

I-60

せん断破壊型 RC 梁の動的耐力に関する実験的研究

室蘭工業大学 正員 岸 徳 光
 三井建設(株) フェロー 三 上 浩
 室蘭工業大学 正員 安 藤 智 啓
 室蘭工業大学 ○学生員 長谷川 弘 毅

1. はじめに

著者らは、これまで耐衝撃用途として使用される鉄筋コンクリート(RC)およびプレストレストコンクリート(PC)製梁、柱、板の耐衝撃性に関する研究を継続して行ってきた。その結果、RC梁に関しては衝撃荷重載荷時の曲げ破壊性状が徐々に明かにされてきており、曲げに対する合理的かつ簡易な耐衝撃設計法が提案されるに至っている[1,2]。しかしながら、静載荷時に曲げ耐力に対するせん断耐力の余裕度(以下、せん断余裕度)の小さな構造部材が衝撃荷重を受ける場合のせん断破壊性状は、RC梁に関してさえも十分に解明されておらず、せん断に対する合理的な耐衝撃設計法は未だ確立されていないのが現状である。一般に、RC梁のせん断破壊は変形をほとんど伴わずに耐力が減少するため極めて脆性的な破壊となり、梁が致命的な損傷に至る危険性を有している。従って、RC梁の耐衝撃設計時には、静載荷時の場合と同様に常に曲げ耐力以上のせん断耐力が確保されている必要がある。しかしながら、RC梁のせん断耐力がどの程度確保されていれば衝撃荷重載荷時において安全であるのかに関する検討など、せん断破壊を示すRC梁の耐衝撃性を総合的に研究した事例は少ない。

本研究では、せん断に対する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、主として静載荷時にせん断破壊が卓越するRC梁に着目して漸増繰返し衝撃載荷実験を行った。用いた試験体は主鉄筋比およびせん断スパン比の異なるRC梁であり、それらパラメータの影響も踏まえて各RC梁の耐衝撃性に関する検討を行った。なお、本研究では主鉄筋とコンクリートのアーチ作用によるせん断耐力に限定して検討を行うため、全ての試験体にはせん断補強筋を配置しないこととした。

2. 実験概要

本実験に用いた試験体の一覧を表-1に示す。試験体は主としてせん断余裕度 α が1.0以下で静載荷時にせん断破壊が卓越するRC梁である。試験体数は、主鉄筋比 p_t 、せん断スパン比 a/d が異なる計6体であり、試験体名はこれら試験体の主鉄筋径(D13, D19)、純スパン長($L=1.0, 1.5, 2.0$ m)を組み合わせで示している。なお、表中には重錘のRC梁への衝突速度 V 、静的曲げ耐力 P_{usc} および静的せん断耐力 V_{usc} の

表-1 試験体の一覧

試験体名	衝突速度 V (m/s)	主鉄筋径	主鉄筋比 p_t (%)	純スパン長 L (m)	せん断 スパン比 a/d	静的曲げ 耐力 P_{usc} (kN)	静的せん断 耐力 V_{usc} (kN)	理論的な静的 せん断余裕度 $\alpha (=V_{usc}/P_{usc})$	実験による 静的耐力 P_{us} (kN)
D13-L1.0	1~2	D13	0.80	1.0	2.38	75.9	45.7	0.60	71.2
D13-L1.5	1~4	D13	0.80	1.5	3.57	50.6	45.7	0.90	61.8
D13-L2.0	1~4	D13	0.80	2.0	4.76	37.9	45.7	1.20	45.8
D19-L1.0	1~2	D19	1.82	1.0	2.38	150.1	60.0	0.40	114.6
D19-L1.5	1~2	D19	1.82	1.5	3.57	100.1	60.0	0.60	82.0
D19-L2.0	1~4	D19	1.82	2.0	4.76	75.1	60.0	0.80	78.1

Experimental Study on Dynamic Capacity of Shear Failure Type of RC Beams
 by Norimitsu KISHI, Hiroshi MIKAMI, Tomohiro ANDO and Hiroki HASEGAWA

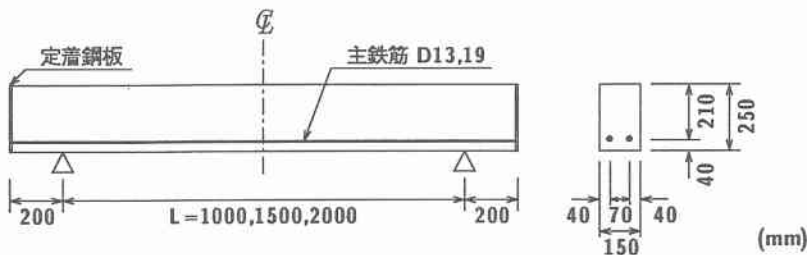


図 - 1 試験体の形状寸法および配筋状況

表 - 2 コンクリートの力学的特性

実験時材令 (日)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
28	21.1	20.2	0.21

表 - 3 主鉄筋の力学的特性

主鉄筋 名称	材質	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン 比
D13	SD345	380	550	206	0.3
D19	SD345	388	559	206	0.3

計算値，および別途行った静荷重実験での静的耐力 P_u も合わせて示している．また，静的曲げ耐力および静的せん断耐力は，それぞれ断面分割法およびコンクリート標準示方書 [3] に基づいて算出している．図 - 1 に試験体の形状寸法および配筋状況を示す．試験体はいずれも断面寸法 15×25 cm の単鉄筋矩形 RC 梁である．各試験体は鉄筋の定着長を節約するために梁端面に 9 mm の鋼板を設置し，この鋼板に鉄筋を溶接している．

衝撃荷重の載荷は，RC 梁のスパン中央部に重量 2.94 kN，載荷面の直径 15 cm の円柱状の鋼製重錘を所定の高さより自由落下させることにより行っている．また，載荷方法は初速度および増分速度を 1 m/s とする漸増繰り返し衝撃載荷（以下，繰り返し載荷）とし，RC 梁が破壊に至るまで行っている．なお，ここで RC 梁の破壊は，目視により梁側面に明瞭な斜めひびわれが発生した状態とした．しかしながら，破壊形態が曲げ型となる場合には既往の研究 [1,2] と同様に，梁スパン中央の累積残留変位が純スパン長の 2 % 程度に達した状態を破壊と定義した．

測定項目は，重錘衝撃力 P ，支点反力 R およびスパン中央部の変位 δ である．重錘衝撃力，支点反力の測定にはそれぞれ容量および応答周波数が 1470 kN，DC ～ 4.0 kHz および 500 kN，DC ～ 2.4 kHz の起歪柱型のロードセルを，変位の測定にはストローク 200 mm，応答周波数 915 Hz のレーザ式変位計を用いた．なお，表 - 2 および表 - 3 には，実験時のコンクリートおよび主鉄筋の力学的特性を示している．

3. 実験結果および考察

3.1 ひびわれ性状

図 - 2 に，繰り返し載荷実験終了後の RC 梁のひびわれ性状をその破壊形態も含め一覧にして示している ((a) 図)．なお，参考のため静荷重実験におけるひびわれ性状も合わせて示している ((b) 図)．

(a) 図より，せん断余裕度が 0.6 以下の D13-L1.0，D19-L1.0/1.5 の場合には，明瞭なせん断破壊を示し斜めひび割れが載荷点直下より支点部近傍まで大きく進展していることがわかる．中でも，せん断余裕度が 0.4 と低く，かつせん断スパン比が小さい D19-L1.0 は曲げひびわれの発生も少なく，せん断破壊が最も明瞭な試験体であった．せん断余裕度が 0.9 および 0.8 である D13-L1.5，D19-L2.0 では衝撃載荷の初期段階で載荷点直下に曲げひびわれが発生し，この部分がヒンジ的な役割をして以後の衝突速度での重錘衝撃力を

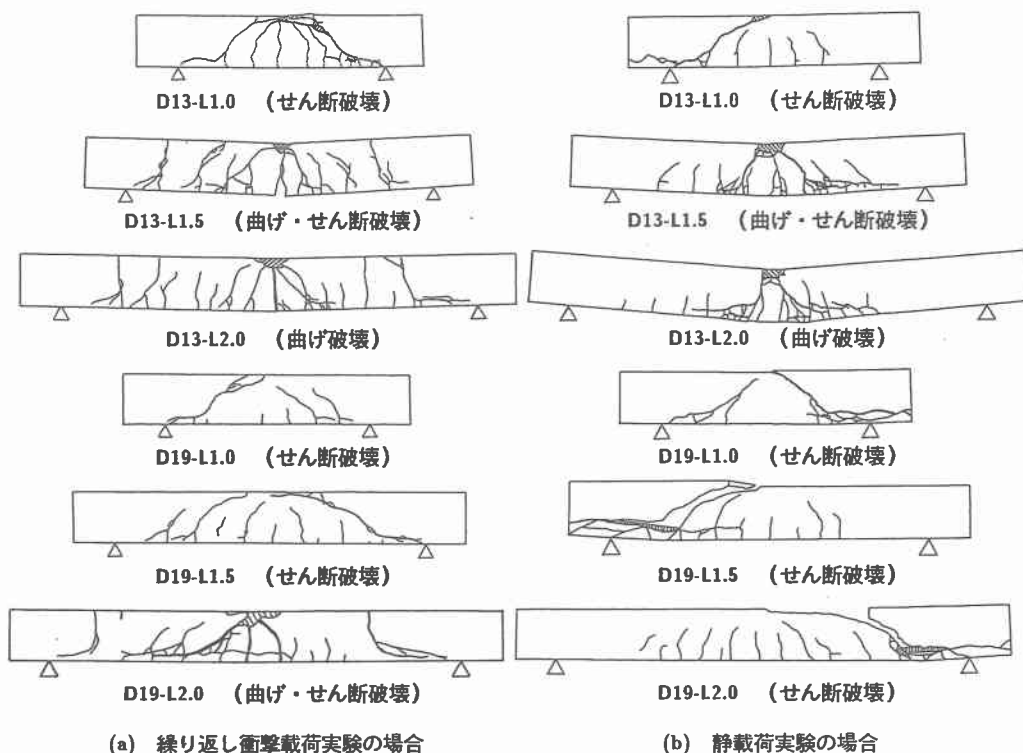


図 - 2 実験終了後の RC 梁のひびわれ性状

吸収したものと考えられる。そのため、静載荷時の D19-L2.0 にみられた明瞭なせん断破壊を示さず、最終載荷速度時に梁下端に生じた曲げひびわれが斜めひびわれに進展して終局に至る曲げ・せん断型の破壊形態を示している。一方、せん断余裕度が 1.0 以上であり、せん断スパン比も大きい D13-L2.0 の場合には曲げひびわれの本数も多く、中央部で角折れしたような曲げ破壊型を呈している。なお、(b) 図の静載荷実験と比較すると、D19-L2.0 を除いた各梁の破壊形態は一致し、ひびわれ分散性状もほぼ類似していることがわかる。

3.2 重錘衝撃力波形、支点反力波形および変位波形

図 - 3 は、各 RC 梁の重錘衝撃力波形、支点反力波形および梁スパン中央部における変位波形を示したものである。ここで、各波形は重錘が RC 梁に衝突する時刻の 30 ms 前の時間を 0 ms とし、150 ms までの時間に対して整理している。なお、支点反力波形は独立に測定した各支点反力を A/D 変換後足し合わせた合計としている。また、紙面の都合により、検討はせん断余裕度 α の異なる 3 試験体 D19-L1.0 および D13-L1.5/2.0 (それぞれ $\alpha = 0.40, 0.90, 1.20$) のみに着目して行うこととした。

まず、重錘衝撃力および支点反力波形を比較すると、両者の主波動は正弦半波的な波形形状を示しており、各試験体で最大値、継続時間とも大略類似していることがわかる。また、いずれの試験体においても、各力の主波動継続時間は衝突速度の増大とともに増加し、梁の塑性化が進行しているものと推察される。

せん断余裕度およびせん断スパン比が小さくせん断破壊した D19-L1.0 の衝撃荷重載荷時の変位波形は、重錘衝撃力波形および支点反力波形と同様な分布形状を示している。すなわち、衝撃荷重除荷後には残留変

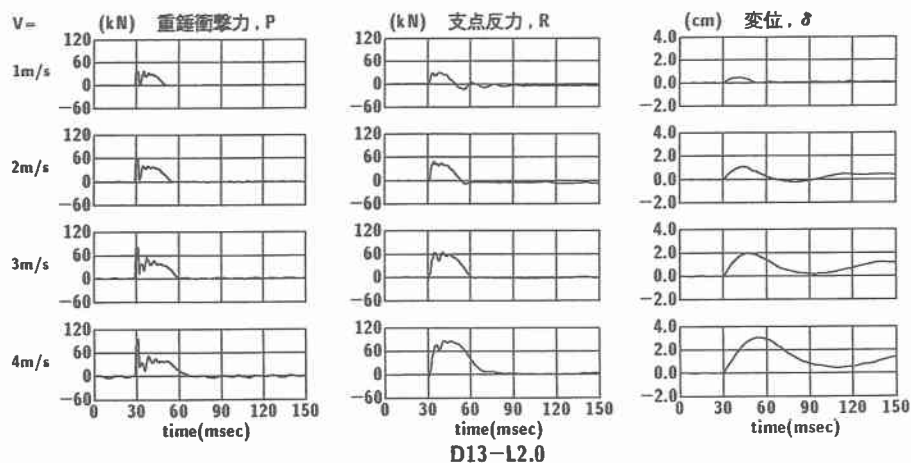
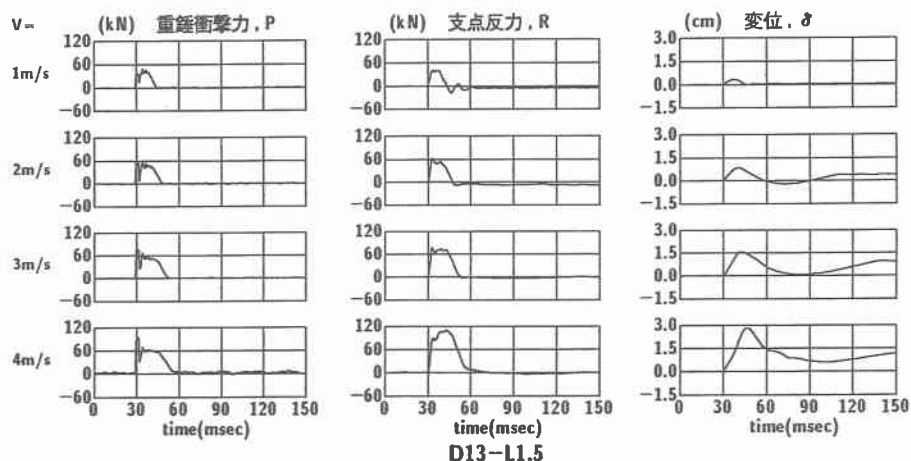
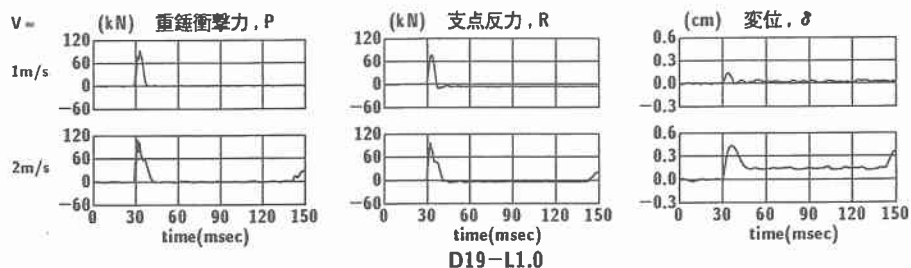


図 - 3 RC 梁の重錘衝撃力波形，支点反力波形，変位波形

位のみを示しほとんど振動状態を示していない。これは、曲げ破壊する RC 梁では衝撃荷重除荷後に低次の自由振動状態になることが明らかになっていることより、せん断破壊する RC 梁特有の現象であるものと考えられる。一方、せん断余裕度 α が 1.20 で曲げ破壊した D13-L2.0 の場合には衝突速度 2 m/s 以上において低次の自由振動状態を示している。なお、せん断余裕度が 0.90 で曲げ・せん断破壊した D13-L1.5 では $V = 2\text{ m/s}$ で低次の自由振動状態が励起されているが、衝突速度が増大するにつれて最大値近傍の波

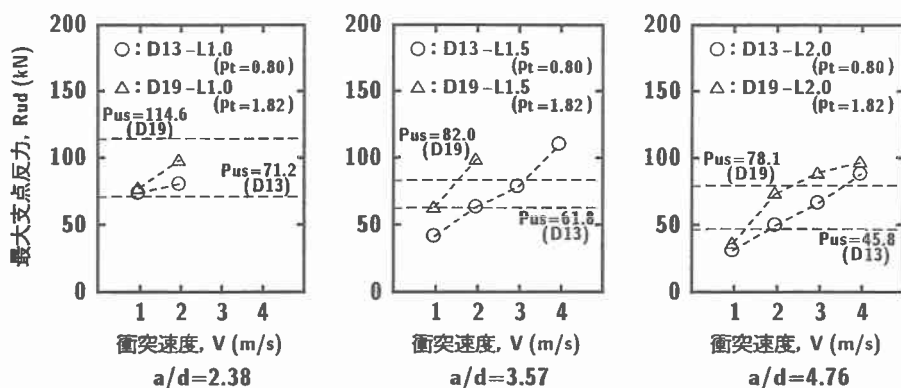


図 - 4 各せん断スパン比における最大支点反力と衝突速度の関係

形形状が鋭角になり、せん断破壊を示した D19-L1.0 に近い波形形状となっている。さらに、衝撃荷重除荷後には自由振動状態を呈しているがその周期は D13-L2.0 より大きなものとなっている。このように D13-L1.5 はせん断破壊と曲げ破壊の双方の特徴を有する波形分布となっており、その破壊形態が曲げ・せん断型であったことに対応している。

3.3 最大支点反力と衝突速度の関係

図 - 4 には、各せん断スパン比における試験体の最大支点反力 R_{ud} と衝突速度 V の関係を示している。また、図中には静載荷実験より得られた静的耐力 P_{us} の値も合わせて図示している。なお、前節 3.2 の考察より、重錘衝撃力と支点反力の最大値は概ね類似していることが明らかになっていることより、ここでは最大支点反力にのみ着目して検討することとした。

図より、支点反力は衝突速度の増大とともに増加していることがわかる。また、せん断スパン比に関わらず、主鉄筋比の大きい試験体 D19 の重錘衝撃力が主鉄筋比の小さい試験体 D13 のそれに比べて大きく示されていることがわかる。これは、表 - 1 に示したように、D19 の静的耐力が D13 のそれに比べて大きいためと考えられる。また、せん断破壊を示した試験体 D13/19-L1.0 および D19-L1.5 では、支点反力が静的耐力を越えるかほぼ同等の値に達した時点で破壊に至っているのに対し、曲げ・せん断破壊を示した D13-L1.5, D19-L2.0 および曲げ破壊を示した D13-L2.0 では静的耐力を越えた時点ではまだ破壊に至っていないことがわかる。一方、最大重錘衝撃力は最大支点反力とほぼ同等であることから、衝撃荷重載荷時にせん断破壊する試験体の動的耐力は曲げ破壊する場合と同様に、最大支点反力または最大重錘衝撃力で評価できると考えられる。

3.4 各力の動的応答倍率

図 - 5 には、繰り返し載荷の最終載荷時における最大重錘衝撃力 P_{ud} および最大支点反力 R_{ud} を実験より得られた静的耐力 P_{us} および計算より得られた静的耐力 P_{min} で除すことにより求めた動的応答倍率を各 RC 梁に関してせん断余裕度 α の低い順に整理して示した。なお、計算静的耐力 P_{min} には静的曲げ耐力 P_{uc} および静的せん断耐力 V_{uc} の低い方を用いている。(a) 図より、静的耐力に実験値を用いた場合にはせん断余裕度が大きくなると各力の動的応答倍率は増加する傾向にあることがわかる。さらに、その動的応答倍率は曲げ破壊した D13-L2.0 および曲げ・せん断破壊した D13-L1.5, D19-L2.0 ではそれぞれ 2.0 および 1.5 程度、せん断破壊した D13/19-L1.0, D19-L1.5 では 1.0 程度であることがわかる。

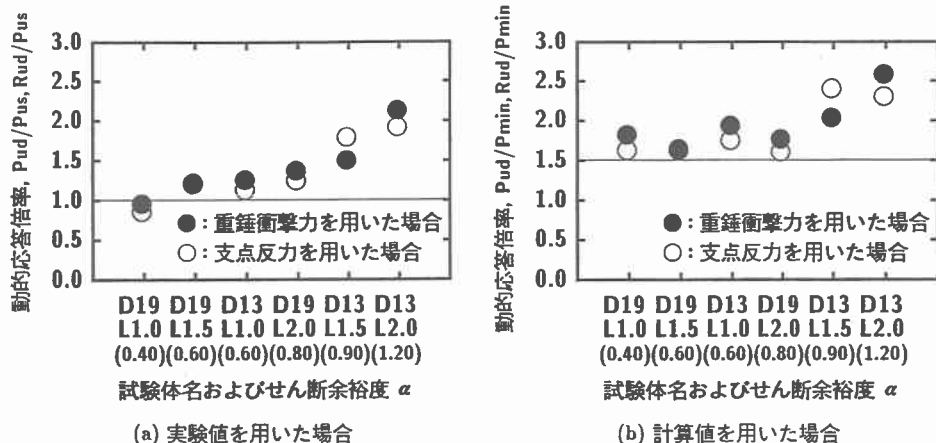


図 - 5 各力の動的応答倍率

一方、(b) 図より、静的耐力に計算値を用いた場合の応答倍率は、曲げおよび曲げ・せん断破壊した試験体で 2.0 程度、せん断破壊した試験体では 1.5 程度であることがわかる。これより、せん断余裕度 α が小さくせん断破壊する RC 梁の動的耐力は実験より得られる静的耐力の 1.0 倍程度、計算静的耐力の 1.5 倍程度として評価できる。

4. まとめ

本研究では、せん断に対する 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、主として静載荷時にせん断破壊が卓越する RC 梁に着目して漸増繰返し衝撃載荷実験を行った。用いた試験体は主鉄筋比およびせん断スパン比の異なる RC 梁であり、それらパラメータの影響も踏まえて各 RC 梁の耐衝撃性に関する検討を行った。その結果を要約すると、

- (1) 衝撃荷重載荷時と静的荷重載荷時では破壊形態が異なる場合がある。
- (2) 重錘衝撃力と支点反力の主波動は正弦半波的な分布を示し、最大値、継続時間とも大略類似している。
- (3) せん断破壊した試験体の変位波形は重錘衝撃力および支点反力波形と同様な形状を示す。また、曲げ破壊した試験体と異なり除荷後には残留変位のみを示し、ほとんど振動状態を示さない。
- (4) せん断スパン比 a/d に関わらず、動的耐力は最大重錘衝撃力および最大支点反力で評価でき、これらの大きさは静的耐力と密接に関連する。
- (5) せん断余裕度 α が 1.0 程度以下でせん断破壊型となる RC 梁の耐衝撃設計は、実験で得られた静的耐力の 1.0 倍、計算で得られた静的耐力の 1.5 倍を動的耐力と考えることで可能となる。

参考文献

- 1) 岸 徳光, 安藤智啓, 三上 浩, 松岡健一: RC 梁の耐衝撃性に及ぼす断面寸法の影響, 第 4 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, 1998.
- 2) 松岡健一, 岸 徳光, 三上 浩, 安藤智啓: スパン長の異なる RC 梁の重錘落下衝撃実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, 1998.
- 3) コンクリート標準示方書(平成 8 年制定)設計編, 土木学会, 1996.