

北海道開発局土木試験所 正員 ○ 外崎 忍

中村敏明

正員 大島 久

1 緒言

この研究の第1契は、予めコンクリート床版内に配置されにPC鋼でプレストレスされに合成桁のひびわれ曲げ強さ、破壊曲げ強さに関するもので、報告の内容はひびわれ曲げ強さ、破壊曲げ強さの計算式ならびに模型実験によるプレストレス導入や載荷試験の各状態におけるひずみ、変形についてである。第2契は疲労強度ならびに繰返し曲げと受けるときのひずみ、変形特性に関するもので、報告の内容は、ひびわれを発生する載荷状態での繰返し曲げ試験の結果より、疲労破壊の有無ならびに途中でのひずみ、変形についてである。

2 ひびわれ曲げ強さ

ひびわれ曲げ強さは床版コンクリート上縁が極限引張ひずみに達しにときの断面各要素の力のつり合いから中立軸 kh を求め、これから抵抗モーメントの形で表わされる。ひびわれ曲げ強さの計算式は中立軸の位置が鋼桁断面内、ハンチ部、床版断面内にくる場合で次のように違ってくる。

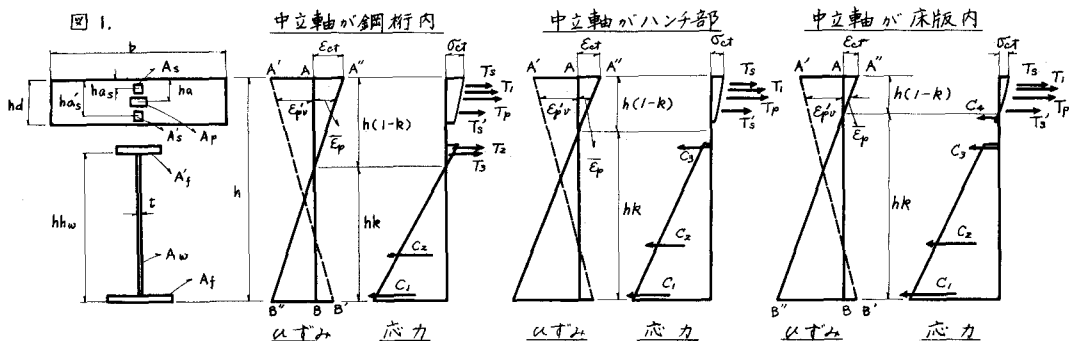


図1は断面各要素の寸法および断面積とひずみおよび応力の分布を表わしている。ひずみ分布のA, Bはプレストレス導入前の状態、A', B'はプレストレス導入後の状態、A'', B''はひびわれ発生時の状態を表わしている。ここで A_f , A_w , A'_f , A_p , A'_s , A_s は支え下フランジ、腹板、上フランジ、PC鋼、下鉄鉄筋、上鉄鉄筋の断面積を表わす。又 σ_{st} はコンクリートの引張強度、 σ_p , σ_s , σ'_s はPC鋼、上鉄鉄筋、下鉄鉄筋の応力度、 ϵ_{pv} は床版プレストレスによるPC鋼のひずみ、 ϵ_{pv} は同じく床版コンクリートのPC鋼位置のひずみ、 E_s , E_p , E_c は鋼、PC鋼、コンクリート(圧縮)の弾性係数である。

中立軸が鋼桁内にあるときのひびわれ曲げ強さ

$$k = \frac{0.9\sigma_{st} b d h / (E_s \epsilon_{st}) + A_p (\phi - a) E_p / E_s + (A'_f + 0.5 A_w) h w + A_s + A'_s}{0.9\sigma_{st} b d h / (E_s \epsilon_{st}) + A_p \phi E_p / E_s + A_f + A'_f + A_s + A'_s} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= A_f \epsilon_{st} E_s k / (1-k), \quad C_2 = 0.5 h t \epsilon_{st} E_s k^2 / (1-k), \quad T_1 = 0.9 \sigma_{st} b d h \\ T_2 &= A'_f \epsilon_{st} E_s (h w - k) / (1-k), \quad T_3 = 0.5 h t \epsilon_{st} E_s (h w - k) / (1-k), \quad T_p = A_p \sigma_p \\ T_s &= A_s \sigma'_s, \quad T'_s = A'_s \sigma'_s \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= hk, \quad y_2 = 2hk/3, \quad y'_1 = h(1-k-d/2), \quad y'_2 = h(hw-k) \\ y'_3 &= 2h(hw-k)/3, \quad y'_p = h(1-k-a), \quad y'_s = h(1-k-a_s) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

PC鋼および鉄筋のひずみ、応力は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_p &= \epsilon_{pv} + \epsilon'_{pv} + \epsilon_{ct}(1-k-a)/(1-k), \quad \sigma_p = E_p \epsilon_{ct} \{ (\phi-a) - \phi R \} / (1-k) \\ \phi &= (\epsilon_{pv} + \epsilon'_{pv} + \epsilon_{ct}) / \epsilon_{ct} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\sigma_s = E_s \epsilon_{ct} (1-k-a_s) / (1-k), \quad \sigma'_s = E_s \epsilon_{ct} (1-k-a'_s) / (1-k) \quad (5)$$

$$\text{ひびわれ曲げ強さ } M_{cr} = C_1 y_1 + C_2 y_2 + T_1 y'_1 + T_2 y'_2 + T_3 y'_3 + T_p y'_p + T_s y'_s + T'_s y'_s \quad (6)$$

中立軸がハンチ部にあるときのひびわれ曲げ強さ

$$R = \frac{0.8 \sigma_{ct} b d h / (E_s \epsilon_{ct}) + A_p (\phi-a) E_p / E_s + (A'_f + 0.5 A_w) h w + A_s + A'_s}{0.8 \sigma_{ct} b d h / (E_s \epsilon_{ct}) + A_p \phi E_p / E_s + A_f + A'_f + A_w + A_s + A'_s} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= A_f \epsilon_{ct} E_s R / (1-k), \quad C_2 = A_w \epsilon_{ct} E_s (R - 0.5 h w) / (1-k) \\ C_3 &= A'_f \epsilon_{ct} E_s (k - h w) / (1-k), \quad T_1 = 0.8 \sigma_{ct} b d h \\ T_p &= A_p \sigma_p, \quad T_s = A_s \sigma_s, \quad T'_s = A'_s \sigma'_s \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= hk, \quad y_2 = 2hk/3, \quad y_3 = h(hw-k), \quad y'_1 = h(1-k-d/2) \\ y'_p &= h(1-k-a), \quad y'_s = h(1-k-a_s), \quad y'_s = h(1-k-a'_s) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$\sigma_p, \sigma_s, \sigma'_s$ は(4)(5)と同様である。

$$\text{ひびわれ曲げ強さ } M_{cr} = C_1 y_1 + C_2 y_2 + C_3 y_3 + T_1 y'_1 + T_p y'_p + T_s y'_s + T'_s y'_s \quad (10)$$

中立軸が床版内にあるときのひびわれ曲げ強さ

$$\begin{aligned} & (bh/E_s)(0.5 E_c - 0.7 \sigma_{ct}/\epsilon_{ct}) k^2 + \{ A_f + A_w + A'_f + (bh/E_s) \{ (d-1) E_c + 1.4 \sigma_{ct}/\epsilon_{ct} \} \\ & + A_p \phi E_p / E_s + A_s + A'_s \} R - \{ h w (A'_f + 0.5 A_w) - (bh/E_s) \{ 0.5 (d-1)^2 E_c - 0.7 \sigma_{ct}/\epsilon_{ct} \} \\ & + A_p (\phi-a) E_p / E_s + A_s (1-a_s) + A'_s (1-a'_s) \} = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= A_f \epsilon_{ct} E_s R / (1-k), \quad C_2 = A_w \epsilon_{ct} E_s (R - 0.5 h w) / (1-k) \\ C_3 &= A'_f \epsilon_{ct} E_s (R - h w) / (1-k), \quad C_4 = 0.5 b h \epsilon_{ct} E_c (d+R-1)^2 / (1-k) \\ T_1 &= 0.7 \sigma_{ct} b h (1-k), \quad T_p = A_p \sigma_p, \quad T_s = A_s \sigma_s, \quad T'_s = A'_s \sigma'_s \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= kh, \quad y_2 = h w (3k - h w) h / (6k - 1.5 h w) + h(k - h w), \quad y_3 = h(k - h w) \\ y_4 &= h(d+R-1)/3, \quad y'_1 = 0.6 h(1-k), \quad y'_p = h(1-k-a) \\ y'_s &= h(1-k-a_s), \quad y'_s = h(1-k-a'_s) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$\sigma_p, \sigma_s, \sigma'_s$ は(4)(5)と同様である。

$$\text{ひびわれ曲げ強さ } M_{cr} = C_1 y_1 + C_2 y_2 + C_3 y_3 + C_4 y_4 + T_1 y'_1 + T_p y'_p + T_s y'_s + T'_s y'_s \quad (14)$$

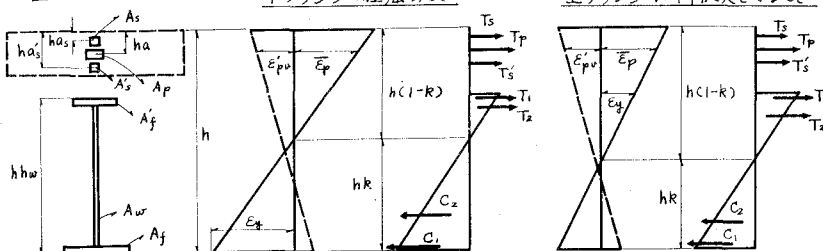
3. 破壊曲げ強さ

図 2.

下フランジの挫屈のとき

上フランジが降伏点になるとき

破壊曲げ強さは、
図2に示すように下
フランジが挫屈応力
に達したとき又は上
フランジ応力が降伏
点に達したときの断



面各要素の力のつり合いから中立軸 \$kh\$ を求め、これより抵抗モーメントの形で表わされる。

下フランジが圧屈応力に達しにときの破壊曲げ強さ

ここで \$E_y\$ は下フランジが圧屈応力に達しにときのひずみを表す。

$$K = \frac{A_f h w + 0.5 A_w h w + A_p (1-a) E_p / E_s + A_s (1-a_s) + A'_s (1-a'_s)}{A_f + A'_f + A_w - A_p \phi E_p / E_s + A_s + A'_s} \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= A_f E_y E_s, \quad C_2 = 0.5 h k \phi E_y E_s, \quad T_1 = A'_f E_y E_s (h w - k) / K \\ T_2 &= 0.5 h \phi E_y E_s (h w - k)^2 / K, \quad T_p = A_p E_y E_y (k \phi + 1 - a) / K, \quad T_s = A_s E_y E_s (1 - k - a_s) / K \\ T'_s &= A'_s E_y E_s (1 - k - a'_s) / K, \quad \phi = (E_{pv} + E'_{pv} - E_y) / E_y \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= h k, \quad y_2 = 2 h k / 3, \quad y'_1 = h (h w - k), \quad y'_2 = 2 h (h w - k) / 3, \quad y'_p = h (1 - k - a) \\ y'_s &= h (1 - k - a_s), \quad y'_s = h (1 - k - a'_s) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

$$\text{破壊曲げ強さ } M_y = C_1 y_1 + C_2 y_2 + T_1 y'_1 + T_2 y'_2 + T_p y'_p + T_s y'_s + T'_s y'_s \quad (18)$$

上フランジが降伏応力に達しにときの破壊曲げ強さ

ここで \$E_y\$ は上フランジが降伏応力に達しにときのひずみ、\$E_y\$ は鉄筋の降伏ひずみである。

$$K = \frac{(A_f + 0.5 A_w) h w + A_p E_p E_s \{1 - a + h w (\phi - 1)\} + (A_s + A'_s) h w E_y / E_y}{A_f + A'_f + A_w + A_p E_p / E_s + (A_s + A'_s) E_y / E_y} \quad (19)$$

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= A_f E_y E_s K / (1 - k), \quad C_2 = 0.5 h \phi E_y E_s K^2 / (h w - k), \quad T_1 = A'_f E_y E_s \\ T_2 &= 0.5 h \phi E_y E_s (h w - k), \quad T_p = A_p E_p E_y \{ \phi + (1 - h w - a) / (h w - k) \} \\ T_s &= A_s E_y E_s, \quad T'_s = A'_s E_y E_s, \quad \phi = (E_{pv} + E'_{pv} + E_y) / E_y \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= h k, \quad y_2 = 2 h k / 3, \quad y'_1 = h (h w - k), \quad y'_2 = 2 h (h w - k) / 3 \\ y_p &= h (1 - k - a), \quad y'_s = h (1 - k - a_s), \quad y'_s = h (1 - k - a'_s) \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

$$\text{破壊曲げ強さ } M_y = C_1 y_1 + C_2 y_2 + T_1 y'_1 + T_2 y'_2 + T_p y'_p + T_s y'_s + T'_s y'_s \quad (22)$$

4. 静的載荷試験

鋼桁はH型鋼 (300 X 150 X 6.5 X 9, \$l = 4300\$)

表1. 鋼桁およびPC鋼棒の材質

材種	規格	降伏点	引張強度	弾性係数	伸び
鋼桁	SS 41	36 kg/mm ²	45 kg/mm ²	2.1 X 10 ⁶ kg/cm ²	24 %
PC鋼棒	2 種	91.5 "	108 "	2.045 X 10 ⁶	10.5 %

を加工し、ブロックジベル (50 X 70 X 3.8) を溶接した。ジベルピッチは桁端部で 160, 中央

部で 200 mm とした。試験桁は床版コンクリート打設後直ちに水中養生し、収縮応力を生じないようにした。鋼桁、PC鋼の材質を表1.に、コンクリートの材質を表2.に示すが、コンクリートは供試体による実測の値である。図3.は試験桁の断面図を示す。

表2. 試験時のコンクリートの材質

圧縮強度	引張強度	弾性係数	引張極限ひずみ
538 kg/cm ²	31 kg/cm ²	3.8 X 10 ⁵ kg/cm ²	170 X 10 ⁻⁶

プレストレスは養生完了後3日目に行い、導入量は25 tで図4に断面各点の測定結果を示す。

載荷試験はプレストレス導入後ブラウトを施す直ちに行い、載荷状態は試験桁支間4.0 mとして、支間2.0 mの載荷桁を介して中央に2点等荷重とした。図5.は曲げモーメントとたわみの関係を示している。

図3. 合成桁断面図

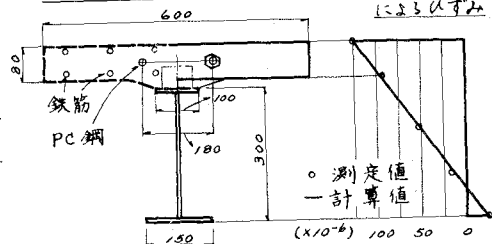


図4. プレストレスによるひずみ

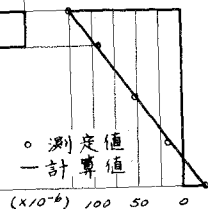


図5で σ_{cm} はひびわれ間のコンクリートの引張応力を表す。 σ_{cm} は軸方向にも床版厚方向にも特有な分布をするが、ここでは一様な値をとるものとした。又曲げモーメントが増えても一定の値をとるものとした。又PC鋼は合成されていないので計算値はこれを補正してある。

5. 動的載荷試験

動的載荷試験は静的載荷試験に用いた桁と同じもので、プレストレスを15%導入しブラウトを施した。

この桁のひびわれモーメントは 0.0 t-m 、合成桁としての弾性限界(コンクリート上縁応力が0となる点)は 3.3 t-m である。この実験は疲労破壊の有無の他にひびわれを生じる範囲での繰返し荷重による応力、変形を調べる目的がある。このため、上限荷重を 9.0 t-m 、荷重比は実橋の例から 0.5 として、載荷方法は静的試験と同様で桁各部の上限、下限時の応力(kg/cm^2)は次のようである。下フランジ($-1331, -591$)、上フランジ($+352, -89$)、上段鉄筋($+911, +86$)、PC鋼($+4413, +3735$)、ジベル溶接部合成応力($+1360, +732$)、ジベル前面コンクリート支圧応力($-158, -105$)、但し曲げ応力はコンクリート断面を無視して断面値によるものである。繰返し載荷回数は200万回まで行、たが、どの部分にも疲労破壊は生じなかつた。図6、図7に繰返し載荷による桁のたわみの変化を示している。

6. むすび

静的載荷試験でひびわれモーメントの計算値は 11.1 t-m であるが、 9.5 t-m で 0.075 mm 程度の小さいひびわれが現れた。計算に用いたコンクリートの引張極限ひずみは平均的な値であるから実際は少し低い荷重でひびわれが出てくる。ひびわれ後のたわみの測定値からひびわれ間のコンクリートの引張応力 σ_{cm} が働いていることがわかるが、図6、図7よりこの応力は繰返し荷重により漸次減少し200万回載荷後には殆んど無くなることがわかる。ただし断面値としては鉄筋、PC鋼の合成作用は期待できるようである。200万回載荷前後のひびわれは、本数や総幅は夫々2.5倍、3.4倍に増えたが、最大幅は1.3倍程度であった。以上の結果からこの種の桁にもひびわれを許す設計の可能性があることがわかった。

図-6 繰返し載荷回数-たわみ図

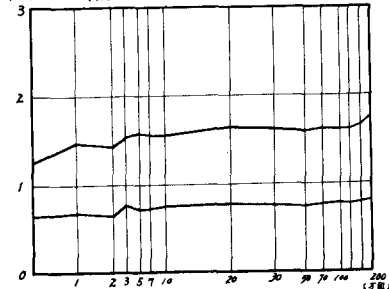


図-5 曲げモーメント たわみ図

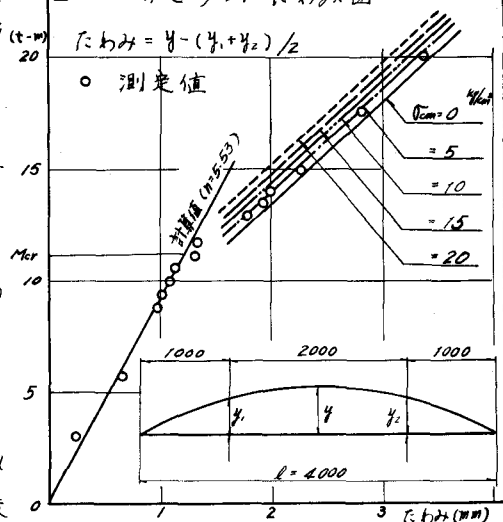


図7. 繰返し載荷前後の曲げモーメント たわみ図

