

# [ 5 ] 海水の浸食による鉄筋の腐食(関門トンネル車道床版の調査)

正会員 ○松下 博通(九州大学工学部)

手塚 誠(日本道路公団)

豊田 昭夫( " )

## 1 まえがき

本州と九州を結ぶ関門トンネルは、昭和33年に完成し約21年を経た海底トンネルで、利用通行台数は1億台を突破し、この間の経済的利益は計り知れないものであった。しかし、この21年間における車両の増加および大型化並びに海水の影響等により、鉄筋コンクリート床版および側壁にひびわれ発生、鉄筋の腐食およびそれに伴うかぶりコンクリートの剥離などの変状が認められたため、海底部の413.3mにわたって打ち替え工事が行なわれた。

この際、取り壊された床版コンクリートおよび鉄筋について、床版コンクリート内における浸透塩分の分布状態の把握および塩分と鉄筋腐食度との相関関係の究明を行なうことは、今後の床版の劣化防止対策および劣化度診断にも役立つため、それらの調査結果について報告する。

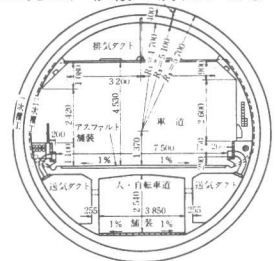


図-1 海底部トンネル断面図

## 2 調査方法

鉄筋の腐食と塩化物の関係は、きわめて複雑な要因によって支配され定量化が困難であり、多くは変状を呈した建物の塩化物量調査および塩化物の使用経験など実験室的な研究が多く、海水の影響を受けた実際の構造物に関する研究は少ない。そこで、海底部の打ち替え工事で取り壊された床版よりダイヤモンドコアドリルを用いてコンクリートコアを採取し、コンクリートの物理的性状および化学的性状試験を行ない、又、コンクリート研り片の化学的性状試験を行なって鉄筋の腐食度との関連を見出すものである。

- ・コンクリートの物理的性状試験……圧縮強度試験、単位体積重量、吸水率および超音波伝播速度測定
- ・コンクリートの化学的性状試験……水溶性塩素濃度測定、水素イオン指数測定(ガラス電極PH計で測定)  
水溶性塩素濃度測定は、試料粉末2gを精秤し、100mlの蒸留水を加え湯浴上で40~50℃に加熱し、時々攪拌しながら1時間溶出させ、ろ過した後、ろ液を希硝酸でPH=6~8に調節し、クロム酸カリウム(5%溶液)を指示薬として1/10N硝酸銀溶液で滴定する。
- ・鉄筋の腐食度試験……鉄筋の発錆状態は孔食状であるため、鉄筋の腐食度は鉄筋長約10cm当りの重量減少比で求めた。試料鉄筋は、コンクリートコアに埋まっている鉄筋およびコンクリート研り片を採取した位置より採取した。

$$\text{腐食度}\% = \frac{(\text{腐食前の鉄筋重量}) - (\text{クエン酸アンモン処理後の鉄筋重量})}{(\text{腐食前の鉄筋重量})} \times 100$$

なお、腐食鉄筋の処理後の鉄筋重量はクエン酸アンモン10%溶液中に試料鉄筋を浸して30分間煮沸させた後よく水洗いし、110℃±5℃で乾燥させた後秤量して腐食鉄筋重量とし、腐食前の鉄筋重量は、床版より採取した腐食を受けていないと推定される10本の鉄筋(φ16%)のクエン酸アンモン処理後の平

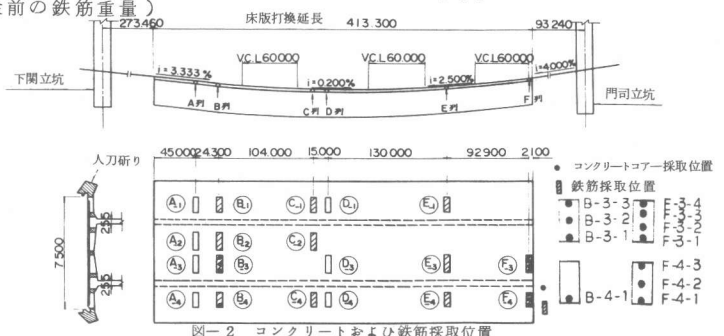


図-2 コンクリートおよび鉄筋採取位置

均単位長さ当りの重量(15.17 g/cm)を用いた。

コンクリートの物理的および化学的性状試験に用いた試料ならびに鉄筋の腐食度試験に用いた試料の採取は、関門トンネル内に漏水した海水の排水径路および関門トンネルの縦断勾配を考慮し、又、関門国道トンネル工事誌による品質管理結果(下関側と門司側でコンクリートの水セメント比が5.4%と6.2%、平均圧縮強度が311kg/cm<sup>2</sup>と197kg/cm<sup>2</sup>)を考慮して、打ち替え工事と平行しながら図-2の位置より試料を採取した。

### 3 コンクリートの物理的性状試験結果および考察

コンクリートコアによるコンクリートの物理的性状試験は、図-3の供試体を用いて圧縮強度、単位体積重量、吸水率および超音波伝播速度測定を行なった。コンクリートの物理的性状試験結果は、表-1の通りである。

圧縮強度は、門司側床版のF列で、F-3-1~4の平均値が313kg/cm<sup>2</sup>、F-4-1~3の平均値が293kg/cm<sup>2</sup>でF列全体の平均値は304kg/cm<sup>2</sup>であった。下関側床版のB列は、B-3-1~3の平均値が400kg/cm<sup>2</sup>、B-4-1は409kg/cm<sup>2</sup>でB列全体の平均値は402kg/cm<sup>2</sup>であり、下関側のB列が門司側のF列に比べて平均値で約100kg/cm<sup>2</sup>程度高い強度であった。これを施工当時の床版コンクリートの品質管理試験結果(関門トンネル工事誌、設計基準強度180kg/cm<sup>2</sup>の門司側198kg/cm<sup>2</sup>(1.8ヶの平均値)、191kg/cm<sup>2</sup>(3.9ヶの平均値)、下関側302kg/cm<sup>2</sup>(2.2ヶの平均値)、315kg/cm<sup>2</sup>(51ヶの平均値)と比べると同じような傾向がみられ、材令によるコンクリートの圧縮強度の増進が考えられる。

単位体積重量は、圧縮強度の大きい下関側のB列が圧縮強度の小さい門司側のF列よりも大きく、又、単位体積重量と圧縮強度、超音波伝播速度、吸水率との関係についての図-4、5、6より相関関係が認められた。超音波伝播速度は、下関側のB列が4500m/s~5000m/s、門司側のF列が3100m/s~4300m/sの範囲で、圧縮強度との間には図-7の通り相関関係が認められた。

### 4 コンクリートコアおよびコンクリート研り片の化学的性状試験結果および考察

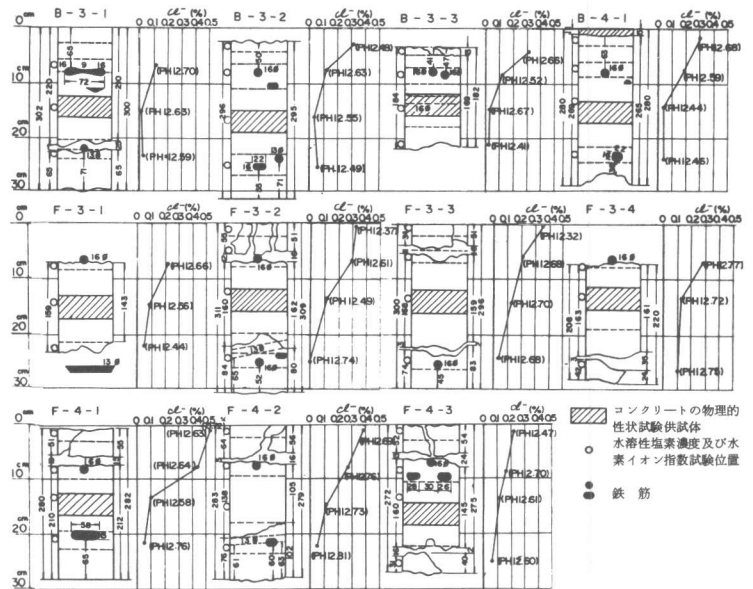


図-3 コンクリートコア形状および水溶性塩素分布

表-1 コンクリートコア試験結果

コア記号	供試体寸法 (cm)		単位容積重量 (kg/L)	吸水率 (%)	超音波伝播速度 (m/s)	圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )				
	高さ	直径				測定値	修正係数	修正値		
B-3-1	20.80	9.99	—	—	—	—	—			
	12.87	9.99	1.29	2432	2393	1.65	4,732	453	0,933	423
B-3-2	29.40	10.00	—	—	—	—	4,836	—	—	—
	12.09	10.00	1.21	2,452	2,415	1.53	4,895	391	0.923	361
B-3-3	7.91	10.00	0.79	2,460	2,427	1.38	4,546	503	0.830	417
	16.22	10.00	—	—	—	—	—	—	—	—
B-4-1	12.32	10.00	1.23	2,518	2,489	1.17	5,070	441	0.927	409
	11.41	10.01	1.14	2,365	2,347	1.69	3,109	331	0.913	302
F-3-1	12.56	9.99	1.26	2,364	2,328	1.59	4,258	364	0.931	339
F-3-2	13.85	10.00	1.39	2,357	2,317	1.72	3,991	299	0.947	283
F-3-3	11.33	9.99	1.13	2,337	2,297	1.74	3,423	360	0.911	328
F-4-1	10.89	10.00	1.09	2,421	2,387	1.48	3,502	307	0.905	278
F-4-2	10.20	10.00	1.02	2,386	2,346	1.67	4,048	343	0.893	306
F-4-3	11.61	10.00	1.16	2,369	2,330	1.71	4,300	322	0.915	295

※ コンクリートコアの中に鉄筋が横断していたが、コア高さが低いため、そのまま試験に供し、圧縮強度試験後鉄筋の重量と容積を測定し、修正した値を示す。

※※ 修正係数はh/dが10以上はJIS A 1107に準じh/dが10未満の場合にJohnsonの試験結果(コンクリートハンドブック参照)を引用して決定した。

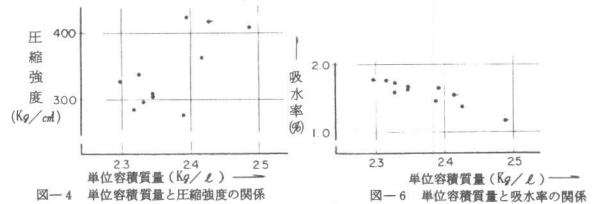


図-4 単位容積重量と圧縮強度の関係

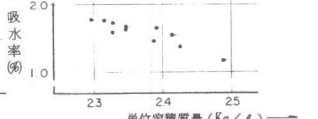


図-6 単位容積重量と吸水率の関係

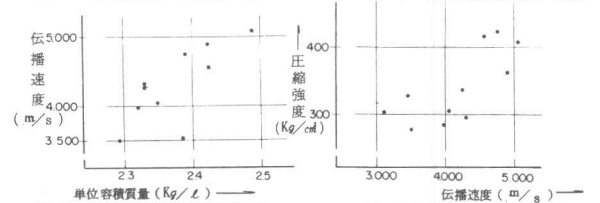


図-5 単位容積重量と伝播速度の関係

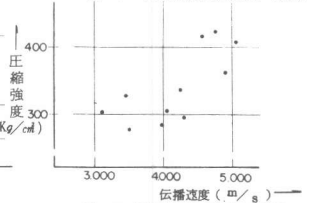


図-7 伝播速度と圧縮強度の関係

コンクリートコアによるコンクリートの化学的性状試験は、図-3の供試体を用いて水溶性塩素濃度および水素イオン指数を測定し、又、コンクリート研り片についても同様の測定を行なった。

関門トンネル施工時に使用された細骨材（山口県豊浦産，福岡県芦屋海岸産の砂を洗浄して利用した）および混和剤（ビゾール180）には塩分の増加をきたすような材料は用いていなかったが、化学的性状試験の結果、車道床版の上下方向の水溶性塩素の分布は、図-3のように床版の上面で高く、下方に行くに従って低下しており、セメントペースト硬化体の空隙を通して水分と共に塩分も上面から下方へ向って浸透を続けている事がわかる。しかし、B列とF列では浸透度に差があり、床版の上側鉄筋位置での水溶性塩素濃度がB列で0.2%以下になっているのに対し、F列で0.23%~0.45%と大きくなっているのは、コンクリートの圧縮強度がB列では402kg/cm<sup>2</sup>、F列で304kg/cm<sup>2</sup>と約100kg/cm<sup>2</sup>程度高い強度によるものと考えられる。

又、床版の横断方向の水溶性塩素の分布は、図-8より車道の両端附近で高く、中央附近に向って低くなっており、トンネル内に漏水した海水が、車道両側の側溝を経由して車道の中央に向って供給されていると推定される。水素イオン指数は、PH=12.77~11.71で新しいコンクリートに比べればアルカリ度がやゝ低下しており、鉄筋に接するコンクリートとしての保護効果はいく分低下していると考えられるが、コンクリートの中酸化という点では程遠い感じである。

### 5 鉄筋の腐食度試験結果および考察

鉄筋の腐食度試験結果は、表-2、3の通りで重量減少比による鉄筋の腐食率が最大53.6%と大きく、鉄筋の腐食がかなり進行しており、海底部車道床版の打ち替え工事を行なったのが良かったと考えている。

鉄筋の腐食度と、その周辺コンクリート中の水溶性塩素濃度との関係は図-9、10であるが、図-9での水溶性塩素濃度と腐食度との相関にばらつきが見られるのは、床版のかぶりコンクリートをブレイカーで研り取り、鉄筋位置附近でのコンクリートおよび鉄筋を試料として採取し、化学的性状試験を行なったため、試料採取の際の鉄筋とコンクリート試料との対応にやゝ明確さを欠いていたためと考える。図-10においては、コンクリートコアから鉄筋とコンクリートを採取したため試料の対応は正確であり、水溶性塩素濃度と鉄筋腐食度との間に高度の相関関係が認められる。

塩分含有量と鉄筋のさび程度の関係について述べた文献としては、実際の構造物の実態調査についての鳥田、他4)の報告および鉄筋発錆の促進試験についてのセメント協会コンクリート専門委員会報告5)などがあるが、神山

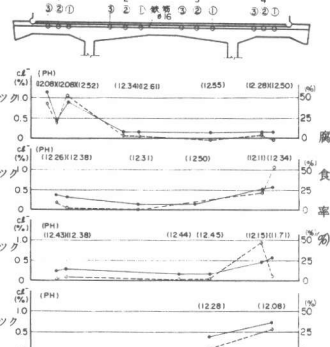


図-8 車道床版の横断方向の水溶性塩素分布

表-2 コンクリートコア中の鉄筋の腐食率

試料	処理前重量 (g)	処理後重量 (g)	長さ (cm)	腐食前の推定重量 (g)	腐食率 (%)	備考 コンクリートCℓ (%)
B-3-2ホ	136.05	136.22	8.99	136.38	0.1	0.13
B-3-2ト	115.40	114.39	7.41	112.41	△ 1.8	0.04
B-3-3ホ	151.36	149.72	10.02	152.00	1.5	0.14
B-4-1ホ	147.33	145.88	9.64	146.24	0.2	0.19
B-4-1ト	112.63	112.09	7.06	107.10	△ 4.7	0.04
F-3-1ホ	150.17	144.75	9.87	149.72	3.3	0.23
F-3-2ホ	137.85	131.62	10.00	151.70	13.2	0.30
F-3-2ト	142.55	141.37	9.40	142.60	0.9	0.09
F-3-2ト'	109.10	108.35	7.23	109.68	1.2	0.09
F-3-3ト	145.88	144.82	9.72	147.45	1.8	0.04
F-3-4ホ	124.01	119.80	9.78	148.36	19.3	0.27
F-4-1ホ	120.34	102.91	9.70	147.15	30.1	0.45
F-4-2ホ	136.47	133.21	9.74	147.76	9.8	0.27
F-4-2ト	120.31	119.40	7.89	119.69	0.2	0.06
F-4-3ホ	149.87	147.00	9.73	147.60	0.4	0.17

[注] (1) 備考欄の「コンクリートCℓ (%)」コアの相当する鉄筋周辺のコンクリート中のCℓ (%)である。  
 (2) 腐食率が△(マイナス)になっているものがあるのは腐食前の推定重量を算出する際に単位長さ当りの重量を一定としたが実際にはバラツキがあった為と考えられる。ホ、床版上側鉄筋位置、ト、床版下側鉄筋位置

表-3 研り部より採取した鉄筋の腐食率

試料	処理前重量 (g)	処理後重量 (g)	長さ (cm)	腐食前の推定重量 (g)	腐食率 (%)	備考 コンクリートCℓ (%)
A'-①	122.40	118.64	9.63	146.09	19.8	0.28
A'-②	80.69	77.30	10.02	152.00	49.1	0.37
B-1-①	112.18	108.57	9.40	142.60	23.9	—
B-1-①'	77.75	73.35	9.97	151.24	51.5	0.86
B-1-②	126.60	122.85	9.90	150.18	18.2	0.45
B-1-③	90.03	86.23	9.82	148.97	42.1	1.11
B-2-①	143.13	141.61	9.55	144.87	2.3	0.16
B-2-②	148.06	146.03	9.85	149.42	2.3	0.16
B-3-①	144.44	143.18	9.25	140.32	△ 2.0	0.14
B-4-①	154.34	152.68	9.87	149.72	△ 2.0	0.15
E-4-②	151.00	148.34	10.06	152.61	2.8	0.15
C-1-①	147.07	145.86	9.80	148.67	1.9	0.31
C-1-②	140.59	133.51	9.65	146.39	8.8	0.38
C-2-①	152.83	151.45	10.05	152.46	0.7	0.15
C-4-①	113.83	109.37	9.19	139.41	21.5	0.58
C-4-②	74.59	69.83	9.92	150.49	53.6	0.53
E-1-①	151.12	149.75	10.06	152.61	1.9	0.29
E-1-②	144.42	142.26	9.79	148.51	4.2	0.23
E-1-③	145.50	143.78	9.63	146.09	1.6	0.16
E-3-②	144.96	142.94	9.65	146.39	2.4	—
E-3-③	155.83	154.69	10.33	156.71	1.3	0.16
E-4-①	147.04	143.43	9.93	150.64	4.8	0.55
E-4-②	84.05	79.91	10.01	151.85	47.4	0.43
F-3-①	149.23	147.02	9.95	150.94	2.6	0.38
F-4-①	97.30	91.77	10.07	152.76	39.9	0.72
F-4-②	116.30	110.28	10.03	152.16	27.5	—

[注] (1) 備考欄の「コンクリートCℓ (%)」は相当する鉄筋周辺コンクリート中のCℓ (%)である。  
 (2) 腐食率が△(マイナス)になっているものがあるのは、腐食前の推定重量を算出する際に単位長さ当りの重量を一定としたが、実際にはバラツキがあった為と考えられる。

3) は先行研究者の文献を引用して、塩化物イオンの浸透と鉄筋のさび程度との関係を模型的に示しているが、今後の関門トンネル車道床版の海水の浸透による鉄筋の腐食調査結果より、鉄筋の腐食度と水溶性塩素濃度との相関々係を示すカーブの形状は、水溶性塩素濃度が0.2% (NaCl換算で0.33%) 附近までは水平で、それを越えると急激に上昇していることが認められるが、この傾向は前出の神山の報告と一致している。

又、表-1、2および図-9、10よりコンクリートコア中の鉄筋の腐食度と水溶性塩素濃度との関係は、コンクリートの圧縮強度が400 $\times$ 程度のち密性の良いコンクリートでは、塩分濃度がかなり大であっても必ずしも問題になる様な鉄筋の腐食は生じていないが、水溶性塩素濃度が0.2%以上では鉄筋の腐食が急激に増大し、体積膨張のためかぶりコンクリートに亀裂が生じている状態で、採取したB列のコンクリートコアでは、かぶりコンクリートの亀裂又は剥離は認められなかったが、F列のコンクリートコアでは、かぶりコンクリートが全て剥離していた。以上のことより、コンクリート中の水溶性塩素濃度と鉄筋腐食との関係において、水溶性塩素濃度0.2%附近がクリティカルポイントになっているのではないかと考える。

#### 6 まとめ

関門国道トンネルの床版コンクリートおよび鉄筋について、コンクリートの物理的、化学的性状およびコンクリート内における浸透塩分濃度と鉄筋の腐食度との相関々係を、ほど把握することが出来た。そこで、打ち替え床版の設計を行なうにあたっては、関門トンネル漏水の海水に対処するため、かぶり厚、水密性の良いコンクリートの配合、排水処理の改善、海水の浸透を防ぐ防水層などを十分検討して設計を行なった。

今後、関門トンネル車道床版の劣化度診断には、コンクリートコアを採取して水溶性塩素濃度を測定し、鉄筋の腐食度を推定して補強対策を行なっていけば良いと考える。又、関門トンネルのライニングコンクリートについては、昭和53年度のコンクリートの物理的、化学的試験の結果、水溶性塩素濃度は最高で0.6%であったが、コンクリートの圧縮強度は約500 $\times$ 、超音波伝播速度は4500m/s~5000m/sと大きく、しかも無筋コンクリートであるため、今後、相当期間経過後も、塩分浸透によるコンクリートの劣化はないものと思われる。

なお、今回の調査に関して、関門トンネル技術検討会(委員長・徳光教授)、(株)オリエンタルコンサルタンツ福岡支社並びに麻生セメント中央研究所の関係各位の御指導と御協力をいただき、ここに御礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 関門トンネル工事誌編さん委員会；関門トンネル工事誌，1960年
- 2) 関 博；海水の作用をうけるコンクリートの中性化について，土木学会論文集 $\mu$ 181 1970年
- 3) 神山 一；コンクリート中の鉄筋のさび，セメントコンクリート $\mu$ 308 1972年10月
- 4) 烏田 尊右 他；鉄筋コンクリート構造物の塩分含有量と鉄筋のさびに関する実態調査  
コンクリートジャーナル，VoL 12， $\mu$ 10 1974年
- 5) セメント協会コンクリート専門委員会報告F-30；海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する促進試験報告 1977年9月
- 6) 永島 正久 他；セメント硬化体に与える海水の化学的浸食のメカニズム

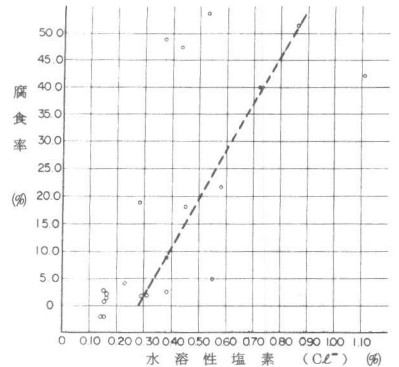


図-9 長物鉄筋の腐食率とコンクリートの水溶性塩素

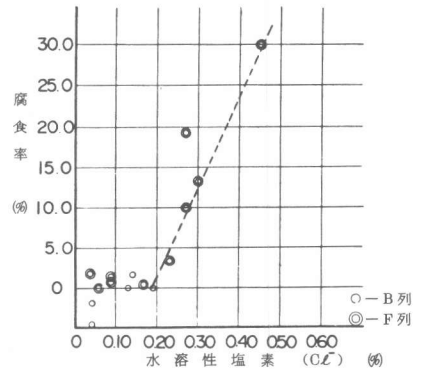


図-10 コア中の鉄筋腐食率とコンクリートの水溶性塩素