

## (32) RC梁の耐衝撃性に及ぼす断面寸法の影響

## AFFECTION OF SECTION SIZE ON ANTI-IMPACT RESISTANCE OF RC BEAM

岸 徳光\*, 安藤智啓\*\*, 三上 浩\*\*\*, 松岡健一\*\*\*\*

Norimitsu KISHI, Tomohiro ANDO, Hiroshi MIKAMI and Ken-ichi MATSUOKA

\* 工博 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27 番 1 号)

\*\* 工修 室蘭工業大学大学院生 工学部建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27 番 1 号)

\*\*\* 工博 三井建設(株)技術研究所 主任研究員 (〒272-0132 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 (〒050-8585 室蘭市水元町 27 番 1 号)

キーワード: RC 梁, 耐衝撃性, 静的曲げ耐力, 吸収エネルギー, 重錘衝撃力  
(RC beam, Anti-impact resistance, Ultimate static energy, Absorption energy, Impact force)

## 1. はじめに

道路落石防護施設, 砂防ダム, 原子力発電所関連施設及び危険物貯蔵施設等は, 衝撃に対して高い安全性が要求される重要構造物である. これらの構造物は, 主として鉄筋コンクリート(RC)やプレストレストコンクリート(PC)で造られている. 近年各研究機関では, RC および PC 構造物の衝撃安全性を向上させる目的で, RC 梁や PC 梁に着目した部材レベルの耐衝撃性に関する基礎的研究が盛んに行われている<sup>1),2)</sup>. しかしながら, これら梁部材に関しても, いまだ合理的な耐衝撃設計法が確立されていないのが現状である.

本研究では, 曲げ破壊型を示す RC 梁の合理的な耐衝撃設計法を確立するための基礎資料を得ることを目的として, 同一の純スパン長を有し, 断面寸法および補強筋量(静的曲げ耐力)の異なる RC 梁に関する重錘落下衝撃実験を行い, 各 RC 梁の耐衝撃性状について比較検討した. 衝撃実験は, 重錘の衝突速度を 1 m/sec から RC 梁が破壊に至るまで 1 m/sec ずつ増加させる漸増繰り返し載荷実験法により行った. なお, RC 梁の破壊は累積残留変位量が純スパンの 1/50 程度に達した状態と仮定した.

## 2. 実験の概要

表-1 に試験体および実験結果の一覧を示す. 試

表-1 試験体および実験結果

試験体名	衝突速度 (m/sec)	補強筋比 (%)	静的曲げ耐力 (kN)	累積残留変位量 (cm)	最終衝突速度での残留変位量(cm)
A-19	1~6	1.88	64.58	3.10	1.65
A-22	1~6	2.55	83.20	1.90	1.10
B-10	1~4	0.42	16.86	4.56	2.50
B-13	1~5	0.75	26.85	5.80	3.38
B-19	1~6	1.69	58.80	3.48	2.05
C-10	1~3	0.74	11.37	3.37	2.33
C-13	1~4	1.32	16.95	5.60	3.60
C-19	1~5	2.98	37.83	3.90	3.02

験体は, 断面寸法と補強筋比を変化させた複鉄筋矩形梁で, 梁幅 16 cm, 梁高 24 cm の A タイプが 2 体, 梁幅 20 cm, 梁高 22 cm の B タイプが 3 体および梁幅 16 cm, 梁高 16 cm の C タイプが 3 体の計 8 体である. 試験体名は, 断面の種類および用いた補強筋の呼び径を組合わせて表示している. 衝突速度は, 実験装置の制約から最大で  $V = 6$  m/sec である. 各 RC 梁の静的曲げ耐力は, 表-2 および表-3 に示すコンクリートおよび鉄筋の力学的特性を用いて断面分割法により算出した. また, このときの曲げ耐力の算定には, 表-3 に示した鉄筋の力学

表-2 コンクリートの力学的特性

試験体名	材令 (日)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (MPa)	ポアソン比
A-19,B-19,C-19	86	27.8	$1.93 \times 10^4$	0.19
A-22,B-13,C-13	85	24.7	$1.18 \times 10^4$	0.20
B-10,C-10	84	27.0	$1.91 \times 10^4$	0.19

\* 設計基準強度:  $f'_{ck} = 23.5 \text{ MPa}$

表-3 鉄筋の力学的特性

補強筋名称	D10	D13	D19	D22
材質	SD295A		SD345	
公称直径 (mm)	9.5	12.7	19.1	22.2
公称断面積 (cm <sup>2</sup> )	0.71	1.27	2.87	3.87
引張耐力 (kN)	31.4 ~ 43.1	55.9 ~ 76.4	140 以上	189 以上
降伏耐力 (kN)	20.6 以上	37.2 以上	99.9 ~ 126	133 ~ 171
弾性係数 (GPa)	206			
弾性伸び率	0.2			

的特性 (規格値) の下限値を用いている。なお、分割数はほぼ一定の解が得られることに留意して 32 ~ 48 分割とした。また、表中には下端補強筋比、衝撃実験終了後の残留変位量も併せて示している。RC 梁の破壊形式については、すべて下端筋降伏による曲げ破壊であり、載荷点直下でV字型に角折れしていた。

図-1 に試験体の形状寸法および配筋位置を示す。なお、側面図は A タイプを標準としている。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ている。従って、支点部は、梁の回転を許容し、ピン支持に近い境界条件となっている。なお、重錘および支点支持部には衝撃力測定用に開発した起歪柱型のロードセルを設置して、重錘衝撃力 (容量 1470kN) と動的支点反力 (1 支点の容量 200kN) を測定した。実験は、スパン中央に重量 1.96kN、直径 15 cm の円柱状の鋼製重錘を所定の高さから自由落下させることにより行っている。なお、重錘の底部は片当たりを防止するために、高さ 2 mm のテーパを有する球底としている。また、スパン中央点にはレーザ式変位計 (容量 80 mm) を設置し、変位応答ならびに残留変位量を測定している。

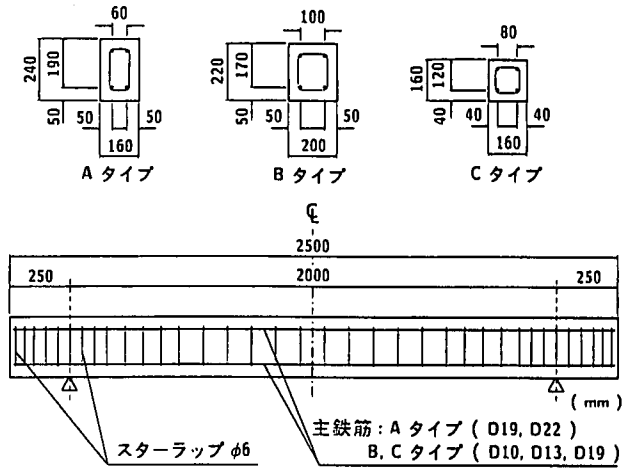


図-1 試験体の形状寸法および配筋位置

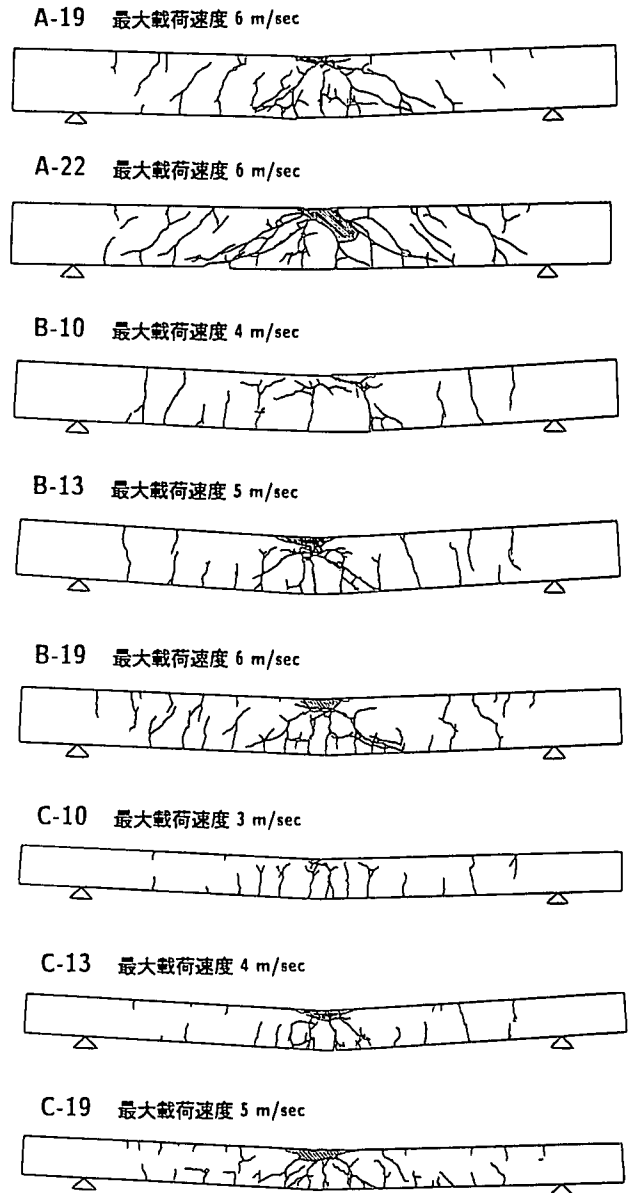


図-2 RC 梁の最終載荷時の破壊性状

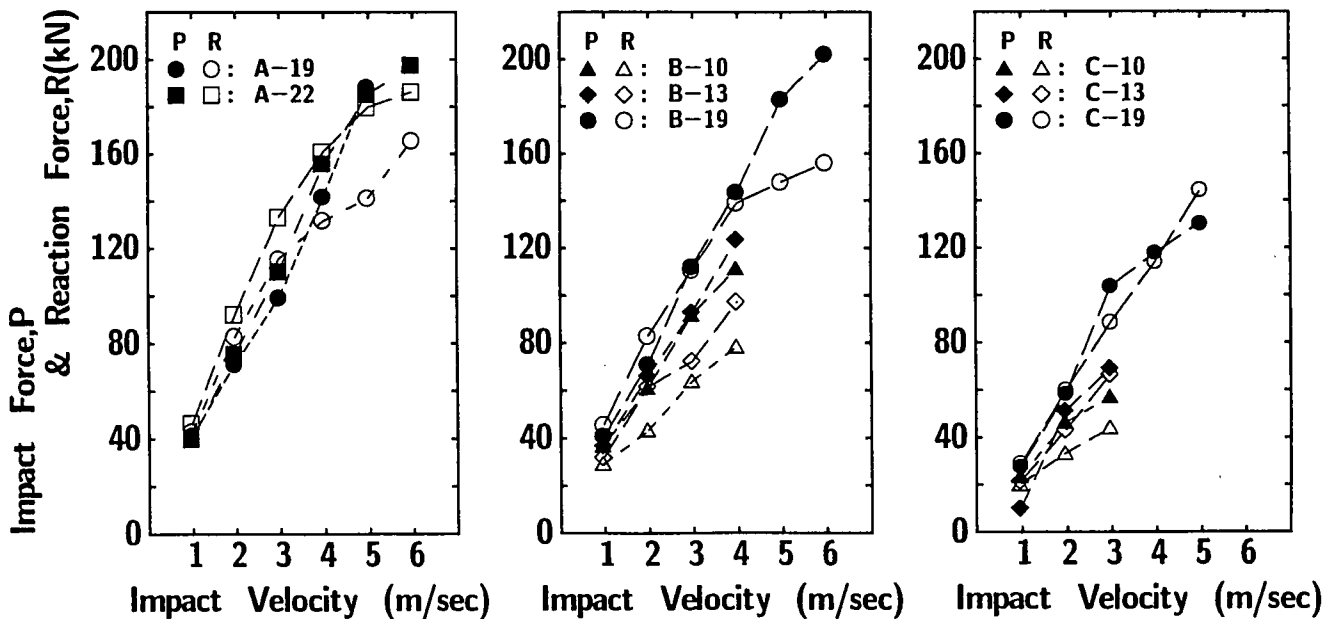


図-3 衝突速度と重錘衝撃力および支点反力の関係

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 残留変位量および破壊性状

本研究では各 RC 梁の耐衝撃性を同一の尺度で比較検討するため、繰り返し載荷時の累積残留変位量が梁の純スパンの 1/50 (4 cm) 程度に達した状態を破壊と定義した。ただし、A-22 梁の残留変位量は最大衝突速度でも破壊基準の半分程度であったが、実験装置の制約上そのまま実験を終了している。一方、B-13 と C-13 梁の累積残留変位量が純スパンの 1/35 程度と基準値を大幅に越えているため、表-1 に示す最終衝突速度より一段階低い衝突速度での実験値を基に以後の考察を行うこととした。なお、他の梁の累積残留変位量は概ね 1/45 ~ 1/65 程度であり、基準値に近い値となっている。

図-2 には各 RC 梁の最終載荷時の破壊性状を示している。いずれも梁の下面から上面に向けて多数のひびわれが鉛直方向に発生し、曲げひびわれ分散性が良いことを示している。なお、静的曲げ耐力の大きな A タイプや B-19 および C-19 では、載荷点直下の梁上部は圧壊の性状を示し、梁下面に向けて斜めひびわれもみられる。しかしながら、斜めひびわれは載荷点近傍にのみ発生しており、全体的には曲げ型の破壊性状を示している。

#### 3.2 衝突速度と重錘衝撃力および支点反力の関係

図-3 に、衝突速度と最大重錘衝撃力および最大合支点反力 (以後、これらを単に重錘衝撃力および支点反力と呼ぶ) の関係を各断面タイプごとに示す。

図より、RC 梁の支点反力は重錘衝撃力と比較すると若干小さい値を示していることがわかる。これは、重錘衝撃力が載荷点部の梁の高さ方向の剛性に大きく依存するのに対して、支点反力は曲げ剛性すなわち損傷の程度に依存するためと考えられる。また、重錘衝撃力と支点反力の差は、衝突速度の増大とともに大きくなることが示されている。これは、上述のように、繰り返し載荷によって損傷による衝撃エネルギー吸収の程度が増大し、重錘衝撃力に比べて支点反力が小さくなるためと推察される。なお、断面タイプの違いに関わらず、支点反力および重錘衝撃力は静的曲げ耐力 (補強筋比) が大きな梁ほど大きく励起されている。

#### 3.3 断面寸法の耐衝撃性に与える影響

図-4 に、断面寸法が異なり静的曲げ耐力が同程度 (A-19 と B-19, B-10 と C-13) の支点反力および累積残留変位量と衝突速度の関係を示す。A-19 梁と B-19 梁の梁幅と梁高は、各々 16 × 24 cm および 20 × 22 cm と若干異なっているが、断面 2 次モーメントは 18,400 cm<sup>4</sup> および 17,700 cm<sup>4</sup> 程度と大差なく、また用いている鉄筋径は両梁で等しい。そのため、両梁の静的曲げ耐力はほぼ同程度であり、支点反力および累積残留変位量と衝突速度の関係も極めて良く一致している。

一方、B-10 梁と C-13 梁の梁幅と梁高は、各々 20 × 22 cm および 16 × 16 cm であり、断面 2 次モーメントも 17,700 cm<sup>4</sup> および 5,500 cm<sup>4</sup> 程度と大き

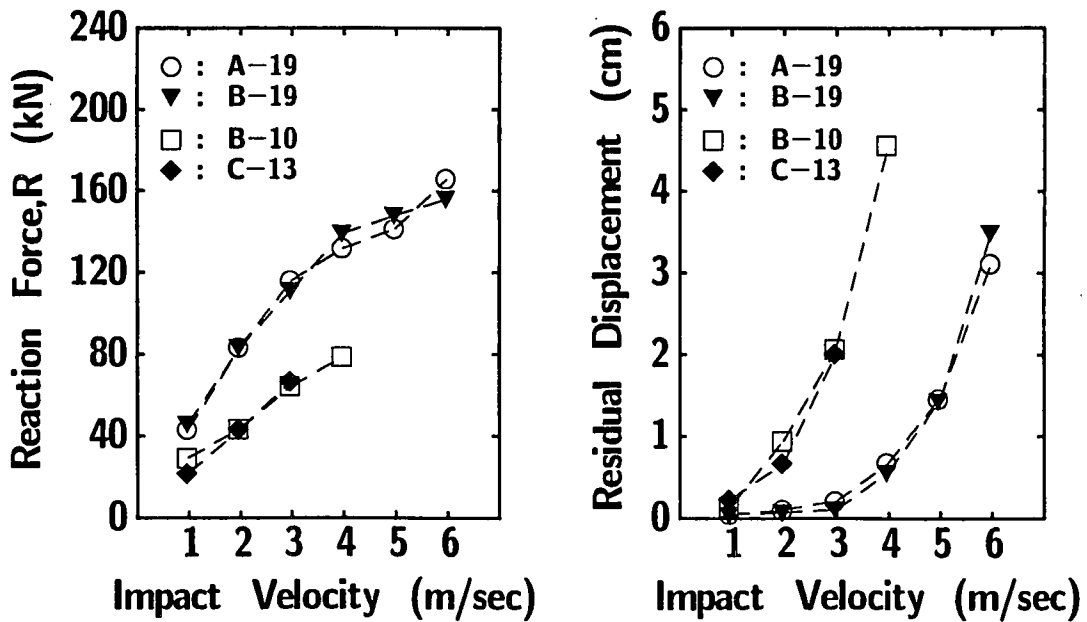


図-4 断面寸法の耐衝撃性に与える影響

く異なっている。しかしながら、断面2次モーメントの小さな梁を太径の鉄筋で補強しているため、両梁の静的曲げ耐力は同程度となっている。このような梁においても、A-19 梁と B-19 梁のように支点反力および累積残留変位量と衝突速度の関係は極めて良く一致している。以上より、衝撃荷重载荷を受ける RC 梁は、断面寸法や補強筋量の違いに関わらず、静的曲げ耐力が同等であれば同様の動的挙動を示すことがわかる。これは、静的曲げ耐力を汎用的な指標として用いることにより、RC 梁の衝撃曲げ耐荷性状の検討が可能であることを意味している。

### 3.4 静的曲げ耐力と支点反力の関係

図-5には、各 RC 梁の静的曲げ耐力と衝撃実験で得られた最大衝突速度（最終载荷時）における支点反力の関係を示している。図中の細破線は、静的曲げ耐力を2倍した値を示している。図より、最終载荷時の RC 梁の支点反力は、断面寸法や補強筋量の違いによらず、静的曲げ耐力の2倍とほぼ同程度か若干大きい程度であることがわかる。これは、静的曲げ耐力を用いて断面設計を行う場合には、支点反力の静的曲げ耐力に対する倍率を2倍程度と評価することで、安全側の設計が可能であることを示唆している。

### 3.5 重錘衝撃力および支点反力と梁中央変位の関係

図-6に最終载荷時における重錘衝撃力および支

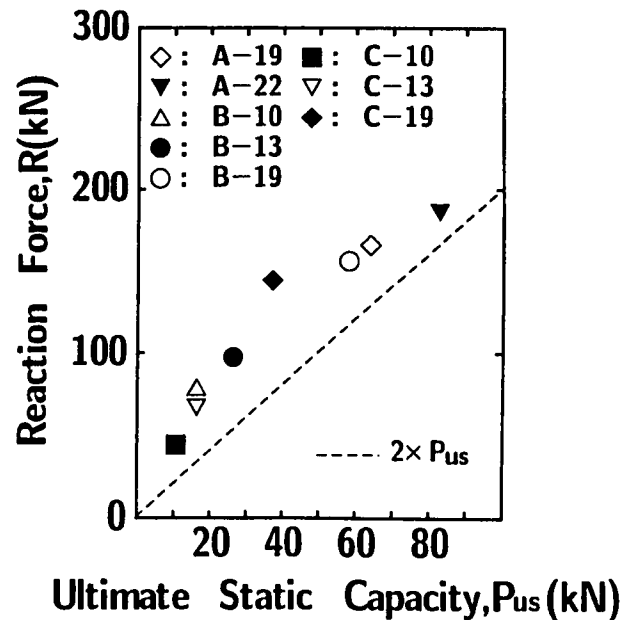


図-5 静的曲げ耐力と支点反力の関係

点反力と梁中央変位の関係を示す。図中、実線は支点反力、破線は重錘衝撃力を示す。なお、A-19 と B-10 梁の最大衝突速度における実験値は得られていないことより、一段階低い衝突速度における結果を示している。また、図下段には重錘衝撃力および支点反力と梁中央変位のなすループの面積として求める吸収エネルギー値を示している。

図-6において各力（重錘衝撃力、支点反力）と変位の関係を見ると、まず重錘の衝突によって大きな重錘衝撃力が極めて小さい変形状態で励起され、変形の増加とともに急速に減少している。一方、支

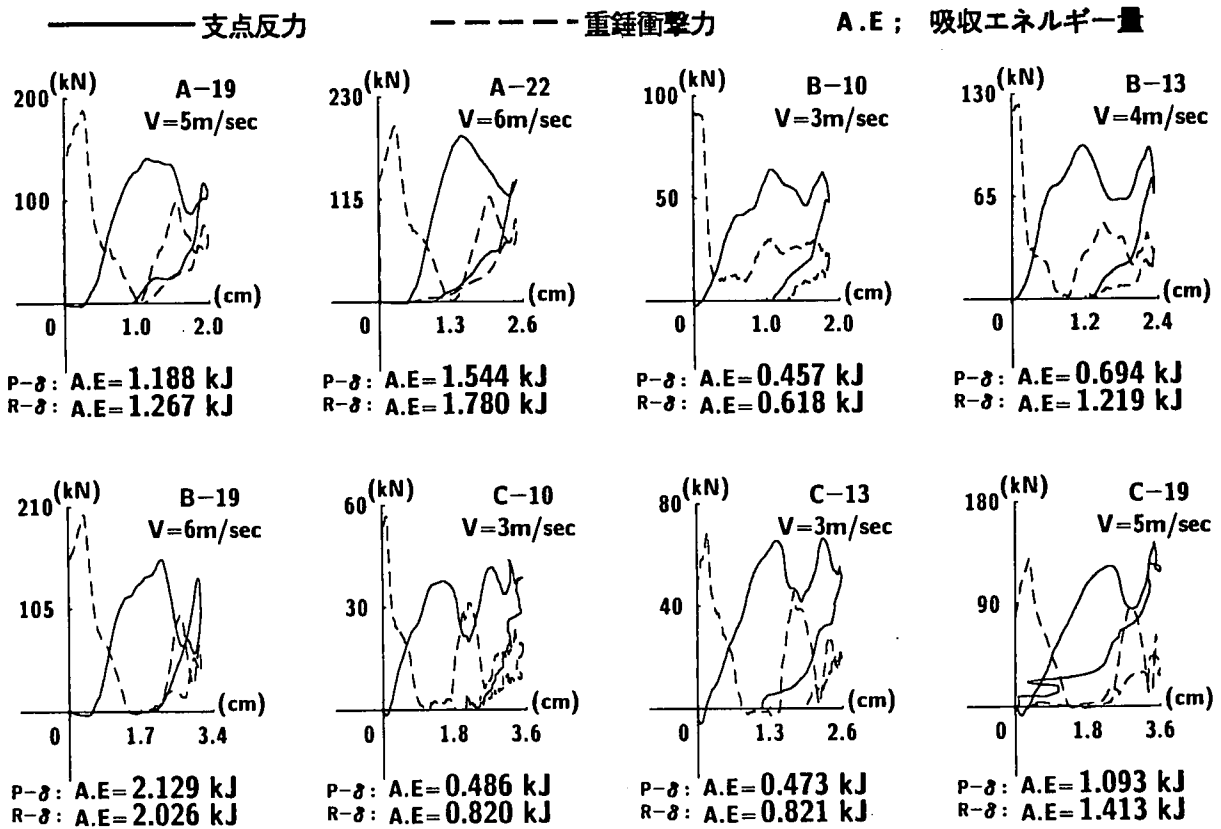


図-6 最終載荷時における重錘衝撃力および支点反力と梁中央変位の関係

点反力は重錘衝撃力の急激な作用の後に変形を伴い徐々に増加してピーク値を示す。また、重錘衝撃力は支点反力がピーク値を示す前後に再度増加し、ピークを示した後急激に減少する。これより、初期の重錘衝撃力は梁の変形を伴わずに急激に励起されることがわかる。これは、梁の変形性能よりむしろ断面剛性に強く影響されて励起されることによるものと考えられる。なお、支点反力がピークを示した後一旦低下して再度増加する現象は、2波目の重錘衝撃力が励起されたことによるものと考えられる。

### 3.6 吸収エネルギーと荷重エネルギーの関係

図-7に、荷重エネルギー（重錘の運動エネルギー）に対する最終載荷時の重錘衝撃力および支点反力と梁中央の変位を用いて評価した吸収エネルギーとの比率を示す。図中、○印は支点反力より求めた吸収エネルギー、●印は重錘衝撃力より求めた吸収エネルギー比率を示す。本実験結果を平均すると、最終載荷時における支点反力より求めた吸収エネルギーは荷重エネルギーの70%程度となる。なお、重錘衝撃力より求めた吸収エネルギーは荷重エネルギーの約50%であった。

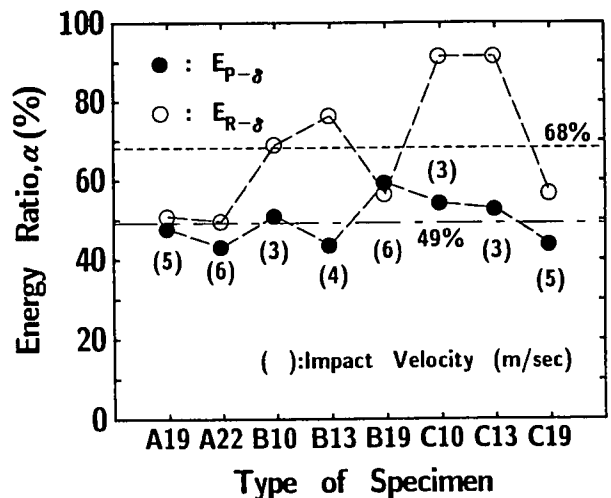


図-7 エネルギー比率

### 3.7 最終載荷時の支点反力・変位の模式化

図-6で得られた支点反力と梁中央変位曲線をもとに、最終載荷時の支点反力  $R$  と残留変位量  $\delta_u$  を用いて模式化する<sup>3)</sup>と、図-8のように示すことができる。また、支点反力と静的曲げ耐力の関係は、図-4で得られた結果を基に、支点反力の静的曲げ耐力に対する比率を、設計的に安全側となるように2.0と仮定すると、RC梁の破壊時の吸収エネルギーと荷重エネルギー  $E_k$  を用いて次式のように示される。

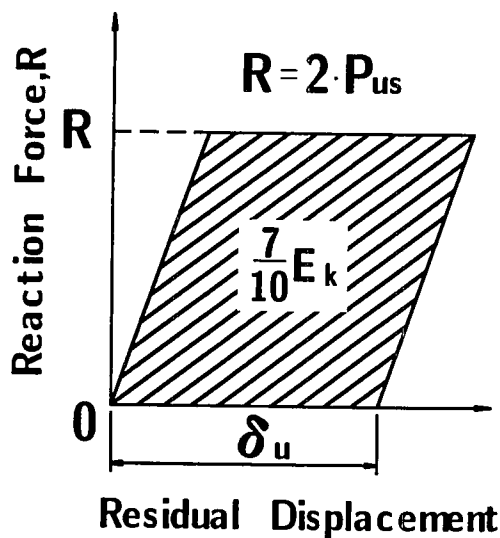


図-8 RC梁の吸収エネルギー模式図

$$2 P_{us} \times \delta_u = 0.7 E_k$$

これより、上式に梁中央最終載荷時の残留変位量および載荷エネルギー量を代入すると、RC梁の耐衝撃設計のための静的曲げ耐力が算出できる。ここで、B-19 および C-10 に着目して、最終載荷時のでの残留変位量  $\delta_u$  および衝突速度をそれぞれ  $2.05 \times 10^{-2}$  m,  $2.33 \times 10^{-2}$  m および 6 m/sec, 3 m/sec として与え静的曲げ耐力  $P_{us}$  を求めると、61.5 kN, 13.5 kN が得られる。これは、表-1 の値にほぼ対応している。

#### 4. まとめ

本研究では、曲げ破壊型を示す RC 梁の合理的な耐衝撃設計法を確立するための基礎資料を得ることを目的として、断面寸法および補強筋量（静的曲げ耐力）の異なる RC 梁の重錘落下衝撃実験を行い、各 RC 梁の耐衝撃性状について比較検討した。その

結果を要約すると、

- (1) 断面寸法や補強筋量の違いに関わらず、静的曲げ耐力が類似の RC 梁は、同様の耐衝撃性状を示す。
- (2) RC 梁の支点反力は静的曲げ耐力の 2 倍程度とすることで、設計的に安全側で評価できる。
- (3) 最終載荷時における支点反力および重錘衝撃力より評価した吸収エネルギーは、それぞれ載荷エネルギーの 70% 程度および 50% 程度である。
- (4) 上述した支点反力と静的曲げ耐力の関係、載荷エネルギーと支点反力より評価される吸収エネルギーの関係を用いることより、静的曲げ耐力を用いた RC 梁の耐衝撃設計が可能となる。

謝辞：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学科構造力学研究室の賀澤友晴君、長谷川弘毅君に多大なる御支援を戴いたことを付記し、ここに感謝の意を表する。

#### 参考文献

- 1) 岸 徳光, 三上 浩, 田村富雄, 松岡健一：RC 梁の衝撃挙動に及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。
- 2) 松岡健一, 三上 浩, 岸 徳光：低補強筋比 RC 梁の耐衝撃性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.2，pp.929-934，1995。
- 3) 三上 浩, 岸 徳光, 松岡健一, 田村富雄：低速度衝撃を受ける RC 梁の耐衝撃設計法の一提案，構造工学論文集，Vol.42A，pp.1255-1260，1996。