

[1076] 長年月、海洋環境下において供用された水路の耐久性調査

石橋 輝樹 (国鉄東京建築工務局)

田 藤 毅 (国鉄東京建築工務局)

正会員 ○ 竹田 宣典 (大林組技術研究所)

正会員 青木 茂 (大林組技術研究所)

1. まえがき

海洋環境下におけるコンクリート構造物においては、塩素イオンの浸透による鉄筋の腐食が問題となる。鉄筋の腐食は、構造物の耐久性に大きく影響を及ぼすが、その進行状況は、環境条件、経過年数、コンクリートの品質等によって異なる。この報告は、海岸に面した火力発電所のタービン用水路の付替工事に伴い、施工後約60年間および30年間、海洋環境下において供用されたコンクリートの水路の数箇所において、塩分浸透および鉄筋の腐食等について調査を行った結果をまとめたものである。

2. 調査概要

2.1 対象構造物

発電所内の水路は2系統あり、その施工は昭和5年と昭和32年に行われ調査時までの供用年数はそれぞれ56年と29年である。図-1に水路の系統および調査位置を示す。調査は以下の4箇所に行った。

①：取水路カルバート (昭和5年施工)

②：取水路カルバート (昭和32年施工)

③：除塵池部の内壁 (昭和32年施工)

④：放水口部の擁壁 (昭和32年施工)

図-2に各調査位置の水路の構造を示す。表-1に調査位置の環境条件を示す。取水路カルバートは海中、除塵池は飛沫帯、放水口擁壁は海上大気中の環境に区分される。(土木学会RC示方書)

2.2 調査方法

取水路カルバートでは上床版部および壁部において、除塵池ではH.W.L.とL.W.L.の中間において、放水口部擁壁ではH.W.L.の近くにおいて直径10cmのコアを採取し、表-2に示す各種の調査を行った。

鉄筋の自然電位および腐食度の調査は、工事に伴って切り出されたコンクリート塊中の鉄筋について行った。なお、鉄筋の腐食度は、表-3に示す様に鉄筋の表面状態により分類した。

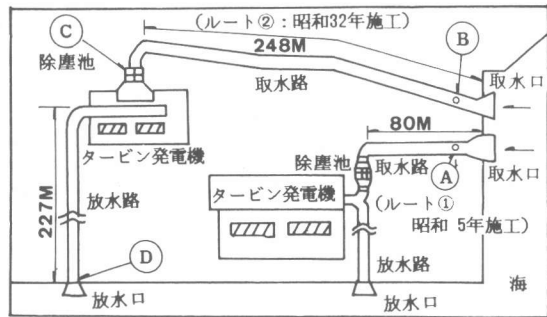


図-1 発電所水路系統

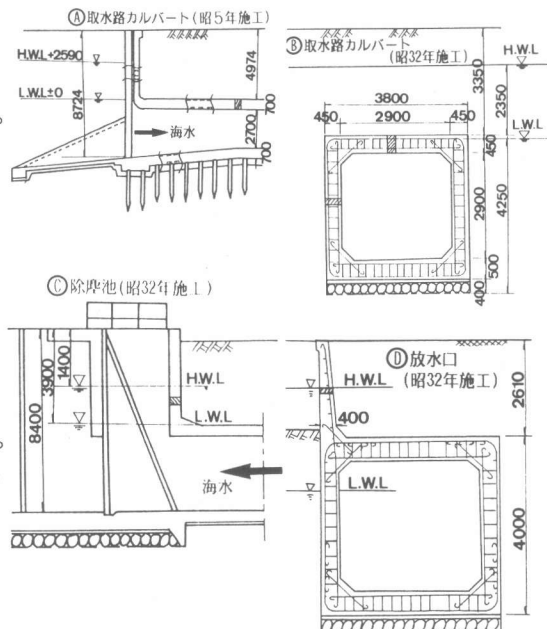


図-2 調査位置の水路の構造

3. 調査結果

3.1 環境条件の影響

昭和32年施工の取水路カルバート、除塵池、放水口のコンクリートの試験結果について述べる。表-4にルート②の施工記録によるコンクリートの配合を示す。水セメント比は54%, 単位セメント量は300 kgであった。AE減水剤(促進形)より混入した塩素イオン量は約1100 g/m³(セメント重量に対して約0.6% NaCl)である。これらの値はRC示方書に適合しない部分もある。

(1) コアの外觀……いずれの部分のコアも、ジャンカおよび著しいペーストのぬけおちはなく、密実・堅硬であった。カルバート内側表面には、フジツボ等の貝類が付着していた。

(2) 力学的性質……表-5に力学試験の結果を示す。設計基準強度は1週で180 kg/cm²であるが、材令29年での圧縮強度は、いずれも平均327~522 kg/cm²であった。施工状況の差もあると考えられるが、圧縮強度は除塵池(C)(飛沫帯)、放水口(D)(海上大気中)、取水路カルバート(B)(海中)の順に高く、環境条件の差が生じている。

単位体積重量、動弾性係数、超音波速度からもコンクリートは密実であると考えられる。

(3) 中性化……最も中性化が進行しているのは、カルバート(B)の壁部の内側で中性化深さは7 mmであった。除塵池、放水口部では、1~3 mm程度であり、砂礫と接触している面は全く中性化していない部分が多い。コンクリート表面が長期間乾燥することがないために、中性化の進行が緩やかであったものと考えられる。

(4) 塩分浸透……図-3に塩分量の分布図を示す。表面部分の塩分量(セメント重量に対するNaCl換算値)は、カルバート(B)の内側で最も多く6~7%, カルバート(B)の外側および放水口擁壁で4~5%, 除塵池内壁で2%であった。

深さ10 cmでの塩分量は、カルバート(B)の外側で約1%, カルバート(B)の内側で約3%であった。混和剤から混入した塩素イオン

表-1 調査位置の環境条件

記号	施工年	調査箇所	海岸線からの距離	調査箇所環境条件	備考
(A)	昭和5年	取水路部カルバート上床盤側壁	約12m	カルバート内側: 常時0.7m/sの海水が流入している カルバート外側: 海水を含んだ石礫に接している	AE減水剤使用せず
(B)		(海中)	約18m		
(C)	昭和32年	除塵池内壁(飛沫帯)	約250m	潮の干満の作用を受ける	AE減水剤使用(促進形) (cl ⁻ 含有)
(D)		放水口擁壁海上大気中	約1m	潮風・波しぶきを受ける	

表-2 調査項目

調査項目	試験方法
力学的性質 圧縮強度 弾性係数 超音波伝播速度	コア供試体の鉄筋部分を除いて、長さl=20cmに整形して試験を実施
中性化深さ	コア供試体を割裂し、フェノールフタレイン1%溶液を噴霧
塩分浸透	粗骨材をぬきとった試料について吸光度法(クロム酸銀)による全塩分定量し、セメント重量に対するNaCl換算値を算出
水和熱	X線回折装置により測定
気泡分布	画像処理方法により硬化コンクリートの気泡径分布・空気量・気泡間隔係数を測定
鉄筋の腐食度	目視検査による発錆状態を分類(表-3)
鉄筋の自然電位	照合電極は飽和硫酸銅電極(ASTM C 876)

表-3 腐食状態の分類

発錆度	鉄筋表面の発錆状態
I	ほとんどが黒皮の状態で、発錆していない
II	部分的に浮き錆があるが、小面積の斑点状である
III	比較的広い面積に錆がある
IV	大部分の範囲に錆があり、局部的に層状の錆がある
V	層状の厚い錆が発生し、部分的に断面欠損している

表-4 配合記録

調査記録	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				設計基準強度 (kg/cm ²)
		C	W	S	G 混和剤	
(B,C,D)	54	300	162	795	1111 AE減水剤促進形 3 kg	σ ₇ =180

表-5 コア供試体試験結果

調査位置		試験項目	圧縮強度 (kg/cm ²)	静弾性係数 ($\times 10^5$ kg/cm ²)	動弾性係数 ($\times 10^5$ kg/cm ²)	超音波速度 (km/sec)	単位体積重量 (t/m ³)	中性化深さ (mm)	
								内側	外側
								(mm)	
(A) 取水路カルバート(昭和5年施工)	上床版部	1	408	3.37	4.00	4.61	2.37	0.0	0.0
		2	458	3.70	4.48	4.48	2.42	0.0	0.0
		3	312	3.76	4.33	4.86	2.43		
		4	517	3.88	4.57	4.87	2.40		
		5	457	3.59	4.31	4.70	2.45		
		6	343	3.93	4.56	4.97	2.45		
		平均	419	3.77	4.38	4.75	2.42	0.0	0.0
	壁部	1	357	3.74	4.34	4.62	2.66	0.0	0.0
		2	231	3.68	4.35	4.68	2.55	4.4	5.0
		平均	291	3.71	4.35	4.64	2.61	2.2	2.5
(B) 取水路カルバート(昭和32年施工)	上床版部	1	241	2.07	*	*	2.41	0.0	*
		2	385	4.18	*	*	2.40	0.0	*
		3	287	3.65	*	*	2.40	*	*
		4	438	3.37	3.82	4.51	2.34	0.1	0.0
		5	423	3.73	3.88	4.62	2.34		
		6	216	3.60	4.04	4.52	2.35	2.8	4.2
		平均	329	3.43	3.91	4.55	2.37	0.7	2.2
	壁部	1	427	3.18	3.96	4.59	2.42	*	*
		2	369	3.64	4.51	4.76	2.43	4.1	0.0
		3	349	4.04	4.00	4.82	2.48	7.0	0.0
		平均	382	3.62	4.32	4.72	2.44	5.6	0.0
(C) 除塵池(昭和32年施工)	内壁	1	526	3.89	*	*	2.42	0.5	0.0
		2	558	4.10	*	*	2.50	*	*
		3	481	3.71	*	*	2.41	2.0	*
		平均	522	3.89	*	*	2.44	1.25	0.0
	擁壁	1	448	3.38	*	*	2.39	0.0	*
		2	483	3.37	*	*	2.37	3.0	*
		平均	466	3.37	*	*	2.38	1.5	*

ン量を差し引き、約30年間に深さ10cmの部分まで浸入・蓄積した塩分量は、外側で0.4%（コンクリート1 m^3 中の Cl^- 量で730 g/m^3 ）内側で2.4%（ Cl^- 量4380 g/m^3 ）となる。除塵池内壁・放水口擁壁の塩分量は、カルバート③の外側と同程度であった。

(5) 水和鉱物調査……図

ー4にX線回折図を示す。鉄筋の腐食に及ぼす影響が少ない固定化された塩分であるフリーデル氏塩は、カルバート③の内側表面から10cm、外側表面から2cmまでにおいて検出され、除塵池および放水口においては検出されなかった。また、カルバート③の内側は外側に比べて、水酸化カルシウム（ $Ca(OH)_2$ ）の検出されない部分が深くまで存在している。

3.2 供用年数の影響

昭和5年施工の取水路カルバート（④）の試験結果について述べる。

(1) 力学的性質……圧縮強度は500 kg/cm^2 以上の部分もあり、全体的に昭和32年施工のカルバート③に比べて強度は高い。これは配合の違いに起因するものと考えられるが、弾性係数・超音波速度からもコンクリート内部は極めて密実であるとみなされる。

(2) 中性化……壁部において、5mm程度中性化している部分があるが、上床版については全く中性化は進行していなかった。

(3) 塩分浸透・水和鉱物調査

昭和5年施工のカルバート④の内側からと外側からの塩分浸透量の差は小さく、表面部分での塩分量は両者とも5～6%であり、昭和32年施工のカルバート③に比べて内側は若干小さく、外側は若干大きい。深さ10cmにおける塩素イオン量は、単位セメント量を300 kg と仮定した場合、内側で3600 g/m^3 、外側で4600 g/m^3 であり、昭和32年

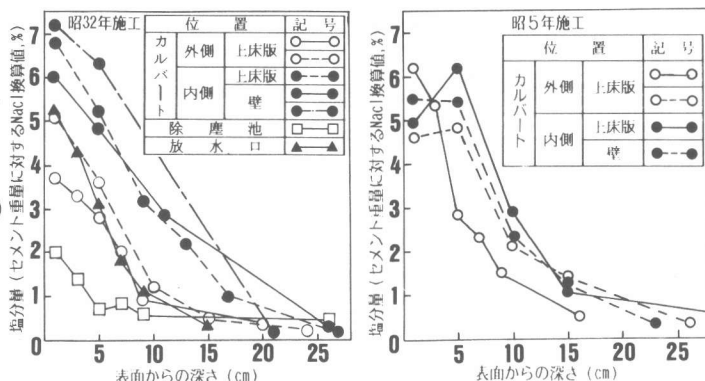


図-3 コンクリート中の塩分量

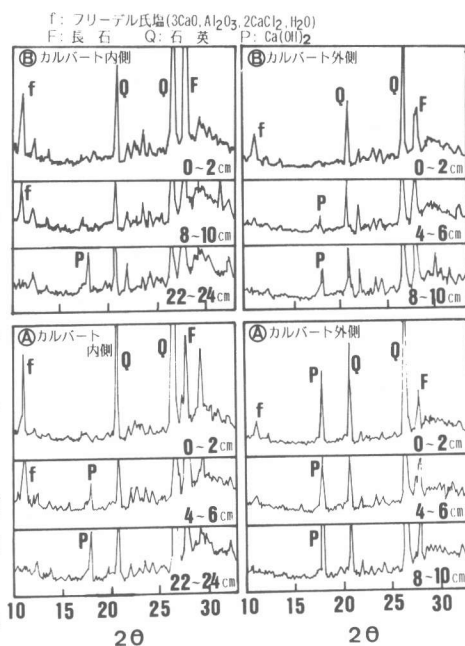


図-4 X線回折結果

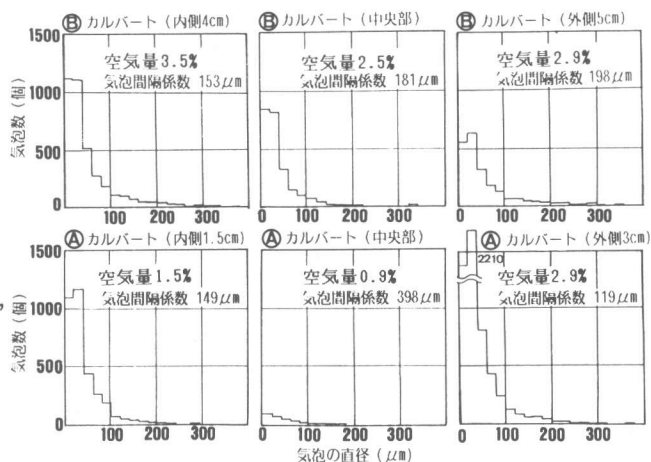


図-5 コンクリート中の気泡分布

施工のカルバート③より深くまで浸透している。

フリーデル氏塩は、カルバート④の内側で表面から6 cmまでにおいて、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ はカルバート④の外側の表面部分においても検出された。

(5) 気泡分布および空気量

図-5 に気泡分布・空気量・気泡間隔係数の測定結果を示す。昭和32年施工のカルバート③の内側・断面中央部・外側での空気量および気泡間隔係数の差は小さい。また、100

μm 以下の気泡が多く、気泡間隔係数も200 μm 以下であるため、凍結融解抵抗性は十分にあると考えられる。

昭和5年施工のカルバート④は施工年代からA Eコンクリートではないと考えられるが、断面中央部での空気量は少なく、気泡間隔係数は大きい。また、内側および外側の表面部分は海水の作用によって100 μm 以下の細い気泡が多い状態となっている。

(6) 鉄筋の腐食状態……表-6 に鉄筋の腐食状態および自然電位を測定した結果を示す。鉄筋はすべて丸鋼を使用しており、錆はコンクリート表面側に多いが、断面欠損を生じているものはなかった。昭和5年施工および昭和32年施工のカルバートの両者とも、カルバートの内側の鉄筋は外側の鉄筋に比べて発錆状態の等級(表-3 参照)が高く、腐食面積率も大きい。

鉄筋の腐食面積率と塩分量の関係を図-6 に、自然電位との関係を図-7 に示す。塩分量が多いと腐食面積率は大きくなる傾向にあり、塩分量が3 %を越えると腐食面積率が、30 %を越えるものもあるが、塩分量が1 %以下(1800 $\text{g}/\text{m}^3 \text{Cl}^-$: RC示方書の規制値の3倍)の場合には、腐食面積率は15 %以下であった。

腐食面積率は鉄筋によって差があるが、塩分量がセメント重量に対して6.0 % (10900 $\text{g}/\text{m}^3 \text{Cl}^-$: RC示方書規制値の18倍) も含まれているにもかかわらず、その平均値は15 %程度のものである。また、自然電位を測定することによって、腐食状態がある程度推定できる。

4. まとめ

- (1) 調査を行った昭和5年および昭和32年施工のコンクリートは、密実・堅硬であり、力学的性質や鉄筋の腐食状況から構造物の保有耐力は十分であると判断される。
- (2) 構造物が供用された環境条件は、コンクリート中の塩分浸透量および鉄筋の腐食に影響を及ぼすが、長年月経過し、コンクリート中に多量の塩分が浸透した場合でも、密実・堅硬なコンクリートであれば鉄筋の腐食は軽度であり構造物は十分な耐久性を保っている。

表-6 鉄筋の腐食状態

調査位置			鉄筋 径 (cm)	かぶり (cm)	塩分量			腐食面積率 (%) 及び 錆の程度	フリーデル 氏塩の 生成範囲	自然 電位 (-mV)
					表面部 NaCl %	鉄筋位置 NaCl % Cl^- g/m ³				
取 付 部 位 (昭和5年 工 施)	内 側	1	φ25	5.0	6.2	11300	13.3	Ⅲ	表面から 6cmまで	457
		2			6.0	10900	24.0	Ⅲ		409
		3			4.5	6.0	10900	48.1		Ⅲ
	外 側	1	φ13	6.2	1.0	1800	15.8	Ⅱ	表面から 2cmまで	—
		2			1.1	2000	7.7	Ⅱ		320
		3			0.9	1600	13.0	Ⅱ		127
取 付 部 位 (昭和32年 工 施)	内 側	1	φ16	6.8	3.5	6400	14.2	Ⅱ	表面から 10cmまで	—
		2			3.3	6000	36.9	Ⅲ		342
		3			3.3	5500	23.1	Ⅲ		344
	外 側	1	φ16	5.0	1.4	2550	16.1	Ⅱ	表面から 2cmまで	221
		2			1.0	1800	9.1	Ⅱ		256
		3			0.9	1600	15.2	Ⅱ		236

*セメント重量に対するNaCl換算値
**単位セメント量を300kgとした場合の塩素イオン量

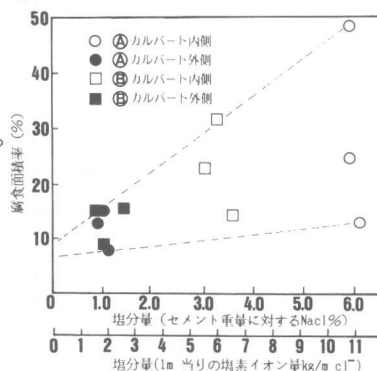


図-6

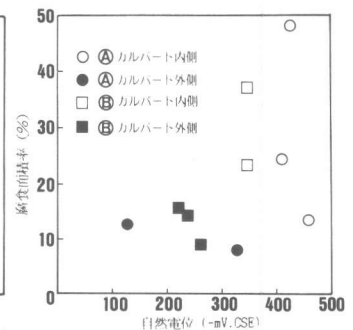


図-7

塩分量と腐食面積率の関係 自然電位と腐食面積率の関係