

論文

[2183] AFRP ロッドで補強した実大桁の耐衝撃挙動に関する実験的研究

三上 浩^{*1}・佐藤昌志^{*2}・岸 徳光^{*3}・田村富雄^{*4}

1. はじめに

最近、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に適用するための研究が盛んに行われている。また、一部では実構造物にも適用され始めている。FRP ロッドの特徴として軽量、高引張強度、耐蝕性に優れていることなどがあげられるが、比較的高価なため非常磁性などの特徴を合わせて付加価値の高い構造物に適用されていくものと考えられる。

著者らは FRP ロッドが高引張強度かつ高い弾性伸び率を有し、鋼材の有する降伏現象がないことに着目して、耐衝撃用途のコンクリート構造物への適用を想定して室内実験を中心として研究を行ってきた。その結果、RC 梁の耐衝撃挙動には補強筋の降伏現象の有無や弾性伸び率の大小、補強筋の (ヤング係数に断面積を乗じた) 剛性、単筋または複筋配置などの配筋方法、補強筋比などが影響を与えることが分かった。一方、PC 梁の耐衝撃挙動には緊張材の剛性、配置位置が影響を与え、特に緊張材の配置位置の影響が大きいことが分かった[1],[2]。

しかし、室内実験では試験体の寸法に制約があり、作用衝撃荷重も小さなものに限定されるため、より現実的な試験体寸法および荷重のもとでの衝撃実験が重要となる。そこで、本研究では落石防護用に設計された PC 覆工の主桁と同一の断面寸法を有するコンクリート桁を4体製作し、桁中央に重量5tfの重錘を自由落下させて衝撃挙動を検討した。本研究では特に緊張材の材質および特性 (PC 鋼棒あるいは AFRP ロッド)、AFRP ロッドを補強材に用いた際のプレストレスの有無、衝撃力の載荷方法 (単調増加繰返し衝撃載荷あるいは単一衝撃荷重載荷) が実大コンクリート桁の耐衝撃挙動に与える影響に着目して検討を行った。

2. 実験の概要

実験に用いた実大のコンクリート桁は表-1に示す4体である。用いた補強材は AFRP ロッドと PC 鋼棒の2種類で、AFRP ロッドを用いた桁にはプレストレスを導入した PF-10 桁と導入していない RF- 桁がある。RF- 桁は2体製作し、一方の桁では繰返し載荷、他方では単一載荷を行った。

表-1 試験体の一覧

試験体名	補強材の種類	プレストレスの有無	重錘落下高さ (m)
RF-R	AFRP ロッド	無	1, 2, 3, 5, 10
RF-10	AFRP ロッド	無	10
PF-10	AFRP ロッド	有	10
PS-10	PC 鋼棒	有	10

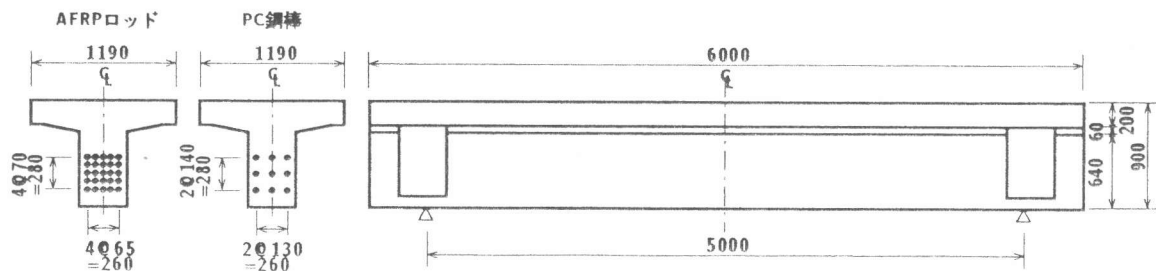
表-2に補強材の力学的特性を示す。PS-10 桁のプレストレスの導入に用いた PC 鋼材は SBPR 930/1080 $\phi 26$ の PC 鋼棒であり、ポストテンション方式でプレストレスを導入した後グラウトを施している。一方、PF-10 桁は組紐状 AFRP ロッド FA15 を 25 本用いてプレテンション方式でプレストレスを導入して製作した。PS-10、PF-10 桁のプレストレスは各々緊張材の有効引張応力を 53.76 kgf/mm^2 、

*1 三井建設 (株) 技術研究所 主任研究員、工博 (正会員)

*2 北海道開発局開発土木研究所 構造研究室長 (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 三井建設 (株) 技術研究所 副所長 (正会員)



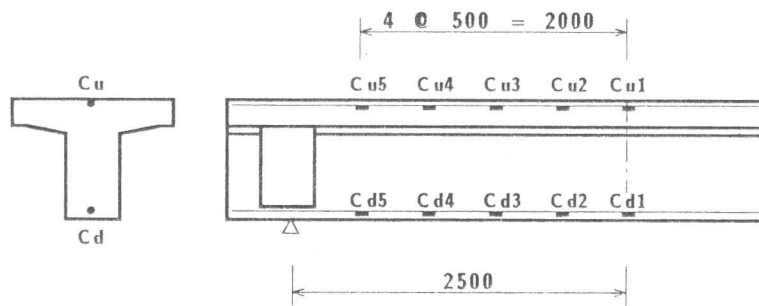
図－1 (a) 桁の形状寸法および補強材の配置

60.45 kgf/mm²として導入している。
その結果、桁上縁で 17.4 kgf/cm² の引張応力、下縁で 153.1 kgf/cm² の圧縮応力となる。また、RF- 桁は PF-10 桁と同位置に同本数のロッドを配置して製作した。

衝撃荷重の載荷は、桁上に 1 m 厚さの EPS (発泡スチロール) を設置して、重錘とコンクリート桁がハー

ドに衝突することを避け、5 tf の重錘をトラッククレーンにより所定の高さにセットした後自由落下させて行った。なお、重錘の外径は 100 cm、高さは 97 cm で底部は球状である。RF-R 桁では落下高さを 1、2、3、5、10 m と増加させて繰返し載荷を行ったが、他の 3 体では 10 m 落下の 1 回のみの載荷とした。

測定項目は、RF-R 桁を除いた 3 体に対しては重錘の加速度応答のみとし、RF-R 桁に対しては桁の上端、下端鉄筋の歪応答も測定した。また、実験終了後にはひびわれ性状の観測を行った。図－1 (a) にコンクリート桁の形状寸法および補強材の配置位置を示す。また、図－1 (b) に歪の測定位置を示す。なお、コンクリートの設計基準強度は 750 kgf/cm² で、実験時の材令における圧縮強度は 777 kgf/cm²、弾性係数は 3.8×10^5 kgf/cm² であった。



図－1 (b) 歪の測定位置

表－2 補強材の力学的特性

補強材名	AFRP ロッド FA15	PC 鋼棒 B 種 1 号 φ26
材質	アラミド繊維	SBPR 930/1080
公称直径 (mm)	14.7	26.0
公称断面積 (mm ²)	170.0	531.0
引張耐力 (tf)	24.0	58.5
降伏耐力 (tf)	—	50.4
弾性係数 ($\times 10^5$ kgf/cm ²)	0.70	2.0
弾性伸び率 (%)	2.0	0.2

3. 実験結果と考察

3.1 重錘衝撃力波形

図－2 に全試験体の 10 m 落下における重錘衝撃力波形を示した。重錘衝撃力は重錘の最大加速度 (2 測点の平均) に重錘質量を乗じて求めた。なお、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。載荷初期には全試験体で時間経過とともに衝撃力がわずかではあるが増加している。これは桁上部に設置した EPS を重錘が通過するまでの重錘衝撃力と時間の関係を示しているものと考えられる。この後衝撃力は急増するが、この立ち上がりの勾配は PF-10、PS-10 のプレストレスを導入した桁において他の桁よりも大きく示されている。これは、プレストレスの導入により桁の変形が抑制され、桁の見かけ上の曲げ

剛性が RF- 桁よりも大きくなったためと考えられる。

衝撃力が急増する時点から完全に除荷される（衝撃力が零に戻る時点）までの経過時間を 4 体で比較すると、RF- 桁はともに 60 ～ 70 msec 程度であるのに対して、PF、PS 桁では 40 ～ 50 msec 程度であり、プレストレスを導入した桁の方が経過時間が短いことが分かる。一方、PF と PS 桁はとも

に類似した衝撃力波形を示しており、衝撃力波形の性状に与える緊張材の材質の影響はプレストレスの有無の影響に比べて顕著ではないことが分かる。繰返し載荷を行った RF-R 桁の衝撃力は RF-10 桁と同程度である。しかしながら、衝撃力波形の立ち上がりは RF-R 桁の方が急であり、載荷方法は衝撃力の大きさよりも波形性状に影響を与えていることが分かる。

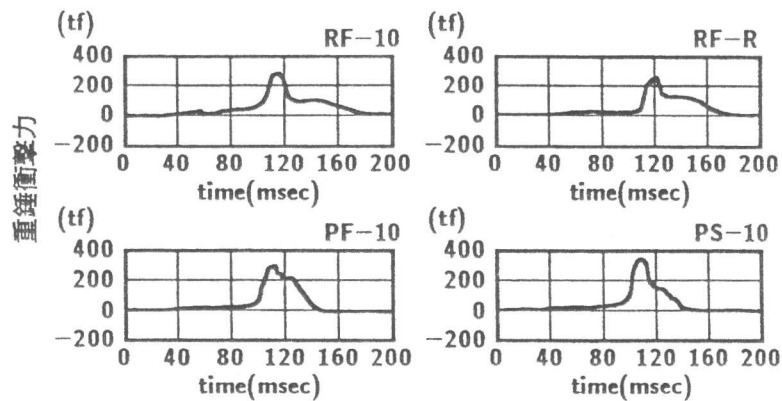


図-2 重錘衝撃力波形 (H = 10 m)

3.2 重錘衝撃力

図-3 に落下高さと重錘衝撃力の関係を示している。図より、繰返し載荷を行った RF-R 桁の重錘衝撃力はほぼ落下高さに比例して増大していることが分かる。10 m 落下の衝撃力は約 262 tf であり、1 m 落下の約 24 tf に対して 10.9 倍程度の値となっている。この重錘衝撃力の増加割合は位置エネルギーのそれ（10 倍）にほぼ対応していることがわかる。

一方、単一載荷を行った試験体のうち最も重錘衝撃力が大きいのは PC 鋼棒を用いた PS 桁で、次が

AFRP ロッドを PC 緊張材に用いた PF 桁、最も少ないのが AFRP ロッドを補強筋に用いた RF-10 桁である。すなわち、プレストレスを導入した桁の方が導入しない桁よりも、またプレストレスを導入した桁間では緊張材の剛性の高い桁の方が低い桁よりも重錘衝撃力が大きくなる傾向にある。これはプレストレスの導入および緊張材の剛性が高いことにより、桁の変形が抑制され見かけ上桁の曲げ剛性が大きくなったためと考えられる。プレストレスの有無に対応する重錘衝撃力の差は 12 tf 程度である。また、緊張材の剛性の違いに対応するそれは 47 tf 程度であることより、緊張材の剛性の大小の重錘衝撃力に与える影響はプレストレスの有無に比べ大きいものと考えられる。しかしながら、衝撃力の大きさが 290 ～ 350 tf 程度であることより、衝撃力の絶対値に対してこれらの差は顕著ではない。

次に、重錘衝撃力に与える載荷方法の影響について検討する。繰返し載荷を行った桁の重錘衝撃力は単一載荷した桁の衝撃力に比べて多少小さいものの、載荷方法は重錘衝撃力に顕著な影響を与えていないことが分かる。

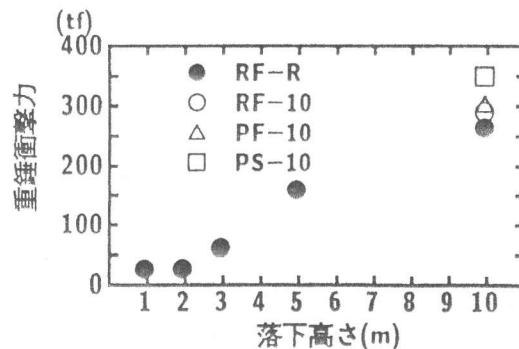


図-3 落下高さと重錘衝撃力の関係

3.3 上、下端鉄筋の応答歪波形

図-4 に、落下高さが 5 m までの RF-R 桁の上、下端鉄筋の応答歪波形を桁中央および測点 3 について

示した。なお、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。

これより、2 m 落下までの上、下端鉄筋の応答歪性状は発生する歪量に大小はあるものの、圧縮、引張ではほぼ対称となっていることが分かる。下端鉄筋に発生する歪量は 2 m 落下までは $100\ \mu$ 以下であり、载荷初期の零歪から次の零歪までの経過時間は 300 msec 程度である。一方、上端筋の歪量も $70\ \mu$ 以下と小さく、主波動の継続時間も 300 msec 程度であり、2 m 落下までは桁の衝撃応答性状はほぼ弾性的であることが分かる。

3 m 落下における下端筋の歪量は 2 m 落下の 10 倍以上と大きく、桁中央では歪が顕著に残留している。波形の性状も 2 m 落下と大きく異なり、波動の立ち上がりから

約 160 msec 経過後に急激に歪が増加して明瞭なピークを示している。一方、上端筋も下端筋と同様に波動の立ち上がりより約 160 msec 経過後に歪が急増し、その後約 20 msec 経過後に明瞭なピークを示しているが歪は残留していない。5 m 落下での下端筋の歪は大歪となり測定不良であったが、上端筋の波形性状は 3 m 落下と比較的類似している。ただし、主波動のピークは立ち上がりより約 120 msec 経過時点で生じており、3 m 落下時よりも 40 msec ほど短い。また、歪量は 3 m 落下と比較して 3 倍程度に増加している。

このような実験結果より、桁は落下高さに対応して次のような 2 段階の耐荷機構によって衝撃力に抵抗しているものと考えられる。すなわち、① 最初の状態は 2 m 落下までに見られるほぼ弾性的な状態、② 3 m および 5 m 落下時の引張側コンクリートにひびわれが多数発生進展して、AFRP ロッドに大きな引張力が作用している状態、である。

3.4 曲げモーメント分布の経時変化

図-5 に RF-R 桁の 2 m および 3 m 落下における曲げモーメント分布の経時変化を示した。曲げモーメントは上、下端鉄筋の実測歪を基に桁の平面保持を仮定し、内力が釣り合うように引張側コンクリートの応力負担を考慮して算定した。なお、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。

2 m 落下では衝撃荷重載荷後、162 msec 経過時点で最大曲げモーメントを示している。モーメントの分布は下向きにゆるやかな凸状を呈している。以後モーメントは徐々に減少し、350~400 msec 経過時点ではほぼ 0 に復元している。2 m 落下における最大曲げモーメントは 32.4 tfm である。この値は、桁中央に静的に 25.9 tf 程度の力を作用させた場合に相当する。すなわち、5 tf の重錘の 2 m 落下は、静的に

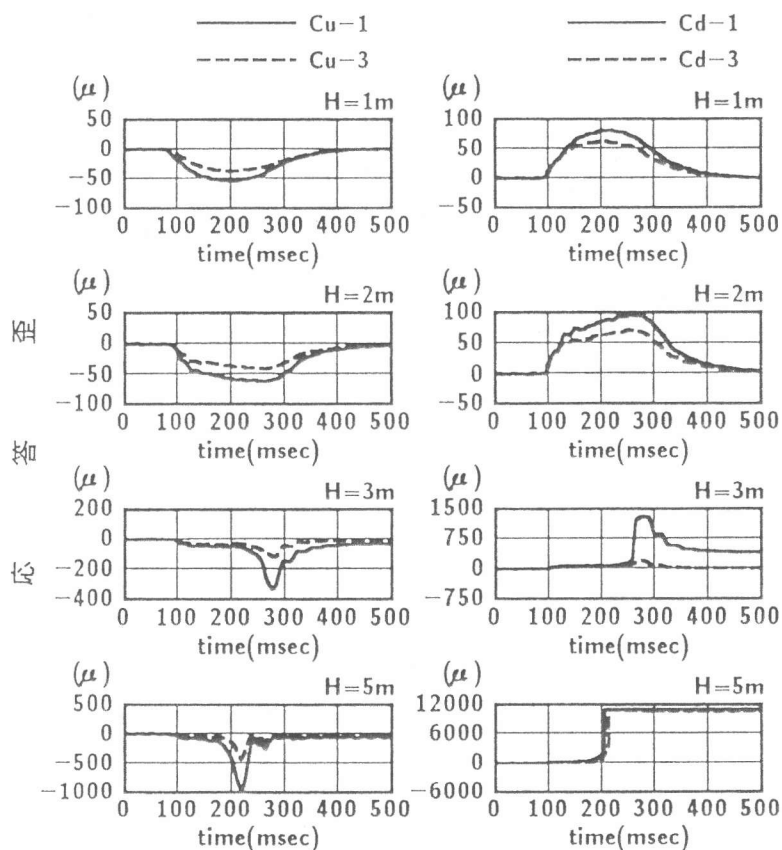


図-4 RF-R 桁の上、下端鉄筋の応答歪波形

25.9 tfの力が桁中央に作用した時と同等の曲げモーメントを励起させていることになる。なお、この値は重錘衝撃力の測定値である 25.1 tf と比較的精度良く対応している。

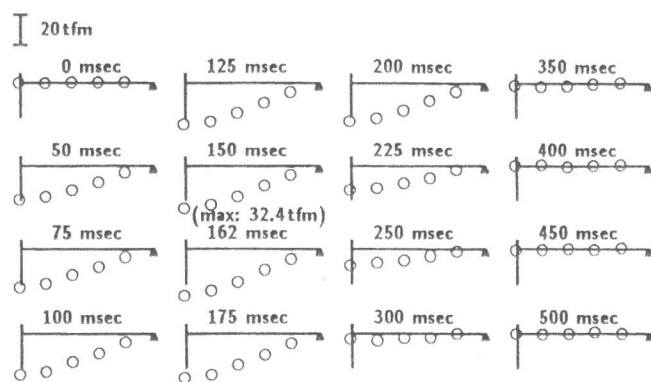
一方、3 m 落下の場合には衝撃荷重載荷初期より 150 msec までは時間的に小さな増加率となっているが、その後急激に大きな増加率となり 184 msec で最大値となっている。曲げモーメントの分布形状は 2 m 落下と異なり、支点から載荷点まで直線的である。以後、曲げモーメントは徐々に減少し、300 ～ 350 msec 経過時点ではほぼ零に復元している。なお、最大曲げモーメントは 102 tfm 程度であり、2 m 落下の約 3.1 倍と大きくなっている。これは、図—3 の 3 m 落下における衝撃力が 2 m 落下に比べて顕著に増加していることに対応している。一方、この最大曲げモーメントは、桁中央に静的に約 82 tf の力が作用した場合のモーメントに相当する。なお、こ

この値は重錘衝撃力の測定値 60 tf に比較して 22 tf 程度大きい。この様な曲げモーメントの分布傾向や大きさの変化からも、2 m と 3 m 落下で桁の衝撃抵抗機構が大きく変化したことが分かる。

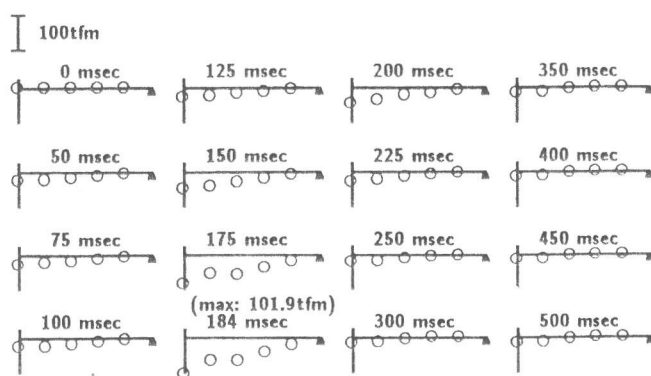
3.5 ひびわれ性状

図—6 に実験終了後の実大桁の表面および裏面のひびわれ性状を示す。プレストレスの有無がひびわれ性状に与える影響を RF-10 と PF-10、緊張材の特性の影響を PF-10 と PS-10、載荷方法の影響を RF-R と RF-10 の比較によりそれぞれ検討する。まず、RF-10 と PF-10 よりプレストレスの有無の影響を検討する。RF 桁の方がひびわれの軸方向分布範囲が広くかつ分散性も良好である。また、水平方向に進展するひびわれは RF 桁の方が PF 桁より顕著である。上部圧縮縁の損傷は RF 桁の方が PF 桁よりも顕著であり、圧縮縁の損傷を少なくするためにはプレストレスを導入した方が良いことが分かる。RF 桁に発生するひびわれは載荷点直下近傍では鉛直方向に、載荷点より離れた位置では曲げせん断型に発生している。一方、PF 桁に発生したひびわれは極めて直線的であり、発生した斜めひびわれの角度は RF 桁に比べて緩くなっている。

次に PF-10 と PS-10 より緊張材の特性の影響を検討する。PS-10 の方がひびわれ本数が少なく、かつ載荷点部分（桁の中央寄り）にひびわれが集中している。しかし、上部圧縮縁の損傷は PS-10 の方が軽微である。PS-10 のひびわれは全般的に直線的であり、この傾向は PF-10 よりも顕著である。すなわち、PS-10 の場合は曲げせん断型のひびわれよりも明瞭に斜めひびわれが卓越しており、その上部圧縮縁の損傷範囲が狭くなっていることと符合する。この傾向は緊張材の剛性が大きいほど、プレストレスが導入さ



(a) 2 m 落下



(b) 3 m 落下

図—5 曲げモーメント分布の経時変化

れた桁ほど顕著であり、見かけ上桁の曲げ剛性が大きいほどこの傾向を示しやすいものと考えられる。

次に載荷方法の影響について検討する。上部圧縮縁の損傷領域の広がりやひびわれの本数、分散性、水平方向に発生するひびわれ本数の大小、曲げせん断型のひびわれが発生する点など AFRP ロッドを用いた桁では、繰返し載荷と単一載荷で顕著なひびわれ性状の差異は認められない。

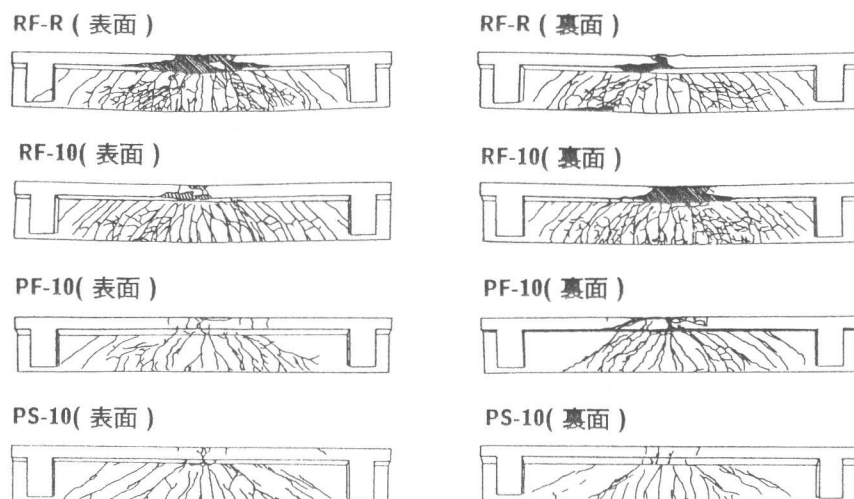


図-6 表面および裏面のひびわれ性状

4. まとめ

- PC 覆工の主桁と同一の断面寸法を有する大型のコンクリート桁を 4 体製作し、桁中央に 5 tf の重錘を最大 10 m の高さから落下させて衝撃挙動を検討した。本実験の範囲内で得られた結果を要約すると、
- (1) PC 桁では RC 桁に比べて重錘衝撃力波形の立ち上がりが急で、主波動の継続時間も短い。また、緊張材の材質が重錘衝撃力波形の性状に与える影響は顕著ではないが、載荷方法の影響は顕著である。
 - (2) AFRP ロッドで補強し、繰返し載荷を行った桁の重錘衝撃力は、ほぼ落下高さに比例して増大し、衝撃力は位置エネルギーの変化に対応している。繰返し載荷を行った桁の重錘衝撃力は単一載荷した桁と同程度であり、単一載荷した PC 桁の中では緊張材の剛性の高い桁が重錘衝撃力が大きい。
 - (3) AFRP ロッドを補強筋に用いた桁の繰返し載荷における上、下端鉄筋の応答歪性状および曲げモーメントの分布傾向は重錘の落下高さによって大きく変化する。これは桁の状態が繰返し載荷により、ほぼ弾性状態からひびわれの顕著な発生およびひびわれの進展する状態へ推移したためと考えられる。
 - (4) PC 桁や緊張材の剛性の高い桁では RC 桁に比べて斜めひびわれが顕著であり、その角度は緩やかでより水平に近い。一方、RC 桁では曲げせん断型のひびわれが明瞭に発生し、上部圧縮縁が損傷を受けやすい。

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の松岡健一教授並びに大学院生の佐竹利治君と松坂祐介君に多大なるご支援を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

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 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
- [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 梁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