

上越線水上・湯桧曾間 第8利根川橋りょう模型試験報告

野 口 功*
 森 野 亮 宏**
 小 須 田 紀 元*

1. ま え が き

本試験は上越線複線化工事のうち水上～湯桧曾間にかかる第8利根川橋りょうの設計施工上の問題点を解明するために行なったものである。構造形式は2ヒンジ箱型断面の斜脚ラーメンで構造的には一次不静定構造となっている。スパン 62m の箱形断面をもつ斜脚ラーメンはわが国では最大のものであり外国においても鉄道橋としてはフランスの La Voulte 橋のほかにも数橋あるのみである。このような斜脚ラーメンは基礎に生ずる反力を軸方向力として十分に活用できる架橋点であれば構造的にきわめて有利であるといえる。しかし、この種の橋りょうは設計上では安全であるように設計されていても、細部について十分追求しておかなければならない問題ならびに設計上の仮定が正しいかどうかの確認、さらに余分に安全率を上げて設計している点の改善方法等まだ幾多の疑問点が残されている。

本試験はこれらの疑問点を解明するために行なったものであるが、特に問題とした点を列挙すると次のごとくである。

1. 箱形断面の場合のひびわれ安全率の見積り方についての再確認
2. ラーメン隅角部の圧力壁の応力状態
3. ひびわれ発生の状態
4. ラーメンの変形の仕方
5. ラーメンの破壊挙動
6. 軸方向力と曲げを同時に受ける部材の破壊安全率の見積り方
7. P C 鋼材定着部付近のひびわれ発生
8. 偏心荷重によるひびわれ発生
9. プラスチック ヒンジの発生順序

以上の問題点について信頼度を高めるために模型桁による試験を行なった。

* 国鉄構造物設計事務所
 ** 国鉄信濃川工事局水上工事区長

2. 試験桁の設計ならびに製作

試験桁の縮尺は経費の関係上実物の 1/6 で行なった。試験桁のプロフィールは 図-1 に示す。

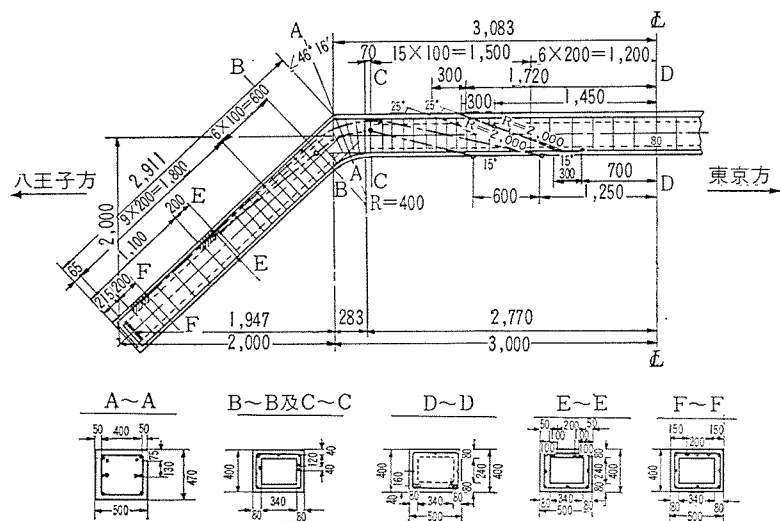
スパン 10m, ライズ 2m 断面の腹部厚, フランジ厚は一様に 8cm とした。P C ケーブルは $\phi 10.8$ mm のストランドを 12 本用いた。実物においては断面は橋側歩道を含んだフランジを有効圧縮縁としているが、模型桁においては単純に矩形断面とした。脚部に入っている部分のストランドは片引きとなっており、水平部材のストランド定着端は欠損断面となるのをさけて突起を設けた。型わくには内わくは、とりはずすしかできないのと桁の変形拘束をさけるため合成樹脂の発泡材を用いた。

隅角部の圧力壁についてはコンクリートの充填が不完全になるのをさけるために、あらかじめプレキャストで造っておき組込んだ。

ラーメンのヒンジは、鋳鉄製のシューで可動ブロックにとりつけ、この可動ブロックは固定したブロックとの間にロードセルを介している。

試験桁に使用したコンクリート、グラウトの配合ならびに強度、および P C 鋼線の機械的性質については表-1 に示す。

図-1 第8利根川橋りょう模型桁詳細図



表一 試験桁の材料の諸性質

a) コンクリートの配合

材 料	重 量	摘 要
セメント	360 kg/m ³	最大寸法 10 mm
水	144 "	
水セメント比	40 %	
絶対細骨材率	52.5 %	
砂	1 021 kg/m ³	
砂 利	820 "	

b) グラウト配合

材 料	重 量	摘 要
セメント	100 kg	早強セメント +フライアッシュ = 20%
水	42 kg	
アルミ粉末	セメント重量の 0.01/100	ポゾリス No. 8
混和材	セメント重量の 0.25/100	

c) コンクリートおよびグラウト強度

材 令	σ_{16} (プレストレス) 導 入 時	σ_{24} (載荷試験時)	σ_{30} (破壊試験時)
圧縮強度	380 kg/cm ²	344 kg/cm ²	373 kg/cm ²
引張り強さ係数		261 "	
ヤング係数			
グラウト圧縮強度	$\sigma_7=215$ kg/cm ²	$\sigma_{14}=275$ kg/cm ²	

テストピースはいずれも空中放置

d) P C ストランド (φ 10.8 mm)

引張強度	降伏点†	破断時のひずみ*	ヤング係数	断面積
188 kg/mm ²	171 kg/mm ²	7.2%	1.94×10^6 kg/cm ²	70.0 mm ²

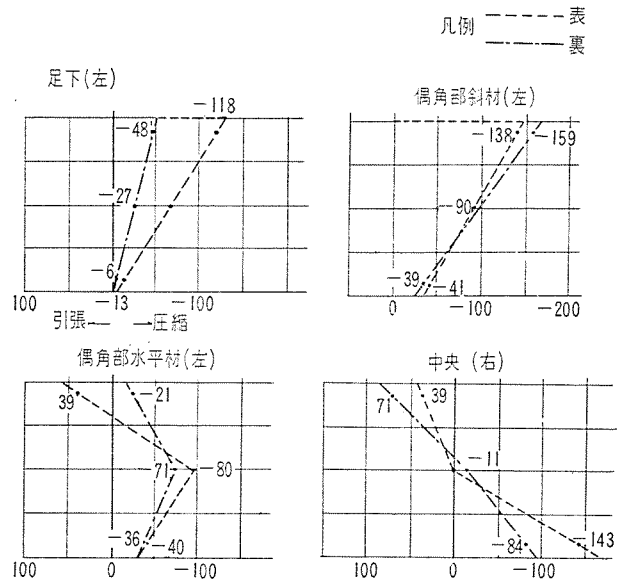
† 0.2% 残留ひずみ * 60 cm 間

プレストレスは単線緊張用 センターホール ジャッキ 2 台を使用し、水平材の鋼材については両側からの緊張を行ない、脚部の鋼材については片側からの緊張によった。コンクリート表面にはったワイヤー ストレイン ゲージによる測定結果を表一2、図一2 に示す。

3. 試 験 方 法

載荷試験は図一3 および図一4 に示すごとく載荷装置により載荷点間隔を 2 m とした。2 点对称載荷、2 点非対称載荷試験を行なった。載荷重はテンションバーを介した。ひずみにより荷重の補正を行なっている。載荷は対称載荷、非対称載荷と 2 回に分けて行ない、各回においてダイヤル ゲージによるラーメンの変形測定、コンクリート応力の測定ならびにモールド ゲー

図一2 プレストレス時の断面応力 ひずみ (×10⁻⁶)



表一2 プレストレス時のひずみの計算値と実測値の比較

	プレストレス† kg/cm ²	ひずみ×10 ⁻⁶ 計 算 値*	ひずみ×10 ⁻⁶ 実 測 値
中 央 部	59.23	198	180
隅角部水平部	55.54	185	182
隅角部斜材部	36.20	120	113

† 自重による応力を差引いた値

* $E=3 \times 10^4$ kg/cm² と仮定

シによる圧力壁応力測定を行なった。

載荷順序は次のとおりであった。

- (1) 荷重 0 より荷重を漸次増し、設計荷重 (10 t) まで 2 t きざみで各測点の測定をする。この操作を 2 回繰り返す。
- (2) 荷重 0 より荷重を漸次増し、ひびわれ発生まで各測点の測定をする。10 t 後は 1 t きざみで測定。
- (3) ひびわれ再開まで (2) の操作をくりかえす。
- (4) 載荷点を移動し非対称載荷としてひびわれ発生

図一3 載荷装置一般図

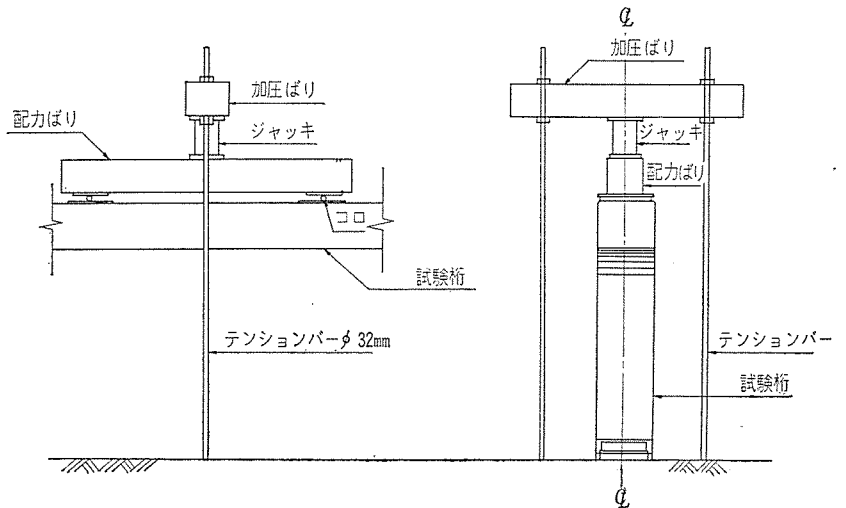
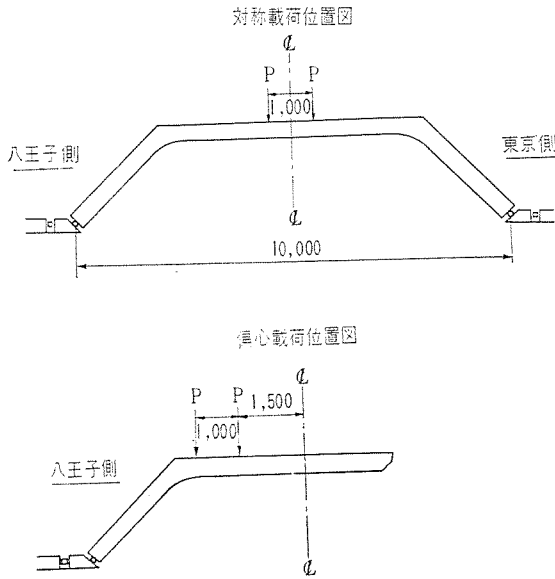


図-4 載荷位置図



まで荷重を漸次増し、測点の測定をする。10 t 後は 1 t きざみ。

(5) 荷重を 0 から漸次増し、破壊まで上げる。同時に測点の測定をする。

4. 実験結果の考察

(1) ひびわれ発生

コンクリートの引張強度は設計においては土木学会のプレストレスト コンクリート設計・施工指針では 50 kg/cm² をとっているが、実際の供試体による引張強さ係数試験では 26.1 kg/cm² を示した。それにもかかわらず実測のひびわれ荷重は隅角部斜材を除いていずれも計算値を下まわっている。

このひびわれ荷重の相違の原因として、次の3つが考えられる。すなわち

1. プレストレスの減少からくるもの
2. コンクリート引張強度
3. P C 鋼材配置の誤差からくるもの

第1点のプレストレスの減少については本模型桁については表-2 から 40 kg/cm²、60 kg/cm² の範囲にあり、実測にもとづくひずみと比較してみると 85~100% の間にあることがわかる。したがってプレストレスとしては、6~9 kg/cm² の違いがあると思っさしつかえない。これをひびわれ荷重に換算すると 2.2~2.8 t の相違となる。

次に第2点のコンクリートの引張強度の違いから生ずるひびわれ荷重の違いの範囲は、コンクリートの引張強度を 26.1 kg/cm² 以上にとれば、ひびわれ荷重の実測値との開きは、ますます大きくなる。

第3点の P C 鋼材配置の誤差からくるプレストレス

の違いは一般にコンクリートの打設にともなって鋼材が沈むのが普通であるため、ひびわれ荷重としては大きくなる方向で第2点と同一の傾向をます要素となる。ただ配置がプレストレスの減少の方向にあったとすると、本模型桁にあっては 1 cm の違いで、3~3.5% の範囲になり結局ひびわれ荷重としては、0.4~0.7 t の相異となる。桁高 40 cm 程度のもので、ケーブルの平均偏心量 1 cm の狂いは、ままたることはあるが、それ以上の狂いは予想できない。

以上の諸検討からひびわれ荷重の計算値と実測値の狂いの原因は第1点と第2点が大きな部分を占めることになる。ちなみにプレストレスの量を実測のひずみと実測のコンクリートの弾性係数 $E_c = 2.54 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ を用いて対称載荷の場合ひびわれ荷重を比較すると表-3

表-3 対称載荷のひびわれ荷重の計算値と実測値の比較

	理論値 t	実測値 t
スパン中央部	+12.5	+13~14
隅角部水平材	-16.1	-14~15
隅角部斜材	-12.4	-15~16

のごとくなる。隅角部斜材を除いてはやや近似性のある値を示し

た。小丸川の実験研究の報告にあるごとくコンクリートの引張強度を箱型断面の特殊性から純引張強度を用いたひびわれ荷重に実測値がよく一致していることを裏づける結果となった。

実際の構造物では対称に荷重がかかるという場合は少なく、そのほとんどが非対称となっている。そこで荷重を偏心させたときのひびわれ荷重の計算値と実測値の比較をしたものが表-4 であるが、計算の結果とよく合っていることがわかる。

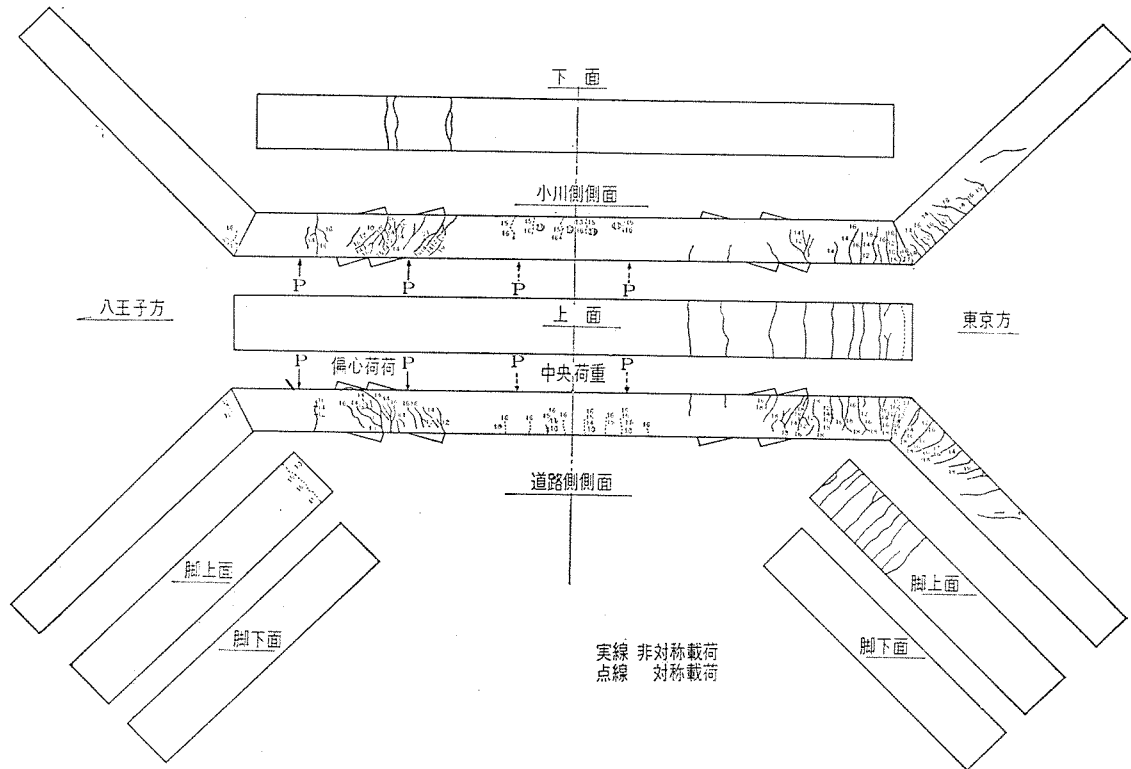
表-4 非対称載荷のひびわれ荷重の計算値と実測値の比較

	理論値 t	実測値 t
s 断面 (載荷中心位置)	+ 9.2	+10
t 断面 (載荷点の対称位置)	-10.1	-11
隅角部水平材 (載荷点から遠い位置)	-14.0	-15
隅角部斜材 (載荷点から遠い位置)	-10.8	-12

ひびわれ発生の状態は図-5 に示すとおりである。

ひびわれが最も早く出たのは載荷点直下ではなく力の差の生ずる所、すなわち定着端付近であって特に大きなひびわれ幅となり破壊に至っている。載荷点付近はラーメン構造にあっては応力が両振りする所であり、P C 鋼材も断面の中立軸付近に集まり一様な分布をしていない。また定着部付近はプレストレスの不連続点となっているし応力集中を起こしやすい断面となっている。この付近のひびわれ安全率を設計断面なみに上げるには設計荷重作用時に多くの圧縮応力を残し、さらに配力鉄筋を

図-5 ひびわれ発生状況図



配置して、できるだけ応力の均等化を計らなければならない。

PC 桁のひびわれ現象は後に述べるたわみの現象からもよくわかるごとく、ひびわれ後の剛性は急激に落ち、疲労についても、ひびわれ発生により PC 鋼材の応力変動が急激に増加し、安全性が低下するので、箱型断面のひびわれ発生による安全性の低下をおぎなえるように、T型断面の場合より多少控え目な設計にしておく必要がある。すなわち、設計荷重時に多少圧縮応力を残すようにすると、引張鉄筋を多目に配置するような配慮が必要である。

破壊荷重の計算値および実験値は表-5 に示してある。

表-5 破壊荷重の計算値と実測値の比較

	破壊曲げモーメント計算値 t	実測値	破 壊 荷 重			
			弾 性 計 算		塑 性 計 算	
			計算値	実測値計算値	計算値	実測値計算値
s 断 面 (載荷中心位置)	+9.1	18	15.2	11.8	15.7	1.14
t 断 面 (載荷中心と 対称の位置)	-7.2		17.0			

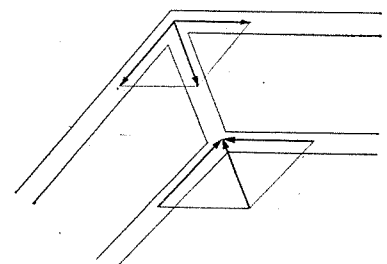
実測の破壊荷重は、弾性計算による破壊荷重塑性計算による破壊荷重にくらべてともに大きい値を示した。プ

ラスチック ヒンジの発生を考慮し曲げモーメントの再分配を認めた塑性計算値は、弾性計算値よりもいくぶん大きい程度であるが、このことは、弾性理論によって求めた破壊荷重は常に安全側の数値を与えることになる。この事実は、すでに猪股博士、坂博士らの実験においても認められている。

(2) 隅角部の設計

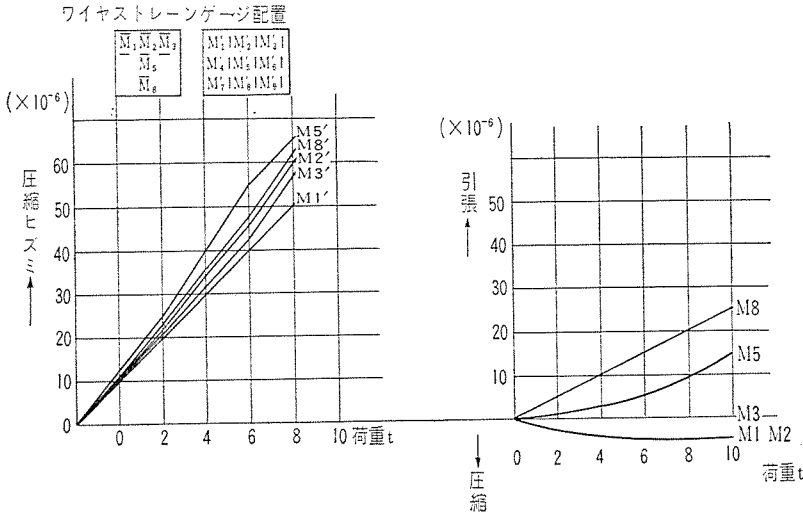
ラーメンの隅角部においては図-6 に示すように上下フランジに作用している引張あるいは圧縮力が方向を変えなければならない。上フランジの引張力および下フランジの圧縮力が方向をかえるた

図-6 隅角部の力の釣合



めには、フランジおよび腹部にせん断力を生じ、これによって力の釣合が保たれる。しかし、隅角部に圧力壁を配置し、図-6 に示すような釣合を生じさせることによって、隅角部付近の複雑な応力を圧力壁の軸圧縮力という単純な応力ととらせることができるはずである。実際には、圧力壁を配置しても一部の力は腹部を通して流れ、圧力壁にどれだけの力が作用するかを計算によって求めることは簡単ではない。このため、模型試験の際に、この圧力壁のひずみを測定し、どのくらいの力が圧

図-7 ひびわれ前の圧力壁の荷重とひずみ



力壁を流れるかを検討してみた。

模型桁に配置した圧力壁は厚さ10 cmで、あらかじめワイヤストレインゲージを埋め込んでプレキャストにより製作し、本体のコンクリートを打つ前に、所定の位置に配置し、本体のコンクリート打ちによって、本体と一体になるようにした。圧力壁内の鉛直方向ならびに水平方向のひずみの測定結果は図-7、8に示すとおりである。

圧力壁に伝わる圧縮応力を簡単に見当をつけるために、次のような方法によって概略の計算を行なって見た。

すなわち、上下フランジの引張あるいは圧縮力のう

図-8 圧力壁内の応力の分布
設計荷重時におけるひずみ (×10⁻⁶)

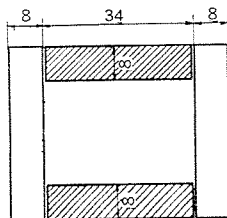
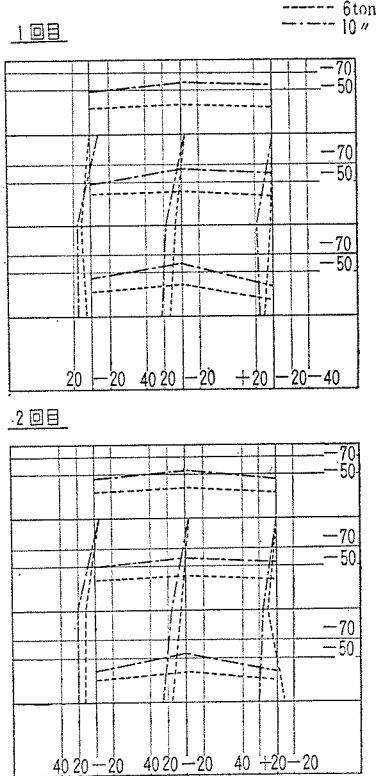
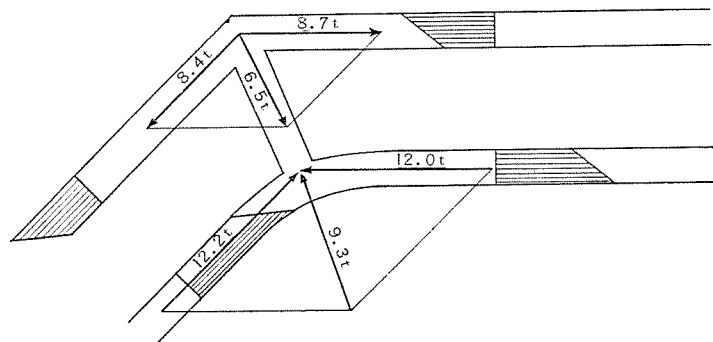


図-9 圧力壁の応力分布



ち腹部の直上の部分に働く力は腹部に直接伝わるものとし、図-9の断面のハッチの部分に作用する力だけが圧力壁に伝わるとする。模型桁における設計荷重が作用したとき図-9のような力が作用する(プレストレスにより圧力壁に作用する力は、ここでは考えない)。これによると上フランジから6.5 t、下フランジから9.3 tの力がかかり、その方向はほぼ圧力壁の方向に作用している。上フランジからの力と下フランジからの力が異なるのはラーメンの軸線に沿う推力の影響があるためであり、この不均等力は圧力壁と

腹部の間のせん断応力あるいは、腹部内におけるせん断応力によって取られることになる。一方図-7、8から圧力壁に作用する圧縮ひずみは、測定されたひずみが小さいためばらつきが多いが、平均的に 50×10^{-6} を考慮することができる。圧力壁のコンクリートのヤング係数を $40 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ と仮定すると、圧力壁に作用している圧縮力は6.8 tとなる。

以上の試験結果をみて、ラーメン隅角部の設計上の注意事項として次のような結論が考えられる。

a) 圧力壁に作用する力の上側と下側の平均値を測定値から検出することはできなかったが、圧力壁には計算で求めたのとそう大きな差のない圧縮力が作用している。したがって、ラーメン隅角部に圧力壁を設けることにより腹部に生ずべき非常に複雑で、かなり大きな影響を与えると考えられる応力の、相当部分をさけることができ、ラーメン隅角部の設計上の未知要素を軽減することができるものと考えられる。

b) 上下フランジ、腹部、圧力壁は一体の構造となっているため、腹部と圧力壁の力の分担、すなわち、腹部が圧力壁をかねると考えた場合の有効幅の取り方などには、まだ解決すべき問題も残されており、上記の簡単な

圧力壁の応力の計算と実際に生ずる応力の間には 30% 程度の差がある。このため、実際の設計において、圧力壁を設けても、隅角部付近の腹部には複雑な応力が残されているので、設計にあたって十分な鉄筋を配置するように心がけることが望ましい。

c) 圧力壁の厚さを決めるためには、上記の簡単な計算によって決めても実用上さしつかえないものと思われる。しかし、圧力壁の厚さを厚くし、圧力壁に働く圧力を多く受けられるようにしておけば、それだけ腹部の負担を減らすことができるので、圧力壁の厚さは十分余裕のあるものとしておくことが望ましい。

d) 上記の検討においては、試験荷重のもとにおいて生ずる力に対してのみ行なった。しかし、プレストレスの影響を考慮すると、プレストレスによって生ずる応力は荷重によって生ずる応力と反対方向であり、上フランジに大きな圧縮応力、下フランジには引張応力が生ずる傾向となる。このため、プレストレスによっては、圧力壁はむしろ引張をうける壁となる。圧力壁が引張力をうける状態において、圧力壁を取り除いたとすると、圧力壁が受けていた引張力を腹部が受けることになる。腹部に鉛直方向の引張応力を生じることが、斜め引張応力が大きくなる傾向を生じ、せん断力に対して常に不利になる。プレストレッシングの際に圧力壁のひずみ測定を行なわなかったので明確なことは述べられないが、プレストレスによって生ずる腹部の引張力を圧力壁でもたせることは、荷重による圧縮力を圧力壁で受けもたせること以上に重要な意味があるかも知れない。なおこの点については今後の研究によらなければならない。

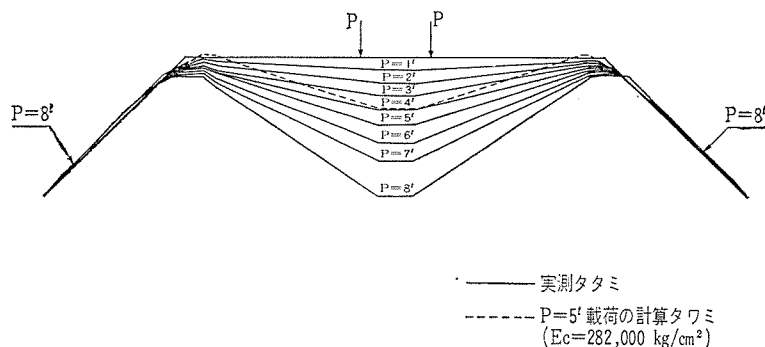
(3) 模型桁の変形

対称荷重時のたわみは 図-10 に示すとおりである。設計荷重時 $2P=10\text{ t}$ における計算値との比較を 表-6 に示した。たわみ曲線は傾向としては理論上のたわみ曲線と相似しているが、絶対値では、スパン中央で計算値より大きく支点に近づくと、計算値より小さくなっている。したがって、支点回転角は計算値より小さな値となっている。非対称荷重時実測たわみが、計算値と比較的よい近似を示していることを考えると、計算に用いたコンクリートの弾性係数 $E_c=282\,000\text{ kg/cm}^2$ は、ほぼ適当な値と考えられるので、対称荷重時の絶対値の差は支

表-6 対称荷重の場合の変形 (設計荷重 $2P=10\text{ t}$)

	計算値	実測値	実測値/計算値
支点回転角	-5.79×10^{-4} ラジアン	-1.88×10^{-4} ラジアン	0.325
スパン中央たわみ	2.84 mm	3.86 mm	1.36

図-10 対称荷重たわみ図



点の移動によるものと思われる。支点の移動が 1.2 mm であるとスパン中央のたわみは計算上 3.86 mm となり、実測値と一致する。実測された支点移動 0.05 mm であったが、この値にはヒンジ部分のなじみ、あるいは、ゆるみ等は入っていないので、実際の支点移動はかなりあったのではないかとと思われるが、不明である。非対称荷重時のたわみ曲線は 図-13 に示すとおりである。表-7 に計算値と実測値の比較を示した。

設計荷重として荷重中心の断面の設計荷重 $2P=6.3\text{ t}$ を用いた。図-11, 図-14 に対称荷重, 非対称荷重の荷重-たわみ図を示した。いずれの場合もひびわれ荷重をこえるとたわみは急激に増加している。ひびわれ発生後、設計荷重以上の荷重をくり返すと、残留変位のため変位が非常に大きくなる (図-14)。

支点回転角は 図-12, 図-15 に示すとおりである。たわみと同様にひびわれ発生前後より角変位も急激に増加している。支点移動量の測定が十分でなく、斜材部の

表-7 非対称荷重の場合の変形 (設計荷重 $2P=6\text{ t}$)

	計算値	実測値	実測値/計算値
荷重方支点回転角	5.96×10^{-4} ラジアン	6.25×10^{-4} ラジアン	1.05
非荷重方支点回転角	-0.6×10^{-4} ラジアン	-11.04×10^{-4} ラジアン	1.84
荷重方支点より 3.5 mm の位置のたわみ	1.49 mm	1.43 mm	0.96

図-11 対称荷重スパン中央荷重-たわみ図

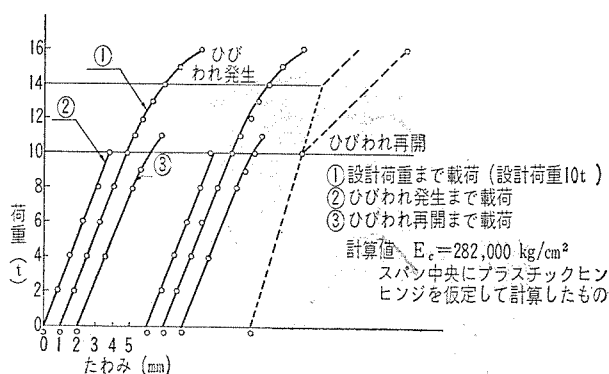


図-12 対称載荷支点回転角

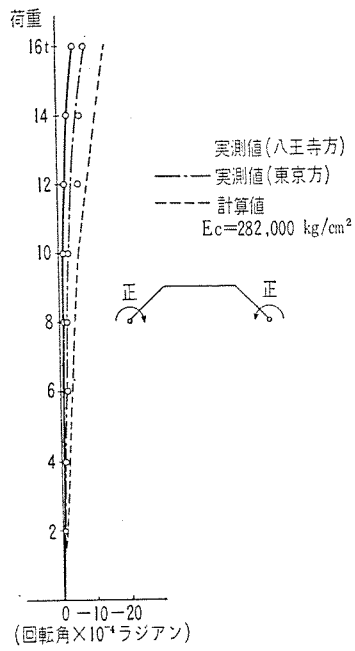


図-14 非対称載荷時のたわみ

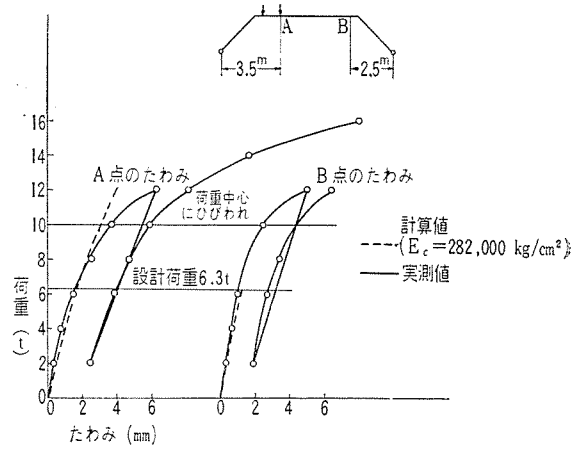


図-13 非対称載荷時たわみ (尺度: たわみ 1 mm に対し 5 mm)

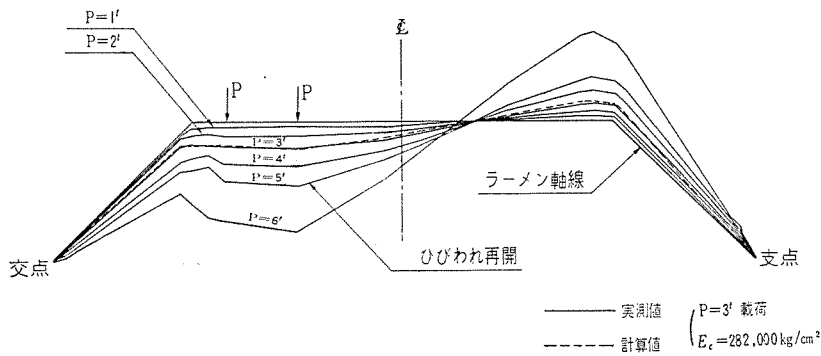


図-15 非対称載荷支点回転角

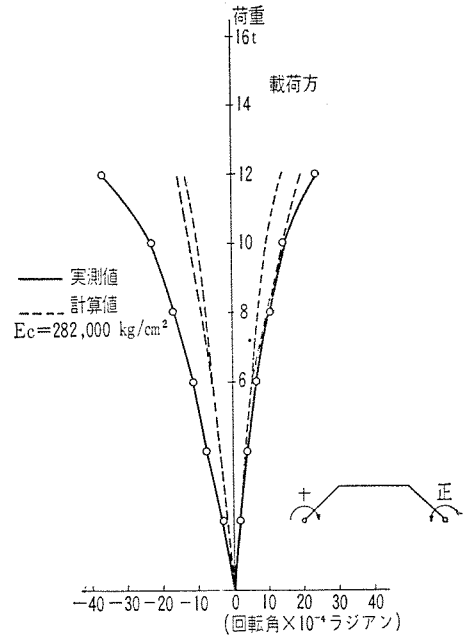
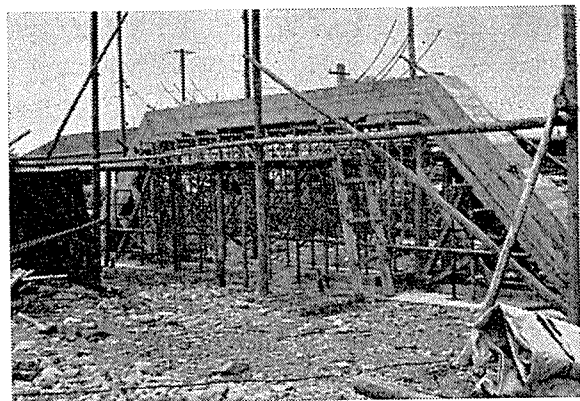


写真-1 隅角部配筋ならびに内部型わく発泡スチロール



写真-2 模型桁の全ぼう



写真—3 ひびわれ発生状況



測定値について疑問の点もあるが、ひびわれの発生がなく、弾性係数を適正に選べば実際には弾性計算によって検討すれば安全性は確保できると考えられる。

5. む す び

わずか一つの模型による試験であり、ラーメンに関するあらゆる問題を解明することは不可能であるが、いくつかの問題点について、明らかにすることができ、また今後の検討の必要な点を指摘することもできる。それらのおもな点をあげると、次のとおりである。

a) ひびわれに対する安全性が、箱型断面において小さくなるので、プレストレスに余裕をもたせるとか、あるいは上下フランジに十分な軸方向の鉄筋を配置することが望ましい。

b) 桁断面に P C ケーブル定着のための切欠きあるいは突出部を設けると、その部分に大きなひびわれが発生するおそれがある。したがって途中で P C ケーブルを定着する場合には、なるべく断面の図心近くに定着し、上フランジの上側あるいは、下フランジの下側に切欠きを設けないようにするのが安全である。さらに定着具付近は、十分な鉄筋によって補強することが必要である。

c) ラーメン隅角部における圧力壁には、活荷重によって相当大きな圧力がかかることが明らかになったが、この事実から推察するに、プレストレス導入直後には、この圧力壁に相当大きな引張力が作用することが想像さ

れる。したがって場合によっては、この圧力壁にプレストレスを与える必要がおこってくるかも知れない。また、隅角部のウェブが圧力壁の一部となって作用するが有効幅の決め方については、なお研究を要する。

d) ラーメンの破壊安全度の計算は、現状においては、弾性計算によっても大きな経済的損失はないものと思われる。

本試験にあたって、試験体の製作ならびに測定は、オリエンタルコンクリート K K また測定の一部は共和電業によって担当していただいた。担当された方の御努力に対して厚く御礼申し上げる次第である。

参 考 文 献

- 1) 和仁達美・川口輝夫・菅原 操・野口 功：“小丸川 P C 鉄道橋の架替え工事ならびに関連して行なった実験的研究報告”，土木学会論文集，No. 76, 1961.
- 2) 猪股俊司・渡辺 昭：“プレストレスト コンクリート ラーメンの破壊試験”，材料試験 June 1959.
- 3) A.A. Topractsoglov, L.S. Beadle, & B.G. Johnston : Connecting for Welded Continuous Portal Frames Part I ~Part III” Welding Journal July 1951, August 1951, November 1952.
- 4) 猪股俊司：“プレストレスト コンクリート スラブ式 2 ヒンジ ラーメン橋の設計法に関する研究”，土木学会論文集，第 48 号.
- 5) C.E. Ebberg, R.E. Walther & R.G. Slutter : “Fatigue resistance of Prestressed concrete beams in bending” A.S.C.E., Jour. of the structural Div. 1957-7.

1963.5.10・受付

「P C 設計施工資料」欄の御利用について

会員各位の御便宜をはかるため協会誌巻末に「P C 設計施工資料」欄を常置し、好評を博しております。より多くのデータを効果的に紹介したいので会社、団体の御利用をお待ちしています。なお、本欄についての御問合わせは事務局に御願いたします。

1. 対 象：P C 関係の材料、工法、機器
2. 内容・体裁：製品、工法等の特徴、性能、規格、使用法、等を一件あたり会誌 2 ページ分にまとめて掲載する。用紙は厚紙を用い切離して利用しうるようにする。
3. 内容の検討：提供先において十分検討されたものを編集委員会でチェックし内容の客観性を確保する。