

I-38

補強筋の特性とコンクリート強度が RC 梁の耐衝撃挙動に及ぼす影響

室蘭工業大学	正 員	岸 徳 光
三井建設(株)	正 員	三 上 浩
室蘭工業大学	正 員	松 岡 健 一
室蘭工業大学	正 員	田 中 功
室蘭工業大学	学生員	松 坂 祐 介

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 $1/2 \sim 1/3$ 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いくつかの留意すべき点も有している¹⁾。

FRP ロッドに関する既往の研究には、梁の主筋やせん断補強筋あるいは PC 梁の緊張材の代替として用いることに関するものが多い。また、静的荷重を対象とした研究が多く、動的荷重下における挙動を検討した例は著者らの例を除くと極めて少ないのが現状である。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ことが分かった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分かった³⁾。

本研究では、既往の研究成果に加え補強筋の特性とコンクリート強度が RC 梁の耐衝撃挙動に及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 (異形鉄筋、AFRP および CFRP ロッド) を用い、それぞれの補強筋に対して 2 種類のコンクリート強度を有する梁を製作し、重錘を梁中央に自由落下させて衝撃実験を行った。本研究では、著者らが今までに行ってきた単調増加繰返し載荷と単一荷重載荷の 2 種類の載荷方法で実験を行っているが、本文では紙面の都合上、単一荷重載荷にのみ着目して検討した結果を報告する。

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、コンクリート強度は 2 種類で、同一の補強筋、コンクリート強度で試験体を 4 体製作した。全試験体数は 24 体である。このうち 1 体は 1 m/sec 刻みの単調増加繰返し載荷を行い、他の 3 体は単一荷重載荷とした。なお、単一荷重載荷における載荷速度 (重錘が梁に衝突する直前の速度) 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。

表-1 試験体の一覧

試験体名	補強筋の種類	コンクリート強度 (kgf/cm ²)	載荷速度 (m/sec)
DC-L1	D10	223	1~3
DC-L2, 3, 4			2, 3, 4
AsC-L1			1~4
AsC-L2, 3, 4	RA9S	223	2, 3, 4
CsC-L1			1~4
CsC-L2, 3, 4			2, 3, 4
DC-H1	D10	465	1~3
DC-H2, 3, 4			2, 3, 4
AsC-H1			1~4
AsC-H2, 3, 4	RA9S	465	2, 3, 4
CsC-H1			1~4
CsC-H2, 3, 4			2, 3, 4

Effects of Rebar's Material and Concrete Strength on Impact Behavior of RC Beam
by Norimitsu KISHI, Hiroshi MIKAMI, Ken-ichi MATSUOKA, Isao TANAKA and Yusuke MATSUZAKA

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形鉄筋と比べて3倍程度大きい。

コンクリートの力学的特性を表－３に示す。コンクリートは粗骨材の最大寸法が15 mm のレーデミクストコンクリートで、低強度コンクリートのW/Cは62%、単位セメント量は210kgf、高強度コンクリートのW/Cは38%、単位セメント量は432 kgfである。

表－２ 補強筋の特性

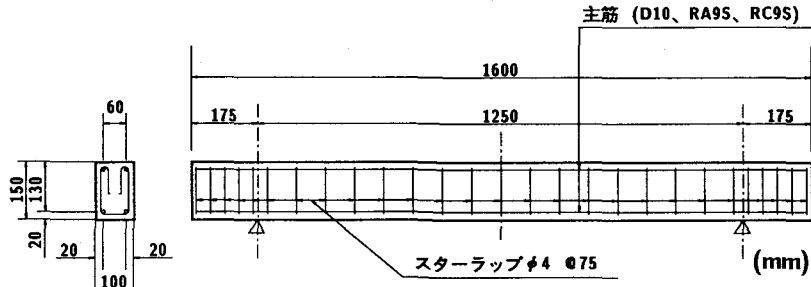
補強筋名	異形鉄筋 D10	AFRP ロッド RA9S	CFRP ロッド RC9S
材 質	SD295A	アラミド繊維	カーボン繊維
公称直径 (mm)	9.5	9.0	9.0
公称断面積 (mm ²)	71	63	63
密度 (g/cm ³)	7.85	1.30	1.55
引張耐力 (tonf)	3.2～4.3	9.6	10.0
降伏耐力 (tonf)	2.1以上	—	—
ヤング係数 ($\times 10^6$ kgf/cm ²)	2.10	0.70	1.20
弾性伸び率 (%)	0.2	2.0	1.2

図－１(a) に試験体の形状寸法および補強筋の配置位置を示す。図－１(b)に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付けた容量1,000 G 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80 mm の非接触式変位計（レーザ式変位センサ）6点である。

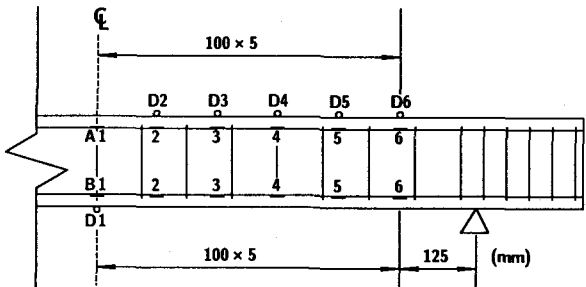
衝撃実験は室蘭工業大学に設置されている落下衝撃万能試験機を用いて行った。衝撃荷重は外径が15 cm で重量が200 kgf の鋼製の円柱からなる重錘を所定の高さにセットした後、梁中央に自由落下させて載荷した。なお、梁は両端面から17.5 cm の位置で上下を鋼製のピンを用いて支持した。

表－３ コンクリートの力学的特性

試験体名	材料試験時 材令(日)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 (kgf/cm ²)	ポアソン比	実験時材令 (日)	圧縮強度 (kgf/cm ²)
RC梁高強度	28	439	2.83×10^5	0.20	114～115	465
RC梁低強度	28	220	2.20×10^5	0.18	119～120	223



図－１(a) 試験体の形状寸法および補強筋の配置位置



図－１(b) 歪および変位の測定位置

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－1に示す様に、異形鉄筋で補強した DC 梁の繰返し载荷における最大载荷速度は、コンクリート強度によらず 3 m/sec である。一方、FRP ロッドで補強した梁はすべて 4 m/sec 载荷で破壊しており、異形鉄筋で補強した梁は繰返し衝撃载荷に対する抵抗性が FRP ロッドで補強した梁に比べて低いことが分かる。

単一荷重载荷では全ての試験体が 4 m/sec 载荷で破壊しており、補強筋の種類、コンクリート強度は単一荷重衝撃载荷における梁破壊時の载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、表－4に示す様に各梁の破壊状況は大きく異なっている。異形鉄筋を用いた梁ではコンクリート強度に関わらず梁中央部で角折れが生じ、スパン中央上部が狭い領域で圧縮破壊している。低強度コンクリートを用い AFRP ロッドで補強した梁は、上部圧縮縁が広い領域で破壊し、上端筋の一部分で座屈現象が見られた。高強度コンクリートを用いた梁では上端筋に座屈現象は見られないものの上部圧縮縁が広域的に破壊している。低強度コンクリートを用い CFRP ロッドで補強した梁は、上部圧縮縁が広域的に破壊したが、高強度コンクリートを用いた梁では下端補強筋が破断して大変形となり破壊している。

以上を要約すると、異形鉄筋を用いた梁では鉄筋が降伏して角折れとなり、CFRP ロッドを用いた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くなる。一方、AFRP ロッドで補強した梁の破壊形式は上部圧縮縁が広域的に破壊する形式であり、最も安定した破壊状況を示している。すなわち、各梁ともに同一の最大载荷速度を示しているが、AFRP ロッドで補強した梁が最も耐衝撃性に優れていると考えられる。

3. 2 補強筋の応答歪性状

図－2に载荷速度が $V=2$ m/sec における梁中央の上端、下端補強筋の応答歪波形を示す。

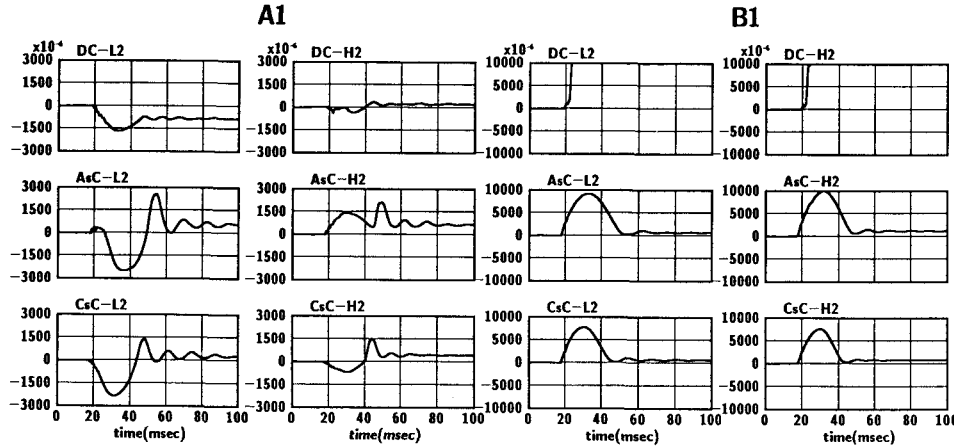
(1) 上端筋の応答歪性状

コンクリート強度が低い AsC-L2 梁は、载荷初期に若干の引張歪が生じたがすぐに圧縮歪に移行し、 $2,300\mu$ 程度の最大歪を示した後減少し、大きく引張歪に移行して減衰自由振動を示している。圧縮と引張の最大歪はほぼ同程度であり 500μ 程度の引張歪が残留した。一方、異形鉄筋を用いた DC-L2 梁は载荷初期から圧縮歪を示し、 $1,500\mu$ 程度の最大歪を示した後減少し、 800μ 程度の歪が残留した。DC 梁は AsC 梁と異なり除荷後急速に減衰している。

CsC-L2 梁は AsC 梁とほぼ同様な応答歪性状を示しているが、1 波目の継続時間は AsC 梁に比べて若干短く、また発生した引張歪は圧縮歪よりもかなり小さい。コンクリート強度が高い AsC-H2 梁は载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。また、低強度コンクリートを用いた梁とほぼ同等の引張歪が発生している。

表－4 梁の破壊状況

試験体名	载荷速度 (m/sec)	破壊形式
DC-L4	4	下端筋降伏
AsC-L4		圧壊(上端筋座屈)
CsC-L4		圧壊
DC-H4		下端筋降伏
AsC-H4		圧壊
CsC-H4		下端筋の破断



図－2 梁中央の上端、下端補強筋の応答歪波形 ($V=2$ m/sec)

このように、AsC 梁の載荷初期の歪の応答性状はコンクリート強度によって大幅に異なっている。これは、後述するひびわれ性状からも分かるように、梁の中央に発生するひびわれがコンクリート強度が高い梁では上下に貫通して全断面引張になったことに関連するものと考えられる。異形鉄筋を用いた DC-H2 梁は、発生する歪レベルが極めて小さい。これも、補強筋を含めた梁の剛性が大きいため、低強度コンクリートを用いた梁に比べて梁下縁から上縁に向けて発生するひびわれが鉛直方向に顕著に進展することに関連するものと考えられる。すなわち、低強度コンクリートを用いた梁のように、載荷点に向けて下縁から進展するひびわれが斜め方向に進展せず、明瞭な圧縮領域が形成されにくいと考えられる。炭素繊維を用いた CsC-H2 梁は、低強度コンクリートを用いた梁に比べて載荷初期の圧縮歪が 1/3 程度と小さいが、その後生じる引張歪はほぼ同様の大きさを示している。歪の応答性状はコンクリート強度によらず全般的に同様であるが、コンクリート強度が高い梁は第 1 波目の継続時間が短いようである。

(2) 下端筋の歪性状

コンクリート強度が低い AsC-L2 梁は載荷初期より引張歪を示し、最大値は $10,000 \mu$ 程度と大きい。歪はその後除荷とともに大きく減衰し比較的小さな残留歪を示している。DC-L2 梁の場合には $10,000 \mu$ 以上の大きな歪が発生し、引張歪が大きく残留していることから鉄筋が完全に降伏したものと考えられる。

CsC-L2 梁は、AsC-L2 梁と同様な傾向を示しているが、1 波目の最大歪は AsC 梁よりも $1,500 \mu$ 程度小さく、かつ 1 波目の継続時間が 5 ～ 10 msec 程度短いことが特徴である。このように、AsC 梁に比べて波形の継続時間が短いことや最大歪が小さいことは補強筋の剛性の影響が現れているものと考えられる。コンクリート強度が高い AsC-H2 梁の応答歪性状は低強度の -L2 梁とほぼ同様であるが、若干主波動の歪が大きく、継続時間が短いようである。DC-H2 梁では -L2 梁と同様に鉄筋が完全に降伏していることが分かる。CsC-H2 梁は -L2 梁とほぼ同様な応答歪性状を示しているが、AsC 梁と同様にコンクリート強度が高い梁の方が主波動の継続時間が若干短いようである。

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。コンクリート強度が応答変位分布の経時変化に与える影響が明かとなっていたことより、ここでは低強度コンクリートを用いた梁についてのみ示した。各梁の 20 msec 経過時点までの経時変化性状は比較的類似している。しかし、DC 梁では支点から測点 D2 まで直線的であるのに対して、AsC、CsC 梁では若干下に凸の形状となっている。こ

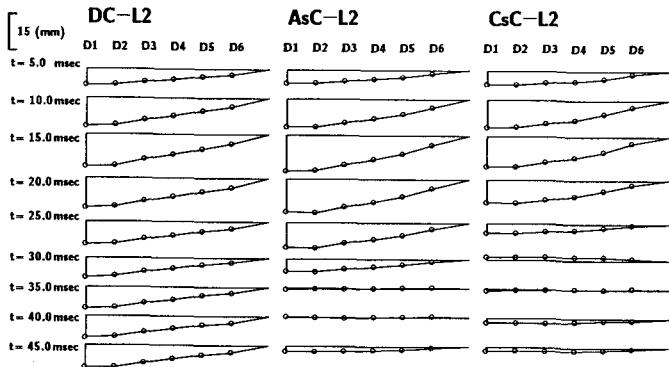


図-3 応答変位分布の経時変化 (V=2 m/sec)

これはひびわれの軸方向の分散性が AsC、CsC 梁の方が良好なためと考えられる。また、20 msec 経過時点での測点 D1 の変位量は AsC、DC、CsC 梁の順に小さくなっている。しかしながらその差は数 mm 程度とわずかであり、補強筋の剛性の応答変位量に与える影響はさほど顕著ではないことが分かる。DC 梁では明瞭な変位の復元が見られない。これは載荷点に角折れが発生し、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 経過時点で変位はほぼ 0 に復元し、CsC 梁では 30 msec 時点で若干のリバウンド変位がみられるが、これも AsC 梁と同様に 35 msec 経過時点で変位は 0 に復元している。

3. 4 最大衝撃力

図-4 に載荷速度と最大衝撃力の関係をコンクリート強度ごとに示した。なお、最大衝撃力は重錘の最大加速度に重錘重量を乗じて求めた。この図から、コンクリート強度および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、高強度コンクリートを用いた梁の 4 m/sec 載荷の 1 例を除いて AsC 梁で、最も最大衝撃力

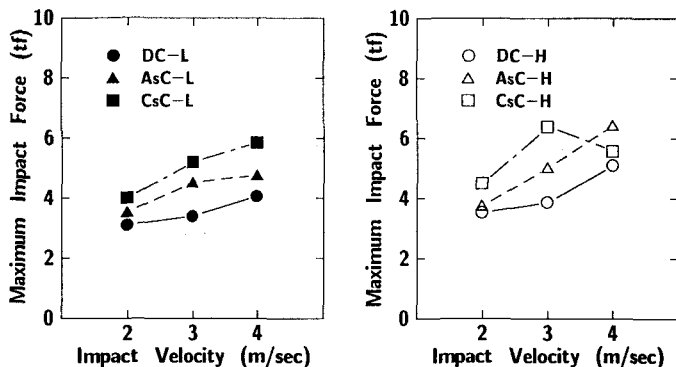
が大きい梁は CsC 梁である。また、最大衝撃力は上述した 1 例を除いて載荷速度が大きくなるに従い大きくなっている。一般に最大衝撃力は剛性の高い梁ほど大きくなり、最も剛性の高い DC 梁で最も衝撃力が大きくなるものと推察されるが、実験結果はこれと逆の結果を示している。これは、本実験では重錘重量が 200 kgf と重く、2 m/sec 載荷程度の落下エネルギーでも鉄筋は降伏して局部的な変形量が増加するため、見かけ上 DC 梁の剛性が最も低い

状態になったためと考えられる。一方、高強度コンクリートを用いた CsC-H2 梁の 4 m/sec 載荷では、下端ロッドが破断して梁が 2 つに折れたため、4 m/sec 載荷での衝撃力が 3 m/sec 載荷よりも小さくなったものと考えられる。また、4 m/sec 載荷で上端筋に座屈現象がみられた AsC-L2 梁は、3 m/sec 載荷でも変形量が依然として少なく、比較的健全な状態を保持していたために 4 m/sec 載荷でさらに衝撃力が大きくなったものと考えられる。この様に補強筋の弾性伸び率は最大衝撃力に大きな影響を与えることが分かる。コンクリート強度で衝撃力を比較すると、高強度コンクリートを用いた梁が低強度コンクリートを用いた梁に比べ衝撃力が若干大きく示されている。その程度は高強度コンクリートを用いた梁が、低強度コンクリートを用いた梁に比べて 1 m/sec 程度高い載荷速度での衝撃力と等しい。

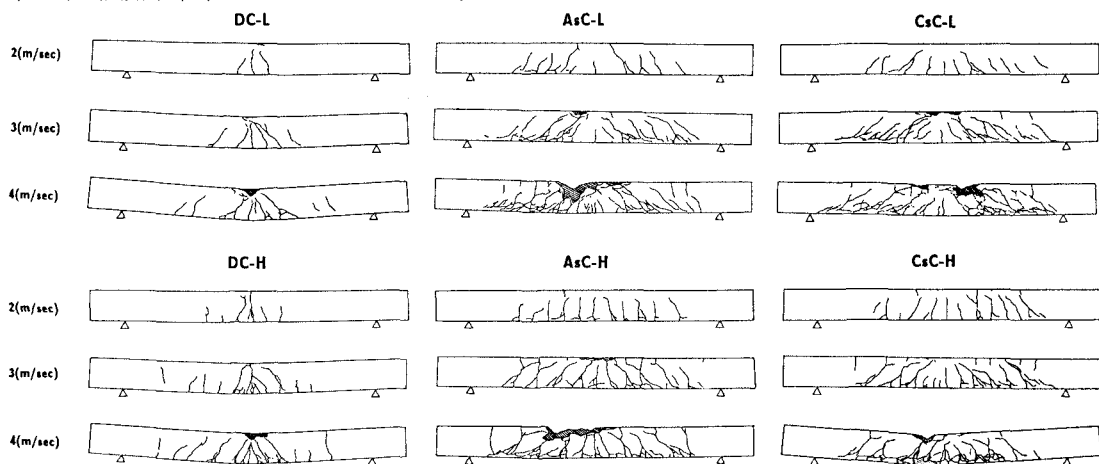
3.5 ひびわれ性状

図—5 にひびわれ性状を示す。低強度コンクリートを用いた DC-L 梁は、2 m/sec 載荷では載荷点直下に 3 本のひびわれが発生したのみである。3 m/sec 載荷になると倍のひびわれ本数となり、中央のひびわれは下縁から上縁まで貫通している。載荷点直下より離れた位置でのひびわれは斜め上方に進展し、上部圧縮領域でわずかながら損傷を受けて、角折れが若干生じている。4 m/sec 載荷では完全に角折れ状態となり、上部圧縮領域が狭い範囲で圧縮破壊している。

AsC-L 梁の 2 m/sec 載荷では、DC 梁と大きく異なり載荷点直下にはひびわれが発生せず、発生したひびわれは DC 梁に比べて軸方向に広範囲に分散している。また、ひびわれは鉛直方向よりも斜め方向に進展したものが多く、3 m/sec 載荷になるとひびわれはさらに密に発生しているが、依然として載荷点直下周辺のひびわれは少ない。4 m/sec 載荷では、上部圧縮領域が広範囲に圧壊して破壊したが、載荷点下部のひびわれは進展高さも低く、DC 梁と異なり梁全体が



図—4 載荷速度と最大衝撃力



図—5 ひびわれ性状

なだらかに変形している。

CsC-L 梁の 2 m/sec 載荷でのひびわれの分散性は AsC 梁と同程度であるが、ひびわれ進展高さは AsC 梁に比べて低い。またひびわれの進展方向は AsC 梁と同様に斜め方向のものが多く、載荷点直下のひびわれ本数は AsC 梁よりも多い。3 m/sec 載荷ではひびわれがさらに密に多数発生しているが、ひびわれの分散範囲は 2 m/sec 載荷と同程度である。上部圧縮縁が若干損傷を受けているが載荷点直下のひびわれ本数には変化がない。4 m/sec 載荷ではひびわれはさらに細かく分散して発生し上部圧縮縁が圧壊しているが、AsC 梁と同様に全体的になだらかな変形を示している。

高強度コンクリートを用いた DC-H 梁では、2 m/sec 載荷でのひびわれが梁の下縁から上縁に向けて垂直に進展している。また、ひびわれの本数は -L 梁よりも多い。3 m/sec 載荷ではひびわれ本数が大きく増加しているが、すでに角折れの状態となっている。また、載荷点付近のひびわれの内、2 ～ 3 本が斜め方向に進展しているが全体的な傾向としてひびわれは垂直方向に発生している。4 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を示している。ひびわれの進展方向は -L 梁に比べて垂直に立ち上がっている。

AsC-H 梁の 2 m/sec 載荷では、-L 梁同様、DC 梁に比べてひびわれが分散している。発生したひびわれは梁の下縁より上縁に向けて垂直方向に進展している。また、載荷点直下にもひびわれが発生しており、-L 梁と性状が大きく異なっている。3 m/sec 載荷では斜め方向のひびわれが若干増加しているが、-L 梁と比べて角度は緩く、載荷点の方向には進展していない。4 m/sec 載荷では上部圧縮領域が広い範囲で圧壊している。

CsC-H 梁の 2m/sec 載荷では、ひびわれの分散性は -L 梁と大差がないが、DC、AsC 梁に比べて梁下縁から上縁に向けて発生したひびわれの角度は緩く、ひびわれの進展高さも高い。3 m/sec 載荷になると 2 m/sec 載荷よりもひびわれが分散して斜め方向のひびわれも増加するが、これらは載荷点の方向には進展していない。4 m/sec 載荷では下端筋が破断したため梁が大きく角折れして大変形を示した。この際、下端コンクリートが大きく剥落した。この様に補強筋の弾性伸び率や剛性およびコンクリート強度はひびわれ性状に大きな影響を与えていることが分かる。

4. まとめ

補強筋の特性とコンクリート強度が RC 梁の耐衝撃挙動に及ぼす影響を検討するため、24 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載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。
- (2)RC 梁の破壊状況は補強筋の特性によって大きく異なる。異形鉄筋を用いた梁では鉄筋の降伏、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圧縮破壊と下端補強筋の破断によって破壊が生じた。
- (3)コンクリート強度は上、下端筋の応答歪性状に影響を与えているが、その傾向は補強筋の剛性が低い梁で顕著であるが、補強筋の特性よりも影響度合いは少ない。
- (4)コンクリート強度が応答変位分布の経時変化に与える影響は少なく、補強筋の特性の影響が支配的である。
- (5)衝撃力の大きさに関するコンクリート強度の与える影響はわずかであり、補強筋の弾性伸び率が与える影響は極めて顕著である。
- (6)高強度コンクリートを用いた梁では、ひびわれの発生角度が鉛直方向になりやすく圧縮破壊領域が狭くなる。また、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る。

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