

環境変化養生がモルタルの細孔構造および耐凍害性に及ぼす影響

正会員○ 上田尚人*1
同 鈴木邦康*2
同 濱 幸雄*3
会員外 三高信吾*4

1. 材料施工—2. モルタル・コンクリートの物性

耐凍害性, 細孔構造, 環境変化養生, オートクレーブ養生, 中性化, 凍結融解試験

1. はじめに

コンクリートなどのセメント系材料の凍害劣化は冬期の気象条件の影響も大きく受けるが, 夏期の影響も大きい。高温状態での乾燥, 降雨や相対湿度の上昇など, 実環境下で経年することによりコンクリートの耐凍害性が著しく低下する可能性が指摘されている。これは環境変化によって発生する微細なひび割れが原因であると考えられているが, 必ずしもひび割れだけでは説明できない。また, 経年を想定した乾燥や乾湿繰り返しにより細孔構造が粗くなることによって吸水率が増加し, 凍害劣化につながっていることを示す報告もある¹⁾。このことから, 経年によるセメント硬化体の細孔構造の変化を明らかにし, そして細孔構造の変化が吸水性状及び耐凍害性に及ぼす影響を明らかにする必要がある。

本研究では, 経年したセメント硬化体の細孔構造の変化と耐凍害性への影響を明らかにすることを目的として, モルタルを対象に実環境を想定した乾燥・乾湿・オートクレーブ・中性化養生による空隙構造の変化と耐凍害性への影響について検討した。

2. 実験計画及び方法

2. 1 試験体の作製方法及び養生条件

1 バッチあたりの調合表を表1に, モルタルの養生条件

W/C	目標 空気量 (%)	kg/バッチ			AE剤 (Cw×%)
		混練水	セメント	細骨材	
0.35	4	3.85	11.0	22.0	0.002
0.35	2	3.85	11.0	22.0	-
0.55	4	5.50	10.0	20.0	0.01
0.55	2	5.50	10.0	20.0	-

生条件を図1に示す。普通ポルトランドセメント及び登別産陸砂(表乾密度=2.69g/cm³, 吸水率=1.52%)を用い, W/C及びAE剤の使用の有無により計4種類を作製した。混練後, 4×4×16 (cm)の型枠に打ち込み, 1日封緘養生後に脱型した。環境変化養生を行う試験体は, W/C35%と55%のnon-AEの試験体を用い, 20°C4週水中の初期養生後Ⅰ:20°C乾(20°C・60%RHの恒温恒湿室中で2週間), Ⅱ:50°C乾(50°C乾燥器中で2週間), Ⅲ:50°C乾湿繰り返し(50°C乾燥器中で6日間→20°C水中2日間→50°C乾燥器中で6日間)の3水準, 計6水準とした。また, オートクレーブ養生は, nonAEおよびAEの4種類の試験体を用い, 脱型後185°C, 10気圧の条件下で6.5時間の養生を行った。養生後, 次の工程の材齢まで封緘で保存した。この10水準の試験体それぞれについてJIS A 1153に準ずる促進中性化行ったものとそうでないものの2水準設け, 計20水準とした。

中性化深さの測定は1, 4, 13週目に行った。中性化深さ測定用の試験体は側面をシールし, CIF試験用の試験体は凍結融解を行う1面以外をシールした。

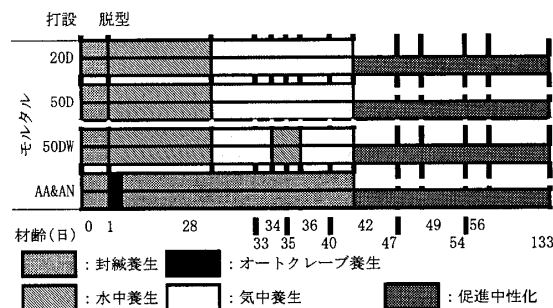


図1 試験体の脱型および養生条件

Influence of Curing Condition to Change of Pore Structure and Frost Resistance of Mortar

Ueda Naoto et al.

2. 2 試験方法

1) 凍結融解試験

凍結融解試験は、環境変化養生・オートクレーブ養生後及び促進中性化試験後に、RILEM CIF 法に準じて行った。CIF 試験は、恒温恒湿室中(20℃ RH60%)での7日間の下面吸水試験と56サイクルの凍結融解試験から成っている。凍結融解の条件は、最高温度+20℃で1時間保持、最低温度-20℃で3時間保持、温度勾配±10K/hourで1日2サイクルとし、下面吸水状態で一面凍結融解を行うものである。養生終了直前の乾燥期間を前処理と見なし、14日気中乾燥は行わなかった。試験体は、養生後に側面をブチルゴム付のアルミテープでシールしたものをを用いた。

2) 細孔構造の測定

細孔構造の測定は、JIS R 1655 に準じた水銀圧入法とアルキメデス法により行う。測定は初期養生後、環境変化養生後、オートクレーブ養生後及び中性化養生後に行った。試料は、養生終了後の試験体を砕き、2.5~5.0mmに粒度調整を行い、アセトンによる水和停止とD-dry乾燥を行ったものをを用いた。ただし、促進中性化養生後のモルタルは、中性化面から8mmの位置でコンクリートカッターにより切断し、中性化部と中性化しきっていない未中性化部に分けてサンプリングを行った。アルキメデス法の測定は、作製した試料を水に浸漬し真空脱気した後、水中重量と表乾質量を測定し、その後105℃で乾燥させて絶乾質量を測定し、かさ密度、真密度、全空隙量を求めた。

3. 実験結果及び考察

3.1 環境変化中のモルタルの物性変化

図2に環境変化中のモルタルの物性の変化を示す。乾湿繰り返しにおいて、湿潤時の吸水により各物性が増加したが基準値には至らなかった。内部拘束ひび割れは発生しなかったことから、乾燥により生じた内部拘束ひび割れは、水分移動を容易にする働きを持っていると考えられる。

3.2 細孔構造の測定結果(環境変化養生後)

図3に水銀圧入法による環境変化養生後の細孔径分布を示す。W/Cに関わらず、4Wに比べ他の試験体

は細孔容積が多く、環境変化やオートクレーブ養生によって細孔が増加し、粗大化している。環境変化では100nm付近の細孔の増加が顕著で、オートクレーブ養生では10~100nm付近の細孔の増加が顕著である。既往の研究では、-18℃までの凍結温度では下限が直径40nmの中程度の毛細管の細孔が多いほど耐凍害性が低下するといわれている²⁾。そこで全空隙量に対する中程度の毛細管の細孔量の変化を調べるため、水銀圧入法の結果から直径6~10000nmの毛細管の細孔量を算出した。

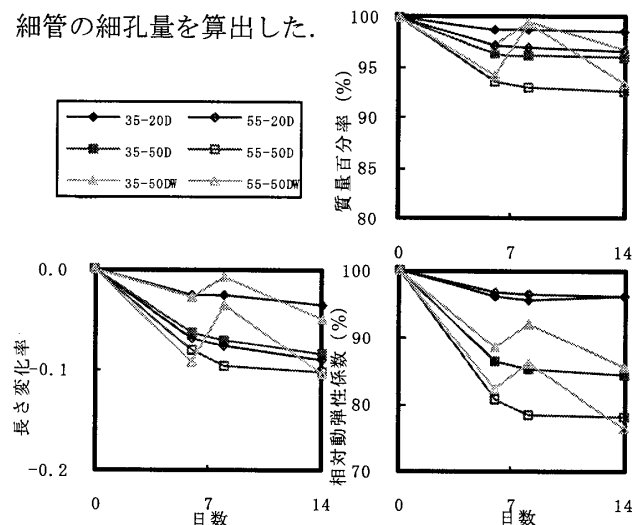


図2 環境変化中のモルタルの物性変化

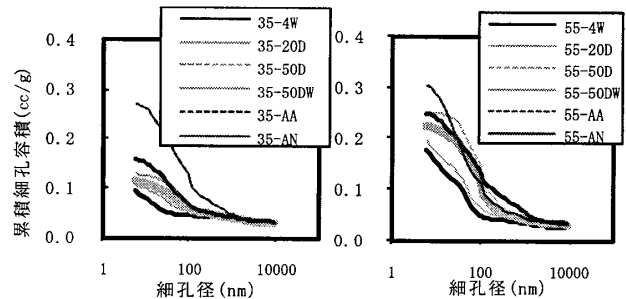


図3 細孔径分布(環境変化養生後)

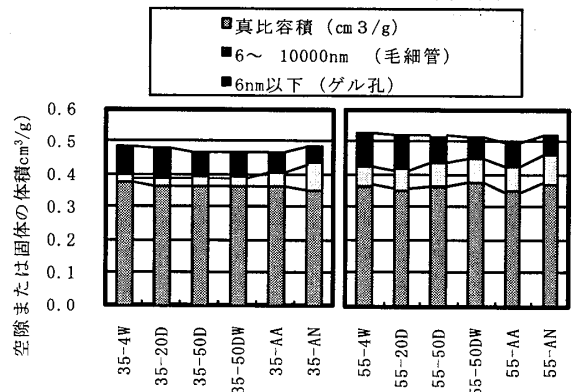


図4 毛細管の細孔量とゲル空隙の細孔量と固体の比較(環境変化養生後)

6nm未満の細孔量はアルキメデス法により算出した全空隙量から水銀圧入法で測定した空隙量を差し引いて算出した。また、真密度の逆数である真比容積が固体である固体の体積に相当するものとし、空隙及び固体の体積を図4に示す。W/C35%では全体積には変化が見られないが、固体の体積に減少が見られ、マトリクスが収縮が確認できる。細孔は6nm以下のゲル孔の細孔が減少し、6~10000nmの毛細管の細孔が増加していることから、マトリクスが収縮及び環境変化により細孔量が増加し、粗大化していることがわかる。

3.3 CIF試験結果（環境変化養生後）

図5に相対動弾性係数の変化を示す。55-AN, 55-50D及び55-50DWが試験開始初期に著しく劣化した。35-ANも凍結融解の進行とともに劣化した。その他の試験体は56サイクルを終えても劣化は見られなかった。耐久性指数と直径6~10000nmの細孔量の関係を見ると、W/Cによってその勾配は異なるものの直径6~10000nmの細孔量が増加するほど耐久性指数が低下しており、環境変化養生による細孔構造の粗大化が耐凍害性を低下させるものと考えられる。また、オートクレーブ養生した場合でも、AE剤を用いたものの耐久性指数の低下は見られなかった(図6)。

図7に吸水率の変化を示す。環境変化養生モルタルは水中養生終了時の値を、オートクレーブ養生モルタルは下面吸水開始時の値を基準としたものである。下面吸水中にほぼ平衡状態に達しているが、その後の凍結融解サイクル中に吸水率の増加が見られる。これはMicro-Ice-Lens Pump効果と考えられる。また、劣化した55-AN, 55-50D及び55-50DWに急激な吸水率の上昇が見られたが、上昇を始めたサイクル時にはすでに相対動弾性係数が著しく低下しており、この吸水率の上昇はMicro-Ice-Lens Pump効果によるものではなく、劣化による組織の緩みが原因であると考えられる。

3.4 促進中性化試験結果

図8に中性化深さの変化を示す。環境変化養生よりもオートクレーブ養生を行ったもの、またW/Cが

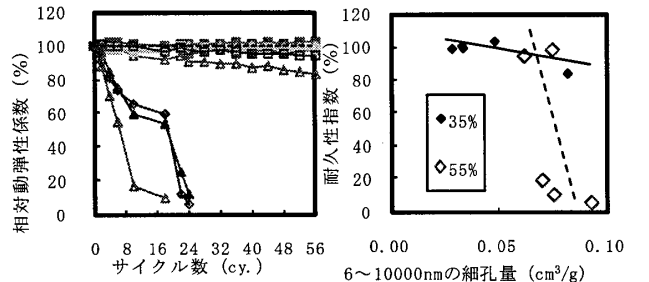


図5 相対動弾性係数の変化(環境変化後)

図6 6~10000nmの細孔量と耐久性指数

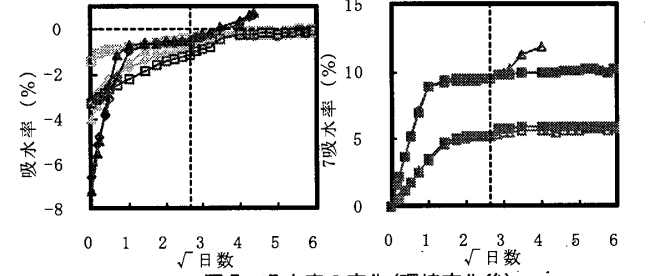


図7 吸水率の変化(環境変化後)

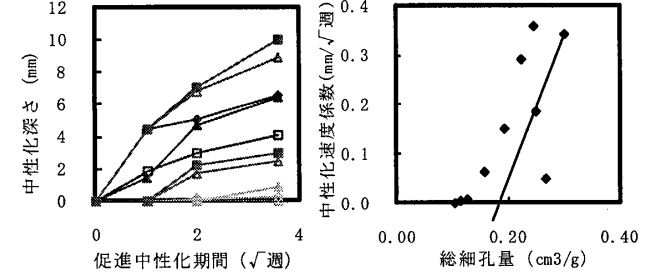


図8 中性化深さの変化

図9 中性化速度係数と総細孔量の関係

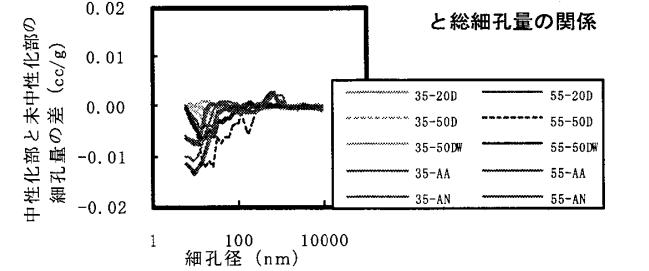


図10 中性化による細孔量の増加

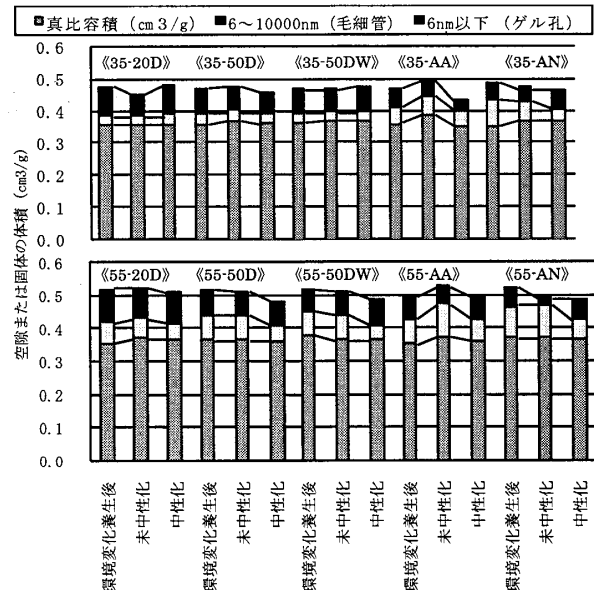


図11 養生による空隙と固体の体積の変化

高いほど中性化の進行が早い。また、中性化速度係数と総細孔量の関係を図9に示す。総細孔量の増加により中性化速度係数も増加しており、細孔の粗大化により中性化が促進されていることがわかる。

3.5 細孔構造の測定結果（中性化養生後）

中性化部から未中性化部の細孔量を引き、中性化による細孔量の増減の結果を図10に示す。中性化により10~100nmの細孔が減少し、組織が緻密化することがわかる。また、既往の研究では、中性化速度係数に及ぼす影響が大きい細孔径の範囲は75~7500nmといわれている³⁾。中性化によって減少するのはこの区間以下の領域で、中性化の進行による組織の緻密化が中性化速度に及ぼす影響は小さいと考えられる。また、環境変化養生後と中性化後を比較し、養生による空隙及び固体の体積の変化を結果を図11に示す。固体の体積は35-ANの環境変化後、35-AA及び55-AAの未中性化部を除き大きな変化が見られず、中性化の影響は確認できない。

3.6 CIF試験結果（中性化養生後）

図12に相対動弾性係数の変化を示す。55-AN、55-50D及び55-50DWが凍結融解開始初期に著しく劣化した。そして、35-ANは劣化が始まるのが遅くなり、環境変化養生後では劣化が見られなかった55-20Dが劣化した。図13に吸水率の変化を示す。劣化した試験体や55-AAは下面吸水中に平衡状態になり、その後さらに吸水しているが、その他の試験体は下面吸水初期の勾配が低く、平衡状態には至っていない。

図14に環境変化養生後と中性化後のCIF試験開始時・下面吸水終了時・試験終了時の吸水率を示す。環境変化養生後に比べ、中性化後の吸水率が低下する傾向にある。これは中性化により試験体の表面が緻密化し、吸水性状が変化したためと考えられる。また、35-ANが環境変化後よりも中性化後のCIF試験で劣化が遅かったのは、下面吸水時の吸水率が環境変化後よりも低くなったため、55-20Dが中性化後

の試験でのみ劣化したのは、中性化後に吸水率が増加したためと考えられる。

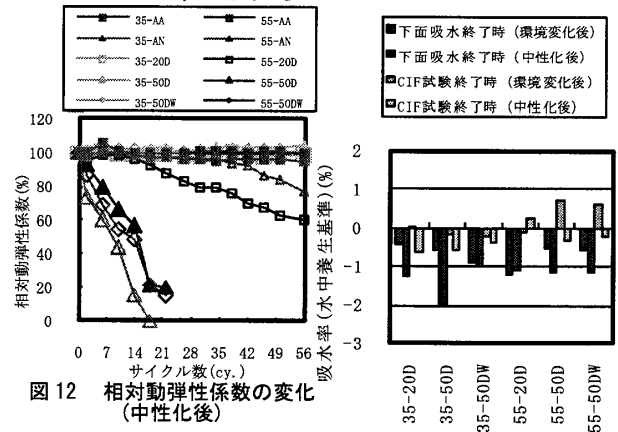


図12 相対動弾性係数の変化（中性化後）

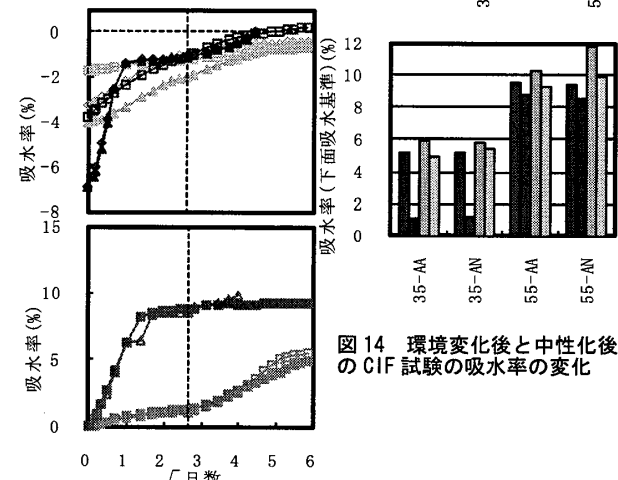


図13 吸水率の変化（中性化後）

図14 環境変化後と中性化後のCIF試験の吸水率の変化

4. まとめ

- 1)セメント硬化体の細孔構造は、乾燥・乾湿繰り返し・オートクレーブの影響により粗大化し、中性化により緻密化する。
- 2)細孔構造の粗大化により、凍結融解にともなう吸水率を増加させ、凍害劣化を促進させることが明らかとなった。

【謝辞】本研究の実施にあたり、住友金属鉱山シロレックス(株)・青野義道氏、の協力を得ました。また、細孔構造の測定では日本大学・湯浅昇先生の協力を得ました。心より感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 青野義道：コンクリートのナノ構造変化がおよぼす耐凍害性への影響に関する研究，室蘭工業大学博士論文，2006
- 2) 鎌田英治，千歩修，田畑雅幸，田中宏和：コンクリートの凍害に及ぼす細孔構造の役割についての統計的解析，日本建築学会構造系論文集，No.487，pp.1-9，1996
- 3) 鄭載東，平井和喜，三橋博三：中性化速度に及ぼすコンクリートの調合及び細孔構造の影響に関する実験的研究，コンクリート工学論文集，Vol.1，No.1，pp.61-73，1990

*1 室蘭工業大学大学院
*2 室蘭工業大学講師・工博
*3 室蘭工業大学准教授・工博
*4 三井住友建設株式会社

Graduate School, Muroran Institute of Technology
Assis. Prof., Muroran Institute of Technology, Dr.Eng
Assoc. Prof., Muroran Institute of Technology, Dr.Eng
Sumitomo Mitsui Construction Co., Ltd