

論文 塩害による鉄筋腐食に及ぼす材料と配合を要因としたコンクリートの種類の影響

武田 均^{*1}・堀口 賢一^{*2}・丸屋 剛^{*3}

要旨: 本論文は、塩害環境下に建設される鉄筋コンクリート構造物の耐久性能向上のために実施した 8 年間に及ぶ暴露実験結果を報告するものである。暴露環境は、室内の安定した環境と実環境に近い海洋飛沫帯の環境とした。試験要因としては、暴露環境のほかセメント種類、水セメント比およびコンクリートの種類を要因とした。鉄筋腐食状況の指標は自然電位を用いた。実験の結果、水セメント比が大きい場合には比較的早期に腐食が発生すること、セメント種類によっても腐食の発生時期が大きく異なること、コンクリートの材料分離傾向が腐食の発生時期に影響を及ぼすことが明らかになった。

キーワード: 鉄筋腐食, 自然電位, セメント, コンクリートの種類, 締固め, 暴露実験

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の耐久性は、使用材料、コンクリートの配合、供用環境により大きな影響を受ける。また、施工されたコンクリートの初期性能もまた構造物の耐久性にとって重要な影響要因であると考えられる¹⁾。

本論文は、塩害による鉄筋コンクリート構造物の劣化に関して、材料、配合および施工を要因として検討したものである。施工要因としては、異なる種類のコンクリートを用いて締固めの影響を検討した。

鉄筋腐食への各種要因の影響程度を調査するために、海洋環境および室内における塩水一面浸漬実験を 8 年間に渡って実施し、自然電位をモニタリングした。

2. 実験概要

2.1 試験体

使用材料を表-1 に示す。また、コンクリートの配合を表-2 に示す。材料、配合要因としては、セメント種類 3 種[普通ポルトランドセメント, 高炉セメント B 種, 低熱ポルトランドセメント], コンクリート種類 3 種[ス

ランプ 12cm の普通コンクリート, 高流動コンクリート, 高流動コンクリートと単位量は同じであるが高性能 AE 減水剤の使用量を極端に減じてスランプ 12 cm としたコンクリート (以下, 低流動コンクリート)] とした。これらは、施工要因のうち締固めが鉄筋の腐食性状に及ぼす影響を把握する目的で設定したものである。

表-1 使用材料

| 材料 | 仕様 |
|------|--|
| セメント | 普通ポルトランドセメント, OPC : 密度 3.16g/cm ³ , 比表面積 3350cm ² /g 高炉セメント B 種, BB : 密度 3.04 g/cm ³ , 比表面積 3830 cm ² /g 低熱ポルトランドセメント, LPC : 密度 3.22 g/cm ³ , 比表面積 3380 cm ² /g |
| 混和材 | 石灰石微粉末: 密度 2.70g/cm ³ |
| 細骨材 | 山砂, 表乾密度 2.65 g/cm ³ , 吸水率 2.25% |
| 粗骨材 | 碎石, 表乾密度 2.67 g/cm ³ , 吸水率 0.79% |
| 増粘剤 | 水不溶性ポリマ(β1,3 グルカン) |
| 混和剤 | AE 減水剤標準形 高性能 AE 減水剤標準形 |

表-2 コンクリートの配合

| 配合記号 | セメントの種類 | スランプ (フロー) (cm) | 空気量 (%) | 水セメント比 (%) | 細骨材率 (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | | | |
|------|---------|-----------------|---------|------------|----------|--------------------------|------|--------|-----|------|-----|--------|
| | | | | | | 水 | セメント | 石灰石微粉末 | 細骨材 | 粗骨材 | 増粘剤 | 混和剤 |
| A | OPC | 12.0 | 4.5 | 50.0 | 46.0 | 160 | 319 | — | 845 | 1001 | — | 0.13* |
| B | OPC | 12.0 | 4.5 | 60.0 | 46.6 | 165 | 275 | — | 867 | 1001 | — | 0.50* |
| C | BB | 12.0 | 4.5 | 50.0 | 45.8 | 158 | 317 | — | 840 | 1001 | — | 0.79* |
| D | LPC | 12.0 | 4.5 | 50.0 | 46.1 | 160 | 320 | — | 849 | 1001 | — | 0.16* |
| E | OPC | (65) | 4.5 | 50.0 | 50.9 | 160 | 320 | 167 | 850 | 828 | 0.5 | 8.79** |
| F | OPC | 12.0 | 4.5 | 50.0 | 50.9 | 160 | 320 | 167 | 850 | 828 | 0.5 | 4.88** |

* : AE 減水剤標準形, ** : 高性能 AE 減水剤標準形

*1 大成建設(株) 技術センター土木技術研究所 主任研究員 工博 (正会員)

*2 大成建設(株) 技術センター土木技術研究所 副主任研究員 工修 (正会員)

*3 大成建設(株) 技術センター土木技術研究所 チームリーダー 工博 (正会員)

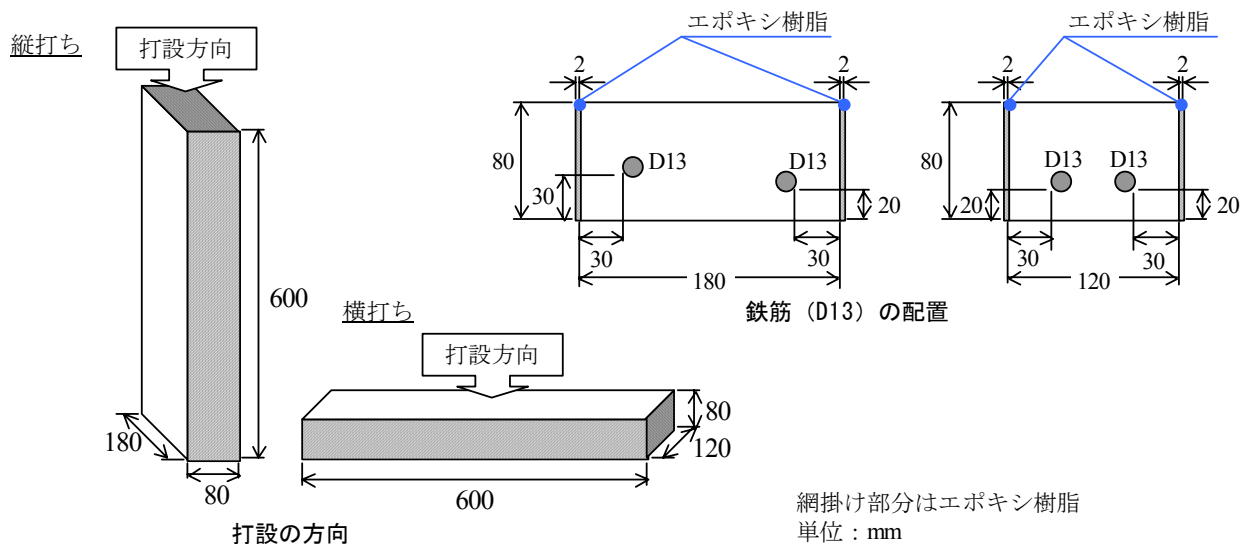


図-1 鉄筋の配置および打設方向

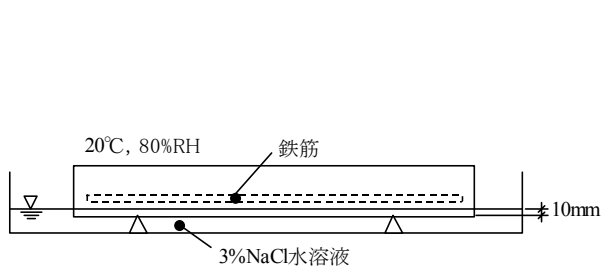


図-2 室内塩水一面浸漬方法

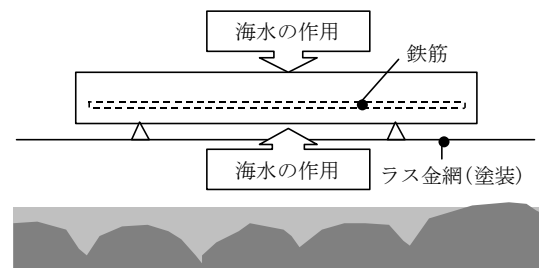


図-3 海洋暴露方法

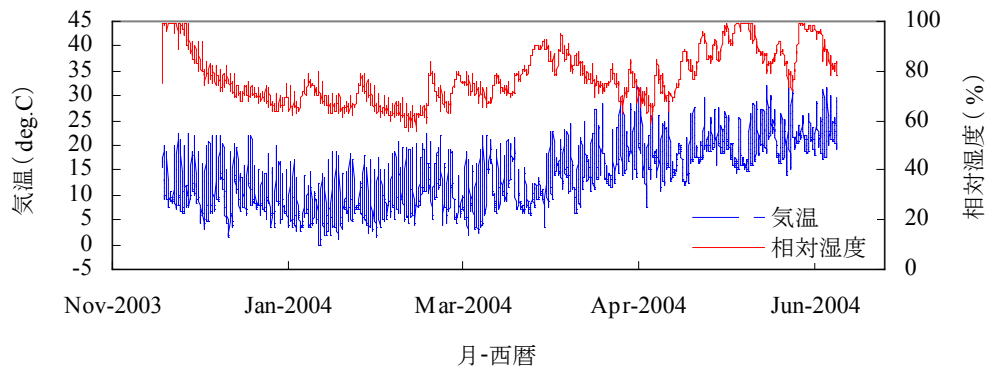


図-4 海洋暴露環境

配合 A, B, C, D は、単位セメント量や骨材量がほぼ同量となるように試験練りを行って決定した。粗骨材の最大寸法は 20mm とした。高流動コンクリート (配合 E) および低流動コンクリート (配合 F) は、石灰石微粉末を使用して粉体量を増量し、粗骨材量を減じた。

試験体の形状および寸法は、図-1 に示したように、120×80×600mm (横打ち試験体) および 180×80×600mm (縦打ち試験体) の直方体とした。横打ち試験体はかぶり 20mm で 2 本の鉄筋を配置した。配合は A, C および D とし、長手方向を水平にして打設した。打設時には内部振動機により締固めた。縦打ち試験体はかぶり 20mm および 30mm で 2 本の鉄筋を配置した。配合は A,

B, E および F とし、長手方向を上下として立てて打設した。打設の方向を変えたのは、内部振動機の加振によるコンクリートの上下方向の材料分離の影響およびブリーディング方向の影響を調査するためである。突き棒およびハンマリングにより打設した後、内部振動機を 30 秒間連続で作用させた。高流動コンクリート (配合 E) の場合には、内部振動機による締固めは行わなかった。本論文では、かぶり 20mm の鉄筋の計測結果のみを報告する。

養生は水中養生とした。本論文では、4 日、7 日および常時湿度 100% の室内の 3 ケースについて報告する。なお、養生の影響については今後報告する予定である。

試験体は、養生終了後、図に示したように試験体の4側面をエポキシ樹脂2mm厚でコーティングした。

2.2 暴露条件

暴露環境は、実験室内における塩水一面浸漬条件および自然海洋環境条件と湿度100%の霧室内とした。

室内暴露は、前養生期間に応じて材齢18日(4日養生)、21日(7日養生)で開始した。海洋暴露は材齢65日で開始した。所定の養生期間経過後は、暴露開始まで室温20℃湿度80%の環境に保管した。暴露開始後現在までにおよそ8年間経過している。

暴露中は、図-2 および図-3 に示したように試験体を水平に設置した。室内における塩水一面浸漬は図-2 に示したように、かぶり側の10mmのみが塩水に常時浸漬するように試験体を静置した。本条件では、試験体下面が常時湿潤状態となり塩化物イオンが供給される。試験体上面は常時乾燥状態となる。一定期間経過後は定常な水分分布となり、塩化物イオンが供給されたと考えられる。室内暴露環境は、室温20℃、相対湿度80%RHである。

自然海洋環境暴露条件は飛沫帯であり、波しぶきがしばしば作用し、試験体上下面から塩化物イオンが供給されるとともに、上下面から乾燥が作用する環境である。ただし、日射は上面にしか作用しない。自然海洋環境における気温と湿度の計測例を図-4 に示す。その他、比較のため湿度100%の霧室内にも暴露を行った。この環境は塩化物イオンが作用せず、乾燥も作用しない非常に安定した環境である。

2.3 調査項目および計測項目

コンクリートの初期物性値を把握するために、20℃水中養生供試体による圧縮強度試験とブリーディング試験、水銀ポロシメータによる細孔径分布の測定を実施した。また、暴露期間中は自然電位を定期的に測定した。自然電位はかぶり面の鉄筋直上において、鉛照合電極により測定した。電位測定点の間隔は25mmとした。電位測定時は、あらかじめ測定面に水道水で湿らせたタオルを配置してかぶりコンクリートがほぼ飽水状態となるように含水率を調整した。測定中も湿らせたタオルによ

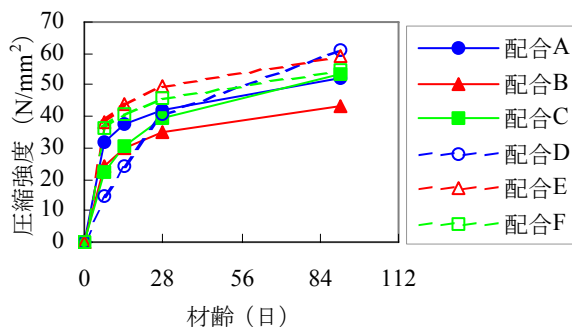


図-5 水中養生供試体の圧縮強度試験結果

り乾燥を防止した。海洋暴露における自然電位の測定は暴露開始後12ヶ月、その後1回/6ヶ月程度の頻度で実施した。測定時には実験室内に試験体を搬入して自然電位の測定を実施した。室内暴露試験体の自然電位の測定は、暴露開始後3ヶ月まで1回/月、3ヶ月以降36ヶ月まで1回/3ヶ月、36ヶ月以降64ヶ月まで1回/4ヶ月、64ヶ月以降92ヶ月まで1回/12ヶ月の頻度で実施した。

3. 実験結果および考察

3.1 初期物性値

圧縮強度試験結果を配合ごとに図-5 に示す。図-5 には各材齢の3体の試験結果を平均して示した。普通ポルトランドセメントを使用した配合間の比較では、配合B(W/C=60%)は配合A(W/C=50%)と比較して20%程度発現強度が低い傾向があるが、28日以降の強度発現は配合Aとほぼ同等であった。その他の配合は、同一水セメント比であるため、91日の発現強度は50~60N/mm²程度となり、大きな差はなかった。また、配合E(高流動コンクリート)、配合F(低流動コンクリート)は、同じくW/C=50%である配合Aと比較して、材齢28日までの発現強度がやや高い傾向があったが、28日以降の強度の発現はほぼ同等であり、91日ではほとんど差がなかった。セメント種類に着目すれば、配合D(LPC)、配合C(BB)はOPCを用いた配合Aと比較して、材齢28日以降の強度の発現が大きい傾向があった。

図-6 にブリーディング試験結果を示す。振動有とは、ブリーディング容器に試料を投入する時に、高周波パイプレータを30秒間作用させたことを示す。配合E(高流動コンクリート)、配合F(低流動コンクリート)では、振動の有無に拘わらずブリーディング量はほぼゼロで

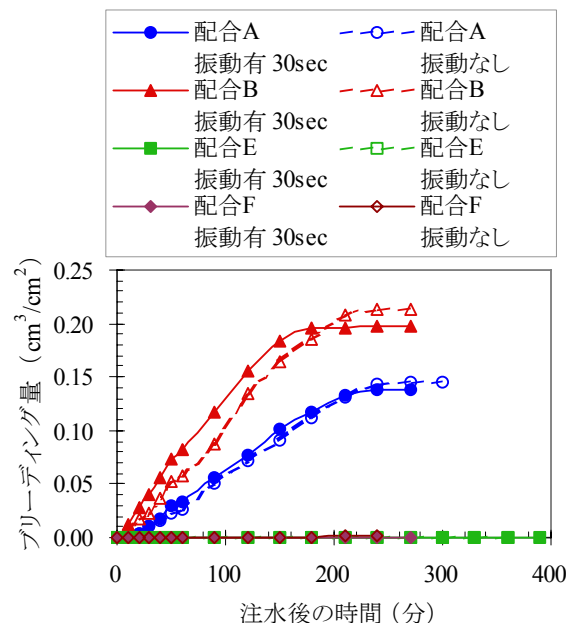


図-6 ブリーディング試験結果

あった。配合 A, 配合 B は, ブリーディングが観察された。配合 A よりも配合 B の方がブリーディング量は多かった。本実験の範囲では, 振動の有無は, ブリーディングの速度には若干の影響があったが, 最終的なブリーディング量には大きな影響はなかった。

図-7に28日間水中養生した各種配合の供試体の水銀ポロシメータによる細孔径分布の測定結果を示す。配合 C (BB) の細孔径分布は, 他の配合と傾向が異なり 0.02 μm 付近に細孔量のピークがあり, 全体として径の小さな細孔が多い傾向がある。また, 配合 D (LPC) および配合 E (高流動コンクリート) も配合 A (OPC) と比較すれば, 0.01~0.03 μm 付近の細孔量が多い傾向があり, 比較的緻密な組織であると考えられる。

3.2 自然電位の測定結果

自然電位の測定値は鉛照合電極電位 (mV vs PRE) であるが, $\text{CSE} = \text{PRE} - 800$ として飽和硫酸銅電極電位 (mV vs CSE) に換算して示す。

(1) 水セメント比が鉄筋腐食に及ぼす影響

図-8 に水セメント比を要因として自然電位の計測結果を比較して示す。図には, 鉄筋直上において 25mm 間隔で計測した全 23 点の計測点の履歴データを区別せずに直線で結んで示した。図において履歴束線の縦方向の広がりが大きくなることは, 鉄筋上の計測点間の電位差が大きくなることを意味する。図は縦打ち試験体の計測結果である。

室内塩水一面浸漬において, 図-8a) および b) に示したように, 配合 A では, 暴露期間 500 日前後で自然電位が -100mV CSE 程度から -300mV CSE 程度まで急激に低下し, 配合 B では, 暴露期間 200 日前後で -50mV CSE 程度から -200mV CSE 程度に急激に低下した。この電位の低下時期を腐食発生時期とみなせば²⁾, 水セメント比の違いによって腐食発生時期に 300 日程度の差があったと考えられる。この腐食発生時期が鉄筋表面の不動態の消失時期を意味するものと考えれば, 鉄筋周辺の塩化物イオン濃度が腐食発生限界を超えた時期と考えることができる。配合 B は, 1500 日前後, 2400 日前後でも電位が大きく低下する時期があり, 暴露期間 2400 日で暴露面に腐食ひび割れが発見された。一方, 配合 A は, 500 日前後で電位が低下したあとは, ほぼ一定の電位で推移しており, 暴露期間 2700 日現在まで腐食ひび割れは見されていない。

次に, 図-8c) および d) に示したように, 同じ配合で製作した試験体の海洋暴露における自然電位の変化では, 暴露開始後 1 回目の測定時期である材齢 360 日の自然電位は, 配合 A は -250mV CSE 程度であったが, 配合 B では -400mV CSE 程度まで電位が低下していた。室内塩水一面浸漬の場合と同様に, W/C=60% の配合の方が腐食の開始が早かったと考えられる。海洋暴露試験体では室内塩水一面浸漬試験体と比較して, 腐食発生以降, 計測点間の電位差が大きくなる傾向がある。海洋暴露試験体の配合 A (16-3-75) は 1440 日時点, 配合 B (18-3-85) は 570 日時点の自然電位測定時に腐食ひび割れが発見された。腐食の発生時期は, 室内塩水一面浸漬と海洋暴露でほぼ同じ時期であったと考えられるが, 腐食の進行は, 乾燥と湿潤の繰り返し作用を受ける海洋暴露の方が, 環境作用が厳しかったと考えられる。なお, 18-3-85 は暴露期間 2340 日で解体調査したため, それ以降のデータが無いのである。

(2) セメントの種類が鉄筋腐食に及ぼす影響

図-9 に, 自然電位モニタリング結果を, セメント種

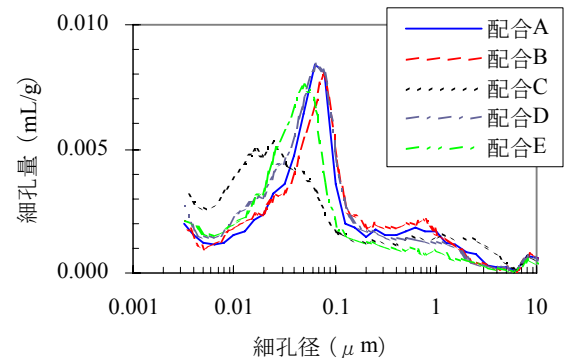


図-7 28 日水中養生後の細孔径分布

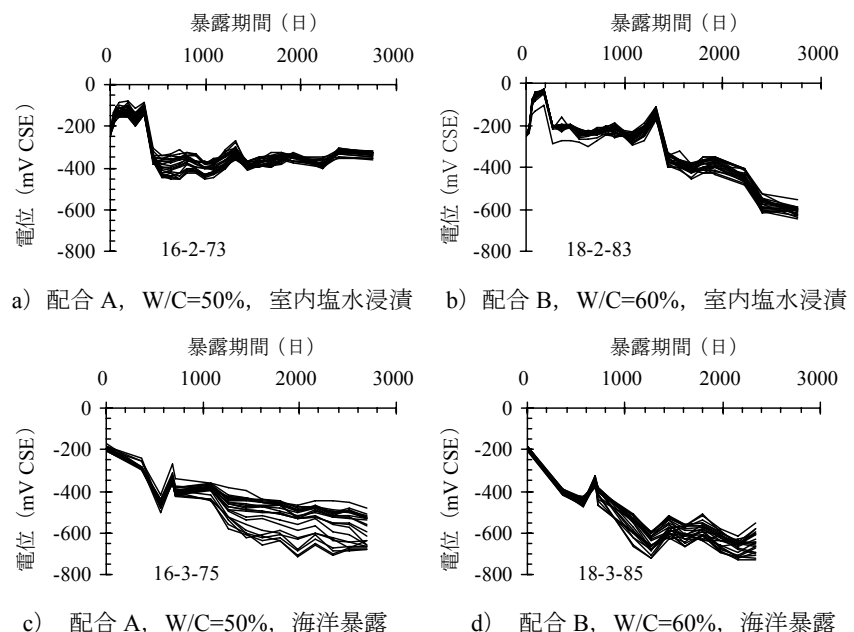


図-8 自然電位の計測結果 (配合 A および配合 B, 縦打ち, 水中養生 7 日間)

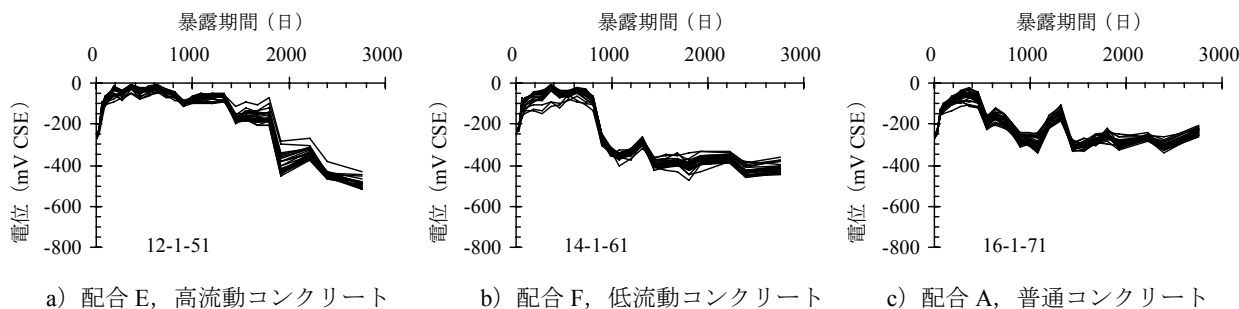


図-11 自然電位の計測結果, 締固めの影響 (室内塩水浸漬, 縦打ち, 水中養生 7 日間)

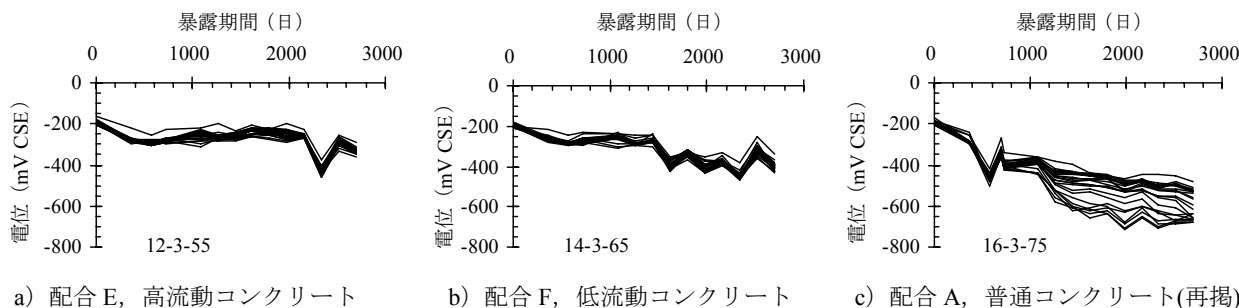


図-12 自然電位の計測結果, 締固めの影響 (海洋暴露, 縦打ち, 水中養生 7 日間)

(3) 鉄筋腐食に及ぼす締固めの影響

図-11 および図-12 に締固めの影響を要因として、自然電位の測定結果を比較して示す。本論文では、締固めの影響を把握する目的で、普通コンクリート、高流動コンクリートおよび低流動コンクリートの各種配合で試験体を製作し、縦打ちにより締固めの影響を考慮した。室内塩水一面浸漬、海洋暴露ともに、自然電位が急激に低下する時期は、配合 A (500 日付近) < 配合 F (750~1000 日付近、海洋暴露では 1500 日付近) < 配合 E (2000 日付近) の順に早い。ブリーディング量が最も多く分離傾向があった配合 B は図-8d) に示したように、360 日時点で腐食傾向を示しており、最も早期に腐食ひび割れが発生するに至った。配合 E および配合 F は、石灰石微粉末を使用している効果によって緻密な組織となり腐食が抑制されている可能性がある。配合 E と配合 F との比較においては、振動締固めを行った配合 F の方がより早期に腐食傾向を示した。両配合ではブリーディングはほとんど観察されなかったが、締固めによって骨材の分布状態に差が生じた結果マクロセルの形成に影響を及ぼした可能性があると考えられる。

4. まとめ

使用材料やコンクリートの種類が鉄筋腐食に及ぼす影響について、室内塩水一面浸漬および海洋環境暴露実験による自然電位のモニタリング結果により検討した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 水セメント比が小さいほど腐食の発生は抑制される。
また、水セメント比が同一の場合、普通コンクリート

と比較して石灰石微粉末を使用した高流動コンクリート配合の方が、腐食の発生が抑制された。配合および振動締固めによる材料分離抵抗性が腐食発生に影響していると考えられる。

- (2) セメント種類が腐食の発生に及ぼす影響としては、高炉セメント B 種の腐食抑制効果が最も高かった。また、低熱ポルトランドセメントを使用した場合には、普通ポルトランドセメントを使用した場合と比較してより早期に腐食が発生したと考えられた。
- (3) 湿度 100% で塩化物イオンの作用の無い環境下では、自然電位は -600~-1000mV CSE といった卑な電位を示し、鉄筋上の電位差も非常に小さかった。
- (4) 本実験の範囲における普通コンクリート試験体は、室内塩水一面浸漬と比較して乾湿の影響を受ける海洋暴露の方が腐食の進行が早い傾向があった。

参考文献

- 1) 武田 均, Ahmet GOKCE, 丸屋 剛: 塩害による鉄筋腐食に及ぼす施工要因の影響, 土木学会第 57 回年次学術講演会, pp.1041-1042, 2002.9
- 2) 堀口賢一, 丸屋 剛, 武若耕司: 自然電位連続モニタリングによる発錆時期推定手法の検討と腐食発生限界塩化物イオン濃度の測定, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1007-1012, 2006.7
- 3) 土木学会コンクリート委員会: コンクリートの塩化物イオン拡散係数試験方法の制定と規準化が望まれる試験方法の動向, コンクリート技術シリーズ, pp.11-13, 2003.9