

鉄筋コンクリート橋にでたひびわれについて

川 口 輝 夫 (1)
大 山 忠 (2)

1. ま え が き

会津田島線の金地川橋りょうは、スパン6.6mの鉄筋コンクリートT形はり4連から成り、その断面は第1図のとおりである。はりの施工は昭和16年であるが、列車の運転を開始したのは昭和25年で、3年後の昭和28年ごろから、はり腹部の下縁と側面とにひびわれがではじめた。昭和30年末から半年にわたってこのひびわれを記録したところが、ひびわれは月日とともに増加または進行していることがわかったので、その原因を確かめるために、列車によって鉄筋に生ずる応力度を実測し、また、はりのコンクリートを一部こわして断面を調べてみた。

その結果、このはりにひびわれが発生した進行する主な原因は、荷重ではなく、鉄筋のかぶりが小さ過ぎたことであると推定される。この橋りょうのように、気象作用のはげしい地方における鉄筋コンクリート構造物では、かぶりを十分にとって鉄筋を保護することが、構造物の寿命を確保するために特に重要であることを示した一例と思われる。

2. ひびわれの状況

昭和30年10月1日、翌31年1月15日および4月17日現在におけるひびわれの状況を第2図に示す。ただし、

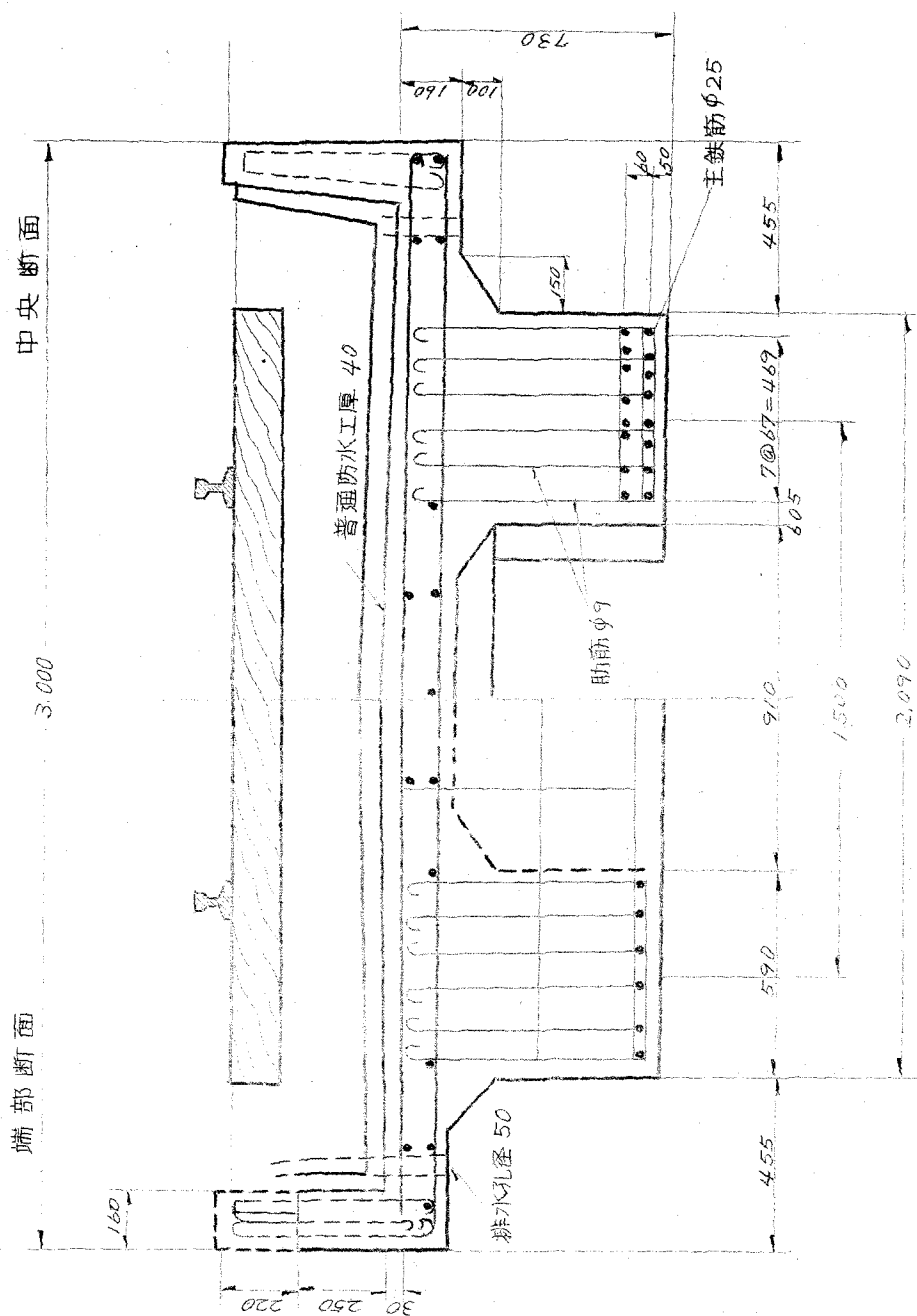
- (1) 各連の左主げたと右主げたとのひびわれ
- (2) 第1連と第2連とのひびわれ
- (3) 第3連と第4連とのひびわれ

は、おのおの良く似ているので、第2図には第2連と第4連との、各南側主げたのひびわれを代表的な例としてあげた。

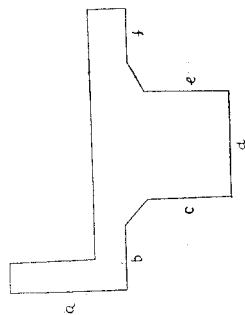
ひびわれのでかたの特色をあげると次のとおりである。

- (1) 第3、4連では、第1、2連よりもひびわれのでかたが少ない。この橋りょうの施工時の記録は明らかでないが、当時の関係者の記憶によれば、第1、2連は同一日に、第3連と第4連とはひき続き1日づつを要して施工され、あとになるほどコンクリートの品質が悪くなったとのことである。従ってひびわれのでかたの差は、外界の条件によるのではなく、はり

第1図 はりの断面

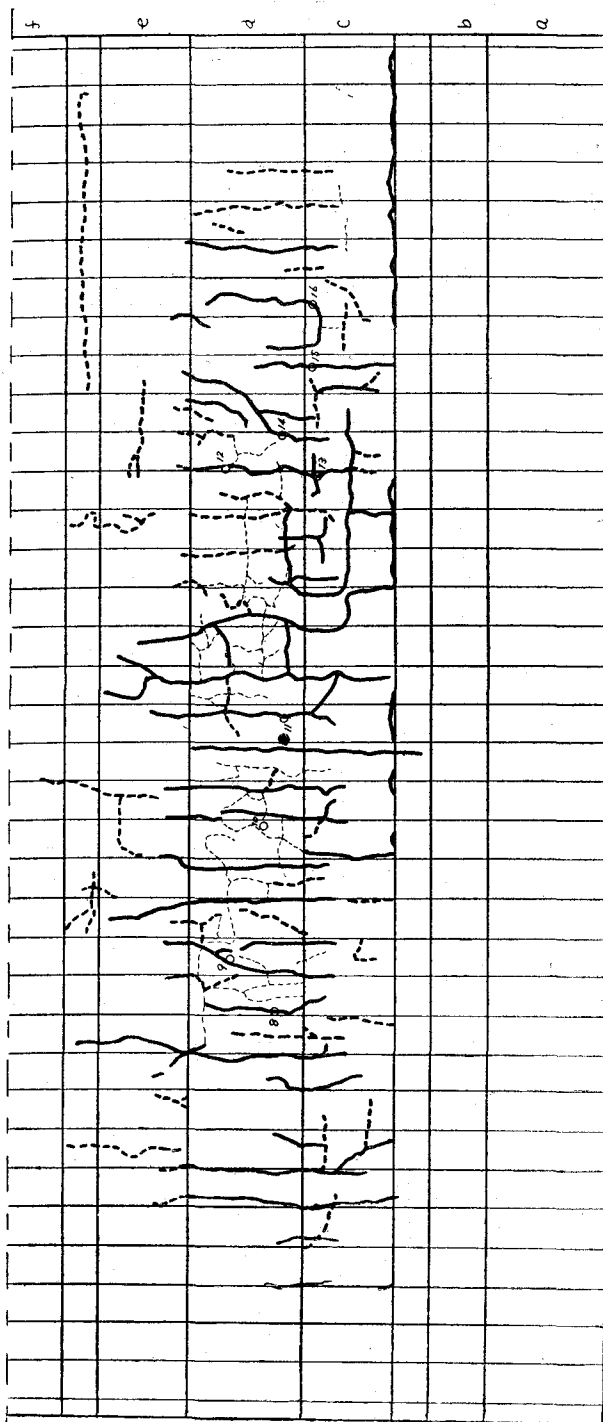


オ2図 ひびわれの進行状況



— 昭和30年10月1日
 - - - 昭和31年1月15日
 - - - 昭和31年4月17日

(1) オ2連南側主げた



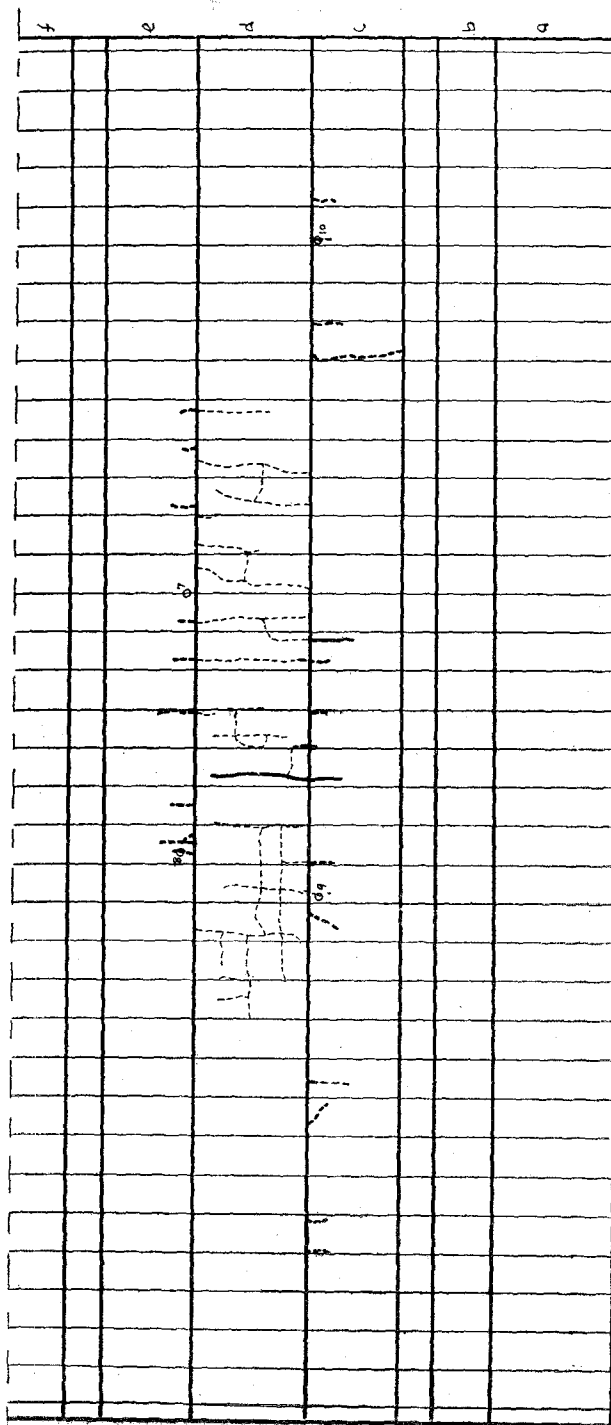
ひびわれの月
 昭和31年4月1

NO	mm
9	1.8
10	1.8
11	1.2
12	1.5

(2) ヤ 4 連 南 側 主 げ た

ひびわれの巾
昭和31年4月1日

NO	m
7	1.0
8	1.2
9	0.5
10	1.0



のコンクリートの品質の差によるものと思われる。

- (2) ひびわれは、はりの軸に直角の方向にでたものが多く、その巾はおおむね 0.5 mm 以上 2.8 mm までである。
- (3) はりの軸に直角なひびわれの位置は、スターラップの位置にほぼ一致している。(第3図に設計上のスターラップの位置を示してある。)
- (4) はりの軸に直角なひびわれは、先づ腹部側面の下部に生じ、ついで腹部下縁に生ずることが多い。
- (5) 亀甲状のひびわれは、はりの軸に直角なひびわれよりもおくれてでてきて、その巾は一般に狭く 0.5 mm 以下である。

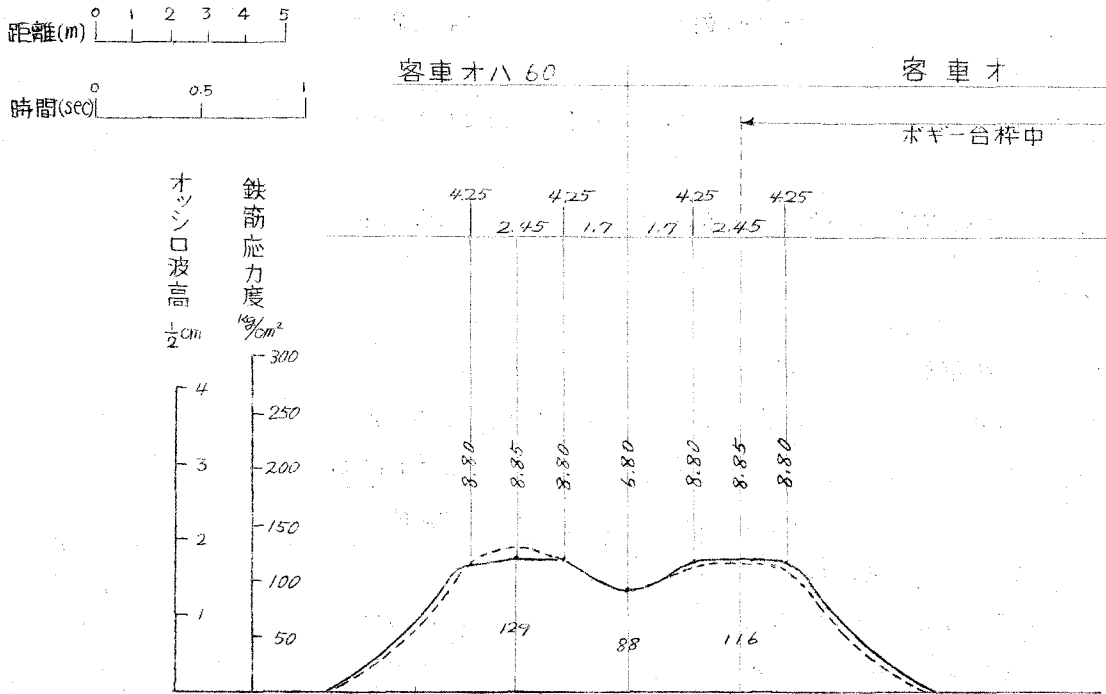
3. 鉄筋応力度の測定および解析

ひびわれの生じた原因を確かめ、またこのように多数のひびわれがあるはりでは、どの程度の応力度がおこっているかを知るために、列車によって生ずる鉄筋の応力度を測定した。これには、スパン中央の鉄筋を一部露出して抵抗線歪計をはりつけ、列車が通過するときの鉄筋の動的歪みを、電磁オシロで記録して、これから応力度を算出する方法をとった。

機関車 C-10 および客車 オハ 60 から成る営業列車が、第2連の上を約 20 km/hr の速度で通過したときの鉄筋応力度の一例を、第3図の破線で示す。最大応力度は、C-10 の第1従輪が、測点であるスパン中央上にのったときに生じており、4本の鉄筋にはりつけた6個の歪計が示した応力度の平均値は、 $264 \pm 16 \text{ kg/cm}^2$ であった。この値は設計で考える活荷重とその衝撃による応力に相当する。第3図の破線に見られる局部的な小波が、衝撃による応力度の増減を示しているものと考えて、ほぼその中間を活荷重応力度とすると、C-10 による最大活荷重応力度は約 250 kg/cm^2 となる。

鉄筋応力度の実測値の波形を見ると、C-10 の第1導輪が、はりの支点の 50 cm 前方、すなわちはりの端から 20 cm 手前にさしかかったときに、すでに応力度を生じはじめ、また最後の従輪が支点を 50 cm 離れたときに、はじめて応力度が 0 になっている。客車の場合も同様である。これは輪重が軌条の剛性によって、はりの長さ方向に数丁の枕木に分布されているためと考えられる。輪重の枕木への分布を考える代りに、簡単のために、輪重をはりの長さ 1 m に等分布するものと仮定して、C-10 の通過によってスパン中央断面に生ずる曲げモーメントを計算すると、第3図の実線に示す曲げモーメント図が得られ、実測の鉄筋応力度の波と良く似た形になる。試みに、 $\sigma_s = M \cdot n \cdot (d - x) / I_i$ の式により $I_i / n \cdot (d - x) = 7,520 \text{ cm}^3$

第3図 列車による中



として、鉄筋の応力度を算出してみると、第3図のように、実測応力度と計算応力度とは、良く一致することになる。

元来この橋りょうの設計荷重はKS-15で、設計荷重および機関車C-10によるスパン中央の最大応力度を、通常の設計計算の仮定に従って算出すると、表-1を得る。

表-1 設計計算による応力度 (kg/cm^2)

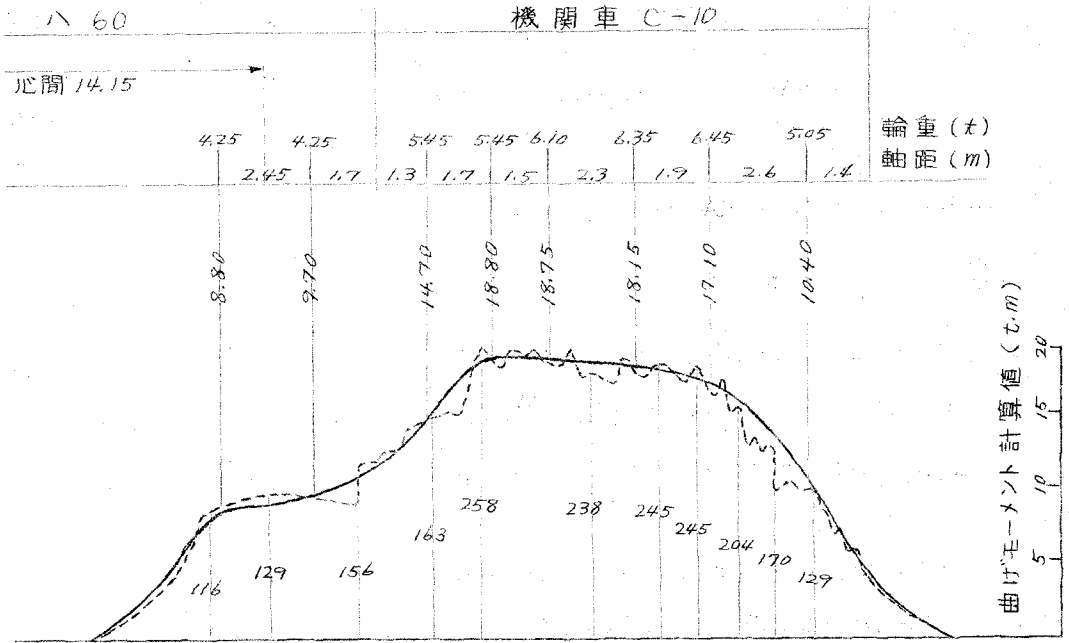
荷 重	種 別	活 荷 重	衝 撃	死 荷 重	合 計
KS-15	鉄 筋 応 力 度	602	253	312	1,177
	コンクリート応力度	24	10	12	46
C-10	鉄 筋 応 力 度	419	183	312	913
	コンクリート応力度	17	7	12	36

この計算によるとC-10によるスパン中央点の鉄筋の最大応力度は $602 \text{ kg}/\text{cm}^2$ になる

中央断面の鉄筋応力

----- 実 測 値

————— 測 定 値



のに、実測値は前述のとおり 264 kg/cm^2 にすぎなかった。この差を生じた原因としては、第1に、測定した列車の速度が速度制限中のため約 20 km/hr にすぎなかったので、設計計算で仮定している衝撃係数（このはりでは 0.436 ）が実情に比して大きすぎることが考えられる。しかし、衝撃を除いて活荷重だけを比較してみても、測定値の 250 kg/cm^2 は、計算による応力度 419 kg/cm^2 の 60% にもならない。次に考えられるのは設計計算では n を 15 と仮定し、また防水工や砂利止め壁などの断面を無視していることによる影響であるが、たとえばこのはりについて n を 8 とし、第1図に示す防水工および砂利止め壁の断面をすべて有効であるとして計算してみても、鉄筋応力度は約 10% 減少するにすぎない。従って、鉄筋の実測応力度と設計計算の応力度とに差があるのは、設計計算で無視しているコンクリートの引張応力が実際には働いていることが主な原因であると考えられる。

そこでコンクリートの引張応力を考えた場合はりの応力度を求めるのに、簡単のためつぎのように仮定して計算してみる。

(1) ひずみは中立軸からの距離に比例する

(2) コンクリートの圧縮と引張りのヤング係数の比を $\frac{E_t}{E_c} = r$ とする

(3) 鉄筋と圧縮側コンクリートとのヤング係数の比を $\frac{E_s}{E_c} = n$ とする。

第4図においてコンクリートに引張応力が働いていると考えた部分を y とすると、中立軸の位置 x 、断面2次モーメント I_i および鉄筋応力度 δ_s はつぎの式で与えられる。

$$x = \sqrt{\left\{ \frac{(b-b_0) + nAs}{b_0} \right\}^2 + \frac{(b-b_0)t^2 + r b_0 y^2 + 2nAsd}{b_0}} - \frac{(b-b_0)t + nAs}{b_0}$$

$$I_i = \frac{1}{3} \left\{ bx^3 + r b_0 y^3 - (b-b_0)(x-t)^3 \right\} + nAs(d-x)^2$$

$$\delta_s = \frac{M}{I_i} n(d-x)$$

いま、C-10 によって中央断面に生ずる最大曲げモーメントの計算値 ($18.8^t \cdot m$) を M に入れ、C-10 によって中央断面の鉄筋に生じた最大活荷重応力度の実測値 ($250^{kg}/cm^2$) を σ_s に入れると、前述のように $I_i/n(d-x) = 7,520 cm^3$ となるから、上式より x および y を求めることができる。

たとえば、 $n=8$ 、 $r=0.4$ 、とすると、 $x=25 cm$ 、 $y=40 cm$ を得る。すなわち引張側のコンクリートは、中立軸以下 $40 cm$ 、従ってちょうど引張鉄筋の図心位置まで有効に働いていることになる。コンクリートの引張応力度の分布は上で仮定したような三角形分布ではない筈であるし、 n および r などに多少の誤差もあるであろうが、この計算によってコンクリートに引張応力が働いていると考えられる部分 ($y=40 cm$) と、後述のようにコンクリートを削り調べて調べた結果、ひびわれのはいていなかった部分とは、ほぼ一致しているので、大体この仮定でもよいであろうと考えられる。

つぎに、 $x+y=h$ 、すなわち引張側のコンクリートがはりの下縁まで全部有効であるとして、同じ n 、および r の値を用いて上式を解けば $x=27 cm$ 、 $y=46 cm$ 、を得る。

従ってこれらの x および y の値を用いると、ひびわれがまだはいていないはり、およびひびわれがはいた現在の状態におけるはりの応力度および歪度を計算することができる。表-2にその結果を示す。ただし表-2の () 内の数字はひびわれ前、() 外の数字はひびわれ後、すなわち現在のはりの応力度またはひずみ度を示す。

表-2 コンクリートの引張応力を考えた場合の

中央断面応力度 (kg/cm^2) および下縁ひずみ度 (10^{-6})

荷 重	鉄 筋 応 力 度	コンクリート 圧 縮 応 力 度	コンクリート 引 張 応 力 度	下 縁 ひ ず み 度
活 荷 重 (C-10)	250 (199)	19.5 (18.1)	12.5 (12.4)	143 (115)
衝 撃 ($i=0.436$)	109 (89)	8.5 (7.9)	5.5 (5.4)	62 (51)
死 荷 重	186 (152)	14.6 (13.5)	9.3 (9.2)	106 (88)
合 計	545 (445)	42.6 (39.5)	27.3 (27.0)	312 (257)

表-2によると、計算上コンクリートに生じている引張応力度はかなり大きい、応力度の分布が実際にはい形であることを考えると、もう少し小さくなるであろう。

またコンクリートがひびわれを生ずる直前の引張りひずみ度は強度にあまり関係なく 300×10^{-6} 程度であると言われているが、上表で見るとおり、ひびわれ前のはりの下縁のひずみ度はまだこの値に達していない。従ってもし荷重によってこのはりにひびわれを生ずるとしても、曲げモーメントの大きなスパン中央附近だけに限られ、ひびわれの巾もごく狭いのではないかと思われる。表-2から考えると、支点に近い断面では、はりの応力度はごく小さいにもかかわらず、中央附近と同じような（もっともひびわれの生ずる時期は幾分おくれるようであるが）ひびわれが生じているのを見ても、ひびわれのおもな原因は、荷重以外にあるように推定できる。

4. 断 面 の 調 査

かぶりのコンクリートを削り切って断面を調べたところ、つぎのことがわかった。

- (1) かぶりは設計に比べて非常に小さく表-3のとおりである。

第 4 図

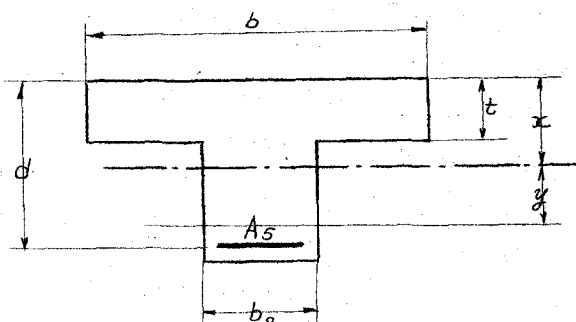


表-3 かぶりの実測値 (mm)

			スターラップのかぶり	引張鉄筋のかぶり		
			下 面	側 面	下 面	側 面
第 1 連	左主げた	左端	10	23	34	45
		右端	20	29	31	38
	右主げた	左端	11	30	28	38
		右端	11	30	29	44
第 2 連	左主げた	左端	11	29	32	40
		右端	9	23	18	35
	右主げた	左端	15	35	26	48
		右端	7	32	18	39
設計上のかぶり			28.5	39	37.5	48

- (2) 巾の広いひびわれは、おおむねスターラップの附近から発生し、スターラップに沿ってはりの腹部を直角にかこんでいる状態である。
- (3) スターラップは一般にかなりさびており、まわりのコンクリートにさびが附着している。
- (4) かぶりの小さいところほど、スターラップのさびがひどい傾向がある。
- (5) 引張鉄筋は一般に黒皮のまゝであるが、はりにひびわれがでているところで、鉄筋の下側に局部的なさびを生じている箇所もある。

これらの状態から考えて、このはりのひびわれの発生および進行については、かぶりの小さいことが一つの原因となっているのではないと思われる。

かぶりの厚さと、かぶりが鉄筋のさびを防ぐ能力との関係は、コンクリートの品質や、気象作用の程度などによって異なるのは当然であるが、かぶりが $\frac{1}{2}$ inch程度の場合には、コンクリートにひびわれが全くなくとも鉄筋がさびて、その断面膨張により鉄筋に沿ったひびわれを生ずることが多いと言われ^{註1} またコンクリートの品質の中ではコンシステンシーの影響が最も大きく、プラスチックでないコンクリートの場合、かぶりが1 cmのときの鉄筋のさびは、2年間の実験で、かぶりが5~6 cmのときのさびの14 倍に達したとも言われている。^{註2}

ひびわれが最初にスターラップに沿って生ずる理由は、上記のように、スターラップがさびる

ためであるとするほか、コンクリートの乾燥収縮や温度変化などが考えられる。一たん生じたひびわれが進行した中が広がってゆく原因は、スターラップのさびによる膨張と、ひびわれにしみこんだ水の凍結作用であろう。

スターラップに沿ったひびわれが、最初に側面の下部に生じ、つぎに下縁に生ずるのは、側面の方が、かぶりは大きい気象作用のうけかたが下縁よりも烈しいためであると考えられる。

5. 結 論

この橋りょうの架設されている金地川地方では、冬期の気温が最低 -17°C 、最高 8°C 、平均 -3°C で、積雪も最大200 cmに達するので、かなり烈しい気象作用をうけることを予期せねばならない。現今の示方書によるとこのような場合のかぶりは、鉄筋直径16 mm以上のとき5 cm以上、16 mm未満のときは4 cm以上としなければならないことになっている。これから見ても、このはりのかぶりは小さすぎ、そのためにはりの寿命が短くなったと言ひ得るであろう。

この調査は、コンクリート構造物の設計および施工にあたって、少くとも現行の示方書に規定されるかぶりを厳守しなければ、気象作用によって構造物の寿命がきわめて短くなることを示す一つの資料となろう。

この論文の作成にあたって、東京大学国分教授の御指導をうけたことを記し、感謝の意を表する次第である。

註1 B. Tremier, The Corrosion of Reinforcing Steel in Cracked Concrete J1. of A. C. I.
vol. 18, No. 10. June 1947

註2 R. Friedland, Influence of the Quality of Mortar and Concrete upon Corrosion of Reinforcement J1. of A. C. I. Oct. 1950.

(1) 国鉄構造物設計事務所

(2) 国鉄鉄道技術研究所構造物研究室主任研究員

