

接着合成PC桁および接着合成桁の二、三の性質について

見 沢 繁 光*
重 松 恒 美**

1. ま え が き

近年道路橋床版で設計荷重以上の載荷や老朽化により補強もしくは架け換えを必要とされている橋は非常に多く、重大な問題となってきている。そのためその対策を経済的かつ安全に実行しうる工法を早急に開発する必要にせまられている。その対策の一つとしてエポキシ樹脂接着剤のような高分子材料が橋の補強に利用されてきている。エポキシ樹脂接着剤は、液状のエポキシ樹脂と硬化剤をブレンドすることにより、化学反応を起して硬化する。その可使時間は早いもので数分、遅いものでも数時間であり、それ以後では作業性はほとんどなく、使用材料の性能に応じて数時間から数日の養生が必要とされる。このことは短時間の加熱養生でも高い接着強度が得られることを示している。この性質を利用してコンクリート床版の底部に接着剤を塗布し、それに鉄板などを貼り付け、引張縁を補強して負荷能力を増大せしめている施工例を見ることが出来る。

しかしながらこの方法は 1) たわみ量の増加を防ぎ、2) 載荷能力の低下を防ぐなどの利点は有するが、載荷能力を増大させることはできない。

本研究は、コンクリート桁の底部にエポキシモルタルを接着剤により貼り付け、エポキシモルタル内に導入したプレストレス力をエポキシモルタルで維持させ、その維持した力を、接着剤を介してコンクリート桁にプレストレス力を伝達させる方式である。この方法によると、短期間の施工が可能となり、現行示方書による設計荷重に基づいて設計された道路橋（以前の示方書によるものも含める）の荷重の増大、橋の経年による耐力の低下等に十分対応できるものと考えられる。

上述の接着合成PC桁は著者らの実験結果によると曲げ破壊強度は同一形状のPC桁（コンクリート桁のみ）の3ないし4倍程度の強度を有することが実験的に確かめられている†。

一般に、鋼とコンクリートからなる合成桁は、鋼桁とコンクリート床版を特別な部材（ジベルなど）を用いてせん断力に抵抗し得るよう結合されており、鋼桁とコンクリート版の一体化により、共同作業が可能となる構造物である。一方著者らが考えた合成桁は、接着面に特別な部材を用いず、接着剤のみにより合成させている。したがって、この合成桁では剛な結合と異なりコンクリート桁とエポキシモルタル、鋼桁とコンクリート版の間にずれが生じると考えられる。それ故今回の主な課題として、このずれによる軸力の減少、それに伴う部分モーメントの変化、縁応力の変化を剛合成と比較し、接着合成プレストレスコンクリート桁および接着合成桁の剛合成（ずれなし）と弾性合成（ずれ有）理論の適合性を取り上げ、理論的、実験的に解析究明した。

(1) 記号の説明 I

（コンクリート桁とエポキシモルタルの合成桁）

E_b : コンクリートのヤング係数 (kg/cm²)

E_e : エポキシモルタルのヤング係数 (kg/cm²)

$n = E_b/E_e$: エポキシモルタルとコンクリートのヤング係数の比

F_b : コンクリート桁の断面積 (cm²)

F_e : エポキシモルタルの断面積 (cm²)

F_i : 合成桁の換算断面積 (cm²)

I_b : コンクリート桁断面のその重心軸に関する断面2次モーメント (cm⁴)

I_e : エポキシモルタル断面のその重心軸に関する断面2次モーメント (cm⁴)

I_i : 合成断面の換算断面2次モーメント (cm⁴)

a : コンクリート桁重心とエポキシモルタル重心との距離 (cm)

a_b : 合成断面の重心からコンクリート桁断面の重心までの距離 (cm)

a_e : 合成断面の重心からエポキシモルタル断面の重心までの距離 (cm)

P : 合成断面に作用するプレストレス力 (kg)

M : 合成断面に作用する曲げモーメント (kg-cm)

* 愛媛大学工学部土木工学科

** 呉工業高等専門学校土木工学科

† 未発表、見沢・重松：接着合成PC桁に関する中間報告書

- M_b : コンクリート桁に働く曲げモーメント (kg·cm)
- M_e : エポキシモルタルに働く曲げモーメント (kg·cm)
- D_b : コンクリート桁断面に作用する軸力 (kg)
- D_e : エポキシモルタル断面に作用する軸力 (kg)
- T : コンクリート桁とエポキシモルタルとの間の接触面に作用するせん断力 (kg/cm)
- ϵ_b : コンクリート桁の直ひずみ
- ϵ_e : エポキシモルタルの直ひずみ
- σ_b : コンクリート桁の直応力 (kg/cm²)
- σ_e : エポキシモルタルの直応力 (kg/cm²)
- C_1 : コンクリート桁とエポキシモルタルとの間の接触面のばね定数 (kg/cm²)
- δ : 弾性ずれ量 (mm)

(2) 記号の説明 II

(鋼桁とコンクリート版の合成桁)

- E_b : コンクリート版のヤング係数 (kg/cm²)
- E_{st} : 鋼桁のヤング係数 (kg/cm²)
- $n = E_{st}/E_b$: コンクリート版と鋼桁のヤング係数比
- F_b : コンクリート版の断面積 (cm²)
- F_{st} : 鋼桁の断面積 (cm²)
- F_i : 合成桁の換算断面積 (cm²)
- I_b : コンクリート版断面のその重心軸に関する断面 2 次モーメント (cm⁴)
- I_{st} : 鋼桁断面のその重心軸に関する断面 2 次モーメント (cm⁴)
- I_i : 合成断面の換算断面 2 次モーメント (cm⁴)
- a : コンクリート版重心と鋼桁重心との距離 (cm)
- a_b : 合成断面の重心からコンクリート版の重心までの距離 (cm)
- a_{st} : 合成断面の重心から鋼桁重心までの距離 (cm)
- M : 合成断面に作用する曲げモーメント (kg·cm)
- M_b : コンクリート版に作用する曲げモーメント (kg·cm)

- M_{st} : 鋼桁に作用する曲げモーメント (kg·cm)
- D_b : コンクリート版に作用する軸力 (kg)
- D_{st} : 鋼桁に作用する軸力 (kg)
- T : コンクリート版と鋼桁との間の接触面に作用するせん断力 (kg/cm)
- ϵ_b : コンクリート版の直ひずみ
- ϵ_{st} : 鋼桁の直ひずみ
- σ_b : コンクリート版の直応力 (kg/cm²)
- σ_{st} : 鋼桁の直応力 (kg/cm²)
- C_2 : コンクリート版と鋼桁との間の接触面のばね定数 (kg/cm²)
- δ : 弾性ずれ量 (mm)

2. 合成桁の解析

(1) 剛合成による解析 (ずれなし)

合成桁は、普通異なった部材間の接触部分に作用するせん断力を確実に伝達し、同時に両部材になんらずれが生じないことを前提としている。この場合にモーメント M およびプレストレス力 P による曲げ応力、軸力、せん断力はエポキシモルタル断面をコンクリート桁と同じヤング係数の換算断面でおきかえるならば、普通の曲げ理論で計算することができる。

a) モーメント M が働く場合 (図-1 (c))

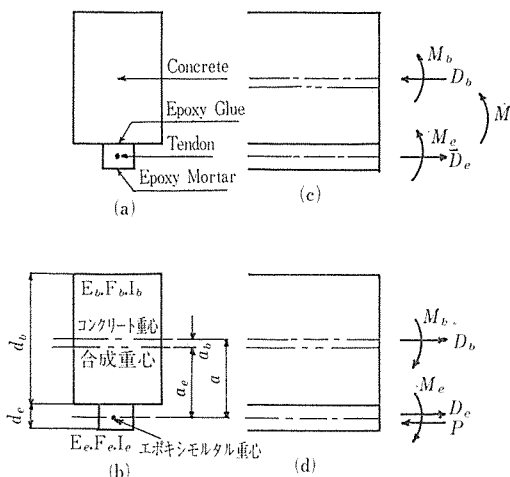


図-1 コンクリートとエポキシモルタルによる合成桁にモーメント M とプレストレス力 P が働く場合

リートとエポキシモルタルのヤング係数を n とすれば

$$n = \frac{E_b}{E_e} \dots \dots \dots (1)$$

コンクリート桁とエポキシモルタルとの合成断面 (図-1 (b)) に対して次の値が与えられる。

換算断面積

$$F_i = F_b + \frac{1}{n} F_e \dots \dots \dots (2)$$

重心距離

$$a_b = \frac{F_e}{n F_i} a, \quad a_e = \frac{F_b}{F_i} a \dots \dots \dots (3)$$

換算断面 2 次モーメント

$$I_i = I_b + F_b a_b^2 + \frac{1}{n} (I_e + F_e a_e^2) \\ = I_b + \frac{1}{n} I_e + F_i a_b a_e \dots \dots \dots (4)$$

合成断面に作用するモーメント M は、軸力 D_b 、 D_e ならびに部分モーメント M_b 、 M_e に分けることができる。

つり合条件より

$$\left. \begin{aligned} -M &= D_b a + M_b + M_e \\ D_b &= D_e = D \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (5)$$

したがって、軸力 D および部分モーメント M_b, M_e の大きさは

$$\left. \begin{aligned} D_b = D_e \equiv D &= \frac{a_b F_b}{I_i} M = \frac{F_e a_e}{n I_i} M \\ M_b &= \frac{I_b}{I_i} M, \quad M_e = \frac{I_e}{n I_i} M \end{aligned} \right\} \dots\dots (6)$$

となり、コンクリート桁上縁、エポキシモルタル下縁に働く直ひずみをそれぞれ $\epsilon_{bu}, \epsilon_{el}$ とすれば

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{bu} &= -\frac{D_b}{E_b F_b} - \frac{M_b}{E_b I_b} \cdot \frac{d_b}{2} \\ \epsilon_{el} &= \frac{D_e}{E_e F_e} + \frac{M_e}{E_e I_e} \cdot \frac{d_e}{2} \end{aligned} \right\} \dots\dots (7)$$

のように表わされ、これよりコンクリート桁上縁応力 σ_{bu} およびエポキシモルタル下縁の応力 σ_{el} も次のように求められる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{bu} &= -\frac{D_b}{F_b} - \frac{M_b}{I_b} \cdot \frac{d_b}{2} \\ \sigma_{el} &= \frac{D_e}{F_e} + \frac{M_e}{I_e} \cdot \frac{d_e}{2} \end{aligned} \right\} \dots\dots (8)$$

また、 $dD/dx = T$ を用いて、コンクリート桁とエポキシモルタルの間の接触面に生ずるせん断力 T を得る。このせん断力は接着剤で受けもたなければならない。同様な方法で鋼桁とコンクリート版についても誘導できる (図-2 (c) 参照)。

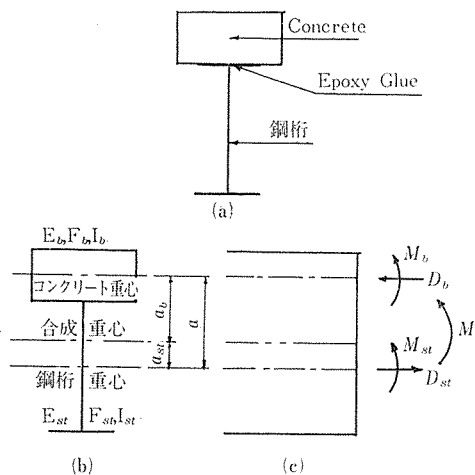


図-2 鋼桁とコンクリートによる合成桁にモーメント M が働く場合

b) プレストレス力 P が働く場合 (図-1 (d)) 同様に、合成断面に偏心量 a_e をもったプレストレス力 P は、軸力 D_b, D_e ならびに部分モーメント M_b, M_e に分けることができる。

つり合条件より

$$\left. \begin{aligned} -D_b \cdot a &= M_b + M_e, \quad -(P - D_e) \cdot a = M_e + M_b \\ D_b &= (P - D_e) \end{aligned} \right\} \dots\dots (9)$$

したがって、軸力 D_b, D_e および部分モーメント $M_b,$

M_e の大きさは、

$$\left. \begin{aligned} -D_b &= \frac{P a_e}{a} \left(\frac{I_b + \frac{1}{n} I_e}{I_i} \right), \quad D_e = P - D_b \\ M_b &= \frac{I_b}{I_i} P \cdot a_e, \quad M_e = \frac{I_e}{n I_i} P \cdot a_e \end{aligned} \right\} \dots\dots (10)$$

となり、コンクリート桁上縁、エポキシ下縁に働く直ひずみ $\epsilon_{bu}, \epsilon_{el}$ は

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{bu} &= +\frac{D_b}{E_b F_b} + \frac{M_b}{E_b I_b} \cdot \frac{d_b}{2} \\ \epsilon_{el} &= +\frac{D_e}{E_e F_e} - \frac{M_e}{E_e I_e} \cdot \frac{d_e}{2} \end{aligned} \right\} \dots\dots (11)$$

のように表わされ、直応力 σ_{bu}, σ_{el} も次のように求められる (図-1 (b) 参照)。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{bu} &= +\frac{D_b}{F_b} + \frac{M_b}{I_b} \cdot \frac{d_b}{2} \\ \sigma_{el} &= +\frac{D_e}{F_e} - \frac{M_e}{I_e} \cdot \frac{d_e}{2} \end{aligned} \right\} \dots\dots (12)$$

また $dD_b/dx = -T$ を用いて、コンクリート桁とエポキシモルタルに働くせん断力 T (kg/cm) が得られる。

上述のプレストレス P による応力とモーメント M による応力を加え合わせるにより、導入時の応力ならびに設計荷重による応力を求めることができる。

(2) 弾性合成による解析 (ずれあり)

(1) でも述べたように合成桁は、普通異なった部材の接触部分に作用するせん断力を確実に伝達し、同時に両部材になんらずれが生じないことを前提としているが、実際には合成桁の場合、種々の形のジベル等を使用したとしても両部材間に厳密にいうならば若干のずれは生じる。したがって、(1) で述べたずれのないということは近似的に満たされているにすぎない。それ故接着剤のようなせん断弾性係数の小さい材料等を使用する場合は、両材料間の接触部分を水平方向のせん断に対する弾性的結合材として取り扱う必要があると考えられる。剛結合に比べて、弾性結合の場合、接触面のせん断抵抗は低下し、断面各部分の軸力は変化する。また部分モーメントの分担も変化する。したがって、ずれの程度の検証には、接触面のせん断力による弾性的結合の割合、いわゆるばね定数 C kg/cm² を考えねばならない。接着剤のばね定数 C は実験的に求めた。

以下この弾性結合のばね定数を C kg/cm² として式を誘導する。位置 x におけるせん断力を $T_{(x)}$ kg/cm とすると、

弾性ずれ

$$\delta_{(x)} = \frac{T_{(x)}}{C} \dots\dots (13)$$

がコンクリート桁とエポキシモルタルの接触面に生ずる。

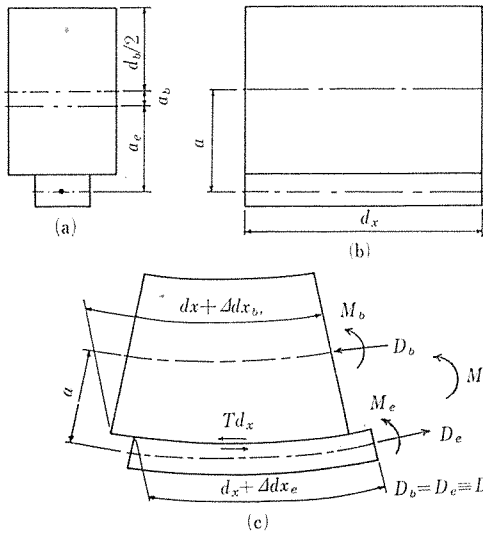


図-3 コンクリートとエポキシモルタルによる合成桁にモーメント \$M\$ が働く場合

a) モーメント \$M\$ が働く場合 (図-3 (a), (b), (c))

1) コンクリート桁とエポキシモルタルによる合成桁：いま、長さ \$dx\$ の桁要素を考えると変形条件は

$$(dx + \Delta dx_e) - (dx + \Delta dx_b) = d\delta = \frac{dT}{C} \dots (14)$$

または

$$\frac{\Delta dx_e}{dx} - \frac{\Delta dx_b}{dx} = \frac{1}{C} \cdot \frac{dT}{dx} \dots (15)$$

となり、接触部分におけるひずみは

コンクリート桁側ひずみ

$$\epsilon_{bl} = \frac{\Delta dx_b}{dx} = -\frac{D_b}{E_b F_b} + \frac{M_b}{E_b I_b} \cdot \frac{d_b}{2} \dots (16)$$

エポキシモルタル側ひずみ

$$\epsilon_{cu} = \frac{\Delta dx_e}{dx} = \frac{D_e}{E_e F_e} - \frac{M_e}{E_e I_e} \left(a - \frac{d_b}{2} \right)$$

曲率はコンクリート桁とエポキシモルタルに対して同じでなければならないから

$$\frac{M_b}{E_b I_b} = \frac{M_e}{E_e I_e} \dots (17)$$

である。そして \$dT/dx = d^2D/dx^2\$ で式 (16) を式 (15) に代入すると次の軸力に関する微分方程式を得た。

$$D \left(\frac{1}{E_b F_b} + \frac{1}{E_e F_e} \right) - \frac{M_e}{E_e I_e} a = \frac{1}{C} \cdot \frac{d^2D}{dx^2} \dots (18)$$

さらにつり合条件、式 (5)

$$M = D \cdot a + M_b + M_e$$

および式 (17) より次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} M_b &= \frac{E_b I_b}{E_b I_b + E_e I_e} (M - D \cdot a) \\ M_e &= \frac{E_e I_e}{E_b I_b + E_e I_e} (M - D \cdot a) \end{aligned} \right\} \dots (19)$$

式 (19) の \$M_e\$ を式 (18) に代入すれば、最終的にモーメント \$M(x)\$ による軸力 \$D\$ の微分方程式を得る。

$$\frac{d^2D}{dx^2} - \omega_1^2 D = -\tau_1 M(x) \dots (20)$$

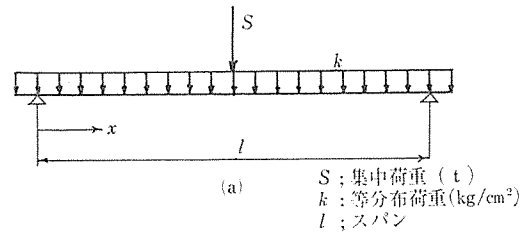
ここで \$\omega_1^2, \tau_1\$ は次のようにおく。

$$\omega_1^2 = C \left(\frac{1}{E_b F_b} + \frac{1}{E_e F_e} + \frac{a^2}{E_b I_b + E_e I_e} \right),$$

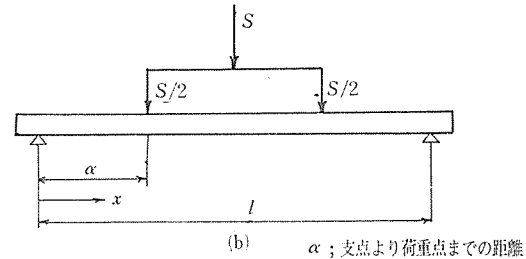
$$\tau_1 = \frac{a}{E_b I_b + E_e I_e} \cdot C$$

外力として、桁の自重、集中荷重を考慮し、上述の軸力に関する微分方程式を解いていく。

合成断面に作用するモーメント \$M(x)\$ は (図-4 (a) 参照)



\$S\$: 集中荷重 (t)
\$k\$: 等分布荷重 (kg/cm²)
\$l\$: スパン



\$\alpha\$: 支点より荷重点までの距離

図-4 荷 荷 状 態

$$M(x) = \frac{S}{2}x + \frac{kl}{2}x - \frac{k}{2}x^2 \left(0 \leq x \leq \frac{l}{2} \right) \dots (21)$$

軸力 \$D\$ の微分方程式は

$$D'' - \omega_1^2 D = -\tau_1 M(x) = -\tau_1 \left(\frac{S}{2}x + \frac{kl}{2}x - \frac{k}{2}x^2 \right) \dots (22)$$

式 (22) の一般解は

$$D = m_1 e^{\omega_1 x} + m_2 e^{-\omega_1 x} + m_3 x^2 + m_4 x + m_5$$

ここで積分定数 \$m_3, m_4, m_5\$ は次のようになる。

$$m_3 = -\frac{\tau_1 k}{2 \omega_1^2}, \quad m_4 = \frac{\tau_1 (S + kl)}{2 \omega_1^2}, \quad m_5 = -\frac{\tau_1 k}{\omega_1^4}$$

これに境界条件 \$D(x=0) = 0, D'(x=l/2) = 0\$ を考慮して解くと、

$$D = \frac{\tau_1 k \cosh \omega_1 \left(\frac{l}{2} - x \right)}{\omega_1^4 \cosh \frac{\omega_1 l}{2}} - \frac{\tau_1 S \sinh \omega_1 x}{2 \omega_1^3 \cosh \frac{\omega_1 l}{2}} - \frac{\tau_1}{\omega_1^2} \left(\frac{k}{2}x^2 - \frac{(S + kl)}{2}x + \frac{k}{\omega_1^2} \right) \left(0 \leq x \leq \frac{l}{2} \right) \dots (23)$$

となり、接触面に働くせん断力 \$T\$ も求めることができる。

$dD/dx=T$ より

$$T = \frac{\tau_1 k \sinh \omega_1 \left(\frac{l}{2} - x \right)}{\omega_1^3 \cosh \frac{\omega_1 l}{2}} - \frac{\tau_1 S \cosh \omega_1 x}{2 \omega_1^2 \cosh \frac{\omega_1 l}{2}} - \frac{\tau_1}{\omega_1^2} \left(kx - \frac{S+kl}{2} \right) \left(0 \leq x \leq \frac{l}{2} \right) \dots\dots\dots (24)$$

となる。この軸力を式 (19) に代入すれば部分モーメント M_b, M_e が得られ、この軸力と部分モーメントを式 (7), (8) に代入すればそれぞれ接触部のひずみ、応力、コンクリート桁上縁、エポキシモルタル下縁のひずみ、応力を求めることができる。これらより軸力の減少による部分モーメントの変化および接触面でのひずみの不連続性、縁応力の変化を計算することができる。

2) 鋼桁とコンクリート版とによる合成桁：モーメント $M(x)$ による鋼桁とコンクリート版の弾性結合の解析も同様に求めることができる。

図-4 (b), 図-5 (a), (b), (c) に示すような2点載荷

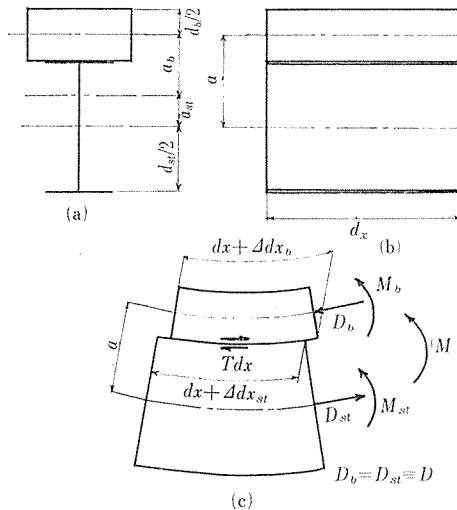


図-5 鋼桁とコンクリートによる合成桁にモーメント M が働く場合

による軸力の微分方程式の解は前述のように得られる。

$0 \leq x \leq \alpha$ での軸力を D_1 とすると、軸力に関する微分方程式は

$$\frac{d^2 D_1}{dx^2} - \omega_2^2 D_1 = -\tau_2 M(x) = -\tau_2 \frac{S}{2} x$$

$\alpha \leq x \leq \frac{l}{2}$ での軸力を D_2 とすると、軸力に関する微分方程式は

$$\frac{d^2 D_2}{dx^2} - \omega_2^2 D_2 = -\tau_2 M(x) = -\tau_2 \frac{S}{2} \alpha$$

となり、 $D_1(x=0)=0, D_2'(x=l/2)=0, D_1(x=\alpha)=D_2(x=\alpha), D_1'(x=\alpha)=D_2'(x=\alpha)$ の4条件より

$$D_1 = \frac{-\frac{\tau_2 S}{2 \omega_2^3} (e^{\omega_2(x-l)} + e^{-\omega_2 x}) \sinh \omega_2 \alpha}{e^{-\omega_2 l} + 1} + \frac{\tau_2 S}{2 \omega_2^2} x \dots\dots\dots (25)$$

$$D_2 = \frac{-\frac{\tau_2 S}{2 \omega_2^3} (e^{\omega_2(x-l)} + e^{-\omega_2 x}) \sinh \omega_2 \alpha}{e^{-\omega_2 l} + 1} + \frac{\tau_2 S}{2 \omega_2^2} \alpha \dots\dots\dots (26)$$

またせん断力は、 $dD_1/dx=T_1, dD_2/dx=T_2$ より

$0 \leq x \leq \alpha$ でのせん断力 T_1 は

$$T_1 = \frac{-\frac{\tau_2 S}{2 \omega_2^2} (e^{\omega_2(\alpha-l)} + e^{-\omega_2 \alpha}) \cosh \omega_2 x}{e^{-\omega_2 l} + 1} + \frac{\tau_2 S}{2 \omega_2^2} \dots\dots\dots (27)$$

$\alpha \leq x \leq \frac{l}{2}$ でのせん断力 T_2 は

$$T_2 = \frac{-\frac{\tau_2 S}{2 \omega_2^2} (e^{\omega_2(x-l)} - e^{-\omega_2 x}) \sinh \omega_2 \alpha}{e^{-\omega_2 l} + 1} \dots\dots\dots (28)$$

ここで $\omega_2^2 = c \left(\frac{1}{E_b F_b} + \frac{1}{E_{st} F_{st}} + \frac{a^2}{E_b I_b + E_{st} I_{st}} \right)$,

$\tau_2 = \frac{a \cdot c}{E_b I_b + E_{st} I_{st}}$ とおく。前と同様な計算を繰り返せば、ひずみ、応力を求めることができる。

b) プレストレス力 P が働く場合 (図-6 参照)

前述のごとく変形条件は

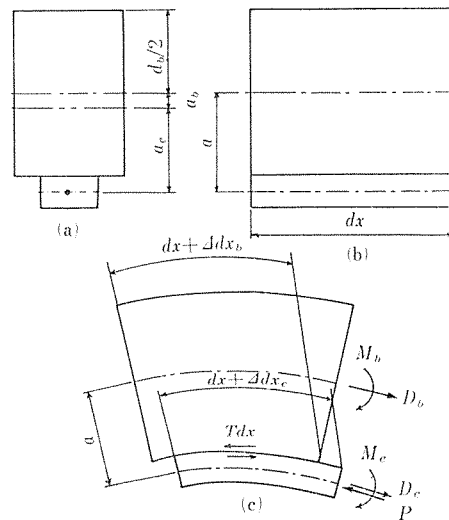


図-6 コンクリートとエポキシモルタルによる合成桁にプレストレス力 P が働く場合

$$\frac{d x_e}{dx} - \frac{d x_b}{dx} = \frac{1}{C} \cdot \frac{d T_b}{dx} = \frac{-1}{C} \cdot \frac{d^2 D_b}{dx^2} \dots\dots\dots (29)$$

となり、接触部分におけるひずみは

$$\left. \begin{aligned} &\text{コンクリート桁側ひずみ} \\ &\epsilon_{bl} = + \frac{D_b}{E_b F_b} - \frac{M_b}{E_b I_b} \cdot \frac{d_b}{2} \\ &\text{エポキシモルタル側ひずみ} \\ &\epsilon_{eu} = + \frac{D_e}{E_e F_e} + \frac{M_e}{E_e I_e} \left(a - \frac{d_b}{2} \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (30)$$

曲率はコンクリート部とエポキシモルタル部に対して同じでなければならないから、式 (17) より

$$\frac{M_b}{E_b I_b} = \frac{M_e}{E_e I_e}$$

である。そして $dT_b/dx = -d^2 D_b/dx^2$ で式 (29), 式 (30), 式 (17) より

$$\left(+ \frac{D_e}{E_e F_e} - \frac{D_b}{E_b F_b} \right) + \frac{M_e}{E_e I_e} a = \frac{-1}{C} \frac{d^2 D_b}{dx^2} \dots\dots\dots (31)$$

つり合条件, 式 (9) で

$$\begin{aligned} -D_b \cdot a &= M_b + M_e, \quad D_b = (P - D_e) \\ -(P - D_e) \cdot a &= M_e + M_b \end{aligned}$$

より, 式 (17) より次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} M_b &= \frac{-E_b I_b}{E_b I_b + E_e I_e} D_b \cdot a \\ M_e &= \frac{-E_e I_e}{E_b I_b + E_e I_e} D_b \cdot a \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (32)$$

式 (32) と式 (5) で式 (31) は次のようになり, 軸力 D_b の微分方程式を得る。

$$\begin{aligned} \left(\frac{D_b - P}{E_e F_e} + \frac{D_b}{E_b F_b} \right) + \frac{D_b \cdot a^2}{E_b I_b + E_e I_e} \\ = \frac{1}{C} \cdot \frac{d^2 D_b}{dx^2} \text{ 整理して } D_b'' - \omega_1^2 D_b = -r_s p(x) \end{aligned} \dots\dots\dots (33)$$

ここで, ω_1^2, r_s は次のようにおく。

$$\omega_1^2 = C \left(\frac{1}{E_b F_b} + \frac{1}{E_e F_e} + \frac{a^2}{E_b I_b + E_e I_e} \right), \quad r_s = \frac{1}{E_e F_e} C$$

ここでプレストレス力 $P(x)$ はプレテンション方式によりプレストレス力を導入したので, 伝達長を実験的に求める必要がある。伝達長間を λ とし, その区間では近似的にパラボラとし, それ以後は鋼線応力は一定になった (後述 3. (2) 参照)。それ故軸力 D_b を求めるにあたり $0 \leq x \leq \lambda$ での軸力を D_{b1} , $\lambda \leq x \leq \frac{l}{2}$ での軸力を D_{b2} とすると, プレストレス力 $P(x)$ によって生じる軸力に関する微分方程式は次のようになる (図-7 参照)

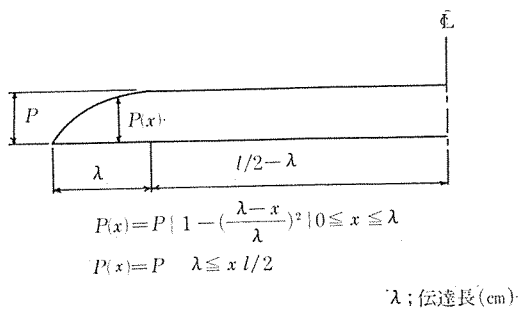


図-7 プレストレス力の変化

$0 \leq x \leq \lambda$ 間では

$$D_{b1}'' - \omega_1^2 D_{b1} = -r_s P(x) = -r_s P \left\{ 1 - \left(\frac{\lambda - x}{\lambda} \right)^2 \right\} \dots\dots\dots (34)$$

$\lambda \leq x \leq \frac{l}{2}$ 間では

$$D_{b2}'' - \omega_1^2 D_{b2} = -r_s P(x) = -r_s P \dots\dots\dots (35)$$

式 (34), (35) の一般解は

$$D_{b1} = m_6 e^{\omega_1 x} + m_7 e^{-\omega_1 x} - \frac{r_s P}{\lambda^2 \omega_1^2} \left(x^2 - 2\lambda x + \frac{2}{\omega_1^2} \right) \quad 0 \leq x \leq \lambda$$

$$D_{b2} = m_8 e^{\omega_1 x} + m_9 e^{-\omega_1 x} + \frac{1}{\omega_1^2} r_s P \quad \lambda \leq x \leq \frac{l}{2}$$

となり境界条件 $D_{b1}(x=0) = 0, D_{b2}'(x=l/2) = 0$, 連続条件 $D_{b1}(x=\lambda) = D_{b2}(x=\lambda), D_{b1}'(x=\lambda) = D_{b2}'(x=\lambda)$ の4条件より式 (34), (35) の一般解は

$$\begin{aligned} D_{b1} &= \frac{2 r_s P}{\lambda^2 \omega_1^4 (1 + e^{\omega_1 l})} \{ (e^{\omega_1(l-x)} + e^{\omega_1 x}) \\ &\quad + (e^{\omega_1(l-\lambda)} - e^{\omega_1 \lambda}) \sinh \omega_1 x \} \\ &\quad - \frac{r_s P}{\lambda^2 \omega_1^2} \left(x^2 - 2\lambda x + \frac{2}{\omega_1^2} \right) \quad 0 \leq x \leq \lambda \end{aligned} \dots\dots\dots (36)$$

$$\begin{aligned} D_{b2} &= \frac{2 r_s P}{\lambda^2 \omega_1^4 (1 + e^{\omega_1 l})} (e^{\omega_1(l-x)} + e^{\omega_1 x}) \\ &\quad \cdot (1 - \cosh \omega_1 \lambda) + \frac{r_s P}{\omega_1^2} - \lambda \leq x \leq \frac{l}{2} \end{aligned} \dots\dots\dots (37)$$

これらより接触面に働くせん断力はそれぞれ $0 \leq x \leq \lambda$ で

$$\begin{aligned} -\frac{dD_{b1}}{dx} = T_{b1} &= \frac{-2 r_s P}{\lambda^2 \omega_1^3 (1 + e^{\omega_1 l})} \{ (e^{\omega_1 x} - e^{\omega_1(l-x)}) \\ &\quad - (e^{\omega_1 \lambda} - e^{\omega_1(l-\lambda)}) \cosh \omega_1 x \} + \frac{2 r_s P}{\lambda^2 \omega_1^2} (x - \lambda) \end{aligned} \dots\dots\dots (38)$$

$\lambda \leq x \leq \frac{l}{2}$ 間で

$$\begin{aligned} -\frac{dD_{b2}}{dx} = T_{b2} &= \frac{-2 r_s P}{\lambda^2 \omega_1^3 (1 + e^{\omega_1 l})} (e^{\omega_1 x} - e^{\omega_1(l-x)}) \\ &\quad \cdot (1 - \cosh \omega_1 \lambda) \dots\dots\dots (39) \end{aligned}$$

となる。この軸力を式 (32) に代入すれば部分モーメント M_b, M_e が得られ, この軸力, 部分モーメントを式 (30) に代入すれば接触部のひずみ, 応力が得られ, 式 (11), (12) に代入すれば, コンクリート桁上縁, エポキシモルタル下縁のひずみ応力を求めることができる。

一般にプレストレス導入時においては, プレストレス力と桁自重の加算となるため, 式 (21) で示す自重のみによるモーメントを考えればよいことになる。設計荷重時にも同様に考え, プレストレス力と活荷重を合成すればコンクリート桁, エポキシモルタルの応力を得ることができる。

3. 実験方法および断面諸元

(1) エポキシモルタルの製作

エポキシモルタルの製作にあたっては, 接着剤はショーボンド (株) のエポキシ樹脂で, 商品名ショーボンド

FC を使用した。ヤング係数を増大するために、珪砂を混合し、エポキシモルタルを作製した。珪砂はショーボンド珪砂の4号，7号を重量比 1:1 に混合して使用した。接着剤と珪砂の配合比は多くの種類について実験を行い，機械的性質，施工のしやすさなどから重量比 1:1 を選別採用した。養生は赤外線温度 70~80°C で3日間行った。材料性質を表-1 に，エポキシ，エポキシモルタルの応力-ひずみ曲線を 図-8 に示し，表-2 は珪砂の粒径について表示した。ヤング係数は割線ヤング係数を使用し，破壊荷重の 1/3 を用いて割線ヤング係数を決定した。

表-1 材料の機械的性質

	ヤング係数 (kg/cm ²)	圧縮応力 (kg/cm ²)	ポアソン比	密度 (g/cm ³)
Epoxy	6.0×10 ⁴	600	0.38	1.6
Epoxy Mortar	15.0×10 ⁴	900	0.30	1.9

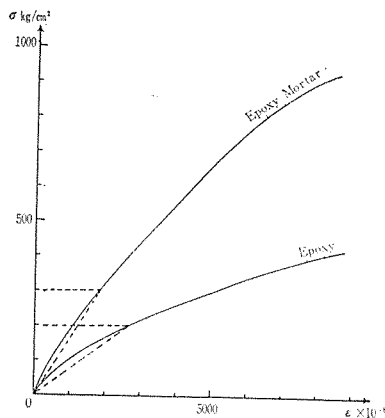


図-8 Epoxy Mortar, Epoxy の応力-ひずみ曲線

表-2 ショーボンド珪砂の粒径分布表

(単位: mm)

粒径	1.19以上	1.19~0.84	0.84~0.59	0.59以下
珪砂 4号	10%以下	20%以下	60%以下	10%以下
粒径	0.42以上	0.42~0.21	0.21~0.105	0.105以下
珪砂 7号	10%以下	40%以下	35%以下	15%以下

(2) エポキシモルタルの付着長

上記のエポキシモルタルでプレストレス力の付着長を調べて見た結果，鋼線は一般にコンクリートのように適当なさびを有した方がよいとは異なり，接着剤ではさび，水分，油気があると付着力は著しく低下した。それ故完全に鋼線を研磨し，油気を取り去ってエポキシモルタル内にそう入した。その結果プレストレス力は十分に維持でき，定着長もコンクリートと比較してほとんど変化がなかった。したがって，理論にも述べているように伝達長間では鋼線応力はパラボラとすることができる。

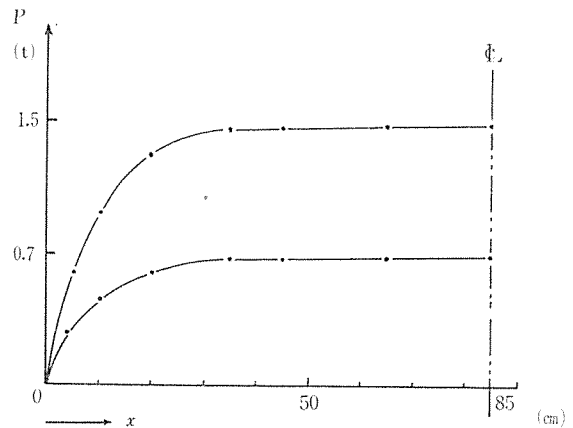


図-9 プレストレス力による伝達長

結果を 図-9 に示している。

(3) 弾性的結合によるばね定数

実用計算に用いる解を得るため，接着面の弾性的結合によるばね定数を 図-10 (a) に示すような実験を行

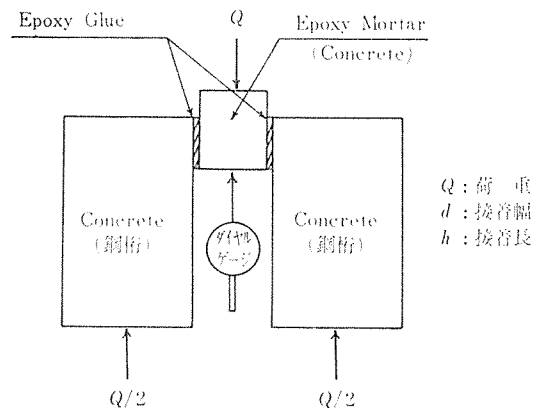


図-10 (a)

って求めた。この実験によると接着面での破壊は生じずコンクリート面で破壊した。したがって，この実験はコンクリートのせん断強度の実験も兼ねているといえる。この実験でコンクリートの最大せん断応力はほぼ 40 kg/cm² であり，実験結果を縦軸に荷重，横軸にずれをとったグラフ (図-10 (b), (c) に描くと最大せん断応力ま

(b) エポキシモルタルとコンクリート (c) 鋼筋とコンクリート

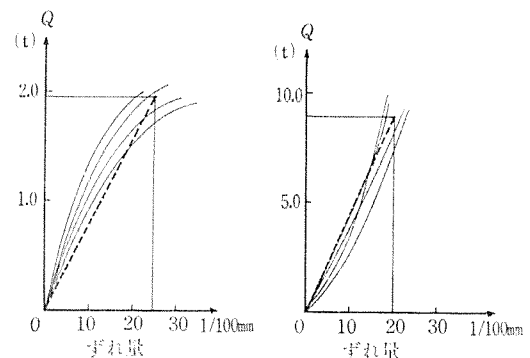


図-10 (b) (c)

での荷重とずれの関係が求まる。コンクリートの最大せん断応力まで直線と見なしてばね定数 C を求めた。エポキシモルタルとコンクリートのばね定数 C_1 は、接着幅 $b=3.5$ cm, 接着長 $h=7$ cm として実験してみた結果最大せん断力 $T_{max}=Q/2h=1960/2 \times 7=140$ kg/cm, そのときのずれ $\delta=0.25$ mm となり $C_1=T_{max}/\delta=140/0.025=5600$ kg/cm ≈ 6000 kg/cm 2 となった。またコンクリート版と I 型鋼では $b=7.5$ cm, $h=15$ cm とした。そのときの最大せん断力 $T_{max}=P/2h=9000/30=300$ kg/cm, そのときのずれは $\delta=0.020$ mm となり

$$C_2=T_{max}/\delta=15000 \text{ kg/cm}^2$$

となった。

(4) 合成接着 PC 桁, 接着合成桁の製作および実験操作

a) 合成接着 PC 桁の製作および実験操作 コンクリート桁は $150 \times 100 \times 1700$ を製作し、せん断破壊を生じさせないように $\phi 6$ mm のスターラップで補強した。導入装置の関係上コンクリート底部を上に向けコンクリート面をサンダーで研磨し、汚れ、レイタンスなどを除去した。その後プレテンション方式により鋼線にプレストレスを導入し、底部を上にしたコンクリート面にショーボンド FC を厚さ 2 mm で塗布し、同時にショーボンド FC に珪砂を混合して作った前述のエポキシモルタルを打設した。養生は赤外線温度 $70 \sim 80^\circ\text{C}$ で 3 日間行ない、エポキシモルタルの強度確認後鋼線を切断して合成桁にプレストレスを導入した。そのときのコンクリートひずみ、エポキシモルタルひずみ、導入時のたわみを測定した。この合成桁を反転してエポキシモルタルを底としたのち、コンクリートひずみ、エポキシモルタルひ

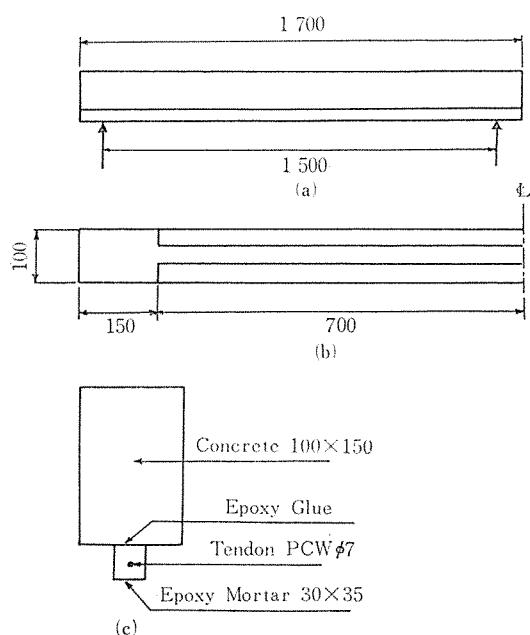


図-11 接着合成 PC 桁

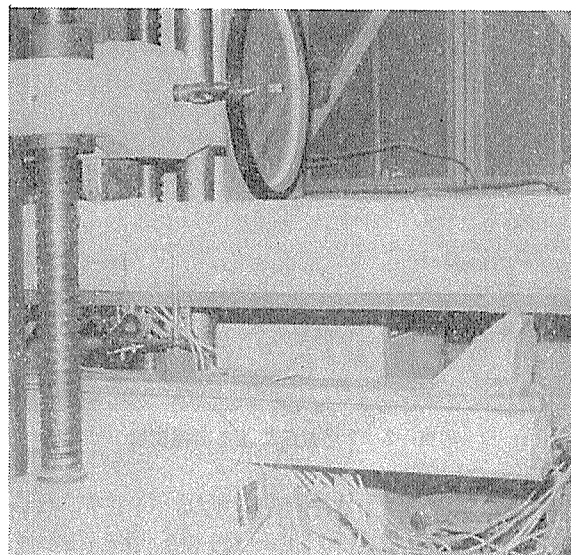


写真-1 接着合成 PC ばりの載荷試験

ずみを測定した。さらに一点載荷試験によるひずみ、たわみ、破壊強度を測定した。しかし載荷荷重が小さいので、ひずみによるずれ量は理論曲線の如き実験値を示さず、ほぼ剛結合のような結果を得た。したがって、ずれを考慮した理論値と実験値との相違を確認するためにコンクリート版と鋼桁をショーボンド FC によって接着した合成桁を製作し確認した。図-11 (a), (b), (c) は接着合成 PC 桁の一般図を示している。写真-1 は接着合成 PC 桁の載荷試験である。

b) 接着合成桁の製作および実験操作 (4). a) のような理由により、I 型鋼 $150 \times 75 \times 75 \times 1950$ コンクリート版 $120 \times 60 \times 1950$, を製作し I 型鋼のフランジ面を研磨し、コンクリート面も同様に汚れ、レイタンスを除去し、ショーボンド FC を厚さ 2 mm で塗布接着して合成桁を製作した。その後赤外線養生し接着剤の強度を確

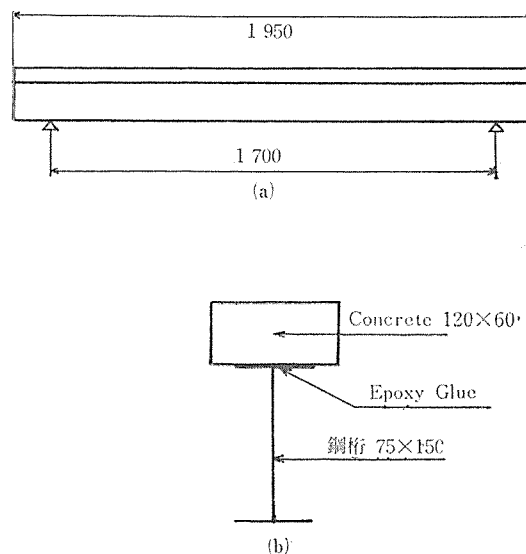
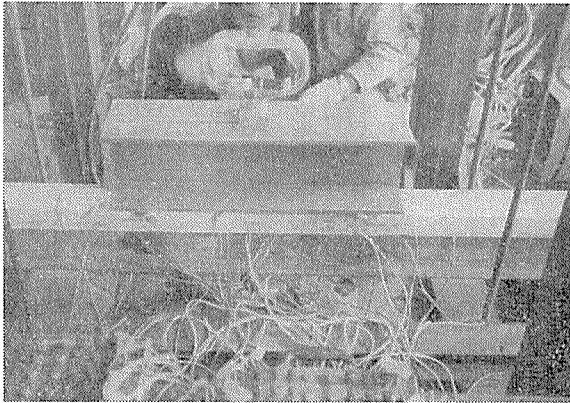


図-12 接着合成桁



写真一2 2点載荷による荷重試験

認し、2点載荷により水平方向のずれ、ひずみ、たわみを測定した。図一12 (a), (b) は接着合成桁（コンクリート版、I型鋼）の一般図を示しており、写真一2 は接着合成桁の載荷試験である。

(5) 実験データおよび断面各諸元

合成桁の負荷条件、断面各諸元を列挙すると次のようになる。

1) プレストレス力（コンクリート桁・エポキシモルタル）

$$P : 1.5 \text{ t} \quad 0.7 \text{ t}$$

2) 一点載荷による集中荷重（コンクリート桁・エポキシモルタル）

$$S : 0.2 \text{ t} \quad 0.4 \text{ t}$$

3) 2点載荷（鋼桁・コンクリート版）

$$S : 2.0 \text{ t} \quad 4.0 \text{ t} \quad 8.0 \text{ t}$$

4) 断面各諸元

㊦ コンクリートとエポキシモルタル合成桁

$$E_b = 3.6 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2 \quad E_e = 1.5 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$$

$$n = E_b/E_e = 2.4 \quad F_b = 150 \text{ cm}^2$$

$$F_e = 10.5 \text{ cm}^2 \quad F_i = 154.4 \text{ cm}^2$$

$$I_b = 2813 \text{ cm}^4 \quad I_e = 8 \text{ cm}^4$$

$$I_i = 3^3 162^3 \text{ cm}^4 \quad a = 9 \text{ cm}$$

$$a_b = 0.255 \text{ cm} \quad a_e = 8.745 \text{ cm}$$

$$C_1 = 6000 \text{ kg/cm}^2 \quad \lambda = 35 \text{ cm (定着長)}$$

㊦ 鋼桁とコンクリート版合成桁

$$E_b = 3.0 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2 \quad E_{st} = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$$

$$n = E_{st}/E_b = 7 \quad F_b = 72 \text{ cm}^2$$

$$F_{st} = 19.14 \text{ cm}^2 \quad F_i = 29.42 \text{ cm}^2$$

$$I_b = 216 \text{ cm}^4 \quad I_{st} = 705 \text{ cm}^4$$

$$I_i = 1458 \text{ cm}^4 \quad a = 10.4 \text{ cm}$$

$$a_b = 6.764 \text{ cm} \quad a_{st} = 3.636 \text{ cm}$$

$$C_2 = 15000 \text{ kg/cm}^2 \quad \alpha = 60 \text{ cm}$$

(6) 数値計算および実験結果

前述の剛結合・弾性結合の理論式による数値計算結果

を図示する。

a) モーメント M による数値計算

1) コンクリートとエポキシモルタルの合成桁：桁自重は考えず集中荷重についてのみ考えた。したがって、式(23)で自重の項を省略して計算した。図一13は剛結合の場合とずれが生じた場合との軸力の分布を図示している。図中の実線はずれが生じないとき、すなわち剛結合の場合、点線はずれがあるとき、すなわち弾性結合の場合で、以下同じように取り扱う。図一14はせん断力の分布を図示している。図一15, 16はコンクリート上縁の圧縮ひずみ分布、エポキシモルタル下縁の引張ひずみ分布を図示している。これを見るとコンクリート上縁ではずれによってわずかにひずみが大きくなっていることがわかり、エポキシモルタル下縁ではずれによってひずみが減少していることがわかる。

2) 鋼桁とコンクリート版の合成桁：図一17は2点載荷 $S=4 \text{ t}, 8 \text{ t}$ による軸力の分布、図一18はせん断力の分布図、図一19はコンクリート上縁のひずみ分布、図一20は接触部のコンクリート下縁のひずみ分布、図一21は接触部の鋼桁フランジのひずみ分布、図一22は鋼桁下縁のひずみ分布を示している。

一般に軸力の減少および部分モーメントの変化による縁ひずみの変化は、コンクリート床版と鋼桁の曲げこわさの比によって異なる。 $E_b I_b < E_{st} I_{st}$ ではコンクリートひずみは減少し、鋼桁ひずみは特に上縁で増大する。このことを図一21に図示してある。せん断力については2点載荷なので剛結合では載荷点で急激に変化するが、弾性合成では連続的に移行しなければならない。また純曲げ部分についてもせん断力が生じる。図一23はずれ量を表わしている。桁端では約 0.12 mm ずれていることになる。

b) プレストレス力 P による数値計算 図一24はコンクリート軸力 D_b 、図一25はエポキシモルタル軸力 D_e を図示している。これによると、ずれによって D_b は減少しており、プレストレス力が増加する付近では大きくなっている。 D_e は D_b が減少しただけ増加している。図一26はせん断力 T の変化を図示しており、せん断力は桁端で最大で、プレストレス力 $P=1.5 \text{ t}$ の場合 $T \approx 55 \text{ kg/cm}$ でずれ量は 0.09 mm 程度である。一方ずれによるコンクリート上縁、エポキシモルタル下縁のひずみ分布はそれぞれ図一27, 28に図示している。図よりコンクリート上縁ではずれにより引張ひずみが剛結合に比較して減少している。エポキシモルタル下縁ではずれによる軸力 D_e が大きくなっているので圧縮ひずみが非常に大きくなっている。

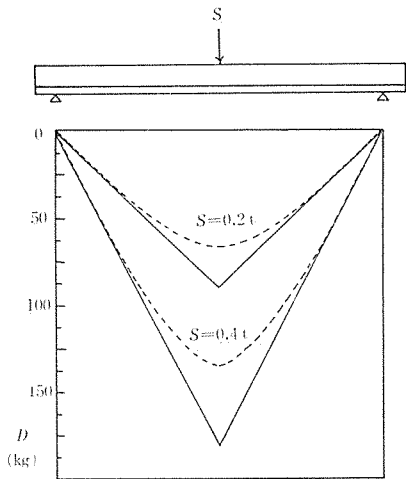


図-13 集中荷重による軸力の分布

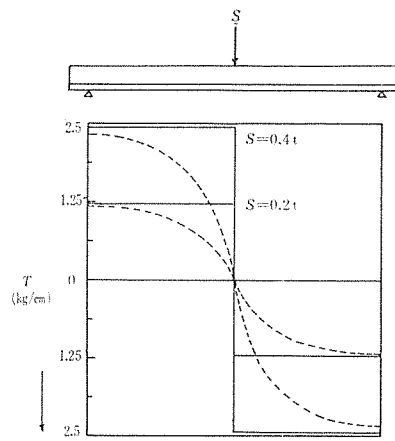


図-14 集中荷重によるせん断力の分布

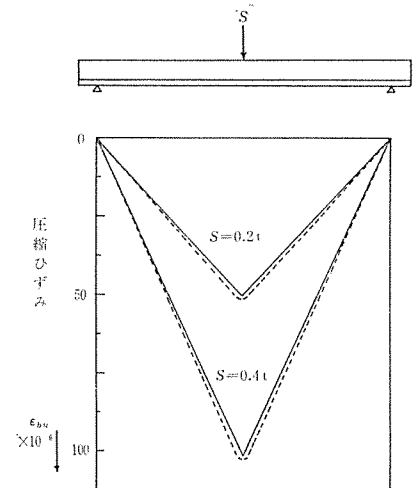


図-15 コンクリート上縁のひずみ分布

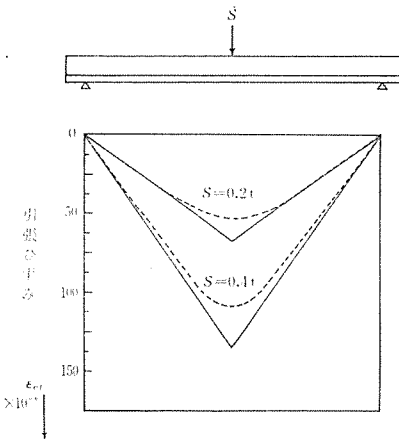


図-16 エポキシモルタル下縁のひずみ分布

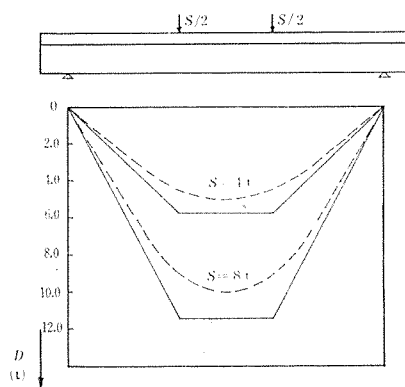


図-17 2点載荷による軸力の分布

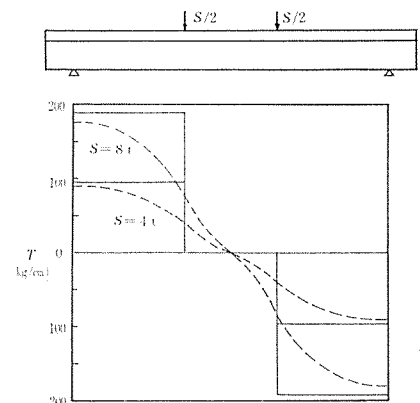


図-18 2点載荷によるせん断力の分布

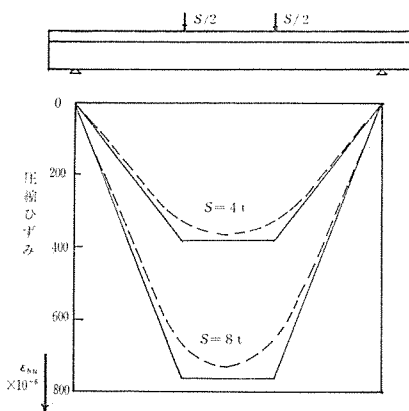


図-19 コンクリート上縁のひずみ分布

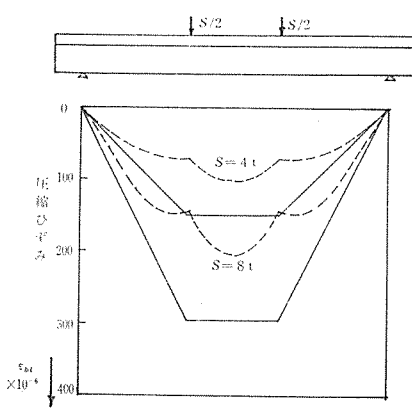


図-20 接触面コンクリートのひずみ分布

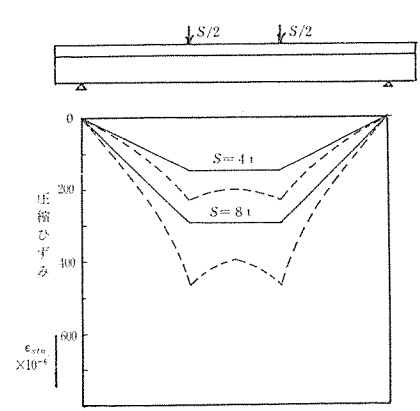


図-21 接触面鋼桁フランジのひずみ分布

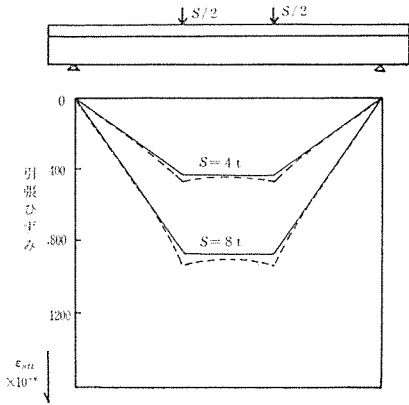


図-22 鋼桁下縁のひずみ分布

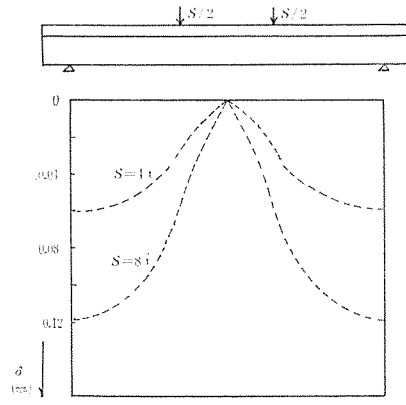


図-23 弾性結合による水平方向のずれ量

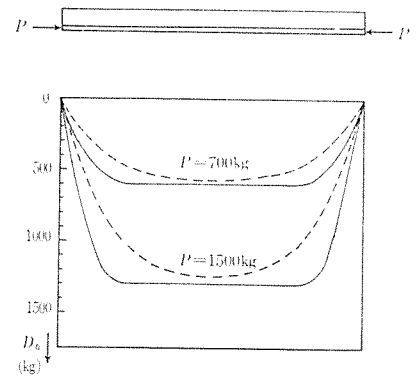


図-24 プレストレス力によるコンクリート軸力の分布

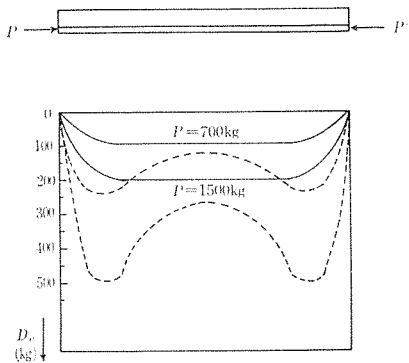


図-25 プレストレス力によるエポキシモルタル軸力の分布

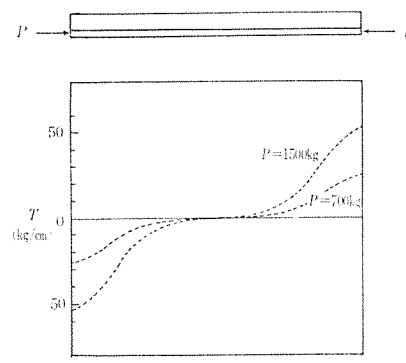


図-26 プレストレス力によるせん断力の分布

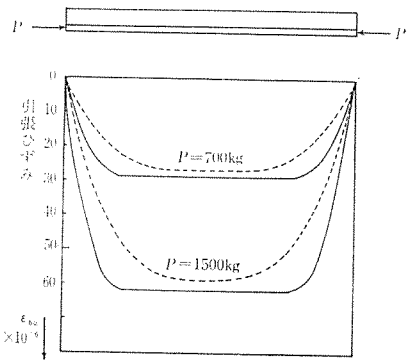


図-27 プレストレス力によるコンクリート上縁ひずみ分布

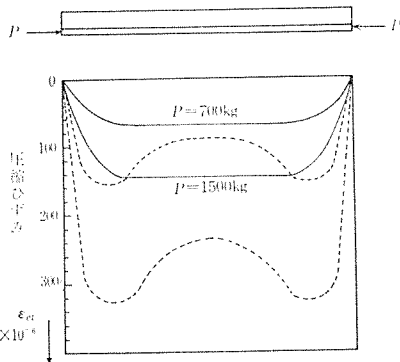
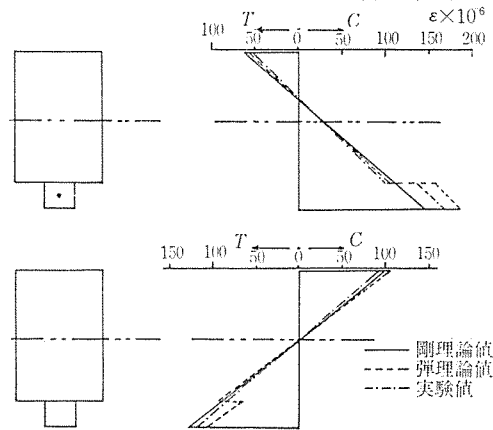


図-28 プレストレス力によるエポキシモルタル下縁ひずみ分布

c) 理論値と実験値の比較検討

1) プレストレス力 P が働いた場合：図-29 (a) はプレストレス力が 1.5 t の場合、スパン中央での剛結合による理論値，弾性結合による理論値，実験値のひずみ分布を図示している。実験値を見るとコンクリート上縁では剛結合の場合と比較してわずかではあるがひずみが減少していることがわかり，またエポキシモルタル下縁ではひずみが増大していることがわかる。この場合コンクリート軸力の減少分はエポキシモルタル軸力に加えら

(a) プレストレス力 1.5 t によるスパン中央のひずみ分布



(b) 外荷重 0.4 t のときのスパン中央のひずみ分布

図-29

れ，エポキシモルタル軸力は増大する。その上両部材の曲げこわさの比が大きく異なっているので，ひずみ変化の割合はコンクリート部で少なくエポキシモルタル部で大きくなる。

2) モーメント M が働いた場合：図-29 (b) は集中荷重 0.4 t 載荷したときのひずみ分布を図示している

が、この場合載荷荷重が小さくひずみ分布は直線性を示している。しかしながら破壊荷重直前になるとわずかではあるがひずみの不連続性が認められた。この原因として、せん断力の値が小さく、ずれが微少なため明確な結果がでない。したがって I 型鋼とコンクリート版をショーボンド FC で接着した合成桁でずれとひずみ変化を実験した。図-30 は外荷重 $S : 2t, 4t, 8t$ の場合のスパ

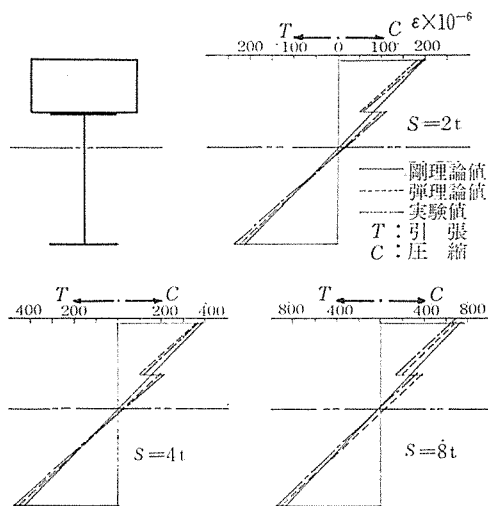


図-30 2点載荷によるひずみ分布

ン中央でのひずみ分布である。荷重 $1t$ からひずみの不連続性が見られ、 $8t$ では接触面での鋼桁のひずみが増加し剛結と比較してひずみ増加量が $\epsilon_{stu} = 90 \times 10^{-6}$ であったので、応力に換算して圧縮応力が剛結合で考えた理論値より約 190 kg/cm^2 増大している。同様に接触面のコンクリートの圧縮応力は約 30 kg/cm^2 減少し、鋼桁下縁では約 60 kg/cm^2 増加し、コンクリート上縁では圧縮応力が約 10 kg/cm^2 減少している。そのときの水平方向のずれは 0.15 mm であった。

したがって、剛結合で考えて設計した場合より応力変化が著しく変わるので、弾性結合理論は十分加味する必要がある。

d) 弾性合成理論に基づく数値計算と実験値の比較

ずれを考えた弾性合成の理論に基づく数値計算と実験値の比較を列挙すると、次のようである。

- 1) 本実験のコンクリート桁とエポキシモルタル合成桁においてはプレストレス力 P を導入した場合にはずれが生じ、理論値と実験値がほぼ一致する。
- 2) 載荷時での測定では必ずしも理論値とは一致しな

い。この原因としてはプレストレス導入時に比較してせん断力のはるかに小さくずれが微少であると思われる。

3) 鋼桁とコンクリート版での合成桁の載荷試験ではせん断力を大きく取り得た。したがって、数値計算と実験値がほぼ一致することを得た。

4. ま と め

床版桁等の補強に対して合成接着 PC 桁を考えたものであるが、解析途上でひずみの不連続性を見出し弾性合成の理論を適用したものである。もともと弾性合成の適用は桁高の大きい鋼桁と薄い床版からなる断面に限定されており、コンクリート床版と鋼桁との結合を弾性的に考えることにより、剛結合の理論であるひずみの直線性をなくし、曲げこわさの違いを利用してコンクリートに生ずる軸力を減少させ、コンクリート応力を減少させるのを目的とした理論である。本実験においては接着剤のようなせん断弾性係数の小さい材料をせん断抵抗として使用したので変形が大きいものと考えられ、普通の剛結合理論のみを考えると非常に問題があると思う。

接着剤のばね定数は、接着剤の種類、接着する部材の種類、接着幅、接着厚によってばね定数が変化するものと考えられる。実験的考察から接着幅を大きくすれば剛結合で取り扱える荷重範囲が決定できると思われる。

本研究では、ずれに対する解析が主題となり、弾性範囲のみに限ったもので、クリープ、その他については今後の課題である。一方接着合成 PC 桁の実際の施工法の研究も考えている。

参 考 文 献

- 1) Hawranek, Steinhardt : Theorie und Berechnung der Stahlbrücken. Springer-Verlag
- 2) 佐伯俊一 : プレストレスト・コンクリート橋, 理工図書
- 3) H. Beck, M. Heunisch : Zum Reibungsverbund zwischen Stahl und Betonfertigteilen bei dubellosen Verbundkonstruktionen, Der Stahlbau, 1972, 2.
- 4) Josef Eibl, Lutz Franke, Olaf Hjorth : Versuche mit kunstharzmörteln. Die Bautechnik, 1972. 10
- 5) 井上幸彦, 他 : 接着技術便覧, 日刊工業新聞社
- 6) 波木 守・大浜嘉彦 : プラスチックコンクリート, 高分子刊行会
- 7) 見沢・重松・長岡 : 接着合成プレストレスト コンクリート桁の 2, 3 の性質について, 土木学会中国四国支部第 25 回学術講演会一般講演概要集, 昭和 48 年 5 月

1973.9.12・受付