

高強度モルタルの体積変化と 微細ひびわれ発生機構

久保ホベルト洋*¹・五十嵐心一*²・川村満紀*³

概要 低水セメント比の高強度モルタルの水中養生下における体積変化特性を明らかにすることを目的として、低水セメント比における特徴的なひび割れの発生およびそれが強度におよぼす影響について検討した。その結果、シリカフェーム無混入モルタルは若材齢から継続して長期間にわたって膨張を示したのに対して、シリカフェーム混入モルタルは若材齢にて収縮を生じた後に膨張した。いずれのモルタルにおいても長期材齢においてひび割れの発生が確認できたがそれらの発生機構は異なると考えられ、また強度におよぼす影響も異なった。単位セメント量が大きく、水セメント比の低い高強度モルタルでは未水和セメントが多量に残存することから、未水和セメントの水和反応が長期材齢にて生じ、その反応生成物の析出にともなう膨張圧の発生がひび割れを発生させると考えられる。

キーワード：低ポロシティー、自己収縮、体積変化、シリカフェーム、微視的構造、微細ひび割れ

1. はじめに

強度および耐久性の面から信頼性の高いコンクリートとして、低水セメント比の高強度コンクリートは様々な用途で利用されている。そのような高性能は、高性能減水剤の使用による水セメント比の低減と、シリカフェーム等の混和材の充填効果とポズラン反応により形成される緻密な内部組織によりもたらされる。この場合、一般的にセメント硬化体の体積変化に関係する連続した毛細管空隙がほとんど存在しないことから、硬化後の体積変化はほとんど生じないと考えられる。

しかし、低水セメント比の高強度コンクリートは初期材齢にて顕著に現れる自己収縮により体積変化を生ずる性質も持っている。まだ若材齢で強度発現の十分でないコンクリートにおいて、この収縮が拘束されることにより内部に発生する引張応力が、引張強度よりも大きいとひび割れが発生すると考えられている。

また、低水セメント比のセメント系材料の長期における体積変化に関して、その特徴的な内部構造との関連から別の体積変化メカニズムが指摘されている¹⁾。すなわち、毛細管空隙のほとんど存在しない低水セメント比の系においても、長期間の水中養生中に水分が内部に侵入する。このとき、多量に残存していた未水和セメント粒

子の水和反応が完全に硬化したセメントペースト中で再び開始されるが、反応生成物の析出に十分な空隙が存在しないため膨張圧が生じ、結果としてセメントペースト中にひび割れを生じるといわれている¹⁾。実際、Odlerら²⁾は種々の配合における低水セメント比のセメントペーストの体積変化を明らかにしており、低ポロシティーの下での反応生成物の新たな析出による膨張を確認し、配合によってはその膨張ひずみは4～5%程度に達している。

以上のように高強度コンクリートはその特徴的な微視的構造により、普通コンクリートとは異なるメカニズムにより体積変化を生ずる³⁾。体積変化はひび割れの発生を伴うことから、コンクリートの強度および耐久性に重大な影響を及ぼす可能性がある。

本研究は、水中養生を行った高強度モルタルの体積変化特性を微視的なひび割れ発生機構との関連において明らかにすることを目的としている。シリカフェームの混入の有無および水セメント比の低減に伴う高強度モルタルの体積変化特性の相違を、蛍光顕微鏡観察により明らかにされたひび割れの特徴の相違と関連づけて考察し、低水セメント比の高強度モルタルの体積安定性と微視的構造の関係を明らかにする。

*1 金沢大学大学院 自然科学研究科 (正会員)

*2 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科 (正会員)

*3 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 (正会員)

2. 実験概要

2.1 使用材料およびモルタルの配合

使用したセメントは普通ポルトランドセメントであり、骨材は富山県早月川産川砂（密度：2.64g/cm³，吸水率：0.9%）を使用した。使用したシリカフェュームの比表面積は20.0m²/g，SiO₂含有量は90.8%であり，そのセメントとの置換率は10%とした。水セメント比は0.24および0.30とし，ポリカルボン酸系高性能減水剤を使用してフローが190±10mmになるようにした。また，一部比較用に水セメント比が0.55の普通モルタルも作成した。以上のモルタルの配合を表一に示す。

2.2 供試体の作成および養生

- (1) 圧縮強度試験 モルタル用ホバートミキサーを使用して，JIS R 5201およびJSCE-F506に従って直径50mm，高さ100mmの円柱供試体を作成した。ただし，モルタルの全練混ぜ時間は7分とした。打設後24時間にて脱型し，20℃の水中養生を行った。所定材齢にてJSCE G505-1995に従って圧縮強度試験を行った。
- (2) 曲げ強度試験 (1)と同様にしてJIS R 5201に従い，40×40×160mmの角柱供試体を作成し，(1)と同様の養生を行い所定材齢にて曲げ強度試験を行った。
- (3) 長さ変化試験 (1)と同様にしてJIS R 5201に従って40×40×160mmの角柱を作成した。その両端には長さ変化測定用端子を取りつけた。打設後24時間にて脱型すると同時に基長を測定し，20℃の水中で養生を行った。所定材齢にてJIS A 1129に従いコンパレータを使用して長さ変化を測定した。
- (4) 蛍光顕微鏡観察 (3)と同様にして供試体を作成し，所定期間水中養生した後厚さ約10mmの薄板を切り出しエタノールに浸漬した。エタノール浸漬後，蛍光染料含有エポキシ樹脂を含浸させた。エポキシ樹脂の硬化後，耐水研磨紙を用いて薄板の表面を注意深く研磨して，蛍光顕微鏡観察試料とした。

3. 結果および考察

3.1 圧縮強度試験

図一および図二は，水中養生を行ったシリカフェ

表一 高強度モルタルの配合（質量比）

W/C	セメント	シリカ フェューム	細骨材	高性能減水剤 (%wt. B)
0.24	1	0	1	1.6
0.24	0.9	0.1	1	4.0
0.24	0.9	0.1	0	4.0
0.30	1	0	1	0.7
0.30	0.9	0.1	1	1.0
0.55	1	0	1	0
0.55*	1	0	1.57	0
0.55*	0.9	0.1	1.54	0.5

注) *W/C=0.24のモルタルと等しいセメントペースト/骨材比（体積）

ーム無混入および混入モルタルの圧縮強度の材齢にともなう変化を示したものである。シリカフェューム無混入モルタルの圧縮強度は，材齢14日以降ほぼ同様な値を示している（図一）。一方，シリカフェューム混入モルタルでは，材齢90日まで圧縮強度は増加するが，材齢180日ではいずれの配合でも若干の強度低下が認められた（図二）。

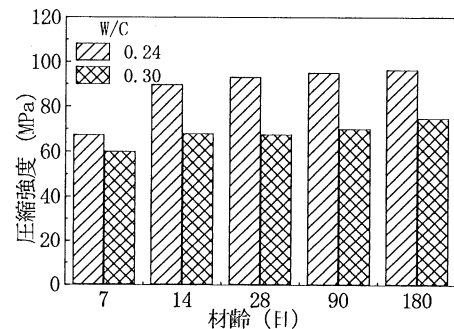
図一と図二を比較すると，シリカフェューム混入モルタルにおける水セメント比0.24と水セメント比0.30間の圧縮強度の差は，シリカフェューム無混入モルタルにおける両者間の強度差より小さいことがわかる。

3.2 曲げ強度試験

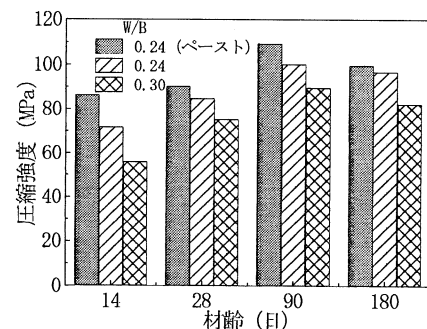
図三および図四はそれぞれシリカフェューム無混入および混入モルタルの曲げ強度の変化を示したものである。材齢の進行にともない曲げ強度は増大していく傾向は見られるが，いずれのモルタルにおいても長期材齢における強度増加はあまり大きくない。シリカフェューム混入モルタル（図二）では材齢180日においていずれの配合においても若干圧縮強度の低下が認められたが，曲げ強度の低下はペーストの場合にしか認められなかった。

3.3 長さ変化試験

水中養生下におけるシリカフェューム無混入モルタルの長さ変化を図五に示す。水セメント比0.24および水セ



図一 シリカフェューム無混入モルタルの圧縮強度



図二 シリカフェューム混入モルタルの圧縮強度

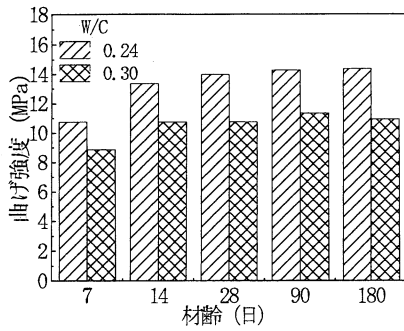


図-3 シリカフェーム無混入モルタルの曲げ強度

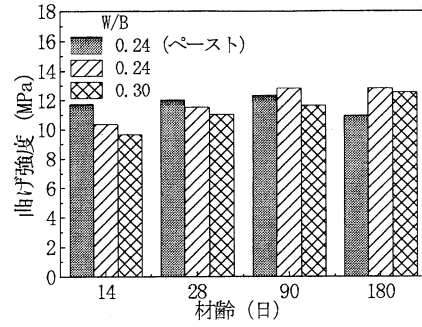


図-4 シリカフェーム混入モルタルの曲げ強度

メント比0.30のモルタルは材齢初期から急激な膨張を示している。材齢の進行にともない膨張は緩やかになり、材齢100～200日の間で膨張が停滞するような傾向を示した。しかし、材齢200日以降では再び急激な膨張を示し、材齢700日を越えるかなりの長期においても体積変化が安定するような傾向は認められない。また、材齢250日までは水セメント比0.24と水セメント比0.30ではほぼ同じ膨張量を示しているが、それ以降においては水セメント比の低い方が膨張割合が大きくなっている。

コンクリートを水中養生した場合は、普通強度コンクリートの水セメント比の範囲では膨潤による体積変化を生ずる。一般にその値はあまり大きくはなく、水中浸漬後6～12ヵ月において $100 \sim 150 \times 10^{-6}$ 程度であると報告されている⁹⁾。しかし、図-5より明かなように水セメント比0.24および0.30の高強度モルタルの膨張ひずみは材齢1年で既に 350×10^{-6} を越え、その後も徐々に膨張し続けており、セメントゲルの膨潤以外の作用によってモルタルが膨張している可能性を示唆している。

モルタルにおける体積変化は骨材が安定である限りにおいては、セメントペーストの体積変化に起因した現象であり、骨材はこれに対して希釈効果を有する。そこで、低水セメント比と高水セメント比における体積変化を直

接比較するために、水セメント比0.24と同じセメントペースト体積率となるように、セメント量と骨材量を調整した水セメント比が0.55のモルタルを作成し、その長さ変化を測定した。図-5に示すように、水セメント比が0.55の普通モルタルも水セメント比0.24のモルタルと同様に、水中浸漬直後に急激な膨張を示した。材齢50日程度で膨張ひずみが 100×10^{-6} 程度に達したが、水セメント比0.24の場合のように長期にわたって膨張が増大する傾向は認められない。このことから、低水セメント比0.24および0.30で認められた大きな膨張は極めて低い水セメント比のモルタル特有の現象であることがわかる。

シリカフェーム混入モルタルの長さ変化試験の結果を図-6に示す。シリカフェーム無混入モルタルの場合と同様に水中浸漬直後の若材齢にて大きな膨張を生じているが、その後収縮して再度膨張している。収縮時のひずみの大きさは水セメント比によって異なり、この初期における膨張曲線のピークを基点とすると、水セメント比0.24では 200×10^{-6} 程度、水セメント比0.30においては 100×10^{-6} 程度収縮した。材齢100～200日では長さ変化はほとんど観察されていない。しかしその後の挙動は水セメント比によって異なり、水セメント比が0.24では材齢200日前後からわずかに膨張し始め、300日程度で

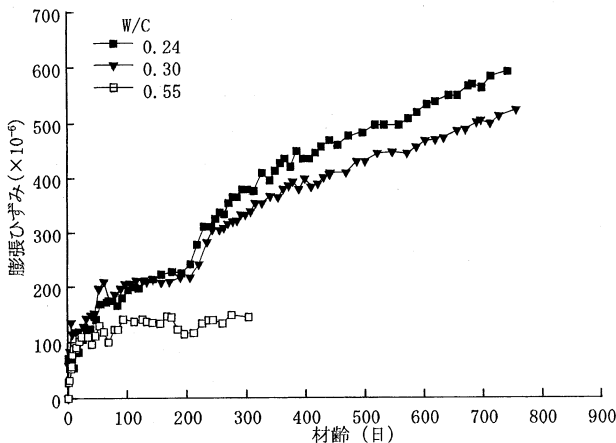


図-5 シリカフェーム無混入モルタルの長さ変化

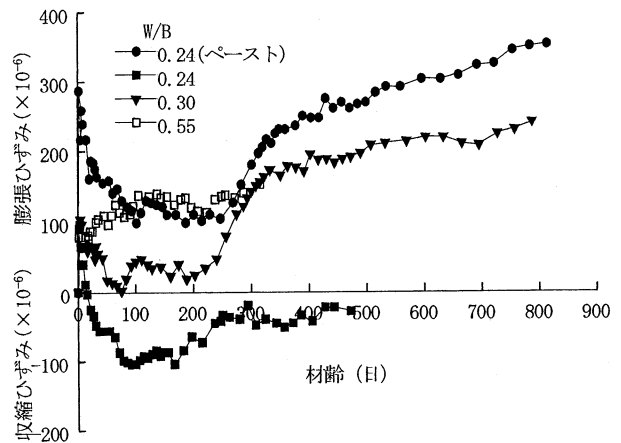


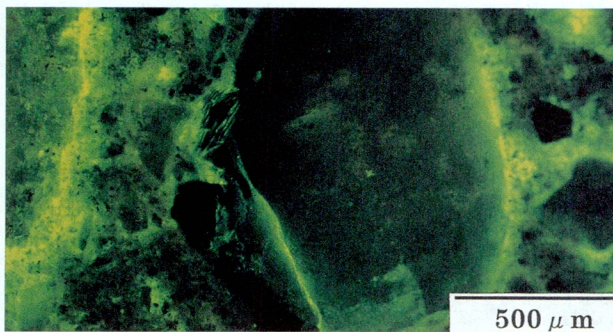
図-6 シリカフェーム混入モルタルの長さ変化

ほぼ安定している。一方、水セメント比0.30では材齢200日以前から著しい膨張を開始し、膨張割合はシリカフェーム無混入のモルタルほど大きくはないが、膨張は徐々に増大しつづけている。また、以上のような浸漬直後の膨張から収縮へと移行し、その後再び膨張を開始するという特異な傾向はシリカフェーム混入セメントペーストにおいて特に顕著である。

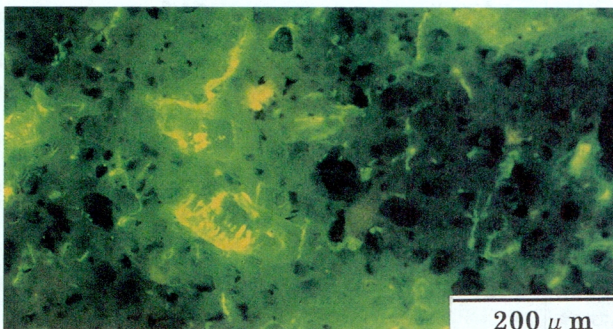
比較のため作成したシリカフェーム混入の水セメント比が0.55の普通モルタルの体積変化に関しては、同じ水セメント比のシリカフェーム無混入モルタルとほとんど差はなく、終局の膨張ひずみは $100 \sim 150 \times 10^{-6}$ 程度である。

3.4 蛍光顕微鏡観察

写真-1は水セメント比0.24のシリカフェーム無混入モルタルの蛍光顕微鏡像を示したものである。低水セメント比によるポロシティーの低いセメントペースト組織が形成されるため、蛍光領域は概して少ないが材齢28日(写真-1(a))においては、一部骨材の周囲に沿って光度の高い領域が観察されたが、セメントペーストマトリックスにひび割れは認められなかった。しかし材齢434日(写真-1(b))においては、不連続で独立した微細なひび割れが多数分布し、明らかに特徴の異なるひび割れがセメントペーストマトリックス全体に観察された。このひび割れは界面におけるひび割れとは全く連結しておらず、また写真より明らかなようにその幅もかなり小さい。



(a) W/C = 0.24 材齢28日

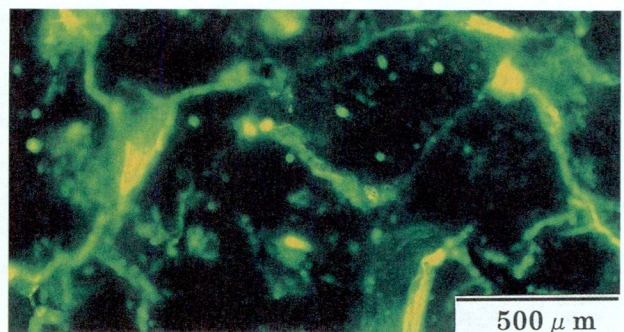


(b) W/C = 0.24 材齢434日

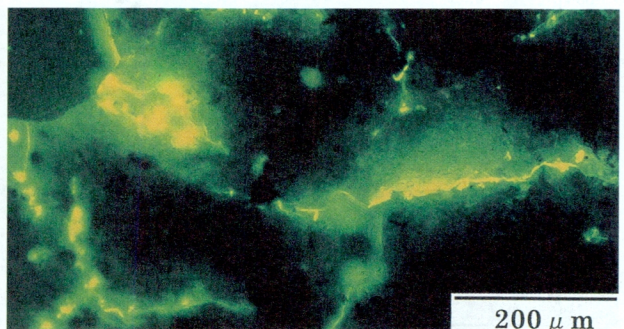
写真-1 シリカフェーム無混入モルタルの蛍光顕微鏡観察像

写真-2(a)はシリカフェーム混入モルタル(水結合材比=0.24)の蛍光顕微鏡像を示したものである。一度収縮し、長さ変化が見かけ上安定している材齢174日において、骨材-セメントマトリックス界面に沿う蛍光領域およびその骨材粒子からセメントペーストマトリックスに向かって放射状に伸びるひび割れが互いに連結している様子が確認できた。以上のような特徴は写真-2(b)に示すように水結合材比0.30においても同様であり、骨材から放射状に伸びるひび割れが観察される。以上のように水中養生を行ったシリカフェーム無混入とシリカフェーム混入のモルタルは、いずれの低水セメント比モルタルにも長期にわたる体積変化に起因すると考えられるひび割れの発生が確認できた。しかし、膨張過程にてひび割れの確認できたシリカフェーム無混入モルタルと収縮過程にてひび割れが観察されたシリカフェーム混入モルタルでは、ひび割れの特徴が異なる。

シリカフェーム混入モルタルの場合のひび割れは、それが供試体の収縮過程で観察されたことから自己収縮の拘束がひび割れ発生の原因と推定される。低水セメント比にて現れる自己収縮は、特に若材齢にてその進行が顕著であるとされているが、内部の自己乾燥状態が継続する限り自己収縮は長期間にわたって継続するようである⁵⁾。また田澤ら⁶⁾が指摘しているように水中養生を行ったとしても自己収縮を抑制することはできない。この場合、組織の緻密化の進行にともない、供試体内部では自己収縮が生じ、表層部は水分の供給により膨張を生じる



(a) W/B = 0.24 材齢174日



(b) W/B = 0.30 材齢490日

写真-2 シリカフェーム混入モルタルの蛍光顕微鏡観察像

とされ、水中養生下では供試体部位によって膨張と収縮が同時に進行するといわれている⁷⁾。この場合供試体内部には変形勾配を生じることになり、これが内部応力を発生させるようである。しかし、これが原因となる場合ではひび割れの分布が供試体断面内にて方向生を持つと予想されるが、本研究においてはそのような特徴は観察されず、連続したネットワーク状のひび割れが断面全体に観察された。一方、自己収縮の内部拘束に関してはセメントペーストと骨材間の相互作用を考慮するべきである。Della & Stang⁸⁾はセメントペーストが収縮を生じる場合、骨材粒子がその収縮を拘束する結果、骨材粒子の周囲に引張応力を誘起し、これが骨材から放射状に伸びるひび割れを発生させることを実験的および解析的に明らかにしている。写真-2(a)に示すように、シリカフェーム混入モルタルにて観察されたひび割れパターンは骨材から放射状に進展してひび割れが連結したような特徴を有する。これがモルタルの収縮期にて観察されたことから、シリカフェーム混入モルタルにおいては自己収縮を骨材が局所的に拘束したことにより発生したものと考えられる。

一方、シリカフェーム無混入の場合は、ひび割れは長期における膨張の過程で観察され、それ以前の早期材齢ではひび割れは認められなかった。先に述べたように、水セメント比が著しく低いセメントペーストはその低いポロシティと多量の未水和粒子の存在により膨張を生じることが指摘されている²⁾。すなわち、長期にて拡散浸透してきた水分と未水和セメントの間に水和反応が生じ、その反応生成物が析出することによる膨張圧の発生が微視的なひび割れを生じさせる。実際、Hillemerier & Schroder¹⁾はそのような硬化体内部に残存していた未水和セメントの水和反応が生じることおよびそれによって耐久性に重大な影響を及ぼすようなひび割れが発生しうることを実験的に明らかにしている。写真-1(b)に示した微細なひび割れはセメントペーストマトリックス全体に分散した不連続なひび割れであり、骨材粒子の存在によりその発生状況が影響を受けてはいない。また、そのようなひび割れが長期材齢で大きな膨張ひずみを生じた後に確認できたことを考え合わせると、シリカフェーム無混入モルタル中のひび割れは未水和セメント粒子の水和に起因した膨張圧の発生を原因として考えるべきと思われる^{1,2)}。

3.5 ひび割れが強度特性に及ぼす影響

一般にコンクリートに発生する微細ひび割れはその耐久性におよぼす影響が懸念されるが、これが強度特性に及ぼす影響も無視することはできない。図-1に示すようにシリカフェーム無混入のモルタルは材齢180日まで強度の低下は認められない。さらに蛍光顕微鏡観察にて明らかにされたひび割れは非常に微細であり、ひび割れの長さも幅もHillemerierら¹⁾が示したものよりかなり小

さくかつ不連続に孤立して分布していた。よって、そのようなひび割れは高強度モルタルの強度発現に対してはほとんど影響を及ぼさないと考えてよいものと思われる。

これに対して、図-2に示したようにシリカフェーム混入モルタルにおいては長期材齢にて強度低下を示しており、かつその材齢前後にて連続したひび割れ網の形成が蛍光顕微鏡観察にて確認されている。

以上のようなシリカフェーム混入モルタルにおける強度の低下はシリカフェーム無混入モルタルに対する強度比にも現れるようである。

図-7はシリカフェーム無混入モルタルの圧縮強度(f_c)に対するシリカフェーム混入モルタルの圧縮強度(f'_c)の割合を示したものである。水セメント比が0.30では、シリカフェーム混入モルタルの方が若干高い強度を示していることが分かる。しかし、水セメント比が0.24においては、シリカフェーム混入モルタルの方が低い強度を示している。すなわち、水セメント比0.24のようなかなり低い水セメント比のモルタルにおいては、シリカフェームの混入による強度の増加は認められない。

シリカフェーム無混入モルタルの曲げ強度(f_b)に対するシリカフェーム混入モルタルの曲げ強度(f'_b)の割合を図-8に示す。曲げ強度比は対応する圧縮強度比の割合より低く、特に水セメント比0.24ではシリカフェーム混入モルタルの曲げ強度は無混入のものよりかなり低い。圧縮強度より曲げ強度の方が微細ひび割れに強く影

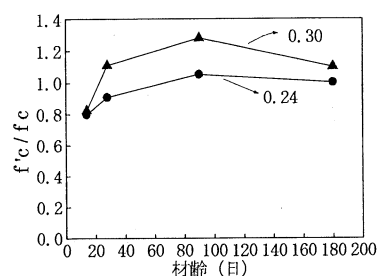


図-7 シリカフェーム無混入モルタルの圧縮強度に対するシリカフェーム混入モルタルの圧縮強度の割合

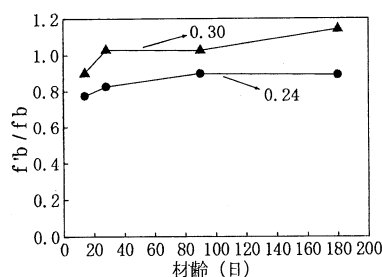


図-8 シリカフェーム無混入モルタルの曲げ強度に対するシリカフェーム混入モルタルの曲げ強度の割合

響を受けると考えられることから、自己収縮の拘束により発生した連続したひび割れがシリカフェーム混入モルタルの曲げ強度を低下させたと考えられる。

4. 結論

低水セメント比の高強度モルタルの体積安定性を水中養生下で生じる収縮および膨張のメカニズムと低水セメント比にて形成される特徴的な微視ひび割れの発生と関連づけながら明らかにした。

本研究にて得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) 水中養生を行ったシリカフェーム無混入モルタルは長期間にわたる膨張を示した。長期材齢にてセメントペーストマトリックスに微細なひび割れが観察された。
- (2) シリカフェーム混入モルタルは水中養生を行うことにより収縮から膨張に転じた。若材齢にて連続したネットワーク状のひび割れが観察された。
- (3) 水中養生を行ったシリカフェーム混入モルタルでは、断面部位によって収縮効果と膨張効果が同時に発生する。
- (4) シリカフェーム混入のモルタルで観察されたネットワーク状のひび割れは、自己収縮の拘束が発生の原因と推定される。
- (5) モルタル中に残存していた未水和セメントの水和反応により発生した膨張圧が、長期材齢にて観察された微視的なひび割れの発生機構と関係すると考えられる。
- (6) 自己収縮によって生じた連続したネットワーク状のひび割れは、シリカフェーム混入モルタルの圧縮強度お

よび曲げ強度を低下させる。しかし、未水和セメントの長期材齢における水和反応に起因すると考えられる微視的なひび割れはシリカフェーム無混入モルタルの強度発現に対してはほとんど影響を及ぼさないと考えてよい。

参考文献

- 1) Hillemerier, B. & Schroder, M.: Poor Durability of High Performance Concrete with Water Cement Ratio ≤ 0.30 , Durability of High Performance Concrete, Proc. International RILEM Workshop, RILEM, pp. 70-75, 1995
- 2) Odler, I. et al.: Hardened Portland Cement Pastes of Low Porosity III. Degree of Hydration. Expansion of Paste. Total Porosity., Cement and Concrete Research, Vol.2, No.4, pp.463-480, 1972
- 3) Hua, A. and Young, J.F.: Volume Stability of Densified Cement Pastes, Materials Science of Concrete : The Sidney Diamond Symposium, The American Ceramic Society, Westerville, pp. 493-507, 1998
- 4) Neville, A.M.: Properties of Concrete, Longman, London, 1995
- 5) Persson, B.: Self-Desiccation and Its Importance in Concrete Technology, Materials and Structures, Vol.30, No.199, pp.293-305, 1997
- 6) 田澤栄一・宮澤伸吾：水和による自己収縮，コンクリート工学，Vol.32, No.9, pp.293-305, 1994.9
- 7) Tazawa, E. and Miyazawa, S.: Tensile and Flexural Strength of Cement Mortar Subjected to Non-Uniform Self-Stress, Magazine of Concrete Research, Vol.44, No.161, pp.241-248, 1992
- 8) Dela, B.F. and Stang, H.: Crack Formation around Aggregate in High-Shrinkage Cement Paste, Fracture Mechanics of Concrete Structures, Proc. of FRAMCOS-3, AEDIFICATIO, Freiburg, Vol. 1, pp. 233-242, 1998

(原稿受理年月日：1999年12月27日)

Long Term Volume Changes and Microcracks Formation in High Strength Mortars

By Roberto Hiroshi Kubo, Shin-ichi Igarashi and Mitsunori Kawamura

Concrete Research and Technology, Vol.11, No.3, Sep., 2000

Synopsis This paper investigated the volume changes of high strength mortars cured in water. The effects of characteristic microstructure on the volume stability were considered in relation to the formation of microcracks. The results indicated that mortars without silica fume exhibited continuous swelling for long ages and the ones with silica fume shrank for a certain period after immersed in water, but started to swell at long ages. Cracking at long ages was confirmed for mortars with and without silica fume. However, there were distinct differences in the characteristics of crack pattern, such as the situation for cracking and their effects on the strength development between both. It was suggested that a mechanism other than autogenous shrinkage was involved in the volume changes that occurred in mortar with an extremely low water/binder ratio. Generation of internal expansive pressure due to the late cement hydration should be taken into account in the mechanism that cause microcracks in mortars at long ages.

Keywords : low porosity, autogenous shrinkage, volume changes, silica fume, microstructure, microcracking