

せん断破壊型 RC 梁の耐衝撃性に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON IMPACT RESISTANCE OF
SHEAR FAILURE TYPE OF RC BEAMS

岸 徳光* 三上 浩** 安藤智啓***

Norimitsu KISHI, Hiroshi MIKAMI and Tomohiro ANDO

* 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 27-1)

** 工博 三井建設(株) 技術研究所 主任研究員 (〒270-0132 流山市駒木 518-1)

*** 工修 室蘭工業大学大学院 工学部建設工学専攻 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

In order to cumulate the fundamental data for establishing a rational impact resistant design procedure of shear failure type of reinforced concrete (RC) beams, static and weight falling impact tests are conducted. Here, two loading methods (iterative and single) are applied by using 2.94 kN steel weight. The total 18 RC beams are used for these experiments of which rebar ratio P_t and shear span ratio a/d are varied as $P_t = 0.80, 1.82\%$ and $a/d = 2.38, 3.57, 5.87$, respectively. In order to investigate the dynamic response of RC beams, the time histories of weight impact force, reaction force and the mid-span displacement are measured. The results obtained from this study are as follows: 1) the characteristics of dynamic behavior of RC beams are much difference depending upon the failure modes: bending and shear failure modes; 2) when the shear bending capacity ratio α is less than 1.0, RC beams under impact loading reach the limit state with shear type of failure; 3) an impact resistant design of shear failure type of RC beams may be performed based on the static capacity with some safety margin.

Key Words: RC beam, impact resistance, shear failure type, shear bending capacity ratio

1. はじめに

衝撃的な外力に対して高い安全性が要求される鉄筋コンクリート (RC) やプレストレストコンクリート (PC) 製構造物には、道路落石防護施設、砂防ダム、原子力発電関連施設および危険物貯蔵施設などがある。近年、これら構造物の安全性を向上させる目的で、RC および PC 製の梁、柱、板の耐衝撃性に関する研究が各機関で盛んに行われるようになってきた。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らかにされてきており、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)}。一方、耐衝撃用途として用いられる RC、PC 製の梁、柱、板が衝撃荷重を受ける場合には、せん断耐力が十分保障されるように断面設計された構造部材であっても、荷重の最大応答値や継続時間等によってはせん断型で破壊する場合がある^{3),4),5)}。このため、耐衝撃用途の構造部材は、衝撃荷重載荷時のせん断破壊性状を十分考慮した上でより安全に断面設計される必要がある。しかしながら、衝撃荷重載荷時における構造部材のせん断破壊性状は、静載荷時にせん断破壊が卓越する RC 梁に関してさえも十分に解明されていないため、未だ曲げとせん断を受ける RC 部材の一般的な耐衝撃設計法も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、コンクリートの斜めひびわれの発生に伴い、耐力が急激に減少することによ

り生じる。また、その耐力の減少がほとんど変形を伴わずに開始されるため、破壊形態は極めて脆性的となる。そのため、せん断型で破壊する RC 梁は、十分な変形を伴って破壊する曲げ破壊型のそれと異なり、構造物として致命的な損傷に至る危険性を含んでいることとなる。従って、RC 梁の耐衝撃設計時には、静載荷時の場合と同様常に曲げ耐力以上のせん断耐力が保障されていなければならない。そのためには、せん断破壊が卓越する RC 梁の耐衝撃性をあらかじめ正確に把握し、せん断破壊に対する合理的な耐衝撃設計法を確立しておくことが極めて重要である。

本研究では、せん断破壊に対する 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 梁に着目して静載荷実験および重錘落下衝撃荷重載荷実験を行った。実験に用いた試験体は数種の主鉄筋比およびせん断スパン比の異なる RC 梁であり、これらパラメータの影響も踏まえ各 RC 梁の耐衝撃性に関する検討を試みた。また、衝撃荷重載荷実験の場合には、衝突速度を漸増させる繰り返し載荷 (以下、繰り返し載荷) と実現現象に即した単一載荷の 2 種類の載荷方法により実験を行った。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、全ての試験体に対してせん断補強筋を配置しないことと

表 - 1 試験体の一覧

試験体名	載荷方法	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)	静的せん断 余裕度 $\alpha (= V_{usc}/P_{usc})$
D13-L1.0-S	静載荷	—	D13	0.80	1.0	2.38	78.4	52.3	0.67
D13-L1.5-S		—	D13	0.80	1.5	3.57	52.2	52.3	1.00
D13-L2.0-S		—	D13	0.80	2.0	4.76	39.2	52.3	1.33
D19-L1.0-S		—	D19	1.82	1.0	2.38	163.1	68.8	0.42
D19-L1.5-S		—	D19	1.82	1.5	3.57	108.7	68.8	0.63
D19-L2.0-S		—	D19	1.82	2.0	4.76	81.5	68.8	0.84
D13-L1.0-II	繰り返し 載荷	1~2	D13	0.80	1.0	2.38	78.4	52.3	0.67
D13-L1.5-II		1~3	D13	0.80	1.5	3.57	52.2	52.3	1.00
D13-L2.0-II		1~4	D13	0.80	2.0	4.76	39.2	52.3	1.33
D19-L1.0-II		1~3	D19	1.82	1.0	2.38	163.1	68.8	0.42
D19-L1.5-II		1~3	D19	1.82	1.5	3.57	108.7	68.8	0.63
D19-L2.0-II		1~3	D19	1.82	2.0	4.76	81.5	68.8	0.84
D13-L1.0-IS	単一載荷	2	D13	0.80	1.0	2.38	78.4	52.3	0.67
D13-L1.5-IS		3	D13	0.80	1.5	3.57	52.2	52.3	1.00
D13-L2.0-IS		3	D13	0.80	2.0	4.76	39.2	52.3	1.33
D19-L1.0-IS		3	D19	1.82	1.0	2.38	163.1	68.8	0.42
D19-L1.5-IS		3	D19	1.82	1.5	3.57	108.7	68.8	0.63
D19-L2.0-IS		3	D19	1.82	2.0	4.76	81.5	68.8	0.84

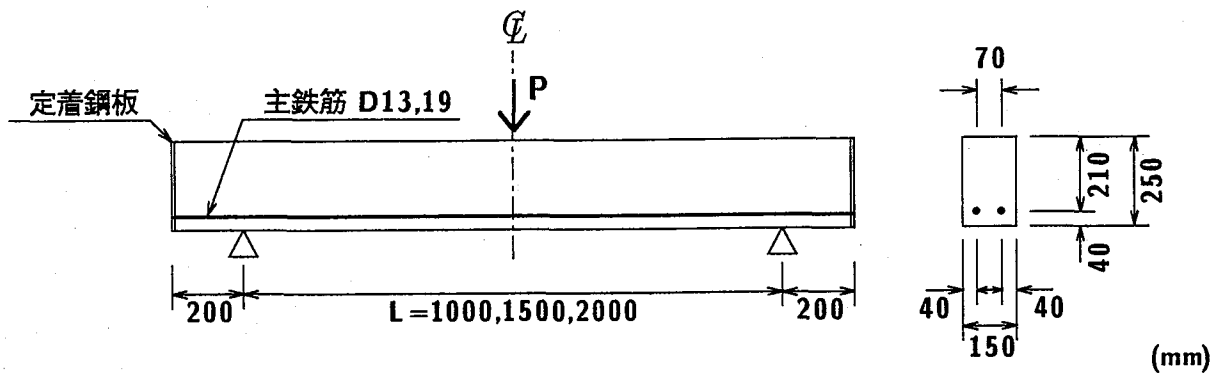


図 - 1 試験体の形状寸法および配筋状況

した。

2. 実験概要

2.1 試験体

本実験に用いた試験体の一覧を表 - 1 に示す。試験体は、計算により求まる静的曲げ耐力に対する静的せん断耐力の余裕度（表中、静的せん断余裕度、以下単にせん断余裕度） α が主として 1.0 以下で、静載荷時にせん断破壊が卓越する RC 梁とした。なお、静的曲げ耐力および静的せん断耐力は、土木学会コンクリート標準示方書⁶⁾に基づいて算定している。試験体数は、主鉄筋比 P_t 、せん断スパン比 a/d および載荷方法の異なる計 18 体である。すなわち、各 RC 梁は主鉄筋径 2 種類 (D13, D19) 、

純スパン長 3 種類 ($L = 1.0, 1.5, 2.0$ m) および載荷方法 3 種類 (静載荷, 繰り返し載荷, 単一載荷) から構成される組み合わせに対して製作した。表中の試験体名は、これら試験体の主鉄筋径、純スパン長および載荷方法 (S: 静載荷, II: 繰り返し載荷, IS: 単一載荷) を組み合わせて表している。また、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} も示している。なお、表中のせん断余裕度 α は、この静的せん断耐力 V_{usc} を静的曲げ耐力 P_{usc} で除した値と定義している。すなわち、静載荷時の RC 梁の破壊形態は、設計的にはせん断余裕度が 1.0 以下の場合にはせん断破壊が、また 1.0 以上の場合には曲げ破壊が卓越することを意味している。

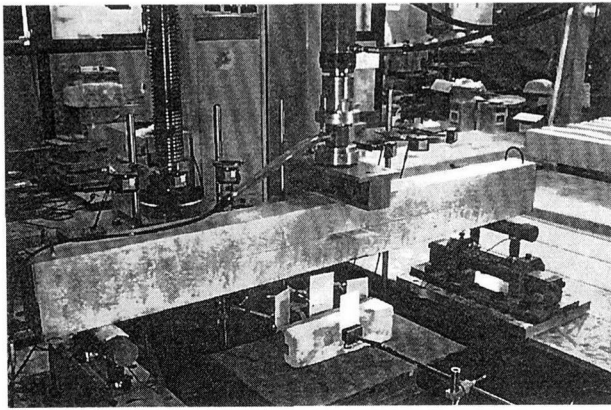


写真-1 静載荷実験の状況

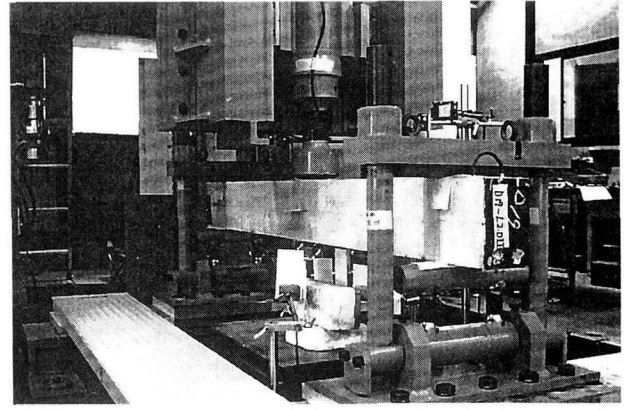


写真-2 重錘落下衝撃荷重実験の状況

図-1に本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(梁幅×梁高)が15×25 cmの単鉄筋矩形RC梁である。また、試験体の純スパン長は $L = 1.0, 1.5, 2.0$ mの3種類である。なお、主鉄筋の定着長を節約するために、全ての主鉄筋は梁端面に設置した9mmの鋼板に溶接し定着している。その結果、いずれの実験においても主鉄筋は抜け出しがなく、鋼板に十分定着されていることを確認している。

2.2 実験方法

(1) 静載荷実験

各RC梁は支点用治具上に設置しており、梁の支点部は単純支持状態としている。静的荷重は、載荷治具を用い断面方向に全幅、スパン方向中央部に10 cmの部分分布荷重が作用するようにして、油圧ジャッキにより加圧し載荷している。また、載荷はロードセルを介し、このロードセルの値が最大応答値に達した後急激に低下する時点まで行っている。写真-1に静載荷実験の状況を示している。

(2) 重錘落下衝撃荷重実験

重錘落下衝撃荷重実験は、RC梁のスパン中央部に重量2.94 kN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、重錘に発生する衝撃荷重を測定するために、重錘には起歪柱型のロードセルが組み込まれている。なお、重錘は載荷部直径が15 cmであり、衝突時の片当たりを防止するために底部が高さ2 mmのテーパを有する球形状となっている。

載荷方法は、衝突速度を $V = 1$ m/sから1 m/s刻みに増加させ、RC梁が破壊に至るまで繰り返し載荷を行う繰り返し載荷と、その最終載荷時と同一速度で載荷させる単一載荷の2種類である。なお、RC梁の破壊は基本的にせん断破壊が卓越するものと考えられることより、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定義することとした。しかしながら、その破壊形態が曲げ型となる場合には、既往の研究¹⁾と同様に、梁スパン中央部の累積残留変位が純スパン長 L の2%($L = 1.0,$

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
29	31.7	24.0	0.22

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	394	565	206	0.3
D19	SD345	390	605	206	0.3

1.5, 2.0 mの場合でそれぞれ2, 3, 4 cm)程度に達した状態と定義することとした。

用いたRC梁は、支点反力測定用の起歪柱型ロードセルを介した支点用治具上に設置している。ただし、重錘衝突時にRC梁のリバウンドが予想されるため、写真-2に示されているように、RC梁は支点部で跳ね上がり防止用の治具を用いて固定している。従って、梁は衝撃荷重載荷時に軸方向に若干の拘束があるものと考えられる。しかしながら、図-3のひびわれ分布からも明らかのように、その影響は小さいものと判断される。また、支点部はロードセル、跳ね上がり防止用治具とも回転自由のシャフトに固定されており、梁の回転をできるだけ拘束しないように配慮している。

2.3 材料の力学的特性

表-2および表-3に、それぞれ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。実験に用いたコンクリートの実験時における圧縮強度は31.7 MPaであった。また、主鉄筋(D13, D19)にはSD345を用いており、D13およびD19の降伏強度はそれぞれ394 MPa, 390 MPaであった。

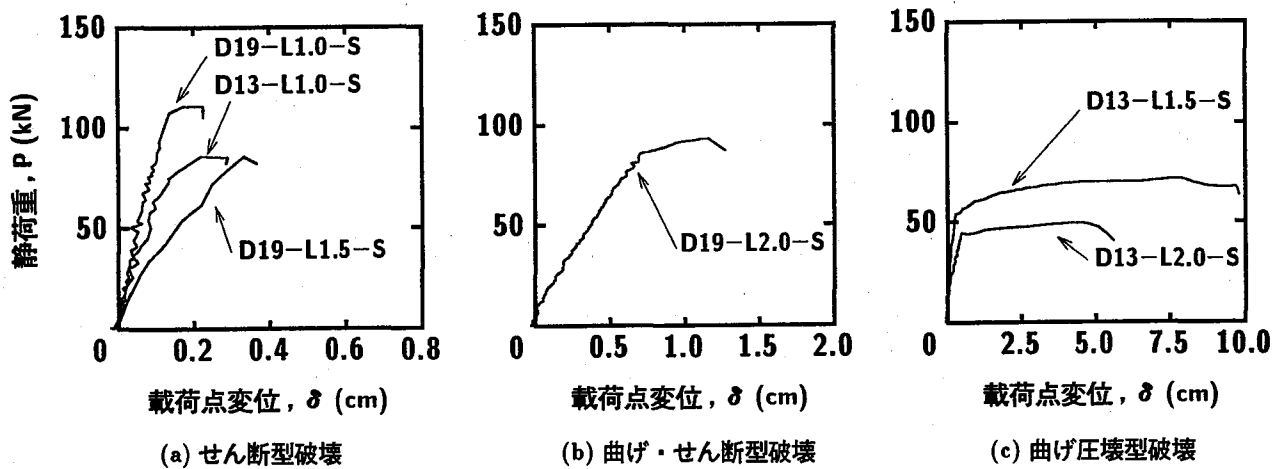


図 - 2 静荷重と載荷点変位の関係

表 - 4 静載荷実験結果の一覧

試験体名	静的せん断 余裕度 α	実験結果			
		最大静荷重 P_{us} (kN)	終局変位 δ_{us} (cm)	吸収エネルギー E_{ps} (kJ)	破壊形態
D13-L1.0-S	0.67	85.1	0.22	0.12	せん断型
D13-L1.5-S	1.00	70.8	7.70	4.90	曲げ圧壊型
D13-L2.0-S	1.33	48.7	4.19	1.70	曲げ圧壊型
D19-L1.0-S	0.42	109.4	0.15	0.09	せん断型
D19-L1.5-S	0.63	85.5	0.34	0.17	せん断型
D19-L2.0-S	0.84	92.7	1.16	0.67	曲げ・せん断型

2.4 測定項目

静載荷実験および重錘落下衝撃荷重載荷実験時の測定項目は、載荷点部（スパン中央部）の荷重 P （以下、静載荷の場合には静荷重、重錘落下衝撃荷重載荷の場合には重錘衝撃力と呼ぶ）、支点反力 R および載荷点部における変位 δ である。また、実験終了後には、各試験体に発生したひびわれ状況も記録している。

静荷重 P の測定は、容量 200 kN の静載荷用ロードセルを用いて行った。また、重錘衝撃力 P および支点反力 R の測定は、それぞれ容量 1470 kN、応答周波数 DC ~ 4.0 kHz および容量 500 kN、応答周波数 DC ~ 2.4 kHz のロードセルを用いて行っている。さらに、載荷点変位 δ の測定は、容量 200 mm、応答周波数 915 Hz の非接触式レーザ変位計を用いて行った。なお、重錘落下衝撃荷重載荷実験の場合には、各応答波形を高帯域用データレコーダで一括収録し、100 μ s の時間間隔で 200 ms 間だけ A/D 変換処理している。また、A/D 変換後、各応答波形は 25 データの矩形移動平均法により平滑化している。

3. 静載荷実験結果

3.1 RC 梁のひびわれ分布

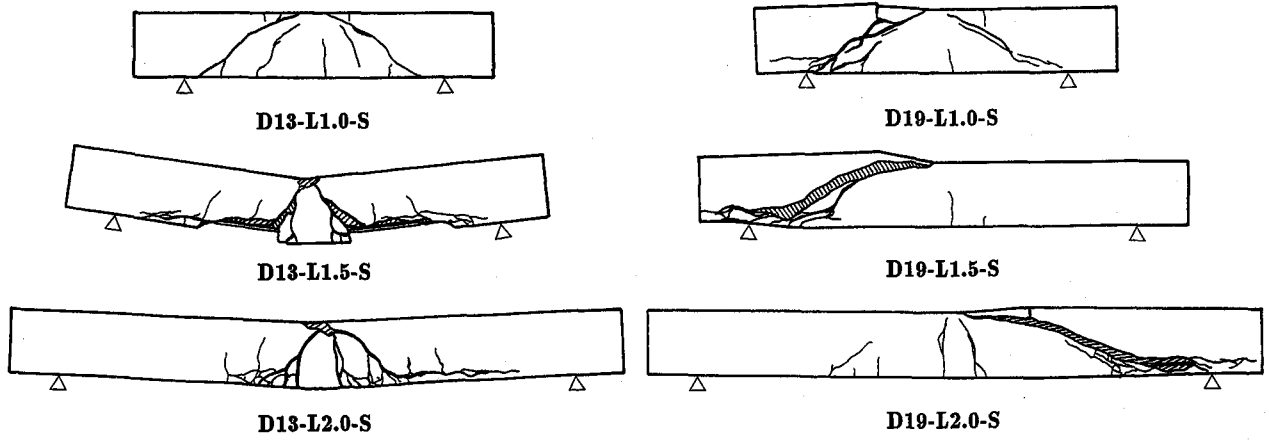
静載荷実験終了後の各 RC 梁のひびわれ分布は、後章

の重錘落下衝撃荷重載荷実験終了後のそれと照らして検討するため、図 - 3 に合わせて示すこととした。

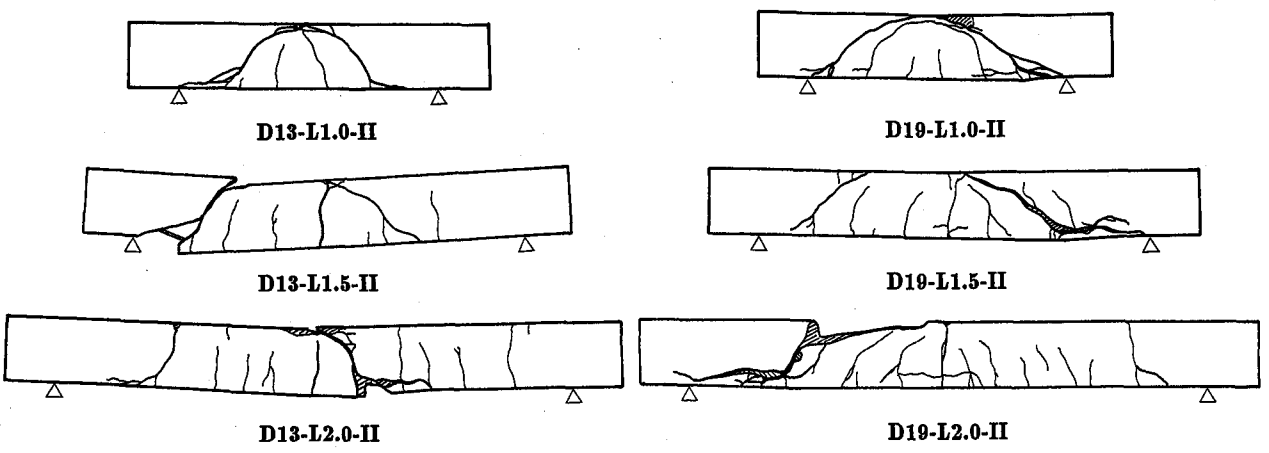
図 - 3 (a) より、せん断余裕度 α が 1.0 以下である D13-L1.0, D19-L1.0/1.5 の梁は、斜めひびわれの発生に伴うせん断破壊が卓越した破壊形態を示していることが分かる。一方、D13-L1.5/2.0 の梁は梁下縁部の曲げひびわれが載荷点の方向へ進展するせん断ひびわれを形成し、さらに上縁載荷点部が圧壊し角折れ状態になっていることより、最終的には曲げ圧壊型の破壊形態を示しているものと考えられる。また、D19-L2.0 の梁は支点から載荷点に向かう大きな斜めひびわれとスパン中央部下縁から上縁に向かう曲げひびわれが発生している。この場合には、せん断余裕度 α が 1.0 以下であるもののせん断スパン比 a/d が大きいことより、曲げひびわれの著しい成長が確認できる。最終的には曲げ・せん断型の破壊形態の様相を呈している。

3.2 RC 梁の静的耐荷性状および吸収エネルギー特性

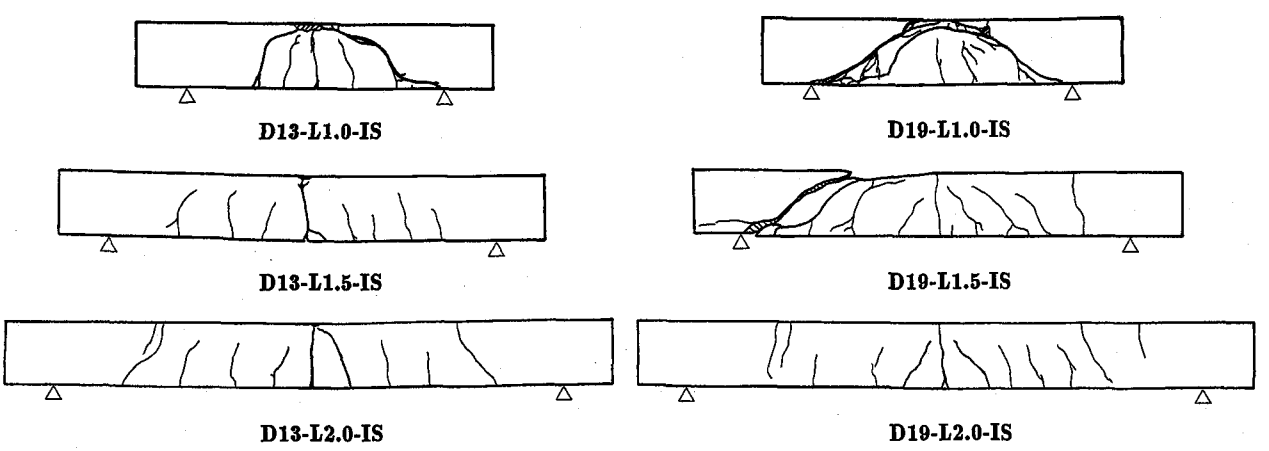
図 - 2 は、各 RC 梁における静荷重 P と載荷点変位 δ の関係を示したものである。前述の図 - 3 (a) のひびわれ分布および図 - 2 から明らかなように、RC 梁の破壊形態は大きく 3 種類に分類されるものと考えられる。す



(a) 静載荷実験の場合



(b) 繰り返し載荷実験の場合



(c) 単一載荷実験の場合

図-3 各載荷方法による実験終了後の RC 梁のひびわれ分布

なわち、1) 梁が弾性限界を越えた直後に小さい変位量で終局に至る場合 ((a) 図)、2) 曲げとともにせん断ひびわれが発生し、主鉄筋降伏後の曲げ変形と大きな斜めひびわれに伴う変形が連成し終局に至る場合 ((b) 図) および 3) 曲げひびわれが載荷点方向への斜めひびわれに進展し、やがて載荷点近傍部の圧壊によって終局に至る

場合 ((c) 図) である。また、これらの曲線分布は、それぞれ弾性型、弾性と完全弾塑性の中間型および完全弾塑性型を示しており、せん断型、曲げ・せん断型、曲げ圧壊型の破壊形態に対応しているものと判断される。

表-4 には、図-2 から得られる各 RC 梁の最大静荷重 P_u 、最大静荷重時の載荷点変位 (終局変位) δ_u お

表 - 5 重錘落下衝撃荷重実験結果の一覧

試験体名	静的せん断 余裕度 α	衝突速度 V (m/s)	繰り返し載荷実験			単一載荷実験	
			累積残留 変位 δ_{ar} (cm)	最終載荷時の 残留変位 δ_r (cm)	破壊形態	残留変位 δ_{rs} (cm)	破壊形態
D13-L1.0-II, IS	0.67	1~2, 2	0.38	0.35	せん断型	0.48	せん断型
D13-L1.5-II, IS	1.00	1~3, 3	5.12	4.66	せん断型	1.14	終局に至らず
D13-L2.0-II, IS	1.33	1~4, 3	5.21	3.20	曲げ・せん断	1.50	終局に至らず
D19-L1.0-II, IS	0.42	1~3, 3	0.85	0.80	せん断型	0.59	せん断型
D19-L1.5-II, IS	0.63	1~3, 3	1.90	1.65	せん断型	0.95	せん断型
D19-L2.0-II, IS	0.84	1~3, 3	1.60	1.53	せん断型	0.60	終局に至らず

よび静荷重 P と載荷点変位 δ より求まる吸収エネルギー E_p の値を一覧にして示している。また、考察の指標として、せん断余裕度 α も合わせて示している。なお、上述の考察より、各 RC 梁の静荷重 P -変位曲線 δ はその破壊形態によって大きく異なることが明らかになった。また、その曲線分布より得られる吸収エネルギー量は、梁が曲げ破壊型に移行するに従い大きくなることも分かる。実験では載荷荷重が最大値に達し著しいひびわれが発生していることを目視により確認の後除荷している。これより、各梁の吸収エネルギー E_p は、統一基準として載荷荷重が最大値に達した時点までの荷重、変位を考慮することとし、その状態で荷重が完全に除荷され変位が残留するものと仮定して算定評価している。

表 - 4 を参考に最大静荷重 P_u を各図ごとに比較すると、最大静荷重 P_u はせん断破壊型の (a) 図に属する梁が最も大きく、(b) 図、(c) 図に属する梁の順に小さく示されている。また、その差を調べると、(a) 図の D13-L1.0 は (c) 図の D13-L1.5 に比較して 1.2 倍程度大きい値になっている。一方、終局変位 δ_u に関しては、最大静荷重 P_u の場合とは逆に、曲げ圧壊型破壊の (c) 図に属する梁が最も大きく、せん断破壊型である (a) 図に属する梁が最も小さいことが分かる。また、曲げ圧壊型破壊である (c) 図の D13-L2.0 はせん断破壊型である (a) 図の D19-L1.5 に比較して 10 倍の大きさとなっている。従って、せん断破壊型を示し (a) 図に属している RC 梁の吸収エネルギー E_p が、曲げ圧壊型を示し (c) 図に属する RC 梁のそれに比べて非常に小さくなる事が分かる。

4. 重錘落下衝撃荷重実験結果

4.1 RC 梁のひびわれ分布

図 - 3 には、各載荷方法による実験終了後の RC 梁のひびわれ分布を一覧にして示している。なお、参考のため表 - 5 には重錘落下衝撃荷重実験の結果も一覧にして示している。

まず、図 - 3 (b) の繰り返し載荷実験の場合について検討を行う。いずれの梁も曲げひびわれとせん断による

斜めひびわれの発生によって、あるいは曲げひびわれが斜めひびわれに進展し最終的にせん断型で終局に至っていることが分かる。詳細にみると、せん断スパン比 a/d およびせん断余裕度 α の小さい D13/D19-L1.0 の梁は、曲げひびわれの本数も少なく衝撃初期からせん断変形が卓越していることをうかがわせる。その他の梁に関しては、梁下縁に曲げひびわれが分散して発生し、かつスパン中央部の曲げひびわれが梁上縁部まで進展していることが分かる。しかしながら、いずれの梁も曲げ引張りあるいは圧壊では終局に至っていない。

せん断余裕度 α が 1.0 より小さい D19-L1.5/2.0 の梁は支点部近傍から載荷点であるスパン中央部上縁に至る大きな斜めひびわれの進展により終局に至っている。せん断余裕度 α が 1.0 である D13-L1.5 の梁は、支点部近傍に発生したほぼ垂直に延びるひびわれによって純せん断的な破壊により終局に至っている。最もせん断余裕度 α の大きい D13-L2.0 の梁はスパン中央部下縁に発生した曲げひびわれが載荷点部にまで進展して終局に至っており、曲げ・せん断型の破壊形態の様相を呈している。

(a) 図の静載荷実験結果と比較すると、D13-L1.5/2.0 を除いた各梁は、両者ほぼ類似の性状によって終局に至っていることが分かる。一方、D13-L1.5 の場合は、静載荷時には曲げ圧壊型破壊となっているが、繰り返し載荷の場合には曲げひびわれが進展しているものの最終的には支点部近傍のせん断ひびわれによって終局に至っている。また、D13-L2.0 の場合には静載荷時には曲げ圧壊型に属しているが、繰り返し載荷時には曲げ型から最終的にせん断破壊によって終局に至っている。これらはいずれもせん断余裕度 α が 1.0 以上であり静載荷時に曲げ破壊を示すことから、衝撃荷重載荷によってせん断破壊が卓越したことを暗示している。

次に、(c) 図の単一載荷実験結果について検討を行う。図より、せん断余裕度 α が小さい D13-L1.0, D19-L1.0/1.5 の梁は、静載荷時 ((a) 図) および繰り返し載荷時 ((b) 図) と類似のひびわれ性状を示し、ほぼ終局に至っていることが分かる。一方、せん断余裕度 α が 1.0 前後あるいはそれ以上である D13-L1.5/2.0 および D19-L2.0 の場

合には、顕著なせん断ひびわれが発生せず分散した曲げひびわれの進展にとどまっておき、未だ終局に至っていない。

これより、せん断余裕度 α が小さい梁の場合には、繰り返し載荷時と単一載荷時の損傷の程度が類似しており、入力エネルギーの累積による劣化の進行度合いが小さいようである。一方、せん断余裕度 α が 1.0 前後以上の場合には、衝突速度 V の小さい段階で曲げひびわれの進展が期待できることより、入力エネルギーの累積によって劣化が進行し、繰り返し載荷で終局に至る最終衝突速度と同一衝突速度による単一載荷の場合には、損傷程度の小さいことが明らかになった。これは、せん断余裕度 α が 1.0 前後以上の場合には曲げひびわれの進展とともに損傷が進行するのに対し、せん断余裕度 α が 1.0 より小さい場合には、曲げひびわれの発生も少なく脆性的に破壊が進行することを暗示している。

4.2 重錘衝撃力波形 P 、支点反力波形 R および載荷点変位波形 δ

図 - 4 は、各載荷方法における RC 梁の重錘衝撃力波形 P 、支点反力波形 R および載荷点部における変位波形 δ を示したものである。なお、支点反力波形 R は衝撃荷重に対する合支点反力として評価するため、両支点反力の値を合算することとした。すなわち、各支点反力を独立に測定して A/D 変換の後、それらを足し合わせて評価している。また、各図は重錘が 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。ここでは、紙面の都合により、検討はせん断余裕度 α の異なる代表的な 3 試験体 D19-L1.0/1.5 および D13-L2.0 (それぞれ $\alpha = 0.42, 0.63, 1.33$) のみに着目して行うこととした。

まず、(a) 図の繰り返し載荷実験の結果より、せん断余裕度 α が 1.0 以下である D19-L1.0/1.5 の場合には、重錘衝撃力 P と支点反力 R の主波動がほぼ類似な正弦半波的な波形形状を示し、最大応答値、継続時間も大略類似していることが分かる。一方、せん断余裕度 α が 1.33 である D13-L2.0 の場合には、重錘衝撃力 P と支点反力 R の主波動継続時間が類似しているものの、波形特性、最大応答値は過去の曲げ破壊型 RC 梁に関する実験結果⁷⁾ と同様両者で異なっている。すなわち、重錘衝撃力波形 P は半周期が 20 ~ 30 ms 程度の正弦半波の波形に振幅が主波動の 1 ~ 1.5 倍程度でかつ高周波である正弦一波の波形が衝撃初期に合成された状態を示している。しかしながら、支点反力波形 R には、初期の高周波成分が発生していない。また、支点反力波形 R の最大応答値も高周波成分が出現されていないことより、重錘衝撃力のそれより小さなものとなっている。

これらの現象は、次節に述べるように梁の曲げとせん断耐力の大小関係が大きく影響しているものと推察される。なお、いずれの試験体においても、重錘衝撃力 P お

よび支点反力 R の主波動継続時間は衝突速度の増大とともに延びており、ひびわれの進行に伴って梁の塑性化が進行していることが分かる。

次に、載荷点変位波形 δ をみると、せん断スパン比 a/d およびせん断余裕度 α の小さい D19-L1.0 の場合における変位波形 δ は、荷重載荷時には重錘衝撃力 P および支点反力波形 R と同様な波形分布を示しているが、除荷後には残留変位による直流成分のみの波形を示している。これは曲げ破壊型の RC 梁の場合にはひびわれ発生後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、せん断スパン比 a/d が小さくせん断破壊型を呈する RC 梁特有の現象であるものと考えられる。

せん断余裕度 α が 0.6 程度であるが、せん断スパン比 a/d が比較的大きい D19-L1.5 において、衝突速度が $V = 2$ m/s と比較的小さい場合には除荷後減衰自由振動状態を示しているが、最終載荷速度である $V = 3$ m/s の場合には除荷後残留変位による直流成分のみの波形を示している。これは最終的にせん断破壊型を示す RC 梁においても、せん断スパン比 a/d が大きいことより損傷程度が軽微な状態となる低衝突速度の場合には曲げ振動が励起されることを意味しているものと考えられる。

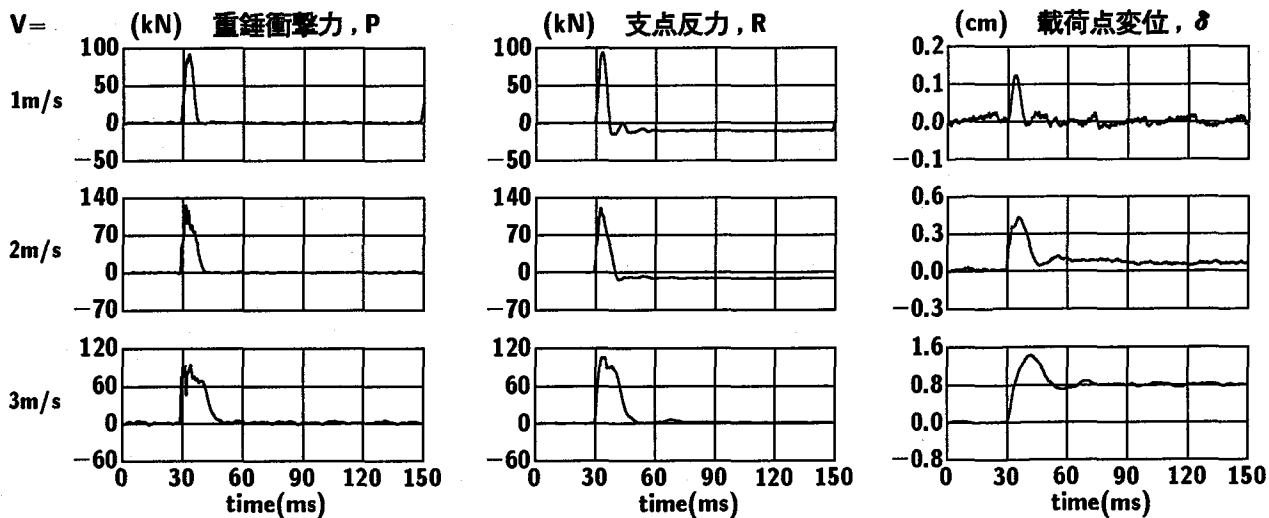
一方、せん断余裕度 α が 1.0 以上でかつせん断スパン比 a/d が大きい D13-L2.0 の場合には、衝突速度が $V = 2$ m/s の時点より除荷後周期の長い振動が励起されており、明らかに曲げ破壊型の傾向を示していることが分かる。

(b) 図の単一載荷実験結果と (a) 図の繰り返し載荷実験結果を比較すると、せん断破壊型を呈する D19-L1.0 の場合の波形性状は両者類似しており、前述のように繰り返し載荷による損傷の累積効果の少ないことが分かる。D19-L1.5 の梁の場合には、繰り返し載荷時の衝突速度 $V = 3$ m/s の場合と類似の波形を呈しており、曲げひびわれの発生 (図 - 3 (c)) も確認できるものの、せん断ひびわれが卓越して破壊に至っていることが分かる。また、これらせん断破壊型を示す D19-L1.0/1.5 の単一載荷時に発生する最大重錘衝撃力および最大支点反力値は、いずれも繰り返し載荷の最終衝突速度における値よりも大きく、載荷点部の残留変位は小さい。

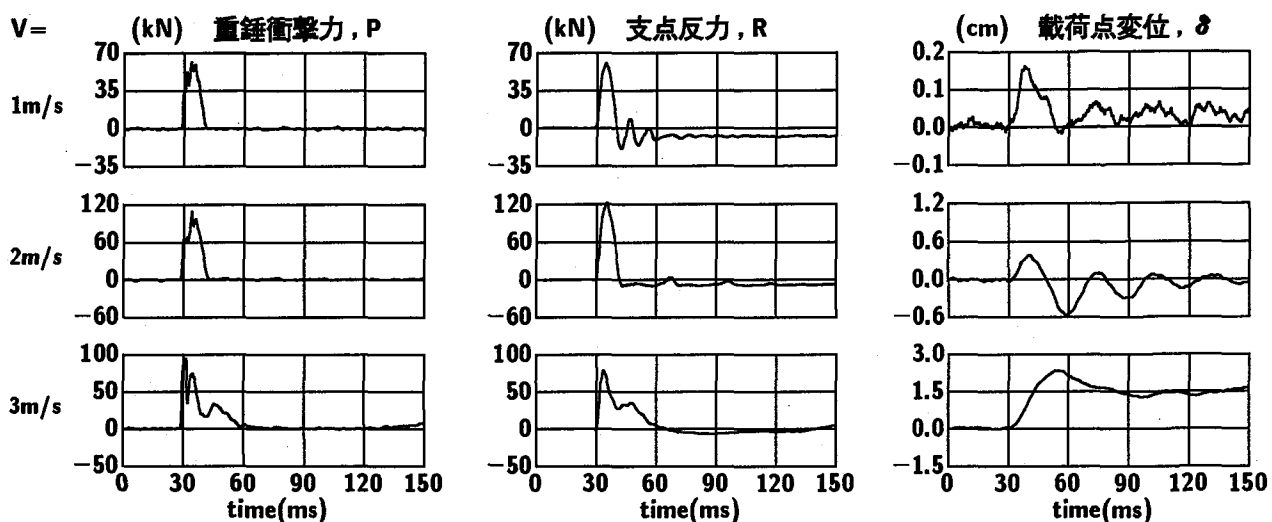
一方、曲げ破壊型を呈する D13-L2.0 の場合には、3 波形とも繰り返し載荷、単一載荷時で類似な性状を示している。また、最大重錘衝撃力、最大支点反力および最大変位量は、前述のせん断破壊型の場合と異なり、載荷方法に関わらず両者ほぼ等しいものとなっている。

4.3 重錘衝撃力 P 、支点反力 R の載荷点変位 δ に関する履歴挙動

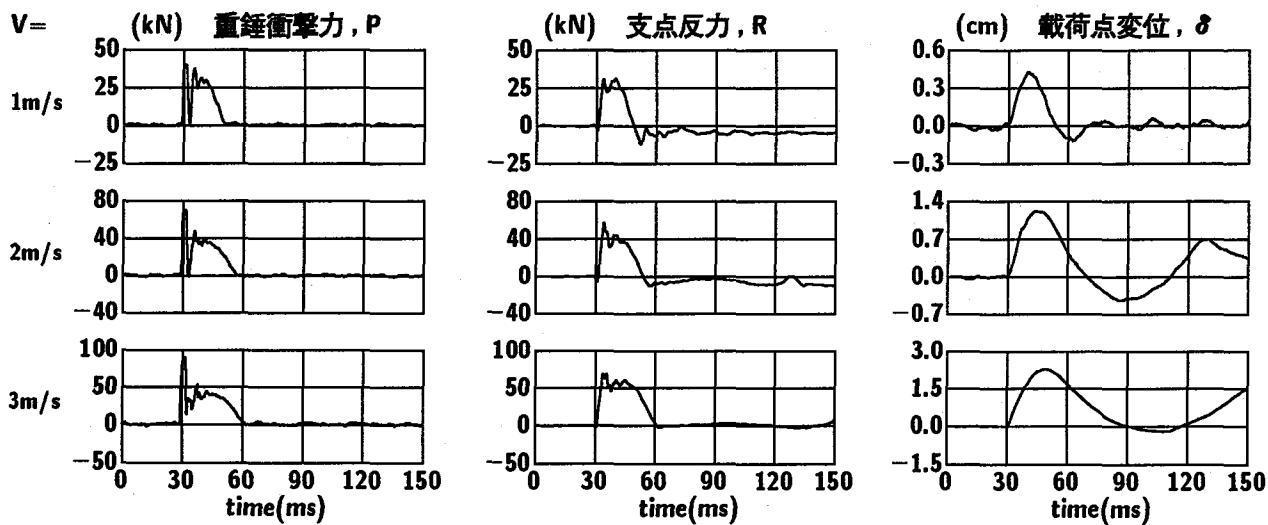
図 - 5 は、各載荷方法を適用した場合の重錘衝撃力 P および支点反力 R の載荷点変位 (以下、変位) δ に関する履歴曲線を示したものである。ここでも前節 4.2 と同様に、D19-L1.0/1.5 および D13-L2.0 の 3 試験体に着



D19-L1.0-II



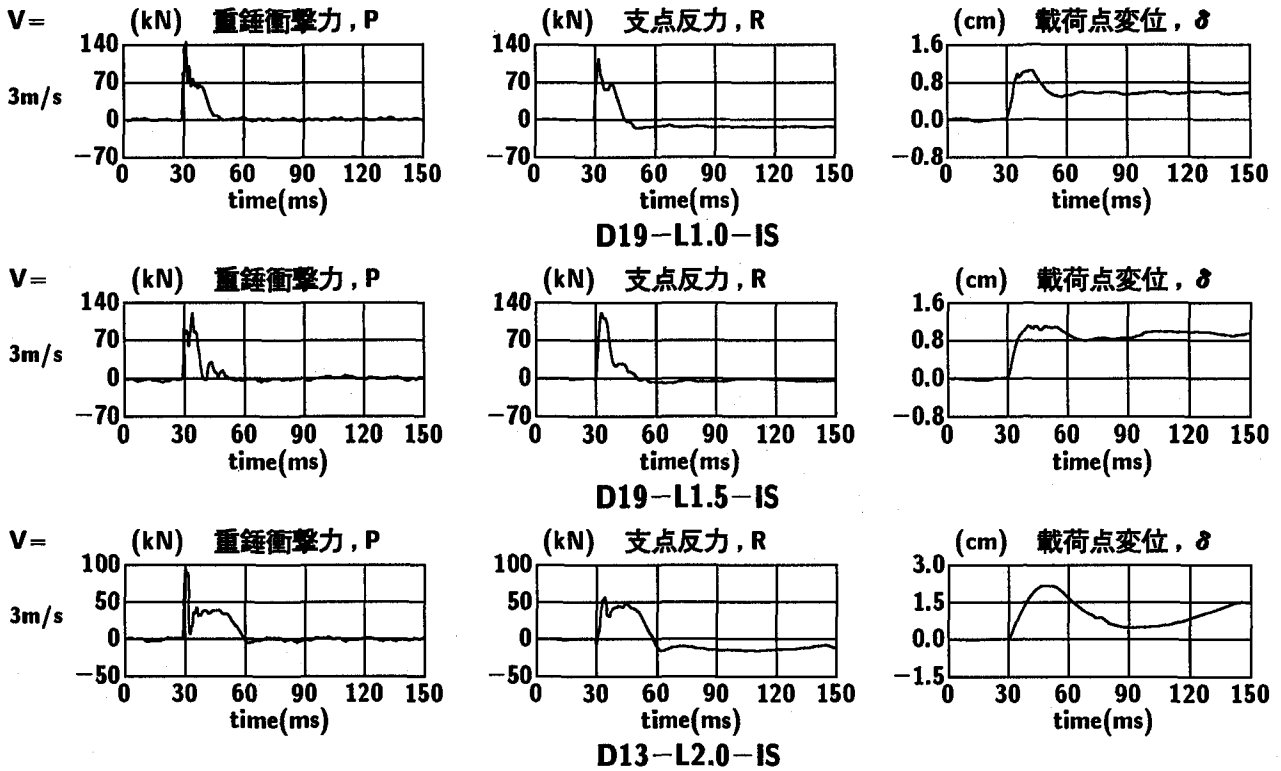
D19-L1.5-II



D13-L2.0-II

(a) 繰返し載荷実験の場合

図-4 RC梁の重錘衝撃力波形 P , 支点反力波形 R および載荷点変位波形 δ



(b) 単一載荷実験の場合

図-4 (続き) RC梁の重錘衝撃力波形 P 、支点反力波形 R および載荷点変位波形 δ

目して検討を行うこととする。

(a) 図より、いずれの梁に関しても、重錘衝撃力 P -変位 δ 、支点反力 R -変位 δ 曲線とも衝突速度の増大に対応して履歴曲線の囲む面積が大きくなり、吸収エネルギーが増大する傾向にあることが分かる。

せん断余裕度 α の大きい D13-L2.0 の履歴曲線を見ると、過去の曲げ破壊型 RC 梁に関する実験結果⁷⁾と同様に、重錘衝撃力 P は変位 δ が十分励起される前に最大値に達し、その後変位 δ の増加とともに一旦ほぼ完全な除荷状態となる。支点反力 R は、衝撃初期の重錘衝撃力 P の作用による梁の応答に対応して増加し最大値を示す。また、重錘衝撃力 P は支点反力 R が最大値を示す前後に再度載荷状態となり、その後両者類似の挙動を呈し除荷状態に至っている。

一方、せん断余裕度 α の小さい D19-L1.0/1.5 の場合には、 α の大きい D13-L2.0 の場合と異なり支点反力 R は大略重錘衝撃力 P と類似の履歴挙動を示していることが分かる。これは、せん断余裕度 α が小さい場合には、相対的に曲げ剛性が大きいことより曲げひびわれなどによるエネルギー損失も比較的少なく、重錘衝突による入力エネルギーが直接的に支点到に伝達されるような特性を示すためと考えられる。

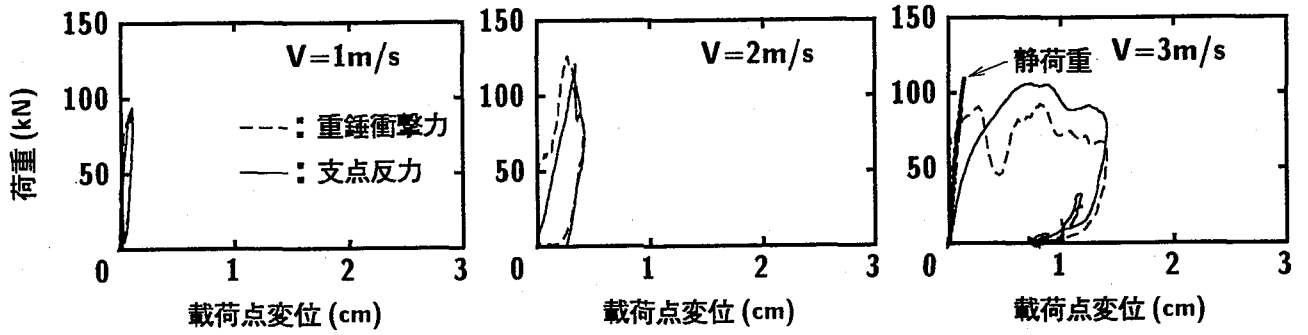
また、各梁の最終衝突速度 $V = 3 \text{ m/s}$ における支点反力 R -変位 δ 曲線と静荷重載荷時の荷重 P -変位 δ 曲

線を比較すると、せん断余裕度 α の小さい D19-L1.0/1.5 の梁における変位量は両者で大差があるものの、最大支点反力は最大静荷重と同程度の大きさであることが分かる。また、せん断余裕度 α の大きい D13-L2.0 の場合には、前述のように曲げ破壊型の履歴曲線と類似の性状を示すため、その最大支点反力は最大静荷重の 1.5 倍程度となっている。

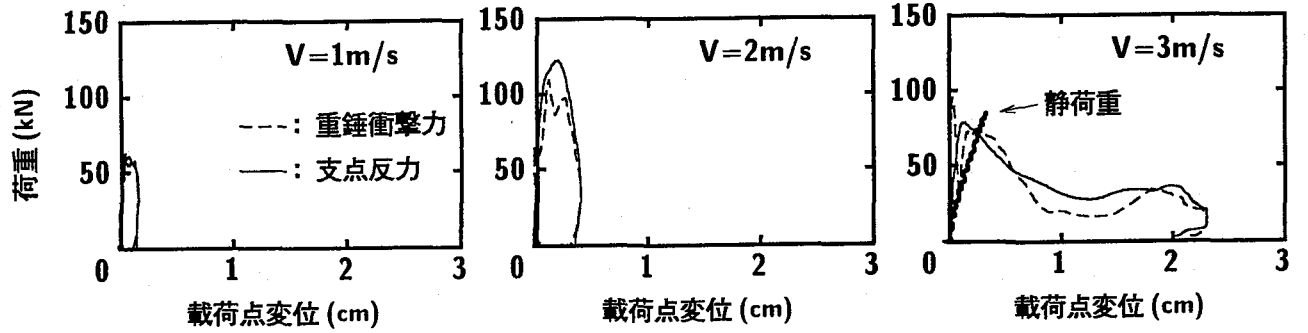
一方、(b) 図の単一載荷実験結果をみると、せん断余裕度 α の小さい D19-L1.0/1.5 の重錘衝撃力 P と支点反力 R に関する載荷初期の増加傾向や、 α の大きい D13-L2.0 における P および R の履歴特性は前述のとおり基本的に繰り返し載荷時と類似であることが分かる。また、最大静荷重と最大支点反力を比較すると、D19-L1.0 および D13-L2.0 の場合には両者ほぼ同程度であるが、D19-L1.5 の場合には最大支点反力が最大静荷重の約 1.5 倍程度の値となっている。

4.4 RC 梁の動的応答倍率

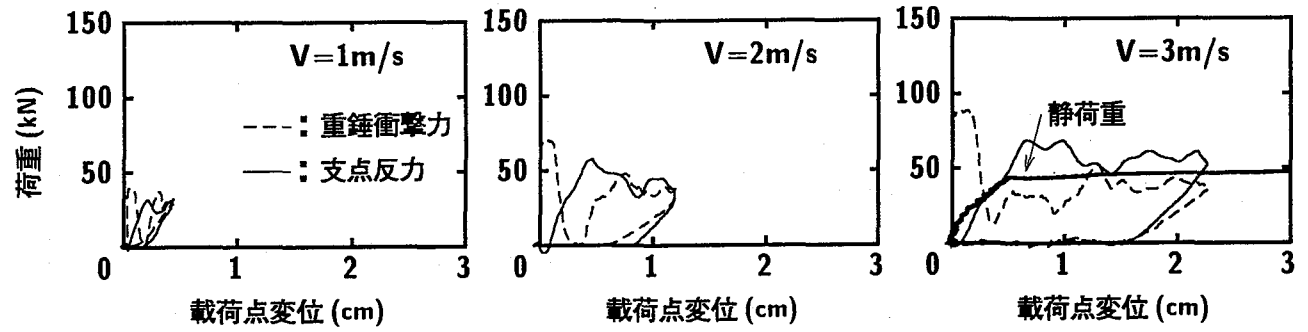
図-6 には、繰り返し載荷の最終載荷時および単一載荷時における最大支点反力 R_{ud} を最大静荷重 (以下、静的耐力) P_u で除すことにより求めた各 RC 梁の動的応答倍率を示している。図より、せん断余裕度 α が大きく曲げ破壊型と同様な支点反力 R -変位 δ の履歴曲線を示す D13-L2.0 の場合における動的応答倍率は、繰り返



D19-L1.0-II

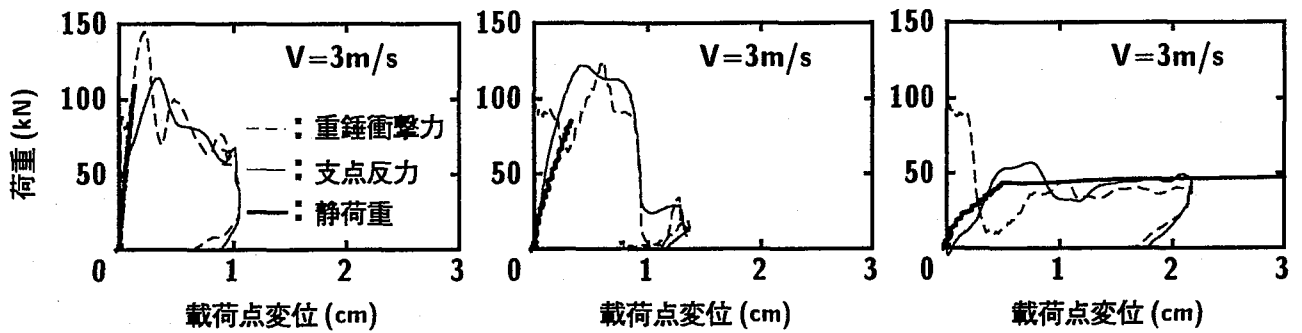


D19-L1.5-II



D13-L2.0-II

(a) 繰り返し載荷実験の場合



D19-L1.0-IS

D19-L1.5-IS

D13-L2.0-IS

(b) 単一載荷実験の場合

図-5 重錘衝撃力 P および支点反力 R の載荷点変位 δ に関する履歴曲線

し載荷，単一載荷とも比較的大きい値を示している。一方，D13-L2.0を除いた他の梁の場合には，繰り返し載荷および単一載荷ともあるいはいずれか一方の載荷時に1.0前後の値を示している。これは，せん断破壊型のRC梁の耐衝撃設計が，静的耐力を用いて行うことができることの可能性を示唆しているものと考えられる。

5. まとめ

本研究では，せん断破壊に対する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梁に着目して静載荷実験および重錘落下衝撃荷重載荷実験を行った。本実験の範囲内で得られた結果を整理すると，

静載荷実験結果より，

- 1)せん断余裕度 α が 1.0 以下の RC 梁の破壊形態は，斜めひびわれの発生に伴うせん断破壊型となる。また，このときの終局変位は極めて小さいためエネルギー吸収量も少ない。

重錘落下衝撃荷重載荷実験結果より，

- 2)せん断余裕度 α が 0.7 程度以下の RC 梁の損傷程度は，繰り返し載荷と単一載荷の場合で概ね等しい。
- 3)せん断余裕度 α が 1.0 前後以上の RC 梁は衝突速度の小さい段階で曲げひびわれの進展が期待できる。そのため，入力エネルギーの累積によって劣化が進行し，繰り返し載荷と単一載荷の場合で損傷程度が異なる。
- 4)せん断スパン比 a/d が 3.5 程度以下，またせん断余裕度 α が 1.0 以下でせん断破壊型を呈する RC 梁の載荷点変位波形は，荷重載荷時には重錘衝撃力および支点反力波形と同様な分布を示している。しかしながら，除荷後には残留変位による直流成分のみの波形分布を示す。
- 5)せん断余裕度 α が 1.0 以下の RC 梁の支点反力-載荷点変位曲線は，重錘衝撃力-載荷点変位曲線と類似している。
- 6)最終載荷時におけるせん断余裕度 α が 1.0 以下の RC 梁の最大支点反力は，静的耐力と同程度である。これより，せん断破壊型の RC 梁の耐衝撃設計は，動的応答倍率を 1.0 程度とすることで静的耐力を用いて行うことができるものと考えられる。

以上より，静載荷時にせん断破壊が卓越する RC 梁の耐衝撃性に関する基礎的データを得ることができた。今後は，断面寸法が異なる RC 梁やせん断補強筋を有する RC 梁の耐衝撃性に関しても明らかにしていきたいと考

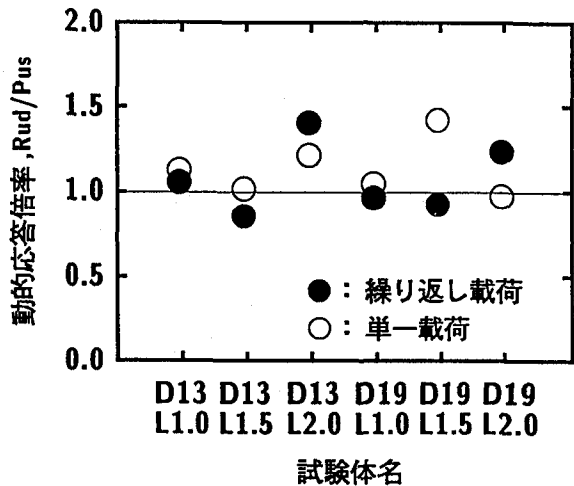


図-6 RC梁の動的応答倍率

えている。

謝辞：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松岡健一教授に適切なご指導を戴きました。また，室蘭工業大学建設システム工科大学院生の賀澤友晴君，長谷川弘毅君他大学院生に多大なるご支援を戴いた。ここに記して謝意を表します。

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) 構造工学シリーズ6，構造物の衝撃挙動と設計法，土木学会，1993。
- 4) 佐藤昌志，熊谷守晃，西 弘明，松岡健一：ルランベツ覆道の落石災害時における衝撃挙動の解析，構造工学論文集，Vol.41A，1995。
- 5) 三上 浩，岸 徳光，吉田紘一，安藤智啓：RC柱模型の横衝撃載荷実験，応用力学論文集，Vol.1，1998。
- 6) 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。
- 7) 岸 徳光，三上 浩，佐藤昌志，松岡健一：RC梁の耐衝撃性に及ぼす断面寸法の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.2，1997。

（1998年9月18日受付）