論文　細骨材粒径がモルタルの乾燥収縮ひずみに与える影響に関する検討

酒井田　智哉[*1]・篠野　宏[*2]・丸山一平[*3]

要旨：本研究は，細骨材粒径範囲を変化させた 15 種類のモルタルの乾燥収縮ひずみを測定し，骨材粒径の影響を明らかにすることを目的とし，質量変化が RH60%下で平衡に達したモルタルのひび割れ状態を確認することで，ひび割れと乾燥収縮ひずみの相関について考察した。実験から，本実験で用いた骨材については細骨材粒径がモルタルの乾燥収縮ひずみに与える影響がみられないこと，単一粒径の骨材を用いた場合，ひび割れが多く確認でき，粒度分布が連続していると確認できるひび割れが少なく，また，試験体表面のひび割れと乾燥収縮ひずみは相関がないことが明らかとなった。

キーワード：乾燥収縮；蛍光エポキシ樹脂含浸法；粒度分布；微細ひび割れ；細骨材体積率

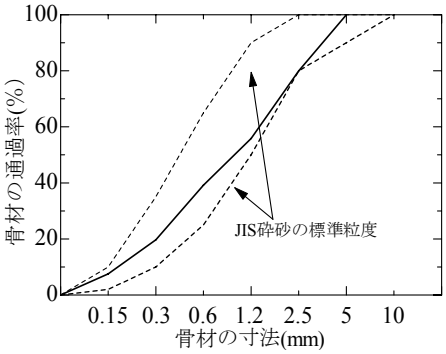
1.　はじめに

コンクリートは水分が失われるにつれて乾燥収縮が生じる。通常，骨材の乾燥収縮ひずみはセメントペーストの乾燥収縮ひずみと比べて非常に小さい。そのため，骨材はセメントペーストの収縮を拘束し，結果的にコンクリートとして見かけの収縮量を低減する。近年骨材の種類や量によって収縮低減効果が異なるという見解があり[たとえば1)]，コンクリートの乾燥収縮ひずみに対する骨材の影響は大きいというのが一般的となっている。一方，骨材寸法の違いによってもコンクリートの乾燥収縮ひずみは異なるという事が報告されている[2)]。しかしこれらの検討は粗骨材が主であり，細骨材での骨材寸法がモルタルの乾燥収縮に及ぼす影響を調べた研究は少ない。一方，乾燥によってコンクリートにはひび割れが入るが，骨材の拘束によって生じる微細ひび割れと乾燥収縮ひずみに相関があるという報告があり[3)]，モルタルのひび割れ性状についてもさらなる検討が必要である。そこで本研究では，モルタルの乾燥収縮の挙動を把握するためモルタルの乾燥収縮ひずみを細骨材粒径範囲と骨材体積比に着目して検討した。さらに，乾燥によってモルタルに生じたひび割れの状況と乾燥収縮ひずみの相関を確認するために，蛍光エポキシ樹脂含浸法[4)]によりモルタルの表面のひび割れの可視化を行い，検討を行った。

2.　実験の概要

2.1　使用材料および調合

本実験では調合のパラメーターを骨材粒径範囲と骨材体積比とした。セメントは市販の早強ポルトラントセメント(密度：3.16g/cm^3)を使用した。骨材は**図－1** に示すような粒度分布を持つ大井川水産系陸砂を使用し，細骨材の粒径を 5 種類にふるい分けした。モルタルの骨材



図－1　細骨材の粒度分布

表－1　骨材体積比と粒径範囲の組み合わせと調合

記号	水セメント比(%)	単位量(kg/m^3)			骨材体積比(%)	骨材粒径範囲(mm)
		水	セメント	細骨材		
L5-20	55	500	909	551	20	5.0以下
L5-40		383	696	1101	40	
L5-60		254	461	1648	60	
L2.5-20		500	909	555	20	2.5～5.0
L2.5-40		383	696	1109	40	
L2.5-60		254	461	1660	60	
M1.2-20		500	909	542	20	1.2～2.5
M1.2-40		383	696	1084	40	
M1.2-60		254	461	1625	60	
S1.2-20		500	909	555	20	1.2以下
S1.2-40		383	696	1109	40	
S1.2-60		254	461	1660	60	
S0.6-20		500	909	523	20	0.6以下
S0.6-40		383	696	1046	40	
S0.6-60		254	461	1570	60	

*1 名古屋大学　工学部社会環境工学科　(学生会員)
*2 名古屋大学大学院　環境学研究科　(正会員)
*3 名古屋大学大学院　環境学研究科　准教授・博士（工学）

体積比は 3 種類とし，計 15 種類の水準を用意した。その組み合わせと調合を**表－1** に，骨材の物性を**表－2** に示す。本実験では骨材は粒径範囲ごとに吸水率, 表乾密度, 絶乾密度を求めた。練り混ぜの際，細骨材は表乾状態とし，細骨材の質量はそれぞれの粒径の表乾密度を使用して決定した。

2.2　試験体の作製

練混ぜはペースト中の空気の混練を避ける目的で真空脱気が可能なミキサーでセメントペーストを作製した後, 細骨材を投入し手練した。練混ぜの後，ブリーディングが確認できなくなるまで練返しを行った。打込みは 40×40×160mm の型枠に行い, 材齢 1 日あるいは 2 日後で脱型後，乾燥開始まで飽和水酸化カルシウム溶液中で 20℃±1℃の一定下で標準水中養生を行った。試験体は 40×40×160mm のモルタルをダイヤモンドカッターで厚さ 10mm に切断し，40×40×10mm となったものを使用した。

2.3　乾燥収縮試験の概要

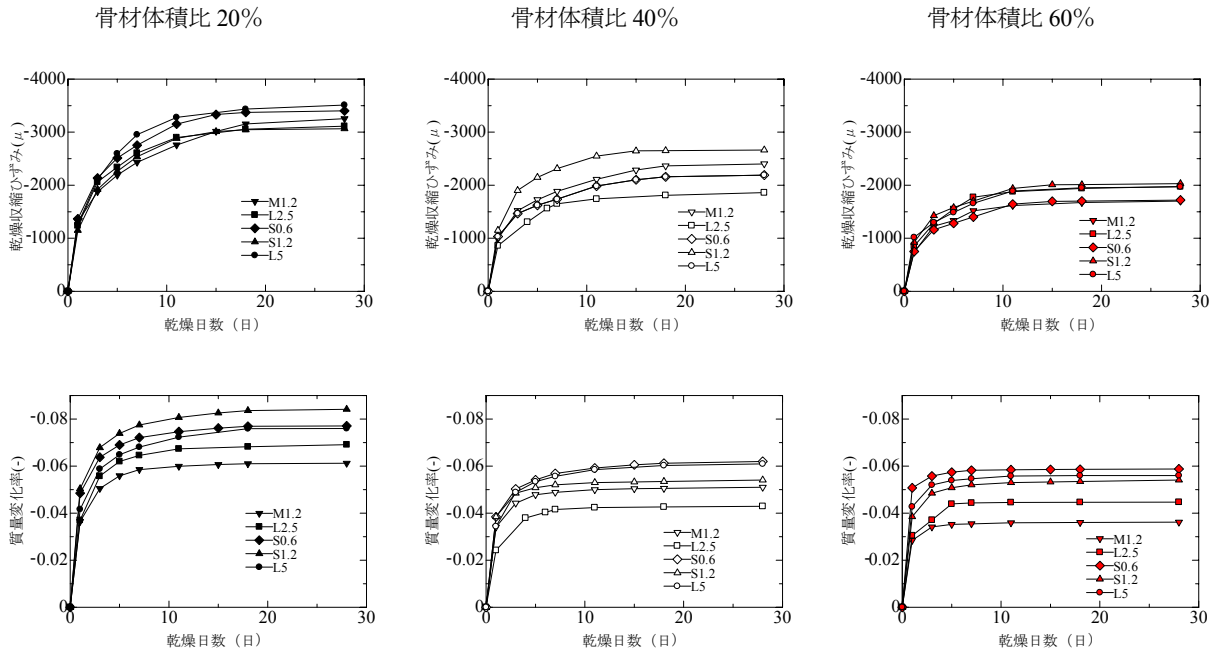
乾燥収縮試験の試験体は高性能高さ測定機（Mitutoyo 社製，精度：(±2.8+5L/1000)μm，L：測定物の長さ）を用いて 40mm 方向の長さ変化を測定した。**図－2** に測定装置の写真を示す。表乾状態の試験体で基長を測定後、20℃RH60%下で乾燥を行い，乾燥開始から 1，3，5，7，11，15，18，28 日後に長さ変化と質量を測定した。質量は精度 0.0001g の校正済み電子天秤にて測定を行った。それぞれのパラメータごとに 3 体ずつ試験体を用意し, 1 体につき 3 点の長さを測定し，9 点の値の平均を実験結

表－2　骨材の物性

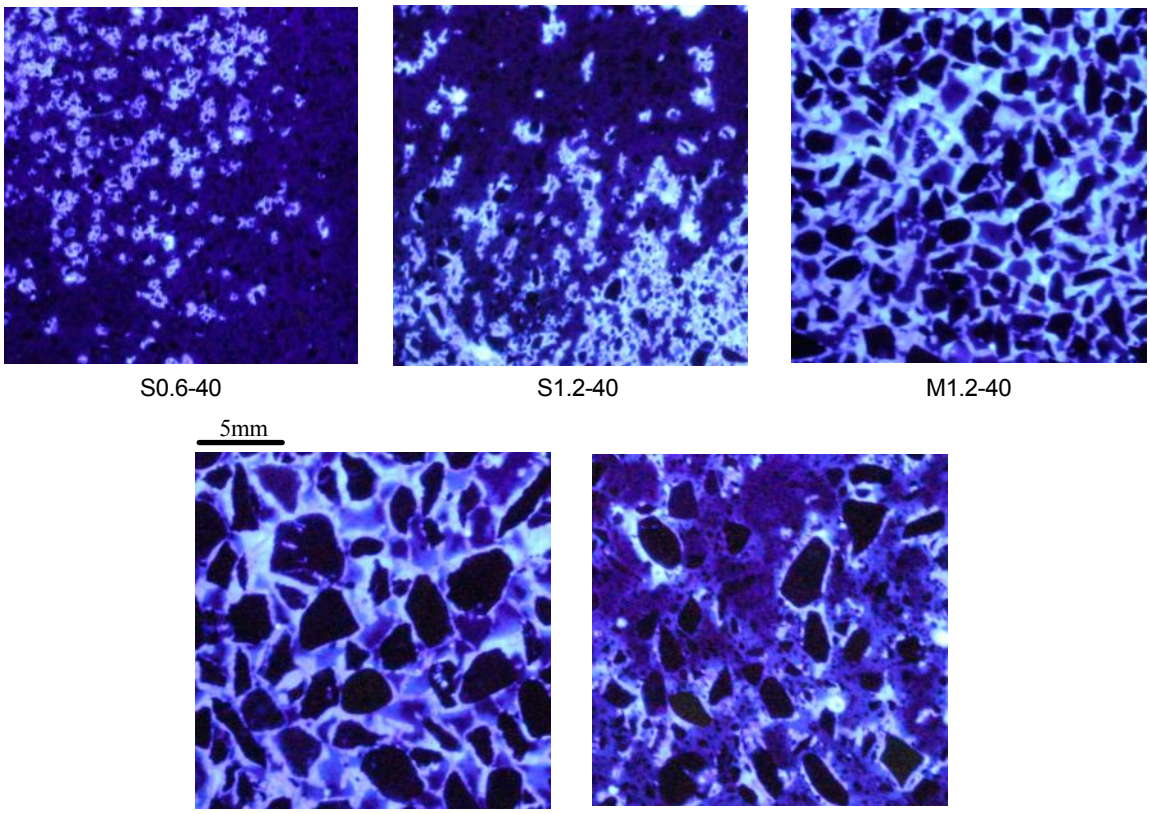
粒径(mm)	5 以下	2.5～5	1.2～2.5	1.2 以下	0.6 以下
吸水率(%)	1.99	1.75	2.25	2.02	2.73
表乾密度 (g/cm^3)	2.75	2.77	2.71	2.77	2.62
絶乾密度 (g/cm^3)	2.66	2.65	2.66	2.67	2.66
実積率(%)	69.03	62.88	61.35	64.56	63.77
ヤング係数 *(kN/mm^2)	67.6				
乾燥収縮ひずみ*	135×10^{-6}				

*同じ川で採取された粒径が大きい石の値

図－2　高性能長さ測定機



図－3　乾燥収縮ひずみと質量減少の経時変化（上：乾燥収縮ひずみ下：質量変化率）



図－4　蛍光エポキシ試験結果によるひび割れ性状

果とした。

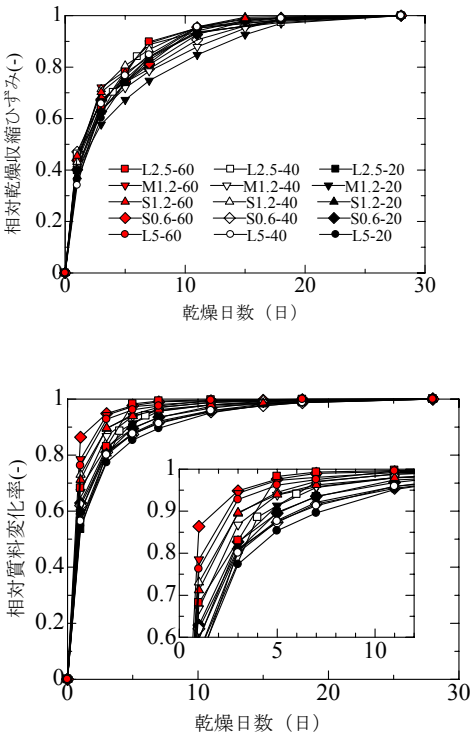
2.4　蛍光エポキシ樹脂含浸試験の概要

質量変化が平衡状態に達した試験体を蛍光エポキシ樹脂に浸漬し，試験体のひび割れを可視化した。本実験では手塚ら[4)]が提案した手法を参考にした。蛍光エポキシ樹脂は，超低粘度エポキシ樹脂（粘度：130±20mPa・s）の主剤に対し，質量比で 2%の蛍光塗料（黄 1：紫 2）を溶解させたものを用いた。脱気にはロータリーポンプ（最大到達圧力性能 6.7×10^{-2}Pa）を用い，低真空状態で試験体の空隙から放出される気泡が消泡するまで含浸を行った。その時間はおおよそ 20 分間であった。蛍光エポキシ樹脂硬化後は，試験体の表面を約 0.3mm研磨して表面の蛍光エポキシ樹脂を取り除き，観察面とした。その後，紫外線探傷灯を照射し，デジタルカメラによる撮影を行った。

3.　実験の結果と考察

3.1　質量と乾燥収縮ひずみの経時変化

図－3 に質量の経時変化と乾燥収縮ひずみの経時変化を示す。乾燥収縮は乾燥 11 日で平衡とみなせるものがほとんどであるが，M1.2－20，M1.2－40，S0.6－40 は乾燥 28 日まで乾燥収縮が継続している。骨材体積比が 40%や 60%のものは乾燥 7 日でほぼ質量変化がなくなるが，骨材体積比が 20%のものは乾燥 18 日まで質量が減少して



図－5　乾燥収縮ひずみと質量変化の分布（上：乾燥収縮ひずみ，下：質量変化率）

いるものが存在する。

3.2　蛍光エポキシ樹脂含浸試験の試験結果

図－4 に各粒径の骨材体積比 40%の試験体の蛍光エポキシ樹脂含浸試験の結果を示す。骨材粒径が均一である M1.2－40 と L2.5 は骨材界面にそったひび割れや，骨材界面から垂直に伸びるひび割れが確認できる。一方, S0.6, S1.2，L5 のひび割れ幅は M1.2 や L2.5 と比べて小さく，L5 では粒径が大きい骨材間をつなぐひび割れが一部確認されるものの，S0.6，S1.2，L5 に生じたひび割れの大部分が骨材界面に沿って生じたひび割れであった。このことから，骨材の粒径が大きい場合，骨材同士を繋ぐひび割れが入りやすいことがわかる。

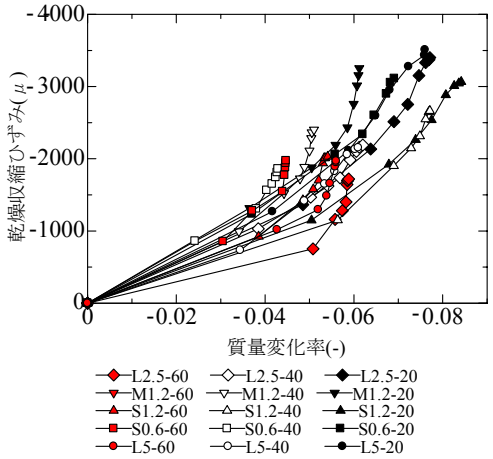
また，骨材体積比が同じとき，乾燥収縮ひずみが同じということは内部に蓄積されるひび割れの総量は同じにならなくてはならないと考えられる。しかし，**図－4** では粒径範囲によって確認できるひび割れの量が違う結果となった。

また，ひび割れの入り方の影響を及ぼす要因として遷移帯が挙げられる。遷移帯は骨材周りの脆弱な部分であるためモルタルの乾燥初期段階では骨材の持つ収縮低減効果が現れず、モルタルはペーストと同じような収縮挙動を示すと考えられる[5)]。遷移帯が少ない場合，早期に骨材の拘束効果が現れるため，ひび割れは入りやすくなると考えられる。本実験では単一粒度では幅の広いひび割れが入り，粒径が大きい骨材界面を繋ぐひび割れが確認されたが，これは骨材周りに生じる遷移帯厚さを一定と仮定すると，粒径が大きく，粒径範囲が狭いほど骨材の表面積が小さくなり, それに伴って遷移帯の量が減り，ひびが入りやすくなった結果と説明できる。

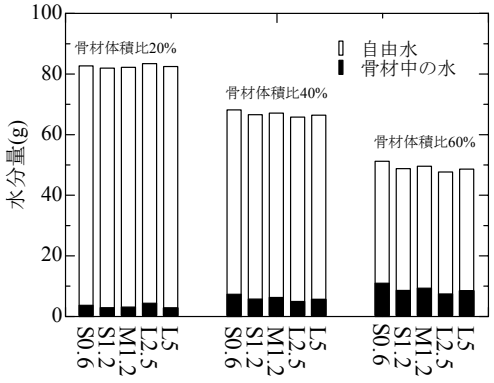
3.3　乾燥速度

図－5 に各乾燥日数での乾燥収縮ひずみおよび質量変化率を乾燥 28 日の値で除したものと乾燥日数の関係を示す。これらをそれぞれ相対質量変化率，相対乾燥収縮ひずみと定義する。骨材体積比が大きくなると，乾燥の早い段階で質量の減少が進むことがわかる。しかし，乾燥収縮ひずみは相対質量変化率に比べて骨材体積比に関わらず各乾燥日数での最終値に対する収縮量の割合に差が見られない。つまり，骨材量が増えると質量変化は早期に終わるが，乾燥収縮の速さには影響が少ない。この原因として考えられるものは，内部拘束による表面のひび割れである。表面のひび割れはモルタルの表面積を大きくすることから，質量減少が早くなる原因となる。

乾燥収縮ひずみと質量変化率の関係を**図－6** に示す。骨材体積比 60%では勾配が大きいことがわかる。勾配が大きいと質量減少量あたりの収縮が大きいということである。また，粒度で比較すると，L2.5 と M1.2 の勾配が大きいことから，単一粒度の場合，質量変化が小さくても収縮駆動力は働きやすいと考えられる。



図－6　乾燥収縮ひずみと質量変化率の関係



図－7　蒸発可能な水の量

図－7 に 40×40×160mm のモルタルに含まれる水分のうち，セメントペースト中の水和に使われない自由水の量と骨材中の水の量を示す。両者を足した水量が乾燥によって蒸発可能な水である。蒸発可能な水の量の算出方法は，調合から，セメントの質量を 0.25 倍した質量を結合水とし[6)]，使用した水の質量から結合水量を引いたものを自由水として計算し,骨材中の水の質量は骨材の吸水率から求めた。粒径範囲ごとの差はあまりないが，骨材体積比によって全水分量と骨材中の水が含まれる割合が異なる。一般に，乾燥によって収縮するのはセメントペーストであり，自由水が多いほど乾燥収縮ひずみが大きい。自由水の量に粒径ごとの差がないが，質量変化率は単一粒度の骨材を用いたほうが小さいほうが乾燥 28 日の値が小さいので，粒径範囲によって水分の蒸発の挙動が変化すると推測できるが，本実験ではその理由については明らかとならなかった。

3.4　粒径と骨材体積比の影響

図－8 に各粒径範囲および骨材体積比での乾燥収縮ひずみと質量変化率の乾燥 28 日の値を示す。ここでは乾燥

28 日の結果の考察を行う。乾燥収縮ひずみに関して，粒径範囲の違いでは，どの骨材体積比でも一貫した傾向はみられず，同一の骨材体積比で粒径を変化させたとき，各骨材体積比で比較すると，乾燥収縮ひずみの最大値と最小値の差は平均で約 300μである。粗骨材の場合，粒径が大きいほど乾燥収縮ひずみは小さくなるという報告[7]があるが，本実験ではそのような結果は得られなかった。このことから，粗骨材と異なり，細骨材の粒径・粒度の乾燥収縮ひずみへの影響は少ないと思われる。

骨材体積比に着目すると，各粒径範囲で骨材体積比が 20%と 40%では乾燥収縮ひずみの差が大きいが，骨材体積比 40%と 60%では乾燥収縮ひずみの差は小さい。骨材体積比 20%での乾燥収縮ひずみの最終値は本実験と同じ水セメント比，乾燥条件で測定したセメントペーストの乾燥収縮ひずみ[8]とほぼ同じ値をとった。骨材体積比 20%ではモルタルはセメントペーストに似た収縮をすると考えられる。質量変化率は骨材体積比 20%と 40%での乾燥収縮ひずみのように大きな差があるということはなく，各骨材体積比間での質量変化の差は同程度となっている。以上のことからモルタルにおいて骨材の収縮低減効果が現れる骨材量は骨材体積比が 20%から 40%の間であることになる。

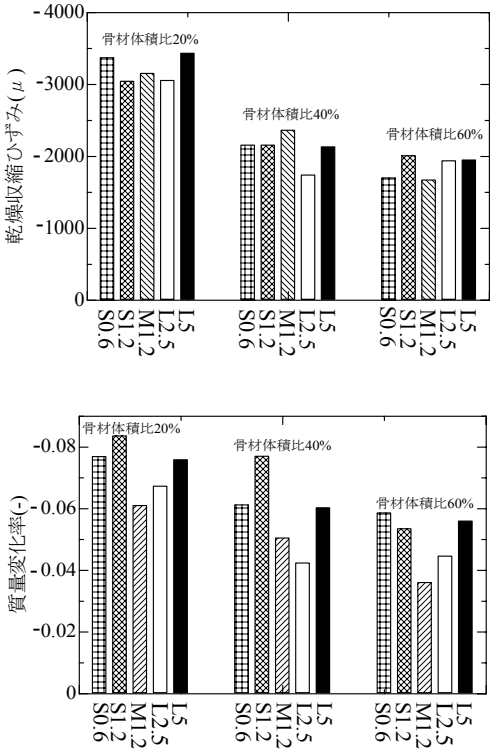
骨材量は多いほど乾燥収縮ひずみは小さく，少ないほど大きくなる。これは，骨材量が多くなると，骨材の拘束効果が強くなるのと同時にセメントペーストの量が減ることから説明できる。質量変化率についても，骨材体積比が大きくなるとともに減少していることがわかる。

3.5　ひび割れ面積の算出

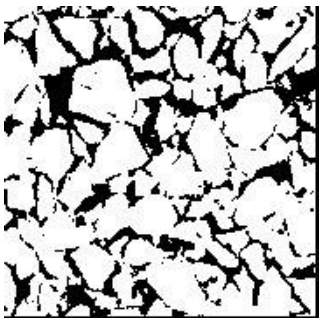
図－10 は，**図－9** に示すように写真をひび割れの部分とそうでない部分を画像解析ソフト：ImageJ により一定の明るさで二値化した画像から，画像中のひび割れの面積が画像の面積に占める割合（以下ひび割れ面積比とする）を求めた結果である。二値化するのに用いた画像は試験体の写真の一部で倍率は約 2.2 倍である。各粒径範囲の傾向として，骨材体積比が大きくなるほどひびの量は減っている。骨材体積比が大きいほど多いと拘束効果は強くなり，ひび割れも多くなると予測されたが，ひび割れ量は骨材量と反比例する結果となった。骨材体積比が大きくなることで骨材間の距離が短くなり，近接する骨材周囲のひび割れがお互いのひび割れの進行を妨げ，見かけ上ひび割れが少なくなった可能性が考えられる。L2.5，M1.2 は目視での観察と同様にひび割れ面積は大きい結果となった。

3.6　乾燥収縮ひずみとひび割れの関係

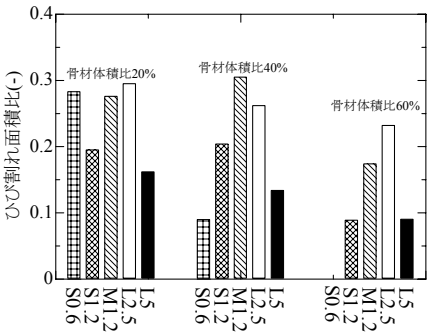
図－11 に乾燥収縮ひずみとひび割れ面積比の関係を示す。ひび割れ面積比は**図－10** と同じ値を用いた。本実験で確認した表層部のひび割れからは粒径によるひび割れの入り方に違いは観察できたが，乾燥収縮ひずみとの相関は見られない。



図－8　骨材体積比と骨材粒径の影響（上：乾燥収縮ひずみ，下：質量変化率）



図－9　L2.5-40 の二値化画像



図－10　ひび割れ面積比

4.　結論

本検討ではモルタルの粒径範囲と骨材体積比が及ぼす

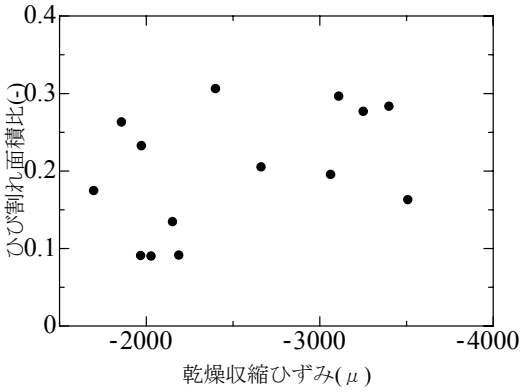
乾燥収縮ひずみへの影響を確認した。さらに，20℃ 60%RH 下で平衡状態に達したモルタル表層部のひび割れ状況を蛍光塗料により可視化し，骨材の粒径範囲によるひび割れの入り方，および乾燥収縮ひずみとの相関について考察し，以下のような知見を得た。

1) モルタルにおいて骨材粒径範囲を変化させると，乾燥収縮ひずみは変化したが，その変化と粒径範囲には一定の傾向がみられなかった。

2) 骨材量が多いほど乾燥収縮ひずみは小さくなり，骨材量が少ないほど乾燥収縮ひずみは大きい。骨材体積比 40%と 60%の乾燥収縮ひずみの差は 500μ ほどであるが，40%と 20%では 1500μ ほど差があり，骨材体積比 20%において乾燥収縮ひずみは極端に大きい。

3) 骨材粒径が均一な場合，モルタルにひびが多く入り，大小様々な粒径の骨材を用いたモルタルは蛍光エポキシ樹脂の含浸で確認できるひび割れが少なかった。

4) モルタル表層部のひび割れと乾燥収縮ひずみには相関はなかった。



図－11　乾燥収縮ひずみとひび割れ面積比の関係

参考文献

1) 後藤幸正，藤原忠司：コンクリートの乾燥収縮に及ぼす骨材の影響，土木学会論文報告集，No.286, pp125－137, 1976.6

2) 樋口優香，寺西浩司，江崎由佳，齊藤和秀：コンクリートの乾燥収縮ひずみに対する骨材寸法の影響，日本建築学会東海支部研究報告書，No.50，pp101－104, 2010.2

3) 篠野宏，堀口直也，丸山一平：乾燥によりコンクリート断面に生じるひずみ分布と微細ひび割れ性状の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp454－459,2012.7

4) 手塚喜勝，朝倉啓仁，中村眞一，佐々木元茂：蛍光エポキシ樹脂含浸法によるコンクリートコアサンプルの微細ひび割れの可視化手法，土木学会北海道支部論文報告集，Vol.61,No.22,005

5) 杉江和：数値解析的手法を用いたセメント系材料の収縮に関わる諸現象の考察，2013年度名古屋大学大学院環境学研究科博士前期課程学位論文，2014.2

6) F.P.Knudsen,J.Amer.Ceram.Soc.,42,376,1959

7) 寺西浩司：コンクリートとモルタルの乾燥収縮ひずみの違い，日本建築学会東海支部研究報告集, No.49, pp53－56, 2011.2

8) 丸山一平，西岡由紀子，五十嵐豪：乾燥下におけるセメントペーストの物性変化－Ⅳ．長期および短期長さ変化等温線－，第67回セメント技術大会講演要旨，pp232－233, 2013.5