

重錘落下試験によるUFCパネルの耐衝撃性の基礎研究

大成建設(株) 正会員 工修 ○ 武者 浩透
 防衛大学校 建設環境工学科 博士 別府 万寿博
 大成建設(株) 工修 岡本 修一
 大成建設(株) 正会員 龍 尊子

1. はじめに

超高強度繊維補強コンクリート (UFC) は、その優れた強度特性と耐久性を活用することにより、従来の鉄筋コンクリートに比べて部材厚を大幅に薄肉化することが可能となり、歩道橋や道路橋あるいは床版構造への適用が進んでいる。しかしながら、その耐衝撃性能に関しての研究報告は未だ非常に少ない。そこで、薄肉のUFCパネルに焦点を絞り、UFCパネルの耐衝撃性能を把握するために一連の実験を実施している。ここでは、そのシリーズ実験の概要と、その内の1つである重錘落下衝撃予備実験について報告する。

2. UFCパネルの耐衝撃性研究の概要

本研究の目的は、PC鋼材が配置されプレテンション方式によりプレストレスが導入された薄肉UFCパネルの耐衝撃性能を把握することである。しかしながら、薄肉UFCパネルについての研究事例は未だないため、表-1に示すシリーズ実験を実施した。まず、鋼球(重量7.26kg)を用いた簡易な落下衝撃実験では、押し抜きせん断破壊を起こす以下の衝撃力に対しては、UFCの繊維補強により薄肉パネルがクッション効果を有するため衝突後の鋼球が跳ね上がり、衝撃力を緩和することが3cmおよび5cmのパネル実験で確認された。次に、高速で衝突する小物体(高速飛翔体)に対して耐衝撃性を確保するパネル厚を把握するため、高速飛翔体衝撃実験を実施した。その実験では、速度200~300m/sで衝突する小物体に対して、局部破壊を起こさないためには少なくとも5cm以上のパネルが必要であることを確認した。ここまでは、50cm四方の要素実験での研究であったが、次からは180×100cmの実パネルを用いた重錘落下実験に進むが、その際のUFCパネルの仕様と反発係数(クッション効果)が大きいパネルの計測方法を設定するため、本実験の前に今回紹介する予備実験を実施した。最後に、予備実験の結果を踏まえた重錘落下本実験を実施し、種々の貴重なデータを得て分析や解析を行っている。

本シリーズ実験で使用しているUFC材料は、土木学会の超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針

表-1 シリーズ実験の目的と仕様

	実験の種類/ 衝撃のタイプ	目的	実験の仕様
1	鋼球落下試験 低速度の衝撃	UFCパネルの耐衝撃基本性能の把握	鋼球重さ : 7.26kg 載荷方向 : 鉛直 衝突速度 : 10m/s程度 パネル厚さ : 30mm, 50mm
2	高速飛翔体衝撃実験 高速度の衝撃	高速度への耐衝撃性および局部破壊の検討 パネル厚さの設定	飛翔体重さ : 46g 載荷方向 : 水平 衝突速度 : 200~400m/s パネル厚さ : 30mm, 50mm
3	重錘落下衝撃予備実験 低速度の衝撃	UFCパネルの仕様の設定 重錘落下実験の計測方法の設定	重錘重さ : 115kg 載荷方向 : 鉛直 衝突速度 : 1~11m/s パネル厚さ : 50mm, 60mm
4	重錘落下衝撃 低速度の衝撃	UFCパネルの耐衝撃性能の把握	重錘重さ : 115kg 載荷方向 : 鉛直 衝突速度 : 1~16m/s パネル厚さ : 60mm, 90mm

表-2 UFC(RPC系)※の配合

※: UFC指針で示されている標準配合粉体 単位: kg/m³

	プレミックス粉体	細骨材	繊維	高性能減水剤	水
UFC-FM (鋼繊維配合)	1,322	932	157 (2.0 vol%)	28	162
				単位水量: 180	
UFC-FO (有機繊維配合)	1,309	922	39 (3.0 vol%)	26	162
				単位水量: 178	

(案)で標準配合粉体として紹介されているRPC系UFCを用いた。配合繊維の種類を、鋼繊維 (高張力鋼: 引張強度 $P_u=2,800\text{N/mm}^2$, $\phi=0.2\text{mm}$, $L=15\text{mm}$), および有機繊維 (PVA: 引張強度 $P_u=1,050\text{N/mm}^2$, $\phi=0.3\text{mm}$, $L=15\text{mm}$) の2種類とし、それぞれの配合を表-2に示す。ここでは、鋼繊維を用いたものをUFC-FM, 有機繊維を用いたものをUFC-F0と称する。

3. 重錘落下予備実験

3.1 実験の概要

重錘落下予備実験は、図-1に示す装置を用いて行った。長さ $1,800\text{mm} \times$ 幅 $1,040\text{mm}$ の試験体パネルを、架台上に敷いた厚さ 3mm の硬質ゴムの上に設置し、パネル短辺での2辺支持とした。パネルの四隅には跳ね上がり防止の治具を設置して架台へ固定した。重錘は先端部および羽部を合わせた合計重量で 115kgf とし、所定の位置まで重錘を持ち上げたのち、電磁石を切り自由落下させる。重錘の先端は円柱状で衝突部直径が 150mm であり、衝突時の角当たりを防止するため底部にはテーパが施されている。

実験に使用する試験体は、材料、断面形状、プレストレスの有無について効果を比較できるように表-3に示すケースについて実施した。ケース名称の見方は、名称の始めのPの有無は、PC鋼材の配置とプレストレスの導入の有無を示す。

FM, FO, RCの文字は使用材料を、続く数字は板厚 (リブ付きの場合: 床版厚/リブ厚) を、末尾に英字が付いている場合は、鉄筋補強 (M: メッシュ筋, D: 異形筋) を示す。試験体の平面サイズは、全て長さ $1,800\text{mm} \times$ 幅 $1,040\text{mm}$ とした。また、配置したPC鋼材は、7本より ϕ

12.7mm のPC鋼より線で、1本あたりの有効導入力は 110kN であり、パネル1枚あたりには 880kN のプレストレス (断面応力で 17.7N/mm^2) が導入されている。ケースPFM4/6のUFC-FMを使用したリブ付きPC-UFC版を図-2に示す。このPFM4/6のケースをメインとして、PC鋼材配置およびプレストレスの影響を比較するためにケースFM4/6を、リブ付き版と平板を比較するためにケースPFM5を、鋼繊維補強と有機繊維補強を比較するためにケースPFO4/6を設定した。また、従来の鉄筋コンクリートとの比較のためRC系の2種類の試験体を用意した。試験体の材料強度は、表-4に示す値であった。

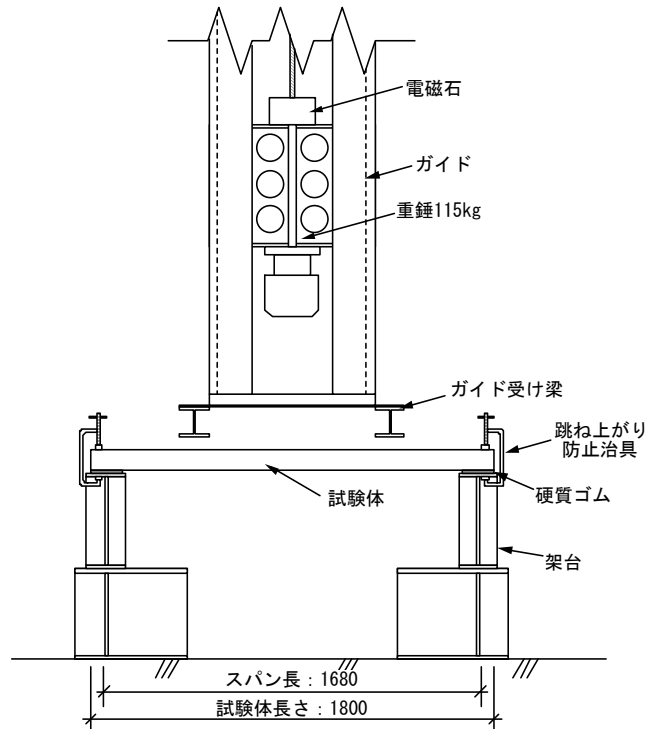


図-1 重錘落下実験装置の概要

表-3 実験ケース

ケース名	使用材料	設定コンクリート強度 (N/mm ²)	長手方向プレストレス	断面形状	厚さ (cm)	補強鋼材
FM4/6	UFC-FM	180	—	リブ形状	床版部: 4 リブ部: 6	鋼繊維
PFM4/6	UFC-FM	180	あり	リブ形状	床版部: 4 リブ部: 6	PC鋼材+鋼繊維 (長手方向のみ)
PFM5	UFC-FM	180	あり	フラット	5	PC鋼材+鋼繊維 (長手方向のみ)
PFO4/6	UFC-F0	160	あり	リブ形状	床版部: 4 リブ部: 6	PC鋼材+有機繊維 (長手方向のみ)
RC10M	RC	50	—	フラット	10	$\phi 6\text{mm}$ メッシュ筋@150 純かぶり40mm
RC12D	RC	50	—	フラット	12	異形鉄筋D10@150 純かぶり40mm

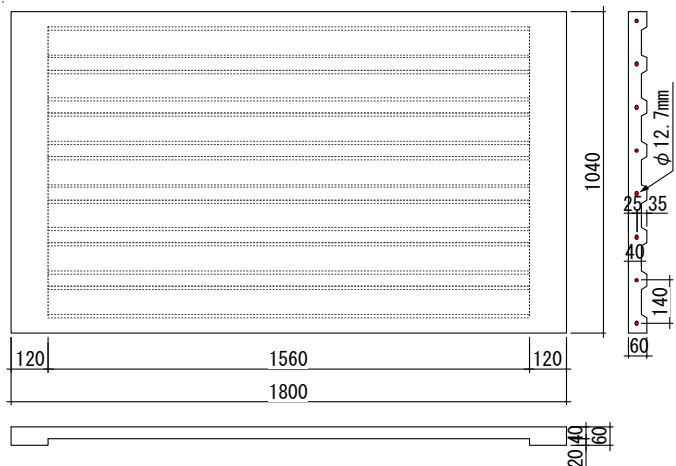


図-2 試験体 (ケース: PFM4/6)

実験は表-5に示すように、同一の試験体に衝突速度（落下高さ）を変化させながら、繰り返し载荷を行った。

表-4 材料強度

単位: N/mm²

	圧縮強度	ひび割れ発生強度	引張強度
UFC-FM※ (鋼繊維配合)	182	11.4	11.9
UFC-FO (有機繊維配合)	168	9.1	5.4
RC	51	—	—

表-5 衝突速度

衝突速度 (m/s)	落下高さ (m)
1.0	0.05
2.5	0.32
5.0	1.28
7.5	2.87
10.0	5.10
10.8	6.00

3.2 実験結果と考察

実験結果の概要を図-3および図-4に示す。

○FM4/6 :

PC鋼材配置およびプレストレス導入のないこのケースでは、重錘の衝撃力に対してはUFCのマトリックス強度と鋼繊維の架橋効果で抵抗するが、衝突時の跳ね返りが90mm程度と小さいためクッション効果による衝撃力緩和も小さいと考えられ、最終的にはスパン中央（载荷点位置）での曲げで破壊した。

○PFM4/6 :

プレストレスが導入されたこのケースでは、衝突時の跳ね返りが945mm（落下高さ5.10m時）でありプレストレスが導入されていないFM4/6のケースに比べ10倍以上と非常に大きく、PC補強による耐力増加のみならず、復元力の大幅増により大きな衝撃力緩和が得られたと考えられ、PC補強無しに比べて2倍の落下高さに耐え得ることが確認された。最終破壊は押抜きせん断であった。また、衝突速度の小さな段階から、载荷点中央から長手方向にひび割れが確認された。

○PFM5 :

メインのPFM4/6の断面を5cm厚の平板としたこのケースでは、最終の衝突速度（落下高さ）はPFM4/6のケースと同じであったが、最終破壊は押抜きせん断と縦割れがほぼ同時に生じる結果となった。落下高さ5.10m時の跳ね返りが855mmとPFM4/6の時よりも多少小さい結果となった。

○PF04/6 :

有機繊維補強のUFC-FOを用いたこのケースでは、最終の衝突速度はPFM4/6のケースと同じであったが、落下高さ5.10m時の跳ね返りが750mmとさらに小さく、クッション効果が少ないため比較的大きな衝撃力が作用したことが想定される。また、最終载荷時の破壊も脆性的で、押抜きせん断破壊と共に、対角線上に大きく割れて破壊している。










ケース名	最終落下高さ 衝突速度 最終破壊形態	試験体上面写真	試験体下面写真	破壊状況写真
FM4/6	落下高さ: 287cm 衝突速度: 7.5m/s 曲げ破壊			
PFM4/6	落下高さ: 600cm 衝突速度: 10.8m/s 押抜きせん断破壊 (長手方向にひび割れ)			
PFM5	落下高さ: 600cm 衝突速度: 10.8m/s 押抜きせん断破壊 長手方向割れ破壊			

図-3 実験結果 (その1)










ケース名	最終落下高さ 衝突速度 最終破壊形態	試験体上面写真	試験体下面写真	破壊状況写真
PFO4/6	落下高さ: 600cm 衝突速度: 10.8m/s 押抜きせん断破壊 対角方向割れ破壊			
RC10M	落下高さ: 50cm 衝突速度: 3.1m/s 曲げ破壊			
RC12D	落下高さ: 510cm 衝突速度: 10.0m/s 曲げ破壊 被り部落下			

図-4 実験結果 (その2)

○RC10M :

UFCパネルと比較用に設定したパネルであるが、鉄筋の純かぶり40mmを確保した薄肉のRCパネルであるため、配置したメッシュ筋は断面の高さ方向の中央に集中した配置となった。そのため、鉄筋が曲げに対して有効に働いておらず、载荷の初期(落下高さ5cm)から版下面にひび割れが生じており、最終の落下高さも50cmであった。

○RC12D :

RC10Mに比べ厚さを2cm増したため、鉄筋は有効に作用するようにはなったが、UFCパネルに比べ部材厚が倍以上と厚く、断面剛性が高いためクッション効果はほとんどなく、破壊前の落下高さ2.87m時であっても跳ね返り高さは計測できないほどの微量であった。衝突速度7.5m/s(落下高さ2.87m)までは耐える結果となったが、最終的には被り部分が大きく剥落し破壊に至った。

4. 実験のまとめと今後

今回の実験で、薄肉UFCパネルの耐衝撃への有効性確認の見通しを付けることができた。PC補強されたUFCパネルの破壊形態は、大きな曲げ補強効果とクッション効果により、曲げ破壊ではなく押抜きせん断破壊であることが分かった。しかしながら、リブ付きおよびリブなし版の両方のケースにおいて縦割れの現象が確認され、静的载荷では考えがたい衝撃载荷特有の現象ではないかと考えられる。この縦割れ現象は、版の形状と厚さに関係があると思われるため、今後の実験では版厚をもう少し厚くした版で研究を進めることとする。比較用のRCパネルについても、今後はパネル厚と鉄筋補強を強化したもので比較を行う。今回は長さ1,800mm版での実験であったが、さらに長いパネルの場合、曲げ破壊へ移行するのか、またはクッション効果により押抜きせん断破壊のままであるのかの確認も必要であると考えられる。また、重錘が1m近く跳ね上がることから、今後の実験での計測では、版上に設置するロードセルの固定方法も課題であることが判明した。今回の予備実験の結果を有効に活用し、のちに実施した重錘落下本実験では貴重なデータを収集することができた。今後も実験や解析を実施し、UFCパネルの耐衝撃性の研究に努める所存である。