

論文 RC 梁の耐衝撃性に及ぼす断面寸法の影響

岸 徳光^{*1}・三上 浩^{*2}・佐藤 昌志^{*3}・松岡健一^{*4}

要旨：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）をそれぞれ変化させた RC 梁に重錘衝撃力を載荷して耐衝撃性状を比較検討し、併せて既往の耐衝撃設計法の適用性を検討した。その結果、(1) 断面寸法や補強筋量の違いに関わらず、静的曲げ耐力が同等な梁の耐衝撃性状は類似である。また、静的曲げ耐力と衝撃荷重載荷時の最大支点反力もほぼ同程度である、(2) 既往の耐衝撃設計法は断面寸法の異なる RC 梁にも適用可能である、等が明らかになった。

キーワード：静的曲げ耐力、耐衝撃性、吸収エネルギー、重錘衝撃、RC 梁

1. はじめに

著者らは、これまで耐衝撃用途のコンクリート構造物の衝撃安全性を向上させる目的で、RC 梁や PC 梁の衝撃応答特性に関する研究を行ってきた [1~2]。特に最近の研究では、同一断面寸法を有する RC 梁の耐衝撃設計法について、主として曲げ破壊する場合に限定した一提案を行った [3]。すなわち、RC 梁の衝撃曲げ耐力は、補強筋量（静的曲げ耐力）の大小に関わらず静的曲げ耐力と同程度であること、同一載荷速度で比較するとエネルギー吸収量が大きい梁ほど最大載荷速度からみた耐衝撃性に劣ることなどを明らかにしてきた。しかしながら、特定の断面寸法を有する RC 梁の実験結果を基に提案した耐衝撃設計法の異なる断面寸法を有する RC 梁への適用性に関しては、いまだ検討されていないのが現状である。

本研究は、RC 梁の合理的で汎用性のある耐衝撃設計法を確立することを目的として、同一の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 梁を用いた衝撃荷重載荷実験を行い、RC 梁の耐衝撃性状や既往の耐衝撃設計法の適用性について検討を行った。本研究では、重量 200kgf の重錘を自由落下させることにより衝撃荷重を載荷させている。載荷方法は載荷速度を $V=1\text{m/sec}$ から 1m/sec 刻みで破壊に至るまでの繰り返し荷重載荷である。

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。重錘衝撃力の載荷は、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 1m/sec 刻みで増加させ、破壊するまで繰り返し行った。なお、載荷装置の制約から最大載荷速度は $V=6\text{m/sec}$ である。

表—1 中の静的曲げ耐力は、表—2, 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

*1 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 三井建設（株）技術研究所 主任研究員、工博（正会員）

*3 北海道開発局 開発土木研究所室長 構造研究室（正会員）

*4 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）

断面分割法によって算出した．分割数はほぼ一定の解が得られる分割数以上とし，5 mm 刻みの 32 ～ 48 分割とした．なお，曲げ耐力の算定には表—3 に示した鉄筋の力学的特性（規格値）の下限值を用いている．また，下端補強筋比，衝撃実験終了後の残留変形量を併せて表中に整理している．破壊形式はすべて下端筋降伏による曲げ破壊であり，載荷点直下で角折れして V 字型を示している．実験に用いたコンクリートの強度は，設計基準強度が $f'_{ck} = 240 \text{ kgf/cm}^2$ で実験時材令における圧縮強度が $f'_c = 252 \sim 284 \text{ kgf/cm}^2$ である．

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示している．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，重錘および支点部には衝撃荷重測定用に開発した歪ゲージ式のロードセルを設置して，重錘衝撃力と動的支点反力を測定した．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 の円柱状の鋼製重錘を所定の高さから自由落下させて載荷している．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，変位応答ならびに残留変形量を測定した．

3. 実験結果および考察

3.1 残留変形量

本研究では各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形量が梁の純スパンの 1/50 (4cm) 程度に達した状態を破壊と定義した．ただし，A-22 梁の残留変形量は最大載荷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 梁の累積残留変形量が純スパンの 1/35 程度と基準値を大幅に超えているため，表—1 に示す

表—1 試験体および実験結果

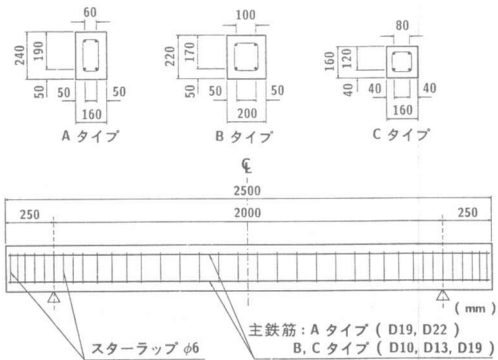
試験体名	載荷速度 (m/sec)	補強筋比 (%)	静的曲げ 耐力 (tf)	残留変形量 (cm)
A-19	1 ～ 6	1.88	6.59	3.10
A-22	1 ～ 6	2.55	8.49	1.90
B-10	1 ～ 4	0.42	1.72	4.56
B-13	1 ～ 5	0.75	2.74	5.80
B-19	1 ～ 6	1.69	6.00	3.48
C-10	1 ～ 3	0.74	1.16	3.37
C-13	1 ～ 4	1.32	1.73	5.60
C-19	1 ～ 5	2.98	3.86	3.90

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 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)	ポアソン比
A-19, B-19, C-19	86	284	1.97×10^5	0.19
A-22, B-13, C-13	85	252	1.20×10^5	0.20
B-10, C-10	84	276	1.95×10^5	0.19

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 ²)	0.71	1.27	2.87	3.87
引張耐力 (tf)	3.2 ～ 4.4	5.7 ～ 7.8	14.3 以上	19.3 以上
降伏耐力 (tf)	2.1 以上	3.8 以上	10.1 ～ 12.9	13.6 ～ 17.4
弾性係数 ($\times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$)	2.1			
弾性伸び率 (%)	0.2			



図—1 試験体の形状寸法および配筋位置

最終載荷速度より一段階低い載荷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形量は概ね $1/45 \sim 1/65$ 程度であり、基準値に近い値となっている。

3.2 載荷速度と重錘衝撃力および最大支点反力の関係

図-2 には載荷速度と重錘衝撃力および最大合支点反力（以後、これを支点反力と呼ぶ）の関係を各断面タイプごとに示す。また、図中には細破線で各梁の静的曲げ耐力を示した。図より、載荷速度と支点反力のなす勾配は、静的曲げ耐力程度の支点反力を励起させる載荷速度で変化し、以後の載荷速度では緩やかな勾配になっていることが分かる。これは、静的曲げ耐力と同程度の支点反力が励起される載荷速度において、梁の下端筋が降伏したことを示すものと考えられる。また、静的曲げ耐力が小さい梁（B-10、C-10、C-13）の場合に勾配の変化が緩やかである。これは、処女載荷（ $V = 1$ m/sec）において、既に静的曲げ耐力と同程度の支点反力が励起され、下端筋が降伏しているためと考えられる。なお、断面タイプの違いに関わらず静的曲げ耐力（補強筋比）が大きな梁ほど支点反力も大きく励起されている。

一方、重錘衝撃力は全般的に支点反力よりも $2 \sim 3$ 倍程度大きく、支点反力にみられた静的曲げ耐力レベルにおける勾配の変化は表れていない。しかしながら、支点反力と同様に静的曲げ耐力の大きな梁ほど重錘衝撃力も大きく励起されていることがわかる。

3.3 静的曲げ耐力と支点反力の関係

図-3 には各梁の静的曲げ耐力と衝撃実験で得られた最大載荷速度における支点反力の関係を図示している。図中の細破線は静的曲げ耐力と支点反力が等しい状態を示している。図より、梁の衝撃破壊時における支点反力は、補強筋量や断面寸法の違いに関わらず静的曲げ耐力とほぼ同程度か若干大きい程度であることが分かる。これは、RC 梁の衝撃曲げ破壊が静的曲げ破壊と同様に補強筋の降伏と密接に関連していることを示している。また、衝撃曲げ耐力と支点反力が等しいと仮定すると、衝撃曲げ耐力は静的曲げ耐力と同程度か若干大きい程度であることより、静的曲げ耐力で評価することは設計的に安全側であると考えられる。

3.4 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の梁（A-19 と B-19、B-10 と C-13）の支点反力および累積残留変形量と載荷速度の関係を示す。A-19 梁と B-19 梁の梁幅と梁高は、各

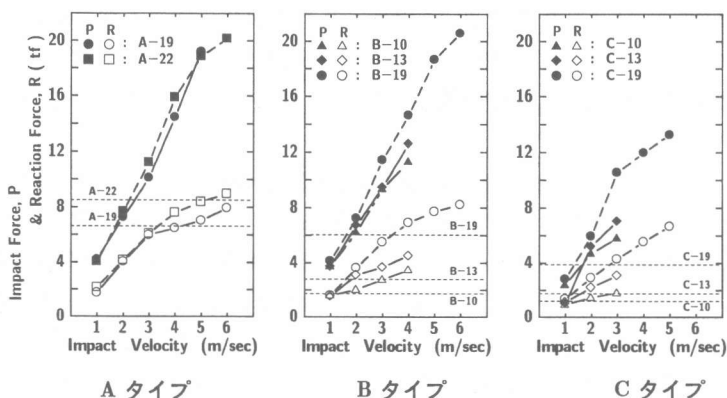


図-2 載荷速度と重錘衝撃力および支点反力の関係

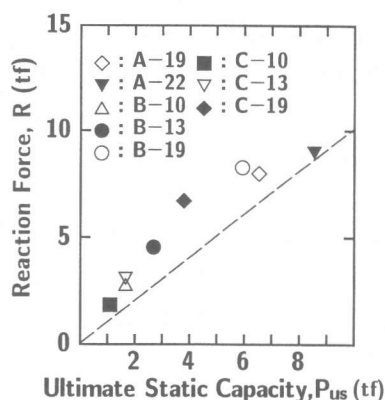


図-3 静的曲げ耐力と支点反力

各 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 $18,400 \text{ cm}^4$ および $17,700 \text{ cm}^4$ 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形量の載荷速度と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 $17,700 \text{ cm}^4$ および $5,500 \text{ cm}^4$ と大きく異なっている。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たため、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形量の載荷速度との関係は極めて良く合致している。以上より衝撃荷重載荷を受ける 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分かる。これは、RC 梁の衝撃曲げ耐荷性状は静的曲げ耐力を汎用的な指標として検討できることを暗示している。

3.5 重錘衝撃力および支点反力と梁中央変位の関係

図-5 に梁破壊時近傍の載荷速度における重錘衝撃力および支点反力と梁中央の変位の関係を示す。図中、実線は支点反力、破線は重錘衝撃力を示す。なお、本図において、A-19 と B-10 梁の最大載荷速度における実験値が得られていないことより、一段階低い載荷速

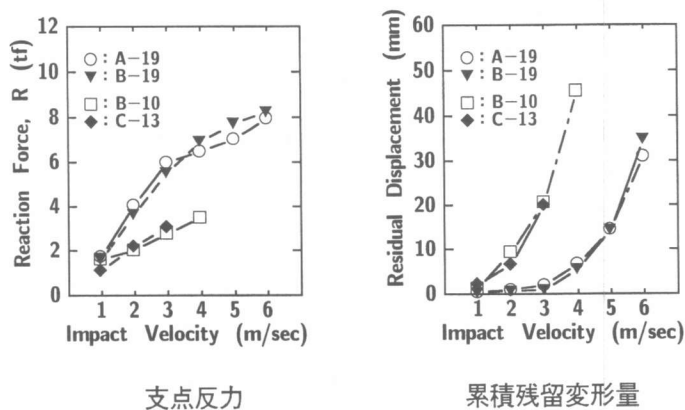


図-4 断面寸法の耐衝撃性に与える影響

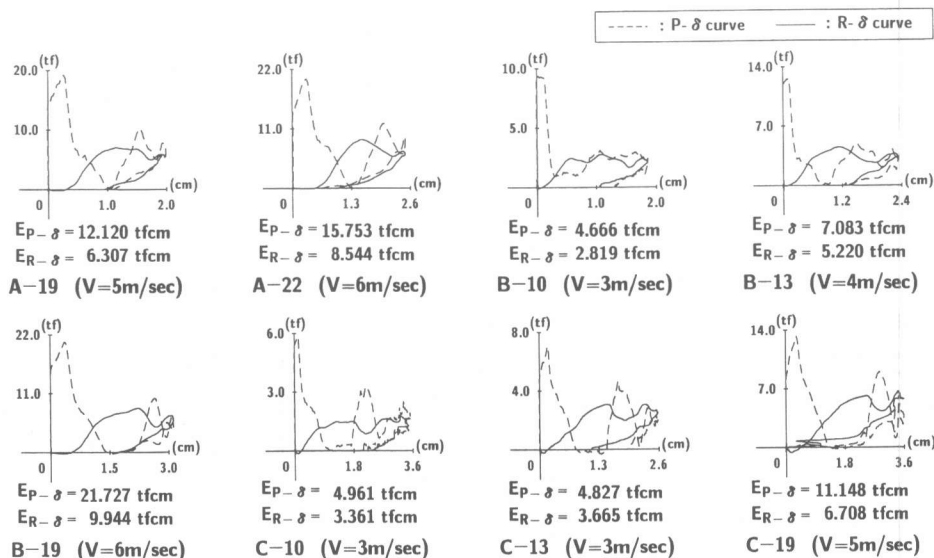


図-5 重錘衝撃力および支点反力と梁中央の変位の関係

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まる吸収エネルギー値を示した．

図-5 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完全に除荷される．一方，支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を示す．また，支点反力がピークを示す前後に再度重錘衝撃力は増加し，ピークを示した後急激に減少する．これより，重錘衝撃力はほとんど梁の変形を伴わずに急激に励起されることが分かる．すなわち，重錘衝撃力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ものと考えられる．一方，重錘衝撃力の 2 波目の最大値と支点反力の最大値はほぼ対応している．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 吸収エネルギーと载荷エネルギーの関係

図-6 に，最終载荷速度近傍における梁の重錘衝撃力あるいは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そのときの载荷エネルギー（重錘の運動エネルギー）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，梁破壊時における支点反力より求めた吸収エネルギーは载荷エネルギーの 30 % 程度となる．既往の研究 [3] におけるこの値は 36 % 程度であることより，梁破壊時の支点反力より求めた吸収エネルギーは载荷エネルギーの 1/3 程度と考えられる．なお，重錘衝撃力より求めた吸収エネルギーは载荷エネルギーの約 50 % であった．

3.7 衝撃エネルギーと静的曲げ耐力および残留変形量の関係

図-7 に梁破壊時における载荷エネルギーと静的曲げ耐力の関係を示す．実線は本実験結果を基に最小 2 乗法で近似した関係であり，破線は既往の研究結果による実験式である [3]．この図から，断面寸法や補強筋量の違いに関わらず，梁破壊時の载荷エネルギー E_K は静的耐力 P_{us} と長さの次元をもつ定数 5.27 ~ 6.45 の積として評価できることがわかる．すなわち，本実験結果と既往の研究結果より梁破壊時の载荷エネルギー E_K は，

$$E_K = (5.27 \sim 6.45) \times P_{us} \quad \dots\dots (1)$$

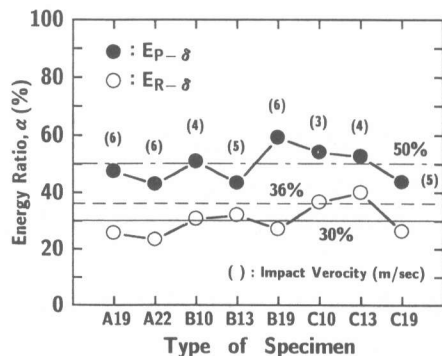


図-6 エネルギー比率

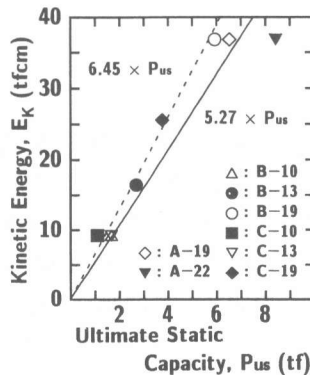


図-7 载荷エネルギーと静的曲げ耐力

また，支点反力を用いた吸収エネルギーは文献 [3] より
図-8 のように示される．よって，文献 [3] と本実験結
果から RC 梁の破壊時の吸収エネルギーが載荷エネル
ギーの 1/3 程度であることより，

$$P_{us} \times \delta_u = \frac{1}{3} E_K \quad \dots\dots (2)$$

(1)，(2) 式より，

$$3 \times P_{us} \times \delta_u = (5.27 \sim 6.45) \times P_{us} \quad \dots\dots (3)$$

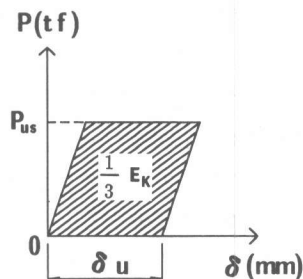


図-8 吸収エネルギー模式図

よって， δ_u は 1.8 ～ 2.2 cm 程度となる．すなわち，ある載荷速度における残留変形量が 1.8 ～ 2.2 cm 程度になるとき累積残留変形量がスパンの 1/50 (4 cm) 程度となって破壊基準に達し，そのときの載荷速度が最終載荷速度であることが分かる．

4. まとめ

断面寸法および補強筋量の異なる RC 梁を製作し，重錘衝撃力を載荷して耐衝撃性状を比較検討し，併せて著者らが提案した既往の耐衝撃設計法の適用性を検討した．本研究の範囲内で明らかになったことを要約すると，

- (1) 断面寸法や補強筋量の違いに関わらず，静的曲げ耐力が同等な梁の耐衝撃性状は同様である．また，静的曲げ耐力と支点反力はほぼ同程度である．
- (2) 最大重錘衝撃力は支点反力の 2 ～ 3 倍と大きい，重錘衝撃力の 2 波目の最大値と支点反力は概ね対応する．
- (3) 梁破壊時の載荷速度における重錘衝撃力より求めた吸収エネルギーは載荷エネルギーの 50 % 程度，支点反力より求めた吸収エネルギーは 30 % 程度である．
- (4) 既往の耐衝撃設計法は断面寸法の異なる RC 梁にも適用可能である．

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小番一広君，柿下大君，賀澤友晴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.
- 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.