

I - 4

曲げ破壊型 RC 梁模型の重錘落下衝撃挙動

室蘭工業大学 正 員 岸 徳 光
 三井建設(株) 正 員 三 上 浩
 防 衛 庁 正 員 安 藤 智 啓
 室蘭工業大学 学生員 賀 澤 友 晴

1. はじめに

耐衝撃用途のコンクリート構造物の安全性を向上させるため、著者らはこれまで RC 梁や PC 梁の衝撃応答特性に関する研究を行ってきた [1-4]。すなわち、断面寸法や補強筋量が異なり静的曲げ耐力が同等な梁の耐衝撃性状についてや、最大支点反力と静的曲げ耐力の関係について研究を行ってきた。しかしながら、スパン長の異なる RC 梁における検討はいまだ行われていない。

本研究では断面寸法、純スパン長をそれぞれ 2 種類とする計 4 種類の梁における耐衝撃性状を比較検討することとした。なお、RC 梁の破壊は既往の研究 [5] と同様に累積残留変形量が梁の純スパンの 1/50 程度に達した状態と定義している。本文では、まず静的曲げ耐力が等しくスパンの異なる梁に関して、合支点反力（以後、本文ではこれを簡略化して単に支点反力と呼ぶこととする）および残留変位特性を比較し、スパン長の耐衝撃性に与える影響を検討している。次に、梁が衝撃曲げ破壊する載荷速度近傍での重錘衝撃力および支点反力と梁中央の変位のなすループの面積で与えられる吸収エネルギーを求め、これらと載荷エネルギー（重錘の運動エネルギー）の関係を明らかにし、RC 梁の耐衝撃性をエネルギー論的観点から考察している。

2. 実験概要

表一 1 に試験体および実験結果の一覧を示す。試験体は断面寸法ならびに純スパン長を変えた複鉄筋矩形梁である。梁幅、梁高ともにそれぞれ 25 cm, 20 cm の正方形断面を A, B タイプとし、各タイプとも純スパン長が 2 m, 3 m の供試体がそれぞれ 3 体、1 体の合計 8 体を製作した。試験体名は断面の種類および純スパン長、重錘重量、載荷条件を組み合わせで表示している。本研究では重錘重量 300 kgf を用い、重錘衝突の初速度および増分速度を 1 m/sec とする繰り返し載荷実験を基準実験としている。また、純スパン 2 m 長の RC 梁を対象として重錘重量 400 kgf を用い、入力エネルギーを基準実験と等しくする場合（載荷条件：E），および各重錘載荷時の入力力積を基準実験と等しくする場合（載荷条件：I）についても実験を行っている。表中の静的曲げ耐力は、表一 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断面分割法により算出した。なお、表一 3 の鉄筋の力学的特性は規格値を用いて示している。分割数はほぼ一定の解が得られる分割数以上とし、約 5 mm 刻みの 50, 41 分割とした。また、下端補強筋比、衝撃実験終了後の

表一 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)	累積残留 変形量(cm)	最終載荷速度での 残留変形量(cm)
A-2-300	1~5	1.09	9.18	2.75	1.34
A-3-300		1.09	6.12	3.62	1.82
B-2-300		3.17	8.56	2.58	1.42
B-3-300		3.17	5.71	3.27	1.75
A-2-400-E	0.87~4.33	1.09	9.18	3.23	1.60
B-2-400-E		3.17	8.56	2.43	1.36
A-2-400-I	0.75~4.50	1.09	9.18	3.83	1.60
B-2-400-I		3.17	8.56	3.55	1.72

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 354 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。各梁は鉄筋の定着長を節約するために端面に9 mm の鋼板を設置し、この鋼板に鉄筋を溶接している。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、RC 梁の両端面から 20 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。治具全体は RC 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、重錘衝撃力ならびに動的支点反力を測定した。衝撃荷重は梁のスパン中央部に重量 300 kgf あるいは 400 kgf 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。スパン中央部にはストロークが 200mm の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。

表-2 コンクリートの力学特性

コンクリート強度(kgf/cm ²)	材令(日)	ヤング係数(kgf/cm ²)	ポアソン比
354	36	2.75×10^5	0.25

表-3 補強筋の力学特性

補強筋名称	D19	D25
材質	SD345	SD295A
公称直径(mm)	19.1	25.4
公称断面積(cm ²)	2.87	5.07
引張耐力(tf)	14.3以上	22.8~30.9
降伏耐力(tf)	10.1~12.9	15.2以上
ヤング係数($\times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$)	2.1	
弾性伸び率(%)	0.2	

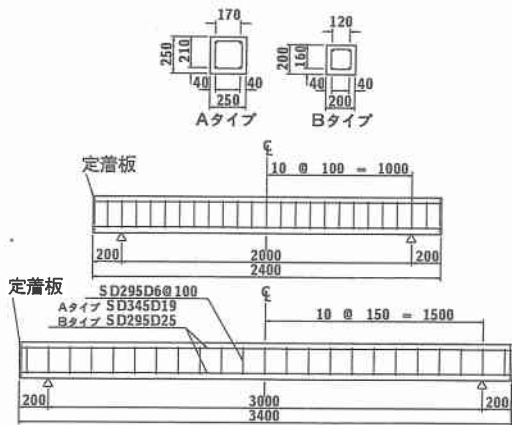


図-1 試験体の形状寸法および配筋位置

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 (純スパン 2 m の梁は 4 cm, 純スパン 3 m の梁は 6 cm) を越えない状態を破壊と定義した。実験はいずれの試験体においても破壊基準とほぼ同程度かそれを若干越えた段階で終了している。しかしながら、破壊基準を越える場合には最終載荷速度では梁の破壊に伴い変位が著しく大きくなるため、それより 1 段階低い載荷速度での実験値をもとに以後の考察を行うこととした。

3.2 載荷速度と最大重錘衝撃力および最大支点反力の関係

図-2に載荷速度と最大重錘衝撃力および最大支点反力の関係をスパン長で比較した。図より、A タイプ、B タイプともに純スパンが 2 m の梁より 3 m の梁の方が重錘衝撃力と支点反力の差が大きいことがわかる。また、その差は載荷速度の増加とともに大きく示されている。これは、本研究に用いられている梁が全て曲げ破壊型であり、純スパン 3 m の場合にはたわみ剛性が小さいことより衝撃力が載荷点から支点到伝播する間に減衰する傾向にあるためや、繰り返し載荷によって RC 梁に損傷が蓄積されその損傷によってエネルギーが吸収されるためと推察される。また、載荷速度が大きくなると若干の差がでてくるが、スパン長に関わらず重錘衝撃力はほぼ同等の値を示している。これは、RC 梁の衝撃荷重載荷点部が桁高方向の軸剛性によって衝

撃力に抵抗しているものと考えられることから、その剛性が繰り返し載荷によっても著しく減少しないことを意味しているものと推察される。

3.3 静的曲げ耐力と最大支点反力の関係

図-3 に各梁の最大支点反力 R_d と静的曲げ耐力 P_u の比を示す。図中の細破線は全試験体平均を示している。図より、破壊寸前の梁の最大支点反力は、静的曲げ耐力のほぼ 2.24 倍程度であることがわかる。また、純スパン 3 m の試験体の比が平均値よりやや大きく示されている。静的耐力を用いて断面設計を行う場合には、大きな静的耐力を要求することで安全側の設計が可能となることより、最大支点反力の静的耐力に対する倍率を 2 程度と評価することは工学的に妥当なものと判断される。

3.4 載荷基準と応答性状の関係

図-4 に載荷条件と重錘衝撃力および支点反力の関係を示した。(a), (b) 図は横軸に運動エネルギーをとり縦軸に重錘衝撃力および支点反力をプロットした図である。一方(c), (d) 図は同様の結果を、力積を横軸にとって整理している。(a), (b) 図より入力エネルギーを横軸にとって整理した場合の応答値は A, B タイプともによく対応していることがわかる。それに対して力積を基準にして整理した場合(c, d 図)には、特に B タイプの実験

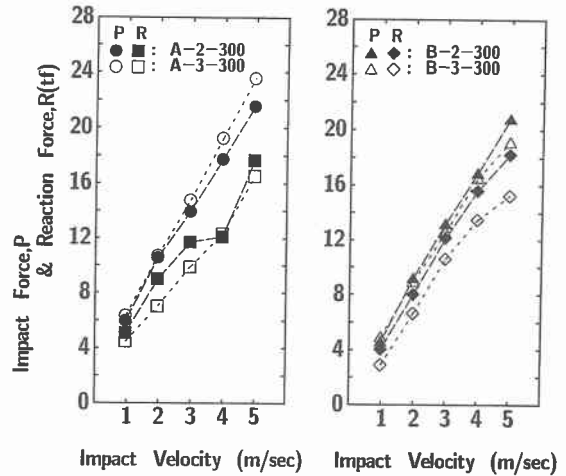


図-2 載荷速度と最大重錘衝撃力および最大支点反力

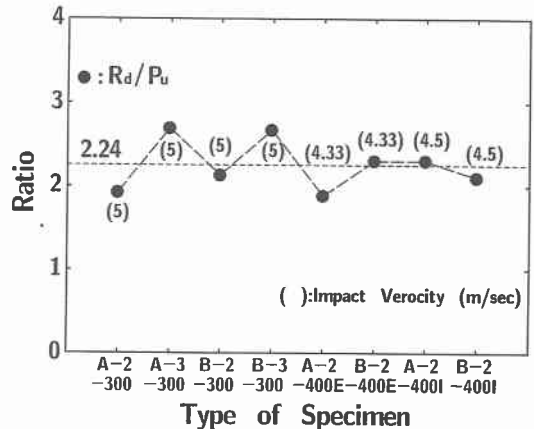


図-3 最終載荷速度における最大
支点反力と静的曲げ耐力の比

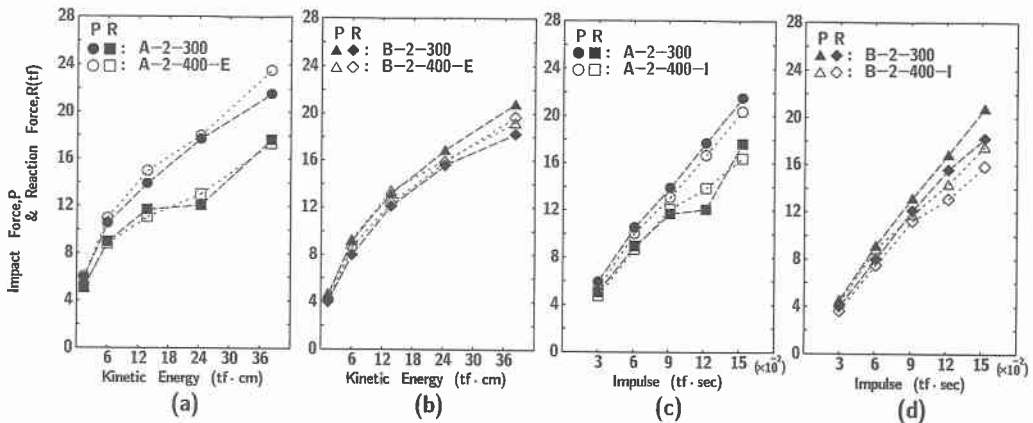


図-4 載荷条件別の最大重錘衝撃力および最大支点反力

結果において重錘重量が小さく速度が大きい場合には重錘重量が大きく速度が小さい場合より大きな応答値を示している。この結果は、RC 梁の衝撃応答性状が異なった重錘重量あるいは載荷速度に対しても入力エネルギーを関数にとることにより適切に評価可能であることを示している。

3.5 スパン長と累積残留変形量の関係

図-5 には、静的曲げ耐力がほぼ等しい A-2、B-2 と A-3、B-3 に関する累積残留変形量分布を示している。図より A タイプが載荷速度の大きい場合に多少大きい値を示しているが、工学的にはいずれのスパン長に対しても類似であることがわかる。これより、弾性状態における断面剛性が異なる場合でも静的耐力が類似の場合には同様の累積残留変形量を示すことが明らかになった。

3.6 重錘衝撃力および支点反力と梁中央変位の関係

図-6 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の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と試験体名、載荷速度を示した。図-6 において各衝撃力（重錘衝撃力、支点反力）と変位の関係をみると、まず重錘衝撃力と支点中央の変位のなすループにおいて純スパン 2 m と 3 m の場合における分布性状が異なっているのがわかる。純スパン 2 m のループは極めて小さい変形状態で大きな重錘衝撃力が励起され、変形の増加と

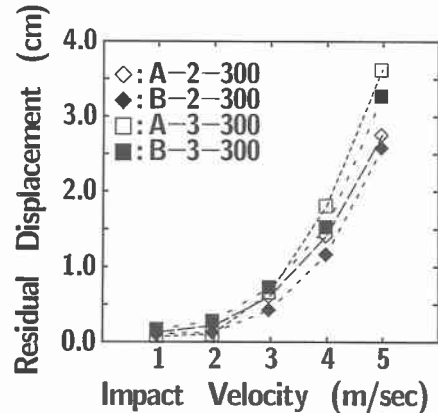


図-5 載荷速度と累積残留変形量

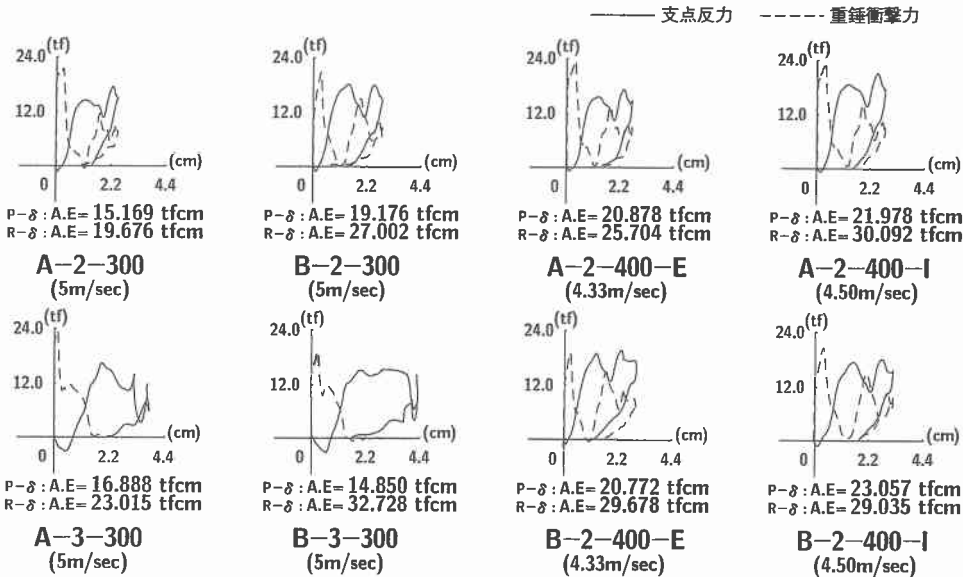


図-6 重錘衝撃力および支点反力と梁中央の変位の関係

ともに急速に減少し一度完全に除荷状態となる。その後 2 波目が励起され、その振幅は初期の 1/2 強になっている。一方、純スパン 3 m の場合における重錘衝撃力は衝撃初期には純スパン 2 m と同様であるが、完全に除荷状態になる前に 2 波目が励起されている。しかしながら、荷重強度の増加は小さくほぼゆるやかな除荷状態となっている。支点反力に関しては、純スパン 2 m の場合には初期の重錘衝撃力によって第 1 ピークの支点反力が励起され、2 波目の衝撃力によっても第 1 ピークと同程度の反力が生じている。一方、純スパン 3 m の場合には初期および第 2 波目の合衝撃力によって支点反力が励起されている。これは、純スパン 2 m の場合にはたわみ剛性が大きいために重錘のリバウンドも大きく、従って第 2 波目の衝撃力も大きくなるものと考えられる。これに対して、純スパン 3 m の場合にはスパンが長いなたわみ剛性が小さく、低次固有振動周期も長くなることより重錘のリバウンド量が小さくなり、あたかも一波の衝撃力が作用したかのよう挙動したものと推察される。

3.7 吸収エネルギーと载荷エネルギーの関係

図-7 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時の载荷エネルギー（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の比率を示す。本実験結果を平均すると、梁破壊近傍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 70 % 程度となる。また、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。

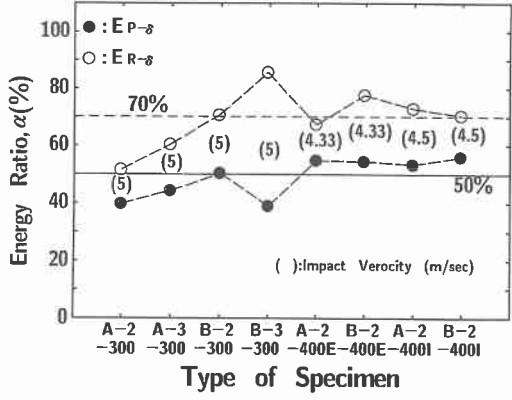


図-7 エネルギー比率

3.8 载荷エネルギーと静的

曲げ耐力および残留変形量の関係

図-6 の支点反力-変位曲線をもとに、最終载荷速度における支点反力と残留変形量 δ_u を用いて模式化すると図-8 のように示すことができる。なお、このときの残留変形量 δ_u は表-4 からほぼ純スパンの 1/150 程度であることがわかる。最大支点反力と静的曲げ耐力の関係は図-3 で示しているように、スパン長によって若干異なる傾向にあるが、安全側に評価することとして、その比率を 2.0 と仮定する。ここで、模式図から得られる吸収エネルギーと入力エネルギーの関係を等

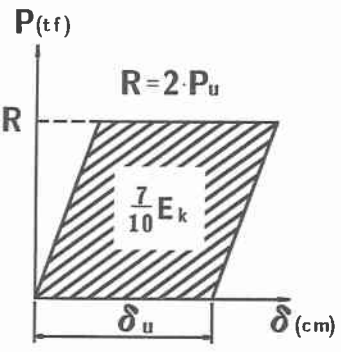


図-8 RC 梁の衝撃エネルギー模式図

式化すればエネルギー収支より、次式が得られる。

$$2.0 P_u \times \delta_u = 0.7 E_K$$

これより、上式に最終载荷速度における入力エネルギーお

表-4 純スパン長に対する残留変形量の比

試験体名	A-2 -300	A-3 -300	B-2 -300	B-3 -300	A-2 -400-E	B-2 -400-E	A-2 -400-I	B-2 -400-I
最終载荷速度 での残留変位 δ_u (cm)	1.34	1.82	1.42	1.75	1.60	1.36	1.60	1.72
純スパン / δ_u	149.3	164.8	140.9	171.4	125.0	147.1	125.0	116.3

よびその時の残留変形量を代入すると、衝撃荷重載荷に対する設計のための静的曲げ耐力が求まる。ここで、 δ_u を上述のように純スパンの 1/150，最終載荷速度を 5 m/sec にして P_u を求めると、A-2-300，A-3-300 に対して 10 tf，6.7 tf が得られ、表—1 の値にほぼ対応していることがわかる。

4. まとめ

曲げ破壊型 RC 梁においてスパン長および断面寸法をそれぞれ 2 種類の試験体に、載荷条件として重錘重量 300 kgf の場合と、重錘重量を 400 kgf に替えて運動エネルギー等価、力積等価で実験を行った場合とで耐衝撃性状を比較検討した。本研究の範囲内で明らかになったことを要約すると、

- (1) スパン長の異なる RC 梁において重錘衝撃力と支点反力の差は、純スパンが長くなるほど大きくなる。
- (2) 静的曲げ耐力がほぼ等しい断面寸法の異なる梁において、曲げ剛性が小さく、変形が大きくなる梁の方が吸収エネルギーが大きくなる。
- (3) 破壊寸前の梁の最大支点反力は静的曲げ耐力の 2 倍程度であるが、純スパンが長くなると多少大きくなる傾向にある。
- (4) 繰返し荷重載荷実験における RC 梁の動的挙動性状は、入力運動エネルギーを関数に取って正規化する事が可能である。
- (5) 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 70 % 程度である。
- (6) 上述の最大支点反力と静的体力の関係、支点反力を用いて評価した吸収エネルギー量の関係および最終載荷速度における残留変形量を規定することにより、静的耐力を用いて RC 梁の衝撃荷重載荷時における断面設計が可能となる。

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) 中島規道，三上浩，岸徳光，松岡健一：PC 桁の衝撃変形挙動におよぼす緊張材の特性と配置位置の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16，No.2，pp.1111-1116，1994。
- 4) 三上浩，田村富雄，岸徳光，松岡健一：コンクリート梁の耐衝撃性におよぼす緊張材の特性とプレストレスの影響，構造工学論文集，Vol.41A，pp.1267-1276，1995。
- 5) 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。