



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	寒冷環境下のコンクリート構造物における補修効果の持続性評価に関する研究
Author(s)	内藤, 勲
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第14444号
Issue Date	2021-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k14444
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/81092
Type	doctoral thesis
File Information	Isao_Naito.pdf



北海道大学大学院工学院 博士学位論文

寒冷環境下のコンクリート構造物における
補修効果の持続性評価に関する研究

Study on Persistence of Repairs Effectiveness of Concrete
in Cold Environment

2021 年 3 月

北方圏環境政策工学専攻

ライフタイム工学研究室

内藤 勲

Isao Naito

目 次

第 1 章 序論	1
1.1 概論	1
1.2 研究の背景	1
1.3 積雪寒冷地における補修の問題点と既往の研究	2
1.3.1 断面修復工法の問題点と既往の研究	2
1.3.2 ひび割れ注入工法の問題点と既往の研究	5
1.4 研究の位置付けと本論文の構成	9
第 1 章の参考文献	11
第 2 章 断面修復箇所の界面の改善方法	13
2.1 概論	13
2.2 脆弱部の改善方法の概念	13
2.3 実験概要	14
2.3.1 劣化供試体の作製方法	14
2.3.2 浸透系塗布材の種類と性質	16
2.3.3 浸透系塗布材の塗布方法	17
2.4 劣化供試体の改善評価方法	18
2.4.1 超音波伝播速度の測定	19
2.4.2 曲げ試験	20
2.5 脆弱部改善後の効果持続性の評価方法	21
2.5.1 C D F 試験	22
2.5.2 超音波伝播速度の測定	22
2.5.3 透水試験	23
2.5.4 脆弱部の改善状態の内部観察	23
2.6 実験結果	24
2.6.1 超音波伝播速度による脆弱部の改善評価	24

2.6.2 曲げ試験	25
2.6.3 再凍結融解後のスケーリング量と超音波伝播速度	27
2.6.4 透水係数の変化	29
2.6.5 SEM観察による凍結融解前後の浸透系塗布材の浸透状態	30
2.7 まとめと考察	35
第2章の参考文献	37
 第3章 界面改善後の断面修復箇所の耐凍害性の向上	 38
3.1 概論	38
3.2 実験概要	38
3.2.1 補修供試体の作製方法	38
3.2.2 試験ケース	40
3.2.3 断面修復後の凍結融解試験方法	41
3.2.4 改善効果の評価方法	42
3.3 実験結果	44
3.3.1 改善深さと破壊位置の関係	44
3.3.2 最大付着強度	47
3.3.3 凍結融解作用による断面修復効果の持続性	49
3.4 まとめと考察	51
第3章の参考文献	52
 第4章 ひび割れ注入工法の耐久性評価	 53
4.1 概論	53
4.2 実験概要	53
4.2.1 ひび割れ注入後の耐久性実験の概要	53
4.2.2 模擬ひび割れ注入供試体の作製	54
4.2.3 ひび割れ注入材の種類と試験ケース	57
4.2.4 接着供試体の凍結融解試験（シリーズ1）	59
4.2.5 X線CT測定による注入後の凍害劣化試験（シリーズ2）	60

4.2.6 未充填接着供試体の凍結融解試験（シリーズ3）	62
4.2.7 暴露実験（シリーズ4）	63
4.3 実験結果	68
4.3.1 接着供試体の凍害劣化の進行（シリーズ1）	68
4.3.2 X線CT測定による凍害劣化の進行過程（シリーズ2）	70
4.3.3 未充填接着供試体の凍害劣化の進行（シリーズ3）	75
4.3.4 暴露実験結果（シリーズ4）	76
4.4 まとめと考察	82
第4章の参考文献	84
 第5章 ひび割れ充填工法の耐久性評価	 86
5.1 概論	86
5.2 実験概要	87
5.2.1 供試体の作製	87
5.2.2 ひび割れ充填材の種類	88
5.2.3 試験方法と試験ケース	88
5.2.4 接着引張試験方法	91
5.3 実験結果	92
5.3.1 接着引張試験による破壊形態	92
5.3.2 接着引張試験による最大引張応力と最大伸び率	95
5.3.3 接着引張試験結果の考察	97
5.3.4 暴露5年後の実験結果	98
5.4 まとめと考察	100
第5章の参考文献	101
 第6章 ひび割れ注入工法におけるひび割れ注入材の注入性状の評価	 102
6.1 概論	102
6.2 ひび割れ注入工法の補修方針	102
6.3 エポキシ樹脂系ひび割れ注入材の硬化前の性能	103

6.3.1 可使時間の算定方法	103
6.3.2 注入性能の評価方法	104
6.4 実験概要	105
6.4.1 可使時間の計測	105
6.4.2 粘度の計測	106
6.4.3 注入充填性試験	106
6.5 実験結果	109
6.5.1 各注入材の可使時間の算定	109
6.5.2 各注入材の粘度の経時変化	111
6.5.3 注入面積速度と充填率	112
6.6 低温環境における注入材の性能評価	116
6.6.1 注入面積速度と補正係数の算出	116
6.6.2 硬化までの到達距離の算出	118
6.6.3 低温環境における注入充填性の事前評価の一例	120
6.7 まとめと考察	121
第6章の参考文献	123
 第7章 析出物のあるひび割れへのひび割れ注入方法の提案	 124
7.1 概論	124
7.2 析出物のあるひび割れの補修の現状と問題点	124
7.3 クロスカットによるひび割れ表面の閉塞状態の調査方法の提案	126
7.3.1 閉塞状態の調査方法の検討	126
7.3.2 閉塞状況調査概要	127
7.3.3 調査結果	129
7.4 クロスカット注入口によるひび割れ注入方法の提案	130
7.4.1 クロスカット注入口による注入方法の提案	130
7.4.2 クロスカット注入方法の試験施工概要	130
7.5 試験施工の結果と考察	134
7.6 まとめと考察	137
第7章の参考文献	138

第 8 章 総括	139
8.1 各章で得られた研究成果の要約	139
8.2 研究成果の社会への還元	140
8.3 今後の課題	141
8.3.1 脆弱部を改善した断面修復手法の品質管理方法の検討	141
8.3.2 寒冷地域における早期補修対策への新たな手法の開発	142
第 8 章の参考文献	142
謝辞	143

第 1 章

序論

第 1 章 序論

1.1 概論

第 1 章では、本研究の導入部として、研究の背景となったコンクリート構造物の既存ストックの増加に伴う補修後の早期再劣化の問題、ならびに、現在までの補修工法における実務上の問題点と既往の研究、および本研究の位置付けについて述べる。

1.2 研究の背景

1960 年代以降の高度経済成長期に数多く建設されたコンクリート構造物の老朽化問題は、2012 年（平成 24 年）の中央自動車道笹子トンネル天井板落下事故によって世論に大きな衝撃を与えて顕在化した。その翌年には「社会資本メンテナンス元年」として位置付けられ、同年に「インフラ長寿命化基本計画」が策定され、以降、社会資本の戦略的な維持管理・更新の推進により、既設コンクリート構造物の補修や補強、建替工事等が多く実施されている。

一方で、早期に補修箇所が再劣化する等の不具合は従前から補修後の問題点のひとつであり、補修工事の重要性が見直されたことから、従前では経過観察で見送っていた不具合事例等も現在では早期に検討・対策を講じる状況となっている。しかしながら、このような不具合事例への対策は補修のやり直しであり、本来であれば不具合がない耐久性のある補修となることが望ましい。このような不具合が生じる要因として考えられることは、現行の補修指針（案）では補修効果や耐久性等が明確ではないこと、新たな補修工法や補修材料が開発されていること等があげられる。

現行の補修指針（案）は、1970 年代に塩害やアルカリシリカ反応によって劣化したコンクリート構造物に対する対策として、旧建設省が 1985～1987 年度に実施した建設省総合技術開発プロジェクト「コンクリートの耐久性向上技術の開発」（以下、総プロ）において報告した補修指針（案）である¹⁾。その後、学会等からコンクリートの補修に関する指針類も多く出ているが、そのほとんどが総プロに準拠しており、この補修指針（案）が現在の補修方法の唯一の基本指針となっている。しかしながら、適切な補修工法や材料の選定方法、適切な補修による耐久性の確保、あるいは補修後の再劣化等に対する抑制対策等には不明確な点が多いため、コンクリート構造物の補修は古くから行われているが、積雪寒冷地のコンクリート構造物のように厳しい寒冷環境下に置

かれた場合には、設計時の想定を超えた劣化が進行する事例が散見される。

平成 28 年（2016 年）に国立研究開発法人土木研究所にて、総プロの補修指針（案）を補足する位置付けで「コンクリート構造物の補修対策施工マニュアル（案）」が作成された。このマニュアル（案）では、補修の不具合事例を教訓として、補修に関わる基本理念と各補修工法における選定・施工・品質管理の留意点を整理しており、本研究成果の一部もこのマニュアル（案）にすでに掲載している。しかし、積雪寒冷環境における補修対策に関する課題はまだ多く残されている。

このような背景から、本研究では、補修後の再劣化事例が多い寒冷環境において、断面修復工法の新たな手法として提案しているコンクリート界面の脆弱部を改善した断面修復箇所の耐久性の向上技術、およびひび割れ修復工法の再劣化原因と材料特性評価による適切な品質確保方法について検討した。また、実際の現場におけるひび割れ修復工法の選定時の問題点を解決するための新たな注入手法の提案も行った。

1.3 積雪寒冷地における補修の問題点と既往の研究

1.3.1 断面修復工法の問題点と既往の研究

断面修復工法は、コンクリートの劣化や鋼材の腐食等によって欠損したコンクリート断面、または、許容限度以上の劣化因子を含むコンクリート部分を除去し、その後の断面を供用開始時の性能および形状、寸法に戻す工法である。断面修復工法は積雪寒冷地においても古くから使用されているが、厳しい寒冷環境では断面修復箇所の剥離等が発生する再劣化事例が多い。この再劣化の一因として、既存コンクリートの凍害劣化の進行による断面修復材との接着力の低下があげられる。例えば、過去の研究におけるコンクリート構造物の現地調査から、図-1.3.1 に示す橋梁地覆の断面修復箇所が剥離・剥落した再劣化事例や、図-1.3.2 に示す樋門コンクリートの断面修復箇所が表面被覆材と一緒に徐々に剥離・剥落した再劣化事例は、断面修復材の収縮等によるひび割れの発生、断面修復内部の既存コンクリートの劣化進行によってコンクリートと断面修復材との接着力が弱まり剥離に至ったことを確認している²⁾。図-1.3.3 は図-1.3.2 の樋門の管理橋台の再劣化が進行して管理橋を支えきれなくなり、補修から 15 年後に管理橋が傾倒した事例である。この再劣化が進行した原因は、コンクリート界面の劣化部分の除去不足および除去しきれず残存した脆弱部を適切に処理しないで断面修復をしたこと、断面修復材によって内部に水分が蓄積したこと、および異なる熱膨張係数の断面修復材の温冷乾湿繰返しにより再劣化が促進された



図-1.3.1 橋梁地覆の断面修復箇所の再劣化事例²⁾

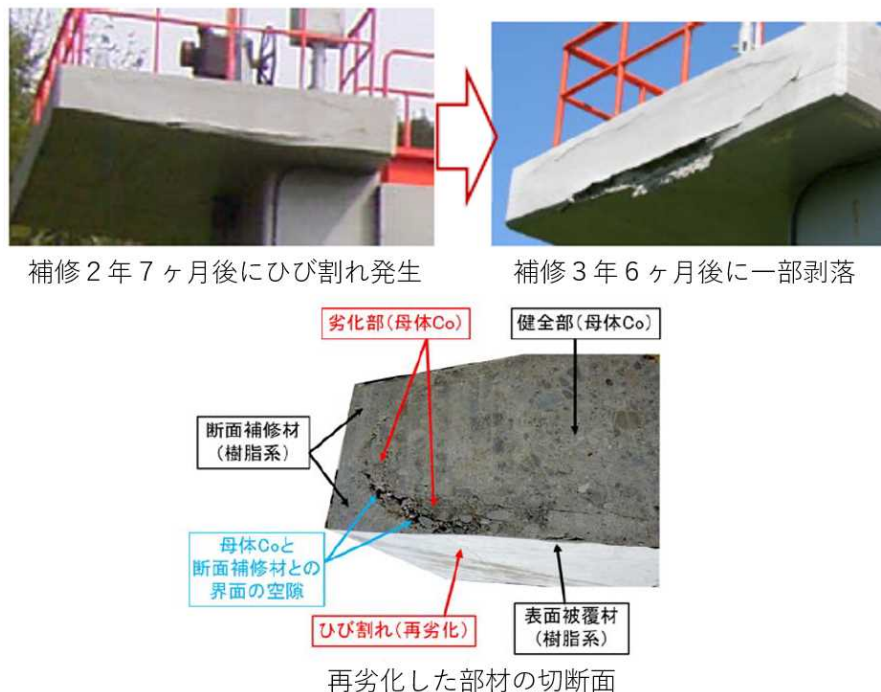


図-1.3.2 樋門コンクリートの補修箇所の再劣化事例²⁾

ことである。図-1.3.4 は別の樋門操作台の断面修復材の内部状態を超音波トモグラフィー法による超音波伝播速度変化分布で示した経年調査結果²⁾であるが、凍害劣化によってコンクリートと断面修復材との界面剥離が徐々に拡大していく様子がわかる。これらの事例のように、断面修復箇所のコンクリート界面の処理を誤ると、厳しい寒冷地域等では早期に再劣化が生じてしまう。

コンクリート界面の劣化部の除去は、電動ピックやコンクリートブレイカーを用いるのが一般的であるが、打撃によって健全部のコンクリートも損傷してしまうことから、ウォータージェットによる除去工法が開発されている³⁾。既往の研究では、ウォータージェット工法によって劣化



図-1.3.3 再劣化による樋門の管理橋の傾倒事例

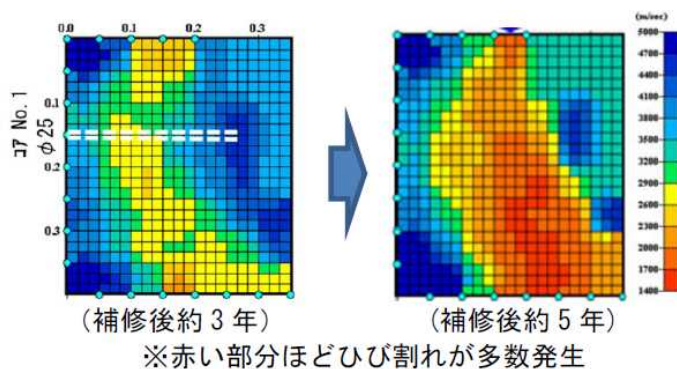


図-1.3.4 コンクリートと断面修復材との界面剥離が経年拡大する調査事例²⁾
(超音波トモグラフィー法による超音波伝播速度分布)

部を除去して断面修復した箇所は、耐凍害性が向上して接着耐久性も持続することが確認され⁴⁾、道路橋梁の上部工の断面修復ではウォータージェット工法による除去が一般化されている。しかし、ウォータージェット工法は、装置が大がかりで費用が高いことから小規模な断面修復には不向きであり、条件によっては必ずしも接着耐久性が持続するわけではない。この改善策としてコンクリートと断面修復材との接着力を有機系接着剤や剥落防止アンカー、建築ではピンネット工法等で強化する手法が提案されている⁵⁾。既往の研究において、渡邊らは、打撃によってはつり処理したコンクリート界面にエポキシ樹脂系接着剤を用いることで断面修復材とコンクリートとの接着強度が大きくなること、エポキシ樹脂系接着剤に有機溶剤を用いて低粘度化することで微細ひび割れに浸透可能となることを確認し、これを用いてコンクリート界面の脆弱部や微細ひび割れを補修する方法を提案している⁶⁾⁷⁾。なお、この既往研究が本研究において検討・提案してい

る脆弱部の改善手法の原形であり，この低粘度化させたエポキシ樹脂系接着剤は本研究においても使用している．また，断面修復材とコンクリートとの接着性や耐久性に関する既往の研究は多数あり，そのほとんどが断面修復材に含有するポリマーの性能，打継ぎ目の処理方法，吸水調整プライマーの性能（ドライアウト防止）等の接着性能に関する研究である．しかし，これらの既往研究は 20℃ 前後の温度環境における実験が大多数であり，寒冷環境における断面修復箇所の接着耐久性や耐凍害性，補修後の効果の持続性については検討されていない．

1.3.2 ひび割れ注入工法の問題点と既往の研究

ひび割れ注入工法は，ひび割れからの劣化の進行を抑える目的で，ひび割れ内部に樹脂系材料やセメント系材料を注入してひび割れを閉塞させる補修方法である．この補修工法は注入材がひび割れ内部に十分に充填されることが前提となる⁸⁾．しかしながら，実際のひび割れ注入工事において，図-1.3.5 および図-1.3.6 に示すように，低温環境下では注入箇所から早期に漏水やエフロレッセンス等の析出物が再発する事例が多く報告されている．図-1.3.5 は樋門の縦壁に発生したひび割れを注入した補修箇所から漏水している事例である．この注入補修は渇水期まで施工を延ばして左右の排水管からの排水がなくなり，ひび割れ内部がほぼ乾燥した状態で 10 月後半に実施しているが，この構造物は道北地方にあるため 10 月後半はかなり気温が低下する時期であるが防寒囲いは実施されていない．寒冷地域におけるひび割れ注入作業では，一般的な施工環境の最低温度である 5℃ 前後での施工も通常実施されており，防寒費が計上されない 10 月では 5℃ 以下であっても防寒囲いを使用しない事例がみられる．



図-1.3.5 ひび割れ注入による補修後の不具合再発事例 1



図-1.3.6 ひび割れ注入による補修後の不具合再発事例 2⁹⁾

このような低温環境で注入作業を行った場合、樹脂系注入材の粘度は高くなって流動性が悪くなるため、部材厚の大きいコンクリート構造物のひび割れは奥まで注入材が充填されない可能性があり、その未充填部の影響によって縦壁の背面から浸透した水による凍害の再劣化が生じたと考えられる。また、図-1.3.6 も樋門の翼壁のひび割れに注入した補修箇所から漏水と析出物が発生した事例⁹⁾である。この事例も 10 月後半に施工しているが前述した事例とは異なり、この不具合は設計注入量が少ないために人為的に未充填状態となったことが原因である。部材厚 300mm の貫通ひび割れに対して設計注入量は深さ 100mm 分の計算量であり、実際の注入作業においても深さ 100mm 相当の注入量で施工されていた。

このような注入材の未充填による不具合事例を確認するため、過去の研究において、北海道の 9 月～12 月に施工した実際のひび割れ注入工事におけるひび割れ注入後の充填確認調査、およびひび割れ注入材の選定理由と施工時の品質管理方法についてアンケート調査を行っている。その結果、図-1.3.7 に示すように、寒い時期になるほど注入材の充填率が低いケースが多く発見され、低温の影響によって十分な注入がなされていない現状が明らかになった¹⁰⁾、また、図-1.3.8 に示すように、材料選定理由では経済性や材料性能のほか、実績が多い、上部工や下部工のため等のひび割れの状態に応じた選定がなされていない実状が確認された¹¹⁾。また、品質管理方法においても、注入量の管理が 6 割程度にとどまる等、十分な管理が行われていない実態もあった。これらの問題点は、30 年ほど前に作られた総プロにおける補修技術指針が、その後、国土交通省として新たに整理・更新されていないこと、また、低温環境における材料選定や施工技術、品質管理方法が未だ確立していないことが原因と思われる。

ひび割れ注入工法の品質管理における最大の問題点として、ひび割れ内部に充填されたひび割れ注入材の充填状態を容易に確認する手段がないことがあげられる。ひび割れ注入工法はひび割

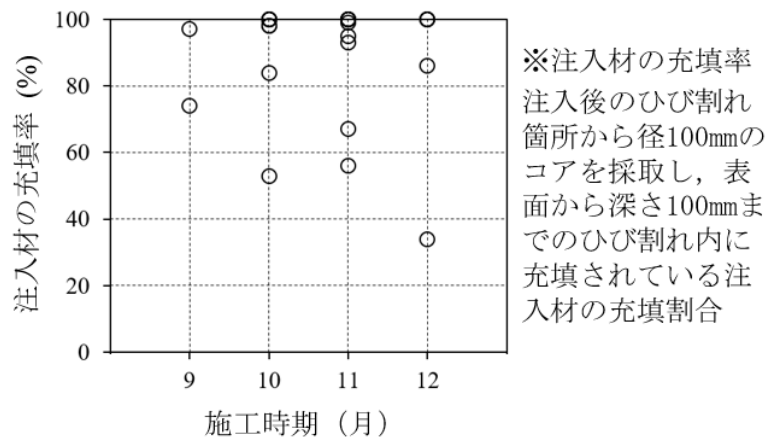


図-1.3.7 ひび割れ注入工事における施工時期と注入材の充填率の関係¹⁰⁾

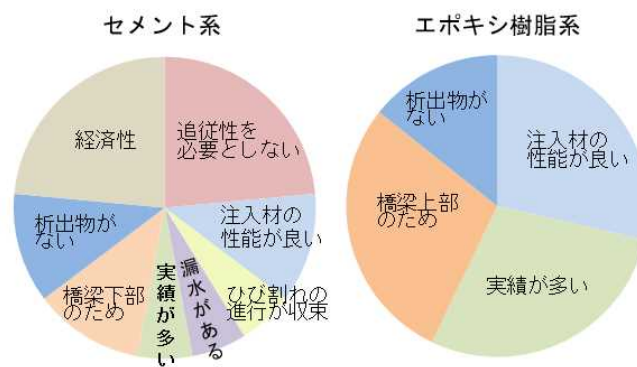


図-1.3.8 ひび割れ注入材の選定理由¹¹⁾

れ内部に直接対策を施すことから、断面修復工法や表面被覆工法のように補修後に補修材や補修箇所を簡単に目視できる状態になく、補修後の品質確認と充填不良への対応は非常に困難である。注入状態を確認する方法としてコア削孔による確認方法はあるが、規模の大きい土木コンクリート構造物では、対象ひび割れの大きさや深さ、位置によって確実に検査できないケースも出てくる。実構造物のひび割れを調査した過去の研究結果において、ひび割れは内部で屈曲していることが多く、径 100 mm のコア削孔では深さ約 200 mm 程度が検査深さの限界であり定量的に検査可能な深さは 100 mm 程度であることを確認している¹²⁾。注入確認を行った既往の研究では、深町らの内視鏡カメラによる注入確認の研究¹³⁾や山口らの超音波による注入確認の研究¹⁴⁾があるが、確認できる注入深さは 100 mm から深くても 300 mm 程度までであり、部材厚が大きい土木構造物では奥まで確認できない。このことから、ひび割れ注入工法の品質管理は、従来、表面ひび割れ幅とひび割れの規模によって粘性や流動性、可使時間等が異なるひび割れ注入材を適用し、

必要注入量を管理することでひび割れ内部に確実にひび割れ注入材が充填される，というみなし規定が用いられてきた．しかし，ひび割れ注入材の選定方法や注入条件もしくは注入時の留意点について整理されている技術資料はなく，前述したように，ひび割れ注入材の未充填が原因と思われる注入後の漏水や析出物等による再劣化が生じている事例も多く散見される．これらの不具合はひび割れの状態に応じた適切な施工等が行われなかった可能性がある．

このような問題等を解決すべく，ひび割れ注入工法の注入性の評価を試みた既往の研究がいくつかある．上村らはひび割れ幅と粘度と注入圧の関係から注入時の面積速度式や注入速度式を提案している¹⁵⁾．この注入面積速度の関係式を用いて，瀬野らはひび割れ内面の粗さをフラクタル次元で定量的に表して注入時間と注入量の予測を¹⁶⁾，西脇らはセメント系補修剤の浸透距離の予測を¹⁷⁾，毛利らは可視化試験体においてひび割れ注入材の粘性とひび割れ幅の影響による広がりや垂れについての評価を行っている¹⁸⁾．また，エポキシ樹脂系補修材の補修後の耐久性を実構造物と暴露試験体によって長年調査している原爆ドーム保存工事がある(図-1.3.9)．エポキシ樹脂系材料は1938年にスイスのピエールカスタンが開発してから，1962年に日本国内で紹介され，1967年に第1回原爆ドーム保存工事で使用されている．この保存工事において，建造物の補修箇所調査と暴露試験体の調査を20年後と30年後に実施しており，樹脂の注入箇所においては充填不足等により再補修を行っているが，エポキシ樹脂補修材の圧縮強度や曲げ強度等はほとんど変化がなく健全であることが証明されている¹⁹⁾²⁰⁾²¹⁾．

しかしながら，これら既往の研究は20～23℃の温度環境もしくは低温ではない環境における実験結果であり，厳しい低温環境におけるひび割れ注入材の初期粘度や硬化反応過程における粘度の変化，および耐久性等は検討されていない．



第1回原爆ドーム保存工事



第2回原爆ドーム保存工



暴露試験状況

図-1.3.9 原爆ドーム保存工事²¹⁾

1.4 研究の位置付けと本論文の構成

前述したように、既存ストックの増大と言うコンクリート構造物の社会的情勢も踏まえた背景により、積雪寒冷地のコンクリート構造物の補修工事における早期再劣化の問題は表面化した。その抜本的な対策については未だ発展途上である。平成 28 年にコンクリート構造物の補修対策施工マニュアル（案）が発刊され、全国的に補修対策への見直しは進められてきており、今後、寒冷環境における補修対策・検討を効率的に進めていくためには、各種補修工法における問題点を洗い出し、新たな品質向上技術や評価技術の開発が必要となってくる。

本研究は、平成 20 年度からコンクリートの補修の再劣化と耐久性に関する研究を進めてきた。本論文は、平成 27 年度までの研究成果を含めて平成 28 年度から令和 2 年度までに実施した研究成果をとりまとめたものである。

本論文では、コンクリート構造物の補修工法において、使用頻度が最も多い補修工法で再劣化事例も多く報告されている断面修復工法とひび割れ修復工法に焦点を当て、寒冷環境下における補修箇所の耐凍害性の向上と補修効果の持続性を評価することを目的とした以下の検討を行った。

断面修復工法では、再劣化の一因であるコンクリート界面の脆弱部を改善して断面修復する技術手法による断面修復箇所の耐凍害性の向上について検証し、その技術手法の適用性と有効性について検討した。また、ひび割れ修復工法では、主にひび割れ注入工法の未充填による再劣化発生に関する検証を行い、低温環境における注入材の粘性変化や温度変化の詳細な把握による注入充填性の定量評価を検討し、さらに、析出物のあるひび割れへの注入手法の提案とその有効性について検討を行った。

本論文の構成は以下のとおりである。

第 1 章では、本研究の背景と目的、既往の研究について説明した。

第 2 章と第 3 章は、断面修復工法について説明した。

第 2 章では、断面修復材がコンクリート界面付近から早期に剥離する再劣化問題に対して、接着耐久性の向上を目的に、再劣化の一因であるはつり後のコンクリート界面に残存する劣化部分やはつりの打撃による新たな損傷部（以下、脆弱部）を改善する手法とその有効性について検討した。脆弱部を改善する方法として、コンクリート界面に浸透系塗布材を浸透させて固化・硬化させることで脆弱部の緻密化を試みた。有効性を評価する実験では、改善の有無や緻密化によって改善された状態を評価するため、コンクリート界面の脆弱部を模擬した供試体に数種の浸透系塗布材を浸透させ、超音波伝播速度、曲げ強度、透水係数、走査型電子顕微鏡の測定を行い、浸透系塗布材による脆弱部の改善効果と効果の持続性について評価した。

第3章では、第2章の実験結果を基に、コンクリート界面の脆弱部を浸透系塗布材で改善した状態で断面修復材を施工した断面修復箇所の耐久性（耐凍害性）と補修効果の持続性について検討した。耐凍害性と持続性を評価する実験では、断面修復を施した供試体において、凍結融解前後における超音波伝播速度と付着強度の測定、および接着状態の評価を行い、コンクリート界面の脆弱部を改善した後に断面修復する手法の補修効果とその持続性について評価した。

第4章から第7章までは、ひび割れ修復工法について説明した。

第4章では、ひび割れ注入工法によって補修されたコンクリートの耐久性、特に凍害および凍害と塩害の複合作用に対する耐久性（耐凍害性）について、ひび割れ注入材の未充填が再劣化の発生・進行に及ぼす影響や劣化が進行するメカニズムを実験的に検証した。検証実験では、ひび割れ注入材の未充填を模擬した供試体において、凍結融解前後の超音波伝播速度とX線CT解析によって凍害劣化の進行状態の確認を行い、さらに、実環境における暴露実験において、暴露2.5年と暴露5年の超音波伝播速度、自然電位、曲げ強度、および塩化物イオン量を測定して、ひび割れ注入による補修効果とその持続性について評価した。

第5章では、ひび割れ充填工法によって補修されたコンクリートの凍結融解前後の耐久性及び接着性の変化を検証した。H型供試体に凍結融解作用を与えた後の接着引張試験と、Uカット充填箇所の接着耐久性等の品質確認方法はないことから独自に考案した引張用クリップを用いた接着引張試験の結果比較から、ひび割れ充填後の耐凍害性と接着耐久性について評価した。また、暴露実験において、暴露5年の補修供試体における目視による状態変化の確認と塩化物イオンの浸透状態の確認を行った。

第6章では、第4章で検証・確認した、ひび割れ注入材の未充填部が凍害劣化の発生に影響することから、注入時の未充填を防止するためのひび割れ注入材の注入性能に関する検討を行った。環境温度に影響されやすいエポキシ樹脂系ひび割れ注入材の粘度変化等の材料特性を詳細に把握し、異なる温度環境における注入充填性試験の結果から、既往の注入面積速度式が低温環境においても適用可能かを検討した。

第7章では、ひび割れ補修工事において工法選定の問題が生じる、析出物のあるひび割れへの対処方法について、析出物によるひび割れ閉塞状況の簡易な調査方法と析出物のあるひび割れへの新たな注入手法を提案した。実構造物による試験施工によって、その適用性と有効性を確認した結果を述べる。

第8章では、各章で得られた知見を要約し、本論文を総括するとともに、今後の課題を示す

第 1 章の参考文献

- 1) 建設省総合技術開発プロジェクト・コンクリートの耐久性向上技術の開発報告書＜第一編＞＜第二編＞：建設省，1988.
- 2) 国立研究開発法人土木研究所：コンクリート構造物の補修対策施工マニュアル（案），土木研究所資料第 4343 号，V 不具合事例集，p.V-24，pp.V-27-28，p.V-30，2016.
- 3) 三田村浩，西弘明，吉田英二，野田直史：積雪寒冷地におけるウォータージェット工法の有効性とその適用について，2009 年度ウォータージェット技術年次報告会論文集，pp.55-60，2010
- 4) 宮川智史，三田村浩，西弘明：打継ぎ界面の構造的評価（コンクリートの長寿命化に向けた予防保全），平成 22 年度 第 54 回 北海道開発技術研究発表会，HP 掲載，2011
- 5) 国立研究開発法人土木研究所：コンクリート構造物の補修対策施工マニュアル（案），土木研究所資料第 4343 号，III 断面修復工法編，p.III-16，2016.
- 6) 渡邊晋也，堀井久一，後藤昭彦：ブレーカではつり処理を行ったコンクリート界面のエポキシ樹脂系接着剤を用いた補修方法に関する実験的研究，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第 12 巻，pp.45-48，2012.
- 7) 渡邊晋也，堀井久一，谷倉泉，後藤昭彦：コンクリート打継面の内部に生じた脆弱部および微細ひび割れの補修方法に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.1660-1665，2012.
- 8) 国立研究開発法人土木研究所：コンクリート構造物の補修対策施工マニュアル（案），土木研究所資料第 4343 号，I 共通編，p.I-16，2016.
- 9) 国立研究開発法人土木研究所：コンクリート構造物の補修対策施工マニュアル（案），土木研究所資料第 4343 号，V 不具合事例集，pp.V-35-36，2016.
- 10) Naitoh, I., Shimata, A. and Mihara, N.: Study on the filling ability of crack injection into concrete in a cold snowy region, *The 6th International Conference of Asian Concrete Federation*, USB stick, 2014.
- 11) 村中智幸，内藤勲，島多昭典：ひび割れ修復工法の選定および施工実態に関する調査，平成 25 年度 第 57 回 北海道開発技術研究発表会，HP 掲載，2014.
- 12) 内藤勲，田口史雄：小径コアによるひび割れ注入後の充填評価方法に関する検討，土木学会第 68 回年次学術講演会，V-390，2013.
- 13) 深町卓也，原田耕司，伊藤幸広：構造物検査用内視鏡を用いたひび割れ注入管理技術の開発，コンクリート工学年次論文集，Vol. 33，No. 2，pp.1519-1524，2011.
- 14) 山口岳思，鎌田敏郎，寺田孝，六郷恵哲：超音波によるコンクリートひび割れ注入材の充填確認方法，コンクリート工学年次論文集，Vol. 27，No. 1，pp.1681-1686，2005.
- 15) 上村克郎，小西敏正，橘高義典：鉄筋コンクリート造のひび割れ補修における樹脂の充填程度の数

式化，セメント技術年報 42，pp.491-494，1988.

- 16) 瀬野康弘，魚本健人：ひび割れ注入補修における注入時間と注入量の予測に関する基礎的研究，土木学会論文集 E，Vol. 64, No. 1, pp.160-172, 2008.
- 17) 西脇智哉，三橋博三，郡司幸弘：ひび割れへの補修剤浸透に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 30, No. 2, pp.637-642, 2008.
- 18) 毛利聡，大久保孝昭：可視化試験体を用いたひび割れ補修材の注入性状の評価技術，日本建築学会技術報告集，第 21 巻，第 47 号，pp.29-34, 2015.
- 19) 沢出稔，池谷純一，森光作，丸一俊雄：原爆ドーム保存工事に使用したエポキシ樹脂の満 20 年経過後の物性試験 その 2 試験結果，日本建築学会学術講演梗概集，pp.391-392, 1989.
- 20) 沢出稔，池谷純一：原爆ドーム保存工事に用いられたエポキシ樹脂の満 30 年経過後の物性試験結果，日本建築学会学術講演梗概集，pp.493-494, 1998.
- 21) 稲妻充倫：エポキシ樹脂による構造物補修補強について，一般社団法人帯広建設業協会平成 27 年度建設工事における技術講習会テキスト，2017.

第 2 章

断面修復箇所 の 界面の改善方法

第2章 断面修復箇所の界面の改善方法

2.1 概論

第2章では、断面修復箇所に再劣化が生じる原因の一つである断面修復箇所のコンクリート界面に残存する脆弱部に着目し、完全に除去することが難しい界面の脆弱部に浸透系塗布材を塗布することによって性能を改善させる検討を行った。本章では、その改善方法の概念と脆弱部を模擬した供試体を用いた検証実験の結果について述べる。

2.2 脆弱部の改善方法の概念

コンクリート構造物に生じた損傷や劣化部分を補修して延命化させる対策の一つである断面修復工法は、コンクリートの劣化箇所を劣化因子ごと除去して断面修復材で原形に復元する工法であり、既存コンクリート構造物の補修に非常に多く適用されているが、厳しい寒冷環境下では、断面修復した箇所が早期に剥離する等の不具合も多く散見される¹⁾。この原因の多くは、はつり作業時の打撃による損傷や除去しきれない劣化部、いわゆる脆弱部が弱点となって凍害劣化が内側から進行するため²⁾³⁾と考えられる。断面修復箇所の耐久性を向上させる技術として、コンクリートへの損傷ダメージが少ないウォータージェット工法が開発されてすでに実用化されており、断面修復後の接着強度や耐凍害性が向上することも既存の研究で確認されている⁴⁾⁵⁾。しかしながら、ウォータージェット工法は施工費用が高いこと等から、小規模な補修では打撃系の除去作業が未だ行われている。このため、一般的な打継ぎ用の接着剤（接着プライマー）を適用したり、断面修復材とコンクリートとの接着力を専用の接着剤によって強化して剥離を防止する技術も開発され⁶⁾、その適用事例は増えているが、厳しい寒冷環境下における断面修復後の耐凍害性やコンクリート界面に残存する脆弱部が接着耐久性に及ぼす影響については明らかになっていない。

本研究では、断面修復箇所のコンクリート界面に浸透系塗布材を浸透させて界面付近に残存する脆弱部の性能改善策を検討し、さらに、脆弱部を改善して断面修復した箇所の補修効果の持続性や耐凍害性の向上を評価する検討を行った。このようにコンクリート界面の脆弱部を改善して断面修復する方法のイメージを図-2.2.1に示す。なお、本章ではコンクリート界面の脆弱部の改善効果について記述し、断面修復後の耐久性向上に関する実験結果は第3章に記述する。



図-2.2.1 界面の脆弱部を改善して断面修復する方法のイメージ

2.3 実験概要

2.3.1 劣化供試体の作製方法

コンクリート表面やはつり面における微細ひび割れ等の微少な空隙を模擬するため、凍害劣化により表面にスケーリングを生じさせた劣化供試体の作製を行った。まず、表-2.3.1 に示す配合のコンクリートにより、JIS R 5210 に規定される普通ポルトランドセメント、小樽市見晴産の粗骨材（密度 2.68g/cm^3 ）と苫小牧産の細骨材（密度 2.69g/cm^3 ）を用いて、 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 400\text{mm}$ の角柱供試体を材齢 28 日まで水中養生して作製した。また、この供試体の一部は、養生後に半分に切断して $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ に加工した角柱供試体も作製した。なお、凍害劣化が生じやすいように AE 剤を使用しない配合とした。

表-2.3.1 コンクリートの配合

セメントの種類	AE剤の有無	Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)				Slump (cm)	Air (%)
					W	C	S	G		
普通ポルトランド	無 (nonAE)	20	55	45	165	300	875	1062	9.3	1.5

脆弱部を模擬する劣化供試体は、図-2.3.1 に示すように、一面のみに深さ 20mm まで凍害劣化を進行させるために他の 5 面には保護コーティングを施した供試体を作製した。保護コーティング材にはエポキシ樹脂系接着剤を使用し、側面は試験面から深さ 20mm を残して保護コーティングを施した。なお、劣化させる面は型枠底面に接する面とした。この保護コーティングを施した供試体に対し、JIS A 1148 A 法⁷⁾に準じた凍結融解試験（以下、JIS 試験）と、劣化の進行が速い RILEM 提案に準拠した凍結融解試験（以下、CDF 試験⁸⁾⁹⁾）の 2 種類の凍結融解試験を実施した。

JIS 試験では、図-2.3.2 に示すように凍結融解試験を行い、凍結融解サイクルを 100 サイクルから 300 サイクルの範囲で変化させることで、劣化程度が異なる 3 水準の劣化供試体を再現した。なお、凍害劣化の程度については、相対動弾性係数により評価した。相対動弾性係数については、各供試体の凍結融解試験終了時に共鳴振動法により共鳴振動数を計測し、以下の式で算出した。

$$P_n = \frac{(f_n)^2}{(f_0)^2} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 P_n ：凍結融解 n サイクル後の相対動弾性係数(%), f_n ：凍結融解 n サイクル後のたわみ振動の一次共鳴振動数(Hz), f_0 ：凍結融解 0 サイクルにおけるたわみ振動の一次共鳴振動数(Hz)

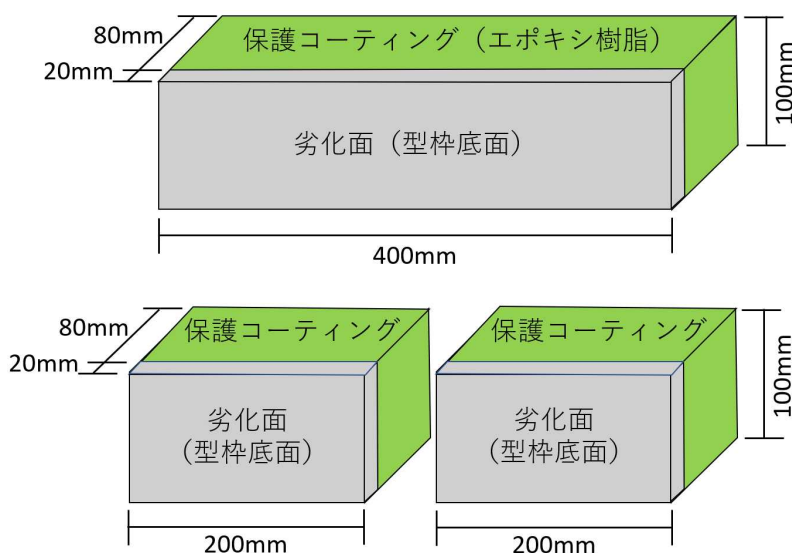


図-2.3.1 劣化供試体のイメージ図

CDF 試験では、図-2.3.2 および図-2.3.3 に示すように、供試体の試験面から深さ 5mm を試験水に浸漬させて 1 週間吸水させた後、CDF 試験による凍結融解試験を 14 サイクル（以下、cyc）実施した。試験水には濃度 3% の NaCl 水溶液を用いた。なお、CDF 試験で作製した一面劣化させた供試体を用いた各種実験は、数多く作製した供試体の中から後述する超音波伝播速度がほぼ同程度の速度となった供試体を選定して行った。

このように断面修復界面の脆弱部を模擬して作製した 2 種類の一面を劣化させた供試体（以下、劣化供試体）において、JIS 試験における角柱 100×100×400mm の劣化供試体は脆弱部の改善の有無を評価する実験に使用し、CDF 試験における角柱 100×100×200mm の劣化供試体は改善後の効果の持続性評価の実験に使用した。

・ JIS試験 (A 1148 A法) : +5 °C ~ - 18 °C
3~4時間/サイクル
試験水 : 水道水
試験サイクル : 0, 100~300サイクル

・ CDF試験 (RILEM) : +20 °C ~ - 20 °C
12時間/サイクル
試験水 : 3% 塩水
試験サイクル : 0, 14サイクル

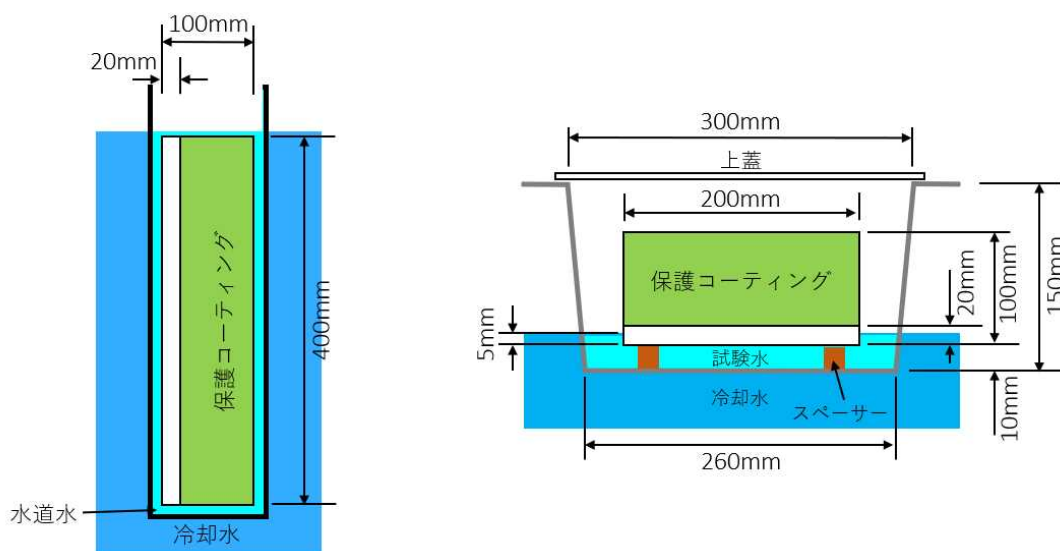


図-2.3.2 凍結融解試験のイメージ (左 : JIS 試験, 右 : CDF 試験⁸⁾⁹⁾)



図-2.3.3 CDF 試験装置と試験状況

2.3.2 浸透系塗布材の種類と性質

模擬した脆弱部を改善するために4種類の浸透系塗布材を使用した。表-2.3.2に使用した材料の種類と主な諸元を示す。塗布材Aは、主成分がけい酸リチウムの固化型けい酸塩系含浸材であり、材料自体の乾燥により固化が進行してコンクリート内部を緻密化する。塗布材Bは、主成分がけい酸ナトリウムの反応型けい酸塩系含浸材であり、コンクリート中の水酸化カルシウムとの

化学反応により固化する。塗布材 C および D は、有機系の浸透系塗布材であり、塗布材 C は、主成分をエポキシ樹脂とする一液型の湿気硬化型浸透系塗布材、塗布材 D は、エポキシ樹脂を主成分とした主剤と硬化剤の二液混合による反応硬化型浸透系塗布材である。塗布材 C と D の両者の性能の相違点は、塗布材 D の方が塗布材 C よりも粘度が若干高く、硬化後の曲げ強さが非常に大きいことである。なお、塗布材 A および B はコンクリート表面を緻密化し、水分の浸入を抑制して劣化を防止する目的の製品であり、塗布材 C はコンクリート表面の微細ひび割れ等の改善を目的とする製品、塗布材 D はひび割れ注入材や表面防水材、接着プライマーとして適用可能な万能な製品である。使用したこれら 4 種類の浸透系塗布材は一般に使用されている製品であるが、材料自体の成分割合や配合等は公表されていない。

表-2.3.2 浸透系塗布材の種類と主な諸元

浸透系塗布材	A	B	C	D
主成分等	けい酸リチウム	けい酸ナトリウム	エポキシ樹脂	
	一液・固化型	一液・反応型	一液・湿気硬化型	二液・反応硬化型
粘度 (mPa・s) ※	10以下	—	150±100 (23℃)	300±200 (20℃)
曲げ強さ (N/mm ²) ※	—	—	2.6	70以上
標準塗布量 (g/m ²) ※	200～400 (2回塗り)	200～400 (2回塗り)	300 (2回塗り)	100～300 (重ね塗り可)
実験塗布量 (g/m ²)	400	400	300	300

※ カタログ値

2.3.3 浸透系塗布材の塗布方法

浸透系塗布材（以下、塗布材）の塗布方法は、図-2.3.4 に示すように、供試体の一面劣化させた面（以下、試験面）を横向きにして側面にした状態で刷毛を用いて行った。塗布材の塗布は、凍結融解試験で劣化させた試験面を超音波洗浄し、20℃の恒温槽で 7 日間自然乾燥させた後に行った。塗布量は表-2.3.2 に示すように、各塗布材それぞれの標準塗布量に準じた。塗布材 A, B, および C は 2 回塗りのため、実験塗布量の半量を塗布した後、5～10 分の間隔を空けてから残り半量の塗布を行った。塗布材を試験面に対して均一に塗布した後、塗布した試験面を側面にしたままで供試体をビニールで覆い、20℃の恒温槽で 7 日間養生した。このように側面方向に塗布した理由は、断面修復箇所は構造物の側面および下面が多いこと、塗布材が浸透しやすい構造物上面の下方塗布ではなく、塗布材が下に垂れて奥まで浸透しにくい側方塗布によって浸透が不十分となる不具合を考慮したためである。なお、浸透系塗布材の塗布では、浸透効率を上げるために界面が乾燥した状態で実施した。一般に断面修復箇所のドライアウト（断面修復材の水分がコン

クリートに吸われて硬化不良となり接着低下や強度低下等が生じる現象）を防止するために用いられるエマルジョン系のプライマーは併用していない。

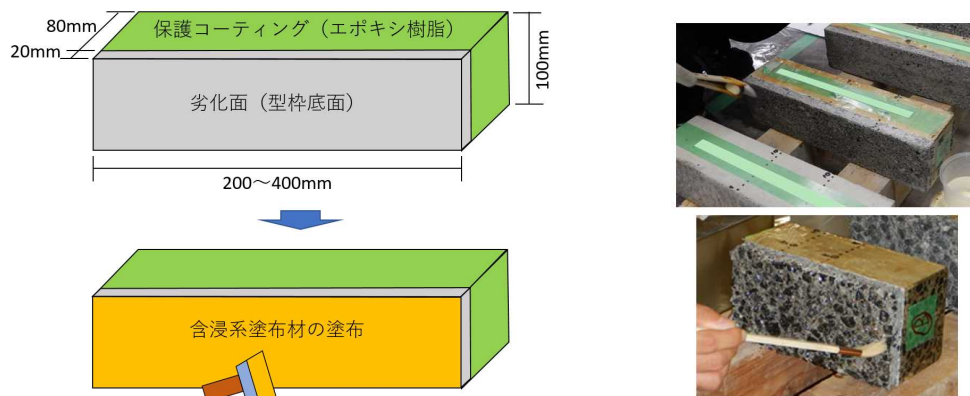


図-2.3.4 浸透系塗布材の塗布方法および塗布状況

2.4 劣化供試体の改善評価方法

塗布材の塗布による劣化供試体の脆弱部改善の有無を評価する方法として，超音波伝播速度の測定および曲げ試験を行った．表-2.4.1 に試験ケースおよび各供試体の劣化程度を示す．

表-2.4.1 試験ケースおよび各供試体の劣化程度

塗布材名	試料名	相対動弾性係数 (%)	劣化無し (N-R0：相対動弾性係数100.0%)
無塗布 N	N-R0	100.0	
	N-R1	60.7	
	N-R2	33.4	
	N-R3	7.7	
塗布材 A	A-R1	83.2	
	A-R2	59.2	
	A-R3	18.6	
塗布材 C	C-R1	70.2	
	C-R2	44.9	
	C-R3	10.9	
塗布材 D	D-R1	62.1	
	D-R2	41.4	
	D-R3	9.6	

劣化供試体は相対動弾性係数が 60%以上を劣化小，40～60%程度を劣化中，20%以下を劣化大とした 3 水準の劣化程度を再現した。ただし，劣化による大きなひび割れや断面欠損が生じていない状態の供試体を選定した。試験ケースは，劣化させていない供試体の無塗布 N-R0 の 1 ケースと 3 水準の劣化供試体に無塗布の 3 ケース，3 水準の劣化供試体に塗布材 A，C，および D を塗布した 9 ケースの計 13 ケースとした。ここで試料名には，劣化無しは R0，劣化小は R1，劣化中は R2，および劣化大は R3 と表記した。例えば，劣化小の供試体に塗布材 A を塗布した試料名は A-R1 とした。なお，この試験ケースでは塗布材 B は使用していない。

2.4.1 超音波伝播速度の測定

超音波伝播速度の測定は，超音波透過法によってコンクリートの劣化程度を評価する方法¹⁰⁾とした。図-2.4.1 に示すイメージ図のように，発信子から発信された超音波がコンクリート内部を通過して受信子に到達する時間を計測し，距離÷時間で算定した超音波伝播速度から評価するものである。ただし，超音波装置から発信される超音波の速度は一定であるため，算定される速度は見かけの超音波伝播速度である。超音波はコンクリート内部を直線的に通過しようとするため，健全なコンクリートは内部組織が密であることから，超音波はほぼ直線的に進む。一方で劣化したコンクリートは内部組織がひび割れや空隙等ができて緩んでいるため，超音波はひび割れや空隙等を避けながら進む。そのため，超音波が発信子から受信子に到達するまでの時間は劣化したコンクリートのほうが遅くなり，見かけの超音波伝播速度も遅くなる。したがって，見かけの超音波伝播速度が減少したコンクリートは劣化していると評価できる。なお，健全なコンクリートの見かけの超音波伝播速度は一般に 3.5～4.0km/sec 以上¹¹⁾とされている。ここで，今回の実験において，コンクリート内部のひび割れや空隙等，いわゆる脆弱部を塗布材で改善できた場合，図-2.4.1 のイメージ図のように，ひび割れや空隙等が補修されて健全なコンクリートの状態に近づくことで，見かけの超音波伝播速度は増加すると考えられる。

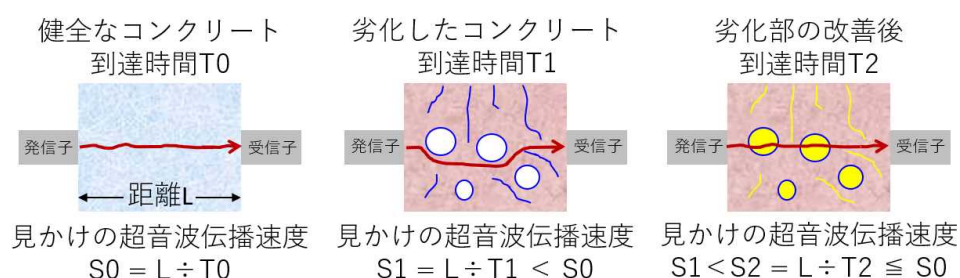


図-2.4.1 超音波透過法によるコンクリートの劣化判定のイメージ

これは、コンクリートが水で飽和すると内部の空隙等が水で満たされて見かけの超音波伝播速度が上昇する現象と同じであり、塗布材によって内部が緻密化されれば、健全なコンクリートの見かけの超音波伝播速度に近づくことが予想される。

塗布材の浸透深さ方向における改善深さを測定する方法として、図-2.4.2に示すように、超音波透過法¹⁰⁾を用いて塗布材の塗布前後の見かけの超音波伝播速度を測定した。測定点は供試体試験面から深さ方向に5, 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75, 85, 95mmの10点を2箇所の計20測点とした。塗布材の塗布前の測定は、凍結融解作用終了後に20℃の恒温槽で12時間自然乾燥した後に行った。塗布材の塗布後の測定は、塗布後に20℃の恒温槽で7日間養生した後に行った。なお、25mm以深の点の計測は保護コーティングを介して行った。なお、用いた機器の超音波速度は28kHzである。

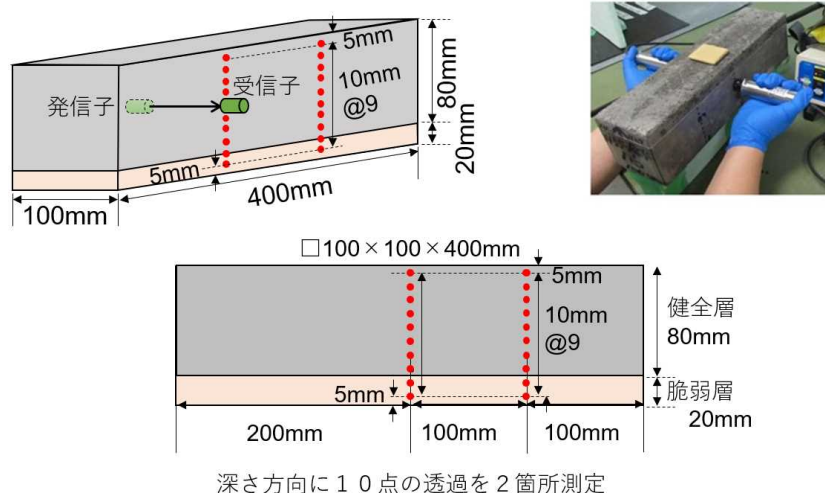


図-2.4.2 超音波透過法による改善深さの測定方法

2.4.2 曲げ試験

塗布材によるコンクリート界面の脆弱部の改善が強度面への影響を検証するために曲げ試験を行った。曲げ試験はJIS A 1106¹²⁾に準拠し、図-2.4.3に示すように供試体の試験面を引張側に配置した4点载荷を行った。試験によって得られた最大荷重と破壊断面から曲げ強度を算出した。曲げ強度は以下の式において算出した。

$$\sigma_b = \frac{Pl}{bd^2} \quad (2)$$

ここで、 σ_b : 曲げ強度 (N/mm²)、 P : 最大荷重 (N)、 l : 底面の支点間距離 (mm)、 b : 破壊断面の平均幅 (mm)、 d : 破壊断面の平均高さ

なお、式(2)は、供試体の底面側（引張側）の破壊位置が、図-2.4.3に示す底面の支点間距離を三等分した中央範囲内で破壊したケースでの算出式であり、中央範囲外で破壊したケースには適用できないが、本試験ではすべて中央範囲内での破壊であったため、式(2)による算出を行った。

また、供試体側面の底面側（引張側）中央付近にひずみゲージを1箇所設置して破壊までの曲げ強度－ひずみ曲線および破壊時の最大ひずみを測定した。

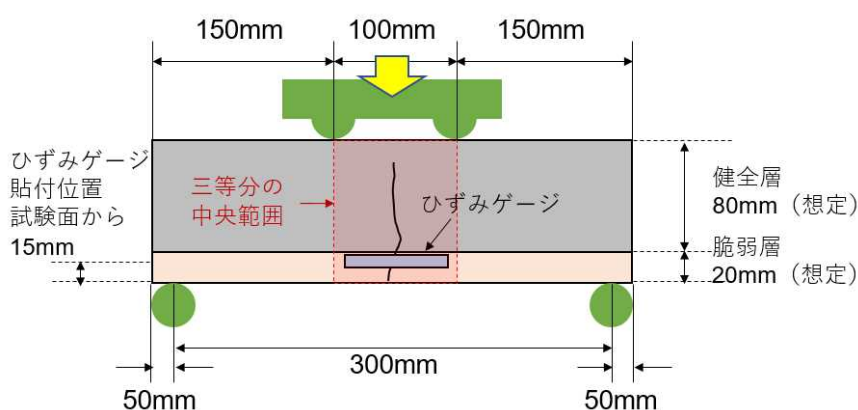


図-2.4.3 曲げ試験方法

2.5 脆弱部改善後の効果持続性の評価方法

劣化供試体の脆弱部改善後の効果持続性を評価するため、CDF試験による一面凍結融解試験で脆弱部を作製した 100×100×200mm の劣化供試体に、塗布材を塗布して脆弱部を改善した後に再度 CDF 試験を実施して劣化させる実験を行った。効果持続性の評価方法は、スケーリング量の測定、見かけの超音波伝播速度（以降、超音波伝播速度）の測定、透水試験、および走査型電子顕微鏡による内部観察を行った。

試験ケースは、無塗布 N の供試体 N-00, N-01, N-02, 塗布材 A を塗布した供試体 A-01, A-02, 塗布材 B を塗布した供試体 B-01, B-02, 塗布材 C を塗布した供試体 C-01, C-02, 塗布材 D を塗布した供試体 D-01, D-02 とした。ここで、劣化していない供試体は 00, 塗布材を塗布した劣化供試体は 01, 再 CDF 試験後の供試体は 02 と表記した（ただし、供試体 N-01, N-02 は無塗布）。なお、各実験ケースの供試体の数はそれぞれ 1 体ずつとした。

2.5.1 CDF試験

塗布材で改善された脆弱部が凍結融解作用を再度受けることによってその改善効果がどの程度持続するかを検証を行うため、CDF試験で作製した劣化供試体に前項2.3.3と同様に塗布材を塗布・養生した後、さらにCDF試験を14cyc実施（以下、再CDF試験）した。再CDF試験は、劣化供試体を作製したCDF試験と同様に試験面から5mmまでを試験水に浸漬させ、7日間静置した後に行った。CDF試験および再CDF試験において、14cyc終了後に各供試体のスケーリング量を測定した。測定方法は、試験面より剥落したスケーリング片を採取してイオン交換水で洗浄後、 $100\pm5^{\circ}\text{C}$ の乾燥機で24時間乾燥させてからスケーリング片の乾燥質量を測定した。その乾燥質量を試験面積で除し、単位面積あたりのスケーリング量（ g/cm^2 ）に換算した。

2.5.2 超音波伝播速度の測定

CDF試験後の劣化供試体の劣化状態、塗布材による改善後の状態、および再CDF試験後の劣化状態を確認する方法として、JIS試験と同様に、超音波透過法による超音波伝播速度の測定を行った。測定点は、試験面から深さ方向に5、15、25、35、45mmの5点を2箇所計10測点とした（図-2.5.1）。測定は、CDF試験前後、塗布材の塗布・養生後、および再CDF試験後に行い、各深さの超音波伝播速度の測定値は2側点の平均値とした。得られたそれぞれの測定値から、塗布材の塗布・養生後の測定値をCDF試験後の測定値で除した改善比、再CDF試験後の測定値をCDF試験後の測定値で除した再劣化比を算出した。なお、CDF試験後および再CDF試験終了後の測定は、 20°C の恒温槽で12時間自然乾燥した後に行い、塗布材の塗布後の測定は前述した養生日数経過後に行った。また、深さ25mm以深の測定は保護コーティングを介して行った。

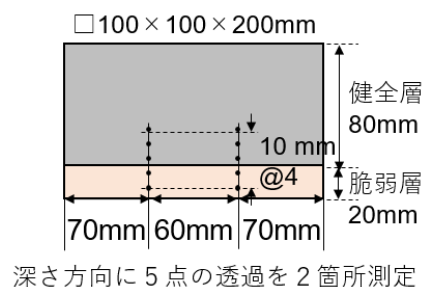


図-2.5.1 超音波透過法による改善深さの測定方法

2.5.3 透水試験

塗布材の塗布によって脆弱部を含めたコンクリート界面が緻密化されることによる遮水効果およびその効果の持続性を評価するため、塗布後と再 CDF 試験後の透水試験による緻密性の評価を行った。

試験は、図-2.5.2 に示すように JSCE-K571-2005 表面含浸材の試験方法（案）の透水量試験¹³⁾ に準じて行い、初期と 24 時間後の水頭高さとの差から透水係数を算出する方法で行った。透水試験用の供試体は、塗布材を塗布した後の供試体および再 CDF 試験後の供試体を、試験断面が 80mm × 100mm、厚さが 10mm となるように試験面より深さ 0～10mm、15～25mm、30～40mm の位置を切り出して作製した。なお、深さが連続していないのは、切り出し加工の際に使用したコンクリートカッターの刃厚 5mm 分の欠損が生じるためである。

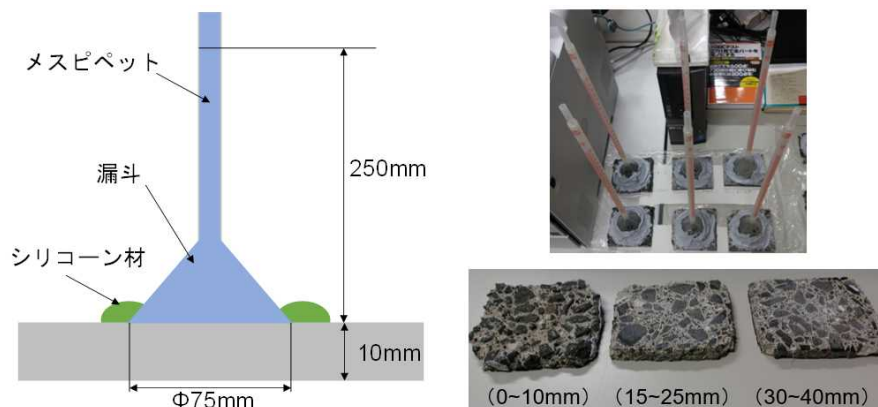


図-2.5.2 透水試験方法¹³⁾と試験状況

2.5.4 脆弱部の改善状態の内部観察

CDF 試験の凍害劣化によって生じた脆弱部のひび割れを対象に、浸透系塗布材の浸透・改善状態を確認するため、走査型電子顕微鏡（以下、SEM）を用いて試験面から 5, 15, 25, 35mm の深さにおける供試体内部の観察を行った。また、観察と同時に SEM に搭載されているエネルギー分散型 X 線分光器（以下、EDS）による生成物の成分分析を行った。試験片は透水試験に用いた各深さに切り出した供試体の中央付近を切断して採取した。なお、測定時は試料室内を完全に真空状態にせず、低真空状態にして行った。図-2.5.3 に使用した SEM の外観を示す。

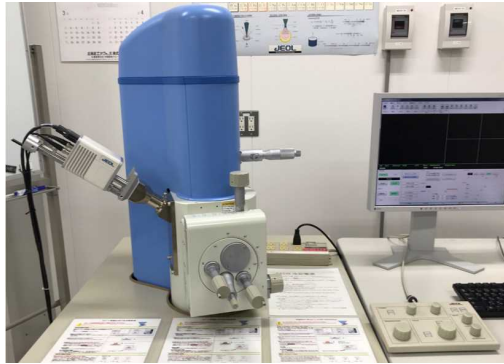


図-2.5.3 走査型電子顕微鏡（SEM）の外観

2.6 実験結果

2.6.1 超音波伝播速度による脆弱部の改善評価

図-2.6.1 は、塗布材の塗布前後の超音波伝播速度の比較である。無塗布のケースにおいて、劣化していない N-R0 と劣化させた N-R1, N-R2, N-R3 を比較すると、相対動弾性係数が低い劣化供試体、すなわち、凍害劣化の程度が大きい供試体ほど超音波伝播速度は低下しており、同時に試験面から深さ方向にむかって超音波伝播速度は増加していることから、凍害劣化が試験面から内部にむかって進行していることがわかる。さらに、塗布材を塗布する前の相対動弾性係数が比較的大きい 60～80% の A-R1, C-R1, D-R1, および一般に凍害劣化と判定される相対動弾性係数 40～60% ¹⁴⁾ の A-R2, C-R2, D-R2 においては、塗布後の超音波伝播速度が塗布前より全体的に増加して 4km/sec 近くまで回復している。この数値は一般的に健全なコンクリートが示す値 ¹¹⁾ であることから、脆弱部のひび割れや空隙に塗布材が浸透して緻密化する改善効果によって健全なコンクリートの状態程度までの回復が期待できる結果となった。

一方、相対動弾性係数が 20%以下の A-R3, C-R3, D-R3 においても、塗布後の超音波伝播速度は大きく増加しているが、2.5～3km/sec 前後に留まっていることから、凍害劣化の程度が大きいと健全なコンクリートの状態までは回復できないことがわかる。

なお、塗布材を塗布した供試体のすべてにおいて、試験面よりも深さ 15～25mm の範囲で超音波伝播速度が低下する傾向にあった。これは、塗布時に塗布材の流動性が良いためにすぐに浸透するが、徐々に下面から垂れてくる現象も見られたことから、試験面に近い深さでは塗布材が流下して多少流れ出てしまったために改善効果が低下したと推測する。

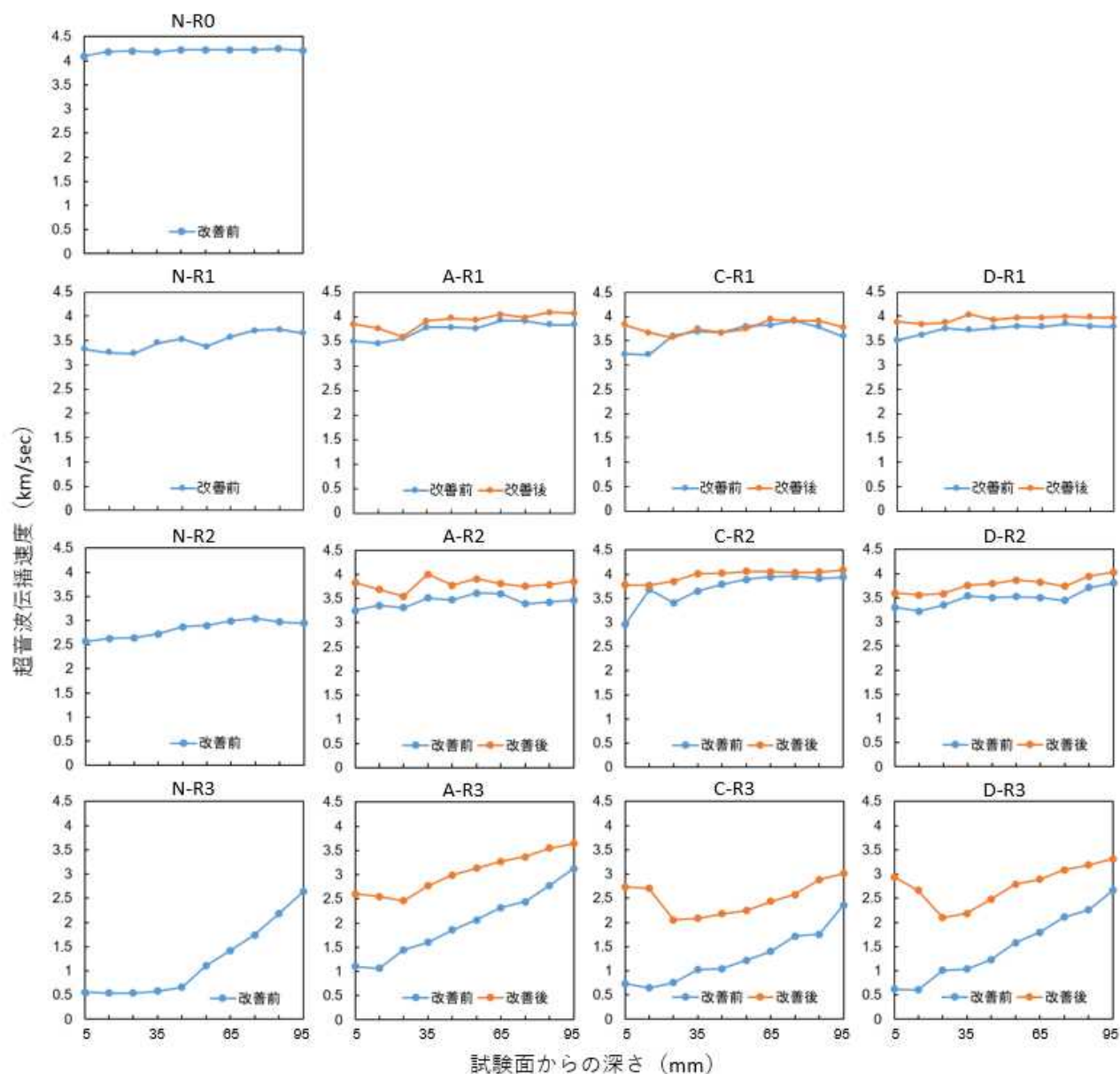


図-2.6.1 各浸透性塗布材の塗布前後の超音波伝播速度変化

以上の超音波伝播速度の測定結果から、断面修復箇所の界面に塗布した塗布材が脆弱部に浸透して緻密化することで脆弱部の改善が可能であることを確認した。ただし、脆弱部の劣化の程度が大きい場合は改善による回復が難しいことを確認できた。

2.6.2 曲げ試験

図-2.6.2に相対動弾性係数と最大曲げ強度の関係を示す。塗布材の種類や有無にかかわらず相

対動弾性係数が大きいほど最大曲げ強度は大きくなり、相対動弾性係数と最大曲げ強度との間には高い相関がみられた。前述した超音波伝播速度の結果から、塗布材による脆弱部の改善によって最大曲げ強度が向上することを期待したが、塗布材Aを塗布した供試体の最大曲げ強度は無塗布Nとほぼ同じか下回る分布となり、塗布材Cと塗布材Dを塗布した供試体の最大曲げ強度は無塗布Nとほぼ同じか若干上回る程度の結果となった。これは、塗布材によって脆弱部は緻密化されるが、固化・硬化した塗布材の脆弱部における相対量は少ないことから、曲げ強度への影響は小さかったと考えられる。しかし、図中の点線範囲にあるケースでは最大曲げ強度が相対的に向上していることから、これらは塗布材の相対量が比較的多くなったために曲げ強度が増加した事例であると思われる。劣化が大きい相対動弾性係数が20%以下の供試体においても、塗布材を塗布した供試体のほうが無塗布Nより最大曲げ強度は多少向上しているのは、劣化が大きいために塗布材の相対量が多くなったためと推測する。

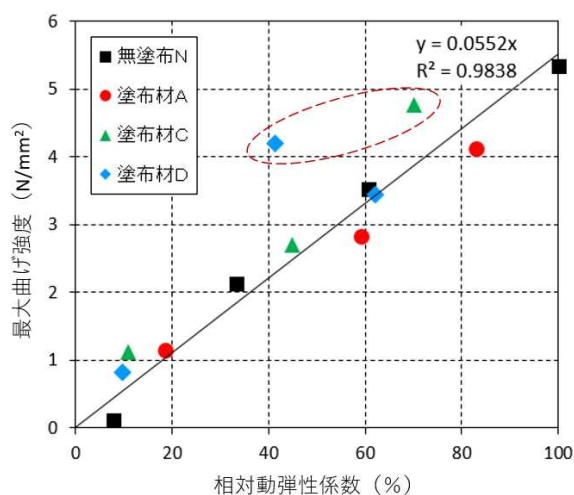


図-2.6.2 相対動弾性係数と最大曲げ強度

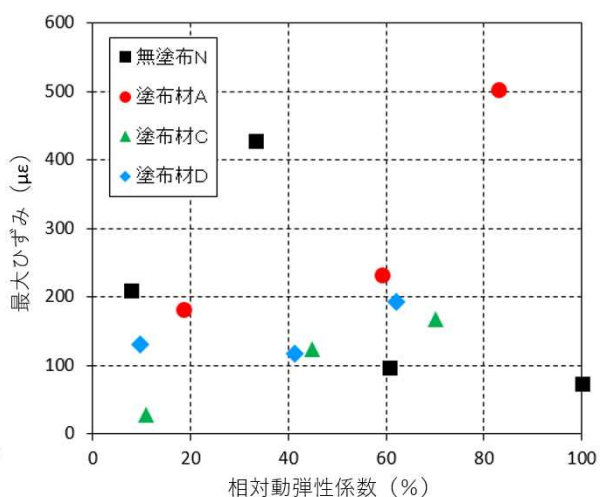


図-2.6.3 相対動弾性係数と最大ひずみ

一方、図-2.6.3に相対動弾性係数と最大ひずみの関係を示すが、塗布材の有無にかかわらず相対動弾性係数と最大ひずみの間には相関はみられなかった。これは、供試体は無筋であり、コンクリートが劣化していてもほとんど脆性破壊となること、塗布材によって脆弱部が緻密化されても靱性は向上しないことから、曲げ荷重によって生じるひずみはモルタルと骨材と固化した塗布材の配置状態に影響されたためと推測する。

2.6.3 再凍結融解後のスケーリング量と超音波伝播速度

図-2.6.4 に各供試体の CDF 試験後と再 CDF 試験後のスケーリング量の変化を示す。無塗布 N は再 CDF 後にスケーリング量が 2.1 倍となり、さらに大きく劣化が進行した。一方、塗布材 B、C、および D では再 CDF 試験後のスケーリング量が大きく減少した。これは塗布材による脆弱部の改善が再劣化を抑制したと言える。特に塗布材 C と D の樹脂系はその抑制効果が顕著である。塗布材 A ではスケーリング量は若干増加したが、無塗布 N よりは増加を抑えられたことから再劣化の進行を抑制できたと言える。

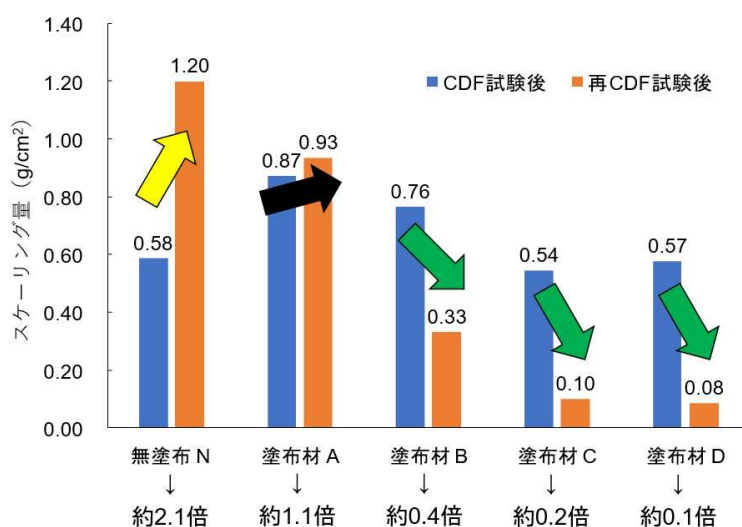


図-2.6.4 スケーリング量の変化

図-2.6.5 に各供試体の CDF 試験前後、改善後、および再 CDF 試験後の超音波伝播速度（以下、速度）の変化を示す。CDF 試験前の健全なコンクリートにおける速度は約 4km/sec であり、CDF 試験後は劣化により試験面付近では 3km/sec 前後に低減している。塗布材 A を除いて深さ方向に徐々に速度が上昇しているのは、試験面から劣化が進行していることを表している。したがって、試験面から深さ 35～45mm 程度まで劣化が進行したと推測される。なお、塗布材 A では試験面から深さ 45mm 付近においても速度が 3km/sec 程度であることから、他の供試体よりも CDF 試験後の劣化深さが少し大きかったと考えられる。塗布後はそれぞれの供試体で CDF 試験後よりも速度が上昇しているため、塗布によって劣化した脆弱部を改善できていると考えられるが、劣化前の健全なコンクリートの速度までは上昇していない。また、すべての供試体で再 CDF 試験後は CDF 試験後よりも速度が低下していることから、改善後でもさらに劣化が進行したことがわかる。

図-2.6.6 に改善比と再劣化比を示す。改善比は CDF 試験後と塗布・養生後の速度比であるた

め、改善比が 1.00 よりも大きいほど塗布材が浸透して脆弱部が改善されたと考える。実験結果では、塗布材 A と B は試験面から深さ 45mm まですべて、塗布材 C は試験面から深さ 25mm まで、塗布材 D は試験面から深さ 15mm までが改善比 1.00 以上に大きくなったことから、塗布材によって脆弱部を改善できていると言える。なお、塗布材 A は試験面から深さ 15mm までの改善比が低くなり、深さ 25～45mm の改善比は大きくなったことから、塗布した試験面付近よりも奥の深いほうがより改善されている。この現象は、塗布材 A は流動性が非常に良いことから脆弱部の奥深くまで浸透できたが、試験面付近では劣化の程度が大きいことから塗布材 A が滞留できずに流下して結果的に試験面付近の浸透量が少なくなり改善が不十分になったことが原因であると推測する。

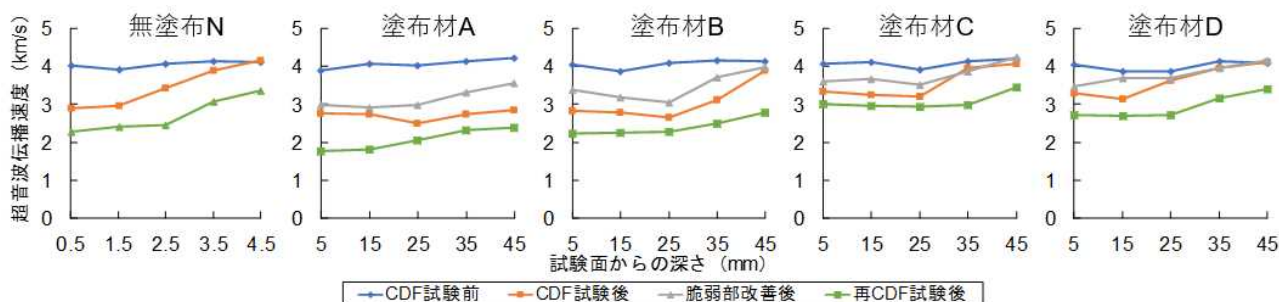


図-2.6.5 超音波伝播速度の推移

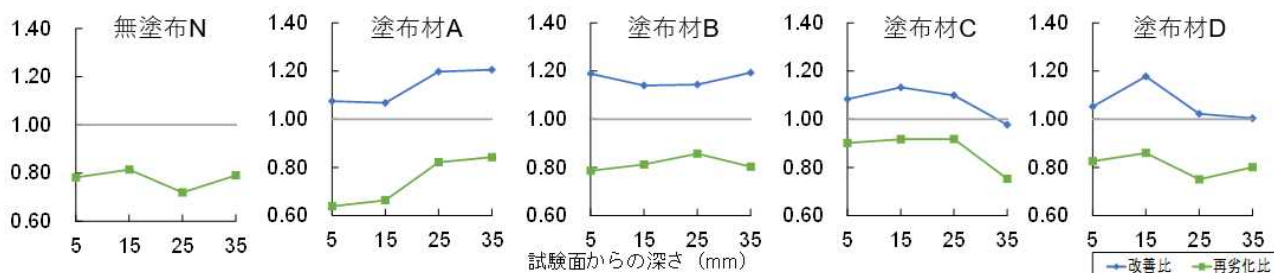


図-2.6.6 改善比と再劣化比

次に、再劣化比は、CDF 試験後と再 CDF 試験後の速度比であり、再劣化比が 1.00 を下回ると再劣化が生じていることを表す。すべての供試体で再劣化比が 1.00 を下回っていることから、再 CDF 試験によって改善後に再劣化が発生している。再劣化した状態を個々にみると、無塗布 N では試験面から深さ方向に一樣に再劣化比が 0.80 程度まで低下していることから、測定した深さ 45mm まで全体的にさらに劣化が進行したと言える。塗布材 A は試験面付近の再劣化比が 0.6 程

度まで低下したことから、上述した改善比の結果と同様に試験面付近の改善が不十分であったと考えられる。塗布材 B は再劣化比が全体的に 0.80 以上となり、再劣化は生じたが脆弱部を改善したことで劣化の進行をある程度抑制できたと思われる。塗布材 C は深さ 25mm までの再劣化比が 0.90 程度であり、塗布材 B 以上に改善による劣化進行を抑制できたと言える。なお、深さ 35mm 以深は再劣化比が低下しているが、これは、塗布前の深さ 35mm 以深の劣化程度が小さく、塗布材 C の浸透量が少ないことで改善効果が得られずに凍害劣化が進行したと推測する。塗布材 D は深さ 15mm までは再劣化比が 0.80 以上となり劣化の進行をある程度抑制できているが深さ 25mm 以深では塗布材 C と同様に塗布材 D の浸透量が少ないことで凍害劣化が進行したと考えられる。

以上の結果から、塗布材によって脆弱部を改善することでコンクリート界面の耐凍害性を向上できる可能性があることを確認した。しかし、今回の試験条件においては、脆弱部を健全なコンクリートの状態まで改善できなかったため、再 CDF 試験で劣化の進行が大きくなったと思われる。

2.6.4 透水係数の変化

図-2.6.7 に各供試体のそれぞれの深さにおける透水係数を示す。透水係数が小さいほど空隙が少なく緻密化されていることを表す。無塗布 N の透水係数の平均は $6.00 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ であった。N-01 および N-02 の結果から、透水係数は深さ方向に減少しており、劣化が試験面から内部にかけて進行していると言える。N-02 は N-01 よりも透水係数が大きく増加していることから、再 CDF 試験によってさらに劣化の程度が大きくなり空隙等が多くなったと推測できる。

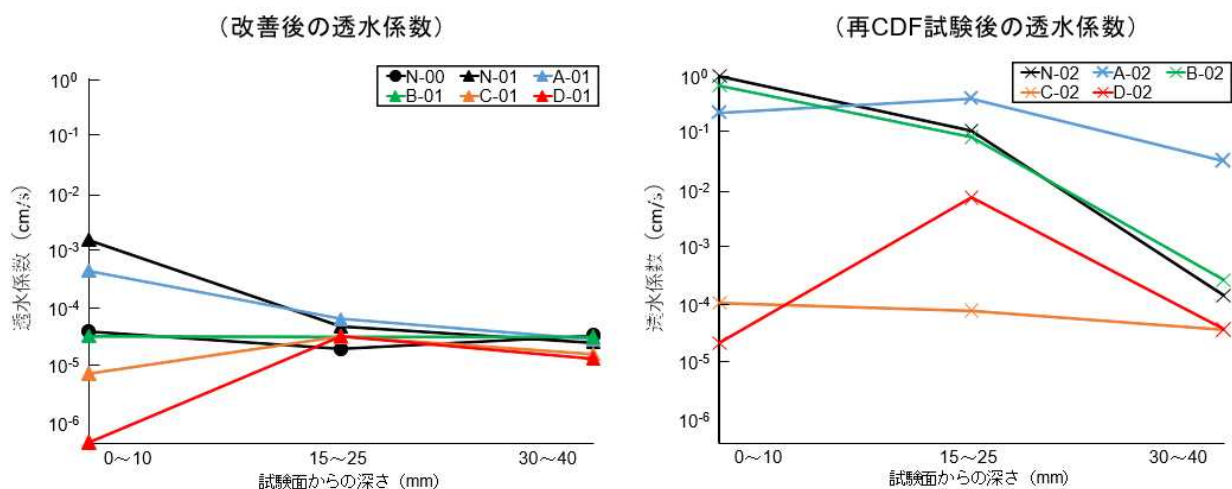


図-2.6.7 深さ毎の透水係数の変化

A-01 では、N-01 と同様に試験面に近いほど透水係数が増加する傾向が見られた。A-02 では深さ 15～25mm の透水係数が N-02 と比較して減少しているが、塗布材 A では脆弱部表面付近の改善比が低い層と内部の改善比の高い層との境界で再劣化が大きく進行したと考えられる¹¹⁾。

B-01 では、劣化していない N-00 と試験面から深さ 40mm まで同程度の透水係数であることから、脆弱部の改善が試験面付近だけでなく内部にも及んでいることが伺える。これは超音波測定での改善比の結果とも一致する。ここで再 CDF 試験後の B-02 では、試験面付近の透水係数が大きく増加するが、深さ 15～25mm では透水係数が減少している。これは反応型である塗布材 B が、再 CDF 試験によって新たなひび割れが生じた際に未反応分が内部に浸透して脆弱部を改善したことによるものと推測する。ただし、今回の試験条件では塗布材 A と同様に脆弱部の改善が不十分であることが考えられ、再劣化が大きく生じる結果となった。なお、今回の結果において、塗布材 Aの方が塗布材 B よりも若干劣る結果となったが、塗布材 A が試験面付近で流下してしまった影響と、塗布材 B の再反応による改善効果があることを考慮すると、反応型の塗布材 B は固化型の塗布材 A よりも耐凍害性が向上する可能性があると考えられる。

C-01 では、深さ 0～10mm の透水係数が N-00 の透水係数を下回っている。C-02 では N-02 と比較して、深さ 0～10mm および 15～25mm での透水係数が大きく減少している。これらの深さは超音波伝播速度の測定結果で改善が確認された深さであり、塗布材 C によって脆弱部が大きく改善されたことで再 CDF 試験後においても内部の緻密性を確保できたと考えられる。ゆえに、塗布材 C によって脆弱部を改善することにより、耐凍害性は大きく向上すると言える。

D-01 では、深さ 0～10mm の透水係数が本実験における最小の値であり、遮水効果が一番大きい結果となった。D-02 でも深さ 0～10mm における透水係数が N の透水係数を下回っているため、再 CDF 試験後でも改善効果は残っている。しかし、深さ 15～25mm の透水係数が大きく増加しており、塗布材 C の再 CDF 試験後の傾向とは異なっている。これは、前述した超音波の再劣化比の結果と同様に、深さ 0～15mm 程度までは脆弱部を強固に改善できているが、深さ 15mm 以深には硬化速度が速いために浸透しきれずに硬化したことで改善が不十分となってしまったと考えられ、深さ 15mm 以深に残存した脆弱部から劣化が進行したと推測される。しかし、塗布材 D は脆弱部を強固に改善することができるため下地強化としての効果は大きく、脆弱部への浸透が確実にできれば耐凍害性を大きく向上することが期待できると考える。

2.6.5 SEM 観察による凍結融解前後の浸透系塗布材の浸透状態

SEM 観察において、各供試体の深さ毎に撮影した微細ひび割れの写真およびその付近の 3 点か

ら EDS 分析した成分組成比の結果を図-2.6.8~11 に示す。なお、写真にある 3 点と同色の棒グラフが各点において検出された元素の組成比である。

無塗布の N-01 と N-02 において、幅が 20~40 μ m 程度の微細ひび割れを深さ 25mm 付近まで確認できる。CDF 試験後の N-01 と再 CDF 試験の N-02 の微細ひび割れ部の写真を比較すると大きな差はないように見える。EDS 分析では、深さ 15mm 付近の元素の組成比で再 CDF 後に Si が増加し Ca が減少している。Si の増加はコンクリート中のセメントの未水和反応分が反応したと推測するが、Ca の減少は再 CDF 試験によってコンクリート中の水酸化カルシウムが多く溶脱したためと考えられる。したがって、再 CDF 試験によってコンクリートの凍害劣化がさらに進行したことが窺える。

塗布材 A と B において、A-01, A-02, B-01, B-02 の SEM 写真では、深さ 25mm 付近までのひび割れに無塗布 N には見られなかった生成物と思われる固体が付着しているのが確認できる。ただし、B-02 の生成物は形状が他とは異なっており、これは再 CDF 試験によって未反応分が新たに反応して生成された固体であると推測する。これらの生成物がひび割れに付着してひび割れ幅が減少していることから、塗布材の浸透・固化によって脆弱部が緻密化されたことを確認した。なお、深さ 35mm 付近では大きな生成物が確認できないことから、塗布材 A および B が浸透した深さは概ね 25mm 程度であると言える。しかし、生成物によってひび割れ幅は減少しているが、十分に閉塞された状態ではないことも確認された。これは、塗布材 A と B は水のように粘性がほとんどなく流動性が非常に高いことから、側面塗布によって塗布材が流下して毛細管現象による浸透拡散が弱まった可能性が考えられる。これらの結果は前述した超音波伝播速度と透水試験における深さ 35mm 付近まで改善されている結果とは異なるが、EDS 分析では Ca の減少が全体的に抑えられていることから、塗布材 A および B によって凍害劣化の進行をある程度抑制できたと言える。なお、ナトリウム系の塗布材 B は Na が僅かではあるが検出されたが、リチウム系の塗布材 A では Li の検出が確認されなかった。この理由については、使用した X 線の検出器の特性によるものと考えられ、エネルギーレベルが低い長波長の Li の X 線を検出器がうまく捉えられなかったためと推測している。

一方、塗布材 C と D において、C-01 と C-02 の SEM 写真では、深さ 25mm 付近までのひび割れは塗布材 C の硬化体によってほぼ閉塞されているが、深さ 35mm 付近には硬化体はほとんど見られないことが確認できる。また、D-01 と D-02 の SEM 写真では、深さ 15mm 付近まで塗布材 D の硬化体がひび割れを閉塞しているが、深さ 25mm 付近には硬化体が見られない。EDS 分析においても C-01 と C-02 は深さ 25mm 付近まで、D-01 と D-02 は深さ 15mm 付近までに塗布材のエポキシ樹脂に多く含まれる C が多く検出されている。これらの結果は前述した超音波伝播速度にお

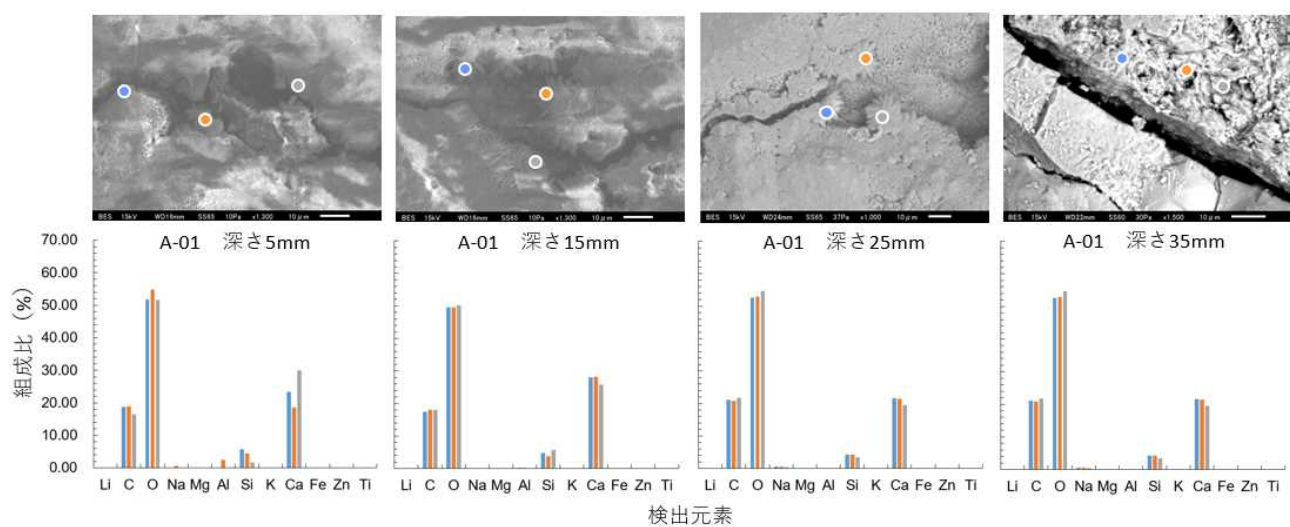
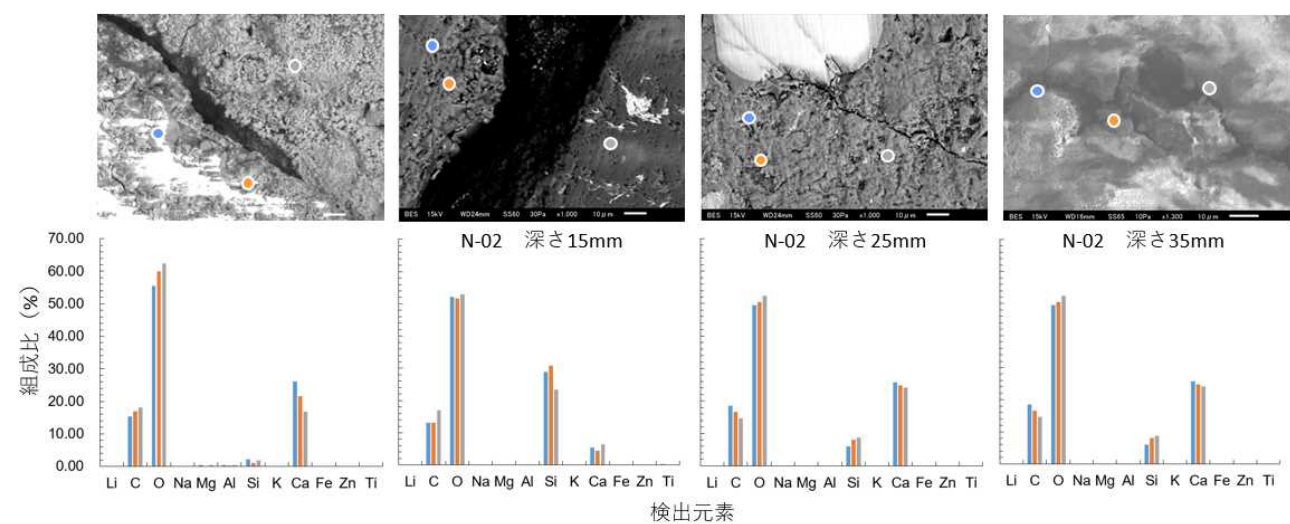
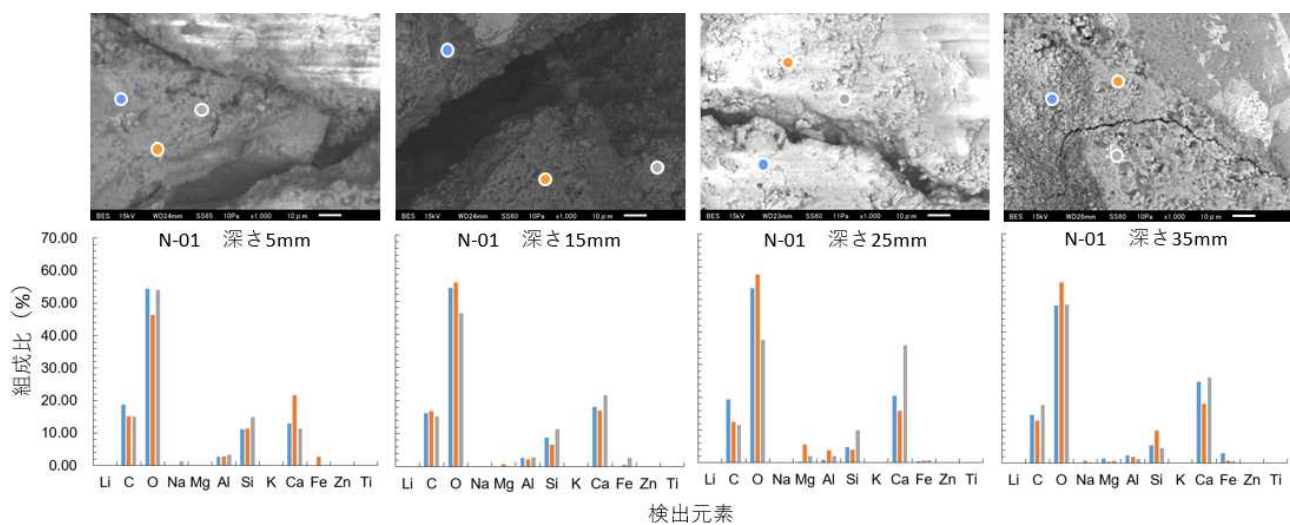


図-2.6.8 深さ毎の微細ひび割れ写真と EDS 分析による成分組成比の結果（1）

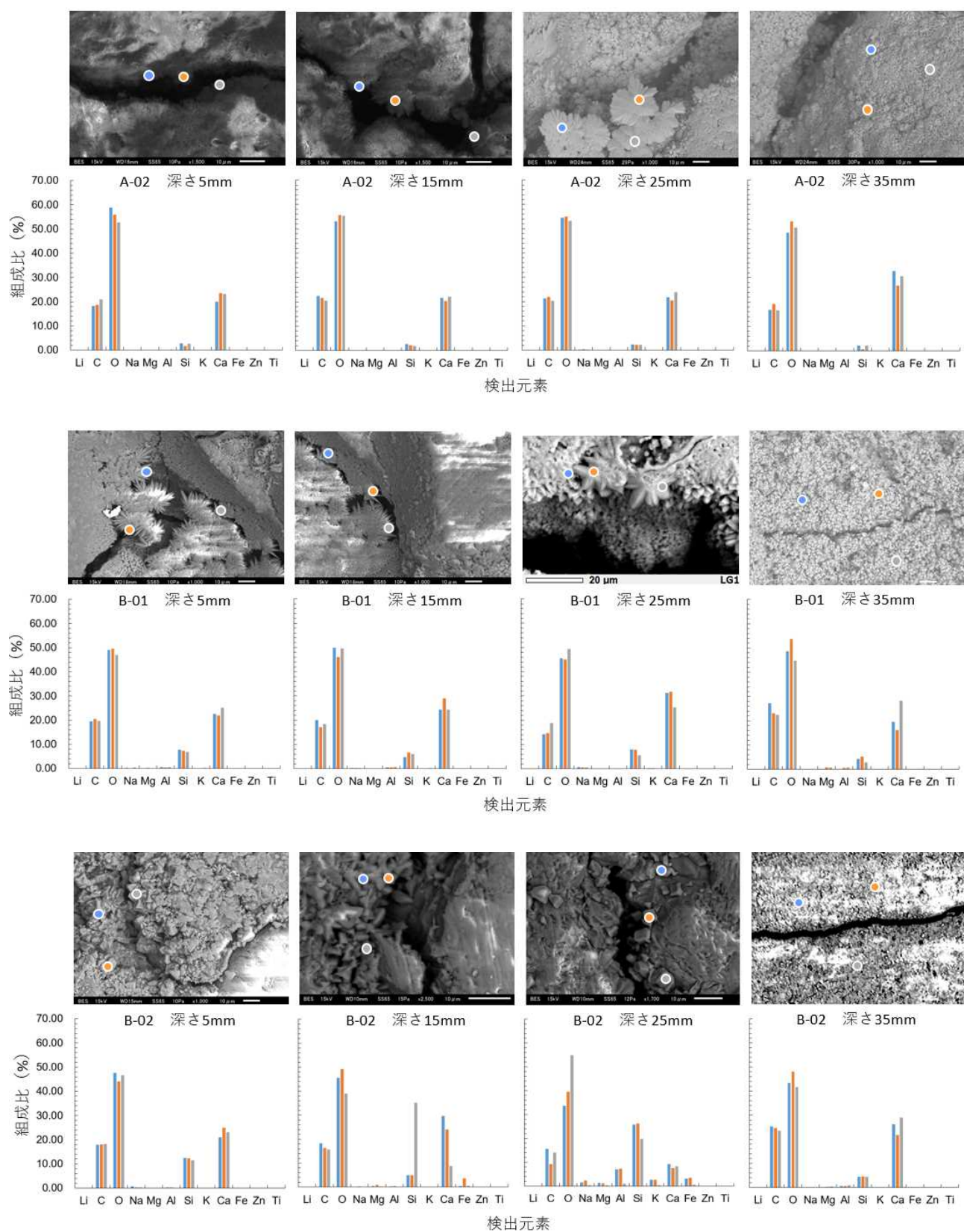


図-2.6.9 深さ毎の微細ひび割れ写真と EDS 分析による成分組成比の結果（2）

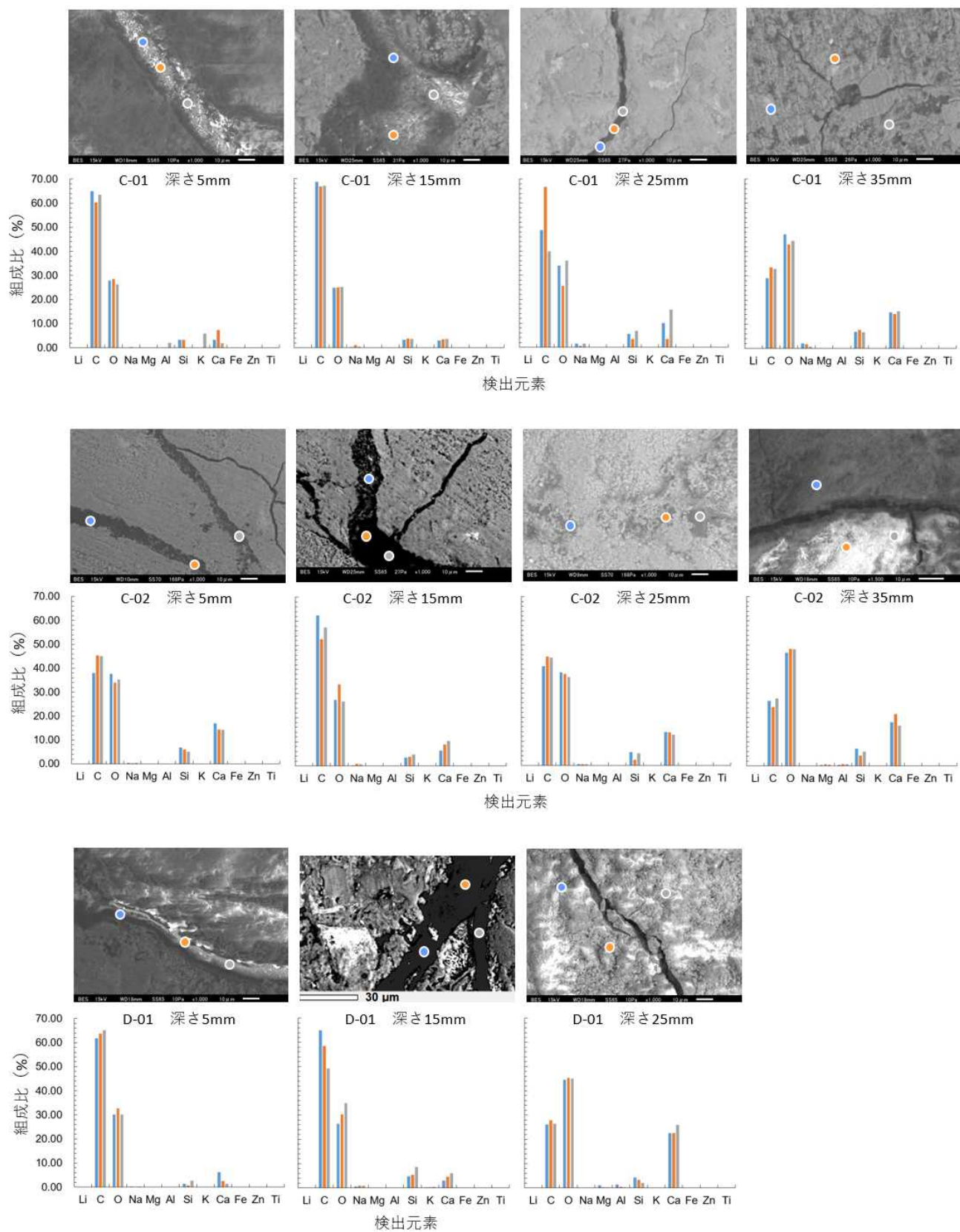


図-2.6.10 深さ毎の微細ひび割れ写真と EDS 分析による成分組成比の結果 (3)

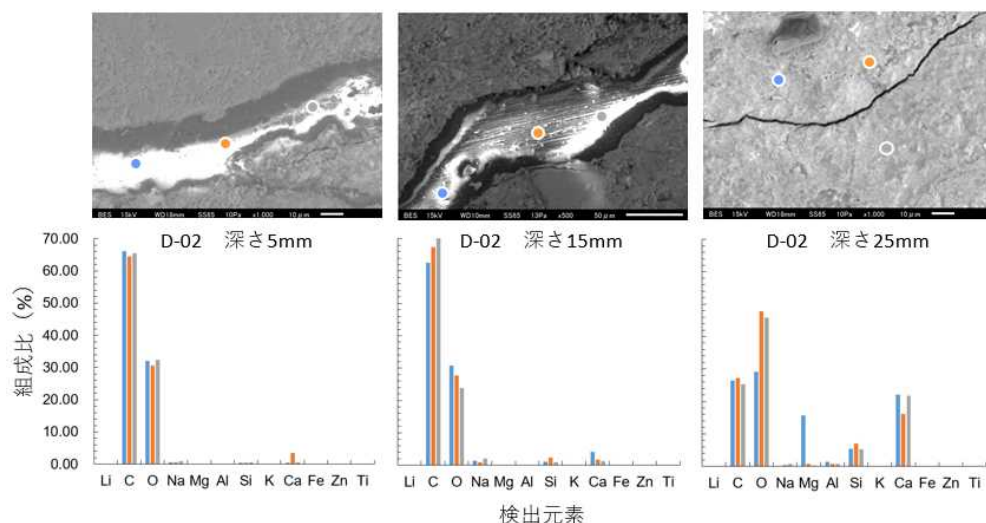


図-2.6.11 深さ毎の微細ひび割れ写真と EDS 分析による成分組成比の結果（４）

ける改善深さおよび透水試験の結果と一致していることから、塗布材 C は深さ 25mm 付近まで、塗布材 D は深さ 15mm 付近まで浸透・拡散して硬化し、脆弱部が緻密化されて凍害劣化の進行を抑制できたことを裏付ける結果となった。

2.7 まとめと考察

本章では、断面修復箇所の再劣化の一因であるコンクリート界面に残存する脆弱部に対して、浸透系塗布材によって脆弱部を緻密化させて改善する方法を試みた。脆弱部の改善を確認する実験では、一面劣化させた脆弱部に浸透系塗布材を塗布して固化させた供試体を超音波伝播速度および曲げ試験によって改善状態の評価を行った。その結果、今回試用したけい酸塩系の浸透系塗布材およびエポキシ樹脂系の浸透系塗布材をコンクリート界面に浸透・固化させることで脆弱部の改善が可能であることを確認した。

また、脆弱部を改善した効果の持続性を評価する実験では、改善後に凍結融解作用を与え、スケリング量、超音波伝播速度、透水係数、および SEM による内部観察によって改善効果の持続性について詳細に検証を行った。その結果、試用した浸透系塗布材によって脆弱部を改善した供試体の耐凍害性は向上することを確認した。一方で、浸透量や脆弱部の劣化程度によって改善比が増減するなど、改善の程度がコンクリートの耐凍害性に影響を受けることも確認できた。以下にその知見を示す。

- 1) 塗布材 A および B のけい酸塩系の浸透系塗布材は、コンクリート界面の脆弱部を改善する効果がある。しかし、固化型の塗布材 A と反応型の塗布材 B では、改善後の凍結融解作用に対する耐久性は異なり、反応型の塗布材 B は改善後も未反応分が新たな劣化を改善する作用があることから、改善後も凍結融解作用による劣化が進行する状態となった場合は固化型よりも反応型のほうが耐凍害性の向上に期待が持てる。
- 2) 塗布材 C および D のエポキシ樹脂系の浸透系塗布材は、コンクリート界面の脆弱部を改善する効果があり、改善後の遮水効果も大きいことから耐凍害性の向上が期待できる。一液湿気硬化型の塗布材 C と二液反応硬化型の塗布材 D では、脆弱部の改善効果には大きな差はみられない。しかし、硬化の速い塗布材 D は浸透に時間を要すると奥まで浸透する前に硬化してしまうことから、硬化の遅い塗布材 C ほうがより浸透して改善範囲が大きくなる傾向が見られる。
- 3) 浸透系塗布材の浸透深さおよび改善効果が期待できる深さは、浸透系塗布材の粘性や硬化速度、および脆弱部の劣化の程度に影響されるが、側面塗布では概ね 15～25mm 程度である。このため、コンクリート界面に残存する脆弱部の深さが 25mm 以下であれば、浸透系塗布材による改善効果が期待できる。

以上の結果を基に次章では、コンクリート界面の脆弱部を浸透系塗布材によって改善した後に断面修復材による補修を施した供試体の耐久性について実験した結果を記述する。

第2章の参考文献

- 1) 国立研究開発法人土木研究所：コンクリート構造物の補修対策施工マニュアル（案），土木研究所資料第 4343 号，Ⅴ 不具合事例集，2016.
- 2) 国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所：凍害が疑われる構造物の調査・対策手引書（案），参考資料 8，樋門の凍害劣化事例集，2017.
- 3) 内藤勲，田口史雄，石谷隆始，畠秀樹，出合寿勇：河川樋門コンクリートの凍害劣化と再劣化に関する調査，寒地土木研究所月報，No.678，pp. 17-26，2009.
- 4) 三田村浩，西弘明，吉田英二，野田直史：積雪寒冷地におけるウォータージェット工法の有効性とその適用について，2009 年度ウォータージェット技術年次報告会論文集，pp.55-60，2010.
- 5) 宮川智史，三田村浩，西弘明：打継ぎ界面の構造的評価（コンクリートの長寿命化に向けた予防保全），平成 22 年度 第 54 回 北海道開発技術研究発表会，HP 掲載，2011.
- 6) 渡邊晋也，堀井久一，後藤昭彦：ブレーカではつり処理を行ったコンクリート界面のエポキシ樹脂系接着剤を用いた補修方法に関する実験的研究，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第 12 巻，pp. 45-48，2012.
- 7) 日本産業規格：コンクリートの凍結融解試験方法，JIS A 1148，2010.
- 8) Jochen Stark ほか（訳：太田利隆ほか）：コンクリートの耐久性，第 2 版，社団法人セメント協会，2003.
- 9) Setzer, M. J., Fagerlund.G and Janssen.D.J. : CDF Tset - Test method for the freeze-thaw resistance of concrete - with sodium chloride solution, Materials and Structures, Vol.29, pp.523-528, 1996.
- 10) 魚本健人，加藤潔，広野進：コンクリート構造物の非破壊試験，森北出版，p.37，1990.
- 11) 岡田清，六車熙：改訂新版コンクリート工学ハンドブック，p.525，1981.
- 12) 日本産業規格：コンクリートの曲げ強度試験方法，JIS A 1106，2006.
- 13) 土木学会規準：表面含浸材の試験方法（案），透水量試験，JSCE-K571-2005，2005.
- 14) 国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所：凍害が疑われる構造物の調査・対策手引書（案），参 3-1，2017.

第 3 章

界面改善後の断面修復箇所 の耐凍害性の向上

第3章 界面改善後の断面修復箇所の耐凍害性の向上

3.1 概論

第3章では、第2章で検証した浸透系塗布材によるコンクリート界面の脆弱部の改善効果に関する実験結果を基に、浸透系塗布材で脆弱部を改善した後に断面修復したコンクリート供試体の耐凍害性の向上および補修効果の持続性を検証した実験結果について記述する。

3.2 実験概要

3.2.1 補修供試体の作製方法

第2章と同様にコンクリート界面に脆弱部を模擬するため、第3章では、表-3.2.1に示す2配合のコンクリートで2種類の供試体を作製し（28日間水中養生）、図-3.2.1に示すRILEMのCDF試験に準じた一面凍結融解試験（以下、CDF試験）¹⁾²⁾とJIS A1148 A法に準拠した凍結融解試験（以下、JIS試験）³⁾を実施して、供試体の一面（型枠底面）を劣化させた供試体を作製した。なお、一面から劣化させる深さを20mmとするため、それ以外の面はすべてエポキシ系接着剤で保護コーティングした状態で凍結融解試験を行った。

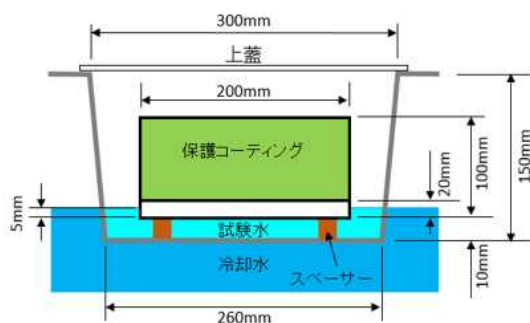
表-3.2.1 コンクリートの配合

セメント の種類	AE剤の有無	Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				Slump (cm)	Air (%)
					W	C	S	G		
普通ポルトラント	有り (AE)	20	55	45	150	273	870	1057	8.6	4.4
普通ポルトラント	無し (non-AE)	20	55	45	165	300	875	1062	9.3	1.5

CDF試験では、試験水に濃度3%のNaCl水溶液を用いて、供試体の劣化させる面（以下、劣化面）をCDF試験容器の試験水に深さ5mmまで浸漬し、1週間吸水させた後、その状態のまま凍結融解試験を56サイクル実施して一面が劣化した供試体を作製した。なお、本試験ケースに用いた凍結融解後の供試体は、多くの供試体の中から後述する超音波測定において劣化程度がほぼ

同程度となった供試体を選定した。また、JIS 試験では凍結融解試験を 100 サイクル（以下、サイクルは **cyc** と表記する）実施して劣化した供試体を作製した。ここでも同程度の劣化となった供試体を選定した。この一面を劣化させた供試体に、図-3.2.2 に示すように実構造物の側面を断面修復するケースを想定して種々の浸透系塗布材（以下、塗布材）を側面塗布し、その上から厚さ 15mm の断面修復材を左官工法で下向き打設した供試体（以下、断面修復供試体）を作製した。ここで下向き打設としたのは、断面修復材のダレによる接着力低下の影響を排除するためである。なお、JIS 試験の劣化供試体は凍結融解後に劣化面の反対側を 15mm 切断し、断面修復材の厚さ 15mm を加えて 100×100×400mm の角柱供試体となるようにした。

- ・ CDF試験 (RILEM) : +20 °C ~ - 20 °C
12時間／サイクル
試験水：3% 塩水
試験サイクル：0, 56 サイクル



- ・ JIS試験 (A 1148 A法)
： +5 °C ~ - 18 °C
3～4時間／サイクル
試験水：水道水
試験サイクル：0, 100サイクル

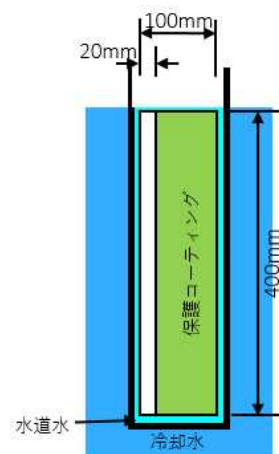


図-3.2.1 凍結融解試験のイメージ（左：CDF 試験，右：JIS 試験）



浸透系塗布材の塗布状況



断面修復材（厚さ15mm）の施工状況
（SBR系ポリマーセメントモルタル）

図-3.2.2 断面修復作業状況

表-3.2.2 に使用した浸透系塗布材および断面修復材の主な諸元を示す。塗布材 A は主成分がけい酸リチウムの固化型、塗布材 C, D, および E は主成分がエポキシ樹脂系の浸透系塗布材である。塗布材 A, C, および D は第 2 章で使用した塗布材であり、塗布材 E は第 2 章では使用していないが粘度が非常に低い材料であるため、脆弱部への多くの浸透を期待して追加した材料である。塗布材 C は、断面修復に使用する場合に材料メーカーが推奨する一液型接着プライマーを併用する仕様とした。なお、第 2 章で使用したけい酸ナトリウム系の塗布材 B は第 3 章では使用していない。また、断面修復材には SBR 系のポリマーセメントモルタルを使用した。一般に広く使用されているセメント系材料と液体混和材を定量混合するプレミックスタイプの断面修復材である。

表-3.2.2 浸透系塗布材の種類と主な諸元

浸透系塗布材	A	C	D	E
主成分等	けい酸リチウム	エポキシ樹脂		
	一液・固化型	一液・湿気硬化型	二液・反応硬化型	
粘度 (mPa・s)	10以下	150±100 (23°C)	300±200 (20°C)	30 (23°C)
曲げ強さ (N/mm ²)	—	2.6	70以上	—
接着プライマー	無	有 (エポキシ樹脂系)	無	無
標準塗布量 (g/m ²)	200～400 (2回塗り)	300 (2回塗り)	100～300 (重ね塗り可)	400 (2回塗り)
断面修復材 (プレミックスタイプ) SBR系	圧縮強さ (N/mm ²)	曲げ強さ (N/mm ²)	接着強さ (N/mm ²)	長さ変化 (%)
	38.0	11.1	1.8	0.098

※ カタログ値

3.2.2 試験ケース

表-3.2.3 に試験ケースを示す。CDF 試験では耐凍害性のある AE コンクリートの 100×100×200mm の角柱供試体、JIS 試験では凍害劣化が進行しやすい non-AE コンクリートの 100×100×400mm の角柱供試体を使用した。塗布材は各試験ケースで塗布量の違いにより試料名を A1, A2, C1, C2, D1, D2, E1, E2 と表記し、塗布材を使用しない試料名は無塗布 N とした。塗布量は標準塗布量とその 2 倍量の 2 水準を基本とした。これは、第 2 章の実験において、塗布時に塗布材が流下することで改善が不足傾向となった結果から、もう少し時間を空けて追加塗布して改善効果を上げるイメージで 2 倍量の塗布とした。ただし、塗布材 C は標準塗布量の塗布で改善効果が高かったため、逆に改善不足をイメージした 1/2 倍量と標準塗布量の 2 水準とした。

試験ケースの「先 56cyc」は先に CDF 試験で 56cyc の凍害劣化が生じた状態の劣化面に塗布材を

塗布するケースを意味する。「先 56-再 28cyc」および「先 56-再 56cyc」は、先に CDF 試験を 56cyc 行い、劣化面に塗布材を塗布して断面修復した後、再度 CDF 試験を 28cyc および 56cyc 行うケースである。「先 0-再 28cyc」は劣化なしの状態に塗布材の塗布を行わず、断面修復後に CDF 試験を 28cyc 行ったケースである。また、JIS 試験の「先 100cyc-再 FT」は、CDF 試験と同様に先に JIS 試験の 100cyc で劣化させた面に塗布材と断面修復を施した後に、再度 JIS 試験を実施するケースを意味する。なお、後述する試験結果では、例えば、塗布材 A1 の先 56-再 28cyc は「A1(56-28)」と表記する。また、供試体数は、先行劣化させた数多くの供試体から同程度に劣化した供試体を用いて比較検討したため、各ケース 1 供試体による評価とした。

表-3.2.3 試験ケース

試験シリーズ	凍結融解方法	コンクリート	含浸塗布材	無塗布	塗布材A		塗布材C		塗布材D		塗布材E		断面修復厚さ (mm)
			試料名	N	A1	A2	C1	C2	D1	D2	E1	E2	
			試験ケース	塗布量 (g/m ²)									
CDF試験	CDF	AE	先56-再28cyc	0	400	800	150	300	200	400	400	800	15
			先56-再56cyc	0	400	－	150	－	200	－	－	－	15
			先0-再28cyc	0	－	－	－	－	－	－	－	15	
JIS試験	JIS	nonAE	先100cyc-再FT	0	400	800	150	300	200	400	400	－	15

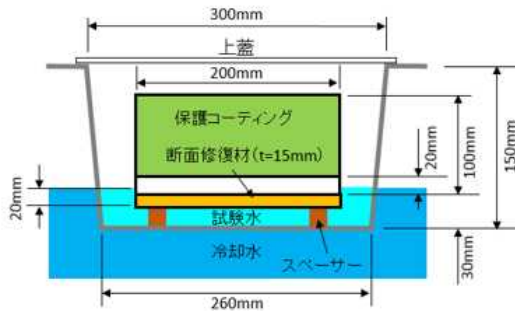
※ CDF試験は100×100×200mm角柱、JIS試験（JIS A1148 A法）は100×100×400mm角柱を使用

3.2.3 断面修復後の凍結融解試験方法

作製した各ケースの断面修復供試体に再度凍結融解作用を与えて断面修復後の耐凍害性の評価を行うための CDF 試験（以下、再 CDF 試験）と JIS 試験（以下、再 JIS 試験）を行った。

再 CDF 試験では、先の CDF 試験と同様の方法で所定のサイクル数を実施して断面修復供試体に再劣化を生じさせた。再 CDF 試験で実施したサイクル数は 28cyc と 56cyc の 2 ケースとした。なお、図-3.2.3 に示すように、試験水に浸漬させる深さは断面修復材の厚さ 15mm を含めてコンクリートの界面から 5mm までとした。このような水分供給の状態は、界面に水分が供給されて凍害劣化が生じて断面修復材が剥離する現象を再現したものである。再 JIS 試験においても、供試体は水没するが、保護コーティングによって界面から水分が供給される状態を模擬し、そこから凍害劣化が生じて断面修復材が剥離する状態を再現した。なお、再 JIS 試験の凍結融解サイクルは断面修復材が剥離するまでもしくは 600cyc までとした。

- ・再CDF試験 (RILEM)
試験サイクル：0, 28, 56 サイクル



- ・再JIS試験
試験サイクル：600サイクル
もしくは
断面修復材が剥離するまで

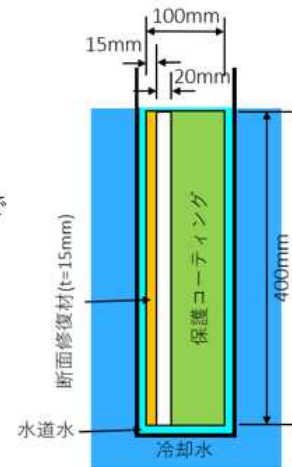


図-3.2.3 再凍結融解試験のイメージ（左：再 CDF 試験，右：再 JIS 試験）

3.2.4 改善効果の評価方法

浸透系塗布材の塗布によってコンクリート界面の脆弱部を改善し、その改善効果によって断面修復箇所のコンクリートと断面修復材との接着が持続する性能（以下、接着耐久性）の向上を評価するため、超音波伝播速度の測定、スケーリング量の測定、付着強度試験、および断面修復材の剥離状態の確認を行った。

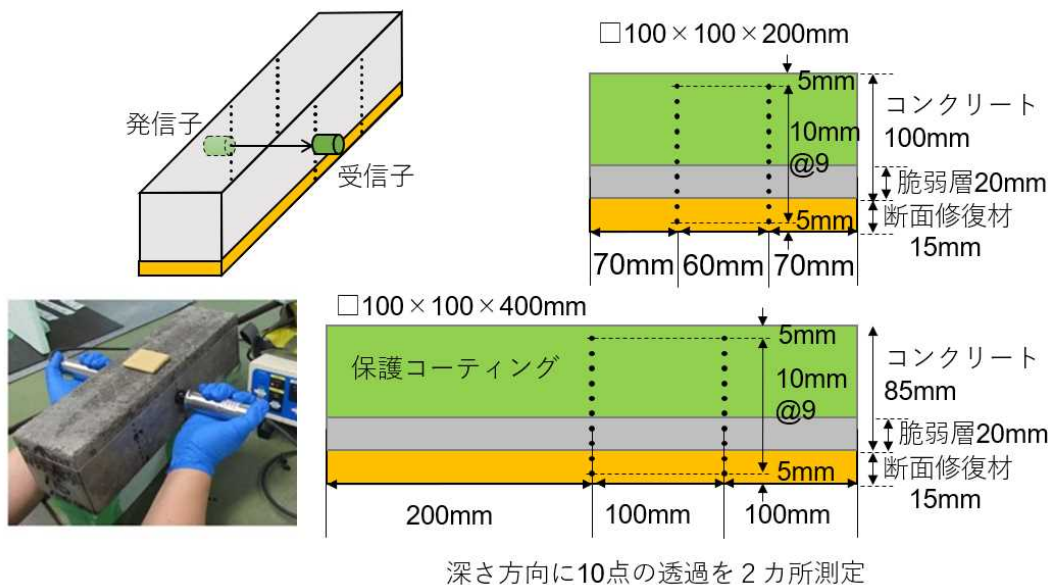


図-3.2.4 超音波透過法の測定方法と測点位置

超音波伝播速度の測定は、第2章と同様に超音波透過法⁴⁾によってコンクリート界面から深さ方向にコンクリートの劣化程度と塗布材による脆弱部の改善程度を判定した。測点は図-3.2.4に示すように、断面修復材から深さ方向に10mm毎に5～95mmの範囲で計10点とした。なお、保護コーティングを施している箇所はコーティングを介して行った。測定は、CDF試験後あるいはJIS試験後、塗布材の塗布後あるいは断面修復材の打設後、および再CDF試験後に行った。

スケーリング量の測定¹⁾²⁾は、CDF試験および再CDF試験後における補修供試体の凍害劣化の程度を示す指標として実施した。スケーリング量は所定サイクル終了後、CDF試験容器内にある供試体から剥離したコンクリート片等の質量を測定することで求めた。

付着強度試験は、図-3.2.5に示すように、再CDF試験後の断面修復供試体の2箇所で行った。試験方法は、断面修復材の表面からφ60mmの円形切り込みを深さ40mmの位置まで入れ、円形治具をエポキシ系接着剤により装着して試験を実施した。試験後、治具に付着したコンクリート片の8箇所の厚さを平均した破壊深さと最大付着強度を2箇所の平均で求めた。また、再JIS試験においては、断面修復材が剥離するまで凍結融解作用を与えた後に断面修復材の剥離状態を目視観察した。

これら4つの測定結果から、浸透系塗布材によるコンクリート界面の脆弱部の改善状態と改善効果を評価し、脆弱部の改善効果が断面修復箇所の接着耐久性に及ぼす影響について考察した。

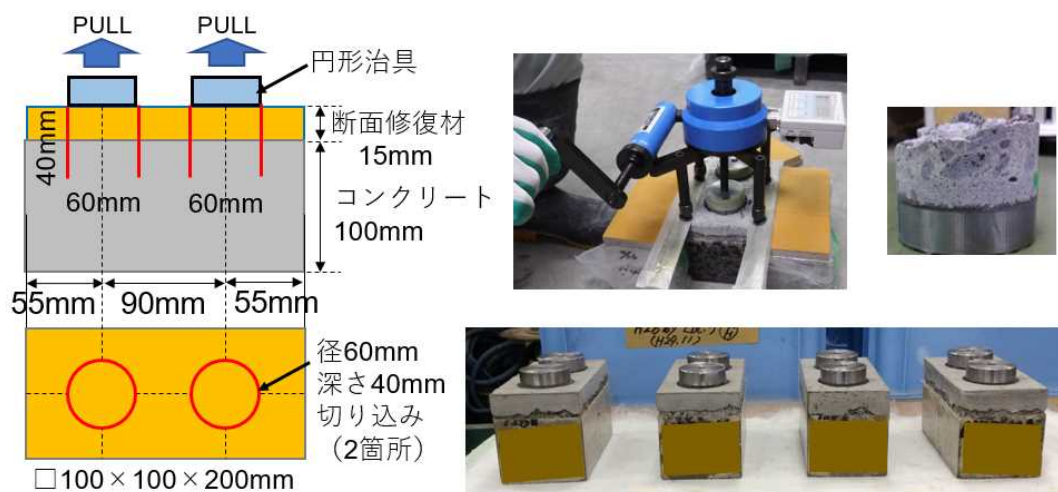


図-3.2.5 付着強度試験方法

3.3 実験結果

3.3.1 改善深さと破壊位置の関係

図-3.3.1 に無塗布 N と各塗布材の先 56-再 28cyc の各試験ケースおよび無塗布 N の先 0-再 28cyc の試験ケースにおける超音波伝播速度と付着強度試験における破壊位置（表面からの深さ）を示す。また、図-3.3.2 に各供試体の付着強度試験における CDF 試験後と再 CDF 試験後の破壊状況写真（側面を 4 箇所撮影）を示す。

補修前（先 56cyc 後）では、CDF 試験による凍害劣化によってコンクリートと断面修復材との界面付近の超音波伝播速度（以下、超音波速度）が大きく低下しており、さらに界面から深さ方向に向かって超音波速度が増加していることから、界面から内部に向かって劣化が進行したことがわかる。この状態に各塗布材を塗布して断面修復を施した結果、超音波速度は全体的に大きく

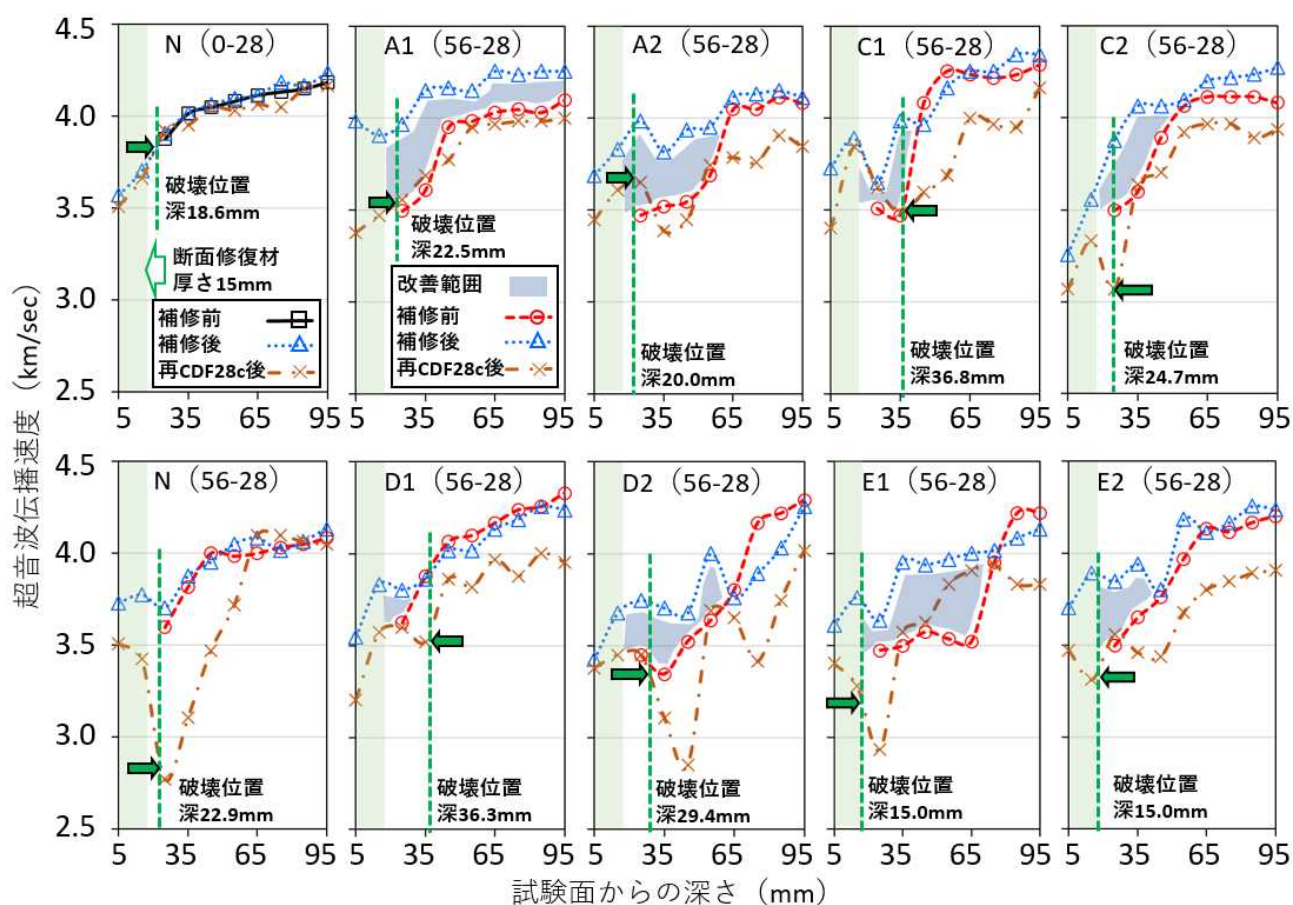


図-3.3.1 補修前後の超音波伝播速度と付着強度試験における破壊位置の関係

増加したことから、第2章と同様に、塗布材の浸透・固化もしくは硬化によって脆弱部が緻密化して改善されたことがわかる。

脆弱部がない無塗布 N(0-28)のケースでは、再 CDF 試験後も超音波速度に変化がなく劣化のないほぼ健全な状態であるが、劣化させた界面にそのまま断面修復した N(56-28)では、再 CDF 試験後に超音波速度が大きく低下して再劣化した状態となった。付着強度試験による破壊位置はほぼ界面付近であり、界面付近が大きく凍害劣化したことで接着力が低下したと考えられる。

塗布材 A のケースでは、補修後に内部の脆弱部から健全な範囲まで超音波速度が全体的に増加

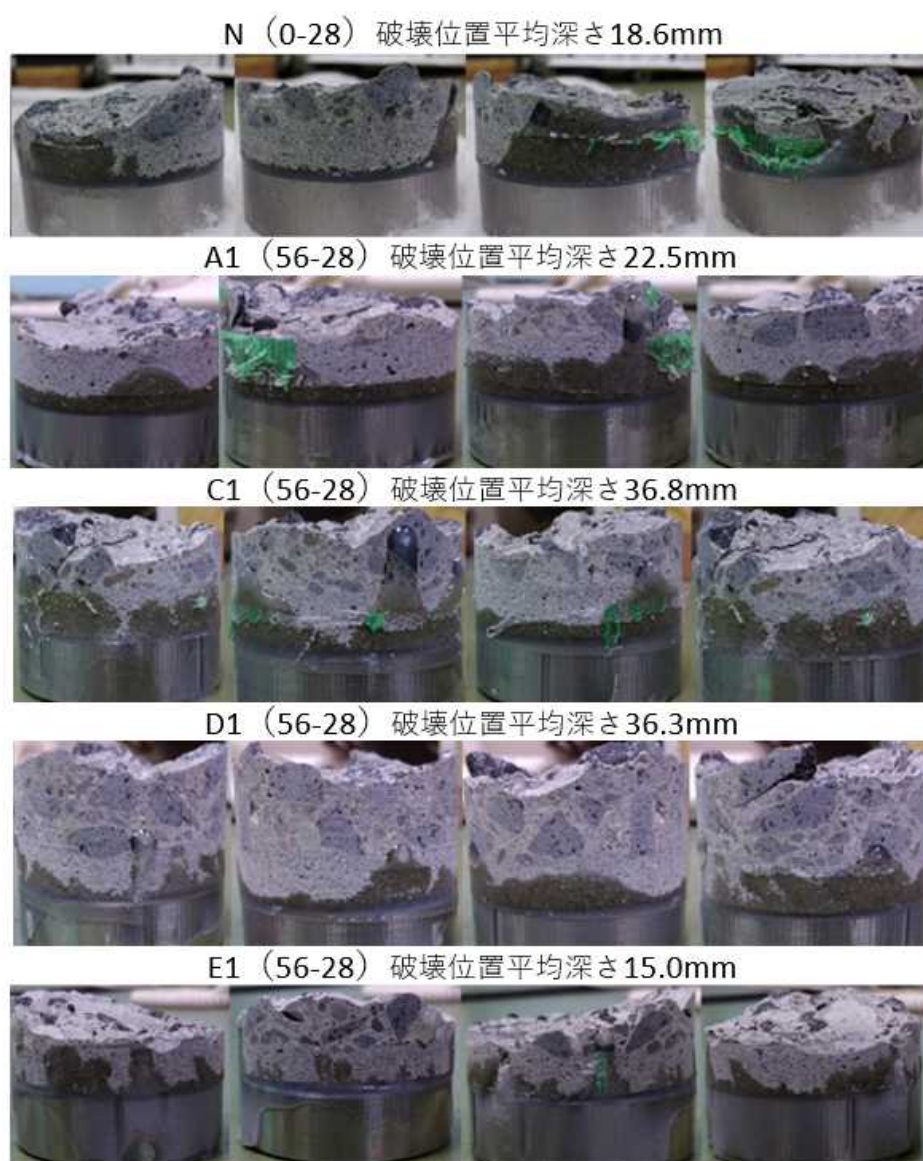


図-3.3.2 付着強度試験における CDF 試験後と再 CDF 試験後の破壊状況写真(1)

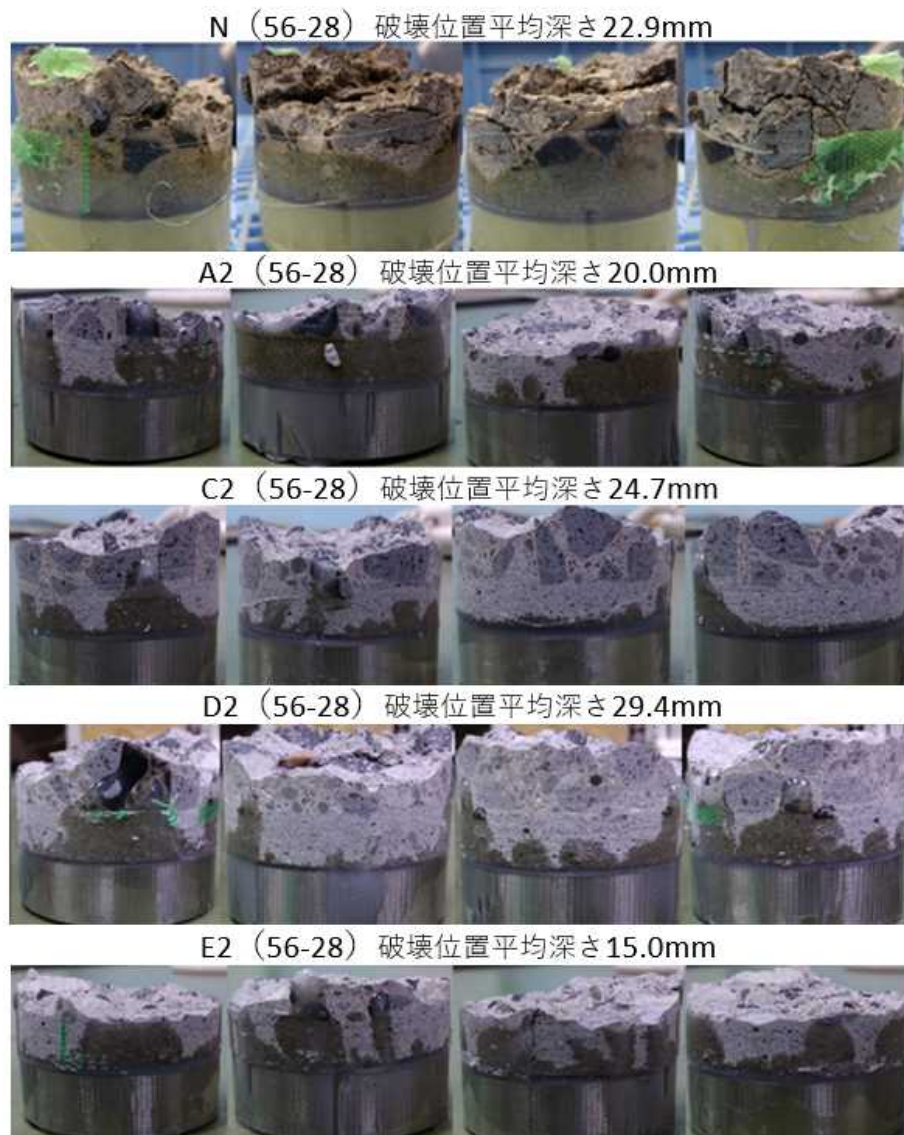


図-3.3.2 付着強度試験における CDF 試験後と再 CDF 試験後の破壊状況写真(2)

している．これは塗布材が健全部にも浸透してより緻密化したと推測される．しかし，再 CDF 試験後には元の劣化にほぼ近い状態まで超音波速度が戻っており，破壊位置も無塗布 N と同様にほぼ界面付近で破壊したことから，界面付近で凍害劣化が進行したと考えられる．ただし，無塗布 N(56-28)よりも超音波速度は低下していないことから，改善によって再劣化の程度は抑制されていると言える．

塗布材 C のケースでは，塗布材 A ほどではないが塗布後の超音波速度は増加しており，劣化部が改善されていることが伺える．塗布量の多い C2 の方がより深部まで浸透している結果となっ

たが、破壊位置は、C1 は塗布材の浸透最深部付近、C2 は界面から深さ 10mm 程度の比較的界面に近い位置となった。C2 は再 CDF 試験後の超音波速度が一番低い位置で破壊していることから改善効果が一番少なかった箇所と考えられる。改善効果が多く得られなかった要因として、劣化の程度に対して塗布量が多過ぎたために、界面付近では浸透できずに流下して拡散不足が発生したと推測され、材料自身の接着力があるため界面破壊にはならなかったと思われる。なお、無塗布 N(56-28)よりも超音波速度は低下していないことから、塗布材 C においても改善によって再劣化は抑制できていると言える。

塗布材 D のケースでは、塗布量の多い D2 の再 CDF 後の超音波速度が大きく低下する結果となり、無塗布 N(56-28)と同程度の再劣化となった。D2 の破壊位置も C2 と同様に改善範囲内の界面から深さ 15mm 程度であった。この破壊位置となった要因は C2 とほぼ同じであり、界面破壊にはならないが、改善後の超音波速度の回復が他よりも若干低かったことから、塗布材 D は粘度が少し高く硬化も速いために微細な空間等への浸透・拡散が滞った可能性も考えられる。

塗布材 E のケースでは、塗布後の超音波速度が増加していることからコンクリートが改善されたことは確認できた。再 CDF 試験後も他のケースと同様にコンクリートの超音波速度は低下する結果となった。しかし、他の樹脂系と異なり塗布量に関わらず 2 ケースとも界面破壊となったことから、断面修復材との接着力が低いことが推測される。

3.3.2 最大付着強度

図-3.3.3 および図-3.3.4 に各ケースにおける再 CDF 試験後の付着強度試験による最大付着強度、およびスケール量と最大付着強度の関係を示す。塗布材 E を除き、塗布材 A、C、および D は無塗布 N よりも最大付着強度が全体的に大きくなった。このことから、塗布材によって脆弱部を改善すると断面修復材とコンクリートとの接着力は向上すると言える。

再凍結融解回数の多い再 56cyc のケースでは、再 28cyc よりも最大付着強度が低下し、スケール量は増加することから、脆弱部の改善を施しても凍結融解回数が増加すると凍害劣化は進行して断面修復箇所の品質は徐々に低下していくことがわかる。しかし、塗布材 A と C は、凍結融解回数が増えても無塗布 N の最大付着強度を上回っていることから、改善効果によって耐凍害性が向上したと考えられる。なお、スケール量として計測した剥落片はそのほとんどがコンクリート片であり、界面付近のコンクリートの劣化によるものと思われる。

さらに、塗布量が多くなると最大付着強度は若干低下する傾向が見られた。これは、前述した C2 と D2 の破壊位置の要因と同じであり、界面付近での塗布材の拡散不足が強度低下に繋がった

と考えられる．このことから，脆弱部の劣化の程度に対して最大限の改善効果を得るための塗布材の適量が存在すると推測される．

また，塗布材 E は，最大付着強度が極端に低いことから，塗布材と断面修復材との接着性が良くないケースであると思われる．

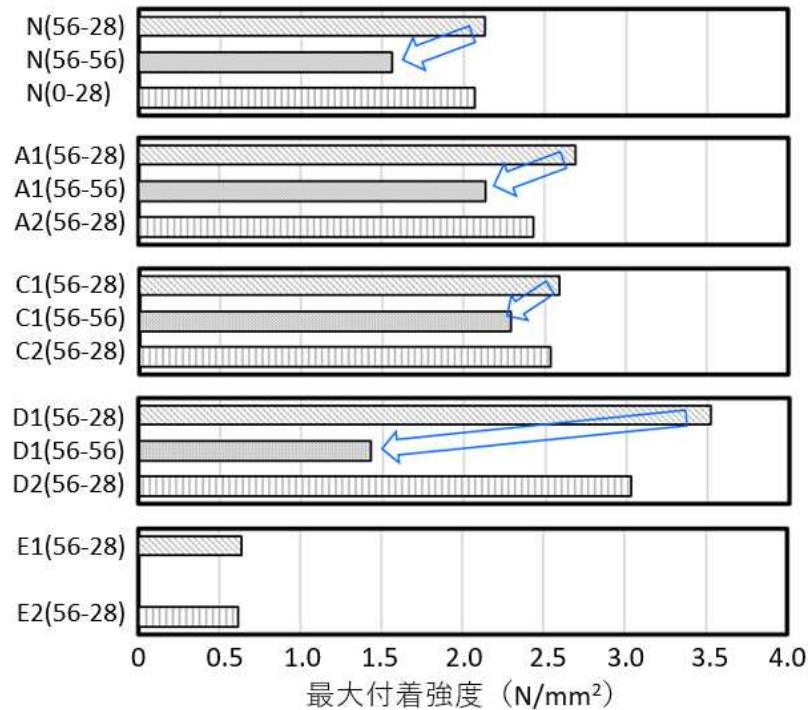


図-3.3.3 最大付着強度

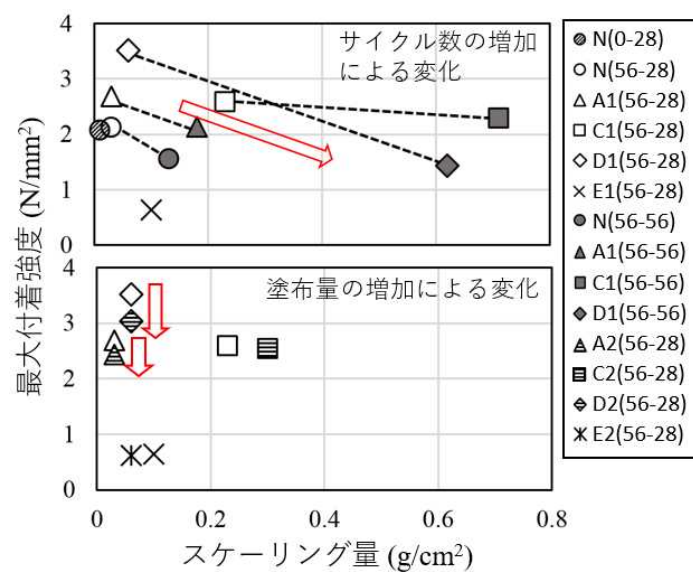


図-3.3.4 スケーリング量と最大付着強度

3.3.3 凍結融解作用による断面修復効果の持続性

次に、断面修復材が剥離するまで凍結融解作用を与えた再 JIS 試験において、図-3.3.5 に各試験ケースの劣化前および補修前後の超音波伝播速度の変化、および図-3.3.6 に各試験ケースの凍結融解サイクルに対する質量減少率の経時累計と断面修復材の剥離状態を示す。各ケースにおいて断面修復材が剥離した凍結融解サイクルは、A1 が 460cyc, A2 が 400cyc, E1 が 210cyc, 無塗布 N が 400cyc であり、C1, C2, D1, および D2 は 600cyc でも剥離が生じなかった。また、質量減少率は、E1 を除いたすべてのケースで 300cyc 前後から徐々に大きくなっており、断面修復材の剥離状態を確認すると、凍結融解サイクル中に剥離した A1, A2, E1, および N は、断面修復材とコンクリートとの界面で剥離していた。これは再 CDF 試験の結果と同様の結果である。

一方、C1, C2, D1, および D2 は、600cyc 終了後において、供試体側面のコンクリート部に長手方向に大きなひび割れが見られ、コンクリートも表面が削れるスケーリング劣化が生じていた。

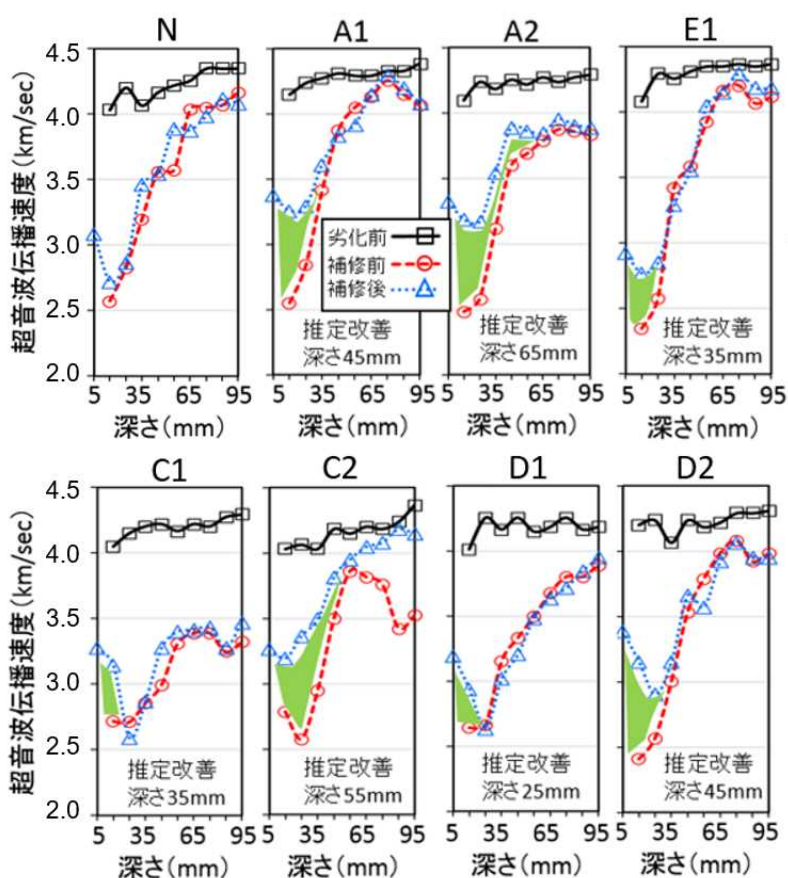


図-3.3.5 劣化前および補修前後の超音波伝播速度の変化

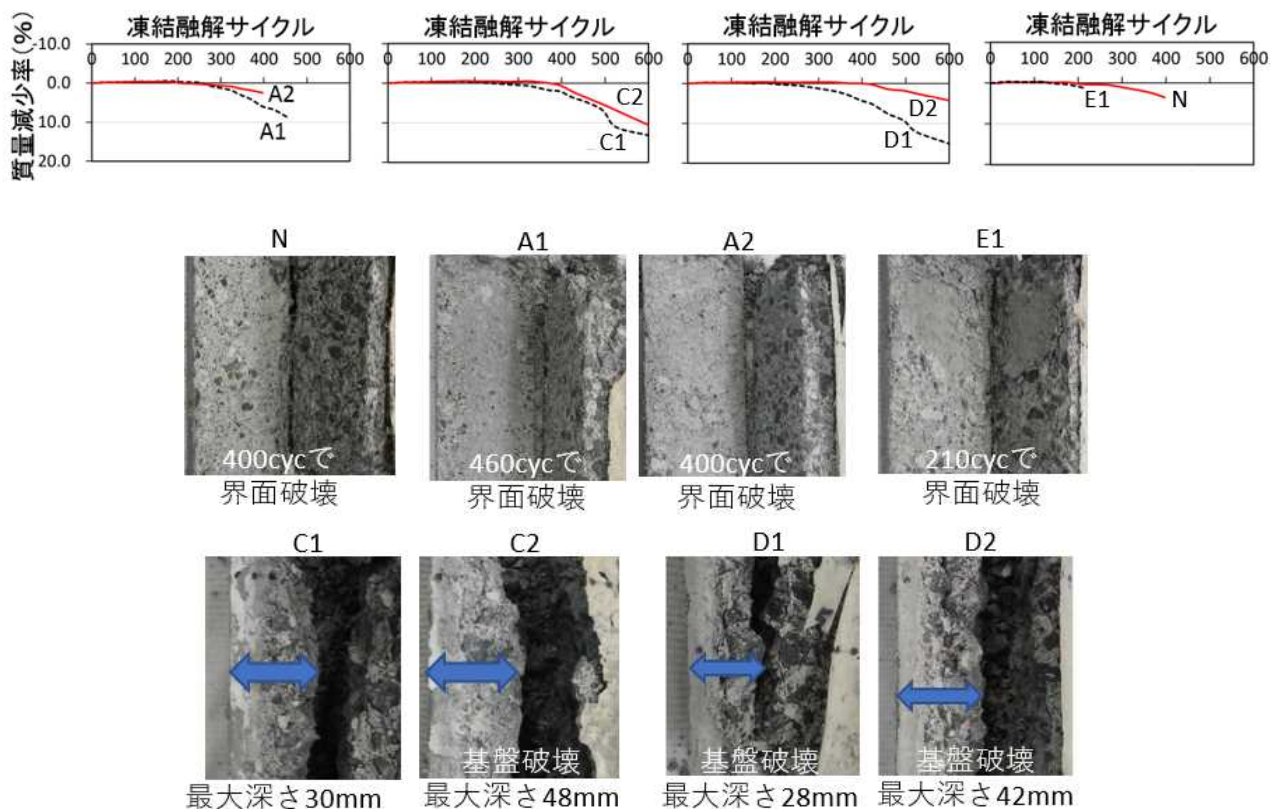


図-3.3.6 質量減少率の経時累計と断面修復材の剥離状態

木槌で断面修復材の側面を数回打撃するとそのひび割れから断面修復材にコンクリートが付着した状態で剥離した。その剥離厚さをメジャーで測定すると、超音波速度で推定された改善深さとほぼ一致していた。これは、改善範囲で凍害劣化は抑制され、改善範囲以深で凍害劣化が進行して基盤破壊が生じた結果であり、改善によって断面修復材とコンクリートとの接着力を持続させる効果が得られ、断面修復箇所の耐凍害性および接着耐久性が向上したと言える。

ここで塗布量に関して、JIS 試験における先行劣化部の超音波伝播速度は 2.5km/sec 程度であり、前述した CDF 試験よりも劣化の程度が大きく空隙等も多いことから、塗布量 2 倍でも塗布材は表面にほぼ残らず浸透していた。したがって、CDF 試験よりも脆弱部への浸透量が多くなり、C1, C2, D1, および D2 の剥離厚さから、塗布量 2 倍の方が深く改善されて接着力も向上したことから、劣化の程度と塗布材の浸透性との関係になるが、より深くまで多く浸透・拡散できれば断面修復箇所の耐凍害性と接着耐久性は大きく向上する可能性が示唆された。

また、塗布材 E では、再 CDF 試験の結果と同様に界面破壊が早いサイクルで生じたことから接着性（相性）に問題があることを確認できた。

3.4 まとめと考察

断面修復箇所の耐凍害性向上対策の検討において、コンクリート界面の脆弱部を改善して断面修復する手法の適用性と有効性について整理した結果を以下に述べる。

コンクリート界面に浸透系塗布材を塗布してから断面修復を行った結果、コンクリート界面の脆弱部が塗布材によって改善されることで断面修復箇所の耐凍害性が向上し、結果として断面修復材とコンクリートとの接着耐久性が持続することを確認した。特に、エポキシ樹脂系の浸透系塗布材は脆弱部の改善効果が大きく、材料自身の接着力も含めて接着効果が高まって断面修復材とコンクリートとの接着耐久性が大きく持続することから、断面修復箇所の耐凍害性の向上に非常に効果があることが明らかとなった。しかし、エポキシ樹脂系の種類によっては、硬化速度や粘性の影響により、脆弱部の劣化の程度に対する塗布材の浸透性と浸透量が見合わないで脆弱部への浸透・拡散が滞ること、断面修復材との接着性に相性が存在することも確認した。したがって、塗布材による改善効果は脆弱部の劣化の程度と塗布材の浸透性能等に影響され、劣化程度に対する適量が存在すると考えられる。このことから、浸透系塗布材の浸透深さがより深くまで浸透して密実に充填できれば、断面修復箇所の耐凍害性は大きく向上する可能性が示唆された。

以上のことから、本研究結果において、コンクリート界面の脆弱部を改善して断面修復を行う手法の適用性を確認できたと共に、本手法は寒冷環境下における断面修復箇所の再劣化防止策として有効な方策であることを明らかにした。

今後の課題として、本手法を実際の断面修復箇所へ適用するためには、温冷差によって断面修復材の収縮により剥離しやすくなることも含めて、改善後の接着耐久性の品質管理方法の検討や部材毎の適用方法等を検討していく必要がある。

第3章の参考文献

- 1) Jochen Stark ほか（訳:太田利隆ほか）：コンクリートの耐久性，第2版，社団法人セメント協会，2003.
- 2) Setzer, M. J., Fagerlund.G and Janssen.D.J. : CDF Tset - Test method for the freeze-thaw resistance of concrete - with sodium chloride solution, Materials and Structures, Vol.29, pp.523-528, 1996.
- 3) 日本産業規格：コンクリートの凍結融解試験方法，JIS A 1148, 2010.
- 4) 魚本健人，加藤潔，広野進：コンクリート構造物の非破壊試験，森北出版，p.37, 1990.
- 5) 国立研究開発法人土木研究所：コンクリート構造物の補修対策施工マニュアル（案），土木研究所資料第4343号，III 断面修復工法編，附録資料D，断面修復材の付着強度試験方法（案），pp.III-45-III-48, 2016.

第4章

ひび割れ注工法の 耐久性評価

第4章 ひび割れ注入工法の耐久性評価

4.1 概論

第4章では、コンクリート構造物のひび割れを修復する工法であるひび割れ注入工法の耐久性に着目した。ひび割れ注入工法は前章で述べた断面修復工法と同じく、コンクリート構造物の劣化・損傷箇所を直接補修する方法のひとつであり、古くから使用されている。ひび割れ注入工法は、注入するひび割れにひび割れ注入材をすべて充填して、ひび割れを完全に閉塞することでコンクリート構造物の一体化を図ることを原則としている¹⁾。これは、ひび割れ内部にひび割れ注入材が満たされなかった、いわゆる「注入不足」あるいは「充填不足」と言われる状態になった場合、一体化が損なわれてひび割れ内に残された未充填部から再び劣化が進行する等の不具合が懸念されるためである²⁾。しかし、ひび割れ注入後の耐久性については未だ明確になっていないのが現状であり、また、充填不足等の状態も正確に測定する技術は確立されていない。さらに、第1章で記述した実際のひび割れ注入工事における充填不足の実態も明らかとなっている³⁾。

このような背景から、本章では、ひび割れ注入工法によって補修されたコンクリートの耐久性、特に凍害および凍害と塩害の複合作用に対する耐久性（耐凍害性）について、ひび割れ注入材の未充填が再劣化の進行に及ぼす影響や再劣化が進行するメカニズムを実験的に検証した結果について述べる。

4.2 実験概要

4.2.1 ひび割れ注入後の耐久性実験の概要

本章で実施したひび割れ注入後の耐久性実験は、ひび割れを導入したコンクリート供試体にひび割れ注入材でひび割れを充填した供試体（以下、模擬ひび割れ注入供試体）を用いて注入後の劣化進行等を再現する方法で実施した。検討内容は、コンクリートの凍害劣化が注入箇所の耐久性に及ぼす影響に関する検討、ひび割れ注入材の未充填箇所が凍害劣化の進行に及ぼす影響に関する検討、および暴露実験による注入後の補修効果の持続性評価に関する検討とした。供試体の状態変化等を評価する手法として、凍結融解試験、超音波伝播速度の測定、X線CTによる測定、

曲げ試験，自然電位測定，および電位差滴定法による塩化物イオン量の測定を行った．これらの結果から得られたコンクリートの劣化状態の変化や注入箇所の接着状態変化からひび割れ注入後の耐久性（耐凍害性）について評価した．

4.2.2 模擬ひび割れ注入供試体の作製

模擬ひび割れ注入供試体は以下の4種類とした．

①接着供試体

無筋の100×100×400mmの角柱供試体を半分に切断し，ひび割れ注入材（以下，注入材）で切断面同士を接着する方法で作製した模擬ひび割れ注入供試体．

②円柱注入供試体

塩化ビニール管を型枠とした径56×200mmの円柱供試体の割裂ひび割れに注入して作製した模擬ひび割れ注入供試体．

③④未充填接着供試体

無筋の100×100×200mmの角柱供試体を半分に切断し，①と同様に注入材で切断面同士を接着する方法で，充填不足を模擬するために接着面積を50%，80%，100%として作製した模擬ひび割れ注入供試体．

⑤大型注入供試体

D13の鋼材（異形鉄筋）1本を長辺方向のかぶり70mmの位置に配した200×200×1000mmの角柱供試体の割裂ひび割れに注入材を注入して作製した模擬ひび割れ注入供試体．

模擬ひび割れ注入供試体の母体となるコンクリートは，表4.2.1に示す3種類の配合とした．なお，①接着供試体に使用したコンクリートは凍害劣化を促進させることを目的にAE剤を使用しない配合とした．以下に，各模擬ひび割れ注入供試体の作製方法を記す．

表-4.2.1 コンクリートの配合

配合 番号	使用 供試体	セメント の種類	AE剤の有無	Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				Slump (cm)	Air (%)
							W	C	S	G		
1	①	普通 ポルトランド セメント	無し (non-AE)	20	45	43	160	356	838	1102	8.0	1.5
2	②		有り (AE)	20	52.1	43.8	156	300	812	1032	7.5	5.5
3	③④⑤		有り (AE)	20	55	47	154	280	890	1001	8.0	4.5

接着供試体と未充填接着供試体の作製方法は、図-4.2.1に示すように、コンクリート打設後に28日間水中養生した角柱供試体を半分に切断後、切断面を電動ニードルで軽くチップングし、エアや刷毛によってレイトンス除去等の表面清掃処理を行い、型枠を付けた片方の切断面に注入材をヘラ等で厚さ0.5mm程度に均等に塗布してもう片方を重ねて接着させる方法で作製した。未充填接着供試体の接着面積の制御は、接着面にビニールで不施工面を施した状態で注入材を塗布する方法とした。接着後は固定器具で固定して20℃の恒温槽で7日間養生した。なお、注入材の厚さは、厚さ0.5mm程度となるように切断面の四隅に厚さ0.5mmのアルミ箔を挟むことで調整した。また、接着供試体と未充填接着供試体の注入面以外はエポキシ樹脂系の接着剤で保護コーティングを施して注入面のみから水分供給を受ける状態とした。また、③未充填接着供試体は注入面とその側面20mmを給水面として保護コーティングを施した。なお、この接着方法によって模擬ひび割れ注入供試体を作製した経緯は、ひび割れの状態がほぼ同じで注入材の充填状態を制御できる供試体を数多く作製するためである。

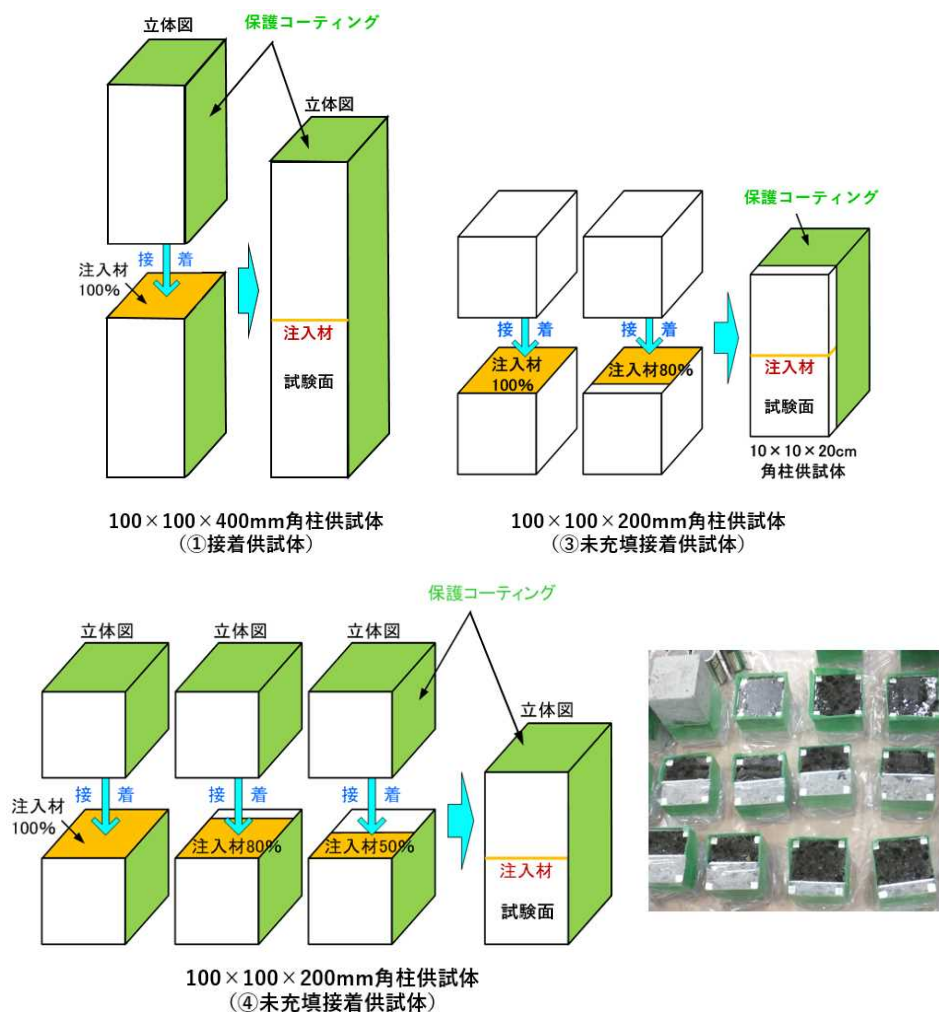


図-4.2.1 接着供試体と未充填接着供試体の作製方法

円柱注入供試体の作製方法は、山本らが提案した作製方法⁴⁾を用いてひび割れ供試体を作製した。図-4.2.2に示すように、まず400×400×200mmの直方体（28日間封かん養生）の供試体を作製し、この供試体から径50mm×長さ200mmのコアを2本採取して、これらを内径56mm（厚1.8mm）の硬質塩化ビニール管（VU管：以下、塩ビ管）にそれぞれ挿入して塩ビ管との隙間を一般的に使用されている無収縮モルタルで充填した。その後、28日間封かん養生を経てから塩ビ管の側面に載荷し、内部のコアに0.2mm幅の割裂ひび割れを導入した。なお、割裂ひび割れ導入時に載荷を停止すると塩ビ管の復元力でひび割れが収束してしまうため、0.2mm幅のひび割れとなるように、厚さ0.2mmのアルミ箔をひび割れの両端に挟むことで調整した。導入したひび割れに自動低圧注入工法で注入材を注入して、図-4.2.2のイメージ図のように注入材が十分に充填された条件Aと注入材が未充填となる条件Bの2条件の円柱注入供試体を作製した。

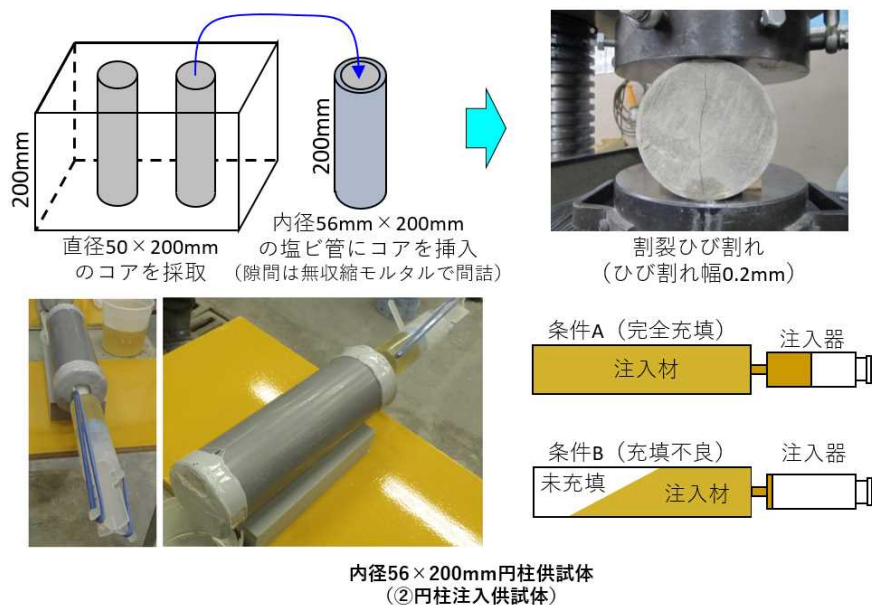


図-4.2.2 円柱注入供試体の作製方法

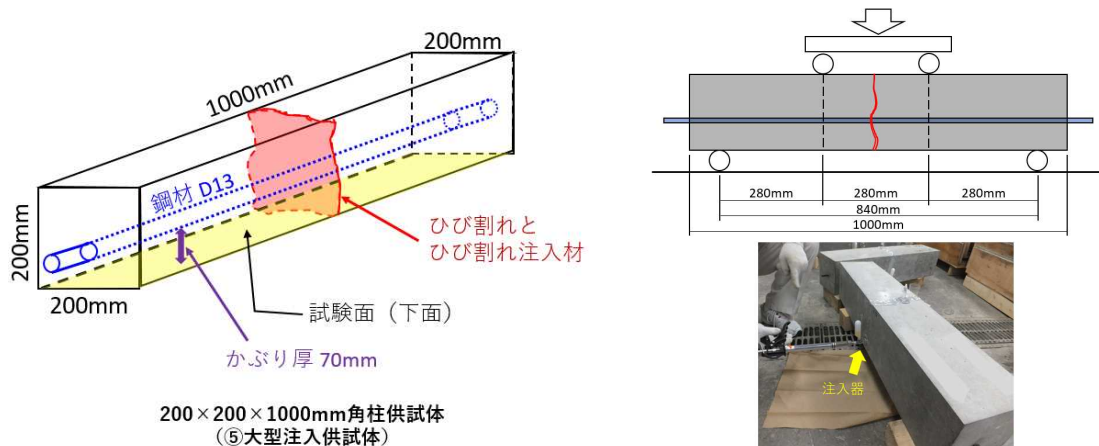


図-4.2.3 大型注入供試体の作製方法

大型注入供試体の作製方法は、図-4.2.3に示すように、D13の鋼材（異形鉄筋）1本を長辺方向のかぶり70mmの位置に配した200×200×1000mmの角柱供試体をコンクリート打設から28日間シート養生した後に4点載荷で供試体の中央付近に幅0.3～0.4mm程度の割裂ひび割れを導入し⁵⁾、4点載荷の下面側（型枠底面側）を注入面として、注入面を側面とした状態で自動低圧注入工法にてひび割れに注入し、注入終了後20℃の恒温室で7日間養生して作製した。なお、自動低圧注入作業は、供試体長軸を水平に、ひび割れを縦方向に向けた状態にして、ひび割れのほぼ中心に注入口を設け、注入口と排出口以外のひび割れはすべてシール材で閉塞した状態で注入した。この大型注入供試体ではひび割れに注入材が完全に充填される状態となるように注入を行った。なお、注入材の接著作業、注入作業および養生はすべて室温20℃の恒温室で実施した。

4.2.3 ひび割れ注入材の種類と試験ケース

実験に用いた注入材は、実際のひび割れ注入工事で使用されているエポキシ樹脂系とセメント系の注入材を使用した。エポキシ樹脂系は硬質系低粘度形の注入材3種類とセメント系は超微粒子セメントのポリマー無し、ポリマー有りの2種類とした。表-4.2.2に使用した注入材の種類と主な諸元を示す。3種類のエポキシ樹脂注入材は、すべて硬質系低粘度形の注入材である。EP1とEP2はひび割れ注入工事で数多く使用されている標準的な注入材であり、可使時間が少し異なる以外はほぼ同じような品質の注入材である。一方でEP3は粘度が低く可使時間が短い注入材であり、規格では低粘度形に属する⁶⁾が超低粘度形と称されている注入材である⁷⁾。また、2種類のセメント系注入材は、CE1が超微粒子セメント注入材、PC1が超微粒子ポリマーセメント注入材であり、両者ともひび割れ注入工事に数多く使用されている注入材である。なお、注入材を使用しないコンクリートのみの供試体はNとした。

①接着供試体、②円柱注入供試体、③④未充填接着供試体、および⑤大型注入供試体に使用した注入材と試験条件を示した試験ケースを表-4.2.3に示す。試験ケースにおいて、シリーズ1では、接着供試体にJIS A1148 A法に準じた凍結融解作用⁸⁾を与えて、注入後の凍害劣化の進行状況を超音波トモグラフィー法⁹⁾¹⁰⁾による評価を試みた。シリーズ2では、注入材が完全充填状態と未充填状態の円柱注入供試体にJIS A1148 A法に準じた凍結融解作用を与えて、ひび割れ注入箇所の凍害劣化発生状態をX線CTの画像解析によって検証する試みを行った。シリーズ3では、未充填接着供試体にRILEMに準じたCDF試験¹¹⁾¹²⁾による凍結融解作用を与えて、注入後の凍害と塩害の複合劣化の進行状況および注入材の接着状態等をスケーリング量と超音波透過法の測定¹³⁾によって評価した。最後にシリーズ4では、寒冷環境の異なる北海道の2箇所において、未充填接着供試

表-4.2.2 ひび割れ注入材の種類と主な諸元

注入材記号	E P 1	E P 2	E P 3	C E 1	P C 1
注入材の種類	樹脂系（硬質系低粘度形）			超微粒子セメント系	
	エポキシ系			ポリマー-無	ポリマー-有
粘度 (mPa・s)	594 (20℃)	570 (23℃)	330 (20℃)	71 (20℃)	208 (20℃)
適用温度 (℃)	5～20	5～20	-4～20	5～30	5～30
接着強さ (MPa) (標準条件)	7.60	7.16	8.10	—	—
引張せん断 接着強さ (MPa)	24.10	7.03	15.40	—	—

※カタログ値

表-4.2.3 試験ケース

シリーズ	配合	供試体	凍結融解方法	試験評価方法	評価内容	使用供試体						
						EP1	EP2	EP3	CE1	PC1	N	
1	1	①	JIS	相対動弾性係数	劣化の進行 注入材の接着	○	－	－	○	－	○	
				超音波 トモグラフィー法							－	
2	2	②		超音波透過法		○	－	－	－	－	－	
				X線CT画像解析								
3	3	③	CDF	スケーリング量		○	－	○	○	○	○	
				超音波透過法								
4	3	④	暴露2.5年	超音波透過法		鋼材の腐食	○	○	○	○	○	－
				曲げ試験								
		⑤	暴露5年	超音波透過法			○	○	○	○	○	－
				自然電位法								
				電位差滴定法	塩分の浸透							

※JIS：JIS A1148 A法，CDF：RILEM CDF，暴露：寒冷環境の異なる北海道の2箇所（増毛，小利別）

体と大型注入供試体による暴露実験を行い，暴露2.5年後および暴露5年後の各供試体の劣化状態，注入材の接着状態，鋼材の腐食状態および塩化物イオンの浸透状態について評価を行った．未充填

接着供試体は半年毎に超音波透過法による測定と暴露 2.5 年後の曲げ試験，大型注入供試体は半年毎に超音波透過法による測定と自然電位測定，暴露 5 年後に圧縮強度，および電位差滴定法による塩化物イオン量の測定を行った．以下に，各シリーズにおける試験の詳細を記述する．

4. 2. 4 接着供試体の凍結融解試験（シリーズ 1）

コンクリートの凍害劣化が注入箇所の耐久性に及ぼす影響について検討するため，凍害劣化が生じやすい non-AE コンクリートを使用した接着供試体の凍結融解試験を行った．凍結融解試験は，JIS A 1148 A 法に準じて 300 サイクルを行い、約 30 サイクル毎に相対動弾性係数の測定を行った．使用した注入材は，エポキシ樹脂系の EP1 とセメント系の CE1 およびひび割れの無い N とした．なお，注入材自身の耐凍害性についても評価するため，使用した注入材において径 50×100mm の円柱供試体を作製して，同様に 300 サイクルの凍結融解試験を行った．接着供試体における凍害劣化の進行状況を確認するため，超音波トモグラフィー法における超音波伝播速度の速度分布から接着供試体内部の劣化の変化を確認する測定を試みた．超音波トモグラフィー法の測定方法⁹⁾¹⁰⁾は，図-4. 2. 4 に示すように，接着供試体の長側面を 40mm 間隔で 10 点×2 面，短側面を 25mm 間隔で 3 点×2 面の計 26 測点において，26 測点をすべて透過させて計 229 測線を測定した．測定回数は凍結融解試験の 0 サイクルから約 30 サイクル毎に計 11 回行った．なお，測定は保護コーティングを介して行った．

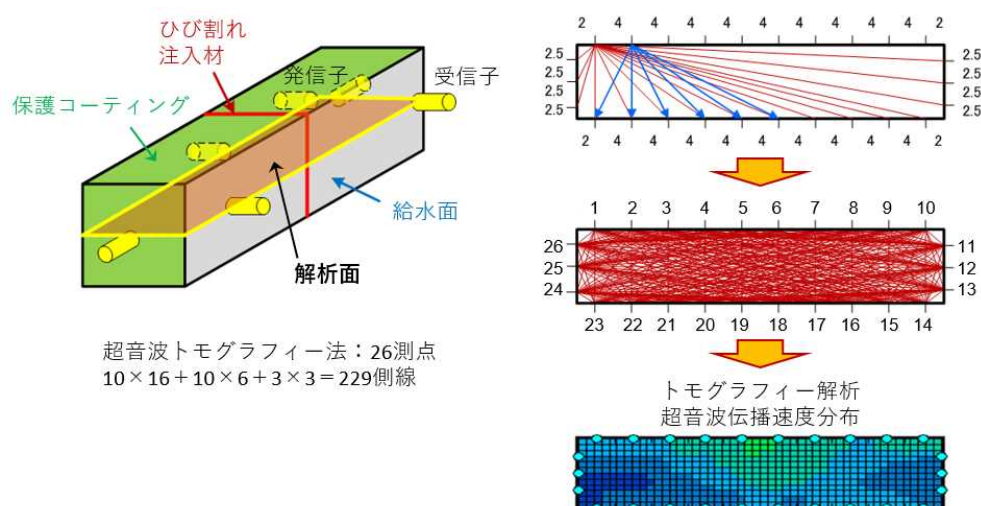


図-4. 2. 4 超音波トモグラフィー法の測定方法と解析分布のイメージ図

4.2.5 X線CT測定による注入後の凍害劣化試験（シリーズ2）

ひび割れ注入材の未充填箇所が凍害劣化の進行に及ぼす影響について検討するため、完全充填および未充填を模擬した円柱注入供試体の凍結融解試験を行った。このシリーズ2の実験に際しては、注入材の未充填部に起因する凍害劣化の過程は明確になっていないことから、杉山らの研究¹⁴⁾を参考にして、X線CTを用いて、注入前後のひび割れ内部状態の観察および凍結融解後の劣化状態の詳細な観察を行った。X線CTで得られた解析データと解析画像による観察から注入材の未充填部に起因する再劣化の発生について分析した。

実験は、注入材の充填状況および注入後の凍害劣化の状態について、注入前、注入後および凍結融解後の各段階でX線CTを用いて可視化した。実験に用いた円柱注入供試体は、注入材にEP1を用いてひび割れに完全充填させた条件Aと未充填の条件Bの2供試体とした。条件Aでは供試体の背面上方に排出口を設けて注入量30mLを注入し、注入材が十分に排出してひび割れに完全に充填された状態とした。一方、条件Bは事前の予備実験で注入量3～5mLを注入した結果から背面に排出しない注入量4mLを注入し、背面のひび割れを開放した状態でも注入材の排出がない未充填の状態とした。条件Aと条件Bの円柱注入供試体への注入結果は表-4.2.4に示す。

表-4.2.4 円柱注入供試体の注入結果

供試体の条件	注入材の種類	施工温度 施工湿度	注入器内注入材量			試験時間	
			注入前	背面排出	注入後	背面排出	注入終了
条件A	EP1	17℃ 40%RH	30mL	25mL	20mL	35min	翌日
条件B			4mL	なし	0mL	—	37min

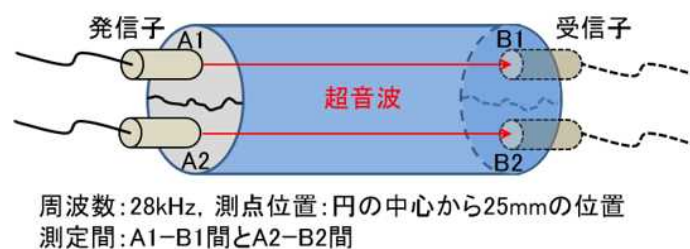


図-4.2.5 円柱注入供試体の超音波透過法の測定方法¹³⁾

円柱注入供試体に凍害劣化を生じさせることを目的として、JIS A 1148 A 法に準じた凍結融解作用を同供試体に与えた。コンクリートの劣化程度を評価するための測定方法として、超音波透過法を用いた¹³⁾。図-4.2.5 に示すように、各供試体を円柱端部のコンクリート面両側から測定端子で挟み、凍結融解 100 サイクル毎に超音波伝播速度を測定した。試験終了の凍結融解サイクルは、条件 A、B それぞれの超音波伝播速度が 2.0km/sec 付近まで低下した時点、もしくは測定不能となる断面欠損が生じた時点までとした。結果として、条件 B の供試体が 1600 サイクルで断面欠損によって測定不能となったため、1600 サイクルで終了とした。

X 線 CT 装置は、微細な観察に適したマイクロフォーカス CT 装置（最大管電圧 320kV，最大管電流 2mA，検出器有効画素数 1024×1024 ピクセル，撮影方式：コーンビーム方式）を用いた。

円柱注入供試体の X 線 CT の測定状況を図-4.2.6 に示す。X 線の照射条件は管電圧 170kV，管電流 115 μ A，露光時間 1.0sec とし、三次元の画像処理が可能なソフトウェアで画像解析（解像度は一辺 0.06mm のボクセル）を行い、その結果から空隙部と物質部を判別した。この判別には、図-4.2.7 に示す X 線透過度（相対値）のヒストグラム例のように、ひび割れを含む空隙部のピーク（第 1 ピーク）と注入材を含むコンクリートの物質部のピーク（第 2 ピーク）の平均値を閾値として用いた。

こうして解析したデータ（以下、CT データ）に基づき空隙量の分布および断面画像を取得した。空隙量については、各供試体を図-4.2.7 に示すように深さ方向に 10mm 間隔で 20 分割し、注入面と排出面の端部 10mm を除く注入面からの深さ 10mm から 190mm までを 18 区間に分け各区分毎に算出した。なお本稿で示す空隙量とは、上記閾値から空隙と判定したボクセルの体積の合計値である。また断面画像については、各区分の分割面である 19 の円形断面（以下、横断面）と供

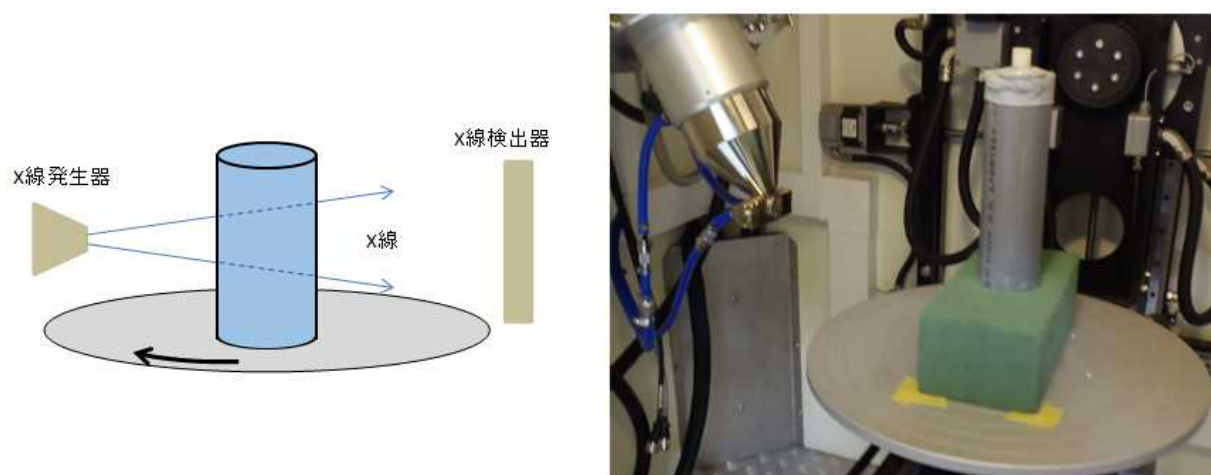


図-4.2.6 円柱注入供試体の X 線 CT の測定状況

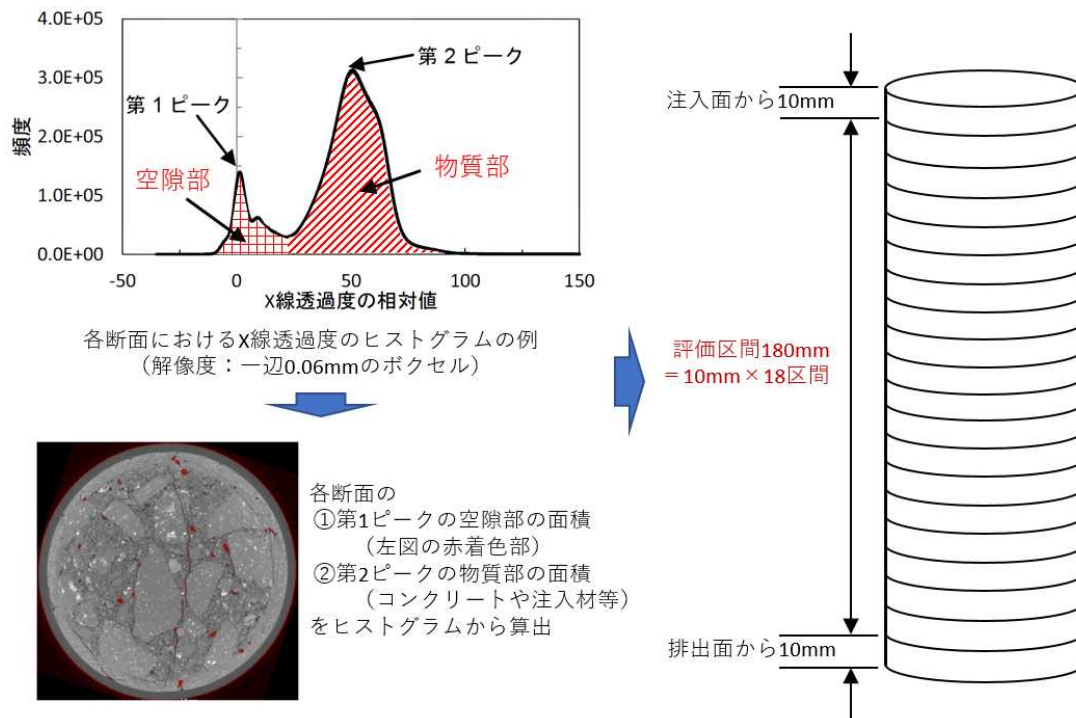


図-4.2.7 CTデータの解析と断面画像の取得方法

試体長軸方向の断面（以下、縦断面）についてそれぞれ取得した。

CTデータの取得は、各供試体の注入前、注入後、および凍結融解後の計3回とした。データ解析から得られた各供試体の空隙量、および断面画像で確認できる空隙、ひび割れ、モルタル、骨材、注入材の配置構成等について、注入前後と凍結融解後の変化を分析し、ひび割れ内に注入材の未充填部が生じた場合の凍害劣化への影響等について検討を行った。

4.2.6 未充填接着供試体の凍結融解試験（シリーズ3）

シリーズ2と同様に、ひび割れ注入材の未充填箇所が凍害劣化の進行に及ぼす影響について検討するため、未充填接着供試体の凍結融解試験を行った。未充填接着供試体の凍結融解試験は、RILEMに準じたCDF試験を28サイクル行い、約6サイクル毎にスケーリング量と超音波透過法の測定を行った。シリーズ3では、コンクリート表面の注入材が未充填を模擬した③の未充填接着供試体を使用し、注入材の接着面積は100%と80%とした。CDF試験の試験方法は、図-4.2.8に示す概要図のように、注入面（試験面）と注入面から側面深さ20mmまでを試験面として、塩

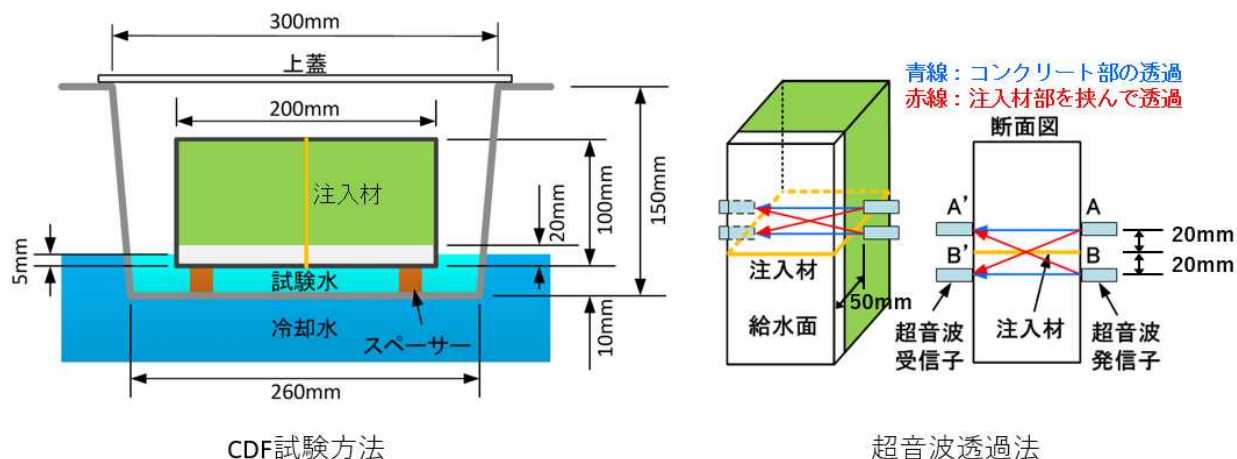


図-4.2.8 CDF 試験と超音波透過法の測定方法 ¹¹⁾¹²⁾¹³⁾

化物イオン濃度 3%の塩水（試験水）に試験面を 5mm 浸漬した状態で、+20℃から-20℃まで 10K/h の定速で 4 時間冷却、-20℃で 3 時間保持、同じ定速で+20℃まで 4 時間加熱、+20℃で 1 時間保持を 1 サイクルとした 12 時間 1 サイクルの行程で CDF 試験を行った。なお、淡水の試験水による CIF 試験についても接着面積 80%の供試体で実施し、塩水と淡水の劣化進行比較も行った。

超音波測定は、図-4.2.8 に示すように、供試体側面の中心部の 4 点を側点として、超音波透過法 ¹³⁾を用いてコンクリート部を透過する側線と注入材部を挟んで斜めに透過する側線の計 4 側線の超音波伝播速度を測定した。測定回数は CDF/CIF 試験の 0 サイクルから約 6 サイクル毎に計 6 回行った。なお、測定は保護コーティングを介して行った。ここで、コンクリート部を透過する超音波伝播速度はコンクリート自体の劣化程度を評価し、注入材部を挟んで斜めに透過する超音波伝播速度は注入材とコンクリートとの接着状態を評価する。例えば、コンクリート部の超音波伝播速度が低下した場合にはコンクリートが凍害劣化している、注入材部を通過した超音波伝播速度が低下した場合は注入材とコンクリートとの接着力の低下(剥離)が生じていると評価する。

4.2.7 暴露実験（シリーズ 4）

暴露実験は、北海道の環境の異なる 2 箇所の暴露場に大型注入供試体と未充填接着供試体を設置して、厳しい寒冷環境下における注入後の耐凍害性と補修効果の持続性について検証を行っている。実験は暴露 30 年を最終目標に実施しているが、本報告では、暴露 2.5 年と暴露 5 年までの結果について報告する。暴露場は日本海側の海岸線沿いにある増毛町の増毛暴露場と最低気温の日本一の記録を持つ内陸の陸別町の小利別暴露場を使用している。増毛暴露場は凍害と塩害の厳

しい複合環境であり，小利別暴露場は極寒の環境である．図-4.2.9に各暴露場の供試体の設置状況を示す．供試体の設置は，大型供試体は試験面（注入面）を下面に，未充填接着供試体は④の未充填接着供試体を使用して試験面を側面にして，増毛暴露場は長手面を海向き（西向き），小利



図-4.2.9 各暴露場の供試体設置状況（左：増毛暴露場，右：小利別暴露場）

別暴露場は長手面を南向きにした。増毛暴露場を海向きとしたのは海からの飛来塩分を長手方向の面に均等に受けるためであり、小利別暴露場を南向きとしたのは日射によって凍結融解作用が生じやすい方向としたためである。なお、未充填接着供試体の注入材の接着面積は 50%，80%，100%とし、前項の CDF/CIF 試験とは異なり、④の未充填接着供試体はひび割れ内部が未充填となるように注入材が充填された状態とした。

暴露中の注入材の状態を確認する方法は、図-4.2.10 に示すようにシリーズ 3 と同様、コンクリートを透過する側線と注入材部を挟んで透過する側線の超音波伝播速度を測定した。測定は半年毎に実施し、大型供試体は 12 側線を暴露 5 年間、未充填接着供試体は 4 側線を暴露 2.5 年間とした。

未充填接着供試体は暴露 2.5 年目において、図-4.2.11 に示す 4 点荷重の曲げ試験¹⁵⁾を試験面を下側（引張側）にして行い、曲げ強度と割裂状態の測定によって注入材とコンクリートとの接着状態を確認した。割裂状態の確認方法は、割裂面を目視にてコンクリートが割れる基盤破壊、注入材が割れる凝集破壊、及び注入材とコンクリートとの接着面から割れる界面破壊の 3 つの破壊形態に分類した。それぞれの破壊形態と割裂時の曲げ強度の結果から、実際の寒冷環境において注入後の注入材の品質や接着耐久性に及ぼす影響について検討を行った。

また、大型注入供試体は、図-4.2.12 に示すように、供試体内の鋼材腐食の有無を調べる自然電位測定を半年毎に行い、暴露 5 年目において EP3 の供試体から小径コアを採取してコンクリート

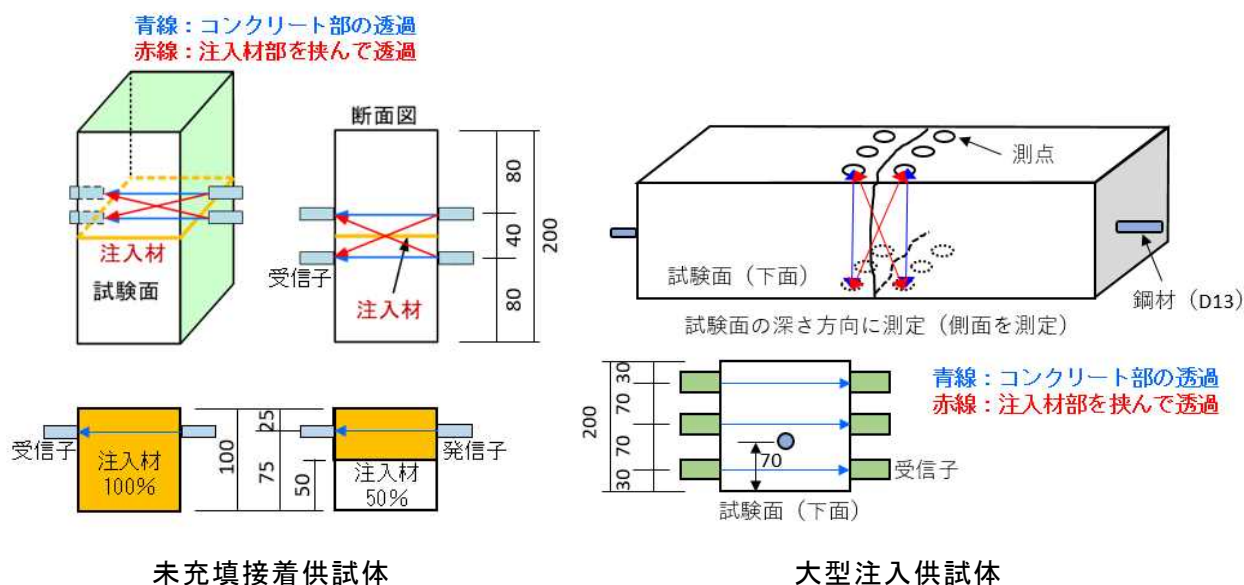


図-4.2.10 未充填接着供試体と大型注入供試体の超音波透過法の測定方法¹³⁾

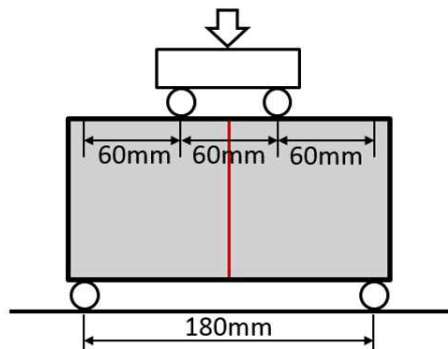


図-4.2.11 未充填接着供試体の曲げ試験¹⁵⁾

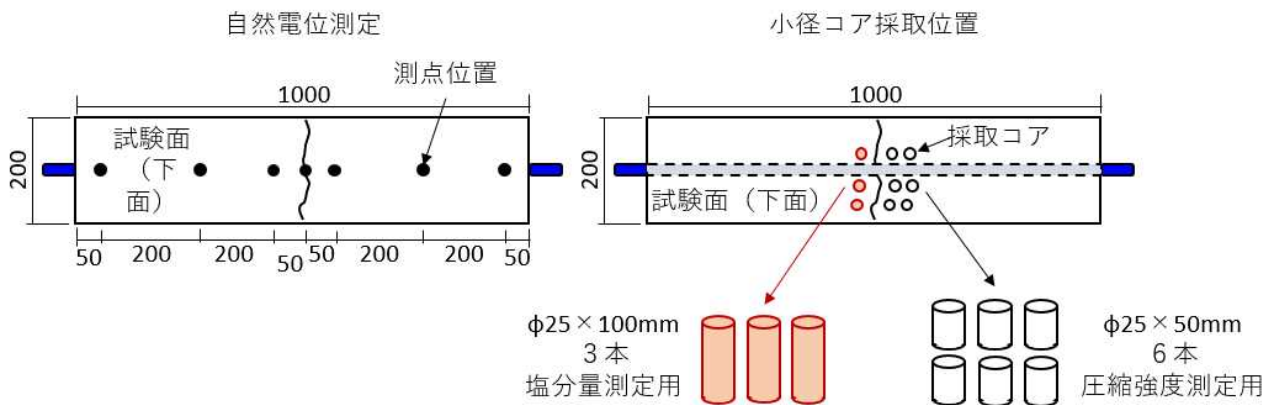


図-4.2.12 大型注入供試体の自然電位測定と小径コアの採取位置

の圧縮強度と塩化物イオン量の測定を行った。なお、小径コアはひび割れ付近の位置に試験面から垂直に貫通させて径 25mm×200mm のコアを 9 本採取した。自然電位測定は大型注入供試体の 7 測点でそれぞれ電位差を測定し、電位差が-350mV よりも卑となった場合に鋼材の腐食が発生していると判断する。圧縮強度は小径コア 6 本の平均強度から求め、塩化物イオン量の測定は小径コアサンプルから電位差滴定法を用いて試験面から深さ方向に 10mm 毎に測定した。

さらに、注入材自体の耐久性も確認するため、前述したシリーズ1と同様に径50×100mmの円柱供試体を各注入材で作製してそれぞれの暴露場に設置した。これらの円柱供試体は外観写真を半年毎に撮影して変状の有無を確認した。

また、各暴露場の1年間の外気温と大型注入供試体内部の温度変化を確認するために、外気温計と大型注入供試体の底面から25mmの深さに小型温度計を埋め込んで計測を行った。図-4.2.13に

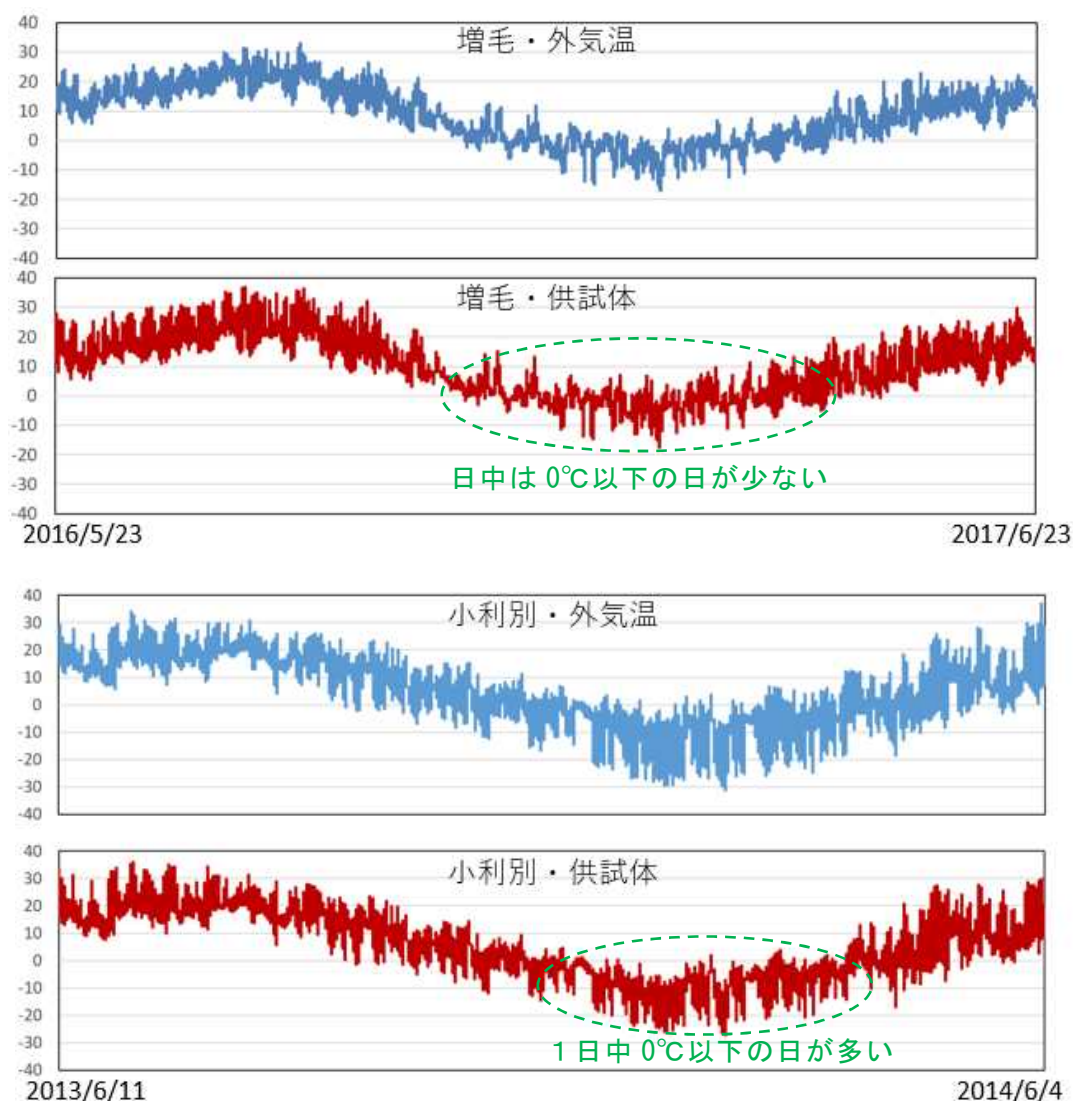


図-4. 2. 13 各暴露場の1年間の外気温と大型注入供試体の内部温度の推移

各暴露場で約1年間計測した外気温と供試体内部温度の推移を示す。計測年は異なるが、増毛暴露場では外気温の最低が -17°C で最高が 32.5°C 、小利別暴露場では最低が -31.1°C で最高が 36.8°C であった。外気温1年間の寒暖差は増毛が約 50°C 、小利別は 70°C 近くあり、暴露場は共に厳しい環境であるが、小利別のほうが1日の温度差も比較的大きく、冬季間の寒さがより厳しいことがわかる。大型注入供試体内の温度は、増毛の最低が -17°C で最高が 36.8°C 、小利別では最低が -27°C で最高が 35.9°C であった。供試体内の1年間の寒暖差は増毛が 54°C 、小利別が 63°C となり、増毛の供試体のほうが夏季は熱くなる傾向が見られる。両暴露場の温度変化における大きな違いは、冬季に増毛は1日中 0°C 以下になる日は少ないが、小利別は1日中 0°C 以下になる日が多いことである。

4.3 実験結果

4.3.1 接着供試体の凍害劣化の進行（シリーズ 1）

接着供試体に実施した JIS A 1148 A 法の凍結融解試験における相対動弾性係数と質量減少率を図-4.3.1 に示す. non-AE コンクリートのひび割れのない供試体である N は, 300 サイクルで相対動弾性係数が 60%を下回っていることから凍害劣化がしやすいコンクリート¹⁶⁾と言える. 接着供試体の EP1 と CE1 は, N よりも相対動弾性係数が大きく低下していることから, 注入材で接着した面から凍害劣化が進行したと推測される. しかし, 接着供試体の質量減少率は低下していないことから, 凍結融解作用によって注入材自体が劣化した, もしくは注入材とコンクリートとの接着が低下したことで相対動弾性係数の低下が生じた可能性も疑われる.

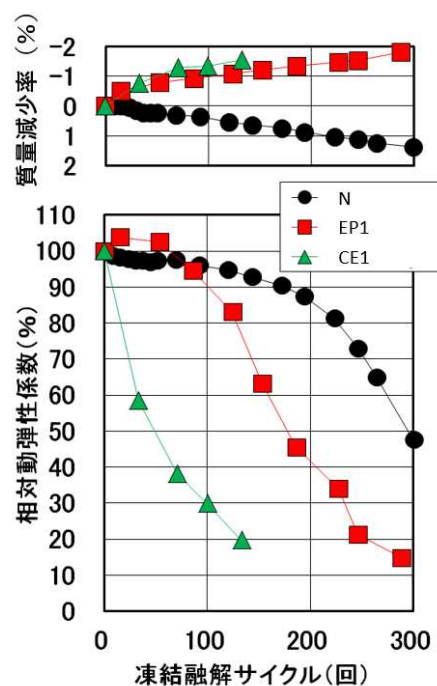


図-4.3.1 相対動弾性係数

次に, 接着供試体におけるトモグラフィー法の解析から得られた凍結融解サイクル毎の超音波伝播速度の分布図を図-4.3.2 に示す. EP1 および CE1 とともに凍結融解サイクルが進むにつれて注入材の接着部分付近から超音波伝播速度 (以下, 速度) が低くなり, 徐々に供試体全体に広がる傾向がみられる. CE1 は凍結融解サイクルの早い段階から速度の低下が生じており, 135 サイクルの測定後に注入材の接着界面で剥落・分離した. EP1 も 135 サイクル辺りから注入材の接着部

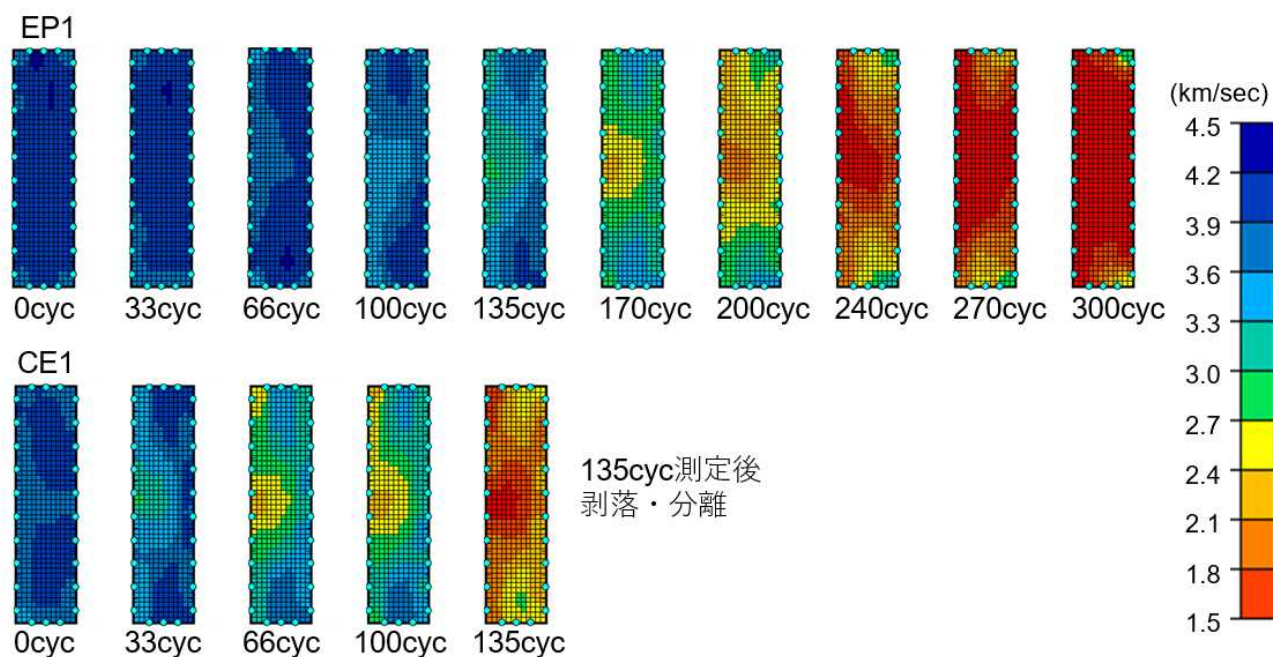


図-4.3.2 超音波トモグラフィー法による接着供試体の超音波伝播速度分布の変化

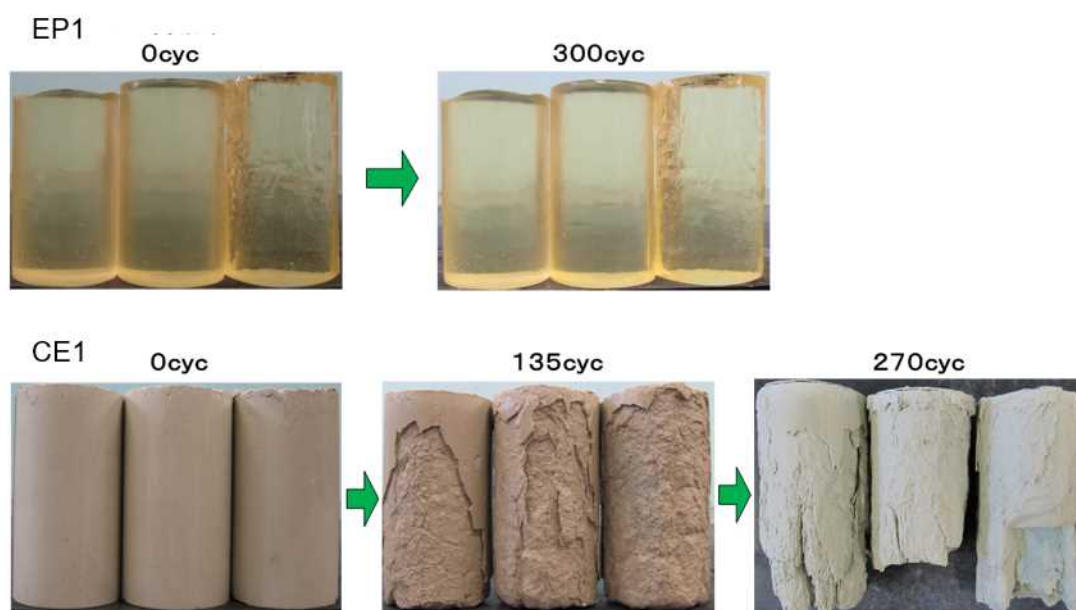


図-4.3.3 注入材単体の円柱供試体の凍結融解試験結果

分付近の速度が大きく低下し始めて全体に広がったが剥落までには至らなかった．速度が遅い箇所は何らかの異常が生じたと考えられ，凍結融解サイクル数が進んで試験面から速度低下が発生

していることから、凍結融解作用によって注入材の接着部分に微細な剥離（隙間）が発生し、そこから水分が浸入して徐々に凍害劣化が進行したと推測される。

ここで、図-4.3.3 に示す注入材単体の円柱供試体の凍結融解試験における状態写真から、EP1 は 300 サイクル後でも全く変化していないのに対して、CE1 は凍結融解サイクルが進むにつれて大きく損傷していくことがわかる。したがって、CE1 のほうが EP1 に比べて相対動弾性係数が大きく低下しているのは、CE1 自体が劣化したことが原因と考えられる。

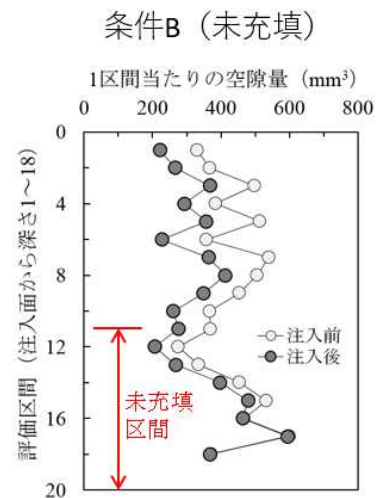
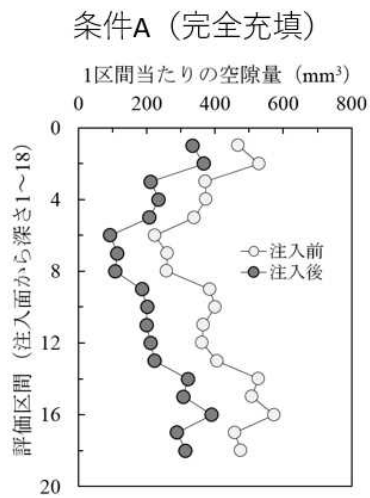
これらの結果から、EP1 は凍結融解作用によってコンクリートと注入材との接着力が低下したと考えられ、CE1 は注入材自体が凍害劣化したことによってコンクリートと注入材との接着不良が急速に進行して早い段階で剥離に至ったと考えられる。したがって、注入によってひび割れを補修しても、コンクリートや注入材が凍害で劣化すると再劣化が発生し、さらに劣化はひび割れ付近から進行することから、ひび割れは補修後も弱点部となりやすいことがわかる。

4.3.2 X線CT測定による凍害劣化の進行過程（シリーズ2）

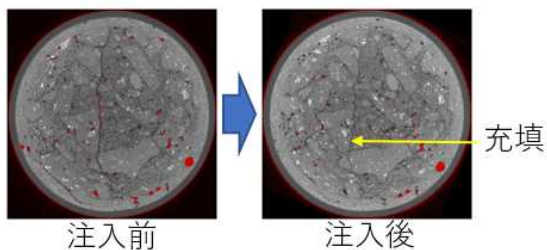
円柱注入供試体のひび割れ注入前後における CT データから算出した空隙量の各 18 区間の分布を図-4.3.4 に示す。注入前後で比較すると、注入後に空隙量が減少した区間は、注入によりひび割れや空隙に注入材が充填され、空隙量が減少したと言える。

条件 A では注入前後で空隙量が一様に減少しているのに対し、条件 B では深さ 11～12 区間から注入前後の空隙量の減少が少なくなり始め、深さ 16～18 区間で注入前後の空隙量が等しくなっている。これは、条件 A ではひび割れや空隙に注入材が十分に充填されたが、条件 B では注入量が不足し、途中でひび割れへの注入材の充填率が下がり始め、注入材が排出面まで届かず未充填となったためである。

ここで、割裂ひび割れに注入された注入材が、割裂ひび割れに付随する横ひび割れ等に沿って注入範囲を拡大しているか CT データによる確認を試みた。図-4.3.5 に示す例のように、検討対象とした区間において、断面方向の解析範囲を割裂ひび割れの両幅 10mm 内とし、CT データから得られた注入前後の空隙量の差を求め、同様に求めた円形断面全体における注入前後の空隙量の差と比較した。対象区間は、条件 A の供試体の注入面近くの深さ 4 区間と排出面近くの深さ 17 区間とした。その結果、図-4.3.6 に示すとおり、割裂ひび割れ付近のみの空隙量の差は全断面に対し 1～1.5 割程度少なかった。これは、注入後の空隙量が割裂ひび割れ付近以外でも減少していた、すなわち、割裂ひび割れに注入された注入材は、割裂ひび割れから少なくとも横幅 10mm より外側にも広がって充填されていたためであると推測できる。



断面の例 (深さ170mm断面・赤色は空隙部)



断面の例 (深さ150mm断面・赤色は空隙部)

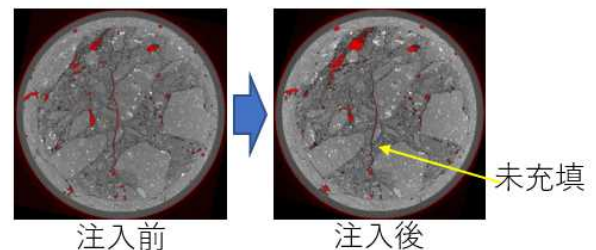


図-4.3.4 CT データによる注入前後の空隙量の変化と断面画像の例

供試体・条件A：注入後・深さ170mm断面

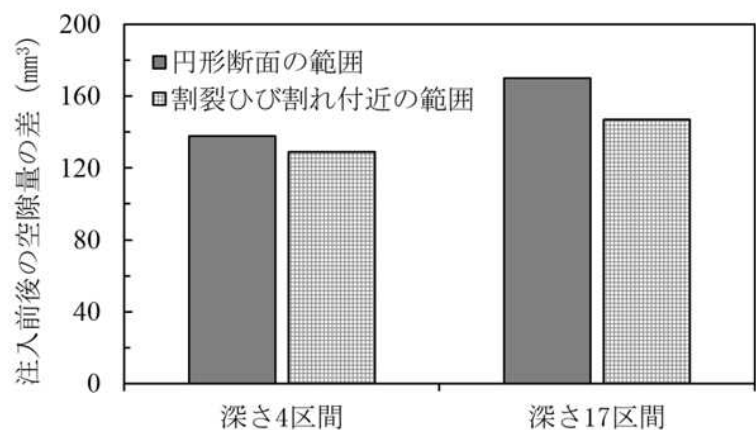
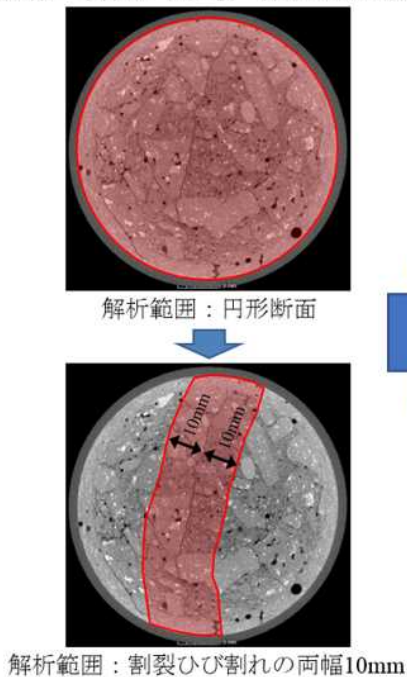


図-4.3.5 解析範囲を割裂ひび割れ付近とした例

図-4.3.6 解析範囲の違いによる空隙量の差の比較

図-4.3.7は、条件Aおよび条件Bにおける凍結融解試験の100サイクル毎の超音波伝播速度の変化である。条件Aでは、凍結融解サイクルが進んでも超音波伝播速度は若干の低下に留まった。これは、ひび割れに注入材が十分に充填されたことで十分な修復効果が得られたもので、凍害劣化の進展の抑制によるものと言える。一方、条件Bでは、凍結融解サイクル数の増加に伴って超音波伝播速度は大きく減少している。これは、条件Aと比較すると、条件Bにおけるひび割れの未充填部が凍結融解抵抗性に大きく影響したためであると考えられる。

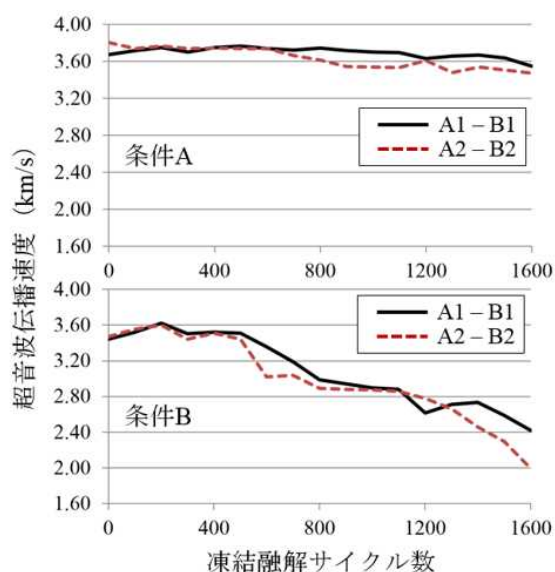


図-4.3.7 凍結融解サイクル毎の超音波伝播速度

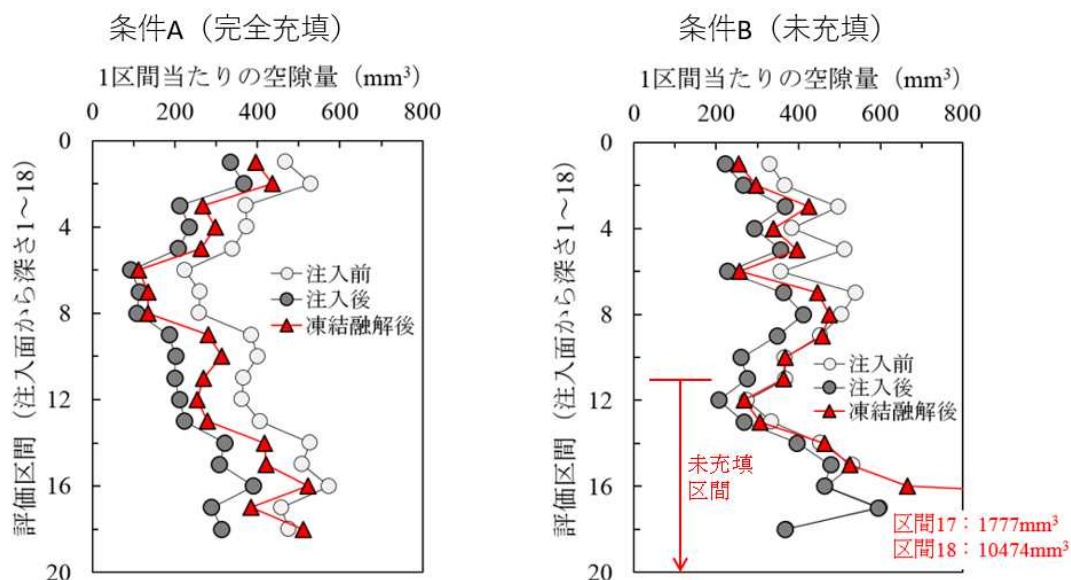


図-4.3.8 注入前後と凍結融解後の空隙量の変化

図-4.3.8 は、図-4.3.4 のひび割れ注入前後の空隙量の変化に凍結融解後の空隙量を重ねたものである。条件 A では、深さ 6～8 区間において注入後と凍結融解後の空隙量は近く、排出面近くの深さ 18 区間の凍結融解後の空隙量が注入前を上回っていることを除くと、それ以外の区間の凍結融解後の空隙量は注入前後の空隙量のほぼ中間の値となっている。上述した超音波伝搬速度測定の結果も加味すると、条件 A では、注入面と排出面のコンクリートから浸透した水分の凍結融解作用により、両面から供試体の中心方向に劣化範囲が徐々に広がっている。しかし、空隙量の増加は僅かであり、供試体内部は未だ健全な状態であると思われる。

一方、条件 B の凍結融解後の空隙量は、深さ 1～7 区間までは注入前後の中間もしくは注入後に近い値であるが、深さ 8～15 区間では注入前とほぼ同じ値となり、深さ 16 区間以深では空隙量が注入前の値を超え大幅に増加している。したがって、注入面側はひび割れに注入材が充填されているため、空隙量の結果から深さ 1～7 区間までは健全な状態がほぼ保たれていると言える。しかし、未充填部がある排出面側では、ひび割れ内に水分が多く供給されたことにより凍害劣化が大きく進展し、これが超音波伝播速度を大きく低下させたと考えられる。

上述した各区間等の空隙量計測結果と併せ、各区間の横断面画像と供試体のひび割れに直交する方向に縦に分割した縦断面画像から、ひび割れの影響による凍害劣化の進行過程について分析する。

図-4.3.9 は、条件 A と条件 B のそれぞれにおける注入後と凍結融解後の横断面画像および縦断面画像の一例である。条件 A の深さ 30mm, 100mm, 160mm, 190mm 断面の画像のすべて、および条件 B の深さ 30mm, 140mm 断面の画像において、凍結融解前後の骨材やモルタル、ひび割れ等の配列や大きさに関する変化は見られない。図-4.3.8 より、これらの位置における空隙量は注入後よりも凍結融解後の方が若干増加しているものの、横断面画像の目視の範囲では空隙等の増加は確認できず、大きなひび割れの発生や明らかな劣化や欠損に至る部位も認められない。これは、割裂ひび割れおよび割裂によって生じた微細ひび割れ等に注入材が十分に充填された効果によるものと推測する。

一方、条件 B の排出面側の横断面画像では、凍結融解後において、深さ 170mm 断面で若干の劣化状態、深さ 180mm 断面は欠損直前の状態であり、縦断面画像から深さ 190mm 以深に断面欠損が生じていることが確認できる。深さ 170mm 断面を詳細に観察すると、凍結融解後に割裂ひび割れ自体の幅は拡大していないが、割裂ひび割れの近傍にある粗骨材の周囲に空隙が生じており、割裂ひび割れから枝別れしたひび割れとつながっている。また、深さ 180mm 断面では、モルタル部が砂利化したように空隙が拡大しているが、割裂ひび割れの位置で空隙は拡大していない。さらに、縦断面画像を観察すると、凍結融解後の条件 A ではひび割れの発生が見られないが、条件

B では排出面側に横ひび割れが層状にいくつも発生している。これは、割裂ひび割れの未充填部に浸入した水分が、割裂時に一度緩んだ粗骨材の周囲や微細ひび割れの僅かな隙間に浸入し、凍結融解作用により粗骨材等の緩みを大きくすることで凍害劣化を進行させたことによるものと推測する。

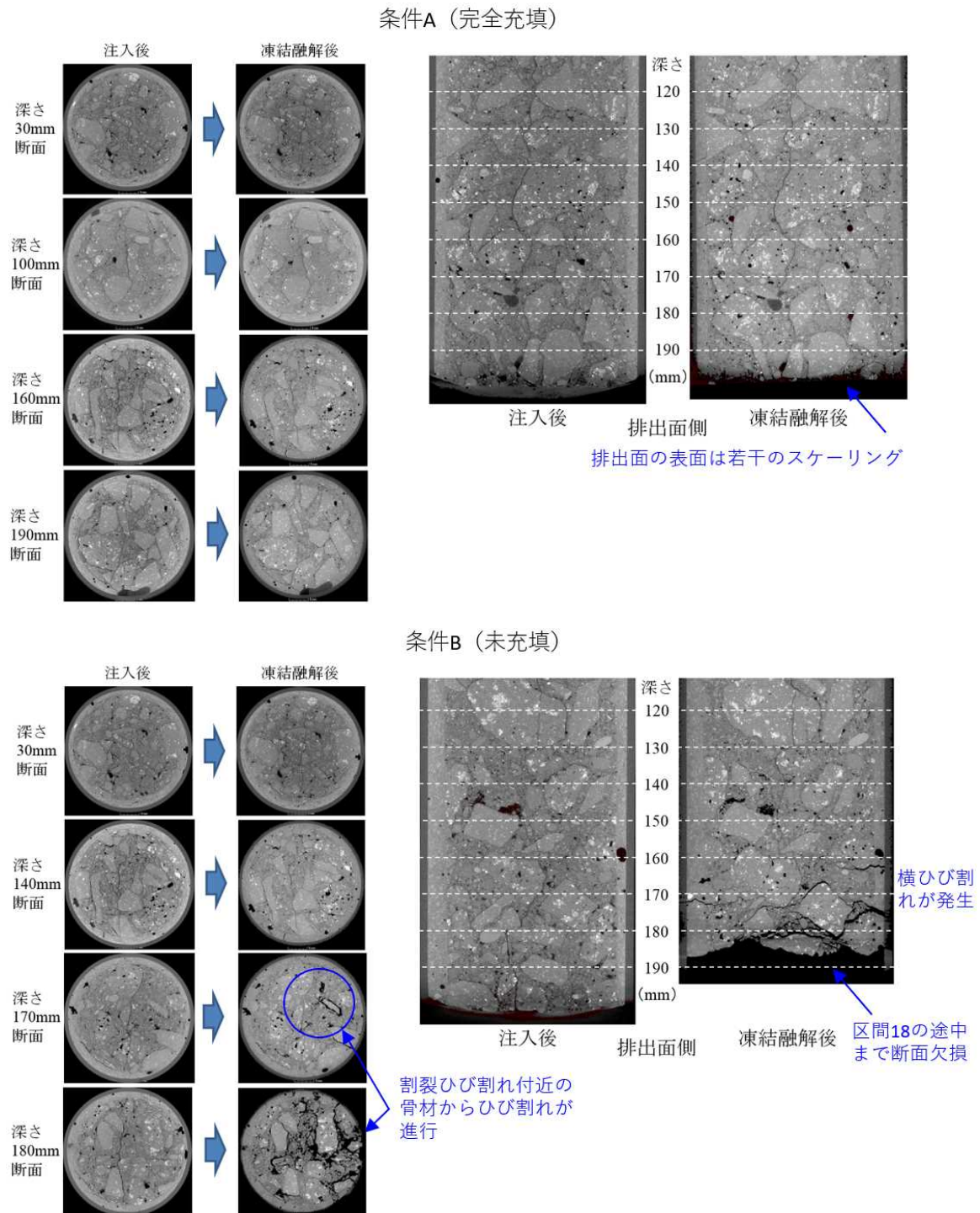


図-4.3.9 注入後と凍結融解後の横断面画像と縦断面画像の一例

以上のように、ひび割れ注入前後と凍結融解後の供試体内部の状態を X 線 CT により可視化した結果、ひび割れにつながる微細な横ひび割れや粗骨材の周囲等の空隙から徐々に劣化が進行していく凍害劣化の進行過程を画像解析で確認できた。このことから、注入後のひび割れに未充填部がある状態で凍結融解作用を受けると、未充填部から凍害が進展して再劣化が発生することを確認できたと考える。

4.3.3 未充填接着供試体の凍害劣化の進行（シリーズ 3）

未充填接着供試体を実施した CDF 試験および CIF 試験における凍結融解サイクル毎の累計スケーリング量と EP1 の接着面積 80%における 28 サイクル後の劣化写真の一例を図-4.3.10 に示す。試験水に塩水を使用した CDF 試験では、注入材の種類に関わらず、耐凍害性を保持しうるスケーリング量の限界値とされている $1500\text{g}/\text{m}^2$ を大きく超えている¹¹⁾。これに対して、淡水の CIF 試験ではスケーリング量は微量であった。

図-4.3.11 に凍結融解サイクル毎の超音波伝播速度を示す。超音波伝播速度（以下、速度）では、凍結融解サイクルが進んでもコンクリート部を透過した速度はさほど低下していないことから、コンクリートの劣化は表面だけであり、コンクリートの内部まで劣化は進行していないと推測

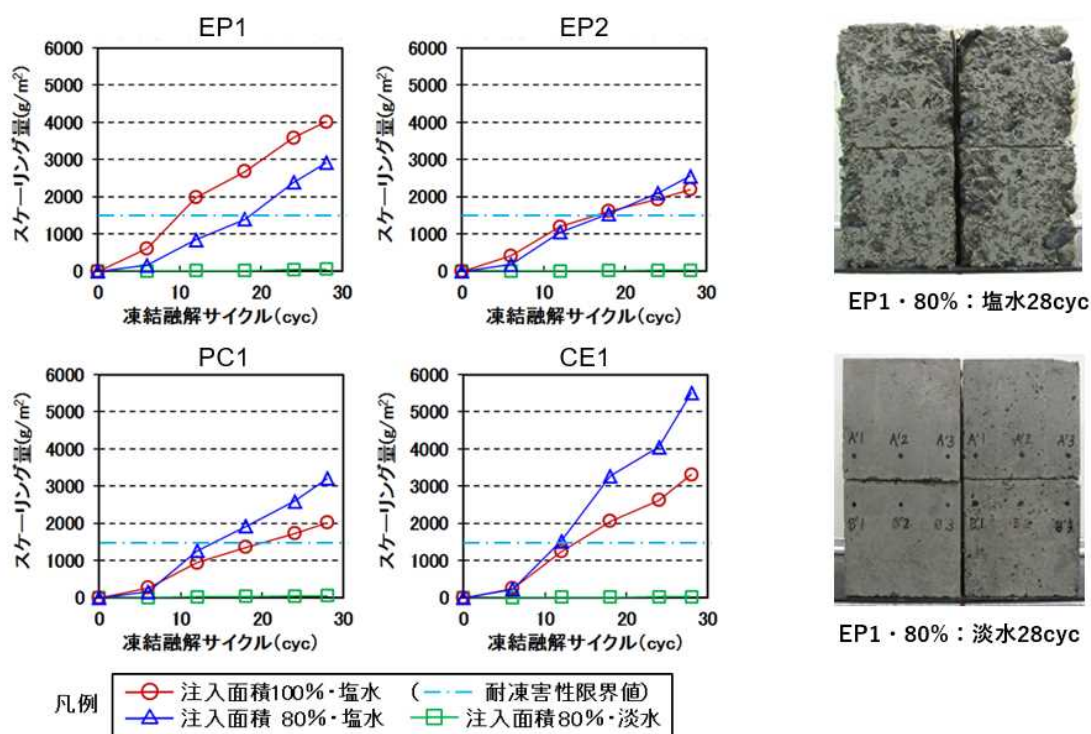


図-4.3.10 CDF/CIF 試験における累計スケーリング量と劣化写真の一例

できる．しかし，注入材部を挟んで透過した速度は，凍結融解サイクルが進むにつれて徐々に低下する傾向がみられる．特に CE1 は大きく低下しており，これは前項の接着供試体の JIS 試験結果と同様に注入材自体が凍害劣化したことによって注入材とコンクリートとの接着力が低下した結果と考えられる．一方，コンクリート表面のひび割れが未充填を模擬した接着面積 80% の塩水のケースが最も低下する結果となった．EP1，EP2，PC1 においても注入材部の速度が一様に低下していることから，表面の未充填部が弱点となってひび割れから浸入した水分によって凍害劣化が進行したことでコンクリートと注入材の接着力低下が助長されたと考えられる．この結果は，シリーズ 2 の X 線 CT 解析による結果を裏付ける結果であり，厳しい凍害劣化が生じる環境では注入後の未充填が存在するとそこから劣化が進行していくことを明らかとした．

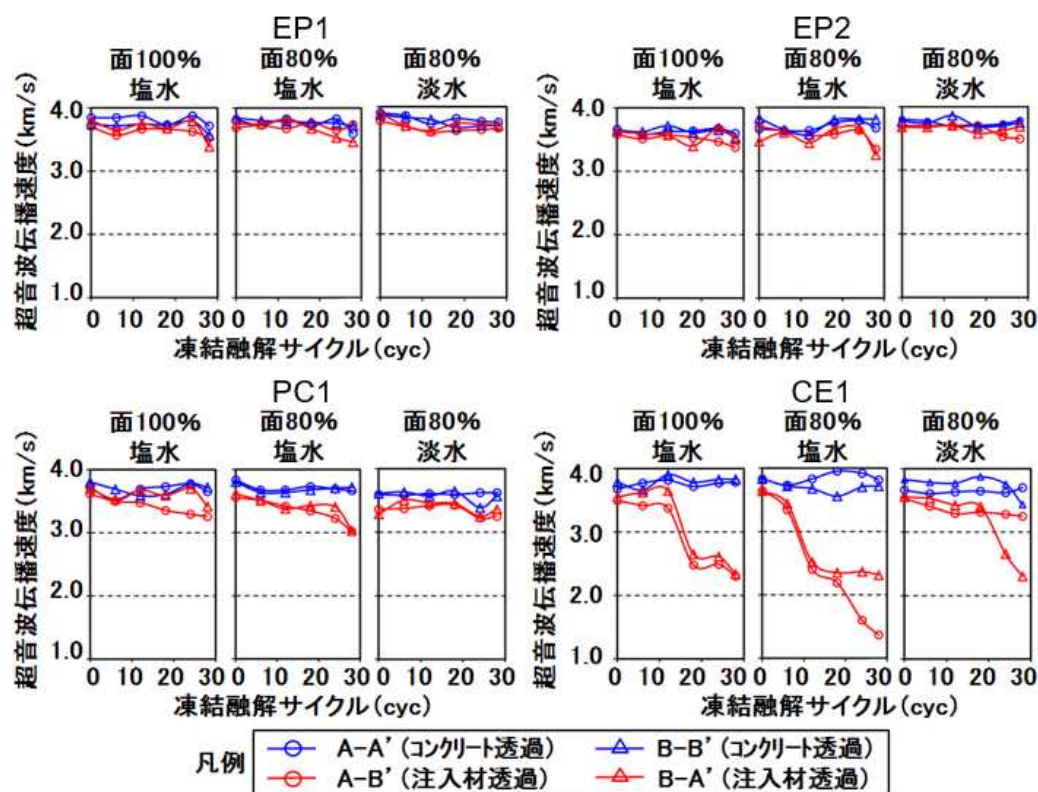


図-4.3.11 凍結融解サイクル毎の超音波伝播速度

4.3.4 暴露実験結果（シリーズ 4）

未充填接着供試体の暴露 2.5 年の超音波伝播速度の経年変化を図-4.3.12 に示す．半年毎の測定時に供試体の含水状態が毎回異なるため，全体的に測定値が増減するバラツキは見られるが，

2 年半の暴露期間において、注入材部とコンクリート部との超音波伝播速度の差が若干広がっているケースもあるが、ほとんどのケースで両者の速度差に変化はあまり見られなかった。これは、注入材とコンクリートとがまだ密着している状態と判断できる。図-4.3.13 および表-4.3.1 に各ケースの最大曲げ強度および破壊形態と破壊状況写真を示す。超音波の結果では注入材の接着状態に変化は見られなかったが、極寒環境の小利別に暴露した供試体の方が最大曲げ強度が全体的に低くなっていた。これは、注入材とコンクリートとの接着力が低下し始めていると推測される。ここで、樹脂系の注入材は接着が強いために基盤破壊となるのが一般的だが、充填率の低いケースを中心に部分的な凝集破壊や界面破壊が生じていた。凝集破壊となった注入材は、厳しい寒冷の影響もあり、年間の温冷差が大きい小利別のほうが温冷や乾湿の繰返しの影響が大きいと想定されることから、注入材自体の品質が変化した可能性も疑われる。一方、セメント系の注入材は、CE1 はすべて凝集破壊、PC1 はすべて界面破壊となった。凝集破壊となった CE1 は、小利別のほうが最大曲げ強度は低いことから注入材自体の凍害劣化が進んだ可能性が考えられる。

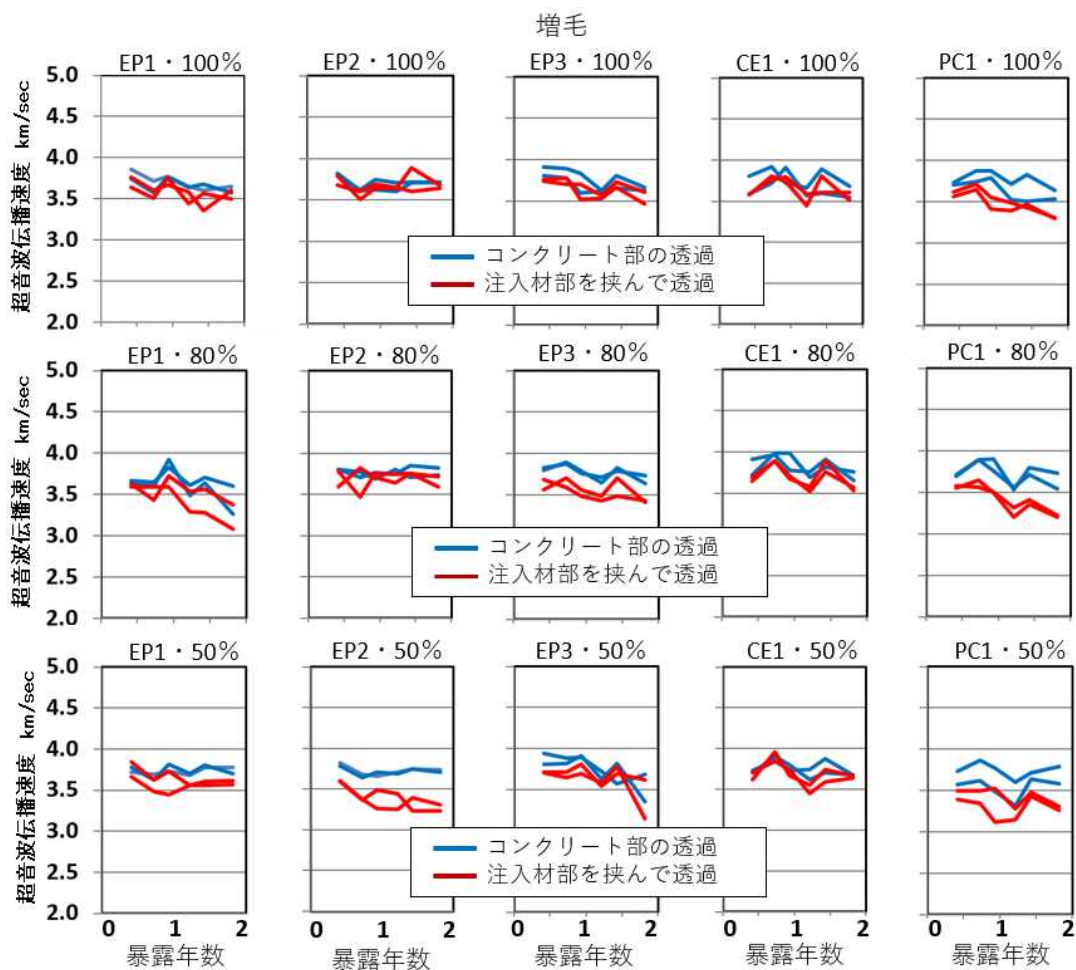


図-4.3.12 未充填接着供試体の暴露 2.5 年目までの超音波伝播速度の経年変化（1）

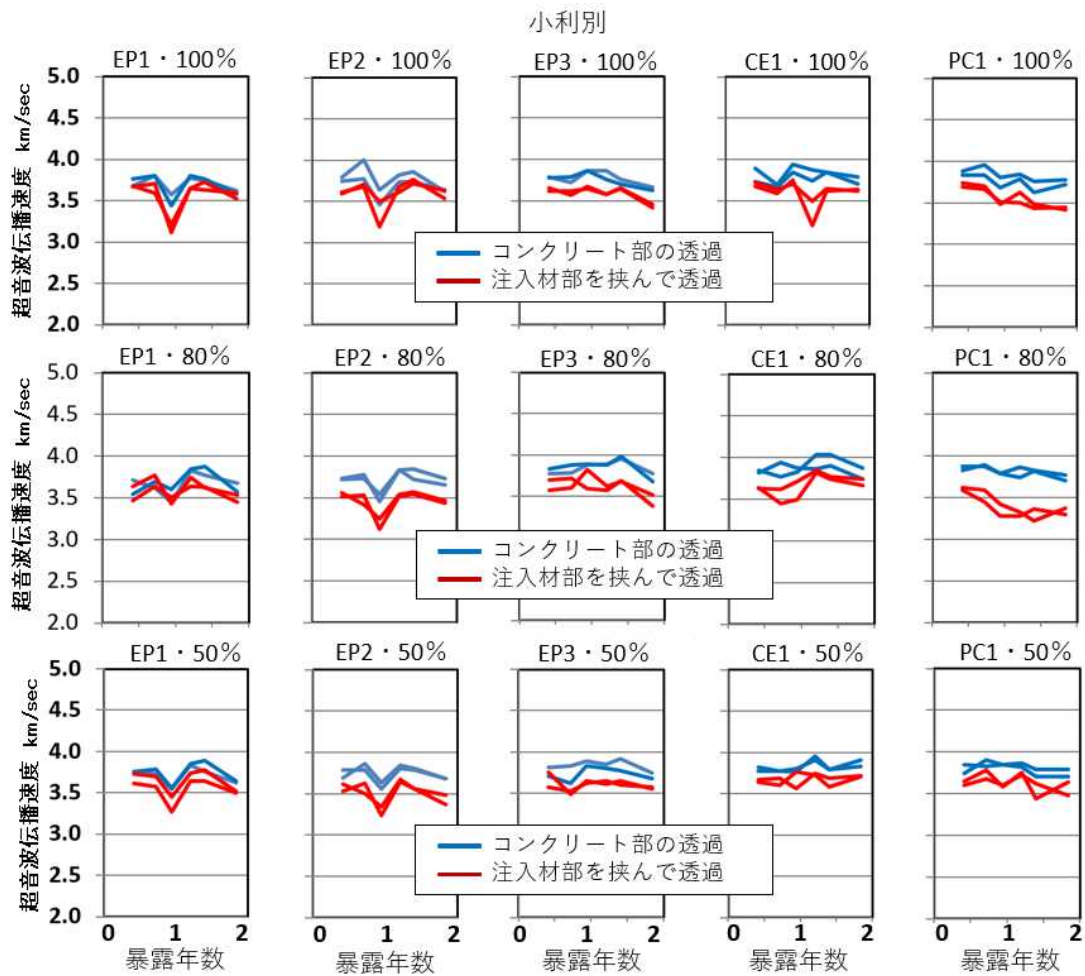


図-4.3.12 未充填接着供試体の暴露 2.5 年目までの超音波伝播速度の経年変化 (2)

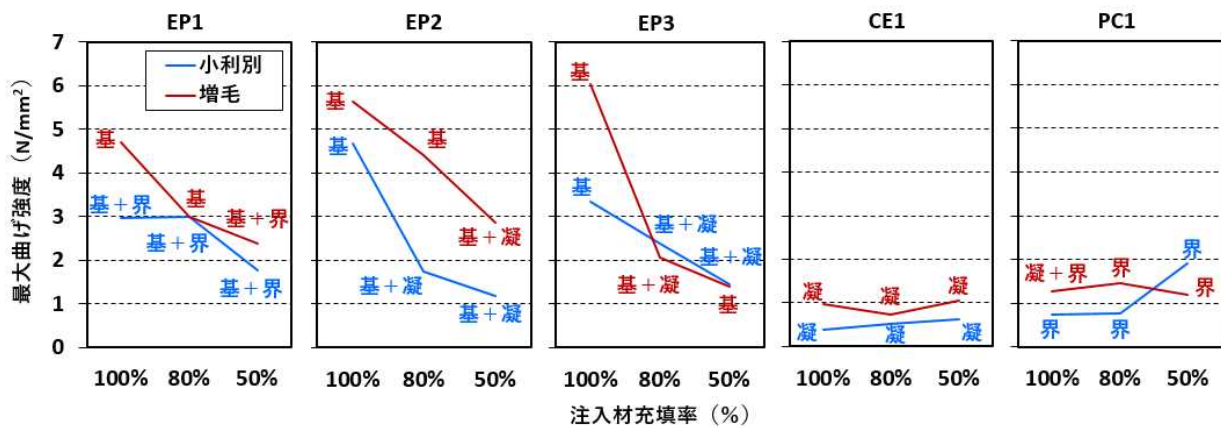


図-4.3.13 暴露 2.5 年後の未充填接着供試体の最大曲げ強度

表-4.3.1 曲げ試験における破壊形態

暴露場所	小利別				
注入材の充填率	EP1	EP2	EP3	CE1	PC1
100%	基盤+界面破壊 	基盤破壊 	基盤破壊 	凝集破壊 	界面破壊 
80%	基盤+界面破壊 	基盤+凝集破壊 	基盤+凝集破壊 	凝集破壊 	界面破壊 
50%	基盤+界面破壊 	基盤+凝集破壊 	基盤+凝集破壊 	凝集破壊 	界面破壊 
暴露場所	増毛				
注入材の充填率	EP1	EP2	EP3	CE1	PC1
100%	基盤破壊 	基盤破壊 	基盤破壊 	凝集破壊 	凝集+界面破壊 
80%	基盤破壊 	基盤破壊 	基盤+凝集破壊 	凝集破壊 	界面破壊 
50%	基盤+界面破壊 	基盤+凝集破壊 	基盤破壊 	凝集破壊 	界面破壊 

このことから、寒冷環境の厳しい地域では、暴露 2 年半程度であってもひび割れ注入後の注入材の品質等が徐々に変化し、コンクリートの劣化が進まなくてもひび割れ内部の注入材とコンクリートとの接着耐久性が低下していく可能性があることを確認した。

次に、大型注入供試体の暴露 5 年間における超音波伝播速度の経年変化を図-4.3.14 に示す。前述した未充填接着供試体と同様に、毎測定時の含水状態が異なるために値にバラツキはあるが、小利別の供試体では、CE1 以外の注入材は暴露年数が経過しても超音波伝播速度にさほど大きな変化は見られない。しかし、CE1 は注入材部の超音波伝播速度が暴露 3 年頃から大きく低下し始めている傾向が見られ、注入材とコンクリートとの接着力が低下した可能性が考えられる。

一方、増毛の供試体では、暴露年数の経過と共に超音波伝播速度が徐々に低下する傾向にあり、特に EP3、CE1、PC1 は暴露 5 年目に超音波伝播速度が大きく低下した。また、注入材部の超音波

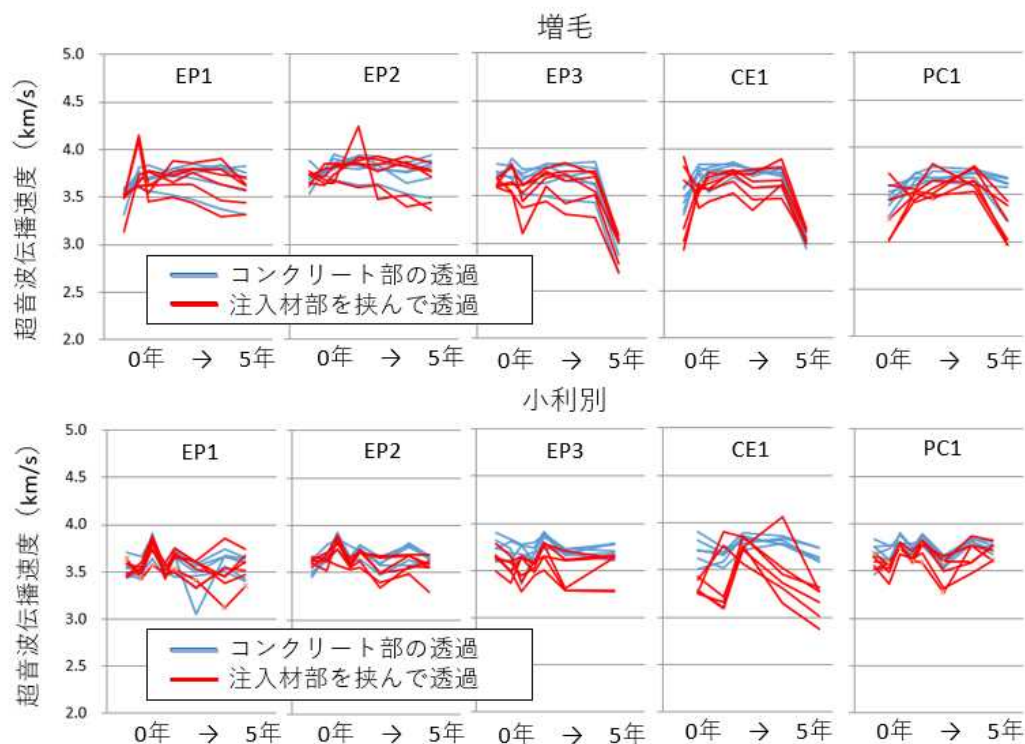


図-4.3.14 暴露5年目までの大型注入供試体の超音波伝播速度の経年変化

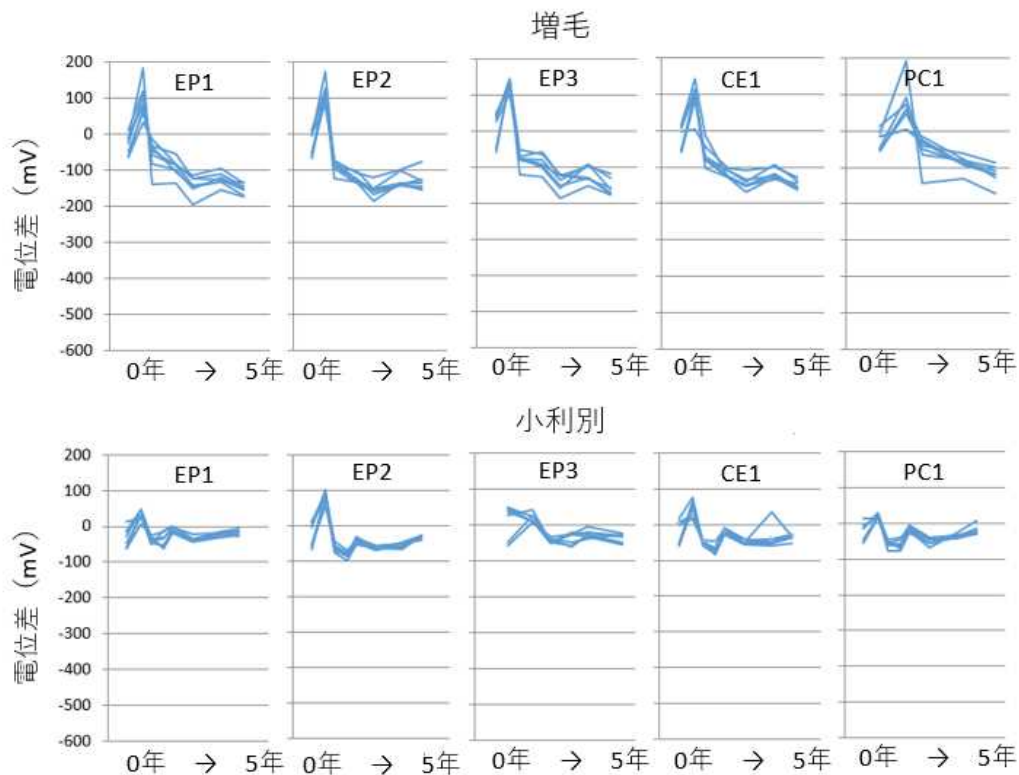


図-4.3.15 暴露5年目までの大型注入供試体の電位差の経年変化

伝播速度もコンクリート部よりも低下している供試体があることから、暴露 5 年目を迎えて注入材との接着力が低下し始めていると思われる。小利別よりも増毛のほうが低下傾向にあるのは、コンクリートの劣化進行速度が増毛のほうが速いためと推測され、これは、劣化の進行が速い凍害と塩害の複合による影響が、超音波伝播速度が大きく低下した暴露 5 年程度で現れてきた可能性が考えられる。

また、図-4.3.15 に各大型注入供試体における電位差の経年変化を示す。小利別の供試体は、バラツキはあるもののすべての供試体において電位差の低下傾向はみられない。一方、増毛の供試体では、注入材の種類にかかわらず暴露年数の経過とともに徐々に電位差が低下する傾向にある。しかしながら、鋼材の腐食発生の目安である -350mV にはまだ達していないことから、塩化物イオンの浸入によって鋼材の腐食が生じやすい状態になってきているが、暴露 5 年ではまだ鋼材に腐食は生じていないと推測される。

次に塩化物イオン量の測定結果を図-4.3.16 に示す。小利別の供試体では当然の結果であるが塩化物イオンの浸透は全くない。一方、飛来塩分環境下である増毛では、供試体の表面付近の塩化物イオン量が 5.77kg/m^3 であった。今回用いた大型注入供試体のコンクリートの水セメント比は 55%であるため、コンクリート標準示方書による計算上の発錆限界量¹⁷⁾は 1.75kg/m^3 である。この発錆限界量を超えている深さは 30~40mm の位置であり、鋼材のかぶり深さ 70mm まではまだ達していない。また、図-4.3.17 に示すように、小径コアによる大型注入供試体のコンクリートの圧縮強度は、小利別で 30.6N/mm^2 、増毛で 34.7N/mm^2 であり、暴露 5 年後でもまだまだ十分な強度を有している。このことから、厳しい寒冷環境においても、ひび割れ注入によってひび割れからの劣化因子の浸入を抑制し、コンクリートの劣化進行を抑える効果とその持続性は 5 年以上あることが確認できた。今後さらに、暴露 10 年の結果を待って、効果の持続性について検証していく予定である。

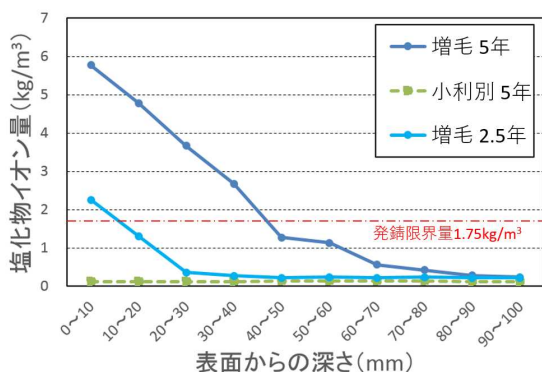


図-4.3.16 塩化物イオン量

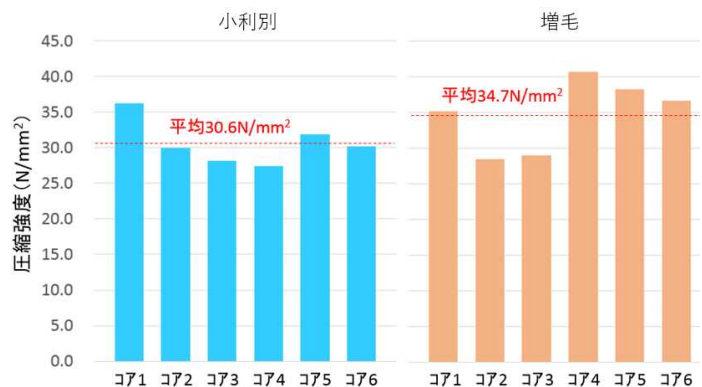


図-4.3.17 暴露 5 年後のコンクリートの圧縮強度

最後に参考として、図-4.3.18 に注入材単体の円柱供試体の経年変化写真を示す。樹脂系の注入材は、紫外線による表面劣化と思われる変色とともに光沢感は失われているが、形状的に大きな変化は見られない。ひび割れ内部にある注入材は紫外線の影響を受けないことを加味すると、暴露5年の結果から、樹脂系の注入材自体の耐久性について問題は見出せない。一方、セメント系の注入材においては、PC1は無数にひび割れているが暴露5年で形状をまだ確保しているが、CE1は暴露2年ほぼ崩壊して暴露5年では完全に崩壊していた。ここで、セメント系の注入材は高い流動性を得るためにセメント等の粉体の粉末度を非常に大きくしているため、今回の円柱供試体を作製したモルタル用モールド程度の体積で固化する際には乾燥収縮量が多くひび割れが発生しやすい。そのため、CE1は暴露後すぐに凍結融解作用等の影響を受けて早期に崩壊したものと考えられる。しかしながら、CE1は材料的に凍害劣化が生じる可能性が高いことから、CE1で作製した模擬ひび割れ注入供試体は注入材とコンクリートとの接着力が低下する結果になったと思われる。

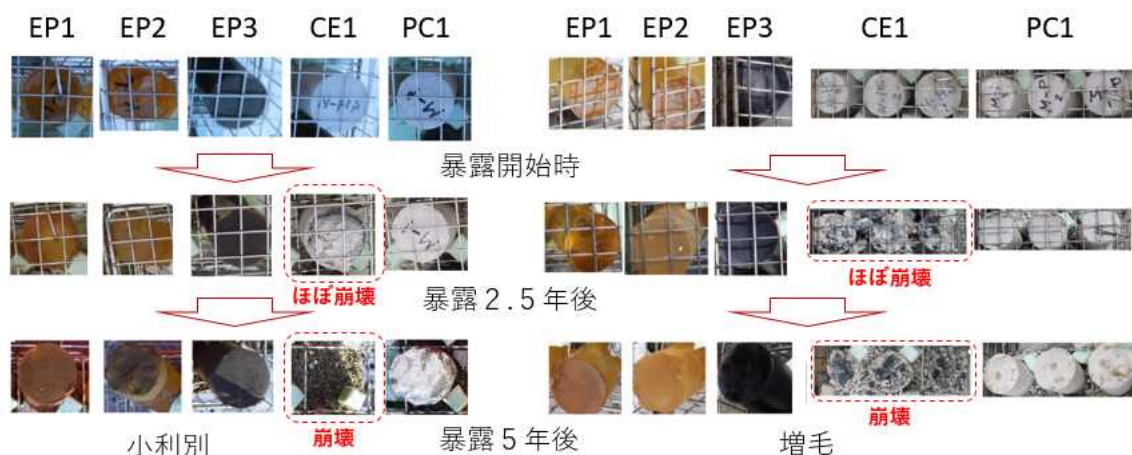


図-4.3.18 注入材単体の円柱供試体の暴露による経年変化

4.4 まとめと考察

本章では、ひび割れ注入後の耐久性、特に耐凍害性について、模擬注入供試体を用いた室内実験および暴露実験によって検証を行った。実際のひび割れ注入工事において多くの未充填が存在していることを確認し、本来、充填不足は施工不良ではあるが、その充填不足を原因とした再劣化のメカニズムについては不明確であった。このことから、本実験において、模擬注入供試体に凍結融解作用を与えて各種試験によるひび割れ注入後の耐久性を評価したところ、ひび割れ注入

の未充填部から凍害劣化の進行が確認された。以下に第 4 章で得られた知見を示す。

- (1) 注入によってひび割れを補修しても、コンクリートや注入材が凍害によって劣化すると、ひび割れ付近から内部に向かって再劣化が進み、注入材とコンクリートとの接着力が低下する。これは、ひび割れが生じた箇所、すなわち、一度損傷した箇所は再劣化しやすい箇所となり、補修後も弱点部となりやすい。
- (2) ひび割れに注入材が十分に充填されるとひび割れ内部で枝分かれしたひび割れや空隙にも充填されることから凍害による再劣化は抑制できる。しかし、未充填部があるとその近傍から凍害劣化が発生しやすく、厳しい凍害劣化が生じる環境では注入材とコンクリートとの一体性は徐々に低下する。
- (3) 注入材の未充填部による再劣化の発生形態は、未充填部に浸入した水分によってその付近の横ひび割れや粗骨材周囲の空隙から凍害劣化が発生し、徐々に奥へと進展していく。
- (4) 厳しい寒冷環境では、未充填部があるとひび割れ内部の注入材自体の品質が時間と共に変化する可能性があり、それによってコンクリートと注入材との接着力が低下する可能性がある。
- (5) 暴露 5 年程度では、注入材の種類による塩分浸透や鋼材腐食の抑制効果の違いはさほど見られないが、凍害塩害の複合環境において暴露 5 年程度で注入材とコンクリートとの接着状態に変化が現れ始めている。

以上の結果から、ひび割れに注入材の未充填部があると、厳しい寒冷環境では再劣化が発生する可能性が高いことが明らかとなった。このことから、第 5 章では、注入材の未充填と類似した状態となるひび割れ充填工法の耐凍害性の検証、第 6 章ではひび割れ注入の未充填を防止するための低温環境による注入性能実験について述べる。

第4章の参考文献

- 1) 国立研究開発法人土木研究所：コンクリート構造物の補修対策施工マニュアル（案），土木研究所資料第4343号，I 共通編，p.I-16，2016.
- 2) 渡辺博志：コンクリート構造物の信頼性の向上－ひび割れの影響－，土木技術資料 平成24年1月号，pp.42-45，2012.
- 3) 国立研究開発法人土木研究所：コンクリート構造物の補修対策施工マニュアル（案），土木研究所資料第4343号，V 不具合事例集，p.V-22，pp.V-27-28，2016.
- 4) 山本昌宏，谷村成，藤井隆史，安藤尚，綾野克紀：微細なひび割れを持つコンクリート試験体の作製方法とそれを用いたひび割れ補修材の性能確認試験方法に関する研究，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第12巻，pp.467-472，2012.
- 5) 独立行政法人土木研究所：コンクリートひび割れ部の塩分浸透性と鋼材腐食に関する暴露試験，土木研究所資料第4130号，2009.
- 6) 公益社団法人日本コンクリート工学協会：コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針2013，pp.127-128，2013.
- 7) 国立研究開発法人土木研究所：コンクリート構造物の補修対策施工マニュアル（案），土木研究所資料第4343号，IV ひび割れ修復工法編，pp.IV-7-8，2016.
- 8) 日本産業規格：コンクリートの凍結融解試験方法，JIS A 1148，2010.
- 9) 山下英俊，堺孝司，熊谷守晃，喜多達夫：実構造物におけるコンクリートの超音波による品質評価，コンクリート工学年次論文報告集，vol.22，No.1，pp.361-366，2000.
- 10) 木村芳幹：超音波トモグラフィ法によるコンクリート構造物品質の推定，(財)日本建築総合試験所機関誌 GBRC，Vol.33，No.2，pp.13-21，2008.
- 11) Jochen Stark ほか（訳：太田利隆ほか）：コンクリートの耐久性第2版，社団法人セメント協会，pp.200-202，2003.
- 12) Setzer, M. J., Fagerlund, G. and Janssen, D.J. : CDF Tset - Test method for the freeze-thaw resistance of concrete - with sodium chloride solution, Materials and Structures, Vol.29, pp.523-528, 1996.
- 13) 魚本健人，加藤潔，広野進：コンクリート構造物の非破壊検査，pp.37-39，森北出版，1990.
- 14) 杉山隆文，志村和紀，畠田大規：高解像度型 X 線 CT による AE モルタル中の空隙構造の透視，土木学会論文集 E2，Vol. 67，No. 3，pp. 351-360，2011.
- 15) 日本産業規格：コンクリートの曲げ強度試験方法，JIS A 1106，2006.
- 16) 国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所：凍害が疑われる構造物の調査・対策手引書（案），参 3-1，2017.

- 17) 土木学会：コンクリート標準示方書，維持管理編，2018 年度改訂，p.145，2018.

第 5 章

ひび割れ充填工法の 耐久性評価

第5章 ひび割れ充填工法の耐久性評価

5.1 概論

第5章では、ひび割れ修復工法の工法選定において、ひび割れ注入工法と比較選定されるひび割れ充填工法の耐凍害性について評価を行った。ひび割れ充填工法は、比較的幅の広いひび割れにおいて、表面からの劣化因子の浸入を防止する工法として適用される¹⁾²⁾。ひび割れ表面に沿ってUカットもしくはVカットを施し、その溝にひび割れ充填材を充填させてコンクリート表面のひび割れからの劣化因子の浸入を防止する工法である。ひび割れ幅に変化がある場合でも、その変化に追従するひび割れ充填材が採用され、ウレタン樹脂やシリコン樹脂、可とう性エポキシ樹脂等の有機系材料の使用によって追従性を保つ場合もある³⁾。しかしながら、厳しい寒冷環境では、ひび割れ充填材の浮き、コンクリートとひび割れ充填材との界面からの漏水や析出物が再発する事例が見られ、修復による効果が得られていないケースもある。これらは、厳しい寒冷環境による基盤コンクリートの凍害劣化やひび割れ充填材の性能低下等が原因と考えられるが、ひび割れ充填工法の耐寒性能は明らかではなく、その評価方法も確立されていない(図-5.1.1)。

本章では、寒冷環境下におけるひび割れ充填工法の耐久性等を把握することを目的として、数種類のひび割れ充填材でひび割れの表面を充填した供試体を作製した。これらの供試体を用いて、凍結融解作用がひび割れ充填箇所の接着耐久性に及ぼす影響について検討した室内実験と北海道の海岸線に暴露して塩化物イオンの浸透状態を確認した暴露実験の結果を報告する。



図-5.1.1 ひび割れ充填箇所の劣化イメージと再劣化事例

5.2 実験概要

5.2.1 供試体の作製

実験に使用した供試体は、日本産業規格 JIS A 1439_2010 の建築用シーリング材の試験方法に準拠した H 型供試体⁴⁾、および鋼材 1 本を中心に配置した角柱供試体に U カットを施してひび割れ充填材を施工した模擬充填供試体とした。

H 型供試体は、図-5.2.1 に示すように 40mm×40mm×10mm の市販のモルタル板（セメント：砂＝1：3，水セメント比 50%）2 枚を用いて、充填材を 12mm×12mm×40mm のサイズに挟めて H 型になるように作製した。

表-5.2.1 コンクリートの配合

セメントの種類	Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				スランプ (cm)	空気量 (%)
				W	C	S	G		
普通ポルトランドセメント	20	55	47	154	280	890	1001	8.0	4.5

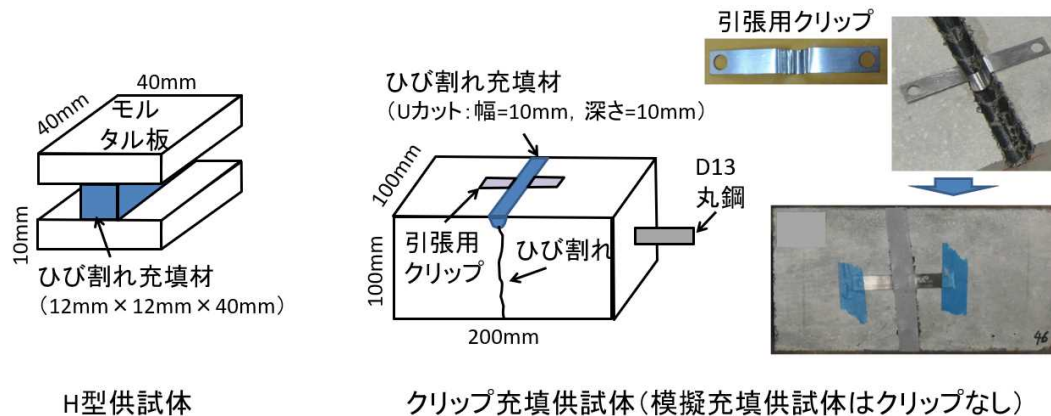


図-5.2.1 H 型供試体⁴⁾とクリップ充填供試体（模擬充填供試体）

模擬充填供試体は、表-5.2.1 に示す配合のコンクリート（水中養生 28 日）を用いて、図-5.2.1 に示すような D13 の丸鋼を中心に 1 本配置した 100mm×100mm×200mm の角柱供試体を作製し、3 点曲げ载荷によって 0.2～0.4mm 程度の割裂ひび割れを導入したひび割れ供試体を作製した。このひび割れ供試体の割裂面のひび割れに U カットグラインダーで幅 10mm×長さ 100mm×深さ 10mm の U カットを施して、U カット部にひび割れ充填材を施工して模擬充填供試体を作製した。ここで、U カット充填材部の接着引張試験を行う供試体には、図-5.2.1 に示すステンレスバネ鋼

の平板を U カット部に沿うように加工して独自に製作した引張用クリップ(幅 10mm, 長さ 70mm, 厚 0.2mm,) を, U カットの溝にはめた状態でプライマーを塗布してひび割れ充填材を施工した(以下, クリップ充填供試体)。なお, ひび割れ充填材の施工は, 20℃の恒温室内で実施して充填後に同室で 2 週間静置して養生を行った。

5.2.2 ひび割れ充填材の種類

表-5.2.2 に使用したひび割れ充填材の種類を示す。ひび割れ充填材(以下, 充填材)は一般的に使用されている可とう性エポキシ系 3 種類, ポリウレタン系 1 種類, 変成シリコーン系 1 種類の計 5 種類の充填材を使用した。可とう性エポキシ系は, 破断時の伸びが異なる 3 種類の充填材

表-5.2.2 ひび割れ充填材の種類と主な諸元

試料名	EP1	EP2	EP3	PU1	MS1
ひび割れ充填材の種類	可とう性エポキシ樹脂			ポリウレタン樹脂	変成シリコーン
	一成分型	一成分型	二成分型	一成分型	二成分型
	湿気硬化型	湿気硬化型	反応硬化型	湿気硬化型	反応硬化型
硬化時間(温度)	1h (23℃)	3.5h (20℃)	5h (20℃)	5h (23℃)	4h (23℃)
最大引張応力(N/mm ²)	1.4	1.2	10 以上	1.03	0.37
破断時の伸び(%)	117	63.1	45 以上	880	543
プライマー	ウレタン系	エポキシ系	エポキシ系	ウレタン系	ウレタン系

※ 数値はカタログ値

を選定した。また, すべての充填材において, 製品メーカーが推奨する専用のプライマーを接着面に塗布して充填材の施工を行った。なお, 充填材の施工は, 各充填材の施工に精通した専門の作業者がそれぞれ実施することで, 作業者の低熟練度による施工不良等を極力少なくした。

5.2.3 試験方法と試験ケース

室内実験では, 凍結融解作用が充填材の接着耐久性に及ぼす影響を検討するため, H 型供試体とクリップ充填供試体において, 凍結融解作用を与える前後に接着引張試験を行って接着耐久性の評価を行った。凍結融解試験は RILEM に準じた CDF 試験とした⁵⁾⁶⁾。CDF 試験は, 図-5.2.2

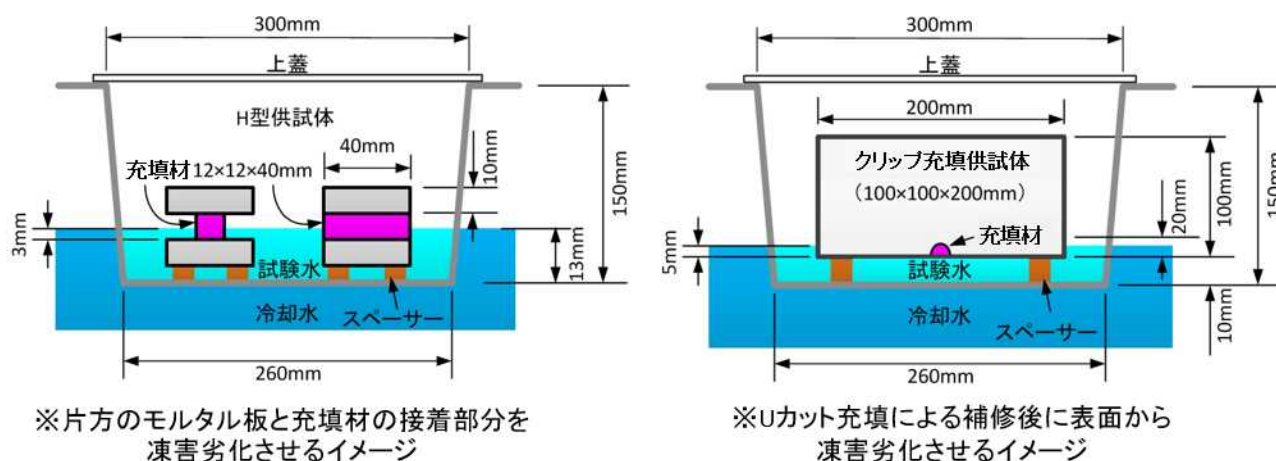


図-5.2.2 各供試体の CDF 試験のイメージ図

表-5.2.3 試験ケース

充填材 記号	CDF サイクル 数	凍害劣化 の程度	H型供試体	クリップ充 填供試体
			スケーリング量 (kg/m ²)	
EP1	0	なし	0	0
	28	小	0.5	0.6
	56	大	8.3	2.5
EP2	0	なし	0	0
	28	小	0.9	0.5
	56	大	2.4	1.5
EP3	0	なし	0	0
	28	小	0.7	0.7
	56	大	8.3	3.2
PU1	0	なし	0	0
	28	小	0.4	0.1
	56	大	7.2	2.4
MS1	0	なし	0	0
	28	小	0.9	0.3
	56	大	3.7	2.5

に示すように、H 型供試体はモルタル板の片方を塩化物イオン濃度 3%の塩水に浸漬し、クリップ充填供試体は充填材の施工面を同じ 3%濃度の塩水に浸漬して行った。凍結融解サイクル数は、H 型供試体およびクリップ充填供試体共に 0, 28, 56 サイクルの 3 ケースとし、設定したサイク

ル数の終了時点で容器内に落ちているモルタル破片の質量と供試体の質量減少量からスケーリング量を測定した。凍結融解行程は、+20℃から-20℃まで 10K/h の定速で 4 時間冷却、-20℃で 3 時間保持、同じ定速で+20℃まで時間加熱、+20℃で 1 時間保持し、12 時間 1 サイクルで行った。この CDF 試験において、H 型供試体およびクリップ充填供試体の試験条件は凍害劣化の程度が異なる 3 水準とした。試験ケースは、表-5.2.3 に示すように、各供試体において所定の凍結融解サイクル終了後の異なる凍害劣化の程度による 3 水準で構成し、同一サイクルでスケーリング量に多少の差はあるが、それぞれ凍結融解なし、スケーリング小、スケーリング大とした。

次に、暴露実験では、模擬充填供試体を北海道増毛町の海岸線にある増毛暴露場に 5 年間設置した。模擬充填供試体は、図-5.2.3 に示すように、U カット充填した試験面を側面にして海向き（西向き）に設置した。試験面以外の面はエポキシ樹脂系接着剤で保護コーティングし、試験面以外からの劣化因子の浸入を防止した。保護コーティングは半年毎に塗り替えることで保護コーティングの劣化（エポキシ樹脂系の紫外線劣化等⁷⁾）による影響を防止した。模擬充填供試体は 5 種類の充填材を 3 体ずつ暴露した。なお、比較として、モルタル補修材（CE1）で U カット充填した模擬充填供試体も作製し、計 6 種類の模擬充填供試体を暴露した。暴露 5 年後に、模擬充填供試体における充填材の損傷状況、およびひび割れ充填した試験面から浸入する塩化物イオンの浸透状況の確認を行い、厳しい凍害と塩害の複合環境におけるひび割れ充填後の補修効果について検討・評価を行った。充填材の損傷状況は、半年毎の目視観察と写真撮影による外観評価、塩化物イオンの浸透状況は、電子プローブアナライザー（以下、EPMA）による塩化物イオンのマッピング分布の測定と電位差滴定法による塩化物イオン量の測定を EP2 と CE1 の試験ケースにおいて行った。



図-5.2.3 増毛暴露場での暴露状況

5.2.4 接着引張試験方法

接着引張試験は万能試験機を用いて行い、図-5.2.4のように、H型供試体は JIS A 1439_2010 の建築用シーリング材の試験方法に準拠し、クリップ充填供試体は取付けた U カット充填材の引張用クリップをシャックルで固定して引っ張る方法で行った。引張速度は 10mm/分とした。H 型供試体は各充填材で 2 試料作製して測定値は平均値とし、クリップ充填供試体は各充填材で 1 試料の測定値とした。なお、H 型供試体では、CDF 試験による凍結融解後のモルタル板が凍害劣化によって損傷したため、接着引張試験時に引張治具が水平に固定されないことから、図-5.2.4 に示すように、充填材とモルタル板の接着部に影響を及ぼさないように L 型の鋼材でモルタル板の補強を行った。補強板の寸法は厚 1mm で 40mm×10mm×10mm の L 型とし、モルタル板への接着はエポキシ樹脂接着剤を使用して、引張治具と水平になるように固定した。また、試作したクリップを用いての接着引張試験方法は、現在、U カット等で施工された充填材の接着強さや耐久性を定量的に評価する手法はないことから、施工後の充填材の接着耐久性を評価・検討するために、JIS A 1439_2010 のはく離接着強さ試験およびせん断接着強さ試験⁴⁾を参考にして考案したものである。



図-5.2.4 接着引張試験状況

5.3 実験結果

5.3.1 接着引張試験による破壊形態

図-5.3.1 および図-5.3.2 に、H 型供試体の接着引張試験における破壊形態の結果および引っ張り時の破壊状況例を示す。なお、EP3 の 56 サイクルはモルタル板の劣化が大きくなりすぎたため、48 サイクルで終了した結果とした。凍結融解前（0 サイクル）の破壊形態は、可とう性エポキシ系の EP3 を除いて、ほとんどの充填材が、材料が破断する凝集破壊であった。可とう性エポキシ系の EP1 と EP2 は、引っ張り時に多少の伸びはあったものの、界面付近で充填材が一気に破断する、いわゆる薄層破壊となった。EP3 は、3 種類の可とう性エポキシ系の中で一番伸びが少なく、部分的な充填材の破断もあるが、充填材とモルタル板との界面破壊であった。EP3 は充填材

可とう性エポキシ樹脂系			ポリウレタン系	変成シリコン系
EP1	EP2	EP3	PU1	MS1
凍結融解 0サイクル				
				
凝集(薄層)破壊	凝集(薄層)破壊	界面破壊(一部凝集)	凝集破壊	凝集破壊
↓				
28サイクル				
				
界面破壊	界面破壊	基盤破壊	凝集破壊	凝集破壊
↓				
56サイクル		48サイクル	56サイクル	
				
界面破壊	界面破壊	基盤破壊	界面破壊(一部凝集)	凝集破壊

図-5.3.1 接着引張試験における H 型供試体の破壊形態



図-5.3.2 接着引張試験時のH型供試体の破壊状況例

自体の接着力が高く、プライマーにも接着力の高いエポキシ系を使用しているが、モルタル板の基盤破壊には至らなかった。ポリウレタン系の PU1 は伸びが非常に大きいため、図-5.3.2 の EP1 のように、充填材が大きく伸びた状態から一気に引きちぎれるように破断した。変成シリコン系の MS1 も同様に伸びが大きいですが、図-5.3.2 のように MS1 は部分的に引きちぎられるよう破断し、最終的には充填材が凹凸にちぎれた破断面となった。

凍結融解後の破壊形態では、EP1 と EP2 は、凍結融解サイクル数 28, 56 サイクルにおいて、充填材とモルタル板の界面から剥がれる界面破壊となり、凍結融解前の凝集破壊と異なる形態となった。これと同様に、PU1 も 56 サイクルでは界面破壊となった。また、凍結融解前は界面破壊であった EP3 は、凍結融解後に基盤破壊となった。MS1 は、凍結融解前も後も凝集破壊となり、破壊形態に変化は見られなかった。したがって、MS1 の破壊形態は凍結融解の有無に関わらず同じ結果であったが、その他の充填材はモルタル板の凍害劣化による強度低下、もしくはモルタルとプライマーとの接着力が低下する結果となった。

次に、表-5.3.1 にクリップ充填供試体および H 型供試体の接着引張試験における破壊形態を比較した表を示す。クリップ充填供試体における接着引張試験では H 型供試体の結果とは異なり、図-5.3.3 に示すように EP3 以外は凍結融解作用に関わらず、すべてクリップで充填材がせん断さ

表-5.3.1 クリップ充填供試体とH型供試体の破壊形態の比較

クリップ充填供試体		凍害劣化の程度			
充填材の種類		凍結融解なし		スケーリング小	スケーリング大
可とう性 エポキシ樹脂	EP1	凝集破壊	⇒	凝集破壊	凝集破壊
	EP2	凝集破壊		凝集破壊	凝集破壊
	EP3	クリップ破断		クリップ破断	界面破壊
ポリウレタン樹脂	PU1	凝集破壊		凝集破壊	凝集破壊
変成シリコーン	MS1	凝集破壊		凝集破壊	凝集破壊

H型供試体		凍害劣化の程度			
充填材の種類		凍結融解なし		スケーリング小	スケーリング大
可とう性 エポキシ樹脂	EP1	凝集破壊	⇒	界面破壊	界面破壊
	EP2	凝集破壊		界面破壊	界面破壊
	EP3	界面破壊		基盤破壊	基盤破壊
ポリウレタン樹脂	PU1	凝集破壊		凝集破壊	界面破壊
変成シリコーン	MS1	凝集破壊		凝集破壊	凝集破壊



図-5.3.3 接着引張試験時のクリップ充填供試体の破壊状況例

れる凝集破壊となった。EP3 は劣化が小さいとクリップの破断となったが、劣化が大きくなると界面破壊となった。今回使用した充填材の引張応力は元々小さいため、このようにクリップによ

ってせん断されて凝集破壊となることはある程度想定済みの結果であったが、EP3 は引張応力が他よりも大きいことから、凍結融解前ではクリップが破断する結果となり、凍結融解後は充填材がクリップと共に持ち上がる界面破壊が生じた（図-5.3.3）。この界面破壊は、凍結融解作用によってコンクリートとプライマーとの接着力が低下したために界面で剥離を起こしたと考えられる。

5.3.2 接着引張試験による最大引張応力と最大伸び率

図-5.3.4 および図-5.3.5 に、クリップ充填供試体と H 型供試体それぞれのスケーリング量と最大引張応力および最大伸び率の関係を示す。

凍結融解後のそれぞれの最大引張応力は、各種充填材の標準値の最大引張応力（カタログ値）を概ね下回っていた。各供試体において最大引張応力はそれぞれ異なるが、可とう性エポキシ樹脂

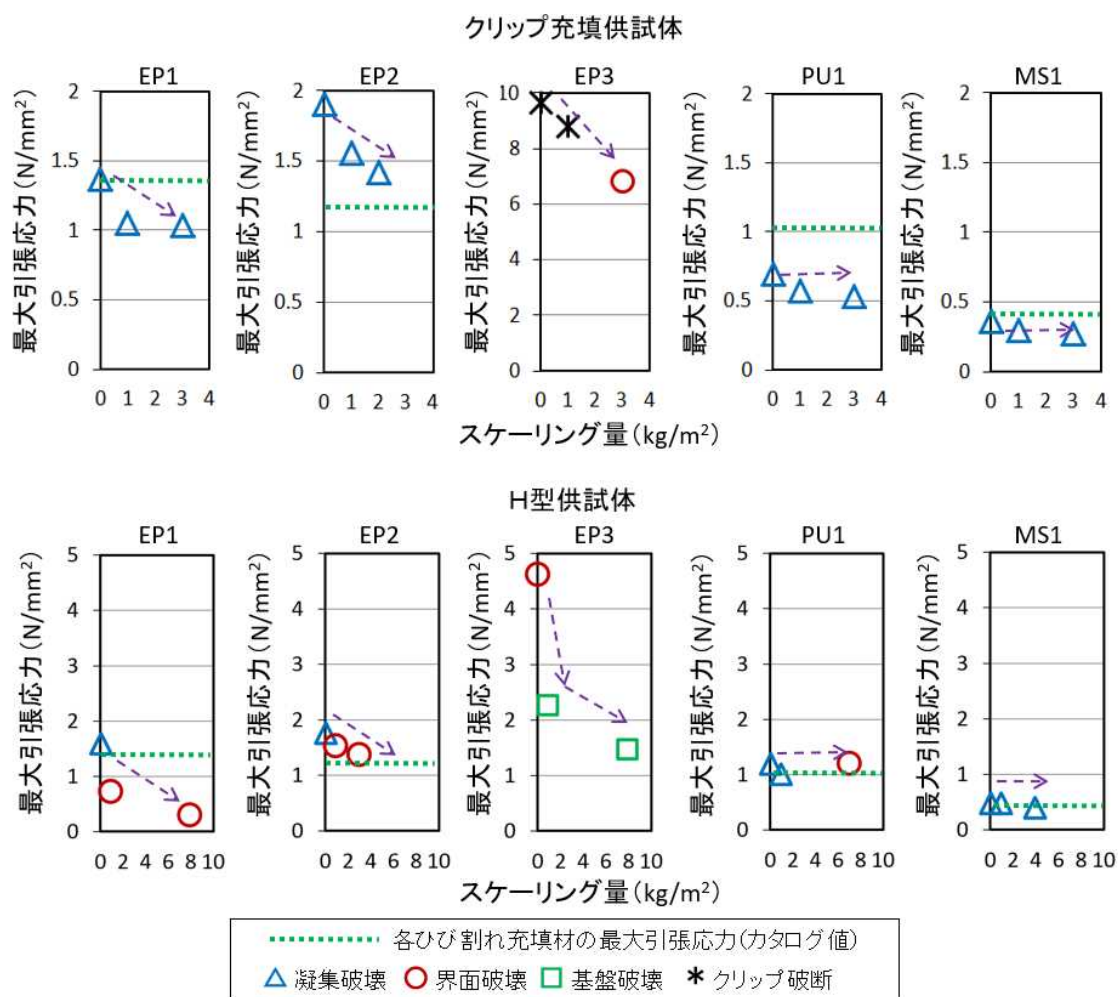


図-5.3.4 スケーリング量と最大引張応力

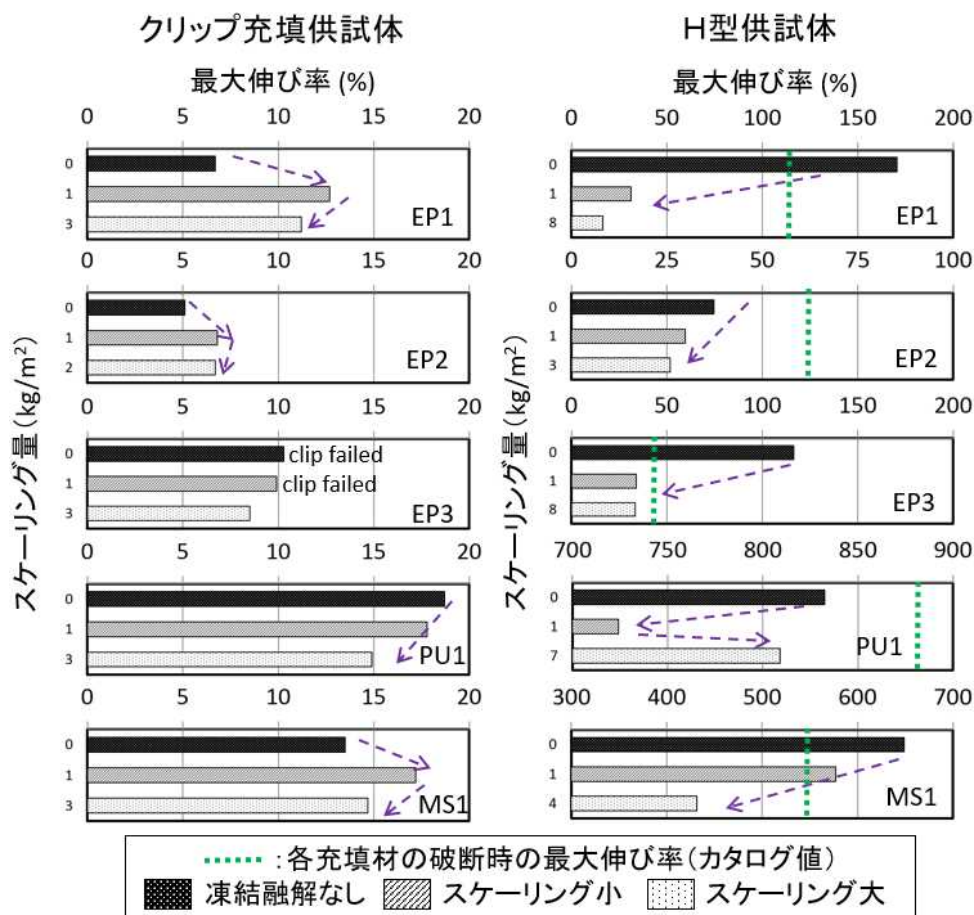


図-5.3.5 スケーリング量と最大伸び率

脂系は3材料共にスケーリング量が多くなるにつれて最大引張応力が減少する傾向が見られる。H型供試体ではモルタル板の凍害劣化によって、充填材との接着力が低下したと推測できるが、クリップ充填供試体では凍結融解後に最大引張応力が2割程度減少する傾向があることから、凍結融解作用もしくは塩水等の影響によって、充填材自体の品質低下が生じていた可能性があることを確認できた。これに対し、ポリウレタン系と変成シリコーン系はスケーリング量が増えても最大引張応力はほぼ横ばいであり、引張応力は凍結融解作用の影響をあまり受けていないことがわかる。

次に最大伸び率を見ると、H型供試体ではPU1を除いて凍結融解後に充填材の伸び率は減少する傾向が見られる。これに対してクリップ充填供試体では劣化の進行に伴い伸び率が一旦増加してから減少する傾向がある。これは、凍結融解作用や塩水の影響で充填材自体の品質が変化して柔らかくなり伸び率が増加したと推測する。しかし、コンクリートの劣化が大きくなると充填材もしくはプライマーとの接着力が低下して途中で剥離したために伸び率が減少したと考えられる。

これらの結果から図-5.3.6に、H型供試体とクリップ充填供試体の最大引張応力と最大伸び率の劣化なしから劣化小、劣化なしから劣化大における増減率を示す。H型供試体では最大引張応力と最大伸び率の減少率が各ケースでほぼ同じような傾向となっている。一方で、クリップ充填供試体では最大引張応力は各ケースほぼ同じような減少率で変化が見られないが、EP1, EP2, MS1においては伸び率が増加となっていることが確認できる。

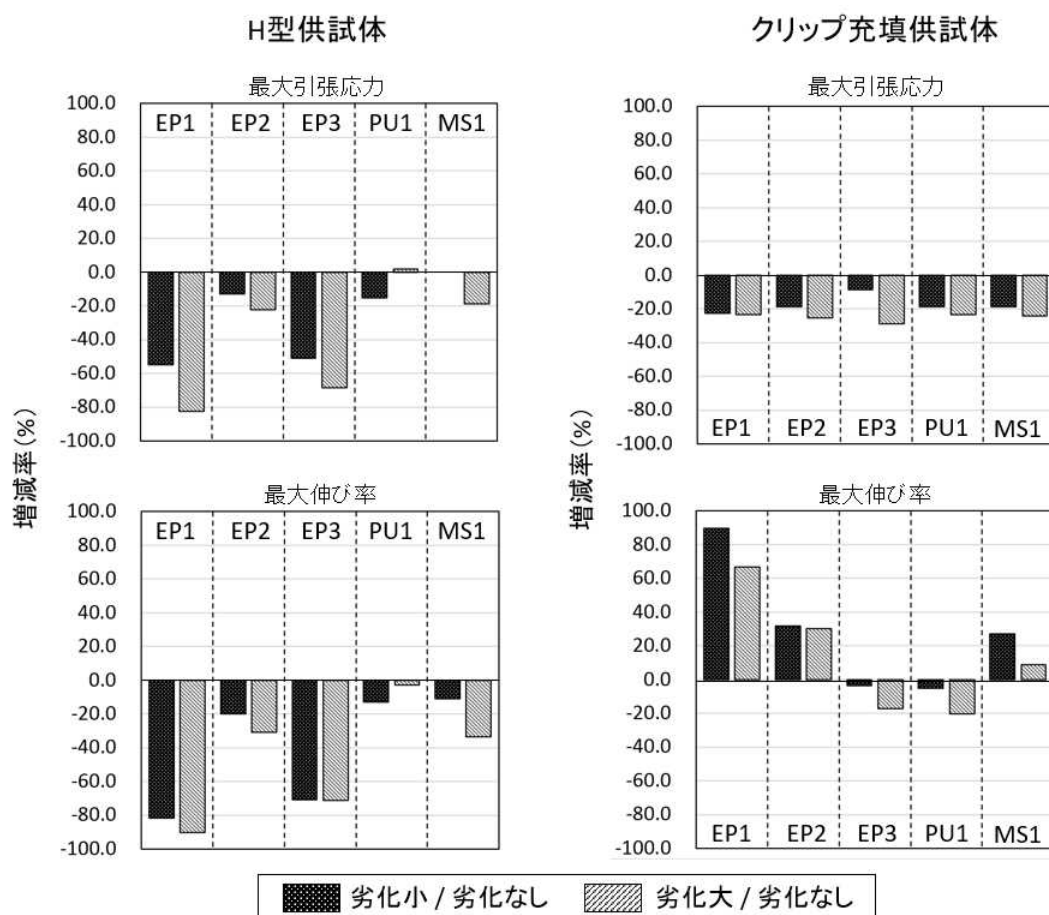


図-5.3.6 最大引張応力と最大伸び率の増減率の比較

5.3.3 接着引張試験結果の考察

以上のH型供試体とクリップ充填供試体の接着引張試験の結果から、凍結融解作用を受けた各種充填材の接着耐久性について考察する。

凝集破壊が界面破壊に変化したEP1, EP2, PU1は、充填材の品質低下も多少あるが、それ以上にモルタル板の劣化とプライマーの劣化による影響が大きく、充填材が破断する応力よりもモルタル板とプライマーとの接着力もしくは充填材とプライマーとの接着力が下回ったと考えられる。

ただし、EP2 と PU1 は、凍結融解前後で最大引張応力の増減にさほど大きな変化はなかったことから、モルタル板の劣化の影響よりもプライマーと充填材との接着力が低下したことで界面破壊が生じたと思われる。

H 型供試体で界面破壊が基盤破壊に変化した EP3 は、モルタル板の劣化が原因と考えられるが、クリップ充填供試体での接着引張試験結果では凍結融解後に界面破壊が生じていた。この原因については今後の課題であるが、恐らく、引張用クリップと U カット面の隙間に水分が浸入し、水分の凍結膨張が大きく影響して界面ではく離が発生したと推測する。

また、凍結融解後も特に破壊形態に変化がなかった MS1 は、充填材自体の多少の品質低下はあるが、モルタル板等が劣化しても充填材が破断する応力のほうが界面の接着力よりも下回っていたため、凍結融解作用にあまり影響しない材料であることを確認した。

以上のことから、本試験の範囲では、凍結融解作用の影響により充填材の接着耐久性が低下することは確認できた。しかし、H 型供試体とクリップ充填供試体の試験結果が一致しないケースもあり、H 型供試体の接着引張試験では充填材の品質変化よりも基盤材の劣化に結果が左右されやすいが、クリップ充填供試体の接着引張試験では充填材の品質変化が結果に反映されるケースがあることを確認できた。したがって、今回独自に試みたクリップによる接着引張試験は、U カットに充填された充填材の凍害劣化後の品質確認に有効な手法となる可能性があり、両試験を併用することで施工後の接着耐久性を評価できる可能性が示唆された。

5.3.4 暴露 5 年後の実験結果

図-5.3.7 に、設置当初と暴露 5 年後の模擬充填供試体の試験面の状態を撮影した写真を示す。6 種類ともに設置当初と暴露 5 年後で大きな変化は見られなかった。暴露 5 年後ではコンクリート表面は若干粗くなっているが、充填材は凍害劣化や紫外線劣化等による剥離等は生じてい

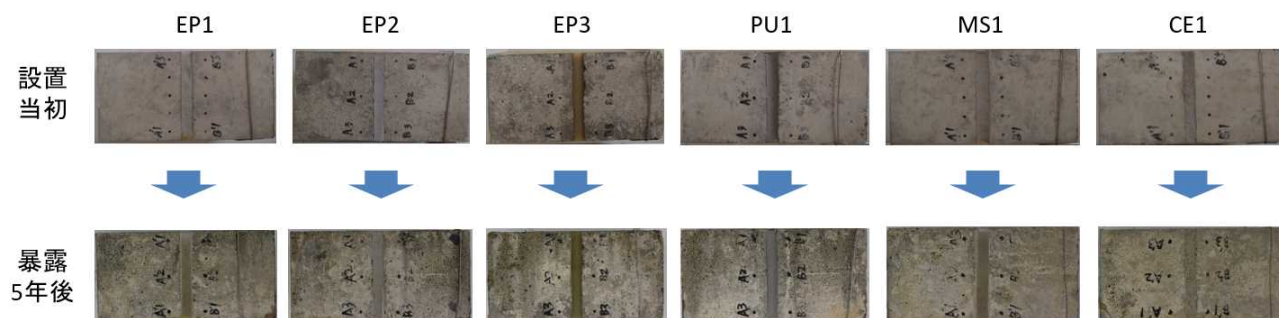


図-5.3.7 各模擬充填供試体の設置当初と暴露 5 年目の試験面の状態比較

ないことから、充填材補修後の状態は暴露 5 年程度でもまだ健全であると言える。

図-5.3.8 および図-5.3.9 に暴露 5 年後の模擬充填供試体の EP2 と CE1 における、EPMA 解析による塩化物イオンのマッピング分布図および電位差滴定法による塩化物イオン量を示す。EPMA による塩化物イオンの浸透状態は、EP2, CE1 共に、試験面表面のひび割れが充填材によって閉塞していても、塩化物イオンが EP2 は深さ約 50mm まで、CE1 は深さ 60mm 以上に浸透していた。また、充填材以深のひび割れ付近にも塩化物イオンが多く存在していることから、塩化物イオンはひび割れに浸入していると思われる。模擬充填供試体には深さ 50mm の位置に D13 鋼材があるため、塩化物イオンは暴露 5 年以内に鋼材まで到達していたことになる。また、塩化物イオン量のグラフを見ると、樹脂系の EP2 とセメント系の CE1 を比較すると、塩化物イオン量は CE1 のほうが多く浸透している。これは、U カット部の充填材の接着面の状態が影響したと推測され、樹脂系は U カット部に接着プライマーを使用していることから遮水・遮塩効果が多少付加されており、塩化物イオンの浸透抑制効果に若干の差が出たと思われる。しかし、表面付近の塩化物イオン量は $3.0 \sim 3.6 \text{ kg/m}^3$ 程度であるが、鋼材の深さ 50mm 付近の塩化物イオン量は 0.7 kg/m^3 程度であるため、腐食発生限界量 1.75 kg/m^3 まではまだ達していなかった。このことから、塩化物イオンは充填材以深のひび割れも伝って内部に浸入していると考えられ、充填材の種類に関わらず、水分や塩分等の劣化因子がひび割れの奥にむき出しの鋼材まで浸入して塩化物イオン量が増えてくると考えると、水分供給および塩分供給のある環境では、U カット充填によるひび割れ補修によって鋼材の保護効果を期待することは難しいと言える。

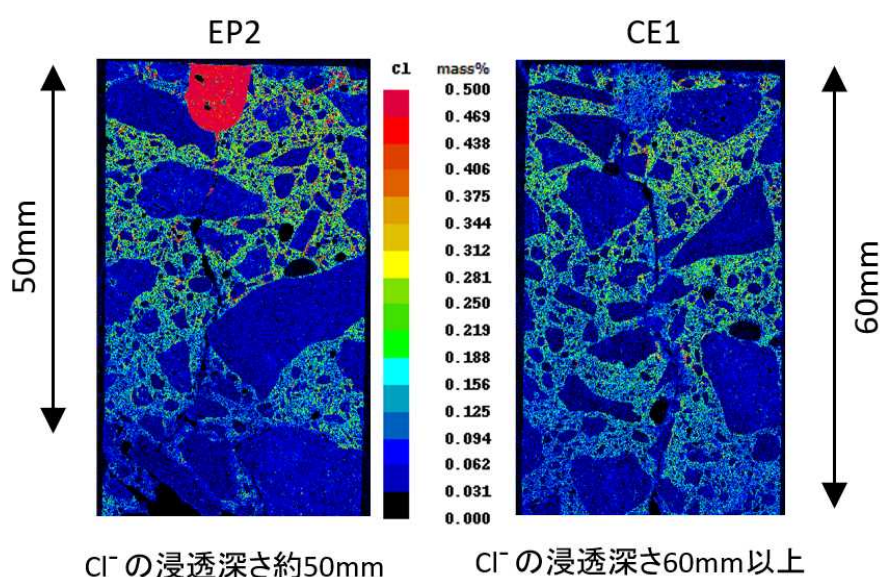


図-5.3.8 EPMA による塩化物イオンの浸透状態

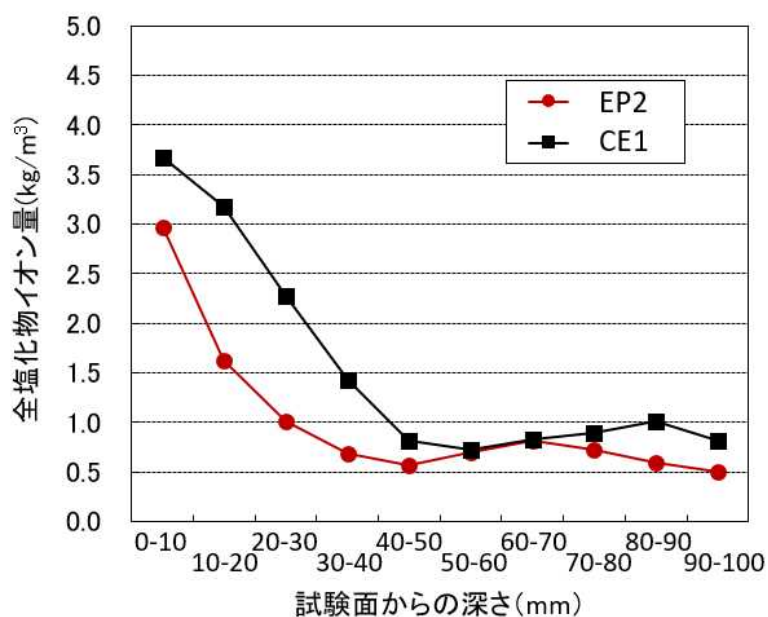


図-5.3.9 塩化物イオン量

5.4 まとめと考察

本章では、ひび割れ充填工法における耐凍害性について、H型供試体とUカット充填による模擬充填供試体を用いた室内実験と暴露実験によって充填箇所の接着耐久性と塩化物イオンの浸透抑制効果を検証した。第5章で得られた知見を以下に示す。

- (1) H型供試体に凍結融解作用を与えるとひび割れ充填材とモルタル（コンクリート）との接着力が低下して破壊形態が変化する。接着力が低下する原因として、モルタル（コンクリート）の劣化だけでなく、充填材自体の品質低下やプライマーの劣化による可能性が考えられる。
- (2) H型供試体に凍結融解作用を与えた後に接着引張試験を行うことで、凍結融解作用がモルタル（コンクリート）と充填材との接着耐久性に及ぼす影響を評価することが可能である。また、今回試案したクリップ充填供試体におけるクリップによる接着引張試験を行うことで、凍結融解作用後の充填材自体の品質変化を確認する有効な手段となり得る。
- (3) Uカット充填後の品質管理方法としてH型供試体とクリップ充填供試体による接着引張試験を併用して評価することでUカット充填箇所の接着耐久性を確認できる可能性がある。
- (4) 厳しい凍害・塩害の複合環境に5年間暴露した結果、充填材および充填箇所に大きな変化は見られず、Uカット充填後の補修状態は健全であった。しかし、塩化物イオンの浸入は充填材

以深のひび割れも伝って内部に浸入していると推測される．したがって、水分や塩分が供給される環境において充填材によるひび割れ補修では、ひび割れ内部の鋼材の腐食抑制は難しいと言える．

第 5 章の参考文献

- 1) 公益社団法人 日本コンクリート工学会：コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針 2013，pp.120-121，2013.
- 2) 国立研究開発法人土木研究所：コンクリート構造物の補修対策施工マニュアル（案），土木研究所資料第 4343 号，I 共通編，p.I-17，2016.
- 3) 公益社団法人 日本コンクリート工学会：コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針 2013，pp.129-130，2013.
- 4) 日本産業規格：建築用シーリング材の試験方法，JIS A 1439，2010.
- 5) Jochen Stark ほか（訳：太田利隆ほか）：コンクリートの耐久性第 2 版，社団法人セメント協会，pp.200-202，2003.
- 6) Setzer, M. J., Fagerlund.G and Janssen.D.J. : CDF Tset - Test method for the freeze-thaw resistance of concrete - with sodium chloride solution, Materials and Structures, Vol.29, pp.523-528, 1996.
- 7) 富山禎仁，西崎到：促進劣化試験による高分子系建設材料の寿命評価，土木技術資料，53-5，pp.26-31，2011.

第 6 章

ひび割れ注入工法における
ひび割れ注入材の注入性状の評価

第6章 ひび割れ注入工法におけるひび割れ注入材の注入性状の評価

6.1 概論

第6章では、第4章で述べたひび割れ内のひび割れ注入材（以下、注入材）の未充填部から凍害劣化の進行が生じやすいことから、ひび割れ注入工法の積年の大きな課題のひとつである、注入材のひび割れ内部への注入性と充填性（以下、この2つを合わせた性能を注入充填性と定義する）を向上させる方策および低温環境におけるひび割れ注入材の性能の規格化を目標とした検討を行った。本報告は、使用頻度が多く、環境温度の変化に影響されやすいエポキシ樹脂系ひび割れ注入材に焦点を当て、異なる温度環境における注入材の温度変化と粘度変化を把握し、模擬ひび割れ供試体を用いた注入試験等から注入性能の評価および注入充填性を評価した結果を述べる。

6.2 ひび割れ注入工法の補修方針

ひび割れ注入工法の補修目的は、既存の指針類にも示されているように、ひび割れへの劣化因子（水や塩分等）の浸入防止・抑制によるひび割れの進行・拡大の防止、鋼材の不動態被膜の保護等によるコンクリート構造物の耐久性の回復である。表-6.2.1に補修方針とひび割れ注入材に求められる性能との関係¹⁾を示すが、補修設計の中では補修方針となる①劣化因子の浸入防止・抑制、②鋼材の腐食抑制（保護）に必要となるひび割れ修復材の基本的な性能を確保する必要がある。なお、②はひび割れ部に露出した鋼材の一部が対象となる。

表-6.2.1 ひび割れ注入材に求められる性能と主な補修方針¹⁾

主な品質規格 (JIS A6024, NSKS-003など) 補修方針			①劣化因子の 浸入防止・抑制	②鋼材の腐食 抑制（保護）
材料に求められる性能				
ひび割れ注入材	充填性・密実性	粘性，流動性，収縮率	○	○
	材料強度	圧縮，引張，曲げ強さ	○	○
	ひび割れ追従性	伸び率	○	
	接着耐久性	接着強さ，接着耐久性	○	
	（耐候性等）	（耐凍害性等）	○	

これら基本的な性能を網羅するひび割れ注入材の種類は、樹脂系とセメント系に大別され、特に樹脂系は粘度や硬化後の性状に様々な品質の材料がある。これら是对応すべきひび割れの状態が多様なためである。しかし、実際には設計時に適切な材料が選択されていなかったため補修後に不具合が生じた事例もある。こうした不具合事例に共通する最も注目すべき点は、温度や水との関係である。ひび割れ注入材に限らず、補修材の施工性能は温度に影響されやすく、特に施工最低温度が 5℃以上の製品が多いため、低温環境には対応しにくいのが一般的である。第 1 章において、過去の研究によるひび割れ注入工事の現地調査における施工時の低温が影響したと思われる未充填事例を報告した²⁾が、このような低温環境下におけるひび割れ注入工法の充填特性や未充填等の不具合について検討した研究や報告は少ない。総プロにおいても、劣化したコンクリート構造物の補修技術に関する研究成果によって主に 20℃ の環境における性状を基本として規格化されているが、低温環境におけるひび割れ注入材の適用条件は、5℃ における実験結果を基にエポキシ樹脂系ひび割れ注入材の粘度を「4000 cps (4000 mPa・s) 以下であることが望ましい」と記述されているのみで、規格値や留意点は明記されていない³⁾。また、日本コンクリート工学会のコンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針においても注入材の品質規格は総プロが参照されている⁴⁾。

このような背景から、本章では、環境温度の変化に影響されやすいエポキシ樹脂系ひび割れ注入材の注入性能や注入充填性を詳細に把握、および低温によって生じる注入時の不具合について実験的に検証し、低温環境下における注入充填性の定量的な評価を試みた。

6.3 エポキシ樹脂系ひび割れ注入材の硬化前の性能

6.3.1 可使時間の算定方法

エポキシ樹脂系ひび割れ注入材の硬化前の性能の一つである可使時間の算定方法について記述する。エポキシ樹脂系ひび割れ注入材はそのほとんどが 2 成分の反応硬化型であり、これらを含めた接着剤系のエポキシ樹脂の可使時間の多くは温度上昇法によって算定されている。この温度上昇法は、硬化反応で発熱するエポキシ樹脂の温度変化から可使時間を求める方法である。可使時間の算定方法は、23±2℃の温度環境において、総プロでは攪拌から最高硬化発熱温度に到達するまでの時間の 60%⁵⁾、また、JSCE-K 541-2013 および JIS A 6024_2015 では攪拌から硬化発熱温度が急激に上昇する立ち上がり点までの時間の 70%、もしくは急激な立ち上がり点の判別が困難

な場合には攪拌から最高硬化発熱温度に到達するまでの時間の 50% ⁶⁾と規定されている (図-6.3.1)。現在、一般的に使用されているエポキシ樹脂系ひび割れ注入材 (以下、注入材) は JSCE-K 541-2013 および JIS A 6024_2015 に基づく製品が多い。これらの可使用時間は環境温度 23±2 °C における値であるが、一般に注入材は低温では粘性が高くなり可使用時間や硬化時間は長くなる性質を有する。寒冷地において 5 °C 前後の低温環境でも施工している実際の工事現場では可使用時間や注入充填性が異なると考えられるが、低温環境における注入材の粘性や可使用時間に明確な規定はない。なお、冬季施工専用の注入材も製品化されているが、低温における注入充填性の向上が担保されたわけではなく、しかも低温時の可使用時間を明示した製品は少ないのが現状である。

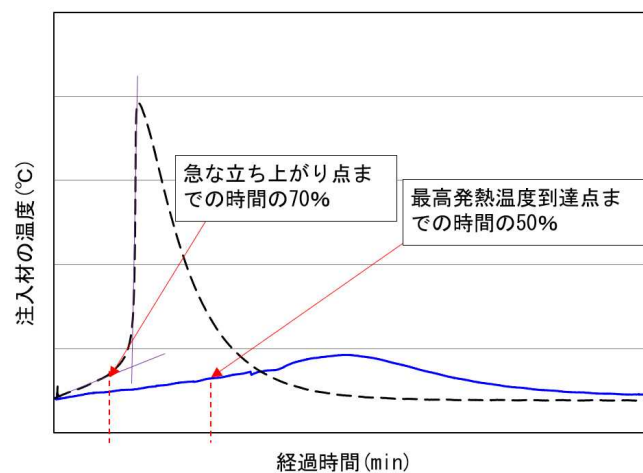


図-6.3.1 温度上昇法による可使用時間の算定例 (JSCE-K 541-2013) ⁶⁾

6.3.2 注入性能の評価方法

ひび割れ注入工法において、注入するひび割れ幅によって注入のしやすさは変化する、すなわち、ひび割れ幅が狭いほど注入しにくくなる等の施工性の特徴は一般的に知られている。このような注入性能は、ひび割れ幅と注入面積速度を関係付ける以下の式 ⁸⁾によって説明される。

$$S_v = \alpha w^2 p / \mu \quad (1)$$

ここに、 S_v : 注入面積速度 (cm^2/sec)、 α : 補正係数、 w : ひび割れ幅 (mm)、 p : 注入圧力 (MPa)、 μ : エポキシ樹脂系注入材の粘度 ($\text{dPa}\cdot\text{sec}$) である。

上村らは、式 (1) により、注入材の粘度、注入圧力とひび割れ幅によってひび割れ内部に流入する注入材の注入面積速度 (注入材が面的に拡散する速度) は支配されるとしている。この注入面積速度は注入材をニュートン流体とした場合に、ナビエ・ストークスの運動方程式から注入圧とひび割れ幅の二乗に比例するとしている。さらに瀬野らの研究においては、これにひび割れ面

の粗さを考慮し、粗くなるほど注入速度は遅くなることを明らかにしている⁹⁾。

一方、注入施工時の環境温度が低いと注入材は硬くなって流動性が悪くなり注入しにくくなることも注入材の一般的な性能として知られている。しかし、低温時の注入材の注入性能を式（1）等によって検証した研究結果はなく、また、低温における注入材の粘性や流動性、可使時間や硬化時間等の性能は各材料開発メーカーにおいてほとんど公にされていない。

このことから本研究では、低温における注入材の注入性能を把握するため、粘性と可使時間が異なる4種類の注入材を用いて、温度上昇法による可使時間の算定、回転粘度計による粘度の計測、および模擬ひび割れ供試体への注入試験を行った。

6.4 実験概要

6.4.1 可使時間の計測

注入材の可使時間は、作業上の効率や品質確保に重要な情報であるため、注入材の製品カタログ等の試験成績表に公開されている。しかし、上述したように可使時間の算定温度は $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ での値が多い。一般にエポキシ樹脂は温度を 10°C 上昇させると硬化速度が2倍になり、硬化時間は $1/2$ 倍となる¹⁰⁾ことから、低温での硬化時間および可使時間は長くなることが推測できる。また、温度上昇法で用いる試料の質量は一般に $100\sim 500\text{g}$ であるが、実際の注入作業においては、例えば低圧注入器に一度に使用する注入材の量は $30\sim 100\text{g}$ 程度であり、さらにひび割れ内部では注入材は拡散して広がる。このため、注入材の量が少なくなると反応熱量も小さくなり、硬化時間および可使時間はより長くなると考えられる。

表-6.4.1 実験に使用したエポキシ樹脂系ひび割れ注入材の主な諸元

注入材の種類	エポキシ樹脂系ひび割れ注入材 硬質系低粘度形			
	低粘度形		超低粘度形	
記号	A	B	C	D
粘度 (dPa・s)	5.94 (20°C : 500g)	6.4 (23±2°C : 150g)	1.5~5.0 (20°C : 100g)	2.7 (5°C : 500g) 1.1 (20°C : 500g)
可使時間 (min)	50 (20°C : 500g)	150 (23±2°C : 150g)	40 (10°C : 100g) 14 (20°C : 100g)	40±10 (20°C : 500g)

※Aは材料メーカーの試験成績値、B、C、Dはカタログ値

そこで、粘度と可使時間が異なる 4 種類の 2 液型の注入材を用いて、環境温度を 5℃と 20℃の 2 水準、試料の量を 30g と 300g の 2 水準として、2 液混合後から硬化までの温度上昇変化を計測し、各注入材における可使時間の実測を試みた。温度計測は熱電対（T 形）を使用して 30 秒間隔で、各注入材で 2 回の計測を行った。可使時間は JSCE-K 541-2013 に準じて求め、計測 2 回の平均値とした。使用した注入材の主な諸元を表-6.4.1 に示す。

これらの注入材はひび割れ注入工事で一般的に使用されている製品であり、使用される頻度が比較的多い硬質系低粘度形である。注入材 A と B は粘度が同程度で一般に広く使用されている標準的な注入材であり、可使時間の違いを除けば硬化後の品質もほぼ同じである。この注入材 A と B を本実験に選定した理由は、低温の影響による可使時間の変化が注入充填性に及ぼす影響を検討するためである。また、注入材 C と D は一般的な低粘度形よりも粘性が低く、低粘度形の粘度範囲に属するが超低粘度形とも呼ばれている¹¹⁾。注入材 D は注入材 A の可使時間と同程度の注入材であり、注入材 C は可使時間が短い速硬型の注入材である。ここでは注入材 C と注入材 D を超低粘度形と定義する。このような超低粘度形はひび割れ幅が 0.2 mm 以下のひび割れに使用されていることもあり、寒冷地域では低温施工時に使用されている場合もある。本実験では、温度変化による粘度と可使時間の変化、およびそれに伴う注入充填性を比較するため、これら 4 種類の注入材を選定した。

6.4.2 粘度の計測

可使時間の計測を行った 4 種の注入材において、試料 300g における環境温度 20℃、5℃および 0℃の 3 ケースについて、2 液混合後から硬化までの注入材の経時粘度をデジタル回転粘度計で計測した。粘度の計測は 1 秒間隔で行い、硬化もしくは高粘度で計測不能になるまで実施した。計測は 1 ケースで 3 回以上行い、粘度変化の過程が類似した複数データから 1 データを選定してこれを測定値とした。また、環境温度 20℃と 5℃においては、試料 30g のケースについても計測を試みた。ただし、試料 30g での結果は使用したデジタル回転粘度計の計測規定量以下のためここでは参考値とした。

6.4.3 注入充填性試験

上述した各注入材の可使時間と経時粘度の計測によって粘性の変化過程等を確認した後、それぞれの注入性状と充填性状を確認するため、図-6.4.1 に示すように内径 108 mm×長さ 200 mm の

塩化ビニル管を型枠としたコンクリート円柱供試体を作製し、脱型せずに水中養生 28 日後に割裂載荷によってひび割れを導入して模擬ひび割れ供試体を作製した¹²⁾。表-6.4.2 にコンクリートの配合を示す。割裂載荷によって作製するひび割れ幅は 0.2 mm および 0.3 mm を基準とした。供試体に導入した割裂ひび割れは載荷力を戻すと塩ビ管の復元力によって幅 0.1 mm 程度にまで収束するため、ひび割れの両端に 0.2 mm 厚、0.3 mm 厚のアルミ箔を挟むことで所定のひび割れ幅を確保した。なお、ひび割れ加工の過程で 0.25 mm と 0.35 mm となったひび割れとアルミ箔を挟まない 0.1 mm の模擬ひび割れ供試体も一部作製した。補修工事でひび割れ注入工法の選定対象となるひび割れ幅の範囲は 0.2～1.0 mm であるが、低温で流動性が悪くなる注入材の性状の影響を受けやすい 0.4 mm 未満の比較的狭いひび割れ幅を対象とした。また、試験で使用した模擬ひび割れ供試体は、数多くの供試体を割裂した中から比較的直線的に 1 本のひび割れが発生した供試体を選定した。

表-6.4.2 コンクリートの配合

セメントの種類	Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				Slump (cm)	Air (%)
				W	C	S	G		
普通ポルトランドセメント	20	52.1	43.8	156	300	812	1032	7.5	5.5



図-6.4.1 コンクリート円柱供試体の割裂載荷によるひび割れ導入状況

これらの模擬ひび割れ供試体を用いて、一面（注入面）から注入材を注入して背面から排出するまでの注入時間を計測し、さらに硬化後に注入材の充填状態を確認する実験を行った。これを注入充填性試験と定義する。注入充填性試験は、図-6.4.2 に示すように模擬ひび割れ供試体の注入面から注入材を 30g 入れた注入器で自動低圧注入を行って排出するまでの注入時間を計測し、その後、注入器を付けたまま 1 週間以上養生した。なお、注入は供試体のひび割れを縦にした状態で側面に注入する方法とし、注入器はゴムの伸縮で自動低圧注入するシリンダータイプを用いた。

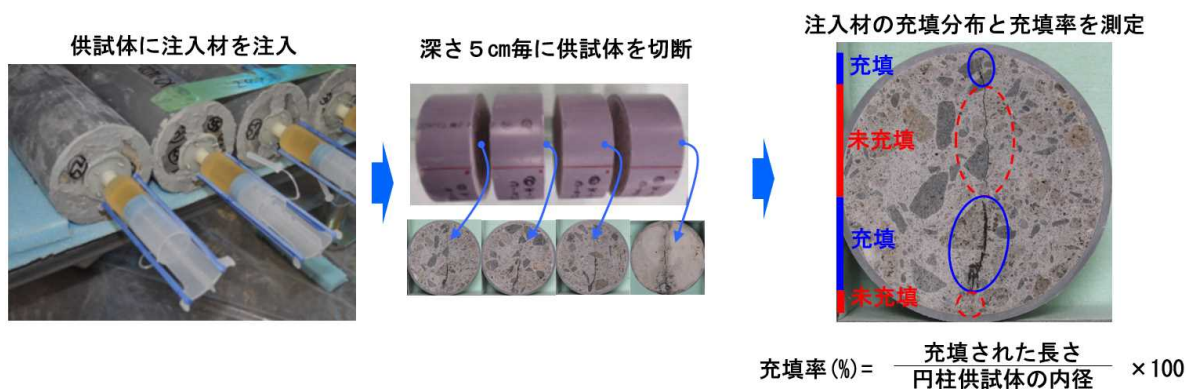


図-6. 4. 2 注入充填性試験の状況と充填率の定義

表-6. 4. 3 注入充填性試験の試験ケース

試験条件				ひび割れ注入材の種類			
実験開始時の温度 (°C)			ひび割れ幅 (mm)	A	B	C	D
環境温度 (室温)	供試体	注入材					
20	20	20	0.1	A2020_0.1	—	—	—
			0.2	A2020_0.2	B2020_0.2	C2020_0.2	D2020_0.2
			0.3	A2020_0.3	B2020_0.3	C2020_0.3	—
5	5	5	0.2	A0505_0.2	B0505_0.2	C0505_0.2	D0505_0.2
			0.3	A0505_0.3	B0505_0.3	C0505_0.3	—
			0.35	A0505_0.35	B0505_0.35	C0505_0.35	—
5	0	5	0.2	A0005_0.2	B0005_0.2	C0005_0.2	D0005_0.2
			0.25	—	B0005_0.25	—	—
			0.3	A0005_0.3	B0005_0.3	C0005_0.3	—
			0.35	A0005_0.35	—	—	—

養生後、注入材が完全に硬化していることを確認してから、供試体の注入面から深さ方向に 50 mm 間隔で切断し、切断面のひび割れに充填されている注入材の充填率を拡大鏡を用いて目視計測した。充填率は内径 108 mm の供試体のひび割れに対して 1 mm 毎に注入材の充填の有無を計測し、充填されていた長さの総計を内径 108 mm で除した値とした。また、内径 108 mm のひび割れ長さに対して注入材が充填されている位置の分布も調べた（以下、充填分布）。

表-6. 4. 3 に試験ケースを示す。試験は、実験室（恒温室）内の環境温度を 20°C と 5°C の 2 水準で行い、実験開始時の供試体の温度を 20°C、5°C、0°C の 3 水準、実験開始時の注入材の温度は環境温度に合わせて 20°C と 5°C の 2 水準とした。供試体のひび割れ幅は 0.1～0.35 mm の範囲とした。なお、20°C と 5°C の供試体と混合前の注入材の温度は、室温 20°C と 5°C の実験室に静置して表面温度が室温と同じ温度になってから 2 液の注入材を混合して注入充填性試験を開始し

た．また，0℃の供試体は，-20℃の冷凍室で半日冷凍した後，室温 5℃の実験室に静置して供試体の表面温度が 0℃まで上昇した時点で試験を開始した．なお，注入器は低温によるシール材の付着力低下を防ぐため，20℃の実験室で先に注入器を接着させてから各供試体の温度管理を実施した．

試験は各ケース 1 供試体で行い，ひび割れ幅 0.2 mm は全ての注入材で実施し，ひび割れ幅 0.3 mm は注入材 A，B，C で実施した．その他のひび割れ幅 0.1 mm，0.25 mm，0.35 mm においては各注入材でランダムに実施した．なお，注入圧力を測定する実験を注入材 A においてひび割れ幅 0.2 mm と 0.3 mm の 3 供試体で事前に実施した．その結果，注入圧力はひび割れ幅 0.2 mm で 0.07 MPa，ひび割れ幅 0.3 mm で 0.06 MPa と 0.08 MPa となり，平均注入圧力は 0.07 MPa であった．

6.5 実験結果

6.5.1 各注入材の可使時間の算定

図-6.5.1 に各環境温度における各注入材の温度変化を示す．環境温度 20℃において，試料 300g で測定した各注入材の温度上昇傾向は，注入材 B は緩やかな温度上昇，注入材 A，C，D は急激に温度が上昇する傾向を示した．一方，試料 30g で測定した試験ケースでは，急激に温度上昇した注入材 C 以外は温度がほとんど上昇しない状態で硬化に至った．

次に，環境温度 5℃において，試料 300g の試験ケースでは，超低粘度形の 2 種類（注入材 C と注入材 D）に温度上昇が見られた．注入材 C は急激に温度が上昇し，注入材 D は緩やかに温度が上昇した．一方，低粘度形の注入材 A と B は温度がほとんど上昇しなかった．また，試料 30g の少量ではすべての注入材で温度がほとんど上昇しない結果となった．

このように低温もしくは少量において温度上昇が見られなかった注入材はエポキシ樹脂の反応熱量が少ない一方で，硬化速度が速い注入材 C のような注入材は反応熱量が多いと考えられる．これらの温度変化傾向から JSCE-K 541-2013 の温度上昇法に準拠した可使時間の算定値を求めた結果を表-6.5.1 に示す．環境温度 20℃における注入材 A の可使時間は 73.5 分，注入材 B は 201 分，注入材 C は 26.6 分，注入材 D は 80.5 分となり，表-6.4.1 に示した標準的な可使時間に比較的近い値となった．しかし，低温環境や少量では温度が上昇しない注入材が多いことから，低温環境では温度上昇法によって可使時間を評価できないことと結論づけられる．

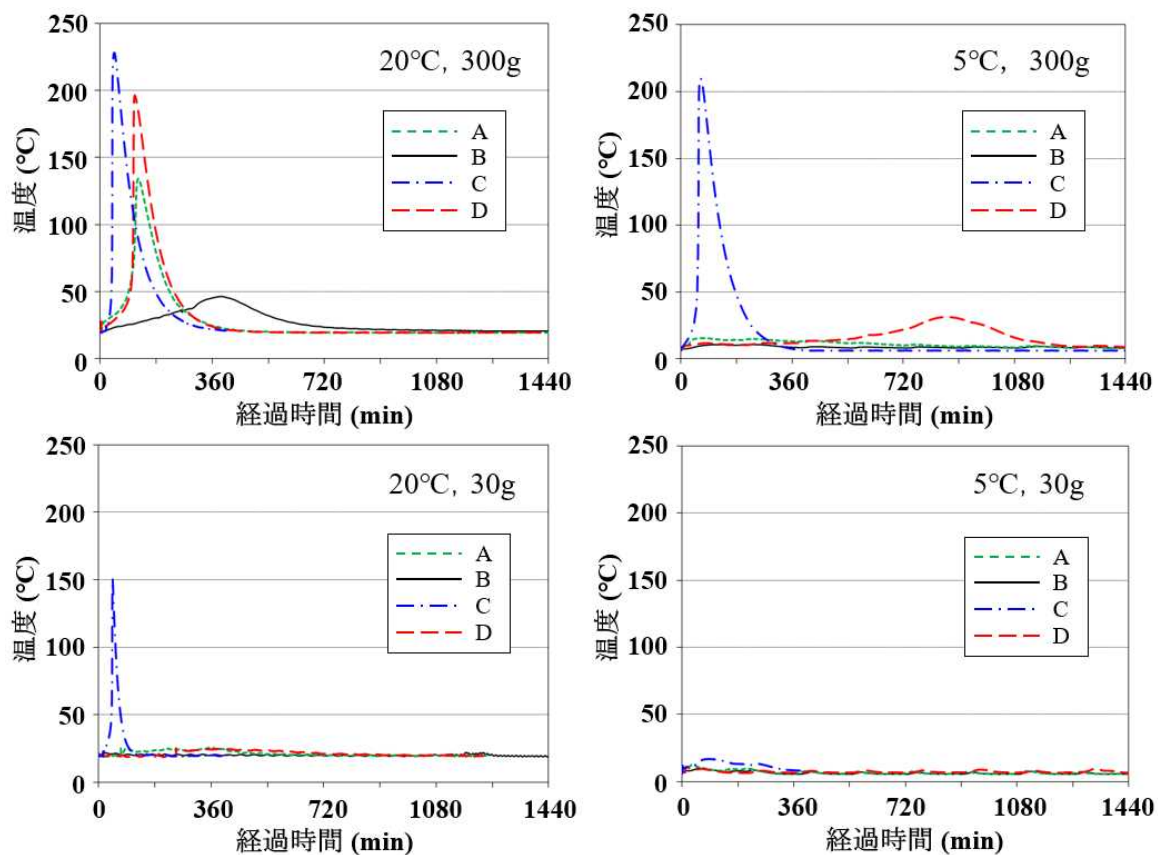


図-6.5.1 各注入材の温度変化

表-6.5.1 温度上昇法による可使時間の算定値

試験条件	環境温度	20°C		5°C	
		算定方法	算定値(min)	算定方法	算定値(min)
300g	A	急上昇点までの70%	73.5	温度上昇なし	—
	B	最高温度までの50%	201	温度上昇なし	—
	C	急上昇点までの70%	26.6	急上昇点までの70%	39.2
	D	急上昇点までの70%	80.5	最高温度までの50%	429.5
30g	A	温度上昇なし	—	温度上昇なし	—
	B	温度上昇なし	—	温度上昇なし	—
	C	急上昇点までの70%	30.1	温度上昇なし	—
	D	温度上昇なし	—	温度上昇なし	—

6.5.2 各注入材の粘度の経時変化

図-6.5.2 に各環境温度における各注入材の粘度の経時変化を示す。環境温度 20℃ では、注入材 A と B は粘度が若干低下した後、徐々に粘度が増加し始めて途中で急に大きく増加して硬化に至った。注入材 C と D は粘度が低下した後、急激に粘度が増加して硬化した。攪拌直後に粘度が若干低下する現象は、反応が始まって発熱し始めたことによって注入材が温まり、初期粘度よりも一時的に粘度が低下することで生じる。また、その後、急激に発熱量が多くなって硬化速度が増加して粘度が増加し、一気に硬化に至る現象は反応型樹脂の特有の性状である。この環境温度 20℃、試料 300g において各注入材の粘度が急激に増加し始めた経過時間は、前項の温度上昇法で算定した可使用時間に近い値となった。

一方、環境温度 5℃ および 0℃ における各注入材の粘度の経時変化は、注入材 C を除いて、注入材 A, B, D は攪拌直後の粘度低下は見られるが、その後の粘度の上昇傾向は徐々に増加して硬化に至る傾向に変化した。さらに、計測終了までの経過時間も低温になるほど長くなった。これは、前項の可使用時間を算定する温度変化の試験結果から、低温によって硬化反応の発熱が抑えられたためと考えられ、言い換えれば、発熱の影響を受けずに硬化が進む低温時の注入材の性能を表していると言える。

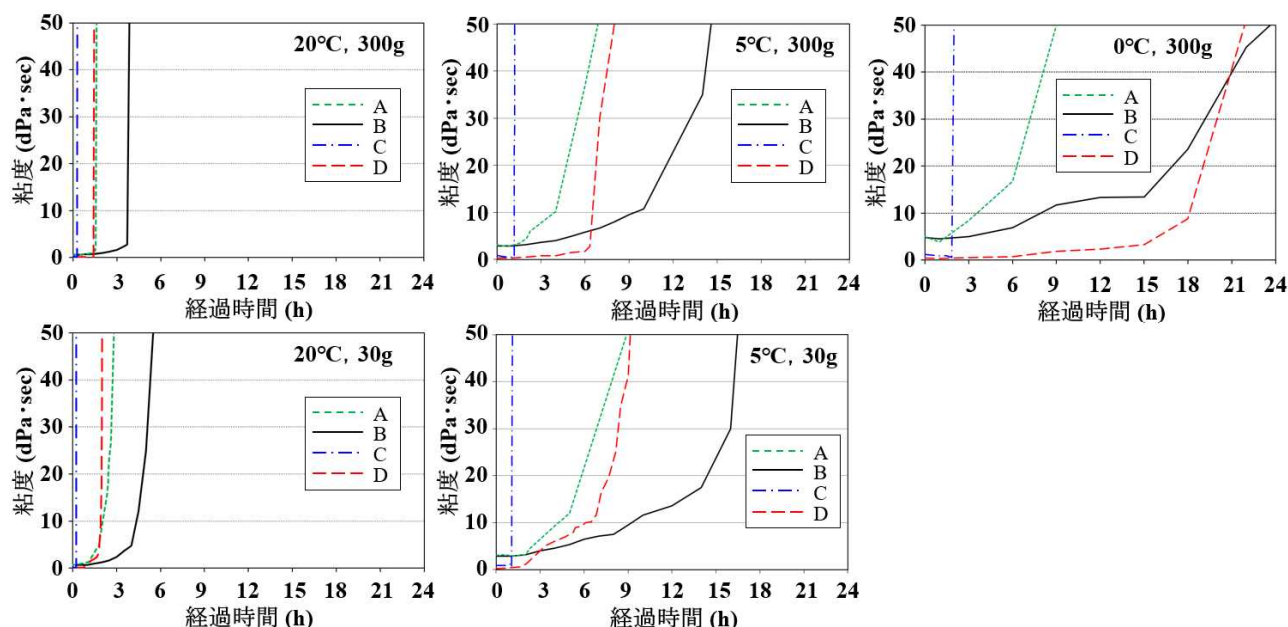


図-6.5.2 各注入材の経時粘度

また、参考値とした環境温度 20℃ および 5℃ の試料 30g における粘度の経時変化は、300g よりも粘度の増加が緩やかとなり経過時間も少し長くなっている。これは反応熱量が少ないためと推測できるが、少量であっても環境温度が可使時間に及ぼす影響は大きいことがわかった。

以上のことから、低温環境で注入材が少量では温度上昇がほとんどない状態で硬化反応が進行することから、ひび割れ内部ではほとんど温度上昇しない状態で注入材が注入・充填されると思われる。したがって、ひび割れ内部の注入材の注入充填性は、注入量に関わらずひび割れ内部の環境温度に依存すると推測する。

6.5.3 注入面積速度と充填率

注入充填性試験の各試験ケースにおいて、注入開始から注入材が背面に排出されるまでの注入時間を図-6.5.3 および図-6.5.4 に示す。図-6.5.3 はひび割れ幅の変化による注入時間の変化、図-6.5.4 はひび割れ幅 0.2 mm と 0.3 mm における環境温度の変化による注入時間の変化に着目して、同じデータをそれぞれ比較したグラフにしている。排出なしのケースを除いた試験ケースすべてにおいて、環境温度に関わらずひび割れ幅が大きくなると注入時間は短くなる。また、ひび割れ幅が同じ場合、環境温度が低くなるにつれて注入時間は大きく増加することから、注入材の流動性はひび割れ幅と環境温度に大きく影響されることがわかる。注入時間が一番長くなった注入材 A のひび割れ幅 0.2 mm では、200 mm の距離に対して注入材の排出まで 0℃ で 6 時間弱もかかっており、5℃ でも約 1 時間半かかることから、低温での施工では施工性が極端に低下することが明らかである。注入材 B の 0℃ も注入時間は長くなったが、可使時間が長いいため注入材 A よりも注入時間は短くなった。一方、超低粘度形の注入材 C は、環境温度 5℃ において注入材 A および B の 20℃ よりも短い注入時間で排出しており、環境温度 5℃ では施工性が良いと言えるが、環境温度 0℃ のひび割れ幅 0.2 mm では注入材は排出しなかった。注入材 D は 0℃ のひび割れ幅 0.2 mm でも 1 時間以内に排出したことから、低温でも施工性は良い結果となった。

次に、図-6.5.5 に注入材が硬化した後の供試体のひび割れに充填された注入材の測定断面毎の充填率を示す。また、図-6.5.6 に各測定断面に充填された注入材の充填分布のイメージ図の一例を示す。排出面である深さ 200 mm の充填率が全体的に若干低下する傾向がみられた。これは、排出面のひび割れが開放されていたことが影響していると思われるが、低温で注入材の粘度が増加してもひび割れ幅が大きいほうが充填率は低下している。図-6.5.6 の充填分布のイメージ図から、排出口付近の充填率の低下は、ひび割れの上部に充填されていない状態とひび割れの上下部に充填されていない状態の 2 パターンがあり、これは注入材の排出によって注入圧が低下して排

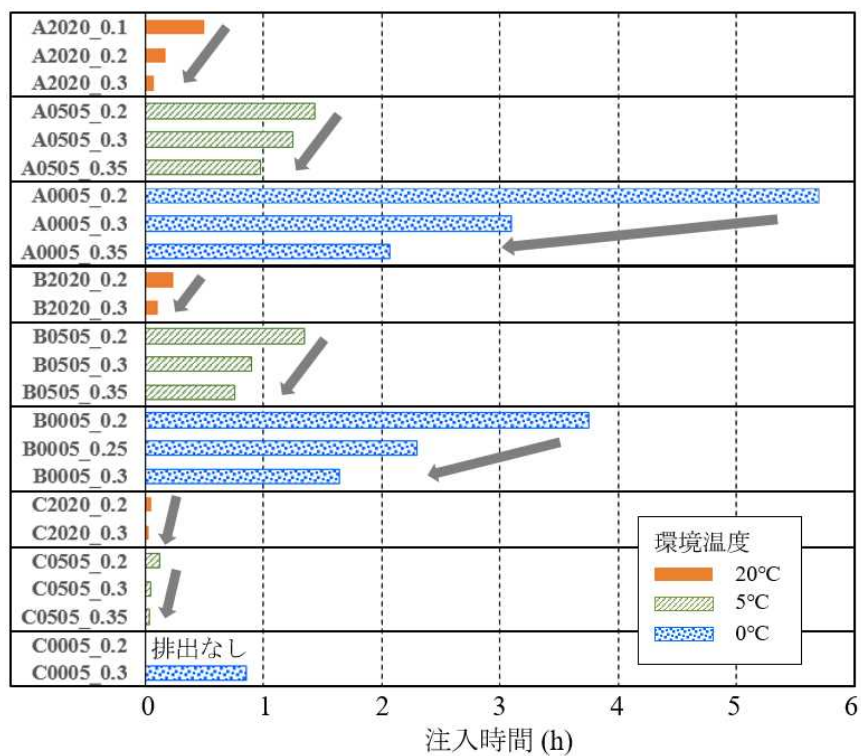


図-6.5.3 ひび割れ幅の変化による注入時間の変化

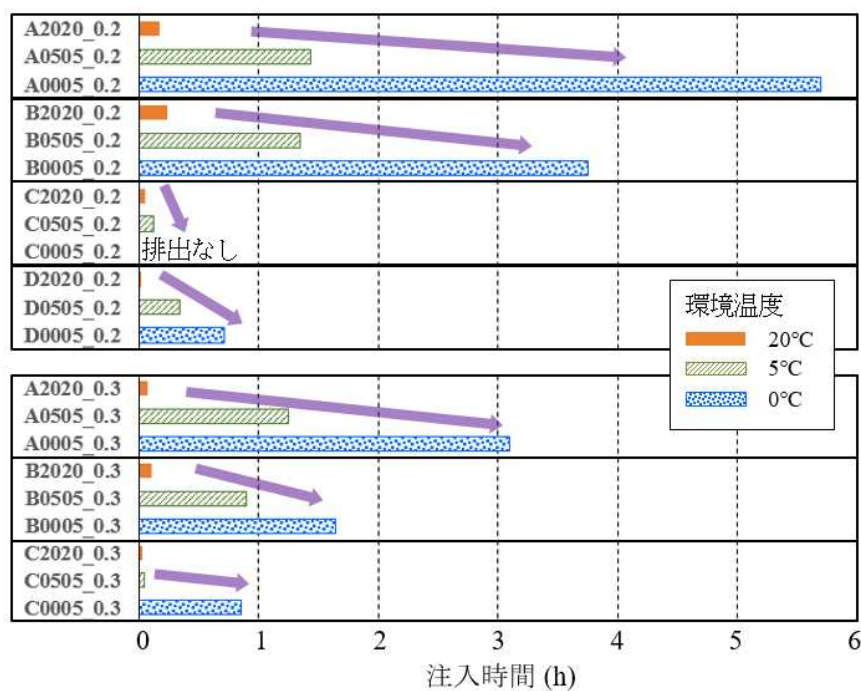


図-6.5.4 ひび割れ幅 0.2mm と 0.3mm の環境温度の変化による注入時間の変化

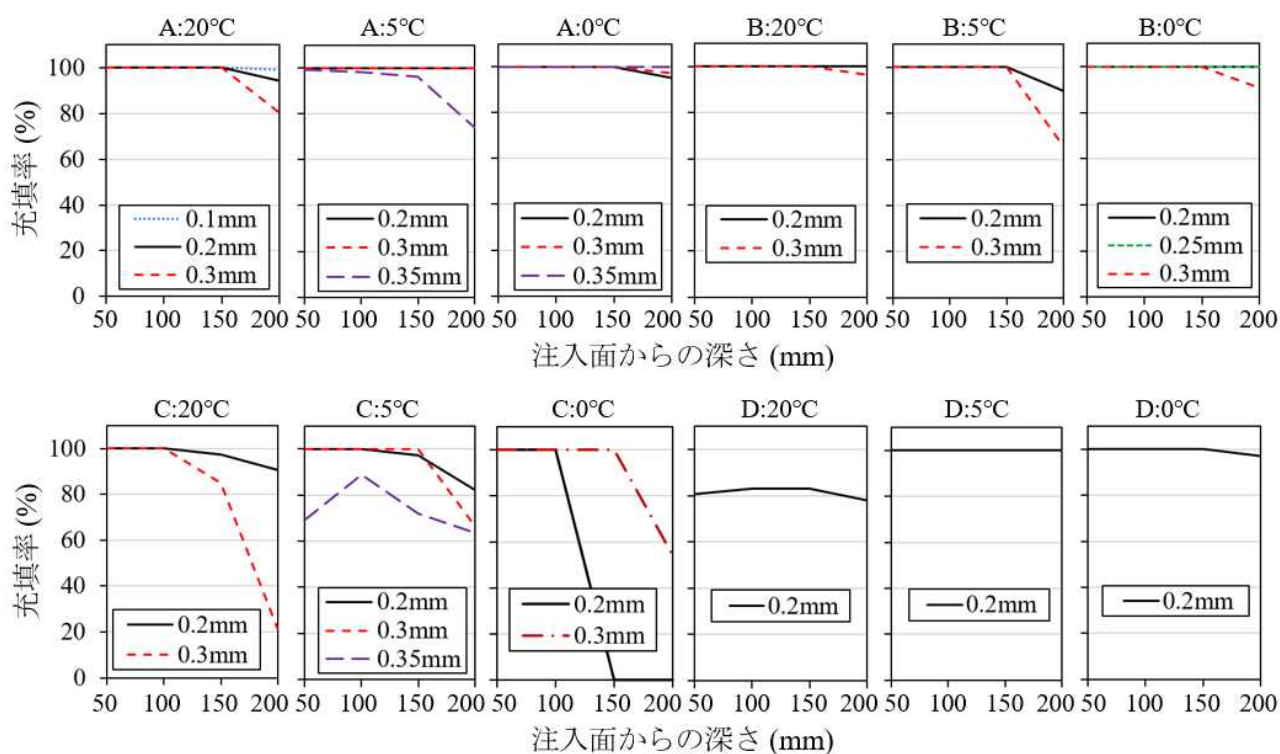


図-6.5.5 注入充填性試験における注入材の充填率

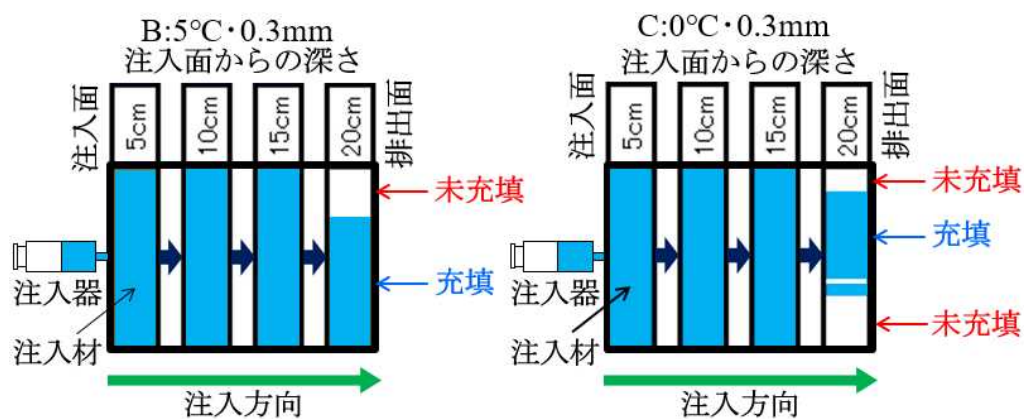


図-6.5.6 注入材の充填状態のイメージ図例

出口で注入材が流下した、もしくは上下に拡散できずに排出されたためと推測する。

注入材別にみると、注入材 A と B は環境温度に関わらず充填率は比較的高い結果となった。注入材 C はひび割れ幅が大きいほど充填率は低下した。環境温度 0°C のひび割れ幅 0.2 mm のケースでは注入材の排出がなかった。注入材 D は低温の 5°C と 0°C ではほぼ充填されているが、20°C

では注入口から流下して上部に拡散しなかったために充填率が低下している。

図-6.5.7 に注入充填性試験で得られた注入面積速度の実測値と充填率の関係、および図-6.5.8 にひび割れ幅と充填率の関係を示す。ここで注入面積速度は注入面積を注入時間で除した値とした。なお、注入時間は供試体の排出面に注入材が到達して排出を確認した時間とし、注入面積は実際に充填されていた面積ではなく、図-6.5.9 に示すように、ひび割れが供試体の中心に屈曲せずに位置していると仮定して注入材が注入口から同心円状に拡散しながら充填されて排出面に到達した時点での状態を想定した面積 (21334.6mm^2) とした。図-6.5.7 から、実測値の注入面積速度が速くなると充填率が低下する傾向がみられ、 20°C の超低粘度の 2 ケースで流下による充填率の低下はあるが、低温のケースのほうが充填率は低くなる傾向がみられた。また、図-6.5.8 においても、 20°C の超低粘度の 2 ケースを除いて低温のケースで充填率が低くなっている。これは、第 1 章で述べた実構造物のひび割れ注入における注入材の充填率の調査結果と同様に、比較的ひび割れ幅が狭い幅 0.35 mm 以下のひび割れ注入では充填が不十分になるケースがあることを確認できたと言える。実際の低温環境の施工では、硬化が速い注入材や粘度の低い注入材を使用する傾向があるため、図-6.5.7 および図-6.5.8 で示した低温でもひび割れ幅が大きいと流下する、あるいは途中で硬化してしまうことで充填率の低下を招いていると推測する。そこで、低温環境における各種注入材の注入充填性に関する性能評価を既往の研究で提案された注入面積速度の関係式(1)によって検討した結果を以降で考察する。

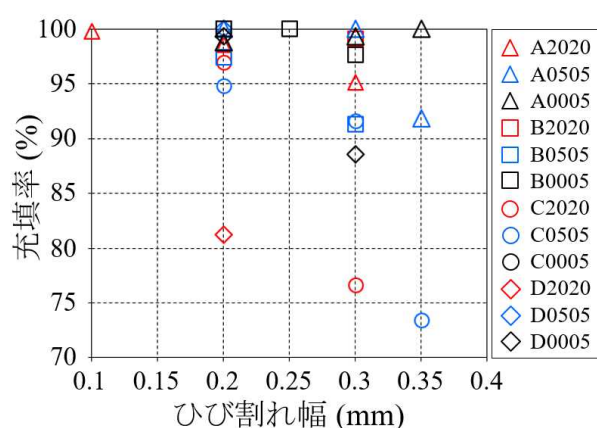
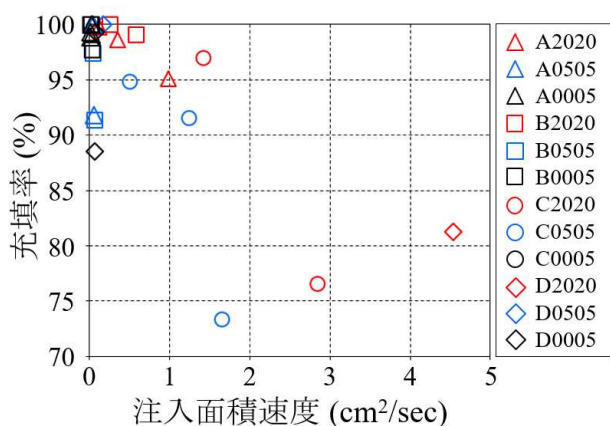


図-6.5.7 注入面積速度の実測値と充填率の関係

図-6.5.8 ひび割れ幅と充填率の関係

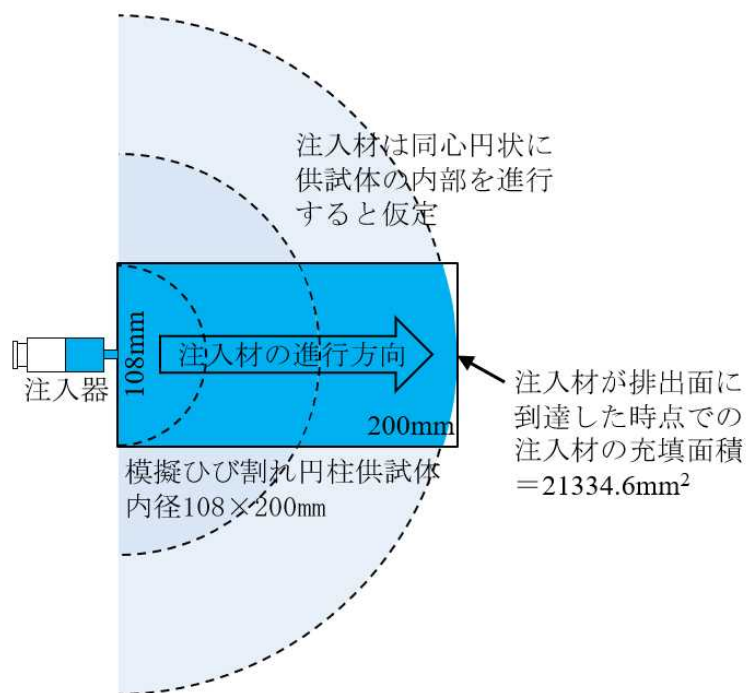


図-6. 5. 9 注入材が供試体に充填されるイメージ図と充填面積

6. 6 低温環境における注入材の性能評価

6. 6. 1 注入面積速度と補正係数の算出

実測値から求めた注入面積速度と注入面積速度の関係式(1)による計算値との相関を求めて補正係数 α の算出を試みた. 注入面積速度の計算値は, 各試験ケースで設定したひび割れ幅 w (cm), 各環境温度で測定した注入材の経時粘度 μ (Pa $\cdot$ sec), および注入圧 p (Pa)をそれぞれ代入して注入面積速度式の補正係数 α を除いた $w^2 p / \mu$ (cm²/sec) を求めた. なお, 注入圧は事前の実験で得られた平均値 0.07 MPa (70000Pa)とした.

図-6. 6. 1 に実測値の注入面積速度と式(1)の計算値から得られた $w^2 p / \mu$ の関係を示す. この関係において試験ケースによっていくつかの相関に分類できる傾向がみられた. これらを分類するとひび割れ幅に関わらず注入材の種類と環境温度で大別でき, それぞれを最小二乗法による回帰直線で表すと概ね相関が得られる結果となった. それぞれの相関をグループ G1, G2, および G3 として, 表-6. 6. 1 に分類したグループ毎の試験ケースを示す. グループ G1 は環境温度 20°C の注入材 A, D, および環境温度 20°C と 5°C の注入材 C, グループ G2 は環境温度 20°C の注入材 B,

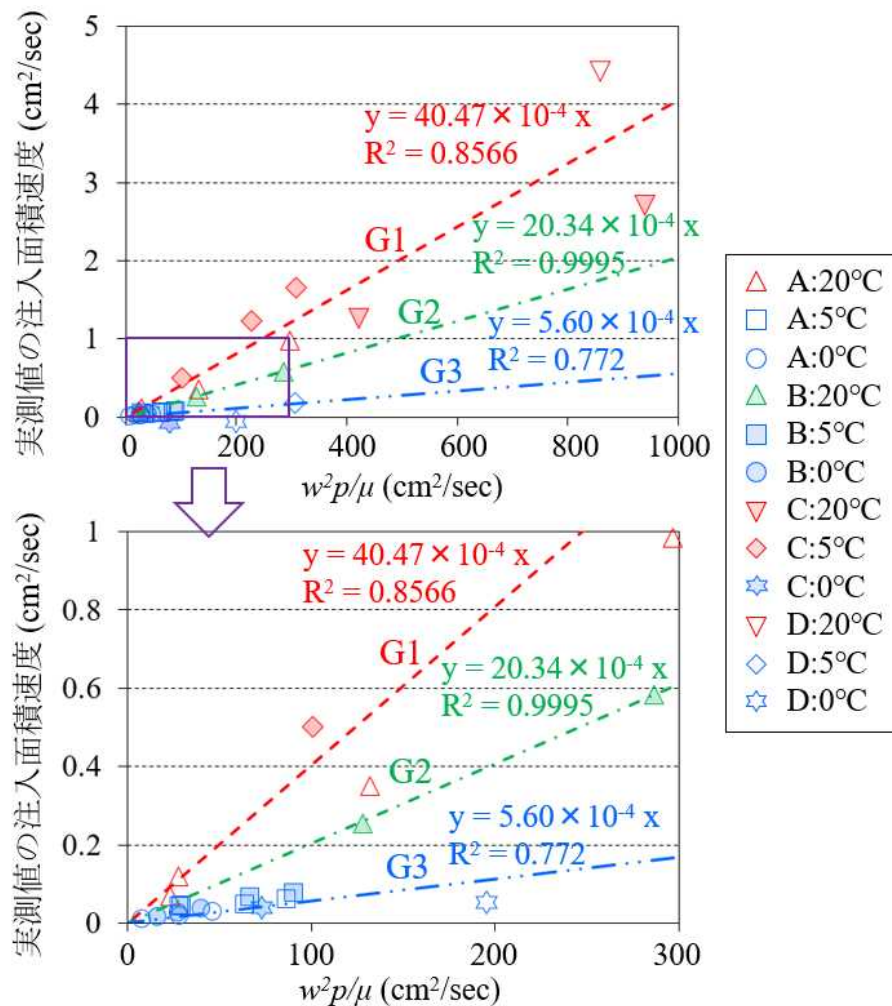


図-6.6.1 注入面積速度の実測値と w^2p/μ の関係

グループ G3 は環境温度 5°C と 0°C の注入材 A, B, D, および環境温度 0°C の注入材 C である。各グループの特徴は、グループ G1 は温度上昇法において急激に温度が上昇した注入材、グループ G2 は徐々に温度が上昇した注入材であり、グループ G3 は低温環境では温度が上昇しなかった注入材、いわゆる温度上昇法では可使用時間が測定できなかった注入材である。それぞれの回帰直線の係数は注入面積速度式の補正係数 α となることから、注入材の温度上昇の有無によって補正係数は異なることがわかる。この結果から、グループ G3, すなわち低温環境における注入材の注入性能は補正係数 $\alpha = 5.60 \times 10^{-4}$ を用いた注入面積速度で表せることが確認できた。

なお、異なる補正係数となった要因として、注入材の粘度以外にも注入充填性に影響する性状の存在が考えられる。例えば、表面張力やチキソトロピー等がこれに該当する。今後、これらの性状の変化が注入充填性に及ぼす影響について検証する必要がある。

表-6. 6. 1 注入面積速度の実測値と w^2p/μ の関係から得られた試験ケースのグループ分け

グループ	ひび割れ注入材の種類			
	A	B	C	D
G1	A2020_0.1	—	C2020_0.2	D2020_0.2
	A2020_0.2	—	C2020_0.3	—
	A2020_0.3	—	C0505_0.2	—
	—	—	C0505_0.3	—
	—	—	C0505_0.35	—
G2	—	B2020_0.2	—	—
	—	B2020_0.3	—	—
G3	A0505_0.2	B0505_0.2	C0005_0.2	D0505_0.2
	A0505_0.3	B0505_0.3	C0005_0.3	D0005_0.2
	A0505_0.35	B0505_0.35	—	—
	A0005_0.2	B0005_0.2	—	—
	A0005_0.3	B0005_0.25	—	—
	A0005_0.35	B0005_0.3	—	—

6. 6. 2 硬化までの到達距離の算出

次に、各試験ケースで注入材が硬化するまでに到達する推定距離を求めた。実測した注入材の粘度の経時変化を用いて硬化までの注入面積速度の経時変化を式(1)から求めた。式(1)の計算においては、環境温度と注入材の相関から分類した各グループの補正係数を用いた。到達距離は、直径 108 (mm) ×長さ L_n (mm)の円柱供試体のひび割れに注入すると仮定して注入面積を 108 mm で除した値 $L_n / 108$ (mm)とした。各試験ケースの経過時間と到達距離の関係を図-6. 6. 2 に、到達距離を表-6. 6. 2 に示す。

環境温度 20℃ では、ひび割れ幅が広く粘度が低い注入材ほど到達距離は長くなるが、急激な硬化によって流動が止まる。環境温度 5℃ および 0℃ では、注入材 C を除いて、時間の経過と共に注入面積速度は徐々に遅くなり到達距離が途中でほとんど伸びなくなってやがて流動が停止する。なお、注入材 C は、初期粘度は低いが可使時間が短いために温度が低くても急に停止している。これらの停止距離もしくは停滞距離が各注入材の環境温度とひび割れ幅における注入可能な限界距離となり、低温環境では注入材 D を除いて注入可能な距離は一様に短くなる傾向となる。このことから、低温環境では施工数量や規模が同じでも 20℃ 前後の温度環境よりも到達距離が短くなり、目標到達までの経過時間も異なることがわかる。

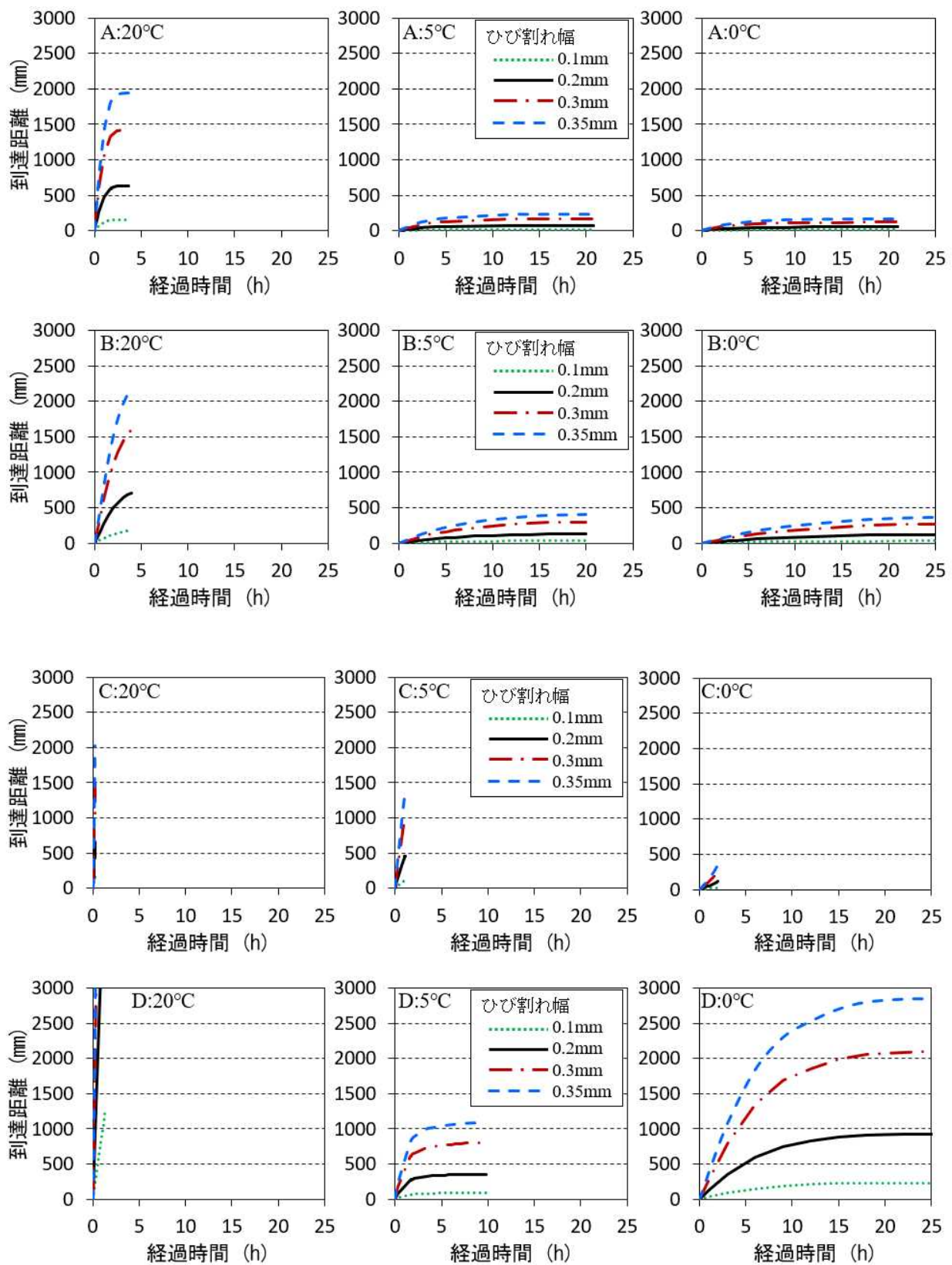


図-6. 6. 2 各注入材の経過時間と到達時間の関係

表-6.6.2 各試験ケースにおける到達距離

ひび割れ幅 (mm)		0.1	0.2	0.3	0.35
注入材	環境温度	到達距離 (mm)			
A	20℃	160.7	635.5	1426.8	1941.2
	5℃	21.7	79.2	175.2	237.6
	0℃	15.7	55.4	121.5	164.5
B	20℃	178.5	706.7	1587.0	2159.2
	5℃	35.4	134.3	299.1	406.2
	0℃	34.7	131.4	292.5	397.2
C	20℃	168.0	664.6	1492.2	2030.1
	5℃	115.3	454.0	1018.4	1385.3
	0℃	29.3	109.9	244.2	331.6
D	20℃	1284.6	5131.1	11541.9	15708.9
	5℃	91.3	357.9	802.2	1091.0
	0℃	234.8	931.8	2093.4	2848.5

6.6.3 低温環境における注入充填性の事前評価の一例

上記の結果から、低温環境における注入材の性能を事前に確認する手法を検討した。表-6.6.3 に各注入材の環境温度毎における初期粘度と表-6.6.2 で示した各試験ケースにおける到達距離から注入が停滞し始める時間を求めた結果をそれぞれ示す。環境温度 5℃ および 0℃ の初期粘度と可使時間は、注入材 D を除いて環境温度 20℃ の値に対して 5℃ で概ね 4 倍、0℃ で概ね 6～7 倍に増加している。前述のように、エポキシ樹脂は温度を 10℃ 上昇させると硬化速度が 2 倍、硬化時間は 1/2 倍となる¹⁸⁾とあり、本実験ではこれよりも若干大きな値となっているが、低温での注入材の初期粘度と可使時間を求める目安となると考える。これに低温の補正係数 $\alpha = 5.60 \times 10^{-4}$ を用いた注入面積速度から、現地のひび割れの状況に応じた注入充填性の評価を行うことが可能であると考えられる。ただし、注入材 C のように環境温度 5℃ でも温度上昇がある注入材は補正係数 $\alpha = 5.60 \times 10^{-4}$ に該当しないため、このような注入材を事前に判別するための確認試験は必要である。その確認方法としては、実際の低温の施工現場における温度変化を JSCE-K 541-2013 の温度上昇法に準じて測定して注入材の温度上昇の有無を調べる試験を事前に行うことで解決できると思われる。

表-6.6.3 各注入材の環境温度毎の初期粘度と注入が停滞し始める時間

環境条件	20℃		5℃				0℃			
注入材	初期粘度 (dPa・sec)	注入停滞 時間(min)	初期粘度 (dPa・sec)	20℃と の比率	注入停滞 時間(min)	20℃と の比率	初期粘度 (dPa・sec)	20℃と の比率	注入停滞 時間(min)	20℃と の比率
A	6.5	143	30.6	4.7	540	3.8	50.1	7.7	1080	7.6
B	6.8	240	28.98	4.3	960	4.0	48.5	7.1	1800	7.5
C	2.0	17.1	8.5	4.3	65	3.8	12.0	6.0	120	7.0
D	1.0	90	3.0	3.0	360	4.0	4.43	4.4	1080	12.0

ここで、本実験の内、排出せずに途中で硬化した注入材 C の環境温度 0℃、ひび割れ幅 0.2 mm の試験ケースにおいて、式(1)を用いて停滞した原因の検証を行った。この試験ケースでは、注入充填性試験の断面確認において、注入材が供試体の半分程度（深さ 100 mm）まで注入材 C が充填されているのを確認している。しかし、注入が途中で停滞して結果的に排出面から排出しなかったため、注入が途中で停止するまでの注入時間は確認できていない。そのため、実測値の注入面積速度は算定できない。そこで、注入材 C の 0℃における初期粘度は、カタログ値で 20℃の 1.5dPa・sec を 6 ～7 倍した 9～10.5dPa・sec とし、環境温度 0℃ で温度上昇がなかったため補正係数を $\alpha = 5.60 \times 10^{-4}$ として式(1)から注入面積速度を計算した。この注入面積速度を供試体に注入される平均速度と仮定し、カタログ値の 20℃の可使時間 14 min を 6～7 倍して 84～98 min までの到達距離を計算すると到達距離は 87.75 mm となった。実際には粘度が増加して注入面積速度は徐々に遅くなり、注入量 30g では可使時間がカタログ値よりも少し長くなるため、この到達距離は妥当な計算値であると考ええる。以上の結果から、本実験における結果の範囲であるが、低温環境における注入材の注入充填性を補正係数 $\alpha = 5.60 \times 10^{-4}$ を用いた注入面積速度の関係式(1)によって評価可能であることが示唆された。

6.7 まとめと考察

本章では、コンクリート構造物の補修工法であるひび割れ注入工法において、低温環境下における注入性能や施工性、それに伴う注入後の充填性が不明確であるエポキシ樹脂系ひび割れ注入材の注入充填性について、既往の研究で提案された注入面積速度によって定量的に評価することを試みた。エポキシ樹脂系ひび割れ注入材は一般に環境温度 5℃ 以上での施工が推奨されるが、実際には環境温度 5℃ 以下での施工、あるいはコンクリートの内部温度が 5℃ 以下での施工が実

施されているため、5℃ と 0℃ における各種注入材の経時粘度と硬化反応による温度変化を把握し、ひび割れを導入したコンクリート円柱供試体への注入実験によって注入時間とひび割れ内の注入材の充填率を求め、注入面積速度の関係式との相関を検討した結果、低温環境における注入充填性について、以下のような知見を得た。

- 1) 環境温度 5℃ では、温度上昇法で可使時間を評価できない注入材が存在する。これらの注入材は低温では硬化反応による発熱がほとんどない状態で硬化反応が進行する。また、30g 程度の少量では温度上昇法で可使時間を評価することができない。
- 2) 攪拌から硬化までのエポキシ樹脂系ひび割れ注入材の性状は、常温に比べて低温になるほど粘度が 4～7 倍程度大きくなり、硬化までの時間も増加するため、低温になるほど注入効率は悪くなる。
- 3) 温度環境にかかわらず、注入面積速度が速いと排出口付近の充填率は低下する傾向がある。これは注入面積速度が速くなると注入材がひび割れ内で流下しやすくなる、もしくは流入しやすい空間（空隙）を通過して拡散されないことが原因と考える。
- 4) 低温環境におけるエポキシ樹脂系ひび割れ注入材の注入充填性について、低温においても注入面積速度とひび割れ幅の関係に一定の相関が認められる。しかし、注入材の発熱状態によって補正係数 α は異なると考えられる。ほとんど発熱しない環境では補正係数 $\alpha = 5.60 \times 10^{-4}$ を提案する。
- 5) 本実験結果の範囲において、5℃ 以下の低温環境ではほぼ発熱しない注入材が多く、その場合、補正係数 $\alpha = 5.60 \times 10^{-4}$ を用いた注入面積速度の関係式(1)から注入材の到達距離を予測することにより、低温時のひび割れ幅やひび割れの規模に応じた注入材の選定や注入効率を事前に把握することが可能であると考えられる。

本研究では、低温環境におけるエポキシ樹脂系ひび割れ注入材の注入充填性を注入面積速度によって定量的な評価が可能であることを明らかにした。低温環境における注入材の初期粘度の簡易測定方法等を含め、規模の大きい供試体もしくは実構造物による検証を行うための適用条件等を検討していく必要はあるが、本実験の結果から、ひび割れ注入工法の低温時の問題点を解決する一助となる情報を得たことができたと考える。

第6章の参考文献

- 1) 国立研究開発法人土木研究所：コンクリート構造物の補修対策施工マニュアル（案），土木研究所資料第 4343 号，IV ひび割れ修復工法編，p.IV-3，2016.
- 2) Naitoh, I., Shimata, A. and Mihara, N.: Study on the filling ability of crack injection into concrete in a cold snowy region, *The 6th International Conference of Asian Concrete Federation*, USB stick, 2014.
- 3) 建設省：建設省総合技術開発プロジェクト，コンクリートの耐久性向上技術の開発，報告書，第二編，pp.221-222，1988.
- 4) 公益社団法人日本コンクリート工学協会：コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針 2013，pp.127-128，2013.
- 5) 建設省：建設省総合技術開発プロジェクト，コンクリートの耐久性向上技術の開発，報告書，第二編，p.259，1988.
- 6) 土木学会規準：JSCE-K-541-2013，コンクリート構造物補修用有機系ひび割れ注入材の試験方法（案），p.436，2013.
- 7) 日本産業規格：JIS A 6024，建築補修用及び建築補強用エポキシ樹脂，pp.29-30，2015.
- 8) 上村克郎，小西敏正，橘高義典：鉄筋コンクリート造のひび割れ補修における樹脂の充填程度の数式化，セメント技術年報 42，pp.491-494，1988
- 9) 瀬野康弘，魚本健人：ひび割れ注入補修における注入時間と注入量の予測に関する基礎的研究，土木学会論文集 E，Vol. 64, No. 1, pp.160-172, 2008.
- 10) 友井正男：熱硬化性樹脂の基礎，エレクトロニクス実装学会誌，Vol. 4, No. 6, pp. 537-542, 2001.
- 11) 国立研究開発法人土木研究所：コンクリート構造物の補修対策施工マニュアル（案），土木研究所資料第 4343 号，IV ひび割れ修復工法編，p.IV-8，2016.
- 12) 山本昌宏，谷村成，藤井隆史，安藤尚，綾野克紀：微細なひび割れを持つコンクリート試験体の作製方法とそれを用いたひび割れ補修材の性能確認試験方法に関する研究，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第 12 巻，pp. 467-472，2012.

第 7 章

析出物のあるひび割れへの ひび割れ注入方法の提案

第7章 析出物のあるひび割れへのひび割れ注入方法の提案

7.1 概論

第7章では、ひび割れ補修工法の選定に検討を要する事例の一つである、エフロッセンス等の析出物が析出したひび割れへの対処方法において、新たなひび割れ注入手法（以下、注入手法）を提案する。

析出物のあるひび割れの補修では、ひび割れ表面の閉塞を理由にひび割れ注入工法（以下、注入工法）を敬遠する傾向が見られるが、本来、ひび割れの補修方針において注入工法の選定範囲にあるひび割れは、ひび割れ内に露出した鉄筋を直接保護して腐食を防止する注入工法による補修が望ましい¹⁾。しかし、このような現場条件を補修の施工技術等によって対処する手法は確立しておらず、ひび割れの状態に応じた適切な補修がなされていない事例も多々あるのが現状である。

このような背景から本研究では、適切な施工技術によって適切な補修が施されることで補修効果が向上することを目的に、析出物のあるひび割れへの対処方法に着目した検証実験を行った。

本報告では、析出物によってひび割れが閉塞している状況の簡易な調査方法および析出物のあるひび割れへの新たな注入手法を提案し、実際の構造物において試験施工を実施してその適用性と有効性について検証した結果を述べる。

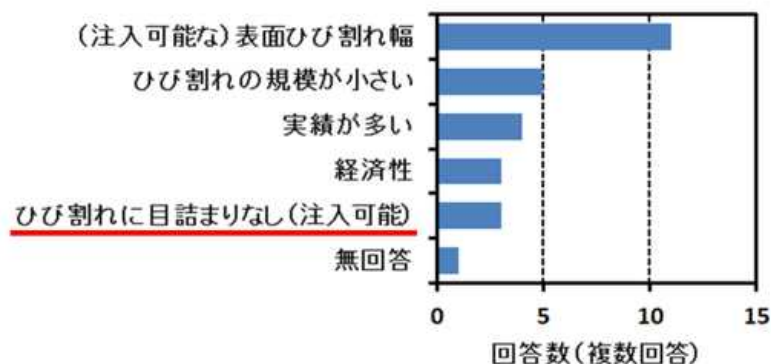
7.2 析出物のあるひび割れの補修の現状と問題点

ひび割れ表面に析出して固化している白色の析出物は、コンクリート中の可溶成分であるセメント水和物（ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ）やアルカリ成分等がひび割れから水分と共に溶出し、ひび割れ表面で蒸発して結晶化した、もしくは炭素ガスと反応して炭酸カルシウム（ CaCO_3 ）や炭酸塩（ NaCO_3 ）などに結晶化した物質である。これをエフロッセンス（白華）という²⁾。現場では、このような白色の析出物を総じて「遊離石灰」と言うことが多いが、遊離石灰（free lime）とは、本来、セメント原料の焼成時に反応せずに残った酸化カルシウム（ CaO ）のことを言う³⁾ことから、ここでは、総称して析出物とする。

昨今の補修工事では、析出物でひび割れの表面が塞がれているため注入出来ないとの理由から、Uカットによるひび割れ充填工法（以下、充填工法）でひび割れ表面を塞ぎ、表面からの劣化因子

の浸入を防止する補修工法を採用している事例が多い。図-7.2.1 にひび割れ補修工事におけるアンケート調査結果⁴⁾を示すが、充填工法を採用した理由として「注入出来ないため」との理由が多い。ひび割れ補修補強指針では、ひび割れ幅 0.2mm～1.0mm までを注入工法、1.0mm 以上を充填工法としている⁵⁾が、析出物のあるひび割れにおいては、幅 1.0mm 未満でも充填工法が採用されている事例が多い。しかしながら、析出物は水分と共に溶出して形成される、言い換えれば、析出物が出ているひび割れは水分が供給されている状態である。このようなひび割れにおける適切な補修方針は、ひび割れへの水分供給を遮断してひび割れ内部に露出した鉄筋の腐食環境を改善することであり、水分供給を絶たなければひび割れ内に滞水することによる悪影響も考えられる。特に、積雪寒冷地では、ひび割れ内に溜まった水分によって凍害劣化が生じる可能性もあり、第5章で述べた暴露実験結果において、U カット充填を施しても表面から浸透した塩化物イオンは充填材以深のひび割れも伝って浸入することから、注入工法による補修が望ましいと言える。

ひび割れ注入工法を選定した理由



ひび割れ注入工法を選定しなかった理由

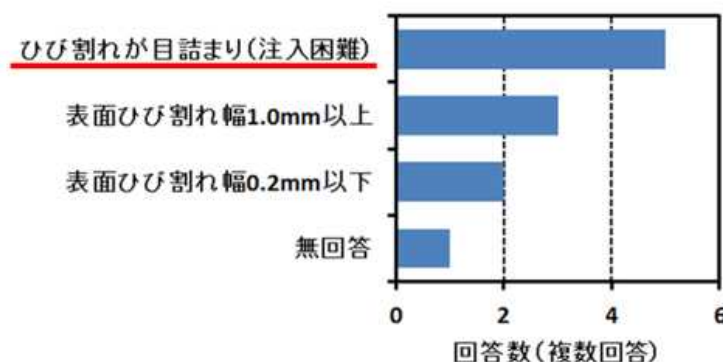


図-7.2.1 ひび割れ補修工事における工法選定アンケート調査結果⁴⁾

しかし、ひび割れ補修工事において析出物があるひび割れの表面を処理する際、確かに、析出物でひび割れ表面は塞がれていることが多い。表面の析出物をスクレーパや電動工具等で除去しても、その削り粉がひび割れ表面に詰まって閉塞されているケースが多いからである。図-7.2.2は、電動工具での除去状況と削った析出物の粉がひび割れ表面に詰まった事例である。このようなひび割れの閉塞が注入工法を敬遠する原因の一つとなっており、ひび割れ修復工法の選定を見直す場合が多くあるのが現状である。また、補修設計前の調査段階では、析出物でひび割れが覆われていても析出物を除去しないケースも多いことから、その後の設計における工法選定において「注入出来ないため充填工法」とされる事例は少なくない。これらの背景には、析出物で閉塞されたひび割れへの注入技術が確立していないことがあげられる。

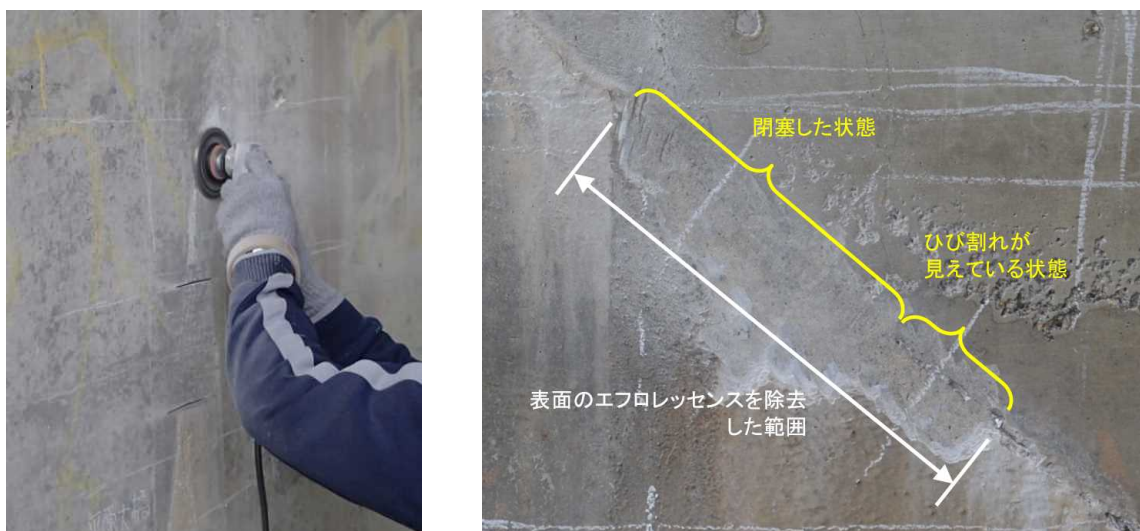


図-7.2.2 析出物の除去状況と削り粉でひび割れ表面が閉塞した事例

7.3 クロスカットによるひび割れ表面の閉塞状態の調査方法の提案

7.3.1 閉塞状態の調査方法の検討

ひび割れの表面で固化している析出物は、そのほとんどが上述したエフロレッセンスであり、空気に触れ易いひび割れ表面付近で結晶化していると考えられる。ひび割れ内部でも空気に触れる環境があれば、ひび割れ内部まで結晶化して閉塞する可能性はあるが、ひび割れ幅が狭くなる

ほどその可能性は低くなると思われる．そこで，ひび割れに析出したエフロレッセンスの実態を把握するため，実構造物のひび割れにおいて析出物によって閉塞された深さを調査する方法を検討した．

コンクリートの内部状況を調べる方法として，最も一般的な方法はコア削孔である．ひび割れ部においても，コア削孔によってコンクリート内部のひび割れの状態を壊すことなく確認することは可能であり，ひび割れ内部の析出物の状態も確認できる．しかし，ひび割れ補修を実施するにあたり，補修対象すべてのひび割れにおいてコア削孔で調査することは難しい．これは，削孔数が増加することによって，構造物へのダメージや調査費用が増大するためである．そこで本研究では，構造物へのダメージを極力少なく，かつ，費用を抑える簡易な調査方法を検討し，ひび割れ表面から小型電動カッターでひび割れに直交した切り込み（以下，クロスカット）を入れ，そのクロスカットの内側に見えるひび割れ内部の閉塞状態を確認する調査方法を試案した．

なお，JIS K 5600-5-6 の塗膜の付着性試験をクロスカット法⁶⁾と言うが，これとは別の手法であり，本論文において，ひび割れに直交した切り込みをクロスカットと定義する．

7.3.2 閉塞状況調査概要

ひび割れに析出した析出物の実態を把握する調査として，実構造物の析出物があるひび割れにおいて閉塞状況調査を行った．調査はコア削孔による確認調査を主として 9 橋梁 15 箇所で行った．試案したクロスカットによる確認調査はその内の 4 橋梁 7 箇所で行った．表-7.3.1 に各橋梁のひび割れに実施した調査の一覧を示す．

コア削孔による調査方法は，直径 50mm×深さ 100～200mm のコアを析出物があるひび割れ部で採取し，コア側面と削孔内のひび割れをルーペで目視して，ひび割れ表面から内部に向かって閉塞している深さを測定した．図-7.3.1 にコア側面の測定状況を示す．

クロスカットによる調査方法は，表面の析出物をスクレーパで除去した後，ひび割れにディスクサンダーでクロスカットを施し，ルーペによる目視計測およびデジタルカメラによる近接撮影によって，クロスカット部の内側に見えるひび割れ内の閉塞状況や閉塞深さを測定する方法とした．クロスカットの方法は，図-7.3.2 に示すように，ひび割れに対して直交に深さ約 10～20mm（カッター刃厚 5mm）の切れ目をディスクサンダーで入れる方法とした．スクレーパやディスクサンダーは，ひび割れ補修時にひび割れ表面に付着している析出物や汚れを除去する際に一般に用いられる工具である．クロスカット作業では，これらの工具を流用することで作業性の向上や作業費を抑える工夫をした．

表-7.3.1 各橋梁のひび割れ調査実施内容

調査 番号	橋梁名	部位	表面ひび 割れ幅 (mm)	調査方法	
				コア 側面・孔内	クロス カット
1	橋梁①	橋台	0.8	○	—
2	橋梁②	橋脚	0.3	○	—
3		橋脚	0.3	○	—
4	橋梁③	橋台	0.2	○	—
5	橋梁④	橋脚	0.4	○	—
6	橋梁⑤	床版	0.2	○	—
7	橋梁⑥	橋台	0.2	○	—
8		橋台	0.2	○	—
9		床版	0.2	○	○
10		床版	0.2	○	○
11	橋梁⑦	橋台	0.2	○	○
12	橋梁⑧	橋脚	0.2	○	○
13		橋脚	0.2	○	○
14	橋梁⑨	橋台	0.2	○	○
15		橋台	0.1	○	○



図-7.3.1 コア側面の測定状況



図-7.3.2 ひび割れへのクロスカット状況

7.3.3 調査結果

図-7.3.3 に採取したコアの側面とコア孔内、およびクロスカット内部のひび割れの閉塞状況例、および図-7.3.4 に調査結果を示す。

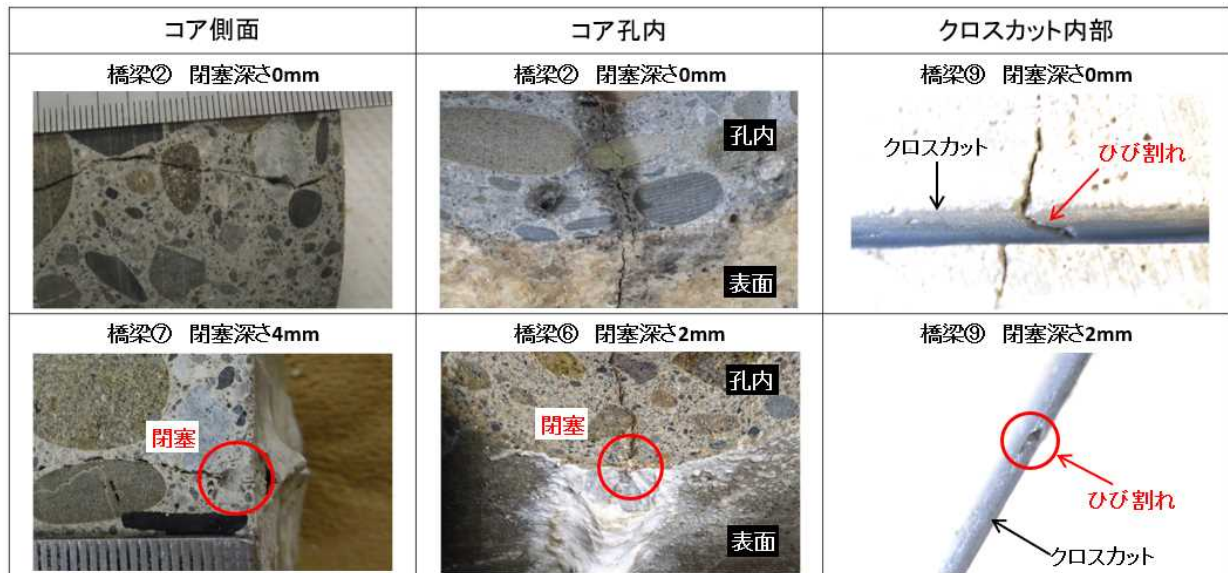


図-7.3.3 コア側面とコア孔内、およびクロスカット内部のひび割れの閉塞状況の例

調査 番号	橋梁名	部位	表面ひび 割れ幅 (mm)	表面の 析出物の 最大厚さ (mm)	表面からの閉塞深さ (mm)	
					コア 側面・孔内	クロス カット
1	橋梁①	橋台	0.8	4	2	—
2	橋梁②	橋脚	0.3	2	0	—
3		橋脚	0.3	1	15	—
4	橋梁③	橋台	0.2	1	0	—
5	橋梁④	橋脚	0.4	1	0	—
6	橋梁⑤	床版	0.2	1	0	—
7	橋梁⑥	橋台	0.2	1	5	—
8		橋台	0.2	2	0	—
9		床版	0.2	10	2	—
10		床版	0.2	2	2	0
11	橋梁⑦	橋台	0.2	6	4	4
12	橋梁⑧	橋脚	0.2	10	0	0
13		橋脚	0.2	4	0	0
14	橋梁⑨	橋台	0.2	3	0	0
15		橋台	0.1	2	2	2

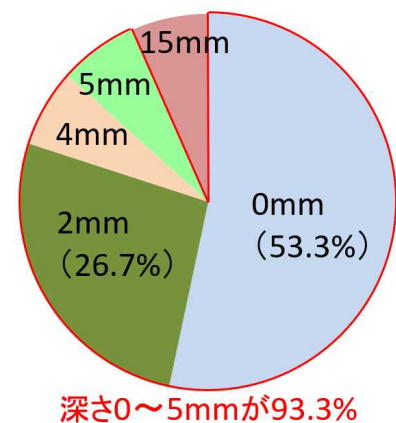


図-7.3.4 各橋梁のひび割れ調査結果

ひび割れの表面には、厚さ 10mm 程度まで大きく結晶化した析出物のひび割れもみられたが、ひび割れ内部は析出物によって閉塞されていないケースが多い結果となった。閉塞していたケースでも、表面からの閉塞深さが 15mm の 1 ケースを除いて、ほとんどが深さ 5mm 以下であった。また、クロスカット内部に確認できたひび割れの閉塞深さは、コア側面の閉塞深さとほぼ同様の結果となった。このことから、析出物がひび割れから析出していても、結晶化した析出物はひび割れの表面付近にあり、ひび割れ深部までは閉塞されていないことを確認した。また、クロスカットによる閉塞調査によって簡易に閉塞深さを確認できること、ひび割れの表面が析出物で閉塞されていても、クロスカットの切り込み深さにより部分的に閉塞を除去できることがわかった。

7.4 クロスカット注入口によるひび割れ注入方法の提案

7.4.1 クロスカット注入口による注入方法の提案

上述したクロスカットによる閉塞調査から、閉塞箇所より以深にひび割れの空隙があること、また、クロスカットによって閉塞が部分的に除去できることを確認できたことから、このクロスカットの部分に注入器を設置して注入することで、通常のひび割れ注入と同様に注入が可能となるはずである。このクロスカットから注入する手法は、建築物のひび割れ注入において一部の注入職人が取り入れている注入技術であり、注入材が入りにくい箇所に簡易な切り込みを入れて注入する方法である。本注入方法はこれを応用したものであるが、一般的な注入技術としては定められていない方法である。図-7.4.1 にクロスカットを注入口とした注入器の設置事例と注入後のクロスカット部の切断面を示す。この事例は試験的にクロスカット注入手法で注入した供試体を作製したものであり、クロスカットがわかりやすいように透明なシール材と注入材には青色の色素を混ぜて使用した。注入器の取り付け方法は一般的な取り付け方法と同じであり、クロスカットした箇所に注入器を取り付けるだけである。クロスカット箇所に設置できる注入器は、座金タイプであれば設置可能であるため、ほとんどの自動低圧注入器に適合している。

7.4.2 クロスカット注入手法の試験施工概要

析出物のあるひび割れに対して、クロスカットによる注入手法の適用性と有効性を検証するため、実構造物の補修工事において試験施工を行った。試験施工は、閉塞調査を行った 1 橋梁（橋

梁⑧) で実施し、対象としたひび割れは、図-7.4.2 に示すように、析出物がある 3 箇所（ひび割れ A～C）とした。ひび割れ A は、ひび割れ長さが 2.15m、ひび割れ幅が 0.05～0.3mm の鉛直ひび割れであり、ひび割れの長さ方向の中間から下方に析出物がある。ひび割れ B と C は、ひび割れ



図-7.4.1 クロスカットに注入器を設置した事例と注入後のクロスカット部の切断面

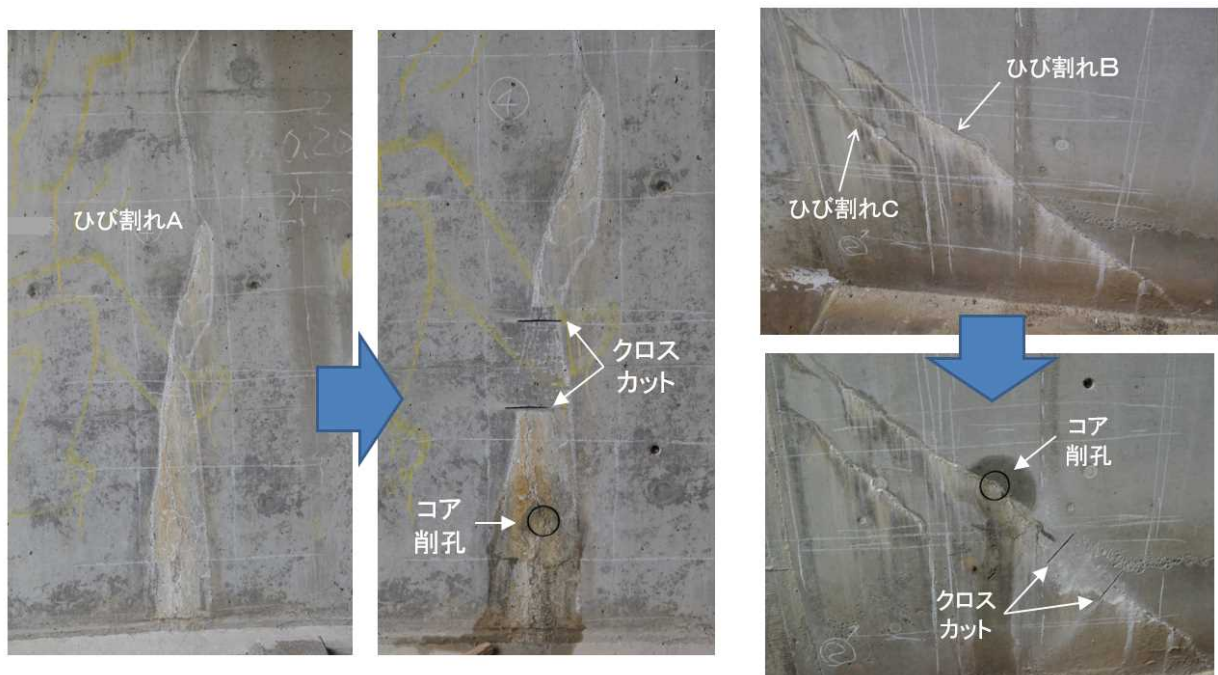


図-7.4.2 試験施工を実施したひび割れ

長さがそれぞれ 1.3m と 0.5m の並行した斜めひび割れであり、ひび割れ幅はそれぞれ 0.1～0.2mm と 0.05mm，析出物はひび割れ全体に存在している．なお，ひび割れ幅は，ひび割れ表面の析出物を除去した後の測定値であり，写真のクロスカットとコア削孔跡は前述した析出物の閉塞調査を行った箇所である．この補修工事では，ひび割れ A と B が補修対象であり，試験施工前の当初設計では，析出物によるひび割れ表面の閉塞を理由に，U カットの充填工法で設計されていた．また，ひび割れ幅 0.2mm 未満であるひび割れ C は補修対象外であった．

図-7.4.3 に注入器の配置位置と各注入器における注入口の処理方法を示す．注入口の処理方法は，ひび割れ表面の析出物や汚れをスクレーパで除去した後，図-7.4.4 に示すように，クロスカ

	位置 №	析出物の 有無	注入口 処理方法	表面ひび 割れ幅 (mm)	注入器間 の距離 (mm)
ひび割れ A	A1	無	通常注入	0.20	160
	A2	無	通常注入	0.10	240
	A3	無	通常注入	0.30	250
	A4	無	通常注入	0.20	230
	A5	無	通常注入	0.30	250
	A6	有	クロスカット	0.20	220
	A7	有	クロスカット	0.30	170
	A8	有	クロスカット	0.10	180
	A9	有	小径コア	0.05	180
ひび割れ B	B1	有	通常注入	0.10	120
	B2	有	通常注入	0.20	180
	B3	有	通常注入	0.10	150
	B4	有	クロスカット	0.10	190
	B5	有	クロスカット	0.10	300
	B6	有	クロスカット	0.10	180
	B7	有	小径コア	0.10	190
ひび割れ C	C1	有	小径コア	0.05	150
	C2	有	通常注入	0.05	160
	C3	有	通常注入	0.05	140

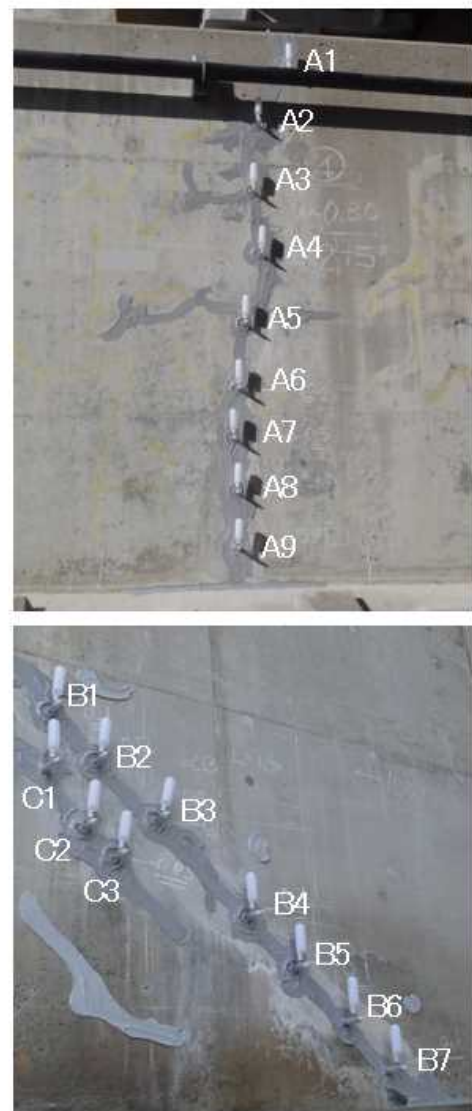


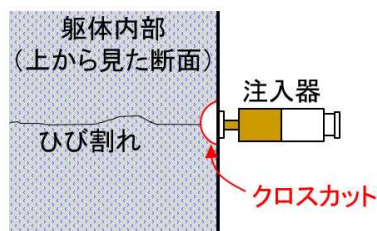
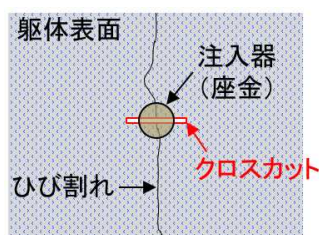
図-7.4.3 注入器の配置位置と各注入器の注入口の処理方法

ットした箇所に注入器を設置する方法と、直径 25mm の小径コアビットで深さ約 20mm の小径コア孔を作製することでひび割れ表面の閉塞部を除去し、小径コア孔専用の注入器を取り付ける方法（以下、小径コア）、および標準的な取り付け方法（以下、通常注入）の 3 方法とした。なお、通常注入において、析出物がある範囲への注入器の取り付け箇所は、析出物の除去後のひび割れ表面に部分的に閉塞がない箇所（除去後にひび割れ表面が一様に閉塞されるわけではなく、部分的に空隙は存在するため）とした。

注入材は一般的な硬質系低粘度形のエポキシ樹脂注入材を使用し、圧力タンク式の注入器による自動低圧注入工法で注入を実施した。

注入作業は、注入器内の注入材の流動が止まるまで注入材を追加し、注入器毎に注入量を記録した。施工は 10 月に実施し、注入日の最高気温は 16.4℃、最低気温は 2.4℃ であった。注入開始は日中（施工時の温度は約 15℃）に開始し、約 2 時間後に注入がほぼ停止したが、その後、夜間の気温低下による注入材の固化遅延を考慮して、注入器の撤去は 2 日後に行った。

注入施工から 1 ヶ月後にコアを採取し、注入材の充填状況の確認を実施した。注入したひび割れ箇所から直径 50mm×深さ 130～300mm のコアを採取し、コア孔とコア側面のひび割れに充填されている注入材を確認した⁷⁾。コアの採取位置は、ひび割れ A において、注入箇所 A2 と A3 の通常注入位置の間（注入後コア A①）と、注入箇所 A7 のクロスカット注入位置（注入後コア A②）、およびひび割れ B の注入箇所 B4 と B5 のクロスカット注入位置の間（注入前コア B①）とした。



（クロスカット）



（小径コア）

図-7.4.4 注入口処理方法と注入器の設置状況の例

7.5 試験施工の結果と考察

図-7.5.1 に各注入器からひび割れに注入された注入量と計算上の注入深さ、および充填割合を示す。注入深さの計算式は、図-7.5.2 に示すように各注入器の注入量を注入器間の中間点距離と注入箇所表面ひび割れ幅で除したものである。なお、クロスカット部と小径コア部の空隙体積は注入量から減じている。また、充填割合は、本橋台の壁厚である 3m を最大注入深さとして計算注入深さから割合を算出した。なお、計算深さ 3m 以上の箇所は 100%とした。

本来、ひび割れの幅は、表面、内部ともに一律ではないが、今回、注入深さの目安を求め、注入状態や注入効率等を評価するため、本計算上では注入箇所毎に表面ひび割れ幅を一律として算出している。

	位置 №	表面ひび 割れ幅 (mm)	注入量 (ml)	計算注入深さ 3m (m)	計算 充填割合 (%)	注入口 処理方法	方法別 平均深さ (m)	方法別 平均充填 割合(%)
ひび 割れ A	A1	0.20	86.7	1.55	51.7	通常注入	3.07	84.9
	A2	0.10	114.7	4.68	100.0			
	A3	0.30	164.7	2.29	76.3			
	A4	0.20	188.7	3.93	100.0			
	A5	0.30	204.7	2.90	96.7			
	A6	0.20	221.7	5.68	100.0	クロスカット	6.15	100.0
	A7	0.30	251.7	4.79	100.0			
	A8	0.10	143.7	7.98	100.0			
	A9	0.05	105.0	10.00	100.0	小径コア	10.00	100.0
ひび 割れ B	B1	0.10	22.0	0.86	28.7	通常注入	0.82	27.5
	B2	0.20	24.0	0.71	23.7			
	B3	0.10	22.0	0.90	30.0			
	B4	0.10	111.7	4.65	100.0	クロスカット	4.97	100.0
	B5	0.10	97.7	5.28	100.0			
	B6	0.10	36.3	2.14	71.3	小径コア	1.79	59.7
	B7	0.10	23.7	1.44	48.0			
ひび 割れ C	C1	0.05	31.7	2.76	92.0	小径コア	2.76	92.0
	C2	0.05	26.0	4.33	100.0	通常注入	2.57	63.4
	C3	0.05	6.0	0.80	26.7			

図-7.5.1 各注入器の注入量と計算注入深さの結果

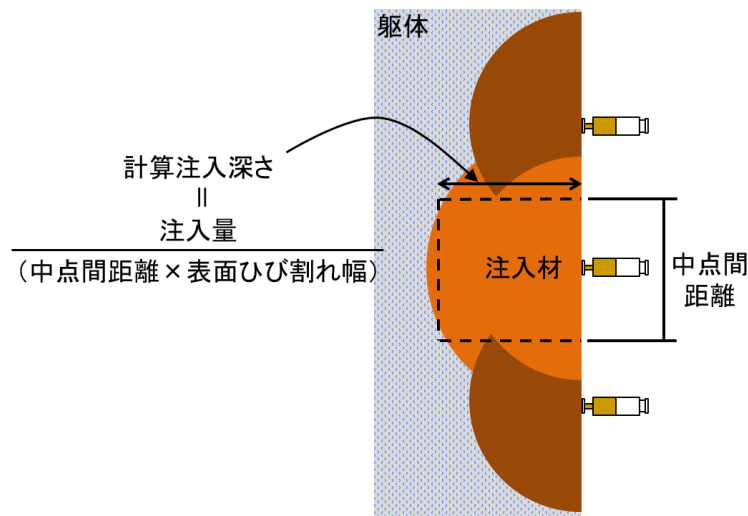


図-7.5.2 注入深さの計算方法

試験注入の結果，すべての注入器からひび割れ内に注入されており，比較的良好な注入状況が確認できた．その中で，クロスカット箇所からの注入量と充填割合が他よりも多くなる結果となった．これは，クロスカットによって注入口の断面積が広くなり，注入材がより入り易くなったためと考えられる．同様に，小径コアの箇所も通常注入箇所よりも注入量，充填割合が多くなったことから，注入口処理によって注入効率が向上したと言える．なお，注入深さが 3m 以上となった注入箇所のひび割れ内の実際の注入状況は，推定であるが，注入材が背面まで到達して背面土砂に流入した，もしくはひび割れ内部に大きな空隙等があり，そこに充填されたなどが考えられる．一方，ひび割れ B の通常注入の 3 箇所において，注入量が少なくなり，他の注入箇所よりも計算上の注入深さ，充填割合が低い結果となった．ひび割れ B と C の通常注入の箇所は，表面のエフロレッセンスを除去した後，ひび割れ表面の所々閉塞していない箇所を注入口として通常注入した箇所であるが，近隣のクロスカットから注入した箇所の注入量が多くなったことを考えると，このひび割れ B の通常注入の 3 箇所は，注入器を据え付けた箇所の注入口が狭かったために，注入材が入り難く，注入量が少なくなった可能性が高い．

図-7.5.3 に通常注入箇所とクロスカット注入箇所の注入後に注入器を外した注入跡の写真を示す．クロスカット注入箇所は，クロスカット部に幅 5mm×長さ 10mm 程度の注入材の塊が確認できる．通常注入箇所と比べると注入跡がはっきりとわかるため，ひび割れ補修をしたことが現地で確認できる．ひび割れ注入は補修後の状態を確認しにくいことから，景観上はよくないが補修跡が確認できることは維持管理上好ましいと言える．

また，図-7.5.4 に，注入から 1 ヶ月後にひび割れ A の通常注入部（A3-A4 間），ひび割れ A と

B のクロスカット部（A6-A7 間，B4-B5 間）の 3 箇所からコアを採取し，コア側面の注入材の充填状況を確認した結果を示す．最長で深さ約 300mm までの確認であるが，目視で確認できる範囲では，全てのコアのひび割れに注入材が密実に充填されている状態であった．

以上の結果から，析出物があるひび割れでも，クロスカット等の処理方法によって注入口を確保することで，容易に注入が可能であることを検証できた．特にクロスカットは，注入効率が上がるもののほか，施工時に，ひび割れ表面の析出物を除去する際に一般に用いられる電動工具を流用できることから，作業負担も少なく作業性も良い方法であることが明らかとなった．

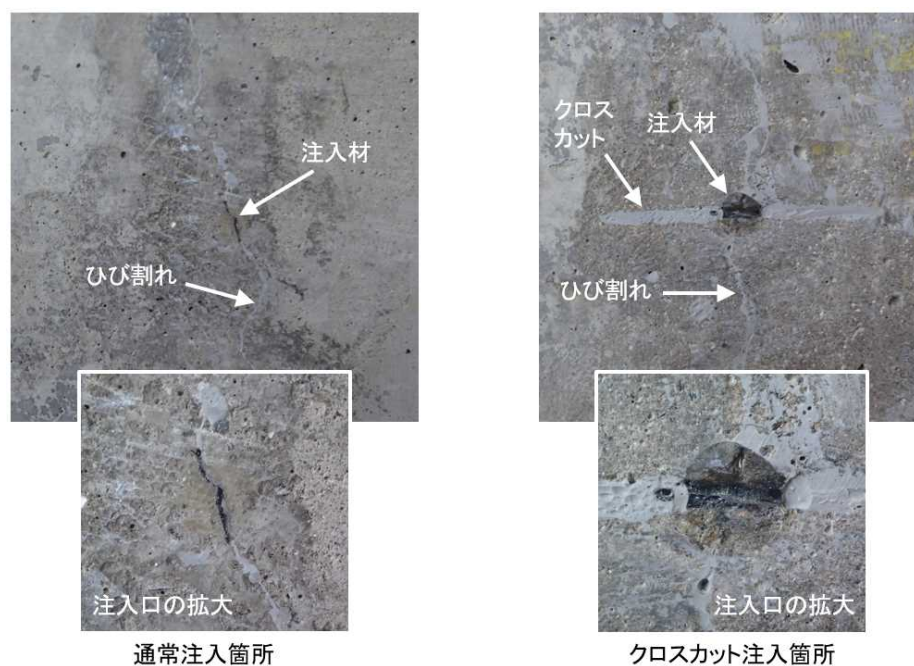


図-7.5.3 注入跡の比較

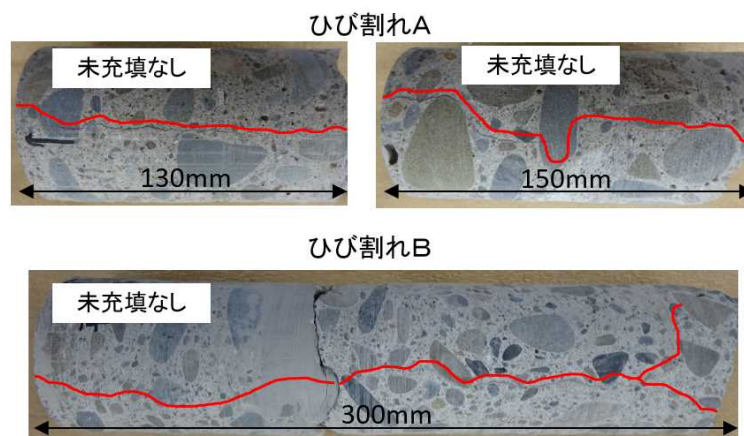


図-7.5.4 試験注入後のコア側面の注入材の充填確認

7.6 まとめと考察

本章では、析出物のあるひび割れへの注入手法として、クロスカットによる注入手法を提案した。本手法は、ひび割れに析出物があることで本来行うべき補修方針を達成できない工法を選定しないように提案したものであり、試験施工によってその適用性と有効性を検証した。第7章で得られた知見は以下の通りである。

- 1) ひび割れ表面の閉塞状況調査の結果において、結晶化した析出物はひび割れ表面付近の深さ5mm以下がほとんどであり、ひび割れ深部まで析出物による閉塞はない。
- 2) ひび割れに直交して切り込むクロスカットを用いて、ひび割れ表面の閉塞深さを簡易的に確認することが可能である。
- 3) クロスカットで閉塞状況調査を行った箇所を含めて、クロスカット箇所を注入口とした注入方法により、析出物があっても容易に注入が可能であり、さらに注入効率を向上させる方法としても有効である。
- 4) クロスカット注入手法は既存の工具を利用して施すことが可能であり、作業性も良く、作業費用の負担も少ない。また、注入器も座金タイプであれば設置可能であるため、ほとんどの自動低圧注入工法に適合できる。

本研究において実施したクロスカット注入手法の試験施工は、国土交通省北海道開発局の多大なるご協力を得て、実構造物の補修工事において実施したものである。試験施工当日には他の補修工事の受注業者や設計コンサルタント等の技術者が多く見学され、その場で今後のひび割れ補修工事における技術相談を多く受けた。その後も口コミで広まったと思われる技術相談が多くあったことから、実装数は把握出来ていないが、本注入方法が北海道内の補修工事にて活用されていると思われる。

また、本注入手法は、平成28年8月に発刊した「土木研究所資料 第4343号 コンクリート構造物の補修対策施工マニュアル（案）」にも掲載した。このマニュアル（案）の発刊後、九州地方整備局で作成された橋梁補修の手引きや東北地方整備局で作成された注入工法の手引き、および幾つかの地方自治体において作成された補修マニュアル等に本注入手法が引用され、その際に、技術相談を受けている。

さらに、国土交通省の道路技術職員が受講する橋梁研修の研修資料を作成しており、北海道開発局では平成28年度から、全国の各地方整備局では令和2年度から本注入手法を紹介していることから、今後、本注入手法は全国標準となることが予想される。本注入手法が全国のひび割れ補修工事で活用されることでコンクリート構造物の延命化に貢献できることを期待したい。

第7章の参考文献

- 1) 国立研究開発法人土木研究所：コンクリート構造物の補修対策施工マニュアル（案），土木研究所資料第 4343 号，IV ひび割れ修復工法編，p.IV-3，2016.
- 2) 公益社団法人 日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術‘10，基礎編，pp. 23-24，2010.
- 3) 公益社団法人 日本コンクリート工学会：コンクリート用語辞典，技報堂，p.28，1983.
- 4) Naitoh, I., Shimata, A. and Mihara, N.: Study on the filling ability of crack injection into concrete in a cold snowy region, *The 6th International Conference of Asian Concrete Federation*, USB stick, 2014.
- 5) 公益社団法人 日本コンクリート工学会：コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針 2013，pp.120-122，2013.
- 6) 日本産業規格：JIS K 5600-5-6 塗料一般試験方法 第5部 塗膜の機械的性質 第6節 付着性（クロスカット法），1999
- 7) 内藤勲，田口史雄：小径コアによるひび割れ注入後の充填評価方法に関する検討，土木学会第 68 回年次学術講演会，V-390，2013.

第 8 章

総括

第8章 総括

8.1 各章で得られた研究成果の要約

本研究では、寒冷環境下における断面修復工法とひび割れ修復工法の耐久性向上に着目し、断面修復工法では、コンクリート界面の脆弱部を改善して断面修復する手法の適用性と有効性に関する実験検証を行った。また、ひび割れ修復工法では、主にひび割れ注入工法に焦点を当て、ひび割れ注入後の未充填が凍害による再劣化に及ぼす影響について検証し、低温環境での未充填を防止するため、ひび割れ注入材の注入性能の詳細な把握を行った。さらに、析出物のあるひび割れへの対処方法として、クロスカットによる注入手法を提案し、実構造物による試験施工によってその適用性と有効性を確認した。

得られた知見を各章ごとに以下に要約する。

第1章では、本研究の背景を述べるとともに、補修工法における問題点とそれに関連する既往の研究、本研究の目的と位置付け、および論文構成を整理した。

第2章では、断面修復箇所の早期再劣化を解決するため、断面修復材とコンクリートとの接着耐久性の向上対策を目的に、コンクリート界面に残存する脆弱部を改善する手法とその有効性について検討した。脆弱部の改善方法は、コンクリート界面に浸透系塗布材を浸透させて脆弱部を緻密化させる方法であり、超音波伝播速度、曲げ強度、および透水試験によりその改善効果を確認した。その結果、浸透系塗布材によって界面の脆弱部の改善は可能であるが、劣化の程度が大きいと健全域まで回復しないことがわかった。なお、浸透系塗布材の浸透状態を走査型電子顕微鏡によって確認した結果、側面塗布による浸透深さは約25mm程度であった。

第3章では、第2章の実験結果を基に、コンクリート界面の脆弱部を浸透系塗布材で改善した状態で断面修復材を施工する断面修復手法の耐久性（耐凍害性）と補修効果の持続性について検討・評価を行った。その結果、特に樹脂系の浸透系塗布材は脆弱部の改善効果も大きく、接着力も付加されることから、断面修復箇所の耐凍害性の向上と接着耐久性の向上に期待できる結果となった。また、浸透系塗布材がより深くまで多く浸透・拡散できれば接着耐久性が向上する可能性が見出せた。一方で、脆弱部の劣化の程度と浸透系塗布材の浸透性能が改善効果に影響することから、改善効果をより得るためには、劣化程度に対する適量が存在すると考えられることがわかった。

第4章では、ひび割れ注入工法によって補修されたコンクリートの耐久性、特に凍害および凍

害と塩害の複合作用に対する耐久性（耐凍害性）について、ひび割れ注入材の未充填が再劣化の進行に及ぼす影響や再劣化が進行するメカニズムを実験的に検証した。その結果、凍結融解前後の超音波伝播速度と X 線 CT 解析において、ひび割れ注入箇所の凍害劣化の進行は未充填が大きく影響することを明らかにした。また、実環境における暴露実験において、暴露 5 年程度ではひび割れ注入による補修効果は持続しているが、注入材の品質変化やコンクリートの凍害劣化によって接着耐久性が徐々に低下してきていることを確認した。

第 5 章では、ひび割れ充填工法によって補修されたコンクリートの凍結融解前後の耐久性と接着性の変化を検証した。H 型供試体の凍結融解後の接着引張試験、U カット充填箇所の引張用クリップを用いた接着引張試験を行った結果、モルタルやコンクリートの凍害劣化によって充填材との接着が弱まること、充填材自体に品質変化が生じて耐久性が低下している可能性があることを確認した。また、暴露実験において、U カット充填でひび割れ表面を閉塞しても充填材以深は塩化物イオンがひび割れにも浸入して内部に浸透していることを確認した。

第 6 章では、注入時の未充填を防止するためのひび割れ注入材の注入性能に関する検討を行った。異なる温度環境におけるエポキシ樹脂系ひび割れ注入材の性状変化測定と注入充填性試験を行った結果、低温では温度上昇法による可使時間の算定ができない注入材が多いが、低温環境で変化する注入材の注入性能は既往の注入面積速度式との相関が得られ、低温での注入充填性を定量的に評価できることを明らかにした。このことから、低温における注入面積速度式の補正係数 $\alpha = 5.60 \times 10^{-4}$ を用いて、低温時のひび割れ幅やひび割れの規模に応じた注入材の選定や注入効率を事前に把握できる可能性が示唆された。

第 7 章では、ひび割れ補修工事において工法選定が検討される析出物のあるひび割れへの対処方法について、析出物によるひび割れ閉塞状況の簡易な調査方法と新たな注入手法を提案し、その検証を行った。その結果、提案した注入手法は、実構造物による試験施工によってその適用性と有効性が確認され、さらに注入効率が向上することも明らかにした。

第 8 章では、各章で得られた知見を要約し、本論文を総括するとともに、今後の課題を示した。

8.2 研究成果の社会への還元

本研究におけるひび割れ修復に関する研究成果の一部は、平成 28 年度に発刊された「土木研究所資料 第 4343 号 コンクリート構造物の補修対策施工マニュアル（案）」¹⁾にすでに掲載されている。このマニュアル（案）の発刊後、各地方整備局ではマニュアル（案）の内容を引用した補

修の手引き等が作製されている。特に、ひび割れ注入工法に関する施工時の留意点や施工手順等は、これまでの指針類等にはほとんど掲載されていないことから、ほぼ原文・原図のまま引用されている。また、国土交通省の技術職に対する橋梁の実務研修において、コンクリートの補修対策に関する講義資料はマニュアル（案）の内容に切り替わり、講義資料の7割強が筆者の作成した原案が引用されている経緯から、マニュアル（案）にはまだ掲載されていない本研究の成果も一部取り入れている。このことから、本研究で得られた研究成果の多くが行政の実務に反映されてきており、今後さらに適切な補修設計・施工・維持管理が成されることで、社会資本の削減に資する貢献が期待される。

8.3 今後の課題

厳しい寒冷環境にあるコンクリート構造物の劣化進行を補修等によって遅らせることは可能であるが、劣化を皆無にすることは難しい。その劣化形態は構造物の種類および置かれた環境によって多様に姿を変えるため、これ以上はないと言う補修対策はない。したがって、寒冷地域におけるコンクリート構造物の補修対策は、状況に応じて様々で且つ細かな対応が求められることから、解決すべき課題が未だ多く残されている。本研究で得た知見においても通過点に過ぎず、今後も寒冷地域における補修のあり方や最善策を模索しながら課題に取り組まなくてはならない。本研究における今後の課題として、脆弱部を改善した断面修復手法に関する課題と、寒冷地域におけるコンクリート構造物の補修全般を考慮した更なる延命処置への取り組みを述べて、本論文の結びとする。

8.3.1 脆弱部を改善した断面修復手法の品質管理方法の検討

断面修復材の早期剥離・剥落の再劣化問題は、凍害劣化や凍害・塩害の複合劣化の環境下で比較的多く見られているが、全国的にも発生している事例であるため、脆弱部への改善手法を現場に還元するためには、本手法が適切な品質となるための品質管理方法を検討しなければならない。断面修復材の接着力は製品のカタログや試験成績表、あるいは接着強度試験で管理することができ、現場の竣工検査において断面修復箇所の品質を評価する術はないことから、現場における管理方法が必要である。今後の課題として、脆弱部を改善した断面修復箇所の接着耐久性を管理する手法の考案とその検証を行う予定である。その結果を基に、本手法を断面修復工法の標準技術として現場に還元されることを願う。

また、近年では、コンクリート床版の砂利化による陥没事例等が話題になっており、その補修対策において、断面修復材とコンクリート床版との接着力の向上が求められている。ここで、コンクリート床版の砂利化した部分を除去して、断面修復する際にコンクリートの脆弱部を改善する手法が注目されている。しかしながら、本研究結果において改善による効果はあるものの強度改善には至らないことから、床版のように繰り返し荷重が掛かる部位での適用については更なる検討が必要である。また、床版は荷重によって振動するため、改善するには追従性のある補修材料の検討も必要であり、これらの課題についても取り組んでいく予定である。

8.3.2 寒冷地域における早期補修対策への新たな手法の開発

厳しい寒冷地域のコンクリート構造物に生じたひび割れは、劣化因子の浸入口となり、構造物の寿命を縮める原因となる。現在、コンクリート構造物の補修対策は、事後処理から予防保全へと変換されているが、実際の現場における予防保全は、新設構造物に対する予防処置だけではなく、既設構造物の劣化箇所の更なる拡大・進行を抑える補修対策も該当している。しかし、初期欠陥等による初期段階のひび割れは、竣工検査にて基準値を超えていなければ是正措置は実施されないことから、厳しい環境では劣化進行の糸口となる。このため、出来るだけ早期の内に微細であってもひび割れへの対策をすることが、結果的にコンクリート構造物の延命化に結びつくと考えられる。本研究では、この早期補修対策の考え方を今後の課題として取り上げ、出来るだけ安価で簡易な予防策を模索し、新たな手法の予防効果による更なる延命化を目指している。

第8章の参考文献

- 1) 国立研究開発法人土木研究所：コンクリート構造物の補修対策施工マニュアル（案），土木研究所資料第 4343 号，2016.

謝辞

本論文は、著者が平成 20 年 4 月から国土交通省北海道開発局より国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所に出向してからの間、および平成 28 年 4 月から在籍した北海道大学大学院工学院北方圏環境政策工学専攻博士後期課程において取り組んだコンクリート構造物の補修の耐久性に関する一連の研究成果を北海道大学大学院工学研究院土木工学部門特任教授 横田弘先生のご指導のもととりまとめたものです。

社会人博士後期課程への入学を快く受け入れてくださった横田弘先生には、本研究を遂行するにあたり、終始懇切丁寧なご指導、ご教示を賜りました。途中で挫けそうになりご相談した際には親身で温かなご助言と励ましをいただき、また、不慣れな海外発表等においても過分なるご高配をいただきまして、終始大変勇気づけられました。論文を中々書き上げることができずに入学から約 5 年が経ちましたが、常に温かく後押ししていただき頑張ることができました。心より感謝の意を表しますとともに、厚く御礼申し上げます。

本論文の審査を通じて、北海道大学大学院工学研究院教授 杉山隆文先生、同特任教授 千歩修先生、同准教授 松本浩嗣先生には、本論文の内容について、種々の貴重なご意見とご指導、ご教示を賜りました。また、早稲田大学理工学部社会環境工学科教授 佐藤靖彦先生には、学位取得を目指す機会を作っていただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

入学当時の寒地土木研究所の所長（現（株）構研エンジニアリング副社長）池田憲二博士、同寒地保全技術研究グループ長（現（株）東亜エンジニアリング副社長）田口史雄博士には、博士後期課程への入学にご理解、ご許可いただいた上、多大なご支援を賜りました。寒地保全技術研究グループ長 桑島正樹氏、耐寒材料チームの上席研究員 島多昭典氏をはじめチームの皆様、各地の暴露測定を常に手伝ってくれたチームの研究員 長谷川諒博士、つくば中央研究所の理事 渡辺博志博士をはじめ材料資源研究グループ iMaRRC の皆様、つくばでの X 線 CT 試験にご協力いただいた iMaRRC の主任研究員 櫻庭浩樹博士、他、土木研究所の関係各位には、多くのご協力とご指導をいただきました。深く感謝申し上げます。

実験に際しては、ひび割れ修復の共同研究者である（株）ダイフレックスの重永真志氏、竹島泰永氏、コニシ（株）の堀井久一氏、辻本仁氏、稲妻充倫氏、尾藤陽介氏、熊谷慎祐博士、日本国土開発（株）の山内匡博士、千賀年浩氏、日鉄セメント（株）の金沢智彦博士、工藤篤志氏、高林佳孝氏、三菱マテリアル（株）の田原英男氏、徳永健二氏、齊藤恵二氏ほか関係各位には、実験に使用した補修材とその関連資材のご提供、補修材の施工や暴露測定等に多くのご協力いただきました。深く感謝申し上げます。実験補助の上山試錐工業（株）の高橋亮一氏、福島孝昌氏

ほか関係各位には、多くのご協力をいただきました。また、国土交通省北海道開発局の道路部門および河川部門の関係各位および補修工事の請負業者の関係各位には、実構造物の再劣化調査や試験施工において、現場のご提供と調査に快くご協力いただきました。さらに、ライフタイム工学研究室の学生で断面修復の実験を3年間一緒に行った宇野剛志氏（現 五洋建設（株））、同じく学生で色々と実験を手伝ってくれた松浦悠氏（現 NEXCO 中日本（株））、白井礼陽氏（現 東京都庁）、磯萌々子氏（現 五洋建設（株））、仲良く接してくれた同研究室の学生や留学生達、および同研究室秘書の中村知佳子氏には、大変お世話になりました。ありがとうございました。

他、ここに挙げた方々以外にも数多くの関係者の皆様方にご協力をいただき、学位論文を完成することができました。心より御礼を申し上げます。

最後に、私事ではありますが、学位取得を応援してくれた両親と家族に心より感謝致します。

2021 年 3 月

内藤 勲