論文　亜熱帯海洋環境下におけるプレキャストコンクリート桟橋の調査

外岡　政則*1・迫田　惠三*2・山根　千学*3・竹田　宣典*4

要旨：本研究は，亜熱帯の海洋環境下に建設されてから25年間経過したプレキャストコンクリート製桟橋の耐久性に関する報告である。試験はこの構造物の床版および梁部材からコア供試体を採取し，コンクリートの圧縮強度，静弾性係数，中性化深さ，塩分含有量および鉄筋の腐食などについて行った。その結果，コンクリートの圧縮強度は，建設時の配合強度の約84%が得られた。中性化はほとんど見られず，塩分含有量は，コンクリートの表面からの深さに関係なく鉄筋を腐食させるに十分な値が得られた。鉄筋の腐食は干満作用を受ける床版部材よりスプラッシュを受ける床版部材の方が大きい値が得られた。

キーワード：プレキャストコンクリート，亜熱帯，圧縮強度，塩分含有量，鉄筋の腐食

1. はじめに

海洋環境下での鉄筋コンクリートは，塩化物による鉄筋の腐食や，海水の化学的，物理的作用により劣化し，その耐久性を著しく損ねると言われている。また，その劣化の程度は，構造物が設置された周囲の環境によって異なることが考えられる。特に環境条件のうち，亜熱帯と寒冷地域ではコンクリートの劣化に及ぼすメカニズムが異なっており，鉄筋コンクリート構造物の耐久性を論じる場合には気象条件を考慮することが大切である。これまで，寒冷地域や亜熱帯地域などの各種の海洋環境下においてコンクリート供試体の暴露試験や，既設鉄筋コンクリート構造物の耐久性調査が行われ，数多くの知見が報告されている[1),2),3),4)]。しかしながら，これまでの既設構造物の耐久性報告のほとんどが，現場打設コンクリート構造物であり，プレキャスト製鉄筋コンクリート構造物の調査報告は極めて少ない。

本研究は，亜熱帯の海洋環境下に建設され25年間経過した，プレキャスト鉄筋コンクリート桟橋からコアを採取して，圧縮強度や中性化深さ，塩分含有量，鉄筋の腐食などについて調査した報告である。

2. 実験概要

2.1　構造物の概要

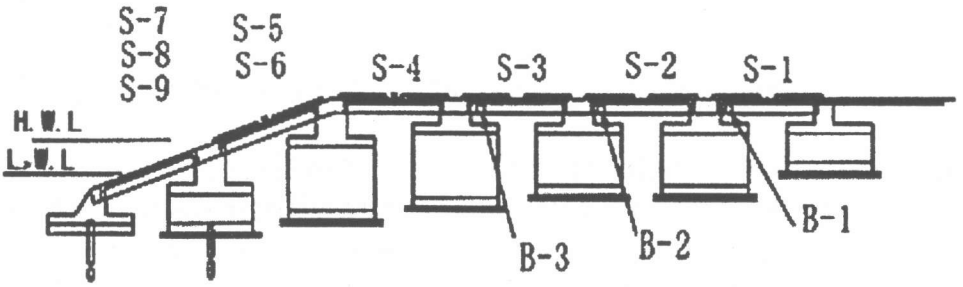
調査した構造物の概要を**表－1**，**図－1**，2に示す。桟橋の全長は47.6m，幅4.6m，床版の厚さは20cmである。構造物の先端部15.6mは斜路となっており，そのうち7.8mは干満作用を受ける。この構造物は1975年に建設され25年が経過したが，特に梁部材のかぶりのコンクリートが剥落し，鉄筋の損傷が激しいため，建て替えのために2000年10月に解体された。

施工時のコンクリートの設計基準強度は，23.5MPaである。使用された鉄筋はSD295A(D10, D13)，SD345（D16～D25）である。この桟橋は，床版および梁ともプレキャスト製で，沖縄県石垣島の工場で製作され，細骨材には海砂が使用されている。

表－1　構造物の概要

構造物の種類	プレキャスト鉄筋コンクリート桟橋
建設年	1975年
構造物の全長	47.6m
構造物の幅	4.6m
設計基準強度	23.5MPa
鉄筋の種類	SD295A（D10，D13）・SD345（D16～D25）
構造物の設置場所	沖縄県八重山郡竹富町網取（西表島）

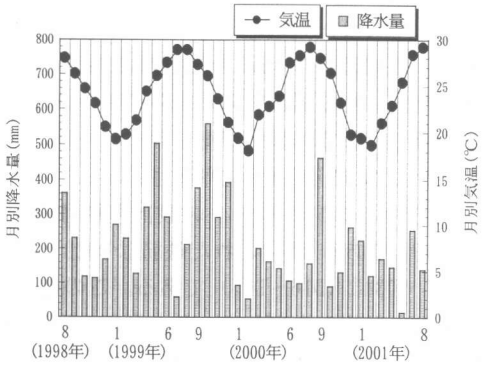
*1　東海大学大学院　海洋学研究科海洋工学専攻　（正会員）
*2　東海大学教授　海洋学部海洋土木工学科　工博　（正会員）
*3　東海大学大学院　海洋学研究科海洋工学専攻
*4　（株）大林組技術研究所　土木材料研究室　工博　（正会員）



図－1　構造物の断面図とサンプリング位置

2.2　構造物周辺の気象環境

この構造物は，沖縄県の西表島に位置し，気候的には亜熱帯に属す。図－3 に過去 3 年間の月別平均気温と降水量を示す。年間平均気温は 24.2℃，年間平均降水量は 2400mm，海水の平均水温は 25.7℃となっている。



図－3　月別平均気温と降水量

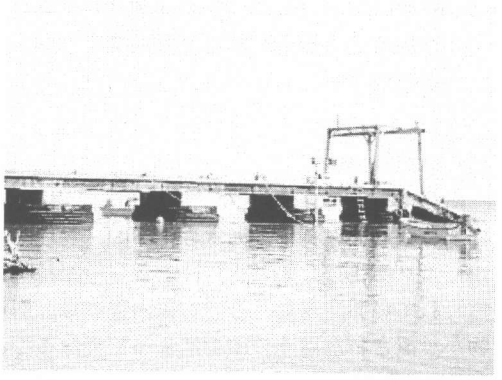
2.3　試験方法

(1) 圧縮強度：図－1 に示す供試体番号においてシュミットテストハンマーによる圧縮強度と，ボーリングマシンにより直径 10cm のコア供試体を採取し，圧縮強度を求めた。

(2) 中性化深さ：コア供試体を割裂し，その断面にフェノールフタレイン 1%エタノール溶液を噴霧して求めた。

(3) 塩分含有量：コア供試体を 2cm ごとにカッターで切断し，その供試体を微粉砕して電位差滴定法によって全塩分量を求めた。

(4) 鉄筋の腐食：コア供試体から鉄筋を取り出し，腐食部分をスケッチし画像処理によって腐食面積率を求めた。

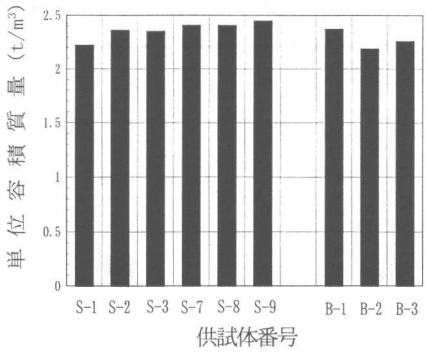


図－2　調査構造物

3　実験結果および考察

3.1　単位容積質量

図－4 にコア供試体の単位容積質量試験の結果を示す。海洋環境下でのコンクリートは，海水中の硫酸塩の作用によるエトリンガイトの生成に起因する膨張や，各種の塩類の浸透によるセメント水和物の溶出によって単位容積質量が増加することが考えられる。いずれの供試体でも，単位容積質量からは特に顕著な劣化は見られなかった。供試体番号の S-7～9 は干満帯を表しているが，他の部分より採取した供試体より単位容積質量が大きくなっている。その原因としては各種塩類の浸透による膨張が考えられる。



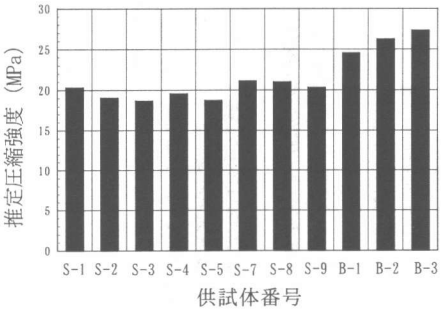
図－4　単位容積質量

3.2　圧縮強度

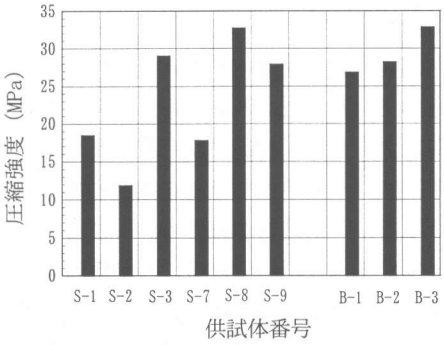
図－5 にシュミットテストハンマーによる推定圧縮強度を示す。材齢 8 年以上の長期材齢のコンクリート構造物では材齢係数を考慮する必要性があるとされている [5]。ほとんどの供試体において材齢係数の補正を行わないと推定圧縮強度は 30MPa 以上を示したが，材齢係数 0.63 を考慮した結果，推定圧縮強度は 20MPa 以上となった。

コア供試体による圧縮強度の結果を**図－6** に示した。供試体番号S-1～3 は陸側に近い床版部材の強度，S-7～9 は干満作用を受ける床版部材の強度，B-1～3 は梁部材の強度を表している。コア供試体の外観では鉄筋の腐食による特に顕著なひび割れは観察されなかった。この桟橋の建設時におけるコンクリートの設計基準強度は，23.5MPa とわかっているのでこの値に 1.25 倍した配合強度 29.4MPa と 25 年経過した強度を比較すると床版部材のコア試料S-1～3 では約 48～95%，干満作用を受けるS-7～9 は約 54～112%，梁部材のコア試料B-1～3 では約 92～112%の強度が得られた。環境的には干満作用による乾湿の繰り返しやエトリンガイトの生成による膨張および海水の浸透による $Ca(OH)_2$ の溶出を受けるコア試料S-7～9 の強度が低くなると考えられる。この原因については**図－14** の鉄筋の腐食面積率の結果からも類推されるように供試体番号S-7～9 の鉄筋の腐食量が他の床版部材より少ないことが考えられる。すなわち，干満作用により乾湿の作用を受けると言ってもその影響は表面の一部に過ぎないことが類推される。

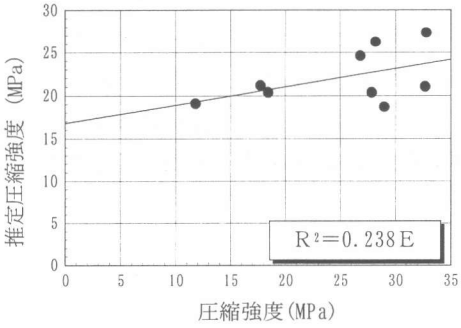
図－7 にシュミットテストハンマーによる推定圧縮強度とコア圧縮強度の関係を示す。両者の関係は相関係数 0.49 と低い値が得られた。このことは，海洋環境下で長期経過したコンクリート構造物の圧縮強度を表面硬度法で推定することは，鉄筋の腐食によるひび割れなどの影響が大きいことから，かなり困難であることを示唆するものと思われる。



図－5　シュミットテストハンマーによる推定圧縮強度



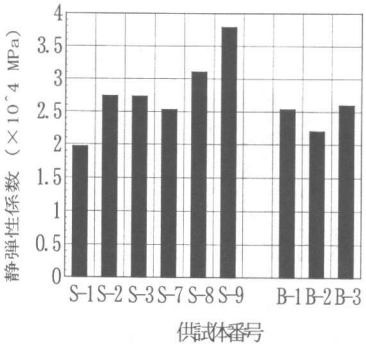
図－6　コア圧縮強度



図－7　コア圧縮強度と推定圧縮強度の関係

3.3　静弾性係数

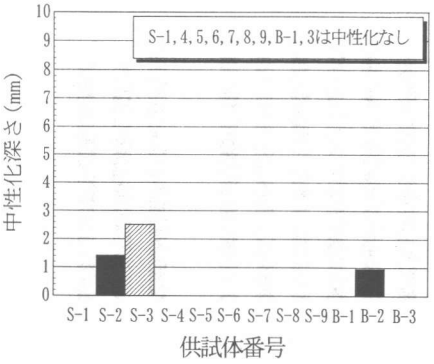
図－8 は静弾性係数の結果を示している。コンクリート中の鉄筋の腐食や海水の化学的作用によってコンクリートが劣化すると，静弾性係数が低下するものと考えられる。圧縮強度と同様に干満作用を受ける床版部材の静弾性係数は，他の部分の値より大きくなっている。これは，干満作用を受ける床版部材の鉄筋の腐食が他の部材のものより小さいことが影響しているものと考えられる。



図－8　静弾性係数

3.4　中性化深さ

中性化深さの結果を**図－9** に示す。建設後 25 年を経過しているので中性化が進んでいるものと予想したが，中性化はほとんど見られなかった。岸谷の式[6]から中性化深さを推定すると約 7.5mm となるが，構造物が屋外であることと構造物の一部が干満作用を受けることが原因と考えられる。コンクリート構造物が湿っている場合の中性化の進行は，既存の構造物の調査や促進実験の結果から遅いことが明らかにされている[6)7)]。この構造物がおかれている地域の降水量が全国の平均雨量より多いことから，雨水がコンクリート内に浸透し，$Ca(OH)_2$ がコンクリート内部から表層に移動したことが原因と考えられる。

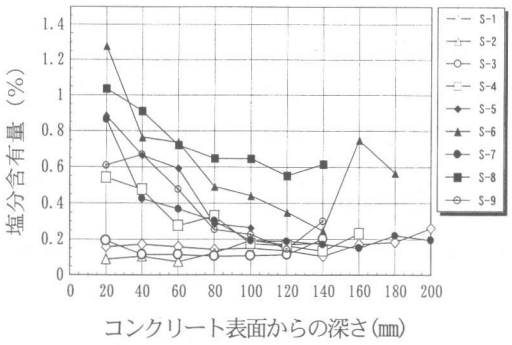


図－9　中性化深さ

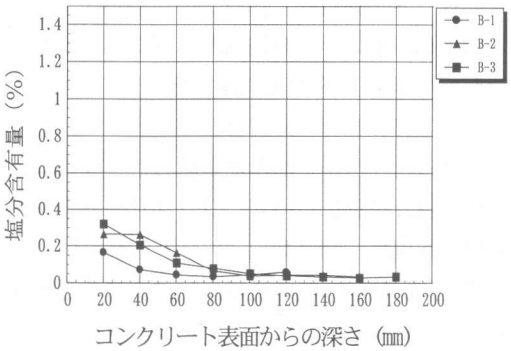
3.5　塩分含有量

塩分含有量の結果を**図－10～11** に示す。床版および梁のコア採取は，床版が上面から梁は側面から行った。一般にコンクリート中の塩分含有量は，コンクリートの表層から深くなるにつれて小さくなる傾向が見られる。しかしながら，海洋環境下での床版部材ではこれと異なった塩分の分布を示すことがある。この桟橋においても陸側に近い供試体番号 S-1～3 の塩分含有量は，コンクリート表面の深さに関係なく一様な塩分含有量を示している。これは床版の厚さが 20cm であることから，床版上部のみならず下部からも塩分浸透があったものと考えられる。これに対して，干満作用を受ける供試体番号 S-7～9 では全体的に塩分が多く，また，コンクリート内部までかなりの塩分を含有していることがわかる。床版部材においては，コンクリートの深さに関係なく鉄筋腐食の限界値といわれている 0.05％以上の塩分量が含まれている。他方，梁部材ではコンクリート表面部分での塩分が多く，表層から 4cm の深さでは鉄筋を腐食させるに十分な塩分量を含有している。

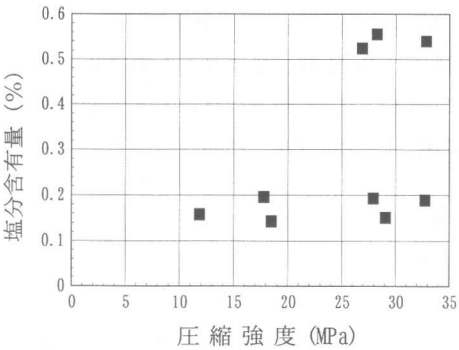
図－12 は各供試体の平均塩分含有量と圧縮強度の関係を示す。一般に圧縮強度が大きいとコンクリートは緻密であり塩分の内部への浸透を妨げることが知られている。この桟橋においては，干満作用を受ける床版部材の圧縮強度と塩分含有量が大きくなっているので，両者の相関は低いものとなった。



図－10　床版部材の塩分含有量



図－11　梁部材の塩分含有量

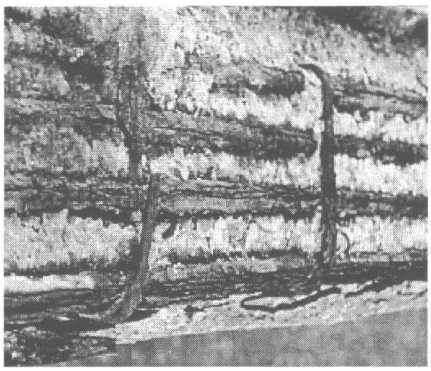


図－12　圧縮強度と塩分含有量の関係

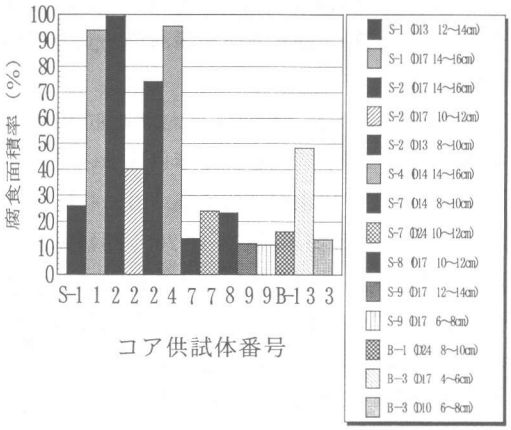
3.6　鉄筋の腐食

図－13 に鉄筋の腐食状況を示す。ほとんどの梁部材においては，図に示すように鉄筋の腐食によるとみなされるかぶり部のコンクリートが剥落している。鉄筋は浮き錆や断面欠損を生じており，鉄筋の腐食による劣化度はVという値が得られた[8]。

鉄筋の腐食面積率の結果を図－14 に示した。全体的には，干満作用を受ける床版部材S-7～9より陸側に近い床版部材S-1～4 の腐食面積率が大きい。これについては次のようなことが原因と考えられる。干満作用を受ける床版部材S-7～9 は，乾湿の繰り返し作用を受けるものの，その影響は表層部分に限定され，内部は常時海水を含み酸素を透過しにくくさせたことが原因だと考えられる。これに対して，陸側に近い床版部材S-1～4 での塩分含有量は干満作用を受ける床版部材に比較して少ないものの，乾燥による塩分浸透と酸素の拡散が内部まで進んだことが腐食量を増大させた原因と考えられる。



図－13　鉄筋の腐食状況



図－14　鉄筋の腐食面積率

4 まとめ

亜熱帯の海洋環境下に建設され 25 年経過したプレキャスト鉄筋コンクリート桟橋の調査の結果，以下のような結論が得られた。

(1) 25 年経過したコンクリートの圧縮強度と建設時の配合強度を比較すると，前者は後者の約 84％の強度を示した。また，干満作用を受ける床版部材の圧縮強度は，他の床版部材の強度より大きい。

(2) 建設後 25 年経過しているので，ある程度の中性化を予想したが，炭酸化は降雨や干満作用の影響によって，ほとんど見られなかった。

(3) 陸側に近い床版部分では，コンクリートの深さに関係なくほぼ一定量の塩分量であり，かつ，鉄筋腐食の限界値であるといわれる 0.05％以上の量であった。これに対し，干満作用を受ける床版部材では表層のみならず内部まで約 0.2％の塩分量が得られた。

(4) 梁部材のかぶりにあたるコンクリートは鉄筋の腐食によりほとんどが剥落していた。また，鉄筋は浮き錆や断面欠損を生じているものが多い。陸側に近い床版部材が干満作用を受ける部材より鉄筋の腐食量が大きい。

参考文献

1) 迫田惠三：鉄筋コンクリート桟橋の劣化度調査，土木学会第 47 回年次学術講演集，pp404-405，1992

2) 大城武ほか：塩害環境下における RC 構造物の暴露試験について（暴露 7 年目について）コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14-1，1992

3) 福手勤ほか：海洋環境下に 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， Vol.16，No.442，pp.43-52，1992

4) 弥勒院輝明ほか：コンクリートの凍害に関する暴露実験，第 8 回コンクリート工学年次講演論文集，pp.189-192，1986

5) 柏忠二：コンクリートの非破壊試験法，pp.24-25，1980

6) 樫野紀元ほか：セメント・コンクリート化学とその応用，セメント協会，pp.47-52，1987

7) 佐伯竜彦ほか：降雨により水分の供給を受けるコンクリートの中性化，コンクリート工学年次論文報告書，Vol.13-1，1991

8) 小林一輔ほか：鉄筋腐食の診断，森北出版株式会社，pp.157

9) 大即信明ほか：10 年間酒田および鹿児島湾に暴露したコンクリート梁の性状，セメント・コンクリート，No.485，1987

10) 木村恵雄ほか：耐海水性に関するコンクリートの 5 年および 10 年試験，セメント・コンクリート，No.289，pp.10-17

11) 太田利隆ほか：海岸に暴露したコンクリートへの塩分浸透について，コンクリート工学年次論文報告集，No.13-1，pp.589-594，1991

12) 竹田宣典ほか：海洋暴露試験に基づく各種コンクリートの塩分浸透量の推定，コンクリート工学年次論文報告書，No.13-1，1991

13) 具志幸晶ほか：コンクリート中の塩分量分布とその異動に関する研究，セメント・コンクリート，No.449，pp.24-31，1974

14) 大城武ほか：鉄筋コンクリート構造物の暴露試験について，第 8 回コンクリート工学年次講演論文集，pp.193-196，1986