

【土木学会論文集 第366号/V-4 1986年2月】

■調査・報告■

耐久性の優れたコンクリート構造物

——寒冷地における構造物——

STUDIES ON THE DURABILITY OF OLD CONCRETE STRUCTURES IN HOKKAIDO

太田利隆*・関野高志**

By Toshitaka OHTA and Takashi SEKINO

1. はじめに

コンクリート構造物は従来から耐久性に優れ、メンテナンスフリーで半永久的な構造物といわれてきたが、最近、建設後比較的短期間のうちに劣化する構造物が話題となり、耐久性が問題となる機会が多くなってきた。

耐久性について、ASTMは設計耐用期間における構造物や部材の安全性能としており、また定められた期間をこえて構造物がそのサービス性を保持する能力とも定義している¹⁾。またCEBの耐久性に関する委員会は、耐久性に優れたコンクリート構造物として設計耐用期間中予定された費用以外の支出を要しないものと定義している。もっとも将来における荷重の増大や環境変化などについて予測は困難であり、また予想外の欠陥の内在もあり得るので、定期点検の必要性を強調し、劣化の徵候をみつけた場合、すみやかに適切な対策をとることを勧告している²⁾。

2. 耐用年数

一般に土木構造物は社会資本として長い期間使用されるといわれているが、機能的耐用年数で定まる場合比較的短いものと思われる。

たとえば北海道開発局で管理する一般国道にかかる鉄筋コンクリート橋1502橋のうち、大正15年内務省道路構造に関する細則により設計されたもの20橋、昭和14年内務省鋼道路橋設計製作示方書により設計されたもの72橋（うち昭和20年以前に架設されたもの3橋）

であり、建設後40年以上経過したコンクリート橋はわずか1.5%にすぎない。一方過去20年間に取壊しとなったコンクリート橋128橋の平均供用年数は25.4年（最小5年、最大48年、標準偏差9.1年）であり、取壊し理由は道路の線形改良、幅員不足が半数以上を占め、ついで耐荷力不足、河川改修が続いている。主要な道路整備も進んできた現在、従来のような多数の構造物の建設、架換は期待できず、維持管理に重点が移り、取壊し理由の割合も変化するとは思われるが、これまでの道路橋の耐用年数は物理的耐用年数よりも機能的耐用年数により定まる例が多く供用年数が比較的短い構造物であるということができる。

このほかに機能上の理由により耐用年数が定まることが多い構造物として荷役作業の革新が著しい岸壁、計画洪水量の見直しが進む河川構造物等があり、経済性が重視されるものに農業土木構造物がある。

一方防波堤など港湾外郭施設は物理的耐用年数が支配的で非常に長い期間供用されるようである。

3. 北海道における環境作用

コンクリート構造物にとって北海道は非常に厳しい環境であり、その代表的なものは凍結融解作用と海岸における潮風の影響である。

(1) 凍結融解作用

コンクリートの凍害に及ぼす外的要因として凍結融解回数、凍結持続時間、凍結最低温度などがある。

コンクリート中の水分は温度低下に伴い凍結し、体積を約10%増大させ、周囲のコンクリート組織を弛緩させるほか、温度上昇時においてもコンクリートと氷の熱膨張係数の相違によりコンクリートの劣化が進む。しか

* 正会員 工修 北海道開発局土木試験所第2研究部長
(〒062 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

** 正会員 北海道開発局港湾部港湾建設課開発専門官

し1回の凍結融解作用で生ずる破壊は小さいので、凍結融解を繰り返す回数が問題である。凍結融解回数は基本的には冬日（最低気温が0°C以下）、真冬日（最高気温が0°C以下）の差により算定でき、北海道では60～120回／冬であるが、日照、潮汐の影響等も考慮する必要がある。

凍結持続時間はコンクリート中の細孔における氷の形成に関係があり、凍結最低温度はコンクリート中の凍結水量に影響を及ぼす。

長谷川は全国の気象資料をもとに、上述の影響を考慮した凍結危険分布図を作成した（図-1）³⁾。本州は山岳地帯を除いて危険度2以下に対し、北海道は大部分危険度3～5を占めている。

土木構造物に対する凍害調査は過去3回行われている。

第1回は昭和30年北海道土木技術会コンクリート腐蝕研究委員会が凍害を受けたコンクリート構造物97件について調査を行ったもので、①配合1:2:4程度のものは被害が僅少である、②配合1:3:6のコンクリートのW/Cは70～90%であり、大きな被害を受けている

ものが多い。防波堤の中には1.5mほど断面欠損したものがある、③凍害を受けた構造物の経過年数は16～35年のものが全体の60%以上を占めているが、0～5年というごく短期間のものも7%ほど含まれている、④早急に補修を要するものが36%以上も含まれており、補修済みのものが26%に上っている、などを報告している⁴⁾。

第2回は昭和47～50年北海道開発局が建設後1～9年経過し、配合が判明しているコンクリート構造物454件について調査を行い、①AEコンクリートにもかかわらず全体の59%に凍害が生じている、②海水（含潮風）の作用を受ける構造物は淡水の作用を受けるものに比し、約2倍の凍害を受ける、③普通ポルトランドセメントの凍害発生率は混合セメントに比し小さいなどと結論づけている⁵⁾。

第3回は昭和54年北海道土木技術会コンクリート研究委員会が1冬経過した海岸構造物の剥離調査を行い、①消波ブロックで88%，防波堤・岸壁で69%，擁壁・覆道で45%の剥離発生率である、②単位セメント量290kg/m³、W/C47%以下になると剥離が小さくなる、

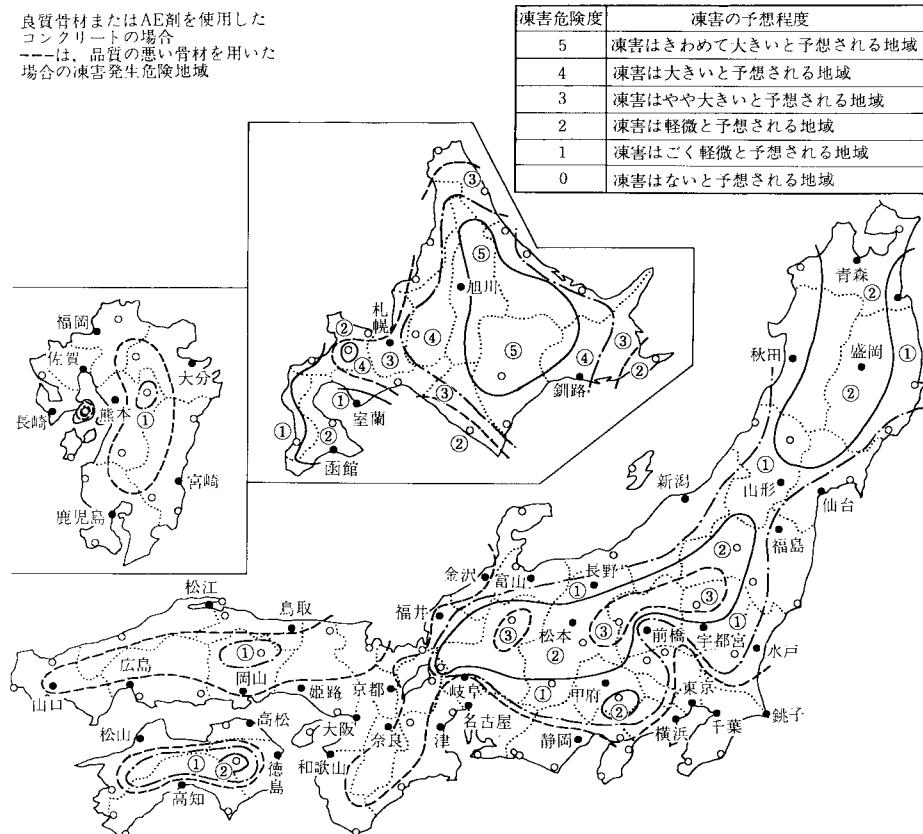


図-1 凍害危険度分布図³⁾

③汀線から 16 m 以内における剥離発生率が大きいことなどを報告している⁶⁾。

(2) 海岸における潮風の作用

北海道の日本海沿岸およびえりも岬以西の太平洋岸は季節風が強く、鉄筋コンクリート構造物がしばしば塩害を受け、劣化する例が見受けられる⁷⁾。このため日本道路協会「道路橋の塩害対策指針（案）」では日本海沿岸を塩害対策区分 B として、沖縄県について厳しい対策を必要とする地帯に指定している。

4. 耐久性に優れたコンクリート構造物の例

構造物の選定にあたっては次の点を基準とした。

① 昭和 20 年以前の構造物であること

② 現在も使用されていること

③ 原則として工事報告が残っていること

(1) 十勝大橋（旧河西橋）⁸⁾

a) 建設の概要

北海道には RC 橋が大正時代に数橋架設された記述があり、その後昭和初期にかけて多数建設されたが、大部分支間 20 m 以下のものであった。

昭和 10~16 年に建設された十勝大橋は支間 41.0 m、橋長 390 m、幅員 18 m で当時として世界第 1 の橋面積を有する鉄筋コンクリートゲルバー桁橋である。設計施工に関する数々の新しい試みとともに北海道における記念碑的鉄筋コンクリート橋となっている。

以下十勝大橋の概要を示す。

架設位置：一般国道 241 号、帶広市～河東郡音更町
河川名：十勝川

橋長：390 m

支間：9@41.0 m + 2@10.5 m (対重用突桁)

有効幅員：18 m = 2@2.7 m (歩) + 2@3.5 m (車)
+ 5.6 m (電車)

主桁：5 本 (桁高径間中央 2.4 m、橋脚上 4.0 m)

床版：厚さ 25 cm、橋脚付近には厚さ 20 cm の下床版を付す

設計荷重：大正 15 年内示第 1 種 (電車荷重 22.4 t を含む) 地震荷重；水平震度 0.15、垂

直震度 0.08

着手：昭和 10 年 6 月

完成：昭和 16 年 9 月

本橋の特徴は次のようである。

① 鉄筋コンクリートゲルバー橋として日本一の最長支間 41.0 m を有することならびに橋面積 6 987 m² は当時として世界第 1 である。

② 橋脚、橋台の可動部には設計荷重 618 tf のコンクリートロッカ (幅 120 cm、高さ 220 cm、奥行 160 cm) を採用している。

③ 本橋の鉄筋は最大径 44 mm の丸鋼で、継手には矢筈式鍛接を用いている。

④ 低水敷 3 径間の施工にはアーチ式木製支保工を採用した。アーチ式支保工にはあらかじめ打設コンクリート量に相当する予載荷重 (砂) を加え、コンクリート施工に伴いこれを除去し、変形を最小限に抑えた。

図-2 に十勝大橋の設計図を示す。設計当時ゲルバーピンジ部のひびわれが問題となっており、細部設計は特に入念に行った。

主桁コンクリートの許容曲げ圧縮応力度は 65 kgf/cm² であるので、材令 28 日の圧縮強度を 3 倍の 195 kgf/cm² 以上、さらに現場の作業上の悪条件を考慮して 15% 増加し 224 kgf/cm² としている。またコンクリートの締固めには内部振動機を使用することとし文献からスランプ 7~13 cm と決定した。コンクリートの配合は重量でセメント 330 kg/m³、水 172 kg/m³、砂 559 kg/m³、砂利 1 365 kg/m³、水セメント比 52% である。

橋体コンクリートの圧縮強度試験結果を表-1 に示す。恒温室養生および実験室コンクリートはいずれも所要強度 224 kgf/cm² を満足しており、現場養生コンクリートの 191 kgf/cm² も設計強度 180 kgf/cm² をほぼ満足している。

コンクリートの混合には 21 切円筒型ミキサー 2 台を用い、1 日の最大打設量は約 180 m³ である。コンクリートの運搬はトロリーで行い、最大運搬距離は 250 m である。打設現場に到着したコンクリートはいったん練り台に受けてスコップで攪拌した後型枠に投入した。打設

表-1 十勝大橋橋体コンクリート強度総括

() 内は供試体数

種別	スランプ (cm)	圧縮強度 (kgf/mm ²)						供試体 総数 (個)	
		材令 7 日		28 日		90 日			
		現	恒	現	恒	現	恒		
複盤着桁	10.2	118(121)	137(119)	194(126)	258 (94)	280 (76)	325 (45)	661	
吊桁	10.0	110 (16)	135 (16)	173 (20)	224 (10)	264 (10)	293 (8)	80	
平均	10.2	117	148	191	254	278	320	741	
実験室コンクリート	10.9	-	103	-	247	-	345		

は一層 30 cm でアメリカ合衆国から輸入した内部振動機バイパーにより十分締め固め、必要により手つきも併用した。コンクリート打設の翌日タービンポンプよりの水射をコンクリート表面に吹き付けてレイタンスの除去を行い、打継面の接着を確実にした。

養生はポンプで河川水をくみ上げ穴を開けたホースや竹管によりたえず注水した。

しかしコンクリートの打設順序、打設方法の種々な工夫にもかかわらず、負の曲げモーメントを受ける床版にひびわれの発生は免れず、支保工撤去時には 2 mm にも

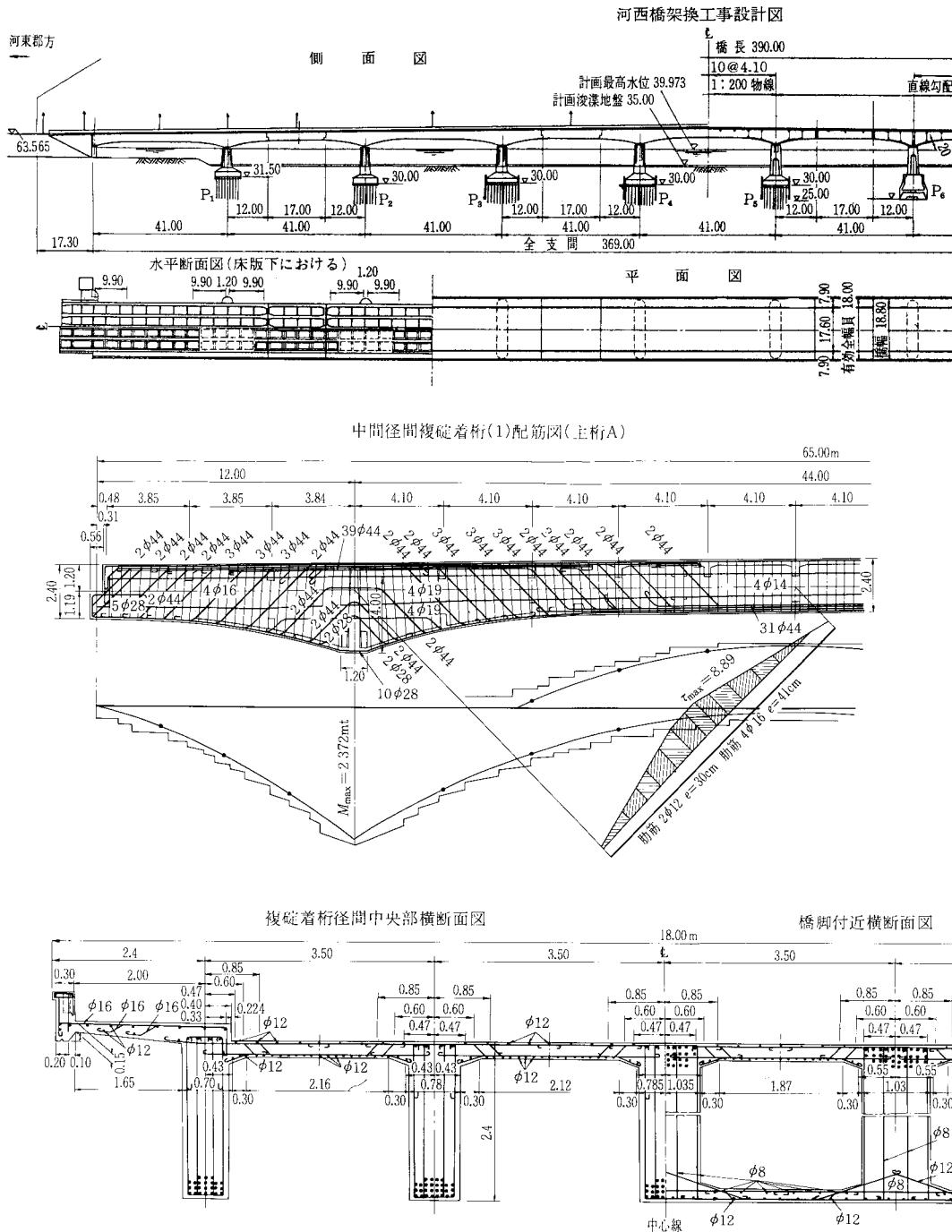
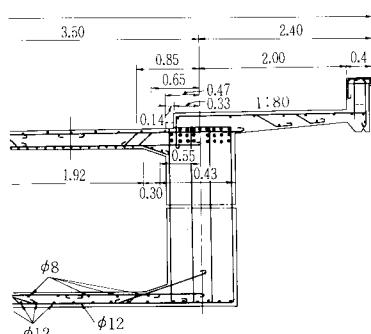
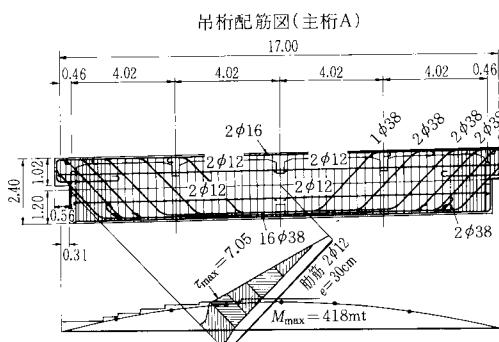
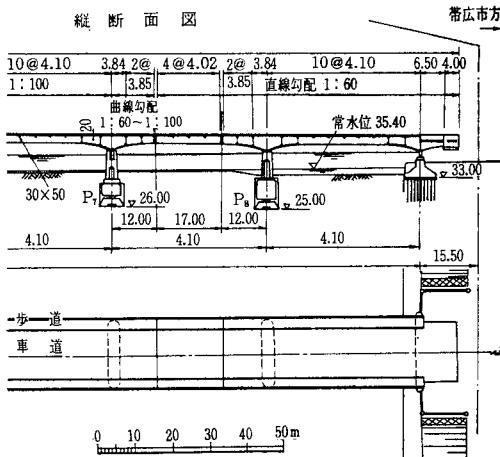


図-2 十勝

達するものが存在した。しかしその後のひびわれの増大は認められなかつたため防水工で対処することにした。

b) 調査および補修

昭和43年ひびわれ調査が土木試験所により行われた。橋脚支点上およびゲルバーハンジ部付近で最大0.75



大橋設計図

~0.85 mm程度のひびわれが1~2本発見されたがほとんど0.35 mm以下で鋼材腐食などの劣化は認められなかった。

昭和58年地覆コンクリートに凍害が生じ、また負の曲げモーメントを受ける床版に石灰の滲出が認められたのを機会に、ひびわれに対する樹脂注入および凍害を受けたコンクリートの補修を行った。

以上十勝大橋は建設後45年を経て、非常に良好な状態が保たれているが、十勝川の計画洪水量の変更により130mほど引堤されることとなり、延長か架換えかの検討が行われている。

(2) 港湾施設

数十年を経た北海道における代表的な港湾コンクリート構造物として、小樽港、室蘭港、函館港などにおける防波堤、岸壁などが挙げられる(表-2)。

構造型式は、明治中期から無筋コンクリートのブロック式が、また明治後期からは鉄筋コンクリートのケーン式が採用されている。以下に各港湾における代表的な施設の概要を述べる。

a) 小樽港^{9), 10), 17)}

① 一般

小樽港は、明治5年道央の幌内炭の積出し港として建設が始められた。その後明治27年に広井博士によって深浅測量、ボーリングなどの調査が行われ明治29年修築方針が定められた。それを受け第一期拓殖計画の第一期工事として明治30年より北防波堤の建設が、また、第二期工事として明治41年より主として南防波堤および島堤の建設がなされ、大正10年に竣工し現在のおおよその防波堤法線を形成するに至った(図-3)。

② 設計・施工概要

明治から大正時代にかけて建設されたコンクリート構造物の型式は、表-2に示すように北防波堤、南防波堤は主としてブロック式、島堤、第1埠頭岸壁は鉄筋コンクリートケーン式である。

北防波堤は北海道において防波堤堤体に初めてコンクリートブロックを用いたケースである。この構造は、当初ブロックを水平に積み重ねたものであったが、施工途中の波による数度のブロック飛散を経験してからは図-4に示すように斜め積みとされた。このブロックの1個の重量は12t~24tであった。コンクリートの配合は、容積比で当初セメント1,砂2,碎石4の割合であったが、明治35年頃より、広井博士の提案により、セメントに適質の火山灰を混入するとコンクリートの耐久性が増し、費用が低廉になることから、セメント1.0, 火山灰0.8, 砂3.2, 碎石6.4の割合に改められた。練りませに用いられた単位水量は120~140kg/m³であるので、W/Cは38~44%と推定される。この当時のコンクリー

表-2 北海道における数十年を経た主要な港湾施設

港名	施設名	延長(m)	構造型式	建設年度	備考
小樽港	北防波堤	1554	ケーソン式およびブロック式	明治30年～41年	構造は大部分ブロック式であるが後期はケーソン式
	南防波堤	816	"	明治41年～大正10年	構造型式は大部分ブロック式
	島堤	915	"	"	構造は大部分ケーソン式
	第1号埠頭岸壁 (-9.0m～-10.0m)	759	ケーソン式	昭和10年～15年	
室蘭港	北防波堤	969	ケーソン式	昭和2年	
	南防波堤	554	ケーソン式	昭和2年	現在基部は背後が埋立てられ護岸となっている
函館港	西防波堤 (船入場防波堤)	918 (156)	ブロック式 (捨石式)	明治43年～大正7年 (明治29年～32年)	現在は漁港として整備されており、近いうちに前面が埋立てられる予定である
	南防波堤	585	ブロック式	明治43年～大正11年	
釧路港	北防波堤	1384	ブロック式	大正11年～昭和12年	

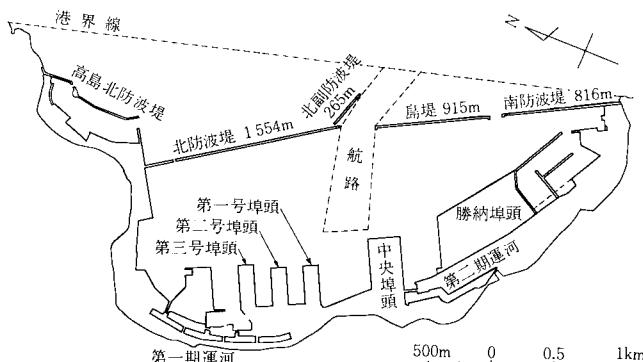


図-3 小樽港現況平面図

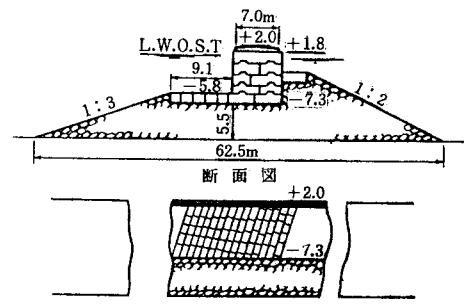


図-4 北防波堤標準断面図

表-3 火山灰混用の試験（海中浸水）

配合 経過	セメント 1 砂	セメント 1 砂	セメント 1 火山灰 砂	セメント 1 火山灰 砂	
1か月	16.65	10.72	17.93	11.56	強度(抗張)kg/cm ²
3か月	27.02	19.56	24.31	18.11	"
6か月	31.41	18.63	27.27	21.14	"
1か年	27.79	24.04	27.38	25.84	"
2か年	27.36	23.85	35.41	27.00	"
3か年	27.36	24.73	31.99	31.06	"
4か年	28.73	24.51	40.90	31.94	"

(明治41年6月 広井 勇著 小樽築港工事報文前編)

トブロック製作は、まずショベルでコンクリートを型枠に投入し、一層18cmになると大鉈で15分間突き固め、表面に水が滲出したところで、さらに小鉈で型枠の隅々を突き固めたうえ、コンクリートの接合をよくするため

熊手で表面をかき荒らした。

養生について特に記述はないが、函館港のコンクリートブロックの場合打設終了後ただちにむしろで覆い、常に散水して温潤状態を15日間保ち続けたとあり¹¹⁾、同

様の処置がなされたものと推定される。またブロックは1か月以上上置した後、据付けたといわれているが、これはコンクリート表面に保護被膜が形成されることを期待していたためと考えられる。

大正元年、南防波堤堤頭部で防波堤の堤体に道内で初めてケーソン構造が用いられた。このケーソンは、幅、長さ12.12m、高さ7.88mで重量約1200tであった。

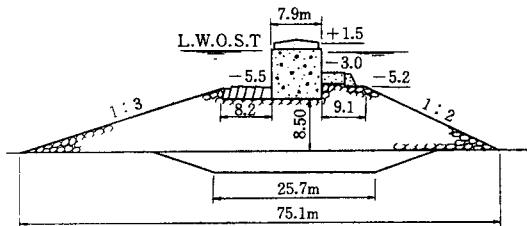


図-5 島堤標準断面図

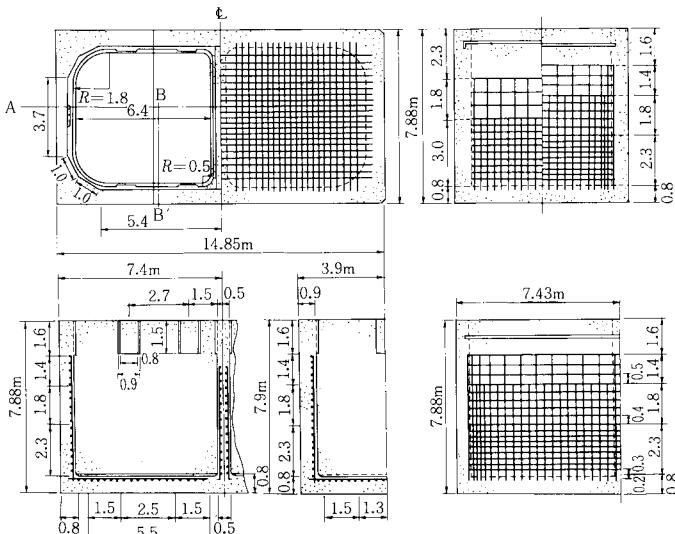


図-6 島堤ケーソン配筋図

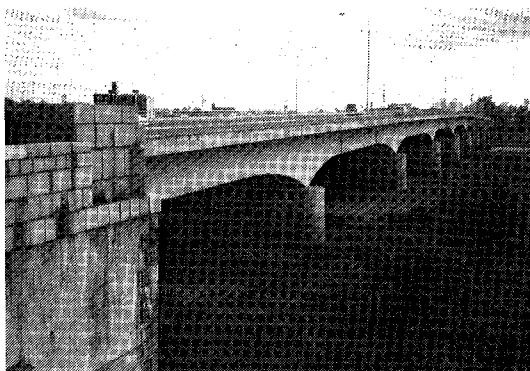


写真-1 十勝大橋（昭和10~12年建設）

これ以降の北防波堤延長部および島堤などの堤体はすべてケーソンが用いられた。島堤のケーソンの構造は、図-5, 6のとおりであり、鉄筋の配置は、モニエー式単鉄筋断面で、鉄筋はすべて径19mmの丸鋼を使用していた。これらのコンクリートの配合は、セメント1.0、火山灰0.2、砂2.2、碎石4.4であった。

底版コンクリートはロートを用いて打設し、所定の高さでコンクリートをならした後、配筋を行った。また立壁の打設高は一層21cmで1人用木蛸(6.75kg), 2人用木蛸(10.5kg)により突き固めた。

③ 現 態

各防波堤はその後上部工のかさ上げなどが行われているが、堤体に用いられているコンクリートブロックおよびケーソンは写真-2~4に示すように建設後65~90年を経た今日も、健全な状態を維持している。船上から観察したところでは顕著な剥離、ひびわれなどは認められない。

b) 函館港^{11), 17)}

① 一 般

函館港は明治初期から開拓使の積極的政策により、北海道と本州を結ぶ窓口としての役割を果たし、定期航路などが開かれた。本格的な築港工事は、明治29年より着工され、港内浚渫、防砂堤工事、弁天岬埋立、船入場防波堤工事などが行われた。その後、第一期拓殖計画（明治43年~大正11年）が実施に移され、西防波堤工事、防砂堤工事等が行われた（図-7）。

② 設計・施工概要

明治32年に竣工した船入場防波堤（延長156m）は、図-8に示すような構造となっている。構造形式は捨石堤であるが、堤体前面および背後の一部にブロックを



写真-2 小樽港北防波堤（明治30~41年建設）

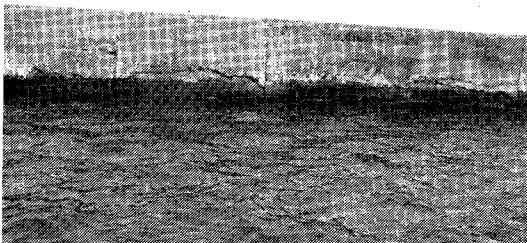


写真-3 小樽港島堤（明治41～大正10年建設、RCケーン）



写真-4 小樽港南防波堤（明治41～大正10年建設）

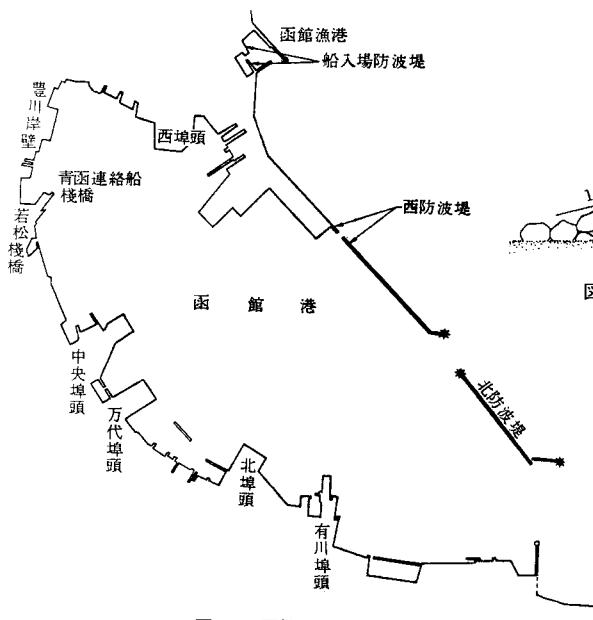


図-7 函館港現況平面図

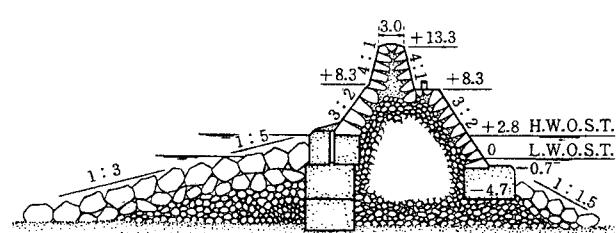


図-8 函館漁港船入場防波堤標準断面図（単位：尺）

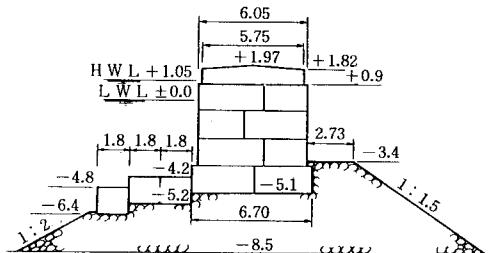


図-9 函館港西防波堤標準断面図（単位：m）

置き、上部の基礎としている。このブロックは、施工中の割石の散乱を防ぐ役目も兼ねており、コンクリートの配合は、容積比でセメント1、砂2、砂利2、碎石2の割合となっている。なお、この船入場は現在、函館漁港として整備が進められている。

大正7年に竣工した西防波堤（延長 917 m）は、図-9に示すようなブロック式防波堤である。この構造形式は、明治30年代に小樽港北防波堤で施工していたものと類似しており、割石基礎上にブロックを積み上げ、その上に場所詰コンクリートを施工している。堤体背面の下部は割石でおおい、波力に対する抵抗力増大を考慮したものとなっている。

③ 現況

船入場防波堤は、写真-5に示すように、現在なお、



写真-5 函館漁港船入場防波堤（明治29～32年建設、基礎のコンクリートブロックは感潮部にあるが健全である）

防波堤として、また漁船の係留施設（港内側）として利用されている。上部工は一部破損している場所もあるが、基礎に用いたブロックについては、ほとんど変化がみられない。なお、この船入場防波堤は近い将来、前面を埋立てことになっているが、北海道で現在も使用されている最古の港湾構造物であることを考慮して一部保存することを検討している。

西防波堤の堤体に用いられたブロックは、写真-6に示すように、60~70年を経た今日、なお第一防波堤としての機能を果たしており、船上から観察した限りでは、ひびわれ、剝離などはみられない。

c) 室蘭港^{12),17)}

① 一般

室蘭港は、明治5年、札幌の玄関口として開港した。その後、石狩炭田の石炭積み出し港として本格的な発展をみた。港湾の修築工事は、第一期拓殖時代の大正7年に着手され、昭和2年までに、南防波堤554m、北防波

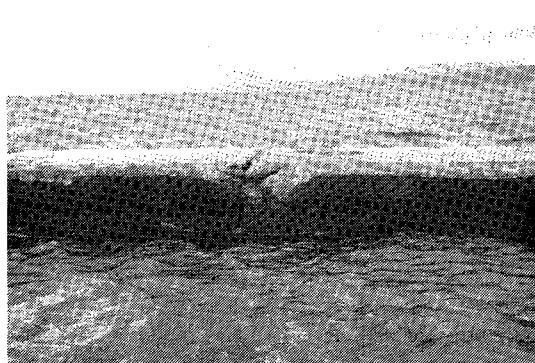


写真-6 函館港西防波堤（明治45~大正11年建設）

堤969mを建設した（図-10）。

② 設計・施工概要

北防波堤、南防波堤とも構造はケーソン式である。防波堤主要部は、図-11に示すように水深約7mまで捨石を行い、その上に幅約6.4m、高さ7.9m、長さ7.3mのケーソンを据え付け、コンクリートを中詰めし、その上に場所打ちコンクリートを+2.3mの高さまで施工している。防波堤の基礎は、2列の斜形コンクリートブロック（重量約27t）、あるいは、1個0.3m³内外の石材により被覆されている。ケーソンの壁厚は、底部0.6m、側壁下部0.75m・上部0.45m、両端壁下部0.6m・上部0.3mとなっている。壁の上部には、特に多くの鉄筋を使用し、上端より約15cmの位置に1 1/8インチ丸鉄を2行に配置してケーソンを一周させている。これらのケーソンに用いたコンクリートの配合は、セメント0.8、火山灰0.2、砂2.5、砂利・砕石5.0であった。

③ 現況

北防波堤は、写真-7に示すように先端部約120mが当時のまま残されており、その他の部分は改良されている。軟弱地盤の上に建設されたため、沈下によりやや大端高が低くなっているが、現在なお、港内の第二線防

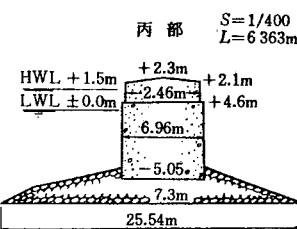


図-11 室蘭港南、北防波堤標準断面図（単位：m）



図-10 室蘭港現況平面図

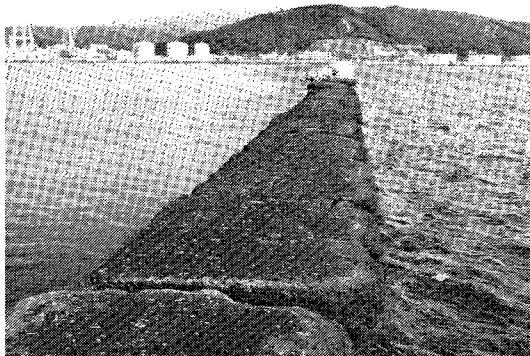


写真-7 室蘭港北防波堤（大正10～昭和2年建設, RC ケーン）



写真-8 室蘭港南防波堤(大正7～昭和2年建設, RC ケーン, 基部は護岸となっている)

波堤としての機能を果たしている。

南防波堤は、写真-8に示すように基部は背後が埋立てられ、護岸となっているが、その先の部分は消波ブロックが前面に設置され、防波堤としての役目を果たしている。

(3) 函館市水道

函館市の水道は明治22年、近代水道として横浜市について2番目、日本人の手になるものとして初めて創設された。函館市郊外の赤川にえん堤をつくり取水し、沈殿池で浮遊物を取り除いた後、管径 $12\frac{1}{2}$ インチの鋳鉄管により約8.6km離れた函館市元町の配水池に導い

た後約6万人に給水するものである。現存するコンクリート構造物は沈殿池、配水池等であるが、配水池は現在もなお使用に供されている。

a) 配水池、沈殿池^[13]

北海道で現存する一番古いコンクリート構造物である（図-12）。セメントは東京深川浅野工場製を用い、配合は各種試験の結果、本体にはセメント1, 砂 $2\frac{2}{3}$, 砂利 $2\frac{2}{3}$, 割栗石（9cm以下） $8\frac{1}{3}$, 池底コンクリート表面仕上げにはセメント1, 砂 $1\frac{1}{3}$, 割栗（4.7cm以下） $8\frac{1}{3}$ を用いた。また各池の周壁上部（笠石）には氷結対策としてレンガ張りを行っている。

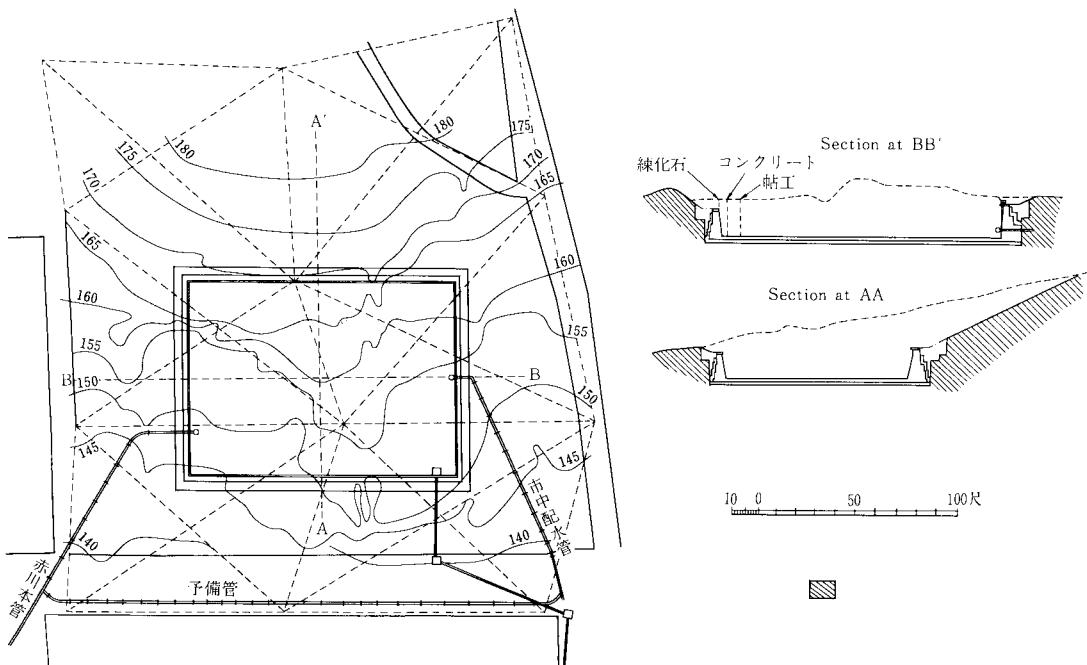


図-12 配水池一般図

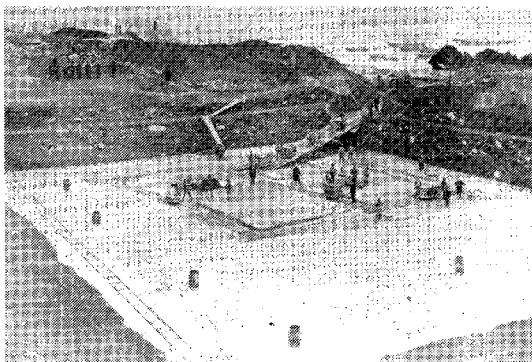


写真-9 函館水道配水池工事（明治21～22年建設、函館市立図書館所蔵）

コンクリートの打設は底部では一層 12 cm、周壁では 24 cm とし、スコップで空隙のないように敷きならし、蛸胴突で軽く突き固めたのち、乾燥を防ぐためむしろで覆い 5 日間養生した（写真-9）。

配水池は第二次拡張工事（大正6～13年）の際、鉄筋コンクリートで屋根をかぶせ、覆土したので、以後北海道の厳しい環境から解放されると同時に、たえず湿潤状態というコンクリートにとって最適の環境条件となっている。

一方沈殿池は第二次拡張工事の際、その役目を終え、現在は池として管理されている。割栗石の多少の脱落は認められるものの、凍害はほとんど認められない。

b) 笹流ダム¹⁴⁾

① 建設の概要

笹流ダムは第二次水道拡張工事に伴い、大正12年に完成した、堤高 25.30 m、堤頂長 199.39 m、堤体積 13 000 m³ の水道専用ダムである。外国の文献をたよりに日本で初めて設計施工された鉄筋コンクリートバットレスダムであり、工費と工期を大幅に節減した画期的な構造物である。

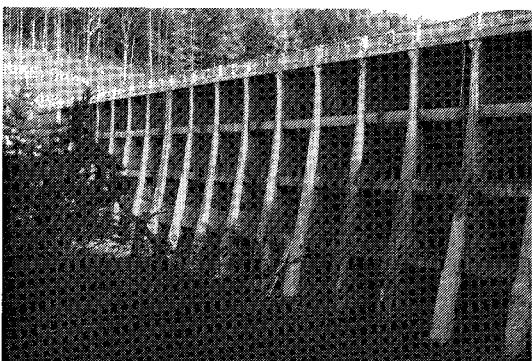


写真-10 笹流ダム（大正9～12年建設）

堤体は 3 つの構造に分類され、中央 130.9 m は水圧を受ける床版とこれを支える扶壁（バットレス）からなる鉄筋コンクリートえん堤（24 径間）、その両岸取付部 30.9 m はコンクリート重力式えん堤、残りの 37.6 m は岩着部としてコンクリート填充壁となっている。

設計時考慮した荷重は水圧および鉄筋コンクリート重量（2.45 t/m³）である。

床版は幅 30 cm（1 尺）、スパン 5.45 m の単純ばかりの集合体と仮定し、計算曲げモーメントの 5 % 増を設計用値としている。

扶壁は構造物の安定と床版支承部における支圧の検討を行っている（図-13）。

また扶壁間には地震を考慮していないので断面力の算定をしていないが振れ止めとして幅 48 cm、高さ 72 cm の水平ばかり 6 本を配置している。

コンクリートの許容圧縮応力度 31.6 kgf/cm²、許容せん断応力度 4.2 kgf/cm²、許容付着応力度 8.4 kgf/cm² であり、鉄筋は円形コルゲーテッドバーを用い、許容引張応力度は 1 125 kgf/cm² である。

コンクリートの配合は床版 1:2:4、扶壁 1:3:6、水平ばかり 1:2.5:5 で扶壁と水平ばかりではセメントの 4 分の 1 を火山灰に置き換えている。

コンクリートミキサーは 3 台（アメリカ製 11 切 1 台、9 切 1 台、日本製 11 切 1 台）を用い、1 日の打設量は 52.5 m³ である。

11 月には気温が 0°C 以下となることがあるため、このようなときには練りませ水を 15°C（60°F）に暖めるとともにコンクリート打設後帆木綿をぬい合わせたもので被覆し、暖炉 2 基により内部温度を 15°C に保持した。

② 調査および補修、補強¹⁵⁾

昭和 15 年の調査では扶壁コンクリートが表面から 4 cm 飲食していた。

昭和 22 年のフェノールフタレインによる調査では床版はほとんど中性化していないのに対し、扶壁では平均

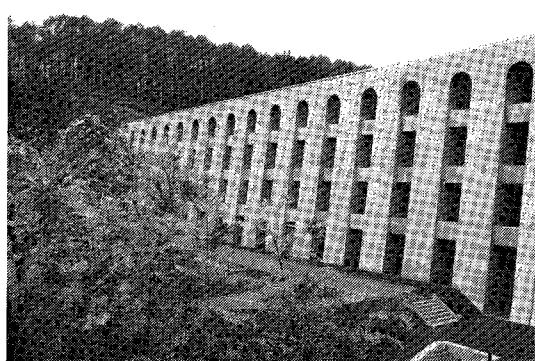


写真-11 補強後の笹流ダム

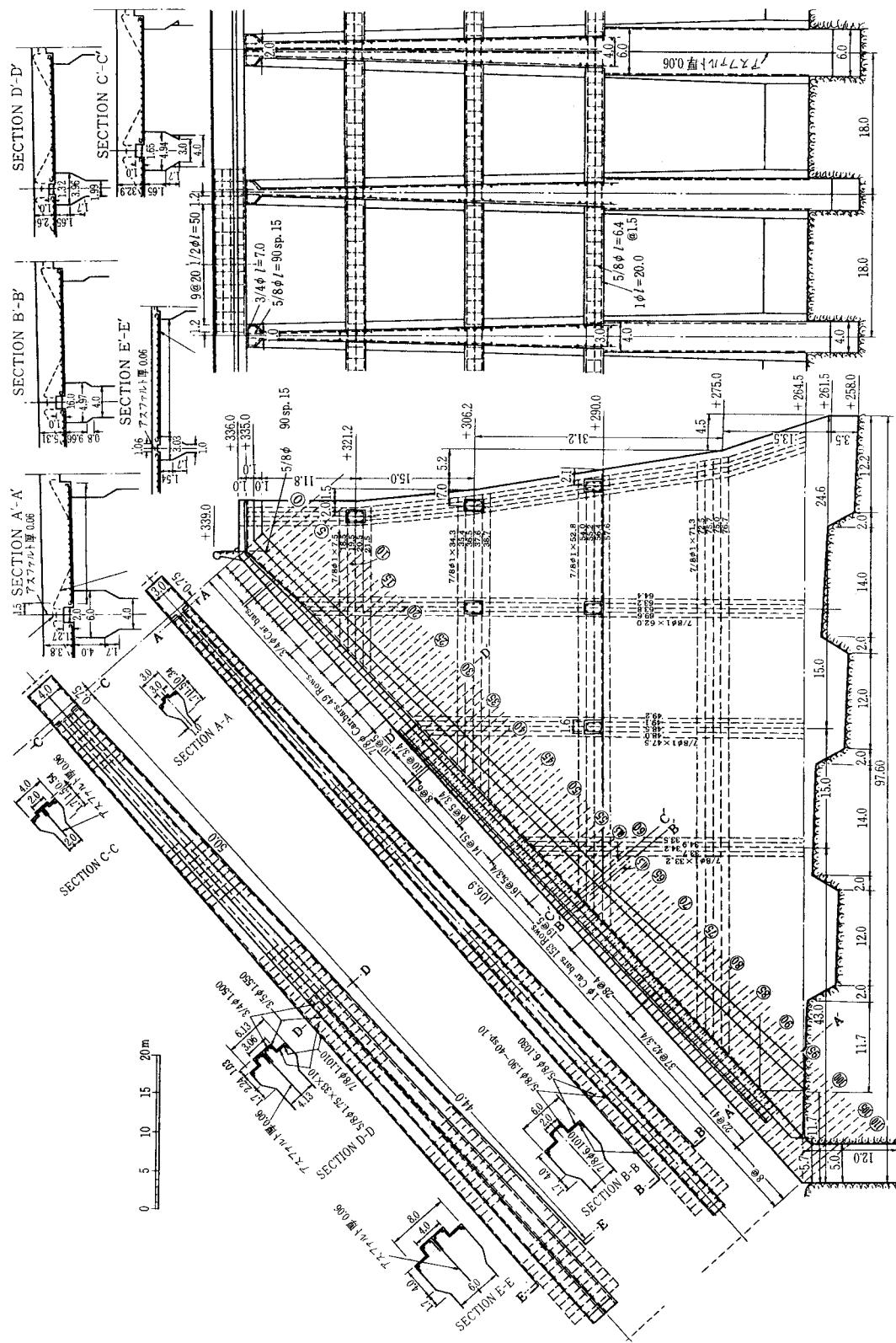


図-13 垂流ダム床版および扶壁設計図

表一覧—4 垂流ダムコンクリート試験結果

採取 孔番号	孔場所	比重	吸水率 (%)	超音波速度 (m/s)	一軸圧縮強度 (kg/cm ²)			中性化試験 (フェノールフタリン (溶液による))	備考
					補正 係数 (h/d=2)	飽和状態 乾燥状態	乾燥状態 補正 強度	静弾性係数 (kg/cm ²)	
床	1	2.435	7.596	4.531	—	1.000	145	145	すべてアルカリ反応あり
	2	2.467	7.114	4.754	—	1.000	168	168	
	3	2.438	6.777	4.578	—	1.000	162	162	
	4	2.454	8.315	4.641	—	0.971	218	212	
	5	2.446	7.367	4.867	—	0.983	110	108	
	6	2.403	8.801	4.491	—	0.983	159	156	
	7	2.464	6.743	4.835	—	1.000	179	179	
	8	2.461	8.011	4.826	—	0.975	206	201	
	9	1	2.458	5.261	4.997	4.287	0.967	—	
	9	2	2.432	6.736	4.611	3.960	0.948	—	
	10	1	2.492	5.761	4.910	4.356	0.925	94	
	11	1	2.436	6.443	5.123	4.481	0.964	203	
	11	2	2.425	6.724	4.798	4.143	0.928	249	
	12	1	2.476	6.122	5.143	4.582	0.934	258	
	12	2	2.445	6.986	5.014	4.427	0.904	262	
	13	1	2.455	6.059	4.679	3.808	0.986	177	
	14	1	2.496	5.720	4.870	3.765	0.992	—	
	15	1	2.473	6.107	5.287	4.746	0.944	170	
	15	2	2.442	6.036	4.556	3.776	0.918	171	
	16	1	2.486	5.543	4.864	4.000	0.998	177	
	平均値	2	2.454	6.711	4.819	4.194	—	183	
設計値									
柱	17	2.441	6.922	—	—	—	*4.7	—	モルタル繊維付近一部中性化
	18	1	2.509	6.181	4.901	4.279	0.977	—	鉄筋引抜きによる付着強度(標準提出)
	18	2	2.463	6.071	4.569	4.000	0.913	374	荷重方向の側方半分のコンクリート、若干劣化
	19	1	2.463	7.842	4.063	3.069	0.966	93	モルタル繊維一部開口劣化
	19	2	2.435	6.929	4.689	3.900	0.927	118	空隙少ないがコンクリート劣化
	20	1	2.488	6.501	4.774	3.812	1.000	—	モルタル繊維一部開口劣化
	20	2	2.451	7.235	4.908	3.987	0.987	194	若干空隙あり、コンクリートは劣化
	21	1	2.469	7.705	4.713	4.054	0.961	191	若干空隙あり、空隙多い
	22	2	2.408	7.284	4.746	4.318	0.945	—	やや大きい空隙約45°に並んでいる、劣化
	平均値	2	2.459	6.961	4.670	3.927	—	184	コンクリート劣化

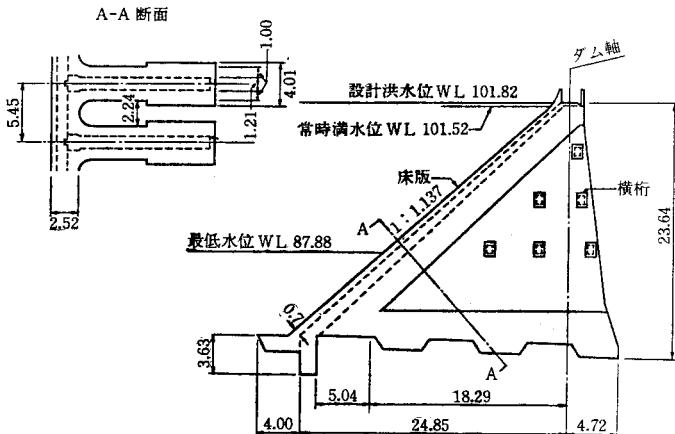


図-14 笹流ダム標準断面図（点線は補強前の断面を示す）

4 cm, 最大 9 cm に達していることが判明し, 昭和 23~24 年吉田徳次郎教授の助言に従い, 中性化したコンクリートをはり, モルタル吹付けによる補修を行った。現場から採取した $4 \times 4 \times 4$ cm の吹付けモルタルの圧縮強度は平均 592 kgf/cm^2 (最小 499 kgf/cm^2 , 最大 803 kgf/cm^2) である。

昭和 54 年に行ったコアを採取しての調査では, 床版, 扶壁ともコンクリート強度は設計強度を上回り, また鋼材の腐食も認められず, ダムは当初の耐力を有していることが判明したが, 凍害による部分的補修が多くなったことと耐震安定性を確保するため, 昭和 58~59 年ダムの補強工事を行った。工事は旧コンクリートを新しいコンクリートで全面的に被覆することによって凍害防止と耐震安定性を確保しようとしたもので, 堤体積も $36\,400 \text{ m}^3$ と当初の 2 倍以上となり外観もかなり変化したが, バットレスダムという構造形式は不变である。

(4) 千歳川発電所

王子製紙(株)は苦小牧工場で使用する電力の一部をまかなうため明治 40~昭和 16 年の間に 5 つのダムと発電所を建設した。

第 1 発電所は明治 40 年 5 月から 2 年 6 か月の歳月をかけて建設が進められたもので第 1 えん堤, 4.3 km に

わたる水路, 水溜池, 発電施設からなり, 3 125 kW A の発電機 4 台を稼動させるものである^[16]。

第 1 えん堤は堤頂長 69.97 m のうち, 中央 41.9 m を石積み, 左岸着岩部 6.25 m を重力式コンクリート構造, 残りは放水路などの施設である。コンクリートはセメント 1, 砂 3, 砂利 6 の配合であるが, コンクリート表面に硬石張を行い, 氷結などに対処している。この思想は第 2~第 4 ダムにも受け継がれ, 内部はセメント 1, 砂 3, 砂利 6 の粗石入コンクリートで施工し, 表面には間知石積みを行っている。このためダム背面に石灰の滲出は認められるものの凍害を受けた様子は

なく, 60~75 年以上経過した現在も良好な状態を保ち続けている。むしろ昭和 16 年完成の第 5 えん堤で乾湿の影響を受ける水際部や第 3, 4 えん堤の耐震安定性を確保するため昭和 26, 29 年に施工した扶壁コンクリートに凍害が認められる。

水路は全長 4.3 km のうち 3.49 km が内径 2.67 m のほぼ馬蹄形をした鉄筋コンクリート構造である。水路コンクリートの有効厚は 30 cm で径 19 mm の鉄筋を 22.5 cm 間隔に配置し, 縦方向には 13 mm 鉄筋を 9 本配置し

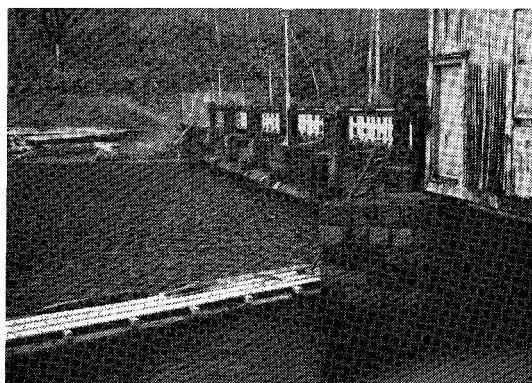


写真-12 千歳川第1発電所えん堤（明治40~42年建設）

表-5 千歳川発電用ダム

	型 式	建設年月	堤 高 (m)	堤 頂 長 (m)	堤 体 積 (m ³)	摘 要
第1ダム	重力溢流型 可動扉付えん堤	明治43年9月	6.06	69.97	605	
第2ダム	重力非溢流型 コンクリートえん堤	大正5年5月	13.03	83.94	3 258	
第3ダム	"	大正7年5月	23.64	119.40	11 246	耐震安定のため補強(昭29)
第4ダム	"	大正9年1月	21.88	102.42	6 780	耐震安定のため補強(昭26)
第5ダム	"	昭和16年2月	7.50	46.88		

た。

コンクリートの配合は断面の上半分がセメント 1, 火山灰 1, 石灰 1/4, 砂 6, 碎石 12, 下半分がセメント 3/4, 火山灰 3/4, 石灰 1/4, 砂 4, 碎石 8 である。

施工にあたってはコンクリートの内部に空隙が残らないこと、コンクリートが型枠の隅々まで行きわたることに苦労を重ね、種々の締固め用金具を考案してその使用を試みたがよい結果が得られず、コンクリートをやや軟らかく練り上げることにより解決したといわれる。

内枠はコンクリート打設後 10 日、外枠は 5 日で脱型して危険のないことを確かめている。

これらの構造物は毎年行われる定期点検においても全く異常は認められず良好な状態が保たれている。

(5) 耐久性に優れたコンクリートの特色

耐久性に優れたコンクリート構造物に共通した点を挙げると次のとおりである。

① 練りませ水が少なく、W/C が小さいコンクリートを十分突き固めている。鉄筋コンクリート構造物の場合でも金具、木綿で突き固めている。十勝大橋は内部振動式バイブレーターを用いたが、豆板などの欠陥が生じないよう突き棒を併用している。

② 湿潤養生を十分行っている。養生日数は 5 日～15 日と差はあるが、むしろで覆い散水したり、穴を開けたホース・竹管などに通水してコンクリート面を湿潤状態に保っている。

③ 打継面の処理を確実にしている。明治時代のコンクリートブロックは熊手でかき荒らし、十勝大橋はウォータージェットでレイタンス除去を行い、打継面の接合を完全にした。

④ かぶりを設計図どおり確保している。モルタルブロックなどはひびわれ発生の原因となるとして使用せず、コンクリート中に埋設される内部スペーサーや鉄筋の緊結を十分行うことにより対処している。

⑤ コンクリート表面を間知石積み、レンガ積みなどで保護している場合、耐凍害性の大きい構造物となっている。

これらのこととは特に新しいものでなくコンクリートの基本を確実に実行すれば、耐久性に優れたコンクリート構造物を建設できることを示している。

5. あとがき

本文で報告した構造物は 45～97 年間、北海道という厳しい環境にあったにもかかわらず、築流ダムを除いて本質的な補修はなされていない。まさに CEB でいう予定外の費用支出のない耐久性に優れた構造物に適合するものである。コンクリートの本質を考えた設計施工が的確に行われた場合、コンクリート構造物はいかに優れた

特性を發揮するかを立証しているが、それを可能にした要因の 1 つに卓越したプロジェクトリーダーの存在があるように思われる。コンクリートの本質を熟知したリーダーが内外の情報をもとに、最新の技術を駆使し、実験を重ねながら設計から完成まで統一した考へて指導したからである。広井博士は人夫 1 人 1 人にコンクリートの練り方まで指導されたともいわれている。仕事の細分化が進み、分業化とコンクリート構造物の早期劣化の関連が話題となる昨今、一度検討してよい問題と考える。

一方これまで述べてきた構造物は機能的耐用期間がきわめて長い幸運な構造物であるとも考えられる。市制が敷かれたばかりの帯広市にかけられる橋に幅員 18 m も必要かどうか大きな議論があったことは想像にかたくない。結果的には機能的耐用年数を大幅に増大させることになった。函館市水道の配水池築流ダムの場合、同規模の配水池や中野ダムの建設により、その後の需要増加に対処したため機能上の問題は生じなかった。また港湾構造物の場合かさ上げにより機能強化を図っている。経済性とあわせてそれらの経過を考えることは、設計耐用期間を検討する際、いくつかのヒントが得られるように思われる。

これからコンクリート構造物は種々の環境に建設され、コンクリートの技術も飛躍的に発展するものと考えられるが、その本質を十分生かした材料の選定、設計施工が行われ、本文に報告したような耐久性に優れたコンクリート構造物が輩出することを希望する。

貴重な資料を提供していただいた、函館市水道局 高井弘明技術部長、王子製紙株式会社苫小牧工場施設部石井正光氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) Frohnsdorff, G. and Masters, L. W. : The Meaning of Durability and Durability Prediction, Durability of Building Materials and Components, STP 691, 1980.
- 2) Durability of Concrete Structures, Bulletin d'Information, Comite Euro-International du Beton, N° 148, 1982.
- 3) 長谷川寿夫：コンクリートの凍害危険度算出と水セメント比限界値の提案、セメント技術年報、昭和 50 年。
- 4) 北海道土木技術会コンクリート腐食研究委員会：コンクリート腐食に関する研究、研究資料第 10 号、昭和 32 年。
- 5) 今井益隆：コンクリート構造物の凍害調査、コンクリート工学、昭和 51 年 11 月。
- 6) 佐伯 昇・鮎田耕一・前川静男：北海道における海岸および港湾コンクリート構造物の凍害による表面剥離損傷、土木学会論文報告集、第 327 号、昭和 57 年 11 月。
- 7) 太田利隆・松尾徹郎・前川静男・藤井 卓：海岸に建設された鉄筋コンクリート橋の塩害について、鉄筋コンクリートにおける塩化物の影響に関するシンポジウム発表論文集、日本コンクリート会議、昭和 50 年。

- 8) 横道英雄：河西橋に関する報告及び研究（その1）～（その7），土木学会誌，昭和17年7月，8月，昭和18年2月，7月，土木試験所報告第3号，昭和23年3月，土木試験所報告第4号，昭和23年4月。
- 9) 広井 勇：小樽築港工事報文前編，北海道庁，明治41年。
- 10) 伊藤長右衛門：小樽築港工事報文後編，北海道庁，大正13年。
- 11) 広井 勇：函館港改良工事報文，北海道庁函館支庁，明治32年。
- 12) 中村廉次：北海道港湾変遷史，技報堂，昭和35年。
- 13) 千種 基：箱館水道工事，工学会誌第91号，明治22年7月。
- 14) 小野基樹：函館市水道貯水池に築造せる中空式鋼筋混擬土堰堤，土木学会誌，第10卷，4号，大正13年8月。
- 15) 茂呂 章：篠流ダム，利水評論，No.29，昭和59年10月。
- 16) 浜田束稻：北海道千歳川水力電気工事土木部工事概要，工学会誌第337号，明治44年2月。
- 17) 北海道開発局港湾部：北海道港湾建設史，北海道開発協会，昭和53年12月。

(1986.1.14・受付)