

論文 高炉スラグ微粉末を用いたモルタル供試体の水分逸散と収縮特性に与える養生及び乾燥温度履歴の影響

加藤 優典^{*1}・辻 貴大^{*2}・浅本 晋吾^{*3}

要旨：近年、高炉セメントを用いた大型地下構造物で収縮ひびわれが発生した事例が報告されており、材齢初期の水和発熱と自己収縮が検討されている一方で、中期材齢以降の温度履歴を考慮した乾燥収縮の検討は少ない。そこで本研究では、高炉スラグ微粉末を混入したモルタル供試体を異なる温度条件下にて養生、乾燥させ、逸散水量および収縮を計測した。その結果、養生、乾燥いずれかで高温を経験したスラグ混入の供試体は水分逸散が小さい一方で収縮が大きくなり、この傾向は比表面積の大きい高炉スラグ微粉末ほど顕著に現れた。この理由として、空隙の緻密化に伴い固体表面エネルギーが増大し収縮を引き起こすと考察した。

キーワード：高炉スラグ微粉末、水分逸散、乾燥収縮、温度、表面エネルギー、比表面積

1. はじめに

製鉄の際に副産物として発生する高炉スラグ微粉末をセメントに混入した高炉セメントは、一般のポルトランドセメントと比較し環境負荷が小さい、水和発熱が低いといった特徴を有するため、高炉セメントを用いた地下構造物および大型構造物が普及している。しかしながら、高炉セメントを用いた構造物に想定以上の収縮ひびわれが発生した事例も報告されている¹⁾。高炉セメントを用いた場合、強度発現が遅い、自己収縮が大きい、引張クリープが小さいといった特徴がひびわれ発生の要因として考えられているが、配合、養生および供用環境に対し各々の要因が複雑に関連しているため、支配的な要因は解明されておらず、収縮ひび割れの予測を困難にしている。

マスコンクリートの場合、材齢初期から中期にわたり膨大な水和発熱により内部は高温状態が維持される。高温環境下ではコンクリートの水和反応の促進によって、自己乾燥が予想される。高炉セメントを用いた場合、自己収縮が増大することが指摘されており、コンクリート標準示方書においてもその体積変化を考慮することが原則とされている²⁾。そのため、温度応力解析を用いた水和発熱による温度上昇、自己収縮の予測式が提案されている²⁾。一方で、乾燥収縮はさほど大きくないという報告がある³⁾。水和反応に起因する自己収縮、および水分の逸散に起因する乾燥収縮は、いずれもコンクリート内部空隙の乾燥が原因であると考えられるため、条件によっては、中期材齢以降でも内部空隙の乾燥によって多大な収縮を引き起こす可能性が予想される。

以上のことから本研究では、早強ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を混入したモルタル供試体を作

製し、養生、乾燥中にさまざまな温度履歴を与え、乾燥時の逸散水量および収縮を計測し、温度の履歴が収縮に与える影響について検討を行った。また、比表面積の大きい高炉スラグ微粉末を混入した場合や普通ポルトランドセメントをベースセメントとした場合についても検討した。

2. 実験概要

本実験に用いたモルタル供試体の示方配合を表-1に示す。早強ポルトランドセメントをベースとし、比表面積がそれぞれ 4200, 8440cm²/g の高炉スラグ微粉末を粉体重量比 30% でセメントと置換し、40×40×160mm の角柱供試体を作製した。水粉体比(W/B)および水セメント比(W/C)は全て 50% で統一した。材齢 1 日で脱型、7 日まで水中養生し、その後恒温恒湿槽にて相対湿度 60% で乾燥させた。養生→乾燥の温度条件は 20℃→20℃、20℃→60℃、60℃→20℃、60℃→60℃の 4 パターンを設定し、乾燥開始後経時的に収縮および逸散水量を測定した。中期材齢以降にも 60℃の高温乾燥履歴を与えた理由は、スラグ混入コンクリートの高温にさらされる原子力発電所の部位への適用性を検討するとともに、学術的な観点から、高温環境で多量の水分が逸散したときの乾燥収縮について検討するためである。収縮ひび割れの計測は、供試体側面にコンタクトチップを基長 100mm としてエポキシ樹脂で貼り付け、精度 1/1000(mm)のコンタクトゲージで長さ変化を測定した。逸散水量については養生終了直後から各供試体の質量を測定し、質量の減少量を供試体体積で除して逸散水量と定義した。なお、養生から乾燥に異なる温度条件で移行する際の温度ひずみの影響を排除するため、供試体は養生終了前の 3 時間乾燥温

*1 埼玉大学大学院 理工学研究科博士前期過程 (正会員)

*2 埼玉大学 工学部建設工学科

*3 埼玉大学大学院 理工学研究科助教 博士(工学) (正会員)

表-1 供試体の示方配合

	スラグの比表面積 (cm ² /g)	W/B (W/C)	水 (kg/m ³)	セメント (kg/m ³)	スラグ (kg/m ³)	細骨材 (kg/m ³)
早強セメントベース	無混入	50	366	734	—	1040
	4200	50	364	509	218	1040
	8440	50	364	509	218	1040
普通セメントベース	無混入	50	367	734	—	1028
	4200	50	363	509	218	1028

セメント：早強ポルトランドセメント 比重 3.13 ブレーン比表面積 4700cm²/g

普通ポルトランドセメント 比重 3.15 ブレーン比表面積 3580cm²/g

スラグ：BF4000 高炉スラグ 比重 2.90 ブレーン比表面積 4200cm²/g

BF8000 高炉スラグ 比重 2.90 ブレーン比表面積 8440cm²/g

細骨材：川砂 比重 2.60（早強セメントベース），2.57（普通セメントベース）

度の水中に静置し、質量、基準長さを計測し、乾燥を開始した。供試体は各条件で3体ずつ作製し、結果はその平均とした。さらに、普通ポルトランドセメントをベースセメントとした供試体も作製し、同様の実験を行った。

3. 実験結果

3.1 逸散水量経時変化

(1) 早強セメントをベースにした場合の比較

早強セメントに比表面積 4200cm²/g の高炉スラグ微粉末を混入、無混入の供試体を常温、高温で乾燥させた場合の逸散水量の経時変化を図-1, 2 にそれぞれ示す。常温での乾燥である図-1 においてスラグ混入有無で比較をすると、常温で養生した場合にはスラグ混入の供試体の逸散水量の方が大きいのにに対し、高温で養生した場合には、無混入の供試体の逸散水量の方が大きくなっている。一方、図-2 で示されるように高温乾燥下では、いずれの養生温度の場合でもスラグ無混入の供試体の逸散水量の方がスラグ混入に比べ大きくなった。養生温度で比較すると、図-1 のスラグ無混入の場合を除き、スラグ混入・無混入いずれの供試体も高温で養生した場合に逸散水量が小さくなっている。常温で養生し、常温で乾燥を施した場合では、スラグ混入の供試体は無混入の供試体と比べ水和の進行が遅れ、空隙が荒くなるため、逸散水量が増大すると考えられる。一方、養生・乾燥いずれかで高温の履歴を受けた場合、スラグ混入のモルタルは水酸化カルシウムとの反応が促進され内部空隙が緻密になり、その結果逸散水量が小さくなったと推察される。

スラグ無混入の供試体で、常温乾燥において、空隙が緻密化する高温養生の方が、常温で養生したものより乾

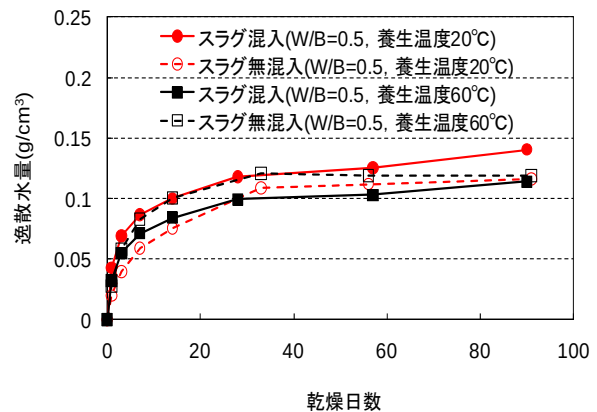


図-1 20°C乾燥の逸散水量経時変化
(養生温度、スラグ混入有無の比較)

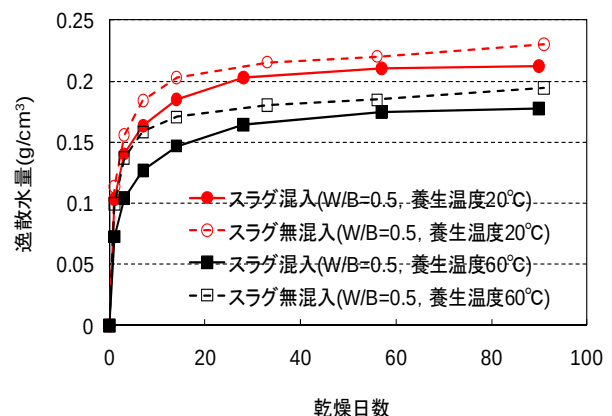


図-2 60°C乾燥の逸散水量経時変化
(養生温度、スラグ混入有無の比較)

燥初期の逸散水量が大きくなっている理由については現状不明であり、今後再検討する予定である。

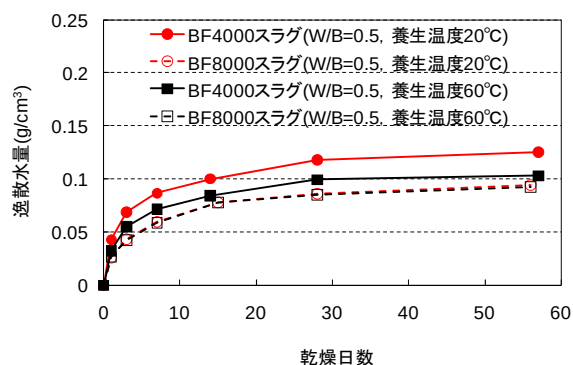


図-3 20℃乾燥の逸散水量経時変化
(養生温度，スラグ比表面積の比較)

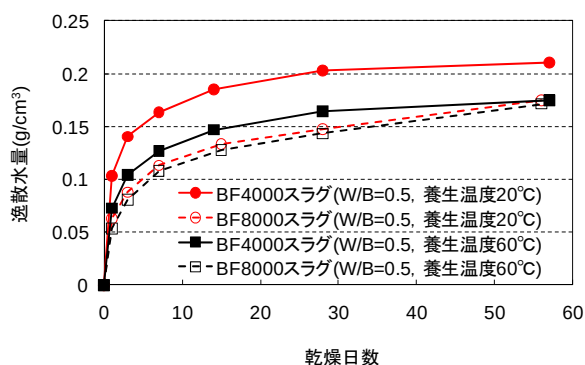


図-4 60℃乾燥の逸散水量経時変化
(養生温度，スラグ比表面積の比較)

(2) 高炉スラグ微粉末の比表面積による比較

早強ポルトランドセメントに比表面積 4200cm²/g (以下, BF4000 スラグ) または 8440cm²/g (以下, BF8000 スラグ) の高炉スラグ微粉末を混入した供試体を, 常温, 高温で乾燥させた場合の逸散水量の経時変化を図-3, 4 にそれぞれ示す。混入するスラグの比表面積で比較すると, 常温養生の場合乾燥温度に関わらず細かい BF8000 スラグの逸散水量が小さいことが観察される。一方高温養生の場合, いずれの乾燥温度条件下であっても逸散水量にスラグの比表面積の影響はみられない。

養生温度で比較すると, 前述のとおり高温養生の場合 BF4000 スラグを用いた供試体の逸散水量は乾燥温度に関わらず小さくなる。一方で, 細かい BF8000 スラグを用いた場合, 常温乾燥, 高温乾燥ともに逸散水量に対する養生温度の影響は小さい。既往の研究から, 比表面積の大きい高炉スラグ微粉末を混入した場合, 常温であっても材齢初期での水和反応の進行が早いことが報告されている⁴⁾。従って, BF8000 スラグは常温養生であっても水和反応が十分に進行し, 養生期間内に高温で養生した場合と同様に緻密な空隙分布が形成されたと考えられる。以上のことから, 比表面積の大きい高炉スラグ微粉末を混入した場合, 内部空隙が緻密になり, 水分逸散が小さくなったといえる。

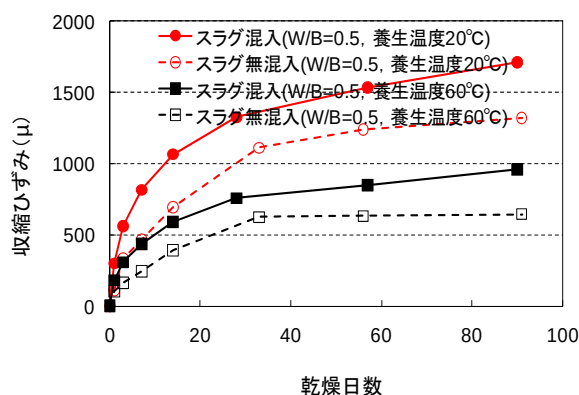


図-5 20℃乾燥の収縮ひずみ経時変化
(養生温度，スラグ混入有無の比較)

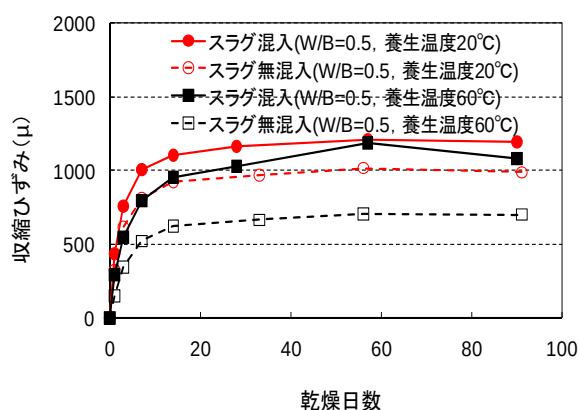


図-6 60℃乾燥の収縮ひずみ経時変化
(養生温度，スラグ混入有無の比較)

3.2 収縮ひずみ

(1) 早強セメントをベースにした場合の比較

図-5, 6 に, 各条件における収縮ひずみの経時変化を示す。スラグ混入の有無で収縮ひずみを比較すると, 養生, 乾燥温度に関わらず, スラグ混入の供試体の収縮の方が大きい。その理由については, 後述する。

養生温度で比較すると, 常温乾燥の場合, 高温養生を経験した供試体はスラグ混入の有無によらず, 収縮が小さくなっている。高温養生を経験した供試体はスラグ混

入の有無に関わらず, 常温養生の場合と比べて水和が促進され, 前述のように空隙が緻密化し乾燥が緩慢になると考えられる。また, この空隙の緻密化に伴い常温養生に比べ供試体のヤング率が増加したことも乾燥期における収縮低減に起因していると推察される。

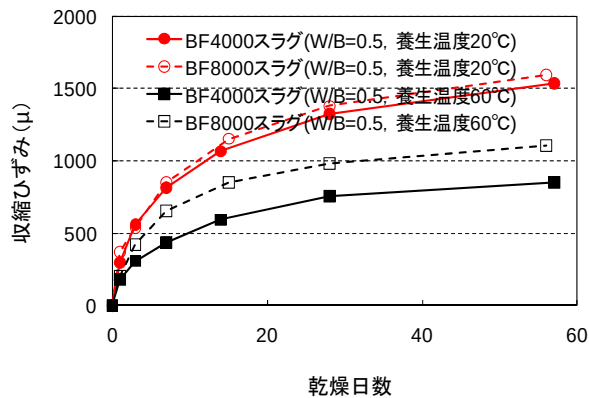


図-7 20℃乾燥の収縮ひずみ経時変化
(養生温度、スラグ比表面積の比較)

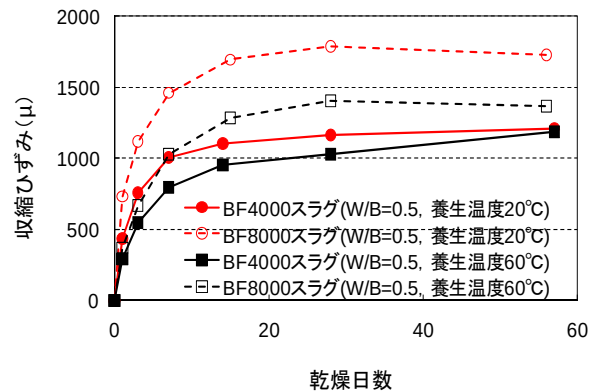


図-8 60℃乾燥の収縮ひずみ経時変化
(養生温度、スラグ比表面積の比較)

(2) 高炉スラグ微粉末の比表面積による比較

図-7, 8 に比表面積の異なる高炉スラグ微粉末を用いた供試体の各乾燥条件における収縮ひずみの経時変化を示す。混入するスラグの比表面積で比較すると、いずれの温度条件でも BF8000 スラグを混入したモルタルの収縮が大きいたことがわかる。前節の結果も勘案すると、高炉スラグ微粉末を混入すると温度条件によらず収縮が増大し、収縮の増大はスラグの比表面積が大きいほど強くなる傾向にあるといえる。一般に比表面積の大きい混和材を用いたセメント硬化体は、水酸化カルシウムとの反応の促進、フィラー効果⁴⁾により内部空隙が緻密になることが報告されている。これより、高炉スラグ微粉末を用いた場合の収縮の増大は、内部空隙の緻密さに強く依存していることが推察される。

養生温度で比較すると、スラグの粒径の違い、乾燥温度によらず、高温で養生した供試体の方が収縮は小さくなっている。これは前節で考察したように、高温養生による剛性の増加が、要因として考えられる。

3.3 逸散水量と収縮ひずみ関係

(1) 早強セメントをベースにした場合の比較

図-9, 10 に、早強ポルトランドセメントをベースにした場合の逸散水量と収縮ひずみの関係を示す。養生、乾燥ともに常に常温環境に暴露されていた場合では、同一逸散水量に対する収縮はスラグの混入の有無で違いは見られない(図-9)。一方で、養生もしくは乾燥時に高温履歴がある場合、スラグを混入したモルタルの同一逸散水量に対する収縮は無混入のものに比べ大きい。要因として、収縮における固体の表面エネルギーの増加⁵⁾が考えられる。以下、その理由について述べる。

固体表面エネルギーの増加がもたらす収縮は、低湿度領域での収縮を説明する上で有力とされている。ゲル空

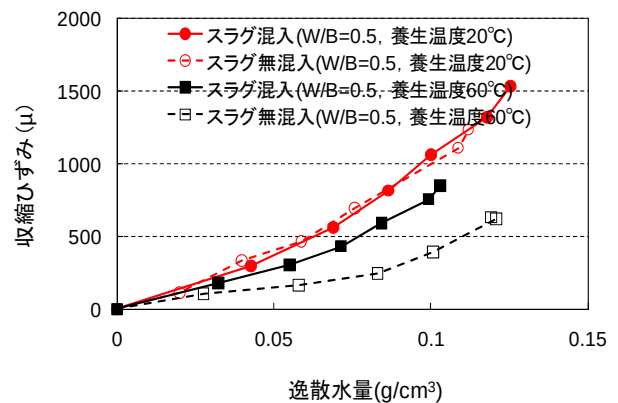


図-9 20℃乾燥の逸散水量と収縮ひずみの関係
(養生温度、スラグ混入有無の比較)

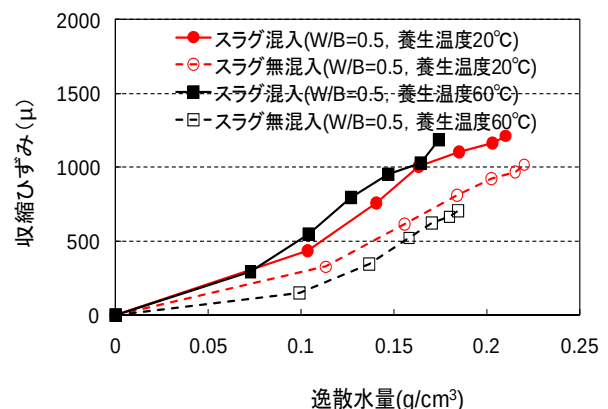


図-10 60℃乾燥の逸散水量と収縮ひずみの関係
(養生温度、スラグ混入有無の比較)

隙や層間空隙といった微細空隙中の水分が逸散すると、壁面の固体表面エネルギーが増加し、固相間の引張力が増大することにより巨視的な収縮を引き起こすと考えられている。スラグ混入の供試体で水和が進行すると緻密な空隙が増大し、毛細管空隙に比べ、層間空隙と

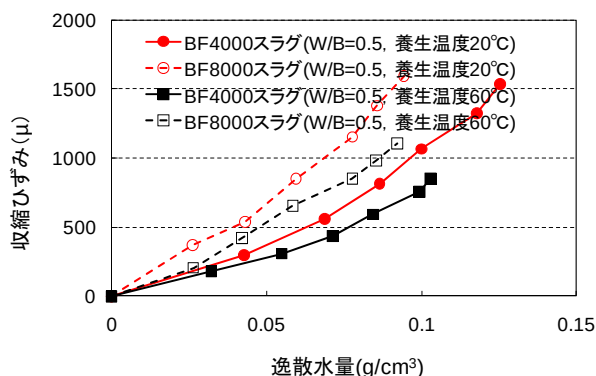


図-11 20℃乾燥の逸散水量と収縮ひずみの関係
(養生温度、スラグ比表面積の比較)

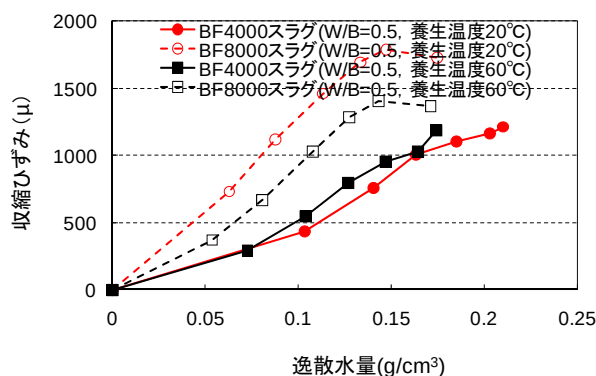


図-12 60℃乾燥の逸散水量と収縮ひずみの関係
(養生温度、スラグ比表面積の比較)

いった微細な空隙が占める割合が大きくなる。相対湿度60%の中湿度域においても、Kelvin 式によれば平衡状態では液状水は直径 4nm 以下の空隙にしか存在しないことになり、それ以上のナノメートルスケールの不飽和空隙が多く存在すれば、表面エネルギーの影響は大きくなると考えられる。さらには、60℃温度下で乾燥させると一部の層間水が逸散することが報告されており⁶⁾、これらの水分の逸散が層間距離を縮め、収縮を増大させると考えられる。実際、高温乾燥の方がスラグを混入した場合の同一水分逸散における収縮増大の傾向が顕著である。以上のことから、空隙が緻密なスラグ混入の供試体はわずかな水分逸散で収縮が大きくなったと推察される。

次に、養生温度の影響について述べる。図-9、10において、3.2節で述べたとおり、高温養生によって水和が促進することで、剛性が増加し、供試体の同一逸散水量に対する収縮が小さくなったと考えられるケースが多い。一方で、後に示す3.3(3)節の普通セメントベースの場合(図-13、14)で顕著であるが、高温養生を経験した場合、同一逸散水量に対する収縮が常温で養生したものより上回っているものもある。これは、高温養生による剛性の増加とともに、空隙の緻密化によって、上述のように表面エネルギーの影響が卓越したためだと考えられる。高温養生による空隙緻密化に伴う剛性の増加、表面エネルギーの影響増大の各寄与量については、空隙構造の観点から今後検討していく予定である。

(2) 高炉スラグ微粉末の比表面積による比較

図-11、12にそれぞれBF4000スラグ、BF8000スラグを混入した場合の、逸散水量と収縮ひずみの関係を示す。図-11、12によれば、養生、乾燥温度によらず、BF8000スラグ混入のモルタルの同一逸散水量に対する収縮はBF4000に比べ大きい。比表面積の大きい高炉ス

ラグ微粉末を混入したモルタルは、水酸化カルシウムとの反応の促進、フィラー効果によって空隙構造がより緻密になるため、表面エネルギーがより大きくなり、わずかな水分逸散でも収縮を増大させたと考えられる。

高温で乾燥させた場合、図-12では、BF4000スラグ混入のモルタルの養生温度の影響が観察されないのに対し、BF8000スラグ混入のモルタルでは高温養生を施した場合に同一逸散水量に対する収縮が小さい。この傾向は常温乾燥の場合の傾向と一致している。

(3) 普通セメントをベースにした場合の比較

図-13、14にそれぞれ普通セメントをベースセメントとした場合の各条件における逸散水量と収縮ひずみの関係を示す。スラグ混入の有無で同一逸散水量に対する収縮を比較すると、常温養生、常温乾燥の場合には無混入のモルタルが大きい、それ以外の温度条件では、スラグ混入のモルタルが大きくなっている。普通セメントをベースとした場合も、常温養生、常温乾燥を経験したスラグ混入のモルタルは、水和の進行が遅く、空隙が粗くなるため、同一逸散水量に対する収縮が小さくなると考えられる。これより各温度履歴において、普通セメントをベースとした場合の同一逸散水量に対する収縮の挙動は、早強セメントをベースとした場合と同様の傾向があることがわかる。

なお、図-12、14において逸散水量の増加に伴い収縮が明らかに回復する現象が観察される。この現象は、高温環境下におけるインクボトル中の水分の逸散が要因の一つとして考えられる。高温環境下では、インクボトル形状空隙にある水分が逸散し得ることが既往の研究で報告されている⁶⁾。また、十分な乾燥期間の後には、気液界面は一定となり毛細管張力は一定値に保たれる。一方、その後インクボトル水が逸散すると系内に存在する水分量が減少するため、飽和度は小さくなる。結果とし

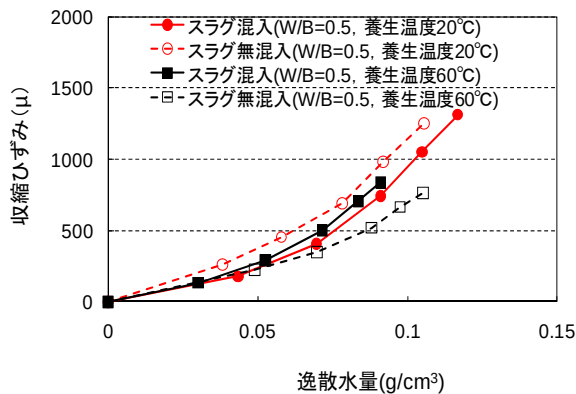


図-13 20℃乾燥の逸散水量と収縮ひずみの関係

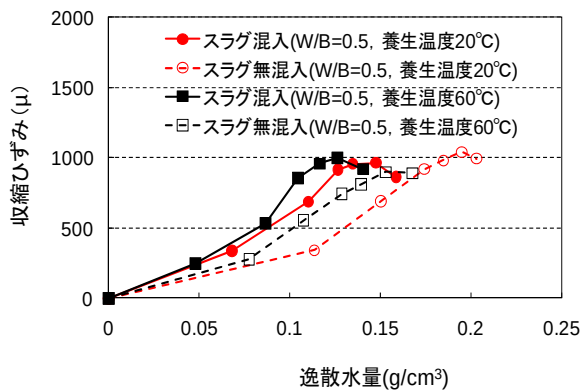


図-14 60℃乾燥の逸散水量と収縮ひずみの関係

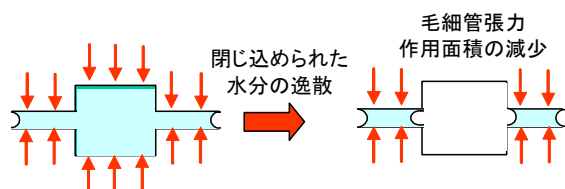


図-15 毛細管張力の作用面積の変化⁷⁾

て、毛細管張力の作用する面積が減り、収縮応力が減少することになり、収縮が回復したと推察される(図-15)。⁷⁾

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) スラグを混入した場合、高温(60℃)養生を施すと水和進行が促進され、空隙の緻密化、それに伴う剛性の増加によって、乾燥期における逸散水量及び乾燥収縮は常温養生と比較し小さくなった。スラグ混入モルタルの養生温度敏感性が確認された。
- (2) スラグを混入した場合、養生もしくは乾燥時に高温履歴を受けると水和の進行が促進し、供試体内部空隙が緻密になり、ゲル、層間空隙で発生する表面エネルギーが増大するため、無混入の場合と比較し、

同一逸散水量に対する収縮は大きくなると推察された。

- (3) 比表面積 4000g/cm² クラスに対し、8000g/cm² クラスの緻密なスラグを混入した場合、フィラー効果の影響が大きくなり、空隙の緻密化が卓越し、同一逸散水量に対する収縮が増大することが示唆された。
- (4) 高温乾燥環境における一部の供試体で、逸散水量が増加するにも関わらず、収縮が明らかに回復する現象が観察された。要因の一つとして、既往の研究で指摘されているように、インクボトル水の逸散による毛細管張力の作用面積が減少したことが考えられた。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金(若手研究(B), 課題番号: 21760342, 研究代表者: 浅本晋吾)の補助を受けて実施した。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 須網功二ほか: 底面を拘束されたスラブにおける自己収縮によるひび割れ発現現象の解明, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, 2003
- 2) 土木学会: コンクリート標準示方書[設計編: 標準], 2007
- 3) 川村祐史ほか: 混和材を用いたセメントペーストの強度および収縮ひずみ, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2001.9
- 4) 李長江ほか: セメントペーストの細孔構造および圧縮強度に及ぼす高炉スラグ微粉末の影響, 日本建築学会構造系論文集, 506 号, 1-6, 1998.4
- 5) Powers, T.C: Mechanisms of Shrinkage and reversible creep of hardened cement paste, International Conference on the Structure of Concrete, Cement and Concrete Association, London, pp.319-344, 1968
- 6) 石田哲也ほか: 温湿度履歴に関するセメント硬化体中の水分平衡・移動モデルの高度化, 土木学会論文集, No.795/V-68, pp.39-54, 2005.8
- 7) 浅本晋吾, 石田哲也: 温度履歴に依存するセメント硬化体の細孔内水分状態と体積変化機構の連関, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.451-456, 2005