

論 文

[1102] 複合した原因による鉄筋腐食に関する実験的研究

正会員○北後征雄（JR西日本コンサルタンツ）

正会員菊地保孝（西日本旅客鉄道施設部工事課）

正会員小林茂広（中研コンサルタント）

正会員宮川豊章（京都大学土木工学科）

はじめに

近年コンクリート構造物の早期劣化例が数多く報告されているが、それの中には、単独の劣化メカニズムではなく、複合した原因によるものも存在する可能性がある。

過去に実施した調査の結果の一例 [1]によれば、コンクリート構造物の中性化の進行が一般的に言わわれている値（＝例えば「岸谷式」によって算定される値）よりも相当大きいことを示しており、その原因是水セメント比が大きいことによると考えてきた。しかしながら、中性化の進行が速い理由のひとつとして、アルカリ骨材反応によって生じた微細なひびわれが、中性化の進行を速めている可能性も考えられる。

本報告は、アルカリ骨材反応が中性化の進行並びに鉄筋腐食に与える影響を供試体レベルで実験した結果について述べるものである。

なお、本実験的研究は、日本材料学会「コンクリートのひびわれ補修に関する基礎的調査研究委員会（委員長：京都大学工学部 藤井 学）」の活動の一環としておこなったものである。

1. 実験概要

表-1 示方配合と想定した変状要因

実験は、アルカリ骨材反応によって生じた微細なひびわれが中性化の進行ひいては鉄筋の腐食を速めるかどうかを調べることを主要な目的としている。

また、アルカリ骨材反応発生のための助剤として、NaClを添加したが、NaOHの形で添加するものと比較することによって、塩化物イオン(Cl⁻イオン)が中性化の進行更には鉄筋の腐食にどのように影響するかについても調べることにした。

1-1. 供試体の種類

以下の4種類の変状要因の組み合わせを想定し、表-1に示す9種類のコンクリートの配合を

配合 No.	W/C %	スランプ 範囲 (cm)	細骨材率 %	単位量 (kg/m ³)							想定した 変状要因
				水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤	AE助剤	NaCl C1として	
1	54	12±1	44.8	170	315	795	1017	0.783	1.2A	0	中 - -
2*		—					968		1A	1.5	中 塩 AR
3		—					1017		1A	1.5	中 塩 -
4*		—					968		1A	3.3	中 塩 AR
5	70	12±1	48.0	184	263	855	963	0.658	0.7A	0	中 - -
6*		—					916		0.7A	1.5	中 塩 AR
7		—					963		0.8A	1.5	中 塩 -
8*		—					916		0.8A	3.3	中 塩 AR
9*		—					916		0.8A (注)	中 -	AR

・骨材の最大寸法 20mm 空気量の範囲 4.5±0.5

・配合Noに「*」を付したものは、反応性骨材を使用している。

・想定した変状要因の欄：「中」：中性化、「塩」：塩害、「AR」：アルカリ骨材反応

・供試体No4における等価Na₂Oは、5 kg/m³である。

・注) 供試体No4、No8 と等量のNa⁺をNaOHのかたちで混入。

設定した。変状要因の組み合わせは、以下の4種類である。

- a. 中性化単独
- b. 中性化+Cl⁻ の影響+アルカリ骨材反応
- c. 中性化+Cl⁻ の影響
- d. 中性化+アルカリ骨材反応

表中、Cl⁻換算3.3 kg/m³のNaClは、アルカリ骨材反応を発生させるための助剤としての量、1.5 kg/m³は実構造物の分析結果を考慮した値である。なお、供試体No.9については、反応性骨材を用いたうえで、Cl⁻で3.3 kg/m³に相当するNa⁺をNaOHの形で混入した。

1-2. コンクリートの配合

コンクリート材料として、セメントは、普通ポルトランドセメント、細骨材は、大槌島産海砂を使用、粗骨材として、非反応性のものは、硬質砂岩碎石、反応性の粗骨材として安山岩碎石を用いた。練り混ぜ水は、水道水とし、AE減水剤にポジリスNa70、AE助剤にポジリスNa303Aを使用した。NaClには、工業用食塩、NaOHは試薬1級のものを用いた。

水セメント比は、設計時の標準配合と同じ54%および実構造物の配合分析結果ならびに促進効果を考慮した70%の2種類とした。

配合No.1～4（水セメント比54%）については、配合No.1において、スランプ12±1cmとなるよう単位水量および最適細骨材率を決定し、配合No.2～4は、配合No.1と同じ単位水量および細骨材率とし、スランプの調整はおこなっていない。

配合No.5～9（水セメント比70%）についても同様に、配合No.5において、スランプ12±1cmとなるよう単位水量および最適細骨材率を決定し、配合No.6～9は、配合No.5と同じ単位水量および細骨材率とし、スランプの調整はおこなっていない。なお、空気量は、各配合とも4.5±0.5%の範囲に入るよう、AE助剤により調整をおこなった。

1-3. 供試体の作製

コンクリートの練り混ぜには、パン型強制練りミキサー(100L)を用い、練り混ぜ時間は2分、練り上がり直後にスランプおよび空気量の測定をおこなった。

供試体は、φ10×20cmの円柱供試体を用いた。作製要領は次のとおりである。

コンクリートを型枠の14cmの高さまで打設した後、アダプターに装着した鉄筋試験体(φ9mm×10cmみがき丸鋼、SS41)を2本、コンクリート中に埋め込み、20°Cの恒温室に24時間静置する。材令1日でアダプターを取りはずし、レイタンスを取り除いた後、モルタルを型枠の所定高さ(20cm)まで打設し、再び20°Cの恒温室で24時間静置した後、脱型、所定の養生をおこなう。なおモルタルの配合は、コンクリートの配合から粗骨材を除いたものとした。

供試体の本数は、配合No.1、3、5、7（非反応性骨材を用いた配合）については、それぞれ4本（中性化促進試験用供試体のみ）を、配合No.2、4、6、8、9（反応性骨材を用いた配合）については、それぞれ10本（中性化促進試験用供試体8本、膨張量測定用2本）を作製した。

また、各配合について、材令1週および4週の圧縮強度試験用供試体(φ10×20cm)それぞれ3本の作製もおこなった。

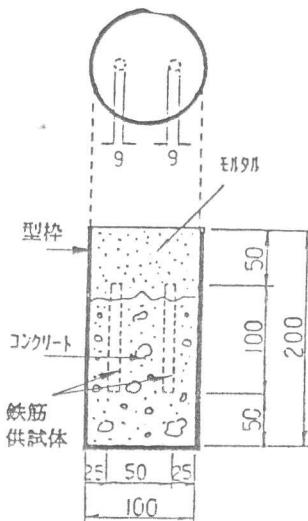


図-1 供試体の作製

1-4. 養生

配合No.1、3、5、7（非反応性骨材を用いた配合）については、打設後材令7日まで、20°C水中にて標準養生をおこない、その後、中性化促進槽に移し、中性化促進試験を開始した。

また、配合4、9については、打設後材令7日まで、20°C水中にて標準養生した後、40°C 100%RHの恒温恒湿室に移し、アルカリ骨材反応の促進試験をおこない、ひびわれが生じ、膨張量が500μもしくは1000μに達した時点で、それぞれ4本づつ中性化促進槽に移し、促進試験を開始した。膨張量の管理は、膨張量管理用に作製した2本の供試体によりおこない、2本の供試体の平均値が500μもしくは1000μを越えた時点を中性化試験の開始日とした。（図-2参照）なお、添加アルカリ量の少ない配合2、6については、予備試験の結果から、膨張量が500μおよび1000μに達するとは考えられない状態であったため、アルカリ量の多い配合4の供試体が500μもしくは1000μに達した時点で、他の配合の供試体も中性化促進槽へ移行し、中性化促進試験を開始した。

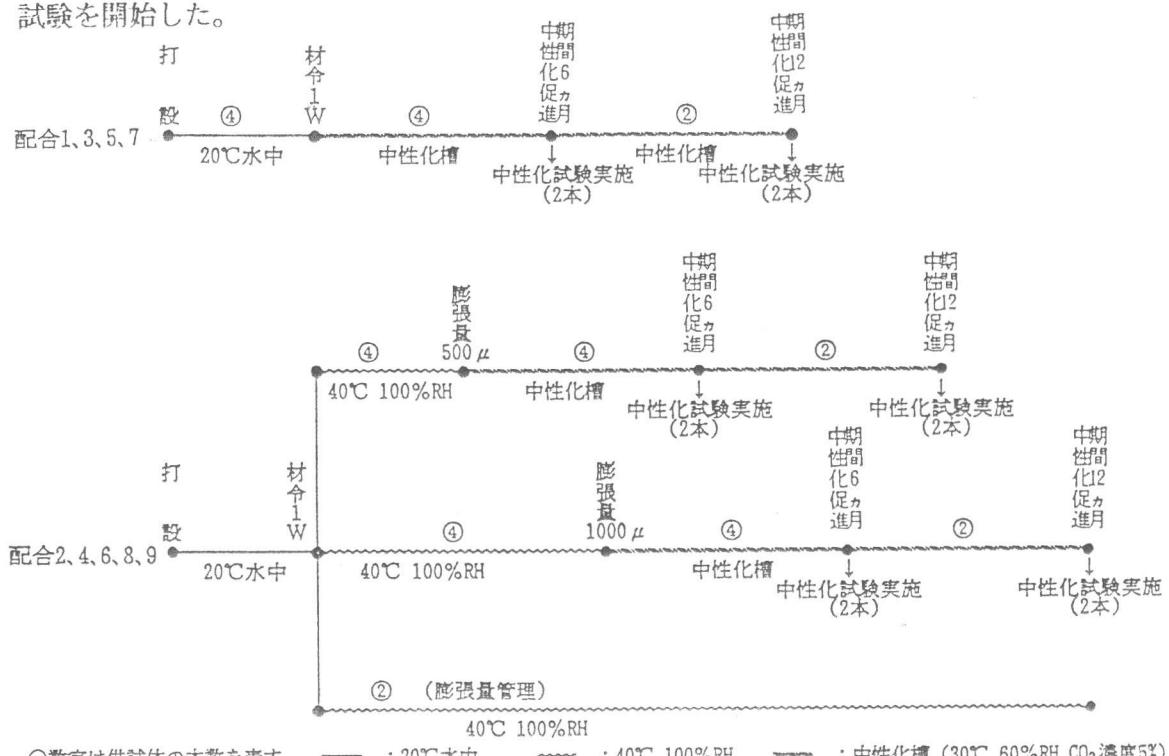


図-2 供試体の養生工程

中性化促進条件は、炭酸ガス濃度5%、室温30°C、湿度60%とした。

また、圧縮強度試験用供試体は、所定の材令まで、20°C水中にて標準養生をおこなった。

1-5. 中性化試験

中性化試験は、中性化促進期間が6ヵ月および12ヵ月になった時点で実施した。

中性化深さは、所定の促進期間に達した供試体2本を割裂した後、フェノールフタレン噴霧法により測定した。

深さの測定箇所を図-3に示す。1供試体につき10箇所（モルタル部分4ヶ所、コンクリート部分6ヶ所）を測定し、コンクリート部分の測定値の平均値を当該供試体の中性化深さとした。

1-6. 鉄筋腐食度調査



図-3 中性化測定位置

中性化試験終了後のコンクリート供試体より、鉄筋供試体を取り出し、表面に付着したモルタルを除去した後、鉄筋表面の錆のスケッチ、発錆面積率の測定および腐食による重量減少率の測定をおこなった。鉄筋表面の錆のスケッチは、鉄筋に透明のビニールを巻き付け、写しとることによっておこなった。腐食による重量減少率の測定は、セメント協会、コンクリート専門委員会報告(F-40)の方法によりおこなった。

2. 実験結果

2-1. フレッシュコンクリートの諸性質および硬化コンクリートの諸性質

供試体作製に用いたコンクリートのスランプ、空気量試験結果および材令1週、4週における圧縮強度試験および静弾性係数の測定結果を表-2に示す。

2-2. 中性化促進試験結果

促進期間6ヵ月並びに12ヵ月における中性化深さの測定結果を図-4、5に示す。また、12ヵ月における鉄筋の錆による重量減少率ならびに発錆面積率の測定結果を図-6～7に示す。

これらの結果から、変状要因の違いによるコンクリートの中性化への影響について、考察する。

(a)水セメント比(W/C)の違いによる影響

水セメント比(W/C)の違いによる中性化深さ、発錆状況への影響が顕著である。このことは、中性化促進期間6ヵ月および12ヵ月における測定値のうち、配合No.1と5、配合No.2と6、配合No.4と8の試験結果を比較すれば明らかである。

中性化深さは、各組合せともW/C=54%に比べW/C=70%の方が1.8～2.0倍の値を示している。また、錆による重量減少率は、1.0～2.8倍、発錆面積率は、3.9～11.0倍とW/Cが大きい方が錆が多く発生する傾向にある。

(b)Cl⁻量の違いによる影響

中性化促進期間6ヵ月の時点で比較する。

Cl⁻量以外の条件が同一であ

る配合No.1(Cl⁻0 kg/m³)と配合No.3(Cl⁻1.5 kg/m³)、配合No.2(Cl⁻1.5 kg/m³)と配合No.4(Cl⁻3.3 kg/m³)、配合No.5(Cl⁻0 kg/m³)と配合No.7(Cl⁻1.5 kg/m³)、配合No.6(Cl⁻1.5 kg/m³)と配合No.8(Cl⁻3.3 kg/m³)を各々比較すると、中性化深さには

表-2 スランプ、空気量、圧縮強度、静弾性係数測定結果一覧

配 合 合 No.	ス ラ ン プ (cm)	空 気 量 (%)	圧縮強度 (kgf/cm ²)		静弾性係数 (×10 ⁴ kgf/cm ²)	
			7日	28日	7日	28日
1	11.0	4.6	294	398	25.8	28.6
2*	9.0	4.4	333	410	26.8	30.1
3	11.5	4.7	311	379	27.4	29.9
4*	8.5	4.9	303	385	27.1	29.8
5	11.2	4.5	174	269	20.3	24.9
6*	8.6	4.6	190	248	22.4	26.0
7	10.2	4.8	172	224	22.9	25.5
8*	8.0	4.5	200	259	22.8	26.5
9*	6.0	4.1	129	199	20.6	25.0

配合No.に「」を付したものは、反応性骨材を使用している。

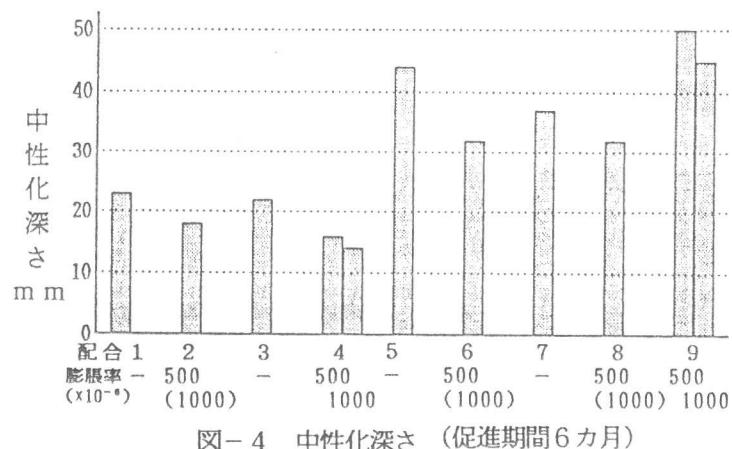


図-4 中性化深さ (促進期間6ヵ月)

ほとんど差は見られないが、錆による重量減少率、発錆面積率とも Cl^- の増加とともに増加している。

(c) アルカリ骨材反応による影響

中性化促進試験開始時におけるASRによる膨張量とひびわれ発生状況を表-3に示す。

図-4、5において、配合No.2とNo.3あるいは配合No.6とNo.7とを比較すると、おむね非反応性骨材を用いた方が大きくなる傾向にある。

応性骨材を用いたNo.3、No.7の方が、反応性骨材を用いた供試体よりも大きな中性化深さ値を示している。錆による重量減少率、発錆面積率も、図-6、7に示したように非反応性骨材を用いた方が大きくなる傾向にある。

また、同一配合で膨張量を変えて中性化促進試験に供した配合No.4およびNo.9においても、膨張量の大きい方が逆に中性化深さは小さい値を示している。

これらの結果は、アルカリ骨材反応による生成ゲルが細孔を充填することによって生じるものである可能性が高い。

しかし、非反応性骨材を用いた供試体（配合No.1、3、5、7）は、実施工を想定し、脱型後1週間の標準養生後、すぐに中性化促進槽に移しているのに対し、反応性骨材を用いた供試体（配合No.2、4、6、8、9）

は打設後、1週間の標準養生後、ASRを促進するため 40°C 、100%R.Hにて養生し、所定の膨張量に達した後、中性化促進槽に移した。従って後者の方が水分を供給される養生期間が長く、そのためコンクリート硬化体組織が密実になったとも考えられる。従って、この結果から直ちにアルカリ骨材反応が中性化を促進することはないと断定することはできないが、更に検討を加え

表-3 中性化促進錆開始時のASRによる膨張量とひびわれ発生状況

配合No.	設定膨張量 μ	中性化錆開始時 の膨張量 μ	最大ひびわれ幅 mm	平均ひびわれ幅 mm	平均ひびわれ 間隔 cm
4	500	540	0.10	0.061	10.8
	1000	1065	0.20	0.104	8.5
9	500	575	0.15	0.068	11.9
	1000	1128	0.35	0.126	7.9

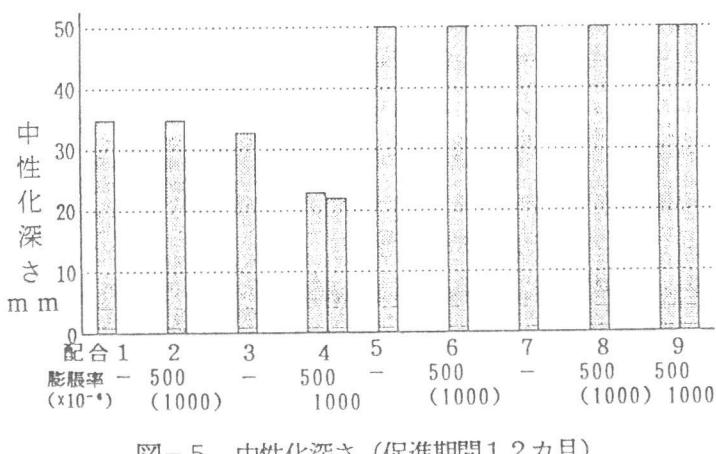


図-5 中性化深さ（促進期間12カ月）

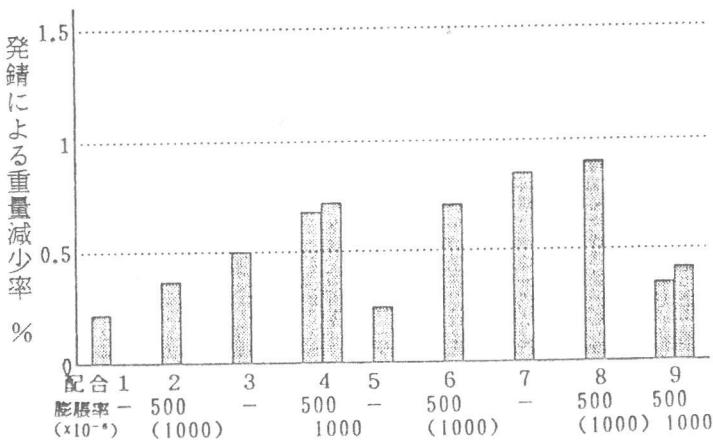


図-6 重量減少率（促進期間12カ月）

明確にしていきたいと考えている。

(d) 中性化深さと鉄筋位置の関係による発錆状況への影響

本供試体のかぶりは、およそ25mmである。図-6～7に示すように、中性化域が鉄筋に到達している供試体の発錆量が大きくなってしまおりコンクリートの中性化が鉄筋の腐食の進行を助長するひとつの要因であることは明らかである。

(e) NaClとNaOHの違いによる影響

配合No.8と配合No.9を比較すると、中性化深さは配合No.9(NaOH)の方が大きいが、錆による重量減少率および発錆面積率はともに配合No.8(NaCl)の方が大きい値を示している。

しかし、この結果からだけでは、材令の相違に起因してコンクリートの強度発現速度が違う

(表-2 参照)ことから中性化速度が異なるなどの要因も考えられるため、明確な判断はできなかった。

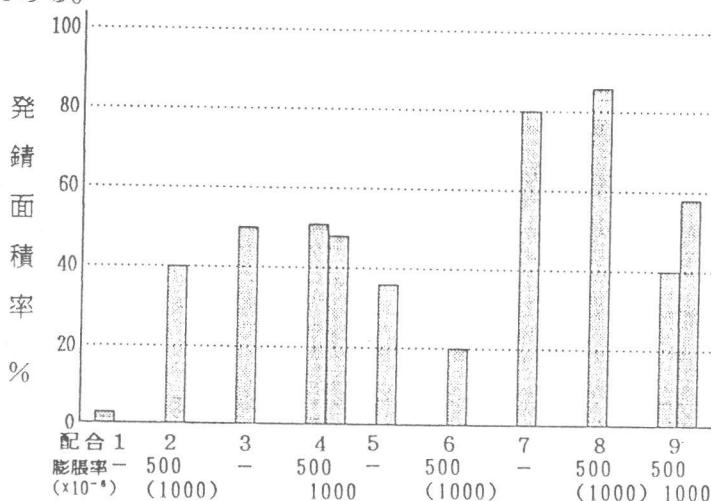


図-7 発錆面積率(促進期間12カ月)

3.まとめ

今回の実験において得られた結果をまとめると、以下のとおりである。

- 1) 今回の実験の範囲においては、アルカリ骨材反応による膨張・ひびわれが、コンクリートの中性化を促進する要因とは考え難い。しかし、中性化促進試験開始までのコンクリートの養生条件の相違などに起因する硬化体組織の差による影響について、更に詳細な検討が必要であると考えられ、今後明確にしていく予定である。ASR促進剤としてのNaClとNaOHの効果の違いについても硬化体組織の差が大きく影響しているものと考えられ、必ずしも明確にはできなかった。
- 2) すでに言われているように、中性化の進行は、水セメント比の大小によって大きな影響を受ける。すなわち、W/Cの大きいものは、中性化の進行が速く、鉄筋の腐食の程度も大きい。
- 3) 中性化促進試験という条件の下、今回の実験で設定したCl⁻換算1.5～3.3 kg/m³程度の塩分では、混入した塩分が中性化の進行を促進するということはないようである。ただし、同程度の中性化深さであっても塩分量の多少は、鉄筋の腐食そのものには大きく影響する。

なお、塩分量と中性化の進行の関係については、既往の文献[2]にみられる傾向とは異なるものであり、実験を含む検討を今後おこなう予定である。

参考文献

- 1) 石橋忠良・北後征雄：鉄筋コンクリート床版下面に施工した各種補修工法の効果、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.9-1、pp.429-434、1987.6
- 2) 例えは小林一輔・宇野祐一：塩化ナトリウムの混入がモルタルの諸性状に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.12-1、pp.465-470、1990.6