

プレキャストコンクリート合成ばりの 打継面におけるずれ特性に関する研究

STUDIES ON SLIP BEHAVIOR AT JOINT SURFACE OF PRECAST CONCRETE COMPOSITE BEAMS

大 浜 文 彦*・小 林 和 夫**
By Fumihiko Ohama and Kazuo Kobayashi

1. 序

プレキャスト桁の架設後に床版部コンクリートを打継いだコンクリート合成桁では、打継面におけるせん断応力とずれ量は桁の挙動（一体性）を考える上できわめて重要である。

コンクリート合成桁は、ずれを無視して求めた打継面のせん断応力が、許容応力以下になるように設計される^{1),2)}。許容応力はずれ破壊（打継面の付着破壊）に対して相当の余裕があるように規定されたもので、この応力以下ではずれが存在しないかまたはきわめて小さいので、それを無視しても良いと考えられる。しかし、ずれ破壊に近い荷重域ではずれの量が大きくなり打継面のせん断応力に影響すると考えられるので、それを無視して計算してよいかどうかについて十分検討しておくことが必要である。

鋼合成桁に対しては、ずれを考慮した理論式によって不完全合成の挙動を説明した報告³⁾があるが、これらは鋼桁と床版部コンクリート間の水平せん断応力（ジベルで抵抗）はずれ量に正比例するとの仮定に立つものである。

コンクリート合成桁では、次章のようにずれ量が小さい間は、これと打継面のせん断応力に近似的に比例関係が成り立つが、ずれ破壊に近づくときずれ量の増大が著しく、この荷重域まで含めると両者の比例関係を仮定できない。

そこで、本研究はコンクリート合成桁に対してずれの大きい領域までを考えた理論式を検討して打継面のずれ量とせん

断応力を計算し、実験値と比較した結果について述べるものである。

2. 理 論 式

(1) 合成桁のせん断応力とずれ量に関する基礎方程式⁴⁾

まず、合成桁のスパン上の任意の位置で、打継面に作用するせん断応力 τ とずれ量 S の間に成り立つ基礎方程式を誘導した結果を述べよう。なお、本文中に説明しない記号は一括して本文の末尾に示す。

a) プレキャスト部に曲げひびわれが発生しない場合

図-1のように断面力として、打継部に作用する軸力と曲げモーメントを N_1, M_1 、一方プレキャスト部のそれらを N_2, M_2 とする。さらに、打継面の幅（新旧コンクリートの付着面の幅）を b 、そこに作用する水平せん断応力を τ とすると以下の諸式が成立する。

ここでは、材軸に直角に作用する荷重のみを対象としているので、軸方向力のつり合いから次式を得る。

$$N_1 - N_2 = 0; N_1 = N_2 = N \dots \dots \dots (1.1)$$

打継部あるいはプレキャスト部のスパン方向 dx 間の微小要素の力のつり合いを考えると、

$$\tau \cdot b \cdot dx = dN; \tau = \frac{1}{b} \frac{dN}{dx} \dots \dots \dots (1.2)$$

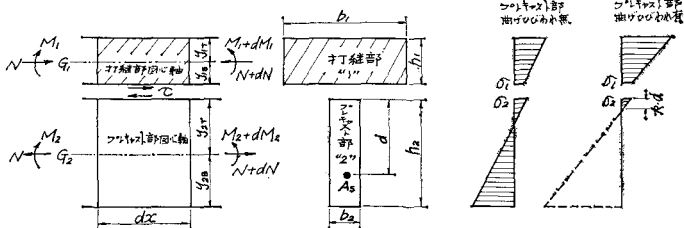


図-1 合成断面の断面力

* 正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 岐阜大学講師 工学部土木工学科

また、荷重による曲げモーメントを M とすれば、モーメントのつり合いから次の式を得る。

$$M = M_1 + M_2 + Nh \dots\dots\dots (1.3)$$

いま、任意点で打継部とプレキャスト部のたわみが等しい(打継面で浮上りがない)、すなわち両部の回転角ひずみが等しいと考えると、

$$\frac{M_1}{K_1} = \frac{M_2}{K_2}, K_1 = E_1 I_1, K_2 = E_2 I_2 \dots\dots\dots (1.4)$$

一方、打継部の下縁とプレキャスト部の上縁の相対変位、すなわちずれ量を S とするとスパン方向の変形適合条件式は次のようになる。

$$dS = \left(\frac{\sigma_1}{E_1} - \frac{\sigma_2}{E_2} \right) dx; \frac{dS}{dx} = \frac{\sigma_1}{E_1} - \frac{\sigma_2}{E_2} \dots\dots\dots (1.5)$$

ただし、 σ_1 と σ_2 はそれぞれ打継部の下縁、プレキャスト部の上縁の応力で、次式から求まる。

$$\sigma_1 = \frac{N}{A_1} - \frac{M_1}{I_1} \times y_{1B}, \sigma_2 = -\frac{N}{A_2} + \frac{M_2}{I_2} \times y_{2T} \dots\dots\dots (1.6)$$

以上の式 (1.1)~(1.6) から τ と S の関係を求めよう。

まず、式 (1.3) と (1.4) から M_1, M_2 を求め、 x で微分すると、

$$\begin{aligned} \frac{dM_1}{dx} &= \frac{K_1}{K_1 + K_2} \times \left(Q - h \frac{dN}{dx} \right), \\ \frac{dM_2}{dx} &= \frac{K_2}{K_1 + K_2} \times \left(Q - h \frac{dN}{dx} \right) \dots\dots\dots (1.7) \end{aligned}$$

ただし、 $Q = \frac{dM}{dx}$ で荷重によるせん断力を表わす。

一方、式 (1.6) を (1.5) に代入して両辺を x で微分すると、

$$\begin{aligned} \frac{d^2 S}{dx^2} &= \frac{1}{E_1} \left(\frac{1}{A_1} \frac{dN}{dx} - \frac{y_{1B}}{I_1} \frac{dM_1}{dx} \right) \\ &\quad - \frac{1}{E_2} \left(-\frac{1}{A_2} \frac{dN}{dx} + \frac{y_{2T}}{I_2} \frac{dM_2}{dx} \right) \dots\dots\dots (1.8) \end{aligned}$$

式 (1.8) に式 (1.2), (1.7) の関係を用いて整理すると、スパン上の任意点でのずれ量 S と打継面のせん断応力 τ に関する基礎式として次式を得る。

$$\begin{aligned} \frac{d^2 S}{dx^2} &= -\frac{h}{K_1 + K_2} \\ &\quad \times Q + \left(\frac{h^2}{K_1 + K_2} + \frac{1}{A_1 E_1} + \frac{1}{A_2 E_2} \right) \\ &\quad \cdot b \cdot \tau = -A \cdot Q + B \cdot \tau \dots\dots\dots (1.9) \end{aligned}$$

ただし、

$$\begin{aligned} A &= \frac{h}{K_1 + K_2}, \\ B &= \left(\frac{h^2}{K_1 + K_2} + \frac{1}{A_1 E_1} + \frac{1}{A_2 E_2} \right) \cdot b \dots\dots\dots (1.10) \end{aligned}$$

b) プレキャスト部に曲げひびわれが発生した場合プレキャスト部下縁の引張応力がプレキャスト部コン

クリートの曲げ引張強度(プレストレスが導入されているときは有効プレストレスを加えたもの)に達するとプレキャスト断面には曲げひびわれが発生する。

ここでは、曲げひびわれが発生した断面では荷重によって生ずるプレキャスト部コンクリートの引張応力を無視することにする。

この場合も前記の式 (1.1), (1.2), (1.3), (1.5) および (1.6) の第1式はそのまま適用できるが、プレキャスト部では全断面を有効とみなせないで式 (1.4) は次の形で表わすことにする。

$$\frac{M_1}{K_1} = \frac{\sigma_2 / E_2}{k \cdot d} \dots\dots\dots (1.11)$$

上式の σ_2, k は図-1 のようにプレキャスト部断面の上縁応力とその位置から中立軸までの距離の主筋 (A_s) までの距離 (d) に対する比を示し、次式から求まるものである。

$$\frac{N}{b_2 d} = n \sigma_2 \frac{1-k}{k} p - \frac{\sigma_2}{2} k = \frac{2np - 2knp - k^2}{2k} \times \sigma_2 \dots\dots\dots (1.12)$$

$$\begin{aligned} \frac{M_2}{b d^2} &= n \sigma_2 \frac{1-k}{k} p \left(1 - \frac{1}{2} \frac{h_2}{d} \right) + \frac{\sigma_2}{2} k \left(\frac{1}{2} \frac{h_2}{d} - \frac{k}{3} \right) \\ &= \left\{ \frac{1-k}{k} np \left(1 - \frac{1}{2} \frac{h_2}{d} \right) + \frac{k}{2} \left(\frac{1}{2} \frac{h_2}{d} - \frac{k}{3} \right) \right\} \sigma_2 \dots\dots\dots (1.13) \end{aligned}$$

ただし、 $n = E_s / E_c, p = A_s / b_2 d$

上の2式から σ_2 を消去して k について整理すると3次方程式となり、以後の式の誘導がきわめて繁雑になる。このためここでは次のように簡単化して近似解を得た。

まず、式 (1.12) の分子は図-2 のように k に関する2次曲線となるが、 k の変化する範囲を $k=0 \sim \alpha$ とすると、この間では近似的に次式(同図の直線)で表わすことができよう。

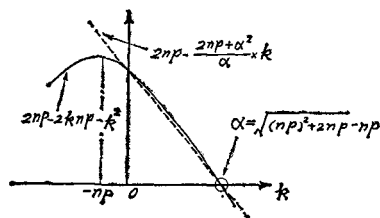


図-2

$$2np - 2knp - k^2 \div 2np - \frac{2\alpha np + \alpha^2}{\alpha} \times k \dots\dots\dots (1.14)$$

ただし、 $k = \alpha$ は完全な重ねはりの状態 ($N=0$) に対応するもので、

$$\alpha = \sqrt{(np)^2 + 2np} - np \quad (2\alpha np + \alpha^2 = 2np) \dots\dots\dots (1.15)$$

式 (1.14) から式 (1.12) は、前記の式 (1.11) も用

いと次のようになる。

$$\frac{N}{b_2 d} = \frac{\sigma_2}{k} n p - \frac{2 \alpha n p + \alpha^2}{2 \alpha} \sigma_2 = \frac{\sigma_2}{k} n p - \frac{n p}{\alpha} \sigma_2$$

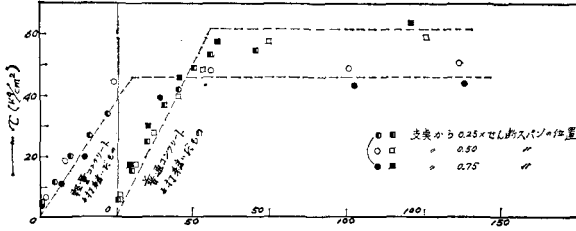
$$= \frac{E_2 \cdot d \cdot M_1}{K_1} \times n p - \frac{n p}{\alpha} \sigma_2 \dots \dots \dots (1.16)$$

これから σ_2 は、

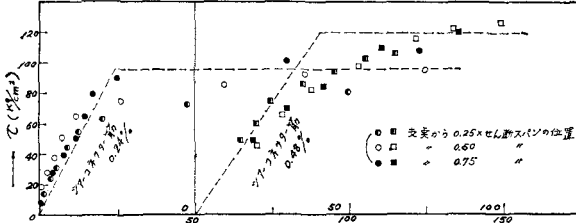
$$\sigma_2 = \frac{\alpha}{n p} \left(\frac{E_2 \cdot d \cdot M_1}{K_1} \times n p - \frac{N}{b_2 d} \right) \dots \dots \dots (1.17)$$

3-(1) 筆者の試験材から求めたもの

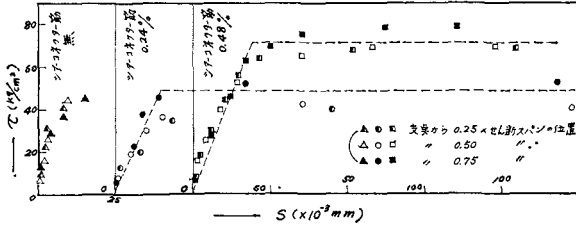
(i) 打継面粗 (シテコネクター筋無)



(ii) 打継面粗 (シテコネクター筋有)



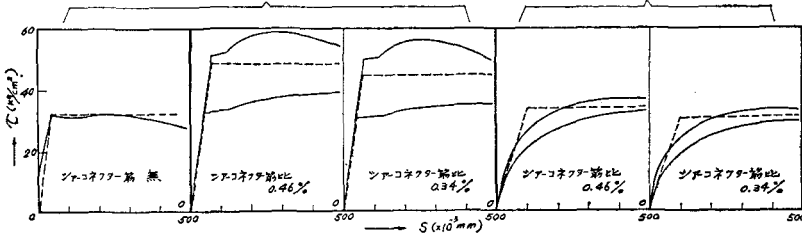
(iii) 打継面滑



3-(2) N.W.Hanson の押抜き試験 (Push-out Test) によるもの

(i) 粗・付着有

(ii) 粗・付着無



(iii) 滑・付着有

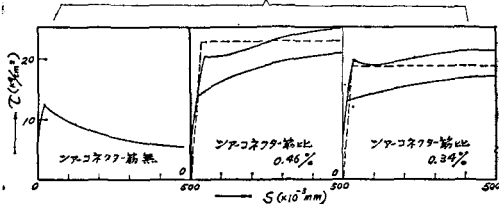


図-3(2) N.W.Hanson の押抜き試験

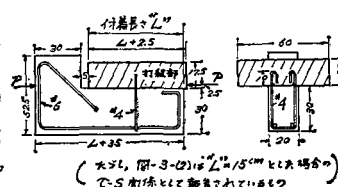


図-3 打継面の τ -S 関係

同様な考え方から、式 (1.13) は次のように変形できる。

$$\frac{M_2}{b_2 d^2} = n p \left(1 - \frac{1}{2} \frac{h_2}{d} \right) \frac{E_2 \cdot d \cdot M_1}{K_1}$$

$$+ \left\{ \left(\frac{1}{4} \frac{h_2}{d} - \frac{\alpha}{3} \right) \alpha - n p \left(2 - \frac{h_2}{d} \right) \right\} \sigma_2 \dots \dots \dots (1.18)$$

式 (1.3), (1.17), (1.18) から M_1 を M と N で表わすと、

$$M_1 = \frac{M + \beta N}{r} \dots \dots \dots (1.19)$$

ただし、

$$\beta = - \left\{ \left(h - \frac{h_2}{2} \right) + \frac{4 \alpha - \alpha^2}{3} \times d \right\}$$

$$= - \left(y_{1B} + \frac{4 \alpha - \alpha^2}{3} \times d \right) \dots \dots \dots (1.20)$$

$$r = 1 + \frac{A_s E_s}{K_1} (1 - \alpha) \left(1 - \frac{4}{3} \alpha \right) d^2$$

式 (1.19) の M_1 を式 (1.17) に代入すると

$$\sigma_2 = \frac{\alpha}{n p} \left(\frac{E_2 d}{K_1} \cdot \frac{M + \beta N}{r} \times n p - \frac{N}{b_2 d} \right) \dots \dots \dots (1.21)$$

最後に、式 (1.6) の第1式の σ_1 と上式 (1.21) の σ_2 を前記の式 (1.5) に代入して両辺を x で微分し、式 (1.2) の $\tau = \frac{1}{b} \frac{dN}{dx}$ の関係を用いると、

$$\frac{d^2 S}{dx^2} = - \frac{1}{r} \frac{y_{1B} + \alpha d}{K_1} \times Q + \left(\frac{1}{A_1 E_1} + \frac{\alpha}{A_s E_s} - \frac{\beta}{r} \times \frac{y_{1B} + \alpha d}{K_1} \right) b \tau = -A' Q + B' \tau \dots \dots \dots (1.22)$$

ただし、 $A' = \frac{1}{r} \frac{y_{1B} + \alpha d}{K_1}$ 、

$$B' = \left(\frac{1}{A_1 E_1} + \frac{\alpha}{A_s E_s} - \frac{\beta}{r} \frac{y_{1B} + \alpha d}{K_1} \right) b \dots \dots \dots (1.23)$$

曲げひびわれのある場合に対する τ と S に関する基礎式 (1.22) は、その無い場合の式 (1.9) と同型の微分方程式となることからわかる。

(2) 打継面のせん断応力とずれ量の関係 (τ -S 関係)

微分方程式 (1.9) または (1.22) を解くには、打継面の τ -S 関係をあらかじめ実験的に求めておく必要がある。この関係の一例として、合成桁の載荷試験および押抜き試験 (Push-off

Test) から得られたものを図-3 に示す。

図-3 (1) は筆者が実施した後記の合成桁(図-5 (1))の載荷試験から求めたものである。打継面のせん断応力 τ は、図-5(1)のようにせん断スパン内で 10 cm 間隔で打継部(フランジ部)の上縁と下縁にペーパーゲージ(検長 67 mm)を貼付してひずみを測定し、同一バッチから作製した $\phi 10 \times 20$ cm シリンダーの圧縮応力 \sim ひずみ関係から 10 cm 間隔ごとのフランジ部の圧縮合力を求め、相隣る 2 断面間 ($\Delta x = 10$ cm) の合力差 (ΔC) から Δx 区間の打継面のせん断応力 $\tau = \Delta C / b \cdot \Delta x$ (b : 付着面の幅) を求めた。

一方、それらに対応する位置のずれ量 S は、ダイヤルゲージ(最小目盛 1/1 000 mm)を固定金具でフランジ部の下縁に取付け、それと同一鉛直面上のプレキャスト部(ウェブ)に固定したアタッチメントにダイヤルゲージの先端をあてがって両部の相対変位量を測定した。

打継面の状態は、図-3 (1)-(i): 粗(粗骨材を最大寸法(15 mm)の 1/2 程度露出, レイタンス除去)でシアコネクター筋なし, 図-3 (1)-(ii): 粗(同上)で、打継面積に対して 0.24, 0.48% のシアコネクター筋($\phi 6$ 丸鋼, 図-3 (1)の点線形)を配置, 図-3 (1)-(iii): 平滑(金ゴテ仕上げ, レイタンス除去)で、シアコネクター筋が 0, 0.24, 0.48% である。

打継面が平滑でシアコネクター筋もない場合は、ずれが小さい段階で($S = 20 \times 10^{-3}$ mm)突発的なずれ破壊を起こした。この場合を除くと、同図のように合成桁の τ - S 関係は厳密にはスパン上の位置の影響も受けるが、ずれの存在しない領域から著しく大きな領域までを含めて近似的には点線で示す 1 本の折線(後記の式(2.1))で表わすことができよう。

一方、図-3 (2) は N.W. Hanson⁹⁾, 乙藤ら⁹⁾による押抜き試験(図-3 (3))の結果のうち前者の例を示した。この場合、 τ は荷重を打継全面積で除したもので、 S は付着長さ L の中央における測定値である。なお、文献には $L = 15$ cm に対する τ - S 曲線が図示されているので、その結果を示した。同文献では L がそれより長くなると($L = 30, 60$ cm), せん断強度 τ_{max} がやや小さくなる傾向が認められている($L = 30$ と 60 cm ではほとんど差がない)。 L と τ_{max} の関係、すなわち(τ - S)におよぼす L の影響については今後さらに検討

を要すると思われる。

図-3 (2) で、“粗”: チッピングで粗骨材を露出させ 10 mm 程度の凹凸を設けたもの, “滑”: コテで平滑にしたもの, “シアコネクター筋比 p_s ”: 打継全面積に対する比, “付着無”: 打継面にシリコンを塗って付着を無くしたものである。

押抜き試験による τ - S 関係も上述の合成桁による場合と同様に、平滑でシアコネクター筋もない場合を除いて同図の点線のように大胆ではあるが次式で近似できよう。

$$\left. \begin{aligned} |S| \leq S_e : \tau = \xi S \quad (\xi = \tau_{max} / S_e) \\ |S| > S_e : |\tau| = \tau_{max} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.1)$$

ただし、 τ_{max} はせん断強度、 S_e は τ - S 近似式の折点でのずれ量を示し、合成桁の試験から得られたものを表-1(1), 押抜き試験の値を表-1(2)に示す。上式の絶対値は τ と S の符号を考慮したものである。

(3) 微分方程式の解法

微分方程式(1.9)または(1.22)を式(2.1)の τ - S 関係のもとで解いて、合成桁の打継面のせん断応力とずれ量を計算する。

なお、ここでは単純ばりに集中荷重または等分布荷重が作用する場合を考える。

a) 集中荷重の場合

この時は載荷点でせん断力 $Q = \frac{dM}{dx}$ (M : 曲げモーメント)が不連続となるから、 Q と M はフーリエ級数の形で与えよう。

$$M = \frac{2l}{\pi^2} \sum_{N=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} P_N \frac{\sin(n\pi \frac{x_N}{l})}{n^2} \sin(n\pi \frac{x}{l}) \dots\dots\dots (3.1)$$

$$Q = \frac{2}{\pi} \sum_{N=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} P_N \frac{\sin(n\pi \frac{x_N}{l})}{n} \cos(n\pi \frac{x}{l}) \dots\dots\dots (3.2)$$

上式の N と P_N はスパン l の単純ばりに作用する集中荷重の個数と各荷重の大きさ、 x_N と x は左側支点から各荷重点および Q, M を求める位置までの距離を表わす。

まず、微分方程式(1.9)または(1.22)の一般解を求めると、

$$\left. \begin{aligned} -S_e \leq S \leq S_e \quad (\tau = \xi S) : \\ S_{II} = \frac{2A}{\pi} \sum_{N=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{P_N/n}{(n\pi/l)^2 + B\xi} \sin(n\pi \frac{x_N}{l}) \cos(n\pi \frac{x}{l}) + C_3 e^{\sqrt{B\xi}x} + C_4 \sqrt{B\xi}x \\ S_{II}' = \frac{2A'}{\pi} \sum_{N=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{P_N/n}{(n\pi/l)^2 + B\xi} \sin(n\pi \frac{x_N}{l}) \cos(n\pi \frac{x}{l}) + C_3' e^{\sqrt{B\xi}x} + C_4' e^{-\sqrt{B\xi}x} \\ S > S_e \quad (\tau = \tau_{max}) : \\ S_I = \frac{2A}{\pi} \sum_{N=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{P_N/n}{(n\pi/l)^2} \sin(n\pi \frac{x_N}{l}) \cos(n\pi \frac{x}{l}) + B\tau_{max} \frac{x^2}{2} + C_1 x + C_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.3)$$

$$S_I' = \frac{2A'}{\pi} \sum_{N=1}^N \sum_{n=1}^{\infty} \frac{P_N/n}{(n\pi/l)^2} \sin\left(n\pi \frac{x_N}{x}\right) \cos\left(n\pi \frac{x}{l}\right) + B'\tau_{\max} \frac{x^2}{2} + C_1'x + C_2'$$

$$S < -S_e \quad (\tau = -\tau_{\max}) :$$

$$S_{II} = \frac{2A}{\pi} \sum_{N=1}^N \sum_{n=1}^{\infty} \frac{P_N/n}{(n\pi/l)^2} \sin\left(n\pi \frac{x_N}{l}\right) \cos\left(n\pi \frac{x}{l}\right) - B\tau_{\max} \frac{x^2}{2} + C_5x + C_6$$

$$S_{III}' = \frac{2A'}{\pi} \sum_{N=1}^N \sum_{n=1}^{\infty} \frac{P_N/n}{(n\pi/l)^2} \sin\left(n\pi \frac{x_N}{l}\right) \cos\left(n\pi \frac{x}{l}\right) - B'\tau_{\max} \frac{x^2}{2} + C_5'x + C_6'$$

上式の(') 記号はひびわれ断面の式 (1.22) に対するものを示す。

おのおの場合の上の未知定数は以下の方法で求める。

① スパン全長に渡って曲げひびわれがないとした場合

(A) すべての位置で $-S_e \leq S \leq S_e$ の時 (図-4(1)(i))

未知定数:

$$C_3, C_4$$

境界条件:

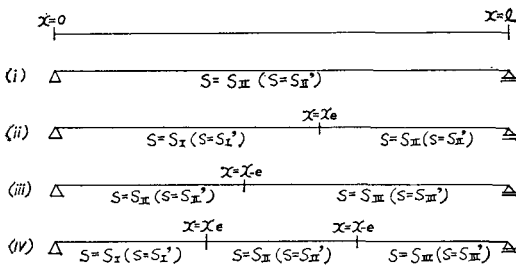
$$(M_1)_{x=0,l} = (M_2)_{x=0,l} = (N)_{x=0,l} = 0 \quad \dots(3.4)$$

$$\text{すなわち } (\sigma_1)_{x=0,l} = (\sigma_2)_{x=0,l} = 0$$

$$\text{から } \left(\frac{dS_{II}}{dx}\right)_{x=0,l} = 0$$

(B) スパンに $S > S_e$ または $S < -S_e$ の領域が存在する時

(1) スパン全長に渡って曲げひびわれがない(ある)ときの場合



(2) 曲げひびわれのない区間とある区間を考えた場合

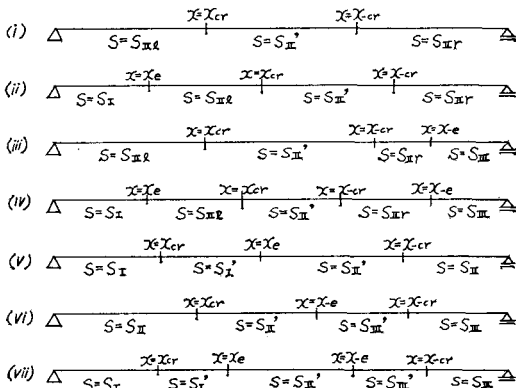


図-4 微分方程式の解法

この時は次の3ケースがある。ただし、以下に示す x_e, x_{-e} は左側支点からおのおの $S = S_e, S = -S_e$ の位置までの距離を示す。

図-4(1)-(ii) の場合

未知定数:

$$C_1, C_2, C_3, C_4$$

境界条件:

$$(\sigma_1)_{x=0,l} = (\sigma_2)_{x=0,l} = 0 \quad \text{から}$$

$$\left(\frac{dS_I}{dx}\right)_{x=0} = \left(\frac{dS_{II}}{dx}\right)_{x=l} = 0 \quad \dots\dots\dots(3.5)$$

連続条件:

$$(S_I)_{x=x_e} = (S_{II})_{x=x_e} = S_e,$$

$$\left(\frac{dS_I}{dx}\right)_{x=x_e} = \left(\frac{dS_{II}}{dx}\right)_{x=x_e}$$

図-4(1)-(iii) の場合

未知定数:

$$C_3, C_4, C_5, C_6$$

境界条件:

$$(\sigma_1)_{x=0,l} = (\sigma_2)_{x=0,l} = 0 \quad \text{から}$$

$$\left(\frac{dS_{II}}{dx}\right)_{x=0} = \left(\frac{dS_{III}}{dx}\right)_{x=l} = 0 \quad \dots\dots\dots(3.6)$$

連続条件:

$$(S_{II})_{x=x_{-e}} = (S_{III})_{x=x_{-e}} = -S_e,$$

$$\left(\frac{dS_{II}}{dx}\right)_{x=x_{-e}} = \left(\frac{dS_{III}}{dx}\right)_{x=x_{-e}}$$

図-4(1)-(iv) の場合

未知定数:

$$C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$$

境界条件:

$$(\sigma_1)_{x=0,l} = (\sigma_2)_{x=0,l} = 0 \quad \text{から}$$

$$\left(\frac{dS_I}{dx}\right)_{x=0} = \left(\frac{dS_{III}}{dx}\right)_{x=l} = 0 \quad \dots\dots\dots(3.7)$$

連続条件:

$$(S_I)_{x=x_e} = (S_{II})_{x=x_e} = S_e,$$

$$(S_{II})_{x=x_{-e}} = (S_{III})_{x=x_{-e}} = -S_e$$

$$\left(\frac{dS_I}{dx}\right)_{x=x_e} = \left(\frac{dS_{II}}{dx}\right)_{x=x_e},$$

$$\left(\frac{dS_{II}}{dx}\right)_{x=x_{-e}} = \left(\frac{dS_{III}}{dx}\right)_{x=x_{-e}}$$

② スパン全長に渡って曲げひびわれを仮定した場合

この場合は上記(i)において、それぞれ $S_I \rightarrow S_I', S_{II} \rightarrow S_{II}', S_{III} \rightarrow S_{III}'$ と置き換えればよいので、ここでは省略する。

③ 曲げひびわれのない区間とある区間を考えた場合
 プレキャスト部下縁の引張応力 σ がその曲げ強度 σ_b
 (プレストレスが与えられているものでは有効プレスト
 レス σ_p を加える) に達すると、曲げひびわれが発生す
 る。

ひびわれが発生しない区間とした区間に対して、それ
 ぞれ式 (1.9) と (1.22) を併用する場合の解法は上記
 の①または②に較べて繁雑になるが、その概略は以下の
 とおりである。

(A) ひびわれが発生しない荷重階

与えられた荷重に対して、上記の①のいずれの場合
 (図-4(1)-(i)~(iv)) に適合する解を求める。ただし、
 その解はスパン上のすべての位置で次式を満足する必要
 がある。

$$\sigma = -\frac{N}{A_2} - \frac{M_2}{I_2} \times y_{2B} = -\frac{N}{A_2} - \frac{y_2 B}{I_2} \times \frac{K_2}{K_1 + K_2} (M - Nh) < \sigma_b + \sigma_p \dots\dots\dots(3.8)$$

なお、 N は $dN = b \cdot \tau \cdot dx$ から $N = b \int \tau \cdot dx$ で求ま
 るので、おのおの場合に対しては次のようになる。

図-4(1)-(i) の場合

$$N = b \cdot \xi \int_0^x S_{II} dx \dots\dots\dots(3.9)$$

図-4(1)-(ii) の場合

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq x \leq x_e : \\ N = b \int_0^x \tau_{\max} dx = b \tau_{\max} \cdot x \\ x_e \leq x \leq l : \\ N = b \left(\int_0^{x_e} \tau_{\max} dx + \int_{x_e}^x \xi S_{II} dx \right) \\ = b \left(\tau_{\max} x_e + \xi \int_{x_e}^x S_{II} dx \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3.10)$$

図-4(1)-(iii) の場合

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq x \leq x_{-e} : \\ N = b \xi \int_0^x S_{II} dx \\ x_{-e} \leq x \leq l : \\ N = b \left(\int_0^{x_{-e}} \xi S_{II} dx + \int_{x_{-e}}^x (-\tau_{\max}) dx \right) \\ = b \left(\xi \int_0^{x_{-e}} S_{II} dx - \tau_{\max} (x - x_{-e}) \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3.11)$$

図-4(1)-(iv) の場合

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq x \leq x_e : \\ N = b \int_0^x \tau_{\max} dx = b \tau_{\max} x \\ x_e \leq x \leq x_{-e} : \\ N = b \left(\int_0^{x_e} \tau_{\max} dx + \int_{x_e}^x \xi S_{II} dx \right) \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} &= b \left(\tau_{\max} \cdot x_e + \xi \int_{x_e}^x S_{II} dx \right) \\ x_{-e} \leq x \leq l : \\ N &= b \left(\int_0^{x_e} \tau_{\max} dx + \int_{x_e}^{x_{-e}} \xi S_{II} dx + \int_{x_{-e}}^l (-\tau_{\max}) dx \right) \\ &= b \left(\tau_{\max} (x_e + x_{-e} - l) + \xi \int_{x_e}^{x_{-e}} S_{II} dx \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3.12)$$

(B) ひびわれが発生した荷重階

この時は 図-4 (2)-(i)~(vii) の7 ケースが起こり
 うる。以下では $x = x_{cr} \sim x_{-cr}$ は曲げひびわれの発生区
 間を示す。この場合、式 (3.3) の S_{II} はひびわれ発生
 区間の左側の発生していない領域で S_{IIl} (未知定数 C_{3l} ,
 C_{4l})、右側の発生していない領域で S_{IIr} (未知定数 C_{3r} ,
 C_{4r}) とする。

図-4(2)-(i) の場合

$$\left. \begin{aligned} \text{未知定数:} \\ C_{3l}, C_{4l}, C_{3r}, C_{4r} \\ \text{境界条件:} \\ (\sigma_1)_{x=0, l} = (\sigma_2)_{x=0, l} = 0 \text{ から} \\ \left(\frac{dS_{IIl}}{dx} \right)_{x=0} = \left(\frac{dS_{IIr}}{dx} \right)_{x=l} = 0 \\ \text{連続条件:} \\ (S_{IIl})_{x=x_{cr}} = (S_{IIr})_{x=x_{cr}}, \\ (S_{IIr})_{x=x_{-cr}} = (S_{IIl})_{x=x_{-cr}} \\ \left(\frac{dS_{IIl}}{dx} \right)_{x=x_{cr}} = \left(\frac{dS_{IIr}}{dx} \right)_{x=x_{cr}} \\ \left(\frac{dS_{IIr}}{dx} \right)_{x=x_{-cr}} = \left(\frac{dS_{IIl}}{dx} \right)_{x=x_{-cr}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3.13)$$

ただし、 x_{cr} と x_{-cr} は次の N が次式 (3.14) を満
 足する値である。

$$\left. \begin{aligned} x_{cr} : N &= b \xi \int_0^{x_{cr}} S_{IIl} dx \\ x_{-cr} : N &= b \xi \int_l^{x_{-cr}} S_{IIr} dx \\ \sigma &= -\frac{N}{A^2} - \frac{M_2}{I_2} \times y_{2B} = -\frac{N}{A_2} - \frac{y_2 B}{I_2} \\ &\quad \times \frac{K_2}{K_1 + K_2} (M - Nh) = \sigma_b + \sigma_p \dots\dots\dots(3.14) \end{aligned} \right\}$$

図-4(2)-(ii) の場合

$$\left. \begin{aligned} \text{未知定数:} \\ C_1, C_2, C_{3l}, C_{4l}, C_{3r}, C_{4r} \\ \text{境界条件:} \\ (\sigma_1)_{x=0, l} = (\sigma_2)_{x=0, l} = 0 \text{ から} \\ \left(\frac{dS_{I1}}{dx} \right)_{x=0} = \left(\frac{dS_{IIr}}{dx} \right)_{x=l} = 0 \\ \text{連続条件:} \\ (S_{I1})_{x=x_e} = (S_{IIl})_{x=x_e} = S_e, \\ (S_{IIl})_{x=x_{cr}} = (S_{IIr})_{x=x_{cr}}, \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3.15)$$

$$\left. \begin{aligned} (S_{\Pi}')_{x=x_{-cr}} &= (S_{\Pi r})_{x=x_{-cr}} \\ \left(\frac{dS_{\Pi}}{dx}\right)_{x=x_e} &= \left(\frac{dS_{\Pi l}}{dx}\right)_{x=x_e} \\ \left(\frac{dS_{\Pi l}}{dx}\right)_{x=x_{cr}} &= \left(\frac{dS_{\Pi}'}{dx}\right)_{x=x_{cr}} \\ \left(\frac{dS_{\Pi}'}{dx}\right)_{x=x_{-cr}} &= \left(\frac{dS_{\Pi r}}{dx}\right)_{x=x_{-cr}} \end{aligned} \right\}$$

ただし、 x_{cr} と x_{-cr} は次の N が前の式 (3.14) を満たす値である。

$$\begin{aligned} x_{cr} : N &= b \left(\int_0^{x_e} \tau_{\max} dx + \int_{x_e}^{x_{cr}} \xi S_{\Pi l} dx \right) \\ &= b \left(\tau_{\max} \cdot x_e + \xi \int_{x_e}^{x_{cr}} S_{\Pi l} dx \right) \end{aligned}$$

$$x_{-cr} : N = b \xi \int_l^{x_{-cr}} S_{\Pi r} dx$$

図-4(2)-(iii) の場合

未知定数:

$$C_{3l}, C_{4l}, C_3', C_4', C_{3r}, C_{4r}, C_5, C_6$$

境界条件:

$$(\sigma_1)_{x=0, l} = (\sigma_2)_{x=0, l} = 0 \text{ かつ}$$

$$\left(\frac{dS_{\Pi l}}{dx}\right)_{x=0} = \left(\frac{dS_{\Pi}}{dx}\right)_{x=l} = 0$$

連続条件:

$$(S_{\Pi l})_{x=x_{cr}} = (S_{\Pi}')_{x=x_{cr}},$$

$$(S_{\Pi}')_{x=x_{-cr}} = (S_{\Pi r})_{x=x_{-cr}},$$

$$(S_{\Pi r})_{x=x_e} = (S_{\Pi})_{x=x_e} = -S_e$$

$$\left(\frac{dS_{\Pi l}}{dx}\right)_{x=x_{cr}} = \left(\frac{dS_{\Pi}'}{dx}\right)_{x=x_{cr}}$$

$$\left(\frac{dS_{\Pi}'}{dx}\right)_{x=x_{-cr}} = \left(\frac{dS_{\Pi r}}{dx}\right)_{x=x_{-cr}}$$

$$\left(\frac{dS_{\Pi r}}{dx}\right)_{x=x_e} = \left(\frac{dS_{\Pi}}{dx}\right)_{x=x_e}$$

... (3.16)

ただし、 x_{cr} と x_{-cr} は次の N が前の式 (3.14) を満たす値である。

$$x_{cr} : N = b \xi \int_0^{x_{cr}} S_{\Pi l} dx$$

$$\begin{aligned} x_{-cr} : N &= b \left(\int_l^{x_{-cr}} (-\tau_{\max}) dx + \int_{x_{-cr}}^{x_e} \xi S_{\Pi r} dx \right) \\ &= b \left(\tau_{\max} (l - x_{-cr}) + \xi \int_{x_{-cr}}^{x_e} S_{\Pi r} dx \right) \end{aligned}$$

図-4(2)-(iv) の場合

未知定数:

$$C_1, C_2, C_{3l}, C_{4l}, C_3', C_4', C_{3r}, C_{4r}, C_5, C_6$$

境界条件:

$$(\sigma_1)_{x=0, l} = (\sigma_2)_{x=0, l} = 0 \text{ かつ}$$

$$\left(\frac{dS_{\Pi}}{dx}\right)_{x=0} = \left(\frac{dS_{\Pi}}{dx}\right)_{x=l} = 0$$

連続条件:

$$(S_{\Pi})_{x=x_e} = (S_{\Pi})_{x=x_e} = S_e,$$

$$(S_{\Pi l})_{x=x_{cr}} = (S_{\Pi}')_{x=x_{cr}},$$

$$\left. \begin{aligned} (S_{\Pi}')_{x=x_{cr}} &= (S_{\Pi r})_{x=x_{-cr}}, \\ (S_{\Pi r})_{x=x_e} &= (S_{\Pi})_{x=x_e} = -S_e \\ \left(\frac{dS_{\Pi}}{dx}\right)_{x=x_e} &= \left(\frac{dS_{\Pi l}}{dx}\right)_{x=x_e} \\ \left(\frac{dS_{\Pi r}}{dx}\right)_{x=x_{cr}} &= \left(\frac{dS_{\Pi}'}{dx}\right)_{x=x_{cr}} \\ \left(\frac{dS_{\Pi}'}{dx}\right)_{x=x_{-cr}} &= \left(\frac{dS_{\Pi r}}{dx}\right)_{x=x_{-cr}} \\ \left(\frac{dS_{\Pi r}}{dx}\right)_{x=x_e} &= \left(\frac{dS_{\Pi}}{dx}\right)_{x=x_e} \end{aligned} \right\}$$

..... (3.17)

ただし、 x_{cr} と x_{-cr} は次の N が前の式 (3.14) を満たす値である。

$$\begin{aligned} x_{cr} : N &= b \left(\int_0^{x_e} \tau_{\max} dx + \int_{x_e}^{x_{cr}} \xi S_{\Pi l} dx \right) \\ &= b \left(\tau_{\max} \cdot x_e + \xi \int_{x_e}^{x_{cr}} S_{\Pi l} dx \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_{-cr} : N &= b \left(\int_l^{x_{-cr}} (-\tau_{\max}) dx + \int_{x_{-cr}}^{x_e} \xi S_{\Pi r} dx \right) \\ &= b \left(\tau_{\max} (l - x_{-cr}) + \xi \int_{x_{-cr}}^{x_e} S_{\Pi r} dx \right) \end{aligned}$$

以下の図-4(2)-(v), (vi), (vii) の場合も上記の図-4(2)-(i)~(iv) の場合と同様に求めることができるので、ここでは省略する。

b) 等分布荷重の場合

スパン l の単純ばりに等分布荷重 q が作用した時は、

$$M = \frac{qx}{2} (l-x), \quad Q = q(l/2-x) \dots \dots \dots (3.18)$$

この場合はスパン中央 $x=l/2$ に関して左右対称であるから $x=0 \sim l/2$ のみで考えればよく、式 (1.9) または (1.22) の一般解は、

$$0 \leq S \leq S_e : S_{\Pi} = C_3 e^{\sqrt{B\xi}x} + C_4 e^{-\sqrt{B\xi}x} \quad (\tau = \xi S)$$

$$+ \frac{A \cdot q}{B \cdot \xi} \left(\frac{l}{2} - x \right)$$

$$\begin{aligned} S_{\Pi}' &= C_3' e^{\sqrt{B\xi}x} + C_4' e^{-\sqrt{B\xi}x} \\ &+ \frac{A' \cdot q}{B' \cdot \xi} \left(\frac{l}{2} - x \right) \end{aligned}$$

$$S_e < S : S_I = \frac{B \cdot \tau_{\max}}{2} x^2 - A \cdot q$$

($\tau = \tau_{\max}$)

$$\cdot \left(\frac{l}{4} x^2 - \frac{x^3}{6} \right) + C_1 x + C_2$$

$$S_I' = \frac{B' \cdot \tau_{\max}}{2} \cdot x^2 - A' \cdot q$$

$$\cdot \left(\frac{l}{4} x^2 - \frac{x^3}{6} \right) + C_1' x + C_2'$$

..... (3.19)

各場合の解法は前記の集中荷重の場合と同様にできる。なお、a) 集中荷重および b) 等分布荷重のいずれれ

も、以上のように S が計算できると、せん断応力 τ は式 (2.1) から求める。

また、日本道路協会 P C 道路橋示方書¹⁾や ACI Building Code²⁾では打継面のせん断応力は、許容せん断応力内ではずれが発生しないかきわめて小さいので、それを無視して次式から計算して良いとしている。

$$\tau = G \cdot Q / I \cdot b \dots\dots\dots (3.20)$$

G : 打継面の外側部分の等価換算断面の合成断面
図心軸に関する断面 1 次モーメント

I : 合成断面の図心軸に関する断面 2 次モーメント

b : 打継面における新旧コンクリートの附着面の幅

3. 実験結果との比較

以下に前記の理論式から合成桁の打継面におけるずれ量とせん断応力を求め、実験値と比較した結果を述べる。

(1) 試験桁の種類

試験桁はスパンの中央に対称な 2 点または 3 点載荷を受ける T 形断面の合成桁で、その寸法と桁の諸特性をそれぞれ図-5、表-1 に示す。その概略は次のようである。

表-1 試験桁の種類 (各種類につき 1 本)

(1) 筆者の試験桁

桁の種類 ^{*1)}	プレキャスト部				打継部		打継面		打継面の τ - S ^{*2)}	
	圧縮強度 (kg/cm ²)	曲げ強度 (kg/cm ²)	弾性係数 (kg/cm ²)	プレストレス (kg/cm ²)	圧縮強度 (kg/cm ²)	弾性係数 (kg/cm ²)	処 理	シアークォンクター筋比 p_s (%)	τ_{max} (kg/cm ²)	S_e ($\times 10^{-3}$ mm)
T-HH'-I-5-2.0	464	45	3.57 $\times 10^5$	上線: 0 下線: 100	208	2.42 $\times 10^5$	粗 (レイタンス除去)	0	49	30
T-HL'-I-5-2.0	464	45	3.57	"	200	1.55	"	"	35	15
H-1	591	77	3.54	上線: 0 下線: 90	483	3.35	"	"	65	25
L-1	569	70	3.47	"	406	1.50	"	"	53	30
H-2	591	77	3.54	"	483	3.35	"	"	62	30
L-2	569	70	3.47	"	406	1.50	"	"	45	30

*1) T-HL'-I-5-2.0, L-1, L-2 は打継部が軽量コンクリートで、最初桁と後 2 者は配合と軽量骨材の種類が異なる。

*2) 桁の載荷試験から求めたもの (本文の 2 章 (2)、図-3(1) 参照)

(2) N.W. Hanson の試験桁

桁の種類	プレキャスト部				打継部		打継面		打継面の τ - S ^{*2)}	
	圧縮強度 (kg/cm ²)	曲げ強度 (kg/cm ²)	弾性係数 ^{*1)} (kg/cm ²)	プレストレス (kg/cm ²)	圧縮強度 (kg/cm ²)	弾性係数 ^{*1)} (kg/cm ²)	処 理	シアークォンクター筋比 p_s (%)	τ_{max} (kg/cm ²)	S_e ($\times 10^{-3}$ mm)
BR-I	294	—	2.6 $\times 10^5$	—	222	2.3 $\times 10^5$	粗 (新旧コンクリート附着有)	0	33	40
BRS-I	314	—	2.7	—	218	2.3	粗 (新旧コンクリート附着有)	0.46	49	60
RS-I	290	—	2.6	—	144	1.8	粗 (新旧コンクリート附着無)	"	35	100
BS-I	327	—	2.7	—	210	2.2	滑 (新旧コンクリート附着有)	"	23	30
BRS-II	345	—	3.0	—	175	2.1	粗 (新旧コンクリート附着有)	0.34	46	60
RS-II	328	—	2.7	—	219	2.2	粗 (新旧コンクリート附着無)	"	31	100
BS-II	337	—	2.8	—	246	2.4	滑 (新旧コンクリート附着有)	"	19	20

*1) 圧縮強度から、ACI 式 $E = 4310 \rho^{1.5} \sqrt{f_c}$ から推定したもの、ただし ρ : コンクリート重量 (t/m³)、 f_c : 圧縮強度 (kg/cm²)

*2) 合成桁と同一打継面状態の押抜き試験から求めたもの (図-3(2), (3) 参照)

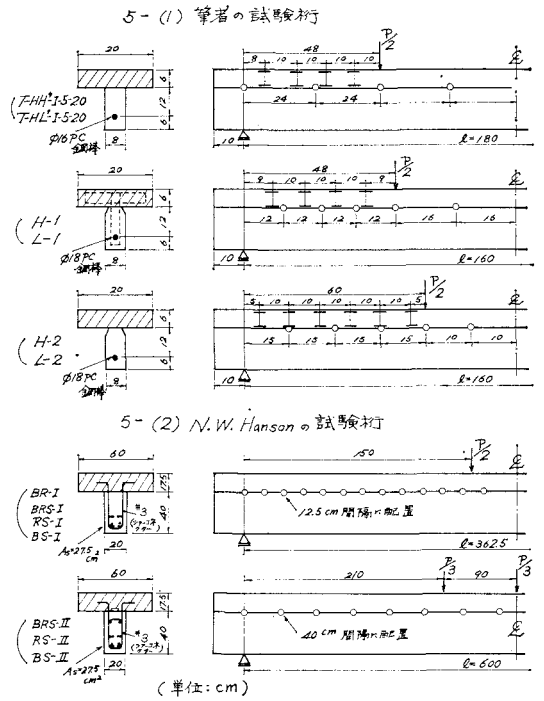


図-5 試験桁の断面と載荷試験の概要

測定項目 (○) ロボット測定用ベアリング
すべり測定用タイラップ
ただし、斜線部は打継部と示す

る。

a) 筆者の試験桁

ここでは打継面が粗で(粗骨材をその最大寸法 15 mm の 1/2 程度露出させて凹凸を設け、レイトンス除去)、シアーコネクタ筋の無い図-5(1), 表-1(1) の 6 種類の桁についての結果を次章(2)に示した。これらは打継面でずれ破壊を起こすように、(T-HH'-I-5-2.0, T-HL'-I-5-2.0 桁)⁷⁾ は打継面でウェブ幅の両側 1/4 はグラインダーで平滑にした上にグリスを塗布し、さらに布テープを挟むことにより、また(H-1, L-1, H-2, L-2 桁)は打継面でウェブの幅を狭くする(8 cm→5 cm) ことによって新旧コンクリート間の付着面積を減じた。なお、プレキャスト部(ウェブ)はいずれも普通コンクリートであるが、桁の記号で“L”のついているものは軽量コンクリートを打継いだものである。

打継面に作用するせん断応力とずれ量の測定方法は、2.(2)で述べたとおりである。

一方、計算は式(2.1)の τ - S 関係を用い (τ_{max} , S_e : 表-1(1)), スパンに曲げひびわれがない区間とある区間に対して微分方程式(1.9), (1.22)を併用した 2.(3)③の方法で行なった。

以上の他に 図-5(1)の H-1 桁とコンクリートの配合・断面・載荷方法は同一で、打継面が粗または平滑で打継全面積の 0.24, 0.48%のシアーコネクタ筋($\phi 6$ 丸鋼, H-1 桁の断面に点線で示す形状のもの)を配置した桁および平滑でそれのない桁の試験も実施した。それらの打継面で実測した τ - S 関係は 2.(2)で述べた 図-3(1)-(ii) (iii)である。実測した最大ずれ量が 20×10^{-3} mm 程度ときわめて小さい値で突発的なずれ破壊の生じた平滑でシアーコネクタ筋もない桁を除くと、3.(2)で結果を述べる前記の 6 種類の桁と同様に式(2.1)の τ - S 関係を適用して計算できるのでここでは省略した。

b) Hanson の試験桁

Hanson 氏が実施されたも

の⁸⁾は 図-5(2), 表-1(2)で、打継面の処理方法と打継全面積に対するシアーコネクタ筋量の割合を同一とした押抜き試験の結果(2.(2)の 図-3(2))と合成桁の結果(スパン上のずれ量の分布(BRS-II桁のみ)、荷重~最大ずれ量)が同時に対応して報告されている。そこで、押抜き試験から得られた τ - S 関係を用い、本理論式を適用した場合の例として引用させて頂いた。

各桁の打継面の状態は表-1(2)に示すが、BRS-II, RS-II, BS-II 桁は 図-5(2)のように打継面にはウェブ幅の 1/2 の空洞を設けて付着面積が減ぜられている。

なお、同文献(5)では主筋の位置、プレストレス量、コンクリートの曲げ強度が不明であるので、ここでは曲げひびわれを考えない 2.(3)①の場合について計算した。

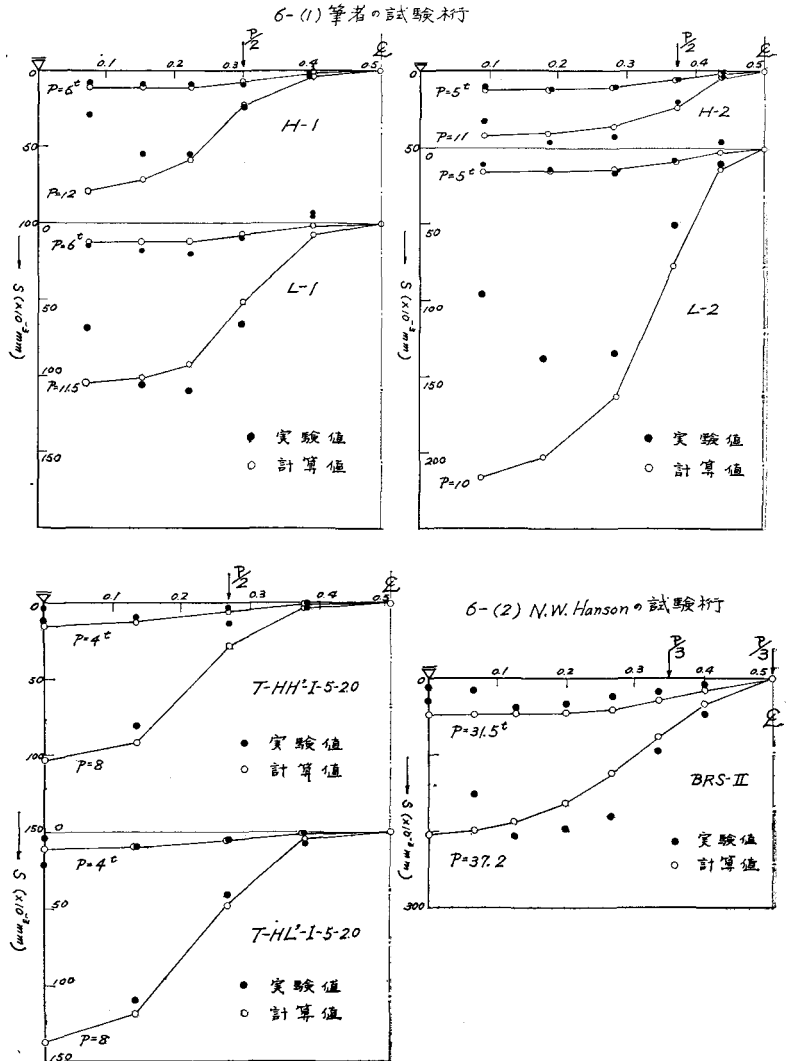


図-6 スパン上のずれ量の分布

(2) 結 果

スパン上のずれ量の分布，荷重～最大ずれ量，せん断スパンにおける打継面のせん断応力の分布，荷重～せん断スパン内における打継面の平均せん断応力の関係を図-6～図-9に示す。

ただし，図-7の最大ずれ量とは各位置での測定値のうちの最大値で，筆者の実験桁ではせん断スパンの中央におけるもの，Hansonの桁では支点から $0.25 \times l$ (l : スパン)の位置におけるものであり，計算値もそれらの位置に対するものである。また，図-9の打継面の平均せん断応力は，せん断スパン内で10cm区間ごとに求めた各区間のせん断応力の平均をとったもので(せん断スパン内の，T-HH'-I-5-2.0, T-HL'-I-5-2.0, H-1, L-1: 30cm間, H-2, L-2: 50cm間に対する平均値)

で，計算値もこの間の平均応力で表わした。

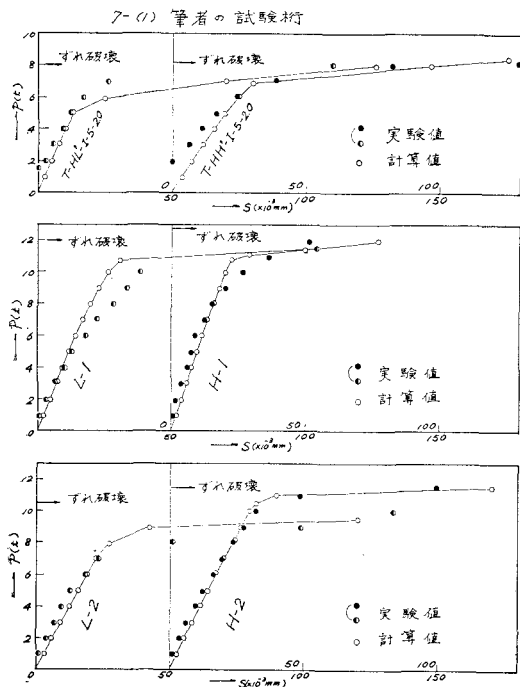
なお，試験桁は各種類につき1本で，ずれ量とせん断応力の実験値は左右スパンの平均値で示した。

計算ではフーリエ展開は収束性を考えて20項目までとした。

(3) 考 察

a) ずれ量

図-6に示すスパン上のずれ量の分布から，支点およびその近くを除く領域でのずれ量分布は本理論式によってある程度定量的に求めるようである。しかしHansonおよび筆者の実験桁ともに支点とその近くでは実験値が小さく，計算値とかなりの差が認められる。乙藤⁶⁾，Saemann⁸⁾らの実験でも支点付近でずれ量が著しく小さくなるのが報告されている。この主な原因として支点



7-(3) 最大ずれ量とスパン中央のたわみの関係 (筆者の実験した H-1 桁に対するもの)

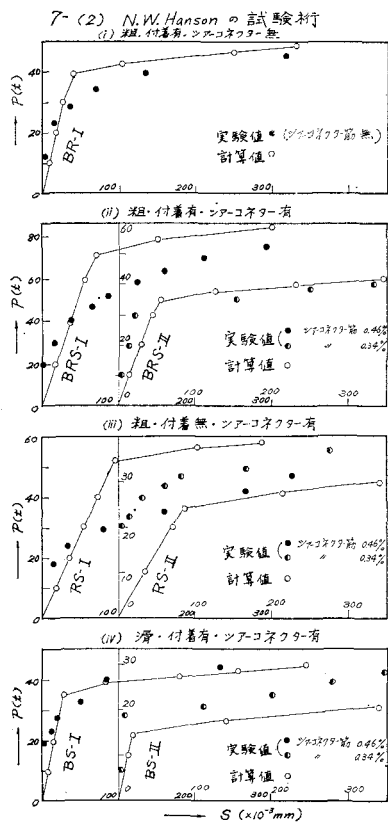
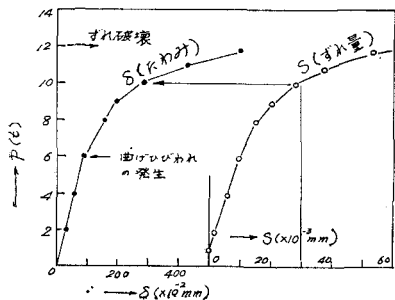


図-7 荷重 (P)～最大ずれ量 (S)

反力による打継面に直角な圧縮応力の影響が指摘されているが、これを加味した本理論式の改良については今後検討したい。

合成桁の一体性を判断する一つの決め手としては、スパン上のずれ量のうち、その最大のものが問題になると考えられる。乙藤ら⁹⁾は最大のずれ量が $50 \times 10^{-3} \text{mm}$ になると、不完全合成作用が著しく、一体はりの剛性から重ねはりの剛性に变化してゆき、この点を境にたわみが増大することを明らかにしている。筆者の一例は図-7(3) のようで、最大ずれ量とたわみは密接に関係し、 $30 \times 10^{-3} \text{mm}$ 程度でたわみの増大すなわち不完全合成作用が著しくなっている ($P=6 \text{t}$ でたわみが増加しているのは曲げひびわれが発生したためである)。最大ずれ量の生ずる位置はせん断スパン (支点とそれに最も近い載荷点間) の中央もしくはやや載荷点偏りと考えられる。図-7 は最大ずれ量を調べたものである。

それによると、大胆な近似ではあるが式 (2.1) の τ - S 関係を仮定することによって、荷重の増加に伴う最大ずれ量の変化の様子を比較的良く説明しうるのである。同図のように荷重が小さい場合、概して実験値が計算値より小さいのは、実際の τ - S 曲線は原点 $(\tau, S) = (0, 0)$ を通らないが、ここではできるだけ簡単でしかもずれの大きい領域まで適合するように原点を通る 1 本の折線式 (2.1) を仮定したためである。

また、合成桁では打継面に直角な圧縮応力の作用する領域が存在するので、図-3(3) に示す押抜き試験体と打継面の応力状態は、厳密には同一ではないと考えられる。しかし、押抜き試験から求められた τ - S 関係を本理論式に用いて計算した図-6(2)、図-7(2) の合成桁のずれ量分布と最大ずれ量に関しては実験値とバラツキもあるが、合成桁の傾向を良く示していると思われる。

また乙藤ら⁹⁾も押抜き試験は合成桁の打継面の強度と性質を調べる有力なせん断試験であることを認めており、前記のように合成桁のたわみはずれ量が $50 \times 10^{-3} \text{mm}$ を越えると急激に変化したが、押抜き試験でもずれが $50 \times 10^{-3} \text{mm}$ で荷重～ずれ量の関係の変化が急激になったと報告している。

b) 打継面のせん断応力

図-8 は、せん断スパン内における打継面のせん断応力の分布の 1 例を H-2、L-2 桁に対して示したものである。

同図から、実験値は曲げひびわれがせん断スパン内にも発生する荷重域 ($P > 8 \text{t}$) では、その影響を受け均一分布を示さず、せん断スパンの中央～載荷点間で大きくなる傾向が認められる。一方、曲げひびわれの有無に応じて微分方程式 (1.9) と (1.22) を併用した計算値は実験値の傾向を大略示しているようである。

一方、図-9 は荷重の増大に伴うせん断スパンの平均せん断応力の変化の様子を示したものである。同図にはずれを無視し、完全に一体であると仮定した時の式 (3.20) の計算値も併記した。ただし、式 (3.20) では合成桁の全断面を有効とした。同図から、以下のことがいえよう。

ずれが存在してもその量が小さく、式 (2.1) で $S \leq$

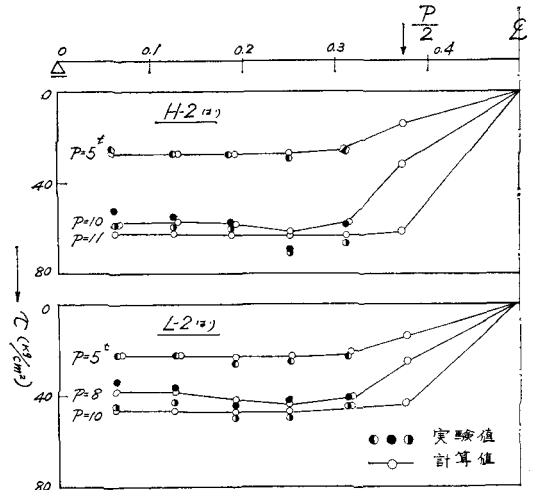


図-8 打継面のせん断応力の分布

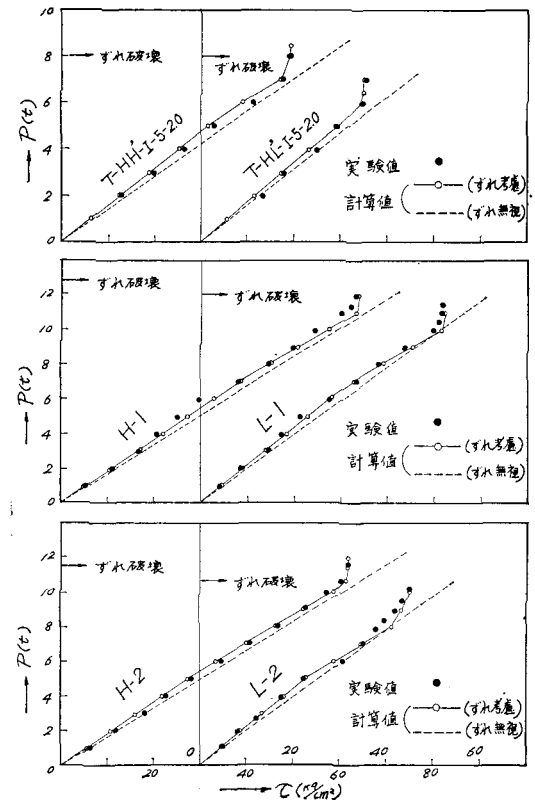


図-9 荷重 (P)～せん断スパンの平均せん断応力 (τ)

$S_e(\tau=\xi S)$ の成立つ荷重域 (図-7(1) の最大ずれ量から, T-HH'-I-5-2.0 : $P < 7$ t, T-HL'-I-5-2.0 : $P < 6$ t, H-1 : $P < 10$ t, L-1 : $P < 10$ t, H-2 : $P < 10$ t, L-2 : $P < 8$ t) では, ずれを考慮した本理論式と無視した式 (3.20) 間での差は比較的少なく, 後者の式でも普通コンクリートおよび軽量コンクリートを打継いだ場合ともに実験値とかなり良く一致していると考えられる。このことは, 許容せん断応力¹⁾ (打継面が粗な時 10 kg/cm², 滑な時 5 kg/cm²) がかなり小さく採られずれがほとんど存在しないと考えられる実際の設計上を対象とする場合はもちろんのこと, ずれが存在しても $S \leq S_e$ の荷重域までは式 (3.20) は実用上, 十分な精度を有していることを示している。

なお, 打継面にグリス, シリコン, 石けん液等を塗って付着を無くした実際的でない場合を除くと, 上記のずれ量 S_e は次のように考えられるであろう。一般にプレキャスト桁に使用されるコンクリートの圧縮強度は 400 kg/cm² 程度より大きく, 打継部はそれと同等以下であるが, 図-3(1) によると打継部が 400 kg/cm² 以上の時は $S_e = 30 \times 10^{-3}$ mm, 図-3(2) から 200 kg/cm² の時は $(20 \sim 60) \times 10^{-3}$ mm の範囲にあって平均すると $S_e = 40 \times 10^{-3}$ mm となるであろう。さらに, 前記の乙藤ら⁹⁾ の結果ではその強度が $(250 \sim 350)$ kg/cm² のものについてはずれが 50×10^{-3} mm になると不完全合成作用が顕著になることから, $S_e = 50 \times 10^{-3}$ mm と考えられよう。このように, S_e は打継部コンクリートの強度で変化するようで, 400 kg/cm² 以下の時は $S_e = (40 \sim 50) \times 10^{-3}$ mm, それ以上の時は $S_e = 30 \times 10^{-3}$ mm 程度ではないかと考えられる。ただし, 本試験の結果に限ってみると, 軽量コンクリートを打継いだ時の S_e も上記の値と差がないようである。

一方, ずれの量が S_e を越えて, ずれの増大が急激になり始めてからずれ破壊 (打継面の付着破壊) に至るまでの荷重域では, 図-9 のように荷重の増大に対するせん断応力の増加はそれ以前の荷重域に較べてかなり小さくなり, 不完全合成作用の著しいことがわかる。この荷重域では, ずれを無視した式 (3.20) による計算値は実験値より相当に大きくなり, とくにずれ破壊に近い状態になると普通コンクリート, 軽量コンクリートを打継いだ場合ともにその計算式は 15% 程度大きいせん断応力を見積ることになる。

したがって, S_e 以上の荷重域になるとずれを無視しえないことが明らかである。従来, ずれ破壊時のせん断応力, すなわち打継面の終局せん断応力を求める場合にも, ずれを無視した式 (3.20) を準用しているが, 上の結果から判断するとこの場合は実際のせん断応力を正しく示していないと思われる。図-9 に示す本試験の結果

によると, 打継面の実際の終局せん断応力は, 式 (3.20) による計算値の 0.85 倍程度とするのが適当であろう。なお, この係数についてはさらに多くの試験条件下で検討する必要がある。

図-9 から基礎式 (1.9) と (1.22) を併用した理論式は, ずれのきわめて小さい荷重域から大きな荷重域までのせん断応力の変化を説明する一つの手掛りを与えるものである。

本試験では軽量コンクリートを打継いだ合成桁についても検討したが, 図-9 からこの場合の終局せん断強度は普通コンクリートを打継いだ時の 80% 程度と考えられた。したがって軽量コンクリートを床版に打継いだ合成桁の打継面の設計は, 許容せん断応力を普通コンクリートに対する場合のたとえば 80% に採るのが適当ではないかと考えられた。

4. 結 語

ここではずれの大きい領域までを含めて, 合成桁の打継面のずれ量とせん断応力を計算する方法を述べ, 試験結果と比較検討した。適用した試験桁の種類と本数が少なく十分とは言えないが, 得られた結果を要約すると,

1) 打継面が平滑でシアコネクター筋もない場合を除くと, 打継面の τ - S 関係は, 大胆ではあるがずれの大きい領域も含めて, $\tau = \xi S (S \leq S_e)$, $\tau = \tau_{\max} (S > S_e)$ で近似できよう。ただし, S_e は打継ぎコンクリートの圧縮強度が 400 kg/cm² 以下の時は $(40 \sim 50) \times 10^{-3}$ mm それ以上の時は 30×10^{-3} mm 程度と考えられた。

2) 上の仮定に立ち, 本理論式で計算したスパン上のずれ量分布は支点とそれに近い位置では一致しないが, それ以外では実験値と比較的良好一致すること, 特にせん断スパンの中央付近に生ずる最大ずれ量に関しては荷重の変化に伴う挙動をかなり説明できるようである。

3) せん断スパン内における打継面のせん断応力の分布は, 曲げひびわれの有無も考慮に入れた本理論式の計算値に大略近いようである。

4) せん断スパン内の平均せん断応力に関しては, (イ) ずれが存在しても $S \leq S_e$ の荷重域ではそれを無視した計算式 (3.20) を用いて実用上十分であり, 許容せん断応力が小さく採られている実際の設計を対象とする場合はもちろんこの範囲にあること, (ロ) それ以上の荷重域になると荷重の増加に対するせん断応力の増加が小さくなり, 式 (3.20) は実験値より大きな応力を与える。したがってこの荷重域ではずれを無視しえないと考えられ, それを考慮した本理論式は 1 つの手掛りとなるであろう。このことから, ずれ破壊時の打継面の終局せん断強度を求めるのに, 従来のように式 (3.20) を準用

することには問題が残り、その計算値の 0.85 倍程度が実際の終局せん断強度と考えられた。なお、この係数はさらに多くの試験で検討する必要がある。

(付)本文中に説明のない記号(添字“1”：打継部,
“2”：プレキャスト部を示す)

b_1, b_2 : 各部の断面の幅

b : 両部の接触面(付着面)の幅

h_1, h_2 : 各部の高さ

h : 両部の図心軸間の距離

y_{1T}, y_{1B} : 打継部の図心軸からその部の上縁, 下縁までの距離

y_{2T}, y_{2B} : プレキャスト部の図心軸からその部の上縁, 下縁までの距離

A_1, A_2 : 各部の断面積

I_1, I_2 : 各部のそれぞれの図心軸に関する断面 2 次モーメント

E_1, E_2 : 各部のコンクリートの弾性係数

E_s : 主筋の弾性係数

参 考 文 献

- 1) 日本道路協会プレストレストコンクリート道路橋示方書: 第 12 章合成げた橋, 12. 6 ずれ止めの設計, pp. 123~124.
- 2) ACI Building Code (ACI 318-63) : "Chapter 25-Composite Concrete Flexural Construction, 2505-Shear Connection"
- 3) 山本 稔: 不完全合成桁の曲げ理論, 土木学会論文集, 第 67 号, pp. 1~10, 1960 年 3 月.
- 4) 小林和夫: コンクリート合成ばりの不完全合成挙動に関する考察, セメント技術年報 XXV, pp. 388~393, 1972.
- 5) Hanson, N.W. : Precast-Prestressed Concrete Bridges 2 Horizontal Shear Connections, J. of the PCA Research and Development Laboratories, Vol. 2, No. 2, pp. 38~58, May. 1960.
- 6) 乙藤・笹戸・浜本・御子柴・大西: コンクリート合成桁の接合面に関する研究, プレストレストコンクリート, Vol. 9, pp. 8~18, Apr. 1967.
- 7) 岡田・小林・吉岡: 軽量コンクリートを打ち継いだ PC 合成ばりの設計に関する研究, 材料 Vol. 18, No. 185, pp. 108~114, Feb. 1969.
- 8) Saemann, J.C. Washa, C.W. : Horizontal Shear Connections Between Precast Beams and Cast-in-place Slabs, J. of the ACI, pp. 1383~1408, Nov. 1964.

(1972. 5.22・受付)