

論文

[2185] PC 桁の衝撃変形挙動におよぼす緊張材の特性と配置位置の影響

中島規道\*1・三上 浩\*2・岸 徳光\*3・松岡健一\*4

1. はじめに

近年、各種の連続繊維補強材 (FRP ロッド) をコンクリートの補強材として用いる研究が盛んに行われている。FRP ロッドのヤング係数は鋼材と比較して小さいため、特にプレストレストコンクリートの緊張材の代替として用いられることが多く、一部においては実構造物にも適用されている。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従来の PC 鋼材にない優れた特質を有している。また、高い弾性伸び率を有し、降伏点を有しないことは、衝撃力を受けるコンクリートの補強材として有利な特質であると考えられる。しかし、FRP ロッドを補強材として用いたコンクリート部材の衝撃挙動に関する研究例は著者らの例以外には極めて少ないのが現状である[1],[2]。一方、従来の PC 鋼材を用いた部材の衝撃挙動に関する研究例も少なく、衝撃挙動におよぼすプレストレスの影響はまだ十分には明らかとなっていない。著者らの AFRP ロッドを緊張材に用いた PC 桁の衝撃挙動に関する研究結果から、緊張材の配置位置は PC 桁の衝撃挙動に大きな影響を与え、上下核点に緊張材を配置した桁が総合的にみて最も優れた耐衝撃性を示すことが明らかになっている[2]。

本研究では、各種 PC 桁の衝撃挙動を明らかにするために、アラミド繊維を用いた組紐状 FRP (AFRP) ロッドおよび PC 鋼より線を緊張材に用いた PC 桁を製作して重錘落下衝撃試験を行い、PC 桁の衝撃挙動におよぼすプレストレスの影響についての検討を行なった。衝撃挙動におよぼすプレストレスの影響因子として、緊張材の材質、導入プレストレス量、緊張材の配置位置などが考えられるが、本研究では緊張材の材質のほか、総プレストレス量 (断面中心でのプレストレス応力) を一定として緊張材位置を変化させた実験を行い、各々が PC 桁の耐衝撃挙動に与える影響を検討した。

2. 実験の概要

試験体の一覧を表-1 に示す。同一の緊張材および配置位置を有する試験体を各々 3 体製作した。合計の試験体数は 18 体である。PC 緊張材として用いた材料は、組紐状 AFRP ロッド FA15 および 7 本より PC 鋼線 T15.2B である。緊張材の力学的特性を表-2 に示す。緊張材として AFRP ロッドを用いた F 桁および PC 鋼線を用いた P 桁は、ともにプレテンション方式

表-1 試験体の一覧

試験体名	緊張材の種類	緊張材位置	載荷速度 (m/sec)
F-A-5, 6, 7	AFRP ロッド	A	5, 6, 7
F-B-5, 6, 7	AFRP ロッド	B	5, 6, 7
F-C-5, 6, 7	AFRP ロッド	C	5, 6, 7
P-A-5, 6, 7	PC 鋼より線	A	5, 6, 7
P-B-5, 6, 7	PC 鋼より線	B	5, 6, 7
P-C-5, 6, 7	PC 鋼より線	C	5, 6, 7

で製作した。緊張材位置は、(1) 断面下縁近傍位置に 2 本 (A 配置)、(2) 断面下側核点位置に 2 本 (B 配置)、(3) 断面上下縁近傍位置に 2 本 (C 配置) の 3 種類とした。なお、総プレストレス量はいずれも同一とした。プレストレス応力は断面中央位置で 50 kgf/cm<sup>2</sup> である。コンクリートは 28 日圧縮強度が

\*1 三井建設 (株) 技術研究所 研究員、工修 (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 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)  
 \*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)

770 kgf/cm<sup>2</sup>、ヤング係数は 3.72×10<sup>5</sup> kgf/cm<sup>2</sup>である。  
 なお衝撃荷重実験はコンクリート打設後 110 ~ 116 日目に行った。実験時の材令における圧縮強度は 806 kgf/cm<sup>2</sup>であった。

図-1 に試験体の形状寸法と緊張材の配置位置および変位計の位置を示す。なお、PC 桁の張り出し部の長さは衝撃による張り出し部の慣性力の影響を少なくし、かつ緊張材の定着長を十分に確保するため 25 cm とした。また、衝撃による桁側面でのコンクリートの剝落を少なくするために、各試験体にはスターラップ (異形鉄筋、径 6 mm) を 100 mm ピッチで配置した。衝撃荷重は外径 15 cm、重量 200 kgf の円柱状の鋼製重錘を所定の高さにセットした後、桁中央部に自由落下させて載荷した。重錘には衝突時の加速度を測定するために容量 1,000 G の歪ゲージ型加速度変換器を両側に 2 個取り付けた。桁は試験体両端面から 25 cm の位置で、リバウンドを防止するために鋼製の治具を用いてその上下部を固定している。治具全体は桁の回転を許容し、ピン支持の条件に近いものとしている。なお、支点部には衝撃荷重測定用に開発されたロードセルを設置してその反力を測定した。さらに、桁の中央から 10 cm 間隔で非接触型の変位計 (容量 80 mm) を設置して桁の応答変位を測定した。また、衝撃実験終了後にはひびわれの発生状況を観察した。載荷荷重は重錘が桁に衝突する直前の速度を載荷速度として、V = 5 m/sec、6 m/sec および 7 m/sec の 3 ケースを考え各試験体に 1 回のみ載荷した。

表-2 緊張材の力学的特性

緊張材名称	AFRP ロッド FA15	PC鋼より線 T15.2B
材 質	アラミド繊維	SWPR7B
公称直径 (mm)	14.7	15.2
公称断面積 (mm <sup>2</sup> )	170.0	138.7
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.30	7.85
引張耐力 (tonf)	24.0	26.6
降伏耐力 (tonf)	—	22.6
ヤング係数 (×10 <sup>6</sup> kgf/cm <sup>2</sup> )	0.70	2.0
弾性伸び率 (%)	2.00	0.15~0.20

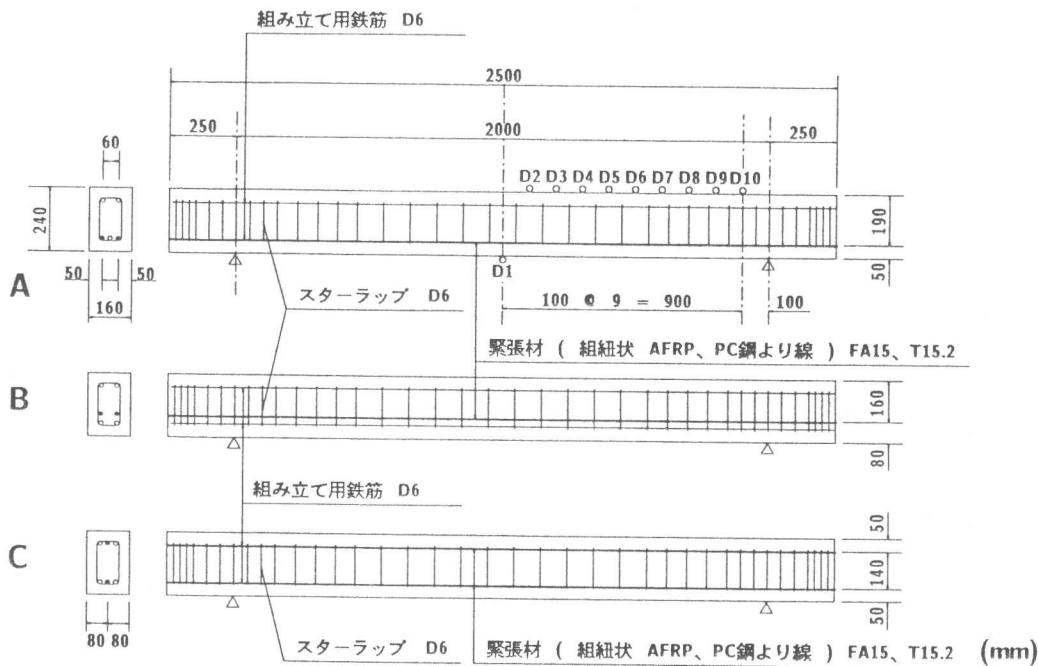


図-1 試験体の形状寸法と緊張材の位置および変位計の位置

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 応答変位波形

載荷速度が V = 7 m/sec における各試験体中央 (測点 D1) の応答変位波形を図-2 に示す。経時変化

は A/D 変換の開始時刻を起点として示した。  
F 桁における下向き応答変位 (+ 変位) を 3 タイプで比較すると、C タイプが最も応答変位量が大きく、 $C > B > A$  となっていることが分かる。

応答変位挙動は各タイプともに下向き変位からリバウンドによる上向き変位に移行している。上向き変位量は下向き変位とは逆に A タイプが最も大きく、 $A > B > C$  となっている。特に A タイプでは下向き最大変位量の 70 % 程度の値を示しており、リバウンド現象が著しいことが分かる。これらは緊張材の配置位置の違いおよびそれともなう断面下縁の導入プレストレス量が異なるためと考えられる。また、主波動の

正弦半波 ( 载荷初期から次の変位 0 まで ) の継続時間は、A タイプが最も短く  $A < B < C$  となっている。すなわち、緊張材の配置位置は主波動の継続時間にも影響を与えていることが分かる。

一方、P 桁の各配置位置における下向き変位および上向き変位の大小関係は F 桁と同様であった。しかしながら、いずれの P 桁も同一緊張材配置の F 桁に比べて最大応答変位量が小さい。これは P 桁の緊張材の剛性が大きいためと考えられる。また、衝撃初期の応答変位の継続時間は P 桁の方が F 桁に比べて短い。

自由振動に移行した後の残留変位に着目すると、P 桁の A タイプでは上向きに変位が残留し、B および C タイプでは下向きに変位が残留している。特に C タイプでは上向きの変位が発生せず、下向きの変位のみで応答している。また、A タイプでは下向き変位から上向き変位に移行した後変位が残留し、自由振動をほとんど示していない。このような変位の残留傾向は F 桁においても同様に認められるが、いずれの F 桁もその残留変位量は P 桁に比べて小さい。すなわち、残留変位の方向は緊張材の配置位置の影響を大きく受け、残留変位の大きさは緊張材の剛性に影響されることが分かる。残留変位を小さくするという観点から考えると、いずれの配置位置においても P 桁よりも F 桁の方が望ましいと言える。

### 3.2 応答変位分布の経時変化

図-3 に载荷速度  $V =$

7 m/sec における各試験体の応答変位分布の経時変化を示す。経時変化は重錘加速度の立ち上がり時間を起点として示している。F-A 桁の応答変位分布は軸方向に緩やかな曲線状を示し、桁全長にわたって連続的な変形性状を示している。B タイプの桁は A タイプに比べて比較的直線的な分布と

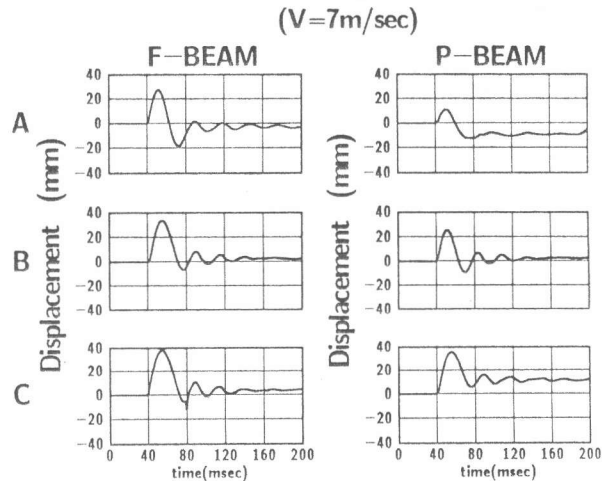


図-2 測点 D1 の応答変位波形

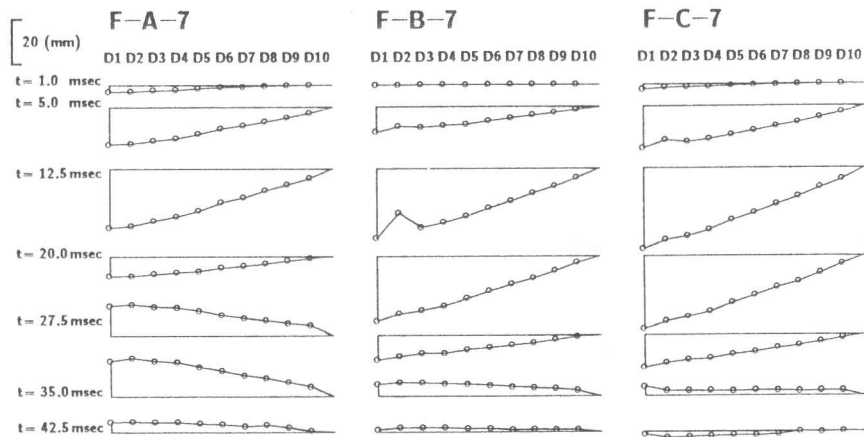


図-3(a) F 桁の応答変位分布の経時変化

なっている。C タイプの分布形状は B タイプよりもさらに直線的となっている。これより、C タイプでは桁中央部において角折れ状態になっていることが予想される。これらの配置位置の違いによる変位分布の差異は、後述するひびわれ発生状況と密接に関連していると思われ、ひびわれの集中あるいは分散の程度および荷点付近に発生し

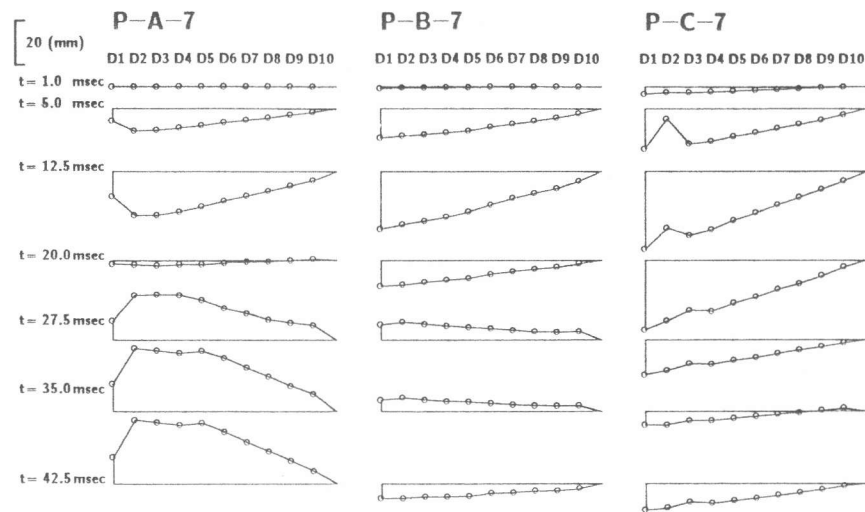


図-3(b) P 桁の応答変位分布の経時変化

たひびわれの方向や進展高さの影響などを受けていると考えられる。A タイプは 27.5 msec 経過時点で桁全体が大きくリバウンドしている。一方、B および C タイプは 35 msec 経過時点でリバウンド変位が発生し、変位量は A タイプに比べてかなり少ないことが分かる。

P 桁も F 桁と類似した変位分布の経時変化を示しているが、A タイプの中央における変位は隣接する測点に比べて小さな値を示している。A タイプは 27.5 msec 経過時点で大きなリバウンド変位を示しているがこの傾向は B タイプにも現れている。しかし、C タイプではリバウンドの傾向は見られず、P 桁は F 桁よりも緊張材の配置の影響が顕著に出現していることが分かる。

### 3.3 荷速度と重錘衝撃力および支点反力の関係

重錘落下衝撃試験では衝撃力の評価が重要な問題である。本実験においては直接的な方法として重錘の加速度より求めた重錘衝撃力と、間接的な方法としての支点反力の 2 つの方法により評価した。なお、支点反力は左右のロードセルで得られた反力を加算したものである。

図-4 に荷速度と重錘衝撃力および支点反力の関係を示す。なお、重錘衝撃力は重錘の最大加速度 (2 測点の平均) に重錘重量を乗じて求めた。F 桁の支点反力は緊張材の配置位置に関わらず 10 ~ 15 tf 程度であり、荷速度が増加しても支点反力は顕著には増加していない。一方、重錘衝撃力は荷速度

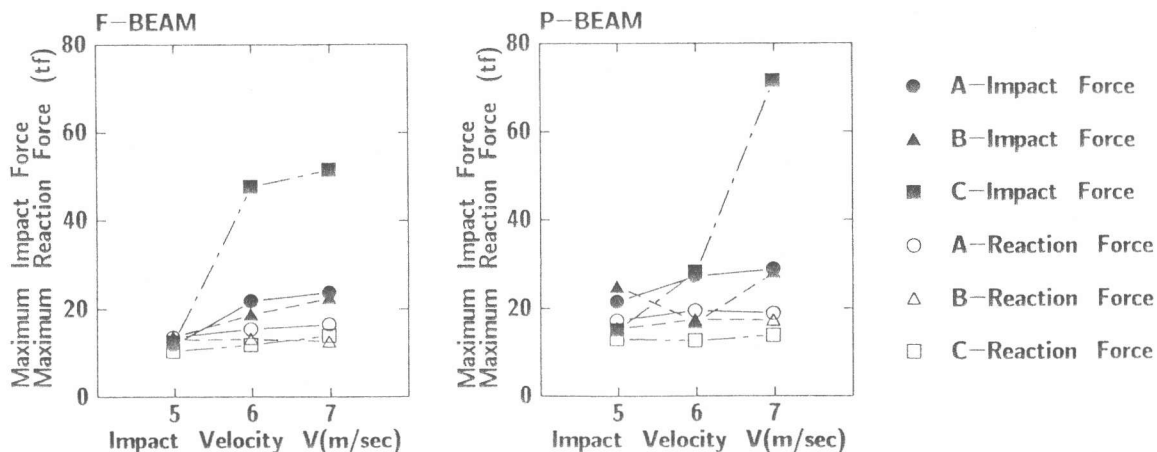


図-4 荷速度と重錘衝撃力および支点反力の関係

$V = 5 \text{ m/sec}$  では支点反力とほぼ等しいが、载荷速度の増加にともない明瞭に増加している。特に C タイプは増加が著しく、50 tf 以上の値を示している。

P 桁の支点反力は F 桁と同様に载荷速度による影響が少なく、ほぼ 13 ~ 18 tf 程度となっている。また、緊張材の配置位置による差異も F 桁と同様に顕著ではない。一方、重錘衝撃力は支点反力よりも全体的に大きな値を示し、F 桁と同様に C タイプの衝撃力が 7 m/sec 载荷で極めて大きな値を示している。緊張材の剛性に着目すると、重錘衝撃力および支点反力ともに剛性の小さい AFRP ロッドを用いた F 桁の方が P 桁よりも小さい。

### 3.4 ひびわれ発生状況

全試験体のひびわれ発生状況を図-5 に示す。载荷速度が  $V = 5 \text{ m/sec}$  では、いずれの試験体にも大きな損傷は見られない。F-A 桁は F 桁の中で最もひびわれの分散性が良いが、リバウンドによる桁上部のひびわれや上下に貫通しているひびわれも多い。B タイプは C タイプに比べてひびわれが载荷点直下近傍に集中し、かつ C タイプには見られない支点付近のひびわれも顕著に認められる。P-B 桁は桁上部から進展するひびわれの本数が F-B 桁に比べて多く、载荷点直下の片側で斜めひびわれが認められる。また、P 桁は F 桁に比べて全般的にひびわれの分散性が高く、緊張材の付着性状および剛性の影響を受けて

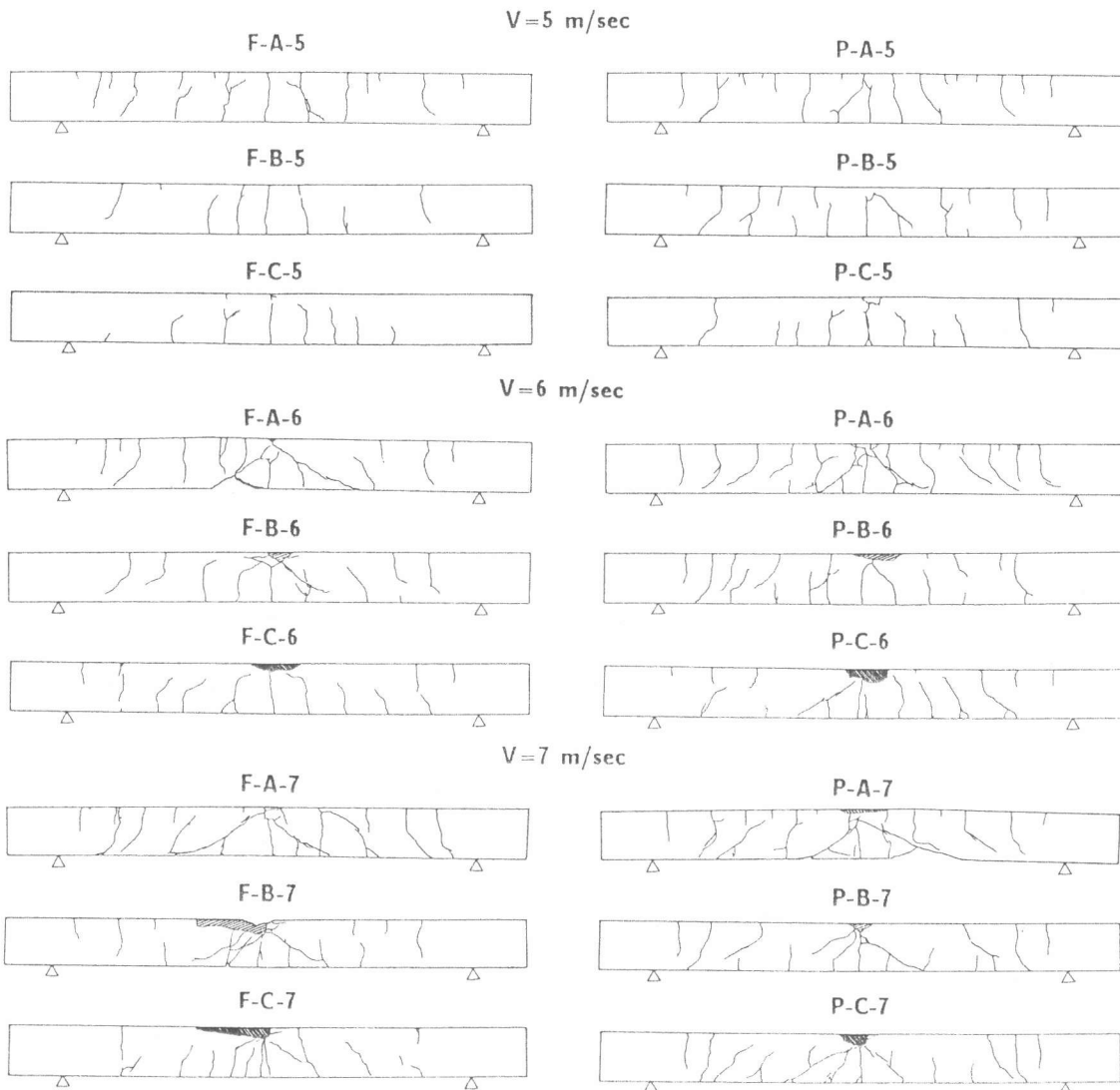


図-5 ひびわれ発生状況

いるものと考えられる。この傾向は、 $V = 6 \text{ m/sec}$  および  $7 \text{ m/sec}$  載荷においても同様に見られる。

載荷速度が  $V = 6 \text{ m/sec}$  では、F 桁および P 桁ともに A タイプで載荷点直下近傍に斜めひびわれが明瞭に発生している。特に F 桁については緊張材に沿ってコンクリートの剝離が生じているが、これは他のタイプに比べて緊張材のかぶり小さいことや大きな緊張力が導入されていることなどに関連するものと考えられる。F-B と P-C 桁では、桁中央の片側に斜めひびわれが発生しているが、全体的には上下に進展するひびわれが支配的である。また、F-C と P-C 桁では上部コンクリートの損傷が他に比べて顕著であり、斜めひびわれは A タイプに比べて顕著ではない。これは、断面下縁のプレストレス応力および緊張材量が C タイプで最も少ないことに関連しているものと考えられる。

載荷速度  $V = 7 \text{ m/sec}$  においては、いずれの桁においても斜めひびわれが明瞭に認められる。斜めひびわれの発生角度は緊張材の配置方法によって異なり、A タイプが最も緩やかな角度であり、A、B、C の順序で発生角度が鉛直に近くなることが分かる。

以上を要約すると、斜めひびわれは載荷速度が大きいほど発生しやすく、緊張材の配置方法としては B および C タイプよりも A タイプで発生しやすい。また緊張材の材質では、F 桁よりも P 桁において発生しやすいようである。斜めひびわれの発生と桁の破壊は密接に関連していると考えられ、耐衝撃性の観点からは、斜めひびわれが発生しにくい配置方法および緊張材を選定すべきであると考えられる。この観点から、配置方法としては上下 2 段の核点に配置した C タイプ、緊張材としては AFRP ロッドを使用した F 桁が優れているものと考えられる。

#### 4. まとめ

PC 桁の重錘落下衝撃試験を行い、耐衝撃性状におよぼす緊張材の材質および配置位置の影響を検討した。本実験の範囲内で得られた結果を要約すると、

- (1) いずれの緊張材を用いても、下向き最大の応答変位量は上下の核点に緊張材を配置した C タイプで最も大きく、 $C > B > A$  である。一方、リバウンドによる上向きの最大応答変位量は断面下縁近傍に緊張材を配置した A 桁で最も大きく、下向き変位とは逆に  $A > B > C$  である。
- (2) 最大応答変位量は剛性の小さい AFRP ロッドを緊張材に用いた桁が PC 鋼より線を用いた桁よりも大きい。一方、載荷初期における応答変位波形の主波動の継続時間は AFRP ロッドを用いた桁の方が長い。
- (3) 残留変位の方向は緊張材の配置位置の影響を受け、その傾向は剛性の高い緊張材を用いた場合に顕著であり、残留変位は剛性が高いほど大きい。
- (4) 断面下縁近傍に緊張材を配置した A タイプの桁は、リバウンドによる上面からのひびわれが多く、また、低い載荷速度から載荷点直下近傍に斜めひびわれが発生しやすい。
- (5) 斜めひびわれの発生角度は A が最も緩く、C が最も鉛直に近い。
- (6) 重錘衝撃力および支点反力の大きさは緊張材の剛性を受け、緊張材の剛性が低いほど小さい。
- (7) PC 桁の耐衝撃性の観点から総合的に判断すると、緊張材の配置位置としては断面の上下核点が優れ、緊張材の特性は剛性が低く弾性伸び量の大きなものが優れていると考えられる。

#### 参考文献

- [1] 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 桁の耐衝撃挙動、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15、No.2、pp.923-928、1993
- [2] 田村富雄、三上浩、岸徳光、松岡健一：AFRP ロッドを緊張材に用いた PC 桁の衝撃挙動に及ぼす緊張材位置の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15、No.2、pp.929-934、1993