦ	養生槽取出し１時間以内

５．４．３　表層引張試験

所定の試験材齢において図２－１５に示すように鋼製アタッチメントをエポキシ接着剤で接着し、建研式引張試験機を用いて、モルタル表層の引張強さを測定した。試験後、引張強さおよび破断位置を記録した[5),13)]。

５．５　試験結果

５．５．１　水分計の機種による水分率（耐酸モルタルＡおよび汎用モルタルＤのみ）

表２－１６、図２－１６に耐酸モルタルＡおよび汎用モルタルＤを用いた水分計の機種による水分率の測定結果を示した。

水分計の測定機構的に、ケット社水分計（高周波容量式）は内部を、サンコウ電子社水分計（直流電気抵抗式）は表面部分を測定しており、サンコウ電子社水分計による水分率測定結果は乾燥または湿潤の影響を受けやすいと考えられる。水分計機種間の測定結果は以下のようになった。

5℃60%RH、20℃90%RH、30℃90%RH　⇒　サンコウ電子＞ケット
20℃40%RH、20℃60%RH、30℃60%RH　⇒　ケット＞サンコウ電子

また、モルタル別の測定結果では、汎用モルタルＤよりも耐酸モルタルＡの方が、水分計機種間で相関がやや高い。この理由としては、次のことが考えられる。すなわち、耐酸モルタルＡはポリマーセメントモルタルであり、セメントモルタルである汎用モルタルＤよりも凝結・硬化が速い。汎用モルタルＤは耐酸モルタルＡよりも養生環境の湿度の影響を受けやすく、乾燥条件下でモルタル表層部分のドライアウトを引き起こしたためである。

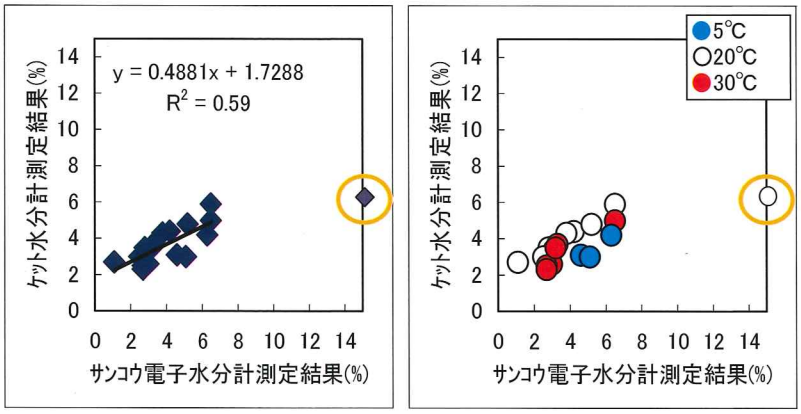
なお、いずれの場合も、水分計の測定限界を超えた測定結果は相関係数の算出には含めていない。

表２－１６　水分計の機種による水分率測定結果

試験温度 (℃)	試験湿度 (%RH)	材齢 (日)	耐酸モルタルＡ		汎用モルタルＤ	
			サンコウ	ケット	サンコウ	ケット
5	60	2	6.3	4.2		
		3	4.6	3.1	5.2	6.8
		7	5.1	3.0	5.0	5.2
20	40	1	4.2	4.4	3.4	8.0
		3	2.8	3.5	2.2	5.8
		7	1.1	2.7		4.7
	60	1	3.8	4.3	4.1	8.3
		3	3.1	3.4	2.8	6.1
		7	2.5	3.0	1.5	5.3
	90	1		6.3		
		3	6.5	5.9		10.8
		7	5.2	4.8	11.0	7.4
30	60	1	3.3	3.7	2.3	7.7
		3	3.0	2.6	2.0	5.5
		7	2.7	2.5	2.3	4.5
	90	1	6.5	5.0		
		3	3.2	3.5	5.9	7.2
		7	2.7	2.3	4.4	6.4

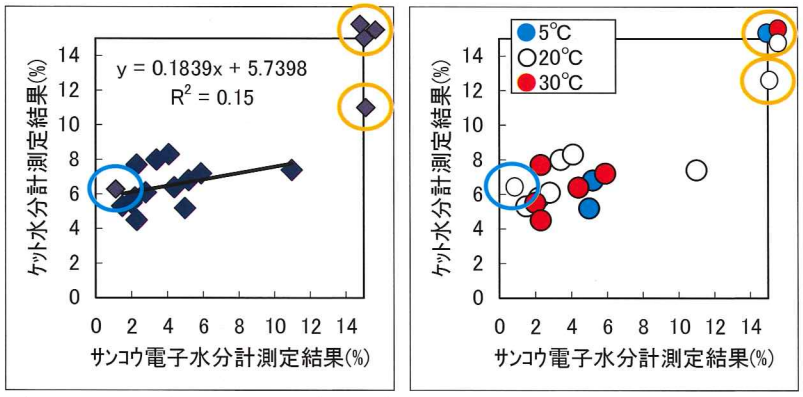
(注)　*1　■ 測定上限以上
▨ 測定下限以下
*2　ｻﾝｺｳ電子水分計　上限 15%　下限 1%
ｹｯﾄ水分計　上限 15%　下限 0%

（1）耐酸モルタルA



（注）回帰式は測定限界を超えたものは含めていない。

（2）汎用モルタルD



（注）回帰式は測定限界を超えたものは含めていない。

図２－１６　水分計の機種による水分率測定結果の関係

（注）　囲み：水分計の測定上限以上

　　囲み：水分計の測定下限以下

５．５．２　モルタルの表面水分率の測定結果

耐酸モルタルの表面水分率の測定結果を図２－１７－１～２－１７－６に、汎用モルタルの表面水分率の測定結果を図２－１８－１～２－１８－６に示す。なお、試験に使用したいずれの水分計もセメントモルタルに適用しているものをポリマーセメントモルタルに流用しているため、エポキシ樹脂系ポリマーセメントモルタルである耐酸モルタルＣについては、他の全ての養生条件を通じて、材齢初期からサンコウ電子社水分計の測定結果が測定下限以下であり、水分率の変化での考察は困難であった。

(1) 養生温度 5℃（湿度 60%RH のみ）　（図２－１７－１、図２－１８－１）

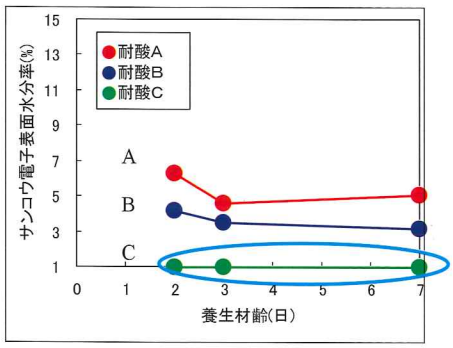
耐酸モルタルＣを除いて、各モルタルとも養生期間の経過と共に水分率が低下する傾向があり、汎用モルタルに比較して耐酸モルタルは、養生期間２日から水分率が低い傾向を示している。

(2) 養生温度 20℃の場合（湿度 40%RH、60%RH、90%RH）　（図２－１７－２～４、図２－１８－２～４）

耐酸モルタルＣを除いて、各モルタルとも養生期間の経過と共に水分率が低下し、高湿度になるほど表面水分率が高くなる傾向を示し、汎用モルタルに比較して耐酸モルタルは、養生期間１日から水分率が低い傾向を示している。

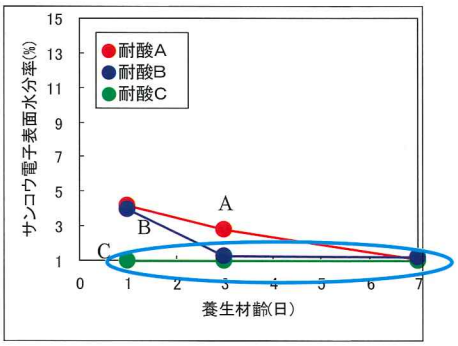
(3) 養生温度 30℃の場合（湿度 60%RH、90%RH）　（図２－１７－５，６、図２－１８－５，６）

耐酸モルタルＣを除いて、各モルタルとも養生期間の経過と共に水分率が低下し、高湿度になるほど表面水分率が高くなる傾向を示し、汎用モルタルに比較して耐酸モルタルは、材齢１日から水分率が低い傾向を示している。



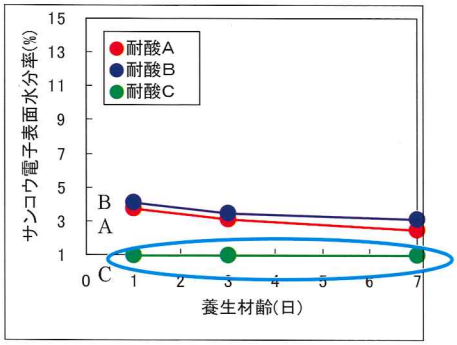
5℃60%RH

図２－１７－１　5℃60%RH 表面水分率



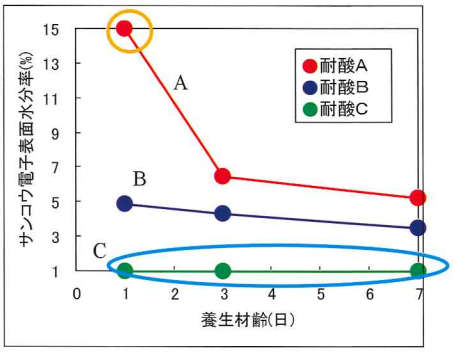
20℃40%RH

図２－１７－２　20℃40%RH 表面水分率



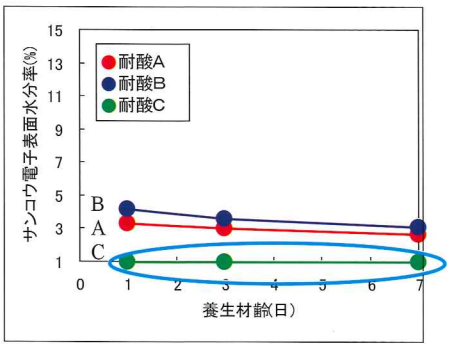
20℃60%RH

図２－１７－３　20℃60%RH 表面水分率



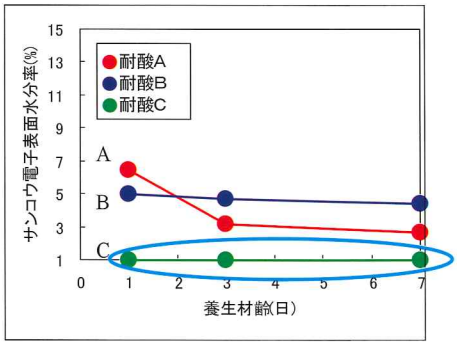
20℃90%RH

図２－１７－４　20℃90%RH 表面水分率



30℃60%RH

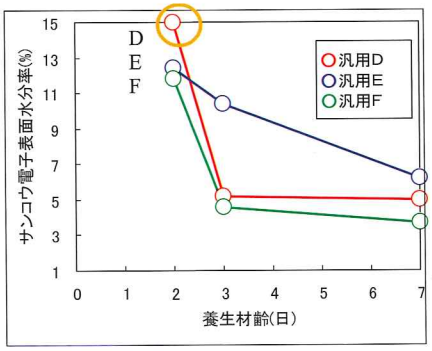
図２－１７－５　30℃60%RH 表面水分率



30℃90%RH

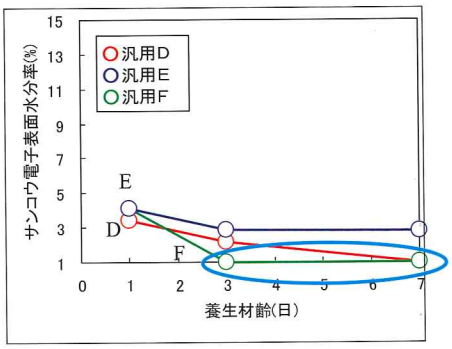
図２－１７－６　30℃90%RH 表面水分率

（注）　囲み：水分計の測定上限以上　　囲み：水分計の測定下限以下



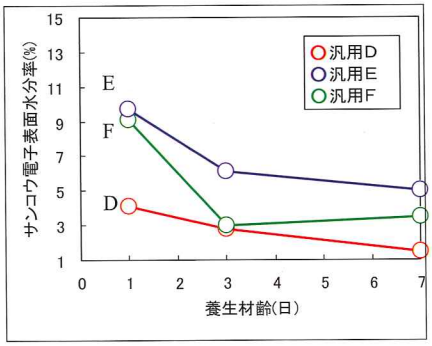
5℃60%RH

図２－１８－１　5℃60%RH 表面水分率



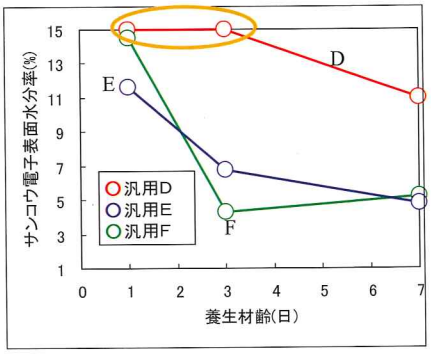
20℃40%RH

図２－１８－２　20℃40%RH 表面水分率



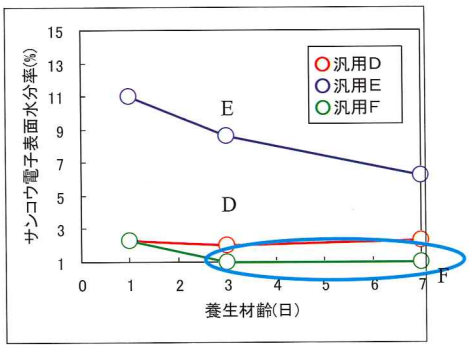
20℃60%RH

図２－１８－３　20℃60%RH 表面水分率



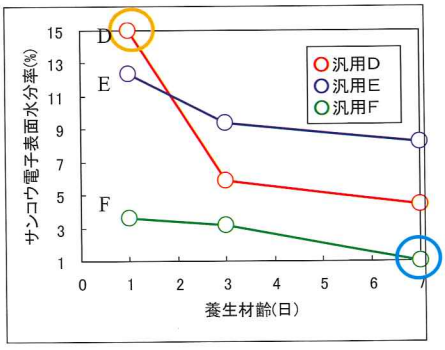
20℃90%RH

図２－１８－４　20℃90%RH 表面水分率



30℃60%RH

図２－１８－５　30℃60%RH 表面水分率



30℃90%RH

図２－１８－６　30℃90%RH 表面水分率

（注）　○ 囲み：水分計の測定上限以上　　○ 囲み：水分計の測定下限以下

５．５．３　モルタルの表層引張試験結果

耐酸モルタルの表層引張強度試験結果を図２－１９－１～２－１９－６および表２－１７に、汎用モルタルの表層引張強度試験結果を図２－２０－１～２－２０－６および表２－１８に示す。

(1) 養生温度 5℃（湿度 60%RH のみ）　（図２－１９－１、図２－２０－１）

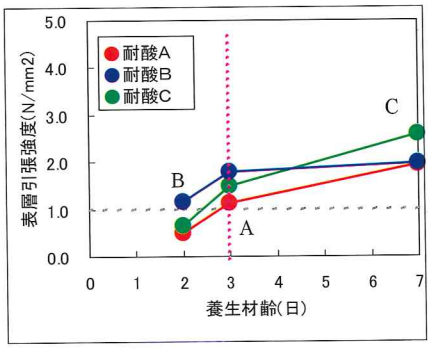
各モルタルとも養生期間の経過と共に表層引張強さが高くなる傾向がある。水分計の機種による測定結果から、5℃60%RH の養生条件では、各モルタルの表層部分のドライアウトは起こっていないと考えられるが、養生温度が低いために各モルタル中のセメントの水和反応が遅く、引張強さの発現が遅れていると考えられる。5℃60%RH の養生条件では、養生期間は耐酸モルタルＢで２日、耐酸モルタルＡおよびＣで３日は必要であると考えられる。

(2) 養生温度 20℃の場合（湿度 40%RH、60%RH、90%RH）　（図２－１９－２～４、図２－２０－２～４）

各モルタルとも養生期間の経過と共に表層引張強さが高くなる傾向があるが、汎用モルタル D、F の場合、低湿度ほど表層引張強さが低く、表層部分のドライアウトが起こっている可能性がある。表層引張試験後に再度同一箇所の引張試験を実施した結果、およそ 2N/mm^2 を超える引張強さが得られていることも、それを示唆している。これに対して耐酸モルタルでは、低湿度での乾燥の影響が少なく、表層引張強さは高い値を示している。

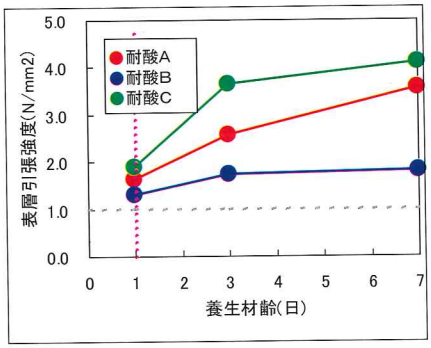
(3) 養生温度 30℃の場合（湿度 60%RH、90%RH）　（図２－１９－５，６、図２－２０－５，６）

各モルタルとも養生期間の経過と共に表層引張強さが高くなる傾向があるが、汎用モルタルＤの場合、低湿度ほど表層引張強さが低く、表層部分のドライアウトが起こっている可能性がある。表層引張試験後に再度同一箇所の引張試験を実施した結果、およそ 1.8N/mm^2 の引張強さが得られていることも、それを示唆している。これに対して各耐酸モルタルでは、低湿度での乾燥の影響が少なく、表層引張強さは高い値を示している。



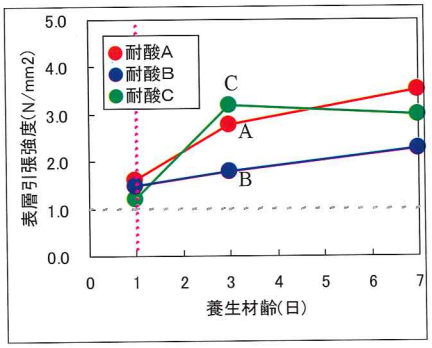
5℃60%RH

図２－１９－１　5℃60%RH 表層引張強さ



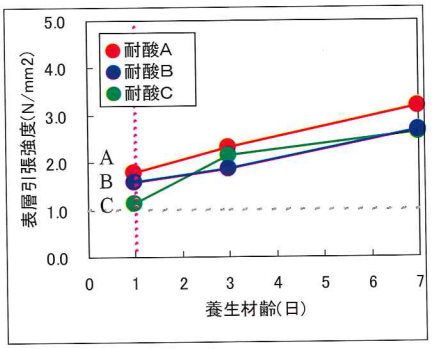
20℃40%RH

図２－１９－２　20℃40%RH 表層引張強さ



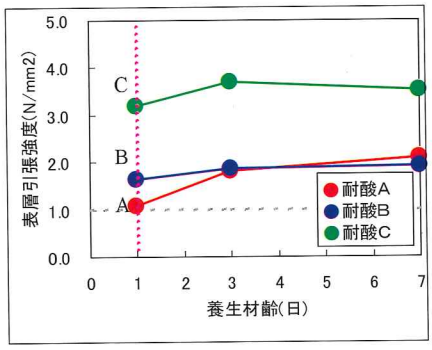
20℃60%RH

図２－１９－３　20℃60%RH 表層引張強さ



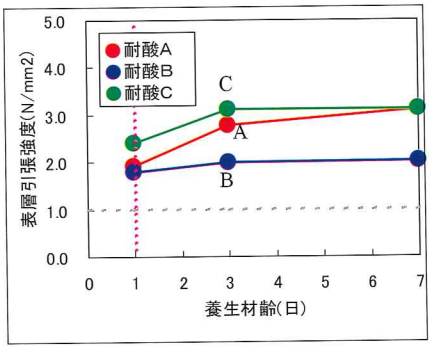
20℃90%RH

図２－１９－４　20℃90%RH 表層引張強さ



30℃60%RH

図２－１９－５　30℃60%RH 表層引張強さ

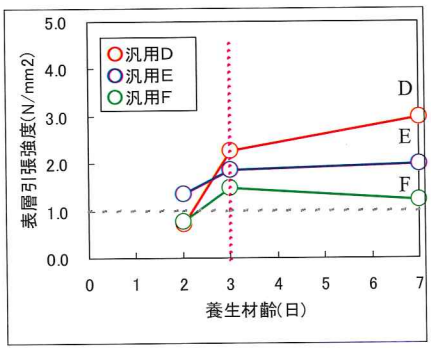


30℃90%RH

図２－１９－６　30℃90%RH 表層引張強さ

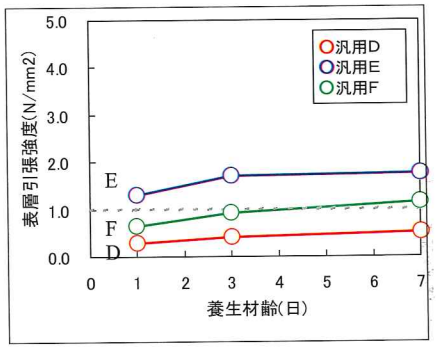
表２－１７　耐酸モルタルの引張試験時破壊モード

試験温度	試験湿度	材齢	耐酸モルタルA	耐酸モルタルB	耐酸モルタルC
5℃	60%RH	2d	表層	表層	モルタル
		3d			
		7d		モルタル	
20℃	40%RH	1d	表層	表層	表層、モルタル
		3d			モルタル
		7d	表層、モルタル	モルタル	
	60%RH	1d	表層	表層	表層、モルタル
		3d	表層、モルタル		モルタル
		7d	モルタル	モルタル	
	90%RH	1d	表層、モルタル	表層	表層、モルタル
		3d	表層		モルタル
		7d	モルタル	モルタル	
30℃	60%RH	1d	表層	表層	モルタル
		3d			
		7d		モルタル	
	90%RH	1d	表層	表層	モルタル
		3d	表層、モルタル		
		7d	表層	モルタル	



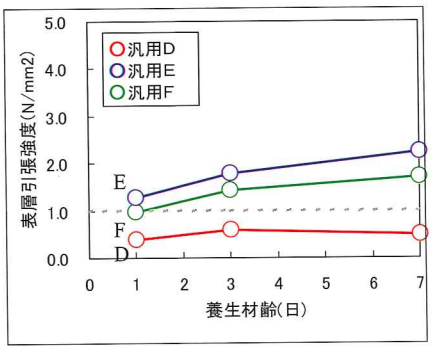
5℃60%RH

図２－２０－１　5℃60%RH 表層引張強さ



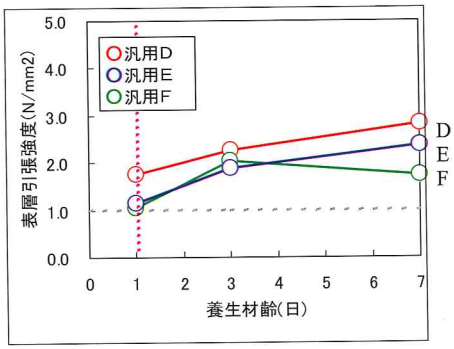
20℃40%RH

図２－２０－２　20℃40%RH 表層引張強さ



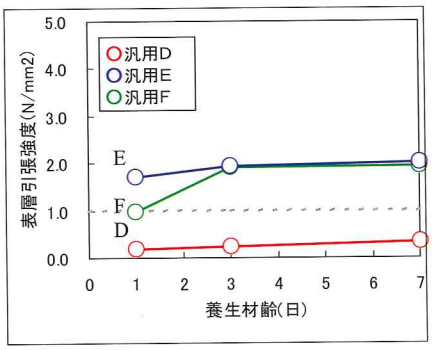
20℃60%RH

図２－２０－３　20℃60%RH 表層引張強さ



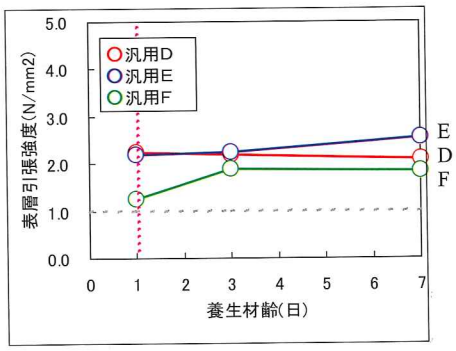
20℃90%RH

図２－２０－４　20℃90%RH 表層引張強さ



30℃60%RH

図２－２０－５　30℃60%RH 表層引張強さ



30℃90%RH

図２－２０－６　30℃90%RH 表層引張強さ

表２－１８　汎用モルタルの引張試験時破壊モード

試験温度	試験湿度	材齢	耐酸モルタルD	耐酸モルタルE	耐酸モルタルF
5℃	60%RH	2d	表層	表層	モルタル
		3d			
		7d		モルタル	
20℃	40%RH	1d	表層	表層	表層、モルタル
		3d			
		7d		モルタル	
	60%RH	1d	表層	表層	表層、モルタル
		3d			モルタル
		7d		モルタル	
	90%RH	1d	表層	表層	表層、モルタル
		3d			モルタル
		7d		モルタル	
30℃	60%RH	1d	表層	表層	表層、モルタル
		3d			モルタル
		7d		モルタル	
	90%RH	1d	表層	表層	表層、モルタル
		3d			モルタル
		7d		モルタル	

５．５．４　養生条件と表層引張強さの測定結果

５．５．４．１　養生湿度 60%RH、養生期間７日における耐酸モルタルと汎用モルタルの表層引張強さ

養生湿度 60%RH、養生期間７日における表層引張強度試験結果を図２－２１－１、２－２１－２に示す。養生湿度 60%RH においては、養生期間７日で耐酸モルタルは温度によらず 2～3.5N/mm^2 程度の表層引張強さが得られた。一方、汎用モルタルは強度発現性にばらつきが見られた。

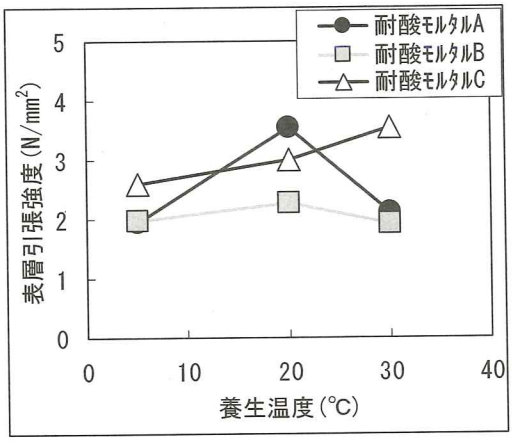


図２－２１－１　養生温度と耐酸モルタルの表層引張強さ
（養生湿度 60%RH）

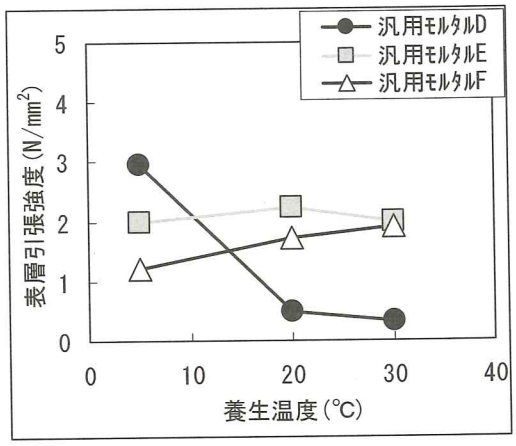


図２－２１－２　養生温度と汎用モルタルの表層引張強さ
（養生湿度 60%RH）

５．５．４．２　養生温度 20℃，養生期間７日における耐酸モルタルと汎用モルタルの表層引張強さ

養生温度 20℃、養生期間７日における表層引張強度試験結果を図２－２１－３、２－２１－４に示す。養生温度 20℃において、耐酸モルタルは養生期間７日で 2～4N/mm^2 程度の表層引張強さが得られた。耐酸モルタルは、20℃，湿度 40%RH 以上、養生期間を７日得られれば良好な表層引張強さが得られる。一方、汎用モルタルは、セメント混和用ポリマーを含まないセメントモルタルであるため、湿度が低い条件ほど表層引張強さは低下した。

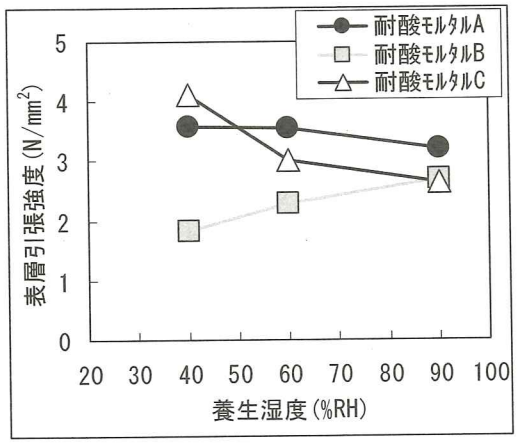


図２－２１－３　養生湿度と耐酸モルタルの表層引張強さ
（養生温度 20℃）

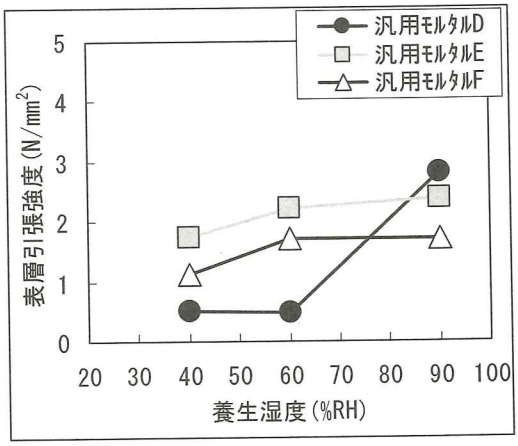


図２－２１－４　養生湿度と汎用モルタルの表層引張強さ
（養生温度 20℃）

5．6　まとめ

耐酸モルタルの成形時および養生時の温度、湿度条件によって、その水分率および表層引張強さにどのような影響が生ずるかを汎用モルタルとの比較で確認した結果、以下のような知見が得られた。

(1) 水分計の機種により測定機構が異なり、高周波容量式水分計は内部を、直流電気抵抗式水分計は表面部分を測定しており、直流電気抵抗式水分計は乾燥または湿潤の影響を受けやすいと考えられる。また、耐酸モルタルＣではエポキシ樹脂系のポリマーセメントモルタルであり、直流電気抵抗式水分計では材齢初期から測定結果が測定下限以下であり、水分率の変化を測定することができなかった。

(2) 養生温度 5℃（湿度 60%RH）の場合、各モルタルとも養生期間の経過と共に水分率が低下する傾向を示し、耐酸モルタルは汎用モルタルに比較して水分率の低下が早かった。また、各モルタルとも表層部分のドライアウトは起こっていないが、養生温度が低いため引張強さの発現が遅れていると考えられた。

(3) 養生温度 20℃（湿度 40%RH、60%RH、90%RH）の場合、各モルタルとも養生期間の経過と共に水分率が低下し、高湿度になるほど水分率が高くなる傾向を示し、耐酸モルタルは汎用モルタルに比較して水分率の低下が早かった。また、耐酸モルタルは汎用モルタルと比較して、低湿度での乾燥の影響が少なく、表層引張強さは高い値を示した。

(4) 養生温度 30℃（湿度 60%RH、90%RH）の場合、各モルタルとも養生期間の経過と共に水分率が低下し、高湿度になるほど表面水分率が高くなる傾向を示し、耐酸モルタルは汎用モルタルと比較して水分率の低下が早かった。また、耐酸モルタルは汎用モルタルと比較して、低湿度での乾燥の影響が少なく、表層引張強さは高い値を示している。

(5) 養生湿度 60%RH、養生期間 7 日において、汎用モルタルは表層引張強度発現性にばらつきが見られたが、耐酸モルタルは温度によらず高い表層引張強さを発現した。また、養生温度 20℃、養生期間 7 日において、汎用モルタルは湿度が低い条件ほど表層引張強さは低下したが、耐酸モルタルは湿度によらず高い表層引張強さを発現した。耐酸モルタルは、20℃，湿度 40%RH 以上、養生期間を 7 日得られれば良好な表層引張強さが得られることがわかった。

６．　断面修復材として必要な付着力に関する検討

６．１　目的

下水処理施設コンクリート構造物の補修工事を行う場合、一般的には劣化部の除去後、断面修復を行い、防食工を行う。その際、断面修復材に求められる付着力は、既設コンクリートとの付着力であり、塗布型ライニング材等との付着力である。

断面修復材と既設コンクリートとの付着力は、1.5N/mm^2 以上の付着強さと規定される場合が多く[5,13]、塗布型ライニング材との付着力は1.5N/mm^2 または2.0N/mm^2 が適用されることが多い。温度，湿度等施工環境条件が変化する中で断面修復材に求められる付着力は、極めて高い水準であると言える。

そこで、本章では、断面修復材の施工後、塗布型ライニング材で防食工を行うために最適な時期を検討することを目的として、断面修復材の表層水分率の経時変化と、断面修復材の表層引張強さ発現性および塗布型ライニング材との付着強さ発現性について室内試験により検証した。

６．２　試験方法

断面修復材施工時、施工後の環境因子として温度、養生期間、表面水分に注目し、塗布型ライニング材を施工する直前の断面修復材の表層水分率と引張強さが塗布型ライニング材施工後一定養生条件下で発現する塗膜付着強さに及ぼす影響を確認した。

また、断面修復材養生中の水和反応進行因子を排除する目的で、促進養生（ほぼ水和反応完結状態）した断面修復材を用い水分のみが塗布型ライニング材の塗膜付着強さに及ぼす影響も併せて確認した。

なお、試験には断面修復材４種類（耐酸モルタル３種類、汎用モルタル１種類）、塗布型ライニング工法２種類（汎用エポキシライニング工法、ＦＲＰライニング工法）を用いた。

６．２．１　試験の種類

６．２．１．１　断面修復材施工時、施工後の環境試験

断面修復材の水和反応進行および表面水分率の複合条件の評価として、5±2℃、20±2℃の環境下で施工した断面修復材塗布供試体を同一環境温度条件下で一定期間（1～5 日間）養生した後、引張強さと表層水分率を測定した。

また、上述の評価をした直後にその断面修復材塗布供試体の被塗面上（図２－２２参照）に塗布型ライニング材を施工し、同一環境温度条件下で一定期間（7～14 日間）養生した後、塗布型ライニング材の塗膜付着強さを測定した（図２－２３参照）。

なお、5±2℃の環境で評価を行った供試体については、塗布型ライニング材施工後の全養生期間（14日）が終了した時点においても、断面修復材の水和反応や塗膜の硬化反応が不完全である可能性が考えられる。そこで、これらについてはさらに、60±2℃の温水中に 10 日間浸せきして反応を十分進行させ、再び塗膜付着強さを測定した。

６．２．１．２　断面修復材促進養生後の環境試験

ほぼ水和反応が完結したと考えられる促進養生を施した断面修復材成形供試体を作製した後に、絶乾および飽和状態と想定した含水分環境条件の断面修復材成形供試体を調整した。調整した断面修復材成形供試体の被塗面上に塗布型ライニング材を施工し、温度 20±2℃、相対湿度 60±5%環境条件下で14 日間養生後、塗布型ライニング材の塗膜付着強さを測定した。

また、上記養生後に60±2℃温水に 10 日間浸せきを行い、同様に塗膜付着強さを測定した。

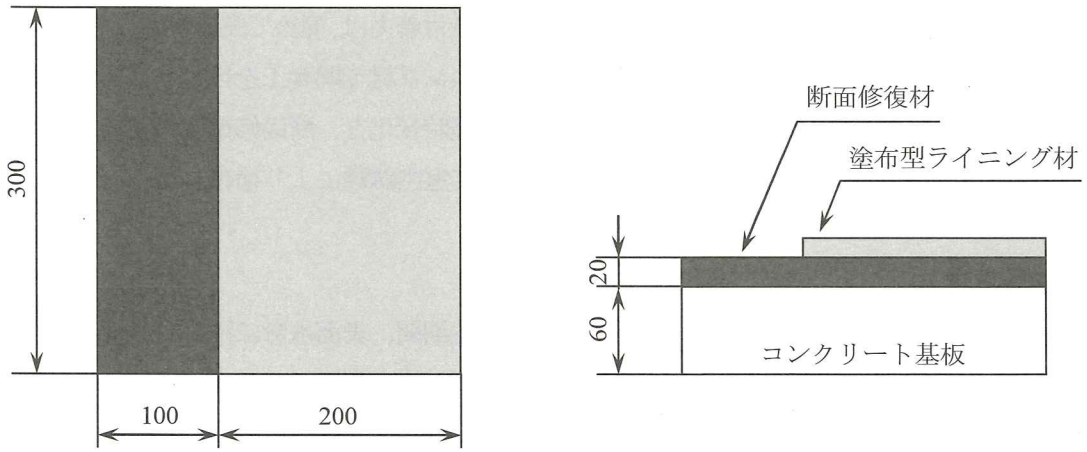


図２－２２　供試体作製概要図

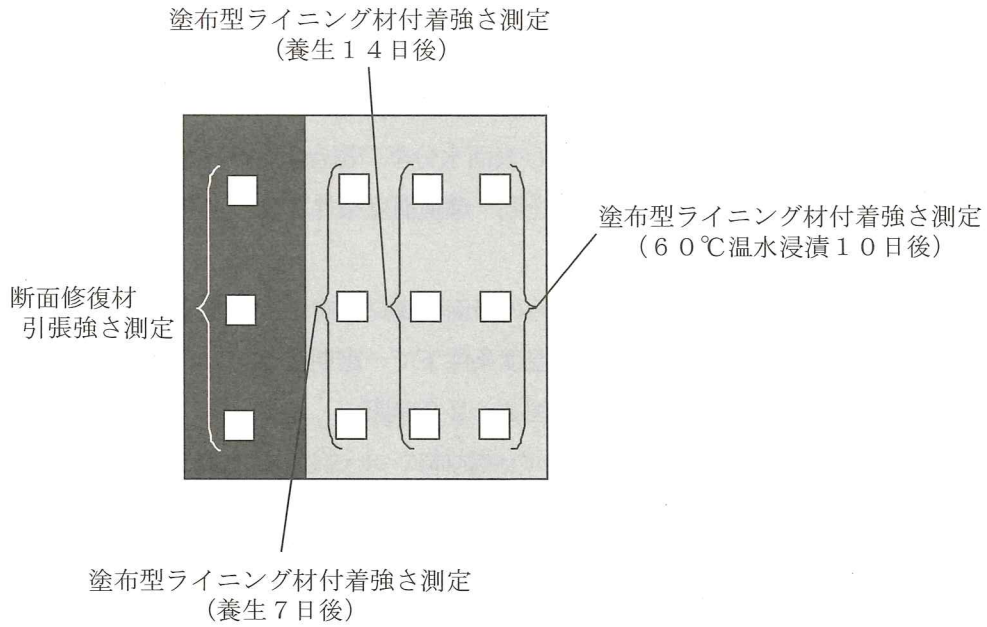


図２－２３　供試体評価概要図

６．２．２　供試体

６．２．２．１　断面修復材施工時、施工後の環境試験用供試体

5±2℃、20±2℃の温度環境条件下に予め24時間放置しておいた300×300×60mmコンクリート板の型枠面上に、断面修復材4種類をそれぞれの工法仕様に基づき各々の温度環境条件下で20mm施工し断面修復材塗布供試体を作製した。なお、耐酸モルタルＢについてのみ、冬季において施工時間が短かった場合を想定し、当該材料の標準的な施工法より早い時期に表面仕上げコテ押えを行って供試体を作製した。

その後、同一環境温度条件下で一定期間養生後、図２－２２に示すように塗布型ライニング材被覆工法2種類をそれぞれの工法仕様に基づき各々の温度環境条件下で施工、養生を行い塗布型ライニング材の塗膜付着強さ測定用供試体を作製した。

各供試体作製に用いた断面修復材および塗布型ライニング材被覆工法をそれぞれ表２－１９，表２－２０に示す。

６．２．２．２　断面修復材促進養生後の環境試験用供試体

断面修復材2種類（表２－１９記載の耐酸モルタルA、汎用モルタルE）を70×70×20mmの型枠で成形、温度20±2℃、相対湿度90%以上の環境条件下で48時間の養生を行い脱型した。

次に温度20±2℃、相対湿度60±5%の環境条件下で試験面（型枠面：70×70mm）以外の他5面を水分蒸発防止を目的にエポキシ系接着剤で保護し、48時間の養生を行った。その後、20±2℃の水に5日間浸せき養生し、続いて30±2℃の温水に21日間浸せき養生して断面修復材成形供試体を作製した。

なお、含水分飽和状態想定の供試体は上述養生後に取り出し、直ちに布で6面を拭き取り調整した。また、含水分絶乾状態想定の供試体は上述養生後に取り出した供試体を温度20±2℃、相対湿度60±5%の環境条件下で48時間放置した後、真空乾燥を24時間行い調整した。

各状態想定の供試体に塗布型ライニング材被覆工法（表２－２０記載の番号1工法）を施工し、温度20±2℃、相対湿度60±5%の環境条件下で14日間養生し、塗布型ライニング材の塗膜付着強さ測定用供試体を作製した。

表２－１９　試験に使用した断面修復材

試験No	ﾓﾙﾀﾙの種類*1	混練配合割合（質量比）
耐酸ﾓﾙﾀﾙA	SBR系PCM	粉体：混和液：水＝100：6：9
耐酸ﾓﾙﾀﾙB	ｱｸﾘﾙ系PCM*2	粉体：水＝100：16
耐酸ﾓﾙﾀﾙC	ｴﾎﾟｷｼ系PCM	粉体：主剤：硬化剤：水＝100：8：1.6：12
汎用ﾓﾙﾀﾙE	CM	粉体：水＝100：16

（注）*1 ﾓﾙﾀﾙの種類／　PCM：ﾎﾟﾘﾏｰｾﾒﾝﾄﾓﾙﾀﾙ　CM：ｾﾒﾝﾄﾓﾙﾀﾙ

*2　耐酸ﾓﾙﾀﾙB／　再乳化形粉末樹脂使用

表２－２０　試験に用いた塗布型ライニング材被覆工法

番号	素地調整材	プライマー	上塗り材
1	ｴﾎﾟｷｼ樹脂ﾎﾟﾘﾏｰｾﾒﾝﾄﾓﾙﾀﾙ (3)	水系ｴﾎﾟｷｼ樹脂ﾌﾟﾗｲﾏｰ (3)	ｴﾎﾟｷｼ樹脂(1)
2	―	無溶剤ｴﾎﾟｷｼ樹脂ﾌﾟﾗｲﾏｰ (2)	ｴﾎﾟｷｼ樹脂(4)

６．２．３　試験条件

６．２．３．１　断面修復材施工時、施工後の環境試験条件

断面修復材施工時、施工後の環境試験の全体フローを図２－２４に示す。

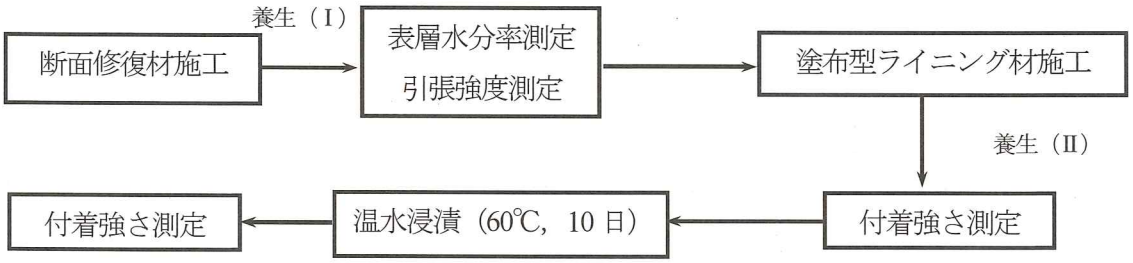


図２－２４　断面修復材施工時、施工後の環境試験フロー

環境試験条件および評価試験項目を表２－２１に示す。

断面修復材施工後の養生（Ⅰ）期間は5±2℃の温度条件下で２日、３日、５日とし、20±2℃の温度条件下で１日、３日、５日とした。それぞれの養生期間後、塗布型ライニング材を施工する前に断面修復材の表層水分率および引張強さを測定した。

また、塗布型ライニング材施工後の養生（Ⅱ）期間は 5±2℃および 20±2℃の温度条件下で７日、14 日とし、それぞれの養生期間後、付着強さを測定した。

なお、5±2℃の温度条件下で実施した供試体は付着強さ測定後、60±2℃温水に 10 日間浸せきし、再び付着強さを測定した。

表２－２１　環境試験条件および評価試験項目

養　生 環境温度	断面修復材施工後の評価項目	塗布型ライニング材施工後の評価項目	
	表層水分率・引張強さ	初期付着強さ	耐温水後付着強さ
	養生(Ⅰ)期間	養生（Ⅱ）期間	60±2℃温水浸せき期間
5±2℃	２日、３日、５日	７日、14 日	10 日
20±2℃	１日、３日、５日	７日、14 日	―

６．２．３．２　断面修復材促進養生後の環境試験条件

断面修復材促進養生後の環境試験の全体フローを図２－２５に示す。

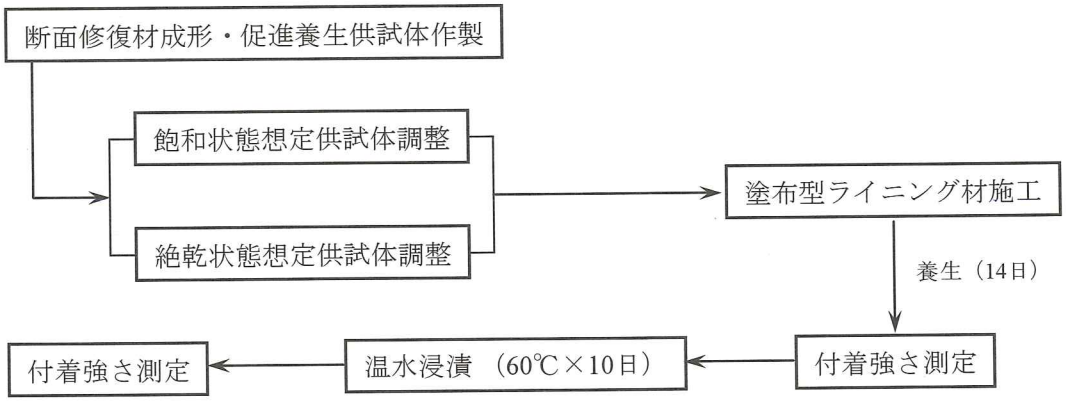


図２－２５　断面修復材促進養生後の環境試験フロー

環境試験条件および評価試験項目を表２－２２に示す。

各含水状態想定供試体に塗布型ライニング材を施工し、温度 20±2℃、相対湿度 60±5%の環境条件下で 14 日間養生後、付着強さを測定した。

また、付着強さ測定後、60±2℃温水に 10 日間浸せきし、再び付着強さを測定した。

表２－２２　環境試験条件および評価試験項目

養生環境 温度/湿度	塗布型ライニング材施工後の評価項目	
	初期付着強さ	耐温水後付着強さ
	養生期間	60±2℃温水浸せき期間
20±2℃ 60±5%RH	14 日	10 日

６．２．４　評価方法

断面修復材の引張強さおよび塗布型ライニング材の塗膜付着強さは、日本下水道事業団の「下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術指針・同マニュアル[13)]」に準じて建研式接着力試験器を用いて測定した。なお、断面修復材施工時、施工後の環境試験では１つの供試体で各環境条件下、3 箇所測定を行った。また、断面修復材促進養生後の環境試験では各環境条件下で 3 個の供試体を作製し、n=3 で測定を行った。

一方、断面修復材の表層水分率は、株式会社サンコウ電子研究所製および株式会社ケット科学研究所製の水分計を用い、１つの供試体で 3 箇所測定を行った。

６．３　試験結果

６．３．１　断面修復材の表層含水率および引張強さ

断面修復材施工時、施工後の環境条件による表層水分率の測定結果を図２－２６－１、図２－２６－２に示す。なお、表層水分率測定は水分計Ａ（株式会社サンコウ電子研究所製、PM-100ｉ：測定モード (MORTAR) ）および水分計 Ｂ（株式会社ケット科学研究所製、HI-520：材料選択ダイヤル（モルタル)、厚さ補正ダイヤル (10mm)、温度補正ダイヤル (AUTO) ）を用いて実施した。

また、引張強さの測定結果を図２－２７－１、図２－２７－２に示す。

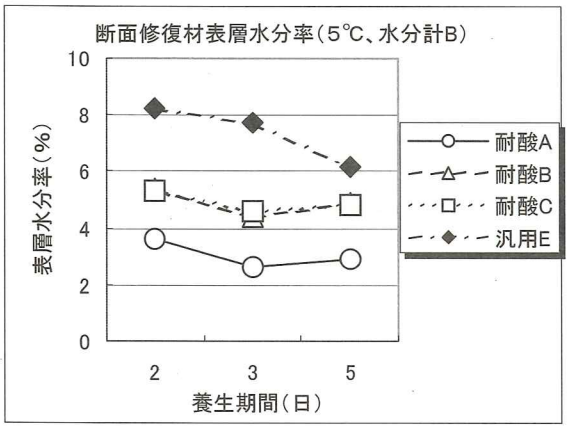


図２－２６－１　断面修復材表層水分率（５℃）

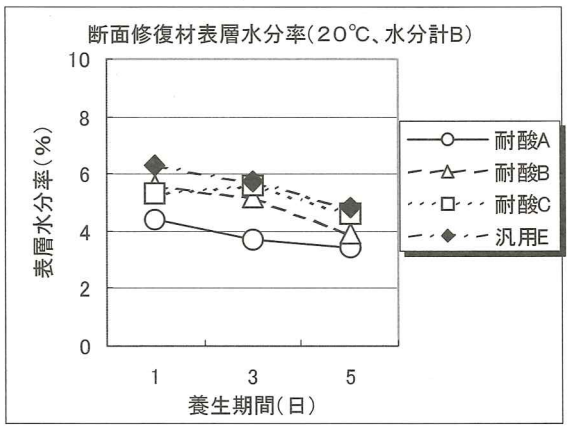


図２－２６－２　断面修復材表層水分率（２０℃）

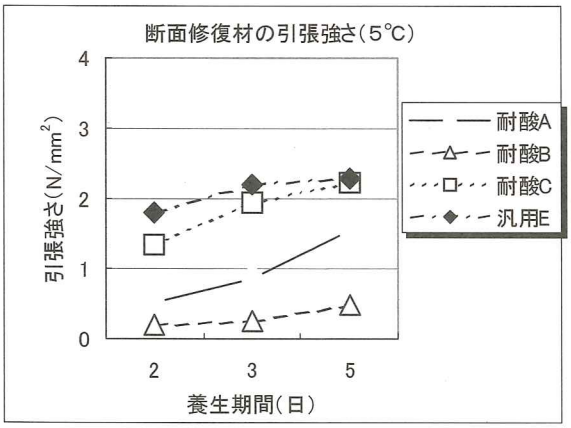


図２－２７－１　引張強さ（５℃）

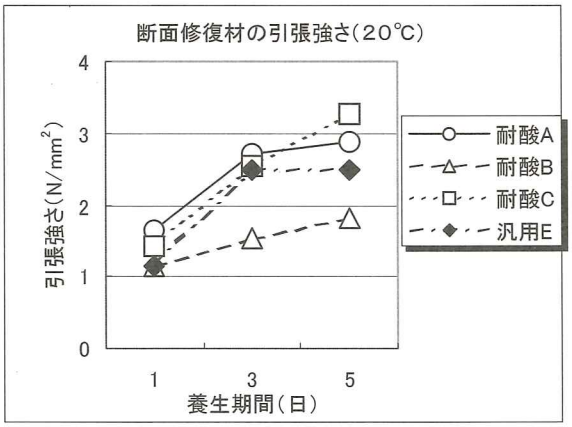


図２－２７－２　引張強さ（２０℃）

一般に塗布型ライニング材施工上の管理条件として規定されている下地含水率は 8%以下であるが、これを確保できていないのは5±2℃環境下における２日養生の汎用モルタルＥのみであり、それ以外の環境条件下および断面修復モルタル種では上記管理条件を全て満足する結果を得た。

一方、断面修復モルタル種の施工、施工後の養生環境条件と引張強さの関係をみてみると、20±2℃環境下では、いずれの断面修復材も３日養生で日本下水道事業団等が規定している付着強さ 1.5N/mm^2 を確保した。また、5±2℃環境下では耐酸モルタルＢを除いて、５日養生で引張強さ 1.5N/mm^2 を確保

した。強度発現が低かった断面修復材（耐酸モルタルＢ）については、「５．５．４耐酸モルタルの表層引張試験結果」で確認したように標準的な施工方法で供試体を作製した場合には、5℃の材齢３日において約 1.5N/mm^2 を発現する。また、本章での試験後の破断位置がモルタル表層部であり、早い表面仕上げコテ押えによりモルタル表層部を乱し硬化不良を引き起こしたことが理由と考えられ、使用するモルタルの標準的な施工法に沿った施工が引張り強さ発現には重要であることがわかる。

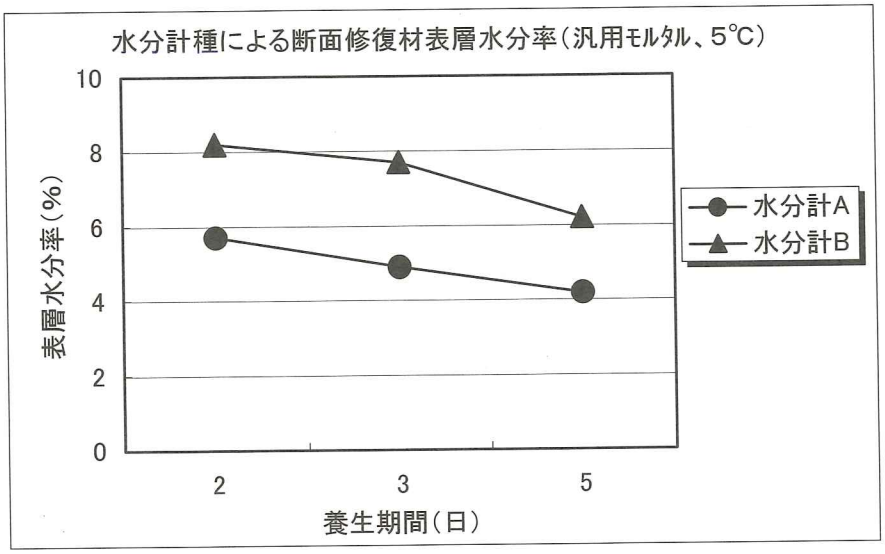


図２－２８　断面修復材表層水分率（５℃、水分計Ａ、Ｂ）

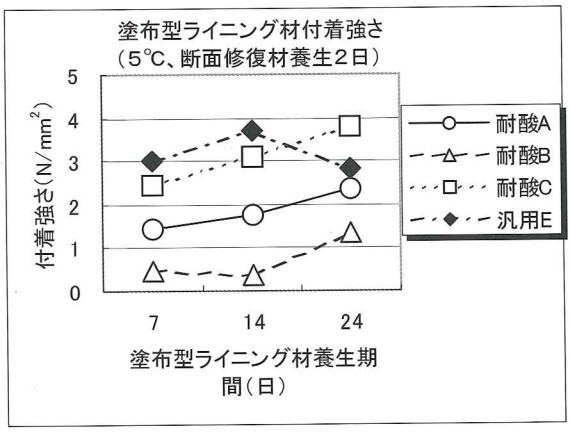
次に、5±2℃環境下における断面修復材（汎用モルタルＥ）の表層水分率を２種の水分計Ａ（株式会社サンコウ電子研究所製）、水分計Ｂ（株式会社ケット科学研究所製）を用いて測定した結果を図２－２８に示す。

水分計の機種差により同一供試体で同時に測定しても表層水分率値に約 2%の差がでるという結果を得た。このことは、一般に塗布型ライニング材の施工管理条件とされている下地含水率 8%以下を現場で管理する上で極めて重要な知見である。即ち、塗布型ライニング材の付着強さ確保の管理条件が施工前の下地含水率に依存しているとするならば、用いる水分計の規定（機種およびモード設定限定）およびその水分計での測定値と上記付着強さとの関係把握が必要不可欠と考える。

６．３．２　塗布型ライニング材の付着強さ

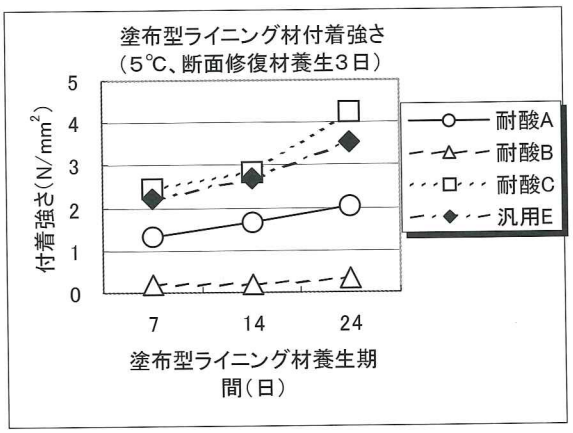
断面修復材施工時、施工後の各環境条件下（温度、養生期間）において表２－２０記載の塗布型ライニング被覆工法（番号１）を施し、同一温度環境下で養生した後の引張強さ測定結果を図２－２９－１～図２－２９－６に示す。

断面修復材の施工時、施工後の各種環境条件下において施した塗布型ライニング被覆工法（番号1）の塗布型ライニング材との付着強さは、5±2℃環境条件下の耐酸モルタルＢ以外の仕様で日本下水道事業団規格値（1.5N/mm^2）を満足する結果を得た。耐酸モルタルＢについては、塗布型ライニング材の付着試験後の破断位置がモルタル表層部であり、先に述べたように表面仕上げコテ押えを早めたことにより、モルタル自体の引張強さが大きく低下している影響がそのまま現われている。以上の結果から、標準的な施工方法により施工した断面修復材は塗布型ライニング材被覆後の養生期間を長く取れば、付着強さは向上する（付着強さ試験後の破断状態は断面修復材の凝集破壊であり、付着力向上は断面修復材の引張強さ向上と相関する）という結果を得た。



＊養生期間２４日=5℃×１４日＋６０℃水浸せき１０日

図２－２９－１　付着強さ－１（5℃）



＊養生期間２４日=5℃×１４日＋６０℃水浸せき１０日

図２－２９－２　付着強さ―２（5℃）

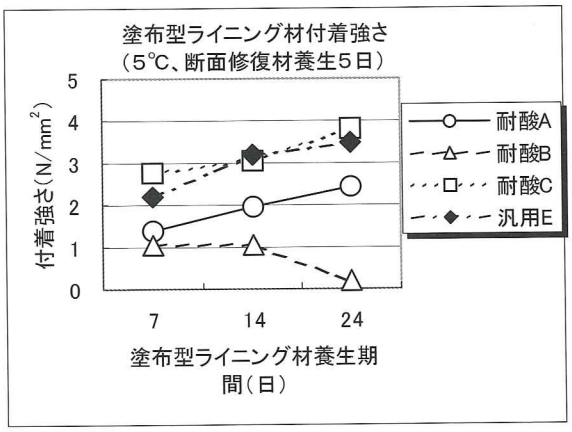
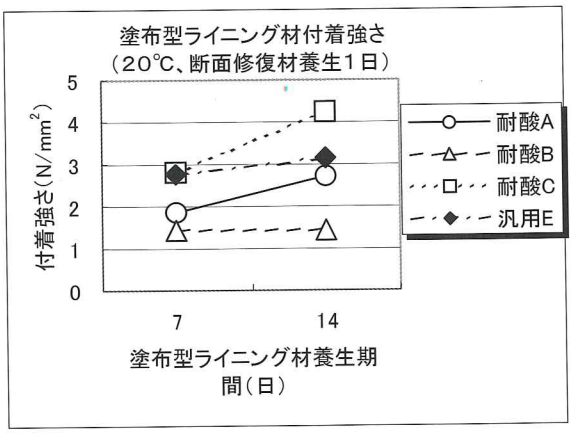


図２－２９－３　付着強さ－３（5℃）



＊養生期間２４日=5℃×１４日＋６０℃水浸せき１０日

図２－２９－４　付着強さ―４（２０℃）

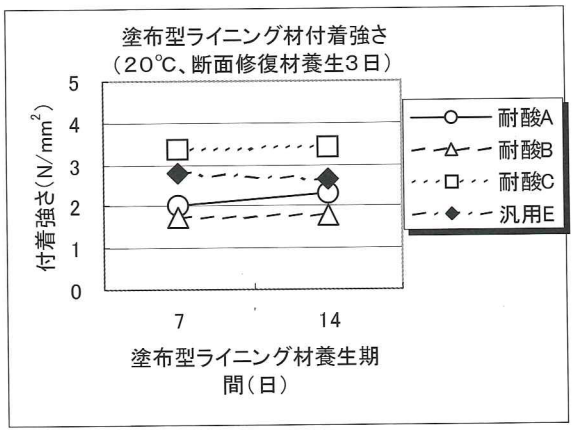


図２－２９－５　付着強さ－５（２０℃）

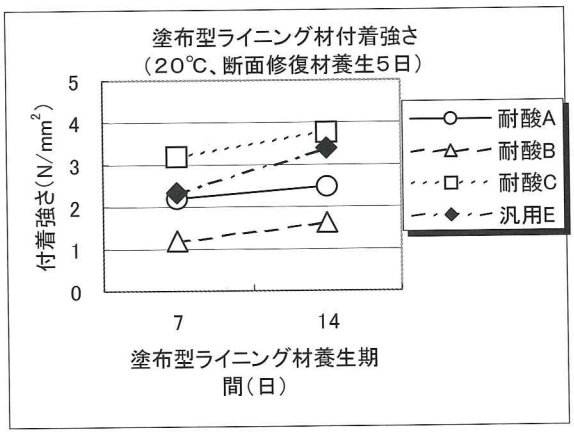


図２－２９－６　付着強さ－６（２０℃）

次に上記全水準の塗布型ライニング材付着強さ（材齢 14 日）と塗布型ライニング材を施工する直前の断面修復材表層水分率（水分計 B）との関係を図２－３０－１に、塗布型ライニング材の付着強さ（材齢 14 日）と塗布型ライニング材を施工する直前の断面修復材の引張強さとの関係を図２－３０－２に示す。

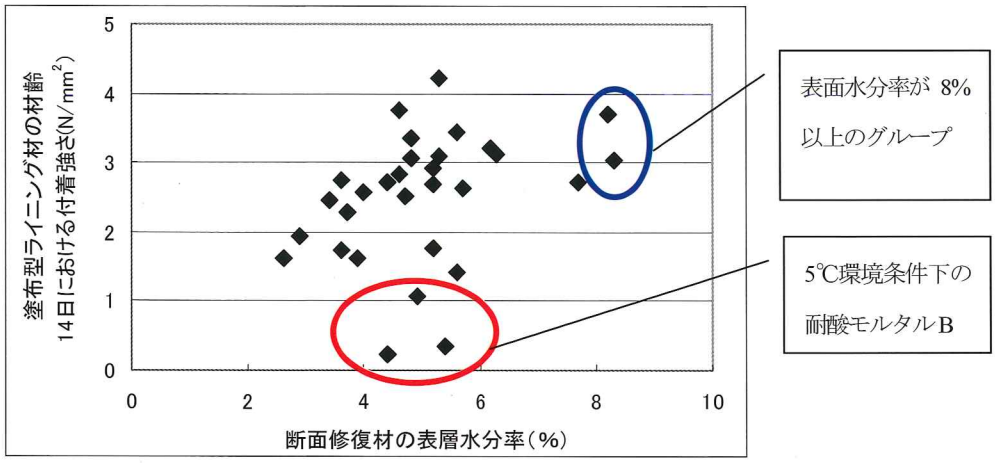


図２－３０－１　断面修復材の表層水分率（水分計 B）と
塗布型ライニング材の付着強さ（材齢 14 日）の関係

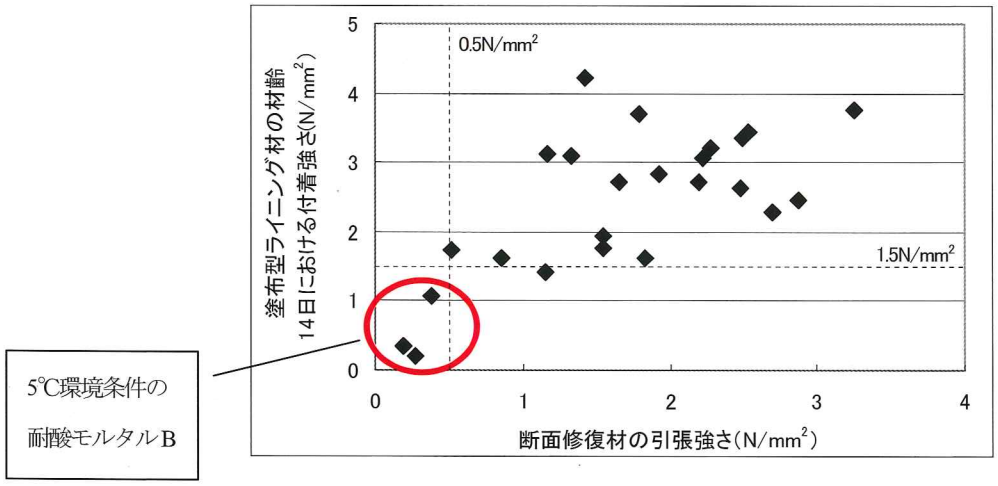


図２－３０－２　引張強さと付着強さの関係

一般に塗布型ライニング材の施工管理条件は、下地からの水蒸気による塗布型ライニング材の膨れ防止や付着性低下防止等の理由から下地含水率 8%以下とされている場合が多いが、本章の試験結果では、塗布型ライニング材施工直前の断面修復材の表層水分率（水分計 B）と塗布型ライニング材の付着強さの相関性は認められなかった。

一方、塗布型ライニング材を施工する直前の断面修復材引張強さと塗布型ライニング材付着強さの

関係をみてみると、引張強さ 0.5N/mm^2 を境に、それ以上の領域で塗布型ライニング材付着強さが日本下水道事業団規格値（1.5N/mm^2）を満足する結果を得た。

上述の断面修復材の表層水分率および引張強さと塗布型ライニング材の付着強さとの関係結果を踏まえて考察すれば、断面修復材の水和反応が進行途中であっても、ある程度の引張強さが発現した状態で塗布型ライニング材を被覆すれば、その後の経時で断面修復材の引張強さは向上すると考えられる。

最後に塗布型ライニング被覆工法種（表２－２０記載の工法番号1、番号2）による塗布型ライニング材の付着強さと断面修復材種（表２－１９記載の耐酸モルタルA、汎用モルタルE）の施工時、施工後の環境条件との関係を図２－３１－１～図２－３２－３に示す。

塗布型ライニング被覆工法種と付着強さの関係をみてみると、20±2℃環境下では断面修復材種および養生期間７日、14 日に関係なく、いずれの被覆工法も日本下水道事業団規格値（1.5N/mm^2）を充分満足する結果を得た。

本試験の目的は、断面修復施工時、施工後の環境条件が被覆工法仕様（被覆工法１では断面修復材の上に直接被覆されるのは水系エポキシ樹脂ポリマーセメントモルタルであり、被覆工法２では無溶剤系エポキシ樹脂プライマーである）とその付着強さへ与える影響差を把握するものであった。しかしながら、本検討環境条件下では付着強さの高低傾向は若干みられるものの、付着強さ発現そのものを阻害するような影響は認められなかった。

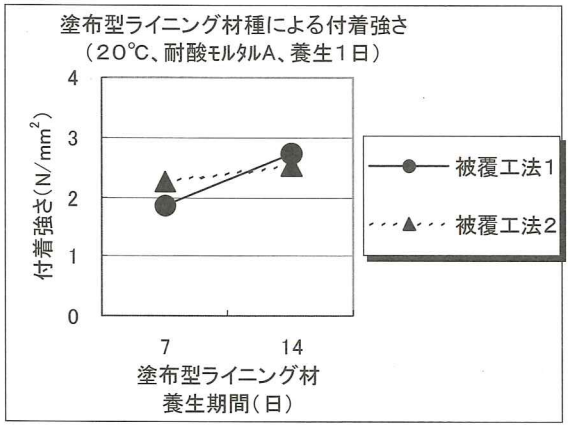


図２－３１－１　付着強さ
（耐酸Ａ、養生１日）

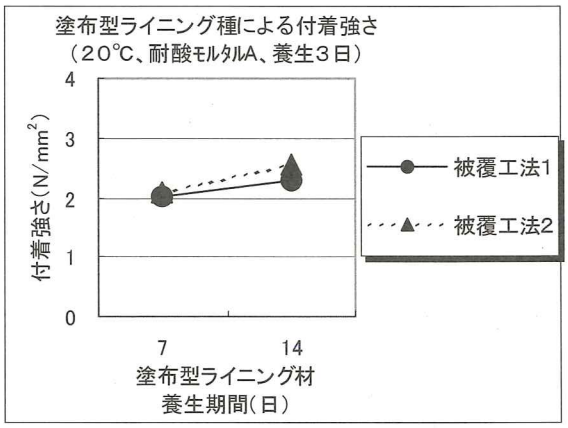


図２－３１－２　付着強さ
（耐酸Ａ、養生３日）

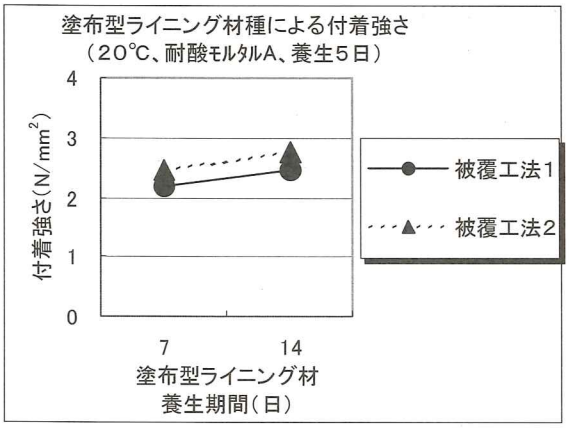


図２－３１－３　付着強さ
（耐酸Ａ、養生５日）

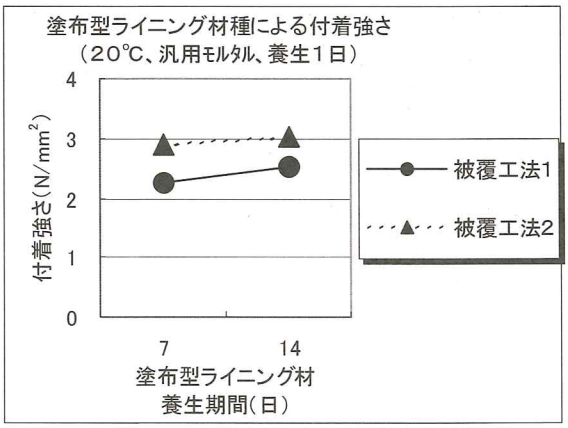


図２－３２－１　付着強さ
（汎用、養生１日）

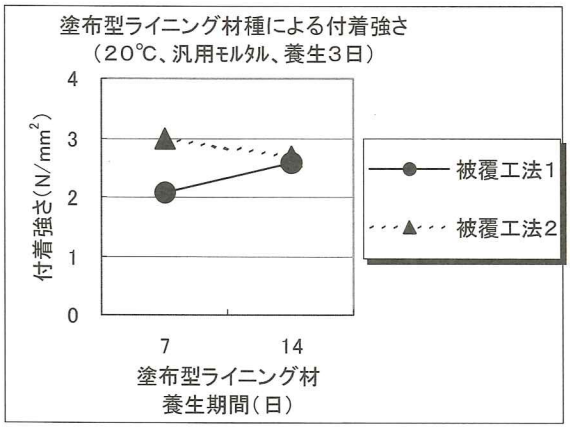


図２－３２－２　付着強さ
（汎用、養生３日）

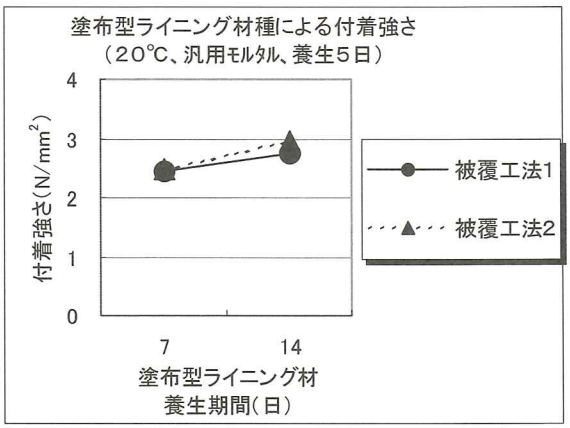


図２－３２－３　付着強さ
（汎用、養生５日）

６．３．３　促進養生断面修復材の水分率と塗布型ライニング材の付着強さ

塗布型ライニング材の付着強さに影響を及ぼす可能性があると考えられる断面修復材養生中の水和反応進行因子を排除想定した促進養生供試体（6.2.2 (2) 記載の供試体作製手順にしたがって作製したもの）を用い、塗布型ライニング材を施工する直前の断面修復材水分率のみの付着強さに与える影響を確認した結果を表２－２３に示す。

促進養生後の断面修復材水分率（絶乾状態および飽和状態）は塗布型ライニング材の付着強さ阻害に影響を与えないという結果を得た。

表２－２３　断面修復材水分率と塗布型ライニング材付着強さの関係

基材	基材の想定養生状態	ライニング材*1 施工後の養生環境・期間	付着強さ*2 (N/mm^2)	破断状態
耐酸モルタルＡ	絶乾	20±2℃×14 日	2.46	基材破壊
	飽和		2.53	基材破壊
汎用モルタルＥ	絶乾		2.13	基材破壊
	飽和		1.84	基材破壊
耐酸モルタルＡ	絶乾	20±2℃×14 日後 60±2℃水×10 日浸せき	2.91	基材破壊
	飽和		2.55	基材破壊
汎用モルタルＥ	絶乾		2.80	基材破壊
	飽和		2.24	基材破壊

*1) 塗布型ライニング被覆工法１

*2) n＝3 の平均付着強さ

６．４　まとめ

本試験では、断面修復材の水和反応進行中における湿度環境因子による挙動（例えば表層エフロなど）と塗布型ライニング材の付着強さの関係について言及できるデータがないので一概には言えないが、断面修復材の施工環境、即ち、施工時、施工後の温度および養生期間等の環境因子が断面修復材の引張強さに影響を与え、さらに塗布型ライニング材と断面修復材の付着強さにも影響を与えることがわかった。

したがって、塗布型ライニング被覆工法における施工管理（特に付着品質管理）として従来から言われていた表層水分率管理以外に、使用する断面修復材の温度―養生期間環境下における引張強さ発現データの熟知と塗布型ライニング材施工前の断面修復材引張強さ測定による管理が必要と考えられる。

7．　本編のまとめ

本編では最近セメントメーカーなどで開発・市販されている、耐酸モルタルの下水処理施設の断面修復への適用性を検討する目的で、耐酸モルタル 3 材料の耐酸性，物理的性能，塗布型ライニングとの併用効果，品質に影響を与える要因および断面修復材として必要な付着力について調査を行った。

(1) 耐酸性

下水腐食環境の表面 pH がほぼ一定で湿潤状態であるのに対して、一般的に行われている浸せき法はセメントから溶出するアルカリ成分によって pH の上昇が生じることから、一定 pH の硫酸を滴下する滴下試験を試みた。その結果、この方法は pH、温度と侵食深さに高い相関が見られるとともに、浸せき試験では認められなかった耐酸モルタルの性能差が認められた。このことから、滴下試験は下水腐食環境の促進試験として適用可能と判断した。なお、この試験で行った JIS モルタルとの比較ではいずれの耐酸モルタルも侵食は小さく耐酸性に優れていた。

(2) 物理的性能

下水処理施設の断面修復材に必要な物理的性能は、母材コンクリート以上の強度発現（曲げ・圧縮強さ），コンクリートとの一体性（付着強さ），および耐ひびわれ性（長さ変化）である。耐酸モルタル 3 材料について評価した結果、いずれも圧縮強さ 50N/mm^2 以上，曲げ強度 8N/mm^2 以上，付着強さ 2N/mm^2 以上，長さ変化 0.08%以下であり、断面修復材としての性能を満たしていた。

(3) 塗布型ライニングとの併用効果

塗膜欠損のある耐酸モルタルと汎用断面修復材を 5%硫酸溶液に浸せきし耐酸性の評価を行った。汎用断面修復材は欠損部から浸入した硫酸に反応し二水石膏などの生成によって膨張し、ライニングに膨れが見られたのに対して、耐酸モルタルには異常は認められなかった。また、硫酸による中性化の領域はいずれの耐酸モルタルも汎用断面修復材よりも小さかった。

(4) 品質に影響を与える要因

養生温度および湿度がモルタル水分と表層引張強さに与える影響を評価した。なお、モルタル水分計にケット社製，サンコウ電子社製を用いて測定した結果、機種間で測定値が異なり、サンコウ電子社製は乾燥または湿潤の影響を受けやすく、エポキシ樹脂系の耐酸モルタル C の測定は不可能であった。モルタル水分率は耐酸モルタル C を除き、養生温度が高く、湿度が低いほど小さくなる傾向となった。表層引張強さはいずれのモルタルも低温環境では強度発現が遅れる傾向であった。耐酸モルタルはどの環境条件においても養生期間の経過に伴い強度は増加した。一方、汎用断面修復材は湿度が低い環境ほど表層引張強さは低下し、養生初期に表層部分のドライアウトが生じた場合、養生期間が経過しても強度の増加は小さい傾向であった。

(5) 断面修復材として必要な付着力

塗布型ライニング材を施工する直前の断面修復材の表層含水率と引張強さが塗布型ライニング材施工後一定養生条件下で発現する塗膜付着強さに及ぼす影響を確認した。また、断面修復材の水分が塗布型ライニング材の塗膜付着強さに及ぼす影響も併せて確認した。

一般に塗布型ライニング材の施工管理条件とされている下地含水率 8%以下を裏付ける表層水分率と付着強さの相関性は認められなかった。一方、塗布型ライニング材を施工する直前の断面修復材引張強さと塗布型ライニング材付着強さの関係をみてみると、引張強さ 0.5N/mm^2 を境に、それ以上の領域で塗布型ライニング材付着強さが日本下水道事業団規格値（1.5N/mm^2）を満足する結果を得た。また、断面修復材水分量（絶乾状態および飽和状態）は塗布型ライニング材の付着強さ阻害に影響を与えないという結果を得た。

耐酸モルタルは断面修復材としての物理的性能を満たしており、材料自体での耐酸性に優れるとともに、塗布型ライニングとの併用時にも汎用断面修復材より優位性が見られ、施工環境の影響も小さく、安定した強度発現が得られる。以上のことから耐酸モルタルは下水処理施設の断面修復モルタルとして適用性に優れており、さらに耐用年数を延長することができる。また、次工程に塗布型ライニングを施工する場合の養生期間は、引張強さ 0.5N/mm^2 が得られるまでとし、目安として 5℃は養生期間 2~3 日以上, 20℃および 30℃については養生期間 1 日以上確保することが望ましい。

参考文献

1) 日本下水道事業団編著，“下水道構造物に対するコンクリート腐食抑制技術および防食技術の評価に関する報告書”，(2001.3)
2) 中本至，谷戸善彦，“下水処理場におけるコンクリートの劣化に関する調査研究”，土木学会論文集，No.403，VI-10，pp.111-120，(1989)
3) セメント新聞発行，“コンクリートテクノ”，Vol.21，No.2，pp.43-64，(2002.2)
4) 若杉三紀夫，榊原弘幸，杉浦章雄，深田和彦，“下水道補修用ポリマーセメントモルタルの耐酸性と試験施工”，アップグレードシンポジウム論文報告集，No.3，pp.157-162，(2003.10)
5) 東京都下水道局施設管理部編集，“コンクリート改修技術マニュアル処理施設編”，(2003.3)
6) 浅上修，岡田昌巳，五十嵐秀明，米田俊一，“各種セメントの耐硫酸性に関する研究”，セメント・コンクリート論文集，No.50，pp.152-157，(1996)
7) 蔵重勲，魚本健人，“コンクリートの硫酸腐食劣化に関する考察”，セメント・コンクリート論文集，No.54，pp.383-389，(2000)
8) 蔵重勲，魚本健人，“硫酸腐食環境におけるコンクリートの劣化特性”，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.1,pp.241-246，(2000)
9) Sand, W., Bock, E. and White, D.C. “Biotest system for rapid evaluation of concrete resistance to sulfur-oxiding bacteria”, Materials Performance, Vol.26, No.3, pp.14-17 (1987)
10) Ehrich S., Helard, L., Letourneux, R., Willocq, J. and Bock, E. 「モルタルの生物学的・化学的硫酸腐食」，月刊下水道, Vol.25, No.3, pp.76-79 および Vol.25, No.5, pp61-64 (2002)
11) 吉本国春，西澤宏，“下水道施設における硫化水素によるコンクリートの劣化機構と防止対策に関する調査”，日本下水道事業団技術開発部報, pp.77-86 (1993)
12) 高橋文彦，嘉指成詞，山本貴士，服部篤史，宮川豊章，“防食ライニングモルタルの硫酸劣化に与えるピンホールの影響に関する研究”，土木学会第 59 回年次講演会講演概要集，pp427-428 (2004.9,愛知)
13) 日本下水道事業団編著，“下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術指針・同マニュアル”，(2002.12)
14) 槙島修，魚本健人，“断面修復材の品質変動が耐久性に与える影響”，土木学会第 59 回年次講演会講演概要集，pp117-118(2004.9,愛知)

第３編　塗布型ライニング材の信頼性に関する検討

１．目的と概要

下水道関連施設では、微生物が生成した硫酸によるコンクリート構造物の劣化が発生することが知られている。この硫酸劣化は進行が非常に速く、年 5mm の速度で劣化したという報告[1]もある。硫酸劣化への対策としては、塗布型ライニング（防食被覆）によるコンクリートの表面保護方法が有効であり、環境改善などの方法と共に広く適用されている。

下水処理施設におけるコンクリート構造物の塗布型ライニングによる補修方法については、下水道事業団や（社）日本農業集落排水協会（現（社）地域資源循環技術センター）等からマニュアル、指針等が発行されている[2),3)]。しかしその一方で、硫酸環境下における塗布型ライニングの性能について、的確に定量評価できる手法は十分に確立されているとは言いがたい。塗布型ライニングの耐久性に関する要求性能と、従来の評価方法における問題点を以下に述べる。

① 環境（硫酸）遮断性

微生物によって生成された硫酸を、コンクリート躯体まで浸透させない性能である。一般に塗布型ライニング材の環境遮断性については、硫黄浸入深さに基づいて評価されている[4),5)]。これは、電子線マイクロアナライザー（Electron Probe Microanalyzer; EPMA）やエネルギー分散型 X 線分析装置（Energy Dispersive X-ray Spectrometer; EDS）などを用いて塗膜断面の元素分析を行い、硫黄元素の浸入深さ＝硫酸の浸入深さとみなして、その経時的な変化を求めるものである。通常は、室内において促進劣化的条件下で硫酸浸せき試験を行い、浸せき後の供試体断面について分析する。硫酸の浸入速さは塗布型ライニングの寿命を決定する要因の一つと考えられるが、浸せき試験条件と実環境との相関性については不明な点が多く、信頼性の高い寿命予測のためには、さらなる検討が必要である。しかしながら、複数の塗布型ライニング材の間で環境遮断性を相対的に比較するためには、有効な手段の一つと言える。

② 耐環境（硫酸）性

微生物によって生成された硫酸による劣化（変質）に耐える性能である。既存の基準類によれば、塗布型ライニング材の耐硫酸性については、硫酸浸せき後の塗膜の外観変化（膨れ、われ、軟化、溶出）の有無によって評価するよう規定されている。しかしながら、浸入した硫酸によって樹脂が劣化し塗膜強度が低下するといった事例[6)]も報告されているため、従来の評価方法に加え、塗膜自体の力学的特性ついても確認しておくことが望ましい。

③ 接着安定性

塗布型ライニング材が長期間安定して躯体に接着している性能である。塗膜の接着安定性に関わる問題の一つとして、“膨れ”の発生が挙げられる。膨れの原因については古くから研究されており、下

地コンクリートの毛細管圧力、水蒸気圧、空気の体積膨張圧、下地コンクリートの湿分移動などにより発生するものと考えられ、様々な再現試験が行われている[7]。従来、コンクリート躯体への塗膜の付着強さについては、建研式接着力試験器あるいはインストロン型万能試験機を用いた、付着強度試験により評価されている。しかし、この手法によって得られる付着強さと塗布型ライニング材の膨れ抑制効果との間には、明確な関係を見出すことは困難である[8]。膨れの発生や成長のメカニズムから推察される塗膜の応力状態を考慮すると、膨れの発生状況を定量評価するためには引き剥がし試験が有効であると考えられる[9),10)]。

以上のような背景から第３編では、次の三項目について検討することとした。

① 膨れを抑制する新しい塗装系を開発し、既存の基準類に準拠した評価方法に基づき、下水処理施設におけるコンクリート補修への適用性を明らかにする。

② 塗布型ライニング材の耐硫酸性を定量的に評価する手段として、引張強度試験の有効性について検証する。

③ 温冷水繰返し浸せきを行うことにより塗布型ライニング材の膨れを再現し、引き剥がし試験による塗膜の接着性評価の妥当性を検討すると共に、塗布型ライニング材の膨れ抑制効果と引き剥がし強さとの相関性を明らかにする。

第３編行う試験項目を表３－１にまとめた。評価は原則として工法（施工システム）として行った。ただし、引張強さ保持率および伸び率保持率の項目は上塗り材または補強層のみの試験とした。

表３－１　試験項目

要求性能	試験方法	評価項目
耐環境性	硫酸溶液浸せき試験	・外観変化 ・引き剥がし強さ ・引張強さ保持率（上塗り材又は補強層） ・伸び率保持率（上塗り材又は補強層）
環境遮断性	硫酸溶液浸せき試験	・硫黄浸入深さ ・質量変化
付着安定性	温冷水繰返し浸せき試験	・外観変化 ・引き剥がし強さ ・付着強さ

ところで近年では大規模地震への対策が急がれる中、ライフラインの一つである下水道関連施設でも耐震性の向上が求められている[11)]。耐震性向上の為の各種補強工法が提案されている中で、炭素繊維シートを用いる補強工法は防食被覆工事と同時に施工できるため、下水処理槽に対する補強方法として適用性が高い[12)]。そこで、本工法の下水道環境への適用性について明らかにするため、塗布型ライニング材と同様に表３－１の項目について検討した。なお、本工法の補強効果について検討した結果は、第４編で述べる。

２．　塗布型ライニング材塗膜の耐環境性および環境遮断性に関する検討

２．１　目的

塗布型ライニング材の主たる劣化現象である“膨れ”の発生を低減できる、新しい塗装系を開発した。第２章では開発した塗装系について、下水処理施設におけるコンクリート補修への適用性を明らかにするために、環境遮断性や耐環境性の評価を行った。既存の基準類が定める評価方法に加えて、引き剥がし試験による塗膜とコンクリート躯体との付着性能の評価や、引張強度試験による塗膜の力学的特性の評価を行った。

２．２　試験方法

２．２．１　試験条件

硫酸浸せき試験条件は、表３－２に示す。外観変化及び質量変化は、引き剥がし強さ又は引張強さ、硫黄浸入深さ供試体の 120 日後に試験する試験にて確認する。

表３－２　硫酸浸せき試験条件

		評価項目				
		外観変化	質量変化	引き剥がし強さ	引張強さ伸び率	硫黄浸入深さ
	供試体	供試体１および供試体２	供試体１および供試体３または供試体４	供試体２	供試体３または供試体４	供試体１
	試験時期	０日・28 日 56 日・120 日	０日・28 日 56 日・120 日	０日・28 日 56 日・120 日	０日・28 日 56 日・120 日	０日・28 日 56 日・120 日
試験温度	硫酸濃度					
23±2℃	0%	●	●	－	●	－
	0.05%	●	●	－	●	●
	0.5%	●	●	－	●	●
	3%	●	●	－	●	●
40±2℃	0%	●	●	－	●	－
	0.05%	●	●	－	●	●
	0.5%	●	●	－	●	●
	3%	●	●	－	●	●
	10%	●	●	●	●	●

２．２．２　試験材料

試験に用いた材料を表３－３に示す。

試験では上塗り材として、ポリウレア系樹脂およびエポキシ樹脂を使用した。また、素地調整材として、パテ系およびポリマーセメント系の材料を用いた。

ＨＡ、ＨＢ、ＨＣの工法は、補強材として炭素繊維を使用した、補強効果も併せ持つ工法である。

表３－３　試験に用いた工法一覧

番号	プライマー①	素地調整材	プライマー②	上塗り材	補強材
DA	－	ポリウレタン樹脂系パテ材 (1)	－	ポリウレア樹脂 (1)	－
DB	無溶剤エポキシ樹脂プライマー(1)	ポリウレタン樹脂系パテ材 (1)	－	ポリウレア樹脂 (1)	－
EA	－	水系エポキシ樹脂ポリマーセメントモルタル (1)	水系エポキシ樹脂(1)	ポリウレア樹脂 (2)	－
EB	－	水系エポキシ樹脂ポリマーセメントモルタル (1)	水系エポキシ樹脂(2)	ポリウレア樹脂 (2)	－
FA	－	水系エポキシ樹脂ポリマーセメントモルタル (2)	－	無溶剤エポキシ樹脂 (1)	ガラスクロス
FB	－	水系エポキシ樹脂ポリマーセメントモルタル (3)	水系エポキシ樹脂(3)	無溶剤エポキシ樹脂 (1)	ガラスクロス
HA	無溶剤エポキシ樹脂プライマー(2)	－	－	無溶剤エポキシ樹脂 (2)	炭素繊維＋含浸接着樹脂
HB	無溶剤エポキシ樹脂プライマー(3)	無溶剤エポキシ樹脂パテ材(1)	－	無溶剤エポキシ樹脂 (3)＋ガラスクロス	炭素繊維＋含浸接着樹脂
HC	無溶剤エポキシ樹脂プライマー(4)	無溶剤エポキシ樹脂パテ材(2)	－	無溶剤エポキシ樹脂 (4)	炭素繊維＋含浸接着樹脂

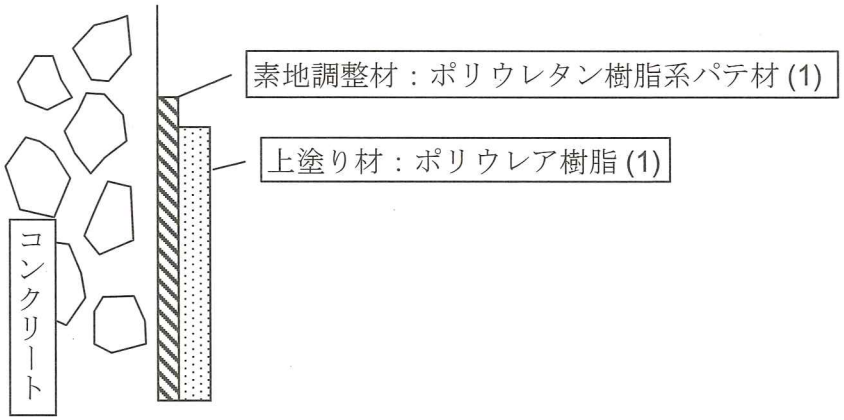


図３－１　塗り重ね仕様図　（ＤＡ）

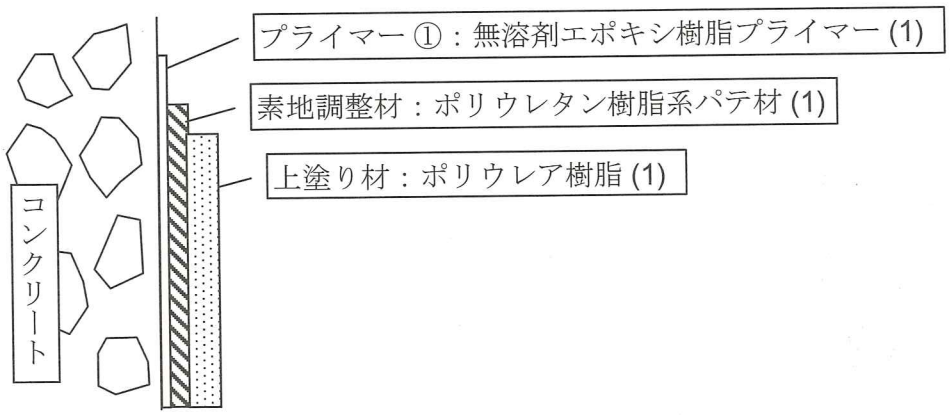


図３－２　塗り重ね仕様図　（ＤＢ）

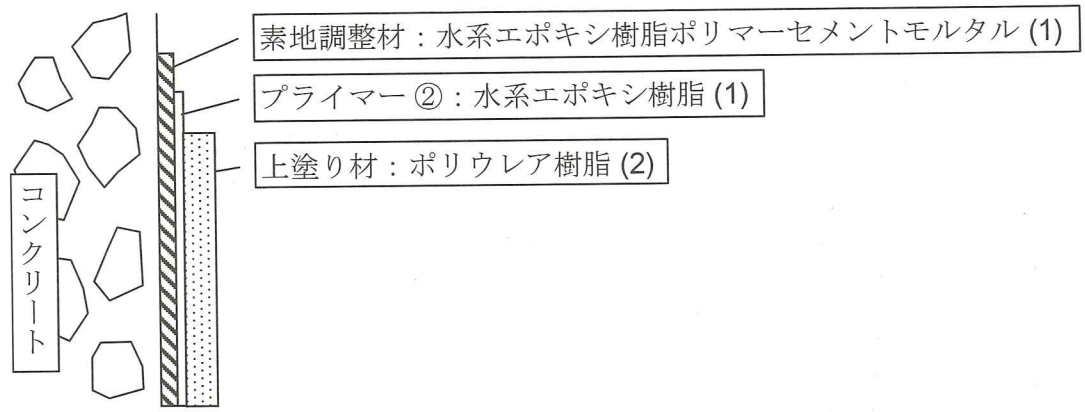


図３－３　塗り重ね仕様図　（ＥＡ）

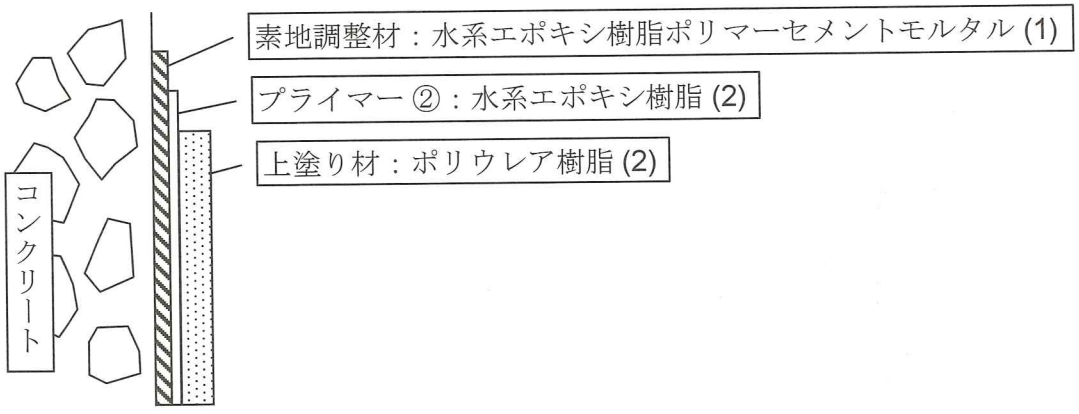


図３－４　塗り重ね仕様図　（ＥＢ）

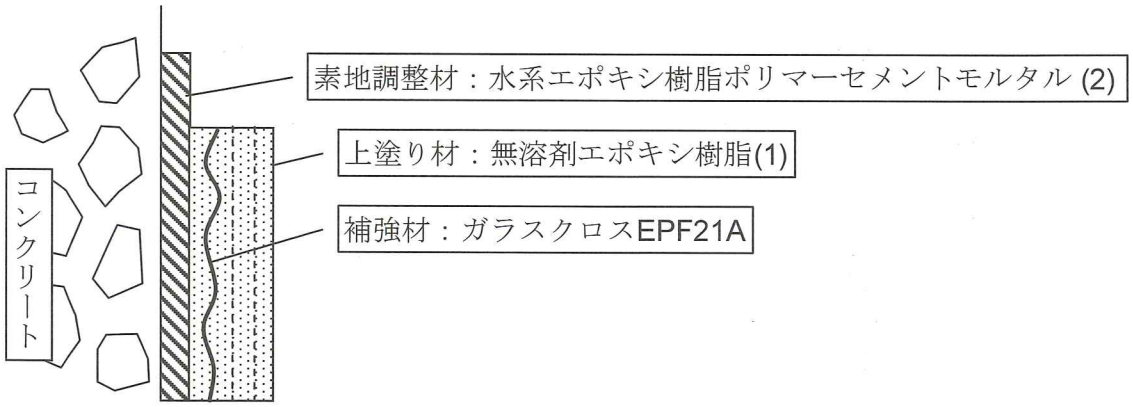


図３－５　塗り重ね仕様図　（ＦＡ）

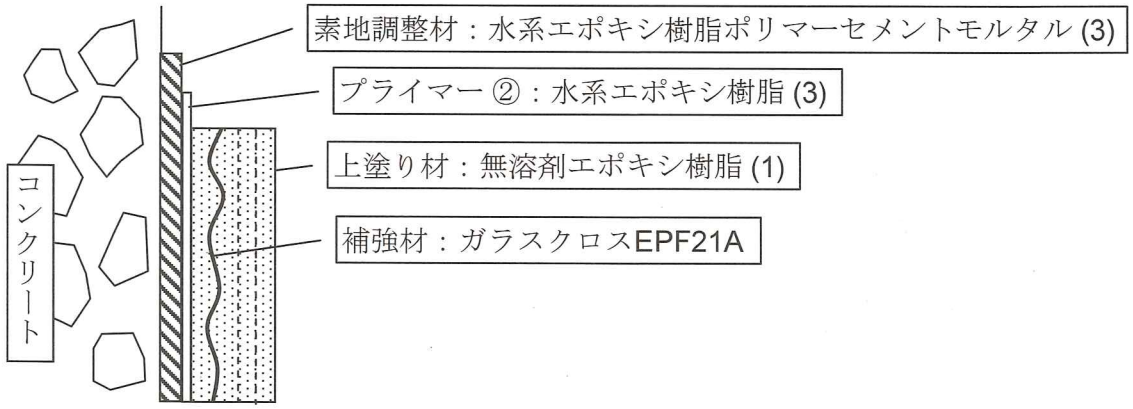


図３－６　塗り重ね仕様図　（ＦＢ）

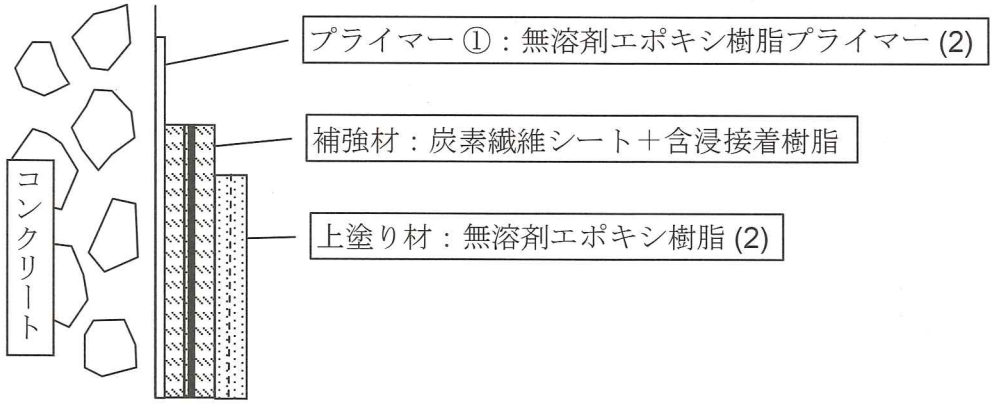


図３－７　塗り重ね仕様図　（ＨＡ）

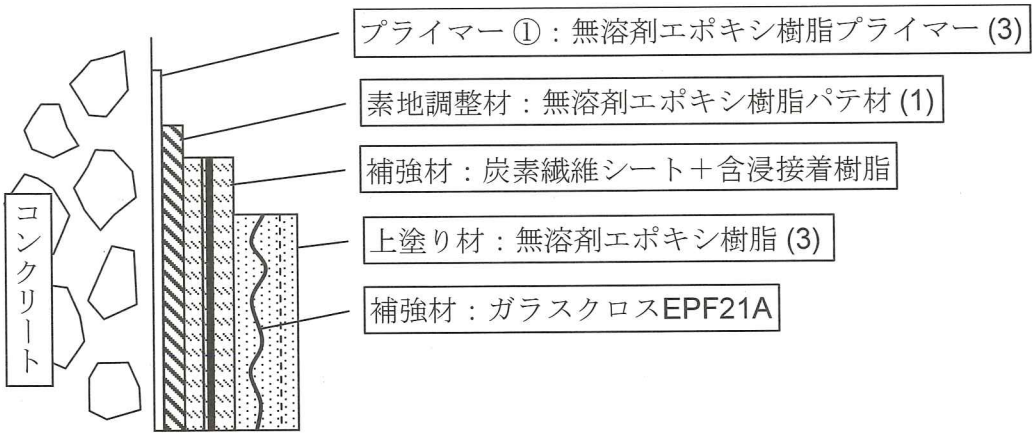


図３－８　塗り重ね仕様図　（HB）

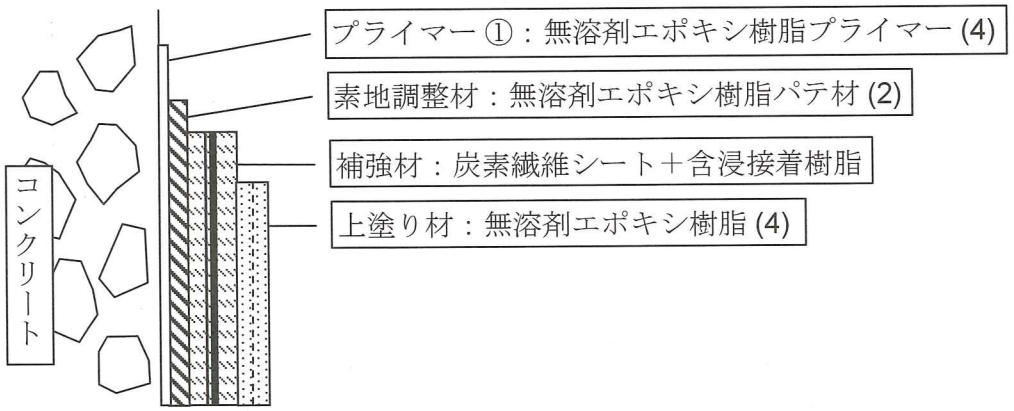


図３－９　塗り重ね仕様図　（HC）

２．２．３　供試体

供試体の概要及び各供試体の数は表３－４に示す。

表３－４　硫酸浸せき試験　供試体数（１工法につき）

	供試体数
供試体１	28 日後　：1 体 56 日後　：1 体 120 日後：3 体（質量変化測定の為 3 体とする。） 合計：5 体×9 条件＝45 体
供試体２	0 日後　：－（温水浸せき試験と併用） 28 日後　：1 体 56 日後　：1 体 120 日後：1 体 合計：3 体
供試体３又は４	0 日後　：5 体（シートの場合は１枚） 28 日後　：5 体（シートの場合は１枚） 56 日後　：5 体（シートの場合は１枚） 120 日後：5 体（シートの場合は１枚） 合計：0 日 5 体＋15 体×9 条件＝140 体 （シートの場合は 0 日 1 枚＋3 枚×9 条件＝28 枚）

（１）試験基板

●モルタル板

JIS R 5201 の 10.4（供試体の作り方）に規定する方法によって調整したモルタルを、内のり寸法 70×70×20mm の金属製形枠を用いて成形し、湿空養生室で 24 時間養生した後、脱形し、その後 6 日間 20±2℃の水中で養生し更に 7 日間以上一般養生室で養生したモルタル板。

●コンクリート板

表３－５に示す条件により設計された、表３－６に示す配合で作製された 300×300×60mm のコンクリート平板。

表３－５　コンクリートの配合設計条件

呼び強度	スランプ	粗骨材の最大寸法	セメントの種類	空気量
40MPa	8±2.5cm	20mm	普通ポルトランドセメント	5%以下

表３－６　コンクリート試験基板の配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m^3)				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
20	40.5	5	44.5	165	407	761	973	1.018

（２）供試体１

70×70×20mm のモルタル板の形枠面を、工法仕様に基づいて塗装した供試体。硫酸浸せきに耐えるよう試験面以外は被覆する。

（３）供試体２

300×300×60mm のコンクリート板の形枠面を、工法仕様に基づいて塗装した供試体。硫酸浸せきに耐えるよう試験面以外は被覆する。なお，引き剥がし試験用の治具を取り付けられるように塗膜の一部を基板よりはみ出すように作製する。

図３－１０に供試体作製の概要図を示す。

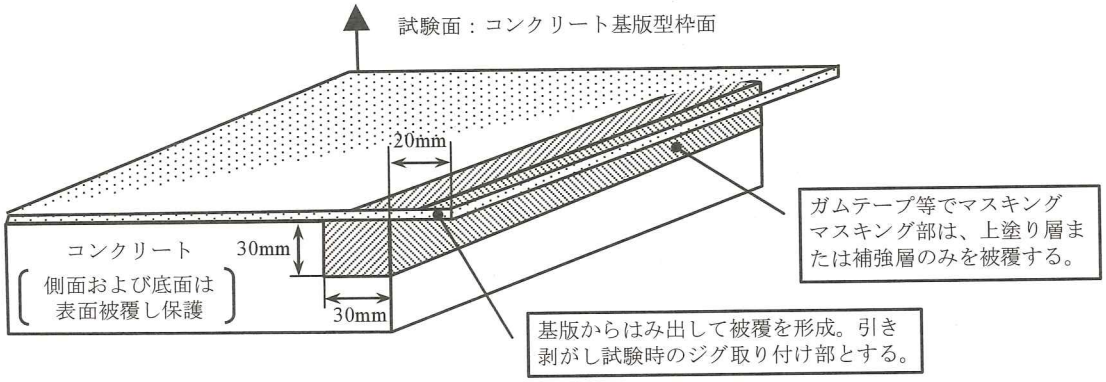


図３－１０　供試体２作製概要図

（４）供試体３

工法の上塗り材を JIS K 5400-2000 (塗料一般試験方法) 8.8 (引張強さと伸び率) (3)に基づき JIS K 6301 (加硫ゴム物理試験方法) に規定するダンベル状１号形に成形した試験片、または、300×300×2mm のシート状に成形した試験片。シートは硫酸溶液浸せき後ダンベル状１号形に成形し引張強さを測定する。

（５）供試体４

JIS K 7073（炭素繊維強化プラスチックの引張強度試験方法）に規定する試験片、または、300×300×1mm（Ⅰ形試験片）又は 300×300×2mm（Ⅱ形試験片）のシート状に成形した試験片。シートは硫酸溶液浸せき後 JIS K 7073 に規定するⅠ形試験片またはⅡ形試験片に成形し引張強さを測定する。

２．２．４　硫酸溶液浸せき方法

（１）供試体１及び供試体２

硫酸浸せき試験は、所定の濃度の溶液に図３－１１に示す供試体設置の要領で供試体を浸せきする。浸せき溶液は７日毎に交換する。

供試体は供試体側面を下にして設置する。試験面は他の供試体から 30mm 以上の間隔が空くように設置する。浸せき深さは、水面下 30mm 以上とする。

供試体を積み重ねる場合にはアングルなどを用いて台にして供試体同士が接触しないようにする。供試体２（引き剥がし試験用）ははみ出した被覆の部分が折れないよう留意する。

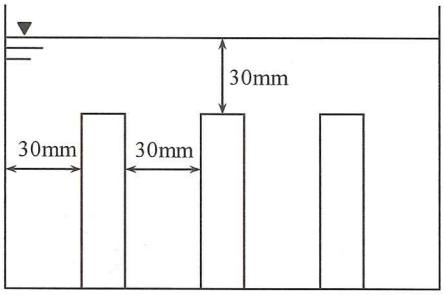


図３－１１　モルタルおよびコンクリート基板供試体浸せき模式図

（２）供試体３及び供試体４

硫酸浸せき試験は、所定の濃度の溶液に図３－１２～３－１４に示す供試体設置の要領で供試体を浸せきする。浸せき溶液は７日毎に交換する。

試験するシートが溶液に沈みまた立てることが可能な場合には、硫酸溶液に侵されないアングルに 30mm 間隔で約 2mm のスリットを設けシートを差し込み浸せきする（図３－１２参照）。

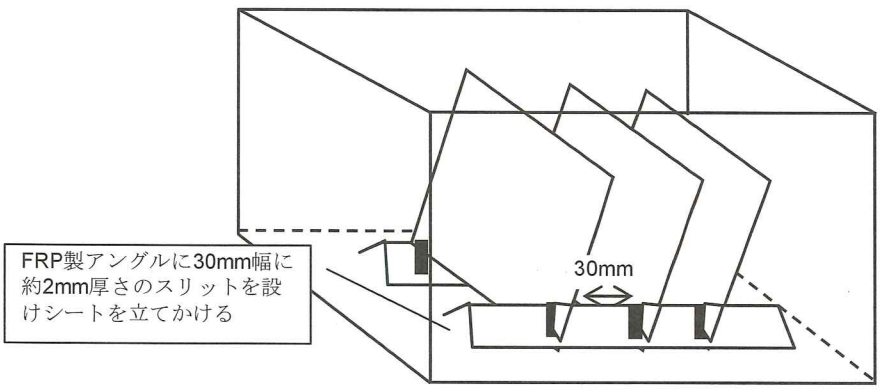


図３－１２　シート浸せき模式図（シートが沈む場合）

シートまたはダンベルが浮く場合には、端部に穴を開けテグスなどを用いて下部を固定し、アングルなどを錘にして浸せきする。供試体同士の間にはスペーサーを設置し十分な間隔を開ける。(図３－１３参照)

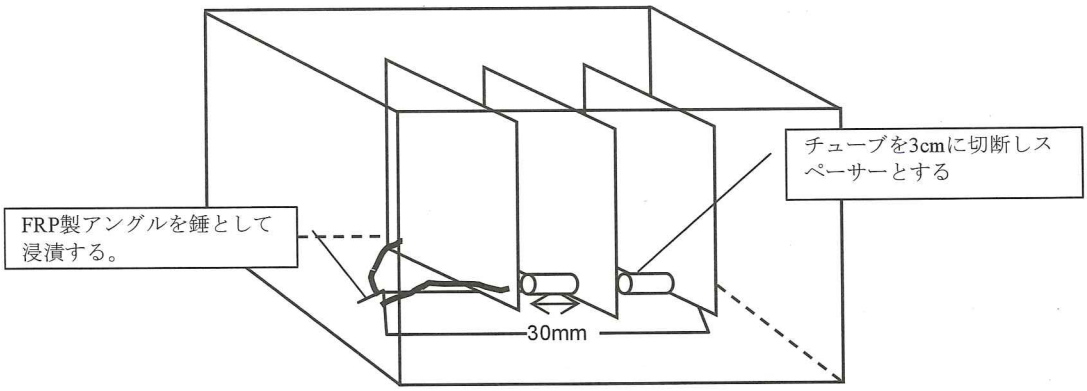


図３－１３　シート浸せき模式図（シートが浮く場合）

シートまたはダンベルが沈む場合には端部に穴を開けテグスなどにより吊し設置する。
供試体の間にはスペーサーを設置し十分な間隔を開ける。

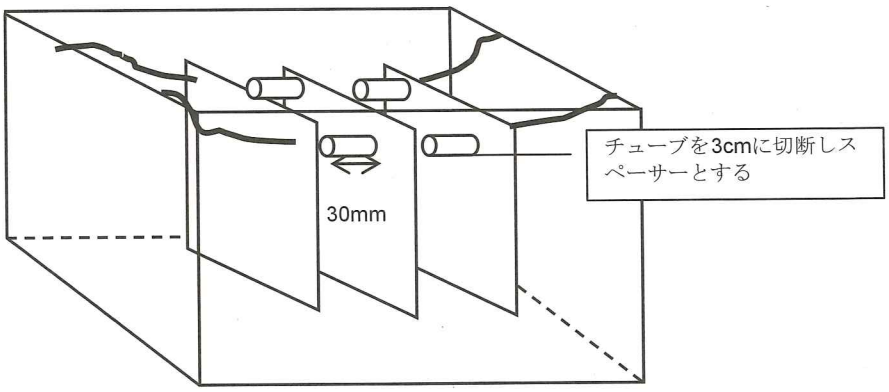


図３－１４　シート浸せき模式図（シートが沈む場合）

２．３　評価方法

２．３．１　外観観察

外観観察は、硫酸溶液引き上げ直後または温水浸せき（60℃）引き上げ直後に行う。

外観は、JIS K 5600-8-1～8-6 のシリーズに基づき膨れ、はがれ、白亜化に関して行う。

また、変色は色見本等と比較して JIS K 5600-8-1 の評価基準に基づき判定する。

２．３．２　質量変化測定

質量変化は、供試体を引き上げた直後表面水をふき取り測定する。

供試体の質量は、有効表示 0.01ｇの秤で測定する。

２．３．３　硫黄浸入深さ測定

硫黄浸入深さは、日本下水道事業団の「下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術指針・同マニュアル」参考資料－３防食被覆層の品質試験方法３－１の(3) 6) 硫黄浸入深さに準じて測定する。測定面はモルタル基板形枠面の被覆層とする

２．３．４　引張強度試験

引張強度試験は、供試体３は JIS K 5400-2000 (塗料一般試験方法) 8.8 (引張強さと伸び率) に準じて測定し、供試体４は JIS K 7073（炭素繊維強化プラスチックの引張強度試験方法）に準じて測定する。

２．３．５　引き剥がし試験

（１）試験方法

引き剥がし試験装置は原則として JIS B 7721 による。試験速度は 100mm/分を基準とする。引き剥がし部位の幅は 30mm、長さ 170mm とする。

引き剥がし試験は、図３－１６に示す要領でコンクリート基板上面の塗膜面にコンクリート表面まで切り込みを入れる。

供試体は図-３－１５に示す要領でインストロン型万能試験機に設置する。供試体は引き剥がす部位の中心部分にチャックが位置するように固定させる。引き剥がし応力が強く供試体が動く場合には、供試体側面をアングルなどで挟み、固定する。

基板からはみ出した部分へ長さ 600mm のテープ又はワイヤーを取り付け 90℃方向に引張荷重をかけ試験する。試験基板を固定しているため、詳細には 104.5° ～75.5° の範囲で引張方向は変化する。上塗り層が引き剥がしの応力に耐えず、剥離が発生する前に破断する場合には、補強材を接着剤を用いて貼り付ける。

引き剥がし端部又は補強材を挟む器具及びチャックは、30mm 以上の幅がある器具とし、引き剥がし部全体に均一に応力がかかるようにする。

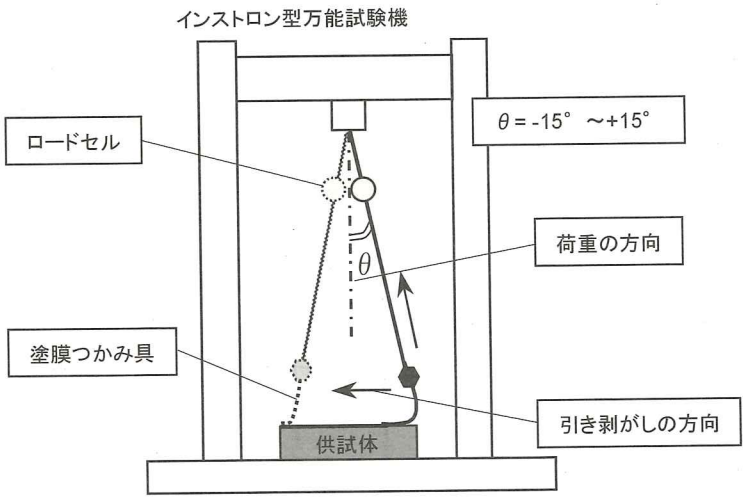


図３－１５　インストロン型万能試験機への設置図

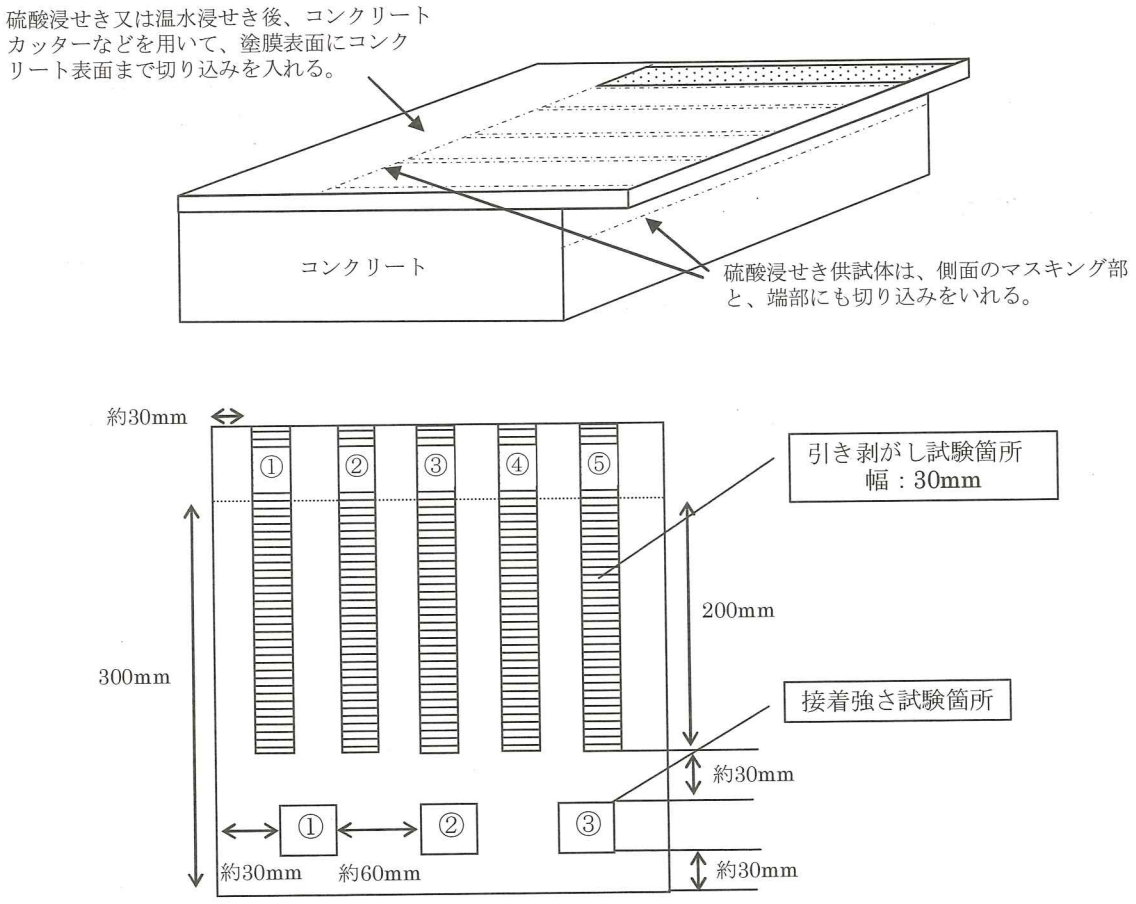


図３－１６　引き剥がし供試体　カット状況図

（２）評価

試験の評価は、試験箇所毎に行い記録し、さらに平均を記録する。同時に引き剥がし状態も、表３－７に従い記録する。剥離面積は、目算でも良い。エネルギーおよび応力は基板破壊が生じた場合には「以上」と記録する。

表３－７　引き剥がし時状態評価点

	1	2	3	4	5	平均値
引き剥がし試験の全剥離面積（mm^2）						
最大応力（N）						
エネルギー（J=N/m）						
基板破壊（%）						
基板－プライマー界面破壊（%）						
プライマー層内破壊（%）						
プライマー－素地調整材　界面破壊（%）						
素地調整材　層内破壊（%）						
素地調整材－プライマー界面破壊（%）						
プライマー層内破壊（%）						
プライマー－上塗りまたは補強層界面破壊（%）						
上塗り又は補強層　層内破壊（%）						

*プライマーを使用していない場合は「－」と記録する。判断が難しい場合には、界面破壊として記録する。

２．３．６　付着強度試験

付着強度試験は、引き剥がし試験後図３－１６に示す位置で、JIS K 5400-2000（塗料一般試験方法）8.7（付着強さ）に準じて、建研式接着力試験器を用いて3箇所測定する。

付着強さ測定後の破断状態は、引き剥がし時の剥離状態評価に準じて評価を行う。

破断するまでの荷重速度は1,500N/min～2,000N/minとする。

２．４　試験結果

２．４．１　外観観察結果

外観観察の結果を表３－８～３－１２に示す。結果は供試体１の結果を示している。その他の供試体の外観状況は、供試体１と同等であった。また、DA と DB は同じ上塗り材を用いているため DA のみを試験した。同様に EA と EB 、FA と FB も同じ上塗り材を用いたため EA および FA のみを試験した。

外観観察の結果、一部の試験材料で変色が生じていた。しかし、膨れや、はがれ等の大きな変状は確認できなかった。

HA の供試体はコーナー部に損傷が生じたが、これは供試体作製時の処理不良と考えられる。現在再試験中である。

表３－８　外観観察結果（供試体１：DA）

供試体番号	温度 ℃	濃度 wt%	浸せき日数					
			２８日		５６日		１２０日	
			膨れ・割れ・はがれ	特記	膨れ・割れ・はがれ	特記	膨れ・割れ・はがれ	特記
DA	23	0	0		0		0	
		0.05	0	エッジ部変色	0	変色	0	変色
		0.5	0		0		0	
		3	0		0		0	
	40	0	0		0		0	
		0.05	0		0		0	
		0.5	0		0		0	
		3	0		0		0	変色
		10	0		0		0	

表３－９　外観観察結果（供試体１：EA）

供試体番号	温度 ℃	濃度 wt%	浸せき日数					
			２８日		５６日		１２０日	
			膨れ・割れ・はがれ	特記	膨れ・割れ・はがれ	特記	膨れ・割れ・はがれ	特記
EA	23	0	0	エッジ部変色	0	変色	0	変色
		0.05	0		0		0	
		0.5	0		0		0	
		3	0		0		0	
	40	0	0		0		0	
		0.05	0		0		0	変色
		0.5	0		0		0	変色
		3	0		0	変色	0	変色
		10	0	エッジ部変色	0	変色	0	変色

表３－１０　外観観察結果（供試体１：FA）

供試体番号	温度 ℃	濃度 wt%	浸せき日数					
			２８日		５６日		１２０日	
			膨れ・割れ・はがれ	特記	膨れ・割れ・はがれ	特記	膨れ・割れ・はがれ	特記
ＦＡ	23	0	0	つや引け	0		0	
		0.05	0	つや引け	0		0	
		0.5	0		0		0	
		3	0		0		0	
	40	0	0	つや引け	0		0	
		0.05	0	つや引け	0		0	
		0.5	0		0		0	
		3	0		0		0	
		10	0		0	つや引け	0	つや引け

表３－１１　外観観察結果（供試体１：HB）

供試体番号	温度 ℃	濃度 wt%	浸せき日数					
			２８日		５６日		１２０日	
			膨れ・割れ・はがれ	特記	膨れ・割れ・はがれ	特記	膨れ・割れ・はがれ	特記
ＨＢ	23	0	0		0		0	
		0.05	0		0	裏面変色	0	
		0.5	0		0		0	
		3	0		0		0	
	40	0	0		0		0	
		0.05	0		0		0	
		0.5	0		0		0	
		3	0	つや引け	0		0	
		10	0		0		0	

表３－１２　外観観察結果（供試体１：HC）

供試体番号	温度 ℃	濃度 wt%	浸せき日数					
			２８日		５６日		１２０日	
			膨れ・割れ・はがれ	特記	膨れ・割れ・はがれ	特記	膨れ・割れ・はがれ	特記
ＨＣ	23	0	0		3-3	一部層間剥離	0	
		0.05	0		0		0	
		0.5	0		0		0	
		3	0		0		0	
	40	0	0		0		0	
		0.05	0		0		0	
		0.5	0		0		0	
		3	0		0		0	
		10	0		0		0	

２．４．２　質量変化測定結果

供試体１の質量変化を測定した結果を、図３－１７～３－２１に示すDAとDBは同じ上塗り材を用いているためDAのみを試験した。同様にEAとEB、FAとFBも同じ上塗り材を用いたためEAおよびFAのみを試験した。

HAの供試体は、供試体作製時の処理不良による角部の損傷が生じたため、現在再試験中である。

上塗り材の種類として、ウレア樹脂系とエポキシ樹脂系の２種類に分けられる。それぞれの樹脂で、質量増加の傾向に差が生じていた。

ウレア樹脂系では、硫酸溶液濃度が高いほど質量増加量が少ない傾向が見られた。これは特に40℃の温度で浸せきした場合に顕著であった。

エポキシ樹脂系のFAおよびHB，HCの供試体では、硫酸溶液濃度の違いでは大きな差は生じていなかった。浸せき温度が高い場合の方が若干質量増加が大きかった。

ウレア樹脂系の上塗り材では、時間の平方根に比例して質量増加している傾向が確認できた。エポキシ樹脂系の上塗り材は、質量増加量が小さくばらつきが大きかったが、ウレア樹脂系と同様に時間の平方根に比例して質量増加していると考えられる。

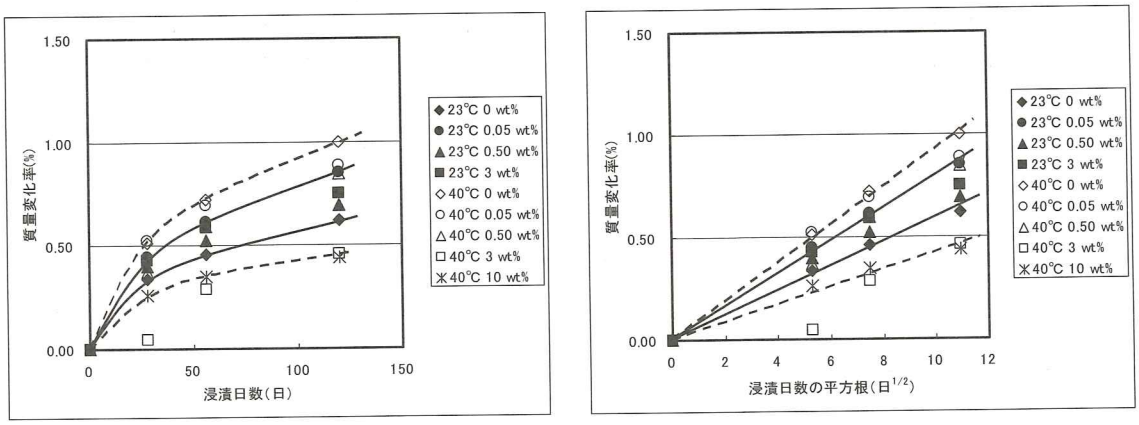


図３－１７　質量変化測定結果（供試体１：DA）

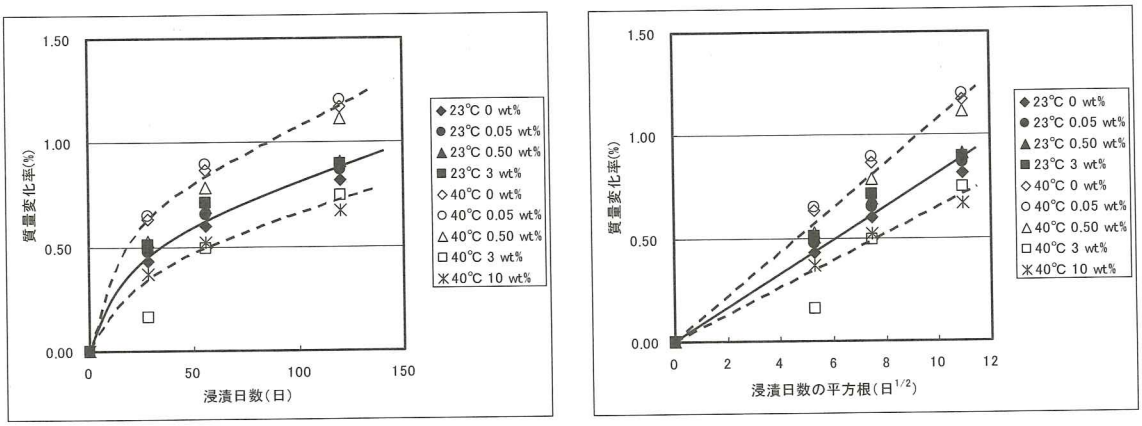


図３－１８　質量変化測定結果（供試体１：EA）

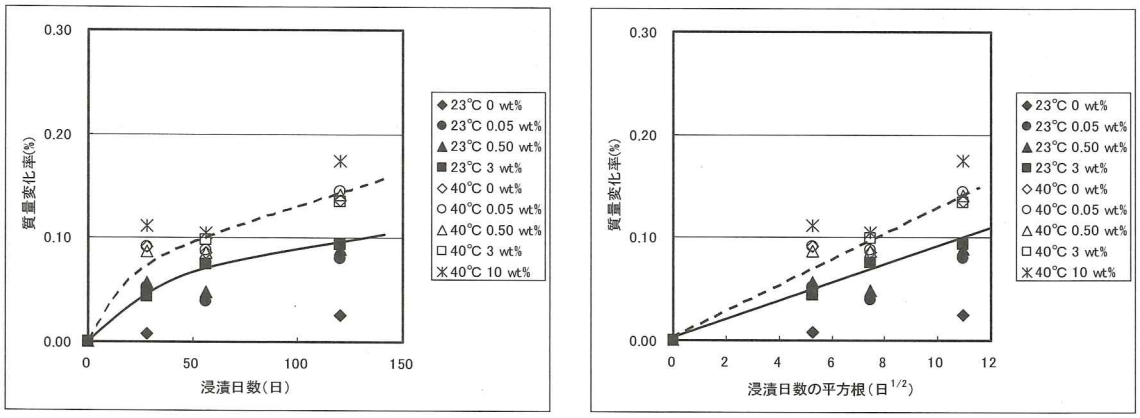


図３－１９　質量変化測定結果（供試体１：FA）

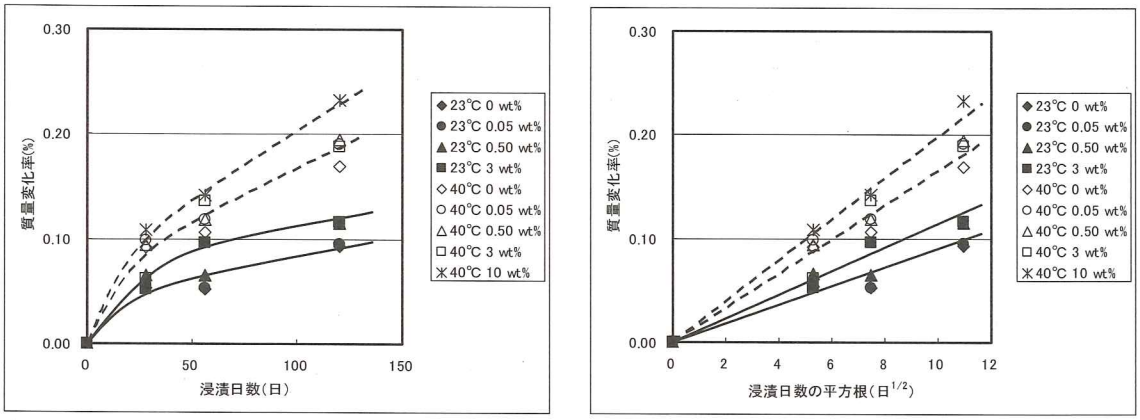


図３－２０　質量変化測定結果（供試体１：HB）

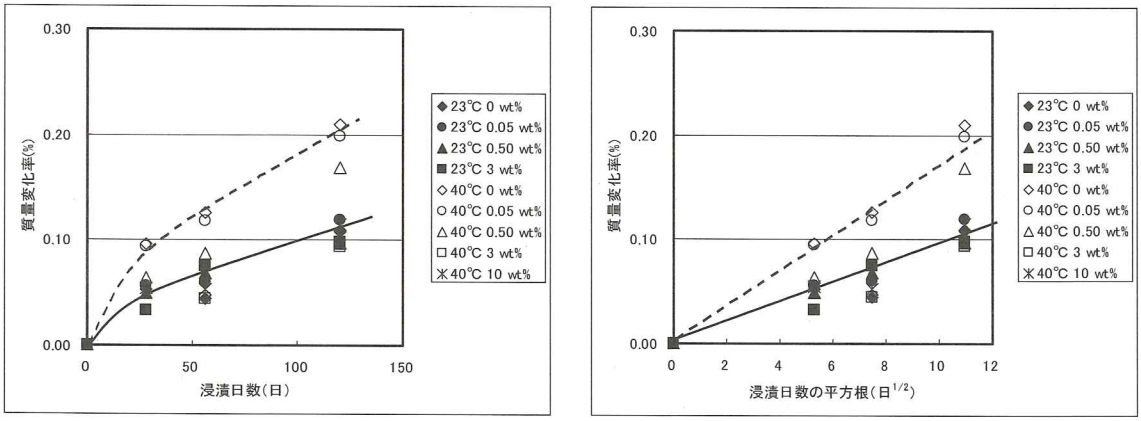


図３－２１　質量変化測定結果（供試体１：HC）

２．４．３　硫黄浸入深さ測定結果

(1) 硫黄浸入深さ測定結果

硫黄浸入深さを測定した結果を、図３－２２～３－２６に示す。DA と DB は同じ上塗り材を用いているため DA のみを試験した。同様に EA と EB 、FA と FB も同じ上塗り材を用いたため EA および FA のみを試験した。

また、HA は供試体作製時の処理不良による、角部の損傷が生じたため、現在再試験中である。

本試験期間内では硫黄浸入深さが浅く、浸せき温度 23℃の条件や硫酸濃度が低濃度の場合には明確な傾向が見られなかったが、硫黄浸入は時間の平方根に比例して増加する傾向にあると考えられる。

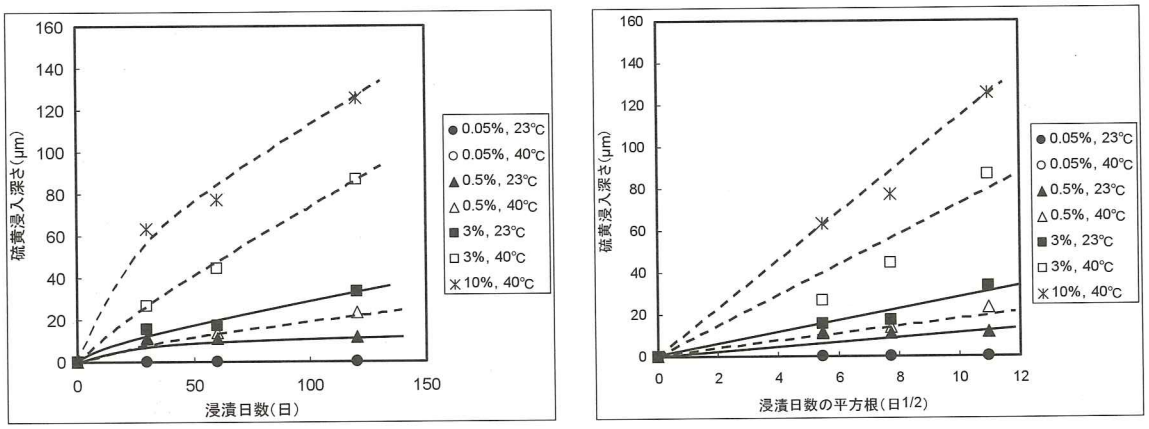


図３－２２　硫黄浸入深さ測定結果（供試体１：DA）

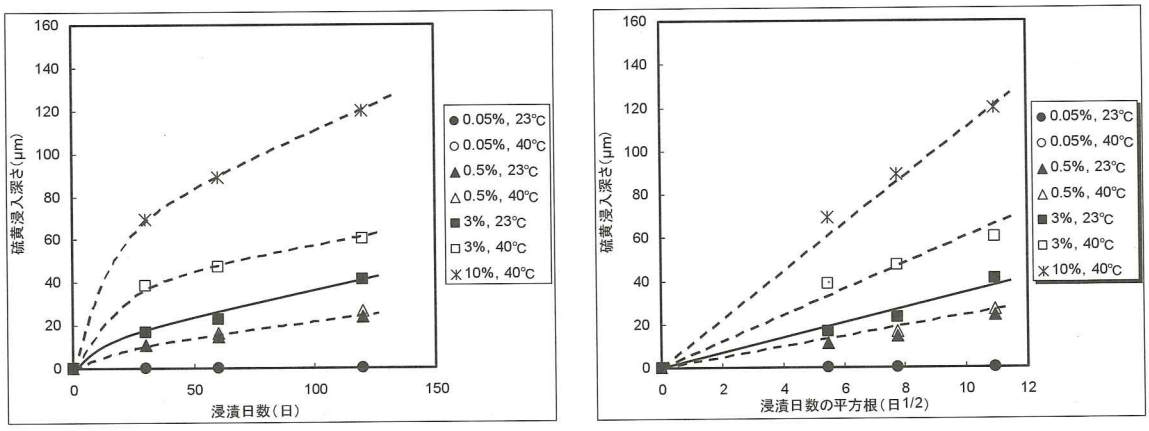


図-３－２３　硫黄浸入深さ測定結果（供試体１：EA）

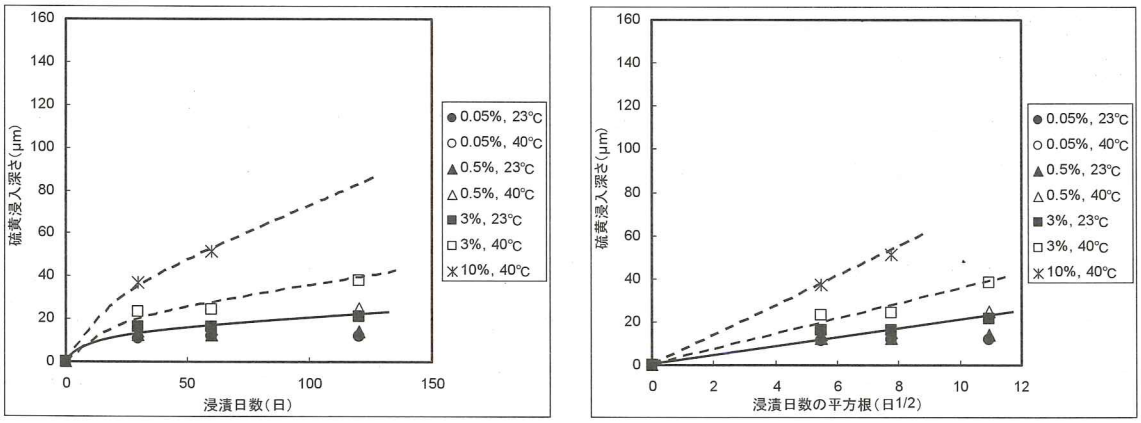


図３－２４　硫黄浸入深さ測定結果（供試体１：FA）

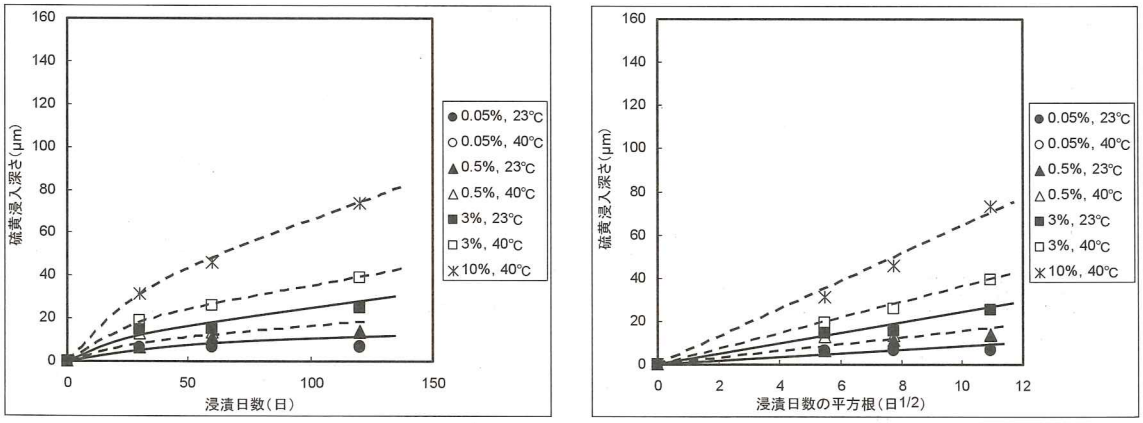


図３－２５　　硫黄浸入深さ測定結果（供試体１：HB）

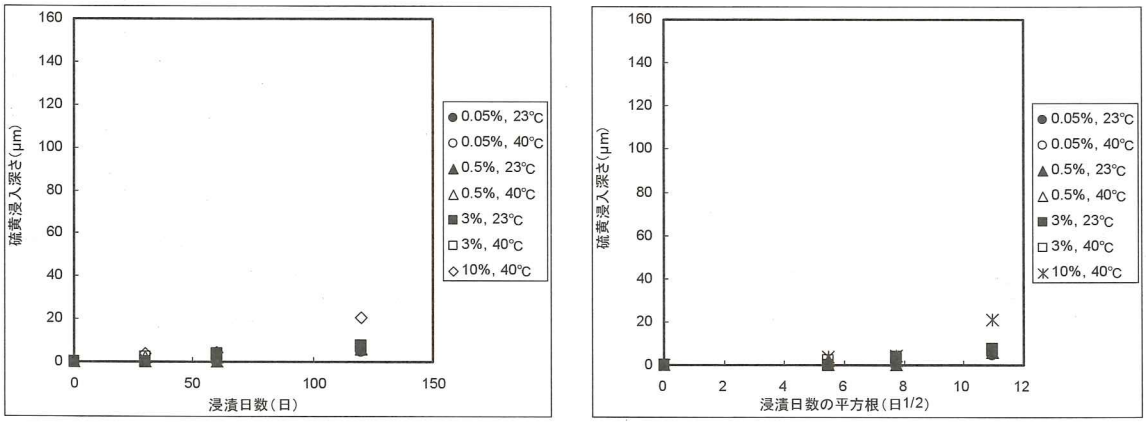


図３－２６　硫黄浸入深さ測定結果（供試体１：HC）

(2) 硫黄浸入速度の解析

時間の平方根を横軸に取り傾きを硫黄浸入速度係数として求めた結果を表３－１３に示す。23℃0.05%及び40℃0.05%は浸入深さの変化が小さかったため計算ができなかった。

23℃に比較して40℃の硫黄浸入速度係数は，0.5%硫酸溶液で約1.1～1.6倍，3.0%硫酸溶液で約1.5～2.5倍であった。

表３－１３　硫黄浸入速度係数計算結果

		√時間の直線近似係数				
浸せき温度	硫酸濃度	DA	EA	FA	HB	HC
40℃	10%	11.05	11.35	6.63	6.35	1.34
	3%	6.85	5.89	3.49	3.50	0.59
	0.50%	2.05	2.29	2.22	1.57	0.46
	0.05%	—	—	—	—	—
23℃	3%	2.79	3.42	2.13	2.27	0.48
	0.50%	1.32	2.08	1.51	1.29	—
	0.05%	—	—	—	—	—

＊　－：変化量が小さい為に計算が出来なかった。

23℃・3%の硫酸溶液浸せき結果の硫黄浸入速度係数から10年後の硫黄浸入深さを推定した場合、表３－１４の結果となる。

この値は、ほぼ塗膜厚さの1/10であり、全ての上塗り材は良好な遮断性を有するといえる。

表３－１４　10年後の硫黄浸入深さ推定値

	DA	EA	FA	HB	HC
硫黄浸入深さ推定値	168μm	207μm	129μm	137μm	29μm

２．４．４　引張強度試験結果

引張強度保持率および伸び率保持率を図３－２７～３－３２に示す。DA と DB は同じ上塗り材を用いているため DA のみを試験した（D と表示)。同様に EA と EB 、FA と FB も同じ上塗り材を用いたため EA（E と表示）および FA（F と表示）のみを試験した。

試験結果は、各上塗り材の材質により引張強さおよび伸び率に大きな差があるので、保持率で示した。

試験結果の評価として、一定以上引張強さおよび伸び率が低下した場合に劣化したと判断することができる。

本試験に用いた上塗り材は注型品ではないため、供試体作製時のばらつきが大きいと考えられるため、標準偏差によりばらつきも評価した。

図中の実線は、試験結果の平均値を示している。その上下の点線は、2σ を示している。2σ は、浸せき期間毎に行った試験（5 個）の標準偏差を計算し平均値を 2 倍した。供試体によるばらつきであれば 2σ 以内に 95%の確率で収まる。

ただし、E は浸せき温度によって平均値が大きく違ったため、浸せき温度毎に平均値を求めばらつきの範囲を示している。

試験の結果、全ての上塗り材で試験値はほぼ 2σ 内に収まっており、引張強度および伸び率に変化はなかったと考えられる。

特に F の供試体では 2σ が非常に大きくなったが、成型時の巻き込みエアーなどの影響により、引き裂き力が掛かったためばらつきが大きくなったと考えられる。

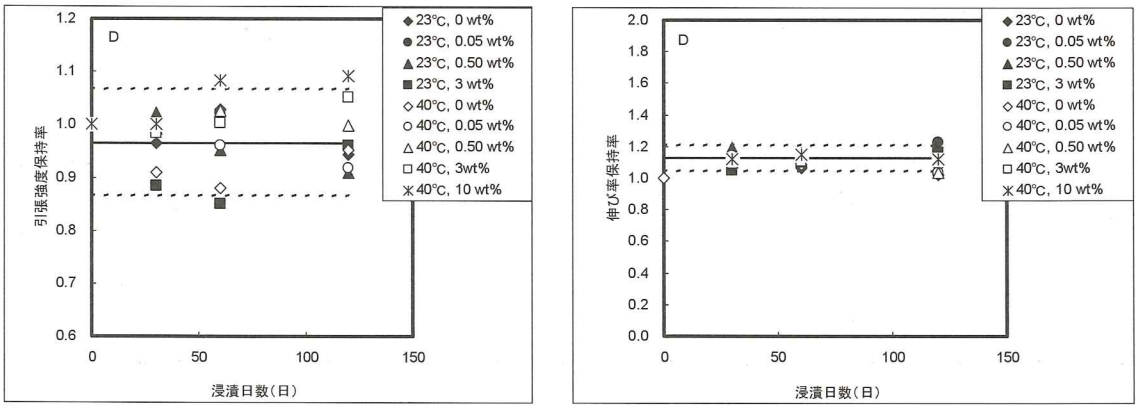


図３－２７　引張強度保持率及び伸び率保持率測定結果（供試体３：D)

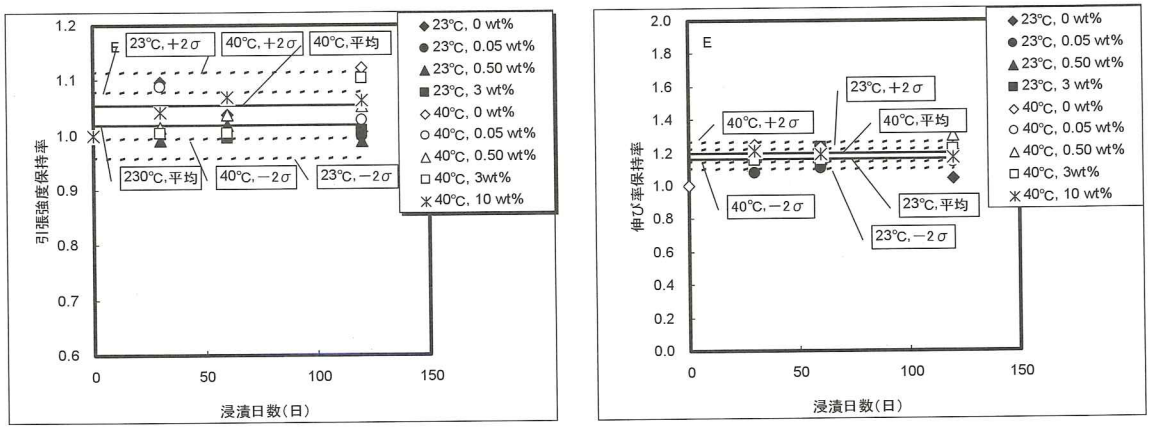


図３－２８　引張強度保持率及び伸び率保持率測定結果（供試体３：E）

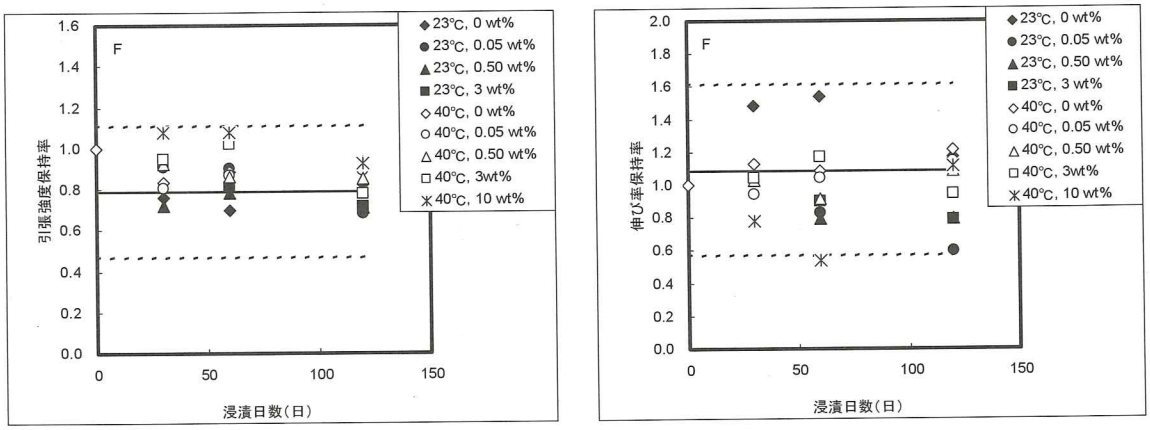


図３－２９　引張強度保持率及び伸び率保持率測定結果（供試体３：F）

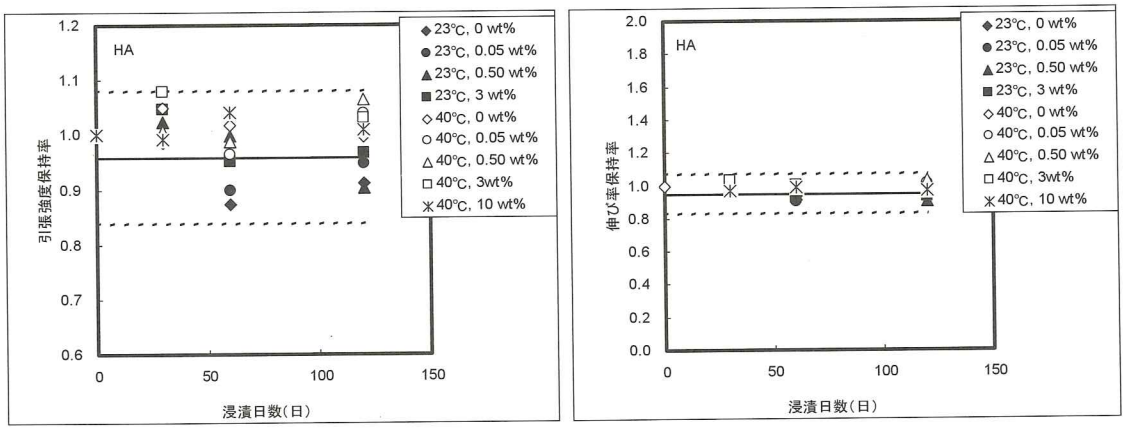


図-３－３０　引張強度保持率及び伸び率保持率測定結果（供試体４：HA）

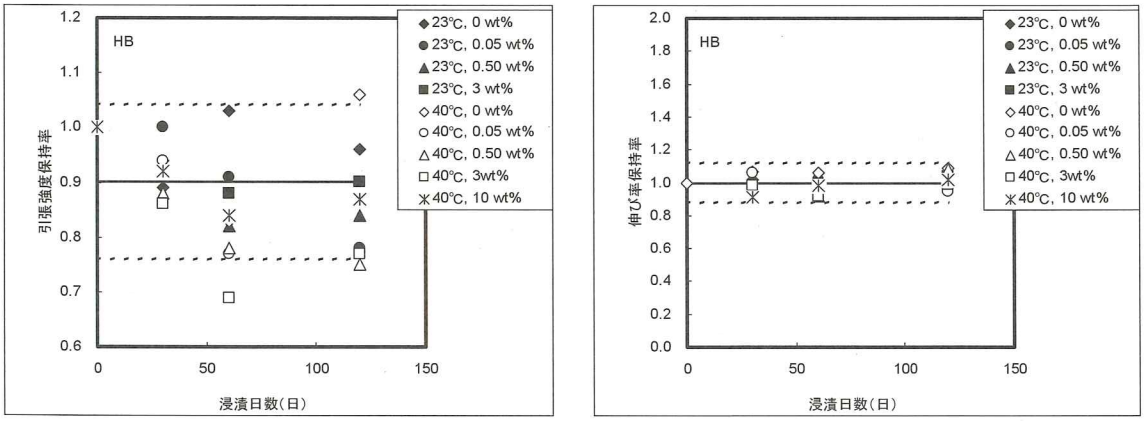


図３－３１　引張強度保持率及び伸び率保持率測定結果（供試体４：HB）

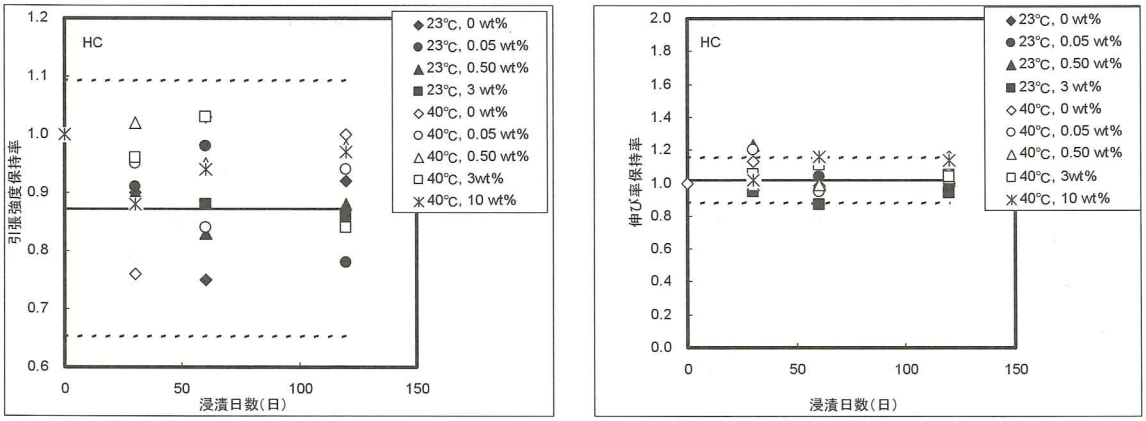


図３－３２　引張強度保持率及び伸び率保持率測定結果（供試体４：HC）

２．４．５　引き剥がし試験結果

引き剥がし試験の結果を、図３－３３に示す。

引き剥がし強さは、引き剥がし開始初期に生じる応力の影響をなくすため、試験開始の 50 秒後から 60 秒間の結果を用いて解析を行った。解析は JIS K 6256　3.項波状曲線の解析に従った。試験結果は波状部の変化が少ない（うねり曲線）場合があったため、解析条件をそろえ 3.4 項Ｄ法に従い曲線の最大値と最小値の平均値を求めた。

引き剥がし強さは、120 日浸せき後に低下する傾向が見られた。

引き剥がし試験後に引き剥がし面の状況を観察したところ、素地調整材で剥離していた。硫黄浸透深さの測定結果から、素地調整材までは硫酸が浸透していなかったことから、引き剥がし荷重の低下は硫酸浸透による劣化が原因とは考えにくい。また、塗膜強度にも大きな低下は見られなかった。
以上の結果から、引き剥がし強さの低下は、水分または温度による影響であると推測される。

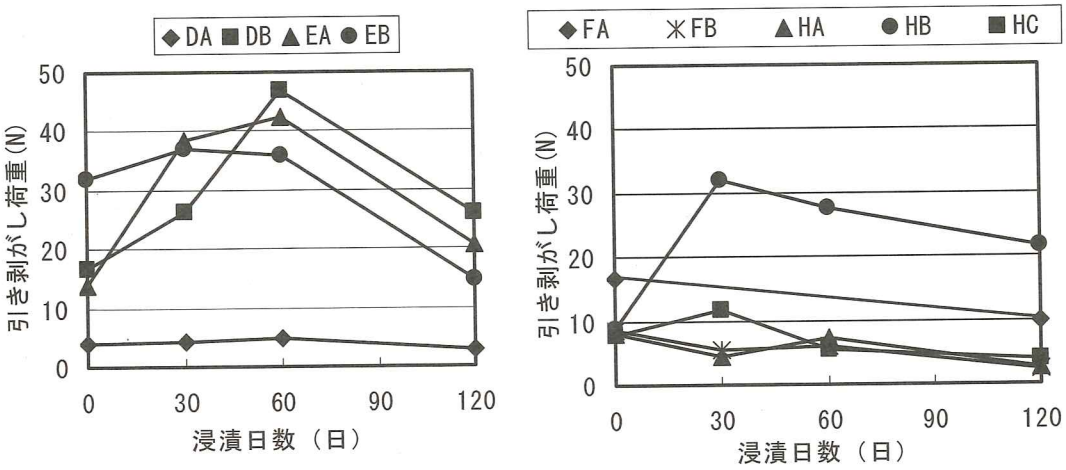


図３－３３　引き剥がし強さ測定結果（供試体２）

２．４．６　付着強度試験結果

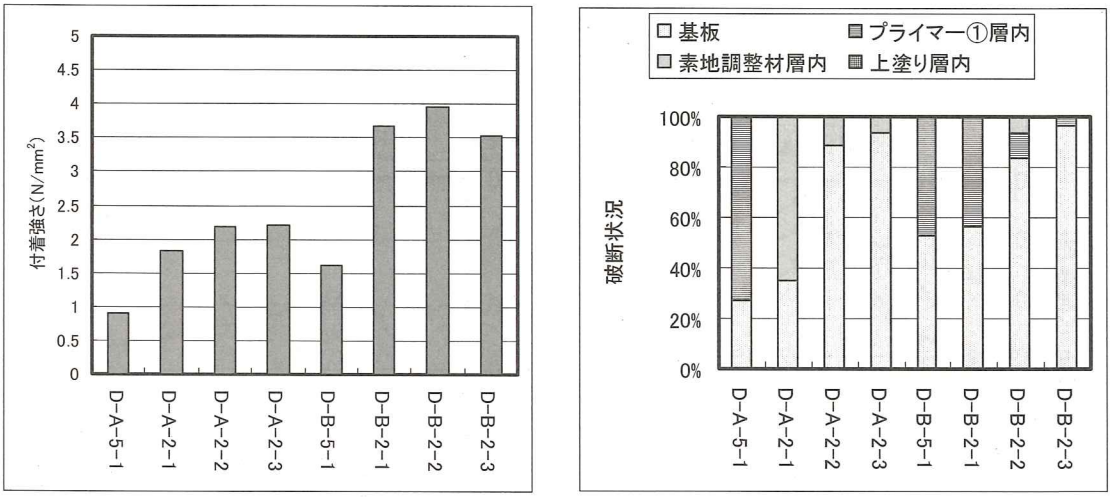
付着強さ測定の結果、図３－３４～３－３７に示す。供試体番号は、グループ名－仕様－試験番号－浸せき日数（1：28 日，2：56 日，3：120 日）を示している。

また、0 日の試験結果は条件が同じであることから、温冷水繰返し浸せき試験で行った供試体 5 の結果を参照している。

ＤおよびＥの仕様では、浸せき日数の増加と共に基板破壊の割合が増しており、徐々に接着性が増していることが伺える。

Ｈの仕様では浸せき日数の増加と共に、付着強さが低下しているが、すべて基板破壊であり、接着性に変化はないと判断できる。

以上の結果から、全ての仕様で硫酸浸せきによる接着性への影響はないと判断できる。



＊DA の仕様はプライマー①を使用していない。

図３－３４　付着強さ測定結果（供試体２：DA，DB）

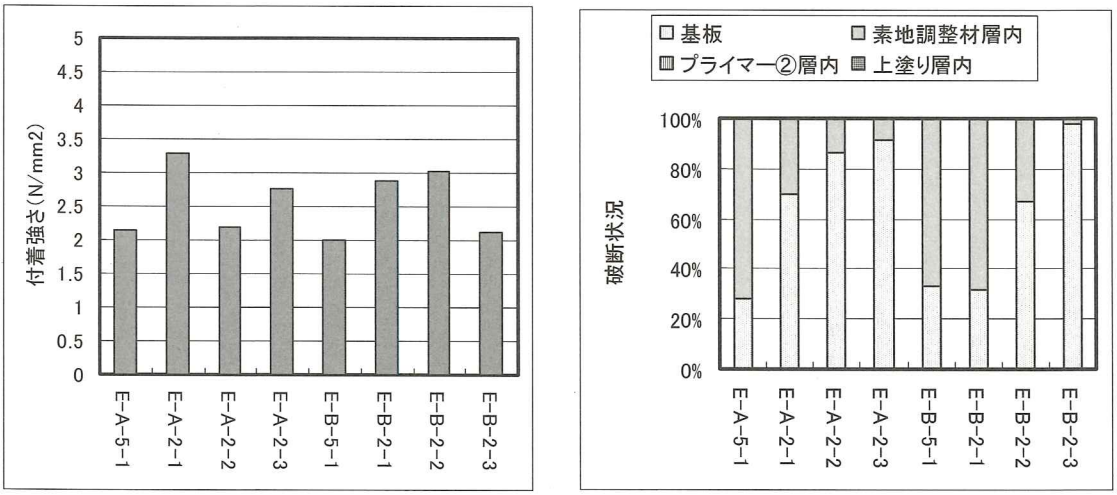
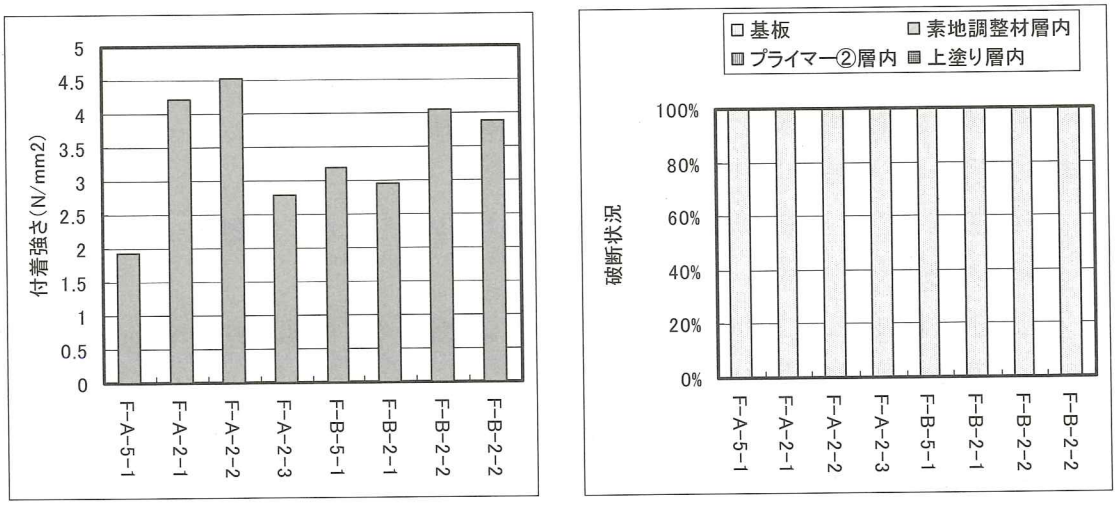
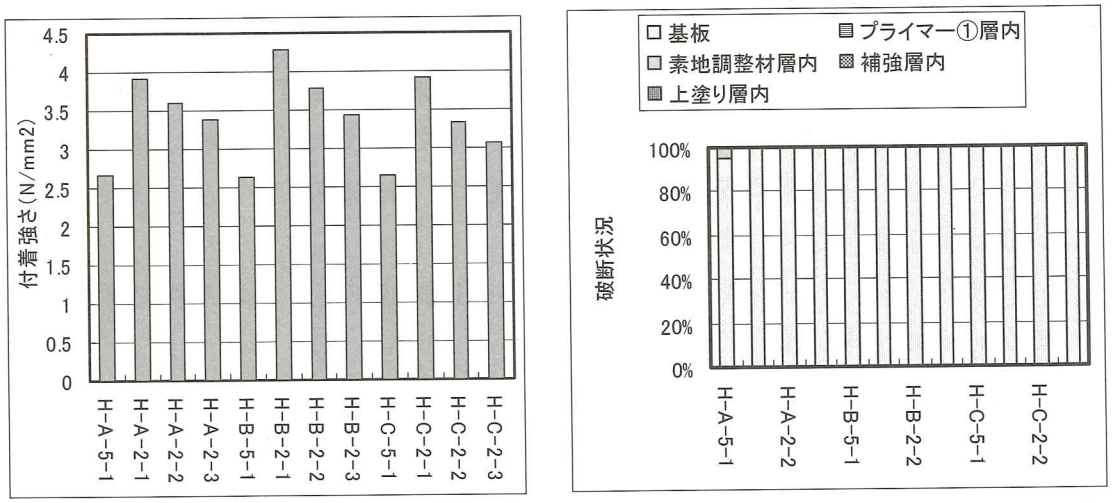


図３－３５　付着強さ測定結果（供試体２：EA，EB）



＊FA の仕様はプライマー②を使用していない。

図３－３６　付着強さ測定結果（供試体２：FA，FB）



＊HA の仕様は素地調整材を使用していない。

図３－３７　付着強さ測定結果（供試体２：HA，HB，HC）

２．５　考察

本試験では、防食被覆材の硫酸遮断性を検討すると共に、耐硫酸性として硫黄浸入による物性変化についても検討し、硫酸劣化環境下における防食被覆材の耐久性を確認した。

本試験の結果をまとめると以下の通りである。

（１）　外観観察の結果、一部の試験材料で変色が生じていた。しかし、膨れや、はがれ等の大きな変状は確認できなかった。

（２）　上塗りの種類として、ウレア樹脂系とエポキシ樹脂系の２種類に分けられる。それぞれの樹脂で、質量増加の傾向に差が生じていた。

ウレア樹脂系では、硫酸溶液濃度が高いほど質量増加量が少ない傾向が見られた。これは特に40℃の温度で浸せきした場合に顕著であった。

エポキシ樹脂系では、硫酸溶液濃度の違いでは大きな差は生じていなかった。浸せき温度が高い場合の方が若干質量増加が大きかった。

いずれの樹脂も、時間の平方根に比例して質量増加していると考えられる。

（３）　硫黄浸入は、全ての樹脂で時間の平方根に比例する関係で増加すると考えられる。硫黄浸入速度は、個々の樹脂により違っておりまた、温度、硫酸溶液濃度差による影響も違っていた。

時間の平方根を横軸に取り傾きを硫黄浸入速度係数として求めた硫黄浸入速度係数（23℃・3%）により10年後の硫黄浸入深さを推定した値は、ほぼ塗膜厚さの1/10であり、全ての上塗り材は良好な遮断性を有するといえる。

（４）　引張強度試験の結果、硫酸浸せきの影響による引張強度の低下および樹脂の軟化あるいは硬質化による伸び率の変化は確認されなかった。

（５）　引き剥がし試験の結果、120 日浸せき後に低下する傾向が見られたが、塗膜の強度は引張強度試験結果などから保持されていることから、硫黄浸入による影響はないと考えられる。

（６）　付着強度試験の結果、硫黄浸入による付着強さの低下は認められなかった。

（７）　全ての試験結果から、本試験期間内で硫酸溶液浸せきによる防食被覆の物理的な性能低下は無いと判断できる。

３．　塗布型ライニング材塗膜の付着安定性についての検討

３．１　目的

塗膜の付着強さ低下の原因として膨れの発生があげられるが、塗膜の膨れ発生要因としてコンクリート躯体からの水あるいは水蒸気の圧力が考えられる。本試験では、塗布型ライニング材により表面被覆したコンクリート供試体を、温水・水中に交互に浸せきすることにより躯体内に発生する蒸気圧により膨れ発生の再現を行い、塗膜の付着強さ保持率を測定する。

試験項目は、表３－１５に示す通りとする。

表３－１５　試験項目

要求性能	試験方法	評価項目
付着安定性	温冷水繰返し浸せき試験	・外観変化 ・引き剥がし強さ保持率 ・付着強さ保持率

３．２　試験方法

３．２．１　試験条件

温冷水繰返し浸せき試験条件を、表３－１６に示す。外観変化，引き剥がし強さ及び付着強さは、23℃と 60℃の水中に繰り返し浸せきし、0、5、10、15、及び 20 回を繰り返した後に、評価を行う。

表３－１６　温冷水繰返し浸せき試験条件

	評価項目		
	外観変化	引き剥がし強さ	付着強さ
供試体	供試体 5 及び 供試体 6	供試体 5 及び 供試体 6	供試体 5 及び 供試体 6
試験時期	0 回･5 回･10 回 15 回･20 回	0 回･5 回･10 回 15 回･20 回	0 回･5 回･10 回 15 回･20 回
23±2℃←→60±2℃ 繰り返し	●	●	●

３．２．２　試験材料

温冷水繰返し浸せき試験では、表３－１７に示した、硫酸浸せき試験に用いた材料と同じものを使用した。

３．２．３　供試体

温冷水繰返し浸せき試験で使用する供試体は、供試体５（標準状態）及び供試体６（吸水状態）の２種類とした。試験に使用した供試体数を表３－１７に示す。

表３－１７　供試体数

	供試体数
供試体５	試験時期５回×５体 合計：５体
供試体６	試験時期５回×５体 合計：５体

供試体５

300×300×60mm のコンクリート板を、養生終了後、工法仕様に基づいて型枠面を塗装した供試体。

供試体６

300×300×60mm のコンクリート板を、養生終了後 24 時間水中へ浸せきした後、工法仕様に基づいて型枠面を塗装した供試体。

供試体　５の作成方法

（１）表３－１８に規定する配合により作製された 300×300×60mm のコンクリート平板を基板として用いる。試験面は、試験基板の型枠面とする。

表－３－１８　試験用基板の配合

寸法	W/C	空気量	粗骨材最大寸法	設計基準強度
300×300×60mm	50%以下	5%以下	25mm 以下	40N/mm^2 以上

（２）試験基板の養生完了後７日間以上室内で乾燥させた後、ダイヤモンドカップサンダー（又はカップホイール）*を用いて試験面（型枠面）を研磨し（細骨材が見える程度）表面のレイタンス、汚れ等を取り除く。

（３）図３－３８に示すように、試験面の一辺に幅 30mm で被覆層がコンクリートに接着しないように、紙製のマスキングテープ等でマスキングを行う。

（４）マスキング後、工法仕様に基づきマスキング部も含めて試験面を塗装する。塗装の際、マスキングを行った辺から基板外へ 20mm はみ出すように被覆を行う。はみ出した部位は、引き剥がし試験時の引っ張りジグ取り付け部とする。

（５）被覆完了後、23℃±2℃、相対湿度 50±5%で 14 日間養生する。

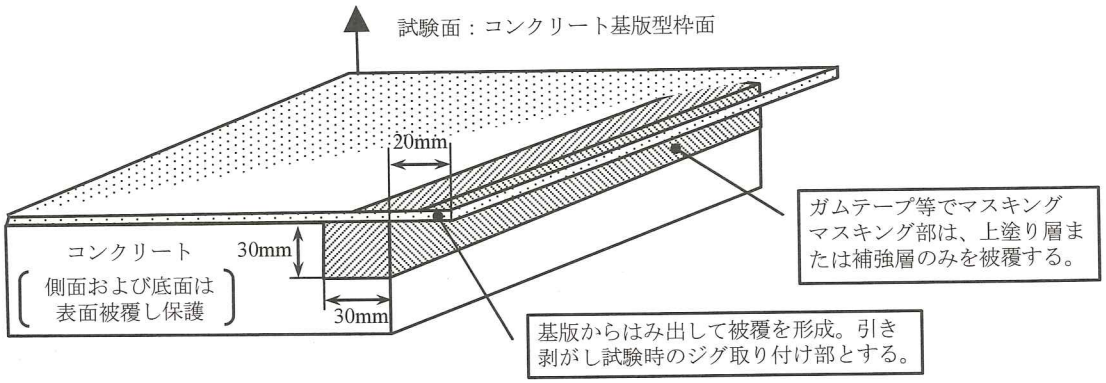
供試体　６の作成方法

（１）供試体５の（１）に規定する試験基板の養生完了後、ダイヤモンドカップサンダー（又はカップホイール）を用いて試験面（型枠面）を研磨し（細骨材が見える程度）表面のレイタンス、汚れ等を取り除いたのち、23℃±2℃の水中に 24 時間浸せきする。

（２）浸せき後表面水をふき取った基板上面を，供試体５の３）以降の手順で被覆する。

（３）被覆中は図－3.32 に示す要領で基板の半分まで浸せきし湿潤な状態を保つ。

（４）被覆完了後，23℃±2℃で半浸せきの状態で 14 日間養生する。



図－３．３８　供試体２作成概要図

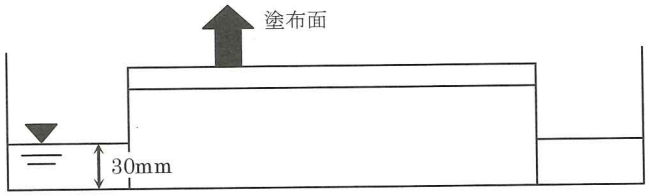


図３－３９　半浸せきの模式図

３．２．４　温冷水繰返し浸せき方法

温冷水繰返し浸せきのフローを図３－４０に示す。

温冷水繰返し浸せきは供試体養生後、23±2℃水中浸せき 24 時間と 60±2℃温水浸せき 24 時間を１回とし、所定の回数まで浸せきを繰り返す。

浸せき終了後、60℃の温水から引き上げたら直ちに外観の確認を行う。

外観観察終了後、室内に静置し 24 時間経過後に強度試験を行う。

浸せきを中断する場合には、23±2℃水中浸せきの状態で中断する。

浸せきする場合の供試体は、３－４１に示すように、供試体の側面を下にして立て、供試体同士の間隔を 30mm 以上とする。

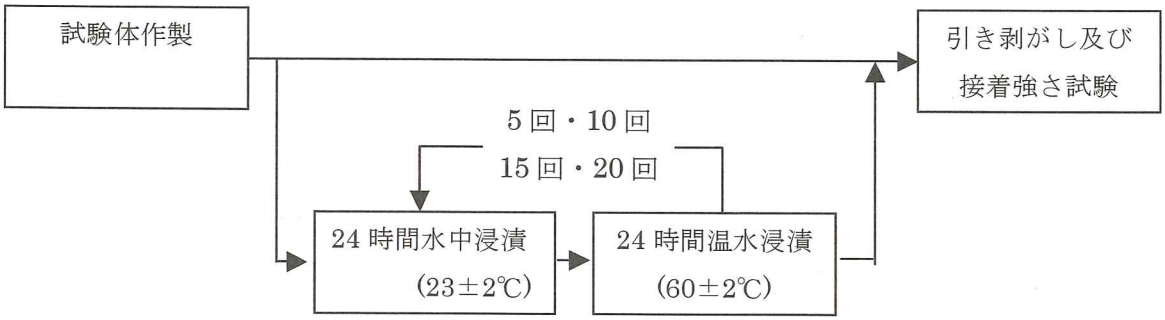


図３－４０　温冷水繰返し浸せきフロー

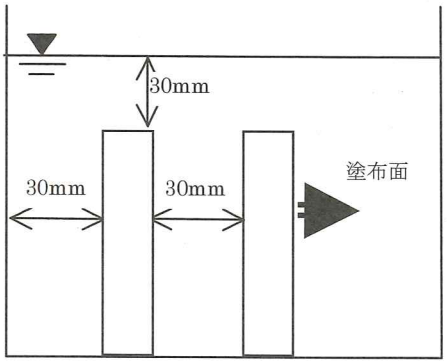


図３－４１　浸せき模式図

３．３　評価方法

３．３．１　外観観察

外観観察は、温水浸せき（60℃）引き上げ直後に行う。

外観は、膨れ、割れ、はがれに関して観察を行い、JIS K 5600-8-1～8-6 のシリーズに基づき等級に分類した。膨れの密度、大きさの等級基準を表３－１９～３－２０に、割れの等級規準を表３－２１に、また、はがれの等級規準を表３－２２に示す。

表３－１９　膨れの密度の等級規準

等級	膨れの密度
0	なし、すなわち、判別できるような欠陥がない。
1	極めてわずか、すなわち、やっと判別できる程度の変化。
2	わずか、すなわち、小さいが判別できる量の欠陥。
3	中程度、すなわち、中程度の量の欠陥。
4	重大、すなわち、著しい量の欠陥。
5	甚大、すなわち、濃密なパターンの欠陥。

表３－２０　膨れの大きさの等級規準

等級	膨れの大きさ
0	10倍に拡大しても視認できない。
1	10倍に拡大してやっと視認できる。
2	わずか、すなわち、小さいが判別できる量の欠陥。
3	正常に補正された視力でやっと視認できる。
4	0.5～5 mm
5	5 mm以上

表３－２１　割れの等級規準

等級	割れの大きさ
0	10倍に拡大しても視認できない。
1	10倍に拡大すれば視認できる。
2	正常に補正された視力でやっと視認できる。
3	正常に補正された視力で明らかに視認できる。
4	一般的に幅 1mmに達する大きな割れ。
5	一般的に幅 1mmを超える非常に大きな割れ。

表３－２２　はがれの等級規準

等級	はがれの大きさ(最大寸法)
0	10倍に拡大しても視認できない。
1	1 mmまで
2	3 mmまで
3	10 mmまで
4	30 mmまで
5	30 mm以上

３．３．２　引き剥がし試験

温冷水繰返し浸せき試験後の引き剥がし試験方法及び評価は、２．２．３項に規定した、硫酸浸せき試験での引き剥がし試験と同様に行った。

３．３．３　付着強さ試験

温冷水繰返し浸せき試験後の付着強さ試験方法及び評価は、２．２．３項に規定した、硫酸浸せき試験での接着強さ試験と同様に行った。

３．４　試験結果

３．４．１　外観観察結果

温冷水繰返し浸せき試験での外観観察結果を表３－２３～３－２６に示す。供試体5、6共に、いずれの供試体にも割れ、はがれは見られなかったが、膨れは、繰り返し回数が10回程度を超えると発生していた。膨れ内部には水が溜まっている場合と、溜まっていない場合があったことから、本試験で膨れが発生した機構として、コンクリートの孔内の空気が膨張した圧力および蒸気圧が関与していると考えられる。

膨れの密度と膨れの大きさの関係を図３－４２に示す。すべての工法に共通して、膨れ密度に関わらず膨れの大きさは同じレベルにとどまっており、膨れの密度とふくれの大きさの相関は見られない。本評価においては、膨れの密度、大きさはJIS-K 5600-8-1～8-6のシリーズに規定された塗膜の評価基準により評点をつけたが、防食塗膜では塗料塗膜に比べ塗膜の厚さと剛性が大きく、膨れが観察される大きさは膨れの大きさ評点3以上であったものと考えられる

膨れの発生に、施工条件による明確な差は見られなかった。今回試験を行った工法は湿潤面でも適用できる工法であったため，施工面の影響をあまり受けなかったことに一因があると考えられる。

表３－２３　外観観察結果（供試体５，６：ＤＡ，ＤＢ）

D-A-5	膨れ	割れ	はがれ	備考
浸漬前	0	0	0	
5回浸漬後	0	0	0	
10回浸漬後	0	0	0	
15回浸漬後	0	0	0	
20回浸漬後	0	0	0	
D-B-5	膨れ	割れ	はがれ	備考
浸漬前	0	0	0	
5回浸漬後	0	0	0	
10回浸漬後	密度 3.5 大きさ 5<	0	0	
15回浸漬後	密度 3 大きさ 5<	0	0	
20回浸漬後	密度 4 大きさ 5<	0	0	ほぼ全面膨れ

D-A-6	膨れ	割れ	はがれ	備考
浸漬前	0	0	0	
5回浸漬後	密度 1 大きさ 5	0	0	
10回浸漬後	0	0	0	
15回浸漬後	密度 2 大きさ 5	0	0	
20回浸漬後	密度 3 大きさ 5	0	0	
D-B-6	膨れ	割れ	はがれ	備考
浸漬前	0	0	0	
5回浸漬後	密度 1 大きさ 5	0	0	
10回浸漬後	密度 2 大きさ 5<	0	0	
15回浸漬後	密度 2 大きさ 5<	0	0	
20回浸漬後	密度 2 大きさ 5<	0	0	

表３－２４　外観観察結果（供試体５，６：ＥＡ，ＥＢ）

E-A-5	膨れ	割れ	はがれ	備考
浸漬前	0	0	0	
5回浸漬後	0	0	0	
10回浸漬後	0	0	0	
15回浸漬後	0	0	0	
20回浸漬後	0	0	0	
E-B-5	膨れ	割れ	はがれ	備考
浸漬前	0	0	0	
5回浸漬後	0	0	0	
10回浸漬後	0	0	0	
15回浸漬後	0	0	0	
20回浸漬後	0	0	0	

E-A-6	膨れ	割れ	はがれ	備考
浸漬前	0	0	0	
5回浸漬後	0	0	0	
10回浸漬後	0	0	0	
15回浸漬後	0	0	0	
20回浸漬後	0	0	0	
E-B-6	膨れ	割れ	はがれ	備考
浸漬前	0	0	0	
5回浸漬後	0	0	0	
10回浸漬後	0	0	0	
15回浸漬後	密度 2 大きさ 4	0	0	
20回浸漬後	0	0	0	

表３－２５　外観観察結果（供試体５，６：ＦＡ，ＦＢ）

F-A-5	膨れ	割れ	はがれ	備考
浸漬前	0	0	0	
5回浸漬後	0	0	0	
10回浸漬後	0	0	0	
15回浸漬後	密度 4 大きさ 3	0	0	
20回浸漬後	密度 4 大きさ 5<			全面膨れ
F-B-5	膨れ	割れ	はがれ	備考
浸漬前	0	0	0	
5回浸漬後	0	0	0	
10回浸漬後	0	0	0	
15回浸漬後	0	0	0	
20回浸漬後	0	0	0	

F-A-6	膨れ	割れ	はがれ	備考
浸漬前	0	0	0	
5回浸漬後	0	0	0	
10回浸漬後	密度 2 大きさ 5<	0	0	
15回浸漬後	密度 2(7ヶ) 大きさ 5<	0	0	
20回浸漬後	密度 3 大きさ 3			
F-B-6	膨れ	割れ	はがれ	備考
浸漬前	0	0	0	
5回浸漬後	0	0	0	
10回浸漬後	0	0	0	
15回浸漬後	0	0	0	
20回浸漬後	0	0	0	

表３－２６　外観観察結果（供試体５，６：HA，HB，HC）

H-A-5	膨れ	割れ	はがれ	備考
浸漬前	0	0	0	
5回浸漬後	0	0	0	
10回浸漬後	0	0	0	
15回浸漬後	密度 2 大きさ 5<	0	0	
20回浸漬後	全面 大きさ 5<			

H-B-5	膨れ	割れ	はがれ	備考
浸漬前	0	0	0	
5回浸漬後	0	0	0	
10回浸漬後	密度 3.5 大きさ 5<	0	0	
15回浸漬後	密度 4 大きさ 5<	0	0	膨れかなり大きい
20回浸漬後	全面 大きさ 5<	0	0	

H-C-5	膨れ	割れ	はがれ	備考
浸漬前	0	0	0	
5回浸漬後	0	0	0	
10回浸漬後	0	0	0	
15回浸漬後	密度 2 大きさ 5			ｴｯｼﾞ部の膨れは 密度3 大きさ5
20回浸漬後	0	0	0	

H-A-6	膨れ	割れ	はがれ	備考
浸漬前	0	0	0	
5回浸漬後	0	0	0	
10回浸漬後	密度 3.5 大きさ 5<	0	0	
15回浸漬後	密度 20% 大きさ 5<	0	0	
20回浸漬後	全面 大きさ 5<	0	0	

H-B-6	膨れ	割れ	はがれ	備考
浸漬前	0	0	0	
5回浸漬後	0	0	0	
10回浸漬後	密度 3 大きさ 5<	0	0	
15回浸漬後	ほぼ全面			膨れかなり大きい
20回浸漬後	全面 大きさ5<			膨れかなり大きい

H-C-6	膨れ	割れ	はがれ	備考
浸漬前	0	0	0	
5回浸漬後	0	0	0	
10回浸漬後	0	0	0	
15回浸漬後	0	0	0	ちぢみ22ケ
20回浸漬後	密度 4 大きさ 5	0	0	全面膨れ

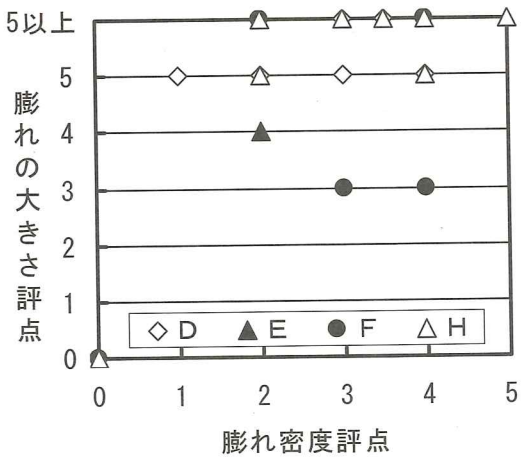


図３－４２　膨れ密度と膨れの大きさの関係

３．４．２　外観変化と付着強さの関係

温水浸せき試験後における、膨れの大きさ、密度と付着強さの関係を図３－４３、４４に示す。

供試体5、6のいずれにおいても同様の外観変化が見られた。膨れ密度が増加するとともに付着強さが上昇するものと低下するものがあり、その関係は明確ではないが、膨れの大きさ評点が5を超えると、付着強さが低下する傾向が見られる。膨れが生じている部分は付着強さが0と考えられ、これが塗膜の付着強さを低下させる要因になっているものと推測されるが、小さな膨れでは、膨れが生じていない部分の付着強さが十分に大きいため付着強さの低下として現れなかったものと考えられる。

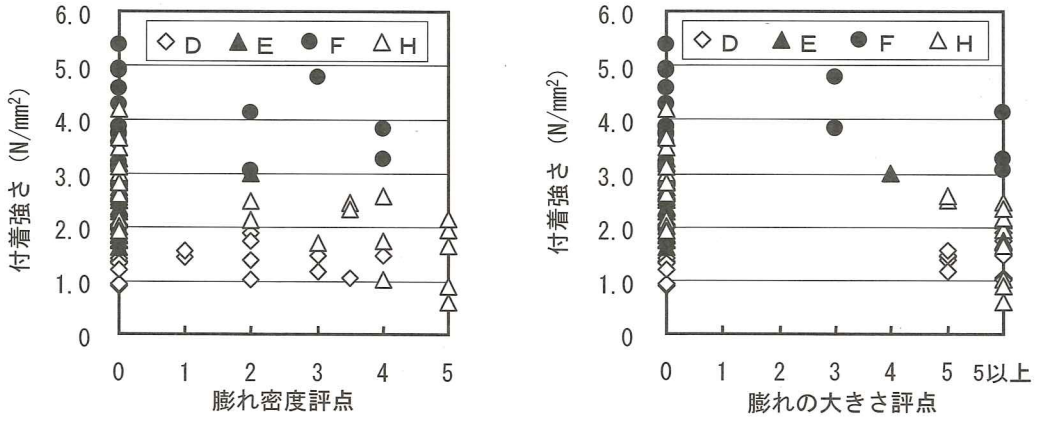


図３－４３　付着強さと膨れ密度　および　膨れの大きさの関係

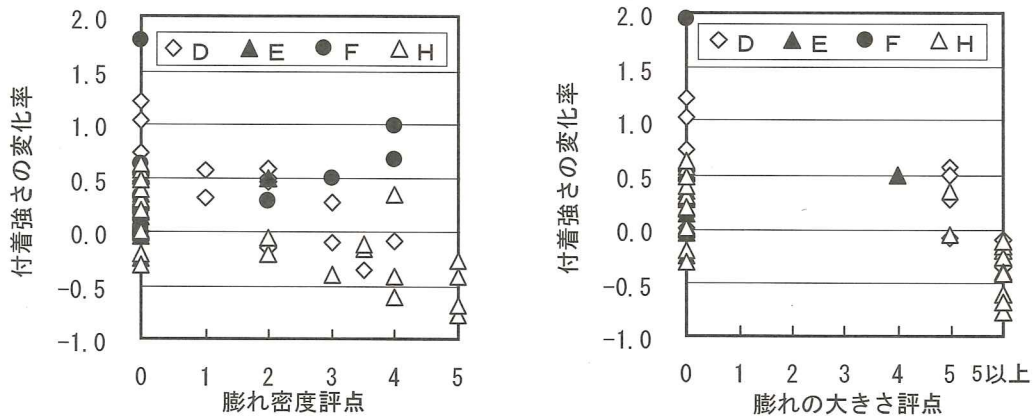


図３－４４　付着強さの保持率と膨れ密度の関係　および　膨れの大きさの関係

３．４．３　外観変化と引き剥がし荷重の関係

温冷水繰返し浸せき試験後における、引き剥がし荷重と膨れ発生状況を図３－４５、図３－４６に示す。引き剥がし荷重が10Nより低い範囲で膨れが発生しやすい傾向が見られたが、他方、10N以下においても膨れが発生していない供試体、あるいは、60N付近の引き剥がし荷重においても、膨れが発生している供試体もあり、明確な関連性は認められない。

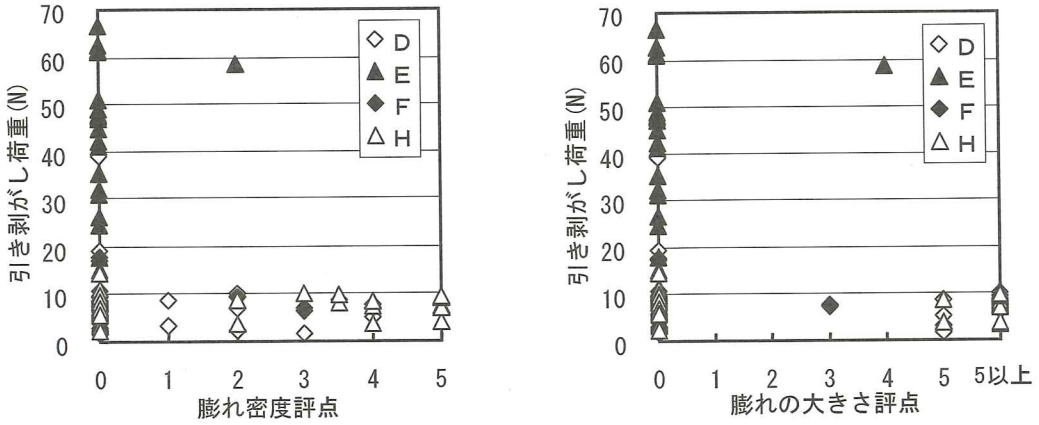


図３－４５　引き剥がし荷重と膨れ密度　および　膨れの大きさの関係

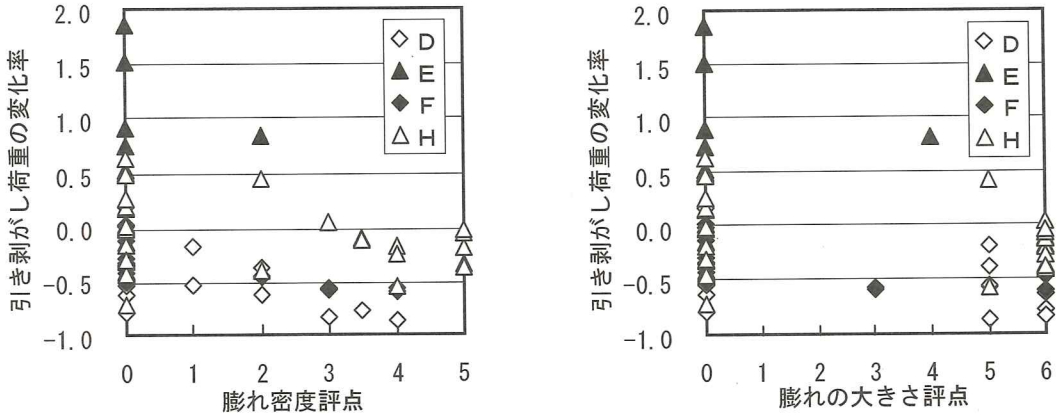


図３－４６　引き剥がし荷重の保持率と膨れ密度　および　膨れの大きさの関係

３．４．４　引き剥がし荷重と付着強さの関係

温冷水繰返し浸せき試験後における、引き剥がし荷重と付着強さ、それぞれの保持率、および、破断状態を表３－２７にまとめる。ここで、破断状態は、それぞれの試験において主に見られた破断の部位を記した。破断部位は、塗り重ねた各層の層内、界面、あるいは、２ ケ所以上が混在している状態が観察された。

付着強さ試験での破断状態では、供試体基板内の母材破壊が多く見られるのに対し、引き剥がし試験では、破断部位が分散している。このことから、引き剥がし試験の方が、塗膜の接着状態を良く再現していると考えられる。

表３－２７　引き剥がし試験、付着力試験結果

	試験条件	平均接着力 (N/mm^2)	保持率 (－)	破断部位	引き剥がし荷重 (N)	保持率 (－)	破断部位
DA-5	浸漬前	0.91	1.00	基板/素地調整	4.50	1.00	基板/素地調整
	5回浸漬後	1.85	2.03		2.98	0.66	
	10回浸漬後	1.33	1.46		1.69	0.37	
	15回浸漬後	1.40	1.54		2.07	0.46	
	20回浸漬後	1.33	1.46		2.91	0.65	
DB-5	浸漬前	1.61	1.00	プライマー層内	39.23	1.00	プライマー層内
	5回浸漬後	2.79	1.73		7.92	0.20	
	10回浸漬後	1.04	0.65		8.71	0.22	
	15回浸漬後	1.45	0.90		6.26	0.16	
	20回浸漬後	1.46	0.91		5.13	0.13	
EA-5	浸漬前	2.14	1.00	素地調整層内	17.88	1.00	素地調整層内
	5回浸漬後	3.25	1.52		26.54	1.48	
	10回浸漬後	1.60	0.75	基板	31.09	1.74	
	15回浸漬後	2.54	1.19		44.94	2.51	
	20回浸漬後	2.72	1.27		50.95	2.85	
EB-5	浸漬前	1.99	1.00	素地/基板	41.17	1.00	素地調整層内
	5回浸漬後	2.34	1.17	基板	24.59	0.60	
	10回浸漬後	3.00	1.50	基板/素地	42.23	1.03	
	15回浸漬後	2.93	1.47	基板	47.83	1.16	
	20回浸漬後	2.37	1.19		35.48	0.86	
FA-5	浸漬前	1.93	1.00	基板	17.82	1.00	上塗り
	5回浸漬後	5.37	2.78		8.63	0.48	素地調整層内
	10回浸漬後	3.14	1.62		8.89	0.50	
	15回浸漬後	3.83	1.98		7.71	0.43	
	20回浸漬後	3.24	1.68		7.19	0.40	
FB-5	浸漬前	3.20	1.00	基板	9.85	1.00	素地/上塗
	5回浸漬後	4.27	1.33		5.15	0.52	素地調整層内
	10回浸漬後	3.55	1.11		5.66	0.57	
	15回浸漬後	3.71	1.16	基板/上塗り	6.96	0.71	
	20回浸漬後	3.11	0.97		9.31	0.95	素地/界面
HA-5	浸漬前	2.67	1.00	基板	6.10	1.00	素地調整層内
	5回浸漬後	3.48	1.30	界面/基板	7.19	1.18	
	10回浸漬後	2.11	0.79	界面	4.15	0.68	
	15回浸漬後	2.12	0.80	界面	3.62	0.59	
	20回浸漬後	1.93	0.72	界面/基板	3.93	0.64	
HB-5	浸漬前	2.63	1.00	基板	11.32	1.00	基板
	5回浸漬後	4.18	1.59		11.09	0.98	基板/レジン
	10回浸漬後	2.31	0.88	界面/基板	9.92	0.88	界面
	15回浸漬後	1.01	0.38	界面	8.32	0.73	界面/基板
	20回浸漬後	0.60	0.23		7.09	0.63	パテ/基板
HC-5	浸漬前	2.65	1.00	基板	6.05	1.00	レジン界面
	5回浸漬後	3.66	1.38		7.60	1.26	プライマー界面
	10回浸漬後	3.16	1.19		9.87	1.63	
	15回浸漬後	2.49	0.94		8.66	1.43	レジン界面
	20回浸漬後	2.61	0.99		3.36	0.56	

	試験条件	平均接着力 (N/mm^2)	保持率 (－)	破断部位	引き剥がし荷重 (N)	保持率 (－)	破断部位
DA-6	浸漬前	0.91	1.00	基板/素地調整	4.06	1.00	基板/素地調整
	5回浸漬後	1.44	1.57		3.29	0.81	
	10回浸漬後	2.02	2.21		4.79	1.18	
	15回浸漬後	1.36	1.49		2.52	0.62	
	20回浸漬後	1.17	1.28		1.75	0.43	
DB-6	浸漬前	1.19	1.00	プライマー層内	19.35	1.00	基板
	5回浸漬後	1.56	1.31		8.76	0.45	
	10回浸漬後	1.88	1.58		10.21	0.53	プライマー層内
	15回浸漬後	1.74	1.46		7.05	0.36	
	20回浸漬後	1.02	0.86		7.23	0.37	
EA-6	浸漬前	1.84	1.00	素地/基板	15.15	1.00	素地調整層内
	5回浸漬後	1.81	0.99		47.08	3.11	
	10回浸漬後	2.48	1.35		61.39	4.05	
	15回浸漬後	1.74	0.95	基板	62.67	4.14	
	20回浸漬後	2.35	1.28		66.55	4.39	
EB-6	浸漬前	2.00	1.00	素地調整層内	32.11	1.00	素地調整層内
	5回浸漬後	2.28	1.14		48.12	1.50	
	10回浸漬後	2.55	1.27	基板/素地	48.91	1.52	
	15回浸漬後	2.98	1.49		58.61	1.83	
	20回浸漬後	2.58	1.29	基板	61.09	1.90	
FA-6	浸漬前	3.20	1.00	基板	17.21	1.00	上塗り
	5回浸漬後	3.08	0.96		10.85	0.63	素地調整層内
	10回浸漬後	4.12	1.28		9.44	0.55	
	15回浸漬後	3.05	0.95				
	20回浸漬後	4.77	1.49		7.18	0.42	
FB-6	浸漬前	3.73	1.00	基板/素地	8.28	1.00	素地/界面
	5回浸漬後	3.85	1.03	基板	6.54	0.79	素地調整
	10回浸漬後	4.91	1.32	基板/素地	7.23	0.87	素地/界面
	15回浸漬後	4.58	1.23	基板	7.61	0.92	素地/補強
	20回浸漬後	4.91	1.32		8.45	1.02	界面/素地
HA-6	浸漬前	2.95	1.00	基板	9.18	1.00	界面/基板
	5回浸漬後	2.01	0.68		6.37	0.69	界面
	10回浸漬後	2.45	0.83		8.19	0.89	
	15回浸漬後	1.72	0.58	基板/界面	7.48	0.81	
	20回浸漬後	2.15	0.73		7.36	0.80	プライマー
HB-6	浸漬前	2.82	1.00	基板	9.92	1.00	基板
	5回浸漬後	2.88	1.02		14.59	1.47	レジン界面
	10回浸漬後	1.70	0.60	界面/基板	10.30	1.04	プライマー
	15回浸漬後	0.89	0.32	界面/基板	9.29	0.94	レジン/基板
	20回浸漬後	1.65	0.58	基板	9.56	0.96	
HC-6	浸漬前	1.91	1.00	基板	8.44	1.00	レジン界面
	5回浸漬後	3.00	1.57		6.96	0.82	
	10回浸漬後	2.82	1.47		5.87	0.69	パテ層内
	15回浸漬後	3.12	1.63		2.43	0.29	レジン界面
	20回浸漬後	2.58	1.35		3.69	0.44	

引き剥がし荷重と付着強さの関係を図３－４７に示す。本評価結果では、測定結果は２種類のグループに分類される。図３－４７のグループ１では、引き剥がし荷重と付着強さはほぼ比例関係にあるが、グループ２では、付着強さにかかわらずあるレベルの引き剥がし荷重を示している。浸せき回数による傾向の変化は見られない。それぞれの試験における破断状態から判断し、これは、プライマー、素地調整材の組み合わせと共に、それぞれの材料の強度特性によるものと考えられる。本評価に使用したコンクリート基板の強度は、40N/mm^{2}以上と現場施工のコンクリートに比べ高強度のものであった。このような高強度の基板に対しては、基板に適応したプライマー、素地調整材、基板の表面処理方法の選定が重要であることを示しており、長期間耐久性を含めた材料、施工法の検討が必要と考えられる。

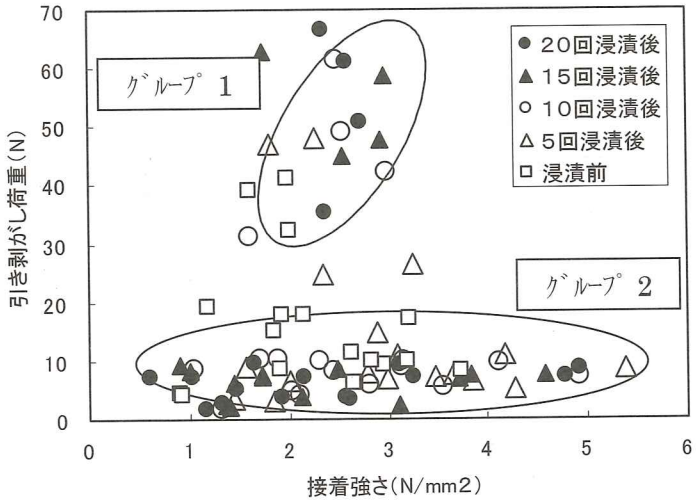


図３－４７　引き剥がし荷重と付着強さの関係

温冷水繰返し浸せき回数と引き剥がし荷重の保持率の関係を、図３－４８に示す。引き剥がし荷重の変化が極端に大きい供試体も見られるが、引き剥がし荷重の低いものでも、供試体５、６共、浸せき回数の増加に伴う荷重の低下は見られない。保持率が極端に大きなものは、引き剥がし荷重の保持率の推移、破断状態の変化から判断し、供試体間の施工条件のばらつきによるものと判断される。今回行った温冷水繰返し浸せき 20 回の評価では材料の劣化は見られておらず、より長期間の評価により材料の耐久性を評価することが望ましい。

本評価においては、供試体の数が各条件１枚であることから、引き剥がし強度の変化率は供試体間のばらつきの影響が大きいと考えられる。膨れが発生した供試体では引き剥がし荷重の低下がみられるが、引き剥がし強度が低下していても、膨れの発生が見られない供試体も多いことから，引き剥がし試験以外の評価方法を組み合わせる必要があると考えられる。

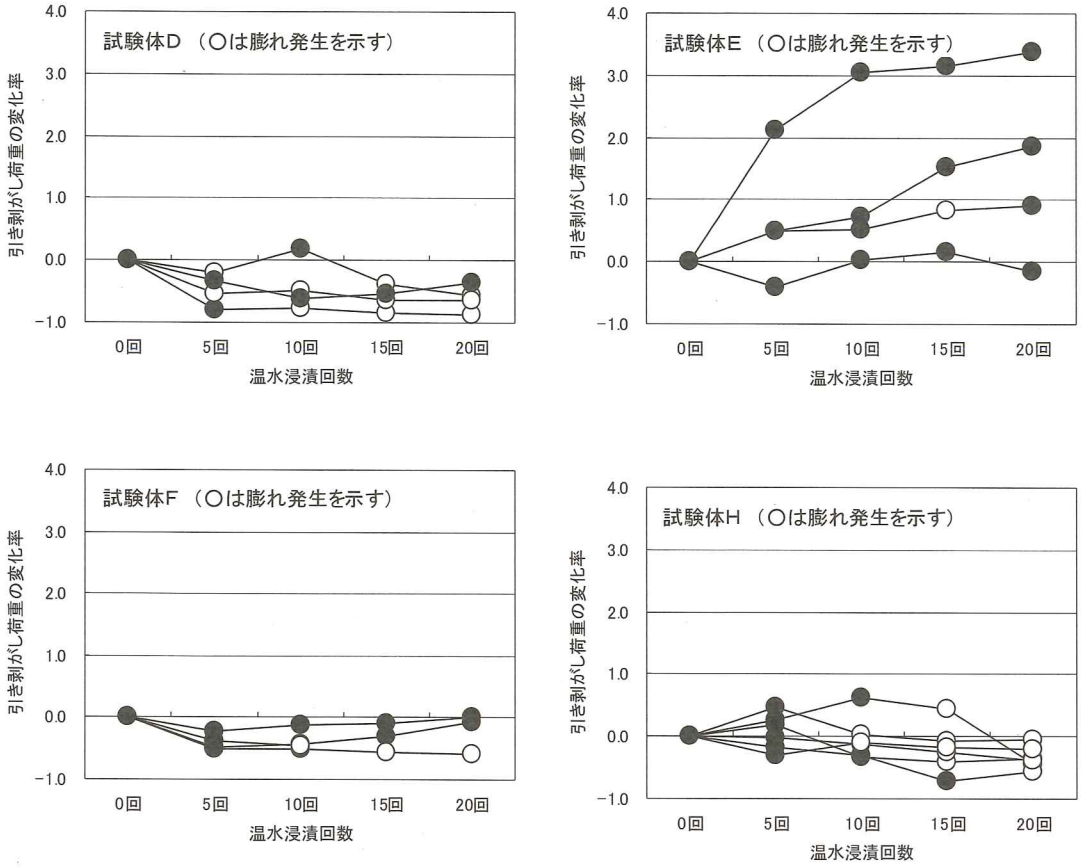


図３－４８　温冷水繰返し浸せき回数と引き剥がし荷重の保持率の関係

３．５　考察

本試験では、防食被覆材の膨れ発生の再現を行い、付着力の保持率をもとに防食被覆材の付着耐久性およびその評価方法を確認した。

本試験の結果をまとめると以下のとおりである。

（１）外観観察の結果、60℃の温冷水繰返し浸せき回数 10 回程度で、防食被覆材に膨れが発生しやすいことが確認できた。

（２）防食被覆材の付着力低下に対しては、膨れの大きさが問題となることが確認された。

（３）防食被覆材の引き剥がし荷重が、10N より低い範囲で膨れが発生しやすいことが確認された。ただし、この範囲内においても膨れが発生しないものもあり、これより高い範囲で膨れが発生するものもあることから、引き剥がし試験での破断状態の分析が必要である。

（４）防食被覆材に発生する膨れによる付着力耐久性低下の評価を行うためには、温冷水繰返し浸せき試験が有効であることが確認された。

４．まとめ

塗布型ライニング材の信頼性に関わる検討課題として、１）硫酸環境下による樹脂の物理的劣化、２）付着安定性の評価方法の２点を主な課題として検討を行ってきた。

硫酸環境下による樹脂の物理的劣化は、塗布型ライニング材の要求性能の耐環境性に関わる検討項目である。現在、耐環境性に関しては硫酸溶液に浸せきし外観変化を確認することによって評価が行われているが、硫酸浸透による物理的性能の変化は十分検討されていなかった。

本編第２章において、塗布型ライニング材塗膜の耐環境性および環境遮断性に関する検討を行った。試験では、温度および硫酸溶液濃度を変化させてライニング材への硫酸浸透の影響を確認した。

試験の結果、ライニング材の強度および伸び率など物理的な性能に変化は確認されなかった。この結果から、本試験で用いたライニング材は良好な耐環境性を有していると確認された。

また、同時に硫酸浸透速度も測定し、10 年経過後の浸透深さの推定も行った。23℃、硫酸溶液濃度 3%への浸透試験の結果から、10 年経過後の浸透深さは、ライニング材厚さの 1/10 程度と推測され、良好な環境遮断性も有することが確認された。

付着安定性は、塗布型ライニング材の信頼性に関わる重要な項目であるが、現在適用されている付着試験ではふくれとの間に明確な関係が認められていない。

本編第３章において、付着強さをより詳細に捕らえることができると考えられる引き剥がし試験により、接着性について検討を行った。

試験では、水中と温水中への浸せきを交互に繰り返す温冷水繰り返し試験により、ふくれの再現を行いふくれと引き剥がし試験の関係性を確認した。

試験の結果、温冷水繰り返しが１０回程度を越えるとふくれの発生が顕著になってきた。

温冷水繰り返し１０回がどの程度の促進環境になっているかは現時点では不明であり、第８編にまとめる現地暴露試験との関係からの検討が今後の課題として残った。

付着強さとふくれの関係を見た場合、ふくれの大きさと関連があった。付着強さはふくれていない場所の強度が十分に高い場合には差が生じにくい為、ふくれがかなり大きくなった（進行した）場合にのみ関係性が認められたと考えられる。

一方、引き剥がし試験では、引き剥がし荷重が 10N 以下でふくれが発生しやすい傾向が確認できた。ただし、この範囲内でもふくれが発生していない場合もあり、さらに詳細な検討が必要と考えられる。

防食被覆材に発生するふくれによる付着力耐久性の評価を行うためには温冷水繰り返し試験が有効であることが認められた。また、接着性評価方法として引き剥がし試験が有効と考えられるが、他の評価方法と組み合わせることにより、さらに的確な評価が行えると考えられる。

参考文献

1) 森　忠洋, 彦坂康夫, 野中資博, 古賀みな子, 野田修司, 三品文雄, 堺　好雄, 小泉淳一: 下水管生物腐食の原因と対策 (3) －腐食速度―, 下水道協会誌論文集, Vol.27, No.316, pp.137-144, 1990.
2) 日本下水道事業団: 下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術指針・同マニュアル, 2002.12
3) 社団法人日本農業集落排水協会: 農業集落排水施設のコンクリート防食設計施工の手引き（設計編・施工編）, 2002.7
4) 岩崎基恭, 上利佳弘, 藤澤健一, 石井将幸, 野中資博: コンクリート防食被覆への硫黄浸透に関する基礎的研究, 複合劣化コンクリート構造物の評価と維持管理計画に関するシンポジウム論文集, 2001.5
5) 中沢　均, 遠田和行, 山本耕三, 宇野祐一: 下水道施設コンクリートを対象とした新しい防食被覆工法の開発, コンクリート構造物のリハビリテーションに関するシンポジウム論文集, pp.93～100, 1998
6) 久保内昌敏, 仙北谷英貴, 津田　健: 耐食樹脂の腐食形態と劣化機構, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文報告集, Vol.2, 2002.10
7) 田中享二, 内田昌宏, 大森　修, 橋田　浩, 湯浅　昇: 塗り床のふくれ発生機構の一考察, 日本建築学会構造系論文集, No.488, pp.25-30, 1996.10
8) 堀江　悟, 小川　健, 小柳　洽, 宮川豊章: 凍結防止剤散布環境下で複合劣化要因による損傷を受けたコンクリートの塗装材料検討, コンクリート工学, Vol.40, No.3, pp.43-52, 2002.3
9) 橋田　浩, 田中享二, 小池迪夫: 防水層の下地コンクリートと接着力のふくれ性状屋根防水層ふくれ現象のメカニズム解明・その５, 日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）, 1991.9
10) 樅山好幸, 内田純二, 舌間貴宏, 吉田　敦: コンクリート構造物の塗装系防食材の性能評価手法の提案, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文報告集, Vol.2, 2002.10
11) 宮崎清和: 下水道施設の耐震化基本計画－地震に強い下水道システムをめざして－, 月刊下水道, Vol.28, No.7, pp.16-19, 2005.6
12) 社団法人日本コンクリート工学協会: 複合劣化コンクリート構造物の評価と維持管理計画研究委員会報告書, 2001.5

第４編　炭素繊維シートによるコンクリート補強工法の下水処理施設への適用性

１．炭素繊維シートによるコンクリート補強工法の概要

炭素繊維シート工法は、炭素繊維を一方向に引き揃えられた一方向シート（例えば、資料－１）、または炭素繊維を縦横二方向に織り込んだ二方向シートを、無溶剤エポキシ樹脂などの室温で硬化する樹脂を用いて、コンクリート表面に含浸させながら接着させて、コンクリート表面に炭素繊維のＦＲＰを形成することで、構造物を補修・補強する工法である。

工法の特長としては以下に示すとおりである。

① 施工作業のほとんどの工程が手作業で、重機を用いることなく施工が可能で、簡易な足場での作業が可能である。

② 金属材料を用いない補修・補強工法であるため、施工後は錆の発生が無く、メンテナンスが容易である。

③ 数々の実験や 10 年間以上の数千から数万に及ぶ実績によって裏打ちされた十分な補強効果がある。

施工手順は、下地処理（ケレン処理）の後、プライマー、素地調整を経て、含浸接着樹脂塗布、シート貼り付け、含浸脱泡、含浸接着樹脂塗布となる。また、必要に応じて保護塗装の仕上げを行う。標準施工断面図は資料―２のとおりである。

適用範囲は、道路橋や鉄道橋の橋脚耐震補強（資料―３）や桁、梁や床版などの補強、また、建築構造物のスラブ補強や柱の耐震補強、トンネル覆工剥落防止対策工（資料―４）など幅広い。

下水施設への適用に関しては、施工時に乾燥状態での施工が可能なように十分な養生を行うこと、接着による補強工法に十分耐えられるような下地を作ること、そして施工後に硫化水素から派生する硫酸に対する保護塗装仕上げを用いるなどの注意点はあるものの、十分適用可能で、下水施設のように狭隘箇所での補修・補強工法としては好適な工法である（上水施設への適用事例、資料―５、６）。

２．炭素繊維シートによるコンクリート補強工法の耐酸性の調査

２．１　目的

コンクリート構造物の補修・補強にあたっては、補修・補強する部位の構造体に求められる性能に応じた目標を定めて、補修・補強の方法と仕様を決定する。硫酸劣化環境下にある下水処理施設においては、劣化因子の遮断を目的とした防食被覆工法の適用による「補修」が一般的であるが、鉄筋腐食等により設計時に有していた構造性能が低下している状況であれば、構造性能の回復を図る「補強」も必要となる場合がある。従って、炭素繊維シートによる補修・補強工法を硫酸劣化環境下のコンクリート構造物に適用する場合には、補強効果と同時に補強材料の耐久性（耐酸性）も要求されることとなる。

第３編では炭素繊維シートを塗布型ライニング材とみなして塗膜の引き剥がし試験や付着試験を行い、主に塗膜の接着性の評価を行った。本編では炭素繊維シートがコンクリートとの付着性能を特に

要求される下水処理施設の床スラブや梁の曲げ補強を想定し、小型供試体を用いた曲げ強度試験によって硫酸環境下における炭素繊維シートの曲げ補強性能について検討を行った。

２．２　試験方法

アムスラー型載荷試験装置で簡易的に評価できる小型曲げ供試体を作製し、炭素繊維シートを貼付・養生後、硫酸溶液に浸せきし所定の期間を経過したものから順に曲げ強度試験に供した。

２．２．１　供試体

供試体形状は図４－１に示す様に、B（断面幅）×H（断面高さ）×L（長さ）＝50mm×40mm×250mmとした。本形状寸法は、事前検討により破壊モードが炭素繊維シートの剥離となる様に設定したものである。供試体が小型でありコンクリート調合での評価では骨材の影響が考えられたため、本検討ではモルタル調合とした。セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、モルタルの呼び強度は40N/mm^{2}とした。モルタル打設時は、炭素繊維貼付面が側枠面となる方向で打設を行った。

モルタル成形後、24時間の湿潤養生をした後に脱枠し、その後１週間の水中養生を行った。水中養生後は気中成行き養生とし、気中養生で３週間経過以降に炭素繊維シートを貼付した。貼付作業は、最初にモルタル表面をサンドペーパーを用いて研磨し、プライマー塗布、パテによる素地調整を行った後に含浸接着樹脂を用いて炭素繊維シートを供試体底面に１層貼付した。上塗り材は、補強面以外からの硫酸浸透を防止するため、供試体全面（６面）に施した。使用材料一覧を表４－１に示す。

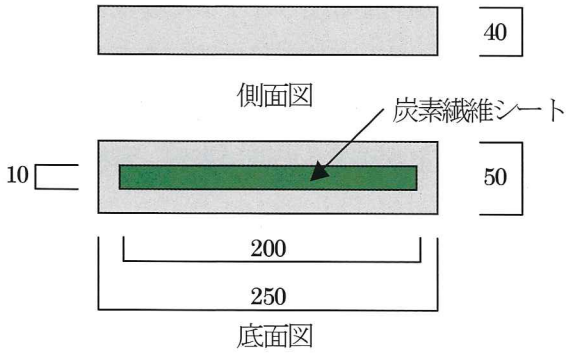


図４－１　供試体形状

表４－１　使用材料

炭素繊維シート	目付け量	200g/m^2
	引張強度	3400N/mm^2
	引張弾性率	245kN/mm^2
プライマー	無溶剤エポキシ樹脂	
素地調整材		
含浸接着樹脂		
上塗り材		

２．２．２　試験条件

硫酸溶液浸せきは溶液濃度１０％とし、４０±２℃の環境下で所定の期間行った。上塗り材の種類は３種類選択し、各試験時期でｎ＝３の供試体を準備した。供試体一覧を表４－２に示す。

表４－２　供試体一覧

供試体シリーズ	上塗り材	試験温度	硫酸濃度	浸せき期間	供試体数
HA	無溶剤エポキシ樹脂	40±2℃	10%	0日・28日・56日・120日	各3体
HB	無溶剤エポキシ樹脂				
HC	無溶剤エポキシ樹脂				

２．２．３　載荷方法

供試体の載荷方法を図４－２に示す。曲げ強度試験方法は、JIS R5201（セメントの物理試験方法）に準拠し、支持スパン220mmの中央集中載荷とした。

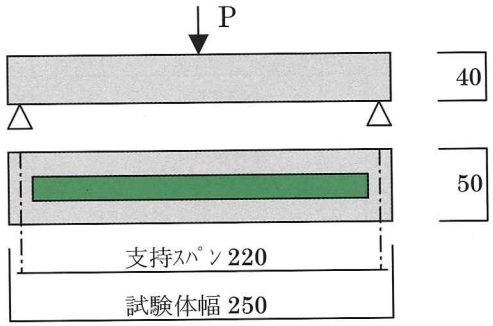


図４－２　供試体載荷方法

２．３　結果

２．３．１　外観変化

浸せき後、全体的に表面のつやがなくなる傾向にあるものの、特に目立った破損等は見られなかった。

２．３．２　破壊性状

ＨＡシリーズとＨＣシリーズの供試体については、炭素繊維の剥離によって最大耐力が決定し、ＨＢシリーズについては炭素繊維の破断によって最大耐力に至った。ＨＡシリーズに関しては供試体作製に不備があったため、５６日目以降の試験を中止している。ＨＣシリーズの剥離例を図４－３に示す。各シリーズの供試体とも浸せき時間が増加しても破壊モードが変化することはなかった。ＨＢシリーズの供試体で破壊モードが炭素繊維の破断であった理由としては、試験面（底面）以外の面を保護している樹脂モルタルの層厚が大きく、その結果供試体の断面高さが高くなり、破壊モードが変化した為と考えられる。試験結果一覧を表４－３に示す。



図４－３　供試体破壊状況例（ＨＣシリーズ）

表４－３　曲げ強度試験結果一覧

供試体シリーズ	供試体番号	浸せき日数(日)	最大耐力(N) n=3 の平均	強度保持率(%)	破壊モード
HA	HA-1,2,3	0	4538.9	100	炭素繊維シート剥離
	HA-4,5,6	28	4409.3	97	〃　剥離
	HA-7,8,9	56	—	—	(再試験中*1)
	HA-10,11,12	120	—	—	(再試験中*1)
HB	HB-1,2,3	0	9154.2*2	100	炭素繊維シート破断
	HB-4,5,6	28	10253.4*2	112	〃　破断
	HB-7,8,9	56	10169.8*2	111	〃　破断
	HB-10,11,12	120	—	—	(試験継続中)
HC	HC-1,2,3	0	3360.9	100	炭素繊維シート剥離
	HC-4,5,6	28	3367.0	100	〃　剥離
	HC-7,8,9	56	3188.3	95	〃　剥離
	HC-10,11,12	120	—	—	(試験継続中)

＊１：供試体作製不備のため、再試験中

＊２：供試体周辺保護材厚さ増加による曲げ耐力増

２．３．３　補強効果

曲げ強度保持率と浸せき日数の関係を図４－４に示す。１２０日のデータに関しては試験継続中であるが、５６日時点ではほぼ曲げ強度を維持していることが確認された。第３編　２．２より、同条件での１２０日後も硫黄浸入深さは上塗り材塗膜内と推察され、硫黄浸入による炭素繊維シート補強層劣化の可能性は低いと推察される。以上より、本補強システムは、硫酸環境下でも高いレベルで曲げ

補強効果を維持することができる工法であるといえる。

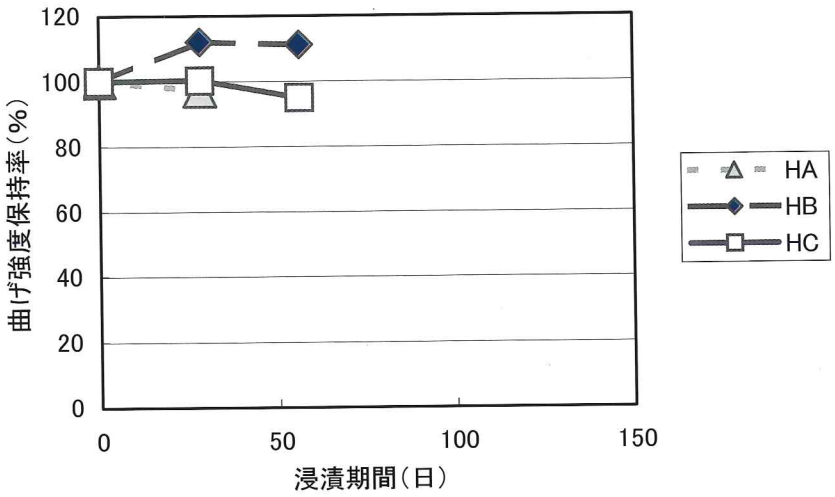


図４－４　曲げ強度保持率の経時変化

３．　まとめ

本編では、炭素繊維シート工法を下水処理施設などの硫酸劣化環境下で適用した場合の補強効果を評価する目的で小型モルタル供試体による曲げ強度試験を行った。本試験の範囲内で得られた知見を以下に記す。

（１）５６日までの浸せき期間では曲げ強度の低下は見られなかった。

（２）硫黄浸入深さ測定結果より、炭素繊維シートによる曲げ補強効果は１２０日浸せき後も維持していると推察され、本工法は硫酸環境下でも要求される補強性能を十分満足するものと思われる。

参考文献

１）コンクリート部材の補修・補強に関する共同研究報告書（Ⅲ）-炭素繊維接着工法による道路橋コンクリート部材の補修・補強に関する設計・施工指針　平成 11 年 12

第５編　ＦＲＰ引抜成形材を用いた新しいシートライニング材の下水処理施設への適用性

１．　目的と概要

下水処理施設において、硫化水素に起因するコンクリートの腐食が発生し、補修を必要とする事例が増えてきている。下水処理施設のコンクリート補修は、腐食環境によって要求性能は異なるが、コンクリートとの固着性、耐食性、施工性、コストなどの点で改善が望まれている。

上記課題の解決を図るために、本グループでは、ＦＲＰ引抜成形材を用いた新しいシートライニング材（以下、ＦＲＰパネルと称す）とそれに対応する施工技術の開発を行い、防食被覆工法としての適用性を検証することとした。

本章では、開発を行ったＦＲＰ引抜成形材を用いたシートラインニング工法（以下、ＦＲＰ防食パネル工法と称す）について、基本性能として固着性、透水性、硫黄浸入深さ、耐薬品性の評価を、施工性能として施工手順、充填性の検討を実施した。

開発したＦＲＰパネルの外観を図５－１に、形状を図５－２に示す。ＦＲＰパネルの形状は、長さ2,700×幅600×厚さ5mmで、幅600mmに4本の15度傾斜したＬ型アンカーを配置している。このＬ型アンカーを傾斜させることによって、ＦＲＰパネルの設置方向は縦または横のどちらにも可能となっている。

ＦＲＰパネルの基材構成は、図５－３に示すように、Ｅガラスコンティニアスストランドマットを外周材としてその中にＥガラスロービングを配置したもので、樹脂としては、含ブロモビスフェノールＡ型エポキシアクリレート（ビニルエステル：VE 樹脂）とビスフェノールＡ型ポリエステル（不飽和ポリエステル：UP 樹脂）の２種類を用いている。

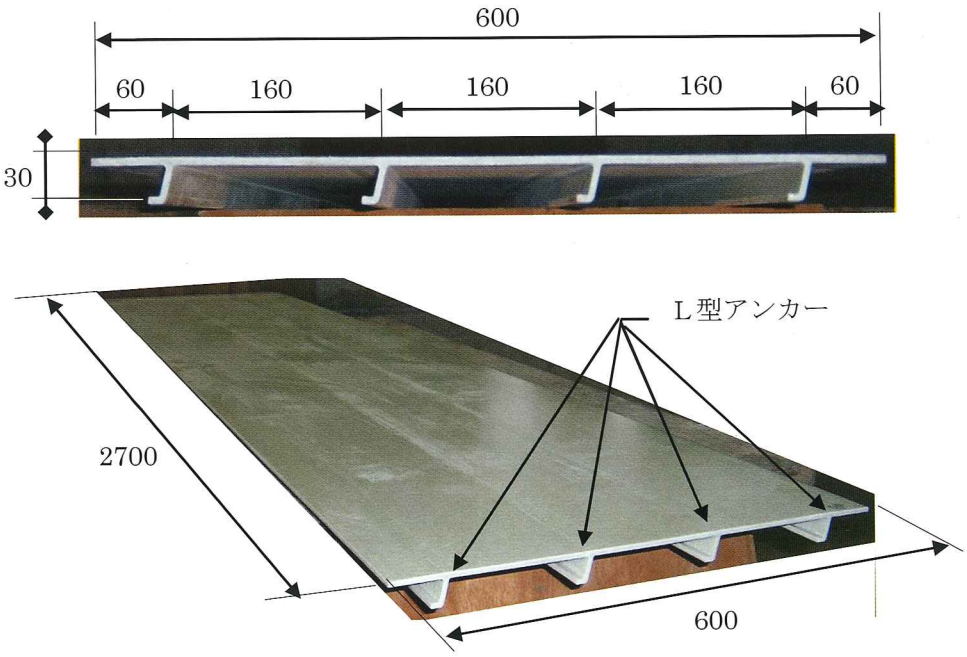


図5−1　ＦＲＰパネルの外観

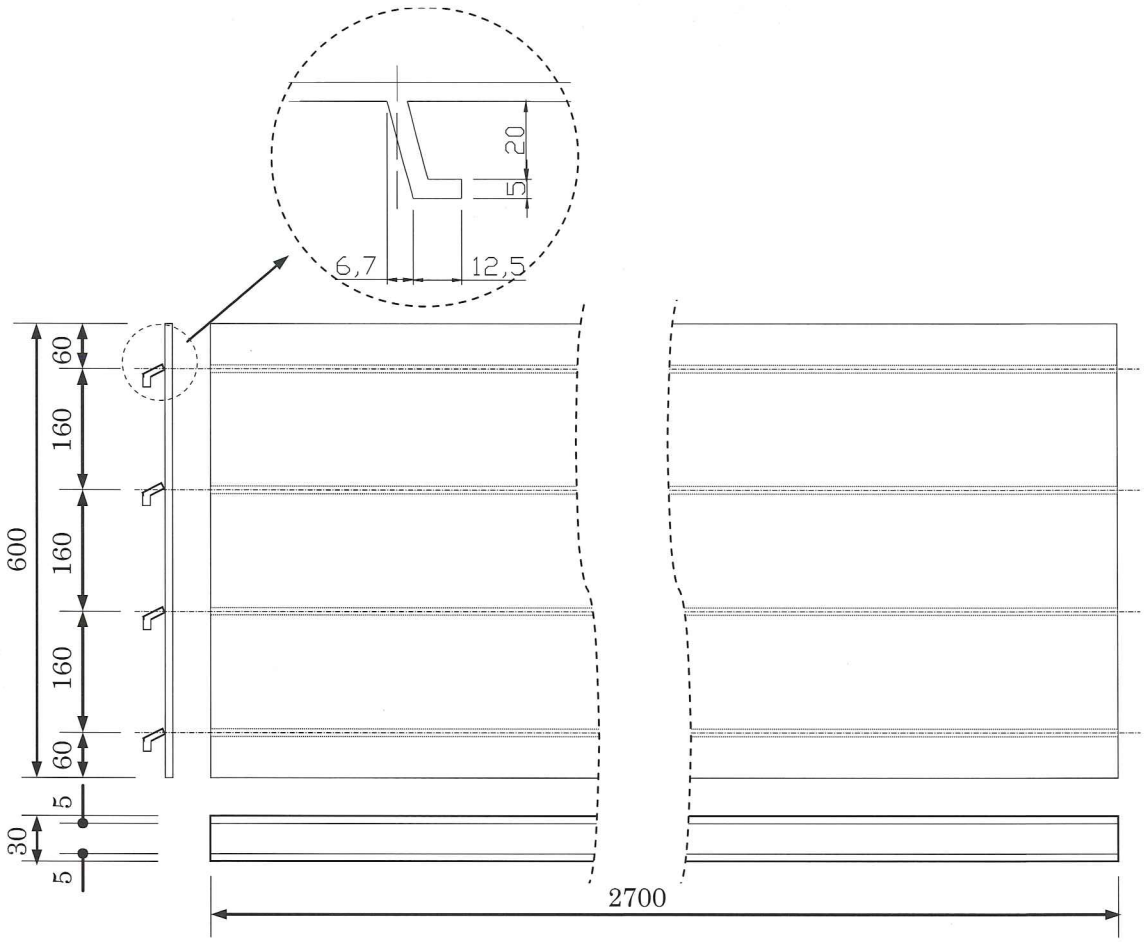


図５－２　ＦＲＰパネルの形状

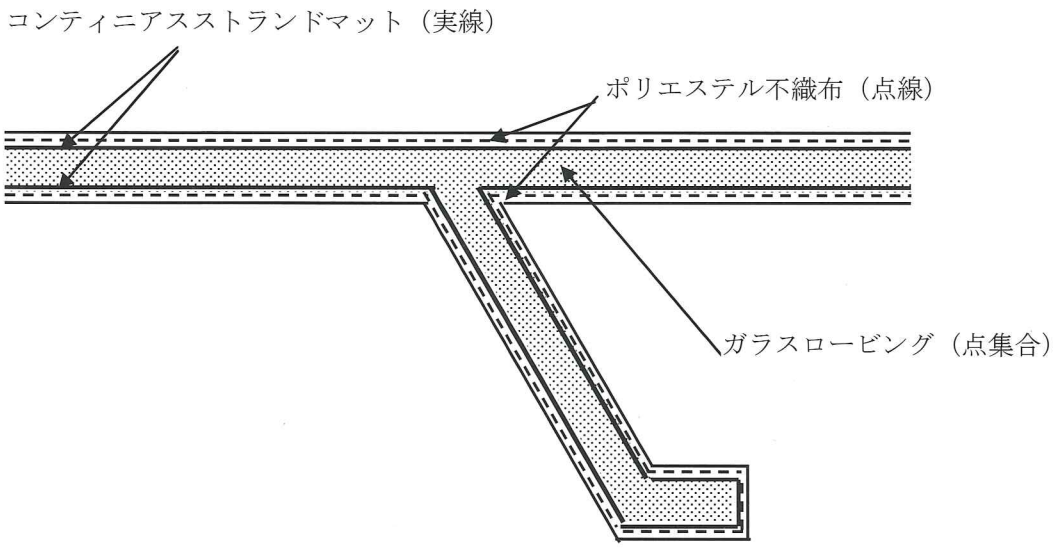


図５－３　ＦＲＰパネルの基材構成

２．　ＦＲＰ引抜成形材の基本性能に関する検討

２．１　目的

開発したＦＲＰパネルについて、下水処理施設への補修材料としての適用性を検証するために、基本性能試験を行う。

２．２　方法

２．２．１　概要

下水処理施設の防食被覆工法として求められるＦＲＰパネルの要求性能は、

① コンクリート構造物との一体性

② 劣化因子の遮断性

③ 防食被覆層の耐硫酸性・耐久性

である。

ＦＲＰパネルの基本性能を把握するために、基本性能試験として、表５－１に示す固着試験、透水試験、硫黄浸入深さ試験および耐薬品試験を実施する。

なお、同表中に示す薬品浸せき条件は、以下の通りである。

- 耐酸性Ａ：3%硫酸水溶液で、温度が40℃の浸せき試験
- 耐酸性Ｂ：10%硫酸水溶液で、温度が23℃の浸せき試験
- 耐アルカリ性Ａ：飽和水酸化カルシウム水溶液で、温度が40℃の浸せき試験
- 耐アルカリ性Ｂ：飽和水酸化カルシウム水溶液で、温度が23℃の浸せき試験
- 耐アルカリ性Ｃ：飽和水酸化カルシウム水溶液で、温度が23℃で、砂の上に供試体を置き、供試体上面が浸せき液面より５mmでる浸せき試験

表５－１　ＦＲＰパネルの基本性能試験一覧

試験名	供試体				薬品浸せき条件	試験項目
	供試体名	樹脂	部位	形状 (単位:mm)		
固着試験	VE-KO-1～3	VE	シート部	モルタル 100×100×50 ＦＲＰ 40×40 Lアンカー	薬品浸せきなし	固着強さ
	VE-KO-4～6				耐ｱﾙｶﾘ性 C60 日	
	UP-KO-1～3	UP			薬品浸せきなし	
	UP-KO-4～6				耐ｱﾙｶﾘ性 C60 日	
透水試験	VE-TO-1～3	VE	シート部	モルタル 150×150×35 ＦＲＰ 150×150×5 5 面被覆	薬品浸せきなし、 耐酸性 A60 日浸せき	透水量
	VE-TO-1J～3J		目地部			
	VE-TO-4～6		シート部		薬品浸せきなし、 耐ｱﾙｶﾘ性 B60 日浸せき	
	VE-TO-4J～6J		目地部			
	UP-TO-1～3	UP	シート部		薬品浸せきなし、 耐酸性 A60 日浸せき	
	UP-TO-4～6				薬品浸せきなし、 耐ｱﾙｶﾘ性 A60 日浸せき	
硫黄 浸入深さ 試験	VE-IO-1	VE	シート部	ＦＲＰ 100×150×5 5 面被覆	耐酸性 A60 日,120 日浸せき	EPMA 分析 硫黄 浸入深さ
	VE-IO-1J		目地部			
	VE-IO-2		シート部		耐酸性 B60 日,120 日浸せき	
	VE-IO-2J		目地部			
	UP-IO-1	UP	シート部		耐酸性 A60 日,120 日浸せき	
	UP-IO-1J		目地部			
	UP-IO-2		シート部		耐酸性 B60 日,120 日浸せき	
	UP-IO-2J		目地部			
耐薬品 試験	VE-YA-2	VE	シート部	ＦＲＰ 130×60×5 4 面被覆	薬品浸せきなし(比較用供試	外観検査 重量変化 厚さ変化 硬さ変化 曲げ変化
	VE-YA-3～6				耐酸性 A30～240 日浸せき	
	VE-YA-7～10				耐酸性 B30～240 日浸せき	
	VE-YA-11～14				耐ｱﾙｶﾘ性 A30～240 日浸せ	
	VE-YA-15～18				耐ｱﾙｶﾘ性 B30～240 日浸せ	
	UP-YA-2	UP			薬品浸せきなし(比較用供試	
	UP-YA-3～6				耐酸性 A30～240 日浸せき	
	UP-YA-7～10				耐酸性 B30～240 日浸せき	
	UP-YA-11～14				耐ｱﾙｶﾘ性 A30～240 日浸せ	
	UP-YA-15～18				耐ｱﾙｶﾘ性 B30～240 日浸せ	

２．２．２　固着試験

固着試験は、ＦＲＰパネルと充填モルタルあるいはコンクリートとの一体性を検証するための試験である。

２．２．２．１　試験手順

① 内のり寸法 100×100×50mm の型枠を作製する。なお、型枠の底は、ＦＲＰパネルと同じ厚さのもので作製し、中央部に 40×40mm の大きさで穴をあける。

② 型枠の底中央部に空けた穴に、40×40mm の大きさに切断したＬ型アンカー付ＦＲＰパネルを設置する。

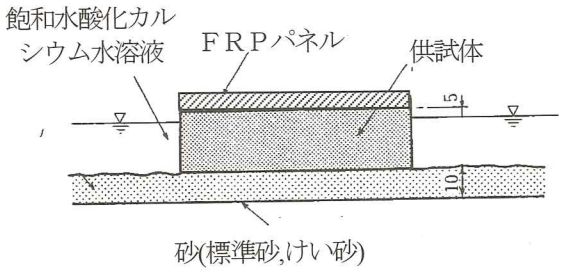
③ JIS R 5201 の 10.4 項に準拠した水セメント比 50%、砂セメント比 3 のモルタルあるいは充填用モルタルを作製し、型枠内に投入し成形する。

④ 温度 20±2℃で、湿布（養生シート）で覆い、2 日間の養生後脱型する。

⑤ 更に、温度 20±2℃、湿度 80%以上で 5 日間養生する。

⑥-A 薬品浸せきなしの供試体は、恒温恒湿（温度 23±2℃、湿度 50±5%）で 6 日間静置する。

⑥-B 耐アルカリ性Ｃ試験の供試体は、JSCE-K 531-1999 に準拠し、飽和水酸化カルシウム水溶液槽内の砂の上に供試体を水平に置き、供試体の上面が液面から約 5 mm の位置に現れるようにし、60 日間放置する。



⑦ 耐アルカリ性Ｃ試験の浸せきが終了後、ＦＲＰパネルに引張用鋼製アタッチメントを接着し 24 時間静置後、固着試験を行う。

２．２．２．２　試験方法

固着試験は、建研式接着力試験器を用いて、JIS A 6021 の 6.9 項に準じて行う。

２．２．２．３　計算

固着強さは次式によって算出する。

なお、固着強さは、同一条件で実施した 3 供試体の平均値とする。

固着強さ（N/mm^2）＝ 最大引張荷重 (N)／（40（mm）×Ｌ型アンカー間隔（mm））

２．２．３　透水試験

透水試験は、ＦＲＰパネルおよびＦＲＰパネル目地部での劣化因子の遮断性を検証するための試験である。

２．２．３．１　試験手順

① 内のり寸法φ150×40mm あるいは 150×150×40mm の型枠の底に、φ150mm あるいは 150×150mm のシート部または接合部ＦＲＰパネルを設置する。

② JIS R 5201 の 10.4 項に準拠した水セメント比 50%、砂セメント比 3 のモルタルあるいは充填用モルタルを作製し、型枠内に投入・成形する。

③ 温度 20±2℃で、湿布（養生シート）で覆い、2 日間の養生後、脱型する。

④ 更に、温度 20±2℃、湿度 80%以上で 5 日間養生する。

⑤ 恒温恒湿（温度 20±2℃、湿度 50±5%）で 14 日間養生する。なお、目地部供試体は、本養生期間中に接合部のコーキングを行う。

⑥ 養生後、5 周面を耐薬品性に優れた樹脂で被覆し、浸せき前の透水試験を実施する。

⑦ 薬品浸せきは、下記の耐酸性Ａ試験と耐アルカリ性Ｂ試験を実施する。

・耐酸性Ａ試験は、3%硫酸水溶液、温度 40℃で 60 日間浸せきする。

・耐アルカリ性Ｂ試験は、飽和水酸化カルシウム水溶液、温度 23℃で 60 日間浸せきする。

⑧ 耐酸性Ａ試験と耐アルカリ性Ｂ試験の浸せきが終了後、透水試験を実施する。

２．２．３．２　試験方法

透水試験は JIS A 1404 の 11.5 項に準じて行うものとする。なお、試験条件は、0.29MPa の水圧を 1 時間かけるものとする。

２．２．３．３　試験方法

透水量は次式より求める。

なお、透水量は、同一条件で実施した 3 供試体の平均値とする。

透水量（g）　＝　W2－W1

W1：　試験前の質量

W2：　試験直後の質量

２．２．４　硫黄浸入深さ試験

硫黄浸入深さ試験は、ＦＲＰパネルおよびＦＲＰパネル目地部での劣化因子の遮断性を検証するための試験である。

２．２．４．１　試験手順

①-A 100×100 mm のシート部ＦＲＰパネルを切出す。

①-B 100×100 mm の目地部ＦＲＰパネルを作製する。

② 目地部供試体は接合部のコーキングを行う

③ ＦＲＰパネル表面以外の 5 周面を耐薬品性に優れた樹脂で被覆する。

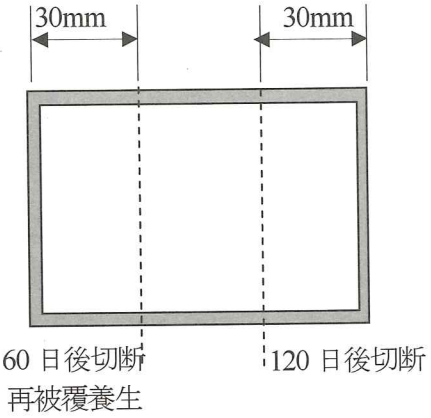
④ 薬品浸せきは、下記の耐酸性Ａ試験と耐酸性Ｂ試験を実施する。

・耐酸性 A 試験は、3%硫酸水溶液、温度 40℃で 120 日間まで浸せきさせる。
・耐酸性 B 試験は、10%硫酸水溶液、温度 23℃で 120 日間まで浸せきさせる。

⑤ 耐酸性 A 試験と耐酸性 B 試験の浸せきが終了後、EPMA による硫黄元素の分析を実施する。

2．2．4．2　試験方法

① 浸せき日数 60 日に供試体を取り出し、端部から約 30 mm 位置を切断する。
② 切断面について、EPMA による硫黄元素のマッピングを行う。
③ 切断した他方の供試体の切断面を耐薬品性に優れた樹脂で被覆し、再度浸せきさせる。
④ 浸せき日数 120 日に供試体を取り出し、端部から約 30 mm 位置を切断する。
⑤ 切断面について、EPMA による硫黄元素のマッピングを行う。



2．2．4．3　計算

EPMA による硫黄元素のマッピングから、硫黄の浸入深さを測定する。

2．2．5　耐薬品試験

耐薬品試験は、ＦＲＰパネルおよびＦＲＰパネル目地部での劣化因子に対する長期耐久性を検証するための試験である。

2．2．5．1　試験手順

① 大きさ 130×100 mm のＦＲＰパネルを切り出す。ただし、130 mm の方向が引抜方向である。
② ＦＲＰパネルの 4 周面を耐薬品性に優れた樹脂で被覆する。
③ 薬品浸せきは、下記の耐酸性 A 試験、耐酸性 B 試験、耐アルカリ性 A 試験、耐アルカリ性 B 試験の 4 ケースについて行う。なお、供試体は 1 ケースに 4 枚浸せきさせる。
・耐酸性 A 試験は、3%硫酸水溶液、温度 40℃で 120 日間まで浸せきさせる。
・耐酸性 B 試験は、10%硫酸水溶液、温度 23℃で 120 日間まで浸せきさせる。
・耐アルカリ性 A 試験は、飽和水酸化カルシウム水溶液、温度 40℃で 120 日間まで浸せきさせる。
・耐アルカリ性 B 試験は、飽和水酸化カルシウム水溶液、温度 23℃で 120 日間まで浸せきさせる。
④ 浸せき開始後、30 日、60 日、120 日に供試体を取り出し、質量・厚さ測定用供試体で外観検査と質量および厚さ測定を行い、残り 3 枚の曲げ試験用供試体で、30 日、60 日、120 日浸せき後

の硬さ試験と曲げ試験を実施する。

２．２．５．２　試験方法

1) 外観検査

外観検査は、質量・厚さ測定用供試体を、浸せき日数30、60、120日毎に取り出し、表面を流水で洗浄後、清浄な布等で拭きとり、表５－２の項目について目視観察を行う。

表５－２　ＦＲＰパネルの外観検査項目

番　号	検 査 項 目
1	ひび割れの有無
2	スケーリング･ハガレの有無
3	フクレ
4	析出物の有無

2) 質量および厚さ変化

質量および厚さ変化は、質量・厚さ測定用供試体の質量と厚さを測定し、浸せき前後の変化率を求めることによって評価する。

質量および厚さ測定は、質量・厚さ測定用供試体を、浸せき日数 30、60、120 日毎に取り出し、表面を流水で洗浄後、清浄な布等で拭きとり、JIS K 7070 に準じて試験を実施する。

① 質量・厚さ測定用供試体の質量を量り、質量変化率を求める。質量の測定は 0.001g まで正確に示す感度の秤を用いる。

② 質量・厚さ測定用供試体の厚さを測定し、厚さの変化率を求める。厚さの測定は0.01mm まで正確に測定できるマイクロメーターで６測点以上行い、その平均値とする。

3) 硬さ変化

硬さ変化は、曲げ試験用供試体でバーコル硬さを測定し、浸せき後の保持率を求めることによって評価する。

バーコル硬さは、曲げ試験用供試体を浸せき日数30、60、120日に取り出し、JIS K 7060 に準じてバーコル硬さ試験から求める。

4) 曲げ変化

曲げ変化は、曲げ試験用供試体を用いて曲げ試験から曲げ弾性率および曲げ強さを測定し、浸せき後の保持率を求めることによって評価する。

バーコル硬さ試験終了後の曲げ試験用供試体を、長さ 100×幅 15mmの短冊形状に切断し、3 本の曲げ供試体を作製する。曲げ試験は、JIS K 7070 およびJIS K 7055 に準じて実施し、曲げ弾性率および曲げ強さを求める。

２．２．５．３　計算

1) 質量変化率は次式より求める。

質量変化率（%）＝　(W2－W1)/W1

W1：浸せき前の質量

W2：浸せき後の質量

2) 厚さ変化率は次式より求める。

厚さ変化率（%）＝　(t2－t1)/t1

t1：浸せき前の厚さ

t2：浸せき後の厚さ

3) 硬さの保持率は次式より求める。

硬さ保持率（%）＝　x2/x1

x1：浸せき前のバーコル硬さ

x2：浸せき後のバーコル硬さ

4) 曲げ弾性率と曲げ強さの保持率は次式より求める。

曲げ弾性率保持率（%）＝　K2/K1

曲げ強さ保持率（%）＝　M2/M1

K1：浸せき前の曲げ弾性率

K2：浸せき後の曲げ弾性率

M1：浸せき前の曲げ強さ

M2：浸せき後の曲げ強さ

曲げ弾性率 $(N/mm^2) = \{L^3/(4\cdot b\cdot h^3)\}\cdot(P_4/\delta_4)$

曲げ強さ $(N/mm^2) = 3\cdot P\cdot L/(2\cdot b\cdot h^2)\cdot\{1+4(\delta/L)^2\}$

L：支間距離 (80 mm)

P：最大荷重 (N)

B：供試体幅 (mm)

h：供試体厚さ (mm)

δ：たわみ（80 mm 以下なら 0 mm とする）

δ_4：4 mm たわみ

P_4：δ_4時の荷重 (N)

２．３　結果

２．３．１　固着試験結果

浸せきによる固着強さの変化を図５－４に示す。また、固着試験によるＦＲＰパネルの破断面の一例を図５－５に示す。

ＦＲＰパネル（VE 樹脂：供試体 VE-KO-1～VE-KO-6）の固着試験結果は、浸せき前で 0.51～0.60 N/mm^2（平均 0.56 N/mm^2）、耐アルカリ性Ｃ試験の 60 日浸せき後で 0.58～0.58N/mm^2（平均 0.58 N/mm^2）であった。これより、アルカリ浸せきによるＦＲＰパネル（VE 樹脂）の固着強さの変化率は４％と小さいことがわかる。また、試験によるＦＲＰパネル（VE 樹脂）の破断面は、コンティニアスストランドマット層とガラスロービング層の界面であった（図５－３参照）。

一方、ＦＲＰパネル（UP 樹脂：供試体 UP-KO-1～UP-KO-6）の固着試験結果は、浸せき前で 0.59～0.62 N/mm^2（平均 0.60 N/mm^2）、耐アルカリ性Ｃ試験の 60 日浸せき後で 0.55～0.60 N/mm^2（平均 0.58 N/mm^2）であった。これより、アルカリ浸せきによるＦＲＰパネル（ＵＰ樹脂）の固着強さの変化率は-3%と小さいことがわかる。また、破断面はＦＲＰパネル（VE 樹脂）の試験結果と同じ位置であった。

これらより、ＦＲＰパネルの固着強さは 0.56～0.60N/mm^2 で、日本下水道事業団「下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術指針・マニュアル」の規格値”0.24N/mm^2 以上”を確保している。また、浸せき前後において、固着強さに変化がほとんど見られないこと、供試体破断面の状況がほぼ同じであることから、ＦＲＰパネルの固着性能は、充填したモルタルあるいはコンクリートのアルカリによって影響を受けないと考えられる。

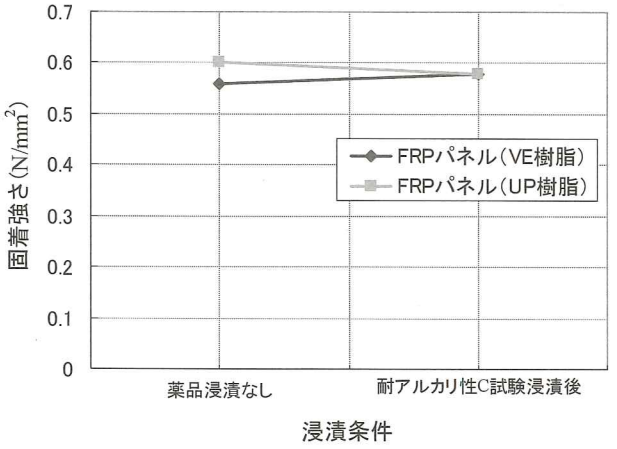


図５－４　浸漬による固着強さの変化

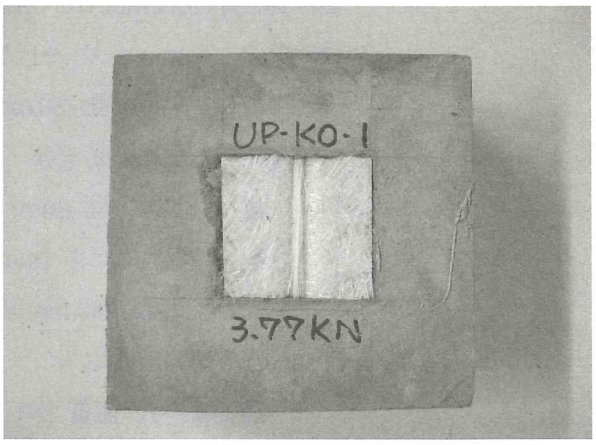


図５－５　固着試験によるＦＲＰパネルの破断面

２．３．３　硫黄浸入深さ試験結果

60 日および 120 日の浸せきが経過した供試体について、供試体の端面から 30mm の位置で切断し、切断面について EPMA による硫黄元素のマッピングを行った。なお、60 日後に取り出した供試体については、EPMA 試料採取後、切断面を耐薬品性に優れた樹脂で被覆養生して、120 日まで再浸せきした（２．２．４．２項参照）。

EPMA による分析から得られた硫黄浸入深さの測定結果を表５－３に、SEM 画像と硫黄元素のマッピング結果の一例を図５－６～図５－８に示す。

シート部供試体は、ＦＲＰパネルの樹脂種類や浸せき条件にかかわらず全ての供試体で硫黄浸入深さは 0.0μｍで、ＦＲＰパネル表面からの硫黄浸入は認められなかった。

目地部の供試体体は、ＦＲＰパネル（VE 樹脂）の場合、耐酸性Ｂ試験の 60 日浸せきのみで 90μｍ程度の硫黄の浸入が見られたが、他の供試体では硫黄の浸入が見られなかった。ＦＲＰパネル（UP 樹脂）の場合、耐酸性Ａ試験では硫黄の浸入が 120 日まで見られなかったが、耐酸性Ｂ試験では 60 日で 1000μｍ程度、120 日で 500μｍ程度と、ＦＲＰパネル厚さの 10%以上の硫黄の浸入が見られた。

目地部への硫黄の浸入の原因は、目地部のコーキングの施工時に不備があったと考えられる。90μｍ程度の硫黄浸入深さは、日本下水道事業団「下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術指針・同マニュアル」における目地部の規格値”100μｍ 以下”を満足しているので問題ないと判断した。しかし、1000μｍ程度の硫黄浸入深さは規格値を超過している。これについては、目地部の施工を２度のコーキングを行う方法に改良し、現在再試験中である。

表５－３　硫黄浸入深さ試験結果

供試体名	樹脂	部位	浸せき条件	硫黄浸入深さ試験結果
VE-IO-1	VE	シート部	耐酸性 A60 日浸せき	0.0 μｍ
			耐酸性 A120 日浸せき	0.0 μｍ
VE-IO-1J		目地部	耐酸性 A60 日浸せき	0.0 μｍ
			耐酸性 A120 日浸せき	0.0 μｍ
VE-IO-2		シート部	耐酸性 B60 日浸せき	0.0 μｍ
			耐酸性 B120 日浸せき	0.0 μｍ
VE-IO-2J		目地部	耐酸性 B60 日浸せき	90 μｍ程度硫黄元素が浸入
			耐酸性 B120 日浸せき	0.0 μｍ
UP-IO-1	UP	シート部	耐酸性 A60 日浸せき	0.0 μｍ

２．３．２　透水試験結果

シート部のＦＲＰパネル（VE 樹脂）の透水量は、耐酸性Ａ試験が浸せき前後で 0.06g から-0.01g となった。ＦＲＰパネル（UP 樹脂）の透水量は、耐酸性Ａ試験が浸せき前後で 0.25g から 0.05g に、耐アルカリ性Ｂ試験が 0.42g から-0.08g となった。

シート部の浸せき前の透水量は、VE 樹脂および UP 樹脂ともに、日本下水道事業団「下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術指針・マニュアル」の規格値”0.15g 以下”を越える結果となったが、これはＦＲＰパネルの表層部の吸水が原因であると考えられる。現在、ＦＲＰパネルの製作過程の改良によりパネルの透水性改善に取り組んでおり、再度試験を実施する予定である。

目地部のＦＲＰパネル（VE 樹脂）の透水量は、耐酸性Ａ試験が浸せき前後で 0.07g から 0.22g に、耐アルカリ性Ｂ試験が 0.00ｇから-0.03g となった。

目地部の透水量においても同様に規格値 0.15g 以下を越えているものがあり、再度試験を実施する予定である。

			耐酸性 A120 日浸せき	0.0 μm
UP-IO-1J		目地部	耐酸性 A60 日浸せき	0.0 μm
			耐酸性 A120 日浸せき	0.0 μm
UP-IO-2		シート部	耐酸性 B60 日浸せき	0.0 μm
			耐酸性 B120 日浸せき	0.0 μm
UP-IO-2J		目地部	耐酸性 B60 日浸せき	1000 μ程度硫黄元素が界面に浸入
			耐酸性 B120 日浸せき	500 μ程度硫黄元素が界面に浸入

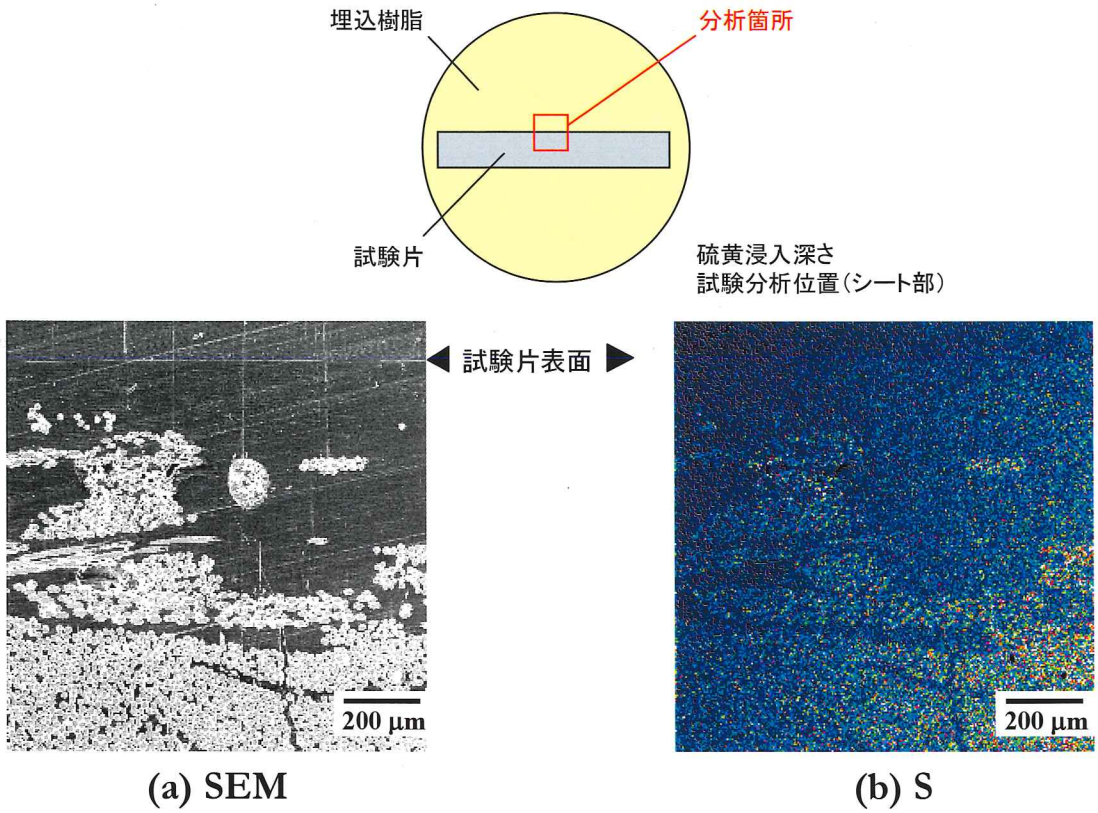


図５－６　VE-IO-1（120 日浸漬　シート部　0.0μm）

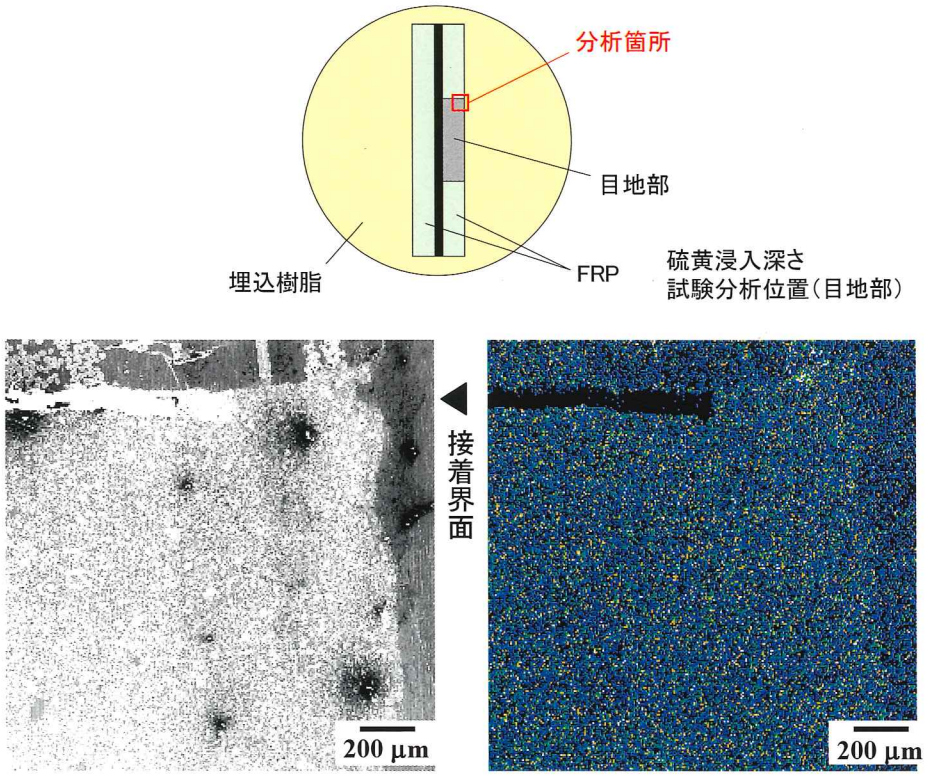


図５－７　VE-IO-1J（120 日浸せき　目地部　0.0μm）

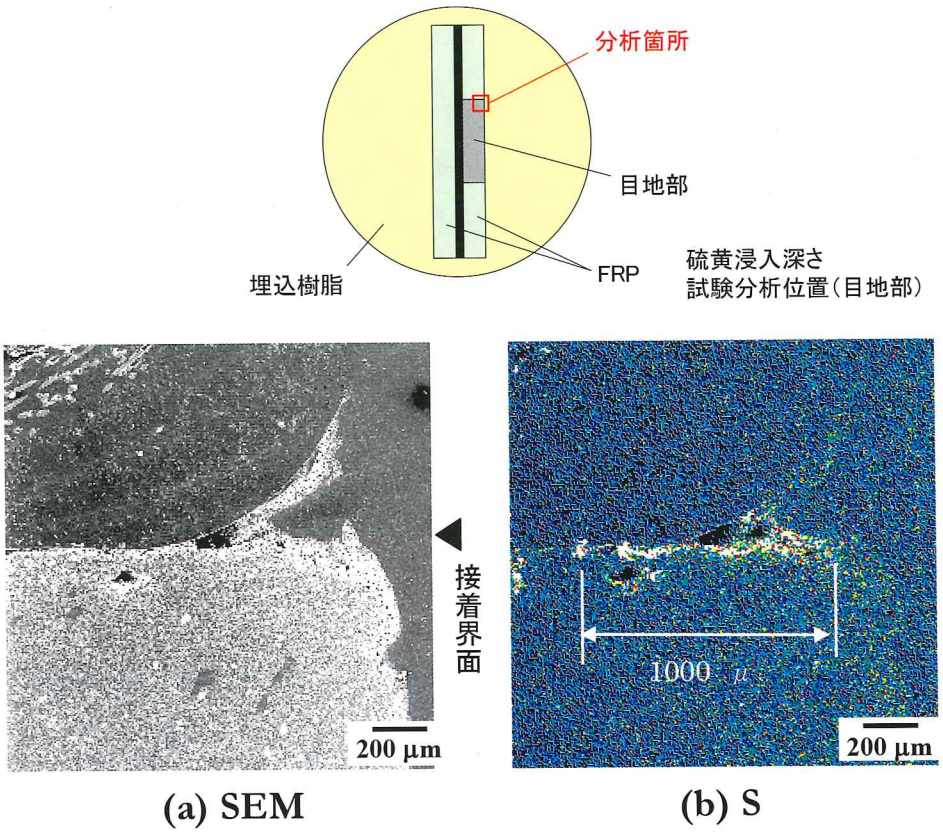


図５－８　UP-IO-2J（60 日浸せき　目地部　1000μm浸入）

２．３．４　耐薬品試験結果

２．３．４．１　外観検査

各環境液中に 240 日浸せき後のＦＲＰパネル（VE 樹脂）の外観写真を、図５－１０～図５－１３に示す。なお、図中の左の浸せき前供試体は、薬品浸せきしていない比較用供試体である。

耐酸性Ａ試験とＢ試験では、240 日浸せき後のＦＲＰパネル（VE 樹脂）の表面にポリエステル不織布の模様が見え始めており、その状態は耐酸性Ｂ試験の方が明瞭になっている。この不織布は耐酸性を有しているので問題がなく、ＦＲＰパネル表面には、ひび割れ、はがれ、膨れ、析出物は見られなかった。一方、耐アルカリ性Ａ試験とＢ試験では、ＦＲＰパネル（VE 樹脂）の表面には、耐酸性試験結果のようなポリエステル不織布の模様は見られず、ひび割れ、はがれ、膨れ、析出物も見られなかった。なお、ＦＲＰパネル（UP 樹脂）の外観検査結果は、VE 樹脂と同様であった。

これらより、ＦＲＰパネルは、酸性およびアルカリ性の浸せきに対して、表面にひび割れ、はがれ、膨れ、析出物の異常が見られず、健全であった。

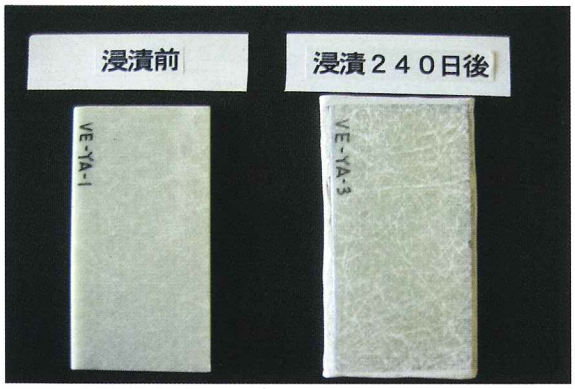


図５－１０　耐酸性Ａ試験 240 日浸漬後の外観比較（VE 樹脂）

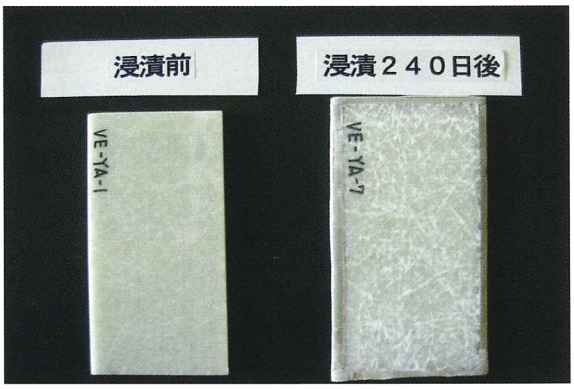


図５－１１　耐酸性Ｂ試験 240 日浸漬後の外観比較（VE 樹脂）



図５－１２　耐アルカリ性Ａ試験 240 日浸せき後の外観比較（VE 樹脂）

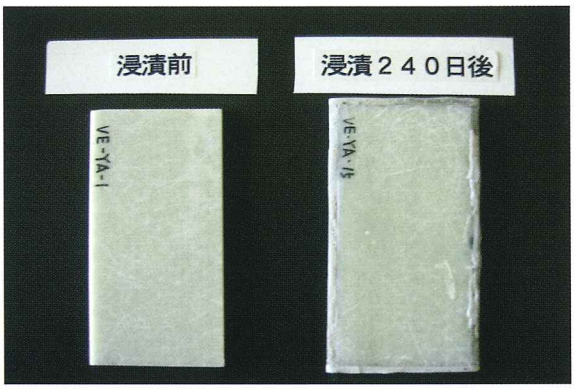


図５－１３　耐アルカリ性Ｂ試験 240 日浸せき後の外観比較（VE 樹脂）

２．３．４．２　質量および厚さ変化

図５－１４にＦＲＰパネル（VE 樹脂）の質量変化率と薬品浸せき日数の関係を、図５－１５にＦＲＰパネル（UP 樹脂）の質量変化率と薬品浸せき日数の関係を示す。なお、ＦＲＰパネル（UP 樹脂）の耐酸性Ｂ試験の供試体は、浸せき日数 240 日で防護被覆層から薬品が浸入し膨潤したので、浸せき日数 120 日までを試験データとした。

浸せき前の質量は、ＦＲＰパネル（VE 樹脂）で 89.854g～92.806g、ＦＲＰパネル（UP 樹脂）で 82.458g～84.169g であった。薬品浸せきにおけるＦＲＰパネル（VE 樹脂）の質量変化率は、120 日まで徐々に増加し、それ以降では大きな変化が見られない。120 日以降のほぼ一定になった質量変化率は、耐アルカリ性試験が 0.5～0.6%程度、耐酸性試験が 0.3～0.4%程度で、耐アルカリ性試験の方が大きくなっている。

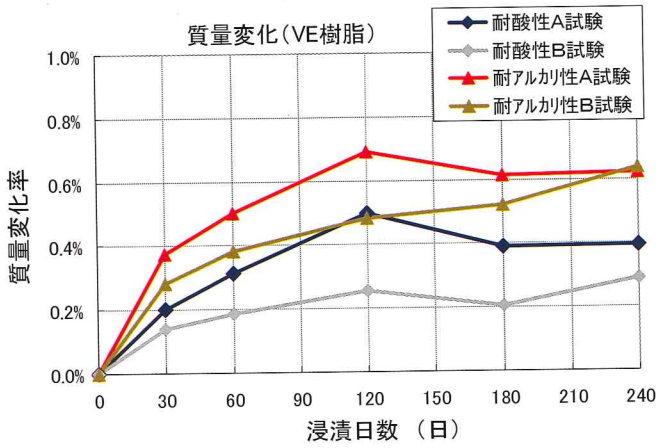


図５－１４　重量変化率と薬品浸せき日数の関係（VE 樹脂）

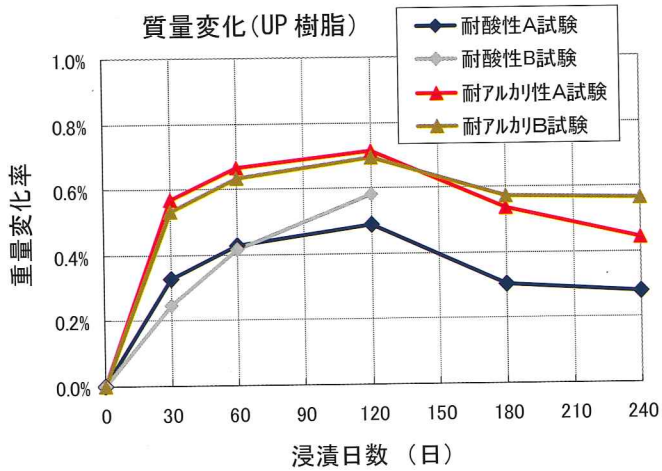


図５－１５　重量変化率と薬品浸せき日数の関係（UP 樹脂）

一方、浸せき後のＦＲＰパネル（UP 樹脂）の質量変化率は、30 日までに大きくに増加し、その後 120 日まで徐々に増加し、それ以降では、ＦＲＰパネル（VE 樹脂）と同様で大きな変化が見られない。120 日以降のほぼ一定となった質量変化率は、耐アルカリ性試験が 0.5～0.7%程度、耐酸性試験が 0.3%程度で、耐アルカリ性試験の方が大きいという結果になった。

２．３．３項で述べた通り、ＦＲＰパネルへの硫黄の浸入は見られなかったことから、これらの質量増加は、ＦＲＰパネルの吸水による影響と考えられる。また、120 日以降で重量変化がほとんど見られないことから、ＦＲＰパネル表面のごく限られた範囲での吸水と思われる。

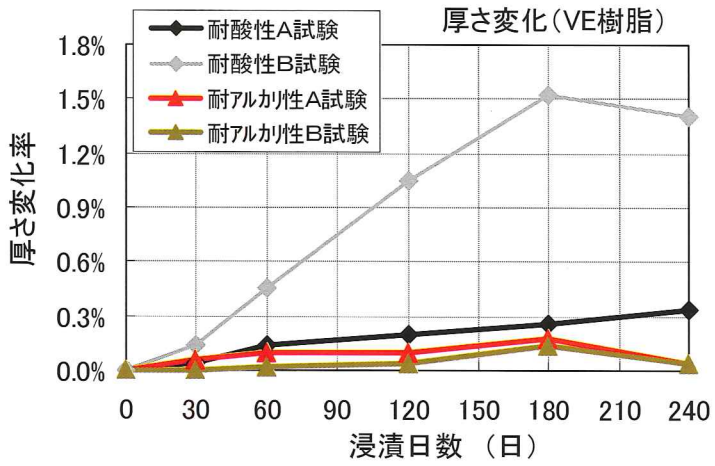


図５－１６　厚さ変化率と薬品浸せき日数の関係（VE 樹脂）

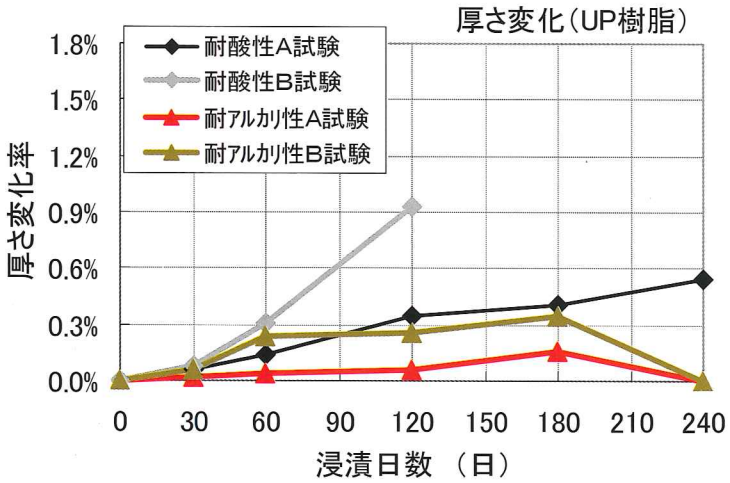


図５－１７　厚さ変化率と薬品浸せき日数の関係（UP 樹脂）

図５－１６にＦＲＰパネル（VE 樹脂）の厚さ変化率と薬品浸せき日数の関係を、図５－１７にＦＲＰパネル（UP 樹脂）の厚さ変化率と薬品浸せき日数の関係を示す。

浸せき前の供試体厚さは、ＦＲＰパネル（VE 樹脂）で 5.047mm～5.060mm、ＦＲＰパネル（UP 樹脂）で 4.961mm～4.986mm であった。

厚さ変化は、耐酸性Ｂ試験を除いて、ＦＲＰパネル樹脂の種類および浸せき条件によって明瞭な違いが見られず、240 日まで浸せきしても厚さ変化率 0.6%程度以下となっている。しかし、耐酸性Ｂ試験は、180 日まで大きく増加し、それ以降は変化が見られなくなるが、厚さ変化率は他の浸せき条件の３倍以上となっている。

２．３．４．３　硬さ変化

図５－１８にＦＲＰパネル（VE 樹脂）のバーコル硬さの保持率と薬品浸せき日数の関係を、図５－１９にＦＲＰパネル（UP 樹脂）のバーコル硬さの保持率と薬品浸せき日数の関係を示す。

浸せき前のバーコル硬さは、ＦＲＰパネル（VE 樹脂）で 50.1～52.0、ＦＲＰパネル（UP 樹脂）で 40.0～42.4 であった。

ＦＲＰパネル（VE 樹脂）の薬品浸せき時におけるバーコル硬さの保持率は、浸せき条件にかかわらず、120 日まで徐々に低下し、それ以降では大きな変化が見られず、240 日で保持率が 70～85%となっている。

一方、ＦＲＰパネル（UP 樹脂）は浸せき条件にかかわらず、30 日まで比較的大きく低下し、その後 120 日まで低下し、それ以降の浸せきでは大きな変化が見られず、240 日で保持率が 65～85%となっている。

ＦＲＰパネルの硬さの変化は、質量の変化と傾向が類似しており、ＦＲＰパネル表面のごく限られた範囲での吸水により、その部分が軟化したことによるものと考えられる。

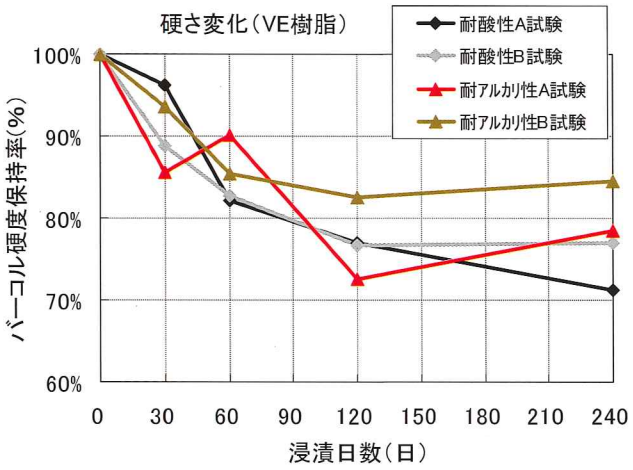


図５－１８　バーコル硬さ保持率と薬品浸漬日数の関係（VE 樹脂）

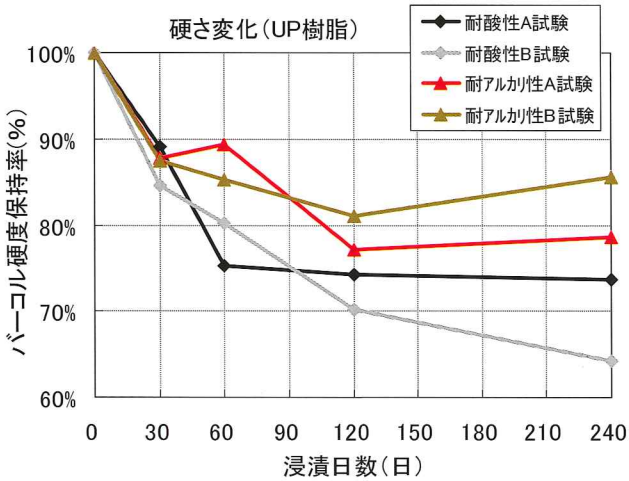


図５－１９　バーコル硬さ保持率と薬品浸漬日数の関係（UP 樹脂）

２．３．４．４　曲げ試験

図５－２０と図５－２１に、ＦＲＰパネル（VE 樹脂）とＦＲＰパネル（UP 樹脂）の曲げ弾性率の保持率と薬品浸せき日数の関係を示す。

浸せき前の曲げ弾性率は、ＦＲＰパネル（VE 樹脂）で 18.2 kN/mm^2、ＦＲＰパネル（UP 樹脂）で 19.0kN/mm^2 であった。

浸せきによるＦＲＰパネル（VE 樹脂）の曲げ弾性率の保持率は、浸せき条件にかかわらず 30 日までで約 0.9 に低下し、それ以降はほぼ一定になっている。ＦＲＰパネル（UP 樹脂）の曲げ弾性率の保持率は、耐酸性Ａ試験を除いて、浸せき条件にかかわらず 30 日までで 0.85 程度に低下し、それ以降はほぼ一定となっている。しかし、耐酸性Ａ試験の保持率は、浸せき日数の経過とともに低下し、240 日で 0.83 程度となり、他の試験ケースと異なるものとなった。

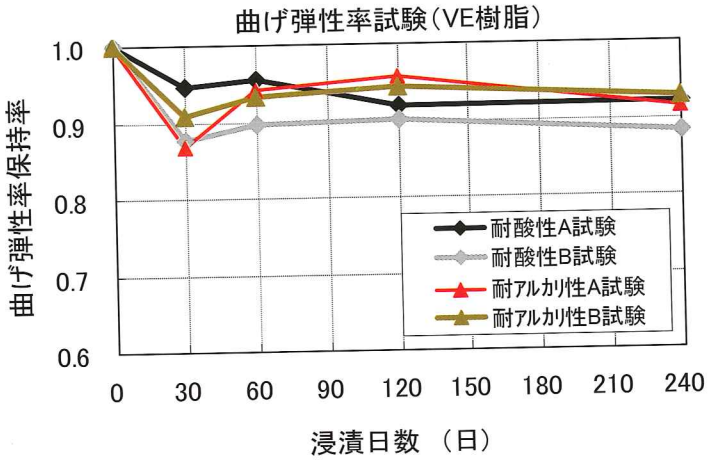


図５－２０　曲げ弾性率保持率と薬品浸漬日数の関係（VE 樹脂）

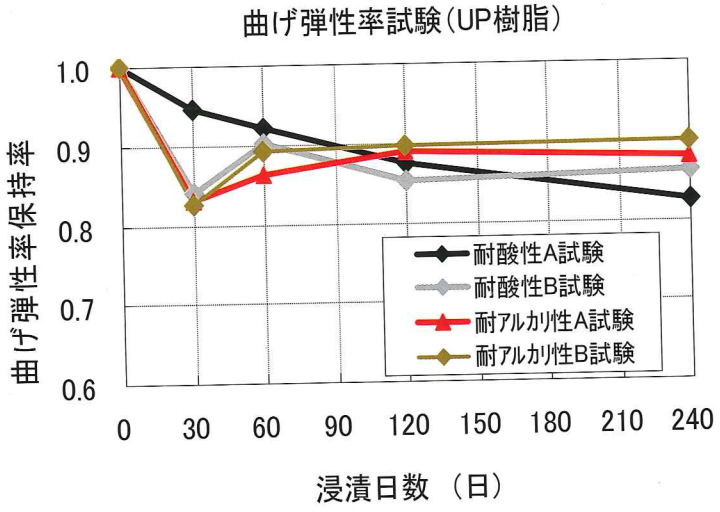


図５－２１　曲げ弾性率保持率と薬品浸漬日数の関係（UP 樹脂）

図５－２２と図５－２３にＦＲＰパネル（VE 樹脂）とＦＲＰパネル（UP 樹脂）の曲げ強さの保持率と薬品浸せき日数の関係を示す。

浸せき前の曲げ強さは、ＦＲＰパネル（VE 樹脂）で 720N/mm^2、ＦＲＰパネル（UP 樹脂）で 650N/mm^{2}であった。

浸せきによるＦＲＰパネル（VE 樹脂）の曲げ強さの保持率の変化は、240 日までゆるやかに低下する傾向に有り、240 日での保持率は 0.75～0.9 程度となっている。一方、ＦＲＰパネル（UP 樹脂）の曲げ強さの保持率の変化は、30 日の浸せきまでに保持率が 0.88 程度まで急激に低下し、耐アルカリ性Ｂ試験を除いて、それ以降はゆるやかに低下する傾向にあり、240 日の浸せきで 0.7 程度となっている。耐アルカリ性Ｂ試験は 30 日以降ほとんど変化が見られなかった。

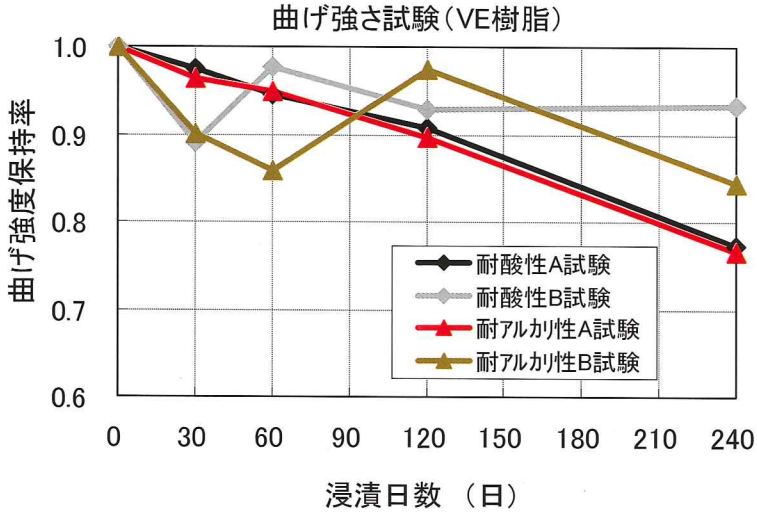


図５－２２　曲げ強さ保持率と薬品浸漬日数の関係（VE 樹脂）

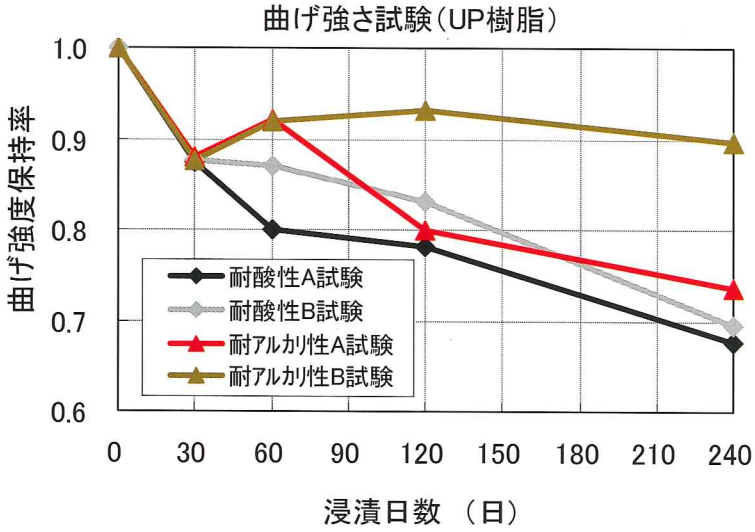


図５－２３　曲げ強さ保持率と薬品浸漬日数の関係（UP 樹脂）

２．４　まとめ

開発したＦＲＰパネルによる防食被覆工法の基本性能を把握するために、各種試験を行った。得られた結果をまとめると以下の通りである。

(1) コンクリートとの固着性

・ＦＲＰパネルの固着強さは 0.56～0.60N/mm^2 で、日本下水道事業団「防食技術指針・同マニュアル」の規格値 0.24N/mm^2 以上となっていた。

・ＦＲＰパネルの固着性能は、充填したモルタルあるいはコンクリートのアルカリによって、低下することはなかった。

(2) 透水性

・浸せき前の透水量に、日本下水道事業団「下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術指針・マニュアル」の規格値 0.15g 以下を越えるものがあり、ＦＲＰパネルの透水性を改善する必要がある。

(3) 硫黄浸入深さ

・シート部では、硫黄の浸入は認められなかった。

・目地部では、硫黄の浸入はほとんど認められなかったが、一部目地部の施工不備によって硫黄が浸入したものがあった。

(4) 耐薬品性

・ＦＲＰパネルの表面には、ひび割れ、はがれ、膨れ、析出物等の著しい外観変化は認められなかった。

・ＦＲＰパネルの質量変化は浸せき日数 120 日まで増加し、それ以降は大きな変化が見られなかった。この質量増加はＦＲＰパネルの吸水によるものと考えられるが、ＦＲＰパネル表面のごく限られた範囲での現象と判断できる。

・厚さ変化は耐酸性Ｂ試験を除いて 0. 6%以下であったが、耐酸性Ｂ試験は、不織布の若干の膨らみによって 3 倍程度大きくなった。

・ＦＲＰパネルのバーコル硬さは浸せき日数 120 日まで低下し、それ以降は大きな変化が見られなかった。一定となる保持率は 065～0. 85 程度であった。

・ＦＲＰパネルの曲げ弾性率は浸せき日数 30 日までに減少し、それ以降は大きな変化が見られなかった。一定となる保持率は 0. 85～0. 95 程度であった。

・ＦＲＰパネルの曲げ強さは、VE 樹脂の場合、240 日までゆるやかに低下し、その保持率は 240 日で 0.75～0.9 程度であった。UP 樹脂の場合、30 日までに大きく低下し、それ以降はゆるやかに低下する傾向にあり、240 日で 0. 7 程度であった。

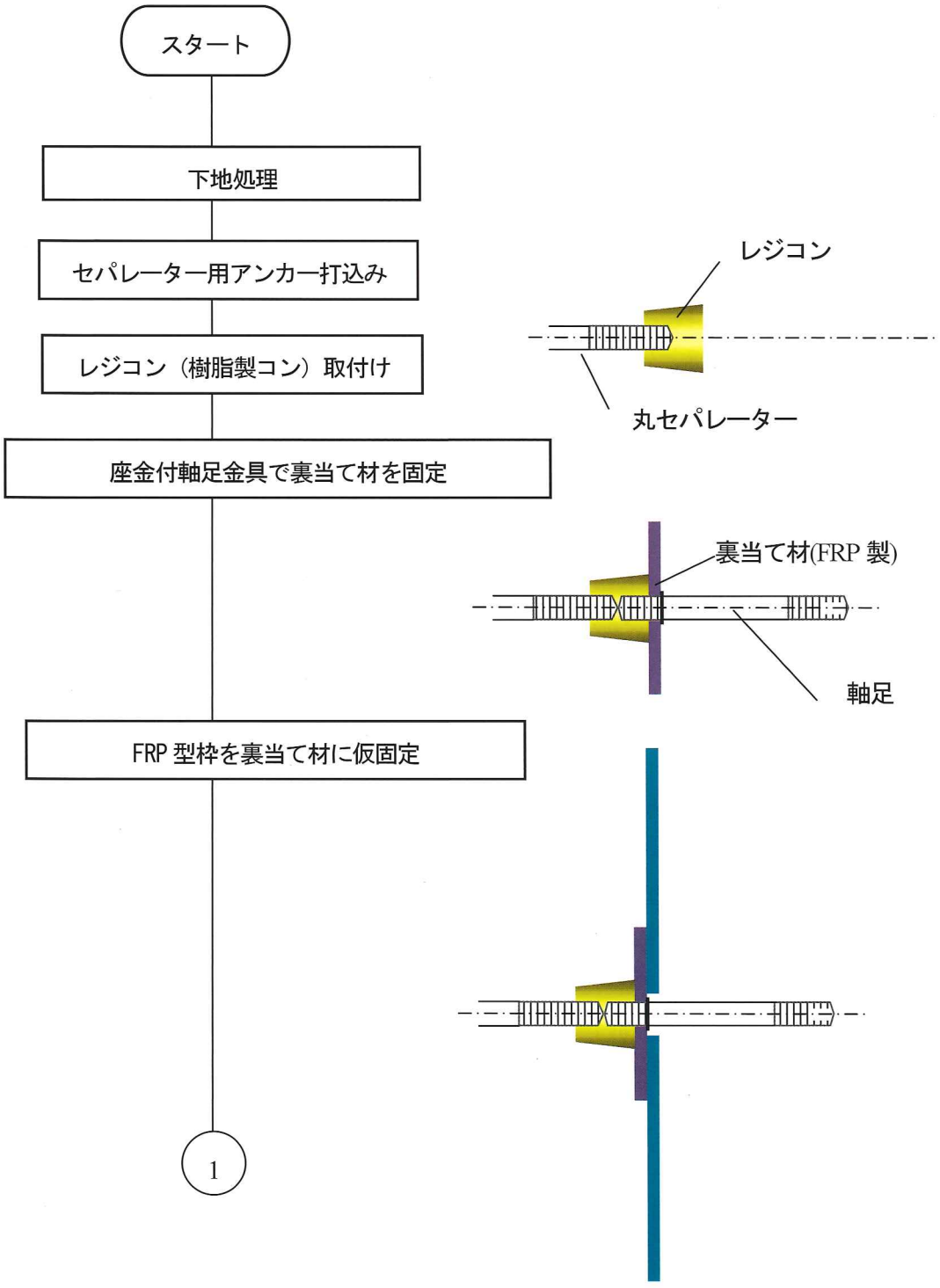
３．　ＦＲＰ引抜成形材の施工方法

３．１　目的

本ＦＲＰ防食パネル工法の施工手順の検討および充填モルタルによる充填性の確認を行う。

３．２　ＦＲＰパネル工法の施工フロー

施工フローを図５－２４に示す。



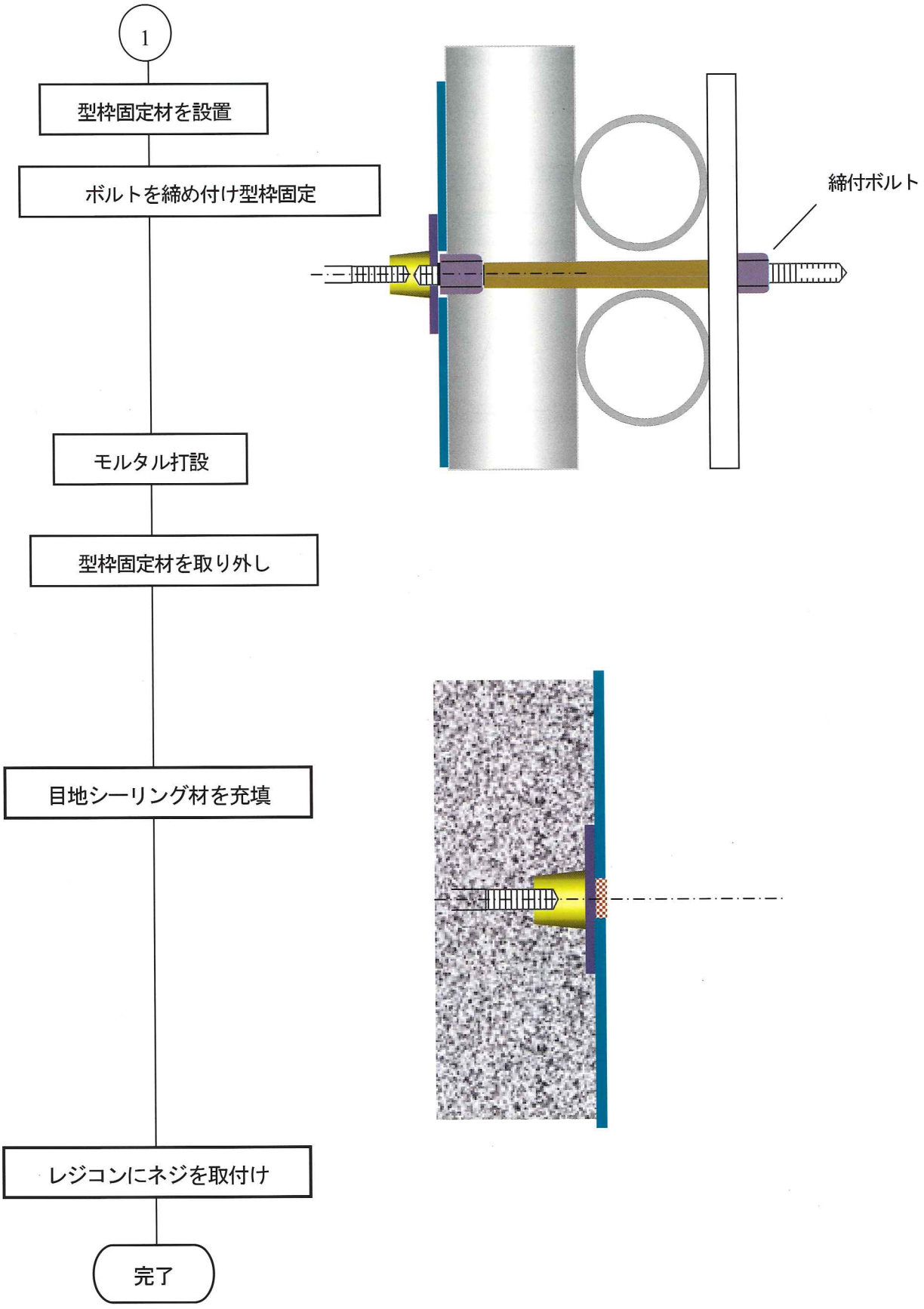


図５－２４　ＦＲＰパネル工法の施工フロー

３．３　ＦＲＰパネル工法の出来形

ＦＲＰパネル工法のシート部、出隅部、入隅部の出来形を図５－２５から図５－２７に示す。

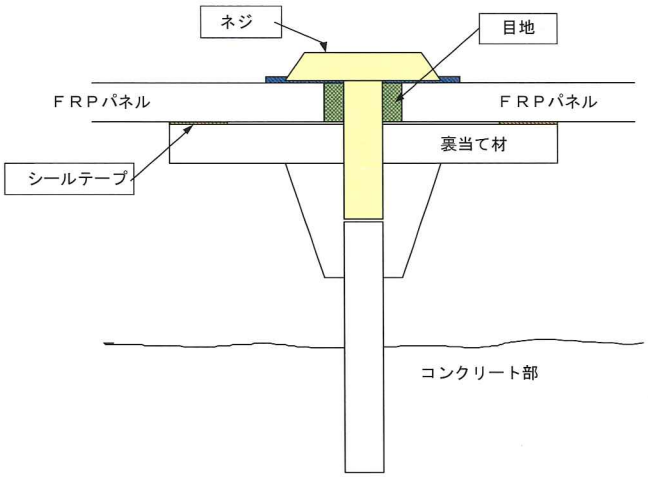


図５－２５　ＦＲＰパネル接合シート部

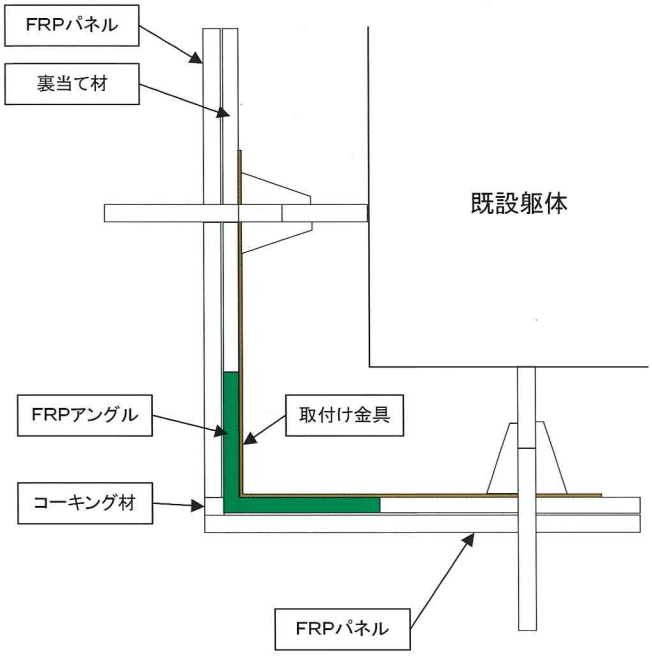


図５－２６　ＦＲＰパネル接合出隅部

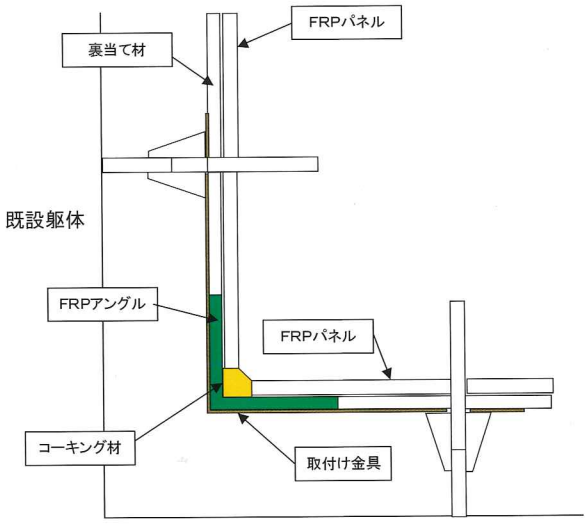


図５－２７　ＦＲＰパネル接合入隅部

３．４　ＦＲＰパネル組立て試験

(1) 目地部の施工性

裏当て材の形状と組立て性について確認した。(図５－２８参照)

・　水平目地　⇒　平面部、入隅部　(壁～天井、壁～ハンチ～天井)

・　垂直目地　⇒　平面部、入隅部、出隅部

パネル接着テープに用いた両面粘着スポンジテープはモルタルリーク防止性能があることを確認した。また、目地部充填施工性試験を行い、弾性シール材の施工性確認およびパネル固定ネジの確認を実施した。

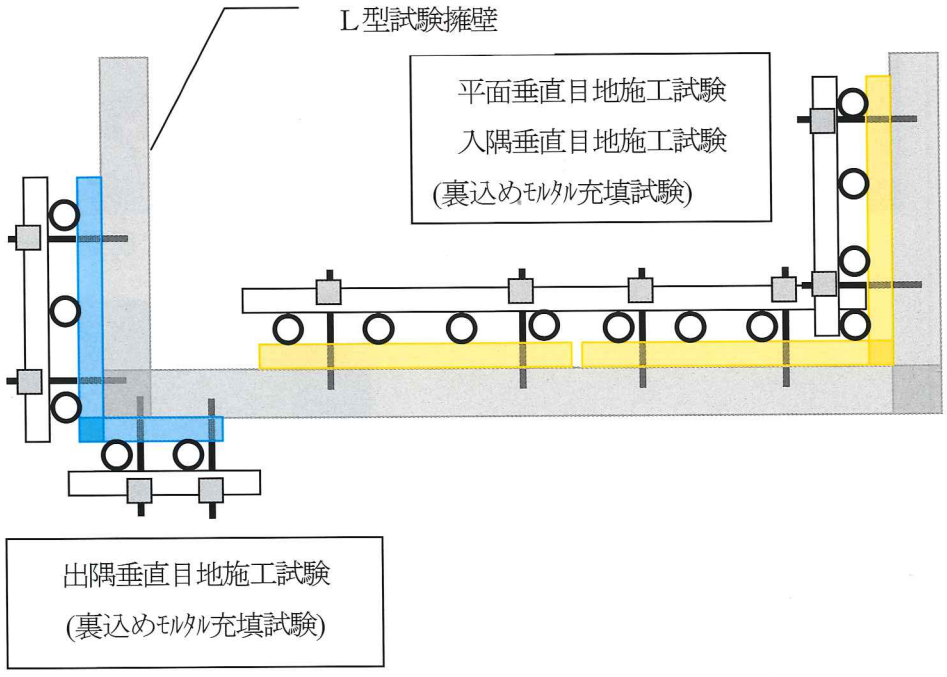


図５－２８　ＦＲＰ施工試験平面図

(2) 充填試験

ＦＲＰパネルの組立て・モルタル充填試験の状況を図５－２９に、試験時におけるパネル背面のモルタル充填状況を図５－３０に、試験後のパネル背面のモルタル充填の確認状況を図５－３１に示す。

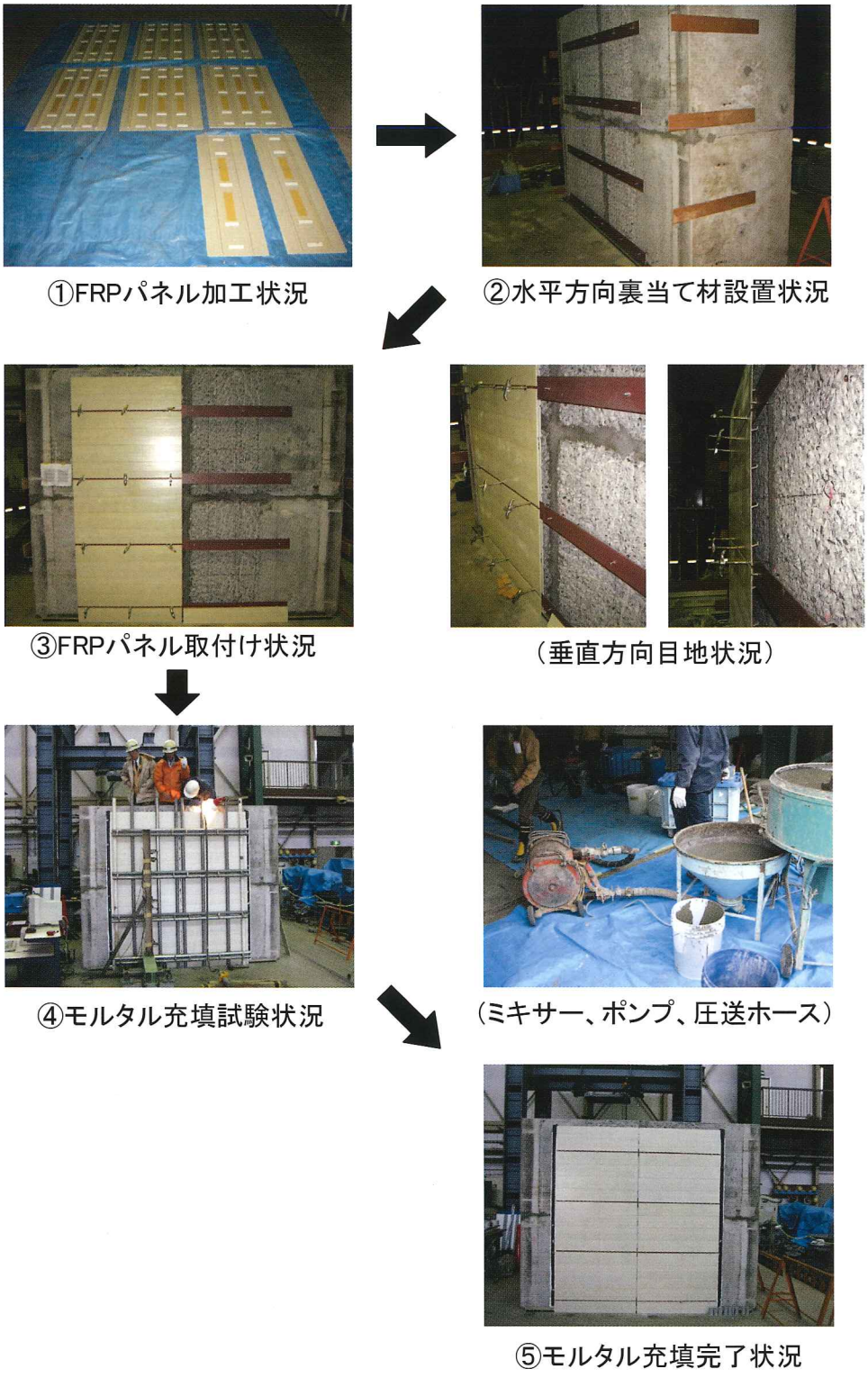
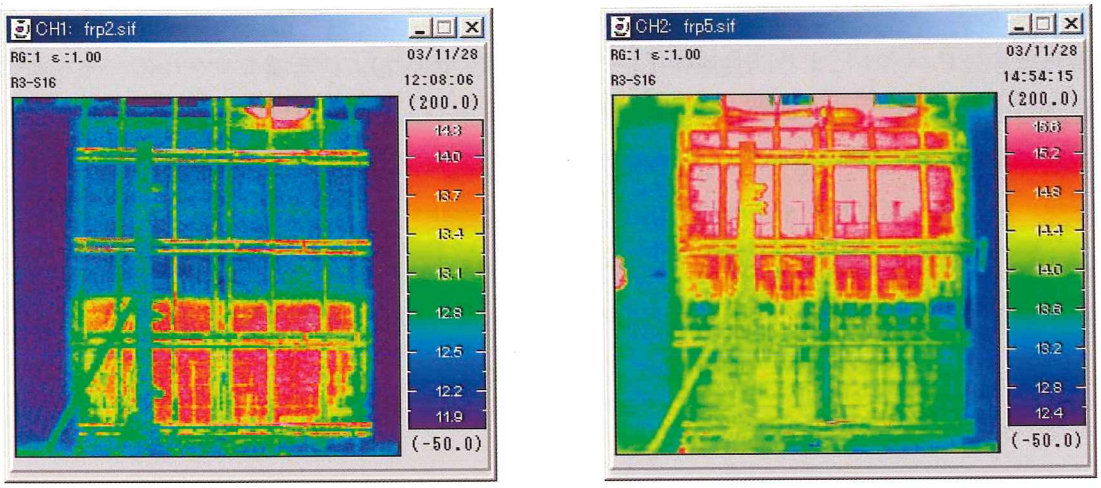


図５－２９　ＦＲＰ施工性確認試験（パネル組み立て試験、モルタル充填試験）



(a) １回目充填終了　　(b) ２回目充填終了

図５－３０　熱画像によるパネル背面のモルタル充填状況



(a) パネルの切断による充填状況の確認　　(b) 採取したコア

図５－３１　パネル背面のモルタル充填の確認状況

３．５　まとめ

開発したＦＲＰパネルによる防食被覆工法の施工手順の検討および充填モルタルのパネル背面の充填性を確認するために、各種試験を行った。得られた結果をまとめると以下の通りである。

・ＦＲＰパネルの組立は、型枠用合板による型枠および支保工の組立とほぼ同様にできた。
・入隅部、出隅部でＦＲＰパネルの施工ができることを確認した。
・背面へのモルタル充填作業は、耐圧ホースや目地部からの漏れなどがなく良好に施工できた。
・背面へのモルタル充填状況は、空隙などの不良箇所もなく確実に充填できた。

第６編　金属被覆材料を用いた新しいシートライニング材の開発

１．はじめに

下水処理施設におけるコンクリート構造物は、微生物によって生成される硫酸により徐々に腐食劣化する。劣化したコンクリート構造物の補修には、損傷箇所をはつり取り、当初の断面位置までポリマーセメントモルタル等の断面修復材で補修し、樹脂ライニングやシートライニングなどの防食ライニングを施工する方法が一般に行われている。

シートライニング工法は防食効果が高いため、特に腐食環境が厳しく点検・補修が困難な場所に使われる工法である。しかし、従来のシートライニング材は比較的高価である上に、その価格に見合うだけの十分な性能評価がなされているとは言い難い。また、施工性の悪さも弱点の一つであり、その改善が技術的課題となっている。

純チタンは、その比重が鋼材の約60%と軽量で取扱い易く、耐食性および成形・加工性に優れ、また、金属であるため耐損耗性、耐衝撃性が高く、変形に強いといった特長を持ち、リサイクルも可能な材料である。薄板に加工すれば、構造物の形状に合わせた被覆が容易になるため、最近では海洋環境における鋼材の防食被覆などへも適用されつつある[1)]。

そこで本編では、純チタン板を防食被覆材として用いたシートライニング工法を開発し、下水処理施設の新たなコンクリート補修技術を確立することを目的とした。考案した工法の下水道環境への適用性を評価するために、日本下水道事業団編纂の「下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術マニュアル」を参考に試験方法および条件を設定し、コンクリートとの固着性、耐硫酸性、耐アルカリ性、透水性、硫酸遮断性などについて試験した。

２．チタンシートライニング工法の概要

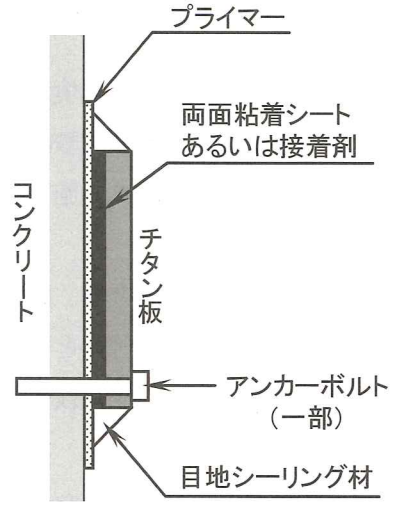
チタン板をシートライニング工法における防食被覆材として活用するために、両面粘着シート（テープ）あるいは接着剤を使用し、チタン板をコンクリート面に接着させる３種類の工法を考案した。工法の仕様を表６－１に、概略図を図６－１に示す。

Ａ法およびＢ法は地上および地下施設の補修を対象としており、Ａ法はチタン板全面に両面粘着シートを貼り付ける工法、Ｂ法はチタン板全面に接着剤を塗布する工法である。一方、Ｃ法はＡ法を簡略化させたものであり、チタン板の端部のみに幅50mm程度の両面粘着テープを貼り付ける工法である。本工法は、背面水圧を考慮する必要の無い、地上施設等の補修を対象としている。

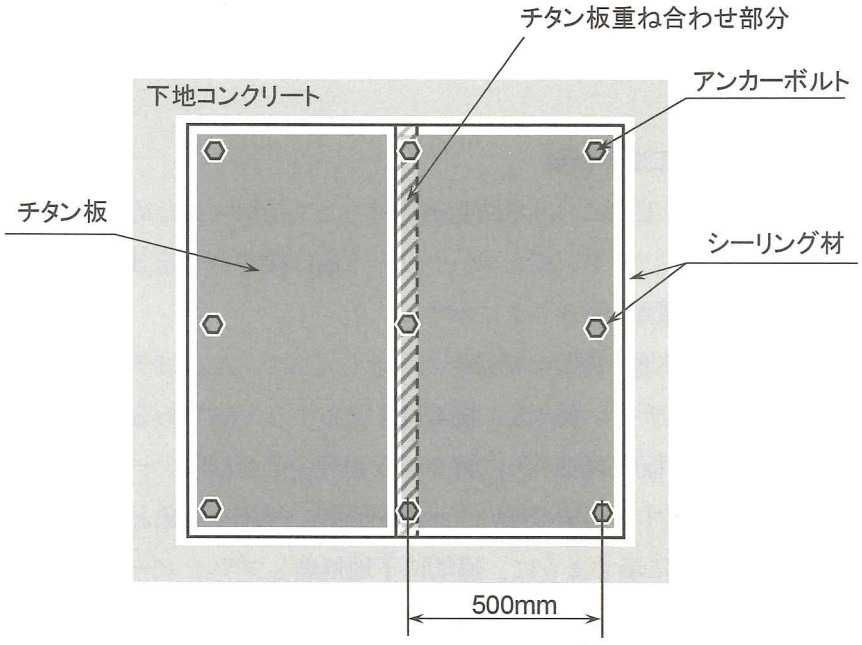
いずれの工法も図６－１(a) に示すように、適切に下地処理しプライマーを塗布したコンクリート面に、接着材料を施したチタン板を貼付して施工する。チタン板と下地コンクリートとの接着の安全率を向上させるために、チタン板端部に 500mm 程度の間隔で、接着剤を塗布したアンカーボルトを打設することとした。また、チタン板どうしの継ぎ目部分は図６－１(b) に示すような重ね継ぎとし、チタン板の端部、継手部およびボルトの外周はシリコーン系シーリング材でシールし環境液の遮断性を確保することとした。

表６－１　チタンシートライニング工法の仕様

工法	チタン薄板	プライマー	接着材料	接着面	シーリング材	アンカーボルト	施工対象
A 法	JIS 2 種 0.5mm 厚	ブチル系	両面粘着シート （アクリル系）	全面	シリコーン系	有り (500mm 間隔)	地上＆地下施設
B 法		ウレタン系	接着剤 （エポキシ系）	全面			地上＆地下施設
C 法		ブチル系	両面粘着テープ （アクリル系）	縁部 50mm			地上施設



(a) 断面図



(b)　正面図

図６－１　チタンシートライニング工法の概略図

３．　チタンシートライニング工法の性能評価試験

３．１　概要と試験項目

開発したチタンシートライニング工法を下水道コンクリート構造物の補修用として使用するためには、日本下水道事業団が規定するシートライニング工法の品質規格[2)]を満足することが必要となる。そこで、日本下水道事業団編纂の「下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術マニュアル（参考資料－３．防食被覆層の品質試験方法)」を参考に、表６－２に示す通り試験項目および試験方法を設定し、チタンシートライニングの下水環境における補修材料としての適用性を評価した。

表６－２　チタンシートライニングの性能評価試験項目

試験項目		試験方法	評価方法	評価対象
コンクリートとの一体性		・乾燥面・湿潤面 ・温冷水繰返し浸せき試験	・接着強さ	・接着材料
耐薬品性	耐硫酸性	・全面腐食試験	・侵食度	・チタン
	耐ｱﾙｶﾘ性	・水酸化ｶﾙｼｳﾑ水溶液浸せき試験	・接着強さ	・接着材料
硫酸遮断性		・硫酸水溶液浸せき試験	・硫黄浸入深さ	・目地材料
遮水性		・硫酸水溶液浸せき試験 ・水酸化ｶﾙｼｳﾑ水溶液浸せき試験	・透水量	・目地材料

３．２　チタンシートライニングとコンクリート躯体との接着性に関する検討

３．２．１　目的

開発したチタンシートライニング工法では、チタン板を両面粘着シート（テープ）あるいは接着剤を使用し、コンクリート面に接着させて施工する。日本下水道事業団が規定するシートライニング工法の品質規格では、ライニング材とコンクリート躯体との固着性を、施工する施設の深さを 8m（背面水圧 0.078MPa）と想定し、安全率を 3 と設定して“0.24MPa（$=N/mm^2$）”と規定している。そこで、本工法におけるチタン板とコンクリート躯体との接着性が、この規定を満足することを確認するために、接着強度試験を行った。また、接着力の耐久性を調べるために、温冷水繰返し浸せき試験を行った。

３．２．２　試験方法

３．２．２．１　供試体

チタン板を下地のコンクリートあるいはモルタル面に接着させるための接着材料は、カタログおよび聞き取り調査により 3 社 6 種類の中から抽出し、予備試験結果から接着力の大きい両面粘着シート 1 種、接着剤 1 種を選定した。これらの接着材料を用いて、40mm 四方に切断した厚さ 0.5mm のチタン板を、300×300×60mm のコンクリート平板に図６－２に示すように貼付し、供試体を作製した。供試体の仕様を表６－３示す。

試験に用いたコンクリート平板は、JIS A 5371 に準拠して作製した。配合設計条件および配合を表６－４、５に示す。

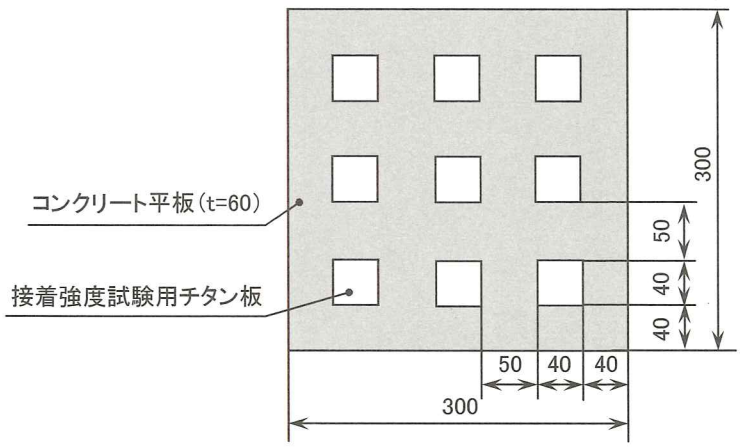


図６－２　接着性の評価に用いた供試体の概略図

表６－３　供試体の仕様

工法	チタン板	コンクリート平板	プライマー	接着材料	接着面	シーリング材	備考
A法	JIS 2種 40×40×0.5	1) 標準状態 2) 吸水状態	ブチル系	両面粘着シート（アクリル系）	全面	シリコーン系	C法の評価も兼ねる
B法			ウレタン系	接着剤（エポキシ系）			

表６－４　コンクリート平板の配合設計条件

呼び強度	スランプ	粗骨材の最大寸法	セメントの種類	空気量
40MPa	8±2.5mm	20mm	普通ポルトランドセメント	5%以下

表６－５　コンクリート試験基板の配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m³)				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
20	40.5	5	44.5	165	407	761	973	1.018

供試体作製の方法は、以下に示す順序で行った。

（1）#150 の研磨紙を用いて、コンクリート平板の表面を研磨し、不陸を修正する。

（2）コンクリート平板を 23℃の水道水中に 24 時間浸せきする*)。

（3）コンクリート表面の水分を拭き取った後プライマーを塗布し、15～20 分程度乾燥させる。

（4）チタン板表面をメチルエチルケトン（MEK）、ついでイソプロピルアルコール（IPA）を含ませたウエス等で拭き、油脂分を除去する。

（5）チタン板表面に接着材料を施し、プライマー処理したコンクリート面に貼付する。

（6）5kg のローラー自重圧で１往復させて圧着する。

（7）チタン板の周囲をシリコーン系シーリング材でシールする。

（8）（1）～（7）で作製した供試体を、室温の水道水に７日間、半浸せき（図６－３）する*)。

＊）実際の施工現場では、乾燥あるいは湿潤、いずれの状態のコンクリート面にもライニングを施工する可能性がある。そこで本研究では、乾燥したコンクリート平板にチタン板を貼付したものを“標準状態”の供試体と位置づけ、上記（2）（8）の操作により吸水させたコンクリート平板を用いて作製した供試体と、比較検討した。

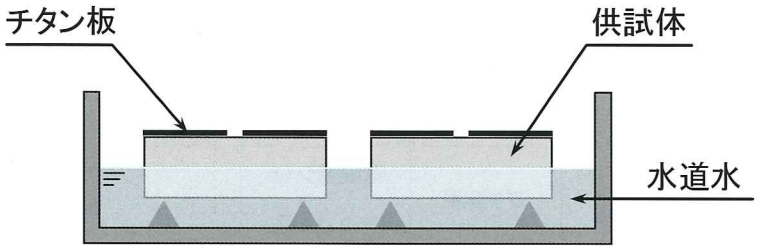


図６－３　供試体の半浸せき

３．２．２．２　試験方法

チタン板とコンクリート平板との接着強さは、JIS A 6909 7.9.2 項に準拠した接着強度試験における最大引張荷重から求めた。試験は建研式接着力試験器を使用し、接着面に対し鉛直方向へ引張力を加えて行った。

一方、接着力の耐久性を調べるために、供試体の温冷水繰返し浸せきを行った。上述の通り作製した供試体を 23℃および 50℃の水道水中にそれぞれ 24 時間ずつ交互に浸せきし、これを 5 サイクル繰り返した後、接着強度試験に供した。

３．２．３　試験結果

３．２．３．１　チタンシートライニングとコンクリート躯体との接着性

標準状態のコンクリート面にチタン板を施工した際の、接着強度試験の結果を図６－４に示す。チタン板の接着強さは、接着剤を使用した場合に特に大きなばらつきが認められた。接着剤の塗布作業は人力によるため、塗布状態にムラが生じやすい。これがばらつきの要因の一つになったものと思われる。接着強さの平均値を比較すると、両面粘着シートおよび接着剤で顕著な差は認められなかった。これらの結果はいずれも、日本下水道事業団が規定するシートライニング工法の品質規格“0.24N/mm^2”を満足する結果となった。

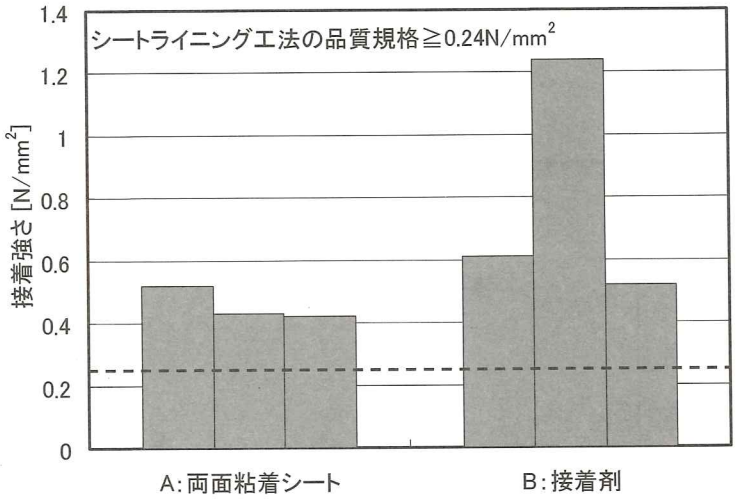


図６－４　チタン板を標準状態のコンクリート面に施工したときの接着強度試験の結果

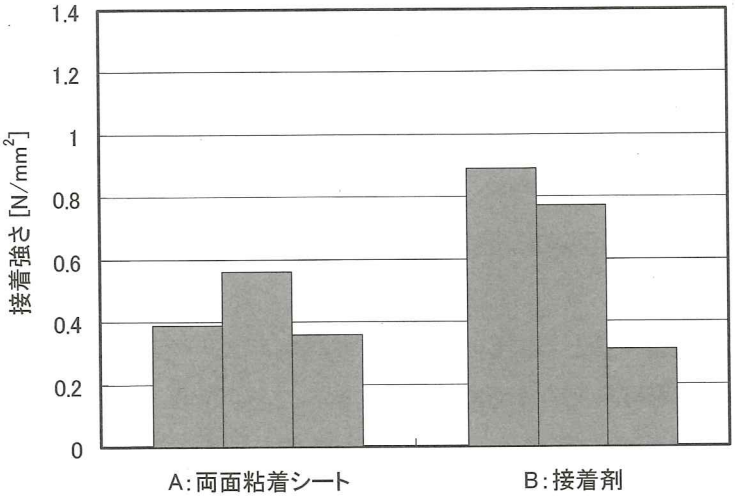


図６－５　チタン板を吸水状態のコンクリート面に施工したときの接着強度試験の結果

一方、吸水状態のコンクリート面にチタン板を施工した際の、接着強度試験の結果を図６－５に示す。標準状態の場合（図６－４）と比べても、いずれも大きな変化は認められなかった。

以上の結果から、両面粘着シートあるいは接着剤を使用する工法により、チタン板とコンクリート躯体との良好な接着性が得られることが明らかとなった。また本工法は、湿潤コンクリート面に対して施工しても、十分な接着強さが得られることが明らかとなった。

３．２．３．２　チタンシートライニングの接着力の耐久性

供試体を温冷水繰返し浸せきした後に行った、接着強度試験の結果を図６－６に示す。グラフの縦軸は、浸せき前の接着強さに対する浸せき後の接着強さの割合、すなわち接着強さの保持率で表した。湿潤コンクリート面に両面粘着シートで施工したケースを除き、いずれも温冷水繰返し浸せきによる接着強さの大幅な変化は認められなかった。

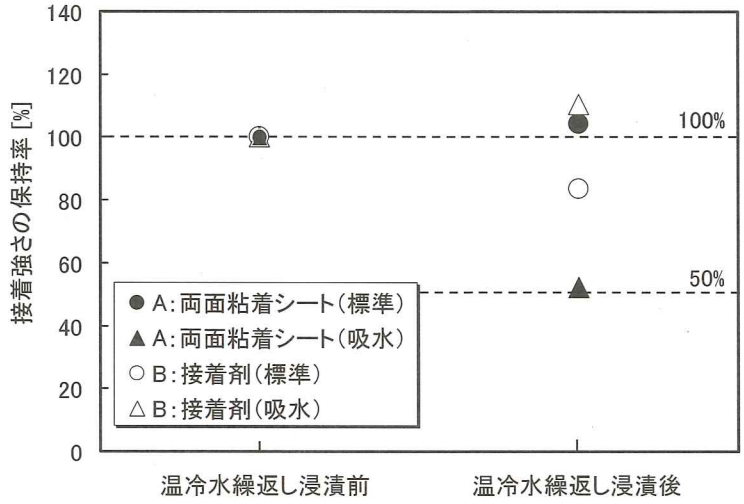


図６－６　温冷水繰返し浸せきによる接着強さの変化

接着強度試験後の剥離面の状況を、図６－７に示す。試験後の剥離面の状況を肉眼で観察し、コンクリート平板 / プライマー / 接着材料 / チタン板の、いずれの層・界面で剥離が生じているかを調べた。結果は剥離が生じている面積で評価し、全体の面積（40×40mm^2）に対する割合で比較した（図６－８）。

浸せき前の剥離面を観察すると（図６－８(a)）、湿潤コンクリート面に接着剤で施工したケースを除き、全てチタン板と接着材料との界面で剥離していることがわかった。一方、浸せき後の剥離面では（図６－８(b)）、接着材料とプライマーとの界面で剥離している箇所が現れていることから、温冷水浸せきによりプライマーの劣化が生じたものと推察される。特に湿潤コンクリート面に両面粘着テープで施工したケースではその傾向が著しく、これが図６－６に見られた接着強さの大幅な低下の要因になったものと考えられる。

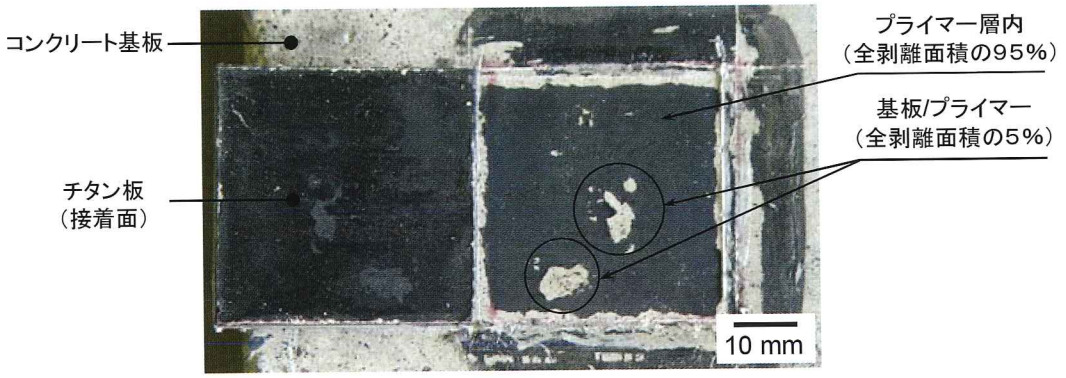
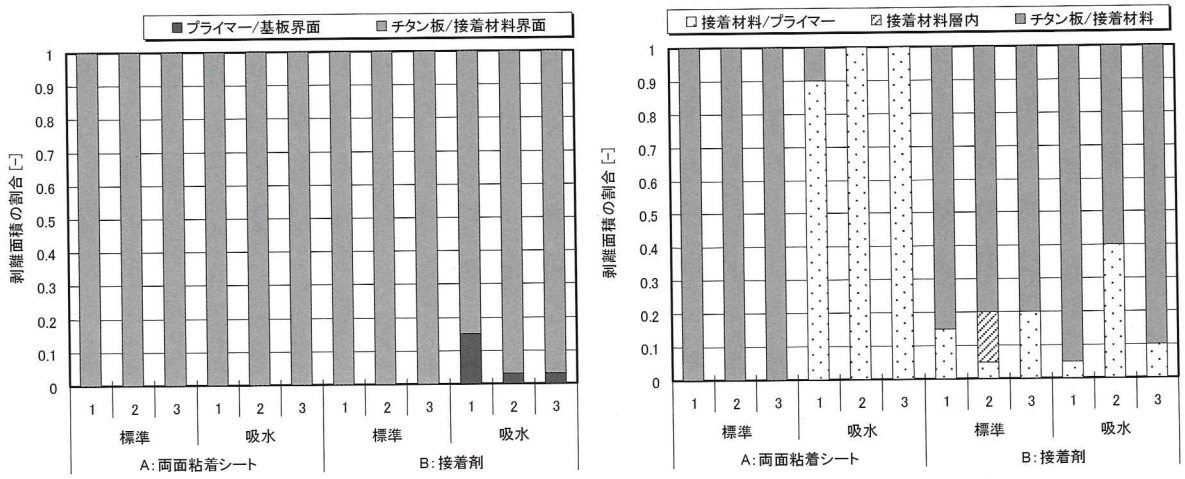


図６－７　接着強度試験後の剥離面の状況と剥離箇所の評価例



(a) 温冷水繰返し浸せき前　　(b) 温冷水繰返し浸せき後

図６－８　接着強度試験における剥離箇所の面積の比較

本研究では、両面粘着テープあるいは接着剤の接着力の耐久性を調べるために、供試体を温冷水繰返し浸せきした後、接着強度試験に供した。この耐久性評価手法に関する品質規格は現在のところ定まっておらず、浸せきによる接着力低下の許容値については、今後の検討結果により結論を得たい。いずれにせよ、チタンシートライニングを湿潤コンクリート面に施工する際には、使用する接着材料およびプライマーの選択に留意すべきである。

３．３　チタンシートライニングの耐薬品性に関する検討

３．３．１　目的

下水道環境へ適用されたシートライニングは、微生物の作用によって生成された硫酸に暴露される。また、ライニング材の下地となるコンクリートあるいはモルタルからアルカリ性溶液が溶出する場合もあり、これによりライニング材が影響を受ける可能性も考えられる。そこで、開発したシートライニング工法の耐硫酸性、あるいは耐アルカリ性について明らかにするため、薬品浸せき試験を行った。

３．３．２　純チタンの耐硫酸性に関する検討

３．３．２．１　試験方法

現行のシートライニング工法の品質規格では、「10%硫酸水溶液に 60 日間浸せきしても被覆にふくれ、われ、軟化、溶出がないこと」と規定されている [2)]。この規格は硫酸浸透性があり、ふくれや軟化などの変状を生じる“高分子系材料”を対象としたものであり、硫酸浸透性の無い金属材料については新たに試験条件を設定する必要がある。本研究では実際の下水道環境（生成硫酸濃度を pH 2 程度と想定）を考慮し、pH 0.5 および pH 1 の硫酸水溶液（40℃）を用いて評価することとした。

試験片としては、JIS2 種 25×25×1.5mm の純チタン板（表面を#400 湿式研磨）を各条件２枚ずつ使用した。試験片を環境液中に１ヶ月間浸せきし、浸せき前後の供試体の重量変化すなわち腐食減量から(1) 式により侵食度（１年あたりの平均腐食深さ）を求めた。

$$P = \frac{M_1 - M_2}{S \times T} \times \frac{365 \times 10^{-4}}{d} \qquad (1)$$

ただし、

P　：侵食度（mm/year）
M_1：試験片の試験前の質量（mg）
M_2：試験片の試験後の質量（mg）
S　：試験片の表面積（dm^2）
T　：試験日数
d　：試験片の密度（g/cm^3）

３．３．２．２　試験結果

チタン板の硫酸浸せき試験の結果を表６－６に示す。また参考までに、文献調査によって得られたチタンの耐硫酸性に関するデータを表６－７に示す。硫酸浸せき試験の結果から、純チタンはpH 0.5以下の環境では十分とはいえないが、pH１以上の環境においては良好な耐食性を示すことが明らかとなった。データは、厚さ 0.5mm の純チタン板が pH １以上の環境で 500 年以上の耐食性を有することを示している。このことから、純チタンを下水処理施設のコンクリート補修材料として適用する場合、pH１以上（硫酸濃度 0.5 wt%以下）の硫酸環境で使用可能であると判断できる。なお、第１編２．２．３で述べた通り、既往の研究から、下水処理施設のコンクリート表面において微生物によって生成される硫酸の濃度は、高い場合でも pH１程度であると推測されている。したがって、純チタンは大多数の下水処理施設へ適用可能であると考えられる。

表６－６　チタンの硫酸浸せき試験の条件と試験結果（侵食度）

項　目			試験Ⅰ	試験Ⅱ	備　考
試験条件	環境液		硫酸水溶液	硫酸水溶液	pH 測定は pH 計を用いた
	濃　度		pH 0.5（約 1.6wt%）	pH 1（約 0.5wt%）	
	温　度		40℃	40℃	
	浸せき時間		１ヶ月	１ヶ月	
結　果	pH	試験前	0.5	1.0	
		試験後	0.5	0.5	
	侵食度（mm/year）		1.05	0.001	

表６－７　希硫酸中におけるチタンの耐食性に関する文献データ（参考）

pH	濃度 (wt%)	温度 (℃)	付帯条件	侵食度 (mm/year)	出　典
pH 0 (約 5wt%) 相当	5	35	—	0.0124	チタニウム・ジルコニウム・ハフニウム/アグネ
	5	60	通気	4.826	チタンデザインデータブック/日本チタン協会
	5	50	—	1.67	Titanium alloys, ASM International
	4	50	—	1.51	Titanium alloys, ASM International
pH 0.5 (約 1.6wt%) 相当	1	35	—	0.0033	チタニウム・ジルコニウム・ハフニウム/アグネ
	1	60	通気	0.00762	チタンデザインデータブック/日本チタン協会
	3	60	通気	0.0127	チタンデザインデータブック/日本チタン協会
pH1～2	データなし				

３．３．３　接着材料の耐アルカリ性に関する検討

３．３．３．１　試験方法

接着材料の耐アルカリ性を調べるために、図６－９に示すような供試体を作製し浸せき試験を行った。供試体は JIS R 5201 に基づいて作製した 70×70×20mm モルタル平板（吸水状態）上に、３．２．２項に述べた手順により両面粘着シートあるいは接着剤を用いて 40×40×0.5mm のチタン板を貼付し、チタン板端部および周囲をシリコーン系シーリング材でシールすることにより作製した。シリコーン系シーリング材は、チタン板の外周を中心に幅 20mm となるように塗布した。この供試体を 40℃に保たれた水酸化カルシウム飽和水溶液中に所定の期間浸せきし、浸せき後の供試体についてチタン板とコンクリート平板との接着強さを求めた。

接着強度試験は JIS A 6909 7.9.2 項に準拠し、接着面に対し鉛直方向へ引張力を加えたときの最大引張荷重を測定した。なお、接着強度試験は、シーリング材をカッター等で完全に除去してから行った。

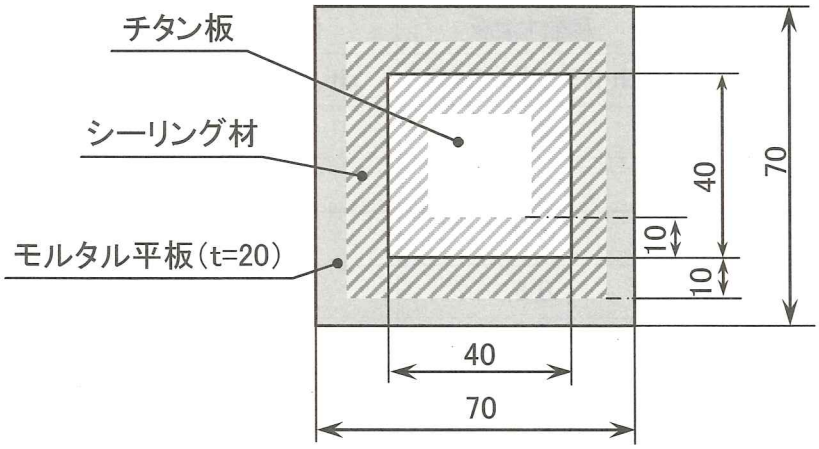


図６－９　アルカリ浸せき試験に用いた供試体の概略図

３．３．３．２　試験結果

40℃の飽和水酸化カルシウム水溶液に浸せきしたときの、チタン板とコンクリート平板との接着強さの経時変化を図６－１０に示す。両面粘着シートあるいは接着剤のいずれを使用して施工した場合も、浸せき開始直後から接着強さは徐々に低下し、両面粘着シートではおよそ 30 日後、接着剤ではおよそ 120 日後にほぼ一定の値となった。接着強度試験後の供試体の剥離面について肉眼で観察したところ、浸せき前の供試体ではチタン板/接着材料界面で剥離している箇所が大部分であったのに対し、浸せき後の供試体では接着材料/プライマー界面あるいは接着剤層内で剥離している箇所の面積が大きくなっていることが明らかとなった（図６－１１）。図６－１０および図６－１１の双方からアルカリ溶液による接着力の低下について考察すると、両面粘着シートの場合には粘着シート自体の劣化が、また、接着剤の場合には接着剤およびプライマーの劣化が、それぞれ強度低下の要因になったものと考えられる。

本研究では 40℃の水酸化カルシウム飽和水溶液という、比較的苛酷なアルカリ環境下で促進劣化試験を行った。現在のところ、この条件での耐アルカリ性試験について品質規格が定まっておらず、加速試験としての妥当性や接着力低下率の許容値については、今後の検討結果により結論を得たい。しかしながら今回の試験では、両面粘着シートあるいは接着剤のいずれで施工した場合にも、アルカリ環境下における接着強さの低下は 0.24N/mm^2 以上で留まっており、これらの接着材料がアルカリ環境下でもシートライニング工法の品質規格を満足することが明らかとなった。

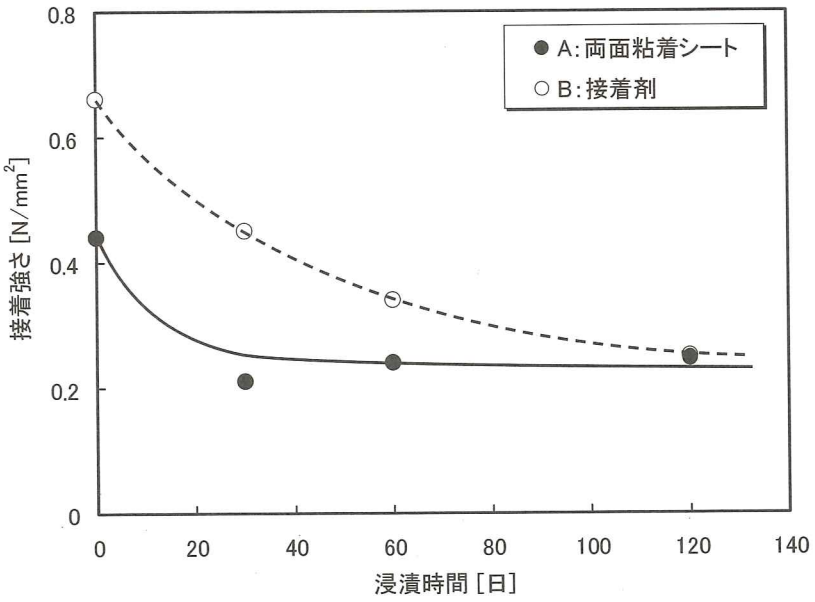
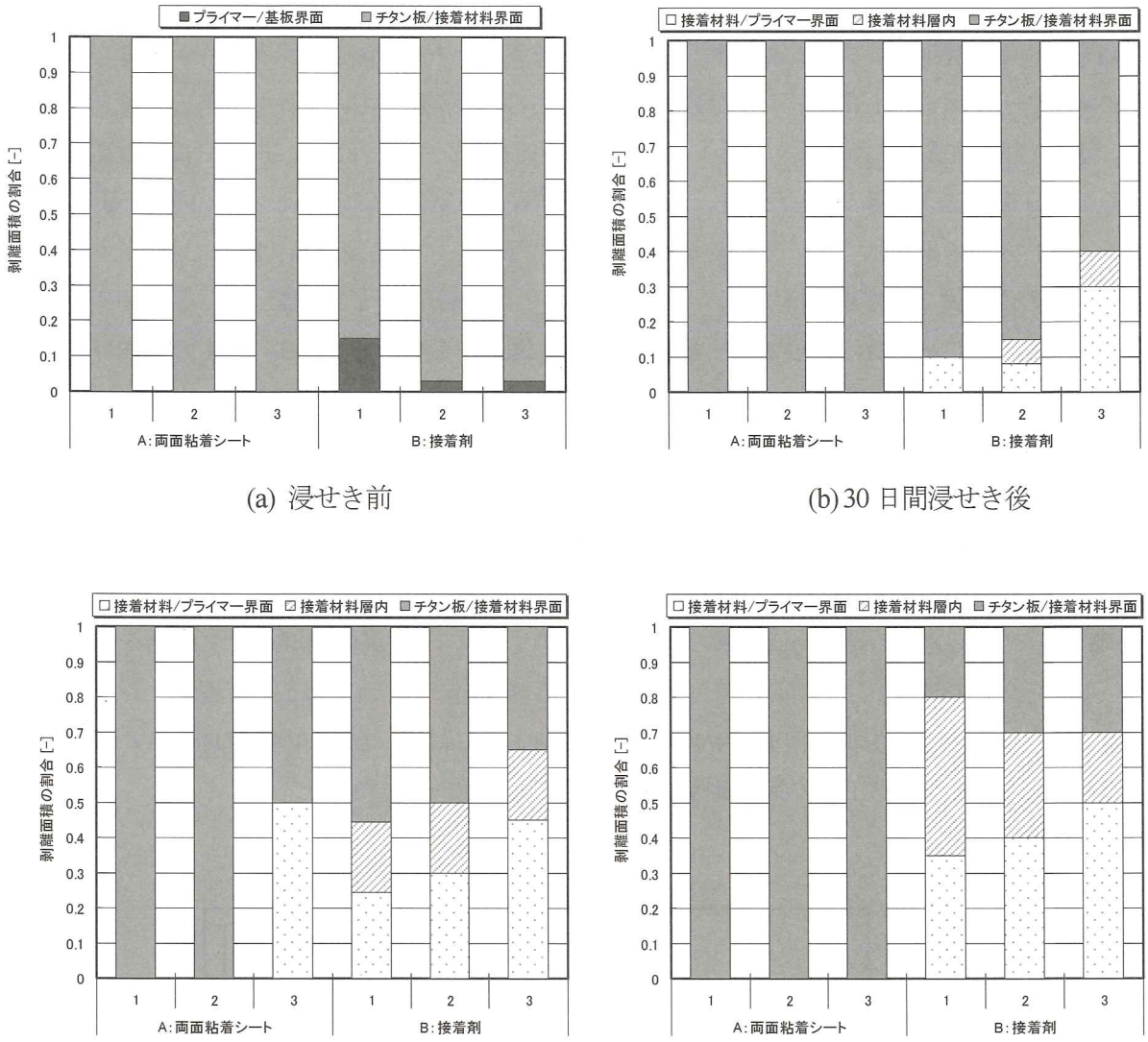


図６－１０　40℃の飽和水酸化カルシウム水溶液に浸せきしたときの接着強さの経時変化



(a) 浸せき前

(b) 30 日間浸せき後

(c) 60 日間浸せき後

(d) 120 日間浸せき後

図６－１１　40℃の飽和水酸化カルシウム水溶液に浸せきしたときの剥離箇所の変化

３．４　目地材料の硫酸遮断性に関する検討

３．４．１　目的

チタンシートライニング工法では、チタン板どうしの継ぎ目部分は重ね継ぎによって施工することを第２章で述べたが、この他に、チタン板の端面を突き合わせて施工することも可能である。いずれの場合も、継ぎ目部分からの環境液の浸入を妨げるために、シリコーン系のシーリング材で処理する。そこで、シリコーン系シーリング材の硫酸遮断性を確認するために、硫酸浸せき後の供試体について元素分析を行った。

３．４．２　試験方法

シリコーン系シーリング材の硫酸遮断性を評価するために、図６－１２に示すような供試体を作製し硫酸浸せき試験を行った。基板となるモルタル平板は、JIS R 5201 に基づき 150×70×20mm の寸法に成形した。３．２．２項に述べた手順により、モルタル平板（吸水状態）上に両面粘着シートあるいは接着剤を用いて 40×40×0.5mm のチタン板を２枚貼付した。このとき、２枚のチタン板は目地部分の間隔がおよそ 2mm となるように貼付した。チタン板の中央部約 20mm 四方を除き、供試体の全面をシリコーン系シーリング材でシールし、40℃の pH1 硫酸水溶液中に浸せきした。浸せき後の供試体断面について、特に目地部分を中心にエネルギー分散型 X 線分析装置（EDS）を用いた元素分析を行い、供試体表面からの硫黄元素の浸入深さを求めた。

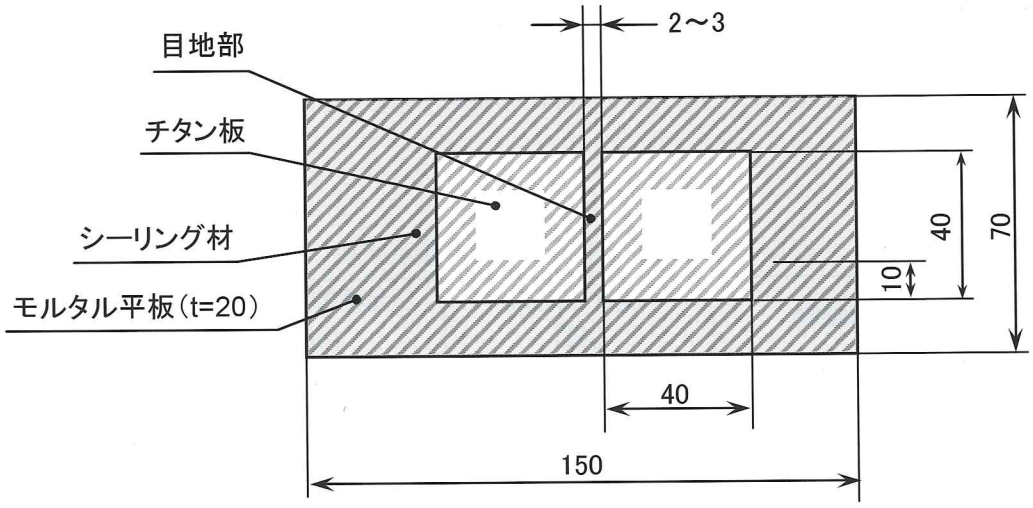


図６－１２　目地材料の硫酸遮断性試験に用いた供試体の概略図

３．４．３　試験結果

40℃、pH1 の硫酸水溶液に 120 日間浸せきした後の供試体断面について、EDS による元素分析を行った結果の一例を図６－１３に、硫黄元素の浸入深さの測定結果を表６－８に示す。

電子顕微鏡画像（図６－１３(a)）を見ると、チタン板とシーリング材が比較的良好に密着しており、シリコーン系シーリング材の施工性の良さが伺える。硫黄元素のマッピング像（図６－１３(b)）からは、チタン板/シーリング材界面も含め目地部分への硫黄元素の浸入が全く認められなかった。両面粘着シートあるいは接着剤、いずれで施工した供試体も最長 120 日間の硫酸浸せきを行ったが、同様に目地部分への硫黄元素の浸入は全く認められなかった。以上の結果から、シリコーン系シーリング材が優れた硫酸遮断性を有していることが明らかとなった。

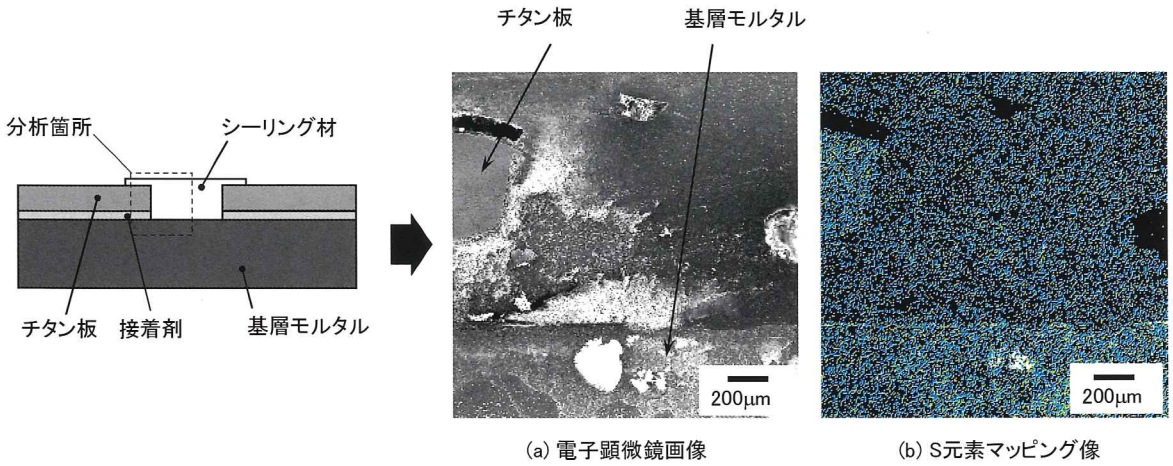


図６－１３　元素分析結果の一例（40℃、pH1 の硫酸水溶液中に 120 日間浸せき後）

表６－８　硫黄元素浸入深さの測定結果

接着材料	浸せき期間 [日]	S 元素の浸入深さ [μm]
A：両面粘着シート	0	0
	30	0
	60	0
	120	0
B：接着剤	0	0
	30	0
	60	0
	120	0

３．５　目地材料の遮水性に関する検討

３．５．１　目的

チタンは金属材料であるため、その遮水性能については申し分ない。それゆえ、チタンシートライニング工法としての遮水性能は、目地材料の性能によって左右される。そこで、シリコーン系シーリング材の目地材料としての適性を確認するために、当該材料で処理した目地部について透水試験を行い、その遮水性能を確認した。なお、日本下水道事業団によるシートライニング工法の品質規格では、防食被覆の遮水性能を圧力下での透水量（0.15g 以下）で規定している。

３．５．２　試験方法

シリコーン系シーリング材の遮水性能を評価するために、図６－１４に示すような供試体を作製し透水試験を行った。基板となるモルタル平板は、JIS R 5201 に基づき 150×150×40mm の寸法に成形した。３．２．２項に述べた手順により、モルタル平板（吸水状態）上に両面粘着シートあるいは接着剤を用いてチタン板（80×40×0.5mm）を 2 枚貼付した。このとき、2 枚のチタン板は目地部の間隔が 2mm となるように貼付し、チタン板端部および周囲をシリコーン系シーリング材でシールした。この供試体を 40℃、pH 1 の硫酸水溶液あるいは 23℃の水酸化カルシウム飽和水溶液中に 60 日間浸せきした後、透水試験を行った。

透水試験では、JIS A 1404 に基づき 0.29MPa の水圧を 1 時間かけ、水圧をかける前後の供試体の質量変化からシーリング材の透水量を求めた。

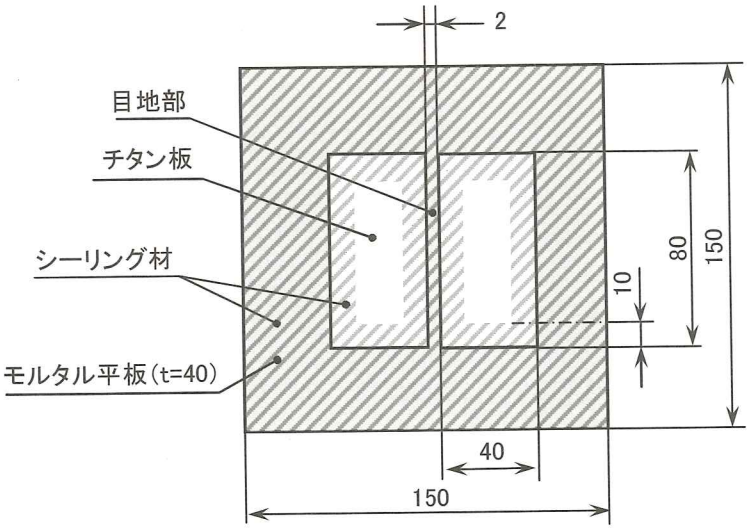


図６－１４　透水性試験に用いた供試体の概略図

３．５．３　試験結果

表６－９に透水試験の結果を示す。透水量のデータは、供試体３個の試験結果を平均した値である。いずれも、酸・アルカリ環境液浸せき前後で透水量の変化は極めて小さく、ほぼ0gという結果となった。前述の通り、シートライニング工法品質規格では透水量は0.15g以下と規定されているが、本試験結果はこの値を十分満足しており、シリコーン系シーリング材は優れた遮水性能を有していると言える。

３.４節における硫酸遮断性試験および本節における透水試験の結果から、シリコーン系シーリング材はチタンシートライニング工法における目地材料として適していることが明らかとなった。

表６－９　透水試験の結果

接着の種類	環境液	透水量 (g)
両面粘着シート	浸せき前	0
	40℃, pH1, H_2SO_4	-0.01
	23℃, $Ca(OH)_2$飽和水溶液	0.02
接着剤	浸せき前	0
	40℃, pH1, H_2SO_4	-0.01
	23℃, $Ca(OH)_2$飽和水溶液	0.01

4．まとめ

本編では、下水処理施設の新たなコンクリート補修技術を確立することを目的とし、純チタン板を防食被覆材として用いたシートライニング工法を開発した。開発した工法の下水道環境への適用性を評価するために、日本下水道事業団編纂の「下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術マニュアル」を参考に試験方法および条件を設定し、コンクリートとの固着性、耐硫酸性、耐アルカリ性、透水性、硫酸遮断性などについて試験した。得られた結論は、以下の通りである。

（1）両面粘着シートあるいは接着剤によりチタン板をコンクリート面に貼付する工法により、シートライニング工法の品質規格である 0.24N/mm^2 以上の接着強さが得られる。

（2）チタンシートライニング工法を湿潤コンクリート面に施工する際には、使用する接着材料およびプライマーの選択に十分留意すべきである。

（3）純チタンは pH 1（0.5wt%）よりも穏やかな硫酸環境下では十分な耐食性を示す。

（4）アルカリ環境下では、両面粘着シートあるいは接着剤のいずれで施工した場合にも、ある程度の接着強さの低下を生じる。

（5）シリコーン系シーリング材は優れた耐硫酸性、遮水性を有しており、チタンシートライニング工法における目地材料として適している。

参考文献

1) 木下和宏，等俊一，斉藤明宏：“チタンで防食耐久性と経済性を目指す”，土木施工，**44** 〔2〕，pp.16-21（2003）
2) 日本下水道事業団：下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術指針・同マニュアル，p.29（2002）

第７編　各種補修材料の現場における施工性に関する検討

１．目的と概要

第２編から第６編まで、本研究で開発した各種補修材料・工法について室内試験による性能評価を行った。その結果、いずれも下水処理施設のコンクリート補修へ十分適用可能であるとの結論が得られた。しかし、下水処理施設の現場への適用に当たっては、実際の下水処理施設において実大規模での施工性を検証し、施工のノウハウや留意点等の知見を得ておくことが不可欠である。

そこで、独立行政法人土木研究所に近い霞ヶ浦浄化センター内にある腐食防止対策実験施設の送水施設（吐出水槽）の壁面に、各種補修材料を数m²程度ずつ施工することにより施工性能を評価・検討した。霞ヶ浦浄化センターの位置図を図７－１、７－２に、腐食防止対策実験施設の概略図を図７－３に、また、施工試験を行った送水施設の外観写真を図７－４に示す。

施工性試験は、既に広く普及し施工技術も確立している塗布型ライニング材を除き、耐酸モルタル、ＦＲＰシートライニング工法およびチタンシートライニング工法について行った。吐出水槽内部の劣化したコンクリート壁面をウォータージェットではつり取り、水洗、下地処理後、各補修材料を工法仕様に基づき施工した。

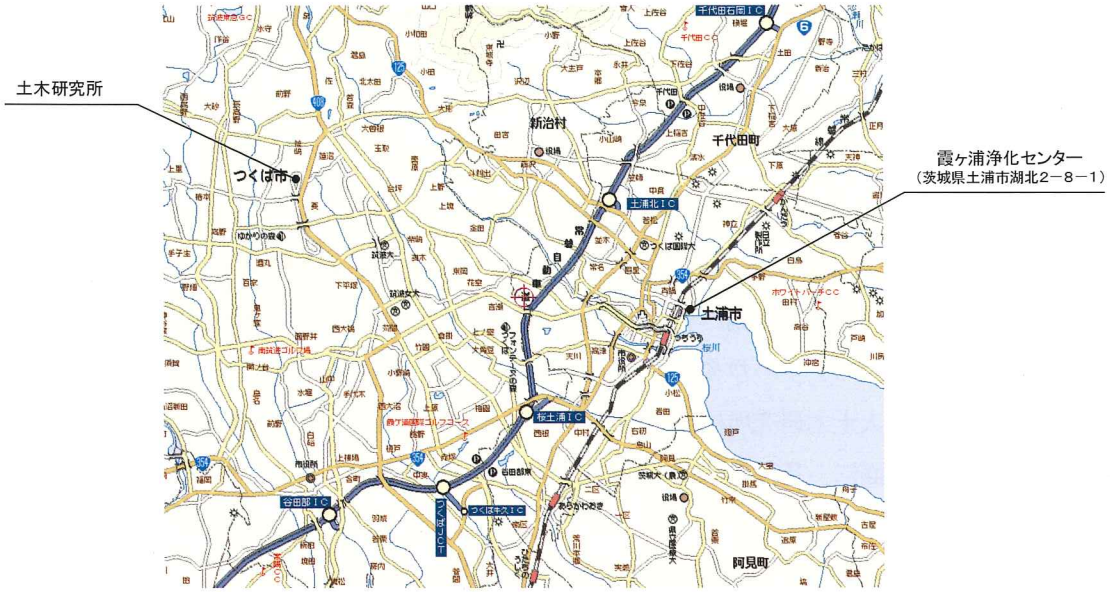


図７－１　霞ヶ浦浄化センター位置図



図７－２　霞ヶ浦浄化センター位置図

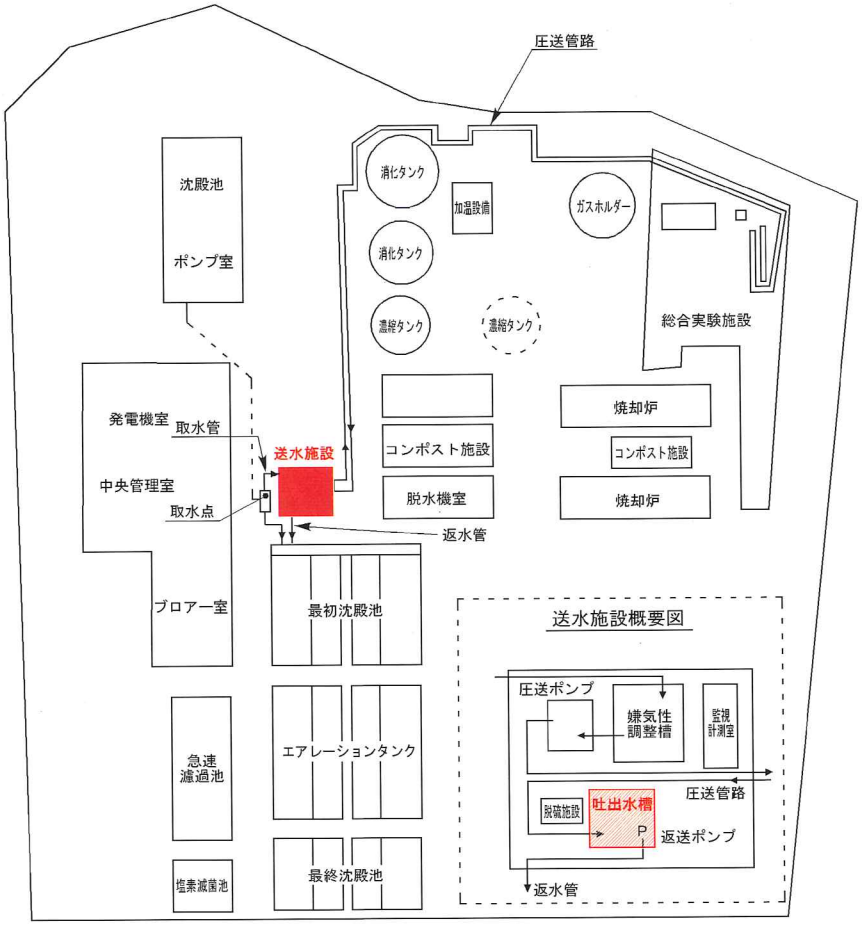


図７－３　霞ヶ浦浄化センター腐食防止対策実験施設の概略図

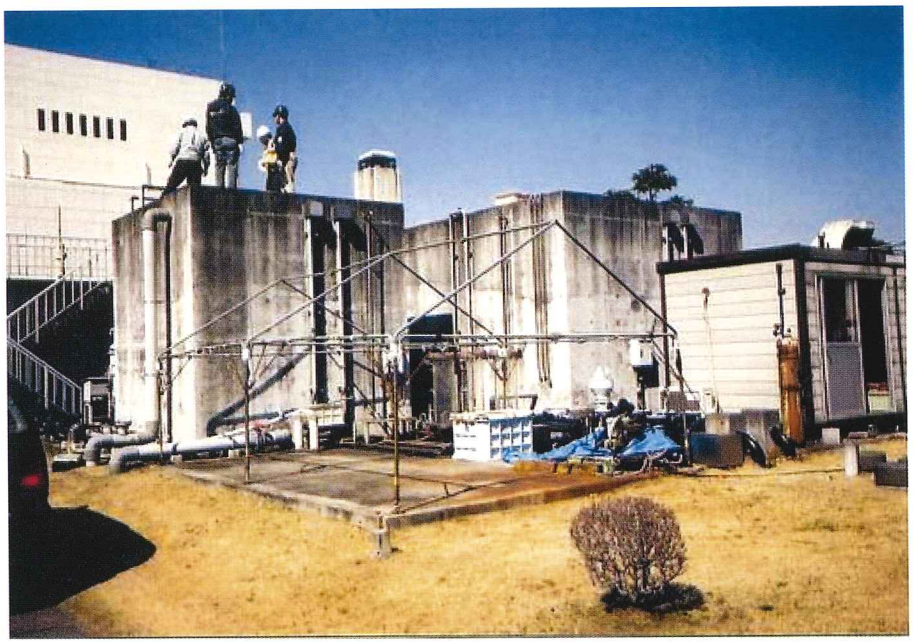


図７－４　送水施設の外観写真（左：吐出水槽、右：嫌気調整槽）

２．　耐酸モルタルの現場施工性に関する調査

２．１　方法

２．１．１　使用した耐酸モルタル

現場施工性に用いた耐酸モルタルを表７－１に示す。スチレン･ブタジエンゴム(SBR)系ポリマーセメントモルタルの耐酸モルタルＡ、再乳化型粉末アクリル系ポリマーセメントモルタルの耐酸モルタルＢおよび水性エポキシ系ポリマーセメントモルタルである耐酸モルタルＣの３種類を用いた。

表７－１　現場施工性に用いた耐酸モルタル

耐酸モルタル	モルタルの種類*	配　合（質量比）	混　練
耐酸モルタルＡ	SBR 系 PCM	粉体:混和液:水=100:6:9～9.5	ダマカットミキサー 2 分+2 分
耐酸モルタルＢ	アクリル系 PCM	粉体:水=100:16～19.2	ハンドミキサー(1000rpm) 2 分
耐酸モルタルＣ	エポキシ系 PCM	粉体:主剤:硬化剤:水 =100:8:1.6:12	ハンドミキサー(1300rpm) 液体 10 秒+2 分

＊　PCM：ポリマーセメントモルタル

２．１．２　施工面

施工面は図７－５に示す霞ヶ浦浄化センター内吐出水槽の壁面に、高さ1500mm×幅700mm(1.05m^2)のコンクリート面とした。コンクリート表面はウォータージェットではつり、平均はつり深さ 20～30mm（最大30～50mm、最小5～10mm）であった。（図７－６）

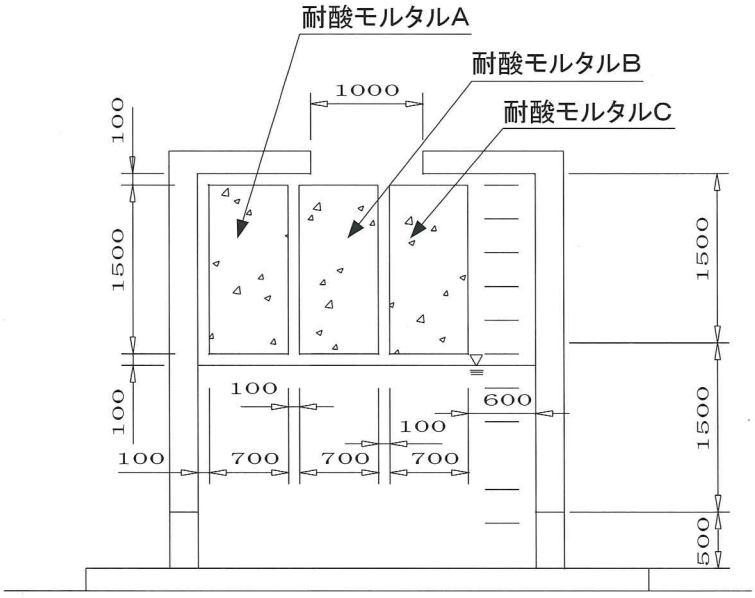


図７－5　耐酸モルタルの施工面



図７－６　はつり状況

２．１．３　施工

施工は温度約 30℃、湿度約 50%の環境条件で表７－２に示す下地処理後（プライマー塗布）、一般的な断面修復工法であるコテ塗り[1),2),3)]で行った。（図７－７～７－９）

なお、耐酸モルタルＡは防食ライニング材を施工しない場合を想定して施工後に高さ方向下半分に撥水剤をローラーで塗布し、耐酸モルタルＢについては全面に被膜養生剤を塗布した。また、耐酸モルタル施工後、施工個所の周辺はシーリング材でシールした。

表７－２　下地処理

耐酸モルタル	プライマーの種類	塗布量 (kg/m^2)	塗布方法
耐酸モルタルＡ	アクリル系	0.1～0.2	ｽﾌﾟﾚｰ噴霧
耐酸モルタルＢ	アクリル系	0.15	ｽﾌﾟﾚｰ噴霧
耐酸モルタルＣ	アクリル系	0.15	はけ塗り

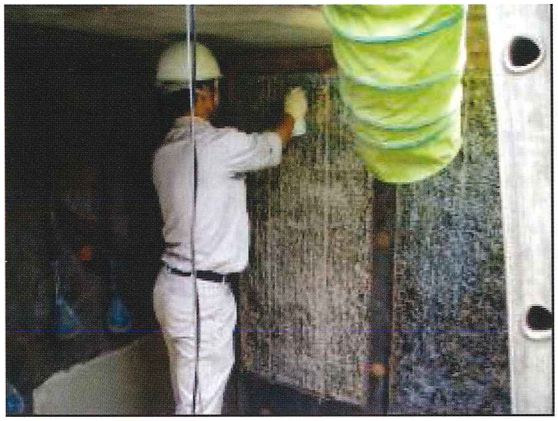
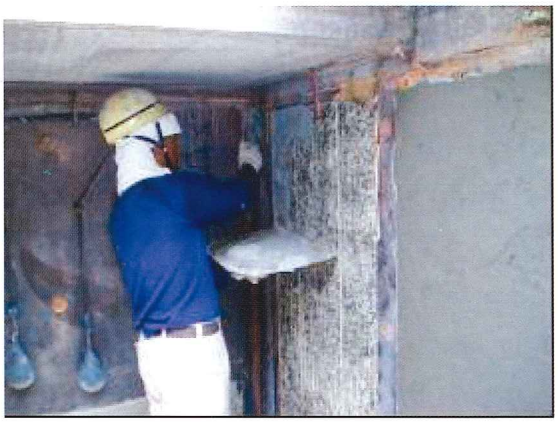
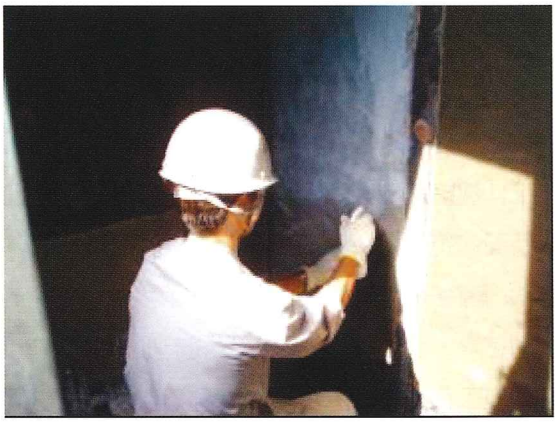
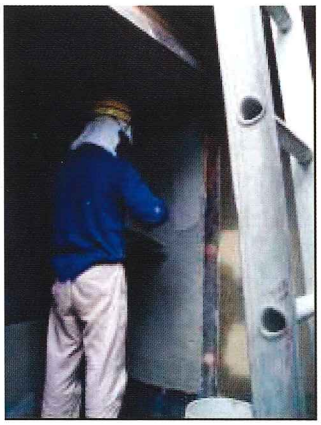
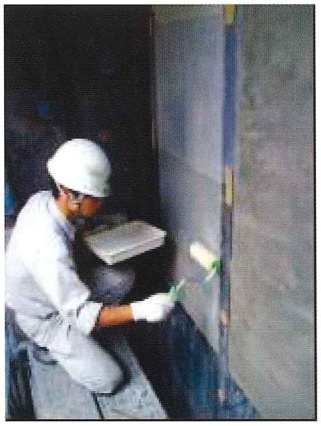
	
水洗後の下地状況	下地へのプライマー塗布状況
	
耐酸モルタル施工状況(1 層目)	1 層目上へのプライマー塗布状況
	
耐酸モルタル施工状況(2 層目)	撥水処理状況(下半分)

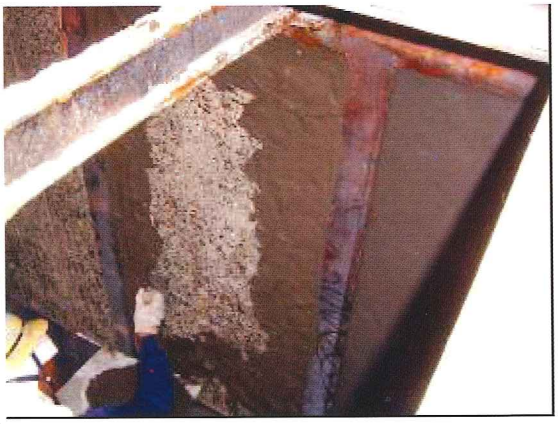
図７－７　施工状況（耐酸モルタル A）



施工前下地状況



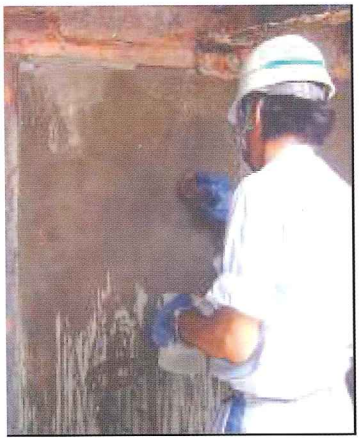
下地へのプライマー塗布完了



耐酸モルタル施工状況(1 層目)



耐酸モルタル施工状況(3 層目)



被膜養生作業

図７－８　施工状況（耐酸モルタルB）

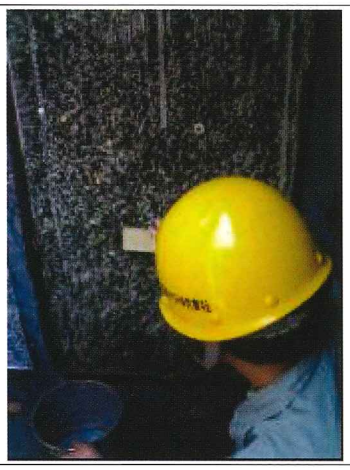
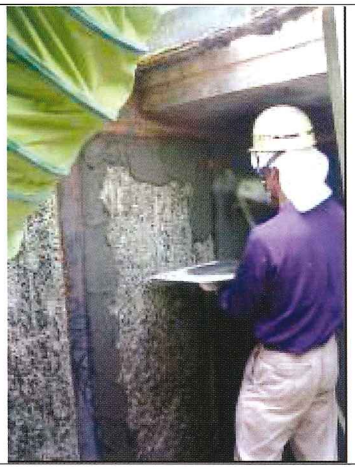
<table>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>施工前下地状況</td><td>水洗後の下地状況</td></tr>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>下地へのプライマー塗布状況</td><td>耐酸モルタル施工状況(1 層目)</td></tr>
<tr><td>  </td><td></td></tr>
<tr><td>耐酸モルタル施工状況(2 層目)</td><td></td></tr>
</table>

図７－９　施工状況（耐酸モルタルC）

２．２　結果および考察

耐酸モルタルの施工量を表７－３に示す。耐酸モルタルＡは２層塗り仕上げで平均施工厚は１層目19mm、２層目 7mm、耐酸モルタルＢでは３層塗り仕上げで１層目 21mm、２層目 5mm、３層目 8mm、耐酸モルタルＣについては２層塗り仕上げで１層目 18mm、２層目 4mm であった。なお、今回行ったウォータージェットでのはつりは施工箇所での凸凹が比較的大きいため、各耐酸モルタルは、主に１層目では凸凹を修正する下地処理、2,3 層目では仕上げとして施工を行った。

表７－３　耐酸モルタルの施工量

耐酸モルタル	施工層	施工量（リットル）	平均施工厚* (mm)
耐酸モルタルＡ	１層目	20.0	19
	２層目	7.0	7
耐酸モルタルＢ	１層目	22.5	21
	２層目	5.5	5
	３層目	8.4	8
耐酸モルタルＣ	１層目	18.5	18
	２層目	4.0	4

＊平均施工厚は施工量／施工面積で算出

いずれの耐酸モルタルにおいても、練り上がり性状は施工に適した良好な性状で、コテ塗りによる施工が可能であり、塗り厚 20mm 程度においてもダレやすべりは認められなかった。（図７－１０）

塗り重ねは施工に影響のないレベルで比較的早くこわばりが生じ、約 2～3 時間で塗り重ねが可能であった。



図７－１０　１層目仕上げ状況

施工後のモルタル表面は平滑に仕上がり、ダレやずりによるひび割れや乾燥によるプラスチックひび割れなどは認められず、良好な状態であった。（図７－１１）

また、施工翌日の状況（図７－１２～７－１４）は収縮などによるひび割れや浮きは認められなかった。

以上の結果から、耐酸モルタルは市販の汎用断面修復材と同様な施工性・硬化性状を有しているものと考えられる。

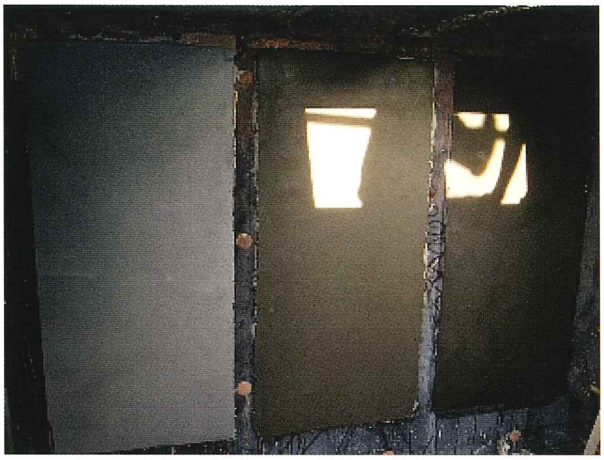


図７－１１　施工仕上がり状況

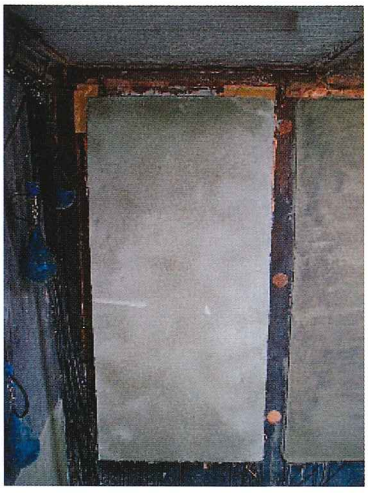


図７－１２　翌日状況
（耐酸モルタルA）



図７－１３　翌日状況
（耐酸モルタルB）

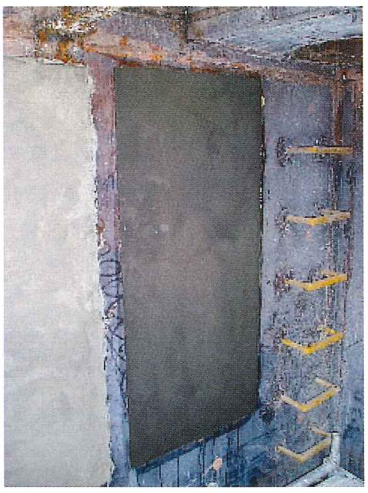


図７－１４　翌日状況
（耐酸モルタルC）

２．３　施工方法および品質管理方法

耐酸モルタルの施工方法および品質管理方法は、補修材料製造会社によって施工マニュアルがあるので、その最大公約数程度の大まかな施工手順および品質管理方法について記述する。各社の施工マニュアルおよび品質管理方法の詳細については、添付施工マニュアルを参照されたい。

２．３．１　施工手順

施工手順をは箇条書きに示す。

（1）コンクリート表面をウォータージェットなどを用いて下地処理を行う。

（2）コンクリート表面を水洗する。

（3）下地処理後、プライマーを塗布する。

（4）コテ塗りや吹付け工法などにより断面修復　→　厚さに応じて２～３層

（5）耐酸モルタル施工後に、撥水剤や被膜養生剤などをローラー塗布またはスプレー噴霧する。

２．３．２　品質管理

品質管理手法については、工事現場管理のために必要であるが性能指標が定められていないので、定められた品質管理マニュアルは存在しないが、今後施工実績を増加させるためには必要となる。

３．　ＦＲＰ引抜成形材の現場施工性に関する調査

３．１　方法

３．１．１　施工対象

ＦＲＰ引抜成形材を用いた新しいシートライニング材による防食被覆工法（以下、ＦＲＰ防食パネル工法と称す）の施工性を確認するために、霞ヶ浦浄化センター内の吐出水槽壁面の一部分に適用した。表７－４に施工概要、図７－１５に吐出水槽の外観、図７－１６に施工前の吐出水槽内部、図７－１７に施工位置図を示す。

表７－４　施工概要

場　　所	霞ヶ浦浄化センター　吐出水槽（茨城県土浦市）
期　　間	平成 16 年 7 月 15 日～21 日
施工範囲	C～D 面：タテ 1.8 m×ヨコ 3.4 m　（入隅部 1 ヶ所）
施工面積	6.1 m^2
施工位置	底版から 1.4 m～3.2 m（液相から気相部）
モルタル充填厚さ	55 mm

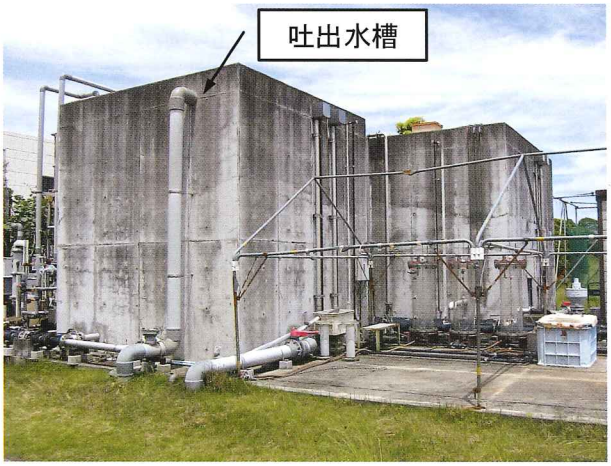


図７－１５　吐出水槽の外観



図７－１６　施工前の吐出水槽内部

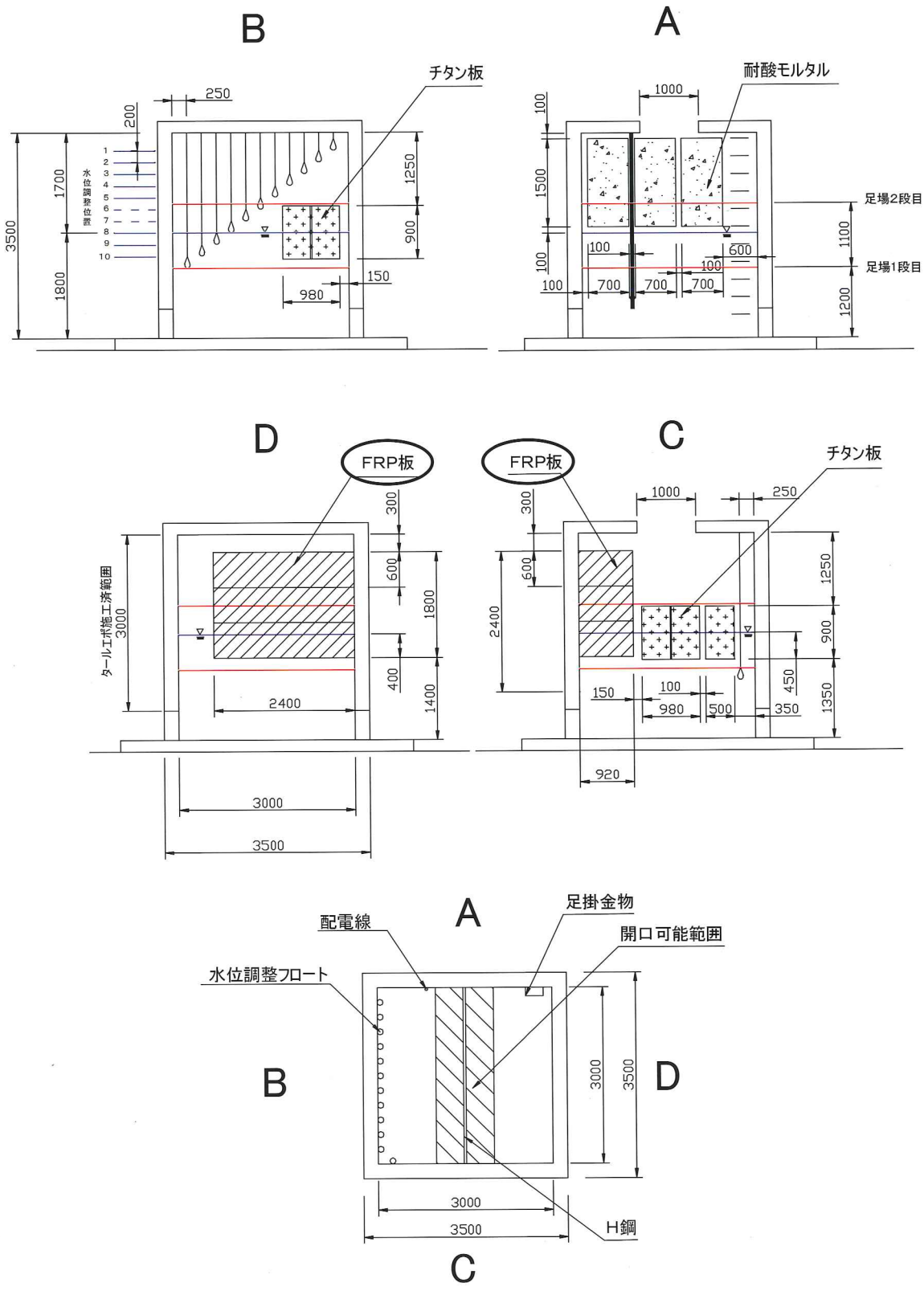

B
チタン板
250
200
1700
1800
3500
1250
900
150
980
水位調整
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
A
耐酸モルタル
1000
100
1500
100
100
700
700
700
100
100
600
足場2段目
足場1段目
1100
1200
D
FRP板
300
600
1800
400
1400
2400
3000
3500
タール工ポ施工済範囲
3000
C
FRP板
チタン板
1000
250
300
600
2400
1250
900
450
1350
150
100
980
500
350
920
A
配電線
足掛金物
開口可能範囲
水位調整フロート
B
D
3000
3500
H鋼
C

図７－１７　施工位置図

３．１．２　施工手順

施工手順を図７－１８に示す。主な工種は、準備工、アンカー設置工、ＦＲＰパネル組立工、ＦＲＰパネル支保工、モルタル充填工および目地工であり、以下にアンカー設置工以降の詳細を示す。

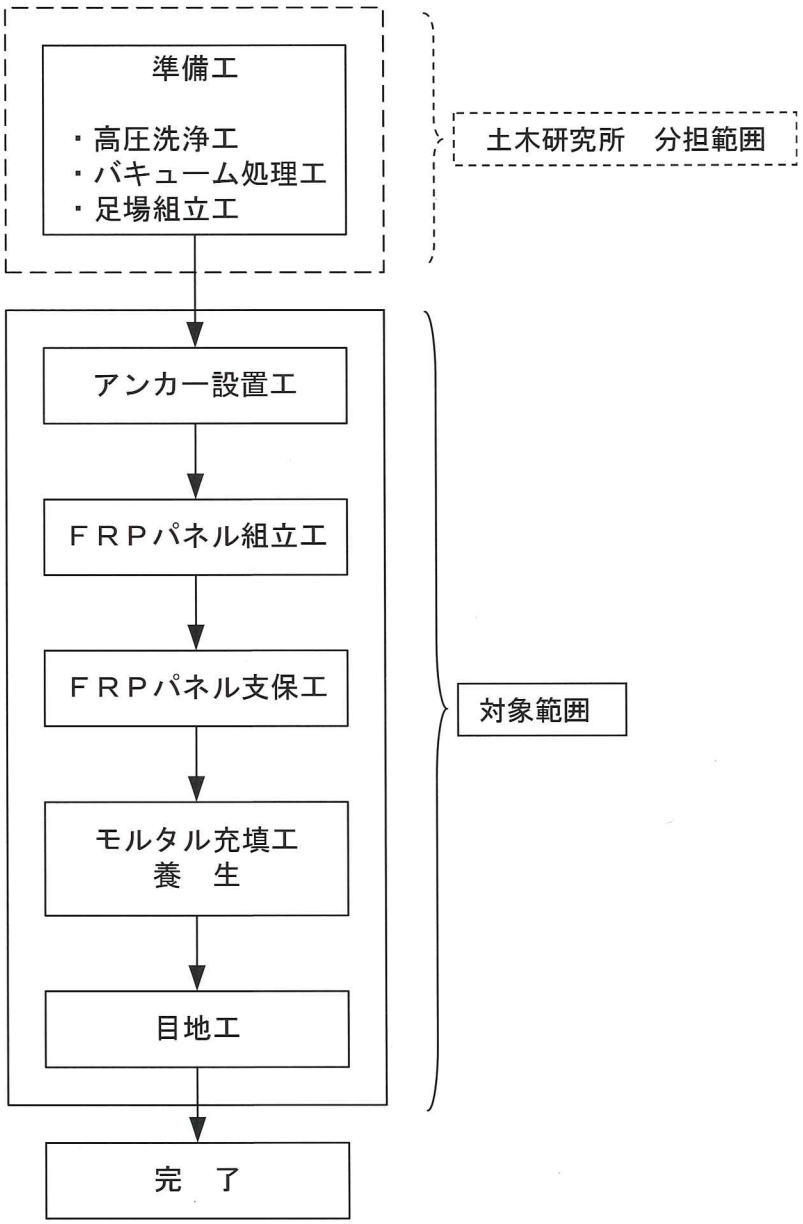


図７－１８　施工手順

(1) アンカー設置工

・高圧洗浄後の既設コンクリート表面に電子レベルによる基準線をもとに、アンカー削孔位置を墨出しする（図７－１９参照)。

・ハンマードリルでアンカー用の穴を削孔後、穴にフォームタイアンカーを挿入し、打ち込み棒でフォームタイアンカーを固定する。

(2) ＦＲＰパネル組立工

・寸切りボルトを 5～10 cm の長さに切断後、フォームタイアンカーにねじ込む。続いて、充填モルタルの所定厚さとなるように、レジコン〔樹脂製コン〕を寸切りボルトにねじ込み後、レジコンに軸足（L=27 mm）をねじ込む（図７－２０参照)。

・所定長さに切断したＦＲＰ接合板にアンカー位置に合わせて削孔後、軸足に差し込む（図７－２１参照)。

・入隅部は、コーナー用固定金物を使用してＦＲＰコーナーアングルを取り付ける（図7－２２参照)。

・ＦＲＰパネルを下段から取り付け、フォームタイで仮留めする（図 7－２３参照)。

・側面および底面端部はマルチアンカー施工後、側面端用のＳＵＳアングル（縦 75 mm×横 75 mm×厚さ 6 mm）と底面用のＳＵＳアングル（縦 150mm×横 150mm×厚さ 12mm）をボルトで固定する（図7－２４参照)。



図７－１９　高圧洗浄後の既設コンクリート表面

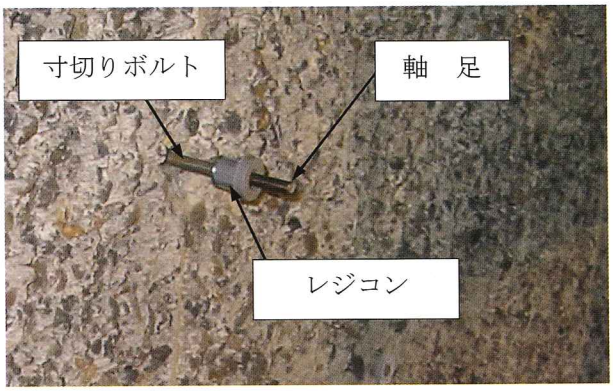


図７－２０　寸切りボルト・レジコン・軸足の設置

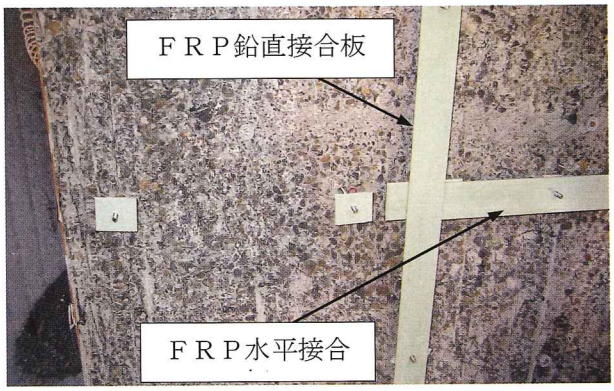


図７－２１　接合板設置状況



図７－２２　接合板設置状況

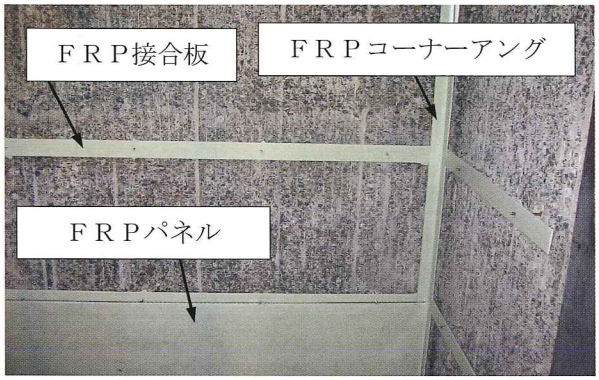


図７－２３　ＦＲＰパネル組立状況



図７－２４　ＦＲＰパネル組立完了

(3) ＦＲＰパネル支保工組立

・図７－２５と図７－２６に支保工組立を示す。

・鋼管バタパイプ（φ48.6 mm）を使用し、縦バタを約 300 mm 間隔、横バタを 600 mm 間隔で設置し、フォームタイで固定する。

・目地部のバタは、2 本使いとなっている。



図７－２５　ＦＲＰパネル支保工組立①

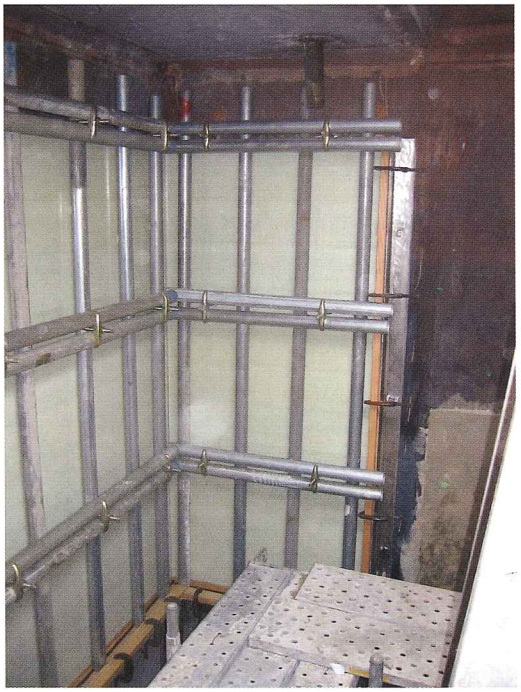


図７－２６　ＦＲＰパネル支保工組立②

(4) モルタル充填工

【使用材料】

・充填性および充填後の体積変化に考慮して、配合を決定した。使用材料を表７－５に示す。

表７－５　使用材料

種　類	名称、主成分等	
セメント	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ、比重 3.16	
細骨材	富津産山砂、表乾比重 2.61	
混和材料	膨張材	ｶﾙｼｳﾑｻﾙﾎｱﾙﾐﾈｰﾄ系化合物
	シリカフューム	比重 2.20、比表面積 100000 m^2/g 以上
	高性能 AE 減水剤	ﾎﾟﾘｶﾙﾎﾞﾝ酸特殊分離低減型
	収縮低減剤	低級ｱﾙｺｰﾙのｱﾙｷﾚﾝｵｷｼﾄﾞ付加物

【製造・充填機器】

・モルタルの製造・充填には、容量 120 リットルのモルタルミキサー、圧送用モルタルホッパー、モルタルポンプおよびφ38mm 網入り耐圧ホースを使用し、電圧は全て 100V とした（図７－２７参照）。



図７－２７　モルタル製造・充填機器

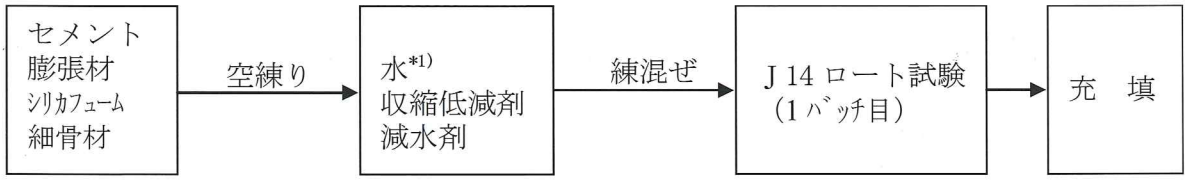
【製造および充填】

・表７－６にモルタル配合表を、図７－２８に練混ぜ手順を示す。
・練混ぜは、１バッチ分を袋セメント２袋（50 kg）当たりとした。
・練混ぜ後、J14 ロート値が所定の範囲内にあること確認してＦＲＰパネル内に充填した。
・充填モルタルの液圧によるＦＲＰパネルのはらみ出しや目地部からのモルタルの漏れ出しを防止するため、全高 1.8 m の約６割（1.1 m）を充填した時点で１時間のインターバルを取った後、残りを充填した。
・設計厚さ 55 mm、設計体積 0.31 m^3 に対して、実厚さ 65 mm、実体積 0.38 m^3（5 バッチ分）を製造、充填して作業を終了した。
・充填完了後の養生期間は２日間とした。

表７－６　モルタル配合表

W/B*1 (%)	S/B (%)	EA/C (%)	SF/C (%)	単位量(kg/m^3)						
				水 W	ｾﾒﾝﾄ C	膨張材 EA	ｼﾘｶﾌｭｰﾑ SF	細骨材 S	収縮低減剤 TG	高性能 AE 減水剤 Sp
40.0	1.50	6.0	10	294	661	40	66	1150	6.61*2	6.52*3

*1:単位結合材量(B)=普通ｾﾒﾝﾄ(C)+ｼﾘｶﾌｭｰﾑ(SF)+膨張材(EA)
*2:C×1.0%
*3:B×0.85%



*1) 低減剤と減水剤を水に混ぜた後にミキサー内に投入する。

図７－２８　モルタル練混ぜ手順

(5) 目地工

・充填モルタルの２日間の養生完了後、ＦＲＰパネル支保工を解体し、目地部周囲にマスキングテープを貼付する。(図７－２９、図7－３０参照)

・目地部に耐食性の優れた樹脂を塗り込み、硬化前にレジコン穴を利用してプラスチックネジで既設コンクリートとＦＲＰパネルを一体化させる（図７－３１参照)。

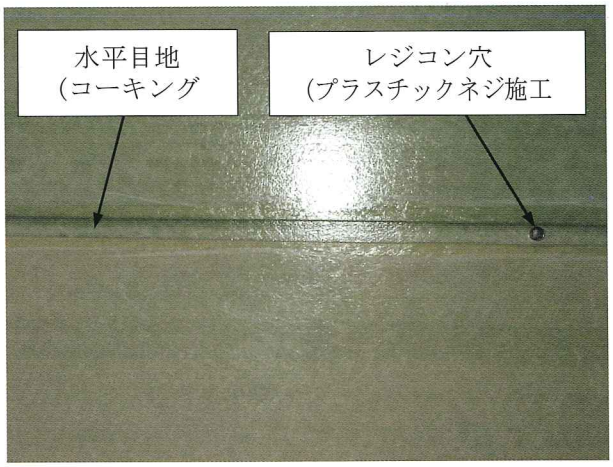


図７－２９　コーキング前の水平目地

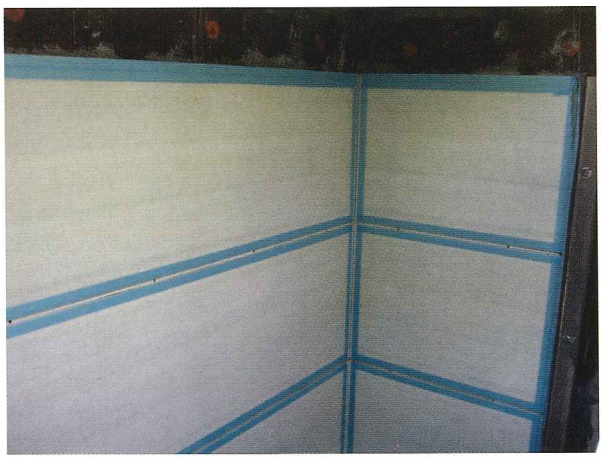


図７－３０　目地部マスキング状況

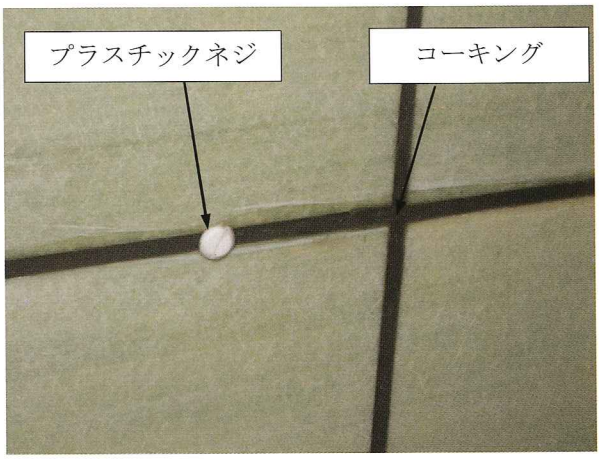


図７－３１　コーキング完了

(6) 施工完了

・図７－３２に施工完了状況を示す。



図７－３２　施工完了

３．１．３　作業工程

表７－７に今回（施工面積 6.1m²）のＦＲＰ防食パネル工法の作業工程を示す。充填モルタルの養生期間２日間を含めた場合、アンカー設置工から片付けまでの作業工程は５日間であった。

表７－７　ＦＲＰ防食パネル工法の作業工程（施工面積 6.1㎡）

工種＼日数	1	2	3	4	5
アンカー設置工	―				
FRP パネル組立工		―			
FRP パネル支保工			―		
モルタル充填工			―		
養　生			― ― ―	― ― ―	
支保工解体 目地工					―
片付け					―

３．２　施工性に関する考察

以下に施工に関する考察を示す。

・ＦＲＰパネルのサイズは、長さ 2700×幅 600×厚 5 mm、重さ 18.4 kgf で、人力での搬入・組立作業が容易にできた。

・ＦＲＰパネルの組立は、型枠用合板による型枠および支保工の組立とほぼ同様にできた。

・硬化後の体積変化と流動性を考慮した現場練り充填モルタルの製造および充填は、耐圧ホースの閉塞やＦＲＰパネル目地部からの漏れ等のトラブルもなく、良好な施工性が確認できた。

・目地部のコーキング作業は、樹脂のダレや硬化不良等は見られず、問題なく施工できた。

３．３　施工方法および品質管理方法

ＦＲＰ引抜成形材を用いた新しいシートライニング材による防食被覆工法の施工性を確認するために、霞ヶ浦浄化センター内の吐出水槽壁面の一部分に適用したが、本現場施工の施工手順から施工マニュアルを構築してゆく予定である。

３．３．１　施工手順

施工手順の概要は、図７－１８に示した通りである。

３．３．２　品質管理

耐酸モルタルと同様に、品質管理手法については、工事現場管理のために必要であるが性能指標が定められていないので、定められた品質管理マニュアルは存在しないが、今後施工実績を増加させるためには必要となる。

４．　チタンシートライニング工法の現場施工性に関する調査

４．１　方法

４．１．１　施工したチタンシートライニング工法

第６編の「２．チタンシートライニング工法の概要」で述べた３種類の工法（A 法、B 法、C 法）について実槽内での施工性試験を実施し、補修工法の特性と施工性を調査確認した。試験を実施したチタンシートライニング工法の仕様を表７－８に示す。

表７－８　施工性試験を実施したチタンシートライニング工法の仕様

工法	チタン薄板	プライマー	接着材料	接着面	シーリング材	アンカーボルト	施工対象
A 法	JIS 2 種 0.5mm 厚	ブチル系	両面粘着シート（アクリル系）	全面	シリコーン系	有り（500mm 間隔）	地上&地下施設
B 法		ウレタン系	接着剤（エポキシ系）	全面			地上&地下施設
C 法		ブチル系	両面粘着テープ（アクリル系）	縁部 50mm			地上施設

４．１．２　施工対象

施工性試験は、霞ヶ浦浄化センター内にある吐出水槽の西側壁面（B 面）および南側壁面（C 面）の一部を利用して実施した。表７－９に施工概要、図７－３３に施工位置図を示す。なお、B 面には２枚のチタン板をＢ法により施工し、C 面にはＡ法により２枚、C 法により１枚のチタン板を施工した。A 法あるいはＢ法の継ぎ目部分は重ね継ぎ（幅 50mm 程度）とし、A 法およびＣ法の間には 20mm の目地を設けシリコーン系シーリング材で処理した。

表７－９　施工概要

場　　所	霞ヶ浦浄化センター　吐出水槽（茨城県土浦市）
期　　間	平成 16 年 8 月 5 日～6 日
施工範囲	吐出水槽：Ｂ面（950×900mm）、Ｃ面（1,450×900mm）
施工面積	約 2.2m^2
施工位置	底版から 1.35m～2.25m（液相から気相部）
モルタル補修厚さ	約 10mm

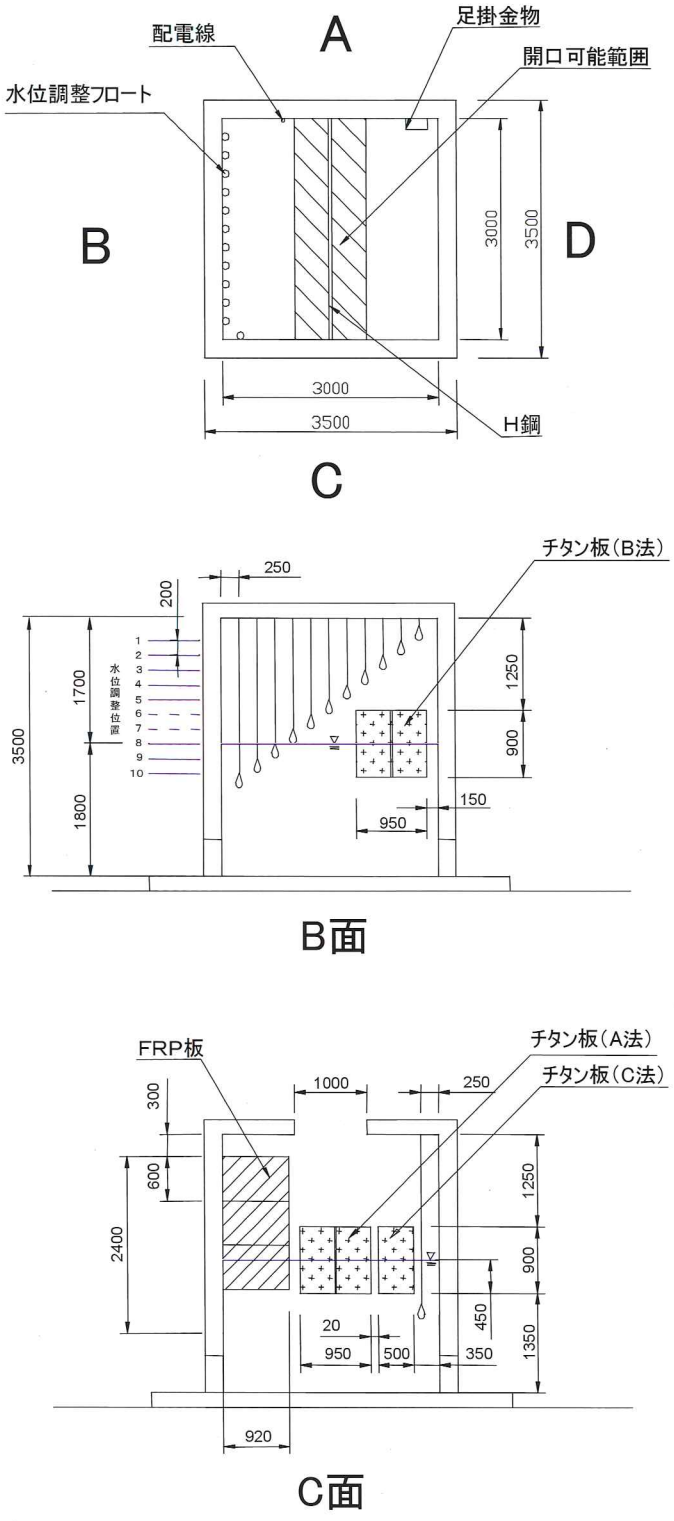

配電線
A
足掛金物
開口可能範囲
水位調整フロート
B
D
3000
3500
3000
3500
H鋼
C
チタン板（B法）
250
200
1700
1800
3500
水位調整台
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
1250
900
150
950
B面
FRP板
チタン板（A法）
チタン板（C法）
1000
250
300
600
2400
1250
900
450
1350
20
950
500
350
920
C面

図７－３３　施工位置図

４．１．３　施工手順

各工法別の施工手順を図７－３４に示す。主な作業はチタン板への接着材料塗布・貼付、モルタルへのプライマー塗布、モルタルへのチタン板セットとライニング、チタン板端部等へのシーリングなどである。

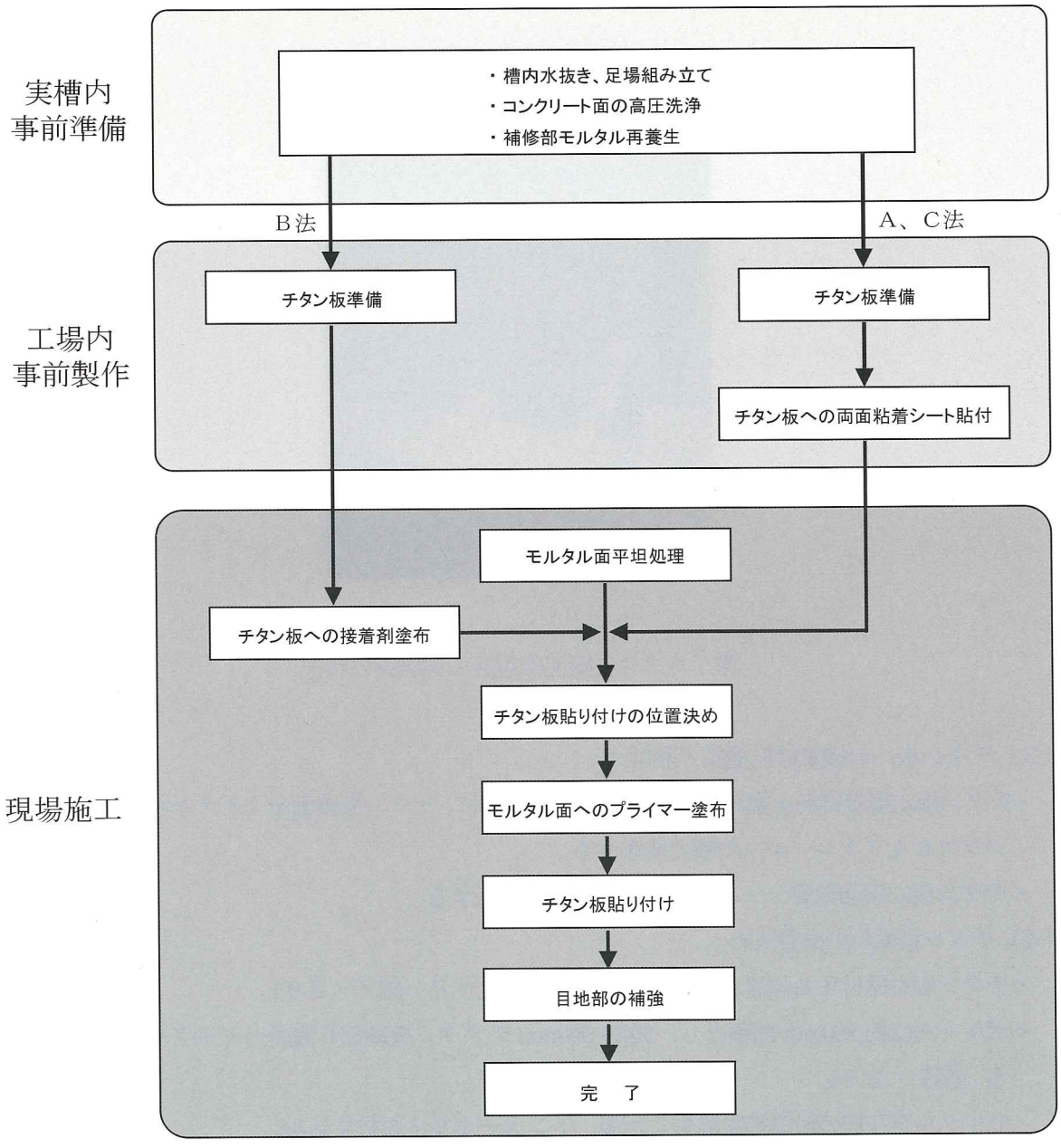


図７－３４　施工手順

施工手順の詳細は以下の通りである。

（1）チタン板準備

・試験に用いるチタン板として、500×900×0.5mm　5枚を大板からシャーにて裁断する。

・裁断後のチタン板は切断部のバリを除去し、施工に支障をきたすような歪は矯正する。

（2）コンクリート補修

・断面修復後のモルタル面（図７－３５）を、サンドペーパーにて極力平坦にする。

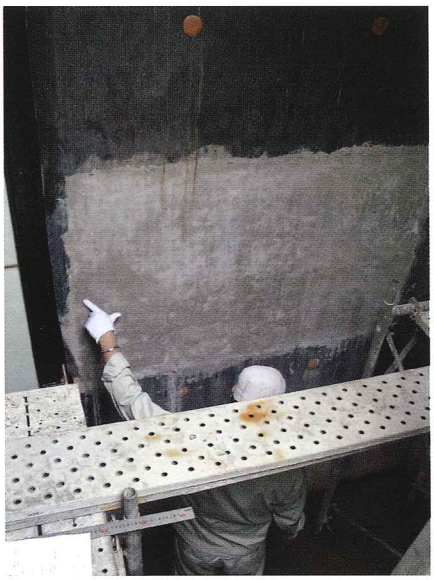


図７－３５　断面修復後の試験面の状況

（3）チタン板への接着材料塗布・貼付

・チタン板に接着材料を塗布あるいは貼付する直前に、チタン板表面を「メチルエチルケトン」「イソプロピルアルコール」の順で洗浄する。

・チタン板に両面粘着シートあるいは接着剤を施工する。

（4）チタン板貼付の位置決め

・チタン板を貼付する位置およびボルト位置を決定する（図７－３６）。

・ボルト穴は約500mm間隔とし、500×900mmのチタン板端部６箇所とモルタル面へ穴あけを行う（図７－３７）。

・モルタル穿孔部の粉塵等を除去した後、アンカーボルトを打ち込む。



図７－３６　チタン板セット作業



図７－３７　モルタル面へのボルト穴あけ作業

（5）モルタル面へのプライマー塗布

・チタン板を貼付するモルタル面に、各工法仕様にしたがってプライマーを塗布する（図７－３８）。

・プライマーは極力厚めに塗布し、接着性を向上させる。

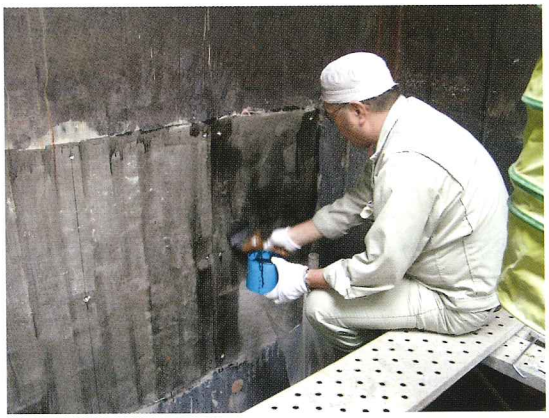


図７－３８　モルタル面へのプライマー塗布作業

（6）チタン板貼り付け

・プライマー塗布から 15 分程度経過した後、（指触しても付着しない程度）チタン板を貼付する。

・チタン板をチタン製の特殊ボルト*)で固定する。

＊）特殊アンカーボルト：M10×20L のチタン製ボルトと直径 40mm のチタン製ワッシャーを溶接させて一体化したもの（図７－３９）。ボルト付近からの環境液の浸入を極力抑える構造となっている。

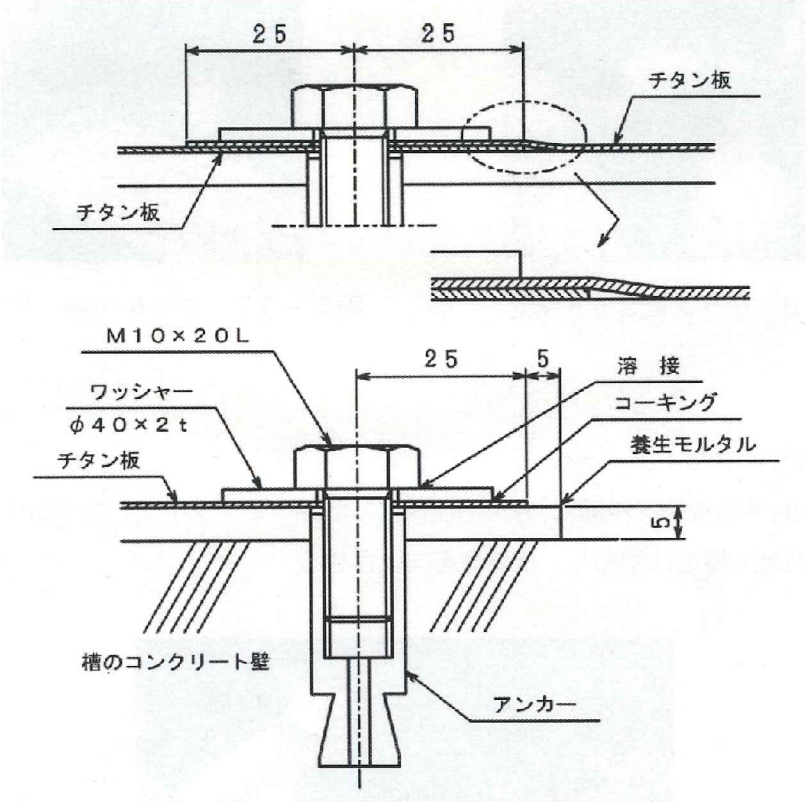


図７－39　アンカーボルト締結の概略図

（7）目地部の補強

・チタン板の端部、継手部およびボルトの外周をシリコーン系シーリング材でシールする（図７－４０）。

・シーリング材はチタン板外周を中心に、幅 20mm 程度となるように塗布した。また極力厚めに塗布し、保護力を高めるようにした。

施工完了時のチタンシートライニング外観写真を図７－４１に示した。



図７－４０　目地部のコーキング作業

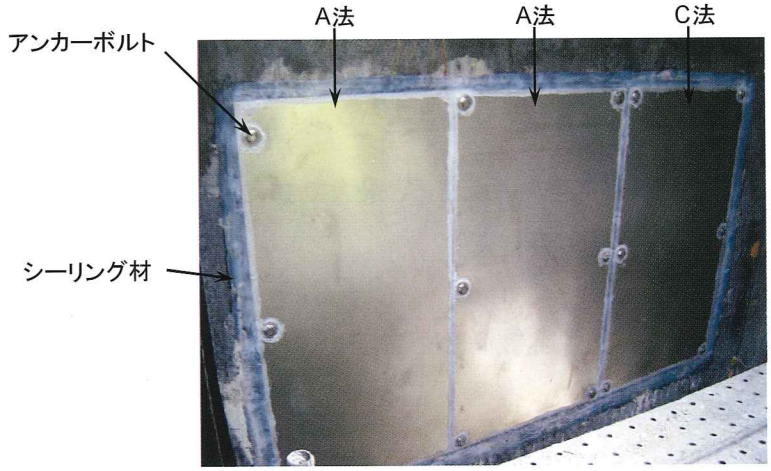


図７－４１　施工完了

４．１．４　作業工程

施工性試験における作業工程期間は、対象モルタル面の表面処理からチタン板施工、シーリング材塗布、片付けまでの延べ２日間であった（表７－１０）。

表７－１０　チタンシートライニング工法の作業工程

	１日目	２日目
準備・段取り	―	
A法、C法の貼り付け	―	
B法の貼り付け		―
片付け		―

４．２　施工性に関する考察

施工作業性は、C 法 → A 法 → B 法の順に良好であった。以下に、施工性試験により明らかとなった、各工法の長所・短所をまとめた。

（1）B法（接着剤方式）

・両面粘着シートのような事前作業ができないため、現場での接着剤塗布作業となる。

・チタン板の位置決めは比較的容易だが、チタン板に反りや補修モルタル表面に不陸がある場合、チタン板をモルタル面に密着させて施工することが困難となる欠点がある。この様なケースには、特殊ボルトの打ち込み本数を増やすなどして対応する必要がある。

・ライニングのチタン板サイズは、作業性を考慮すると最大で 1m 四方が妥当である。

（2）A法、C法（両面粘着シート方式）

・両面粘着シートはチタン板への事前貼付が可能であるため、現場における作業が効率的である。

・両面粘着シートは粘着力が強く、モルタル面に一度接触したら剥がしづらい。そのため、チタン板の位置決めが比較的困難である。

・ライニングのチタン板サイズは、作業性を考慮すると最大で 1m 四方が妥当である。

４．３　施工方法および品質管理方法

耐食金属チタンによるシートライニング防食被覆工法の施工性を確認するために、霞ヶ浦浄化センター内の吐出水槽壁面の一部分に適用したが、本現場施工の施工手順から施工マニュアルを構築してゆく予定である。

４．３．１　施工手順

施工手順の概要は、図７－３４に示した通りである。

４．３．２　品質管理

耐酸モルタルと同様に、品質管理手法については、工事現場管理のために必要であるが性能指標が定められていないので、定められた品質管理マニュアルは存在しないが、今後施工実績を増加させるためには必要となる。

５．まとめ

本編では、本共同研究において開発した各種補修材料・工法（耐酸モルタル、FRP シートライニング工法、チタンシートライニング工法）について、霞ヶ浦浄化センター内の腐食防止対策実験施設で実大規模での試験施工を行い、現場施工性を評価・検討した。得られた結果をまとめると、以下の通りである。

（１）耐酸モルタル

・いずれの耐酸モルタルも練り上がり性状は施工に適した良好な性状で、コテ塗りによる施工が可能であり、塗り厚が 20mm 程度でもダレやすべりは認められなかった。

・塗り重ねは施工に影響のないレベルで比較的早くこわばりが生じ、約 2～3 時間で塗り重ねが可能であった。

・施工後のモルタル表面は平滑に仕上がり、ダレやずりによるひび割れや乾燥によるプラスチックひび割れなどは認められず、良好な状態であった。

・施工翌日の状況は収縮などによるひび割れや浮きは認められなかった。

・耐酸モルタルは市販の汎用断面修復材と同様な施工性・硬化性状を有しているものと考えられる。

（２）ＦＲＰシートライニング工法

・ＦＲＰパネルは、長さ 2700×幅 600×厚 5 mm の寸法で重さが 18.4 kg であり、人力での搬入・組立作業が容易にできた。

・ＦＲＰパネルの組立は、型枠用合板による型枠および支保工の組立とほぼ同様にできた。

・硬化後の体積変化と流動性を考慮した現場練り充填モルタルの製造および充填は、耐圧ホースの閉塞やＦＲＰパネル目地部からの漏れ等のトラブルもなく、良好な施工性が確認できた。

・目地部のコーキング作業は、樹脂のダレや硬化不良等は見られず、問題なく施工できた。

（３）チタンシートライニング工法

・接着剤を用いる工法はチタン板の位置決めは比較的容易だが、チタン板に反りや補修モルタル表面に不陸がある場合、チタン板をモルタル面に密着させて施工することが困難であった。

・両面粘着シートはチタン板への事前貼付が可能であるため、現場における作業が効率的であった。

・両面粘着シートは粘着力が強く、モルタル面に一度接触したら剥がしづらいため、チタン板の位置決めが比較的困難であった。

・ライニングのチタン板サイズは、作業性を考慮すると最大で1m四方が妥当であると考えられる。

参考文献

1) 日本下水道事業団編著，“下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術指針・同マニュアル”，(2002.12)
2) 東京都下水道局施設管理部編集，“コンクリート改修技術マニュアル処理施設編”，(2003.3)
3) 日本建築学会発行，“鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修指針（案）・同解説”，(1997.1)

第８編　各種補修材料の長期耐久性に関する調査（暴露試験）

１．概要

１．１　目的

本共同研究で開発した各種補修材料・工法の下水処理施設における耐久性を調べるため、第２編から第６編までで述べたように、室内における促進試験を実施した。ここで用いた促進試験条件は、実際の下水道環境を簡略化するために、硫酸水溶液の濃度および温度のみを基準に設定したものである。室内試験で得られた結果に基づいて、各材料を実環境に適用したときの寿命を推定するためには、促進条件下および実環境下での材料劣化の状況や進行速度を比較し、相関を明らかにする必要がある。

そこで、施工性試験（第７編参照）を行った霞ヶ浦浄化センター腐食防止対策実験施設の送水施設（吐出水槽および嫌気調整槽）内部を、実際の下水処理施設と同様の環境に設定し、各種補修材料の暴露試験を行った。暴露試験は、各種補修材料について室内試験に用いたものと同様の供試体を作製し、施設内部に所定の期間静置することにより行った。

１．２　暴露供試体設置方法

暴露は図８－１に示す霞ヶ浦浄化センター内吐出水槽気層部のステンレス製アングル上にステンレス製バスケットを設置し、バスケットに供試体を入れた。供試体は４個のステンレス製バスケットに配置し、試験を行った。

１．３　吐出水槽および嫌気調整槽の暴露環境の測定

吐出水槽および嫌気調整槽の暴露環境について、硫化水素濃度および温度の測定を行った。測定結果を図８－２、８－３に示す。

１．４　試験項目および試験方法

暴露開始から６カ月経過した供試体について、外観観察、質量変化、侵食深さおよび硫酸浸透深さの測定を行った。

（１）外観観察

目視で外観の変化を確認し、写真撮影した。

（２）質量変化

質量の初期値は暴露直前の値とした。暴露試験開始後、所定材齢で各供試体それぞれについて質量を測定した。質量測定は、上水道の蛇口を完全開放した状態で供試体表面全面を１分間洗浄し、表面を清潔な布で拭き質量を測定した。

（３）侵食深さ

供試体の侵食深さは暴露直前の供試体厚さと、所定材齢における供試体厚さとの差から求めた。供試体の厚さはマイクロメーターで測定し、測定位置５箇所の厚さの平均値とした。

（４）硫酸浸透深さ

供試体中央部を切断し、切断面（70×20mm）に１％フェノールフタレイン溶液を噴霧し、呈色域をノギスで５点測定した。測定値は５点の平均値とした。初期値は暴露前に５点測定した厚さの平均値とした。

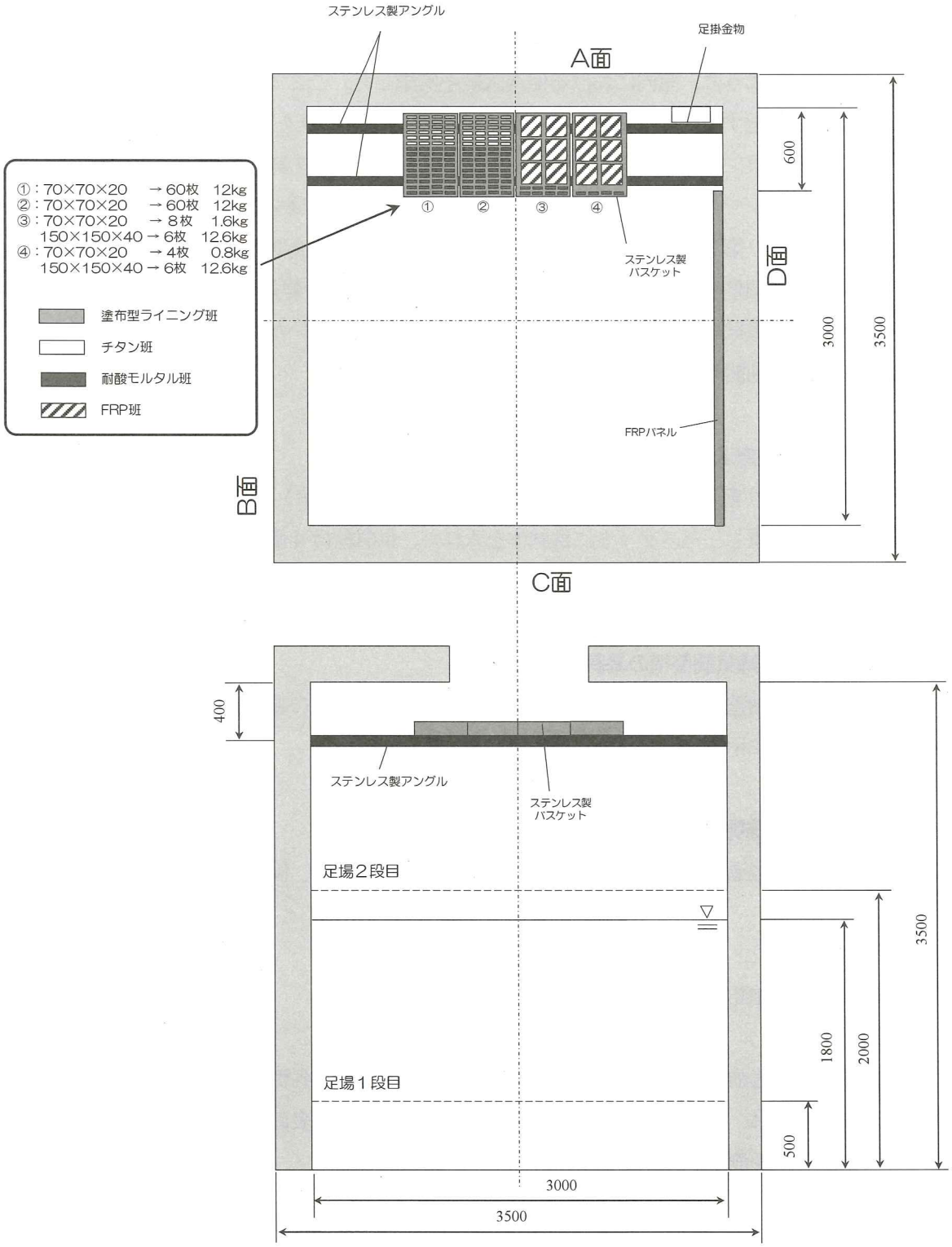


図８－１　吐出水槽供試体配置図

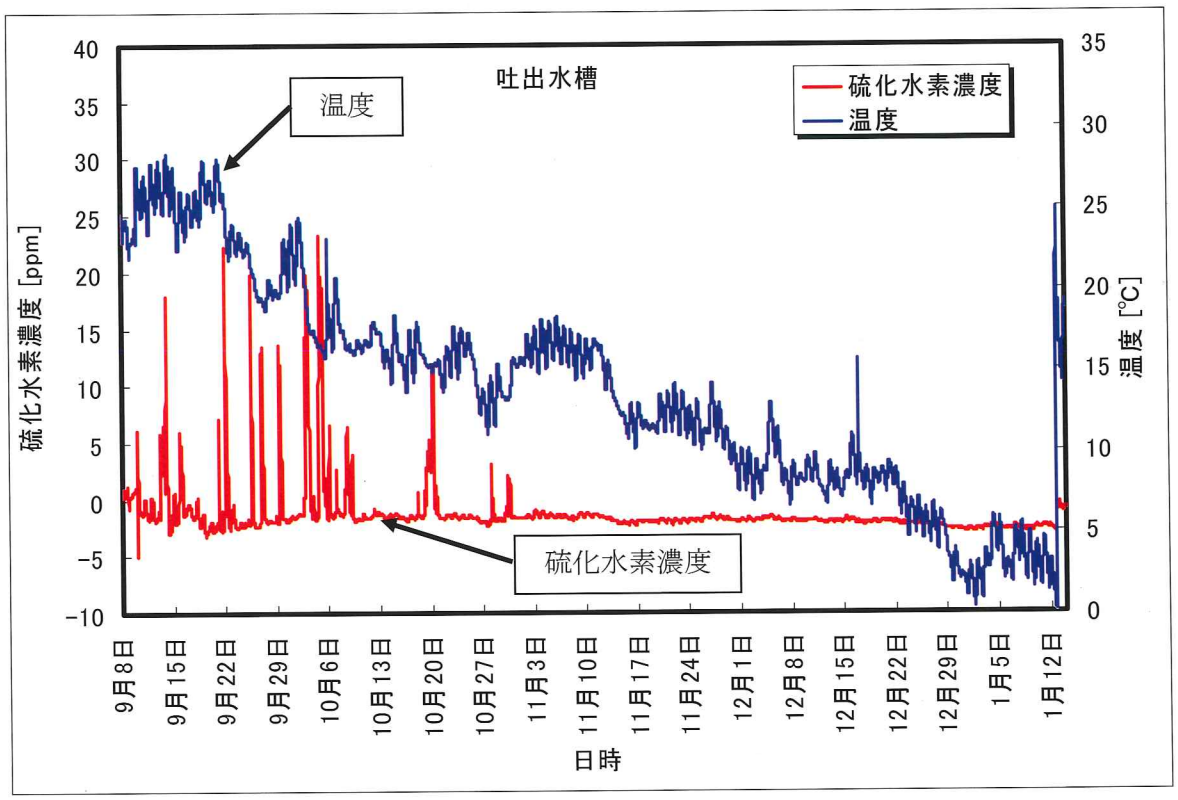


図８－２　吐出水槽の硫化水素濃度および温度の測定結果

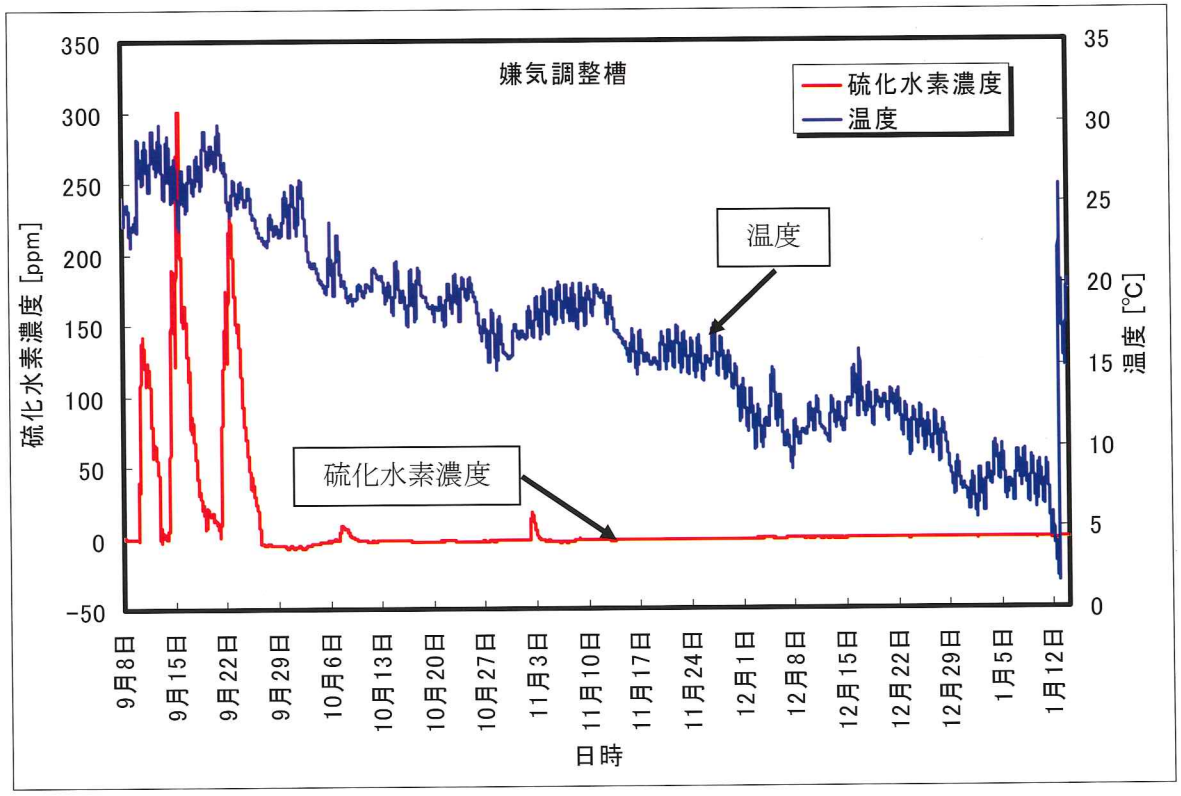


図８－３　嫌気調整槽の硫化水素濃度および温度の測定結果

２．　耐酸モルタル（無塗装）の暴露試験

２．１　方法

２．１．１　供試体

暴露試験は表８－１に示す耐酸モルタル３種類，市販断面修復材３種類，および JIS モルタルの計７種類のモルタルを用いた。

表８－１　暴露試験に用いたモルタル

供試体 No.	モルタル	モルタルの種類*	配合（質量比）
A	耐酸モルタル A	SBR 系 PCM	粉体：混和液：水=100：7.2：7.5
B	耐酸モルタル B	アクリル系 PCM	粉体：水=100：16
C	耐酸モルタル C	エポキシ系 PCM	粉体：主剤：硬化剤：水 =100：8：1.6：12
D	汎用断面修復材 D	CM	粉体：水=100：19
E	汎用断面修復材 E	CM	粉体：水=100：16
F	汎用断面修復材 F	CM	粉体：水=100：16
JIS	JIS モルタル	CM	セメント：標準砂：水=1：3：0.5

＊　モルタルの種類／PCM:ポリマーセメントモルタル、CM:セメントモルタル

供試体の寸法は 70×70×20mm とし、耐酸モルタルおよび汎用断面修復材の養生は JIS A 1171 に準拠して温度 20±2℃，相対湿度 90%以上で 48 時間経過した後、脱型してから、温度 20±2℃の水中で 5 日間養生し、さらに、温度 20±2℃，相対湿度 60±10%で 21 日間養生した。JIS モルタルについては JIS R 5201 に準拠して温度 20±2℃，相対湿度 90%以上で 24 時間経過した後、温度 20±2℃の水中で 27 日間養生した。

暴露試験に用いる供試体は、既往の報告では角柱で供試体全面が腐食を受ける条件で行っているが、供試体の形状によって劣化性状が異なる場合がある。現場の断面修復材の腐食を再現する目的で供試体は成形時仕上げ面(70×70mm)の 1 面を試験面とし、残り 5 面は耐酸性を有する防食テープで被覆した。

２．１．２　暴露方法

暴露は図８－４に示す霞ヶ浦浄化センター内吐出水槽気層部のステンレス製アングル上にステンレス製バスケットを設置し、バスケットに供試体を入れた。（図８－５）

供試体は図８－６に示す４個のステンレス製バスケットに配置し、試験を行った。

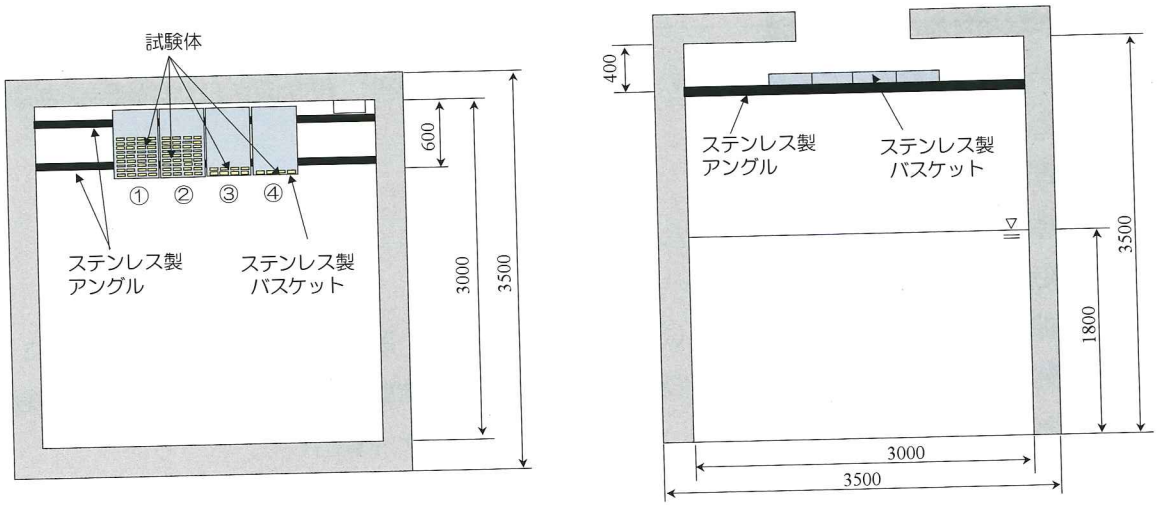


図８－４　供試体設置図（左：平面図、右：断面図）

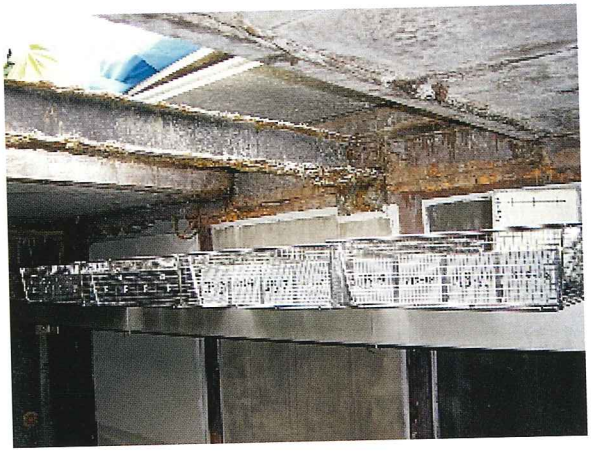


図８－５　設置状況

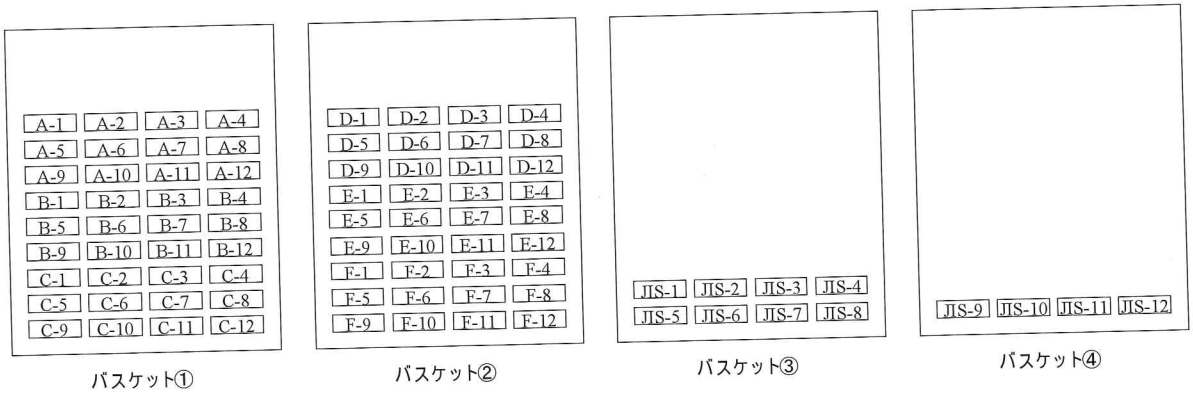


図８－６　供試体配置図

２．１．３　試験項目および試験方法

暴露開始から６カ月経過した供試体について、外観観察、質量変化、侵食深さおよび硫酸浸透深さ試験を行った。

（１）外観観察

目視で外観の変化を確認し、写真撮影した。

（２）質量変化

質量の初期値は暴露直前の値を初期値とした。暴露試験開始後、所定材齢で各供試体それぞれについて質量を測定した。質量測定は、上水道の蛇口を完全開放した状態で供試体表面全面を１分間洗浄し、表面を清潔な布で拭き質量を測定した。質量変化率は (1) 式より算出した。

$$\text{質量変化率}(\%) = \frac{(M_0 - M_1)}{M_0} \times 100 \qquad (1)$$

M_0：暴露直前の供試体質量 (g)

M_1：所定材齢における供試体質量 (g)

（３）侵食深さ

供試体は、暴露直前に図８－７に示す測定位置５箇所をマイクロメーターで厚さを測定し、平均値を初期値とした。暴露開始後、所定材齢で測定位置５箇所の厚さを測定し、平均値を測定値とした。侵食深さは (2) 式より算出した。

$$\text{侵食深さ}(mm) = T_0 - T_1 \qquad (2)$$

T_0：暴露直前の供試体の平均厚さ (mm)

T_1：所定材齢における供試体の平均厚さ (mm)

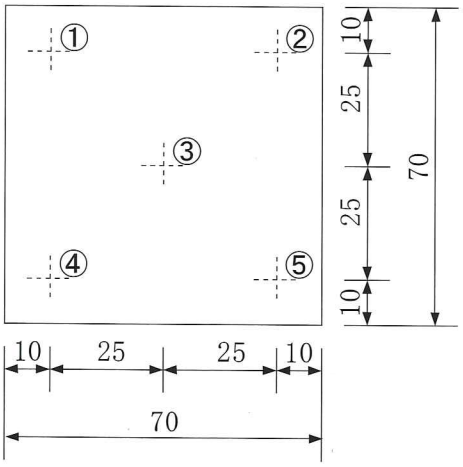


図８－７　供試体厚さの測定位置

（４）硫酸浸透深さ

図８－８および８－９に示すように供試体中央部を切断し、切断面（70×20mm）に1%フェノール

フタレイン溶液を噴霧し、呈色域をノギスで 5 点測定した。測定値は 5 点の平均値とした。初期値は暴露前に 5 点測定した厚さの平均値とし、硫酸浸透深さは(3)式より算出した。

$$硫酸浸入深さ(mm) = T_0 - T_2 \qquad (3)$$

T_o：暴露直前の供試体の平均厚さ (mm)

T_2：所定材齢におけるフェノールフタレイン呈色域の平均厚さ (mm)

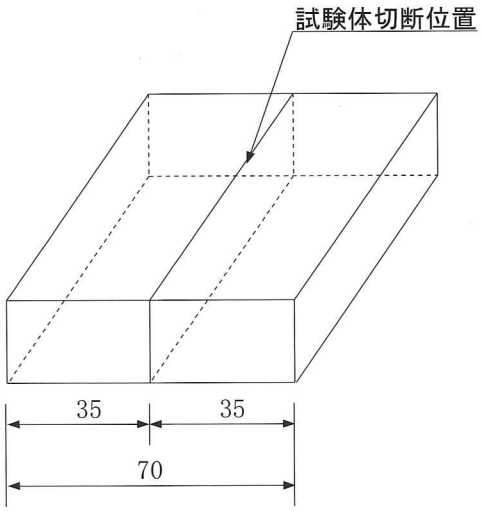


図８－８　供試体切断位置

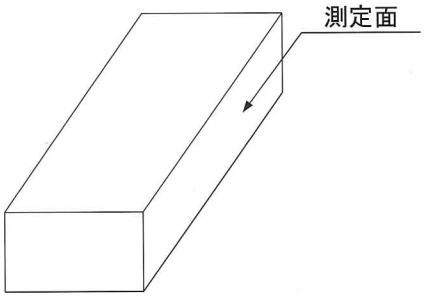


図８－９　硫酸浸透深さ供試体

２．２　結果

２．２．１　外観観察

暴露開始から６ヶ月経過した外観状況を図８－１０～８－１６に示す。JIS モルタルは表層のペーストが剥離し、一部骨材の露出が見られた。その他のモルタルは外観に変化は認められなかった。



図８－１０　６ヶ月経過外観状況
(耐酸モルタルA)



図８－１１　６ヶ月経過外観状況
(耐酸モルタルB)

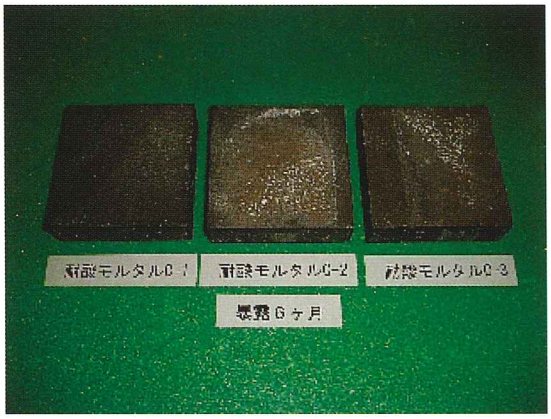


図８－１２　６ヶ月経過外観状況
(耐酸モルタルC)



図８－１３　６ヶ月経過外観状況
(汎用断面修復材 D)

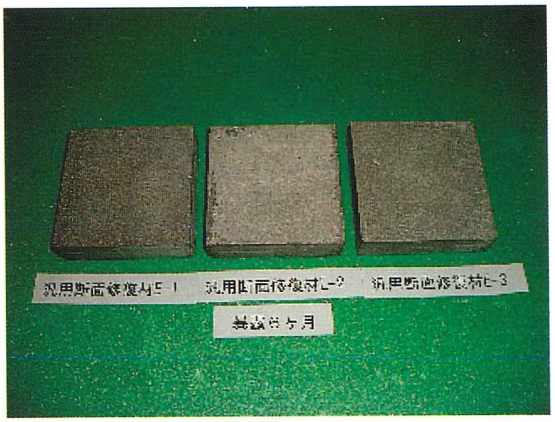


図８－１４　６ヶ月経過外観状況
(汎用断面修復材 E)

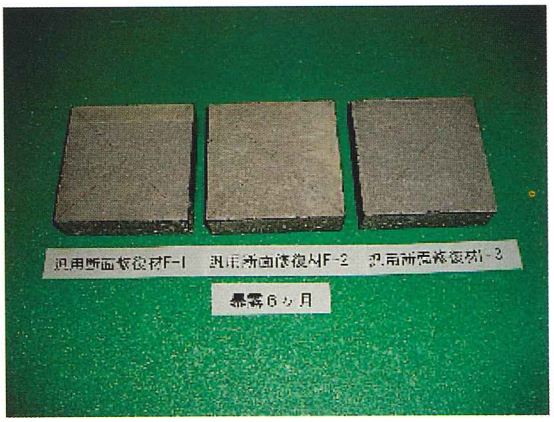


図８－１５　６ヶ月経過外観状況
(汎用断面修復材 F)



図８－１６　６ヶ月経過外観状況
(JIS モルタル)

２．２．２　質量変化

暴露開始から６ヶ月経過後の質量変化を図８－１７に示す。JIS モルタルの質量は減少しているのに対し、他のモルタルは増加傾向であった。

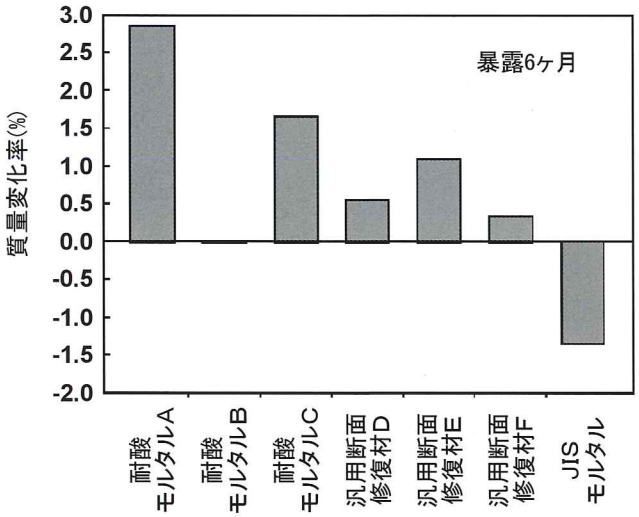


図８－１７　質量変化

２．２．３　侵食深さ

暴露開始から６ヶ月経過後の侵食深さを図８－１８に示す。いずれのモルタルも侵食はほとんど認められなかった。

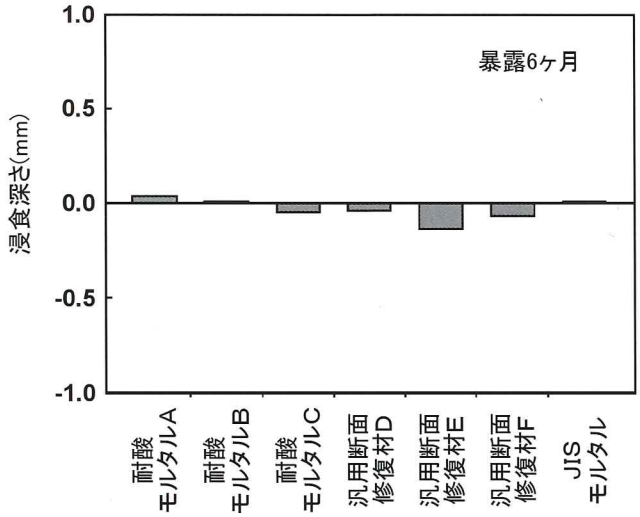


図８－１８　侵食深さ

２．２．４　硫酸浸透深さ

暴露開始から６ヶ月経過後の硫酸浸透深さを図８－１９に示す。フェノールフタレイン法による硫酸浸透深さの測定結果はいずれのモルタルも若干の硫酸浸透（中性化）が見られたが、モルタルの種類による明確な差はなかった。

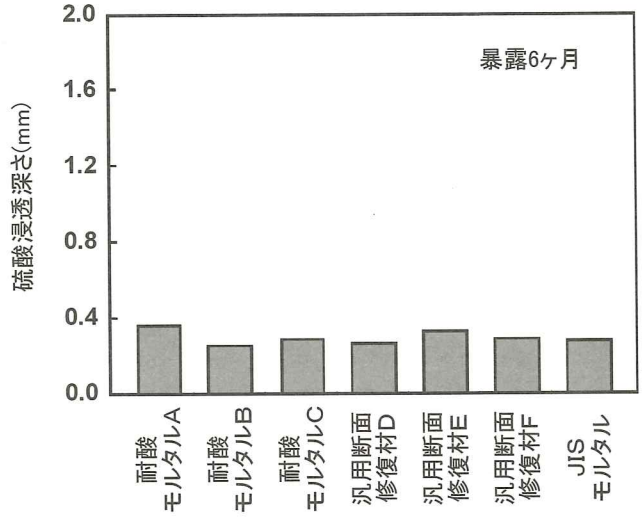


図８－１９　硫酸浸透深さ（フェノールフタレイン法）

２．３　室内促進試験結果と暴露試験結果との相関性について

下水処理施設の供試体暴露試験は腐食環境によって異なるが、侵食深さは1.0～14.0mm/年の報告がある。本暴露試験の結果は暴露６ヶ月経過時点においてはJISモルタルの外観に骨材の露出、ペースト剥離による質量減少が見られたが、いずれのモルタルも劣化は極軽微でモルタルの種類による明確な差は認められなかった。これは、吐出水槽内の硫化水素濃度が暴露２ヶ月以降ほぼ0ppmで推移していることから、腐食環境が緩慢であったためと考えられる。

３．　塗布型ライニング材の暴露試験

３．１　方法

３．１．１　供試体

供試体は、施工工程に従って作製した供試体 70×70×20mm を用いた。

３．１．２　暴露方法

暴露は図８－２０に示す霞ヶ浦浄化センター内吐出水槽気層部のステンレス製アングル上にステンレス製バスケットを設置し、バスケットに供試体を入れた。（図８－２１）

供試体は図８－２１に示す２個のステンレス製バスケットに配置し、試験を行った。

３．１．３　試験項目および試験方法

暴露開始から６カ月経過した供試体について、外観観察、付着試験を行った。

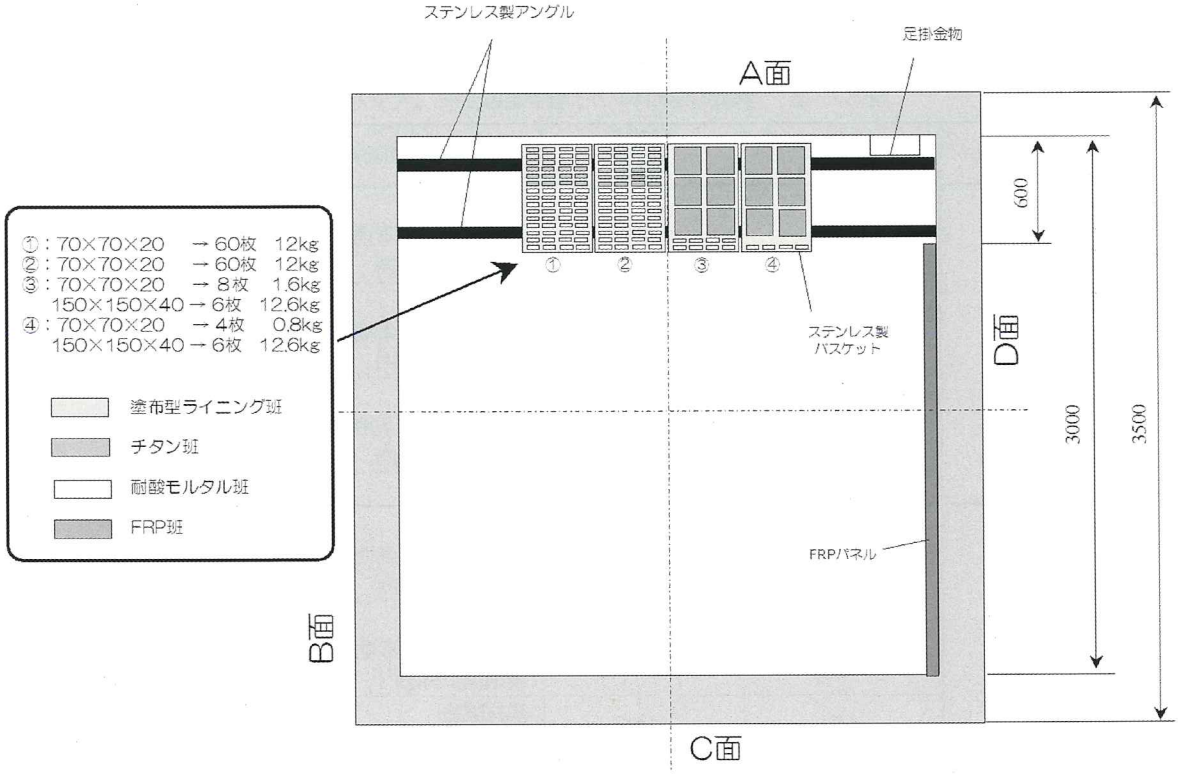
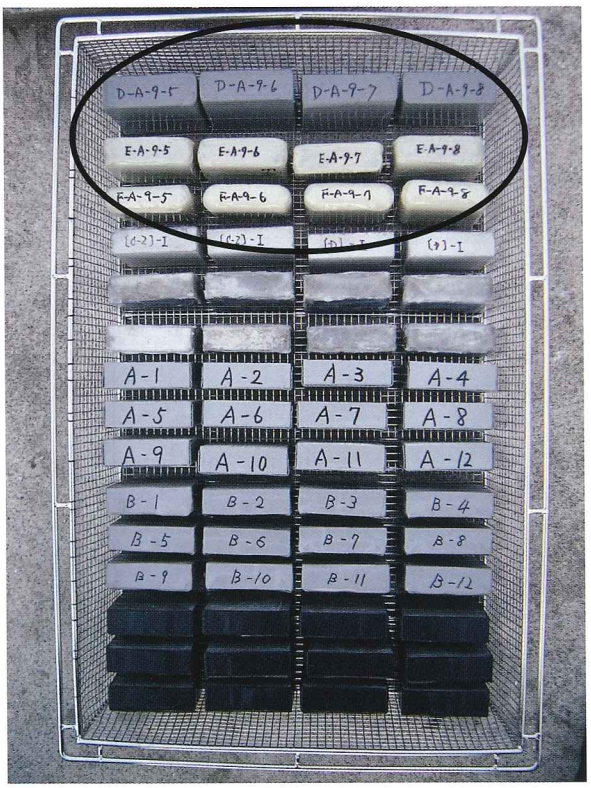
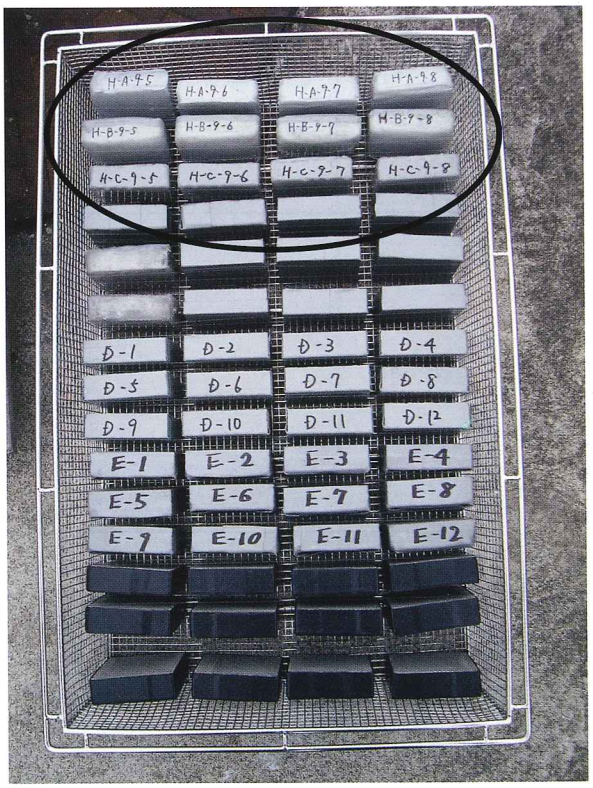


図８－２０　　供試体配置図



(かご①)



(かご②)

図８－２１　　供試体設置状況

３．２　結果

表８－２　暴露供試体の付着試験結果（その１）

供試体No.	繰返し	付着力 [kN]	剥離箇所	剥離面積 [%]
DA-10-1	①	3.51	基材破壊 プライマー／素地調整材 素地調整材層内	3 82 15
	②	3.44	基材破壊 プライマー／素地調整材 素地調整材層内	10 50 40
	③	2.96	基材破壊 プライマー／素地調整材 素地調整材層内	10 20 70
	平均	3.30	－	－
DB-10-1	①	5.30	基材破壊 プライマー／素地調整材 素地調整材層内	10 85 5
	②	6.36	基材破壊 プライマー／素地調整材 素地調整材層内	20 75 5
	③	5.24	基材破壊 プライマー／素地調整材	5 95
	平均	5.63	－	－
EA-10-1	①	4.47	基材破壊 素地調整材層内 素地調整材／シート	30 40 30
	②	4.23	基材破壊 素地調整材層内 素地調整材／シート	30 50 20
	③	5.26	基材破壊 素地調整材層内 素地調整材／シート	45 30 25
	平均	4.65	－	－
EB-10-1	①	4.72	基材破壊 素地調整材層内 素地調整材／シート	50 35 15
	②	4.19	基材破壊 素地調整材層内 素地調整材／シート	60 20 20
	③	4.92	基材破壊 素地調整材層内 素地調整材／シート	25 60 15
	平均	4.61	－	－
FA-10-1	①	7.47	基材破壊 素地調整材層内	95 5
	②	7.59	基材破壊 素地調整材層内	97 3
	③	7.82	基材破壊 素地調整材層内	97 3
	平均	7.63	－	－
FB-10-1	①	6.32	基材破壊	100
	②	6.92	基材破壊	100
	③	7.61	基材破壊	100
	平均	6.95	－	－

表８－３　暴露供試体の付着試験結果（その２）

供試体No.	繰返し	付着力 [kN]	剥離箇所	剥離面積 [%]
HA-10-1	①	6.94	炭素繊維シート塗布材層内	100
	②	7.47	炭素繊維シート塗布材層内	100
	③	6.57	炭素繊維シート塗布材層内	100
	平均	6.99	－	－
HB-10-1	①	7.67	基材破壊 パテ／プライマー	95 5
	②	8.95	基材破壊 パテ／プライマー	90 10
	③	7.74	基材破壊 パテ／プライマー	80 20
	平均	8.12	－	－
HC-10-1	①	7.49	基材破壊	100
	②	6.84	基材破壊	100
	③	7.35	基材破壊	100
	平均	7.23	－	－

３．３　促進試験結果と暴露試験結果との相関性について

本暴露試験の結果は暴露６カ月経過時点においては、いずれの供試体も劣化は極軽微で塗布材の種類による明確な差は認められなかった。これは、吐出水槽内の硫化水素濃度が暴露２カ月以降ほぼ0ppmで推移していることから、腐食環境が緩慢であったためと考えられる。

４．　ＦＲＰ系シートライニング材の暴露試験

４．１　方法

４．１．１　ＦＲＰパネル暴露供試体

ＦＲＰパネルの長期耐久性を調査するために、表８－４に示す供試体を作製した。ＦＲＰパネル暴露供試体は、外観、質量、板厚および曲げ特性を調査するための外観供試体と、ＦＲＰパネルへの硫黄浸入深さを調査する硫黄浸入深さ供試体の２種類とした。

外観供試体は、厚さ 5 mm のＦＲＰパネルを長さ 130 mm×幅 130 mm の大きさに切断し、４つの切断面をビニルエステル樹脂で被覆養生して作製した。

硫黄浸入深さ供試体は、一般部供試体とＦＲＰパネル間の接合部モデルの目地部供試体を作成した。一般部供試体は、厚さ 5 mm の樹脂（マトリックス）の異なる２種類のＦＲＰパネルを、長さ 150 mm ×幅 100 mm の大きさに切断し、４つの切断面と下面の 5 面をビニルエステル樹脂で被覆養生して作製した。目地部供試体は、裏当て接合板上に 12mm の幅でＦＲＰパネル間に接合部を設け、その接合部に目地材を充填して作製した。目地部供試体数は、表８－４に示すように目地材料および樹脂をパラメータとして７体とした。なお、２種類のＦＲＰパネルの樹脂は、ビニルエステル樹脂（VE）と不飽和ポリエステル樹脂（UP）である。

表８－４　ＦＲＰパネル暴露供試体

供試体	供試体名	樹脂	試 験 形 状	目地材料	暴露期間	試験項目
外観	VE-M-05	VE	130×130×5 4 面を被覆養生	－	0.5 年	外観、質量、 厚さ、曲げ
	VE-M-10				1.0 年	
	VE-M-30				3.0 年	
	VE-M-50				5.0 年	
硫黄浸入深さ	VE-S-PL	VE	シート部 150×100×10 5 面を被覆養生	－	暴露期間 0.5 年 1.0 年 3.0 年 5.0 年 供試体端から 3, 6, 9, 12cm を切断し再被覆	硫黄浸入深さ EPMA 0.5, 1, 3, 5 年
	UP-S-PL	UP				
	VE-S-J1	VE	目地部 150×100×15 5 面を被覆養生	VE+フィラー5%wtA		
	VE-S-J2			VE+フィラー15%wtA		
	VE-S-J3			シリコーン		
	VE-S-J4			VE+フィラー5%wtA+ 表面にシリコーン塗布		
	VE-S-J5			VE+フィラー5%wtA+ プラスチックネジ設置		
	VE-S-J6			VE+フィラー5%wtA+ タールエポ塗布		
	UP-S-J1	UP		VE+フィラー5%wtA		

４．１．２　暴露方法

ＦＲＰパネル暴露供試体は、図８－２２に示すように吐出水槽の気相部に設置し、平成16年8月から長期暴露を開始した。なお、ＦＲＰパネル暴露供試体の出し入れは、吐出水槽上部のコンクリート蓋を取外すことによって行うものとした。ＦＲＰパネル暴露供試体の設置状況を図８－２３、８－２４に示す。

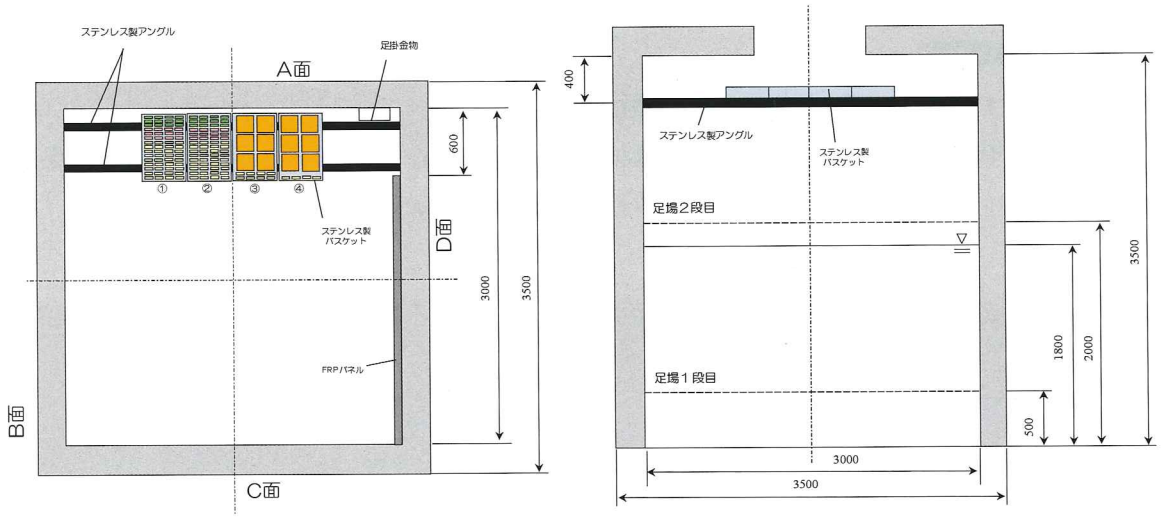


図８－２２　ＦＲＰパネル暴露試験体の配置



図８－２３　ＦＲＰパネル暴露試験体



図８－２４　ＦＲＰパネル暴露試験体設置状況

４．１．３　試験項目および試験方法

所定の暴露期間を経過したＦＲＰパネル暴露供試体を吐出水槽から取出し、表８－４に示す試験項目について試験を実施した。

外観供試体を用いての外観、重さ、厚さおよび曲げ試験を実施する。また、硫黄浸入深さ供試体を用いてのEPMAによる硫黄元素のマッピング分析を実施する。

４．２　結果

平成 17 年１月にＦＲＰパネル暴露供試体設置後約 0.5 年が経過したので、第１回目の供試体取出しを実施した。取出した供試体は、全ての外観供試体４体（供試体番号 VE-M-05～VE-M-50）と硫黄浸入深さ供試体の９体（供試体番号 VE-S-PL～UP-S-J1）である。なお、外観検査、重さ・厚さ測定が終了した外観供試体 VE-M-05 以外の３体、および切断面を再被覆した硫黄浸入深さ供試体の９体は、取出し日から４日後に吐出水槽に再設置した。

４．２．１　外観観察

外観供試体４体について、目視による外観検査を実施した。

暴露前と 0.5 年経過したＦＲＰパネル暴露供試体を図８－２５、８－２６に示す。検査の結果、全てのＦＲＰパネルには、ひび割れ、膨れ、はがれ、変色、析出物は見られなかった。

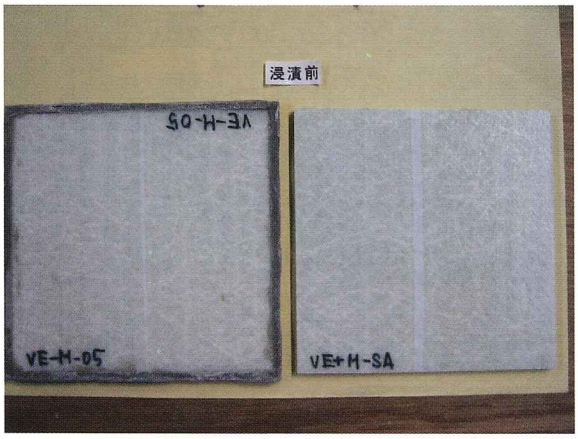


図８－２５　ＦＲＰパネル暴露試験体（暴露前）

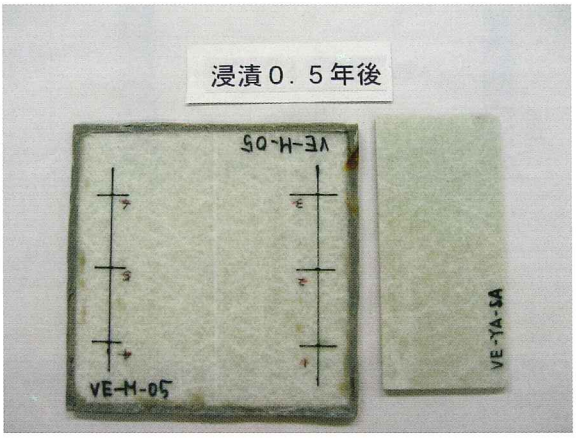


図８－２６ＦＲＰパネル暴露試験体（0.5 年暴露後）

４．２．２　質量・厚さ測定

外観供試体４体について、計量器による質量測定とマイクロメーターよる厚さ測定を実施した。

供試体の質量は、１体について３回測定しその平均値とした。供試体の厚さは、１体について６箇所を３回測定しその平均値とした。暴露前と 0.5 年暴露後のＦＲＰパネル暴露供試体の質量測定結果を表８－５、ＦＲＰパネルの厚さ測定結果を表８－６に示す。

0.5 年の暴露期間により、ＦＲＰパネルの質量変化は、約 0.2%（0.4 g）程度の増加が確認された。また、ＦＲＰパネルの厚さ変化は、約 0.25～0.35%（0.013～0.018 mm）程度の増加が確認された。

表８－５　暴露供試体質量測定結果

供試体名	暴露前質量 (g)	0.5 年経過後質量 (g)	質量変化率 (%)
VE-M-05	187.7712	188.0961	0.173
VE-M-10	184.1671	184.5305	0.197
VE-M-30	187.7600	188.1185	0.191
VE-M-50	188.4982	188.8707	0.198

表８－６　暴露供試体厚さ測定結果

供試体名	暴露前厚さ (mm)	0.5 年経過後厚さ (mm)	厚さ変化率 (%)
VE-M-05	5.242	5.260	0.356
VE-M-10	5.145	5.158	0.251
VE-M-30	5.278	5.295	0.322
VE-M-50	5.222	5.235	0.244

４．２．３　曲げ特性

0.5 年経過したＦＲＰパネル暴露供試体 VE-M-05 を、短冊状の長さ 100mm×幅 15mm の形状に切断加工して、５本の曲げ供試体を作製した。

0.5 年経過した外観供試体の曲げ弾性率と曲げ強さの試験結果を表８－７に示す。なお、ＦＲＰパネル（VE）の初期曲げ特性は、曲げ強さが 684.8 N/mm^2、曲げ弾性率が 18.20 kN/mm^2 である。0.5 年間の暴露により、曲げ強さが 88%、曲げ弾性率が 95%と曲げ特性の保持率が若干減少している。

表８－７　暴露試験体曲げ試験結果

供試体名	最大荷重 (N)	最大荷重時たわみ (mm)	供試体形状		修正曲げ強さ (N/mm^2)	平均修正曲げ強さ (N/mm^2)	曲げ弾性率 (kN/mm^2)	平均曲げ弾性率 (kN/mm^2)
			高さ (mm)	幅 (mm)				
VE-M-05-1	1948.7	6.37	5.239	14.953	569.77	600.8	19.35	17.38
VE-M-05-2	1991.4	8.31	5.196	15.063	612.97		16.69	
VE-M-05-3	2050.2	7.80	5.213	15.000	603.55		17.07	
VE-M-05-4	1958.5	8.09	5.200	15.012	602.66		16.17	
VE-M-05-5	2084.5	7.79	5.215	14.952	615.14		17.61	

４．２．４　硫黄浸入深さ試験結果

硫黄浸入深さ供試体を端面から 30 mm の位置で切断する。その切断面について、一般部供試体の場合は、ＦＲＰパネル表面からの硫黄の浸入深さを、目地部供試体の場合は、目地材料とＦＲＰパネルの接着界面への硫黄浸入深さを EPMA のマッピングから判定した。なお、切断した他方の供試体は、切断面をビニルエステル樹脂で被覆養生後、吐出水槽に再設置した。

EPMA は、SEM 画像と硫黄元素（S）のマッピングを測定した。硫黄浸入深さ供試体の硫黄浸入測定結果を表８－８に、SEM 画像と硫黄元素のマッピング例として、一般部を図８－２７に、目地部を図８－２８に示す。

EPMA による硫黄元素のマッピング結果より、0.5 年の暴露期間では、ＦＲＰパネルおよびＦＲＰパネル目地部からの硫黄浸入は認められなかった。

表８－８　硫黄浸入深さ試験結果

供試体名	樹脂	試験形状	硫黄浸入深さ試験結果
VE-S-PL	VE	一般部	0.0 μm
UP-S-PL	UP		0.0 μm
VE-S-J1	VE	目地部	0.0 μm
VE-S-J2			0.0 μm
VE-S-J3			0.0 μm
VE-S-J4			0.0 μm
VE-S-J5			0.0 μm
VE-S-J6			0.0 μm
UP-S-J1	UP		0.0 μm

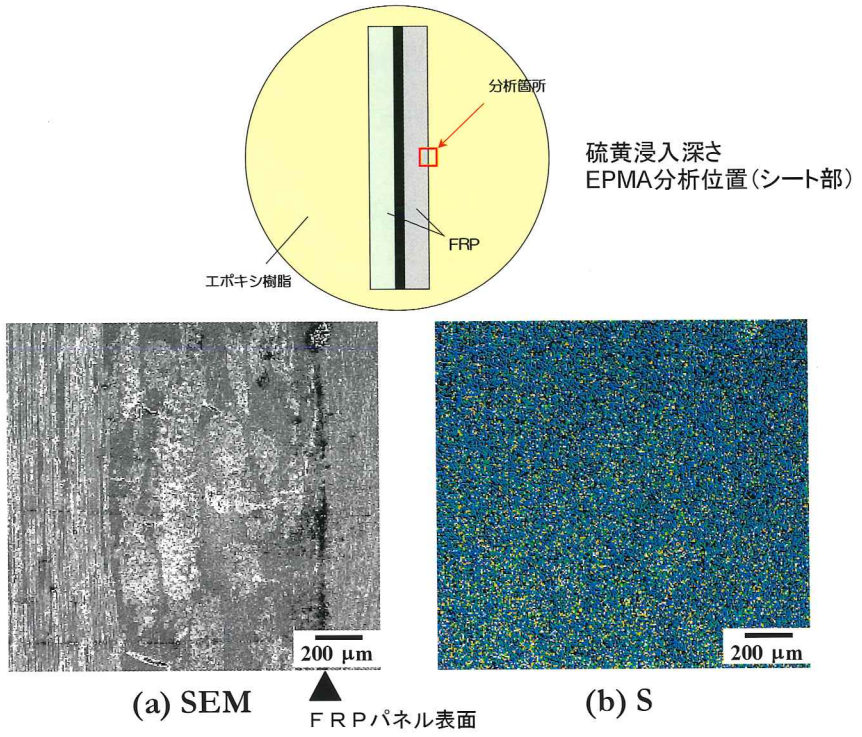


図８－２７　EPMA 分析結果（VE-S-PL　×６０　シート部 0.0μm）

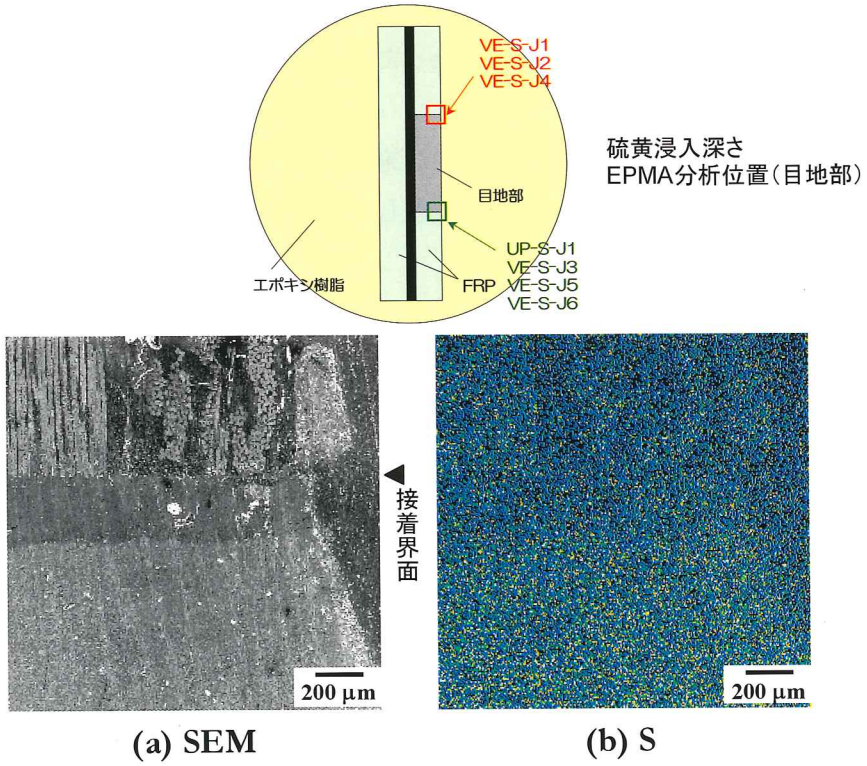


図８－２８　EPMA 分析結果（VE-S-J1　×６０　目地部　0.0μm）

４．２．５　ＦＲＰ防食パネル工法の外観調査結果

吐出水槽に施工したＦＲＰパネルによる防食工法の外観を観察した。図８－２９に施工時のＦＲＰパネルによる防食工法の外観を、図８－３０に施工から 0.5 年経過後のＦＲＰパネルによる防食工法の外観を示す。

0.5 年経過した表面は、液相部でごみが付着しているが、ＦＲＰパネル表面および目地部に、ひび割れ、膨れ、はがれ、変色、析出物は見られなかった。

４．２．６　促進試験結果と暴露試験結果との相関性について

0.5 年経過の暴露供試体を用いてＦＲＰパネルの耐久性の試験、およびＦＲＰパネル防食工法の外観調査を実施した。結果をまとめると、以下のとおりである。

暴露供試体による耐久性試験より、

・ＦＲＰパネルにはひび割れ、膨れ、はがれ、変色、析出物は見られなかった。
・ＦＲＰパネルの質量変化は、約 0.2%程度の増加が、厚さ変化は、約 0.25～0.35%程度の増加が確認された。
・ＦＲＰパネルの曲げ特性は、保持率が曲げ強さで 88%、曲げ弾性率で 95%と若干減少した。
・ＦＲＰパネルの一般部および目地部への硫黄の浸入は認められなかった。

ＦＲＰパネル防食工法の外観調査より

・ＦＲＰパネル表面および目地部には、ひび割れ、膨れ、はがれ、変色、析出物は見られなかった。

ＦＲＰパネルは、硫酸による劣化の影響をほとんど受けていないと判断できる。一方、吐出槽の硫化水素濃度は、最初２ヶ月間は最大 25 ppm 程度あったが、その後は、気温の低下に伴いほとんど発生していない環境であった。

これらのことから、ＦＲＰパネル暴露供試体および施工したＦＲＰパネル防食工法の外観は厳しい腐食環境下に曝されておらず、引続き暴露試験を継続し、耐久性の調査を行っていく必要がある。



図８－２９　施工時のＦＲＰパネルによる防食工法の外観



図８－３０　施工から0.5年経過後のＦＲＰパネルによる防食工法の外観

５．　耐食金属系シートライニング材の暴露試験

５．１　方法

５．１．１　供試体

供試体は、両面粘着シートおよび接着剤を使用して作製した供試体 70×70×20mm を用いた。

５．１．２　暴露方法

暴露は図８－３１に示す霞ヶ浦浄化センター内吐出水槽気層部のステンレス製アングル上にステンレス製バスケットを設置し、バスケットに供試体を入れた。

供試体は図８－３２に示す１個のステンレス製バスケットに配置し、試験を行った。

５．１．３　試験項目および試験方法

暴露開始から６カ月経過した供試体について、外観観察、付着試験を行った。

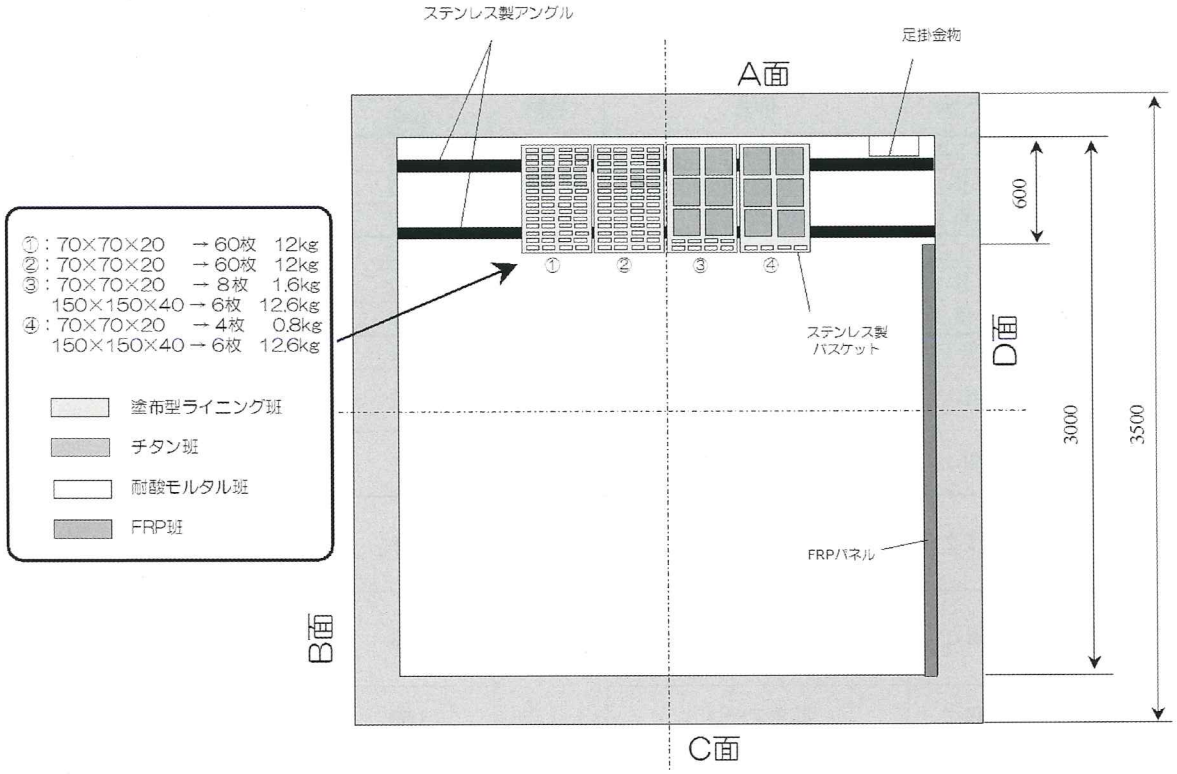
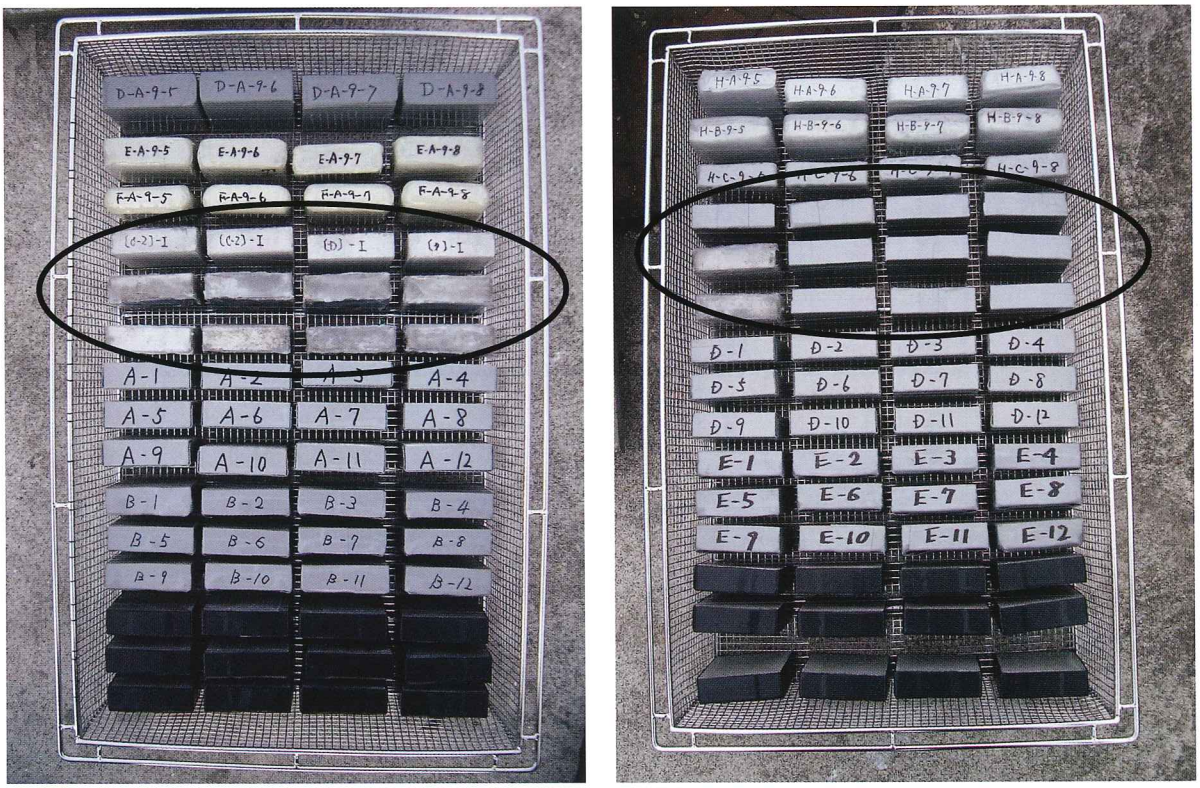


図８－３１　供試体配置図



(かご①)　　(かご②)

図８－３２　供試体設置状況

５．２　結果

表８－９　暴露試験結果

接着	供試体No.	防食	試験	建研式付着力 [kN]	はく離箇所 [%]
両面粘着シート	[C-2]-Ⅰ-1	無し	暴露前	1.21	チタン板／テープ　100
	[C-2]-Ⅱ-1	シリコーン系シーリング材		1.15	チタン板／テープ　100
	[C-2]-Ⅲ-1	防食テープ		0.87	チタン板／テープ　100
	[C-2]-Ⅰ-2	無し	暴露後	0.97	チタン板／テープ　100
	[C-2]-Ⅱ-2	シリコーン系シーリング材		0.77	プライマー／基材　100
	[C-2]-Ⅲ-2	防食テープ		1.28	チタン板／テープ　100
接着剤	[D]-Ⅰ-1	無し	暴露前	1.21	チタン板／接着剤　100
	[D]-Ⅱ-1	シリコーン系シーリング材		1.52	チタン板／接着剤　90 接着剤／プライマー　10
	[D]-Ⅲ-1	防食テープ		1.39	チタン板／接着剤　93 接着剤／プライマー　17
	[D]-Ⅰ-2	無し	暴露後	1.38	チタン板／接着剤　10 接着剤／プライマー　10 プライマー／基材　80
	[D]-Ⅱ-2	シリコーン系シーリング材		1.28	チタン板／接着剤　90 接着剤／プライマー　3 プライマー／基材　7
	[D]-Ⅲ-2	防食テープ		1.52	チタン板／接着剤　90 接着剤／プライマー　10

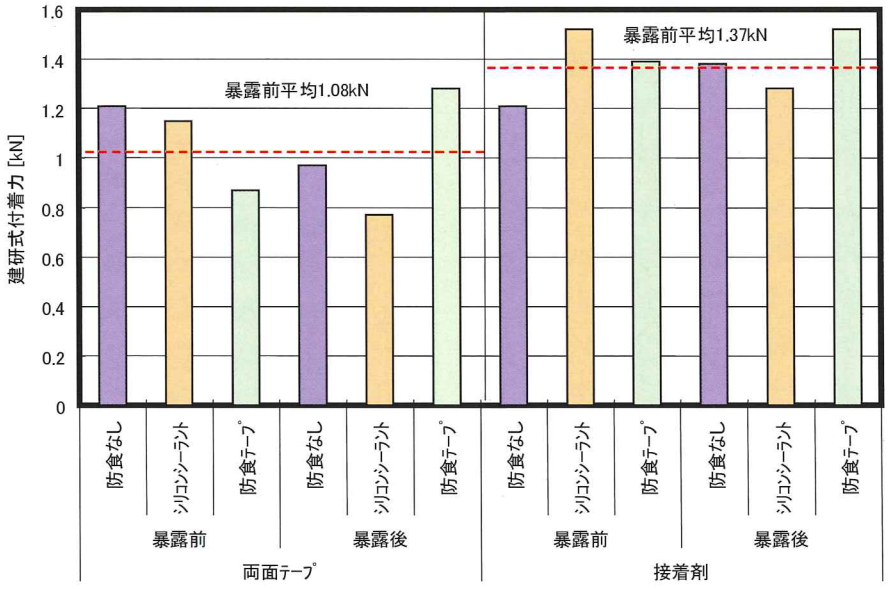


図８－３３　暴露試験結果

５．３　促進試験結果と暴露試験結果との相関性について

本暴露試験の結果は暴露６カ月経過時点においては、いずれの供試体も劣化は極軽微であった。これは、吐出水槽内の硫化水素濃度が暴露２カ月以降ほぼ 0ppm で推移していることから、腐食環境が緩慢であったためと考えられる。

第９編　まとめ

１．　各材料の性能試験および促進試験

（１）耐酸モルタル（無塗装）

耐酸モルタルの各材料の性能試験および促進試験結果は、研究開発中であり性能指標の定まっていない滴下試験を除き、いずれの試験結果も性能指標の値を満足した。滴下試験については、今後の暴露試験との相関性について検討し、性能指標を定めてゆくことが必要と考える。

（２）塗布型ライニング材

塗布型ライニング材の防食被覆材の硫酸遮断性を検討すると共に、耐硫酸性として硫酸浸入による物性変化についても検討し、硫酸劣化環境下における防食被覆材の耐久性を確認した。

硫酸溶液浸せき試験の結果、上塗り材の硫黄浸入速度は求められた速度式から１０年後で塗膜厚さのほぼ1/10であり、良好な遮断性を有しているといえる。また、硫酸溶液浸せき後の引張強度、引き剥がし試験、接着強さなどの物理的な性能低下は認められなかった。

温水浸せき試験の結果、外観観察から60℃の温水浸せき回数10回程度で、防食被覆材に膨れが発生しやすいことが確認できた。また、防食被覆材に発生する膨れによる接着力耐久性低下の評価を行うためには、温水浸せき試験が有効であることが確認された。

（３）炭素繊維系シートライニング材

硫酸劣化環境下で適用した場合の補強効果を評価する目的で小型モルタル供試体による曲げ試験を行った結果、硫酸浸せき試験の浸せき日数５６日では供試体の曲げ強さは、９５％以上保持することが確認できた。

（４）ＦＲＰ系シートライニング材

研究開発中であり性能指標が定められていないため一概に評価できないが、各薬品浸せき後の固着性能保持率は９０％以上であった。外観にも異常はなく、バーコル硬度保持率も７０％であった。また、曲げ弾性率の保持率は８５～９０％程度となっている。今後の暴露試験との相関性について検討し、性能指標を定めてゆくことが必要と考える。

（５）耐食金属系シートライニング材

ＦＲＰ系シートライニング材と同様、性能指標が定められていないため一概に評価できないが、防食被覆層と下地コンクリートとの一体性や、耐硫酸性、硫酸遮断性、遮水性はいずれも良好である。ただし、湿潤コンクリート面に施工する場合や、アルカリ性の強い環境下では、プライマーや接着材料の選定に留意すべきである。

各材料について、今後の暴露試験との相関性について検討し、性能指標を定めてゆくことが必要と考える。

２．　各補修材料の現場施工技術および暴露試験

（１）耐酸モルタル（無塗装）

暴露６カ月経過時点においては JIS モルタルの外観に骨材の露出、ペースト剥離による質量減少が見られたが、いずれのモルタルも劣化は極軽微でモルタルの種類による明確な差は認められなかった。これは、吐出水槽内の硫化水素濃度が暴露２ヶ月以降ほぼ 0ppm で推移していることから、腐食環境が緩慢であったためと考えられる。

（２）塗布型ライニング材および炭素繊維系シートライニング材

暴露６カ月経過時点においては、いずれの供試体も劣化は極軽微で塗布材の種類による明確な差は認められなかった。耐酸モルタルと同様に、吐出水槽内の硫化水素濃度が暴露２カ月以降ほぼ 0ppm で推移していることから、腐食環境が緩慢であったためと考えられる。

（３）ＦＲＰ系シートライニング材

暴露６カ月経過時点において、液相部でごみが付着しているが、ＦＲＰパネル表面および目地部に、ひび割れ、膨れ、はがれ、変色、析出物は見られず硫酸による劣化の影響をほとんど受けていないと判断できる。これは、吐出槽の硫化水素濃度が暴露２カ月以降ほぼ 0ppm で推移していることから、腐食環境が緩慢であったためと考えられ引続き暴露試験を継続し、耐久性の調査を行っていく必要がある。

（４）耐食金属系シートライニング材

暴露６カ月経過時点においては、いずれの供試体も劣化は極軽微であった。これは、吐出水槽内の硫化水素濃度が暴露２カ月以降ほぼ 0ppm で推移していることから、腐食環境が緩慢であったためと考えられる。

本研究での暴露試験調査は、暴露６カ月経過時点１回だけであり、吐出水槽内の硫化水素濃度を計測のうえ引続き暴露試験を継続し、耐久性の調査を行って促進試験の結果との相関性について検討していくことが必要であろう。



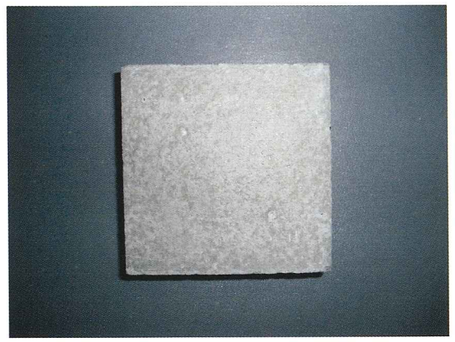
資　料　編

目　次

資料１　【第２編補足資料】硫酸滴下試験後の供試体浸食状況写真..... 資料１-１
資料２　【第３編補足資料】塗布型ライニング材評価試験結果..... 資料２-１
　資料２－１　硫酸浸漬による外観変化..... 資料２-１
　資料２－２　引き剥がし試験における塗膜の破壊箇所..... 資料２-２
　資料２－３　付着強度試験における塗膜の破壊箇所..... 資料２-11
　資料２－４　引き剥がし試験チャート..... 資料２-20
　資料２－５　供試体外観写真..... 資料２-30
　資料２－６　塗膜断面の元素分析結果（硫黄元素マッピング）..... 資料２-72
資料３　【第４編補足資料】炭素繊維シート工法について..... 資料３-１

資料１　【第２編補足資料】硫酸滴下試験後の供試体浸食状況写真

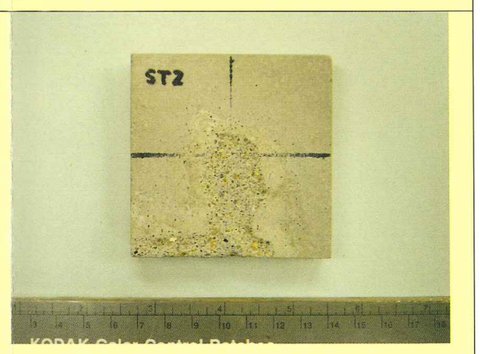
各モルタル、コンクリートの浸食状況（試験温度 10～40℃、pH0～2、試験材齢４週）

（１）ＪＩＳモルタル	試験温度	ｐＨ		
		0	1	2
試験前 	10℃			
	20℃			
	30℃			
	40℃			

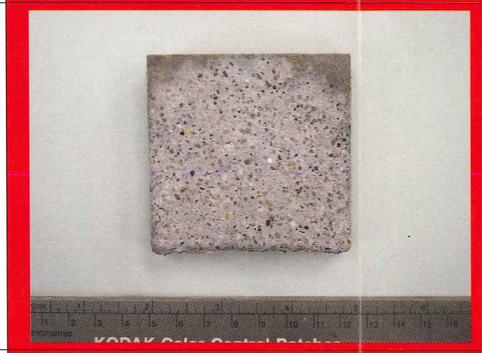
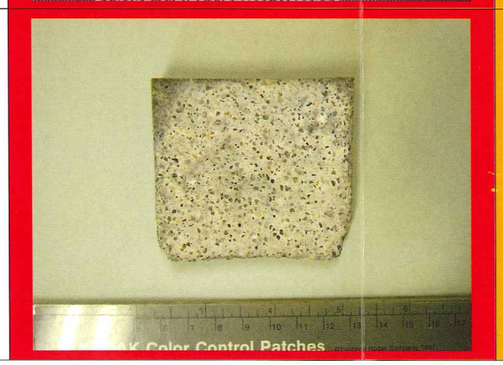
各モルタル、コンクリートの浸食状況（試験温度 10～40℃、pH0～2、試験材齢４週）

（２）コンクリート（７０×７０×２０mm）	試験温度	ｐＨ		
		1	1.5	2
試験前 	10℃			
	20℃			
	30℃			
	40℃			

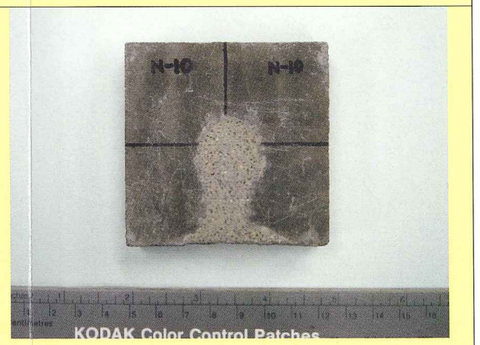
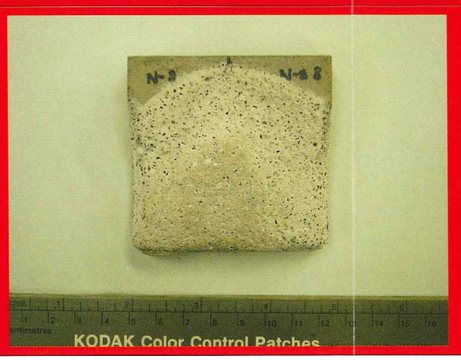
各モルタル、コンクリートの浸食状況（試験温度 10～40℃、pH0～2、試験材齢 4 週）

（３）耐酸モルタルＡ	試験温度	ｐＨ		
		0	1	2
試験前 	10℃			
	20℃			
	30℃			
	40℃			

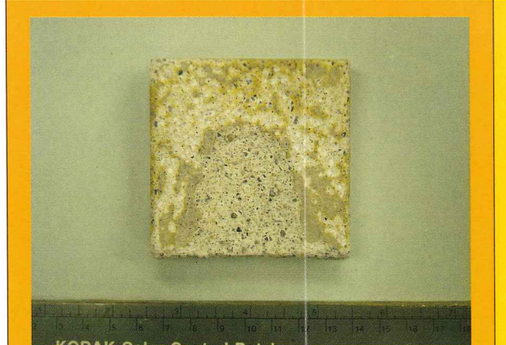
各モルタル、コンクリートの浸食状況（試験温度 10～40℃、pH0～2、試験材齢 4 週）

（４）耐酸モルタルB	試験温度	pH 0	pH 1	pH 2
試験前 	10℃			
	20℃			
	30℃			
	40℃			

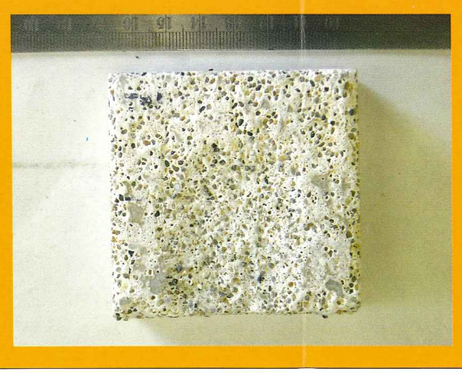
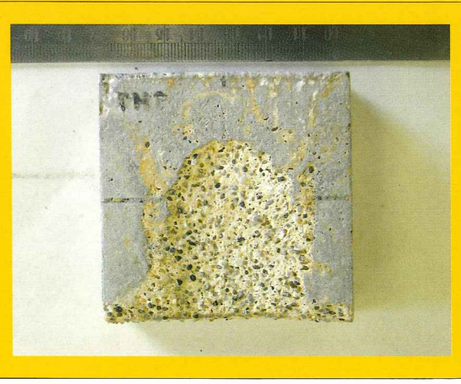
各モルタル、コンクリートの浸食状況（試験温度 10～40℃、pH0～2、試験材齢 4 週）

（５）耐酸モルタルC	試験温度	pH		
		0	1	2
試験前 	10℃			
	20℃			
	30℃			
	40℃			

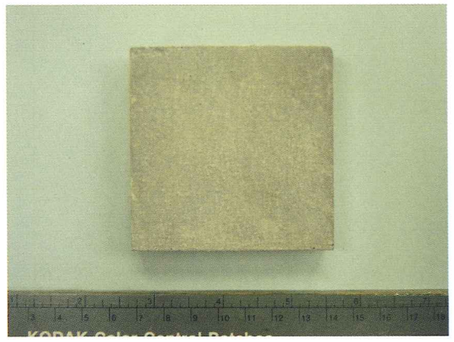
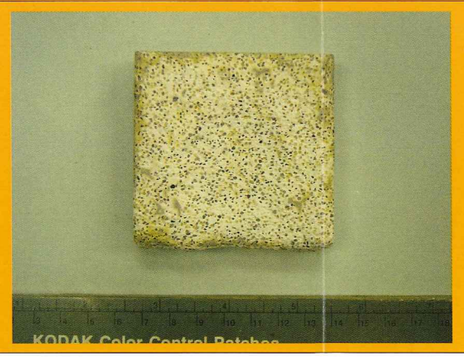
各モルタル、コンクリートの浸食状況（試験温度 10～40℃、pH0～2、試験材齢 4 週）

（６）汎用モルタルD	試験温度	pH		
		1	1.5	2
試験前 	10℃			
	20℃			
	30℃			
	40℃			

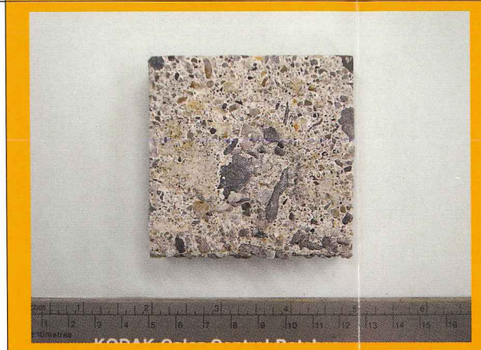
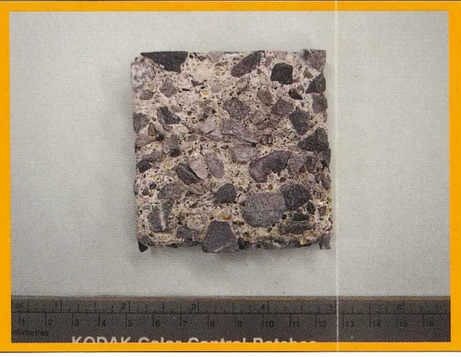
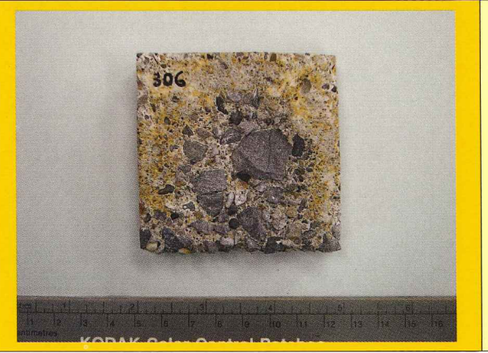
各モルタル、コンクリートの浸食状況（試験温度 10～40℃、pH0～2、試験材齢 4 週）

（7）汎用モルタルE	試験温度	pH		
		1	1.5	2
試験前 	10℃			
	20℃			
	30℃			
	40℃			

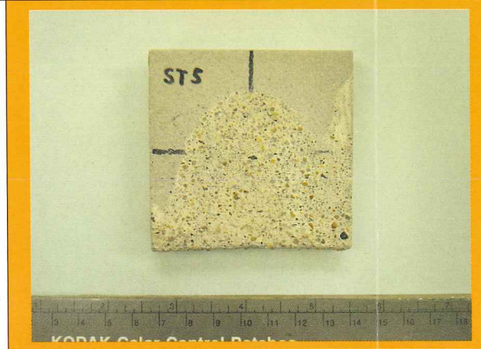
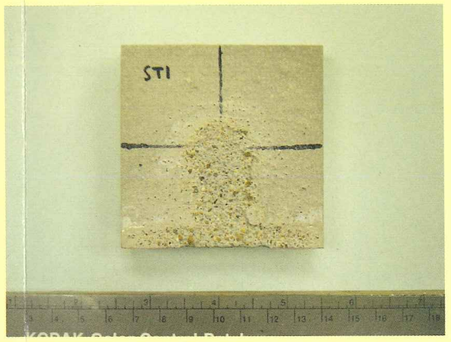
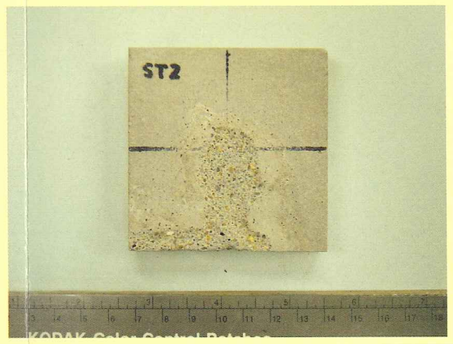
各モルタル、コンクリートの浸食状況（試験温度 10～40℃、pH0～2、試験材齢 4 週）

（８）汎用モルタルＦ	試験温度	ｐＨ		
		1	1.5	2
試験前 	10℃			
	20℃			
	30℃			
	40℃			

試験材齢による浸食状況（試験温度 40℃、pH1～2、試験材齢 2～8 週）

（1）コンクリート７０×７０×２０mm	試験材齢	pH		
		1	1.5	2
試験前 	2 週			
	4 週			
	8 週			

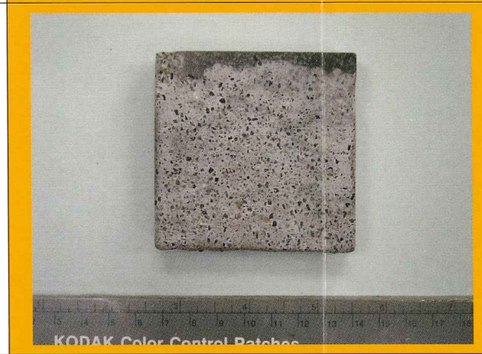
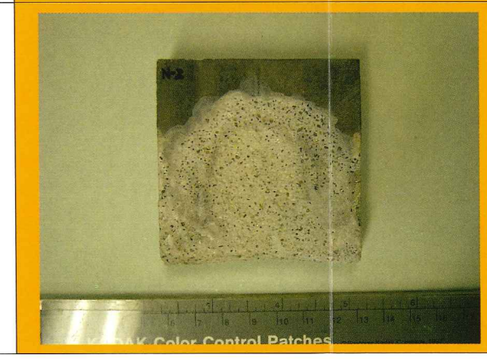
試験材齢による浸食状況（試験温度 40℃、pH1～2、試験材齢 2～8 週）

（２）耐酸モルタルＡ	試験材齢	pH		
		1	1.5	2
試験前 	2 週			
	4 週			
	8 週			

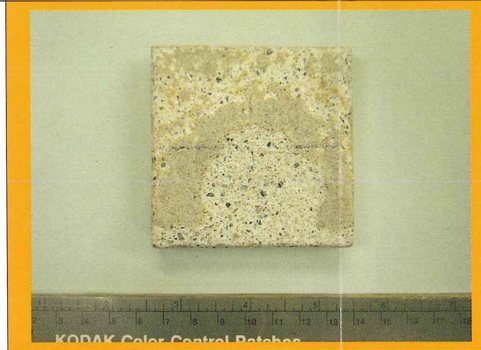
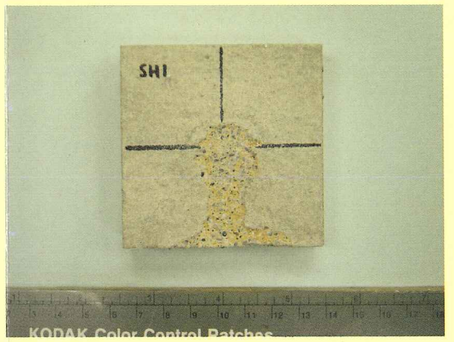
試験材齢による浸食状況（試験温度 40℃、pH1～2、試験材齢 2～8 週）

（3）耐酸モルタルB	試験材齢	pH		
		1	1.5	2
試験前 	2 週			
	4 週			
	8 週			

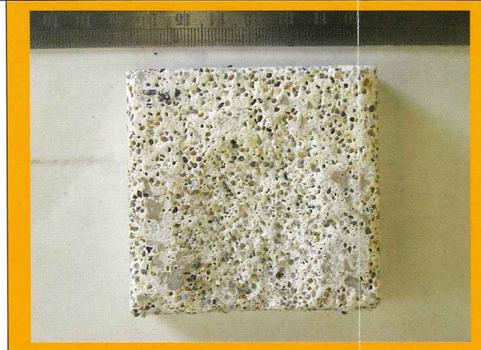
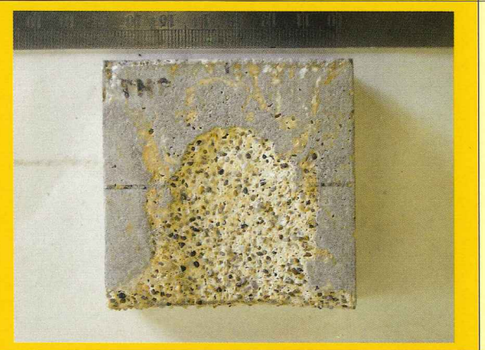
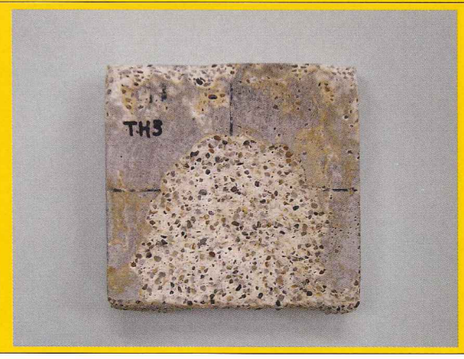
試験材齢による浸食状況（試験温度 40℃、pH1～2、試験材齢 2～8 週）

（４）耐酸モルタルC	試験材齢	pH		
		1	1.5	2
試験前 	2 週			
	4 週			
	8 週			

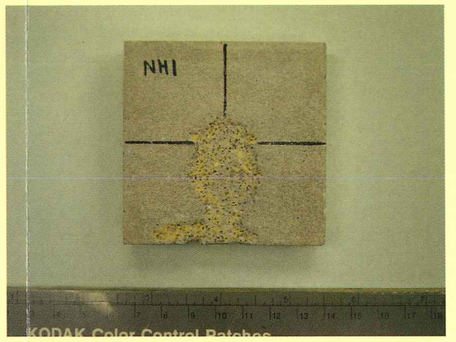
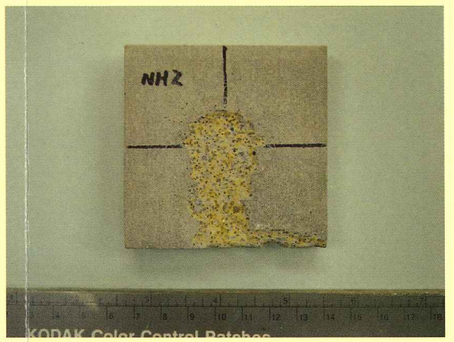
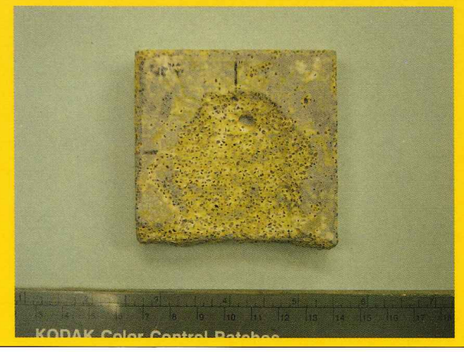
試験材齢による浸食状況（試験温度 40℃、pH1～2、試験材齢 2～8 週）

（５）汎用モルタルD	試験材齢	pH		
		1	1.5	2
試験前 	2 週			
	4 週			
	8 週			

試験材齢による浸食状況（試験温度 40℃、pH1～2、試験材齢 2～8 週）

（６）汎用モルタルＥ	試験材齢	ｐＨ 1	ｐＨ 1.5	ｐＨ 2
試験前 	2 週			
	4 週			
	8 週			

試験材齢による浸食状況（試験温度 40℃、pH1～2、試験材齢 2～8 週）

（7）汎用モルタルＦ	試験材齢	pH		
		1	1.5	2
試験前 	2 週			
	4 週			
	8 週			

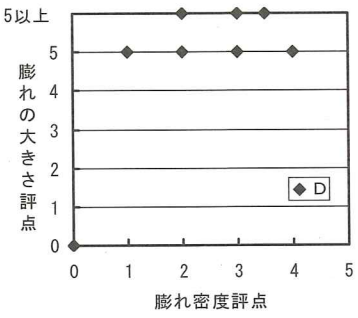
資料２　【第３編補足資料】塗布型ライニング材評価試験結果

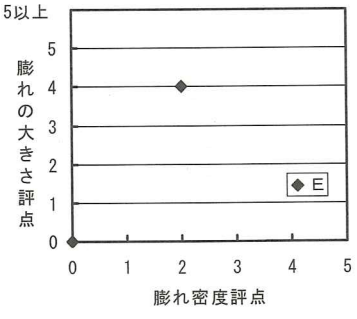
資料２－１　硫酸浸漬による外観変化

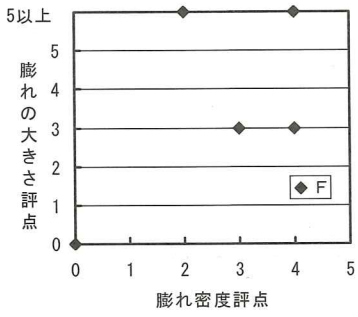
試験体番号	外観観察結果							
	浸漬前				浸漬後			
	膨れ	割れ	剥がれ	写真	膨れ	割れ	剥がれ	写真
D-A-5-1	0	0	0		0	0	0	
D-A-5-2	0	0	0		0	0	0	
D-A-5-3	0	0	0		0	0	0	
D-A-5-4	0	0	0		0	0	0	
D-A-5-5	0	0	0		0	0	0	
D-A-6-1	0	0	0		0	0	0	
D-A-6-2	0	0	0		密度 1 大きさ 5	0	0	
D-A-6-3	0	0	0		0	0	0	
D-A-6-4	0	0	0		密度 2 大きさ 5	0	0	
D-A-6-5	0	0	0		密度 3 大きさ 5	0	0	
D-B-5-1	0	0	0		0	0	0	
D-B-5-2	0	0	0		0	0	0	
D-B-5-3	0	0	0		密度 3.5 大きさ 5<	0	0	
D-B-5-4	0	0	0		密度 3 大きさ 5<	0	0	
D-B-5-5	0	0	0		密度 4 大きさ 5<	0	0	ほぼ全面ふくれ
D-B-6-1	0	0	0		0	0	0	
D-B-6-2	0	0	0		密度 1 大きさ 5	0	0	
D-B-6-3	0	0	0		密度 2 大きさ 5<	0	0	
D-B-6-4	0	0	0		密度 2 大きさ 5<	0	0	
D-B-6-5	0	0	0		密度 2 大きさ 5<	0	0	
E-A-5-1	0	0	0		0	0	0	
E-A-5-2	0	0	0		0	0	0	
E-A-5-3	0	0	0		0	0	0	
E-A-5-4	0	0	0		0	0	0	
E-A-5-5	0	0	0		0	0	0	
E-A-6-1	0	0	0		0	0	0	
E-A-6-2	0	0	0		0	0	0	
E-A-6-3	0	0	0		0	0	0	
E-A-6-4	0	0	0		0	0	0	
E-A-6-5	0	0	0		0	0	0	

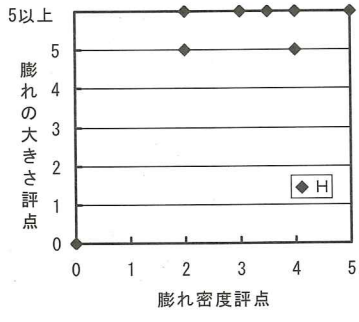
試験体番号	外観観察結果							
	浸漬前				浸漬後			
	膨れ	割れ	剥がれ	写真	膨れ	割れ	剥がれ	写真
E-B-5-1	0	0	0		0	0	0	
E-B-5-2	0	0	0		0	0	0	
E-B-5-3	0	0	0		0	0	0	
E-B-5-4	0	0	0		0	0	0	
E-B-5-5	0	0	0		0	0	0	
E-B-6-1	0	0	0		0	0	0	
E-B-6-2	0	0	0		0	0	0	
E-B-6-3	0	0	0		0	0	0	
E-B-6-4	0	0	0		密度 2 大きさ 4	0	0	
E-B-6-5	0	0	0		0	0	0	
F-A-5-1	0	0	0		0	0	0	
F-A-5-2	0	0	0		0	0	0	
F-A-5-3	0	0	0		0	0	0	
F-A-5-4	0	0	0		密度 4 大きさ 3	0	0	
F-A-5-5	0	0	0		密度 4 大きさ 5<			全面ふくれ
F-A-6-1	0	0	0		0	0	0	
F-A-6-2	0	0	0		0	0	0	
F-A-6-3	0	0	0		密度 2 大きさ 5<	0	0	
F-A-6-4	0	0	0		密度 2(7ヶ)	0	0	
F-A-6-5	0	0	0		密度 3 大きさ 3			
F-B-5-1	0	0	0		0	0	0	
F-B-5-2	0	0	0		0	0	0	
F-B-5-3	0	0	0		0	0	0	
F-B-5-4	0	0	0		0	0	0	
F-B-5-5	0	0	0		0	0	0	
F-B-6-1	0	0	0		0	0	0	
F-B-6-2	0	0	0		0	0	0	
F-B-6-3	0	0	0		0	0	0	
F-B-6-4	0	0	0		0	0	0	
F-B-6-5	0	0	0		0	0	0	

試験体番号	外観観察結果							
	浸漬前				浸漬後			
	膨れ	割れ	剥がれ	写真	膨れ	割れ	剥がれ	写真
H-A-5-1	0	0	0		0	0	0	
H-A-5-2	0	0	0		0	0	0	
H-A-5-3	0	0	0		0	0	0	
H-A-5-4	0	0	0		密度 2 大きさ 5<	0	0	
H-A-5-5	0	0	0		全面 大きさ 5<			
H-A-6-1	0	0	0		0	0	0	
H-A-6-2	0	0	0		0	0	0	
H-A-6-3	0	0	0		密度 3.5 大きさ 5<	0	0	
H-A-6-4	0	0	0		密度 20% 大きさ 5<	0	0	
H-A-6-5	0	0	0		全面 大きさ 5<	0	0	
H-B-5-1	0	0	0		0	0	0	
H-B-5-2	0	0	0		0	0	0	
H-B-5-3	0	0	0		密度 3.5 大きさ 5<	0	0	
H-B-5-4	0	0	0		密度 4 大きさ 5<	ふくれかなり大きい		
H-B-5-5	0	0	0		全面 大きさ 5<			
H-B-6-1	0	0	0		0	0	0	
H-B-6-2	0	0	0		0	0	0	
H-B-6-3	0	0	0		密度 3 大きさ 5<	0	0	
H-B-6-4	0	0	0		ほぼ全面	ふくれかなり大きい		
H-B-6-5	0	0	0		全面 大きさ5<	ふくれかなり大きい		
H-C-5-1	0	0	0		0	0	0	
H-C-5-2	0	0	0		0	0	0	
H-C-5-3	0	0	0		0	0	0	
H-C-5-4	0	0	0		密度 2 大きさ 5	ｴｯｼﾞ部のふくれは密度3 大きさ5		
H-C-5-5	0	0	0		0	0	0	
H-C-6-1	0	0	0		0	0	0	
H-C-6-2	0	0	0		0	0	0	
H-C-6-3	0	0	0		0	0	0	
H-C-6-4	0	0	0		0	0	0	ちぢみ22ヶ
H-C-6-5	0	0	0		密度 4 大きさ 5	0	0	全面ふくれ









資料２－２　引き剥がし試験における塗膜の破壊箇所

供試体５（ＤＡ）

供試体番号	番号	全剥離面積 (mm^2)	破断状態						
			基板破壊（%）	基板ー素地調整材界面破壊（%）	素地調整材層内破壊（%）			素地調整材ー上塗り層界面破壊(%)	上塗り層内破壊（%）
D-A-5-1	1	6000	10	90					
	2	6000	5	95					
	3	6000	5	95					
	4	6000	10	90					
	5	6000	5	95					
平均値		6000	7	93					
D-A-5-2	1	6000		100					
	2	6000		100					
	3	6000		100					
	4	6000		100					
	5	6000		100					
平均値		6000		100					
D-A-5-3	1	6000		100					
	2	6000		100					
	3	6000		100					
	4	6000		100					
	5	6000		100					
平均値		6000		100					
D-A-5-4	1	6000		100					
	2	6000		100					
	3	6000		100					
	4	6000		100					
	5	6000		100					
平均値		6000		100					
D-A-5-5	1	6000	7	93					
	2	6000	5	95					
	3	6000	5	95					
	4	6000	10	90					
	5	6000	3	97					
平均値		6000	6	94					

供試体５（ＤＢ）

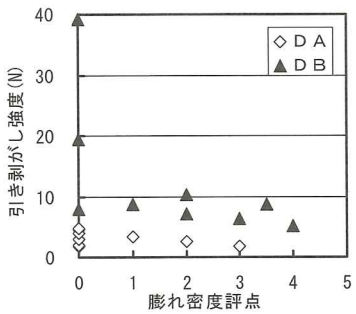
供試体番号	番号	全剥離面積 (mm^2)	破断状態						
			基板破壊（%）	基板ープライマー界面破壊（%）	プライマー層内破壊（%）	プライマーー素地調整材界面破壊（%）	素地調整材層内破壊（%）	素地調整材ー上塗り層界面破壊（%）	上塗り層内破壊（%）
D-B-5-1	1	6000	5		80	15			
	2	6000	5		90	5			
	3	6000	5		75	20			
	4	6000	10		80	10			
	5	6000	10		90	0			
平均値		6000	7		83	10			
D-B-5-2	1	6000			100				
	2	6000			100				
	3	6000			100				
	4	6000			100				
	5	6000			100				
平均値		6000			100				
D-B-5-3	1	6000			70			30	
	2	6000			100			0	
	3	6000			100			0	
	4	6000			100			0	
	5	6000			100			0	
平均値		6000			94			6	
D-B-5-4	1	6000			100				
	2	6000			100				
	3	6000			100				
	4	6000			100				
	5	6000			100				
平均値		6000			100				
D-B-5-5	1	6000			100				
	2	6000			100				
	3	6000			100				
	4	6000			100				
	5	6000			100				
平均値		6000			100				

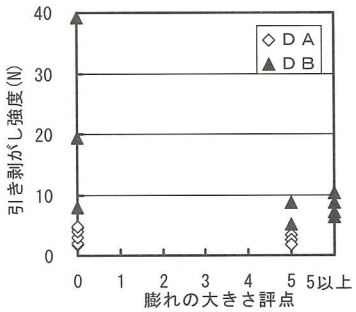
供試体６（ＤＡ）

供試体番号	番号	全剥離面積 (mm^2)	破断状態						
			基板破壊 (%)	基板ー素地調整材界面破壊 (%)	素地調整材層内破壊 (%)			素地調整材ー上塗り層界面破壊 (%)	上塗り層内破壊 (%)
D-A-6-1	1	6000	5	95					
	2	6000	5	95					
	3	6000	5	95					
	4	6000	5	95					
	5	6000	10	90					
平均値		6000	6	94					
D-A-6-2	1	6000	5	95					
	2	6000	5	95					
	3	6000	0	100					
	4	6000	0	100					
	5	6000	5	95					
平均値		6000	3	97					
D-A-6-3	1	6000	5	95					
	2	6000	5	95					
	3	6000	5	95					
	4	6000	5	95					
	5	6000	5	95					
平均値		6000	5	95					
D-A-6-4	1	6000	3	97					
	2	6000	3	97					
	3	6000	3	97					
	4	6000	3	97					
	5	6000	3	97					
平均値		6000	3	97					
D-A-6-5	1	6000	3	97					
	2	6000	5	95					
	3	6000	2	98					
	4	6000	3	97					
	5	6000	2	98					
平均値		6000	3	97					

供試体６（ＤＢ）

供試体番号	番号	全剥離面積 (mm^2)	破断状態						
			基板破壊 (%)	基板ープライマー界面破壊 (%)	プライマー層内破壊 (%)	プライマーー素地調整材界面破壊 (%)	素地調整材層内破壊 (%)	素地調整材ー上塗り層界面破壊 (%)	上塗り層内破壊 (%)
D-B-6-1	1	6000	50		50				
	2	6000	50		50				
	3	6000	90		10				
	4	6000	100		0				
	5	6000	100		0				
平均値		6000	78		22				
D-B-6-2	1	6000	5		95				
	2	6000	5		95				
	3	6000	5		95				
	4	6000	5		95				
	5	6000	5		95				
平均値		6000	5		95				
D-B-6-3	1	6000			100		0		
	2	6000			98		2		
	3	6000			95		5		
	4	6000			90		10		
	5	6000			60		40		
平均値		6000			89		11		
D-B-6-4	1	6000	3		97		0		
	2	6000	5		95		0		
	3	6000	0		100		0		
	4	6000	2		95		3		
	5	6000	3		90		7		
平均値		6000	3		95		2		
D-B-6-5	1	6000	5		90		5		
	2	6000	2		93		5		
	3	6000	3		93		4		
	4	6000	2		93		5		
	5	6000	1		93		6		
平均値		6000	3		92		5		





供試体５（ＥＡ）

供試体番号	番号	全剥離面積 (mm^2)	破断状態						
			基板破壊 (%)	基板－素地調整材界面破壊 (%)	素地調整材層内破壊 (%)	素地調整材－プライマー界面破壊 (%)	プライマー層内破壊 (%)	プライマー－上塗りまたは補強層界面破壊 (%)	上塗り又は補強層層内破壊 (%)
E-A-5-1	1	6000			100				
	2	6000			100				
	3	6000			100				
	4	6000			100				
	5	6000			100				
平均値		6000			100				
E-A-5-2	1	6000			100				
	2	6000			100				
	3	6000			100				
	4	6000			100				
	5	6000			100				
平均値		6000			100				
E-A-5-3	1	6000			100				
	2	6000			100				
	3	6000			100				
	4	6000			100				
	5	6000			100				
平均値		6000			100				
E-A-5-4	1	6000			100				
	2	6000			100				
	3	6000			100				
	4	6000			100				
	5	6000			100				
平均値		6000			100				
E-A-5-5	1	6000			100				
	2	6000			100				
	3	6000			100				
	4	6000			100				
	5	6000			100				
平均値		6000			100				

供試体５（ＥＢ）

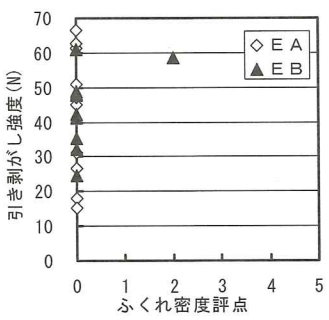
供試体番号	番号	全剥離面積 (mm^2)	破断状態						
			基板破壊 (%)	基板－素地調整材界面破壊 (%)	素地調整材層内破壊 (%)	素地調整材－プライマー界面破壊 (%)	プライマー層内破壊 (%)	プライマー－上塗りまたは補強層界面破壊 (%)	上塗り又は補強層層内破壊 (%)
E-B-5-1	1	6000			100				
	2	6000			100				
	3	6000			100				
	4	6000			100				
	5	6000			100				
平均値		6000			100				
E-B-5-2	1	6000			100				
	2	6000			100				
	3	6000			100				
	4	6000			100				
	5	6000			100				
平均値		6000			100				
E-B-5-3	1	6000			100				
	2	6000			100				
	3	6000			100				
	4	6000			100				
	5	6000			100				
平均値		6000			100				
E-B-5-4	1	6000			100				
	2	6000			100				
	3	6000			100				
	4	6000			100				
	5	6000			100				
平均値		6000			100				
E-B-5-5	1	6000	0		100				
	2	6000	3		97				
	3	6000	5		95				
	4	6000	5		95				
	5	6000	0		100				
平均値		6000	3		97				

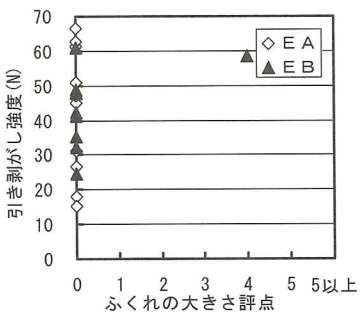
供試体６（ＥＡ）

供試体番号	番号	全剥離面積 (mm^2)	破断状態						
			基板破壊 (%)	基板－素地調整材界面破壊 (%)	素地調整材層内破壊 (%)	素地調整材－プライマー界面破壊 (%)	プライマー層内破壊 (%)	ﾌﾟﾗｲﾏｰ－上塗りまたは補強層界面破壊	上塗り又は補強層層内破壊 (%)
E-A-6-1	1	6000			100				
	2	6000			100				
	3	6000			100				
	4	6000			100				
	5	6000			100				
平均値		6000			100				
E-A-6-2	1	6000			100				
	2	6000			100				
	3	6000			100				
	4	6000			100				
	5	6000			100				
平均値		6000			100				
E-A-6-3	1	6000			100				
	2	6000			100				
	3	6000			100				
	4	6000			100				
	5	6000			100				
平均値		6000			100				
E-A-6-4	1	6000			100				
	2	6000			100				
	3	6000			100				
	4	6000			100				
	5	6000			100				
平均値		6000			100				
E-A-6-5	1	6000			100				
	2	6000			100				
	3	6000			100				
	4	6000			100				
	5	6000			100				
平均値		6000			100				

供試体６（ＥＢ）

供試体番号	番号	全剥離面積 (mm^2)	破断状態						
			基板破壊 (%)	基板－素地調整材界面破壊 (%)	素地調整材層内破壊 (%)	素地調整材－プライマー界面破壊 (%)	プライマー層内破壊 (%)	ﾌﾟﾗｲﾏｰ－上塗りまたは補強層界面破壊	上塗り又は補強層層内破壊 (%)
E-B-6-1	1	6000			100				
	2	6000			100				
	3	6000			100				
	4	6000			100				
	5	6000			100				
平均値		6000			100				
E-B-6-2	1	6000			100				
	2	6000			100				
	3	6000			100				
	4	6000			100				
	5	6000			100				
平均値		6000			100				
E-B-6-3	1	6000			100				
	2	6000			100				
	3	6000			100				
	4	6000			100				
	5	6000			100				
平均値		6000			100				
E-B-6-4	1	6000			100				
	2	6000			100				
	3	6000			100				
	4	6000			100				
	5	6000			100				
平均値		6000			100				
E-B-6-5	1	6000	0		100				
	2	6000	3		97				
	3	6000	7		93				
	4	6000	3		97				
	5	6000	3		97				
平均値		6000	3		97				





供試体５（ＦＡ）

供試体番号	番号	全剥離面積 (mm^2)	破断状態						
			基板破壊 (%)	基板－素地調整材界面破壊 (%)	素地調整材層内破壊 (%)			素地調整材－補強層界面破壊 (%)	上塗り又は補強層層内破壊 (%)
F-A-5-1	1	6000						20	80
	2	6000						0	100
	3	6000						0	100
	4	6000						0	100
	5	6000						0	100
平均値		6000						4	96
F-A-5-2	1	6000			100				
	2	6000			100				
	3	6000			100				
	4	6000			100				
	5	6000			100				
平均値		6000			100				
F-A-5-3	1	6000			100				
	2	6000			100				
	3	6000			100				
	4	6000			100				
	5	6000			100				
平均値		6000			100				
F-A-5-4	1	0							
	2	6000			100				
	3	6000			100				
	4	6000			100				
	5	6000			100				
平均値		4800			100				
F-A-5-5	1	6000			100				
	2	6000			100				
	3	6000			100				
	4	6000			100				
	5	6000			100				
平均値		6000			100				

供試体５（ＦＢ）

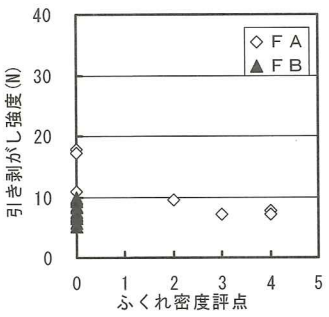
供試体番号	番号	全剥離面積 (mm^2)	破断状態						
			基板破壊 (%)	基板－素地調整材界面破壊 (%)	素地調整材層内破壊 (%)	素地調整材－プライマー界面破壊 (%)	プライマー層内破壊 (%)	ﾌﾟﾗｲﾏｰ－上塗りまたは補強層界面破壊 (%)	上塗り又は補強層層内破壊 (%)
F-B-5-1	1	6000			30				70
	2	6000			40				60
	3	6000			40				60
	4	6000			100				0
	5	6000			30				70
平均値		6000			48				52
F-B-5-2	1	6000		20	80				
	2	6000		0	100				
	3	6000		0	100				
	4	6000		10	90				
	5	6000		5	95				
平均値		6000		7	93				
F-B-5-3	1	0			0				0
	2	6000			100	0			0
	3	6000			100	0			0
	4	6000			100	0			0
	5	6000			90	10			0
平均値		6000			98	3			0
F-B-5-4	1	6000			85			15	
	2	6000			85			15	
	3	6000			90			10	
	4	6000			90			10	
	5	6000			93			7	
平均値		6000			89			11	
F-B-5-5	1	6000			30	70			0
	2	6000			70	30			0
	3	6000			80	20			0
	4	0			0	0			100
	5	6000			60	40			0
平均値		6000			60	40			0

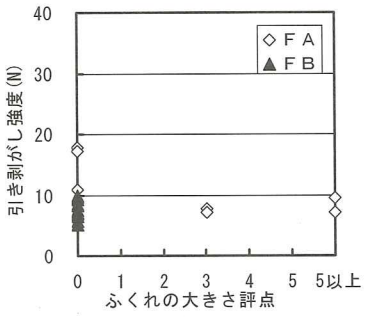
供試体６（ＦＡ）

供試体番号	番号	全剥離面積 (mm^2)	破断状態						
			基板破壊 (%)	基板ー素地調整材界面破壊 (%)	素地調整材層内破壊 (%)			素地調整材ー補強層界面破壊 (%)	上塗り又は補強層層内破壊 (%)
F-A-6-1	1	5100			10			0	90
	2	2550			0			5	95
	3	210			15			0	85
	4	945			30			0	70
	5	510			5			0	95
平均値		1863			12			1	87
F-A-6-2	1	1650			90				10
	2	0							
	3	6000			100				0
	4	4320			90				10
	5	0						0	100
平均値		3990			93				7
F-A-6-3	1	4350			100			0	0
	2	3690			100			0	0
	3	0							
	4	0							
	5	4800			100			0	0
平均値		4280			100			0	0
F-A-6-4	1	0							
	2	1800			100				0
	3	0							
	4	250			100				0
	5	0							
平均値		1800			100				0
F-A-6-5	1	0							
	2	6000			100			0	0
	3	6000			100			0	0
	4	6000			100			0	0
	5	0							
平均値		6000			100			0	0

供試体６（ＦＢ）

供試体番号	番号	全剥離面積 (mm^2)	破断状態						
			基板破壊 (%)	基板ー素地調整材界面破壊 (%)	素地調整材層内破壊 (%)	素地調整材ープライマー界面破壊 (%)	プライマー層内破壊 (%)	ﾌﾟﾗｲﾏｰー上塗りまたは補強層界面破壊 (%)	上塗り又は補強層層内破壊 (%)
F-B-6-1	1	1200			0	0			100
	2	6000			5	90			5
	3	6000			20	80			0
	4	6000			50	50			0
	5	6000			90	10			0
平均値		6000			41	58			1
F-B-6-2	1	0							
	2	2700		20	80				0
	3	6000		10	90				0
	4	6000		40	60				0
	5	6000		0	100				0
平均値		5175		18	83				0
F-B-6-3	1	6000			60	40			
	2	6000			50	50			
	3	6000			70	30			
	4	6000			70	30			
	5	6000			60	40			
平均値		6000			62	38			
F-B-6-4	1	0							
	2	0							
	3	6000			70			30	
	4	6000			50			50	
	5	6000			30			70	
平均値		6000			50			50	
F-B-6-5	1	6000			30	70			
	2	6000			30	70			
	3	6000			30	70			
	4	6000			40	60			
	5	0							
平均値		6000			33	68			





供試体５（ＨＡ）

供試体番号	番号	全剥離面積 (mm^2)	破断状態						
			母材破壊 (%)	母材ープライマー界面破壊 (%)	プライマーーパテ界面破壊 (%)	パテ層内破壊 (%)	パテーレジン界面破壊 (%)	レジン凝集破壊 (%)	炭素繊維シート層内剥離 (%)
H-A-5-1	1	6000	0		100				0
	2	6000	0		98				2
	3	6000	0		100				0
	4	6000	1		99				0
	5	6000	0		100				0
平均値		6000	0		99				0
H-A-5-2	1	6000		15	85				
	2	6000		10	90				
	3	6000		8	92				
	4	6000		8	92				
	5	6000		7	93				
平均値		6000		10	90				
H-A-5-3	1	6000		2	98				
	2	6000		2	98				
	3	6000		3	97				
	4	6000		2	98				
	5	6000		5	95				
平均値		6000		3	97				
H-A-5-4	1	6000		3	97				
	2	6000		5	95				
	3	6000		0	100				
	4	6000		3	97				
	5	6000		2	98				
平均値		6000		3	97				
H-A-5-5	1	6000	0	10	90				
	2	6000	3	10	87				
	3	6000	0	20	80				
	4	6000	0	35	65				
	5	6000	0	30	70				
平均値		6000	1	21	78				

供試体５（ＨＢ）

供試体番号	番号	全剥離面積 (mm^2)	破断状態						
			母材破壊 (%)	母材ープライマー界面破壊 (%)	プライマーーパテ界面破壊 (%)	パテ層内破壊 (%)	パテーレジン界面破壊 (%)	レジン凝集破壊 (%)	炭素繊維シート層内剥離 (%)
H-B-5-1	1	6000	100						
	2	6000	100						
	3	6000	100						
	4	6000	100						
	5	6000	100						
平均値		6000	100						
H-B-5-2	1	6000	70				30		0
	2	6000	80				20		0
	3	6000	55				45		0
	4	6000	35				60		5
	5	6000	20				75		5
平均値		6000	52				46		2
H-B-5-3	1	6000	5		95				
	2	6000	10		90				
	3	6000	15		85				
	4	6000	20		80				
	5	6000	20		80				
平均値		6000	14		86				
H-B-5-4	1	6000	35		65				
	2	6000	35		65				
	3	6000	15		85				
	4	6000	30		70				
	5	6000	40		60				
平均値		6000	31		69				
H-B-5-5	1	6000	15		0	82	3		
	2	6000	20		0	80	0		
	3	6000	30		0	70	0		
	4	6000	30		0	70	0		
	5	6000	30		65	5	0		
平均値		6000	25		13	61	1		

供試体５（HC）

供試体番号	番号	全剥離面積 (mm^2)	破断状態						
			母材破壊 (%)		プライマーーパテ界面破壊 (%)	パテ層内破壊 (%)	パテーレジン界面破壊 (%)	レジン凝集破壊 (%)	炭素繊維シート層内剥離 (%)
H-C-5-1	1	6000					95	5	
	2	6000					97	3	
	3	6000					97	3	
	4	6000					98	2	
	5	6000					100	0	
平均値		6000					97	3	
H-C-5-2	1	6000			95		5		
	2	6000			90		10		
	3	6000			70		30		
	4	6000			95		5		
	5	6000			0		100		
平均値		6000			70		30		
H-C-5-3	1	6000			85		15		0
	2	6000			95		5		0
	3	6000			90		10		0
	4	6000			85		15		0
	5	6000			30		55		15
平均値		6000			77		20		3
H-C-5-4	1	6000			5		95		0
	2	6000			0		50		50
	3	6000			0		50		50
	4	6000			0		97		3
	5	6000			0		97		3
平均値		6000			1		78		21
H-C-5-5	1	6000					100		0
	2	6000					100		0
	3	6000					100		0
	4	6000					100		0
	5	6000					98		2
平均値		6000					100		0

供試体６（HA）

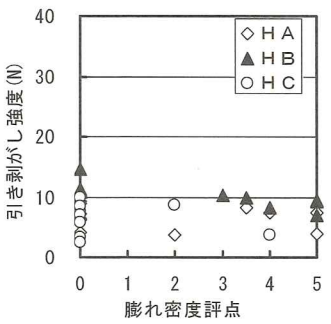
供試体番号	番号	全剥離面積 (mm^2)	破断状態						
			母材破壊 (%)	母材ープライマー界面破壊 (%)	プライマーーパテ界面破壊 (%)	パテ層内破壊 (%)	パテーレジン界面破壊 (%)	レジン凝集破壊 (%)	炭素繊維シート層内剥離 (%)
H-A-6-1	1	6000	25	5	70				
	2	6000	10	5	85				
	3	6000	3	2	95				
	4	6000	2	4	96				
	5	6000	15	35	50				
平均値		6000	11	10	79				
H-A-6-2	1	6000	2	49	49				
	2	6000	0	70	30				
	3	6000	5	50	45				
	4	6000	2	70	28				
	5	6000	3	75	22				
平均値		6000	2	63	35				
H-A-6-3	1	6000	5	50	45				
	2	6000	3	27	70				
	3	6000	2	30	68				
	4	6000	3	17	80				
	5	6000	2	38	60				
平均値		6000	3	32	65				
H-A-6-4	1	6000	3	70	28				
	2	6000	2	33	65				
	3	6000	0	15	85				
	4	6000	2	48	50				
	5	6000	5	55	40				
平均値		6000	2	44	54				
H-A-6-5	1	6000		80	20				
	2	6000		60	40				
	3	6000		40	60				
	4	6000		60	40				
	5	6000		70	30				
平均値		6000		62	38				

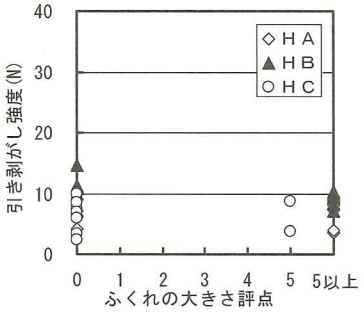
供試体６（HB）

供試体番号	番号	全剥離面積 (mm^2)	破断状態						
			母材破壊 (%)	母材－プライマー界面破壊 (%)	プライマー－パテ界面破壊 (%)	パテ層内破壊 (%)	パテ－レジン界面破壊 (%)	レジン凝集破壊 (%)	炭素繊維シート層内剥離 (%)
H-B-6-1	1	6000	70	30					0
	2	6000	90	10					0
	3	6000	20	10					70
	4	6000	95	5					0
	5	6000	90	10					0
平均値		6000	73	13					14
H-B-6-2	1	6000	0				100		
	2	6000	5				95		
	3	6000	5				95		
	4	6000	5				95		
	5	6000	5				95		
平均値		6000	4				96		
H-B-6-3	1	6000	5		95				
	2	6000	10		90				
	3	6000	15		85				
	4	6000	10		90				
	5	6000	10		90				
平均値		6000	10		90				
H-B-6-4	1	6000	20				75	5	
	2	6000	30				65	5	
	3	6000	30				65	5	
	4	6000	65				33	2	
	5	6000	20				75	5	
平均値		6000	33				63	4	
H-B-6-5	1	6000	25				72		3
	2	6000	20				77		3
	3	6000	20				75		5
	4	6000	60				30		10
	5	6000	60				35		5
平均値		6000	37				58		5

供試体６（HC）

供試体番号	番号	全剥離面積 (mm^2)	破断状態						
			母材破壊 (%)		プライマー－パテ界面破壊 (%)	パテ凝集破壊 (%)	パテ－レジン界面破壊 (%)	レジン凝集破壊 (%)	炭素繊維シート層内剥離 (%)
H-C-6-1	1	6000					95	5	
	2	6000					90	10	
	3	6000					95	5	
	4	6000					90	10	
	5	6000					95	5	
平均値		6000					93	7	
H-C-6-2	1	6000			0		95		5
	2	6000			70		30		0
	3	6000			30		70		0
	4	6000			0		100		0
	5	6000			0		100		0
平均値		6000			20		79		1
H-C-6-3	1	6000			3	27			70
	2	6000			5	95			0
	3	6000			5	85			10
	4	6000			5	95			0
	5	6000			10	90			0
平均値		6000			6	78			16
H-C-6-4	1	6000					100		
	2	6000					100		
	3	6000					100		
	4	6000					100		
	5	6000					100		
平均値		6000					100		
H-C-6-5	1	6000					100		
	2	6000					100		
	3	6000					100		
	4	6000					100		
	5	6000					100		
平均値		6000					100		





資料２－３　付着強度試験における塗膜の破壊箇所

供試体５（ＤＡ）

供試体番号	番号	測定値 (kN)	付着強さ (N/mm^2)	破断状況						
				基板破壊 (%)	基板－素地調整材界面破壊 (%)	素地調整材層内破壊 (%)			素地調整材－上塗り層界面破壊 (%)	上塗り層内破壊 (%)
D-A-5-1	1	1.73	1.08	0	100					
	2	0.78	0.49	40	60					
	3	1.86	1.16	40	60					
平均		1.46	0.91	27	73					
D-A-5-2	1	3.26	2.04	10	90					
	2	2.79	1.74	5	95					
	3	2.83	1.77	15	85					
平均		2.96	1.85	10	90					
D-A-5-3	1	2.17	1.36	5	95					
	2	1.84	1.15	5	95					
	3	2.39	1.49	3	97					
平均		2.13	1.33	4	96					
D-A-5-4	1	1.84	1.15	5	45					
	2	2.35	1.47	15	85					
	3	2.55	1.59	20	80					
平均		2.25	1.40	13	70					
D-A-5-5	1	1.96	1.23	15	85					
	2	2.45	1.53	5	95					
	3	1.96	1.23	70	30					
平均		2.12	1.33	30	70					

供試体５（ＤＢ）

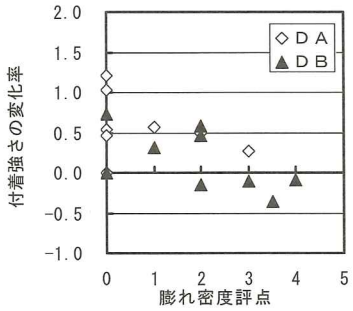
供試体番号	番号	測定値 (kN)	付着強さ (N/mm^2)	破断状況						
				基板破壊 (%)	基板－ﾌﾟﾗｲﾏｰ界面破壊 (%)	ﾌﾟﾗｲﾏｰ層内破壊 (%)	ﾌﾟﾗｲﾏｰ－素地調整材界面破壊 (%)	素地調整材層内破壊 (%)	素地調整材－上塗り層界面破壊 (%)	上塗り層内破壊 (%)
D-B-5-1	1	3.72	2.33	50		50				
	2	1.57	0.98	70		30				
	3	2.46	1.54	40		60				
平均		2.58	1.61	53		47				
D-B-5-2	1	4.07	2.54	30		70				
	2	4.23	2.64	10		90				
	3	5.10	3.19	5		95				
平均		4.47	2.79	15		85				
D-B-5-3	1	1.26	0.79	20		80				
	2	1.52	0.95	5		95				
	3	2.23	1.39	5		95				
平均		1.67	1.04	10		90				
D-B-5-4	1	3.18	1.99	15		85				
	2	1.21	0.76	7		93				
	3	2.57	1.61	7		93				
平均		2.32	1.45	10		90				
D-B-5-5	1	2.27	1.42	5		95				
	2	1.78	1.11	40		60				
	3	2.98	1.86	3		97				
平均		2.34	1.46	16		84				

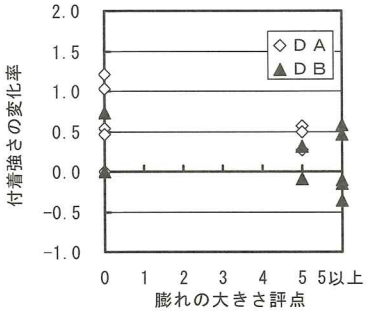
供試体６（ＤＡ）

供試体番号	番号	測定値 (kN)	接着力 (N/mm²)	破断状況 基板破壊 (%)	基板－素地調整材界面破壊 (%)	素地調整材層内破壊 (%)			素地調整材－上塗り層界面破壊 (%)	上塗り層内破壊 (%)
D-A-6-1	1	1.41	0.88	0	100					
	2	1.03	0.64	0	100					
	3	1.95	1.22	10	90					
平均		1.46	0.91	3	97					
D-A-6-2	1	3.12	1.95	10	90					
	2	2.43	1.52	10	90					
	3	1.34	0.84	5	95					
平均		2.30	1.44	8	92					
D-A-6-3	1	2.88	1.80	20	80					
	2	3.89	2.43	65	35					
	3	2.94	1.84	10	90					
平均		3.24	2.02	32	68					
D-A-6-4	1	3.52	2.20	20	80					
	2	1.26	0.79	5	95					
	3	1.76	1.10	10	90					
平均		2.18	1.36	12	88					
D-A-6-5	1	1.72	1.08	10	90					
	2	2.04	1.28	5	95					
	3	1.84	1.15	3	97					
平均		1.87	1.17	6	94					

供試体６（ＤＢ）

供試体番号	番号	測定値 (kN)	接着力 (N/mm²)	破断状況 基板破壊 (%)	基板－ﾌﾟﾗｲﾏｰ界面破壊 (%)	ﾌﾟﾗｲﾏｰ層内破壊 (%)	ﾌﾟﾗｲﾏｰ－素地調整材界面破壊 (%)	素地調整材層内破壊 (%)	素地調整材－上塗り層界面破壊 (%)	上塗り層内破壊 (%)
D-B-6-1	1	1.86	1.16	10		90				
	2	1.95	1.22	10		90				
	3	1.51	0.94	上塗りアタッチメント100%						
平均		1.77	1.19	10		90				
D-B-6-2	1	2.47	1.54	5		95				
	2	2.96	1.85	10		90				
	3	2.04	1.28	25		75				
平均		2.49	1.56	13		87				
D-B-6-3	1	3.14	1.96	50		50				
	2	3.04	1.90	15		85				
	3	2.83	1.77	30		70				
平均		3.00	1.88	32		68				
D-B-6-4	1	2.71	1.69	5		95				
	2	2.81	1.76	10		90				
	3	2.81	1.76	28		72				
平均		2.78	1.74	14		86				
D-B-6-5	1	0.91	0.57	3		97				
	2	1.92	1.20	30		70				
	3	2.07	1.29	20		80				
平均		1.63	1.02	18		82				





供試体５（ＥＡ）

供試体番号	番号	測定値 (kN)	接着力 (N/mm^2)	破断状況						
				基板破壊 (%)	基板－素地調整材界面破壊 (%)	素地調整材層内破壊 (%)	素地調整材－プライマー界面破壊 (%)	プライマー層内破壊 (%)	プライマー－上塗りまたは補強層界面破壊(%)	上塗り又は補強層層内破壊 (%)
E-A-5-1	1	3.43	2.14	40		60				
	2	3.75	2.34	30		70				
	3	3.09	1.93	15		85				
平均		3.42	2.14	28		72				
E-A-5-2	1	5.75	3.59	25		75				
	2	4.88	3.05	10		90				
	3	4.96	3.10	20		80				
平均		5.20	3.25	18		82				
E-A-5-3	1	2.51	1.57	100		0				
	2	2.29	1.43	100		0				
	3	2.90	1.81	90		10				
平均		2.57	1.60	97		3				
E-A-5-4	1	3.62	2.26	100						
	2	4.82	3.01	100						
	3	3.77	2.36	100						
平均		4.07	2.54	100						
E-A-5-5	1	4.76	2.98	60		40				
	2	3.50	2.19	60		40				
	3	4.80	3.00	80		20				
平均		4.35	2.72	67		33				

供試体５（ＥＢ）

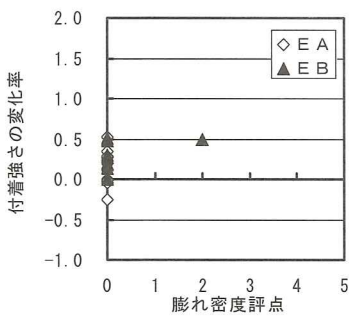
供試体番号	番号	測定値 (kN)	接着力 (N/mm^2)	破断状況						
				基板破壊 (%)	基板－素地調整材界面破壊 (%)	素地調整材層内破壊 (%)	素地調整材－プライマー界面破壊 (%)	プライマー層内破壊 (%)	プライマー－上塗りまたは補強層界面破壊(%)	上塗り又は補強層層内破壊 (%)
E-B-5-1	1	3.43	2.14	40		60				
	2	3.24	2.03	30		70				
	3	2.90	1.81	30		70				
平均		3.19	1.99	33		67				
E-B-5-2	1	3.60	2.25	100		0				
	2	4.01	2.51	70		30				
	3	3.62	2.26	95		5				
平均		3.74	2.34	88		12				
E-B-5-3	1	5.16	3.23	75		25				
	2	5.65	3.53	30		70				
	3	3.58	2.24	85		15				
平均		4.80	3.00	63		37				
E-B-5-4	1	5.06	3.16	100						
	2	5.10	3.19	100						
	3	3.91	2.44	100						
平均		4.69	2.93	100						
E-B-5-5	1	4.41	2.76	90		10				
	2	3.32	2.08	90		10				
	3	3.64	2.28	90		10				
平均		3.79	2.37	90		10				

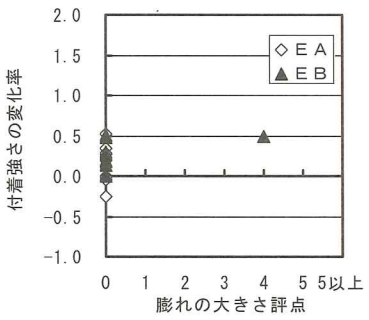
供試体６（ＥＡ）

供試体番号	番号	測定値 (kN)	接着力 (N/mm²)	破断状況						
				基板破壊 (%)	基板ー素地調整材界面破壊 (%)	素地調整材層内破壊 (%)	素地調整材ープライマー界面破壊 (%)	プライマー層内破壊 (%)	プライマーー上塗りまたは補強層界面破壊	上塗り又は補強層層内破壊 (%)
E-A-6-1	1	2.99	1.87	20		80				
	2	2.90	1.81	40		60				
	3	2.93	1.83	50		50				
平均		2.94	1.84	37		63				
E-A-6-2	1	3.71	2.32	65		35				
	2	1.88	1.18	10		90				
	3	3.10	1.94	10		90				
平均		2.90	1.81	28		72				
E-A-6-3	1	3.89	2.43	65		35				
	2	3.22	2.01	20		80				
	3	4.80	3.00	30		70				
平均		3.97	2.48	38		62				
E-A-6-4	1	2.83	1.77	100		0				
	2	2.92	1.83	90		10				
	3	2.61	1.63	95		5				
平均		2.79	1.74	95		5				
E-A-6-5	1	2.71	1.69	85	5	10				
	2	4.60	2.88	75	5	20				
	3	3.95	2.47	70	5	25				
平均		3.75	2.35	77	5	18				

供試体６（ＥＢ）

供試体番号	番号	測定値 (kN)	接着力 (N/mm²)	破断状況						
				基板破壊 (%)	基板ー素地調整材界面破壊 (%)	素地調整材層内破壊 (%)	素地調整材ープライマー界面破壊 (%)	プライマー層内破壊 (%)	プライマーー上塗りまたは補強層界面破壊	上塗り又は補強層層内破壊 (%)
E-B-6-1	1	3.21	2.01	30		70				
	2	3.59	2.24	5		95				
	3	2.80	1.75	10		90				
平均		3.20	2.00	15		85				
E-B-6-2	1	3.32	2.08	30		70				
	2	3.56	2.23	5		95				
	3	4.05	2.53	10		90				
平均		3.64	2.28	15		85				
E-B-6-3	1	2.94	1.84	70		30				
	2	4.45	2.78	40		60				
	3	4.84	3.03	40		60				
平均		4.08	2.55	50		50				
E-B-6-4	1	4.17	2.61	80		20				
	2	5.12	3.20	80		20				
	3	5.00	3.13	25		75				
平均		4.76	2.98	62		38				
E-B-6-5	1	4.25	2.66	95		5				
	2	3.66	2.29	90		10				
	3	4.49	2.81	85		15				
平均		4.13	2.58	90		10				





供試体５（ＦＡ）

供試体番号	番号	測定値 (kN)	接着力 (N/mm^2)	破断状況						
				基板破壊 (%)	基板－素地調整材界面破壊 (%)	素地調整材層内破壊 (%)	素地調整材－プライマー界面破壊 (%)	プライマー層内破壊 (%)	プライマー－上塗りまたは補強層界面破壊 (%)	上塗り又は補強層層内破壊 (%)
F-A-5-1	1	3.02	1.89	100						
	2	2.90	1.81	100						
	3	3.36	2.10	100						
平均		3.09	1.93	100						
F-A-5-2	1	9.01	5.63	100						
	2	8.26	5.16	100						
	3	8.50	5.31	100						
平均		8.59	5.37	100						
F-A-5-3	1	4.60	2.88	100						
	2	4.86	3.04	100						
	3	5.59	3.49	100						
平均		5.02	3.14	100						
F-A-5-4	1	6.80	4.25	100						
	2	5.71	3.57	100						
	3	5.85	3.66	100						
平均		6.12	3.83	100						
F-A-5-5	1	4.68	2.93	100						
	2	4.33	2.71	100						
	3	6.56	4.10	100						
平均		5.19	3.24	100						

供試体５（ＦＢ）

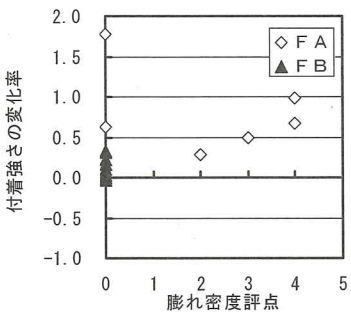
供試体番号	番号	測定値 (kN)	接着力 (N/mm^2)	破断状況						
				基板破壊 (%)	基板－素地調整材界面破壊 (%)	素地調整材層内破壊 (%)	素地調整材－プライマー界面破壊 (%)	プライマー層内破壊 (%)	プライマー－上塗りまたは補強層界面破壊 (%)	上塗り又は補強層層内破壊 (%)
F-B-5-1	1	6.09	3.81	100						
	2	3.91	2.44	100						
	3	5.36	3.35	100						
平均		5.12	3.20	100						
F-B-5-2	1	7.00	4.38	95		5				
	2	6.98	4.36	80		20				
	3	6.50	4.06	65		35				
平均		6.83	4.27	80		20				
F-B-5-3	1	6.18	3.86	100						
	2	4.60	2.88	100						
	3	6.28	3.93	100						
平均		5.69	3.55	100						
F-B-5-4	1	7.13	4.46	100						0
	2	5.06	3.16	0						100
	3	5.63	3.52	100						0
平均		5.94	3.71	67						33
F-B-5-5	1	5.14	3.21	100						0
	2	4.98	3.11	0						100
	3	4.80	3.00	100						0
平均		4.97	3.11	67						33

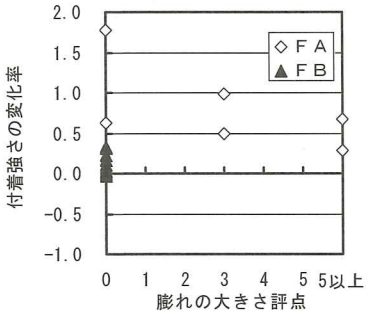
供試体６（ＦＡ）

供試体番号	番号	測定値 (kN)	接着力 (N/mm²)	破断状況						
				基板破壊 (%)	基板－素地調整材界面破壊 (%)	素地調整材層内破壊 (%)	素地調整材－プライマー界面破壊 (%)	プライマー層内破壊 (%)	プライマー－上塗りまたは補強層界面破壊 (%)	上塗り又は補強層層内破壊 (%)
F-A-6-1	1	5.64	3.53	100						
	2	4.98	3.11	100						
	3	4.76	2.98	100						
平均		5.13	3.20	100						
F-A-6-2	1	4.62	2.89	100						
	2	4.33	2.71	100						
	3	5.85	3.66	100						
平均		4.93	3.08	100						
F-A-6-3	1	5.99	3.74	100						
	2	6.64	4.15	100						
	3	7.13	4.46	100						
平均		6.59	4.12	100						
F-A-6-4	1	5.26	3.29	100						
	2	4.78	2.99	100						
	3	4.60	2.88	100						
平均		4.88	3.05	100						
F-A-6-5	1	7.53	4.71	100						
	2	6.84	4.28	100						
	3	8.51	5.32	100						
平均		7.63	4.77	100						

供試体６（ＦＢ）

供試体番号	番号	測定値 (kN)	接着力 (N/mm²)	破断状況						
				基板破壊 (%)	基板－素地調整材界面破壊 (%)	素地調整材層内破壊 (%)	素地調整材－プライマー界面破壊 (%)	プライマー層内破壊 (%)	プライマー－上塗りまたは補強層界面破壊 (%)	上塗り又は補強層層内破壊 (%)
F-B-6-1	1	6.06	3.79	100			0			
	2	6.02	3.76	100			0			
	3	5.83	3.64	10			90			
平均		5.97	3.73	70			30			
F-B-6-2	1	5.00	3.13	100						0
	2	6.68	4.18	90						10
	3	6.80	4.25	90						10
平均		6.16	3.85	93						7
F-B-6-3	1	8.64	5.40	25		75				
	2	7.90	4.94	100		0				
	3	7.03	4.39	100		0				
平均		7.86	4.91	75		25				
F-B-6-4	1	6.58	4.11	100		0				
	2	7.63	4.77	80		20				
	3	7.77	4.86	100		0				
平均		7.33	4.58	93		7				
F-B-6-5	1	7.88	4.93	100						
	2	8.20	5.13	100						
	3	7.51	4.69	100						
平均		7.86	4.91	100						





供試体５（HA）

供試体番号	番号	測定値 (kN)	接着力 (N/mm^2)	破断状況						
				母材破壊(%)	母材－プライマー界面破壊(%)	ﾌﾟﾗｲﾏｰ－ﾊﾟﾃ界面破壊(%)	パテ層内破壊(%)	パテ－レジン界面破壊(%)	レジン凝集破壊(%)	炭素繊維シート層内剥離(%)
H-A-5-1	1	4.13	2.58	100		0				
	2	3.56	2.23	100		0				
	3	5.11	3.19	85		15				
平均		4.27	2.67	95		5				
H-A-5-2	1	5.06	3.16	10		90				
	2	5.59	3.49	0		100				
	3	6.03	3.77	100		0				
平均		5.56	3.48	37		63				
H-A-5-3	1	3.93	2.46	5		95				
	2	2.61	1.63	0		100				
	3	3.60	2.25	10		90				
平均		3.38	2.11	5		95				
H-A-5-4	1	4.25	2.66	0	5	95				
	2	1.48	0.93	0	10	90				
	3	4.45	2.78	20	5	75				
平均		3.39	2.12	7	7	87				
H-A-5-5	1	3.48	2.18	20	5	75				
	2	2.87	1.79	35	0	65				
	3	2.92	1.83	40	5	55				
平均		3.09	1.93	32	3	65				

供試体５（HB）

供試体番号	番号	測定値 (kN)	接着力 (N/mm^2)	破断状況						
				母材破壊(%)	母材－プライマー界面破壊(%)	ﾌﾟﾗｲﾏｰ－ﾊﾟﾃ界面破壊(%)	パテ層内破壊(%)	パテ－レジン界面破壊(%)	レジン凝集破壊(%)	炭素繊維シート層内剥離(%)
H-B-5-1	1	4.67	2.92	100						
	2	4.00	2.50	100						
	3	3.94	2.46	100						
平均		4.20	2.63	100						
H-B-5-2	1	6.76	4.23	100				0		
	2	7.31	4.57	100				0		
	3	6.01	3.76	90				10		
平均		6.69	4.18	97				3		
H-B-5-3	1	2.85	1.78	15		85				
	2	4.96	3.10	40		60				
	3	3.30	2.06	20		80				
平均		3.70	2.31	25		75				
H-B-5-4	1	1.46	0.91	15		85				
	2	0.49	0.31	10		90				
	3	2.88	1.80	30		70				
平均		1.61	1.01	18		82				
H-B-5-5	1	0.77	0.48	15		85				
	2	1.36	0.85	15		85				
	3	0.73	0.46	10		90				
平均		0.95	0.60	13		87				

供試体５（HC）

供試体番号	番号	測定値 (kN)	接着力 (N/mm^2)	破断状況						
				母材破壊 (%)		プライマー－パテ界面破壊 (%)	パテ凝集破壊 (%)	パテ－レジン界面破壊 (%)	レジン凝集破壊 (%)	炭素繊維シート層内剥離 (%)
H-C-5-1	1	3.75	2.34	100						
	2	4.32	2.70	100						
	3	4.63	2.89	100						
平均		4.23	2.65	100						
H-C-5-2	1	5.91	3.69	100						
	2	5.59	3.49	100						
	3	6.05	3.78	100						
平均		5.85	3.66	100						
H-C-5-3	1	5.12	3.20	100						
	2	5.16	3.23	100						
	3	4.88	3.05	100						
平均		5.05	3.16	100						
H-C-5-4	1	4.05	2.53	100						
	2	4.53	2.83	100						
	3	3.38	2.11	100						
平均		3.99	2.49	100						
H-C-5-5	1	4.11	2.57	100						
	2	3.77	2.36	100						
	3	4.64	2.90	100						
平均		4.17	2.61	100						

供試体６（HA）

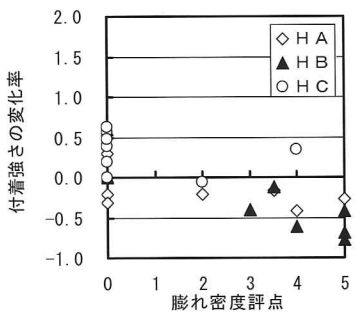
供試体番号	番号	測定値 (kN)	接着力 (N/mm^2)	破断状況						
				母材破壊 (%)	母材－プライマー界面破壊 (%)	プライマー－パテ界面破壊 (%)	パテ層内破壊 (%)	パテ－レジン界面破壊 (%)	レジン凝集破壊 (%)	炭素繊維シート層内剥離 (%)
H-A-6-1	1	4.98	3.11	100						
	2	4.48	2.80	100						
	3	4.70	2.94	100						
平均		4.72	2.95	100						
H-A-6-2	1	2.29	1.43	90		10				
	2	3.62	2.26	95		5				
	3	3.75	2.34	100		0				
平均		3.22	2.01	95		5				
H-A-6-3	1	4.01	2.51	100		0				
	2	3.32	2.08	85		15				
	3	4.41	2.76	85		15				
平均		3.91	2.45	90		10				
H-A-6-4	1	3.24	2.03	55	10	35				
	2	3.77	2.36	65	5	30				
	3	1.23	0.77	15	5	80				
平均		2.75	1.72	45	7	48				
H-A-6-5	1	4.37	2.73	80		20				
	2	2.71	1.69	40		60				
	3	3.26	2.04	65		35				
平均		3.45	2.15	62		38				

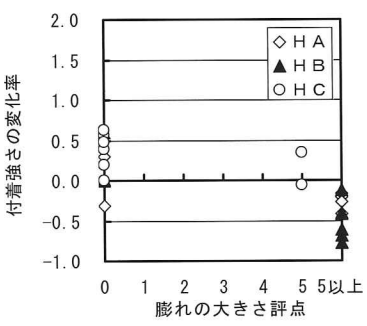
供試体６（HB）

供試体番号	番号	測定値 (kN)	接着力 (N/mm²)	破断状況						
				母材破壊 (%)	母材－プライマー界面破壊 (%)	プライマー－パテ界面破壊 (%)	パテ層内破壊 (%)	パテ－レジン界面破壊 (%)	レジン凝集破壊 (%)	炭素繊維シート層内剥離 (%)
H-B-6-1	1	3.59	2.24	100						
	2	5.20	3.25	100						
	3	4.76	2.98	100						
平均		4.52	2.82	100						
H-B-6-2	1	3.68	2.30	60				40		
	2	3.89	2.43	5				95		
	3	6.26	3.91							30
平均		4.61	2.88	22				45		10
H-B-6-3	1	3.46	2.16	20		80				
	2	1.80	1.13	40		60				
	3	2.92	1.83	25		75				
平均		2.73	1.70	28		72				
H-B-6-4	1	1.44	0.90	60				35	5	
	2	1.82	1.14	35				60	5	
	3	1.03	0.64	20				78	2	
平均		1.43	0.89	38				58	4	
H-B-6-5	1	1.94	1.21	85		3		10		2
	2	2.07	1.29	90		5		5		
	3	3.91	2.44	90		5		5		
平均		2.64	1.65	88		4		7		1

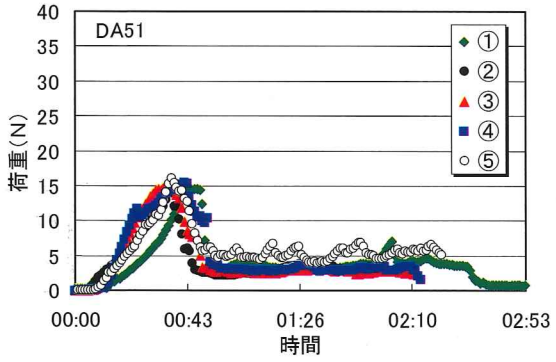
供試体６（HC）

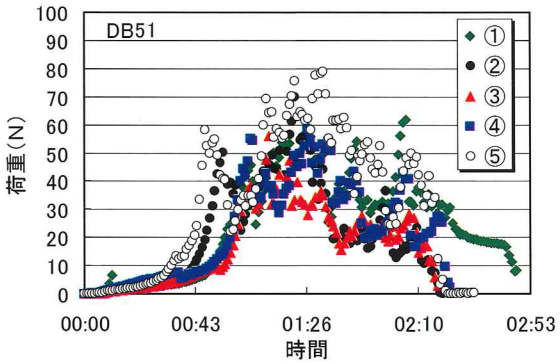
供試体番号	番号	測定値 (kN)	接着力 (N/mm²)	破断状況						
				母材破壊 (%)		プライマー－パテ界面破壊 (%)	パテ凝集破壊 (%)	パテ－レジン界面破壊 (%)	レジン凝集破壊 (%)	炭素繊維シート層内剥離 (%)
H-C-6-1	1	2.98	1.86	100						
	2	2.68	1.68	100						
	3	3.51	2.19	100						
平均破断率				100						
H-C-6-2	1	5.24	3.28	100						
	2	4.05	2.53	100						
	3	5.10	3.19	100						
平均破断率				100						
H-C-6-3	1	4.82	3.01	100						
	2	4.49	2.81	100						
	3	4.21	2.63	100						
平均破断率				100						
H-C-6-4	1	4.17	2.61	100						
	2	4.98	3.11	100						
	3	5.81	3.63	100						
平均破断率				100						
H-C-6-5	1	4.49	2.81	100						
	2	3.28	2.05	100						
	3	4.60	2.88	100						
平均破断率				100						

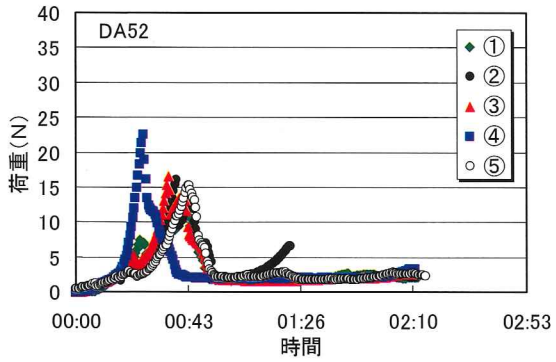


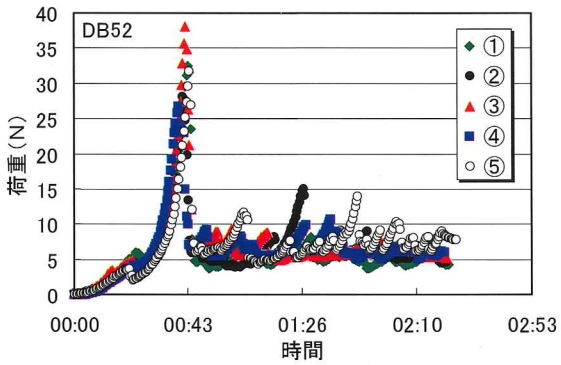


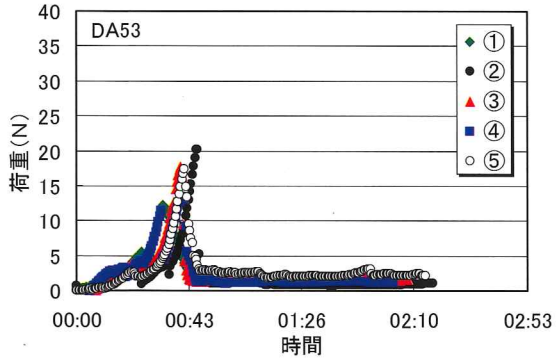
資料２－４　引き剥がし試験チャート

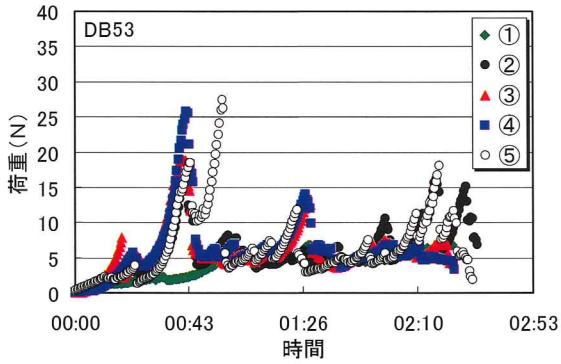


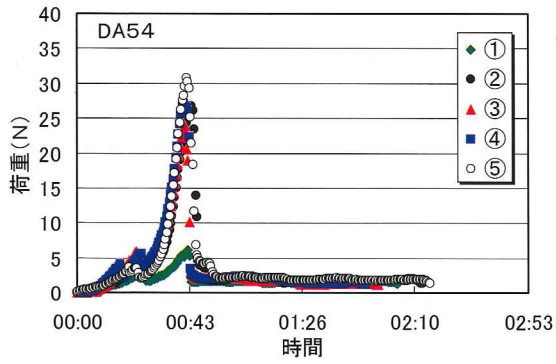


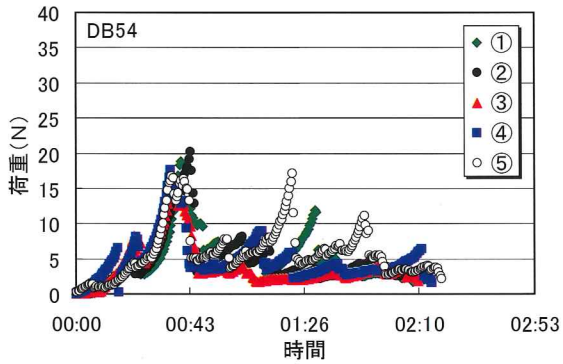


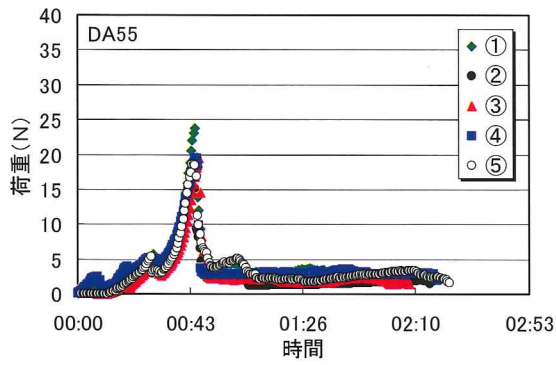


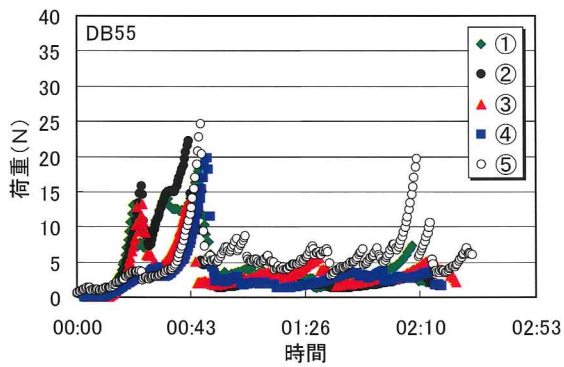


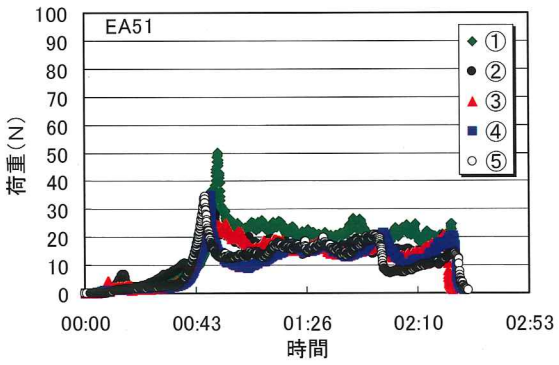


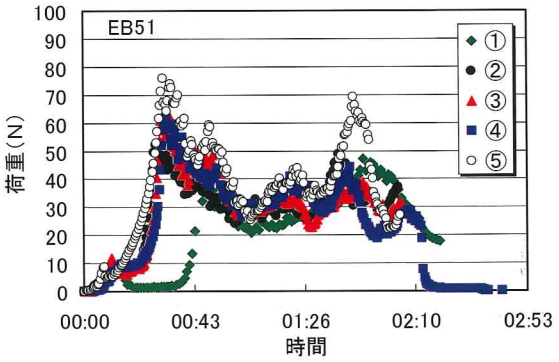


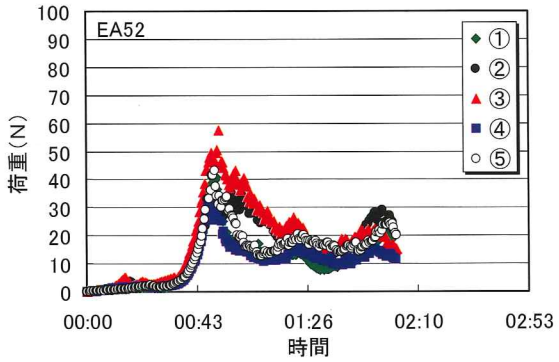


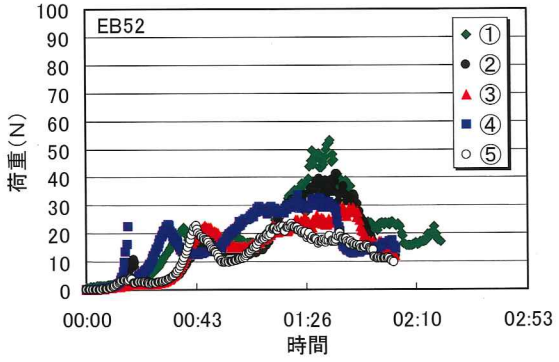


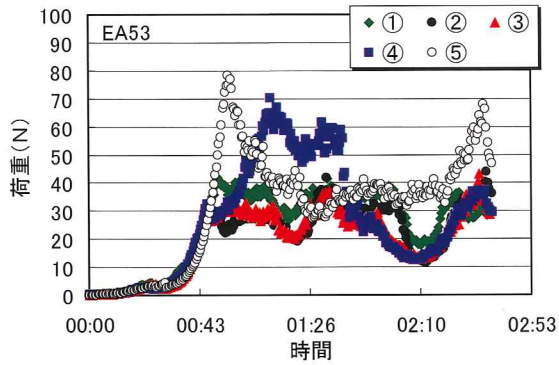


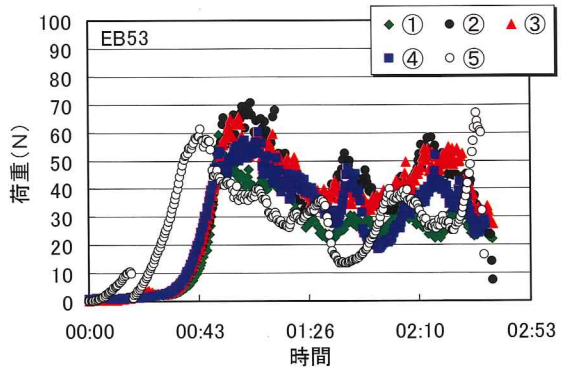

EA51
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
① ② ③ ④ ⑤

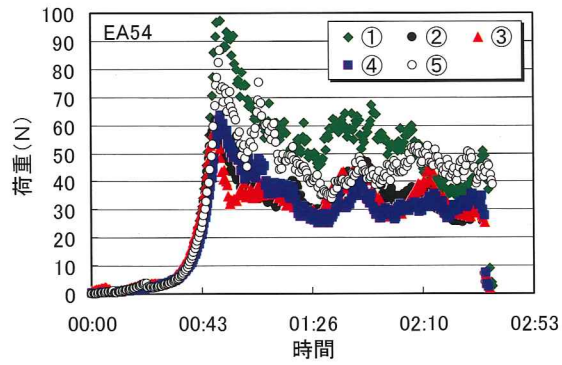

EB51
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
① ② ③ ④ ⑤

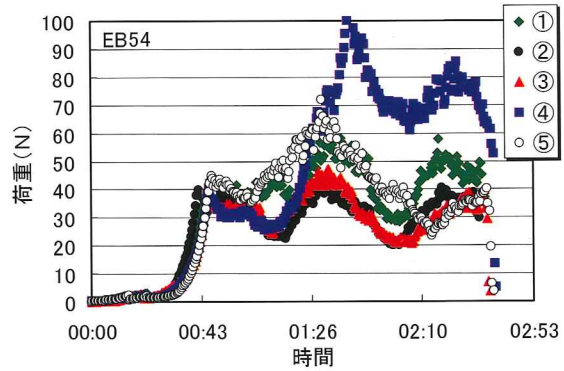

EA52
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
① ② ③ ④ ⑤

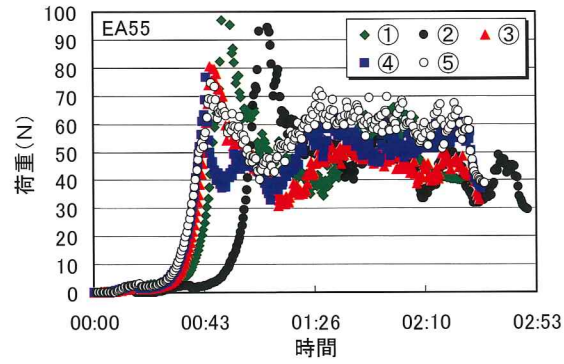

EB52
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
① ② ③ ④ ⑤

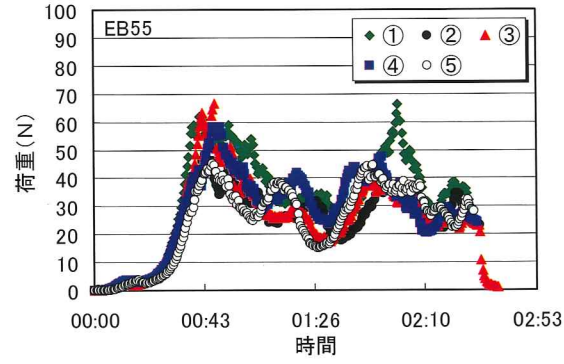

EA53
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
① ② ③ ④ ⑤

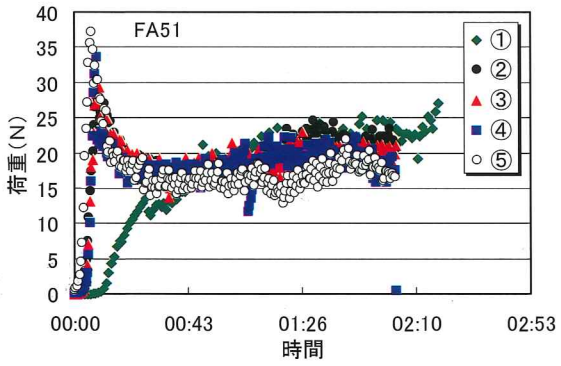

EB53
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
① ② ③ ④ ⑤

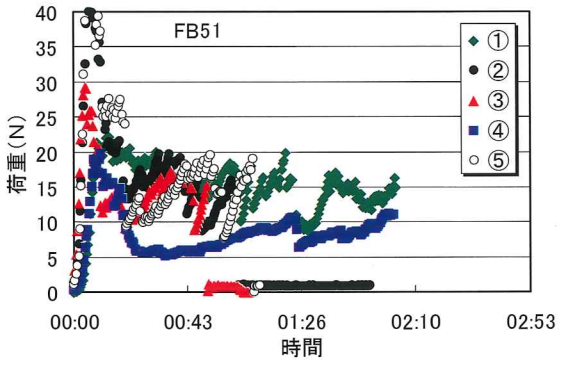

EA54
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
① ② ③ ④ ⑤

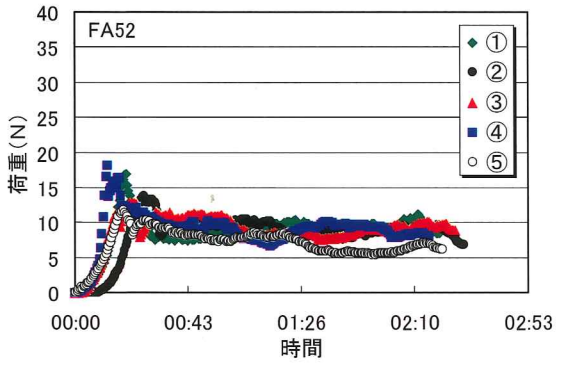

EB54
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
① ② ③ ④ ⑤

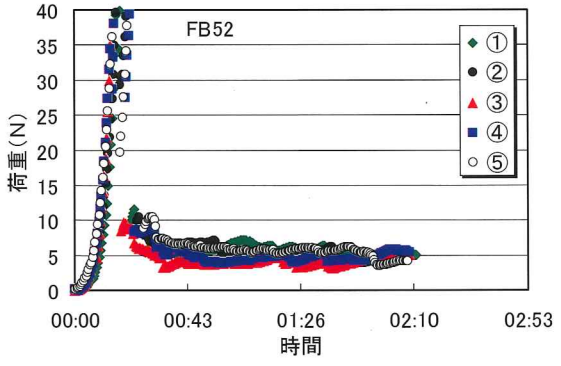

EA55
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
① ② ③ ④ ⑤

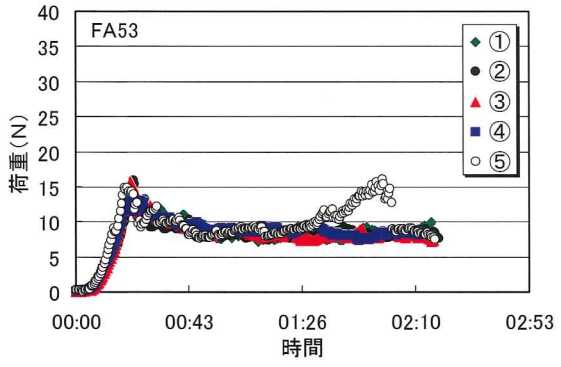

EB55
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
① ② ③ ④ ⑤

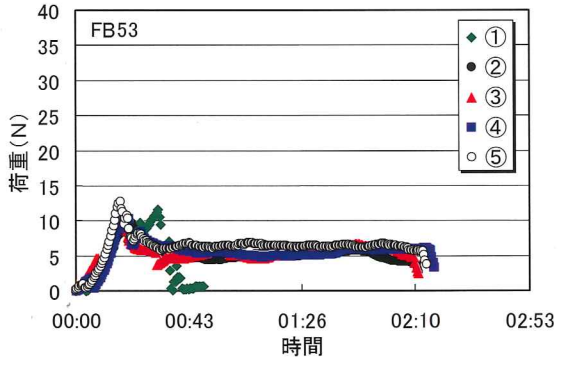

FA51
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

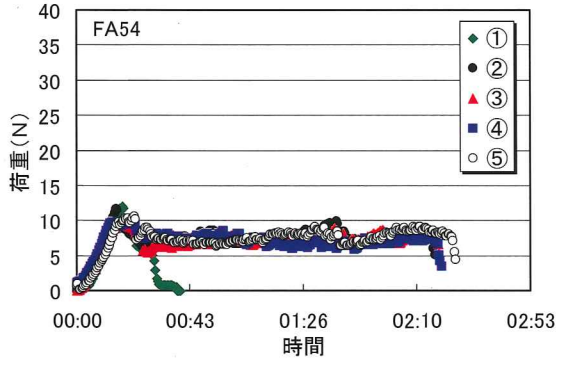

FB51
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

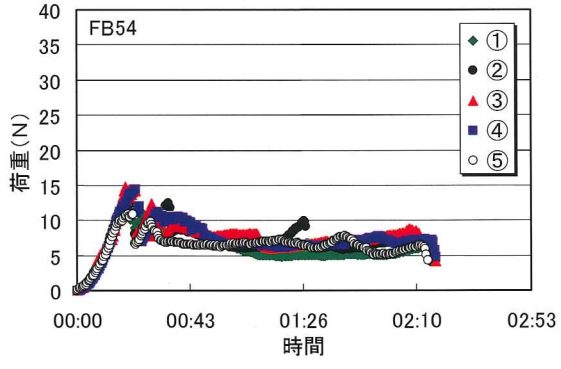

FA52
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

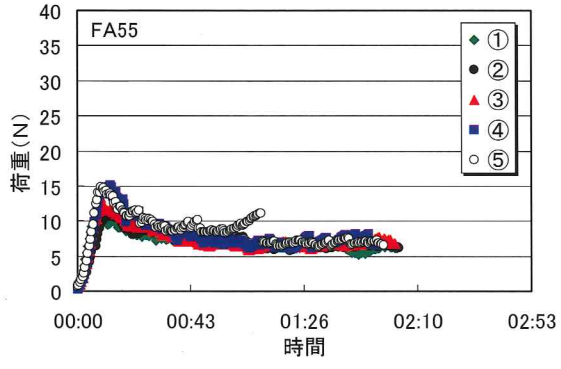

FB52
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

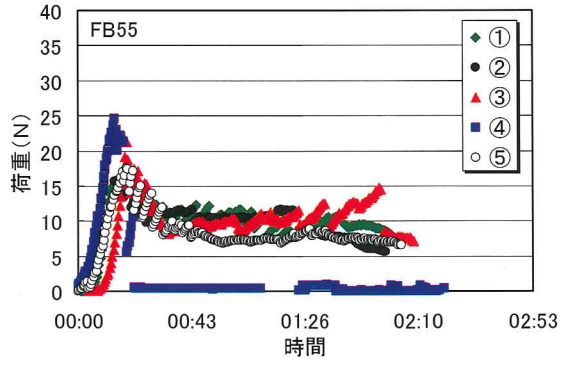

FA53
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

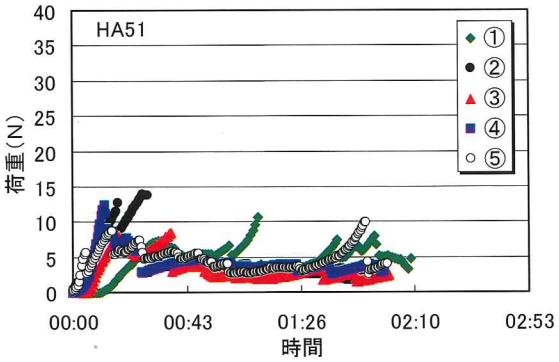

FB53
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

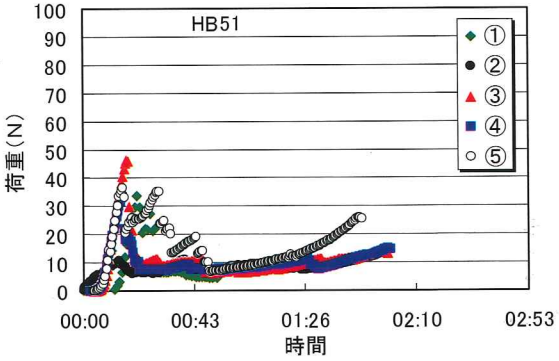

FA54
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

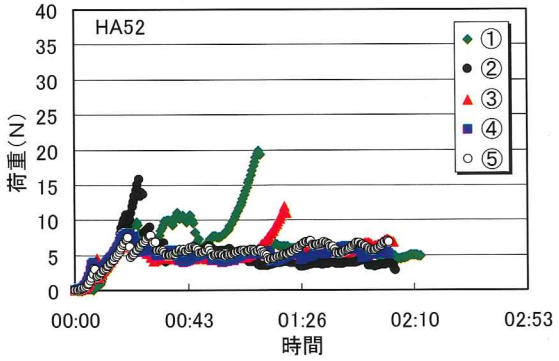

FB54
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

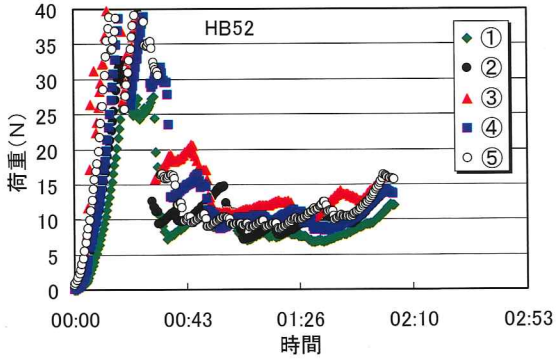

FA55
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

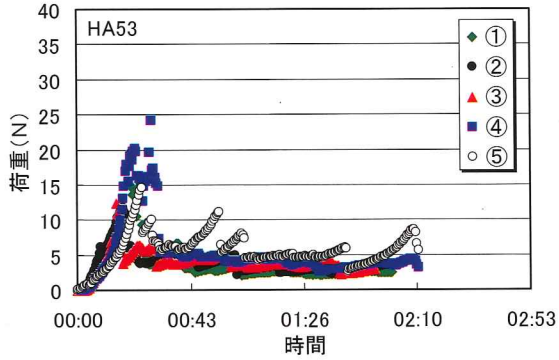

FB55
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

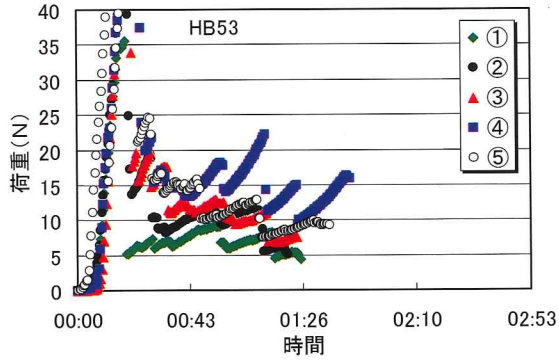

HA51
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

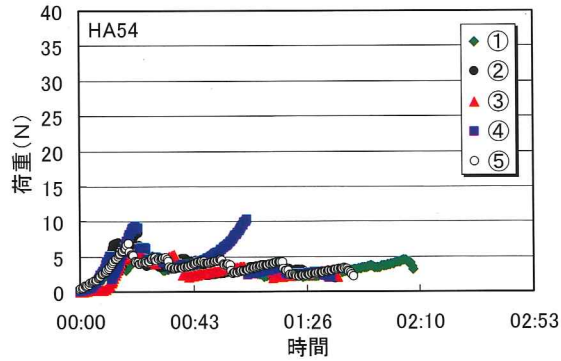

HB51
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

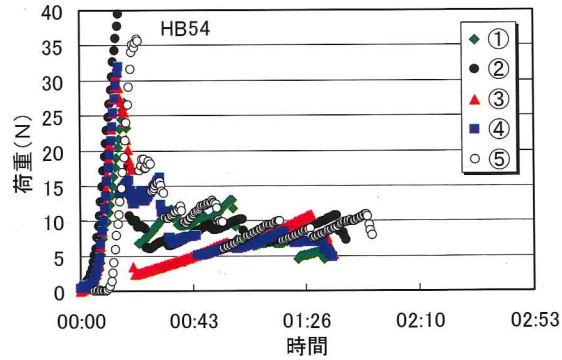

HA52
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

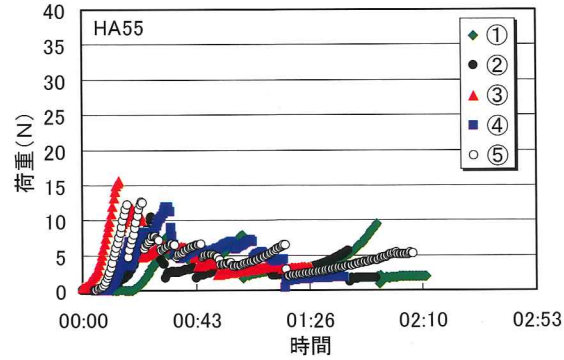

HB52
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

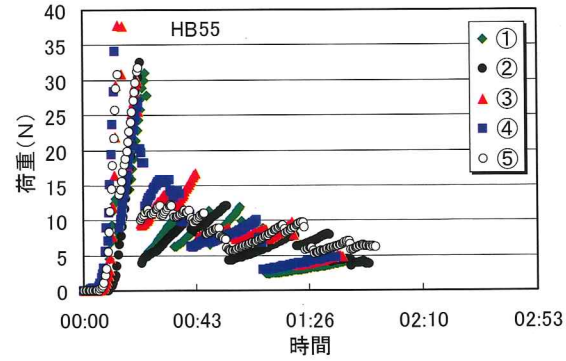

HA53
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

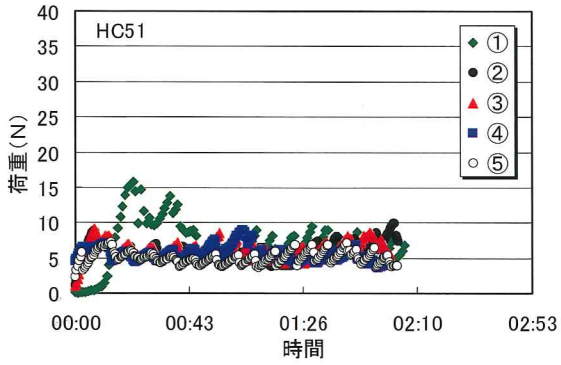

HB53
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

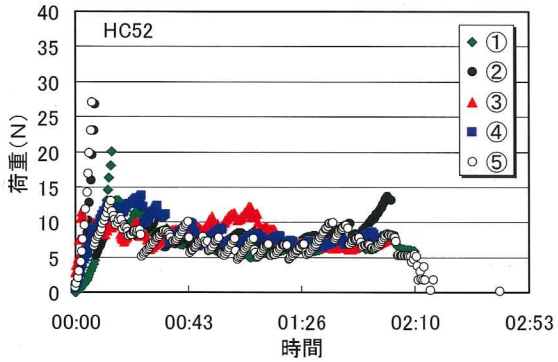

HA54
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

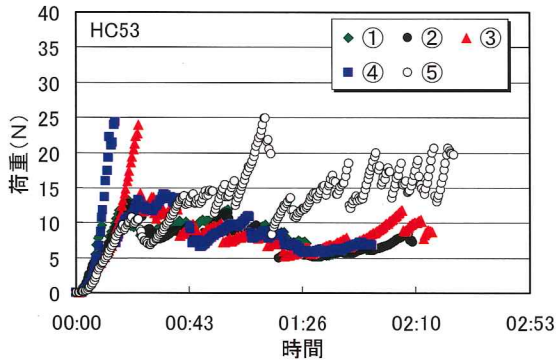

HB54
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

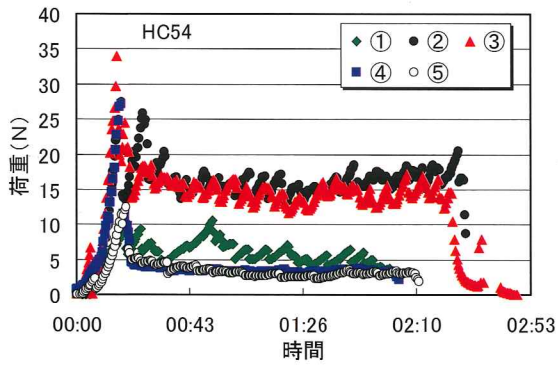

HA55
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

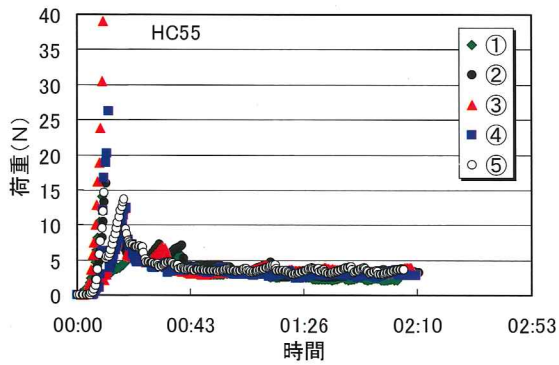

HB55
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

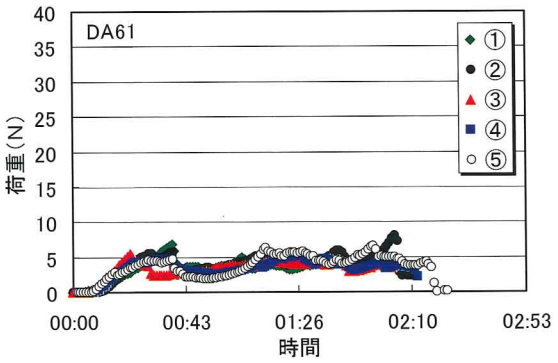

HC51
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

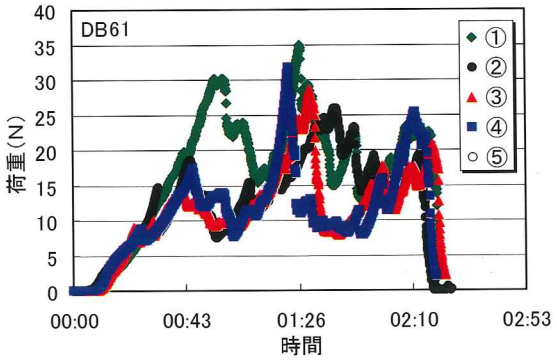

HC52
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

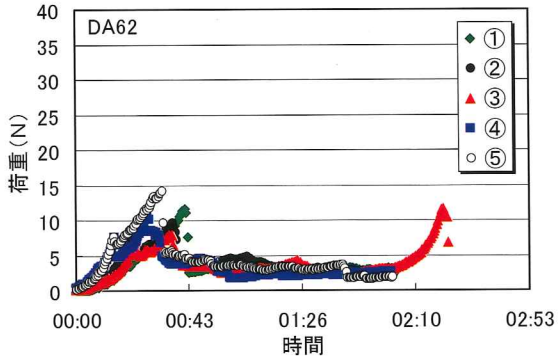

HC53
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

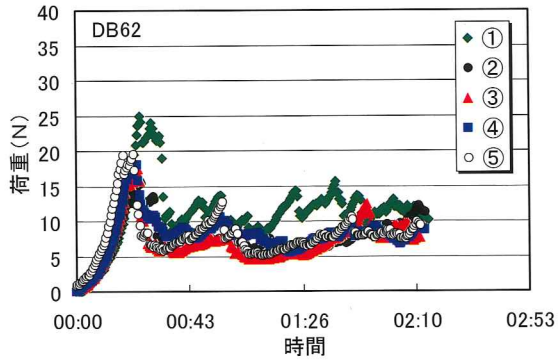

HC54
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

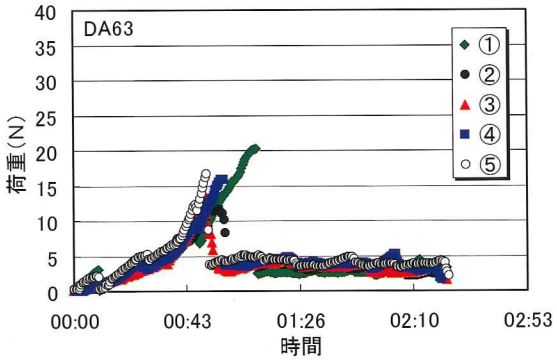

HC55
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

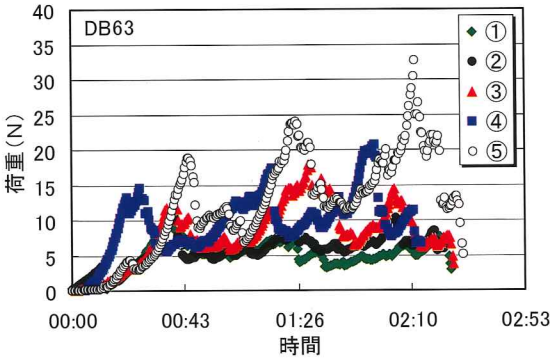

DA61
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

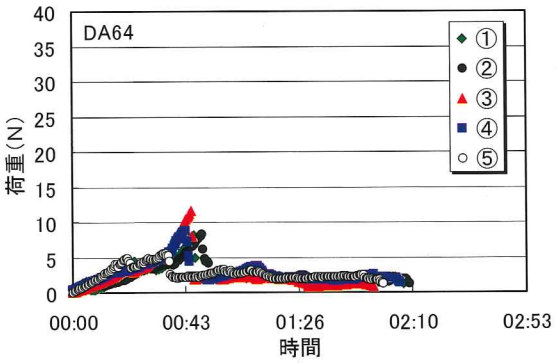

DB61
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

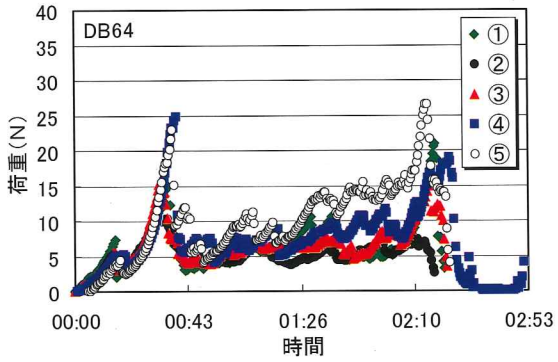

DA62
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

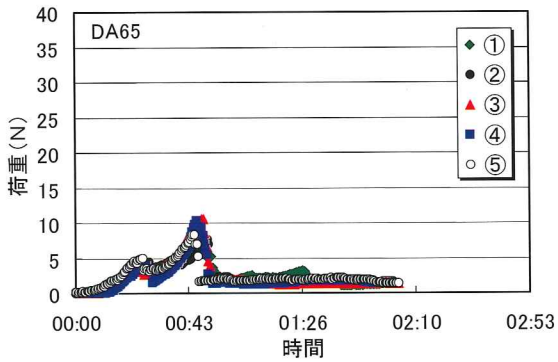

DB62
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

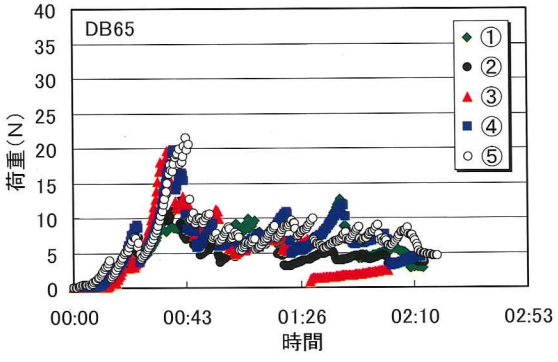

DA63
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

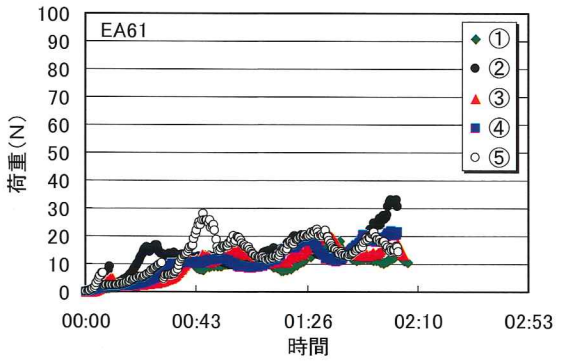

DB63
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

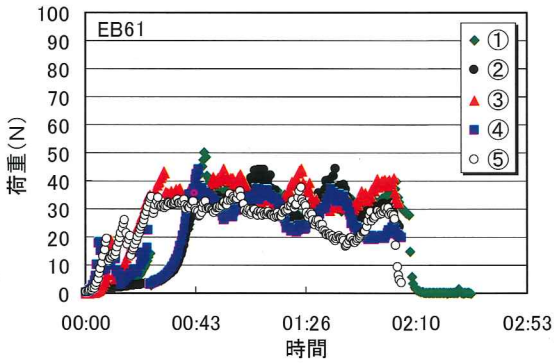

DA64
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

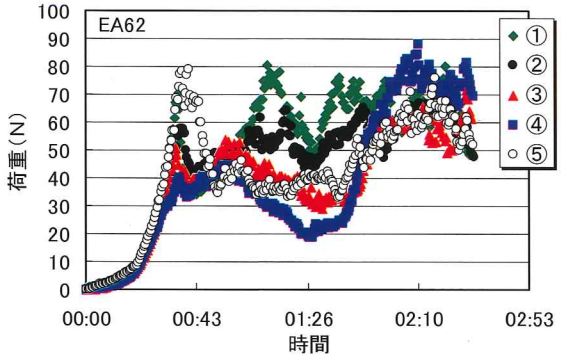

DB64
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

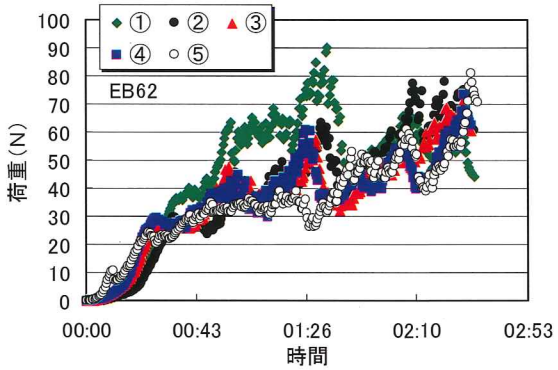

DA65
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

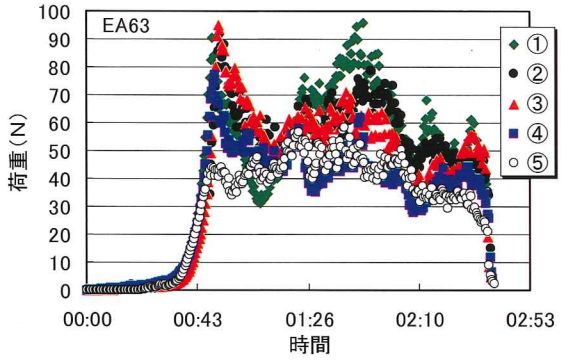

DB65
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

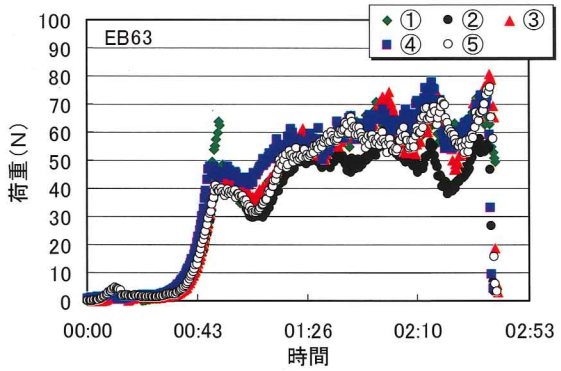

EA61
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
① ② ③ ④ ⑤

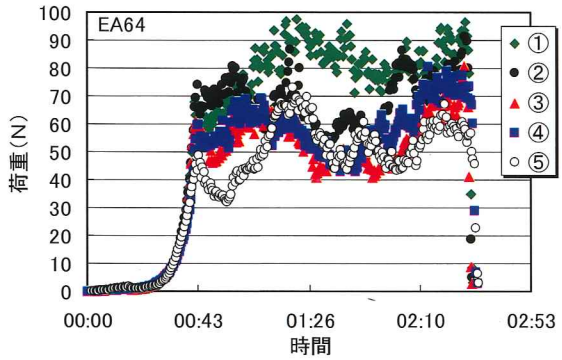

EB61
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
① ② ③ ④ ⑤

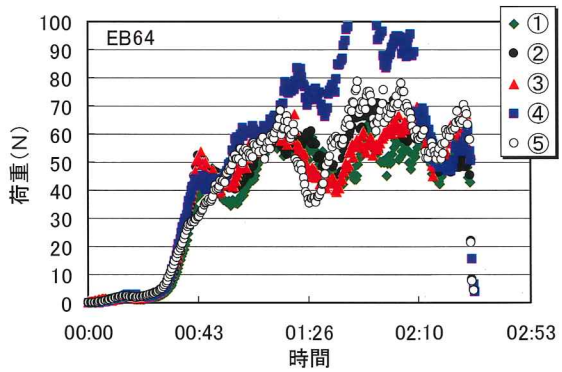

EA62
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
① ② ③ ④ ⑤

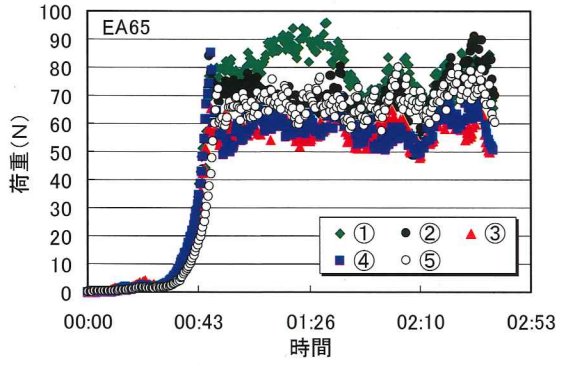

EB62
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
① ② ③ ④ ⑤

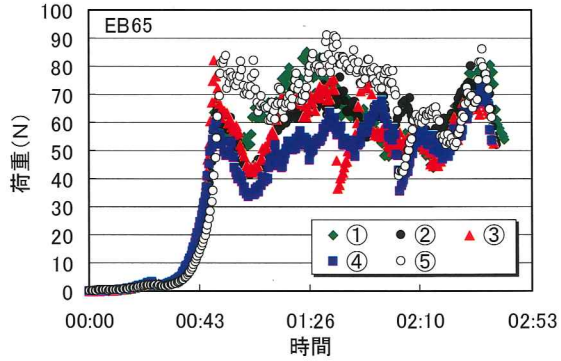

EA63
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
① ② ③ ④ ⑤

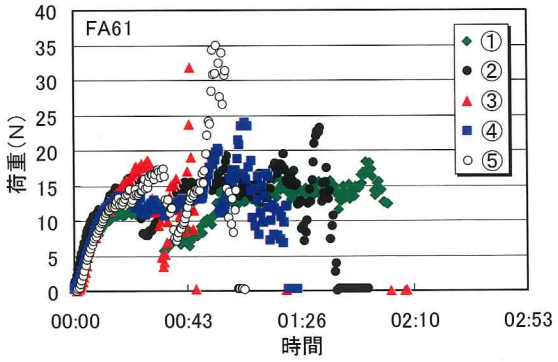

EB63
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
① ② ③ ④ ⑤

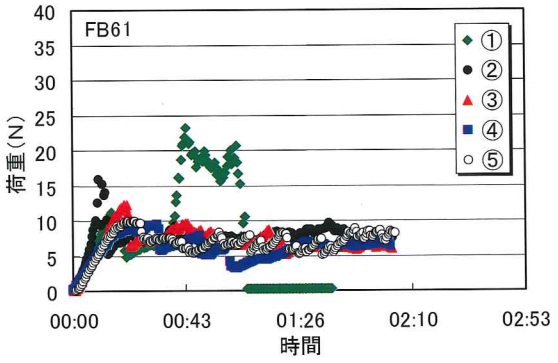

EA64
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
① ② ③ ④ ⑤

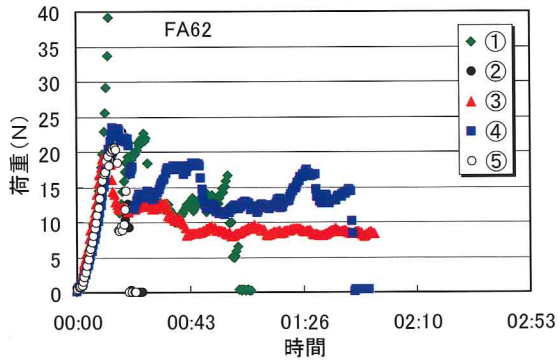

EB64
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
① ② ③ ④ ⑤

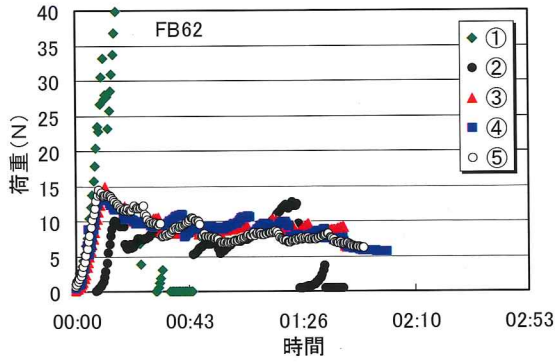

EA65
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
① ② ③ ④ ⑤

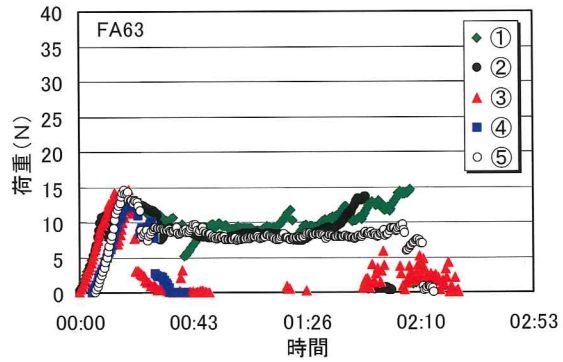

EB65
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
① ② ③ ④ ⑤

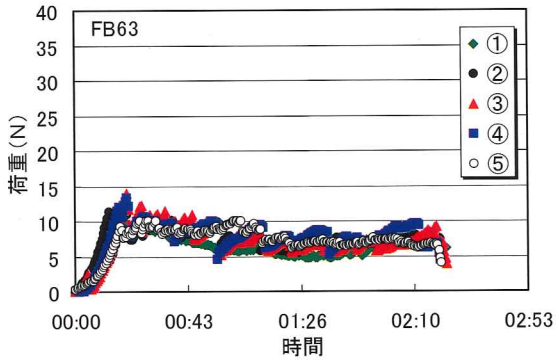

FA61
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

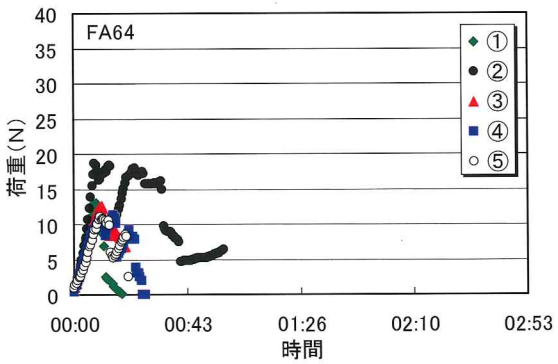

FB61
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

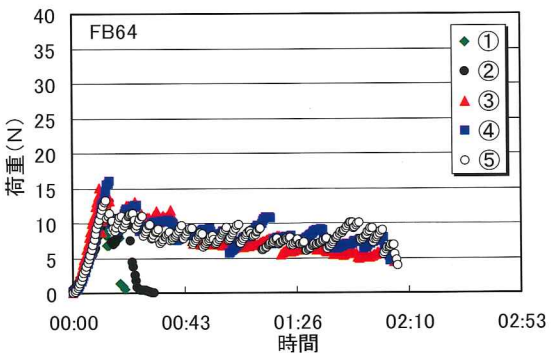

FA62
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

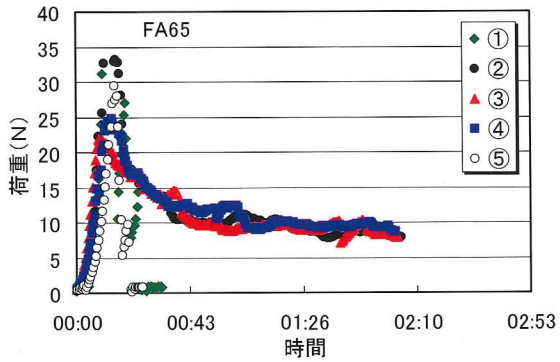

FB62
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

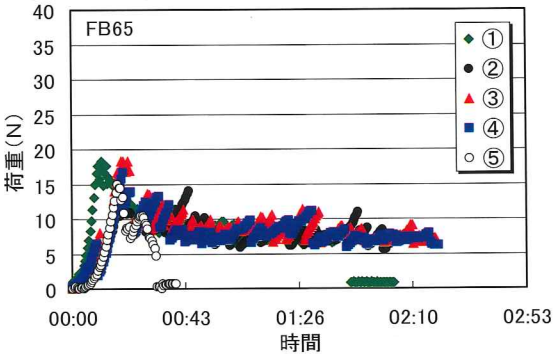

FA63
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

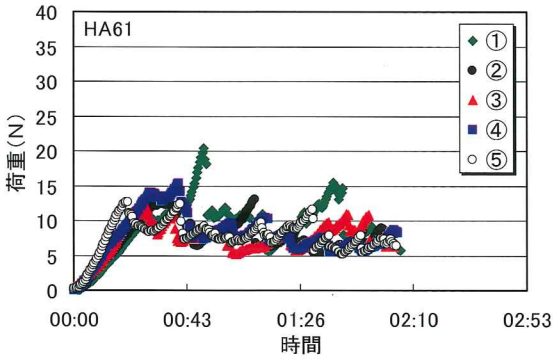

FB63
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

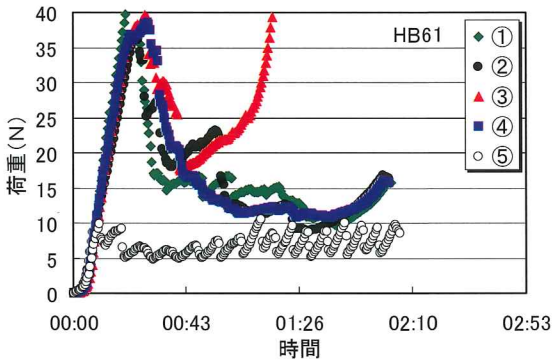

FA64
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

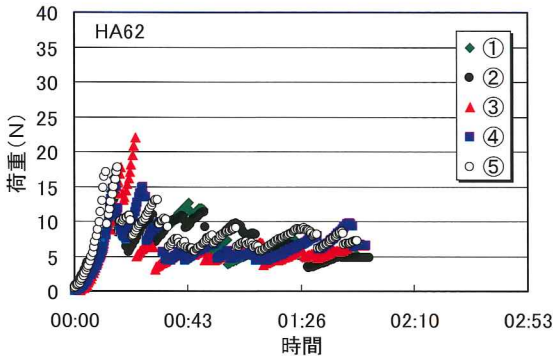

FB64
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

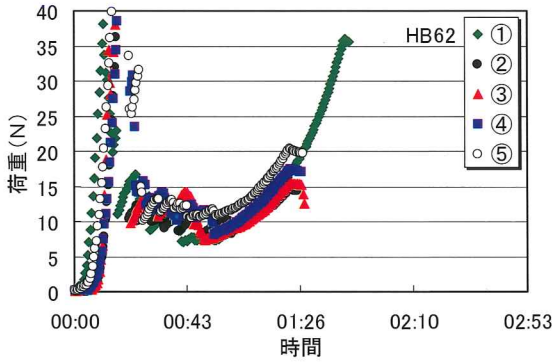

FA65
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

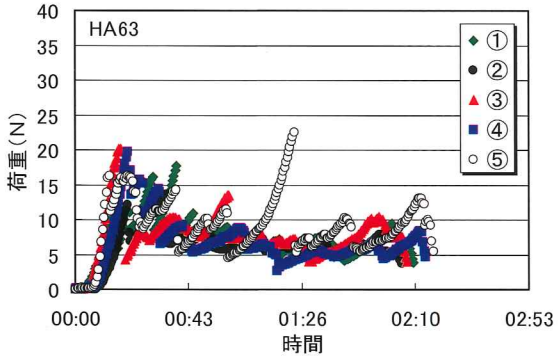

FB65
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

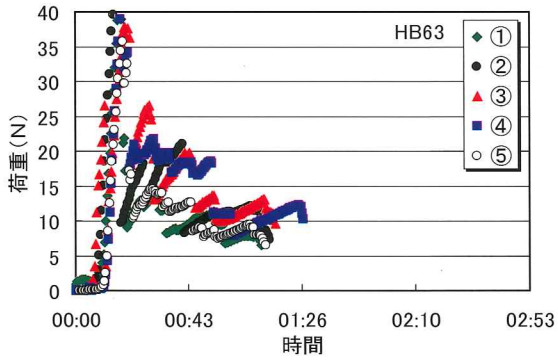

HA61
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

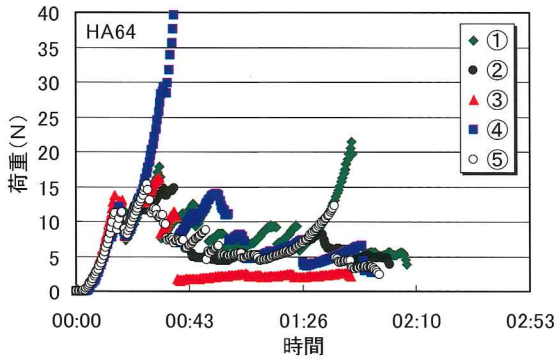

HB61
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

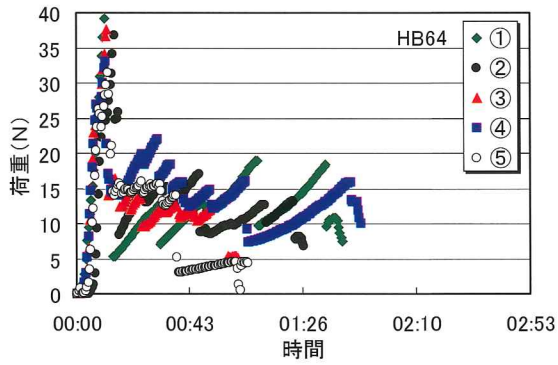

HA62
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

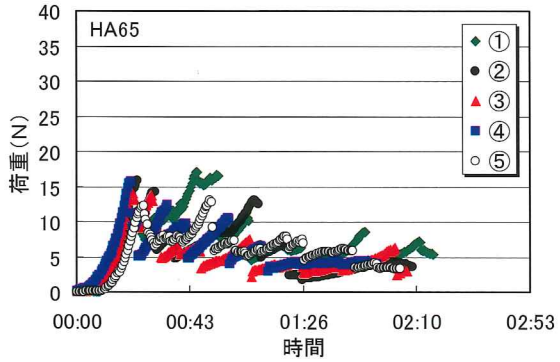

HB62
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

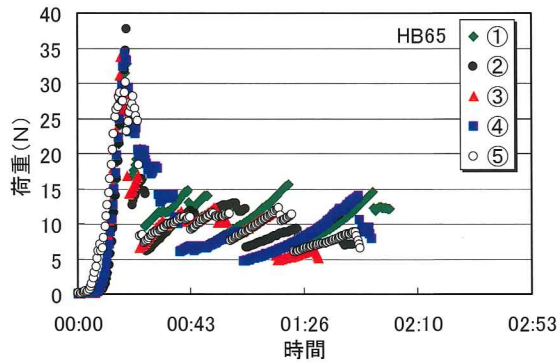

HA63
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

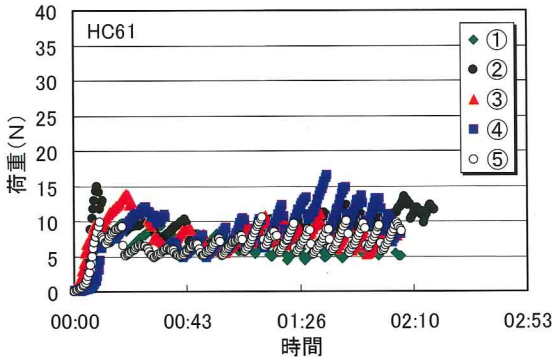

HB63
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

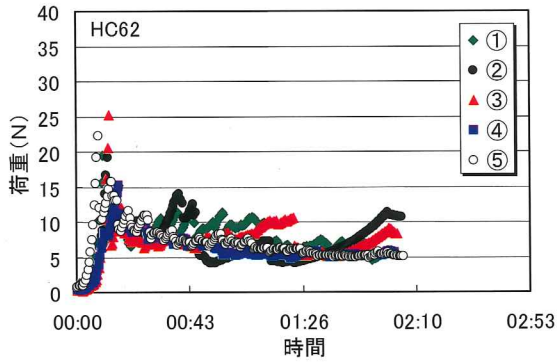

HA64
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

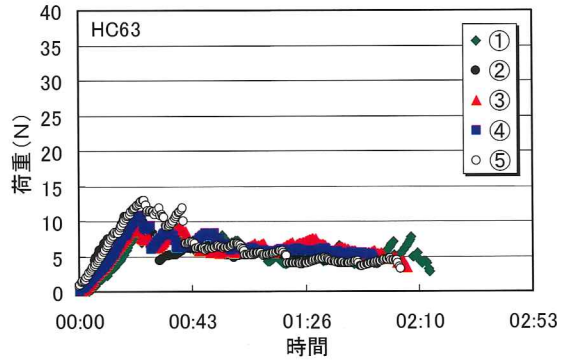

HB64
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

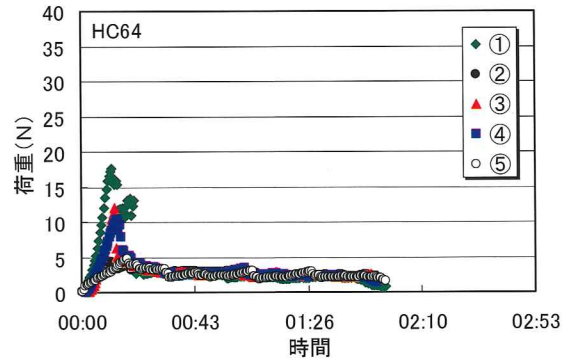

HA65
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

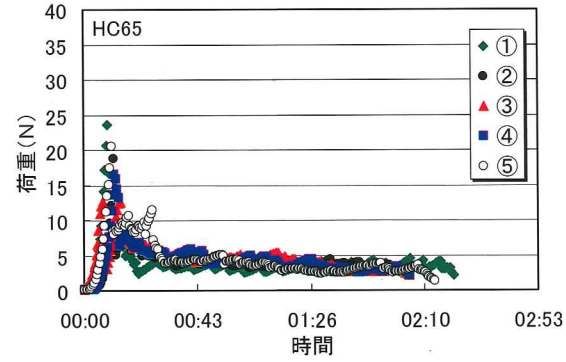

HB65
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤


HC61
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤


HC62
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

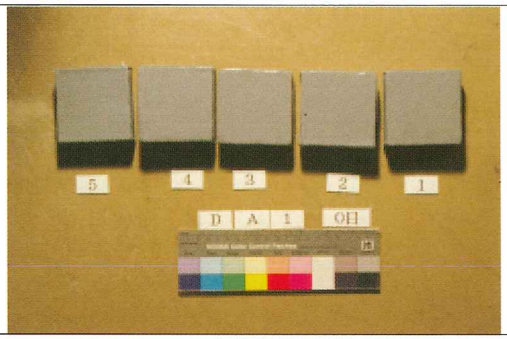
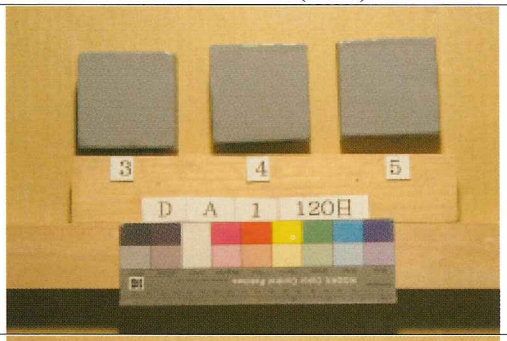
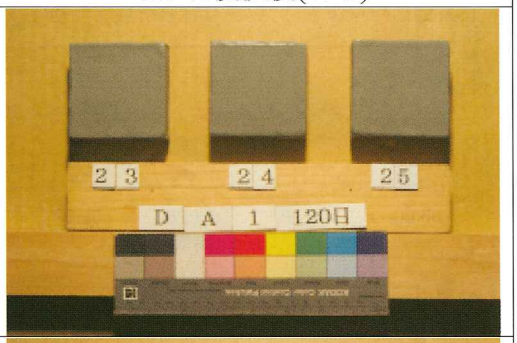
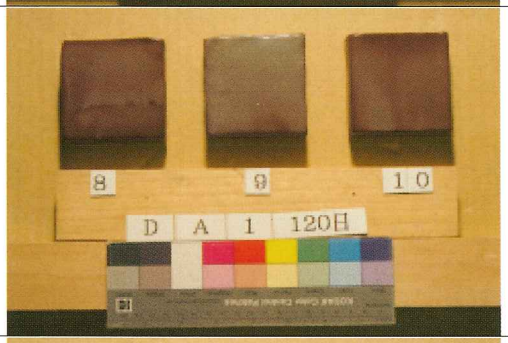
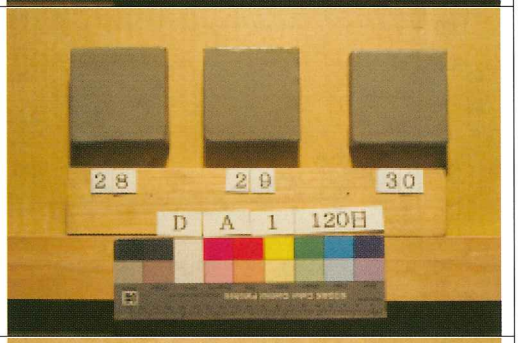
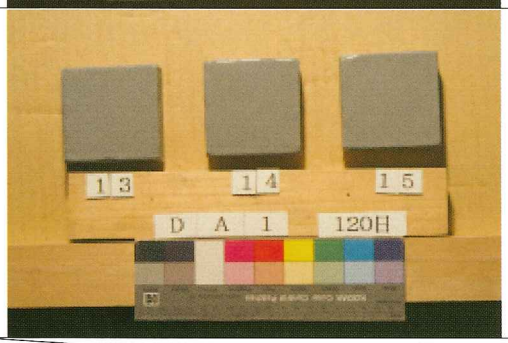
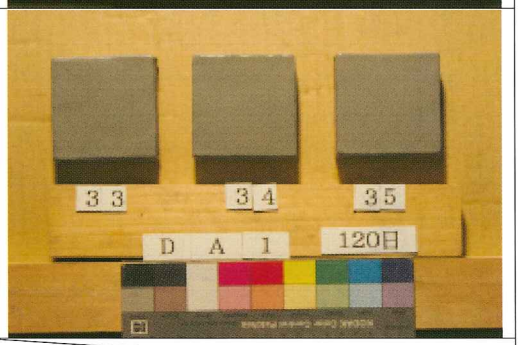
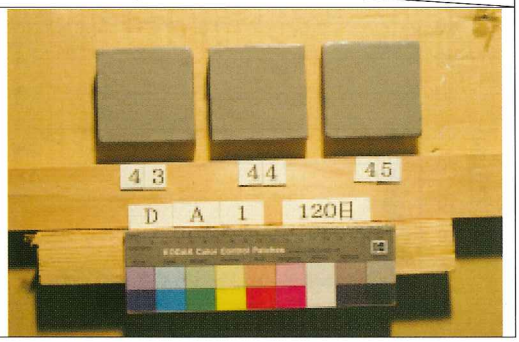

HC63
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤


HC64
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

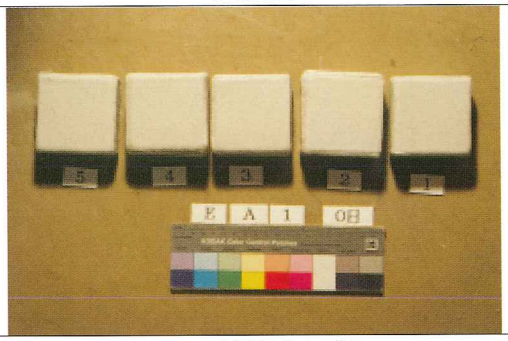
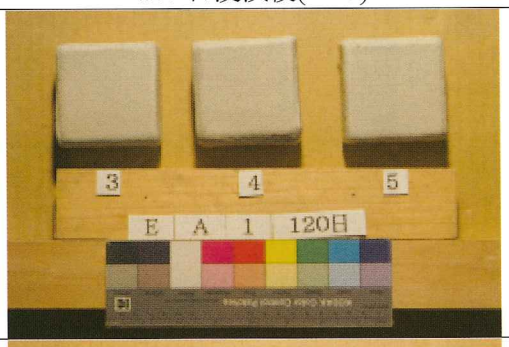
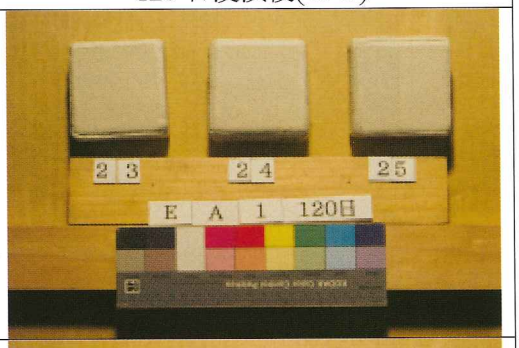
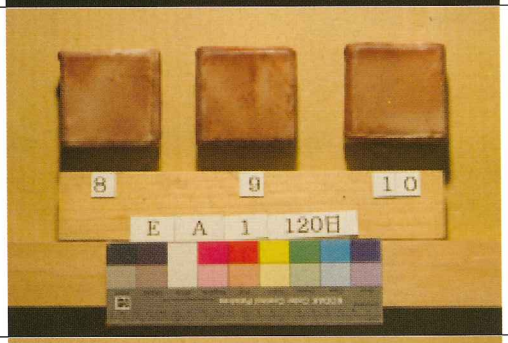
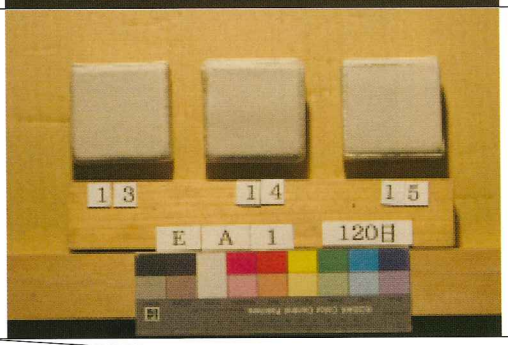
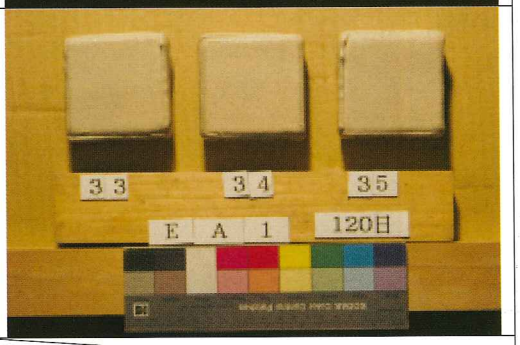
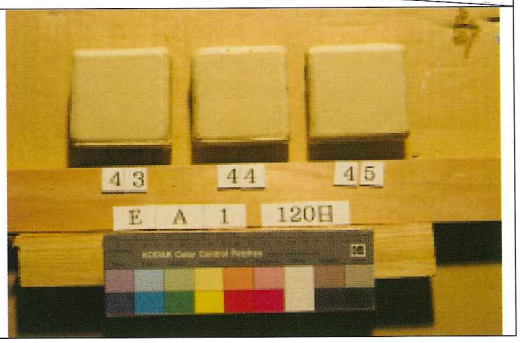

HC65
荷重(N)
時間
00:00
00:43
01:26
02:10
02:53
①
②
③
④
⑤

資料２－５　供試体外観写真

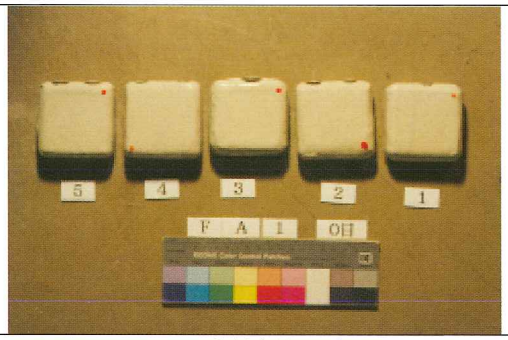
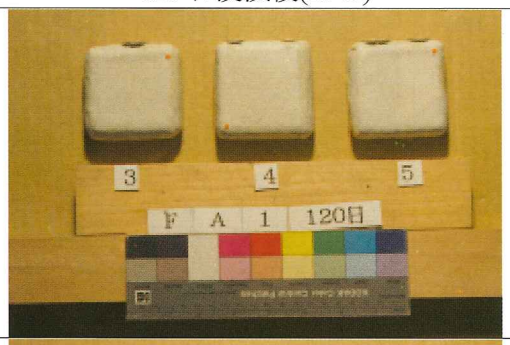
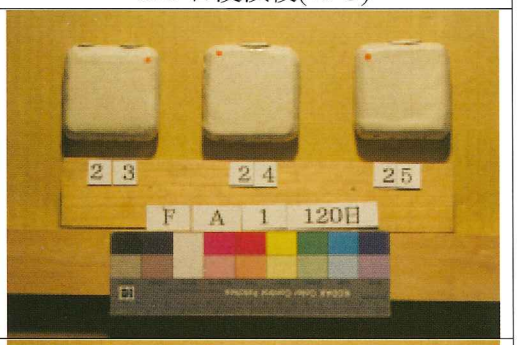
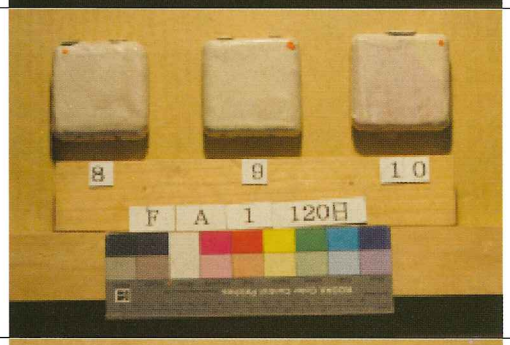
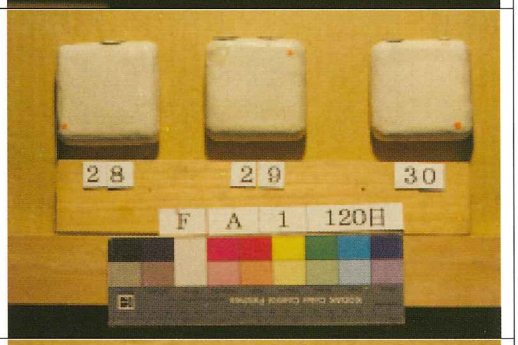
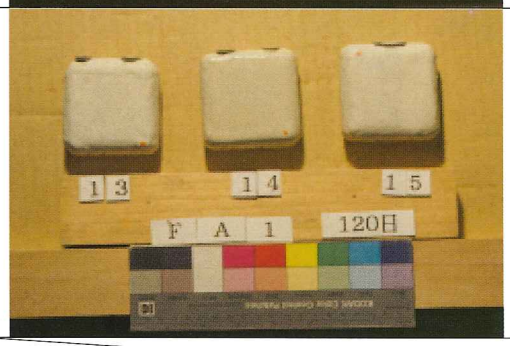
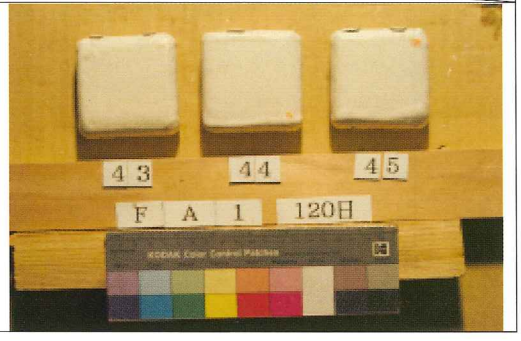
供試体１（ＤＡ）

DA	試験前		
			
	120 日浸漬後(23℃)		120 日浸漬後(40℃)
0%		0%	
0.05%		0.05%	
0.5%		0.5%	
3%		3%	
		10%	

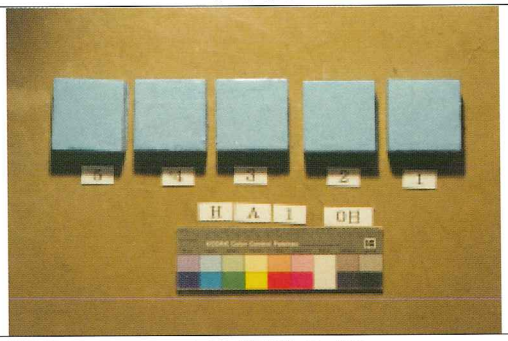
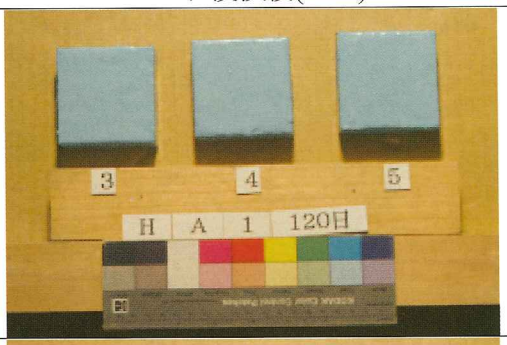
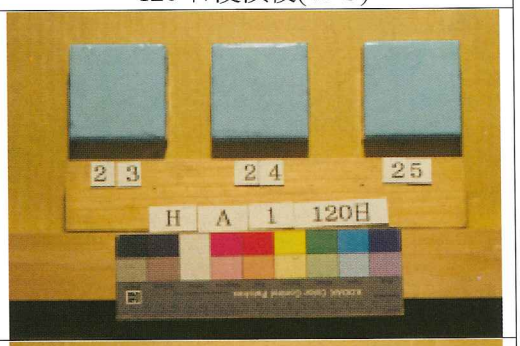
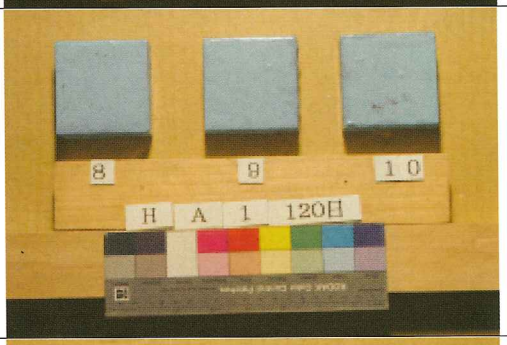
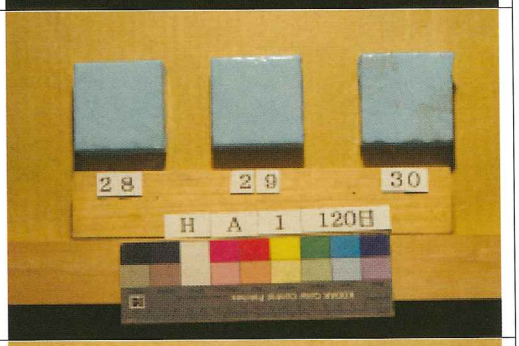
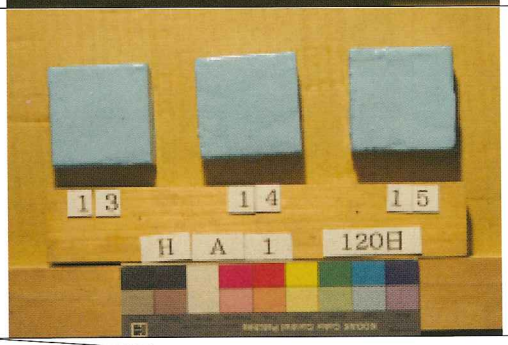
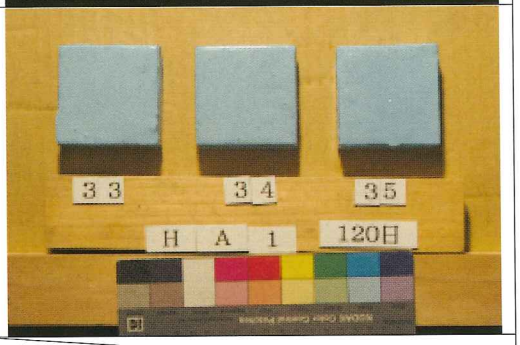
供試体１（ＥＡ）

EA	試験前		
			
	120 日浸漬後(23℃)		120 日浸漬後(40℃)
0%		0%	
0.05%		0.05%	
0.5%		0.5%	
3%		3%	
		10%	

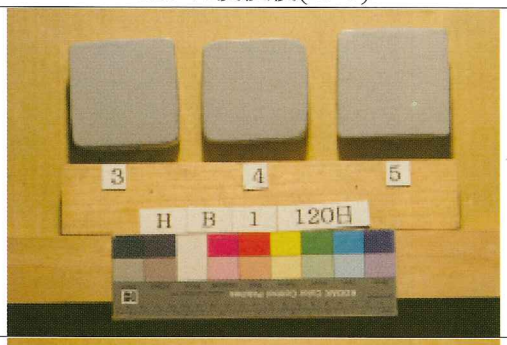
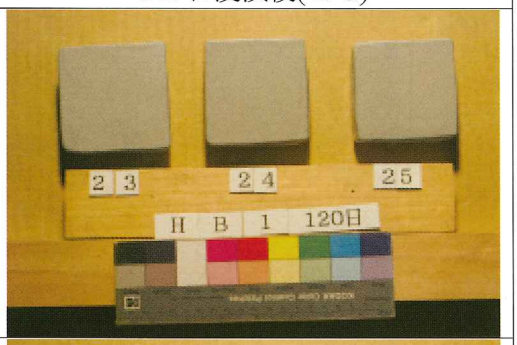
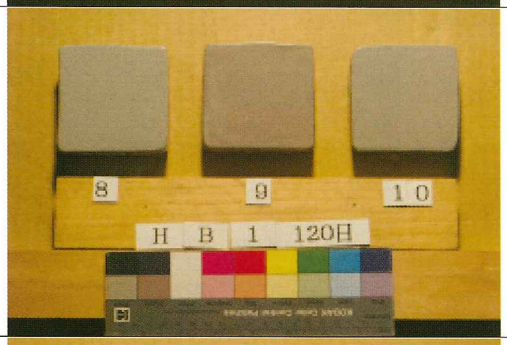
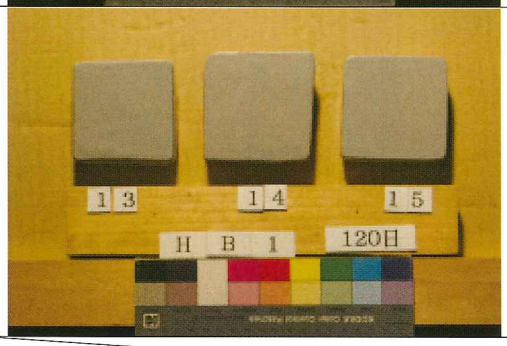
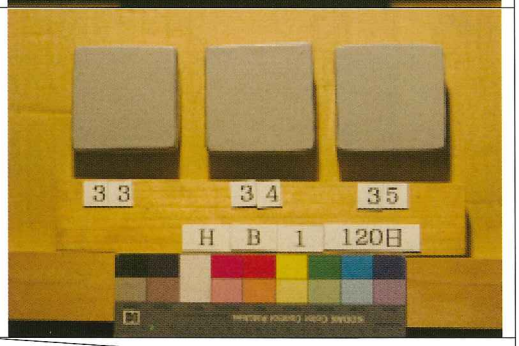
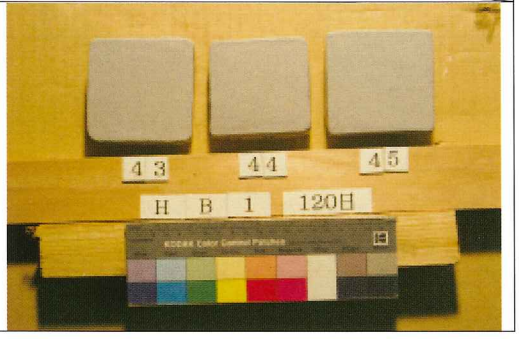
供試体１（ＦＡ）

FA	試験前		
			
	120 日浸漬後(23℃)		120 日浸漬後(40℃)
0%		0%	
0.05%		0.05%	
0.5%		0.5%	
3%		3%	
		10%	

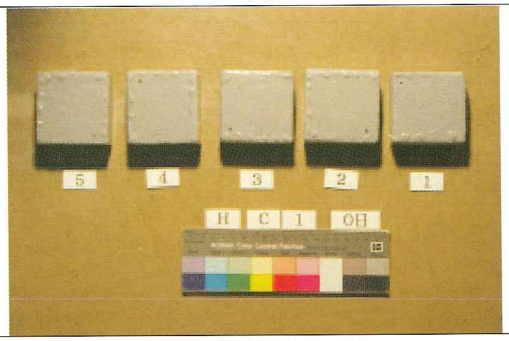
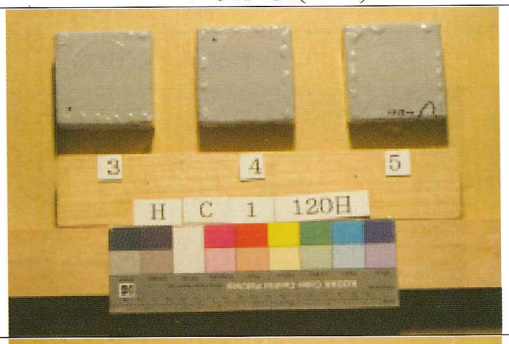
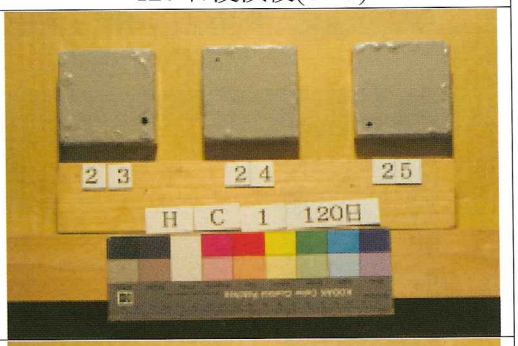
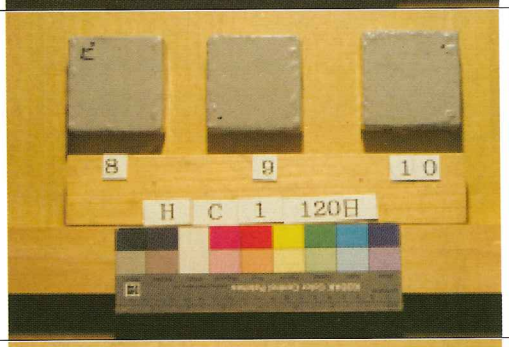
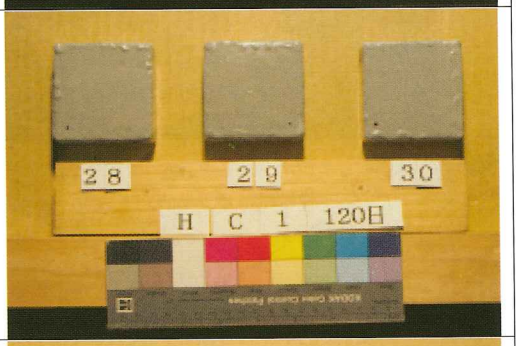
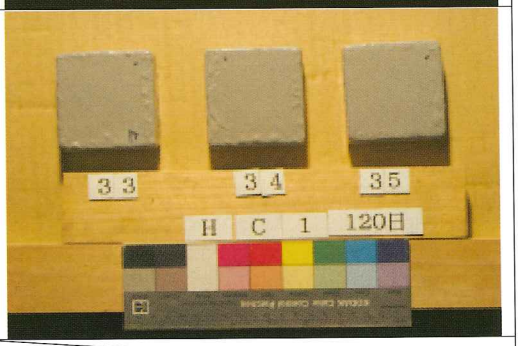
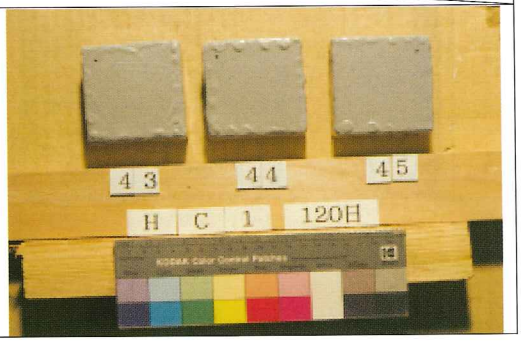
供試体１（ＨＡ）

HA	試験前		
			
	120 日浸漬後(23℃)		120 日浸漬後(40℃)
0%		0%	
0.05%		0.05%	
0.5%		0.5%	
3%		3%	
		10%	

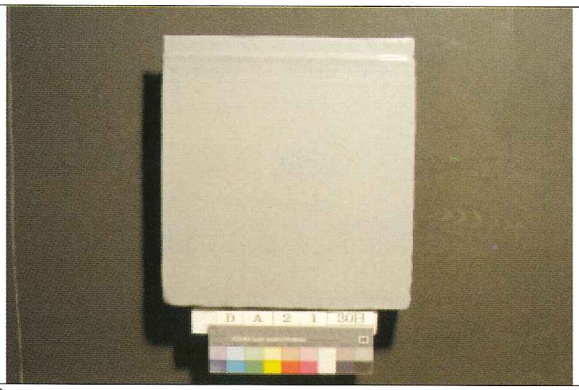
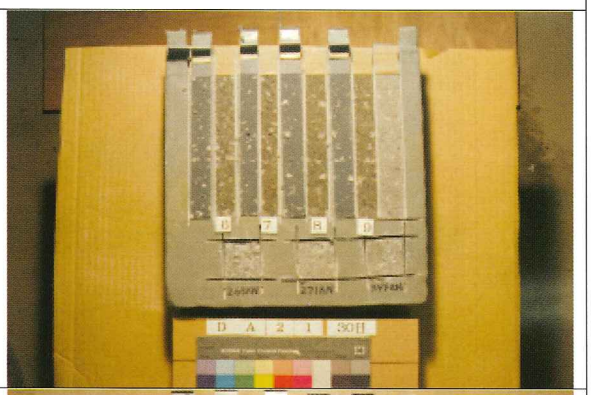
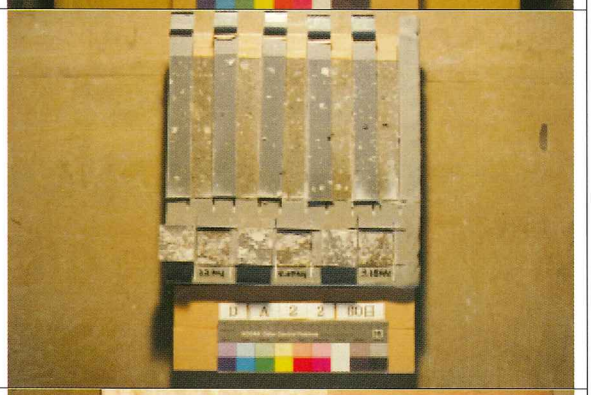
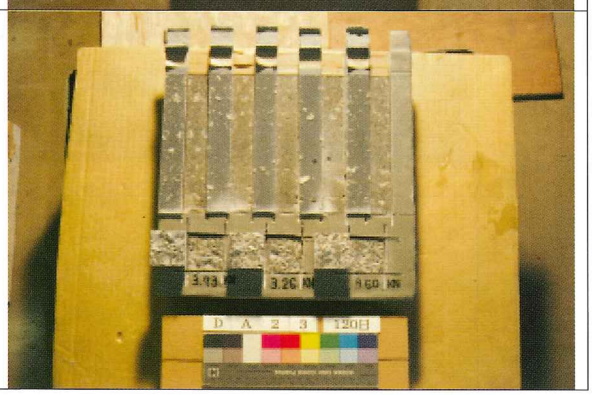
供試体１（ＨＢ）

HB	試験前		
			
	120 日浸漬後(23℃)		120 日浸漬後(40℃)
0%		0%	
0.05%		0.05%	
0.5%		0.5%	
3%		3%	
		10%	

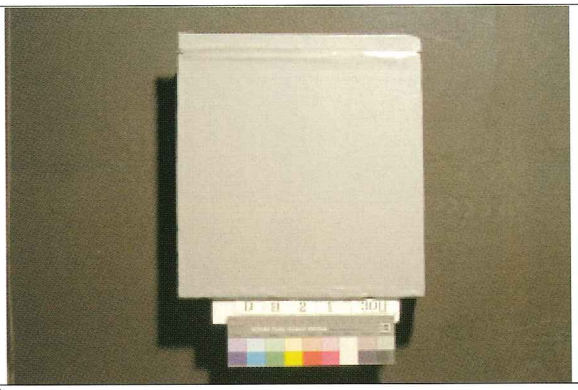
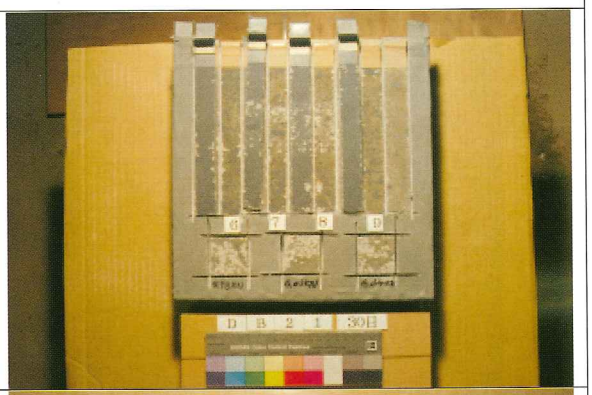
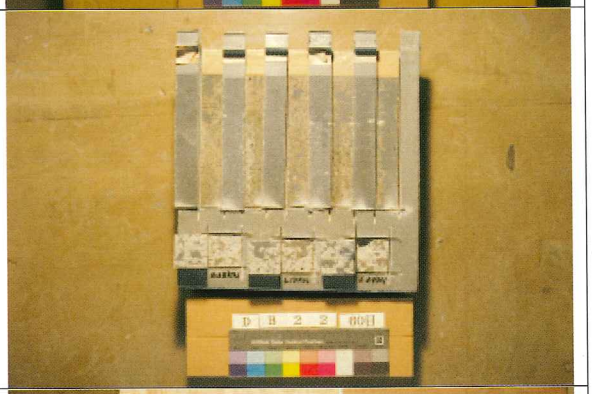
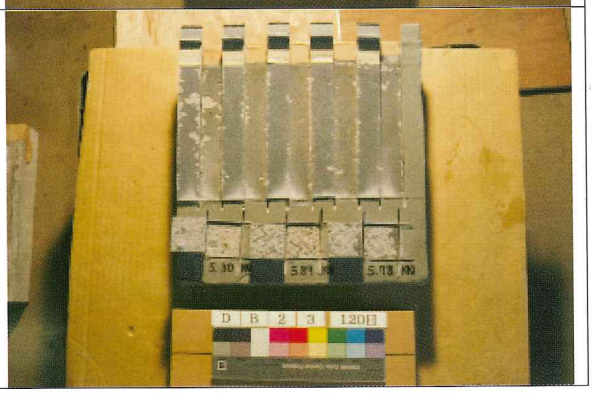
供試体１（ＨＣ）

HC	試験前		
			
	120 日浸漬後(23℃)		120 日浸漬後(40℃)
0%		0%	
0.05%		0.05%	
0.5%		0.5%	
3%		3%	
		10%	

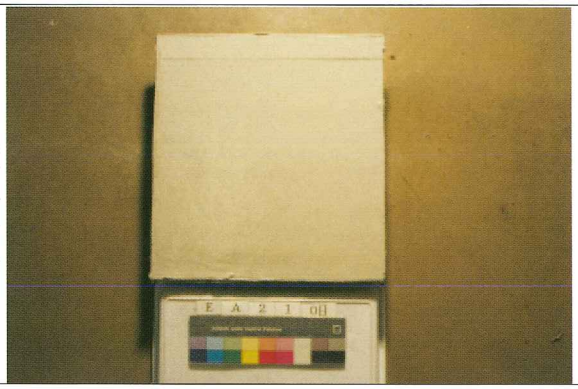
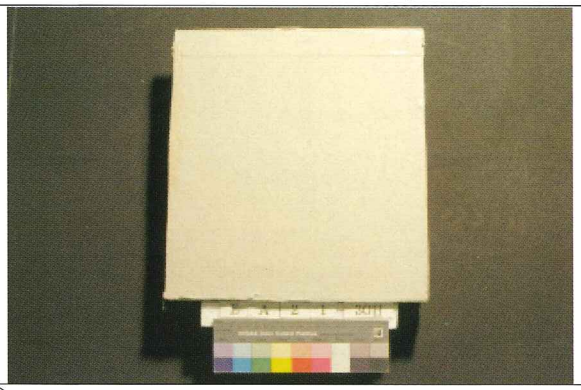
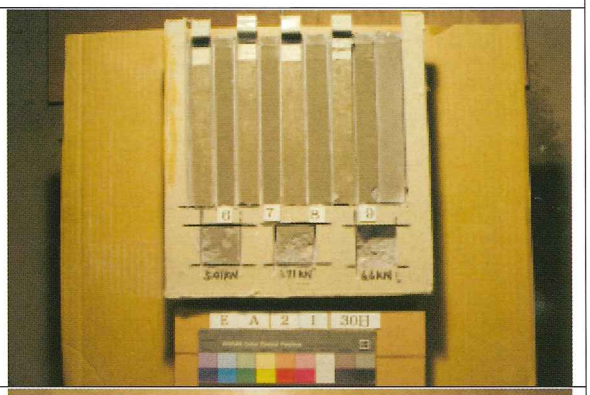
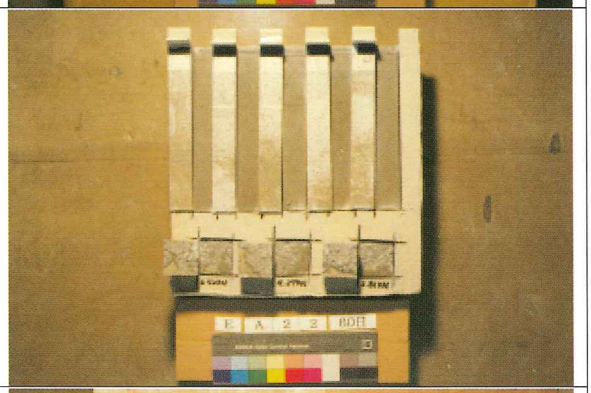
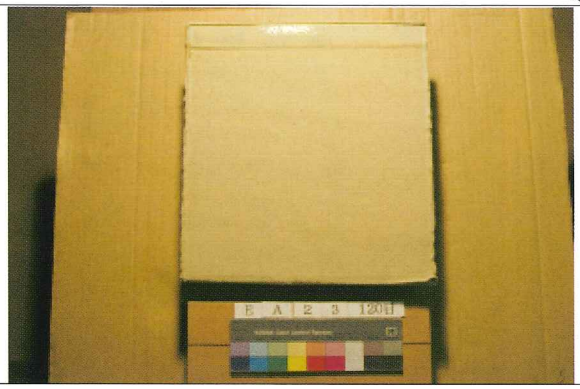
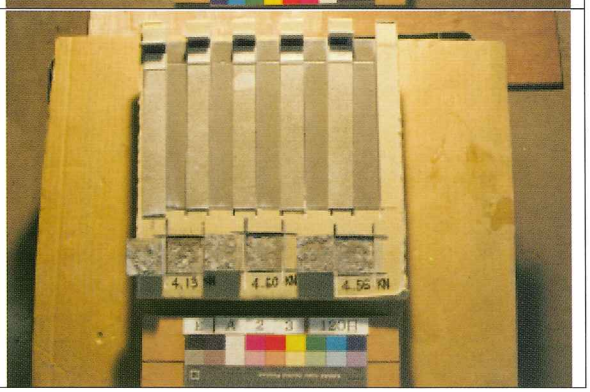
供試体２（ＤＡ）

DA	試験前	
		
	硫酸浸漬後	引き剥がし試験後
28日後		
56日後		
120日後		

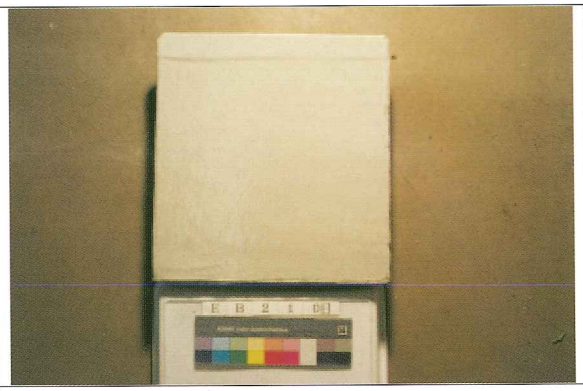
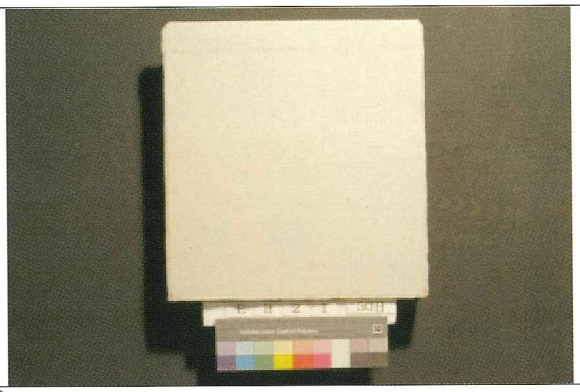
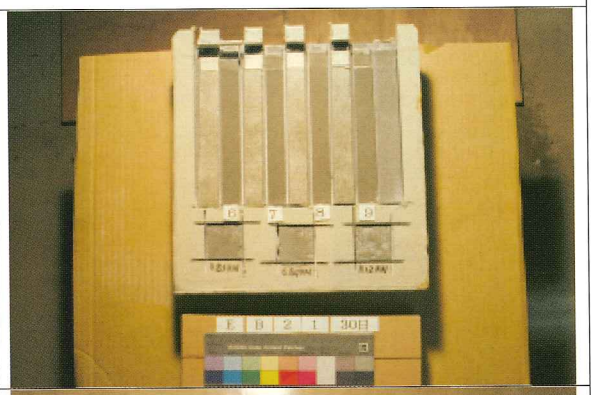
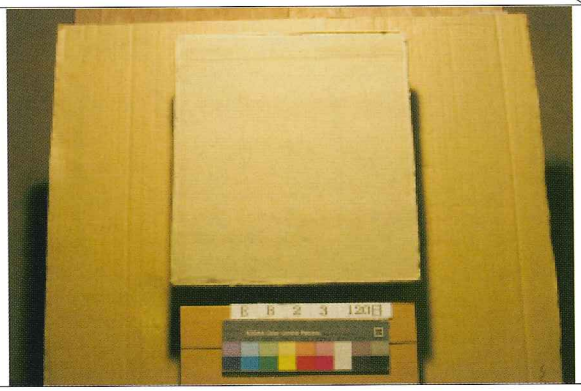
供試体２（ＤＢ）

DB	試験前	
		
	硫酸浸漬後	引き剥がし試験後
28日後		
56日後		
120日後		

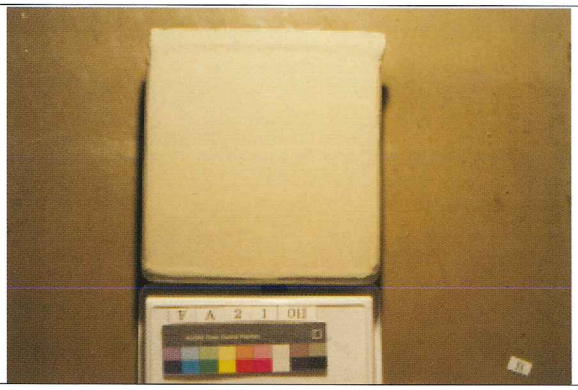
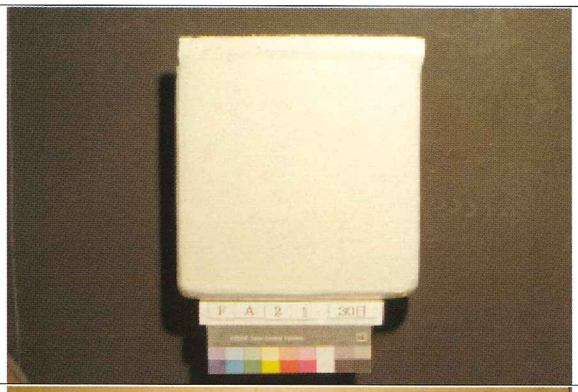
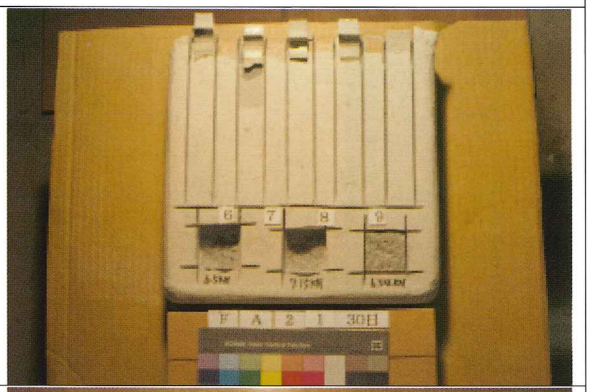
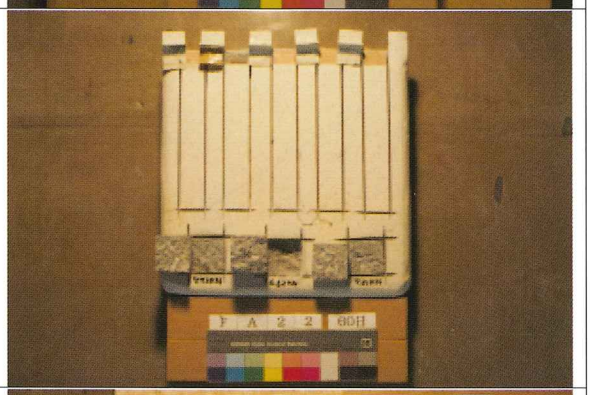
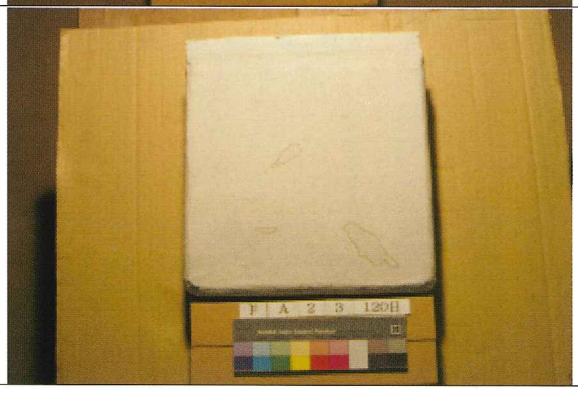
供試体２（ＥＡ）

EA	試験前	
		
	硫酸浸漬後	引き剥がし試験後
28日後		
56日後		
120日後		

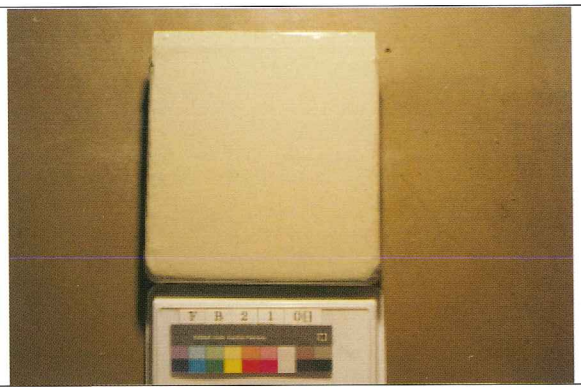
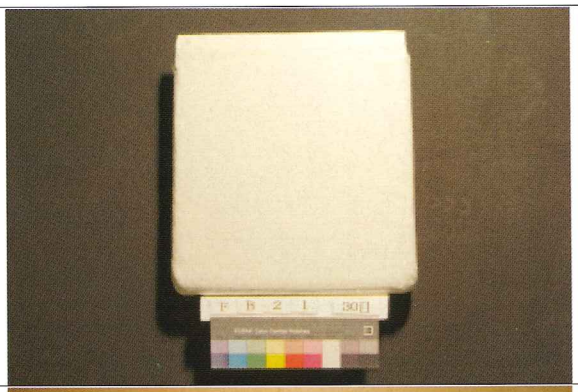
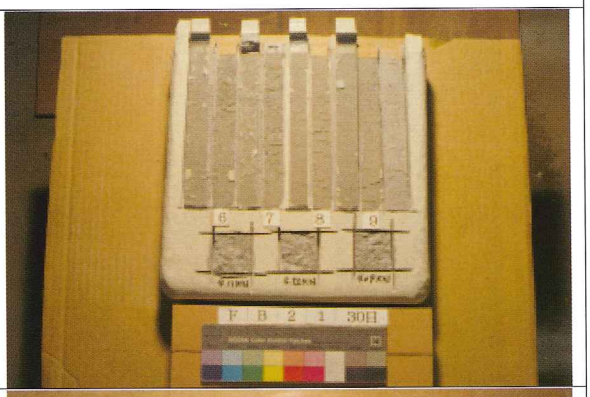
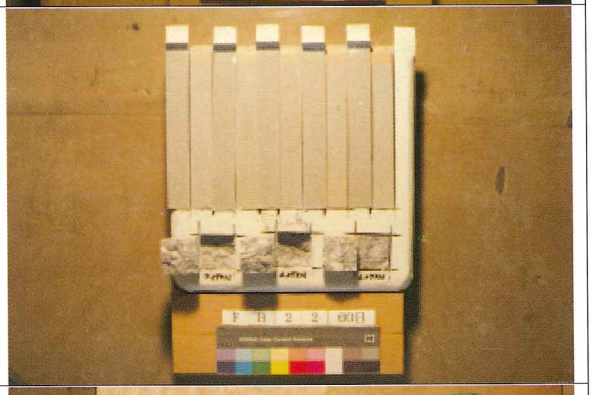
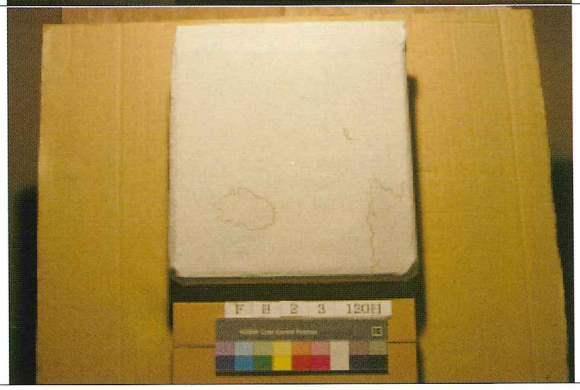
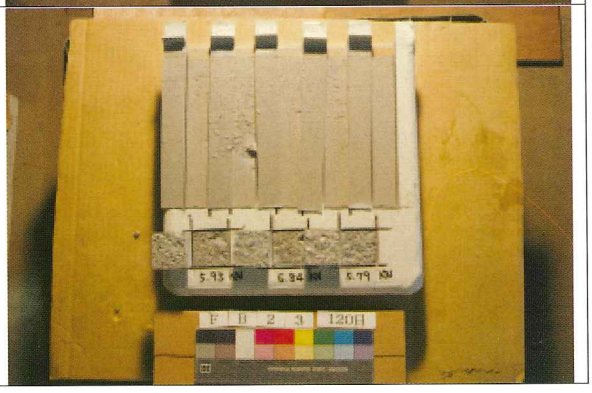
供試体２（ＥＢ）

EB	試験前	
		
	硫酸浸漬後	引き剥がし試験後
28日後		
56日後		
120日後		

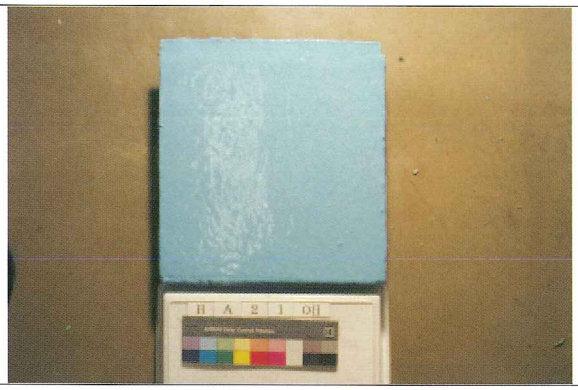
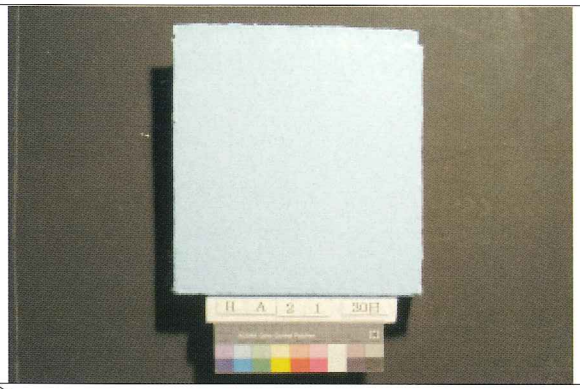
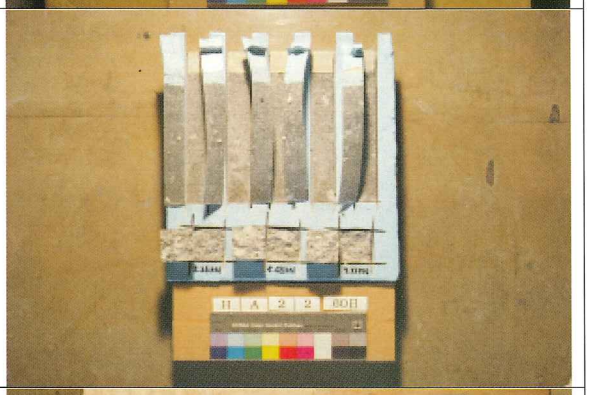
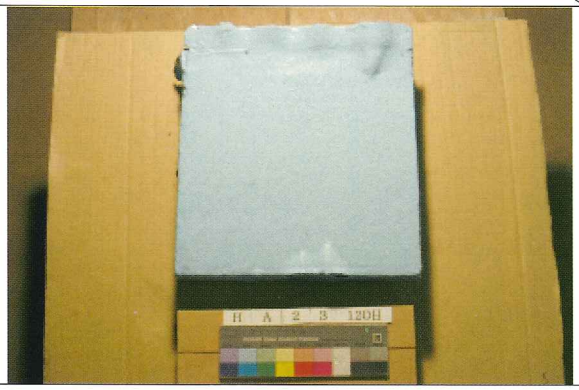
供試体２（ＦＡ）

FA	試験前	
		
	硫酸浸漬後	引き剥がし試験後
28日後		
56日後		
120日後		

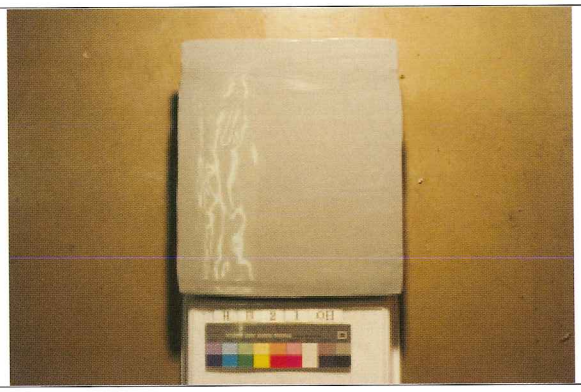
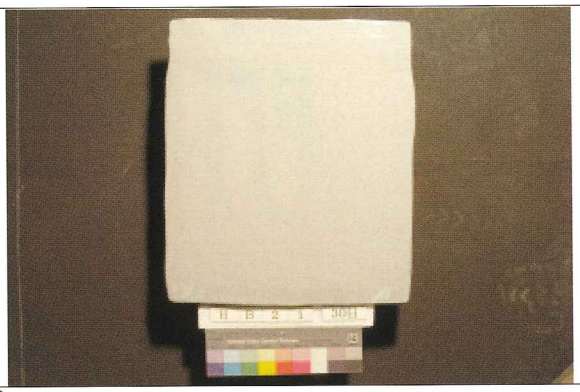
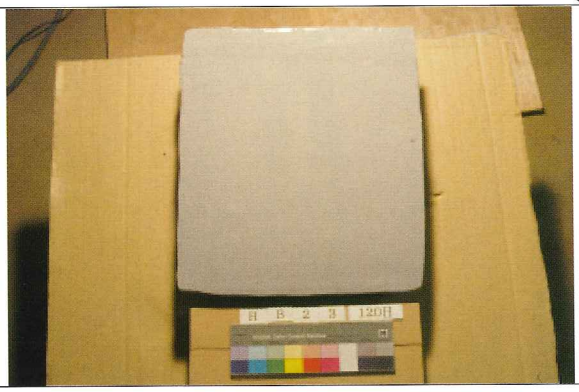
供試体２（ＦＢ）

FB	試験前	
		
	硫酸浸漬後	引き剥がし試験後
28日後		
56日後		
120日後		

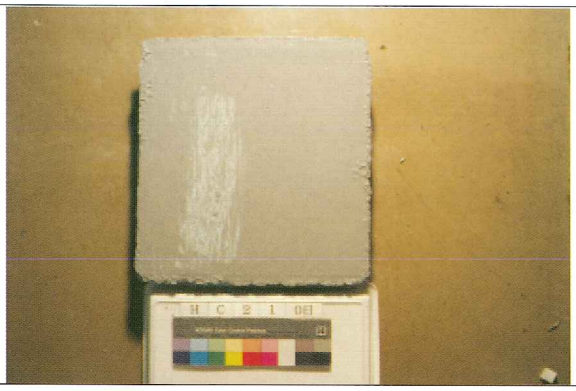
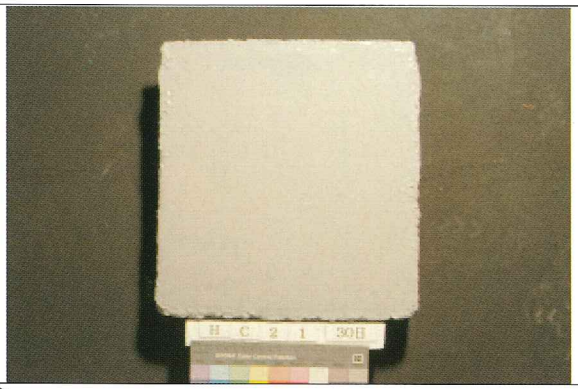
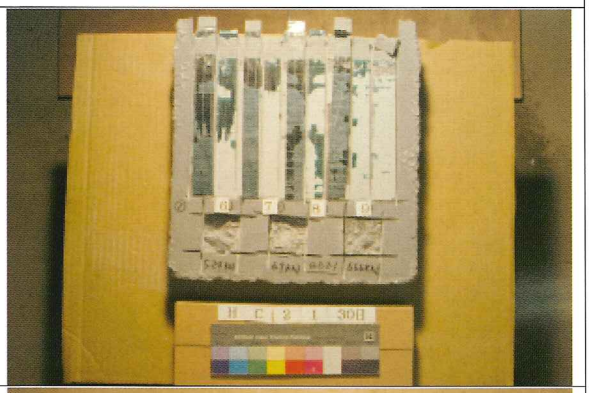
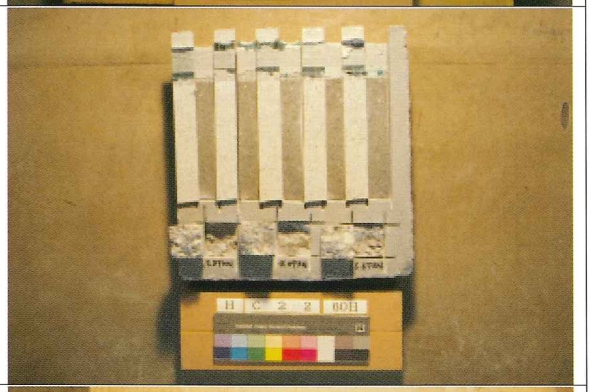
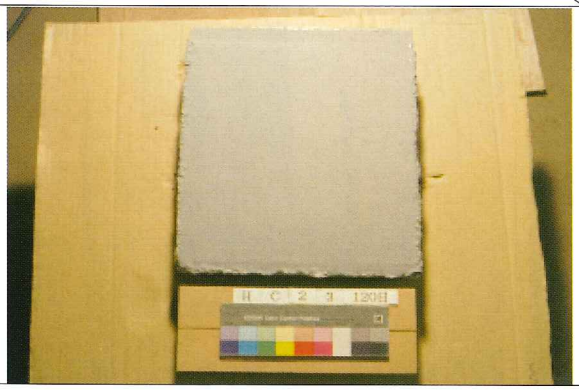
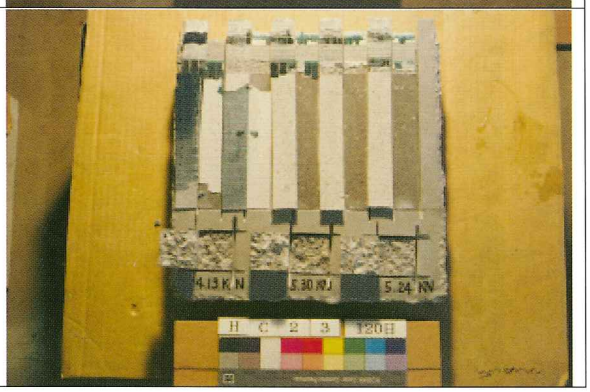
供試体２（ＨＡ）

HA	試験前	
		
	硫酸浸漬後	引き剥がし試験後
28日後		
56日後		
120日後		

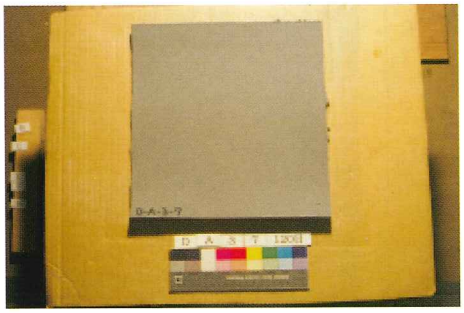
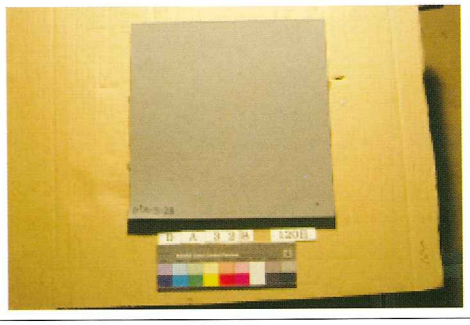
供試体２（ＨＢ）

HB	試験前	
		
	硫酸浸漬後	引き剥がし試験後
28日後		
56日後		
120日後		

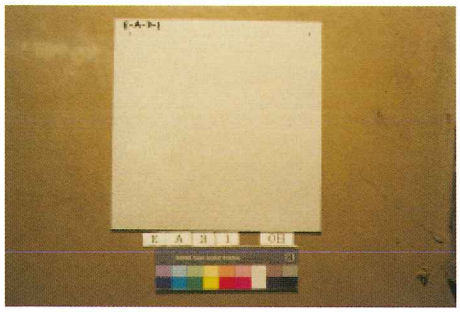
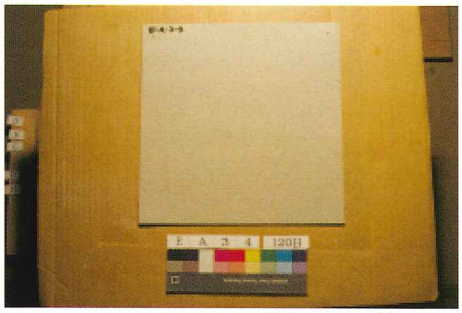
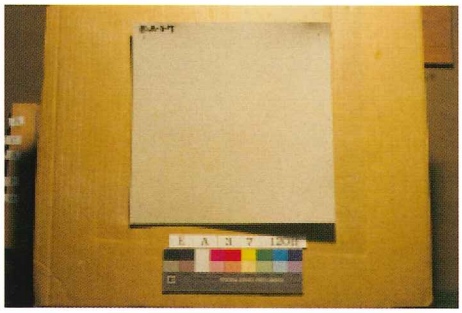
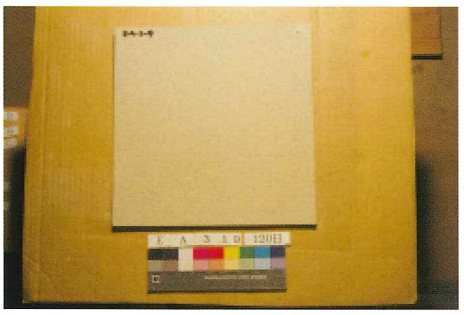
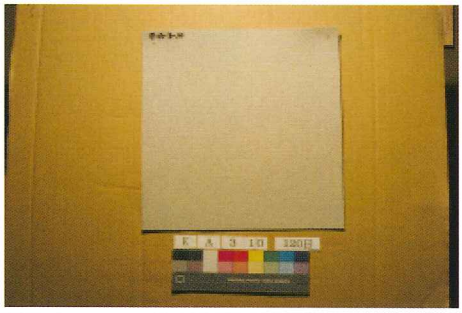
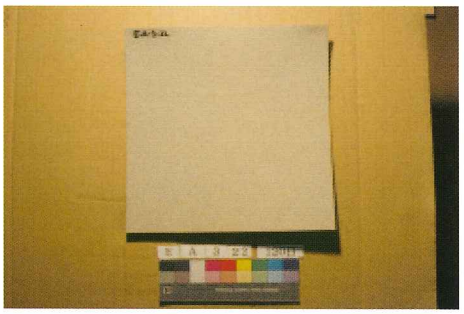
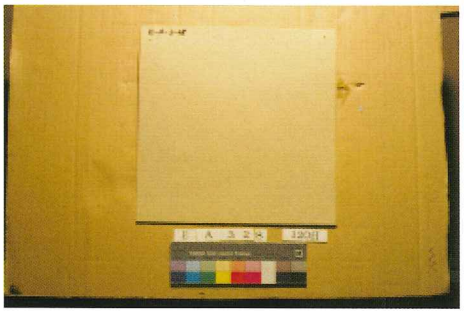
供試体２（ＨＣ）

HC	試験前	
		
	硫酸浸漬後	引き剥がし試験後
28日後		
56日後		
120日後		

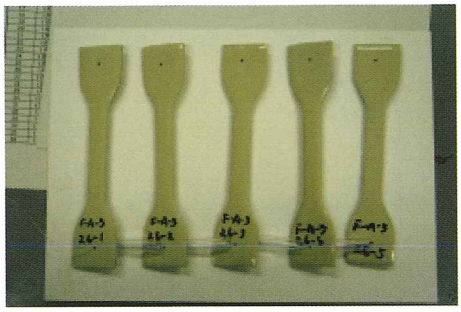
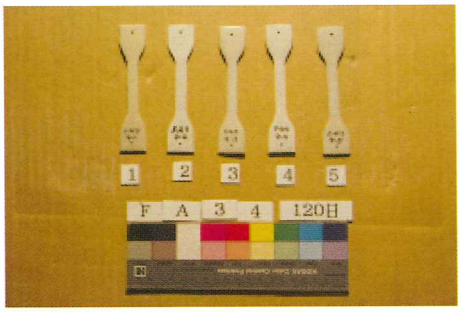
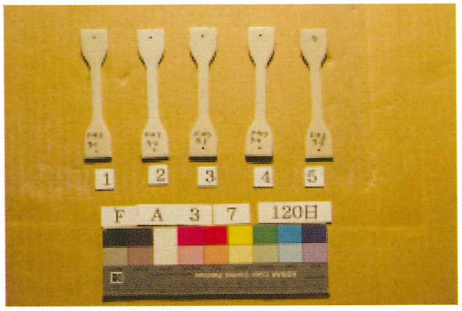
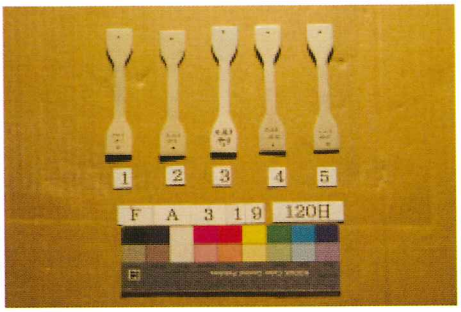
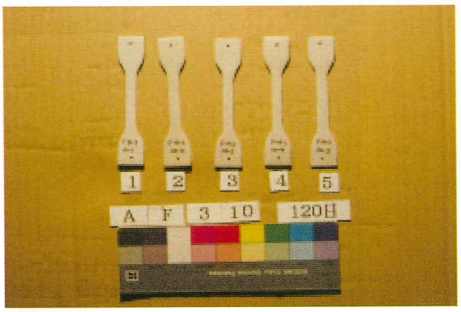
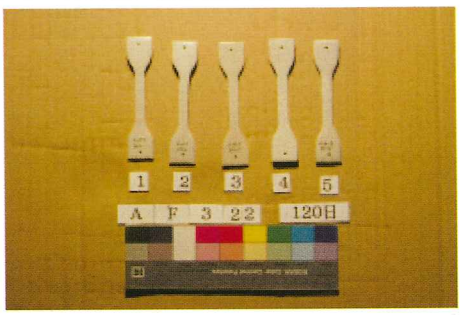
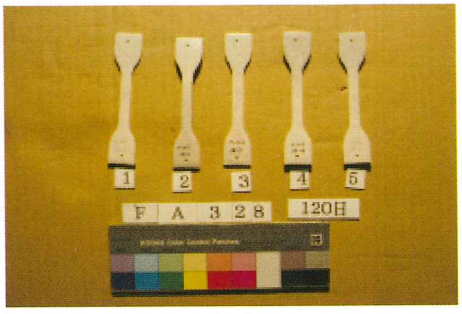
供試体３（ＤＡ）

DA	試験前		
			
	120 日浸漬後(23℃)		120 日浸漬後(40℃)
0%		0%	
0.05%		0.05%	
0.5%		0.5%	
3%		3%	
		10%	

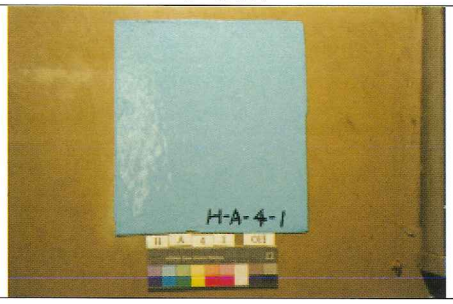
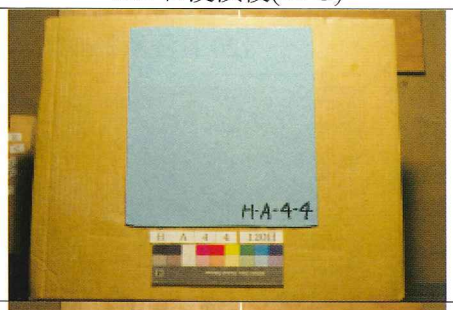
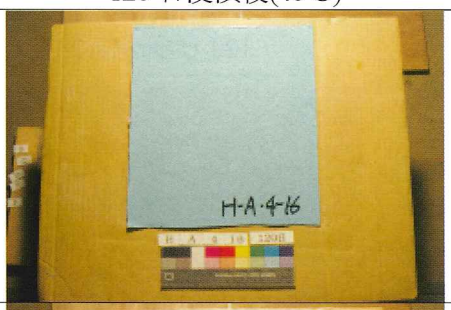
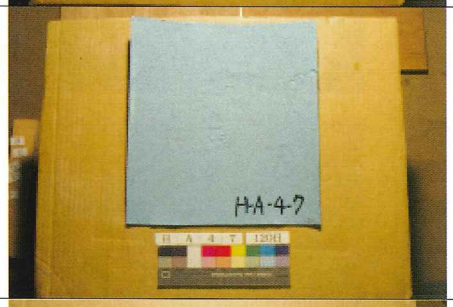
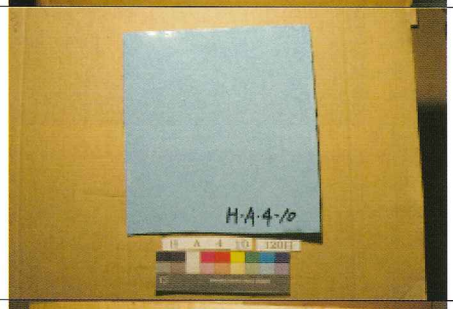
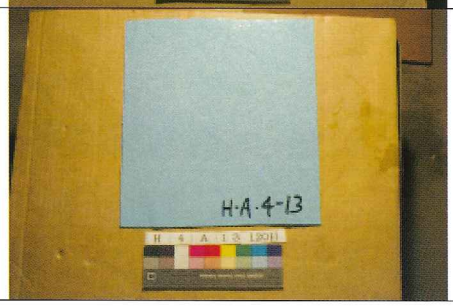
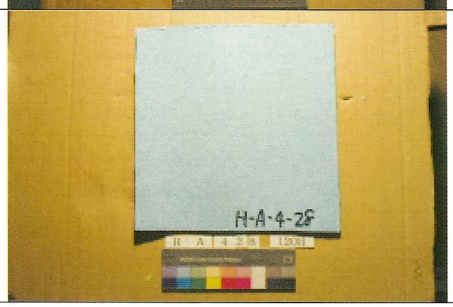
供試体３（ＥＡ）

EA	試験前		
			
	120 日浸漬後(23℃)		120 日浸漬後(40℃)
0%		0%	
0.05%		0.05%	
0.5%		0.5%	
3%		3%	
		10%	

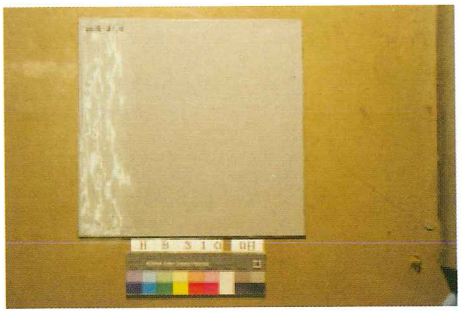
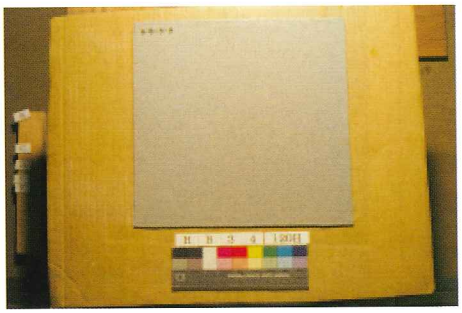
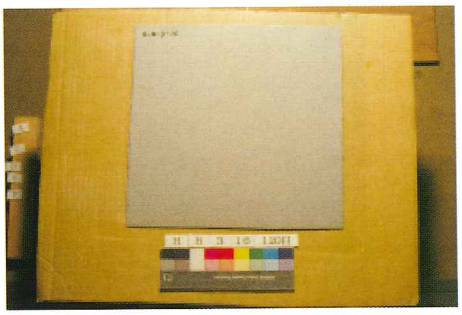
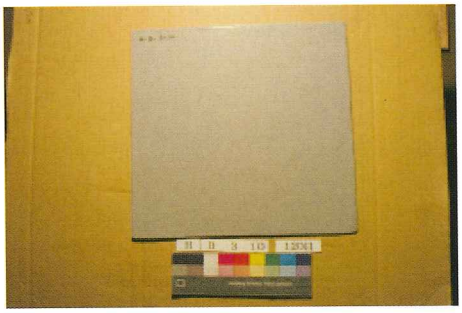
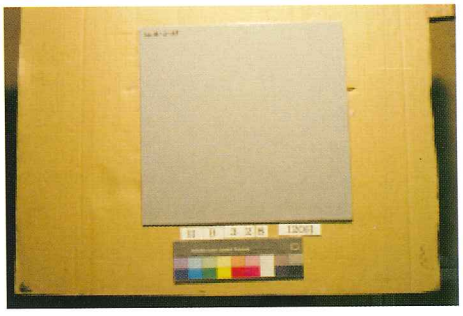
供試体３（ＦＡ）

FA	試験前		
			
	120 日浸漬後(23℃)		120 日浸漬後(40℃)
0%		0%	
0.05%		0.05%	
0.5%		0.5%	
3%		3%	
		10%	

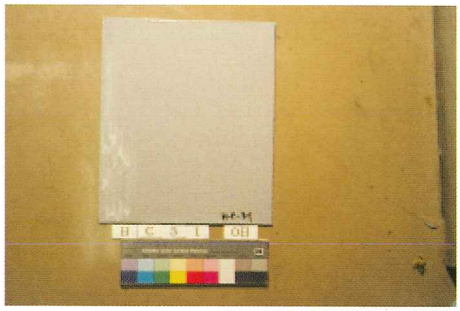
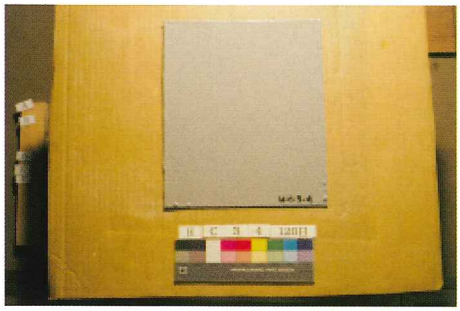
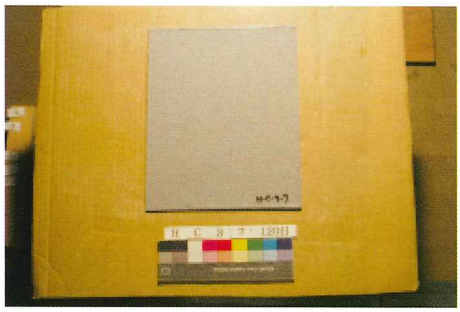
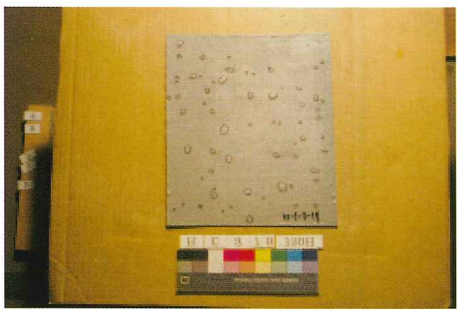
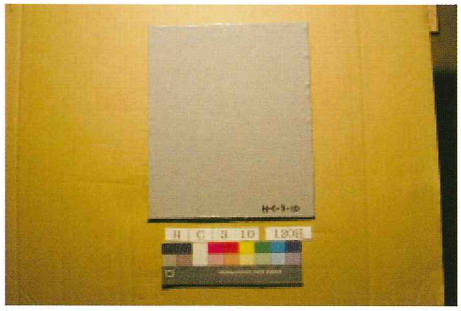
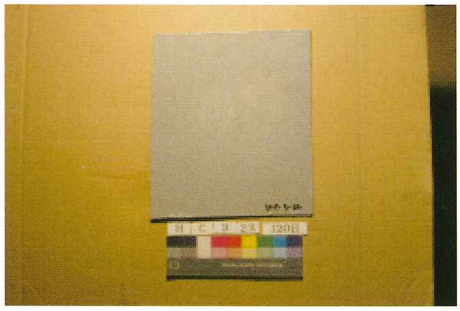
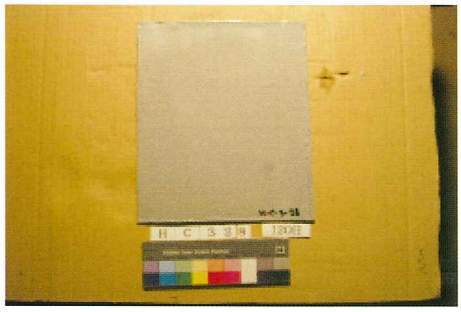
供試体４（HA）

HA	試験前		
			
	120 日浸漬後(23℃)		120 日浸漬後(40℃)
0%		0%	
0.05%		0.05%	
0.5%		0.5%	
3%		3%	
		10%	

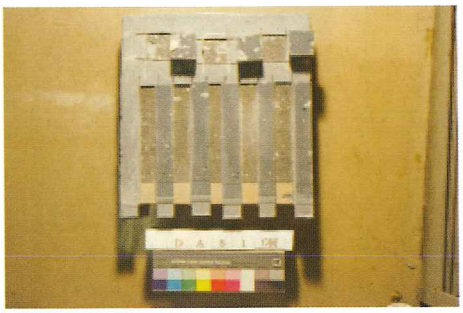
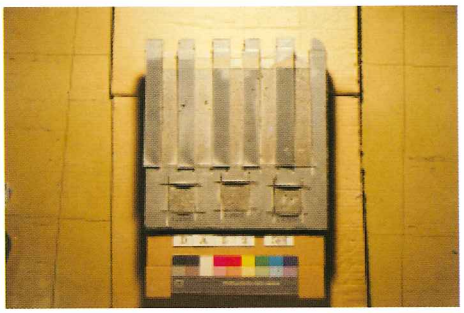
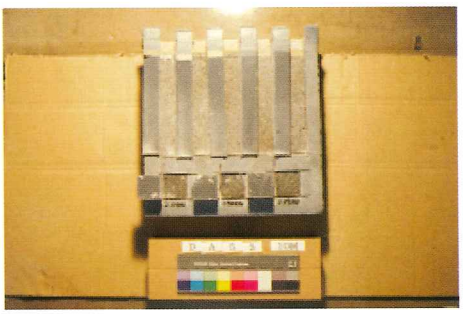
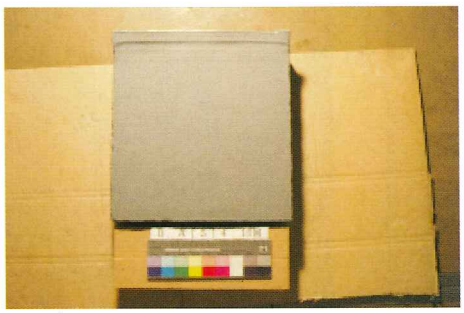
供試体３（ＨＢ）

HB	試験前		
			
	120 日浸漬後(23℃)		120 日浸漬後(40℃)
0%		0%	
0.05%		0.05%	
0.5%		0.5%	
3%		3%	
		10%	

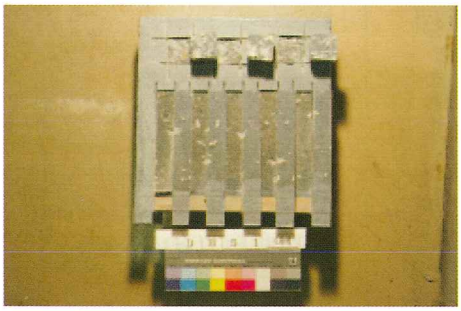
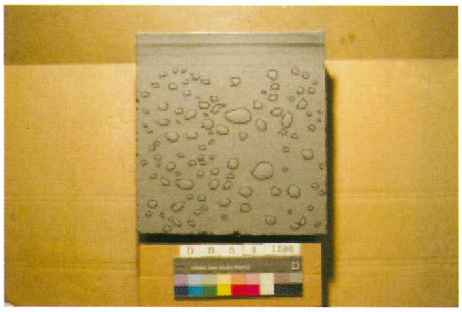
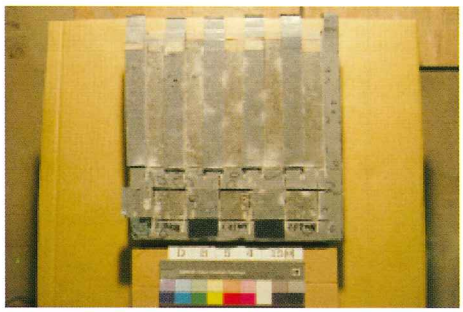
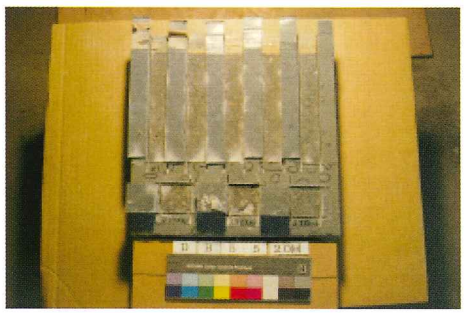
供試体３（ＨＣ）

HC	試験前		
			
	120 日浸漬後(23℃)		120 日浸漬後(40℃)
0%		0%	
0.05%		0.05%	
0.5%		0.5%	
3%		3%	
		10%	

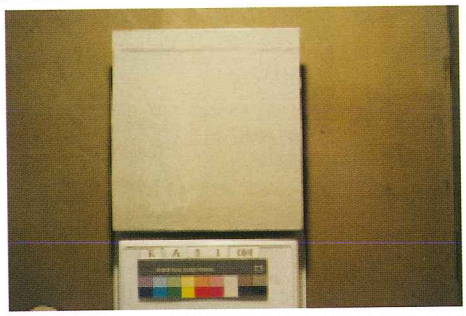
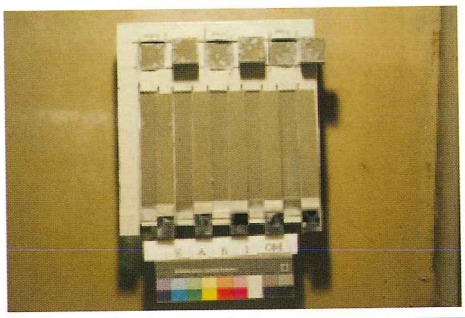
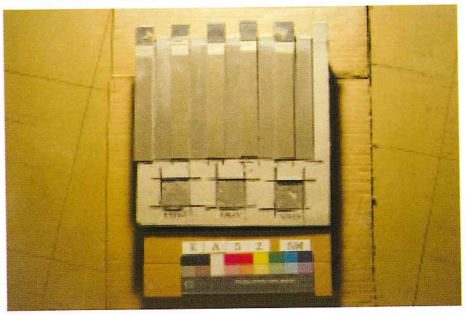
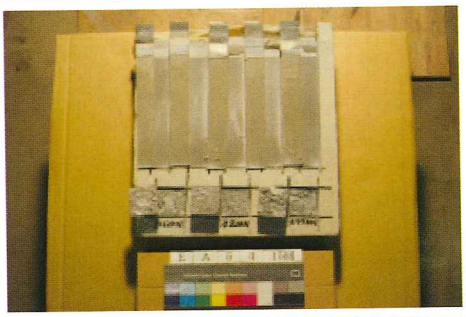
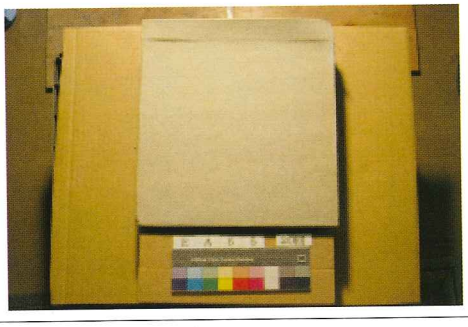
供試体５（ＤＡ）

DA	温冷水繰り返し浸漬後	引き剥がし試験後
0 回		
5 回		
10 回		
15 回		
20 回		

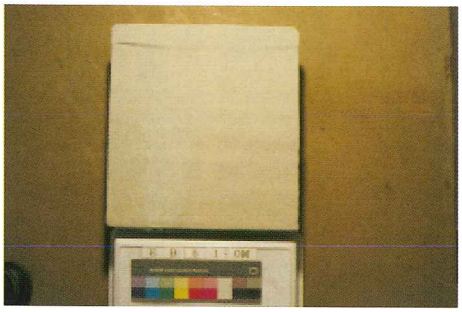
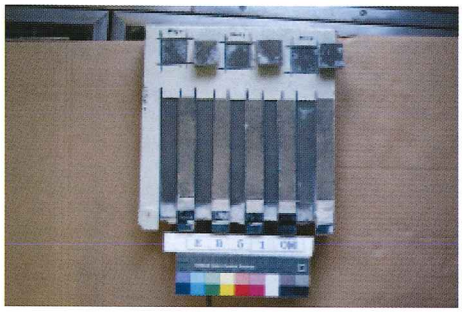
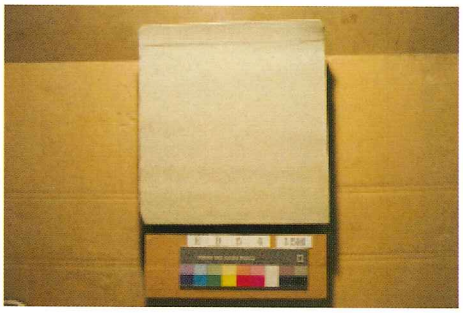
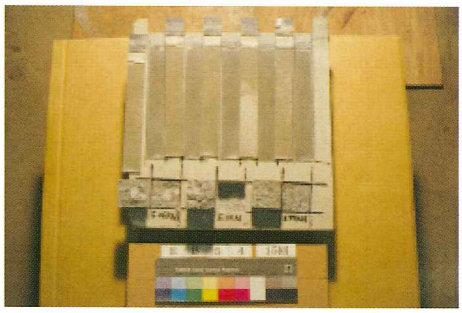
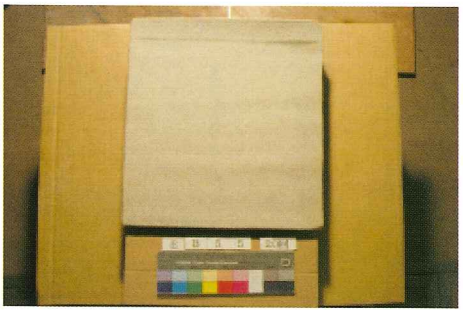
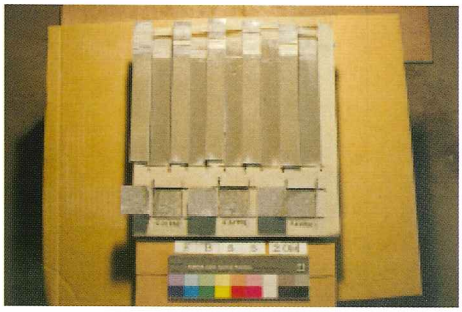
供試体５（ＤＢ）

DB	温冷水繰り返し浸漬後	引き剥がし試験後
0 回		
5 回		
10 回		
15 回		
20 回		

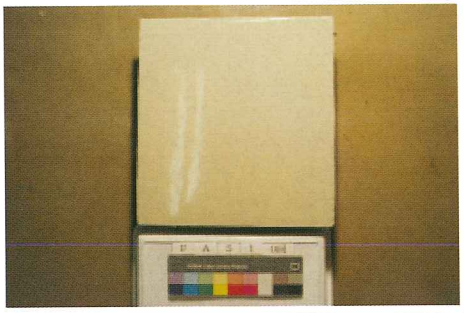
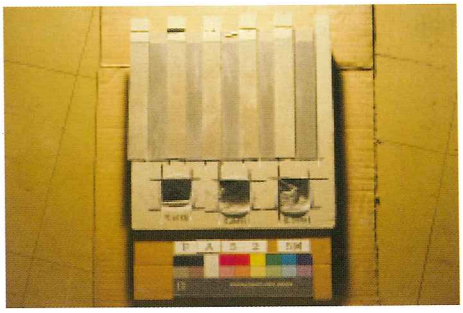
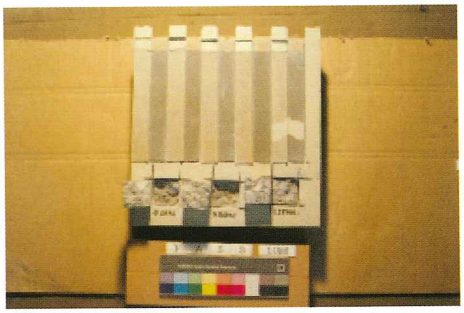
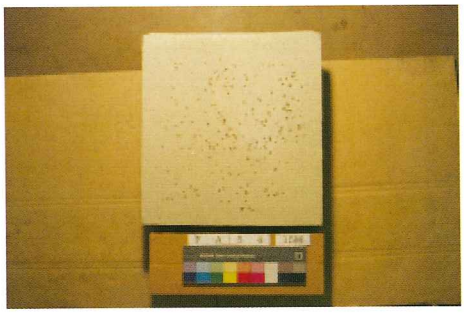
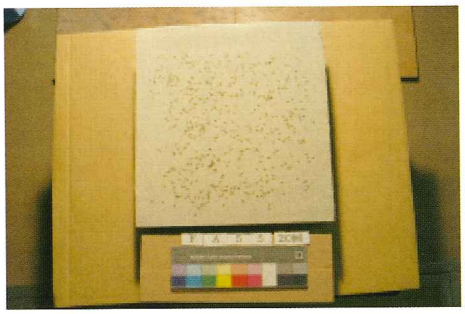
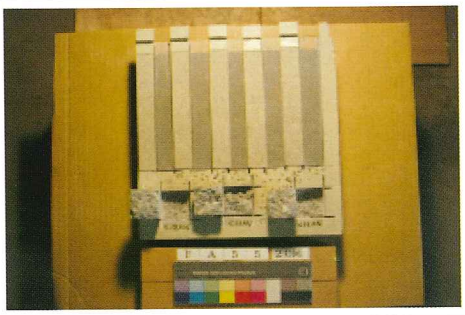
供試体５（ＥＡ）

EA	温冷水繰り返し浸漬後	引き剥がし試験後
0 回		
5 回		
10 回		
15 回		
20 回		

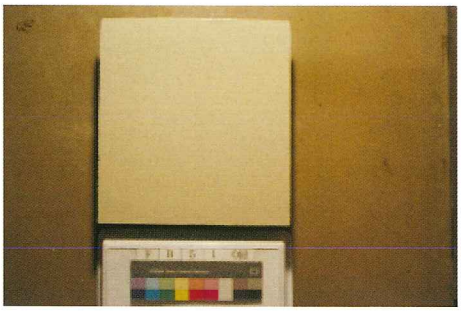
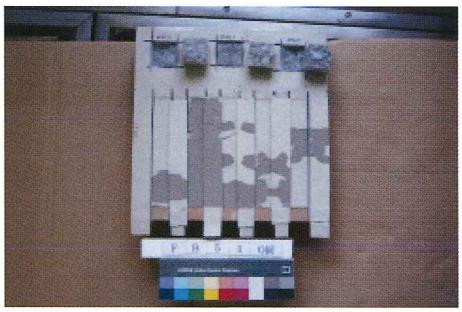
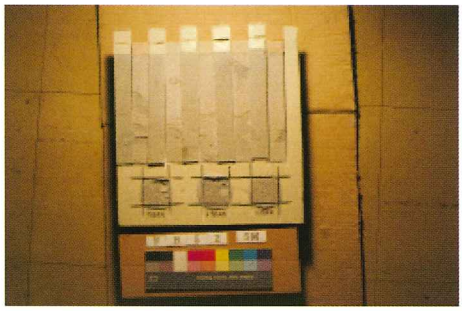
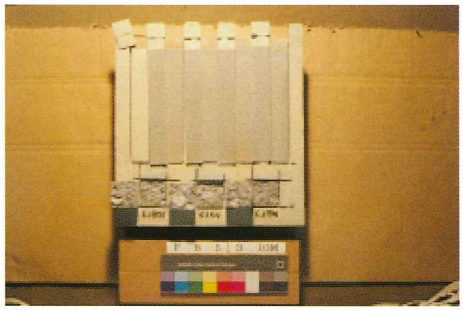
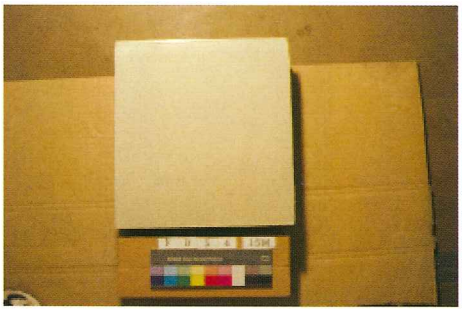
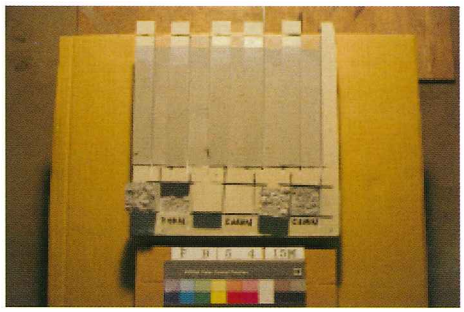
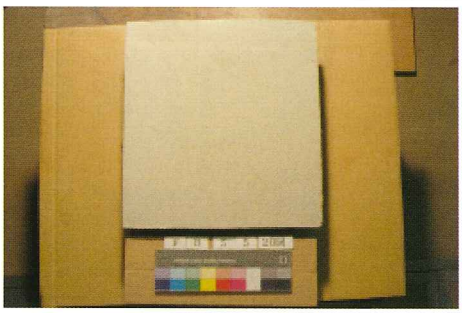
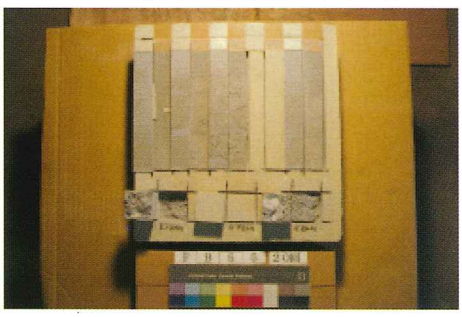
供試体５（ＥＢ）

EB	温冷水繰り返し浸漬後	引き剥がし試験後
0 回		
5 回		
10 回		
15 回		
20 回		

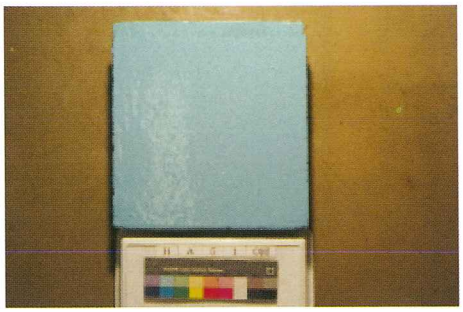
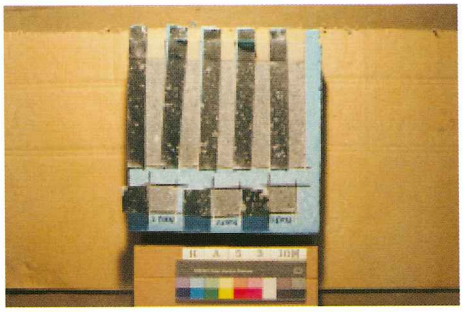
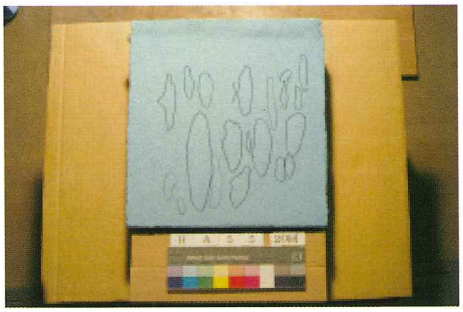
供試体５（ＦＡ）

FA	温冷水繰り返し浸漬後	引き剥がし試験後
0 回		
5 回		
10 回		
15 回		
20 回		

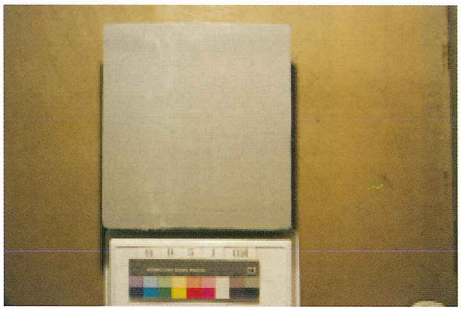
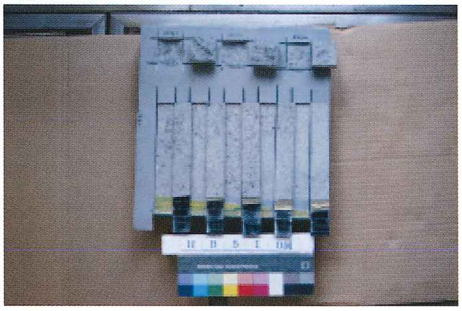
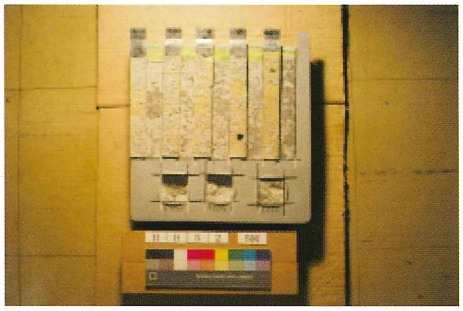
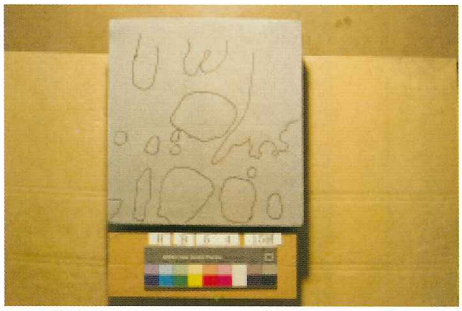
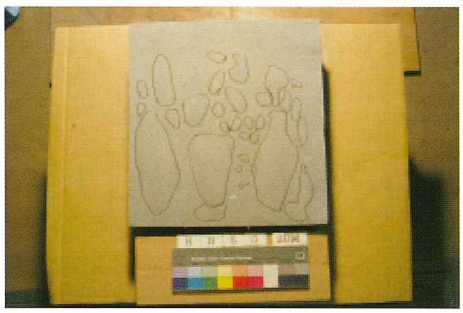
供試体５（ＦＢ）

FB	温冷水繰り返し浸漬後	引き剥がし試験後
0 回		
5 回		
10 回		
15 回		
20 回		

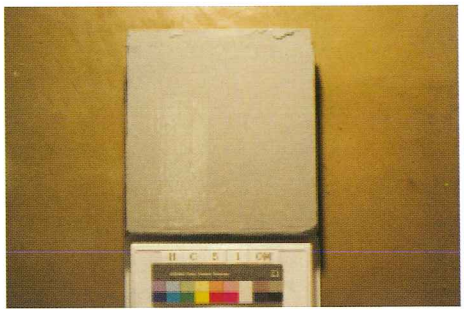
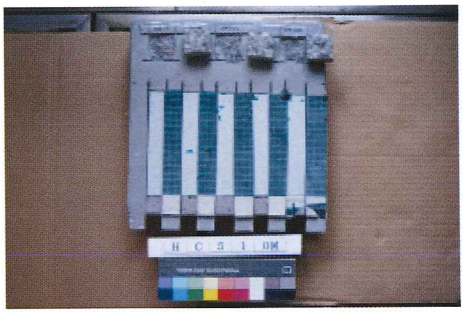
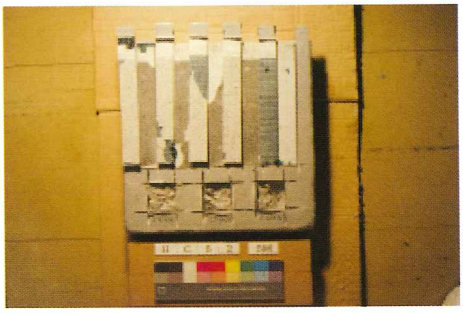
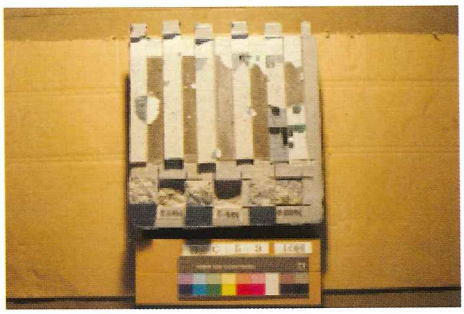
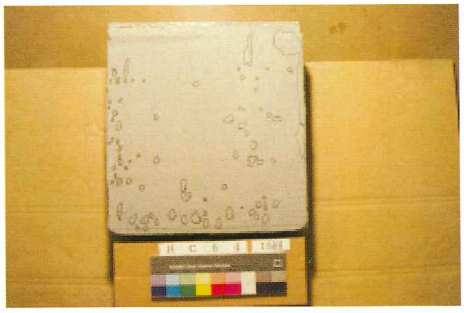
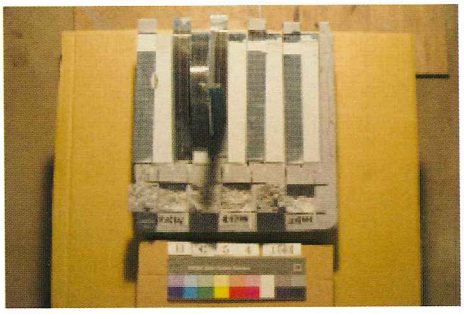
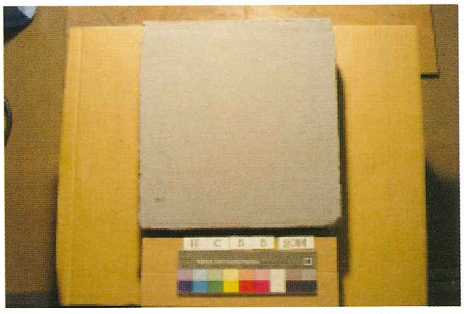
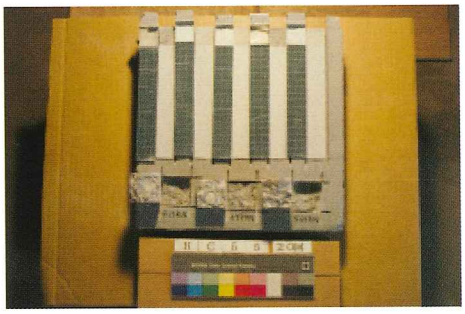
供試体５（HA）

HA	温冷水繰り返し浸漬後	引き剥がし試験後
0 回		
5 回		
10 回		
15 回		
20 回		

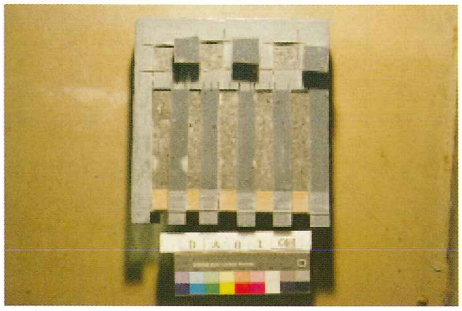
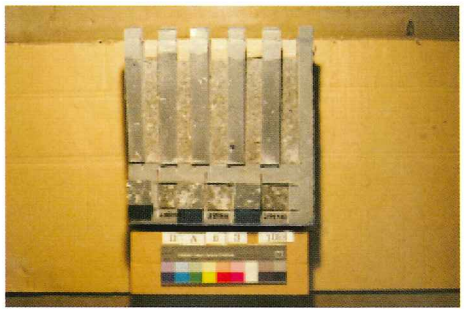
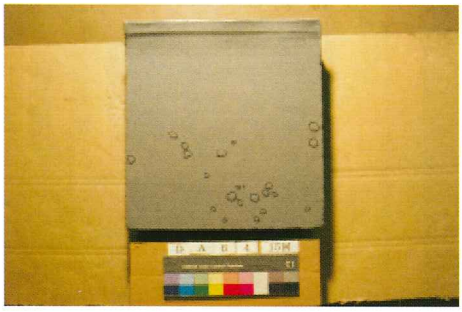
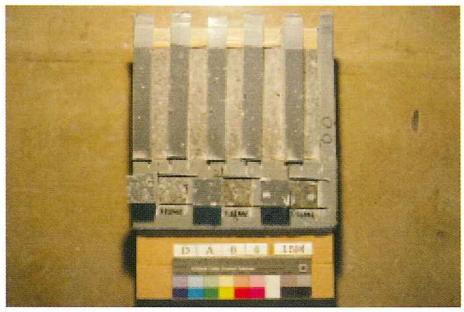
供試体５（ＨＢ）

HB	温冷水繰り返し浸漬後	引き剥がし試験後
0 回		
5 回		
10 回		
15 回		
20 回		

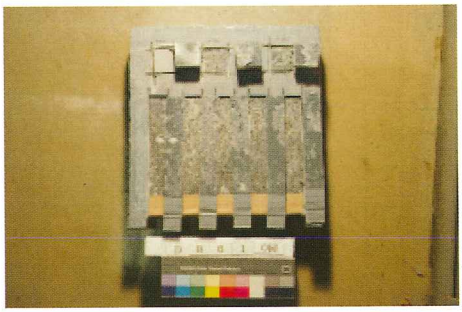
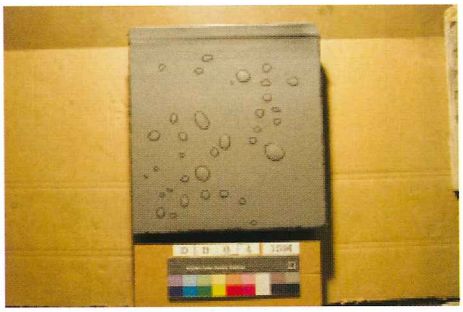
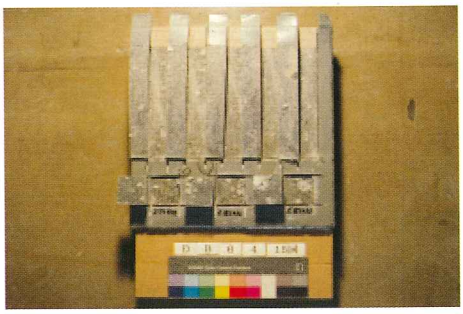
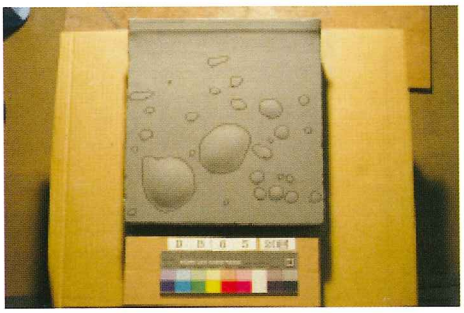
供試体５（ＨＣ）

HC	温冷水繰り返し浸漬後	引き剥がし試験後
0 回		
5 回		
10 回		
15 回		
20 回		

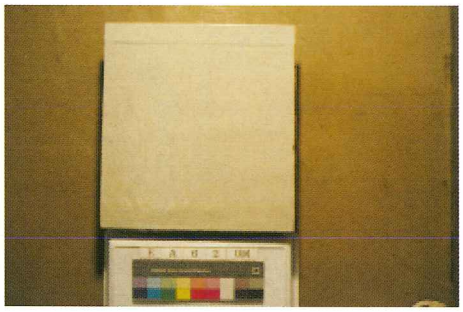
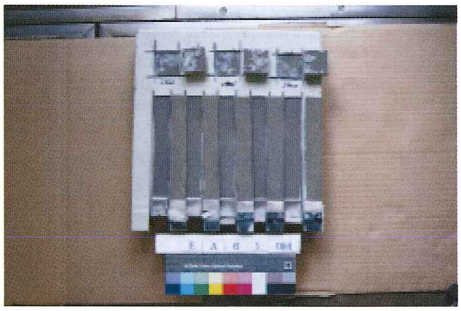
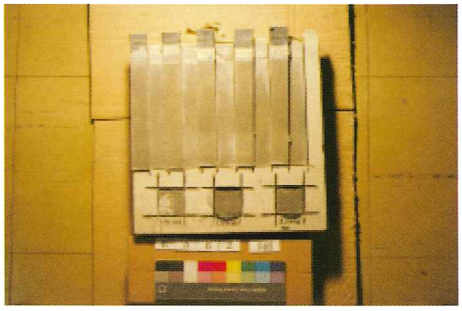
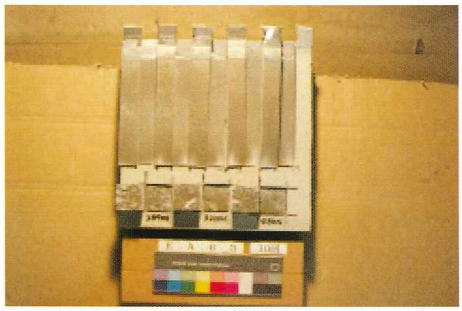
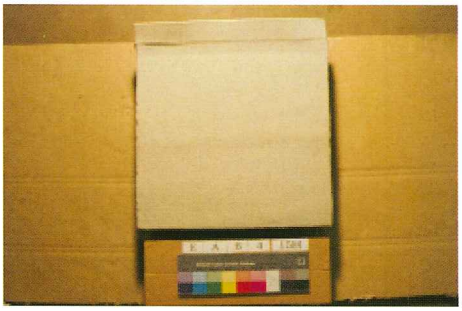
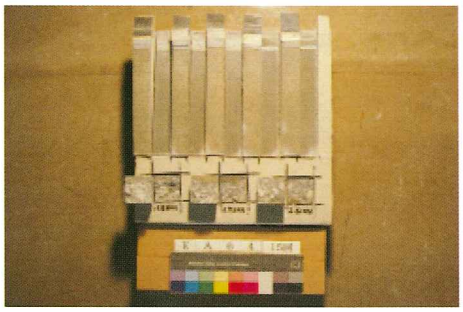
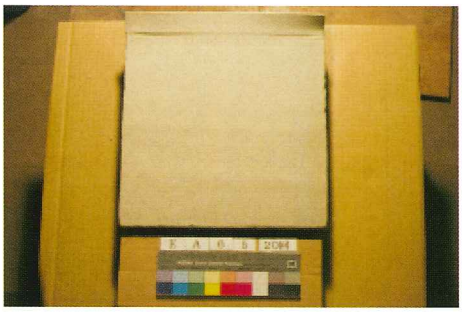
供試体６（ＤＡ）

DA	温冷水繰り返し浸漬後	引き剥がし試験後
0 回		
5 回		
10 回		
15 回		
20 回		

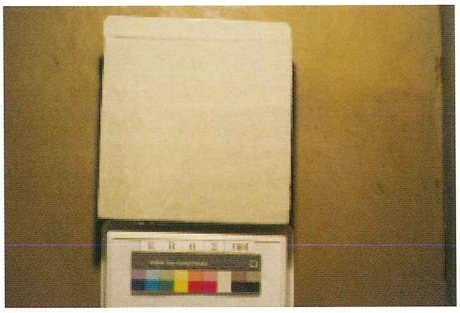
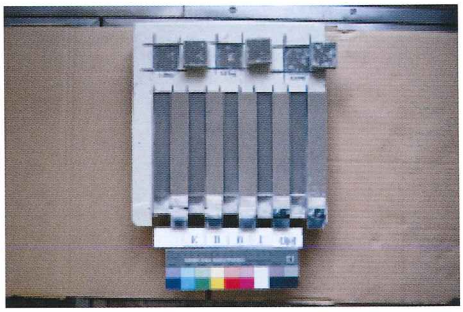
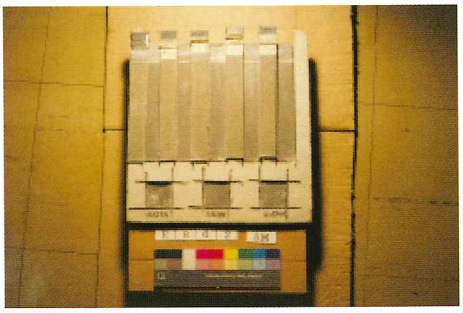
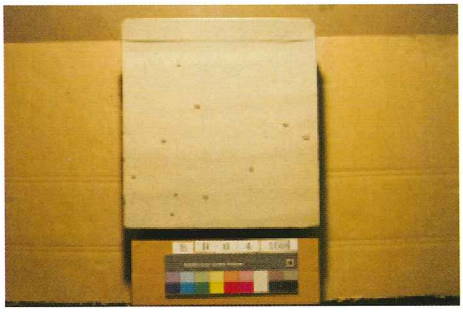
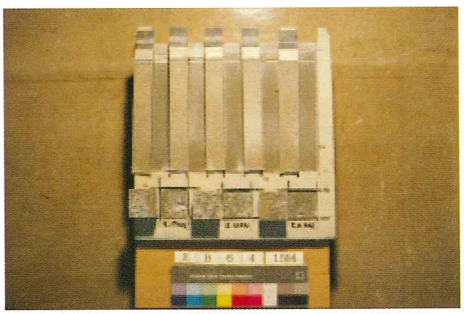
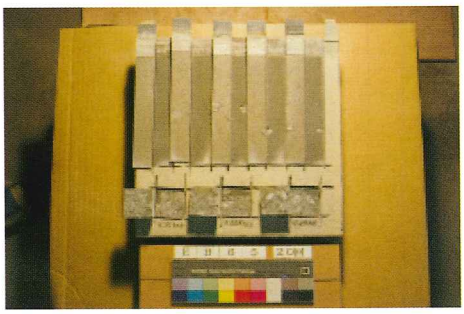
供試体６（ＤＢ）

DB	温冷水繰り返し浸漬後	引き剥がし試験後
0 回		
5 回		
10 回		
15 回		
20 回		

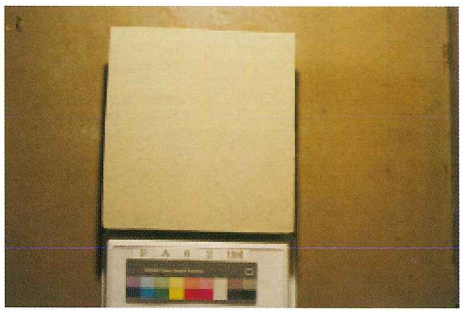
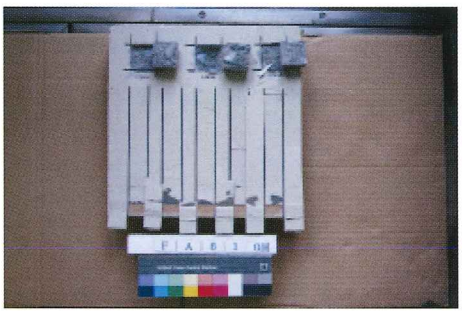
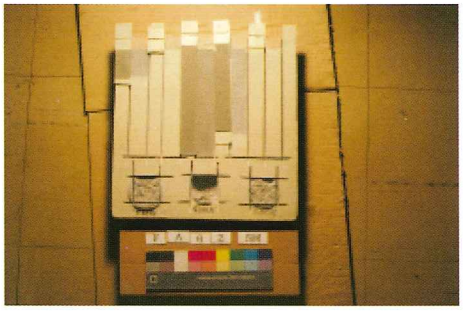
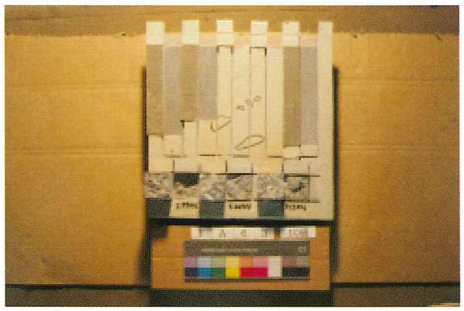
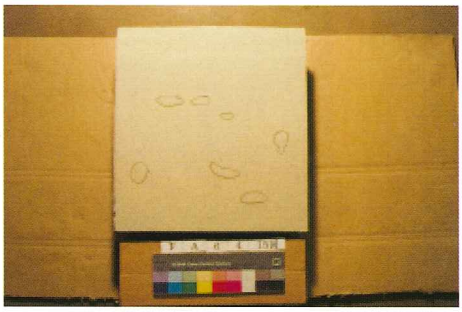
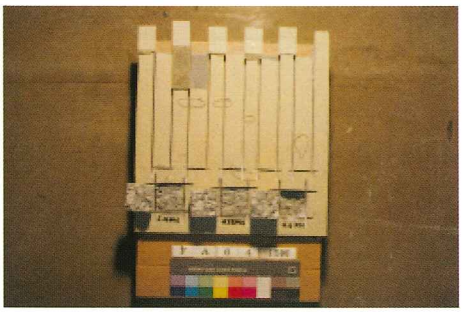
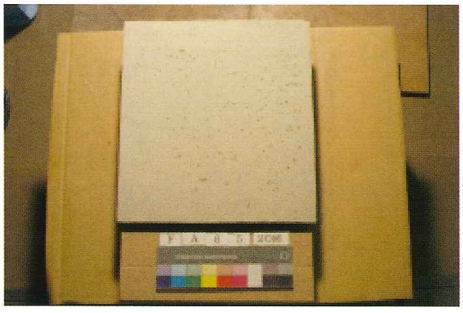
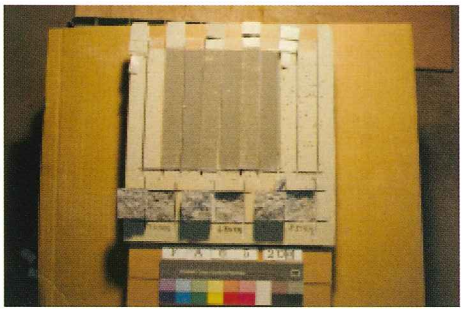
供試体６（ＥＡ）

EA	温冷水繰り返し浸漬後	引き剥がし試験後
0 回		
5 回		
10 回		
15 回		
20 回		

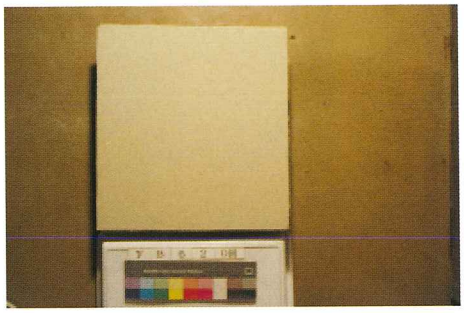
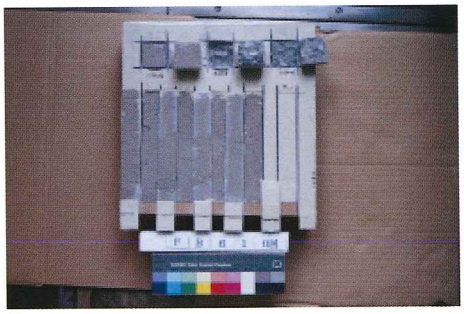
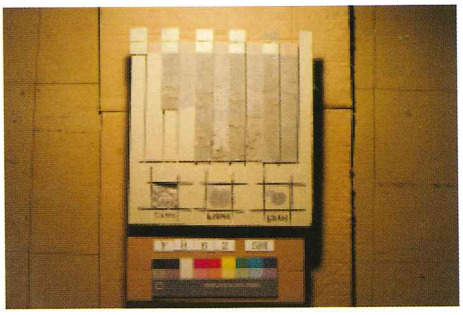
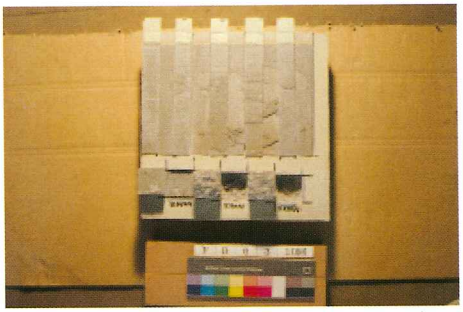
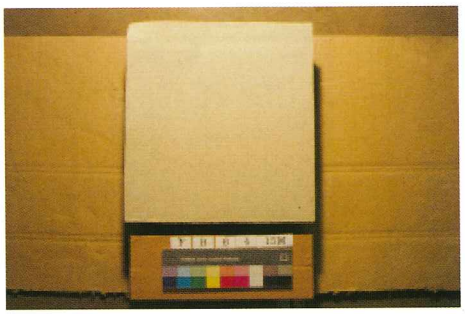
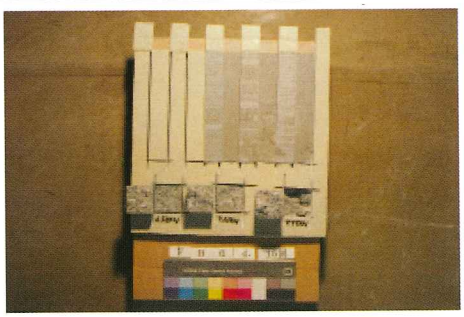
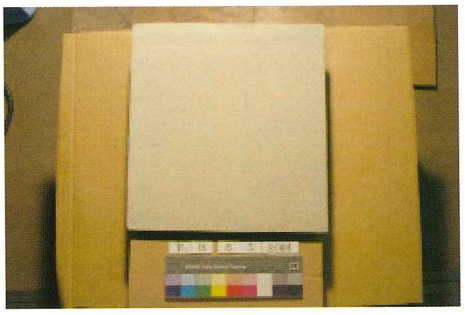
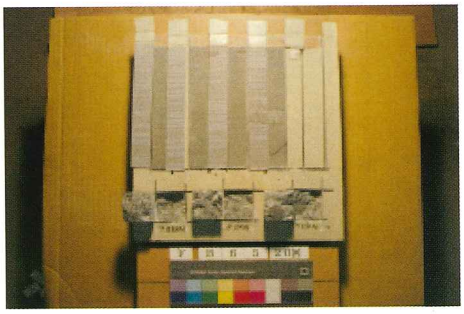
供試体６（ＥＢ）

EB	温冷水繰り返し浸漬後	引き剥がし試験後
0 回		
5 回		
10 回		
15 回		
20 回		

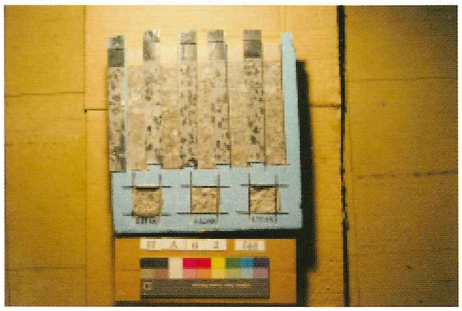
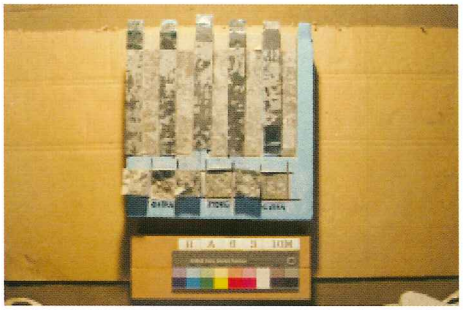
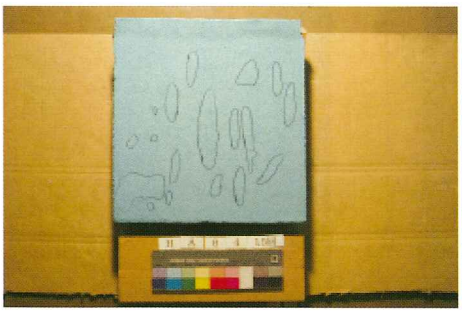
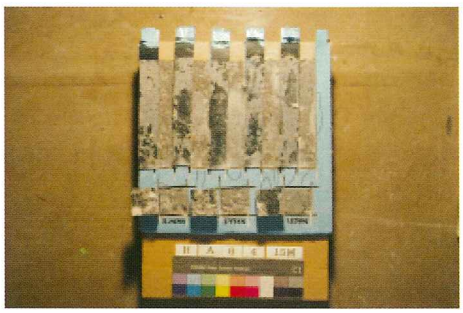
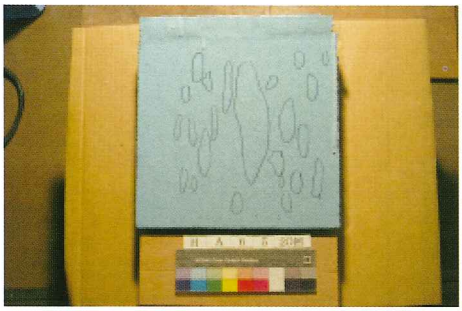
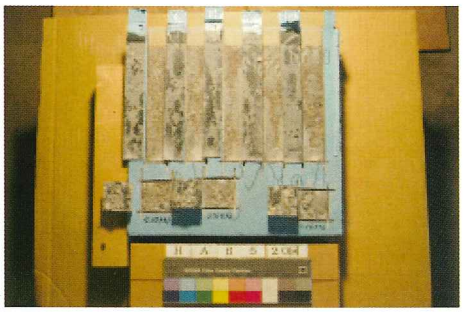
供試体６（ＦＡ）

FA	温冷水繰り返し浸漬後	引き剥がし試験後
0 回		
5 回		
10 回		
15 回		
20 回		

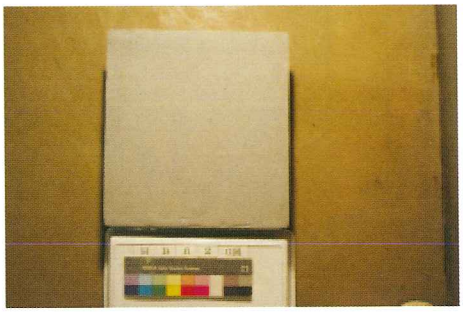
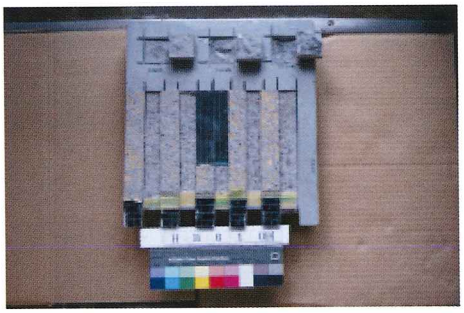
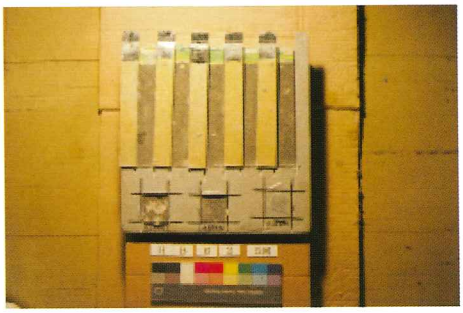
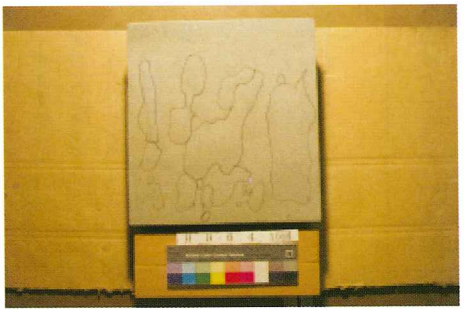
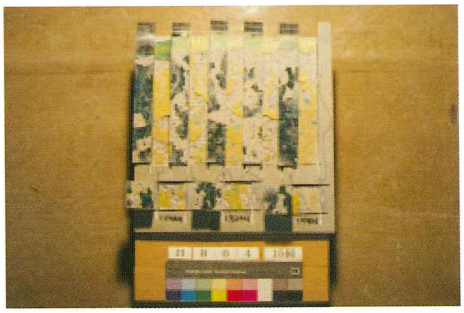
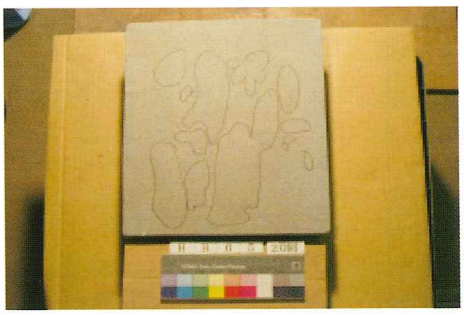
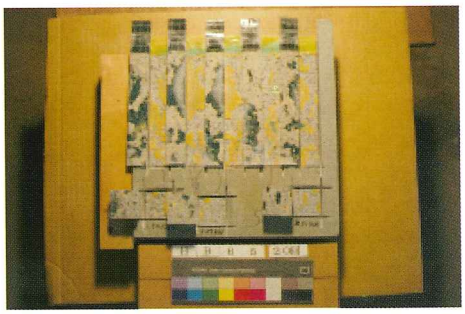
供試体６（ＦＢ）

FB	温冷水繰り返し浸漬後	引き剥がし試験後
0 回		
5 回		
10 回		
15 回		
20 回		

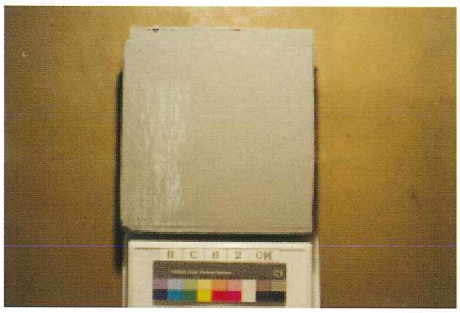
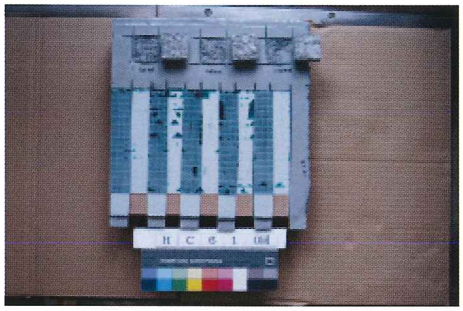
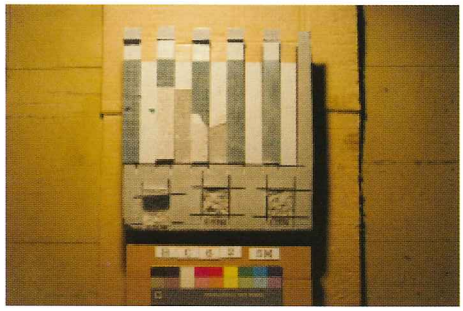
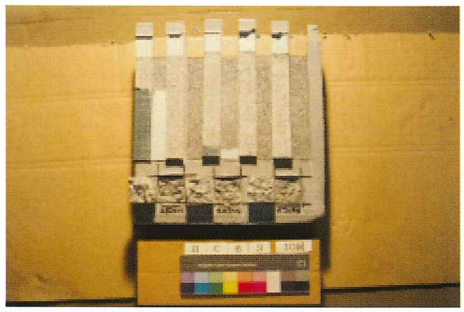
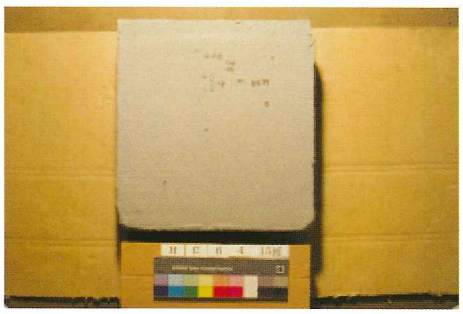
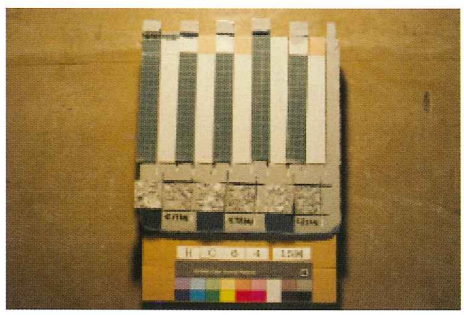
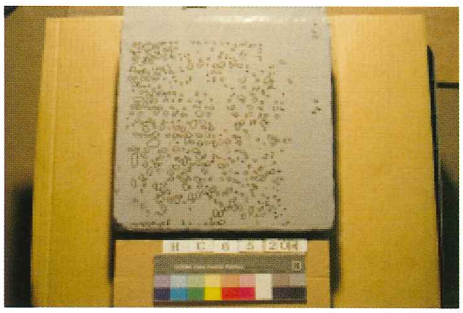
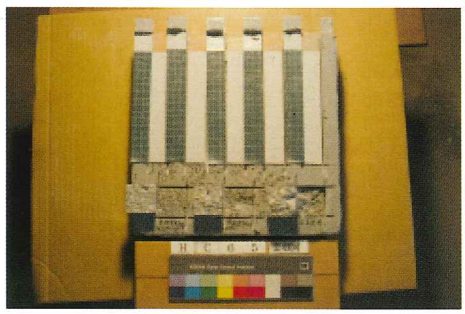
供試体６（ＨＡ）

HA	温冷水繰り返し浸漬後	引き剥がし試験後
0 回		
5 回		
10 回		
15 回		
20 回		

供試体６（ＨＢ）

HB	温冷水繰り返し浸漬後	引き剥がし試験後
0 回		
5 回		
10 回		
15 回		
20 回		

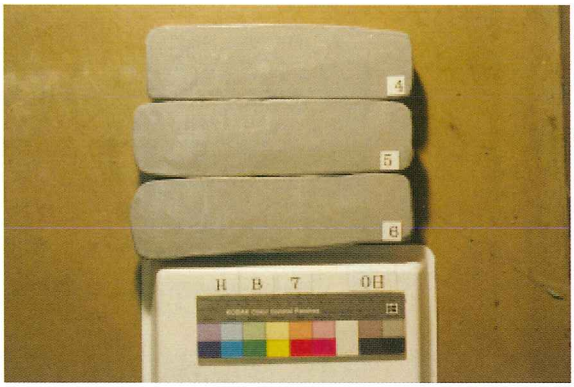
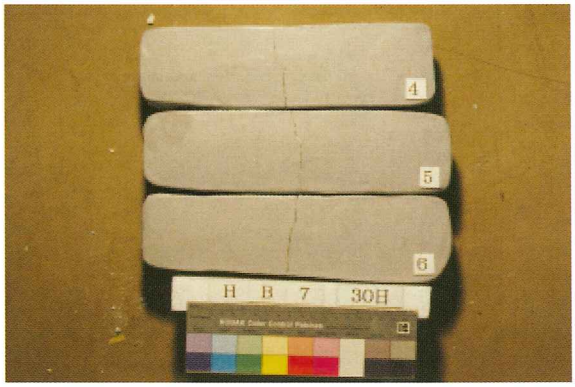
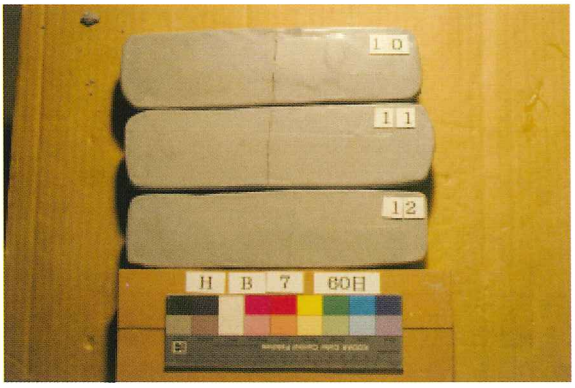
供試体６（ＨＣ）

HC	温冷水繰り返し浸漬後	引き剥がし試験後
0 回		
5 回		
10 回		
15 回		
20 回		

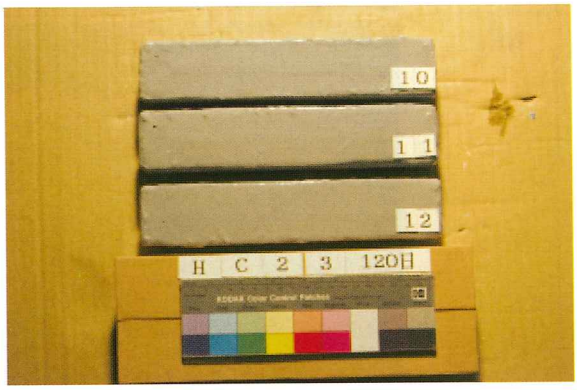
供試体７（HA）

HA	硫酸浸漬後	曲げ試験後
0日後		
28日後		
56日後		
120日後		

供試体７（ＨＢ）

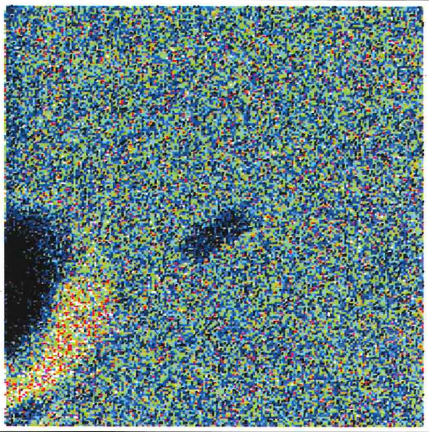
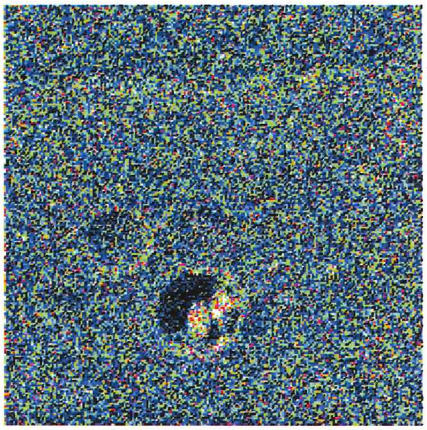
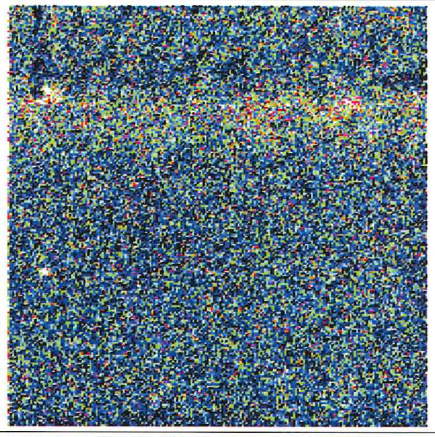
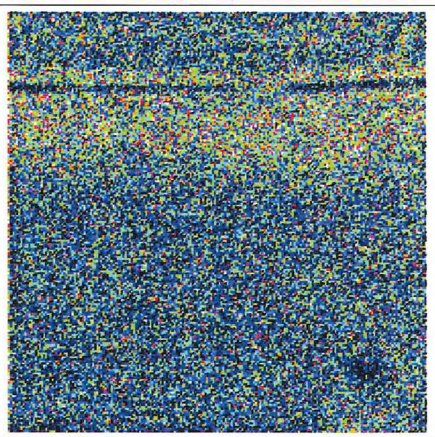
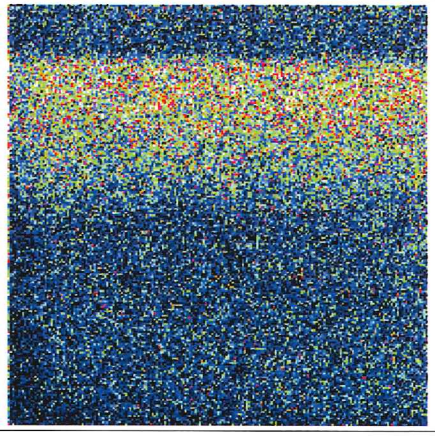
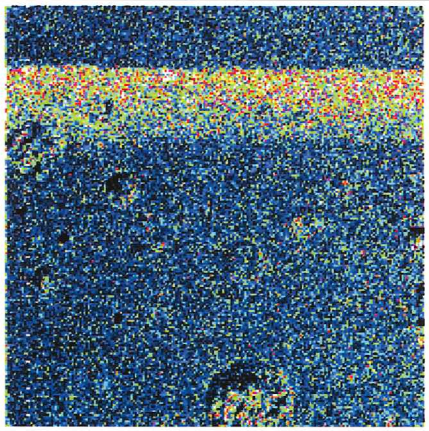
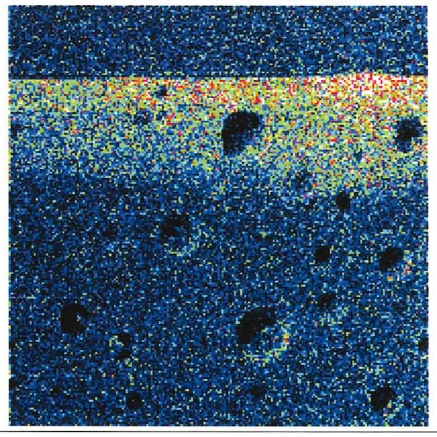
HB	硫酸浸漬後	曲げ試験後
0日後		
28日後		
56日後		
120日後		

供試体７（ＨＣ）

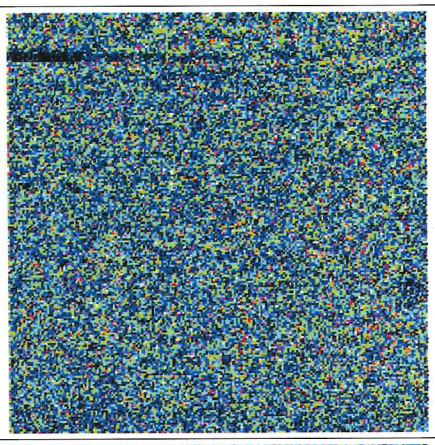
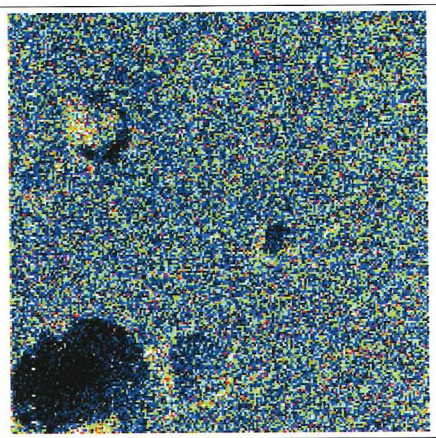
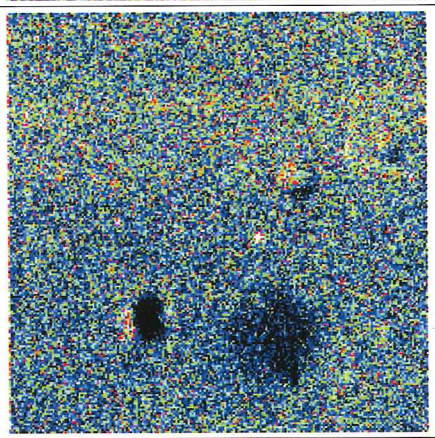
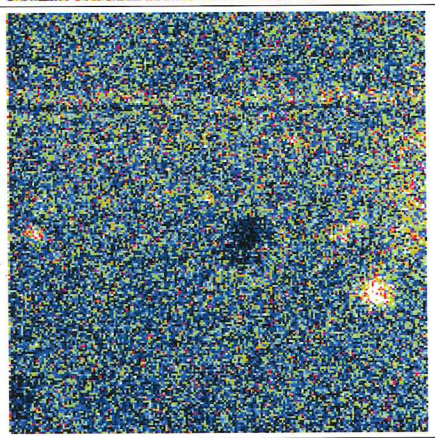
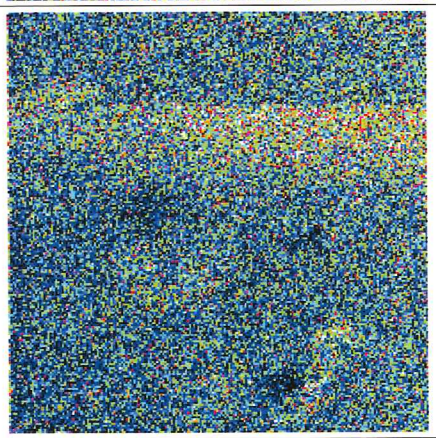
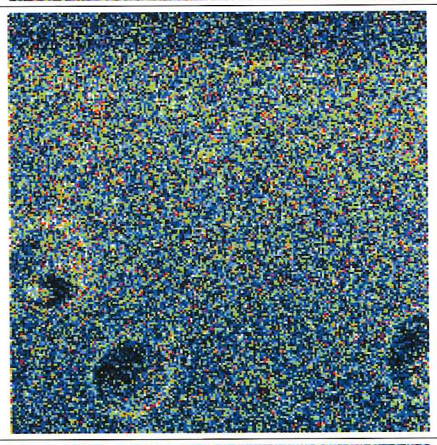
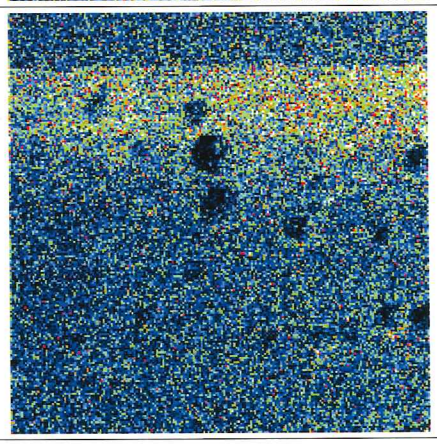
HC	硫酸浸漬後	曲げ試験後
0日後		
28日後		
56日後		
120日後		

資料２－６　塗膜断面の元素分析結果（硫黄元素マッピング）

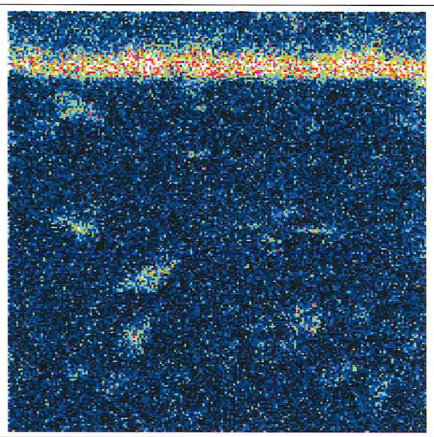
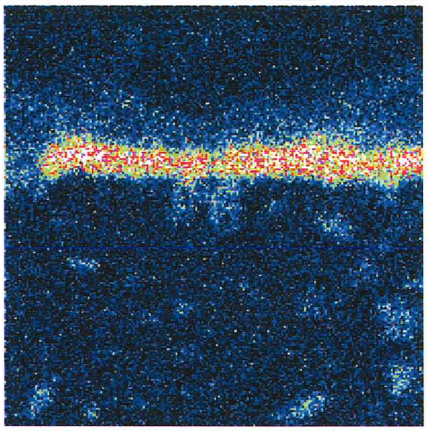
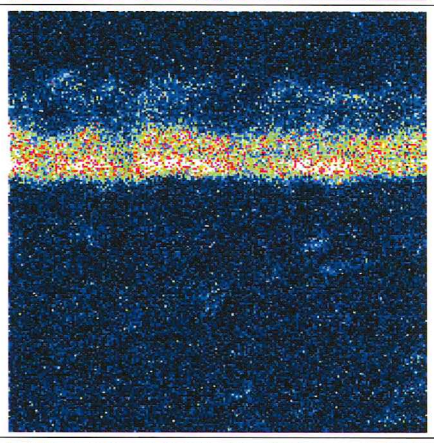
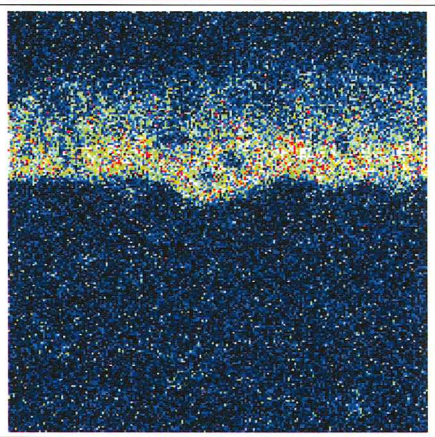
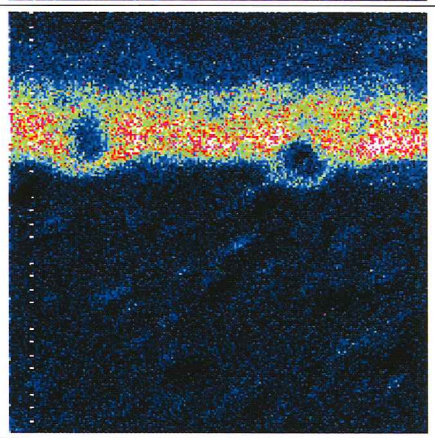
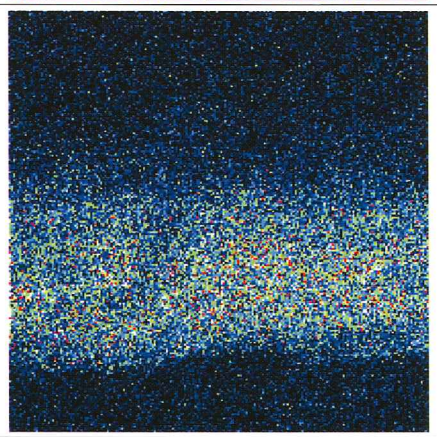
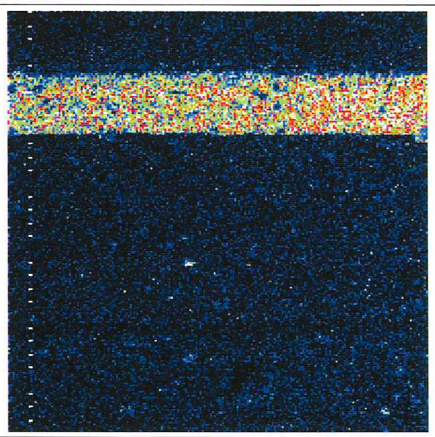
供試体１（ＤＡ）

DA	120 日浸漬後(23℃)		120 日浸漬後(40℃)
0.05%		0.05%	
0.5%		0.5%	
3%		3%	
		10%	

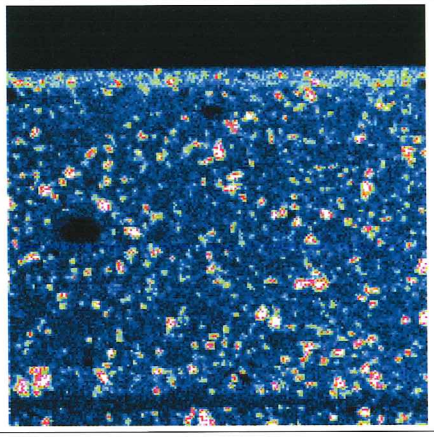
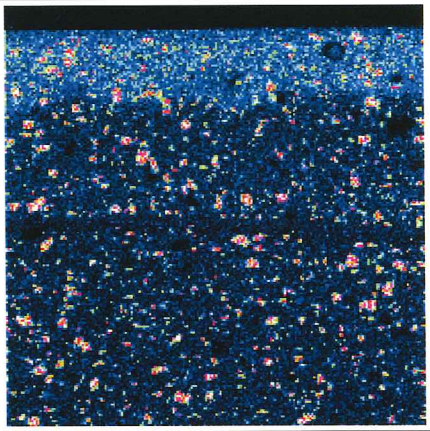
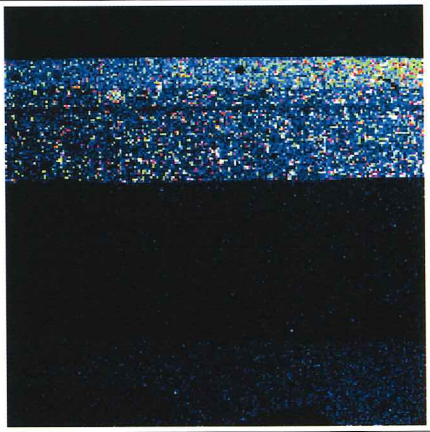
供試体１（ＥＡ）

EA	120 日浸漬後(23℃)		120 日浸漬後(40℃)
0.05%		0.05%	
0.5%		0.5%	
3%		3%	
		10%	

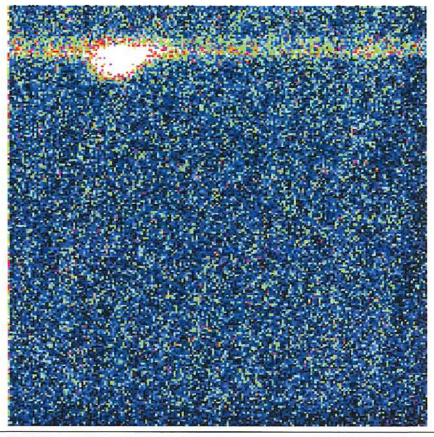
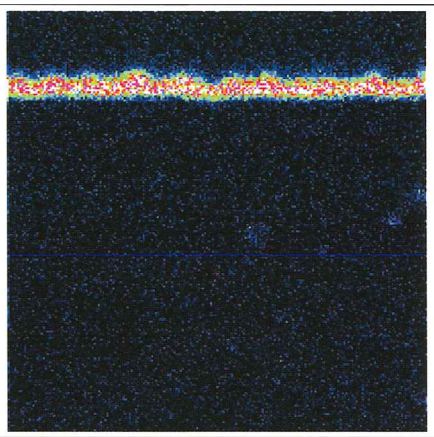
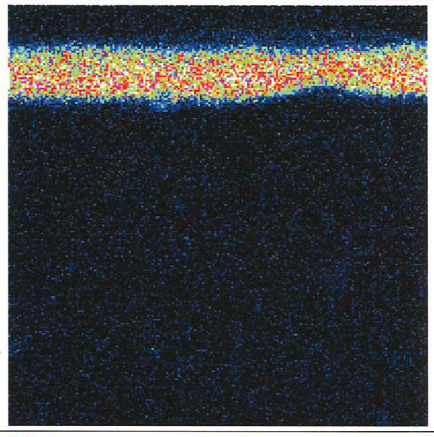
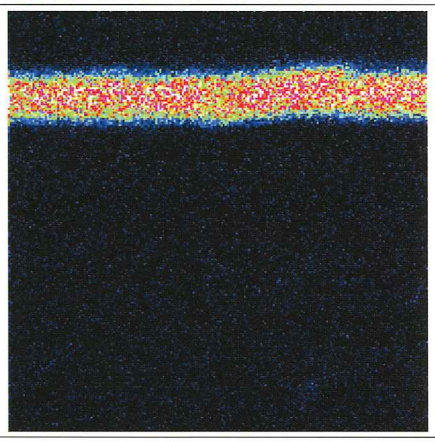
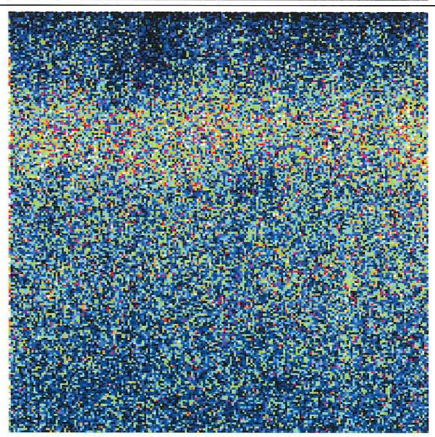
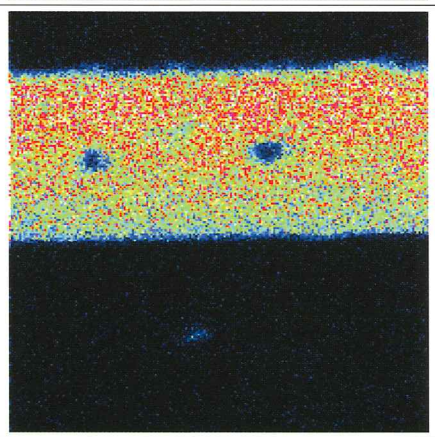
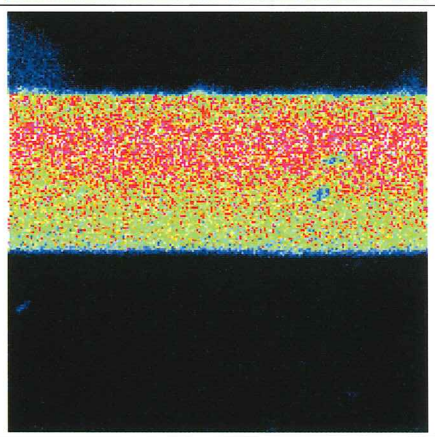
供試体１（ＦＡ）

FA	120 日浸漬後(23℃)		120 日浸漬後(40℃)
0.05%		0.05%	
0.5%		0.5%	
3%		3%	
		10%	

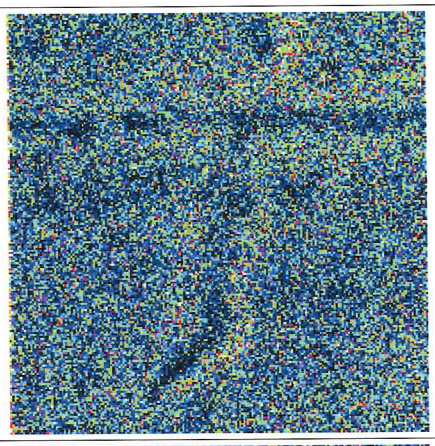
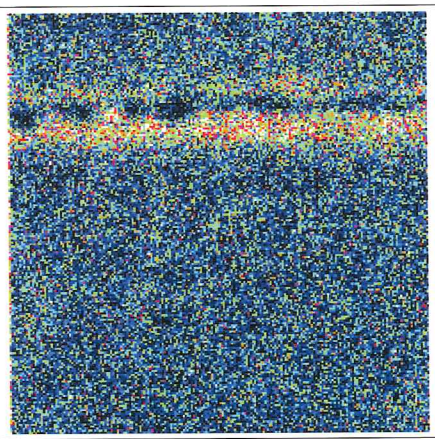
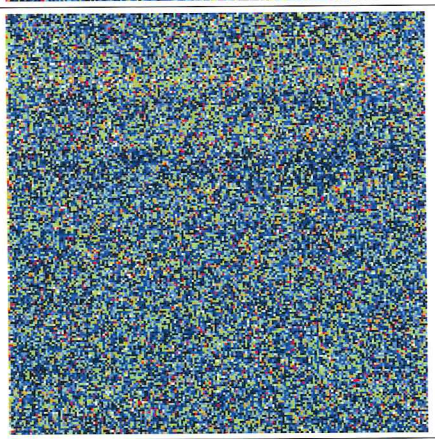
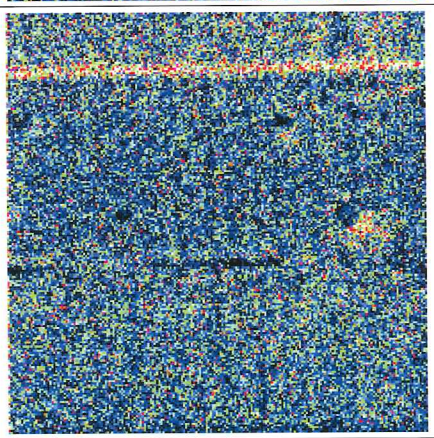
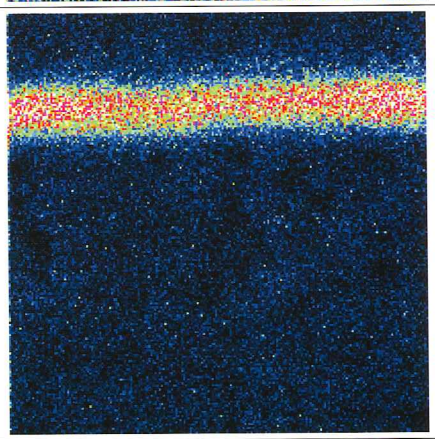
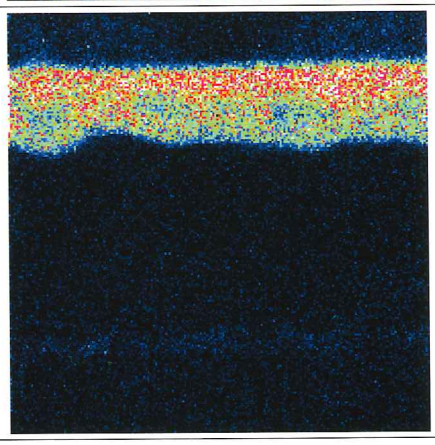
供試体１（ＨＡ）

HA	120 日浸漬後(23℃)		120 日浸漬後(40℃)
0.05%		0.05%	
0.5%		0.5%	
3%		3%	
		10%	

供試体１（ＨＢ）

HB	120 日浸漬後(23℃)		120 日浸漬後(40℃)
0.05%		0.05%	
0.5%		0.5%	
3%		3%	
		10%	

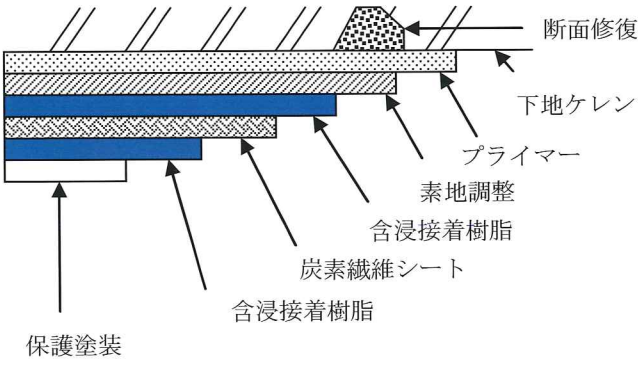
供試体１（ＨＣ）

HC	120 日浸漬後(23℃)		120 日浸漬後(40℃)
0.05%		0.05%	
0.5%		0.5%	
3%		3%	
		10%	

資料３　【第４編補足資料】炭素繊維シート工法について



資料３－１　炭素繊維シート（例）



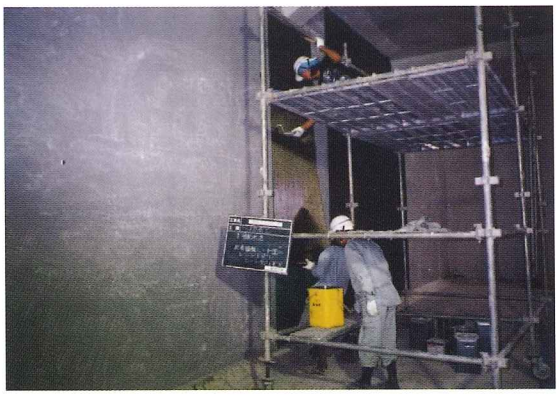
資料３－２　炭素繊維シート工法標準施工断面図



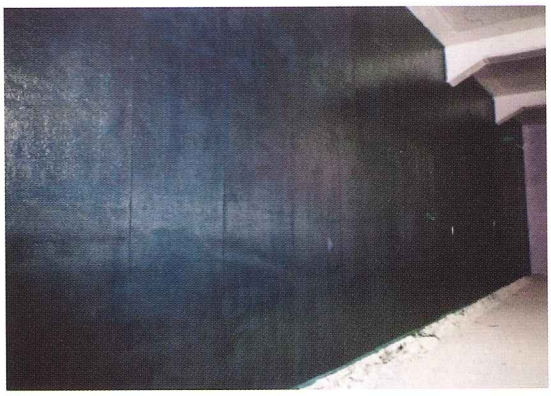
資料３－３　橋脚耐震補強事例



資料３－４　トンネル剥落対策事例



資料３－５　上水施設への炭素繊維シート貼付



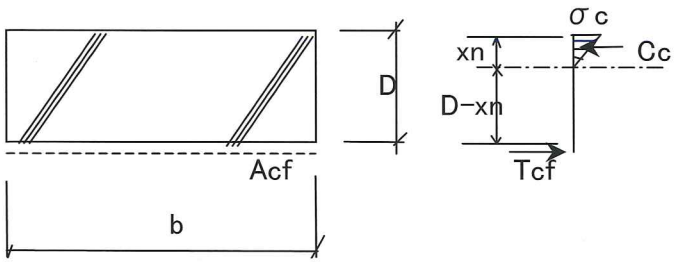
資料３－６　同左　貼付完了（保護塗装前）

資料３－７　ＨＣ試験体　硫酸浸漬１２０日後載荷時の応力推定

① 前提

・試験体破壊時の荷重から作用モーメントを算出し、その後材料の発生応力を算出する。
・弾性設計の範囲で検討を行う。

② 炭素繊維シート発生応力推定



計算仮定

・上図の応力状態を仮定して圧縮側モルタルの力と引張側炭素繊維の力が釣り合う中立軸を算出し、モルタル、炭素繊維の応力を算出する。

軸方向の釣り合い

$$T_{cf} = C_c$$

$$T_{cf} = A_{cf} \cdot n_{cf} \cdot \sigma_{cf} \cdot (D - x_n)/x_n$$

$$C_c = (b \cdot x_n/2) \cdot \sigma_{cf}$$

$$x_n = \frac{-(2A_{cf} \cdot n_{cf})^2 + \sqrt{(2A_{cf} \cdot n_{cf})^2 - 4b \cdot (2A_{cf} \cdot n_f \cdot D)}}{2 \cdot b}$$

$$I = \frac{b \cdot x_n^3}{3} + b \cdot x_n \cdot \left(\frac{x_n}{2}\right)^2 + n_f \cdot A_f \cdot (D - x_n)^2$$

$$\sigma_c = (M/I) \cdot x_n$$

$$\sigma_{cf} = n_{cf} \cdot (D - x_n) \cdot (M/I)$$

M = 102135 [N･mm]　→　 

$M = PL/4$
$= 1857 \times 220/4$
$= 102135$

b = 50 [mm]
D = 40 [mm]
A_{cf} = 1.11 [mm^2]　高強度 20 タイプ　0.111 [mm]×10 [mm] = 1.11 [mm^2]
E_c = 31000 [N/mm^2]
E_{cf} = 245000 [N/mm^2]
n_{cf} = 18.42　コンクリートのヤング係数は 13.3kN/mm^2 として算出
T_{cf} = 2671.95
C_c = 2671.95
x_n = 5.33 [mm]
I = 27102 [mm^4]
σ_c = 20 [N/mm^2]　← 圧縮側モルタル発生応力
σ_{cf} = 2407 [N/mm^2]　← 炭素繊維発生応力