

論文 塩分濃度の異なるコンクリートの基本的性質について

横室 隆^{*1}・依田 彰彦^{*2}

要旨：天然骨材の枯渇化に伴い、山砂、海砂などが用いられている。海砂は、1960 年後半から関西以西で多用されてきた。最近では海砂の採取規制が行われ、使用量が急減しているが、1986 年以前の RC 造構造物では早期劣化が懸念される。また、建設工事の工期短縮、生産性の向上などが不可欠となる。そのため硫酸ナトリウムを添加し、早期強度の増進を図ることなど考えられる。本研究は、塩分濃度の異なるコンクリートの基本的な性質について 5 年にわたり検討した結果、塩分濃度が増すに従って初期強度は大きくなるが、長期強度は低下する。また、乾燥収縮率は大きくなり、鉄筋の発錆率も多くなることを明らかにした。

キーワード：塩分濃度、コンクリート、圧縮強度、乾燥収縮率、中性化深さ、鉄筋の発錆

1. はじめに

コンクリート用細骨材として天然骨材の枯渇化に伴い、山砂、陸砂および海砂などが用いられている。海砂については 1960 年代後半から関西以西で特に多用されてきた。これを受け 1986 年から、塩化物イオンの総量規制が導入された。最近では、海砂の採取規制がおこなわれ、使用量は急減している。しかし、1986 年以前の鉄筋コンクリート構造物では早期劣化が懸念される。また、建設工事の迅速化、工期短縮および生産性の向上を図ることが不可欠となっている。そのため、コンクリート中に硫酸ナトリウムを添加することにより、早期強度の増進が図れることなどが、これまでの研究で^{1), 2)}で明らかとなっている。本研究は、塩分濃度の異なるコンクリートの基本的な性質を究明するため、これまでに研究^{3)~8)}を進めている。

本報告は、塩分濃度の異なるコンクリートの圧縮強度をはじめ乾燥収縮率、凍結融解作用に

対する抵抗性、中性化深さおよび鉄筋の発錆などについて、長期材齢から検討したものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料

セメントは、普通ポルトランドセメントを用いた。その品質を表-1に示す。細骨材は鬼怒川産砂(絶乾密度 2.65g/cm³, 吸水率 1.7%, f.m.2.8)粗骨材は鬼怒川産砂利(絶乾密度 2.61g/cm³, G max 25mm)、水は上水道水(塩化物イオン量 10.6mg/l)、化学混和剤は主成分がリグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体の AE 減水剤(塩化物イオン 0.06%)を用いた。また、鉄筋の発錆状況を観察するため、SR295 の丸鋼(φ13)を研磨紙を用いて黒皮を落し、これを磨き鉄筋として用いた。

2.2 塩分濃度の調整

塩分濃度の調整は、細骨材量に対して塩化ナトリウム(NaCl)を 0.04%、0.10%および 0.30%添加した。また、同様に硫酸ナトリウム(Na₂SO₄)を 0.025%、0.25%および 10.0%添加した。

2.3 コンクリートの調合

コンクリートの調合は材齢 28 日圧縮強度を 22.5N/mm²と設定したので、水セメント比を 63%とした。また、スランプ 18±2.5cm、空気量 4.5

表-1 普通ポルトランドセメントの品質

密度 (g/cm ³)	比表 面積 (g/cm ²)	凝結		圧縮強さ (N/mm ²)			塩化物 イオン (%)
		始発	終結	3d	7d	28d	
		(h-m)					
3.15	3370	2-0.5	3-15	27.5	42.4	59.1	0.005

*1*2 足利工業大学 工学部建築学科教授 工博(正会員)

表－２ 各種コンクリートの調合と得られた結果

NO	w/c (%)	塩分濃度 (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)				スランプ (cm)	空気量 (%)	ワーカ ビリテ ィー	ブリーデ ィング量 (cm ³ /cm ²)	相対動弾 性係数 (300サイクル) (%)
				水	セ メン ト	細 骨 材	粗 骨 材					
1	63	無混入	44.4	173	275	789	1011	19.5	5.0	良	0.24	92
2	63	NaCl 0.04%	44.4	173	275	789	1011	20.0	4.9	良	0.39	90
3	63	NaCl 0.10%	44.4	173	275	789	1011	20.0	5.0	良	0.40	85
4	63	NaCl 0.30%	44.4	173	275	789	1011	20.5	4.9	良	0.42	81
5	63	Na ₂ SO ₄ 0.025%	44.4	173	275	789	1011	19.5	5.0	良	0.35	93
6	63	Na ₂ SO ₄ 0.25%	44.4	173	275	789	1011	19.5	5.0	良	0.38	90
7	63	Na ₂ SO ₄ 2.50%	44.4	173	275	789	1011	20.5	4.3	良	0.40	0
8	63	Na ₂ SO ₄ 10.0%	44.4	173	275	789	1011	20.5	4.3	良	0.48	0

±0.5%を目標とした。実際に得られたコンクリートの調合を表－２に示す。

3. 実験項目と方法

実験の項目と方法を以下に述べる。

3.1 フレッシュコンクリートの性状

(1) スランプ

JIS A 1101 (コンクリートのスランプ試験方法) によった。

(2) 空気量

JIS A 1128 (フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法) によった。

(3) ワーカビリティー

ワーカビリティーは目視によって観察した。

(4) ブリーディング量

JIS A 1123 (コンクリートのブリーディング試験方法) によった。

3.2 硬化コンクリートの性状

(1) 圧縮強度

JIS A 1108 (コンクリートの圧縮強度試験方法) によった。供試体は 10φ×20cm の円柱供試体を用い、20℃水中養生した。なお、材齢は 7 日、28 日、91 日、1 年、3 年および 5 年とした。

(2) 乾燥収縮率

JIS A 1129-1 モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法－コンパレータ法－により、乾燥期間 260 週までの長さ変化率を測定した。なお、材齢 1 週を基長とした場合の変化率を求めた。

(3) 凍結融解に対する抵抗性

ASTM C 666 A 法 (Resistance of concrete rapid freezing and thawing) により、300 サイクルまでの相対動弾性係数を測定した。

(4) 中性化深さ

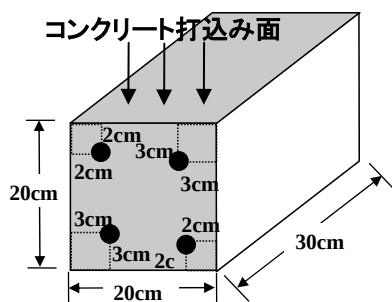
ごく一般地域 (足利市) に自然暴露した供試体 (図－1) を用いた。この供試体の養生方法は、材齢 7 日まで 20℃水中養生、その後、屋外に自然暴露した。中性化深さの測定は 1% のフェノールフタレインアルコール溶液法により、コンクリートカッターを用いて、厚さ 6cm 程度にカットし、20×20cm の両側面 (エポキシ樹脂塗布部を除く) の 40 ヶ所を測定し、その平均中性化深さを求めた。なお、材齢 1 年および 5 年で試験した。

(5) 鉄筋の発錆

1) オートクレーブによる鉄筋の促進腐食

JIS A 6205 (鉄筋コンクリート用防せい剤) 附属書 2、コンクリート中の鉄筋の促進腐食試験

コンクリート打込み面、底面および(20×20cm)の両側面にエポキシ樹脂を塗布した。



図－1 磨き鉄筋（φ13）の配筋状況

方法により、10φ×20cm の円柱供試体を用い、この供試体の中心に長さ 10cm の磨き鉄筋（φ13）を埋め込み、その鉄筋の発錆について確認した。鉄筋の発錆率の算出は、鉄筋の発錆が認められたものに対して 5%硫酸濃度の溶液中に 24 時間浸せきし、ブラシを用いて錆を落とし、質量法によって、その発錆率を求めた。

2) 自然暴露による鉄筋の発錆

3. 2. (4) で述べた通り、屋外に自然暴露した同様の供試体（20×20×30cm）を用い、図－1 に示すような磨き鉄筋（φ13）かぶり厚さ（2cm, 3cm）を配筋した。これを材齢 5 年で鉄筋の発錆について、上記(5)1)と同様の方法で鉄筋の発錆率を算出した。

4. 実験結果と考察

(1) ワーカビリティー

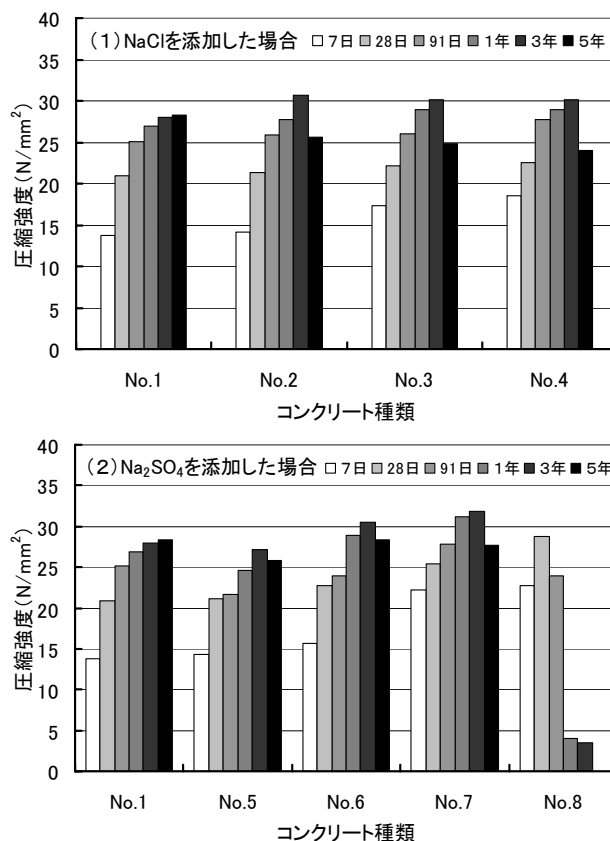
各種コンクリートのスランプおよび空気量は目標とした範囲の値が得られ、スランプした形状からワーカビリティーを判断した結果、各種コンクリートとも良好であった。

(2) ブリーディング量

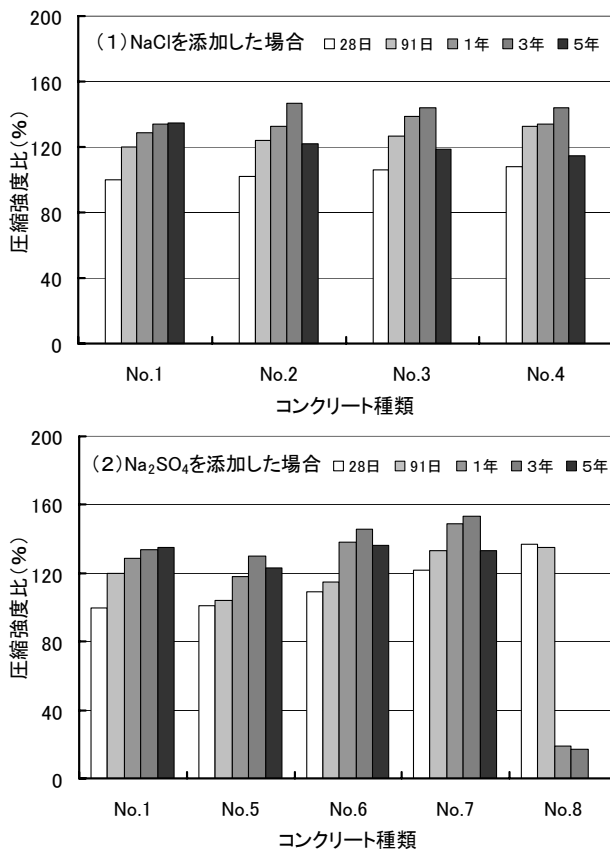
各種コンクリートのブリーディング量を表－2 に示す。このことから No.1 の無混入コンクリートに対して NaCl および Na₂SO₄ を添加したコンクリートは、塩分濃度が多くなるほどブリーディング量は多くなっている。しかし、JASS 5 の目標値 0.5cm³/cm² 以下を全て満足している。

(3) 圧縮強度

各種コンクリートの圧縮強度の結果を図－2



図－2 各種コンクリートの圧縮強度



図－3 各種コンクリートの圧縮強度比

に示す。図-2(1)の NaCl を添加した場合、初期の材齢 7 日でみると、No.1 の無混入コンクリートの圧縮強度は 13.8N/mm^2 に対して、No.2 のコンクリートは 14.2N/mm^2 、No.3 のコンクリートは 17.3N/mm^2 、No.4 のコンクリートは 18.5N/mm^2 と添加量が増すに従って、高い圧縮強度が得られている。この理由としては、塩化物イオンを含むことによってカルシウムシリケート水和物の生成を促進するためと考える。同様に、図-2(2)の Na_2SO_4 を添加した場合でみると、No.5 のコンクリートは 14.3N/mm^2 、No.6 のコンクリートは 15.6N/mm^2 、No.7 のコンクリートは 22.2N/mm^2 、No.8 のコンクリートは 22.8N/mm^2 と、添加量が増すに従って高い圧縮強度が得られている。また、No.1 の無混入コンクリートは、材齢の経過に伴い圧縮強度は増進しているが、NaCl および Na_2SO_4 添加した場合のコンクリートは、No.8 のコンクリートを除き、材齢 3 年までの圧縮強度は増進しているが、その後の圧縮強度は低下している。

次に、各種コンクリートの圧縮強度比を図-3に示す。この図は NO.1 の無混入コンクリートの材齢 28 日の圧縮強度を 100%とした場合の各種コンクリートの圧縮強度比を求めた。材齢 5 年でみると NaCl を添加した場合では 115~122%の範囲にあり、添加量が多いほどその値は小さくなっている。同様に Na_2SO_4 を添加した場合では No.8 のコンクリートを除き、123~136%の範囲にあり、添加量が多くなるほど、その値は大きくなっている。また、No.8 のコンクリートをみると、材齢 1 年では 19%，材齢 3 年では 17%，材齢 5 年では崩壊しており、かなりの強度低下がみられる。この理由としては、コンクリート中のカルシウムアルミネートと反応し、エトリングライトをつくりコンクリートが膨張したものと考えられる。

(4) 乾燥収縮率

各種コンクリートの乾燥収縮率を図-4に示す。図-4(1)の NaCl を添加した場合の乾燥期間 260 週でみると、No.1 の無混入コンクリート

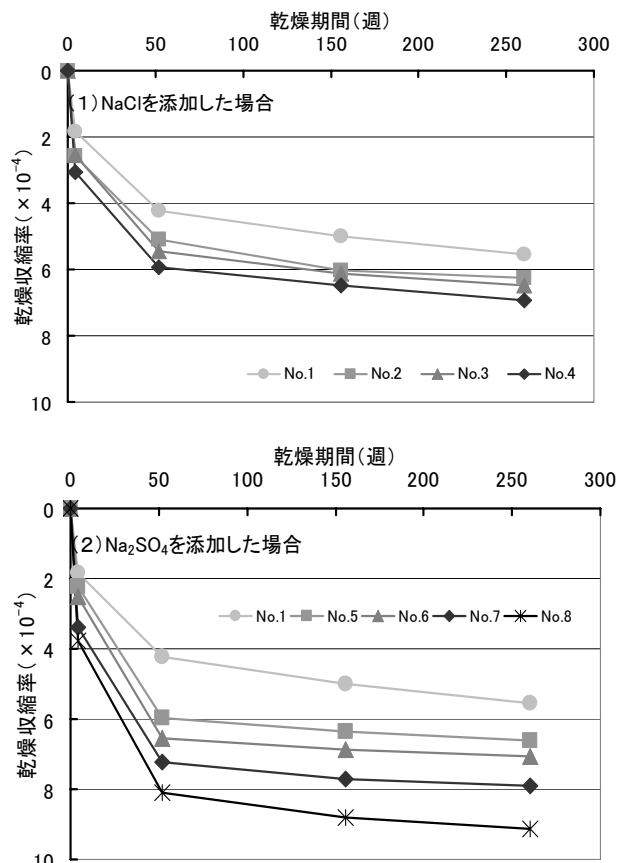


図-4 各種コンクリートの乾燥収縮率

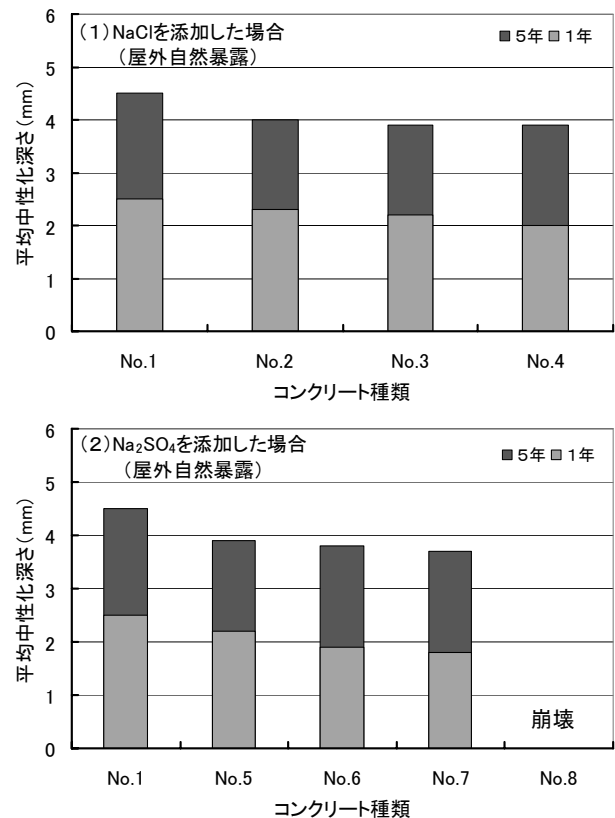


図-5 各種コンクリートの平均中性化深さ

は 5.6×10^{-4} 程度であるのに対して、NaCl を添加したコンクリートは 6.3×10^{-4} 程度であり、添加量が増すに従って乾燥収縮率は大きくなっている。同様に図-4 (2) の Na_2SO_4 を添加した場合のコンクリートは 7.6×10^{-4} 程度であり、添加量が増すほど、同様に乾燥収縮率は大きくなっている。従って、いずれの場合でも添加量が増すほど、乾燥収縮率は大きくなる。

(5) 凍結融解作用に対する抵抗性

各種コンクリートの 300 サイクルまでの相対動弾性係数の結果を表-2 に示す。これを見ると NaCl を添加したコンクリートの相対動弾性係数は日本建築学会の基準値 80% を満足している。しかし、添加量が多くなるに従って低下している。同様に Na_2SO_4 を添加した場合、NO.5 および NO.6 のコンクリートは基準値を満足しているが、NO.7 および NO.8 のコンクリートは、 Na_2SO_4 の添加量が多いため崩壊している。これは、4 (3) に前述した通り、エトリンガイトの生成によりコンクリートが膨張したものと考ええる。ちなみに、NO.7 のコンクリートの相対動弾性係数は、200 サイクルで 35%、NO.8 のコンクリートは 100 サイクルで 40% となっている。従って、 Na_2SO_4 の添加量は 0.25% 以下の範囲と考える。

(6) 中性化深さ

各種コンクリートの平均中性化深さを図-5 に示す。これを見ると NO.8 のコンクリートを除き、いずれのコンクリートとも材齢 5 年で 4mm 程度であり、NaCl および Na_2SO_4 を添加した場合のコンクリートの違いによる優位差は、現在のところ認められない。

(7) 鉄筋の発錆

1) オートクレーブによる鉄筋の促進腐食

各種コンクリートの鉄筋の発錆率を図-6 に示す。図-6 (1) をみると NaCl を添加した場合では $2.6 \sim 15.1 \times 10^{-2}$ (%) の範囲である。図-6 (2) をみると Na_2SO_4 を添加した場合では $2.1 \sim 4.7 \times 10^{-2}$ (%) の範囲にある。従って、添加量が増すほど、鉄筋の発錆率は増加している。

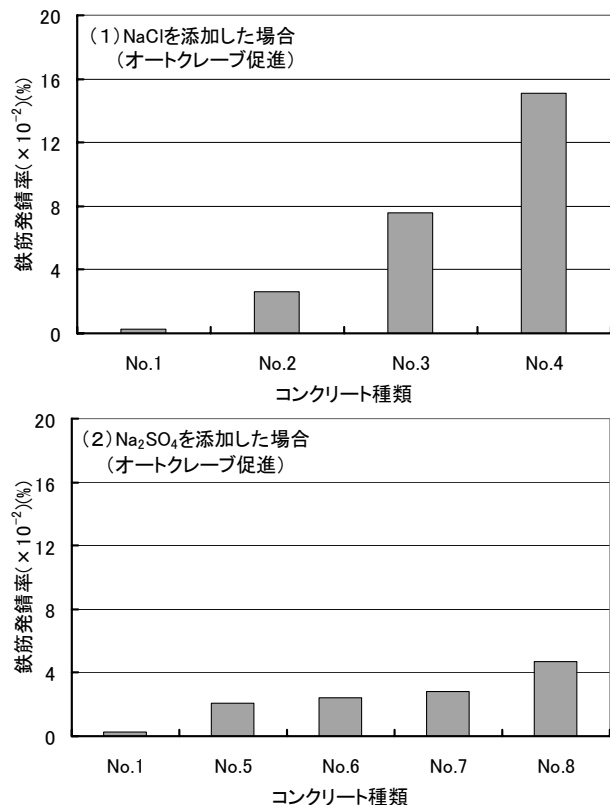


図-6 各種コンクリートの鉄筋の発錆率 (オートクレーブ促進)

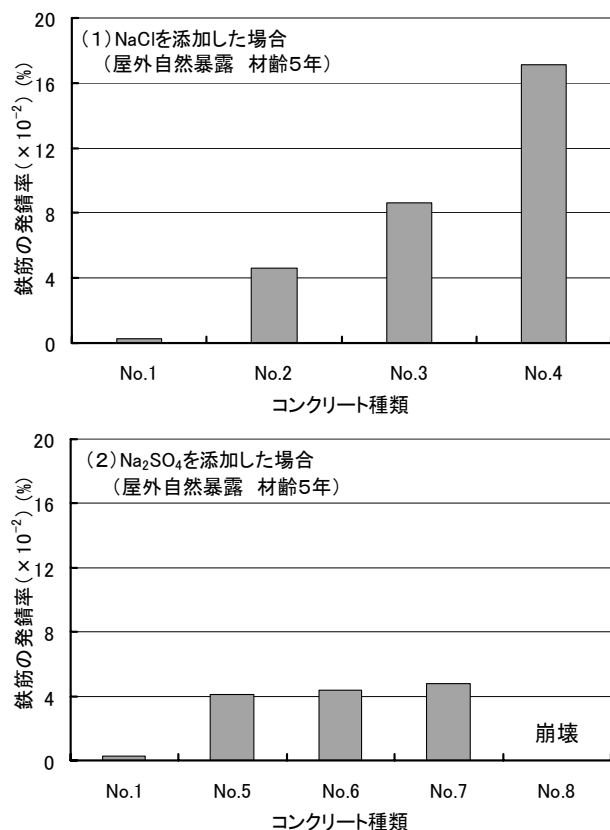


図-7 各種コンクリートの鉄筋の発錆率 (自然暴露)

2) 自然暴露による鉄筋の発錆

各種コンクリートを屋外に自然暴露した鉄筋の発錆率を図-7に示す。図-7(1)をみるとNaClを添加した場合には、 $4.6 \sim 17.1 \times 10^{-2}$ (%)の範囲にある。図-7(2)をみるとNa₂SO₄を添加した場合にはNO.8のコンクリートを除き、 $4.1 \sim 4.8 \times 10^{-2}$ (%)の範囲にある。これを、オートクレーブによる鉄筋の促進腐食の発錆率に対する自然暴露による鉄筋の発錆率の割合を求めると、NaClを添加した場合には1.77~1.13倍、Na₂SO₄を添加した場合には1.95~1.02倍となる。従って、添加量が多くなるほど鉄筋の発錆率は増加するが、添加量が多いほど、その割合は小さくなる。

5. まとめ

本実験研究からNaClおよびNa₂SO₄を添加した場合の塩分濃度の異なるコンクリートの基本的性質について、5年にわたって検討した結果、以下のことが明確となった。

(1) 圧縮強度

圧縮強度はNaClおよびNa₂SO₄の濃度が増すに従って、初期強度は大きくなるが、長期強度は低下する。

(2) 乾燥収縮率

乾燥収縮率はNaClおよびNa₂SO₄の濃度が増すほど、収縮率は大きくなる。

(3) 凍結融解作用に対する抵抗性

凍結融解作用に対する抵抗性は、Na₂SO₄を2.5%以上と多量に添加したものは膨張崩壊したが、これらを除く、他のコンクリートの濃度によるちがいはみられない。

(4) 中性化深さ

平均中性化深さは、NaClおよびNa₂SO₄による濃度によるちがいはみられない。

(5) 鉄筋の発錆

鉄筋の発錆については、NaClおよびNa₂SO₄の濃度が高いものほど、その発錆率は多くなる。

謝辞

本実験研究には、当時足利工大院生の小椋由之君（現西松建設）および添田悠介君（現東鉄工業）

をはじめ、多くの卒研究生の協力を得たことを付記し、深甚の謝意を表する。

参考文献

- 1) 松田応作，下田正雄ほか：ボウ硝 Na₂SO₄ 混入セメントモルタルコンクリートの諸性質，小野田研究報告，第18巻，第68号，pp.28~38，1966.10
- 2) 依田彰彦，大矢真佐夫：モルタルおよびコンクリート用早期強度増進剤の開発研究（その1），鹿島建設技術研究所，1970.7
- 3) 枝広英俊，依田彰彦：塩分濃度の異なる海砂を用いたコンクリートの基本的性質について，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.215~216，1982.10
- 4) 枝広英俊，依田彰彦：オートクレーブによる海砂コンクリート中の鉄筋の防食に関する研究，コンクリート工学年次講演会論文集，vol.8，pp.129~132，1986.6
- 5) 枝広英俊，依田彰彦，鈴木澄江：塩素イオン総量を変えたコンクリート中の鉄筋の腐食と防食に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.365~366，1988.10
- 6) 鈴木澄江，依田彰彦，枝広英俊：コンクリート中のCl⁻の挙動及び異形鉄筋の腐食性状に関する研究，pp.643~644，1989.10
- 7) 枝広英俊，依田彰彦：コンクリート中の塩素イオンの挙動に関する実験研究，コンクリート工学年次論文報告集，vol.12，No.1，pp.419~424，1990.6
- 8) 枝広英俊，依田彰彦：促進試験と屋外自然暴露によるコンクリート中の各種鉄筋の腐食性状，コンクリート工学年次講演会論文集，vol.14，NO.1，pp.757~762，1992.6