

## AFRP ロッドを埋設補強した RC 梁の重錘落下衝撃実験

FALLING-WEIGHT IMPACT TEST FOR RC BEAMS  
REINFORCED WITH NEAR SURFACE MOUNTED AFRP RODS

三上 浩\*, 藤田 学\*\*, 岸 徳光\*\*\*, 澤田 純之\*\*\*\*

Hiroshi MIKAMI, Manabu FUJITA, Norimitsu KISHI and Sumiyuki SAWADA

\*博(工) 三井住友建設(株)技術研究所 主席研究員(〒270-0132 千葉県流山市駒木 518-1)

\*\*博(工) 三井住友建設(株)技術研究所 土木研究開発部長(〒270-0132 千葉県流山市駒木 518-1)

\*\*\*工博 室蘭工業大学教授 建設システム工学科(〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

\*\*\*\*修(工) 室蘭工業大学大学院 建設工学専攻(〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

キーワード: AFRP ロッド, RC 梁, 曲げ補強, 重錘落下衝撃実験

(AFRP rod, RC beam, flexural strengthening, falling-weight impact test)

## 1. はじめに

近年, 既存鉄筋コンクリート (RC) 構造物の補強法として各種連続繊維シート (以後, FRP シート) を用いた工法が採用されるようになってきた. FRP シート接着工法は, 一般的に, 1) 材料が軽量で施工が簡便であり重機が不要であること, 2) 現場合わせて施工可能であり工期短縮が図れること, 3) 耐食性に優れており, 簡単な仕上りで済むこと, などの特長を有している. しかしながら, FRP シート接着工法の場合には接着面が完全に被覆されてしまうため, 1) 既存 RC 構造物のひび割れ観測が不可能となり, 維持管理が困難となること, 2) 既存 RC 部材内部に帯水し, コンクリートの疲労耐久性が低下する可能性があること, などの欠点も有している. これに対し, 著者らはこれらの欠点を解消する補強法として, 部材かぶりコンクリート部分を切削して溝を造り, FRP ロッドを埋設して補強する工法を提案し, その静的耐荷挙動に関する静載荷実験を進めてきた<sup>1)</sup>. その結果, かぶりコンクリートに埋設する AFRP ロッドの引張剛性 (弾性係数  $E \times$  断面積  $A$ ) がシートを用いて補強する場合と同程度である場合には, 類似の補強効果を示すことが明らかになっている.

本研究では下縁かぶり表面部にアラミド繊維性の FRP ロッド (AFRP ロッド) を埋設して曲げ補強した場合の RC 梁の耐衝撃性状を検討するため, 重錘落

下衝撃実験を行った. 本実験は, AFRP シート補強試験体と比較することにより AFRP ロッドの耐衝撃性状検討を行うため, 無補強試験体 1 種類, AFRP ロッド補強試験体 2 種類および AFRP シート補強試験体 1 種類の計 4 種類, 全 12 体の RC 梁を用いて行った.

## 2. 実験の概要

### 2.1 試験体の概要

表-1には試験体一覧を示している. 本実験に用いた試験体は無補強, AFRP ロッド (以後, ロッド) 径を 5, 9 mm とする場合, ロッド径 9 mm の場合と引張剛性が類似の AFRP シート (以後, シート) 補強した場合の計 4 種類である. シートの目付量は  $615 \text{ g/m}^2$  ( $415, 200 \text{ g/m}^2$  のシートを 2 層貼り) とした. 試験体名は試験体の種類 (N: 無補強, R5: ロッド径 5 mm, R9: ロッド径 9 mm, S9: R9 と引張剛性が同等) を示している.

図-1には, 本実験に用いた RC 梁の断面寸法の配筋状況, シートおよびロッド位置を示している. 試験体は形状寸法 (梁幅  $\times$  梁高  $\times$  純スパン長) がいずれの梁も  $150 \times 250 \times 2000 \text{ mm}$  の複鉄筋矩形 RC 梁である. なお, 主鉄筋に D13 を用い, せん断補強筋には D10 を用いている. そのせん断補強鉄筋は 100 mm 間隔で配筋している. R5, R9 梁は主鉄筋に

表-1 試験体一覧

試験体名	補強方法	補強材料	補強量	衝突速度 $V$ (m/s)		引張剛性 $E \cdot A$ (GN)
				繰り返し載荷	単一載荷	
N	-	-	-	1~4	3, 4	-
R5	ロッド	RA5	2本	1~4	3, 4	2.46
R9	ロッド	RA9	2本	1~4	4, 5	7.88
S9	シート	A415 + A200	幅: 142mm	1~4	4, 5	7.89

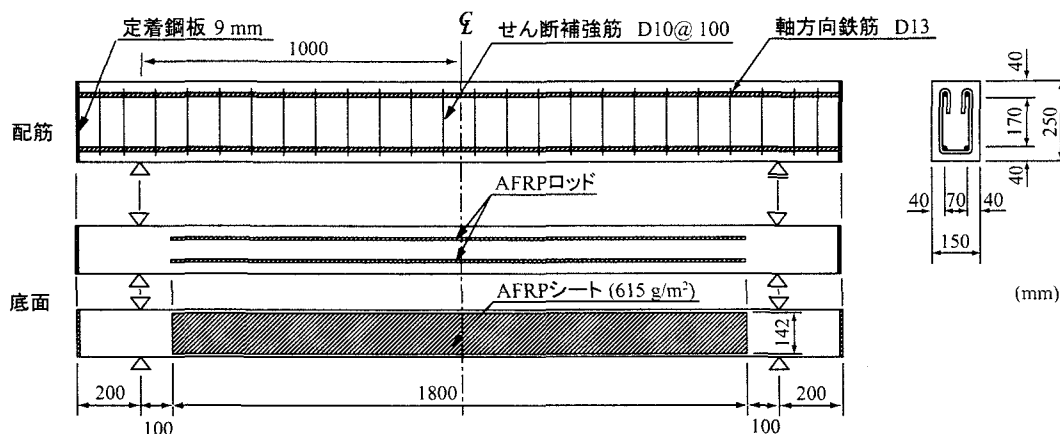


図-1 試験体概要図

表-2 材料の力学的特性値

(a) コンクリート

材令 (日)	圧縮強度 $f'_c$ (MPa)	弾性係数 $E_c$ (GPa)	ポアソン比 $\nu_c$
120	31.0	26.8	0.22

(b) 鉄筋

鉄筋 名称	材質	降伏強度 $\sigma_y$ (MPa)	弾性係数 $E_s$ (GPa)	ポアソン比 $\nu_s$
D13	SD295A	362	206	0.3
D10		419		

(c) AFRP ロッド

補強 材料	ロッド径 (mm)	公称断面積 $A$ (mm <sup>2</sup> )	弾性係数 $E$ (GPa)	引張強度 (GPa)
RA5	5.0	19.6	62.5	1.45
RA9	9.0	63.0		

(d) AFRP シート

補強 材料	シート目付量 (g/m <sup>2</sup> )	シート厚さ $t$ (mm)	弾性係数 $E$ (GPa)	引張強度 (GPa)
A200	200	0.138	131	2.48
A415	415	0.286		

沿う形で下面にダイヤモンドカッターを用いてロッド径と同程度の溝を切削し、ロッドを直径分だけ埋め込むことにより補強している。補強範囲は、梁中央部から支点の100 mm手前までとしている。ロッドの埋め込みの際には、一般的なパテ状のエポキシ樹脂で空隙を充填して行った。S9梁に関しては、幅142 mmのシートを2層貼りしてR9梁と同範囲に補強している。なお、シート接着面には、シートの付着性能向上に有効であるショットブラスト処理(処理深さ1~2 mm程度)を行い、かつプライマーを2度塗りしてシートの接着が良好に行われるようにした。表-2には、各種材料の力学的特性値を示して

いる。

## 2.2 実験方法

写真-1には、実験状況を示している。RC梁はリバウンド防止用治具付の支点治具上に設置している。支点治具全体は、RC梁の回転のみを許容するピン支持に近い構造となっている。実験は、重錘をRC梁のスパン中央部に所定の高さから自由落下させることにより行っている。用いた重錘は、質量が300 kg、載荷点部の直径が150 mmの円柱状鋼製重錘である。重錘底部は、衝突時の片当たりを防止するために、曲率半径が1,407 mmで高さが2 mmの球面状となっている。

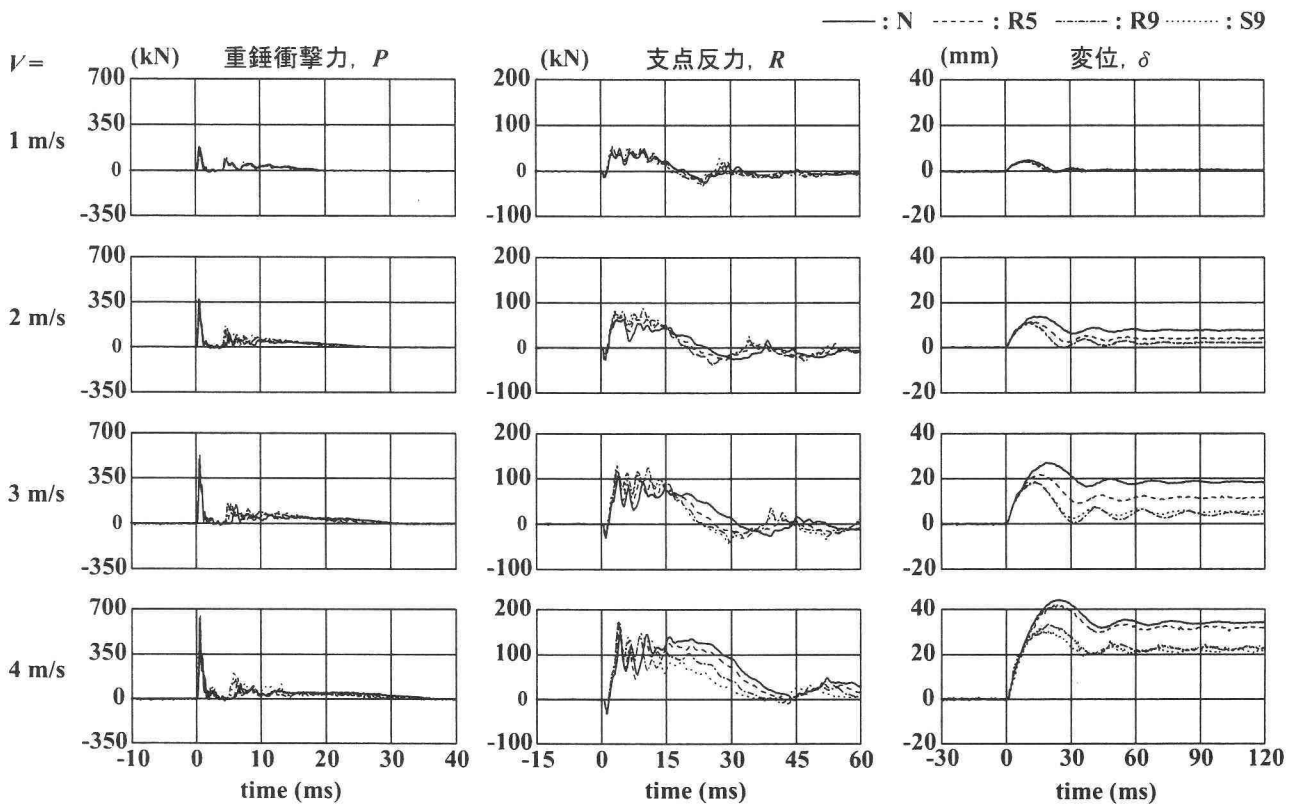


図-2 各応答波形（繰り返し載荷）

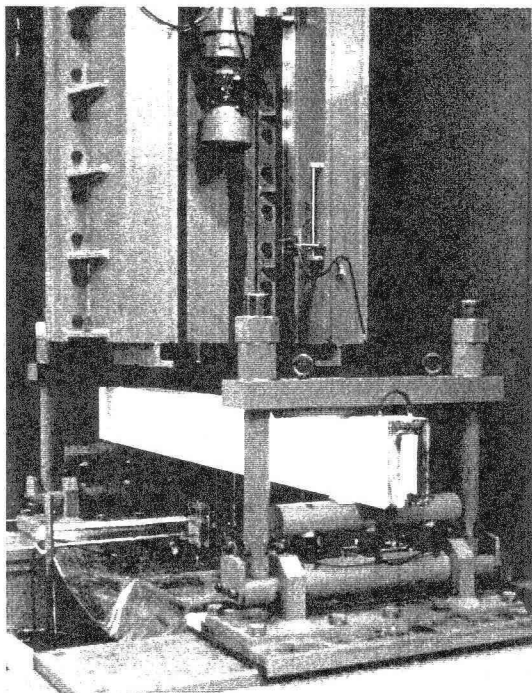


写真-1 実験状況

実験は、載荷方法として漸増繰り返し載荷（以後、繰り返し載荷）と単一載荷の2種類を採用している。前者は、処女載荷および速度増分を1 m/sに設定し、

RC梁が終局に至るまで繰り返し重錘を落下させる方法であり、後者は各試験体に対して1回のみ重錘を落下させる方法である。本論文では、単一載荷実験用の試験体を各2体用意した。1体目は、繰り返し載荷実験における最終衝突速度で実験を行うものであり、他の1体は、1体目が終局に至った場合には1 m/sだけ減速した速度にすることとし、未だ終局に至らない場合には1 m/sだけ加速した速度で実験を行うこととした。梁の終局は、N梁の場合には、既往の研究<sup>2)</sup>から累積残留変位が純スパン長の2% (40 mm)程度に達した時点、ロッドあるいはシートで補強したRC梁の場合には、それらが剥離した時点を目安とした。

測定項目は、重錘衝撃力 $P$ 、合支点反力（以後、支点反力 $R$ ）および載荷点変位（以後、変位 $\delta$ ）の各応答波形である。また、実験終了後には梁側面に生じたひび割れを記録している。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 重錘衝撃力、支点反力および変位波形

図-2には、各RC梁の重錘衝撃力 $P$ 、支点反力 $R$ および変位 $\delta$ に関する繰り返し載荷時の各応答波

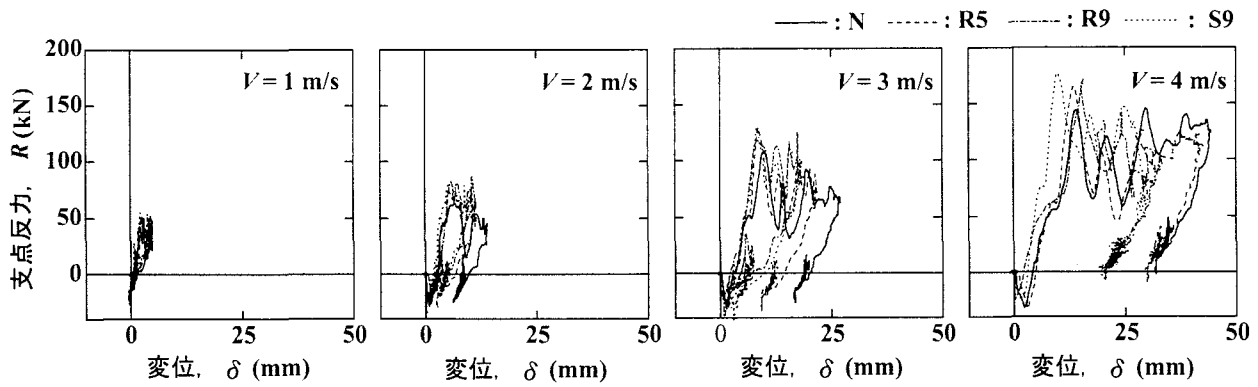


図-3 R- $\delta$  履歴曲線 (繰り返し載荷)

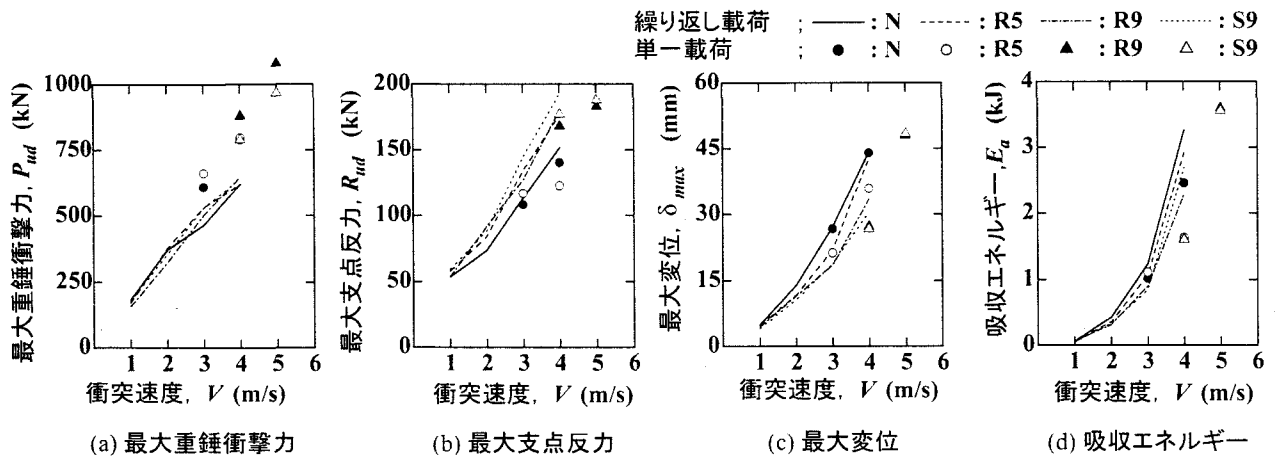


図-4 各種応答値

形を衝突速度  $V$  毎に示している。図中、各波形は重錘衝突時を  $0\text{ ms}$  として整理している。

N, R5, R9 梁において、重錘衝撃力波形  $P$  は、補強の有無や補強量にかかわらず類似の波形性状を示している。すなわち、衝撃初期に振幅が大きく継続時間の短い (第 1 波) と後続の周期が数 ms の波形成分を含んだ継続時間が  $10 \sim 20\text{ ms}$  と比較的長い (第 2 波) からなる分布性状を示している。なお、第 1 波の振幅は衝突速度  $V$  の増加と共に増大する傾向を示し、第 2 波目の立ち上がりの時刻は衝突速度  $V$  の増加と共に遅延し、かつ長くなる傾向を示していることが分かる。これらの傾向は、繰り返し載荷によって損傷が蓄積され、固有振動周期が長くなることに関連しているものと考えられる。

支点反力波形  $R$  は、衝突速度  $V$  が  $1 \sim 2\text{ m/s}$  と小さい場合には各梁で同様の性状であり、 $5\text{ ms}$  程度で最大値を示し、その後主波動は継続時間が  $20 \sim 25\text{ ms}$  程度の正弦半波状の波形を示している。支点反

力波形  $R$  も衝突速度が  $3, 4\text{ m/s}$  と大きくなると初期の振幅が大きくなり、後続の主波動の継続時間が長くなる傾向にある。これは、重錘衝撃力波形  $P$  と同様に、衝突速度  $V$  の増加に対応して劣化が進行し、固有周期が長くなるためと考えられる。また、 $V = 4\text{ m/s}$  における分布を見ると、主波動の継続時間は S9, R9, R5, N の順に延びていることが分かる。以上より、補強量が多いほどより健全であり、またロッド補強よりもシート補強で、劣化の程度がより小さいことが推察される。

変位波形  $\delta$  に関しては、重錘衝撃力波形  $P$  や支点反力波形  $R$  のような高周波成分はみられず、いずれも正弦波状の分布を示していることが分かる。なお、最大応変変位や残留変位は衝突速度  $V$  の増加に対応して増大する傾向にある。最大応変変位や残留変位の差異は  $V \leq 3\text{ m/s}$  までは、ロッドあるいはシートの補強量に対応した補強効果が現れていることが分かる。すなわち、N 梁の変位が最も大きく、次い

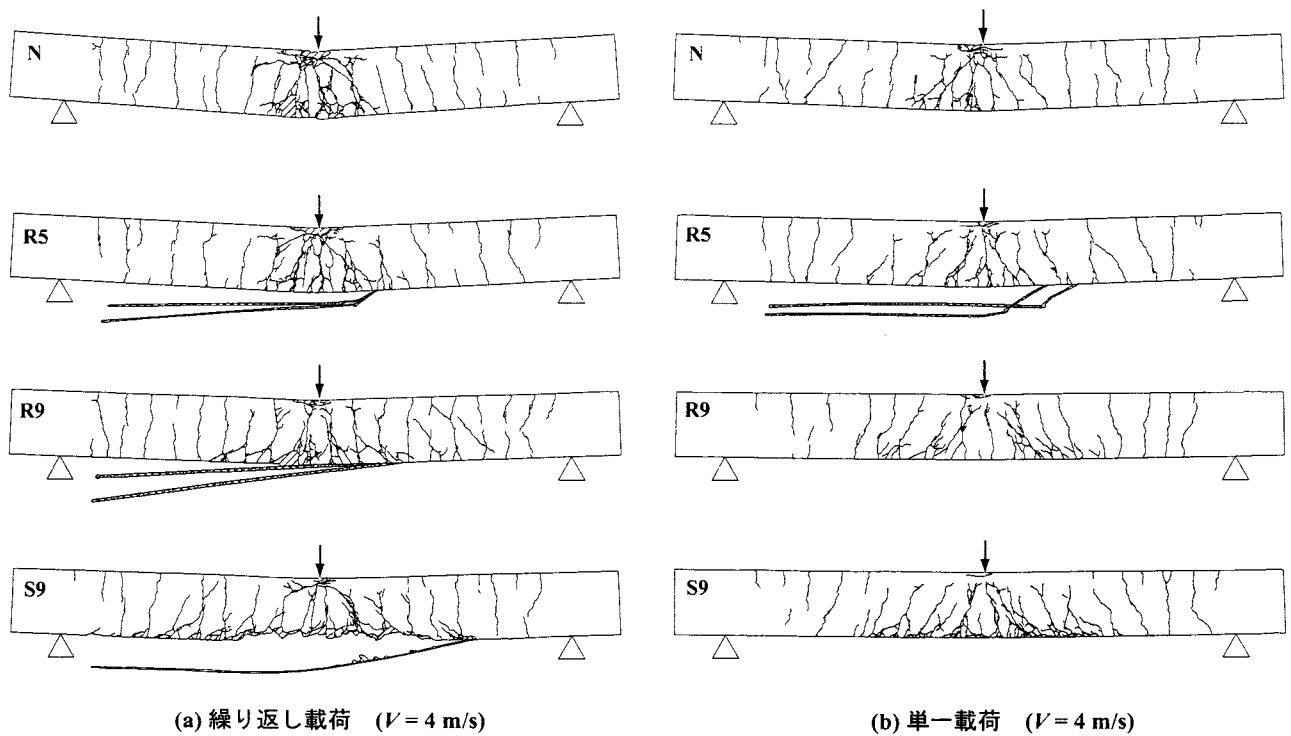


図-5 実験終了後におけるひび割れ分布性状

でR5梁であり、R9とS9梁は補強量が類似で最も変位が小さい。しかしながら、 $V=4\text{ m/s}$ では、N、R5梁がほぼ同様の変位波形を表していることが分かる。これは、 $V=3\text{ m/s}$ 終了時にR5梁のロッドの剥離が確認されていたことから、この時点で補強効果が低減したものと推察される。また、 $V=3\text{ m/s}$ 終了時に剥離の傾向を示していないR9、S9梁に関しては、 $V=4\text{ m/s}$ 時においてN、R5梁に比較して小さな応答変位および残留変位を示していることから、十分な補強効果が発揮されていることが分かる。

### 3.2 支点反力-変位履歴曲線

図-3には、各RC梁の繰り返し載荷時の支点反力-変位履歴曲線 ( $R-\delta$ 履歴曲線)を衝突速度  $V$  毎に示している。

図より、 $V=1, 2\text{ m/s}$ の場合には、 $R-\delta$ 履歴曲線のループ内の面積で評価される吸収エネルギー量が小さいことから各梁ともほぼ弾性的な挙動を示していることが分かる。 $V=3\text{ m/s}$ の場合には補強量の減少に対応して吸収エネルギー量も大きくなっている。これは、補強量が少ない場合には、梁に多数の曲げひび割れが発生し、残留変位も10 mm程度以上を示すことから、梁全体で大きくエネルギーを吸収したためと考えられる。 $V=4\text{ m/s}$ の場合には、前述のようにR5梁において既にロッドの剥離が進行し

ているためN梁と類似の履歴曲線を示している。また、残留変位の大きさに差があるものの、平均的に見れば平行四辺形状の  $R-\delta$  曲線が示されている。本実験におけるRC試験体はせん断耐力が曲げ耐力に比べて十分に大きく、曲げ破壊で終局に至る。そのため、既往の研究<sup>2)</sup>で明らかのように曲げ破壊型RC梁固有の平行四辺形状の  $R-\delta$  曲線を示したものと考えられる。

### 3.3 各種応答値の比較

図-4には、最大重錘衝撃力  $P_{ud}$ 、最大支点反力  $R_{ud}$ 、最大変位  $\delta_{max}$  および吸収エネルギー  $E_a$  を、衝突速度  $V$  毎に示している。

最初に繰り返し載荷時の結果に着目すると、最大重錘衝撃力  $P_{ud}$  の増分は、衝突速度の増大と共に減少の傾向にあるものの、ロッドの補強量やシートとロッドの差異に依存せず全梁でほぼ同様の分布を示していることから、ロッドの補強量やシートとロッドとの差異による影響は小さいものと判断される。最大支点反力  $R_{ud}$ 、最大変位  $\delta_{max}$  は衝突速度の増加と共に各梁間で差異がより顕著になっていることから、ロッドあるいはシート補強による効果は、その補強量に対応した応答値が発生していることが分かる。吸収エネルギー  $E_a$  はいずれの梁においても衝突速度  $V$  の増加と共に二次放物線的に増大してい

る。また、同一衝突速度に着目すると、ロッド補強量の増大と共に吸収エネルギー量が減少傾向にあることから、補強量に対応して耐衝撃性が向上していることが分かる。

次に単一載荷時の結果を見ると、最大重錘衝撃力値  $P_{ud}$  は繰り返し載荷の場合と異なり、損傷が蓄積されていないことにより衝突速度  $V$  に対応してほぼ線形に増加していることが分かる。

最大支点反力  $R_{ud}$  の分布を見ると、ロッドあるいはシート補強量の大きさに対応して分布している状況は繰り返し載荷時と同様である。但し、 $V=4\sim 5$  m/s に対する増分は繰り返し載荷時の  $V=3\sim 4$  m/s におけるそれに比較して、大幅に低減していることが分かる。 $V=5$  m/s においては、ロッドあるいはシート剥離に伴う終局に近い状況であることが推察される。最大変位  $\delta_{max}$  に関しては、いずれの梁も繰り返し載荷時と同様の値を示しており、繰り返し載荷による劣化の蓄積による影響の小さいことが分かる。また、R9, S9 梁の分布はほぼ同一の値を示しており、補強割合が等しい場合にはロッドとシートの差異はないと考えられる。吸収エネルギー  $E_o$  に関しては、いずれの梁も繰り返し載荷時より小さい値を示しており、単一載荷時には損傷が蓄積されていないため、繰り返し載荷時よりも耐衝撃性に優れていることが確認できる。

### 3.4 ひび割れ分布

図-5には、各RC梁の繰り返し載荷における最終速度時と単一載荷  $V=4$  m/s 時の実験終了後におけるひび割れ分布を示している。

(a) 図より、いずれの梁も上下縁から真っ直ぐに進展する曲げひび割れが発生している。詳細を見ると、N, R5 梁は載荷点近傍も含め類似の分布性状を示しているが、R9, S9 梁の場合には下縁かぶり部に曲げひび割れに継がる斜めひび割れが発生している。その発生範囲は R9 梁よりも S9 梁の方が広い。これ

は、シートとコンクリートとの付着が健全であることや、その結果、補強材の分担力が大きいことに起因しているものと推察される。

一方、(b) 図の単一載荷時の結果より、繰り返し載荷時と同様に曲げひび割れが発生し、かつ載荷点から下縁に向かう斜めひび割れが発生している。これは、図-4(a)からも明らかなように、単一載荷時には梁が劣化していないことにより繰り返し載荷時に比較して大きな重錘衝撃力が発生することに起因しているものと考えられる。

## 4. まとめ

本研究では、AFRP ロッドを下面埋設して曲げ補強した RC 梁の耐衝撃性状を検討するため、同程度の引張剛性を持つ AFRP ロッドおよびシートで曲げ補強した RC 梁の重錘落下衝撃実験を実施した。本研究の範囲内で得られた知見をまとめると、以下の通りである。

- 1) ロッドを埋設して曲げ補強した RC 梁の耐衝撃性は、シート補強の場合と同様に補強量の増加と共に向上する。
- 2) 引張剛性が同等のシートとロッドを用いて曲げ補強した RC 梁の耐荷性状は、ほぼ同様である。

## 参考文献

- 1) 岸徳光, 三上浩, 栗橋裕介, 田村富雄: AFRP ロッドを埋設した RC 梁の曲げ耐荷性状に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.1983-1988, 2003.
- 2) 岸徳光, 三上浩, 松岡健一, 安藤智啓: 静載荷時に曲げ破壊が卓越する RC 梁の耐衝撃設計法に関する一提案, 土木学会論文集, No647/I51, pp.177-190, 2000.