

論文 短繊維補強 PC はりの衝撃特性に関する実験的検討

鈴木雅博^{*1}・酒井博士^{*2}・孕石孝平^{*3}・六郷恵哲^{*4}

要旨：耐衝撃部材は、安全性を確保するために衝撃作用下の部材の靱性を向上あるいは変位復元性を向上させる必要がある。これを実現するため、短繊維補強PCはりを提案した。本研究では、その衝撃特性を把握するために、短繊維の有無及びプレストレス量を変化させた部材を作製し、落下高さを漸増させる重錘落下試験を実施した。その結果、短繊維補強PCはりは、①短繊維補強をしていないPCはりと比較して最大支点反力が増加し、かつ、塑性域でのはりの残留変位が小さくなり高い復元性を示すこと、②部材損傷を小さくする効果があること、等が認められ、耐衝撃性能の向上が認められた。

キーワード：耐衝撃部材，短繊維補強PCはり，重錘落下衝撃試験，重錘衝撃力

1. はじめに

道路用施設，港湾施設，砂防ダム等のコンクリート構造物では，衝撃的な荷重が緩衝材を介さず部材に直接作用する場合がある。これらの構造物は衝撃作用に対する安全性を確保するために，耐荷力の他に衝撃作用下における部材の靱性を向上あるいは変位復元性を向上する必要がある。これまでも，鉄筋コンクリートはり(以下RC)の耐衝撃特性に関する基礎試験が行われている。しかしながら，塑性域での性能に関する検討はほとんど行われていないのが現状である。

塑性域における衝撃作用に対する構造物の性能を向上させるためには，①短繊維補強コンクリート(以下SFC)の高靱性，②PCはりの高復元性，の両者の利点を活かした短繊維補強プレストレストコンクリートはり(以下SFPC)を衝撃部材に適用することが有効と考えられる。

本研究では，SFPCの衝撃性能を把握することを目的に，プレストレス量，短繊維の有無が衝撃特性に及ぼす影響について，重錘落下による衝撃試験を行い検討を行った。

2. 試験方法

2.1 試験概要

重錘落下方式による衝撃試験の方法は，①重錘載荷方法(単一高さによる繰返し，落下高さの漸増等)，②重錘形状，③重錘重さ，等の試験方法が確立されていないのが現状である。本試験では，落下高さの漸増による重錘落下試験を用いることとした。その理由は，単一高さでの重錘落下試験の場合には，供試体が破壊に到達するための重錘質量や落下高さ等の設定が非常に難しく，試験が困難となるからである。また，落下高さを漸増した場合には，与える衝撃エネルギーを増加させることができることから，静的載荷試験と類似した破壊過程の取り扱いが可能であると考えたからである。そこで，本研究ではこの方法を用いて，種々のはりの耐衝撃特性を把握することとした。

2.2 試験条件

供試体の要因を表-1に示す。部材の種別は鉄筋コンクリートはり(RC)，プレストレストコンクリートはり(以下PC)，短繊維補強鉄筋コンクリートはり(以下SFRC)，短繊維補強プレストレストコンクリートはり(SFPC)の4種類とした。

*1 (株)ピー・エス 開発技術第一部 主任技師 工修 (正会員)

*2 (株)ピー・エス 開発技術第一部 主任研究員 (正会員)

*3 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*4 岐阜大学教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)

プレストレスはプレテンション方式で断面に一樣に導入し、そのプレストレス量は6, 12MPaの2種類とした。RC部材における鉄筋量はRC部材とPC部材の静的曲げ耐力がほぼ同一となるように決定した。図-1に供試体断面図を示す。部材は断面を200×200mmの矩形とし、部材長を3000mmとした。スパン長は静的曲げ破壊耐力が静的せん断耐力を下回るように2240mmとした。なお、せん断筋はD6(SD295A)を100mmピッチで全域に配置した。また、供試体の振動によりはり上縁にも引張応力の発生が考えられることから、鉄筋やPC鋼材などの補強材は上下対称に配置した。供試体のコンクリートの試験材齢時の平均圧縮強度は、短繊維を用いない場合で53.8MPa、短繊維を用いた場合で64.3MPaである。SFCに用いた短繊維は両端にフックの付いたホッチキス型鋼繊維で直径0.75mm、長さ60mm(アスペクト比80)である。また、SFCの短繊維量はコンクリート体積の1%である。表-2に使用した補強材の力学特性を示す。

図-2に衝撃載荷試験装置を示す。衝撃試験は、

所定の高さまで吊り上げた重錘を電磁石を解放することにより、自由落下させる方法²⁾とした。重錘は鋼板をφ17mmPC鋼棒で連結したもので、その質量は250kgである。また、供試体と衝突する部分の重錘の形状は、片あたりを防ぐために、半径75mmの球状とした。本試験では供試体の跳返りを防止するために、支点架台にばね(ばね定数392N/mm)を各支点で2個、合計4箇所介在させて供試体を固定した。各支点の拘束力は15.7kNである。支点治具は図に示すようにピン構造として、部材の回転を許容する構造とした。また、支点部の水平方向を拘束しないように可動支点部側にローラーを入れた。重錘の落下方法は初期高さを10cmとし、10cmずつ落下高さ(図に示す供試体上面と重錘先端部との距離)を上げて行った。

測定は①重錘に設置した加速度計(容量1000G, 応答周波数0~7kHz)による加速度, ②片側に設置したロードセル(容量2MN)による支点反力, ③スパン中央から支点側200mm位置に設置したレーザー変位計(測定範囲±100mm, 応答性

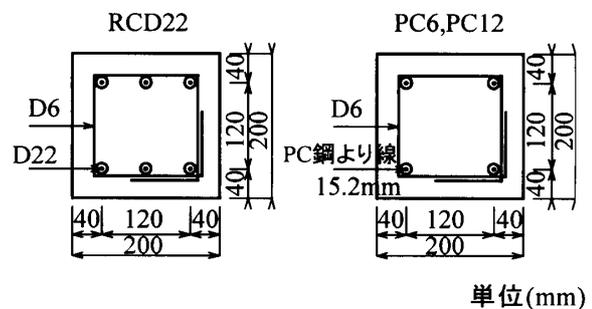
表-1 供試体の要因

供試体名	部材種別	使用鋼材	プレストレス量(MPa)	SF (%)
RCD22	RC	D22	-	-
SFRCD22	SFRC			1
PC6	PC	7本より	6	-
SFPC6	SFPC			1
PC12	PC	15.2mm	12	-
SFPC12	SFPC			1

表-2 補強材の力学的特性

呼び名	規格	公称直径(mm)	公称断面積(mm ²)	引張荷重(kN)	降伏荷重(kN)
D22	SD295A	22.2	387.1	209	149
7本より 15.2mm	SWPR 7BN	15.18	140.2	275	257

但し、PC鋼線の降伏荷重は0.2%永久伸びに対する荷重



注)供試体名の内、SF量を示す部分は省略

図-1 供試体断面

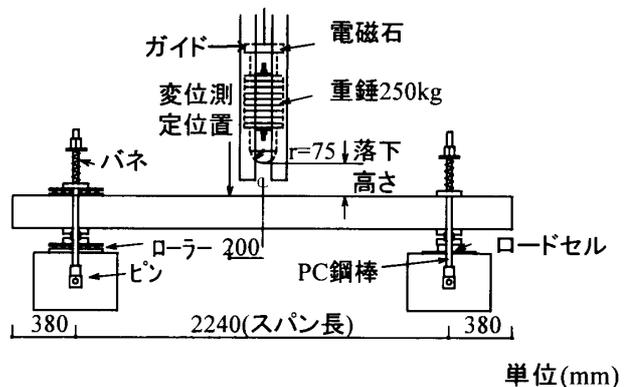


図-2 衝撃載荷試験装置

915Hz, 分解能200 μ m)による供試体変位とした。これらの計測は動ひずみ計, 波形記憶装置を介して50 μ sec間隔で行った。尚, 測定結果の検討はフィルタ処理をせずに行った。本試験における終局時は処女載荷前の変位を原点として, 重錘落下終了後の測定位置のはりの変位(以下残留変位)が20mm(スパン中央ではスパン長の約1%)を越えた落下高さとして定義した。

3. 試験結果及び考察

3.1 破壊状況

写真-1にRCD22, PC6, SFPC6, PC12の重錘落下高さ50cm, 100cm, 150cmの供試体状況を示す。RCD22はひび割れが細かく分散しているのに対して, PC6, SFPC6及びPC12は, 落下高さ10~20cmでひび割れが供試体中央に3ないし4本発生し, 落下高さの上昇とともにひび割れおよび重錘衝突面のコンクリートの剥落が進行し破壊した。PC, SFPCでは, 落下高さの増加とともに, 初期に発生した数本のひび割れの内の1本のひび割れの開口が大きくなる傾向を示した。落下高さ1.0m及び1.5mのSFPC6のひび割れの開口はPC6と比較して小さく, コンクリートをSFCとすることにより劣化の抑制効果が確認された。PC6とPC12の終局時の供試体状況を比

較すると, PC12の方が損傷が大きくなる傾向が認められた。

3.2 衝撃力, 全支点反力, 変位に関する応答波形

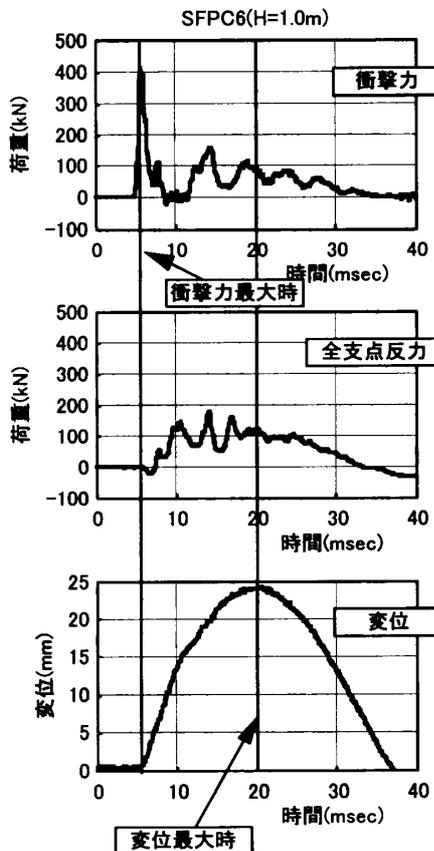


図-3 衝撃力, 全支点反力及び変位の応答関係

落下高さ(m)	RCD22	PC6	SFPC6	PC12
0.5	 (0.6m)			
1.0				
1.5	 (1.1m)(終局)	 (1.4m)(終局)		 (1.2m)(終局)

写真-1 各落下高さの供試体状況

図-3は、代表的な事例としてSFPC6の落下高さ1mにおける、衝撃力、片側で測定した支点反力を2倍した値(以下全支点反力)、供試体変位に関する応答波形を示す。但し、図に示す各データは重錘衝突前約5msecを原点として、40msec間の計測値である。衝撃力は重錘加速度に重錘質量を乗じた値である。図より、全支点反力及び変位は、衝撃力最大値の発生時刻に変化し始めており、この傾向は全供試体について同様であった。図-4にSFPC6の落下高さ各落下高さの衝撃力及び全支点反力の関係を示す。ここで、衝撃力が最大となる時刻と変位最大となる時刻は異なるが、ここでは衝撃力は衝撃力最大値とし、全支点反力については変位最大となる時刻での計測値としてそれぞれ示す。図に示すように、全支点反力は衝撃力との1/4程度と小さくなる傾向が認められた。この差違は、供試体の慣性や繰返し落下によるはりの劣化の影響により生じたものと推察される。以下、重錘衝突面のコンクリートの剥落とひび割れ進展が同時に進行する劣化の評価が可能と考えられる、全支点反力と変位の関係を検討する。

3.3 全支点反力と変位

図-5に各供試体の変位と全支点反力の関係を示す。図に示す変位は、処女載荷前の変位を原点としたものである。図中の各全支点反力に対応する変位は、図-3で示した最大変位に1回前の重錘落下の残留変位を加えた変位であり、全支点反力ゼロに対応する変位は残留変位である。また、全支点反力は図-4と同様に変位が最大となる時刻の測定値である。図中の黒丸は変位-全支点反力曲線の塑性開始点及び終局時となる点を示す。ここで、塑性開始点は図-5の全支点反力と変位の関係から供試体が塑性する点を示

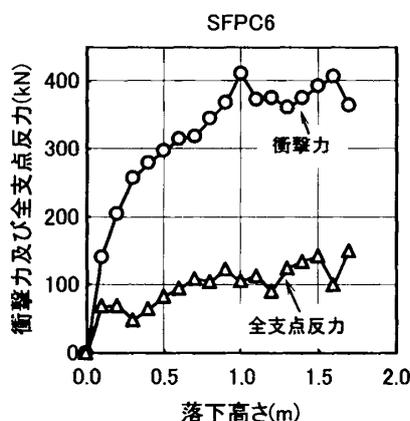


図-4 落下高さとの衝撃力及び全支点反力

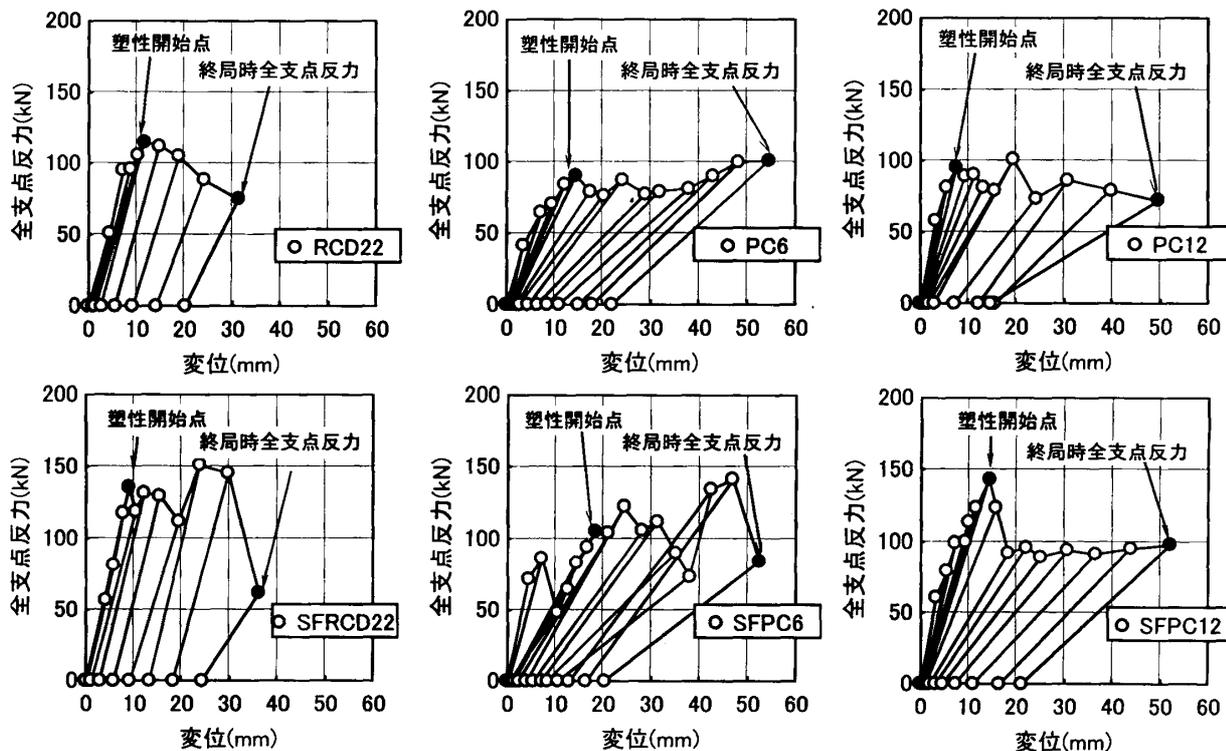


図-5 全支点反力と変位の関係

している。但し、SFPC6についてはデータのばらつきが大きいので、単純には判断できないが、ここでは、図に示す点を塑性開始点と仮定した。PC部材はRC部材と比較して、塑性開始点以降の残留変位増分が少なく、衝撃力負荷後の部材の高い変位復元性が確認された。全支点反力の最大値はRCD22とSFRCD22、PC6とSFPC6、PC12とSFPC12、それぞれで比較すれば、コンクリートをSFCとした場合に大きくなる結果となった。表-3に各供試体の塑性開始点、終局時となる落下高さ及び最大支点反力と静的曲げ耐力(静的曲げ載荷試験により得られた荷重最大値)の関係を示す。SFPC6の塑性開始点及び終局時となる落下高さはPC6と比較して高くなる傾向が認められ、同様にSFPC12とPC12を比較した場合についても、SFPC12の方が高くなる傾向が認められた。但し、RCD22とSFRCD22の塑性開始点となる落下高さはほとんど同じであり、SFCの効果はあまり認められなかった。次に最大全支点反力に対する静的曲げ耐力の比を比較する。表に示すように、静的曲げ耐力がほぼ同じであることから、この比は耐衝撃性に対する1つの目安になるものと考えられ、SFRCD22はRCD22より、SFPC6はPC6より、SFPC12はPC12より、それぞれ大きくなった。以上のことから、PC部材、RC部材ともにコンクリートをSFCにすることにより、重錘衝突面のコンクリートの剥落やひび割れ開口の抑制効果による断面剛性の低下が抑制でき、耐衝撃性が向上すると判断される。

SFRC部材とSFPC部材の比較をSFRCD22とSFPC6で検討した場合には、SFRCD22の方が終局時の落下高さが低く、かつ、最大全支点反力に対する静的曲げ耐力の比がほとんど同じであることから、より高い落下高さまで耐えうるSFPC6の方が耐衝撃性に優れているものと考えられる。最後にプレストレス量の効果をPC6とPC12で比較すると、PC12の方が終局時の落下高さが低く、かつ、最大全支点反力に対する静的曲げ耐力の比が低い結果となった。また、

表-3 塑性開始点、終局時となる落下高さ及び最大支点反力と静的曲げ耐力の関係

供試体名	落下高さ(m)		最大全支点反力/ 静的曲げ耐力
	塑性開始点	終局時	
RCD22	0.5	0.9	1.02(112)
SFRCD22	0.4	1.1	1.29(118)
PC6	0.5	1.4	1.02(99)
SFPC6	0.7	1.6	1.27(111)
PC12	0.3	1.2	0.90(112)
SFPC12	0.6	1.5	1.23(116)

*()内は静的曲げ耐力(kN)

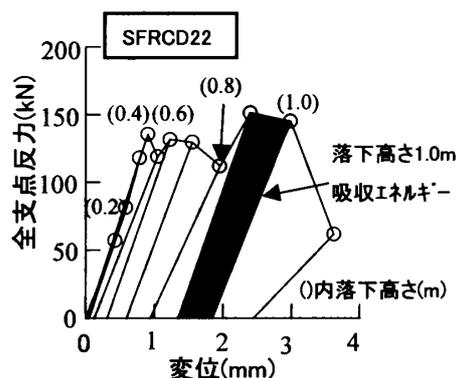


図-6 吸収エネルギー算定例

SFPC6とSFPC12を比較しても同様な結果を示している。これより、PC部材、SFPC部材ともに、耐衝撃特性を向上するためには、適切なプレストレス量が存在すると考えられる。

3.4 位置エネルギーと吸収エネルギー

落下前の重錘位置エネルギー(以下 E_i)は供試体衝突直前には、重錘落下を供試体に正確に落下させるために設置したガイド(図-2参照)との摩擦等により低減するが、ここでは、 E_i を供試体に負荷されたエネルギーとして考えることとした。 E_i は重錘が供試体に衝突した後に、供試体の振動による運動エネルギーやひび割れの進展に費やされる吸収エネルギー(以下 E_k)等に変換されると考えられる。ここでは、 E_i と E_k との関係について考察する。 E_k は図-5に示した支点反力-変位曲線より、図-6に示すように1回の重錘落下により生じた全支点反力と載荷点変位のループの面積として算出した。図-7に処女載荷から終局時衝撃力までの E_i と E_k の関係を示す。これより、 E_k はほぼ図-5に示す塑性開始点とな

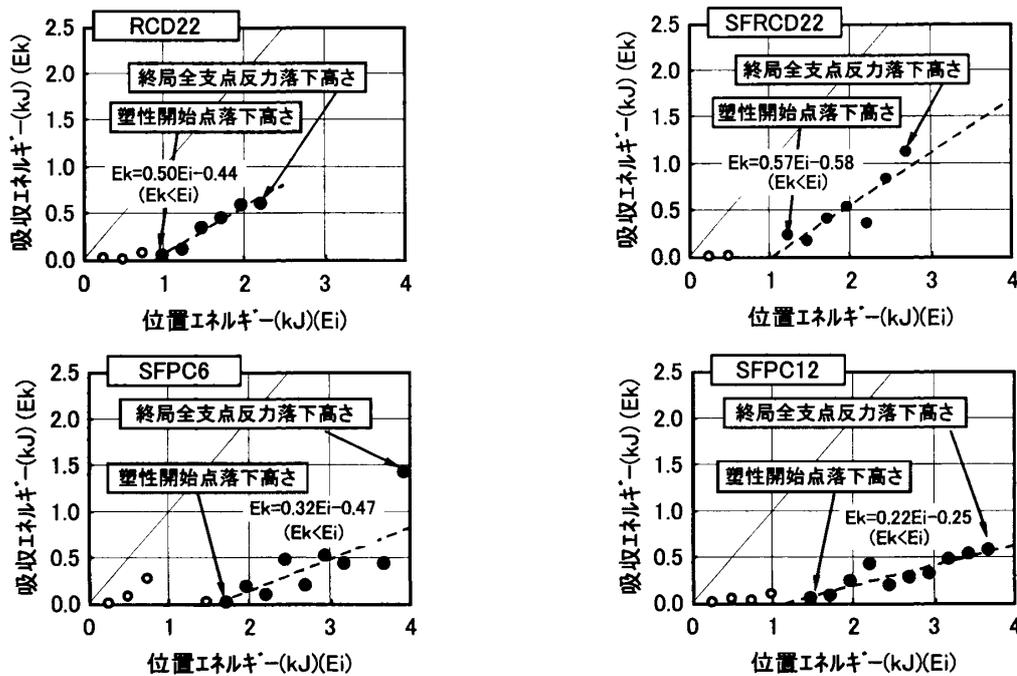


図-7 位置エネルギーと吸収エネルギーとの関係

る落下高さまではほとんど発生せず、 E_i が増加しても全支点反力が増加しない塑性域において増加する結果を示した。図中の点線は、図-5に示す塑性開始点から終局時全支点反力までの塑性域において、1回の重錘落下により生じた E_k (図中黒丸)を回帰した線でほぼ直線性が認められた。 E_i に対する E_k の割合が大きいほど残留変位が大きく、はりの劣化が大きくなるものと考えられる。直線の傾きをRCD22とSFRCD22を比較するとほとんど差が認められず、RCはりの場合にはコンクリートをSFCとする効果が認められなかった。SFPC6の直線の傾きはSFRCD22と比較して小さくなり、プレストレスを導入することの効果を確認された。これは、SFPCはりの場合には、プレストレスにより変位の高い復元性があるために、 E_i が増加しても残留変位の増加が小さくなったためと考えられる。また、プレストレス力の影響をSFPC12とSFPC6で比較すると、直線の傾きはSFPC12の方がやや小さくなる結果となった。

4. まとめ

本試験では衝撃力を受けるコンクリート構造物の塑性域における性能を向上させることを目

的としSFPC部材を提案し、その衝撃特性を明らかにするために落下高さを漸増させる重錘落下による衝撃試験を実施した。本試験結果で得られた知見を以下に示す。

- (1)短繊維補強コンクリートは普通コンクリートと比較して衝撃特性の向上が認められた。
- (2)短繊維補強の有無に拘わらず、PCはりはRCはりと比較して高い復元性を示した。
- (3)SFPCはりの終局時落下高さはSFRCはりと比較すると高くなる傾向が認められた。
- (4)PCはり、SFPCはりはプレストレス量によって耐衝撃性能が異なることが認められた。
- (5)落下高さを漸増させる衝撃試験の場合には、塑性域における吸収エネルギーと位置エネルギーの関係は1次関数で表すことができた。

参考文献

- 1)例えば、三上浩ほか：低速度衝撃を受けるRC梁の耐衝撃設計法の一提案、構造工学論文集、Vol.42A,pp.1255-1260, 1996
- 2)小柳治ほか：衝撃荷重下のコンクリートの変形と破壊に関するエネルギー的考察、コンクリート工学年次講演会講演論文集、Vol.5,pp.129～132, 1983