

(76) PC杭の海洋環境下における耐久性

- (株)ピー・エス 正会員 由浅直洋
- 運輸省港湾技術研究所 正会員 福手 勤
- (株)ピー・エス 正会員 久野公徳
- 同 上 正会員 佐藤健一

1. まえがき

本報告は、海洋環境下に 37 年間暴露されていたプレストレストコンクリート杭(PC杭)を対象にして各種の調査を行い、コンクリートの物理的、化学的な特性および経年変化を把握し、海洋環境下でのPC建造物の耐久性について総合的に評価するものである。

2. PC杭の概要

調査対象のPC杭は、神戸港で37年間暴露されていたもので、対角線の長さが719mm(Aタイプ)と810mm(Bタイプ)の八角形断面であり、各タイプ2本ずつの合計4本である。A、B両タイプともφ500mmの中空断面を有しており、PC鋼線はφ12.4を10cm間隔で配置している。断面図を図-1に示す。

このPC杭は工場にて製作され(プレテンション杭)、その後設置場所に曳航されてウォータージェットとドロップハンマーの併用にて打ち込まれている。当時の製作がうまくいっておらず、PC鋼線のかぶり厚が一定ではないのが特徴である。

暴露されていた神戸港の環境は、太平洋側であるため比較的温暖であり、凍結融解作用はほとんどなく、防波堤で囲まれているため大きな波の進入もない状態である。

設計基準強度は  $f_{ck} = 45 \text{ N/mm}^2$ 、導入プレストレスト量  $\sigma_{pe} = 2.0 \text{ N/mm}^2$  である。コンクリートの配合は、単位セメント量  $C = 450 \text{ kg/m}^3$ 、水セメント比(W/C) 45%、スランプは 8~10 cm であり、細、粗骨材は川砂、川砂利(最大骨材寸法: 25mm)を使用し、早強セメントを使用している。

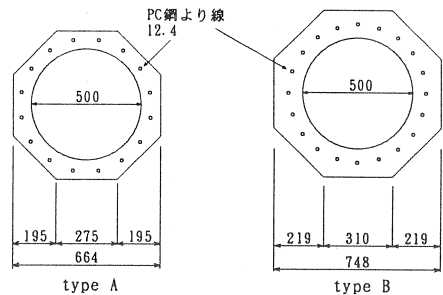


図-1 PC杭断面図

3. 調査内容および試料の採取

調査対象としたPC杭を海上大気部、干満部、海中部および土中部の4部位に分割し、PC鋼線、フープ筋を含まないようにφ75×150mmの大きさでコンクリートコアを採取し、表-1に示すような各種の物理的、化学的分析調査を行った。

表-1 実施した試験項目

調査項目	調査方法
1. 外観観察	目視にて確認
2. 塩化物イオン量調査	全塩分: JCI-SC5 可溶性塩分: JCI-SC4
3. 圧縮強度	JIS A 1107 に準ずる
4. ヤング係数	ストレインゲージを添付し測定する
5. 透水性試験	
6. RCPT試験	AASHTO T-277
7. X線回折	X線回折装置を用いる
8. 細孔径分布	

4. 試験結果

4. 1 外観観察

本PC杭は部材中にウォータージェット用の鋼管が埋設配管されており、この鋼管の腐食が非常に激しく、杭表面上が欠損している部分が認められた。また、錆による膨張が原因と考えられるひび割れが多数発生しており、そのひび割れ幅は1~5 mmで、鋼管の配置位置に沿って杭軸方向に進展していた。PC鋼線のかぶり量が1.5~2.0 cmと小さい箇所に、PC鋼線に沿った杭軸方向のひび割れが確認されたが、かぶり量大きい箇所では認めらず、発生しているひび割れは鋼管の腐食が原因であるものがほとんどである。

#### 4.2 物理的分析

各杭のそれぞれの部位での圧縮強度を図-2に、静弾性係数を図-3に示す。圧縮強度は $f_c = 68.8 \sim 111.1 \text{ N/mm}^2$ と設計基準強度を大きく上回り、静弾性係数もコンクリートの圧縮強度結果と対応して大きい値となっている。ただし、海上大気部はその他の部位と比較すると、約 $10 \sim 40 \text{ N/mm}^2$ 程度小さくなっていることが特徴である。これは海上大気部が他の部位と比較して、乾燥を受けやすい環境下にあるためと考えられる。

図-4に現行のコンクリート標準示方書における圧縮強度と静弾性係数との関係を、実測値と対比して示す。圧縮強度、静弾性係数ともに小さい傾向にあった海上大気部でも、現行示方書で規定されている圧縮強度とヤング係数の関係をほぼ満足しており、示方書に示される関係を外挿した部分に位置する。材料的にも川砂、川砂利を使用するなど、非常に優れたコンクリートといえる。

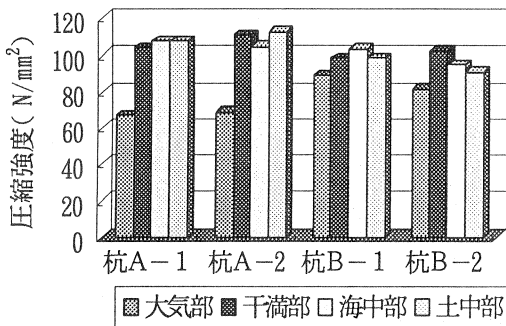


図-2 圧縮強度試験結果

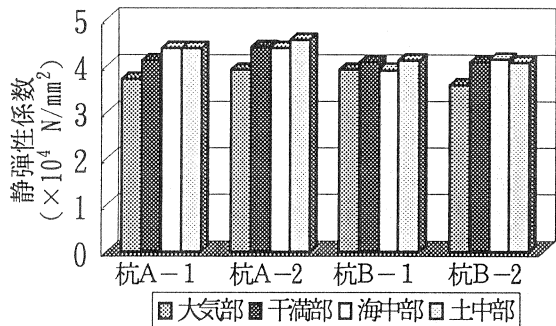


図-3 静弾性係数試験結果

コンクリート表面から、各深さにおける全細孔容積を水銀圧入式ポロシメータによって測定した結果を図-5に示す。海中部と土中部では、コンクリート表面付近の全細孔容積(細孔直径7500 nm以下)が内部に比較して多くなり、逆に海上大気部と干満部は表面近く的全細孔容積が少なく、内部になるほど多くなる傾向を示している。

図-6は各部位ごとの細孔直径と細孔容積の関係を示すが、部位ごとの差が顕著である。海上大気部と干満部は、海中や土中部と比較して大きな細孔径の細孔容積が多い。海上大気部と干満部では乾湿の繰り返しによる水分の移動が原因で、大きな細孔径の細孔容積

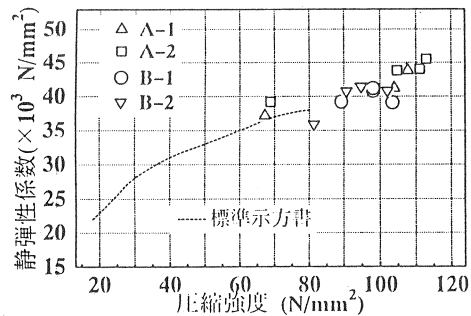


図-4 圧縮強度と静弾性係数との関係

が増加したものと考えられる。

また、コンクリート内の水密性や密実性を評価するために透水性試験を行った。試験は透水試験機(谷藤機械工業製)を用い、水圧を加えた試験体を割裂して破断面の浸透深さを測定し、拡散係数を算出し透水性を評価した。その結果、平均拡散係数は海上大気部では  $140 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 程度と非常に大きな値を示し、干満部では  $3.83 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 、海中部では  $3.91 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 、土中部では  $4.47 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec}$ であった。これらの結果は圧縮強度試験結果と対応しており、海上大気部が他の部位と比較して水密性、密実性において劣っていると考えられる。

#### 4.3 化学的分析

塩化物イオンの浸透状況を把握するために、コンクリートに含まれる塩分濃度を測定した。測定した塩化物は、可溶性塩化物イオンと全塩化物イオンである。コア供試体は、中空部まで貫通するように杭軸直角方向に各4部位より採取されたもので、深さ方向に1cm間隔に切断して分析試料とした。

全塩化物イオン測定結果を図-7に、可溶性塩化物イオン測定結果を図-8に示す。表中の値はコンクリート重量に対する塩化物イオン量を示す。

海上大気部では、可溶性塩化物イオンおよび全塩化物イオンともコンクリート表面より2cmの深さの位置でほぼ0と浸透していないが、干満部、海中部および土中部では、深さ13cm程度まで浸透しており、それ以降はほぼ一定値となっている。

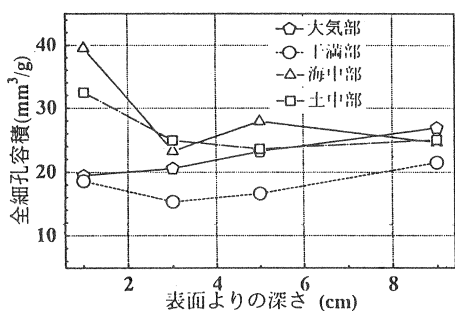


図-5 表面からの距離と全細孔容積の関係

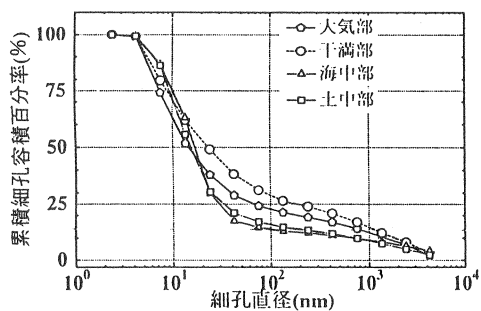


図-6 細孔直径と累積細孔容積百分率の関係

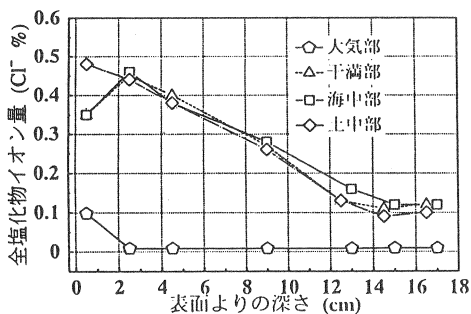


図-7 表面からの距離と全塩化物イオン量の関係

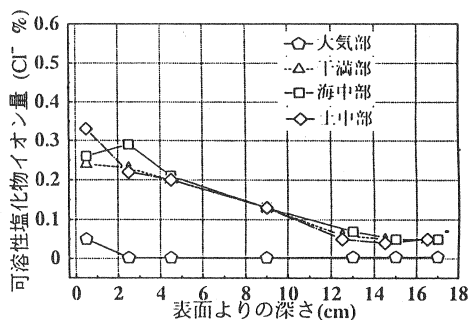


図-8 表面からの距離と可溶性塩化物イオン量の関係

図-9に全塩化物イオンと可溶性塩化物イオンの差を示す。全塩化物イオンと可溶性塩化物イオンの差である固定塩分は、コンクリート表面より10 cmの深さまでは、コンクリート重量に対して0.1～0.2%の範囲にあることが分かる。この結果はセメント重量に対して0.5～1.0%の塩化物イオンが固定化されていることを示すものである。

また急速塩化物イオン透過性試験(AASHTO T-277)も同時に行った。その結果、60V、6時間の条件にてコンクリート中を流れた電気量(電流値と時間との積分値)は平均で1094クーロンとなり、塩化物イオンのコンクリート部材内への浸透性はAASHTO規準(表-2参照)より"Low"レベルを示し、本PC杭のコンクリートは、材料学的に塩分浸透抵抗性に富んだコンクリートであると評価することができる。

コンクリート中の鉱物検出を目的に、X線回折を各部位ごとに実施した。その結果、水酸化カルシウム、カルシウム・アルミネート水和物および骨材中に含まれている鉱物のみが認められ、エトリンガイトやフリーデル氏塩などは認められなかった。また、海上大気部でも中性化によって生じる炭酸カルシウムは認められなかった。水酸化カルシウムはすべての部位で認められ、特に、コンクリート表面での水酸化カルシウムの溶脱、劣化につながる徴候は認められなかった。

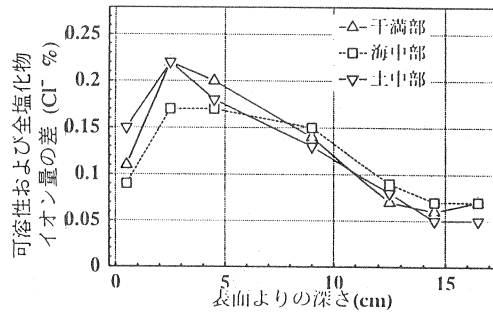


図-9 可溶性塩化物イオン量と全塩化物イオン量との差

## 5. まとめ

以上、物理的、化学的な試験結果から判断すると、海洋環境下に長期間敷設されていたにもかかわらず、本PC杭は比較的健全な状態が保たれており、耐久性に富んだPC部材であると思われる。したがって、海洋環境下でのPC構造物の適用にあたっては、部材中のウォータージェット用鋼管等については耐腐食性対策(グラウト注入等)を施すとともに、PC鋼材のかぶり厚を現行の7.0cmを確保すればPC部材の耐久性の向上をはかることが十分可能と考えられた。

表-2 塩化物イオンの透過性評価基準

電流量 (クーロン)	塩化物イオン透過性
4000～	High
2000～4000	Moderate
◎ 1000～2000	Low
100～1000	Very low
～100	Negligible

## 6. 参考文献

- [1] 福手ほか：海洋環境に20年間暴露されたコンクリートの耐久性に関する研究、土木学会論文集 No. 442
- [2] 守分ほか：70年以上経過した鉄筋コンクリート構造物の干満帯および海中部における耐久性、コンクリート工学年次論文報告集 VOL. 19, No. 1
- [3] 笹谷ほか：急速試験法(AASHTO T277-83)による各種コンクリートの塩化物イオン透過性の評価、土木学会論文集 No. 564
- [4] 山田ほか：塩害環境下におけるコンクリート中への塩化物イオンの浸透に関する解析的研究、日本建築学会構造系論文集 第501号