# 論文 繊維補強セメント系複合材料を用いた RC 架構の衝撃載荷実験

森 浩二\*1·佐藤 裕一\*2·金子 佳生\*3

要旨:ポリプロピレン繊維補強コンクリートを用いた RC 架構の耐衝撃性と衝撃後の残存性能を調べるため, 90°回転させた RC 架構に対する落下錘を用いた衝撃載荷実験と,衝撃後の静的水平載荷実験を行った。実 験変数は繊維補強の有無,および落下錘の重量とした。衝突実験では試験体の部材角は落下錘の重量におお むね比例するが,落下錘の重量が大きい場合には衝突が複数回に分散し,最大加速度は頭打ちとなった。静 的載荷実験による残存性能の確認では,ポリプロピレン繊維によって衝撃による初期の剛性低下を抑制する 効果を確認することができた。

キーワード:ポリプロピレン繊維,落下錘,自由振動,等価粘性減衰定数,静的載荷実験

#### 1. はじめに

大地震時における変位応答の制御は重要な課題である。 1985年のメキシコ地震では長周期地震動によって14階 建てのRC造住宅が共振し,隣接した棟同士が衝突しあ って倒壊した事例があり,解析的な検討が行われている <sup>1)2)</sup>。日本においても2016年の熊本地震で新耐震基準に よる建物のエキスパンションジョイント周辺に生じた被 害事例が複数報告<sup>3)</sup>されている。また,免震建物では免 震層と擁壁との衝突が課題<sup>4)</sup>となっている。

本論文では、小型 RC 架構を用いて、衝撃荷重を受け た際の挙動およびその後の静的な荷重に対する復元力特 性などへの影響を実験的に確認した結果について述べる。 また、衝撃荷重により懸念される性能低下への対策とし て繊維補強セメント系複合材料を用いた場合の効果につ いての検討を行う。

#### 2. 実験方法

## 2.1 試験体

試験体の一覧を表-1 に,試験体の概要を図-1 に示 す。実験変数はコンクリートに対する繊維補強の有無, および衝撃実験における落下錘重量とした。試験体の形 状は,海外の古い耐震基準に基づく建物の部材,および 現代の意匠性の高い細長い柱を想定し,柱せん断スパン 比 4.5,柱断面 100mm×100mm,クリアスパン 900mm の 柱 2 本と厚さ 100mm のフラットスラブ,および固定用 基礎部からなる1層1スパンの架構とした。また,柱の 配筋は主筋 4-D10 (SD345),せん断補強筋は 2-R4@80 とした。

## 2.2 材料

使用材料は普通コンクリート(N)およびポリプロピレン繊維補強コンクリート(PP)の2種類とした。コン

*1	京都大学大学院	工学研究科博士調	果程 (正会員)	
*2	京都大学大学院	工学研究科助教	博士 (工学)	(正会員)
*3	京都大学大学院	工学研究科教授	Ph. D. (正会)	員)

表-1 試験体一覧

試験体 名	材料	目標変位 (%)	落下錘重量 (kg)
N0	普通コンク	—	_
N1		1.5	45.5
N2	リート (N)	4.0	141.9
N3		6.0	219.4
PP0	ポリプロピ	—	—
PP1	レン繊維補	1.5	45.5
PP2	強コンクリ ート (PP)	4.0	141.9
PP3		6.0	219.4





クリートの調合およびポリプロピレン繊維の諸元を表-2 に示す。ベースとなるコンクリートは同一調合で,混 入する繊維の量は外割として定めた。コンクリートは重 力式のコンクリートミキサーでコンクリートを練り混ぜ, ポリプリピレン繊維補強コンクリートは練り混ぜた後の コンクリートに繊維を投入し手練りによって練り混ぜた 後,目視により繊維が均一に分散していることを確認し た。コンクリートおよび鉄筋の材料試験結果を表-3 に 示す。弾性係数にややばらつきが見られるが圧縮強度の 差は小さい。

表-2 使用材料 (a) コンクリート調合

	繊維量	W/C	W	C	S	G	SP/C
	(Vol.%)	(%)		(kg	/m <sup>3</sup> )		(%)
F							
Ν		47	185	394	809	869	0.5
PP	1.2						

W: 水, C: セメント, S: 細骨材, G: 粗骨材, SP: 高性能 AE 減水剤, F: 基礎部コンクリート, N: 普通コンクリート, PP: ポリプロピレン繊維補強コンクリート

(b) 繊維諸元										
	繊維長 密度 繊維径* 引張強度 断面 表面   (mm) (g/cm <sup>3</sup> ) (mm) (N/mm <sup>2</sup> ) 形状 形状									
PP	PP 30 0.91		0.7	500	矩形	エン ボス				

\*真円換算の値

## 表-3 材料試験結果

(a) コンクリート								
		圧縮強 度 σ <sub>B</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	割裂強 度 σ <sub>t</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	強度時 ひずみ ɛu (×10 <sup>-3</sup> )	弹性係数 E <sub>c</sub> (×10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup> )			
衝	F	61.5	3.7	1.61	5.26			
撃	N	56.9	3.9	2.47	2.75			
	PP	60.8	3.5	2.45	4.49			
斟	F	60.0	4.0	2.51	3.11			
前	N	57.3	3.9	2.55	2.15			
нJ	PP	58.7	3.8	2.75	3.41			

(b) 鉄筋
--------

	部位	降伏応力 σ <sub>y</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	引張強 度 σ <sub>u</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 E <sub>s</sub> (N/mm <sup>2</sup> )
D16	基礎主筋	391	569	2.05
D10	柱・N スラブ 主筋	359	514	1.97
D10	PP スラブ主筋	353	500	1.98
R4	柱・スラブせ ん断補強筋	517*	585	1.81

\*0.2%オフセット法による

#### 2.3 衝撃載荷実験

衝撃荷重の大きさを実験変数として3通りの衝撃荷重 について実験を行った。衝撃実験装置を図-2に示す。 実験において試験体は90°回転させた状態で固定し,高 さ1.29mから鋼板を重ねた落下錘を衝突させることによ り荷重を加えた。衝突時の速度は一定で5m/sとなる。落 下錘の重量は45.5kg,141.9kg,219.4kgの3通りである。

Saatci らによる梁の衝撃実験<sup>5)</sup>によれば, 落下錘の運動 エネルギーに対する試験体の吸収エネルギーの比は 0.062~0.322 の範囲であり, せん断補強筋量と落下錘の 運動エネルギーに依存する。本実験ではエネルギー比を 0.2 と仮定し, 試験体の目標部材角をそれぞれ 1.5%, 4%, 6%として, 落下高さを一定とした場合の落下錘重量を決 定した。

落下錘の衝突位置にはロードセル,スラブに変位計お よび加速度計を設置し,落下直前から1秒間,サンプリ ング周波数2kHzで計測を行った。



図-2 衝撃実験装置



図-3 静的載荷装置

#### 2.4 静的載荷実験

衝撃試験の後,試験体を元の姿勢に戻し,図-3 に示 す装置を用いてスラブに静的荷重を加えて残存性能を確 認した。スラブの水平変位から算定した柱の部材角に対 して 0.125%, 0.25%, 0.5%, 1%, 2%, 4%, 6%, 8%の サイクルを正負 2 回ずつ繰り返し加力した。

#### 3. 実験結果

#### 3.1 衝撃載荷実験

表-4 に衝撃載荷実験結果の一覧を示す。表中,位置 エネルギーは落下錘重量と落下高さから算定した位置エ ネルギー,最大荷重は落下位置に設置したロードセルに より計測した荷重の最大値,最大加速度はスラブ側面に 設置した加速度センサの最大値,最大部材角および残留 部材角は基礎とスラブの相対変位から算定した柱の部材 角の最大値および落下錘衝突から約 0.9 秒後の部材角を 表す。部材角および加速度については移動平均による平 滑化処理を行った。

最大荷重は図-4 に示すように、試験体間のばらつき

はあるものの落下錘のエネルギーとおおむね比例する結 果となったが,最大加速度は落下エネルギーとは比例せ ず,落下錘重量141.9kgの場合と219.4kgの場合との間に 大きな差異は見られなかった。落下錘は試験体との衝突 後にリバウンドを生じており,落下エネルギーが複数回 の再衝突によって分散して試験体に入力したことが要因 であると考えられる。

衝撃試験後の試験体ひび割れ状況を図-5 に示す。衝 撃荷重は試験体のスラブ左側から入力している。ひび割 れは柱・スラブの引張側に多く発生していた。ひび割れ の発生本数は落下錘の重量が大きい場合で多く, PP シリ ーズのひび割れ本数は若干少なく,またひび割れが小さ く微細なものが多くなっていた。

試験体の部材角の時刻歴を図-6 に,加速度の時刻歴 を図-7に示す。最大部材角はN1で0.47%,N2で4.59%, N3で7.03%, PP1で0.83%, PP2で3.98%, PP3で6.12% であり,落下エネルギーが大きい試験体ほど最大部材角 も大きくなっている。また,振幅は単調減少ではなく, 落下錘のリバウンドによる再接触によって0.2秒後や0.4







秒後に振幅が増大していることが確認できる。残留部材角は落下錘重量が大きいものほど大きく,残留変形が微小な N1 と PP1 を除けば,繊維補強コンクリートを用いた PP2, PP3 の残留部材角が同荷重の N2, N3 に比べてやや小さくなる傾向が見られた。加速度のピークは前述したように N2, N3, PP2, PP3 間の差は小さく,落下錘重量の差は再衝突の回数の違いとなって表れている。また,衝突後0.2秒後や0.4秒後付近に落下錘のリバウンドによる再衝突が確認できる。試験体の部材角スペクトルを図ー8 に示す。卓越周期は0.5~1 秒で,落下錘重量が大きい試験体の周期が長くなっている。PP2 および PP3 では落下錘が同重量のNシリーズ試験体よりやや卓越周期が長い。

#### 3.2 静的載荷実験

#### (1) 荷重-変形関係

図-9に静的載荷試験の荷重-部材角関係を示す。部材 角は衝撃載荷後に生じた残留変形角を原点としている。 普通コンクリート試験体 (N シリーズ), ポリプロピレン 繊維補強試験体 (PP シリーズ) とも落下錘重量が大きく なるほど履歴形状は紡錘型から逆S字型に移行している。 この傾向は普通コンクリート試験体がより顕著であり, ポリプロピレン繊維補強試験体では繊維の混入によって 落下錘の衝撃による試験体の破壊が抑制されていたと考 えられる。また、衝撃試験時最大部材角が 1%未満の試 験体 N1. PP1 では、部材角 1%までの荷重-部材角関係が それぞれ N0, PP0 とほぼ一致した。一方, 他の試験体 (N2, N3, PP2, PP3) では初期の剛性低下が生じ, 剛性低下の程 度は落下錘重量の大きい試験体ほど、また、繊維補強試 験体より普通コンクリート試験体において顕著であった。 典型的な例として部材角 1.0%まで荷重-部材角関係にお ける N0 と N3, PP0 と PP3 との比較を図-10 に示す。



## (2) 等価粘性減衰定数

表-5 に等価粘性減衰定数の一覧を,図-11 にその比較を示す。落下錘重量が大きい試験体ほど等価粘性減衰定数が小さくなる傾向があり,衝撃荷重による損傷によって試験体のエネルギー吸収性能が低下している。低下の度合いは普通コンクリート試験体の N3 が著しく,ポリプロピレン繊維補強試験体の PP3 は PP2 と同程度であった。落下錘重量が大きい場合にはポリプロピレン繊維による損傷抑制効果が明確に表れている。また,等価粘性減衰定数が最も大きくなっている部材角 4%~6%付近では,部材角 4%時より 6%時の方が等価粘性減衰定数の試験体間の差が小さくなっていることがわかる。これは衝撃試験時の最大部材角がN3を除き 6%未満であったため,衝撃荷重による残存性能への影響が小さくなっていると考えられる。



## 4. まとめ

普通コンクリートおよびポリプロピレン繊維補強コン クリートを用いた RC 架構について,スラブ面内方向に 衝撃荷重を加える方法で落下錘重量を実験変数とした衝 撃載荷実験を行い,その後の静的載荷実験によって衝突 後の残存性能について検討を行った。

衝撃載荷実験では,落下錘重量が一定以上の場合に, 衝突時における落下錘のリバウンドによって試験体への 入力が分散するため試験体の最大加速度は落下錘重量と 比例しないこと,一方,試験体の最大部材角や残留部材 角はおおむね比例すること,試験体の損傷によって卓越 周期は長くなっていることを確認した。

衝突後の静的載荷試験では,落下錘重量が小さい場合 には剛性低下は確認されず,損傷はほとんど生じていな いと考えられる。落下錘重量が大きい場合では剛性の低 下や等価粘性減衰定数の低下が生じていること,その場 合にポリプロピレン繊維が落下錘の衝突による試験体の 損傷を抑制することを確認した。



図-10 初期荷重-部材角関係

表-5 等価粘性減衰定数

部材角(%)	N0	N1	N2	N3	N 平均	PP0	PP1	PP2	PP3	PP 平均
0.25	0.069	0.069	0.062	0.046	0.062	0.100	0.074	0.066	0.071	0.078
0.5	0.062	0.057	0.047	0.039	0.051	0.068	0.056	0.047	0.055	0.057
1	0.088	0.085	0.074	0.052	0.075	0.086	0.078	0.064	0.077	0.076
2	0.205	0.211	0.192	0.144	0.188	0.199	0.205	0.173	0.189	0.191
4	0.289	0.295	0.286	0.233	0.276	0.288	0.293	0.262	0.268	0.278
6	0.294	0.301	0.289	0.248	0.283	0.295	0.305	0.279	0.282	0.290
8	0.249	0.278	0.251	0.249	0.257	0.276	0.281	0.273	0.277	0.277
h <sub>eq</sub> 平均	0.180	0.185	0.172	0.144	0.170	0.188	0.185	0.166	0.174	0.178



今後は解析的な検討によってポリプロピレン繊維補強 コンクリートの補強効果について定量的な評価が可能と なるよう研究を進める予定である。

## 謝辞

本研究は日本学術振興会科学研究費基盤(C)(課題番号15K0692)の助成を受けた。実験にあたり、ポリプロ ピレン短繊維は萩原工業株式会社より、高性能AE減水 剤は株式会社フローリックより提供いただいた。また、 実験の実施には京都大学工学研究科の野村昌弘氏、吉門 大志氏、伊田唯果氏、宇田佳史氏、槇田航己氏に協力い ただいた。関係各所に感謝の意を表する。

## 参考文献

- 磯部大吾郎,太田外氣晴,井上智広,松枝富士雄: 長周期地震動に伴う棟間衝突に関する一考察 その2:14 階建て3連棟建物の棟間衝突・崩壊解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集,B-2, pp.941-942, 2010
- 佐藤裕一,中条貴大,金子佳生:棟間接触をモデル 化した1985年メキシコ地震被災 RC 建物の地震応答 その1~2,日本建築学会大会学術講演梗概集,B-1, pp.295-298,2016
- 国土技術政策総合研究所,建築研究所:平成 28 年 (2016 年) 熊本地震建築物被害報告(速報),建築 研究資料, No.173, 2016.9
- 三輪田吾郎,小巻潤平,佐藤浩太郎,佐野剛志,勝 俣英雄,多幾山法子,林康裕:実大免震建物の擁壁 衝突実験とそのシミュレーション解析,日本建築学 会構造系論文集,第76巻,第663号, pp.899-908, 2011.5
- Saatci, S. and Vecchio, F. J.: Effects of Shear Mechanisms on Impact Behavior of Reinforced Concrete Beams: ACI Structural Journal, Vol. 106, pp.78-86, 2009.