

せん断補強筋を有しない RC 梁の重錘落下衝撃挙動に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON IMPACT BEHAVIOR OF RC BEAMS WITHOUT STIRRUPS
DUE TO A STEEL WEIGHT FALLING

安藤智啓*, 岸 徳光**, 三上 浩***, 松岡健一**

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

* 工修 室蘭工業大学大学院 工学部建設システム工学科 (〒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 (〒272-0132 千葉県流山市駒木 518-1)

キーワード: RC 梁, せん断破壊, 重錘衝撃力, 支点反力, 衝撃挙動

(RC beam, Shear failure, Weight impact force, Reaction force, Impact behavior)

1. はじめに

耐衝撃用途構造物(落石防護施設, 原子力発電所関連施設など)の構成要素である RC 梁, 柱, 版の耐衝撃性に関する研究は, これまで多くの研究者によって実施されてきた^{1), 2), 3)}. その結果, 曲げ破壊型 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, 簡易な耐衝撃設計法も提案されるに至っている⁴⁾. 一方, RC 部材のより合理的な耐衝撃設計手法を確立するためには, 曲げ耐力のみならず, せん断耐力に関する設計法も確立しなければならない. しかしながら, せん断破壊型 RC 部材の耐衝撃性に関する研究は, 高速載荷時の RC 版に関する局部破壊問題を除きほとんど見あたらないのが現状である.

本研究では, 最も単純な梁部材に着目し, 静載荷時にせん断破壊が卓越する RC 梁の衝撃挙動に関する実験的検討を試みた. ここでは特にせん断補強筋を配筋せずに, 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て検討することとした. 実験は, 落下重錘の初速度および増分速度を 1 m/s とし, RC 梁が破壊に至るまで繰り返し載荷する方法(以下, 繰り返し載荷)とその最終速度で一度だけ載荷する方法(以下, 単一載荷)により実施している. 用いた試験体はコンクリート強度および主鉄筋比の異なる RC 梁であり, これらパラ

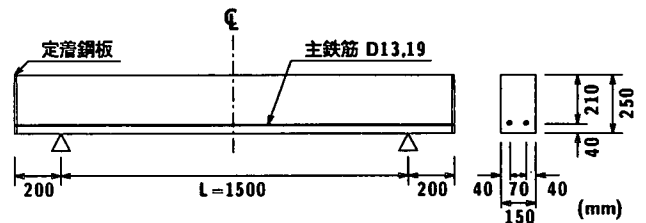


図-1 試験体の形状寸法および配筋状況

メータの影響および上述の載荷方法の影響も合わせて RC 梁の衝撃挙動を検討している.

2. 実験の概要

図-1には, 用いた試験体の形状寸法および配筋状況を示している. 試験体は断面寸法が 150 × 250 mm の単鉄筋矩形 RC 梁である. また, コンクリート強度には $\sigma'_c = 31.7 \text{ MPa}$, 21.1 MPa の 2 種類を, 主鉄筋径には D19, D13 の 2 種類を採用し, これらの組み合わせに前述の 2 種類の載荷方法を考慮して合計 8 体の RC 梁を製作している. 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.

表-1には, 試験体の設計値一覧を示している. 試験体名には, コンクリート強度のタイプおよび主鉄筋径を組み合わせ用いている. 静的せん断耐力 V_{usc} および静的曲げ耐力 P_{usc} は, 土木学会コンク

表-1 試験体の設計値一覧

試験体名	コンクリート強度 σ'_c (MPa)	主鉄筋径 (主鉄筋比 p_t)	静的せん断耐力 V_{usc} (kN)	静的曲げ耐力 P_{usc} (kN)	せん断余裕度 α	衝突速度 V (m/s)
H-19	31.7	D19	68.8	163.1	0.63	1~3 (3)
H-13 (H-type)		D13	52.3	78.4	1.00	1~3 (3)
L-19	21.1	D19	60.0	150.1	0.60	1~2 (2)
L-13 (L-type)		D13	45.7	50.6	0.90	1~4 (4)

リート標準示方書⁵⁾に準拠し算定している。せん断余裕度 α は、この V_{usc} を P_{usc} で除した値であり、 $\alpha \leq 1.0$ は、静載荷時に RC 梁がせん断破壊することを意味している。また、衝突速度欄には、繰り返し載荷実験時の衝突速度の他、単一載荷時の衝突速度を括弧内数値として示している。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。

実験は、リバウンド防止用治具付の支点用治具上に設置した試験体の梁スパン中央部に、質量 300 kg の円柱状鋼製重錘を所定の高さから自由落下させることにより行っている(写真-1)。また、繰り返し載荷の場合は、RC 梁側面に明瞭な斜めひび割れが発生するまで、単一載荷の場合は繰り返し載荷の最終速度と同一速度で実験を実施している。用いた重錘は載荷部直径が 150 mm であり、衝突時の片当りを防止するために重錘底部には高さ 2 mm のテーパが施されている。なお、治具全体は回転のみを許容しピン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 、合支点反力(以下、支点反力)波形 R および載荷点変位(以下、変位)波形 δ である。 P の測定には容量および応答周波数がそれぞれ 1,470 kN, DC ~ 4.0 kHz の起歪柱型ロードセルを、 R の測定には容量 500 kN, 応答周波数 DC ~ 2.4 kHz の同型ロードセルを用いている。また、 δ 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 RC 梁の実験終了後のひび割れ状況を示している。図より、繰り返し載荷の L-13 および単一載荷の H-, L-13 試験体を除くと、各 RC

表-2 コンクリートの力学的特性

コンクリート名称	実験時材令 (日)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
H-type	29	31.7	24.0	0.22
L-type	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
D19	SD345	390 / 388	605 / 559	206	0.3
D13	SD345	394 / 380	565 / 550	206	0.3

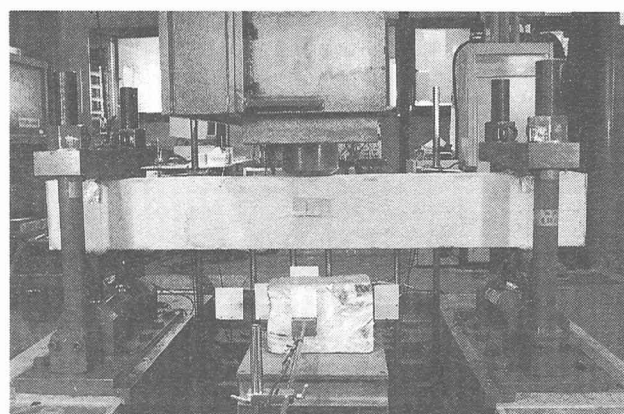


写真-1 実験状況

梁は載荷部から支点部に至る貫通する斜めひび割れの発生によりせん断破壊していることが分かる。

コンクリート強度がひび割れ分布性状におよぼす影響について見ると、RC 梁の破壊時の衝突速度がコンクリート強度により異なっていることが分かる。すなわち、D19 を用いる場合には低強度の L 試験体の衝突速度が、また D13 を用いる場合には高強度の H 試験体のそれが 1 m/s 小さい。本来、静的せん断耐力の小さい L 試験体の方が小さい衝突速度で破壊に至るものと考えられる。しかしながら、D13 を用いる場合にはこれと異なる傾向を示し、H 試験体の方が小さい衝突速度で破壊している。これは、D13 の場合には静的なせん断余裕度 α が 1.0 前後であるため、衝撃実験においてもせん断と曲げの破壊モードが混在する領域となり、L 試験体の場合には H 試験体の場合と異なり曲げ破壊が卓越するモードを示したためと考えられる。なお、L-13 試験体は、 $V = 4$ m/s 時で著者らが曲げ破壊型 RC 梁

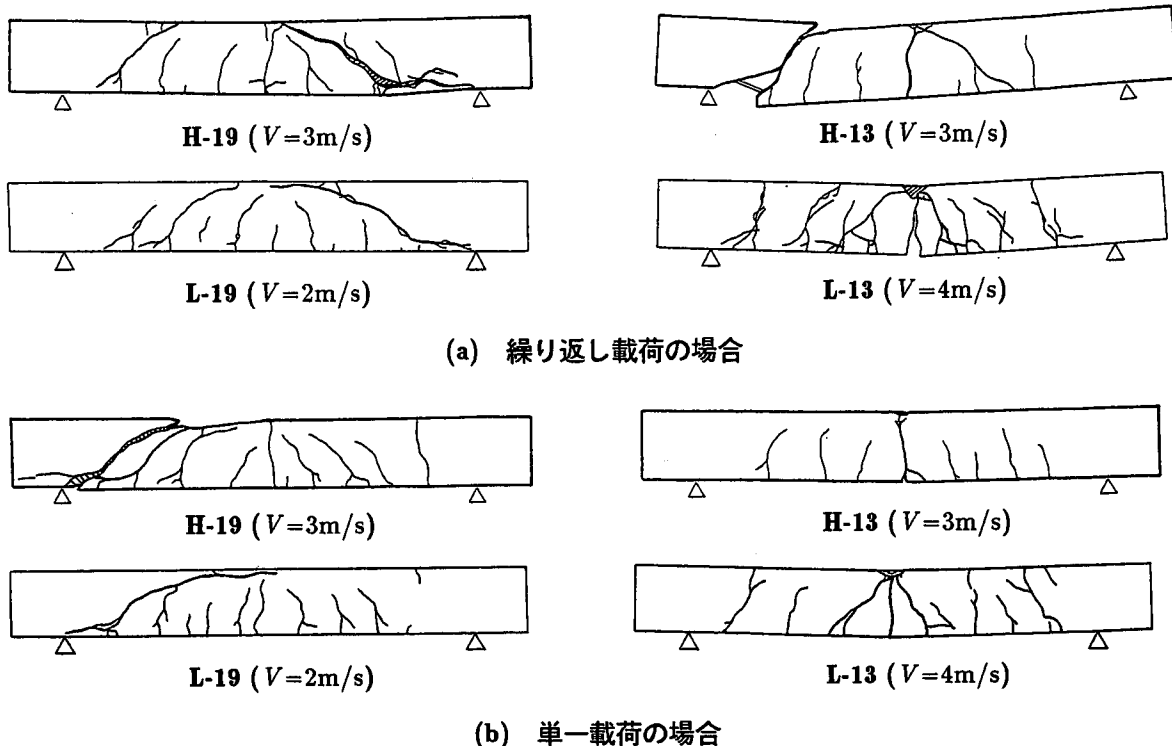


図-2 各 RC 梁の実験終了後のひび割れ状況

の破壊基準に設定している純スパン長の 2% 以上の累積残留変位量を示したため、この時点で実験を終了している。

載荷方法がひび割れ分布性状におよぼす影響について見ると、H-13 試験体の場合を除くと、各 RC 梁のひび割れ分布は載荷方法に関わらずほぼ類似していることが分かる。なお、H-13 試験体の場合には、単一載荷時にせん断破壊に至っておらず、未だ曲げ破壊型の挙動が卓越している様子が伺える。

3.2 重錘衝撃力、支点反力および変位波形

本節では、せん断破壊型 RC 梁の重錘衝撃力、支点反力および変位波形の分布性状を把握するため、繰り返し載荷時にせん断破壊に至った H-19/13 試験体に着目し各応答波形特性に関する検討を試みることにする (図-3)。

(a) 図より、重錘衝撃力波形 P および支点反力波形 R は、衝突速度 $V=1, 2$ m/s 時に半周期が 10 ms 程度の正弦半波的な分布性状を示していることが分かる。 $V=3$ m/s 時には、振幅が $1/3 \sim 1/2$ に低減した緩やかな波動も出現し、この波動が衝撃初期の波動と合成された分布性状を示している。この緩やかな波動の出現は、斜めひび割れの発生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、主鉄筋のみがせん断力に抵抗している状態に起因するものと考えられる。一方、変位波形について見ると、斜めひび割れ発生時の衝突速度 $V=3$ m/s で、荷重除荷後の波動が直流成分のみとなっていることが分かる。

(b) 図より、衝突速度 $V=1, 2$ m/s における重錘衝撃力波形 P および支点反力波形 R は、H-19 試験体の場合に比較して継続時間が多少長い正弦半波の分布性状を示していることが分かる。 $V=3$ m/s 時には、衝撃初期の正弦半波の継続時間が $V=1, 2$ m/s 時に比べると短く示されている。また、この正弦半波後には、H-19 試験体の場合と同様に継続時間が長い緩やかな波動が出現している。一方、変位波形も $V=3$ m/s の時点で荷重除荷後に直流成分のみの波動に移行している。なお、 $V=2, 3$ m/s 時の重錘衝撃力波形には、波動の立ち上がり部に継続時間が 2~3 ms 程度と継続時間の非常に短い波形成分が励起されている。これは、H-19 試験体の $V=3$ m/s の場合にも同様に見られる。

3.3 支点反力の変位に関する履歴挙動

本節では、せん断破壊型 RC 梁の衝撃力-変位の履歴挙動を把握するため、本研究で用いた全ての試験体を対象に検討を試みることにした。また、前

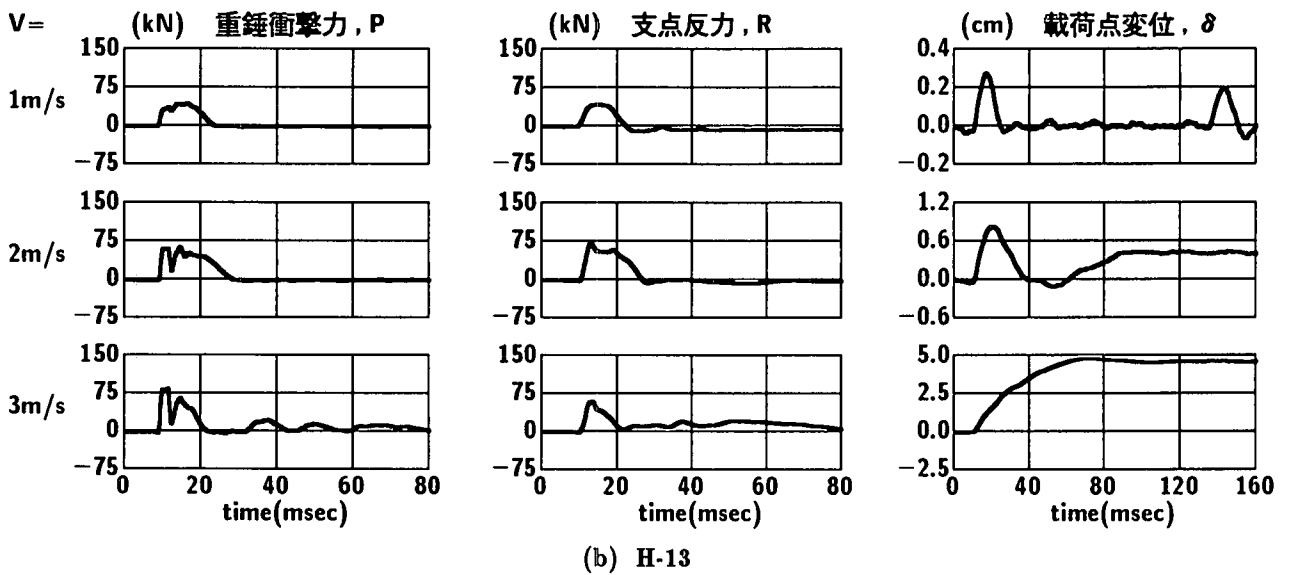
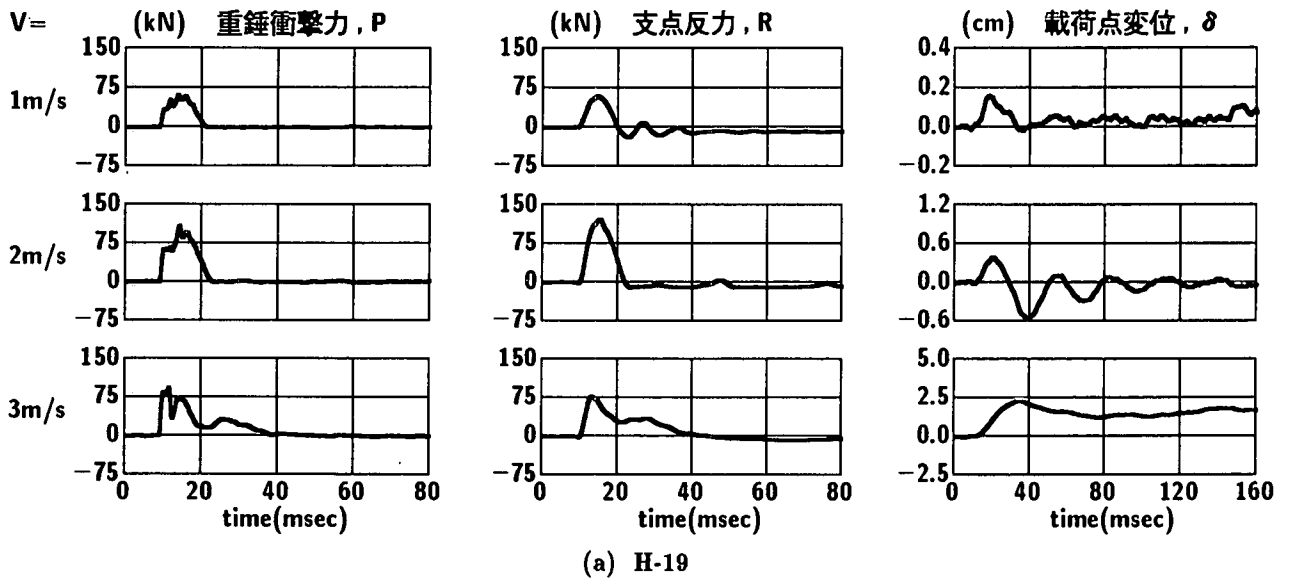


図-3 重錘衝撃力波形、支点反力波形および変位波形（繰り返し載荷の場合）

節の考察より、1) 重錘衝撃力波形には立ち上がり部において波動継続時間の短い波形成分が励起され複雑な分布性状を示すこと、一方、2) 支点反力波形の場合には変位波形に対応した単純な正弦半波の分布性状を示すこと、が明らかになっている。これより、衝撃力評価として支点反力を用いる方がより合理的であるものと判断され、支点反力の変位に関する $R-\delta$ 履歴挙動のみに着目して考察を行うものとする。また、ここでは特に1) コンクリート強度、2) 主鉄筋比および3) 載荷方法が $R-\delta$ 履歴挙動に与える影響に着目して検討することとする。以下、項目ごとに考察を行う。

(1) コンクリート強度の影響

(a) 図には、繰り返し載荷における D19 および

D13 試験体に関する $R-\delta$ 曲線を示している。図より、せん断余裕度が $\alpha = 0.6$ 程度の D19 試験体の場合には、高コンクリート強度 H を用いる場合の立ち上がり勾配が低コンクリート強度 L を用いる場合のそれに比べて大きく示されていることが分かる。また、 $V = 2 \text{ m/s}$ における最大支点反力が、高強度 H を用いる場合に大きく示されている。しかしながら、最大変位に関しては低強度 L を用いる場合の方が若干大きい。

一方、 $\alpha = 1.0$ 程度の D13 試験体の場合には、 $R-\delta$ 曲線の立ち上がり勾配が、いずれの衝突速度においてもコンクリート強度に関わらず同程度であることが分かる。また、 $V = 1, 2 \text{ m/s}$ 時には、両者の履歴曲線が非常に良く対応している。このうち、

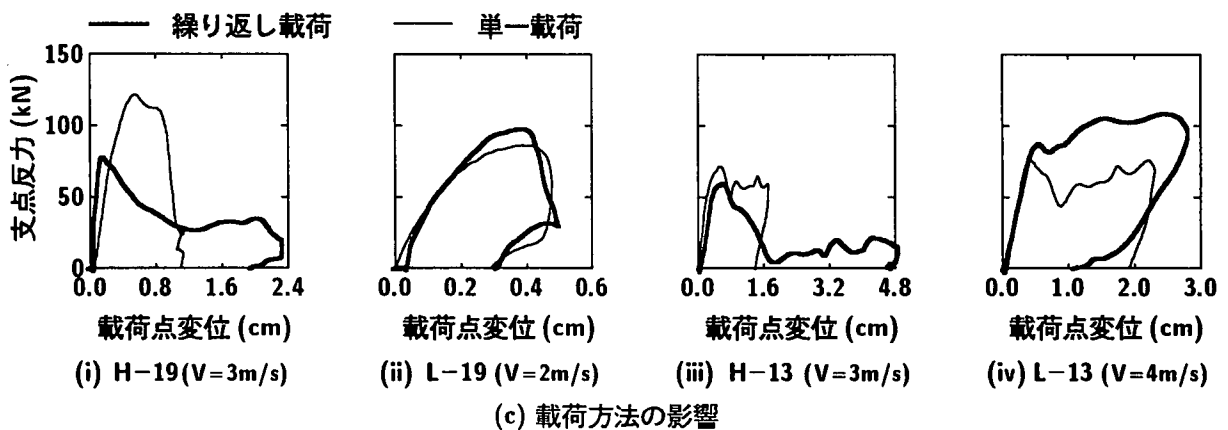
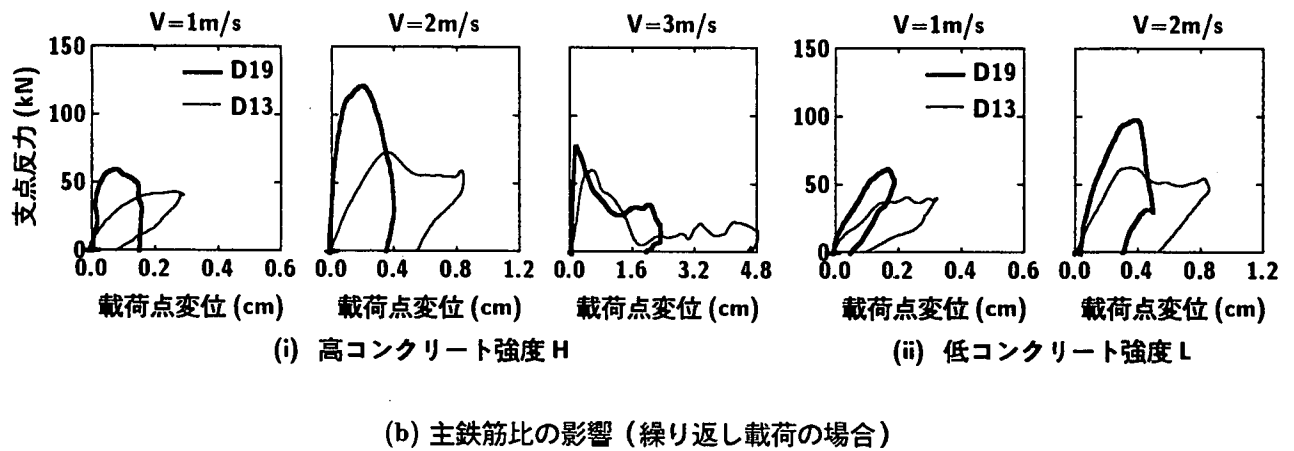
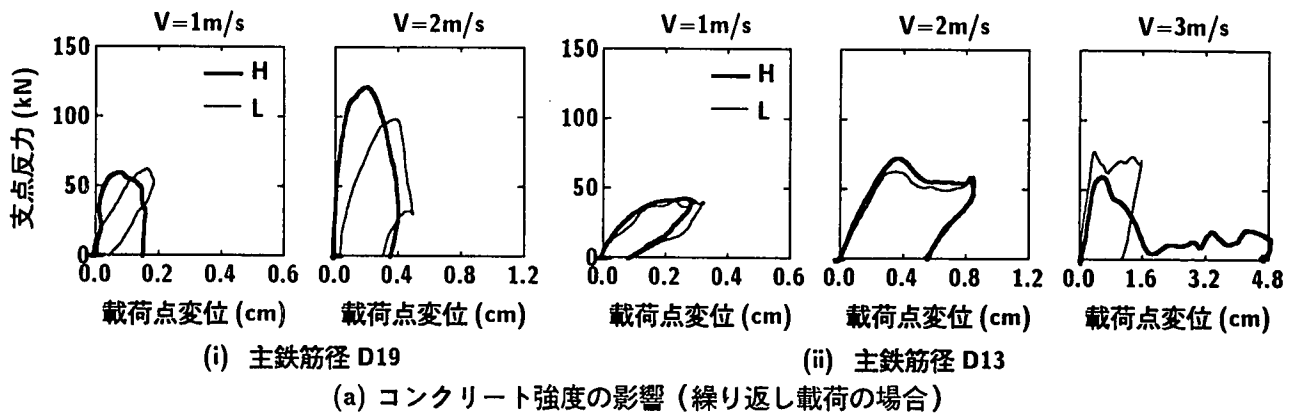


図-4 重錘衝撃力および支点反力の変位に関する履歴曲線

$V = 2 \text{ m/s}$ 時には両者とも曲げ破壊型 RC 梁の場合に見られる平行四辺形状の分布性状を示している。しかしながら、 $V = 3 \text{ m/s}$ 時には高強度 H を用いる場合のみが三角形の分布性状を示している。これは、H 試験体がこの時点でせん断破壊したことを裏付けている。

以上より、曲げ破壊が卓越する衝突速度レベルでは、 $R-\delta$ 履歴挙動におよぼすコンクリート強度の影響は、それほど大きくないものと判断される。し

かしながら、斜めひび割れが発生し梁がせん断破壊に至る場合には、高コンクリート強度を用いる梁の最大支点反力の方が大きく、最大変位は小さくなることが明らかになった。

(2) 主鉄筋比の影響

(b) 図には、繰返し載荷における H および L 試験体の $R-\delta$ 曲線を示している。図より、H、L 試験体のいずれの載荷速度に対しても、せん断耐力

が大きい D19 を用いる場合が D13 を用いる場合に比べて立ち上がりの勾配が大きく示されていることが分かる。また、最大支点反力はせん断耐力が大きい D19 を用いる場合に大きく、最大変位は耐力の小さい D13 を用いる場合に大きく励起されている。最終載荷時の $R-\delta$ 曲線について見ると、L-13 試験体を除くと、いずれの梁も三角形形状の分布性状を示し、せん断破壊の傾向を示していることが分かる。一方、L-13 試験体の場合は、曲げ破壊型 RC 梁に特有な平行四辺形状の様相を呈している。

(3) 載荷方法の影響

(c) 図には、各 RC 梁の $R-\delta$ 曲線を繰り返し載荷と単一載荷の場合で比較して示している。図より、せん断破壊に至らなかった単一載荷の H-13 試験体、繰り返しおよび単一載荷の L-13 試験体の場合には、 $R-\delta$ 曲線が平行四辺形状の分布性状を示していることが分かる。その他の梁に関しては、せん断破壊を示したためいずれも三角形形状の分布性状を呈している。また、L-19 試験体を除くと、H-19/13 で示されているように、繰り返し載荷の最大支点反力が単一載荷のそれに比べて小さく、最大変位が大きくなっている。これは、低衝突速度時に曲げひび割れが発生し、梁の曲げ剛性が低減していることを暗示している。

一方、載荷方法に関わらず曲げ挙動が卓越している L-13 試験体の場合には、繰り返し載荷の最大値の方が大きく示されている。これは、繰り返し載荷によって曲げ剛性が低減し、変位振幅が大きくなることに対応して慣性力も増大することによるものと推察される。

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に、静載荷時にせん断破壊が卓越するせん断補強筋を有しない RC 梁の衝撃挙動に関する実験的検討を試みた。本実験で得られた結果を整理すると、

- 1) 静的なせん断余裕度が 0.6 程度以下の場合には、載荷部から支点部に貫通する斜めひび割れが発生しせん断破壊する。
- 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性状を示す。また、斜めひび割れが発生してくる衝突速度では、正弦半波後に継続時間の長い緩やかな波動が現れる。一方、変位波形はこの段階で荷重除荷後に直流成分のみとなる。

- 3) 支点反力-変位曲線 ($R-\delta$ 曲線) は、梁に斜めひび割れが発生してくる場合には三角形形状の分布性状を示す。
- 4) コンクリート強度が $R-\delta$ 曲線におよぼす影響は、曲げ破壊が卓越する衝突速度レベルでは小さい。しかしながら、斜めひび割れが発生しせん断破壊に至る場合には、高コンクリート強度を用いる場合で最大支点反力は大きく、最大変位は小さく励起される。
- 5) せん断破壊に至る RC 梁の最大支点反力は耐力が大きい梁ほど大きく、最大変位は耐力が小さい梁ほど大きい。一方、載荷方法の差異に着目すると、単一載荷時の場合には繰り返し載荷と比較して劣化損傷度が小さいことより、最大支点反力は大きく、最大変位は小さく示される。

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）と長谷川弘毅君（同）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) 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.3, 1998.
- 5) 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.