

論文 高強度コンクリートの塩化物イオン浸透性および内部鉄筋の防食性に関する促進試験

濱田秀則*1・中橋一壽*2・黒木隆二*3

要旨：高強度コンクリートを使用して製作したプレストレストコンクリート矢板（PC矢板）を港湾環境に適用することを目的として、その海洋環境下における耐久性を乾湿繰り返し劣化促進試験に基づき考察した。ポルトランドセメントのみを使用した高強度コンクリートと高炉スラグ微粉末を混入した高強度コンクリートの、耐海水性、塩化物イオンの浸透性、並びに内部鉄筋の防食性を試験した。その結果、高強度コンクリートは、硬化体自身の耐久性および内部鉄筋の防食性に優れることを示す結果を得た。

キーワード：高強度コンクリート、塩化物イオン浸透性、内部鉄筋防食性、促進試験

1. はじめに

本研究の基本目的は、高強度コンクリートを使用して製作したプレストレストコンクリート矢板（以後、PC矢板と称す）を港湾環境で使用していくために、その海洋環境下における耐久性を評価することである。すなわち、コンクリート中に埋設された鋼材（鉄筋およびPC鋼線）の防食性を把握することである。高強度コンクリート中に埋設された鋼材の防食性に関する検討事例はこれまでも存在するものの¹⁾、必ずしも十分ではないと思われる。本研究においては、数種の材料を用いて製作した高強度コンクリート中に鉄筋を埋設した円柱供試体を用いて、乾湿繰り返しによる劣化促進試験を行った。その結果に基づき、高強度コンクリート中に埋設された鋼材の防食性に関して考察を行った。本実験で用いたコンクリート材料および配合はPC矢板と同等のものとした。また、鋼材のかぶり厚さは実際のPC矢板を想定し、3 cm、5 cm、7 cm と設定した。

試験シリーズの一環として、矢板モデルの供試体に関しても同様の劣化促進試験を実施して

いるが、その結果及び考察に関しては、別報告に取りまとめることとする。

2. 実験概要

2.1 供試体の形状および寸法

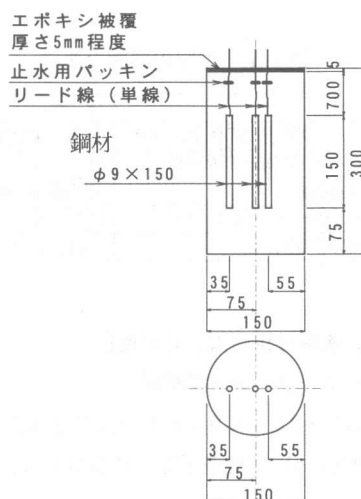


図-1 鉄筋埋設供試体の形状および寸法

*1 運輸省港湾技術研究所 構造部 材料研究室 工博（正会員）

*2 オリエンタル建設(株) 技術部（正会員）

*3 (株)富士ピーエス 東京支店 技術部 設計課（正会員）

本研究に用いた供試体は2種類である。内部に鉄筋を埋設する場合はφ15×30cmの円柱供試体を用いた。その概形を図-1に示す。また、強度および弾性係数の試験を行うための供試体としてφ10×20cmの円柱供試体を用いた。

2.2 実験の要因ならびに水準

本実験の要因と水準を表-1に示す。

使用材料に関しては、早強ポルトランドセメントのみの使用と、高炉スラグ微粉末の混入とがある。さらに、高炉スラグ微粉末の置換率として、30%および50%の2種類を設定した。打設後の養生方法として、湿潤養生と蒸気養生の2種類を取り上げ、コンクリートの配合に関する要因としては、水セメント比32%と50%の2種類を取り上げた。また、埋設鉄筋のかぶり厚として、3cm、5cm、7cmの3種類を検討の対象とした。

蒸気養生はコンクリート打設4時間後に開始し、最高温度60℃を6時間継続した。また、湿潤養生は打設後3日間継続した。その後、材齢約2ヶ月まではシートをかぶせた気中養生を実施した。

表-1 実験の要因と水準

要 因	水 準
高炉スラグ微粉末の使用の有無	使用、未使用
高炉スラグ微粉末の置換率	30%、50%
打設後の養生	標準養生、蒸気養生
コンクリートの水結合材比	32%、55%
埋設鉄筋のかぶり	3cm、5cm、7cm

2.3 使用材料およびその性質

(1) コンクリート用材料

セメントは、早強ポルトランドセメント（密度3.13g/cm³）と普通ポルトランドセメント（密

度3.16g/cm³）の2種類であり、いずれもJIS R 5210に適合している。使用した高炉スラグ微粉末は、密度が2.92g/cm³、比表面積が6170cm²/gであり、JIS A 6206に適合している。細骨材は鬼怒川産川砂（密度2.60g/cm³）、粗骨材は鬼怒川産碎石（密度2.62g/cm³、最大寸法20mm）である。高性能AE減水剤は、ポリカルボン酸エーテルの複合体系のものを、また、AE剤は変性アルキルカルボン酸系のものを使用した。

(2) 鋼材料

埋設した鉄筋はSR235（径：9mm、長さ：150mm）であり、JIS G 3112に適合している。使用前に表面を磨き錆を落とした状態で使用した。鉄筋の一端にリード線をハンダで接続し、ハンダ部分をエポキシ樹脂でカバーした。図-1に示すように、リード線の途中に止水用パッキンを装着し、リード線に沿った海水の浸入を防止するように試みた。

2.4 コンクリートの配合

コンクリートの配合を表-2に示す。本実験で用いた配合は4種類である。配合番号1は早強ポルトランドセメントのみを使用した高強度コンクリートである。配合番号2と3は高炉スラグ微粉末を使用した高強度コンクリートであり、番号2が置換率30%、番号3が置換率50%の場合の配合である。配合番号4は、上記3種類との比較の意味で用いた普通ポルトランドセメントを使用した普通強度のコンクリートの配合である。なお、以下の図表において使用されている「配合番号」はすべて表-2に対応している。

練り混ぜ直後のフレッシュコンクリートの性状を表-3にまとめて示す。

表-2 コンクリートの配合

配合番号	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)							備考
			水	セメント	スラグ	細骨材	粗骨材	高性能AE減水剤	AE剤	
1	32	45.3	150	469	0	784	950	1.2	0.0015	置換率 0%
2	32	45.0	150	328	141	775	950	1.2	0.002	置換率 30%
3	32	44.9	150	234	234	770	949	1.2	0.002	置換率 50%
4	55	45.0	180	330	0	790	973	0.2	0.002	比較用配合

表-3 フレッシュコンクリートの性状

配合 番号	スランプ (cm)	空気量 (%)	練上り温度 (℃)
1	18.0	4.5	31.0
2	21.5	4.5	31.0
3	22.0	4.0	31.0
4	9.0	5.0	25.0

2.5 促進試験の方法

促進試験はコンクリート材齢が約2ヶ月の時点より開始した。本研究で用いた乾湿繰り返し促進試験の仕様は、40℃に加熱した海水の噴霧1日間、扇風機を用いた常温送風乾燥2.5日間を1サイクルとするものであり、1週間で2サイクル実施した。本実験では、220サイクル(約110週間)まで継続した。なお、試験室が密室となっているため、コンクリートの乾燥が必ずしも十分ではなかった。

2.6 供試体に関する試験の方法

(1) コンクリートの圧縮強度

上述したとおり、試験体は $\phi 10 \times 20\text{cm}$ を使用し、試験はJIS A 1108に準拠して行った。本試験は促進試験の前後に実施した。

(2) 動弾性係数

試験体は、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ を使用し、JIS A 1127に規定される「共鳴縦振動法」に準拠して行った。本試験は、同一の供試体を用い、促進試験期間中経時的に実施した。

(3) コンクリートの細孔容積

分析用試料は、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の供試体のほぼ中央の高さで、かぶりが約30mmの位置より採取した。モルタル塊を試験対象とし、水銀圧入式ポロシメーターにて、計測細孔径の範囲が約 $0.005 \sim 10 \mu\text{m}$ となるように計測を行った。本試験は、促進試験の前後および促進試験期間中(100サイクル終了時)に実施した。

(4) 急速塩素透過性試験

本試験は、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の供試体の中央部より切り出した試料を用い、AASHTO T-277の方法に準拠して、促進試験の前後に実施した。

(5) コンクリート中の全塩化物含有量

本試験は、促進試験期間中(100サイクルおよび150サイクル終了時)と促進試験終了後(220サイクル終了時)に実施した。 $\phi 15 \times 30\text{cm}$ の供試体を割裂し、埋設鉄筋の周囲(かぶり厚が3cm, 5cm, 7cm)より試料を採取した。モルタルの微粉末試料を用いて、JCI-SC5に準拠した方法で全塩化物含有量を測定した。

(6) 埋設鉄筋の自然電極電位

本試験は、参照電極として飽和カロメル電極を使用し、供試体を海水中に浸せきした状態における鉄筋の電位を計測した。本試験は、一定の供試体を促進試験中経時的に計測した。

(7) 埋設鉄筋の発錆状況観察

本試験は、促進試験の途中(100サイクル終了時)および促進試験終了後(220サイクル終了時)において実施した。 $\phi 15 \times 30\text{cm}$ の供試体を割裂し、埋設鉄筋を取り出した後目視観察を実施した。観察図を作成し、発錆の程度を発錆面積率で表示した。

3. 実験結果および考察

3.1 供試体の外観状況

促進試験を終了した供試体の表面は、一部に茶色への変色が見られたが、総じて、ひび割れ、剥離などの劣化は発生しておらず、健全であると判断できた。

3.2 コンクリート硬化体に関する試験

(1) コンクリートの圧縮強度

図-2に圧縮強度試験結果を示す。いずれの配合の場合も、促進試験による強度の低下はなく、むしろ促進試験後に強度は増加している。また、配合1と配合2, 3を比較してわかるように、高炉スラグ微粉末を混入した方が圧縮強度は低くなっている。このような強度の傾向は、既往の研究²⁾においても示されている。また、図中に促進試験と同期間水中養生を行った供試体の圧縮強度も示しているが、配合番号2および4においては促進試験を行った供試体の圧縮強度が水中養生を行った供試体のそれよりも値

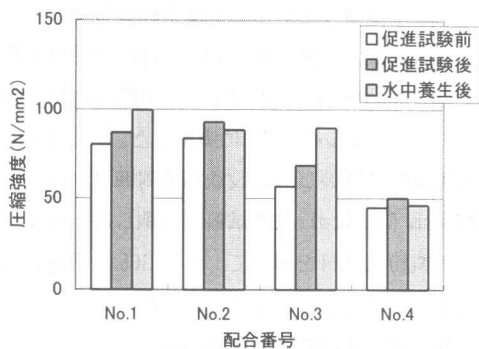


図-2 圧縮強度の経時変化

は大きい。しかし、配合番号1および3においては、促進試験を行った場合の方が水中養生を行った場合よりも強度はかなり低い。

促進試験を行った供試体においては、水中養生を行った場合と同程度の強度増進は必ずしも期待できないものと思われる。

(2) 動弾性係数

図-3に促進試験期間中の動弾性係数の経時変化を示す。すべての配合において、促進試験期間をとおして動弾性係数の低下は認められず、促進試験による硬化体自体の劣化は生じていないと判断される。

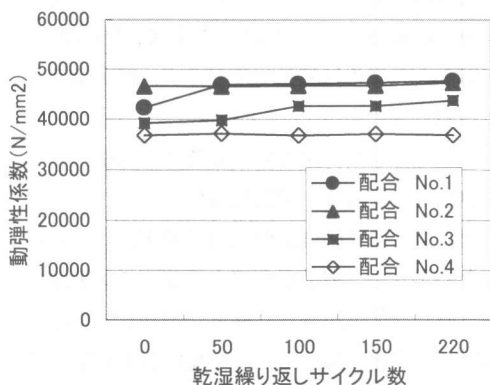


図-3 動弾性係数の経時変化

(3) コンクリートの細孔容積

図-4に促進試験前後の全細孔容積の計測結果を示す。配合番号3のみ傾向が明確ではないが、全細孔容積は促進試験後にむしろ減少して

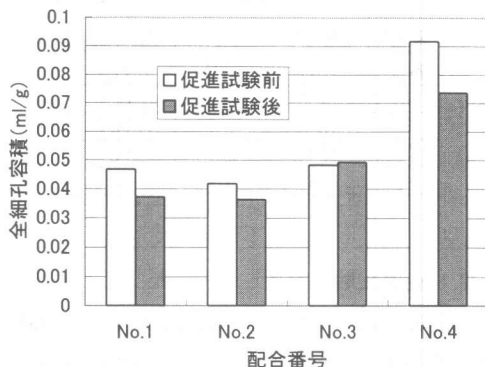


図-4 コンクリート中の細孔容積

いる。このことは、促進試験後に硬化体組織が緻密化していることを示していると考えられる。配合番号2（高炉スラグ置換率30%）の全細孔容積が最も小さく、適量の高炉スラグ微粉末の混入により組織が緻密化していることがわかる。

(4) 急速塩素透過性試験

図-5に急速塩素透過性試験結果（積算電流量表示）を示す。すべての配合において、積算電流量は促進試験後に減少している。この一つの要因としては、促進試験後に組織が緻密化しているためとも考えられ、前述の細孔容積の試験結果と一致している。

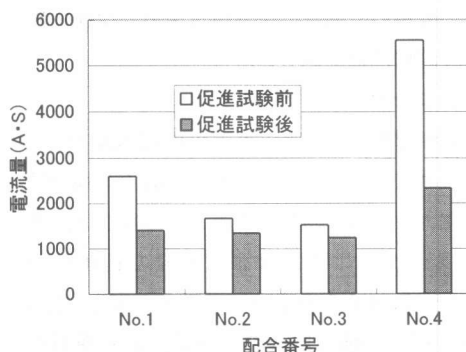


図-5 急速塩素透過性試験結果

(5) コンクリート中の塩化物含有量

図-6にコンクリート中の塩化物含有量の計測結果を示す。図中、かぶり厚さが15mmのデータは150サイクル終了時の塩化物含有量を、そ

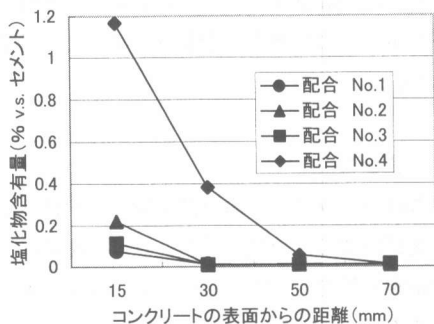


図-6 コンクリート中の塩化物含有量

他のデータは220サイクル終了時の塩化物含有量を示している。

普通強度のコンクリート（配合番号4）に比べて、高強度コンクリートの塩化物含有量は極めて少なく、遮塩性に優れていることがわかる。本試験の範囲内では、ポルトランドセメントのみを使用した場合と高炉スラグ微粉末を混入した場合とではほぼ同程度の塩化物含有量であった。

(6) 蒸気養生の影響について

図-7に湿潤養生を行ったコンクリートと蒸気養生を行ったコンクリートの圧縮強度を併記して示す。図より、いずれの配合の場合も蒸気養生による強度増進効果はないことがわかる。

一方、いずれの配合の場合も、蒸気養生を行った供試体でも促進試験後に強度は増大している。したがって、圧縮強度に関しては、蒸気養生を行うことにより促進試験に対する耐久性が劣るということはないと思われる。

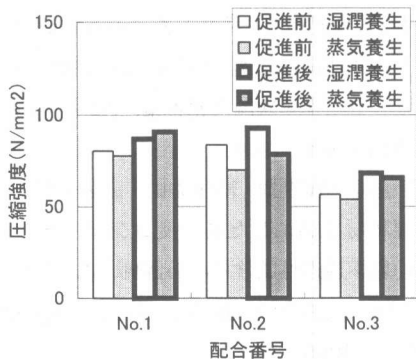


図-7 圧縮強度に及ぼす蒸気養生の影響

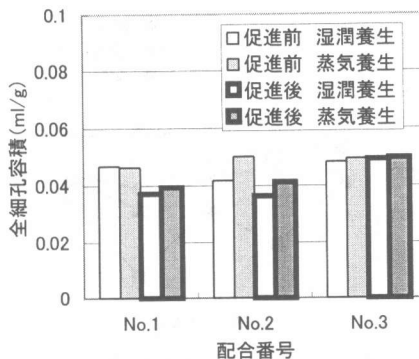


図-8 細孔容積に及ぼす蒸気養生の影響

図-8に湿潤養生を行ったコンクリートと蒸気養生を行ったコンクリートの全細孔容積を併記して示す。配合番号1と3に関しては、蒸気養生が全細孔容積に及ぼす影響は認められない。一方、配合番号2（高炉スラグ置換率30%）に関しては、蒸気養生を行うことにより全細孔容積が大きくなる傾向にあり、促進試験の前後でその傾向は同じである。これより、高炉スラグ微粉末を使用する場合には、蒸気養生を加えることの影響を十分検討しておくことが重要であると思われる。

3.3 埋設鉄筋に関する試験

(1) 埋設鉄筋の自然電極電位

図-9に促進試験期間中の埋設鉄筋の自然電極電位の経時変化を示す。なお、図中に示す値は、かぶり厚が7cmに位置する鉄筋の計測値である。多少のばらつきは存在するが、すべての配合において促進期間中大きく低下するような傾向は認められず、促進試験期間中に大きな腐食の進行は生じなかったものと推察される。

自然電極電位の計測値に対しては、むしろ高炉スラグ微粉末混入の影響が大きく、混入している方が明らかに電位は卑となる傾向がある。また、混入率の影響も顕著であり、混入率の大きい方が、電位は卑になる。したがって、高炉スラグ微粉末を混入した場合は、電位の計測値に対して考察を行う際には、このことを十分考慮しておく必要がある。

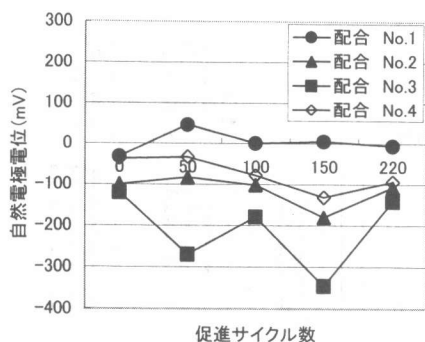


図-9 自然電位の経時変化

(2) 埋設鉄筋の発錆状況

図-10 に促進試験終了後の埋設鉄筋の発錆面積率を示す。なお、図中の値は、かぶり厚が 3 cm に位置する鉄筋の発錆面積率である。発錆量自体は極めて軽微であり、最大でも 2 % の発錆面積率であった。

配合番号 2 の湿潤養生の場合に、最も発錆面積率が多いが、発錆量自体が小さいこともあり、その理由を特定することは難しい。

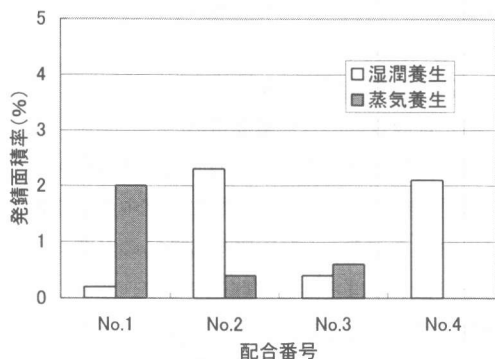


図-10 埋設鉄筋の発錆面積率

(3) 蒸気養生の影響

図-10 に蒸気養生を行った場合の供試体の埋設鉄筋の発錆面積率も併せて示す。配合番号 1 の場合、蒸気養生を実施した場合が 2 % という発錆面積率を示している。しかし、発錆量自体が少ないため、この発錆が蒸気養生によるものかの判断はできない。

全体的に発錆面積率が小さいものの、発錆面積率に対する蒸気養生の影響を認めることはできない。

4. まとめ

高強度コンクリートの海洋環境下における耐久性を評価するために、乾湿繰り返し法による劣化促進試験を行った。その結果、以下のような結論を得た。

- 1 促進試験によるコンクリートの圧縮強度、弾性係数の低下は生じなかった。
- 2 コンクリートの細孔容積は促進試験により減少する傾向を示した。
- 3 促進試験後の高強度コンクリート中の塩化物含有量は、普通強度コンクリート中のそれに比べて大幅に少なかった。
- 4 促進試験を通して、コンクリート中铁筋の自然電極電位に大きな変化は生じなかった。
- 5 促進試験を 220 サイクル実施した後も、コンクリート中铁筋の発錆面積率は 2 % 以下の軽微なものであった。
- 6 本実験の範囲内においては、促進試験前後のコンクリートおよび埋設鉄筋の性状に対して、蒸気養生の影響は認められなかった。
- 7 今回試験の対象とした高強度コンクリートは、硬化体自身の耐久性および内部鉄筋の防食性に関して良好な結果を示した。

参考文献

- 1) 例えば、真下昌章・福手勤・濱田秀則・渡辺芳春：各種混和材を添加した高強度コンクリートの急速塩素透過性試験による評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.1，pp.979～984，1995
- 2) 真下昌章・福手勤・濱田秀則・渡辺芳春：各種混和材を添加した高強度コンクリートの急速塩素透過性試験による評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.1，pp.979～984，1995