

(128) 高速荷重を受けるアンボンドPCはりの弾塑性挙動に関する一考察

防衛大学校 正会員 ○圓林 栄喜
 同上 大下 英吉
 同上 香月 智
 同上 石川 信隆

1. 緒言

現在、プレストレストコンクリート製(以下PCという)落石覆工は、高耐力を有し施工も容易であることから一般に広く用いられている¹⁾が、近年、落石条件が厳しくなるにつれて大きな断面を有するPCはり部材が必要となってきた。しかし、PC部材の利点は、本来RC部材より小さな断面で大きな耐力を有することであり、断面の大規模化はPC構造物の特徴を必ずしも活用しているとは言えない。また、現行の許容応力度設計法では、許容しうる落石条件にも自ずと限界があり、構造物のじん性を考慮した設計への移行が望ましいものと考えられる。そのためには、部材のじん性を向上させることが重要な課題となる。従来、PCはり部材のじん性を向上させる研究としては、主として圧縮側コンクリート部の軟化勾配を緩めることにより圧縮力と引張力の釣り合いを維持させるという考えのもとに行われてきた²⁾。しかし、これらの研究は、主に静的な荷重条件のもとでの研究であり、部材が破壊に至るような大規模な衝撃的荷重に対する検討は未だなされていなかった。

そこで本研究は、衝撃的な外力が作用するもとの動的じん性を向上させる方法を検討するために、2つの基礎的な実験を行った。まず、従来の円形スパイラル筋で補強されたPCはり部材の静的および高速荷重実験を行い、その動的じん性の効果を検討した。次に、得られた実験結果から動的じん性の向上を期待できる部材としてアンボンド化したPCはり部材を提案し、このアンボンドPCはりに対する静的および高速荷重実験を再び行い、その動的じん性に及ぼす効果を確認したものである。

2. 円形スパイラル筋で補強されたPCはり部材の弾塑性挙動

2.1 実験の概要

本実験では、荷重速度の影響を確認するために静的荷重実験と高速荷重実験を行った。すなわち、静的荷重実験は200 tf アムスラー試験機を用いて行い、高速荷重実験は写真-1のような高速変形負荷装置を用いて荷重速度を4 m/sに維持して行った。本装置は、試験体と荷重体とを最初から接触させて急速に荷重するため、荷重点において応力波の影響や慣性力の影響を小さくできることから静的試験の速度を早くした試験と考えて良く、部材のひずみ速度効果を考慮した終局限界状態を調べるためのものである³⁾。すなわち、PCはり部材自体のもつ動的じん性の限界(終局曲率あるいは終局変位)を高速荷重実験によって明らかにすることが可能である。これは、落石等で設計荷重をはるかに超える荷重が作用した場合の破壊時の動的じん性を調べるための実験である。測定項目は、図-1に示すように荷重、変位、ひずみ、加速度およびひび割れ状況である。また供試体寸法は図-2に示すように、220 cm×25 cm×15 cmの部材を用い、支間距離は200 cmとしている。ここでは、円形スパイラル筋のピッチの影響を調べるために、4種類の供試体を用いて実験を行った。すなわち、A:スパイラル筋なし、B:粗(ス

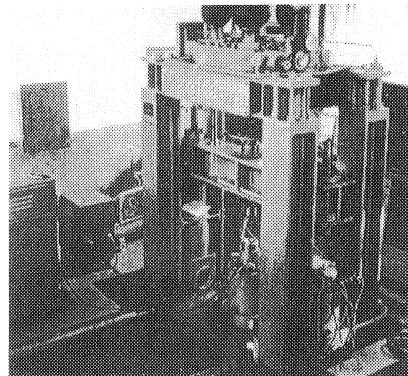
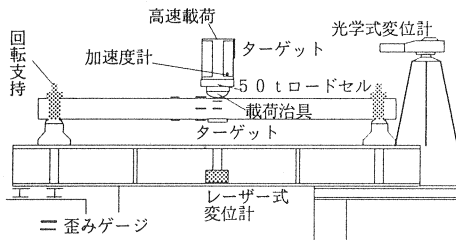


写真-1 高速変形負荷装置



- 測定項目
 1 荷重 (ロードセル)
 2 変位計 (下変位, 上変位)
 3 ひずみ (載荷点付近5ヶ所)
 4 加速度 (載荷ビーム)
 5 ひび割れ, 破壊形態

図-1 測定項目

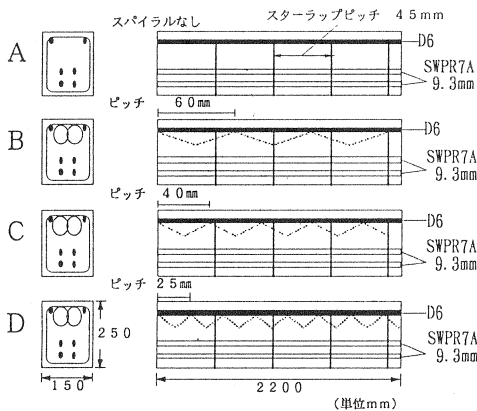


図-2 供試体

パイラル筋ピッチ60mm), C:中(スパイラル筋ピッチ40mm), D:密(スパイラル筋ピッチ25mm)の4種類とした。材料諸元については表-1に示すが,スパイラル筋ピッチがせまいことからモルタルを使用した。

2.2 実験結果と考察

(1) 荷重～回転角関係

図-3に示すように実験結果を同じ条件のもとで比較するパラメータとして,はりの支間距離に影響されない次式に示す回転角 θ を用いて行うこととした。

$$\theta = \frac{2 \cdot \delta}{L} \quad (1)$$

ただし, δ :はり載荷点部の変位, L :はりの支間距離

図-4は,静的載荷実験の荷重～回転角関係を示したものである。この図から,供試体Cのスパイラル筋中(スパイラル筋ピッチ40mm)から供試体Dの密(スパイラル筋ピッチ25mm)に補強した場合のじん性は,無補強の供試体Aより約10%から40%伸びていることがわかる。これに対し,スパイラル筋を粗(ス

表-1 材料の諸元

部材名	項目	数量
コンクリート	水セメント比	0.47
	セメント (kg/m ³)	600
	水 (kg/m ³)	298
	細骨材 (kg/m ³)	1300
	圧縮強度 (N/mm ²)	39.2
P C鋼材	初期引張力 (kN/本)	66.8

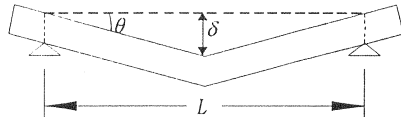


図-3 はりの回転角

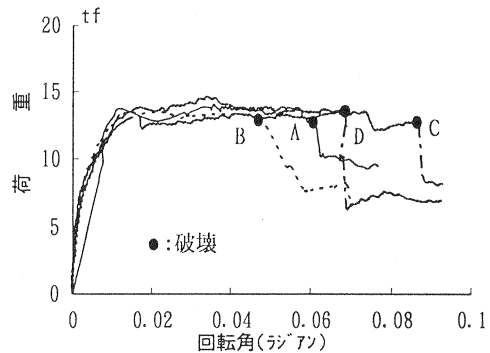


図-4 静的載荷時の荷重～回転角関係

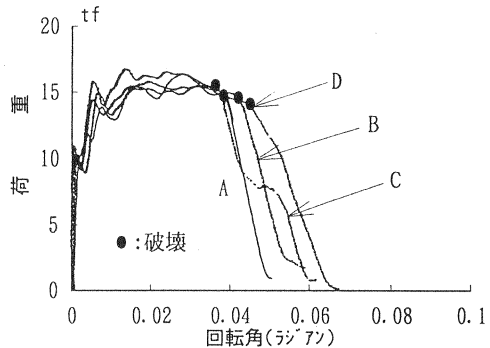


図-5 高速載荷時の荷重～回転角関係

パイラル筋ピッチ60mm), C:中(スラル筋ピッチ60mm)に補強した供試体Bのじん性は, 無補強の供試体Aよりも小さくなっていることがわかる。これは, 鈴木ら⁴⁾がスパイラル筋の効果がないとしているスパイラル筋のピッチSと巻き径Dの比 $S/D=0.7$ より大きいB供試体($S=60\text{mm}, D=60\text{mm}$ なので $S/D=1.0$)を用いたことなどによりじん性が伸びなかったものと思われる。しかし, ばらつきはあるものの静的載荷実験においては, スパイラル筋の補強を密(本実験では $S/D=0.66$ 以下)にすれば, コンクリートへの拘束効果が現われ, じん性が大きくなっていることが認められる。

図-5は, 高速載荷実験における荷重~回転角関係を示したものである。静的載荷実験と比較し, 耐力は約10%程度上昇しているが, すべての供試体の終局回転角(耐力が急落する点)はいずれも静的に比べて小さくなっており, スパイラル筋のピッチに関係がないことがわかる。これは, PC鋼線がいずれの供試体でも破断したためである。

	静的載荷実験	高速載荷実験
A スラ なし		
B 60 mm		
C 40 mm		
D 25 mm		

図-6 破壊形態

(2) 破壊形態

図-6に静的および高速載荷実験の破壊形態を示す。この図の左側から, 静的載荷実験ではいずれの供試体もPC鋼線が降伏し圧縮側コンクリート部が圧壊するという破壊形態を生じていることがわかる。一方, 高速載荷実験では, 図-6の右側に示すようにいずれの供試体もPC鋼線の破断という破壊形態となっていることが認められた。写真-2および3は, 破壊形態の一例として静的載荷時および高速載荷時の供試体Cの破壊状況を示したものである。写真-2, 3の破壊状況からひび割れ分布を比較してみると, 明らかに高速載荷時のひび割れが荷点中央部に集中しており, ひび割れ数も少ないことがわかる。すなわち, 高速載荷時には, はりの変形モードが静的な場合の全体的な変形とは異なり, 荷点部近傍の局部的変形となっており, このため, PC鋼線が局部の急激な変形に追従しきれずに破断したものと考えられる。すなわち, 高速載荷時のはりのじん性を増すためには, PC鋼線の破断に対する何らかの処置が必要であり, その一案として局部変形から全体変形へ移行させるため, PC鋼線とコンクリートとのアンボンド化を考えてみた^{5), 6)}。

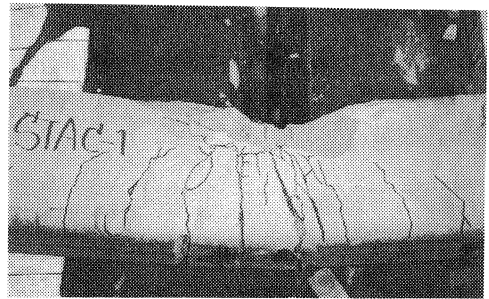


写真-2 静的載荷時の破壊状況 (供試体C)

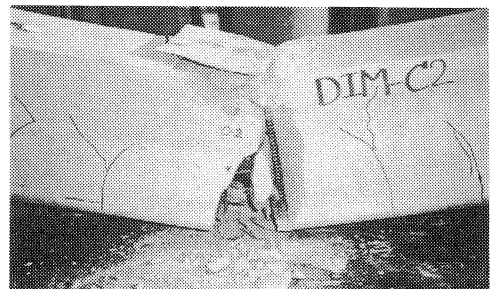


写真-3 高速載荷時の破壊状況 (供試体C)

3. アンボンドPCはり部材の弾塑性挙動

3.1 実験の概要

2.の実験結果から, 圧縮域コンクリートに円形スパイラル筋を用いることは, 高速載荷時の動的じん性の改善には必ずしも貢献しなかった。そこで, ここでは高速変形時のPC鋼線の破断を防止し, 動的じん性が向上するように図-7に示すようなPCはり部材のアンボンド化について検討した。

そのために, 図-8に示すような3種類の供試体を作成した。すなわち, 先の実験で用いた供試体Aと同じ

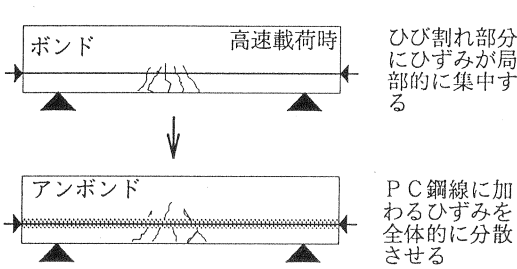


図-7 動的じん性の改善方法

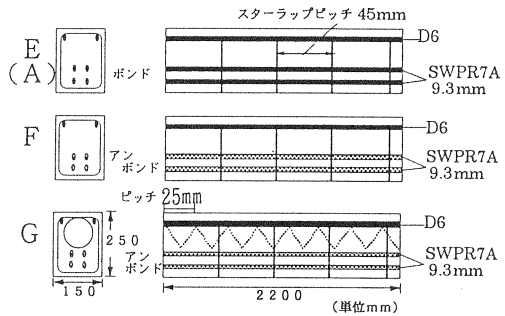


図-8 アンボンドPCはりの供試体

断面のPCはりである供試体E, 次にEと同じ断面でPC鋼線とコンクリートとの付着をなくした供試体F, さらにアンボンド化した断面に円形スパイラル筋で補強した供試体Gの3体を作成し, その効果を確認することとした。また, アンボンド化に伴ないはりの静的挙動も変化する可能性があるため, 本実験においても静的載荷と高速載荷の2種類の実験を行った。測定項目および供試体寸法については前項と同じであるが, 高速載荷実験の載荷装置のストロークの限界から, 支間距離を200cmとすると終局限界を求められなかったため, はりの終局限界までの挙動の比較のために, 高速載荷実験についてのみ支間距離を100cmとした。このスパンを短くすることによる影響は, シアースパン比が2.5となるため, ちょうど曲げ破壊とせん断破壊との境界になる⁷⁾ものと推定される。

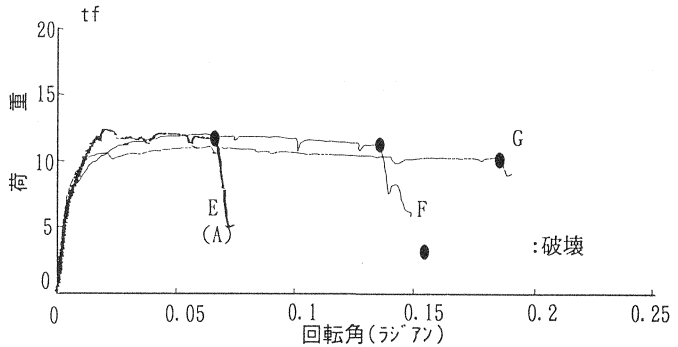


図-9 静的載荷時の荷重～回転角関係(アンボンドPCはり)

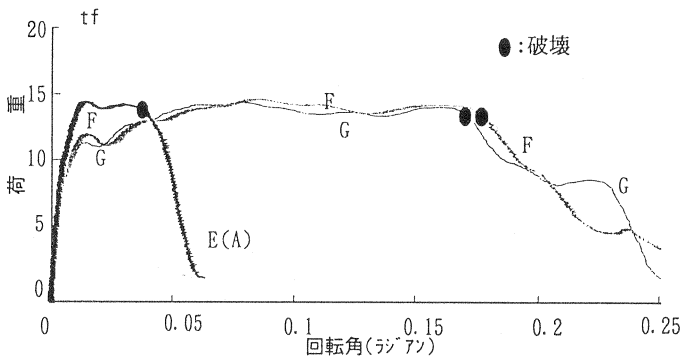


図-10 高速載荷時の荷重～回転角関係(アンボンドPCはり)

3.2 実験結果と考察

(1) 荷重～回転角関係

図-9は, 静的載荷時の荷重～回転角関係を示したものである。アンボンド化した供試体FとGのじん性は, ボンドタイプ供試体E(A)に比較して約2倍以上伸びていることがわかる。また, 円形スパイラル筋で補強した供試体Gは供試体Fよりもさらに約20%程度じん性が伸びていることから, アンボンドタイプのPCはりでも円形スパイラル筋によるじん性の向上が期待できることが認められた。また, 図-4と図-9を比較すると, アンボンド化により, 約2倍以上のじん性向上が認められ, 一方の静的耐力の低下も約10%以下であり, アンボンド化に伴う耐力低下はさほど問題点とはならない。図-10は, 高速載荷実験における荷重～回転

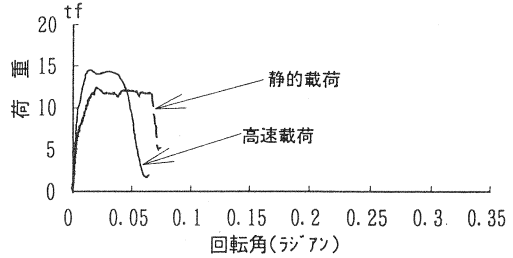
角関係を示している。供試体E(A)に比較してアンボンドタイプの供試体F, Gはそれぞれ約3倍から4倍もじん性が伸びていることがわかる。すなわち、動的じん性の向上を期待したアンボンド化の方法はいずれも期待どおり有効であることを確認できた。

(2) 静的荷重実験と高速荷重実験との比較

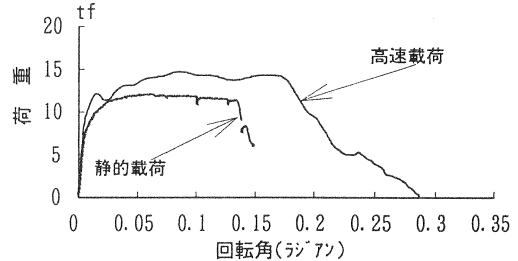
図-11は、各供試体ごとの静的荷重実験と高速荷重実験の荷重～回転角関係を比較したものを示したものである。ボンドタイプの供試体Eは、高速荷重時の終局回転角が静的よりも約30%程度小さくなっていることがわかる。一方、アンボンドタイプ供試体Fは逆に高速荷重時の終局回転角の方が静的よりも約20%大きくなっている。また、供試体G(アンボンド+円形スパイラル筋補強タイプ)は、静的荷重時と高速荷重時の終局回転角にさほど大きな違いはないことがわかる。したがって、アンボンド化することにより、高速荷重時の終局回転角が少なくとも静的荷重時の終局回転角を下回ることはないことが認められる。

(3) 破壊形態

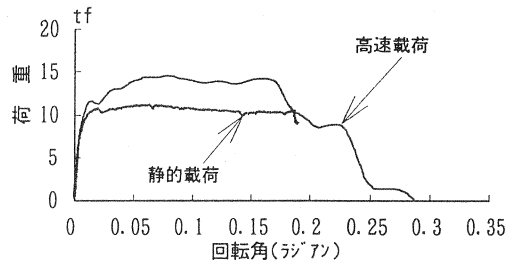
図-12は、静的荷重時と高速荷重時の破壊形態を比較して示したものである。静的荷重実験では供試体E, F, GがいずれもPC鋼線が降伏し、コンクリートの圧壊が生ずる破壊形態であった。しかし、高速荷重時においては2.のボンドタイプと同じくアンボンドタイプの供試体も引張側PC鋼線の破断となった。すなわち、アンボンドタイプは動的じん性が向上するものの最終的な破壊形態はいずれもPC鋼線の破断となることがわかった。破壊形態の一例として、写真-4および5に静的荷重時および高速荷重時の供試体Fの破壊状況を示す。ひび割れ分布はいずれの場合も中央に集中していることがわかる。ここで、アンボンド供試体G, FのPC鋼線が破断した際に、はり両端の定着用コーンに突発的な破壊的引き抜けが生じた。したがって、アンボンドPCはりの実用化にあたっては、端部の固定方法に十分な配慮が必要と思われる。



(a) 供試体E(ボンドPCはり: q=0.28)



(b) 供試体F(アンボンドPCはり: q=0.28)



(c) 供試体G(アンボンド+スパイラル補強PCはり)

図-11 静的荷重時と高速荷重時の荷重～回転角関係の比較

	静的荷重実験	高速荷重実験
ボンド E	<p>圧壊 剥離 PC鋼線降伏 (より線1本破断)</p>	<p>PC鋼線破断</p>
アンボンド F	<p>圧壊 剥離 PC鋼線降伏 (より線1本破断)</p>	<p>PC鋼線破断</p>
アンボンド + スパイラル G	<p>圧壊 剥離 PC鋼線降伏 (より線1本破断)</p>	<p>PC鋼線破断</p>

図-12 破壊形態

4. 結論

本研究の成果をまとめると以下のようになる。

- (1) ボンドタイプの供試体では、破壊形態がP C鋼線の破断が原因となるため、高速載荷時の円形スパイラル筋の効果は認められなかった。
- (2) 静的載荷および高速載荷実験によって、アンボンド化したP Cはりのじん性向上が有効であることが認められた。
- (3) 円形スパイラル筋で補強する方法は、静的にはかなり有効であるが、高速載荷時にはアンボンド化に比べその効果はあまりないことがわかった。

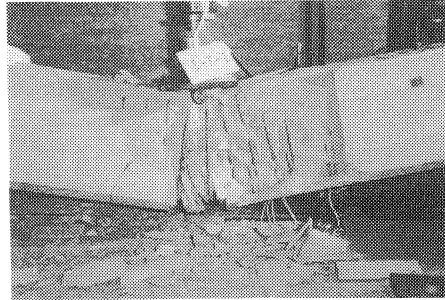


写真-4 静的載荷時の破壊状況(供試体F)

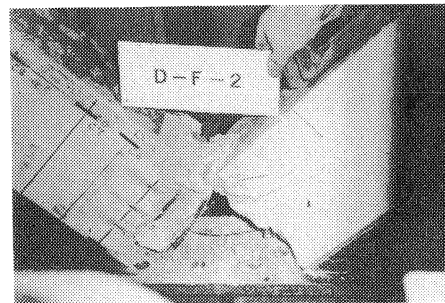


写真-5 高速載荷時の破壊状況(供試体F)

参考文献

- 1) 土木学会：構造物の衝撃挙動と設計法，pp. 177, 1993. 12
- 2) 日本建築学会：プレストレスト鉄筋コンクリート(Ⅲ種P C) 構造設計・施工指針・同解説，pp. 136, 1986. 1
- 3) 土木学会：構造物の衝撃挙動と設計法，pp. 37, 1993. 12
- 4) 鈴木計夫，中塚俊，吉田晴彦：円形補強筋を用いたコンファインドコンクリートの補強及び変形特性，「材料」，第34巻，第376号，pp. 33~39, 1985. 1
- 5) 圓林栄喜，香月智，石川信隆：低速載荷時の円形スパイラル筋で補強したP Cはりの準静的弾塑性解析，第19回構造工学における数値解析法シンポジウム論文集，pp. 171~176, 1995. 7
- 6) 圓林栄喜，小林一隆，香月智，石川信隆：高速載荷時の円形スパイラル筋で補強したP Cはりの弾塑性挙動に関する一考察，構造工学論文集 Vol. 42A, pp. 1235~1246, 1996. 3
- 7) 大塚浩司，庄谷征美，外門正直，原忠勝：(第二版)鉄筋コンクリート工学，pp. 29~31, 技報堂出版