論文 湿度変化に伴うセメントペーストの長さ変化と脱水量の相関性に関する研究

中央大学 理工学部土木工学科	学生会員	○小泉	諒
中央大学理工学部都市環境学科教授	正会員	大下吏	き吉
(株)フジタ 技術センター	正会員	藤倉裕	介谷

1. はじめに

セメント系材料の空隙構造は,強度,乾燥収縮や クリープ,各種の有害物質の侵入等に代表される構 造性能や耐久性能に大きく関与する非常に重要な物 性であり,その定量化には細孔空隙径分布,吸脱着 等温線などを用いた方法が挙げられる。

一般に,実構造物は絶えず変動する環境下に置か れており、一様環境下にある室内実験で得られた各 種の情報はそのままの形で実構造物に適用すること は困難である。すなわち,実環境を忠実に再現した 室内実験の実施や限られた室内環境条件下における 情報から任意の条件下の情報を推測する手法の確立 が必要になる。この意味からすると、上述した構造 性能や耐久性能に関与する各種性状は相対湿度や雰 囲気温度に大きく影響を受けるため, 室内実験にお いては任意の相対湿度や温度条件のもとで評価が行 われている。しかしながら,既往の研究のほとんど が,これら各種性状と相対湿度や温度を直接関連付 けることだけに留まっており,各種性状に大きく関 与する空隙構造の相対湿度や温度の依存性、さらに はこの観点に立脚して各種性状を議論したものはほ とんどない。

本研究では、セメントペーストの長さ変化に及ぼ す水分逸散量の影響に関する実験を行うものであり、 相対湿度の変化に伴う空隙径分布,水分挙動の観点 に着目した水分脱着量の実験を実施し、セメントペ ーストの水分挙動と長さ変化に関する議論を行った。

2. 実験概要

(1) 使用材料

本実験で使用したセメントは,普通ポルトランド (以下,N),早強ポルトランド(以下,H),低熱ポル トランド(以下, L)の配合および普通ポルトランドと 早強ポルトランドの2種類にシリカフュームで20% 置換した配合(以下, N+SF, H+SF)とした。また,本 実験では実験中の再水和の影響をできる限り少なく するため,20℃の水中にて2年間養生したものであ る。試験体は水結合材比を50%としたセメントペー ストとし,空隙構造の違いによる影響について着目 し,水和させた試験体を用いた。φ50mm×100mmの 円柱試験体を作製して養生後,湿式のコンクリート カッターを使用して35×10×100mmの板状試験体を 作製した。

(2) 測定方法

試験は恒温・恒湿室内にて,水中から取り出した 直後の湿潤状態からRH80%への過程,その後RH60%, RH40%と順次乾燥させる過程を与えた。測定はレー ザー変位計(0.0001mm)を用いて試験体の長手方向の 長さ変化およびロードセル型の荷重計(1kg:4000µ →0.25g:1µ)にて質量変化を同時に測定した。各 湿度下で2~3 週間設置し,平衡が得られ各値がほぼ 一定に安定したことを確認後,次の過程へ移行した。 **写真-1**に計測装置の概要を示す。



写真-1 計測方法の概要

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学理工学部 TEL:03-3817-1892 FAX:03-3817-1803

3. 実験結果および考察

3.1 脱水量と長さ変化の関係

図-1は、実験結果の例として早強ポルトランドセ メントを用いた場合の湿潤状態からRH40%までの乾 燥過程における乾燥収縮ひずみと脱水量の径時変化 を表したものである。また、図-2は、脱水量と乾燥収 縮ひずみの関係を試料ごとに表したものであり、飽 和~RH80%, RH80%~60%, RH60%~40%の区間ごとに(a) ~(c)に示す。同図より同一の脱水量であっても収縮 ひずみは各試料で異なり, また全体の収縮量も異な ることが分かる。例えば、飽和~RH80%の区間では N+SFの試料において同一の脱水量に対して収縮ひ ずみ量が多く, H+SFの試料では最終的なひずみ量 が最も多い傾向が示されている。また、RH60%~40% の区間ではシリカフュームで置換しているセメント ペーストは、置換なしに比べて各脱水量で大きな収 縮ひずみを生じていることが分かる。これは、各相 対湿度における液状水の凝縮半径(ケルビン半径) に関係しており,各試料の空隙径分布が異なること の影響が現れているためであると推察される。

3.2 空隙構造に基づく脱水量と収縮ひずみの予測

空隙構造の違いが脱水量や収縮量に影響を及ぼす ことは明らかであろう。そこで、各相対湿度下にお いて平衡に至った最終的な収縮ひずみと脱水量の関 係について空隙構造の観点から考察する。まず、既 往の空隙構造モデルを用いて算定した空隙径分布を 図-3¹⁾に示す。既往の空隙構造モデルでは水銀圧入法 により求めた結果との整合性を確認しており、空隙 内の含水状態と表面エネルギーの観点から体積変化 機構を評価する方法を検討している。同図より空隙 径が0.01 μ m以下ではNとH+SFに分布が多く, 0.01 μ m~0.1 μではHとNに多く存在する傾向が見られる。 空隙径の小さな空隙の分布が多いH, H+SFは図-2に おいて比較的大きな収縮ひずみが見られる。また, 各種のセメントペーストを相対湿度ごとで比較する と,相対湿度が低い程大きな収縮ひずみが生じる傾 向にある。図-4¹⁾は既往の研究によりモデル化した体 積変化機構と脱水量の関係を示す。また、同図には 各相対湿度における計算値をプロットした結果を示 す。収縮ひずみが脱水量に依存することは容易に理



解されるが、図-4に示すようにモデルにより求めた 結果も同一の脱水量に対して収縮量が異なる値が示 されることが分かる。この現象は、同一の空隙量を 有していても空隙径により収縮量が異なるわけであ り、空隙構造の観点から脱水量と収縮ひずみの相関 性について議論することが必要であると考えられる。

3.3 長さ変化に及ぼす水分挙動の影響

3.2 では脱水量が平衡に至った時の収縮ひずみと セメントペーストに起こる水分挙動について述べた。 しかし、実環境下におけるセメント硬化体の体積変 化挙動を考える場合には各相対湿度において平衡に 至るまでの脱水量と収縮ひずみの生じる過程を考慮 することも重要であると考えられる。既往の研究²⁾ では、雰囲気温度をパラメータとしたセメントペー ストの細孔壁面における水分の吸脱着性状に関する 実験を実施し、その温度依存性に関する検討を行っ た。温度依存性は吸着過程の低相対湿度領域と脱着 過程のほぼ全相対湿度領域において生じ、高温とな ることにより前者においては飽和度の急激な増加, 後者においてはその経路が吸着過程に漸近すること を指摘した。しかしながら、その確固たるメカニズ ムは未解明のままである。図-1や図-2には各相対湿 度にて平衡に至るまでの過程を示しているが、脱水 量や収縮ひずみが平衡に至る過程を詳細にみてみる と, 脱水量がほぼ一定となった後も収縮ひずみは進 行していることが分かる。この現象は、図-5に示す ような2段階のメカニズムによるものと考えられる。 第一段階では、試験体からの脱水が進行してそれに 伴って収縮ひずみが生じる。その後、第二段階では 見かけ上は脱水量が平衡となるが、試験体の内部で はその後も引き続き水の移動(試験体内の平衡過程) が生じるため、収縮ひずみが生じる。この2段階の メカニズムでは脱水速度や液状水の移動機構も異な り、すなわち体積変化機構も異なるものと考えられ る。この2段階のメカニズムについては今後の検討 課題である。**表-1**に各種類のセメントおよび相対湿 度における収縮ひずみの全体量と脱水量が一定にな った後の収縮ひずみの増分、割合を示す。同表に示 す通り脱水量が一定になった後の収縮ひずみの割合 は全体の10%~20%となっており、脱水量が一定に



表-1 脱水量平衡時のひずみ増分と割合

		飽和→RH80%	RH80%→60%	RH60%→40%
Ν	Δε	****	****	84(9.5%)
	全体	1098	1012	883
N+SF	Δε	****	127 (11.5%)	122 (10.8%)
	全体	1188	1103	1137
Н	Δε	225 (19.1%)	138 (11.6%)	199 (14.2%)
	全体	1176	1194	1404
H+SF	Δε	177 (12.7%)	183 (12.4%)	324 (17.5%)
	全体	1394	1477	1855
L	Δε	209 (18.8%)	102 (8.0%)	173 (15.4%)
	全体	1117	1285	1125

(****は計測期間中脱水量の平衡なし)

なってからも比較的大きな収縮が発生していること が分かる。図-6は、図-2における脱水量と乾燥収縮 ひずみを増加率の径時変化で表したものである。実 験データにはばらつきがあるためそれぞれの曲線に 合う近似曲線を用いて算出した。図中に示す値は、 各湿度区間において収縮ひずみの最大値から脱水量 が一定になった際の収縮ひずみの値を引いたひずみ の増分を表している。収縮ひずみの増加量を比較す ると H, H+SF が高い数値を示している。H, H+SF は 0.01 µm 以下の空隙径の空隙容積が多いため収縮 ひずみが大きくなったと考えられる。また、脱水量 と収縮ひずみの増分はそれぞれの速度として評価す ることができる。同図から N+SF 以外のセメントペ ーストの同じ傾向の曲線であることが分かる。どの 湿度区間においてもH+SF, Lは早い段階でN, Hよ り高い値を示している。この傾向については脱水機 構と収縮量との詳細な検討が必要であり今後の検討 課題である。

4. まとめ

以下に本研究で得られた結果を示す。

- (1)セメント硬化体を対象とした既往の研究結果 および著者らが実施した実験結果との比較を 行うことにより脱水量と乾燥収縮ひずみの関 係について検討した。その結果、同一の脱水量 を有しても収縮量が異なることが分かった。こ の理由としては空隙構造の違いによる影響が 考えられ、著者らの提案する空隙構造モデルに 基づいた考察を行った。
- (2)各相対湿度において、平衡となる脱水量に至った後も引き続き収縮が生じることが明らかとなった。これは2段階のメカニズムによるものと考えられる。この傾向については脱水機構と収縮量との詳細な検討が必要であり今後の検討課題である。

参考文献

 藤倉裕介,大下英吉:セメント硬化体の相組 成と構成相の粒度変化に着目したセメント 硬化体の空隙構造モデル,土木学会論文集
E, Vol.66, No.1, pp.38-52, 2010





小柳朋宏,大下英吉:乾湿変化に伴うセメントペーストの長さ変化に及ぼす温度ならびにアルカリ含有量の影響に関する研究,コンクリート工学年次論文集 Vol.31, No.1, pp661-665, 2009