

コンクリート表層品質評価委員会

報 告 書

- 東日本大震災により津波を受けたコンクリート構造物の表層品質評価
- 各種非破壊検査を用いたコンクリートの表層品質評価
- 変状あるいは含浸性塗布材の施工箇所への各種非破壊試験の適用性の検討
- 実コンクリート部材への各種非破壊試験の適用性の検討

2023年5月



公益社団法人 日本コンクリート工学会 東北支部

はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震による本震とその後の津波の襲来、そして余震により多くの建造物が被害を受けた。同じ年の3月25日に7学協会による「東日本大震災に関する学術合同調査委員会」が発足し、(公社)日本コンクリート工学会東北支部は5部門(コンクリート工学)を所掌し、建造物の調査WG、瓦礫処理・有効活用WG、災害時マネジメントWGによる調査結果がまとめられ、復興に向けての課題と教訓がまとめられた。その後、節目の10年を迎え、当時課題としていたことが現状でどの様になっているのかJCI東北支部の幹事会・役員会の中で検証が必要との意見が出された。特に、津波履歴を受けた鉄筋コンクリート建造物の表層評価においては、津波塩分の浸透状況を再調査し、鉄筋腐食に至る可能性があるのか確認する必要がある。

また、震災後、新たに造られるコンクリート建造物に対しては、過酷な気象条件にも十分耐えられるよう、産学官が一体となって長寿命化を図る動きが活発となり、コンクリート建造物の品質確保の取り組みが積極的に行われた。施工による品質の良否を判断する一つの手法として、透気試験や透水試験が用いられ、施工や養生方法の違いによる品質評価が行われた。この様な取り組みから、新設コンクリート建造物の表層品質の確認に多くの非破壊検査が用いられるようになってきたが、特に透気試験や透水試験などは、対象とするコンクリート表層の状況によって測定結果が大きく変わることが知られている。今後、コンクリートの品質評価を正しく行うためにも、各種非破壊検査の特徴を理解し、目的に合わせて使用していくことが必要になってきている。

本委員会は、これらの課題に対応するために「コンクリート表層品質評価委員会(委員長 武田三弘、幹事長 渡邊弘子)として立ち上げられ、①地震や津波を受けたコンクリートの震災後における表層品質評価(WG1 主査 菅野秀人)、②各種非破壊試験を用いたコンクリートの表層品質評価(WG2 主査 大友鉄平)、③変状あるいは含浸性塗布材の施工箇所への各種非破壊試験の適用性の検討および④実コンクリート部材への各種非破壊試験の適用性(WG3 主査 迫井裕樹)の4つの課題について調査・研究を行ったものである。本報告書が、今後のコンクリートの表層品質評価に役立てば幸いである。

2023年3月31日

東北学院大学工学部 武田三弘

コンクリート表層品質評価委員会

委員構成

委員長	武田 三弘 (東北学院大学)
幹事長	渡邊 弘子 (月の泉技術士事務所)
幹事(WG1 主査)	菅野 秀人 (秋田県立大学)
(WG2 主査)	大友 鉄平 (早川ゴム株式会社)
(WG3 主査)	迫井 裕樹 (八戸工業大学)
委員	阿波 稔 (八戸工業大学)
	石橋 努 (株式会社復建技術コンサルタント)
	石山 智 (秋田県立大学)
	佐藤 輝明 (国土交通省東北地方整備局)
	石垣 進 (国土交通省東北地方整備局)
	大塚亜希子 (秋田県立大学)
	松川 欣司 (仙台コンクリート試験センター株式会社)
	上原子晶久 (弘前大学)
	子田 康弘 (日本大学)
	徳重 英信 (秋田大学)
	権代 由範 (仙台高等専門学校)
	西脇 智哉 (東北大学)
	樋本 智 (東日本高速道路株式会社)
	皆川 浩 (東北大学)
	森田 大作 (パシフィックコンサルタンツ株式会社)

(五十音順, 敬称略)

目 次

1. 地震や津波を受けたコンクリートの震災後における表層品質評価	1
1.1 津波被災した構造物の実測調査（震災当時と 10 年後の塩化物イオン濃度分布の比較）	1
1.1.1 土木構造物（橋脚 R）	1
1.1.2 土木構造物（橋台 U）	2
1.1.3 土木構造物（橋桁 S）	3
1.1.4 土木構造物（橋脚 T）	4
1.1.5 建築構造物（建屋 I）	5
1.1.6 建築構造物（校舎 I）	6
1.1.7 建築構造物（A 邸, B 邸）	8
2.1.8 建築構造物（C 邸, D 邸）	9
1.1.9 建築構造物（E 邸）	10
1.2 実測調査結果を踏まえた津波浸水等による塩害の対策に関する検討	12
1.2.1 べた基礎部を想定した津波汚泥による塩分浸透実験	12
1.2.2 ひび割れ量を変数とする塩水吸水試験	17
(1) 実験方法	17
(2) 実験結果	17
1.2.3 高圧洗浄による塩化物イオン浸透抑制効果の検証	22
1.3 まとめ	25
2. 各種非破壊試験を用いたコンクリートの表層品質評価	26
2.1 各種非破壊試験の概要	26
2.1.1 透気試験	26
2.1.2 表面吸水試験	27
2.1.3 簡易透気試験	27
2.1.4 X線造影撮影法	28
2.2 各種非破壊試験の測定結果と空隙量との関係（X線造影撮影法との比較による考察）	29
2.2.1 実験概要	29
2.2.2 実験結果	30
2.3 各種非破壊試験の相関性	31
2.4 各種非破壊試験の測定結果に及ぼす表面水分率の影響	33
2.5 長期材齢における各種非破壊試験結果の変動	36
2.5.1 実験概要	36

2.5.2 実験結果	37
(1) コンクリート表面の含水率	37
(2) 透気試験による評価	40
(3) 表面吸水試験による評価	41
(4) 簡易透気試験による評価	42
(5) 全試験結果の比較と考察	43
2.6 まとめ	44
3. 変状あるいは含浸性塗布材の施工箇所への各種非破壊試験の適用性の検討	45
3.1 簡易透気試験によるセパレータ周囲に生じた沈みひび割れの貫通評価	45
3.1.1 簡易透気試験機の概要	46
3.1.2 実験概要	47
(1) 供試体概要	47
(2) 貫通ひび割れの確認方法	47
3.1.3 実験結果	47
(1) 沈みひび割れの貫通評価	47
(2) X線造影撮影法によるセパレータ周辺の沈みひび割れ発生状況の確認	48
3.2 含浸性塗布材（含浸材）が表層品質に及ぼす影響	50
3.2.1 検討概要	50
3.2.2 検討結果	51
(1) 表層透気係数	51
(2) 表面吸水速度	51
(3) スケーリング抵抗性	52
(4) 非破壊試験による表層品質とスケーリング抵抗性	53
3.3 まとめ	54
4. 実コンクリート部材への各種非破壊試験の適用性の検討	55
4.1 簡易透気試験を用いた実コンクリート部材の表層品質評価	55
4.1.1 調査現場の概要	55
4.1.2 測定結果	59
(1) 樋門側壁（2019年竣工）	59
(2) 高架橋橋脚（2014年竣工）	62
(3) 高架橋橋脚補強部（2021年竣工）	63
(4) ボックスカルバート側壁（2021年竣工）	64
4.2 各種非破壊試験を用いたプレキャスト部材の表層品質評価	66
4.2.1 実験概要	67

(1) 供試体概要	67
(2) 検討項目	67
4.2.2 結果および考察	67
(1) 対象面内における表層透気係数の分布	67
(2) 対象面内における表面吸水速度の分布	70
(3) 耐久性（塩分浸透性／スケーリング抵抗性）	72
4.3 まとめ	73
5. 総括	74

付録（参考資料・論文リスト）

1. 地震や津波を受けたコンクリートの震災後における表層品質評価

1.1 津波被災した構造物の実測調査（震災当時と 10 年後の塩化物イオン濃度分布の比較）

2011 年東北地方太平洋沖地震では、沿岸部に立地する数多くのコンクリート構造物が津波により被災した。これら被災構造物を耐久性の観点から俯瞰した場合、耐塩害性が強く考慮されていない建築物が津波を受けた際には、劣化の進行により継続使用を考える上で問題が発生する可能性がある。特に当該震災のような大規模災害では、物資不足、人手不足により復旧作業が数週間から数ヶ月単位で遅れることが想定されるため、劣化の進行が懸念される。実際に、高濃度の塩化物を含む汚泥等が長期にわたり堆積・付着していた事例も報告されている¹⁾。このため震災後に津波被害を受けた実構造物の塩分浸透調査が行われている^{2),3)}。その結果、ひび割れ部における塩化物イオンの浸透などが確認された。津波被災以前の塩化物イオン浸透状況に関するデータが得られていないことから、過度な一般化はできないとした上で、また津波による海水の浸水が直ちに構造安全性の低下に直結することは考えにくいですが、継続使用と長期耐久性を考えた場合には、含有塩化物量と鉄筋腐食のリスクを十分に勘案する必要があることが示唆されている。本節では、このような当時の懸念を受けて震災から 10 年が経過し改めて津波被災した建造物の塩化物浸透調査を実施して、当時の調査結果との比較を行った。

1.1.1 土木構造物（橋脚 R）

写真-1.1.1 は海岸線から 700m に立地する鉄筋コンクリート橋脚である。2010 年に架設され⁴⁾、竣工後 1 年で被災したもので、塩害対策が施されていた橋脚である。津波痕と考えられる濃い変色域（写真-1.1.2 参照）から 1.26m の津波高さだったものと推察される。震災後の調査は 2012 年 8 月に実施された。塩化物イオン濃度の測定は、写真-1.1.2 に示す 5 点（A～E 点）においてドリルによりコンクリート粉末を採取し、蛍光 X 線装置を用いて測定した。



写真-1.1.1 調査対象橋脚³⁾

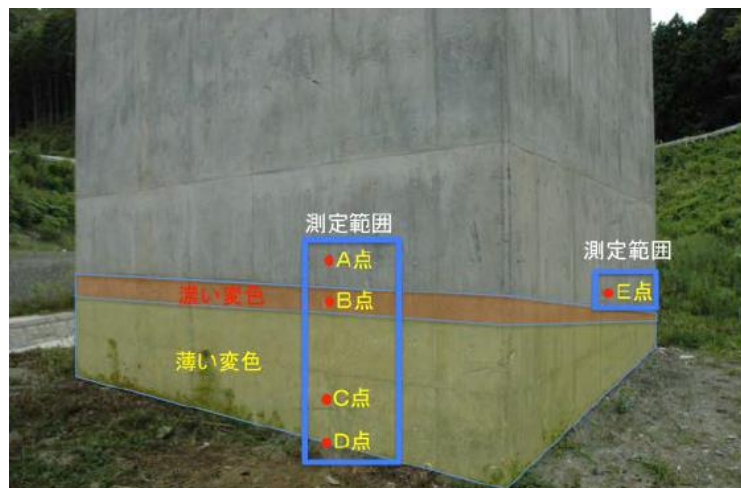


写真-1.1.2 測定位置³⁾

（黄色は薄い変色域、赤色は濃い変色域を表す）

震災後約10年が経過した2020年10月に再度サンプル採取を行った。前回の調査において、5箇所で大きな違いがなかったことを鑑みて、今回の採取箇所は前回調査におけるA点付近（高さ1.4m）についてのみ調査した。調査結果を図-1.1.1に示す。前回と大きな違いはなく塩化物イオン濃度は 0.6kg/m^3 以下の値となっていた。傾斜地に立地することから浸漬時間は短かったと推察され、また比較的新しい構造物であったためコンクリート組織が緻密で、浸透する塩化物イオン濃度は小さかったものと考えられる。また、震災当時の調査では土壌においても塩化物イオンが確認され、コンクリートの乾燥による土壌水分の吸い上げによる塩化物イオン濃度の凝縮も懸念された³⁾が、今回の調査ではそのような現象は確認できなかった。

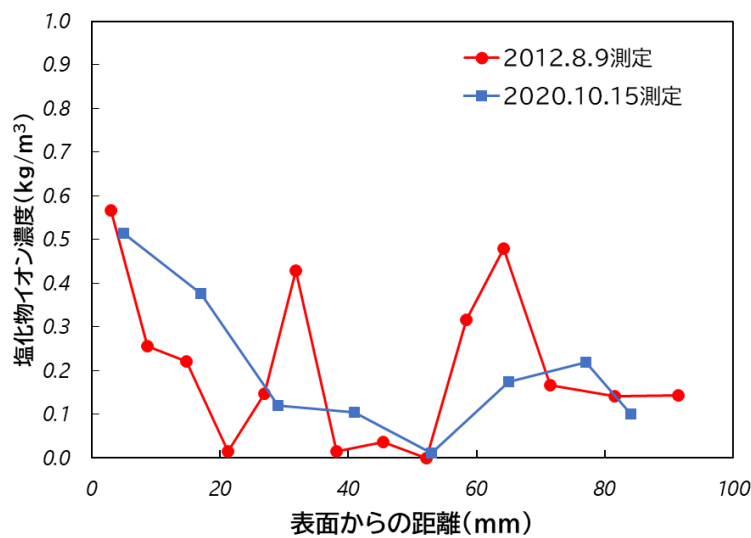


図-1.1.1 調査結果の比較

1.1.2 土木構造物（橋台U）

本橋脚も、2010年に架設された⁴⁾比較的新しい鉄筋コンクリート橋脚（写真-1.1.3）である。調査箇所は地表より30cmの高さである。震災後の調査においても高い塩化物イオン濃度は確認されなかったが、10年後の調査においても同様（図-1.1.2）であった。なお、当該地点では津波は到達していなかったことを付記する。



写真-1.1.3 調査対象橋台

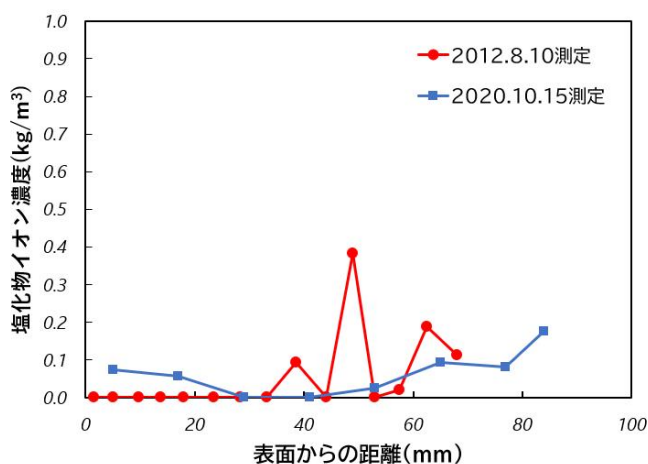


図-1.1.2 調査結果の比較

1.1.3 土木構造物（橋桁S）1998年架設⁴⁾

1998年に架設⁴⁾され、竣工後13年が経過して被災した橋桁（写真-1.1.4）である。震災から1年半以上が経過した2012年12月の調査では、 $1\text{kg}/\text{m}^3$ を超える塩化物イオン濃度が表面付近で検出されたが、10年度の調査では、塩化物イオン濃度が $0.3\text{kg}/\text{m}^3$ に低下していた。なお調査位置は橋桁端部付近で、橋床版下端から30cmおよび60cm下の桁梁側面よりドリルによりコンクリート粉末を採取し、蛍光X線装置を用いて測定した（写真-1.1.5）。図-1.1.3には、床版下30cm位置の調査結果の比較を示す。震災後10年が経過し、塩化物イオン濃度が低下している。橋桁の形状から当該部分は雨掛かりになっており、長年にわたる雨水等により表面の塩化物が洗浄された可能性がうかがえる。



写真-1.1.4 調査対象橋桁



写真 1.1.5 調査状況（2020年調査時）

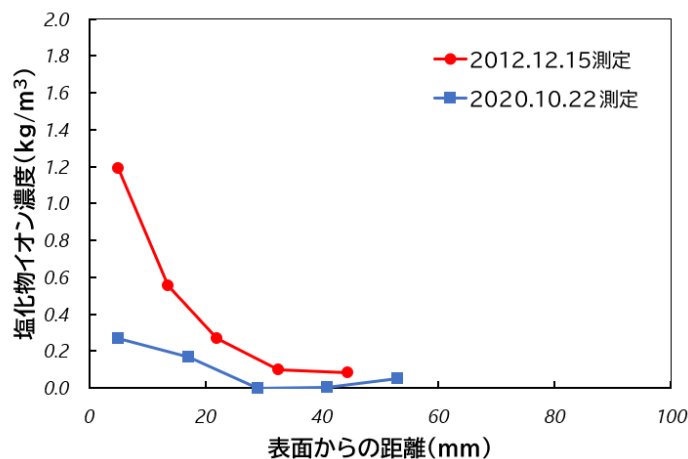


図-1.1.3 調査結果の比較

1.1.4 土木構造物（橋脚T）

1992年に架設⁴⁾された本橋脚（写真-1.1.6）では、ひび割れが塩化物浸透状況に及ぼす影響を検討するため、複数箇所の調査を実施した（図-1.1.4）。ここでは、ひび割れのない箇所とひび割れがある箇所から乾式コアドリルを用いてコアを採取し、塩分濃度を測定した。測定方法は採取したコアを割裂させ、割裂面に対して蛍光X線装置

により測定した。なお、ひび割れが発生した箇所から採取したコアについては、ひび割れ面に沿って割裂させている。なお、2020年の調査では、ドリルによりコンクリート粉末を採取し、蛍光X線装置を用いた測定としている。



写真-1.1.6 調査対象橋脚³⁾

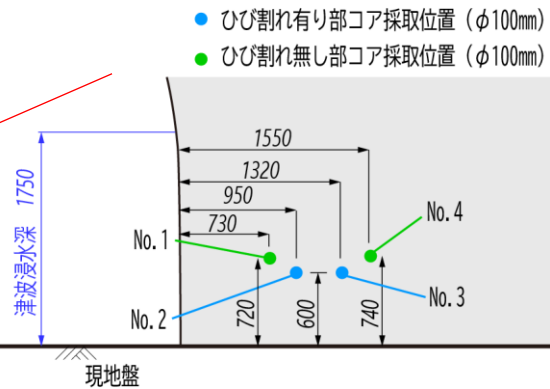


図-1.1.4 コア採取箇所（脚部拡大図）

調査結果を図-1.1.5（ひび割れなし）、図-1.1.6（ひび割れあり）に示す。これらを見ると、ひび割れ有無によらず震災後の調査では表面に $5\text{kg}/\text{m}^3$ を超える高い塩化物イオン濃度を示していたものが、10年を経過して、深部に移動していることが確認できる。さらに、ひび割れがある方がその深部への移動量が多いことも確認でき、深さ40mm付近では $2\text{kg}/\text{m}^3$ を超える高い濃度が確認された。また採取したコアより測定した中性化深さは、ひび割れありでは37mmであり、中性化深さと濃度が高い位置とが整合していることから、炭酸化によって塩化物が解離し、未炭酸化部分に移動・濃縮したことが考え得る。または津波被災前より当該箇所は中性化しており、中性化領域は水分が透水しやすい特性の影響から塩化物イオンも乾湿繰り返しによって中性化域から非中性化域に移動したとも推察できる。

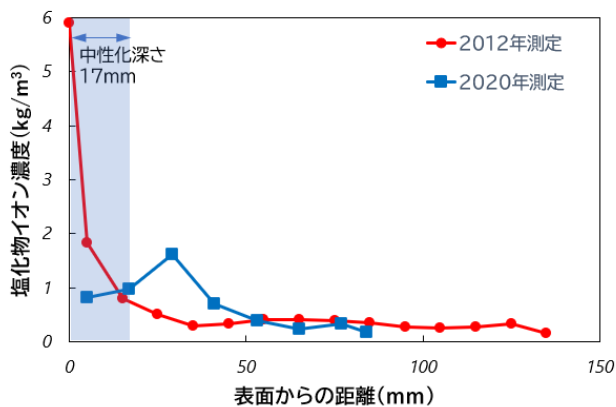


図-1.1.5 調査結果（ひび割れなし）

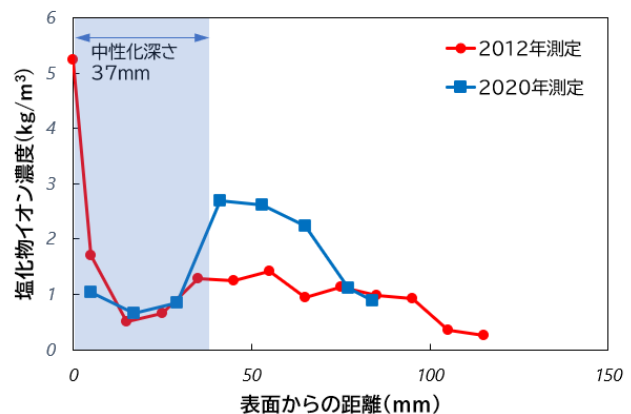


図-1.1.6 調査結果（ひび割れあり）

1.1.5 建築構造物（建屋 I）

建築構造物（写真-1.1.7）では基礎立ち上り部，附属建造物（倉庫）（写真-1.1.8）では内部床スラブについて調査した。なお，当該建築物の竣工年は不明である。倉庫床スラブの調査（写真-1.1.9）では，図-1.1.7に示すように，震災後の調査においても20mm～30mmの深部において高い塩化物イオン濃度が観測されていたが，10年後調査においては，さらに高濃度の塩化物イオンが検出された。ただし，中性化深さは6.5mmと非常に浅い結果となっていた。外部に面する基礎の立ち上り部（写真-1.1.8及び写真-1.1.9）については，図-1.1.8及び図-1.1.9に示すように，震災後の調査よりも10年後の調査では塩化物イオン濃度の低下が見られた。また中性化深さも5mm（A地点），1.5mm（C地点）と浅いものであった。この2箇所については，屋根の形状から雨掛かりとなっていることが特徴である。



写真-1.1.7 調査対象建物の外観



写真-1.1.8 附属建造物（倉庫）の外観



写真-1.1.9 倉庫床の調査箇所

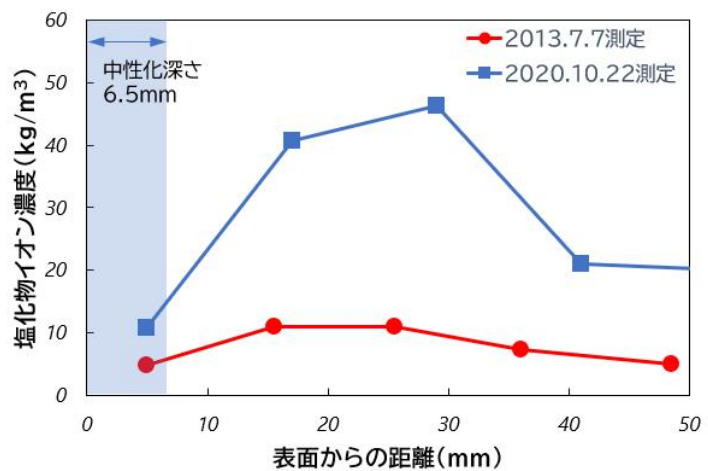


図-1.1.7 調査結果（倉庫床）



写真-1.1.10 基礎立上り部(A)の調査箇所

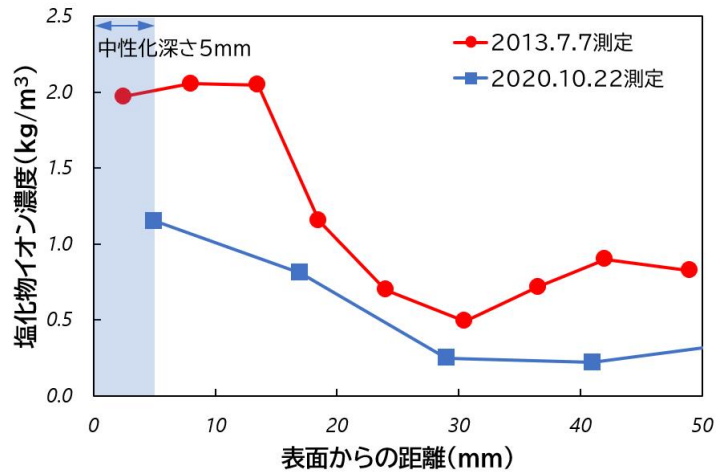


図-1.1.8 調査結果（基礎立ち上がり部(A)）



写真-1.1.11 基礎立上り部(C)の調査箇所

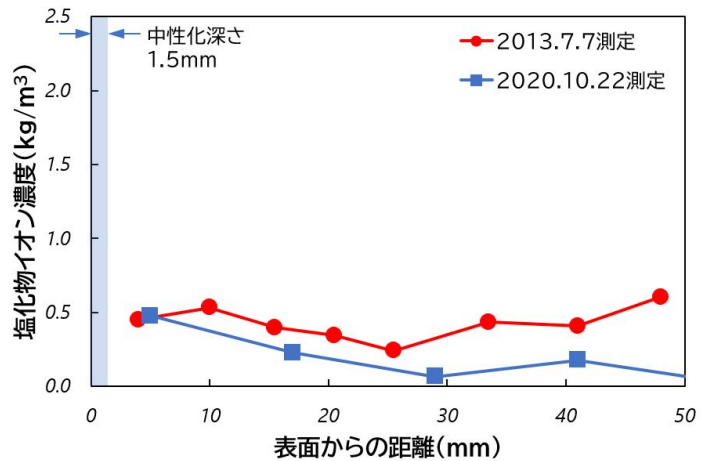


図-1.1.9 調査結果（基礎立ち上がり部(C)）

1.1.6 建築構造物（校舎 I）

当該校舎（写真-1.1.12）は、2005年竣工の比較的新しい建築物である。ここでは外壁2箇所(A, B点)と内壁1箇所(D点)について調査した。外壁A点（写真-1.1.13）は、ひび割れのない箇所である。表面の塩化物イオン濃度は 1.5kg/m^3 と10年で大きな変化はなく、深部では前回よりも低下傾向が見られ（図-1.1.10）、大きな中性化（6mm）もなかった。ひび割れのあった外壁B点（写真-1.1.14）では、表面の塩化物イオン濃度はA地点と近い値となっていたが、深部においても比較的高い塩化物が確認され、中性化も34mmと大きい結果となっていた（図-1.1.11）。内壁（ひび割れなし、写真-1.1.15）においても表面の塩化物イオン濃度は他点と同程度で、中性化深さは7mm程度と浅い結果であった（図-1.1.12）。



写真-1.1.12 調査対象建物の外観



写真-1.1.13 調査箇所（外壁 A 点）

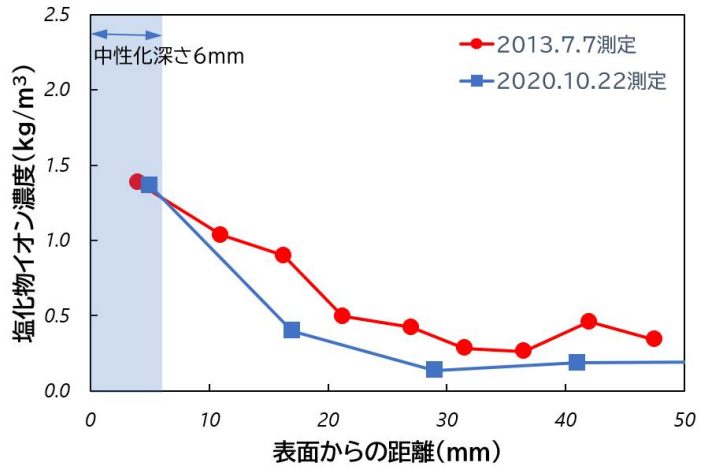


図-1.1.10 調査結果（外壁 A 点）



写真-1.1.14 調査箇所（外壁 B 点）

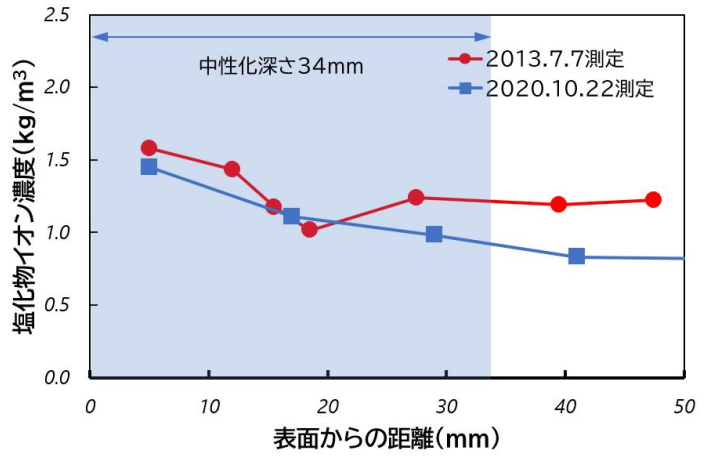


図-1.1.11 調査結果（外壁 B 点）



写真-1.1.15 調査箇所（内壁 D 点）

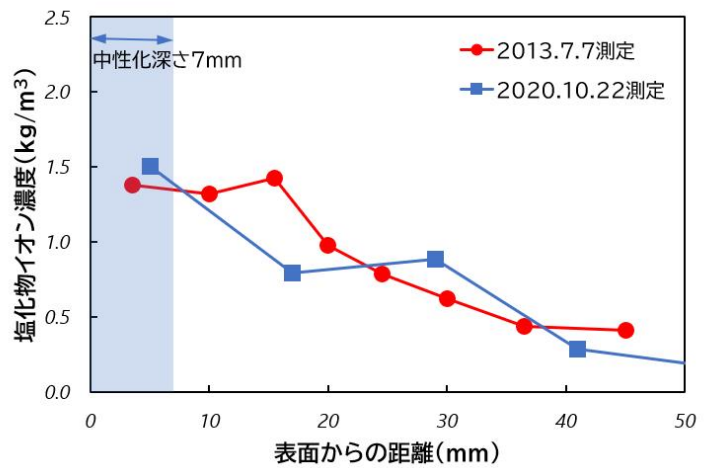


図-1.1.12 調査結果（内壁 D 点）

1.1.7 建築構造物 (A 邸, B 邸)

建築後1年未満に津波に被災した2棟(A邸, B邸)の住宅基礎部について調査した。この住宅は海岸線から160mに位置し、津波高さは1.5mと推察される。震災後の調査は1年4ヶ月が経過した2012年7月に実施した。基礎立上り部からドリルによるコンクリート粉末を採取して蛍光X線装置で分析した。住宅A(写真-1.1.16)では、表面の塩化物イオン濃度は 0.5kg/m^3 程度となっており、深部ではさらに濃く15mm付近で 2kg/m^3 程度となっている。中性化深さが12.5mmと濃度が高い位置と整合していることから、炭酸化によって塩化物が解離し、未炭酸化部分に移動・濃縮したものと考えられる。または被災前より当該箇所は中性化しており、中性化領域は水分が透水しやすい特性の影響から塩化物イオンも乾湿繰り返しによって中性化域から非中性化域に移動したとも推察できる。10年後の調査結果では、表層の塩化物はさらにやや深部へ移動しており、中性化深さも18mmと深くなっていることが確認できる(図-1.1.13)。住宅B(写真-1.1.17)では、表面と深さ25mm付近に塩化物イオン濃度が高い箇所が確認できる(図-1.1.14)。10年後の調査においても塩化物イオン濃度分布の傾向は大きく変わっていなかった。なお、震災後では土壌の塩化物がコンクリートの乾燥によって吸い上げられることが懸念されたが、今回の調査においてそのような傾向は確認できなかった。



写真-1.1.16 調査箇所 (A 邸基礎)

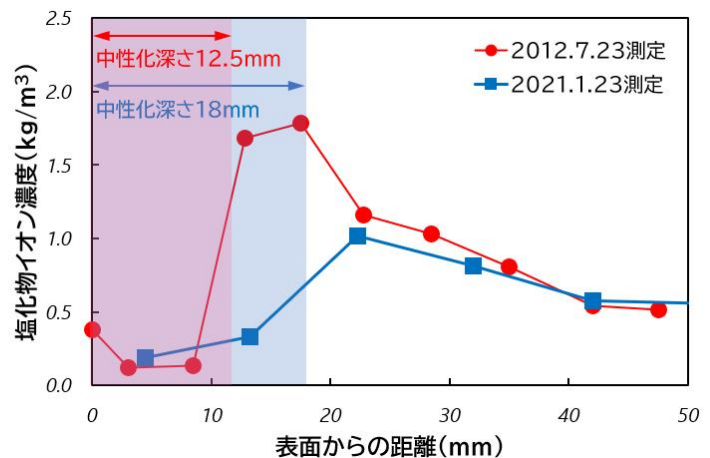


図-1.1.13 調査結果 (A 邸基礎)



写真-1.1.17 調査箇所 (B 邸基礎)

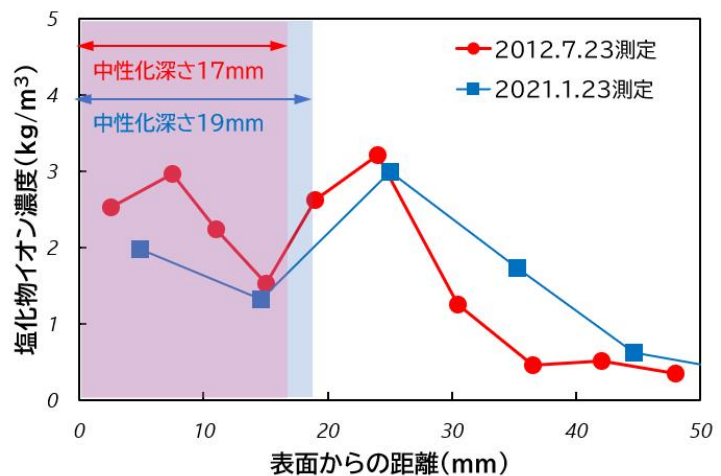


図-1.1.14 調査結果 (B 邸基礎)

1.1.8 建築構造物 (C 邸, D 邸)

べた基礎の住宅 2 棟 (C 邸, D 邸) の調査を 2021 年 1 月に実施した。床下点検口下の近傍の基礎底盤部 (土間) と立上り部のコア抜き調査を実施した。図-1.1.15 に基礎底盤部 (土間) と立上り部との塩化物イオン濃度の分布の比較をそれぞれ示す。基礎底盤部では内部において高い塩化物イオン濃度が確認された。なお, C 邸は被災後, 専門業者による洗浄が施され, D 邸では, 所有者自身による洗浄が行われている。図-1.1.16 には C 邸と D 邸の基礎底盤部の塩化物イオン濃度の比較を示す。ただし C 邸については, 図-1.1.15 で示した調査後に再調査 (2021 年 2 月実施) した結果を用いて比較している。これを見ると洗浄者違いによる塩化物浸透の差は見られなかった。なお, 2 邸の中性化深さは, C 邸で 3mm, D 邸で 2mm と浅い結果となっていた。

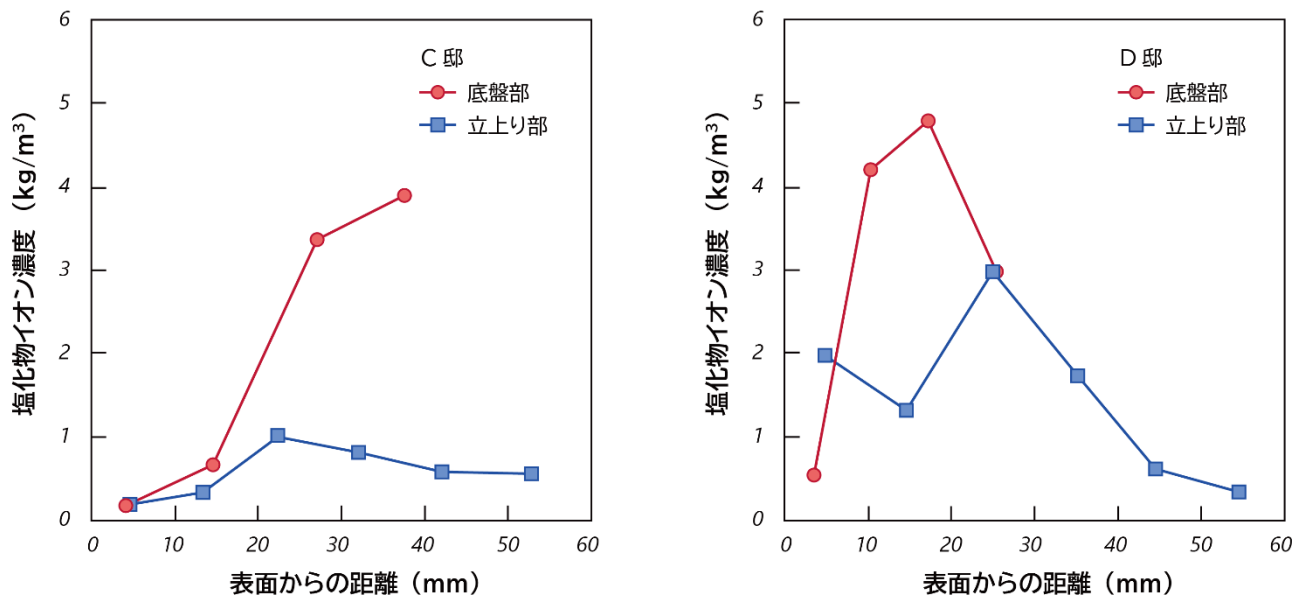


図-1.1.15 べた基礎底盤部と立上り部の塩化物の比較 (左 : C 邸, 右 : D 邸)

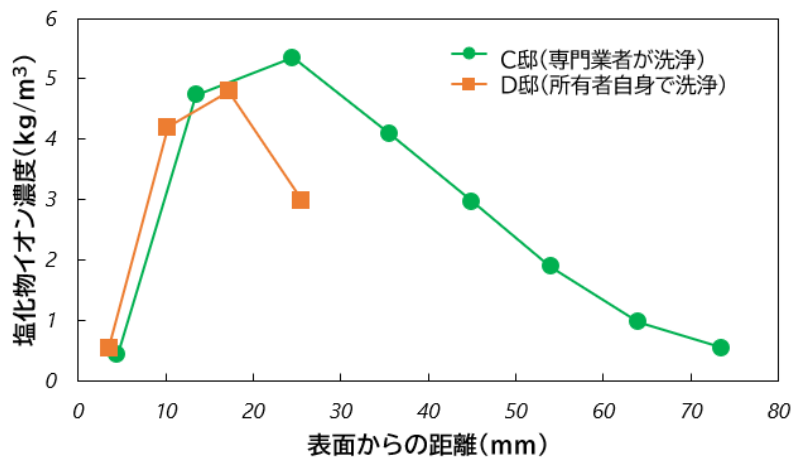


図-1.1.16 C 邸と D 邸の基礎底盤部の塩化物イオン濃度の比較

1.1.9 建築構造物（E 邸）

当該住宅は、震災当時築10年が経過した木造2階建て住宅である。海岸線から約2kmに位置し、敷地は約1mの盛土の上に建つ。震災時は、1階床上1.5mまで浸水している。写真-1.1.18には建物全景と、震災翌日の周辺状況の様子を示す。基礎はべた基礎形式である。被災約2ヶ月後に床上の洗浄を実施し、床下には石灰を散布した。汚泥の撤去は約1年後に実施している。写真-1.1.19には震災後約3ヶ月後と約10年が経過した現在の床下の状況を比較して示す。



写真-1.1.18 建物全景と被災後（2011年3月12日）の周辺の様子



写真-1.1.19 震災後の床下の状況（左）と現在の状況（右）

調査はべた基礎の底盤部と立上り部について、コア採取（写真-1.1.20）と、底盤部のはつりによる鉄筋の腐食状況調査（写真-1.1.21）を行った。調査結果を図-1.1.17に示す。表面の塩化物イオン濃度は10年が経過して大きく低下しているが、今回の調査では内部において濃度が高くなっている。このような表層付近の塩化物イオンが低下する要因として、被災後の中性化によるいわゆる「濃集」が原因の一つとして考えられる。また、津波被災前より中性化していたことによってモノサルフェートが分解していたため、被災時に塩化物イオンが表層付近で固定化されておらず、表層付近の空隙水に染み込んだ塩化物イオンが奥行き方向に拡散しやすかったとも考えられる。しかし被災後2年後と10年後の調査であったことと、中性化については未調査であったことより、原因の特定は難しい。立上り部で非常に大きな値を示したことについては、今回採取した部分が立上り壁の隅部であるた

め、直交方向からの塩化物浸透の影響が含まれてることも考えられる。また、底盤部においても高い塩化物イオン濃度を示している。ただし、写真-1.1.21 に示す底盤部の鉄筋の状況のように、被災後 10 年を経過しても発錆は確認されなかった。なお、鉄筋のかぶり厚さは 4cm が確保されていることを確認している。

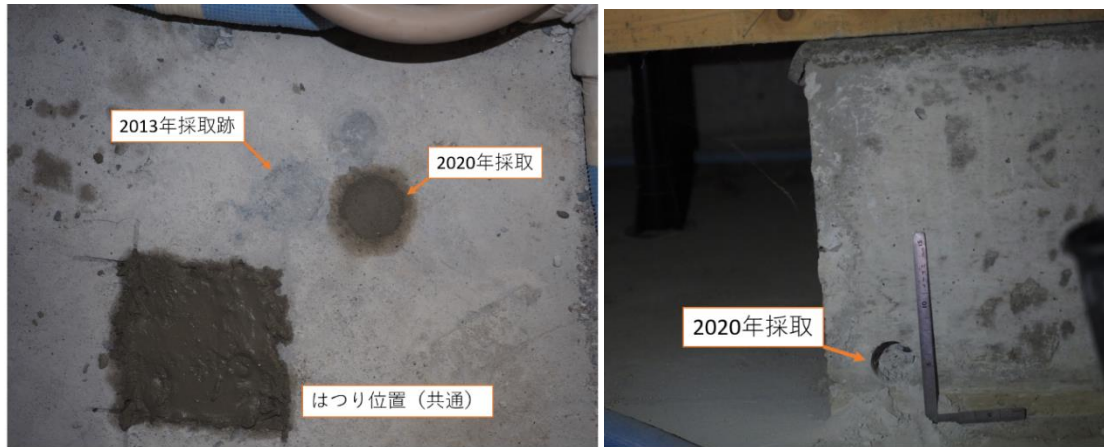


写真-1.1.20 べた基礎底盤部（左）と立上り部（右）の調査箇所

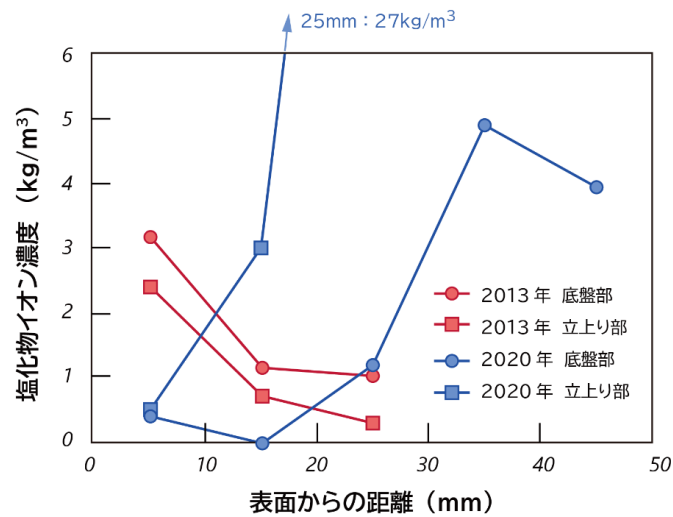


図-1.1.17 調査結果



写真-1.1.21 鉄筋調査（底盤はつり）結果

(執筆者：菅野秀人)

1.2 実測調査結果を踏まえた津波浸水等による塩害の対策に関する検討

東日本大震災による津波によって、多くのコンクリート構造物が浸水を受けた（以後、「津波浸水」）。この津波浸水を受けた箇所の震災当時と10年後の調査結果から、大きく3つの傾向が見られた。ひび割れの発生していない土木構造物においては、震災当時は高い塩化物イオン濃度を示していたが、10年経過した時点においては低下しており、特に雨掛りがある箇所ではその傾向が顕著であった。他方、ひび割れが発生した土木構造物では、津波当時内部に浸透した塩化物が中性化の影響で内部にシフトする傾向が見られた。住宅基礎の塩化物イオン濃度は、震災時、海水を含む汚泥が長期間堆積していたことと、もともと断面が薄く乾燥傾向であったことより、震災当時から値が高く、10年後においてもその傾向は変わらなかった。この結果より、津波浸水を受けた住宅基礎部の塩化物による鋼材腐食が懸念されたことから、再現実験による検証を行った。再現実験では、特に塩化物イオン濃度が高い傾向にあった鉄筋コンクリートべた基礎部を想定した小型 RC 供試体を作製し、津波を想定した汚泥混じりの塩水による津波浸水再現実験を行い、実際に津波浸水を受けた RC 基礎部の塩化物イオン濃度分布と一致するのかの確認を行った。塩化物イオン濃度分布の解析には、国立研究開発法人土木研究所が提供している「コンクリート中の塩化物イオン濃度分布簡易分析シート」（以後、「分析シート」）を利用し、表面塩化物イオン量と見掛けの拡散係数を求め、津波被害を受けた RC 基礎部の当時の塩化物イオン濃度分布を推測した。

1.2.1 べた基礎部を想定した津波汚泥による塩分浸透実験

(1) 実験方法

実験では、津波浸水を受けた一般住宅基礎部（A 邸）を想定した小型 RC 供試体を用いた。そのため、コンクリートは生コン工場より購入したレディーミクストコンクリート（普通 24-12-20N）を使用し、鉄筋のかぶりも実際の値に近いものとして D13（1 本）を 70mm のかぶり配置した。供試体は、1 週間型枠存置のままとし、脱型後は実際の建築基礎と同様に気中養生（28 日間）とした。その後、供試体上面に塩水混じりの汚泥を溜めるための堰を造り、供試体側面は乾燥による影響を無くすため、エポキシ樹脂でコーティングを行った。

津波浸水の条件としては、津波浸水を受けた住宅基礎部において 30cm 程度の津波汚泥が溜まっていたとの情報があったことから、条件①：基礎部上面への海水混じりの汚泥の堆積、条件②：基礎部底面への海水の浸透、条件③：①と②の組み合わせの 3 パターンについて実験を行った。実際の海水混じりの汚泥の代わりとして、条件①では、供試体上面に細骨材を 30mm の厚さに敷き詰め 200ml の塩水を 10 日間に分け合計 2L 流し込む条件で、条件②では、大型の容器に高さ 5cm ほど細骨材を敷き詰めてから各濃度の塩水を 6L 流し込み、その上に供試体を設置させた条件で、条件③では①と②を組み合わせた条件で実施した。

津波浸水を受けた一般住宅では、震災 3 ヶ月後にべた基礎部の津波汚泥の除去と洗浄を実施していたため、同様に 3 ヶ月間①から③の状態に放置した。放置時の保管場所の気温は促進実験のため約 30℃、湿度は約 38%とした。供試体の設置状況を写真-1.2.1 に示す。その後、供試体から振動型ドリルを用いて表層から下面までコンクリート粉末を採取し、蛍光 X 線分析装置を用いて塩化物イオン濃度を測定し、その分布を求めた。

(2) 実験結果

図-1.2.1 中の「測定値」は、被害を受けた RC 基礎部(A 邸)について、10 年後に粉末採取により求めた塩化物イオン濃度分布である。被災から 10 年後経過しており中性化 (3mm) も進んでいるため、表層の塩化物はイオンに解離し内部へ移動していることが分かる。

ここで、被害を受けた RC 基礎部は、津波浸水を受けてから 3 ヶ月後に基礎部の海水混じりの汚泥を取り除いたことから、それ以後の塩化物イオンの供給はない状態である。そこで、基礎部の塩化物イオン総量は当時のままと仮定し、実験から求めた表面塩化物イオン濃度と見掛けの拡散係数を用いて、実測値と計算値の塩化物イオン総量が同じとなる条件を見つけた結果が、図-1.2.1 中の「推定値」である。解析結果から、表面塩化物イオン濃度は $15(\text{kg}/\text{m}^3)$ 、見掛けの拡散係数は $7(\text{cm}^2/\text{年})$ と推定することができ、測定値と推定値がほぼ一致する結果となった。

図-1.2.2 中の「測定値」は、小型 RC 供試体を用いた条件① (塩分濃度 3%) における 3 ヶ月後の塩化物イオン濃度分布の一例を示している。この測定結果より、分析シートを利用して解析した結果 (図-1.2.2 中の「推定値」)、供試体 2 体による表面塩化物イオン濃度は、 $9.5\sim 15.5(\text{kg}/\text{m}^3)$ (平均 $12.25(\text{kg}/\text{m}^3)$)、見掛けの拡散係数は、 $3.5\sim 7.0(\text{cm}^2/\text{年})$ (平均 $6.0(\text{cm}^2/\text{年})$) となった。

今後は、長期的な材齢における中性化の進行によって生じる塩化物イオンの解離や濃縮、そしてこの現象による鋼材腐食について検討を行っていく予定である。

図-1.2.3～図-1.2.8 は、浸透条件として①～③の組み合わせについて、塩分濃度 3%と 24%の塩化物イオン濃度分布を示した一例である。この結果より、3%では 20～30mm、24%では 40～70mm の範囲まで

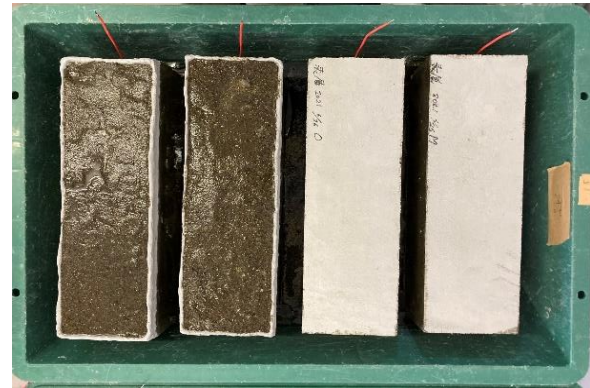


写真-1.2.1 供試体津波浸水状況

(左 2 体 : 条件①、右 2 体 : 条件②)

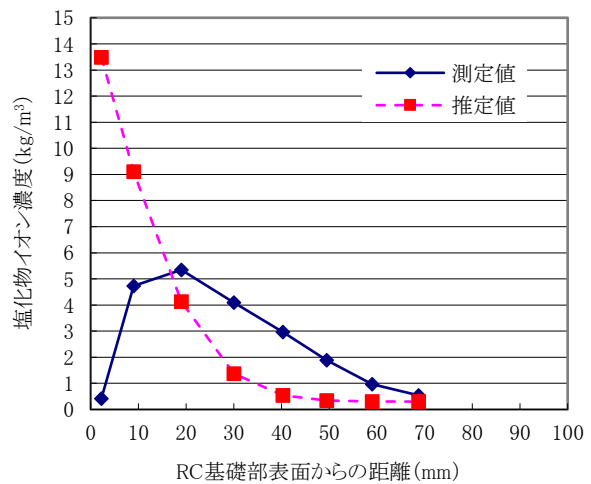


図-1.2.1 津波を受けた基礎部の塩化物イオン濃度分布

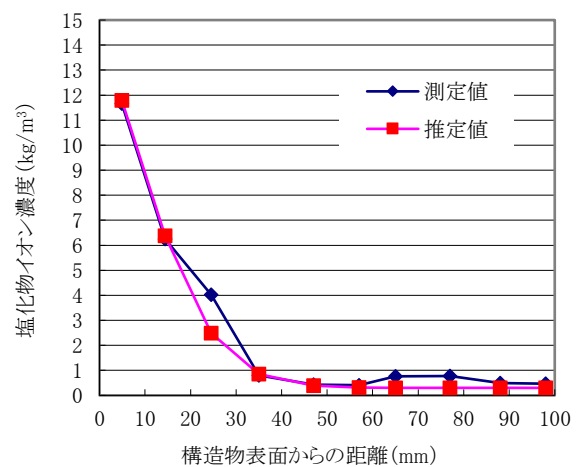


図-1.2.2 塩化物イオン濃度分布 (浸透条件①)

塩化物イオンの浸透が進む結果となった。この様に、建築基礎で用いられているコンクリートにおいては、乾燥の影響もありコンクリート内部に高濃度の塩化物が浸透するため、今後、中性化の進行により塩化物イオンが内部に移動する事によって鋼材腐食の可能性が懸念される。そのため、今後も長期的な観測を実施する予定である。

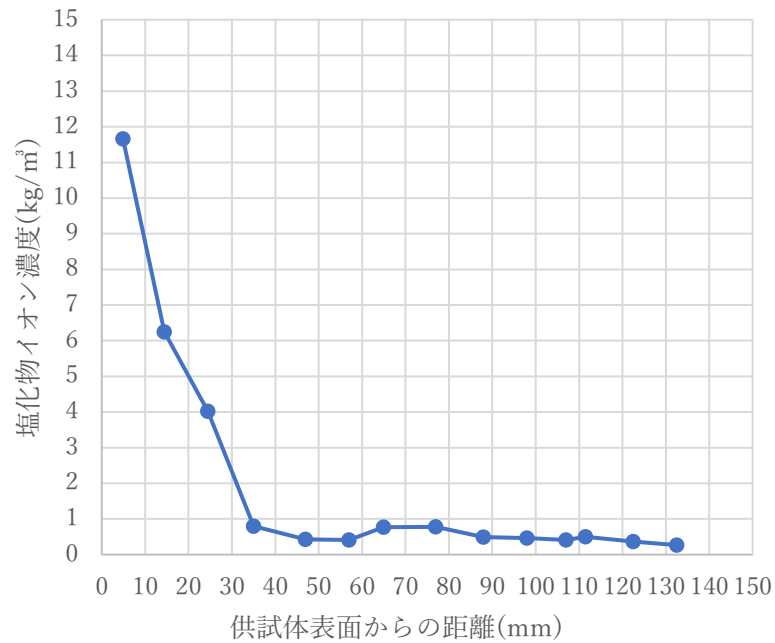


図-1.2.3 塩化物イオン濃度分布 (浸透条件① (3%))

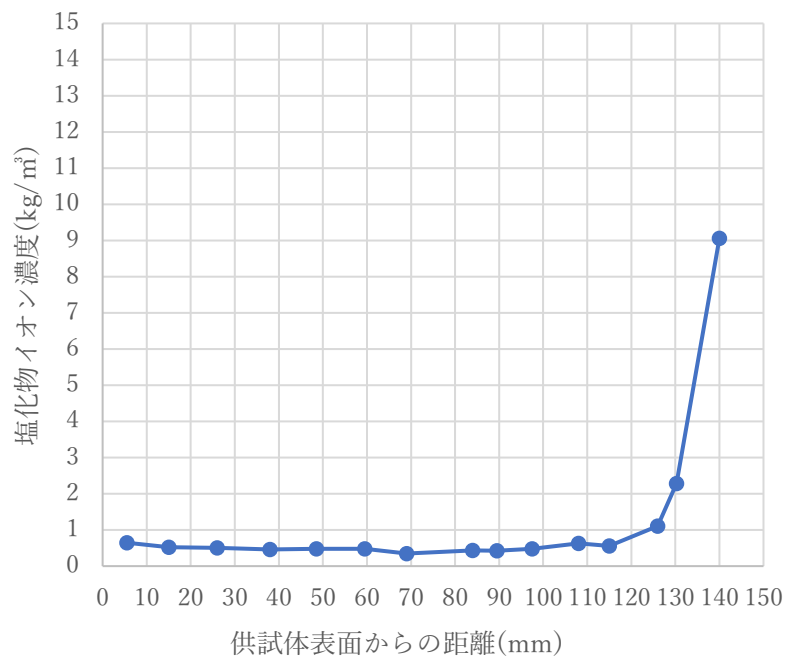


図-1.2.4 塩化物イオン濃度分布 (浸透条件② (3%))

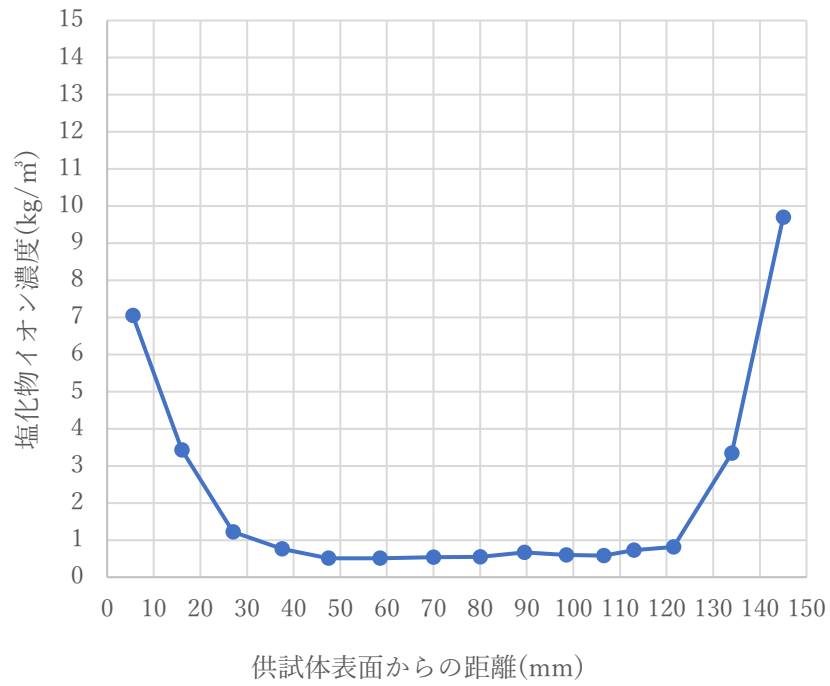


図-1.2.5 塩化物イオン濃度分布 (浸透条件③ (3%))

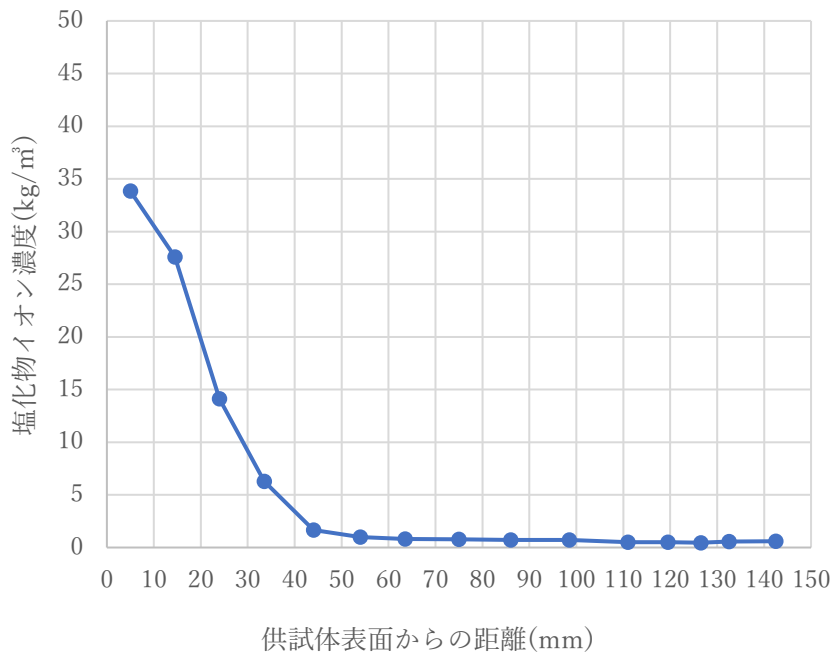


図-1.2.6 塩化物イオン濃度分布 (浸透条件① (24%))

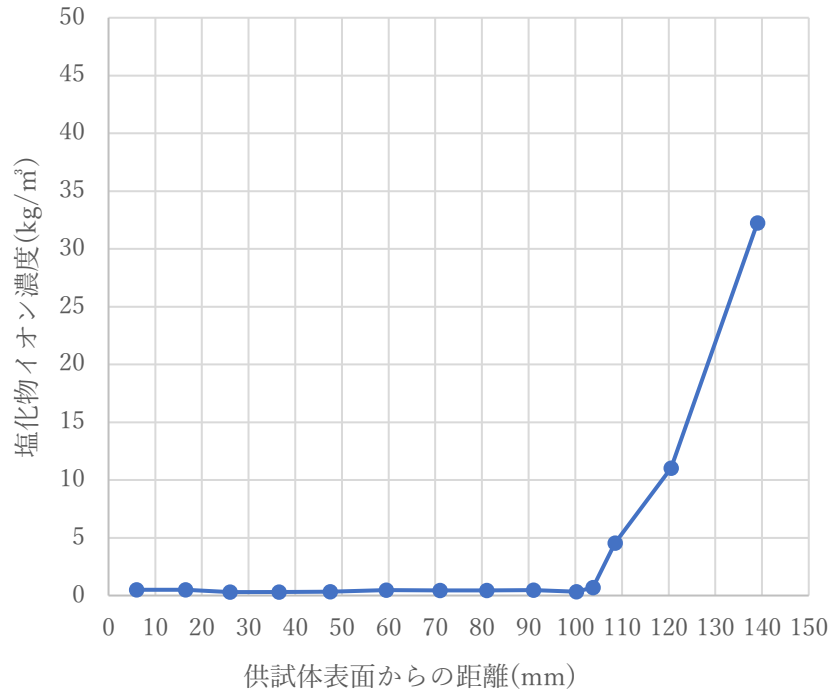


図-1.2.7 塩化物イオン濃度分布（浸透条件②（24%））

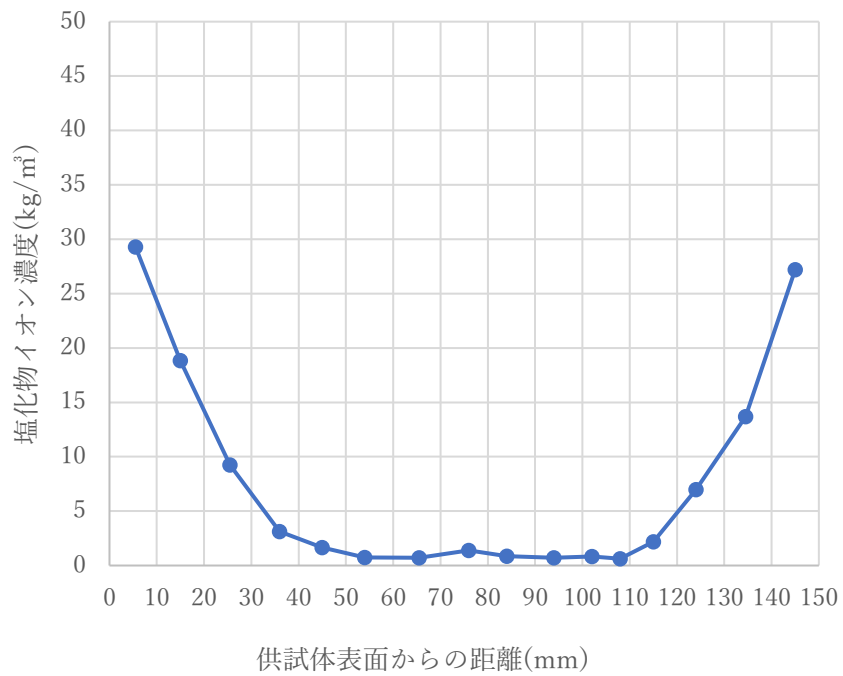


図-1.2.8 塩化物イオン濃度分布（浸透条件③（24%））

（執筆者：武田三弘）

1.2.2 ひび割れ量を変数とする塩水吸水試験

(1) 実験方法

本実験では、ひび割れからの塩水浸透の評価を目的とし、割裂ひび割れを導入したφ100mmの円柱試験体に対して塩水吸水試験を実施した。試験体概要を図-1.2.9に、塩水吸水装置概要を図-1.2.10に示す。円柱試験体は養生終了後60℃の乾燥炉で5日間乾燥させてから割裂ひび割れを導入し、吸水面（上面）におけるひび割れ両端部のひび割れ幅を0.5mm, 1mm, 2mmに調整して、底面はひび割れを可能な限り閉じた。その後、側面及び底面のひび割れをアルミテープでふさぎ、吸水面以外の全ての面をエポキシ樹脂塗装した。これらの工程を行うことで、表面が乾燥した未貫通ひび割れを持つ住宅基礎の状態を再現しようと試みた。なお、ひび割れ幅の調整などの関係で、割裂ひび割れを可能な限り直線的に導入しなかったため、試験体は水セメント比0.65、砂セメント比2.0のモルタルとした。塩水吸水期間は2週間とし、塩水は海水を想定した0.51mol/Lの塩化ナトリウム水溶液を用いた。試験期間中は吸水面から30mm, 50mm, 100mmの場所におけるひび割れ近傍とひび割れから離れた場所での内部含水率の変動を測定した。吸水試験終了後直ちに試験体を吸水面から10mm毎にスライスして円盤状にし、図に示すように円盤の中央40mmの領域をひび割れ近傍として切り分け、JIS A 1154に準拠して全塩化物量を測定した。

(2) 実験結果

試験期間中の内部含水率変動の代表例を図-1.2.11～図-1.2.13に示す。全ての試験体、測定箇所において、吸水開始から4～5時間経過したところで含水率が上昇し始め、96時間が経過した頃に30mmの位置の含水率が頭打ちとなった。このときの含水率の値は約15%であり、50mm, 100mmにおける含水率は時間経過と共にこの値に収束していくような形となっている。ひび割れ近傍と周辺部の含水率の経時変化を比較すると、ひび割れ近傍における含水率の上昇は周辺部のそれと比べて速く、ひび割れ面からも吸水が行われていることがわかる結果となった。ひび割れ幅との関係を見ると、ひび割れ近傍100mmの測定結果において、ひび割れ幅が増加するにしたがって含水率の上昇が顕著になる傾向が見られたが、30mm, 50mmの測定結果では明確な傾向は見られなかった。今回の試験体作製において、割裂ひび割れは吸水面では比較的直線状に導入することが出来たが、試験体内部においてはその限りでは無かったため、ひび割れに対して幅だけでは無く別のパラメータも必要と考える。また、試験体が小さいことによる二

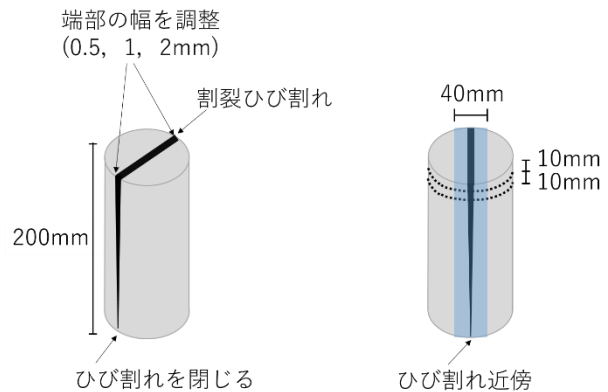


図-1.2.9 試験体概要

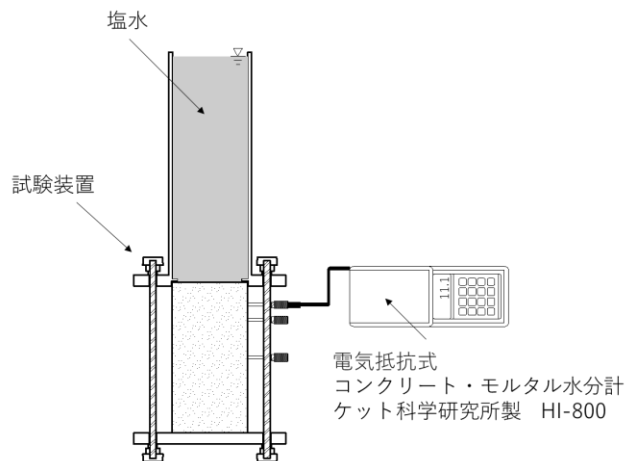


図-1.2.10 塩水吸水装置概要

方向吸水の影響も無視できないため、津波などによるひび割れからの塩水浸透をより正確に把握するためには、試験条件のさらなる改良が必要と考える。

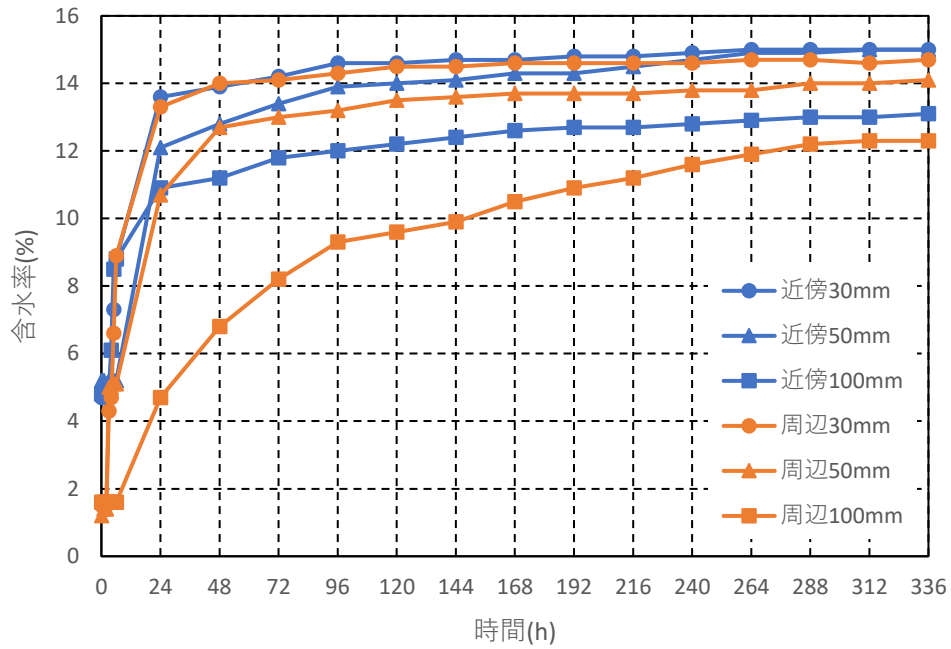


図-1.2.11 ひび割れ幅 0.5mm の試験体の内部含水率変動

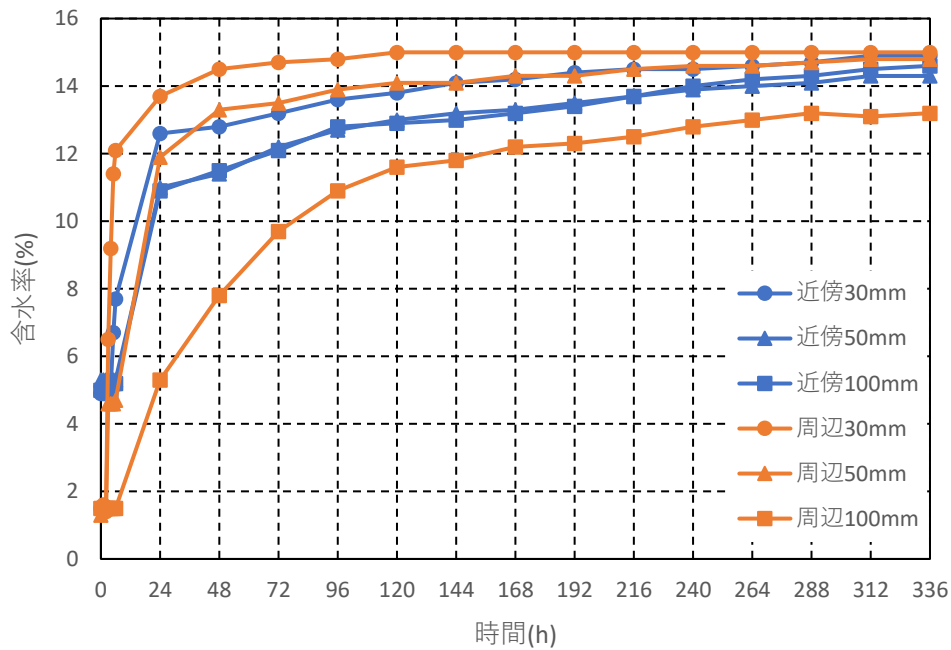


図-1.2.12 ひび割れ幅 1.0mm の試験体の内部含水率変動

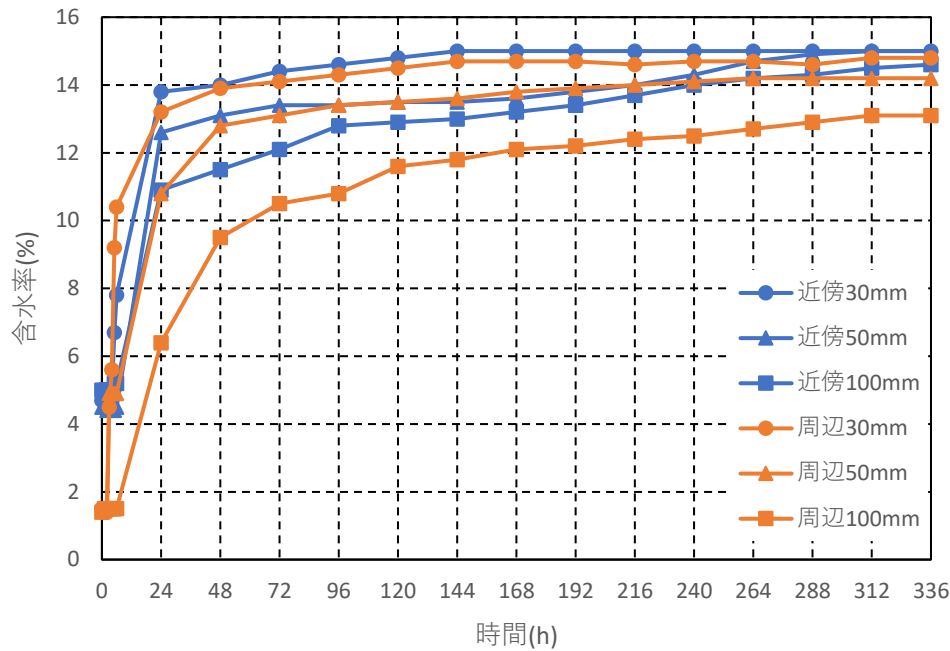


図-1.2.13 ひび割れ幅 2.0mm の試験体の内部含水率変動

次に、全塩化物量測定結果を図-1.2.14～図-1.2.16に示す。2週間程度の吸水期間であったが、期間の短さに反してひび割れ近傍では全ての試験体で吸水面から100mmの深さにまで塩化物が浸透していることがわかる。ひび割れ周辺部においてもひび割れ面から浸透したと考えられる塩化物が、ひび割れ幅0.5mmの試験体で深さ60mm、幅1.0mmの試験体で70mm、幅2.0mmの試験体で90mmの深さまで浸透している。乾燥した試験体に対して水分と共に塩化物が浸透（移流）した結果と考えられる。今回の試験体は、乾燥工程を割裂ひび割れ導入前にしていたためひび割れ近傍での含水率が周辺よりも高い状態であったが、割裂後に乾燥していた場合はひび割れ近傍もさらに乾燥していたと予想することが出来る。一般的に住宅基礎は、床下換気口を有する開放型と高気密高断熱住宅に用いられる密閉型に分けられるが、そのどちらの場合においても室内環境の保全のために乾燥させることが常である。乾燥とひび割れが併発することにより、塩水の吸水が短期間でもコンクリートの内部まで塩化物が浸透する状況が確認できた。

今後の検討として、基礎コンクリートをより正確に再現した実験の検討、実験住宅を利用した浸水実験、浸水深とそれに伴う水圧の発生による塩化物浸透への影響などを考慮した検討を行い、津波による塩分浸透被害を明確にしていく予定である。

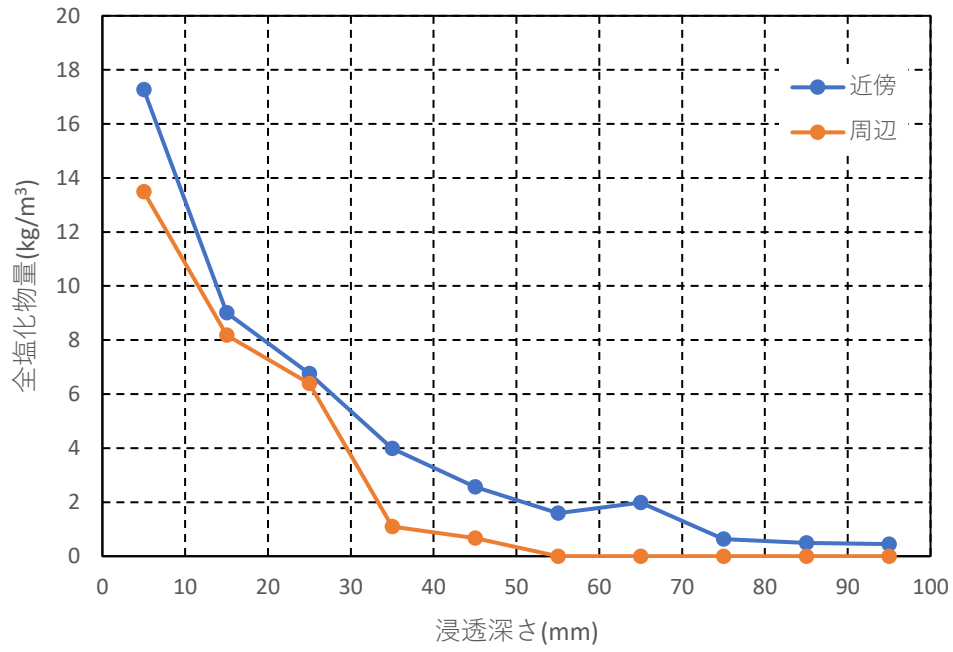


図-1.2.14 ひび割れ幅 0.5mm の試験体の全塩化物濃度分布

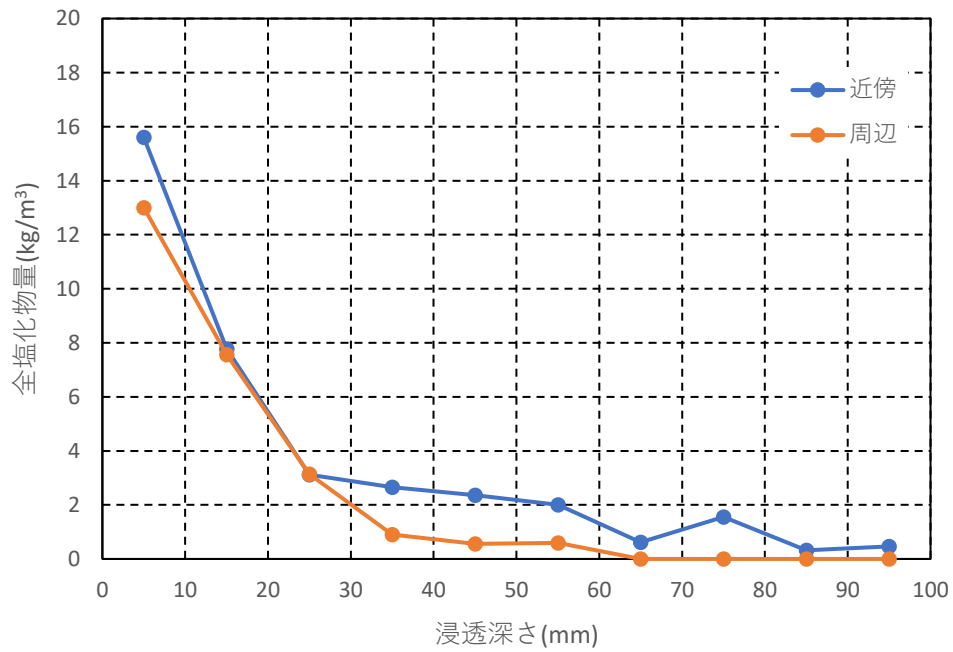


図-1.2.15 ひび割れ幅 1.0mm の試験体の全塩化物濃度分布

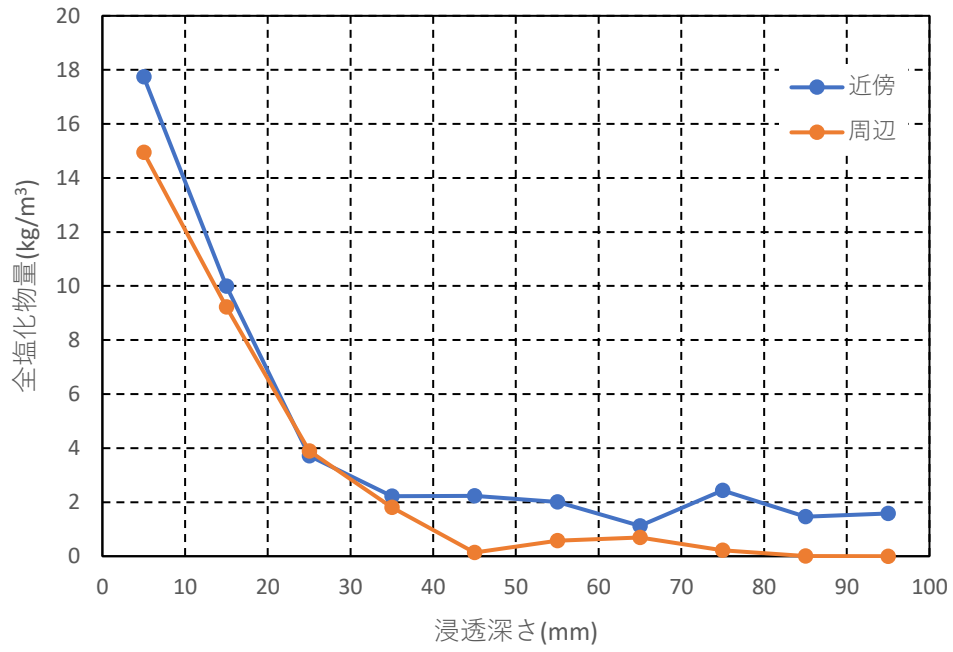


図-1.2.16 ひび割れ幅 2.0mm の試験体の全塩化物濃度分布

(執筆者：石山 智)

1.2.3 高圧洗浄による塩化物イオン浸透抑制効果の検証

津波浸水を受けたコンクリート表層部の塩化物イオンの洗浄効果を確認するため、1.2.1 で使用した供試体の上面部を、高圧洗浄機を用いて 20 秒および 300 秒洗浄し、洗浄後の塩化物イオン濃度分布も調べ、洗浄効果について確認を行った。高圧洗浄機の使用を表-1.2.1 に示す。図-1.2.17, 図-1.2.18 は、浸透条件①の 3%と 24%濃度の洗浄前、洗浄時間 20 秒後および洗浄時間 300 秒後の塩化物イオン濃度分布を、図-1.2.19, 図-1.2.20 は、浸透条件③の 3%と 24%濃度の洗浄前、洗浄時間 20 秒後および洗浄時間 300 秒後の塩化物イオン濃度分布を示したものである。洗浄状況を写真-1.2.2 に示す。いずれもコンクリート表層部（上面）のみの洗浄を行っている。浸透条件①において、下面側の塩化物イオン濃度が大きい箇所が見られるが、これは上面に塩水を入れた際、こぼれた塩水があったことによる影響であるが、調査面としては使用しないため、このまま使用することとした。この実験結果から、高圧洗浄前のコンクリート表層部（厚さ 10mm）の塩化物イオン濃度に対して、高圧洗浄時間 20 秒では 1~21%（平均 11%）、300 秒では 11~38%（平均 25%）減少させる効果が見られ、洗浄時間が長いほどより除去効果が上がる結果となった。なお、総塩化物イオン量として比較した場合、高圧洗浄時間 20 秒では 5%減少であるが、300 秒の場合は 15%減少させる結果となった。また、高圧洗浄の深さ方向の効果は、10mm~30mm 程度までとばらつきがあり、明確な洗浄効果深さは不明であるが、いずれも 10mm 程度は効果が確認できた。

表-1.2.1 高圧洗浄機の仕様

常用吐出圧力	7 MPa
常用吐出水量	310 L / 時間
最大許容圧力	9 MPa
最大吐出水量	360 L / 時間



写真-1.2.2 洗浄状況

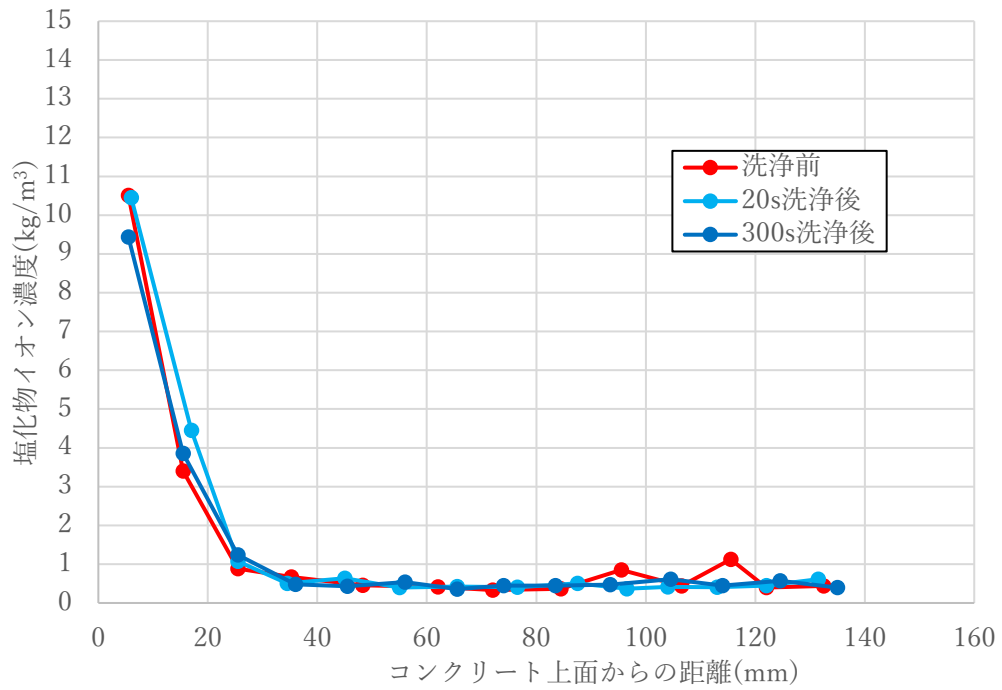


図-1.2.17 塩化物イオン濃度分布（浸透条件①、3%）

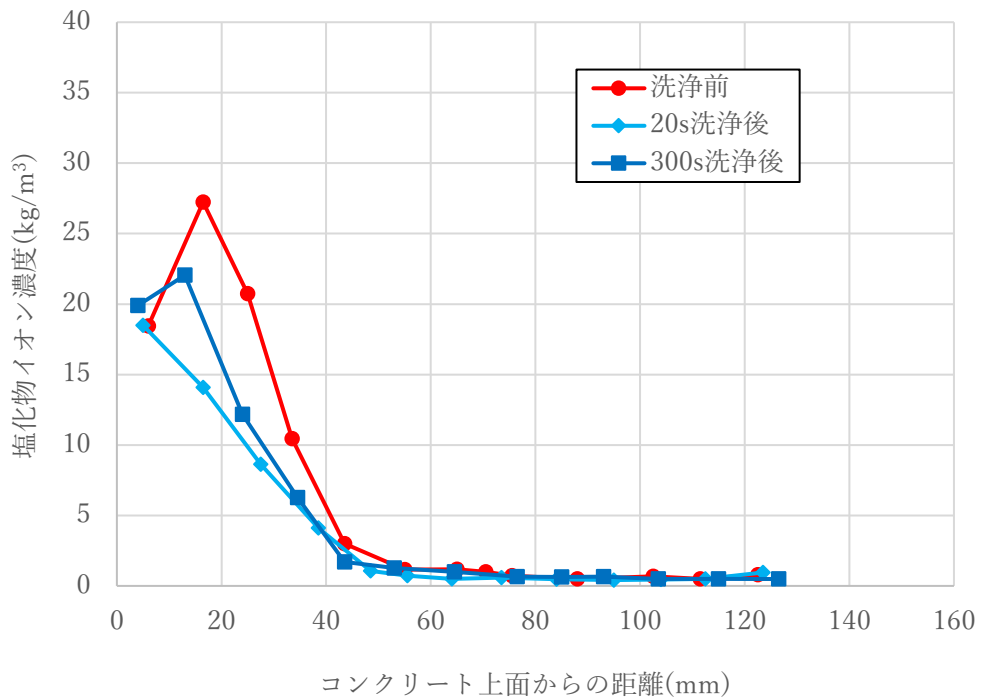


図-1.2.18 塩化物イオン濃度分布（浸透条件①、24%）

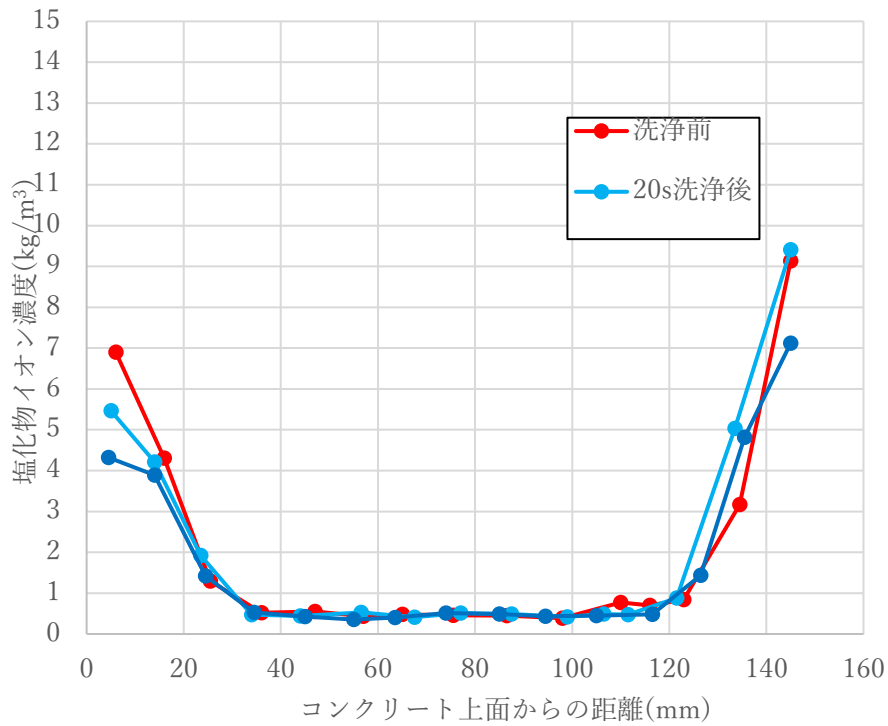


図-1.2.19 塩化物イオン濃度分布（浸透条件③、3%）

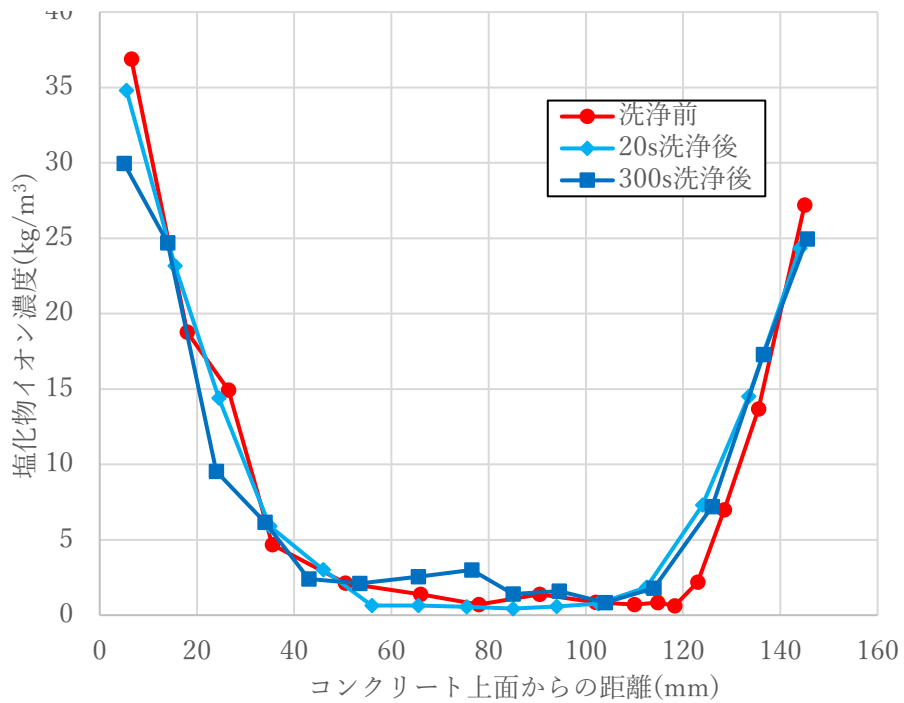


図-1.2.20 塩化物イオン濃度分布（浸透条件③、24%）

（執筆者：武田三弘）

1.3 まとめ

コンクリート構造物は鋼構造物や木質構造物と比べて津波に強いとされ、実際、構造躯体そのものの倒壊や流出を免れたコンクリート構造物も多くあった。一方で、耐久性の観点からコンクリートの耐塩害性については、この震災から多くの教訓を得るべきである。本WGでは、この津波浸水を受けた箇所の震災当時と10年後の調査を実施した結果、大きく3つの傾向が見られた。

- (1) ひび割れの発生していない箇所においては、震災当時は高い塩化物イオン濃度を示していたが、10年経過した時点においては低下していた。特に建築構造物の基礎の立上り部のような雨掛かりとなる箇所ではその傾向が顕著であった。
- (2) ひび割れが発生した橋脚 T のような土木構造物では、津波当時内部に浸透した塩化物イオンが、中性化の影響で内部にシフトする傾向が見られた。またこの現象の別な要因として、被災前から当該箇所は中性化しており、中性化領域の透水しやすさの影響から塩化物イオンも乾湿繰り返しによって中性化域から非中性化域に移動したとの推察も考え得る。
- (3) 建築構造物の基礎の塩化物イオン濃度は、震災時、海水を含む汚泥が長期間堆積していたことと、もともと断面が薄く乾燥傾向であったことより、震災当時から塩化物イオン濃度が高く、10年後においてもその傾向は変わらなかった。特に、べた基礎の底盤においては、津波被災時に長時間にわたり塩水に浸る可能性が高いこと、接地面において土壌からの塩化物浸透が懸念されることなど、耐久性の観点での懸念事項が多い。

これらの知見のうち(2)に着目した実験室レベルでの検討として、ひび割れからの塩水浸透の評価を目的とし、割裂ひび割れを導入した円柱試験体の塩水吸水試験を実施して、乾燥とひび割れが併発することにより、塩水の吸水が短期間でもコンクリートの内部まで塩化物が浸透する状況が確認できたことを報告した。また(3)に着目して、べた基礎底盤を想定して実験室レベルでの塩分浸透実験を実施し、塩化物を含んだ汚泥による塩分浸透メカニズムについての見解をまとめた。今後は、長期的な材齢における中性化の進行によって生じる塩化物イオンの解離や濃縮、この現象による鋼材腐食についての検討も必要であると思われる。また、このような汚泥の堆積による塩化物イオン浸透への対応策として、有用であると考えられる高圧洗浄による塩化物イオンの洗浄効果について報告した。

(執筆者：菅野秀人)

2. 各種非破壊試験を用いたコンクリートの表層品質評価

2.1 各種非破壊試験の概要

2.1.1 透気試験

構造物の耐久性は、かぶりコンクリートの品質と厚さに大きく依存する。かぶりコンクリートの品質は、打込み、締固め、仕上げ、養生などの施工の要因によって大きく変動し、標準養生された供試体の性能とは一般に一致しない¹⁾。

本試験は、既往の研究²⁾を参考とし、物質移動抵抗性のみを対象として透気性を定量的に評価した。試験では、トレント法による表層透気試験（ダブルチャンバー法）によって透気係数 kT ($\times 10^{-16}m^2$) を測定した（写真-2.1.1）。測定深さは、コンクリート表面から内部までの気圧が変化する範囲であり、これを L 値とした。 L 値は透気試験による影響深さであり、空隙の総量との相関が見られる。なお、試験前には水分計（高周波容量式・型番 HI-500）でコンクリート表面の含水率を測定し、5.5%以下を確認した後に試験を開始した。

透気試験機の仕様を表-2.1.1に示す。試験は、測定対象とする箇所の表面にチャンバーセルを吸着させ、真空状態から圧力上昇値（時間）を測定することにより、かぶりコンクリートの品質を評価する。特徴として、測定範囲は実質 $\phi 50mm$ 、測定開始までは暖気を含め1時間程度、緻密なコンクリートの場合測定時間は長くなる等が挙げられる。品質のグレードを表-2.1.2に示す。



写真-2.1.1 透気試験機（ダブルチャンバー法）

表-2.1.1 透気試験機の仕様

外部チャンバー内径	直径 100mm
内部チャンバー内径 及び断面積 A	直径 50mm, 1963mm ²
内部チャンバー容積 V_c	165000mm ³
チャンバーパッキン	スポンジゴム O -リング
真空ポンプ	油回転真空ポンプ
減圧時間	30s
測定間隔	15s
試験開始 30 秒後の 目標真空到達圧力	3.0kPa (abs) (30mbar)
測定開始時間 t_0	減圧開始後 60s
測定時間	最大 720s/360s または 2kPa に達する時間
空気の粘性	$2.0 \times 10^{-5} Pa \cdot s$
空隙率	0.15

表-2.1.2 透気係数による品質グレード

透気係数 kT ($\times 10^{-16}m^2$)	~0.01	0.01~0.1	0.1~1	1~10	10~
評価	優	良	一般	劣	極劣

2.1.2 表面吸水試験

表面吸水試験（SWAT）はコンクリートの緻密性や水密性を評価する一つの方法として実績を有する。測定は、シリンダーの水位がコンクリートの吸水により低下することを利用し、水圧の変化を圧力センサーで読み取ることによって間接的に水位を測定し、10分間の吸水量を求めることとしている（写真-2.1.2）。SWATは、使用した細骨材、測定時期、材齢および表面の水分率といった環境条件により測定値が変動しやすい、測定範囲がφ80mm、使用水を外気温に合わせる必要がある等の特徴が挙げられる。

透水量および吸水速度は、値が小さいほどかぶりコンクリートが緻密であると評価する。計測開始から100秒間の累積吸水量が1mlを下回る場合、空気量に関係なく高いスケーリング抵抗性を有するコンクリートであることが分かっている。また、1～1.5mlでは、設計時に空気量を適切に設定し、かつ硬化時に空気量が確保されていることが重要となる。1.5mlを超えるような場合は、空気量を確保してもスケーリング抵抗性が劣る可能性がある³⁾。



写真-2.1.2 SWATによる測定状況

2.1.3 簡易透気試験

簡易透気試験は独自に開発した方法である。写真-2.1.3に試験機を示す。呼び径100mmの硬質塩ビ排水継ぎ手とツマミ付き掃除口排水用塩ビ継ぎ手を組み合わせたものに、2本のコック（一方は負圧用、一方は負圧調整用）と負圧計を取り付けたもので、軟質シリコンでコンクリートとの密着性を良くするシングルチャンバーを端部に取り付けた構造となっている。測定方法は、シリコン部分を測定面に密着させた状態で、負圧用のコックから減圧し、負圧計の値が-80kPaを超えるまで吸引した後にコックを閉め、負圧計の値が-80kPaから-60kPaまでの増圧にかかった時間(sec)を計測する。この増圧量(20kPa)を、経過した時間で除した値を簡易透気係数(kPa/sec)と定義している。なお、20kPaまでの増圧が進まないような緻密なコンクリートの場合、5分までを最大計測時間とし、それまでに増圧した値を5分(300秒)で割った値を透気係数として求めている。この試験機の特徴は、材料費1万円以下で作製可能であり、使用に当たっては暖機運転などの必要性はなく、最大計測時間は5分と短く、同時に複数個の測定を行えることと、手動用の吸引装置があれば、電源がなくとも使用が可能であることが挙げられる。品質のグレードとしては、0.05(kPa/sec)未満を「緻密」、0.5(kPa/sec)未満を「一般」、0.5(kPa/sec)以上を「粗」として評価している。



写真-2.1.3 簡易透気試験による測定状況

2.1.4 X線造影撮影法

X線造影撮影法は、コンクリートに造影剤を浸透させることによって、肉眼で確認できない内部に発生したひび割れや空隙を検出することができる方法である⁴⁾。この方法によってひび割れや空隙の検出だけでなく、その発生量を定量化することができる。X線撮影によって得られる透過画像の濃淡は、供試体を透過し検出装置に到達したX線量（X線透過線量）によって決まる。すなわち、気泡やひび割れなどの空隙や吸収係数が低い物質の箇所ほどX線透過線量は多く、X線フィルム上ではその箇所が黒くなる。一方、造影剤のような吸収係数が高い物質の箇所ではX線透過線量は少なく、白くなる（図-2.1.1）。

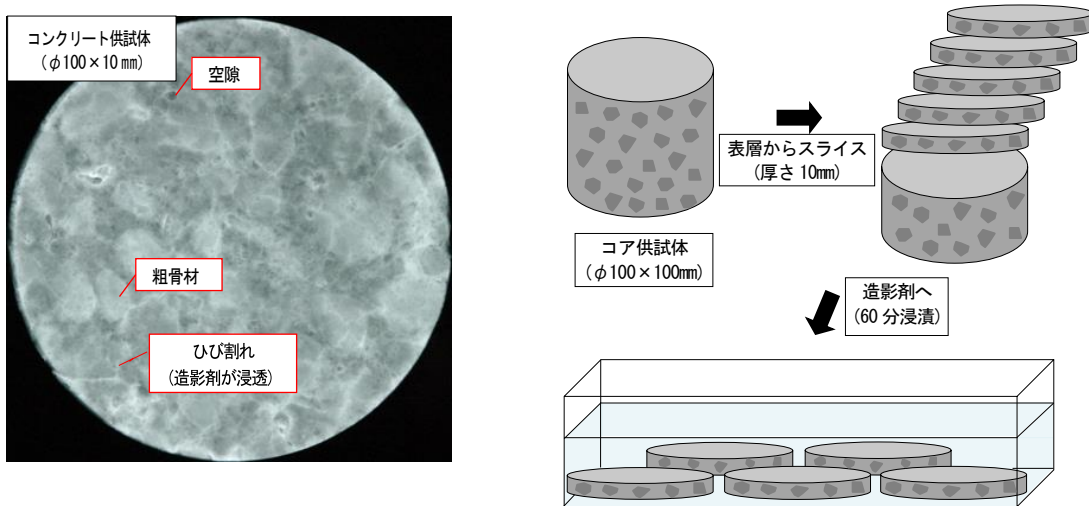


図-2.1.1 X線画像の一例と供試体の作製方法

X線造影撮影用の供試体は、 $\phi 100\text{mm} \times h100\text{mm}$ にコア抜きした後にダイヤモンドカッターによって厚さ 10mm にスライスして、その後造影剤に 60 分浸漬させた。浸漬後には余分な造影剤を除去して X 線による撮影を行った。

2.2 各種非破壊試験の測定結果と空隙量との関係 (X線造影撮影法との比較による考察)

2.2.1 実験概要

供試体は土間を想定した平板コンクリートと、壁部を想定した壁状コンクリートを作製して各種非破壊試験によるコンクリート表層の評価を行った⁵⁾。表-2.2.1には、供試体の形状、配合および寸法の一覧を示す。配合は6ケース、数量は41体、測定は透気試験 155 箇所、透水試験 123 箇所、簡易透気試験 145 箇所、X線造影撮影試験 119 箇所とした。

表-2.2.1 供試体の形状、配合および寸法

供試体 No.	形状	配合	寸法 (mm)	
A1-A13	土間	21-18-20-N	500×500×100	
B1-B7	壁	24-8-25-BB	1000×1000×1000	
C1-C3	土間	30-18-20-N	500×500×100	
D1-D9			1630×300×200	
E1-E5	壁	24-12-20-BB	1160×580×200	
F1-F18		30-12-20-N	700×700×100	
G1-G18		24-12-20-N	275×400×500	
H1-H18			700×700×100	
I1-I4		土間	30-12-20-N	700×700×100
J1-J4				500×500×100
K1-K19	24-12-20-N			1160×580×200
L1-L12	壁	24-12-20-N	1160×580×200	
M1-M8			500×500×100	
N1-N4	土間	24-12-20-N	500×500×100	
O1-O3			500×500×100	
P1-P8	壁	24-12-20-N	1160×580×200	
	土間		500×500×100	

2.2.2 実験結果

図-2.2.1に、透気係数 kT ($\times 10^{-16} \text{m}^2$) の測定結果と X 線造影撮影法による累積透過線変化量との関係を示す。累積透過線変化量とは、透気試験における測定深さ L 値までの空隙量を透過線変化量で表したものである。表層から L 値までの範囲における相関係数は 0.92 と良好な関係が得られており、本実験の結果から、透気係数は L 値までの空隙の総量と考えられる。

図-2.2.2に、表面吸水速度と透過線変化量との関係を示す。表面吸水速度 ($\text{ml}/\text{m}^2/\text{s}$) と透気試験から得られた L 値までの累積透過線変化量との関係は、相関係数 0.57 であった。一方、表面吸水速度と表層 10mm 以内の累積

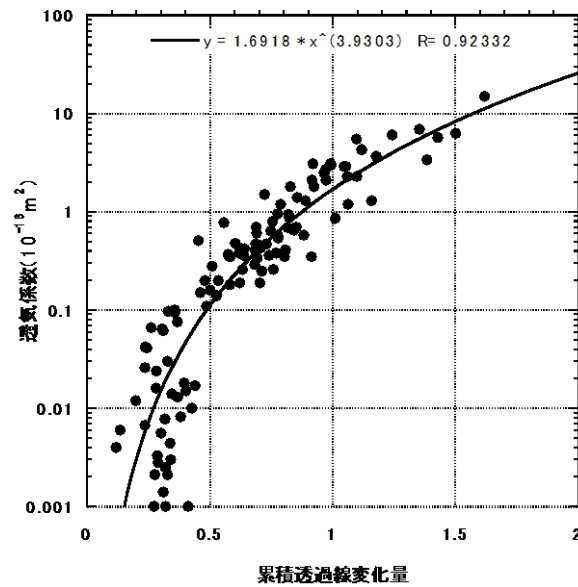


図-2.2.1 透気試験結果と累積透過線変化量との関係

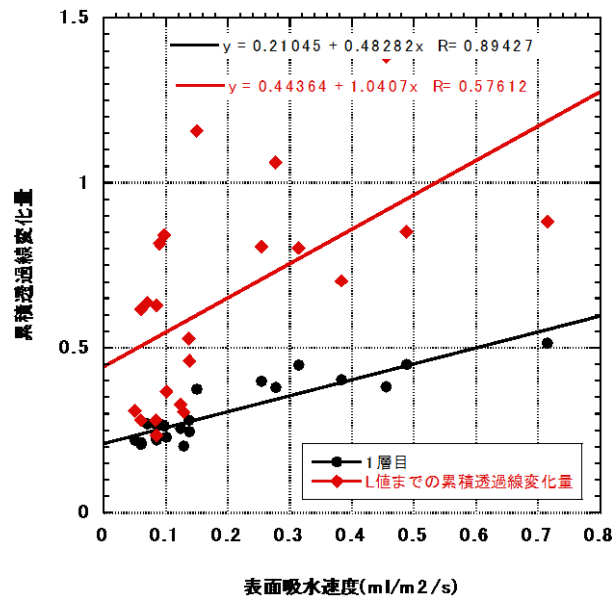


図-2.2.2 吸水試験結果と累積透過線変化量との関係

透過線変化量との関係では、相関係数 0.89 であった。このことから、本実験において表面吸水試験では、コンクリート表面から 10mm 以内の空隙量を測定していると考えられる。

図-2.2.3 は、簡易透気係数と透気試験で求めた L 値までの累積透過線変化量との関係である。L 値までの透過線変化量（空隙量）との関係は相関係数が 0.86 であり、他の深さのケースより良好であった。今回の試験範囲において簡易透気試験での測定深さは、透気試験と同等の 100mm 程度と考えられる。

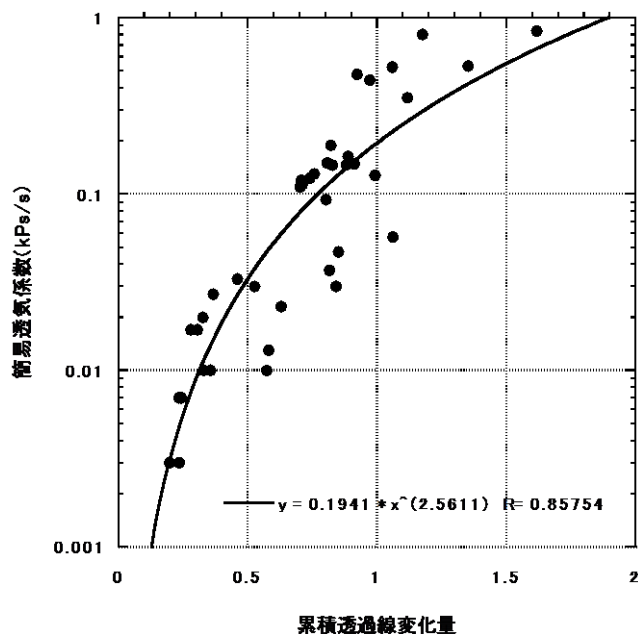


図-2.2.3 簡易透気試験結果と累積透過線変化量との関係

2.3 各種非破壊試験の相関性

以下に、各種非破壊試験によってコンクリートの同一箇所を測定し、相関性について調べた結果を示す。なお、相関性については、透気試験と吸水試験、透気試験と簡易透気試験および吸水試験と簡易透気試験の結果から考察を加えている。

図-2.3.1 は透気係数と吸水速度との関係を示しており、図-2.3.2 は図-2.3.1 を水分率ごとに色分けした結果である。透気係数と吸水速度との相関係数は 0.75 であったものの、水分率が高い条件では吸水速度が小さくなる傾向が見られた。一方、水分率が低い乾燥した条件下では、透気係数および表面吸水速度とも測定値の範囲が広くなる傾向となった。

図-2.3.3 は透気係数と簡易透気係数との関係を示している。本実験の結果から、水分率を分けて相関を取ると異なる結果が示されており、水分率 3.9% では相関係数 0.98、水分率 4.3~4.7% では相関係数 0.86 であったことから水分率が影響を及ぼすことが示されている。また、各種非破壊試験の相関性は、コンクリート表面の水分率によって大きく変わることが分かった。

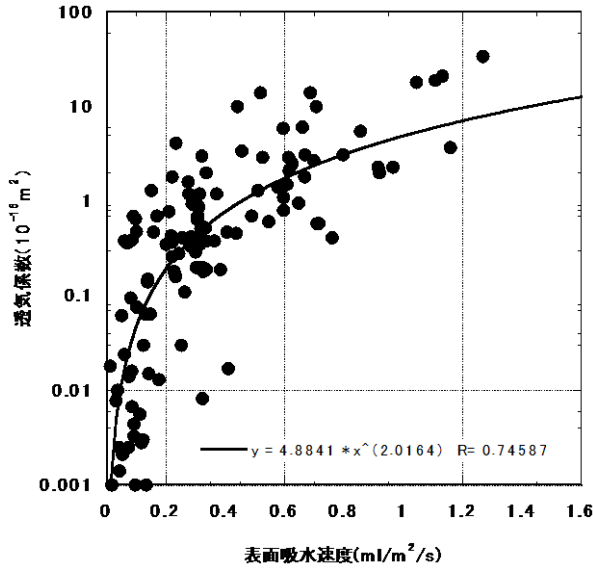


図-2.3.1 透気係数と吸水速度との関係

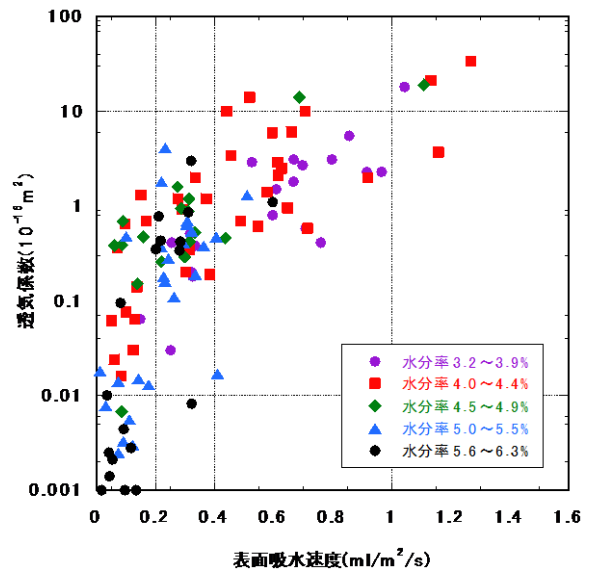


図-2.3.2 透気係数と吸水速度との関係

図-2.3.4は吸水速度と簡易透気係数との関係を示している。吸水速度は、コンクリート表面の水分率が大きいほど小さくなる傾向が見られ、水分率の及ぼす影響が大きいと思われる。簡易透気係数では、水分率の高低に係なく測定値の範囲が広くなる結果となった。簡易透気試験は、コンクリートの水分率が高い場合には測定値が大きくなるが、水分率が低い場合には測定値がばらつく傾向にある。

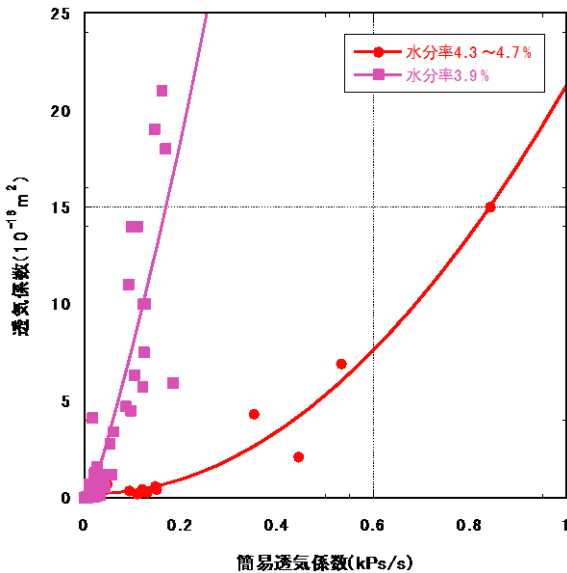


図-2.3.3 透気係数と簡易透気係数との関係

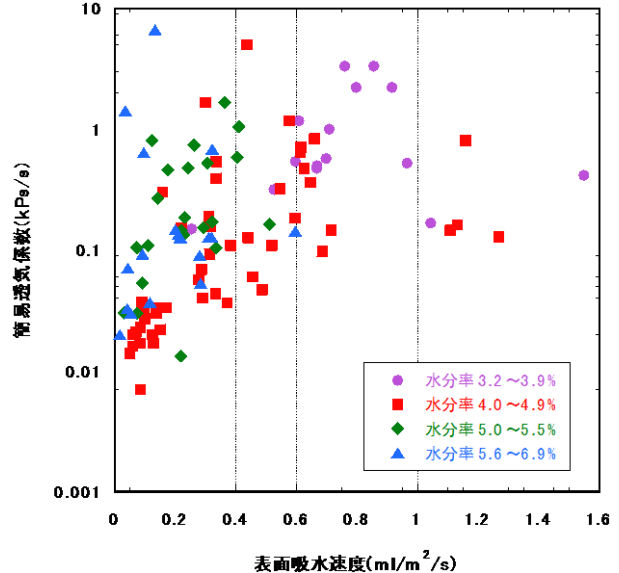


図-2.3.4 吸水速度と簡易透気係数との関係

2.4 各種非破壊試験の測定結果に及ぼす表面水分率の影響

本検討は、水分率と各種試験結果との関係を調べるため、同一のコンクリート表面を対象とし異なる水分率において、透気試験、吸水試験および簡易透気試験を行った。非破壊試験後は、コア削孔を行った後に厚さ 1cm にスライスし 24 時間乾燥した後 24 時間 NaCl3% 水溶液に浸漬させて、凍結融解を実施した。凍結融解は、ASTM C 672 の温度履歴に沿った水中凍結水中融解とし、質量減少率が 10% になるまで継続した。

供試体はコンクリート壁面を想定した寸法（幅 1160mm×高さ 600mm×奥行 200mm）として、普通 24-12-20BB のコンクリートを打ち込んだ（写真-2.4.1）。なお、1 体は標準的な締固め時間 15 秒、もう 1 体は過度な締固め 30 秒としている。測定は側面 11 箇所について、同一箇所を透気試験、簡易透気試験および吸水試験の順に行った（写真-2.4.2）。

試験時の水分率は、測定箇所の平均水分率が 4.0% 時点、その後室内の環境に放置した 5.0% 時点、さらには水中に 3 日間浸漬し水揚げした後の 5.6% 時点の 3 ケースとしている。なお、水分率の測定は、高周波および電気抵抗式のコンクリート水分計を用いて行った。

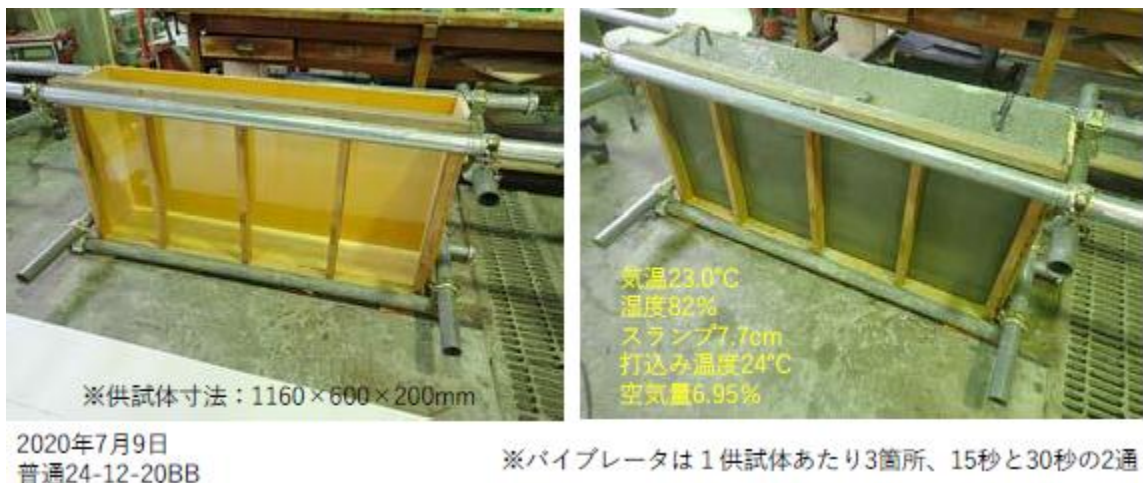


写真-2.4.1 供試体の作成方法

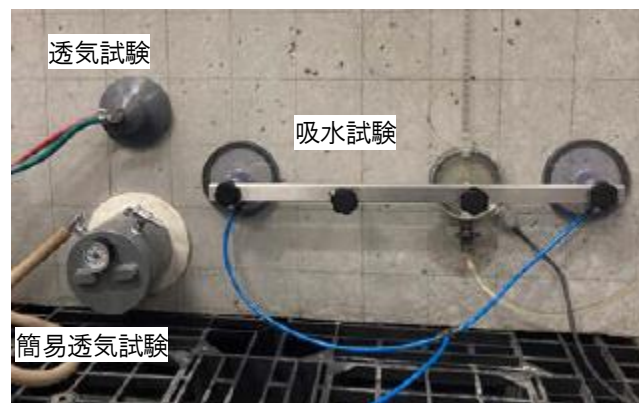


写真-2.4.2 各種非破壊試験による測定状況

図-2.4.1は、同一箇所において水分率を3ケースとした場合の透気係数を測定した結果である。結果から、透気係数は水分率によって大きく異なり、水分率が大きいほど透気係数が小さい傾向が見られた。また、平均水分率5.6%時の透気係数 kT は、そのほとんどが $0.001\sim 0.1$ ($\times 10^{-16}m^2$) となり、「優」の品質グレードに位置した。一方、平均水分率5.0%時の透気係数 kT では $0.1\sim 1$ ($\times 10^{-16}m^2$) となり「一般」の品質グレード、平均水分率4.0%時の透気係数 kT では $0.1\sim 1$ ($\times 10^{-16}m^2$) および $1\sim 10$ ($\times 10^{-16}m^2$) となり「一般」から「劣」の品質グレードに位置した。透気試験では、同一箇所のコンクリートにもかかわらず水分率によって評価が大きく異なり、水分率が高くなるにつれ、透気係数が低くなる傾向が示された。

透気係数はその測定原理上、コンクリートの乾燥に伴い変化する含水状態の影響を大きく受けるため、測定時の水分率の管理に十分な配慮が必要となる。また、他の構造物において同様の比較を行う場合には、水分率による補正を検討する必要があると思われる。既往の研究⁹⁾においても、透気係数とコンクリート水分逸散量には強い相関があることが分かっており、トレント法で得られる透気試験の結果は、コンクリート中の含水状態を示している可能性が分かっている。透気係数は、材齢経過（乾燥の進展）に伴って増大すること、水分逸散によって増大するコンクリート表層の開放空隙量と等価であることも報告されており、このことからトレント試験は、コンクリートの乾燥の進展程度を定量評価可能な非破壊試験として品質評価に活用できる可能性を示している⁷⁾。

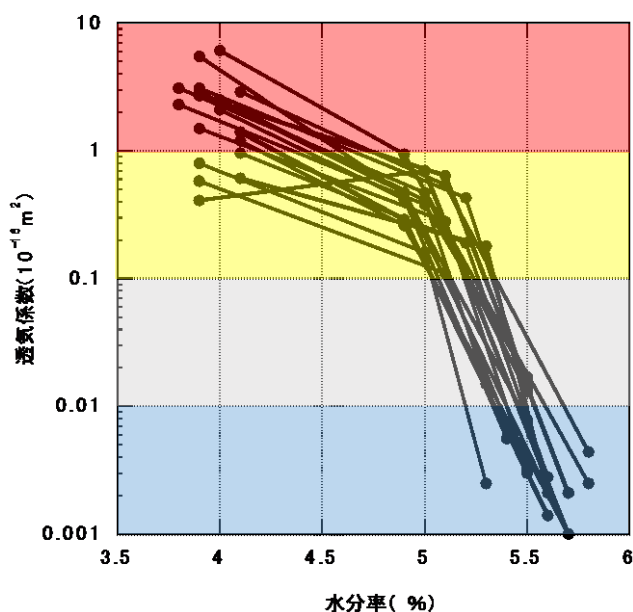


図-2.4.1 透気係数と水分率との関係

図-2.4.2は、同一箇所において水分率を3ケースとした場合の吸水速度を測定した結果である。前述の透気係数と同様の傾向が確認され、水分率が大きいほど吸水速度が小さい結果であった。評価に関しても、平均水分率5.6%時の吸水速度は、 $0\sim 0.25$ ($ml/m^2/s$) となり「良」の品質グレードに位置した。一方、平均水分率5.0%時の吸水速度では $0.25\sim 0.5$ ($ml/m^2/s$) となり「一般」の品質グレード、平均水分率4.0%時の吸水速度では $0.5\sim 1$

($\text{ml}/\text{m}^2/\text{s}$) となり「劣」の品質グレードに位置した。この結果の一因として、コンクリート表層付近の浅い位置(10mm 以内)で相関関係が良好であるため、線形的になったと考えられる。

図-2.4.3 は、同一箇所において水分率を3 ケースとした場合の簡易透気係数を測定した結果である。水分率によらず簡易透気係数の測定結果が広がる傾向を示した。正確には、水分率が大きくなるにつれ測定値が低くなるため性能が良くなる傾向となったが、一方では変化が見られない結果も見られることから、

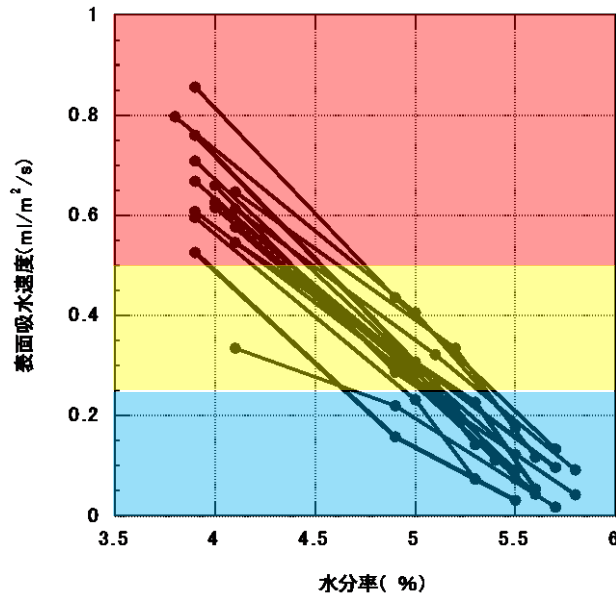


図-2.4.2 吸水速度と水分率との関係

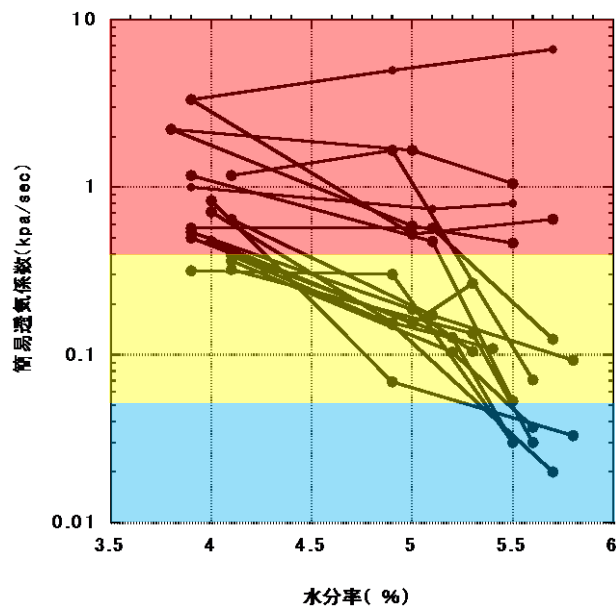


図-2.4.3 簡易透気係数と水分率との関係

水分率の影響をあまり受けていないと考えられる。ばらつきが大きくなるのではなく、粗の箇所は水分率に関係なく粗のままに評価される箇所が多くなると考えている。簡易透気試験の測定では、約-80kPa以上の高い負圧を与えているため、一定以上の空隙（間隙）において水分率の影響を受けにくいと考えられる。

なお、凍結融解試験においては、各種非破壊試験による測定値と凍結融解のサイクル数との関係に明確な相関が確認できなかった。

2.5 長期材齢における各種非破壊試験結果の変動

2.5.1 実験概要

供試体の寸法は幅 500mm×奥行 500mm×高さ 100mm とし、鉄筋は配置せず、型枠存置とした（写真-2.5.1）。なお、供試体は屋外に曝露したが、屋根のある個所に設置して雨風の影響が限りなく無い様に考慮した。

使用したコンクリート（普通 24-18-20N）は、スランプ 7.6cm、空気量 5.6%、圧縮強度 22.0 N/mm²（材齢 7 日）、29.2N/mm²（材齢 28 日）であった。なお、圧縮強度用の供試体は、養生場所と同位置に静置した。

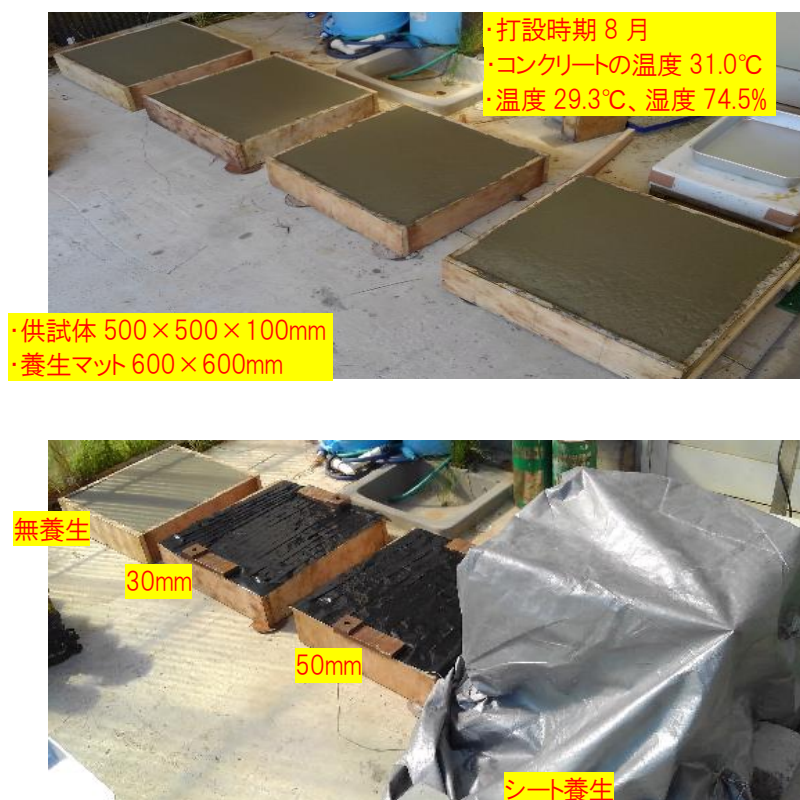


写真-2.5.1 供試体の作製および養生状況

養生のケースおよび散水の頻度を表-2.5.1 に示す。養生期間は、いずれのケースも 7 日間としている。7 日後以降はすべてのマットやシートを外し、コンクリート表面を粗出させた。保水性養生マットには、30mm および 50mm ずつカットを入れている。一般的に地覆箇所は、鉄筋が多く露出しているため養生がほとんど行われてい

ないが、その箇所への養生を行うための専用マットとなっている。また、このマットは敷設後にめくることなく上面からの散水を可能としていることから、省人化を図れる材料となっている。

シート養生は、一般的なビニルシートを供試体に覆いかぶせ、外部からの影響が及ばないように考慮した。無養生は養生を一切行っていない。散水は無養生およびシート養生には行わず、保水性養生マットのみを行い、敷設前の初期のみ散水をした。なお、養生期間中は散水を行っていない。

コンクリートの品質評価は、材齢7日、28日、139日および419日において、透気試験、透水試験および簡易透気試験を実施し、得られた結果に関して材齢別、試験方法別に比較をして考察を加えた⁸⁾。

表-2.5.1 養生のケースおよび散水頻度

養生のケース	散水頻度
無養生	無
保水性養生マット・30mm スライス加工	敷設時の初期のみ (養生期間中は散水無)
保水性養生マット・50mm スライス加工	
シート養生	無

2.5.2 実験結果

(1) コンクリート表面の含水率

図-2.5.1には、コンクリート表面の含水率を測定した結果を示している。無養生およびシート養生のケースでは、2日経過後に含水率が大きく減少し、3日目以降は4%程度を推移した。一方、保水性養生マットのケースでは、経過日数と共に減少傾向が見られるものの、約5%程度を維持した。

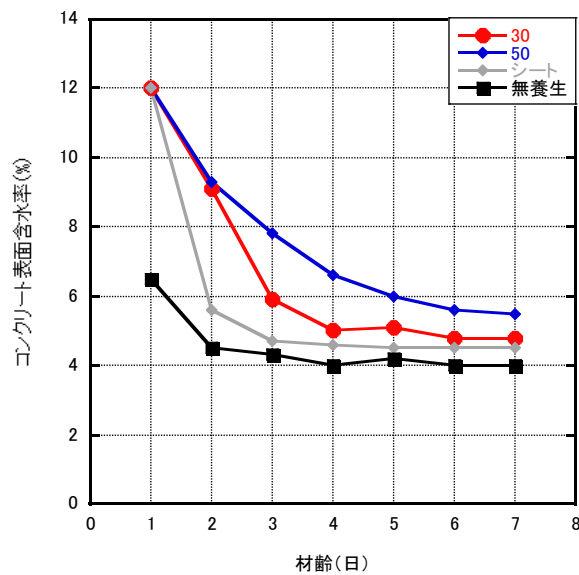


図-2.5.1 コンクリート表面の含水率と材齢との関係(材齢1日～7日)

表-2.5.2 コンクリート表面の含水率(材齢 28 日、139 日、419 日)

養生のケース	材齢 28 日	材齢 139 日	材齢 419 日
無養生	4.0	3.6	4.0
保水性養生マット・30mm スライス	4.4	3.8	4.1
保水性養生マット・50mm スライス	4.2	3.9	4.1
シート養生	4.1	3.9	4.1

写真-2.5.2 には、経過日数別のコンクリート表面の含水状態を示す。保水性養生マットのケースでは、マットからの影響によって、供試体表面に養生マットによる敷設跡が確認することができた。


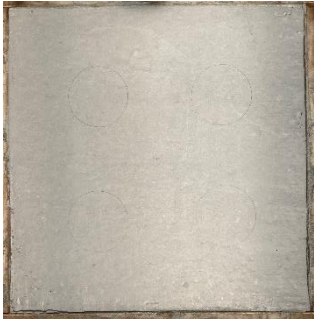










1 日経過	3 日経過	7 日経過
無養生		
		
保水性養生マット・30mm スライス加工		
		
保水性養生マット・50mm スライス加工		
		
シート養生		
		

写真-2.5.2 経過日数別のコンクリート表面の含水状態

(2) 透気試験による評価

図-2.5.2に、材齢7、28、139および419日に測定した透気係数を示す。無養生およびシート養生は、いずれの材齢においても「極劣」の評価であった。また、材齢28日では透気係数が小さくなる傾向が見られたが、その後の測定値に大きな変動が見られなかった。一方、保水性養生マットでは、材齢139日以降「一般」から「劣」への評価となり、乾燥が及ぼす影響から透気係数が増加したと考えられる。また、中性化深さを調べたところ、無養生は3mm程度、保水性養生マットは1mm程度であったことから、無養生では炭酸化反応によりコンクリート表面の空隙量が減少し透気係数が小さくなった可能性も考えられるが、現在も検証中である。

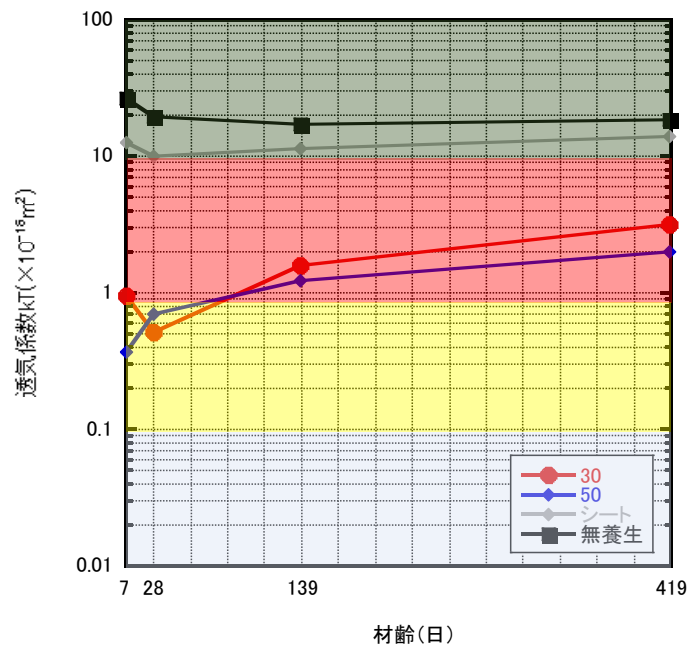


図-2.5.2 養生ケースと透気係数

◆材齢 7 日

実験ケース	30mm	50mm	シート養生	無養生
透気係数	0.95	0.37	12.5	26.5
品質グレード	一般	一般	極劣	極劣

◆材齢 28 日

実験ケース	30mm	50mm	シート養生	無養生
透気係数	0.52	0.7	10	19.5
品質グレード	一般	一般	極劣	極劣

◆材齢 139 日

実験ケース	30mm	50mm	シート養生	無養生
透気係数	1.6	1.24	11.5	17
品質グレード	劣	劣	極劣	極劣

◆材齢 419 日

実験ケース	30mm	50mm	シート養生	無養生
透気係数	3.15	2.0	14.0	18.5
品質グレード	劣	劣	極劣	極劣

(3) 表面吸水試験による評価

図-2.5.3に材齢7, 28, 139 および419日に測定した表面吸水量を示す。無養生およびシート養生は、いずれの測定値も「粗」の評価であり、材齢139日まで材齢と共に測定値が小さくなる傾向であったものの、材齢419日では増加に転じた。一方、保水性養生マットでは、材齢7日において「密」の評価であったものの、その後「一般」および「粗」の評価となり、材齢と共に測定値が大きくなる傾向が見られた。

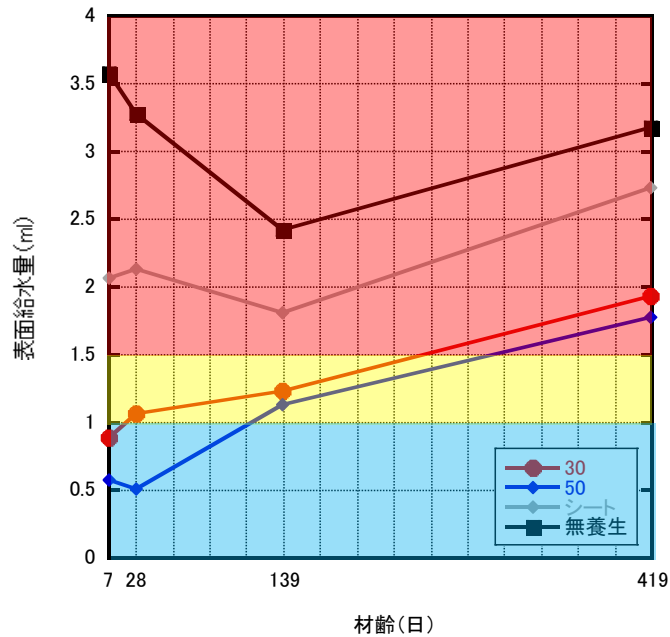


図-2.5.3 養生ケースと吸水量

◆材齢7日

実験ケース	30mm	50mm	シート養生	無養生
吸水量	0.88525	0.5836	2.0691	3.5832
品質グレード	密	密	粗	粗

◆材齢28日

実験ケース	30mm	50mm	シート養生	無養生
吸水量	1.0617	0.5097	2.1325	3.2816
品質グレード	一般	密	粗	粗

◆材齢139日

実験ケース	30mm	50mm	シート養生	無養生
吸水量	1.234	1.137	1.816	2.419
品質グレード	一般	一般	粗	粗

◆材齢419日

実験ケース	30mm	50mm	シート養生	無養生
吸水量	1.938	1.781	2.732	3.183
品質グレード	粗	粗	粗	粗

(4) 簡易透気試験による評価

図-2.5.4に、材齢7、28、139および419日に測定した簡易透気係数を示す。無養生およびシート養生は、いずれの材齢においても「一般」であったが、測定値は経過日数とともに品質向上の方向へシフトした。

一方、保水性養生マットでは、全材齢とも「密」の評価であり、いずれの材齢においても測定値に大きな変動が見られなかった。

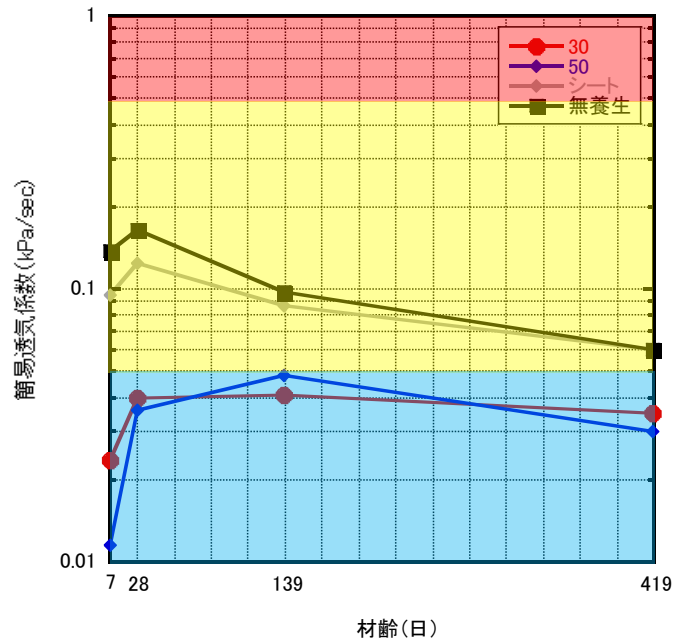


図-2.5.4 養生ケースと簡易透気係数

◆材齢 7 日

実験ケース	30mm	50mm	シート養生	無養生
簡易透気係数	0.0235	0.0115	0.095	0.137
品質グレード	密	密	一般	一般

◆材齢 28 日

実験ケース	30mm	50mm	シート養生	無養生
簡易透気係数	0.04	0.036	0.125	0.165
品質グレード	密	密	一般	一般

◆材齢 139 日

実験ケース	30mm	50mm	シート養生	無養生
簡易透気係数	0.041	0.048	0.087	0.097
品質グレード	密	密	一般	一般

◆材齢 419 日

実験ケース	30mm	50mm	シート養生	無養生
簡易透気係数	0.035	0.030	0.06	0.06
品質グレード	密	密	一般	一般

(5) 全試験結果の比較と考察

図-2.5.5 に、これまでの実験で得られた結果を養生，試験および材齢別に比較したものである。養生マット 30mm および 50mm では同様の傾向であり，透気係数は一般から劣評価と低下する傾向となった。吸水量では 28 日まで高品質の評価であったものの，それ以降に低下傾向となり 419 日では劣評価となった。簡易透気係数では 7 日以降における材齢にて密実の評価であった。一方，無養生やシート養生では，透気係数および吸水量とも極劣および粗の評価，簡易透気試験では一般評価であった。

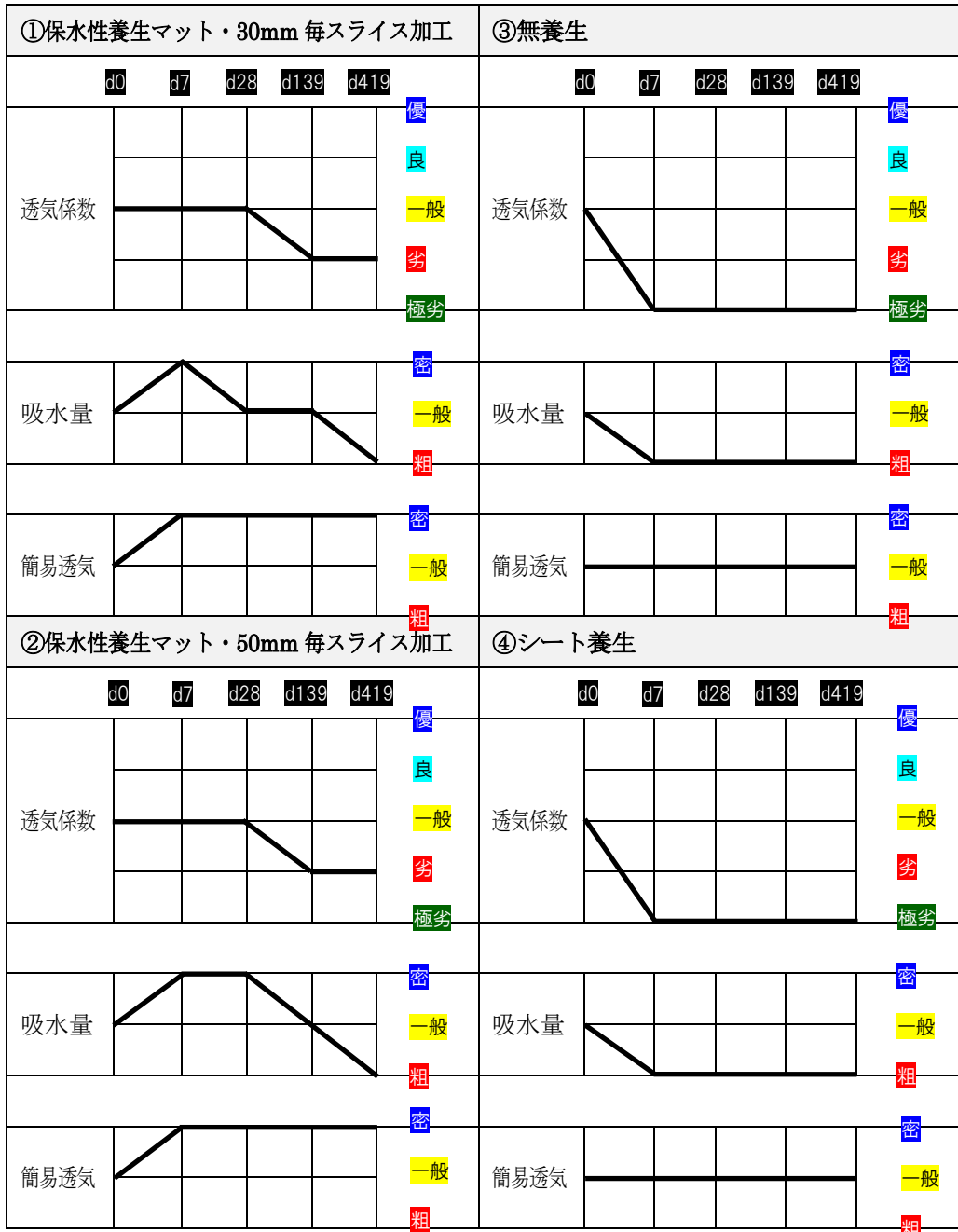


図-2.5.5 養生ケース、材齢および非破壊試験による比較

2.6 まとめ

本章では、各種非破壊試験を用いたコンクリートの表層品質の評価を行った。測定結果に関して、空隙量との関係、表面水分率が及ぼす影響および各種非破壊試験の相関性について検討した。さらには、長期材齢における測定結果の変動に関する検討し考察を加えた。以下に得られた知見を述べる。

1. 各種非破壊試験の測定結果と空隙量との関係（X線造影撮影法との比較による考察）

- (1) 表層からL値までの範囲において、透気係数 kT と透過線変化量との相関は良好であった。
- (2) 表面吸水速度と累積透過線変化量との相関から、吸水試験では10mm以内の空隙量を測定していると考えられる。
- (3) 簡易透気係数と累積透過線変化量との相関から、簡易透気試験の測定深さは100mm程度と考えられる。

2. 各種非破壊試験の相関性

- (1) 透気係数と吸水速度との関係から、水分率が高い条件では測定値が小さくなり、低い乾燥条件では測定範囲が広がる傾向となった。
- (2) 透気係数と簡易透気係数との関係から、水分率3.9%では相関係数0.98、水分率4.3~4.7%では相関係数0.86であり、水分率が大きく影響を及ぼすことが示された。
- (3) 吸水速度と簡易透気係数との関係から、吸水速度は水分率が大きいほど小さく、簡易透気係数では水分率の高低に関係なく測定値の範囲が広がる傾向が見られた。

3. 各種非破壊試験の測定結果に及ぼす表面水分率の影響

- (1) 透気係数および吸水速度では、同一箇所のコンクリートにもかかわらず水分率によって評価が大きく異なり、水分率が高いほど測定値が低い結果が得られた。
- (2) 簡易透気係数では、水分率の影響をあまり受けないと結果が得られた。本方法は高い負圧を与えているため、一定以上の空隙（間隙）において水分率の影響が受けにくいと考えられる。

4. 長期材齢における各種非破壊試験結果の変動

- (1) 無養生およびシート養生では、試験方法や材齢によらず、評価が「一般」、「劣」、「極劣」であり全体的に低評価であった。しかし、試験方法によっては、評価グレード自体が改善するものではないが、材齢の進行とともに測定値が品質改善にシフトする結果も得られている。
- (2) 保水性養生マットでは30mmおよび50mm共に、試験方法や材齢によらず、評価が「一般」、「密」であった。しかし、透気係数および吸水量では、材齢の進行とともに品質が低下する傾向が見られ、材齢419日では「劣」や「粗」の結果が得られている。

（執筆者：大友鉄平）

3. 変状あるいは含浸性塗布材の施工箇所への各種非破壊試験の適用性の検討

3.1 簡易透気試験によるセパレータ周囲に生じた沈みひび割れの貫通評価

国土交通省東北地方整備局管内において管理しているコンクリート製樋門・樋管は、2020年現在、1264施設あり、設置から40年を経過している施設は全体の約5割を占めており、今から10年後には約7割、20年後には約8割に達することから、維持修繕・補修・更新の比重が大きくなっている。老朽化を迎えているこれらの樋門コンクリート構造物に対して、国土交通省では「河道及び河川管理施設の長寿命化計画策定の手引き（平成30年3月）」を策定し、管内においても施設の状態を把握するための定期点検を開始した。国立研究開発法人土木研究所先端材料資源研究センターによる「樋門・樋管のコンクリート部材における点検結果評価のポイント

（案）（平成28年3月）」では、収集された河川コンクリート構造物の点検結果から、特に事例数の多い樋門・樋管を中心に変状事例を整理した。そのうち代表的な8種類の変状を抽出したところ、最も事例が多い変状は函体直角方向輪切り状ひび割れであり、事例数は少ないが鉄筋に沿ったひび割れや函軸方向ひび割れ（頂版中央付近）など、“ひび割れ”の発生要因が多い状況となっている。また、乾燥収縮によって発生するひび割れは、樋門の側壁および天端に発生するケースが多く、竣工から約5年程度にわたって発生・増加することが判明している。初期に発生する乾燥収縮ひび割れは大変微細であり、目視で確認するのは難しく見逃しがちである。このひび割れが次第に大きく進展していき、コンクリートの耐久性を低下させる要因にもなるため、初期の乾燥収縮ひび割れの発生状況を把握することは、長期的な維持管理を行う上で、大変重要となる。

写真-3.1.1は、セパレータを縦に貫通するように乾燥収縮ひび割れが発生し、赤褐色の漏水が生じている箇所である。この様な変状が見られた場合、ひび割れ自体が貫通ひび割れと判断される場合があるが、実際は、セパレータに発生した沈みひび割れからの漏水の場合がある。この変状の発生要因は、以下のとおりである。最初に、打込み後の材料分離に伴うブリーディングによりコンクリートが沈下し、セパレータ周辺に沈みひび割れ（貫通）が発生する。この箇所は表層のPコン周辺には沈みひび割れは確認できていないが、セパレータ本体に生じているケースである。脱型後、乾燥収縮によってコンクリート面にひび割れが入ってくるが、縦横等間隔に配置したセパレータに発生した沈みひび割れが起点となって、セパレータを繋ぐように函軸直角方向の側壁にひび割れが発生する。その後、地下水の上昇などによって、セパレータ周辺に発生した沈みひび割れから水が浸透し、表面の乾燥収縮ひび割れから水がしみ出すことになる。なお、この写真では赤褐色の析出物が見られており、鋼材の腐食が懸念されることになるが、調査の結果、背面の土砂中の鉄分が流れ出し、コンクリート表面で酸化したものであり、鋼材自身の腐食は殆ど認められなかった。

樋門においては乾燥によって発生するひび割れが貫通することはないが、この様に別の要因で発生したひび割れが重なることで、調査・点検における判断が難しくなるケースがある。写真-3.1.1のようなセパレータ周辺の沈みひび割れが貫通していると竣



写真-3.1.1 セパレータ箇所に生じた変状

工時点で判断することができれば、簡易的な補修を行うことによって、このような変状への進展を抑えることが可能となり、結果的には点検業務の軽減や補修費の削減に繋つながらるものと思われる。しかしながら、このような判断を行うことができる検査方法は無く、簡易的な調査方法の開発が望まれている。

以上のようなことから、本研究では、新設構造物におけるセパレータ周辺の沈みひび割れに対して、独自に開発した簡易透気試験機を用いた簡易透気係数（以後、「透気係数」）を求める実験を行い、ひび割れの貫通評価を行った。

3.1.1 簡易透気試験機の概要

筆者らが開発した簡易透気試験機（2.1.3 参照）を写真-3.1.2 に示す。本試験機は、本体が呼び径 100mm の硬質塩ビ排水継ぎ手とツマミ付き掃除口排水用塩ビ継ぎ手を組み合わせたものに 2 本のコック（一方は負圧用、もう一方は負圧調整用）と負圧計を取り付けたもので、軟質シリコンでコンクリートとの密着性を良くするシングルチャンバーを端部に取り付けた構造となっている。

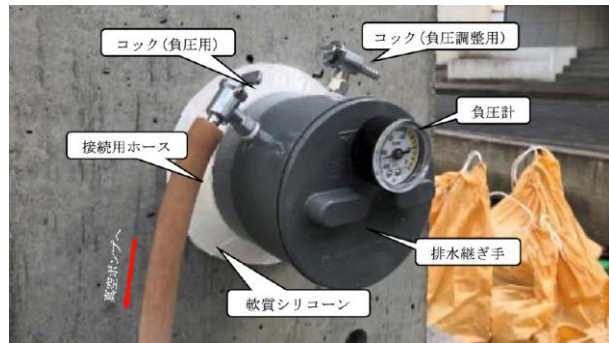


写真-3.1.2 簡易透気試験機

測定方法は、シリコン部分を測定面に密着させた状態で、負圧用のコックから減圧し、負圧計の値が-80kPa を超えるまで吸引した後、コックを閉め、負圧計の値が-80kPa から-60kPa までの増圧にかかった時間(sec)を計測し、この増圧量(20kPa)を経過した時間で除した値を簡易透気係数(kPa/sec)と定義している。なお、20kPa までの増圧が進まないような緻密なコンクリートの場合、5分までを最大計測時間とし、それまでに増圧した値を5分（300秒）で割った値を透気係数として求めている。

この試験機の特徴は、材料費で言えば1万円以下で作製可能であり、使用に当たっては暖機運転などの必要性はなく、最大計測時間は5分と短く、同時に複数個の測定を行える点と、手動用の吸引装置があれば、電源がなくとも使用が可能であることが挙げられる。

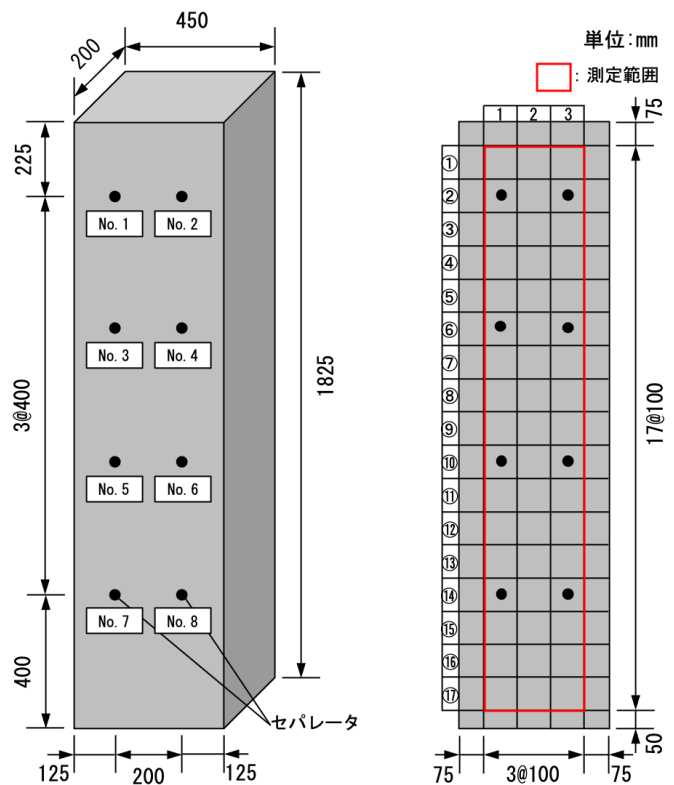


図-3.1.1 供試体形状寸法

4.1.2 実験概要

(1) 供試体概要

実験には、樋管の壁を想定した幅 450×高さ 1825×奥行き 200mm の壁状コンクリート供試体を作製した。供試体の寸法および形状を図-3.1.1 に示す。この供試体には、拘束および沈下による沈みひび割れを誘発するために、セパレータ（図中の黒い点）を底面より 400, 800, 1200, 1600mm の位置に 2 本ずつ、計 8 箇所設けた。コンクリートは、

レディーミクストコンクリート工場で練り混ぜられた普通 24-12-20 BB を使用した。打ち込みは、2 層による急速打ち込みとし、棒状振動機で締固めた後は、型枠に振動を与えず放置した。また、脱型は翌日に行い、屋外で 28 日間気中養生とした。なお、新設構造物を想定していることから、セパレータの穴埋め処理は行っていない。供試体に用いたコンクリートの配合を表-3.1.1 に示す。

表-3.1.1 コンクリートの配合

粗骨材最大寸法(mm)	スランブ(cm)	水セメント比(%)	空気量(%)	細骨材率(%)
20	12	51.0	6.9	42.8
単位量(kg/m ³)				
水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
166	325	759	1073	3.25

(2) 貫通ひび割れの確認方法

一般にセパレータに生じる沈みひび割れは、円形の P コンの周りに逆ハの字に生じる場合が多く、このひび割れが反対の面まで繋がることで“貫通ひび割れ”となる。一方、目視では表層部にはその様なひび割れの発生は確認出来ないが、セパレータ本体（鋼製の箇所）下面や内部に沈みひび割れが発生することで、漏水する可能性がある。実験では、その様な箇所も貫通ひび割れとし、連続性のないひび割れ・空隙を非貫通ひび割れと定義している。貫通ひび割れの確認方法は、最初に簡易透気試験による透気係数を求め、その後、漏水実験を行うことにより評価した。また、セパレータ箇所をコア抜きし、X 線造影撮影法²⁾を用いてコンクリート内部のひび割れ発生状況の確認を行った。X 線造影撮影法は、コンクリート用に開発した造影剤をコンクリートに浸透させ、X 線を照射・撮影を行うことによって、肉眼では確認できない微細なひび割れや空隙を検出することが可能となる。

簡易透気試験による測定は、セパレータが中央となるように試験機を設置し測定を行った。漏水試験は、供試体セパレータ位置の片側面にポケット状にビニールを貼り付け、そのポケットに 100ml の水を貯水した状態で、反対側のセパレータ位置を真空ポンプで負圧状態として、漏水状況の確認を目視により行った。

簡易透気試験および漏水実験終了後、セパレータ位置からコア(φ100mm)を採取し、円盤状に厚さ 10mm 毎にスライスし、X 線造影撮影法を用いて表層から奥行方向の沈みひび割れの発生状況について確認を行った。

3.1.3 実験結果

(1) 沈みひび割れの貫通評価

図-3.1.2 は、水分率毎に測定した全てのセパレータの透気係数を示したものである。図中の計測外とは、真空ポンプにて吸引しても・80kPa まで負圧にできなかった箇所を意味している。この図より、セパレータの設置位置

が高いほど透気係数が大きい傾向が見られた。これは、打ち込み後のブリーディングに伴う沈下の影響で沈みひび割れが発生したものと考えられる。また、水分率が小さいほど、透気係数は大きい値となる傾向もみられた。図中の基準 (0.667kPa/sec) とは、既往の簡易透気試験の論文³⁾において、貫通ひび割れと判断された透気係数の限界値である。この結果より、No.1 から No.3 までのセパレータ位置で貫通ひび割れ、No.4 から No.8 までが非貫通ひび割れという評価となった。

写真-3.1.3 は、No.1 から No.4 までの漏水実験の結果を示したものである。実験の結果、No.1~No.3 ではセパレータに発生した沈みひび割れからの漏水を目視で確認できたが、No.4 ではセパレータからではなく左下のやや離れた気泡 (図中の矢印) から漏水する結果となった。表面には沈みひび割れの発生は確認出来なかったことから、恐らく内部に発生したひび割れと空隙が繋がっているものと思われる。この結果より、これまで貫通ひび割れの基準であった 0.667 (kPa/sec) から、安全側を考慮して No.4 の透気係数である 0.400(kPa/sec) に修正することにした。

実際の現場において、目視検査では沈みひび割れの貫通確認の判断は出来ないが、この様な簡易的な装置を用いることによって、その確認を行うことが可能であることがわかった。

なお、セパレータ位置における貫通ひび割れの確認方法は、型枠脱型後から、乾燥収縮によって表面にひび割れが入るまでの期間において有効な手法である。乾燥収縮ひび割れが入った場合はこの判定基準から評価することは出来ないため、乾燥収縮ひび割れのパテ埋めやシール材によるコーティング等を行う必要がある。今後は貫通ひび割れと評価した箇所についてのひび割れ補修方法や、補修を行った場合の充填状況の確認について検討をしていく予定である。

(2) X線造影撮影法によるセパレータ周辺の沈みひび割れ発生状況の確認

写真-3.1.4 は、沈みひび割れによる貫通および非貫通と評価した箇所について、X線造影撮影を行った際の、表層から奥行方向の内部ひび割れ発生状況 (図-3.1.1 の正面から見た方向) の一例である。写真中の白い部分は

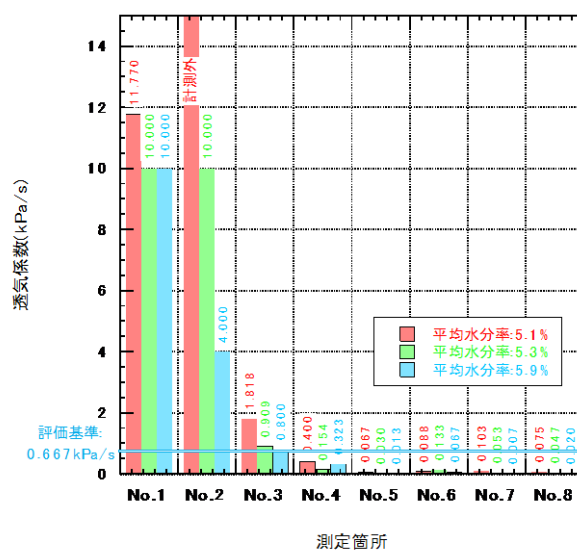


図-3.1.2 セパレータ位置の透気係数

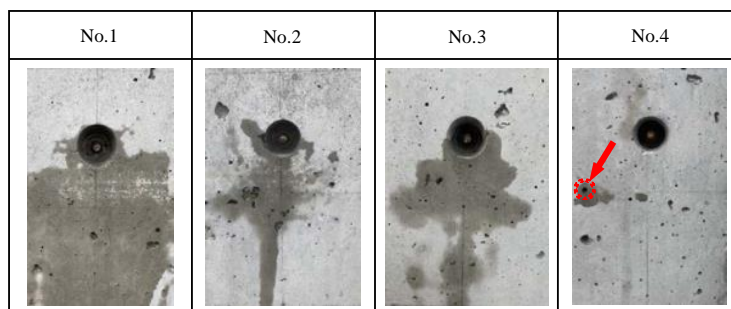


写真-3.1.3 漏水状況

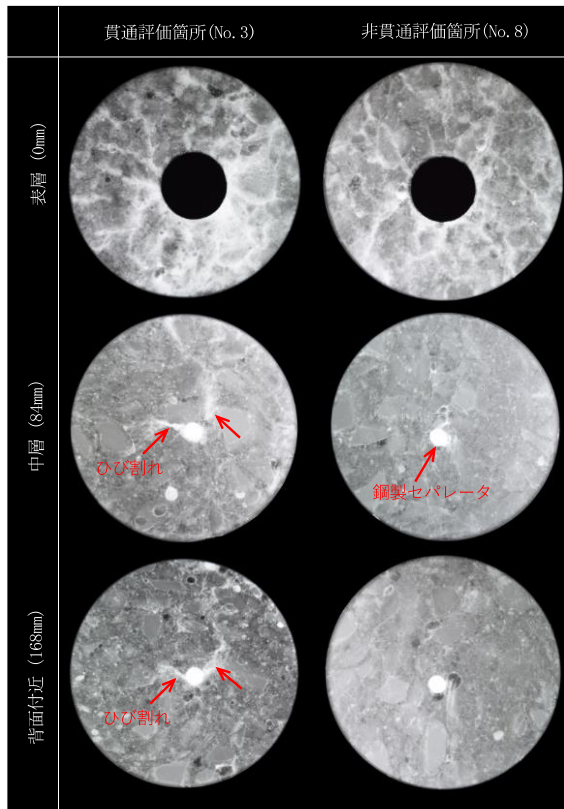


写真-3.1.4 X線造影撮影結果 (No.3,8)

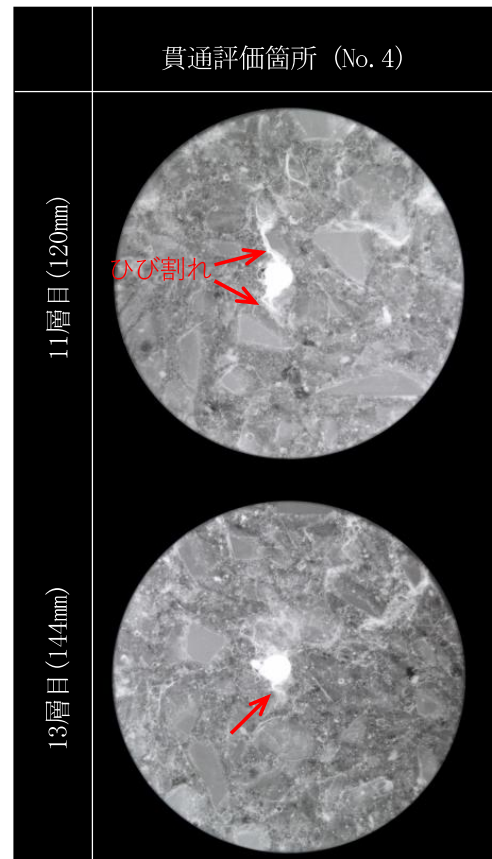


写真-3.1.5 X線造影撮影結果 (No.4)

造影剤が浸透した箇所であり、色が白いほど浸透量が多いことを意味している(なお、供試体中央の白丸は鋼製セパレータである)。表層部では、貫通、非貫通の両方において乾燥収縮によると思われる網目状のひび割れが確認できたが、貫通ひび割れと評価した供試体では、セパレータ下面に空洞や、セパレータ周辺にV字型のひび割れが形成されており、乾燥収縮ひび割れと沈みひび割れが連続的に繋がっている状況が確認できた。一方、非貫通と評価した箇所では、セパレータ部分の沈みひび割れは非常に微細かつ不連続なものであった。

なお、No.4の箇所(写真-3.1.5)では、セパレータ近くの気泡から漏水が確認できたため、X線造影撮影(写真-3.1.4)により内部のひび割れ状況を確認した。その結果、セパレータ周辺に多くの沈みひび割れが発生しており、漏水の原因は、この沈下ひび割れや骨材下面のブリーディング水による空隙などが繋がったためではないかと考えている。

(執筆者：武田三弘)

3.2 含浸性塗布材（含浸材）が表層品質に及ぼす影響

近年、コンクリート構造物の耐久性向上のため、コンクリートの表層品質を向上させることを目的とした各種含浸材が検討・開発されている。改質メカニズムの異なる含浸材を用いたコンクリートの室内試験に基づく性能比較（例えば、1)～3)）や劣化構造物への適用を想定した検討（例えば、4)～6)）、実構造物への適用や実環境における長期性能（例えば、7)～10)）などについて、関係各所で鋭意検討が進められ、その効果が報告されている。

含浸材の多くは、無色透明であり、施工箇所の外観を変えず、品質改善・耐久性向上が図られる点も多くの施工実績につながっている。しかし一方で、外観を変えないことから、施工箇所における施工品質の良否およびその効果を評価・判断しづらい点も課題として挙げられる。けい酸塩系表面含浸工法的设计施工指針（案）¹¹⁾では、含浸材施工前後の性能評価・確認を行うための試験方法が幾つか紹介されており、また、含浸材を施工したコンクリートに対して非破壊試験による現場での簡易的な性能評価・確認手法に関する検討も行われている（例えば、12)～16)）が、含浸材種類、改質メカニズム、施工時のコンクリートの状態など、含浸材の改質効果に与える影響要因が多岐に渡るため、未だデータの蓄積が十分でなく、今後更なる検討とデータ・知見の蓄積が求められる。

本章では、各種含浸材を施工した際の表層品質の評価および、その後の耐久性に関わる事項について実験的検討を行うとともに、含浸材施工箇所品質の経時変化について検討を行った。

3.2.1 検討概要

本検討では、普通ポルトランドセメントを使用し、水セメント比 60%、目標スランプ：12.0±1.5cm、目標空気量：5.0±1.0%のコンクリートを用い、後述する非破壊試験用として 220×220×80mm の平板供試体および、スケーリング抵抗性試験用として 100×100×400mm の角柱供試体を作製した（図-3.2.1）。打設後 24 時間で脱型を行い、その後、材齢 28 日まで水中養生または気中養生を行った。その後、材齢 56 日まで恒温室内に静置した後、含浸材の施工を行い、後述する各種測定を実施した。検討で用いた含浸材は、けい酸リチウムを主成分とする固化型、けい酸ナトリウムを主成分とする反応型および、反応型とシラン系を混合使用する混合型の 3 種類を用いた。また比較検討用に、含浸材を施工しないものも用意した。なお、含浸材の施工は、所定の材齢の後、各含浸

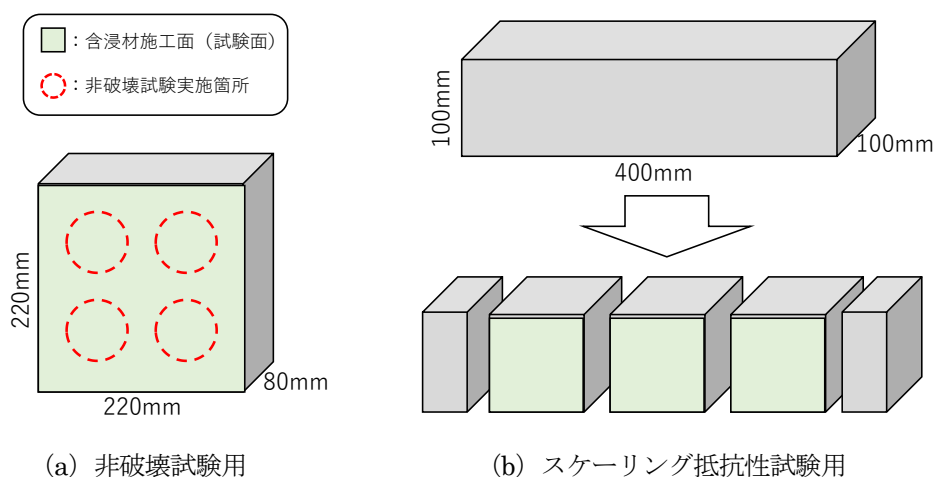


図-3.2.1 供試体概要

材の推奨使用量を各施工法に準じて施工した。

検討項目は、非破壊試験（表層透気試験（トレント法）・表面吸水速度試験（SWAT））およびスケーリング抵抗性試験（JSCE K-572）とした。非破壊試験は、220×220×80mmの平板供試体を用い、スケーリング抵抗性試験は100×100×400mmの角柱供試体の両端50mmを除く中央300mmより100mm幅で切断した試験体を用いた。各試験ともに、打設側面に含浸材を施工し、試験面とした（図-3.2.1 参照）。なお非破壊試験は、含浸材施工後の経時変化を確認するため、施工後、恒温室内に静置し、半年後および1年後にも測定を行った。

4.2.2 検討結果

(1) 表層透気係数

図-3.2.2 に各種含浸材を施工した際の表層透気係数を示す。結果を概観すると、養生方法の違いに関わらず、含浸材を施工したものは、含浸材を施工しないものよりも表層透気係数が小さい値を示すことが確認され、含浸材施工による透気性の改善効果が確認された。また、各養生条件において、含浸材を施工しないものと比較した際の改善効果は、水中養生を行ったものの方がやや大きい傾向にあることが確認された。

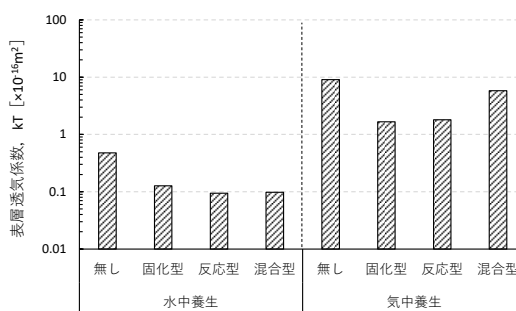


図-3.2.2 表層透気係数

含浸材種類の違いに着目すると、水中養生を行ったコンクリートに施工した場合、反応型を含む含浸材でやや小さい値を示すものの、含浸材種類の違いによらず、ほぼ同程度の表層透係数であった。一方、気中養生を行ったコンクリートに対して含浸材を施工した場合、固化型を用いた際に最も小さな値を示したが、反応型と同程度であった。混合型を用いた場合、他の含浸材を用いた場合よりもやや大きな値を示し、透気性の改善効果が少ないことが認められた。

(2) 表面吸水速度

図-3.2.3 に各種含浸材を施工した際の表面吸水速度を示す。表層透気係数（図-3.2.2）と同様に、養生方法の違いによらず、含浸材を施工することにより表面吸水速度が小さな値を示し、表層品質改善の効果が確認された。ただし、表面吸水速度に対する表層品質改善の効果は、水中養生を行ったものよりも、気中養生を行ったコンクリートの方が大きくなる傾向にあることが確認された。また、含浸材種類による影響に着目すると、養生方法の違いによらずいづれも、混合型を用いた際に表面吸水速度が最も小さな値を示すことが確認された。混合型は、シラン系を含むものであり、反応型による表層内部の微細構造の充填に伴う改質効果と併せて、シラン系材料による撥水層の形成に伴う吸水抑制効果が大きく寄与するものと考えられる。

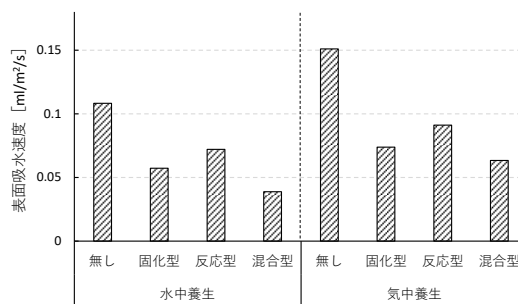


図-3.2.3 表面吸水速度

上記(1)および(2)の結果より、含浸材を施工することによる表層品質の改質の有無は、表層透気係数あるいは表面吸水速度により、含浸材施工前後あるいは無塗布面との比較を行うことで確認することが可能であると考えられる。ただし、含浸材施工箇所の表層透気係数および表面吸水速度が減少しても、その程度あるいはそれらの値そのものが、その後の耐久性などに及ぼす効果としてどの程度寄与するのは判断が難しいことに留意が必要である。

(3) スケーリング抵抗性

各条件における累加スケーリング量を図-3.2.4 に示す。図中の各条件において、黒斜線で示す部分は凍結融解 60 サイクル終了までの累加スケーリング量を、赤斜線部は凍結融解 61～120 サイクルまでの累加スケーリング量をそれぞれ示している。反応型を除くその他の条件においては、水中養生を行ったものの方が、気中養生を行ったものよりもスケーリングが多く発生することが確認された。

水中養生を行ったものについて、固化型は凍結融解 60 サイクル終了時では、含浸材を使用していないものと同程度のスケーリング量であったが、その後凍結融解 120 サイクルまで継続した際のスケーリング量は、含浸材を使用していないものと比較してやや少なくなることが確認された。また反応型および混合型は、全凍結融解期間を通じて、スケーリングの発生を抑制することが確認された。

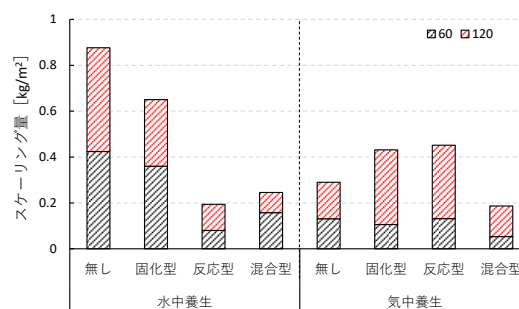


図-3.2.4 累加スケーリング量

気中養生を行ったものについて、凍結融解 60 サイクルまでは、含浸材の有無・種類の違いがスケーリング量に及ぼす影響は少なく、同程度のスケーリング量を示すことが確認された。ただし、固化型、反応型については、凍結融解 60 サイクル以降のスケーリング発生が多く、凍結融解 120 サイクル終了時には、含浸材を用いないものよりも多くのスケーリングが発生する結果となった。

つまり、養生条件・含浸材種類の組合せ条件によって、長期的に凍結融解作用を受けるコンクリートのスケーリング発生状況が異なることとなる。固化型は、気中養生を行った際に凍結融解 60 サイクルまでは効果を発揮するものの、その後長期的な凍結融解作用を受けた際のスケーリング発生量が多くなる傾向になる。反応型は、養生条件の違いによらず、凍結融解 60 サイクルまでは効果を発揮するが、気中養生を行った場合に、凍結融解後半でのスケーリング発生が多くなる傾向になる。反応型とシラン系を混合した混合型は、養生条件の違いにより、スケーリング発生速度が前期に多く発生する場合と、後期に多く発生する場合とに区分される。

通常、スケーリング抵抗性は、凍結融解 60 サイクル終了時の累加スケーリング量を用いて評価される。凍結融解 60 サイクル時点でのスケーリング量が含浸材を用いない場合と同程度あるいは少ない結果を示し、「含浸材による効果有り」と判断されるものであっても、前述のように、養生条件・含浸材種類の組合せによって、継続的・長期的な凍結融解作用により、含浸材を施工していないものよりも多くのスケーリングが発生する場合がある。室内試験における凍結融解サイクルと実環境下での期間との関係については今後更なる検討・議論が必要であるが、上述の結果は、実環境において、供用開始後ある段階からスケーリング発生が加速する可能性があることを示唆するものであり、実構造物の耐久性向上・維持管理に対して含浸材を使用する際に留意が必要であると考えられる。

(4) 非破壊試験による表層品質とスケーリング抵抗性

含浸材施工後の表層透気係数または表面吸水速度と累加スケーリング量の関係を図-3.2.5および図-3.2.6にそれぞれ示す。いずれの図も、凍結融解 60 サイクル終了時および 120 サイクル終了時のスケーリング量をプロットしている。図-3.2.5 より、表層透気係数とスケーリング量の関係は、水中養生を行った場合に、表層透気係数が大きいほど、スケーリング量が大きくなる傾向が認められるものの、気中養生を行った場合には両者の間に明確な傾向は確認されなかった。また、図-3.2.6 より、気中養生/含浸材なしの条件（図中の緑破線の箇所）を除くその他の条件において、表面吸水速度の増加に伴い、スケーリング量が大きな値を示す傾向は認められるものの、明確ではないことが把握された。

つまり、含浸材施工前後の非破壊試験（表層透気試験（図-3.2.2）、表面吸水速度試験（図-3.2.3））結果を比較することにより、含浸材施工による表層品質（表層部の空隙充填による透気性・透水性）改質の有無は評価・判断することが可能であるものの、その結果を基に、維持管理において活用が可能となるような、耐久性（スケーリング抵抗性）に対する効果の予測・評価はやや困難であることを示唆するものと考えられる。

ここで、雨がかりの無い気中に静置した試験体の表面吸水速度の経時変化を図-3.2.7に示す。これより、含浸材を用いないものおよび固化型は、時間の経過に伴い、表面吸水速度が増加すること、反応型および混合型は、時間経過に伴い漸減あるいは初期と同程度の値を示すことが確認された。図-3.2.7 に示す表面吸水速度の変化率と

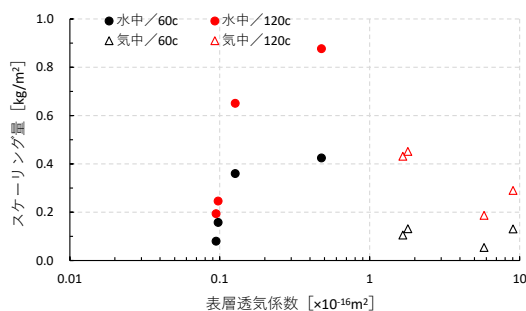


図-3.2.5 表層透気係数とスケーリング量

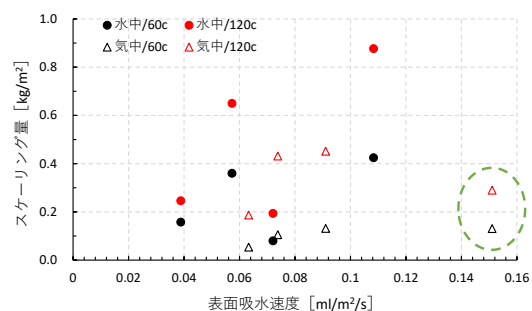


図-3.2.6 表面吸水速度とスケーリング量

スケーリング量の関係をプロットしたものを図-3.2.8に示す。一部、傾向から外れる値（図中の緑破線の箇所）も認められるが、全条件を通じて、表面吸水速度の変化率の増加に伴い、スケーリング量が大きな値を示すことが把握された。これは、表面吸水速度の経時変化を把握することにより、スケーリング量の予測・評価が可能であることを示唆するものと考えられる。

4. 実コンクリート部材への各種非破壊試験の適用性の検討

4.1 簡易透気試験を用いた実コンクリート部材の表層品質評価

簡易透気試験を用いたコンクリート表層の密実性の評価が、実構造物に対して適用可能か確認するため、竣工後2年が経過した体験型河川堤防実習施設（樋門）の樋門函体側壁に対して、水分率および透気係数、ひび割れやうきの発生状況を調べ、測定結果の比較検討を2年連続で行った。なお、今回の測定では、コンクリート面に乾燥収縮によるひび割れが発生していることから、セパレータ付近の貫通ひび割れ判定は行っていない。また、他の実構造物として、高架橋橋脚部、耐震補強された橋脚部、ボックスカルバートの表層の密実性の評価も同時に行った。従来の維持管理においては、ひび割れや変状の発生状況をトレースした図を用いて、点検時に使用されているが、その図からではどの箇所が特に劣化が進行しやすい箇所なのか不明であり、ひび割れに関しては長さや幅の数値がどの様に変化するかが一つの指標となるが、数値が書かれた図面上では視覚的に劣化の進行が進んでいる箇所の特定は難しいものと考えられる。この簡易透気試験の実コンクリート構造物への適用方法としては、コンクリート構造物の表層全面の透気係数を求め、それをコンター図化して見ることによって、どの箇所が密実で無いかを視覚的に知ること、中性化が進行しやすい箇所を特定でき、点検時の要注意箇所や詳細調査を実施する上でのスクリーニングとして使用できるものと考えている。

4.1.1 調査現場の概要

調査を行った現場は、①樋門の側壁（2019年竣工）、②高架橋橋脚部（2014年竣工）、③高架橋橋脚補強部（2021年竣工）、④ボックスカルバート側壁（2021年竣工）である。写真-4.1.1～写真-4.1.4に測定箇所の表面状況を示す。いずれの箇所においても、約200×200mmの升目をチョークで書き込み、升目の中心部に対して、水分計を用いて表面水分率を計測後、簡易透気試験機を設置して測定を行った。



樋門測定箇所



写真-4.1.1 樋門の側壁 (2019年竣工)



写真-4.1.2 高架橋橋脚部 (2014 年竣工)



写真-4.1.3 高架橋橋脚補強部 (2021 年竣工)



ボックスカルバート全景

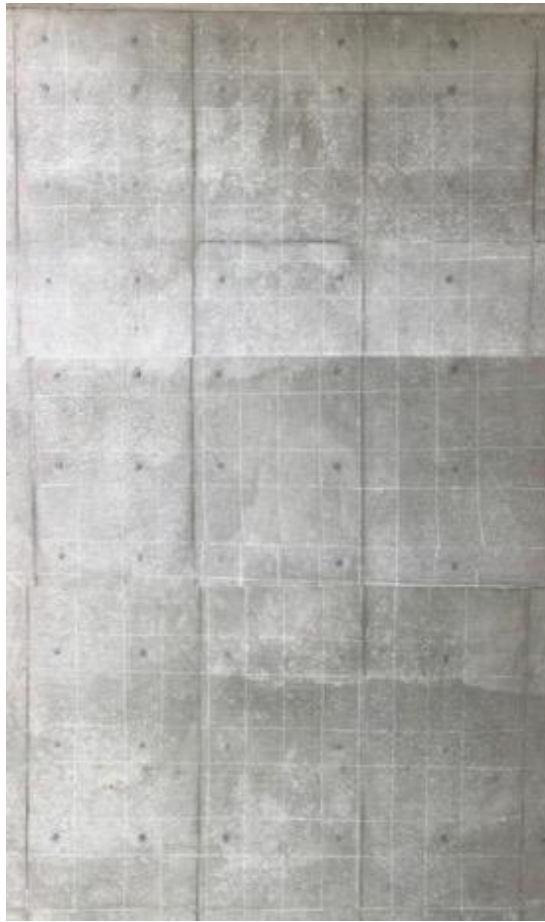


写真-4.1.4 ボックスカルバート側壁 (2021年竣工)

4.1.2 測定結果

各実構造物の測定箇所コンクリート表層水分率と簡易透気係数の測定結果をコンター図で表したものとひび割れのトレースを図-4.1.1～図-4.1.13に示す。なお、水分率および簡易透気係数のコンター図は、エクセルにおける「条件付き書式」の3色スケールを用いて作成しており、水分率のコンター図は、最小値3.5%、中間値4.5%および最大値4.5%で、簡易透気係数のコンター図は、最小値0.05、中間値0.5および最大値5で表現している。

(1) 樋門側壁（2019年竣工）

樋門のコンクリート水分率および簡易透気係数の測定結果において、2020年11月に測定した結果を図-4.1.1、図-4.1.2に、2022年3月に測定した結果を図-4.1.3、図-4.1.4に示す。また、2022年3月時点のひび割れトレース図を図-4.1.5に示す。図-4.1.3の水分率のコンター図より、側壁全体的に赤みがかっており水分率が小さく乾燥している傾向がみられるが、特に右側の乾燥が大きいことが分かる。図-4.1.4の簡易透気係数のコンター図をみると、右側に透気係数が大きい箇所が集中しており、一部かなり悪い箇所も見られた。右側が乾燥している理由は、この箇所は直射日光が当たる箇所であり、開口部付近は風の影響も受けやすいため、乾燥が進行したものと考えられる。この乾燥の影響で、乾燥ひび割れが入ったことで簡易透気係数も大きくなったものと考えられる。また、2年後の測定結果の方が、乾燥が進行し、より全体的に簡易透気係数が大きくなると予想していたが、実際に測定を行った結果、158箇所の測定中、簡易透気係数が大きくなったのは10箇所だけであり、それ以外は概ね小さくなる傾向となった。この傾向は、湿度による水分率の変化や背面からの水分の供給などの影響が考えられるが、現時点では不明であり今後もこの傾向について継続的に調査していく予定である。

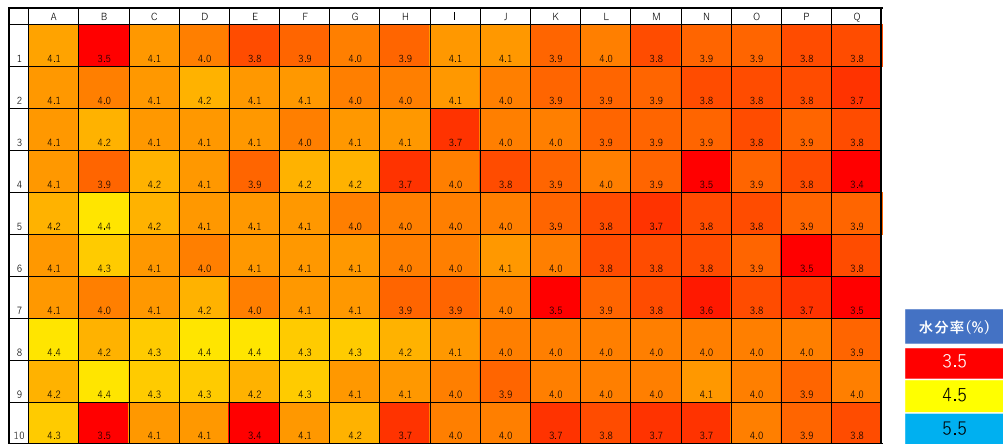


図-4.1.1 樋門側壁（水分率、2020年11月測定）

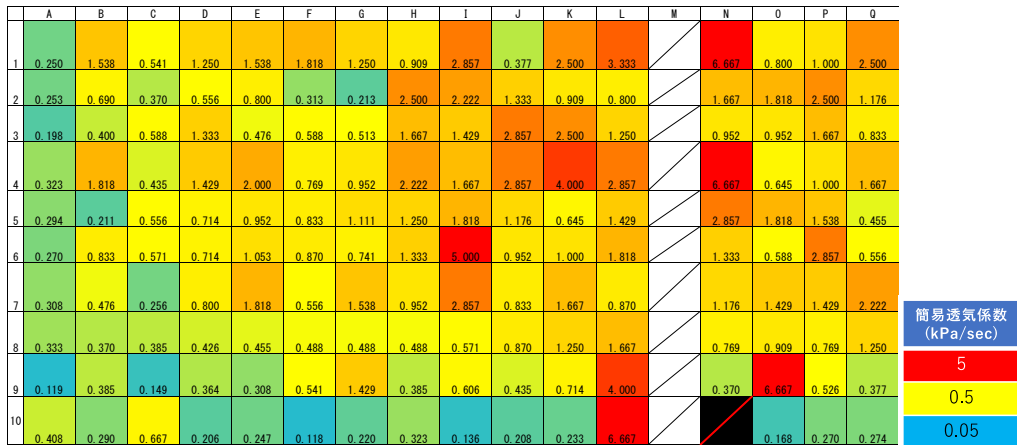


図-4.1.2 樋門側壁（簡易透気係数、2020年11月測定）

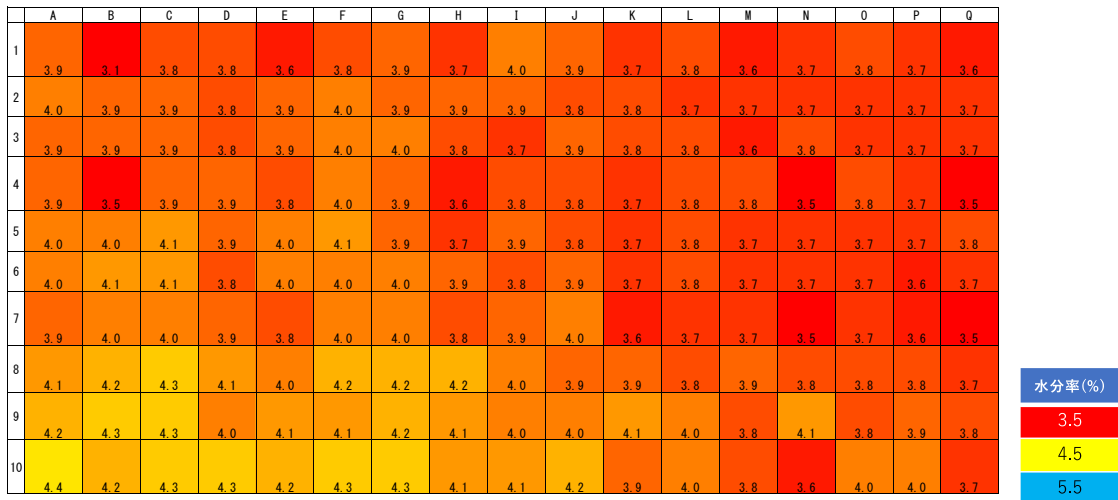


図-4.1.3 樋門側壁（水分率、2022年3月測定）



図-4.1.4 樋門側壁（簡易透気係数、2022年3月測定）

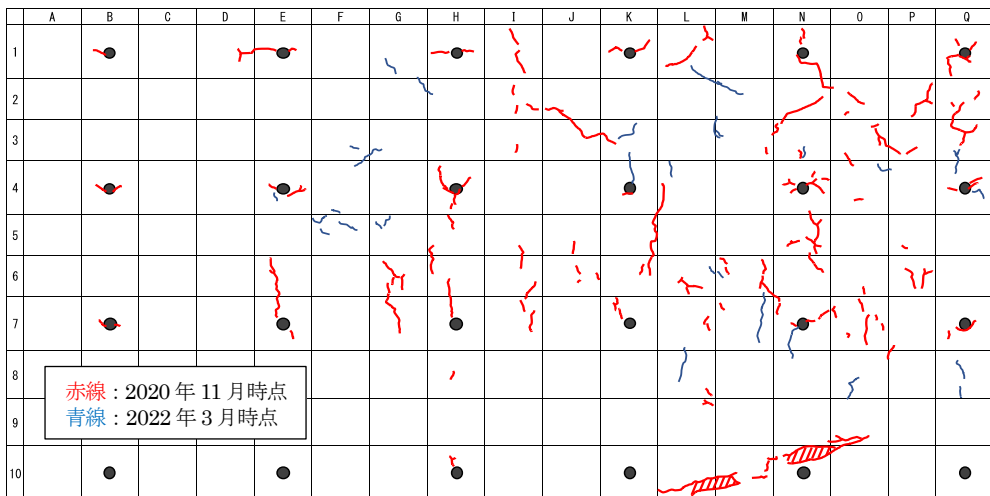


図-4.1.5 樋門側壁（ひび割れのトレース、2022年3月測定）

(2) 高架橋橋脚部 (2014 年竣工)

高架橋橋脚部のコンクリート水分率および簡易透気係数の測定結果 (2022 年 3 月測定) を図-4.1.6, 図-4.1.7 に示す。また、ひび割れのトレース図を図-4.1.8 に示す。水分率を測定した図-4.1.6 より、全体的に乾燥傾向がみられ、特に下側より上側の方が、乾燥が進んでいる傾向がみられた。一方、簡易透気係数を測定した図-5.1.7 より、全体的に青の箇所が多く、緻密な箇所が多い傾向となった。簡易透気係数が大きい箇所は、セパレータの箇所が多く、ひび割れトレース図からもそのことを確認することが出来る。この測定結果より、打込み時のブリーディングによる沈下によってセパレータ周辺に沈みひび割れが多数発生してしまったが、コンクリートとしては緻密な評価となった。これは、打込み速度が速かったか、打込み後の締固めが不足したことが原因と考えられるが、その後の養生は適切であったことにより、このような結果になったものと推察される。

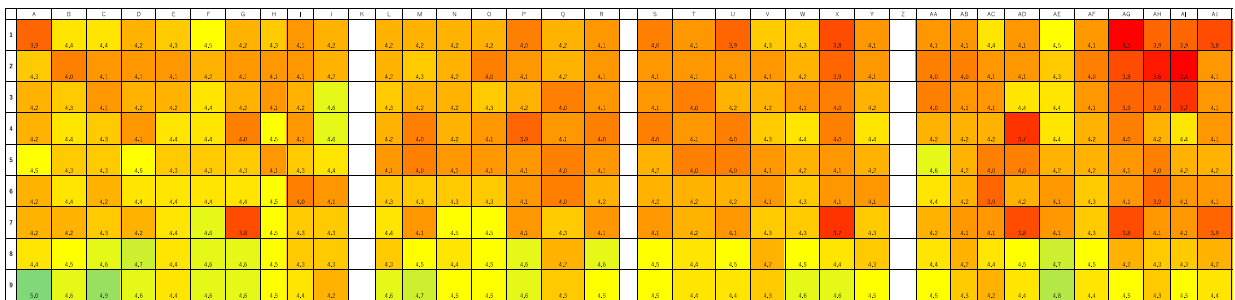


図-4.1.6 高架橋橋脚部 (水分率、2022 年 3 月測定)

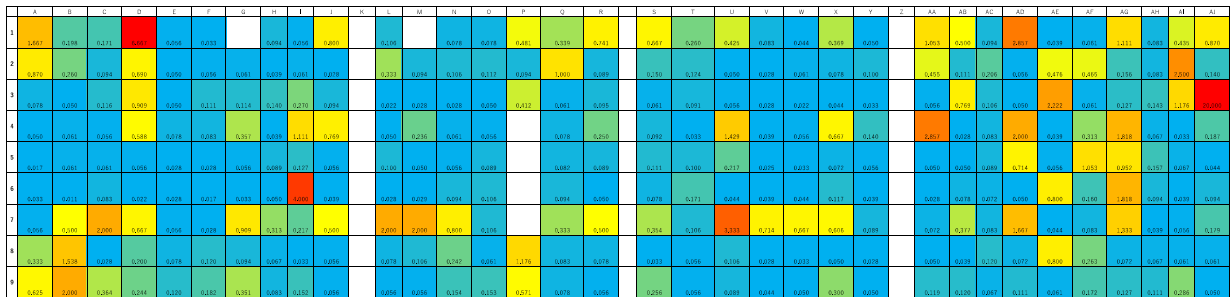


図-4.1.7 高架橋橋脚部 (簡易透気係数、2022 年 3 月測定)

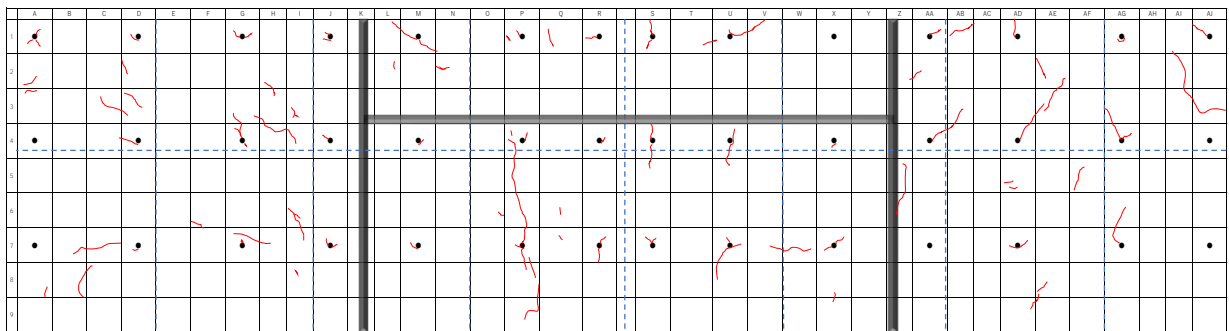


図-4.1.8 高架橋橋脚部 (ひび割れトレース図、2022 年 3 月測定)

(3) 高架橋橋脚補強部(2021年竣工)

高架橋橋脚補強部のコンクリート水分率および簡易透気係数の測定結果(2022年3月測定)を図-4.1.9、図-4.1.10に示す。また、ひび割れのトレース図を図-4.1.11に示す。水分率の測定結果より、全体的に水分率が高い傾向がみられた。施工時期から日数がそれほど経過していない理由もあるが、適切な養生が行われたことにより、水分の保有率が高くなったものと推察された。簡易透気係数の結果からは、ハンチ部である上端部から2行までの箇所では、大変高い密実性を示していた。これは、ハンチ部であるため底版に近い効果によりこのような緻密な結果につながったものと考えられた。また、側面についても簡易透気係数が大きい箇所はほとんど無く、大変緻密な評価となり、施工・養生が適切に行われていることを確認することができた。

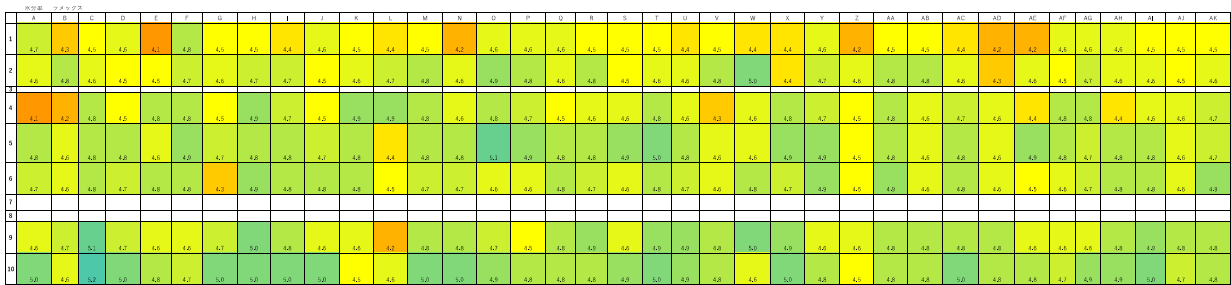


図-4.1.9 高架橋橋脚補強部(水分率、2022年3月測定)

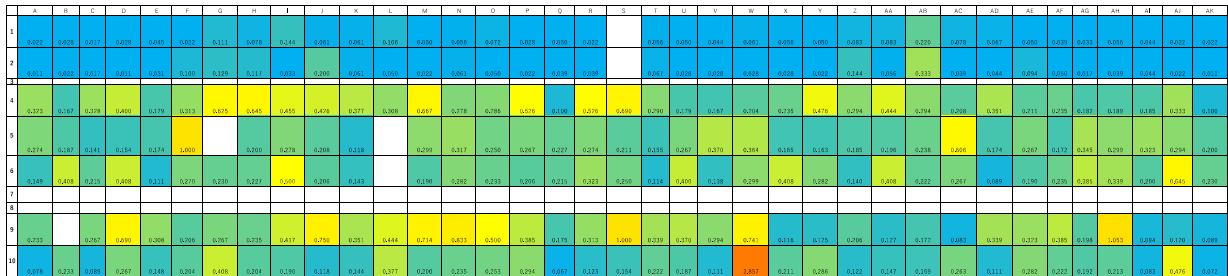


図-4.1.10 高架橋橋脚補強部(簡易透気係数、2022年3月測定)

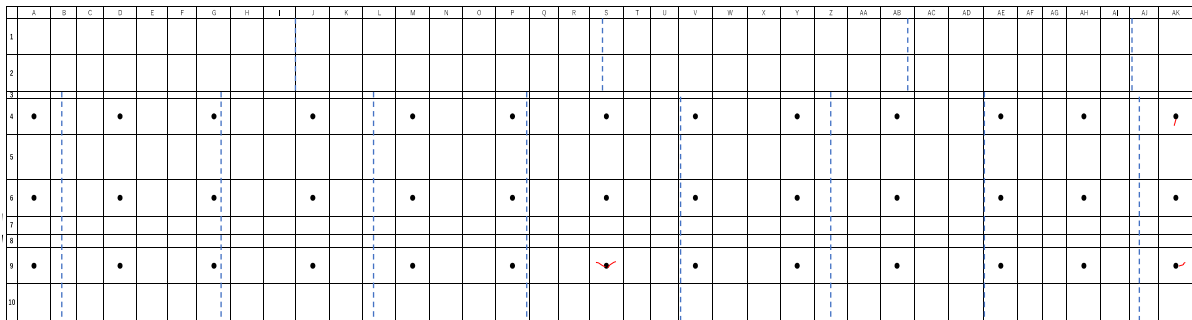


図-4.1.11 高架橋橋脚補強部(ひび割れトレース図、2022年3月測定)

(4) ボックスカルバート側壁 (2021 年竣工)

ボックスカルバート側壁のコンクリート水分率および簡易透気係数の測定結果 (2021 年 8 月測定) を図-

4.1.12, 図-4.1.13 に示す。水分率をみると、全体的に高い傾向がみられたが、簡易透気係数をみると、部分的に高い値の箇所が点在する結果となった。これまでの傾向では、水分率が高い条件では、簡易透気係数による評価は良くなる傾向がみられていたが、この現場においては異なる傾向となった。

簡易透気係数の高い値の箇所について、コンクリート表面の状況を確認した結果が図-4.1.14 である。この図より、セパレータ周りの沈みひび割れや、締固め不良と思われる箇所の測定結果が大きい値であることがわかる。このような箇所は、将来的に中性化が進行しやすいため、予防的な試みとしては、あらかじめ表層に対策を施すなどの対応が重要と思われる。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	4.6	4.9	4.6	4.9	4.9	5.3	4.9	4.8	5.2	5.2	4.9	5.8
2	3.9	5.0	4.2	5.2	4.9	5.3	5.2	4.9	5.2	5.2	4.8	5.2
3	4.9	5.3	5.3	5.1	5.0	5.4	5.3	5.0	5.1	5.1	5.0	4.9
4	4.6	5.3	4.7	5.2	4.2	5.4	5.2	5.1	5.6	5.6	5.0	5.5
5	5.2	5.1	5.4	5.2	5.0	5.1	5.3	5.3	5.2	5.2	5.2	5.5
6	4.8	4.5	5.4	5.0	4.9	5.3	5.1	5.6	5.5	5.5	5.4	5.3
7	5.0	4.9	5.1	4.9	4.8	5.1	5.1	5.3	5.2	5.2	5.2	5.4
8	4.9	5.2	5.2	4.9	4.9	5.4	5.5	5.1	5.3	5.3	5.2	5.2
9	5.1	4.9	5.0	5.2	4.9	5.1	5.0	5.3	5.0	5.0	5.2	5.3
10	5.0	4.9	4.9	5.0	4.9	4.8	4.5	4.9	5.5	5.5	5.3	5.3
11	5.1	4.7	5.4	5.3	5.3	4.7	5.0	5.0	5.2	5.2	5.4	5.0
12	4.6	4.9	4.7	4.6	4.9	4.9	4.8	5.7	5.1	5.1	5.3	5.1
13	5.2	5.3	5.2	4.9	5.6	4.9	5.0	5.2	5.2	5.2	5.0	5.0
14	5.2	5.5	5.4	5.3	5.0	5.1	5.2	4.8	5.1	5.1	5.0	5.0
15	5.3	5.5	5.6	5.7	5.6	5.7	5.7	5.3	5.4	5.4	5.5	5.5
16	4.5	5.4	5.2	5.6	5.2	5.5	5.7	5.1	5.2	5.2	4.9	5.3
17	4.8	4.8	5.5	5.5	5.5	5.4	5.2	5.1	5.2	5.2	5.2	5.1
18	4.8	5.2	4.6	5.3	5.1	4.9	5.1	5.1	5.2	5.2	4.8	5.4
19	5.3	5.5	5.8	5.5	5.3	5.2	4.9	5.1	5.4	5.4	5.5	5.3

図-4.1.12 ボックスカルバート側壁(水分率)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	1.333	0.909	0.250	0.263	0.465	0.667	1.818	0.465	0.247	0.256	0.161	0.333
2	0.323	0.253	1.053	0.190	0.571	1.000	1.818	0.769	0.408	1.111	0.909	2.000
3	0.625	0.061	0.417	0.714	1.176	0.625	1.818	1.111	0.714	1.111	1.176	1.538
4	0.952	0.303	0.625	0.541	0.476	0.526	0.476	2.857	2.500	1.111	1.250	0.500
5	0.339	1.818	0.163	0.198	0.233	0.139	0.303	0.238	0.444	0.299	0.426	0.571
6	0.333	0.244	0.198	0.308	4.000	0.370	0.769	0.870	1.250	1.333	1.000	0.870
7	0.500	0.270	0.333	0.541	1.818	0.690	1.176	0.741	1.538	0.645	0.645	0.455
8	0.339	0.134	0.909	0.909	1.250	1.250	0.556	0.455	0.909	0.465	1.250	1.111
9	0.323	0.290	0.211	0.833	0.714	0.714	0.833	0.500	0.571	0.500	0.741	0.556
10	0.606	0.206	0.667	0.141	1.000	1.538	1.667	0.867	0.870	0.198	0.741	2.222
11	0.127	0.098	0.145	0.200	0.267	0.667	1.000	0.606	0.364	0.154	0.769	0.500
12	0.870	0.909	1.176	0.556	0.769	0.690	0.513	2.222	0.952	0.050	0.303	0.187
13	0.197	0.222	0.167	1.538	1.333	0.870	0.357	0.370	0.133	0.690	0.222	0.143
14	0.145	0.160	0.465	0.909	0.714	0.556	0.741	0.833	0.769	0.408	1.429	0.500
15	0.313	0.177	0.465	0.426	0.667	0.263	0.067	0.345	0.152	0.140	0.155	0.690
16	0.282	0.351	0.465	0.128	0.833	0.667	0.227	0.800	0.230	0.667	1.176	0.435
17	0.225	0.154	0.100	0.465	0.233	0.556	0.253	0.741	0.667	0.455	0.667	0.513
18	0.222	0.089	0.392	0.206	1.667	1.818	0.625	0.370	0.370	0.149	0.370	0.286
19	0.123	0.164	0.159	0.222	0.154	0.625	0.111	0.238	0.111	0.133	0.185	1.053

図-4.1.13 ボックスカルバート側壁(簡易透気係数)

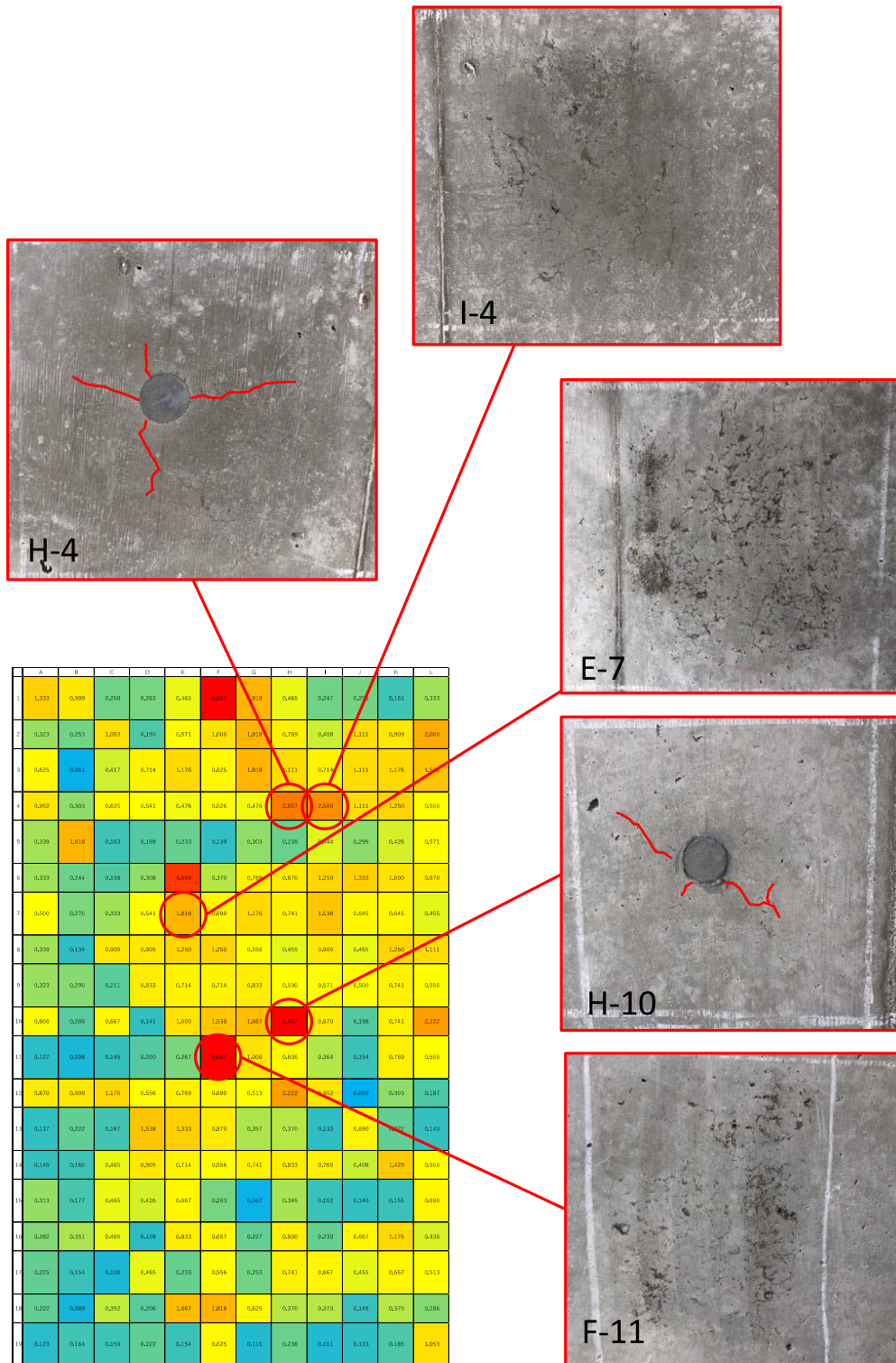


図-4.1.14 簡易透気係数が高い値を示す箇所のコンクリート状況

(執筆者：武田三弘)

4.2 各種非破壊試験を用いたプレキャスト部材の表層品質評価

近年、生産性向上の取組みの一環として、建設現場におけるプレキャスト製品の採用が増加している。プレキャスト製品の活用は、建設現場における担い手不足の解消や、工期に制約のある寒冷地での現場、災害復旧など迅速な対応が要求される現場において、大きなメリットを有する。

プレキャストコンクリートは現場打ちコンクリートとは異なり、工場で製造・管理されるため、一般的に高い性能を有しているとされる一方で、従来より、蒸気養生に伴い生じる表面微細ひび割れと、それに伴う耐久性への影響が指摘されており^{例えば、1)～4)}、品質向上に関する検討が種々行われている。

鳥海ら⁵⁾は、蒸気養生中に散水を行うことにより、蒸気養生中の水分逸散が抑制でき、細孔構造の緻密化と、それに伴い中性化速度係数が低減される（同一配合の現場打模擬コンクリートよりも高い中性化抵抗性を示す）ことを報告している。ただし、非破壊試験等を活用した表層品質の評価に関する検討は行われていない。

また、阪口ら⁶⁾は、プレキャストコンクリートの高品質化を目的として、熱伝導率の異なる2種類の養生シートを用いたボックスカルバートに対して、養生保温効果が表層品質に及ぼす影響について検討を行っている。部材側壁（外側）に対するテストハンマーによる強度分布の結果、熱伝導率の低いシートを用いた際に対象面全体を通じて高い値を示す箇所が多い傾向にあることが示されている。また、部材側壁（外側／内側）において、Torrent法による表層透気係数およびSWATによる表面吸水速度の測定を行い、それらの平均値は、養生方法（養生シートの種類）・測定面（内壁／外壁）の違いによらず、同等の値を示すが、熱伝導率の小さい養生シートを用いた際に、特に内側において、測定値のバラツキが小さくなることを報告している。これは、養生シートの熱伝導率が小さいことによる保温・保湿効果によって、同一面内での品質差が少なく均一な品質を確保することが可能になることを示唆しているものと考えられる。ただし、耐久性に関する検討は行われておらず、表層品質と耐久性の関係は不明である。

また、現場打ちコンクリートも同様であるが、特にプレキャストコンクリートに対しては表面気泡や色むらなど表面美観もまた要求される表層品質の一つとなる。この点に関して、高山ら⁷⁾はプレキャストコンクリートの表面の黒ずみを抑制するための化学混和剤（減水剤ポリマーおよびそれらを混和した高性能減水剤）の各種性状について検討・報告している。

近年、i-Constructionにより利用拡大が期待される大型プレキャスト製品について、表層品質の確保・向上とそれに伴う耐久性向上が求められるため、非破壊試験等を活用したプレキャストコンクリートの表層品質評価についてさらなる検討が必要となる。さらに、製品の大型化に伴う表層品質および耐久性の面的ばらつきが懸念されることから、その評価手法と適用性に関する検討も必要となる。

本章では、大型プレキャスト製品の隔壁を模擬した試験体に対して、各種非破壊試験による対象面内の表層品質の分布把握に加えて、各種非破壊試験における測定数による結果のバラツキに関して検討を行った⁸⁾。また、各種非破壊試験による測定箇所における耐久性試験を実施し、表層品質評価と耐久性の関係について検討を行った。

表-4.2.1 配合

W/C [%]	s/a [%]	単位量 [kg/m ³]					
		W	C	S ₁	S ₂	G	混和剤
36.0	40.0	157	431	410	284	1068	3.88

4.2.1 実験概要

(1) 試験体概要

本検討で使用した配合および試験体概要を表-4.2.1 および図-4.2.1 に示す。本検討では、プレキャストコンクリート製品を製造する A 工場で実際に使用している配合（水セメント比：36%，目標スランプ：18.0±2.5cm，目標空気量：4.5±1.5%），製造方法を用いて試験体を製造した。

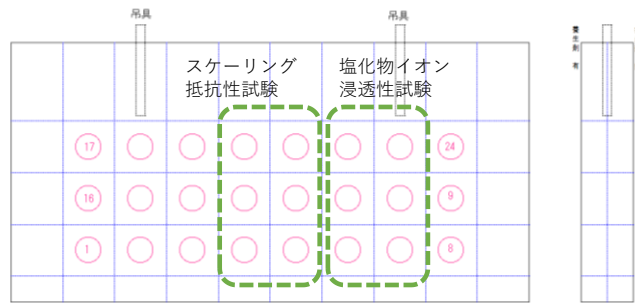


図-4.2.1 試験体概要

試験体は、比較的大型のボックスカルバート等に使用される隔壁部を模擬し、H1000×B2000×T200mm とした。製造・養生は、通常の製品製造と同様、常圧蒸気養生の後、脱型し、出荷材齢まで気中養生を行った。また比較検討のため、プレキャスト製品の初期表層品質向上を目的とした適用実績が多くある塗膜養生剤を脱型後に塗布したケースも準備した。なお、本検討で使用した塗膜養生剤は、水性パラフィンを主成分とする養生剤である。

(2) 検討項目

本検討では、表層品質として、トレント法による表層透気係数および、SWAT による表面吸水速度について検討を行った。測定箇所は、いずれの測定においても、対象面（2000×1000mm）の上部 300mm，下部 100mm，左右 200mm を除く 1600×600mm の範囲を 200mm 間隔で区分けた全 24 箇所（図-4.2.1 中の○印の箇所）であり、表層透気係数の測定の後、同一カ所において表面吸水速度試験を実施した。また、雨がかりのない気中で約 8 ヶ月間静置した後、再度、同一カ所において表層透気係数および表面吸水速度試験を実施した。

その後、試験体を測定箇所ごとに切断し、中央部より採取した 200mm 角の試験体を用いて、スケーリング試験および塩化物イオン浸透性試験を実施した。各試験に用いた試験体は、図-4.2.1 に示す箇所より採取したものをを用いた。いずれの試験も、切り出し試験体の型枠面を試験面とした。切断面をシリコンによりシールした後、スケーリング試験は JSCE K-572 に準じて、塩化物イオン浸透試験は 10%NaCl 溶液に浸せきし、所定の浸せき期間終了後割裂し、硝酸銀溶液噴霧による塩化物イオン浸透深さにより評価を行った。

4.2.2 結果および考察

(1) 対象面内における表層透気係数の分布

脱型後、出荷材齢まで気中養生を行った際の、測定対象面における表層透気係数の分布を図-4.2.2 (a) ~ (b) に示す。脱型後の塗膜養生剤塗布の有無に関わらず、いずれも測定対象面内において $0.1 \sim 0.01 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 程度の表層透気係数を示すことが把握された。いずれの試験体においても、測定対象面の上部においてやや高い透気係数

を示すことが確認された。これは、打設時の振動締固めおよびブリーディング等に起因するものと推定されるが、顕著な表層透気係数の増加は認められなかった。

一方、同一試験体を雨がかりの無い屋外に約 8 ヶ月静置した後に、同一カ所において再度表層透気係数を測定した際の測定値分布が、**図-4.2.3 (a) ~ (b)** である。養生直後 (**図-4.2.2**) と比較して、対象面全体的に表層透気係数が高い値を示すことが確認された。これは主として、気中静置による含水率の低下に伴うものとの推察される。また、測定対象面における表透気係数の分布が、養生直後と比較してより顕著に表れていることが確認された。つまり、8 ヶ月経過後、対象面全体を通じて、乾燥に伴う透気係数の低下が生じるが、特に、初期段階において低い透気係数を示した上部ほど、その影響を受けやすく、含水率低下が進みやすいため、表層透気係数の分布がより顕著になったものと考えられる。

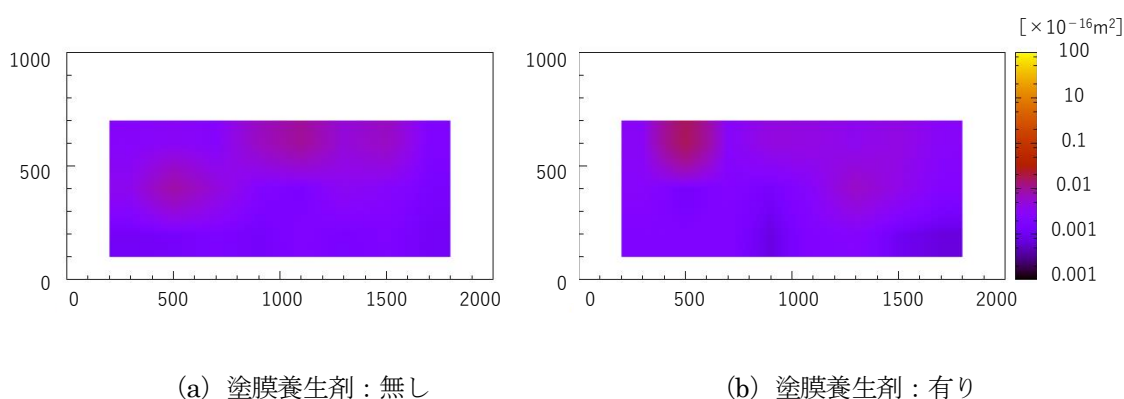


図-4.2.2 表層透気係数の面的分布（養生直後）

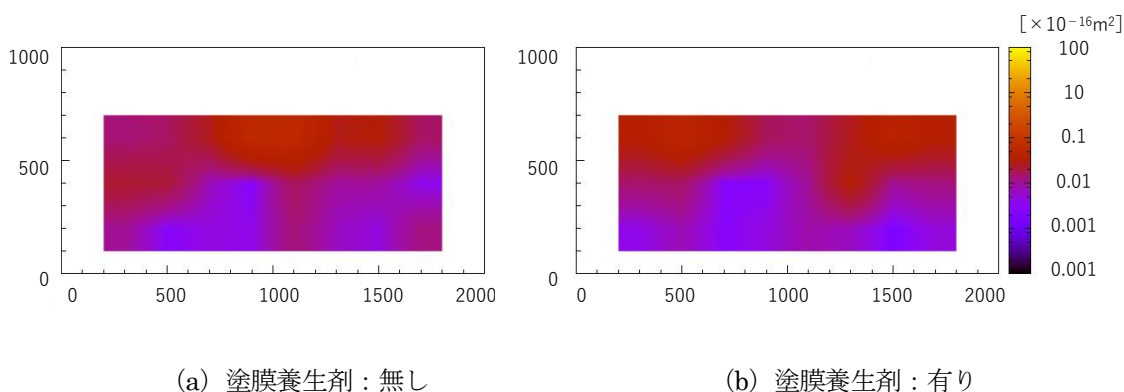


図-4.2.3 表層透気係数の面的分布（約 8 ヶ月間気中静置）

塗膜養生剤を用いていない試験体の測定結果を上・中・下段（8 点/段）ごとに整理し、箱ひげ図として示したものが**図-4.2.4 (a) ~ (b)** である。前出のコンター図 (**図-4.2.2**, **図-4.2.3**) で示すように、上段ほど高い値を示すこと、中段 8 点の平均値と全 24 点の平均値がほぼ同程度の値を示すことが確認された。これは、測定時の材齢によらず、対象面の中段付近を測定位置として抽出することにより、全体平均と同程度の評価が可能であることを示す一方で、測定位置が上段・下段に集中すると、全体平均とは大きく異なる測定結果を示す可能性を示唆するものである。また、各材齢において、中段での測定値平均値は、全 24 点の平均値と同程度の値を示す一方で、各

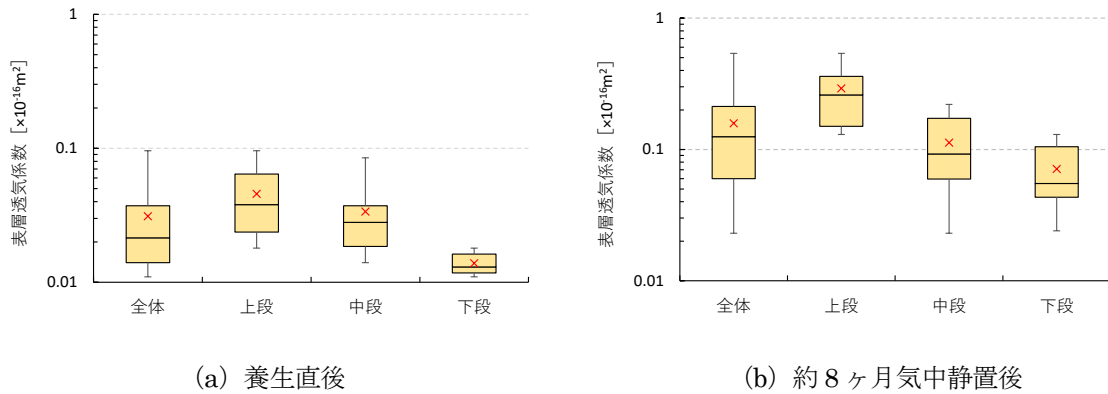


図-4.2.4 各高さ位置における表層透気係数（塗膜養生剤：無し）

段における測定値のバラツキは、中段がやや大きいようである。つまり、測定位置を対象面中段より抽出しても、その測定点数によっては、測定結果が大きく異なる可能性があることに留意が必要となる。

測定対象面全体に対して、どの程度の箇所を抽出・測定することが妥当か確認を行った結果の一例を図-4.2.5に示す。ここで示す結果は、養生剤を用いていない面における気中で約8ヶ月経過した際の結果である。図中の青線は、対象面全体（24点）の測定結果の平均値を示し、×

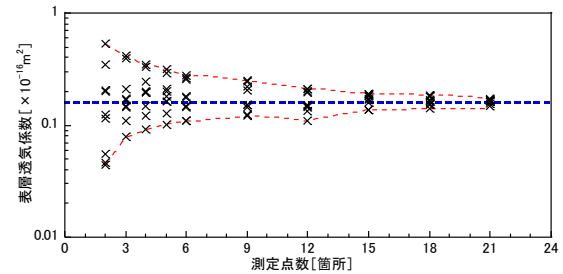


図-4.2.5 測定点数による表層透気係数の平均値のバラツキ

印は対象面内における任意箇所 N 点を抽出・測定した結果の平均値を示し、これを抽出箇所 N 点につき各 10 回繰り返した。また図中の赤線は、各抽出点数における平均値の最大・最小を示している。これより、対象面全体の平均値を代表値とすると、抽出点数の増加に伴い、標準誤差（平均値のバラツキ）が少なくなり、代表値に漸近することが確認された。この標準誤差をどの程度まで許容するのは、今後のさらなる検討・議論が必要となるが、概ね 6~9 点、つまり対象面全体に対する測定可能数の 3~4 割程度を抽出・測定することで、対象面の代表値とすることが可能であると考えられる。

(2) 対象面内における表面吸水速度の分布

養生直後における対象面内における表面吸水速度の分布を図-4.2.6 (a) ~ (b) に示す。図-4.2.6 (a) において、対象面左下で一部高い吸水速度を示す点があるが、これについては装置のセットアップが十分でなく、測定時に漏水した可能性がある。これらの結果より、透気係数の結果と同様、対象面上段ほどやや高い値を示す傾向にあるものの、対象面全体を通じて、ほぼ同程度の値を示すことが確認された。また、気中において8ヶ月経過後の測定結果を図-4.2.7 (a) ~ (b) に示す。透気係数の結果と同様、時間経過に伴い、対象面全体における表面吸水速度が高くなることが確認され、また、その分布も出荷材齢時よりも明確になることが確認された。ただし、表層透気係数ほど、測定位置（上・中・下段）の差が明確とならないことが確認された。

これらの測定結果を、測定位置ごとに箱ひげ図として示したものが図-4.2.8 である。養生直後において、測定位置による表面吸水速度の差は少ないものの、表層透気係数と同様、上段ほど高い値を示す傾向が確認された。しかし一方で、材齢が経った後は、測定位置による値の違いは明確でなく、むしろ、平均・バラツキともに、上・中・下段いずれも同程度の値を示すことが確認された。

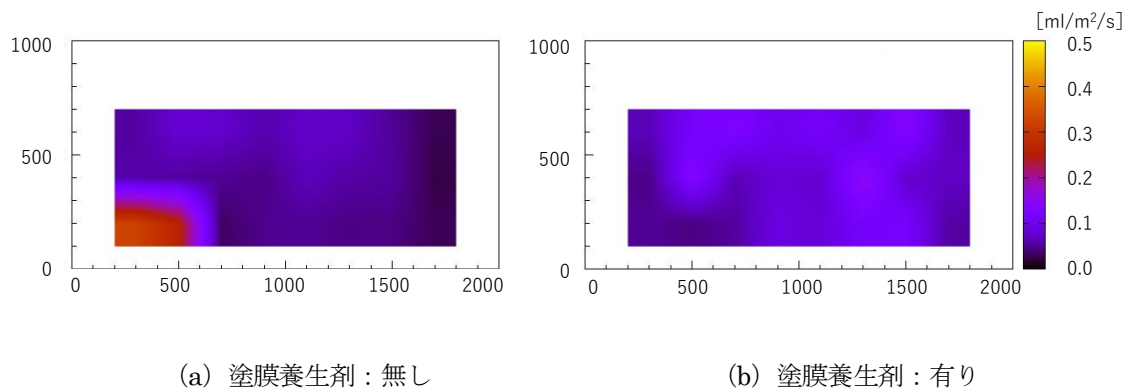


図-4.2.6 表面吸水速度の面的分布（養生直後）

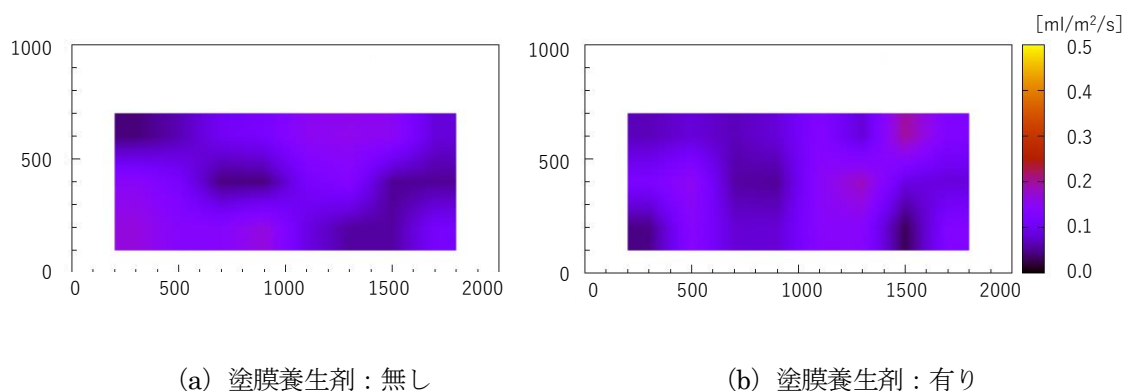
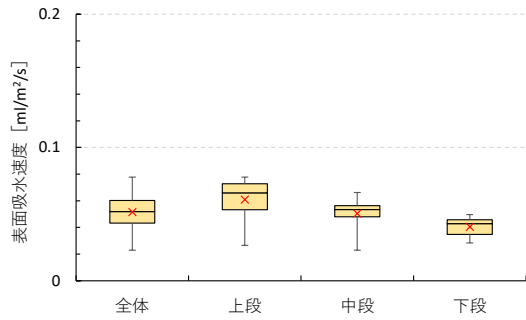
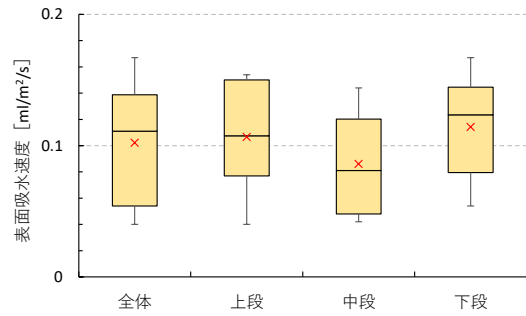


図-4.2.7 表面吸水速度の面的分布（約8ヶ月間気中静置）



(a) 養生直後



(b) 約8ヶ月気中静置後

図-4.2.8 各高さ位置における表面吸水速度（塗膜養生剤無し）

表層透気係数の場合と同様、検討対象面に対して、どの程度の測定点の抽出が妥当か確認を行った結果の一例を図-4.2.9に示す。図-4.2.9は、養生剤を用いていない面における気中8ヶ月経過後の結果である。これより、表透気係数の結果と同様、測定点数の増加に伴い標準誤差が代表値に漸近し、対象面全体に対する測定可能数の3~4割程度を抽出・測定することで、対象面の代表とすることが可能であると考えられる。

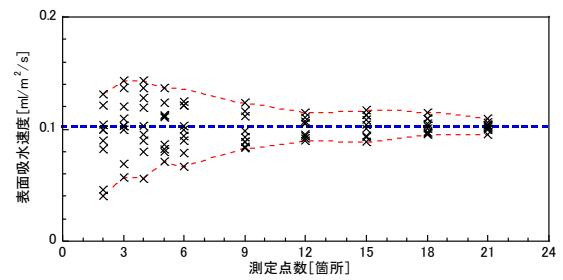


図-4.2.9 測定点数による表面吸水速度の平均値のバラツキ

(3) 耐久性（塩分浸透性／スケーリング抵抗性）

各試験体より切出した試験体を用いた塩化物イオン浸透深さおよび凍結融解 60 サイクル終了時のスケーリング量をそれぞれ図-4.2.10 および図-4.2.11 に示す。図中のエラーバーは、測定値の最大／最小値を示している。これらの結果より、塩化物イオン浸透深さ、スケーリング量ともに、養生剤の有無によらず、ほぼ同程度の値を示し、本検討の範囲内では養生剤の有無が耐久性に及ぼす影響は少ないことが確認された。

図-4.2.12 には、塩化物イオン浸透深さと各位置で測定された表面吸水速度の関係を示す。養生剤の有無によらず塩化物イオン浸透深さが同程度の値を示したが、その範囲内においても、両者の間には線形関係 ($R^2=0.52$) が確認された。つまり、表面吸水速度が大きくなるほど、塩化物イオン浸透深さも大きな値を示す傾向が認められ、表面吸水速度はプレキャストコンクリート部材の表層品質・耐久性への影響を評価するための一資料とすることが可能であると考えられる。

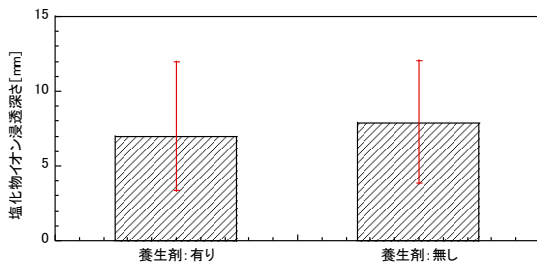


図-4.2.10 塩化物イオン浸透深さ

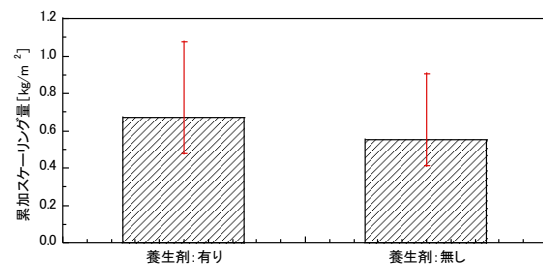


図-4.2.11 スケーリング抵抗性

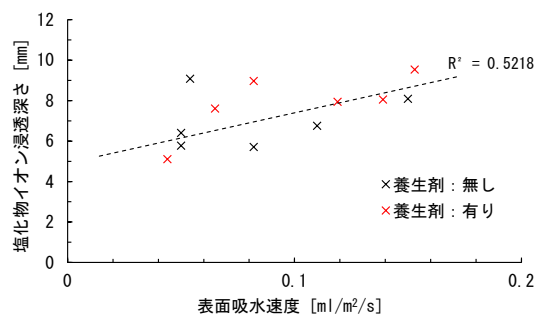


図-4.2.12 塩化物イオン浸透深さと表面吸水速度の関係

(執筆者：迫井裕樹)

4.3 まとめ

本章では、実環境におけるコンクリート部材およびプレキャストコンクリート製品に対して、各種非破壊試験を実施し、表層品質の評価に対する適用性の確認・評価、検討を行った。

実構造物における水分率の分布より、時間経過に伴い乾燥傾向を示すことが確認された。特に、構造物種・測定箇所によって、日射および開口部付近の風による影響を受ける箇所では、水分率が低くなる傾向を示す一方で、高架橋橋脚補強部など、施工時期からの経過日数が少なくかつ、適切な養生が行われたことが推察される構造物においては、測定面全体を通じて含水率が比較的高い値を示すことが確認された。

実構造物における簡易透水係数は、水分率が高いほど低い値を示す傾向が認められ、前述の日射や風の影響により水分率が低くなる箇所では簡易透気係数が高くなるなど、同一評価対象面内であっても、環境や形状（部位）、経過時間の影響により、測定結果が異なることが把握された。ただし、全体的に水分率が高いものであっても、セパレータ周辺の沈みひび割れや施工不良と思われる箇所では、簡易透気係数が高い値を示すことが確認された。このような箇所においては、将来的に早期の劣化進行が懸念されるため、表層に対策を施すなど予防保全的対応が必要になるものと考えられる。

大型プレキャスト部材の隔壁部を模擬した試験体による検討より、表層透気係数・表面吸水速度ともに、同一対象面内全体において上段ほど大きな値を示し、時間経過に伴ってその傾向がより顕著になることが確認された。また、各種非破壊試験の測定位置、測定数によって測定値のバラツキが大きくなる場合があることに留意が必要であり、本章の検討範囲内では、測定対象面全体の平均値を代表とした場合、対象面内の3～4割程度を抽出・測定することで、概ね代表値とすることが可能であると考えられる。

(執筆者：武田三弘)

5. 総括

本委員会は、東日本大震災後に立ち上がった東日本大震災に関する学術合同調査委員会による調査・報告結果において、10年の節目を迎え、当時の課題や懸念事項がどの様になっているのか再度検証する必要があった。また、東日本大震災後のコンクリート構造物の品質確保の取り組みにおいて用いられた非破壊検査においても、対象構造物の表層の状況によって測定結果が大きく変わることが知られており、コンクリートの品質評価を正しく行うためにも各種非破壊検査の特徴を理解し、目的に合わせた使用方法を行っていくことも必要となった。その様なことから、「コンクリート表層品質評価委員会」を立ち上げ、これらの課題について取り組みを行った。

第1章では、「地震・津波を受けたコンクリートの震災後における表層品質評価」として、東日本大震災直後および10年以上経過してから測定した津波被災したコンクリート構造物の塩化物イオン濃度を比較している。この結果、ひび割れの発生していない土木構造物においては、震災当時は高い塩化物イオン濃度を示していたが、10年経過した時点においては低下しており、特に雨がかりがある箇所ではその傾向が顕著であった。ひび割れが発生した土木構造物では、津波当時内部に浸透した塩化物イオンが、中性化の影響で内部にシフトする傾向が見られた。住宅基礎の塩化物イオン濃度は、震災時、海水を含む汚泥が長期間堆積していたことと、もともと断面が薄く乾燥傾向であったことより、震災当時から塩化物イオン濃度が高く、10年後においてもその傾向は変わらなかった。特に、べた基礎の底盤においては、津波被災時に長時間にわたり塩水に浸る可能性が高いこと、接地面において土壌からの塩化物浸透が懸念されることなど、耐久性の観点での懸念事項が多いことがわかった。また、基礎底盤を想定した実験室レベルでの塩分浸透実験も実施し、塩化物を含んだ汚泥による塩分浸透メカニズムについての見解をまとめた。今後は、長期的な材齢における中性化の進行によって生じる塩化物イオンの解離や濃縮、この現象による鋼材腐食についての検討も必要であると思われる。また、このような汚泥の堆積による塩化物イオン浸透への対応策として、有用であると考えられる高圧洗浄による塩化物イオンの洗浄効果についても報告している。

第2章では、透気試験、透水試験、簡易透気試験およびX線造影撮影法などの各種非破壊検査を用いて、同一箇所を測定した際の測定結果の相関性やコンクリートの表面水分率の影響、長期材齢による各種非破壊試験測定結果の変動について述べられている。この結果、透気試験（ダブルチャンバー法）および簡易透気試験における透気係数は、L値までの深さの空隙量と相関が高く、透水試験においては表層から10mm以内の空隙量との相関が高い結果となった。各種非破壊試験同士の測定結果の関係性は、透気試験と透水試験には相関が見られたがコンクリートの表面水分率の違いによって影響を受ける結果となった。同一コンクリート面に対して、表面水分率が約5.5%から4.0%に変化した時の測定結果において、透気試験、透水試験、簡易透気試験いずれにおいても表面水分率が小さくなるほど測定結果は大きくなり、評価が悪くなる傾向となった。これは表面水分率が変化することで評価結果が大きく変わることを意味している。表面水分率が5.5%では「優」の評価でも、4.0%では「劣」となる結果が得られたが、コンクリート自体が劣化したわけではなく、水分の蒸発により乾燥しただけであるため、評価方法としては表面水分率も含めた検討が必要になってくるものと考えている。土間コンを想定した供試体を用いて、無養生と養生マット、ブルーシートなどを用いた養生方法の違うコンクリート表面を各種非破壊試験で長期的に測定した結果、いずれの非破壊試験においても養生方法の違いによる密実性の評価結果の傾向に大

きな差は見られなかった。また、400日を超える長期的な測定結果から、初期材齢で緻密な評価であった箇所においては測定結果が若干大きくなる傾向がみられ、初期材齢で粗な評価であった箇所においては測定結果が若干小さくなる傾向がみられたが、いずれも評価グレードが変わるような変化ではない。この様に、各種非破壊試験を実施する際は、非破壊試験によっては測定深さが異なること、表面水分率の影響を受けやすいことを理解した上で、利用することが必要と考えられる。

第3章では、簡易透気試験によるセパレータ周囲に生じた沈みひび割れの貫通評価と含浸性塗布材（含浸材）が表層品質に及ぼす影響について述べられている。大型供試体に発生させたセパレータ周りの沈みひび割れの貫通評価を、簡易透気試験から求めた透気係数を用いることで判断できることや、また、貫通評価された沈みひび割れに対して漏水試験から貫通していることを確認し、貫通ひび割れの発生状況についてX線造影撮影法を用いて視覚的に確認していることが述べられている。含浸性塗布材（含浸材）が表層品質に及ぼす影響については、含浸材を施工したものは、含浸材を施工しないものよりも表層透気係数および表面吸水速度が小さい値を示す傾向が見られ、塗布後の養生方法の違いによる改善効果の違いについても述べられている。また、スケーリング抵抗性についても検討されており、養生条件・含浸材種類の組合せ条件によって、長期的に凍結融解作用を受けるコンクリートのスケーリング発生状況が異なる結果が得られており、含浸材を施工していないものよりも多くのスケーリングが発生する場合があります。含浸材施工による表層品質（表層部の空隙充填による透気性・透水性）改質の有無は評価・判断することが可能であるものの、その結果を基に、維持管理において活用が可能となるような、耐久性（スケーリング抵抗性）に対する効果の予測・評価はやや困難であることを示唆することが示されている。

第4章では、実コンクリート部材への各種非破壊試験の適用性の検討が述べられている。簡易透気試験を用いた実コンクリート部材の表層品質評価では、簡易透気試験を用いてコンクリート構造物の表層全面の透気係数を求め、それをコンター図化することで、点検時の要注意箇所や詳細調査を実施する上でのスクリーニングとしての使用方法と、その測定事例の紹介がされている。各種非破壊試験を用いたプレキャスト部材の表層品質評価では、大型プレキャスト製品の隔壁を模擬した試験体に対して、各種非破壊試験による対象面内の表層品質の分布把握と測定数による結果のバラツキに関して検討、および表層品質評価と耐久性の関係について検討を行った。測定面のばらつきに関しては、測定対象面全体の平均値を代表とした場合、対象面内の3～4割程度を抽出・測定することで、概ね代表値とすることが可能であることが示されている。また、表面吸水速度はプレキャストコンクリート部材の表層品質・耐久性への影響を評価するための一資料とすることが可能であることが示されている。

（執筆者：武田三弘）

付録（参考資料・論文リスト）

1.1

- 1) 石山智, 山田寛次: 津波を受けた住宅基礎コンクリートの塩害に関する基礎的研究, 日本建築学会東北支部研究報告集構造系, 第75号, pp.57-58, 2013
- 2) 石山智, 権代由範, 西脇智哉, 長谷川兼一: 東北地方太平洋沖地震による津波被害を受けたコンクリート材料の塩分浸透状況に関する調査, 日本建築学会技術報告集, Vol.22, No.50, pp.377-380, 2016
- 3) 武田三弘, 小山田佳夫: 被災建造物の耐久性に関する調査, 東日本大震災に関する東北支部学術合同調査委員会 報告書 DVD, 2013
- 4) 国土交通省: 全国道路施設点検データベース, <https://road-structures-map.mlit.go.jp/Index.aspx>, 閲覧日 2023年6月2日

2章

- 1) 半井健一郎, 蔵重勲, 岸利治: かぶりコンクリートの透気性に関する竣工検査ースイスにおける指針一, コンクリート工学, Vol.49, No.3, pp.3-6, 2011
- 2) 半井健一郎, R.J.Torrent: 表層透気試験(トレント法)の実務展開, コンクリート工学, Vol.52, No.7, pp.595-600, 2014
- 3) 小松怜史, 田島涼, 細田暁: 表面吸水試験を用いたコンクリート床版上面の品質評価方法の検討, コンクリート工学論文集, 第29巻, pp.33-40, 2018
- 4) 武田三弘, 大塚浩司: X線造影撮影法によるコンクリートの性状評価手法の開発と応用, 土木学会論文集 E2, Vol.68, No.3, pp.146-156, 2012
- 5) 武田三弘: 各種非破壊検査によるコンクリート表層品質評価の問題点と維持管理のための活用方法について, コンクリート建造物の補修・補強に関するフォーラム, 2021
- 6) コンクリート建造物の養生効果の定量的評価と各種養生技術に関する研究小委員会(356委員会)成果報告書およびシンポジウム論文集, 土木学会, 2019
- 7) 蔵重勲, 山田一夫, 小川彰一: 非破壊透気試験等を用いたコンクリート品質管理の可能性検討ー指定廃棄物の最終処分に向けてー, セメント・コンクリート論文集, Vpl.69, 1号, pp.287-294, 2015
- 8) 菅原瑛, 武田三弘, 鈴木恵子: 各種非破壊検査によるコンクリート表層評価に関する基礎的研究, 土木学会第76回年次学術講演会, V-334, 2021

3.1

- 1) 樋門のコンクリート躯体に生じた乾燥収縮ひび割れに対する数値計算: 佐藤 薫, 石川 雅美, 川上義仁, 平成26年度土木学会東北支部技術研究発表会, V-28, 2015.3
- 2) 武田三弘, 大塚浩司: X線造影撮影法によるコンクリートの性状評価手法の開発と応用, 土木学会論文集 E2

(材料・コンクリート構造), Vol.68, No.3, pp146-156, 2012.7

- 3) 軍司翔太, 武田三弘, 阿部大輝, 増澤 優, 海老根壮: 樋管に発生したセパレータ周りの沈下ひび割れに関する基礎的実験, 平成 28 年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, VI-53, 2017.3

3.2

- 1) 樋原弘貴, 武若耕司, 山口昭伸, 白澤直: 各種表面含浸材の性能把握と効果の違いに関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1619- 1624, 2010
- 2) 太田晃博, 佐藤宇泰, 渡邊浩平, 迫井裕樹, 阿波稔, 各種ケイ酸塩系表面含浸材によるスケーリング抵抗性, 平成 23 年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, V-21, 2012
- 3) 遠藤裕丈, 田口史雄, 小野俊博, 登靖博: けい酸塩系表面含浸材を施工したコンクリートのスケーリング抵抗性の基礎的評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.1203- 1208, 2007
- 4) 迫井裕樹, 阿波稔, 月永洋一, 塩田哲康: 劣化程度の異なるコンクリートへの含浸材適用とその後の耐久性, 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 17 巻, pp.149- 154, 2017
- 5) 中嶋亮介, 鶴田浩章: 劣化を生じたコンクリートにおける表面含浸材の併用による劣化抑制効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1681- 1686, 2013
- 6) 原沢蓉子, 伊代田岳史: 劣化した構造物への表面含浸材の適用に関する一検討, 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, 第 14 巻, pp.547- 552, 2014
- 7) 伊藤稔, 鷺見高典, 加藤諄, 吉田亮: 都市高速道路の壁高欄に適した表面保護工法とその材料について, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.1, pp.532- 537, 2021
- 8) 澤田巧, 福手勤, 藤井雄基, 内藤英晴: 表面含浸材の海洋・港湾コンクリート構造物への適用性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1651- 1656, 2013
- 9) 遠藤裕丈, 島多昭典: シラン系表面含浸材を塗布して 15~16 年経過した北海道の道路橋地覆コンクリートでの追跡調査, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.1432- 1437, 2022
- 10) 岡田明也, 齋藤俊克, 出村克宣: シラン系及び無機系表面含浸材を含浸させたモルタル及びコンクリート供試体の屋外暴露 12.5 年後の性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1663- 1668, 2017
- 11) 土木学会: コンクリートライブラリー137 けい酸塩系表面含浸工法的设计施工指針(案), 2012
- 12) 金堀雄伍, 樋原弘貴, 添田政司, 久保田崇嗣: コンクリート抵抗値および透気係数によるけい酸塩系表面含浸材の現場での性能確認手法への適用性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1887- 1892, 2016
- 13) 児玉昂大, 上田隆雄, 山本晃臣: 各種表面含浸材を適用したモルタルの近赤外線分光法による評価に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, pp.1576- 1581, 2020
- 14) 遠藤裕丈, 安中新太郎: シラン系表面含浸材の含浸状況の非破壊評価方法の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, pp.1486- 1491, 2020
- 15) 西谷朋晃, 矢野貴行, 皆川浩, 久田真: 英酸塩系表面含浸材の塗布が非破壊試験による電気抵抗率の測定結果

に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1798- 1803, 2012

- 16) 阿川清隆, 宮里心一, 伊藤哲夫, 出口宗浩: 表面含浸材の遮塩性・遮水性評価に対する電気抵抗試験法の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1649- 1654, 2011

4.2

- 1) 阿波稔, 大塚浩司, 諸橋克敏: 蒸気養生過程で発生する鉄筋コンクリート部材の微細ひび割れ, コンクリート工学年次論文集, Vol.15, No.1, pp.567- 572, 1993
- 2) 阿波稔, 大塚浩司, 今野洋一: 乾燥によりコンクリート表面に発生する微細ひび割れ性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.17, No.1, pp.725- 730, 1995
- 3) 丸山貴吉, 平部一樹, 中嶋望, 伊達重之: 高温蒸気養生ならびに早期脱型が膨張コンクリートに及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.367- 372, 2017
- 4) 中谷俊晴, 渡邊賢三, 坂井吾郎, 石田哲也: 製造時期および二次養生方法の違いがプレキャストコンクリート製品の諸物性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.2, pp.541- 546, 2019
- 5) 鳥海秋, 原洋介, 宇治公隆, 上野敦: 蒸気養生中の散水がコンクリート表層部の品質および強度特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.493- 498, 2018
- 6) 阪口裕紀, 小澤満津雄, 迫井裕樹, 大垣健太: 遮熱シートを用いて蒸気養生を実施したプレキャストコンクリート部材の表層透気係数の測定, 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 30 巻, pp.107- 112, 2020
- 7) 高山勝行, 齋藤賢, 菅彰, 新藤健司: 表面美観効果を有する新規化学混和剤の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.541-546, 2017
- 8) 祐川真也, 迫井裕樹, 後藤琢磨: 大型プレキャスト製品の表層品質分布と耐久性, 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 22 巻, pp.357- 360, 2022.