

コンクリートにおける反応生成物と骨材の適合性

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/16277

氏名	荒野 憲之
生年月日	
本籍	新潟県
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第338号
学位授与の日付	平成12年3月22日
学位授与の要件	課程博士(学位規則第4条第1項)
学位授与の題目	コンクリートにおける反応生成物と骨材の適合性
論文審査委員(主査)	川村 満紀(工学部・教授)
論文審査委員(副査)	中本 義章(工学部・教授) 鳥居 和之(工学部・教授) 五十嵐心一(工学部・助教授) 斉藤 満(金沢工業大学・教授)

学位論文要旨

ABSTRACT

This paper describes the reaction products and compatibility of aggregate in concrete. This study aims at pursuing the microstructural features in reactive aggregate containing mortars, relating them to the expansion behavior of the mortars. In this paper, it was discussed that the alkali reactivity of high-carbon ferrochromium slag and its applicability as an aggregate for concrete, the relationship between the composition of alkali silica gels and expansion of mortars, the difference of the mechanisms of ASR suppression between fly ash, slag and silica fume, and the changes in microstructural features and the characteristics of ASR gels composition in immersed in NaCl solution.

アルカリシリカ反応に代表されるコンクリートにおける反応およびその生成物が構造物の耐久性に及ぼす影響については、国内外の多くの研究者の努力によって一般の建設技術者にもかなり認識されるようになってきている。また、天然骨材の枯渇問題から、良質のコンクリートを生産し続けていくためには、良質の骨材の供給が将来的にも大きな課題となっている。このような状況下においては、コンクリート構造物の耐久性を維持管理していく上で、骨材の反応性やコンクリート中の反応生成物を解析・制御することが、従来以上に重要となってくるものと考えられる。しかし、その反応を制御し劣化を防止する手法は確立されていないため、反応性骨材の使用範囲が拡大するまでには至っておらず、その反応プロセスやメカニズムについて今も研究が続けられている。

本論文は、コンクリートにおける反応生成物と骨材の適合性について、反応生成物の微視的構造や組成とモルタルの膨張特性との関係およびそのメカニズムを明らかにすることを目的として、高炭素フェロクロムスラグの組成と反応性がモルタルの力学的な性質に及ぼす影響、アルカリシリカ反応におけるゲルの組成がモルタルの膨張性に及ぼす影響、鉱物混和材を添加した場合の膨張抑制メカニズム、NaCl 溶液に浸漬した場合の反応生成物の構造や組成がモルタルの膨張性に及ぼす影響および塩水噴霧—乾燥繰り返し条件下でのコンクリートの膨張性を検討した一連の研究をまとめたものである。

第1章では、コンクリートにおける反応生成物と骨材の適合性に関する研究の歴史的背景を中心に記述するとともに、本研究の対象であるアルカリシリカ反応に関する研究の流れを述べ、本研究の目的を明らかにした。

第2章では、高炭素フェロクロムスラグの反応性とコンクリート用骨材としての適用性を明らかにすることを目的として、クロム製鋼過程において排出されるフェロアロイ製造の副産物である高炭素フェロクロムスラグについて、その化学組成や鉱物組成とアルカリ反応性との関係、および高炭素フェロクロムスラグを骨材として使用したモルタルの力学的性質に及ぼす影響を検討し、そのコンクリート用骨材としての適用性について考察した。

その結果、高炭素フェロクロムスラグの鉱物組成は、スピネル結晶、フォルステライト結晶およびコーディエライト組成のガラス相から構成され、そのアルカリ反応性が化学法で無害でないと判定されるにもかかわらず、同スラグを骨材として含むモルタルやコンクリートは異常な膨張を示さないことから、スラグ中のガラス相はアルカリシリカ反応による有害な膨張を引き起こす可能性が低いことが明らかとなった。

また、高炭素フェロクロムスラグを骨材として使用したモルタルの圧縮強度、曲げ強度および破壊靱性は、川砂を使用した普通モルタルよりも大きく、長期材齢における強度発現が顕著であることを確認し、高炭素フェロクロムスラグ骨材粒子の剥離ひび割れや迂回ひび割れが、骨材—マトリックス間の実界面ではなく、実界面から離れたマトリックス中にて発生、進行することを確認した。従って、高炭素フェロクロムスラグは、その鉱物組成として多量のシリカを含むガラス相を有するものの、有害な膨張に繋がるアルカリシリカ反応性は低く、ガラス相中のシリカ成分がセメントマトリックスとの反応性を有し骨材粒子とセメントペーストマトリックス間の付着強度向上につながるため、コンクリート用の骨材として有望な材料と考えられる。

第3章では、アルカリシリカゲルの組成とモルタルの膨張特性との関係を明らかにすることを目的として、反応性骨材粒子（焼成フリント）を含むモルタル供試体を 0.6N NaOH 溶液および $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 飽和 0.6N NaOH 溶液に浸漬して、外部からのアルカリおよびカルシウム供給の有無による生成 A S R ゲルの組成の違いを明らかにし、アルカリシリカ反応過程とモルタルの膨張との関係および異なる養生条件下におけるモルタル中のゲルの組成と膨張の関係を検討した。また、鉱物混和材を添加してモルタル中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の量を減少させた供試体を作製し、混和材無添加の供試体との比較により、外部からアルカリが供給される場合の A S R 膨張におけるカルシウムの役割について考察した。

その結果、焼成フリントを反応性骨材として使用したモルタルにおけるアルカリシリカ反応過程は、水酸化アルカリを主成分とする細孔溶液が元々反応性骨材内に有する微細なひび割れを通して粒子内部に浸透し、骨材粒子からのシリカ成分の拡散が促進され、骨材がより多孔質となり粒子内部でアルカリシリカ反応が進行し、反応性骨材粒子内部のひび割れ内に A S R ゲルが生成すること、およびその膨張応力でひび割れ幅を拡大させペースト部を貫通するひび割れにまで至りモルタル全体の膨張を発生させることを明らかとした。

モルタル中の A S R ゲルの組成と膨張の関係について検討した結果、外部からアルカリが供給される場合には、A S R ゲル中のアルカリ量の増加はモルタルの膨張量を減少させるのに対し、ゲル中のカルシウム量の膨張量に及ぼす影響は顕著ではないことを確認した。

また、モルタル中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量を減少させたシリカフェームおよびフライアッシュ添加供試体では、外部から NaOH 溶液がモルタル内部へ充分浸透しても、膨張性の A S R ゲルが生成し難いことが明らかとなり、膨張性のゲルの生成には $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の存在が必要であることを確認した。従って、コンクリートにおいて、カルシウムは $\text{Ca}(\text{OH})_2$ として反応性骨材

粒子とセメントペーストの界面に存在し、骨材粒子からのシリカの溶出を阻止し膨張性の A S R ゲルを生成させる役割をカルシウムが有するものと考えられる。

第 4 章では、鉱物混和材によるアルカリシリカ反応抑制のメカニズムを明らかにすることを目的として、フライアッシュ、高炉スラグおよびシリカフュームを鉱物混和材として添加した反応性骨材（焼成フリント）含有モルタルについて、それらの膨張量の測定、細孔溶液の組成分析および生成される A S R ゲルの組成から、細孔溶液中のイオン濃度や生成した A S R ゲルの組成とモルタルの膨張量との関係を明らかにし、種々の鉱物混和材を添加した場合の A S R 膨張抑制効果を検討することにより、異なる鉱物混和材間における A S R 膨張抑制メカニズムの相違を考察した。

その結果、シリカフュームを添加したモルタルでは、ポゾラン反応による OH⁻イオンの消費が早期から発生することを確認し、シリカフュームによる A S R 膨張の抑制は、細孔溶液の OH⁻イオン濃度低減効果が大きくアルカリシリカ反応が抑制されるためと推察した。

それに対して、同じポゾラン物質であるフライアッシュを添加したモルタルでは、膨張を示さなかった供試体においても反応性骨材粒子内部に A S R ゲルが生成することを明らかとし、フライアッシュ添加ではポゾラン反応による細孔溶液の OH⁻イオン濃度低減効果に加え、生成するゲルの CaO 含量が少なくアルカリ含量特に Na₂O 量が高いため、ゲルの粘性が低下し膨張圧が緩和され、モルタル供試体全体の膨張が抑制されると考えられる。

一方、高炉スラグを添加したモルタルにおいて生成する A S R ゲルは、骨材とセメントペースト相との界面から 200 μm 以内の範囲の骨材内部に限定されることがわかり、高炉スラグ添加による A S R 膨張抑制は、細孔溶液中の OH⁻イオン濃度の低減効果は小さく、高炉セメントの潜在水硬性によりセメントペーストの組織の緻密化が進み、各種イオンや細孔溶液の移動度が低下し、A S R 膨張が抑制されると考えられる。

第 5 章では、NaCl 溶液に浸漬したモルタルにおける反応生成物の組成と膨張特性を明らかにすることを目的として、種々のセメントを使用した反応性骨材（焼成フリント）含有モルタルについて、NaCl 溶液に浸漬したモルタル中の A S R ゲルの組成およびセメントペースト相の微視的構造の特徴を明らかにした。さらに、反応生成物の構造や組成とモルタルの膨張特性の関係から、モルタルの膨張に及ぼすセメントの種類の影響を検討し、NaCl 溶液浸漬による膨張促進のメカニズムについて考察した。

その結果、NaCl 溶液に浸漬したモルタルの膨張量は、使用するセメントの C₃A 量が多いほど膨張は促進されることが明らかとなり、C₃A 量が多い場合は NaCl との反応で生成されるフリーデル氏塩量が増え、同反応に伴い細孔溶液中の OH⁻イオン濃度が上昇し A S R が促進されるため、モルタルの膨張量が增大すると考えられる。

浸漬溶液の種類の影響を検討した結果、NaOH 溶液に浸漬した場合に比べ、NaCl 溶液中のモルタルが長期間にわたって膨張し続けることがわかり、これは NaCl 溶液中のモルタルにおいて生成される A S R ゲルのアルカリ量が、NaOH 溶液中のモルタルの場合よりも低いことに起因すると推察した。

また、反応性骨材を含有するモルタルでは、14 日間以上 NaCl 溶液中に浸漬することにより、A S R によって形成されたひび割れに、A S R ゲルとの混合物の形態でエトリンジャイトが存在することを確認したが、浸漬期間 406 日においても骨材粒子内部に膨張性の A S R ゲルが存在することが確認され、エトリンジャイト形成の膨張量への影響は明確とはならなかった。

第 6 章では、実際の塩分環境条件下におけるコンクリートの膨張特性を明らかにすることを目的として、セメントの種類および量を変えた反応性骨材（輝石安山岩）含有コンク

リートについて、NaCl 溶液噴霧－乾燥繰り返し条件下における膨張試験を行い、乾湿繰り返し条件の膨張量への影響およびセメントの種類やアルカリ量と膨張性との関係についても検討した。

その結果、塩水噴霧－乾燥繰り返し条件下では、初期に乾燥収縮およびASR膨張の影響を受けやすく、コンクリート表面に多数のひび割れが発生することが明らかとなった。供試体の膨張量は、コンクリート中のアルカリ量の多い方が増大する傾向にあることがわかり、外部からNaClが供給される場合は、コンクリート中のアルカリ総量が少ない場合でも膨張劣化の可能性があることが明らかとなった。

第7章では、各章で得られた結果から、コンクリートにおける反応生成物と骨材の適合性について総括すると同時に、今後の課題と展望について述べた。

学位論文審査結果の要旨

本学位論文に関し、平成12年1月28日に第1回審査委員会を開き、面接審査を行なった後、論文の内容について検討した。さらに、2月1日に行なわれた口頭発表の後に第2回審査委員会を開き協議の結果、以下のように判定した。

本論文の内容は、フェロクロムスラグのコンクリート用骨材としての有効利用を目的とした基礎研究とアルカリシリカ反応のメカニズムに関する研究に分かれている。前者においては、このスラグはガラス相、スピネル、フォステライトより成ることおよびこのガラス相中のシリカ成分は有害なアルカリシリカ膨張を引き起こす可能性は低いことを明らかにしている。後者においては、アルカリシリカゲルの組成がモルタルの膨張に及ぼす影響、コンクリートのアルカリシリカ反応における $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の役割およびNaClのアルカリシリカ反応に及ぼす影響について検討し、本研究において得られた実験結果に関する限り、ゲルのカルシウム量はその膨張にほとんど影響しないが、アルカリ量の小さいゲルの膨張量は大きいことおよび膨張性のゲルが生成するためには、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が存在する必要があることを明らかにしている。また、NaCl溶液に浸漬したモルタルにおいて、膨張によって生じたひびわれ中にエトリンジャイトが生成されるが、それがモルタルの膨張に影響を及ぼすか否かは明確ではなかったとしている。

以上の研究成果は、フェロクロムスラグの有効利用およびアルカリシリカ反応のメカニズムの解明に貢献するものであり、博士論文として価値あるものと判定した。