

## わが国における PC 鉄道橋の問題点について

友 永 和 夫

## 1. 緒 言

本誌 Vol 2, No. 1, Feb. 1960 に筆者等が報告した「国内および国外の PC 鉄道橋について」に、欧州各国の鉄道に対し、筆者が直接に照会して得た結果を付記した次第であるが、鉄道橋としては日本はドイツとともに世界で最も活潑に PC 橋を使用してきた国であり、他の国々では今なお慎重な態度の段階にあると思われる。

PC の新しい技術によって、適当に設計すれば、想定荷重に対しひびわれの生じないコンクリート構造物が得られ使用したコンクリートの全断面積を有効に活用する利点を有することは周知のことである。良質のコンクリートと高強度の鋼線または鋼棒の、それぞれの特質を極度に活用した経済的な構造物が得られるので、材料、設計、施工の進歩と相まって土木建築界に、橋梁、桁、柱、版、舗装、シェル構造、杭、管、塔、貯蔵槽等、あらゆる分野にその活用が急速に発展していることは同慶にたえない。しかし反面、広範囲な応用、発達、改良、実施が主体となり、基本的な研究が不十分なままに実際面が先行しがちであるので、今後本協会誌などを通じ、ますます調査研究、設計施工の経験、結果、疑問点などの知識の交換、緊密なる連絡が行なわれ、PC 界および本協会がかがやかしい発展をとげることを望んで止まない。

橋梁のなかでも道路橋のように常時作用荷重と設計荷重との間に非常な開きのある反面、少ない回数ではあるが、設計荷重より大きい集中荷重も予想される場合と、鉄道橋のように常時作用荷重と設計荷重との間に大差がなく、しかも荷重の激度の瀬度が線区によってきわめて大きい場合とでは、おのづから設計的配慮において考え方が変わらないが、現在の段階では、いずれも土木学会プレストレスト コンクリート 設計施工指針と日本材料試験協会鋼棒使用 PC 設計施工指針に準拠しており、特に区別していない状態である。

以下日ごろ 鉄道橋としてのプレストレスト コンクリート橋の数々を設計してきた立場のものとして感じていることを、筆のままに書いて各位の御批判を御願する次第である。

## 2. PC 橋の縦ひびわれについて

PC 橋の縦ひびわれは幸いにしてわが国の鉄道橋に関してはその例を聞いていないが、一般にいわれているようにグラウトの不良、不完全からくる水分の凍結によるのが原因とすれば、このような状態の、または状態に近いグラウトのシース全長にわたっての信頼性、従って付着力および端部定着の信頼性の問題が残される。一つの桁断面の中のすべてのシース中のグラウトの信頼性が一様に少なく、付着力が同時に不足する場合には、ひびわれ荷重以上の荷重でひびわれは 1 カ所に集中し、コンクリートの上突縁には悪い影響となり桁の破壊安全率は低下する。グラウトの良好のものと不良のものが混在すると仮定すると、グラウトの不完全なシース中の PC 鋼線は付着がないため計算上より楽をして、その分だけグラウトの完全なシース中の PC 鋼線は負担が大となり、疲労破壊は各個撃破的に起こる危険性がある。また上記のひびわれが、桁本体のコンクリートの締固め不十分のための、シースの外側でシースの下側にできた空げき部の水分の凍結の影響とすれば、PC 桁としては最も大切なコンクリートの有効断面積の問題、コンクリートの信頼性、コンクリートの許容応力の問題となる。いづれにしても最近この方面の研究も相当突進でなされているように聞いているが、原因の確認と、その今後の対策の 1 日も早いことが望まれる次第である。

付着の効果については計算上は  $1\sim 2 \text{ kg/cm}^2$  のきわめて小さい値であることはよく知られている。しかし、PC 構造物はひびわれができないコンクリート構造物であることに利点を見出しているの、フルプレストレスト コンクリートの場合でも、たまの過荷重または予定どおりのプレストレスが導入されなかった場合のような誤差を考えると、桁の引張り側には引張応力が働らくことがありうると考えるのが至当であり、このような場合、大きいひびわれがおこらないように付着作用が保証されなければならない。

いづれにしても注入が良好に行なわれてはじめてよい付着がえられるので、注入作業は PC の施工の上でもっとも大切なことの一つであり、先日来日したドイツの Baur 氏も、監督者側として国鉄などでは PC 注入の専

門家をおくべきだといっていた。

フレシネー, B.B.R.V. 方式のケーブルにはグラウトがよく均一に注入できるように, スペースを入れるべきだと思われる。これによってPC線のねじれを防ぎ, 間隔を一定に保ち, 洗条水の残ることも少なくなるものと思われる。

### 3. PC 鉄道橋の剛度と衝撃について

現在国鉄で普通に設計された KS-16, 支間 19 m の合成桁, PC 桁, 鋼床版上路鉄桁, 普通上路鉄桁につき, 活荷重 (衝撃をふくまない) によるたわみ度を計算すると支間を  $l$  とすると, それぞれ  $\frac{l}{3000}, \frac{l}{1600}, \frac{l}{1300}$  程度である。すなわち, たわみ剛度は PC 桁と合成桁はほぼ同じである。また対数減衰率は全振巾につき大戸川橋で 0.084, わが国の普通の鉄桁では 0.074~0.240 くらいである。ドイツの測定例は鋼橋 0.046, 合成桁 0.204, 鉄筋コンクリート桁 0.313, PC 桁 0.078 で, PC 桁の対数減衰率は案外に僅少である。また一方 PC 桁は中位の支間で鋼桁に比較して自重が 5~6 倍にも達するので, 通過車両からの外力の振動周期と共振を生ずる場合, 車両の進行にともなう桁上の車両の位置変化による桁の載荷自己振動周期の変化がきわめて少ないことと, 上記の対数減衰係数が比較的小さいことと両々相まって中位の支間においても車両の振動と共振を生じ, 相当の振巾にまで共振増巾する可能性がきわめて大きい。この点一般の鋼鉄桁においては中位以下の支間に対しては自重が軽いため, 車両の移動にともない時々刻々載荷自己振動数が大きく変化し, 共振を生ずる時間がきわめて少ないとされている。ただし PC 桁が自重が大であることは車両がレール継目をたたいたり, 車輪のフラットによってレールが周期的に槌打ちされるような瞬間的のいわゆる衝撃力の吸収には自重の軽い鋼橋より有利かも知れぬが, このような点は将来の研究課題の一つとなる。

上記のような観点から鋼桁, PC 桁, 合成桁ともに衝撃係数としては一応同一公式を使用するのがよいと信じている。

### 4. PC 鉄道橋の支承について

鉄道橋の支承には固定支承と可動支承とを設ける必要がある。可動支承としては在来の鋼鉄桁においてはすべて鋳鉄製の滑り支承を用いてきている。鋳鉄を用いているのは安価であることほかに鋼底版と鋳鉄との間の摩擦係数が鋼と鋼との間の摩擦係数より小さいからでもある。アメリカ, ドイツなどの示方書によると, 鉄桁においても支間 20 m 以上の可動支承にはローラー支承を用

いることになっている。これは大支間になると活荷重の載荷時の反力が大であり, 桁の活荷重による下突縁の弾性のびの量も大となるので, 橋脚, 橋台がきわめて大きい可撓性をもっていない場合には, 可動支承の摩擦抵抗力 (反力×摩擦係数) が橋脚, 橋台の頂面に線路方向に作用し, 橋脚, 橋台自体または基礎に悪い応力を与えることになる。従って活荷重および桁の自重の大なる場合で, 可動量の多い場合には, ますます可動支承部の摩擦抵抗の少ない構造が要求されるわけである。

PC 鉄道橋と鋼鉄桁と比較すると活荷重によるのび, すなわち可動支承の移動量は PC 桁の場合 ( $l+i$ ) でコンクリートの応力で  $80 \text{ kg/cm}^2$  とすれば鋼に換算して  $80 \times 6 = 480 \text{ kg/cm}^2$  の応力の弾性のびの程度である。中くらいの支間の鉄桁の場合  $800 \text{ kg/cm}^2$  くらいが  $l+i$  による応力となるから, 可動せしめるべき量は PC 桁は鉄桁の  $1/2 \sim 2/3$  程度と考えられるが, ( $l+i+d$ ) による反力は PC 桁は鉄桁の約 2 倍になり, 自重が大なるために活荷重の進行にともない, 反力の変化は鉄桁にくらべて小さい。従って鉄桁の場合は反力が十分に大にならないうちに, 全体の伸びのなかのかなりの部分は滑動するが, PC 桁の場合は当初から自己による摩擦力がすでに大きいために, 滑りにくい欠点がある。このような意味から, これも将来の研究課題ではあるが, 一応 PC 桁は 20 m 程度からはローラーを入れることにしたい意向である。もちろん, それ以下の支間についても可動支承については, ゴムパッド等のせん断弾性を活用したような支承の良質で耐久性のあるものが早急に望まれる次第である。

### 5. 各種の方式および材料について

現在 PC の種々の方式が日本に導入されているが, これらを, どのようにその利点によって使い分けるか, また種々の方式に対し鋼線, 鋼棒をどのように示方するかの問題が, それぞれ決定されなければならない。例えば PC 鉄道橋で支間 30 m くらいになると Freyssinet 方式の場合  $\phi 7 \text{ mm}$  の鋼線を用いても,  $\sigma_{28} = 500 \text{ kg/cm}^2$  のコンクリートを使用すると, その下突縁断面に対し, シースの間隔は Guyon の Long span prestressed concrete bridges constructed by the Freyssinet system における忠告による最小間隔に近いものとなり, 良質のコンクリートをせまいシース間隔を通して打たなければならない結果となる。このような場合, コンクリートの断面積を大きくしても  $400 \sim 450 \text{ kg/cm}^2$  のコンクリートの設計の方が良好ともいえるし, またこのような場合にはある程度集中ケーブル方式に近い B.B.R.V. 方式

の方がよい設計かも知れない。しかし、B.B.R.V.方式をとる場合、釘頭をつくるための鋼線に要求されるべき性質は特に考慮されなければならない。

PC鋼線はコンクリートに封入されているとはいえ、 $-5^{\circ}\text{C}$  または  $-10^{\circ}\text{C}$  くらいまでの低温度における、また火災等で  $370^{\circ}\text{C}$  以上に相当時間保たれたのち各種の物理的性質（引張強度、降伏点応力度、衝撃、疲労、レラクセーション）も一応はやっておかねばならない問題であろう。

直径の大なる、例えば  $\phi 7\text{mm}$  鋼線では、オイルテンパー線が一部製造されているが、これらについても stress corrosion の問題もふくめて十分なる使用上の、製造上の注意事項を規定する必要がある。

$\phi 7\text{mm}$  をこえると良質の高強度の鋼線の製造が困難となるので、世界的にもだんだんと stranded cable を用いる傾向があるが、これらについても製造上、使用上のよい示方書が決定され、安心して使用できる日が近いことであろう。特に strand は製法により  $E$  のばらつきが大きいのではなからうか。また cold roll 鋼線も cold drawn 鋼線と内部応力の状態が異なり、降伏点が高いが伸びが少ないような傾向はないか等々、それぞれの利点とともに欠点の比較試験をして、indented 鋼線をもふくめてその利点を活用できるように、有効に使用するように研究調査されてゆかねばならない。特に有効プレストレスに直接の関連をもつレラクセーションについては長期間のものがなんらかの方法で合理的に推定または決定されねばならない。

Stranded cable に関しては素線継ぎをどうするかが問題であり、製造上に相当の支障となるであろうが、特にPC鉄道橋のような動的応力が問題となる場合の鋼線では、よりあわせ過程中に継目を設けることは禁止すべきであろう。また線材として日本では主として第2種甲すなわち Mn の比較的少ないものを用いているが、輸出用には先方の要求から第2種乙すなわち Mn の比較的多いものの方が製造されているが、脱酸効果、塑性変形加工、熱処理の効果、耐疲労性、じん性等からいって、いずれが良好なものであるかなども十分調査研究が望ましい。

## 6. PC 橋の疲労について

鉄道橋としてPCを使用する場合、最も問題となるのは耐疲労性の問題であろう。疲労破壊に対する安全率の取り方について、各国ともなんらの規定も今のところ与えられていない。この点がいままで各国で鉄道橋にPCが活潑に取り入れられない一つの理由であろうと思われる

る。

PC桁の疲労については猪股俊司氏の実験のほか Freyssinet, P. Xercavins, T.Y. Lin, P.W. Abeles, R.E. Rowe, W. Eastwood, C.E. Ekberg 等の論文があるが、これらの数多くの実験結果が静的ひびわれ強度、疲労破壊強度、静的破壊強度との比率が実験者によりまちまちの値に出ているのであるが、曲げモーメントによる疲労破壊に関するかぎりにおいては、これらの実験のばらつきをある程度説明づけ、また疲労破壊に関して一定の安全率をもたすにはどのようにすればよいかを図表化して求めるようにした点では、C.E. Ekberg の論文は研究者および設計者に対してきわめて重要な意義をもつと思われる。ただ Ekberg は Rüschi の論文の考え方を取り入れて、安全率には

- (1) 内力および内部応力の算定の不確かさ
- (2) コンクリートと鋼の材料の性質の不確かさ
- (3) コンクリートの分離と鋼材中の不純物に対する材料の局所的な弱点

の3つを考慮すべきものとして、彼の図表から求められる疲労破壊曲げモーメント ( $M_{\text{dyn-ult}}$ ) は次の式を満足することを提唱している。すなわち、

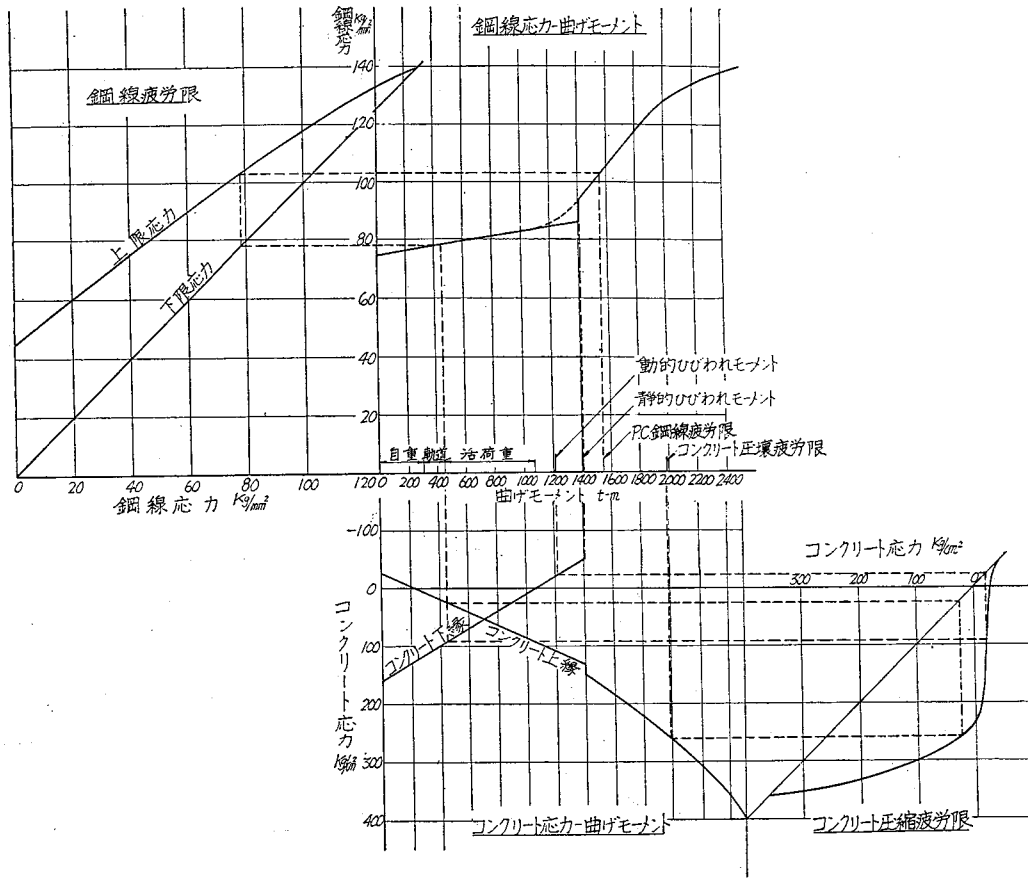
$$M_{\text{dyn-ult}} \geq K(D+L+I)$$

ここに  $D, L, I$  はそれぞれ死荷重曲げモーメント、活荷重曲げモーメント、動的曲げモーメントであり、 $K$  は荷重係数または安全率である。しかも Ekberg は  $K$  の値として2前後の値をとるべきであることを強く主張している。

従来疲労破壊に対する検算の方法がなかったので、ひびわれ安全率から現在普通設計されてきたPC桁の疲労安全率を想定してみると、まず静的ひびわれ安全率が支間の大小により 1.14~1.27 であり、一般に実験結果からも、Ekberg の図表換算によっても静的ひびわれ荷重より少し大きい荷重までの荷重変動で、PC鋼線の疲労破断によって桁の疲労破壊が生じているので、前記安全率にさらに安全率があるとしても、支間の大小に応じ疲労破壊に対する安全率は前記の不確かさが全々ないとして 1.25~1.4 くらいであると考えるのが至当のようである。参考までに Ekberg の方法によって求めた小丸川PC桁の疲労限図を 図-1 に示す。

結局前記の3つの不確かさという悪い条件がどのように競合しても安全率が1より小さくならない値として、この 1.25~1.4 くらいでよいか、Ekberg の主張のごとく2近い値をとっておくべきかの問題である。現在まで架設されたわが国のPC鉄道橋は列車回数も比較的少ないか、設計荷重と実際荷重との間に余裕のある箇所も多

図-1 小丸川 PC 桁疲労限度図 (Ekberg の方法による)



いのであるが、最近ではだんだん重要本線にも架設されるすう勢にあるので、荷重強度、瀬度に応じて当然この安全率  $K$  を変化せしめて、少なくとも 1.75 程度までは重要線について考えるべきものと思われる。

PC 橋の大きい利点としてひびわれが生ずるまでは、PC 鋼線または PC 鋼棒の応力変動範囲はコンクリートの品質、支間の大小により多少異なるが、80~100 kg/cm<sup>2</sup> のコンクリートの応力変動に対応して  $n \left( = \frac{E_s}{E_c} \div 6 \right)$  倍した 480~600 kg/cm<sup>2</sup> 程度で、下限応力と比較するときわめて小さいものである。

従って PC 鋼線の場合その下限応力は約 8 000 kg/cm<sup>2</sup> であっても、コンクリートにひびわれが出ない範囲においては PC 鋼線の疲労破断は一般には生じないはずである。ただコンクリートにひびわれが生ずると Ekberg の図表 (図-1 参照) からも計算的にも PC 鋼線の負担は急激に増大し変動割合も大となり、ひびわれの切欠の影響もあり、PC 鋼線の疲労破壊にきわめて不利な状態となる。従って鉄道橋のごとく疲労破壊が設計の決定的条件となるような構造物では、どのような原因でひびわれが入るかの問題を十分に考慮しなければならない。

筆者は、きわめて慎重に施工された大戸川橋の実例そ

の他からプレストレスの導入自体の不確実さは少し安全をみると  $\pm 10\%$  は考えておかねばならないと思う。この原因としては PC 鋼線の  $E_s$ 、コンクリートの  $E_c$ 、PC 鋼線の摩擦損失、コンクリートのクリープ、乾燥収縮等々それぞれ計算仮定値または試験片の測定値と実際の桁本体の場合との間に誤差のあること、また PC 鋼線のレラクセーションを一応 5% と見込むのが通例であるが、これに関しては長期の測定値の少ないこと、数 10 年後を予想すれば 8% は見込む必要があるのではないかな等々の問題、またはドイツ国鉄の Bührer 博士の指摘するように振動機による締固めに起因する下層部と上層部との締固めの程度の差、および含有水量の差からくる断面内の硬化収縮量の差、特にコンクリートの発熱により断面内部におこる温度の不均一な状態から常温に冷却するとき生ずる計算上の内部応力は約 2/3 はクリープで消滅するが、約 1/3 は応力として残るであろうというような問題、また材令の若いコンクリートに引張力を与えて引張クリープをおこさせると、圧縮強度の弱いコンクリートになること等々の問題があるようである。ドイツ国鉄ではこれらのことが各種のコンクリートについて実験的に研究され、ドイツ国鉄の毎年 1 回の約 1 週間にわた

る各地方鉄道局の橋梁課長を集めての講習会で講習されていた。PC鉄道橋の施工管理者としての高品質コンクリート注意書、および、振動締固めの効果、コンクリート打設後幾時間までは振動機をかけてよいかの限度、一番能率のよい時期はいつか、等が各品質のコンクリートに対し実験的にきめられていた、これらはすべて不当な施工をすれば前記の不確実さの要素となりうるものである。

PC桁の疲労破壊は一般の設計のものではPC鋼線の疲労破壊でおこるので、PC鋼線または鋼棒の疲労に対する性質は特に大切である。他方日本においても最近冷間引抜、冷間圧延、オイルテンパー、高周波熱処理等各種の製造法によるPC鋼線や鋼棒があらわれており、またPC鋼線の直径も使用上の効率の点からφ7mmくらいまでの太いものが普通となってきたので、太い鋼線に対する製造上の注意、製品の信頼度は細いものに比し、どのようであるかを知る必要がある。一般にPC鋼線は最近の傾向としてできるだけ引張強度と降伏点応力度を高くすることに重点がおかれているが、例えばバネ用鋼線などでは引張強度、および、降伏点応力度が低下し、レラクセーションが大きくなる等の犠牲をはらっても、疲労強度とじん性に重点をおいた熱処理(370°C近くに10分程度)をし、かつ表面きず検査も特に厳格にしている。PC鋼線は370°C5分間程度短時間の熱処理によって引張強度、降伏点の最高になる点をねらっているが、鉄道橋のような疲労を当然考慮すべきものに使用するのには、信頼度の点から安全率にどのように見込むべきか問題となる一つの要素であろう。

吊橋の主索、吊索等が一般に最大設計荷重に対しほぼ3以上の安全度を有し、常時荷重に対し4~5以上の安全度をもって使用されていることと比較するのは、種々問題の存する点とは思われるが、PC橋ではほぼ同様なPC鋼線を有効プレストレス時において破断強度の大体1/1.7( $\sigma_a=0.6\sigma_B$ )で使用している点については、破壊安全率は2以上で検算しているから静的には2以上の安全率があることは確実であるが、鉄道橋については次のようにドイツ規格のごとく考えるのがよいと考える。すなわちドイツは $\sigma_a \leq 0.55\sigma_B$ 、または $\sigma_a \leq 0.75\sigma_e$ (ここに $\sigma_e$ は鋼線の降伏点応力度)を常時満足することを規定しており、従って有効プレストレスで約 $\sigma_{ae} \doteq 0.5\sigma_B$ となり、引張破壊に対し1/2で使用している。KS 18、支間18.14m、2主桁の鉄道橋をDIN 4 227と日本の指針によりそれぞれフルプレストレスで設計した結果、所要PC鋼線量は1.25:1の比となった。ドイツではPC線に対しこのような低い許容応力度を用い、鉄道橋の場合に

はフルプレストレスで設計するわけであるが、Bührerの指導によればさらに引張側のコンクリートに圧縮応力をいくぶん発することを推していることは注目に値すると思われる(一方日本の鋼棒使用のPC設計施工指針では $\sigma_a \leq 0.70\sigma_e$ のみを規定しており $\sigma_B$ との関連がないので鋼棒によっては、ドイツより安全側かどうか不明である)。

しかし一方においてRoweも述べているように、フランスのひとつの傾向として、Xercavinsが実験したように、引張強度(152 kg/mm<sup>2</sup>)と降伏点(150 kg/mm<sup>2</sup>)が極度に接近した鋼線を有利に使用し、有効プレストレスが引張強度の76%のような高い応力度に用いても、くり返し疲労に十分耐えうるとの実験結果が発表されている。しかしこのような鋼線は、破断までの伸びの問題と高い応力度で使用すればするほど、材質欠陥または表面きず等が疲労強度におよぼす影響が大きい可能性があるため、材質の均一性にも一段と慎重を要することになるであろう。

またXercavinsの実験はPC鋼線の有効プレストレスをあげることによって、桁としての疲労耐力が上っているという結果を得ているが、コンクリート断面積一定でPC鋼線の断面積や位置も変化せしめないで有効プレストレスのみを増大せしめているので、コンクリート桁の引張側に導入されている圧縮応力はPC鋼線の有効プレストレスに比例して制限なく増大している。したがって静的きれつ荷重も疲労破壊荷重もましているが、下表に示すごとく有効プレストレスの増加割合ほどにはましていない。結局コンクリートの引張強度は一定であり、前記PC鋼線の有効プレストレスの割増しに比例してまずわけではないから、有効プレストレスの増分より少し下まわった静的きれつ荷重の割増しがあり、その静的ひびわれ荷重の割増しにほぼ等しい疲労破壊荷重の割増しがあるということを示している。

PC 鋼 線			静的きれつ荷重			疲労破壊荷重		
有効プレストレス 引張強度			静的破壊荷重			Xercavins の結果より*		
A桁	B桁	C桁	A桁	B桁	C桁	A桁	B桁	C桁
51%	64%	76%	43%	50%	57%	57%	67%	81%*
1 : 1.26 : 1.49			1 : 1.16 : 1.33			1 : 1.18 : 1.42*		

\* Xercavins はA桁(0.33~2.76 t-m)、B桁(0.33~3.25 t-m)、C桁(0.65~3.9 t-m)で、約 $1.0 \times 10^6$ に耐える実験結果を得たが、C桁のみは下限応力が異なるので、補正を要する。従って81%、1.42の数値はさらに少し小さい数値となるはずである。またこれらの数値はひびわれ後のPC鋼線の応力を助ける意味から補強鉄筋(この場合PC線の約1/3入っている)とその位置(PC線より引張縁に近い場合は大きく助ける)によって大きく変動しうる数値である点に注意を要する。

このように疲労破壊が静的ひびわれ荷重より相当大きい荷重で生ずる実験結果もあるが（P C 鋼線量の約 1/3 の補強鉄筋が相当影響していると思われる）、猪股氏の実験の結果のごとく、ほとんど静的ひびわれ荷重と等しい荷重のくり返しで疲労破壊を生ずるものもある。また猪股氏の実験結果から推察すれば、P C 鋼線の有効プレストレスをさらに高めた場合は、静的ひびわれ荷重以下の荷重のくり返しでも疲労破壊が予想される。Ekberg の図表解析によってこれらの実験結果がすべて説明がつくかどうかは興味のある問題であるが、Ekberg も説明しているように、いわゆる Balaced Design (Ekberg の本文にも明確ではないが、静的破壊モーメントの作用した場合に、P C 鋼線の応力が 0.2% 永久ひずみを生ずるいわゆる鋼線の降伏点応力度となるように P C 鋼線量を撰定した設計) より少ない P C 鋼線量の設計、すなわち under reinforced design か、より多い P C 鋼線量 (Ekbery は明記していないが補強鉄筋もふくめて考えてよいと思われる) の設計、すなわち over reinforced design かによって、P C 桁の疲労破壊が静的ひびわれ荷重の近くでおこるか、静的ひびわれ荷重より相当高いところでおこるか、などのことが明らかにされている。

実際の橋梁の安全性からは、静的強度でひびわれモーメントと破壊モーメントとの間に相当の差がある方が、保守上、保安上からも望ましいように、疲労破壊の場合でも、動的または静的ひびわれ荷重よりも相当さらに大きい荷重のくり返しでなければ疲労破壊しない方が保守管理上、対策を講ずる点からも望ましいことは当然である。この意味からは Ekberg のいわゆる over reinforced design にして疲労破壊に対して 2 に近い安全率をもたせることはきわめて有意義のことと信ずる。

このような観点からはドイツの鉄道橋のごとく、日本

より約 20% P C 鋼線の許容応力度が低く設計され、前記のごとく P C 鋼線量が日本より 25% 近くも多い設計の場合には上記の over reinforced design になっているわけであって、ひびわれ後のコンクリートの引張応力の肩代りによる P C 鋼線の応力の増加量が比較的少ないことと、P C 鋼線の有効プレストレス応力度、すなわち疲労の下限応力度が低いために疲労破壊せしめる応力変動巾が広くとれること、二重に疲労に対する安全性を示すことになっているわけである。この意味からドイツのごとく P C 鋼線の許容値を低目にとることには、特に耐疲労性に重要な意義があると考えられる。

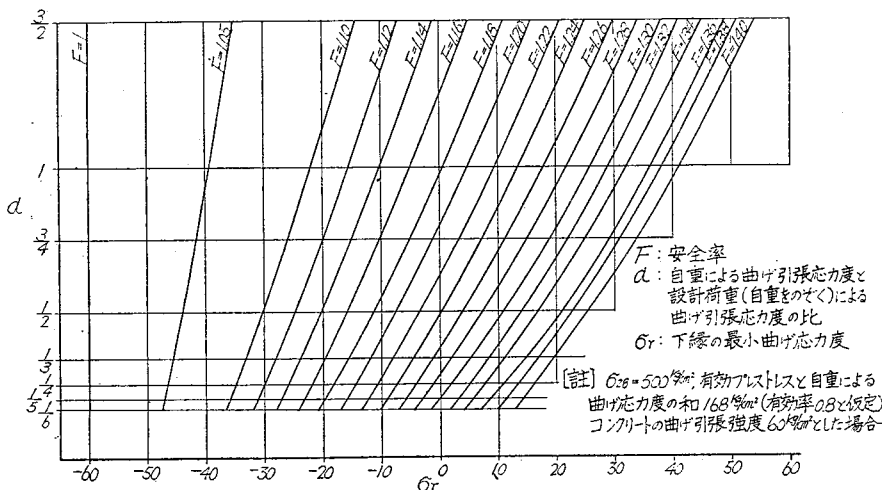
Ekberg の図表により、いちいち疲労安全率を求めることは、理論的には正しいが、実際の設計には相当煩雑であることと、実際問題として、ひびわれ後については不明確な点のあること、実際の桁では多くのシースが封入され、プレストレスのよく入ったものと、そうでないもの等のばらつきもあるので、疲労破壊が各個撃破的に生じるであろうこと等を考えて、相当精度が落ちるが、静的ひびわれにある安全率をみて疲労破壊の安全性を確保することが考えられる。土木学会プレストレス コンクリート設計施工指針 43 ページの表から明らかのように、現行の同規程によって設計された P C 桁では、ひびわれの安全度のみからは支間の大小によって非常に差があることになる。

鉄道橋の設計では、フルプレストレスの設計にすることはもちろんであるが、ひびわれの安全率を一定にするためには、さらに部材引張部に残すべき最小圧縮応力度を支間に応じて適当に選定する必要がある。

同表を計算しなおして図示した図-2 を見ると前記のことが明瞭である。

フランスの仕方書には桁の各部において、その突縁

図-2 ひびわれに対する安全率



の最大圧縮応力の8%の圧縮応力を残すことになっている。桁自重がないとしたときの導入引張部圧縮応力の8%の意味であれば、導入力の誤差を8%とみなしたものと考えられ合理的と思われる。また一方図-2のごとくひびわれ安全度を一定とするためには、大支間の桁すなわち $\alpha$ の大きい桁ほど大きい圧縮応力を残すべきである点からも、自重がないとした導入圧縮応力の何%残すと規程するのが合理的と思われる。

土木学会の指針には、ひびわれ安全度の計算法が与えられているが、いくらにとるべきかは指定していないのであるが、疲労破壊の安全性を確保する意味からは前記のごとくPC鋼線の許容応力のある程度下げること、または補強鉄筋を相当に入れることを前提としてひびわれ安全度1.4~1.5をとりたい。

安全率の考え方として、死荷重と活荷重にべつべつの荷重係数をかけて計算する方法も考えられるかも知れないが、特にPC桁では危険側の誤差に活荷重、インパクトよりもプレストレスの導入の誤差が最後まで直接きてくること、コンクリート、PC鋼線、プレストレス導入等の誤差やばらつきが大きい支間ほど、施工上からも誤差の危険率が大きいことを考えれば、死荷重の大きい安全率をとることも考えうるので、Ekbergのごとく $[D+L+I]$ に一樣の安全率を考えるのがよいであろう。

また、ひびわれ安全度をもって疲労破壊に対する安全性を確保するものとする、コンクリートの曲げ引張強度は、断面が矩形か、I形か、中空箱型かによって三段階くらいに分けて規定する方が妥当と思われる。

また、ドイツのPC橋梁用コンクリートの一例として、ポルトランドセメントZ225、Z325、Z425を用い、セメント使用量 $300\text{ kg/m}^3$ 、 $w/c=0.38$ 、骨材0~7mm 50%、7~15mm 25%、15~30mm 25%を用いて、 $\sigma_{28}$ がそれぞれ520、540、630 $\text{ kg/m}^2$ の立方体強度を得ている。骨材を厳選して、硬化収縮、コンクリート打込後の温度上昇を考えて、セメント量が一般に日本より少ない点は、日本のPC界においても今後の研究課題とな

るであろう。

われわれの実際的设计が引張側のコンクリートの最大圧縮応力を許容応力一杯に押えて設計するのが一般であるから Xercavins の実験桁のようにPC鋼線の有効プレストレスを種々に変えて引張側のコンクリートの圧縮応力を種々にするという設計上の撰択は実際の桁では許されない。ただ引張側の疲労破壊からいえばプレストレスが入りすぎた方が、入り足らぬ場合より一般的には疲労破壊に対して有利であるということがいえるようではあるが、これはまたPC鋼線の安全度、信頼性との関連において論ずべき問題である。動的ひびわれ荷重が静的ひびわれ荷重より低いところにあるので、コンクリートのくり返し曲げ引張許容応力(応力変動巾によって異なるが Abeles は modulus of rupture の約1/2, Magnel は約1/3であるとしている)を与えて動的ひびわれ荷重をきめ、これに対して安全率をとる考え方もあるかも知れないが、多くの実験結果はPC桁の疲労破壊は、特に over reinforced design の場合とか補強鉄筋の多い場合は、必ずしもコンクリートのひびわれによる応力集中の影響が決定的とはいえないようであり、静的ひびわれを最初に生ぜしめたのち、静的ひびわれ荷重以上で $2 \times 10^6$ 回にも耐えている例も多いので、動的ひびわれ荷重を基本に考えて安全率を考えるということは、ひびわれ発生の安全率を、厳密に議論する場合には必要であるが、ひびわれ後相当高い荷重までもたすような疲労破壊安全率を論ずる場合には、簡単には静的ひびわれがおきたあとの疲労を検討すればよいようである。

以上思いつくままに設計の立場から問題となりうる事項を列記してきた次第である。何らかの参考になってさらに掘りさげた研究調査の一助にともなれば幸いである。ことに疲労安全度の問題は、今後とも研究と調査と現場施工の実態とあらゆる方面からこれを総合して決定すべき問題であると考えているが、少なくともドイツの鉄道橋程度の疲労安全度を保持すべきものと考え検討中である。

(筆者：工博 国鉄構造物設計事務所長)