

(106) 外ケーブルを用いたPRCはりのせん断耐力

日本大学理工学部交通土木工学科 正会員 柳沼 善明
 日本大学大学院理工学研究科 ○高島 修

1 はじめに

近年、外ケーブルを用いたプレストレストコンクリート(PC)橋梁が注目されてきている。今後採用が増加すると思われる外ケーブル方式を用いたPC橋梁を設計するためには、曲げのみならずせん断に対しても十分な検討が必要である。内ケーブル方式PCはりのせん断に関する研究がさかんに行われているが、外ケーブル方式PCはりのせん断に関する研究は数少ない。一方、各国設計基準でプレストレス力がはりのせん断耐力へ及ぼす影響を明確に記述していないのが現状であり、この分野の資料の蓄積が望まれている。

本研究では、外ケーブルを用いたせん断補強筋のないPRCはりを対象としてせん断破壊実験を行い、破壊性状と内ケーブル方式で提案されているせん断耐力算定式の適用性を検討することを主な目的とした。

2 実験概要

実験に使用した試験体は、せん断補強筋のないはりで、形状と寸法を図-1に示す。試験区間の断面寸法は幅15cm、高さ30cm、有効高さ26cmで、スパン240cm、せん断スパン75cmである。使用鉄筋(SD345)として上縁側にD10、下縁側にD19をそれぞれ2本づつ使用し、PC鋼材はSBPR1080/1230のφ17mmを2本使用した。また、コンクリートの圧縮強度は、 $f_{ck} = 35\text{N/mm}^2$ のものを用いた。

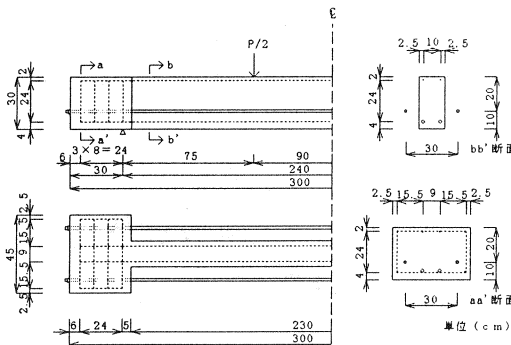


図-1 試験体

実験条件は、ケーブル方式、プレストレス力を変化させた(表-1)。試験体の総数は8体である。

載荷方法は2点集中載荷で、静的にせん断破壊させた。

また、プレストレス力は試験体端部に取り付けたセンターホール型ロードセルで所定の量を導入した。荷重の載荷はプレストレス力を導入した後ただちに行った。これは、コンクリートのクリープや乾燥収縮、PC鋼材のリラクゼーションなどによるPC鋼材の応力減少をできるだけ少なくするためである。

表-1 供試体の種類

試験体名	ケーブル方式	プレストレス力(kN)
A98-1	外ケーブル (デビエータ無)	100
A98-2		200
A98-3		300
B98-1	外ケーブル (デビエータ有)	100
B98-2		200
C98-1	内ケーブル (アンボルト)	100
C98-2		200
C98-3		300

3 実験結果と計算結果の比較

3.1 実験結果

実験結果を表-2に示す。斜めひび割れ発生荷重は、プレストレス力の増加に伴い、増加していることがわかる。また、ケーブル方式に注目すると、同一プレストレス力において、内ケーブル、外ケーブル(デビエータ無)、外ケーブル(デビエータ有)の順で斜めひび割れ発生荷重が大きくなっている。内ケーブル場合、外ケーブルに比較し、コンクリート断面がシース径分減少するため、せん断耐力が減少すると考えられる。

表-2 実験結果一覧

試験体名	荷重(kN)			破壊モード
	曲げひび割れ発生	斜めひび割れ発生	最大	
A98-1	98.3	121.1	220.9	せん断圧縮
A98-2	199.3	156.1	231.1	せん断圧縮
A98-3	299.8	201.1	240.9	せん断圧縮
B98-1	101.8	116.2	211.1	せん断圧縮
B98-2	198.3	156.1	209.5	せん断圧縮
C98-1	99.1	96.1	219.0	せん断圧縮
C98-2	200.6	141.0	—	—
C98-3	298.6	174.2	215.2	せん断圧縮

備考) C98-2については途中で実験を中断したため最大荷重、破壊モードを載せていない。

3.2 破壊性状

各試験体のひび割れ状況を図-2に示す。斜めひび割れは、曲げひび割れの延長として徐々に伸展していった。そして、斜めひび割れが形成されても直ちに破壊に至らず、さらに大きな荷重に耐えることができた。これは、斜めひび割れ上部のコンクリートと引張鉄筋でストラットの耐荷機構を形成したためである。最終的に、上部コンクリートの圧壊によって破壊した。

図-2のA98-1、A98-2、A98-3より、プレストレス力が増加すると、コンクリートの圧壊部分が大きくなることが観察でき、この時の破壊は爆裂を伴い急激であった。また、プレストレス力が大きいと、斜めひび割れとはり軸方向のなす角度が鋭角になる傾向があった。この傾向は、外ケーブル(デビエータ有)、内ケーブルの場合にも言える。ケーブル形式の違いに注目すると(A98-1、B98-1、C98-1)、ひび割れ角度、ひび割れ本数に相違はみられなかった。

3.3 荷重とたわみの関係

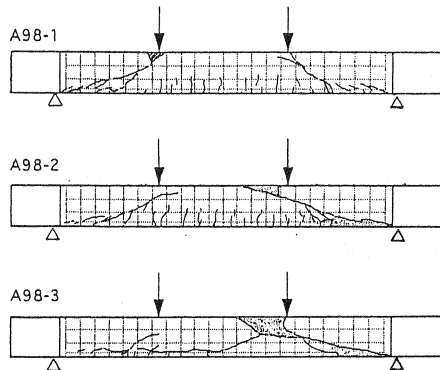
図-3、4に荷重とたわみの関係を示す。図-3は、ケーブル方式の相違に着目した荷重とたわみの関係で、図-4は、プレストレス力の影響に着目した荷重とたわみの関係である。図-3の斜めひび割れ発生時のたわみは、A98-1が4.69mm、B98-1が4.63mm、C98-1が4.55mmでほぼ同じであった。

図-4より、プレストレス力が増加すると、たわみにくくなるのがわかる。また、斜めひび割れ発生時のたわみは、A98-1、2、3でそれぞれ4.69mm、5.71mm、7.48mmであり、プレストレス力が増加すると、斜めひび割れ発生時のたわみも増加することが言える。しかし、最大荷重時のたわみは、プレストレス力に関係なく、ほぼ同じであった。

3.4 せん断耐力式の評価

土木学会¹⁾、ACI規準²⁾、日本建築学会³⁾のせん断耐力算定式を用いて、せん断耐力を計算し、実験値との比較を行い、その結果を図-5に示した。斜めひび割れ荷重の実験値/計算値($V_{c,r}/V_{c,a1}$)は、外ケーブル(デビエータ無)の場合、土木学会式で1.132~1.230、ACI規準式で、1.654~1.786、建築学会式で0.905~1.014であった。外ケーブル(デビエータ有)の場合、

(a) 外ケーブル(デビエータ無)



(b) 外ケーブル(デビエータ有)

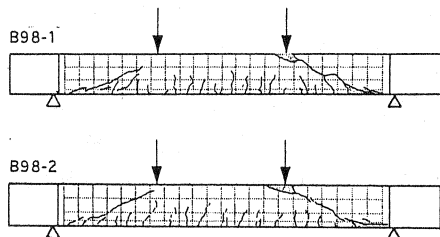


図-2 ひび割れ図

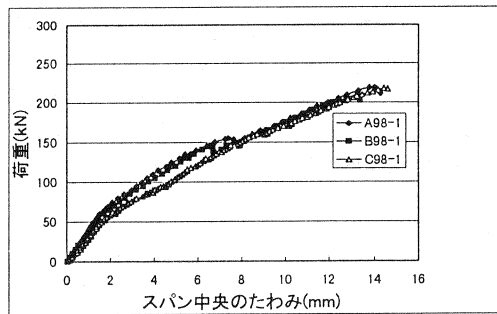


図-3 荷重とたわみの関係(ケーブル方式の相異)

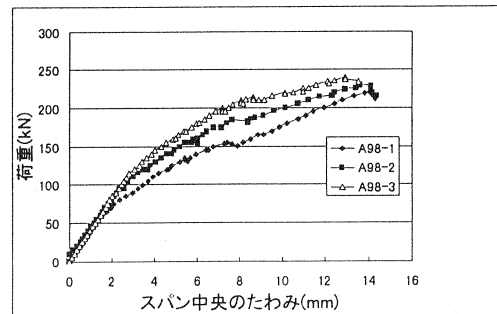
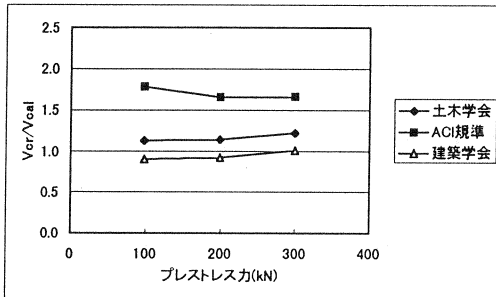
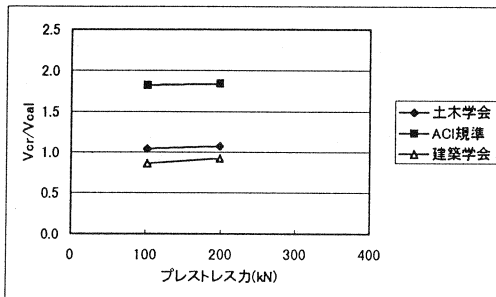


図-4 荷重とたわみの関係(プレストレス力の影響)

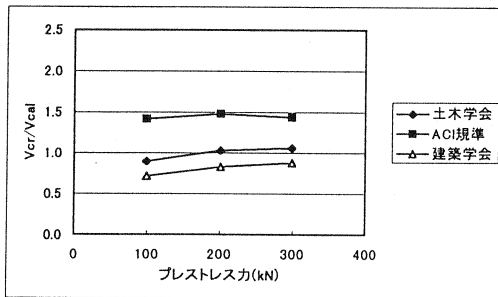
土木学会式で 1.041~1.077、ACI 規準式で、1.825~1.843、建築学会式で 0.860~0.922 であった。内ケーブルの場合、土木学会式で 0.901~1.063、ACI 規準式で、1.419~1.482、建築学会式で 0.718~0.878 であった。土木学会式、建築学会式では、プレストレス力が増加するとより安全側に計算される傾向がある。また、各せん断耐力算定式において、アンボンドの場合、内ケーブルより外ケーブルのほうが安全側に計算される。



(a) 外ケーブル (デビエータ無) PRC はり



(b) 外ケーブル (デビエータ有) PRC はり



(c) 内ケーブル PRC はり

図-5 計算値と実験値の比較結果

3.5 プレストレスの効果

図-6は、実験で得られた斜めひび割れ発生荷重と式(1)の土木学会式から計算し、プレストレスの効果を考慮する係数 β_n と M_o/M_u の関係を示したものである。

$$V_{cd} = (1/d)^{1/4} \cdot (100p_w)^{1/3} \cdot 0.2(f_{cd})^{1/3} \cdot \beta_n \cdot b \cdot d \quad (1)$$

ここに、 M_o はデコンプレッションモーメント、 M_u は曲げ耐力、 V_{cd} はコンクリートの負担するせん断力、 d は有効高さ、 b ははり幅、 p_w は軸方向鉄筋比、 f_{cd} はコンクリートの圧縮強度である。図-6より、斜めひび割れ荷重時の β_n と M_o/M_u の関係は、内ケーブルの場合 $\beta_n = 1 + 2M_o/M_u$ の直線にほぼ一致した。外ケーブルの場合 $\beta_n = 1 + 2M_o/M_u$ の直線と、 $\beta_n = 1 + 3M_o/M_u$ の直線との間であった。外ケーブルのほうが内ケーブルより安全側である。したがって、外ケーブル方式において、内ケーブルで提案されている $\beta_n = 1 + 2M_o/M_u$ の適用は、安全側に計算されるものと考えられる。

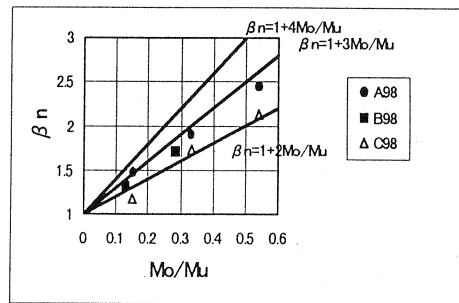


図-6 プレストレスの効果

3.6 Tanの提案式による検討

Tan は外ケーブル方式のよりのせん断耐力を明確にするために、図-7に示すモデルから耐力式を提案⁴⁾している。これはストラット・タイモデルと呼ばれ、コンクリートの圧縮域と鉄筋位置の引張力の釣り合いによって、破壊耐力を予測するものである。このモデルの大きな特徴は、コンクリートの圧縮域が載荷点から放射状に広がって作用していることである。また、Tan はストラットとはり軸方向の角度を 45° と定めている。

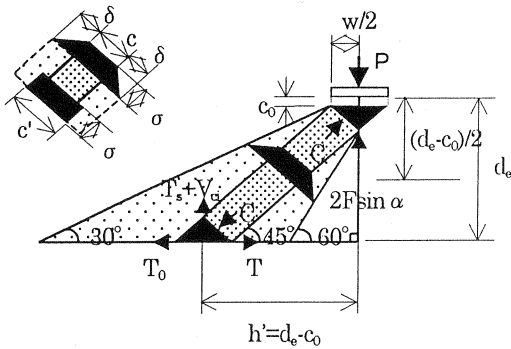


図-7 Tanモデル

図-7において、P は作用荷重、T、T₀ は鉄筋位置に作用する引張力、C は圧縮部に作用する圧縮力、w は荷重ピンの幅、σ は圧縮部に作用する圧縮応力、d_e は有効高さ、α は PC 鋼材と部材軸とのなす角度、c は圧縮部の幅、c' は放射状に広がる圧縮域を考慮した圧縮部の幅、c₀ は荷重ピンの高さ、F はプレストレス力である。

c' の幅を持つ圧縮部が、T、T₀、T_e+V_a の45° 方向への合力により受ける応力を考える。この応力がひび割れ発生時のコンクリートの圧縮強度に達したときを破壊耐力とする。Tan の提案式では、ひび割れ発生時のコンクリートの圧縮強度は、コンクリートのシリンダー圧縮強度を0.8低減させている。

T、T₀は、

$$T_0 = \frac{P(a-h)}{2} - F[(d_{pc} - c_0) + \sin \alpha \cdot (a - h')] \quad (2)$$

$$T = T_0 + \frac{P}{2} - F \cdot \sin \alpha \quad (3)$$

となる。ただしモーメントの中心は、荷重点から支点に向かって距離h、はりの上縁から距離c₀の点とする。ここに、a はせん断スパン、h ははり高さ、d_{pc} ははりの上縁から PC 鋼材までの距離である。

破壊耐力の計算はウェブ幅をbとして

$$\frac{T \cdot \cos 45 + \frac{P}{2} \sin 45}{c' \cdot b} = 0.8 \cdot f_c' \quad (4)$$

表-3 Tan のせん断耐力計算結果

試験体名	せん断耐力の計算値 (kN)	実験値/計算値
A98-1	212.3	1.041
A98-2	231.4	0.999
A98-3	250.5	0.962
B98-1	197.9	1.067
B98-2	218.0	0.961

を満たすPにより求まる。

表-3を見ると Tan モデルによる計算値は実験値とはほぼ一致し、外ケーブル方式のはりのせん断耐力を精度良く計算できるものと思われる。

4 結論

今回の PRC はりのせん断破壊実験の結果をまとめると次のようである。

- ① 外ケーブル、内ケーブルともに、プレストレス力が増加するほど、斜めひび割れとはり軸方向のなす角度が鋭角になる傾向がある。
- ② 土木学会の内ケーブル方式で提案されているせん断耐力算定式による外ケーブル方式の計算値は、デビエータの有無に関わらず、安全側に計算される。
- ③ 土木学会のプレストレス効果を示す係数β_nは、M₀/M_uと比例の関係がある。
- ④ Tan が提案した外ケーブル方式のせん断耐力式は、精度良く計算でき、実験値とよく一致する。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編]，平成8年版，pp.60~64，1996
- 2) M.P.Collins and D.Mitchell：Prestressed Concrete Structures，PRENTICE HALL，pp.309~320，1991
- 3) 日本建築学会：プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説，pp.254~257，1975
- 4) K.H.Tan and A.E.Naaman：Strut-and-Tie Model for Externally Prestressed Concrete Beams，ACI Structural Journal，pp.683~691，Nov./Dec. 1993