

V—16 PRCけたの設計と載荷試験について

日本鉄道建設公団 札幌支社 正会員 高橋 昇
丸山 修

1. 概 要

(1) PRCについて

ひびわれを許さないPCとひびわれを許すRCとの中間範囲の構造であるPRCは、1960年代になってから本格的に実用化が取り組まれるようになった。我国では、横道英雄氏が1961年ころ初めて紹介し、1966年にはその理論をもとに、支間48mを有する π 型ラーメン橋の上姫川橋が、国道5号線森町付近に北海道開発局により建設された。この理論は、RCにおいて支間が大きい場合などには、ひびわれ幅を小さく抑えることが不経済となるため、比較的少量のプレストレスを導入してひびわれ性状を改善すれば、RCの適用範囲を拡大することができるという観点から生まれたものと推測される。

これに対してPCの立場からも、ひびわれ条件を緩和してプレストレス量を減少すれば、経済設計につながるから検討が進められてきた。PCにおいてひびわれが発生した場合、一般に鋼材量が少なく付着性状も良くないため、ひびわれ幅の制御は困難である。このため異形鉄筋を配置してひびわれを制御し、合わせて耐力の増大に寄与させるという考え方が取り入れられるようになった。我国では、猪股俊司氏が1974年頃この設計方法について提案を行い、パーシャルPCの普及に貢献されている。

鉄道橋においては、1964年頃、国鉄・構造物設計事務所でパーシャルPC桁の載荷試験が行われ、疲労耐力が評価された。その後、ひびわれに対する予測などの数多くの研究が行われたことや、PC鋼材の腐食耐力についても問題はないとの判断で、1982年奈良県の桜井線ボケラ橋梁に初めてⅢ種PC鉄道橋として採用された。

鉄道公団においても、PRC桁の経済性・構造上のメリットに着目し、調査研究を進めてきた。ここに紹介するPRC桁（津軽海峡線・建川一線架道橋）は、当公団が津軽海峡線・北海道方で初めて採用したものであり、実橋による載荷試験も行っているので合わせて報告したい。

PRCは、その名のとおり、PCとRCの両者の性質を有しており、荷重状態に応じてその性質を利用することのできる機能性の高い構造と言える。PRCの特徴については、次のような利点があげられる。

- ① 永久荷重作用のみの状態でのひびわれ開口を、ごく微細なものに制限することで鉄筋コンクリートより耐久的な構造とすることができる。
- ② プレストレス量の加減により、コンクリートのクリープによる過大な部材のそりを制限することができる。

PRC桁は、鉄道橋においては、橋長25m～35m程度の桁に適していると言われてきた。当公団の調査研究結果においても、その経済性が確かめられている。また、従来RCとして設計されてきた20m前後の桁においても、桁高制限を受ける場合等、PRC桁が有利になることが考えられ、今後の普及が期待される。

(2) 建川一線架道橋

当公団で建設している津軽海峡線の北海道方木古内町付近の町道・建川一線との立体交差は、現地の状況から桁長25.0mの橋梁で町道をまたぐ形式で計画された。軌道は複線スラブ構造で、将来、北海道新幹線と共用できるように狭軌と標準軌の両方のゲージを持つ3線軌条が可能な構造とし、列車荷重はKS-16とN-18、P-19を考慮した。また、桁下空頭4.7m以上の確保のため、桁高は2.2m以下と制限を受けた。これらの条件をもとにRC桁、PC桁等について採用の適否を検討した。

鉄道橋で $\ell=25\text{m}$ 程度の桁の場合、RC構造とすると（活荷重＋死荷重）で鉄筋の許容応力度いっぱい

設計を行ったときには、死荷重が全荷重に占める割合はおおきく、死荷重時のコンクリートのひびわれ幅は比較的大きなものとなり、耐久性に不安を残す。また、ひびわれ幅を小さくおさえようとすれば、経済的に割高な設計となってしまう。一方、PC構造とすると、導入するプレストレス量が大いことから桁のクリープ変形（そり）が大きくなることが考えられ、スラブ軌道などの直結軌道の場合、保守費が増大することも考えられる。

以上を考慮の上、検討の結果、所要のひびわれ条件を満足するように比較的少量のプレストレスを導入するPRC桁が、経済的にも有利となり、クリープによる影響も小さいことから採用することにした。

2. 設 計

(1) PRC部材の設計方法

土木学会プレストレストコンクリート標準示方書においての設計方法は、仮想引張応力法を基本として作成されている。仮想引張応力法は、永久荷重作用状態でコンクリートに発生する引張応力を許容するもので、全断面有効としてのコンクリートの仮想引張応力の制限値を定め、かつひびわれ断面として部材に有害を与えない範囲においてのひびわれを鉄筋応力度で規制することとしており、設計法は従来行っているPCあるいはRCの設計手法と同様の性質を有しており、なじみやすい設計法ということができ、本橋においての検討は、この手法を適用することにした。

この手法によれば、曲げに対する検討項目として、次の3つを行うこととしている。

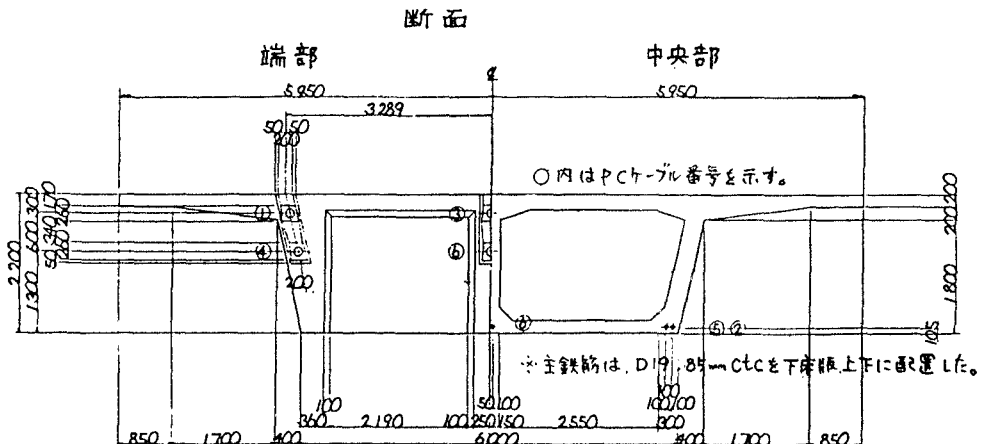
- ① 永久荷重作用のみの状態でのコンクリートの下縁応力度を全断面有効として求め、これが許容値を下回らないこと。（本橋では $-20\text{kg}/\text{cm}^2$ ）
- ② ひびわれ幅を制限するために、永久荷重作用時のひびわれ断面で計算した鉄筋応力度が許容値を満足すること。（本橋では $1000\text{kg}/\text{cm}^2$ ）
- ③ 破壊に関する安全度の検討。（死荷重+活荷重+衝撃 の1.7倍）

(2) 設計条件

一般的な設計条件を次に示す。

構造型式	： 複線2室箱形PRC単純桁	列車荷重	： KS-16, N-18, P-19
支 間	： 23.7m（橋長：25.0m）	材 料	： コンクリート $\sigma_{ck}=300\text{kg}/\text{cm}^2$
幅 員	： 11.9m	PC鋼材	12T12.7mm
桁 高	： 2.2m	鉄 筋	SD35

図-1 桁断面、PCケーブル配置



(3) 仮想引張応力度とPC鋼材量、鉄筋量との関係

永久荷重作用時のコンクリートの仮想引張応力度の許容値を決めることは、ひびわれ断面使用時の許容値と密接な関係があり、ひびわれ断面において、耐久性に影響のないひびわれ発生にとどめておくために重要となる。また、最小PC鋼材量は、疲労により決定される場合を除き、この仮想引張応力度により決定され、鉄筋量はPC鋼材量に応じて設計荷重作用時の鉄筋応力度の条件によって決定される。

本橋の場合は、コンクリートの設計基準強度 $\sigma_{ck} = 300\text{kg}/\text{cm}^2$ に対し、仮想引張応力度を $20\text{kg}/\text{cm}^2$ 程度に制限して設計を行った。

最小PC鋼材量は12T12.7mmで6本となったが比較検討のため、7本、8本についても曲げ応力度及びPC鋼材と主鉄筋に関する工事費を算出した。なお、曲げ破壊安全度の検討は、(死荷重+活荷重+衝撃)の1.7倍の破壊状態における設計曲げモーメント M_u に対して設計部材の破壊抵抗曲げモーメント M_{rd} を求め

破壊安全度 F が

$$F = M_{rd}/M_u \geq 1$$

を確認した。断面耐力の計算上の仮定については、土木学会PC標準示方書6.2によった。

工事費については、今回の場合、PC鋼材の単価を700千円/ト、鉄筋の単価を130千円/トとして算出したがPC鋼材本数の差異による工事費の変化はほとんど無かったため、PC鋼材を6本として鉄筋量を増した方がひびわれ幅が若干小さめになることと各主桁に2本ずつ同数の配置ができ、施工性も良いことから6本として設計した。

しかし、PC鋼材と鉄筋の単価は、施工時期・施工地区によりそれぞれ異なるものと考えられ、一般的には、PC鋼材を減らして鉄筋を増した方がその単価差により経済的となる場合が多いと考えられる。今回の設計においてもPC鋼材量については、結果的に永久荷重作用時のコンクリートの仮想引張応力度によって決定されており、そのときのひびわれ断面での鉄筋の応力度は約 $460\text{kg}/\text{cm}^2$ と許容値の半分程度と小さい。また、当公団における最近の調査研究においてもこの傾向が確認されている。したがって、仮想引張応力度の許容値を緩め、永久荷重作用時のひびわれ断面での鉄筋応力度を許容値いっぱいまでバランスさせることにより、より少ないPC鋼材での設計も可能である。今後の課題としてとらえ、経済性・合理性を高めてゆきたい。

(4) ひびわれ幅の制限値について

コンクリートに発生するひびわれは、コンクリート内の鋼材の腐食の原因となり、耐久性をそこなうので有害にならないようにその幅を制限することが必要である。一般的に、鉄筋に引張応力度 $2000\text{kg}/\text{cm}^2$ 程度の応力が生じても、ひびわれ幅は0.2mm程度以下で、あまり問題とならないが、乾湿がくり返される場合など環境条件が悪い場合には、常時作用する荷重に対して制限が必要とされている。

今回の設計においては、死荷重時のひびわれ幅を、ひびわれ断面における鉄筋応力度の許容値を $1000\text{kg}/\text{cm}^2$ とすることにより間接的に制限し、活荷重作用時のひびわれ幅については、実列車荷重を通常の旅客列車を想定した場合と全設計荷重とした場合について計算し、検討を行っている。目標値については、ほぼ0.2mmとしている。

3. 実橋載荷試験

(1) 測定項目

- ① 鉄筋のひずみ
- ② コンクリートのひずみ
- ③ 主桁のたわみ
- ④ コンクリートの圧縮強度と引張強度及び弾性係数
- ⑤ コンクリートのひびわれ

(2) 載荷方法

載荷重としては、コンクリート、水、鋼材など種々検討を行ったが、比較的安価で、容量を小さくできるため、載荷中も安定が確保できる方法として、敷鉄板を重ねて使用することにした。

荷重は、総重量235tを25段階に分けて載荷した。桁への伝達は、6ヶ所の荷重調整用油圧ジャッキを通じてそれぞれ均等に荷重がかかるようにジャッキを調節しながら行った。

(3) 載荷試験結果

試験結果については、紙面の都合から ① 鉄筋のひずみ、② コンクリートのひびわれ の二つを代表として紹介したい。

① 鉄筋のひずみ

図-2は、下床版5ヶ所に配置した鉄筋ひずみ計の変化をそれぞれグラフ化したものである。(グラフはひずみに弾性係数 $2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ を乗じて応力度として表わしている。) 載荷から除荷に至るまで3日の期間がかかっており、7月3日夜から7月4日朝、7月4日夜から7月5日朝までは、作業を中断して放置している。この時間帯には、荷重の変化は全く無いが、ひずみ計には明らかな変化がとらえられている。

(15段階および25段階) このひずみ変化は、コンクリートのクリープに起因するものと考えられる。

ひびわれの目視での発見は、23段階となっているが、鉄筋ひずみ計 No. 2 付近では22あるいは21段階ころからひびわれが生じて鉄筋の負担が大きくなっていることが読み取れる。図-2を見る限りにおいては、ひびわれは鉄筋ひずみ計 No. 1・No. 2 付近(本線左側)に顕著に発生していることが推測される。

図-3は、図-2のデータからその平均値を算出し、放置の間のクリープによる応力変化を差し引いてグラフ化したものと全断面有効とした場合の計算値あるいはひびわれ断面として行ったPRCとしての計算値とを対比したものである。ひびわれ発生前の状態では、ほぼ全断面有効としての計算値に近似して変化し、ひびわれ発生後は急激に応力が増加している。しかし、その絶対値はPRCとしての計算値(25段階で1200 kg/cm^2)の $\frac{1}{3}$ 程度となっている。その原因としては、まず、ひずみ計の位置とひびわれの位置とが必ずしも一致していないこと。つまり、ひびわれの位置にたまたまひずみ計があれば、大きなひずみとして測定されるが、ひずみ計の位置がひびわれから離れていればひずみは比較的小さく測定される。たとえば、図-2において No. 2 のひずみ計は前者の例、No. 3 のひずみ計は後者の例と考えることができる。また、もうひとつ考えられる原因としては、この桁については処女載荷であり、ひびわれ発生の状態がまだ初期の段階で、引張側のコンクリートの引張抵抗をすべて無視するほどひびわれが成長していないため、鉄筋の分担する応力が小さくなっていることである。

② コンクリートのひびわれ

ひびわれは、荷重段階23で目視により初認され、24段階、25段階へと進むにつれ、その幅、長さとも進行を続けた。図-4、図-5にひびわれ幅、ひびわれ間隔を集計したものを、図-6には荷重段階25でのひびわれ状況をスケッチしたものを示す。荷重段階23での計算上の桁下縁の合成応力度は、 -34 kg/cm^2 程度であり、テストピースでの割裂試験による引張強度測定結果($\sigma_{ct} = 30 \text{ kg/cm}^2$)からも妥当なところでひびわれが発生しているものと考えられる。

ひびわれ発生の傾向としては、今回のデータではひびわれ個数も少なかつた確かな分析はむずかしいが、ひびわれは、最初小さなひびわれが広い間隔で発生し、徐々に幅を拡げながらもその間隔をつめる形でその間に新しいひびわれが発生し、しだいに細いひびわれが多数を占めるようになっている。

表-1には、荷重段階25での計算値との比較を示す。計算は、角田の式とCEB-FIP 1978年の計算式に、実測鉄筋応力度を代入して行った。この結果を見ると、今回のひびわれは、間隔が広く、幅が大きい傾向があることがわかる。

図-2 鉄筋応力度の変化 (1)

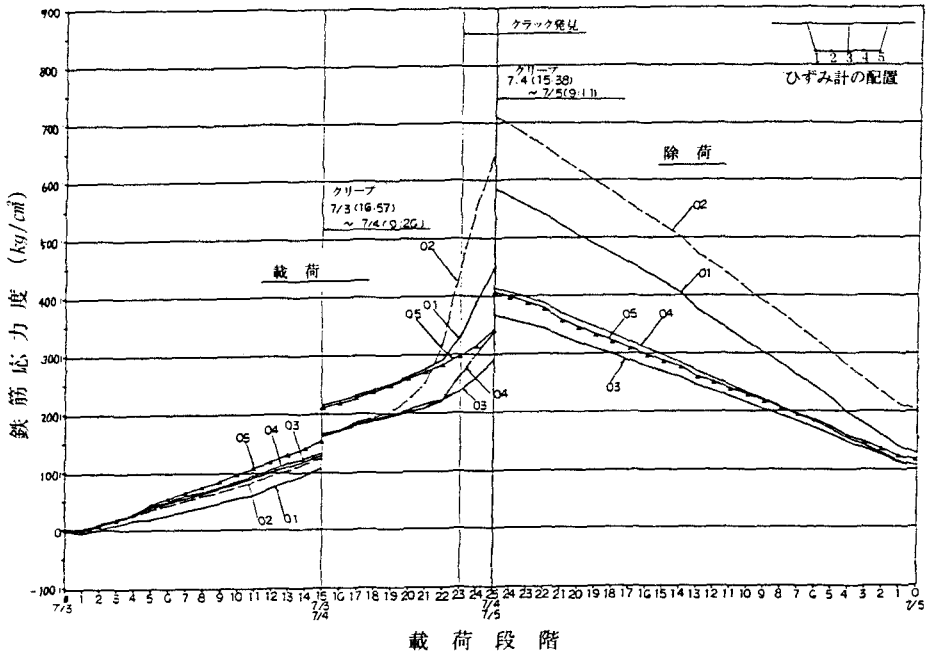


図-3 鉄筋応力度の変化 (2)

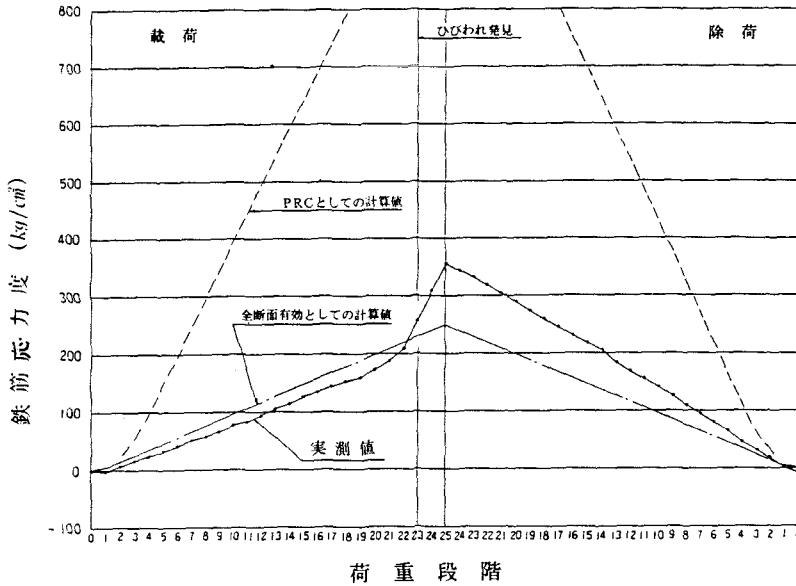


図-4 ひびわれ幅の分布

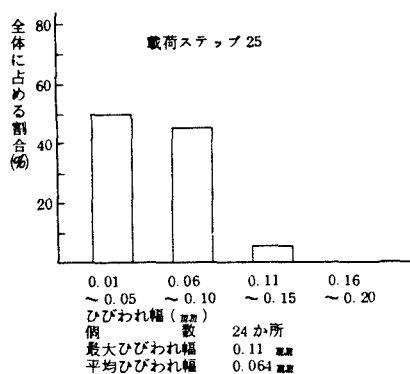


図-5 ひびわれ間隔の分布

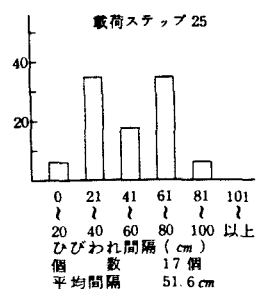


図-6 ひびわれ発生状況

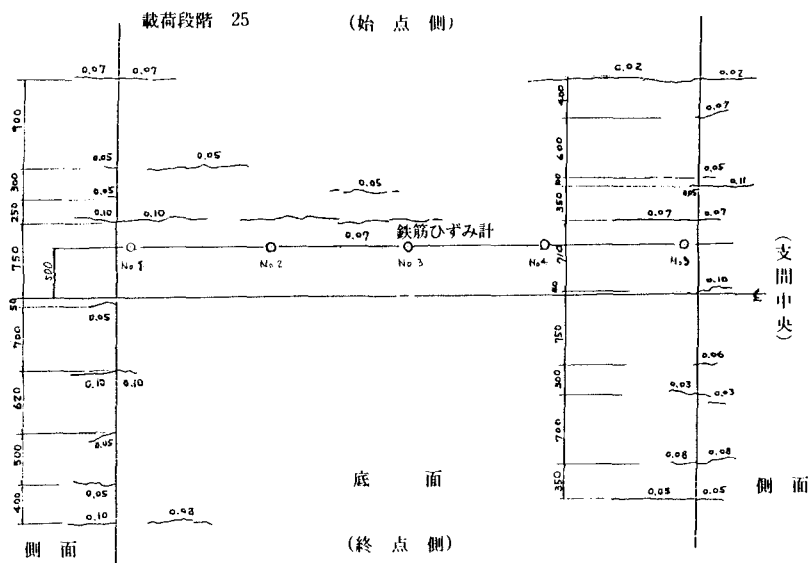


表-1 ひびわれの計算値との比較

	最大ひびわれ間隔 (cm)	平均ひびわれ間隔 (cm)	最大ひびわれ幅 (mm)	平均ひびわれ幅 (mm)
角田の式	23.2	—	0.09	—
CEB-FIP(1978年)	—	—	0.04	0.03
実測値	—	51.6	0.11	0.06