

論文

[1065] 高強度多孔質セメント硬化体に関する研究

正会員 ○ 米 澤 敏 男 (竹中工務店技術研究所)

古 賀 吉 則 (竹中工務店技術研究所)

1. はじめに

セメント系材料の軽量化を目的に多孔質のセメント硬化体が従来から建設材料として使用されてきた。現場打設の気泡モルタルや工場製品であるALC板などがその例である。これらの材料は構造二次部材として使用されるのが通例であり、強度よりも軽さに主眼が置かれてきた。したがって、その圧縮強度は、せいぜい100~150Kg/cm²程度であった。しかし、高性能減水剤やシリカ質微粉末のような最近のセメント硬化体の高強度化技術をベースにすれば、多孔質のセメント硬化体であっても相当に高強度のものが得られる可能性がある。そうだとすれば、コンクリート等の構造用セメント硬化体の軽量化をさらに進展させ、強度と軽さのバランスを向上させる可能性も生まれてくる。

従来、気泡モルタル等多孔質セメント硬化体の強度は、ほぼ空隙の量により定まると考えられてきた。この研究は、マトリックスを高強度化した多孔質セメント硬化体の強度と空隙量の関係とともに強度を支配している諸要因を調べ、乾燥収縮と中性化についても検討を加えたものである。

2. 実験

2-1 概要 : 水結合材比25%と50%のモルタルの空気量を各種の界面活性剤を用いてブレンから50%の範囲で変化させ、圧縮強度、曲げ強度、乾燥収縮および中性化を試験した。さらに圧縮強度に影響している諸要因を調べるために、①水銀圧入式ポロシチーメーターによる75Åから1μmの細孔構造の分析 ②走査電子顕微鏡(SEM)による気泡の形態観察、および ③画像解析による気泡の形状分析を行った。

2-2 使用材料と調査 : 使用したセメントは普通ポルトランドセメントであり、水結合材比25%の場合には、シリカフュームを主成分とし高性能減水剤を含有する高強度用混和材(電気化学工業製)をセメントの内割で15%使用した。使用した水は水道水であり、細骨材は豊浦標準砂である。また砂セメント比は、水結合材比25%のモルタルで1.25、50%のモルタルで1.80とした。界面活性剤としては、アニオン系11種、両性2種、非イオン系4種の計17種を用い、空気量を20、30、40、50およびブレンの5水準を目標に調整した。

2-3 練り混ぜと養生 : 練り混ぜには容量20ℓのモルタルミキサーを用いた。練り混ぜ条件は、全材料投入後の攪拌速度と時間を330rpmおよび442rpmで各1分に固定し、界面活性剤の量により空気量を調整した。型枠に打設したモルタルを材令1日で脱型し、7時間オートクレーブ養生(180°C、10Kg/cm²)を行った。なお180°Cまでは3時間で昇温させ、180°Cで7時間経過後14時間かけて槽内で自然冷却し、室温に戻した。

2-4 強度、乾燥収縮および中性化の試験 : 圧縮強度、曲げ強度、乾燥収縮、中性化の各試験には、4×4×16cmの角柱供試体を用いた。圧縮強度と曲げ強度は、オートクレーブ養生の終了後、JIS R5201 セメントの物理試験法に準じてただちに試験した。オートクレーブ養生した供

試体をさらに20°C水中で材令7日まで養生し、温度20°C、湿度60%の気中で乾燥収縮と中性化の試験を行った。乾燥収縮は、コンタクト歪計により測定した。中性化試験に用いた供試体は、打ち込み面、底面および端面をエポキシ樹脂でコーティングし、残り2面を露出した。中性化深さは、割裂面にフェノールフタレインを噴霧し測定した。

2-5 水銀圧入式ポロシチーメーターによる細孔構造の分析 : 強度試験後の供試体を3mm程度まで粉碎し、デシケーター中で24時間乾燥させた後、水銀圧入式ポロシチーメーター(カルロエルバ社製)により75Åから1μmの細孔径の分布と量を測定した。

2-6 SEMによる気泡の形態観察 : 強度試験後の供試体を切断して10×20×5mmの試料を作製した。観察面(10×20mm)はアルミナ粉末のレベルまで研磨し、研磨後、超音波洗浄により研磨粉やダストを除去した。また、観察面はイオンスパッターにより白金コーティングを行った。

2-7 画像解析による気泡の形状特性の分析 : SEM写真から大きさ約20μm以上の全ての空隙をトレース紙に写しとり、ADS社製画像解析システム(PIP-4000 粒度分布計測パッケージ)を用いて平均径、円形度等の形状特性を分析した。この画像解析は、1試料当たり80mm²について実施した。

3. 実験結果と考察

3-1 圧縮強度と曲げ強度

図-1に圧縮強度とフレッシュモルタルの空気量の関係を示す。水結合法比25%と50%のモルタルのいずれも空気量の増加とともに圧縮強度が低下する傾向を示すが、25%のほうが相当高い強度を示している。多孔質セメント硬化体であっても空気量40~50%位までは圧縮強度が水結合法比に影響されるのは明らかである。ただし、空気量が50%程度になると水結合法比の影響は小さくなるようである。

水結合法比25%と50%の場合のもう一つの大きな差異は、同じ空気量に対する圧縮強度の分布範囲の大小である。水結合法比50%の場合、その分布範囲は比較的小さいが、25%の場合には、かなり大きな分布範囲を示す。例えば、空気量30%の場合、水結合法比25%のモルタルの圧縮強度の最大値は700Kg/cm²弱であるが、最小値は約330Kg/cm²であり倍以上の差がある。空気量30%のモルタルであっても700Kg/cm²に近い圧縮強度が得られる事実は、きわめて注目すべきであり、かなり高強度の多孔質セメント硬化体を実現される可能性を示している。空気量30%のフレッシュモルタルの比重は水結合法比50%で約1.55、25%で約1.65である。

図-2は、図-1に示した圧縮強度の最大値と最小値の差と空気量の関係を示したものである。データ数の問題もあり、図-2の値そのものが十分な精度を有しているとは言えないが、水結合

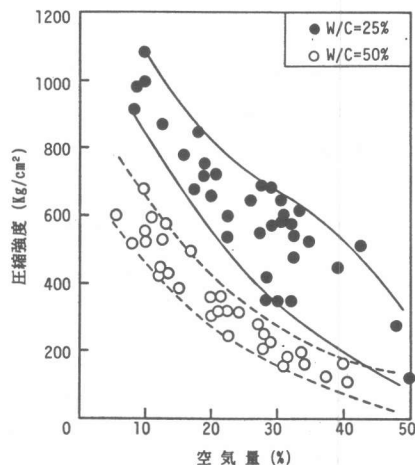


図-1 圧縮強度と空気量の関係

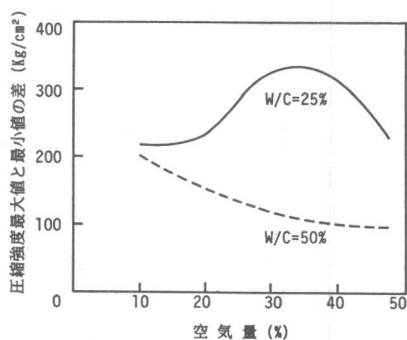


図-2 圧縮強度最大値と最小値の差と空気量の関係

材比の違いにより圧縮強度の分布範囲に違いがあることは明確に示している。水結合材比50%の場合、空気量の増加とともに圧縮強度の最大値と最小値の差は少しずつ小さくなる傾向が観察されるが、水結合材比25%の場合は、これとは全く異なっており、その値は空気量の増加とともに増大し空気量30~40%でピークを示すように見える。水結合材比25%のモルタルの空気量30~40%における圧縮強度の広範囲な分布は、このモルタルの圧縮強度が、空気量のみならず他の要因にも強く影響されていることを示している。図-1には、アニオン系、両性、非イオン系の使用した三種の界面活性剤の区分を示していないが、界面活性剤のタイプによる差は明確ではなかった。同じアニオン系でも大きな強度差が観察された。

図-3は、曲げ強度とフレッシュモルタルの空気量の関係を示す。圧縮強度と同様、曲げ強度も空気量40~50%位までの範囲では、水結合材比に影響されている。また、同じ空気量に対する曲げ強度の分布範囲も、水結合材比50%の場合よりも25%の場合の方が大きい。ただし、曲げ強度の場合には、圧縮強度のように空気量30~40%で強度の分布範囲がピークを示す傾向は観察されない。この理由は明らかではないが、多孔質セメント硬化体が圧縮を受ける時の破壊のメカニズムと曲げを受ける時のメカニズムの違いによるものであるのは確かであろう。

3-2 細孔構造

図-4は、空気量約30%のモルタルの圧縮強度と直径75Åから1μmの細孔の総量の関係を示す。水結合材比25%と50%の場合で細孔量に差があり、毛細管空隙のレベルの構造が異なるのは明らかである。しかし、同じ水結合材比では、細孔量はある範囲に分布しているにもかかわらず、圧縮強度は細孔量に全く影響されていない。

図-5は、空気量30%のモルタルの圧縮強度と平均細孔径の関係を示す。平均細孔径も細孔量と同じく圧縮強度との関係をほとんど示していない。

使用した界面活性剤の種類の違いがセメントの水和にある程度影響し、毛細管空隙のレベルの細孔構造が界面活性剤によって異なっているのは確かなようであるが、図-3、4の結果は、こ

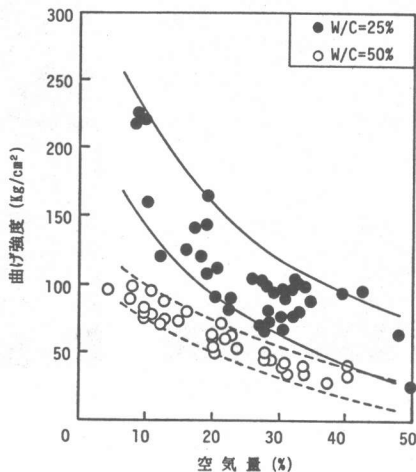


図-3 曲げ強度と空気量の関係

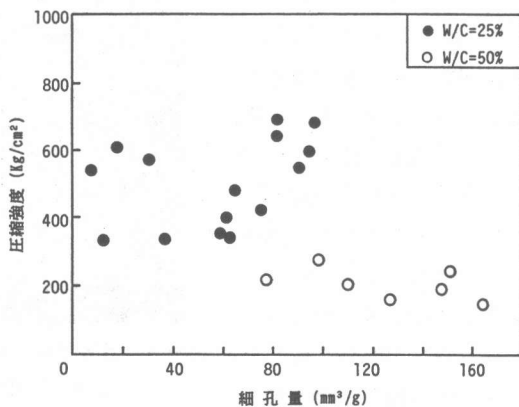


図-4 圧縮強度と細孔量の関係 (空気量30%)

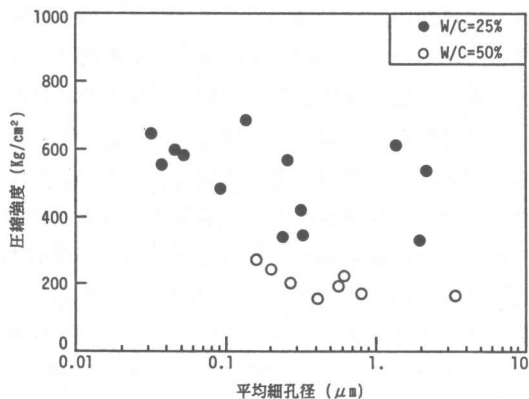


図-5 圧縮強度と平均細孔径の関係 (空気量30%)

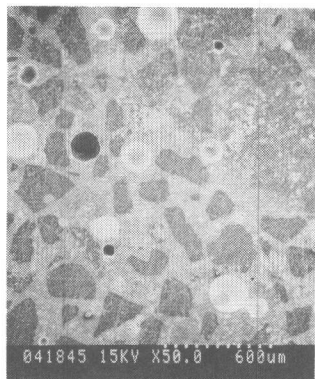


図-6 SEM像 (W/C=25%、プレーン)

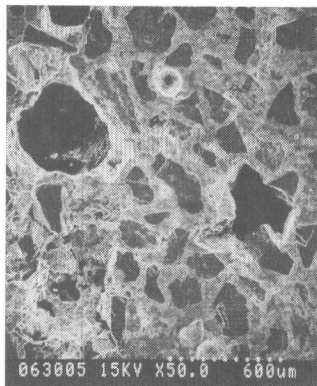


図-7 SEM像 (W/C=50%、プレーン)

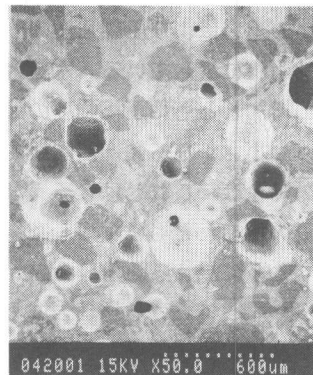


図-8 SEM像 (W/C=25%、空気量=30%、圧縮強度=690Kg/cm²)

のレベルの細孔構造の違いが、図-1、2で観察された水結合材比25%のモルタルの強度の広範囲な分布を説明するものではないことを示している。

3-3 気泡の形態

図-6は、水結合材比25%のプレーンモルタル（空気量9%）の研磨面のSEMによる二次電子像を示す。セメントマトリックスの間に分散している濃い色の粒子は標準砂である。

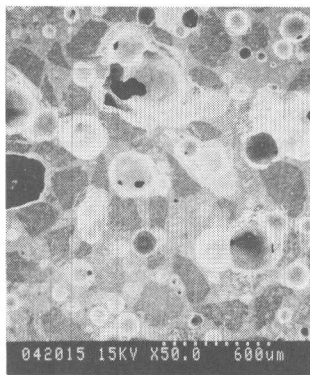


図-9 SEM像 (W/C=25%、空気量=30%、圧縮強度=330Kg/cm²)

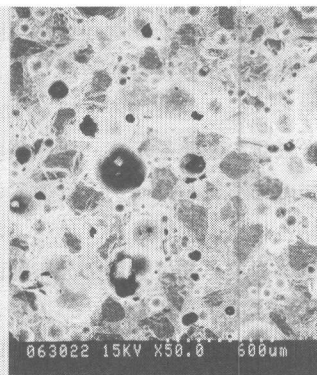


図-10 SEM像 (W/C=50%、空気量=30%)

標準砂とは別に、セメントマトリックス中に観察される大きさ数10ミクロンから数100ミクロンの球形の空隙が気泡である。図-7は、水結合材比50%のプレーンモルタル（空気量3%）の場合であるが、球形の気泡は存在するものの、骨材とマトリックスの界面やマトリックス中に水の分離によると推定される空隙が観察され、球形から相当に変形した大きな空隙も観察される点で水結合材比25%の場合と異なっている。この違いは、水の分離による空隙を少なくしたり、気泡の形を球形に保つうえで水結合材比を小さくすることが有効なことを示している。

図-8は、水結合材比25%、空気量約30%で690Kg/cm²の圧縮強度を示したモルタルのSEM像である。大きさ数10から数100ミクロンの球形の気泡が多量に存在することがわかる。図-9は同じく水結合材比25%で空気量約30%であるが、330Kg/cm²の圧縮強度しか示さなかった供試体のSEM像である。図-8に比べて、気泡の形が球形からやや変形しているものが多く、気泡どうしが結合して独立性が悪いものが多い。図-8と9の差異は、多孔質セメント硬化体の圧縮強度が、水結合材比や空気量とともに気泡の形状や独立性に影響されることを示している。すなわち、図-1、2に示したように水結合材比25%の場合に、空気量が同じでも強度が広い範囲に分布するのは気泡組織の違いによる可能性が強いと考えられる。

図-10は、水結合材比50%、空気量30%の供試体のSEM像である。気泡とともに水の分離によると推定される空隙やこの空隙と気泡が連なっているものが多く観測される。全体として空隙

が連続的であり気泡の独立性が悪い。界面活性剤を種々変化させても水結合材比50%の場合は、同じ空気量に対する強度の分布範囲が狭いのは、空隙組織が気泡とともに水の分離による空隙にも強く影響されていることによるのではないかと考えられる。

3-4 気泡の形状特性

図-11は、空気量30%のモルタルの圧縮強度と20 μm 以上の空隙の平均径の関係を示す。この平均径はSEM像の画像処理によって求めたものである。同じ水結合材比では圧縮強度と平均径との間には関係は見られない。気泡の量が等しければ小さな気泡の方が強度は高くなるように想像されるが、このデータの範囲では必ずしもそうではない。

図-12は、同じく空気量30%のモルタルの圧縮強度と平均円形度との関係を示す。ここでいう円形度とは空隙の周長を l 、面積を S とする時に、 $l^2 / (S \times 4\pi)$ で定義される値であり、円の場合には1となる。データ数が必ずしも十分とは言えないが、水結合材比25%の場合も水結合材比50%の場合も円形度が1よりも大きくなるにつれて圧縮強度が低下する傾向が観察される。これは、気泡の形が球形から変形したり、気泡どうしが結合したり、水の分離による空隙が発生したりして、全体として空隙の形が球からずれてくると強度が低下することを示している。これはまた、先に述べたSEM観察の結果とも合致するものであり、水結合材比25%のモルタルの強度が、同じ空気量でも相当に広い範囲に分布する理由と考えられる。言い換えれば、多孔質セメント硬化体の強度を上げるためには、気泡の形状を球形に保持すること、気泡の結合を抑制すること、水の分離による空隙の発生を抑制すること等が大切であるということになる。

3-5 乾燥収縮

図-13に乾燥収縮の試験結果を示す。この供試体の圧縮強度は、水結合材比25%で690 Kg/cm^2 、50%で280 Kg/cm^2 を示したものである。この供試体は、オートクレーブ養生したものであり、乾燥収縮の絶対値は、相当に小さい。水結合材比50%の場合、空気量を増加すると乾燥収縮も増えるが、水結合材比25%の場合、空気量を30%くらいまで増加しても乾燥収縮はほとんど増加しない。

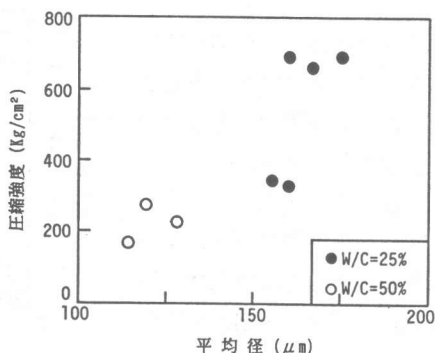


図-11 圧縮強度と20 μm 以上の空隙の平均径の関係(空気量30%)

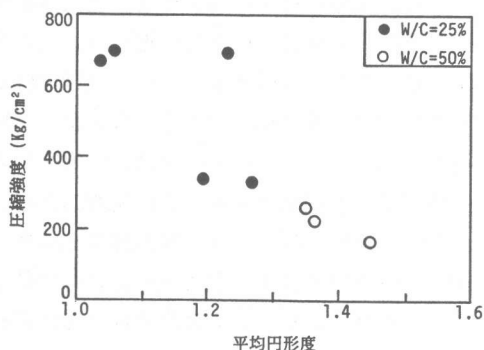


図-12 圧縮強度と20 μm 以上の空隙の平均円形度の関係(空気量30%)

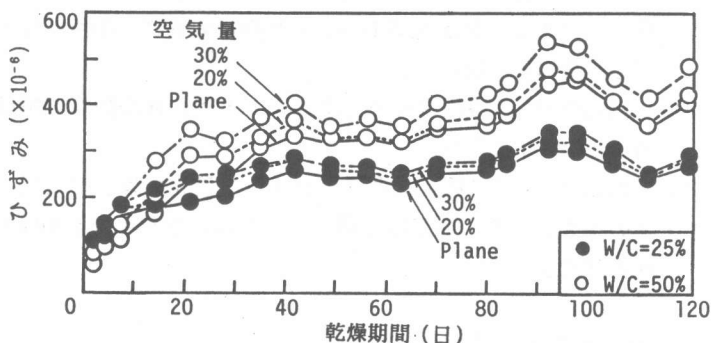


図-13 乾燥収縮の経時変化

この理由は必ずしも明らかではないが、高強度多孔質セメント硬化体を実用するうえで有利な性質である。

3-6 中性化

図-14に中性化深さの試験結果を示す。この供試体も乾燥収縮と同様、水結合材比25%で690Kg/cm²、50%で280Kg/cm²の圧縮強度を示したものである。

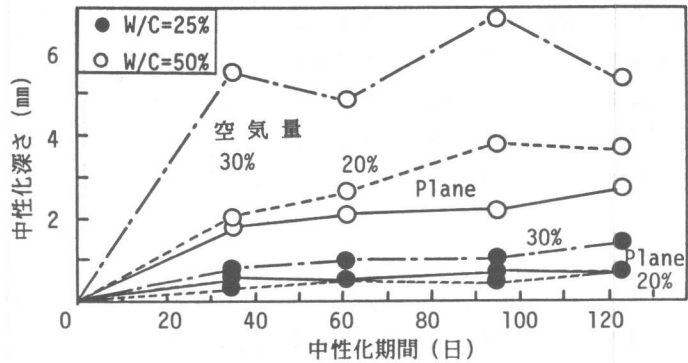


図-14 中性化深さの経時変化

水結合材比50%の場合、空気量を増加することにより中性化の進行も大きくなる。水結合材比25%の場合、中性化の進行は、もともときわめて少ないが、空気量を増加しても空気量20%では、プレーンモルタルと中性化深さは変わらない。空気量30%では、プレーンモルタルよりもわずかに中性化深さは大きくなるが、水結合材比50%のプレーンモルタルの中性化深さよりは、はるかに小さい。このデータは、乾燥室における120日の中性化試験であり、これから高強度多孔質セメント硬化体を構造物に適用した時の中性化の特性をただちに判定するのは困難である。しかし、水結合材比25%の高強度多孔質セメント硬化体の中性化が、空気量30%程度であっても相当に小さいのは明らかである。この性質も高強度多孔質セメント硬化体の性質としてきわめて注目すべきであり、この材料を様々な建設材料に利用するうえで有利な性質である。

4. 結論

この研究により得られた結論を以下にまとめる。

- (1) 多孔質セメント硬化体の強度は、空気量の増加とともに低下するが、空気量40～50%位までは水結合材比によっても影響を受ける。
- (2) 水結合材比を25%とした場合、空気量30%のモルタルでも700Kg/cm²に近い圧縮強度が得られ、かなり高強度の多孔質セメント硬化体の実現される可能性がある。
- (3) 水結合材比を25%程度に小さくすると、同じ空気量でも強度は相当広い範囲に分布する。これは多孔質セメント硬化体の強度が気泡等の空隙組織の構造に強く影響されるためである。
- (4) 多孔質セメント硬化体の強度を上げるためには、気泡の形状を球形に保持すること、気泡どうしの結合を抑制することや水の分離による空隙の発生を抑制すること等により空隙組織を良好にすることが大切である。気泡の大きさを小さくすることは、この研究の範囲では必ずしも有効ではない。
- (5) 水結合材比25%程度の多孔質セメント硬化体の乾燥収縮は、空気量を30%位まで増加してもほとんど増加しない。
- (6) 水結合材比25%程度の多孔質セメント硬化体は、空気量を30%位まで増加しても中性化深さの増大は小さく、気泡を導入していない水結合材比50%の供試体よりもはるかに小さい中性化深さを示す。

<参考文献>

- 1) 古賀、米澤「高強度気泡コンクリートに関する研究」建築学会大会、1989