

論文 低補強筋比 RC 梁の耐衝撃性

松岡健一*1・三上 浩*2・岸 徳光*3

要旨：本論文は鉄筋および AFRP ロッドを用いた比較的補強筋比の小さい RC 梁の耐衝撃性を重錘落下衝撃実験によって定量的に評価することを試みたものである。実験の結果、(1) 異形鉄筋で補強した梁の衝撃耐力は静的耐力を若干上回る程度である。(2) AFRP ロッドで補強した梁の衝撃耐力は、同一補強筋比の異形鉄筋で補強した梁よりも大きい。(3) 梁が衝撃破壊する際の吸収エネルギーは、補強筋の特性や補強筋比に関わらず載荷エネルギーの約 1/3 であることが分かった。

キーワード：AFRP ロッド、耐衝撃性、吸収エネルギー、RC 梁

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分かった。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、静的耐力と衝撃耐力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。また、異形鉄筋で補強した梁については、繰り返し載荷と単一載荷を行い、載荷方法が耐衝撃性に与える影響を検討した。最後に、実験結果を基に RC 梁の耐衝撃性のエネルギー論的検討を行っている。

*1 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)

*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)

2. 実験の概要

実験に用いた試験体は表-1に示す18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。末尾のSの有無は載荷方法を示し, ある場合は単一載荷, ない場合は繰り返し載荷したことを示す。表中の()内の数字は単一載荷した梁の実験結果を示している。

繰り返し載荷は, 載荷速度(重錘が梁に衝突する直前での速度)を $v = 1 \text{ m/sec}$ から 1 m/sec 刻みで増加させ破壊するまで行った。また, 単一載荷は繰り返し載荷での最大載荷速度で一回のみ載荷した。

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。また, 単一載荷で残留変位量が4cm程度を示したのはD10-3Sのみであった。

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

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 (S)	1~3 (3)	下端筋降伏	0.23	0.972	4.13 (2.37)
D10-2 (S)	1~4 (4)	下端筋降伏	0.47	1.834	4.82 (2.39)
D10-3 (S)	1~4 (4)	下端筋降伏	0.69	2.530	3.68 (4.06)
D13-2 (S)	1~4 (4)	下端筋降伏	0.83	3.164	3.50 (1.91)
D16-2 (S)	1~5 (5)	下端筋降伏	1.31	4.502	3.61 (1.80)
D19-2 (S)	1~6 (6)	下端筋降伏	1.88	6.876	3.98 (1.74)
N (S)	1~3 (3)	下端引張破壊	0.00	0.228	5.62 (1.68)
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 (×10 ⁶ 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 (S)	29~32	251	2.33×10^5	0.207
D13,16,19 (S)	27~29	378	2.71×10^5	0.190
N,NS,RA5	20~22	288	2.12×10^5	0.155
RA7,9,11	24	291	2.25×10^5	0.143

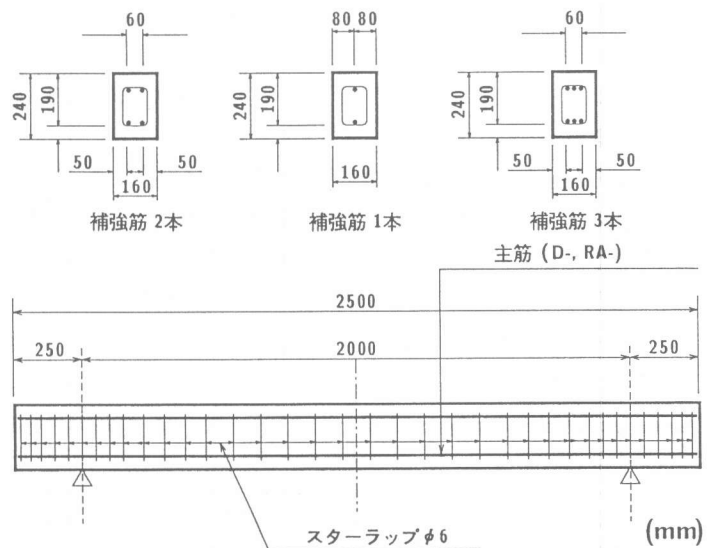


図-1 試験体の形状寸法および補強筋の配置位置

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（レーザ式変位計）を設置し、変位応答を測定した。

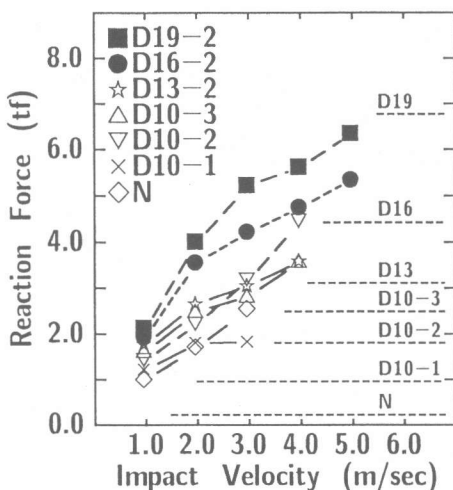
3. 実験結果および考察

3.1 載荷速度と支点反力の関係

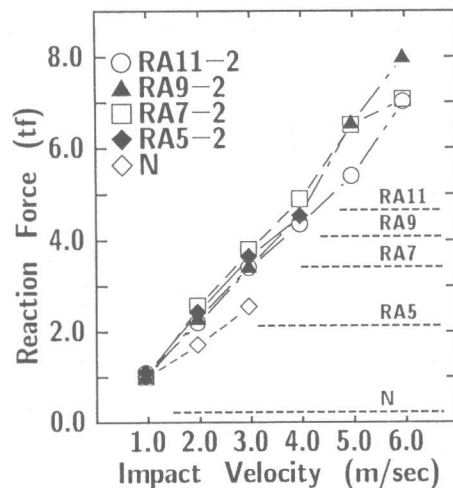
図-2 (a), (b)に繰り返し載荷を行った梁の載荷速度と支点反力の合力の関係を示した。また、図中には破線で静的耐力を示した。

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 $v = 2$ m/sec載荷で大きく変化し、 $v = 2$ 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、 $v = 2$ 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、各試験体間の曲げ剛性の差が小さ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。



(a) D 梁



(b) RA 梁

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破壊時の最大支点反力は、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どうかは、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。また、単一載荷における動的反力は繰り返し載荷での最大反力と同程度であり、動的支点反力は主に載荷速度に影響されることが分かる。

一般的に見ると、異形鉄筋で補強した梁の衝撃耐力は静的耐力とほぼ同程度と考えておけば安全側である。また、補強筋量が多くなると動的反力が静的耐力を下回る傾向があることより、今後は補強筋量の多い梁について検討を行う必要があ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以上の各梁の支点反力は大差がない。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。

3.3 耐衝撃性のエネルギー論的考察

図-4に補強筋の特性による耐衝撃性の差異を検討するため、繰り返し載荷を行った試験体の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 $v = 4 \text{ m/sec}$ 載荷で破壊した梁の $v = 3 \text{ m/sec}$ 載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倍程度大きいのが、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はほぼ同程度となっている。この面積を吸収エネルギー (E) 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、両梁が同じ載荷速度で破壊したことと良く対応している。

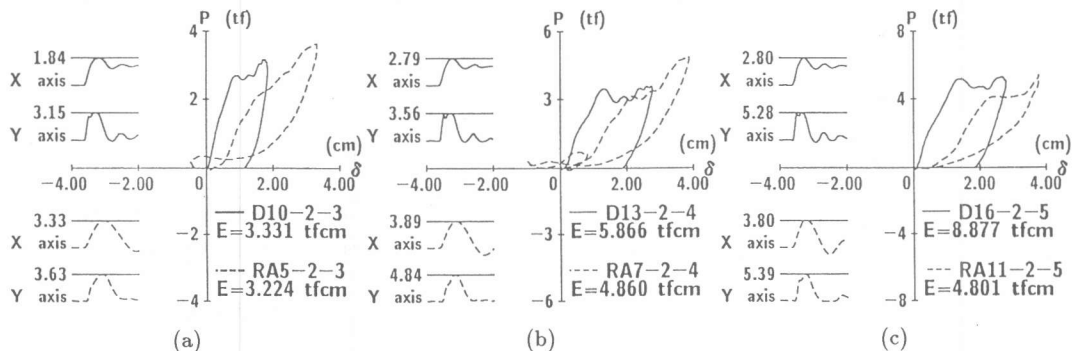


図-4 支点反力と梁中央変位の関係 (繰り返し載荷)

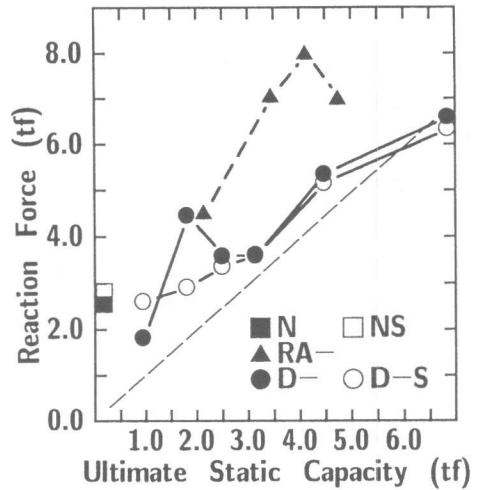


図-3 静的耐力と最大支点反力の関係

(b) 図は、静的耐力が同程度の D13-2 ($v = 4 \text{ m/sec}$ 載荷で破壊) と RA7-2 ($v = 6 \text{ m/sec}$ 載荷で破壊) の $v = 4 \text{ m/sec}$ 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 (E) 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が劣ることが分かる。

(c) 図は、静的耐力が同程度の D16-2 ($v = 5 \text{ m/sec}$ 載荷で破壊) と RA11-2 ($v = 6 \text{ m/sec}$ 載荷で破壊) の $v = 5 \text{ m/sec}$ 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 (E) 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い梁ほど耐衝撃性が劣ることが分かる。

図-5 に単一載荷を行った D-S 梁の支点反力と梁中央変位の関係を示した。図より、単一載荷での支点反力-変位関係は、図-4 に示した D 梁の支点反力-変位関係と類似しており、載荷方法が上記の関係に与える影響は少ないことが分かる。同一の載荷速度 ($v = 4 \text{ m/sec}$) で単一載荷した D10-2S と D10-3S および D13-2S の吸収エネルギー (E) を比較すると、静的耐力の大きな梁ほど E が小さいことが分かる。これは、静的耐力と衝撃荷重載荷時の吸収エネルギーの大きさに一定の関係があることを示している。

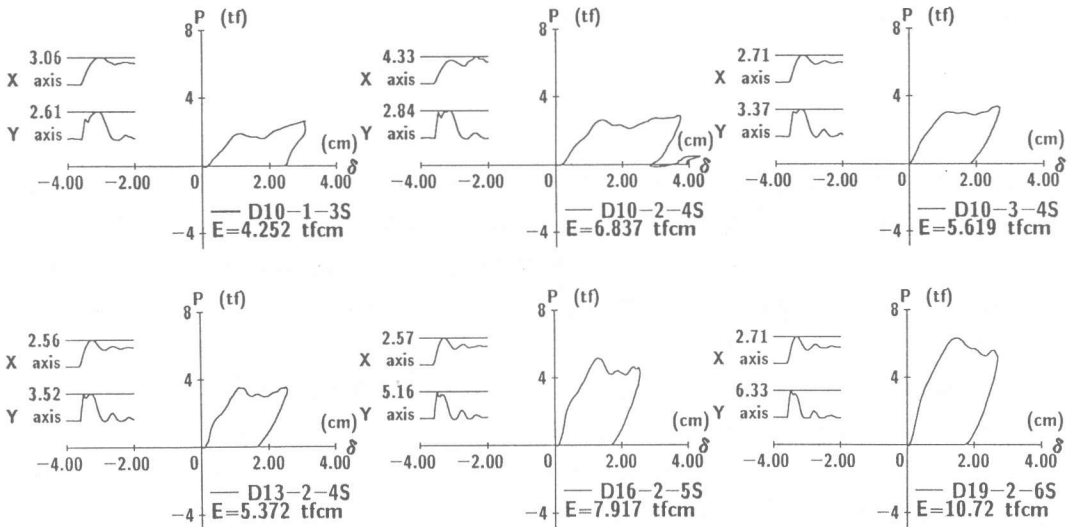


図-5 支点反力と梁中央変位の関係 (単一載荷)

図-6 に繰り返し載荷を行った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 (重錘の運動エネルギー) 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ば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

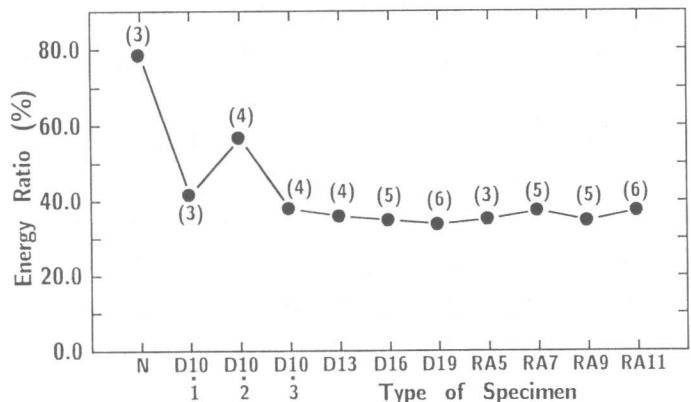


図-6 吸収エネルギーと載荷エネルギーの比率

に関わらず、梁が破壊するときの吸収エネルギーは荷重エネルギーの約 1/3 である。この比率は今回の実験に用いた梁の断面寸法に対する固有な値であることも考えられるので、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 は全試験体の最大荷重速度における荷重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。図中の直線は荷重エネルギーの 36% を示す線である。図より、36% の線は繰り返し荷重を行った全梁の破壊時の吸収エネルギー（図中●）のほぼ下限値を示していることが分かる。

単一荷重を行った梁（図中○）のうち、D16S と D19S は 36% 線よりも低い吸収エネルギーを示しているが、これは残留変位量がまだ 4 cm に満たないためと考えられる。

4. まとめ

RC 梁の耐衝撃性を定量的に評価するために、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荷重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、途中の荷重速度から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ほぼ同程度である。すなわち、衝撃耐力は静的耐力にほぼ等しい。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) 耐衝撃性をエネルギー論的に検討すると、耐衝撃性に優れている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、本実験の場合には荷重エネルギーの 1/3 程度である。

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科大学院生の村瀬尚久君を始めとする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

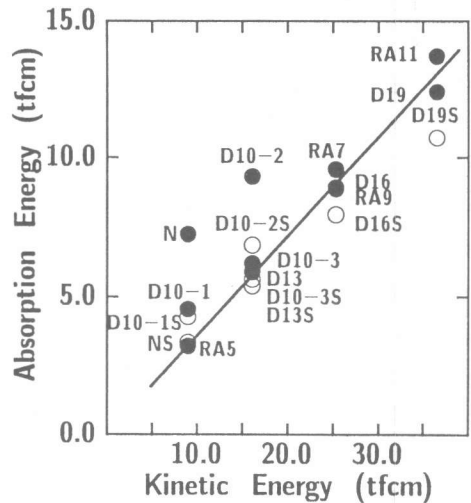


図-7 吸収エネルギーと荷重エネルギーの関係