論文 コンクリートの種類が塩分量分布および鉄筋腐食に与える影響

玉井 譲*1・山本 貴士*2・服部 篤史*3・宮川 豊章*4

要旨:同一の梁型供試体内で複数のサンプルを採取し,塩分量分布の測定を行い,ばらつき に与える影響について検討を行った。同時に供試体内に埋設した鉄筋の腐食に対する非破壊 的なモニタリングおよび腐食面積率の測定を行い,同位置での全塩分量との関係について検 討を加えた。その結果,全塩分量の平面的な分布性状(場所ごとの相違)に関して,通常の コンクリートとしてシリカフュームを混和することにより,無混和に比べて塩分量の変動係 数を小さくできることが認められた。また,全塩分量,分極抵抗および腐食面積率の3者の 間にはお互いに相関関係があることが認められた。

キーワード:塩分量分布,鉄筋腐食,自然電位,分極抵抗,腐食面積率,シリカフューム

1. はじめに

近年,鉄筋コンクリート構造物において塩害 による鉄筋腐食により構造物がその性能を失う 例が多く見られるようになり,構造物の維持管 理の必要性が高まっている。さらに各種構造物 に対する塩害における耐久性設計および維持管 理については、「性能規定」の概念が広く取り入 れられつつあり,またライフサイクルコストの 検討も行われてきている。そのため耐久性の分 野においても,腐食確率での表現等,確率理論 に基づいた評価方法が求められている。一方で, コンクリート中の鉄筋の腐食状態を非破壊的に 正確に把握することも重要である。しかし 種々 のコンクリートにおいて塩分量の平面的な分布 性状を研究した例は少なく,塩分量と自然電位 および分極抵抗との関係、あるいは鉄筋の腐食 性状との関連性を検討した研究もあまり見られ ない。また,シリカフュームを用いたコンクリ ートの塩害に対する耐久性についてもあまり研 究がなされていない。そこで本研究では,水セ メント比,粗骨材の最大粒径および混和材の有 無に着目し,種々のコンクリートにおける塩化

物イオンの浸透性に関して平面的な分布性状の 検討を行った。同時に供試体内に埋設した鉄筋 の腐食性状に関しても自然電位および分極抵抗 の非破壊的な手法と実際の腐食状態との比較検 討および塩分量の分布性状との相関関係につい て検討を加えた。以上により,コンクリートに 本来存在しているばらつきおよび塩分による鉄 筋腐食を統計的に評価することを目的とした。

- 2. 実験要因
- 2.1 配合

コンクリートの密実性に関しては,塩分の浸 透速度が速いと考えられるW/C=60%,海上ある いは飛沫帯における構造物に用いられる W/C=40%¹⁾の2種類とした。また,骨材の大き さが浸透性状に与える影響を検討するために, 粗骨材の最大寸法を15mmまたは10mmとした。 さらに,海洋環境における耐久性向上に効果が あるとされる²⁾シリカフュームをセメント置換 で10%混和したコンクリートの浸透性状につ いてもあわせて検討を行った。用いた4種類の 示方配合を表-1に示す。

- *1 京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 工修 (正会員)
- *2 京都大学大学院助手 工学研究科 社会基盤工学専攻 博士(工学) (正会員)
- *3 京都大学大学院助教授 工学研究科 社会基盤工学専攻 博士(工学) (正会員)
- *4 京都大学大学院教授 工学研究科 社会基盤工学専攻 工博 (正会員)

配合名	スランプ (cm)	粗骨材の	W/R	細骨材 率 (%)		単位	量(kg/	単位量(cc/m ³)			
		最大寸法 (mm)	(%)		W	С	SF ^{*1}	S	G	AE減水剤	AE助剤
NN6015	9±1	15	60	48	170	283	0	870	950	708	566
NN6010		10	60	51	185	308	0	898	899	770	616
NN4015		15	40	48	170	425	0	817	923	1063	850
SF6015		15	60	48	175	263	29	865	955	4670 ^{*2}	875

表-1 示方配合

2.2 供試体の作成

セメントは普通ポルトランドセメント,シリ カフューム(SF)は比重 2.20,比表面積 200,000cm²/gの粉体状のもの,砂(S)は滋賀県 野洲川産川砂(比重2.55,F.M.2.49),砂利(G) は滋賀県土山産砕石(比重2.61,最大寸法10 および15mm)を使用した。供試体は10×20× 160 cmの梁型供試体とし,長さ150 cmの鉄筋 (D10)の端部を研磨後,長さ50 cmの絶縁被覆 つきコードをハンダ付けし,この部分を自己融 着テープとエポキシ樹脂で被覆したもの4本を 図-1 に示すように配置した。

2.3 養生および環境条件

供試体は材齢1日で脱型を行い,材齢28日まで散水養生を行った。養生終了後,室内で毎日 1回ずつ塩分濃度5%(CL⁻換算)の塩水を手作 *1:シリカフューム *2:高性能AE減水剤を使用

業で散水し,乾湿繰返し条件となるようにして 腐食を促進させた。

2.4 測定項目

暴露開始後6ヶ月において,図-2に示すよう に両端100mmを除いて,コンクリートカッター を用いて140mmの等間隔に供試体を切断(1本 の鉄筋につき計10切断片)し,さらに表裏から 深さ方向に切断して測定用試料を作成した。深 さ方向については,鉄筋表面位置である5~15 mm区間,(以下10mm)および25~35mm区間,(以 下30mm)において塩分量の測定を行った。試料 は1箇所の所定の深さについて2個作成し,結 果は平均した。このように作成した試料に対し て,塩化物イオン選択性電極を用いた方法 (JCI-SC4)に従って,全塩分量の測定を行った。 さらに,コンクリート中に埋設した鉄筋に対



			70 70											
200	,		× ×	× ×										
_		100	_ 140 _	_ 140 _	_ 140 _	< 140 <	_ 140 _	_ 140 _	_ 140 _	< 140 <	_ 140 _	_ 140 _	100	
	図-2 測定点および切断方法										_ 単位:mm			

しては,自然電位および分極抵抗を定期的に測 定した。照合電極には飽和銀塩化銀電極 (Ag/AgCI)を用い,腐食状況がある程度局部的 に得られる交流インピーダンス法(交流電圧: ±10mVp-p,周波数:10Hzから20mHz,電極と径 11 cmのステンレス製円盤からなるガード対極 を用いた2重対極方式,D10に対して被測定面 積6.2cm²)を用いて行った。測定は,図-2に示 すように1本の鉄筋につき10点(鉄筋直上)の両 側面において行った。また,暴露開始後1ヶ月 および6ヶ月において,鉄筋をはつりだし,鉄 筋の表面画像を取り込み,色差による画像処理 を行い,目視による判定と併せて鉄筋の腐食面 積率を測定した。

3. 実験結果

3.1 コンクリート中の全塩分量の分布

暴露開始後6ヶ月における深さ30mmでの全塩 分量の測定結果を図-3に示す。最大値と最小値 の差および変動係数に関しては,W/C(B)および 最大粒径による差は認められない。シリカフュ ームを混和したコンクリートでは,これらは無 混和と比べて同程度以下であった。シリカフュ ームを通常程度のスランプとなるコンクリート に使用することでばらつきを小さくすることが 可能と考えられる。

打設時のフレッシュ性状としてスランプと各



図-3 各コンクリートの全塩分量の測定結果

コンクリートにおける全塩分量分布の変動係数 の関係を図-4に示す。W/C(B)および最大粒径に かかわらず,無混和のコンクリートでは,サン プルは少ないものの線形関係が得られ,スラン プが大きいものほど変動係数は大きくなる傾向 にある。スランプが小さいと打設時に型枠に充 填されにくいために,締固めを十分に行ったこ とで,むしろ一様なコンクリートとなったと考 えられる。一方,スランプが大きい場合では, 締固め度合いにばらつきが生じやすく,施工時 には外観的には問題にならなかった程度の材料 分離が塩分浸透量におけるばらつきには大きな 影響を与えたと考えられる。一方,シリカフュ ームを混和したものでは,無混和とは異なる傾 向を示し,変動係数は小さい。



図-4 スランプと変動係数の関係

3.2 腐食モニタリングと塩分量の評価

3.2.1 自然電位と分極抵抗との関係

暴露開始後6ヶ月における自然電位と分極抵抗の関係を図-5に示す。自然電位が卑なほど分極抵抗が小さくなる傾向が見られた。今回の実験のように交流インピーダンス法により局部的な自然電位および分極抵抗を測定した場合においては両者の間に線形関係が見られ,データは±20%程度の範囲に納まっている。一方,シリカフュームを混和したものについては,なお,同一の自然電位でも分極抵抗が大きくなる傾向にある。同一の鉄筋に対して自然電位より分極抵抗のばらつきが大きいことから,分極抵抗は,

より局部的な腐食状況を把握できる可能性があ ると考えられる。



3.2.2 自然電位と塩分量の関係

暴露開始後6ヶ月における自然電位と深さ10 mmおよび30mmでの全塩分量の関係を図-6に示 す。シリカフュームの混和,無混和によらず塩 分量が多くなると指数関数的に自然電位は卑な 傾向になり,全塩分量が5.0kg/m³以上では全塩 分量に関わらず自然電位が-400mV付近でほぼ 一定の値をとっている。自然電位と全塩分量と の関係の上限は図-6中に示すように指数関数 で表される。全塩分量が5.0kg/m³以下の腐食が 開始した直後あるいは初期の段階では,自然電 位は全塩分量に影響を受け,自然電位は急激に 卑な傾向になるが,全塩分量が5.0kg/m³以上の 腐食がある程度進行した段階では腐食反応部が 増加せず,全塩分量との関連は小さくなったと 考えられる。



図-6 自然電位と全塩分量の関係

3.2.3 分極抵抗と塩分量の関係

暴露開始後6ヶ月における分極抵抗と10mmお よび 30mmでの全塩分量の関係を図-7に示す。 全塩分量が多くなるほど分極抵抗は指数関数的 に小さくなる傾向にあり,ばらつきも小さく自 然電位との関係より明確である。分極抵抗と全 塩分量との関係の上限は図-7中に示すように 指数関数で表される。全塩分量が5.0kg/m³以下 の状態では,全塩分量が多くなると分極抵抗の 値は 100k ・cm²程度まで急激に小さくなって おり,5.0kg/m³以上では,分極抵抗の値は 50k

・cm²以下でほぼ一定の値となっている。これ らは全塩分量と自然電位における傾向とほぼ一 致している。分極抵抗が急激に下がる 1.0~ 1.5kg/m³あたりで腐食が開始しているとすると, 分極抵抗を経時的に測定することにより非破壊 的に腐食開始を判断することが可能であると考 えられる。全塩分量が5.0kg/m³以上と多量に存 在する状態では、分極抵抗が小さく激しい腐食 が生じているが,全塩分量はあまり影響を及ぼ してはいない。むしろ,酸素の供給など他の要 因が大きく影響していると考えられる。一方, シリカフュームを混和したものは,全塩分量と の関係は同様だが、相関のある範囲では無混和 と比べて同一の全塩分量であっても分極抵抗の 値は小さい。シリカフュームを混和したコンク リートの非破壊的な調査においては実際には腐 食していないにもかかわらず分極抵抗の値は小 さく,腐食速度が大きいと判断される可能性が ある。



3.3 腐食面積率と腐食モニタリングの評価

3.3.1 腐食面積率と自然電位の関係

暴露開始後6ヶ月における腐食面積率と自然 電位の関係を図-8 に示す。自然電位が-300mV より貴な値では腐食面積率が 10%以下と腐食 があまり進行していない状態である。また,自 然電位が-400mV 前後の値をとっているもので は腐食面積率が20%以上と進行しており,同一 の自然電位においても腐食面積率のばらつきが 大きい。ASTM C 876³⁾規格によると,自然電位 の値が-240mV 以下では 90%の確率で腐食が生 じているとされているが,今回の研究の範囲で は-240mV 以下の場合でも腐食が生じていない 場合が多く,逆に90%の確率で腐食していない とされる-90mV 以上の場合に腐食が確認されて いるものもある。これは非腐食部が分極され、 同一の鉄筋に対して測定した 10 点の自然電位 が平均化する傾向にあるためと考えられる。自 然電位より腐食の位置および開始について判定 を正確に行うのは困難と考えられ,分極抵抗な ど他の非破壊試験をあわせて検討することが必 要である。一方、シリカフュームを混和したも のについては,自然電位が-240mV以下でも腐食 が生じていないものも多く,判定基準にさらな る検討が必要である。



図-8 腐食面積率と自然電位の関係

3.3.2 腐食面積率と分極抵抗の関係

暴露開始後6ヶ月における腐食面積率と分極 抵抗の関係を図-9に示す。分極抵抗が100k・ cm²以上では W/C=40%()を除いて腐食面積 率が 10%以下であり腐食はあまり進行してお らず,分極抵抗と腐食面積率についての相関は 弱い。また,分極抵抗が 50k ・cm²以下では, ばらつきは大きいものの,分極抵抗が小さくな ると腐食面積率は急激に大きくなる傾向にあり, 腐食面積率と分極抵抗は腐食が進行した段階に おいては相関が強くなっており,交流インピー ダンス法を用いて得られた分極抵抗の値は局部 的な腐食状況を表現していると考えられる。腐 食面積率が 20%以上においては自然電位より も分極抵抗の方が相関は高い。また,50~100k

・cm²で腐食が激しくなる境界値が存在してい ると考えられる。一方,シリカフュームを混和 したものについては,同一の分極抵抗において も腐食面積率が小さくなっており,分極抵抗が 危険側に測定されているため,自然電位ととも に無混和のコンクリートとは異なった判定基準 が必要である。



3.4 腐食面積率と塩分量の評価

暴露開始後6ヶ月における腐食面積率と深さ 10 mmおよび 30 mmでの全塩分量の関係を図-10 に示す。全塩分量が5.0kg/m³以下では,ばらつ きが大きいものの,腐食面積率の最大値と全塩 分量は相関があるが,また,5.0kg/m³以上では 全塩分量が多くなると腐食面積率が若干大きく なっているもののほぼ一定の値となっている。 つまり,ある一定量の塩分が存在すれば,塩分 量には無関係に腐食は進行し,腐食面積率は大 きくなっている。塩化物イオンは鉄筋の不動態 被膜を破壊するため,腐食が開始する初期段階 においては相関があるが,腐食が進行すると全 塩分量との相関は小さくなったものと考えられ る。一方,シリカフュームを混和したものにつ いては,同一の全塩分量でも腐食面積率は無混 和のものと比べて小さく,シリカフュームによ る腐食抑制効果があると考えられる。今回は全 塩分量を用いているため,シリカフュームがも つ塩分の固定化能力が原因かは判断できないが, 一つの要因である可能性が考えられる。



腐食発生限界量を検討するために,図-10の 全塩分量が2.0kg/m³以下の部分を拡大して図-11に示す。腐食発生面積率が1%程度を腐食・ 非腐食の境界とすると腐食発生限界量は1.0~



1.5kg/m³の範囲にある。腐食が大きいものもこ の全塩分量以上の領域にある。一般に腐食発生 限界量は1.2kg/m³といわれている⁴⁾。腐食発生 限界量は温度や酸素の供給に影響されると指摘 されており,また内在塩分と外部からの塩分浸 透とは異なるとも考えられるが,1.2kg/m³は妥 当であると考えられる。しかし,ばらつきが大 きいため,より多くのデータが必要である。

4.まとめ

本実験で得られた知見を以下に示す。

(1)通常程度のスランプ性状となるコンクリー トとしてシリカフュームを混和することにより, 無混和に比べて全塩分量の変動係数を小さくで きることが認められたが,W/C および粗骨材の 最大寸法については,変動係数との関係は認め られなかった。

(2)無混和のコンクリートについては、全塩分量の変動係数は打設時のスランプの大小に影響を受けることが認められた。

 (3)分極抵抗,全塩分量および腐食面積率の3
者の間には,腐食の進行段階ごとに相関の強弱がある。その進行段階における境界値としては, 全塩分量が5.0kg/m³,分極抵抗が50~100k・cm²,腐食面積率で10%程度であった。

(4)腐食面積率と全塩分量との関係より、腐食発 生限界量は1.0~1.5kg/m³の範囲であった。

参考文献

- 1) 平成 11 年版コンクリート標準示方書[施工 編],土木学会,1999
- 2)中村裕ほか:海洋環境下におけるシリカフュ ームコンクリートの力学的特性,塩分浸透お よび鉄筋腐食に関する実験的研究,コンクリ ート工学年次論文報告集, Vol.23, No.2, pp.529-534,2001
- 3) ASTM C 876 : Half cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete,1977
- 4)コンクリート標準示方書[維持管理編],土木 学会,2001