

V-14

海水中における鉄筋コンクリートの鉄筋腐食

室蘭工業大学 正員 尾崎 訓
 室蘭工業大学 正員 菅田紀之
 新日本製鉄㈱ 河内雄二

1. はじめに

約70年間海中にあった鉄筋コンクリートケーソン壁の鉄筋の腐食状況を調べたので報告する。このケーソンは北海道第一期拓殖計画に引き続き、第二期拓殖計画によって昭和の初め頃に竣工した浦河港の南防波堤ケーソンである。防波堤の外の海水を防波堤内に引き込むために、海面下約 3m 付近のケーソン壁を取り壊した際にその鉄筋コンクリート壁の一部を採取し、試験を実施した。

調査の中心は鉄筋の腐食状況を知ることにあつたが、腐食に関わるコンクリート中の塩分含有量、鉄筋を保護してきたコンクリートの中性化の程度、細孔構造、強度の他、生成物質等も調べた。その結果、コンクリートが海水中で十分な品質を維持していたので、高アルカリ環境下における鉄筋は主として塩化物イオンの存在による Magnetite 等の安定錆の存在にとどまり、腐食はさほど進展していなかった。

2. 採取試料

採取した試料は厚さ 23cm で一個の重量が約 90kg の鉄筋コンクリートの塊 3個である。

図-1のようにφ19 mm の鉄筋が 12cm のかぶりで 27cm 間隔に入り、これに直角にφ12 mm 鉄筋が 14cm のかぶりで 20 cm 間隔に入っていた。

3個の塊を A, B, C の記号を付けて取り扱い、これらの鉄筋コンクリートの塊を主鉄筋方向と平行にダイヤモンドカッターで A1, A2, A3, A4のように4分割した。

3. 鉄筋の腐食

鉄筋は重量が 200g 未満になるように配慮して、直径19mmの丸鋼を約 8 cm の長さに切断し、取り出した。

腐食状況を観察し、鉄筋重量を正確に量った後、鉄筋展開図を用いて腐食面積を求めた。

鉄筋表面は保護性の黒さびの均一腐食状態であったが、黄色や白色の部分的な赤錆も少し存在していた。

これらの鉄筋を10% クエン酸アンモニウム溶液に数日間浸漬して腐食生成物を除去し、

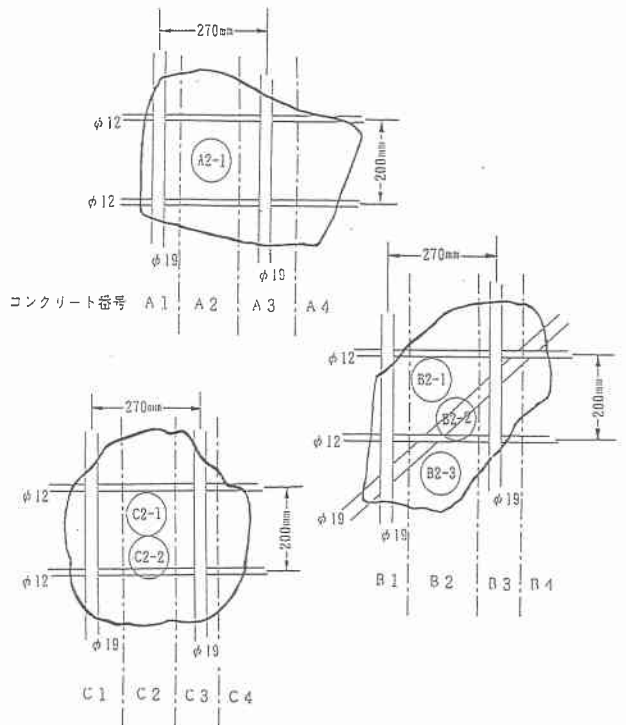


図-1 鉄筋およびコア採取状況

Steel Corrosion of Reinforcing Bars in Reinforced Concrete Submerged in the Sea
 by Shinobu OZAKI, Noriyuki SUGATA and Yuuji KAWAUCHI

重量測定を行い重量減少率を求めた。

これらの試験結果を表-1に示したが、これによれば、重量減少率は約1%、これから換算した腐食厚さは0.05mm程度であった。又、部分的な赤錆の腐食面積率は約15%であった。

鉄筋表面の腐食生成物を調べるためにX線回折法による定性分析を行なった。その結果を図-2に示す。保護性の黒錆の均一腐食は Fe_3O_4 (Magnetite)を主成分とする腐食生成物で、 FeO (Wustite)のほか $\alpha-Fe$ や $\alpha-FeO(OH)$ (Goethite)も存在していた。この様な黒錆の上に部分的に発生していた黄色い錆の主体は $\beta-FeO(OH)$ (Akaganeite)で、 $\alpha-FeO(OH)$ (Goethite)と共存していた。

図には示さなかったが、この錆を粉末にしてX線回折法で定性分析すると、 $\alpha-FeO(OH)$ (Goethite)のほか $\beta-FeO(OH)$ (Akaganeite)や Fe_3O_4 (Magnetite)も同定された。

このほか、白色の錆も存在し、 $\beta-FeO(OH)$ Akaganeite が同定されたが、粉末のX線では Fe_3O_4 (Magnetite)や FeO (Wustite)も存在する。

4. コンクリートの中性化と塩分含有量

コンクリートは中性化されておらず、フェノールフタレイン溶液による中性化深さは殆ど測定できなかった。そこで、微粉碎したコンクリートを50℃の温水で30分間振とうし、pH値を測定してみた。その結果は図-3のように壁の表側・裏側とも表面から5cm位迄の深さの範囲のpHが低くなっており、中性化の傾向が見られる。しかし、ケーソン壁の表面からのかぶり厚が13cm、裏側からのかぶり厚が8cmの鉄筋位置におけるpH値は12以上で、表面でも11以上のpH値を示しており、劣化に影響する程の中性化は進行していなかった。

一方、塩分含有量については、コアを深さ毎にスライスしたコンクリートを微粉碎し、これを試料として全塩分量を求めた。塩化物イオン含有量の試験結果を図-4に示す。

表-1 鉄筋の腐食試験結果

試料番号	重量減少率 (%)	腐食厚さ (mm)		腐食面積率 (%)
		重量から	計測から	
A-1 (19mm)	0.94	0.05	0.19	12.8
A-3 (19mm)	0.72	0.03	0.17	18.3
B-3 (19mm)	1.12	0.05	0.13	13.0
B-3 (12mm)	1.14	0.04	0.10	16.8

(腐食面積率には黒さびの面積は含んでいない)

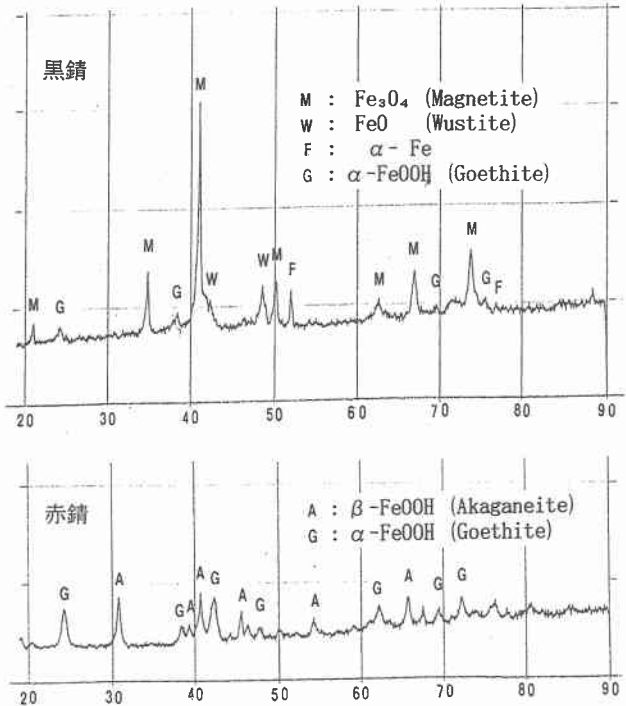


図-2 鉄筋錆のX線回折ピーク

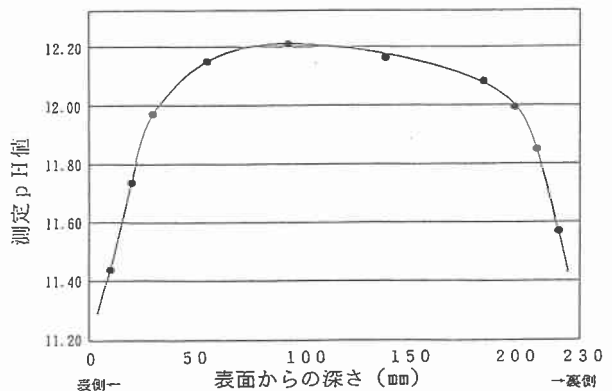


図-3 pH値の分布

壁の表側も裏側も表面付近の塩化物イオンはコンクリート重量の約 0.5% と大きく、壁の裏側からも海水が浸透したことが伺われ、深さ 5 cm 位から内部も 0.2~0.3% という高い値の一定値となっている。このことは、コンクリートの表面部に約 12 kg/m³ もの塩化物イオンが存在しており、内部でも 6 kg/m³ 程度含まれていることを意味する。

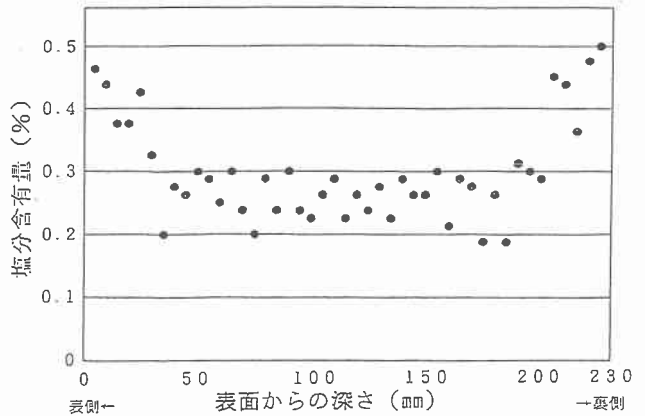


図-4 塩化物イオンの分布

5. コンクリートの強度と配合推定

壁の表面と直角に直径 99mm のコアを抜き、高さ 198 mm 程度に成型した供試体による圧縮強度の平均値は 356 kgf/cm² であり、配合は不明だが、約70年経過した現在でも十分な強度等を有している。

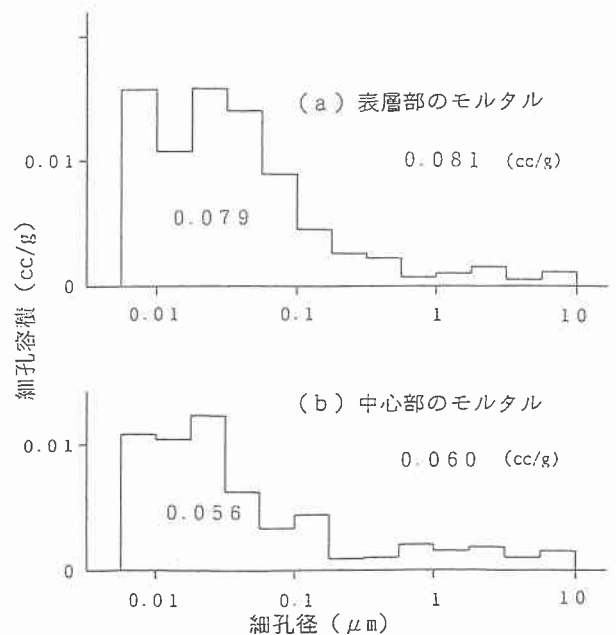
しかし、コンクリートの配合が不明なので、配合推定を行なった。推定方法としてはセメント協会コンクリート専門委員会報告 F-18 を参考にした。配合推定に必要なセメントの分析値としては、同時期に比較的近くで工事が行なわれた室蘭港の施工記録¹⁾ にある鉦津セメント分析表を参照し、石灰をCaO=50%、強熱減量 ig. loss=1.8% と仮定して利用した。

骨材の分析値には強熱減量 ig. loss=1.8%、不溶解残分 insol=95.4%、CaO=0.3% を使用した。その結果は、骨材の吸水率を 1% として単位骨材量が 1950 kg/m³、単位セメント量が 290 kg/m³、単位水量が 153 kg/m³、水セメント比が 52.5% と推定された。

なお、鉦津セメントが用いられたことは、熱分析の結果から見てほぼ間違いないものと思われる。

表-2 コンクリートの配合推定結果

試料番号		B2-2	C2-2	平均
単位量 kg/m ³	セメント	285	295	290
	水	149	156	153
	骨材	1964	1935	1950
水セメント比 (%)		52.2	52.8	52.5



6. 細孔径分布

試料のモルタルをコンクリートから慎重に取り出し、水銀ポロシメーターによる水銀圧入法にて細孔径を調べた。表層部と中心部のコンクリート中のモルタルの細孔径分布を図-5に示す。これを見ると中心部の全細孔量 0.060 cc/g に比べ表層部のモルタルの全細孔量の方が 0.081 cc/g と大きく、特に0.1

図-5 モルタル部の細孔径分布

μ m以下の細孔が多くなっている。これは水酸化カルシウムの溶出が原因と考えられるが、劣化を促進させるほどではない。

7. コンクリート空隙中の腐食生成物

壁の表層部及び中心部のコンクリート中からモルタル部分だけを取り出し、微粉碎したものを試料として粉末X線回折法による定性分析を行った。

図-6に示した結果から、ピークの大きな骨材成分を除いて判読すると、コンクリート壁の表層部では、Calsite や Ettringite が多く見られ、海水の影響をより受けたことが伺える。また、コンクリート壁の中心部では、Friedel's 塩や Portlandite のピークが顕著に見られる。

一方、電子顕微鏡で観察した結果でも、表層部、中心部共に Ettringite がモルタルの微細な空隙中に観察され、X線回折法による結果を確認することができた。

Ettringite は表層部では写真-1のように空隙の内側に向かって大きな結晶が発達し、中心部では写真を省略したが、外に向かって発達した結晶の塊が Friedel's塩らしき六角形柱状結晶と共に空隙を埋めていた。

8. おわりに

海中に設置された鉄筋コンクリート内の鉄筋の錆について、約70年間経過した場合の事例を報告し、このようなコンクリートの場合、鉄筋はさほど腐食していないことを示した。

この調査研究を実施するに当たり、北海道開発局室蘭開発建設部浦河港建設事務所、北見工業大学、日鉄セメント㈱の関係各位にご協力を頂きました。ここに記して深く感謝申し上げます。

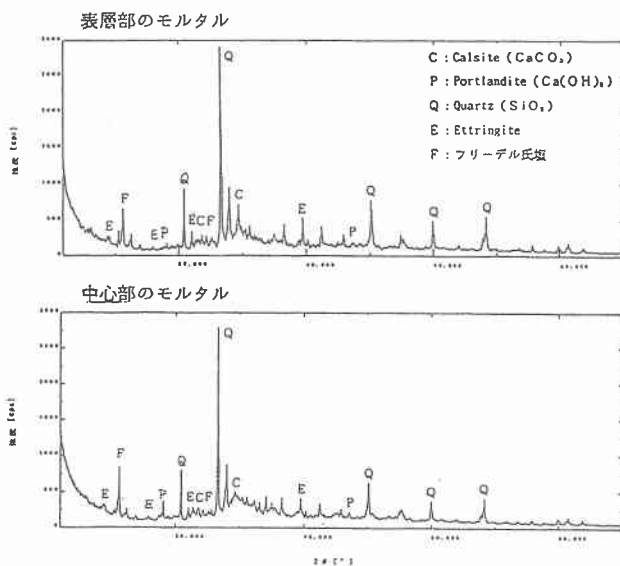


図-6 コンクリートのX線回折結果

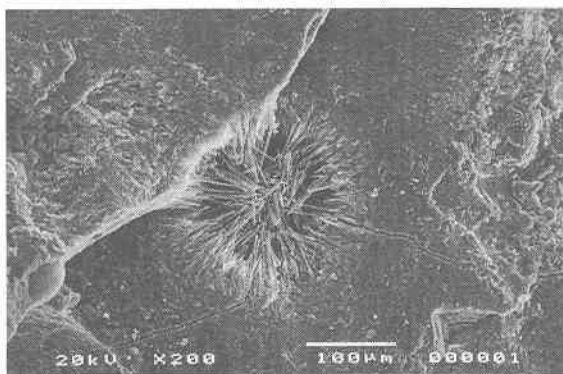


写真-1 コンクリート表層部の Ettringite

参考文献

- 1) 中村廉次：北海道港湾変遷史、1960年