

## プレキャストPC桁における空気量と耐凍害性に関する調査

プレストレスト・コンクリート建設業協会東北支部 正会員 ○北野 勇一  
 プレストレスト・コンクリート建設業協会東北支部 池田 正行  
 日本大学工学部 岩城 一郎  
 八戸工業大学 阿波 稔

Abstract : Air content in hardened concrete has been said to greatly influence the durability of concrete structure attacked frost damage. However, any test or experiment has not successfully proved the causal relation between the air content of high strength precast concrete members during plant fabrication and freeze-thaw resistance of those members. Therefore, various investigations were performed on the precast prestressed concrete girders fabricated by steam curing in the plant. This report shows the results of those investigations.

Key words : Precast prestressed concrete, Air content, Freeze-thaw resistance, Scaling

### 1. はじめに

硬化コンクリート中の空気量は、凍害を受けるコンクリート構造物の耐久性に大きく影響すると言われている。しかし、プレストレストコンクリート（以下、PCという）工場にて製造される高強度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、PC工場にて蒸気養生を行い製作されるプレキャストPC桁を対象に空気量と耐凍害性に関する各種調査を実施した。本稿では、上記の目的で実施された一連の調査の結果についての概略を報告する。

なお、本調査は2013年2月にPC建協東北支部内に設立された「PC橋長寿命化委員会」の活動の一環として実施されたものである。

### 2. 調査概要

#### 2.1 調査方針

目標空気量を荷卸時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）」<sup>1)</sup>に提示される6.0%（新仕様）としたコンクリートを用いて製作するプレキャストPC桁の気泡組織と塩分影響下での耐凍害性を確認する。

#### 2.2 調査対象

対象とするプレキャスト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 5373<sup>-2010</sup>附属書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を選定する。試験体はBS16の切り出しモデルとし、プレストレスの有無による凍害発生過程への影響がないことからPC鋼材を鉄筋

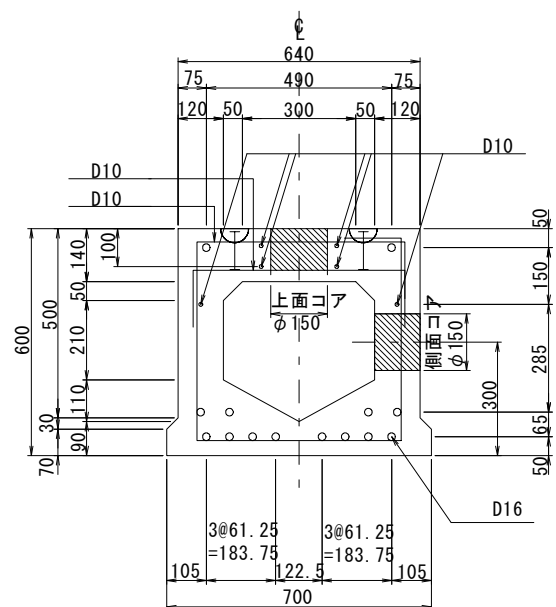


図-1 試験体断面図

表-1 コンクリート配合

配合	対象工場	設計基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )	目標スランプ (cm)	粗骨材最大寸法 (mm)	セメントの種類	目標空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				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	1086	高性能減水剤+A E剤	
2						4.5	36.6	42.0		153	418	745		1145
3	B		15			10	6.0	35.9	38.8	160	446	660	1131	高性能A E減水剤
4								4.5	38.0		41.3	422	726	
5	C		6.0				35.0	39.5	164	469	708	1107	高性能減水剤+A E剤	
6								4.5		37.0	41.6			443

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 (±2.5cm) および空気量 (本文中に記載) が得られるように調整する。

に置き変える (図-1)。また、PC工場は、コンクリート配合や製作方法の違いを検討するため、岩手県内にある3工場を対象とする。

2.3 試験体の製作

コンクリート配合を表-1に示す。コンクリートは設計基準強度50N/mm<sup>2</sup>、プレストレス導入時強度35N/mm<sup>2</sup>、空気量を4.5%と6.0%の条件と、各工場の規格に従い、表に示す6配合を用いる。ここで、新仕様の空気量については7%以上とした既往研究が少ないことから、今回の実験では6.0~6.9%を目標とし、現況仕様は新仕様との空気量の差を2%程度つけることにする。また、新仕様である配合1, 3, 5は強度発現を確保するため、現況仕様よりも水セメント比を1.4~2.1%低める。

試験体の製作方法を表-2に、製作状況を写真-1に示す。コンクリートは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、各工場の規格に従い締固め、型枠表面のエア抜きおよび仕上げを行う。これらの試験体の製作方法は、プレキャストPC桁BS16の製作要領を忠実に再現する。また、蒸気養生は各工場ですべて通常行われる設定で行い (表-3参照)、脱枠後は散水養生などの追加養生を行わずに屋外に保管する。

2.4 調査項目および調査方法

調査項目および調査方法を表-4に示す。空気量調査としては、フレッシュ時と硬化コンクリートについて実施する。耐凍害性については、硬化コンクリートの気泡間隔係数およびスケール量等の結果より判断する。また、コンクリート表層品質の評価として表層透気性を調査する。

表-2 試験体の製作方法

工種	A工場	B工場	C工場
打込み	3層 (下部, ウェブ, 上部) に分け打ち込む。		
締固め	1~3層: 棒状バイブレータφ50×2	1~3層: 棒状バイブレータφ42×2	1層目: 外部振動機30秒 2,3層目: 棒状バイブレータφ30×2
型枠表面エア抜き	棒状バイブレータφ40×2	棒状バイブレータφ40×2	棒状バイブレータφ30×2
仕上げ	金ごてを用いコンクリート上面を仕上げる。		



写真-1 新仕様 6.0%試験体の製作状況

表-3 蒸気養生の設定

対象工場	前養生時間	昇温速度	最高温度
A	3hr 以上	15°C/hr 以下	40°C×4hr
B			45°C×4hr
C			65°C以下
示方書 <sup>2)</sup>	2~3hr 以上	20°C/hr 以下	65°C以下

表-4 調査項目および調査方法

調査項目	調査方法
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	製品同一養生 (蒸気養生) を行った $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 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	試験体上面と側面の透気性を 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, 気泡間隔係数	試験体上面と側面より $\phi 150\text{mm}$ のコアを採取し, 表面より約 5mm (表層) と約 50mm (内部) の気泡組織を ASTM C457 リニアトラバース法により調査する。
コンクリート表層のスケーリング量	試験体上面と側面より採取したコアを $\phi 150 \times 80\text{mm}$ に成形し, 表層側に土手を設けて 3%NaCl 水溶液を湛水させ, $-20^\circ\text{C} \times 16$ 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)。

3. 調査結果および考察

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の試験結果を表-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%を満たし, 現況仕様である配合2, 4, 6でも新仕様との空気量の差が1.8~2.5%となった。また, 圧縮強度は新仕様とした場合にも所定の強度が得られ, 強度発現性が問題とならないことを確認した。

3.2 表層透気性

表層透気性に関する調査状況を写真-2 に示す。透気係数は試験体上面 (床版として着目) と試験体側面 (桁として着目) についてそれぞれ3箇所ずつ測定し, その平均値を図-2 に示す。一般のコンクリート構造物で測定される透気係数は品質クラス一般の $0.1 \sim 1 \times 10^{-16}\text{m}^2$ であると想定されるが, 今回の結果はいずれもその1/10~1/100ほどで品質クラス良または優に当たることが確認された。また, 一般のコンクリート構造物ではブリーディングの発生により上面の透気係数が高くなると考えられるが, 今回の調査結果はむしろ側面の透気係数が若干高まる傾向にあった。これは, 今回用いたコンクリートがノンブリーディングの配合であることから上下方向の透気性の差が小さくなること<sup>3)</sup>, 散水養生が行われる上面は透気性が低くなるが封緘養生となる側面では透気性が若干高まること<sup>4)</sup> (今回の試験体では打込み後翌日までは上面に養生マットを敷き, 蒸気養生により湿潤状態となっている) が影響したものと推察される。

なお, 透気係数は温度や含水状態の影響を受けて結果が大きく左右されることがあるが, 海外の

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 <sup>2</sup> )	
			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) 空気量の括弧内の数値は, 現況仕様と新仕様との空気量の差を示す。



写真-2 表層透気性に関する調査状況

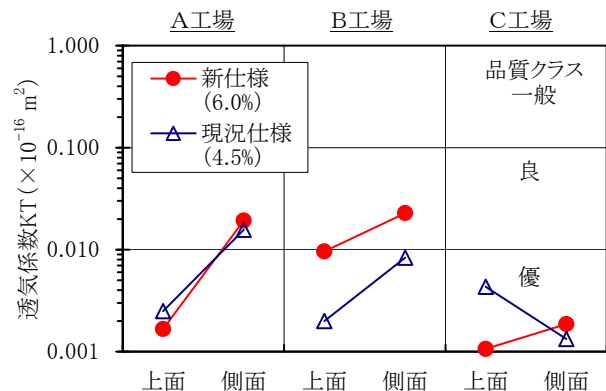


図-2 表層透気性に関する調査結果

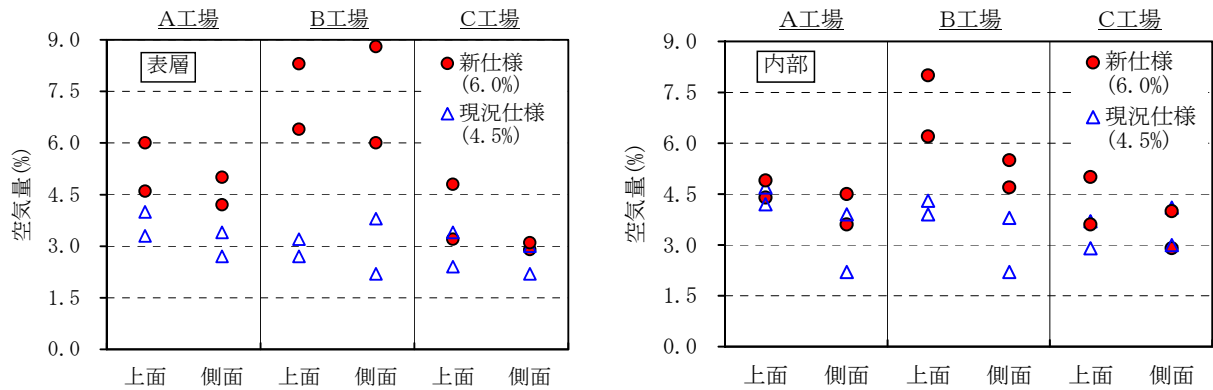


図-3 試験体表層と内部における硬化コンクリート中の空気量

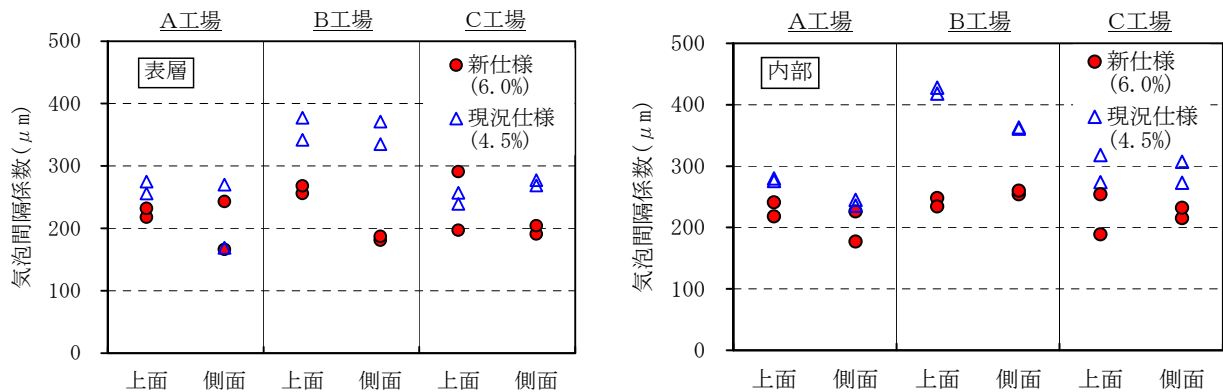


図-4 試験体表層と内部における硬化コンクリート中の気泡間隔係数

指針には実務上、①試験材齢28～90日、②コンクリート表面温度10℃（熟練者は5℃）以上で試験装置に直射日光が当たらないこと、③コンクリートの含水率が5.5%以下であることを規定している<sup>5)</sup>。本調査は材齢28日で温度10℃程度の屋内にて実施し、コンクリート含水率は4.5～6.1%であった。コンクリート含水率は12箇所中の3箇所で5.5%を上回ったが、残り9箇所については上記の規定をすべて満足するものである。したがって、今回調査した試験桁の表層品質は高いと評価できるといえる。

### 3.3 硬化コンクリート中の空気量と気泡間隔係数

試験体表層と内部の空気量と気泡間隔係数を調査した結果を図-3および図-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上面表層に着目すると、現況仕様4.5%試験体は空気量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%試験体は空気量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、上面と側面あるいは表層と内部の差異は、空気量および気泡間隔係数とも、それほど大きくないことも確認された。つまり、今回対象とした3工場の製作方法に則れば、実際のプレキャストPC桁の製作においても気泡組織が均等に分布し得ると考えられる。

図-5は、硬化コンクリート中の空気量と気泡間隔係数との両者の関係を整理したものである。

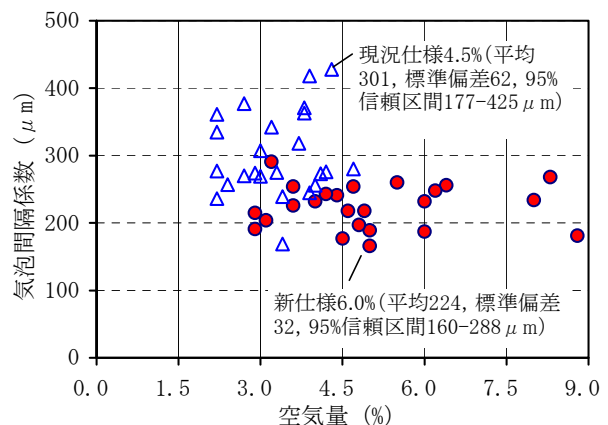


図-5 硬化コンクリート中の空気量と気泡間隔係数の関係

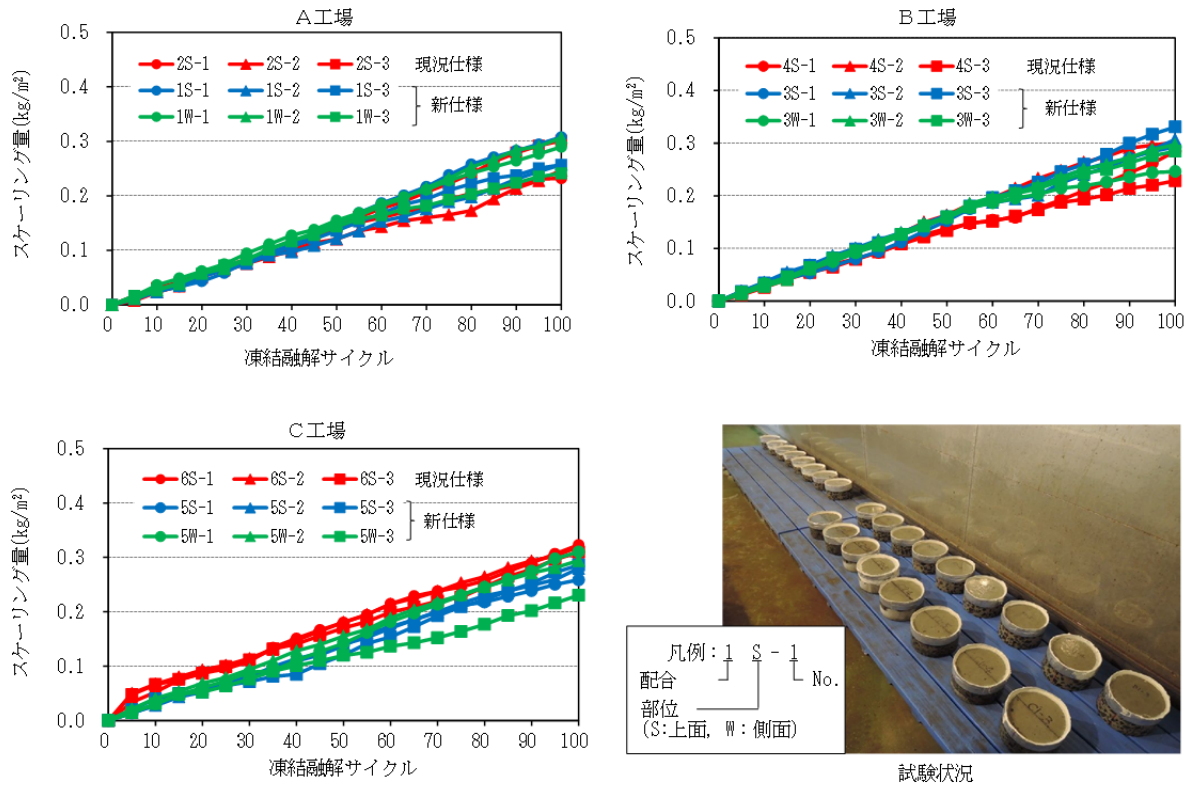


図-6 スケーリング量の推移



写真-3 スケーリング試験後の状況

表-6 目視による評価基準<sup>7)</sup>

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

現況仕様4.5%は気泡間隔係数の変動係数が20.6%となるのに対し、新仕様6.0%のそれは14.3%と小さい。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 (気泡間隔係数で概ね300  $\mu$ m以下) を安定して形成し得ると言える。

### 3. 4 コンクリート表層のスケーリング量

図-6にスケーリング量の測定結果を示す。スケーリング量は空気量や部位あるいは工場の違いによらず概ね同程度で線形的に増大し、最終100サイクルで0.23~0.33kg/m<sup>2</sup>となった。

次に、スケーリング試験後の状況を写真-3に示す。この写真には本調査の試験体と、水セメント比45%でNonAEの試験体<sup>6)</sup>を併せて示す。本調査100サイクル後の試験体は、凍結融解の影響を受けても、骨材の露出が確認されることはなかった。水セメント比45%でNonAEの試験体が凍結融解の影響を受けて表面のペースト分が剥がれ落ち骨材が露出する状況と比べると、本調査の試験体は極めて健全な状態を保つと言える。ちなみに、ASTM規格に定められる目視による評価基準に照合すると、本調査

の試験体はいずれも評価1に該当し、水セメント比45%でNonAEの試験体は評価5に相当する (表-6)。

前出の図-6に示した結果の内、試験体上面に着目して凍結融解50サイクルおよび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-7に示す。図には前述の文献6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極めて少ないことがわかる。つまり、コンクリートの水セメント比を40%以下にまで低減することで、耐凍害性がさらに向上すると言える。

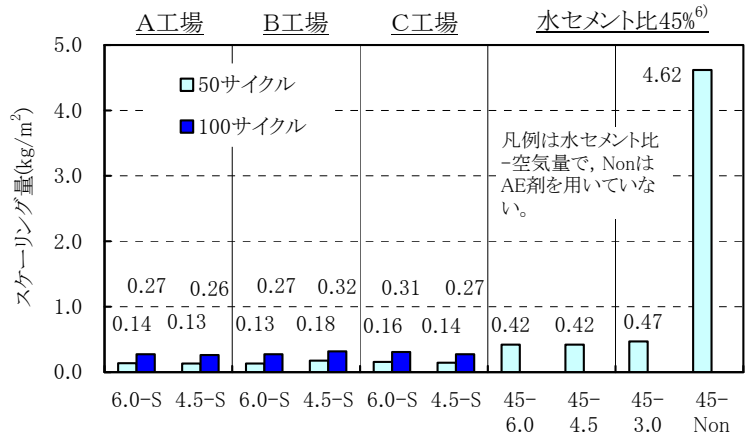


図-7 スケーリング量の比較

4. まとめ

実物大のプレキャストPC桁を製作し各種調査を行った結果、次のことが確認された。

- 1) 目標空気量を荷卸時6.0% (新仕様) としたコンクリートは、荷卸時4.5% (現況仕様) のコンクリートよりも水セメント比を1.4~2.1%低めることにより、材齢1日で35N/mm<sup>2</sup>, 材齢28日で50N/mm<sup>2</sup>が確保され、強度発現性が問題とならないことが確認された。
- 2) 上記1)のコンクリートを用いて製作した試験体の上面表層に着目すると、現況仕様4.5%試験体は空気量2.4~4.0%, 気泡間隔係数239~377μmであるのに対し、新仕様6.0%試験体は空気量3.2~8.3%, 気泡間隔係数197~291μmと改善されることが確認された。
- 3) 凍結融解試験では現況仕様4.5%試験体および新仕様6.0%試験体とも所定の試験期間でスケーリングがほとんど発生せず、試験期間を延長しても非常に耐凍害性が高いことが確かめられた。

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頂いたことに対しまして感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 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
- 2) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書施工編, pp. 355, 2013.3
- 3) 早川健司, 加藤佳孝：振動締固めにより充填されたかぶりコンクリートの品質変動に関する研究, 土木学会第65回年次学術講演会V-684, 2010.9
- 4) 松崎晋一郎, 吉田亮, 岸利治：単位水量と水セメント比がコンクリート表層の透気性に及ぼす影響とその養生依存性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 1, 2009.
- 5) 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—スイスにおける指針—, コンクリート工学, Vol. 49, No. 3, 2011.3
- 6) 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
- 7) 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.