

講座

PC げたの事故とその対策

(1)

PC 構造物の設計に関係した事故

プレストレスト コンクリート

編集委員会

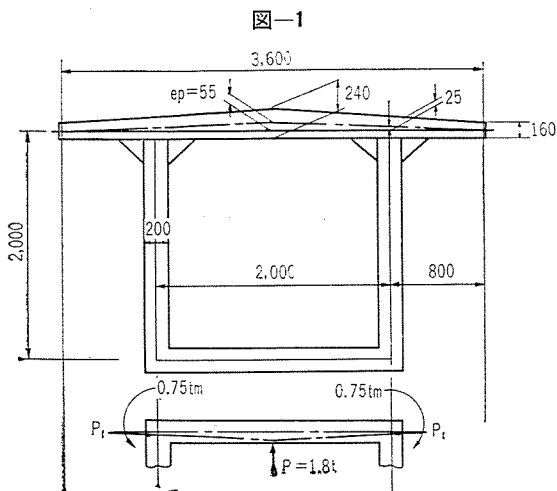
1. まえがき

PC 構造物は、年を追って各方面で急速に増加しているが、何分にも発展途上のものであり、今後その設計、製作、架設、その他の各部門において、研究開発しなければならない問題点を数多くふくんでいる。これから述べる事故例については、この意味で、今後の研究開発の一助となれば幸と思ひ。関係各所にご無理をお願いし、なるべくありのままの資料を提出していただき、それをもとにし事故の原因およびその対策を検討し以下に示す順を追って発表して行くことにした。

- (1) 設計に関係したもの
- (2) 支保工
- (3) 型わく、配筋、その他
- (4) コンクリート打設、養生
- (5) 架設
- (6) その他 (PC 鋼材, シュー, その他)

設計 1. 箱型断面腹部に生じた橋軸方向水平ひびわれ

T 橋で採用された断面は 図-1 に示すような箱型であり、スラブに PC 鋼棒 $\phi 24$ (3 種) を 1 m 間隔に配置して横締めを行なった。以後数カ月経って、スラブと腹部の接合線付近に、橋軸方向の水平ひびわれ (ハークラ



ック程度) が腹部内側に認められた。支点付近の腹部拡幅部にひびわれは認められなかった。ひびわれの原因としてはつぎのことが考えられる。

(1) 断面と

しては箱型ラーメンであるため、横締鋼棒によるプレストレスによって、スラブと腹部の接合点に不静定モーメントが生じた (図-1, 2 参照)。

(2) 桁製作後の温度変化乾燥収縮クリープなどによる不静定モーメントが生じた。

(3) せん断力による斜引張応力

以上の各原因について、仮定を設けて計算して見ると以下のような結果となる。

プレストレスによる支点角変化によって生じる不静定モーメント

$$k = \frac{K_2}{K_1} = \frac{I_2}{I_1} \cdot \frac{h}{l}, \quad k' = \frac{I_2}{I}$$

$$\frac{K}{K_1} = \frac{I}{l} \cdot \frac{h}{I_1} \cdot \frac{I_2}{I_2} = \frac{I}{I_2} k = \frac{k}{k'}$$

$$N = k(2+k) + k'(3+2k) \quad \text{また} \quad M_P = 1.2 \text{ t} \cdot \text{m}$$

いまの場合 $I = I_1 = I_2$ $h = l$ $\therefore k = k' = 1$ であるから

$$M_A = \frac{M_P}{N} (2k + 3k') = \frac{M_P \cdot 5}{8} = 0.75 \text{ t} \cdot \text{m} \quad \dots \dots \dots (1)$$

(弾性収縮, 温度降下によるスラブ収縮による不静定モーメント)

スラブ下縁の平均圧縮応力度: $\sigma_c = 40 \text{ kg/cm}^2$

プレストレスによる弾性ひずみ:

$$\epsilon_P = \frac{\sigma_c}{E_c} = \frac{40}{3.25 \times 10^5} = 12.3 \times 10^{-5}$$

ただし $E_c = 3.25 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$

すなわち温度変化に換算 $t_P = 12.3^\circ\text{C}$

つぎに上下スラブの温度差を 15°C と仮定すると

(弾性収縮 + 温度降下) $\xrightarrow{\text{換算}} t = 27.3^\circ\text{C}$

$$\therefore M_A = \frac{3 E_c I \epsilon t}{h} \cdot \frac{k + k'}{N}$$

上式中 $k = k' = 1$, $N = 8$, $I = \frac{100 \times 20^3}{12} = 66700 \text{ cm}^4$

$$\therefore M_A = \frac{3 \times 3.25 \times 10^5 \times 66700 \times 27.3}{200 \times 10^5} \times \frac{2}{8} = 22000 \text{ kg/cm}$$

(スラブとの接合部付近の腹部に働く直角方向の曲げモーメントおよび曲げ引張応力度)

プレストレスによる角変化によって生じる
不静定モーメント

$$M_A = 75\,000 \text{ kg/cm}$$

弾性収縮温度降下によって生じる不静定
モーメント

$$M_A = 22\,000 \text{ kg/cm}$$

$$\text{計 } \Sigma M_A = 97\,000 \text{ kg/cm}$$

$$\therefore \text{曲げ引張応力度: } \sigma_t = \frac{\Sigma M_A}{Z} = \frac{97\,000}{6\,670} = 14.5 \text{ kg/cm}^2$$

この他に、支点付近ではPC鋼材曲げ上げによる負のせん断力による斜引張応力が約 $2 \sim 4 \text{ kg/cm}^2$ 生じると考えられるので、クリープ変形などを加え合せると、合計 20 kg/cm^2 前後の引張応力が生じる可能性があり、またスラブと腹部の接合部は、施工継手となる場合も多いので、とかく引張強さも他の部分に較べて低下しやすい箇所であるので、ひびわれが発生し易い。

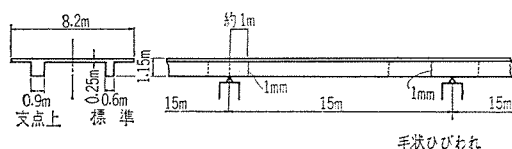
対策

断面方向については鉄筋コンクリート構造とすれば、ほとんど問題はなくなる。またPC鋼棒などで横締する場合でもスラブ中立軸よりの偏心をなくし、軸圧縮のみを利用する構造とすれば、弾性収縮、温度降下を考えてもこのための不静定モーメントによる引張応力は $3 \sim 5 \text{ kg/cm}^2$ 程度であり問題とならない。

設計 2. 連続けた下縁のひびわれ

PC連続けたの腹部に図-3のようなひびわれを生じることがある。この例(A橋)では、ひびわれは脱型後に発見され、日中に日射をうけるとひびわれ幅は明らかに大きくなり 1 mm 以上に達した。ひびわれはちょうど腹部幅の拡幅が始まる断面に生じている。本橋ではPCケーブルは橋端でアンカーされ、中間アンカーはない。この種のひびわれに関しては施工中のけたの支持状態など種々な原因が考えられるが、ここでは日射によりけた

図-3 A橋 $3 \times 15 \text{ m}$ のひびわれ



断面に生じる温度勾配の影響と、死荷重応力がコンクリート打設順序いかんによっては、設計値とは異なる値になりうることについて検討してみよう。

(1) 日射によりけた断面に生じる温度勾配の影響

図-4 吉井川橋径間部断面温度勾配

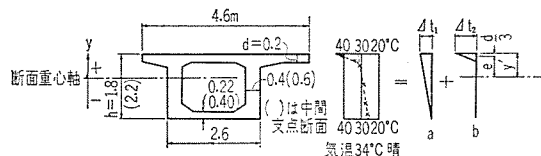


図-4の左側に示すような箱型断面が日射をうけたときの断面内の温度を熱電対により測ったところ、水平方向の温度差は余り認められず、けたの高さ方向に図に示すような温度勾配があり、これはけた上縁で高く下縁で低い直線勾配 a と、床版上縁で高く下縁で低い b とで合成されていることが分る。実測結果によると a, b による温度差はそれぞれ $\Delta t_1 = 6^\circ\text{C}$, $\Delta t_2 = 12^\circ\text{C}$ であった。いま計算を簡単にするために等スパン三径間連続けたで全長にわたり断面が一樣だとすると、温度 Δt_1 , Δt_2 によるけた腹部の応力は(引張を正とする)、

端支点で

$$\sigma = \alpha E_c \left(\frac{T}{A} + \frac{T_e}{I} y \right) \dots\dots\dots(1)$$

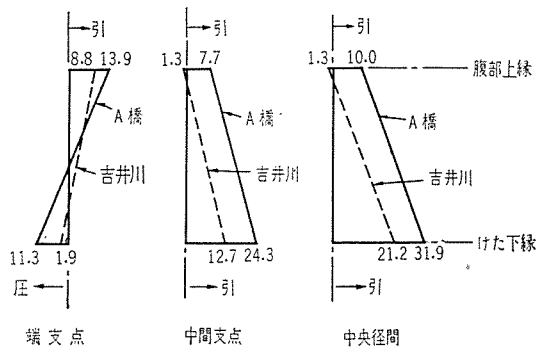
中間支点、中央径間で

$$\sigma = \alpha E_c \left(\frac{T}{A} - \frac{T_e}{5I} y - \frac{6y}{5h} \Delta t_1 \right) \dots\dots(2)$$

ここに $\alpha = 1 \times 10^{-5}$, E_c : コンクリートの弾性係数, A, I, h : それぞれけたの断面積, 断面二次モーメント, 高さ, $T = \Delta t_2 \cdot A_t / 2$ (A_t は上床版の断面積) である。また y は図-4に示すように重心軸からの距離で上方を正とし, $e = y_c' d / 3$ である。両式の第1, 第2項は b による応力, 式(2)の第3項は a による応力である。 y は下方に負となるから、中央径間の下縁応力の絶対値は3項の和となり, A_t/A が大きくなるほど第1, 第3項が大きくなり一般に下縁引張応力が大になる。

連続けたは中間支点付近で径間部よりも A, I が大きくなっているのが普通である。いまけた全長に比してこの断面の拡大部の長さが比較的短いとすれば、中間支点の腹部応力は式(2)の A, I に中間支点断面の値を用い、

図-5 日射による腹部の応力 ($\Delta t_1 = 6^\circ\text{C}$, $\Delta t_2 = 12^\circ\text{C}$, $E_c = 3 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$)



第3項に I (径間部)/ I (中間支点) を乗ずれば近似的に求まる。このようにしてA橋と吉井川橋 (3×33.2 m) の端支点, 中間支点, 中央径間の腹部応力を $E_c=3 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$, $\Delta t_1=6^\circ\text{C}$, $\Delta t_2=12^\circ\text{C}$ として求めると 図-5 のようになる。図から A_t/A の大きいA橋の中央径間の腹部引張応力が箱型断面の吉井川橋に比して大きいこと, 中間支点では中央径間に比して腹部引張応力が小さく, 吉井川ではその差が特にいちじるしいことなどが分る。さらに都合の悪いことには, けたがプレストレスされていないで支保工に支えられているときにも腹部に引張応力を生じる。この場合けたが全長にわたり剛な面上で支えられ伸縮は自由に生じるとすると腹部応力は

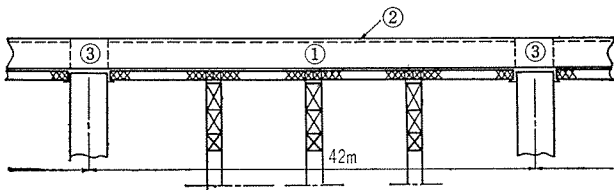
$$\sigma = \alpha E_c \left(\frac{T}{A} - \frac{y}{h} \Delta t_1 \right) \dots\dots\dots (3)$$

たとえばA橋径間部断面下縁で 24.7 kg/cm^2 となる。これは単純けたでも同様であるが, けたを1本づつ製作するときなどは腹部にも日が当たるのでけたの温度はより均等になり, このような温度応力を生じないものと思う。

2) コンクリート打設中に生じる死荷重応力

たとえば 図-6 に示すようなけた高 2.8 m スパン 3×42 m の箱型断面連続けたで, 径間部の上床版②を打設

図-6 支保工とコンクリート打設順序



したところ, 径間部の支保工支柱の沈下が支点付近の沈下よりも大きく, 3日前に打設した腹部①に曲げを生じた。すなわち上床版死荷重の一部が, 腹部と下床版よりなる単純けたに作用したことになり, このため径間部下縁の死荷重引張応力が計算値よりも $4 \sim 10 \text{ kg/cm}^2$ 大きく, 中間支点上の下縁圧縮応力が約 10 kg/cm^2 小さくなった。この応力差はクリープにより減少するが, 緊張時にはまだ大部分残留していると思われる。

対策

RC連続けたでは目立たなかったこの種のひびわれがPCで問題になったおもな理由は, まず下縁に十分な鉄筋のないためにひびわれが分布せずに集中して生じ, その幅が大きくなったことと, 引張鋼材が配置されていない支点付近の下縁圧縮応力がプレストレスによって減じるためであろう。吉井川橋では A_t/A が比較的小さいことと, 支点付近の腹部に十分水平鉄筋を配置してあったためにこの種のひびわれは生じなかった。

したがってこの種のひびわれを防止するには腹部, 下床版に十分な鉄筋を配置することが必要で, その量と位

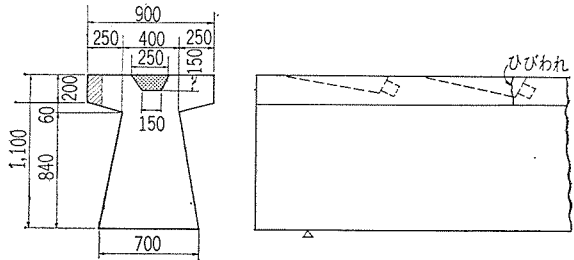
置は日射による応力に, プレストレス, 自重応力を適宜加算して生じる引張応力をもとにして決定すればよい。

設計 3.

E橋の例であるが, プレストレス導入直径 図-7 に示すように, 上突縁定着ケーブル用切欠き部付近からほぼ突縁の厚さ程度までのひびわれが生じた。

切欠き部による断面減少を無視して計算すると, ひびわれの発生した断面において 6 kg/cm^2 程度の圧縮応力

図-7



度であり, 切欠き部をのぞいた断面で計算すると, 25 kg/cm^2 の引張応力度となることがわかった。なお架設作業中, 設計上の支点よりも約 1 m 内側に仮支点を設けるとすると切欠による影響と考えると約 30 kg/cm^2 の引張応力が生じることも考えられ, これ等の原因によるものとわかった。

対策

この種のひびわれは, 周知のことではあるが, 架設中の仮支点のための, けた自重による曲げ応力度の減少による。プレストレス直後の上縁引張力の増加と合せて, 念のためとり上げた。対策としては, 2本目のけた以後は, 上突縁を引張鉄筋で補強し, 架設中の仮支点の範囲を明示することによって, 以後のひびわれをヘヤークラック程度に止めた。

設計 4.

鉄道橋の橋側歩道を主げた架設後現場打ちした鉄筋コ

図-8

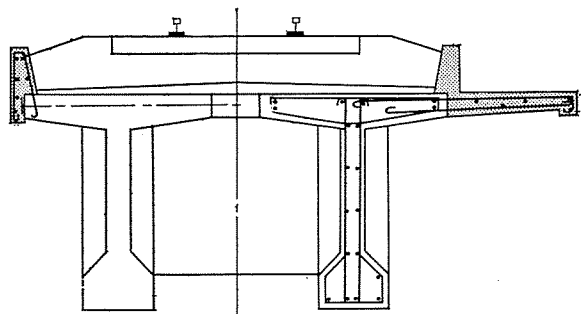


図-9

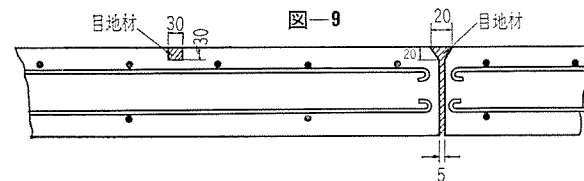
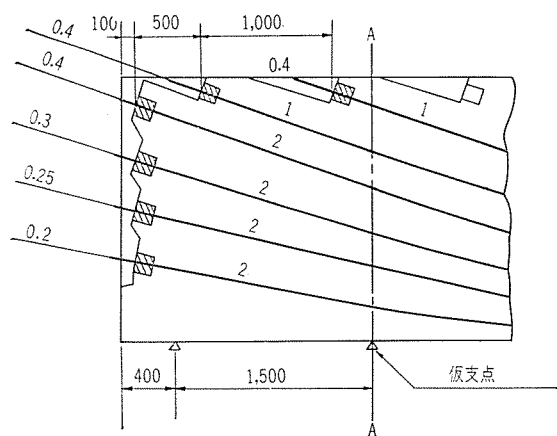


図-10



ンクリート構造とする場合が多い (図-8 参照)。この場合の歩道で伸縮目地を設けないものには 3~5m 間隔に橋軸と直角方向のひびわれの発生した例が多い。

対策

歩道には、3~4m 間隔で 図-9 に示すような伸縮目地を設けるようになり(この場合、砂利止め壁にも伸縮目地を設ける)、以後はこの種のひびわれはほとんど見られなくなった。

(注)： 図-8 に示すようにスラブ横締め定着部コンクリートを切欠き緊張定着後、コンクリートの後埋めを施した場合、完全な施工が困難であり雨水が定着部付近に浸み込み、定着具およびPC鋼材を腐食させる傾向が見られるので、横締め定着ごとの切欠部は設けず、砂利止を利用して定着部を保護する方法が多く採用されている。

設計 5.

N橋では、後述する設計 6 に示すひびわれと、ほぼ似たひびわれが発生した (図-10 参照)。この場合ケーブルの曲線部の影響もある程度考えられるが、主として、架設中の仮支点を仮定して、その時緊張定着によって生じる張出しばりとしての仮支点断面におけるせん断力について検討してみた。

図-11 に示すように定着反力の鉛直分力 P_1, P_2, P_3 、および張出部けた自重によるせん断力を断面 A~A で求めると、

$$S_A = 161 \text{ t}$$

$$N \text{軸における圧縮応力} : \sigma_c = 40 \text{ kg/cm}^2$$

$$\tau = \frac{SQ}{Ib} = \frac{161 \times 0.37}{0.564 \times (0.4 - 0.08) \times 10} = 33 \text{ kg/cm}^2$$

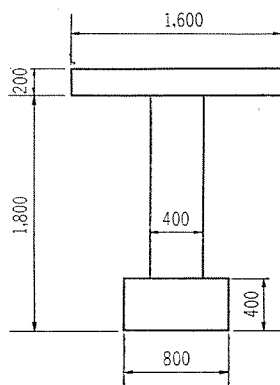
$$\sigma_1 = \frac{\sigma_c}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_c^2 - 4\tau^2} = 20 - \frac{1}{2} \sqrt{5960}$$

$$= 20 - 39 = -19 \text{ kg/cm}^2$$

本例の場合、けた自重によるせん断力が加算されることになり、その上、ケーブル曲げ上げによる上向きの引張力 $P_t/2R$ が考えている断面の単位長さ当り働くことも考えられる (R : ケーブルの曲率半径, P_t : は緊張力)

対策

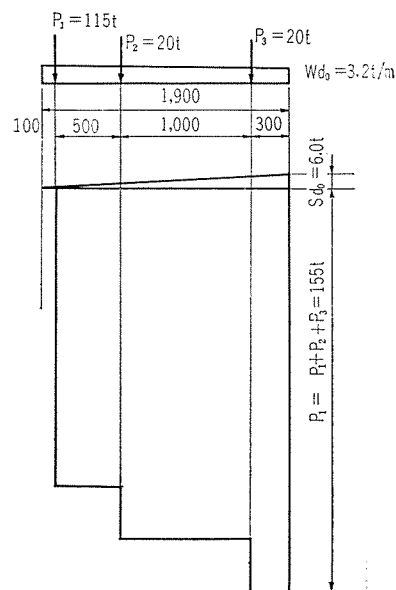
断面 A~A



断面要素その他(断面 A~A)

A	1.20m ²
I	0.564m ⁴
y	1.07 m
y'	0.93 m
z	0.525m ³
z'	0.610m ³
Q	0.370m ³
Pt	500 t
ep	0.07 m

図-11



つぎの設計 6 でも述べるように、この付近にスターラップまたは用心鉄筋を十分入れることが考えられる。また、設計上許されるならば支点付近の曲げ上げ角度の傾斜を小さくする。なお架設時の仮支点についても十分検討し、余り内側に移動させないなどが考えられる。

設計 6. けた端部のひびわれ

B橋で全ケーブル 16 本のうちけた端で定着されている 10 本 (図-12 参照) を材令 4 日で緊張したところ 図-12 に示す位置に幅 0.02~0.1mm 程度のひびわれが発見された。本橋では一次緊張を早期に行なってけたを製作台から移動させ、十分な材令をへてのち残り 6 本を緊張することにしていた。ひびわれ発生けたの材令 3 日、7 日の供試体強度は表-1 のとおりであった。なお打設後の気温は 15~27°C の範囲にあった。

その後打設したけたではひびわれを生じた区間の腹部両側に 19mm の異形鉄筋を 6 本ずつ垂直方向に配置した。そのためもあってかその後ひびわれは生じなかった。なお同種のけたについてワイヤーストレインゲージによって緊張時のけた端部のひずみを測定したところ、図-13 に示すような引張主応力度の分布がえられ ($E = 3 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ としてひずみより応力を求めた)、ひびわれ発生位置で応力が最大になっていることが分る。

表-1

材 令	標 準 養 生	現 場 養 生
3 日	349	333
7 日	393	380

図-12 けた端部ケーブル配筋ときれつ位置

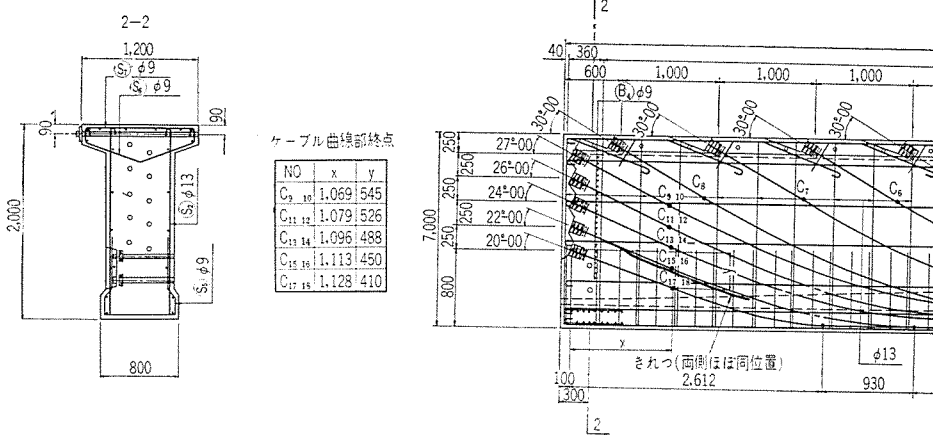
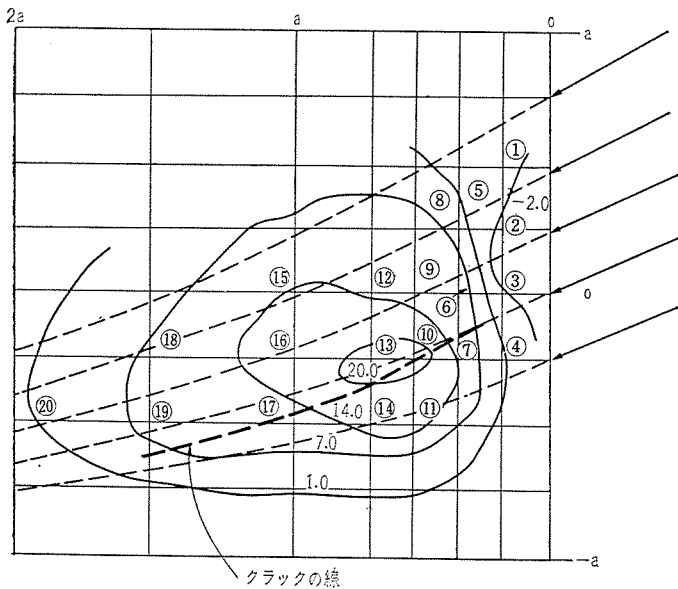


図-13 緊張後の等主応力線 kg/cm²
($E=3 \times 10^5$ kg/cm² と仮定)



けた端部の応力はアンカーに作用する支圧力の外に、その部分のアンカーの屈曲、緊張中のけた端部の支承状態によっても影響される。本例ではケーブルは図-12に示す曲線部終点より内方でパラボラ状に配置されているので、ひびわれ発生区間ではほとんど屈曲の影響はないものと考えられる。

ここではけた端部の応力状態についての理論的解析は行なわないが、この事故例はけた端面でケーブルが一樣にアンカーされないで図-12のように折り曲げられているときには、図-13に示すような引張応力の分布を生じ、材令が若くてコンクリート強度が十分でないとひびわれを生じうることを示しており、この部分に十分な垂直方向の鉄筋を配置することが望ましい。

設計 7.

S橋は $l=19.2$ m の鉄道橋であり、図-14に示すような孔あきスラブに近い箱型断面である。架設1年後の

調査の結果、けた下面に橋軸方向の多数のひびわれ(幅 0.03 mm 前後のもの)が発見された。なおこれ等のひびわれ中にはシースの配置にそったものも認められた。なお鉄筋としては下縁の橋軸直角方向に $\phi 9$ mm が 20 cm 間隔に配置されていた。

図-15に示す荷重分布の仮定によって、

単位幅当りの横方向曲げモーメントを求めるとつぎのようになる。

$$M = \frac{4.75 \times 1.9^2}{2} - \frac{8.6 \times 1.05^2}{2} = 8.56 - 4.76 = 3.8 \text{ t}\cdot\text{m}$$

$$Z = 0.146 \text{ m}^3 \quad \therefore \sigma = \pm \frac{M}{Z} = \frac{3.8}{0.146 \times 10} = \pm 2.6 \text{ kg/cm}^2$$

単鉄筋T型断面として所要鉄筋量を求めるとつぎのようになった。

$$A_s = \frac{M}{\sigma_s \left(d - \frac{t}{2} \right)} = \frac{380000}{1300(95 - 12.5)} = 3.54 \text{ cm}^2 \quad (5 - \phi 9 \dots A_s = 3.18 \text{ cm}^2)$$

対策

横方向モーメントに対する鉄筋としては特別に不足していたと考えられないが、この橋梁だけでなく、下面にこの種のひびわれが発生した話しを聞き、その原因が主げたのプレストレスによる横方向のポアソンひずみ、グラウト注入時の不当の加圧、またグラウトの凍結膨張等々と考えられる。本橋のようにシースのかむりが 40 mm 以下となり、シースを鉛直に重ねるよう

図-14

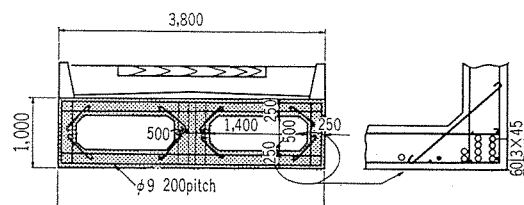
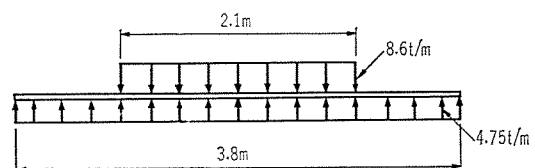


図-15

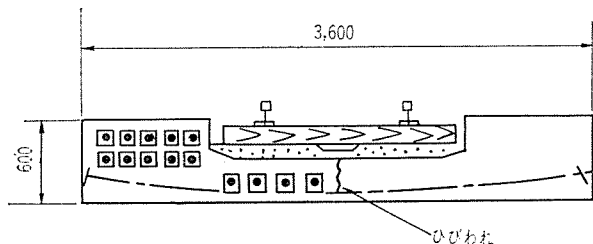


な場合は、シーすにそったひびわれが生じ易いので上記横方向曲げモーメントに対する鉄筋以外の用心鉄筋を考えるべきであった。一般に箱型橋、スラブ橋などでは、横方向に十分な鉄筋を配置すべきと思われる。

設 計 8.

H橋は 図-16 に示す無道床中路橋 $l=8.8$ m, KS-14 である。図示のように、けた端に定着されたPC鋼棒の緊張中にひびわれが断面の中央に橋軸方向に両端から約2 m 近く発生した。

図-16



対 策

まず原因は、横締めを行わず、主方向のPC鋼棒を緊張したこと、および、緊張順序もむしろ、主げた部のものを先にしたため等と思われたので、つぎには、特にけた端付近の横締めを密に行ない、その後主方向を全断面一様に圧縮力の導入されるように行なった所、以後ひびわれの発生を認めなかった。

設 計 9.

I橋の場合、図-17 に示す箱型断面を有する連続げたの支点付近の下縁定着舟形の隅角部からひびわれが発生した。支承はベアリング プレート シューを用いてある。図-18 に示すようにプレストレスによるせん断力の急変するCC' 断面から、DD' 断面までの間に下縁からのひびわれが発生しやすいことは考えられる。しかし、AA' 断面から BB' 断面でもほぼ同じ状態であるが、ここにはひびわれが発生していない。

計算結果としては、力は作用点から有効とし、平均保持の原則が成立つものとして計算した値は表-2 に示すとおりである。仮定には問題が残るが、AA' 断面、と

図-17

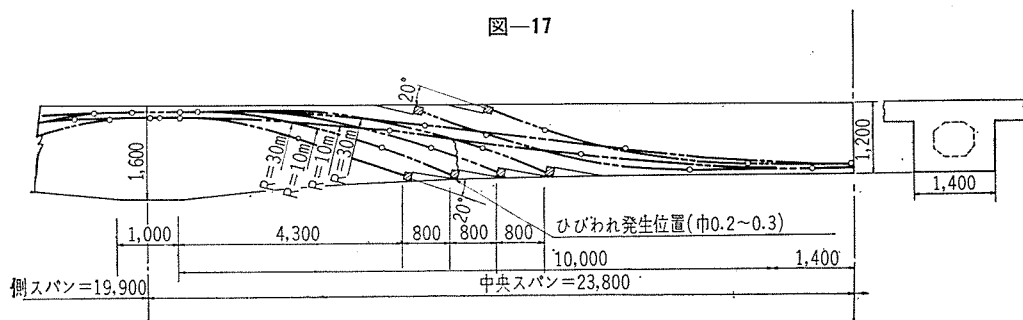


図-18

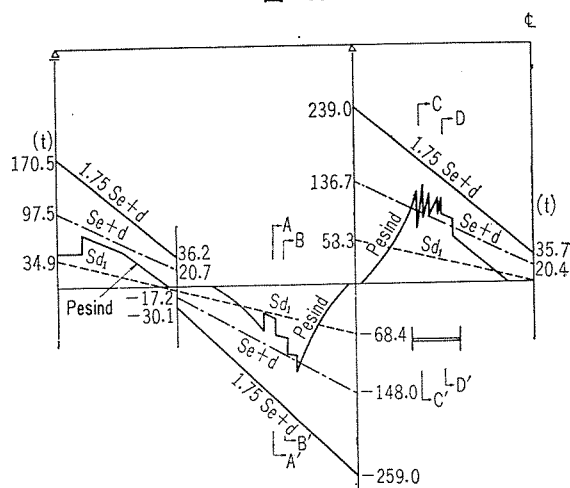


図-19

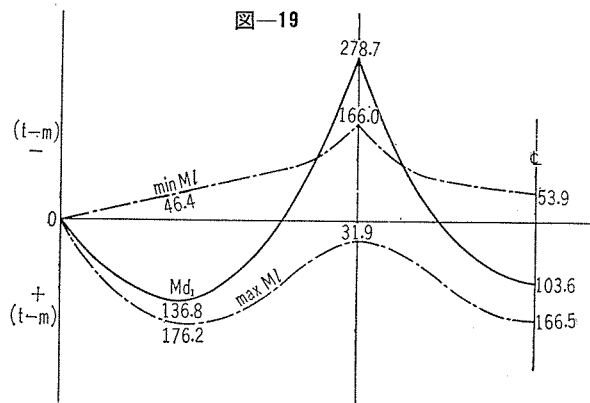


表-2 (単位 kg/cm²)

	A		B		C		D	
	上縁	下縁	上縁	下縁	上縁	下縁	上縁	下縁
① L_d	21.3	21.1	28.1	17.0	26.7	15.7	27.5	19.9
② max L_e	14.2	-31.8	11.8	-25.8	9.9	-22.1	13.1	-29.3
③ min L_e	-10.5	23.5	-10.6	23.2	-10.3	23.0	-9.1	20.4
①+②	35.5	-10.7	39.9	-8.0	36.6	-6.4	40.6	-9.4
①+③	10.8	44.6	17.5	41.0	16.4	38.7	18.4	40.3

$\sigma_{28}=350$ kg/cm²

DD' 断面の引張応力度には大きな差は認められない。

なお 図-19 は M_{max} , M_{min} 図を示す。

対 策 : CC' 断面から DD' 断面にかけて、異形鉄筋

を、パーシャルで計算した必要鉄筋量のほぼ2倍入れることにより、有害なひびわれの発生を防ぐことができた。

(編集責任者：小寺, 小池, 御子柴の各委員)