

報告 鉄筋コンクリート貨物船「武智丸」に関する調査報告

森 弥広*1・宇野祐一*2・小林一輔*3

要旨：太平洋戦争末期に建造され、戦後は瀬戸内海の漁港において防波堤の役割を果たしている、2隻の鉄筋コンクリート貨物船についての調査結果を報告する。船体から採取したコアについて、中性化、圧縮強度、塩化物の浸透状況、鉄筋腐食などを調べた。その結果、高濃度の塩化物を含んでいる鉄筋コンクリート部材であっても、コンクリートの組織が密実であれば海洋環境下においても、優れた耐久性を示すことを確認した。

キーワード：鉄筋コンクリート船，耐久性，塩化物の浸透，中性化

1. 概要

太平洋戦争末期に建造された2隻の鉄筋コンクリート船が、広島県の瀬戸内海に面する漁港の防波堤として使用されている（写真-1）。建造後、50数年を経た現在でも船体の劣化損傷は少ない。これらの鉄筋コンクリート船は、資材、労働力ともに劣悪な条件下で建造されたにも拘らず、干満差の大きい腐食環境下において優れた耐久性を発揮している。この原因を解明できれば、海洋環境に建設されるコンクリート構造物の防食設計にも反映させることができる筈である。本調査は、このような目的で実施した。



写真 1 安浦漁港における鉄筋コンクリート船

2. 鉄筋コンクリート船「武智丸」の建造の経緯と履歴

昭和17年末、鋼材の生産不足に伴う造船計画の縮減を余儀なくされた海軍当局は、コンクリート船の建造によって少しでも船腹の増強を図ろうとした。コンクリート船のメリットは、1) 鋼材の使用量が鋼船に比較して総トン当たりで約40%、重量トン当たりで約65%程度少ないこと、2) 製造に技術と設備を要する厚鋼板を殆ど必要とせず、主に小型棒鋼で足りることから、厚板工場が戦災を受けても影響が少なく、且つ船舶建造と材料面で競合しないこと、3) 機関、艀装品、部品などは、在来船のものを流用できること、などであった。

艦船の喪失が造船量の2倍となり、これに追い打ちをかけるように鉄不足が深刻な昭和19年、当時の鋼船のE型規格船とほぼ同じ仕様の鉄筋コンクリート貨物船を建造することにした。総トン数800トン、全長64.3m、幅10m、深さ6m(満載吃水5m)、載貨重量940トン、定格出力750馬力ディーゼル機関、航海速度9.5ノットという要目で、主として日本近海の海軍用石炭輸送を目的とした。

*1 千葉工業大学 工学部土木工学科助教授 工博(正会員)

*2 ショーボンド建設(株) 事業本部土木部部長 工博(正会員)

*3 千葉工業大学 工学部土木工学科非常勤教授 工博(名誉会員)

昭和 19 年から 20 年にかけて 3 隻が建造され、それぞれ、第一武智丸～第三武智丸と命名された。呉海軍工廠に配属された第一武智丸は瀬戸内海を東は大阪から西は八幡、若松まで約 1 年間にわたって石炭などの物資を輸送した。航行性は安定していた。コンクリートが重いという特徴が発揮され、空荷のときも鋼船のように吃水が上がらず、シケのときも揺れは少なかった。鉄筋コンクリート船は以外に強かった。当時、瀬戸内海一帯には B29 爆撃機によって磁気機雷が投下敷設されており、多くの鋼船が触雷して瞬時に爆発・沈没した。第二武智丸の場合、触雷 3 回、機銃掃射 1 回を受けたが、ドッグ入りすることもなく数日間の沖修理によって直ちに就航した。神戸港内で鋼船に追突されたとき沈んだのは鋼船の方であった。

昭和 20 年 9 月 17 日、四国・中国地方を枕崎台風が襲った。犠牲者は死者・行方不明者を合わせて 3,756 人に達した。安浦漁港には防波堤が無く、係留されていた漁船は台風の度に被害に遭っていたが、このときも大きい被害を受けた。昭和 22 年、安浦漁業会は県に防波堤設置を陳情した。しかし、調査の結果、安浦漁港の海底は粘土質で軟弱であり、当時の土木技術では防波堤の設置が困難であることが判明した。

代案として浮上したのが、それぞれ呉と大阪に係留されていた鉄筋コンクリート船、第一武智丸と第二武智丸の活用であった。昭和 24 年度に水産省の補助を得て 800 万円の事業費で基礎工事が開始され、翌 25 年 2 月中旬の朝、満潮時を待って据付工事が行われた。基礎工事と据付は以下のようにして行われた。表土を浚渫して粗朶沈床(0.9m)を敷き、その上に置換砂(1.6m)を敷き均して粗朶沈床の安定を図り、その上に 2 隻の武智丸の船尾同士を接して沈設した。また 2 隻の船体間、船体の両側には船体安定用の捨石が施工されている。鉄筋コンクリート船防波堤が設置されて以降、安浦漁港では台風の被害が少なくなった。太平洋戦争末期に貨物船として活躍した 2 隻の鉄筋コンクリート

船は、戦後は防波堤として 2 度目の役割を果たしているのである。

3. 「武智丸」の調査結果

3.1 調査の概要

防波堤となった 2 隻の武智丸が設置された安浦漁港は干満の潮位差が 5 m に達するので、干潮時には船底が露出するような状態となり、満潮時には海水が甲板のレベルまで達する。このとき、海水は船体内部にまで侵入してくるので、船体を構成する鉄筋コンクリート部材は甲板から上部を除いて海水による乾湿繰り返し作用を受けることになる。瀬戸内海に面しており、年間を通じて海水飛沫の影響は比較的少ない。船体の断面幅は船側の吃水線以上が 12 cm で、それ以下は 13～18cm と厚みを増し、船底部では 25 cm 程度となる。船首の部分は衝突による損傷防止の目的で鋼板を張り付けている。武智丸の設計図が残されていないので、鉄筋の配置は不明である。

本調査では、船体の吃水線上部の船首部分(第一武智丸)と後部船室部分(第一武智丸および第二武智丸)の 3ヶ所からコアを採取し、圧縮強度、引張強度、弾性係数、塩化物の浸透状況、中性化、酸素拡散係数などを測定した。コアは、船の内側から外側に向かって水平方向に貫通して採取した(写真-2)。



写真 - 2 コア供試体の採取状況

塩化物の浸透状況や中性化の測定は、1本のコアについて、海に面する外側と内側からの両方向について行った。さらに、コア採取の際に切り取った鉄筋(丸鋼)の腐食状況を観察した。コアの寸法は直径約80mmである。船尾に近い部分の船側下部の鉄筋は、縦方向に直径14mm、横方向に直径10mmの鉄筋が、それぞれ約15cmのピッチで部材断面中心部に配置されていた。かぶりは50~60mmであった。内部の鉄筋に腐食の傾向は殆ど認められなかった。コンクリート中には貝殻が認められた。コアによっては小規模の空隙が存在したが、総じてコンクリートは良く締め固められており、ジャンカなどは認められなかった。なお、外側表面には黒色の付着物が点状に存在していた。

3.2 コンクリートの品質

第一武智丸の船室部分から採取した3本のコアについて測定した圧縮強度と弾性係数の平均値は、それぞれ34.6N/mm²および34.3kN/mm²、引張強度は2.64N/mm²であった。資料¹⁾によれば、“コンクリートの配合は容積比で1:1.5:3(セメント:砂:砂利)、目標とする材齢28日圧縮強度を300kg/cm²とした”とある。一般の鉄筋コンクリートの標準配合は、1:2:4配合であった。船舶用ということで特別仕様のコンクリートを用いたのである。

以上の試験結果は、58年を経過した現在も製造時の品質が保持されていることを示している。資料²⁾によれば、セメントは大阪窯業セメント会社の普通ポルトランドセメント、粗骨材には揖保川下流の砂利(20mmふるい通過)が使用されたようである。砂利の使用はコアによって確認することができた。細骨材は貝殻の存在から海砂が使用された可能性が高い。

3.3 中性化深さ

図-1に中性化深さを示す。海に面する外側表面からは数mm程度であったのに対して、内側からは20mm程度で、同じ断面でありながら中性化の進行には著しい差があった。

なお、供試体No.3及びNo.4は、コア採取作業中に中央の鉄筋部分で破断し、破断面の鉄筋は腐食しており、他の供試体とは異なる様相を呈していた(No.4供試体の外側部分は、海中に没し測定が不能であった)。

水セメント比を50%と仮定し、浜田式を用いて推定した中性化深さは21mmで、内側の中性化深さは、この推定値に近い。しかし、外側からの中性化深さは、この値の約1/10程度に止まる。この理由については、後で考察するように塗装の影響が考えられる。

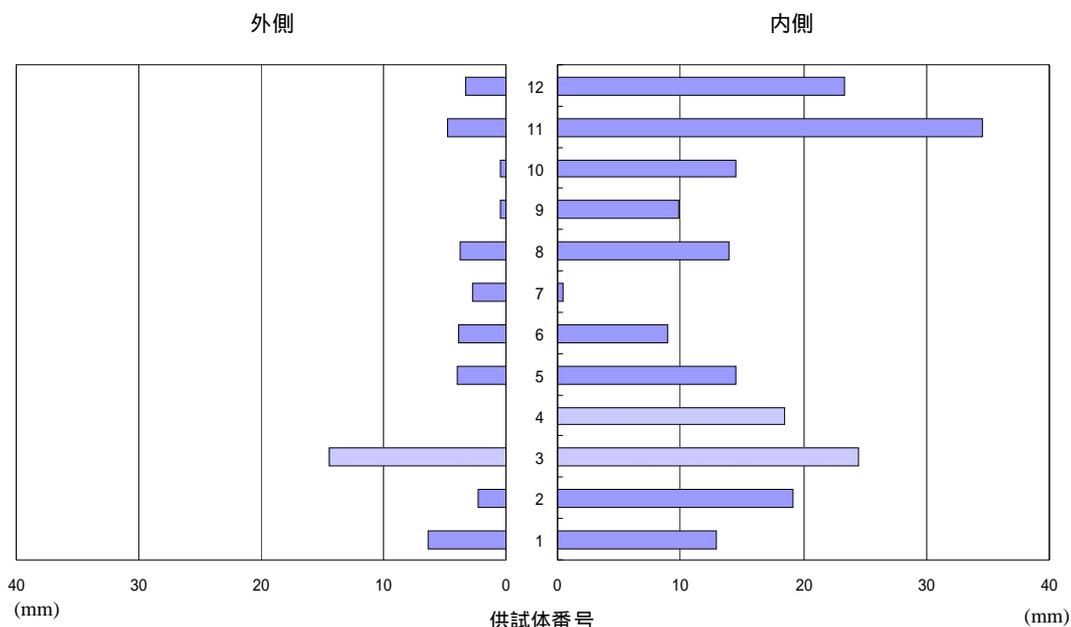


図-1 中性化深さ

3.4 塩化物の浸透と物質移動

図 - 2 は、第一武智丸から採取した No.8 のコアについて、海に面する外側から内側にかけてのコンクリート中の塩分分布を示したものである。塩分の分析は、「JCI-SC4「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」に準拠して行った。この結果を見ると、コンクリートは打ち込み当初から 2.5kg/m^3 程度の塩化物イオンを含んでいたことが分かる。この値は現行の JISA5308「レディーミクストコンクリート」の規定値である 0.3kg/m^3 の 8 倍に相当する値である。

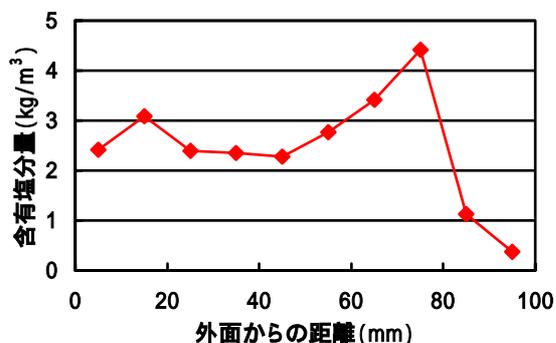


図 - 2 コンクリート中の塩分濃度

全く除塩しない海砂（表面水率 10%）を 1000kg/m^3 使用したとしても、コンクリート中の塩化物イオン量は約 2kg/m^3 である。このような多量の塩分を含む海砂が使用された原因として考えられるのが、武智丸が建造されたドックの立地条件である。ドックは兵庫県高砂市の廃塩田を素掘りしてつくられた。

コンクリート中の高濃度の塩分はこの塩田砂の使用によるものと思われる。

この図を見ると、海に面する外側からの塩分浸透の傾向は明確ではない。その理由は後で述べるように塗装の影響によるものと思われる。内側では炭酸化の進行に伴う含有塩分の内部への拡散による濃縮現象が生じている³⁾。

図 - 3~8 は、No.8 のコアについて EPMA による各元素の面分析結果を、それぞれカラーマッピング像によって示したものである（各図中において、明るい部分が濃度の高いことを示している）。海に面する外側表面（上部）から内部（下部）への各元素の分布状況を示した図 - 3~4 から、炭酸化による物質移動の傾向が認められる。これは塗装材の変化に伴い、進行した現象であろう。

内側表面（上部）から内部（下部）への各元素の分布状況を示した図 - 5~8 からは炭酸化による物質移動が顕著に認められ、図 - 2 における塩化物の濃縮現象と対応している。

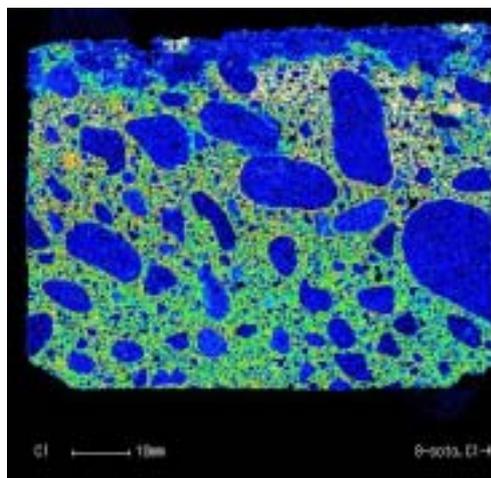


図 - 3 EPMA 面分析による塩素の分布
(外側)

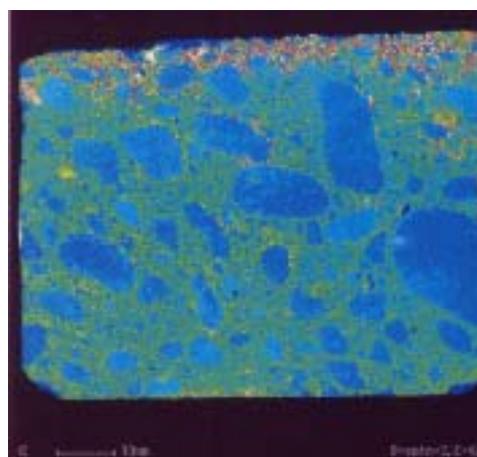


図 - 4 EPMA 面分析による炭素の分布
(外側)

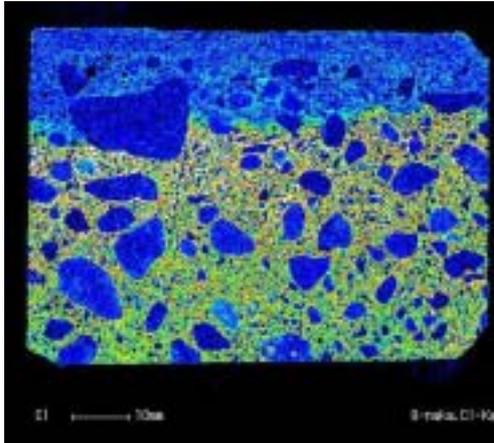


図 - 5 EPMA 面分析による塩素の分布
(内側)

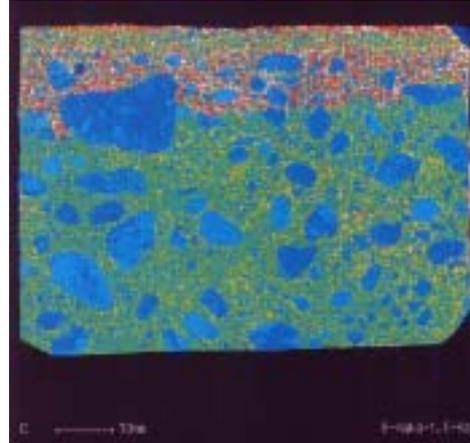


図 - 6 EPMA 面分析による炭素の分布
(内側)

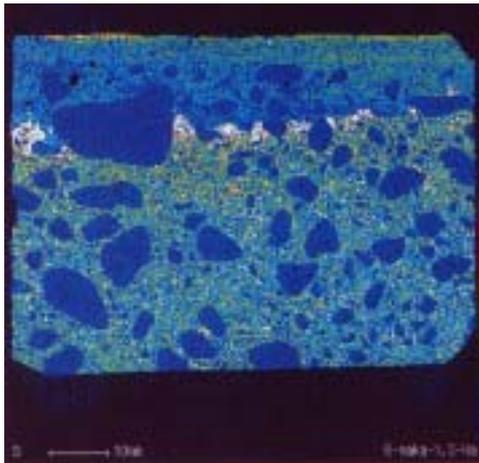


図 - 7 EPMA 面分析による硫黄の分布
(内側)

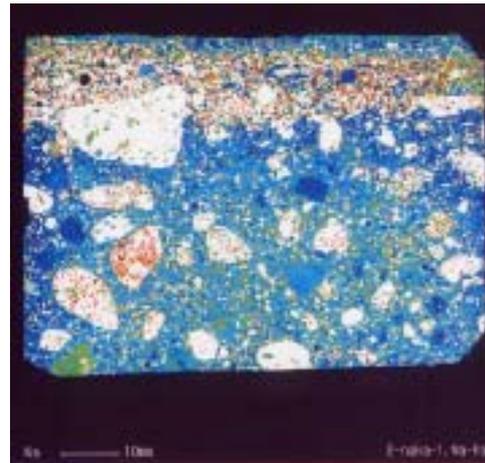


図 - 8 EPMA 面分析による Na の分布
(内側)

3.5 酸素拡散係数

JCI-DD5「酸素の拡散係数試験方法(案)」に準じて、飽水率 0%の状態での測定を行った結果、酸素拡散係数 D_n は 1.6×10^{-4} (cm²/s) となった。この値は、水セメント比が 40~50% のコンクリートについて 28 日間標準養生を行った試験体を飽水率 0% で測定した場合の酸素拡散係数の値⁴⁾ よりも一桁小さい。主な理由としては、長期にわたる水和の進行に伴うセメント硬化体組織の緻密化を挙げることができる。

4. 「武智丸」の耐久性に関する考察

今回の調査範囲内で明らかになった点は、
1) 極めて高濃度の塩分を含むコンクリートが使用されていたが、内部の鉄筋には腐食が殆ど認められなかった
2) 外部からの塩分浸透が殆ど認められなかった
3) 海に面する外側と内側で中性化の進行に著しい差があり、外側では殆ど中性化が進行していなかった、などである。

一方、船体の外側表面に黒っぽい物質が付着していた。これを掻きとって FTIR 分析 (KBr 錠剤法) を行ったところ、明らかに有機物と思われる物質が検出された。防水を兼ねた塗装材としてアスファルトが使用された可能性が高い。内側では、第一武智丸の船室部分において数mm厚のモルタル塗装が行われていたが、その他の箇所では塗装の形跡は見当たらない。2) と 3) の現象は、船体の塗装材の存在によって説明できる。この塗装材は殆ど痕跡程度の状態にまで劣化していたが、長期にわたって船体外側表面からの腐食因子の進入を阻止する役割を果たしていたものと考えられる。1) の現象に関しては、鉄筋のかぶり大きいこと、酸素拡散係数の値が小さい密実な組織のコンクリートであること、の 2 点を指摘したい。

5. まとめ

本調査を通じて、高濃度の塩化物を含んでいる鉄筋コンクリート部材であっても、コンクリートの組織が十分に密実であれば、海風の作用を受ける環境下において優れた耐久性を示すことを確かめることができた。

また、このコンクリート船が建造された当時は、資材、労働力とも劣悪な条件下であったことを考えると、入念な施工と管理がいかに大切かを、示唆しているのではなかろうか。

最後に本調査に当たっては、広島県安浦町産業課の荒木俊一課長および前田建設工業(株)新規事業部の出頭圭三部長にご協力を頂いた、ここに深甚の謝意を表す。

参考文献

- 1) 小野塚一郎：戦時造船史，日本海事振興会，pp.551-556，1962
- 2) 苅山信行：運命を波にまかせて - 防波堤になった鉄筋コンクリート船・武智丸 - ，セメント・コンクリート，No.604，pp.36-43，1997.6
- 3) 小林一輔，白木亮司，河合研至：炭酸化によって引き起こされるコンクリート中の塩化物，硫黄化合物及びアルカリ化合物の移動と濃縮，コンクリート工学論文集，Vol.1，No2，1990
- 4) 耐久性診断研究委員会報告書，日本コンクリート工学協会，pp.29-36，1989.6