

# [91] 横拘束コンクリートによるアンボンドプレストレスト コンクリート梁の靱性改善

正会員 六車 熙 (京都大学工学部)  
 正会員 渡辺 史夫 (京都大学工学部)  
 正会員 ○清水 良成 (京都大学工学部)

## 1. まえがき

プレストレストコンクリート(以下PCと略記)部材は通常のRC部材に比べて曲げ靱性が劣り、耐震性を高めるためには何らかの方法で靱性改善を行なうことが望ましい。特に、アンボンドPC部材では、PC鋼材に付着がないために曲げ終局に至るまでの鋼材の伸びは付着のある場合に比べて少なく鋼材の利用率は悪くなる。靱性改善およびPC鋼材の利用率を高めるためには、コンクリートの圧縮靱性を増大するのが良策の一つである。その方法として高強度横補強筋による横拘束コンクリートの利用がある。本研究は横拘束コンクリートを用いたアンボンドPC梁の曲げ試験を行ない、靱性およびPC鋼材応力の利用率の改善の可能性を検討したものである。

## 2. 供試体

供試体は図1に示すとおりで、高強度矩形スパイラル筋によりコア寸法14×19cmを横拘束した全長2.8m、断面寸法16×21cmのアンボンドPC梁4本と、無拘束のPC梁2本を用いた。横拘束コンクリートを用いたPC梁は、横補強筋ピッチ50および30mmとした。全供試体とも導入プレストレス力は16.4ton(公称)である。アンボンドPC鋼材はφ17mm C種鋼棒で、偏心距離3.5cm(核半径)の直線配置としてある。コンクリートは重量配合比1:2.13:2.61、水セメント比44%である。各鋼材の機械的性質を表1に示す。また、表2には無拘束コンクリートと、ピッチ50および30mmの高強度矩形スパイラルフープによる横拘束コンクリートの機械的性質について示してある。これは、無拘束コンクリートの圧縮強度および応力-歪曲線をもとにして、横拘束コンクリートについての既往の研究結果<sup>\*)</sup>を用い、その圧縮強度および応力-歪曲線をモデル化して求めたものである。図2には各コンクリートに対するモデル化応力-歪曲線を図示する。なお、これらは供試梁の終局耐力、変形解析等に用いた。

## 3. 荷重および測定方法

材令2週でプレストレス力を導入し、直ちに試験を行なった。荷重は図1に示すように、支点間距離260cm、曲げスパン60cm、せん断スパン100cmの三分点荷重とした。各種類の梁2本のうち、記号Iは単調曲げ荷重、記号IIは一方向高応力繰返し荷重を表す。繰返し荷重の除荷点は、無拘束コンクリート梁においては、初ひびわれ時、および上縁歪が0.1, 0.2, 0.3%になった時であり、横拘束コンクリート梁では、その他にカバーコンクリート圧壊時、およびその時の中央たわみの $1/2$ のたわみ増分に対して設定さ

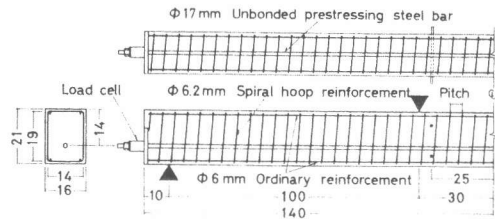


図1 供試体図

	φ17	φ6.2	φ6
弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	2.3 × 10 <sup>4</sup>	2.1 × 10 <sup>4</sup>	2.0 × 10 <sup>4</sup>
降伏応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	12247	11740*	2248

\* 0.2% off-set stress

表1 鋼材の機械的性質

	Cover & UH-∞ Core	UH-50 Core	UH-30 Core	
圧縮強度 $f_c, \sigma_m$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	305.0	371.7	425.8	
圧縮応力降伏時 $\epsilon_m, \epsilon_m'$ (%)	0.236	0.699	1.076	
圧縮限界歪 $\epsilon_u, \epsilon_u'$ (%)	0.354	1.050	1.616	
応力-歪曲線係数	$k_1 k_2$	0.680	0.832	0.841
	$k_2$	0.411	0.451	0.455
引張強度 $\sigma_t$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	31.20			
引張降伏歪 $\epsilon_{ty}$ (%)	0.016			
引張限界歪 $\epsilon_{tu}$ (%)	0.040			
1/3 弾性係数 $E_c$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	1.89 × 10 <sup>5</sup>			

表2 コンクリートの機械的性質

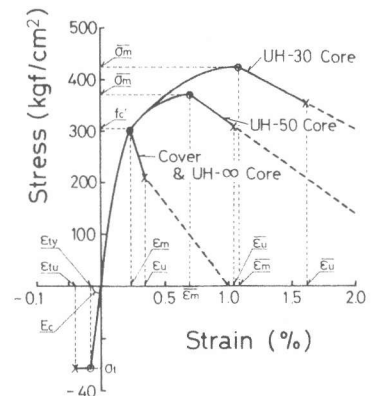


図2 コンクリートのモデル化応力-歪曲線

れている。中央たわみ、曲げスパン内の上、下縁歪（検長50cm）を電気式変位計を用いて測定した。この上、下縁歪測定値を用いて曲げスパン曲率を算出した。また、P C鋼棒引張力の変化をP C鋼棒の両端においてロードセルによって測定した。

#### 4. 実験結果および考察

##### 4.1 変形挙動

荷重によってどの供試梁においても曲げスパンに5～6本とせん断スパンに数本の曲げひびわれが発生した。無拘束コンクリート梁では、圧縮側コンクリートの圧壊によって急激な荷重低下が起こった。横拘束コンクリート梁の場合には、曲げスパンのカバーコンクリートの一部が圧壊しはく離すると、その部分のひびわれに曲げ変形が集中し、それまでに発生していたひびわれは閉じていくことが認められた。変形が進むにつれて、曲げスパン上縁のカバーコンクリートがはく離する範囲はさほど広がらず、曲げ変形の集中は一層著しくなっていた。この曲げ変形の集中はP C鋼棒に付着がないために起こると考えられる。

##### 4.2 モーメントー曲率曲線

各供試梁のモーメントー曲率関係を図3に示す。図3から、無拘束コンクリート梁のモーメントー曲率関係は非常に脆性的であるが高強度矩形スパイラルフープによる横拘束コンクリート梁では著しく靱性に富んだ性状を示していることがわかる。横拘束コンクリート梁の単調荷重時モーメントー曲率曲線は、ピッチが30mmのものではカバーコンクリート圧壊以後、荷重低下がほとんど起こらずに塑性流動が著しく起こっているが、ピッチ50mmの場合には荷重の低下がともなっている。繰返し荷重時のモーメントー曲率関係において、無拘束コンクリート梁の場合には除荷とともに変形がほぼ荷重試験前の状態に戻り、弾性的な挙動を示しているが、横拘束コンクリート梁では除荷時の残留変形が増大し、1回の繰返しループが囲む面積も大きくなって塑性的な挙動をしている。図3に示した△印は無拘束コンクリートの曲げ圧縮限界歪 $\epsilon_u$ （無拘束コンクリート応力ー歪曲線の平均応力が最大となる時の歪）に、カバーコンクリート上縁歪が達した点である。この点の曲率の値はどの供試体においてもよく一致しており、カバーコンクリートの圧壊もほぼこの点近傍で起こっている。また、×印の点は、各ピッチに対する横拘束コンクリートのモデル化応力ー歪曲線の曲げ圧縮限界歪 $\bar{\epsilon}_u$ に、コアコンクリート圧縮縁歪実測値が対応する点である。この点以後はピッチ30mmの横拘束コンクリート梁において荷重の低下が起こっている。また、ピッチ50mmの場合には、この点以後に繰返し荷重による履歴曲線の単調荷重曲線からの落ちこみが認められ、荷重の低下も大きくなっている。したがって、×印の点は横拘束コンクリート梁のモーメントー曲率関係において一つの使用限界を与えるものといえよう。

##### 4.3 モーメントー鋼棒引張力増分曲線

図4は各供試梁のモーメントーP C鋼棒引張力増分実測値を示したものである。横拘束コンクリート梁の場合には、曲げ終局時の塑性変形が著しく起こるので、これにともなってP C鋼棒引張力も増大している。繰返し荷重のモーメントー鋼棒引張力増分関係を例にとると、無拘束コンクリート梁では曲げ終局時のP C鋼棒全引張力

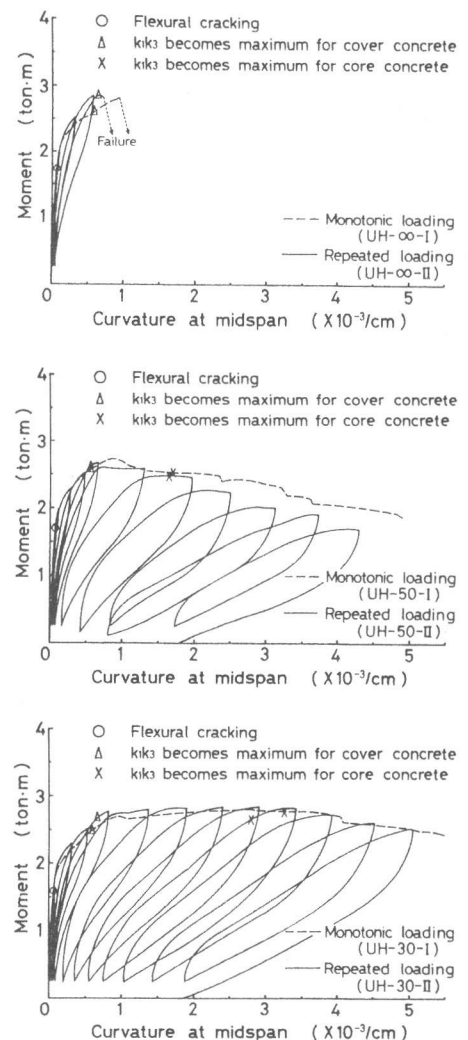


図3 モーメントー曲率曲線

は22.8 ton (導入プレストレス力16.7 ton+引張力増分値6.1 ton)であるのに対して、ピッチ50mmの横拘束コンクリート梁では24.6 ton, ピッチ30mmのものでは26.7 tonであり, 横補強筋ピッチを小さくすることによってPC鋼棒応力が降伏点近くまで高められ, 著しく鋼棒応力利用率が改善されていることがわかる。横拘束コンクリート梁のモーメント-鋼棒引張力増分曲線では繰返し載荷の場合, 除荷によってPC鋼棒全引張力はプレストレス導入時に比べ減少している。また, 終局時には鋼棒引張力の増加は非常に小さくなっている。特に, ×印の点以後には鋼棒の引張力増加が少ないことがわかる。その理由として, 曲げ変形の集中した部分に塑性ヒンジができ, 大部分の変形がその部分で起こったためPC鋼棒の伸び増分が少なくなったこと, およびその部分のコアコンクリートの破壊が進んだことなどが考えられよう。すなわち, ×印の点はコアコンクリートの破壊に対応して, PC鋼棒の引張力増分の限界を表すものといえよう。

### 5. 単調載荷時の曲げ変形解析

#### 5.1 仮定と方法

図2に示したモデル化応力-歪曲線を用いて, 図5に示す手順で梁全長にわたるプレストレス導入時からのPC鋼棒伸び変化量が, 鋼棒配置位置でのコンクリート伸び変化量と一致すると考えた伸び変形の適合条件を用いて, 単調載荷時の曲げ変形解析を行なった。なお, 曲げスパンでは断面の歪分布が一定であると仮定した。手順と仮定の詳細は以下のとおりである。

i) 曲げスパンの上縁歪を設定し, 曲げスパンの曲率を仮定するとその歪分布から断面の圧縮合力が計算でき, それと釣合うPC鋼棒の引張力が求まる。また, 曲げスパンのモーメントが計算できるので, 梁のモーメント分布が求まる。さらに, 曲げスパンにおける鋼棒位置コンクリート伸び変化量が計算できる。せん断スパンの任意断面における鋼棒位置コンクリート歪変化量を求めるために, 通常ではせん断スパンを梁軸方向に分割し, PC鋼棒引張力と各断面におけるモーメントより断面の歪分布を求める。しかし, この方法ではひびわれ発生等による断面曲率の集中をうまく取り扱えない。そこで, 曲率と上縁歪の変化量がほぼ対応することを考慮し, せん断スパンにおける上縁歪の変化量を10等分し, 各々の上縁歪に対するモーメントをPC鋼棒引張力との軸方向力の釣合いより求め, 各上縁歪に対する断面位置を決定した。一方, 上に述べたせん断スパン上縁歪分布を求める際に, せん断スパンの載荷点位置における上縁歪 $\epsilon_s$ を求めなければならない。曲げスパンで仮定されたモーメントとPC鋼棒引張力より求めるのであるが, 設定された曲げスパンの上縁歪が終局時に達すると,  $\epsilon_s$ が計算上2つ求まる。これら2つの値の間にある上縁歪においてモーメント

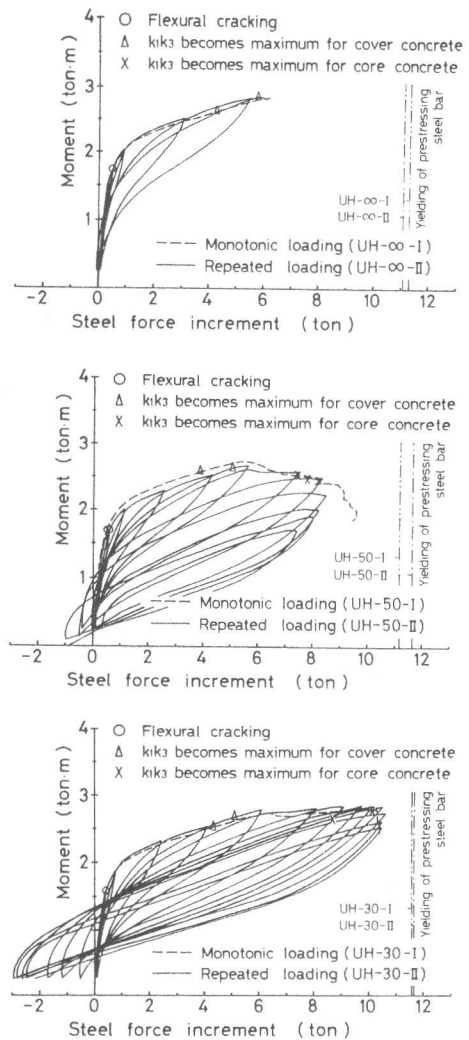


図4 モーメント-鋼棒引張力増分曲線

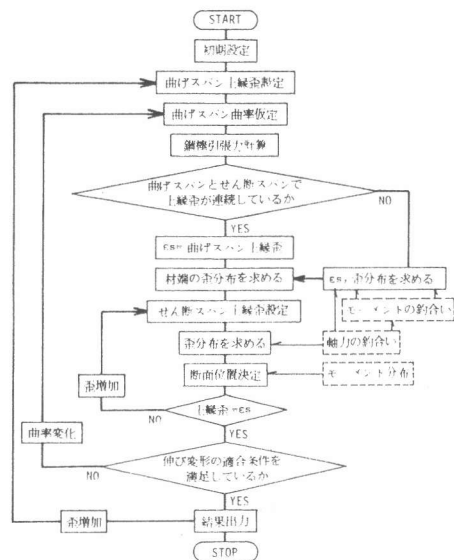


図5 アンボンドPC梁の曲げ解析のフローチャート

を軸方向力の釣合いより求めると、曲げスパンのモーメントより大きな値となり矛盾が生じる。曲げスパンの上縁歪は漸増するので上記のうちの大きい方の値となるが、せん断スパンでは支点位置から载荷点までモーメントが単調に増加することより、小さい方の値を与えなければならない。したがって、この時には曲げスパンとせん断スパンの境界断面において上縁歪が不連続になることが起こる。

- ii) 以上のことから、 $\epsilon_s$  を求める際に、曲げスパンの上縁歪より少し大きな上縁歪におけるモーメントを軸方向力の釣合いから求めて、その値が曲げスパンのモーメントより大きいならば  $\epsilon_s$  を曲げスパンの上縁歪で与え、そうでない時には上縁歪と曲率を相互に変化させて得られた  $\epsilon_s$  のうち小さい方の値をとる。
- iii) 材端の歪分布を求め、前述した方法を用いて上縁歪を材端の値から  $\epsilon_s$  まで変化させ、各断面の歪分布と位置を決定すれば鋼棒位置での梁全長にわたるコンクリート伸び変化量が計算できる。
- iv) 鋼棒位置コンクリート伸び変化量をプレストレス導入時の鋼棒伸びに加え、伸び総量から鋼棒の引張歪を求めると、P C 鋼棒の応力-歪曲線から鋼棒引張力が計算できる。この値が i) で仮定した鋼棒引張力の値にほぼ等しくなるまで曲げスパンの曲率を変化させて i) ~ iv) の計算を繰り返す。

## 5.2 モーメント-曲率関係の解析結果

単調载荷時のモーメント-曲率解析結果を実験結果と比較して図6に示してある。どの供試梁においても解析曲線と実験曲線は△印の点までよく一致しており、その時の曲率もほぼ一致している。しかし、横拘束コンクリート梁の場合には、×印の点の曲率は両者においてほぼ一致しているが、曲線そのものにはずれが生じている。また、ピッチ30mmの横拘束コンクリート梁の解析曲線では×印の点前後でモーメントがほぼ一定となって実験の形とよく似ているが、これは解析においてP C 鋼棒が降伏していることによるもので実験の状況とは異なると思われる。このように△印以後に曲線にずれが生じる主な理由として、実験では曲げ変形集中によって塑性ヒンジが形成されているのに対し、解析では曲げスパンは曲率が一定で均等に湾曲すると仮定していることが考えられよう。

## 5.3 モーメント-鋼棒引張力増分関係の解析結果

図7には解析で求められたモーメントと鋼棒引張力増分の関係を実験結果と比較して示してある。曲線は両者において△印の点まではよく一致しているが、その点における鋼棒引張力増分値は解析の方が少し大きくなっている。横拘束コンクリート梁の解析曲線ではピッチが50, 30mmのいずれにおいてもP C 鋼棒応力は降伏応力に達しており、実験値は解析値に比べ鋼棒の引張力増加が少なく鋼棒の伸び変化量が小さい。何らかの方法によってアンボンドP C 梁の曲げひびわれを分散させ、カバーコンクリート圧壊後の曲げ変形集中を緩和することができれば、横拘束コンクリートの使用によるP C 鋼材応力利用率の改善の効果をさらに増大させることが期待できよう。

## 6. 結論

高強度角スパイラルフープによる横拘束コンクリートを用いることによって、アンボンドP C 梁の曲げ破壊時の靱性を大幅に改善することが可能であることを示した。さらに、これによって曲げ破壊に至るまでのアンボンドP C 鋼材の応力利用率も大幅に増大できることを明らかにした。

〔参考文献〕\* ) 六車, 渡辺, 田中, 勝田「横拘束筋によるプレレストレストコンクリート梁の曲げ靱性改善に関する研究」 第2回コンクリート工学年次講演論文集, PP 377~380, 1980.

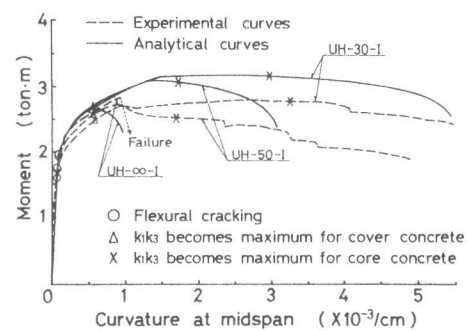


図6 モーメント-曲率曲線

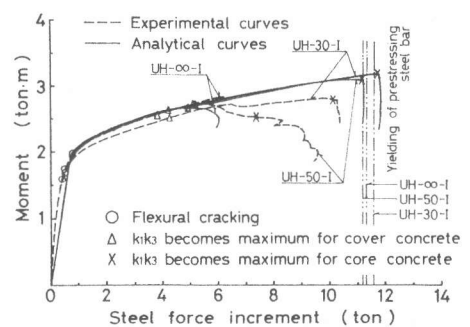


図7 モーメント-鋼棒引張力増分曲線