



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	断面修復コンクリートの早期劣化に関する研究
Author(s)	金, 侖美
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第13351号
Issue Date	2018-09-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k13351
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/82742
Type	doctoral thesis
File Information	Yunmi_Kim.pdf



断面修復コンクリートの早期劣化に関する研究

Study on the Premature Deterioration of Repaired Concrete using Patch-repair Material

**北海道大学 大学院工学院
空間性能システム専攻**

金倫美

目 次

目 次.....	I
表目次.....	IV
図目次.....	V
第1章 序 論.....	1
1.1. 本研究の背景および目的.....	2
1.2. 本研究に関する既往研究.....	3
1.3. 本研究の構成.....	5
第1章の参考文献.....	7
第2章 積雪寒冷地における断面修復コンクリートの早期劣化の原因に関する考察.....	9
2.1. 断面修復コンクリートにおける早期劣化現象および原因推定.....	10
2.1.1. 概説.....	10
2.1.2. コンクリートー断面修復材の界面の剥離.....	11
2.1.3. 断面修復部のひび割れ.....	11
2.1.4. コンクリートー断面修復材の界面からのエフロッセンス・錆汁.....	11
2.1.5. 断面修復コンクリートにおける早期劣化現象と劣化原因の関係.....	12
2.2. 断面修復材の品質基準に関する技術資料調査と考察.....	14
2.2.1. 概説.....	14
2.2.2. 調査範囲および方法.....	14
2.2.3. 市販断面修復材に適用されている品質基準.....	14
2.2.4. 断面修復の品質基準および試験規格.....	15
2.3. 第2章の結論.....	17
第2章の参考文献.....	18
第3章 凍害を受けたコンクリートの性状.....	19
3.1. 概説.....	20
3.2. 実験の概要.....	21
3.3. 実験結果.....	24
3.3.1. 実験結果概要.....	24
3.3.2. 凍害劣化程度と圧縮強度および超音波伝播速度の関係.....	25
3.3.3. 凍害劣化程度と静弾性係数およびポアソン比の関係.....	26
3.3.4. 凍害劣化程度と見かけの線膨張係数およびひび割れ密度の関係.....	27

3.3.5. 凍害劣化程度と絶乾密度および含水率の関係	28
3.4. 第3章の結論	29
第3章の参考文献	30
第4章 コンクリートおよび断面修復材の温度変化に対するひずみ変化の検討	31
4.1. 概説	32
4.2. 実験の概要	33
4.3. 実験結果	35
4.3.1. シリーズⅠ：凍害劣化程度の異なるコンクリートおよび断面修復材の温度変化によるひずみ変化	35
4.3.2. シリーズⅡ：凍害劣化程度の異なるコンクリートおよび断面修復材の温度変化	37
4.4. 第4章の結論	41
第4章の参考文献	42
第5章 積雪寒冷地を想定した断面修復コンクリート中の物質移動に関する実験的検討	43
5.1. 概説	44
5.2. 実験の概要	46
5.2.1. 実験計画	46
5.2.2. 実験方法	50
5.2.3. 測定方法およびデータ処理方法	52
5.3. 実験結果	56
5.3.1. シリーズⅠ：コンクリート・断面修復材の表面および両者の界面における片面吸水試験による水分移動	56
5.3.2. シリーズⅡ：コンクリートー断面修復材の界面における塩水片面吸水試験および塩水片面吸水凍結融解試験による劣化状況および水分移動性状	61
5.3.3. シリーズⅢ：塩化物残留コンクリートに断面修復材を補修した場合の断面修復面における塩水片面吸水試験および塩水片面吸水凍結融解試験による塩化物イオンの移動性状	65
5.4. 第5章の結論	70
第5章の参考文献	71
第6章 断面修復コンクリートの一体性	72
6.1. 概説	73
6.2. 実験の概要	74
6.3. 実験結果	78
6.3.1. シリーズⅠ：コンクリートの凍害劣化程度による断面修復材の付着強度変化	78

6.3.2. シリーズⅡ：コンクリートー断面修復材の界面から吸水する片面吸水凍結融解試験 による断面修復コンクリートの付着強度変化	80
6.3.3. シリーズⅢ：コンクリートのひずみに対する断面修復材の追従性.....	82
6.4. 第 6 章の結論.....	84
第 6 章の参考文献.....	85
 第 7 章 総 括.....	 86

表目次

表 2-1	品質基準に適合する市販断面修復材	15
表 2-2	品質基準の項目および試験規格 ⁵⁾⁶⁾	16
表 3-1	実験計画	21
表 3-2	コンクリートの調合および基礎性状	21
表 3-3	試験体の概要	22
表 3-4	水セメント比および相対動弾性係数による測定結果.....	24
表 3-5	W/C 40%の劣化グレードによる測定結果.....	24
表 4-1	実験計画	33
表 4-2	コンクリートの調合および基礎性状	34
表 4-3	断面修復材の調合及び各種性状	34
表 5-1	実験計画	47
表 5-2	実験条件	48
表 5-3	コンクリートの調合および基礎性状	48
表 5-4	断面修復材の調合および基礎性状	48
表 6-1	実験計画	74
表 6-2	コンクリートの調合および基礎性状	74
表 6-3	断面修復材の調合および基礎性状	74
表 6-4	一軸ひずみ追従性試験結果の概要	82

図目次

図 1-1	本論文の構成	6
図 2-1	積雪寒冷地における断面修復コンクリートの早期劣化現象 ¹⁾	10
図 2-2	断面修復コンクリートの早期劣化現象および劣化原因の関係	13
図 3-1	超音波伝播速度の測定方法	22
図 3-2	見かけの線膨張係数の求め方	22
図 3-3	ひび割れ観察方法	23
図 3-4	劣化グレードと圧縮強度比	25
図 3-5	超音波伝播速度と圧縮強度	25
図 3-6	劣化グレードと静弾性係数	26
図 3-7	劣化グレードとポアソン比	26
図 3-8	劣化グレードと槽内温度に伴う見かけの線膨張係数	27
図 3-9	ひび割れ密度と槽内温度に伴う見かけの線膨張係数の関係	27
図 3-10	劣化グレードと絶乾密度	28
図 3-11	劣化グレードと表乾状態の含水率	28
図 4-1	コンクリートと断面修復材のひずみ差による早期劣化	32
図 4-2	ひずみ測定方法	34
図 4-3	温度測定方法	34
図 4-4	W/C 40%のひずみ	35
図 4-5	W/C 60%のひずみ	36
図 4-6	W/C 60% (AE)のひずみ	36
図 4-7	断面修復材のひずみ	36
図 4-8	DM 100 の温度変化	37
図 4-9	DM 80 の温度変化	38
図 4-10	DM 60 の温度変化	38
図 4-11	PCM の温度変化	39
図 4-12	RM の温度変化	39
図 4-13	コンクリートの熱移動による温度変化	40
図 4-14	コンクリートおよび断面修復材の熱移動による温度変化	40
図 5-1	物質移動による早期劣化	45
図 5-2	実験フロー	49
図 5-3	A タイプ試験体の概念図	51
図 5-4	B タイプ試験体の概念図	51
図 5-5	C タイプ試験体の概念図	51
図 5-6	A, B タイプ試験体の電極様子	52

図 5-7	絶対乾燥状態の比抵抗 (ρ_d) 推定.....	53
図 5-8	C タイプ試験体の電極様子.....	54
図 5-9	超音波伝播速度の測定概念図.....	54
図 5-10	スケーリング高さの測定概念図.....	54
図 5-11	塩化物イオン含有量の測定概念図.....	55
図 5-12	片面吸水による水分の質量変化率.....	57
図 5-13	片面吸水による比抵抗変化率.....	59
図 5-14	飽和率と比抵抗変化率の相関.....	60
図 5-15	スケーリング高さの変化.....	61
図 5-16	超音波伝播速度の変化.....	62
図 5-17	断面修復コンクリートの比抵抗変化率.....	63
図 5-18	片面吸水試験 48 時間における測定高さ と比抵抗変化速度.....	64
図 5-19	質量含水率の変化.....	66
図 5-20	4 週間塩水片面吸水凍結融解試験を行った試験体の外観.....	66
図 5-21	塩化物イオン含有量の変化.....	68
図 5-22	質量含水率と塩化物イオン含有量の相関.....	69
図 6-1	断面修復コンクリートの剥離原因.....	73
図 6-2	引張試験の概念図.....	75
図 6-3	片面吸水凍結融解試験の吸水方法の概念図.....	76
図 6-4	割裂引張試験の概念図.....	76
図 6-5	引張試験および割裂引張強度の破断パターンの区分.....	77
図 6-6	一軸ひずみ追従性試験の概念図.....	77
図 6-7	引張試験による C 破断面積率.....	78
図 6-8	引張試験によるコンクリートの破断性状.....	78
図 6-9	引張試験による付着強度および標準偏差.....	79
図 6-10	割裂引張試験による片面吸水凍結融解試験「前」, 「後」の C 破断面積率.....	80
図 6-11	割裂引張試験による片面吸水凍結融解試験「前」のコンクリート破断性状.....	81
図 6-12	割裂引張試験による片面吸水凍結融解試験「後」のコンクリート破断性状.....	81
図 6-13	割裂引張試験による片面吸水凍結融解試験「前」, 「後」の付着強度.....	81
図 6-14	コンクリートの荷重に従うひずみ.....	83
図 6-15	コンクリートのひずみに対する断面修復材のひずみ.....	83
図 6-16	一軸ひずみ追従性試験後の試験体様子 (No.1).....	83

第1章 序 論

1.1. 本研究の背景および目的

日本では高度経済成長期に、建築および土木に関連する建設技術が飛躍的に向上し、建築物だけでなく、橋やダムといった鉄筋コンクリート構造物が急激に増加した。現在、日本国内の建設後 40 年以上経過した鉄筋コンクリート構造物は、20%を上回っており、2026 年には 47%の鉄筋コンクリート構造物が老朽化し、補修が必要となると予想されている¹⁾。一般に、コンクリート構造物は物理的・環境的な劣化要因により経年劣化し、性能が低下する。これは構造物の安全性および使用性、耐久性、機能性などの構造性能の問題を引き起こすだけでなく、人的被害につながる可能性も考えられる。

鉄筋コンクリート構造物の補修は、性能が低下した部材の劣化進行を制御し、耐久性能の回復や向上を目的に実施される。また、効果的な補修のためには、劣化の原因と劣化状況を調査し、これに適した補修工法と材料を用いて補修を行うことが重要である。補修工法のひとつである断面修復工法は、コンクリート部材の劣化部分をはつり取り、除去された部分を断面修復材で充填する工法であり、中性化および塩害、凍害、化学的侵食や、それらの複合的な劣化などの様々な劣化に対して適用されている²⁾。特に、積雪寒冷地のコンクリート構造物は、凍害によるコンクリートのスケーリングと剥落による部材断面の減少や、微細ひび割れの発生によるコンクリートの組織の緩みによるコンクリート自体の性能の低下があることが多く、このような場合、断面修復工法が採用される。しかし、断面修復した鉄筋コンクリート構造物が補修後に目標とした耐用年数に達する前に再び劣化するという事例が数多く報告されている³⁾。さらに、積雪寒冷地では、補修後の早期劣化だけでなく、断面修復コンクリートに再補修をしても、再び断面修復部にひび割れや剥落などの劣化が生じるケースがある⁴⁾。積雪寒冷地では、凍結融解作用だけでなく、融雪剤の散布による塩化物イオンも影響していることが考えられる。断面修復コンクリートの早期劣化の問題は、継続的な補修により維持管理コストを増大させ、莫大な経済的損失をもたらすため、その原因を明らかにし、効果的な対策を講じる必要がある。

断面修復工法では、鉄筋コンクリート構造物と断面修復材の一体性を確保する必要がある。また、補修を行ったコンクリートは長期にわたって劣化環境に曝されているため、使用上の問題がない場合でも、外的要因によってコンクリートの物性が変化している可能性が高い⁵⁾⁶⁾。また、凍害を受けた鉄筋コンクリート構造物の凍害深さの判断に明確な基準がなく、劣化したコンクリートが残っているはつり不足の状態でも断面修復される可能性も排除できない。現在、コンクリートの劣化に関する研究は、多くの研究者たちによって多くの成果が得られており⁷⁾⁸⁾、耐凍害性に優れた断面修復材の開発も盛んに行われてきた⁹⁾。しかし、コンクリートと断面修復材の複合体の凍結融解作用時の挙動や劣化メカニズムについての研究は、ほとんど行われていない。

本論文では、積雪寒冷地における断面修復を行った鉄筋コンクリート構造物の早期劣化について事例分析および文献調査を行い、劣化状況から劣化原因を推定し、それらの劣化メカニズムを想定し、劣化環境および劣化状況をモデル化した促進劣化試験などを行った。これらの結果から断面修復を行った鉄筋コンクリート構造物の早期劣化のメカニズムを検討し、各種の劣化原因と早期劣化現象の関係を明らかにすることを目的とする。

1.2. 本研究に関する既往研究

本論文の主な研究対象は、積雪寒冷地における補修を行った鉄筋コンクリート構造物の早期劣化である。これには、コンクリートの劣化現象（凍害、塩害など）や補修工法および性能評価方法なども関連する。このため、文献調査はこれらの観点から、凍害を受けたコンクリートの性状に関する研究、補修を行ったコンクリートの劣化に関する研究、断面修復工法の性能評価方法に関する研究、複合体の一体性および一体性能評価方法に関する研究の各項目について実施した。

(1) 凍害を受けたコンクリートの性状に関する研究

凍害を受けたコンクリートは物理的特性の低下を引き起こし、凍害によるコンクリートの物性および力学性状の変化について多くの研究者によって様々な研究がなされている。松村ら（2003 年）は凍結融解作用を受けたコンクリートは劣化程度が激しいほど圧縮強度、曲げ強度などの力学性状が低下し、中性化が促進されることを明らかにした。また、凍害によりひび割れの本数が増加することから、ひび割れ密度を把握することで凍害を受けたコンクリートの劣化程度を推定することが可能であると報告している¹⁰⁾。しかし、鎌田ら（1986 年）によると、凍害に伴うコンクリートのひび割れは、ある原因で生じた微細ひび割れから顕在化し、ひび割れ中の水分凍結が劣化を促進させることより、水分の浸透経路として凍害を促進させると述べている¹¹⁾。

(2) 補修を行ったコンクリートの劣化に関する研究

積雪寒冷地における主な劣化現象は凍害であるが、融雪剤の散布によって塩化物イオンの影響が加わっていることが考えられる。補修を行ったコンクリートにおいて再劣化が発生し、これらの原因について研究がなされている。特に、凍害劣化した鉄筋コンクリート造の補修後の再劣化については、日本コンクリート工学会北海道支部の研究委員会（2015 年）で検討されている。この研究委員会では、補修を行った実際の鉄筋コンクリート構造物の劣化状況を調査し、設計上・施工上の問題点について考察している。この結果、主な劣化現象は、補修部の剥落やひび割れ、エフロッセンスであるとしている⁴⁾。これらの詳しい内容については第2章で取り上げる。塩害による補修後の再劣化については、伊藤ら（2004 年）により研究がなされている。塩害により補修を行った鉄筋コンクリート構造物が、初期の劣化原因と同様な塩害により再劣化することを想定した暴露試験を行い、塩害による再劣化メカニズムを検討した。この結果、コンクリートの内在塩分が多ければ組織が緻密な補修材を用いても補修効果を得ることは困難であり、補修部に近いコンクリート部の鉄筋にはマクロセルと考えられる腐食が発生したことを報告している¹²⁾。しかし、Kim ら（2007 年）の研究によると、断面修復を行ったコンクリートの海岸における長期暴露試験の結果に基づいて鉄筋の腐食速度を導出する場合、鉄筋の腐食によるひび割れの発生は約 30 年がかかると計算されている¹³⁾。

(3) 断面修復工法の性能評価方法に関する研究

断面修復工法に関する研究は、断面修復材の性能および施工性について行われている。断面修復材の性能項目としては耐久性および基礎物性に分けられるが、促進中性化試験および塩水浸漬試験や圧縮強度および密度、細孔容積などの実験的な研究によって評価が行われている¹⁴⁾。また、槇島ら（2010 年）は断面修復材を選定するための性能評価方法について考察し、主に製造方法、施工方法、養生方法などの条件による物質遮断性能の試験的評価方法を示した¹⁵⁾。断面修復材の施工性に関する研究は、吹付け試験およびひび割れ抵抗性試験、鉄筋背面への充填性試験などが行われている¹⁶⁾。

(4) 複合体の一体性および一体性能評価方法に関する研究

コンクリートに張り付けたタイルやモルタルの剥落の原因として両材料の温冷乾湿ムーブメントの違いが考えられ、コンクリートとタイルなどの複合体の一体性についての検討が行われてきた。断面修復コンクリートの温冷乾湿ムーブメントによる一体性の評価方法として利用できるものは、千歩ら（2006 年）の一軸ひずみ追従性試験における剥離判定方法がある¹⁷⁾。また、Park ら（2010 年）は断面修復材の引張強度と付着強度の関係から、付着強度が高まる場合はひび割れ抵抗性が増加し、断面修復部の幅が広い場合は断面修復材と躯体コンクリートの付着界面からひび割れが発生すると分析している¹⁸⁾。

タイルおよび仕上げモルタルに対する一体性評価方法に関する研究は、齊藤ら（2017 年）のコンクリートとモルタルの熱膨張を考慮した剥落評価方法があり、温冷繰返しによる両材の変位差から剥離の判定を行うものである¹⁹⁾。また、小山ら（2007 年）は接着引張強度試験および押込み載荷試験、圧縮軸ひずみ追従試験を行い、タイルの破壊状況を考慮した評価方法を提案している²⁰⁾。

1.3. 本研究の構成

本論文では、積雪寒冷地における断面修復コンクリートの早期劣化を対象とし、既往の研究および補修を行った鉄筋コンクリート構造物の早期劣化事例から、その劣化メカニズムを想定し、それに対応する実験を行い、検討を行った。ここでは、典型的な早期劣化形態を、(a) コンクリートー断面修復材の界面の剥離の発生、(b) 断面修復部のひび割れの発生、(c) コンクリートー断面修復材の界面からのエフロレッセンス・錆汁、の三つとした。この劣化原因として、断面修復時の脱塩不足、不適切な断面修復材の使用、不適切な断面修復面の処理（はつり不足）などを想定し、凍結融解作用を受けることで温冷乾湿ムーブメントだけでなく、水分・塩化物イオンの移動促進・蓄積されることが考えられる。ここでは、断面修復材を施した鉄筋コンクリート構造物の劣化発生の原因の究明を目的とし、寒冷地の凍結融解を想定した水中促凍結融解試験で、はつり不足状態の再現、コンクリートまたは断面修復材の熱的挙動の把握、断面修復コンクリートにおける物質移動および両材の一体性について検討を行う。

本論文の構成は図 1-1 に示すとおりであり、各章の概要は以下のとおりである。

第 1 章「序論」では、本研究の背景および目的について記述し、既往の研究の調査結果および本論文の構成について説明した。

第 2 章「積雪寒冷地における断面修復コンクリートの早期劣化の原因に関する考察」では、早期劣化の現象として、コンクリートー断面修復材の界面における剥離、断面修復部におけるひび割れおよびコンクリートー断面修復材の界面からのエフロレッセンス・錆汁の三つの劣化形態に着目し、凍害劣化部分のはつり不足、補修方法および使用環境に不適切な補修材の使用に原因があると考え、これらの原因による早期劣化メカニズムを検討した。また、補修材の選定において、日本の市販断面修復材を対象として技術資料および品質基準の現状を調査し、技術資料および断面修復材と関連する規格や品質基準の問題点について示している。

第 3 章「凍害を受けたコンクリートの性状」では、凍結融解作用を受けたコンクリートの物性や力学的性状について検討を行っている。凍害を受けたコンクリート構造物の補修において、凍害劣化部分のはつり不足が補修後のコンクリートの早期劣化の原因と考えられる。ここでは、耐凍害性の異なるコンクリートを対象とし、凍害劣化程度を変えたコンクリートの物性および力学特性について定量的および定性的に評価を行った。

第 4 章「コンクリートおよび断面修復材の温度変化に対するひずみ変化の検討」では、断面修復を行ったコンクリート構造物の断面修復部におけるひび割れ発生に着目し、コンクリートおよび断面修復材の温度変化によるひずみ変化を検討することで、コンクリート構造物の早期劣化原因について検討した。なお、影響要因として断面修復材およびコンクリートの凍害劣化程度および含水状態による熱的性状についても検討している。

第5章「積雪寒冷地を想定した断面修復コンクリート中の物質移動に関する実験的検討」では、コンクリートと断面修復材の界面におけるエフロレッセンスの滲出に対して、コンクリートまたは断面修復材の表面および断面修復部の界面からの水分・塩化物の浸透を想定し、積雪寒冷地を想定した断面修復コンクリート内部の物質移動に関する実験的検討を行った。影響要因として、断面修復時のコンクリートの凍害劣化状態、塩化物残留状況等を変え、これらの影響を明らかにしている。

第6章「断面修復コンクリートの一体性」では、断面修復材とコンクリートの付着性能および一体性について、コンクリートの凍害劣化程度、凍結融解作用、両材のひずみ差の影響について検討を行った。これらの結果から積雪寒冷地における断面修復コンクリートの剥離発生および断面修復部のひび割れ発生などの劣化原因について検討する。

第7章「総括」では、各章の要約および本研究の成果について述べている。

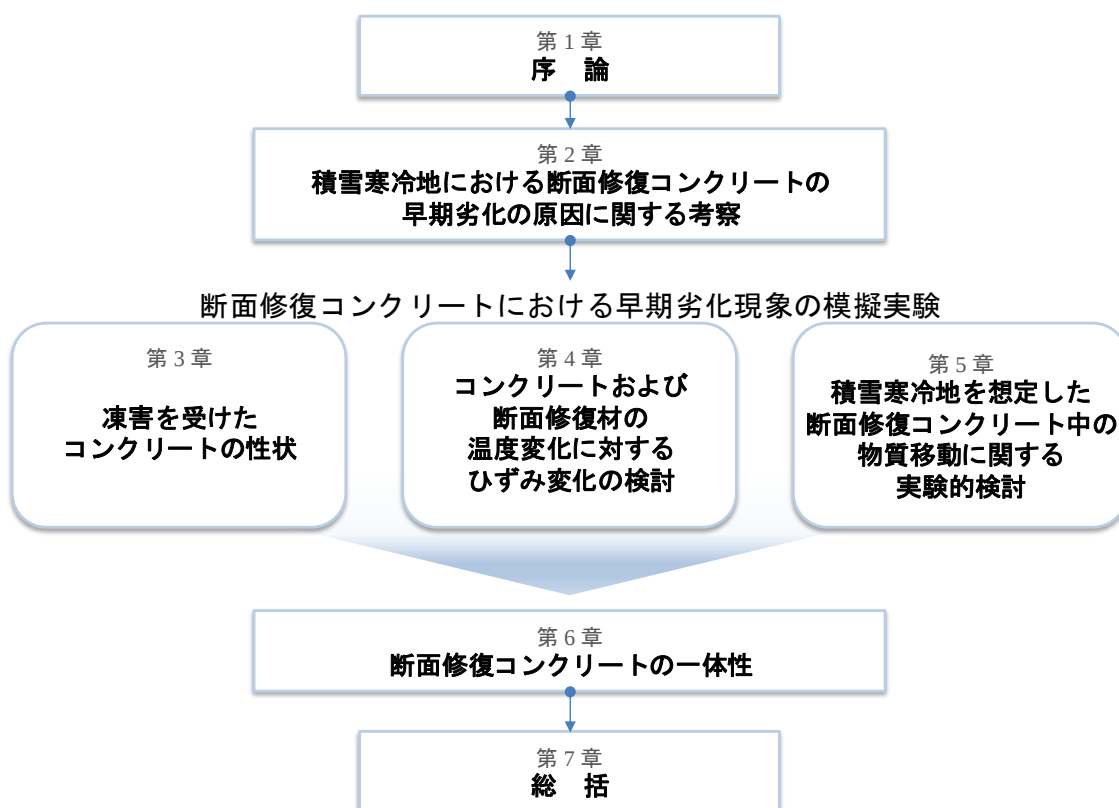


図 1-1 本論文の構成

第 1 章の参考文献

- 1) コンクリート構造物のライフサイクルマネジメント研究委員会：コンクリート構造物のライフサイクルマネジメントの現状把握と将来展望，日本コンクリート工学会北海道支部，pp.1-13，2012
- 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'13，公益社団法人日本コンクリート工学会，2013
- 3) Tilly, Graham : The Durability of Repaired Concrete Structures, IABSE Symposium Report, International Association for Bridge and Structural Engineering, Vol.93, No.22, pp.1-8, 2007
- 4) 積雪寒冷地におけるコンクリート補修工法の設計施工に関する研究委員会：積雪寒冷地におけるコンクリート補修工法の設計施工に関する研究委員会報告書，日本コンクリート工学会北海道支部，pp.1-54，2016
- 5) 鎌田英治：コンクリートの凍害と細孔構造，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.10, No.1, pp.51-60, 1988.6
- 6) Choi, Yoon Suk, Won, Min Sik, Yi, Seong Tae, Yang, Eun Ik : Characteristics of Pore Structure and Chloride Penetration Resistance of Concrete Exposed to Freezing-Thawing, Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Vol.16, No.6, pp.73-81, 2012.11
- 7) SHISHENG, Shi. : Effect of Freezing-thawing Cycles on Mechanical Properties of Concrete, China Civil Engineering Journal, 1997
- 8) CAI, H.; LIU, X. : Freeze-thaw durability of concrete: ice formation process in pores, Cement and Concrete Research, Vol.28, No.9, pp.1281-1287, 1998
- 9) 宮川豊章, 出村克宣: Polymers in Concrete-新しい動向, 材料, Vol.41, No.469, pp.1581-1587, 1992
- 10) 松村宇, 桂修, 吉野利幸: 凍害を受けたコンクリートの性状と劣化度評価法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.68, No.563, pp.9-13, 2003
- 11) 田畑雅幸, 洪悦郎, 鎌田英治：コンクリートの凍害におけるひびわれの役割の考察，日本建築学会構造系論文報告集，Vol.366, pp.11-17, 1986
- 12) 伊藤正憲，宇野祐一，弘中義昭，魚本健人：補修条件の違いによる補修後の再劣化に関する研究，コンクリート工学年次論文集， Vol.26, No.1, pp.1701-1706, 2004
- 13) Moo-Han Kim, Gyu-Yong Kim, Bong-Suk Cho, Young-Duck Kim, Young-Sun Kim, Performance Evaluation of Repair Material and Method for Reinforced Concrete Structure by Long Term Exposure Experiment, Journal of the Korea Concrete Institute, Vol.19, No.1, pp.39-46, 2007
- 14) 槇島修，魚本健人：断面修復材の耐久性の評価に関する研究(1)，生産研究，Vol.56, No.3, pp.255-258, 2004
- 15) 槇島修，加藤佳孝，魚本健人：コンクリート構造物の耐久性を考慮した断面修復工法の適用と断面修復材の性能評価に関する一考察，土木学会論文集 F, Vol.66, No.1, pp.101-111,

2010

- 16) 谷倉泉, 設楽和久, 三浦康治: コンクリート構造物の断面修復に用いる補修材料の性能評価, 建設の施工企画, No.670, pp.49-50, 2005
- 17) 千歩修, 服部梢, 長谷川拓哉: 断面修復材とコンクリートの一体性評価方法の検討, 北海道支部研究報告論文集, 2006
- 18) Park, Dong-Cheon, Song, Hwa-Cheol, Park, soo-Yong : Numerical Analysis on the Performance of Repaired Beam Considering Interfacial Fracture Property, Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, Vol.26, No.9, pp.63-70, 2010
- 19) 齊藤弘一郎, 大久保孝昭, 寺本篤史, 蔡誠: コンクリートと建築外装仕上げモルタルとの接着一体性評価試験の確立, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1089-1090, 2017
- 20) 小山拓, 吉岡昌洋, 兼松学: 促進劣化させた直貼りタイルの接着耐久性評価方法に関する研究, 日本建築仕上学会研究発表論文集, pp.45-48, 2007

第2章 積雪寒冷地における断面修復コンクリートの早期劣化の原因に関する考察

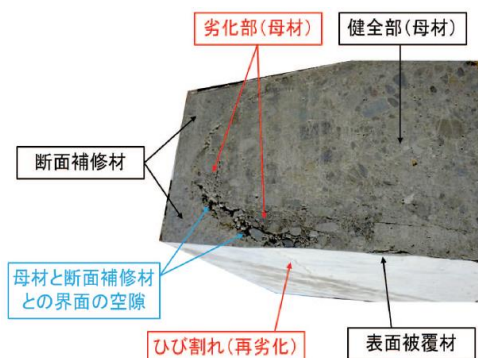
2.1. 断面修復コンクリートにおける早期劣化現象および原因推定

2.1.1. 概説

北海道のような環境条件および使用条件が厳しい地域では、劣化して補修を行った鉄筋コンクリート構造物が早期に劣化する現象が問題となっている。日本コンクリート工学会北海道支部は「積雪寒冷地におけるコンクリート補修工法の設計施工に関する研究委員会」を設置し、補修後早期に劣化した事例を取りまとめ、それらの問題点について考察した¹⁾。しかし、補修を行った構造物の早期劣化については不明な点が多く、その原因について明らかにすることは困難であり、様々な劣化因子が複合的に作用していることが考えられる。

ここでは、日本コンクリート工学会北海道支部の「積雪寒冷地におけるコンクリート補修工法の設計施工に関する研究委員会」が発表した研究報告書に基づいて図 2-1 および以下のような三つの劣化現象について着目し、不適切な補修方法および不適切な補修材の選定に原因があると想定し、これらの劣化メカニズムについて検討する。

- (a) コンクリートー断面修復材の界面の剥離
- (b) 断面修復部のひび割れ
- (c) コンクリートー断面修復材の界面からのエフロレッセンス・錆汁



(a) 河川樋門の操作台



(c) 胸壁角部および主桁端部

図 2-1 積雪寒冷地における断面修復コンクリートの早期劣化現象¹⁾

2.1.2. コンクリートー断面修復材の界面の剥離

図 2-1 の(a)は、凍害劣化した河川樋門の操作台を断面修復工法および表面被覆工法で補修を行ったものであるが、補修後 2 年半で操作台側面の断面修復部にひび割れが生じ、一部の断面修復材が剥離・剥落した事例である。寒地土木研究所の調査結果²⁾によると、はつり作業が不十分であったことおよび凍結した既設コンクリートに適切な養生を行わずに断面修復および表面被覆を行ったことが原因と推定され、既設コンクリートと断面修復材の付着力不足および両材の境界から浸透した水分の凍結膨張によりひび割れや剥落が発生したと分析している。このようなことから、凍害環境および凍害劣化したコンクリートが残された場合を考慮し、断面修復コンクリートの一体性低下に起因する要因について検討を行う必要がある。

2.1.3. 断面修復部のひび割れ

図 2-1 の(b)は、凍害と塩害の複合劣化により劣化したコンクリート構造物を断面修復工法で補修を行ったものであるが、補修後 1, 2 年で断面修復部に劣化が観察された事例である。この場合、断面修復部に発生したひび割れにエポキシ樹脂の注入および表面改質材の塗布による再補修を行ったが、エポキシ樹脂を注入したひび割れの範囲がさらに広がった。なお、補修時に適切な前処理および養生を行ったにもかかわらず、断面修復部に劣化が発生したものである。しかし、既設コンクリートにおける劣化は認められない。

断面修復コンクリートは断面修復材と躯体コンクリートの複合体であるが、周囲環境の温度変化等による伸縮挙動はそれぞれ異なる場合があり、同様な熱膨張係数の場合でも断面修復材と躯体コンクリートに含水状態の差や内外部に温度差が生じる場合は両材の伸縮挙動に差異が発生する。このような場合、ひずみ差が大きくなると、躯体コンクリートに拘束されている断面修復材に応力が生じ、ひび割れが発生すると考えられる。

以上の現象は、温度変化に伴う各材料の固有の物理・力学的特性などの物性に起因するため、凍害環境を考慮し、既設コンクリートおよび断面修復材の基本的な特性を理解した上で材料の挙動を検討する必要がある。

2.1.4. コンクリートー断面修復材の界面からのエフロレッセンス・錆汁

エフロレッセンスというのは毛細管空隙やひび割れなどから浸透する物質（水や炭酸ガスイオンなど）により生じるものである。図 2-1 の(c)のように、断面修復部のひび割れおよびコンクリートー断面修復材の界面からのエフロレッセンスおよび錆汁が認められる。エフロレッセンスの場合、滲出だけで断面修復材および躯体コンクリートの耐久性が低下するとはいえないが、滲出される箇所には水分および塩化物イオンなどの劣化因子が浸透している可能性が高く、それらが凍結融解作用を受けることで凍害劣化を促進している可能性がある。したがって、積雪寒冷地における早期再劣化の原因を把握するためには、凍害と塩害の複合劣化環境を考慮し、エフロレッセンスの滲出に起因する断面修復コンクリートの界面の条件を検討する必要がある。

2.1.5. 断面修復コンクリートにおける早期劣化現象と劣化原因の関係

本論文で取り上げる断面修復コンクリートの早期劣化現象¹⁾²⁾は、断面修復部におけるひび割れおよび剥落、断面修復材と躯体コンクリートの界面における剥離およびひび割れであり、断面修復部および断面修復材と躯体コンクリートの界面におけるひび割れから析出されるエフロレッセンス・錆汁も含んでいる。ここでは、前述の劣化現象および「1.2 本研究に関する既往研究」で検討した劣化現象に基づいて断面修復コンクリートにおける早期劣化現象とその原因の関係についてまとめる。図 2-2 に断面修復コンクリートの早期劣化現象および劣化原因の関係を示す。劣化原因は断面修復材の施工時の問題および不適切な断面修復材の使用と考えられ、次のような劣化メカニズムが想定される。

(1) 施工時の問題

① 躯体コンクリートの含水率が高い状態で断面修復を行う場合

凍結融解作用を受けることで躯体コンクリート中の水分が凍結膨張し、断面修復部から剥落する可能性がある²⁾。さらに、躯体コンクリートと断面修復材の界面から水分が浸透する場合は断面修復部の剥落が発生しやすくなる²⁾と考えられる。

② 躯体コンクリートに塩化物イオンが残留している状態で断面修復を施工した場合

鉄筋が腐食し、鉄筋の膨張により断面修復材が剥落する可能性がある。このような場合、残留塩化物イオンだけでは早期に劣化する可能性は低い³⁾⁴⁾とされているが、断面修復部および躯体コンクリートと断面修復材の界面から塩化物イオンや水分が浸透することで鉄筋の腐食が促進されることが考えられる。

③ 躯体コンクリートと断面修復材の付着力が十分確保されないうちに凍害を受けた場合

凍結融解作用により断面修復材と躯体コンクリートの界面から水分が浸透することが考えられ、界面の剥離やひび割れが生じることが考えられる。

④ 躯体コンクリートに劣化部が残っている場合（劣化部分のはつり取り不十分）

躯体コンクリート部分の劣化の進行、断面修復材におけるひび割れの発生および剥落、両材の界面から剥離やひび割れの発生が促進されることが考えられる。

(2) 不適切な断面修復材の使用

① 耐凍害性が不十分な断面修復材を使用した場合

凍害を受けることで断面修復部の表面から劣化が進行し、塩化物イオンや水分の浸透が容易になり、鉄筋腐食を引き起こす可能性がある。

② 躯体コンクリートと熱挙動が異なる断面修復材を用いた場合

両材にひずみ差が発生して断面修復部にひび割れが生じることや躯体コンクリートと断面修復材の界面に剥離および剥落が生じることが考えられる。さらに、断面修復部のひび割れや両材の界面が劣化因子の浸透経路となり、エフロレッセンスを引き起こすことや鉄筋腐食を促進させる原因となることが考えられる。

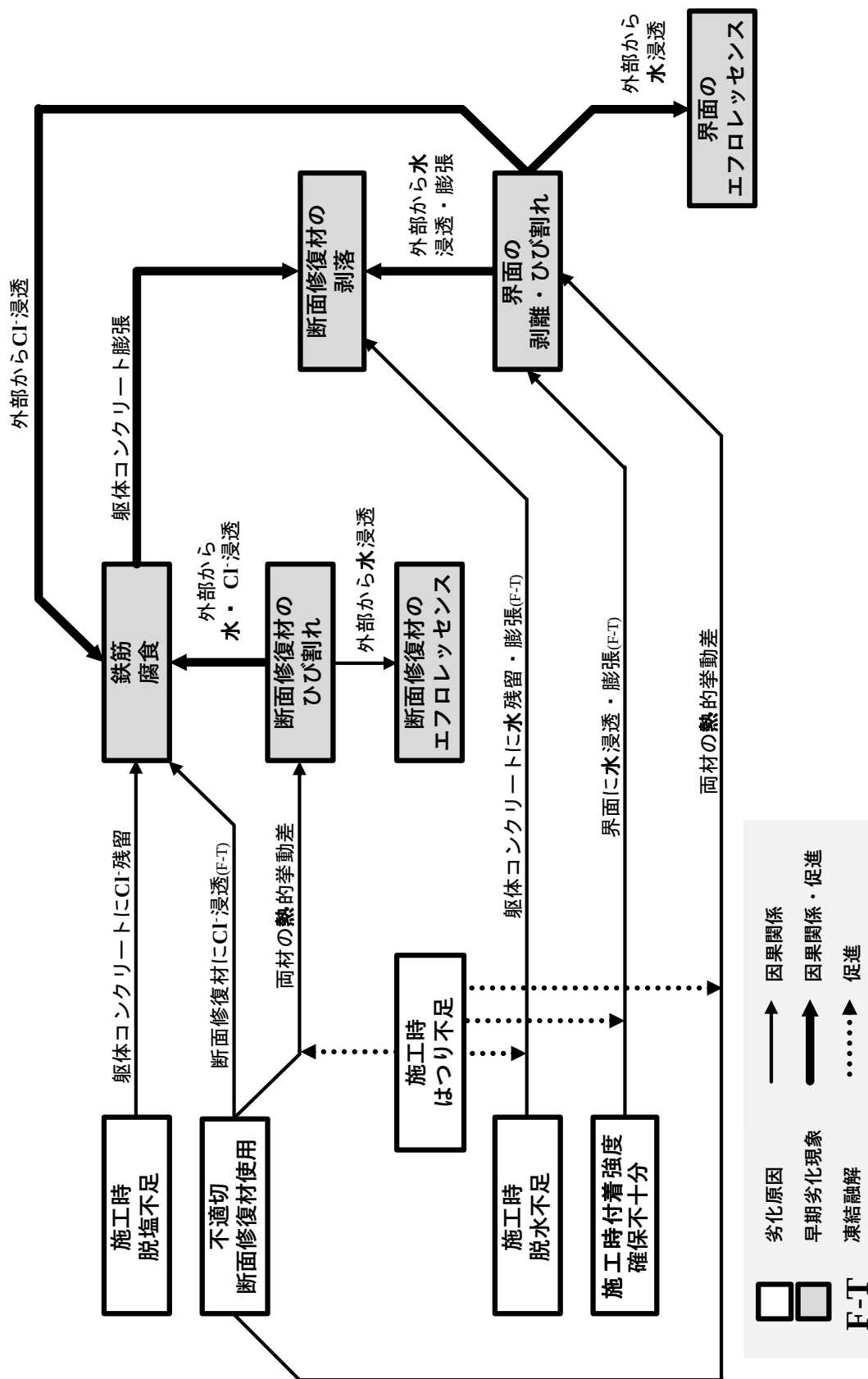


図 2-2 断面修復コンクリートの早期劣化現象および劣化原因の関係

2.2. 断面修復材の品質基準に関する技術資料調査と考察

2.2.1. 概説

鉄筋コンクリート構造物の補修に用いる補修材は市販品の公開技術資料を参考にして選定される。しかし、各企業は、補修材の用途と性能を提示しているが、企業によって異なる品質基準の性能項目が示されていることが多い。すなわち、技術資料において性能を判断するのに必要な性能項目の試験結果が示されていない、あるいは同じ性能項目に異なる試験が行われていることがあり、材料同士を同一の性能項目で並列に比較することが困難である。現状は、品質基準ごとに補修材料が開発されているものと考えられる。

ここでは、劣化状況に応じて要求性能を満たした断面修復材を選定するため、市販されている断面修復材を対象に技術資料および品質基準の現況を調査し、技術資料の問題点について検討を行う。

2.2.2. 調査範囲および方法

断面修復材の品質基準に関する技術資料調査は、日本の17企業から2016年12月時点で市販されている124種の断面修復材を対象とした。技術資料は企業から提供されるカタログや成績書などを収集し、断面修復材の品質項目と対象とする品質基準を取りまとめた。また、断面修復材の品質基準の中で採用数が多い2つの品質基準、「構造物施工管理要領」および「建築改修設計指針」の中に規定される品質基準に対して、用いられている品質項目と試験方法を検討した。

2.2.3. 市販断面修復材に適用されている品質基準

表2-1に技術資料から得られた断面修復材に対応する品質基準を示す。対応している製品の数が多いものの品質基準は「その他の品質基準」と分類した。表より、取りまとめた技術資料は124種であるが、適合する品質基準を記述している製品数は57種で全ての46%のみであることが分かった。これは多数の断面修復材が特定の用途に向けて製造されているのではなく、汎用に作られたためだと考えられる。

断面修復材に採用されている品質基準は規定されている機関により道路や橋梁などの土木構造物、一般建築物、硫酸が作用する下水道、水利施設などに関するものがある。特に東・中・西日本高速道路の「構造物施工管理要領」は品質基準に適合する断面修復材が多くなっている。これは、東・中・西日本高速道路は全国の鉄筋コンクリート構造物を管理しており、広い範囲で断面修復材が使用されているためだと思われる。

表 2-1 品質基準に適合する市販断面修復材

品質基準		製品数
東・中・西日本高速道路	構造物施工管理要領	28
建築保全センター	建築改修設計指針	8
日本下水道事業団	下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術マニュアル	5
東京都下水道局	コンクリート改修技術マニュアル	6
西日本旅客鉄道	コンクリート構造物補修の手引き	2
(旧) 日本道路公団	型枠コンクリート工の断面修復材の品質規格	6
首都高速道路公団	コンクリート塗装及び FRP 基準 (案)	2
公共建築協会	建築材料等評価名簿	2
平成 13 年国土交通省告示 1372 号の品質規格		3
その他の品質基準		6
社内基準		6
品質基準なし		67

※全ての製品数は 124 種であり、品質規格の採用数は重複選択がある。その他の品質基準：農業土木事業協会、九州旅客鉄道、東日本旅客鉄道、東京港埠頭、東海道新幹線、日本農業集落排水協会

2.2.4. 断面修復の品質基準および試験規格

表 2-2 に「構造物施工管理要領」および「建築改修設計指針」に規定される品質基準の項目および試験規格を示す。「構造物施工管理要領」の品質基準は床版上面とそれ以外に分け、床版上面以外の断面修復は断面修復の工法で分類されている。「建築改修設計指針」は外壁改修工事のモルタル塗り仕上げ外壁の改修に分類され、断面修復材の主材としてエポキシとポリマーと区分している。また、試験項目は品質基準として劣化因子に抵抗する耐久性および力学的性能をまとめる。

(1) 「構造物施工管理要領」の品質基準

劣化因子に対する耐久性能は中性化抵抗性、凍結融解抵抗性、遮塩性であり、断面修復工法によって試験規格が異なる。また、耐久性能の品質基準を規定している調査項目は打ち込み工法や吹付け工法、床版上面であるが、左官工法による断面修復材の性能照査項目は耐久性能について規定していない。これは、左官工法による品質基準では、補修後に塗装工事をすることを想定し、塗装塗膜によって耐久性を確保するように考えているためである⁵⁾。「構造物施工管理要領」を採用している技術資料は 28 種であるが、その中で 7 種の断面修復材のみが耐久性を検討している性能照査項目を採用している。

力学的性能は圧縮強度、付着強度、静弾性係数であり、圧縮強度および付着強度は「構造物施工管理要領」の全ての性能照査項目に規定されている。しかし、試験規格において、圧縮強度と付着強度両方とも、それぞれの照査項目に対して試験規格の異なるものが規定されている。

(2) 「建築改修設計指針」の品質基準

エポキシ樹脂モルタルおよびポリマーセメントモルタルの両方とも耐久性に関する品質基準がなく、断面修復部の表面状態や力学的性能について規定している。コンクリートとの一体性を確保するための温冷乾湿繰返しに対する長さ変化の規定がないが、これらの材料が、大断面の補修に用いられる可能性もあり、規定が必要と思われる。また、断面修復材の中には優れた中性化抵抗性、凍結融解抵抗性、遮塩性を持つものもあり、これらの性能も具体的に規定すべきものと考えられる。

表 2-2 品質基準の項目および試験規格⁵⁾⁶⁾

区分 (品質基準を規定している製品数)			品質基準の項目						
			耐久性性能			力学的性能			
			中性化抵抗性	凍結融解抵抗性	遮塩性	圧縮強度	曲げ強度	付着強度	静弾性係数
構造物施工 管理要領 (28)	床版 上面 以外	左官工法による 断面修復材の 性能照査項目 (21)	-	-	-	JIS R 5201	-	JSCE K 561	-
		打ち込み工法による 断面修復の 性能照査項目 (1)	試験法 432	試験法 432	試験法 432	JSCE G 522	-	試験法 432	-
		吹付け工法による 断面修復の 性能照査項目 (6)	試験法 432	試験法 432	試験法 432	試験法 432	-	試験法 432	試験法 432
	床版 上面	床版上面による 断面修復の 性能照査項目 (1)	試験法 439	試験法 439	試験法 439	JIS A 1108	-	試験法 439	JIS A 1149
建築改修 設計指針 (8)	欠損部充てん用 エポキシ樹脂モルタル 品質基準 (4)		-	-	-	-	JIS R 5201	(JIS A 5371)	-
	欠損部充てん用 ポリマーセメントモルタル 品質基準 (4)		-	-	-	JIS R 5201	JIS R 5201	(JIS A 5371)	-

※JIS A 1108：コンクリートの圧縮強度試験方法，JIS A 1149：コンクリートの静弾性係数試験方法，JIS R 5201：セメントの物理試験方法，JIS R 5371：プレキャスト無筋コンクリート製品，JSCE G 522：プレパックドコンクリートの圧縮強度試験方法，JSCE K 561：コンクリート構造物用断面修復材の試験方法，試験法 432：断面修復用吹付けモルタルの試験方法，試験法 439：床版上面における断面修復用補修材の試験方法

※製品数は「構造物施工管理要領」は 28 種，「建築改修設計指針」は 8 種であり，採用数は重複選択がある。

2.3. 第 2 章の結論

本章では、積雪寒冷地における断面修復コンクリートの早期劣化現象の事例に基づき、劣化現象の原因について分析した。また、市販の断面修復材が採用している品質基準および試験規格を比較・検討し、これら品質規格の問題点について考察した。その結果、次のような知見が得られた。

- (1) 断面修復コンクリートの早期劣化現象は、コンクリートー断面修復材の剥離、断面修復材のひび割れおよびコンクリートー断面修復材の界面からのエフロレッセンス・錆汁が代表的なものである。
- (2) 断面修復コンクリートの早期劣化の原因として、断面修復時のはつり不足、使用環境に不適切な断面修復材の使用、コンクリートの脱塩不足・高い含水状態の保持およびこれらの複合的な作用が考えられる。
- (3) 断面修復材の品質基準は「構造物施工管理要領」および「建築改修設計指針」に規定されるものが代表的なものであるが、断面修復材に要求される耐久性の評価項目がないものがあり、要求性能が同様であっても試験規格が異なる場合がある。

第2章の参考文献

- 1) 積雪寒冷地におけるコンクリート補修工法の設計施工に関する研究委員会：積雪寒冷地におけるコンクリート補修工法の設計施工に関する研究委員会報告書，日本コンクリート工学会北海道支部，pp.1-54，2016
- 2) 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
- 3) 伊藤正憲，宇野祐一，弘中義昭，魚本健人：補修条件の違いによる補修後の再劣化に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.1701-1706，2004
- 4) Moo-Han Kim, Gyu-Yong Kim, Bong-Suk Cho, Young-Duck Kim, Young-Sun Kim, Performance Evaluation of Repair Material and Method for Reinforced Concrete Structure by Long Term Exposure Experiment, Journal of the Korea Concrete Institute, Vol.19, No.1, pp.39-46, 2007
- 5) 東日本高速道路株式会社・中日本高速道路株式会社・西日本高速道路株式会社：構造物施工管理要領，高速道路総合技術研究所，2015
- 6) 国土交通省，建築保全センター：建築改修工事監理指針 上巻，建築保全センター，2016

第3章 凍害を受けたコンクリートの性状

3.1. 概説

積雪寒冷地におけるコンクリート構造物の代表的な劣化現象は凍害である。雨水や積雪により水分を含んだコンクリートが凍結融解作用を受ける場合、ひび割れやスケーリングなどを引き起こす。このように凍害によるコンクリートの劣化はコンクリート自体を劣化させるため、コンクリートの圧縮強度や静弾性係数などの力学性状を低下させる。このような場合、コンクリートの劣化部をはつり取った後に補修を行うが、コンクリートの凍害劣化部の判断が困難である。凍害深さは、熟練した作業者ははつり作業時の打撃感覚で評価できるという記述^りや、劣化部分のはつり方法については、ハンマーや電動ピックで叩いて火花が出るまではつるなどの意見があったが、コンクリートの水セメント比、空気連行剤の使用の有無などによって劣化したコンクリートの性状が異なり、凍害劣化部分の定義は明確でないといえる。

一般に、コンクリートの補修には、構造物の当初設計の性能と同等あるいは当初設計の性能以上の性能を備える補修材が用いられる。従って、コンクリートの劣化部が残された状態で補修を行うと、躯体コンクリートと補修材の物性および力学性状が大きく異なり、躯体コンクリート、補修材あるいは両者の界面から早期に劣化することが考えられる。

本章では、凍害深さの定義が不明確であることから、凍害劣化部分が残っているコンクリートに補修を行うことが断面修復コンクリートの早期劣化の原因の一つであると考え、凍害劣化程度の異なる各種コンクリートの物性および力学性状を明らかにする。

3.2. 実験の概要

本章では、促進凍結融解試験によって劣化程度を変えたコンクリートの物性および力学性状について検討を行う。表 3-1 に実験計画、表 3-2 にコンクリートの調合および基礎性状を示す。また、試験項目と試験体の形状を表 3-3 に、超音波伝播速度の測定方法を図 3-1 に、見かけの線膨張係数の求め方を図 3-2 に、ひび割れ観察方法を図 3-3 に示す。

コンクリートの水セメント比は 40%および 60%であり、W/C 60%の場合は non AE および AE コンクリートの 2 種である。試験体は、 $\square 75 \times 400 \text{mm}$ の寸法で作製し、4 週間水中養生を行ったものを用いた。これらのコンクリートは、JIS A 1148-A 法の水中促進凍結融解試験に準じて試験を行い、コンクリートが凍害を受けた状態を再現する。コンクリートの劣化グレードは、相対動弾性係数（以下、DM）で区分し、DM が 100, 90, 80, 70, 60（%）のものとした。ここで、DM 100 の試験体は促進凍結融解試験を行わないものであり、凍害劣化されていない健全な状態のコンクリートである。DM 90～DM 60 のものは促進凍結融解試験を行うことで凍害劣化されているものを想定している。また、DM 90～DM 60 の相対動弾性係数の範囲は、DM 90 のものが 95～85%，DM 80 が 85～75%，DM 70 が 75～65%，DM 60 が 65～55%である。測定項目は、超音波伝播速度および圧縮強度、静弾性係数、ポアソン比、見かけの線膨張係数、ひび割れ密度、絶乾密度、表乾状態の含水率であるが、絶乾密度および表乾状態の含水率は W/C 40%の試験体に対して測定を行った。

表 3-1 実験計画

コンクリート		劣化グレード (DM)	測定項目
試験体条件	劣化方法		
W/C 40% W/C 60% W/C 60% (AE)	促進凍結融解試験 (JIS A 1148-A 法)	DM 100 90 80 70 60	-超音波伝播速度 -圧縮強度 -静弾性係数 -ポアソン比 -見かけの線膨張係数 -ひび割れ密度 -絶乾密度 -表乾状態の含水率

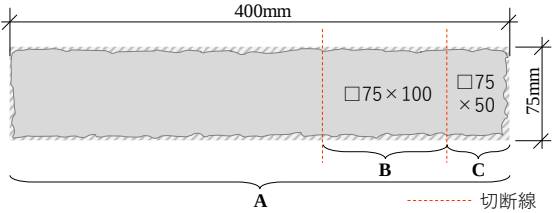
*DM：相対動弾性係数

表 3-2 コンクリートの調合および基礎性状

区分	W/C (%)	s/a (%)	単位質量 (kg/m ³)				AE 剤 (kg)	空気量 (%)	スランプ (cm)	圧縮強度 (N/mm ²)	耐久性指数
			W	C	S	G					
WC 40%	40	45.3	180	450	804	979	-	1.3	18.0	55	27.2
WC 60%	60	46.9	180	300	880	1,003	-	1.9	19.0	29	16.3
WC 60% (AE)	60	45.4	180	300	828	1,002	0.018	3.9	20.5	20	29.3

*C：セメント(普通ポルトランドセメント、密度：3.16g/cm³)、S：陸砂(表乾密度：2.67g/cm³)、
G：砕石 (表乾密度：2.68g/cm³)

表 3-3 試験体の概要

区分	測定項目	試験体形状 (mm)	試験体概要
A	超音波伝播速度	□75×400	
B	見かけの線膨張係数 圧縮強度 静弾性係数 ポアソン比 絶乾密度* 表乾状態の含水率*	□75×100	
C	ひび割れ密度	□75×50	

※W/C 40%のみ

超音波伝播速度は、促進凍結融解試験が終わった□75×400mm のものを 50℃ の乾燥炉で 1 週間乾燥させたものを用いて測定を行った。なお、図 3-1 のように試験体の両側に超音波探触子を接触させ、幅方向を透過する超音波伝播速度を測定し、3 箇所での超音波伝播速度の平均を算出した。

試験体の見かけの線膨張係数は、□75×100mm に切断した B 試験体を用い、乾燥させた試験体の表面にひずみゲージを貼り付けて測定した。なお、ここでは、図 3-2 のように-10℃/h の速度で 60℃ から-20℃ まで温度を低下させて、槽内温度変化に伴う試験体のひずみ変化を測定し、次の式 (1) を用いて見かけの線膨張係数を求めた。

$$\text{見かけの線膨張係数} = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta T} \quad \text{式 (1)}$$

ここに、 $\Delta \varepsilon$ ： ひずみ変化 ($\times 10^{-6}$)

ΔT ： 槽内温度変化 (℃)

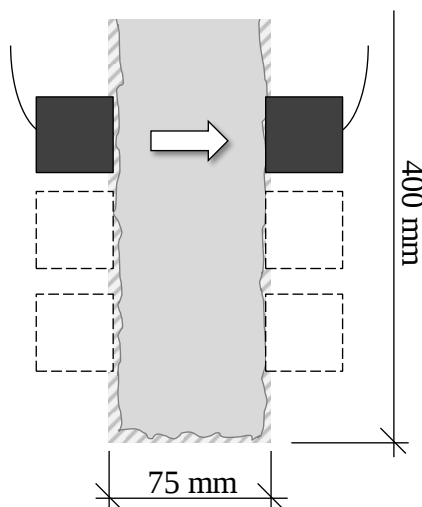


図 3-1 超音波伝播速度の測定方法

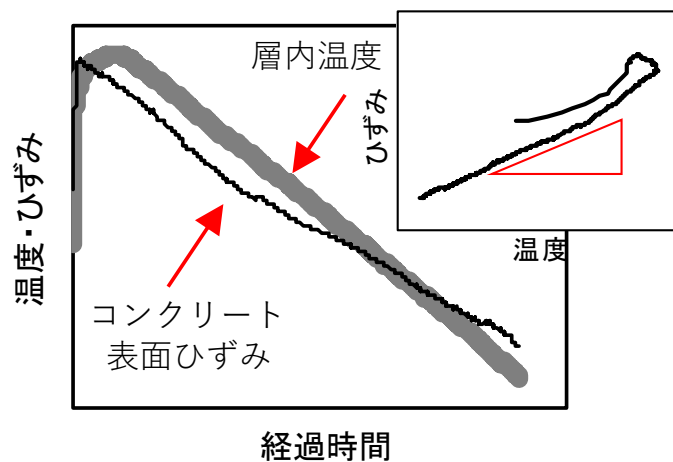


図 3-2 見かけの線膨張係数の求め方

圧縮強度および静弾性係数，ポアソン比は，見かけの線膨張係数の測定が終わった B 試験体を用いて測定を行った。また，W/C 40%の B 試験体のみ絶乾密度および表乾状態の含水率を測定した。

ひび割れ密度は， $\square 75 \times 50 \text{ mm}$ の寸法で切り出した C 試験体の切断面に対して測定を行った。ひび割れの観察は，切断面を研磨した試験体を 50°C の乾燥炉で 3 日間乾燥させ，ひび割れを可視化するために真空脱泡装置を用いて研磨面のひび割れを墨汁で黒色に染色した。墨汁の注入後，表面を軽く再研磨し，顕微鏡でひび割れ観察を行った。ひび割れ密度の評価は，図 3-3 に示すように観察面に縦横の両方向に 5mm 間隔で計 28 本の測線を引き，その線上を顕微鏡で観察し，測線上を横切るひび割れ本数をカウントし，次の式 (2) によってひび割れ密度を算出した。

$$C_n = \frac{N}{L} \quad \text{式 (2)}$$

ここに， C_n ： ひび割れ密度 (本/mm)

N ： 測線を横切るひび割れの総本数 (本)

L ： 総測線長 (mm)

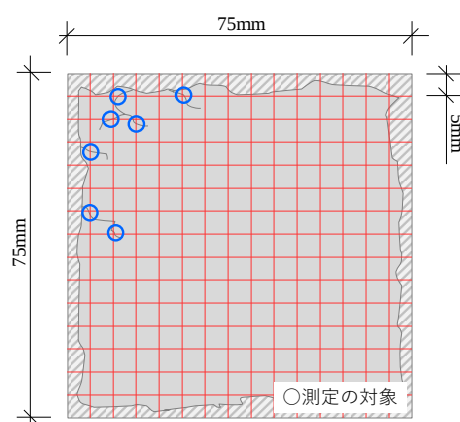


図 3-3 ひび割れ観察方法

3.3. 実験結果

3.3.1. 実験結果概要

表 3-4 に水セメント比および相対動弾性係数の異なる試験体の超音波伝播速度および圧縮強度，静弾性係数，ポアソン比，見かけの線膨張係数，ひび割れ密度の測定結果を示し，表 3-5 に W/C 40%の試験体に対して絶乾密度および表乾状態の含水率の測定結果を示す。なお，表 3-4 の DM 100 は相対動弾性係数および超音波伝播速度，静弾性係数のみ測定し，DM 100 以外の空欄は，試験体の損傷により測定ができなかったものである。

表 3-4 水セメント比および相対動弾性係数による測定結果

W/C	相対動弾性係数 (%)	超音波伝播速度 (m/s)	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	ポアソン比	見かけの線膨張係数 (×10 ⁻⁶ /°C)	ひび割れ密度 (本/mm)
40	100	5,147	55	34.6	-	-	-
	90	3,391	29	3.9	0.10	8.1	0.11
	80	3,019	32	8.1	0.06	10.6	0.09
	70	2,127	23	6.4	0.02	14.5	0.15
	60	2,646	26	1.8	0.11	19.4	0.25
60	100	4,772	29	28.8	-	-	-
	90	1,691	12	4.1	0.35	9.2	0.24
	80	1,299	15	1.4	0.18	14.8	0.29
	70	1,068	15	0.7	0.17	16.2	-
	60	1,071	4	0.7	0.60	31.4	-
60 (AE)	100	4,388	20	27.6	-	-	-
	90	3,243	18	3.3	0.07	3.6	0.09
	80	2,820	18	12.7	0.24	4.9	0.12
	70	2,494	20	5.7	-	5.2	0.14
	60	2,128	16	10.7	1.24	6.6	0.13

表 3-5 W/C 40%の劣化グレードによる測定結果

DM	相対動弾性係数 (%)	超音波伝播速度 (m/s)	圧縮強度 (N/mm ²)	絶乾密度 (kg/m ³)	表乾状態の含水率 (%)
100	100	4,702	49	2,450	5.7
	100	4,839	51	2,451	5.9
	100	5,256	39	2,457	5.8
90	94	4,500	51	2,441	6.0
	89	4,779	29	2,436	6.2
	87	3,783	44	2,439	5.9
80	79	4,694	37	2,453	5.9
	79	4,364	45	2,453	5.8
	77	3,910	19	2,443	5.8
70	69	4,535	40	2,451	6.1
	67	3,361	37	2,442	5.9
	66	4,308	41	2,428	6.2
60	58	3,838	33	2,445	6.0
	56	3,762	48	2,450	5.7
	55	3,323	23	2,450	-

3.3.2. 凍害劣化程度と圧縮強度および超音波伝播速度の関係

図 3-4 に劣化グレードと圧縮強度比の関係を示す。凍害劣化を受けたコンクリートの圧縮強度は健全なコンクリートより著しく減少した。また、劣化グレードが激しくなるほど圧縮強度も低下する傾向を示している。DM 90 の試験体において、W/C 40%および W/C 60%の圧縮強度比は 0.5 以下の値を示している。DM 60 の試験体においては、W/C 60%の圧縮強度比は 0.2 で、凍害劣化による圧縮強度の低下は W/C 60%が最も大きかった。しかし、W/C 60%(AE)の DM 60 の圧縮強度比は 0.8 で、W/C 40%および W/C 60%の試験体より凍害劣化による圧縮強度の低下が少なかった。

図 3-5 に超音波伝播速度と圧縮強度の関係を示す。DM 100 の圧縮強度は、W/C 40%、W/C 60%、W/C 60% (AE)の順で W/C 40%の圧縮強度が最も大きかった。超音波伝播速度は、全ての調合で DM 100 の試験体が 4 km/s 以上を示し、凍結融解作用を受けた試験体は、DM 100 の試験体より 30%以上減少した値を示している。W/C 40%および W/C 60%の超音波伝播速度と圧縮強度の関係は、両者に比例関係が認められる。W/C 60% (AE)の場合は、超音波伝播速度が低下しても、圧縮強度はほぼ一定の値を示した。これは、AE コンクリートが non AE コンクリートより耐凍害性が高いこと¹⁾および AE コンクリートにおける凍害劣化は、微細なひび割れが分散して発生していること²⁾が考えられる。

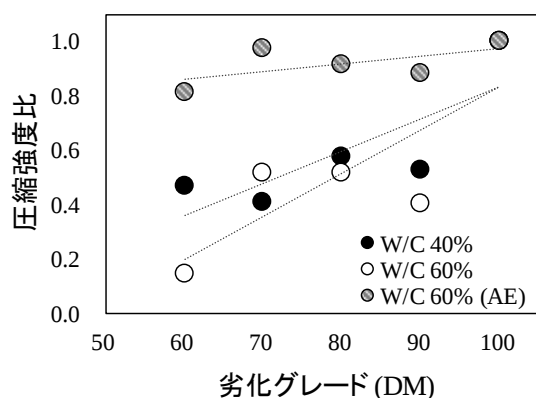


図 3-4 劣化グレードと圧縮強度比

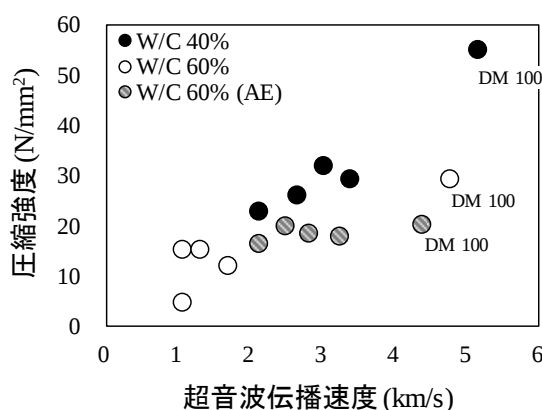


図 3-5 超音波伝播速度と圧縮強度

3.3.3. 凍害劣化程度と静弾性係数およびポアソン比の関係

図 3-6 に劣化グレードと静弾性係数の関係を示す。DM 100 の静弾性係数は、圧縮強度と同様に W/C 40%の静弾性係数が 35 kN/mm²で最も大きく、W/C 60%および W/C 60% (AE)の静弾性係数は 29 kN/mm²および 28 kN/mm²であった。凍害を受けた試験体の場合は、DM 100 の静弾性係数より顕著に減少し、各調合の DM 100 の半分以下の静弾性係数を示した。特に、DM 90 の場合は、同調合 DM 100 の静弾性係数の約 10%の値を示した。また、DM 80~DM 60 の静弾性係数は DM が小さくなるほど減少する傾向を示したが、W/C 60% (AE)の静弾性係数の値にはバラツキが大きかった。

図 3-7 に劣化グレードとポアソン比の関係を示す。DM 100 のポアソン比は測定しなかったが、既往の研究³⁾より、健全なコンクリートのポアソン比は 0.1~0.2 程度と考えられる。凍害劣化を受けたコンクリートのポアソン比は、0.1 以下の値を示すものと 0.2 を超える大きな値を示すものがあった。これは、圧縮加力時にひび割れが発生し、ひび割れの位置がゲージの位置と重なる場合に大きな値を示し、ゲージに重ならない場合、小さな値となるものと思われる。DM 60 の凍害劣化程度が激しい場合は、多数のひび割れがゲージと重なっていると考えられ、1.2 以上のポアソン比の値を示した。

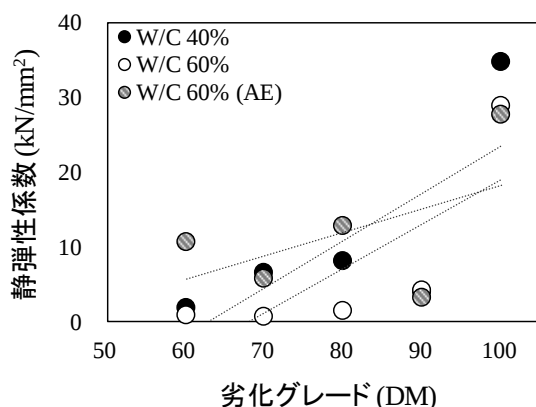


図 3-6 劣化グレードと静弾性係数

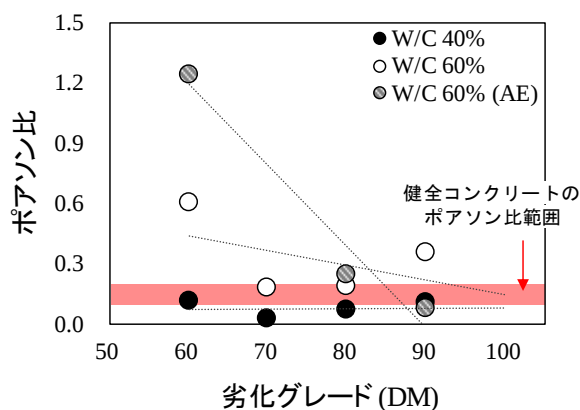


図 3-7 劣化グレードとポアソン比

3.3.4. 凍害劣化程度と見かけの線膨張係数およびひび割れ密度の関係

図 3-8 に劣化グレードと槽内温度変化時のコンクリートの見かけの線膨張係数の関係を示す。なお、見かけの線膨張係数の測定に用いた試験体の寸法が□75×100mm であるため、試験体内部に温度分布を生じていると考えられ、ここで使用する見かけの線膨張係数は、線膨張係数とは異なる値である。図より、凍害劣化程度が激しくなるほど槽内温度変化時の見かけの線膨張係数が大きくなる傾向が認められる。これは、凍害劣化程度が激しいほどコンクリートに微細ひび割れが多くなり、ひび割れ幅が温度変化で変化しているためと考えられる。なお、この見かけの線膨張係数の大きさは、全ての劣化程度でも 60% > 40% > 60% (AE) となっており、特に、W/C 60% の DM 60 の見かけの線膨張係数は、DM 90 の試験体に対して 3.5 倍の値に増加している。これは、水セメント比が大きいほどひび割れが多くなり、空気量の連行は、微細なひび割れを分散させて発生させる効果があるものと思われる。

図 3-9 にひび割れ密度と槽内温度変化時のコンクリートの見かけの線膨張係数の関係を示す。なお、W/C 60% の DM 70 および DM 60 のひび割れ密度は、試験体の損傷が大きく、ひび割れ密度の測定ができなかった。グラフ中のシンボルの大きさと DM の大きさを区分し、シンボルが大きいほど DM が大きいものである。図より、DM 100 の試験体は W/C 60% (AE) のひび割れ密度が最も小さく、W/C 40%、W/C 60% の順で W/C 60% のひび割れ密度が最も大きかった。また、ひび割れ密度と見かけの線膨張係数は比例関係を示しており、ひび割れ幅が温度変化で変化しているものと考えられる。また、W/C 60% (AE) は、連行された空気量によって DM が小さくなくてもひび割れが発生しにくく、凍害劣化程度が激しくなっても見かけの線膨張係数が大きく変化しなかったと考えられる。

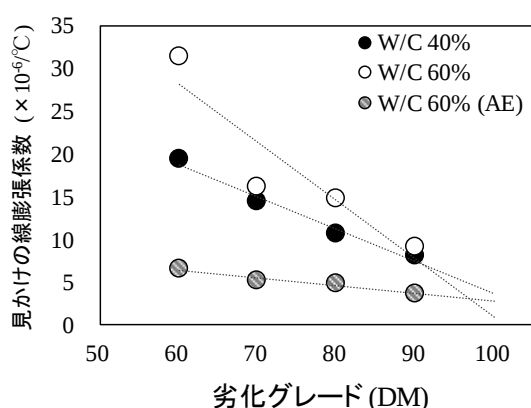


図 3-8 劣化グレードと槽内温度に伴う見かけの線膨張係数

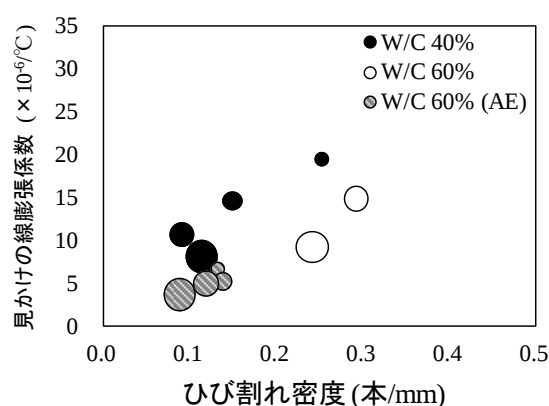


図 3-9 ひび割れ密度と槽内温度に伴う見かけの線膨張係数の関係

3.3.5. 凍害劣化程度と絶乾密度および含水率の関係

図 3-10 に劣化グレードとコンクリートの絶乾密度、図 3-11 に劣化グレードと表乾状態の含水率の関係を示す。グラフ中の黒いシンボルは白いシンボルを劣化グレードに区分して平均したものである。図より、凍害劣化したコンクリートの絶乾密度は DM 100 の絶乾密度より小さい値を示す傾向が認められるが、バラツキも大きくなっている。凍害劣化したコンクリートのひび割れの体積は小さいものと考えられる。一方、表乾状態のコンクリートの含水率は、バラツキが大きいが、凍害程度が激しくなるほど増加する傾向を示している。この結果から絶乾密度と湿潤時の含水率が反比例すると考えられ、劣化したコンクリートは、ひび割れ密度の増加によって絶乾密度が大きくなり、表乾状態の含水率が増加しているものと考えられる。

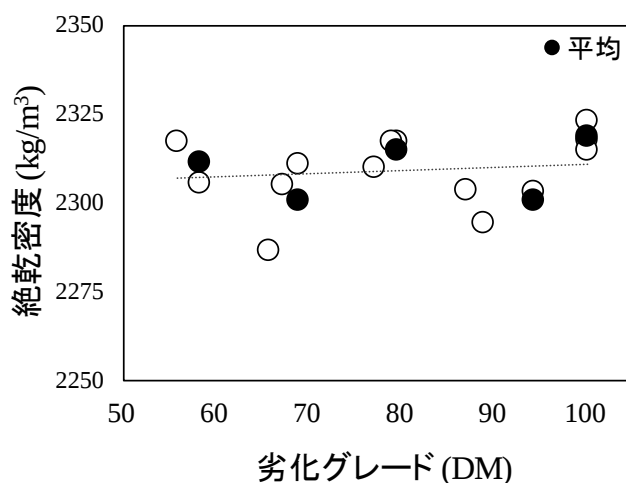


図 3-10 劣化グレードと絶乾密度

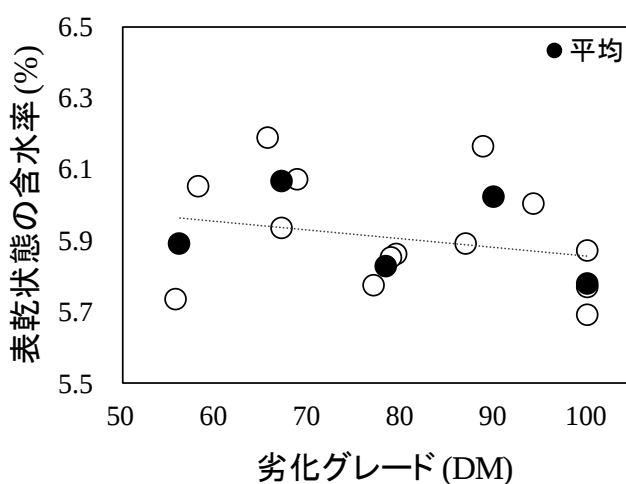


図 3-11 劣化グレードと表乾状態の含水率

3.4. 第3章の結論

本章では、耐凍害性の異なるコンクリートに対し、促進凍結融解試験を行い、凍害劣化を受けたコンクリートの性状を把握した。その結果、本章の範囲では次のような知見を得ることができた。

- (1) 凍害を受けたコンクリートの圧縮強度は、劣化程度が激しくなるほど減少する傾向を示すが、AE コンクリートの場合は強度減少の傾向が小さくなる。
- (2) 凍害を受けたコンクリートの超音波伝播速度は、劣化程度が激しくなるほど低下するが、AE コンクリートの場合は、凍害劣化による圧縮強度の変化が小さくても明確な低下傾向を示す。
- (3) 凍害を受けたコンクリートの静弾性係数は顕著に減少し、ポアソン比は著しく大きな値を示す場合と小さい値を示す場合がある。
- (4) 凍害を受けたコンクリートの見かけの線膨張係数およびひび割れ密度は、劣化の程度が激しいほど大きくなり、この傾向は、AE コンクリートより non AE コンクリートの方が顕著である。
- (5) 凍害を受けたコンクリートは、劣化の程度が激しいほど絶乾密度が小さくなり、表乾状態の含水率が大きくなる傾向を示す。

以上のことから、凍結融解作用を受けたコンクリートは、微細なひび割れによって各種性状が低下し、相対動弾性係数 90%程度の凍害劣化部分が取り残された断面修復コンクリートでも早期劣化する可能性があると考えられる。このため、実際のコンクリート構造物の補修時には凍害劣化部分を適切に評価する必要がある。

第 3 章の参考文献

- 1) 長谷川寿夫, 藤原忠司 : コンクリート構造物の耐久性シリーズ 凍害, 技報堂出版, pp. 99, 1988.2
- 2) VECCHIO, F. J. and COLLINS, M. P. : Compression response of cracked reinforced concrete, Journal of structural engineering, Vol.119, No.12, pp.3590-3610, 1993
- 3) James M. Gere and Barry J. Goodno : Mechanics of Materials, Cengage Learning, 2014
- 4) Backstrom, J. E., Burrows, R. W., Wolkodoff, V. E. and Powers, T. C. : Void spacing as a basis for producing air-entrained concrete, Journal of American Concrete institute, Vol.4, pp.760-761, 1954
- 5) 周藤将司, 緒方英彦, 石神暁郎, 佐藤智 : 凍害劣化の生じたコンクリートの力学特性および現地非破壊試験による動弾性係数の評価法に関する研究, 農業農村工学会論文集, Vol.84, No.3, pp.291-299, 2016.12

第4章 コンクリートおよび断面修復材の温度 変化に対するひずみ変化の検討

4.1. 概説

断面修復を行ったコンクリート構造物の断面修復部におけるひび割れの発生には、既設コンクリートおよび断面修復材の熱的挙動によるひずみ変化が影響していることが考えられる。なお、コンクリートおよび断面修復材に使われた材料や使用比率および使用環境における構造物の乾湿変化によって熱的性状が変わることが考えられる。

本章では、積雪寒冷地における断面修復コンクリートの早期劣化の事例に基づいて図 4-1 および以下のような二つの劣化原因を想定した。

- (a) 外気温度変化でコンクリートおよび断面修復材が異なるひずみを示す。
- (b) コンクリートと断面修復材の熱的性状が異なる。

(a)については、コンクリート構造物に補修を行うことはコンクリートと補修材が一体になるよう環境条件や既設コンクリートの条件を十分検討した上、補修材を選定する必要がある。しかしながら、既設コンクリートと断面修復材に熱挙動の差がある場合、断面修復材および既設コンクリートにひずみ差が発生すると考えられる。特に、日射の影響がある場合、部材表面の温度が急激に上昇することが多く、両材のひずみ差が大きくなり、既設コンクリートに拘束されている断面修復部にひび割れが発生することが考えられる。

(b)については、既設コンクリートと同様な線膨張係数の補修材を用いても、熱的性状が異なる場合、部材の中心部に行くほど両材の温度差が大きくなることが考えられる。このような場合、コンクリートー断面修復材の界面における両材のひずみ差が大きくなり、界面からの剥離発生が考えられる。

ここでは、断面修復部におけるひび割れ発生に着目し、コンクリートまたは断面修復材の含水状態、コンクリートの劣化程度、断面修復材の熱的性状の違いを考慮し、温度変化に対するコンクリートおよび断面修復材のひずみ変化について検討することを目的としている。

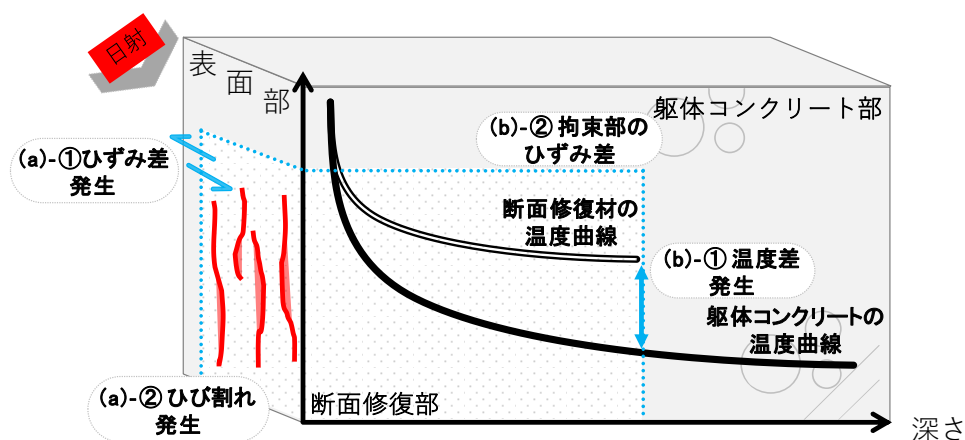


図 4-1 コンクリートと断面修復材のひずみ差による早期劣化

4.2. 実験の概要

本章では、コンクリートおよび断面修復材における長さのひずみについて次の 2 シリーズの実験を行った。

シリーズⅠ：凍害劣化程度の異なるコンクリートおよび断面修復材の温度変化によるひずみ変化

シリーズⅡ：凍害劣化程度の異なるコンクリートおよび断面修復材の温度変化

実験計画を表 4-1 に、各種コンクリートおよび断面修復材の調合および基礎性状を表 4-2 および表 4-3 に示す。また、図 4-2 および図 4-3 にひずみの測定方法および温度の測定方法を示す。

シリーズⅠでは、各種コンクリートおよび断面修復材の温度変化時のひずみ変化について検討を行う。コンクリートは W/C 40%および W/C 60%の non AE コンクリートと W/C 60%の AE コンクリートの 3 種である。これらは、 $\square 75 \times 400 \text{mm}$ の寸法で作製し、4 週間水中養生を行ったものであり、JISA 1148-A 法の水中促進凍結融解試験に準じて凍害劣化をさせたものである。コンクリートの劣化グレードは、相対動弾性係数（以下、DM）が 100, 90, 80, 70, 60（%）のものとした。ここで、DM 100 の試験体は水中促進凍結融解試験を行わない健全な状態のコンクリートである。DM 90～DM 60 のものは凍害劣化程度の異なるコンクリートである。また、DM 90～DM 60 の相対動弾性係数の範囲は、DM 90 が 95～85%、DM 80 が 85～75%、DM 70 が 75～65%、DM 60 が 65～55%である。断面修復材は市販の SBR 系ポリマーセメントモルタル（以下、PCM）およびレジンモルタル（以下、RM）の 2 種である。試験体は、 $\square 75 \times 100 \text{mm}$ の寸法で切り出したものであり、図 4-2 のようにひずみゲージを貼り付けてひずみを測定する。また、含水状態でひずみが変わるため、試験体は 60℃の乾燥炉で 1 週間乾燥させた後に測定を行った。測定環境は、20℃・3h～-20℃・3h / 1 サイクルのプログラム恒温槽内である。

表 4-1 実験計画

シリーズ	試験体条件				測定環境	測定項目
	区分	劣化グレード	寸法	含水状態		
Ⅰ	W/C 40% W/C 60% W/C 60% (AE)	DM 100 90 80 70 60	$\square 75 \times 100$ (mm)	乾燥状態	20℃・3h～-20℃・3h	ひずみ
	断面修復材	PCM RM				
Ⅱ	W/C 40%	DM 100 80 60	$\square 75 \times 50$ (mm)	乾燥状態 表乾状態	60℃・12h～10℃・12h	温度
	断面修復材	PCM RM				

シリーズⅡでは、コンクリートおよび断面修復材の温度変化について検討を行う。コンクリートは W/C 40%であり、DM 100 および DM 80, DM 60 のものを用いた。断面修復材は PCM および RM である。試験体は $\square 75 \times 50 \text{mm}$ のものであり、 60°C の乾燥炉で1週間乾燥させた乾燥状態および水中で1週間浸漬させた湿潤状態の2種の含水状態で測定を行った。ここでは、図 4-3 のように試験体の5面を断熱材で覆い、槽内側の表面と断熱側の表面および槽内側の表面から10mm離れた位置に熱電対を設置した。湿潤状態試験体の場合は乾燥防止のため、断熱材の設置部以外はポリエチレンシートでコンクリートの表面を覆った。なお、このような設定は、コンクリートまたは断面修復材の表面から流入する外気の熱が1次元に近い状態で移動する状況想定したものである。測定は、 $60^\circ\text{C} \cdot 12\text{h} \sim 10^\circ\text{C} \cdot 12\text{h} / 1$ サイクルのプログラム恒温槽内で行った。

表 4-2 コンクリートの調合および基礎性状

区分	W/C (%)	s/a (%)	単位質量 (kg/m ³)				AE 剤 (kg)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	耐久性指数
			W	C	S	G				
WC 40%	40	45.3	180	450	804	979	-	1.3	55	27.2
WC 60%	60	46.9	180	300	880	1,003	-	1.9	29	16.3
WC 60% (AE)	60	45.4	180	300	828	1,002	0.018	3.9	20	29.3

*C : セメント(普通ポルトランドセメント, 密度 : 3.16g/cm^3), S : 陸砂(表乾密度 : 2.67g/cm^3),
G : 砕石 (表乾密度 : 2.68g/cm^3)

表 4-3 断面修復材の調合及び各種性状

区分	質量比 (kg)		密度 (kg/m ³)	表乾状態の含水率 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	見かけの線膨張係数 ($\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)
	主材	硬化剤				
PCM	ビニロン繊維・軽量骨材配合プレミックスセメント(4)	カチオン性 SBR 系樹脂 (1)	1,357	7.2	37.2	4
RM	エポキシ樹脂 (2)	ポリアミドアミン・変性脂肪族ポリアミン・三級アミン (1)	780	0.7	21.0	41

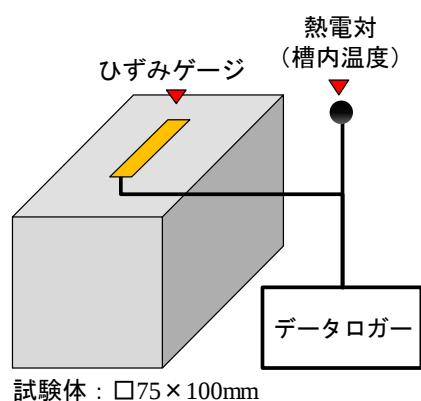


図 4-2 ひずみ測定方法

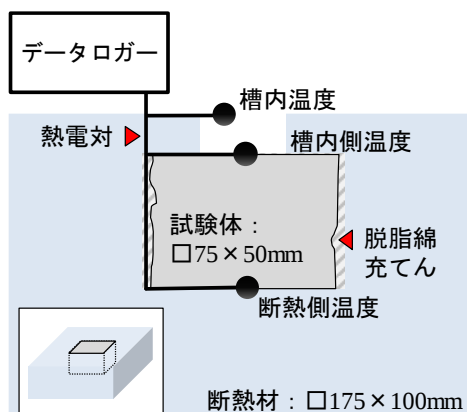


図 4-3 温度測定方法

4.3. 実験結果

4.3.1. シリーズⅠ：凍害劣化程度の異なるコンクリートおよび断面修復材の温度変化によるひずみ変化

図 4-4 および図 4-5、図 4-6 に槽内温度変化による各種コンクリートの劣化グレードによるひずみ変化を、図 4-7 に PCM および RM のひずみ変化を示す。また、各図の(a)に横軸に槽内温度を縦軸にコンクリートまたは断面修復材のひずみ変化を示す。(b)にコンクリートのひずみおよび槽内温度の経時変化を示す。

一般にコンクリートの線膨張係数は $7 \sim 14 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ とされている¹⁾。AE コンクリートの DM 90 の見かけの線膨張係数は $3.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ で健全なコンクリートより小さな値と示すが、non AE コンクリートは $8.1 \sim 9.14 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ で健全なコンクリートの線膨張係数の範囲を示した。なお、劣化グレードが小さいほどひずみ変化が大きくなる傾向を示す。これは、凍害劣化程度が激しくなるほどひび割れ密度が大きくなることから、ひび割れの幅が温度変化によって変化していることが考えられる。

水セメント比で比較すると、同じ劣化グレードにおいて W/C 40%より W/C 60%のひずみ変化が大きくなったが、これは同 DM でも W/C 60%のひび割れの発生や組織の緩みが著しいためと考えられる。W/C 60% (AE)の場合は、劣化グレードが小さくてもひずみ変化が非常に小さく、DM 60 のひずみは W/C 40%および W/C 60%の DM 70, DM 60 よりも小さい変化幅を示している。これは、W/C 60% (AE)の耐久性指数が最も大きく（表 4-2 参照）、凍結融解作用による圧縮強度の低下およびひび割れ密度の増加が小さいことが原因と考えられる。

PCM および RM の見かけの線膨張係数は、それぞれ $4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ および $41 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ であり、一般的なコンクリートの線膨張係数の半分および 4 倍程度の値を示している。また、槽内温度変化によるひずみ変化は、PCM が $-200\mu\epsilon$ 、RM が $-1000\mu\epsilon$ となり両方とも DM 90 より大きい変化幅を示した。特に、RM のひずみ変化は W/C 60%の DM 60 よりもひずみ変化の幅が大きかった。このことから、コンクリートと線膨張係数が大きく異なる断面修復材が使用されているものと思われる。

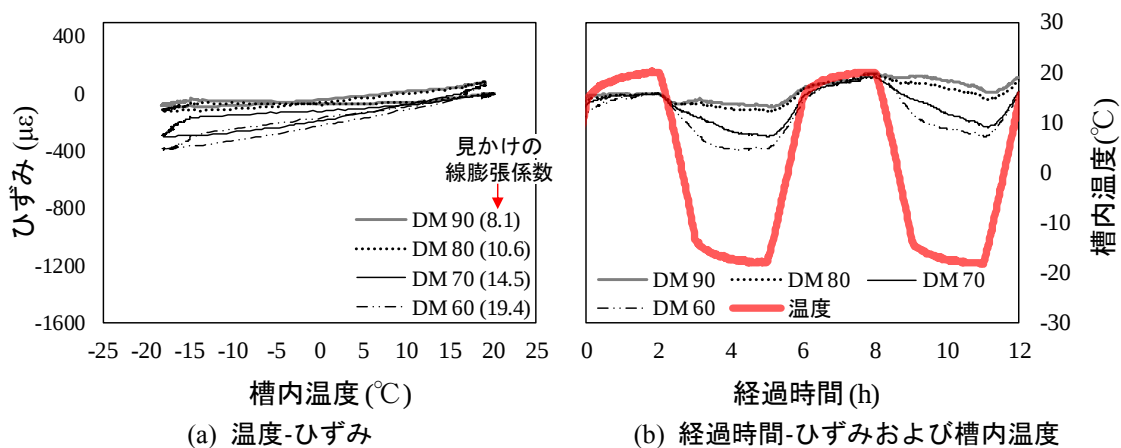


図 4-4 W/C 40%のひずみ

なお、PCM および W/C 40%と W/C 60%の DM 90 のひずみは槽内温度が融解過程から凍結過程に進んでも一定の時間までひずみの増加を示している。これは、試験体の中心部と槽内の温度変化に時間差があることが考えられる。特に PCM および RM の場合はこの時間差が大きく、材料内部に温度分布が生じていると考えられる。

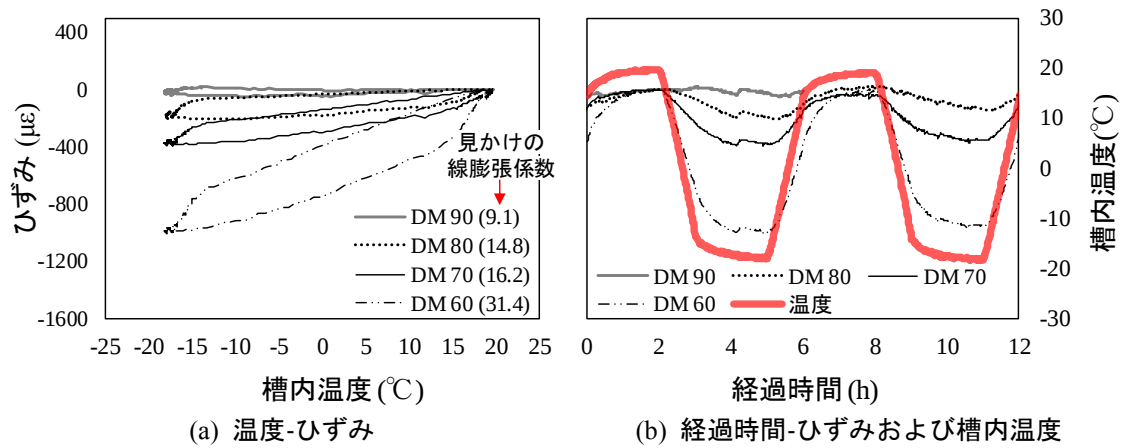


図 4-5 W/C 60%のひずみ

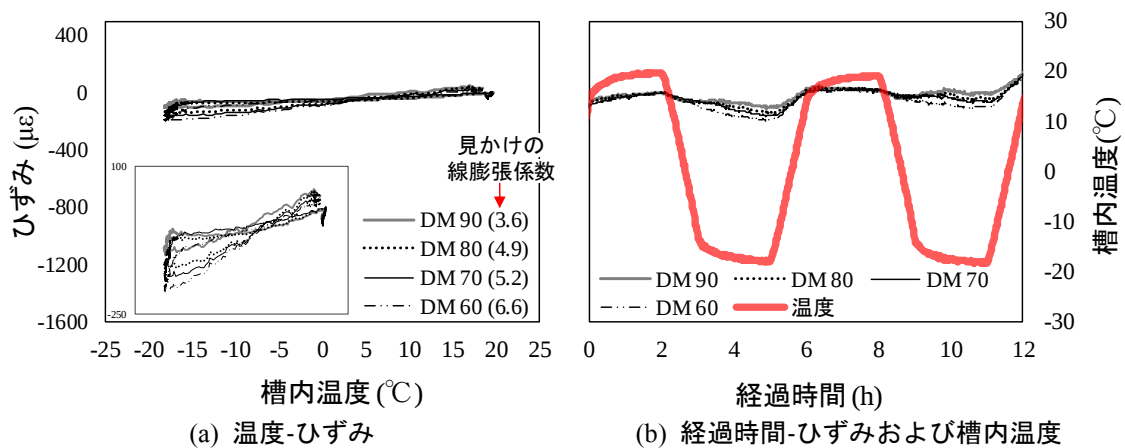


図 4-6 W/C 60% (AE)のひずみ

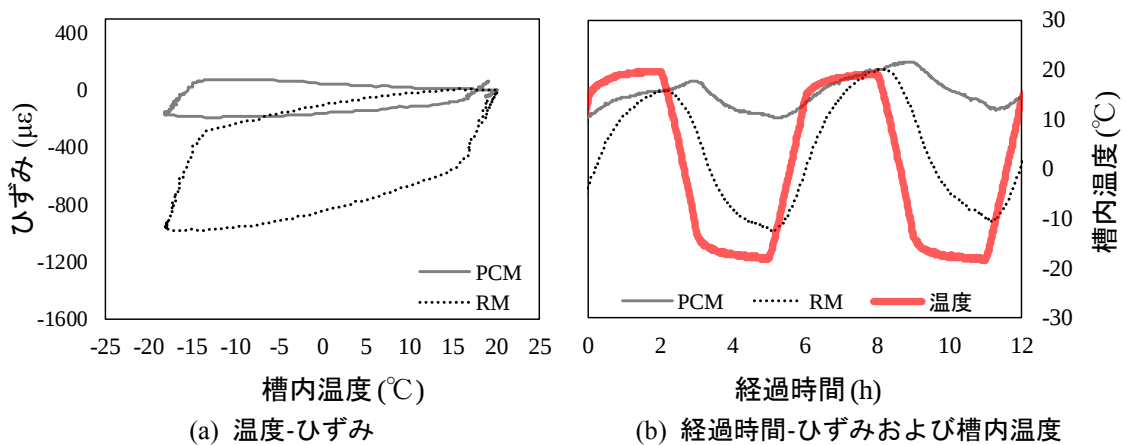


図 4-7 断面修復材のひずみ

4.3.2. シリーズⅡ：凍害劣化程度の異なるコンクリートおよび断面修復材の温度変化

図 4-8 および図 4-9, 図 4-10 に槽内温度変化によるコンクリートの両側表面の温度変化を示し, 図 4-11 および図 4-12 に PCM および RM の両側表面の温度変化を示す。なお, (a)に乾燥状態試験体の槽内温度, 槽内側および断熱側の表面温度の経時変化を示し, (b)に湿潤状態試験体の同様の経時変化を示す。また, 乾燥状態および湿潤状態試験体の槽内側表面温度と槽内温度の差を(c)に示すが, この差が大きいことは槽内の空気と試験体表面との対流による熱移動が容易でないものと考えられる。乾燥状態および湿潤状態試験体の槽内側表面と断熱側表面の温度差は(d)に示すが, この値が小さいほど試験体中の熱移動が容易であると考えられる。

各劣化グレードのコンクリートおよび PCM と RM の槽内と槽内側表面の温度変化は, 乾燥状態試験体より湿潤状態試験体の温度差が大きくなり, コンクリートあるいは断面修復材の表面は湿潤状態の方が温度変化しにくいことがわかる。一般的にコンクリートの比熱が $653 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ に対して水の比熱は $4180 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ であるため¹²⁾, 熱容量の違いが原因と考えられる。

各試験体の槽内側表面と断熱側表面の温度差は, DM 80 を除き既往の研究³⁾と同様に乾燥状態より湿潤状態の温度差が小さくなり, コンクリートあるいは断面修復材は水分を含むと熱移動がしやすくなることがわかった。これは, 一般に空気熱伝導率が $0.025 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ であり, 水の熱伝導率が $0.6 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ であることから¹⁴⁾, 試験体中の空隙が水分で満たされる場合, 熱移動がしやすくなると考えられる。

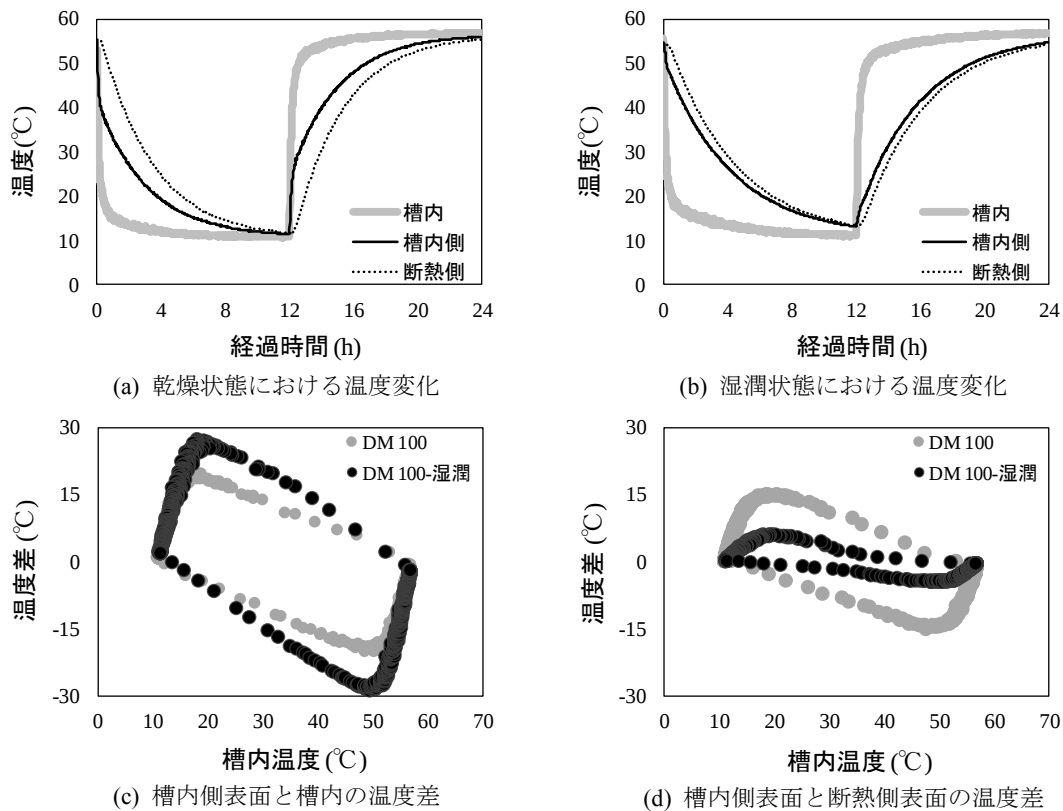


図 4-8 DM 100 の温度変化

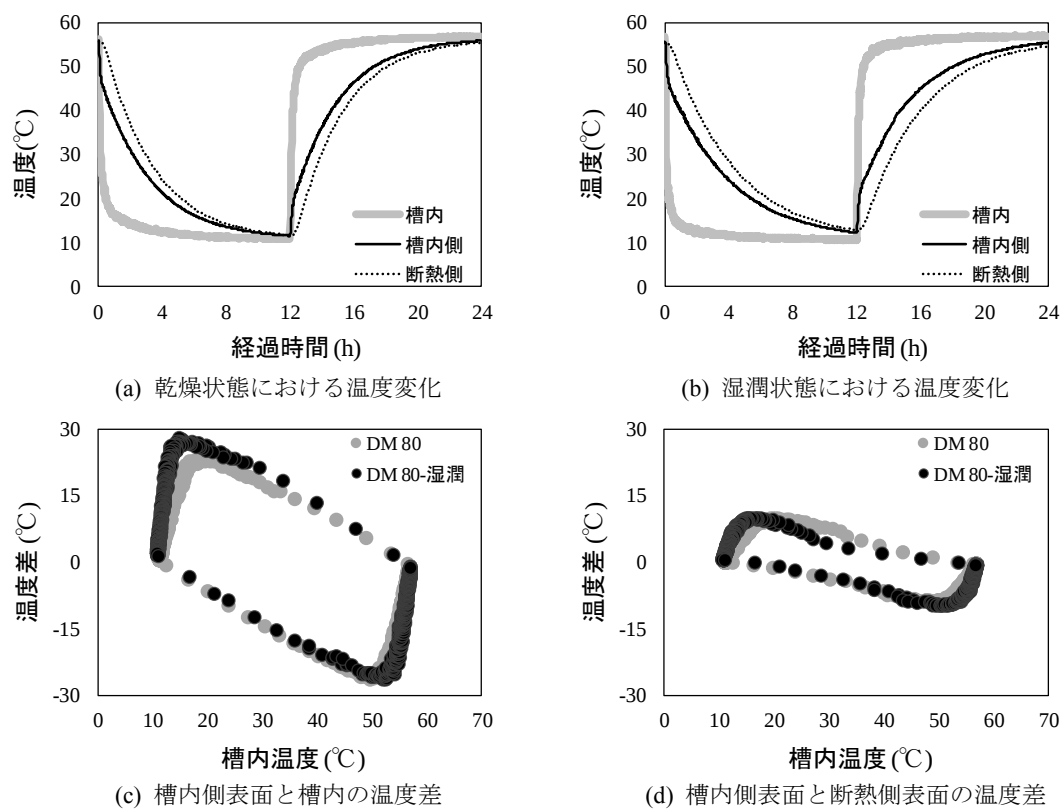


図 4-9 DM 80 の温度変化

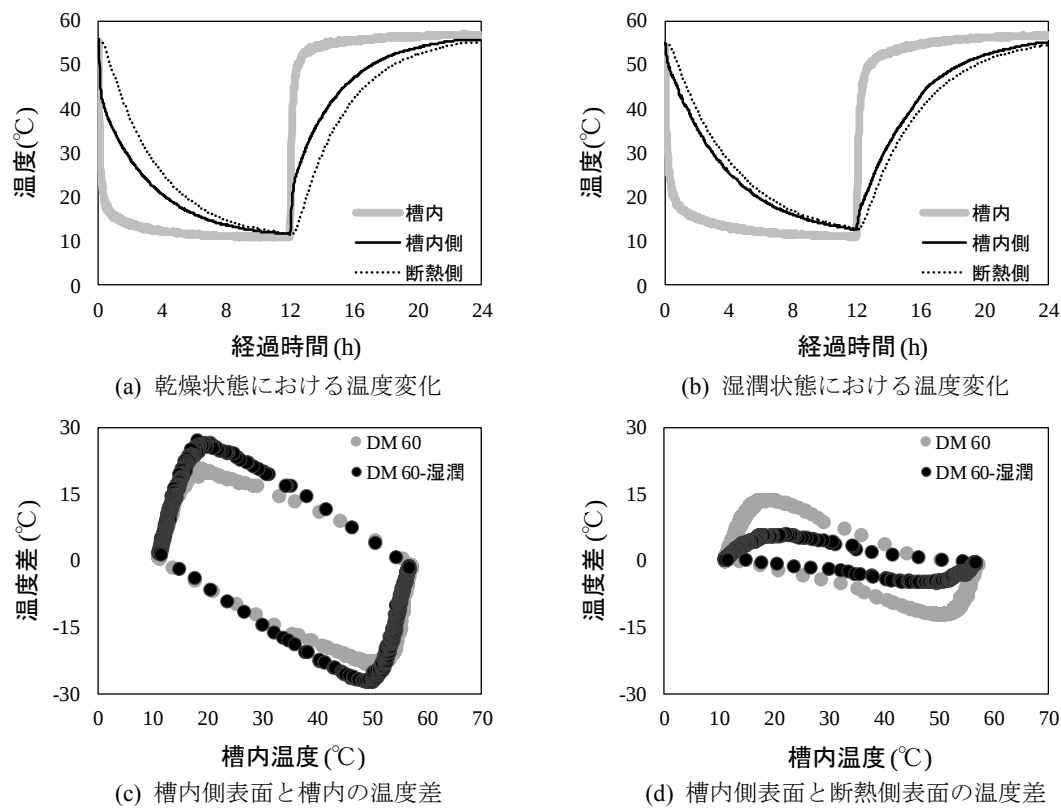
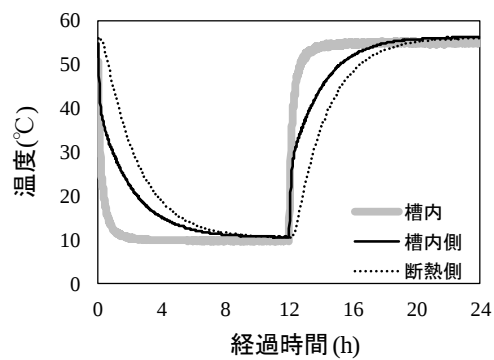
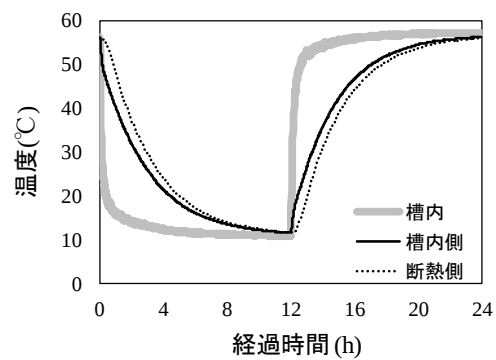


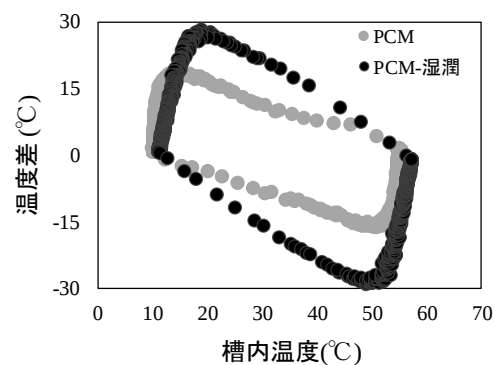
図 4-10 DM 60 の温度変化



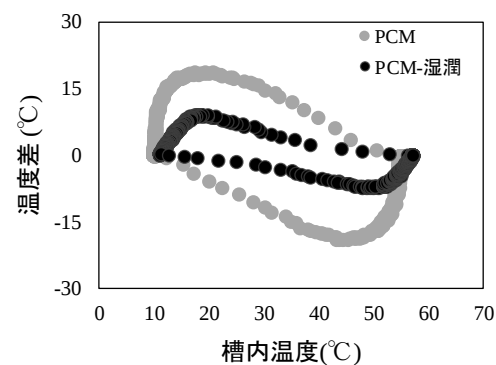
(a) 乾燥状態における温度変化



(b) 湿潤状態における温度変化

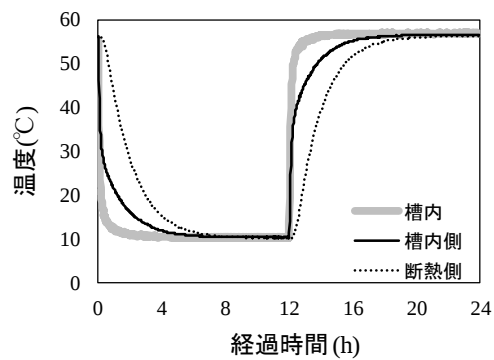


(c) 槽内側表面と槽内の温度差

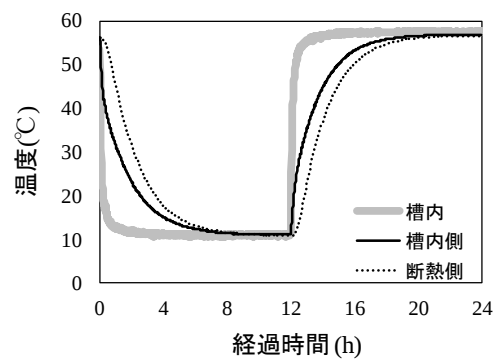


(d) 槽内側表面と断熱側表面の温度差

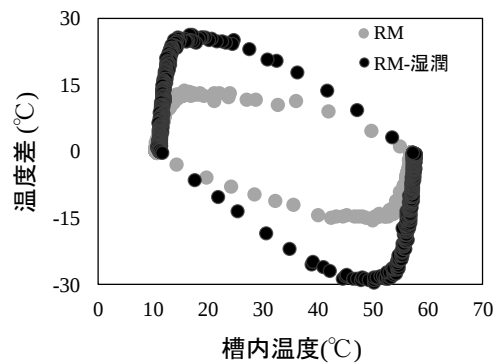
図 4-11 PCM の温度変化



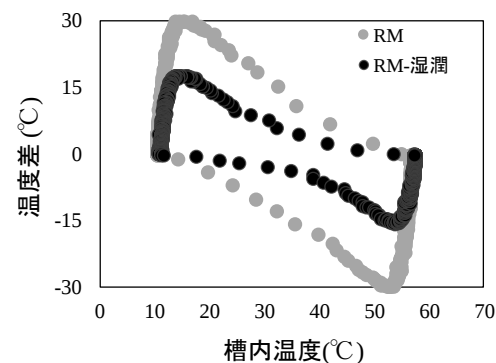
(a) 乾燥状態における温度変化



(b) 湿潤状態における温度変化



(c) 槽内側表面と槽内の温度差



(d) 槽内側表面と断熱側表面の温度差

図 4-12 RM の温度変化

図 4-13 に乾燥状態および湿潤状態のコンクリートにおける槽内温度下降区間（経過時間 0 ～ 12h）の槽内側表面と断熱側表面の温度差を示す。乾燥状態試験体の場合、DM 100 の槽内側表面と断熱側表面の最大温度差が 15℃ であり、最も大きい値を示している。促進凍結融解試験を行った DM 80 および DM 60 はやや小さな温度差となり、DM 80 の最大温度差が最も小さい値を示した。一方、湿潤状態の試験体の場合は、乾燥状態の試験体より最大温度差が減少し、DM 100 と DM 60 が同様な最大温度差を示し、DM 80 の最大温度差が 10℃ で最も大きい値を示している。これは、コンクリート中の水分がコンクリートの温度変化に影響していることが考えられる。

図 4-14 に DM 100 および PCM と RM の槽内温度下降区間（経過時間 0 ～ 12h）の槽内側表面と断熱側表面の温度差を示す。その結果、乾燥状態および湿潤状態両方とも DM 100 のコンクリートより断面修復材の温度差が大きく、断面修復材よりコンクリートの熱移動による温度変化が容易であることがわかる。また、PCM より RM の温度差は大きくなった。これは、RM の絶乾密度が 780 kg/m³ であり、PCM の絶乾密度が 1,357 kg/m³ であるため、RM の空隙の量が PCM より多いことが考えられる。

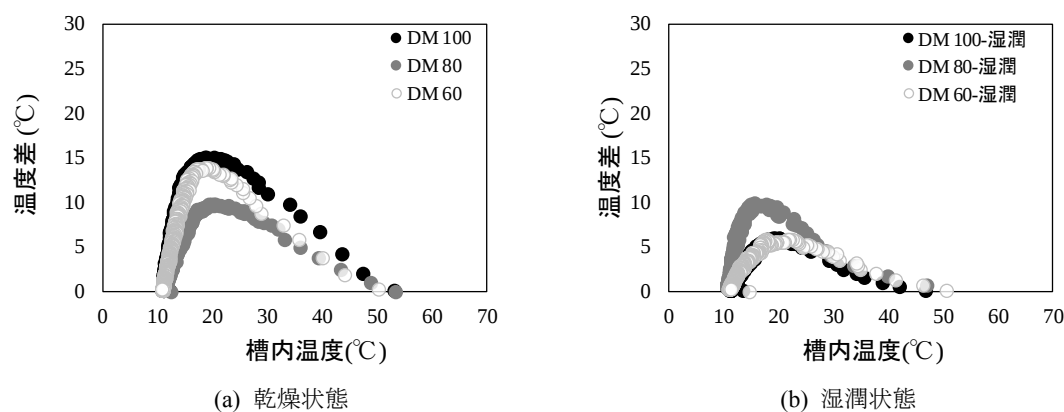


図 4-13 コンクリートの熱移動による温度変化

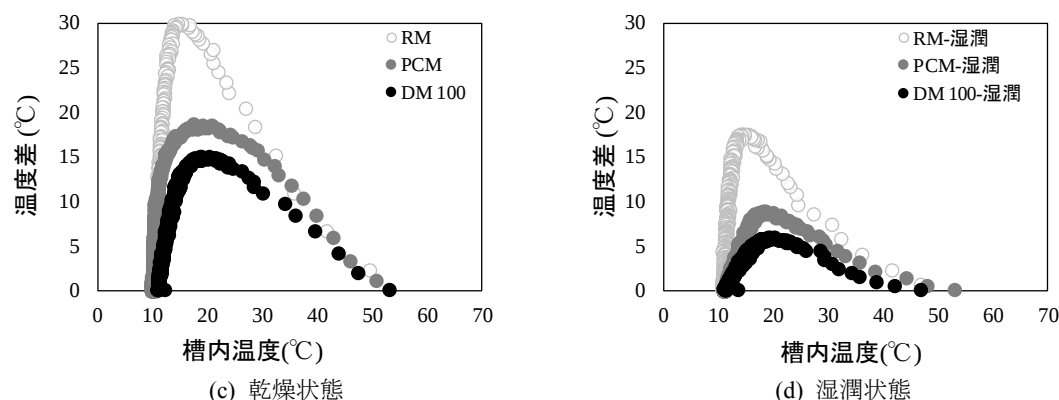


図 4-14 コンクリートおよび断面修復材の熱移動による温度変化

4.4. 第 4 章の結論

本章では、断面修復コンクリートの早期劣化の原因をコンクリートと断面修復材の温度変化によるひずみ差と想定し、外部環境の温度変化時の材料の温度変化およびひずみ変化を把握するために二つのシリーズの実験を行った。その結果、本章の範囲では次のような知見を得ることができた。

- (1) 槽内温度変化時のコンクリートの見かけの線膨張係数は、相対動弾性係数が 90%程度の場合一般的なコンクリートの線膨張係数 ($7 \sim 14 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) と同等であるが、凍害劣化程度の激しいものほど大きな見かけの線膨張係数を示す。また、凍害劣化による見かけの線膨張係数の変化は、non AE、高水セメント比のものほど大きく、non AE・W/C 60%・相対動弾性係数 60%で $31.4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 程度の値を示した。
- (2) 槽内温度変化時の断面修復材の見かけの線膨張係数は、一般的なコンクリートの線膨張係数に対してポリマーセメントモルタルは半分程度、レジンモルタルは 4 倍程度の値を示した。
- (3) 槽内温度変化によるコンクリート表面および断面修復材表面の温度変化は、乾燥状態より湿潤状態の方が遅くなる。
- (4) 槽内温度変化によるコンクリートの材料内部の熱移動は、乾燥状態よりも湿潤状態の方が速い。絶乾状態の場合の熱移動は健全なコンクリートよりも凍害劣化したコンクリートの方が速く、湿潤状態の場合の熱移動は、凍害劣化したコンクリートと健全なコンクリートが同様である。
- (5) 槽内温度変化による断面修復材の材料内部の熱移動は、絶乾状態の熱移動の速度が湿潤状態よりも遅く、健全なコンクリートよりも断面修復材の熱移動の速度が遅くなる。

以上の結果から、コンクリートは劣化程度・含水状態によって見かけの線膨張係数・熱的性状が大きく変化する。また、断面修復材の見かけの線膨張係数・熱的性状は、コンクリートのそれと大きく異なるものがある。このため、これらの性状の差異によって断面修復材にひび割れおよび界面に剥離が生じることが考えられる。今後、実環境における材料の組み合わせ、含水状態、温度変化等を考慮し、断面修復材のひび割れ発生条件を明確にする必要がある。

第 4 章の参考文献

- 1) 理科年表 平成 27 年：国立天文台，2015
- 2) American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers : SHRAE Handbook: Fundamentals Volume, Atlanta, 1993
- 3) Kook-Han Kim, Sang-Eun Jeon, Gi-Sung Bang, Jin-Keun Kim : Experimental Study on Thermal Conductivity of Concrete, Journal of the Korea Concrete Institute, Vol.13, No.4, pp.305-313, 2001
- 4) 平成 28 年省エネルギー基準解説書編集委員会：平成 28 年省エネルギー基準に準拠した算定・判断の方法および解説，一般財団法人建築環境・省エネルギー機構，2017
- 5) 鎌田英治：コンクリートの凍害と細孔構造，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.10, No.1, pp.51-60, 1988.6

第5章 積雪寒冷地を想定した断面修復コンクリート中の物質移動に関する実験的検討

5.1. 概説

第2章で取り上げた断面修復コンクリートにおけるエフロレッセンスおよび錆汁は、断面修復を行った鉄筋コンクリート構造物の内部から外部への物質移動があることを示唆している。なお、積雪寒冷地における断面修復コンクリートの劣化現象は凍害だけでなく、融雪剤による塩害と凍害の複合劣化が生じていることが考えられ、補修前のコンクリート構造物と同様の劣化環境に曝されることになる。

本章では、積雪寒冷地における断面修復コンクリートの早期劣化の事例および鉄筋コンクリート構造物の劣化現象に基づいて図5-1 および以下のような三つの劣化原因を想定した。

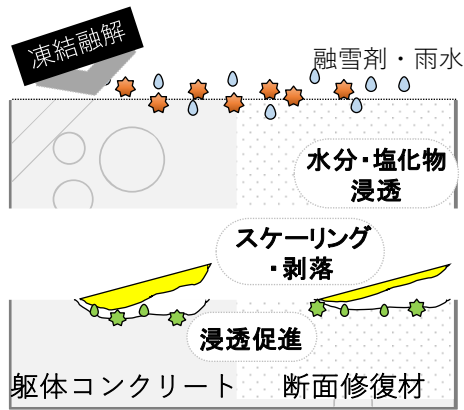
- (a) 凍結融解環境下でコンクリートの表面または断面修復材の表面から水分・塩化物が浸透する。
- (b) 凍結融解環境下でコンクリートー断面修復材の界面から水分・塩化物が浸透する。
- (c) 断面修復時にコンクリートに水分・塩化物が残留している。

(a)は、積雪寒冷地では塩化物系の融雪剤が多く使用されており、断面修復コンクリートが塩化物イオンの侵入と同時に凍結融解の繰返しを受けることで、躯体コンクリートまたは断面修復材の表層部において塩化物イオンの濃縮現象¹⁾が起きることや、凍結押込み力による水分・塩化物の移動、浸透圧増加によりスケーリングあるいはひび割れなどの凍害劣化が激しく促進されることが考えられる。

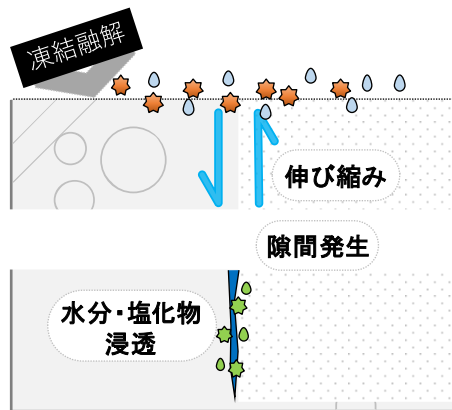
(b)は、コンクリートー断面修復材の界面が劣化因子の浸透経路となるものである。これは、外部環境の気温変化、乾湿繰返しなどで断面修復材と躯体コンクリートが異なる伸び縮みを示し、両材の界面にひび割れあるいは隙間が発生して断面修復コンクリートの界面から水分や塩化物などの劣化因子が浸透するものである。また、凍結融解による水分の膨張により隙間の幅を拡張させて界面からの物質移動を促進させることも考えられる。

(c)は、劣化したコンクリートにはつり作業や脱塩作業が十分実施されていない状態で断面修復を行うことにより、躯体コンクリートに塩化物イオンおよび水分が残留する場合である。このような場合、断面修復後の凍結融解作用により塩化物が鉄筋の付近へ移動し鉄筋のマクロセル腐食を促進させることが考えられる。

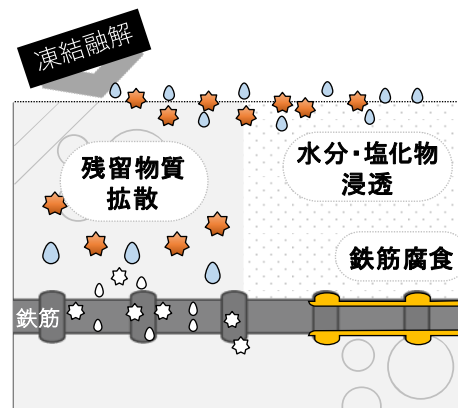
ここでは、積雪寒冷地の厳しい環境の断面修復コンクリートにおける物質移動に着目し、断面修復材と躯体コンクリート、またはこれらの界面における水分・塩化物の移動現象について検討を行い、これらの物質移動による断面修復コンクリートの早期劣化メカニズムを明らかにすることを目的としている。



(a) 表面から浸透



(b) 界面から浸透



(c) 劣化因子の残留

図 5-1 物質移動による早期劣化

5.2. 実験の概要

5.2.1. 実験計画

本章では、断面修復コンクリートにおける物質移動について次の3シリーズの実験を行った。

シリーズⅠ：コンクリート・断面修復材の表面および両者の界面における片面吸水試験による水分移動性状

シリーズⅡ：コンクリート・断面修復材の界面における塩水片面吸水試験および塩水片面吸水凍結融解試験による劣化状況および水分移動性状

シリーズⅢ：塩化物残留コンクリートに断面修復材を補修した場合の断面修復面における塩水片面吸水試験および塩水片面吸水凍結融解試験による塩化物イオンの移動性状

実験計画を表5-1に、実験条件を表5-2に、コンクリートおよび断面修復材の調合および基礎性状を表5-3および表5-4に示す。また、本章の実験フローを図5-2に示す。

シリーズⅠでは、躯体コンクリートと断面修復材の表層部および断面修復コンクリートの界面からの水分移動状況について検討を行う。コンクリートはW/C 40%であり、促進凍結融解試験で劣化程度を変えたもの（相対動弾性係数（以下、DM）が100, 90, 80, 70, 60（%）のもの）を用いた。ここで、DM 100は断面修復時にはつり作業が完全に行われた健全な状態を想定し、DM 90～60ははつり作業が不十分な状態で断面修復材を施工した状態を想定した。断面修復材はSBR系のポリマーセメントモルタル（以下、PCM）を用いた。試験体の形状は単一体であるAタイプおよび、コンクリートと断面修復材の複合体であるBタイプのものを用いた。これは、コンクリートおよびPCMの表層部からの水分移動および断面修復コンクリートの界面からの水分移動を把握するため作製したものであり、両タイプとも60℃の環境で1週間乾燥させ、この時の含水率を0%とした。片面吸水試験は、20℃、R.H 60%の恒温恒湿条件で行った。測定項目は、試験体の質量および電極の比抵抗である。これは、片面吸水試験時の試験体全体の含水率変化や試験体の吸水面から50mmの高さ（センサー位置）の含水率変化を比較するために測定したものである。なお、測定は、片面吸水開始時点（0D）から8日（8D）まで24時間間隔で行った。

シリーズⅡでは、凍結融解作用の有無の条件で断面修復コンクリートの界面から塩化物を含んだ水分の移動状況について検討する。躯体コンクリートはW/C 40%でDMが100, 90, 80, 70, 60（%）であり、断面修復材はPCMを用いた。試験体形状はBタイプである。試験体は、塩水片面吸水試験などを行うまで1週間気中乾燥させた。試験は塩水片面吸水試験（20℃、R.H 60%の恒温恒湿室内）、塩水片面吸水凍結融解試験（20℃・3h～-20℃・3h）および乾燥の影響を考慮した塩水片面吸水凍結融解試験（60℃・6h～-20℃・18h）（以下、塩水片面吸水凍結融解試験（60℃乾燥））の3種類のものを行った。なお、ここでは3wt%の塩水を用いたが、凍結防止剤等による塩化物イオンの浸透を想定したものである。測定項目は、超音波伝播速度およびスケリング高さ、比抵抗である。ここで、超音波伝播速度は躯体コンクリートとPCMを通過する部分を測定

することで断面修復コンクリートの界面における剥離の発生を把握できるものと考えられる。スケーリング高さは躯体コンクリート部分のスケーリング高さであり、片面吸水凍結融解および温冷乾湿による水分の吸上げ高さによって影響を受けるものと思われる。これらの測定項目は、片面吸水時点から 0, 12, 28, 56, 112 サイクル目に測定を行い、塩水片面吸水凍結融解試験は 4 サイクル/1 日の条件で測定を行い、塩水片面吸水凍結融解試験（60℃ 乾燥）は 1 サイクル/1 日の条件で 12 サイクルのスケーリング高さのみ測定を行った。また、比抵抗の測定は断面修復コンクリートの界面における水分量の変化を確認するために行い、1 日毎に試験体の吸水面から 10mm の間隔で 50mm までの位置で測定を行った。

シリーズⅢでは、塩化物残留コンクリートに断面修復材を用いて補修した断面修復コンクリートにおいて断面修復材と躯体コンクリート間の塩化物を含んだ水分の移動状況に凍結融解作用が及ぼす影響について検討を行う。補修前に躯体コンクリートは、3.5wt%の塩水で片面吸水試験および片面吸水凍結融解試験を行った。これらの条件は、補修の前処理（脱塩）が不足したまま断面修復し、補修後の凍結融解作用により部材内部で塩化物の移動や拡散があることを想定したものである。断面修復材は耐凍害性や緻密性の違いが躯体コンクリートに残留していた水分や塩化物イオンの拡散に影響を与えると考え、PCM および PCM に対して比較的に耐凍害性が低く、塩化物浸透抑制効果が小さいと考えられるセメントモルタル（以下、CM）を用いた²⁾。試験体形状は C タイプの複合体であり、塩水を吸水させた躯体コンクリートの吸水面に断面修復を行い、5 日間気中乾燥した。試験方法は、塩水片面吸水試験（20℃, R.H 60%の恒温恒湿室内）および塩水片面吸水凍結融解試験（20℃・1.5h～-20℃・2.5h）の 2 種類であり、各試験体は補修前のコンクリートと同様の方法で塩水片面吸水試験または塩水片面吸水凍結融解試験を行った。測定項目は、比抵抗および塩化物イオン含有量であり、比抵抗からは質量含水率を導出した。これらの測定部は、吸水面から 15mm の間隔で 60mm までである。層として分割する間隔は、電極を埋め込める厚さの限界値として 15mm とした。また、比抵抗および塩化物イオン含有量の測定は、断面修復を行う前（1stD）および片面吸水時点から 7, 14, 21, 28 日目に計 5 回測定を行った。

表 5-1 実験計画

シリーズ	試験方法	試験条件	測定項目
I	片面吸水試験 - 20℃, R.H 60%	コンクリート劣化グレード 試験体形状 断面修復材	質量 比抵抗
II	塩水片面吸水試験 - 20℃, R.H 60% (塩水 3wt%) 塩水片面吸水凍結融解試験 - 20℃・3h～-20℃・3h (塩水 3wt%) 塩水片面吸水凍結融解試験 (60℃ 乾燥) - 60℃・6h～-20℃・18h (塩水 3wt%)		超音波伝播速度 スケーリング高さ 比抵抗
III	塩水片面吸水試験 - 20℃, R.H 60% (塩水 3.5wt%) 塩水片面吸水凍結融解試験 - 20℃・1.5h～-20℃・2.5h (塩水 3.5wt%)		比抵抗 塩化物イオン含有量

表 5-2 実験条件

シリーズ	コンクリート		断面修復材	乾燥方法	試験体 (形状；吸水面)	測定高さ (mm)
	W/C	劣化グレード				
I	40%	DM 100 90 80 70 60	PCM	60℃ 乾燥	コンクリート (A；下面) 断面修復材 (A；下面) 複合体 (B；界面)	50 (5F)
II	40%	DM 100 90 80 70 60	PCM	気中乾燥	複合体 (B；界面)	0～10 (1F) 10～20 (2F) 20～30 (3F) 30～40 (4F) 40～50 (5F)
III	50%	塩分含有 塩分含有・軽微凍害劣化	CM PCM	気中乾燥	複合体 (C；断面修復材の下面)	0～15 (1F) 15～30 (2F) 30～45 (3F) 45～60 (4F)

*DM：相対動弾性係数，PCM：ポリマーセメントモルタル，CM：セメントモルタル

*試験体形状

A タイプ：



B タイプ：



C タイプ：



表 5-3 コンクリートの調合および基礎性状

区分	W/C (%)	s/a (%)	単位質量 (kg/m³)				空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm²)	全塩化物イオン含有量 (kg/m³)
			W	C	S	G			
W/C 40%	40	45.3	180	450	804	979	2	54.7	-
W/C 50%	50	44.4	185	370	816	1,025	0.9	39.6	0.15

*C：セメント(普通ポルトランドセメント，密度：3.16g/cm³)，S：陸砂(表乾密度：2.67g/cm³)，

G：碎石 (表乾密度：2.68g/cm³)

表 5-4 断面修復材の調合および基礎性状

区分	質量比 (kg)					プライマー量 (kg/m²)	密度 (kg/m³)	圧縮強度 (N/mm²)	全塩化物イオン含有量 (kg/m³)
	主材	硬化剤	W	C	S				
PCM	4	1	-	-	-	0.3～0.5	1,315	37.2	3
CM	-	-	1	2	4.5	-	2,147	19	0.3

*主材：ビニロン繊維・軽量骨材配合プレミックスセメント，硬化剤：カチオン性 SBR 系樹脂

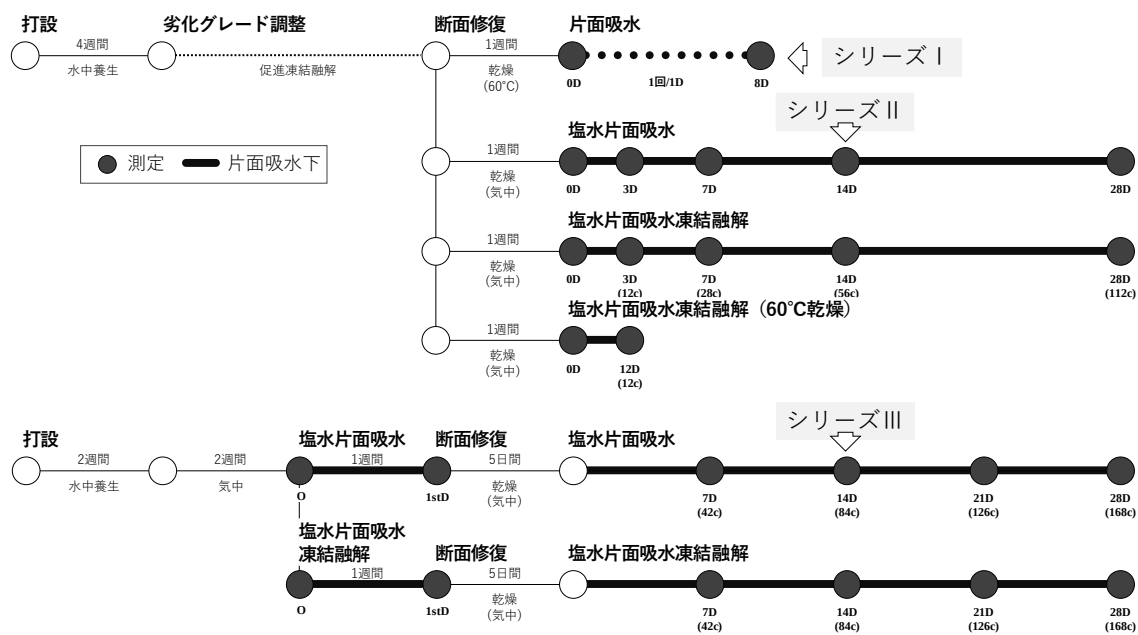


図 5-2 実験フロー

5.2.2. 実験方法

A タイプ試験体の概念図を図 5-3 に示す。コンクリートは 4 週間水中養生を行い、所定の相対動弾性係数（以下、DM）になるまで促進凍結融解試験を行ったものを用いた。これらは、試験体の端部から 50mm までの部分を切断し、切断面から $\phi 75 \times 100\text{mm}$ の寸法になるように切り出したものを試験体とした（図 5-3 の(a)）。試験体は DM ごとに 3 体ずつ作製した。また、断面修復材は同様の形状のものを作製し、4 週間気中養生したものを用いた。電極は、図 5-3 の(b)のように試験体の吸水面に平行方向に固定させた。なお、電極を押さえる力により比抵抗が変わるため電極両側にクランプを用いて一定の力で押さえた。片面吸水試験では、図 5-3 の(c)のように切断面を吸水面として試験体を静置し、試験を行った。これらの試験体は、断面修復材は 1 体、コンクリートは劣化グレード毎に 3 体ずつ計 16 体を作製した。

B タイプ試験体の概念図を図 5-4 に示す。躯体コンクリートは図 5-4 の(a)のように各相対動弾性係数ごとに $75 \times 37.5 \times 100\text{mm}$ の寸法で切り出し、切断前の外側であった面を修復面として図 5-4 の(b)のように断面修復材を施工した。すなわち、補修界面に平行方向になるよう電極と熱電対を固定させ、断面修復材を試験体の寸法が $\phi 75 \times 100\text{mm}$ になるように打ち込んだ。ここで、プライマーは絶縁性があると考えられたため、使用しなかった。施工後、 $\phi 75\text{mm}$ の寸法の面を吸水面とし、修復界面が見える側面にはエポキシを塗ることで側面の修復界面から塩水が浸透しないように防水処理した。その後、図 5-4 の(c)のように試験体を配置し、各試験条件で片面吸水試験などを行った。これらの試験体は、コンクリートの劣化グレードおよび試験条件毎に 3 体ずつ計 45 体を作製した。

C タイプ試験体の概念図を図 5-5 に示す。躯体コンクリートは 2 週間水中養生・2 週間気中養生を行ったコンクリートを $\phi 100 \times 40\text{mm}$ の寸法に切り出したものを用いた。コンクリートの吸水面は切断面とし、吸水面以外からの水分の移動を防ぐために吸水面以外の面にエポキシ樹脂を塗布した。その後、塩水片面吸水および塩水片面吸水凍結融解の試験条件で 1 週間吸水させることで躯体コンクリートに塩化物が残留するようにした（図 5-5 の(a)）。次に、塩水吸水面を補修面として断面修復材の厚さが 30mm となるように PCM および CM を施工した。CM では断面修復する際はドライアウト防止のため打継ぎ面を湿潤状態にして施工し、PCM では躯体コンクリートの打継ぎ面を乾燥させてプライマーを塗布した後に施工した。施工後、断面修復部の底面を吸水面とし、吸水面以外の面に再度エポキシ樹脂を塗布した（図 5-5 の(b)）。片面吸水試験方法は図 5-5 の(c)であり、各試験体は断面修復前と同じ試験条件で 4 週間吸水させた。電極は各測定部位の中央に断面修復面に平行な方向で固定させて埋設した。これらの試験体は、各試験条件及び断面修復材の種類ごと、質量含水率測定用に電極を埋設した 1 体、塩化物イオン含有量測定用に 12 体（2 体 $\times$ 6 回測定）、計 52 体作製した。

また、B、C タイプにおいて塩水片面吸水させる場合は塩水の蒸発を防ぐために、試験体およびトレーをポリエチレン袋に入れて密封した状態で行った。

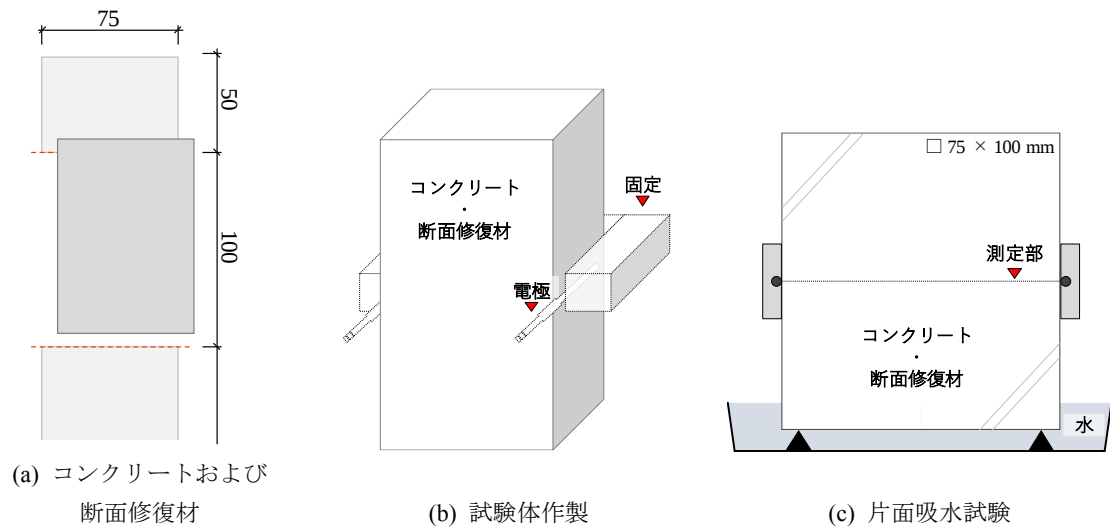


図 5-3 A タイプ試験体の概念図

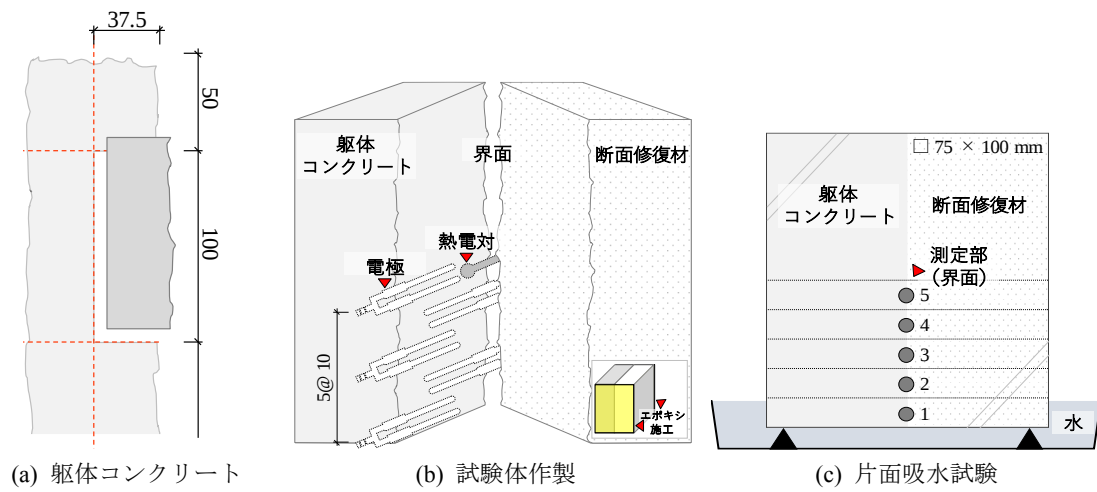


図 5-4 B タイプ試験体の概念図

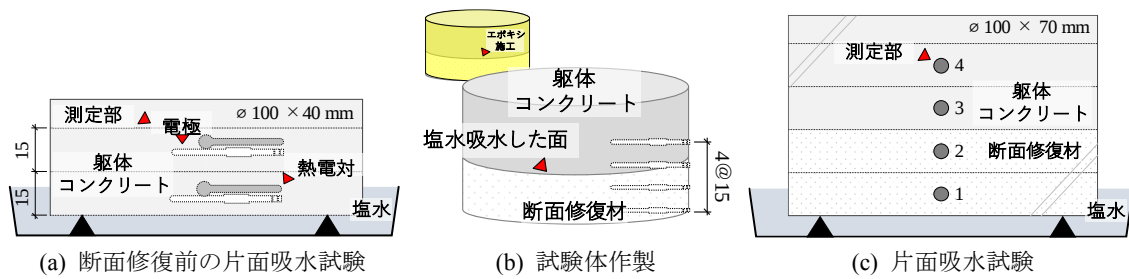


図 5-5 C タイプ試験体の概念図

5.2.3. 測定方法およびデータ処理方法

(1) 比抵抗変化率および質量変化率

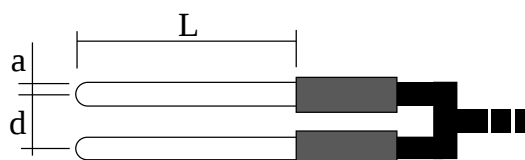
コンクリートの含水状態は、交流 2 電極法³⁾を用いて検討を行う。この方法は、測定の対象となるコンクリートに電極を設置し、電気抵抗を測定することで含水状態を推定する方法である。ここで、コンクリートは含水状態により電気抵抗が変わり、コンクリートに水分がない場合は不導体になって抵抗の測定が不可能になる。また、電気抵抗はイオンの量にも影響を受けるため、同様の調査でもイオンの含有量が異なると電気抵抗も大きく変わる。

本章の実験では、片面吸水試験によるコンクリートの含水状態の変化を把握するため、形状係数を測定した図 5-6 のような電極を用いて比抵抗を測定し、同時に質量も測定した。なお、次のような手順で各種測定を行い、比抵抗変化率および飽和率を求めた。なお、比抵抗変化率および飽和率とも絶対乾燥状態が 0、飽和状態が 100 の値となる。ただし、比抵抗の測定は試験体の温度が $20\pm5^{\circ}\text{C}$ の条件で測定を行ったが、温度の影響については考慮していない。

- ① 片面吸水試験を行う前に試験体を 60°C の乾燥炉で 1 週間乾燥させ、乾燥状態の質量 (W_d) を測定する。
- ② 片面吸水試験による試験体の質量 (W_n) および比抵抗 (ρ_n) を測定する。
- ③ 片面吸水試験が終わった試験体は飽水状態になるまで水に浸し、試験体表面の水分を除去して質量 (W_w) および比抵抗 (ρ_w) を測定する。
- ④ 絶対乾燥状態の比抵抗は測定できないため、図 5-7 の(a)のような時間経過(横軸)と比抵抗(縦軸)の関係から絶対乾燥状態の比抵抗 (ρ_d) を推定する。ここで、用いた関係式は多項式であり、決定係数 (R^2) は 0.9 ± 0.1 範囲のものである。
- ⑤ 試験体の含水率変化による比抵抗変化率および飽和率は次の式を用いて導出し、DM ごとに 3 体の値を平均したものをを用いる。

$$\text{比抵抗変化率 (\%)} = \frac{\rho_d - \rho_n}{\rho_d - \rho_w} \times 100 \quad \text{式 (3)}$$

$$\text{飽和率 (\%)} = \frac{W_n - W_d}{W_w - W_d} \times 100 \quad \text{式 (4)}$$



※ $L > d > a$
(ただし、B typeは d (約75mm) $> L > a$)

図 5-6 A, B タイプ試験体の電極様子

ただし、片面吸水試験に絶対乾燥状態の質量が分からない試験体を用いた場合は、次のようにデータ処理を行った。

- ① 片面吸水試験による試験体の比抵抗 (ρ_n) を測定する。必要であれば、試験体の質量 (W_d) も測定する。
- ② 片面吸水試験が終わった試験体は飽水状態になるまで水に浸し、試験体表面の水分を除去した後に質量 (W_w) および比抵抗 (ρ_w) を測定する。
- ③ 含水状態の試験体は 20°C, R.H 60%で乾燥させ、1 日間隔で 4 回以上試験体の質量 (W_n) および比抵抗 (ρ_n) を測定する。
- ④ 20°C, R.H 60%での測定が終わった試験体は 105°C の乾燥炉で乾燥させ、絶対乾燥状態の質量 (W_d) を測定する。
- ⑤ 図 5-7 の(b)のような試験体の比抵抗 (横軸) と質量 (縦軸) の関係から絶対乾燥状態の比抵抗 (ρ_d) を推定する。ここで、決定係数 (R^2) は 0.9 ± 0.1 範囲である。
- ⑥ 片面吸水試験による比抵抗変化率および飽和率は式 (3) と式 (4) を用いて計算し、3 体の試験体を平均としたものを用いる。

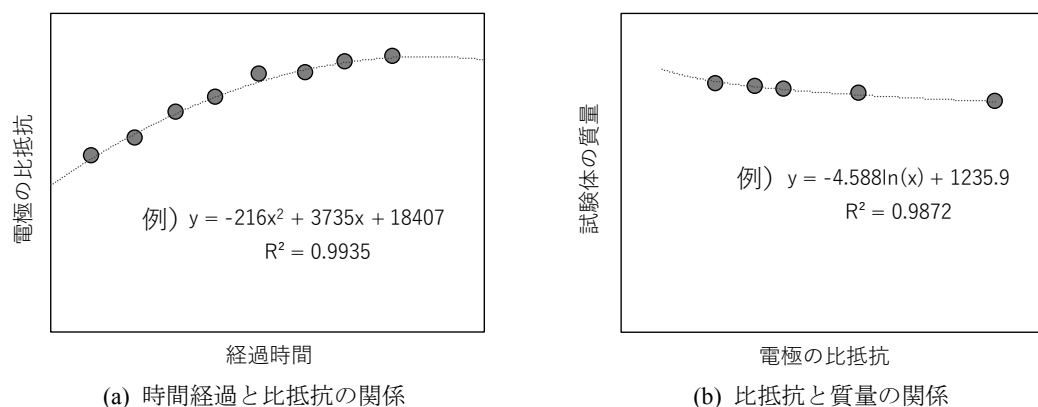


図 5-7 絶対乾燥状態の比抵抗 (ρ_d) 推定

(2) 質量含水率

質量含水率は交流 2 電極法を利用し、質量含水率と温度の関係式の式 (5) ⁴⁾を用いて算定した。比抵抗は形状係数がわかる図 5-8 のような電極を試験体に埋め込んで測定し、温度は電極に取り付けた熱電対を用いて測定を行った。

$$M = \frac{\frac{3892}{273+t} - \ln(\rho) + 1.576}{1.085} \quad \text{式 (5)}$$

ここに、 M : 質量含水率 (%)

t : 測定温度 (°C)

ρ : 比抵抗 ($\Omega \cdot \text{mm}$)

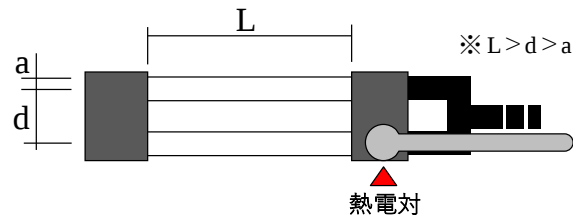


図 5-8 C タイプ試験体の電極様子

(3) 超音波伝播速度

超音波伝播速度の測定概念図を図 5-9 に示す。超音波伝播速度は、断面修復コンクリートの界面で発生するひび割れおよび隙間などの欠損の発生を推定するために修復界面に直交する方向で測定した。また、超音波伝播速度は水分の影響を受けるため、デシケーターに試験体とシリカゲルを入れ、1 週間静置した後に測定を行った。超音波伝播速度は次の式を用いて求めた。

$$V = \frac{L}{T} \quad \text{式 (6)}$$

ここに、V： 超音波伝播速度

L： 距離

T： 超音波伝播時間

(4) スケーリング高さ

図 5-10 にスケーリング高さの測定概念図を示す。スケーリング高さは躯体コンクリート面を鉛直方向から撮影した写真を Image J で画像分析する方法を採用した。測定部は、図 5-10 のように試験体の両側および中央部であり、試験体の吸水面を基準とし、②④（試験体両側）および③（試験体中央部）のスケーリング部分に線を引いてこの長さを測定した。ここで、画像上の長さは mm ではないため①線を試験体の高さ（約 100mm）と換算してスケーリング高さを求め、3 体の試験体の測定値を平均したものを用いた。

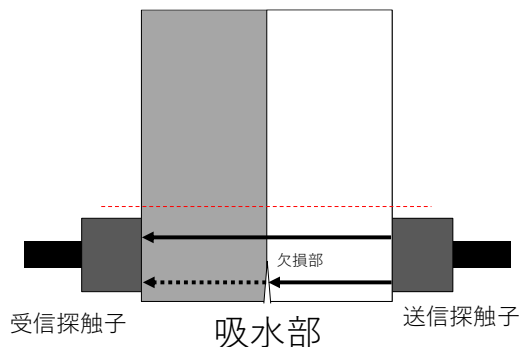


図 5-9 超音波伝播速度の測定概念図

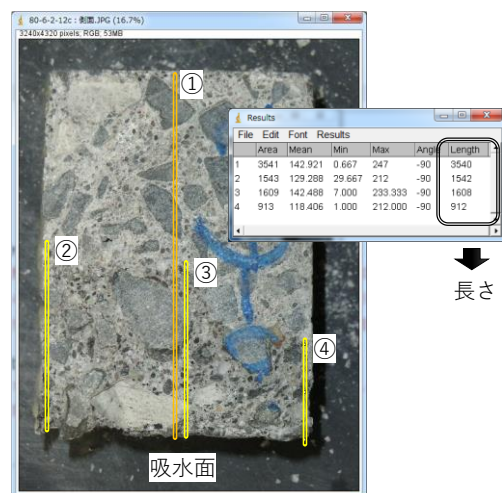


図 5-10 スケーリング高さの測定概念図

(5) 塩化物イオン含有量

塩化物イオン含有量の測定概念図を図 5-11 に示す。塩化物イオン含有量の測定には、試験体の測定部を切断し粉砕した資料を用いて JIS A 1154 の硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法に準じて測定を行った。

本章では、全塩化物の抽出方法により試料中に含まれている全塩化物を抽出した後、電位差滴定法および式 (7) によって試料中の塩化物イオンの濃度を算出し、式 (8) から塩化物イオン含有量を求めた。

$$C = \frac{(V - V_0) \times 0.003545 \times f}{W} \times \frac{200}{X} \times 100 \quad \text{式 (7)}$$

ここに、C：塩化物イオン濃度 (%)

V：試料の入った抽出液に対して行った 0.1mol/l 硝酸銀溶液の滴定量 (ml)

V₀：ブランクに対して行った 0.1mol/l 硝酸銀溶液の滴定量 (ml)

f：0.1mol/l 硝酸銀溶液のファクター

X：分取量 (ml)

W：試料 (g)

0.003545：0.1mol/l 硝酸銀溶液 1ml の塩化物イオン相当量 (g)

$$\text{塩化物量}(\text{kg/m}^3) = \frac{\text{乾燥単位容積質量}(\text{kg/m}^3) \times \text{塩化物イオン濃度}(\%)}{100} \quad \text{式 (8)}$$

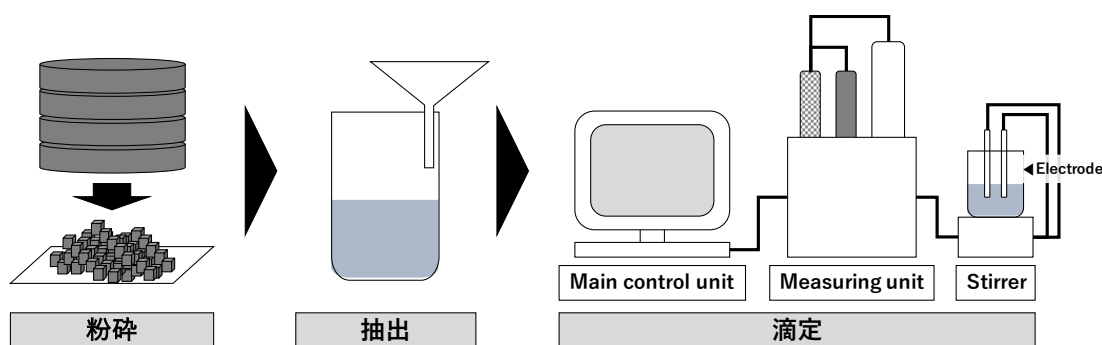


図 5-11 塩化物イオン含有量の測定概念図

5.3. 実験結果

5.3.1. シリーズⅠ：コンクリート・断面修復材の表面および両者の界面における片面吸水試験による水分移動

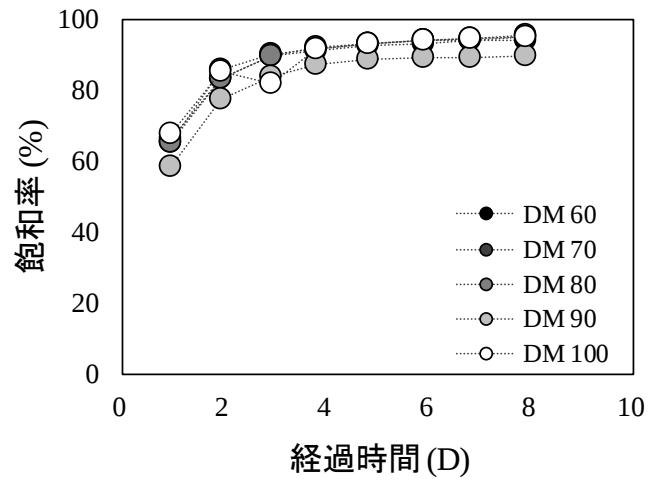
(1) 質量変化率

図 5-12 に片面吸水試験による質量変化率の経時変化を示す。グラフの横軸は片面吸水開始時点から経過した時間であり、縦軸は試験体の飽和状態の質量を 100%、60°C 乾燥後の質量を 0% と仮定して飽和率を示したものである。図 5-12 の(a)はコンクリート、(b)に PCM、(c)に断面修復コンクリートの質量変化率である。

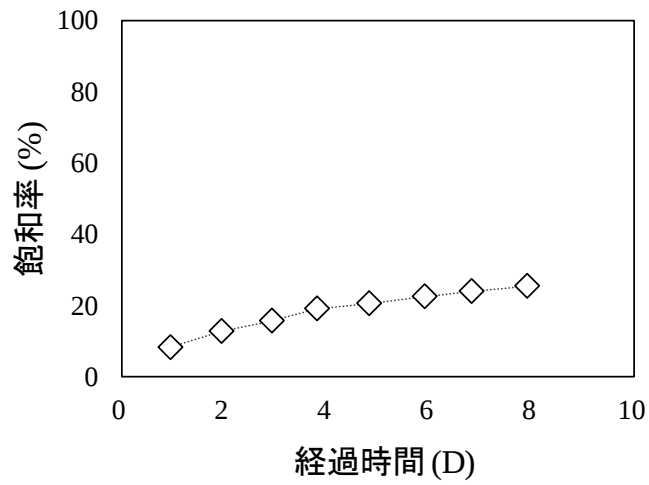
コンクリートにおける質量変化率の経時変化は、2 日目までに急激な上昇を示し、全ての試験体で 2 日目の飽和率が 70%を上回っている。以後、飽和率は緩やかに上昇する傾向を示した。これは、コンクリートの含水率勾配により拡散速度が異なることから、片面吸水開始直後では試験体がほぼ絶対乾燥状態であったため水分の吸水が速くなり、その後試験体の吸水面と内部の含水率勾配が徐々に小さくなって水分の拡散が遅くなったためと考えられる。また、劣化グレードの異なる試験体の質量変化率の経時変化には明確な差異が見られずに全ての試験体が同様な傾向を示した。これは、コンクリートの吸水性状にはマイクロクラックの影響があるが⁵⁾、コンクリートの劣化グレードを調整するために凍結融解と水中養生を繰返したことで、同等の DM でもひび割れ密度にバラツキが生じていることが原因と考えられる。

一方、PCM の質量変化率は、コンクリートに比べて非常に緩やかに増加する傾向を示した。コンクリートの飽和率が 90%程度まで上昇したのに対し、PCM の飽和率は 30%にも到達しなかった。これは、コンクリートに比べ PCM が緻密であり、吸水抵抗性が非常に高いためである。

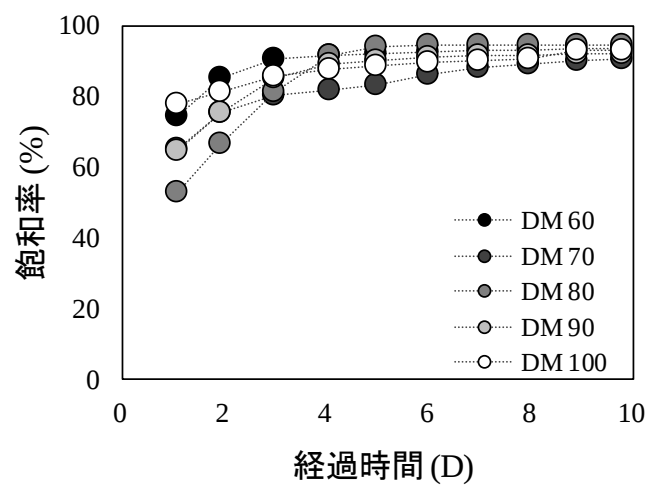
断面修復コンクリートの場合は、劣化グレードの異なる試験体の質量変化率の差が大きかった。特に、断面修復コンクリートの DM 100 は 1 日目で最も大きい飽和率を示しており、コンクリートの DM 100 よりも高い値となった。劣化グレードが DM 90 ~ 60 の断面修復コンクリートの場合は、試験初期に飽和率が小さく、最終的に高い飽和率となる傾向を示した。これは、コンクリート自体および PCM 自体の飽和率の組み合わせでは説明できないことから、断面修復コンクリートの水分移動にはコンクリートー断面修復材の界面が影響しているものと考えられる。また、DM 90 ~ 60 の試験体はコンクリートの補修面がスケーリングによって凹凸になった状態であり、コンクリートー断面修復材の一体性がよくなっていることも考えられる。なお、DM 100 の場合は断面修復面が平滑であり、コンクリートー断面修復材の界面に十分な一体性が得られていないことが考えられる。



(a) コンクリート



(b) PCM



(c) 断面修復コンクリート

図 5-12 片面吸水による水分の質量変化率

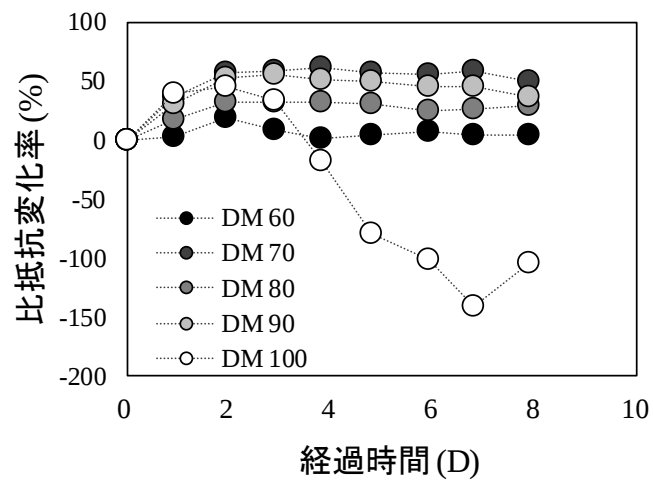
(2) 比抵抗変化率

図 5-13 に片面吸水試験による比抵抗変化率の経時変化を示す。測定部は、試験体の吸水面から 50mm の高さ（以下，5F）である。グラフの横軸は片面吸水試験の開始時点から経過した時間であり，縦軸は試験体の飽和状態の比抵抗を 100%とし，絶対乾燥状態の比抵抗を 0%として比抵抗の変化率を示したものである。なお，比抵抗は飽和状態になるほど減少する傾向を示すため，含水率が高くなるほど比抵抗変化率は大きくなる。

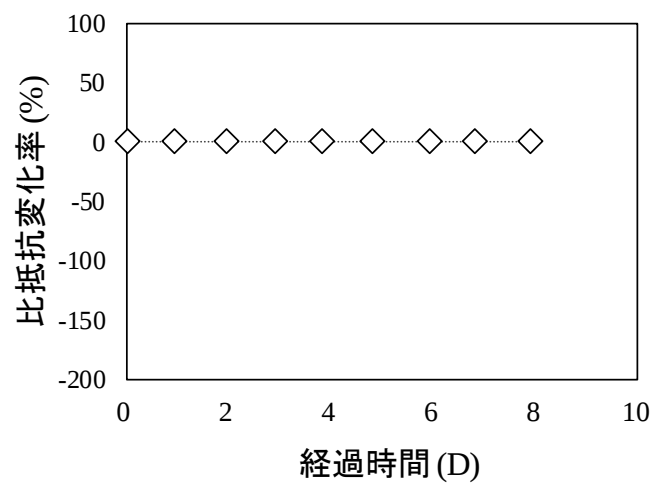
コンクリートの比抵抗変化率は，2 日目まで増加する傾向を示すが，以後，減少またはほぼ一定の値を示し，8 日目では 50%よりも小さい変化率を示している。特に，DM 100 は著しく減少し，絶対乾燥状態の比抵抗変化率よりも小さい値を示している。これは，外部から塩化物などのイオンが供給されなかったことから，試験体内部のイオンの濃度が低下したため比抵抗変化率が低下したものと考えられる。また，DM 100 は，片面吸水試験 2 日目以降，著しく減少し，絶対乾燥状態の比抵抗変化率よりも小さい値を示している。これは，下面から吸水された水分が試験体表面で蒸発し，導電性の小さい結晶が細孔を充填したためと考えられる。なお，DM 90～60 の試験体の場合，ひび割れを充填するだけの結晶は生じていないものと考えられる。

一方，PCM における比抵抗変化率は，変化せずに 0%を維持した。これから，片面吸水により吸収された水分が 5F まで拡散されなかったと考えられる。

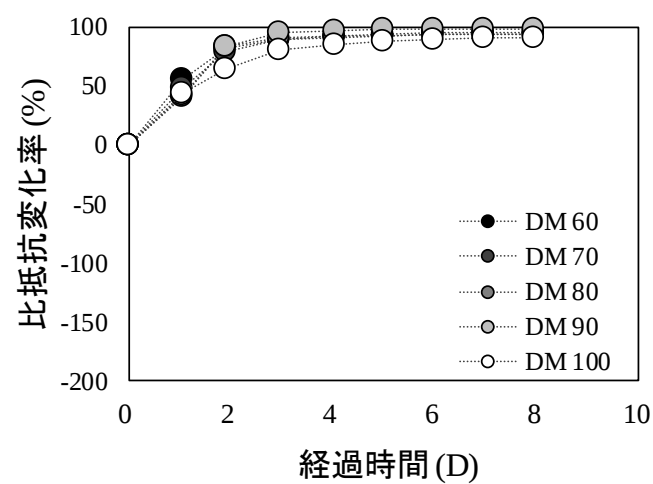
断面修復コンクリートの界面の比抵抗変化率は，経過時間に従って増加する傾向を示すが，2 日目までは急激に増進し，以降は比抵抗変化率の勾配が緩やかな傾向を示した。また，8 日目で全ての値が 90%を上回っている比抵抗変化率を示している。これから，断面修復コンクリートの界面における水分の拡散が劣化したコンクリート中の拡散よりも速く，持続的な水分の供給により界面はほぼ飽和状態になっていることが考えられる。



(a) コンクリート



(b) PCM



(c) 断面修復コンクリート

図 5-13 片面吸水による比抵抗変化率

(3) 飽和率と比抵抗変化率の関係

図 5-14 にコンクリートおよび断面修復コンクリートにおける飽和率と比抵抗変化率の関係を示す。グラフの横軸は飽和率，縦軸は比抵抗変化率であるが，飽和率と比抵抗変化率の経過変化はシンボルの大きさで現した。すなわち，シンボルの大きさが大きいほど経過時間が大きいことを意味する。

コンクリートは劣化グレードに関わらずに飽和率が比抵抗変化率よりも高い傾向を示した。このことから，コンクリートの表層では，水分の蒸発による含水率勾配，非導電性の結晶の生成による細孔の充填が生じていることが考えられ，表面に取り付けた電極では試験体全体の含水率の把握は難しいものと考えられる。断面修復コンクリートでは，1日目までには比抵抗変化率より飽和率のほうが高い値を示したが，以後，飽和率より比抵抗変化率のほうが高くなり，飽和率と比抵抗変化率が近い値に近づく傾向を示した。このことから，試験体内部の電極は，試験体内部および界面の含水状態を把握できているものと考えられ，界面の水分移動後，試験体全体の含水率が上昇しているものと思われる。

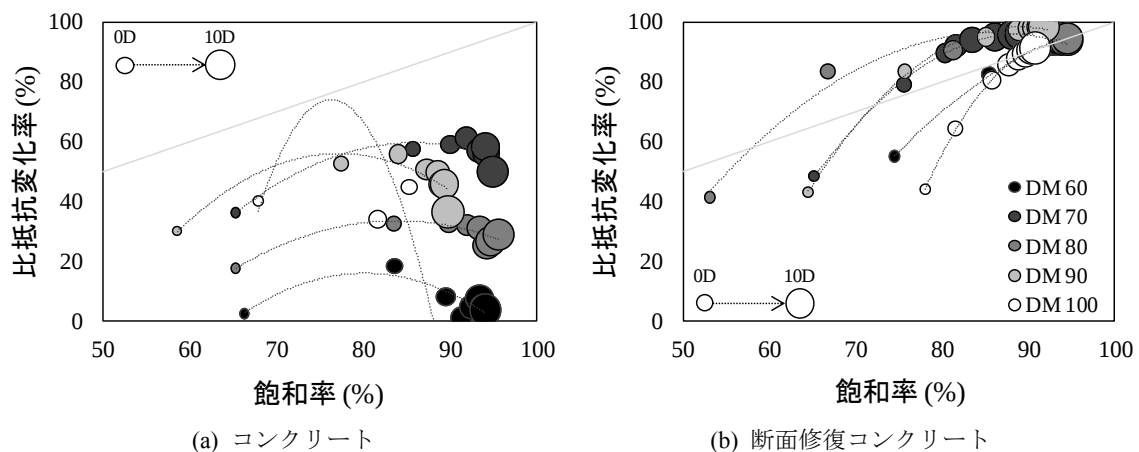


図 5-14 飽和率と比抵抗変化率の相関

5.3.2. シリーズⅡ：コンクリート断面修復材の界面における塩水片面吸水試験および塩水片面吸水凍結融解試験による劣化状況および水分移動性状

(1) スケーリング高さの変化

図 5-15 に $20^{\circ}\text{C} \cdot 3\text{h} \sim -20^{\circ}\text{C} \cdot 3\text{h}$ の条件の塩水片面吸水凍結融解試験（以下，塩水片面吸水凍結融解試験）および $60^{\circ}\text{C} \cdot 6\text{h} \sim -20^{\circ}\text{C} \cdot 18\text{h}$ の条件の塩水片面吸水凍結融解試験（以下，塩水片面吸水凍結融解試験（ 60°C 乾燥））におけるコンクリート表面のスケーリング高さを示す。グラフの横軸は経過時間であるが，塩水片面吸水凍結融解試験では 4 サイクルを 1 日として 0, 3, 7, 14, 28 日の結果を，塩水片面吸水凍結融解試験（ 60°C 乾燥）では 3 日目に 12 サイクル目の結果を示し，縦軸はスケーリング高さを示している。シンボルの大きさは DM を示しており，大きさが大きいものほど DM の数字が大きいものである。

図より，塩水片面吸水凍結融解試験におけるスケーリング高さの変化は，DM 90 ～ 60 の場合は 7 日目からスケーリングが確認され，経過時間に従って徐々になる傾向を示した。しかし，DM 100 の場合は 7 日目でも確認されなかった。また，スケーリング高さは躯体コンクリートの DM が大きいほど低くなる傾向を示した。これは，凍害劣化を受けるほど微細ひび割れが多く発生し，DM が小さいほど水分の移動が促進され凍害劣化が大きくなった結果だと考えられる。

塩水片面吸水凍結融解試験（ 60°C 乾燥）の場合は，12 サイクル目のスケーリング高さのみ示しているが，塩水片面吸水凍結融解試験の 28 日目よりも高いスケーリング高さを示している。これは， 60°C の乾燥がひび割れの発生やコンクリート構造物の表面における水分の吸水または，拡散を促進していることが考えられる。また，塩水片面吸水凍結融解試験と同様に躯体コンクリートの DM が大きくなるほどスケーリング高さが低くなり DM 100 の場合は塩水片面吸水凍結融解試験の 28 日目のものと同様なスケーリング高さを示している。凍害劣化の程度が激しいコンクリートほど補修後の凍結融解作用で劣化が激しくなるといえる。

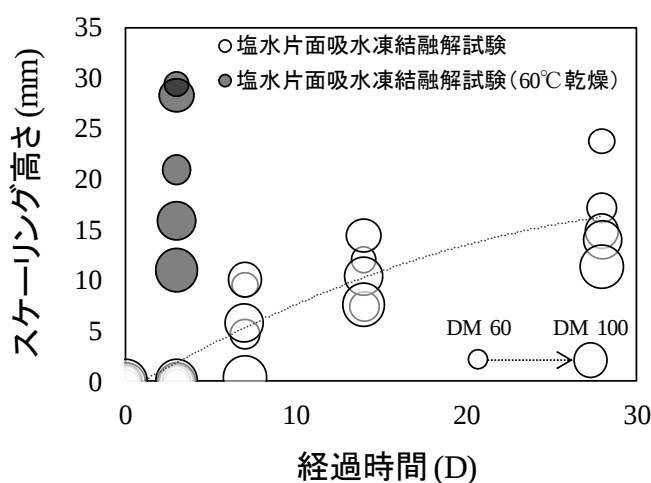


図 5-15 スケーリング高さの変化

(2) 超音波伝播速度の変化

図 5-16 に塩水片面吸水試験および塩水片面吸水凍結融解試験における超音波伝播速度の変化を示す。グラフの横軸は経過時間を示しており、縦軸は超音波伝播速度を示している。ここで、塩水片面吸水凍結融解試験の経過時間は 4 サイクルを 1 日として 0, 3, 7, 14, 28 日の時点で測定したものである。また、グラフ中のシンボルの大きさは DM を示しており、最も大きいものは DM 100, 小さいものは DM 60 である。

塩水片面吸水試験の超音波伝播速度は 7 日目まで増加する傾向を示すが、以後、減少する傾向を示している。これは、静置環境が 20℃ であることから PCM が養生され組織が緻密になった結果だと考えられる。7 日目以降からは、超音波伝播速度の低下が認められる。これは、測定前の乾燥過程で界面に剥離が発生したことや試験体の含水率が低下したこと、超音波伝播速度の測定時のバラツキが考えられる。

塩水片面吸水凍結融解試験の場合、0 日目の時点ではコンクリートの DM が小さくなるほど超音波伝播速度が小さくなり、超音波伝播速度の最大値と最小値に差が大きかったが、14 日目まで徐々に一定な値になる傾向を示した。これは、塩水片面吸水凍結融解により断面修復コンクリートの界面に剥離が生じたこと、含水率が上昇したこと、吸水された塩化物イオンが乾燥過程で結晶になりコンクリートの空隙を埋めたことなどが考えられる。一方、28 日目での超音波伝播速度は 14 日目よりも低くなり、0 日目の同 DM の超音波伝播速度に対してかなり低下した。これにより、試験体のコンクリートおよび界面に凍害劣化が著しくなったことが考えられる。

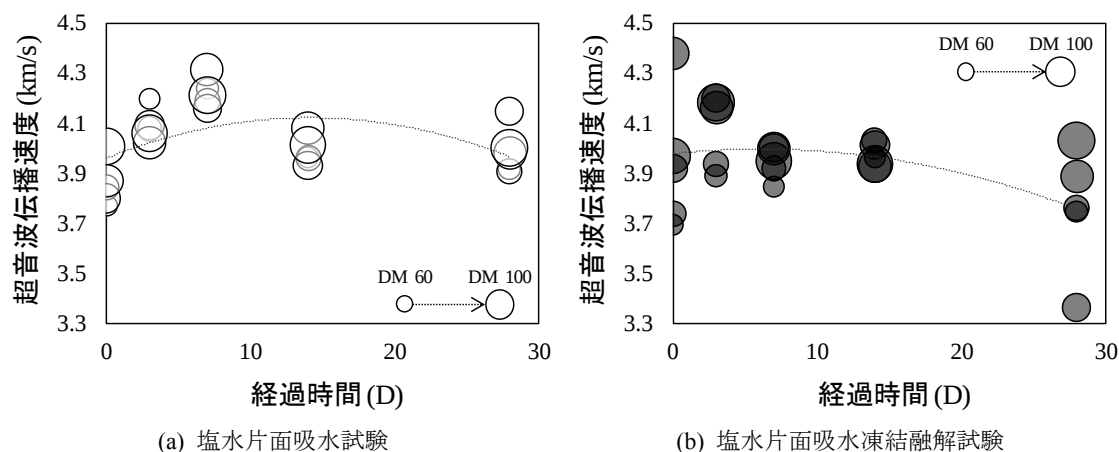


図 5-16 超音波伝播速度の変化

(3) 比抵抗変化率の変化

図 5-17 に塩水片面吸水試験および塩水片面吸水凍結融解試験における 5F の比抵抗変化率を示す。グラフの横軸は経過時間を示しており、縦軸は比抵抗変化率を示している。なお、塩水片面吸水凍結融解試験の経過時間は 4 サイクルを 1 日として示したものである。

塩水片面吸水試験の場合、DM による比抵抗変化率の差異が大きく、DM 100 は 1 日目で約 100%まで増加する傾向を示している。これは、DM 100 は健全であり、コンクリートの補修面に凸凹がない状態で断面修復を行ったために界面に付着欠陥が生じていることが原因と考えられる。コンクリートを劣化させた試験体の場合は、DM 60, 70, 80, 90 の順でコンクリートの劣化グレードが激しいほど比抵抗変化率が高くなる傾向を示した。これから、コンクリートの劣化は水分の移動速度に影響を及ぼすことがわかる。また、DM 80 と DM 90 の比抵抗変化率は、片面吸水試験の初期にマイナス値を示した。これは、電極の抵抗が高くなったことを意味しており、図 5-13 の(c)のグラフと異なっている。本シリーズの実験では塩水を使用したことと試験体を乾燥せずに試験を開始したことから、濃度平衡になるためにコンクリートと界面にあった水分が塩水のほうへ移動したことが考えられる。

塩水片面吸水凍結融解試験の場合は、塩水片面吸水試験に比べて DM による比抵抗変化率の差異が小さく、4 日目では全ての比抵抗変化率が約 100%に至っていた。これは、凍結融解時の水分押し込み力が生じたこと、凍結融解時の温度変化でコンクリートと断面修復材のひずみ差が生じて試験体の界面に剥離などの損傷が発生し、試験体の界面に水分が浸透したことが原因と考えられる。DM 70 と DM 80 の比抵抗は、塩水片面吸水試験の DM 80 や DM 90 と同様に塩水片面吸水前の比抵抗よりも大きくなり比抵抗変化率がマイナス値を示しているが、塩水片面吸水試験に比べてマイナスの値が小さかった。また、塩水片面吸水凍結融解試験では比抵抗変化率の大きさには DM の影響が見られなかった。コンクリートと断面修復材の界面に剥離が生じ、界面から水分が移動していることが考えられる。

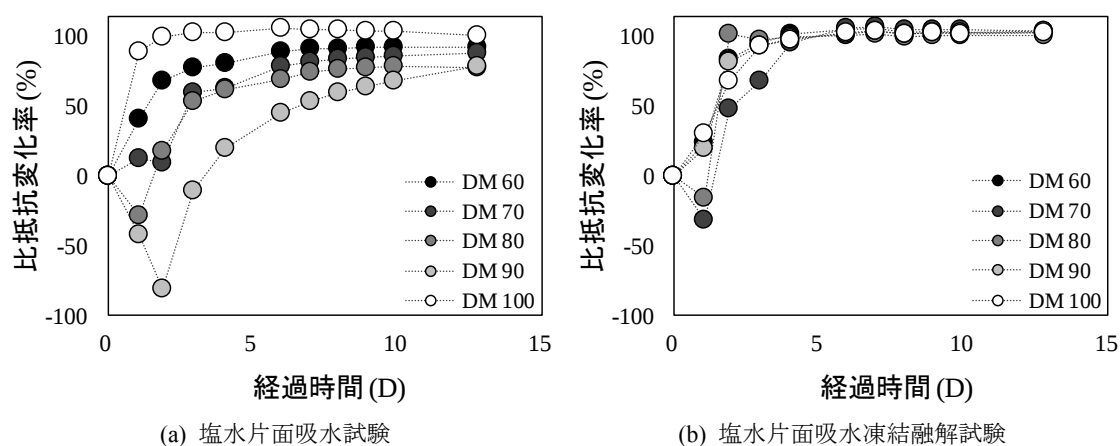


図 5-17 断面修復コンクリートの比抵抗変化率

図 5-18 に片面吸水試験 48 時間目の比抵抗変化速度を示す。グラフの横軸は試験体の測定高さを示しており、縦軸は比抵抗変化速度を示している。また、グラフ中のシンボルの大きさは DM を示しており、最も大きいものは DM 100、小さいものは DM 60 である。

塩水片面吸水試験の場合、測定高さ 1F は全ての試験体から約 2%/h の値を示しており、高さが高くなるほど速度変化が小さくなる傾向を示している。なお、比抵抗変化速度に及ぼす DM の明確な影響は見られず、DM 90 の場合はマイナス値を示しており、DM 100 の比抵抗変化速度は測定高さによる変化幅が大きくなり 2%/h から 3%/h の範囲で維持された。塩水片面吸水凍結融解試験の場合は、測定高さ 1F の全ての比抵抗変化速度が 2%/h であり、塩水片面吸水試験と同様に高さが高くなるほど比抵抗変化速度が小さくなる傾向を示しているが、塩水片面吸水試験に比べて変化の範囲が小さく、DM による比抵抗変化速度の差も小さかった。

以上の結果から、断面修復部において補修面の凸凹状態は水分移動速度に影響が大きいと考えられ、コンクリートと断面修復材の温度変化による伸縮によって断面修復コンクリートの界面に剥離が発生し、水分移動が容易になることが考えられた。また、凍結融解時に乾燥の影響が大きい場合はコンクリートの劣化を促進させる可能性が考えられる。

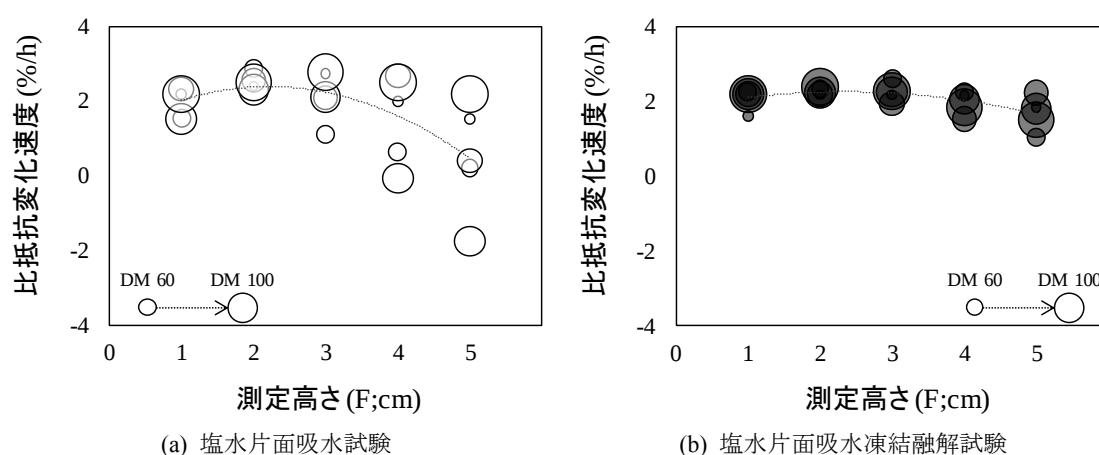


図 5-18 片面吸水試験 48 時間における測定高さと比抵抗変化速度

5.3.3. シリーズⅢ：塩化物残留コンクリートに断面修復材を補修した場合の断面修復面における塩水片面吸水試験および塩水片面吸水凍結融解試験による塩化物イオンの移動性状

(1) 質量含水率

図 5-19 に塩水片面吸水試験および塩水片面吸水凍結融解試験における質量含水率を、図 5-20 に塩水片面吸水凍結融解試験における試験体の劣化状況を示す。グラフの横軸は経過時間であるが、O はコンクリートに劣化をさせる前、1stD は断面修復を行う前に劣化させた躯体コンクリートを測定したものであり、7 日目から 28 日目（以下、D）までは片面吸水試験の経過時間である。縦軸は試験体の深さごとの質量含水率の累積値（1F から 4F までの質量含水率の合計）を示している。ここで、塩水片面吸水凍結融解試験の経過時間は 6 サイクルを 1 日として示している。

凍結融解の有無で比較すると、塩水片面吸水凍結融解試験の質量含水率の累積値が塩水片面吸水試験の値より高い結果となった。これは、凍結融解作用は含水率を上昇させる効果があることや、断面欠損（図 5-20 の(a)）や断面修復材の吸水面のスケーリング（図 5-20 の(b)）に見られるように組織の緩みが生じたことが原因と考えられる。なお、コンクリートと断面修復材の界面の剥離やコンクリート部の凍害劣化は認められなかった。

断面修復前のコンクリートの質量含水率は、塩水片面吸水試験の 1stD の質量含水率の累積値が約 11.5%で O より約 0.5%増え、塩水片面吸水凍結融解試験の 1stD は約 12.1%となり O より約 1.2%増加した。これは、塩水片面吸水凍結融解試験では凍結融解作用によって含水率の上昇が大きくなったためと思われる。また、塩水片面吸水試験および片面吸水凍結融解試験の両試験において、3F、4F いずれも 1stD から 7D の間で含水率が若干減少する傾向があった。これは、断面修復材を施工する前まで試験体は気中で乾燥したためであるが、吸水面以外のエポキシ樹脂により乾燥による水分の移動が抑制されその変化が少なかったと考えられる⁶⁾。

断面修復を行った後の質量含水率は、塩水片面吸水試験の試験体は断面修復材の種類に関わらず質量含水率の累積値が 1stD から 28D までに約 0.7%減少した。これは、コンクリートの表面がエポキシ樹脂および断面修復材で覆われているので表面から水分が逸散できないが、コンクリートから断面修復材に水分が移動していることが考えられる。一方、塩水片面吸水凍結融解試験の試験体は、質量含水率の累積値が増加する傾向が見られた。これは、凍結融解作用により断面修復材からコンクリートまで水分の移動が促進されているものと考えられる。

塩水片面吸水試験の試験体の断面修復部は、14D の質量含水率の累積値が 7D の値より低下したが、時間の経過により徐々に増加する傾向を示した。なお、CM で断面修復した試験体の場合は、2F の質量含水率の変化が小さく、主に 1F の質量含水率の変化によって質量含水率の累積値が変化する様子が見られた。

塩水片面吸水凍結融解試験の試験体は、7D から 21D まで質量含水率の累積値が増加し、塩水片面吸水試験と同様に 1F の質量含水率の変化によって質量含水率の累積値が変化した。さらに、PCM の場合は、1F の質量含水率が 7D の 2.3%から 14D の 5.3%に約 2 倍増加した。これは、目

視で確認できない凍害による組織の緩みやマイクロアイスレンズ（Micro-Ice-Lens）の形成によるポンプ作用⁷⁸⁾等によって質量含水率が増加したと思われ、2F においては影響が少ないものと考えられる。一方、PCM と CM の両方とも各段の含水率が 21D から 28D までに減少しているが、CM の場合、凍結融解作用によって 1F の電極の一部が露出（図 5-20 の(a)）したため、信頼できない値と思われる。

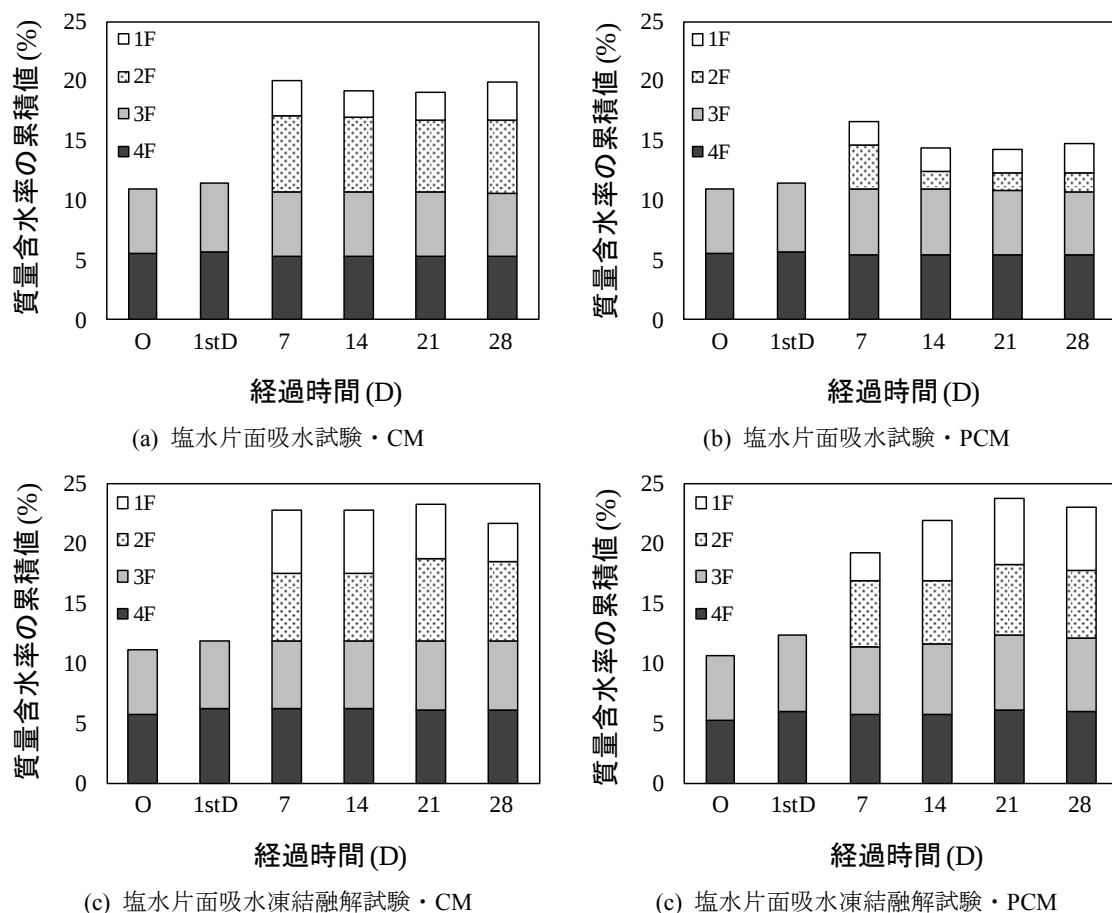


図 5-19 質量含水率の変化

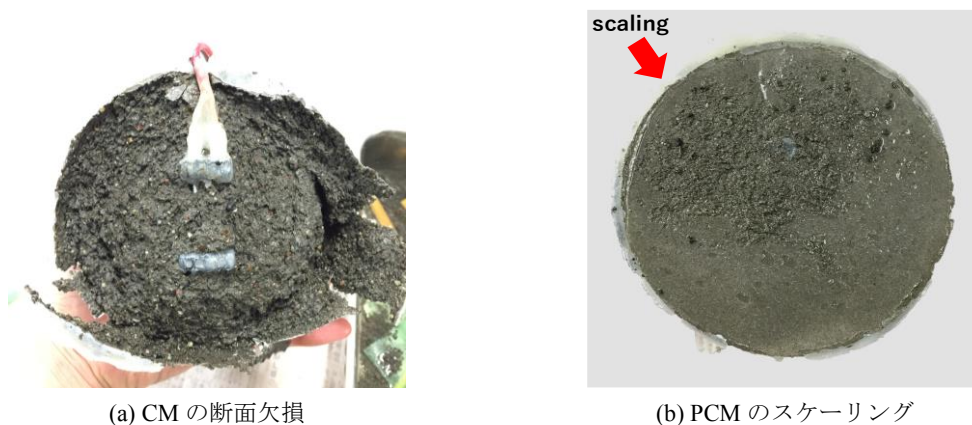


図 5-20 4 週間塩水片面吸水凍結融解試験を行った試験体の外観

(2) 塩化物イオン含有量

図 5-21 に片面吸水試験および塩水片面吸水凍結融解試験における塩化物イオン含有量を示す。グラフの横軸は経過時間であり、縦軸は試験体の深さごとの質量含水率の累積値（1F から 4F までの塩化物イオン含有量の合計）を示している。ここでは、各材料の全塩化物イオンの量（表 5-3 と表 5-4）を差し引き、マイナス値を除外してデータをまとめた。

断面修復材で比較すると、塩水片面吸水試験と塩水片面吸水凍結融解試験のいずれも CM で断面修復した試験体より PCM で断面修復した試験体の方が、塩化物イオンの含有量が少ない結果となった。これは、CM に比べて PCM の緻密性が高いことが原因と考えられる。

断面修復前である 1stD の塩化物イオン含有量は、塩水片面吸水試験より塩水片面吸水凍結融解試験の試験体の塩化物イオン含有量が小さくなった。これは、凍結過程では塩水が凍結し、水分移動が行われないため、あるいは塩水の凍結時に未凍結部分の塩分濃度が多くなり、試験体から高濃度塩水への逆方向の水分移動が生じていること等が考えられる。

断面修復後の塩水片面吸水試験の試験体は、3F は 7D の塩化物イオンの含有量が 1stD より低い値を示すが、14D には 7D より塩化物イオンの含有量が高くなり、以後 28D まで次第に減少する傾向が見られた。なお、4F は 1stD から 28D までの含有量が 0 であったので、4F までは塩化物が移動していないと言える。これは、断面修復を行う前に 1 週間塩水を吸収させた 1stD の試験体において、塩化物イオンが十分に拡散しなかったことや、背面のエポキシ施工により吸水面からの水分の移動がしにくくなり、塩化物イオンの拡散が難しかったことが考えられる⁹⁾。

断面補修後の塩水片面吸水凍結融解試験の場合、CM で断面修復した試験体の 1stD から 28D までは塩化物イオン含有量の累積値が増加する傾向があり、28D の 4F において塩化物イオンの増加が確認された。PCM で断面修復した試験体の 3F の値は 1stD より 7D の塩化物イオン含有量が少なくなるが、21D まで塩化物イオン含有量の変化は認められなかった。しかし、28D の 3F は塩化物イオン含有量の増加が確認された。これは、凍結融解作用によって吸水面に劣化（図 5-20 の(b)）が生じ、塩化物浸透抑制効果が低下したためと考えられる。

塩水片面吸水試験における断面修復材の塩化物イオン含有量の変化は CM、PCM のいずれも 2F の塩化物イオン含有量は増加しなかった。なお、CM の 1F の塩化物イオン含有量は 7D から 28D まで増加し、1F の 28D は塩化物イオン含有量が 10.0 kg/m^3 まで増え、1F の 7D の約 2 倍の値となった。一方、PCM の塩化物イオン含有量は 1F の 7D が 1.8 kg/m^3 であり、時間に伴って徐々に減少し 28D で 1.1 kg/m^3 となった。PCM の場合は、ある程度の塩化物が浸透するものの、その後の塩化物の浸透が抑制されるものと思われる。

塩水片面吸水凍結融解試験の CM は時間とともに各段の含有量が増加し、28D では目視で凍害劣化（断面欠損）が確認できた。PCM は 2F の含有量は 0 のまま変化せずに、1F の塩化物イオン含有量が徐々に増加した。凍結融解作用には塩化物イオン浸透の促進効果があると考えられ、CM のように凍害劣化が生じるとさらにひび割れによる塩化物イオンの浸透が促進されるものと思われる。なお、図 5-19 では質量含水率の大きな増加は認められなかったが、これは質量含水率の電極とモルタルの接触面積が凍害劣化の発生により変化し質量含水率を正確に測定で

きていない可能性も考えられる。

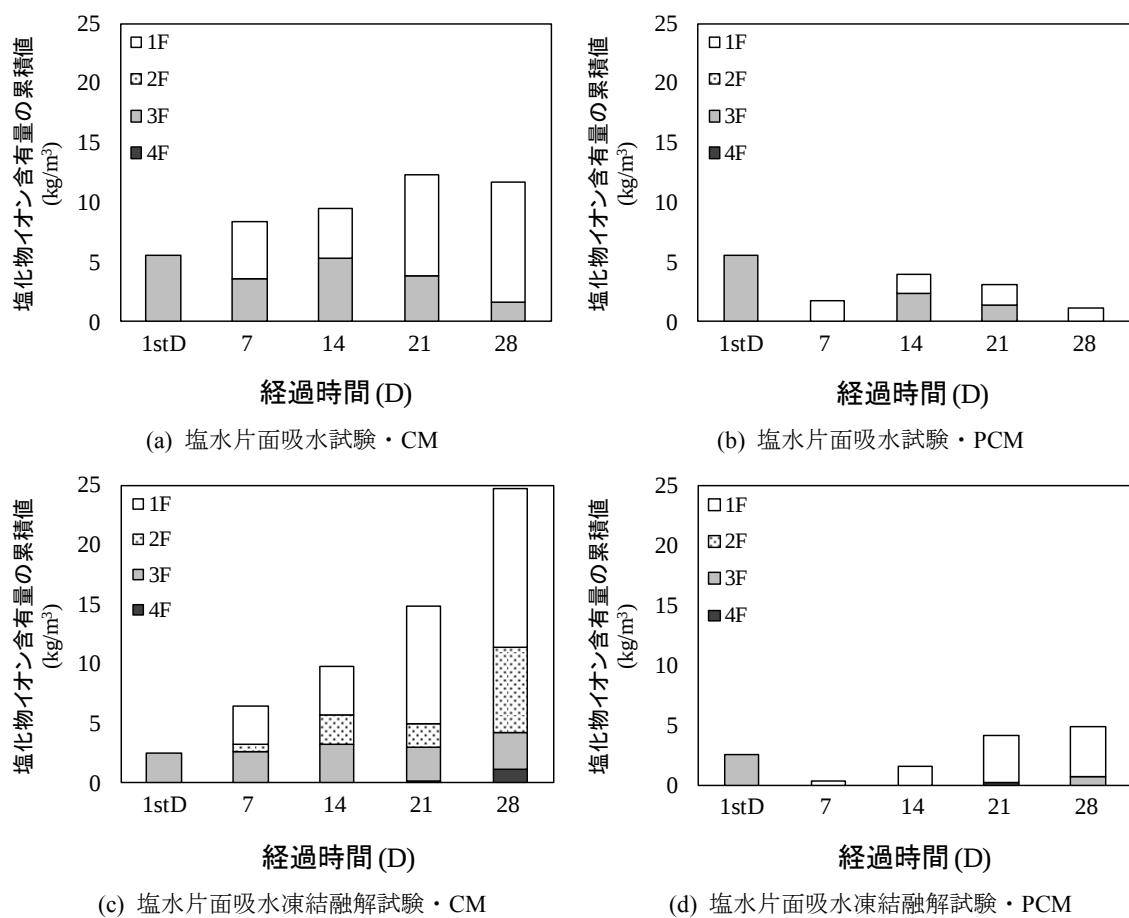


図 5-21 塩化物イオン含有量の変化

(3) 質量含水率と塩化物イオン含有量の関係

図 5-22 に横軸に質量含水率，縦軸に塩化物イオン含有量をとったグラフを示す。(a)には断面修復材と近接している 3F の関係を，(b)には 4F の関係を示している。シンボルの大きさは経過時間を示しており，最も小さいシンボルは 7D，大きいのは 28D である。

コンクリートの 3F のグラフから，塩水片面吸水試験の CM で断面修復した試験体は，質量含水率が 5.4%程度で変化は小さく，塩化物イオン含有量は $1 \sim 6 \text{ kg/m}^3$ で他の試験体より比較的に広い範囲で変化した。PCM で断面修復した試験体の質量含水率は 5.4%程度であり，CM で断面修復した試験体と同等の値を示したが，塩化物イオン含有量は $0 \sim 3 \text{ kg/m}^3$ の範囲であり，CM で断面修復した試験体より小さい値と狭い変動範囲となっている。しかし，これらの変動範囲は経過時間に従って両方とも減少する傾向がある。これから，塩水片面吸水試験のコンクリートにおける物質移動は，断面修復材から拡散されるのではなく，断面修復材と躯体コンクリートの間に塩化物イオンの濃度勾配が生じ，コンクリートから断面修復材へ塩化物イオンの拡散があった結果と考えられる。また，塩化物イオンの拡散には断面修復材の緻密さに影響を受けているものと考えられる。

塩水片面吸水凍結融解試験の試験体は，CM で断面修復を行った試験体の質量含水率が 5.6 ～ 5.9%の変動範囲を示しており，塩化物イオン含有量は全ての値が約 3 kg/m^3 を示し，塩化物イオンの変動は塩水片面吸水試験の CM および PCM で断面修復を行った試験体よりも小さかった。一方，PCM で断面修復を行った試験体は 21D までに塩化物イオン含有量が検出されず，CM で補修した試験体よりも塩化物イオン含有量が少なかったが，質量含水率の増加傾向が認められ，CM で断面修復した試験体よりも大きい質量含水率を示した。これは，凍結融解作用によって外部から PCM へ塩水が浸透するが，PCM の高い緻密さにより PCM の 2F およびコンクリートまで塩化物イオンの移動ができなかったと考えられる。

コンクリートの 4F の質量含水率は 3F と同様の変動範囲を示したが，塩水片面吸水試験と塩水片面吸水凍結融解試験とも塩化物イオンが浸透していない。

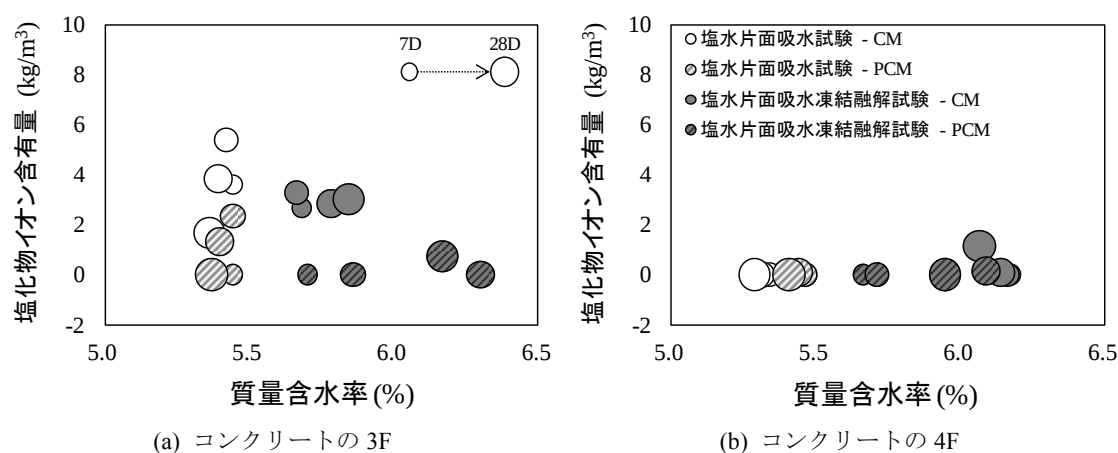


図 5-22 質量含水率と塩化物イオン含有量の相関

5.4. 第 5 章の結論

本章では、断面修復材表面あるいは修復界面からの物質移動および、塩化物の残留による断面修復コンクリートの早期劣化メカニズムを想定し、はつり不足、塩化物の供給、凍結融解を想定した実験を行い、断面修復コンクリートの早期劣化の原因について検討を行った。その結果、本章の範囲では次のような知見を得ることができた。

- (1) 片面吸水試験による断面修復コンクリートにおける水分移動は、断面修復材あるいは凍害劣化したコンクリートよりも両材の界面で著しい。
- (2) 塩水片面吸水凍結融解試験では、界面における水分の移動は塩水片面吸水試験よりも促進される。
- (3) 塩水片面吸水試験による塩化物残留コンクリートの質量含水率の変化はほぼ一定の値を維持するが、塩化物イオン含有量は減少する傾向を示す。濃度勾配による断面修復材への塩化物の拡散と推定される。
- (4) 塩化物残留コンクリートに断面修復材を行った断面修復コンクリートが凍結融解作用を受けた場合、コンクリート部分の質量含水率が増加したが、塩化物イオン含有量は増加の傾向を示さなかった。断面修復材が塩化物イオンの移動を抑制したことが考えられる。

以上のことから、断面修復コンクリートの界面には施工時から欠陥が生じていることが考えられ、さらに温度変化および凍結融解作用によって界面に剥離が生じていることが考えられる。凍結融解による含水率上昇作用があることや断面修復材の組織の緩みによる劣化物質の浸透促進が考えられる。

第5章の参考文献

- 1) 谷口智之, 横田弘, 橋本勝文: 凍害劣化を考慮したモルタルへの塩化物イオン浸透予測手法の検討, 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, Vol.15, pp.123-128, 2015.10
- 2) Lee, J. and Chang, P. : Microstructure and Freeze-Thaw Resistance of Portland Cement Mortars, Journal of the Korean Ceramic Society, Vol.28, No.11, pp.917-925, 1991
- 3) 鎌田英治, 田畑雅幸, 中野陽一郎: コンクリート内部の含水量の測定, セメント技術年報, No.30, pp.288-292, 1978
- 4) 酒井正樹, 千歩修, 長谷川拓哉, 中野佑樹: 乾燥を考慮したコンクリートの凍害劣化挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.945-950, 2008.7
- 5) 下田智也, 細田暁, 松田芳範, 小林薫: 含水率による表層の吸水抵抗性と表面含浸材の効果の分析, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, 2010
- 6) 小池賢太郎, 山口明伸, 武若耕司, 福重耕平: 移流拡散方程式を用いたコンクリート中の塩化物イオン浸透モデルに関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.945-950, 2014.7
- 7) Setzer, M. : Micro-Ice-Lens Formation in Porous Slid, Journal of Colloid and Interface Science, Vol.243, No.1, pp.193-201, 2001
- 8) Setzer, M. : Mechanical stability criterion, triple-phase condition, and pressure differences of matter condensed in a porous matrix, Journal of Colloid and Interface Science, Vol.235, No.1, pp.170-182, 2001

第6章 断面修復コンクリートの一体性

6.1. 概説

本章では、第3章、第4章および第5章で取り上げた凍害劣化したコンクリートの性状、コンクリートと断面修復材のひずみ差、凍結劣化時の断面修復コンクリートへの水分・塩分の浸透などに基づき、積雪寒冷地における断面修復コンクリートの早期劣化、すなわち剥離発生および断面修復部のひび割れ発生などの劣化原因を図6-1および以下の三つのように想定した。

- (a) 凍害劣化状態のコンクリートに断面修復を行った。
- (b) コンクリートー断面修復材の界面の水分・塩分浸透が凍結融解によって促進した。
- (c) コンクリートと熱的挙動の差異が大きい断面修復材で補修を行った。

(a)については、積雪寒冷地における鉄筋コンクリート構造物の主な劣化現象はスケーリングおよびひび割れのようなコンクリート組織の緩みであり、劣化部には微細なひび割れが生じているため、補修を行う前にコンクリートの劣化部を完全に除去する必要がある。しかしながら、はつり作業が十分実施されずに断面修復を行う場合が多いと考えられる。このような場合、外力あるいは、凍結融解作用を受けることで躯体コンクリートの劣化部を含む断面修復部が容易に剥離することが考えられる。

(b)については、補修部分にはコンクリートー断面修復材の界面に微細な隙間があることが考えられる。隙間へは水分が浸透し、凍結融解作用を受けることで水分浸透が促進し、水分の凍結膨張によってコンクリートと断面修復材の付着力が低下し、コンクリートと断面修復材の間に剥離が発生することが考えられる。

(c)については、外部環境の気温変化などで断面修復材と躯体コンクリートに温度変化が生じることで、両者が異なる伸び縮みを示してコンクリートー断面修復材の界面に剥離やひび割れが発生することが考えられる。

ここでは、断面修復コンクリートにおける剥離やひび割れ発生に着目し、積雪寒冷地におけるコンクリートー断面修復材の付着力低下およびコンクリートの熱的挙動による断面修復材のひずみ変化について検討を行い、コンクリートー断面修復材の一体性損失による断面修復コンクリートの早期劣化メカニズムについて検討することを目的としている。

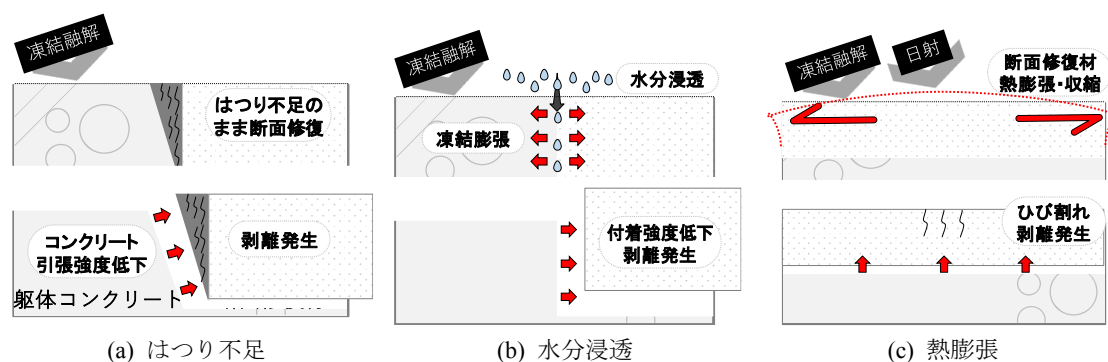


図 6-1 断面修復コンクリートの剥離原因

6.2. 実験の概要

本章では、断面修復コンクリートの一体性について次の3シリーズの実験を行った。

シリーズⅠ：コンクリートの凍害劣化程度による断面修復材の付着強度変化

シリーズⅡ：コンクリートー断面修復材の界面から吸水する片面吸水凍結融解試験による
断面修復コンクリートの付着強度変化

シリーズⅢ：コンクリートのひずみに対する断面修復材の追従性

実験計画を表 6-1 に、コンクリートの調合および基礎性状を表 6-2 に、断面修復材の調合および基礎性状を表 6-3 に示す。また、図 6-2 に引張試験方法を、図 6-3 に片面吸水凍結融解試験の吸水方法の概念図を、図 6-4 に割裂引張試験方法を示す。また、これらの試験による試験体の破断パターンの区分を図 6-5 に示す。一軸ひずみ追従性試験方法の概念図を図 6-6 に示す。

表 6-1 実験計画

シリーズ	試験方法 (複合体劣化方法)	コンクリート		断面修復材		測定項目
		劣化グレード	寸法 (mm)	種類	寸法 (mm)	
I	引張試験	DM 100 90 80 70 60	□75×100	PCM	□40×30	付着強度
II	割裂引張試験 (片面吸水凍結融解試験)	DM 100 90 80 70 60	75×37.5×100	PCM	75×37.5×100	付着強度
III	一軸ひずみ追従性試験	DM 100	□75×200	PCM	□40×20	ひずみ

*DM：相対動弾性係数，PCM：ポリマーセメントモルタル

*塩水片面吸水凍結融解試験：20℃・3h～-20℃・3h

表 6-2 コンクリートの調合および基礎性状

W/C (%)	s/a (%)	単位質量 (kg/m³)				空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm²)
		W	C	S	G		
40	45.3	180	450	804	979	2	54.7

*C：セメント(普通ポルトランドセメント，密度：3.16g/cm³)，S：陸砂(表乾密度：2.67g/cm³)，G：碎石 (表乾密度：2.68g/cm³)

表 6-3 断面修復材の調合および基礎性状

区分	質量比 (kg)		プライマー量 (kg/m²)	密度 (kg/m³)	圧縮強度 (N/mm²)
	主材	硬化剤			
PCM	ビニロン繊維・軽量骨材配合 プレミックスセメント(4)	カチオン性 SBR 系樹脂(1)	0.3～0.5	1,357	37.2

シリーズ I では、コンクリートの凍害劣化程度によるコンクリートと断面修復材の付着強度の変化について検討を行う。コンクリートは促進凍結融解試験を行い、相対動弾性係数（以下、DM）が 100, 90, 80, 70, 60（%）のものを用いた。ここで、DM 100 は凍結融解試験を行っていないものであり、コンクリートの凍害劣化部分を完全に除去し、健全な状態で断面修復材を施工したことを想定した。DM 90 から DM 60 は、はつり作業が十分行われずに、凍害劣化部分が残された状態で断面修復材を施工したことを想定した。断面修復材は SBR 系のポリマーセメントモルタル（以下、PCM）を用いた。PCM は、付着性の向上やドライアウトの防止のため、プライマーを補修面に塗布した後、施工した。試験体は、 $75 \times 100 \text{ mm}$ の寸法で切り出したコンクリートの側面（ $75 \times 100 \text{ mm}$ ）を断面修復材の施工面とし、 $40 \times 30 \text{ mm}$ の寸法で PCM を施工し、4 週間気中養生したものとした。測定項目は付着強度であり、日本建築仕上学会式引張試験機を用いて試験を行った。破断パターンは、コンクリート破断（以下、C 破断）、界面破断（以下、I 破断）、断面修復材破断（以下、P 破断）と区分した。なお、破断面を鉛直方向から撮影し、Image J を用いる画像分析方法で破断面を占める各破断パターンの面積率を求めた。

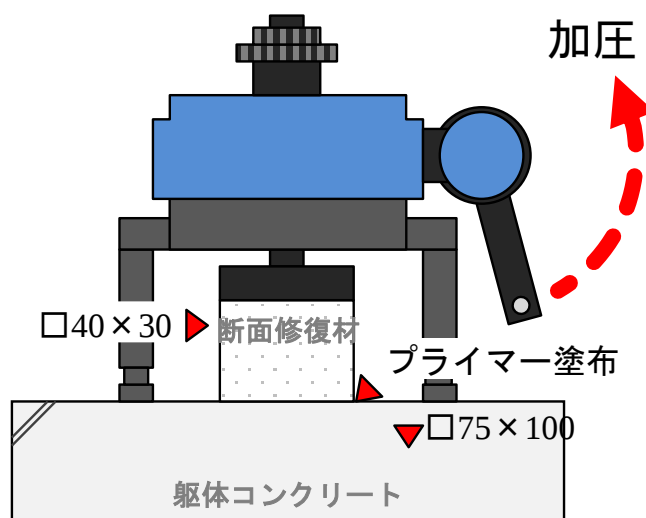


図 6-2 引張試験の概念図

シリーズⅡでは、断面修復コンクリートの界面における水分浸透および凍結融解が断面修復材と躯体コンクリートの付着強度に及ぼす影響について検討を行う。躯体コンクリートは DM 100, 90, 80, 70, 60 (%) のものを、断面修復材は PCM を用いた。試験体は、75×37.5×100mm の寸法で切り出したコンクリートにプライマーを塗布し、試験体寸法が□75×100mm になるよう断面修復材を施工したものである。ここで、断面修復面は切断前の外側であった面であり、吸水面以外の修復界面にはエポキシ樹脂接着剤を塗布して防水処理を行った。なお、各試験体は図 6-3 に示す吸水条件で 4 週間片面吸水凍結融解試験 (20℃・3h~ -20℃・3h, 112cycle) を行った。測定項目は付着強度であり、片面吸水凍結融解試験を行わなかったもの (以下、片面吸水凍結融解試験「前」) と 4 週間片面吸水凍結融解試験を行ったもの (以下、片面吸水凍結融解試験「後」) を比較した。付着強度の測定方法は、エポキシ樹脂接着剤を除去した試験体の上下面に図 6-4 のように金属棒を置いて加圧する割裂引張試験方法で、式 (9) から断面修復材と躯体コンクリートの付着強度を求めた。なお、C 破断、I 破断、P 破断と区分し、Image J を用いて破断パターンの面積率を算出した。

$$f_t = \frac{2P}{\pi dl} \quad \text{式 (9)}$$

ここに、 f_t : 引張強度 (N/mm²)

P : 最大荷重 (N)

d : 供試体の直径 (ここでは 75mm)

l : 供試体の長さ (mm)

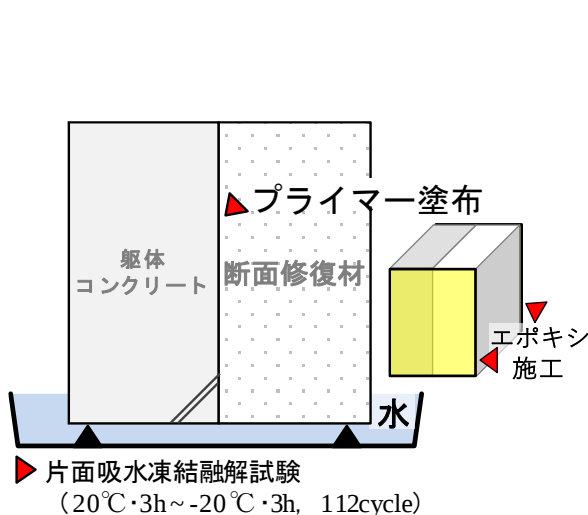


図 6-3 片面吸水凍結融解試験の吸水方法の概念図

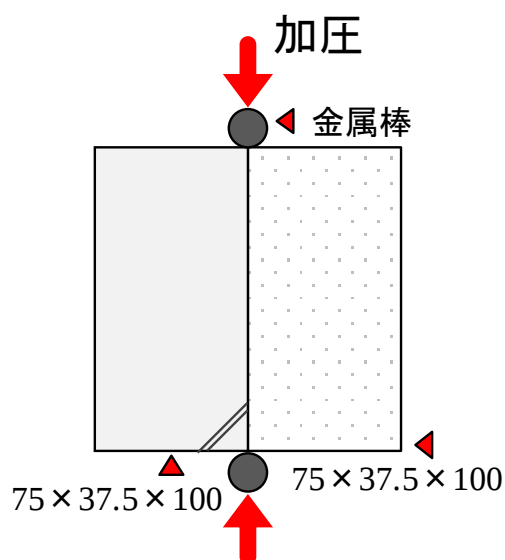


図 6-4 割裂引張試験の概念図

シリーズⅢでは、コンクリートのひずみに対する断面修復材の追従性および剥離発生について検討を行う。コンクリートは DM 100 で $\square 75 \times 200 \text{mm}$ に切断したものをを用いた。断面修復材は PCM を用い、プライマーを塗ったコンクリートの側面に $\square 50 \times 20 \text{mm}$ の寸法に施工し、4 週間気中養生した。一軸ひずみ追従性試験は、図 6-6 のようにコンクリートに加圧し、断面修復材をまたぐパイゲージでコンクリートのひずみを、パイゲージと平行方向に貼り付けたひずみゲージで断面修復材表面のひずみを測定した。

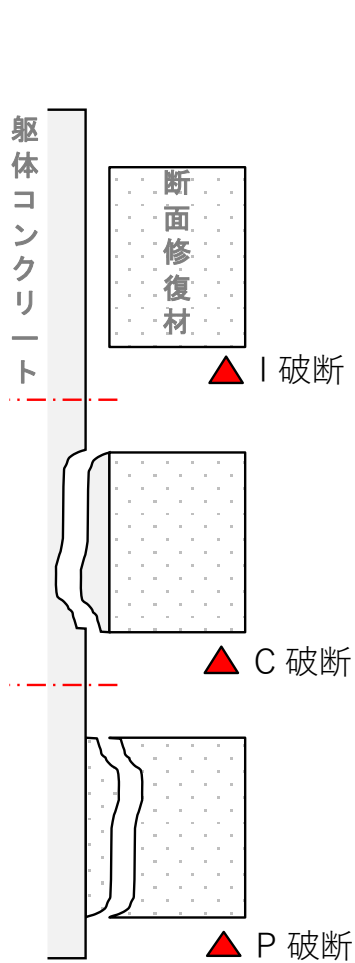


図 6-5 引張試験および割裂引張強度の破断パターンの区分

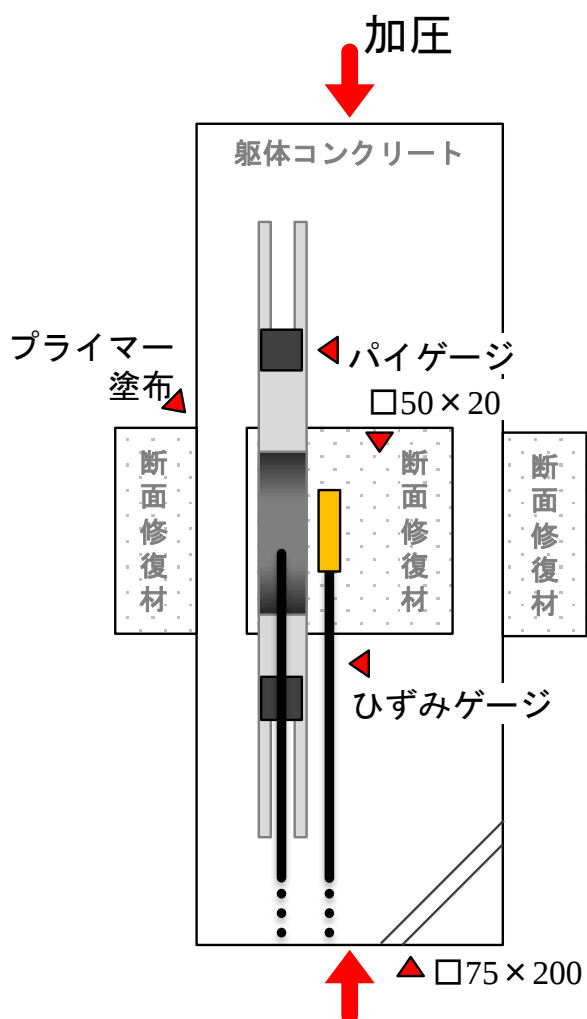


図 6-6 一軸ひずみ追従性試験の概念図

6.3. 実験結果

6.3.1. シリーズ I : コンクリートの凍害劣化程度による断面修復材の付着強度変化

図 6-7 に引張試験による C 破断面積率を, 図 6-8 に引張試験を行ったコンクリートの破断状況を示す。その結果, DM 100 の C 破断面積率は 0%であり, 破断パターンは I 破断であった。これは, コンクリートおよび断面修復材の引張強度より両者の付着強度が小さかったことが考えられる。なお, I 破断面には断面修復材を施工する前に塗布したプライマーが見られた。これは, 凸凹が少ないコンクリートの表面においてプライマーの塗布は微細な凸凹を平滑に埋めることになり, プライマーと断面修復材の接触面積が小さくなっていることが考えられる。

DM 90~60 の場合は I 破断および C 破断であり, C 破断面積率は 50%以上の値を示している。また, 凍害劣化を生じたコンクリートの場合はその劣化程度によらず C 破断面積率が高くなるものが多く, DM 60 の C 破断面積率は 75%以上の高い値を示している。I 破断の比率が高い試験体は, DM 90 および DM 80 のものであり, DM 80 の試験体中には C 破断面積率が 0%のものもあった。

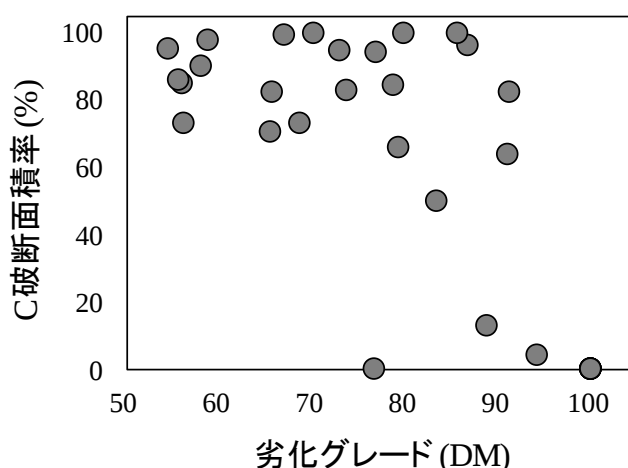


図 6-7 引張試験による C 破断面積率

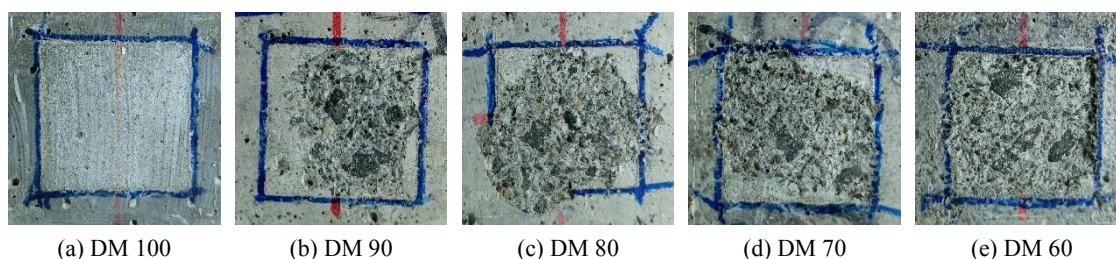


図 6-8 引張試験によるコンクリートの破断性状

図 6-9 に付着強度および付着強度の標準偏差を示す。グラフの横軸はコンクリートの劣化グレードを示しており、左側の縦軸は付着強度を、右側の縦軸は DM 100, 90, 80, 70, 60 ごとに求めた付着強度の標準偏差を示している。図より、DM 90~60 の場合、DM が小さくなるほどコンクリートと断面修復材の付着強度が小さくなる結果となった。また、付着強度の標準偏差は DM 60 が 0.2, DM 90 が 0.34 で、DM が小さくなるほど標準偏差も小さくなる傾向を示した。これは、凍害劣化を受けたコンクリートにおいてモルタルと骨材の付着強度が低下する¹⁾²⁾³⁾ことが考えられ、コンクリートの破断面の中心には骨材の分布（図 6-8 の(b)~(e)）が見られることから、各試験体の測定部に骨材の分布が異なったことが同じ DM でも異なる付着強度を示した原因と考えられる。また、DM が小さい場合は、骨材の影響よりもモルタルの組織の緩みやひび割れの影響による付着強度の低下が原因と考えられる。

DM 100 の付着強度の範囲は 1.3~2.4MPa であり、凍害劣化を受けたコンクリートの付着強度よりも高い値を示しているが、付着強度の標準偏差は 0.46 で最も大きい値を示している。これは、図 6-8 の(a)に示されるように DM 100 の破断パターンは I 破壊であり、付着強度はプライマーが影響していると考えられ、試験体ごとにプライマーの塗布量が一定でなく、断面修復材を施工するまでの待ち時間などが異なることなどでプライマーの接着強度が微妙に異なった結果だと考えられる。

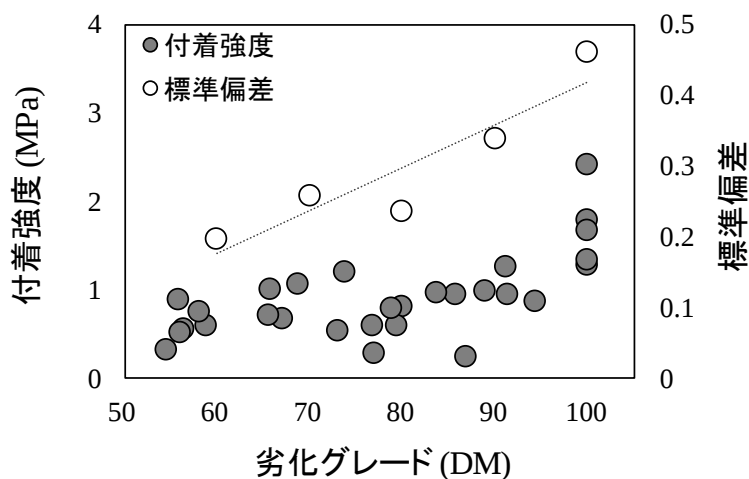


図 6-9 引張試験による付着強度および標準偏差

6.3.2. シリーズⅡ：コンクリート断面修復材の界面から吸水する片面吸水凍結融解試験による断面修復コンクリートの付着強度変化

図 6-10 に割裂引張試験による片面吸水凍結融解試験「前」、「後」の C 破断面積率を示す。また、割裂引張試験を行った片面吸水凍結融解試験「前」、「後」の試験体の破断性状を図 6-11 および図 6-12 に示す。

片面吸水凍結融解試験「前」は、凍害劣化を受けたコンクリートの場合はその劣化程度によらず C 破断面積率が大きくなる傾向を示した。DM 60～90 の場合は、コンクリートの破断性状は主に C 破断であり、全ての試験体で 70～80 (%) の C 破断面積率を示した。DM 100 の破断性状は主に C 破断および I 破断であったが、一部の試験体からは図 6-11 の(a)のような P 破断も見られた。なお、DM 100 の C 破断面積率は 46%であり、片面吸水凍結融解試験「前」の試験体中で最も小さい値を示した。

片面吸水凍結融解試験「後」の場合は、凍害劣化を受けたコンクリートの場合はその劣化程度によらず C 破断面積率が大きくなる傾向を示し、片面吸水凍結融解試験「前」の同 DM よりも小さい C 破断面積率を示した。これは、片面吸水により試験体の界面あるいはコンクリートへ水分が吸水され、界面が劣化したことが原因と考えられる。DM 100 の破断性状は、軽微なコンクリートの破断が見られたが、C 破断面積率は約 0%でほぼ I 破断であった。また、I 破断面にはプライマーが残っていた。これは、片面吸水凍結融解試験を行うことで試験体の吸水面から断面修復材とコンクリートの界面へ水分が吸水され、凍結融解作用などによってプライマーの接着力が低下⁴⁾したものと考えられる。DM 60～90 の試験体の場合は C 破断および I 破断が見られた。特に、DM 90 の場合は、片面吸水凍結融解試験の吸水面であった部分でも I 破断が見られた(図 6-11 の(b))。これは、片面吸水凍結融解試験により吸水部付近のプライマーと断面修復の接着力が低下し、剥離が発生したものと考えられる。

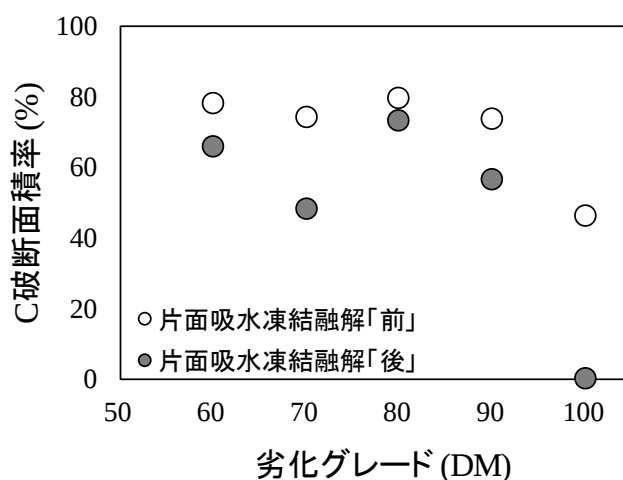


図 6-10 割裂引張試験による片面吸水凍結融解試験「前」、「後」の C 破断面積率

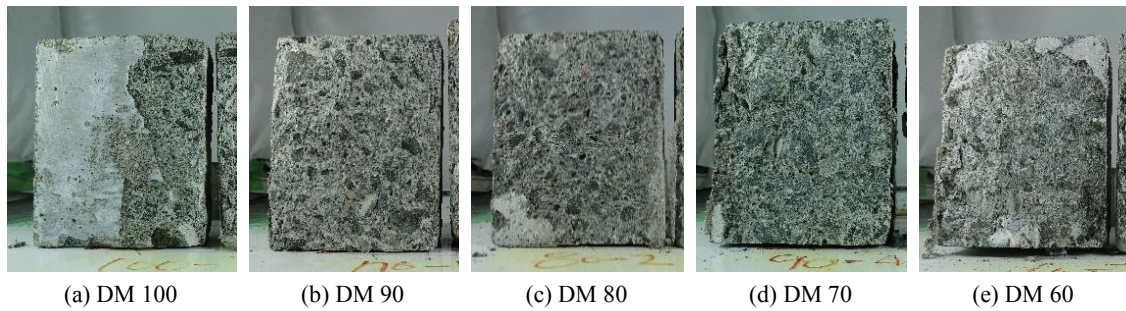


図 6-11 割裂引張試験による片面吸水凍結融解試験「前」のコンクリート破断性状

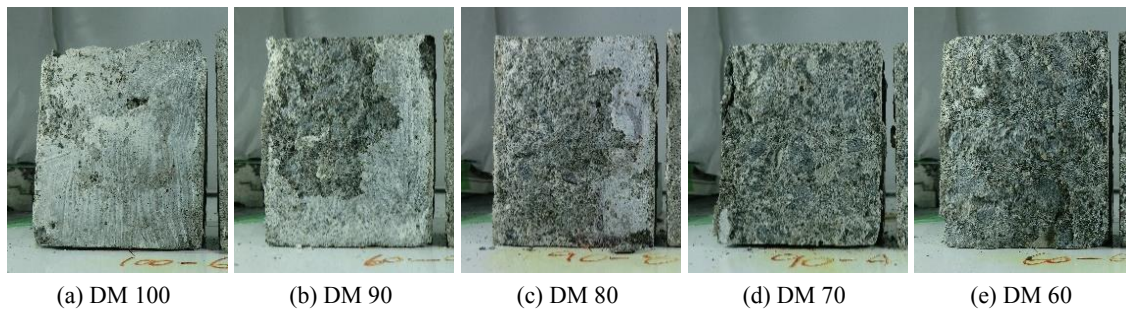


図 6-12 割裂引張試験による片面吸水凍結融解試験「後」のコンクリート破断性状

図 6-13 に割裂引張試験による片面吸水凍結融解試験「前」、「後」の付着強度を示す。片面吸水凍結融解試験「前」の付着強度は、DM が大きくなるほど徐々に増加する傾向を示した。片面吸水凍結融解試験「後」の DM 100 の場合は、片面吸水凍結融解試験「前」より著しく減少し、最も小さい値を示した。DM 60～90 の試験体の場合は片面吸水凍結融解試験「前」より若干減少し、「前」と同様に DM が大きくなるほど付着強度が増加する傾向を示した。これは、片面吸水凍結融解試験により断面修復材とコンクリートの界面の吸水、界面での水分の凍結、温度変化によるひずみ差等が原因と考えられる。

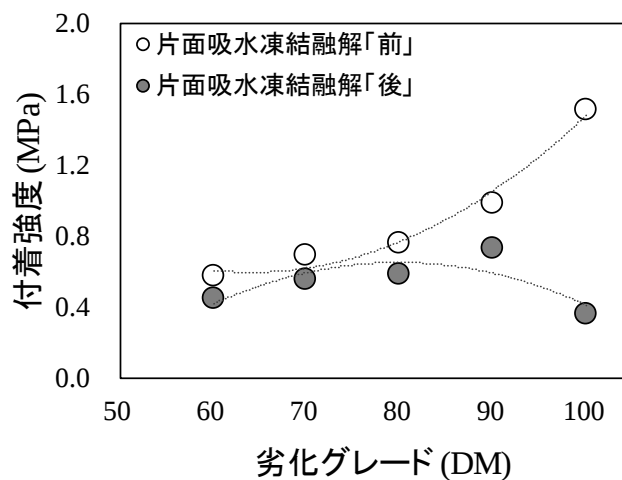


図 6-13 割裂引張試験による片面吸水凍結融解試験「前」、「後」の付着強度

6.3.3. シリーズⅢ：コンクリートのひずみに対する断面修復材の追従性

表 6-4 に一軸ひずみ追従性試験結果の概要を示す。また、図 6-14 に一軸加圧による躯体コンクリートおよび断面修復材のひずみ変化を示す。グラフの横軸は躯体コンクリートの荷重、縦軸はひずみを示している。なお、ひずみは加力前を 0 として「+」値は膨張、「-」は収縮を意味する。

図より、試験体 No.1 および No.2 とも躯体コンクリートは加力によって収縮するが、断面修復材のひずみは増加した。これは、一軸加圧による躯体コンクリートが収縮することによって、断面修復部の中心部から断面修復材が剥離することで躯体コンクリートに拘束されていない断面修復材の表面部が膨張したと考えられ、加力前に部分的に剥離していたものと思われる。躯体コンクリートの荷重による断面修復材のひずみは、完全な剥離が生じていないと思われる区間では No.1 および No.2 とも類似なひずみ変化を示した。躯体コンクリートのひずみ変化は、No.1 と No.2 で異なっているが、これは、ひずみの測定が片面であったために偏心が生じていること、No.1 と No.2 のコンクリートの圧縮強度および静弾性係数が異なることが原因と考えられる⁵⁾。また、完全な剥離が生じていないと思われる躯体コンクリートの荷重の範囲は No.1 が 0～333kN、No.2 が 0～151kN と異なっており、No.2 のほうが低い荷重で完全な剥離が発生したものと考えられる。

図 6-15 に No.1 および No.2 の躯体コンクリートのひずみ変化に対する断面修復材のひずみ変化を示す。No.1 の場合は、躯体コンクリートのひずみが $-2725\mu\epsilon$ であり、断面修復材のひずみが $555\mu\epsilon$ で、No.2 は躯体コンクリートおよび断面修復材のひずみが $-1238\mu\epsilon$ および $237\mu\epsilon$ で完全な剥離が発生した。これらの値は約 2 倍の差があるが、完全な剥離には部分的な凹凸や接着状況が影響しているものと思われる。

図 6-16 に一軸ひずみ追従性試験を行った試験体の状況を示す。一軸加圧により躯体コンクリートと断面修復材は I 破断を示した。躯体コンクリートの断面修復部は断面修復材を施工する前に塗布したプライマーが残っており、ひずみ差が生じる条件では界面剥離が生じやすいものと考えられる。

表 6-4 一軸ひずみ追従性試験結果の概要

区分	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	最大荷重時		追従性範囲の最大荷重時		
			最大荷重 (kN)	躯体コンクリート ひずみ ($\mu\epsilon$)	最大荷重 (kN)	躯体コンクリート ひずみ ($\mu\epsilon$)	断面修復材 ひずみ ($\mu\epsilon$)
No.1	63.4	20.6	334	-3324	333	-2726	555
No.2	49.9	15.4	277	-1467	151	-1238	237

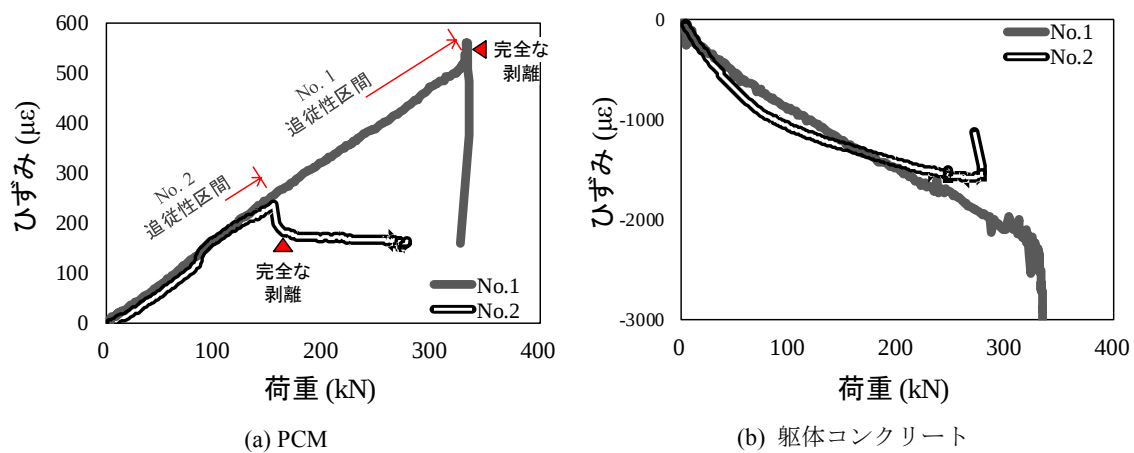


図 6-14 コンクリートの荷重に従うひずみ

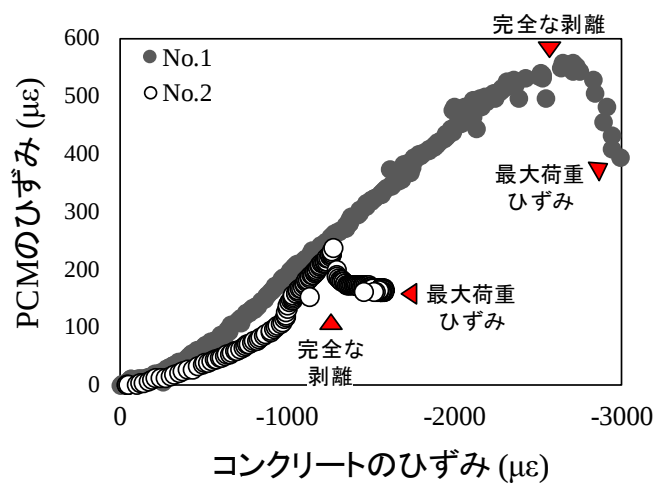


図 6-15 コンクリートのひずみに対する断面修復材のひずみ

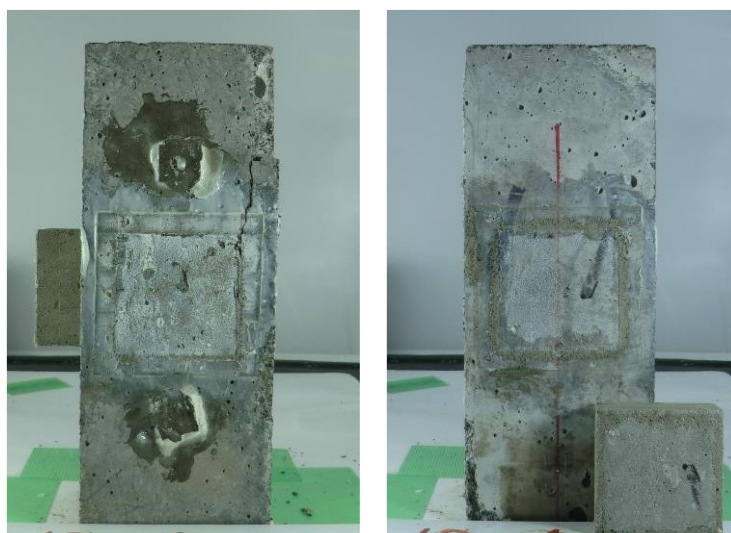


図 6-16 一軸ひずみ追従性試験後の試験体様子 (No.1)

6.4. 第 6 章の結論

本章では、コンクリートー断面修復材の界面の劣化による断面修復コンクリートの早期劣化メカニズムを想定し、はつり不足、凍結融解作用、コンクリートと断面修復材のひずみ差を考慮した三つのシリーズの実験を行い、検討を行った。その結果、本章の範囲では次のような知見を得ることができた。

- (1) 健全なコンクリートと断面修復材の直接引張試験では、コンクリートと断面修復材の界面破断を示すが、付着強度にバラツキが大きい。
- (2) 凍害劣化を受けたコンクリートと断面修復材の直接引張試験では、コンクリートの相対動弾性係数が 90%程度の軽微な劣化程度でも健全なコンクリートの付着強度の 50%程度に低下する。破断パターンは、コンクリート破断となり、破断面に粗骨材表面がみられる。
- (3) 健全なコンクリートと断面修復材の片面吸水凍結融解試験前・後の割裂引張強度の変化は、片面吸水凍結融解試験を行うことで著しく低下する。破壊パターンは、試験前に界面破断であったが、試験後はコンクリート破断に変化する。
- (4) 片面吸水凍結融解試験による凍害劣化を受けたコンクリートと断面修復材の割裂引張強度の変化は、片面吸水凍結融解試験後も試験前と同様に小さな値を示した。
- (5) 一軸ひずみ追従性試験では、コンクリートと断面修復材のひずみ差によって界面には剥離が発生する。

以上、はつり不足部分が取り残された場合、断面修復材の付着強度は低下し、著しく小さくなる。健全なコンクリートの場合では凍結融解作用を受けると付着強度が低下する。また、断面修復材とコンクリートの界面には剥離が生じていることが考えられ、両材にひずみ差が生じる場合には容易に剥落する。

第 6 章の参考文献

- 1) 上田稔, 長谷部宣男, 佐藤正俊, 奥田宏明: コンクリートの引張破壊メカニズムと引張強度の破壊力学的研究, 土木学会論文集, Vol.19, No.466, pp.69-78, 1993
- 2) 千歩修, 濱幸雄, 松村光太郎, 袴谷秀幸: コンクリートの耐凍害性に及ぼす粗骨材の線膨張係数と石粉の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.787-792, 2000
- 3) 佐伯昇, 鮎田耕一, 前川, 静男: 北海道における海岸および港湾コンクリート構造物の凍害による表面剥離損傷, 土木学会論文報告書, Vol.1982, No.327, pp.151-162, 1982
- 4) Sang-Keun Oh; Neung-Hoe Heo, Hong-Chul Shin, Sung-Min Choi : Characteristics of Bond Strength as Types of Primer for the Facilities of Anti-corrosion Waterproofing Materials by the Reversed Pressure and Concrete Surface Condition, Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection, Vol.18, No.1, pp.68-74, 2014
- 5) 野口貴文, 友澤 史紀: 高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学特性との関係, 日本建築学会構造系論文集, Vol.60, No.472, pp.11-16, 1995

第7章 総括

鉄筋コンクリート構造物を長期的に使用するためには、劣化状況に応じて補修を行う必要があり、凍害劣化等を生じたコンクリートは劣化部分を取り除き、断面修復材で補修が行われる。しかしながら、積雪寒冷地においては、断面修復材で補修を行った鉄筋コンクリート構造物が早期に劣化する事例が数多く報告されている。

本論文では、積雪寒冷地における断面修復コンクリートの早期劣化を対象とし、既往の研究および補修を行ったコンクリート構造物の早期劣化事例から、その劣化メカニズムを想定し、それに対応する実験を行い、検討を行った。ここでは、典型的な早期劣化形態を、1) コンクリートと断面修復材の界面の剥離、2) 断面修復部のひび割れ、3) コンクリートと断面修復材の界面からのエフロレッセンス・錆汁、の三つとした。この劣化原因として、断面修復時の脱塩・脱水不足、不適切な断面修復材の使用、不適切な断面修復面の処理（はつり不足）などを想定した。断面修復コンクリートが凍結融解作用を受けることで温冷乾湿ムーブメントだけでなく、水分・塩化物イオンの移動促進・蓄積されることが考えられる。

ここでは、断面修復を施した鉄筋コンクリート構造物の劣化発生の原因の究明を目的し、寒冷地の凍結融解を想定した水中促凍結融解試験で、はつり不足状態の再現と凍害劣化を受けたコンクリートの性状の把握、コンクリートまたは断面修復材の熱的挙動の把握、断面修復コンクリートにおける物質移動および両材の一体性について検討を行った。以下に本研究で得られた成果を示す。

第1章 序 論

本研究の背景と目的、既往の研究、ならびに、本研究の構成を記した。

第2章 積雪寒冷地における断面修復コンクリートの早期劣化の原因に関する考察

本章では、積雪寒冷地における断面修復コンクリートの早期劣化現象の事例に基づき、劣化現象の原因について分析した。また、市販の断面修復材が採用している品質基準および試験規格を比較・検討し、これら品質規格の問題点について考察した。その結果、次のような知見が得られた。

- (1) 断面修復コンクリートの早期劣化現象は、コンクリートー断面修復材の剥離、断面修復材のひび割れおよびコンクリートー断面修復材の界面からのエフロレッセンス・錆汁が代表的なものである。
- (2) 断面修復コンクリートの早期劣化の原因として、断面修復時のはつり不足、使用環境に不適切な断面修復材の使用、コンクリートの脱塩不足・高い含水状態の保持およびこれらの複合的な作用を想定した。
- (3) 断面修復材の品質基準は「構造物施工管理要領」および「建築改修設計指針」に規定されるものが代表的なものであるが、断面修復材に要求される耐久性の評価項目がないものがあり、要求性能が同様であっても試験規格が異なる場合がある。

第3章 凍害を受けたコンクリートの性状

本章では、耐凍害性の異なるコンクリートに対し、促進凍結融解試験を行い、凍害劣化を受けたコンクリートの性状を把握した。その結果、本章の範囲では次のような知見を得ることができた。

- (1) 凍害を受けたコンクリートの圧縮強度は、劣化程度が激しくなるほど減少する傾向を示すが、AE コンクリートの場合は強度減少の傾向が小さくなる。
- (2) 凍害を受けたコンクリートの超音波伝播速度は、劣化程度が激しくなるほど低下するが、AE コンクリートの場合は、凍害劣化による圧縮強度の変化が小さくても明確な低下傾向を示す。
- (3) 凍害を受けたコンクリートの静弾性係数は顕著に減少し、ポアソン比は著しく大きな値を示す場合と小さい値を示す場合がある。
- (4) 凍害を受けたコンクリートの見かけの線膨張係数およびひび割れ密度は、劣化の程度が激しいほど大きくなり、この傾向は、AE コンクリートより non AE コンクリートの方が顕著である。
- (5) 凍害を受けたコンクリートは、劣化の程度が激しいほど絶乾密度が小さくなり、表乾状態の含水率が大きくなる傾向を示す。

以上のことから、凍結融解作用を受けたコンクリートは、微細なひび割れによって各種性状が低下し、相対動弾性係数 90%程度の凍害劣化部分が取り残された断面修復コンクリートでも早期劣化する可能性があると考えられる。このため、実際のコンクリート構造物の補修時には凍害劣化部分を適切に評価する必要がある。

第4章 コンクリートおよび断面修復材の温度変化に対するひずみ変化の検討

本章では、断面修復コンクリートの早期劣化の原因をコンクリートと断面修復材の温度変化によるひずみ差と想定し、外部環境の温度変化時の材料の温度変化およびひずみ変化を把握するために二つのシリーズの実験を行った。その結果、本章の範囲では次のような知見を得ることができた。

- (1) 槽内温度変化時のコンクリートの見かけの線膨張係数は、相対動弾性係数が 90%程度の場合一般的なコンクリートの線膨張係数 ($7 \sim 14 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) と同等であるが、凍害劣化程度の激しいものほど大きな見かけの線膨張係数を示す。また、凍害劣化による見かけの線膨張係数の変化は、non AE、高水セメント比のものほど大きく、non AE・W/C 60%・相対動弾性係数 60%で $31.4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 程度の値を示した。
- (2) 槽内温度変化時の断面修復材の見かけの線膨張係数は、一般的なコンクリートの線膨張係数に対してポリマーセメントモルタルは半分程度、レジンモルタルは 4 倍程度の値を示した。
- (3) 槽内温度変化によるコンクリート表面および断面修復材表面の温度変化は、乾燥状態より

湿潤状態の方が遅くなる。

- (4) 槽内温度変化によるコンクリートの材料内部の熱移動は、乾燥状態よりも湿潤状態の方が速い。絶乾状態の場合の熱移動は健全なコンクリートよりも凍害劣化したコンクリートの方が速く、湿潤状態の場合の熱移動は、凍害劣化したコンクリートと健全なコンクリートが同様である。
- (5) 槽内温度変化による断面修復材の材料内部の熱移動は、絶乾状態の熱移動の速度が湿潤状態よりも遅く、健全なコンクリートよりも断面修復材の熱移動の速度が遅くなる。

以上の結果から、コンクリートは劣化程度・含水状態によって見かけの線膨張係数・熱的性状が大きく変化する。また、断面修復材の見かけの線膨張係数・熱的性状は、コンクリートのそれと大きく異なるものがある。このため、これらの性状の差異によって断面修復材にひび割れおよび界面に剥離が生じることが考えられる。今後、実環境における材料の組み合わせ、含水状態、温度変化等を考慮し、断面修復材のひび割れ発生条件を明確にする必要がある。

第5章 積雪寒冷地を想定した断面修復コンクリート中の物質移動に関する実験的検討

本章では、断面修復材表面あるいは修復界面からの物質移動および、塩化物の残留による断面修復コンクリートの早期劣化メカニズムを想定し、はつり不足、塩化物の供給、凍結融解を想定した実験を行い、断面修復コンクリートの早期劣化の原因について検討を行った。その結果、本章の範囲では次のような知見を得ることができた。

- (1) 片面吸水試験による断面修復コンクリートにおける水分移動は、断面修復材あるいは凍害劣化したコンクリートよりも両材の界面で著しい。
- (2) 塩水片面吸水凍結融解試験では、界面における水分の移動は塩水片面吸水試験よりも促進される。
- (3) 塩水片面吸水試験による塩化物残留コンクリートの質量含水率の変化はほぼ一定の値を維持するが、塩化物イオン含有量は減少する傾向を示す。濃度勾配による断面修復材への塩化物の拡散と推定される。
- (4) 塩化物残留コンクリートに断面修復材を行った断面修復コンクリートが凍結融解作用を受けた場合、コンクリート部分の質量含水率が増加したが、塩化物イオン含有量は増加の傾向を示さなかった。断面修復材が塩化物イオンの移動を抑制したことが考えられる。

以上のことから、断面修復コンクリートの界面には施工時から欠陥が生じていることが考えられ、さらに温度変化および凍結融解作用によって界面に剥離が生じていることが考えられる。凍結融解による含水率上昇作用があることや断面修復材の組織の緩みによる劣化物質の浸透促進が考えられる。

第6章 断面修復コンクリートの一体性

本章では、コンクリートー断面修復材の界面の劣化による断面修復コンクリートの早期劣化メカニズムを想定し、はつり不足、凍結融解作用、コンクリートと断面修復材のひずみ差を考慮した三つのシリーズの実験を行い、検討を行った。その結果、本章の範囲では次のような知見を得ることができた。

- (1) 健全なコンクリートと断面修復材の直接引張試験では、コンクリートと断面修復材の界面破断を示すが、付着強度にバラツキが大きい。
- (2) 凍害劣化を受けたコンクリートと断面修復材の直接引張試験では、コンクリートの相対動弾性係数が90%程度の軽微な劣化程度でも健全なコンクリートの付着強度の50%程度に低下する。破断パターンは、コンクリート破断となり、破断面に粗骨材表面がみられる。
- (3) 健全なコンクリートと断面修復材の片面吸水凍結融解試験前・後の割裂引張強度の変化は、片面吸水凍結融解試験を行うことで著しく低下する。破壊パターンは、試験前に界面破断であったが、試験後はコンクリート破断に変化する。
- (4) 片面吸水凍結融解試験による凍害劣化を受けたコンクリートと断面修復材の割裂引張強度の変化は、片面吸水凍結融解試験後も試験前と同様に小さな値を示した。
- (5) 一軸ひずみ追従性試験では、コンクリートと断面修復材のひずみ差によって界面には剥離が発生する。

以上、はつり不足部分が取り残された場合、断面修復材の付着強度は低下し、著しく小さくなる。健全なコンクリートの場合では凍結融解作用を受けると付着強度が低下する。また、断面修復材とコンクリートの界面には剥離が生じていることが考えられ、両材にひずみ差が生じる場合には容易に剥落する。

本研究では、積雪寒冷地における断面修復コンクリートの早期劣化の原因を明らかにした。また、この成果に基づいて断面修復コンクリートの早期劣化の防止のためには、凍害劣化部分を適切に取り除く必要があり、凍害劣化した部材の劣化状況を明確に判断する方法について検討すべきである。さらに、断面修復コンクリートにおけるひび割れまたは剥離の発生は、温冷乾湿および凍結融解の繰返しによる両材のひずみ差が起因すると考えられる。使用環境に適合する補修材料を選定するためには、断面修復材とコンクリートのひずみ差を小さくする必要があり、両材のひずみ差と剥離およびひび割れ発生の条件を明らかにする必要がある。なお、断面修復材の線膨張係数、乾燥収縮率などの性能評価項目を追加もしくは改定する必要がある。