

過大な膨張を与えたPCはり部材の耐荷特性

京都大学		修士課程	○阿部	亮太
京都大学	正会員	博士(工学)	高谷	哲
京都大学	正会員	博士(工学)	山本	貴士
京都大学	正会員	工学博士	宮川	豊章

Abstract : The purpose of this study is to clarify the loading capacity of PC beam that has the stirrups fractured due to the significant ASR expansion. PC beam specimens that have the discontinuous stirrups at its corner were arranged. The excessive expansion using an expansive additive was also induced in those specimens. A flexural loading test was performed, and the flexural and shear capacity were examined. In the specimens using the expanding material, the ultimate load of the specimens with the excessive expansion was significantly decreased due to the degradation of the concrete strength and reduction of prestress. Furthermore, the changing of the failure mode was sometimes observed. In the specimens with discontinuous stirrups, the restriction against expansion decreased. Therefore, the bond splitting cracks were induced easily, and brought the shear bond failure.

Key words : ASR , PC beam , Fractured stirrup , Excessive expansion due to expansive additive

1. はじめに

近年, ASRにより劣化したコンクリート構造物の内部の鉄筋が破断するという事例が報告されており, PC構造物においても, スターラップの曲げ加工部に破断が生じている事例が報告されている。鉄筋の定着は構造物の耐荷性の前提条件であるため, スターラップの破断が部材の耐荷性能に大きな影響を与えることが予想される。そこで本研究では, 著しいASR膨張劣化にともないスターラップの隅角部が破断したPCはりの耐荷性能を明らかにすることを目的として, スターラップ隅角部をあらかじめ不連続(以下, 破断と呼ぶ)としたPCはり供試体に膨張材を用いて過大な膨張を与え, これに対して曲げ載荷試験を行うことでその耐荷挙動を検討した。

2. 実験概要

2. 1 供試体および実験要因

供試体の諸元を図-1に示す。幅×高さ(有効高さ)×全長(スパン長)=100×200(133)×1600(1400)mmのPCはりとした。φ23mm鋼製シースの内部にφ17mmPC鋼棒(B種1号, $f_{pu}=1269\text{N/mm}^2$)を配置し, 引張強度の34%の98kNの緊張力を与え, 下縁プレストレス9.8 N/mm²を導入した。せん断スパン内のスターラップ間隔は, せん断破壊が先行する250mm間隔(図-1(a))と曲げ破壊が先行する100mm間隔(図-1(b))の2種類とし, せん断耐力比はそれぞれ, せん断破壊先行型で $V_y \cdot a/M_u=0.66$, 曲げ破壊先行型で $V_y \cdot a/M_u=0.92$ とした。スターラップは, 図-1に示す位置で引張側隅角部を切断した。

コンクリートには, 健全なコンクリートを模擬した普通コンクリート(W/C=45%)とASRを生じたコンクリートを模擬した膨張コンクリート(W/B=45%, 膨張材をセメント内割り30%で配合)を用いた。なお, 表-1に示すように, 自由膨張した圧縮供試体の圧縮強度は $f'_c=5.82\sim 6.16\text{N/mm}^2$ であった。また, 膨張コンクリートの自由膨張量は, ゲージプラグを設置した表面付近のひび割れが著しく, 長さ変化を測定することができなかつたため, 得られなかつた。このとき, 目標導入プレストレス(9.8 N/mm²)に比べて膨張コンクリート強度が小さい状態となる。このため, プレストレス導入時に端部が

割裂破壊した供試体もあり、本研究ではプレストレス導入時に破壊に至らなかった供試体についてのみ実験を行った。

2. 2 載荷方法

載荷は、スパン1400mmに対し曲げスパン400mmの対称2点1方向漸増繰返し曲げ試験とし、PC鋼棒が降伏するまでは5kN毎、降伏後は $2\delta_y$ 毎（実験時の荷重-変位曲線より降伏点を決定）に繰り返した。最大荷重以降は、荷重が最大荷重の6割に達するまで繰り返した。

3. 実験結果

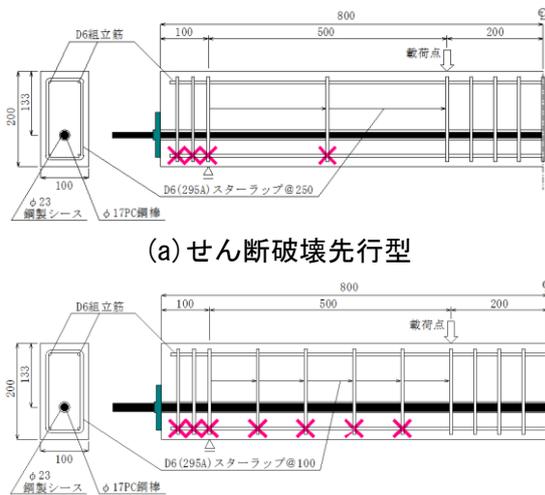
載荷試験結果の一覧を、実験要因とともに表-1に示す。

3. 1 せん断破壊先行型

各供試体の破壊状況および荷重-変位関係を、それぞれ図-2、図-3に示す。

(1) 膨張材によるASR膨張模擬の影響

N-P-s250 (普通) 供試体は斜め引張破壊先行の設計であったが、曲げ引張により破壊した。図-2(a)に示すように、斜めひび割れが発生したものの、プレストレスにより進展、開口が抑制されたため、曲げ引張破壊に至ったと考えられる。また、E-P-s250 (膨張) 供試体は図-2(b)に示すように、斜めひび割れ上部の載荷点付近が大きく圧壊して、せん断圧縮により破壊した。軸方向に卓越した膨張ひび割れの影響でプレストレスが低下し、また、コンクリート強度が著しく低下していたことから、斜めひび割れの開口が抑制できなかつたとともに、せん断圧縮域の破壊が容易かつ広範にわたって生じたと推察される。



(a) せん断破壊先行型

(b) 曲げ破壊先行型

図-1 供試体概要 (単位: mm)



(a) N-P-s250 (曲げ引張)



(b) E-P-s250 (せん断圧縮)



(c) E-P-s250-R (せん断付着)

図-2 せん断破壊先行型の破壊状況 (破壊形式)

表-1 供試体一覧および実験結果

供試体名	コンクリートの種類	スターラップの破断	f'_c (N/mm ²)	計算値						実験値	
				曲げ耐力 M_u (kN·m)	終局曲げ荷重 P_u (kN)	せん断耐力			せん断耐力比 $V_y \cdot a / M_u$	最大荷重 P_u (kN)	破壊形式
						V_c (kN)	V_s (kN)	V_y (kN)			
N-P-s250	普通	無	43.1	27.0	107.9	24.8	8.64	33.4	0.62	125.0	曲げ引張
E-P-s250	膨張	無	6.12	—*)	—*)	—*)	8.64	—*)	—*)	45.6	せん断圧縮
E-P-s250-R	膨張	有	6.12	—*)	—*)	—*)	8.64	—*)	—*)	33.3	せん断付着
N-P-s100	普通	無	43.2	27.0	108.0	24.8	21.6	46.4	0.86	125.7	曲げ引張
E-P-s100	膨張	無	5.82	—*)	—*)	—*)	21.6	—*)	—*)	79.8	曲げ圧縮
E-P-s100-R	膨張	有	6.16	—*)	—*)	—*)	21.6	—*)	—*)	37.7	せん断付着

*) コンクリート強度 f'_c が著しく低下した場合、曲げ耐力 M_u は負となるため算定不能。

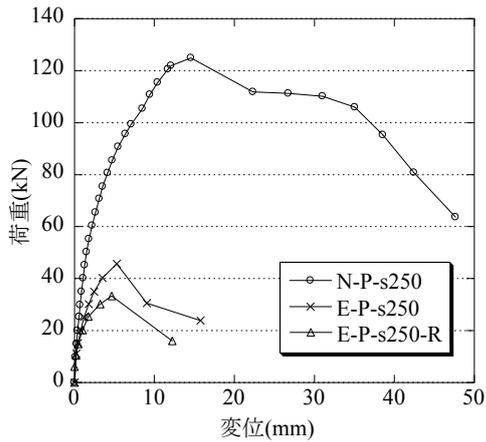


図-3 荷重-変位関係 (せん断破壊先行型)

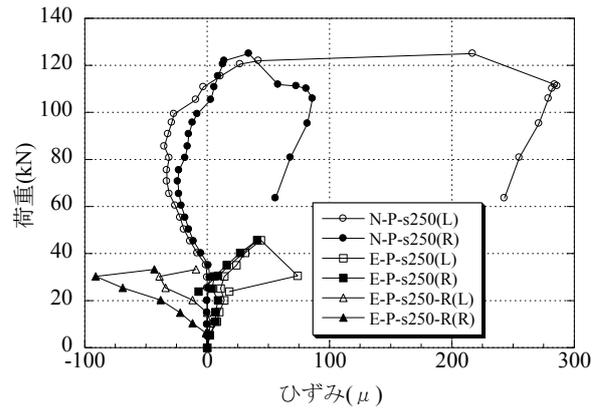


図-4 スターラップひずみ (せん断破壊先行型)

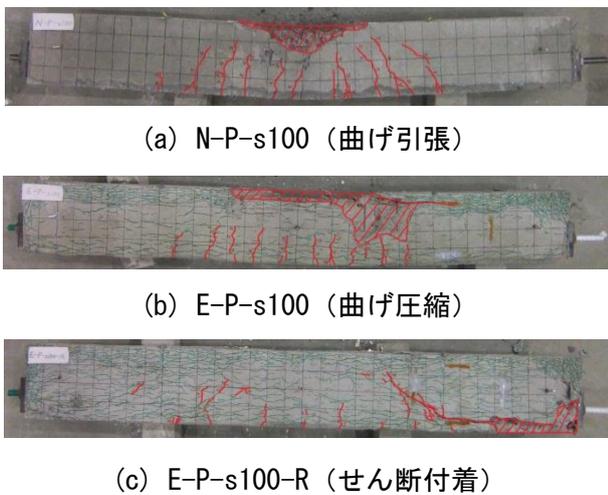


図-5 曲げ破壊先行型の破壊状況 (破壊形式)

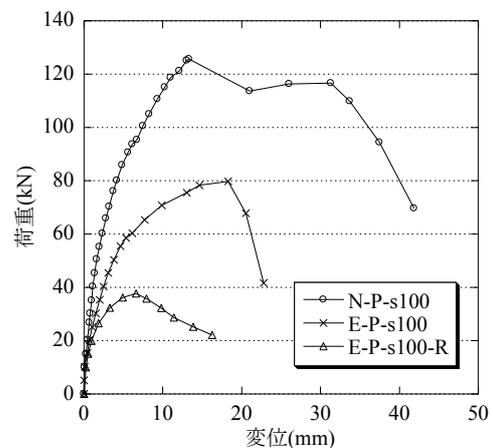


図-6 荷重-変位関係 (曲げ破壊先行型)

(2) スターラップの破断の影響

E-P-s250-R(膨張, スターラップ破断) 供試体はせん断付着により破壊した。図-2(c)に示すような膨張にともなう多数の軸方向ひび割れが発生しており, 特に, スターラップを破断させた場合, 供試体下縁側の拘束が失われ, この部分でコンクリートが過大に膨張し, 大きな軸方向ひび割れが発生した。この軸方向ひび割れが載荷時にPC鋼材のダウエル作用による鋼材に沿うひび割れ (付着割裂ひび割れ) に移行し, せん断付着破壊に至ったと考えられる。

荷重とスターラップひずみの関係を図-4に示す。N-P-s250(普通) 供試体およびE-P-s250(膨張) 供試体では, スターラップの定着により引張力を受け持っているが, E-P-s250-R(膨張, スターラップ破断) 供試体では, スターラップが有効に作用していないことが確認できる。

3. 2 曲げ破壊先行型

各供試体の破壊状況および荷重-変位関係を, それぞれ図-5, 図-6に示す。

(1) 膨張材によるASR膨張模擬の影響

N-P-s100(普通) 供試体は, 曲げ引張により破壊した。また, E-P-s100(膨張) 供試体は, 曲げ圧縮により破壊し, その最大荷重はN-P-s100(普通) 供試体に比べて, 大幅に低下している。膨張コンクリートの強度低下により, PC鋼棒の降伏前に圧縮縁のコンクリートが破壊した。

(2) スターラップの破断の影響

E-P-s100-R(膨張, スターラップ破断) 供試体はせん断付着により破壊した。載荷前の膨張供試体には, せん断破壊先行型の供試体と同様に, 特に, 供試体下縁側に大きな軸方向ひび割れが発生した。

この軸方向ひび割れが付着割裂ひび割れに移行し、せん断付着破壊に至ったと考えられる。

したがって、曲げ破壊が先行するように設計された部材であっても、スターラップの破断およびそれにとまなう付着割裂ひび割れの発生がせん断耐荷機構に影響を与え、急激な耐荷性能の低下を引き起こす可能性がある。

4. 過大な膨張を生じたPC部材の定着部破壊の推定

図-7に示すように、定着部近傍のコンクリートには、定着板からの支圧応力により割裂応力¹⁾が作用する。スターラップ破断により拘束が失われたASR膨張PC部材では、定着部近傍のコンクリート引張強度低下にとまなない、付着割裂ひび割れが発生し易くなると考えられる。そこで、定着部近傍のコンクリート強度が破壊形式に与える影響について検討した。

最大荷重時に定着部に作用する割裂応力は、PC鋼棒の導入時の緊張にとまなう引張力に、曲げ変形にとまなう引張力の増分を加えて求めた²⁾。単純ばりでは、支点外側に外力にとまなう鋼棒引張力は理論上作用しないが、等曲げスパン内に最大荷重時に作用する引張力が支点外側にも作用するアンボンドの状態を仮定した。なお、膨張コンクリートの強度は著しく小さく、最大荷重を求めるのに不適切であったため、曲げ圧縮破壊に至ったE-P-s100(膨張)供試体の最大荷重からコンクリート強度を逆算した値($f'_c=26.6\text{N/mm}^2$)を用いた。

最大荷重時に定着部に作用する割裂応力の計算値を、表-2に示す。これらの割裂応力がコンクリートの引張強度を上回ったとき、定着部の割裂破壊が先行する。特に、スターラップの破断により膨張に対する拘束が失われると、コンクリートが過大に膨張して、定着部近傍のコンクリート強度が著しく低下するため、付着割裂ひび割れ発生危険性が高まると考えられる。

ただし、今回は、等曲げ区間のPC鋼棒の引張力が定着部付近まで作用するとして検討したが、ボンドタイプでは作用割裂応力はより小さくなると考えられる。また、定着部の割裂応力として検討したが、載荷実験で見られた破壊メカニズムからは、支点付近のみならず、付着割裂ひび割れの発生した領域において、PC鋼棒の付着割裂強度との比較のもと検討すべきであると考えられる。さらに、実際のASR膨張では、過度に膨張を与えた今回の状態のように供試体コア部までの強度が一様に著しく低下する可能性は小さい。すなわち、今回の実験で想定したモデルは、ASR膨張劣化したPC部材において、最も安定性の低下を招くシナリオの一つであり、きわめて限定的なケースであると考えられる。

5. 結論

(1) 過大な膨張を与えたPCはりでは、せん断破壊先行型の設計の場合、普通コンクリートを用いた場合に曲げ破壊が先行してもコンクリート強度の著しい低下およびプレストレスの減少により、斜めひび割れをとまなう破壊へ移行した。曲げ破壊先行型の設計の場合も、破壊形式は変化しなかったものの、コンクリート強度の著しい低下およびプレストレスの減少により、普通供試体に比べて最大荷重が低下し、脆性的な破壊を示した。

(2) スターラップの隅角部を破断したPCはりでは、膨張に対する拘束が小さくなり、付着割裂ひび割れが発生しやすく、せん断付着破壊に至る。

参考文献 1) 岡田清, 藤井学, 小林和夫: プレストレストコンクリート構造学, 国民科学社, pp. 137-145, 2002.5. 2) 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, 1998.
謝辞 本研究の一部は、建設技術研究開発費補助金「ASR 劣化構造物の力学性能推定技術の確立」(代表: 宮川豊章)により実施したことを記し、謝意を表す。

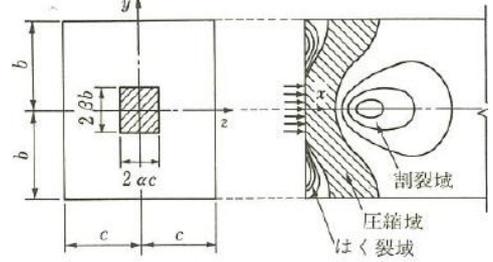


図-7 定着近傍の応力状態¹⁾

表-2 最大荷重時の割裂応力

E-P-s250	1.09
E-P-s250-R	0.98
E-P-s100	1.82
E-P-s100-R	1.04

(単位: N/mm²)