

論文 高強度コンクリートの塩害抑制効果の評価

山崎純子¹・榊田佳寛²・中村成春³

要旨：本研究は、高強度コンクリートの塩害抑制効果を評価するために、外来塩化物および内在塩化物による鉄筋腐食度および塩化物浸透状況を暴露試験によって評価したものである。実験では、高炉スラグ微粉末による塩害抑制効果、高強度鉄筋の腐食傾向も調べた。実験の結果は、次のようにまとめられる。(1)鉄筋の腐食は、外来、内在塩化物どちらの場合にも水結合材比が小さい方が小さい。(2)外来塩化物について塩化物イオン浸透量は、水結合材比が小さい方が小さい。(3)高強度鉄筋の腐食傾向は、普通強度鉄筋と異なり、深さ方向への進行が大きい。

キーワード：塩化物、鉄筋腐食、高強度コンクリート、質量減少率、発錆面積率

1. はじめに

コンクリート中に有害量の塩化物イオンが含まれると鉄筋を腐食させ、鉄筋コンクリートの耐久性を著しく損なわせる原因となる。この現象を塩害と呼び、その対策として、水結合材比を小さくした高強度コンクリートの利用が考えられる。また、高炉スラグ微粉末は塩化物イオンの浸透を抑制し、塩害抑制効果があると考えられている。

本研究は、塩化物イオンをその導入経路により初期内在塩化物と外来塩化物とに分け、低水結合材比および高炉スラグ微粉末の添加による塩害抑制効果を実験的に検討したものである。

2. 実験概要

実験の要因と水準を表-1に、鉄筋の成分を表-2に、コンクリートの調合と性質を表-3に、供試体概要を図-1に示す。表-1における高炉スラグ微粉末置換率は、水結合材比が30%の場合のみであり、水セメント比が60%のものには適用しない。鉄筋の種類でSD685(A)は、建設省総合技術開発プロジェクト「New RC」で開発された高強度鉄筋であり、成

分調整(C, Si, Mnの含有量が多い)し、降伏点及び引張強さを高くしたものである。SD295(B)は普通強度鉄筋でJIS G 3112規格品である。表-3における供試体名は数字、記号の順に水結合材比、スラグ添加率および塩化物量のレベル、ならびに鉄筋の種類を表す。

表-1 実験の要因と水準

要因	水準
水結合材比 W/B (%)	30, 60
高炉スラグ微粉末置換率 (%)	0, 30, 50
塩化物量 Cl ⁻ (kg/m ³)	0.49, 2.47, 4.94
鉄筋の種類	SD685 (A), SD295 (B)
暴露試験方法	海岸(沖縄): Cl ⁻ =0.49 内陸(筑波): 2.47, 4.94

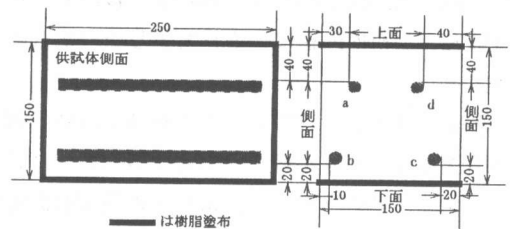


図-1 供試体概要 (数値の単位は mm)

*1 (株)ユーエスケー (正会員)
 *2 宇都宮大学教授 工学部建設学科 工博 (正会員)
 *3 宇都宮大学助手 工学部建設学科 工博 (正会員)

表-2 鉄筋の成分

鉄筋の種類	化学成分 (%)						機械的性質		
	C	Si	Mn	P	S	C+Mn/6	降伏点または耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	破断伸び (%)
SD685 (A)	0.30	0.30	1.53	0.019	0.009	0.56	677.66	864	20.0
SD295 (B)	0.27 以下	—	1.50 以下	0.040 以下	0.040 以下	—	295 ~ 390	440	16 以上 (2号) 18 以上 (3号)

表-3 実験の組み合わせとコンクリートの調合・性質

供試体名 (A, B は鉄筋の種類を表す)	W/B (%)	高炉スラグ微粉末置換率 (%)	塩化物物量 Cl ⁻ (kg/m ³)	単位水量 (kg/m ³)	細骨材率 (%)	混和剤の使用量		コンクリートの性質		
						高性能 AE 減水剤 (kg/m ³)	空気量調整剤 (l/m ³)	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 材齢 28 日 (N/mm ²)
6-0-1-A, B	60	0	0.49	178	46.8	0.472	—	18.0	4.5	41.5
3-0-1-A, B	30	0		165	41.1	5.500	1.00	19.5	4.5	90.9
3-3-1-A, B		30			40.6	3.300	0.60	17.5	3.9	95.0
3-5-1-A, B		50			40.3	3.300	0.60	18.5	3.3	96.9
6-0-2-A, B	60	0	2.47		178	46.8	0.742	—	18.5	4.6
3-0-2-A, B	30	0		165	41.1	5.500	1.00	18.0	4.5	88.8
3-3-2-A, B		30			40.6	3.575	0.65	18.0	4.4	97.0
3-5-2-A, B		50			40.3	3.300	0.60	17.5	3.7	88.9
6-0-3-A, B	60	0	4.94		178	46.8	0.742	—	18.0	4.4
3-0-3-A, B	30	0		165	41.1	6.050	1.10	17.5	4.4	82.6
3-3-3-A, B		30			40.6	4.125	0.75	18.0	4.3	94.7
3-5-3-A, B		50			40.3	3.850	0.70	18.0	3.6	88.5

塩害抑制効果の評価は、5年間暴露した供試体における鉄筋の発錆面積率、質量減少率とし、外来塩化物については塩化物イオン浸透量も対象とした。ここで、外来塩化物とは、海岸から約 10m の距離に暴露した供試体において、当初導入した初期内在塩化物量を差し引いたものを表す。

発錆面積率は、透明シートに鉄筋表面部の錆を手作業により写し取り、平面に展開してビデオパターンアナライザーによりその面積を測定した。

質量減少率は、鉄筋を酸洗い液 (2-メルカベンゾチアゾール 150ppm, クエン酸 2 アンモニウム 10%水溶液) に浸漬して錆を擦り落とし

た後、質量を測定し、当初の鉄筋質量からの差をとって、当初の質量の百分率で表した。本来は、錆落とし時に失われた酸化皮膜 (黒皮) の質量も考慮に入れなければならないが、ここではダミーの鉄筋を用意していなかったため、酸化皮膜も錆の質量に算定して、見かけの質量減少率とした。

塩化物イオン量は、コンクリートカッターで分割したコンクリート片を、ジョークラッシャー、ブラウクラッシャー、振動ミルにかけ、0.15mm ふるいを全通するまで微粉碎したものを試料として、酸分解 (全塩分) 及び温水 (可溶性塩分) により塩分を抽出した後、電位差滴定法を用いて定量した。

3. 実験結果及び考察

3.1 鉄筋腐食度

(1) 発錆面積率

図-2 に発錆面積率を示す。W/C = 60% の場合の発錆面積率は W/B = 30% より大きく、その差は塩化物量が多くなるほど顕著になる。W/B = 30% ではスラグ置換率が 0% の鉄筋にいくらか発錆が見られたものの、スラグ置換率が 30% および 50% ではほとんど発錆していないことがわかる。塩化物イオン量の違いでは 4.94 kg/m³ の鉄筋の発錆面積率が最も大きく、普通強度鉄筋 B では 50% 近くになったものもある。塩化物イオン量が 0.49kg/m³ の供試体は、外部塩害の環境下でありながら発錆面積率はどれも 5% 未満と小さく、暴露期間 5 年では塩害の影響は出ていないと考えられる。なお、かぶり厚さの影響については、現在までの結果では、かぶり厚さが小さい方が発錆面積率が大きいとい

うことはなく、違いはほとんど見られない。鉄筋 A, B の比較では、普通強度鉄筋 B のほうが発錆面積率が大きくなる傾向が出ている。

(2) 質量減少率

図-3 に質量減少率を示す。ここでの質量減少率は錆とともに除去してしまった酸化皮膜の質量も錆の質量に算定した見かけの質量減少率であり、その分値は大きくなっている。図-3 より、外来塩化物および初期内在塩化物で塩化物イオン量が 2.47kg/m³ の場合、高強度鉄筋 A の質量減少率はいずれも 1.1% 前後、普通強度鉄筋 B はいずれも 0.8% 前後であり、高強度鉄筋の方がやや質量減少率は大きい、水結合材比及びかぶり厚さの違いによる影響は見られない。また、塩化物イオン量が 4.94kg/m³ の場合、W/B = 30% の鉄筋の質量減少率は、外来塩化物や塩化物イオン量が 2.47kg/m³ の場合とほぼ同じであるが、W/C = 60% の鉄筋の質量

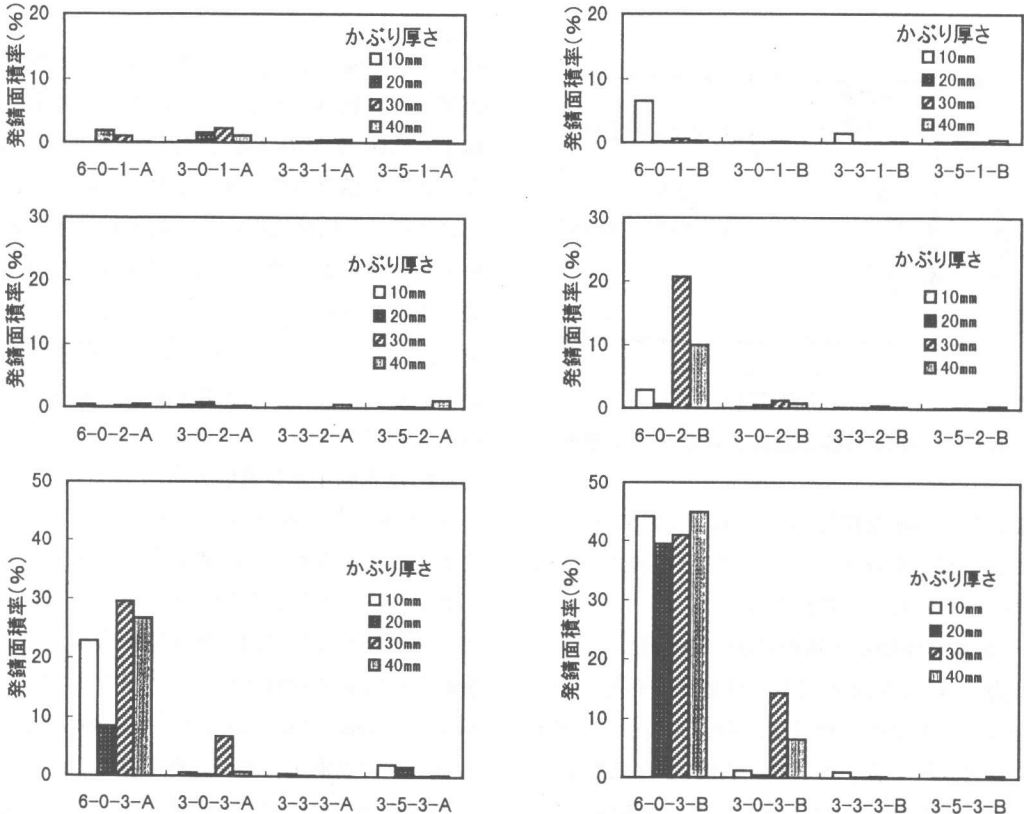


図-2 発錆面積率

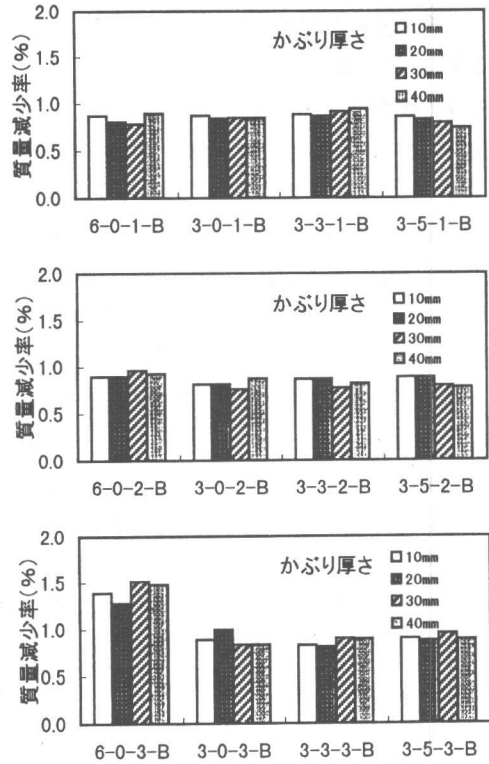
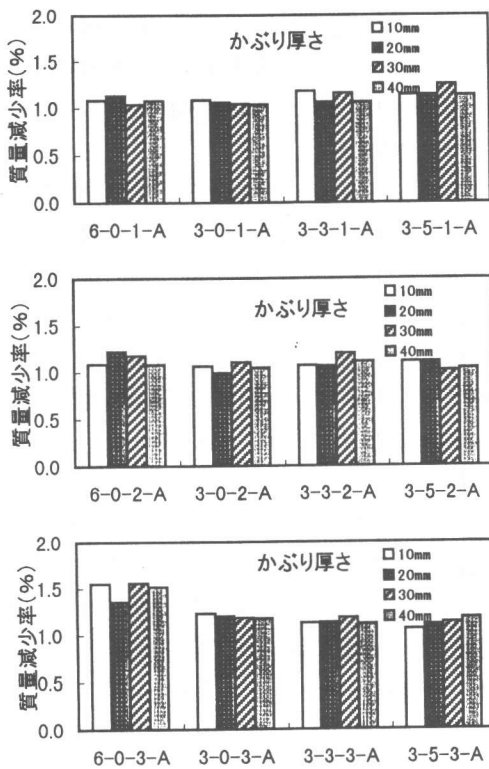


図-3 質量減少率

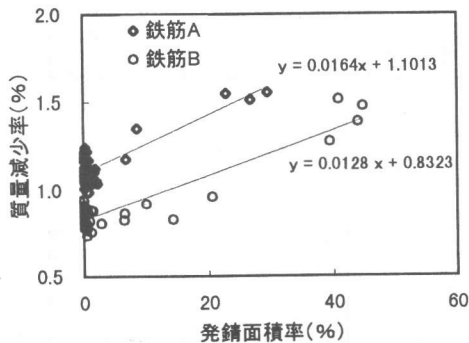


図-4 発錆面積率と質量減少率との関係

減少率は高強度鉄筋 A、普通強度鉄筋 B ともに 1.5 %前後の値となっており、腐食がかなり進行していることがわかる。

(3) 発錆面積率と質量減少率の関係

図-4 に発錆面積率と質量減少率との関係を示す。図中の直線式は、鉄筋 A、B それぞれの回帰直線を表している。鉄筋 A は鉄筋 B と比較して発錆面積率は小さいが、質量減少率は

同じかやや大きくなっている。また、回帰直線の傾きは鉄筋 A のほうが大きくなっており、高強度鉄筋 A での腐食は普通強度鉄筋 B の腐食と傾向が異なっており、腐食は鉄筋の表面方向に広がると同時に深さ方向にも進行する錆であることがうかがえる。回帰直線の Y 切片は、酸化皮膜の量を示していると考えられるが、鉄筋 A で大きいのは、鉄筋の酸化皮膜の量が多いことが考えられ、鉄筋の酸化皮膜の厚さが厚いことが推測される。

3.2 塩化物イオン量の分布

図-5 に塩化物イオン量の分布（全塩分）を示す。上段は海岸に暴露した供試体の表面からの深さにおける塩化物イオン量の分布を、中段、下段は初期初期内在塩化物を含み、内陸に暴露した供試体の塩化物イオン量で、①は、側面から 3 mm、④は、側面から 72.5mm、⑦は、もう一方の側面から 8mm の位置を表している。

上段で W/C = 60%の供試体では表面近くの

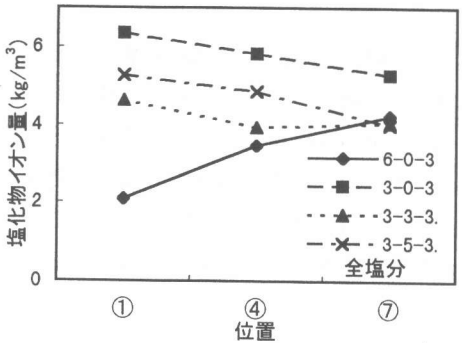
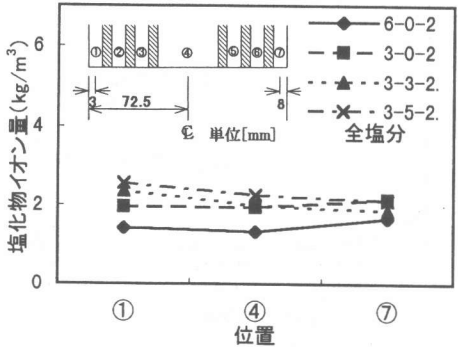
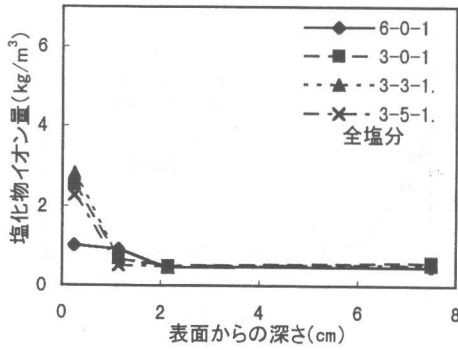


図-5 塩化物イオン量の分布

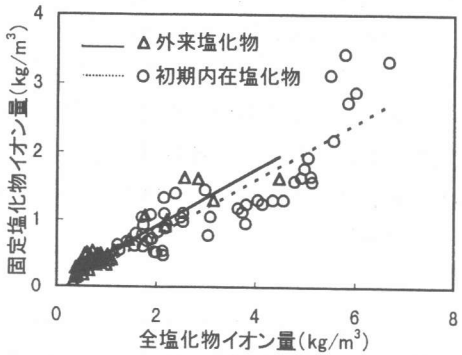


図-6 全塩化物イオン量と固定塩化物イオン量との関係

全塩化物イオン量が 1.00kg/m^3 程度であるのに対し、 $W/B = 30\%$ の供試体では $2.00 \sim 3.00\text{kg/m}^3$ と多い。これは $W/B = 30\%$ の供試体はその緻密な構造のために、外部からの塩化物イオンがその表面で浸透を抑制され、内部には浸透しにくいのに対し、 $W/C = 60\%$ の供試体は内部へ浸透するため、表面の塩化物イオン量が少なくなるためと考えられる。

中段、下段の初期内部塩害環境下にある供試体は、塩化物イオンの外部への流出があると思われるが、供試体 6-0-3 で表面近くの塩化物イオン量の減少が見られるのみで、他の供試体にそのような傾向は見られなかった。また、 $W/C = 60\%$ の供試体では全体的に塩化物イオン量が減少しており、塩化物イオンの流出があったことがうかがえるが、これと比較すると、 $W/B = 30\%$ ではあまり変化が見られなかった。

図-6 に全塩化物イオン量と固定塩化物イオン量との関係を示す。図中の直線は外来塩化物、初期内在塩化物それぞれの値における回帰直線を表したもので、その傾きはほぼ等しく、今回の実験では、固定化率はいずれも変わらなかったことが認められる。

3.3 拡散係数

外来塩化物において、コンクリート中への塩化物浸透量をみるために、拡散方程式によって供試体表面からの深さにおける塩化物量(C)を、非線形最小二乗法に基づく逆解析により近似させ、拡散係数(K)を算出した。また、供試体表面の塩化物イオン量(C_1)も、逆解析によった。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = K \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \dots\dots\dots (1)$$

$$x = 0 : \frac{\partial x}{\partial C} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

$$x = d : C = C_1 \dots\dots\dots (3)$$

$$t = 0 : C = C_0 \dots\dots\dots (4)$$

式(1)～式(4)の解は、次の式(5)のようになる。

$$C = C_1 + \frac{4(C_1 - C_0)}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n-1} \exp\left(\frac{-K(2n-1)^2 \pi^2 t}{4d^2}\right) \times \cos \frac{(2n-1)\pi}{2d} x \dots\dots\dots (5)$$

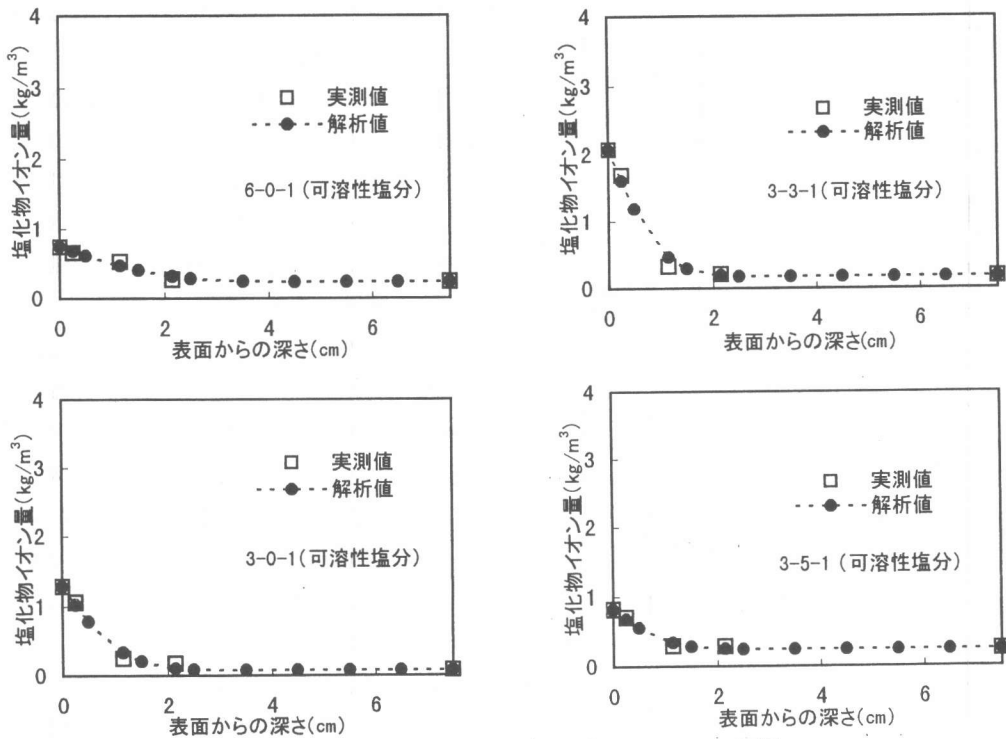


図-7 塩化物イオン量の実測値と解析値との関係

表-4 拡散係数及び表面の塩化物イオン量

全塩分	6-0-1	3-0-1	3-3-1	3-5-1
C_1 (kg/m ³)	1.208	3.035	3.404	2.759
K (cm ² /year)	0.1886	0.0627	0.0627	0.0522
$C_1 - C_0$ (kg/m ³)	0.750	2.533	2.949	2.268

可溶性塩分	6-0-1	3-0-1	3-3-1	3-5-1
C_1 (kg/m ³)	0.738	1.273	2.069	0.821
K (cm ² /year)	0.2318	0.0866	0.0650	0.0675
$C_1 - C_0$ (kg/m ³)	0.509	0.453	1.899	0.575

ここで、 d ：供試体中心からの距離 (cm)， C_0 ：当初の塩化物イオン量 (kg/m³)， C_1 ：供試体表面の塩化物イオン量 (kg/m³)， t ：時間 (year)， K ：拡散係数 (cm²/year)。

表-4 に拡散係数および表面の塩化物イオン量を、図-7 に供試体表面からの深さにおける塩化物イオン量の実測値と解析値との関係 (可溶性塩分) を示す。W/C = 60% の供試体は表面の塩化物イオン量は小さいが、拡散係数

は大きく、逆に W/B = 30% の供試体は表面の塩化物イオン量は大きい、拡散係数は小さい。水結合材比が小さい高強度コンクリートは、表面で塩化物イオンの浸透が抑制されると考えられる。また、高炉スラグ微粉末を混入した方が、拡散係数はやや小さくなる傾向にある。

4. 結論

本研究の範囲で、次のような結果を得た。

- 1) 鉄筋の腐食は、外来塩化物、初期内在塩化物どちらの場合も水結合材比が小さい方が小さい。
- 2) 外来塩化物によるコンクリートへの塩化物イオン浸透量は、水結合材比が小さい方が表面の濃度は高いが、内部への浸透量は小さい。
- 3) 高強度鉄筋の腐食性状は、普通鉄筋と異なり、深さ方向に進行する傾向にある。

謝辞

コンクリート中の塩化物イオンの分析にあたっては、八洋コンクリートコンサルタント(株)吉崎芳郎氏、大久保清美さん、山本光彦氏、ならびに、当時宇都宮大学卒業生の佐藤幸恵さん(本学大学院生)の御協力を得ました。ここに記して謝意を表します。