

# P C げたのひびわれと P C 鋼線の腐食

太田 利隆\* 服部 健作\*\* 高柴 保明\*\*\*

## まえがき

現在、広く構造物に利用されているポストテンション方式のプレストレストコンクリート（以下 P C と呼ぶ）が広範囲に利用されるようになったのは、1939 年フランスの Freyssinet が定着用コーンおよび P C 鋼線を緊張するための特殊ジャッキを考案してからである。ポストテンション P C げたが施工されるようになったのは、日本国内では昭和 28 年（1953 年）、北海道内では昭和 29 年からであり、他の構造物に比べ歴史が浅く耐久性に関する資料が乏しい。

セメントペースト中の水酸化カルシウムが強アルカリ性を示し、それが鋼材表面に不動態皮膜を作り防錆的役割をするため、完全なグラウトに P C 鋼線がつつまれている場合には腐食の心配はないといわれている。しかしグラウトの品質不良や注入不良のような場合にコンクリートのひびわれなどが結びついた場合には外部からの酸

素・水分・塩分などが P C 鋼線を急速に腐食させる心配がある。

一方、鋼材は引張応力の下では無応力の時よりも腐食しやすい。P C 鋼線は緊張後このような引張応力を常時受けている状態にある。

初期の P C げたの施工に際しては、P C グラウトの重要性が認識されておらず、また P C グラウト注入の経験や資材も十分ではなかった。しかし、P C げたの縦ひびわれ発生問題が注目されるようになり、昭和 32 年 3 月北海道土木技術会のグラウト指針ができた頃から、グラウトに対する認識も高まり注入技術や器材も改善されてきた。

表一はコンクリート研究室が行った北海道における P C 橋の縦ひびわれ調査結果である。表一からは昭和 32 年以前に比べ、昭和 33 年以後の縦ひびわれの減少ぶりがよくわかる。このことは、P C グラウト指針完成後のグラウトに対する認識の高まりや施工・機材施工技術の

表一 縦 ひ び わ れ 調 査 結 果

| 建設年度        | 29～32年 | 33年 | 34年 | 35年 | 36年 | 37年 | 38年 |
|-------------|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 調査けた数       | 498    | 337 | 197 | 155 | 36  | 84  | 71  |
| ひびわれけた数     | 216    | 70  | 39  | 21  | 10  | 14  | 12  |
| ひびわれ延長率 (%) | 12.5   | 5.2 | 0.9 | 0.5 | 0.8 | 0.6 | 1.0 |

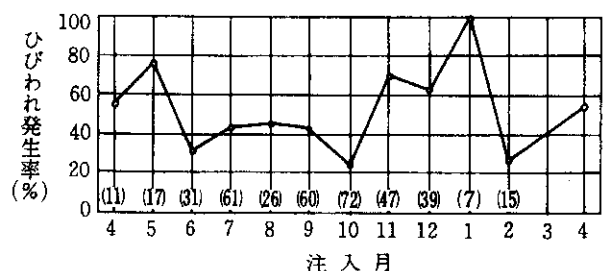
$$\text{ひびわれ延長率} = (\text{ひびわれ延長} / \text{調査けた延長}) \times 100 (\%)$$

向上を示すものと考えられる。

図一は、昭和 32 年以前に施工されたけたのグラウト注入月とけたひびわれ発生率との関係を示したものである。ひびわれ発生率とは調査けたの中でひびわれが発見されたけた本数の調査けた全本数に対する割合を百分率で表わしたものである。

図一からひびわれ発生率は冬期に高くグラウトの凍結膨張の影響が大きいと思われる。一方では夏場におけるグラウト注入でも 40% のけたにひびわれが発見されており、グラウト分離水の残留による冬期の凍結膨張やグラウト膨張剤の入れすぎやグラウト注入圧のかけすぎな

どが考えられる。図一からも P C グラウト指針以前のグラウト注入技術が不満足なものであることがうかがわれる。



図一 グラウト注入月とけたひびわれ発生率

\*コンクリート研究室長 \*\*同副室長 \*\*\*同室員

このように昭和30年代前半はPCグラウト技術の変革期であった。これらの時期に施工されたPCげたの調査を行い、当時の設計・材料・施工技術の変遷を知ることが今後のPC橋の維持管理上大切なことと思われる。

コンクリート研究室では昭和49年双岩橋、昭和51年俱知安橋、昭和53年奈江橋、昭和54年沼下橋、滝下橋の調査を行った。まず、現地でひびわれ調査・非破壊試験・コア抜きなどを行った後に解体し、PC鋼線をシースごと研究室に搬入し、グラウトの注入程度・シースの腐

食程度・PC鋼線の腐食程度などについて調査した。

このほかに、工場製作ブロックを現地で連結して製作したPCげたの一部を現地調査なしで研究室に搬入し、解体調査した潮見橋（昭和53年調査）、清瀬橋（昭和55年調査）がある。

表一2に調査橋の概要を、表一3に調査橋のひびわれ延長率を示す。

また、表一4に調査橋のコンクリート強度について示す。

表一2

| 橋名   | 路線名  | 所在地  | 橋長    | 有効幅員  | 支間    | 調査けた数 | 調査けた延長 | PC工法            | グラウト工法        | 施工期間         | コンクリート打ちグラウト注入   | 調査年度 |
|------|------|------|-------|-------|-------|-------|--------|-----------------|---------------|--------------|------------------|------|
| 双岩橋  | 274号 | 日高町  | 15.70 | 6.00  | 15.00 | 1     | 15.70  | フレシネー           | コンプレッサー       | S31年         | 11~12月<br>11~12月 | S49年 |
| 俱知安橋 | 5号   | 俱知安町 | 105.0 | 7.00  | 21.00 | 6     | 126.00 | フレシネー           | コンプレッサー       | S31年         | 8~9月             | S51年 |
| 奈江橋  | 12号  | 砂川市  | 18.0  | 10.00 | 17.60 | 9     | 158.40 | フレシネー           | コンプレッサー       | S31年         | 8~10月<br>11月     | S53年 |
| 潮見橋  | 232号 | 天塩町  | 35.8  | 6.00  | 35.00 | 1     | 12.0   | フレシネー<br>工場ブロック | 手動グラウト<br>ポンプ | S32年<br>S33年 | 11月<br>4~5月      | S53年 |
| 沼下橋  | 239号 | 苫前町  | 35.9  | 5.5   | 35.0  | 2     | 70.0   | フレシネー           | 手動グラウト<br>ポンプ | S33年         | 10~11月<br>10~11月 | S54年 |
| 滝下橋  | 239号 | 苫前町  | 35.9  | 5.5   | 35.0  | 2     | 70.0   | フレシネー           | 手動グラウト<br>ポンプ | S33年         | 7~9月<br>8~9月     | S54年 |
| 清瀬橋  | 274号 | 日高町  | 30.8  | 3.5   | 30.0  | 1     | 6.5m   | フレシネー<br>工場ブロック | 手動グラウト<br>ポンプ | S31年<br>S32年 | 9月<br>7月         | S55年 |

表一3 ひびわれ延長率

| 橋名   | 測定初年度値 (%) | 最終測定年度値 (%) | 測定期間      |
|------|------------|-------------|-----------|
| 双岩橋  | 4.8        | 9.6         | S33年・S49年 |
| 俱知安橋 | 53.5       | 178.7       | S33年~S51年 |
| 奈江橋  | 149.2      | 270.4       | S33年~S53年 |
| 潮見橋  | —          | —           |           |
| 沼下橋  | 0.0        | 20.7        | S34年・S54年 |
| 滝下橋  | 0.0        | 2.5         | S34年・S54年 |
| 清瀬橋  | —          | —           |           |

ひびわれ延長率 = (ひびわれ延長 / 調査けた延長) × 100 (%)

表一4

|      | 主げたコンクリート<br>設計基準強度 400 (kg/cm <sup>2</sup> ) |           |          | 場所打ちコンクリート<br>設計基準強度 300 (kg/cm <sup>2</sup> ) |           |          |
|------|-----------------------------------------------|-----------|----------|------------------------------------------------|-----------|----------|
|      | n                                             | $\bar{x}$ | $\sigma$ | n                                              | $\bar{x}$ | $\sigma$ |
| 双岩橋  | 12                                            | 466       | 96       | 7                                              | 360       | 48       |
| 俱知安橋 | 18                                            | 388       | 66       | 7                                              | 502       | 78       |
| 奈江橋  | 24                                            | 415       | 47       | 10                                             | 403       | 48       |
| 沼下橋  | 14                                            | 454       | 73       | 14                                             | 492       | 67       |
| 滝下橋  | 14                                            | 507       | 45       | 16                                             | 590       | 52       |
| 潮見橋  | 8                                             | 564       | 67       |                                                |           |          |
| 清瀬橋  | 4                                             | 642       | 51       |                                                |           |          |

標準偏差  $\sigma$  は補正済みの値である。

## 1. 各橋ごとの特徴

### 1-1 双岩橋(昭和49年調査)

双岩橋は、昭和31年一般国道274号日高町千栄ベンケヌ川に架設された橋長15.70m、幅員6.0mのPC単純Tげた橋である。

昭和33年のひびわれ延長率は4.8%であり、同時代に施工されたPC橋のひびわれ延長率の平均値12.5%に対し良好な値を示している。昭和49年の解体時のひびわれ延長率でも9.6%と小さな値を示している。

本橋は7本主げたであるが、解体調査は上流側から3本目の1けたについてのみ行った。なお、この解体調査を行ったけたについてはひびわれは発見されていない。

グラウト強度試験は、整形可能なものから1cm立方体に整形して行ったが、平均103kg/cm<sup>2</sup>にすぎなかった。しかし、それでも整形可能なグラウトは良質の方であり、施工技术・機材などの不十分さから粗雑な注入が行われたものと思われる。

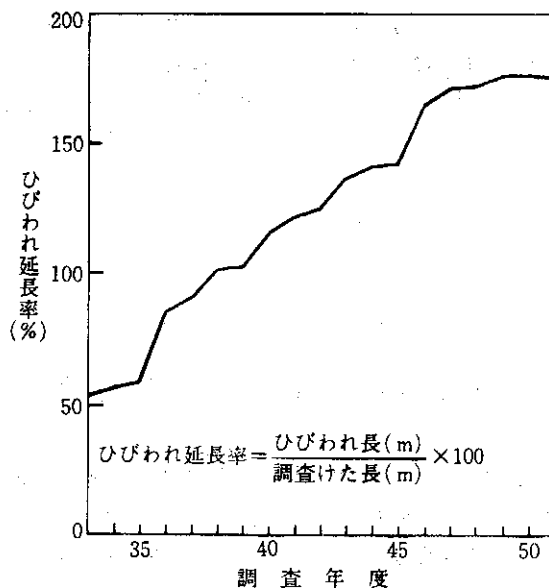
ケーブルの中には、約4mにわたってまったくグラウトの入っていない全断面空げきの部分もあった。

この原因としては、グラウト注入をコンプレッサーにより行っていたためと思われる。この部分のシースはかなりデコボコになっており、シース継手も不完全であり、シース断面の急変がグラウト注入を阻害した一因とも考えられる。シース・PC鋼線の腐食は発見されなかった。シース継手部にわずかな腐食が見つかった程度である。この部分的腐食は継手部の布テープが原因したか、コンクリート打設前のものと思われる。このようにシース・PC鋼線に腐食が発見されないのは、主げたコンクリートにひびわれなどが一切ないために、シース・PC鋼線が外気から完全に保護されていたためと思われる。

### 1-2 倶知安橋(昭和51年調査)

倶知安橋は、昭和31年一般国道5号倶知安町地内尻別川に架設されたPC単純けた橋(支間割10.5m+4@21.0m+10.5m、有効幅員6.50m)であるが、尻別川改修工事とともに橋梁架設位置の変更により、昭和51年に廃橋となった。

PCグラウトの圧縮強度試験は、1cm×1cm×1cmに整形して試験を行った。試験結果は最大値462kg/cm<sup>2</sup>、最小値216kg/cm<sup>2</sup>、平均値340kg/cm<sup>2</sup>となり、昭和36年度改訂土木学会「プレストレスト、コンクリート設計施工指針」による型枠法(φ5cm×10cm)に従って試験を行った場合、4週強度200kg/cm<sup>2</sup>、押蓋かん法(2号押蓋かんφ10cm×12cm)に従って試験を行った場合、4週強度300kg/cm<sup>2</sup>以上の規定をほぼ満足している。しかし、試料



図一2 倶知安橋ひびわれ延長率

は成形可能な大きさで注入状態が良好と思われる個所より採取したものなので、本橋のグラウトの品質を代表しているとはいいがたい。

図一2は、昭和51年度調査までの倶知安橋ひびわれ延長率を表わした。

本橋のひびわれ延長率は、調査初年度(昭和33年)で53.5%であり、解体調査を行った昭和51年では178.7%となった。

ケーブルの中には5mにもわたってまったくグラウトの入っていない全断面空げきの部分もあり、グラウトの品質は全体的に見て不満足なものである。

コンクリートの中性化は、コンクリートの破断面にフェノールフタレイン1%溶液(JIS. K. 8006)を噴霧し、紅変した部分を未中性化部分、変色のない部分を中性化部分と判定した。中性化深さは1mm程度であり、シースの腐食に直接原因するほど深くはなかった。

ひびわれ発生箇所は耳げた(第1けた、第6けた)の腹部および底面、中げた(第2けた～第5けた)では底面に多く発生しており、底面には雨水などの浸透水により、コンクリート中から溶出した石灰分がツララ状に下がっている箇所も見られた。

PC鋼線の引張試験は、基準尺(1.0m)の腐食程度Ⅰ―健全、Ⅱ―しもふり状に発錆、Ⅲ―浮錆が全体に発生、Ⅳ―断面欠損が見られるものの4段階に分類して実施した。表一5は腐食程度によるPC鋼線の破断力を示した。腐食程度Ⅱ、Ⅲ、Ⅳの破断力はⅠを基準とした場合、それぞれ0.99、0.97、0.75であった。

引張強度試験結果腐食程度Ⅰの引張強度平均値169kg/mm<sup>2</sup>、降伏点応力度145.7kg/mm<sup>2</sup>となり、設計条件( $\sigma_{pu}$  =

表一5 腐食程度によるPC鋼線の破断力

| 判定<br>記号 | 腐食度判定基準<br>(基準尺<br>$\ell=1.00\text{m}$ ) | PC鋼線の引張強さ     |          |                          |                                     |
|----------|------------------------------------------|---------------|----------|--------------------------|-------------------------------------|
|          |                                          | 破断荷重<br>(ton) | 破断力<br>比 | 断面積<br>( $\text{mm}^2$ ) | 引張強度<br>( $\text{kg}/\text{mm}^2$ ) |
| I        | 健全<br>(腐食なし)                             | 3.320         | 1.0      | 19.6                     | 169                                 |
| II       | しもふり状に<br>錆発生                            | 3.281         | 0.99     | (19.6)                   | —                                   |
| III      | うきさびが全体<br>に発生                           | 3.220         | 0.97     | (19.0)                   | —                                   |
| IV       | 断面欠損あり                                   | 3.500         | 0.75     | (16.7)                   | —                                   |

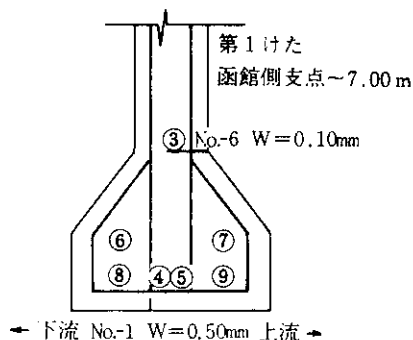
( ) 内推定断面積 破断力比 =  $\frac{\text{腐食鋼線の破断荷重}}{\text{Iの破断荷重}}$

$165\text{kg}/\text{mm}^2$ ,  $\sigma_{py}=140\text{kg}/\text{mm}^2$ ) と比較すると満足されているが、ヤング係数はやや少ない値を示していた。

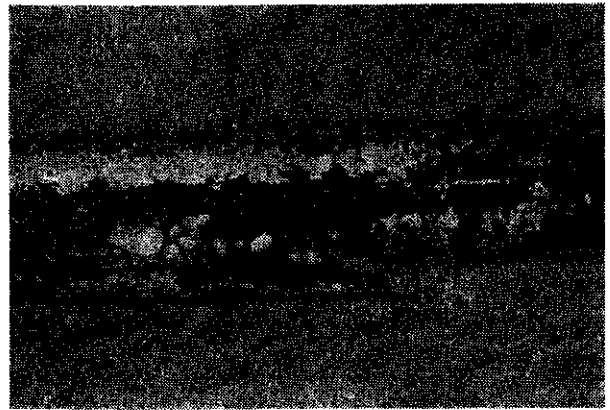
シースの腐食度判定基準は、A—健全、B—表面軽い錆発生、C—腐食による小穴あり、D—小穴が連続し腐食による損傷が激しいものの4段階に分類した。またグラウトの注入状態については、I—シーす内全部入っている、II—シーす内1/2程度、III—1/2未満またはまったく入っていないものの3段階に分類して調査を実施した。

シーすの腐食程度Aで20%、Bで26%鋼線に腐食が認められた。PC鋼線の腐食はグラウトの注入状態I—3%、II—37%、III—43%であり、鋼線腐食程度はほとんどIIであった。グラウトの注入状態がIであっても束ねたPC鋼線の間げきにグラウトが行きわたらない個所があり、この部分の鋼線には錆の発生が多く認められた。

図一3はシーすの腐食が特にひどい個所のひびわれとシーすの関係を示す断面図である。この断面の第3シーすでは写真一1のような腐食が見られ、シーす・PC鋼線ともに腐食程度DおよびIVと判定した。底面に発生したひびわれ(No.1)は51年度調査で0.5mmとなったが、ひびわれ深さが鉄筋およびシーすに影響するほどではなかった。これに反し上流側腹部に発生したひびわれ(No.6)は幅0.1mmであり、底面に発生したひびわれよりも小さいが、ひびわれ深さが第3シーすに達していたのが大きく影響したものとする。



図一3 ひびわれとシーすの関係



写真一1

### 1-3 奈江橋(昭和53年調査)

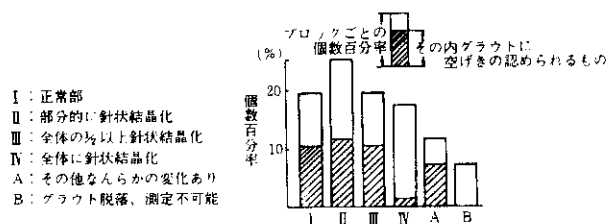
奈江橋は、昭和31年一般国道12号砂川市豊沼地内に架設された。ポストテンション方式PC単純橋(支間17.60m、有効幅10.40m)であり、昭和53年河川改修にともない廃橋となった。

本橋のグラウトに用いたセメントは、早強ポルトランドセメントで、混和剤などは用いられず、フロー値14~16秒となっていた。フロー値および当時の他の橋の例よりW/Cは、50~60%程度と推定される。

グラウトをシーすごと基準尺(1m)に切断し、各ブロックごとのグラウトの状態の個数百分率を表一6に示す。この橋のグラウトの特徴的なことは、針状結晶化が著しく進んでいることで、シーすの接触面に小さく発生している物(IIa)からPC鋼線間にも結晶化が進み、付着に害を及ぼしているもの(IIc)まで、シーす全長の75%にまで及んでいた。針状結晶が生じているグラウトは、非常にろく指で容易につぶすことができるほどである。また針状結晶のほかにも、グラウト中に黒色の変色粒が多数発生していたり、頁岩を削り取ったようなものがある物、白墨状で非常にろい物、などが認められた。

グラウトに針状結晶を生じた主な原因として、グラウト注入後まもなく凍結したことが考えられる。奈江橋から約4kmほどの地点にある。砂川市吉野における昭和31年11月、12月の外気温を見てみると、グラウト注入後真冬日が多く、最低気温が $-20^{\circ}\text{C}$ にまで達している。記

表一6 グラウト針状結晶化率



録によれば、グラウト注入後蒸気養生により3日間30℃、さらに7日間10℃に保たれたとされているが、十分に保温されなかった疑いがある。混和剤を用いないグラウトの場合、W/Cが50%を越えると、-7℃～8℃で不安定となり、凍結膨張が起こり得ることが、林正道氏（現北見工業大学教授）によって証明されている。

本橋に縦ひびわれが多数発生した原因も、グラウトの凍結膨張が大きな役割を果たしたと考えられる。

図-4に本橋のひびわれ延長率を示す。本橋のひびわれ延長率は調査初年度（昭和33年）で149.2%、解体調査を行った昭和53年で270.4%と、条件の近い他の内陸橋と比較しても非常に多い。しかし、ひびわれ延長率の増加は、他の橋とほぼ同じである。この橋のグラウト注入時期は11月20～30日であり、すぐに凍結を受けたのに対し、他の橋のグラウト注入は夏～秋で、凍結前に十分硬化する期間があったと考えられる。

シースの腐食程度については目視により（写真-2）、A—（Ⅰ）健全、B—（Ⅱ）表面に軽度の腐食発生、C—

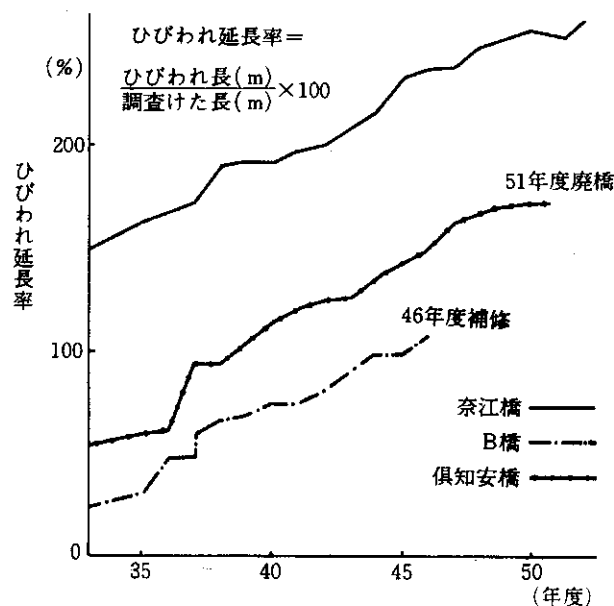


図-4 奈江橋ひびわれ延長率

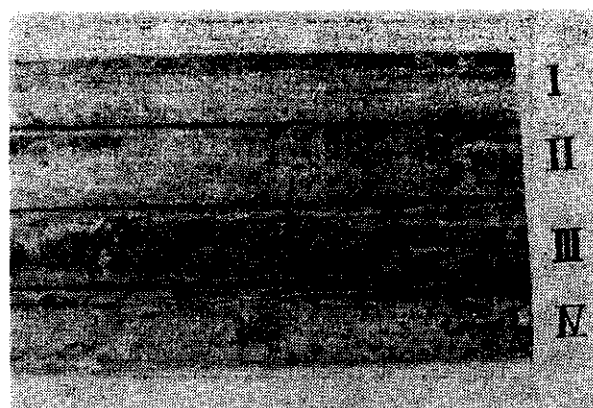


写真-2

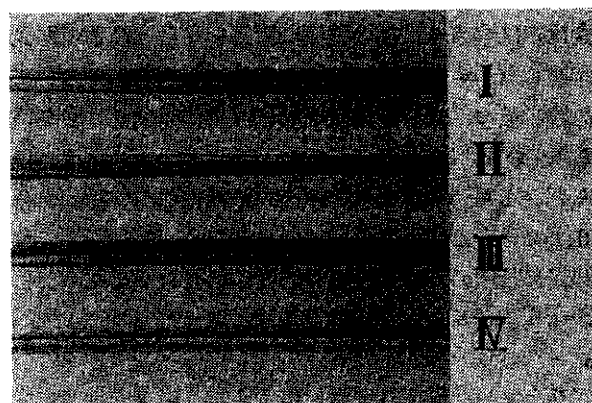


写真-3

（Ⅲ、Ⅳ）重度な腐食、腐食による小穴ありの3段階、また、PC鋼線の腐食程度については（写真-3）、Ⅰ—健全、Ⅱ—しもふり状に発錆しているもの、Ⅲ—浮錆が全体に発生しているもの、Ⅳ—錆による断面欠損が見られるものの、4段階に分類した。

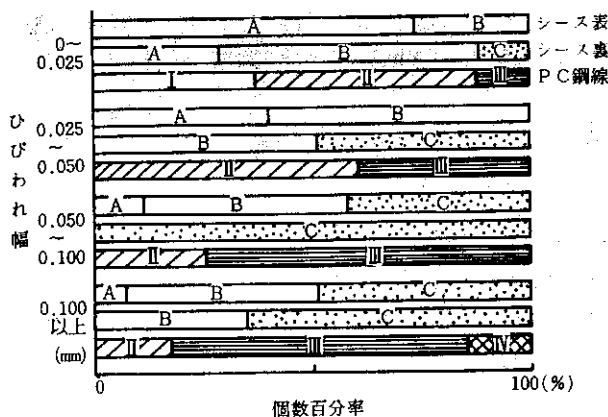
表-7は、腐食程度によるPC鋼線の破断力を比較したものである。健全な鋼線—Ⅰを1.00とした時、Ⅱは0.954、Ⅲは0.946、Ⅳは0.944とおおよそ5%程度の減少が認められた。

図-5に、ひびわれ幅とシーシ・PC鋼線の腐食を示す。ひびわれ幅0.025mm以下では、シーシ、鋼線ともに

表-7 腐食程度によるPC鋼線の破断力

| 判定記号 | 腐食度判定基準<br>(基準尺 $l=1.00m$ ) | P C 鋼線の引張強さ |       |                        |                       |
|------|-----------------------------|-------------|-------|------------------------|-----------------------|
|      |                             | Pu (ton)    | 破断力比  | $\sigma_{pu}(kg/mm^2)$ | Es ( $10^5 kg/cm^2$ ) |
| Ⅰ    | 健全 (腐食なし)                   | 3.508       | 1.00  | 178.6                  | 19.6                  |
| Ⅱ    | しもふり状に発錆                    | 3.347       | 0.954 | 170.5                  | 20.1                  |
| Ⅲ    | うきさびが全体に発生                  | 3.317       | 0.946 | 168.6                  | 20.0                  |
| Ⅳ    | 断面欠損あり                      | 3.313       | 0.944 | 168.7                  | 19.8                  |

$$\text{破断力比} = \frac{\text{腐食鋼線の破断荷重}}{\text{Ⅰの破断荷重}}$$

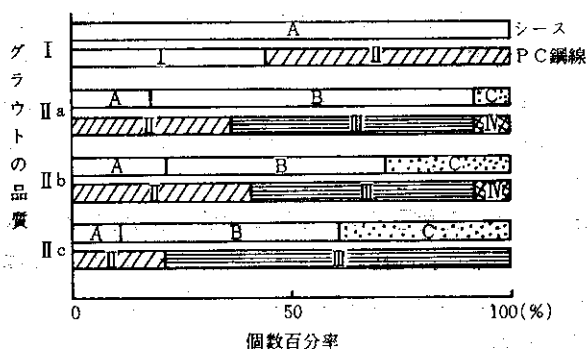


図—5 ひびわれとシー、鋼線の腐食

腐食比率は小さく、橋の強度に影響を与えるほどの腐食は存在しなかった。しかし、0.025～0.050 mmにおいては、約半数の鋼線が全体(基準尺1 m)に発錆しており、さらに0.05 mm以上のひびわれ発生地点のシーには、ほとんどなんらかの腐食による小穴が存在していた。さらに0.1 mm以上の地点においては、鋼線の一部に断面の欠損が表われ始め、PC鋼線の強度に影響を与え始めた。

図—6にグラウトの状態と鋼線、シーの腐食を示す。

グラウトの状態Ⅰ(正常)のように、グラウトそのものの品質が良好で空げきも認められない部分には、シー

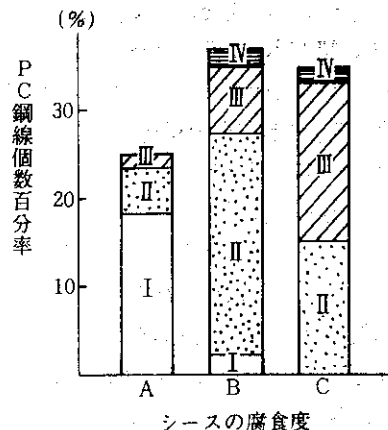


図—6 グラウトの状態とシー、鋼線の腐食

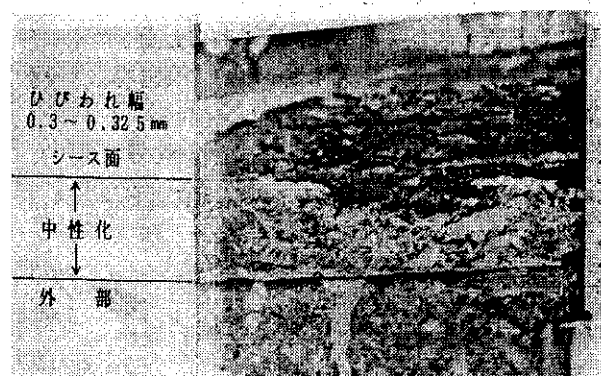
ス、鋼線ともに腐食はほとんどなかった。

しかし、グラウトの状態の悪化とともに腐食は増加し、Ⅱ。(グラウト全体が針状結晶を起こしているもの)においては、シー全体の約90%が腐食しており、鋼線においても全体の約80%に腐食が生じていた。

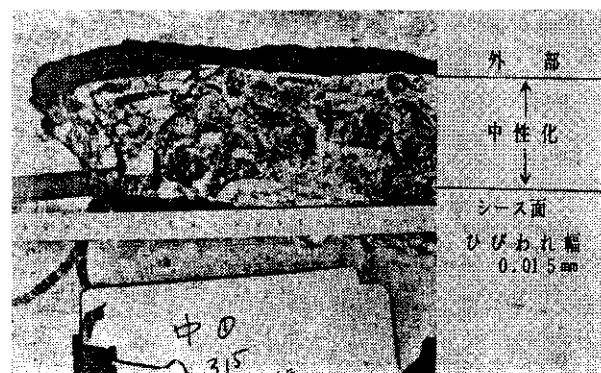
図—7は、シーの腐食とPC鋼線の腐食との関係を示した。PC鋼線は、シーの腐食程度Aで27%、Bで95%、Cにいたってはすべての鋼線になんらかの腐食が生じ、鋼線の腐食程度、Ⅲ、Ⅳ(現在、もしくは近い将来、PC鋼線に強度低下を及ぼすことが考えられる腐食程度)は、シー腐食程度Aで7%、Bで27%、Cで43



図—7 シーの腐食とPC鋼線の腐食



写真—4



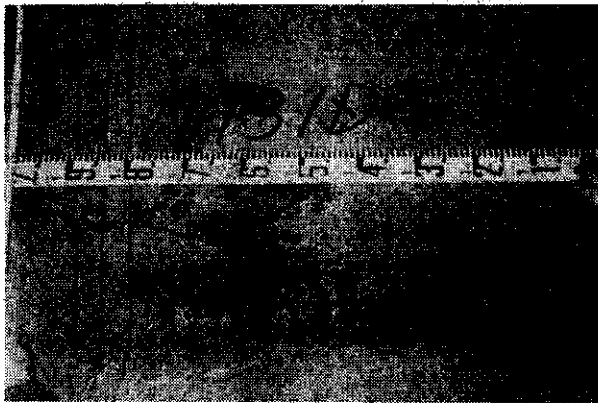
写真—5

%あった。

中性化深さは最大5 mm程度であり、シーの腐食に直接関与するほど深くはなかった。しかし、ひびわれ部については、写真—4、5に示すように、ひびわれ部に沿ってシー付近まで中性化している。この写真の場合、ひびわれ幅は0.3～0.325 mmであるが、ひびわれ幅0.05 mm以上のものについてはほとんどのシー面まで、0.015 mm程度のひびわれ(写真—5)でも、シー面まで中性化していたものも見受けられた。

1-4 沼下橋、滝下橋解体調査(昭和54年調査)

沼下橋、滝下橋は、昭和33年一般国道239号苦前町古



写真一6

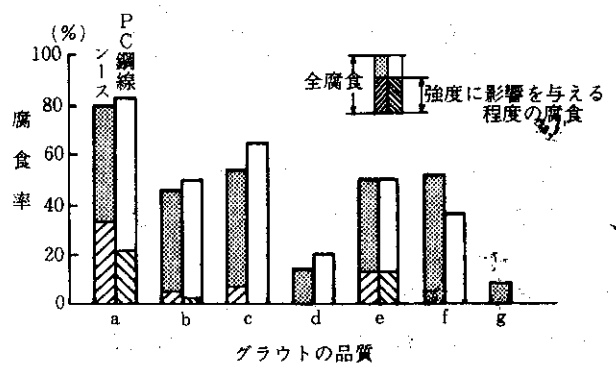
丹別川に架設されたポストテンション単純PCげたで、ともに山間部にあり距離も1kmと離れていない、また、橋長・幅員が同じであり、さらに主げた製作には同一図面を使用している。

| 判定 | グラウトの品質                   | シース、鋼線に及ぼす影響             |
|----|---------------------------|--------------------------|
| a  | 網目状微小気泡化                  | 強度になんらかの影響を与える腐食の発生の可能性大 |
| b  | 気泡多数発生<br>(径1mm程度のもの)     | 腐食の発生する可能性が大きく、          |
| c  | 微小気泡多数発生<br>(径0.5mm以下のもの) | 部強度に影響を与える場合あり           |
| d  | 部分的に気泡あり                  | 弱い腐食、もしくは正常              |
| e  | 断面に空げきあり                  | a、b、cと同様                 |
| f  | その他<br>異物混入               | 異物の位置によっては腐食の可能性大        |
| g  | 正常部                       | ——                       |

コンクリート研究室がグラウトの凍結膨張による縦ひびわれ調査を橋の完成直後に行った際には、ひびわれは発見されなかった。しかし、昭和54年解体調査時において、冬期グラウト注入を行ったと記録されている沼下橋第1けたの腹部に、シースぞいのひびわれを発見し（写真一6）、それ以外では特にひびわれは発見されなかった。

中性化深さは沼下橋、滝下橋ともに正常部で最大1mm程度であり、シース・鋼線の腐食には影響ないと思われる。しかし、滝下橋における施工不良による骨材分離部分ではシース面まで中性化が及んでおり、シース底部に点状腐食が発生しているのが観測された。

判定基準aはグラウト中の細かい気泡の連続部分であり、これを網目状微小気泡化と呼ぶことにした。この部分のグラウトは非常にもろく指でつぶすことができるほどであり、また図一8に示すように、シース・PC線の



図一8

腐食に対する影響も大きかった。

図一9は、沼下橋、滝下橋のグラウトに関する各判定基準の割合を表わすものであるが、この場合、滝下橋と比較して沼下橋の気泡発生率が非常に高いことがわかる。その差の主たるものは網目状気泡化であり、通常の気泡（判定基準b、c）はほぼ同じである。沼下橋、滝下橋は同一設計・施工条件において製作されており、異なるのは施工時期である。滝下橋の場合には、コンクリ

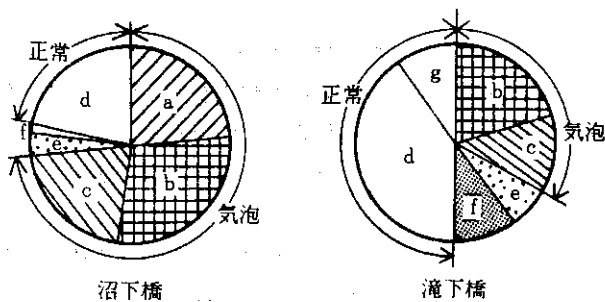
ート打設・グラウト注入が7～9月と条件の良い時期に施工されているが、沼下橋の場合にはコンクリート打設・グラウト注入が10月、11月と冬期にかけており、特に沼下橋第1けたは最後に施工されたけたであり、グラウト注入後テント内で炭火をもって3日間養生したという記録がある。

表一8

|                   | 沼下橋ひびわれ部<br>グラウト (%) | 滝下橋健全全部<br>グラウト (%) | 備考         |
|-------------------|----------------------|---------------------|------------|
| W <sub>1</sub> /C | 25.6                 | 18.2                | 105°C 24hr |
| W <sub>2</sub> /C | 23.3                 | 21.9                | 100°C 1hr  |
| W/C               | 48.9                 | 40.1                |            |
| 吸水量               | 8.8                  | 4.3                 | 48hr水浸     |

W<sub>1</sub>=キャピラリー水+ゲル水 W<sub>2</sub>: 化学的結合水  
W = W<sub>1</sub> + W<sub>2</sub> C: セメント

強熱減量1%として補正



図一9

沼下橋第1けたのひびわれ部のグラウトと滝下橋のグラウトのキャピラリー水・ゲル水と化学的結合水を加熱によって測定して水セメント比に換算した値ならびに同じ部分のグラウトの吸水量を表一8に示す。

グラウトはコンクリートとシーズに包まれているために、グラウト注入から今日まで外部との水の出入りがなかったと仮定すると、滝下橋の水セメント比W/Cは設計どおり40%である。これに反し沼下橋ひびわれ部の水セメント比W/Cは50%近い値を示している。

沼下橋第1けたでは、水セメントW/Cが高かったことに養生期間の不足が加わって、グラウトが凍結膨張を起こし腹部のひびわれを引起こしたと推定される。さらに吸水量においても沼下橋ひびわれ部が滝下橋よりも大きい原因として、水和による収縮のほかにグラウトの凍結膨張による組織破壊の影響が加わったことが考えられる。

表一9からわかるように、判定記号Ⅳに相当するものは滝下橋ではなく、沼下橋に若干見られるだけである。

表一9

| 橋名  | 判定記号 | 腐食度判定基準<br>(基準尺 $l=1.00m$ ) | P C 鋼線の引張強さ |                                     |       |
|-----|------|-----------------------------|-------------|-------------------------------------|-------|
|     |      |                             | Pu (ton)    | $\sigma_{pu}$ (kg/cm <sup>2</sup> ) | 破断力比  |
| 沼下橋 | I    | 健全, 非常に弱い腐食                 | 6.277       | 163.8                               | 100.0 |
|     | II   | しもふり状に発錆                    | 6.268       | 163.5                               | 99.8  |
|     | III  | うきさび全体に発生                   | 6.211       | 162.0                               | 98.9  |
|     | IV   | 断面欠損あり                      | 6.088       | 158.8                               | 96.9  |
| 滝下橋 | I    | 健全, 非常に弱い腐食                 | 6.250       | 163.1                               | 100.0 |
|     | II   | しもふり状に発錆                    | 6.242       | 162.8                               | 99.8  |
|     | III  | うきさび全体に発生                   | 6.195       | 161.6                               | 99.1  |
|     | IV   | 断面欠損あり                      | —           | —                                   | —     |

$$\text{破断力比} = \frac{\text{各平均引張力}}{\text{Iの平均引張力}} \times 100 (\%)$$

沼下橋における判定記号Ⅳのものは破断力比96.9%と約3%の強度低下を示しており、その中でも最大8%の低下を示したものもある。図一11に示すように、判定基準Ⅰの鋼線は沼下橋で19%, 滝下橋で68%であり、図一9のグラウトの品質の割合と似たような傾向を示している。

#### 1-5 潮見橋 (昭和53年調査), 清瀬橋 (昭和55年調査)

潮見橋は、昭和33年一般国道232号天塩町で架設された工場ブロック製単純PCげたであるが、昭和53年道路改良にともない廃橋になった (海岸に位置していた)。

清瀬橋は、昭和32年一般国道274号日高町で架設された工場ブロック製単純PCげたであるが、昭和55年道路改良にともない廃橋になった (内陸に位置していた)。

工場ブロックを現場で連結する場合、ブロック間の間詰にモルタルを用いているが、中性化などに対してモルタル部分が弱点になってくる。

この2橋は現地調査なしで1けたのうちの部分ブロックを搬入したため、ひびわれとの関係は明らかではない。調査対象は潮見橋3ブロック、清瀬橋2ブロック6.5mであった。

グラウトに対してはPCグラウト指針後であり手動グラウトポンプを用いて施工されたため、グラウト中に空げきなどは特に発見できず、またグラウトの品質も悪くなかった。しかし、海岸に位置していた潮見橋のPC鋼線の25%に強い腐食が発見された。

潮見橋は完全にブロックごと搬入されたため、継目モルタル面の中性化を試験できなかった。清瀬橋では注意深く継目モルタルごと搬入してモルタル面中性化をフェノールフタレイン1%溶液を噴霧し調査した。その結果はまったく赤変しない部分が5cmも内部に達している部分もあり、また赤変しても色がうすいところも多く、継目モルタル面の中性化が進んでいることが明らかになった。なお、コンクリート本体の中性化はほとんどなかった。

継目モルタル面に沿って外部の空気・水・その他海岸線では塩分がPCげたの内部に侵入したものと考えられる。この塩分の侵入により、潮見橋ではシーズが腐食し、次にシーズに接しているPC鋼線が腐食したものと考えられる。いずれにしても継目モルタル面に沿って外部の空気・水・塩分の侵入がうたがわれるので、今後の維持管理に注意を要する。

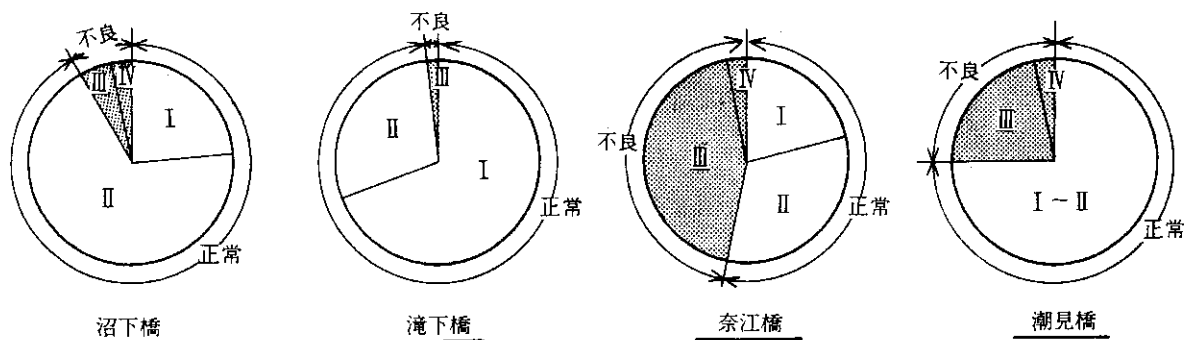
#### 2. 各橋間における解体調査の比較

主げたコンクリートの各橋の配合を表一10に示す。解体調査に際して各橋から採取した主げたコアコンクリート強度と場所打ちコアコンクリート強度を表一3に示す。

最大ひびわれ幅の経年変化を奈江橋、俱知安橋と現在供用中である海岸線の橋について図一10に示す。

奈江橋、俱知安橋のような内陸橋の場合、毎年多少の





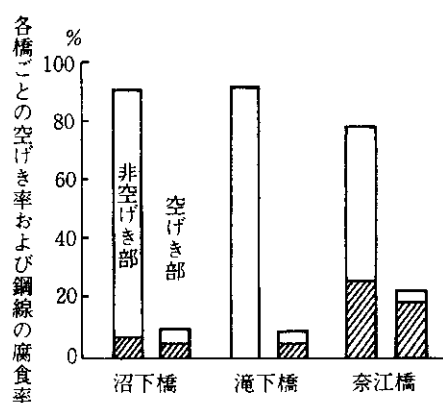
図一11

から問題のある腐食といえる。以上の点から、判定記号Ⅰ、Ⅱを正常部分、判定記号Ⅲ、Ⅳを不良部分として図一11に表示した。

図一11からわかるように、奈江橋では測定PC鋼線50%近くに強い腐食が見られ不良と判定された。

この奈江橋はグラウトは空げき率がかかなり高く、さらに凍結による針状結晶化が見られるなど、鋼線の腐食に関して好ましくない状態であった。また奈江橋は縦ひわれが完成直後から非常に多い橋であった。一方、沼下橋、滝下橋では強い腐食が見られ不良と判定された鋼線は沼下橋で12%、滝下橋で2%であり、かなり良い結果といえる。また工場製ブロック工法により施工され海岸線で供用されていた潮見橋では、測定PC鋼線の25%近くに強い腐食が見られ不良と判定された。工場製ブロック工法の各ブロック間の継目が弱点となったことに海岸線の影響が加わったことがその原因と考えられる。

図一12にはひびわれと空げきがともに発見された奈江橋、沼下橋、滝下橋におけるグラウトの空げき率とそれに対する鋼線の腐食率を示してある。ここで、斜線部分は問題のある鋼線腐食、つまり判定記号Ⅲ、Ⅳの割合を示している。どの橋でも空げき部分では非空げき部に比較して腐食率が圧倒的に高く、ひびわれのあるPCげたでは空げき部分が鋼線腐食に悪影響を与えていることが理解される。



図一12

奈江橋の空げき率は、沼下橋・滝下橋に比較して2倍以上であるが、このことは奈江橋のグラウト注入がコンプレッサーを用いて行われたことに原因していると思われる。

奈江橋ではグラウトの非空げき部でもかなりの腐食が生じているが、これは凍結によるグラウトの針状結晶化の影響と思われる。潮見橋でもグラウトの非空げき部においてかなりの腐食が生じているが、これは各ブロック間の継目が弱点になったことと海岸線に位置していたためと思われる。

奈江橋のひびわれ延長率は調査初年度149.2%、最終年度270.4%であり、この値は沼下橋、滝下橋はもちろん俱知安橋よりも大きく、条件の似た他の橋に比べても大きい。

しかし、ひびわれ延長の増加割合という点では俱知安橋などと大差はない。奈江橋のグラウト注入時期は11月下旬であり注入直後に凍結を受け、縦ひびわれを引き起こしたと思われる。

沼下橋においても解体調査時に凍結によると思われる縦ひびわれが発見されているが、測定初年度にはひびわれは観測されていない。橋梁の完成後、早期の縦ひびわれの原因はグラウトの凍結膨張が大きな要因を占め、そのほかにコンクリートの乾燥収縮、プレストレスによるひずみなどが考えられる。

ひびわれ延長率の最終年度値を見ると、沼下橋20.7%、滝下橋2.5%、双岩橋9.6%であり、滝下橋ではひびわれなしといってもよいほどである。一方、奈江橋270.4%、俱知安橋178.7%であり、その差はきわめて大きい。沼下橋、滝下橋、双岩橋の交通量が少ない場所にあったのに対し、奈江橋、俱知安橋では、元一級国道で交通量の多い場所にあったという要因もあるが、沼下橋、滝下橋、双岩橋の最終測定年度のひびわれ延長率が、奈江橋、俱知安橋の測定初年度のひびわれ延長率よりも小さいことは両者の差が施工上の問題に起因していると考えられる。

双岩橋はPCグラウト指針以前にコンプレッサーによりグラウト注入された橋である。解体調査したけたのグラウト空げき率の推定値は66%にもなるが、ひびわれは発見されなかった。グラウト注入時期は11月、12月である。整形可能なグラウト強度平均値 $103\text{kg}/\text{m}^2$ というグラウトの品質の悪さを考えると、このグラウトは凍結を受けたと考えるのが妥当である。グラウトは凍結を受けたが、その膨張は空げきをうめつくせずに終わり、主げたコンクリートに縦ひびわれを生じさせることにはならなかったと思われる。

橋梁完成早期の縦ひびわれの原因は、グラウトの凍結膨張が大きな要因を占め、そのほかに、グラウト膨張材の入れすぎ・グラウト注入圧のかけすぎ・コンクリートの乾燥収縮・プレストレスによるひずみなどが考えられる。

俱知安橋のグラウト空げき率の推定値が45%と高いことは、グラウト注入がコンプレッサーによって行われたためと思われる。しかし、測定初年度においてひびわれ延長率が53.5%もあるのは、グラウト注入が8月、9月だったことを考えると、原因としてはグラウト中の分離水がそのまま水分としてシース内に残留し、冬期に入り凍結膨張を引起したか、凍結膨張以外の原因としてはグラウト膨張材の入れすぎ、グラウト注入圧のかけすぎなどが考えられる。

奈江橋は、測定初年度のひびわれ延長率が149.2%と大きいことは、グラウト注入時期からみて前述したとおり凍結膨張によると思われる。

グラウト空げき率が20%にもなっているのは、グラウト注入にコンプレッサーを使ったためと思われる。

沼下橋、滝下橋は、グラウト指針以後に手動グラウトポンプにより施工されたために、グラウト空げき率も7~8%と小さく、また縦ひびわれも測定初年度には発見されなかった。

これらのことから、昭和30年代前半に起こったグラウト技術の変革の影響を考えると、グラウト空げき率を減少させた主因は、コンプレッサーから手動グラウトポンプに変わったことであり、PCげたの縦ひびわれを激減させた主因はPCグラウト指針と考えられる。

### 3. 解体調査結果

以上の解体調査結果を要約すると次に示すとおりである。

- (1) 現場製作の主げたコンクリートの強度の伸びは少なく、設計基準強度を下まわるものもあった。PCげたのような高強度の現場打ちコンクリートの場合には、品質管理により一層の注意が必要である。

- (2) コンクリートの中性化深さは正常部では最大でも5mm程度であり、シースの腐食に影響するほどではなかった。しかし、骨材分離部分や0.05mm以上のひびわれ部分では中性化はシースに達しており、シースの腐食の一因となっていた。工場ブロック工法の継目モルタル面は、本体コンクリートに比べはるかに中性化が進んでおり、外部からの水・空気・塩分などの侵入が疑われ、シース・PC鋼線の腐食の一因と考えられる。

- (3) センタースパイラルコイルがグラウト充填の障害物であったりグラウト中の空げきの発生を助長し、またシースに接している部分ではシースの腐食が多数見られるなどが観測された。また、センタースパイラルコイルの目的であるPC鋼線をシース内に均等に配置させるという役割を十分に満足していた個所はほとんどなかった。センタースパイラルコイルの使用は慎重にすべきである。

- (4) グラウトの状態がPC鋼線の腐食・シースの腐食・縦ひびわれに大きな影響を与えていると思われる。強い腐食を受けているPC鋼線はグラウト空げき部や不良部に多く、グラウトがしっかりしていた部分ではほとんどなかった。グラウトが凍結を受けたと思われる位置ではコンクリート表面に縦ひびわれが見られ、グラウト状態は針状結晶化や網目状小気泡化が見られ、PC鋼線は腐食を受けているものが多かった。腐食を受けているPC鋼線の中には設計上の引張力を下まわるものもかなりあった。

- (5) PC鋼線の腐食は、グラウトの品質不良や空げき部とコンクリートのひびわれなどによる中性化や外部の空気・水・塩分の侵入とが結びついた場合、つまりPC鋼線周囲の不動態被膜の破壊と外部の腐食因子の侵入とが結びついた場合に起こると考えられる。

- (6) PCグラウト指針と手動グラウトポンプの有無の差は、グラウト空げき部、ひびわれ延長率などにかなりの差となってでてきている。PCグラウト指針がグラウトの品質向上に大きく貢献したことがよくわかる。PCグラウト指針以前に施工されたPCげたには縦ひびわれが入っている可能性が大きく、多数のひびわれのあるPCげたは維持管理に注意が必要であり、さらにこのようなPC橋が海岸近くに位置する場合には、維持管理にはより一層の注意やなんらかの対策が必要と思われる。

### 参考文献

- 松尾徹郎ほか；双岩橋調査について，土木試験所月報 第273号，1976年  
大川 守ほか；俱知安橋解体調査，第20回北海道開発局

技術研究発表会論文集，1977年  
高柴保明ほか；奈江橋解体調査，第22回北海道開発局技  
術研究発表会論文集，1979年  
服部健作ほか；既設PC橋の鋼線腐食について，第23回

北海道開発局技術研究発表会論文集，1980年  
林 正道；プレストレストコンクリート用グラウトに関  
する実験的研究，土木試験所報告 第29号，  
1962年

\*

\*

\*