

論文

[1101] コンクリート表層部の品質評価に関する基礎的研究

正会員 〇月永洋一 (八戸工業大学工学部)  
 正会員 庄谷征美 (八戸工業大学工学部)  
 正会員 杉田修一 (八戸工業大学工学部)  
 正会員 笠井芳夫 (日本大学生産工学部)

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性については、コンクリート表層部の品質が極めて重要であることが認識されており、表層部の品質をどのようにとらえるかが課題となっている。また、品質評価のための試験は、構造物の品質管理や維持管理の立場上、躯体に与える損傷が少なく、広範な部分からの情報収集が可能で、経済性や時間的制約からも簡便に実施できるものが望ましい。

筆者らは、コンクリート表層部の品質を、力学的特性と細孔構造や中性化等の物理・化学的特性の二面からとらえようとしており、特に、試験の簡易性を重視して、前者の見地から接着引張強度試験(Pull-off法)および後者の見地から簡易透気性試験(Figg法)について検討を進めている。

本報は、海岸地および内陸地の凍害環境下に暴露した種々のコンクリートについて、接着引張強度試験と各種の強度推定を目的とした非破壊試験等および簡易透気性試験とポロシチー試験の結果を対比、検討し、上記二試験による特性値が表層部の品質評価のための指標となり得るかを考察したものである。

2. 実験方法

2. 1 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント、粗骨材は碎石(最大寸法25mm、粗粒率6.90、比重2.71)細骨材は陸砂(粗粒率2.74、比重2.57)を使用した。混和剤はA E剤(ヴィンソル)を使用、一部については、高性能減水剤も併用した。本実験には強度および耐久性に影響を与えらる混和材および塩分を混入した供試体も作製した。混和材は表1に示す4種類を、混入塩分は人工海水(Cl<sup>-</sup>量換算で1.98%)を使用した。

表 1. 混和材の品質

混和材		比重	比表面積 F (cm <sup>2</sup> /g)	化学成分(%)								
種類	記号			ig. loss	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	S	C
シリカフューム	S	2.03	28×10 <sup>4</sup>	0.7	90.6	0.3	3.1	0.3	0.3	—	—	1.5
高炉スラグ	B4	2.90	4,250	1.2	33.3	12.5	0.4	41.6	6.4	0.0	0.8	—
	B8	2.91	8,350	0.3	34.9	13.5	0.4	41.6	6.5	0.0	0.9	—
フライアッシュ	F	2.13	3,300	3.0	58.9	26.7	3.5	2.6	0.3	—	—	—

表 2. 基本コンクリートの調(配)合〔塩分無混入〕

記号	混和材	置換率 A/C+A (%)	スラン プ (cm)	空気量 (%)	水結合 材比 W/C+A (%)	細骨材 率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )					
							水 W	結合材 C+A	細骨材 S	粗骨材 G	A E剤	高性能 減水剤
50CNON	—	—	8.0	3.2	50	41	175	350	721	1094	0.067	—
50SNON	S	10	8.2	2.4	50	41	175	350	714	1084	0.147	3.50
60CNON	—	—	7.8	3.2	60	43	177	295	773	1081	0.024	—
60SNON	S	10	6.4	3.2	60	43	177	295	767	1073	0.118	2.95
60B4NON	B4	45	8.5	2.8	60	43	176	293	771	1077	0.059	—
60B8NON	B8	45	8.5	3.4	60	43	180	300	764	1068	0.090	—
60FNON	F	20	8.5	2.9	60	42.5	165	275	775	1106	0.171	—

2. 2 コンクリートの調(配)合  
 基本コンクリートの調(配)合を表2に示す。表2の各種調(配)合に加えてそれぞれ人工海水をCl<sup>-</sup>量換算で1.2kg/m<sup>3</sup>混入したのもも作製した。調(配)合は目標スランプ8cm、目標空気量3.0%と統一した。供試体は打設後2日で脱型

し、材令7日まで水中養生、更に、材令28日まで室内で湿布養生した。その後供試体は、材令1ヵ月（1988年12月）より、八戸市の海岸部と内陸部の2地点に暴露した。暴露地点海岸部は汀線より約25mの砂地盤上、内陸部は海岸線からの最短距離が約5kmの3階建の建物の屋上とした。

## 2. 3 試験項目および方法

試験は、次に示す9項目について実施した。試験材令は、養生終了時の材令28日、3ヵ月、6ヵ月および1年であるが、表面反発度試験と貫入抵抗試験については材令3ヵ月より、簡易透気性試験は材令6ヵ月より実施した。

①接着引張強度試験：概要を図1に示す。10×40×50cm供試体にコアビットにより径50mm、深さ15mmの円形溝を明け、円型鋼片をエポキシ樹脂接着剤で接着、24時間経過後建研式接着力試験機を用いて引張り、最大荷重を破断面積で除して接着引張強度とした。

②表層強度試験<sup>1)</sup>：概要を図1に示す。10×40×50cm供試体に逆円錐台型鋼片を予め埋め込み、建研式接着力試験機による引抜き時の最大荷重を鋼片上端面積で除して強度を求め、強度と厚さの関係から深さ7mmに対応する値を表層強度とした。

③簡易透気性試験<sup>2)</sup>：概要を図2に示す。10×40×50cm供試体に径5mm、深さ35mmの試験穴を設け、真空ポンプで穴内部の空気を抜取り、真空度が140mmHgから170mmHgまで低下する時間を計測して単位時間当たりの低下量を求め、簡易透気速度とした。

④圧縮強度試験：JIS A1108に準じた。

⑤表面反発度試験：15×40×50cm供試体についてシュミットハンマー法により実施した。

⑥貫入抵抗試験：10×40×50cm供試体についてASTM C803-82を参考にスプリング反発式による貫入抵抗試験機により貫入深さを測定した。

⑦超音波伝播速度試験：10×10×40cm供試体について超音波パルス表面法により実施した。

⑧動弾性係数試験：10×10×40cm供試体についてたわみ振動法により実施した。

⑨ポロシチー試験：接着引張強度試験終了後の破壊片から試料を採取、水銀圧入式ポロシメータにより総細孔容積を測定した。

## 3. 結果および考察

### 3. 1 経時変化特性

接着引張強度、表層強度、簡易透気速度および総細孔容積の経時変化を調査記号60Cを一例として図3～図6に示す。全体として、接着引張強度および表層強度は材令の経過と共に増加の傾向を示すが、簡易透気速度および総細孔容積の値は大きくなり、強度は伸びても細孔構造は粗大化する傾向を示す。材令3ヵ月は暴露期間2ヵ月目で冬期間にあたり、温度記録によると凍結融解作用を20回程度受けていることが認められ、接着引張強度および表層強度に若干その影響がみられる。しかし、その後の材令経過による強度発現は順調であり、一時的な品質変化が極く表層部でのみで生じていたことを推察させる。

### 3. 2 調（配）合条件および暴露条件の影響

圧縮強度および貫入深さを例にとり接着引張強度との関係を図7に示す。また、総細孔容積と簡易透気速度との関係を図8に示す。図3～図6を含めて考えると、初期（混入）塩分は全般に長

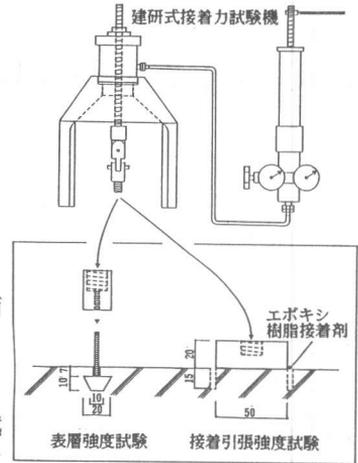


図1. 接着引張強度試験および表層強度試験

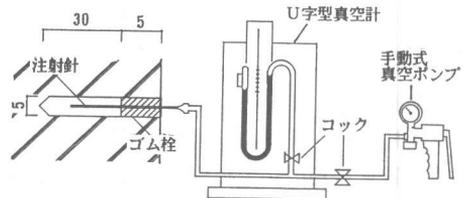


図2. 簡易透気性試験

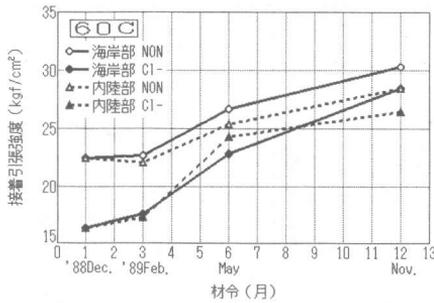


図 3.接着引張強度の経時変化

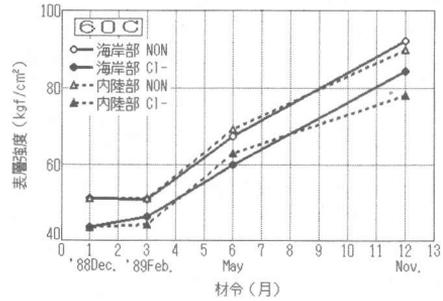


図 4.表層強度の経時変化

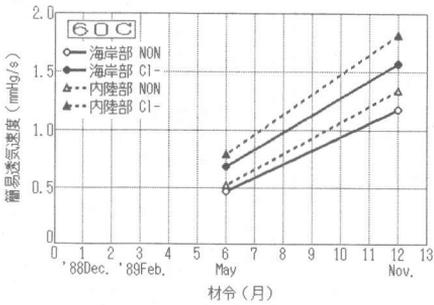


図 5.簡易透気速度の経時変化

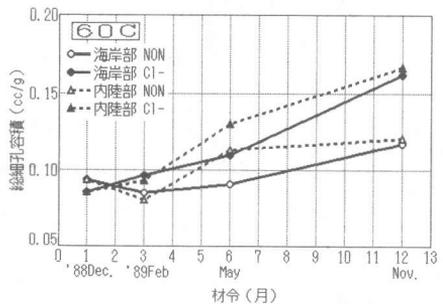


図 6.総細孔容積の経時変化

期的な強度度発現に影響を及ぼしていることが伺えると共に、細孔径や細孔容積の増大、これによる透気性の増加など耐久性を損わせる組織や構造の変化をもたらしているようである。調合種別による場合、シリカフューム、微粉碎スラグ( $F=8,000\text{cm}^2/\text{g}$ )を混和した50S、60S、60B8では、圧縮強度および表層部の強度の伸びが大きく、細孔構造の緻密化も伺え、表層部品質の改善効果がみられる。フライアッシュ、高炉スラグ( $F=4,000\text{cm}^2/\text{g}$ )を混和した60F、60B4では、この様な傾向はみられず、活性発現の遅れに加え、冬期間の気象作用による品質低下の影響を長期的に受けたことが主原因と推察される。暴露条件の違いでは、内陸部の場合海岸部に比べ、表層部の強度はやや小さく、簡易透気速度は大きな値を示す傾向にある。内陸部では海岸部に比べ、年間を通じて湿度が若干低く、冬期間は気温も幾分低いため、気象条件の差が影響したと推察される。

### 3. 3 表層部の強度特性および透気性と他物性値の関係

本研究で測定した全試験値のデータ間相関行列を表3に示す。表中には接着引張強度との相関を各調合別に求めた結果も併記した。表によると、接着引張強度と高度に有意な相関を示す項目は、材令ごとおよび全データによる場合、表層強度をはじめ、圧縮強度、反発度、動弾性係数などがある。簡易透気速度の場合は、図8も参照すると、総細孔容積が有意な相関を示していることが分る。接着引張強度について調合別の相関をみると、図7からも分るように貫入深さが比較的高い相関関係にあることも認められる。また、圧縮強度との相関が最も高く、接着引張強度試験は、圧縮強度推定のための局部破壊試験としても有用であることを裏付けている。

### 3. 4 接着引張強度と表層強度の関係

図9および図10にこれらの関係を示したが、全般に両者の相関は高度に有意であるものの、接着引張強度の変化に対し、表層強度の変化が大きく、また、直線関係式を代入すると材令ごとに勾配変化があつて、両者の変化が必ずしも対応していないことが分る。これは、主に両者の破壊機構が異なることによるものと考えられる。しかし、この程度のバラツキを許容した場合、表層強度に関し菅原<sup>1)</sup>らの指摘する凍害劣化判定の強度指標としての有用性を、接着引張強度にも期

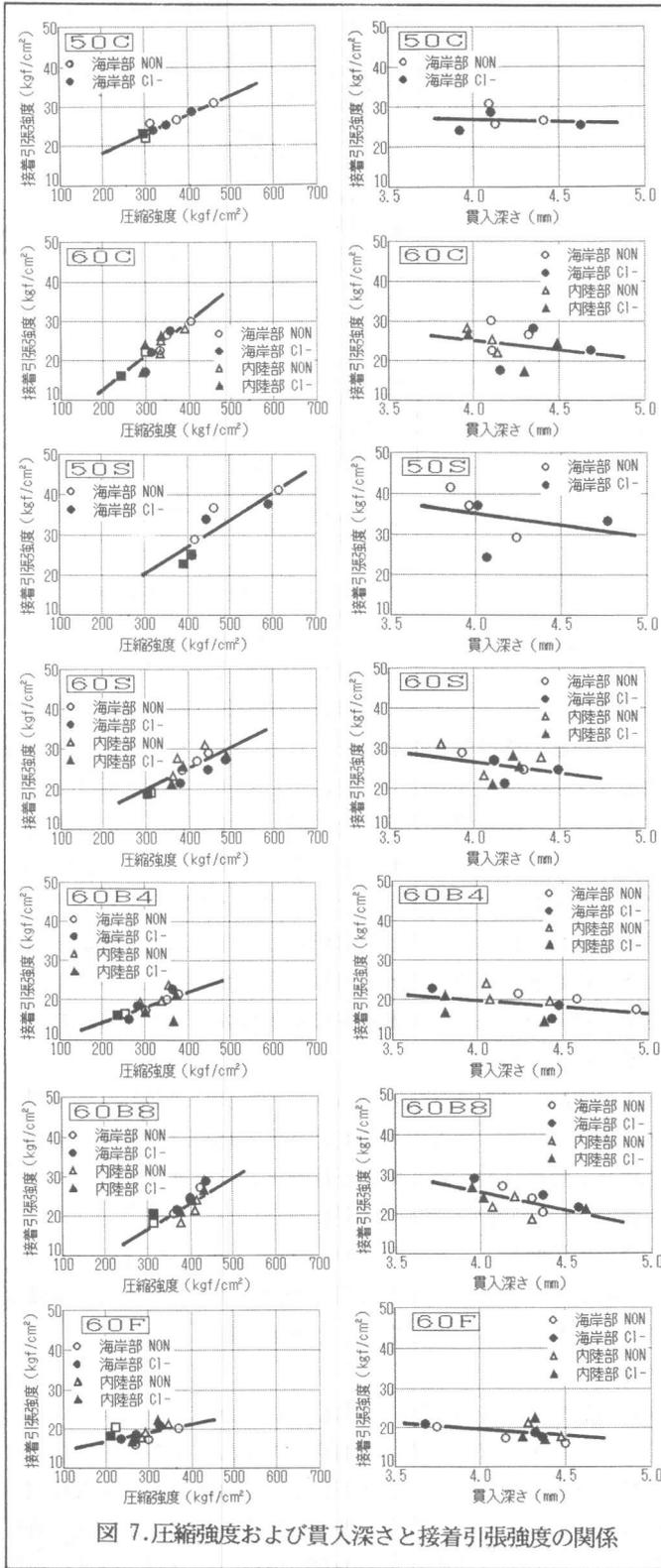


図 7. 圧縮強度および貫入深さと接着引張強度の関係

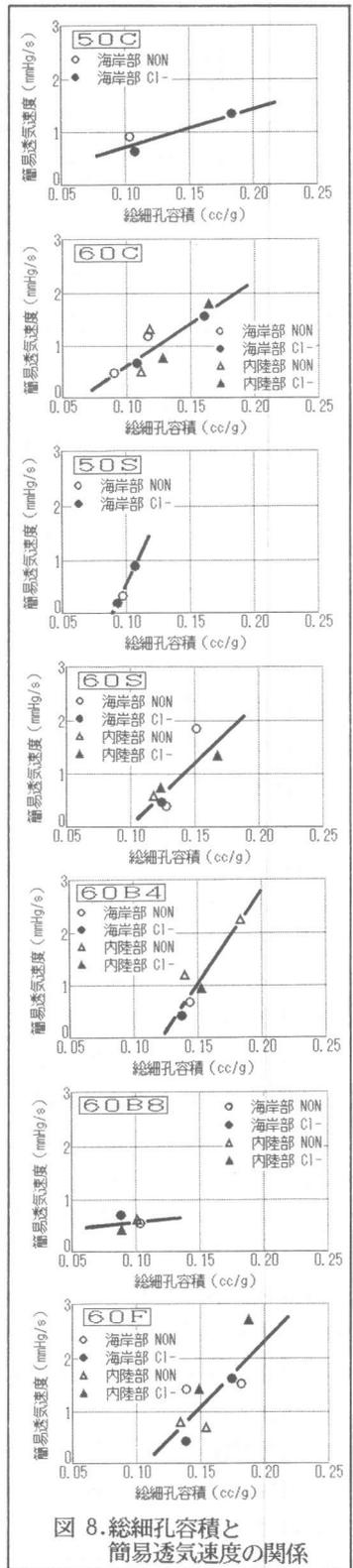


図 8. 総細孔容積と簡易透気速度の関係

表 3. データ間相関マトリックス

①材令28日 ②材令3ヶ月 ③材令6ヶ月 ④材令1年 ⑤全データ \* : 有意水準 5% \*\* : 有意水準 1% 有意

	表層強度	圧縮強度	反発度	貫入深さ	音速	動弾性係数	総細孔容積	簡易透気速度
接着引張強度	① 0.784** ② 0.778** ③ 0.634** ④ 0.701** ⑤ 0.757**	① 0.719** ② 0.764** ③ 0.786** ④ 0.869** ⑤ 0.854**	① ---- ② 0.732** ③ 0.817** ④ 0.437* ⑤ 0.714**	① ---- ② -0.506* ③ 0.151 ④ -0.047 ⑤ -0.301*	① 0.276 ② 0.495** ③ 0.627** ④ 0.455** ⑤ 0.262*	① 0.402 ② 0.650** ③ 0.645** ④ 0.564** ⑤ 0.404**	① -0.476 ② -0.565** ③ -0.703** ④ -0.720** ⑤ 0.098	① ---- ② ---- ③ -0.605** ④ -0.492* ⑤ -0.071
表層強度		① 0.794** ② 0.692** ③ 0.739** ④ 0.641** ⑤ 0.756**	① ---- ② 0.467* ③ 0.711** ④ 0.315 ⑤ 0.645**	① ---- ② -0.047 ③ -0.058 ④ -0.156 ⑤ -0.476**	① 0.540* ② 0.431* ③ 0.586** ④ 0.310 ⑤ 0.105	① 0.507* ② 0.425* ③ 0.571** ④ 0.493* ⑤ 0.131	① -0.476 ② -0.737** ③ -0.729** ④ -0.384 ⑤ 0.544**	① ---- ② ---- ③ -0.403* ④ -0.468* ⑤ 0.472*
圧縮強度			① ---- ② 0.607** ③ 0.753** ④ 0.572** ⑤ 0.709**	① ---- ② -0.308 ③ -0.022 ④ -0.089 ⑤ -0.345**	① 0.593* ② 0.696** ③ 0.684** ④ 0.584** ⑤ 0.351**	① 0.558* ② 0.727** ③ 0.531** ④ 0.536** ⑤ 0.357**	① -0.391 ② -0.757** ③ -0.670** ④ -0.608** ⑤ 0.069	① ---- ② ---- ③ -0.585** ④ -0.451* ⑤ 0.027
反発度				① ---- ② -0.573** ③ -0.115 ④ -0.117 ⑤ -0.487**	① ---- ② 0.567** ③ 0.656** ④ 0.249 ⑤ 0.413**	① ---- ② 0.721** ③ 0.557** ④ 0.101 ⑤ 0.460**	① -0.542** ② -0.770** ③ -0.561 ④ -0.561 ⑤ -0.037	① ---- ② ---- ③ -0.568** ④ -0.156 ⑤ 0.238
貫入深さ					① ---- ② -0.318 ③ 0.000 ④ -0.133 ⑤ -0.229	① ---- ② -0.569** ③ 0.168 ④ -0.125 ⑤ -0.205	① ---- ② -0.039 ③ -0.168 ④ 0.029 ⑤ -0.313*	① ---- ② ---- ③ -0.214 ④ -0.050 ⑤ -0.489**
音速						① 0.893** ② 0.827** ③ 0.804** ④ 0.662** ⑤ 0.728**	① -0.293 ② -0.632** ③ -0.701** ④ -0.413 ⑤ -0.506**	① ---- ② ---- ③ -0.534** ④ -0.251 ⑤ 0.235
動弾性係数							① -0.337 ② -0.555** ③ -0.645** ④ -0.561* ⑤ -0.436**	① ---- ② ---- ③ -0.519** ④ -0.507* ⑤ -0.220
総細孔容積								① ---- ② ---- ③ 0.552** ④ 0.607* ⑤ 0.767**
接着引張強度	50C 0.950** 60C 0.938** 50S 0.937** 60R4 0.910** 60R8 0.900** 60F 0.644*	0.951** 0.881** 0.872** 0.883** 0.884** 0.534*	-0.307 0.020 0.708 0.816** 0.877** 0.855**	-0.130 -0.223 -0.292 -0.430 -0.614* -0.502	-0.024 -0.283 -0.169 -0.072 -0.295 0.526	0.090 0.291 -0.071 -0.212 -0.528 0.430		

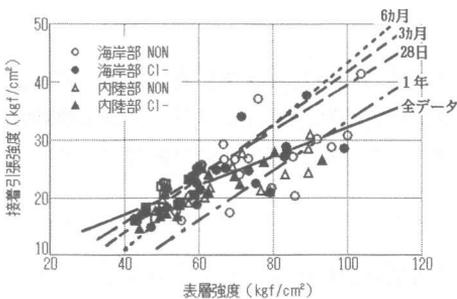


図 9. 表層強度と接着引張強度の関係

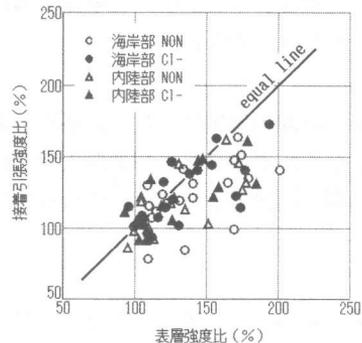


図10. 表層強度比と接着引張強度比の関係

待できると考えられ、試験の簡易性からも現場での活用が有視観できると思われる。

### 3. 5 簡易透気速度とポロシティーの関係

図11は、全データによる総細孔容積と簡易透気速度の関係を示したものである。図8、表3にもみられるように簡易透気速度は細孔構造と密接な関係を有していることが分る。図12は、簡易透気速度の逆数を透気抵抗性と考え、かさ容積に対する細孔容積比を気孔率(ポロシティー)Pとして

表すと、Parrot<sup>3)</sup>の提唱する $\alpha P^{-4}$ の関係が概略成立することを示したものである。係数 $\alpha$ は、10倍程度の幅を有するが、これは供試体の含水程度に大きく依存しているためと考えられる。しかしながら、組織・構造面からの耐久性判定の一指標として簡易透気速度が有用であることを示すものと判断される。

#### 4. まとめ

1年間供試体を暴露し、表層部品質について種々の検討を行なった。結果をまとめると次のとおりである。

- 1) 全般に、表層部の強度は増進するが、細孔構造は粗大化する傾向を示す。
- 2) 冬期間の気象作用により、表層部の強度発現は停滞する傾向にあり、高炉スラグ(F=4,000cm<sup>2</sup>/g) およびフライアッシュを混和した場合は、この傾向が著しい。
- 3) 初期塩分は、強度発現に悪影響を及ぼし、細孔構造の粗大化をもたらすと考えられる。
- 4) シリカフェーム、高炉スラグ(F=8,000cm<sup>2</sup>/g)を混和した場合は、高炉スラグ(F=4,000cm<sup>2</sup>/g)、フライアッシュを混和した場合に比べ、強度増進および細孔構造の緻密化など、表層部品質の改善効果がみられる。
- 5) 内陸部の場合海岸部に比べ、表層部の強度はやや小さく、簡易透気速度は大きな値を示す傾向にあり、気温・湿度条件の差が影響したものと推察される。
- 6) 接着引張強度は、材令、調合および暴露条件による表層部の強度変化を旨く反映でき、性状変化を比較的敏感に捉え得る点で、凍害など表層部劣化の指標として有望である。
- 7) 接着引張強度は、圧縮強度と高度に有意な相関を示し、試験は、圧縮強度推定のための局部破壊試験としても有用である。
- 8) 簡易透気速度は、ポロシチーと密接な関係があり、組織・構造面からの耐久性判定に関しての一指標たり得ると考えられる。

〔謝辞〕暴露試験の実施に当り、太平洋金属㈱よりご協力をいただきました。記して深く謝意を表します。なお、本研究は八戸工業大学プロジェクト研究「寒冷地コンクリート構造物の耐久性評価手法に関する研究」(代表者：庄谷征美)の一環として行なわれたものであることを付記する。

#### 〔参考文献〕

- 1) 菅原 隆、佐伯 昇、モルタルとコンクリートの表層強度に関する2, 3の実験、セメント技術年報38, pp.301~304 (1984)
- 2) 長野基司、笠井芳夫、コンクリートの透気性に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集 pp.231~232(1988)
- 3) L.J.Parrott、Measurements and Modelling of Moisture, Microstructure and Properties in Drying Concrete、Pore Structure and Materials Properties、Proc. of 1st International RILEM Congress、vol.3、pp.135~142(1987)

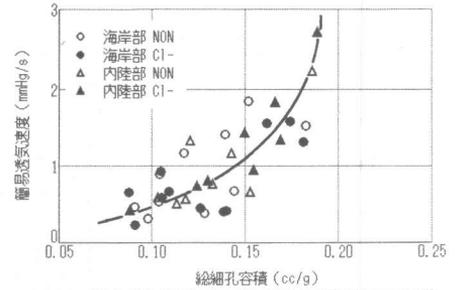


図11. 総細孔容積と簡易透気速度の関係

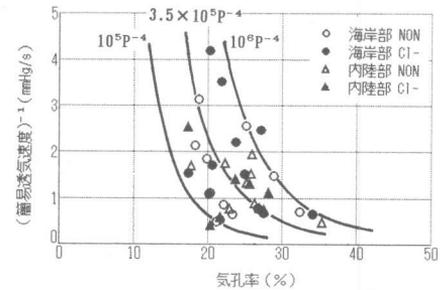


図12. 気孔率と(簡易透気速度)<sup>-1</sup>の関係