

論文 水セメント比が異なるセメントペーストのフレッシュ時の収縮現象に関する検討

渡辺 暁央*1・近藤 崇*2・廣川 一巳*3

要旨：複数の水セメント比のセメントペーストについて、ASTM C1698 に準じたコルゲートモールドによる長さ変化試験を実施して、打設から凝結に至るまでのフレッシュ時の収縮について検討した。試験装置は、30 度に傾斜させた測定台にコルゲートモールドに打設した供試体を設置し、レーザー変位計により収縮を自動計測した。その結果、打設直後から凝結に至るまで大きな収縮が発生しており、その収縮量は水セメント比が大きくなるほど大きくなる。このフレッシュ時の収縮の要因について検討するため、ブリーディング試験および水和度測定による化学収縮の算出を行ったが、現時点では明確な関係性が得られていない。

キーワード：コルゲートモールドによる長さ変化試験、ブリーディング、Powers モデル、化学収縮

1. はじめに

コンクリートの研究においては、体積変化の制御が重要な課題として位置づけられている。水和熱による膨張と収縮、乾燥収縮や自己収縮等、凝結後において部材の拘束にともなう内部応力に起因するひび割れの発生要因となり、収縮の定量化と防止法の検討が長年実施されている。特に、構造物の断面補修の現場で使用される材料は、水和反応過程において材料の体積変化が発生しないことが望まれており、体積変化が非常に少ない無収縮モルタルが開発されている。しかし、無収縮モルタルは凝結後に有害な収縮が発生しないことをコンセプトとしており、打設から凝結に至る収縮については製品性能に記載されていない。これは、基本的な考え方として、凝結前のフレッシュ時の体積変化は、ひび割れ発生の観点から無害であること、また、フレッシュ時の体積変化を容易に測定する方法が確立されていないことにも原因の一つと考えている。もし、打設から凝結までのフレッシュ時についても体積変化のない材料が開発されれば、補修工事における空間充填等を目的とした有意義な材料となる可能性がある。

そこで、著者らは、フレッシュ時の体積変化を容易に評価する方法について検討し、体積変化(長さ変化)を測定する試験の一つである ASTM C1698 のコルゲートモールドによる長さ変化試験に着目した。本手法は、セメントペースト・モルタルの自己収縮を容易に評価する手法として主に国外で使用されている^{1), 2), 3)}。また、国内では五十嵐ら⁴⁾が本手法を採用して自己収縮の研究を実施しており、彼らの工夫としてレーザー変位計による自動測定を導入している。このレーザー変位計による測定方法を適用すれば、打設から凝結に至るまでのフレッシュ

時の収縮を評価できる可能性があると考えられる。ASTM の規定では、コルゲートモールドにセメント硬化体を打設して水平に静置し、そのセメント硬化体の凝結(終結)を測定開始時間として、基準棒と長さの差をダイヤルゲージで測定し、長さ変化を評価するものである。著者らの研究では、この ASTM の長さ変化試験装置について、ダイヤルゲージによる手動測定をレーザー変位計による自動測定に変更するとともに、打設から凝結までの収縮を適切に測定するために、写真-1 に示すように 30 度に傾斜させた台にコルゲートモールドを静置して長さ変化を測定した。コルゲートモールドを水平ではなく傾斜した台に設置した理由は、水平に設置した場合、セメント硬化体の収縮にともない、レーザー変位計側の端部が収縮による変位を示すだけでなく、固定端となるべき反対側の端部も収縮による変位が発生してしまう。そのため、測定台を傾斜させることにより、傾斜の下側の端部を固定端として、傾斜の上側の端部をレーザー変

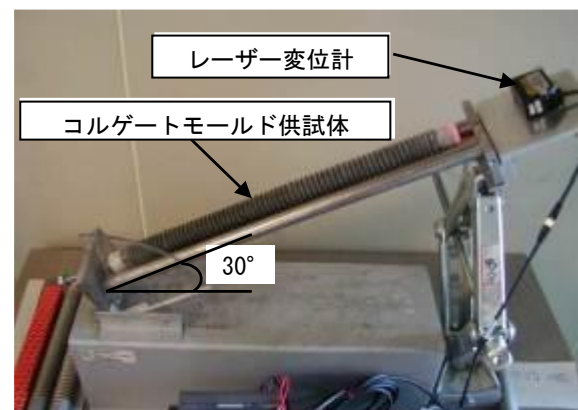


写真-1 長さ変化測定装置

*1 苫小牧工業高等専門学校 環境都市工学科准教授 博士(工学) (正会員)

*2 苫小牧工業高等専門学校 環境都市工学科准教授 博士(工学)

*3 苫小牧工業高等専門学校 環境都市工学科教授 (正会員)

位計で測定することにより、コルゲートモールドの全長に対する長さ変化を直接評価できるようにした。既往の研究では、膨張性を示すセメント硬化体に対して本手法を適用しており、打設から凝結に至るまでの収縮が測定できることを示した^{5), 6), 7)}。しかし、この凝結前の収縮に関しては、どのような特性を示すかを明確に示した研究事例はほとんど認められない。また、コルゲートモールドを傾斜した測定台に設置するという工夫は、傾斜の上側にブリーディングが比較的多く発生して、水平に設置した場合と比較して適切な評価ができていないのかという疑問もある。

本研究では、ASTM C1698 のコルゲートモールドによる長さ変化試験を一部改良した装置を使用して、数種類の水セメント比のセメントペーストにおいて、打設直後の収縮を測定する。この試験で得られる打設から凝結(終結)までの収縮量(フレッシュ時の収縮)に着目して、水セメント比の違いによる収縮量の変化を明らかにすることを目的とする。また、ブリーディング試験による単位容積ブリーディング率の評価、および凝結時の水和度を測定して Powers モデルによる内部組織構成率の評価を行う。これら結果とフレッシュ時の収縮を関連づけて、収縮の要因について考察を行う。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

セメントは普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm³)を使用した。水セメント比が 20~60%のセメントペーストを作製した。なお、水セメント比が 20%のセメントペーストはポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤を添加している。練り混ぜは、オムニ式モルタルミキサーを使用し、高水セメント比のセメントペーストでも可能な限り均質な練り上がりとなるようにした。

2.2 コルゲートモールドによる長さ変化試験

ASTM C1698 に従い、直径約 30mm、長さ約 425mm のポリエチレン製コルゲートモールドの片側にテフロン製の栓をして、振動台の上に鉛直に設置し、振動を加えながら、上部からセメントペーストを注ぎ込んだ。その後、テフロン製の栓をして密閉し、長さ変化試験用の供試体とした。これを写真-1 のように、30 度の傾斜をつけた設置台に静置した。供試体下端部のテフロン栓を固定端として、上端部のテフロン栓に対して、レーザー変位計(測定範囲±10mm、分解能 0.1mm、サンプリング周期 10 分)を使用して長さ変化を自動測定させた。試験は、20±2℃の恒温室内で実施した。測定本数は、各水セメント比の供試体ごとに 3 本の測定を行った。

なお、一連の研究を行う前に、設置台の角度の影響を把握するため、水セメント比が 50%のセメントペースト

に対して、角度が 0 度および 30 度に変化させた場合の試験を実施した。

2.3 凝結試験

JIS R5201 に準じて、各水セメント比のセメントペーストの凝結試験を実施した。なお、高水セメント比のセメントペーストでは、増粘剤を用いなければブリーディングの影響により厳密な測定が困難であるが、コルゲートモールド内のセメントペーストの状況を検討するため、増粘剤は使用していない。そのため、本研究結果は、ブリーディングの影響を受けた状況下での始発、終結時間を測定している。

2.4 ブリーディング試験

JIS A1123 に準じて、各水セメント比のセメントペーストのブリーディング試験を実施した。JIS 規格におけるブリーディング率は、試料の表面積に対するブリーディング量を規定しているが、本研究では体積変化の観点から考察するために、単位体積セメントペーストにおけるブリーディング水量を定義して、下記の式(1)に基づいて評価した。

$$B=V_b/V_p \quad (1)$$

ここに、B:単位体積ブリーディング率、V_b:ブリーディング水量(cm³)、V_p:セメントペーストの体積(cm³)

2.5 水和度の測定

各水セメント比のセメントペーストを直径 50mm×高さ 100mm の円柱供試体に打設して密閉した。20±2℃の恒温室内にて静置し、下記に示す 2 つの手法で水和度を測定した。

(1) 反射電子像の画像解析による方法⁸⁾

終結時間の供試体から 10mm 四方の供試体を切り出し、エタノール浸漬により水和反応を停止させた。真空樹脂含浸装置にてエポキシ樹脂を含浸させ、硬化後、研磨・琢磨を行い、反射電子像取得試料とした。反射電子検知器を装備した走査型電子顕微鏡にて、倍率 500 倍で反射電子像を取得した。得られたセメント硬化体の反射電子像について、未水和セメント粒子に関する 2 値化を行い、面積率を求めた。ランダム構造の切断面の面積率は体積率に等しいことを利用して、式(2)にて水和度 α_{BEI} を計算した。

$$\alpha_{BEI}=1-V_i/V_0 \quad (2)$$

ここに、V_i:反射電子像の画像解析にて得られた未水和セメントの体積率、V₀:配合時のセメントペースト中のセメントの体積率

(2) 結合水の測定による方法

始発および終結時間の供試体から破碎した試料を採取してエタノール浸漬により水和反応を停止させた。105℃の恒温槽で乾燥を行い、自由水を完全に蒸発させた。この試料の質量を測定した後、1050℃の電気炉で強熱して、

質量減少を測定した。式(3)にて水和度 α_{ig} を計算した⁸⁾。

$$\alpha_{ig} = (M_{105} - M_{1050}) / M_{1050} / 0.23 \quad (3)$$

ここに、 M_{105} :105℃の恒温槽で乾燥させた試料の質量(g)、 M_{1050} :1050℃で強熱した試料の質量(g)

2.6 Powers モデルによる内部構成相の計算⁹⁾

Powers モデルは、1g のセメントが完全水和するのに必要な水が 0.23g であり、セメントと水が結合して水和物の固形相を形成する。このときの化学収縮による体積変化は、結合水体積の 0.254 倍である。その水和物固形相とゲル空隙が一体となり、水和生成物を形成する。水和生成物中のゲル空隙の空隙率は 0.28 である。これらを整理することにより、セメント硬化体の内部組織の構成を水和度の関数として示すことができる。本研究では、化学収縮に着目し、式(4)により化学収縮量 $V_{cs}(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$ を算出した¹⁰⁾。なお、文献に示されているとおり、本式は完全に水和した場合のセメント硬化体の化学収縮量を水和度で低減した式であるが、低水セメント比において配合時のセメントが完全に水和しない場合にも適用が可能であり、この場合は配合水が水和反応で消失した時点で水和反応が停止し、その段階の水和度までの範囲で本式が適用できる。

$$V_{cs} = \rho_c \cdot 6.410^{-5} (1-p) \alpha \quad (4)$$

ここで、 ρ_c :セメントの密度(g/cm^3)、 p :配合時の水の体積率($= (w/c) / (w/c + \rho_w / \rho_c)$; w/c :水セメント比、 ρ_w :水の密度、 ρ_c :セメントの密度)、 α :水和度(α_{BEI} , α_{ig})

3. 実験結果

3.1 傾斜が測定結果に及ぼす影響

図-1 は、水セメント比が 50% のセメントペーストについて長さ変化測定装置の設置台の傾斜角を 0 度および 30 度に変化させたときの長さ変化試験の結果について、3 本の試験値のうち代表的な 1 本の測定値を示したものである。いずれの角度においても打設直後に大きな収縮を示し、材齢 8 時間程度で収縮が終了している。傾斜角 30 度の測定結果と比較して、傾斜角 0 度の収縮量が小さく測定されている。これは、コルゲートモールドを水平に設置したため、変位計による測定を実施する端部と反対側の端部において、測定原理上は固定端となるべき部分においても収縮による変位が発生したためである。そこで、固定端側において、収縮による変位量を基準棒との差から求めて、傾斜角 0 度の測定値と合計して補正を実施した。その結果を青線(傾斜角 0° 補正後)で示すが、この値は 30 度とほぼ同じ測定値となることが確認された。このことは、コルゲートモールドを水平に設置して測定する ASTM の手法について、測定台を傾斜させて測定しても、供試体全体に及ぼす収縮量に大きな影響を与えないことを示しているといえる。仮に、水平に供試体

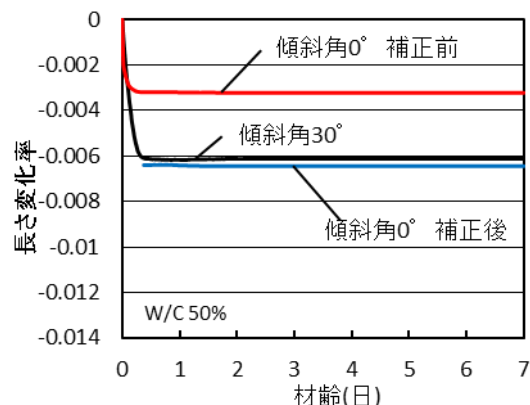


図-1 角度を変化させた場合の長さ変化試験
(水セメント比 50%)

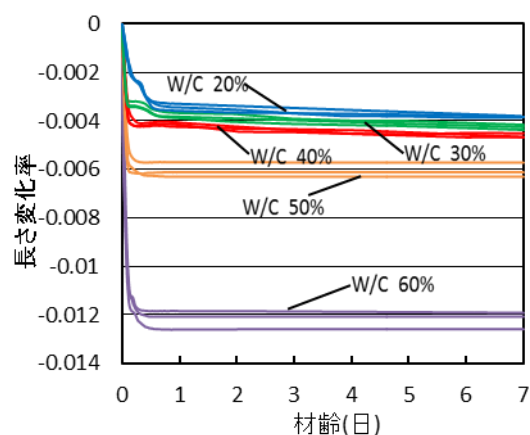


図-2 水セメント比の違いによる長さ変化率の相違

を設置して自動計測による収縮を実施するのであれば、供試体の両端部にレーザー変位計を設置して試験を実施することが求められる。しかし、測定装置の設計や測定データの解析処理の容易さを考慮すれば、1 台の変位計による測定が望ましいと考え、測定台を傾斜させて測定する手法を提案する。以降の検討では、傾斜角 30 度の測定を行い、水セメント比の相違が測定結果に与える影響について議論する。

3.2 水セメント比の相違による収縮量の相違

図-2 は、水セメント比が 20~60% のセメントペーストの長さ変化試験の結果を示したものである。いずれの水セメント比においても打設直後から大きな収縮を示している。この初期の収縮は水セメント比が大きくなるほど大きくなり、水セメント比が 20% では収縮率が約 0.003 であるのに対して、水セメント比が 60% では約 0.012 となっている。また、測定値のばらつきも、高水セメント比のペーストほど大きくなるようであり、水セメント比が 20% ではほぼ同じ測定値が得られているのに対して、水セメント比が 50% および 60% では測定値のばらつきが

0.001 程度認められる。水セメント比が 40%以下の低水セメント比のセメントペーストは、終結後も継続的な収縮が測定され、自己収縮が発生していることが確認される。一方、水セメント比が 50%および 60%のセメントペーストは、終結後から材齢 7 日までの期間で、レーザー変位計の検出限界(0.0002)以上の収縮は確認できなかった。

3.3 凝結試験結果

表－1 はセメントペーストの凝結試験の結果である。高性能 AE 減水剤を使用した水セメント比が 20%のセメントペーストを除いて、水セメント比が大きくなるほど始発、終結時間が長くなる。

3.4 ブリーディング試験結果

図－3 は、ブリーディング試験の結果である。単位体積ブリーディング率は、水セメント比 60%のセメントペーストが 0.18 と最も大きく、水セメント比が小さくなるにしたがいブリーディング率が小さくなり、水セメント比が 20%および 30%ではブリーディングが発生していない。また、水セメント比が 40～60%のセメントペーストのブリーディングは、材齢約 2 時間で終了している。

3.5 凝結における水和度

図－4 はセメントペーストの始発および終結時における水和度の測定結果を示したものである。終結時における画像解析法および結合水量法による水和度の測定結果は水セメント比 60%を除いてほぼ一致する。水セメント比が 60%のセメントペーストにおける画像解析法による測定では、切り出した試料が軟弱で切断および研磨・琢磨の段階で、未水和セメント粒子のはく離等があり、適切な評価ができなかった可能性があることが考えられる。一方、結合水量法による始発の水和度については、終結より小さい値ではあるものの、その差が小さい。これは、始発に水和反応が発生している状況では、エタノール浸漬による水和の即時停止が難しい可能性が考えられ、厳密な始発時間は、本研究の実験結果よりも若干早い可能性があることに留意して考察する必要があるといえる。

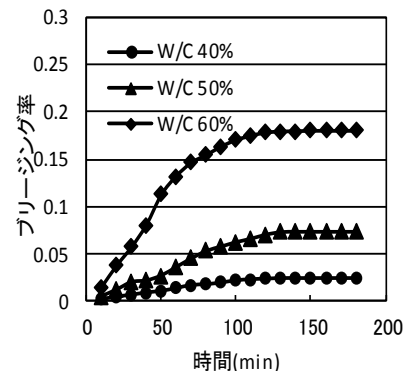
4. 考察

4.1 初期の長さ変化と凝結の関係

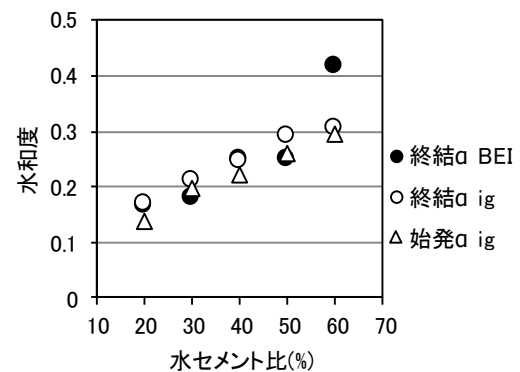
図－2 に示したコルゲートモールドによる長さ変化試験の結果では、打設直後から著しいフレッシュ時の収縮が測定された。この初期の収縮は、表－1 に示す凝結時間と密接に関係していることが推定される。そこで、初期の収縮と凝結時間との対応を図－5 に示す。いずれの水セメント比においても打設からの経過時間に比例する形で直線的に収縮が発生している。水セメント比が 40%以下の低水セメント比では、この直線形状が始発の時間を境に緩やかなものとなる。また、水セメント比が 20%

表－1 凝結試験結果

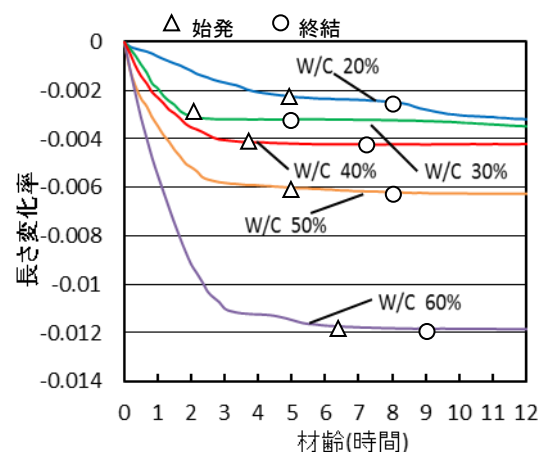
W/C(%)	20	30	40	50	60
始発	5h26m	2h34m	4h12m	5h09m	6h31m
終結	7h45m	5h35m	7h35m	8h02m	9h11m



図－3 ブリーディング試験結果



図－4 水和度の測定結果



図－5 初期の長さ変化と凝結時間の関係

のペーストでは、終結とともに収縮が大きくなっていることが確認され、大きな自己収縮が発生していることがわかる。一方、高水セメント比では、初期の直線的な収縮は、始発より 2～3 時間早い段階で終了している。また、高水セメント比においては、終結以降の長さ変化は認められない。

この打設直後の初期収縮は、凝結までの期間で発生している。凝結がセメントペーストの骨格構造の形成を示していることから、打設から始発までは、水和反応による体積変化が、長さ変化試験の結果に直接影響することが推定される。また、高水セメント比では、打設から2時間程度の間で発生するブリーディングによる体積変化を考慮する必要があるものと考えられる。そこで、ブリーディングおよび水和反応による化学収縮の観点から、初期の収縮の要因について考察する。

4.2 凝結までの収縮に及ぼすブリーディングの影響

図-6は、打設直後から始発までの間のフレッシュ時の収縮率と単位容積ブリーディング率の関係を示したものである。長さ変化試験とブリーディング試験では、試験条件が異なり直接比較することが必ずしも適切とはいえないが、単位容積ブリーディング率の大きさに比較して、長さ変化試験の収縮率が小さいものである。また、コルゲートモールドという密閉された空間では、ブリーディングが発生してもコルゲートモールド内で材料分離が発生するだけで、コルゲートモールド全体の体積が変化するわけでないためと考えられる。そのため、コルゲートモールドによる長さ変化試験の測定結果は、ブリーディングの影響が少ないと推察される。

4.3 凝結までの収縮に及ぼす化学収縮の影響

図-7は、結合水量法により測定した始発の水和度から計算した化学収縮量と長さ変化試験による初期の収縮率との関係を示したものである。Powersモデルによる化学収縮量の計算結果は、いずれの水セメント比においても約 $0.02\text{cm}^3/\text{cm}^3$ である。これは、セメントペーストの骨格構造を形成するために必要なセメントの水和度は、水セメント比により異なるものの、ビカー針を支えるのに必要なセメントペースト単位体積あたりの生成量は、いずれの水セメント比においても同じであることを示している。この結果の解釈については、さらなるデータの蓄積が必要であるとともに、始発時間における正確な水和水度測定をいかに確立するかという課題がある。

仮にいずれの水セメント比においても始発時の化学収縮量が等しいのであるなら、長さ変化試験で得られる初期の収縮率が高水セメント比になるほど大きくなるという傾向と合致しないことになる。長さ変化試験で得られる打設直後の初期収縮は、化学収縮を反映していることを仮定して検討を実施したが、現時点では明確な結論が得られていない。初期の収縮と水和反応による骨格構造の形成過程については、さらなる検討が必要である。

5. まとめ

本研究は、ASTM C1698 に準じたコルゲートモールドによるセメントペーストの長さ変化試験を行い、打設か

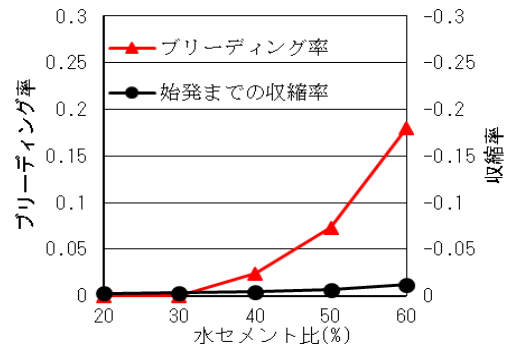


図-6 初期の収縮率とブリーディング率の関係

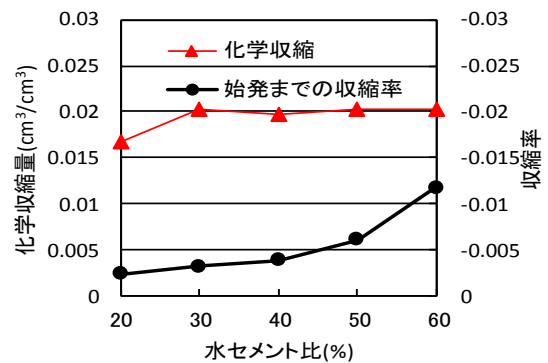


図-7 水和水度の測定結果

ら凝結(終結)までに発生するフレッシュ時の収縮について検討を行った。得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 打設から終結までのフレッシュ時の収縮を自動測定する場合は、コルゲートモールドの設置台に傾斜をつけることにより、測定が可能となる。測定台を30度傾けて長さ変化試験を実施した結果、測定値は傾きの影響をほとんど受けないことを確認した。
- (2) 長さ変化試験では、いずれの水セメント比のセメントペーストにおいても、打設直後から著しい収縮が測定された。この収縮は、水セメント比が大きいほど大きな収縮率を示した。
- (3) 終結後の長さ変化は、低水セメント比(W/C=40%以下)のセメントペーストにおいて自己収縮による収縮が確認されたが、高水セメント比(W/C=50, 60%)では長さ変化が認められなかった。
- (4) 打設直後からの著しい収縮は、低水セメント比では始発時間まで、高水セメント比では始発の2~3時間前までであり、その後ゆるやかな収縮になる。
- (5) 打設から始発までの収縮率について、単位体積ブリーディング率および化学収縮との対応を検討したが、現時点で明確な関係性を得ることができていない。

謝辞

本研究の実験は、苫小牧工業高等専門学校環境都市工

学科および環境システム工学専攻の学生の卒業研究および特別研究の一環として実施したものである。協力していただいた学生に、謝意を示す。

参考文献

- 1) Millard, M. J. and Kurtis, K. E.: Effects of lithium nitrate admixture on early-day cement hydration, *Cement and Concrete Research*, Vol.38, No.4, pp.500-510, 2008
- 2) Mohr, B. J. and Hood, K. L.: Influence of bleed water reabsorption on cement paste autogenous deformation, *Cement and Concrete Research*, Vol.40, No.2, pp.220-225, 2010
- 3) Sant, G. and Lothenbach, B. et al.: The origin of early age expansions induced in cementitious materials containing shrinkage reducing admixtures, *Cement and Concrete Research*, Vol.41, No.3, pp.218-229, 2011
- 4) 荒金延明, 五十嵐心一, 小池祐輝: 空間分布特性から見た超吸水性ポリマーの内部養生効果, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.32, No.1, pp.449-454, 2010.7
- 5) 上村清志, 廣川一巳, 渡辺暁央: 焼成ホッキ貝殻粉末を混入したモルタルの初期膨張特性, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.34, No.1, pp.556-561, 2012.7
- 6) 石井允都, 渡辺暁央, 廣川一巳: 焼成貝殻粉末を使用したモルタルの膨張特性について, *プレストレストコンクリート工学会 第 21 回シンポジウム論文集*, pp.541-544, 2012.10
- 7) 石井允都, 廣川一巳, 渡辺暁央: 焼成ホッキ貝殻粉末および焼成ホタテ貝殻粉末混入モルタルの膨張特性の相違について, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.35, No.1, pp.1567-1572, 2013.7
- 8) 井上豪, 五十嵐心一: 2,3 の手法により求めたセメントの水和度の比較, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.27, No.1, pp.541-546, 2005.7
- 9) Powers, T.C.: Physical Composition of hardened Portland cement paste, *ACI Journal*, Title No.67-24, pp.404-407, 1970
- 10) Jensen, O.M. and Hansen, P.F: Water-entrained cement-based materials I. Principles and theoretical background, *Cement and Concrete Research*, Vol.31, No.4, pp.647-654, Apr.2001