

[50] 60年間海洋環境下にあったコンクリートについて

正会員 ○尾崎 詔 (室蘭工業大学工学部)
松谷正憲 (室蘭工業大学大学院)

1. はじめに

近年コンクリート構造物の劣化あるいは損傷が問題になり、多くの研究報告がなされているが、その中には長期にわたって使用された古いコンクリート構造物の健全度を調査した研究報告もある。これらの結果は、長期にわたる耐久性を知る上で重要な資料となるように思われる。

本研究は、このような視点から、60年間海水環境下にあった室蘭港北防波堤のコンクリートを入手できた機会に、コンクリートの強度や鉄筋の腐食状況を調べるとともに、配合推定、塩分含有量、中性化試験などを行って、長年の海洋環境における影響を調査した結果について発表する。

2. 室蘭港北防波堤

室蘭港北防波堤は、北海道開拓時代の第一期拓殖計画により、大正7年に起工された。¹⁾ 室蘭港の波浪は比較的静穏で、平均波高は約30cm、未超過確率99%の波高は1.6m程度である。防波堤は、鉄筋比0.33%程度の鉄筋コンクリートケーソンを主構造とする混成堤である。図-1のように、ケーソンの高さは7.9mで天端は基本水準面上0.3mの位置にあり、その上に厚さ1.3~2.7mの上部コンクリートが場所打ちされていた。ケーソン内部には中詰コンクリートが場所打ちされ、ケーソンの根固めには約27tonの重さの方塊コンクリートが基本水準面下-7.6mの位置に設置されていた。

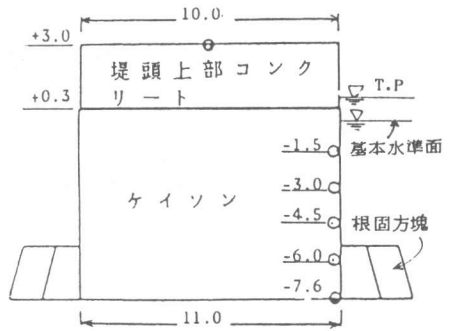


図-1 防波堤および試料採取位置

3. 採取したコンクリートの試料

室蘭港北防波堤から採取したコンクリートの試料は、ケーソン部コンクリートのコア6本と破砕塊5個、上部コンクリートのコア7本と破砕塊1個、根固め方塊コンクリートのコア15個、中詰コンクリートの破砕塊1個であった。ケーソン部コンクリートの破砕塊は図-1のように基本水準面下-1.5m、-3.0m、-4.5m、-6.0m、-7.5mの位置から採取した。

4. コンクリートの配合と使用材料

コンクリートの配合は、記録によると表-1の通りである。¹⁾ これらのコンクリートに用いられたセメントは日本製鋼所輪西製鉄工場製の鉋さいセメントで、比重2.85 (単位容積重量1023kg/m³) と知られている。この鉋さいセメントは、水さいの粉末に15~30%の普通ポルトランドセメントと適当の水酸化石灰を混合したもので、主成分は石灰50%、珪酸29%程度で、不溶解残分と強熱減量はそれぞれ1%程度であったらしい。広井博士の大英断によって明治35年に小樽港で初めて火山灰が使用されたが、室蘭港でも博士の指導によって洞爺付近の火山灰が用いられたようである。細骨材としては伊達市黄金付近の海砂が、粗骨材としては室蘭市増市海岸の砂利と砕石が使用されたらしい。

表-1 記録によるコンクリートの配合 (容積比)

試料	セメント	火山灰	砂	砂利・砕石	
ケイソンコンクリート	夏期製作	0.8	0.2	2.5	5.0
	冬期製作	1.0	0.1	2.2	5.0
中詰コンクリート	1.0	1.0	1.0	2.0	
	1.0	—	8.0	1.6	
根固め方塊コンクリート	1.0	1.0	5.0	1.0	

表-2 コンクリートの圧縮強度等

試料	平均圧縮強度 [kg/cm ²]	単位容積重量 [kg/m ³]	弾性係数 [10 ⁴ kg/cm ²]
ケイソン	347	2372	2.69
根固め方塊	181	2236	1.58
上部コンクリート	254	2269	2.27

5. コンクリートの圧縮強度と配合推定

圧縮強度試験は、ケーソン部コンクリート 3個、上部コンクリート 5個、根固め方塊コンクリート 8個のコアにより行った。これらの平均圧縮強度、単位容積重量弾性係数の結果を表-2に示す。ケーソン部コンクリート及び上部コンクリートの圧縮強度はかなり大きい値を示したが、セメント協会コンクリート専門委員会報告に基づいて行ったコンクリートの配合推定試験の結果では、表-3のようにならかなり貧配合なコンクリートの様相を示し、水セメント比もかなり大きな値を示した。そこで、火山灰の単位容積重量を 770kg/m^3 と仮定して、表-1を参考に火山灰量を推定したが、ケーソン部コンクリートでは 27kg/m^3 (冬期 14kg/m^3)、上部コンクリートでは 26kg/m^3 、根固め方塊コンクリートでは 67kg/m^3 と推定され、火山灰を考慮した水結合材比もケーソン部コンクリートで 64% (冬期 68%)、上部コンクリートで 81%、根固め方塊コンクリートで 66%にとどまった。

建設時のブリケットによる引張強度がケーソン部コンクリートで約 8kg/cm^2 (材令 1~2週間)であったことを考え合わせると、60年後の現在十分な強度を有しているのは、丹念に施工された密実なコンクリート¹⁾と相まって、火山灰がボゾランとしての役割を果たしたものと考えられる。

6. コンクリートの空隙量

ついで、モルタル部分の空隙量を水銀ポロシメーターで測定したところ、表-4の結果を得た。海水深さによる差は殆ど見られないが、深い海水中のコンクリート表面から深い位置の空隙は普通のコンクリート並に小さな値を示した。この空隙の分布を図-2に示すと、空隙量は同じでも、普通のコンクリートの場合よりも小さな空隙が多くなっており、火山灰の使用がボゾラン反応により、水密性の向上に寄与したものと思われる。

なお、骨材の吸水率試験に準じて行ったコンクリートの吸水率の値は表-5のように大きな値を示した。この中で、根固め方塊表面部の値が意外に小さくなっている。

7. 鉄筋の腐食状況

鉄筋は海水面付近と基本水準面下 -6mの位置から採取できた。鉄筋の腐食状況は、JCI 規準案に準じて試験を行った。鉄筋の腐食部分を展開図で写しとり、試験前の重量を測った後、10%クエン酸アンモニウム液に浸漬後腐食生成物を除去して鉄筋重量を測定し、結果をまとめて表-6に示した。これらの値から腐食は殆ど進行していないと判断されるが、観察の結果でも表面に軽度の赤錆が発生して

表-3 配合推定試験結果

試料	配合推定による単位量 [kg/m ³]			W/C
	水	セメント	骨材と火山灰	
ケイソン	136	186	2032	73
根固め方塊	146	155	2035	94
上部コンクリート	164	177	1960	92

表-4 水銀ポロシメーターによる空けき [cc/g]

ケイソンのコンクリート	空けきの直径範囲 [μ]		空けき全量	
	0.003~10	10~100		
基本水準面下 -1.5m	表面	0.065	0.005	0.071
	深さ 8cm	0.064	0.010	0.075
基本水準面下 -6.0m	表面	0.064	0.006	0.069
	深さ 8cm	0.052	0.006	0.059
普通のコンクリート		0.049	0.010	0.059

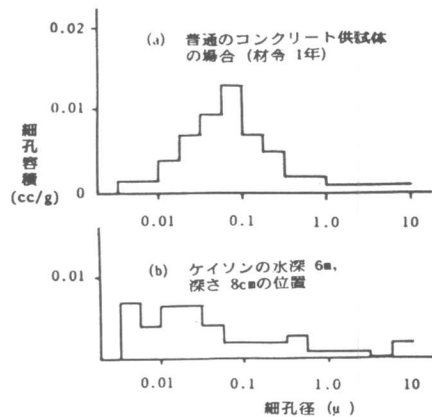


図-2 モルタル部の細孔径分布

表-5 コンクリートの吸水率

	表面部 (%)	内部 (%)
ケイソン	7.3	8.7
根固め方塊	6.9	7.9
上部コンクリート	7.9	7.1

表-6 鉄筋の腐食状況試験結果

試料	かぶり厚 (mm)	重量減少率 (%)	腐食厚さ (mm)	腐食面積率 (%)
ケイソンコア	75	0.66	0.03	11.7
ケイソン破砕塊	75	1.11	0.05	18.0

いる程度の均一腐食であった。

8. コンクリートの塩分含有量

そこで、土木学会および日本道路協会の「海砂中の塩分含有量試験方法」を準用して試験を行い、コンクリート中に含まれる塩素量をNaClに換算して塩分含有量とした。

試料別の塩分含有量を図-3に示す。コンクリート表面付近の塩分含有量は、コンクリート重量の0.2~0.6%前後の高い値を示したが、表面から8cm入った所ではほぼ0.1%以下になった。

コンクリート表面付近の塩分含有量は上部コンクリートで約0.6%と最も高い値を示し、海洋飛沫帯にあるコンクリート表面が塩害を受け易いことと合致している。

根固め方塊コンクリートも上部コンクリートに次いで高い値を示したが、これは極めて貧配合のコンクリートである点からうなづける。しかし、表面から8cm程度入った所の塩分含有量は0.1%以下となっており、小さな吸水率の結果を考え合わせると、火山灰による水密性向上の効果が考えられる。

ケーソン本体のコンクリートは最も小さな塩分含有量を示した。このコンクリートでは、かぶりりが175mmと非常に大きいせいもあり、鉄筋の腐食は殆ど起っていなかったが、鉄筋位置における塩分含有量は0.1%で、塩素量はコンクリート1m³に対し、1.4kgであった。

次に、海水面からの深さによる塩分含有量をケーソン破砕塊によって調べてみた結果を図-4に示す。海水面からの深さによる塩分含有量の違いは殆ど認められなかったが、内部の塩分含有量は図-3に示した0.1%という一定値よりも大きな値となり、海水圧の影響も考えられた。ただし、このコンクリートでは、海砂が使用されたようなので、その量をNaCl量で0.09%程度に想定すると、海水の侵入による影響は0.1%程度と思われる。

なお、このケーソンの基本水準面下-6mの位置には、かぶり75mmの鉄筋が入っていたが、約0.2%の塩分含有量にも拘わらず殆ど錆びていなかった。

9. 中性化の程度

フェノールフタレイン溶液によって測定した平均中性化深さを表-7と表-8に示す。

根固め方塊コンクリートでは平均中性化深さが30mmを越えたが、ケーソン及び上部コンクリートでは中性化は全然進行していなかった。

そこで、PH値の測定を行ってみたが、図-5のように根固め方塊ではかなりの深さまでPH値の低下を示し、中性化が相当内部まで進行していることが分ったが、ケーソン及び上部コンクリートでは中性化の徴候は見られな

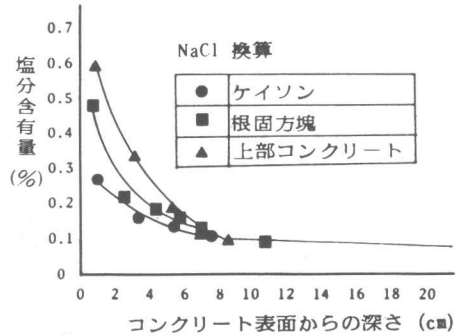


図-3 試料別の塩分含有量

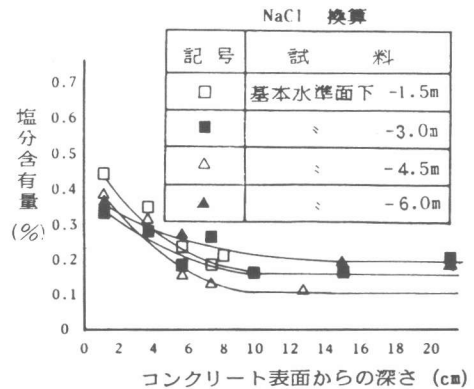


図-4 海水面下の位置によるケーソンの塩分含有量

表-7 試料別の平均中性化深さ

試料	平均中性化深さ (mm)
ケーソン	0
根固め方塊	30.8
上部コンクリート	0

表-8 海水面からの深さによる平均中性化深さ

ケイソンのコンクリート	平均中性化深さ (mm)			
	最大	最小	平均	
基本水準面下	-1.5m	7	3	4
	-3.0m	0	0	0
	-4.5m	4	2	2
	-6.0m	3	3	3

った。

海水面からの深さによる影響は殆どなさそうで、中性化は進行していないが、海水面に近い所は他の個所よりは僅かながら中性化が進行しており、これは図-6のようにPHの測定結果からも確かめられた。

10. まとめ

60年間海洋環境下にあったコンクリートを調査して得た結論は次の通りである。

(1) 圧縮強度はケーソン部コンクリートが最も強く 347 kg/cm²、上部コンクリートが259kg/cm²、根固め方塊コンクリートが181kg/cm²であり、建設当時のブリケットによる引張強度から見ても、十分な強度を有していると思われる。

(2) 配合推定による水セメント比はケーソン部コンクリートで 73%、上部コンクリートで 92%、根固め方塊コンクリートで 94%と大きな値を示した。単位火山灰量を資料¹⁾から試算するとケーソン部コンクリート27kg/m³（冬期施工14kg/m³）、上部コンクリート26kg/m³、根固め方塊67kg/m³となり、水結合材比でも、それぞれ 64%（冬期 68%）、81%、66%に過ぎず、小樽港の場合の水セメント比に比べ疑問がある。²⁾

(3) 中性化は、貧配合の根固め方塊コンクリート以外は殆ど進行しておらず、火山灰の使用がボゾラン反応によるコンクリートの水密性の向上に効果があったことは、空隙の測定結果からもうかがわれ、コンクリートの劣化を抑制するのに役立ったと思われる。

(4) 塩分含有量は、海洋飛沫帯の上部コンクリートで0.6%、根固め方塊コンクリートで0.5%と、コンクリートの表面部分では非常に大きく、ケーソン部コンクリートでも海水中では0.4%程度の値を示したが、表面から 8cm以上中に入ったコンクリートの内部では0.1%程度の一定値に減少し、海水圧を受ける場合でも0.2%の一定値にとどまった。

(5) これらのコンクリートには、海砂が使われたらしいが、鉄筋の錆が殆ど進行しておらず、ひびわれが存在しないこのようなコンクリートでは、十分なかぶりがあれば、問題となるような腐食には至らないようである。

以上のように、鉱さいセメントを用い、火山灰を使って造った60年前のコンクリートが、長い間海洋環境下にあったにも拘わらず、殆ど劣化していないことがわかった。

最後に、貴重な試料を提供して下さいました北海道開発局室蘭開発建設部、室蘭港建設事務所、ならびにコンクリートの分析試験の場を提供して下さいました日鉄セメント株式会社の関係各位に対して、深く感謝の意を表します。

参考文献：

- 1) 中村廉次：北海道港湾変遷史，1960年
- 2) 藤井光蔵：34年間小樽築港防波堤に使用されたる浅野セメント製混凝土方塊、セメント工業1933年（昭和8年）6月～1934年（昭和9年）2月

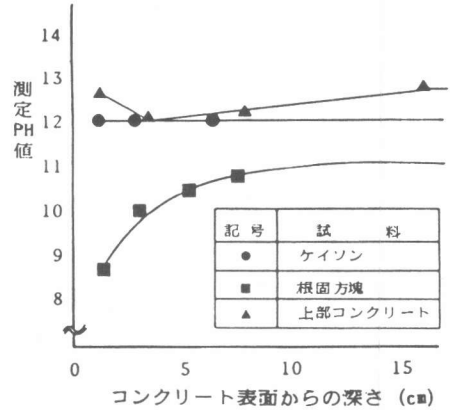


図-5 試料別による測定PH値

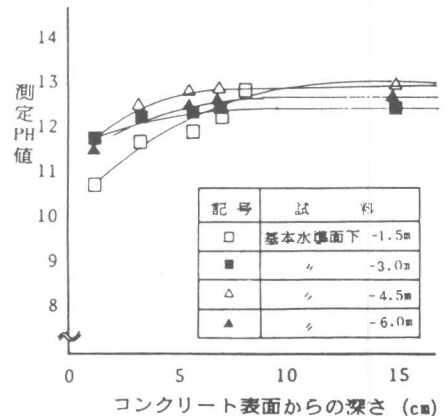


図-6 海水面下の位置によるケーソンの測定PH値