

# 論文 NaOH および NaCl 添加した複合劣化コンクリートの中の鉄筋腐食に関する研究

市原 鴻<sup>\*1</sup>・久保 善司<sup>\*2</sup>・菊池 創太<sup>\*3</sup>

**要旨:** ASR と塩害の複合劣化を念頭におき, NaOH, NaCl 添加, 骨材のアルカリ骨材反応性および養生環境を要因とした鉄筋コンクリート供試体を作製した。これらに電気化学的腐食測定を行うことで, NaOH, NaCl 添加および骨材のアルカリ骨材反応性がコンクリート中の鉄筋腐食に与える影響について検討した。NaOH を添加した供試体中の鉄筋は無添加のものに比べて分極抵抗が低くなる傾向にあり, 材齢初期においてその差は顕著であったが, 日数が経過するとその差は小さくなった。また, ASR 劣化によるひび割れが鉄筋腐食を加速させる要因となる可能性が示唆された。

**キーワード:** 鉄筋腐食, アルカリシリカ反応, 水酸化ナトリウム, 塩化ナトリウム, 自然電位, 分極抵抗

## 1. はじめに

高度成長期において膨大な数のコンクリート構造物が集中的に整備され, 社会資本として供用されている。建設当初, メンテナンスフリーと考えられてきた。しかし, 厳しい使用・環境条件等によって早期劣化の問題が生じて以降, その認識は払拭され, 予防保全型の維持管理へ移行しつつある。劣化が生じたコンクリート構造物においては, 劣化原因の特定, 劣化状況の把握, さらに, 劣化進行予測が適切な対策の実施において重要となる。そのため, 各種劣化メカニズムの解明やその対策のための検討がなされている。代表的な劣化原因の一つとして挙げられる塩害においては標準的な維持管理対策が確立されつつある。

他方, コンクリート材料中の骨材に起因するアルカリ骨材反応 (以下, ASR) については, その劣化機構が複雑であること, その劣化因子である骨材, アルカリ, 水分の除去が現状においては困難な場合が多いことなどによって, 対策が確立されていると言いがたい。さらに, これまでは, 安山岩, チャートなどの限定された地域で産出される骨材による事例が多く<sup>1)</sup>, 限定された地域の問題として扱われることが多かった。しかし, 近年では, 地質学的知見から反応性を有する骨材は全国の広範な地域において存在する可能性が示唆されており<sup>2), 3)</sup>, これまで報告のなかった地域においても ASR に対する対応が必要となることが懸念されている。

それらに加えて, スパイクタイヤ禁止以降, 凍結防止剤散布を起因とした塩害の事例も報告されており, 沿岸部以外の地域においても塩害に対する対策が必要となっている。多量の散布によって比較的短期間に深刻な劣化を生じている構造物も報告されている<sup>4), 5)</sup>。凍結防止剤

の散布は塩害を促進すると同時に, 外部からアルカリと水分を供給することによって, ASR も促進することが知られている<sup>6)</sup>。したがって, 寒冷地などの凍結防止剤散布地域において, ASR が構造物に生じた場合には, 両者が複合し, ASR と塩害両者の複合劣化を生じることとなる。既往の研究では, ASR によって発生したゲルが鉄筋周辺に存在することによって緩衝作用を生じて, 腐食を抑制するメカニズムが生じるとの報告もされている<sup>6)</sup>。他方, 凍結防止剤散布下の ASR 劣化構造物においては腐食を生じているケースもあり, ASR と塩害の複合劣化の実態については十分に明らかにされていないのが現状である<sup>6)</sup>。

本研究では, ASR と塩害の複合劣化を念頭におき, NaOH, NaCl 添加および骨材のアルカリ骨材反応性を要因とした鉄筋コンクリート供試体を作製し, 複合劣化の実態を解明するための実験的検討を行うこととした。作製した供試体の電気化学的腐食測定を行うことで, NaOH, NaCl 添加および骨材のアルカリ骨材反応性がコンクリート中の鉄筋腐食に与える影響について検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体概要

#### (1) 使用材料

セメントとして普通ポルトランドセメント (密度: 3.15g/cm<sup>3</sup>, 全アルカリ量: 0.57%) を用いた。非反応性の細骨材および粗骨材として, 手取川産川砂 (密度: 2.59g/cm<sup>3</sup>, 吸水率: 1.81%) および川砂利 (密度: 2.60g/cm<sup>3</sup>, 吸水率: 1.97%) を用いた。また反応性骨材として安山岩を粉砕し細骨材 (密度: 2.68g/cm<sup>3</sup>, 吸水率: 2.24%) として用いた。混和剤は AE 助剤を用いた。所定のアル

\*1 金沢大学大学院 自然科学研究科環境デザイン学専攻 (学生会員)

\*2 金沢大学 理工学域環境デザイン学類准教授 博(工) (正会員)

\*3 金沢大学 理工学域環境デザイン学類 (学生会員)

表-1 配合

配合名	単位量(kg/m <sup>3</sup> )										
	W/C	W	C	G	S	Sr*	助剤	NaOH	NaCl	等価アルカリ量	Cl <sup>-</sup> 量
N-N-0	55	168	305	980	798	0	0.16	0	0	1.74	0
N-N-2.4	55	168	305	980	798	0	0.16	0	3.96	3.84	2.4
N-N-4.8	55	168	305	980	798	0	0.16	0	7.91	6.65	4.8
N-A-0	55	168	305	980	798	0	0.16	4.21	0	5.00	0
N-A-2.4	55	168	305	980	798	0	0.16	4.21	3.96	7.10	2.4
N-A-4.8	55	168	305	980	798	0	0.16	4.21	7.91	9.91	4.8
R-A-0	55	168	305	980	559	239	0.16	4.21	0	5.00	0
R-A-2.4	55	168	305	980	559	239	0.16	4.21	3.96	7.10	2.4
R-A-4.8	55	168	305	980	559	239	0.16	4.21	7.91	9.91	4.8

\*Sr：反応性細骨材

カリ量、Cl量とするため NaOH および NaCl をコンクリートの練混ぜ水に溶かして使用した。コンクリート中に埋設する鉄筋として直径 9mm、長さ 300mm の丸鋼 (SR235) を用いた。

(2) コンクリートの配合

本実験で用いた示方配合を表-1 に示す。水セメント比は、標準的なコンクリートを想定し 55% とした。非反応性の骨材を使用し、NaOH および NaCl 無添加の配合を N-N-0 とした。これに対し、NaCl 添加がコンクリートに与える影響を調べるため、Cl<sup>-</sup>量が 2.4kg/m<sup>3</sup> となるよう NaCl を添加したものを N-N-2.4、Cl<sup>-</sup>量が 4.8kg/m<sup>3</sup> となるようにしたものを N-N-4.8 とした。また NaOH 添加がコンクリートに与える影響を調べるため、N-N-0 の配合に対して NaOH を添加し、セメントに含まれるアルカリ量および添加 NaOH によるアルカリ量の合計が Na<sub>2</sub>O 等価アルカリ量で 5kg/m<sup>3</sup> となるよう調整し、この配合を N-A-0 とした。N-N の配合と同様に、N-A-0 に対して Cl<sup>-</sup>量が 2.4kg/m<sup>3</sup> および 4.8kg/m<sup>3</sup> となるよう NaCl を添加した配合を N-A-2.4、N-A-4.8 とした。アルカリ骨材反応性が鉄筋腐食に与える影響を調べるため、NaOH を添加した N-A の配合に対し、細骨材の 30% が反応性細骨材となるよう一部骨材を置換したものを R-A-0、R-A-2.4、R-A-4.8 をとした。実験条件を表-2 に示す。

(3) 供試体寸法および鉄筋配置

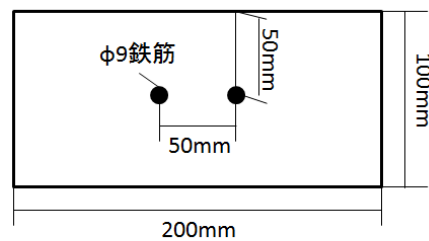
供試体の寸法は 200×200×100mm の直方体とし、φ9 鉄筋を 2 本配置した。供試体概要を図-1 に示す。鉄筋は両端 10mm および中央 100mm の領域を除いて塗膜処理を施した。この鉄筋の両端 50mm が供試体のコンクリート部分から突き出るよう平行に配置し、コンクリート中に埋め込まれた中央 100mm の領域に対して電気化学的腐食測定を行った。2 本の鉄筋は打設面から 50mm 位置において鉄筋中央となるよう配置した。2 本の鉄筋は中心を 50mm 離れた状態で配置した。

表-2 実験条件

実験条件		記号
細骨材の反応性	非反応性, 反応性	N, R
NaOH 添加	なし, あり	N, A
Cl <sup>-</sup> 量(kg/m <sup>3</sup> )	0, 2.4, 4.8	0, 2.4, 4.8
養生温度(°C)	20, 40	記号なし, *

例：N-A-2.4 (非反応性細骨材, NaOH 添加, Cl<sup>-</sup>2.4kg/m<sup>3</sup>, 20°C環境で養生)

側面図



断面図

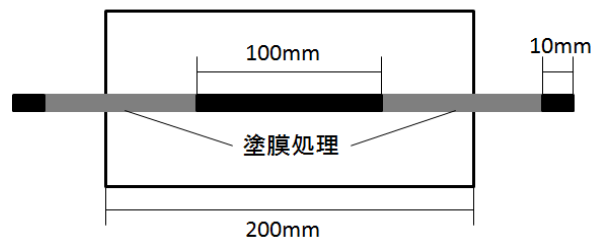


図-1 供試体

(4) 養生環境

各供試体は表面に濡れたウエスをあてた状態でそれぞれビニール袋に密封し、コンクリート表面が常に湿潤状態に保たれるよう室温 20°C環境で養生を行った。

また、R-A 配合(R-A-0, R-A-2.4, R-A-4.8)の供試体は

各配合につき2体ずつ供試体を作製し、一方はASRによる劣化を促進するため40℃環境での養生を行った。R-A配合の供試体内、40℃での促進養生を行った供試体をそれぞれR-A-0\*、R-A-2.4\*、R-A-4.8\*とする。

## 2.2 電気化学的腐食測定

携帯型鉄筋腐食診断機(照合電極:銀/飽和塩化銀電極)を用いて、自然電位の測定を行った。自然電位測定時はコンクリート表面を軽く濡らし、濡れたウエスでしばらく覆ってコンクリート表面近傍を湿潤状態とし、測定を行った。コンクリート表面に照合電極を設置し、コンクリート中の鉄筋との電位差を測定した。測定の概要(自然電位測定)を図-2に示す。自然電位から腐食状態を評価する基準としてASTM C 876の判定基準を用いた。この基準はCSE(飽和硫酸銅電極)を用いたものであるため、本研究で用いた銀/飽和塩化銀電極に換算した値と共に表-3に示す。また、同診断機の交流インピーダンス法による分極抵抗の測定を行った。分極抵抗測定時は、コンクリート中にある2本の鉄筋の内一方を対極、もう一方を試料極として測定を行った。腐食判定に用いたCEBの基準を表-4に示す。

## 2.3 膨張量測定

ASR劣化を促進する供試体の膨張量を測定した。40℃環境での促進養生を行う供試体の側面にコンタクトチップを貼り付け、マイクロストレインゲージを用いてASRによる膨張量を測定した。コンタクトチップの貼付け位置を図-3に示す。コンタクトチップは1つの側面に4点貼り付け、100mm区間を2区間測定した。反対側の側面にも同様にコンタクトチップを貼り付け、1つの供試体につき合計4区間での膨張量を測定しその平均を供試体の膨張量とした。

ひび割れが確認された状態での供試体表面にラップを巻き、その上からひび割れをマーカーでなぞってひび割れのスケッチを行った。スケッチはコンクリートの上面(打設面)、底面および鉄筋が突き出していない2側面で行った。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 膨張量

ASR促進養生を行った供試体の膨張量測定結果を図-4に示す。いずれの供試体も養生開始から45日での測定時よりASRによる膨張が確認され、日数の経過とともに膨張量は増加した。Cl<sup>-</sup>量が多い配合のものほど膨張量が大きくなった。今回の実験ではCl<sup>-</sup>量を調節するためにコンクリートにNaClを添加したことで、Cl<sup>-</sup>量の多い配合ほどコンクリート中のアルカリ量も増加し、ASR劣化を促進したものと考えられる。また、R-A-2.4\*、R-A-4.8\*の供試体は養生開始から100日の時点でコンクリート

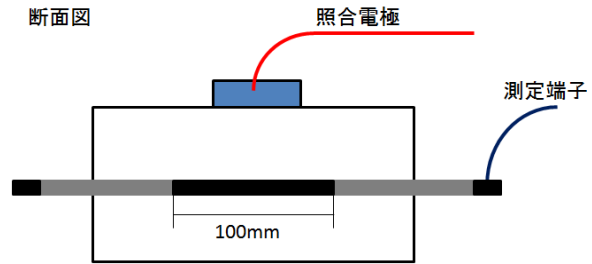


図-2 自然電位測定概要

表-3 自然電位の腐食判定基準

電位 (mV vs. CSE)	電位 (mV vs. Ag/AgCl)	腐食の 判定基準
$E > -200$	$E > -90$	90%以上腐食なし
$-200 \geq E \geq -350$	$-90 \geq E \geq -230$	不確定
$-350 \geq E$	$-230 > E$	90%以上腐食あり

表-4 分極抵抗の腐食判定基準

分極抵抗測定値 $R_p$ ( $k\Omega \cdot cm^2$ )	腐食速度の判定
$52 \leq R_p \leq 130$	低～中程度の腐食速度
$26 \leq R_p \leq 52$	中～高程度の腐食速度
$R_p < 26$	激しい、高い腐食速度

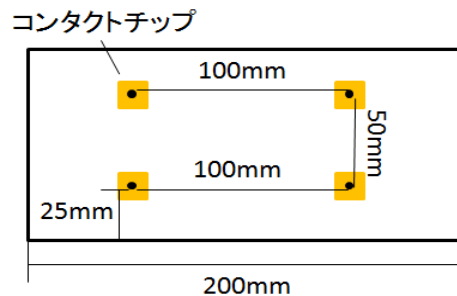


図-3 コンタクトチップ貼付け位置

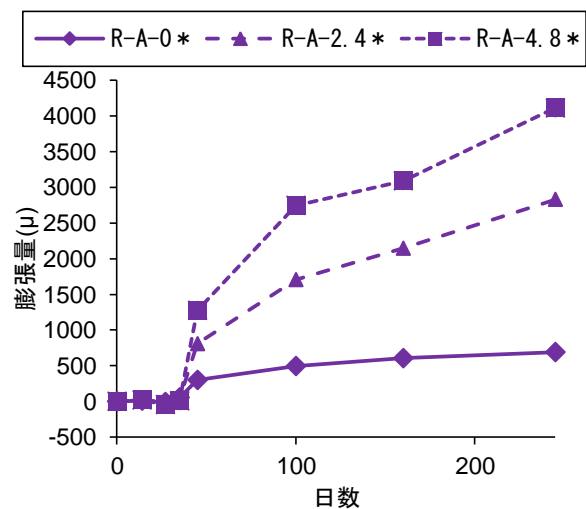
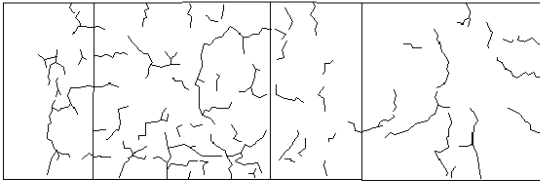
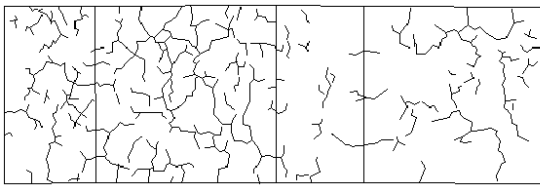


図-4 膨張量

R-A-2.4\*



R-A-4.8\*



側面 上面 側面 底面

図-5 100日時点ひび割れ図

表面に膨張によるひび割れが多数確認された。ひび割れの様子を図-5に示す。ひび割れのうちいくつかは、鉄筋の上を沿って生じたものが確認されたが、多くのひび割れは方向性もなくランダムにコンクリート表面に生じていた。また R-A-0\*は表面に目立った膨張ひび割れは確認されなかった。ひび割れが発生した R-A-2.4\*、R-A-4.8\*と比べ、R-A-0\*は膨張量が小さく、表面にひび割れが生じるほどの引張応力が作用しなかったものと考えられる。コンクリート表面に 500~1000 $\mu$  の膨張が生じるとひび割れが発生するとされており、R-A-0\*はひび割れの発生する膨張量に達しなかったものと考えられる。なお、R-A-0\*は他と比べ、後述の腐食測定結果では鉄筋が非腐食もしくは小さい腐食を示す値であったため、腐食によりひび割れの発生は促進されなかったものと考えられる。

### 3.2 自然電位

20°C環境で養生した供試体の材齢初期における自然電位の測定結果を図-6に示す。NaOH無添加であるN-N配合とNaOHを添加したN-A配合およびR-A配合を比較した場合、NaOH添加した供試体は無添加のものに比べ自然電位の低下が大きい傾向を示した。しかし、日数の経過につれてNaOH無添加の供試体とNaOH添加した供試体との自然電位の差は小さくなった。NaOH添加したものはOHイオン濃度が高くなったことで、自然電位が若干低下したものと考えられる。この原因については更なる検討が必要である。

最大養生期間までの自然電位測定結果を図-7に示す。Cl量が多い供試体ほど自然電位が卑側の値を示す傾向が見られた。NaCl無添加の供試体N-N-0は、測定開始時点から非腐食に近い値を示し、日数が経過しても自然電位に大きな変化は見られなかった。NaOH添加したN-A-0

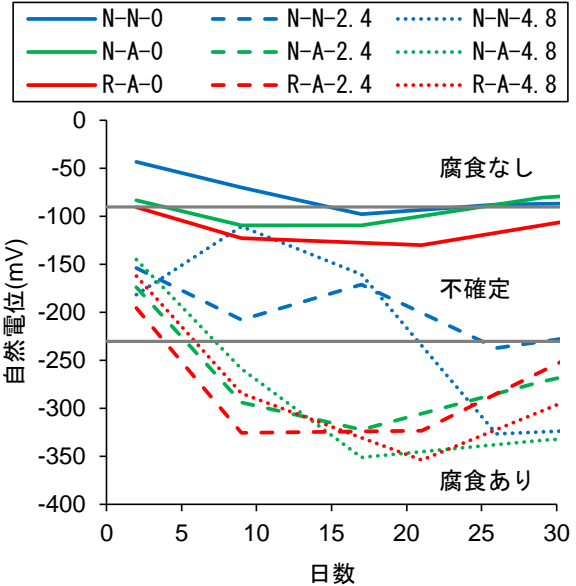


図-6 自然電位(20°C) 材齢初期

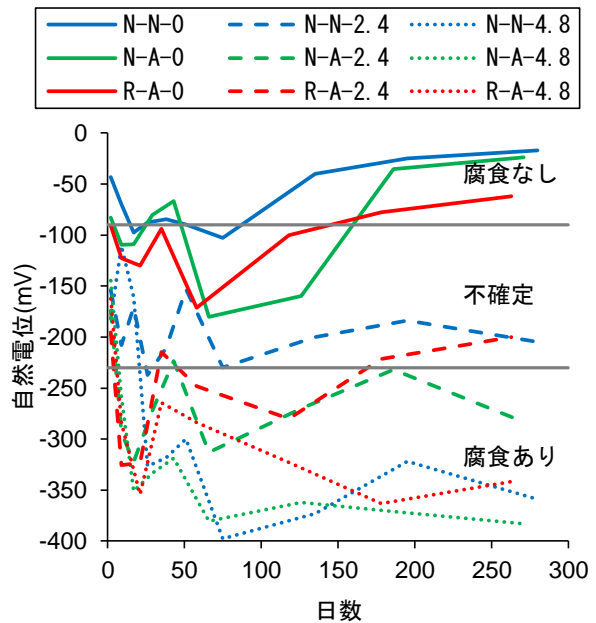


図-7 自然電位(20°C)

およびR-A-0は100日前後までは自然電位が卑側へ推移する傾向を示したが、その後回復傾向を示し、N-N-0と同程度の自然電位となった。Cl量が2.4kg/m<sup>3</sup>もしくは4.8kg/m<sup>3</sup>となるようNaClを添加した各供試体は、日数の経過につれて自然電位が腐食領域へと卑側の推移を示した。反応性細骨材を用いたR-A-2.4およびR-A-4.8は、約100日以降より自然電位が回復する傾向を示した。日数の経過とともにASRゲルが生成され、ゲルの緩衝効果により自然電位が貴側に推移したものと考えられる。

NaOH添加し、反応性骨材を使用したR-A配合につい

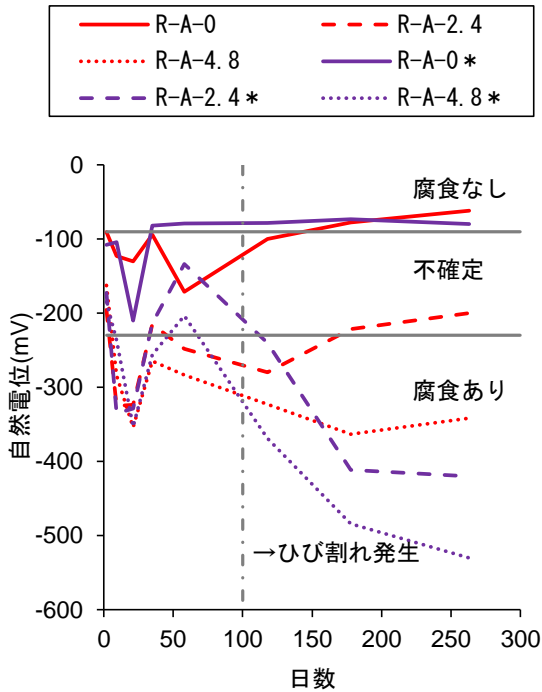


図-8 自然電位 (40°C促進比較)

て、20°C環境で養生した供試体と40°C環境で促進養生を行った供試体の自然電位を比較したものを図-8に示す。NaCl無添加のR-A-0およびR-A-0\*は非腐食を示す同程度の自然電位となった。他方、NaClを添加した供試体については、材齢初期においてほとんど同じ自然電位を示したものの、日数の経過に従い、40°C促進養生を行ったR-A-2.4\*およびR-A-4.8\*は20°C養生の供試体と比べより卑側の値へ推移した。70日時点ではR-A-2.4\*およびR-A-4.8\*の方が自然電位は大きくなったが、ASRによるひび割れが供試体表面に確認された養生100日以降より自然電位が大きく低下し始め、R-A-2.4およびR-A-4.8を下回った。ASR促進養生を行った供試体の方が早い段階でASRゲルが発生したことで一時的に自然電位は回復したが、その後膨張が進展し、表面にひび割れが生じたことにより、コンクリート表面からの水分や酸素の供給状況が変化し、自然電位が再度卑側へ推移する原因になったものと考えられる。

### 3.3 分極抵抗

材齢初期における分極抵抗の測定結果を図-9に示す。材齢初期において、NaOH添加したN-A配合およびR-A配合は、NaOH無添加のN-N配合より分極抵抗が小さい値を示した。NaClを添加したものは養生15日付近までN-N配合の分極抵抗が他を上回ったが、それ以降はN-N配合の供試体も分極抵抗が低下し始めた。

最大養生期間までの分極抵抗の測定結果を図-10に示す。自然電位と同様分極抵抗も、コンクリート中のCl量が多いほど値が小さくなる傾向が見られた。NaCl無添

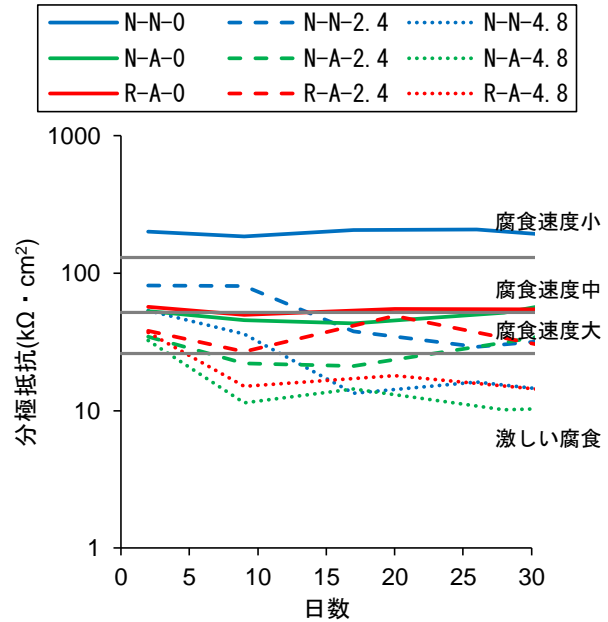


図-9 分極抵抗 (20°C) 材齢初期

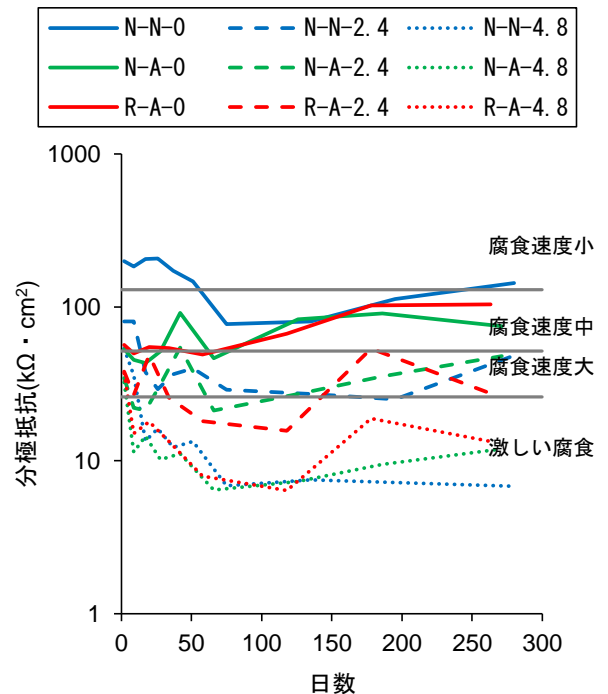


図-10 分極抵抗 (20°C)

加の供試体は小から中程度の腐食速度を示す値となり、Cl量2.4kg/m<sup>3</sup>のものはおおそ中程度の腐食速度を示す値となった。Cl量4.8kg/m<sup>3</sup>のものは最も分極抵抗が小さく、激しい腐食を示す値となった。初期材齢においてNaOHの有無によりNaCl無添加の供試体に生じた分極抵抗の差は日数の経過とともに小さくなり、最終的にはNaOH添加した供試体もNaOH無添加のものと同程度の



分極抵抗となった。材齢初期においては、NaOHを添加することにより高いOH-イオン濃度に鉄筋が接することで、通常とは異なる不動態皮膜が生成されたと推測され、その生成時において分極抵抗が低下したものと考えられる。また、日数の経過に伴い、この不動態皮膜生成が終了に近づくことで、分極抵抗が大きく（回復）なったものと考えられる。

NaOH添加し、反応性骨材を使用したR-A配合について、20℃環境で養生した供試体と40℃環境で促進養生を行った供試体を比較したものを図-11に示す。養生開始から100日程度までは40℃促進養生を行った供試体の方が、わずかに分極抵抗が大きくなる傾向を示した。その後、ASR劣化によるひび割れが確認されたR-A-2.4\*およびR-A-4.8\*については、20℃養生を行った同配合の供試体と比べ分極抵抗が大きく低下した。ASR促進養生を行った供試体は早い段階でASRゲルによる緩衝作用により一時的に分極抵抗が大きくなったが、ひび割れの発生により再度腐食側へ推移したものと考えられる。他方、表面にひび割れが確認されなかったR-A-0とR-A-0\*は同程度の分極抵抗となった。本実験のようにASR劣化によってコンクリート表面に多くのひび割れが発生した場合、限界以上の塩化物イオン量が存在する場合には、ひび割れの存在がコンクリート中の鉄筋腐食を加速させる原因になるものと考えられる。

#### 4. まとめ

NaOHおよびNaClの添加、反応性骨材使用および養生環境を要因としたコンクリート供試体中の鉄筋に対し電気化学的腐食測定を実施し、各要因がコンクリートの鉄筋の腐食状態（自然電位・分極抵抗値）に与える影響を調べた。得られた知見を以下にまとめる。

- (1)材齢初期において、コンクリートにNaOHを添加することにより無添加のものより自然電位が小さくなる傾向が見られた。また、日数の経過とともにこの差は小さくなった。
- (2)膨張が顕著でなく、ASR反応のみが生じた場合の自然電位の挙動において、コンクリート中に生成されたASRゲルの緩衝作用によると推察される電位の回復が認められた。
- (3)コンクリートにNaOHを添加した場合、無添加のもの比べて分極抵抗が低くなる傾向にあり、材齢初期においてその差は顕著であった。コンクリート供試体中のNaOHが腐食測定の結果そのものに影響を与える可能性が示唆された。
- (4)ASR膨張が進展し、コンクリート表面にひび割れが生じた場合、ひび割れ発生後の自然電位および分極抵抗

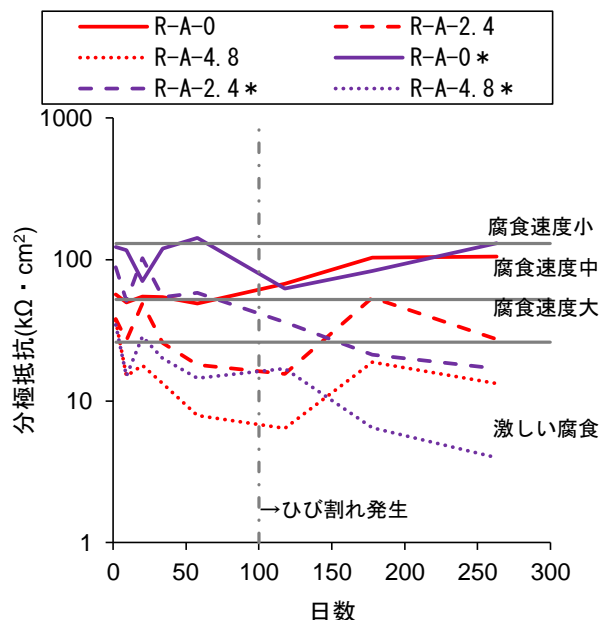


図-11 分極抵抗(40℃促進比較)

は大きく低下した。ひび割れによりコンクリート中への水分や酸素の供給状況が変化し、鉄筋腐食を加速させる要因になった。

(5)コンクリート表面にひび割れが多数発生するほどASR劣化が進行し、限界以上の塩化物イオン量を含む場合には、ASRによって腐食が促進される可能性が示唆された。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：アルカリ骨材反応対策小委員会報告書、コンクリートライブラリー124、2005
- 2) 広野真一：岩石学的見地から見た国内のアルカリシリカ反応性骨材、コンクリートテクノ、Vol.30、No.11、pp9-15、2011
- 3) 広野真一：わが国の反応性骨材の地質学的な分布と岩石学的試験による骨材のアルカリシリカ反応性に関する基礎的研究、金沢大学博士論文、2015
- 4) 本荘清司、中野将宏、藤原規雄ほか：凍結防止剤によって塩害劣化した鋼橋RC床版の詳細調査、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、Vol.10、pp.51-56、2010
- 5) 横山和昭、本荘清司、葛目宏ほか：道路橋RC床版の鉄筋腐食を伴う劣化機構の解明に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.30、No.3、pp.1687-1692、2008
- 6) 日本コンクリート工学会：作用機構を考慮したアルカリ骨材反応の抑制対策と診断研究委員会報告書、2008