

フライアッシュコンクリートにおける塩害と中性化の劣化機構に関する検討

徳島大学大学院 学生会員○三浦健太 徳島大学大学院 正会員 上田隆雄
日建技術コンサルタント 非会員 河田奈弓 徳島大学大学院 正会員 塚越雅幸

1. はじめに

フライアッシュを混和したコンクリートは、ポゾラン反応による細孔組織の緻密化などにより高い塩害抵抗性が期待できる一方、水酸化カルシウムが消費され、セメント硬化体自体の pH が低下することにより中性化抵抗性は低下することが懸念される。実構造物において、塩害と中性化が複合し劣化することがあるが、フライアッシュコンクリートにおける複合劣化に関するデータは少ないことから、本研究では、フライアッシュコンクリートにおける塩害と中性化の複合劣化機構について検討を行った。

2. 実験概要

本実験で用いたコンクリートの配合を表-1 に示す。水結合材比（以下、W/B）を 55%とし、FA はⅡ種とⅣ種を用い、内割り置換（IN）及び、外割り置換（EX）として、セメント質量の 20%、細骨材容積の 20%置換した。さらにコンクリートは外来型の塩害と内在型の塩害を想定して、混入する Cl^- 濃度は外来型で 0kg/m^3 、内在型で 3kg/m^3 の 2 通りとした。なお、内在型は配合名の末尾に C1 と表記する。モルタル供試体はコンクリート配合から粗骨材を除き、初期混入 Cl^- 濃度はコンクリートの単位体積当たり 3kg/m^3 となるようにした。91 日圧縮強度試験用に $\phi 100 \times 200\text{ mm}$ の円柱を作製し、 $100 \times 100 \times 180\text{ mm}$ 角柱のかぶり 30 mm 位置に異形鉄筋 D13 を配置したものを各配合 3 本ずつ作製した。また、 $\phi 50 \times 100\text{ mm}$ のモルタル円柱の 3 mm 鉄線を中心に配置したものを作製した。塩害と中性化の複合劣化を模擬するために、外来型の場合は 28 日封緘養生後、塩水浸漬と促進中性化を交互に繰り返した。塩水は NaCl 濃度 10% とし、促進中性化は 20°C 、60% R.H、 CO_2 濃度 5% とした。塩水浸漬と促進中性化の繰り返し周期は、塩水浸漬 7 日、促進中性化 7 日とした。また、内在型の場合は、28 日封緘養生後、前述の促進中性化を行った。外来型も内在型も 2 週間ごとに自然電位、分極抵抗、コンクリート抵抗を測定した。モルタル供試体は 4 ヶ月促進中性化を行い、細孔溶液中の Cl^- 濃度、 OH^- 濃度等の測定を行うとともに、中性化深さ、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率、細孔径分布を測定した。

3. 内在塩を含むモルタル中性化に伴う諸物性変化

モルタル供試体 4 ヶ月促進中性化後の中性化深さ及び Cl^-/OH^- モル比を図-1 に示す。 Cl^-/OH^- モル比は鉄筋腐食環境の指標に用いられ、値が大きいほど鉄筋腐食に対して厳しい環境を示す。中性化深さが大きいほど、 Cl^-/OH^- モル比も大きくなる傾向にある。特

表-1 コンクリートの配合

配合	W/B (%)	単位量 [kg/m^3]								
		C	W	S	G	FAⅡ	FAⅣ	WRA	AEA	NaCl
N	55	298	164	779	1084	-	-	1.16	0.33	(4.94)
ⅡIN		237	163	699	1149	59	-	1.12	0.79	
ⅡEX		311	171	540	1158	115	-	2.56	3.01	
ⅣEX		316	174	536	1150	-	110	1.65	1.65	

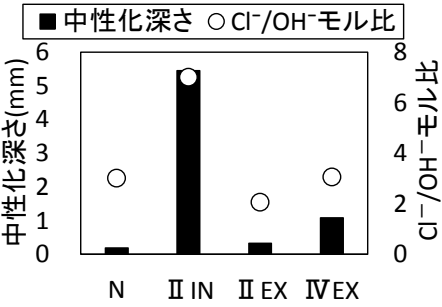


図-1 モルタルの中性化深さ及び細孔溶液中の Cl^-/OH^- モル比

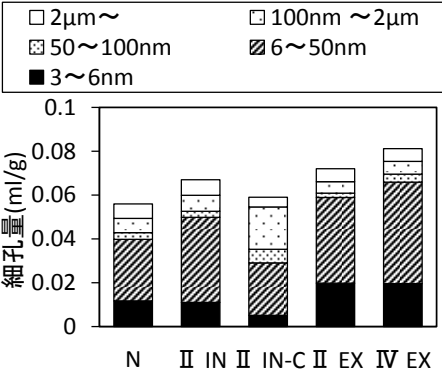


図-2 細孔径分布

に、フライアッシュを内割り混和したⅡIN配合では、どの配合よりも単位セメント量が少ない。そのため、中性化抵抗性及び Cl^- の固定化能力も小さく、さらに、中性化により固定されていた Cl^- が遊離し、自由 Cl^- となるため、 Cl^-/OH^- モル比が大きくなったと考えられる。一方、ⅡEX配はN配合と中性化深さ及び Cl^-/OH^- は殆ど差が見られなかった。

モルタル供試体4ヶ月促進中性化後の細孔径分布を図-2に示す。ⅡIN配合は中性化部分と未中性化部分に分けて測定を実施した。以下、ⅡIN配合の中性化部分をⅡIN-Cと示す。未中性化部分を比べると、総空隙量(グラフの高さ)はN配合よりフライアッシュを混和した配合の方が多いが、フライアッシュⅡ種を外割りで混和した場合、50nm以上の空隙量が少ない。これは、単位粉体量の増加やポゾラン反応により、腐食因子の浸透を抑制できると考えられる。また、ⅡIN配合とⅡIN-Cを比べると、50nm以上の空隙量が増加している。これはC-S-Hが中性化によって多孔化したと推定される。

4. 角柱鉄筋コンクリート供試体の複合劣化

内在型と外来型の複合劣化後コンクリート中 Cl^- 濃度分布予測を図-

3に示す。予測計算には、中性化速度係数を算出し、 Cl^- の拡散現象は中性化位置までは実行拡散係数、未中性化部分は見掛けの拡散係数を用いて Cl^- 濃度分布を算出した。なお、内在型は初期混入 Cl^- $3\text{kg}/\text{m}^3$ が全体に均一に分布したと仮定した。内在型の場合、全ての配合でコンクリート表面の Cl^- 濃度が $3\text{kg}/\text{m}^3$ より低下し、中性化位置よりも後ろに Cl^- 濃縮層が形成されている。特に、ⅡIN配合は中性化の進行が早く、 Cl^- 濃縮層が一番鉄筋に近い位置に形成されていると予測される。外来型の Cl^- 浸透予測は、全配合で中性化位置より内部方向に Cl^- 濃縮層がみられるが、内在型の Cl^- 浸透予測ほど濃縮層は顕著でなく、どの配合も鉄筋位置まで Cl^- が浸透していないと予測できる。

図-4に内在型と外来型複合劣化供試体中鉄筋の分極抵抗経時変化を示す。内在塩の場合は、N配合よりフライアッシュを混和した配合で分極抵抗が小さくなっている。特にNⅡINは、フライアッシュのポゾラン反応により水酸化カルシウムが消費され、pHが低下したことにより Cl^-/OH^- モル比が増大したためと考えられる。よって、内在型の場合、フライアッシュを混和すると中性化及びポゾラン反応によるpH低下の影響が細孔構造の緻密化より大きくなり、鉄筋腐食環境は厳しくなると考えられる。また、外来型の場合はフライアッシュを混和することでN配合より分極抵抗は大きくなっている。これは、フライアッシュを混和した配合は、ポゾラン反応により細孔構造が緻密化するため、N配合より劣化因子である Cl^- の浸透が抑制されたと考えられる。したがって、外来型の場合は内在型のように初期 Cl^- を含まないので、ポゾラン反応及び中性化の影響によるpHが低下より、細孔構造の緻密化の影響が大きくなり、鉄筋腐食の抑制効果があると考えられる。

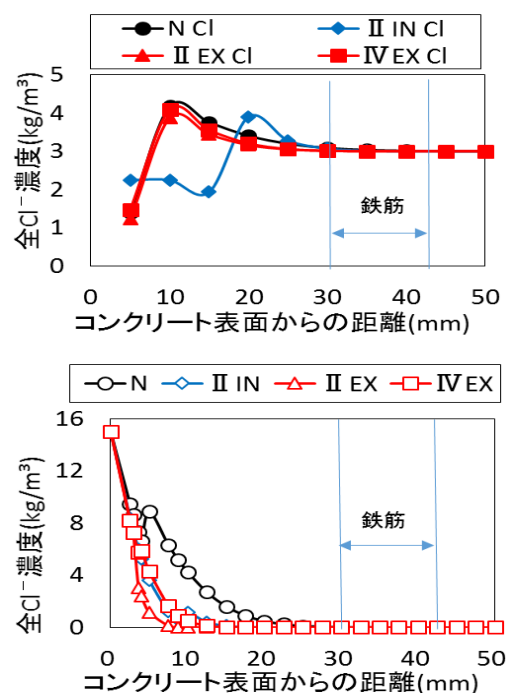


図-3 コンクリート中の Cl^- 濃度分布予測(上:内在型、下:外来型)

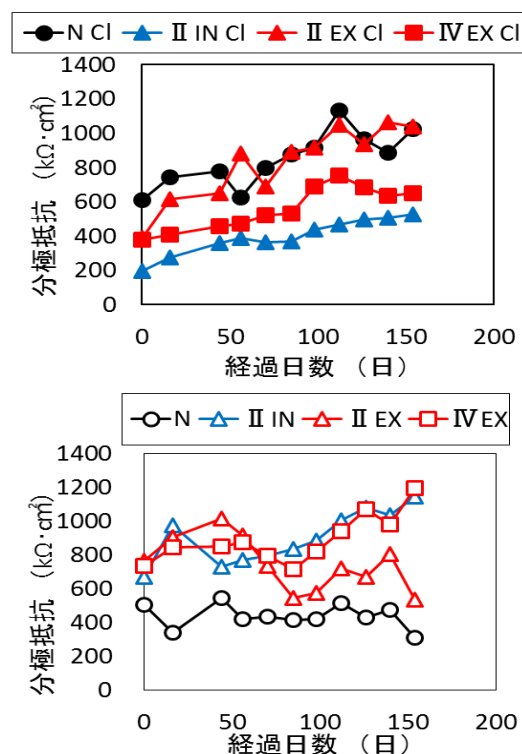


図-4 分極抵抗の経時変化(上:内在型、下:外来型)