

プレキャスト床版を用いた負の曲げモーメントを受ける弾性合成桁の実験的研究

Experimental Studies on Elastic Composite Girders using Precast Concrete Slab
subjected to Negative Bending Moment

中井 博*・山内幸裕**・袴田文雄***・酒造敏廣****・山本竜太郎*****

By Hiroshi NAKAI, Yukihiro YAMAUCHI, Fumio HAKAMADA, Toshihiro MIKI and Ryutaro YAMAMOTO

This paper reports experimental studies on the elastic composite girders using precast concrete slab subjected to negative bending moment. Static behaviors of headed shear studs were made clear by the push-out tests and then the ultimate and fatigue strength of the elastic composite girders were investigated by the tests of model girders. It is shown from these experimental studies that the static and fatigue behaviors of the elastic composite girders remarkably depended upon the stiffness parameter of shear studs. Moreover, spacing and corresponding design method of the shear studs are examined theoretically.

1. まえがき

近年、連続桁橋のコンクリート床版に、プレキャスト床版を活用する試みが活発で、プレキャスト床版を用いた桁橋の設計法に関する研究の報告も多くなりつつある^{1)~4)}。

ところが、プレキャスト床版を連続桁橋に用いる場合、コンクリート床版の浮き上がりを防止するためにスラブ止めの代わりとして配置したスタッドが、コンクリート床版と鋼桁との間のずれ止めとして挙動することが考えられる。そのために、負の曲げモーメントが作用する連続桁の中間支点近傍の断面においては、コンクリート床版と鋼桁との間の合成作用により、設計上無視できない引張応力がコンクリート床版に発生するとともに、スタッドにも大きなせん断力が作用することになる。

それらの研究としては、コンクリート床版と鋼桁との間に弾性的なずれが生じることを前提とした弾性合成桁の解析とその設計法とに関する研究が、今までにも数多く行われている^{5)~9)}。しかし、弾性合成桁を積極的に利用するためには、ずれ止めとして比較的径の小さいスタッドを用いる必要がある。そのようなスタッドのせん断耐力については、これまでの研究によると、実用に供し得るまで十分に把握されていないように思われる¹⁰⁾。

本研究は、プレキャスト床版を有し、それらの結合法としてPC鋼棒を用いてプレストレスを導入し、しかるのちに鋼桁と合成した連続弾性合成桁橋の中間支点付近に着目し、負の曲げモーメントを受けてプレキャ

*	工博	大阪市立大学教授	工学部土木工学科 (〒558 大阪市住吉区杉本3-3-138)
**		阪神高速道路公団	保全施設部企画係長 (〒541 大阪市東区久太郎町4-68)
***		阪神高速道路公団	大阪第一建設部設計課主査 (〒559 大阪市住之江区北加賀屋2-11-8)
****	工博	大阪市立大学助手	工学部土木工学科 (〒558 大阪市住吉区杉本3-3-138)
*****		大阪市立大学大学院	工学研究科前期博士課程在学中 (〒558 大阪市住吉区杉本3-3-138)

スト床版に引張応力が作用するような領域のスタッドのせん断耐力とバネ定数、弾性合成桁の静的挙動および疲労特性ならびに弾性合成桁とするためのスタッドの配置法を明らかにするため、以下のような一連の実験的研究を行ったものである。

まず、スタッドのせん断耐力・バネ定数の特性を明らかにするため、スタッドの押し抜き試験を行う。つぎに、負の曲げモーメントを受ける合成桁供試体3体（以下、実験桁という）を製作して、うち2体を静的耐力実験（弾性実験も含む）、また1体を疲労実験に供し、弾性合成桁としての解析結果とも比較のうえ床版と鋼桁との弾性範囲内における応力・たわみ性状、および、耐力、ならびに、疲労特性を調べる。

さらに、実験結果を解析結果、および、現行道路橋示方書¹³⁾と比較し、スタッドの配置法、床版と鋼桁との間に作用する水平せん断力の算定方法、および、スタッドに作用するせん断力の照査法について検討を加え、プレキャスト床版を用いた弾性合成桁の設計法について種々な面から検討を試みる。

2. 実験概要

（1）スタッドの押し抜き試験

押し抜きせん断供試体の概要を図-1に示す。供試体は、 $\phi 13$ スタッド4本（片側2本、高さ17cm）と、あらかじめ製作したプレキャスト・コンクリート版（500mm×230mm×600mm）とH形鋼（H-200×204×12×12）とからなり、スタッド孔に後打ちしたプレミックス形の無収縮グラウト剤で結合している。組み立てる前に、H形鋼とコンクリート部分との接触面にはシリコンプレーを散布し、接触面における付着の影響が小さくなるようにした。荷重は、反復繰返し載荷を行いつつ漸増させ、スタッドの終局耐力に至るまで載荷した。なお、各材料強度は表-1に示す。

（2）弾性合成桁の静的載荷実験

連続桁の中間支点付近を図-2(a)~(b)に示すような張り出し部を有する単純梁の実験桁にモデル化し、静的載荷実験を行えるようにした。実験桁としては、同一寸法のを2体（G-1、G-2桁）製作した。それらは、プレキャスト床版5枚（幅500mm×厚さ200mm×長さ1,000mm）と鋼桁（H-440×300×11×18）とを、 $\phi 13$ スタッド（高さ17cm）を2列に50cm間隔で配置したずれ止め、および、PC鋼棒（ $\phi 23$ ）2本によって一体化している。なお、各材料強度を表-1に示す。

このうち、G-1桁は、床版内にセットしたPC鋼棒を通じて、弾性実験前にプレストレスを導入している。また、G-2桁は、プレストレス導入前に床版にひび割れを発生させ、その後プレストレスを導入して再度、弾性実験を行うものである。なお、コンクリート床版内には、コンクリート平均圧縮応力で3.9MPaに相当するプレストレスを導入している。荷重は、図-2(a)に示すように、右側の桁の端部に載荷し、中間支点上のコンクリート床版に引張応力を生じさせるようにした。

（3）疲労実験

疲労実験は、図-2(c)に示す実験桁1体（G-3桁）について行った。疲労実験桁は、静的実験桁と比べて、①桁

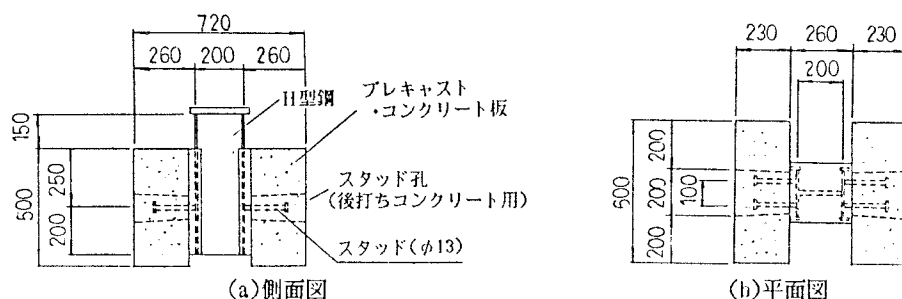


図-1 押し抜き実験供試体（寸法単位：mm）

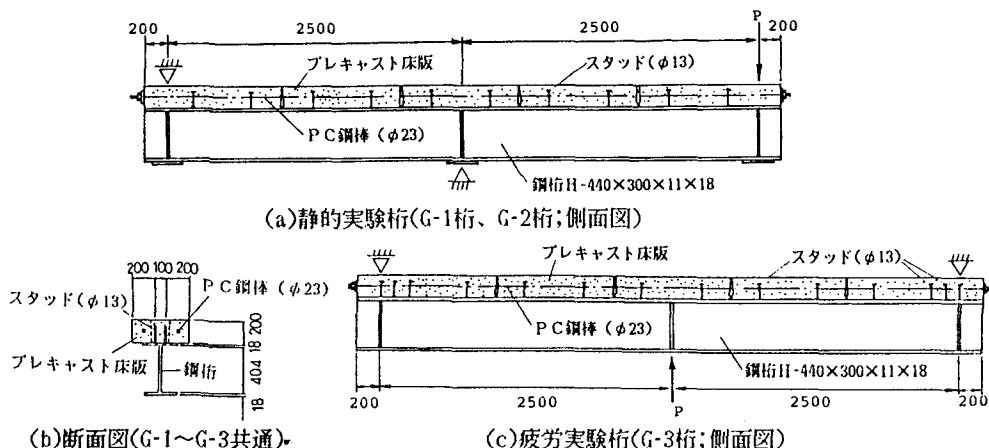


図-2 実験桁の一般図(寸法単位:mm)

表-1 鋼桁、コンクリート床版およびスタッドの機械的性質

項目 材料	ヤング係数 E(MPa)	ポアソン比 μ	降伏点 σ_y (MPa)	引張強度 σ_{tu} (MPa)	圧縮強度 σ_{ck} (MPa)	降伏せん断応力 τ_y (MPa)
鋼 桁	2.10×10^5	0.28	279	432	—	161
スタッド	2.36×10^5	—	402	461	—	232
コンクリート	0.34×10^5	0.20	—	3.6	56.9	—

注；コンクリートの引張強度 $=0.27 \cdot (\sigma_{ck})^{2/3}$ ($\sigma_{ck} \leq 49\text{MPa}$)¹⁵⁾、 $\tau_y = \sigma_y / \sqrt{3}$

端部のスタッドを合計8本増やしたこと、②桁中央で繰り返し荷重を載荷したことの2点以外は、G-1およびG-2桁と同様である。表-2には、疲労実験における荷重ステップ、上下限荷重、および、繰り返し回数とを示す。

3. スタッドの押し抜き試験結果とその考察

(1) スタッドのバネ定数の変動

荷重-ずれ曲線を図-3に例示する。この図より、除荷時の曲線勾配は載荷時のそれに比べて大きくなっており、荷重Pとずれ δ との間の線形性は乱れていた。

そこで、荷重-ずれ曲線の載荷・除荷1サイクルの試験値を直線近似して最小自乗法で整理し、その直線の傾きから、スタッドのバネ定数を求めた。

いま、スタッド一本に作用するせん断力を $Q_s (=P/4)$ と定義して、 Q_s とバネ定数kとの関係をプロットすれば、図-4が得られる。ここで、限界せん断耐力 Q_{sc} は、荷重-ずれ曲線の載荷・除荷1サイクルの近似直線が、ちょうど $\delta = 0.08\text{mm}$ に達するときのオフセット値に相当する荷重と定義した。そして、スタッドの作用せん断力 Q_s を、この限界せん断力 Q_{sc} で

表-2 疲労実験における載荷荷重と繰り返し回数

載荷 ステップ	上限荷重 P_u (KN)	下限荷重 P_l (KN)	繰り返し数 ($\times 10^4$)	応力比 σ_l / σ_u	荷重比 P_l / P_{sa}
Step-1	45.6	9.8	100	0.25	0.51
Step-2	58.8	9.8	100	0.33	0.65
Step-3	78.4	9.8	50	0.43	0.87
Step-4	98.0	9.8	50	0.54	1.09
Step-5	137.3	9.8	138	0.76	1.52

注；1) σ_u ：上限荷重による床版の最大作用引張応力(MPa)
2) σ_{sa} ：プレストレスも考慮した床版の許容引張応力($=6.4\text{MPa}$)¹³⁾
3) P_{sa} ：押し抜き試験によるスタッドの残留ずれ0.08mmに対応する許容限界荷重($=90\text{KN}$)

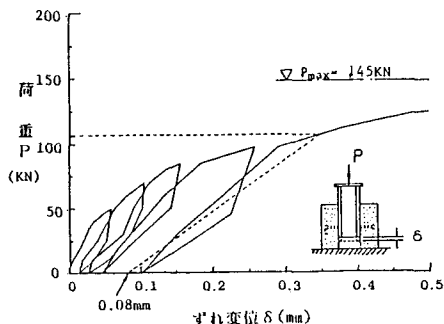


図-3 荷重-ずれ曲線(供試体No.2)

無次元化している。

この図から、バネ定数 k は、スタッドの作用せん断力 Q_s が大きくなるに伴って小さくなり、作用せん断力 Q_s に大きく影響されることがわかる。

(2) スタッドの限界せん断力

上述の Q_{sc} の他に、押し抜き載荷荷重の最高値に相当するスタッド1本当たりのせん断耐力として終局せん断耐力 Q_{su} を求めた。これら Q_{sc} 、および、 Q_{su} の平均値を、表-3に示す。

この表より、 Q_{sc} の試験値は、参考のため表中に示した道路橋示方書¹³⁾およびECCSの指針¹⁴⁾による計算値より35～42%高い値を示している。すなわち、限界せん断力は、道路橋示方書、あるいは、ECCSのせん断耐力算式によって安全側に推定できることがわかる。

(3) ずれ止めのフレキシビリティ定数

鋼桁とコンクリート床版との間の合成作用を表すパラメータとして、文献8)に示されたずれ止めのフレキシビリティ定数 s 、すなわち、

$$s = \sqrt{(k_o \cdot L_d) / (k \cdot m)} \quad \dots(1)$$

を用いて整理してみる。

ここに、 k_o ：基準ばね定数(=196kN/cm/cm)、 k ： $\phi 13$ スタッド一本の単位当たりのばね定数(kN/cm/本)、 m ：一列あたりのスタッド本数、 L_d ：ずれ止め間隔(cm)。

いま、スタッドの押し抜き試験から、残留ずれ0.08mm、すなわち $Q_s/Q_{sc}=1$ なる限界状態に対応するバネ定数 $k=1327$ kN/cm/本、スタッド本数 $m=2$ 、ずれ止め間隔 $L_d=50$ cmを用いると、実験桁に用いたずれ止めのフレキシビリティ定数 s の値は約1.9となる。

4. 弾性実験結果とその考察

上記で明らかにしたスタッドのフレキシビリティ定数 $s=1.9$ を用いて、弾性合成桁の弾性挙動を断面内垂直ひずみ分布、軸方向力分布、水平せん断力分布、および、たわみについて解析し、実験値と比較し、考察を行った。

(1) 弾性解析

文献11)によると、図-5に示す弾性合成桁に対する、軸方向力 $N(x)$ と曲げモーメント $M(x)$ との関係は、次

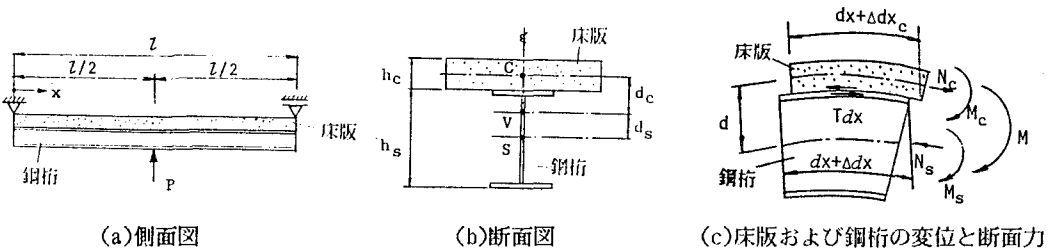


図-5 弾性解析モデル

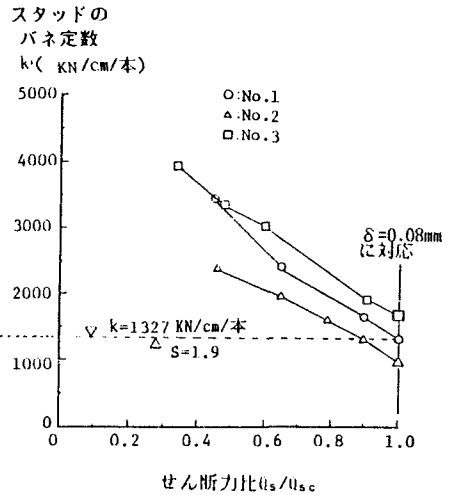


図-4 スタッドのバネ定数 k と作用せん断力 Q の関係

表-3 スタッドの押し抜き試験結果

項目	せん断耐力						バネ定数 k (kN/cm/本)	
	限界せん断力 Q _{sc} (kN/本)		終局せん断力 Q _{su} (kN/本)		参考値 Q _s [*] (kN/本)			
	試験値	平均値	試験値	平均値	道示	ECCS指針	試験値	平均値
供試体No.								
1	24.5		40.2				1314	
2	26.5	26.5	36.3	36.3	19.6	18.6	961	1327
3	28.4		44.1				1706	

の微分方程式で与えられる。

$$\frac{d^2 N(x)}{dx^2} - \omega^2 N(x) = -\gamma M(x) \quad \dots(2)$$

上式中、 ω および γ は、次式で与えられるすれ止めの剛度パラメーターである。

$$\omega^2 = \frac{nd I_v}{d_c E_c A_c (I_c + n I_s)} \cdot C \quad \gamma = \frac{d}{E_c (I_c + n I_s)} \cdot C \quad \dots(3)a, b$$

ここに、 n ：鋼とコンクリートとのヤング係数比（ $=E_s/E_c$ ）、 E_c 、 E_s ：コンクリートおよび鋼桁のヤング係数(MPa)、 A_c 、 A_s ：コンクリート床版および鋼桁の断面積(cm^2)、 I_v 、 I_c 、 I_s ：完全合成桁、コンクリート床版および鋼桁の断面二次モーメント(cm^4)、 h_c ：コンクリート床版の厚さ(cm)、 d ：コンクリート床版の図心Cと鋼桁の図心Sとの距離(cm)、 d_c ：完全合成桁としての重心Vとコンクリート床版の図心Cとの距離(cm)、 C ：分布バネ定数($= (k \cdot m)/L_d$, KN/cm/cm)。

そこで、図-5の実験桁について式(2)の解から任意点 x における軸方向力 $N(x)$ 、および、水平せん断力 $T(x)$ の解を求めると、次式が得られる¹¹⁾。

(i) 床版および鋼桁に作用する軸方向力 $N(x)$ ：

$$N(x) = N_0(x) \cdot \left\{ 1 - \frac{\sinh \omega x}{x \omega \cosh(\omega \frac{l}{2})} \right\}, (x \leq l/2) \quad \dots(4)$$

(ii) 床版と鋼桁との間に作用する水平せん断力 $T(x)$ ：

$$T(x) = T_0(x) \cdot \left\{ 1 - \frac{\cosh \omega x}{\cosh(\omega \frac{l}{2})} \right\}, (x \leq l/2) \quad \dots(5)$$

ここに、 $N_0(x)$ および $T_0(x)$ は、バネ定数 $C = \infty$ 、すなわち完全合成桁としたときの軸方向力および水平せん断力であり、次式で与えられる。

$$N_0(x) = \frac{A_s d_s}{I_v} M(x) \quad T_0(x) = \frac{A_s d_s}{I_v} Q(x) \quad \dots(6)a, b$$

また、 $M(x) = P \cdot x/2$ (図-5(a)の場合)：桁断面に作用する曲げモーメント、 $Q(x) = P/2$ (図-5(a)の場合)：桁断面に作用するせん断力。さらに、床版および鋼桁断面内における垂直応力 σ は、次式から求められる。

(iii) 床版上面および下面の応力(圧縮を正)：

$$\sigma_{cu, cl} = \frac{N}{A_c} \pm \frac{M_c}{I_c} \frac{h_c}{2} \quad \dots(7)a$$

(iv) 鋼桁上および下フランジ・プレートの応力(引張を正)：

$$\sigma_{su, sl} = \frac{N}{A_s} \mp \frac{M_s}{I_s} \frac{h_s}{2} \quad \dots(7)b$$

ここに、 $M_c = \{M(x) - N(x) \cdot d\} \cdot E_c I_c / (E_c I_c + E_s I_s)$ 、 $M_s = \{M(x) - N(x) \cdot d\} \cdot E_s I_s / (E_c I_c + E_s I_s)$ ：コンクリート床版および鋼桁に作用する曲げモーメント ($\text{N} \cdot \text{cm}$)、 h_c ：コンクリート床版の厚さ(cm)、 h_s ：鋼桁の高さ(cm)。

(v) たわみ δ ：

たわみ δ は、仮想仕事の原理から、次式により求められる。

$$\delta = \int_0^l \frac{M_s \cdot \bar{M}_s}{E_s \cdot I_s} dx + \int_0^l \frac{S_s \cdot \bar{S}_s}{G_s \cdot A_w} dx \quad \dots(8)$$

ここに、 M_s 、 S_s ：それぞれ鋼桁に作用する曲げモーメント ($\text{KN} \cdot \text{cm}$)、および、せん断力 (KN) で、 $\bar{}$ の付けたものは仮想仕事によるもの、 G_s ：鋼のせん断弾性係数 (KN/cm^2)、 A_w ：腹板の断面積 (cm^2)。

(2) 断面内の垂直ひずみ分布

各測定点における、荷重-ひずみ曲線は、弾性範囲内ではほぼ線形関係にあり、 $s=1.9$ の弾性合成桁の解析結果とよく一致していた。そこで、弾性範囲内の最大載荷荷重49KNにおける、実験桁各断面のひずみ分布

を、図-6に示す。このとき、実験桁は、中間支点を軸にして、曲げモーメント分布が対称となるので、測定断面のひずみは、中間支点近傍の対称な二つの断面のひずみの平均値として整理したものである。

この図から、実験値は、完全合成桁の解析値よりも弾性合成桁としての解析値($s=1.9$)に近く、床版と鋼桁との間でずれが生じていることを意味している。

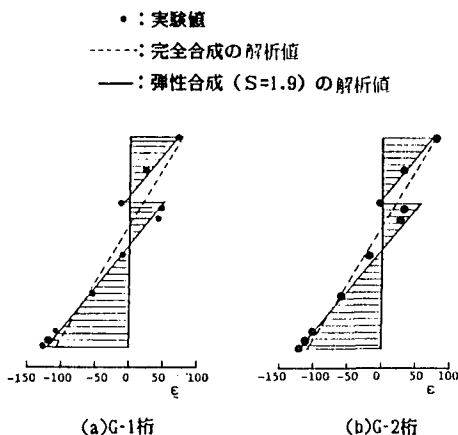
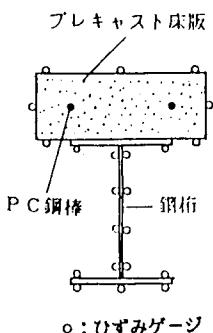


図-6 断面内のひずみ分布（単位： $\times 10^{-6}$ ）

（3）床版、および、鋼桁に

作用する軸方向力の分布

スタッドのバネ定数は、3.で明らかにしたように、作用せん断力が大きくなるに従って低下する。しかし、弾性範囲内の実験の場合、作用荷重が増加しても単位荷重あたりの軸方向力に変動はなく、スタッドのバネ定数の変化が実験桁の弾性挙動に及ぼす影響はほとんど現れなかった。

そこで、G-1桁について、弾性範囲内（載荷荷重49kN）におけるコンクリート床版および鋼桁に作用する軸方向力Nの橋軸方向分布を図-7に示した。

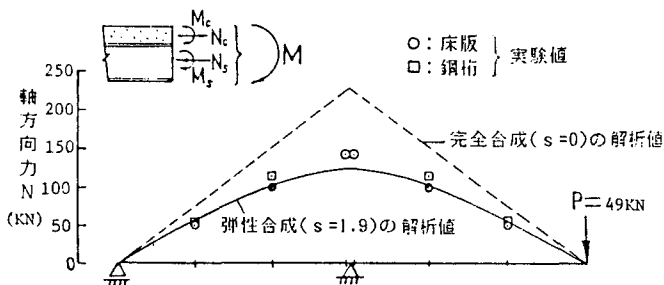


図-7 コンクリート床版、および、鋼桁に作用する軸方向力Nの橋軸方向分布(G-1桁)

この図からわかるように、軸方向力は中間支点上で、完全合成桁に対する解析値よりも40%程度小さくなり、フレキシビリティ定数 $s=1.9$ とした弾性合成桁に対する解析値とよく一致している。また、G-2桁についても同様の性状が認められた。

（4）たわみ分布

図-8は、載荷荷重49kNにおけるたわみ分布を示す。この図から、たわみ分布の実験値は弾性合成桁の解析曲線とよく一致している。

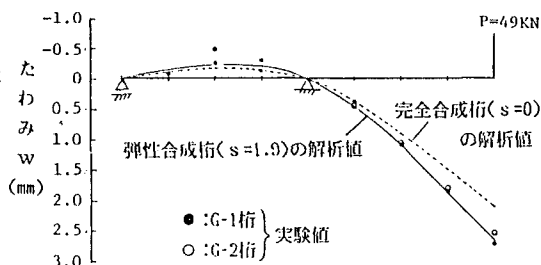


図-8 たわみ分布

5. 弾性合成桁の耐荷力実験結果とその考察

正の曲げモーメントを受けるプレキャスト床版合成桁の耐荷力は、すでに文献2)で述べられている。しかし、負の曲げモーメントを受ける場合の実験データはほとんど見当たらないので、模型桁の弾性範囲内の実験が終了後、荷重を漸増させて破壊実験を行った。それらの結果を以下に示す。

（1）荷重-床版上面の垂直ひずみ曲線

載荷荷重 P と中間支点上のコンクリート床版上面の引張ひずみ ε_{cu} との関係の一例を、図-9 に示す。この図からわかるように、載荷荷重 $P=90\text{KN}$ 付近に至っても、まだフレキシビリティ定数 $s=1.9$ とした弾性合成の解析結果とよく一致している。しかし、 P =約 90KN を越えると、荷重が増加してもコンクリート床版のひずみはほぼ一定値に留まっている。これは、コンクリート床版にひび割れが進展し始め、載荷荷重に対する曲げ抵抗が失われつつあることを示している。

そして、載荷荷重が $P=314\sim 333\text{KN}$ に至ると、ひずみは激減していることから、この段階で床版に顕著なひび割れが生じ、もはやコンクリート床版は引張力に対して抵抗しなくなったことがわかる。もちろん、この段階で、中間支点上においては、肉眼で確認できるひび割れがすでに生じていた。

(2) たわみ変動

G-1桁のたわみの荷重にわたる変動を図-10に示す。この図から、載荷荷重が $P=123\text{KN}$ 以後、たわみの急増が認められる。また、G-2桁も同様の性状を示していた。

(3) 損傷状況

G-1桁で、肉眼で確認できるひび割れが発生したのは約 294KN 、G-2桁では約 245KN であった。そのときのG-1桁の床版上面のひび割れ状況を、写真-1に示す。ひび割れは中間支点上のプレキャスト床版部分とその継目部分、および、スタッド孔の後打ちコンクリートのまわりから進展するひび割れが顕著に観察された。しかし、載荷荷重をゼロに戻すと、PC鋼棒によるプレストレス力により、これらのひび割れは再び閉じて、肉眼ではわからなかった。

また、スタッドは終局状態に至るまで破断することなく、変形を生じるのみで、その変形は桁両端部で最も大きく現れていた。これは、鋼桁・床版間に作用する水平せん断力が、実験桁の両端部で最も大きくなるが、次第に内部に伝達されるためである。

(4) 限界荷重

実験桁の耐荷力としては、上述の床版上面の荷重-引張ひずみ曲線に着目し、2つの限界荷重 P_{cr} 、および、 P_{ub} を表-4に示すように定義してみた。

また、参考のため、弾性合成桁とみなして解析した結果から、 P_{sc} 、 P_{su} および P_{cu} の3つの限界荷重も表-4に示すように定義してみた。そして、これら5つの限界荷重値を、表-5にまとめた。

これらの値の比較から、G-1桁の床版のひび割れ進展荷重 P_{cr} ($\approx 109\text{KN}$) は、コンクリートの引張強度に対応する限界荷重 P_{cu} とほぼ一致する傾向にある。また、プレストレス導入前の載荷によって床版継目にひび割れ

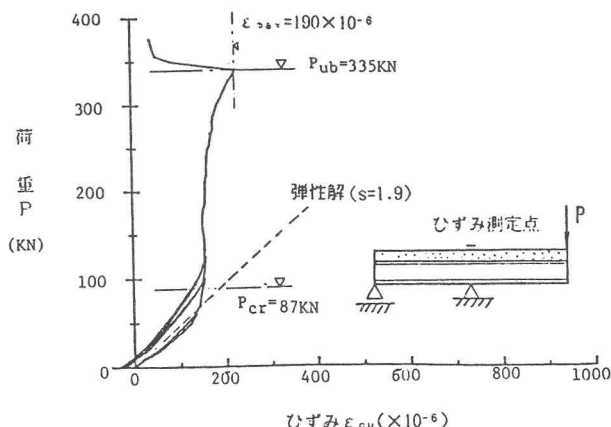


図-9 載荷荷重と支点上・床版上面のひずみとの関係

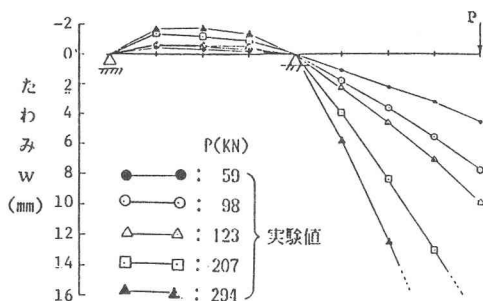


図-10 たわみ変動(G-1桁)

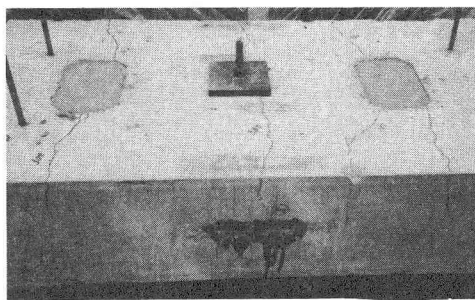


写真-1 ひび割れ発生状況(G-1桁)

がすでに生じていたG-2桁も同様である。

6. 疲労実験結果とその考察

G-3桁で負の曲げモーメントを繰り返し載荷し、各荷重ステップの終了後に静的載荷実験を行って、①断面内のひずみ分布、②荷重－ひずみ曲線、③荷重－たわみ曲線、④荷重－ずれ曲線、および、⑤軸方向力の分布などを調べた。その特徴的なものを以下に示す。

(1) 荷重－ひずみ曲線

各載荷ステップの荷重繰り返し前後における実験桁の中央断面の鋼桁、および、床版内のひずみと載荷荷重Pとの関係を、図-11に示す。

この図から、Step-4まで、実験桁はほぼ健全であることがわかる。Step-5の段階では、繰り返し回数が増えるに従って床版上面の引張ひずみは若干小さくなり、また鋼桁上フランジ・プレートのひずみは大きくなっていることが明らかである。

これらは、紙面の関係上省略したが、断面内のひずみ分布でも確認できた。

(2) 荷重－ずれ曲線

載荷荷重 P と桁端部の鋼桁・床版間のずれ δ との関係を、図-12に示す。この図からわかるように、Step-2までは、繰り返し載荷前後におけるずれの差異は5%以下である。しかし、Step-3では約10%、Step-4では約15%と、繰り返し回数が増加するに伴ってずれは大きくなっており、ずれ止めの剛度が徐々に低下していることがわかる。そして、Step-5では、0→50万回→100万回と繰り返し回数が増加するのに伴って、ずれが激増

表-4 実験桁の限界荷重の定義

限界荷重	限界荷重の定義
ひびわれ進展荷重 P_{er}	床版の上面（引張側）におけるひずみが、荷重増加にかかわらず、ほぼ一定値となり始める荷重
ひびわれ荷重 P_{ub}	上記の荷重 P_{er} 後、床版のひびわれが大きくなり、床版の上面（引張側）におけるひずみが、抜けてしまう荷重
参考値 P_{sc}	スタッドの残留ずれ $\delta=0.08\text{mm}$ 、限界せん断耐力に対応する荷重
参考値 P_{su}	スタッドの終局せん断耐力に対応する荷重
参考値 P_{cu}	版のコンクリートの作用引張応力が引張強度に達する荷重

表-5 耐力実験結果による限界荷重(KN)

実験桁	限界荷重 ひびわれ進展荷重 P_{er}	ひびわれ荷重 P_{ub}	限界荷重の参考値		
			P_{sc}	P_{su}	P_{cu}
G-1	109	314	77	114	107
G-2	87	335	77	114	78

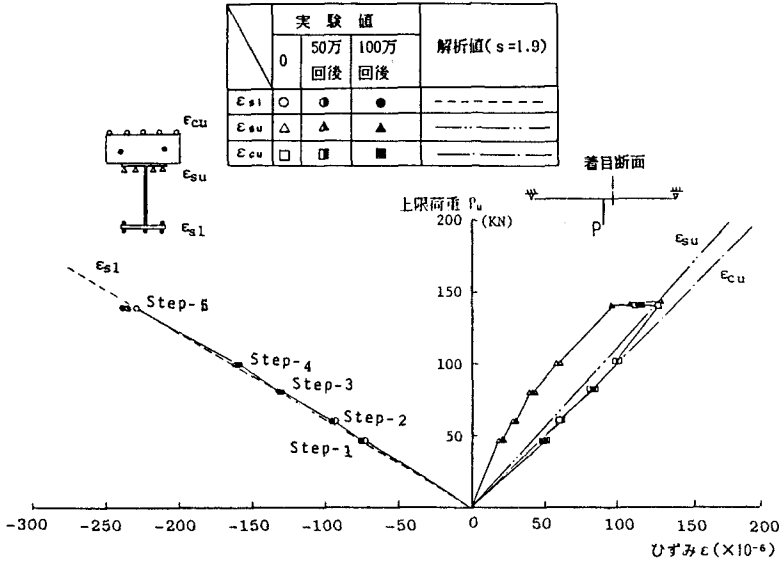


図-11 荷重－ひずみ曲線(G-3桁中央断面)

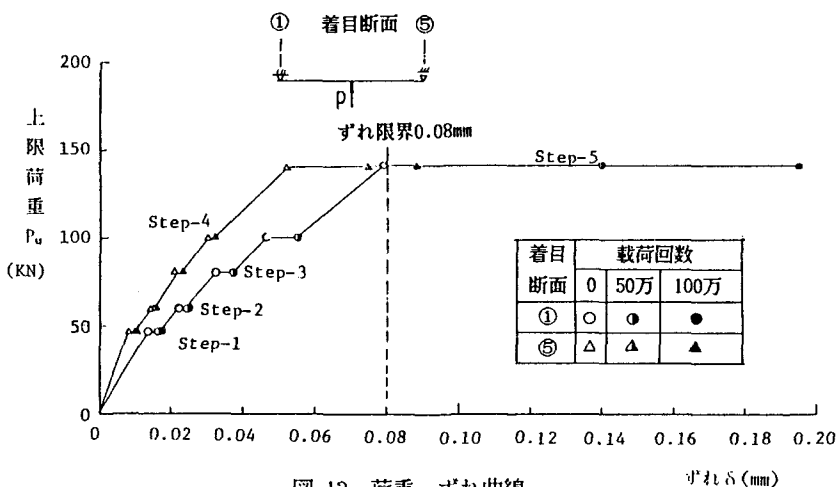


図-12 荷重-ずれ曲線

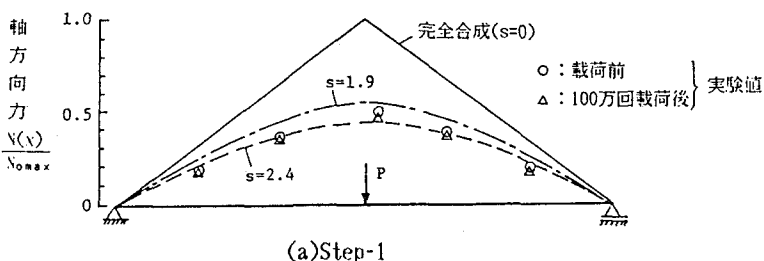
している。このことは、Step-5の段階で、スタッド自身の疲労による破損が進んでいたことを示唆している。

(3) 床版に作用する軸方向力の分布

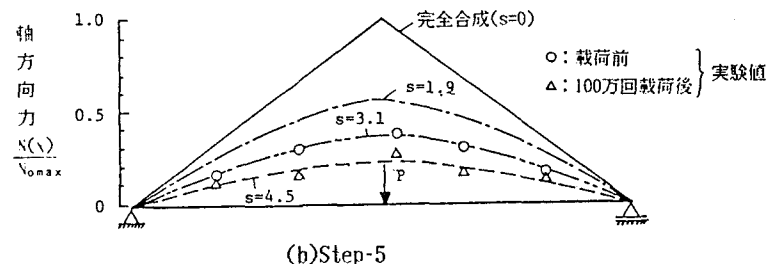
Step-1～Step-5において、

繰り返し载荷前後の軸方向力の分布を求めた。そのうち、特にStep-1およびStep-5についての軸方向力を、図-13に示す。その際、実験値に最小自乗法を適用して、弾性合成桁の解析結果(フレキシビリティ定数 s を種々変化させたもの)を再現する曲線も、破線および鎖線でプロットしてある。

これらの図からわかるように、Step-1では、繰り返し载荷前後の軸方向力分布には、大きな差異は見られない。しかし、上限荷重が大きくなるに従って、実験値に適合させる



(a)Step-1



(b)Step-5

(N_{0max} : 完全合成に対するスパン中央の軸方向力の理論値)

図-13 繰り返し载荷前後の床版の軸方向力 N の分布

るためのフレキシビリティ定数 s は、徐々に大きくなっていくことがわかった。そして、最終のStep-5の段階に至ると、载荷前後の軸方向力に対する s 値は、3.1～4.5と変化し、スタッドの疲労破損に伴ってずれ止めの剛度が大きく低下していることが推測される。

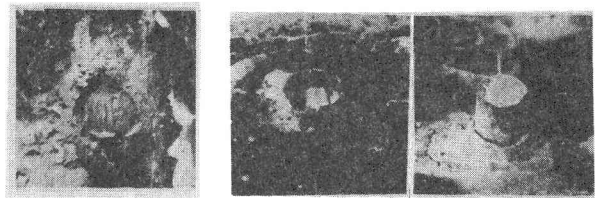
(4) 疲労損傷状況

Step-5の段階で、50万回および100万回载荷後に床版を調べたところ、スタッド孔の後打ちコンクリート部分にひび割れが生じているのが確認された。このとき、桁端部のずれ変位が急増していた。

ついで、Step-5の138万回载荷した時点で、スタッドがすべて破断し、鋼桁と床版とが完全に分離した。このときのスタッドの破断面は、すべて疲労破面を呈していた。そして、その破断位置は、①鋼桁より高さ約

2cmのスタッド幹部、②溶接ルート部、および、③スタッドの溶接上端部の3種に分類できた。その状況を写真-2に示す。

また、床版よりスタッドを取り出して調べたが、大きな曲がりや後打ちコンクリートとの間のゆるみはとくに観察されなかった。



(a)溶接上端部 (b)溶接ルート部 (c)幹部

写真-2 スタッド各部の破断面

7. 弾性合成桁のスタッドの配置法に関する考察

これまでの結果から、ずれ止めに作用する水平せん断力は、弾性合成桁として解析し、文献11)に従って算定してもよいと思われる。ここでは、弾性合成桁を設計するときに必要なスタッド一本あたりに作用するせん断力の実用的な算出方法とその照査法について検討してみた。

(1) 非合成桁の限界

押し抜き試験から推定すると、完全な非合成状態($s > 7$)⁹⁾を再現するには、図-14に示すように、ずれ止めの間隔は非現実的なものとなる。また、道路橋示方書の完全合成桁に対する最大ずれ止め間隔(60cm)に従うなら、フレキシビリティ定数 $s \geq 2$ のずれ止めを設計することは困難であることがわかる。

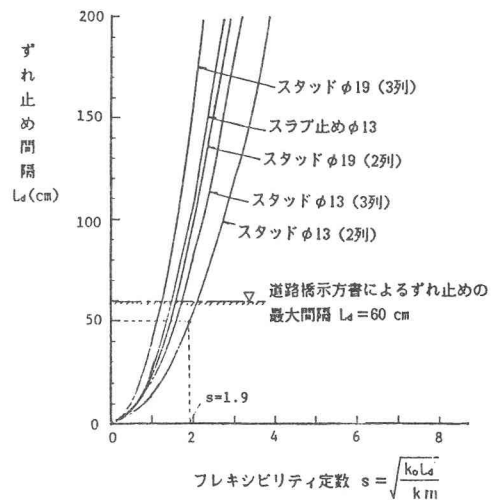


図-14 フレキシビリティ定数とずれ止め間隔の関係

(2) 床版と鋼桁との間の水平せん断力についての基本的な考え方

道路橋示方書¹³⁾では、一つの考え方として着目点の曲げモーメントの符号にかかわらず、完全合成桁と考え、版のコンクリート断面を有効として水平せん断力を計算するものとしている。もう一つの考え方として、負の曲げモーメントを受ける桁断面においては、床版にひび割れが生じた限界状態を考えると、床版はもはや軸方向引張力に抵抗しなくなるという考えのもとでも設計できる。つまり、この場合、版コンクリートを無視し、P C鋼棒によって抵抗すると考えることもできる。

(3) 床版と鋼桁との間の水平せん断力の算出方法に関する考察

図-15には、これまでの実験から推定した床版と鋼桁との間の水平せん断力の橋軸方向変化を示す。図中には、版のコンクリートを有効、および、無効と考えた場合のそれぞれの水平せん断力も示してある。

この図からわかるように、版のコンクリートを無視した方法は、中間支点近傍のごく限られた領域で、コンクリートを有効とした方法に比べて合理的な水平せん断力を与える。しかし、中間支点から少し離れると、 $s = 1.9$ の推定値に対して危険側の値を与えることがわかる。ここで、中間支点近傍の領域は、実験桁全スパンを l とすれば、中間支点の両側約 $l/8$ の範囲となる。これは、3径間連続桁に換算すると、側径間長あるいは中央径間長の約 $1/20$ の範囲に相当する。

一方、版のコンクリートを有効とした道路橋示方書の方法によると、計算値は中間支点近傍の水平せん断力の推定値に対して、約20~80%安全側の値を与えることがわかる。

(4) 床版・鋼桁間の水平せん断力、および、スタッドの作用せん断力の一算定法

上述の結果から、版のコンクリートを有効とした方法では、中間支点の近傍における、スタッドの作用せん断力を過大評価することになる。

弾性合成桁とみなしたときの図-15の端支点①における水平せん断力 T_{sm} は、次式で求められる。

$$T_{sm} = \alpha \cdot T_o \quad \cdots(9)$$

ここに、

$$\alpha = 1 - 1 / \{ \cosh(\omega l / 2) \} \quad \cdots(10)$$

上式は図-15の破線に相当し、中間支点近傍を除いた範囲内で、床版コンクリートを有効とした方法に比べて、合理的な水平せん断力値を与えることがわかる。

これらのことから、鋼桁と床版との間に作用する水平せん断力 T を算定して設計に供するに際し、以下のことがいえる。

- ①プレキャスト床版を用いた連続桁橋で、正の曲げモーメントを受ける領域では、水平せん断力を版のコンクリートを有効とした道路橋示方書の式に従って算出すればよい。
- ②しかし、弾性合成桁として設計を行うのであれば、式(10)に示したパラメーター α を低減係数として使い、式(9)から水平せん断力を求めるほうが合理的である。
- ③また、中間支点近傍のごく限られた範囲内の水平せん断力は、版のコンクリートを無視した方法により求められる。

したがって、スタッド 1 本当たりの作用せん断力 Q_s は、水平せん断力 T を用いて次式で求められる。

$$Q_s = T \cdot l_d / m \quad \cdots(11)$$

(5) スタッドに作用するせん断力の照査法

一般に、スタッドの許容せん断力 Q_{sa} が与えられると、式(11)のスタッドのせん断力 Q_s は、次式によって照査できる。

$$Q_s \leq Q_{sa} \quad \cdots(12)$$

しかしながら、実際に試設計を行ってみると、式(12)を満足する弾性合成桁の設計は、難しいことがわかった。図-15では、負の曲げモーメントを受ける連続合成桁中間支点部を、単純なモデルに置き換えて、弾性合成桁として解析したものであって、実際の連続合成桁の正の曲げモーメントを受ける領域は、剛なスタッドが設けられる。したがって、この剛なスタッドの作用せん断力 Q_s が、式(12)を満足していればよいとも考えられるが、この点については、今後の研究課題であろう。

8. まとめ

本研究により弾性合成桁の静的挙動、耐荷力、および、疲労強度は、床版の引張強度、ならびに、押し抜きせん断試験より得られるスタッドの限界せん断耐力・終局せん断耐力に大きく左右されるということがわかった。具体的には、次の諸点が明らかにされた。

- ①スタッドのバネ定数は、作用せん断力、および、残留ずれが増加するにつれて低下する傾向を呈する。
- ②押し抜き試験によって得られた残留ずれ0.08mmに相当するバネ定数を用いれば、弾性合成桁の静的挙動が十分精度よく推定できる。
- ③プレキャスト床版を用いた弾性合成桁の耐荷力は、スタッドの終局せん断耐力、および、導入プレストレスも含めた床版の引張強度に左右される。

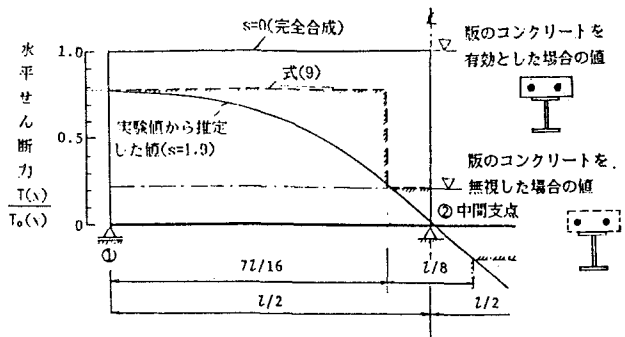


図-15 床版・鋼桁間の水平せん断力の算出方法

- ④プレキャスト床版を用いた弾性合成桁の200万回の繰り返し疲労強度を確保するためには、残留ずれ0.08mmに対応するせん断耐力を基準にとればよい。
- ⑤弾性合成桁にプレキャスト床版を用いても、その連続性はプレストレス導入により十分に確保される。
- ⑥完全非合成桁 ($s > 7$) の状態を再現するためには、ずれ止め間隔を著しく大きくしなければならない。
- ⑦そして、道路橋示方書の完全合成桁に対する最大ずれ止め間隔に従うなら、ずれ止めのフレキシビリティ定数 s は2以上を確保することはできない。
- ⑧フレキシビリティ定数 $s = 2$ のずれ止めを用いることにより、中間支点近傍(連続桁・各スパンの約1/20の範囲)の床版と鋼桁との間の水平せん断力は、版のコンクリートを無視し、P C鋼棒のみに水平せん断力を伝達するものとして算定できる。
- ⑨中間支点から少し離れた断面では、版のコンクリートを有効とした道路橋示方書の設計基準により、水平せん断力を安全側に算定できる。
- ⑩このほか、弾性合成桁としての特徴を踏まえ、上記に低減係数を乗じて水平せん断力を合理的に算定できる方法も示したが、今後さらに、検討する必要がある。

謝 辞： 本研究を行うにあたり、阪神高速道路公団・本社工務部 吉川 紀設計課長、古池正宏技術係長、同・大阪第一建設部 杉山 功設計課長、ならびに(株)横河橋梁製作所・研究所 寺田博昌所長、松本好生課長補佐のほか多数の方々にご協力をいただき、ここに、深謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 土木学会関西支部共同研究グループ：プレキャスト床版を用いた合成桁橋の耐荷力と実用化に関する研究報告書(1)および(2)、昭和60年6月、および、昭和61年6月
- 2) Takenaka, H. Kishida, H. and Nakai, H.: A Study on New Composite Girder using Prestressed Precast Concrete Slab by PPCS Method, Der Stahlbau, s.165~174, 6/1986
- 3) 中井 博・竹中裕文・喜田 浩：プレキャスト床版を用いた合成桁の自動車走行のもとにおける耐久性の実験的研究、構造工学論文集、土木学会、Vol.32A, pp.395~408, pp.81~92、1986年3月
- 4) 中井 博・渡辺英一・竹中裕文・林 圭一：プレキャストコンクリート床版合成桁のクリーブリラクセーションに関する基礎的考察、構造工学論文集、vol.33A, pp.285~298、1987年3月
- 5) 橋 善雄・足立義雄：不完全合成桁について、土木学会論文集、第112号、pp.11~19、昭和39年12月
- 6) 橋 善雄：連続合成桁橋、昭和41年1月、理工図書(株)
- 7) 浜田純夫・有住康則：不完全連続合成桁の有限要素解析、土木学会論文報告集、No.265、pp.1~9、1977年9月
- 8) 小松定夫・佐々木 考：不完全合成格子桁橋の理論と近似計算法について、土木学会論文報告集、第329号、pp.27~37、1983年1月
- 9) 小松定夫・佐々木 考：不完全合成桁橋の合理的設計、橋梁と基礎86-5、pp.23~28、1986年5月
- 10) Mainstone, R.J. and Menzies, J.B.: Shear Connectors in Steel-Concrete Composite Beams for Bridges, Concrete, Vol.1, No.9, pp.291~302, 1967.
- 11) Hawranek/Steinhardt: 鋼橋の理論と計算、山海堂、(橋 善雄・小松定夫訳)
- 12) 島田静雄・高木録郎：合成桁の理論と設計、昭和61年4月、山海堂(株)
- 13) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II.鋼橋編、昭和55年2月
- 14) ECCS: Composite Structures, 1981
- 15) 岡田 清・六車 興：コンクリート工学ハンドブック、1981年、朝倉書店

(1988年1月22日受付)