

DEF と ASR の複合劣化機構に関する検討

徳島大学大学院 法人会員 ○宮内滉貴 徳島大学大学院 正会員 上田隆雄

1. はじめに

近年、DEF（エトリンガイト遅延生成）による劣化の事例が多く報告されており、特に海外で注目を集めてきたが、国内においても劣化事例の報告が増加しており、劣化機構や対策に関する検討もなされている。DEFとは、セメントの水和で生成したエトリンガイトが、蒸気養生などの高温環境下で分解された後、コンクリートの硬化後に遅延生成し、コンクリートを膨張させ、ひび割れが生じるという劣化現象であり、(1)過剰な硫酸塩(2)初期の高温条件(3)十分な水分供給、の3条件が重なった場合に発生することが知られている。一方で、アルカリシリカ反応（ASR）による劣化が進行したコンクリート構造物において、反応性生成物の中にDEFによるエトリンガイトの生成が認められる場合が多いことが報告されており、DEFとASRの複合劣化機構についても、解明が求められている。本研究では、DEFとASRの複合劣化状況を再現する実験を実施し、複合劣化のメカニズムについて検討した。

2. 実験概要

本研究では、100×100×350mmのコンクリート角柱、φ100×200mmのコンクリート円柱、φ50×100mmのモルタル円柱を作製した。水セメント比は55%で一定とし、非反応性骨材のみを用いてK₂SO₄を添加した配合をNS、反応性骨材を用いてK₂SO₄を添加した配合をRS、反応性骨材を用いてKOHを添加した配合をROとする。ここでK₂SO₄は、DEF促進を目的として、セメント中の初期含有SO₃量に加え、SO₃量がセメント量の2%となるように細骨材代替で添加した。さらにKOHは、K₂SO₄添加配合と同量のR₂O量として、総R₂O量が6.82 kg/m³となるように添加した。これらの供試体は打設後にビニールフィルムで乾燥を防止した上で4時間の前養生を20℃環境で実施し、その後、各配合半数の供試体は20℃環境で養生を継続し、残りの供試体はDEF生起条件である90℃の高温養生を実施した。高温養生を行う供試体は型枠ごと密封したビニール袋中に入れ、20℃/hの昇温速度で90℃まで加熱し、12時間保持した後に自然冷却した。材齢1日ですべての供試体を脱型し、20℃の恒温室中で7日間の封緘養生を行った。この際の封緘養生方法としては、保管するコンクリートに用いられたK₂SO₄溶液あるいはKOH溶液に浸した湿布で包んだ後にビニールフィルムで密封するアルカリラッピングの手法を採用した。その後の供試体の保管環境は、①20℃水中保管②40℃湿空保管の2種類とし、①は空隙中においてエトリンガイトの溶解析出反応による再生成が進行しやすい条件として選定し、②は促進ASR条件であり、前述の方法でアルカリラッピングを実施した供試体を温度40℃環境に保管した。保管中、コンクリート角柱供試体で、膨張率、質量、超音波伝播速度の測定を週1回行った。その後、材齢120日のモルタル円柱で細孔溶液の抽出を行い、細孔溶液中のイオン濃度(OH⁻, SO₄²⁻, Na⁺, K⁺, Ca²⁺)を測定した。また材齢130日のコンクリート円柱で圧縮強度試験を行った。

3. コンクリートの圧縮強度

図中に示した供試体名はコンクリート配合名の後に2つの数字をハイフンで結んだ形で付しており、最初の数字は養生温度、後の数字は養生後の保管温度を示している。すなわち、2, 4, 9はそれぞれ20℃, 40℃, 90℃を示しており、例えば、RS9-2は90℃養生を行った後に、20℃水中保管を行ったRS配合供試体を表している。

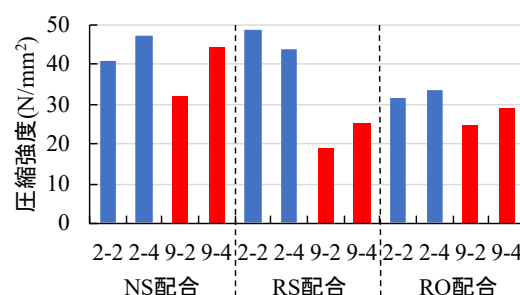


図-1 コンクリートの圧縮強度

材齢 130 日における円柱コンクリート供試体の圧縮強度を図-1 に示す。NS 配合の中では 9-2 の強度が最も小さく、外観上の変状には至っていないがコンクリート内部で DEF が進行しているものと考えられる。これに対して、RS 配合の場合、20℃養生の供試体に対して、ひび割れの発生した 9-2 および 9-4 供試体で顕著な強度低下が見られる。90℃養生の結果として劣化が進行していることから、DEF が要因となっていると考えられるが、NS 配合に比べて大きく強度低下していることから、反応性骨材を用いたことで劣化が顕著に促進されたことがわかる。RO 配合については、NS 配合や RS 配合と比べて全体的に強度が小さいことから、添加した KOH の影響でセメントの水和反応が阻害された可能性がある。

4. コンクリートの膨張率の経時変化

角柱コンクリート供試体の膨張率の経時変化を図-2 に示す。NS 配合では 9-2 の膨張が先行しているが、9-4 の膨張も徐々に増加し、材齢約 140 日以降は 9-2 を上回っていることから、ASR 促進環境である 40℃湿空保管でも DEF は進行するものと考えられる。全供試体中、最も大きい膨張を示した RS9-4 は、DEF 単独劣化の NS9-2 や、ASR 単独の影響が強い RS2-4 や、RO 配合供試体よりも顕著に大きな膨張を示していることから、DEF と ASR の相互作用によって膨張が促進された可能性がある。RO 配合については、9-4 の膨張が徐々に増大しているが全体的な膨張率は小さく、外観上のひび割れなども認められていないことから現時点では ASR 単独による劣化の程度は小さいと言える。

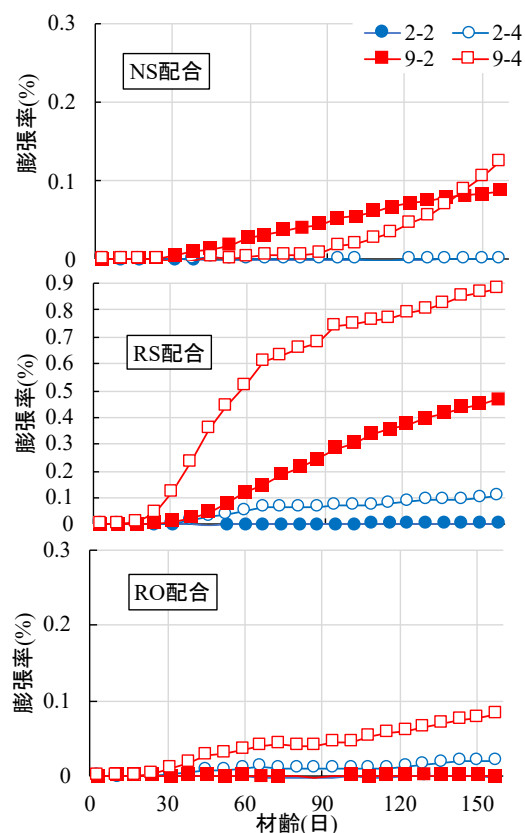


図-2 コンクリート膨張率の経時変化

5. モルタル細孔溶液のイオン組成

材齢 120 日のモルタル細孔溶液中における各種イオン濃度測定値を図-3 に示す。全体的な傾向として、20℃水中保管を行った 2-2 と 9-2 について、各種イオン濃度が顕著に小さい。これは供試体を水中保管したことで、供試体中のイオンの相当部分が水中に溶出したためと考えられることから、ここでは、40℃湿空保管を行った 2-4 と 9-2 の結果について考察を行う。NS 配合については、20℃養生の 2-4 に比べて、90℃養生の 9-4 の OH^- 濃度は小さく、 SO_4^{2-} と K^+ 濃度は大きくなっていることから、90℃養生によって 1 次生成したエトリンガイトが分解され、 SO_4^{2-} が細孔溶液中に溶出するとともに、pH が低下してエトリンガイトの再生成を促すイオン組成となっていることがわかる。これに対して、RS 配合も 9-4 は OH^- 濃度は小さく、 SO_4^{2-} の濃度は大きくなっているが、NS 配合の場合よりも SO_4^{2-} の濃度は小さい。これは、図-2 に示すように NS 配合の 9-4 に比べ RS 配合の 9-4 の方が膨張が大きくなっており、DEF の進行で SO_4^{2-} が消費されていることによるものと考えられる。

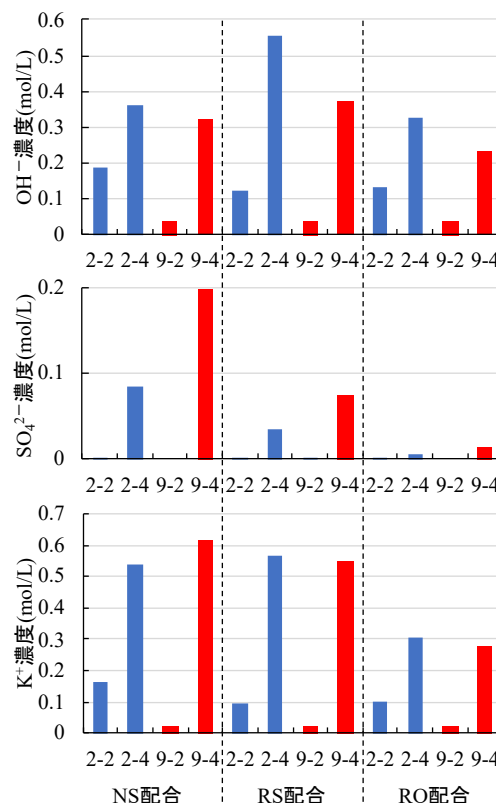


図-3 モルタル細孔溶液中の各種イオン濃度