

## 論文 高所にポンプ圧送した吹付けモルタルの塩分浸透性

桜田 良治<sup>\*1</sup>・平田 文<sup>\*2</sup>・丸山 久一<sup>\*3</sup>

**要旨**：高低差 125m の高所に、中継ポンプを使用しないで鉛直にポンプ圧送して吹付けた場合の、吹付けモルタルのポンプ圧送性や材料分離特性を現場圧送実験により解明した。また、この高所にポンプ圧送した吹付けモルタルの耐久性として、硬化後の吹付けモルタルの長期材齢での塩分浸透性、および凍結融解の繰返し作用を受けた場合の塩分浸透性について、急速塩化物イオン透過性試験を行い積算電気量の算出を試みた。

**キーワード**：吹付けモルタル、塩分浸透、急速塩化物イオン透過性試験、凍結融解

### 1. はじめに

急傾斜地や断崖などの岩肌や法面の風化を防ぐために、高所に施工されるモルタル吹付けは、ポンプ圧送により吹付け用のモルタルを所定の高さまで送った後、圧搾空気ですりこむ方法によって行われている。しかし、高所圧送や長距離圧送後に吹付けるモルタルの圧送性や長期耐久性については、まだ十分に解明されていない。

吹付けコンクリートの長期耐久性に係わる要因としては、塩分浸透を受けた吹付けコンクリートの凍結融解によるスケーリング劣化やのり棒内部の鉄筋の腐食<sup>1)</sup>、凍結融解の繰返しによる内部組織の劣化、さらに母岩自体の風化による吹付けコンクリートの剥落があげられる。

この中で、急傾斜地の高所へポンプ圧送した場合のフレッシュモルタルの材料分離および強度発現特性、ポンプ圧送後に吹付けたモルタルの耐久性、特にのり棒内部の鉄筋腐食、スケーリング劣化に係わる塩分浸透性やこれに凍結融解が加わった複合劣化については、十分な解明がなされていない状況にある。

本研究では、高低差 115m を、中継ポンプを使用しないで吹付けモルタルを鉛直にポンプ圧

送した場合の、ポンプ圧送性や材料分離特性を明らかにするとともに、圧送後に高さ 125.45m の位置で吹付けたモルタルの長期材齢での塩分浸透性を解明することを目的とする。さらに、これら硬化後の吹付けモルタルが凍結融解の繰返し作用を受けた場合の塩分浸透性についても電気泳動法に基づく急速塩化物イオン透過性試験により解明する。

### 2. 実験概要

#### 2.1 原位置圧送実験

北海道浜益郡浜益村タンパケにて、高低差 125.45m の高所へ、中継ポンプを使用しないでポンプ圧送したモルタルの現場吹付け実験を行い、フレッシュモルタルのポンプ圧送性、吹付け後のモルタルの強度発現特性を調べた(写真-1)。今回使用したポンプは、ピストン方式で 24.5 N/mm<sup>2</sup> の最大吐出圧力をもつ。吹付けモルタルのポンプ圧送前、ポンプ圧送後(高さ 115 m)、エア吹付け後(高さ 125.45m)の 3 箇所供試体を採取し(図-1)、気中養生して材齢 28 日および 7 日での圧縮強度を調べた。吹付け用のモルタルは、現地のレディーミクストコンク

\*1 秋田高専 環境都市工学科助教授 博士(工学) (正会員)

\*2 日特建設(株) エンジニアリング企画部長

\*3 長岡技術科学大学 工学部環境建設系教授 Ph.D. (正会員)



写真-1 ポンプ圧送実験現場

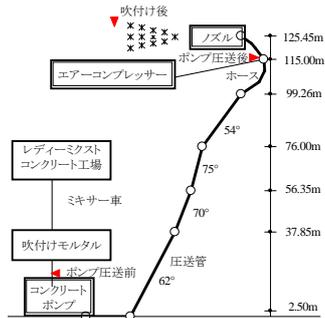


図-1 配管および供試体採取位置

リート工場で練混ぜた後に、現場までアジテータ車で 30 分搬送した。

ポンプ圧送前の供試体は、アジテータ車より採取したモルタルを鋼製モールドに打設した。高さ 115m までポンプ圧送したモルタルは、上部ステージにて鋼製モールドに打設した。エアークン吹付け後の供試体は、高さ 115m までポンプ圧送したモルタルを約 10m エアー搬送した後に、最上部ステージ（高さ 125.45m）にてネットモールドに吹付けた後にコアサンプリングした（写真-2）。本実験での吹付けモルタルの配合としては、水セメント比  $w/c=53\%$ 、セメント砂比  $C:S=1:3$  のモルタルと、水セメント比  $w/c=60\%$ 、セメント砂比  $C:S=1:4$  のモルタルの 2 種類とした。モルタルの高所圧送時の材料分離や品質の維持状況を確認するため、配合には湿式吹付け用の高性能減水剤等の混和剤は用いなかった。

## 2.2 室内実験

急速塩化物イオン透過性試験により、吹付けモルタルの塩分浸透性を評価した。所定の材齢（最大 666 日）まで水中養生した直径 10cm の



写真-2 吹付けとコアサンプリング

円柱供試体を、ダイヤモンドカッターで厚さ 5cm の円盤状に切り出した。その供試体を拡散セルで挟み込み、陽極側のセルには 0.3 規定の NaOH 溶液を、陰極側のセルには 0.5 規定の NaCl 溶液を満たした。セル間に 15V の定電圧を 6 時間かけ、供試体を通して流れる電流値を 10 分毎に測定した。実験終了後、円盤状の供試体を切断し、0.1 規定の硝酸銀水溶液を割裂断面に塗布し、その変色深さから塩化物イオン拡散係数を算出した。

また、材齢 176 日まで水中養生した円柱供試体（ $\phi 10 \times 20\text{cm}$ ）について、JIS A 1148 の A 法による凍結融解試験を 300 サイクルまで行った。凍結融解温度の管理は、温度管理用円柱供試体の中心部の温度測定を行うとともに、容器内部を水で十分に満たした。また、測定サイクル毎に供試体の位置を替えるとともに、上下を交換した。試験終了後に再び所定の材齢まで水中養生し、急速塩化物イオン透過性試験により塩分浸透に対する抵抗性の違いを検討した。

## 3. 吹付けモルタルのポンプ圧送特性と圧縮強度特性

### 3.1 ポンプ圧送特性

高低差 125.45m、水平距離 40m をポンプ圧送した後のフレッシュモルタルのスランプは、セメント砂比 1:3 モルタル ( $w/c=53\%$ ) では、ポンプ圧送前で 12.5cm、高さ 115m までポンプ圧送した後で 6.5cm、ポンプ圧送後に高さ 125.45m の位置でエアークン吹付けした後で 1.5cm となる（図-2）。そのスランプロスは、ポンプ圧送後に 48%、エアークン吹付け後に 89% となる。一方、1:4 モルタル ( $w/c=60\%$ ) のスランプロスは、高さ

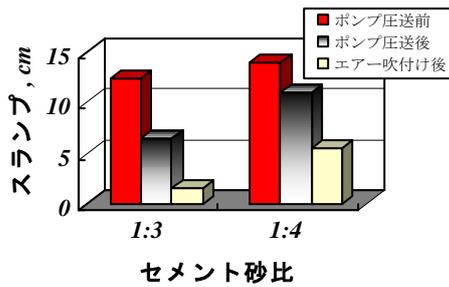


図-2 圧送箇所でのスランプ

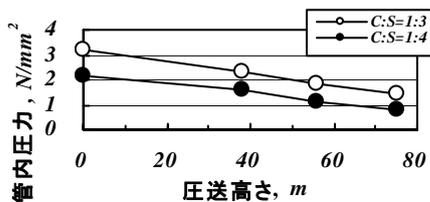


図-3 圧送箇所での管内圧力

115m までポンプ圧送した後で 21%, 最上部ステージでエア吹付け後では 60%と、セメント砂比 1:3 モルタルに比べて、スランプの低下が小さい。実験時の外気温は 21.5°C~24.0°Cで、各実験ケースとも練混ぜ開始から 30 分でモルタルをアジテータ車で現場まで搬送し、その後 30 分以内に圧送・吹付け実験を終えた。実験時、配管全てに陽が当たり、吹付けモルタルの温度は最大で約 3.5°C上昇し、これが両モルタルにおいても、ポンプ圧送時や吹付け時のスランプ低下に影響を及ぼしたと考えられる。

実験では、ピストン方式で最大吐出圧力が 24.5 N/mm<sup>2</sup> のポンプを使い、1 時間当たりの吐出量を 7.8 m<sup>3</sup>/hour としてポンプ圧送を行った。この時、各圧送位置での管内圧力は、セメント砂比 1:3 のモルタル(w/c=53%)の方が、1:4 のモルタル(w/c=60%)より平均で 47%高い(図-3)。両モルタルにおいて、圧送時の管内圧力は、ポンプ最大理論吐出圧力(24.5 N/mm<sup>2</sup>)の 80%以下で、正常な圧送が可能であった。

### 3.2 圧縮強度特性

材齢 28 日まで気中養生した円柱供試体(φ10×20cm)の圧縮強度は、セメント砂比 1:3 のモルタル(w/c=53%)では、ポンプ圧送前で 32.5 N/mm<sup>2</sup>、高さ 99.26m までポンプ圧送した後で 31.6 N/mm<sup>2</sup>、ポンプ圧送後に高さ 125.45m の位

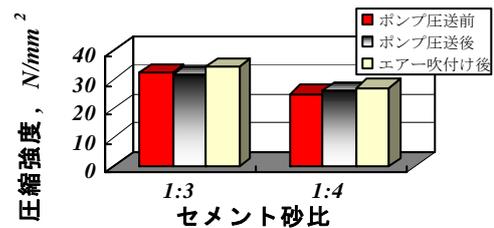


図-4 圧送箇所での圧縮強度

置でエア吹付けしたモルタルで 34.2 N/mm<sup>2</sup>と、ポンプ圧送箇所で強度発現に有意な差はない(図-4)。しかし、エア吹付け後の強度が、ポンプ圧送前に比べて 5%大きく、セメント砂比 1:4 のモルタル(w/c=60%)でも 8%大きな値をとる。さらに、両モルタルの吹付け後の単位容積質量は、圧送前に比べて 1.0~3.9%増加した。これより吹付けに伴う強度増加の要因としては、吹付け圧力により密実に充填されたことや圧送時の空気量の減少などが考えられる。

## 4. ポンプ圧送した吹付けモルタルの塩分浸透性

### 4.1 吹付けモルタルの塩分浸透性

急速塩化物イオン透過性試験における 6 時間通電時の吹付けモルタルの積算電気量  $C_t$  (Coulomb)と材齢 28 日で基準化した経過時間  $t/28$  ( $t$ : 材齢(日))との関係を図-5 に示す。セメント砂比 1:3 の積算電気量は、材齢の進行による吹付けモルタルの組織の密化に伴い次第に減少する。また、高さ 115m までポンプ圧送した後のモルタルの材齢 145 日~666 日までの積算電気量の平均は、ポンプ圧送前に比べて 5%程度大きな値をとる。さらに、ポンプ圧送後に高さ 125.45m でエア吹付けしたモルタルの積算電気量は、ポンプ圧送前および高さ 115m までポンプ圧送したモルタルに比べて、18%程度小さな値を示す。エア吹付け後の積算電気量が、ポンプ圧送前および圧送後に比べて小さいのは、吹付け圧により密実に充填されたことと空気量の減少などが影響したものと考えられる。

ここで、硬化した吹付けモルタルが、凍結融解の繰返し作用を受けた場合の、塩分浸透に対する抵抗性について検討した。材齢 176 日まで

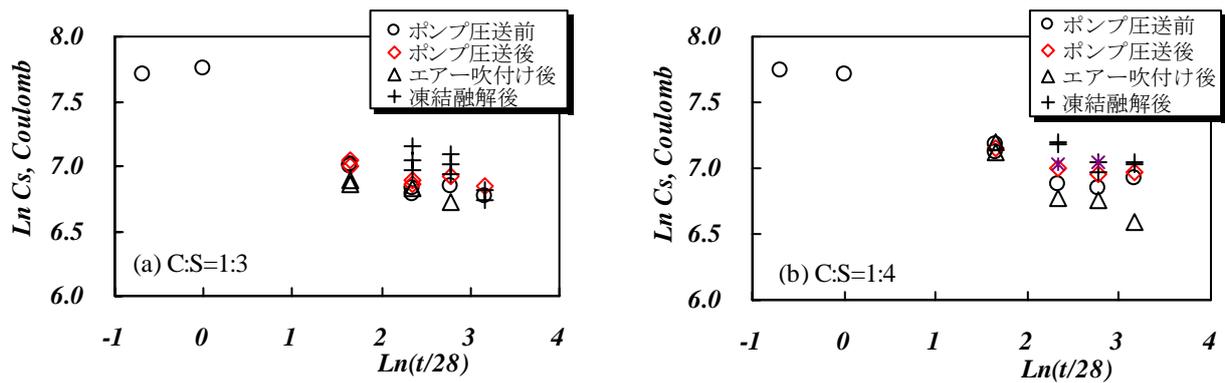


図-5 積算電気量の材齢に伴う変化 (a)C:S=1:3, (b)C:S=1:4

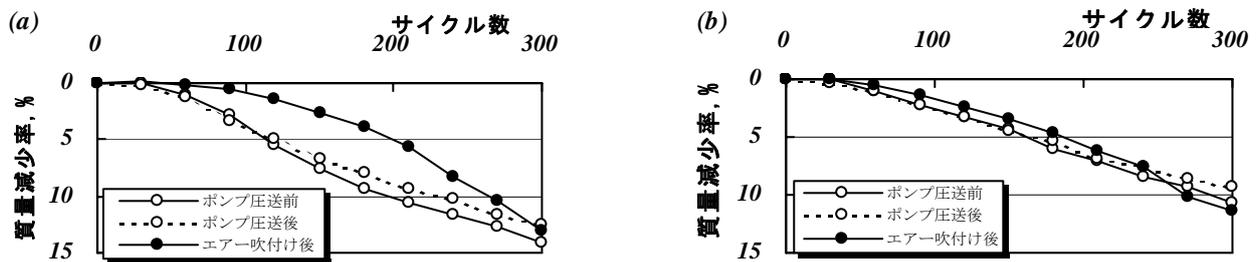


図-6 凍結融解による質量減少率 (a)C:S=1:3, (b)C:S=1:4

水中養生した円柱供試体について、水中凍結水中融解による凍結融解試験を実施した。

その結果、凍結融解サイクルが300サイクルでの質量減少率は、セメント砂比1:4のポンプ圧送前のモルタル供試体で11%、ポンプ圧送後で10%、エア吹付け後で12%であり、質量減少率に圧送箇所での有意な差はない(図-6(b))。また、セメント砂比1:3のモルタルでも、凍結融解による質量減少率に、圧送箇所での有意な差は認められなかった(図-6(a))。

相対動弾性係数は、セメント砂比1:3のモルタル(ポンプ圧送前、圧送後)において凍結融解サイクルとともに緩やかに減少し、210サイクルで89%を示した。240サイクル以降は、供試体表面の剥離などにより正常な測定が不能となり、質量減少率のみを測定した。セメント砂比1:4のモルタルでも同様の傾向を示したが、吹付け後供試体の相対動弾性係数の低下率は、1:3のモルタルより大きい傾向にあった。

このような凍結融解の繰返し作用を受けた吹付けモルタル(材齢290日)の積算電気量は、凍

結融解作用を受けていないものに比べて、セメント砂比1:3のモルタルでは25%大きく、1:4のモルタルでは28%大きい(図-5)。

また、同じ材齢で凍結融解の繰返し作用を受けたモルタル供試体の中でも、ポンプ圧送後に高さ125.45mでエア吹付けしたモルタルとポンプ圧送する前のモルタルの積算電気量を比べると、セメント砂比1:3のモルタルがエア吹付けした後では8%小さな値を示し、セメント砂比1:4のモルタルでは、16%小さな値を示すことが判明した。

#### 4.2 吹付けモルタルの急速塩化物イオン透過性試験での積算電気量

中継ポンプを使わずに、高低差115mを鉛直にポンプ圧送した後に吹付けたモルタルの、長期材齢での塩分浸透に係わる積算電気量の算出を試みる。急速塩化物イオン透過性試験で6時間通電したときの積算電気量は、材齢の進行とともに減少していく(図-5)。

ここでは、材齢に伴う積算電気量 $C_s$ の経時変

表-1 吹付けモルタルの圧縮強度，スランプおよび積算電気量

| w/c (%) | 試料採取位置 | $f'_{c28}$<br>28 day<br>N/mm <sup>2</sup> | $f'_{c7}$<br>7 day<br>N/mm <sup>2</sup> | $[w/c][f'_0/f'_{c28}]$ | スランプ<br>cm | 積算電気量<br>標準養生<br>Coulomb | 積算電気量<br>凍結融解後<br>Coulomb |
|---------|--------|---|---|------------------------|------------|--------------------------|---------------------------|
| 53      | ポンプ圧送前 | 32.5                                      | 21.2                                    | 0.411                  | 12.5       | 945                      | 1119                      |
| 53      | ポンプ圧送後 | 31.6                                      | 20.8                                    | 0.423                  | 6.5        | 1012                     | 1204                      |
| 53      | エア吹付け後 | 34.2                                      | 22.9                                    | 0.390                  | 1.5        | 828                      | 1026                      |
| 60      | ポンプ圧送前 | 25.2                                      | 14.9                                    | 0.600                  | 14.0       | 944                      | 1067                      |
| 60      | ポンプ圧送後 | 26.1                                      | 15.3                                    | 0.579                  | 11.0       | 1056                     | 1147                      |
| 60      | エア吹付け後 | 27.3                                      | 20.8                                    | 0.554                  | 5.5        | 861                      | 1145                      |

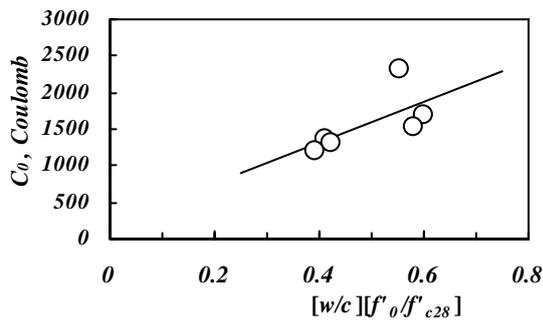


図-7 実験定数  $C_0$  と  $[w/c][f'_0/f'_{c28}]$  の関係

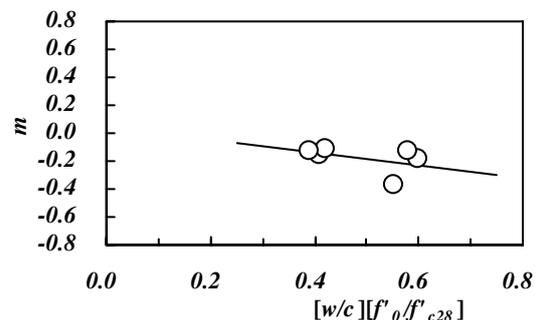


図-8 実験定数  $m$  と  $[w/c][f'_0/f'_{c28}]$  の関係

化を材齢  $t$  のべき関数で近似した。

$$C_s = C_0 (t/28)^m \quad (1)$$

ここに、 $C_s$ ：材齢  $t$  日における急速塩化物イオン透過性試験での 6 時間積算電気量 (Coulomb)， $t$ ：吹付けモルタルの材齢(日)， $C_0$ ：材齢 28 日( $t/28=1.0$ )における 6 時間積算電気量 (Coulomb)， $m$ ：実験定数である。

吹付けモルタルの 6 時間積算電気量  $C_s$  は、吹付けモルタルの水セメント比  $w/c$ ，ポンプ圧送した後の材料分離状況，エア吹付け後のモルタルの締固め状況などに支配される。

ここで、ポンプ圧送前とポンプ圧送後(高さ 115m)のセメント砂比 1:3 ( $w/c=53\%$ )のモルタルの材齢 28 日における圧縮強度を比較すると、ポンプ圧送後の方が約 3% 小さい(表-1)。また、エア吹付け後(高さ 125.45m)の供試体では、ポンプ圧送前の供試体に比べて、約 5% の圧縮強度の増加が認められる。このことから、ポンプ圧

送後の吹付けモルタルの材料分離状況や、吹付け後の締固め状況と圧縮強度との間には、密接な相関があると考えられる。

そこで、式(1)の積算電気量の経時変化式における実験定数  $C_0$ ， $m$  を、吹付けモルタルの水セメント比  $w/c$  と、各圧送箇所での吹付けモルタルの材齢 28 日における圧縮強度比  $f'_0/f'_{c28}$  の関数として表した(図-7，8)。回帰式は、表-1 に示すように、試料採取位置 3 ケース，水セメント比 2 ケースの全データより算出した。

$$C_0 = 2789.088[w/c][f'_0/f'_{c28}] + 193.224 \quad (2)$$

$$m = -0.452[w/c][f'_0/f'_{c28}] + 0.044 \quad (3)$$

圧縮強度比  $f'_0/f'_{c28}$  として、各圧送箇所での材齢 28 日における圧縮強度  $f'_{c28}$  に対するセメント砂比 1:4 ( $w/c=0.60$ ) のモルタル (ポンプ圧送前) の材齢 28 日における圧縮強度  $f'_0$  の比とした。この値は、セメント砂比 1:4 のポンプ圧送前の圧縮強度  $f'_0$  を基準として表したもので、圧

縮強度  $f'_{c28}$  の小さい吹付けモルタルに対しては、大きい値を示す。この圧縮強度比  $f'_o/f'_{c28}$  と水セメント比  $w/c$  の関数として積算電気量経時変化式の実験定数を表すことで、吹付けモルタルのポンプ圧送後の材料分離状況や、吹付け後の締固め状況の影響を考慮することができる。

Mangat P. S.らは、コンクリートの塩化物イオン拡散係数  $D_c$  の経時変化を材齢  $t$  のべき関数で近似し ( $D_c = D_i t^m$ )、式中の実験定数  $m$  は、水セメント比に強く依存することを明らかにしている<sup>2)</sup>。ここでは、水セメント比のみを変数としていて、コンクリートの締固め条件や施工条件は考慮されていない。

式(1)～式(3)より算出した、ポンプ圧送後に吹付けたモルタルの6時間積算電気量の値は、セメント砂比 1:3 のモルタルでは実測値と最大で±9%、セメント砂比 1:4 のモルタルでは±20%の誤差範囲にある。今回は、説明変数として吹付けモルタルの水セメント比  $w/c$  とポンプ圧送後および吹付け後の締固め状態を表す圧縮強度比  $f'_o/f'_{c28}$  のみを取り上げたが、本算出モデルの精度を上げるためには実測データを積み重ねるとともに、ポンプ圧送時の材料分離や空気量の変化、および吐出量などの影響についても考慮する必要がある。

また、吹付けモルタルの塩分浸透には、吹付け時に発生するモルタル中の大空隙やサンドポケットの影響を考慮する必要がある。例えば、材齢 145 日における塩化物イオン拡散係数と積算電気量の関係において(図-9)、供試体中に散在する大空隙位置(○, △印)での塩化物イオン拡散係数は、モルタルの基質部分より 1.5~4 倍大きい値をとる。このため、吹付けモルタルの塩分浸透性は、モルタル基質部分の動態に加えて、大空隙やサンドポケットによる塩分浸透の局所性も考慮して評価する必要がある。

## 5. まとめ

本結果を要約すると、以下のとおりである。

(1) 高低差 115m を、中継ポンプを使用しないで

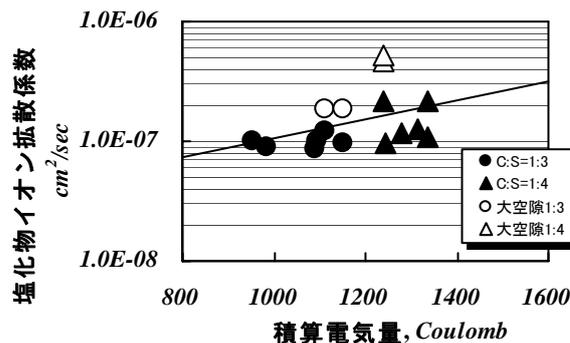


図-9 塩化物イオン拡散係数と積算電気量の関係

ポンプ圧送した吹付け用モルタル(セメント砂比 1:4  $w/c=60$  %)のスランプロスは、高さ 115m までポンプ圧送した後で 21%、高さ 125.45m でエア吹付けした後に 60%と、セメント砂比 1:3 のモルタル( $w/c=53$  %)に比べて、スランプの低下が小さく抑えられる。また、エア吹付け後におけるモルタルの圧縮強度が、ポンプ圧送前、ポンプ圧送後に比べてセメント砂比 1:3 のモルタルでは 5%、1:4 で 8%大きくなる。

(2) エア吹付け後のモルタル中に散在する大空隙位置での塩化物イオン拡散係数は、吹付けモルタルの基質部分より 1.5 倍~4 倍大きく、塩分浸透には局所性が認められる。

(3) 急速塩化物イオン透過性試験での 6 時間積算電気量  $C_s$  の経時変化は、材齢  $t$  の、べき関数  $C_s = C_0(t/28)^m$  で近似できる。このうち、実験定数  $C_0, m$  は、吹付けモルタルの水セメント比  $w/c$ 、および吹付けモルタルのポンプ圧送前の 28 日強度  $f'_o$  と、ポンプ圧送後および吹付け後の 28 日強度  $f'_{c28}$  との圧縮強度比  $f'_o/f'_{c28}$  の関数で表すことができる。

$$C_0 = 2789.088[w/c][f'_o/f'_{c28}] + 193.224$$

$$m = -0.452[w/c][f'_o/f'_{c28}] + 0.044$$

現場実験に際し御協力をいただきました、北海道開発局滝川道路事務所に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) Glassgold I. L.: Shotcrete Durability, Concrete International, Vol.11, No.8, pp.78-85, 1989
- 2) Mangat P.S. and Molloy B.T.: Prediction of Long Term Chloride Concentration in Concrete, Mater. and Structures, No.27, pp.338-346, 1994