

論文 塩害と ASR の複合劣化に及ぼす高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの抑制効果

松元 淳一^{*1}・武若 耕司^{*2}・山口 明伸^{*3}・梅木 真理^{*4}

要旨: 高炉スラグ微粉末をコンクリート材料として用いることは、アルカリシリカ反応 (以下、ASR と称す) を抑制する方法として極めて効果的である。しかしながら、海洋構造物での利用が多いため、その場合は、海水中の NaCl の浸透が ASR を引き起こす恐れがある。そこで本研究は、複合劣化の進行に及ぼす高炉スラグ微粉末の有効性を内在塩分および外来塩分の双方の観点から実験的な検討により明らかにすることを試みた。その結果、外来塩分の影響を受ける環境で高炉スラグ微粉末を使用した場合、コンクリート表層部に腐食発生限界量の何倍もの NaCl が蓄積しても ASR 抑制効果は変わらないことを確認した。

キーワード: 高炉スラグ微粉末、複合劣化、塩害、アルカリシリカ反応、鉄筋腐食

1. はじめに

近年、アルカリシリカ反応 (以下、ASR と称す) による鉄筋コンクリート構造物の劣化が報告され、多くの研究が活発に行われている¹⁾。この ASR の抑制手段方法として非反応性の骨材を使用することが望まれているが、骨材の正確な判定や供給は困難であることから、コンクリート中のアルカリ総量の抑制や高炉スラグ微粉末、フライアッシュなどの混和材料の使用が JIS にて規準化されている。

一方、海洋構造物に多く用いられている高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートに関する研究は古くから行われ、炭酸化の進行に懸念があるものの、塩害対策やアルカリ骨材反応対策としては極めて有効であり、幅広く使用されている。また、以前に著者らが行った検討により、「塩害と炭酸化」の複合劣化環境下においては、スラグ混入による防食効果が塩害単独の場合とは異なり、高炉セメント B 種相当が極めて有効であることが確認された²⁾。しかしながら、海洋構造物に ASR 反応性骨材が使用された場合、海水中の NaCl の浸透により ASR を促進することも想定され、鉄筋近傍の塩化物イオン量が腐食発生限界量以下であっても、コンクリート表面付近ではその何倍もの塩分が蓄積されていることもあり、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの場合においても、NaCl 量と ASR 発生との関係をより明確にする必要があると考えられる。

そこで本研究では、高炉スラグ微粉末置換率 (以下、スラグ置換率と称す) を変化させたモルタルならびにコンクリート供試体を用いて、予め NaCl を添加した内在塩分を想定したモルタルバー法および一般環境の外来塩分を想定した塩水乾湿繰り返し試験を行い、コンクリートの ASR 膨張特性や内部鉄筋腐

食状況について実験的に検討を行った。

2. モルタルバー法 (内在塩分を想定)

2.1 試験概要

モルタルバー法は、JIS A 1146 に準じて行った。以下に実験の概要を示す。反応性骨材としては、鹿児島産の砕石を粒度調整したもの (砕砂) と鹿児島県桜島で発生する土石流により砂防堤や河口に堆積した、いわゆる火山性細骨材である「流下土砂」(密度 2.58g/cm³, 吸水率 1.52%) を用いた。これらの骨材は、図-1 に示す JIS A 5308 の化学法で「無害でない」と判定されたものであり、砕砂および流下土砂のいずれも安山岩種で反応性鉱物のクリストバライトを含んでいる。また、非反応性骨材としては、富士川産川砂 (密度 2.65g/cm³, 吸水率 1.93%) を用い、これらを組み合わせた反応性骨材混入率は 0, 50 および 100% とした。なお、著者らが過去に行ったモルタルバー法の結果では、いずれの骨材も反応性骨材混入率が 50%~100% になると膨張量は極めて大きくなり、ペシマムは 75~100% の間に見られた³⁾。セメントは等価 Na₂O が 0.55% の普通ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末としては、密度 2.90g/cm³, 目標ブレン値 4000cm²/g で等価 Na₂O が 0.42% のものを用いた。

表-1 モルタルバー法の要因と水準

要因	水準		
	50	0	30, 70
スラグ置換率(%)	50	0	30, 70
NaOH水溶液の調整による等価アルカリ量(%)	-	1.2, 2.4	1.2
NaCl添加量 (kg/m ³)	1.98~42.85 の10水準	0, 2.4, 6 (Cl量: 0, 1.46, 3.64)	2.4
反応性骨材混入率(%)	100	0, 50, 100	

*1 鹿児島大学大学院 理工学研究科物質生産工学専攻 博士課程 (正会員)

*2 鹿児島大学 工学部海洋土木工学科教授 工博 (正会員)

*3 鹿児島大学 工学部海洋土木工学科准教授 博士 (工学) (正会員)

*4 鹿児島大学 工学部海洋土木工学科 (非会員)

試験に用いたモルタルの配合における高炉スラグ微粉末の置換率は、セメント質量の内割として0, 30, 50および70%の4水準とした。なお、以下では、スラグ置換率0, 30, 50 および70%で作製した供試体を OPC, BA, BB ならびに BC として示す。アルカリ量については、高炉スラグ微粉末を含んだ全粉体に対する初期等価アルカリ量 $[(Na_2O)]$ が、1.2, 2.4%になるよう NaOH 水溶液を用いて調整した。また、塩分の浸透程度の違いを検討するために、NaCl を0, 2.4 および $6kg/m^3$ の3水準で添加した。なお、この場合の NaCl 添加量は初期等価アルカリ量 $[(Na_2O)]$ の一部として取り扱っていない。

一方、コンクリート表層部に蓄積した塩分を想定し、NaOH の代わりに NaCl で等価アルカリ量 $[(Na_2O)]$ を1.2 および2.4~3.98%で計10水準になるよう調整したものについても同時に検討を行った。この場合、添加した NaCl 量から Cl 量を算出すると4.91, 7.30~24.00 kg/m^3 となる。供試体の要因と水準をとりまとめて表-1に示した。

モルタル供試体は製作2日後に温度40℃、湿度99%の環境に設定された促進恒温試験槽に静置し、所定材齢に達した供試体は、乾燥させないように室温20℃で供試体を保管して、温度が一定になったところで、ダイヤルゲージで長さ変化、重量を測定した。

2.2 試験結果および考察

一例として、初期アルカリ量1.2%の NaCl 添加量 $2.4kg/m^3$ における反応性骨材混入率50, 100%の膨張率の経時変化を図-2に示す。OPC 供試体の場合においては、試験開始5週目付近より膨張率が0.1%を越え、16週目以降では、反応性骨材混入率50, 100%共に、膨張率が0.3%と大きな膨張量となっており、供試体表面には亀甲状のひび割れが確認できた。しかしながら、セメントの一部を高炉スラグ微粉末で置換した供試体は、いずれも膨張率は小さな値を示したことから、セメントの30%を高炉スラグ微粉末で置換することで、今回使用した反応性骨材では、ASR を抑制する効果はあると考えられる。

図-3に、初期アルカリ量1.2%の反応性骨材混入率50%における NaCl 添加量の違いによる膨張率の経時変化を示す。ここで、NaCl 添加量 $2.4kg/m^3$ から Cl^- 量を算出すると $1.46kg/m^3$ となり、これは、塩化物イオンが鉄筋の腐食に与える腐食発生限界量 ($1.2kg/m^3$) に近い値である。また同様に、NaCl 添加量 $6kg/m^3$ では Cl^- 量は $3.64kg/m^3$ となる。結合材がセメントのみの OPC 供試体においては、NaCl の添加量が多くなるにしたがって、膨張率が大きくなる結果を示している。これは、NaCl 中の Na^+ の影響でモルタルの等価アルカリ量 $[(Na_2O)]$ 1.2%が、実際は NaCl 添加量2.4, $6kg/m^3$ でそれぞれ1.41, 1.73%になったためであると

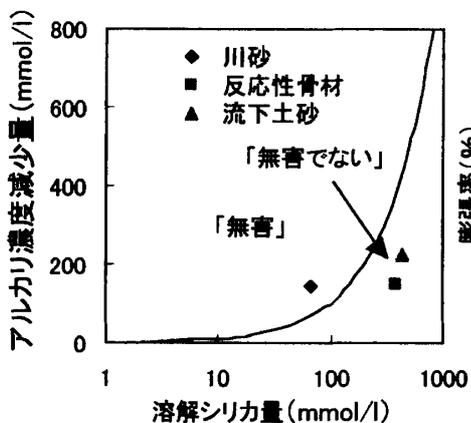


図-1 化学法結果

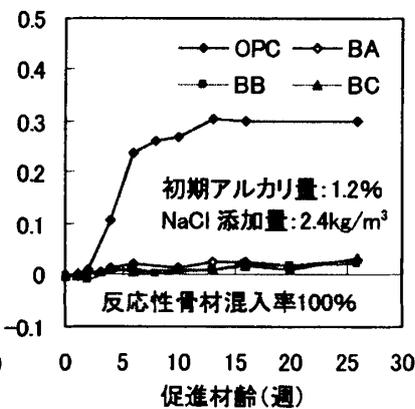
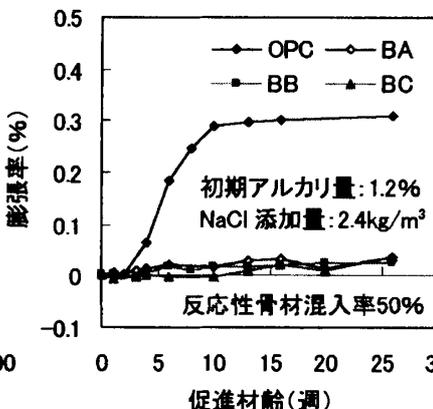


図-2 初期アルカリ量1.2%の NaCl 添加量 $2.4kg/m^3$ における膨張率の経時変化

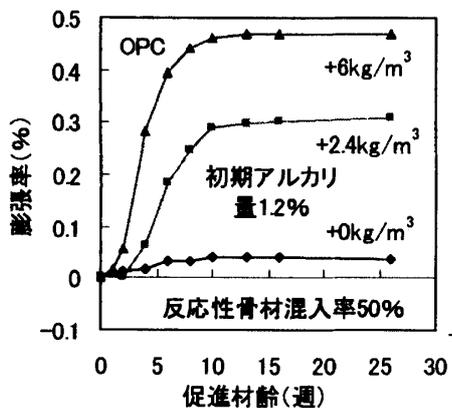


図-3 OPC および BB 供試体の反応性骨材混入率50%における NaCl 添加量の違いによる膨張率の経時変化

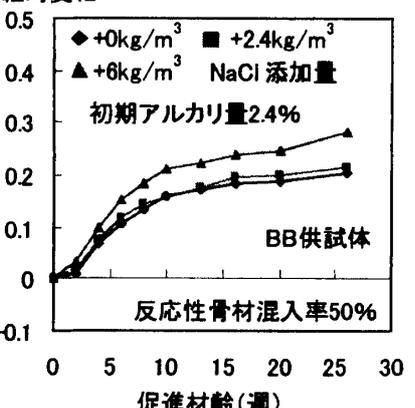
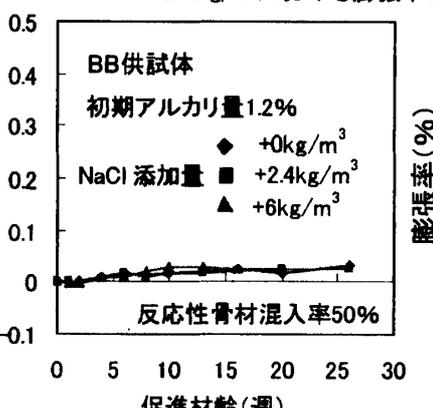


図-4 初期アルカリ量2.4%の BB 供試体における膨張率の経時変化

考えられる。しかしながら、セメントの一部を高炉スラグ微粉末で 50% 置換した BB 供試体においては、モルタルの等価アルカリ量 $[(Na_2O)]$ が、NaCl 添加量によって同様に増加しているにもかかわらず、いずれの NaCl 添加量でも、殆ど膨張しない結果を示し、高炉スラグ微粉末をセメント重量の 50% 置換した場合、供試体中の全アルカリ量が 1.2% 程度では、塩化物イオンが腐食発生限界量やそれに近い量となる程度の NaCl がモルタル中に浸透しても ASR は生じないと予想された。ただし、図-4 に示す初期アルカリ量を 2.4% に設定したものについては、26 週で 0.2% 程度の膨張が認められ、NaCl の添加量が多くなるに従って、膨張率も大きくなる傾向を示した。

図-5 には、等価アルカリ量を NaCl で調整した BB 供試体の反応性骨材混入率 100% における各供試体の膨張率の経時変化を示した。なお、表-2 に実験モルタル供試体中の等価アルカリ量とそれの場合の Cl 量についてとりまとめたものを示している。現在、試験は 22 週であるが、NaCl 量が多くなるに従って、膨張率は大きくなる傾向を示した。また、モルタルバー法では、促進材齢 26 週で膨張率が 0.1% 以上ならば、ASR と判定できるとの規定があり、これまでのところ、初期等価アルカリ量 2.4%、つまり Cl 量が $13.15kg/m^3$ 以上になると 0.1% を超えていることから、高炉スラグ微粉末を使用した場合でもコンクリート表面にある程度の NaCl が蓄積すると ASR を生じる可能性があると考えられた。

図-6 には、スラグ置換率 50% 供試体において等価アルカリ量 $[(Na_2O)]$ を NaOH あるいは NaCl のそれぞれで調整した場合の等価アルカリ量と膨張率の関係を示した。また、NaOH で調整を行い、さらに NaCl を添加した供試体の結果についても併せて示す。既往の研究では、OPC 供試体の場合、NaCl の方が影響が大きいと示されているが¹⁾、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートでは、同一の等価アルカリ量において、NaOH で調整したモルタルの方が、NaCl で調整した場合よりも膨張量は大きくなる傾向を示した。これは、反応性鉱物との関連があるとも言われてい

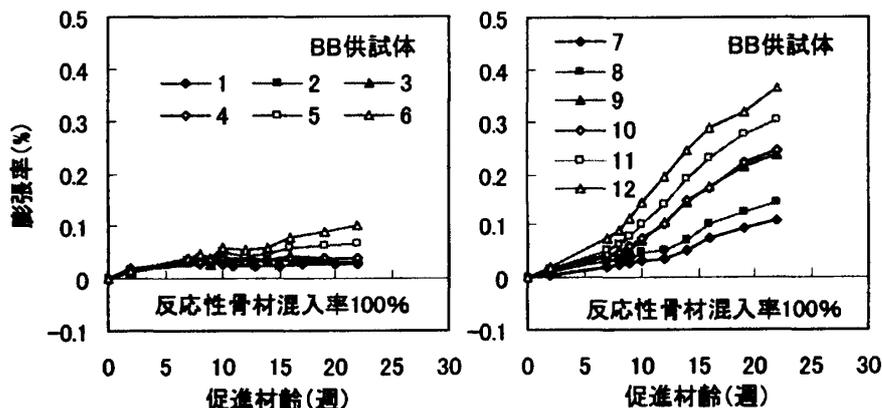


図-5 BB 供試体の反応性骨材混入率 100% における膨張率の経時変化

表-2 実験供試体の Cl 量と等価アルカリ量 (番号は図-5 と対応)

番号	スラグ置換率	Cl量(等価アルカリ量) (kg/m ³)	番号	スラグ置換率	Cl量(等価アルカリ量) (kg/m ³)
1	50%	4.91(1.20%)	7	50%	14.50(2.60%)
2		7.30(1.55%)	8		16.00(2.81%)
3		8.48(1.71%)	9		18.00(3.10%)
4		9.05(1.80%)	10		20.00(3.40%)
5		11.40(2.14%)	11		22.00(3.69%)
6		13.15(2.40%)	12		24.00(3.98%)

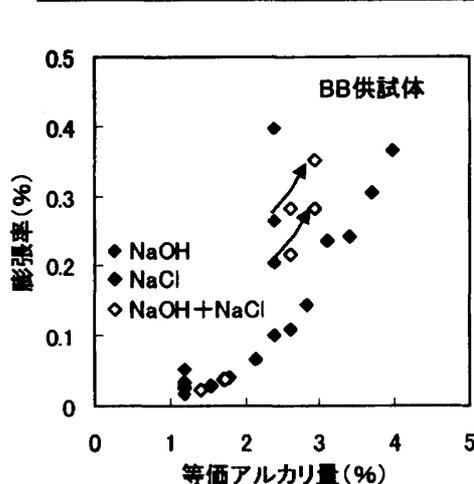


図-6 等価アルカリ量と膨張率の関係

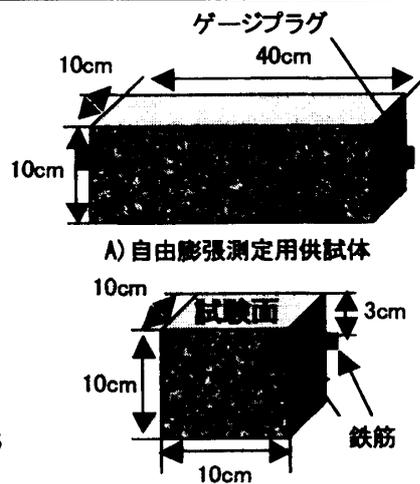


図-7 耐久性試験の供試体形状

るが、モルタルバー法の場合、脱型直後より試験を開始するため、試験の進行と同時に水和反応が起こっており、高炉スラグ微粉末を混入したコンクリート中の OH^- の絶対量が少ないことから、NaOH が刺激剤となり、 Na^+ が移動しやすい状況にあったものと考えられる。また、NaOH と NaCl が混合した場合、NaOH あるいは NaCl 単体の間を推移しているように見えるが、図中の矢印のように Na^+ 濃度の増加によって膨張は促進される傾向を示した。

3. 塩水乾湿繰り返し試験 (実環境の外來塩分を想定)

3.1 試験概要

実験に用いた供試体は、図-7 に示す自由膨張測定用供試体および鉄筋コンクリート供試体を水結合材比 (以下、W/B) 50% として表-3 に示す配合で作製した。なお、配

合決定に際しては、単位水量を一定とし、目標スランプ値を 10±2cm として配合を定めた。使用材料は、反応性骨材としてモルタルバー法と同様の火山性細骨材「流下土砂」、非反応性骨材としては、富士川産川砂（密度 2.65g/cm³、吸水率 1.93%）を用いた。セメントおよび高炉スラグ微粉末についても先述のモルタルバー法と同様なものとしている。また、粗骨材に鹿児島県始良産の非反応性砕石（密度 2.55g/cm³、吸水率 0.93%）を用いた。スラグ置換率は、0%および 50%の 2 種類を基本とし、鉄筋コンクリート供試体については 70%の場合も併せて検討を行った。供試体内部の初期アルカリ量は、全粉体に対する等価アルカリ量 [(Na₂O)] が、1.2%になるよう NaOH 水溶液を混入して調整した。また、反応性骨材混入率については、0、50 および 100%の 3 水準とした。供試体の要因と水準を表-4 に示す。鉄筋コンクリート供試体については、かぶりを 3cm として鉄筋を埋設し、初期養生を行った後、試験面以外の側面および底面をエポキシ樹脂にて被覆した。なお、初期養生については、その期間を 28 日とし、養生中に NaOH が溶出しないよう密封養生とした。

試験方法としては、塩水浸せきと ASR 促進を複合させた劣化促進試験（以下、塩害-ASR 試験と称す）とし、ASR 反応性骨材を用いたコンクリートを一般環境で塩水乾湿繰り返しを行うことによって実施した。試験環境の条件は、表-5 に示すように塩水浸せき 3.5 日と乾燥 3.5 日の繰り返しを 1 サイクルとし、50 サイクルまで実施することにした。また、比較用に、浸せき溶液を蒸留水とし ASR のみの影響を検討する場合（以下、ASR 試験と称す）と非反応性骨材を用いた一般的なコンクリートで塩水乾湿繰り返し行った場合（以下、塩害試験と称す）も同時に行った。なお、塩水浸せきに用いた溶液は NaCl 5%水溶液として行った。また、長さ変化および重量変化については、自由膨張測定用供試体を用いて、塩水浸せき開始直前と塩水浸せき終了直後の 2 回、所定のサイクルで測定を行った。

3.2 試験結果および考察

(1) 自由膨張供試体

塩害-ASR 試験あるいは ASR 試験を 50 サイクルまで行った後の反応性骨材混入率 100%供試体における表面劣化状況を写真-1、2 にそれぞれ示す。なお、供

表-3 実験供試体配合

W/B (%)	反応性骨材率 (%)	スラグ置換率 (%)	単位量 (kg/m ³)						
			W	C	GGBS	川砂 (非反応性)	流下土砂 (反応性)	G	NaOH
50	0	0	195	390	0	785	-	949	3.27
		50		195	195	779		941	3.60
		70		117	273	777		938	3.73
	50	0		390	0	382	382	952	3.27
		50		195	195	388	379	944	3.60
		70		117	273	387	378	941	3.73
	100	0		390	0	-	762	955	3.27
		50		195	195		756	947	3.60
		70		117	273		753	944	3.73

表-4 供試体の要因と水準

要因	水準
W/B (%)	50
スラグ置換率 (%)	0, 50, 70
アルカリ量 (%)	1.2
反応性骨材混入率 (%)	0, 50, 100
かぶり (cm)	3
初期養生期間 (日)	28

表-5 試験環境の条件

1 サイクル	浸せき時間	3.5 日
	乾燥時間	3.5 日
温度		20~30℃
湿度		50~60%
浸せき方法		・NaCl 5%水溶液 ・蒸留水

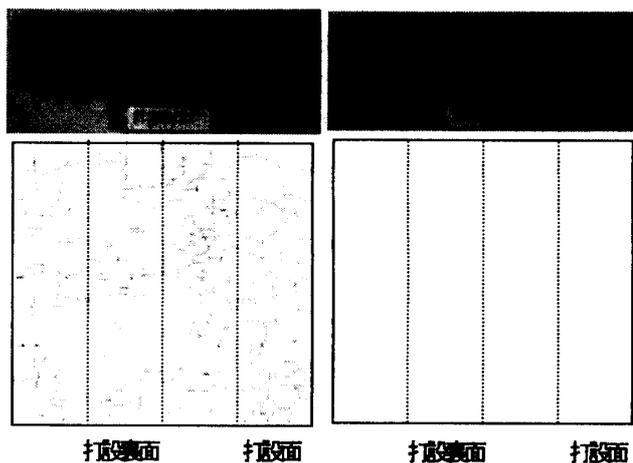


写真-1 塩害-ASR 試験の 50 サイクル終了時の表面劣化写真および供試体ひび割れ状況

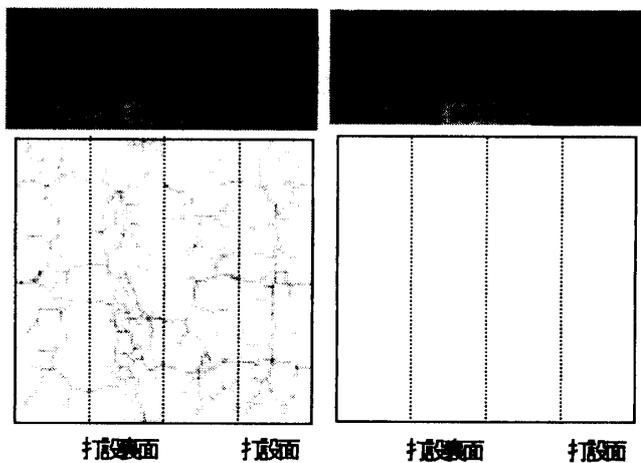


写真-2 ASR 試験の 50 サイクル終了時の表面劣化写真および供試体ひび割れ状況

試体表面のひび割れ状況をマッピングした結果についても併せて示した。高炉スラグ微粉末を用いた供試体の表面には、ASR によるひび割れは認められなかったのに対し、普通コンクリート (OPC) の供試体表面には、いずれの試験供試体においても亀甲状のひび割れが認められ、塩害-ASR 試験の方が ASR 試験に比べ、ひび割れ本数は多かったものの、ひび割れ幅については ASR 単独試験の方が大きく、最大 0.45mm であった。

図-8 に OPC および BB 供試体の反応性骨材混入率 100%におけるそれぞれの試験の膨張率の経時変化を示す。OPC 供試体について見てみると、塩害-ASR 試験では 14 サイクル、ASR 試験では 18 サイクル以降に膨張が始まり、膨張率が 0.1% を超える頃 (塩害-ASR 試験: 16 サイクル、ASR 試験: 21 サイクル) に表面にひび割れが発生した。

また、50 サイクル終了時には、塩害-ASR 試験の膨張率は 0.55% と ASR 単独に比べ極めて大きな膨張量を示した。これらのことから、塩害-ASR 複合劣化の場合、コンクリート中に浸透した Na⁺によって ASR が早い段階で引き起こされ、膨張量も促進されるメカニズムであると考えられる。一方、BB 供試体は試験条件の如何に拘らず、膨張は認められておらず、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの場合、ASR 単独の環境だけでなく、塩害と ASR の複合劣化の状況でも ASR 膨張の抑制効果は変わらないと考えられた。この傾向は、図-9 に示す 50 サイクル終了時の曲げ強度試験結果からも明らかなように、ASR と判定されている OPC 供試体の反応性骨材混入率 100% 供試体においては、強度低下が確認されたのに対し、セメントの 50% を高炉スラグ微粉末で置換した供試体については、強度低下は確認されず、むしろ、反応性骨材混入率 100% の方が、曲げ強度は大きくなる傾向を示した。

図-10 に、OPC および BB 供試体の塩害-ASR 試験あるいは塩害試験における 50 サイクル終了時のコンクリート中の全塩化物イオン量分布を示す。なお、測定は供試体側面より行ったものである。これより、普通コンクリート (OPC) の場合、供試体深さ 2~3cm まで塩害-ASR 試験供試体の方が塩害試験供試体よりも全塩化物イオン含有量が大きく、外部から進入する Na⁺の影響により、コンクリート内部のアルカリ濃度が上昇し、ASR を促進したものと考えられた。また、BB 供試体について見ると、塩化物イオンの浸透に対する抵抗性は塩害-ASR

複合劣化の場合でも明らかに高い結果となった。ただし、BB 供試体の塩害-ASR 試験におけるコンクリート表層部の全塩化物イオン量は 22kg/m³ であり、これを NaCl 量に換算すると 35.84kg/m³ となり、前述のモルタルパー法の結果では 0.2% を超える膨張が認められている。しかしながら、図-8 に示した BB 供試体の膨張率は 0.02% と ASR 膨張を抑制しており、内在塩分と外部から供給される塩分では ASR に与える影響は異なるものと考えられ、内在塩分の場合、高炉スラグ微粉末を使用するとかえって空隙構造が粗大化するとの報告もあり⁹⁾、水分等が浸透しやすい状況にあったのではないかと予想される。

次に、塩害-ASR 試験を 50 サイクルまで行った後のコンクリート内部の Na⁺の含有量分布について、イオンクロマトグラフにより測定した結果を図-11 に示す。OPC 供

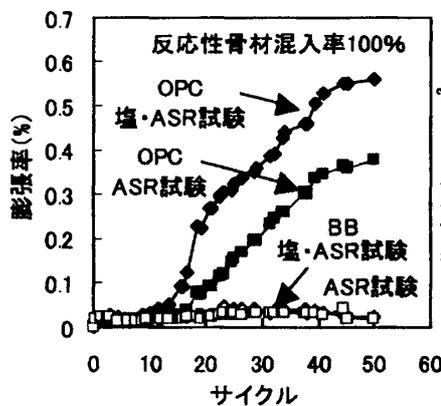


図-8 各試験のサイクル初期からの膨張率の経時変化

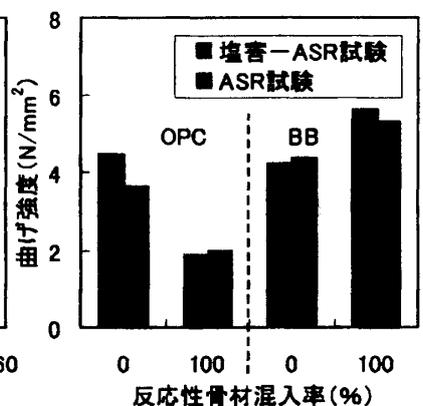


図-9 50 サイクル時の曲げ強度試験結果

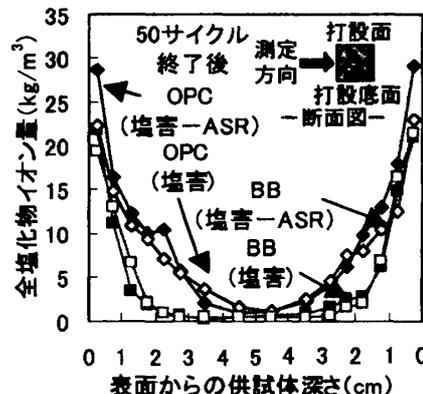


図-10 50 サイクル終了時の各試験の全塩化物イオン量分布

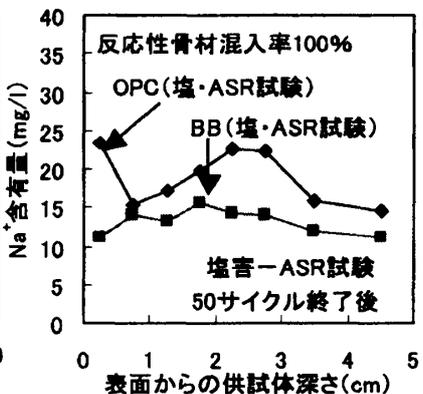
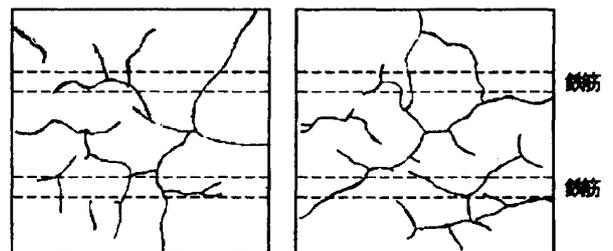


図-11 50 サイクル終了時の Na イオン含有量分布



反応性骨材混入率 50% 反応性骨材混入率 100%
※BB および BC 供試体のひび割れは確認できない
図-12 塩害-ASR 試験の 50 サイクル後における表面ひび割れ分布状況

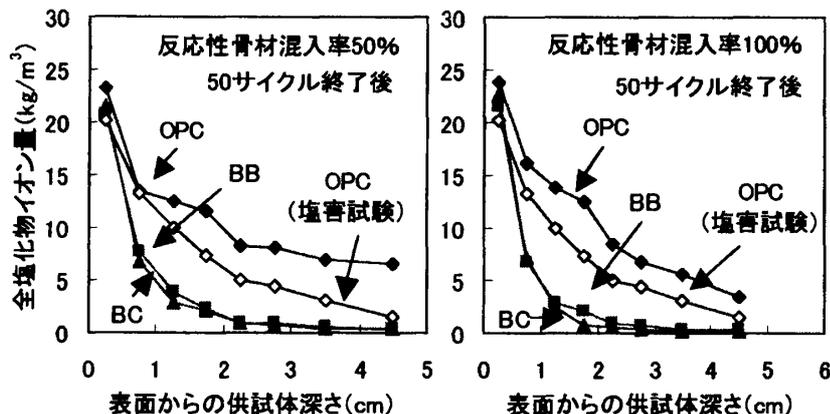


図-13 塩害-ASR試験あるいは塩害試験の50サイクル終了時における全塩化物イオン量分布

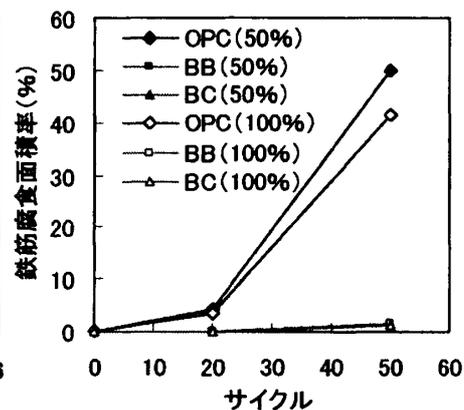


図-14 塩害-ASR試験の各供試体における鉄筋腐食面積率の経時変化

試体の場合、外部から Na^+ が供給されているにも拘らず、深さ 0.5~2cm の間で少なくなっており、表面域でも ASR によって Na^+ が消費されたものと考えられる。しかしながら、BB 供試体中の Na^+ 量は深さ方向にほぼ一定の結果を示し、細孔構造が緻密となって外部からの浸透を抑制したのではないかと予想される。

(2) 鉄筋コンクリート供試体

一例として、OPC 供試体の塩害-ASR 試験における 50 サイクル終了後の表面ひび割れ分布状況を図-12 に示す。全体的に亀甲状のひび割れが確認でき、鉄筋に沿ったひび割れは、幅が 0.25~0.3mm と大きくなる傾向を示した。なお、OPC 供試体の ASR 単独の場合とスラグを置換した供試体のそれぞれの試験では、ひび割れは確認されなかった。

図-13 に塩害-ASR 試験あるいは塩害試験を 50 サイクルまで行った後の反応性骨材混入率 50% および 100% のコンクリート内部の全塩化物イオン量を示す。先ほどの自由膨張供試体と殆ど同様な傾向を示し、OPC 供試体のみ腐食発生限界量 (1.2kg/m^3) を超える塩化物イオン含有量が確認され、その量は、反応性骨材混入率 50% の方が 100% より多くなる傾向を示した。

図-14 には、塩害-ASR 試験の反応性骨材混入率 50% および 100% における各供試体中の鉄筋腐食面積率の経時変化をそれぞれ示した。OPC 供試体においては、いずれの反応性骨材混入率とも、ひび割れが発生し、塩化物イオンが浸透しやすい状況にあったため、鉄筋腐食面積率は大きくなる傾向を示した。これに対して、高炉スラグ微粉末置換率 50% あるいは 70% 供試体中の鉄筋腐食は殆ど発生しておらず、塩害と ASR の複合劣化環境下においても鉄筋腐食抑制効果は明らかに高いものと考えられた。

4 まとめ

本研究では、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの塩害と ASR の複合劣化について、高炉スラグ微粉末置換率を変化させて、内在塩分および一般環境の外來塩分を想定したモルタルバー法および塩水乾湿繰り返し試験を行

い、以下の結論が得られた。

(1) 内在塩分を混入したモルタルバー法の結果からでは、高炉セメントコンクリートに鉄筋腐食限界量の何倍もの NaCl を添加すると ASR を引き起こすだけでなく、加速する恐れが認められた。

(2) 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの場合、ASR に与える NaCl の影響は、普通コンクリートの場合と異なる可能性があることを確認した。

(3) 乾湿繰り返し環境にある高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは鉄筋腐食発生限界量の何倍もの塩分がコンクリート表層部に蓄積されても ASR 膨張を抑制した。これは、モルタルバー法の結果とは異なり、細孔組織の形成の違いが関与しているものと考えられた。

(4) 通常のコンクリートに塩害と ASR の複合劣化が作用した場合、浸透した Na^+ によって ASR が早い段階で引き起こされ、膨張量もさらに促進されたのに対し、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、塩化物イオンの浸透に対する抵抗性は高く、防食効果も塩害環境と同じく高い。

謝辞：本研究は、平成 18 年度、鉄鋼スラグ協会研究奨励金により実施した研究の一部である。関係者各位に感謝する次第である。

参考文献

- 1) 鳥居和之ほか：アルカリシリカ反応によるモルタルの膨張挙動に及ぼすセメントと反応性骨材の組合せの影響，土木学会論文集，No.739/V-60，pp.251-263，2003
- 2) 松元淳一ほか：塩害と炭酸化の複合劣化が高炉スラグ微粉末に与える影響，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集第 7 巻，pp.265-270，2007
- 3) 檀原弘貴ほか：ケイ酸系系表面含浸材の浸透深さと浸透域でのコンクリート品質改善に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集第 29 巻，No.2，pp.547-553，2007
- 4) 加藤弘義ほか：高炉スラグ微粉末を使用したモルタル中の塩化物イオンの挙動と鉄筋腐食に与えるセッコウの影響，土木学会論文集，No.746/V-61，pp.1-12，2003