

## (23) AFRPロッドを用いた四辺単純支持RC版の耐衝撃性に及ぼす コンクリート強度の影響

三井建設(株)	○三	上	浩
三井建設(株)	田	村	富雄
室蘭工業大学	岸		徳光
室蘭工業大学	松	岡	健一
計測技販(株)	後	藤	雪夫

### 1. はじめに

最近、コンクリート部材の補強材として連続繊維補強材 (FRP ロッド) を用いる研究が盛んに行われている。また、既に緊張材の代替として数橋の PC 橋梁にも適用されており、今後さらに FRP ロッドの建設分野における適用範囲は広がるものと予想される。FRP ロッドの一つの長所は耐食性に優れることであり、腐食環境下におけるコンクリート構造物の補強材としての適用は特に効果的であると考えられる。また、FRP ロッドは高引張強度を有しており、軽量、非帯磁性等の付加価値も併せて有している。しかし、FRP ロッドの弾性係数は一般に鋼材の 1/2~1/3 程度であり、鉄筋代替として曲げ部材に適用すると変形量が許容できない場合も想定される<sup>1)</sup>。この観点からは、FRP ロッドを面部材へ適用することが合理的と考えられる。なお、FRP ロッドで補強したコンクリート部材に関する既往の研究の多くは静的耐荷挙動に着目しており、衝撃荷重などの動的な荷重に対する検討例は著者等のものを除くと極めて少ないのが現状である。

このような背景から、著者等は弾性域での伸びが鉄筋と比較して大きくエネルギー吸収性能の良いアラミド繊維を補強筋に用いた RC 梁や RC スラブの衝撃応答性状を検討してきた<sup>2)~3)</sup>。その結果、RC 梁や RC スラブの衝撃応答性状は補強筋の剛性 (以下、補強筋の断面積にヤング係数を乗じたものを剛性と称する) や付着特性に大きく影響されることが明らかになった。本研究では著者等の既往の研究をさらに拡張し、RC スラブの補強筋に FRP ロッドを用いた際のコンクリート強度 (ヤング係数) の耐衝撃挙動に与える影響を実験的に検討し、それを在来の補強筋を用いた場合と比較した。

### 2. 衝撃実験の概要

#### 2.1 試験体の概要

試験体の一覧を表-1に示す。試験体は補強筋 4 種類、コンクリート強度 2 種類の合計 8 体である。試験体の名称の内、AC, AsC, DC, RC は各々補強筋の種類を示し、H または L はコンクリート強度が高い (High)、低い (Low) を示す。なお、末尾の 1 は補強筋比が 1% であることを示している。

補強筋に用いた FRP ロッドはアラミド繊維を組紐状に編み上げた後樹脂を含浸硬化させて成形した組紐状 AFRP ロッドである。また補強筋の付着特性が耐衝撃挙動に与える影響を併せて検討するため、ロッド表面に樹脂が硬化する前に 5 号珪砂 (平均粒径 0.3mm) を接着して成形した砂付きロッドと無処理の砂なしロッドの 2

表-1 試験体の一覧

名称	補強筋の種類	コンクリート強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
AC-H1	砂なしAFRPロッド RA5	461
AsC-H1	砂付きAFRPロッド RA5S	461
DC-H1	異形鉄筋 D6	461
RC-H1	丸鋼 R6	461
AC-L1	砂なしAFRPロッド RA5	171
AsC-L1	砂付きAFRPロッド RA5S	171
DC-L1	異形鉄筋 D6	171
RC-L1	丸鋼 R6	171

種類を用いた。一方、鉄筋についてもほぼ同様な断面面積を有する丸鋼および異形鉄筋の 2 種類を用いた。

コンクリート強度は各々目標強度が  $f'_c = 500 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $180 \text{ kgf/cm}^2$  のもので、一方はプレストレストコンクリート構造の耐衝撃挙動について将来検討することも考慮した高強度とし、他方は現場打ちの RC を考慮した最も低強度レベルのコンクリートとした。なお、補強筋比は従来の衝撃荷重を考慮すべきコンクリート構造物の施工実績および研究実績の豊富さなどから  $p=1\%$  とし、補強筋を 5cm ピッチで配置した。コンクリートスラブの配筋を図-1 に示す。スラブの寸法は  $150 \text{ cm} \times 150 \text{ cm} \times 7 \text{ cm}$  で、既存の衝撃載荷試験装置で破壊に至らしめるためにスラブ厚を薄くし、かつかぶり 1cm の単筋直交配置とした。

## 2.2 コンクリートおよび補強筋の特性

コンクリートは粗骨材の最大寸法が 15 mm のレデーミクストコンクリートで、高強度コンクリートでは W/C が 38.0%、単位セメント量は 432kg である。低強度コンクリートでは W/C が 62.0%、単位セメント量は 210kg である。

表-2 に材令 28 日におけるコンクリートの力学的特性を示す。なお、衝撃実験時の材令は AC-H1~RC-H1 の 4 体は 35~37 日、AC-L1~RC-L1 の 4 体は 49~54 日である。

表-3 に補強筋の特性を示す。組紐状 AFRP ロッドは基材として直径  $12 \mu\text{m}$  のアラミド繊維を用い、それを組紐機で編み上げた後エポキシ樹脂を含浸し、硬化させて成形したものである。この際、アラミド繊維の重量含有率は約 70% である。なお、組紐の凹凸はロッドの直径の 10 倍の区間内に 4ヶ所ある。補強筋の特性は AFRP ロッドで試験片 3 本、鉄筋で 4 本の実測値の平均値である。なお、鉄筋の降伏耐力および弾性伸び率は規格値を示している。組紐状 AFRP ロッドは鉄筋の約 1/6 の重さであり、ヤング係数は鉄筋の約 1/3 程度と低いが引張耐力は鉄筋の 2.3~2.5 倍程

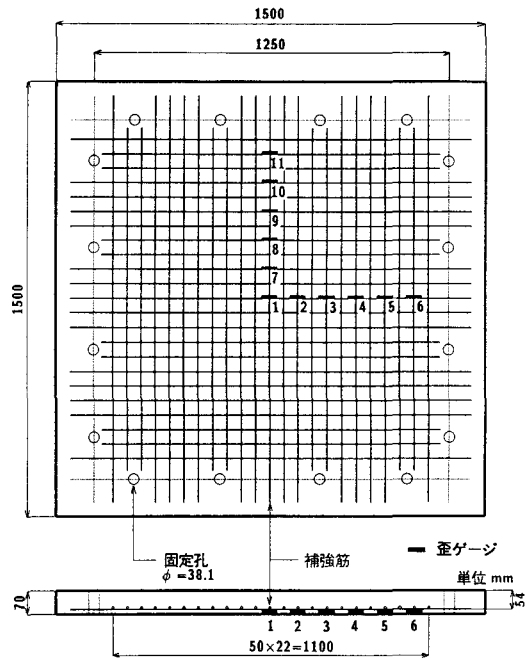


図-1 コンクリートスラブの配筋

表-2 コンクリートの力学的特性

試験体名	圧縮強度 ( $\text{kgf/cm}^2$ )	ヤング係数 ( $\text{kgf/cm}^2$ )	ポアソン比	単位重量 ( $\text{tonf/m}^3$ )
AC-H1~RC-H1	461	$2.71 \times 10^5$	0.195	2.314
AC-L1~RC-L1	171	$1.82 \times 10^5$	0.230	2.127

表-3 補強筋の特性

補強筋名	砂なしロッド RA5	砂付きロッド RA5S	丸鋼 R6	異形鉄筋 D6
材質	アラミド繊維	アラミド繊維	SR30	SD30A
(公称)直径 (mm)	6	7	5.87	5.75
(公称)断面積 ( $\text{cm}^2$ )	0.25	0.25	0.27	0.26
密度 ( $\text{g/cm}^3$ )	1.30	1.30	7.85	7.85
引張耐力 (tonf)	2.8	2.8	1.2	1.1
降伏耐力 (tonf)	—	—	0.81以上	0.78以上
ヤング係数 ( $\times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ )	0.67	0.67	2.10	2.06
弾性伸び率 (%)	1.67	1.67	0.20	0.20
ポアソン比	0.60	0.60	0.28	0.27

度と大きい。AFRP ロッドは破断するまで完全弾性的な挙動を示し、弾性伸び率は鉄筋の 8 倍程度にまで達している。鉄筋と AFRP ロッドの最大弾性伸び率における引張強さを比較するとロッドの方が 3.5 倍程度大きい。また、弾性範囲内での歪エネルギーを両者で比較すると AFRP ロッドは鉄筋の 9.2~10 倍大きい。

なお、補強筋の静的載荷における付着特性は文献(1)より、砂付きの AFRP ロッドではすべり量が 0.2mm 程度の小さな領域では異形鉄筋とほぼ同等であるが、すべり量がそれ以上増加しても付着強度は増加せずほぼ一定値を示す。一方、砂なしロッドの付着強度はすべり量によらず丸鋼よりも高いものの、すべり量が小さな領域では異形鉄筋よりも小さく、すべり量が大きくなるに従い付着強度が増加する傾向を有している。

### 2.3 実験方法

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。衝撃荷重は直径 15cm で重量が 100kgf 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、スラブ中央に自由落下させて載荷した。この際実験の再現性を考慮し、偏心載荷を防止するため、重錘はリアウエイユニットを介して載荷した。また、重錘は平底の場合には片あたりが懸念されるため、2mm のテーパを設けた球底とした。スラブの支持方式は矩形版の 4 辺を上下から鋼製のローラーではさむ単純支持方式とした。なお重錘の載荷速度(スラブに衝突する直前における重錘の速度)は  $V=1\text{m/sec}$  から  $1\text{m/sec}$  刻みとし、 $7\text{m/sec}$  以上は試験装置の制約から最大で  $7.5\text{m/sec}$  とした。

本実験での計測項目および計測点数は重錘の両側面に取り付けられた容量 1000G の歪ゲージ型加速度変換器 2 点と補強筋に取り付けた歪ゲージ 11 点の 13 点である。補強筋の歪測定に用いたゲージは歪限界が 5% の一般用歪ゲージである。また、歪ゲージには防水処理を施し、組紐状 AFRP ロッドではその腹部に歪ゲージを接着した。歪波形はノイズの発生を極力少なくするためにキャプタイケーブルを用いた 3 線式 1 枚ゲージ法によって測定した。データはウェブメモリーを用いて A/D 変換を行い、EWS で各種波形処理を行っている。

### 3. 補強筋の応答特性

図-2 に載荷速度が  $V=3\text{m/sec}$  における測点 1 の歪波形を 8 体のスラブについて示した。全サンプリングタイムは 100msec であり、サンプリング間隔は  $50\mu\text{sec}$  である。-L1 で 4 体を比較すると RC-L1 は減衰自由振動を示しているのに対して、AsC-L1 は減衰が大きく、ほとんど自由振動を示していないことが判る。一方、-H1 で 4 体を比較すると、AFRP ロッドを用いた場合は除荷後急激に減衰しているが、鉄筋を用いた場合は減衰自由振動を示していることが判る。ただし、歪の主波動の概観や継続時間は 4 体のスラブでほぼ同様である。

すなわち、剛性の高い補強筋を用いるとスラブは減衰自由振動を示しやすく、この傾向はコンクリート強度が高い場合に特に顕著である。

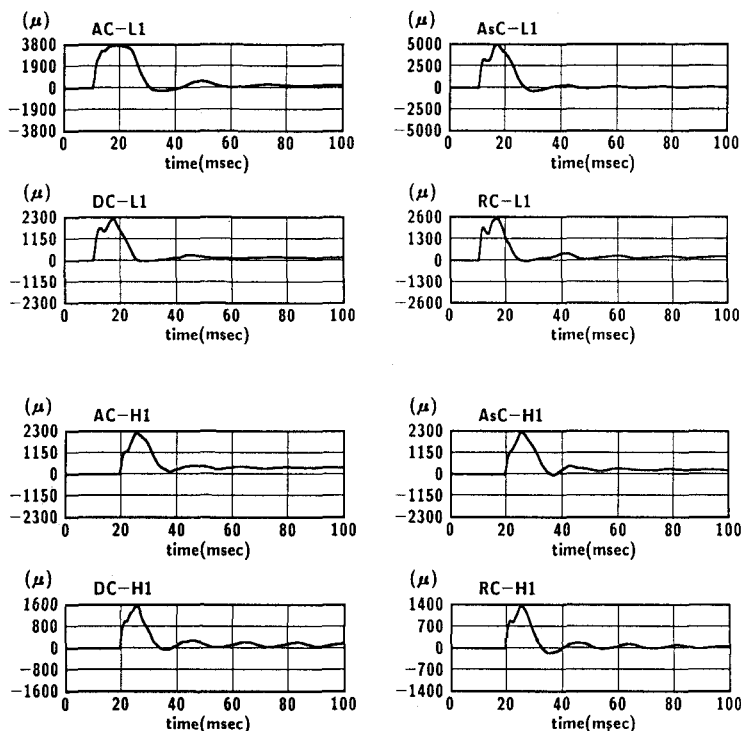


図-2 応答歪波形 ( $V=3\text{m/sec}$ , 測点 1)

#### 4. 衝撃破壊特性

##### 4.1 衝撃破壊特性の指標

RC 構造物の衝撃破壊特性は RC がコンクリートと補強筋の複合構造物であることから、コンクリート、補強筋およびこれらが複合されたものとしての広範囲な視点から検討する必要がある。なお、本実験ではスラブの衝撃破壊をスラブ表面に押抜け部が形成され、目視で貫入が確認された状況と定義した。

本文では以下の実験量を衝撃破壊特性を検討する上での指標とした。(1)破壊時の載荷速度：載荷ルールを全く同様として各スラブの破壊時における載荷速度を比較することでコンクリート強度（あるいはヤング係数）の衝撃破壊特性に与える影響を補強筋の剛性および付着特性に関連づけて検討するため。(2)押抜け部貫入量：最大載荷速度での各スラブの損傷度合いを比較し、損傷度合いに与えるコンクリート強度の影響を比較検討するため。(3)破壊時の補強筋歪：スラブが衝撃破壊する際に補強筋の歪レベルが静的な状態での終局歪に対してどの程度であるかを把握し、適切な補強筋の種類や補強筋比などを検討するため。(4)最大衝撃力と載荷速度の関係：重錘加速度から求めた最大衝撃力と載荷速度の関係を理論値と比較し、この関係がコンクリート強度や補強筋の特性によってどの様に変化するかを検討するためである。以下、各々について検討を行う。

##### 4.2 載荷速度からみた衝撃破壊特性

図-3 に破壊時の載荷速度とコンクリート強度の関係を示す。図より、付着強度の高い補強筋を用いたスラブ(AsC, DC)はコンクリート強度によらずほぼ一定の最大載荷速度を示していることが判る。しかし、付着強度の低い補強筋を用いたスラブ(AC, RC)ではコンクリート強度が増加することで最大載荷速度も増加している。これは、付着強度の低い補強筋を用いた場合には破壊時における載荷速度は主としてコンクリート強度に支配される傾向が強いことを示すものと考えられる。このように、コンクリート強度がスラブの載荷速度の大きさからみた耐衝撃性に与える影響は、補強筋の剛性よりも補強筋の付着特性に密接に関連していることが判る。

##### 4.3 押抜け部貫入量からみた衝撃破壊特性

図-4 に貫入量とコンクリート強度の関係を示した。( )内の数字は載荷速度を示している。\*印の貫入量は 54mm である。図-3 より、付着強度の高い補強筋(AsC, DC)はコンクリート強度によらずほぼ一定の最大載荷速度を示すことが判ったが、図-4 より、コンクリート強度が増加することで押抜け部貫入量は減少していることが判る。一方、付着強度が低い補強筋を用いたスラブ(AC, RC)ではコンクリート強度の増加にともなって最大載荷速度が増加したが、押抜け部貫入量もほぼ同様あるいは増加している。このように、コンクリート強度の増加が最大載荷速度を増加させる場合は押抜け部貫入量も大きくなるが、最大載荷速度が変わらない場合は押抜け部貫入量を減少させる。

図-5 に最大載荷速度と押抜け部貫入量との関係をコンクリート強度に着目して示した。付着強度が低い補強筋で低コンクリート強度の場合は破壊時の載荷速度が他と比べて小さいにも関わらず押抜け部貫入量が大きくなることが判る。また、付着強度が高

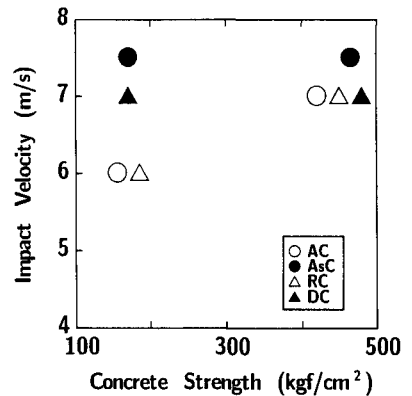


図-3 破壊時の載荷速度とコンクリート強度の関係

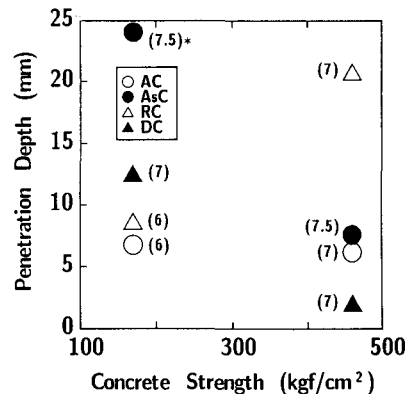


図-4 貫入量とコンクリート強度の関係

い補強筋を用いた場合でも低コンクリート強度の場合は AsC-L1 の様に大きな載荷速度まで耐えられるものの破壊時の損傷が大きくなる事が判る。以上から、破壊時の損傷を小さくしかつ大きな載荷速度まで耐えられる RC スラブを構築するためには、高強度のコンクリートを用いることが最も効果的であることが判る。

#### 4.4 補強筋歪からみた衝撃破壊特性

図-6 にスラブ破壊時あるいは破壊直前での載荷速度における補強筋の歪を測点 1 または 2 について、それ以前の載荷速度で発生した残留歪も全て加算してコンクリート強度ごとに比較した。これから、AFRP ロッドで補強したスラブ( AC, AsC )の終局歪はコンクリート強度によらずほぼ 10000  $\mu$  程度であり、静的荷重状態での終局歪の約 1/2 が発生していることが判る。一方、鉄筋を用いたスラブではコンクリート強度が大きいほど最大歪も大きくなり、低強度コンクリートでは 3000~5000  $\mu$  が高強度コンクリートでは 8000  $\mu$  以上であり、ともに鉄筋は完全に降伏していることが判る。

これは、低剛性かつ弾性伸び率の大きい補強筋を用いたスラブでは、主としてスラブのたわみ性で衝撃力に抵抗するのに対して、高剛性かつ弾性伸び率の小さい補強筋を用いたスラブは局部的な変形で衝撃力に抵抗し、補強筋比が 1% 程度では降伏してしまうためと考えられる。また、補強筋の降伏により補強筋がそれ以上の応力を負担できないため、コンクリートの衝撃に抵抗する寄与度が増加し、コンクリート強度(あるいはヤング係数)の影響が顕著になると考えられる。

#### 4.5 最大衝撃力と載荷速度の関係からみた衝撃破壊特性

図-7 に高強度コンクリートにおけるスラブの最大衝撃力と載荷速度の関係を示した。この図で、直線は文献(4)を参考に弾性接触論に基づいて誘導した理論式を用いて算出した計算値である。なお、本理論式では補強筋の特性や配置方法を評価することはできないが、低、高強度コンクリートの特性は、各々表-2 に示すヤング係数および単位重量を用いて評価した。また、実験値は重錘の最大加速度に重錘重量を乗じて求めた。この図から明らかな様に、計算値と実験値は極めて良く合致し、補強筋の種類が最大衝撃力と載荷速度の関係に大きな影響は与えていないことが判る。

図-8 に低強度コンクリートにおける両者の関係を示した。計算値は概ね実験値の下限値を与えているが、載荷速度が大きくなるに従い計算値と実験値の差は大きくなっている。特に異形鉄筋を用いた場合には、最大衝撃力が理論値に比べてかなり大きくなる傾向にあることが判る。また、図-7、8 でコンクリート強度の影響を比較すると、DC の場合を除いて理論計算結果と同様に高強度(高ヤング係数)コンクリートの方が最大衝撃力は大きくなっていることが判る。

- 以上を要約すると、(1)高強度(高ヤング係数)コンクリートを用いた方が最大衝撃力は大きくなる傾向にある。  
 (2)高剛性かつ高付着強度の補強筋を用いると、変位量が小さくなり、最大衝撃力は大きくなると考えられる。

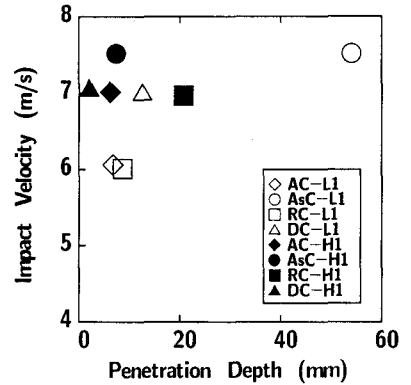


図-5 最大載荷速度と貫入量の関係

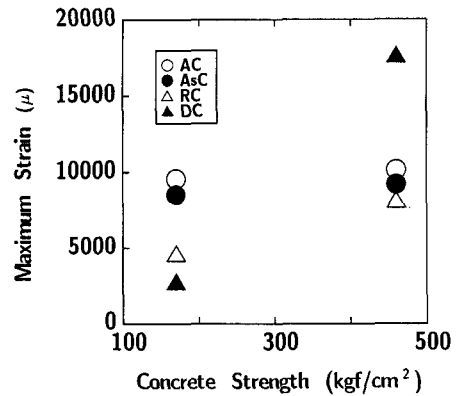


図-6 最大歪とコンクリート強度の関係

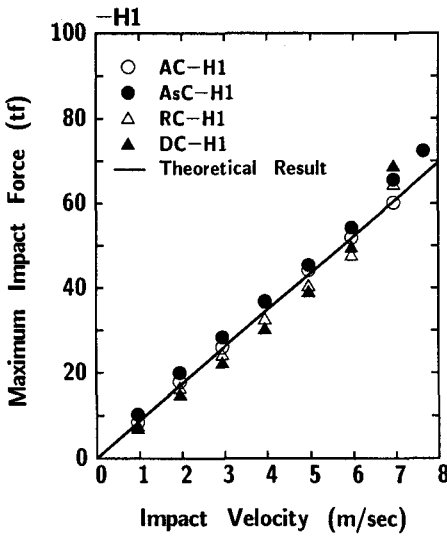


図-7 最大衝撃力と載荷速度の関係  
(高強度コンクリート)

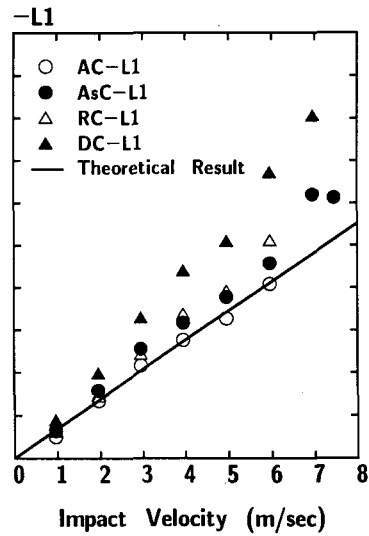


図-8 最大衝撃力と載荷速度の関係  
(低強度コンクリート)

## 5. まとめ

RC スラブのコンクリート強度（ヤング係数）がスラブの耐衝撃挙動に与える影響を、補強筋の剛性および付着特性に関連づけて、重錘の自由落下衝撃実験によって検討した。本実験で得られた結果を以下に要約すると、

- 1) 剛性の高い補強筋を用いたスラブは減衰自由振動しやすく、この傾向はコンクリート強度が高いと顕著である。
- 2) 破壊時の載荷速度からみた耐衝撃性は、付着強度の低い補強筋を用いた場合は主としてコンクリート強度に支配され、付着強度の高い補強筋を用いた場合はコンクリート強度に顕著には影響されない。
- 3) 破壊時の損傷を小さくし、かつ大きな載荷速度に耐え得る RC スラブを製作するには、高強度のコンクリートを用いることが最も効果的である。
- 4) 補強筋の最大歪に与えるコンクリート強度の影響は、低剛性の補強筋を用いた場合よりも高剛性の補強筋を用いた場合に顕著である。
- 5) 補強筋の剛性と付着特性が最大衝撃力と載荷速度の関係に与える影響はコンクリート強度が低い場合に顕著であり、高強度コンクリートの方が最大衝撃力は大きくなる傾向にある。

最後に本研究を行うにあたり、室蘭工業大学建設システム工科大学院生の松岡篤君(現、ドービー建設工業(株))に多大なるご支援を戴きました。ここに深大なる謝意を表すものであります。

## 参考文献

- 1) 三上、武富、石橋、能町：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. 3.
- 2) 三上、岸、松岡、能町：組紐状 AFRP ロッドを用いたコンクリートスラブの重錘落下衝撃挙動，構造工学論文集，vol. 37A, pp. 1591-1602, 1991.3.
- 3) 岸、中野、三上、松岡：組紐状 AFRP ロッドで補強した RC スラブを用いた大型緩衝構造の衝撃吸収性能，コンクリート工学年次論文報告集，第 14 巻，第 2 号，pp. 655-660, 1992.
- 4) 大沼 博志：コンクリート構造物の高温クリープと衝撃応答特性に関する研究，北海道大学学位論文，1984.