

## V-17

海中に曝露された水中トンネル材料の性能特性について<sup>1</sup>

北海道大学大学院 学生員 出雲 健司  
 北海道大学工学部 正 員 佐伯 昇  
 道立工業試験場 後町 光夫  
 前田建設工業㈱ 竹内 利正  
 新日本製鐵㈱ 佐藤 光一

## 1. はじめに

本研究は水中トンネル<sup>1)</sup>で使用される材料を想定し、それらの材料を実際に海中と飛沫帯に曝露してその劣化状況を調査したものである。水中トンネルとは字の如く水の中に造るトンネルのことである。その水中トンネルがどのような構造になっているかという、トンネル自体は浮力を利用して水の中を浮くようになっており、そのトンネルをアンカーで水中を漂わないように固定する全く新しい方式のトンネルと言える。水中トンネルは海面下30mに設置する事を想定しており、トンネルを構成する材料が十分な耐久性を有する事が必要である。本研究は水中トンネルが設置される条件となるべく同じ状況下で海中・飛沫帯にてコンクリートとFRP版の曝露試験を実施し、材料の劣化状況を調査することで水中トンネルに適した材料を見い出すことをその目的とする。海中に曝露した供試体は海中のトンネル本体を想定し、飛沫帯に曝露した供試体は海中のトンネルと地上の道路の接合部分を想定している。また、FRPは新素材として船舶などにも使用されている実績も多く海水に対する耐久性は十分と考えられるためにトンネル本体の外装材やロッドとしての補強筋に使用することを想定している。本研究は1, 3, 5, 10年ごとに試験を実施する予定であり、今回はその1年目で、コンクリート供試体は中性化深さ試験、浸透塩分量試験、圧縮強度試験を実施し、FRP版は引張強度試験を実施した。

## 2. 実験概要

(表1) 供試体配合の一覧表

| TYPE      | 使用<br>骨材 | s/a | W/C | 示方配合 |      |       |     |     |       | プレ<br>スト<br>レス |
|-----------|----------|-----|-----|------|------|-------|-----|-----|-------|----------------|
|           |          |     |     | C    | S i  | B     | W   | S   | G     |                |
| N 40-0-0  | 普通       | 40  | 40  | 415  | 0    | 0     | 166 | 716 | 1,093 | ×              |
| NS40-10-0 | 普通       | 40  | 40  | 374  | 41.5 | 0     | 166 | 709 | 1,083 | ×              |
| NB40-0-40 | 普通       | 40  | 40  | 225  | 0    | 150   | 150 | 742 | 1,134 | ○              |
| NS35-10-0 | 普通       | 40  | 35  | 427  | 47.4 | 0     | 166 | 688 | 1,051 | ×              |
| NB35-0-40 | 普通       | 40  | 35  | 257  | 0    | 171.6 | 150 | 723 | 1,105 | ×              |
| LS40-10-0 | 軽量       | 40  | 40  | 383  | 42.5 | 0     | 170 | 701 | 534   | ○              |
| LB40-0-40 | 軽量       | 40  | 40  | 255  | 0    | 170   | 170 | 703 | 535   | ×              |

※) TYPEの記号はNが普通骨材・Lが軽量骨材を使用していて、Sはシリカフューム・Bは高炉スラグをセメントと置換している事を示している。その隣の数字が水セメント比、シリカフュームの置換率、高炉スラグの置換率となっている。尚、プレストレスコンクリートを制作した配合は○がついている二つの供試体のみである。

使用するセメントは普通ポルトランドセメントで、供試体によってはシリカフューム（比重2.20）や高炉スラグ（比重2.96、ブレン5890cm<sup>2</sup>/g）で一部置換して使用した。使用する細骨材は静内産の川砂（比重

<sup>1</sup>The Characteristics of Exposed the Materials in the sea for the Tunnel in the water  
 by Kenji IZUMO, Noboru SAEKI, Mitsuo GOCHO, Toshimasa TAKEUCHI, Koichi SATO

2.73, 粗粒率3.07)を、普通粗骨材は静内産の碎石(比重2.78, 粗粒率6.58)を、軽量粗骨材は人工軽量粗骨材MA417(絶乾比重1.26, 24時間吸水率9.8%, 粗粒率6.31)を使用した。

海中・飛沫帯に曝露したコンクリート供試体はセメントの種類、使用骨材、水セメント比の違いにより7種類の供試体を使用し、一部の供試体にプレストレスコンクリートを付け加えて制作した。ただし、飛沫曝露用のプレストレスコンクリートは制作しなかった。各供試体の配合は(表1)に示す。

中性化深さ試験は、供試体を輪切りにして切断面にエタノールに重量比で1%のフェノールフタレインを溶解したフェノールフタレイン溶液を吹きかけ、非発色面を測定した。

浸透塩分濃度試験は、切断面からドリルで穴を開けて外径から1, 2, 3, 4cmの4カ所から試料を採取し、試験を行った。

曝露したFRP版の基材構成は7層になっている。その構成とマトリックス樹脂を(表2)に示す。

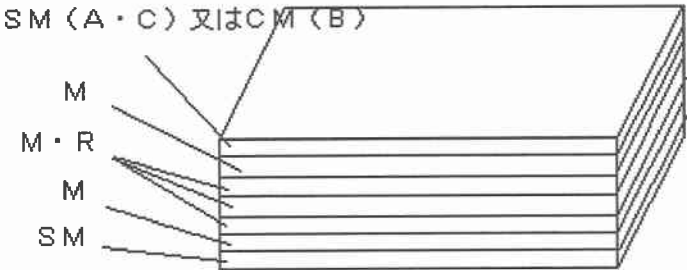
(表2) FRPの基材構成表

|          | A                | B                | C                |
|----------|------------------|------------------|------------------|
| マトリックス樹脂 | ビニルエステル          | ビニルエステル          | イソ系不飽和ポリエステル     |
| 繊維基材構成   | SM・M・(MR)×3・M・SM | CM・M・(MR)×3・M・SM | SM・M・(MR)×3・M・SM |

※) SM: ガラス繊維サーフェスマット, CM: カーボン繊維サーフェスマット, M: チョップドストランドマット(Eーガラス), R: ロービングクロス(Eーガラス)

A・Cの表面はガラス繊維としているが、表面がコンクリートと接することを考慮して、Ca(OH)<sub>2</sub>に弱く腐食しやすいガラス繊維に代えて、カーボン繊維の供試体Bも一つ加えた。また、マトリックス樹脂を2種類にしたのは経済的側面を考慮したためである。

(図1) FRPの基材構成図



3. 実験結果および考察

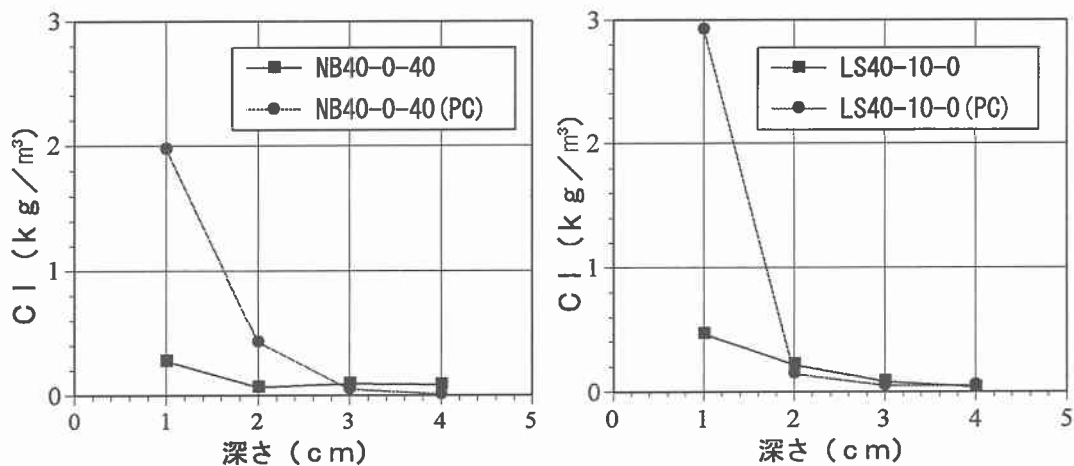
3. 1. 中性化深さ試験

全ての供試体で中性化深さは全くと言っていいほど進行はしておらず、全て0mmという結果になった。

3. 2. 浸透塩分量試験

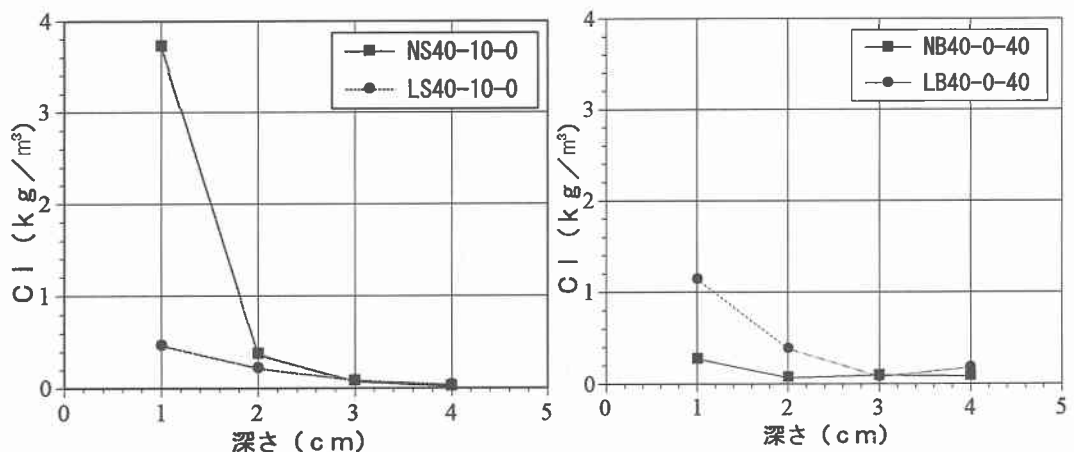
(図2)は同骨材・同セメント・同水セメント比の条件のもとでプレストレスの有無による浸透塩分量の違いを示したものである。左図が普通骨材・40%の普通ポルトランドセメントを高炉スラグに置換したもので、右図が軽量骨材・10%の普通ポルトランドセメントをシリカフェウムに置換したもので、縦軸にコンクリート1m<sup>2</sup>あたりの浸透塩分量を示している。これらの図が示すようにプレストレスコンクリートの方が明らかに浸透塩分量が多い。これはプレストレスコンクリートの方は骨材の界面にBond・crack(ボンドクラック)が発生しているのが原因と思われる。したがって、海中でプレストレスコンクリートを使用する場合は鉄筋のかぶりを大きくする必要があるのではないかとと思われる。

(図3)は同セメント・同水セメント比・プレストレスコンクリートではないという条件の下で、骨材の違いによる浸透塩分量の違いを示したものである。左図は10%の普通ポルトランドセメントをシリカフェウムに置換したもので、右図は40%の普通ポルトランドセメントを高炉スラグで置換したもので、これも1m<sup>2</sup>あ

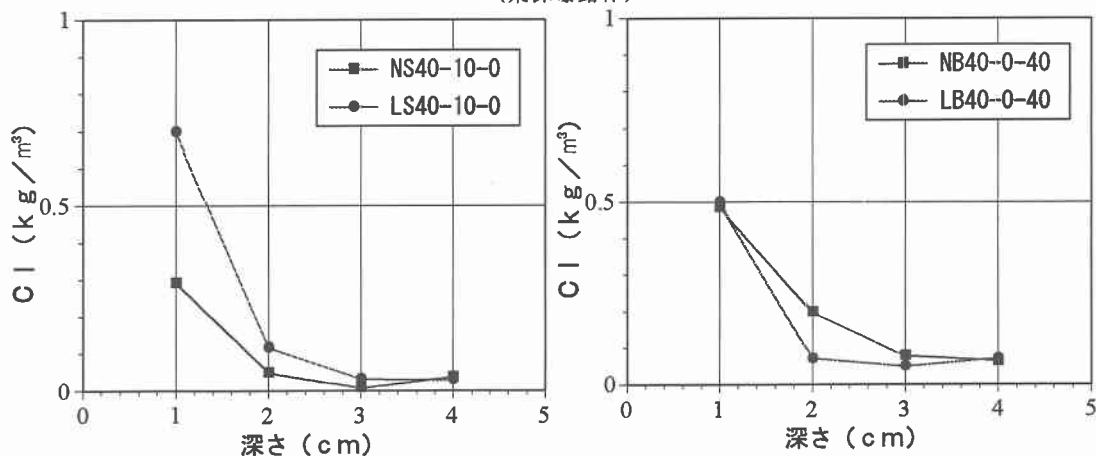


(図2) プレストレスの有無の違いによる浸透塩分量の比較

(海中曝露体)



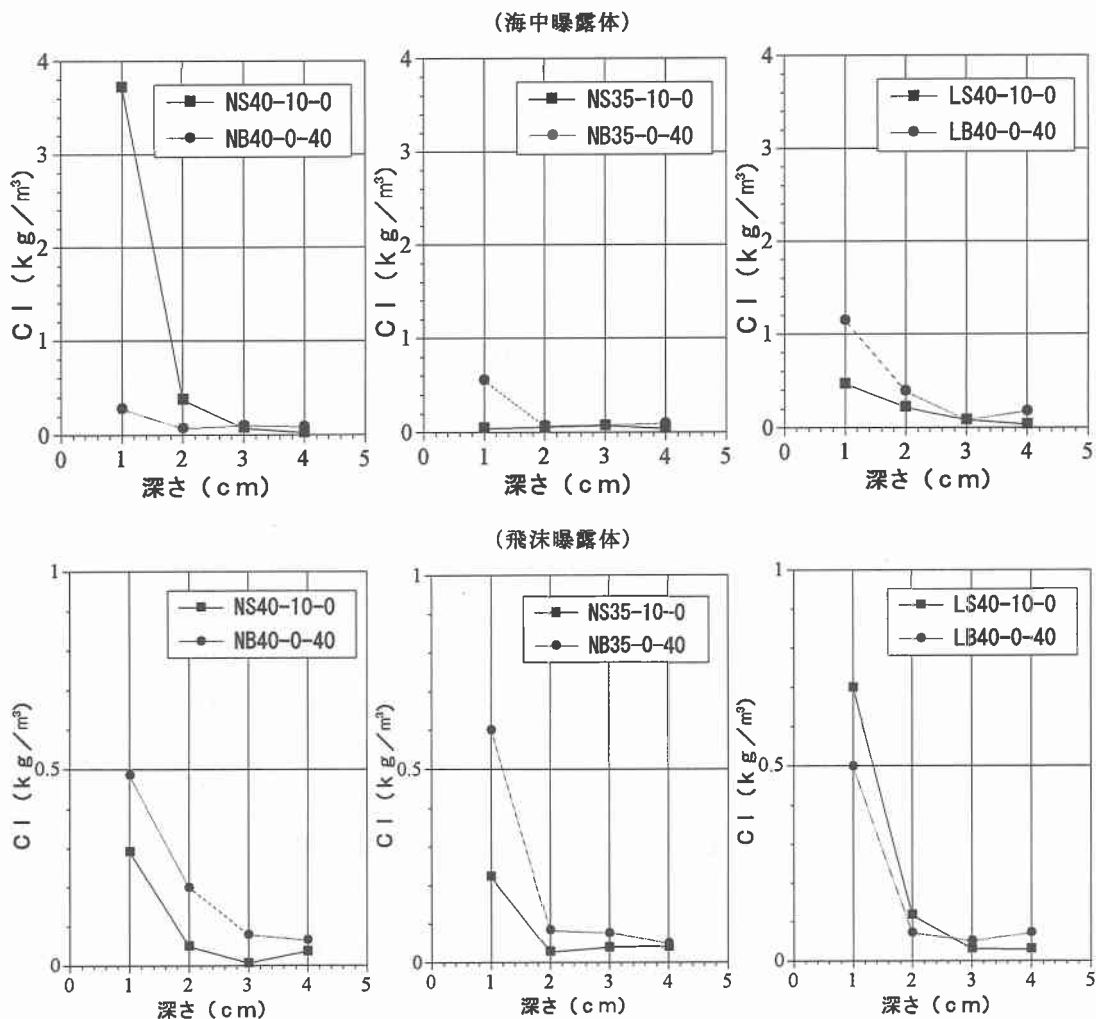
(飛沫曝露体)



(図3) 骨材の違いによる浸透塩分量の比較

たりの浸透塩分量を示している。まず、上の二つの図が示すように海中では骨材の違いでどちらが浸透塩分に対しての抵抗が弱いかは言えない。ただ、普通骨材とシリカフェーム、軽量骨材と高炉スラグの組み合わせは塩分の浸透に対する抵抗が弱いと思われる。また、下の二つの図が示すように飛沫帯でも骨材の違いでどちらの骨材が浸透塩分に対しての抵抗が弱いかは言えない。

(図4)は同水セメント比、同骨材、プレストレスコンクリートではないという条件の下で、セメントの種類で浸透塩分量を比較したものである。左図は普通骨材を使用して水セメント比が40%のもので、中図は普通骨材を使用して水セメント比が35%のもので、右図は軽量骨材を使用したものである。これらの図が示すように海中・飛沫曝露体ともにセメントの種類だけでは一概にどのセメントが塩分の浸透に対しての抵抗が弱いとかは言えないという結果となっている。

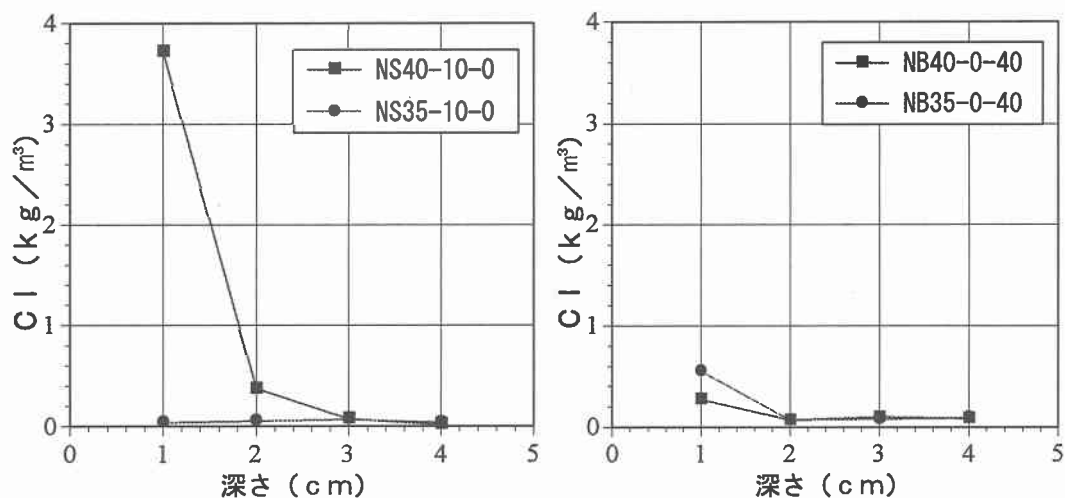


(図4) セメントの種類による浸透塩分量の比較

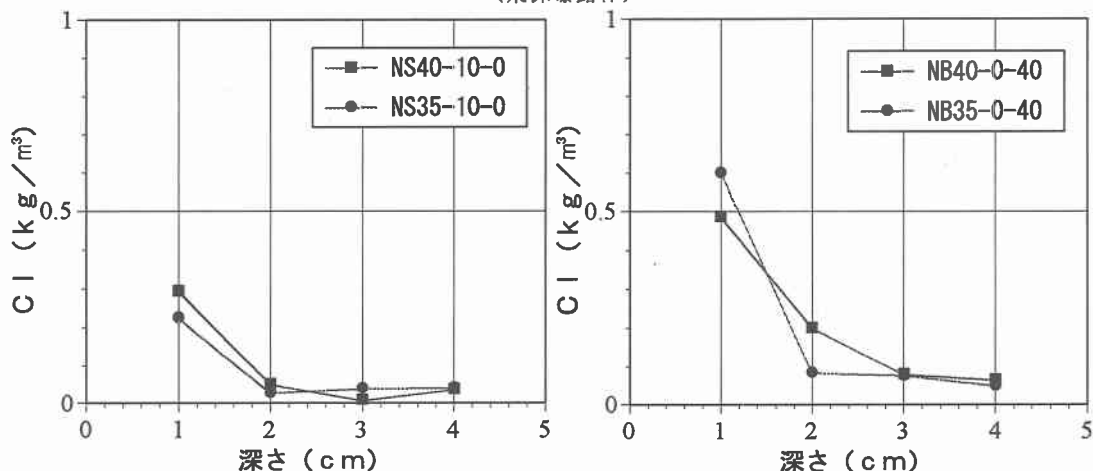
(図5)は同セメント、同骨材、プレストレスコンクリートではないという条件の下で、水セメント比の違いで比較したものである。左図は普通ポルトランドセメントの10%をシリカフェームに置換したセメントを使用しており、右図は普通ポルトランドセメントの40%を高炉スラグに置換したセメントを使用している。海中曝露体では、左図は顕著に水セメント比が大きい方が明らかに浸透塩分量が大きく、右図ではそれほど

目立ってはいないが水セメント比が小さい方が浸透塩分量が大きくなっているという結果となっている。一方、飛沫曝露体の方は左右両図ともにほとんど変わりがなく、40%と35%の水セメント比ではそれほど変わりが無いことを示している。

(海中曝露体)



(飛沫曝露体)



(図5) 水セメント比の違いによる浸透塩分量の比較

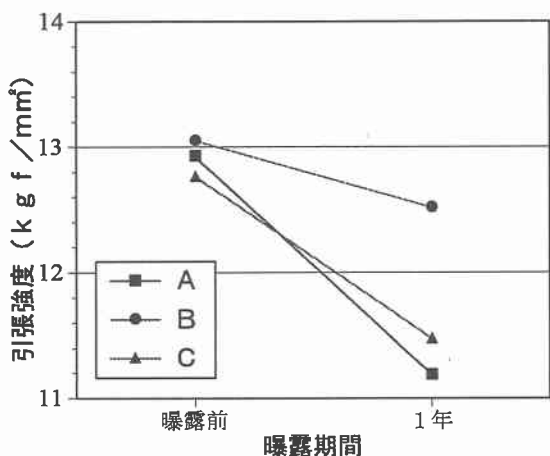
### 3. 3. 圧縮強度試験

圧縮強度はほとんどの供試体で軒並み上昇を見せている。

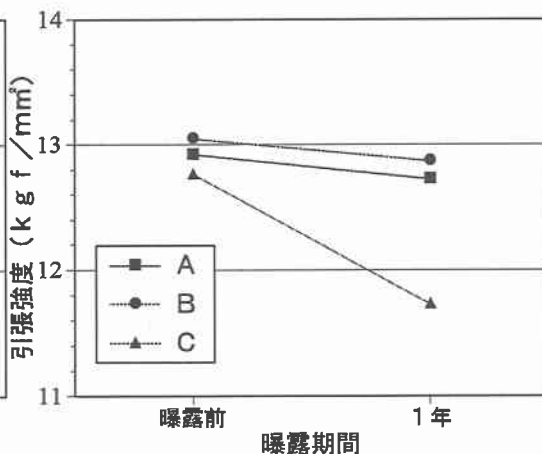
### 3. 4. FRPの引張試験

飛沫帯に曝露したFRP版の引張強度の変化は(図6)に示すとおりである。この図から明らかにBに比べてAとCの引張強度の低下が著しいことが分かる。Bの表面はカーボン繊維で、A・Cの表面がガラス繊維という違いからこのような結果が出てきたと思われる。

海中曝露のFRP版の引張強度の変化は（図7）に示すとおりである。この図からCの引張強度がAとBに比べて明らかに低下が著しいことが分かる。これはCのマトリックス樹脂がイソ系ポリエステルなのに対して、AとBのマトリックス樹脂がビニルエステルである事からこのような結果が出てきたと思われる。



（図6）飛沫帯のFRP版の引張強度の変化図



（図7）海中曝露のFRP版の引張強度の変化図

#### 4. まとめ

- 今回は1年目ということで中性化深さはほとんど進行していなかった。
- プレストレスコンクリート供試体はプレストレスを掛けていない供試体に比べて、塩分の浸透に対して抵抗が弱いので、かぶりを多く取る必要があるのではないと思われる。
- 海中に曝露した供試体では、普通骨材と普通ポルトランドセメントをシリカフェームに置換した組み合わせと、軽量骨材と普通ポルトランドセメントを高炉スラグに置換した組み合わせとが、塩分の浸透に対しての抵抗に弱いと思われる。
- 普通・軽量骨材の違いやセメントの違い、水セメント比の違いによるという1種類の要素から見ると、浸透塩分に対しての抵抗がどれが強いかは一概には言えない。
- 飛沫帯曝露のFRPはB、つまり、表面がカーボン繊維でマトリックス樹脂がビニルエステルのFRP版が一番引張強度の低下が見られなかった。
- 海中曝露のFRPはC、つまり、表面がガラス繊維でマトリックスがイソ系ポリエステルのFRP版が一番引張強度の低下が著しかった。

#### <参考文献>

- 1) 平成3年度 水中トンネル研究調査会 材料分科会 報告書；（社）水中トンネル研究調査会