

(54) 低速度衝撃を受ける RC 梁の動的耐力とエネルギー吸収性能

STRENGTH AND ABSORPTION ENERGY OF RC BEAM UNDER LOW VELOCITY IMPACT

岸 徳光*, 三上 浩**, 松岡健一***, 田村富雄****

Norimitsu KISHI, Hiroshi MIKAMI, Ken-ichi MATSUOKA and Tomio TAMURA

* 工博 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科 (〒050 北海道室蘭市水元町 27-1)

** 工博 三井建設(株)技術研究所 主任研究員 (〒270-01 千葉県流山市駒木 518-1)

*** 工博 室蘭工業大学教授 工学部建設システム工学科 (〒050 北海道室蘭市水元町 27-1)

**** 工博 三井建設(株)技術研究所 副所長 (〒270-01 千葉県流山市駒木 518-1)

キーワード: 衝撃荷重, RC 梁, AFRP ロッド, 吸収エネルギー

(impact load, RC beam, AFRP rod, absorption energy)

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の耐久性向上を目的として、鉄筋や PC 鋼材の代替に各種の連続繊維補強材 (FRP ロッド) を用いる研究が盛んに行われている。また、実構造物への適用事例も増加している¹⁾。FRP ロッドは耐食性に優れ、軽量であり、同一断面積の鉄筋の 2 ~ 3 倍以上の引張耐力を有している。反面、ヤング係数は鋼材の 1/2 ~ 1/3 程度と低く、降伏点を持たずに 1 ~ 4 % 程度の歪で脆性的に破断するなど、コンクリートの補強材として適用するにあたって留意すべき点も多い。

著者らは、アラミド繊維製の FRP ロッド (AFRP) が高引張強度かつ降伏点を持たないことに着目し、耐衝撃用途のコンクリート梁への適用を想定して、異形鉄筋やその他の FRP ロッドで補強した梁と耐衝撃性を比較してきた。その結果、異形鉄筋で補強した梁は、鉄筋の降伏により衝撃荷重が載荷点直下に集中し、梁は大きく角折れして大変形となることが明らかになっている。

一方、炭素繊維やビニロン繊維製ロッドで補強した梁はロッドの破断で破壊しやすく、ロッドの弾性伸び率や引張強度が梁の耐衝撃性に大きな影響を与えることが明らかになった。他方、AFRP ロッドで補強した梁は、鉄筋で補強した梁に比べて残留する変位量が少なく、他の FRP ロッドを用いた梁のようにロッドの破断で破壊しにくく、耐衝撃性が最も良好であることが分かった^{2), 3)}。

本研究は、異形鉄筋および AFRP ロッドで補強した RC 梁の耐衝撃性の定量的評価および衝撃設計法の一提案を試みたものである。RC 梁の耐衝撃性を定量的に評価するためには、破壊をどのように定義するかが重要な問題となる。異形鉄筋を用いた梁は低載荷速度で鉄筋が降伏して角折れするため、本研究では残留変位量が梁の純スパンの 1/50 (4 cm) 程度となった状態を破壊と定義した。

また、無筋梁を含め、補強筋比が小さい梁と通常の補強筋比を有する梁を用いて、静的耐力と耐衝撃性の関係を明らかにするようにした。一方、AFRP ロッドを用いた梁は、梁上部の圧壊によって破壊しやすいが、ロッドの破断による破壊も想定されるため、補強筋比を最大で 0.56 % と低めに設定し、ロッド破断と圧壊の 2 種類の破壊形式が出現するように計画して実験および考察を行った。最後に、実験結果を基に RC 梁の衝撃抵抗メカニズムの解明を試みている。

2. 実験の概要

実験に用いた試験体は表-1に示す11体である。試験体名は、表に示しているように補強筋の種類(D:異形鉄筋、RA:AFRP ロッド、N:無筋)、呼び径および本数(一以下)で表している。衝撃実験は、載荷速度(重錘が梁に衝突する直前での速度)を1 m/sec から1 m/sec刻みで増加させ破壊するまで行った。表中の静的耐力は、表-2、3に示す補強筋およびコンクリートの力学的特性を用いて、断面分割法によって算出した。なお、分割数は48である。また、衝撃実験終了後の残留変位量を表中に整理している。RA5はロッドの破断による破壊であり、RA7はロッドの破断と上部圧壊が同時であったため、RA9、RA11に比べて大きな残留変位量を示している。なお、用いたコンクリートの呼び強度は全て $f'_{ck} = 255 \text{ kgf/cm}^2$ であるが、一部の梁のコンクリートは異なるバッチで打設したため圧縮強度および力学的特性が異なっている。

図-1に試験体の形状寸法および配筋位置を示す。本実験では、支点部のリバウンドを防止するため、梁の両端面から25 cmの位置で鋼製の治具を用いて梁の上下を固定した。治具全体は梁の回転を許容し、ピン支持に近い構造となっている。なお、支点部には衝撃荷重測定用に開発したロードセルを設置し動的な反力を測定した。

衝撃荷重は、ピン支持された梁のスパン中央に重量が200 kgf、直径が15 cmの鋼製の重錘を所定の高さから自由落下させて載荷している。また、スパン中央には容量80 mmの非接触式変位計(レーザ変位計)を設置し、変位応答を測定した。

表-1 試験体および実験結果

試験体名	載荷速度 (m/sec)	破壊形式	補強筋比 (%)	静的耐力 (tf)	残留変位量 (cm)
D10-1	1~3	下端筋降伏	0.23	0.972	4.13
D10-2	1~4	下端筋降伏	0.47	1.834	4.82
D10-3	1~4	下端筋降伏	0.69	2.530	3.68
D13-2	1~4	下端筋降伏	0.83	3.164	3.50
D16-2	1~5	下端筋降伏	1.31	4.502	3.61
D19-2	1~6	下端筋降伏	1.88	6.876	3.98
N	1~3	下端引張破壊	0.00	0.228	5.62
RA5-2	1~4	下端筋の破断	0.14	2.172	8.63
RA7-2	1~6	下端筋破断及び圧壊	0.28	3.480	6.98
RA9-2	1~6	圧壊	0.42	4.150	1.34
RA11-2	1~6	圧壊	0.56	4.728	1.22

表-2 補強筋の力学的特性

補強筋名称	D10	D13	D16	D19	RA5	RA7	RA9	RA11
材質	SD295A				SD345		アラミド繊維	
公称直径 (mm)	9.5	12.7	15.9	19.1	5.2	7.3	9.0	10.4
公称断面積 (cm ²)	0.71	1.27	1.99	2.87	0.21	0.42	0.63	0.85
引張耐力 (tf)	3.2~4.4	5.7~7.8	8.9~12.2	14.3以上	3.2	6.4	9.6	12.8
降伏耐力 (tf)	2.1以上	3.8以上	6.0以上	10.1~12.9	—			
ヤング係数 ($\times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$)	2.1				0.7			
弾性伸び率 (%)	0.2				2.0			

表-3 コンクリートの力学的特性

試験体名	衝撃実験時 材令(日)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 (kgf/cm ²)	ポアソン比
D10-1,2,3	29	251	2.33×10^5	0.207
D13,16,19	27	378	2.71×10^5	0.190
N,RA5	20	288	2.12×10^5	0.155
RA7,9,11	24	291	2.25×10^5	0.143

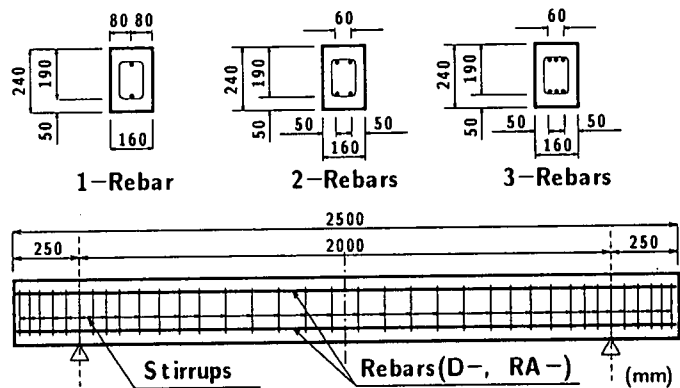


図-1 試験体の形状寸法および補強筋の配置位置

3. 実験結果および考察

3.1 載荷速度と支点反力の関係

図-2 (a), (b) に載荷速度と支点反力の合力の関係を示した。また、図中には破線で静的耐力を示した。図-2 (a) より、異形鉄筋で補強した梁の支点反力と載荷速度のなす勾配は、N と D10-2 を除いて 2 m/sec 載荷で大きく変化し、2 m/sec 以上の載荷速度で勾配が緩やかになっていることが分かる。これは、2 m/sec 載荷で梁の下端鉄筋が降伏したことに対応するものと考えられる。また、N と D10-2 を除いて、補強筋比が大きな梁ほど支点反力が大きい。これは、鉄筋を含む梁の見かけ上の曲げ剛性が大きな梁ほど支点反力が大きいことを示している。一方、静的耐力と支点反力を比較すると、最大支点反力は静的耐力と同程度か若干上回る程度であることが分かる。

図-2 (b) より、AFRP ロッドで補強した梁の支点反力と載荷速度の関係は、補強筋比や載荷速度の大きさに関わらず、ほぼ同様な線形であることが分かる。これは、AFRP ロッドには降伏点がなく、また、ロッドの剛性も小さくかつ低補強筋比であるため、梁の曲げ剛性の差が各試験体で少ないためと考えられる。一方、支点反力を静的耐力と比較すると、支点反力は最大で静的耐力の 2 倍程度となっており、異形鉄筋で補強した梁と大きく異なっている。

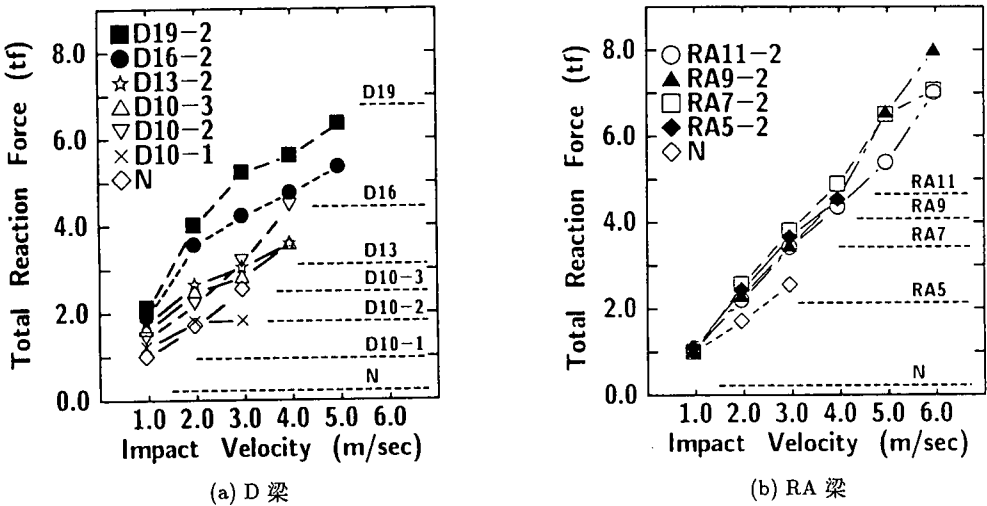


図-2 載荷速度と支点反力の関係

3.2 静的耐力と最大支点反力の関係

図-3 に各梁の静的耐力と衝撃実験で得られた最大支点反力の関係を示す。図中細破線は静的耐力と支点反力が等しくなる線である。これより、異形鉄筋で補強した梁の最大支点反力は、静的耐力と同程度か若干上回る程度であることが分かる。これは、異形鉄筋で補強した梁が衝撃破壊するか否かは、静的終局限界と同様に鉄筋が降伏するか否かと密接に関連していることを意味しているものと考えられる。一方、AFRP ロッドで補強した全ての梁では、最大支点反力が静的耐力よりも大きく、最大で 2 倍程度の値を示しているが、静的耐力が 3.48 tf 以上の梁では支点反力に大差がない。これは、AFRP ロッドをある補強筋量以上配置すると衝撃荷重載荷時の破壊形式がすべて梁上部の圧壊になるためと考えられる。

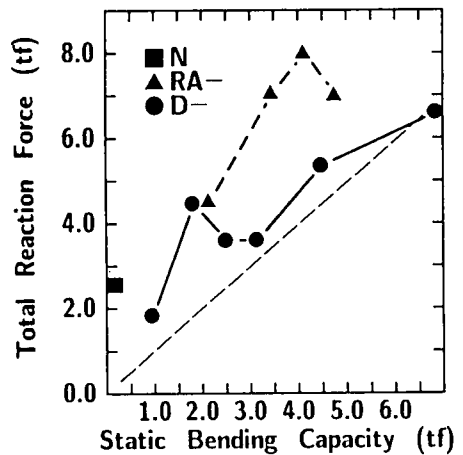


図-3 静的耐力と最大支点反力の関係

3.3 耐衝撃性と衝撃設計法

図-4 に各梁の静的耐力と衝撃破壊時の重錘の運動エネルギー（载荷エネルギー）の関係を示した。図より、異形鉄筋で補強した梁では、破壊時の载荷エネルギーは静的耐力が増加するに従って直線的に増加することが分かる。一方、AFRP ロッドを補強筋比 0.28 % 以上で配置した梁（静的耐力 = 3.48 tf 以上）の破壊時の载荷エネルギーは、梁の破壊がすべて圧壊となるため一定となっている。なお、この载荷エネルギーは、補強筋比が 0.14 % の梁（RA5-2、静的耐力 = 2.17 tf）の 2 倍以上である。AFRP ロッドで補強した梁の補強筋比が少ないレベルでの補強筋比の増減は、衝撃破壊時の载荷エネルギーに顕著な影響を与えていることが分かる。AFRP ロッドと異形鉄筋を用いた梁が最大の载荷エネルギーを示す場合の補強筋比を比較すると、0.28 % (RA7-2) と 1.88 % (D19-2) であり、AFRP ロッドを異形鉄筋の 15 % 程度配置すれば同等の载荷エネルギーが得られることが分かる。

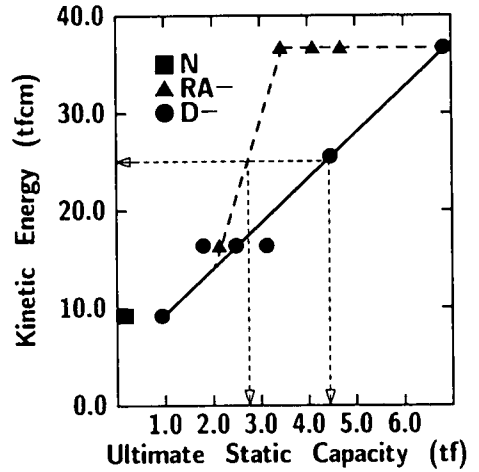


図-4 静的耐力と载荷エネルギーの関係

同時に図-4 は、設計载荷エネルギーに対して、所要の静的耐力を有する梁を設計することにより梁の耐衝撃設計が可能になることを示している。また、既存の RC 梁の静的耐力を計算することにより、その梁がどの程度の衝撃载荷エネルギーに耐え得るかを求めることも可能となる。今後、試験体の断面寸法と静的耐力を変化させた RC 梁に関する同様な実験を行い、寸法効果を把握することによってより実用的な耐衝撃設計用の実験式を提案できるものとする。

3.4 耐衝撃性のエネルギー論的考察

図-5 に補強筋の特性による耐衝撃性の差異を検討するため、支点反力と梁中央変位の関係を比較した。(a) 図は、静的耐力が同程度の D10-2 と RA5-2 を比較したもので、ともに 4 m/sec 载荷で破壊した梁の 3 m/sec 载荷時における反力と変位の関係を示している。なお、図中の X、Y は各々変位および反力の応答波形を示している。これより、反力と変位の関係は、D 梁と RA 梁で大きく異なることが分かる。D 梁では弾性的に大きな支点反力が励起され、ほぼ一定の反力-変位関係を示した後除荷され、反力一定領域における変位量程度の極めて大きな変位が残留している。一方、RA 梁ではほぼ弾性的に静的耐力以上の反力が励起され応答変位量も D 梁に比べて 2 倍程度大きいが、残留する変位は極めて小さい。そのため、反力と変位のなすループの面積が両梁でほぼ同程度となっている。この面積を吸収エネルギーと仮定するならば、両梁の吸収エネルギーは同程度であり、両梁が同じ载荷エネルギー

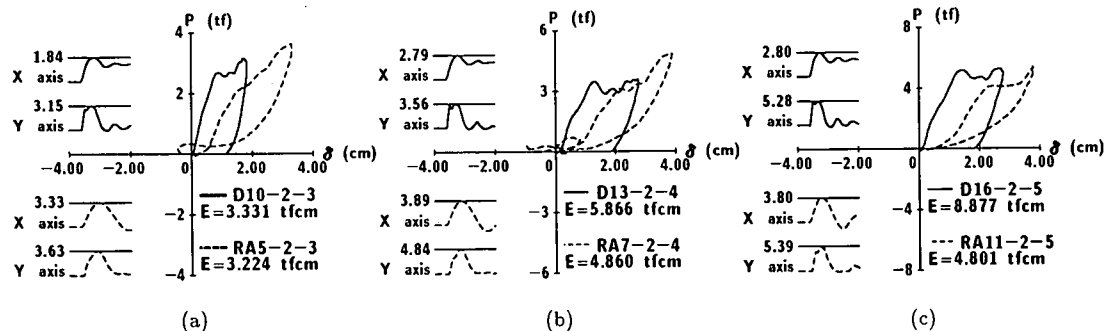


図-5 支点反力と梁中央変位の関係

ギーで破壊したものと考えられる。(b)図は、静的耐力が同程度の D13-2 (4 m/sec 載荷で破壊) と RA7-2 (6 m/sec 載荷で破壊) の 4 m/sec 載荷における反力と変位の関係を比較したものである。反力と変位の関係は (a) 図とほぼ同様であるが、反力と変位のなすループの面積である吸収エネルギーは D13-2の方が RA7-2よりも大きい。すなわち、同じ載荷速度では吸収エネルギーの大きな梁ほど耐衝撃性に劣ることが分かる。

(c) 図は、静的耐力が同程度の D16-2 (5 m/sec 載荷で破壊) と RA11-2 (6 m/sec 載荷で破壊) の 5 m/sec 載荷における反力と変位の関係を示したものである。この図からも (b) 図と同様に、耐衝撃性に劣る D 梁の吸収エネルギーが RA 梁よりも大きいことが分かる。このように、同じ載荷速度で比較すると、吸収エネルギーの大きな梁ほど耐衝撃性が劣ることが分かる。

図-6 に各梁の破壊時の吸収エネルギーとその時の載荷エネルギーの比率を示した。() 内の数字は計測可能な最大の載荷速度である。無筋梁を含む低補強筋比の梁ではらつきがあるものの、D10-3 から RA11 まではほぼ一定の比率を示している。これらを平均すると比率は約 36 % となり、梁の補強筋比や補強筋の特性に関わらず、梁が破壊するときの吸収エネルギーは載荷エネルギーの約 1/3 で

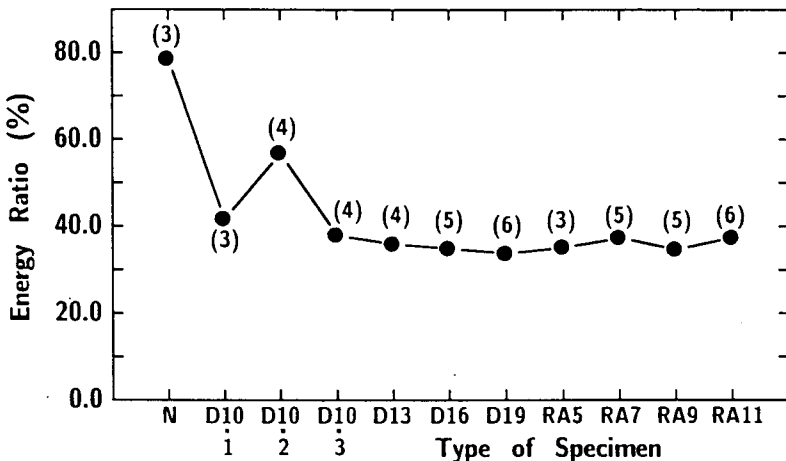


図-6 吸収エネルギーと載荷エネルギーの比率

ある。この比率は今回の実験に用いた梁の断面寸法で固有な値と考えられる。今後、異なる断面寸法の梁に関する実験を行い、断面寸法とこのエネルギー比率の関係について確認したいと考えている。

図-7 は梁破壊時の載荷エネルギーと吸収エネルギーの関係を示したものである。図中の直線は載荷エネルギーの 36 % のエネルギーを示す線である。図より 36 % 線はほぼ全梁の破壊時の吸収エネルギーの下限值を示していることが分かる。

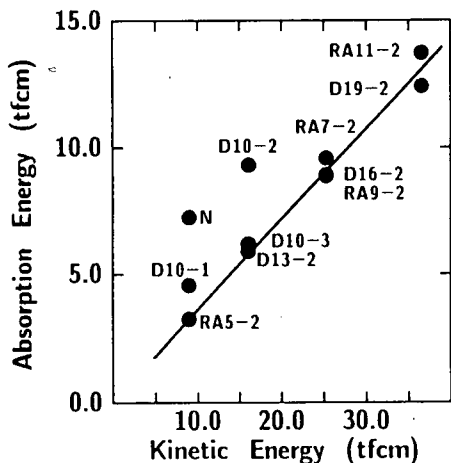


図-7 吸収エネルギーと載荷エネルギーの関係

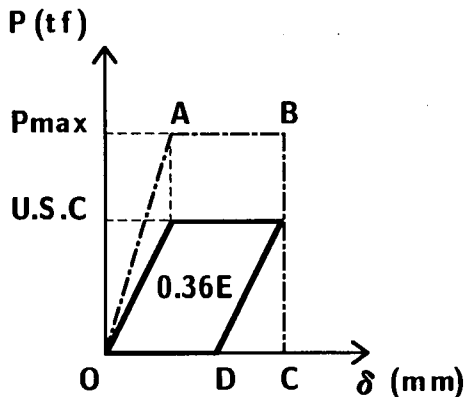


図-8 D梁の衝撃エネルギー模式図

図-8は、異形鉄筋で補強した梁に衝撃力が作用する場合の荷重-変位関係を実験結果を基に模式的に示したものである。図-5に示した様に、D梁の反力-変位関係は平行四辺形であり、衝撃破壊時の最大反力は静的耐力(U.S.C)とほぼ等しい。重錘の衝突によって励起される動的衝撃力を P_{max} とすると、載荷エネルギー E は OABC の面積で求められる。一方、吸収エネルギーは平行四辺形の面積であり静的耐力に変位量 (\overline{OD}) を乗じたものに等しい。また、この値は載荷エネルギー E の 36% であることから下式が成立する。

$$U.S.C \times \overline{OD} = 0.36 \times E \quad \therefore \overline{OD} = \frac{0.36E}{U.S.C}$$

すなわち、図-4 から設計載荷エネルギーを満足する RC 梁を、静的耐力を計算することによって選定すると、その梁の衝撃破壊時の最大変位量は上式により求めることができる。

4. まとめ

RC梁の耐衝撃性を定量的に評価し、衝撃設計法を提案するために、鉄筋およびAFRP ロッドを用いた比較的補強筋比の小さいRC梁を製作して重錘落下衝撃実験を行った。本実験の範囲内で得られた結論を要約すると、

- 1) AFRP ロッドで補強した梁の支点反力は載荷速度の増加にともない線形的に増加する。一方、鉄筋で補強した梁では鉄筋の降伏のため、支点反力の増加勾配が AFRP ロッドで補強した梁に比べて緩やかになる。
- 2) 衝撃破壊時の最大支点反力は、異形鉄筋で補強した梁では静的耐力と同程度である。一方、AFRP ロッドで補強した梁では最大で静的耐力の約 2 倍の支点反力が発生するが、補強筋比がある程度以上大きい梁では支点反力はほぼ一定となる。
- 3) RC 梁の静的耐力と衝撃破壊時の載荷エネルギーの関係を実験結果より求めた。この図を用いて設計載荷エネルギーを満足する RC 梁を、静的耐力に基づいた静的設計によって決定することができる。
- 4) 耐衝撃性のエネルギー論的検討から、耐衝撃性に優れた梁は吸収エネルギーが小さいことが分かった。また、梁の限界吸収エネルギーは補強筋の特性や量に関わらず固有であり、本実験の場合には載荷エネルギーの 1/3 程度である。
- 5) 異形鉄筋で補強した梁の荷重と変位の関係を実験結果を基に模式化し、衝撃破壊時の動的変位量を求める式を提案した。

最後に、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構造力学講座の諸君に多大なる御支援を頂いたことを付記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用、コンクリートライブラリー第 72 号、土木学会、1992
- 2) 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
- 3) 岸徳光、三上浩、田村富雄、松岡健一：RC 梁の衝撃挙動におよぼす補強筋特性の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16, No.2, pp.1105~1110, 1994