

機関番号：12401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760342

研究課題名(和文) 混和材料を複合的に用いたコンクリートの収縮ひび割れ評価システムの開発

研究課題名(英文) Development of shrinkage cracking assessment system of concrete containing mineral admixture

研究代表者

浅本 晋吾 (ASAMOTO SHINGO)

埼玉大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：50436333

研究成果の概要(和文)：本研究では、高炉スラグ微粉末、フライアッシュといった産業廃棄物をセメントと置換したコンクリートの収縮ひび割れ発生を予測するため、実験による系統的な検討を行った。その結果、混和材をセメントと置換した場合、材齢初期の養生温度が高いと反応が促進され、空隙が緻密化し、収縮が小さくなる一方で、伸び性能、引張強度が低下し、ひび割れ抵抗性が低下する可能性が示唆された。以上のことから、混和材を用いたコンクリートの収縮ひび割れを予測するうえで、温度履歴を考慮することは重要であることが分かった。

研究成果の概要(英文)：The comprehensive experimental study for the assessment of the shrinkage cracking of concrete with industrial waste such as blast furnace slag and fly ash is carried out. The experimental results suggest that the shrinkage cracking resistance after curing at elevated temperature is likely to be decreased due to reductions of tensile creep and tensile strength when the mineral admixture is replaced with cement, while the dense pore structure arising from the promoted chemical reaction under high temperature can mitigate the shrinkage. It is significant to take into account the effect of temperature history of concrete with mineral admixture to predict the shrinkage cracking.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：収縮ひび割れ、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、養生温度、引張クリープ

1. 研究開始当初の背景

近年、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末といった産業副産物をセメントに置換して、コンクリートの混和材として有効利用することで、環境負荷低減、循環型社会実現を目指す動きが活発になっている。これらの混和材の使用によって、ワーカビリティ向上、水和発熱低減、長期耐久性向上など高機能コンクリートを達成することも可能であり、積極的な利用が工学的、社会的に求められているといえる。一方で、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート構造物に多数の収縮ひび

割れが発生した事例が近年報告され^{1),2)}、従来では想定されなかった早期劣化の原因解明が求められている。現状、これら混和材を用いたコンクリートの材料挙動の予測は、広範な実験に基づいた経験式に頼っており、用途拡大、材料の多様化には対応できない状況にある。収縮ひび割れ発生要因についても国内外で多くの研究報告がなされているが、収縮、強度発現、剛性、引張クリープなどが複雑に影響し合うため統一的な結論は得られていないのが実情である。

以上の背景のもと、本研究では、水和によ

る強度発現、収縮、鉄筋拘束に伴う引張クリープなど複合作用を考慮して、混和材料を単一、もしくは複合的に用いたコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性について総合的な検討を行うことを目的とした。

2. 研究の目的

本研究では、各種混和材料を用いたコンクリートの時間依存変形特性を、微視的な材料挙動の観点から解明し、収縮ひび割れの発生、進展を任意の境界条件で予測できる解析システムを構築することを最終的な目的とした。さらに、高炉スラグ微粉末とフライアッシュを複合使用することで、その性能について検証を行い、産業副産物を適切に組み合わせた次世代の高機能コンクリートの開発を目指した。

3. 研究の方法

(1) 混和材混入モルタルの水分逸散、収縮特性に関する実験

まず、高炉スラグ微粉末、フライアッシュを単一、もしくは、複合的に混和したモルタルの養生温度、水分逸散、乾燥収縮特性に着目して基礎的な実験を行った。

本実験に用いたモルタルは、細骨材率を体積比で40%とし、水粉体比は全て50%で統一した。供試体サイズは、40×40×160mmの角柱供試体である。配合は、普通ポルトランドセメントのみを用いた供試体（以下、OPC）、高炉スラグ微粉末を粉体質量比30%でセメントと置換した供試体（以下、BS30）、フライアッシュについては20%で置換した供試体（以下、FA20）、さらに、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末を15%ずつ30%のセメントと置換した供試体（以下、FA15BS15）の4種類である。材齢1日で脱型し、材齢7日まで20℃もしくは60℃で水中養生し、その後恒温恒湿槽にて20℃相対湿度60%で乾燥させた。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してから、乾燥を開始した。乾燥開始後、各供試体の質量変化、長さ変化率（＝収縮ひずみ）を計測した。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。

また、乾燥収縮試験で使用した試料を用いて水銀圧入試験を行った。試験の都合上、乾燥56日の計測終了後、封緘状態で乾燥100日まで各温度の恒温恒湿槽内で静置したものを用い、FA15BS15は今後計測予定である。

(2) 混和材混入モルタルの収縮ひび割れ抵抗性に関する実験

次に、養生温度に着目して、高炉スラグ微粉末、フライアッシュを用いたモルタルの収縮、引張クリープ、強度、剛性が収縮ひび割れ抵抗性に与える影響について実験によって

総合的に検討した。

本実験では、学術委員会の試験方法³⁾を参考に、限られた実験スペースを有効に使うため小型のモルタル供試体を用い、収縮ひび割れを意図した区間に導入することでばらつきを抑え、収縮ひび割れ抵抗性を効率的に検討できる試験方法を開発した。53 x 53 x 420mmの小型角柱供試体の中心に、両端部130mmにねじ切りを設けたφ17mmの鋼棒を埋設した。鋼材端部のねじ切りとモルタルのかみ合いによって、テフロンシートを用いて付着を除去した中央の区間160mmのモルタルの収縮を拘束し、収縮拘束応力として引張応力を伝達させた。配合は、(1)のシリーズと同様に、水粉体比50%、細骨材体積率40%のモルタルで、セメントの代わりに高炉スラグ微粉末を30%置換したBS30と60%置換したもの（以下、BS60）、フライアッシュを20%置換したFA20、および混和材無混入のOPCの3種類とした。養生、乾燥条件は、(1)と同様である。

収縮ひび割れを意図した区間内に発生させるため、中央120mmの2側面のみを乾燥させ、その他無拘束区間の一部と定着区間の全ての面は封緘し、付着除去区間の中央で乾燥が集中するように工夫した。乾燥開始より、供試体の鋼棒中央のひずみを計測することで、収縮拘束によってモルタル断面に作用する引張応力を算出した。また、乾燥区間の体積表面積比が拘束供試体と等しい無拘束の供試体で乾燥収縮ひずみを同時に計測した。乾燥収縮ひずみの絶対値から鋼棒ひずみの絶対値を差し引いたものを拘束引張応力によってもたらさせる引張ひずみとし、それから供試体に作用する引張の弾性ひずみを引いた値を引張クリープひずみとした。弾性ひずみは鋼棒から得られる引張応力をヤング率で除することで求めた。ヤング率は、同配合、養生条件で作製したφ50 x 100mmの円柱供試体を20℃湿度60%環境で乾燥し、養生直後と乾燥後経時的に圧縮試験によって計測し、得られた結果は時系列で線形補間した。収縮ひび割れの発生は、鋼棒のひずみがひび割れ発生によって大きく低下したときを発生時点とみなし、目視でも確認を行った。

4. 研究成果

(1) 養生温度に着目した混和材混入モルタルの水分逸散、収縮挙動の結果および考察
常温乾燥における水分逸散量の経時変化を図-1に示す。常温養生の場合、FA20およびFA15BS15の水分逸散量がほぼ同じで大きく、ついで、BS30、OPCの順となった。また、高温養生を施した場合は、常温養生の場合とは逆にOPCの水分逸散量が最も大きく、BS30、FA20およびFA15BS15の順に水分逸散量が小さくなった。OPCに比べ、混和材を混入した

供試体は常温での養生では水和反応が緩慢であるため、乾燥時の空隙分布はOPCより荒くなる一方で、高温養生を施した場合、混和材の潜在水硬性、ポゾラン反応などが促進され乾燥時にOPCより空隙が緻密化するため、上記のような水分逸散挙動になったと推察される。特にフライアッシュが混入されているFA20、FA15BS15の供試体は、常温養生後の乾燥では水分逸散量が大きくなる一方で、高温養生を施すと、いずれもBS30より水分逸散が小さくなることから、高炉スラグ微粉末よりフライアッシュを混入した方が養生温度に敏感で、空隙の変化が大きいと推察される。

図-2に、各温度で養生したのち乾燥を施した各供試体の空隙分布の結果を示す。上述のように、FA15BS15については、現在実験中であるため、OPC、BS30、FA20の結果で比較検討する。各配合の空隙分布の違いに着目すると、常温養生では、混和材を添加した供試体の方が、100nm以上の比較的粗大な空隙が多く分布している。一方、高温養生を施すと、混和材の反応促進によって、100nm付近の空隙がOPCに比べ減少し、特にFA20は10nm以下の緻密な空隙が増加している。これより空隙分布からも混和材の温度敏感性、高温養生による空隙緻密化が確認された。

次に、各配合、各養生条件での、乾燥収縮ひずみの経時変化を図-3に示す。常温養生後の収縮ひずみに関しては、水分逸散には各供試体で相違が見られたにもかかわらず、いずれの養生温度においても混和材有無、あるいは混和材の種類によってさほど相違は見られない。一方で、高温養生させた場合には、乾燥初期には、FA15BS15の収縮が最も小さく、FA20の収縮が他の配合より若干大きくなった。養生温度で比較すると、高温養生した場合、混和の有無や種類によらず常温養生に比べ収縮が小さい。これは、高温養生を経験した場合、水和反応が促進され供試体の剛性が増したためと考えられる。

各配合の収縮ひずみと水分逸散の関係を考えてみると、水分逸散量が大きくても収縮ひずみは必ずしも大きくならない。図-2に示したように、常温養生では、混和材を混入した場合、100nm以上の比較的粗大な空隙が多く分布し、そこにあった水分が逸散することで、水分逸散を増大させる一方で、収縮への寄与は小さいと考えられる。高温養生を施すと、混和材置換によって、上記100nm以上の空隙が無混入に比べ減少し、特に、FA20は、10nm以下の空隙が大きく増加し、水分逸散が減少する一方で、収縮はOPCより大きくなった。以上のことから、100nm以上の径を持つ空隙内の水分は、収縮にさほど寄与せず、10nm以下の微細な空隙内の水分の逸散が収縮に大きく寄与すると考えられ、比較的孔径の

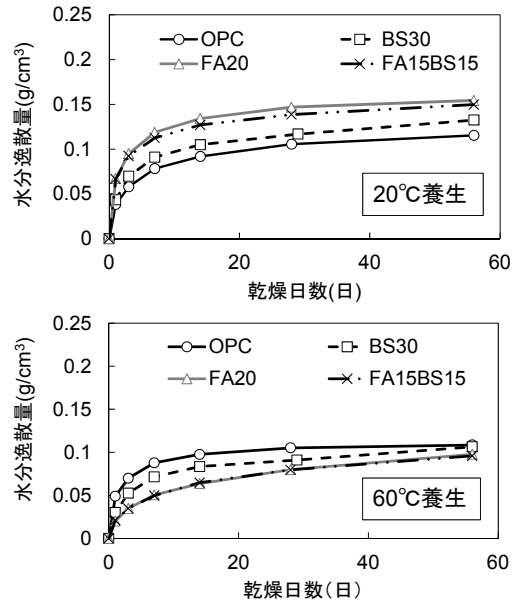


図-1 水分逸散量の経時変化

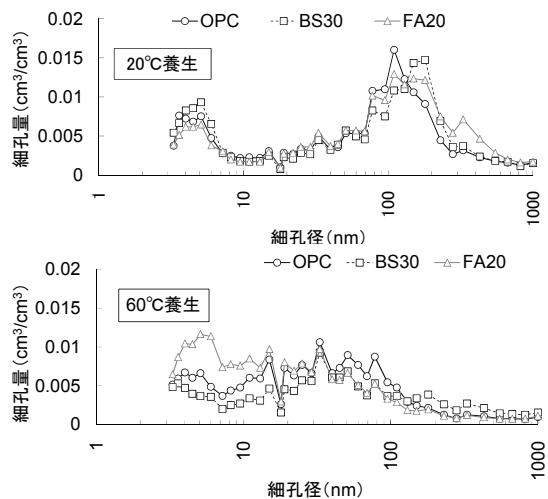


図-2 乾燥後の空隙分布

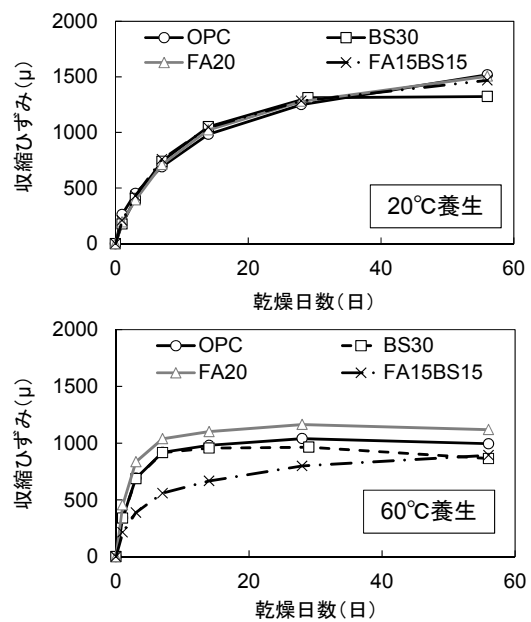


図-3 収縮ひずみの経時変化

大きいところで作用する毛細管張力より、微細な空隙で影響が卓越するC-S-Hゲルの固体表面エネルギーの増大が各配合の収縮の相違をもたらしたと考えられる。

(2) 養生温度および混和材置換が収縮ひび割れ抵抗性に与える影響評価

まず乾燥収縮ひずみの結果を図-4に示す。

図-3と同様に、配合によらず、高温養生を施すと、剛性の増加によって常温養生に比べ乾燥収縮が小さくなったと考えられる。(1)の結果とは異なり、高炉スラグ微粉末を添加すると、収縮が若干大きくなる傾向が現れたが、乾燥時間が短いため、長期の乾燥を施すと、大きな違いはなくなると推察される。

次に、各配合、養生条件での収縮拘束応力の経時変化を図-5に示す。各配合、養生条件での供試体は2体ずつあり、収縮ひび割れ発生日数にも相違がみられたので、分けて図示する。各2体の収縮拘束応力の漸増は、いずれの条件でもほぼ一致しており、収縮の拘束条件のばらつきは小さいと思われる。収縮ひび割れ発生日数についても、フライアッシュを置換した供試体を除けば、2体の差は概ね1日程度以内に収まりばらつきも小さく、ひび割れもすべての条件で乾燥区間に発生したため、乾燥部分を工夫した本試験法は有効であったと考えられる。

常温養生の後、各配合の収縮ひび割れ発生までの時間を比較すると、多少のばらつきはあるものの、FA20とOPCは同程度で、高炉スラグ微粉末置換のBS30、BS60の方が収縮ひび割れ発生までの時間は短い傾向にある。これは、研究委員会の報告³⁾と一致する。常温養生を施したときのBS60の乾燥収縮ひずみは4配合間で最も大きい(図-4)、乾燥2日くらいまでは、BS30と大きな相違はなく、また、後述する引張クリープの影響で、収縮ひび割れ発生日数は、BS30と大きく変わらない結果になったと考えられる。OPC、FA20は、高炉スラグ微粉末を置換した供試体に比べると、図-4に示されるように、収縮の漸増が緩慢で、収縮拘束応力が引張応力に達するまでの時間が長く、収縮ひび割れ発生日数が長くなったと推察される。漸増する拘束応力下での引張クリープの影響については、後に述べる。

次に、高温養生させたときの収縮拘束応力と収縮ひび割れ発生日数について考察する。

図-5に示すように、どの配合も高温養生によって収縮ひずみが低減するため、FA20を除けば、常温養生したものに比べ収縮ひび割れ発生までの日数は増大する傾向にある。圧縮試験によるヤング率の計測結果によれば、全配合で高温養生によってヤング率が増加しており、緻密さが増し引張強度も増大すると考えられ、収縮ひずみの低減と引張強度の増大に

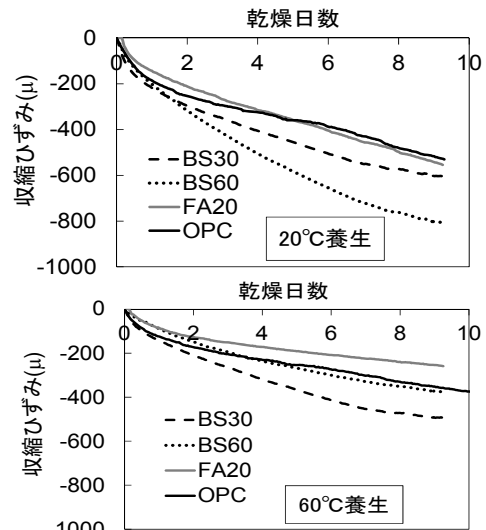
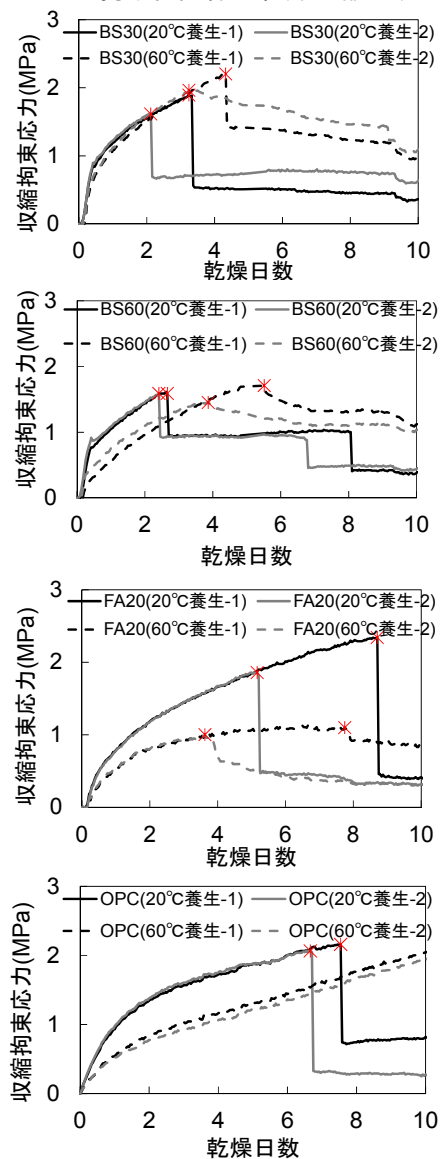


図-4 無拘束供試体の乾燥収縮ひずみ



* : 収縮ひび割れ発生日数

図-5 拘束供試体の収縮拘束応力の経時変化と収縮ひび割れ発生日数

よって、収縮ひび割れ発生までの日数が伸びたと思われる。OPC供試体については、本実験条件では、26日乾燥させてもひび割れは発生せず、高温養生によって、収縮が低下し引張強度は増大したことで、収縮ひび割れ抵抗性が増大したと考えられる。一方で、混和材を置換した供試体は、高温養生を施しても、常温養生に比べ、収縮ひび割れ発生までの収縮拘束応力にさほどの増進はなく、特に、フライアッシュに関しては、収縮ひび割れ発生時の収縮拘束応力が極端に小さい。この理由について以下考察する。

混和材を置換した場合、高温養生を施すと、無置換のものに比べ、(1)の結果から示されたように、空隙の緻密化が進み、供試体からの水分逸散を遅延させる。高温養生後乾燥させると、ごく表層部は、外気に直接触れているため乾燥による平衡が早く大きく収縮するが、緻密化した組織で囲まれている内部では乾燥が緩慢で収縮の進行も非常に緩やかであるとされる。平面保持により全体で考えると収縮としては平均化され小さくなるが、こうした表層の収縮に対する内部拘束が目視で確認できないマイクロクラックを誘発すると推察される。特に、水和反応が温度に敏感なフライアッシュ置換のFA20で考えると、高温養生によって空隙緻密化が進み、表層の収縮の内部拘束が顕著になるため、マイクロクラックが入りやすいことになる。このとき、これらのマイクロクラックの発生が引張強度を低下させるために、常温養生より低応力でマクロな収縮ひび割れが発生したと考えられる。ひび割れ後の応力の低下は緩慢であり、局所化した収縮ひび割れが突発して発生するというより、微細なひび割れが分散しながら表面に発生し、最終的にそれが徐々に局所化したために、突発的な応力低下が観察されなかったと推察される。また、混和材置換率の高いBS60も常温養生とさほど収縮ひび割れ発生応力が変わらず、養生直後の剛性も常温養生のものより大きく空隙の緻密化が進んだと考えられ、上記の仮説に従えば、マイクロクラックの影響が少なからずあると考えられる。しかしながら、このマイクロクラック発生については直接的な検証はできていないため、同様の条件のもと時系列で発生状況を確認する必要がある。

次に、収縮ひび割れ発生までの引張クリープひずみの結果を図-6に示す。BS30、BS60で乾燥初期にひずみが上下する傾向がみられるのは、拘束されたモルタルの収縮ひずみは短いながらも封緘区間を含んでいること、圧縮ヤング率を単純に線形補間したことなどが理由として挙げられ、クリープひずみの増加が安定する、乾燥0.5日以上の結果で、以下考察を進める。

常温養生後のBS30、BS60のクリープひずみ

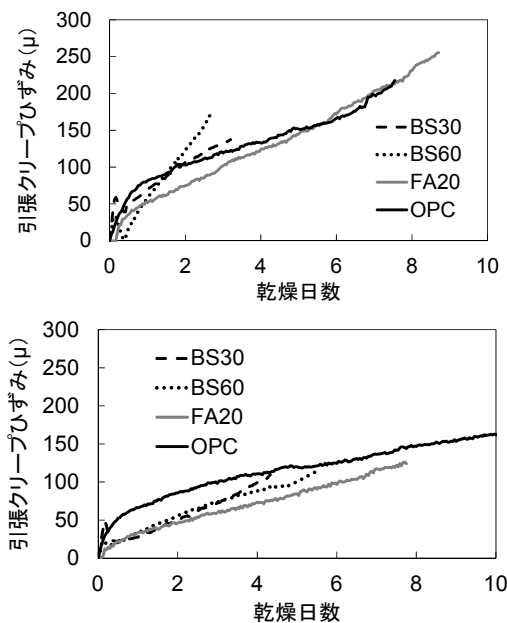


図-6 収縮拘束応力による引張クリープひずみの経時変化

を比較すると、BS60 はひび割れ発生直前の引張クリープひずみが BS30 より大きく引張応力が緩和されたため、収縮の小さい BS30 とひび割れ発生日数がさほど変わらなかったと推察される。高炉スラグ微粉末を置換したモルタルは、収縮が OPC、FA20 より大きく、収縮拘束応力が大きいにもかかわらず、乾燥初期のクリープは小さく、作用する大きな引張応力がさほど緩和されないために、ひび割れ発生が早くなったと考えられる。OPC と FA20 はほぼ同様な引張クリープ挙動を示し、収縮ひずみもさほど違いはないが、ひび割れの発生日数が長い供試体で比較すると、フライアッシュ置換モルタルでは、乾燥日数の経過に伴いクリープひずみが OPC より若干大きいため、その分拘束応力を緩和し、収縮ひび割れ発生までの時間が長くなったと推察される。

高温養生においては、OPCの引張クリープが最も大きく、収縮拘束応力を緩和したために、同じ乾燥収縮ひずみを持つBS60に比べ、拘束応力の漸増は緩やかになり、乾燥26日でも収縮ひび割れ発生が起らなかったと考えられる。高炉スラグ微粉末を置換したBS30、BS60の引張クリープはOPCより小さく、供試体の拘束応力を緩和できず、早期にひび割れが発生したと判断される。FA20は最も引張クリープが小さいが、収縮拘束応力も小さいため、持続応力に比例するクリープが小さくなったと考えられる。

(5) まとめ

本研究の主な成果を以下にまとめる。

- ・20°Cで7日程度の水中養生後乾燥を施すと、

高炉スラグ微粉末、フライアッシュといった混和材をセメントと置換した場合、無置換のものに比べ、100nm以上の空隙率が増え、水分逸散量は増大する。一方で、60℃といった高温で同期間水中養生すると、混和材の反応促進により、100nm以上の空隙は減り、10nm以下の空隙が増大するため、無置換のものより水分逸散量は低下する。

- ・混和材でセメントを置換した場合、高温養生による空隙の緻密化によって水分逸散は抑制されるものの、微細空隙の水分逸散に伴う固体表面エネルギー増大の影響が卓越し、少ない水分逸散量でも収縮は大きくなることが分かった。
- ・フライアッシュ単体、もしくは、高炉スラグ微粉末とフライアッシュを複合的にセメントと置換した場合、高温養生を施すと、高炉スラグのみで置換した場合より、空隙の緻密化が進み、常温養生に比した水分逸散の低下率が大きいことから、高炉スラグよりフライアッシュの方が水和反応の温度敏感性は高いことが分かった。
- ・高温養生を施した場合、フライアッシュを混和した配合以外は、収縮の低下に伴い収縮ひび割れ発生日数が長くなる傾向にあった。フライアッシュを混和させた場合、高温養生を施すと、空隙が緻密化するため、表層部の収縮が乾燥の緩慢な内部組織に拘束され、ごく表層部にマイクロクラックが発生し、収縮ひび割れ抵抗性が低下する可能性が示唆された。
- ・収縮拘束応力が大きくても、引張クリープが大きければ応力緩和によって収縮ひび割れ発生までの期間は長くなり、混和材を混入すると、引張クリープの特性は、養生温度の影響を大きく受けることが分かった。

以上の成果を解析システムに反映させるまでは今回至らなかったが、混和材を混入した場合、若材齢時の温度履歴によって、空隙構造、水分逸散、収縮、引張クリープ、マイクロクラック発生などの特性が大きく変化することが分かり、検討検証を重ね、解析システムに組み込むことが今後の課題と考えている。

参考文献

- 1) 土木学会：混和材料を使用したコンクリートの物性変化と性能評価研究小委員会(333委員会)報告書ならびにシンポジウム講演概要集、コンクリート技術シリーズ74, 2007
- 2) 土木学会：混和材料を使用したコンクリートの物性変化と性能評価研究小委員会(333委員会)No.2, コンクリート技術シリーズ89, 土木学会, 2010
- 3) 日本コンクリート工学協会：混和材料か

ら見た収縮ひび割れ低減と耐久性改善研究委員会報告書, 2010

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① 加藤優典, 辻貴大, 浅本晋吾: 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, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.32, No.1, pp.203-208, 2010
- ② 浅本晋吾, 宮腰良太, 辻貴大, 松井久仁雄: 固体表面に吸着する液体特性に依存するセメント硬化体の体積変化, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.32, No.1, pp.593-598, 2010

[学会発表] (計5件)

- ① 加藤優典, 混和材を用いたセメントペーストの空隙分布および水分保持性能の検討, 土木学会第65回年次学術講演会, 2010年9月2日, 北海道大学
- ② 辻貴大, 混和材を混合したモルタルの水分逸散と収縮特性に関する研究, 土木学会第65回年次学術講演会, 2010年9月1日, 北海道大学
- ③ 辻貴大, フライアッシュを混和したモルタルの収縮特性と空隙構造に関する研究, 第64回セメント技術大会, 2010年5月25日, ホテルメトロポリタン
- ④ 加藤優典, 「混和材料を使用したコンクリートの物性変化と性能評価」に関するシンポジウム, 2010年5月24日, 土木学会
- ⑤ S. Asamoto, Investigation into shrinkage behavior of mortar with blast-furnace slag based on micromechanics, Sustainable Infrastructure Development in Asia International Exchange Symposium, 14 Sep., 2009, University of Ruhuna, Sri Lanka.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

浅本 晋吾 (ASAMOTO SHINGO)
埼玉大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号: 50436333

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者