

## スターラップを有しないせん断破壊型 RC 梁の単一載荷衝撃実験

Single Loading Impact Tests on Shear-Failure Type RC Beams without Stirrups

安藤智啓\* 岸 徳光\*\* 三上 浩\*\*\* 松岡健一\*\* 蟹江俊仁\*\*\*\*

Tomohiro ANDO, Norimitsu KISHI, Hiroshi MIKAMI, Ken-ichi G. MATSUOKA, and Shunji KANIE

\* 工修 室蘭工業大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (〒050-8585 室蘭市水元町 27 - 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 - 1)

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

\*\*\*\* 工博 大成建設(株) 課長 エンジニアリング本部 (〒163-0606 新宿区西新宿 1 - 25 - 1)

In this paper, in order to investigate impact resistance of shear-failure type Reinforced Concrete (RC) beams, weight falling impact tests are conducted. Here, twenty-seven simply supported RC beams without stirrups are used. Impact load is singly surcharged onto the mid-span of RC beams using a 300 kg steel weight. All RC beams used here are of 150 mm width and 250 mm depth in cross section, in which rebar and shear-span ratios are taken as variables. The results obtained from this study are as follows: 1) reaction force is linearly increased at incident and then is suddenly decreased after reaching the maximum value; 2) after unloading, the mid-span displacement faintly vibrates accompanying with some drift; 3) hysteresis loop between reaction force and displacement may be modeled as a triangular form; and 4) the impact resistant design procedure for RC beams may be rationally performed based on the relations among static shear capacity, the maximum reaction force, residual displacement, input and absorbed energy.

*Key Words: shear-failure type RC beam, impact test, impact resistance, static shear capacity*

## 1. はじめに

耐衝撃用途鉄筋コンクリート (RC) 構造物である道路落石防護施設や砂防ダム等の衝撃安全性をより向上させるために、近年各研究機関で、RC 梁、柱、板部材の耐衝撃性に関する研究が盛んに行われている<sup>1)~3)</sup>。また、これらの RC 部材は通常曲げ破壊が先行するように断面設計されていることより<sup>4), 5)</sup>、主に曲げに対する部材の耐衝撃性に着目した研究が進められている。これまでのところ、衝撃荷重載荷時に曲げ破壊型となる RC 梁に関しては、その耐衝撃性がかなり明らかにされてきており、合理的な耐衝撃設計手法も提案されるまでに至っている<sup>6), 7)</sup>。しかしながら、衝撃荷重載荷時にせん断破壊型となる RC 部材の耐衝撃性に関しては、研究事例が少なく RC 梁に関してさえも十分に把握されていないのが現状である。

一般に、RC 部材のせん断破壊は、部材の大きな変形を伴わずに急激に耐力が低下することにより生じるため、極めて脆性的となる。このため、部材のエネルギー吸収が十分期待できる曲げ破壊型の場合とは異なり、破壊時に致命的な損傷に至る危険性を有している。平成 4 年に北海道日高支庁様似町のルランベツ覆道上で発生した岩塊崩落において、海側柱部に生じたせん断ひび割れは、このような RC 部材のせん断破壊に対する危険性を認識させる災害であった<sup>8)</sup>。従って、RC 部材は耐衝撃設計時においても、静載荷時と同様常に曲げ耐力以上のせん断耐力を確保することが必要であるものと判断される。

そのためには、曲げと同様せん断に対する合理的な耐衝撃設計法を確立しなければならない。

このような観点より、本研究ではせん断に対する合理的な耐衝撃設計手法を確立するための基礎資料を得ることを目的として、RC 部材の中でも最も単純である RC 梁に着目し、主に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実験的検討を試みた。RC 梁のせん断耐力式は、土木学会のコンクリート標準示方書<sup>9)</sup>においてせん断補強筋 (スターラップ) による耐力分担とコンクリートと主鉄筋による耐力分担から構成されている。衝撃荷重載荷時にもこのような考え方が成立するものと仮定し、本研究では特にスターラップを配筋せずに、コンクリートと主鉄筋から成るアーチ作用による効果のみに着目し検討することとした。実験は、重錘落下方式に基づき、重錘を所定の高さから RC 梁上に一度だけ落下させる単一載荷法により実施している。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、これらパラメータの影響も含めて検討を行った。

## 2. 実験の概要

## 2.1 試験体の概要

図 - 1 には試験体の形状寸法および配筋状況を示している。試験体はいずれも断面寸法 150 × 250 mm の単鉄筋矩形 RC 梁である。また、主鉄筋径には D19, D13 の 2 種類を、純スパン長  $L$  には 1.0, 1.5, 2.0 m の 3 種類

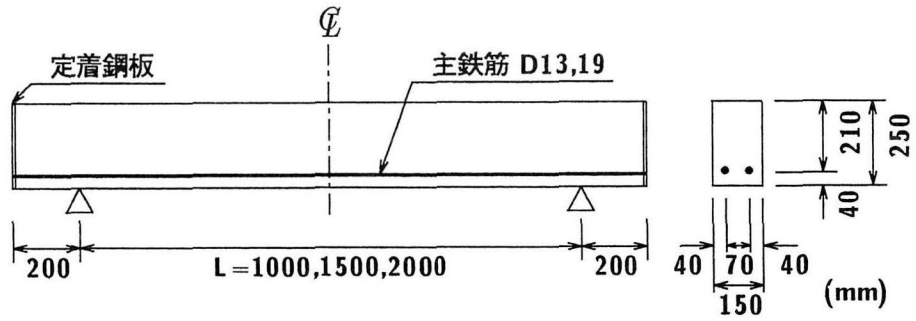


図 - 1 試験体の形状寸法および配筋状況

表 - 1 試験体の一覧

試験体名	主鉄筋径 (主鉄筋比 $p_t$ )	純スパン長 $L$ (せん断スパン比 $a/d$ )	衝突速度 $V$ (m/s)	静的せん断耐力 $V_{usc}$ (kN)	静的曲げ耐力 $P_{usc}$ (kN)	静的せん断余裕度 $\alpha$
D19-L1.0	D19 (0.0182)	1.0 (2.4)	1	68.8	163.1	0.42
			3			
			4	70.8	165.2	0.43
			5			
D19-L1.5	D19 (0.0182)	1.5 (3.6)	1	68.8	108.7	0.63
			3			
			4	70.8	110.1	0.64
			5			
D19-L2.0	D19 (0.0182)	2.0 (4.8)	1	68.8	81.5	0.84
			3			
			4	70.8	82.6	0.86
			5			
D13-L1.0	D13 (0.0080)	1.0 (2.4)	1	52.3	78.4	0.67
			2			
			3	53.9	78.8	0.68
			4			
D13-L1.5	D13 (0.0080)	1.5 (3.6)	1	52.3	52.2	1.00
			3			
			4	53.9	52.5	1.03
			5			
D13-L2.0	D13 (0.0080)	2.0 (4.8)	1	52.3	39.2	1.33
			3			
			4	53.9	39.4	1.37
			5			
			6			

を採用し、これらの組み合わせにより試験体を製作している。なお、主鉄筋は梁端面に設置した厚さ 9 mm の定着鋼板に溶接し、その定着長を節約している。このため、実験時には主鉄筋の抜け出しが見られず、鋼板に鉄筋が十分定着されていることを確認している。

表 - 1 には、用いた試験体の一覧を示している。試験体数は合計 27 体である。表中の試験体名には、主鉄筋径 (D19, D13) および純スパン長  $L$  (1.0, 1.5, 2.0 m) を組み合わせて用いている。また、表中には主鉄筋比  $p_t$ 、せん断スパン比  $a/d$ 、静的せん断耐力  $V_{usc}$ 、静的曲げ耐力  $P_{usc}$  および静的せん断余裕度 (以下、せん断余裕度)  $\alpha$  も合わせて示している。ここで、 $V_{usc}$  および

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 / 34.5	24.0 / 22.6	0.22 / 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
D19	SD345	390 / 381	605 / 549	206	0.3
D13	SD345	394 / 406	565 / 582	206	0.3

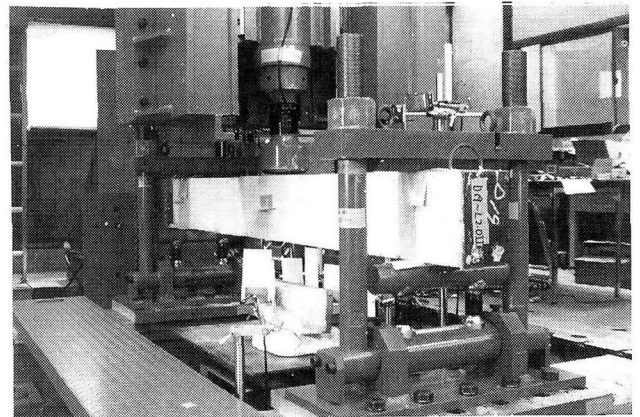


写真 - 1 重錘落下衝撃実験の状況

$P_{usc}$  は、土木学会コンクリート標準示方書<sup>9)</sup>に基づいて算定している。このうち  $P_{usc}$  の算定には断面分割法を適用している。また、各耐力算定時の部材係数には、 $\gamma_b = 1.0$  を用いている。せん断余裕度  $\alpha$  はこの  $V_{usc}$  を  $P_{usc}$  で除した値であり、 $\alpha \leq 1.0$  および  $\alpha \geq 1.0$  は、それぞれ静載荷時に RC 梁がせん断破壊および曲げ破壊することを意味している。表より、本実験に用いた試験体は、D13-L2.0 試験体を除きほぼ  $\alpha \leq 1.0$  であることより、これらの試験体は静載荷時にはせん断型で破壊に至ることが分かる。なお、表中、同一試験体の各耐力値、静的せん断余裕度値が異なっているのは、試験体が 2 回に分けて打設されたことによって各材料特性が異なっているためである。しかしながら、それらの差異は僅か

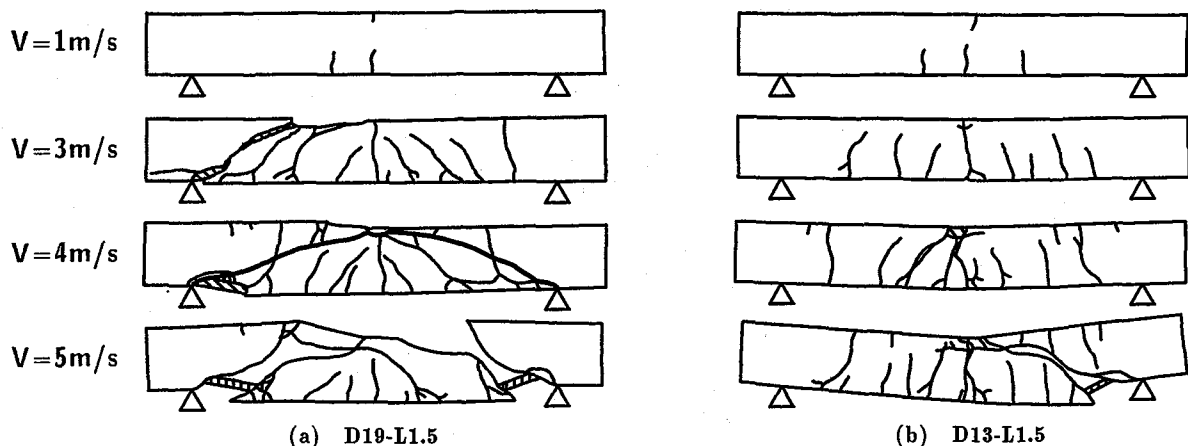


図-2 ひび割れ状況

あることより、ここでは実験結果に対して基準化等の特別な処理を施さずに考察することとする。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。

## 2.2 重錘落下衝撃実験および測定項目

写真-1には重錘落下衝撃実験の状況を示している。実験は、RC梁のスパン中央部に質量300kgの円柱状鋼製重錘を所定の高さから単一に載荷させることにより行っている。また、本研究では、特にRC梁の破壊時近傍の耐衝撃性に着目していることより、全て処女試験体を用い、衝突速度を梁が二分あるいは三分するまで1m/sずつ増加させて単一載荷実験を行った。ただし、衝突速度が比較的遅い $V = 2$  m/s時の実験に関しては、試験体数の制約もありD13-L1.0の場合を除き実施していない。なお、用いた重錘は載荷部直径が150mmであり、衝突時の片当りを防止するため、重錘底部は高さ2mmのテーパを有する球形状となっている。試験体は反力測定用ロードセルが取り付けられた支点用治具上に設置し、さらに梁支点部上縁には跳ね上がり防止用治具も設けている。また、治具全体は回転のみを許容し単純支持に近い構造となっている。

測定項目は、重錘衝撃力波形 $P$ 、支点反力波形 $R$ および載荷点変位(以下、変位)波形 $\delta$ である。 $P$ の測定には容量および応答周波数がそれぞれ1470kN、DC $\sim$ 4.0kHzの起歪柱型ロードセルを、 $R$ の測定には容量500kN、応答周波数DC $\sim$ 2.4kHzの同型ロードセルを用いている。また、 $\delta$ の測定にはストローク200mm、応答周波数915Hzのレーザ式変位計を用いている。なお、 $P$ および $R$ は、直流増幅器を介して高帯域用データレコーダ(応答周波数DC $\sim$ 40kHz)に一括収録している。その後、100 $\mu$ s/wordのサンプリング間隔で各応答波形をA/D変換している。また、各衝撃力波形 $P$ 、 $R$ に関しては、高周波成分を除去するためにA/D変換後2.5msecの矩形移動平均法により数値的なフィルター処理を施している。

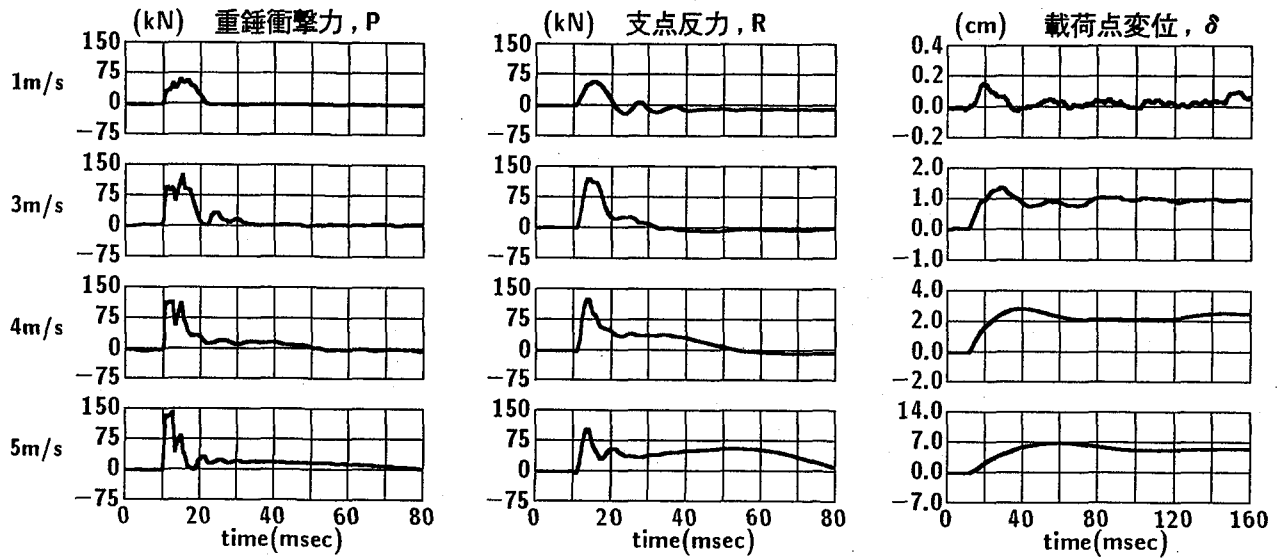
## 3. 実験結果および考察

### 3.1 ひび割れ状況

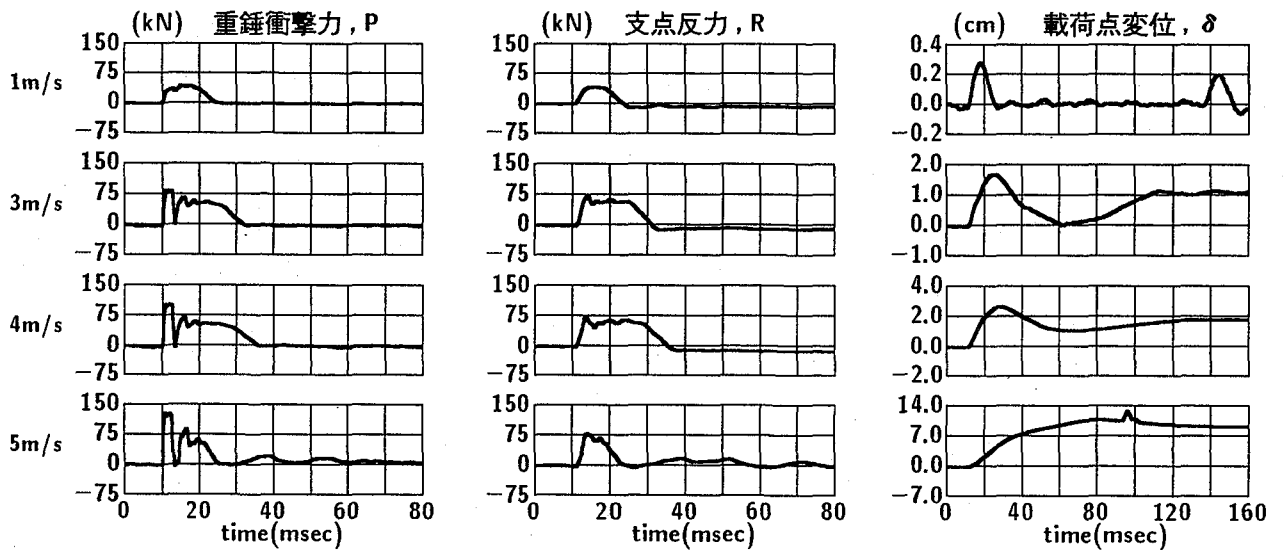
図-2には、各衝突速度におけるRC梁のひび割れ状況の一例を示している。紙面の都合により、ここでは純スパン長 $L$ が1.5mである試験体D19/D13-L1.5の結果のみに着目して検討することとする。

まず、(a)図のせん断余裕度 $\alpha$ が0.6程度である試験体D19-L1.5の場合に関して考察する。図より、衝突速度 $V = 1$  m/sの場合には、載荷点部の梁下縁に数本の曲げひび割れのみ発生していることが分かる。 $V = 3$  m/sでは、曲げひび割れが支点部近傍に至るまで広範囲に分散している。また、これらの曲げひび割れは載荷点部に向かい斜め方向に進展している。なお、このひび割れ分布性状は $V = 4, 5$  m/sの場合にもほぼ同様である。さらに、 $V = 3$  m/s以降では、載荷点から支点部に至る貫通する斜めひび割れも発生している。特に、 $V = 5$  m/sの場合には、梁が完全に三分されコンクリート塊がアーチ状に押し抜けられる破壊状態を呈している。その結果、斜めひび割れ形成部における主鉄筋が大きく塑性変形している。

次に、(b)図のせん断余裕度 $\alpha$ が1.0程度である試験体D13-L1.5の場合に関して考察する。ここでもD19試験体の場合と同様に、衝突速度 $V = 1$  m/sの場合には、載荷点部の梁下縁に数本の曲げひび割れのみが発生している。 $V = 3$  m/sでは支点部近傍まで曲げひび割れが分散し、かつ載荷点部の曲げひび割れが上下に貫通していることが分かる。この時の残留変位は1.14cmであり未だ破壊に至っていない。 $V = 4$  m/sの場合には $V = 3$  m/sの場合とほぼ同様の曲げひび割れの分散性状を示しているものの、衝突速度 $V$ の増加に伴って多くのひび割れが梁上縁まで進展し、残留変位も2.26cmに達している。この残留変位量は、著者等が単一載荷時の曲げ破壊型RC梁に設定した破壊規定である純スパン長の1.1%である1.65cmよりも大きく、既に破壊域に達していることが分かる。さらに、衝突速度を



(a) D19-L1.5



(b) D13-L1.5

図-3 重錘衝撃力波形、支点反力波形および変位波形

増加させ、 $V = 5 \text{ m/s}$  とする場合には  $V = 3, 4 \text{ m/s}$  時と同様の貫通する曲げひび割れが発生しているものの、これらとは独立した載荷点から支点に至る貫通した斜めひび割れが発生し、破壊に至っている。これより、静的なせん断余裕度  $\alpha$  が 1.0 前後の場合には、衝突速度の小さいレベルで曲げ破壊型を、大きいレベルでせん断破壊型を示すことが明らかになった。

さらに、両試験体のひび割れ状況を比較すると、せん断余裕度  $\alpha$  が 1.0 より小さい D19-L1.5 の場合には衝突速度  $V$  の小さいレベルから斜めひび割れが発生しており、せん断破壊の兆候を示している。一方、 $\alpha$  が 1.0 前後の D13-L1.5 の場合には  $V = 4 \text{ m/s}$  の段階まで曲げ破壊型の傾向を示しており、 $\alpha$  が 1.0 前後の場合はある段階の衝突速度までは曲げ破壊の傾向を示すことが分かる。

### 3.2 重錘衝撃力波形、支点反力波形および変位波形

図-3 には、各衝突速度における RC 梁の重錘衝撃力波形  $P$ 、支点反力波形  $R$  および変位波形  $\delta$  の一例を示している。ここでも、前節と同様に試験体 D19/D13-L1.5 に着目し、各種応答波形性状に関する検討を試みることにした。また、ここでは重錘が RC 梁に衝突する 10 msec 前の時刻を 0 msec とし、衝撃力波形  $P$ 、 $R$  の場合には 80 msec、変位波形  $\delta$  の場合には 160 msec までの時間に対して整理した。なお、支点反力波形は独立に測定した両支点反力を足し合わせた合計として評価し、以後この合計値を用いて考察することとした。

まず、(a) 図の試験体 D19-L1.5 の各応答波形に関して検討する。図より、重錘衝撃力波形  $P$  は、衝撃初期に振幅が大きくかつ継続時間の短い波形成分が現れていることが分かる。また、これは衝突速度  $V$  の増大とともに顕著になっている。しかしながら、支点反力波形  $R$

は重錘衝撃力波形  $P$  で見られた継続時間の短い波形成分は現れていない。この衝撃初期の波形を除くと、 $P, R$  の分布性状は大略類似した傾向を示している。すなわち、衝突速度  $V = 1 \text{ m/s}$  の場合には、各波形は半周期 10 msec 程度の正弦半波的な分布を示している。また、 $V$  の増加とともに振幅が  $1/4 \sim 1/2$  程度に低減した緩やかな波動が衝撃初期に発生する正弦半波後に現れている。その継続時間は  $V$  の増加とともに増大しており、 $V = 5 \text{ m/s}$  の場合で 60 msec 程度となっている。なお、この正弦半波以降の波動の出現と継続時間の増大は、前節のひび割れ分布と照らして、斜めひび割れ域が衝突速度の増大とともに拡大していくことにより、コンクリートと主鉄筋によるせん断抵抗力が減少し、斜めひび割れ部の主鉄筋のみがせん断力に抵抗することに起因しているものと考えられる。さらに、変位波形  $\delta$  を見ると、 $V = 3 \text{ m/s}$  以降で荷重除荷後に直流成分のみが示されている。これは、前述したように、斜めひび割れが梁の上下縁を貫通するため、コンクリート部のせん断抵抗力が零になり、主鉄筋のみが抵抗しせん断変形したことによるものと考えられる。

次に、(b) 図の試験体 D13-L1.5 の各応答波形に関する検討を行う。図より、重錘衝撃力波形  $P$  は、衝突速度  $V = 1 \text{ m/s}$  の場合には波動継続時間が 15 msec 前後の正弦半波状の分布で、継続時間が多少長いものの、(a) 図の D19-L1.5 試験体と同様な性状を示している。一方、 $V = 3 \sim 4 \text{ m/s}$  の場合には、衝撃初期に波動継続時間が数 msec の正弦半波状の波形成分が現れ、その後、継続時間が 15 msec 以上の緩やかな正弦半波状の分布となっている。この分布性状は曲げ破壊型 RC 梁に関する実験結果に類似しており<sup>10)</sup>、(a) 図の D19-L1.5 の実験結果とは明らかに異なっていることが分かる。また、 $V = 5 \text{ m/s}$  の場合には、第 2 波目の波動が正弦半波状であるもののその継続時間が  $V = 4 \text{ m/s}$  の  $1/2$  程度となり、どちらかと云えば、(a) 図の D19-L1.5 試験体の実験結果に近い分布性状を示している。これより、せん断余裕度  $\alpha$  が 1.0 前後の場合には、図 - 2 のひび割れ分布性状からも明らかなように、衝突速度が比較的小さい段階では曲げ型の破壊モードを示すが、衝突速度の増大に伴いせん断型の破壊モードを示すことが明らかとなった。

支点反力波形  $R$  は、衝突速度が  $V = 4 \text{ m/s}$  までは曲げ破壊型 RC 梁の実験結果と同様<sup>10)</sup>、ほぼ台形状の分布を示している。一方、 $V = 5 \text{ m/s}$  の場合には、正弦半波状の分布を示しているものの、重錘衝撃力波形よりも継続時間が短く、かつ同一衝突速度における (a) 図の D19-L1.5 試験体の実験結果に示されているような継続時間の長い 2 波目の波動は示されていない。これは、図 - 2 のひび割れ分布図にも示されているように、衝突速度が増すことによって上下に貫通する斜めひび割れが発生して、破壊モードが曲げ破壊型からせん断破壊型に移行し、入力エネルギーと破壊エネルギーが釣り合う状態

になったためと推察される。

変位波形  $\delta$  についても、重錘衝撃力  $P$ 、支点反力  $R$  に対応した波形性状を示している。すなわち、衝突速度  $V = 4 \text{ m/s}$  までは衝撃荷重載荷によって大きく変形するものの、荷重の除荷とともに復元傾向を示し、最終的に残留成分を含む低次の曲げ振動状態に移行している。一方、 $V = 5 \text{ m/s}$  の場合には、荷重の除荷時にも変位は単調に増加し、一定値に漸近する傾向を示している。その性状は、同一衝突速度における (a) 図 D19-L1.5 試験体の実験結果と類似であり、せん断破壊型の性状を示していることが分かる。

### 3.3 重錘衝撃力、支点反力の変位に関する履歴挙動

図 - 4 には、重錘衝撃力および支点反力の変位に関する  $P-\delta, R-\delta$  履歴曲線の衝突速度  $V$  による推移状況を示している。ここでは、試験体 D19/D13-L1.5 の他、せん断余裕度  $\alpha$  が最小、最大である D19-L1.0, D13-L2.0 の場合も含め検討する。また、履歴曲線は  $\alpha$  の小さい梁の順に示している。図中の破線および実線は、それぞれ  $P-\delta$  および  $R-\delta$  を示している。なお、図中には別途行った静載荷実験の結果 ( $P_s-\delta$ ) も合わせて示している。

図より、いずれの梁に対しても、 $P-\delta, R-\delta$  履歴曲線の囲む面積は、衝突速度  $V$  の増加に対応して増大しており、梁の吸収エネルギー量が増大していることが分かる。

詳細に見ると、せん断余裕度  $\alpha$  が 0.7 以下である D19-L1.0/L1.5 の場合の  $R-\delta$  履歴曲線において、支点反力  $R$  は、衝突速度  $V$  の小さい段階では衝撃力が線形的に増加して最大値に達し、その後急激に減少する三角形形状の分布を示していることが分かる。しかしながら、 $V$  が増加し梁が上下に貫通する斜めひび割れの発生によって二分あるいは三分されるような変形状態に至る場合には、三角形形状の分布を示した後さらに荷重が作用した状態で変位が増大している。これは、RC 梁が以下のように挙動するためと推察される。すなわち、1) 衝撃力の入力により、上下に貫通した斜めひび割れが発生し、三角形形状の荷重-変位分布を示す、2) 入力エネルギーが過大な場合には、斜めひび割れの発生により、梁が三分されて主鉄筋のみがせん断力を伝達する構造となり、未だ消費されていないエネルギーに対しては主に変位の大きい載荷点部梁要素の慣性力成分から成る支点反力-変位特性を示す、である。また、 $P-\delta$  と  $R-\delta$  の履歴挙動を比較すると、三角形形状を示す変位初期に関しては、立ち上がり部を除き両者ほぼ類似した性状を示している。しかしながら、三角形形状の分布以降に出現する履歴挙動に関しては、支点反力  $R$  が重錘衝撃力  $P$  よりも大きく示されている。なお、立ち上がり部での重錘衝撃力の最大値は支点反力のそれに比べてより変位量の小さい段階で発生している。また、この傾向は試験体 D13-L1.5/L2.0 の場合でも同様に見られ、かつより顕著に示されて

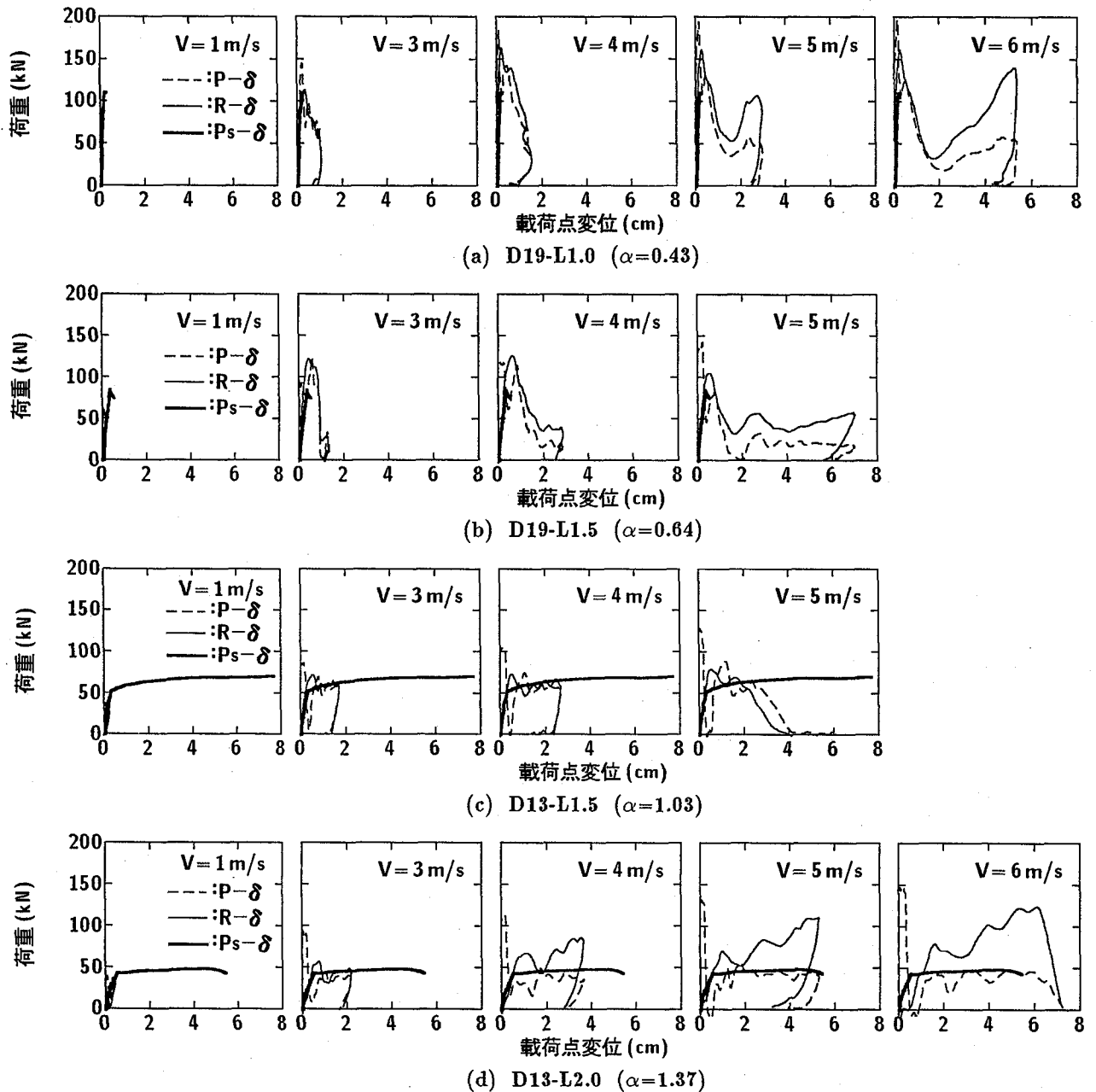


図-4 重錘衝撃力および支点反力の変位に関する履歴曲線

いる。

せん断余裕度  $\alpha$  が 1.0 程度である D13-L1.5 の場合の  $R-\delta$  履歴曲線において、支点反力  $R$  は衝突速度  $V = 4$  m/s 以下において、最大値程度の衝撃力が作用した状態で変位が増大し、やがて初期剛性と同程度の剛性で除荷される平行四辺形状の分布を示している。これは、曲げ破壊型 RC 梁に関する実験結果と同様の性状であり<sup>7)</sup>、前述のとおり曲げ型の破壊モードであることを確認できる。一方、 $V = 5$  m/s の場合には、 $\alpha < 0.7$  の実験結果で示された三角形の分布に類似しており、せん断破壊型であることを裏付けている。また、 $P-\delta$  と  $R-\delta$  の履歴挙動は、せん断余裕度  $\alpha$  が 0.7 以下の場合である D19-L1.0/L1.5 試験体に関する実験結果同様に、初期の立ち上がり部の挙動を除き両者大略類似した性状を示し

ている。

せん断余裕度  $\alpha$  が 1.0 以上である D13-L2.0 の場合には、 $R-\delta$  履歴曲線は  $V = 3$  m/s で D13-L1.5 の場合と同様に平行四辺形状の分布を示している。また、 $V = 4$  m/s 以降では支点反力のみが変位の増加とともに増大し、 $P-\delta$  と  $R-\delta$  の履歴挙動は多少異なった性状を示している。これは、過度の衝撃荷重載荷によって、RC 梁が曲げ破壊とともに大きく変形し、大きな慣性力が支点反力に伝達されたためと推察される。

静載荷実験の結果と比較すると、いずれの梁においても  $R-\delta$  の立ち上がり勾配は  $P_s-\delta$  のそれとほぼ等しいことが分かる。また、衝撃荷重載荷時にせん断破壊を示している D19-L1.0/L1.5 試験体の場合には、静載荷時にも小さな変位で終局に至っている。さらに、衝撃荷重

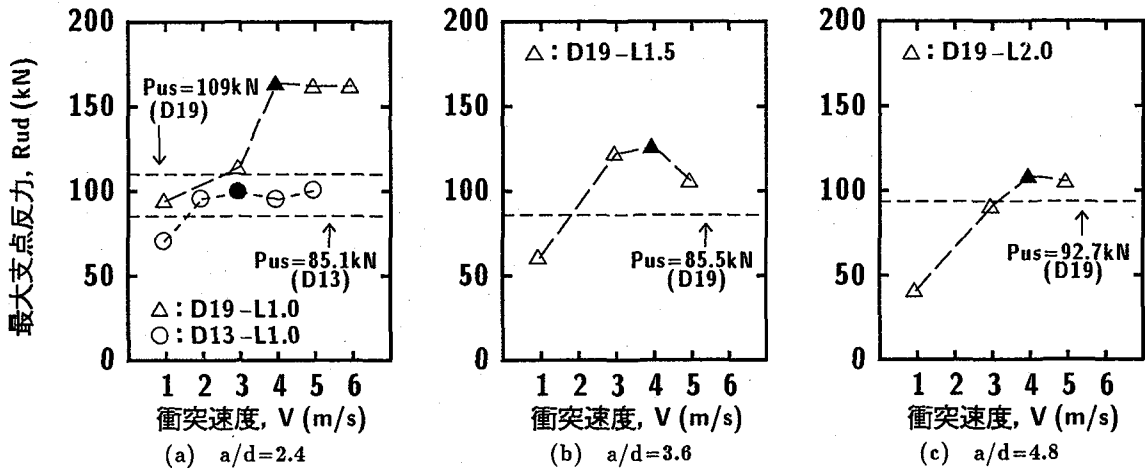


図 - 5 最大支点反力と衝突速度の関係 (黒塗り印 : 最大値を表す)

載荷時に衝突速度が小さい段階で曲げ破壊を示している D13-L1.5/L2.0 試験体の場合には、静載荷時にも変形が大きく示され曲げ破壊の性状を示していることが分かる。これより、衝撃荷重載荷時の破壊モードは静載荷時のそれと良く対応していることが明らかとなった。以上の考察より、以後のせん断に対する耐衝撃性は、曲げ破壊型を示す D13-L1.5/L2.0 の試験体に関する実験結果を除いて議論することとする。

### 3.4 最大支点反力と衝突速度の関係

前節の考察より、重錘衝撃力波形  $P$  は、1) 衝撃初期に振幅が大きくかつ継続時間の短い高周波成分を含む複雑な波形分布を示すこと、また 2) ほとんど変位が生じない衝撃初期の段階で急激に励起されるため、エネルギー-取支関係が評価しにくいことが明らかになった。これより、以後の考察は最大支点反力  $R_{ud}$  のみに着目して検討することとした。

図 - 5 には、各せん断スパン比  $a/d$  における RC 梁の最大支点反力  $R_{ud}$  と衝突速度  $V$  の関係を示している。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。また、図中▲、●印は、各 RC 梁における  $R_{ud}$  の最大値を示している。

図より、最大支点反力  $R_{ud}$  は、せん断破壊型を示すいずれの梁においても、実験実施試験体中の絶対最大値 (図中、▲、●) に至るまで衝突速度  $V$  の増加とともにほぼ直線的に増大していることが分かる。なお、 $R_{ud}$  の絶対最大値発生時における RC 梁は、ほとんど全て明瞭な斜めひび割れの発生に伴うせん断型で破壊していることを確認している。それ以降の衝突速度に対する  $R_{ud}$  は、この▲、●印の値とほぼ同等か若干小さく示されている。これは、衝突速度の増大により梁が二分あるいは三分されるような大きな変形を生じる場合、この二分あるいは三分の破壊状態に至るために消費されるエネルギーはほぼ等しく、余剰エネルギーが破壊後の分離された各 RC 梁要素の剛体変形に費やされることを示している

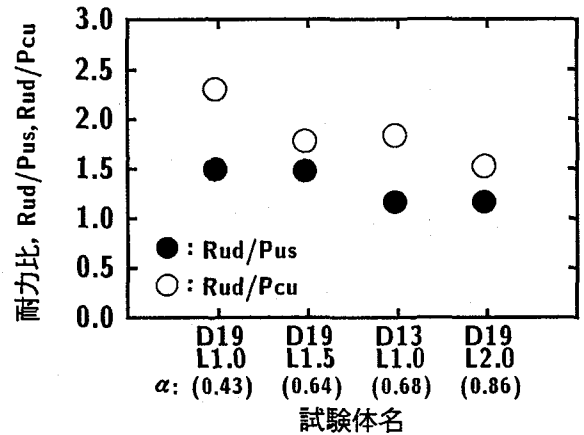


図 - 6 耐力比

ものと考えられる。また、せん断スパン比  $a/d = 2.4$  の場合には、主鉄筋比  $p_t$  の大きい D19 試験体の  $R_{ud}$  が、 $p_t$  の小さい D13 試験体のそれに比べて大きく示されている。これは、D19 および D13 試験体の静的耐力  $P_{us}$  の大小関係に対応している。

### 3.5 耐力比

図 - 6 には、各 RC 梁の耐力比をせん断余裕度  $\alpha$  の小さい順に示している。ここでは RC 梁の動的耐力を、図 - 5 の黒塗りで示した絶対最大支点反力  $R_{ud}$  と仮定して評価している。図中の耐力比は、この  $R_{ud}$  の値を静載荷実験で得られた静的耐力  $P_{us}$  および計算より得られた静的耐力  $P_{cu}$  で除すことにより求めている。なお、計算静的耐力  $P_{cu}$  には、静的曲げ耐力  $P_{usc}$  と静的せん断耐力  $V_{usc}$  の小さい方の値を採用している。

まず、静的耐力として静載荷実験結果を仮定する場合について見ると、 $\alpha$  が 1.0 以下でせん断破壊型試験体の場合には、耐力比は 1.0 ~ 1.5 程度である。一方、計算値静的耐力値を用いる場合の耐力比は、 $\alpha$  が 1.0 以下で 1.5 ~ 2.5 程度の範囲内にあることが分かる。これより、せん断余裕度  $\alpha$  が 1.0 以下で衝撃荷重載荷時にせん断

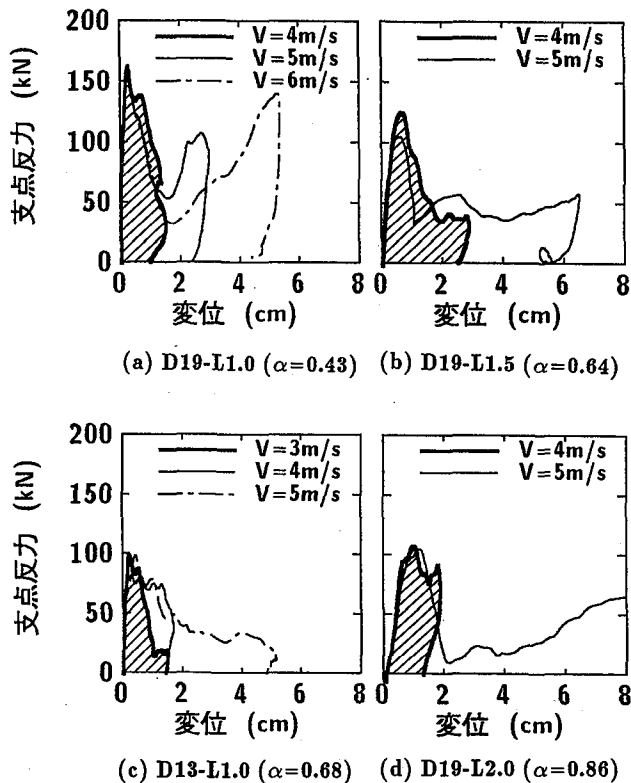


図-7 支点反力の変位に関する履歴曲線  
(絶対最大支点反力発生時以降)

破壊型を示す RC 梁は、絶対最大支点反力を梁の動的耐力と仮定し、実験より得られる静的耐力と等価、あるいは計算静的耐力の 1.5 倍と仮定することにより、安全側で耐衝撃設計が可能となるものと判断される。

### 3.6 RC 梁の破壊時における吸収エネルギー

図-7 には、各せん断余裕度  $\alpha$  に対する絶対最大支点反力の発生した衝突速度以降の支点反力-変位曲線 ( $R-\delta$  曲線) を示している。図より、各タイプの  $R-\delta$  曲線は、載荷初期から最大支点反力値に達するまで、および除荷時も D13-L1.0 試験体を除き衝突速度  $V$  の増加により支点反力が一定値あるいは再度上昇するまでは、衝突速度に関わらず概略三角形の分布形状を示していることが分かる。また、いずれのタイプの梁も  $V$  の増加に伴い、 $R-\delta$  曲線で囲まれる吸収エネルギー量が増大していることが分かる。しかしながら、それは三角形分布を示した後に形成される  $R-\delta$  曲線で囲まれる面積に対応して増大している。これは、前述したように、斜めひび割れが発生し RC 梁が二分あるいは三分されるために消費される破壊エネルギーはほぼ等しいこと、余剰エネルギーは斜めひび割れ部の主鉄筋を介して分離した各 RC 梁要素の剛体変形に費やされることと対応しているものと考えられる。なお、D19-L2.0 試験体の場合には、絶対最大支点反力が発生した  $V = 4 \text{ m/s}$  の場合は、どちらかと云えば変位初期の分布が平行四辺形状で示されている。このような場合でも吸収エネルギー量は、

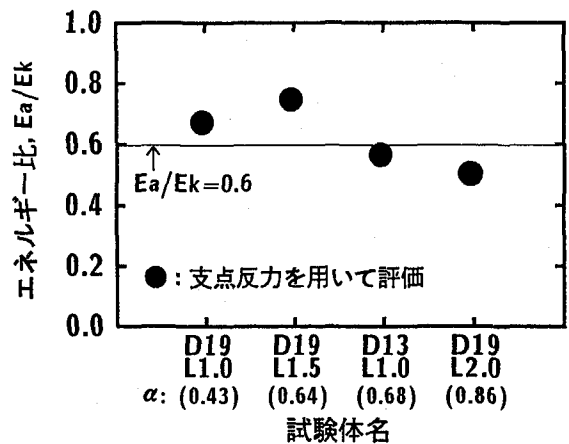


図-8 エネルギー比

$V = 5 \text{ m/s}$  時の変位初期の三角形分布の部分で評価されるそれとほぼ類似していることが分かる。また、 $V = 4 \text{ m/s}$  時に平行四辺形状を示したのは、梁に上下に貫通する斜めひび割れが発生していないことを実験後に確認しており、梁が曲げ型の挙動を呈したためと推察される。しかしながら、このときの残留変位は  $1.07 \text{ cm}$  であり、曲げ破壊型 RC 梁に対して設定した破壊規定である純スパン長の  $1.1\%$  (この場合、 $2.2 \text{ cm}$ ) には達していない。

以上より、変位初期の三角形分布以降に支点反力  $R$  が一定値に移行する状態や、再度増大する状態が出現される場合には、RC 梁は二分あるいは三分されるような著しいせん断破壊を生じることが明らかとなった。これより、RC 梁が真にせん断破壊を起こす時の吸収エネルギー  $E_a$  は、入力エネルギー (重錘落下エネルギー) を変化させて得られる絶対最大支点反力発生時の変位初期に励起される三角形分布から求まる吸収エネルギー  $E_a$  として評価することが妥当であるものと判断される。なお、試験体数の制約から真の絶対最大支点反力発生時の吸収エネルギー  $E_a$  を求めることは不可能であることより、ここでは実験の範囲内で得られる絶対最大支点反力発生時の値 (図中、斜線部面積) を求め評価することとした。

### 3.7 エネルギー比

図-8 には、各せん断余裕度  $\alpha$  に関する絶対最大支点反力発生時の衝突速度における吸収エネルギー  $E_a$  (図-7の斜線部面積) を入力エネルギー  $E_k (=MV^2/2)$  で除すことにより算定したエネルギー比を示している。

図より、せん断余裕度  $\alpha$  が  $1.0$  以下でせん断破壊型試験体の場合には、エネルギー比  $E_a/E_k$  は  $0.5 \sim 0.7$  程度以下の範囲内にあることが分かる。また、その平均値は  $E_a/E_k = 0.6$  である。これより、エネルギー比を  $E_a/E_k = 0.6$  と評価することで、エネルギー収支に基づくせん断破壊型 RC 梁の衝撃安全性照査が可能になるものと判断される。



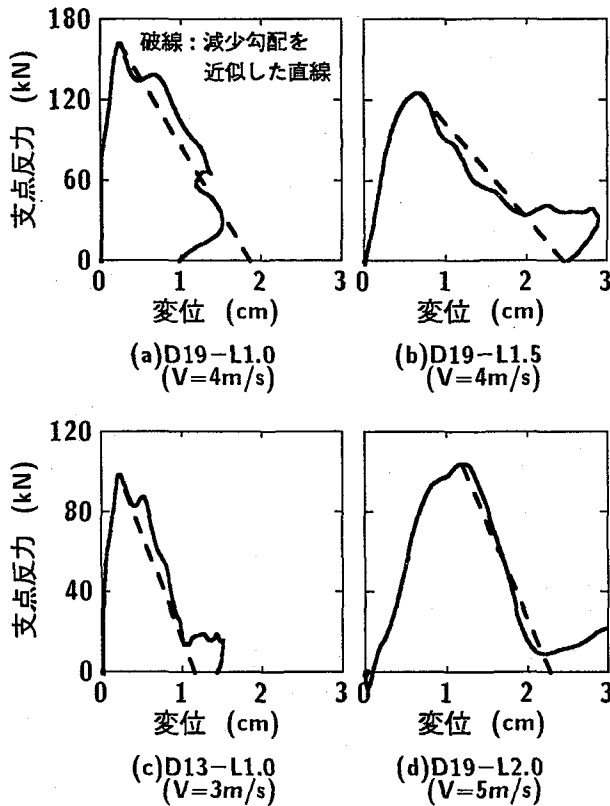


図-9 せん断破壊時の支点反力-変位曲線

### 3.8 せん断破壊時の支点反力-変位曲線の模式化

図-9には、絶対最大支点反力  $R_{ud}$  (以下、単に最大支点反力) が発生した衝突速度  $V$  におけるせん断破壊型試験体の支点反力の変位に関する  $R-\delta$  履歴曲線を示している。ただし、 $\alpha$  が 1.0 に近い D19-L2.0 試験体の場合には、 $R_{ud}$  が  $V = 4 \text{ m/s}$  で最大となるものの、上下に貫通する斜めひび割れが見られず曲げ破壊型の場合と同様の平行四辺形状の分布を示したことより、明瞭にせん断破壊した一段衝突速度の大きい  $V = 5 \text{ m/s}$  の  $R-\delta$  曲線を代用して示している。また、図中の破線は、最大支点反力  $R_{ud}$  と  $R_{ud}$  到達後に直線的に減少する勾配から支点反力  $R$  がほぼ一定値に移行する時点 (D19-L1.5/L2.0, D13-L1.0 の場合) あるいは変位が減少に転じる時点 (D19-L1.0 の場合) までを結んだ直線を示している。

図-9の支点反力-変位曲線 ( $R-\delta$  曲線) を基に、RC梁のせん断破壊時における  $R-\delta$  履歴曲線を模式化すると、 $R-\delta$  曲線は最大支点反力  $R_{ud}$  と図-9に示す破線の延長線上に示される残留変位  $\delta_{ar}$  (以後、推定残留変位) から成る三角形分布で表すことができる (図-10)。ここで、前節 3.5 および 3.7 で得られた計算値を用いた場合の耐力比およびエネルギー比をそれぞれ 1.5, 0.6 と仮定し、耐衝撃設計時に要求される RC 梁の静的せん断耐力  $V_{usd}$  (以下、設計用静的せん断耐力) に関して整理すると、次式のようになる。

$$V_{usd} = 0.8 \frac{E_{kd}}{\delta_{rd}} \quad (\text{kN}) \quad (1)$$

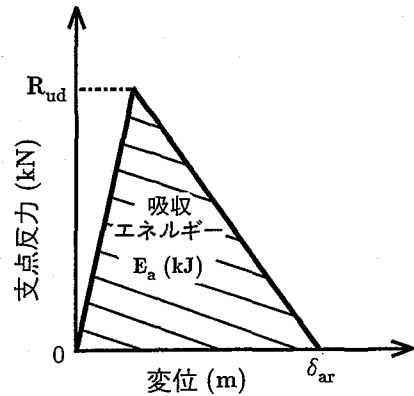


図-10 支点反力-変位曲線の模式化

表-4 推定残留変位  $\delta_{ar}$  の一覧

試験体名	D19-L1.0	D19-L1.5	D13-L1.0	D19-L2.0
せん断余裕度 $\alpha$	0.43	0.64	0.68	0.86
衝突速度 $V$ (m/s)	4	4	3	5
推定残留変位 $\delta_{ar}$ ( $\times 10^{-2}$ m)	1.85	2.45	1.15	2.27
$L / \delta_{ar}$	54.1	61.2	87.0	88.1

$L$ : 純スパン長 (m)

ここで、 $E_{kd}$  (kJ) および  $\delta_{rd}$  (m) は、それぞれ耐衝撃設計時に設定される入力エネルギーおよび RC 梁の残留変位である。これより、式 (1) に  $E_{kd}$  および  $\delta_{rd}$  を代入することで  $V_{usd}$  が算定でき、算定した  $V_{usd}$  に即して断面を決定することでスターラップが配筋されない場合のせん断破壊型 RC 梁の合理的な耐衝撃設計が可能になるものと判断される。

図-9より、本実験における推定残留変位  $\delta_{ar}$  は、 $L/88 \sim L/54$  の範囲内にあった (表-4)。今後は、さらにデータを蓄積して設計用残留変位  $\delta_{rd}$  の規定に向けた検討を行いたいと考えている。

### 4. まとめ

本研究では、せん断破壊型 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、スターラップが配筋されない場合で主に静載荷時にせん断破壊が卓越する RC 梁に着目して、重錘落下方式による単一載荷衝撃実験を行った。本実験で得られたせん断余裕度  $\alpha$  が 1.0 より小さい RC 梁に関する結果を整理すると、以下のとおりである。

- 1) RC 梁は、衝突速度の小さいレベルでは載荷点より支点部に至る貫通する斜めひび割れが卓越したせん断破壊の性状を示す。また、衝突速度の大きいレベルではひび割れ面が大きく開口し、梁が二分あるいは三分されるような著しいせん断破壊の性状を示す。
- 2) 重錘衝撃力および支点反力波形は、衝突速度の小さいレベルでは正弦半波的な分布を示す。また、衝突速度

- の増加に伴い、正弦半波後に振幅が正弦半波の  $1/2 \sim 1/4$  程度に低減された緩やかな波動が現れる。一方、変位波形は衝撃力波形に上述の緩やかな波動が現れる衝突速度で、荷重除荷後の波動が直流成分のみとなる。
- 3) 重錘衝撃力-変位曲線および支点反力-変位曲線は、いずれも衝突速度の小さいレベルでは変位の増加に伴い線形的に増大し、最大値に達した後急激に減少する三角形の分布を示す。また、衝突速度の増大に伴い梁が二分あるいは三分されるような変形状態を示す場合には、三角形の分布を示した後に荷重が作用した状態で変位が増大する分布が現れる。
  - 4) 最大支点反力は、静的実験より得られた静的耐力の  $1.0 \sim 1.5$  倍程度、また計算静的耐力の  $1.5 \sim 2.5$  倍程度である。
  - 5) 最大支点反力を梁の動的耐力と仮定し、計算静的耐力の  $1.5$  倍、入力エネルギーに対する梁の吸収エネルギー比（エネルギー比）を  $0.6$  と評価することで、エネルギー収支関係を用いた RC 梁のせん断に対する耐衝撃設計が可能となる。
  - 6) 従って、衝撃荷重載荷時における RC 梁の設計用静的せん断耐力は、入力エネルギーの  $0.8$  倍を設計用残留変位で除すことにより安全側で評価できる。

謝辞：本研究を行うにあたり、当時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（現札幌市役所）および同大学院構造力学研究室の長谷川弘毅君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) 中田吉彦, 榎谷 浩, 梶川康男, 森嶋芳大: 個別要素法による鉄筋コンクリートはりの衝撃挙動解析, 構造工学論文集, Vol.44A, 1998.
- 2) 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.
- 3) 圓林栄喜, 香月 智, 石川信隆, 太田俊昭: 簡易動的解析法による PC はりの動的終局変形の推定, 構造工学論文集, Vol.45A, 1999.
- 4) 構造工学シリーズ 8, ロックシェッドの耐衝撃設計, 土木学会, 1998.
- 5) 日本道路協会: 道路橋示方書 (V耐震設計編)・同解説, 1996.
- 6) 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, 1996.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 岸 徳光, 三上 浩, 松岡健一, 安藤智啓: 静載荷時に曲げ破壊が卓越する RC 梁の弾塑性衝撃応答解析, 土木学会論文集, No.619/I-47, pp.215-233, 1999.

(1999 年 9 月 17 日受付)