

V-5 60年間、海水の作用を受けた コンクリートの性状について

室蘭工業大学 正会員 尾崎 毅

室蘭工業大学 学生員 松谷正憲

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となり、これらに関する多くの研究報告がなされている。そのほとんどは、戦後（1950年以降）に建設されたコンクリート構造物に関するものであるが、一方、大正時代に造られた古いコンクリート構造物を調査した結果、耐久性ありとしている研究報告もある。

本研究は後者に属するものであり、60年間、海水の作用を受けた室蘭港北防波堤のコンクリートを入手する機会を得たので、コンクリートの配合推定、空隙等の物理的性質、強度等の力学的性質、塩分含有量・中性化の化学的性質や、鉄筋の腐食状況を調査した結果について報告するものである。

2. 室蘭港北防波堤の概要および使用材料

中村廉次氏の「北海道港湾変遷史」によれば、室蘭港北防波堤は、北海道開拓時代の第一期拓殖計画（明治43～昭和元年）により、大正7年に起工された。防波堤は、許容応力 $1300\text{kg}/\text{cm}^2$ 程度の鉄筋が、0.33% 入っている鉄筋コンクリートケイソンを主構造とする混成堤である。ケイソンの高さは、7.9m で、天端は、T.P +0.3m の位置にあり、この上に厚さ 1.3～2.7m の上部コンクリートが場所打ちされていた。ケイソン内部には、中詰コンクリートが打たれ、ケイソンの根固めには、約27ton の重さの方塊コンクリートが、T.P-7.6m の位置に設置されていた。

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鉱滓セメント（一部、浅野セメントが混合された可能性がある。）で比重 2.85（単位容積重量 $1023\text{kg}/\text{m}^3$ ）と知られている。この鉱滓セメントは、水淬の粉末に15～30%の普通ポルトランドセメントと適量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年に小樽港を始めとして、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、火山灰が用いられたようである。火山灰及び骨材の産地は、はっきりしていないが、古老の記憶によれば、火山灰は、洞爺付近のもので、砂は伊達市黄金付近の海砂が、砂利と碎石は室蘭市増市海岸付近のものが使用されたらしい。資料¹⁾によるコンクリートの配合（容積比）を表-1に示す。

試 料		セメント	火山灰	砂	砂利・ 碎石
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
根固方塊コンクリート		1.0	1.0	5.0	1.0

表-1 コンクリートの配合（容積比）

採取位置	記号	試 料	個 数
ケイソン	A	コ ア	6
		破 砕 塊	5
根固方塊	B	コ ア	15
		破 砕 塊	0
上部コンクリート	C	コ ア	7
		破 砕 塊	1
中詰コンクリート	D	コ ア	0
		破 砕 塊	1

表-2 コンクリートの採取状況

3. コンクリートの採取状況

試料として採取したコンクリートの採取位置、状況、個数を表-2に示す。採取位置は、室蘭港北防波堤のケイソン部コンクリート、上部コンクリート、根固方塊コンクリート及び中詰コンクリートであつた。ケ

イソソ部コンクリートの破砕塊の採取位置は、T.P より -1.5、-3.0、-4.5、-6.0、-7.5mであり、それぞれ、A-1.5、A-3.0、A-4.5、A-6.0、A-7.5 と記した。以後、本研究に使用する記号は、表-2 と前述の記号を使うことにする。また、表-4 に示す A-1.5-8は、ケイソソ部破砕塊の T.Pより-1.5m、表面より深さ 8cmのコンクリートを示す。

4. コンクリートの配合推定

試験方法は、セメント協会コンクリート専門委員会報告の F-18 に基づいて行なった。試験結果を表-3 に示す。ただし、s/aについては、表-1 より約 33% と仮定した。表-1 に示されているように、このコンクリートには、火山灰が混合されているが、その単位量は、正確に試験できなかった。しかし、火山灰の主な成分は、不溶解残分であり、表-3 の配合推定試験結果の骨材に、火山灰量が含まれていると考えられる。セメント¹⁾、細骨材²⁾、粗骨材²⁾、火山灰²⁾ の単位容積重量を、それぞれ 1023kg/m³、1350kg/m³、1590kg/m³、768kg/m³ と仮定し、表-1 の配合割合によれば、火山灰量は、ケイソソ部コンクリート 27kg/m³（冬期製作 14kg/m³）、根固方塊部コンクリート 67kg/m³、上部コンクリートは26kg/m³ となる。ただし、上部コンクリートの配合割合は、ケイソソ部コンクリートと同じとした。水セメント比は、試験結果より 73~94%となったが、火山灰を考慮した水結合比は、ケイソソ部コンクリート 64%（冬期製作 68%）根固方塊部コンクリート 66%、上部コンクリート 81% となった。資料²⁾によれば、小樽港では、水セメント比が38~44%程度であったようだ。

5. コンクリートの空隙量

水銀ポロシメーターにより測定した空隙量を表-4 に示す。表-4 に示す値は、コンクリート試料 1g に対する空隙量である。潮汐帯では、表面(A-1.5-0)の空隙量と表面から 8cm(A-1.5-8)の空隙量と、差はほとんどなかった。しかし、常時水中では、表面(A-6.0-0)の空隙量と、表面から 8cm(A-6.0-8)の空隙量とでは、差が生じた。この部分(A-6.0-8)は、海水の作用が一番受けづらい所であり、普通のコンクリート（材令1年）の空隙全量と同じであることから考えて、A-1.5-0、A-1.5-8、A-6.0-0 といった所は、海水の作用により空隙量が増えたと考えられる。

図-1 に、普通のコンクリート（材令1年）とA-6.0-8のコンクリートの細孔径分布を示した。普通のコンクリートでは、数十分の一ミクロン程度の空隙が多く集まっているが、A-6.0-8のコンクリートでは、数百分の一ミクロン程度の空隙が多く集まっている。これは、火山灰

試 料	配合推定による単位量 [kg/m ³]				W/C
	水	セメント	細骨材	粗骨材	
ケイソソ	136	186	670	1362	73
根固方塊	146	155	671	1364	94
上部コンクリート	164	177	649	1311	92

表-3 配合推定試験結果

試 料	[cc/g]		
	空けきの直径範囲 [μ]		空けき全量
	0.003~10	10~100	
A-1.5-0	0.065	0.005	0.071
A-1.5-8	0.064	0.010	0.075
A-6.0-0	0.064	0.006	0.069
A-6.0-8	0.052	0.006	0.059
普通コンクリート	0.049	0.010	0.059

表-4 水銀ポロシメーターによる空けき

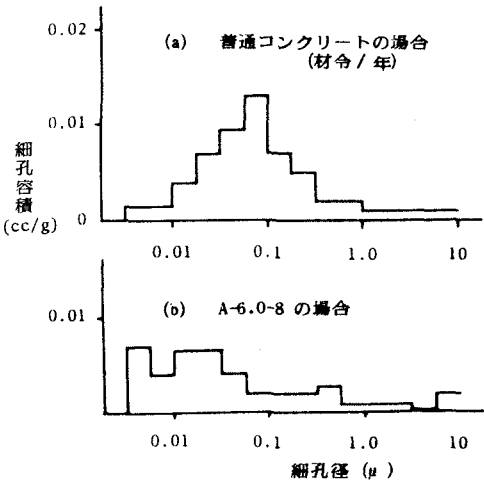


図-1 細孔径分布

によるポズラン反応の結果、空隙が数百分の一ミクロン程度に微細化したと考えられる。このように、火山灰の使用は、水密性の向上に役だったと考えられる。

表-5に、JIS A1109 及び JIS A1110 の「細骨材・粗骨材の比重及び吸水率試験」に準じて行なった表面部と内部の吸水率の測定結果を示す。ケイソン部コンクリート、根固方塊部コンクリートについては、内部よりも表面部の方が、吸水率が低くなり、上部コンクリートは、逆に、内部の方が吸水率が低くなっていた。

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

表-5 コンクリートの吸水率

6. コンクリートの圧縮強度

圧縮強度試験に使用する試料コンクリートのコアは、長さが直径の2倍程度になるように切断し、長さ20cmに満たないコンクリートについては、JIS A1107に従って補正を施した。表面部は、JIS A1132に準じて、硫黄キャッピングによる表面仕上げを施し試験を行なった。ケイソン部コンクリート3個、根固方塊部コンクリート8個、上部コンクリート5個の平均圧縮強度、単位容積重量、静弾性係数を、表-6に示す。

試料	平均圧縮強度 [kg/cm ²]	単位容積重量 [kg/m ³]	静弾性係数 [10 ⁴ kg/cm ²]
ケイソン	347 ±23	2372 ±34	2.690 ±0.292
根固方塊	181 ±4	2236 ±109	1.580 ±0.071
上部コン クリート	254 ±24	2269 ±34	2.267 ±0.239

表-6 コンクリートの力学的性質

平均圧縮強度は、根固方塊部コンクリート、上部コンクリート、ケイソン部コンクリートの順で大きくなっていた。一番低い値を示した根固方塊部コンクリートは、他の2種に比べ貧配合であるため圧縮強度は低くなったと考えられる。また、表-3の配合推定試験結果より、水セメント比が、かなり大きな値を示しているにもかかわらず、上部コンクリート、ケイソン部コンクリートの平均圧縮強度が高い値を示した。これは、火山灰がセメントの増量材の役割を果たしている点と、資料¹⁾より、コンクリートを十分に締め固めて堅固なコンクリートが造られたこと等に起因していると考えられる。参考までに、建設時のブリケットによる引張強度は、ケイソン部コンクリートで約8kg/cm²（材令1~2週間）であったことが分っているので、これから試算してみると、60年間の現在も、十分な圧縮強度を有しているように思われる。

7. 鉄筋の腐食状況

鉄筋は、海面上のケイソン部コンクリート、海中のケイソン部の破砕塊（A-6,5-8）に含まれていた。鉄筋の腐食試験は、J.C.I.規準案にある「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法（案）」に準じて試験を行なった。試料中の鉄筋の腐食部分を、展開図で写しとり、試験前の鉄筋重量を計った後、10%クエン酸アンモニウム溶液（60℃）に適当時間浸漬後、ワイヤブラシを用いて腐食生成物を除去し、試験後の鉄筋重量を測定した。その重量減少量を試験前の重量で除した値を重量減少率とし、腐食厚さは重量減少量から求め、腐食面積率は試験前の腐食部分の面積を鉄筋の評価対象面積で除した値として求めた結果を表-7に示す。

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	175	0.66	0.03	11.7
ケイソン 破砕塊	75	1.11	0.05	18.0

表-7 鉄筋の腐食状況試験結果

どちらの鉄筋も、表面付近に軽度の赤錆が発生している程度の均一腐食であった。海面上のケイソン部コンクリートに含まれる鉄筋については、若干表面に近い方に腐食が集まっていたが、海中のケイソン部の破砕塊については、そのようなことはなかった。いずれの鉄筋も、重量減少率で約1%前後であり、腐食

厚さで最大 0.05mm、また腐食面積率においても、鉄筋の総断面積の20%以下となっており、鉄筋の有効断面を損失するには至っていない。以上の点から考えて、60年間経過したにもかかわらず、腐食は進行していないと考えられる。

8. コンクリートの塩分含有量

本試験は、土木学会および日本道路協会による「海砂中の塩分含有量試験方法」に基づいて、コンクリート中に含まれる塩素量を、NaCl量に換算して、コンクリート中の塩分含有量とした。溶液として用いた水は、水温約 15℃前後の水道水で、その水に可溶性塩分を測定することにした。コンクリートの試料は、表面から約 2cm 間隔に採取し、2.5mmフルイを通過するように粉砕して試験を行なった。

1) 試料別の塩分含有量

試料別の塩分含有量試験結果を、図-2 に示す。表面付近（表面から0~2cm）の塩分含有量は、コンクリートの表乾重量に対する百分率で0.2~0.6% 前後と高い値を示すが、表面から 8cm入った所では、ほぼ 0.1%以下となっていた。すなわち、

[ケイソン部コンクリートでは、]

表面付近の塩分含有量は、他の2種に比べて、小さい値を示した。このコンクリートには、かぶり厚 175mmの位置に鉄筋が配筋されたいが、腐食は殆ど起っていない。配筋位置の塩分含有量は、コンクリート重量（平均単位容積重量 2372kg/m³）に対して、NaCl量で 0.1%であり、コンクリート 1 m³ に対して、塩素量1.4kg となった。

[根固方塊部コンクリートでは、]

表面付近の塩分含有量は、高い値を示した。表-1より、打設当時の配合が貧配合である点より、60年間に徐々に海水が浸入したと考えられる。しかし、表面から 8cm以上入った内部では、0.1%以下となっている。これは、先に表-5で示したように、コンクリートの表面部及び内部ともに、吸水率が小さく、火山灰使用による水密性の向上による効果によるものと考えられる。

[上部コンクリートでは、]

表面部分の塩分含有量は、他のケイソン部コンクリート、根固方塊部コンクリートに比べて、0.6%と、いちばん高い値を示すが、表面から 8cm以上入った内部では、0.1%以下となり、安定する。これは、根固方塊部コンクリート同様、表-5に示されるように、内部の吸水率に差は無いものの、表面部は、内部に比べて吸水率の値が大きくなっているためと考えられる。以上の点から考えて、海洋飛沫帯である上部コンクリー

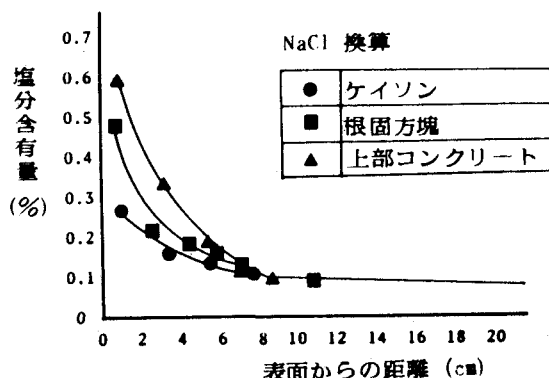


図-2 試料別の塩分含有量試験結果

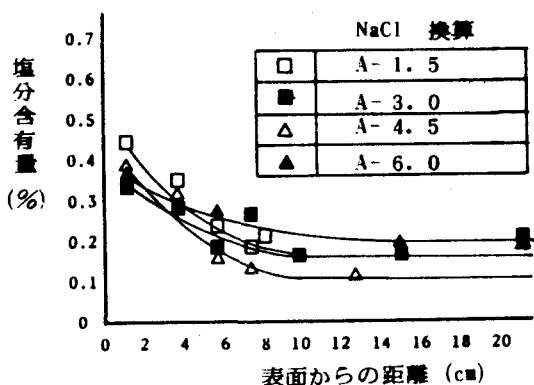


図-3 海水面からの深さによる塩分含有量試験結果

トは、表面部で塩害を受けやすいと考えられる。

2) 海水面からの深さによる塩分含有量

ケイソン部コンクリートの海水面の深さによる塩分含有量試験結果を、図-3に示す。A-3.0~A-6.0は常時海水中の部分である。図-2の海水面上のケイソン部コンクリートに比べて、表面から10cm以降で、NaCl量0.2%となった。海水面からの深さに対する塩分含有量の違いは認められなかったが、表面から10cm以上中に入った内部ではNaCl量0.2%となり、図-2に示す海水面上のケイソン部コンクリートの一定値(0.1%)よりも大きな値となった。これは海水圧及び潮夕帯での海水の影響により、コンクリートの内部の方まで塩分が浸透したものと考えられる。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、その量をコンクリート表乾重量に対してNaCl量で0.088%を想定すると、海水の侵入によって1%少々塩分含有量が高くなったと考えられる。

9. 中性化試験

表-8と表-9は、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示す、と同時に、PH値を測定した結果を図-4、図-5に示した。

1) 試料別の中性化

ケイソン部コンクリート及び上部コンクリートでは、平均中性化深さが0mm、また測定PH値からも、中性化は起っていないかった。しかし根固方塊部コンクリートでは、平均中性化深さが30.8mmとなり、測定PH値からみても、中性化が起っている傾向があった。ただし、配合推定試験結果より、根固方塊部コンクリートの水セメント比を94%として、 $R=1.4$ の時、岸谷の式では中性化深さが、68.6mmとなる。

2) 海水面の深さによる中性化

海水面からの深さによる中性化は、海水面からの深さの影響は受けていない。ただし、潮夕帯であるA-1.5は、常時水中にあるA-3.0、A-4.5、A-6.0よりも中性化は大きくなっ

試 料	平均中性化深さ (mm)
ケイソン	0
根固方塊	30.8 ±7.4
上部コン クリート	0

表-8 試料別の平均中性化深さ

試料		平均中性化深さ (mm)		
		最大	最小	平均
ケ イ ソ ン	A-1.5	7	3	4
	A-3.0	0	0	0
	A-4.5	4	2	2
	A-6.0	3	3	3

表-9 海水面からの深さによる平均中性化深さ

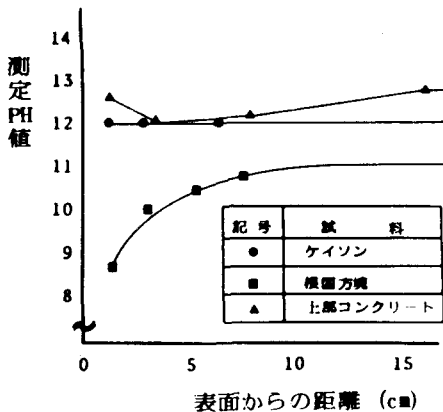


図-4 試料別による測定PH値

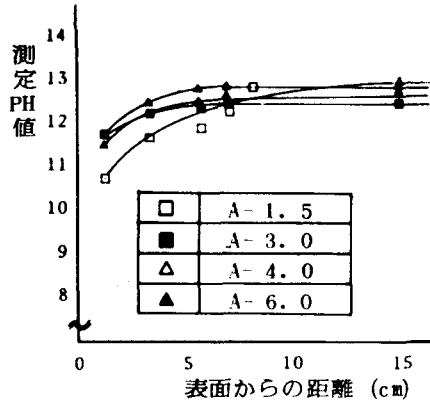


図-5 海水面からの深さによる測定PH値

ており潮汐の影響を受けたようである。

以上の点から考えて、中性化は起っていたが、60年間という長い年月を考えれば、進行したとは考えられなかった。

10. まとめ

60年間、海水の作用を受けたコンクリートを調査した結果から得た結論は、次の通りである。

(1) 圧縮強度は、ケイソン部コンクリートが最も強く 347kg/cm^2 、上部コンクリートが 259kg/cm^2 、根固方塊部コンクリートが 181kg/cm^2 であり、建設時のブリケットによる引張強度からみても、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イソン部コンクリートで 73%、根固方塊部コンクリートで 94%、上部コンクリートで 92% と大きな値を示したが、単位火山灰量を資料¹⁾ から試算すると、ケイソン部コンクリート 27kg/m^3 (冬期製作 14kg/m^3)、上部コンクリートで 26kg/m^3 、根固方塊部コンクリートで 67kg/m^3 となり、水結合材比でも、それぞれ 64% (冬68%)、81%、66% に過ぎず、小樽港の場合の水セメント比 (38~44%) に比べて疑問がある。

(3) 中性化は、貧配合の根固方塊部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増強材として有効であったのみならず、コンクリートの水密性にも効果があつたことは、空隙の測定結果からうかがわれ、コンクリートの劣化を抑制するにも役立つと思われる。

(4) 塩分含有量は、海洋飛沫帯の上部コンクリートで 0.6%、根固方塊部コンクリートで 0.5% と、コンクリートの表面部では非常に大きく、ケイソン部コンクリートでも海中では 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% 程度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になるような腐食にはいたらないようである。

以上のように、鉾澤セメントを用い、火山灰を使って造った60年前のコンクリートが、長い間、海水の作用を受けてきたにも拘わらず、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くださっ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くださっ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年間小樽港築港防波堤に使用せら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