

# ピルツ PC 高架橋に関する実験 (その1)

——ゲルバーヒンジ部に関する実験——

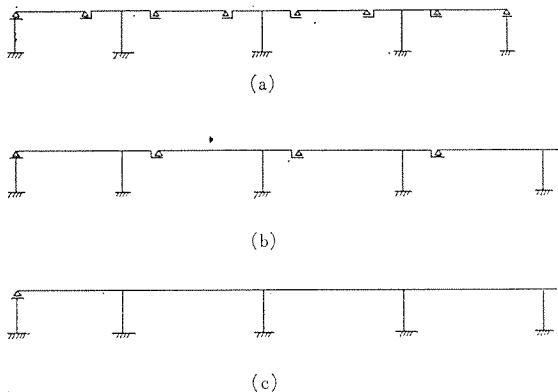
木下 忠 朋\*・泉 満 明\*  
光岡 毅\*\*・三村 長二郎\*\*\*

## 1. はじめに

ピルツ PC 高架橋は、プレストレスト コンクリート床版(あるいは桁)が円形または多角形状の一本の脚柱に剛結されて、荷重による応力が直接柱に流れ込む構造のものが基本的構造単位となっているものである。この基本的構造単位が<sup>まのこ</sup>葺に類似していることからピルツと呼ばれている。構造形式としては図-1に示すようなものがある。

この形式の高架橋は ① 橋脚が一本脚であるため、高架橋の下の交通計画に対して有利、② 桁高が小さいためランプの延長が短くなる、③ 車道幅員や横断勾配が変化しても、同一の外観を保持することが可能、④ 特殊な支保工(グリュストワーゲン)を使用することによって路下の交通をほとんど支障しないで施工が可能、などの特長を有しているので、これの都市内高架道路構造物に対する適用についての研究が進められている。しかしながら図-1(a)あるいは(b)の構造形式では、伸縮継手の設置箇所が多く、自動車走行上の難点があり、また構造上ゲルバー形式のヒンジとなり、構造上の弱点となる場合が多い。(c)形式では温度乾燥収縮による応力が設計上問題となる。しかも現状では、ピルツ本体の

図-1 ピルツ橋の構造形式



\* 首都高速道路公団  
\*\* 建設省土木研究所  
\*\*\* 鹿島建設株式会社技術研究所

妥当な設計法も不明であり、施工経験も少ない。

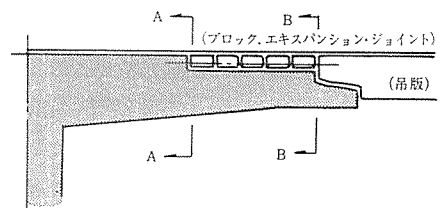
本報告は、主として(a)形式について、上述の諸問題点を明らかにし、その解決法を見出すために行なった実験であり、“実験(その1)”においては、スラブ形式のピルツ橋のゲルバーヒンジ部を対象として、その静的挙動、疲労強度等に検討を加えたものである。さらに次回に報告する“実験(その2)”においては、実施されたピルツ橋に対し載荷を行ない、設計、施工より検討を加えたものである。

## 2. 実験の概要

ピルツ PC 橋のヒンジ部の側面は図-2に示すように、ブロックエキスパンションジョイントのための切欠部(A断面)と吊版を載せるための切欠部(B断面)を有する特殊な形状をしている。本実験はこの2ヵ所の切欠部を持ったヒンジ部の構造的な特性を明らかにしようとしたものである。実験は想定された設計案を対象にしたが、切欠部は橋軸方向の挙動が主要であるので、その方向に沿って切出したはりを試験体とした。実験ではまず原設計案に対して縮尺を3/4にしたPC模型試験体を2個製作して、静的載荷試験と疲労試験を行なった。また応力集中の影響がある切欠部付近の局部応力状態を調べるため、2次元光弾性実験を行なった。

しかし、これらの実験の結果、ブロックエキスパンションジョイント用の切欠部は局部的な応力の影響により、十分なひびわれ安全度を有していないことが明らかになったので、その改良を試みた。改良案についてはやはり形式であるが、実物大寸法でPC模型試験体を2個製作し静的載荷試験と疲労試験を行なった。その

図-2 ヒンジ部付近の縦断面



結果、改良効果は確かめられ、局部応力の影響に十分留意すれば通常のPC桁の設計に用いている「はり理論」が有用なことがわかった。

### 3. ヒンジ部（原設計案）PC 模型実験

#### (1) 実験方法

試験体は静的試験用および疲労試験用とも図-3に示したとおりである。はりとしての試験体の幅は補強筋やPC鋼棒の間隔から決めた。プレストレスの導入は、 $\sigma_c \geq 350 \text{ kg/cm}^2$  で実施し、鋼棒の緊張力はダイナモメータで管理するとともに鋼棒に取り付けたワイヤーストレインゲージによりひずみを測定して確認した。また試験体に生じるプレストレス分布も同じくストレインゲージによって測定した。なお、試験体製作に用いたコンクリートや鋼材は、あとで述べる改良案の試験体と同様である。

静的荷重試験は試験体を反力床上に固定し、片持ばりとして、その先端に油圧ジャッキで荷重を加えた。試験はまず初ひびわれ発生までの試験、ついで再びひびわれ試験、破壊試験の順に実施した。おのおのの試験では試験体に生じる応力やたわみ、またひびわれ発達状況を調べた。

疲労試験はやはり片持ばり形式にしてその先端に正弦形の繰返し荷重を 300 rpm で加えた。繰返し荷重は図-4に示すような段階で行ない、下限荷重は実橋の死荷重に相当し、上限荷重は死+活荷重に相当するように選んだ。荷重の大きさはロードセルをブラウン管オシログラフに継いで適時確認した。また試験体の異常なひずみやひびわれを調べるため、試験の途中適宜繰返し荷重を休止して静的荷重試験を行なった。

図-3 ヒンジ部（原設計案）模型試験体

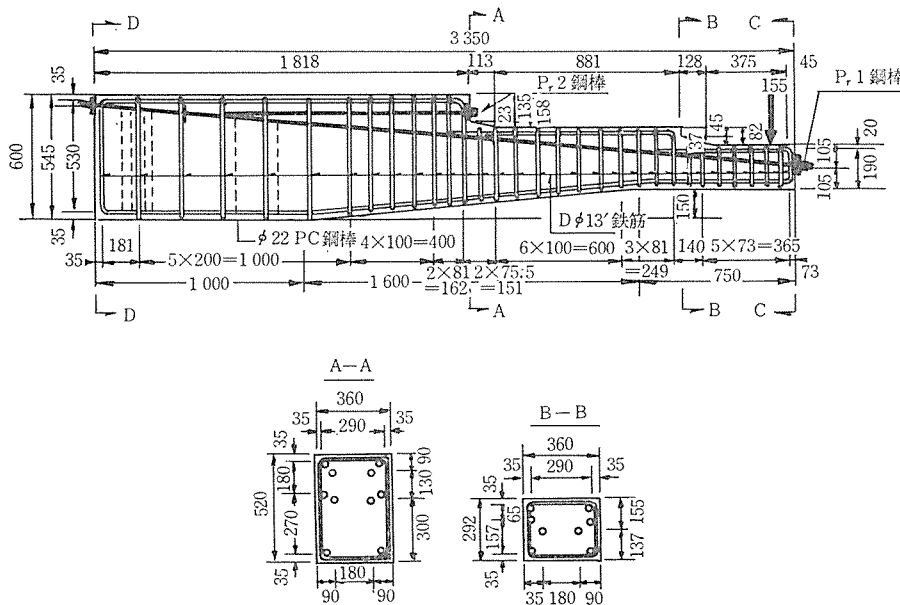
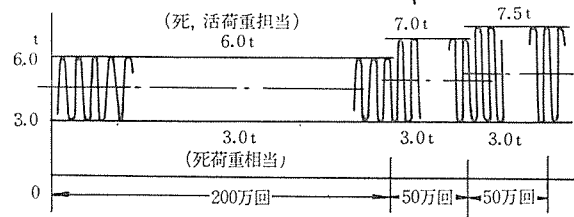


図-4 繰返し荷重段階



#### (2) 実験結果とその考察

静的荷重試験におけるプレストレス分布や荷重による応力分布には、切欠部において応力集中効果が認められる（応力集中度）=（実測値）/（はり理論による計算値）の形でまとめると大体表-1のようになる。すなわち、ヒンジ部の先端で定着されたPC鋼棒（Pr 1）はA, B両断面を補強するが、A断面切欠部に定着された鋼棒（Pr 2）はその定着部に生じる局部応力（引張応力=この実験例では  $50 \text{ kg/cm}^2$  に達する著しいものである）により逆に不利な影響を与えていることがわかる。

一方プレストレス分布と荷重による応力分布の実測結果をひびわれ発生直前について合成してみると図-5のようになる。この図からA断面切欠部ではプレストレスが低下しているが、B断面切欠部では計算結果とよく対応していることがわかる。しかしA断面切欠部でもPr 2によるプレストレス（定着端局部応力）を除外すれば同様に対応する。したがって、プレストレスと荷重による応力の切欠部における応力集中分は両者を合成すれば互いに打消しあうことがわかる。初ひびわれ荷重についても実測と計算の結果を比較すると表-2のようになるが、A断面ではPr 2による応力を差し引いて補正した計算結果とよく対応する。したがって、このような鋼棒定着に伴う局部応力の影響を別にすれば、応力集中の伴うヒンジ部でも設計計算に「はり理論」が有用であると

考えられる。なお、破壊荷重については、土木学会PC指針のPC桁破壊耐力計算式<sup>1)</sup>を適用すると、実測（=17.4 t）と計算（=18.5 t）結果は対応しているので、切欠部でもこの計算式を用いてさしつかえないと考えられる。

疲労試験ではPr 2による局部応力のために低下していたひびわれ抵抗を上限荷重が越えていたため、試験開始直後から、A断面切欠部にひびわれが生じた。各荷重段階におけるひびわ

れの発達状況は図-6に示したとおりであって、ひびわれは各载荷の初期に発達し、その後はあまり成長しなかった。その長さは通常のRC桁計算式で求めた中立軸の位置まで達していないが、静的载荷試験における長さよりやや大きい。これは後で述べる改良案の疲労試験結果からもわかるように、コンクリートの引張疲労強度が静的強度より小さくなるためと考えられる。したがって、切欠部でもひびわれに対する疲労の影響は、通常のPC桁の疲労性状を検討する場合と同様に、コンクリートの材料としての疲労性状から推定されると考えられる。

図-5 Pr 1, Pr 2 によるプレストレスと载荷重による応力の合成 (ただし、载荷重  $P=3.0t$  の場合)

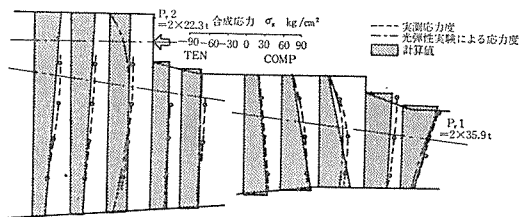


図-6 疲労試験時のひびわれ成長状況

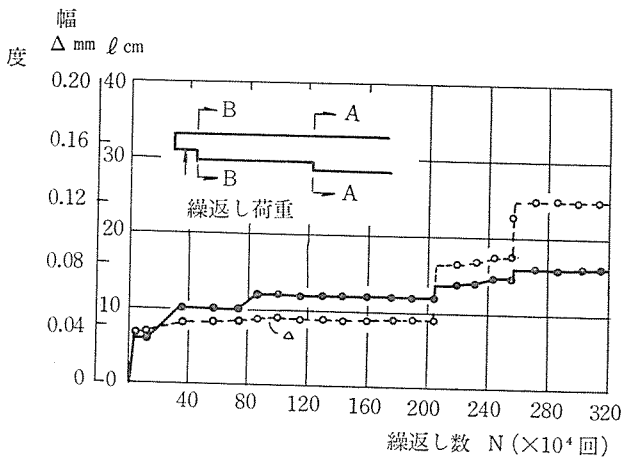


表-1 応力集中度

応力集中度	A 断面	B 断面
プレストレス (Pr 1)	1.5	1.4
” (Pr 2)	(-2.5)	—
” (Pr 1+Pr 2)	0.55	1.4
载荷重による応力	1.4	1.2

表-2 初ひびわれ荷重

初ひびわれ荷重 (t)	実測値	はり理論	補正した計算値
A 断面	3.5 前後	6.8~7.1	3.4~3.7
B ”	10.0 ”	10.5~11.0	—

ただし、コンクリートの引張強度: 30~35 kg/cm<sup>2</sup>

#### 4. ヒンジ部 (原設計案) 光弾性模型実験

光弾性模型の材料としては厚さ 6 mm のエポキシ樹脂板を用い、Pr 1 および Pr 2 のプレストレスと载荷重による応力を調べるために 3 種類の模型を使用した。実験の結果は先に述べた PC 模型実験における応力分布の結果と同様であり、プレストレスと载荷重による応力の合成結果を図-5に併記した。

ただし、切欠部においてもはり理論が有用であるということは、このような切欠部の応力分布を扱った類似実験例によると<sup>2)</sup>、切欠部が曲げを受け、せん断力の影響が少ない場合である。またその実験例によると曲げが支配的になるのは载荷点から切欠部までの偏心距離がその桁高の半分以上離ればよいとの結果になっているので、この実験例における切欠部は A, B 両断面とも曲げが支配的になり、このはり理論で扱ってさしつかえないわけである。

次にプレストレスのうち Pr 1 と载荷重による応力を A 断面切欠部で等しくなるように荷重条件を選んで合成すると図-8 になる。このように Pr 2 による局部応力を除けば、この切欠部は特に弱点部になっていないことがわかる。

図-7 Pr 2 による切欠部付近の応力

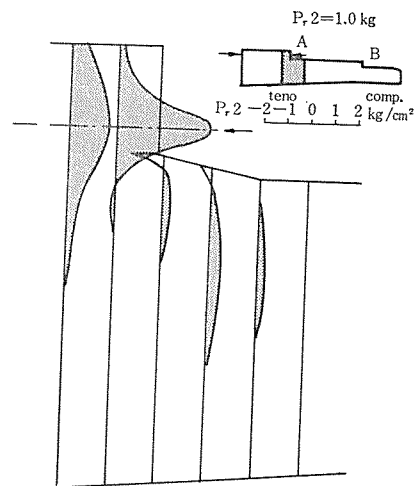
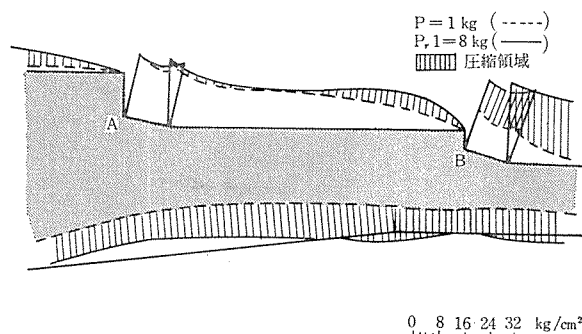


図-8 プレストレス(Pr 1)と载荷重による応力の合成



### 5. ヒンジ部 (改良案) PC 模型実験

いままで述べたように原設計案のヒンジ部では、A断面切欠部が、ひびわれ安全度に対して弱点部になっており、これは切欠部の形状による応力集中効果にあまり関係せず、A断面に定着された鋼棒による局部応力(引張り)のためであることが明らかになったので、この点に留意してA断面の切欠部について次のような改良を試みた。

- a) 鋼棒の定着位置を切欠部より内側に入れる。
- b) 定着位置を1列でなく1本ずつ交互に2列にする。
- c) ハンチを大きくし、その勾配を二段に分ける。
- d) アンカープレートの後に斜め補強筋を入れる。

#### (1) 試験体

試験体は実大寸法によることにし、その幅については

PC鋼棒の間隔から72.5cmにした。疲労試験用の試験体を図-9に示したが、これは試験機の都合から単純ばり形式にしたもので、試験体中央を対称にして両側がA、B両断面切欠部を有するヒンジ部になっている。一方、静的載荷試験用の試験体は先の原設計案の場合と同様に片持ばり形式であるが、A断面が主眼点であるのでB断面は設けなかった。A断面の構造は図-9と同様である。試験体製作に用いた材料は表-3,4に示したとおりである。

#### (2) 実験方法

静的載荷試験の方法は先に述べた原設計案の試験と同様である(写真-1参照)。疲労試験は単純ばり形式で載荷し(写真-2参照)、その反力が静的載荷試験時の試験荷重に対応するようにした。繰返し荷重は正弦形で300rpmの振動数で実施し、載荷段階は図-10に示すようにして行なった。試験荷重の大きさは試験体自重分

図-9 ヒンジ部 (改良案) 疲労試験用 PC 模型試験体

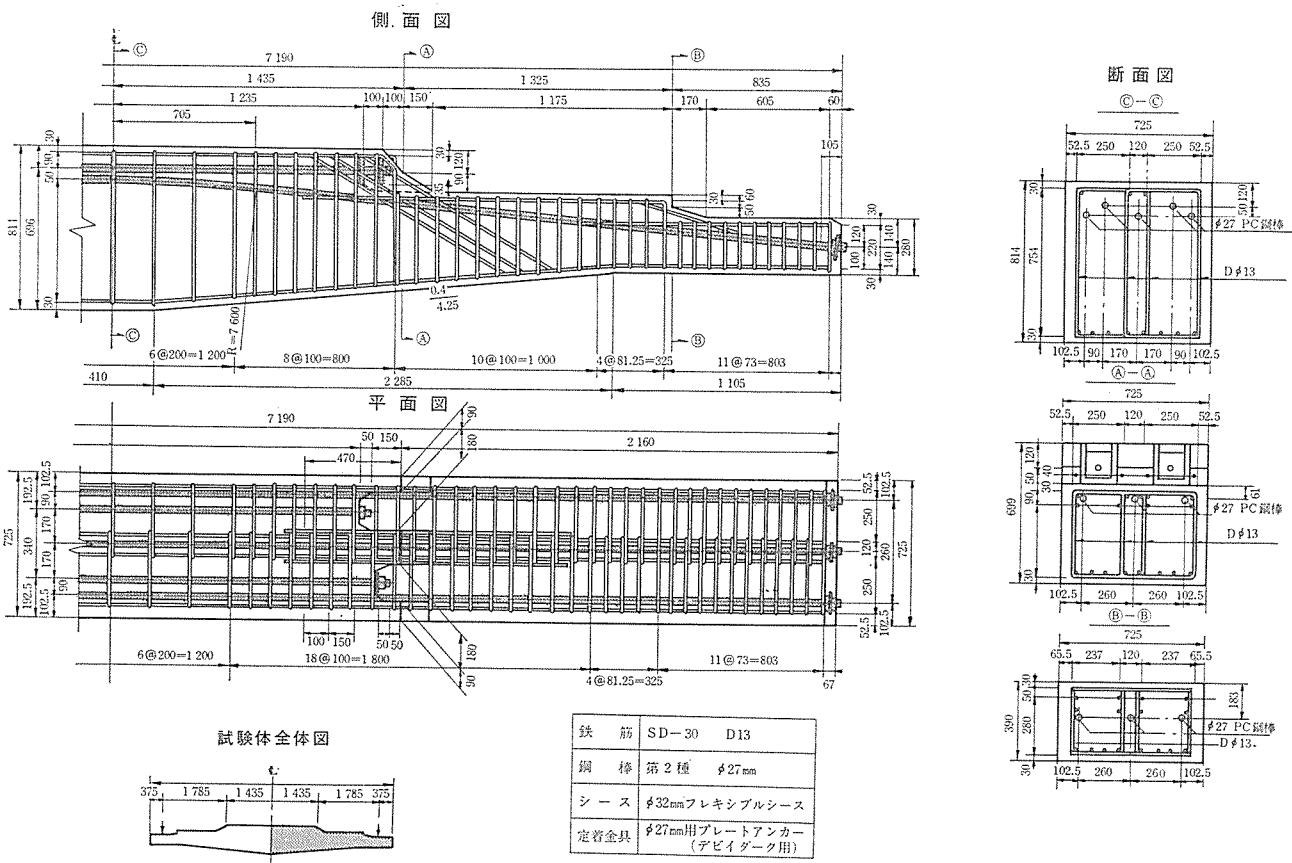


表-3 コ ン ク リ ー ト

試験体	単位セメント量 (kg)	粗骨材最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )			弾性係数 (kg/cm <sup>2</sup> )	
				プレストレス時	試験時	28日強度	プレストレス時	試験時
静的試験用	400	25	5	368	400	426	2.9×10 <sup>5</sup>	3.3×10 <sup>5</sup>
疲労試験用	405	25	8	394	403	443	3.0×10 <sup>5</sup>	3.1×10 <sup>5</sup>

表—4 鋼 材

	直 径 (mm)	引張荷重 (t)	引張強度 (kg/mm <sup>2</sup> )	降伏点荷重 (t)	降伏点応力度 (kg/mm <sup>2</sup> )	伸 び (%)	弾性係数 (kg/cm <sup>2</sup> )	備 考
鉄 筋	D13	6.6	52	40.2	32	23	2.12×10 <sup>6</sup>	JIS G 3112 SD 30 D 13 に合格
静的試験用PC鋼棒	26.85	73	129	61	108	8.1	2.05×10 <sup>6</sup>	NPR-4 土木学会規格 3種 φ27 mm に合格
疲労試験用PC鋼棒	26.25	57	106	50	92	10.2	2.05×10 <sup>6</sup>	NPR-4 土木学会規格 2種 φ27 mm に合格

を考慮し、また試験体の固有振動数が低いため、その動的増幅効果も考慮して決めた。後者の影響は静的に載荷したときの静ひずみと繰返し載荷時の動ひずみを測定し、両者のひずみが等しくなるような動荷重を知って考慮した。図—10 の大きさは、このようにして決めたものであるが、

載荷段階 (a) は、切欠部のプレストレスの測定値で小さいものがあり、測定の不調かプレストレスが十分伝わらないのかわからなかったので、所定の設計荷重に相当しないが、切欠部でフルプレストレスになるように上限荷重を設定したものである。

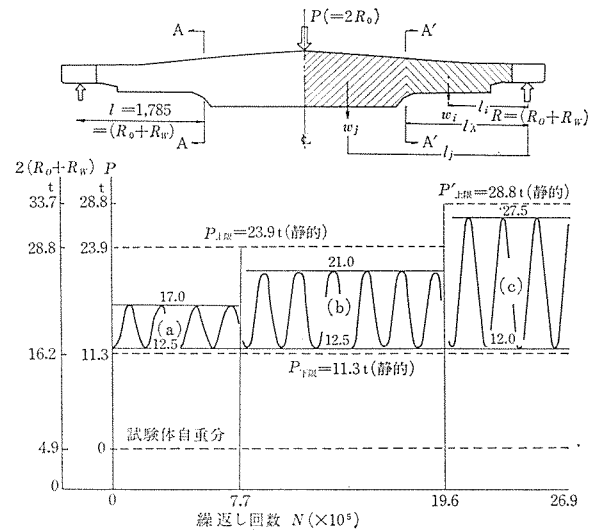
載荷段階 (b) は、所定の荷重条件で、下限荷重は設計死荷重に、上限荷重は設計死・活荷重に相当する。すなわち、はり理論に基づいてフルプレストレスになるように上限荷重を設定したものである。

載荷段階 (c) は、上限荷重の大きさを、ハンチを無

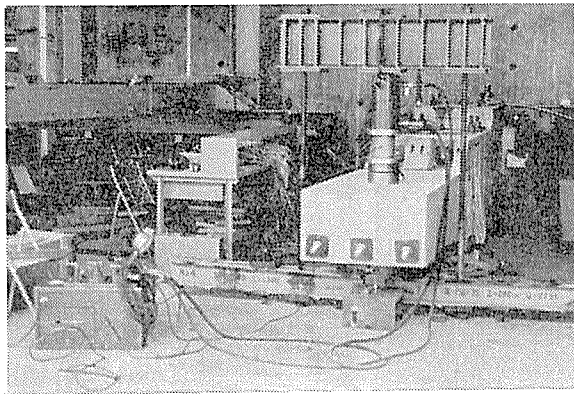
視したA断面上縁で、計算上引張応力が 15 kg/cm<sup>2</sup> になるような値、すなわち土木学会PC指針のパーシャルプレストレスに相当するものである。

なお、疲労試験では、各載荷段階において試験を休止し、上限荷重に対応する静的な載荷試験も行なったが、その順序は表—5 に示したとおりである。

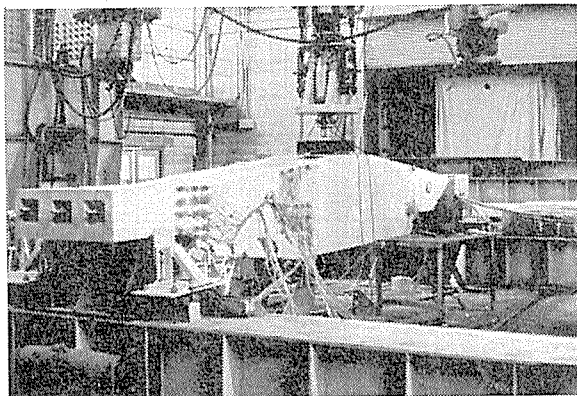
図—10 疲労試験載荷段階



写真—1 ヒンジ部 (改良案) 静的載荷試験状況



写真—2 ヒンジ部 (改良案) 疲労試験状況



表—5 疲労試験時の静的載荷試験順序

試験番号	静的載荷量 (t)	繰返し荷重回数履歴 N (回)	疲労試験履歴
No. 1	24	N=0	—
No. 2	24	N=7.70×10 <sup>5</sup>	(a) 低荷重相当
No. 3	29	N=1.96×10 <sup>6</sup>	(b) 設計荷重相当
No. 4	29	N=2.69×10 <sup>6</sup>	(c) 過載荷重相当
No. 5	40	〃	(初ひびわれ試験)
No. 6	32	〃	(再びひわれ試験)

(3) 試験結果とその考察

a) 静的載荷試験について プレストレス導入直後の応力分布は図—11, 12 に示し、また載荷重による応力分布は図—13 に示した。これらの図に記した計算値ははり理論によるもので、ハンチ部は千鳥形に切り込まれているが、全断面有効にしたものである。また、ひびわれの発達状況は図—14 に示した。

先の実験で問題になった切欠部のPC鋼棒定着による局部応力の影響は、本例のような改良によってほとんど

なくなっており、このような細部構造の工夫が効果的であることがわかる。ここでプレストレスと載荷重による応力を合成してみると 図-15 のようになる。したがって、切欠部に鋼棒定着端があっても、その影響を受けないように工夫すれば、切欠部の応力計算は先の実験の検討結果と同様に、はり理論によって求めてもよいことがわかる。

初ひびわれ荷重についても表-6 に示したように、この計算方法でよく対応しており、また破壊荷重についても土木学会 P C 指針の破壊耐力計算式でよく対応している。したがって、先の実験と同様に、切欠部においても通常の P C 桁の計算方法が、有用であることが認められ

図-11 Pr 1 によるプレストレス分布

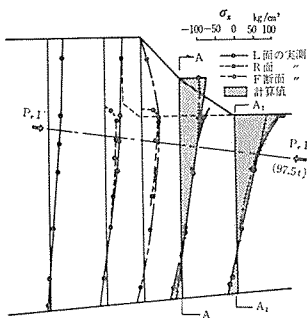


図-12 Pr 2 によるプレストレス分布

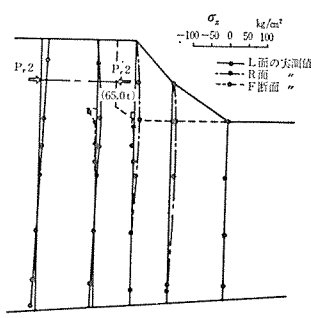


図-13 載荷重による応力分布 (P=20 t ひびわれ発生前)

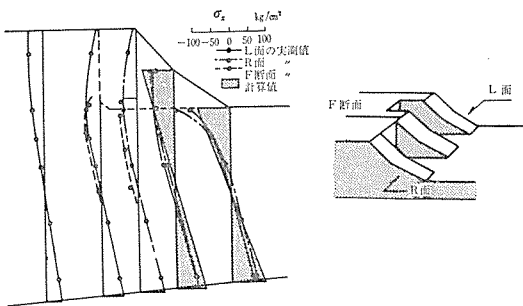


図-14 ひびわれ発生状況

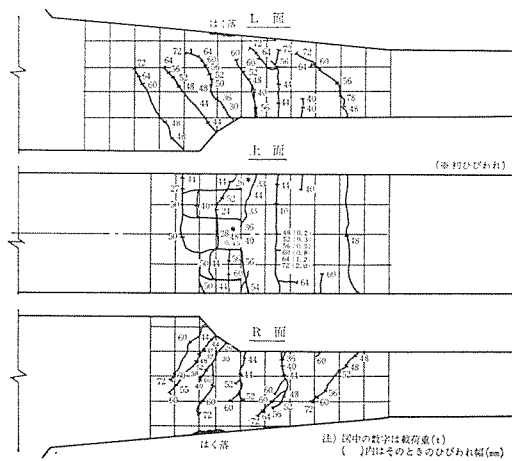
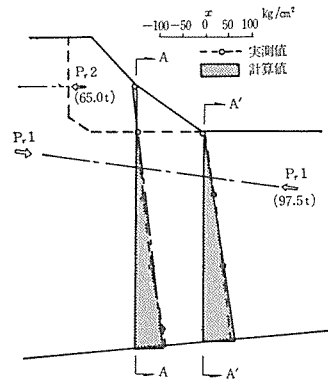


表-6 初ひびわれ荷重と破壊荷重

荷 重 (t)	実 測 値	計 算 値
初ひびわれ荷重	25.0	23.5~25.0
破 壊 荷 重	80.0	75.0

図-15 プレストレスと載荷重による応力の合成 (ただし載荷重: 20 t)



る。  
b) 疲労試験について  
疲労試験用の試験体について繰返し載荷重に入る前に行った静的載荷試験の結果は、いま述べた結果と同様である。したがって、ここではA断面切欠部のひずみに対する繰返し荷重の影響について述べることにする。ただしB断面は、疲労の影響が認められないので省略

する。  
A断面付近の各位置を 図-16 のように表示し、その位置のひずみを表-5 に示した各載荷について整理すると、代表例であるが 図-17~19 のようになる。

載荷段階 (b) までは、これらの図の No. 1~3 (表-5 参照) に相当し、各点とも応力とひずみの経路が同じになっているので、疲労による影響を受けていないことがわかる。

載荷段階 (c) では、No. 4 に相当し、A断面の i 部分ではひびわれ発生直前になり、k 部分ではわずかにひびわれが入り、j 部分はひずみが逆に減少し、l, m, n, o 部分では、まだ疲労の影響を受けていないことがわかる。

この載荷段階以降の No. 5 は、疲労試験後、静的な載荷によって初ひびわれ試験を行なったもので、応力とひずみの関係で大きな変曲点になっている所は初ひびわれが入ったことを示している。ここでA断面引張側の応力状態をはり理論によって計算すると 図-20 のようになる。この結果と、いま述べてきたことを比較検討すると、繰返し載荷中のひびわれは、引張応力が約 20 kg/cm<sup>2</sup> になると生じ、静的な載荷によるひびわれは 30~40 kg/cm<sup>2</sup> になると生じることがわかる。ただし、計算によるこれらの応力は、No. 3 や No. 5 の静的試験による実測応力とあっているもので、前者のひびわれはコンクリートの疲労引張強度 (通常、静的引張強度の 50~70% 程度) に支配され、後者はこの程度の疲労履歴があっても、ほとんど影響されずに、静的引張強度に支配されると考えることができる。したがって、このよう切欠部の設計で疲労の影響を考慮するには、はり理論による

図-16 A断面各位置の呼称

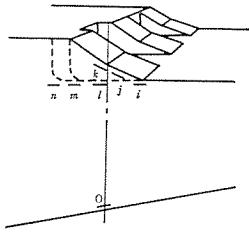
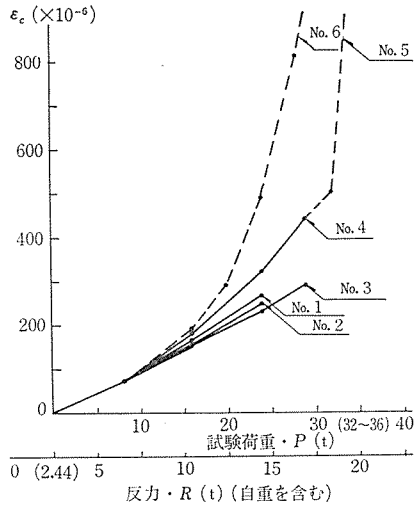


図-17 i点のコンクリートひずみの変化



注：図-17,18,19 の No. 1~6 は 表-5 の試験番号を表わす

図-18 k点のコンクリートひずみの変化

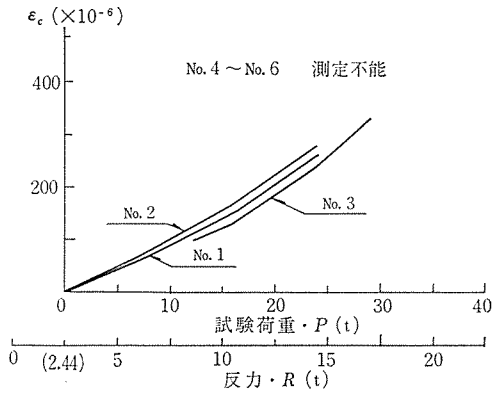


図-19 l点のコンクリートひずみの変化

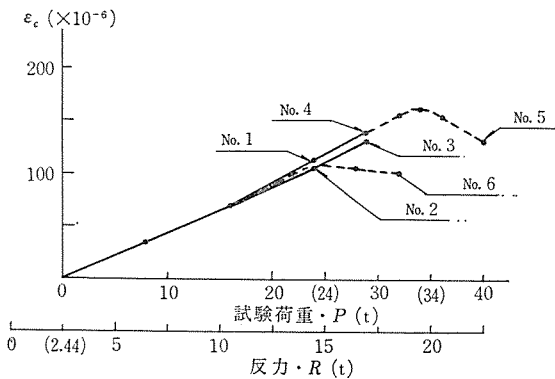
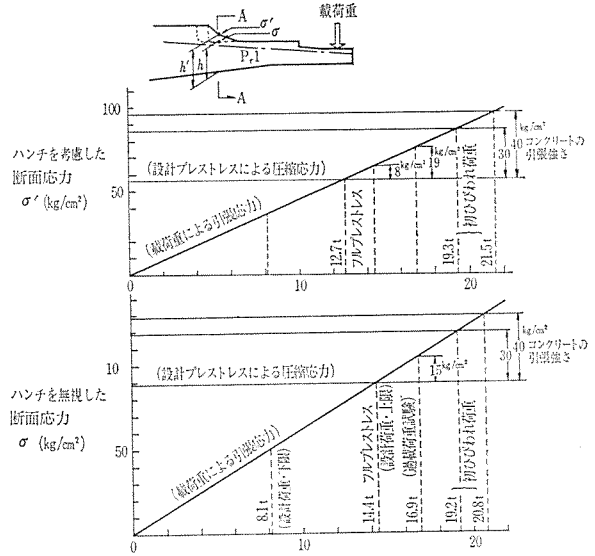


図-20 A断面引張側のはり理論による応力状態



計算に以上のような条件を含めればよいと考えられる。

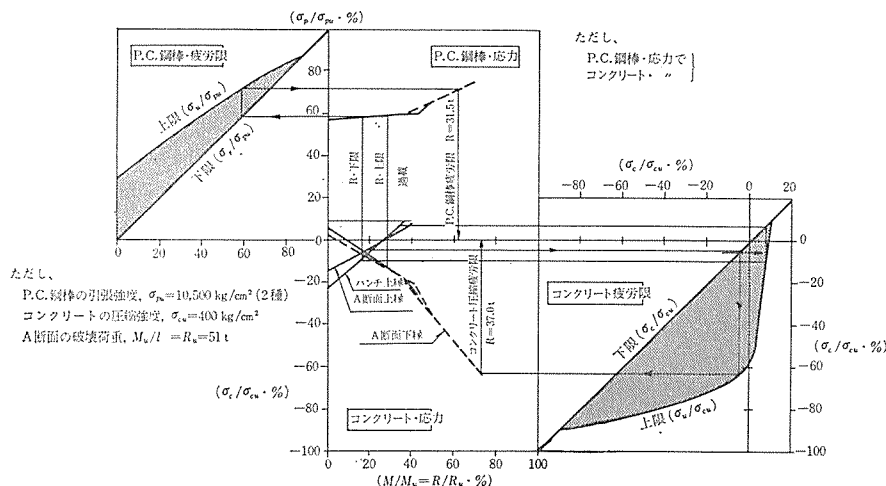
c) 切欠部の疲労限 疲労試験後、静的な荷重による破壊試験を行なったが、破壊荷重は先に行なった検討と同様な計算でよく合っていて、この場合も疲労履歴の影響は認められない。

ここで繰返し荷重時の破壊耐力、すなわち疲労限について検討してみる。ただしひびわれに伴う鋼材の腐食などの2次の影響は別の観点から扱うべき問題なのでここでは考慮せず、鋼材やコンクリートの疲労性状に基づく“Ekbergの方法”<sup>3)</sup>を適用して推定する。この方法を用いるにあたって必要な部材の応力レベルは疲労限近くまで実測していないので、PC桁に関する計算<sup>4)</sup>で外そうさせることにした。計算結果は、ひびわれ発生前後も実測結果とよい近似をしているので、そのまま疲労限近くまで延ばしてまとめると図-21のようになる。この図から部材の疲労限はPC鋼棒の疲労によっていることがわかる。その大きさは静的破壊耐力の62%であるが、土木学会PC指針の破壊安全度の規定 ( $R_{規} = 1.3 \times \text{死荷重} + 2.5 \times \text{活荷重}$ ) と比べても、この設計例では  $R_{規}/R_u = 50\%$  であるのでまだ余裕がある。この規定がすでに疲労の影響を含んでいることを考えれば十分安全である。なお、鉄筋については記載していないが、応力レベルが低いので問題ない。

## 6. ま と め

この実験はピルツPC橋のヒンジ部について、その構造的な特性を明らかにし、具体的な設計が行なえるようにするために実施したものであるが、本実験例のような切欠部の場合、その問題点は切欠部に設けたPC鋼棒定着端の局部応力による影響と切欠部の応力集中による影

図-21 PC鋼棒およびコンクリートの応力から推定したA断面の疲労限 (Ekbergの方法による)



ただし、  
P.C.鋼棒の引張強度、 $\sigma_{pu}=10,500 \text{ kg/cm}^2$  (2種)  
コンクリートの圧縮強度、 $\sigma_{cu}=400 \text{ kg/cm}^2$   
A断面の破壊荷重、 $M_c/R_c=51 \text{ t}$

響とにしばられる。

前者の問題点については切欠部に鋼棒を直接定着させると局部応力の影響が著しく、切欠部が弱点部になってしまうことが明らかになった。しかし、この定着端は鋼棒の緊張作業上、合理的に配置されたものであるため、その配置がえによって不利な影響を避けることでは本来の意味がなくなってしまう。むしろ切欠部が局部応力に直接影響されないようにする工夫が必要である。このような局部応力は計算に載らないが、定性的には定着端のごく近傍に限られることから、ここでは定着端を切欠部からわずかに内側に入れるなどの改良を行なった。実験の結果は良好であったので、この問題点は切欠部の細部構造に十分留意することによって処理すればよいと考えられる。

後者の問題点については以下に述べるようなことから、通常のPC桁の設計で用いている計算方法が有用である。

1) 切欠部付近のプレストレスや載荷重による応力には応力集中効果があるが、フルプレストレスでは両者の応力集中分が互いに打消しあって、はり理論による計算結果とよく一致する。ただしこの計算は、他の実験例から判断して、切欠部が曲げを受けせん断力の影響が少ないときに成立つが、この場合は両方の切欠部とも曲げが支配的であるので有効である。

2) 初ひびわれ荷重は切欠部に作用する応力とコンク

リートの材料強度によって決まると考えられる。ただし応力の計算には前項と同様にはり理論が有用であるが、コンクリートの引張強度は静的な載荷時には静的強度を、繰返し載荷時には疲労強度(通常、静的強度の50~70%程度)を用いる必要がある。

3) 静的な載荷による破壊は、初め切欠部からひびわれが発達しても、必ずしも切欠部に限らず、部材の破壊耐力が低い部分で生じる。破壊耐力は切欠部に関係なく土木学会PC指針のPC桁破壊耐力計算式でよく合う。

4) なお、ひびわれ発生後の切欠部の応力状態はPC桁の計算方法で推定される、と考えられるので、繰返し載荷時の破壊、すなわち疲労限の推定に“Ekbergの方法”を適用してみた。この例ではPC鋼棒の疲労破壊によって生じるが、その大きさは、十分な耐力を有するものであった。

## 7. あとがき

この実験を実施するにあたって原設計案のPC模型疲労試験は中央大学理工学部コンクリート教室の試験機を用い、改良案のPC模型疲労試験は建設省土木研究所橋梁研究室の試験機を用いた。また静的載荷実験と光弾性実験は鹿島建設(株)技術研究所の設備を用いた。中央大学での実験においてコンクリート教室の方々に多分の協力をいただきましたことをここに感謝致します

### 参考文献

- 1) 土木学会編：プレストレス コンクリート設計施工指針 昭. 36
- 2) 野尻陽一・秋山 暉：ゲールパーヒンジ切欠部の応力についての光弾性実験，コンクリート ジャーナル，Vol. 7，No. 7，昭. 44.7
- 3) Ekberg, C.E., Walther, R.E., and Slutter, R.G.: Fatigue Resistance of Prestressed Concrete Beams in Bending, Proc. of ASCE., Vol. 83, No. ST 4, July 1957.
- 4) 小寺重郎・岩城 良：P.R.C.について，コンクリート ジャーナル Vol. 3, No. 5.

1969.11.11・受付