

## [24] 海水の作用を受けるコンクリートの耐凍害性確保のための適正空気量

正会員 ○ 鮎田 耕一（北見工業大学工学部）

正会員 林 正道（北見工業大学工学部）

### 1. まえがき

連続して、あるいはしばしば飽水されるようなコンクリート構造物で、かつ侵入した水が凍るような場合には凍結融解作用に対して厳しい条件にあるため凍害を受けやすい。特に、海水の作用を受ける構造物は内陸にある構造物に比べると条件が厳しく、北海道開発局が道内のコンクリート構造物（経過年数1～9年）を対象として昭和47年から行った実態調査<sup>1)</sup>の結果では、海岸・港湾構造物はその他のものに比べて2倍以上の凍害発生率を示している。また、北海道土木技術会が海岸・港湾構造物を対象に昭和54年に行った実態調査<sup>2)</sup>では、施工から一冬経過後に調査構造物の70%にスケーリングが発生していることを明らかにしている。

このような被害の状況に対して、その対策を図るために筆者らは各種の実験を行ってきており、配合条件に関しては最大の水セメント比と適正空気量について検討してきた<sup>3)</sup>。このうち、空気量の効果についてはプレーンコンクリート及び空気量が4～5%と9～20%の広い範囲にあるAEコンクリートの場合について検討した結果を報告している。この結果、9%以上の空気量を入れることは4～5%の空気量のコンクリートに比べて、海水の作用を受ける場合でも効果が少ないことを明らかにしたが、適正空気量を求めるには至らなかった。そこで、さらに空気量4～8%のAEコンクリートの場合について検討したので、本文ではその結果について報告する。

また、併せて硬化コンクリートの気泡組織をパーソナルコンピューターを用いた画像解析システムによって測定することを試みたので、その結果についても報告する。

### 2. 使用材料、配合及び凍結融解試験方法

セメントは混合材を加えていない普通ポルトランドセメント（比重3.18、比表面積3,060cm<sup>2</sup>/g）を用いた。骨材は札内川産の川砂（比重2.64、吸水率2.10%）と川砂利（最大寸法25mm、比重2.68、吸水率1.48%）、AE剤は主成分が天然樹脂酸塩系のものを用いた。練り混ぜ水は水道水である。

用いたコンクリートの配合、練り上がり性状及び材令28日（標準養生）の圧縮強度（ $\sigma_{28}$ ）、静弾性係数（1/3割線係数、Es）を表-1に示した。

凍結融解試験は1サイクル4時間（凍結温度-18°C、融解温度+5°C）の海水又は淡水中における急速試験で標準養生材令28日から開始した。供試体寸法は10×10×40cmであり一条件につき3個用いた。ほぼ30サイクルごとに動弾性係数、長さ、質量を測定し300サイクルまで実験を行った。

### 3. 画像解析による硬化コンクリートの気泡組織の測定

硬化コンクリートの気泡組織は一般にはASTM C457によって測定されている。この方法は顕微鏡を用い肉眼で気泡の数などを測定するものであるから大変な根気が要求されるとともに、気泡かどうかの判別などに熟練さが要求される。

表-1 コンクリートの性状

配 合				練り上がり性状			硬化コンクリート	
単位	量 (kg)	w/c	s/a	スランプ	空気量 (%)	温 度 (°C)	$\sigma_{28}$ ( $\text{kg/cm}^2$ )	Es ( $\text{tf/cm}^2$ )
セメント	水	細骨材	粗骨材	(%)	(%)	(cm)	(%)	(°C)
260	138	645	1329	53.1	33.0	8.0	4.1	18.5
260	134	631	1300	51.5	33.0	8.0	6.1	18.0
260	125	621	1281	48.1	33.0	9.0	8.0	20.0
							312	278
							285	246
							308	266

表-2 硬化コンクリートの気泡組織

フレッシュコンクリートの空気量	4 %			6 %			8 %		
	A	$\alpha$	L	A	$\alpha$	L	A	$\alpha$	L
画像解析法	2.9	228	253	5.2	209	199	8.3	235	106
ASTM法	3.1	281	199	6.2	216	164	7.6	237	116

A : 空気量 (%)

 $\alpha$  : 比表面積 ( $cm^2/cm^3$ )L : 気泡間隔係数 ( $\mu m$ )

そこで本研究ではASTM法のほかにパーソナルコンピューターを用いた画像解析によって気泡組織を測定する<sup>4)</sup>ことを試み両方法の比較を行った。

試料の作製と処理：供試体を打ち込み面に垂直に切断し10 cm角の試料を作製した。ASTMの修正ポイントカウント法による測定後、画像解析用に気泡とその他の部分を区分するための処理を行った。すなわち、測定面を水性の黒色スタンプ液で着色後、約60 °Cの気中で48時間温め、白色のZnOペースト（ZnOとワセリンを等量混合）を一様の厚さに塗り、大きな気泡には指先で詰めた。常温になった後、約3 °Cの気中で1時間冷却し、気泡部分以外のペーストをセメントナイフで除去した。さらに、ペーストを完全に除去するために石膏を測定面に散布しペーストとともにセメントナイフで除去した。

以上の処理を行うことにより、気泡を白色にその他の部分を黒色に色分けした。

画像解析の方法：本実験に用いたシステムでは一画像を160 × 160 ドットに分割できるが、試料の一画像の範囲を3 × 3 mmとし、約20  $\mu m$ より大きい直径の気泡が識別できるようにした。

試験結果：画像解析法とASTM法による試験結果を表-2に示した。値は同じ配合の供試体2個の平均値であり、画像解析の処理画像数は一試料につき300面である。両方法による測定結果はほぼ同じ値を示している。一部にやや差が生じているデータもあるが、この原因がASTM法、画像解析法のどちらにあるのかは現在のところ不明である。

また、画像解析の処理画像数と得られたデータの関係を図-1に示した。この結果から200画像程度を処理すると実用上ほぼ十分な値の範囲に結果が収束するといえよう。

#### 4. 耐凍害性を得るための空気量

凍結融解試験の結果を図-2に示した。また、凍結融解開始時（材令28日）の圧縮強度と凍結融解300サイクル終了時の相対動弾性係数、長さ増加比、質量減少率を図-3に示した。長さ増加比はコンクリートの内部組織のゆるみを、質量減少率はスケーリングの影響を主に表している。

実験の結果から明らかになったことは次の通りである。なお、ここでいう空気量はまだ固まらないコンクリートのそれである。

- 1) 4～8 %の範囲で空気量が変化しても圧縮強度は変わらない。すなわち、エントレンドエアのワーカビリティ改善効果のために空気量が多いほど単位水量が少なく、結果としてW/Cが小さくなり空気連行による強度低下の

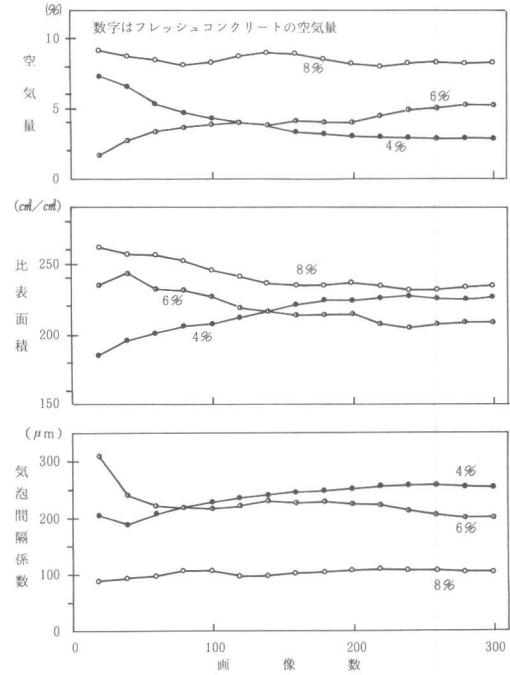


図-1 画像解析の結果

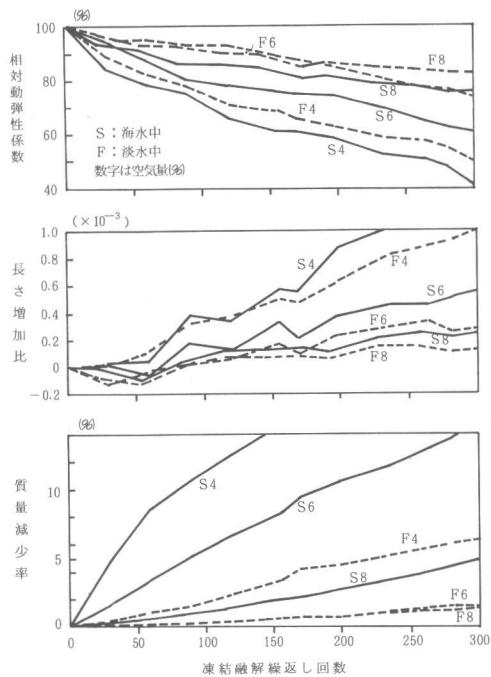


図-2 凍結融解試験結果

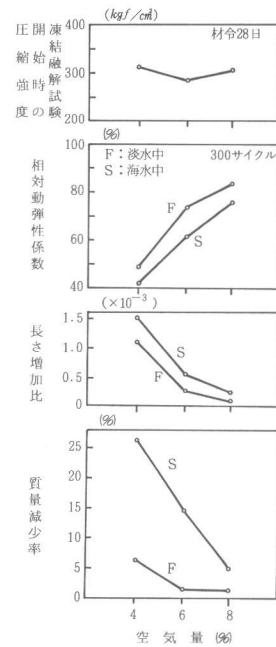
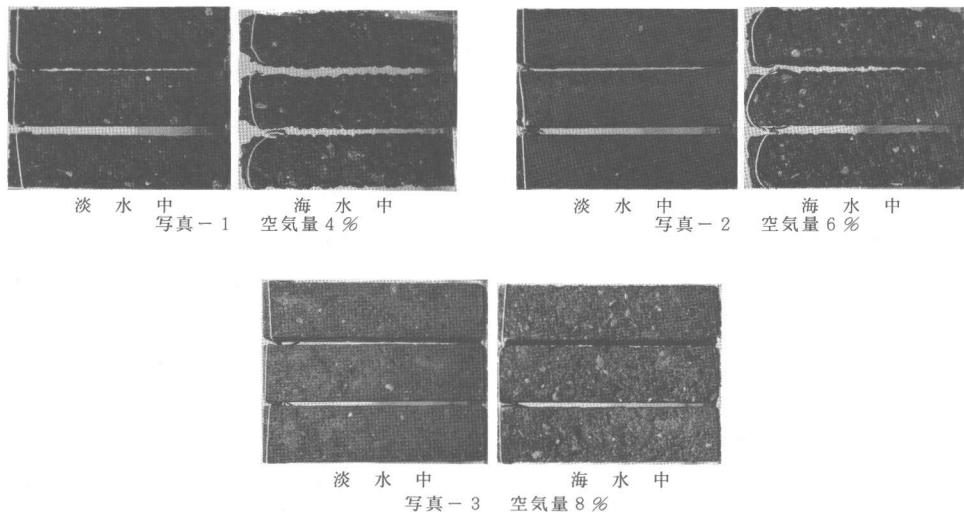


図-3 凍結融解開始時の圧縮強度と凍結融解300サイクルにおける性状



悪影響を相殺している。

2) 海水中で凍結融解作用を受けた場合には、淡水中に比べて耐久性が劣り、特にスケーリングの発生が著しい(写真-1～3参照)。これは筆者らがやって明らかにしたように<sup>5)</sup>露出面近傍のセメント硬化体中のCa(OH)<sub>2</sub>が海水の侵入によって溶出し毛細管空隙が多くなり、そのため凍結可能水量が増加することが主な原因であると思われる。

3) 4～8%までの範囲で空気量が増すほど、淡水中でも海水中でも耐凍害性は改善される。これはこの範囲の

空気量では前述のように空気量の増加に伴う強度低下がないのに加えて、空気量が多い硬化コンクリートでは気泡間隔が表-2に示したように狭く、それが凍結水による膨張圧を緩和しているためといえよう。

以上の実験結果からコンクリートの耐凍害性確保のための適正空気量について次のことがいえよう。

1) 海水の作用を受けるコンクリートの耐凍害性を確保し、特にスケーリングの抑制を図るためにには空気量は8%が望ましい。

2) 淡水の作用を受ける場合の耐凍害性も空気量が多いほど改善されるが、内部組織のゆるみ及びスケーリングを抑制するには空気量6%でほぼその目的が達せられる。

3) 土木学会のコンクリート標準示方書（昭和55年版）では、耐久性確保のための空気量として3～6%を、同示方書解説では配合のための概略値として5%（粗骨材の最大寸法25mmの場合）をそれぞれ推奨し、また、レディミクストコンクリート（JIS A 5308-78）の標準品では通常で4%、寒冷地で4.5%（粗骨材の最大寸法20～40mm）と定めている。これらはいずれも淡水、海水の作用の区別はされていない。前述の筆者らの実験の範囲から言えば、連続してあるいはしばしば飽水されるような構造物・部材の場合には、現行の土木学会の標準示方書やJISの値より多い空気量の方が望ましいことになる。ただし、実験は水中で行ったものなので、飽水されないような構造物・部材ではこれより少ない空気量であっても耐久性の確保は可能であろう。したがって、耐凍害性確保のための適正空気量は構造物・部材の露出条件によって区別することが望ましい。ちなみに、ACI 211.1-81（Standard Practice for Selecting Proportions of Normal, Heavyweight and Mass Concrete）では露出条件を、Mild, Moderate, Extremeに分けて推奨空気量を、それぞれ3.0, 4.5, 6.0%（粗骨材の最大寸法25mm）としている（海水の作用については触れていない）し、ACI 201.2R-77（Guide to Durable Concrete）でも同様の措置をとっている。我が国の規準もこのように露出条件による区分が必要と思われるし、さらに、海水の作用を受ける構造物を対象とした規準が必要となろう。

## 5.まとめ

コンクリートの耐凍害性を確保するために必要な適正空気量に関する実験と、それに付随して硬化コンクリートの気泡組織測定システムに関する検討を行った結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 連続して、あるいはしばしば飽水される構造物・部材の耐凍害性を得るために空気量（粗骨材の最大寸法25mm）は、海水の作用を受ける場合で8%、淡水の作用を受ける場合で6%が望ましい。
- 2) 耐凍害性確保のためのコンクリートの適正空気量を定めるにあたっては、構造物・部材の露出条件（海水か淡水かの違い、飽水の程度の違い）ごとに区分することが必要であろう。
- 3) パーソナルコンピューターを利用した画像解析によって硬化コンクリートの気泡組織の測定を試みた結果、特性値（空気量、比表面積、気泡間隔）はASTM法とほぼ同じ値が得られた。測定方法の確立のために、今後さらに検討を加えていく考えである。

## 参考文献

- 1) 今井益隆：コンクリート構造物の凍害調査、コンクリート工学、Vol.4. No.11, 1976.11
- 2) 佐伯昇、鯖田耕一、前川静男：北海道の海岸および港湾コンクリート構造物の凍害による表面剥離損傷、土木学会論文報告集、第327号、1982.11
- 3) 鯖田耕一、林正道：海水の作用を受けるコンクリートの凍結融解に対する耐久性、セメント技術年報35、1981
- 4) S. Chatterji, H. Gudmudsson : Characterization of Entrained Air Bubble Systems in Concretes by Means of an Image Analysing Microscope, Cement and Concrete Research, Vol. 7, 1977.7 (魚本、武若抄訳、コンクリート工学、Vol. 18, No.10, 1980.10)
- 5) 鯖田耕一、林正道：海水にさらされたコンクリート露出面の強度性状、セメント技術年報36、1982