

論文

[2184] RC 梁の衝撃挙動におよぼす補強筋特性の影響

岸 徳光^{*1}・三上 浩^{*2}・田村富雄^{*3}・松岡健一^{*4}

1. はじめに

最近、炭素繊維やアラミド繊維を主材とする連続繊維補強材 (FRP ロッド) をコンクリートの補強材として実構造物に適用する例が徐々に増えつつある。FRP ロッドは軽量かつ高引張強度を有し、耐蝕性に優れ、非帯磁性であるなど鋼材にない優れた特質を有している。反面、ヤング係数が鋼材の 1/2 ~ 1/3 程度と低いことや降伏点を有しないこと並びに付着特性が従来の鋼材と大きく異なることなどコンクリートの補強材として適用するにあたってはいくつかの留意すべき点も有している[1]。

著者らは FRP ロッドが高い弾性伸び率を有しかつ降伏点を有しないことに着目して、FRP ロッドで補強した RC スラブや RC 梁の衝撃挙動を検討してきた。その結果、補強筋の剛性 (ヤング係数に断面積を乗じたもの) や付着特性が RC スラブの衝撃応答性状に大きな影響を与えることが明らかになっている。特に、ロッド表面に珪砂を接着させた砂付きのアラミド繊維製 FRP (AFRP) ロッドで補強したスラブは、異形鉄筋で補強したスラブよりも耐衝撃性に優れている[2]。また、異形鉄筋で補強した RC 梁はスパン中央で角折れが生じやすく、AFRP ロッドで補強した梁は全体的な変形挙動を示すことや、RC 梁の耐衝撃性に与える因子として異形鉄筋を用いた梁では下端補強筋比、AFRP ロッドを用いた梁では補強筋配置の影響度合いが高いことが明らかになっている[3]。

本研究では、既往の研究成果に加えて補強筋の特性が RC 梁の耐衝撃挙動におよぼす影響を明らかにするために、新たに炭素繊維製のロッドを追加した 3 種類の主筋を用いた梁を製作し、重錘を梁中央に自由落下させて衝撃挙動を検討した。また、著者らが今までに行ってきた単調増加繰返し衝撃荷重載荷 (以後、繰返し載荷) と新たに単一衝撃荷重載荷 (以後、単一載荷) の 2 種類の載荷方法で実験を行い、載荷方法が RC 梁の衝撃挙動におよぼす影響もあわせて検討している。

2. 実験の概要

表-1 に試験体の一覧を示す。補強筋の種類は 3 種類で、同一の補強筋で試験体を 4 体、合計 12 体製作した。このうち 1 体は載荷速度 (重錘が梁に衝突する直前の速度) を 1 m/sec 刻みとして繰返し載荷を行い、他の 3 体は 1 回のみ試験体に衝撃荷重を載荷する単一載荷とした。なお、単一載荷における載荷速度は繰返し載荷で梁が破壊したときの載荷速度を参考に決定した。主筋に用いた補強筋は異形鉄筋が D10、砂付き AFRP ロッドが RA9S、砂付き CFRP ロッドが RC9S で、ともにロッド表面に 5 号珪砂 (平均粒径 0.3 mm) を接着したものをを用いた。補強筋は全て複筋配置とし、下端補強筋比は全て約 1% とした。

補強筋の特性を表-2 に示す。AFRP、CFRP ロッドの特性はカタログ値で、鉄筋の特性は規格値を示している。組紐状 FRP ロッドは繊維を組紐機で編み上げた後、樹脂を含浸硬化させて成形した。砂付きのロッドは樹脂が硬化する前にロッド表面に珪砂を接着させて成形した。FRP ロッドのヤング係数は鋼材の 1/2 ~ 1/3 程度であるが弾性伸び率は 6 倍から 10 倍程度である。また、引張耐力は同一断面積の異

*1 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科、工博 (正会員)

*2 三井建設 (株) 技術研究所 主任研究員、工博 (正会員)

*3 三井建設 (株) 技術研究所 副所長 (正会員)

*4 室蘭工業大学教授 工学部建設システム工学科、工博 (正会員)

形鉄筋と比べて3倍程度大きい。用いたコンクリートは粗骨材の最大寸法が15mmのレデーミクストコンクリートで、W/Cは38%、単位セメント量は432kgfであり、実験時の材令における圧縮強度は465kgf/cm²である。

図-1に試験体の形状寸法および補強筋の配置位置と歪および変位の測定位置を示す。本実験における測定点は重錘の両側面に取り付けた容量1,000Gの歪ゲージ型加速度変換器2点と上、下端筋に取り付けた歪ゲージ12点並びに容量80mmの非接触式変位計(レーザ式変位センサ)6点である。

衝撃実験は室蘭工業大学に設置されている落下衝撃万能試験機を用いて行った。衝撃荷重は外径が15cmで重量が200kgfの鋼製の円柱からなる重錘を所定の高さにセットした後、梁中央に自由落下させて載荷した。なお、梁は両端面から17.5cmの位置でリバウンドを防止するためその上下を鋼製の治具を用いて固定した。なお、治具全体は梁の軸方向変位を拘束しないように回転可能な構造とした。

表-1 試験体の一覧

試験体名	補強筋の種類	載荷速度(m/sec)
DC-R	D10	1~3
DC-S2, 3, 4		2, 3, 4
AsC-R	RA9S	1~4
AsC-S2, 3, 4		2, 3, 4
CsC-R	RC9S	1~4
CsC-S2, 3, 4		2, 3, 4

表-2 補強筋の特性

補強筋名	異形鉄筋 D10	AFRP ロッド RA9S	CFRP ロッド RC9S
材 質	SD295A	アラミド繊維	カーボン繊維
公称直径(mm)	9.5	9.0	9.0
公称断面積(mm ²)	71	63	63
密度(g/cm ³)	7.85	1.30	1.55
引張耐力(tonf)	3.2~4.3	9.6	10.0
降伏耐力(tonf)	2.1以上	—	—
ヤング係数(×10 ⁶ kgf/cm ²)	2.10	0.70	1.20
弾性伸び率(%)	0.2	2.0	1.2

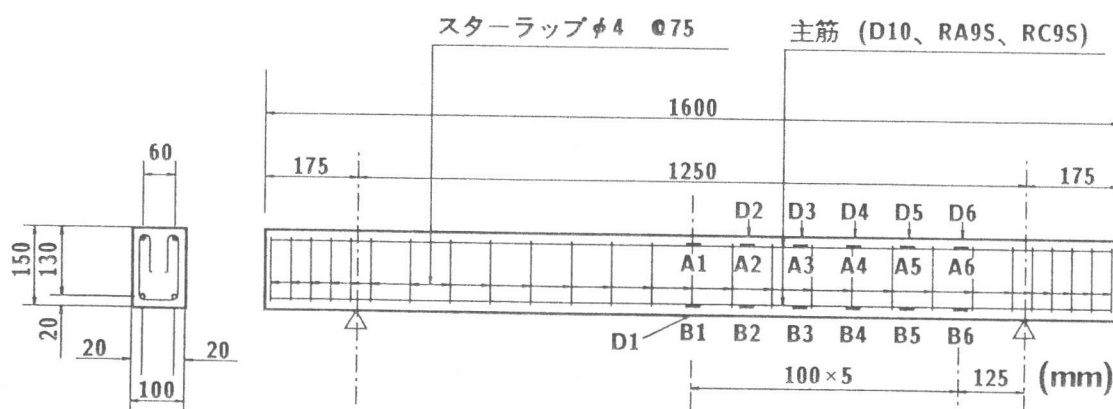


図-1 試験体の形状寸法と配筋および測定位置

3. 実験結果および考察

3.1 衝撃抵抗強さおよび破壊状況

表-3に梁破壊時の載荷速度と破壊形式および残留変形量を示した。繰返し載荷におけるDC-R梁の破壊時の載荷速度はV=3m/secである。これに対して、FRPロッドで補強した梁はすべてV=4m/sec載荷で破壊しており、異形鉄筋で補強した梁の繰返し載荷に対する抵抗性はFRPロッドで補強した梁に比べて低いことが分かる。また、破壊形式はDC-R梁が下端筋降伏による角折れ、AsC-R梁が圧壊、CsC-R梁が上、下端筋の破断による破壊であった。

一方、単一載荷では全ての試験体が $V = 4$ m/sec 載荷で破壊しており、補強筋の種類は単一載荷における梁破壊時の載荷速度には顕著な影響を与えていないことが分かる。しかし、各梁の破壊状況は繰返し載荷と同様に大きく異なっている。DC-S 梁では鉄筋が降伏して梁中央部で角折れが生じ、スパン中央上部で圧縮破壊している。AsC-S 梁では上部圧縮縁が広域的に圧壊している。CsC-S 梁は下端補強筋が破断して大変形となり破壊している。

表-3 梁の破壊状況

試験体名	載荷速度 (m/sec)	破壊形式	残留変形量 (cm)
DC-R	3	下端筋降伏	3.00
AsC-R	4	圧壊	0.87
CsC-R	4	上、下端筋の破断	9.92
DC-S	4	下端筋降伏	3.32
AsC-S	4	圧壊	1.33
CsC-S	4	下端筋の破断	4.16

以上を要約すると、載荷方法に関わらずDC梁では鉄筋が降伏して角折れとなり、CsC梁ではロッドが破断するため、ともに破壊は壊滅的であり残留する変形量も極めて大きい。一方、AsC梁の破壊は上部圧縮縁の広域的な圧壊であり、残留する変形量も少なく最も安定した破壊状況を示している。すなわち、梁破壊時の載荷速度および破壊形式や残留変形量から見た耐衝撃性は、AFRPロッドで補強した梁が最も優れていると考えられる。

3.2 補強筋の応答歪性状

図-2に載荷速度が 2 m/sec における梁中央の上端、下端補強筋の応答歪波形を全試験体について示した。経時変化は A/D 変換の開始時刻を起点として示している。なお、DC-R の下端筋の歪は大歪のために測定不能であったので、 $V = 1$ m/sec 載荷での応答歪性状を示した。

(1) 上端筋の応答歪性状

単一載荷した AsC-S2 梁の上端筋は載荷初期から引張歪を示し、最大歪は 2 波目に生じて $2,000 \mu$ 程度である。これは、梁の中央に発生するひびわれの進展高さが高く、中立軸が上端筋位置よりも上方に移動し、全断面引張に近い状態になったことに関連するものと考えられる。これに対して、異形鉄筋を用いた DC-S2 梁では発生する歪レベルが極めて小さい。これは、梁中央部に上、下に貫通するひびわれが発生したものの、AsC-S2 梁に比べて補強筋の剛性が高いために、後述(図-3)のように変形も AsC-S2 梁より小さく、中立軸が上端筋近傍部に存在するためと考えられる。一方、CsC-S2 梁では載荷初期に 700μ 程度の圧縮歪が生じているが、その後引張歪に移行して最大で $1,500 \mu$ 程度を示している。

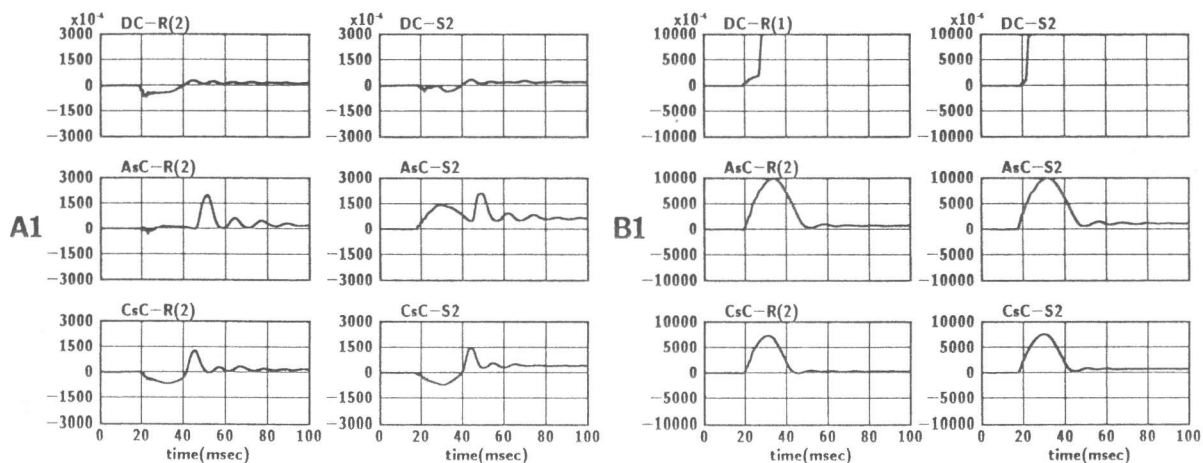


図-2 梁中央の上端、下端補強筋の応答歪波形 ($V = 2$ m/sec)

DC-R や CsC-R 梁のように剛性の高い補強筋を用いた梁の繰返し載荷における応答歪性状は単一載荷の場合と比較的類似している。しかし、AsC-R 梁では単一載荷の場合に見られた 1 波目の引張歪が極端に小さく、2 波目の引張歪の最大値は単一載荷の場合と同程度である。

(2) 下端筋の歪性状

下端筋の応答歪性状は載荷方法によらず類似しており、応答歪性状に与える載荷方法の影響は少ない。DC-R 梁では $V = 1 \text{ m/sec}$ 載荷で鉄筋が降伏し、 2 m/sec 載荷では大歪となって計測が不可能であった。一方、単一載荷でも $V = 2 \text{ m/sec}$ 載荷で鉄筋が降伏していることが分かる。この様に繰返し載荷を行った DC-R 梁では低い載荷速度から鉄筋が降伏して衝撃荷重が梁中央に集中するため、他の梁と比較して低い載荷速度で破壊したものと考えられる。AsC 梁では載荷方法に関わらず、継続時間が 30 msec 程度の正弦半波の主波動が示され、歪はその後大きく減衰している。一方、CsC 梁も載荷方法に関わらず AsC 梁と同様な波形性状を示している。しかし、最大引張歪は AsC 梁の 70 % 程度であり、主波動の継続時間も 10 msec 程度短くなっている。この様に、補強筋の剛性や弾性伸び率は RC 梁の応答歪性状に大きな影響を与えている。

3.3 応答変位分布の経時変化

図-3 に載荷速度が 2 m/sec における応答変位分布の経時変化を示す。ここでは、両載荷方法で応答変位分布の経時変化が類似であることより、単一載荷についてのみ示した。なお、経時変化は重錘加速度の立ち上がり開始時刻を起点として示した。DC 梁では支点から測点 D2 まで直線的に変位が分布しているのに対して、AsC、CsC 梁では若干下に凸の形状となっている。

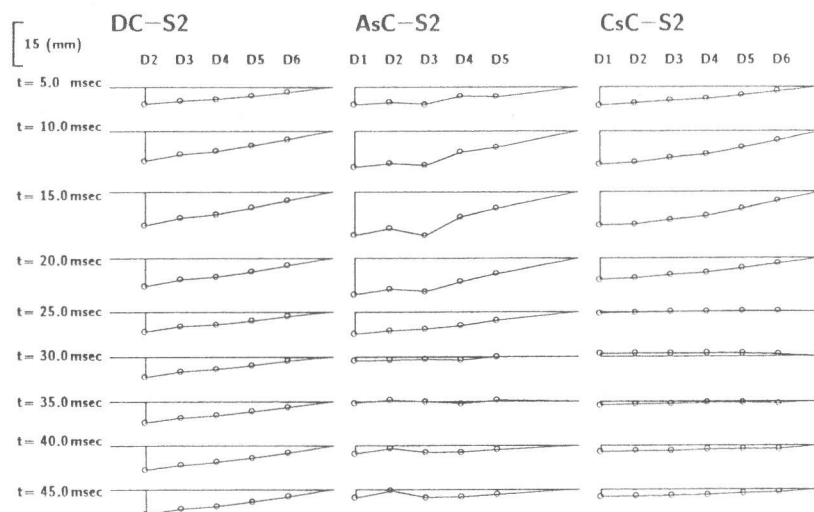


図-3 応答変位分布の経時変化 ($V = 2 \text{ m/sec}$)

これはひびわれの軸方向の分散性が AsC、CsC 梁の方が DC 梁に比べて良好なためと考えられる。各梁が最大の変位分布を示す時刻で変位量を比較すると、AsC、CsC、DC 梁の順に小さくなっており、補強筋の剛性が応答変位量に影響を与えていることが分かる。なお、DC 梁では変位が復元する傾向が見られない。これは載荷点直下で角折れが生じ、変位が大きく残留したためと考えられる。一方、AsC 梁では 35 msec 経過時点で変位がほぼ 0 に復元している。CsC 梁では 25 msec で変位がほぼ 0 に復元したものの、30 msec 経過時点ではリバウンドによると見られる小さな負方向の変形が示されている。この様に、補強筋の剛性や弾性伸び率は応答歪性状と同様に梁の応答変位分布の経時変化に大きな影響を与えている。

3.4 最大重錘衝撃力

図-4 に載荷速度と最大重錘衝撃力の関係を載荷方法ごとに示した。なお、最大重錘衝撃力は重錘の最大加速度に重錘質量を乗じて求めた。繰返し載荷で載荷速度が低い場合の重錘衝撃力は速度に比例して大幅に増加している。衝撃力の増加率は剛性の高い補強筋を用いた場合に大きい。しかし、各梁とも破壊時

の載荷速度における衝撃力は破壊直前の載荷速度での衝撃力に比べて小さくなっている。これは、梁破壊時には繰返し載荷による損傷が大きく、低載荷速度の状態に比べてより変形しやすい状態になっているためと考えられる。

一方、単一載荷の場合には、載荷速度に関わらず DC 梁の衝撃力が最も小さいことが分かる。次に小さいのが、 $V = 4 \text{ m/sec}$ 載荷の 1 例を除いて

AsC 梁で、最も最大衝撃力が大きい梁は CsC 梁である。また、最大衝撃力は CsC 梁の $V = 4 \text{ m/sec}$ を除いて載荷速度が大きくなるに従い大きくなっている。一般に最大衝撃力は剛性の高い梁ほど大きく、最も剛性の高い DC 梁で衝撃力が大きくなるものと推察されるが、実験結果はこれと逆の結果を示している。これは、本実験では重錘重量が 200 kgf と重く、 $V = 2 \text{ m/sec}$ 載荷程度の落下エネルギーで鉄筋が降伏し局所的な変形量が増加するため、見かけ上 DC 梁の曲げ剛性が最も低い状態になったためと考えられる。一方、CsC 梁の $V = 4 \text{ m/sec}$ 載荷では、下端ロッドが破断して梁が大変形となったため、 $V = 4 \text{ m/sec}$ 載荷での衝撃力が $V = 3 \text{ m/sec}$ 載荷よりも小さくなったものと考えられる。この様に、補強筋の剛性や弾性伸び率および梁の破壊形式は重錘衝撃力の大きさに顕著な影響を与えている。

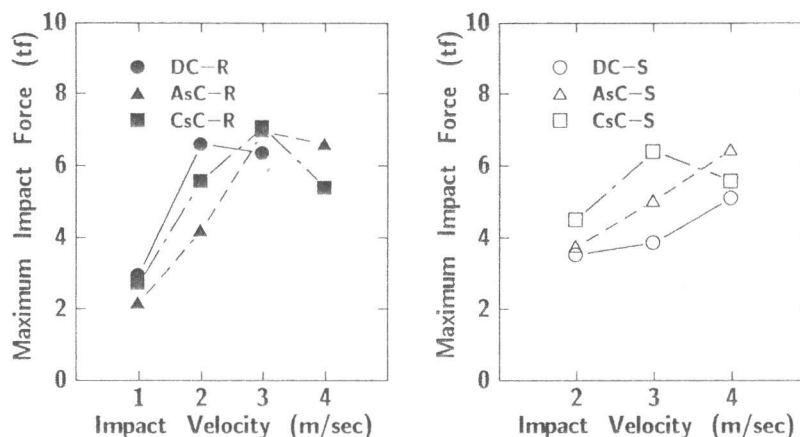


図-4 載荷速度と最大衝撃力

3.5 ひびわれ性状

図-5 にひびわれ性状を載荷方法ごとに示した。上段は繰返し載荷、下段は単一載荷の場合である。繰返し載荷の DC 梁では $V = 1 \text{ m/sec}$ 載荷で梁中央にひびわれが一本発生し、このひびわれは梁の上縁から下縁まで貫通している。 $V = 2 \text{ m/sec}$ 載荷では載荷点直下周辺にひびわれ本数が増加したがまだ角折れの状態にはなっていない。 $V = 3 \text{ m/sec}$ 載荷では完全に角折れし、梁中央上部が狭い領域で圧壊している。一方、AsC 梁の $V = 1 \text{ m/sec}$ 載荷では梁下縁に数本の短いひびわれが発生し、載荷速度が増加するにつれてひびわれ本数も増加している。最終的には $V = 4 \text{ m/sec}$ 載荷で上部圧縮縁が広域的に圧壊したが残留変形量は少ない。CsC 梁のひびわれ性状は AsC 梁と類似しているが、同じ載荷速度におけるひびわれの進展高さは AsC 梁よりも高く、最終的には $V = 4 \text{ m/sec}$ 載荷で上、下端筋が破断して二つに折れて破壊した。

一方、単一載荷の $V = 2 \text{ m/sec}$ 載荷における DC 梁のひびわれ性状は、繰返し載荷とほぼ同様である。 $V = 3 \text{ m/sec}$ 載荷ではひびわれ本数が増加して若干角折れの状態を示しているが繰返し載荷と異なり圧縮縁の損傷は見られない。 $V = 4 \text{ m/sec}$ 載荷では角折れが激しくなり、上部圧縮縁が狭い範囲で圧壊している。一方、AsC 梁の $V = 2 \text{ m/sec}$ 載荷におけるひびわれは DC 梁に比べて分散性が良好であり、繰返し載荷の場合に比べて進展高さが高い。 $V = 3 \text{ m/sec}$ 載荷では斜めひびわれが増加し、繰返し載荷と異なり梁上部に若干の損傷が見られる。 $V = 4 \text{ m/sec}$ 載荷では上部圧縮領域が広域的に圧壊して破壊した。

CsC 梁の $V = 2 \text{ m/sec}$ 載荷におけるひびわれの分散性は AsC 梁とほぼ同様である。しかし、AsC 梁に比べて支点側に発生した斜めひびわれの角度は緩く、進展高さも高い。 $V = 3 \text{ m/sec}$ 載荷になると 2 m/sec 載荷よりもひびわれ本数が増加し、特に斜めひびわれが支点側に増加している。 $V = 4 \text{ m/sec}$ 載荷

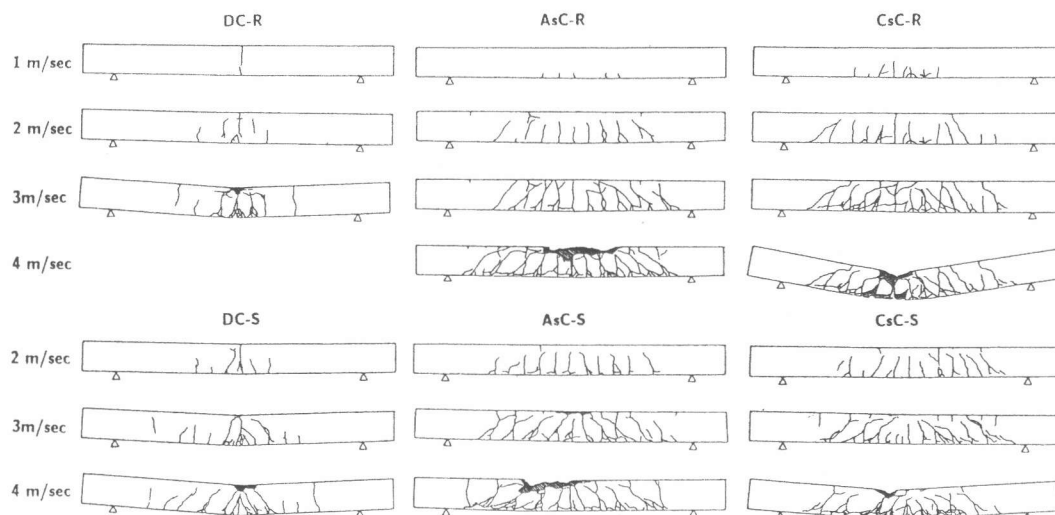


図-5 ひびわれ性状

では下端筋が破断したため梁が大きく角折れて大変形を示した。この際、下端コンクリートが大きく剥落した。この様に、補強筋の剛性や弾性伸び率はひびわれ性状と破壊形式に大きな影響を与えている。

4. まとめ

補強筋の特性が RC 梁の耐衝撃挙動におよぼす影響を検討するため、12 体の試験体を製作して梁中央に 200 kgf の重錘を自由落下させて衝撃実験を行った。本研究の範囲内で得られた結果を要約すると、

- (1) 異形鉄筋で補強した梁の繰返し衝撃载荷に対する抵抗性は FRP ロッドで補強した梁に比べて劣る。
これは低载荷速度で鉄筋が降伏するため、衝撃力が载荷点直下部分により集中するためと考えられる。
- (2) RC 梁の破壊形式は補強筋の弾性伸び率によって大きく異なる。異形鉄筋を用いた梁では鉄筋が降伏して破壊し、AFRP ロッドを用いた梁では圧縮破壊、CFRP ロッドを用いた梁では補強筋の破断によって破壊が生じた。また、破壊時の残留変形量は AFRP ロッドを用いた梁が最も小さかった。
- (3) 補強筋の剛性や弾性伸び率は補強筋の応答歪性状や応答変位分布の経時変化に顕著な影響を与える。
- (4) 载荷方法に関わらず重錘衝撃力の大きさに与える補強筋の剛性や弾性伸び率の影響は極めて顕著であり、载荷速度が大きい場合は梁の破壊形式(損傷程度)も衝撃力の大きさに影響を与える。
- (5) 補強筋の剛性や弾性伸び率はひびわれ性状に大きな影響を与え、これは応答歪性状や応答変位分布の経時変化および重錘衝撃力の大小関係にも密接に関連している。

最後に、本研究を行うに当たり室蘭工業大学建設システム工学科大学院生の松坂祐介君に多大なるご支援をいただきました。記して謝意を表するものであります。

参考文献

- [1] 三上浩、武富幸朗、石橋一彦、能町純雄：組紐状 AFRP ロッドで補強したコンクリートはりの疲労特性に関する実験的研究、土木学会論文集、第 427 号/ VI-14、pp.85-94、1991
- [2] 三上浩、加藤正利、田村富雄、岸徳光：組紐状 AFRP ロッドで補強した RC スラブの耐衝撃性に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14、No.2、pp.661-666、1992
- [3] 三上浩、田村富雄、岸徳光、松岡健一：組紐状 AFRP ロッドで補強した RC 梁の耐衝撃挙動、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15、No.2、pp.923-928、1993