# CFRP シートを用いて曲げ補強した RC 梁の衝撃載荷実験

Impact loading tests on flexural strengtheued RC beam with CFRP sheet

三井住友建設(株)	$\bigcirc$	フュ		三上	浩 (Hiroshi Mikami)
釧路工業高等専門学校		フュ	- 11 -	岸	徳光 (Norimitsu Kishi)
室蘭工業大学大学院		Æ	員	栗橋	祐介 (Yusuke Kurihashi)
室蘭工業大学大学院		正	員	小室	雅人 (Masato Komuro)

# 1. はじめに

近年,既設鉄筋コンクリート(RC)構造物の補修補強工 事が盛んに行われており,その工法の一つとして連続繊維 (FRP)シート接着工法が広く採用されるようになってきた. 一方,近年では落石防護覆工や落石防護擁壁,原子力関連 施設などの耐衝撃用途構造物の性能向上が求められている.

著者らは、このような状況に鑑み、既設 RC 構造物の耐 衝撃性を向上させる工法として、上記の FRP シート接着工 法や FRP ロッド埋設工法を提案し、これらの工法により補 強した RC 梁の重錘落下衝撃実験を実施している。その結 果、FRP シートや FRP ロッドの補強による RC 梁の耐衝撃 性向上効果を確認している<sup>1),2)</sup>.

しかしながら、これらの実験は、材料強度や重錘衝突速 度および高速度カメラの撮影方法やデータ処理方法など 異なるため、RC梁の耐衝撃挙動に及ぼす補強材料の力学 特性の影響を直接比較することが困難であった。そこで、 著者らは、RC梁の材料強度や重錘衝突速度が極力同等な 条件の下、AFRPシート/ロッド、および炭素繊維(CFRP) シート/ロッドを補強材料として用いた統一的な補強RC 梁の重錘落下衝撃実験を実施した。

本論文では、FRP 材として最も多く流通し、近年では 土木構造物の補修補強の他、航空機にも用いられている CFRP シートを用いて曲げ補強した RC 梁の重錘落下衝撃 実験結果について整理し、その耐衝撃挙動やシートの耐衝 撃性向上効果について検討する.

## 2. 実験概要

表-1には、本実験に用いた試験体の一覧を示している. 表中の試験体のうち、第一項目は CFRP シート補強の有無 (N:無補強, SC:シート補強)を示し、第二項目の H に付 随する数値は設定落下高さ (m) を示している.

また,表には,本実験に用いた各試験体のコンクリートの圧縮強度および主鉄筋の降伏強度も併せて示している.

なお,各補強試験体に関する実験ケースは,表に示され ている通りであるが,無補強とシート補強した場合におけ



図-1 試験体の形状寸法, 配筋および補強状況

る RC 梁の耐衝撃性に関する比較は, 設定落下高さ *H* = 2.5 m の場合で行うこととした.

図-1には、試験体の形状寸法と配筋および補強状況を示している。本実験に用いた試験体の形状寸法(梁幅×梁高×スパン長)は、200×250×3,000 mmである。また、軸方向鉄筋は上下端にD19を各2本配置し、梁軸方向端面に設置した厚さ9 mmの定着鋼板に溶接固定している。さらに、せん断補強筋にはD10を用い、100 mm 間隔で配筋している。

CFRP シート補強の場合には、梁底面の補強範囲にブラ スト処理を施してエポキシ系プライマーを塗布し、指触乾 燥状態であることを確認の後エポキシ系含浸接着樹脂を用 いて接着を行っている.なお、養生期間は1週間程度であ り、目付量が600 g/m<sup>2</sup>の CFRP シートを1 層接着するこ ととした.

衝撃荷重載荷実験は,質量 300 kg,先端直径 200 mm の 鋼製重錘を所定の高さから一度だけ自由落下させる単一載 荷法に基づいて行っている.なお,重錘落下位置は梁のス パン中央部に限定している.また,試験体の両支点部は, 回転を許容し,浮き上がりを拘束するピン支持に近い構造 となっている.

表-2には、本実験で用いた CFRP シートの力学的特性 値を一覧にして示している.

本実験の測定項目は,重錘衝撃力,合支点反力(以後,単

3X I 四版种 克								
試験体名	設定重錘落下高さ	実測重錘落下高さ	引張剛性	コンクリート強度	主鉄筋降伏強度	計算曲げ耐力	計算せん断耐力	
	<i>H</i> (m)	$H'(\mathbf{m})$	EA (MN)	$f_c'$ (MPa)	$f_y$ (MPa)	$P_u$ (kN)	$V_u$ (kN)	
N-S	静的	-		32.4	381.7	55.0	329.0	
N-H2.5	2.50	2.29	-	52.4				
SC-S	静的	-		32.4	381.7	106.0	329.0	
SC-H1.0	1.00	1.12	16.3					
SC-H2.0	2.00	1.77						
SA-H2.5	2.50	2.29						
SA-H3.0	3.00	3.07						

表-1 試験体一覧

表-2 CFRP 補強材の力学的特性値 (公称値)

	目付量 厚さ (g/m <sup>2</sup> ) (mm)	弾性係数	引張強度	破断ひずみ		
		厚で (mm)	$E_r$	fru	$\mathcal{E}_{ru}$	
			(GPa)	(MPa)	(%)	
	600	0.333	245	3400	1.39	1



図-2 荷重-変位関係の比較

に支点反力),スパン中央点変位(以後,単に変位)および CFRPシート軸方向各点の軸方向ひずみ(以後,単にひず み)である.なお,重錘衝撃力と支点反力は,起歪柱型の 衝撃荷重測定用ロードセルを用いて計測している.また, 変位はレーザ式非接触型変位計を用いて計測している.さ らに,実験時にはひび割れ分布やCFRPシートの剥離およ び破断状況を高速度カメラを用いて撮影している.

#### 3. 実験結果

#### 3.1 静載荷実験

図-2には、荷重-変位関係に関する実験結果を計算結 果と比較して示している.なお、計算曲げ耐力は、土木学 会コンクリート標準示方書<sup>31</sup>に準拠して各材料の応力-ひ ずみ関係を設定し、平面保持およびコンクリートと CFRP シートとの完全付着を仮定して断面分割法により算出した. また、計算時における終局状態は、梁上縁コンクリートの 圧縮ひずみが終局ひずみである 3,500 µ に至った時点と定 義している.

図より, N/SC-S 試験体に関する主鉄筋降伏荷重は,そ れぞれ 57.0,73.7 kN であり,最大荷重はそれぞれ 66.7,98.1 kN である.

これより, CFRPシート接着を施すことによって, 主鉄 筋降伏荷重は無補強の場合に比較して 30% 程度, 最大荷 重は 45% 程度増加していることが分かる.

また、実験結果と計算結果を比較すると、N-S 試験体の 場合には、実験結果は主鉄筋降伏後に上縁コンクリートが 圧壊するものの、変位の増加に伴って、荷重も徐々に増加 している.計算結果は、主鉄筋降伏直後に終局に至ってい る.SC-S 試験体の場合には、実験結果は主鉄筋降伏点近 傍までは計算結果とほぼ対応しており、その後、実験結果 は計算結果よりも若干過小な値を取って、計算終局点に到 達後上縁圧壊と共にシート剥離により除荷状態に至ってい る.従って、CFRPシートとコンクリートの付着は計算終 局変位時まで概ね確保されているものと推察される.



#### 3.2 衝擊荷重載荷実験

#### (1) 各種時刻歴応答波形

図-3には、各種時刻歴応答波形を示している.図-3(a) より、重錘衝撃力波形は試験体の種類や設定落下高さHに よらず、振幅が大きく継続時間が1ms程度の第1波に振 幅が小さい第2波目が後続する性状を示していることが分 かる.図-3(b)より、支点反力波形は継続時間が30~50 ms程度の主波動に高周波成分が合成された分布性状を示 していることが分かる。全体を見ると、入力エネルギーの 増加と共に継続時間も多少長くなる傾向にあることが分か る.これは、入力エネルギーの増加に対応してひび割れ等 による損傷度合いが高くなり、梁の曲げ剛性が低下するこ とによるものと推察される。

図-3(c)より,載荷点変位波形はいずれの試験体においても最大振幅を示す第1波が励起した後,減衰自由振動状態に至っていることが分かる.また,入力エネルギーの増加と共に残留変位も増加していることが分かる.設定落下高さH=2.5mにおいて,N試験体の場合にはSC試験体の場合に比較して,最大変位と残留変位が大きく示されており,減衰自由振動状態における固有振動周期も延びていることが分かる.これより,CFRPシートで曲げ補強を施すことにより,効率的に最大変位及び残留変位を抑制可能であることが分かる.

## (2) 実験終了後におけるひび割れ分布

図-4には、各試験体の側面および底面のひび割れ分布 性状もしくはシートの剥離状況を示している.図より、補 強の有無や設定落下高さHによらず、梁側面にはスパン全 長に渡って下縁のみならず上縁にもひび割れが進展し、か つ載荷点近傍下縁部には斜めひび割れが発生していること が分かる.衝撃荷重載荷時における上縁からのひび割れの 進展は、衝撃初期に曲げ波が見かけ上両端固定梁のような 状態で支点側に伝播することにより発生し、下縁からのひ



図-4 衝撃実験後のひび割れ分布性状



び割れは主曲げの伝搬により発生するものと推察される. 梁底面においては、N試験体の場合には、載荷点近傍に 曲げひび割れと主鉄筋配置位置に軸方向ひび割れが多数発 生している. SC 試験体の場合には,設定落下高さH = 1.0 mにおいて,シートの部分剥離が見受けられ,H = 2.0 m 以降において,徐々に部分剥離範囲が両支点側に拡大する傾向にある.最終的にはH = 3.0 mにおいて左側スパンで全面的なシート剥離に至った.シートの剥離は,後述の写真-1に示しているように,下縁かぶりコンクリートに発生した斜めひび割れの先端がシートを押し下げて引き剥がすピーリング作用によって発生したことを確認している.

# (3) CFRP シートのひずみ分布の時間的な推移状況

図-5 には、各設定落下高さにおける SC 試験体に関する CFRP 補強材の軸方向ひずみ分布を比較して示している.

図より,経過時間 t = 0.5 msにおいて,シートのひずみ 値はいずれの場合も載荷点中央部で 0.25 % 以上の引張ひ ずみが発生しており.また、その両支点側では圧縮ひずみ が発生していることが分かる. 圧縮ひずみの発生は、重錘 衝突によって曲げ波が梁全体に伝播する過程において、前 述の見かけ上の固定端が形成され両支点側に推移している ことを裏付けている.

t = 1.0 msのひずみ分布を見ると、いずれの場合におい ても正曲げ部分と負曲げ部分が共に支点の方向に向かって 進展している状況が示されている.また、載荷点部のひず み分布は、平坦な分布となっており、局部的に剥離の傾向 を示している.また、t = 2.0 msのひずみ分布を見ると、 未だ両端固定梁に類似したひずみ分布を示しており、主曲 げが支点部に到達していないことが窺える.

t = 5.0 msのひずみ分布を見ると、両梁共にスパン全体に渡って正曲げの状態を示しており、低次の曲げモードを呈していることが窺える.設定落下高さH = 2.5, 3.0 mの場合には、載荷点近傍のひずみが0.5%を超過しており、この部分の主鉄筋が降伏しているものと推察される.

t = 10.0 msのひずみ分布より,設定落下高さHが大きい 場合程,最大ひずみおよび 0.5%以上の大きなひずみの分 布範囲が大きくなる傾向にあることが分かる.特に,H =2.5,3.0 m の場合には,いずれの場合も最大ひずみが 1.0% を超過し,中央部でひずみ分布勾配が急変していることか ら,主鉄筋の塑性化が進行し梁の変形曲率が大きくなって いることが推察される.なお,H = 1.0 mの場合には,他の 試験体に比較して全般的にひずみ値が小さい.これは,塑 性化の進行度合いが低いことによるものと考えられる.

最大変位時のひずみ分布を見ると、*H*=1.0mの場合に おいても、載荷点近傍で0.5%以上のひずみが発生してい



SC-H3.0 (t = 21.1 ms) 写真-1 載荷点近傍ひび割れ分布性状

ることから,主鉄筋が降伏に至っていることが分かる.また,いずれの試験体においても,最大ひずみおよび大きなひずみの分布範囲が両支点側に拡大している.これは,主鉄筋の塑性化し変形曲率が増大する範囲が拡大したことを示している.ただし,H = 2.5 mの場合には右側スパンに,H = 3.0 mの場合には左側スパンにおいて 1.0%程度のひずみが支点部近傍まで分布していることから,シートの部分剥離が進展しているものと考えられる.この傾向は,H = 3.0 mの場合において,より明瞭に現れている.

残留ひずみの分布より、シート剥離した SC-H3.0 試験体 を除き、いずれの試験体も、シートひずみが 0.5 ~ 1.0 % 程 度復元しており、H が大きいほどひずみの復元量が大きい ことが分かる.これは、CFRP シートが破断に至るまでは 完全弾性体に近い力学特性を示すため、シートが剥離して いない試験体に対しては大きな復元力を発揮したことによ るものと考えられる.なお、H = 2.5 m の場合には、右側 スパンにおいて支点付近まで残留ひずみが発生しているた め、全面的剥離に極めて近い損傷状態であったものと考え られる.

写真-1には、最大変位時における載荷点近傍のひび割 れ分布性状を示している。写真より、いずれの試験体にお いてもスパン中央部には曲げひび割れが発生し、上縁から 両支点側下縁に向かって斜めひび割れが進展していること が分かる。また、Hが大きい場合ほど、上縁コンクリート の圧壊が顕在化するとともに、ひび割れ幅が拡大する傾向 にある。特に、 $H=2.5, 3.0 \, \text{m}$ の場合には、前述のピーリン グ作用によるシートの部分剥離が発生している。この傾向 は、 $H=3.0 \, \text{m}$ の場合においてより顕著に見られる。

# (4) 各種応答値-入力エネルギー

図-6より、補強試験体の最大変位および残留変位は、



ともに入力エネルギーの増大に伴ってほぼ線形に増加する 傾向にあることが分かる.なお,SC-H3.0 試験体の場合に は、シートが剥離したため,残留変位が急激に大きくなっ ている.また,無補強のN試験体と比較すると,SC試験 体の最大変位および残留変位ともに小さくなっている.こ の傾向は,残留変位においてより顕著に示されていること から,CFRPシート補強による変位の復元効果が発揮され ていることが分かる.

## 4. まとめ

- CFRP シートで曲げ補強することにより RC 梁の耐衝 撃性が向上する.特に,残留変位の抑制効果が顕著に 発揮される.これは,CFRP シートが破断に至るまで は完全弾性体に近い力学特性を示すため,大きな復元 力を発揮したことによるものと考えられる.このよう な性状は,著者らによる既往のAFRP シート曲げ補強 RC 梁の場合と同様である.
- 2) CFRPシート曲げ補強 RC 梁は、衝撃荷重の作用により、シートが剥離して終局に至った.また、シートの剥離は、下縁かぶりコンクリートに発生した斜めひび割れがシートを下方に押し下げるピーリング作用によって発生した.DFRPシートの全面剥離は、H=3.0mの場合に発生したが、H=2.5mの場合も極めて全面剥離に近い状況であった。

#### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP15K06199 の援助により行われた ものである.ここに記して感謝の意を表する.

#### 参考文献

- (1) 栗橋祐介,今野久志,三上浩,岸徳光:AFRPシート曲げ補強 RC 梁の耐衝撃性能に関する実験的検討, 構造工学論文集, Vol. 60A, pp. 953-962, 2014.3
- 三上浩,栗橋祐介,今野久志,岸徳光:衝撃載荷によって損傷を受けた RC 梁の AFRP シート曲げ補強による耐衝撃性向上効果,構造工学論文集, Vol. 61A, pp. 990-1001, 2015.3
- 3) 土木学会:コンクリート標準示方書 [設計編], 2012 年 制定