

I-22

AFRP ロッドで補強した実大桁の耐衝撃挙動

三井建設(株) 正 員 三 上 浩
 北海道開発局 正 員 佐 藤 昌 志
 室蘭工業大学 正 員 岸 徳 光
 三井建設(株) 正 員 田 村 富 雄

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帯磁性などの特徴を合わせて付加価値の高い構造物に今後も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、補強筋の剛性、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、梁中央に重量 5 tf の重錘を自由落下させて衝撃挙動を検討した。特に本研究では AFRP ロッドを補強材に用いた際のプレストレスの有無、緊張材の材質および特性、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。用いた補強材の種類は 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、他方では単一衝撃荷重載荷を行った。

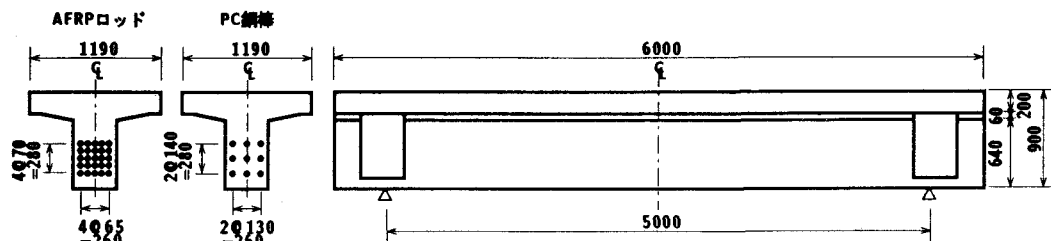
表-2 に補強材の力学的特性を示す。PS-10 桁のプレストレスの導入に用いた PC 鋼材は SBPR 930/1080 $\phi 26$ の PC 鋼棒であり、ポストテンション方式でプレストレスを導入した。一方、PF-10 桁は組紐状 AFRP ロッド FA15 を 25 本用いてプレテンション方式でプレストレスを導入した。PF-10、PS-10 桁のプレストレスは各々緊張材の有効引張応力を 53.76 kgf/mm^2 、 60.45 kgf/mm^2 として導入している。その結果、桁上縁で 17.4 kgf/cm^2 の引張応力、下縁で 153.1 kgf/cm^2 の圧縮応力となる。

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 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 $\phi 26$
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 ($\times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$)	0.70	2.0
弾性伸び率 (%)	2.0	0.2



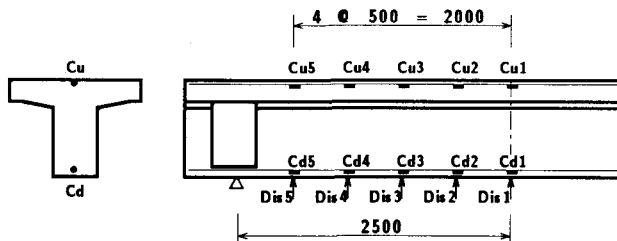
図－1 (a) 桁の形状寸法および補強材の配置

また、RF- 桁は PF 桁と同位置に同本数の AFRP ロッドを配置して製作した。

衝撃荷重の載荷は桁上に 100 cm 厚さの EPS (発泡スチロール) を設置し、鋼製の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。RF-R 桁は落下高さを 1、

2、3、5、10 m と増加させて繰返し載荷したが、他の 3 つの桁は 10 m 落下の 1 回のみの載荷とした。

本実験での測定項目は、RF-R 桁を除いた 3 桁は変位応答および重錘の加速度応答で RF-R 桁は桁の上端、下端鉄筋の歪応答も測定した。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) に変位および歪の測定位置を示す。なお、用いたコンクリートの圧縮強度は 777 kgf/cm^2 、弾性係数は $3.8 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ であった。



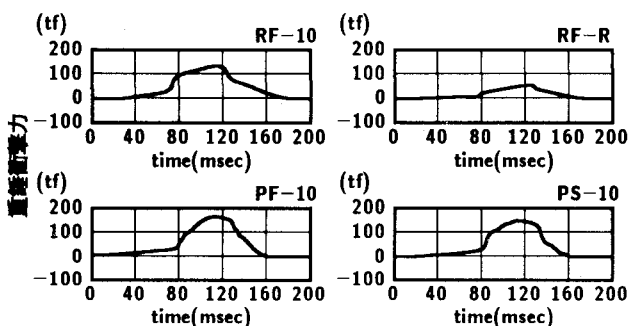
図－1 (b) 変位および歪の測定位置

3. 実験結果と考察

3. 1 重錘衝撃力波形

図－2 に 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に重錘重量を乗じて求めた。載荷初期には時間経過とともにわずかではあるが衝撃力が増加している。この傾向は 4 体に共通であり、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すものと考えられる。

この後、衝撃力は急増するが増加傾向が顕著な桁は PF-10、PS-10 のプレストレスを導入した桁である。これは、プレストレスの導入により PC 桁の見かけ上の曲げ剛性が RC 桁より大きく、PC 桁の変形が抑制されたためと考えられる。衝撃力が急増する時点から 0 に戻るまでの経過時間を 4 体で比較すると、RF- 桁はともに 100 msec 程度であるのに対して、PF、PS 桁では 80 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 桁は、RF-10 桁に比べて衝撃力が小さ



図－2 重錘衝撃力波形 (H = 10 m)

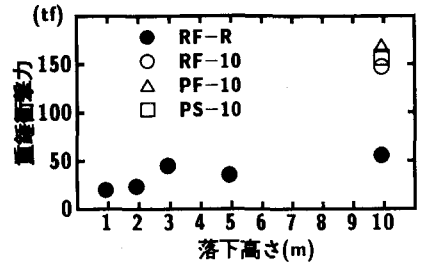
いものの比較的類似した衝撃力波形を示しており、載荷方法は衝撃力波形の性状よりも衝撃力の大きさに顕著な影響を与えていることが分かる。

3. 2 重錘衝撃力

図一3に落下高さと重錘衝撃力の関係を示す。繰返し載荷を行った RF-R 桁では、落下高さが 3 m までは重錘衝撃力が増大したが 5 m 落下では 3 m 落下よりも小さく、10 m 落下では若干 3 m 落下よりも大きくなっている。すなわち、3 m 落下を除いて重錘衝撃力は落下高さにほぼ比例して増大しており、1 m 落下と比較して 10 m 落下の衝撃力は 3 倍程度を示している。この衝撃力の差は位置エネルギーの変化に相当する衝撃力の変化 (10 倍) よりも少なく、ほぼ力積の変化に相当する衝撃力の変化 ($\sqrt{10}$ 倍) が生じたことが分かる。

一方、単一衝撃荷重載荷を行った試験体のうち最も重錘衝撃力が高いのは AFRP ロッドを PC 緊張材に用いた PF 桁で、次が PC 鋼棒を用いた PS 桁、最も少ないのが AFRP ロッドを補強筋に用いた RF 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。

次に 10 m 落下で 4 体を比較すると、単一衝撃荷重載荷の 3 体と繰返し載荷の桁では衝撃力が大きく異なり、処女荷重載荷の試験桁には繰返し載荷の桁の 2.5 倍程度の大きな衝撃力が発生していることが分かる。これは、繰返し載荷を行うことでひびわれが徐々に発生、進展して剛性の低下が大きくなり変形しやすい状態になったためと考えられる。

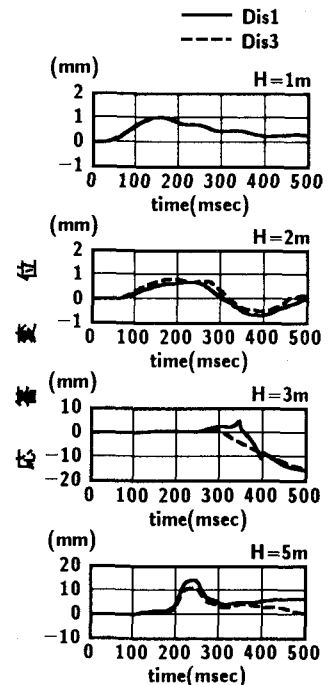


図一3 落下高さと重錘衝撃力の関係

3. 3 応答変位波形

図一4に、RF-R 桁の落下高さ 5 m までにおける桁中央および測点 3 (1 m 落下時には測定不良) の応答変位波形を示す。1 m 落下では 100 msec 経過後に最大変位を示し、以後変位は徐々に復元して 500 msec 経過後にはほとんど 0 に復元している。2 m 落下では、200 msec 以上経過した時点で最大変位となり、300 msec で一度変位 0 に復元するもののリバウンドが生じ 500 msec 程度で再び変位が 0 に復元している。3 m 落下では 200 msec 経過後に若干の下向き変位を示した後、大きくリバウンドしている。測点 3 も大きくリバウンドし、2 m 落下と 3 m 落下で桁の衝撃抵抗機構が大きく変化したことが伺われる。5 m 落下では 70 msec 程度経過した後に明瞭なピークが現れているが測点 1 の 150 msec 程度以降ではほぼ同等な下向き変位を示し、変位は大きく残留している。一方、測点 3 では変位はほぼ 0 に復元している。これから、3 m 落下と 5 m 落下でも桁の衝撃抵抗機構が再度大きく変化したことが考えられる。

ここで、1 度目の衝撃抵抗機構の変化は、2 m 落下までは桁が比較的弾性状態に近く全断面で衝撃力に抵抗していたものが、衝撃載荷の繰返しで徐々に桁下縁にひびわれが発生して、3 m 落下では AFRP ロッドが大きな力を分担するようになり、ロッドに作用した引張力が弾性的な反力を励起して上方に変位が残留したものと考えられる。



図一4 応答変位波形

一方、2 度目の変化は桁に発生するひびわれが繰返し載荷により上下に貫通し、桁の全断面で引張力を負担する状態に近づいたためと考えられる。

3. 4 上、下端鉄筋の応答ひずみ波形

図-5 に落下高さ 5 m までの RF-R 桁の上、下端鉄筋の応答ひずみ波形を桁中央および測点 3 について示した。

これより、各落下高さにおける上、下端鉄筋の応答ひずみ性状は発生する歪量に大小はあるものの、その性状はほぼ逆対称となっていることが分かる。2 m 落下までは下端鉄筋に発生する歪は 300μ 以下であり、0 歪から次の 0 歪までの経過時間は 300 msec 強である。一方、上端筋も主波動の継続時間が 300 msec 程度であり、歪は 200μ 以下と小さく、2 m 落下までは桁の衝撃応答性状は比較的弾性的であることが分かる。

3 m 落下の場合には、下端筋のひずみ

レベルは 2 m 落下の 10 倍程度以上と大きくなり、桁中央では大きくひずみが残留している。波形の性状も 2 m 落下と大きく異なり、約 230 msec 経過後に急激にひずみが増加し始め、約 50 msec 経過後に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約 230 msec 経過後に歪が急増し、約 50 msec 経過後に明瞭なピークを示している。

5 m 落下の場合における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 200 msec 経過時点で生じており、3 m 落下時よりも 70 ~ 80 msec ほど短い。また、歪レベルも 3 m 落下と比較して 1/4 程度に減少している。

このように、上、下端鉄筋の歪の応答性状からも衝撃抵抗機構が 2 度にわたり変化したことが伺われる。最初は 2 m と 3 m 落下の間で生じ、2 m 落下では桁が比較的弾性的な性状を示し、3 m 落下では AFRP ロッドに大きな引張力が作用してロッドの応答性状が大きく桁の歪性状に影響を与えている。一方、3 m と 5 m 落下では 5 m での上端筋の歪が 3 m に比べて小さいことおよび下端筋が大歪となり測定不良であったことから、5 m 落下では中立軸がさらに上昇して徐々に全断面引張の状態に推移しつつあることが分かる。

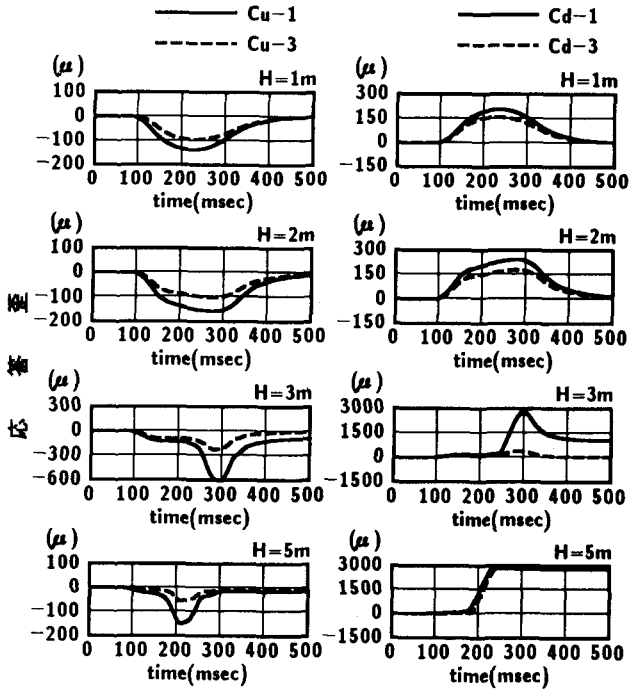


図-5 RF-R 桁の上、下端鉄筋の応答歪波形

3. 5 曲げモーメント分布の経時変化

図-6 に RF-R 桁の 2 m 落下および 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 300μ 以上の引張歪が発生した部分のコンクリートを無視して算定した。2 m 落下までは 300μ 以下の引張歪となっているため全断面が有効である。

2 m 落下では衝撃荷重載荷後、177 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 落下での最大曲げモーメントは 83.2 tfm である。この値は、桁中央に静的に 66.6 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 66.6 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。

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約 200 msec で最大値となっている。175 msec 経過時点までの曲げモーメントの分布形状は支点から載荷点まで直線的である。以後、徐々に載荷点近傍の曲げモーメントが大きくなり、この部分の曲げモーメントは 500 msec 経過後も 0 とならず残留している。

なお、最大曲げモーメントは 191 tfm 程度であり、2 m 落下の 2.3 倍と大きくなっている。これは、図-3 の衝撃力が 3 m 落下で 2 m 落下の 2 倍程度以上となっ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 153 tf の力が作用した場合のモーメントに相当する。

このよう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。

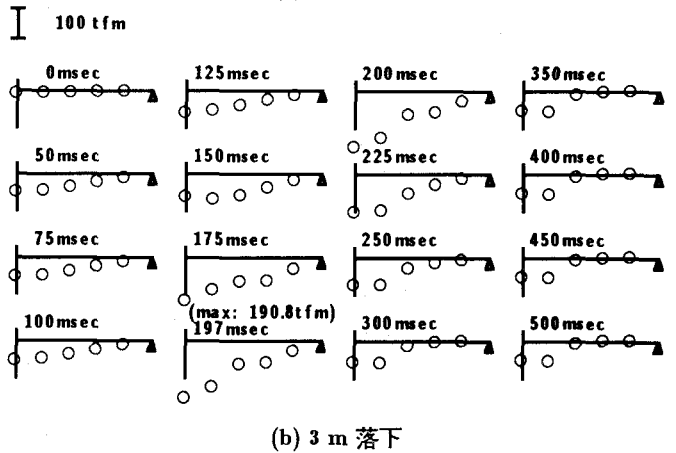
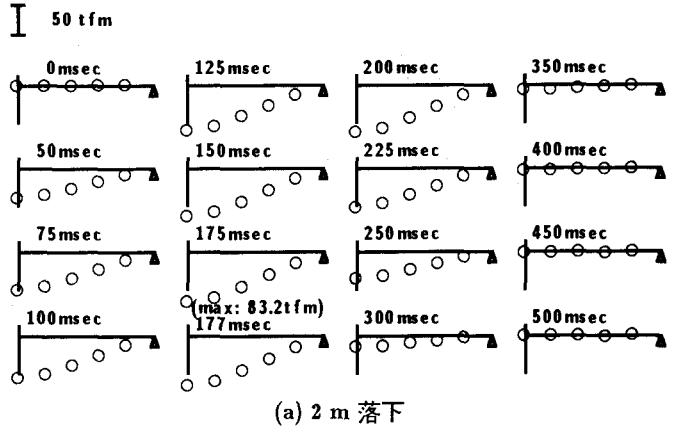


図-6 曲げモーメント分布の経時変化

3.6 ひびわれ性状

図-7 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（梁の中央寄り）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な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れた桁ほど顕著であり、見かけ上の梁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

RF-R (表面)



RF-R (裏面)



RF-10(表面)



RF-10(裏面)



PF-10(表面)



PF-10(裏面)



PS-10(表面)



PS-10(裏面)



図-7 表面および裏面のひびわれ性状

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、繰返し載荷と単一衝撃荷重載荷で顕著なひびわれ性状の差異は認められない。

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 の高さから自由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)重錘衝撃力波形の性状に与える補強材の材質および載荷方法の影響は、プレストレスの有無の影響に比べて顕著ではない。
- (2)載荷方法、プレストレスの有無の順に重錘衝撃力の大きさに影響を与えるが、補強材の材質の影響は顕著ではない。
- (3)AFRP ロッドを補強筋に用いた桁の繰返し載荷における応答変位性状や上、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。これは桁の衝撃抵抗機構の変化に対応している。
- (4)ひびわれ性状にはプレストレスの有無および緊張材の材質が大きな影響を与える。しかし、載荷方法の影響は余り顕著ではなかった。

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