

プレキャストPC桁における空気量と耐凍害性および塩分浸透性に関する調査

北野 勇一*1・池田 正行*2・岩城 一郎*3・阿波 稔*4

目標空気量を現況仕様4.5%と新仕様6.0%としたコンクリートを用い、実際に稼働しているPC工場にてプレキャストPC桁を模擬した試験体を製造し、コンクリートコアを採取するなどして各種調査を行った。その結果、凍結防止剤の影響と凍害の複合劣化が懸念される床版面に着目すると、現況仕様4.5%では空気量2.4～4.0%、気泡間隔係数239～377 μm であるのに対し、新仕様6.0%では空気量3.2～8.3%、気泡間隔係数197～291 μm と改善された。また、現況仕様4.5%および新仕様6.0%ともきわめて高い耐凍害性を有するとともに、塩分浸透性は新仕様6.0%とした場合でも現況仕様4.5%と変わらないことを確認した。

キーワード：プレキャストPC桁、空気量、耐凍害性、塩分浸透性

1. はじめに

近年、東北では凍害と塩害の複合劣化によるコンクリート構造物の早期劣化が課題となっている。プレストレストコンクリート（以下、PCという）構造物においても、寒冷で空気量が少なく高濃度の塩分が供給されることで著しい劣化を引き起こした事例が報告されている¹⁾。また、PC工場にて蒸気養生を行い製造される高強度のプレキャストコンクリート部材における空気量と耐凍害性との関連性については十分に明らかにされていない。

そこで、一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会東北支部（以下、PC建協東北支部という）は、日本大学工学部および八戸工業大学の協力を得て、プレキャストPC桁を対象に各種調査を実施することにした。調査にあたっては、目標空気量を荷卸し時4.5%（現況仕様）と「東北地方におけるコンクリート構造物設計・施工ガイドライン（案）」²⁾に提示される6.0%（新仕様）としたコンクリートを用い、実際に稼働しているPC工場にてプレキャストPC桁を模擬した試験体を製造することにした。

なお、本調査は2013年2月にPC建協東北支部に設立

された「PC橋長寿命化委員会」の活動の一環として実施し、得られた成果は、国土交通省東北地方整備局における高耐久PC桁の標準仕様として採用されることになった。

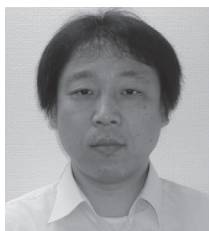
2. 調査方法

2.1 調査対象

プレキャストPC桁は、床版および桁としてのコンクリート施工が行えることを考慮し、JIS A 5373²⁰¹⁰ 付属書B 推奨仕様B-1に記載される中空断面のスラブ橋桁であるBS16を対象とした。試験体は、BS16の支間中央部の切出しモデルとし（図-1）、プレストレスによる凍害への影響は無視できると考えられることから、PC鋼材を鉄筋に置き換えた。PC工場は、コンクリート配合や製造方法の違いを検討するため、岩手県内にある3工場を対象とした。

2.2 試験体の製造

コンクリート配合を表-1に示す。1工場につき空気量を新仕様6.0%と現況仕様4.5%の2配合ずつ、合計6配合のコンクリートを用い、試験体も都合6体製造することにした。使用材料やスランプは各工場の規格に従うものとし、空気量を7%以上とした既往研究が少ないことから、



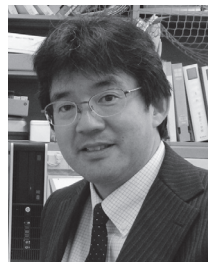
*1 Yuichi KITANO

(一社)プレストレスト・
コンクリート建設業協会
東北支部



*2 Masayuki IKEDA

(一社)プレストレスト・
コンクリート建設業協会
東北支部



*3 Ichiro IWAKI

日本大学 工学部
土木工学科 教授



*4 Minoru ABA

八戸工業大学 工学部
土木建築工学科 教授

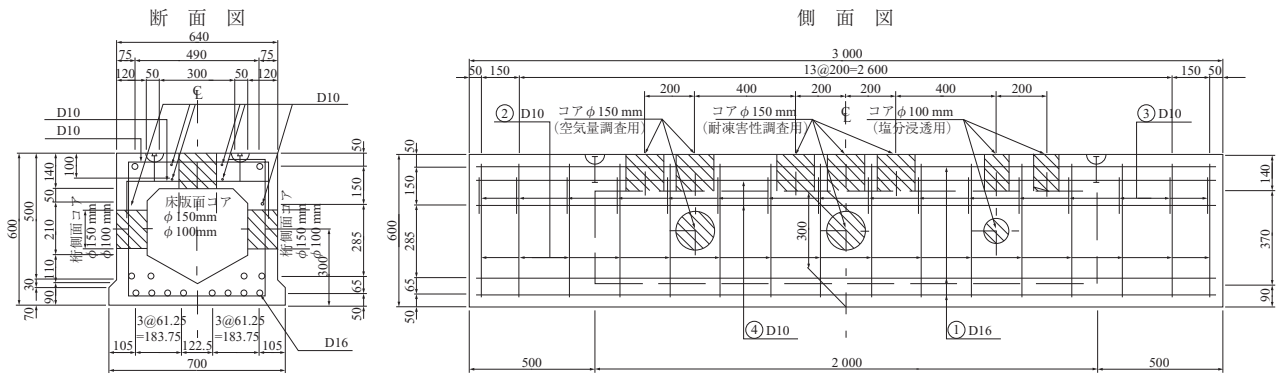


図 - 1 試験体形状

表 - 1 コンクリート配合

配合	工場	設計基準強度 (N/mm ²)	目標スランプ (cm)	粗骨材最大寸法 (mm)	セメント種類	目標空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤	
									水	セメント	細骨材	粗骨材		
1	A	50	12	20	H	6.0	35.2	42.0	160	455	708	1 086	高性能減水剤 + AE 剤	
2						4.5	36.6	42.0	153	418	745	1 145		
3	B		15			6.0	35.9	38.8	160	446	660	1 131	高性能 AE 減水剤	
4						4.5	38.0	41.3		422	726	1 125		
5	C		10			10	6.0	35.0	39.5	164	469	708	1 107	高性能減水剤 + AE 剤
6							4.5	37.0	41.6		443	774		

注) セメントの種類Hは早強ポルトランドセメントである。骨材は各工場とも化学法で「無害」の骨材を用いる。混和剤は、所定のスランプ(±2.5 cm)および空気量(本文中に記載)が得られるように調整する。

新仕様である配合1・3・5の目標空気量を6.0～6.9%にした。一方、現況仕様である配合2・4・6の空気量は、新仕様との空気量の差をおおむね2%つけるものとした。また、設計基準強度50 N/mm²とプレストレス導入時強度35 N/mm²(本検討では材齢1日とする)を確保するため、新仕様の水セメント比は、現況仕様より1.4～2.1%小さくすることとした。

試験体の製造状況を写真-1に示す。コンクリートの施工は、表-2に示す各工場の要領に従い、両ウェブに均等に入るように留意しながら3層に分けて打込み、締固め、型枠表面のエア抜き、および、床版面の仕上げを行った。また、蒸気養生は各工場で行われている条件にて実施し(表-3)、材齢1日で脱枠した後は、とくに追加養生を行わずに、屋外にて保管した。



写真 - 1 試験体の製造状況

材齢28日以降には、各種試験に用いるコンクリートコアを試験体より採取した。コア採取の位置は、前出の図

表 - 2 コンクリート施工要領

工種	A工場	B工場	C工場
打込み 締固め	1～3層： 棒状パイプ レータφ50	1～3層： 棒状パイプ レータφ42	1層：外部振動機30秒 2,3層：棒状パイプレータ φ30
型枠表面 エア抜き	棒状パイプ レータφ40	棒状パイプ レータφ40	棒状パイプレータφ30
仕上げ	金ごてを用いコンクリート床版面を仕上げる		

表 - 3 蒸気養生の条件

	A工場	B工場	C工場
前養生時間	3時間以上		
昇温速度	15℃/時間以下		
最高温度	40℃(4時間)		45℃(4時間)

- 1に示すとおり、床版面と桁側面の中央部とした。

2.3 試験項目および内容

試験項目および内容を表-4に示す。コンクリートの品質調査として、フレッシュ性状と圧縮強度ならびに表層透気試験(Torrent法による)を実施した。硬化コンクリート中の空気量調査は、試験体より採取したコンクリートコア(蒸気養生のみ)と、別途、標準養生と蒸気養生の2パターンの養生を行ったφ10×20 cmのテストピース(B工場とC工場の新仕様6.0%のみ)を用いて実施した。耐凍害性の調査については採取コアを成形し塩分作用下の凍結融解試験を行い、さらに、空気量を増すことにより塩化物イオンが浸入しやすくなることも懸念されたことから、採取コアに対し電気泳動法による塩分浸透性試験を実施した。

表 - 4 試験項目および内容

試験項目	内容
フレッシュ性状	スランブは JIS A 1101, 空気量は JIS A 1118 に従い試験する。
圧縮強度	蒸気養生を行った $\phi 10 \times 20$ cm の円柱供試体を用い, JIS A 1108 に準じて圧縮強度試験を行う。
表層透気性	試験体の床版面と桁側面の透気性を Torrent 法により各 3 箇所ずつ測定し, 平均値を透気係数とする。測定材齢は 28 日とし, その 3 日前より屋内に保管する。
硬化コンクリート中の空気量	試験体の床版面と桁側面より $\phi 150$ mm のコンクリートコア (各 2 本) を採取し, 表面より約 5 mm (表層) と約 50 mm (内部) の空気量を ASTM C457 リニアトラバース法により調査する。また, B 工場と C 工場の新仕様 6.0 % については, 別途 $\phi 10 \times 20$ cm のテストピースを 6 本採取し, 標準養生と蒸気養生を 3 本ずつ行い, 材齢 28 日以降に高さ中央部で切断し, 前述の方法にて空気量を調査する。
塩分作用下の凍結融解性	試験体の床版面と桁側面より採取したコンクリートコア (各 3 本) を $\phi 150 \times 80$ mm に成形し, 表層側に土手を設けて 3 % NaCl 水溶液を灌水させ, $-20^{\circ}\text{C} \times 16$ 時間の凍結と $20^{\circ}\text{C} \times 6$ 時間の融解 (移行時間は各 1 時間) を 1 サイクルとした凍結融解を 100 サイクル (通常 50 サイクル) まで行い, スケーリング量を測定する (ASTM C672 に準じる)。
塩分浸透性	試験体の床版面と桁側面より採取したコンクリートコア (各 2 本) を $\phi 100 \times 50$ mm に成形し, JSCE G571 「電気泳動によるコンクリート中の実効拡散係数試験方法 (案)」に従い試験を実施する。

3. コンクリートの品質調査結果

3.1 フレッシュ性状および圧縮強度

フレッシュ性状と圧縮強度試験結果を表 - 5 に示す。スランブは所定値内であり, 空気量は新仕様である配合 1・3・5 で目標の 6.0 ~ 6.9 % を確保し, かつ, 現況仕様である配合 2・4・6 の空気量との差を 1.8 ~ 2.5 % つけることができた。また, 6 配合とも所定の圧縮強度が得られ, 目標空気量を高めた新仕様 6.0 % についてもプレキャスト PC 桁の製造に関わる強度発現性に問題のないことが確認された。

表 - 5 フレッシュ性状と圧縮強度試験結果

配合	スランブ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	
			1 日	28 日
1	13.0	6.2	41.6	59.4
2	14.0	4.4 (-1.8)	40.6	60.4
3	16.0	6.6	35.5	54.4
4	15.0	4.4 (-2.2)	36.2	58.4
5	11.0	6.3	43.0	58.5
6	9.0	3.8 (-2.5)	41.7	58.1

注) 括弧内は, 現況仕様と新仕様との空気量の差を示す。

3.2 表層透気性

表層透気試験の実施状況を写真 - 2 に, 透気係数の測定結果を図 - 2 に示す。今回の測定で得られた透気係数は, 床版面で $0.001 \sim 0.010 \times 10^{-16} \text{m}^2$, 桁側面で $0.001 \sim 0.023 \times 10^{-16} \text{m}^2$ であり, 透気係数から推定されるコンクリートの品質クラス “良” ~ “優” に該当することが確認された。ちなみに, 1954 年にわが国初の本格的なポストテンション PC 桁として建設された第一大戸川橋梁では, 2007 年に実施された調査³⁾において透気係数が $0.001 \sim 0.008 \times 10^{-16} \text{m}^2$ であることなど, きわめて耐久性の高い構造物であるとの報告がなされており, 材齢が大きく異なるものの, 今回得られた透気係数はこれに匹敵するものであった。

なお, 透気係数は床版面よりも桁側面の方が若干大きくなる傾向であった。これは, 蒸気養生中の床版面は湿潤状態にあるが, 桁側面は鋼製型枠に接しているために封緘に近い状態であったことが影響している可能性もある。



写真 - 2 透気試験 (Torrent 法) の状況

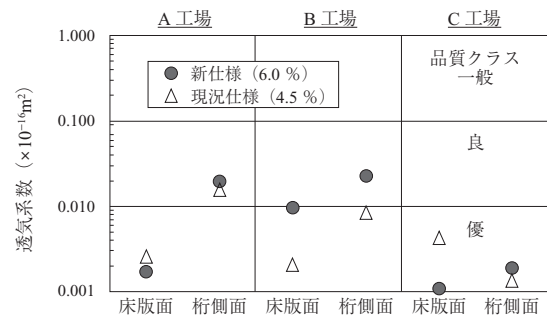


図 - 2 透気係数の測定結果

4. 硬化コンクリート中の空気量調査結果

4.1 試験桁中の空気量調査結果

試験体から採取したコアの表層部 (表面より約 5 mm) について, 空気量と気泡間隔係数を調査した結果を図 - 3 と図 - 4 に示す。凍結防止剤の影響と凍害の複合劣化が懸念される床版面の調査結果に着目すると, 現況仕様 4.5 % では空気量 2.4 ~ 4.0 %, 気泡間隔係数 239 ~ 377 μm であるのに対し, 新仕様 6.0 % は空気量 3.2 ~ 8.3 %, 気泡間隔係数 197 ~ 291 μm と改善されることが確認された。

また, 図 - 5 は全調査結果について空気量と気泡間隔係数の関係として整理したものである。図には気泡間隔係数の統計量を記入したが, 現況仕様 4.5 % は平均 301 μm , 標準偏差 62 μm であるのに対し, 新仕様 6.0 % は平均 224 μm , 標準偏差 32 μm といずれも小さくなっている。つまり, 空気量を新仕様 6.0 % としたコンクリートを採用す

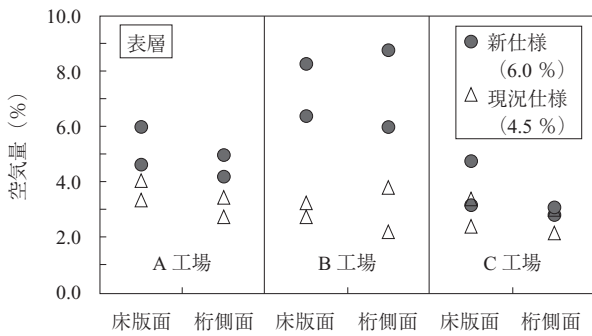


図 - 3 試験桁コア中の空気量

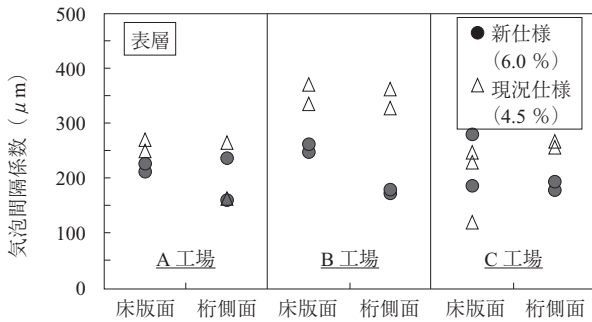


図 - 4 試験桁コア中の気泡間隔係数

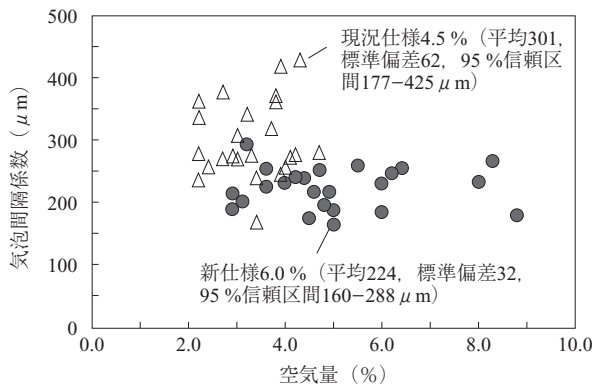


図 - 5 試験桁コア中の空気量と気泡間隔係数の関係

ることにより、硬化コンクリート中に良質な気泡組織（気泡間隔係数でおおむね 300 μm 以下）を安定して形成し得るといえる。

4.2 蒸気養生の有無が気泡組織に与える影響

新仕様 6.0% を対象に、標準養生と蒸気養生を行ったテストピースを用い、気泡数を調査した結果を図 - 6（空気量が多かった B 工場）と図 - 7（空気量が多かった C 工場）に示す。ここで、トラバース総長はおおむね 1587 mm であり、テストピース 3 体の平均を図示した。気泡径 501 μm 以上の気泡数に着目すると C 工場に比べ B 工場の方が約 2 倍と多くなっているが、気泡径 500 μm 以下については両工場ともおおむね同程度の個数であった。また、標準養生と蒸気養生の気泡数には大差がなく、とりわけ、質のよいエントレインドエアに相当する気泡径 51 ~ 100 μm および 101 ~ 150 μm に着目すると、標準養生よりもむしろ蒸気養生の方が気泡数が多く導入さ

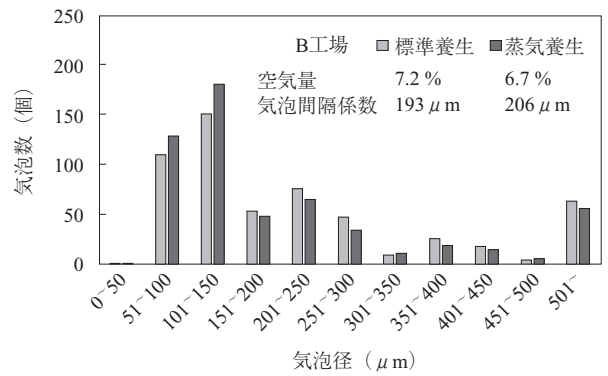


図 - 6 新仕様 6.0% テストピース中の気泡数 (B 工場)

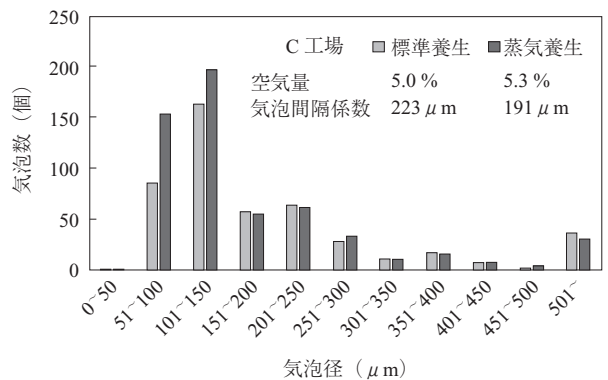


図 - 7 新仕様 6.0% テストピース中の気泡数 (C 工場)

れる結果となった。

図 - 6 と図 - 7 をもとに、気泡径の小さい方より空気量を累計した結果を図 - 8 に示す。この図からも、気泡径の小さい範囲の累計空気量は、工場の違い（空気量の大小）や蒸気養生の有無にかかわらず、ほとんど差がないことがわかる。一方、累計空気量に大差が生じているのは気泡径 501 μm 以上の部分であり、C 工場が約 1.5% の空気量を有するのに対し、B 工場では 3.0% 強にも達している。つまり、B 工場（空気量が多）と C 工場（空気量が多）の違いは、粗大な気泡数の違い（前出の図 - 6 に示す B 工場の 501 μm 以上の気泡数は図 - 7 の C 工場の約 2 倍）であり、耐凍害性の向上が期

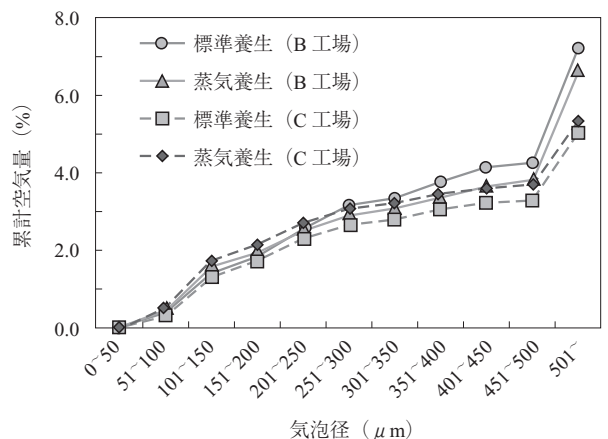


図 - 8 新仕様 6.0% テストピース中の累計空気量

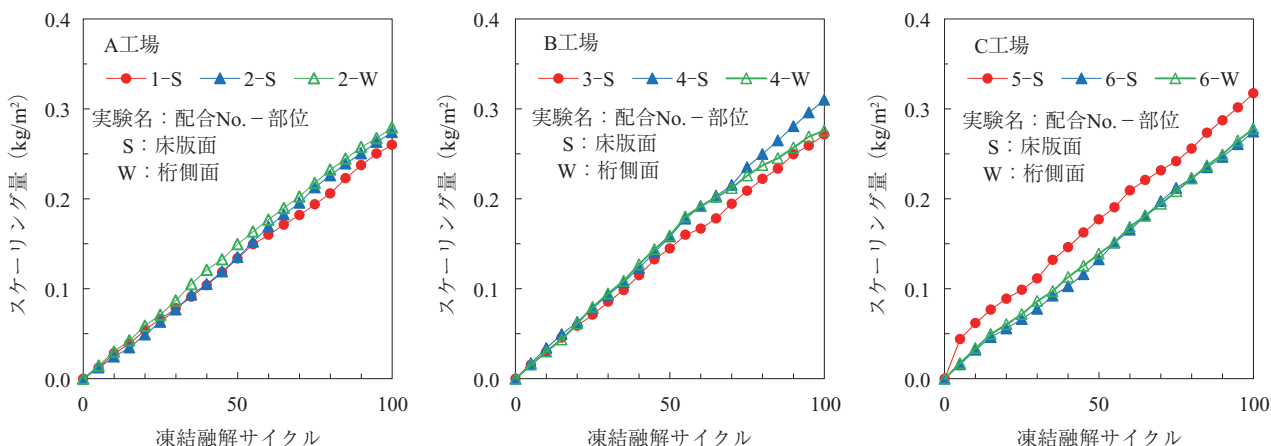


図 - 9 塩分作用下の凍結融解試験結果

待できる気泡組織についてはほぼ同一のものが得られているといえる。

5. 耐凍害性の調査結果

塩分作用下の凍結融解試験を実施した結果 (3 体の平均) を図 - 9 に示す。測定されたスケーリング量は、現況仕様 4.5 % と新仕様 6.0 % の違いによらず 3 工場ともおおむね同程度であり、凍結融解サイクルの進行に伴い線形的に増大し、最終 100 サイクルで 0.26 ~ 0.32 kg/m² となった。また、3.2 節にて確認された床版面と桁側面の透気係数の違いは、スケーリング量の違いとしてとくに顕在化することとはなかった。

試験後のスケーリング状況を写真 - 3 に示す。本調査 100 サイクル後の試験体はわずかなペーストの剥れが認められるだけであり、ASTM 規格⁴⁾ の評価 1 に該当する状態であった (表 - 6)。参考までに、別途実施された水セメント比 45 % で空気量をとくに導入していない NonAE の試験体⁵⁾ を写真の下に掲載したが、この試験体では表面のペースト分がすべて剥れ落ちて骨材が露出している状況と比べると、今回の試験体は凍結融解 100 サイクル後もきわめて健全な状態であったといえる。



写真 - 3 試験後のスケーリング状況

表 - 6 目視による評価基準⁴⁾

評価	コンクリート表面状態
0	はく落なし
1	粗骨材の露出なし。劣化深度最大 3 mm 程度のごく軽微なはく落
2	軽度のはく落 (評価 1 と評価 3 の中間程度)
3	いくらか粗骨材の露出が確認される中度のはく落
4	強度のはく落 (評価 3 と評価 5 の中間程度)
5	表面全体に粗骨材の露出が確認される激しいはく落

前出の図 - 9 中の床版面に着目し、凍結融解 50 サイクルと 100 サイクルにおけるスケーリング量を比較した結果を図 - 10 に示す。図には前述の文献⁵⁾ に示される水セメント比 45 % で NonAE、空気量 3.0 %、4.5 %、6.0 % の凍結融解 50 サイクルの試験結果を併記した。図より、本調査試験体のスケーリング量は、水セメント比 45 % の AE コンクリートに比べ 50 サイクル時点で 1/2 以下であり、試験期間を 100 サイクルまで延長してもきわめて少ないことがわかる。つまり、適切な空気量の確保に加え、水セメント比を 40 % 以下にまで低減することで、耐凍害性がきわめて高くなるといえる。

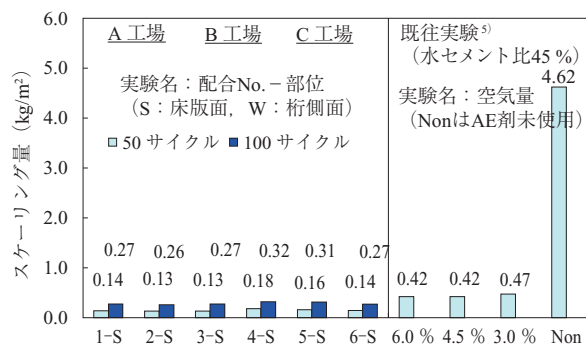


図 - 10 既往実験とのスケーリング量の対比

6. 塩分浸透性の調査結果

塩分浸透性試験の状況を写真 - 4 に示す。電気泳動セルの陰極側から厚さ 50 mm の供試体を介し、陽極側へ移動した塩化物イオンの濃度を測定し (図 - 11)、経時的な

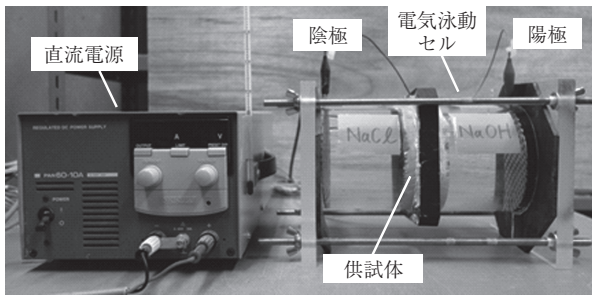


写真 - 4 塩分浸透性試験の状況

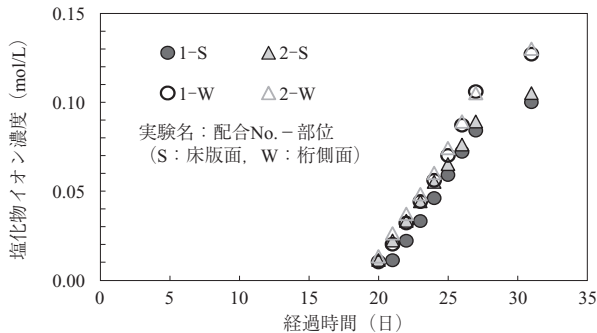


図 - 11 陽極側の塩化物イオン濃度の経時変化

濃度変化が一定となったところで塩化物イオンの移動流速を計算する。このようにして定常状態における塩化物イオン流速が得られれば、Nernst-Planck の式を適用して塩化物イオンの実効拡散係数を算出することができ、その結果の一例を図 - 12 に示す。本実験で得られた実効拡散係数は $0.84 \sim 0.95 \text{ cm}^2/\text{年}$ であり、新仕様 6.0 % の塩分浸透性は現況仕様 4.5 % と変わらないことが確認された。また、若干ではあるが、試験体の床版面よりも桁側面の方が実効拡散係数が大きくなる傾向であった。これは、3.2 節にて述べたように、蒸気養生中は床版面で湿潤状態、桁側面で封緘状態となっていると考えられることが影響した可能性もあるが、塩分浸透性に与える影響はきわめて小さい結果となった。

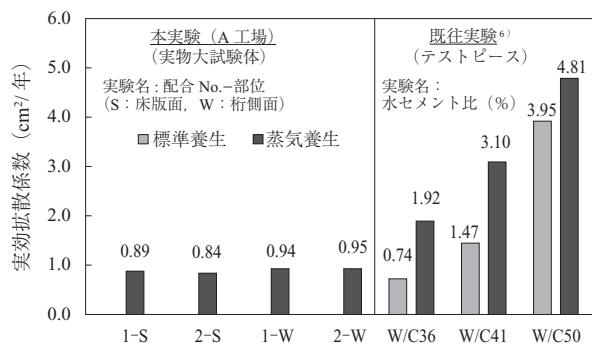


図 - 12 既往実験との実効拡散係数の対比

なお、図 - 12 には早強ポルトランドセメントを用い水セメント比を変化させた既往実験⁶⁾の結果も併せて示し

たが、本実験の結果は既往実験の蒸気養生の結果よりもかなり小さく、標準養生を行った水セメント比 36 % の結果に近づいた。これは、既往実験では寸法の小さい $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ のテストピースを用いているため蒸気養生後の乾燥の影響を強く受けてしまったものと考えられる。いずれにしても、実際に製造されるプレキャスト PC 桁では、とくに追加養生を行わずとも、十分な湿潤養生を行ったコンクリートと同程度の塩分浸透性が得られると考えられる。

7. ま と め

プレキャスト PC 桁を模擬した試験体からコンクリートコアを採取するなどして各種調査を行った結果、次のことが確認された。

- 硬化コンクリート中の空気量調査より、凍結防止剤の影響と凍害の複合劣化が懸念される床版面に着目すると、現況仕様 4.5 % では空気量 2.4 ~ 4.0 %、気泡間隔係数 $239 \sim 377 \mu\text{m}$ であるのに対し、新仕様 6.0 % では空気量 3.2 ~ 8.3 %、気泡間隔係数 $197 \sim 291 \mu\text{m}$ と改善された。また、テストピースを用いた空気量調査より、蒸気養生の有無が気泡組織に与える影響は認められなかった。
- 塩分作用下の凍結融解試験より、現況仕様 4.5 % および新仕様 6.0 % と所定の試験期間でスケリングがほとんど発生せず、試験期間を延長してもきわめて高い耐凍害性を有することが確認された。
- 電気泳動法による塩分浸透性試験より、塩化物イオンの実効拡散係数は $0.84 \sim 0.95 \text{ cm}^2/\text{年}$ であり、塩分浸透性は新仕様 6.0 % とした場合でも現況仕様 4.5 % と変わらないことが確認された。

なお、本調査の実施にあたり、東北地方整備局道路工事課長 (現 南三陸国道事務所長) の佐藤和徳氏をはじめとする関係各位に多大なるご支援とご協力をいただいたことに対しまして感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 岩城一郎, 子田康弘, 大越雅城, 上原子晶久, 鈴木基行: 凍結防止剤により劣化したプレテンションホロースラブ桁橋の詳細調査とその劣化機構の解明, 土木学会論文 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.69, No.1, pp.53-66, 2013
- 2) 東北コンクリート耐久性向上委員会: 東北地方におけるコンクリート構造物設計・施工ガイドライン (案), pp.86, 2009.3
- 3) 土木学会: コンクリート技術シリーズ No.87 歴代構造物品質評価/品質検査制度研究小委員会 (216 委員会) 成果報告書およびシンポジウム講演概要集, pp.15-17, 2009
- 4) American Society for Testing and Materials: Standard test method for scaling resistance of concrete surface exposed to de-icing chemicals, Annual Book of ASTM Standard, Vol.04.02, pp.344-346, 1998
- 5) 佐久間正明, 子田康弘, 岩城一郎: 塩分環境下におけるコンクリートの耐凍害性に及ぼす空気量およびフライアッシュの影響, 平成 25 年度東北支部技術研究発表会, V-37, 2013.3
- 6) 俵 道和, 呉 承寧, 石川嘉崇, 滝上邦彦: プレストレストコンクリートへのフライアッシュの適用性に関する基礎試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, pp.197-22, No.1, 2011

[2015 年 1 月 7 日受付]