

重錘落下衝撃実験における境界条件の相違が鉄筋コンクリート梁の衝撃挙動に及ぼす影響

岸 徳光¹・大野友則²・三上 浩³・安藤智啓⁴

¹フェロー会員 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)

E-mail: kishi@news3.ce.muroran-it.ac.jp

²正会員 工博 防衛大学校教授 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20)

³フェロー会員 博(工) 三井建設(株)技術研究所首席研究員 (〒270-0132 流山市駒木 518-1)

⁴正会員 博(工) 防衛庁第4研究所研究員 (〒229-0006 相模原市淵野辺 2-9-54)

本研究では、衝撃に関する実験的研究で一般的に行われている重錘落下衝撃実験において、1) リバウンド防止用治具設置の有無、2) 衝撃力の測定方法、3) ゴム緩衝材設置の有無、および4) 重錘の先端部形状、がRC梁の衝撃挙動に与える影響を明らかにするために、種々の境界条件下でのRC梁を用いた重錘落下衝撃実験を実施し、上述の影響に関する検討を行った。その結果、支点反力波形および変位波形は、ゴム緩衝材に残留変位成分が生じない载荷条件の範囲では、载荷点部におけるゴム緩衝材設置の有無にかかわらずほぼ同様の性状を示すことや、重錘载荷点部のコンクリートが著しく剥落しない衝突速度レベルでは、重錘の先端部形状の相違によらずほぼ同様の応答性状を示すこと、等が明らかになった。

Key Words : falling-weight impact test, impact behavior, boundary condition, RC beam

1. はじめに

土木・建築工学分野において耐衝撃用途を目的として建設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)構造物には、道路付帯構造である道路落石防護施設や土石流対策施設、原子力発電所関連施設等がある。これらの施設構造物のうち、原子力発電所関連諸施設は数多くの衝撃実験結果に基づいて断面設計されている。また、その他の耐衝撃用途RC/PC構造物の構成要素である梁、柱、版部材は、設計時に想定される衝撃的な外力を静的荷重に置き換え、許容応力度設計法に基づいて断面設計されており、十分な耐力が確保されているものと推察される。しかしながら、雲仙普賢岳山麓における土石流の発生(平成3年)、北海道様似町における岩塊崩落(平成4年)や北海道豊浜トンネル上での岩盤崩落(平成8年)等に見られるように、設計規模を遙かに上回る衝撃力の作用により、構造部材が壊滅的な損傷を受け、人命や社会生活に多大な被害をおよぼす災害が比較的に数多く発生している。このため、最近、災害に強いRC/PC構造部材の設計・施工が強く望まれるようになり、この種

の構造部材の耐衝撃性に関する実験的・解析的研究が各研究機関で盛んに行われるようになってきた^{1)~10)}。

しかしながら、近年の各研究機関における精力的な研究活動にもかかわらず、これらの構造部材の耐衝撃問題において、1) 実験的には衝撃試験装置、高応答性を有するセンサーや計測器が必要であること、2) 衝撃力や部材の動的応答(変位や歪等)を的確に測定するためには高度な計測技術が必要であること、3) 数値解析的には波動伝播問題等の動的効果や材料の歪速度効果の問題、またコンクリートの場合にはひび割れ発生等の弾塑性的な問題も伴うため、現象が非常に複雑であること、4) 研究事例が静的な場合に比べて著しく少なく、公表された実験データや解析データも十分ではないこと、等より、RC/PC梁、柱、版部材に関する合理的な耐衝撃設計手法は、コンクリート構造部材の基本であるRC梁に関してさえも未だ確立されるまでには至っていないのが現状である。

一方、RC/PC構造部材の耐衝撃設計法を確立するために行われるこれら構造部材の衝撃挙動把握のための実験に関しても、統一された指針が確立されていないため、衝突体の先端部形状や部材の支持方法等の

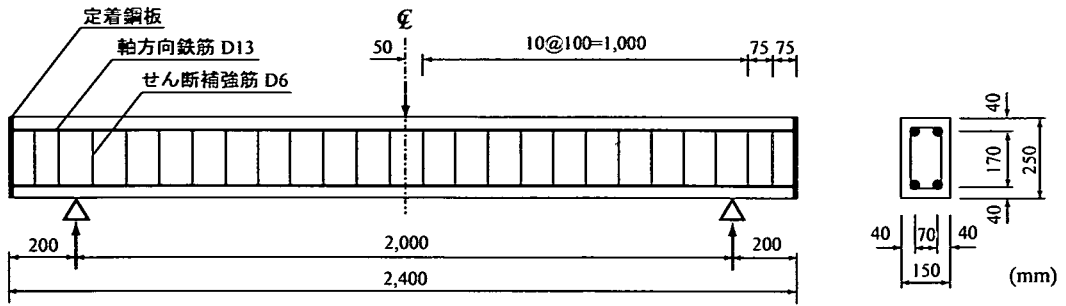


図-1 RC梁の形状寸法および配筋状況

表-1 コンクリートの配合

梁	設計 基準強度 f'_{cd} (MPa)	目標		水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	粗骨材の 最大寸法 (mm)	配合 (kg/m ³)				
		スランブ (cm)	空気量 (%)				セメント C	水 W	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 Ad
A梁	30	10	4.5	47.9	44.3	20	336	161	811	1,020	0.67
B梁	33			44.6	41.9						

境界条件が実施者により異なっている状況にある。また、構造部材の耐衝撃性評価において重要な指標となる衝撃力の測定方法に関しても、周波数応答特性を検証しない状態で部材載荷点上に静載荷用ロードセルを設置する場合やゴム緩衝材を設置する場合等、その方法は各機関毎に異なっている。さらに、衝撃力評価に関しても、被衝突体に発生する荷重を用いるのか、支点部に生じる反力波形を荷重として用いるのか等、明確な規定がない。従って、RC/PC構造部材の衝撃挙動把握のための実験は、現在のところ各研究機関の独自のノウハウにより実施され、かつ部材の耐衝撃性も各研究者・技術者の個人的な見解に基づいて評価されているのが現状である。

このような観点より、本研究ではRC/PC構造部材の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、コンクリート構造物の基本部材であるRC梁に着目し、かつ各研究機関で一般的に用いられている重錘落下方式による衝撃実験法（以後、重錘落下衝撃実験法）を対象として、上述したような種々の境界条件の違いがRC梁の衝撃挙動に及ぼす影響に関して検討を行うこととした。検討項目を列挙すると、1) リバウンド防止用治具設置の有無の影響、2) 衝撃力に関する測定方法の影響、3) 衝突位置におけるゴム緩衝材設置の有無の影響、および4) 重錘の先端部形状の影響、である。また、本論文では、RC梁の耐衝撃性の評価方法についても検討している。

2. 実験の概要

(1) RC梁の形状寸法、配筋状況および材料特性

図-1には、本実験に用いたRC梁の形状寸法および配筋状況を示している。RC梁は、断面寸法（梁幅×梁高）が150×250mmで、全長が2.4mの複鉄筋矩形RC梁である。梁内部には軸方向鉄筋としてD13を、芯かぶり40mmの位置に上下に2本ずつ配筋している。せん断補強筋（D6）は、支点間を100mm間隔で配筋している。また、本実験では、張出し部の慣性力による影響をできるだけ除去するために、RC梁の両端面に厚さ9mmの定着鋼板を設置し、この定着鋼板に軸方向鉄筋を溶接することで定着長を短くし張出し部を短縮させている。なお、全ての実験において、軸方向鉄筋の抜け出しは見られず、鉄筋が鋼板に十分定着されていることを確認している。また、本研究では実験を後述のようにその種類や条件に応じて2回に分けて実施している。その結果、コンクリート強度も異なるために、対応して各試験体もA梁、B梁として区別することとした。

各梁の全試験体数は、A梁、B梁でそれぞれ7体、15体である。各梁に用いたコンクリートは、表-1に示すような設計基準強度を設定して配合設計を行った。コンクリートの養生は、A梁に関しては、コンクリート打設後15℃/hrの割合で養生温度を上昇させ、3時間経過の後に45℃で6時間蒸気養生を行った。その

表-2 コンクリートの力学的特性

梁	実験時材齢 (日)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
A 梁	26	32.3	20.9	0.17
B 梁	36	41.4	23.1	0.23

表-3 鉄筋の力学的特性

梁	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
A 梁	D6	SD295A	366	540	206	0.3
	D13	SD345	373	535		
B 梁	D6	SD295A	368	531	206	0.3
	D13	SD345	373	518		

表-4 RC 梁の静的設計値一覧

梁	主鉄筋比 p_t	せん断スパン比 a/d	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 $\alpha (= V_{usc} / P_{usc})$
A 梁	0.008	4.76	137.4	38.2	3.60
B 梁			143.5	39.1	3.67

後実験を実施するまで気中養生を行っている。一方、B 梁の場合には、打設後 20℃ の状態で 11 時間養生後、気中養生とした。表-2 にはコンクリートの実験時の材齢および力学的特性を一覧にして示している。また、表-3 には、各梁に用いた鉄筋に関する引張試験結果の力学的特性値を一覧にして示している。

(2) RC 梁の静的設計値

表-4 には、各 RC 梁の設計値および実験時の各静的耐力の一覧を示している。表には、主鉄筋比 p_t 、せん断スパン比 a/d の他、土木学会コンクリート標準示方書¹¹⁾ に基づいて算出される静的せん断耐力 V_{usc} 、静的曲げ耐力 P_{usc} 、および V_{usc} を P_{usc} で除して得られるせん断余裕度 α も示している。各耐力算定時の部材係数には、 $\gamma_b = 1.0$ を用いている。表より、せん断余裕度は $\alpha > 1.0$ であることより、本実験で用いる RC 梁は全て静載荷時には曲げ破壊型で破壊に至ることが予想される。

(3) 実験ケース

表-5 には、本実験ケースの一覧を示している。試験体名欄における第 1 項目 (“A” or “B”) は、それぞれ A 梁および B 梁を示している。前述したリバウンド防止用治具設置の有無の影響および衝撃力の測定方法の影響に関する検討は、A 梁を用いて行っている。一方、ゴム緩衝材設置の有無による影響および重錘の先端部形状の影響に関する検討は、B 梁を用いて行っている。

A 梁において、第 2 項目はリバウンド防止用治具の

有無 (R:有, N:無) である。第 3 項目のない A-R/N 梁はリバウンド防止用治具設置の有無のみが異なり、他の 3 つの条件: 1) 静載荷用ロードセルを使用せず; 2) 衝突部の RC 梁上にはゴム緩衝材を設置せず; 3) 先端部形状が扁平 (曲率小) である重錘を使用する、は等しくしている。ここでは、特に A-R 梁に採用した境界条件を基準載荷条件 (あるいは単に基準載荷) と呼ぶこととする。第 3 項目は基準試験体に静載荷用ロードセル (Load-Cell) を設置する場合の設置方法 (LW: 重錘に組み込む場合, LB: RC 梁上に設置する場合) を表している。

B 梁において、第 2 項目は重錘の先端部形状の曲率の大きさ (S:小 (Small), M:中 (Medium), L:大 (Large)) を表している。この中で、B-S 試験体の境界条件は、A-R 梁と同様に基準載荷条件となっている。但し、衝突速度 V は A-R 梁の場合と異なっている。さらに、第 3 項目は載荷点部にゴム緩衝材を設置する場合のゴムの材質 (AH: 硬質ゴム, AS: 軟質ゴム) を表している。

各梁の衝撃実験において、A 梁の場合には理想状態における設定衝突速度に対応した高さから重錘を落下させ、実験終了後に衝突速度に関する検定を行い正確な速度に校正している。一方、B 梁の場合には設定衝突速度に対して前もって校正された高さから重錘を落下させて実験を行っている。従って、両梁の場合とも設定衝突速度の下に実験を行っているものの、実際には、B 梁の場合には真に設定速度で重錘が衝突しているが、A 梁の場合には設定速度よりも小さな速度で衝

表-5 実験ケース一覧

試験体名	リバウンド防止用治具の設置の有無	衝撃力の測定方法*	ゴム緩衝材の設置の有無	重錘の先端部形状**	衝突速度 V (m/s)
A-R	有	I	無	曲率小	3.5, 4.4
A-N	無				3.5
A-R-LW	有	II			3.5, 4.4
A-R-LB		III			3.5, 4.4
B-S	有	I	無	曲率小	4.0, 5.0
B-M				曲率中	4.0, 5.0
B-L				曲率大	4.0, 5.0
B-S-AH			有 (硬質ゴム使用)	曲率小	4.0, 5.0
B-M-AH				曲率中	4.0, 5.0
B-L-AH				曲率大	4.0, 5.0
B-S-AS			有 (軟質ゴム使用)	曲率小	4.0, 5.0
B-L-AS				曲率大	4.0

- * : I (衝撃用ロードセルと支点ロードセルを設置する場合)
 II (I の他に静載荷用ロードセルを重錘に組み込む場合)
 III (I の他に静載荷用ロードセルを梁上載荷点部に設置する場合)

** : 曲率小 (曲率半径 $r = 1,407$ mm), 曲率中 (曲率半径 $r = 90$ mm), 曲率大 (曲率半径 $r = 30$ mm)

突していることとなる。本文では、実験時の記載に関しては当初設定した衝突速度を、また実験結果の整理は全て校正された衝突速度を示すものとする。

衝突速度欄に示している衝突速度 V は、A 梁および B 梁を用いて基準載荷条件の下で別途実施した漸増繰り返し載荷実験において、RC 梁が破壊に至った衝突速度と同一および、それよりも設定速度で 1 m/s 大きい衝突速度に対応している。ここで、漸増繰り返し載荷実験とは、設定の第一回目の衝突速度および増分衝突速度を 1 m/s として、梁が破壊に至るまで衝突速度を増加させて衝撃実験を繰り返すことを意味している。なお、RC 梁の破壊の目安は、著者らの過去の研究に基づき¹²⁾、繰り返し載荷時における累積残留変位が純スパン長の 2% (本実験の場合には 40 mm) 程度に達した状態と設定している。図-2 に示しているように、両梁の場合とも $V = 3.5$ m/s および $V = 4.0$ m/s の場合には設定値を超えており、この衝突速度時に梁が破壊に至っていることが分かる。なお、本実験に用いた RC 梁は、表-5 に示すとおり全 22 体である。

(4) 実験方法および測定項目・測定方法

ここでは、各種載荷条件における実験方法および測定項目の概要について述べる。なお、本実験は、全て室蘭工業大学内に設置している構造物耐衝撃耐荷力評価試験装置を用いて実施した。以下に、リバウンド防止用治具設置の有無、衝撃力の測定方法、ゴム緩衝材設置の有無および重錘形状の影響、の項目毎に概要を述べる。

a) リバウンド防止用治具設置の有無

写真-1 には、リバウンド防止用治具を設置する場合でかつ基準載荷状態 (A-R 梁あるいは B-S 梁を用いる場合) の重錘落下衝撃実験の状況を示している。写真に示すように、RC 梁は、支点反力測定用の起歪柱型ロードセル (以後、支点反力用ロードセル) が組み込まれている支点治具上に設置している。支点部上縁には、リバウンド防止用の治具を設置している。治具全体は、回転のみを許容するピン支持に近い構造となっている。衝撃荷重載荷用の重錘には、質量 300 kg、全長約 1.4 m の円柱状鋼製重錘を用いている。また、重錘底部には衝突部の片当たりを防止することを目的として、高さ 2 mm のテーパ (曲率半径は $r = 1,407$ mm) 加工を施している。さらに、重錘下部には重錘衝撃力測定用の起歪柱型ロードセル (以後、衝撃用ロードセル) が組み込まれている。重錘落下衝撃実験は、この支点治具上に設置された RC 梁のスパン中央部に、所定の高さから重錘を一度だけ自由落下させる単一載荷法により実施している。なお、載荷点部の RC 梁上には、静載荷用ロードセルやゴム緩衝材は設置していない。

一方、実験時にリバウンド防止用治具を設置しない場合 (A-N 梁を用いる場合) には、RC 梁は支点治具上に単純に置かれた状態となっている。従って、衝撃実験時に RC 梁が負載荷状態に至る場合には、RC 梁全体が上方へ跳ね上がるように挙動することが予想される。なお、その他の実験に対しては、上述した方法と同様にリバウンド防止用治具を設置している。

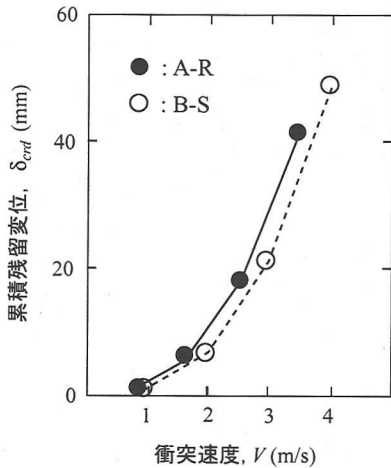


図-2 A 梁と B 梁の累積残留変位 (繰り返し荷重実験)

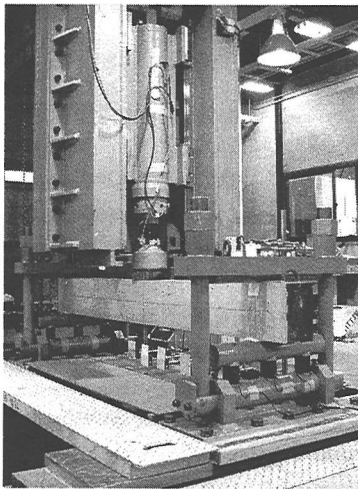


写真-1 重錘落下衝撃実験の状況 (基準荷重の場合)

測定項目は、重錘衝撃力波形 P 、合支点反力波形 R (以後、支点反力波形) および荷重点部における鉛直方向変位波形 δ (以後、変位波形) である。重錘衝撃力波形 P の測定には、容量および応答周波数がそれぞれ $1,470 \text{ kN}$, $\text{DC} \sim 4.0 \text{ kHz}$ の衝撃用ロードセルを、支点反力波形 R の測定には、容量および応答周波数がそれぞれ 980 kN , $\text{DC} \sim 2.4 \text{ kHz}$ の支点反力用ロードセルを用いている。また、変位波形 δ の測定には、ストローク 200 mm 、応答周波数 $\text{DC} \sim 915 \text{ Hz}$ のレーザ式変位計を用いている。なお、本実験で用いたセンサーは、レーザ式変位計を除き全て歪ゲージタイプである。従って、これらのセンサーに対しては直流式の増幅器を用いることとした。各センサーからの出力波形は、

全て高帯域用データレコーダ (応答周波数 $\text{DC} \sim 40 \text{ kHz}$) に一括収録し、その後 $100 \mu\text{s}/\text{word}$ のサンプリング間隔で A/D 変換を施している。また、重錘衝撃力波形 P には、衝撃初期の波動の継続時間が非常に短いことより、フィルター処理を施していない。一方、支点反力波形 R および変位波形 δ の場合には、主波動の継続時間が重錘衝撃力波形 P の衝撃初期における波動に比べて長く、かつ後述のように卓越する波形成分の最大周波数が支点反力波形で 2 kHz 程度であることより、高周波成分のノイズを除去することとし、 0.5 ms 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。なお、これら一連の測定方法は、リバウンド防止用治具設置の有無にかかわらず同様である。また、後述の各荷重条件においても、これと同様な方法で測定およびデータ処理を行っている。

b) 衝撃力に関する測定方法

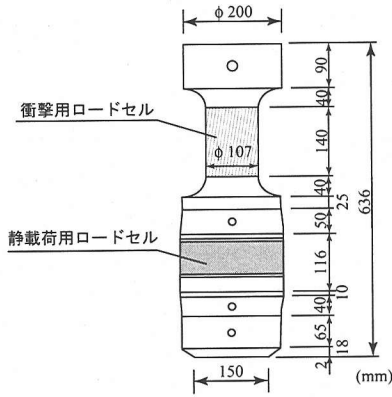
本研究では、衝撃力に関する測定方法として、各研究機関で一般的に採用されている以下の 3 ケースを設定した。すなわち、1) 重錘に衝撃用ロードセルを組み込む場合、2) 1) を基本として、さらに静荷重測定用ロードセル (以後、静荷重用ロードセル) を重錘先端部に組み込む場合、および 3) 静荷重用ロードセルを RC 梁上に設置する場合、である。本研究では、静荷重用ロードセルとして、重錘への組み込みや梁上への設置が容易なセンターホール型を使用している。本実験に用いた静荷重用ロードセルの内径および外径は、それぞれ 133 mm , 220 mm 、質量は約 40 kg である。また、容量および応答周波数は、それぞれ $1,960 \text{ kN}$, $\text{DC} \sim 400 \text{ Hz}$ であり、その周波数特性は前述した衝撃用ロードセルの場合に比較して $1/10$ 以下と小さい。

図-3 には、一例として静荷重用ロードセルを用いる場合の設置状況を示している。静荷重用ロードセルを重錘に組み込む場合には、重錘全体の質量が 340 kg となる。また、梁上に静荷重用ロードセルを設置する場合には、重錘衝突時におけるロードセルの跳ね上がり等を防止するために、RC 梁を挟み込むようにして固定されている厚さ 25 mm の鋼板上にボルトで定着することとした。

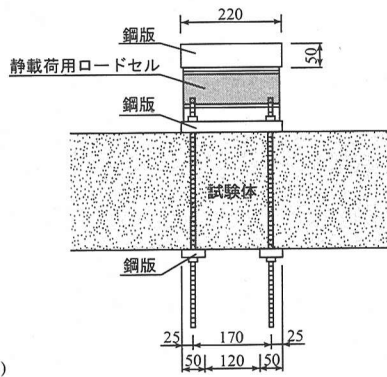
さらに、ロードセルの荷重点部上面には、ロードセル受圧面の変形を抑制するために、厚さ 50 mm の鋼板を設置し、ボルトでロードセルに固定している。なお、本静荷重用ロードセルも歪ゲージ型であることより、前述した衝撃用ロードセルや支点反力用ロードセルの場合と同様な方法により出力波形の計測を行っている。その他は、前述した基準荷重時の実験方法と同様である。

c) ゴム緩衝材設置の有無

ゴム緩衝材設置の有無に関する検討に関しては、以



(a) 重錘に組み込む場合



(b) 梁上に設置する場合

図-3 静載荷用ロードセルの設置状況

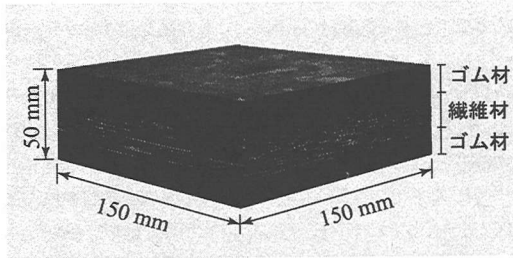


写真-2 硬質のゴム緩衝材の形状寸法

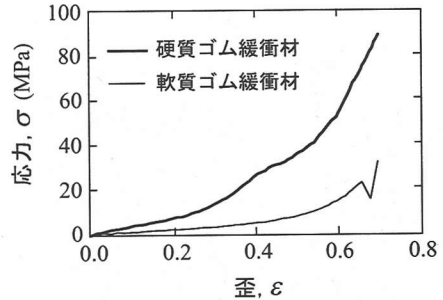


図-4 ゴム緩衝材の静載荷時における応力-歪関係

下の3ケースを設定している。すなわち、1) ゴム緩衝材を設置しない場合、2) 硬質のゴム緩衝材を設置する場合、および3) 軟質のゴム緩衝材を設置する場合、である。写真-2には、硬質のゴム緩衝材の場合を例にその形状寸法を示している。写真に示すように、硬質のゴム緩衝材は、中間部分に繊維材を配置した積層構造となっている。一方、軟質のゴム緩衝材の場合は、形状寸法が硬質の場合と同様であるものの、繊維材を配置せずゴム材のみの構造となっている。図-4には、硬質ゴム緩衝材および軟質ゴム緩衝材の静載荷時における応力-歪関係を示している。図より、ゴム緩衝材の初期弾性係数は、硬質の場合で34.2 MPa程度、軟質の場合で8.2 MPa程度である。実験は、ゴム緩衝材を設置しない場合には基準荷重の条件で実施している。一方、ゴム緩衝材を設置する場合には、基準荷重に対してさらにゴム緩衝材をスパン中央部の梁上に両面テープを介して設置することにより実施した。但し、重錘の先端部形状の影響も考慮して検討する場合に対しては、基準荷重である重錘先端部が扁平な場合と共に鋭角な場合の荷重条件下に対しても実験を行っ

ている。

d) 重錘の先端部形状

重錘の先端部曲率がRC梁の衝撃挙動に与える影響を検討するために、本研究では先端部曲率が著しく異なる3種類の代表的な重錘を用いることとした。図-5には、これら重錘の先端部形状を示している。図に示すように、本実験に用いた3種類の重錘は、曲率小(曲率半径 $r=1,407$ mm)、曲率中(曲率半径 $r=90$ mm)、曲率大(曲率半径 $r=30$ mm)と区別して呼称している。重錘先端部は実験に応じて取り外しが容易な構造となっており、重錘全体の質量は先端部形状にかかわらず300 kgとなるように調整している。また、全ての重錘先端部には焼き入れを施し、衝突時の塑性変形ができるだけ小さくなるようにしている。

3. 実験結果

(1) リバウンド防止用具設置の有無の影響

RC梁に関する重錘落下衝撃実験において、梁の支

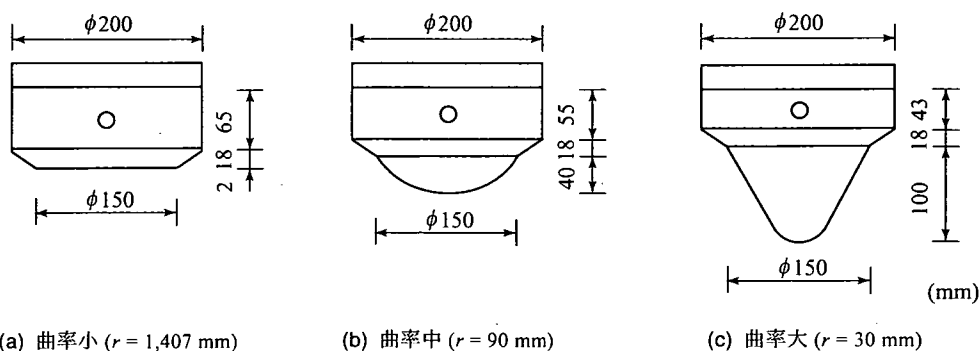


図-5 重錘の先端部形状

点部を上下方向に固定しない場合には、重錘の衝突に伴って梁端部に跳ね上がり（リバウンド）が生じ不安定な挙動を示したり、梁が支点治具上から落下する場合が想定される。このため、通常は安全対策上の観点から支座位部にリバウンド防止用治具を設置し、梁支座位部の上下方向への運動を拘束している。しかしながら、RC梁の真の耐衝撃性を評価する観点からは、リバウンド防止用治具設置の影響を明確にしておくことが必要である。ここでは、リバウンド防止用治具の設置がRC梁の耐衝撃挙動に与える影響を明らかにするために、表-5に示すA-R梁およびA-N梁に関する実験結果に着目して検討を行うこととする。

衝撃挙動の検討には、重錘衝撃力波形 P 、支点反力波形 R 、変位波形 δ および実験終了後のRC梁側面に生じるひび割れ分布を用いている。なお、以降の各載荷条件に関する検討も、これと同様のパラメータに着目して行うものとする。また、各波形は、重錘衝撃力波形 P と支点反力波形 R に関しては、重錘衝突時を0msとし50ms間に対して整理している。但し、重錘衝撃力波形 P に関しては、後述するように振幅が大きく継続時間の短い衝撃初期の波形成分に限定して、波形をより分かりやすい形で比較するために、衝突時を0msとし10ms間についても整理している。一方、変位波形 δ に関しては、重錘衝突時を0msとし波動がほぼ定常状態に至る100ms間に対して整理している。以下、各出力波形やひび割れ分布に関する実験結果の考察を行う。

a) 重錘衝撃力波形 P

図-6(a), (b)には、重錘の衝突速度が $V = 3.5 \text{ m/s}$ の条件でリバウンド防止用治具を設置する場合（A-R梁）と設置しない場合（A-N梁）の重錘衝撃力波形 P を比較して示している。(a)図より、重錘衝撃力波形 P の性状は、最大値に若干差異が見られるものの、リバウンド防止用治具設置の有無にかかわらず、両者は良好に対応していることが分かる。また、いずれの波形も、

衝撃初期の振幅が大きく継続時間の短い波形成分（第1波目）とその後の振幅が小さく継続時間の長い成分（第2波目）が連なった波形性状を示している。一方、時刻0～10msの間を拡大した(b)図からも、両波形は衝撃初期の10ms間において非常に良く対応していることが分かる。これより、重錘衝撃力波形 P はリバウンド防止用治具設置の有無に影響されないことが明らかとなった。

b) 支点反力波形 R

図-6(c)には、A-R梁とA-N梁の支点反力波形 R を比較して示している。図より、リバウンド防止用治具を設置しないA-N梁の場合には、初期応答の立ち上がり時間や荷重の除荷時間が治具を設置するA-R梁に比べて若干遅くなっていることが分かる。また、A-N梁の場合には衝撃初期に10波程度の減衰する高周波成分が励起されており、波動の最大振幅もA-R梁の2倍程度を示している。これは、A-N梁の場合には、重錘衝突時にリバウンドによってRC梁の支座位部に瞬間的に浮き上がるように挙動し、その後再度支座位部に接触するまでに僅かに時間を要すること、またその際にRC梁が支座位部に衝突する形で作用すること、等によるものと考えられる。なお、これらの差異を除くと、両波形は全般的には継続時間が30ms程度の低次の正弦半波が卓越した類似の分布性状を示している。これより、支点反力波形 R は、リバウンド防止用治具を設置しない場合には設置する場合と比較して、応答の立ち上がりが遅いことや衝撃初期に最大振幅が2倍程度の高周波成分が励起されるが、低周波成分は周期、振幅共に両者類似の性状を示すことが明らかとなった。

c) 変位波形 δ

図-6(d)には、A-R梁とA-N梁の変位応答波形 δ を比較して示している。図より、両波形とも、荷重用時には支点反力波形の低周波成分に類似した正弦波状の分布を示していることが分かる。しかしながら、

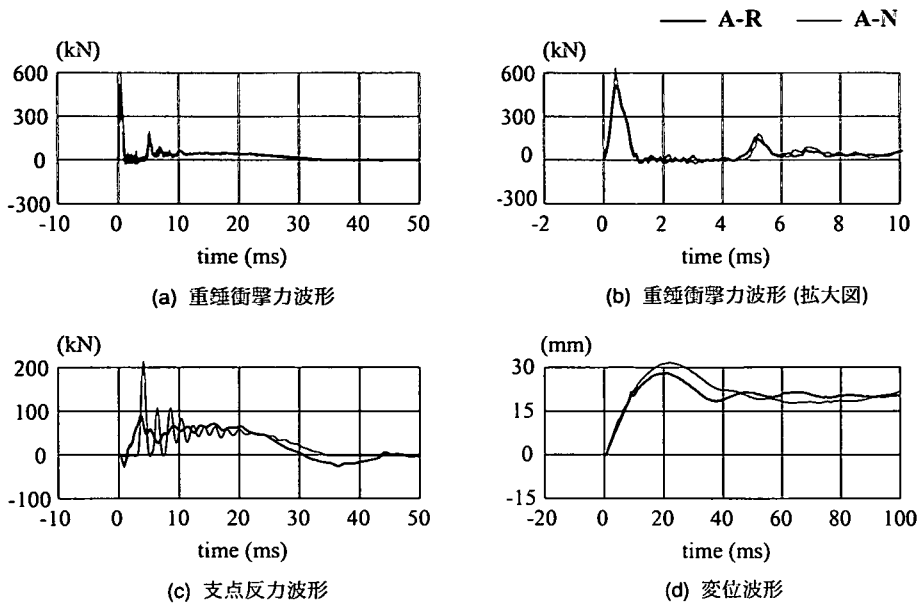


図-6 リバウンド防止用治具設置の有無の影響 (各種応答波形の比較 ($V = 3.5 \text{ m/s}$))

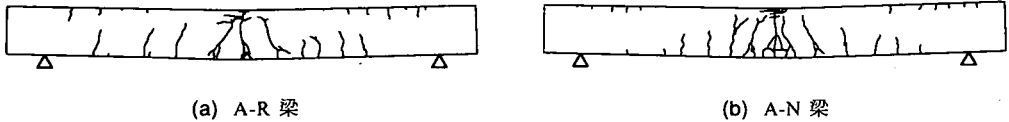


図-7 実験終了後のひび割れ分布の比較 ($V = 3.5 \text{ m/s}$)

変位波形にはリバウンド防止用治具を設置しない場合の支点反力波形に含まれている高周波成分は励起されていない。また、両波形を比較すると、最大変位値や荷重除荷後の振動周期に若干差異が見られるものの、立ち上がり時間や立ち上がり勾配および荷重除荷後の正方向へのドリフト成分（残留変位）の大きさ等の応答性状は類似している。なお、荷重除荷後の変位波形性状に関しては、リバウンド防止用治具を設置する場合には低次の自由振動状態を呈しているが、設置しない場合には明確な振動状態に至っていない。これはリバウンド防止用治具を設置することによって、RC梁の支点部が上下方向に固定されて振動の節が強制的に形成されるのに対して、設置しない場合には、その節が形成しづらいことによるものと推察される。以上より、変位波形 δ から得られる最大変位や残留変位量、波動の立ち上がり時間や立ち上がり勾配はリバウンド防止用治具の設置の有無によらず同程度であるものと判断される。

d) ひび割れ分布

図-7には、A-R梁とA-N梁の実験終了後のRC梁

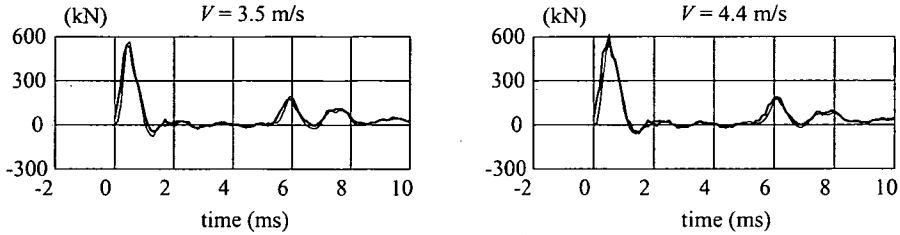
側面に生じるひび割れ分布を比較して示している。図より、各梁には荷重点部から半スパンの3/4程度まではほぼ左右対称に梁下縁から上縁に向かう曲げひび割れが生じている。全般的に両梁のひび割れ分布は、A-N梁で荷重点部梁下縁のひび割れ本数が若干多いことを除くと、リバウンド防止用治具設置の有無による影響は小さいと判断される。

以上より、本実験の範囲内では、リバウンド防止用治具設置の有無は、衝突直後の支点反力や荷重除荷後の変位波形の振動特性に影響を与えるものの、重錘衝撃力波形、支点反力波形の低次波形成分、荷重載荷時の変位波形およびひび割れ分布性状には、それほど大きな影響を与えないことが明らかになった。なお、以降の荷重条件の影響に関する検討は、リバウンド防止用治具を設置して行った試験に対して行うこととする。この時の支点境界条件は回転のみが許容されるピン支持に近い状態となっている。

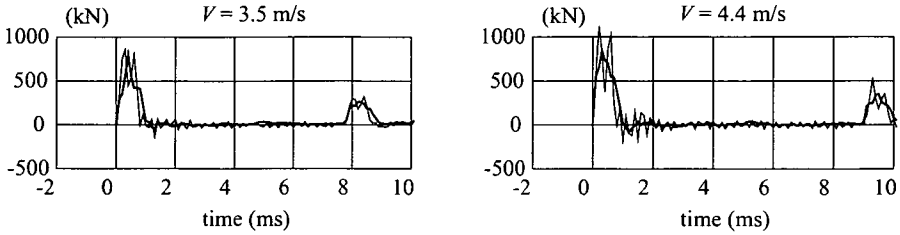
(2) 衝撃力の測定方法の影響

RC梁が重錘落下等による衝突を受ける場合には、重

— 静載荷用ロードセル — 衝撃用ロードセル



(a) A-R-LW 梁



(b) A-R-LB 梁

図-8 衝撃用ロードセルおよび静載荷用ロードセルから得られる衝撃力波形の比較

錘には静的な場合と異なり荷重の作用時間が短い衝撃力が発生する。そのため、通常は容量が大きく周波数特性の大きい起歪柱型の衝撃用ロードセルを用いて計測を行っている。この際、衝撃力を精度良く測定するためには、発生する衝撃力の大きさや周波数特性に対応したロードセルを選定しなければならない。ところが実務的な簡便さから、現実的には静載荷用のロードセルを用いる場合も多い。そこで、本研究では、前述した衝撃用ロードセルと静載荷用ロードセルを用いて RC 梁の衝突点部に生じる衝撃力を測定し、各ロードセルからの衝撃力波形を比較することによって、静載荷用ロードセルの適用性に関して検討を行うこととする。また、静載荷用ロードセルの設置方法に関しても、重錘に組み込む場合と梁上に設置する場合の 2 ケースを設定し、重錘衝撃力波形 P 、支点反力波形 R 、変位波形 δ および RC 梁のひび割れ分布性状に着目して、これらの設置方法が RC 梁の衝撃挙動に与える影響について検討を行った。なお、これらの検討は、表-5 に示す A-R 梁、A-R-LW 梁および A-R-LB 梁に関する実験結果を用いて行っている。

a) 静載荷用ロードセルの適用性検討

図-8 には、静載荷用ロードセルを重錘に組み込む場合 (A-R-LW 梁) と同ロードセルを RC 梁上に設置する場合 (A-R-LB 梁) に関して、衝突速度 $V = 3.5, 4.4$ m/s における衝撃用ロードセルおよび静載荷用ロードセルからの各衝撃力波形を比較して示している。こ

では、波形の比較を容易にするために、波形の測定時間を 10 ms とし、衝撃初期の現象に着目して整理している。なお、前項の場合と同様に、時刻 30 ms までの両波形はこの後振幅が小さくほぼ同様の波形が形成されていることを確認している。

図より、A-R-LW 梁の場合には、衝突速度 V によらず、荷重の立ち上がりから 10 ms まで両波形が非常に良く対応していることが分かる。一方、A-R-LB 梁の場合には、衝突速度 V の大きさによらず衝撃用ロードセルから得られる衝撃力波形には応答周波数が 3.5 kHz 程度の高周波成分が含まれている。また、衝撃初期に励起される第 1 波目の波形にも高周波成分が含まれている。これらの高周波成分は、重錘が RC 梁上に設置した静載荷用ロードセルに衝突することによって発生するもので、その成分の有無を除くと、両波形は立ち上がりから最大応答値に達した後除荷に至る性状やその 7~8 ms 後に再度振幅の小さい半波が励起される性状等は良く対応している。

以上より、本実験の場合には、衝撃力波形に含まれる 500 Hz 程度の波形成分と同程度の応答周波数を有する静載荷用ロードセルを用いる場合には、衝撃用ロードセルと同様の衝撃力波形を得ることができると判断される。

b) 静載荷用ロードセルの設置方法の影響

図-9 には、A-R 梁、A-R-LW 梁および A-R-LB 梁を対象として得られた衝撃用ロードセルからの重錘衝

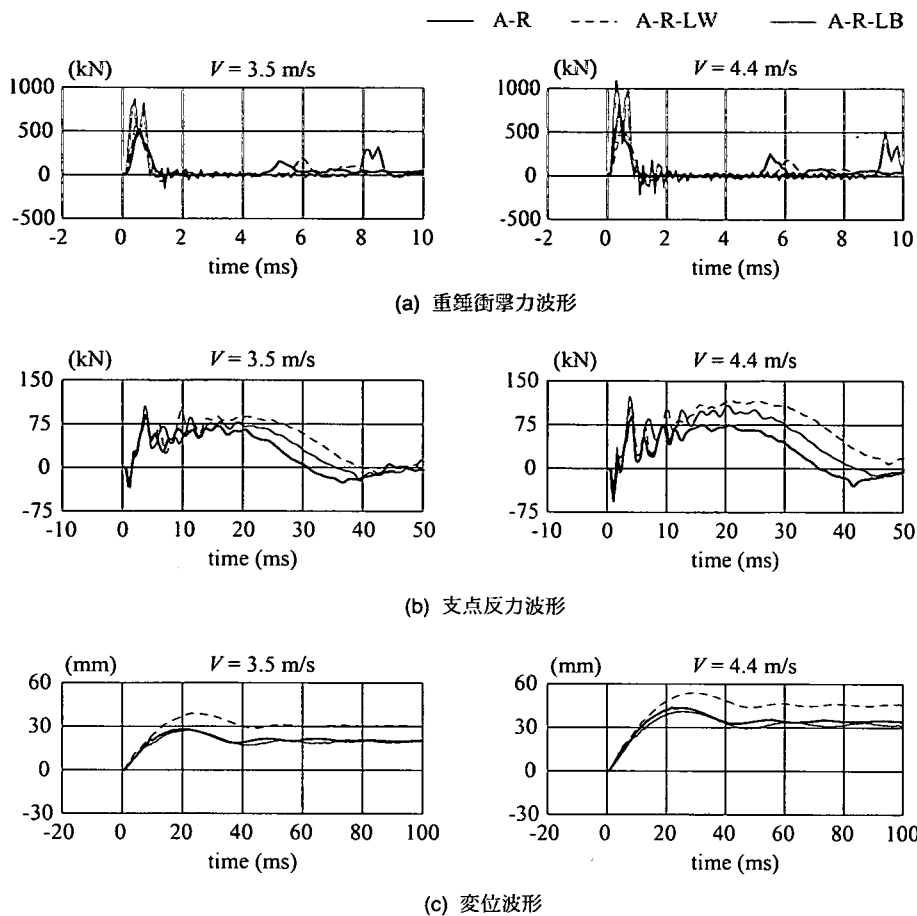


図-9 静載荷用ロードセルの設置方法の影響 (各応答波形の比較)

衝撃力 P 、支点反力 R および変位 δ に関する各応答波形を示している。まず、重錘衝撃力波形 P について見ると、いずれの波形にも衝撃初期に急激に立ち上がり、最大応答値を示した後急激に除荷に至る波形成分とその数 ms 後に励起される振幅の小さい半波が形成され、各 RC 梁で類似の波形性状を示していることが分かる。しかしながら、静載荷用ロードセルを梁上に設置して計測した A-R-LB 梁の場合には、他の梁に比べて最大衝撃力は大きく、第 2 主波動の立ち上がりまでの経過時間が長い。これは、実験時に金属音が発生したことを確認していることより、重錘とロードセル上下に設置されている鋼板を含め鋼材同士が激しく衝突し複雑に挙動したことによるものと考えられる。

次に、支点反力波形 R について見ると、衝突速度 V の大きさによらず、いずれの波形も継続時間が数十 ms の正弦半波と衝撃初期に振幅の比較的大きい高周波成分を含んだ類似の波形性状を示していることが分かる。しかしながら、正弦半波の振幅や継続時間は、

各 RC 梁の場合で若干異なっている。すなわち、正弦半波の振幅は A-R 梁、A-R-LB 梁、A-R-LW 梁の順に除々に大きく示されている。また、継続時間もこの順番に対応して長い。この傾向は、衝突速度 $V = 4.4 \text{ m/s}$ の場合に顕著に現れている。これは、A-R-LW 梁の場合の重錘質量が他に比べて 40 kg 程度大きいことより、同一衝突速度でも入力エネルギーが若干大きくなったことによるものと考えられる。一方、梁上にロードセルを設置した A-R-LB 梁の場合には、静載荷用ロードセル、鋼板およびボルト等の全てで 60 kg 程度の質量が付加するため梁の自重が大きくなり、A-R 梁の場合に比べると同一入力エネルギー条件下でも支点部により多くの慣性力が伝達されたためと推察される。しかしながら、これらの差異は A-R-LW 梁の場合に比べると小さい。

変位波形 δ について見ると、衝突速度 V によらず、最大変位は、A-R-LW 梁の場合が他の梁に比較して明らかに大きく生じていることが分かる。しかしながら

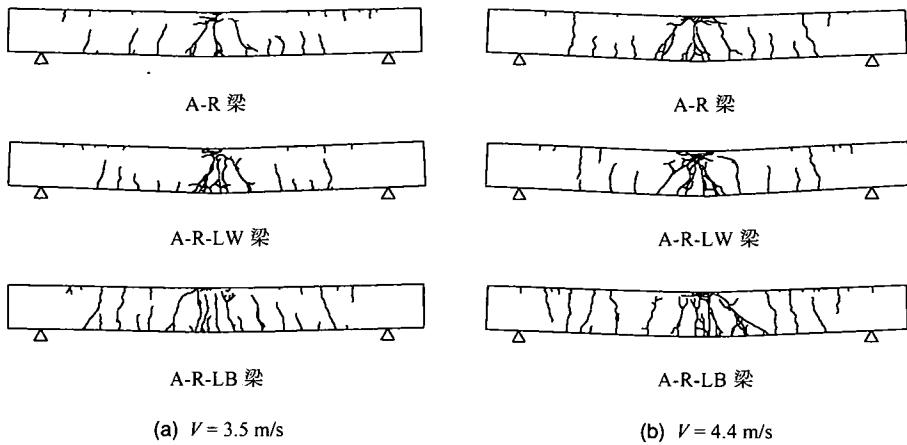


図-10 静載荷用ロードセルの設置方法の影響(ひび割れ分布の比較)

ら、A-R 梁と A-R-LB 梁の場合には、両者の振動周期にわずかの差異が見られるものの、最大変位や残留変位等は両者でほぼ等しい。このことは、重錘質量が等しく、かつ入力エネルギーも等しい場合には、重錘衝突部の载荷条件が異なる場合でも同等の変位応答が生じることを意味している。

図-10 に示されているひび割れ分布について見ると、いずれの梁も衝突速度 V にかかわらず、梁下縁から上縁に向かう曲げひび割れが多数発生しており、曲げ破壊が卓越した分布性状となっていることが分かる。また、その分布性状は、A-R 梁と A-R-LW 梁の場合ではほぼ同様であるが、A-R-LB 梁の場合にはひび割れの本数が多く、かつ梁下縁から上縁に向かうひび割れの進展度合いも大きく、他の梁の場合と異なった性状を示している。A-R 梁、A-R-LW 梁の場合は、先端部が 1,407 mm の曲率半径を有する重錘を用いたことにより、载荷点中央部に大きな衝撃荷重が作用する結果となっている。これに対して、A-R-LB 梁の場合には厚さが 25 mm で軸方向長さが 220 mm の鋼板上に静載荷用ロードセルを設置した状態で、これに重錘を直接衝突させている。これより、上述のひび割れ分布性状は、衝撃荷重が軸方向に幅 220 mm の範囲に分布して载荷されたことによるものと考えられる。

以上より、静載荷用ロードセルを重錘に組み込んで用いる場合には、ロードセルの質量分が重錘全体の質量として加算されるため、支点反力波形や変位波形の最大値および継続時間に影響を及ぼすことが明らかになった。従って、静載荷用ロードセルを重錘に組み込んで実験を実施する場合には、重錘にロードセル等の質量を付加することに留意する必要がある。一方、静載荷用ロードセルを梁上に設置する場合には鋼材同士の衝突現象となるため、重錘衝撃力波形の最大値は、

これを設置しない場合に比べて大きく評価される。また、鋼板上にロードセルを設置することにより曲げひび割れの本数も多く、その進展度合いも著しくなることが明らかになった。しかしながら、本実験の範囲内では、ロードセル設置方法の違いが支点反力や変位応答に及ぼす影響は小さいことが明らかとなった。

(3) ゴム緩衝材設置の有無の影響

RC 梁の重錘落下衝撃実験を実施する場合には、研究機関あるいは実験目的によっては载荷点部にゴム緩衝材を設置する場合がある。これには、1) 落石覆工等の耐衝撃用途構造物には予め衝突が予想される箇所に緩衝材を設置して局所的な損傷を防ぐこと等、衝突体が直接構造物に衝突する場合の少ないことや、2) 実験で静載荷用ロードセルを用いる場合には、ロードセルを過大な衝撃荷重から守るため、等の理由がある。ここでは、ゴム緩衝材設置の有無が RC 梁の衝撃挙動に与える影響を明らかにするために、表-5 に示す重錘の先端部形状が曲率小で、1) ゴム緩衝材を設置しない場合 (B-S 梁)、2) 硬質ゴム緩衝材を設置する場合 (B-S-AH 梁)、および 3) 軟質ゴム緩衝材を設置する場合 (B-S-AS 梁)、に関する実験結果と、重錘の先端部形状が曲率大で同様の载荷条件に対応する B-L 梁、B-L-AH 梁、B-L-AS 梁に関する実験結果に着目して検討を行うこととする。

a) 重錘の先端部形状が曲率小の場合

図-11 には、B-S 梁、B-S-AH 梁、B-S-AS 梁に関する重錘衝撃力波形 P 、支点反力波形 R および変位波形 δ を比較して示している。ここでも、 P は衝撃初期の 10 ms 間の現象に着目して示している。重錘衝撃力波形 P について見ると、いずれの衝突速度 V に対しても、波形性状が各载荷条件で顕著に異なっていること

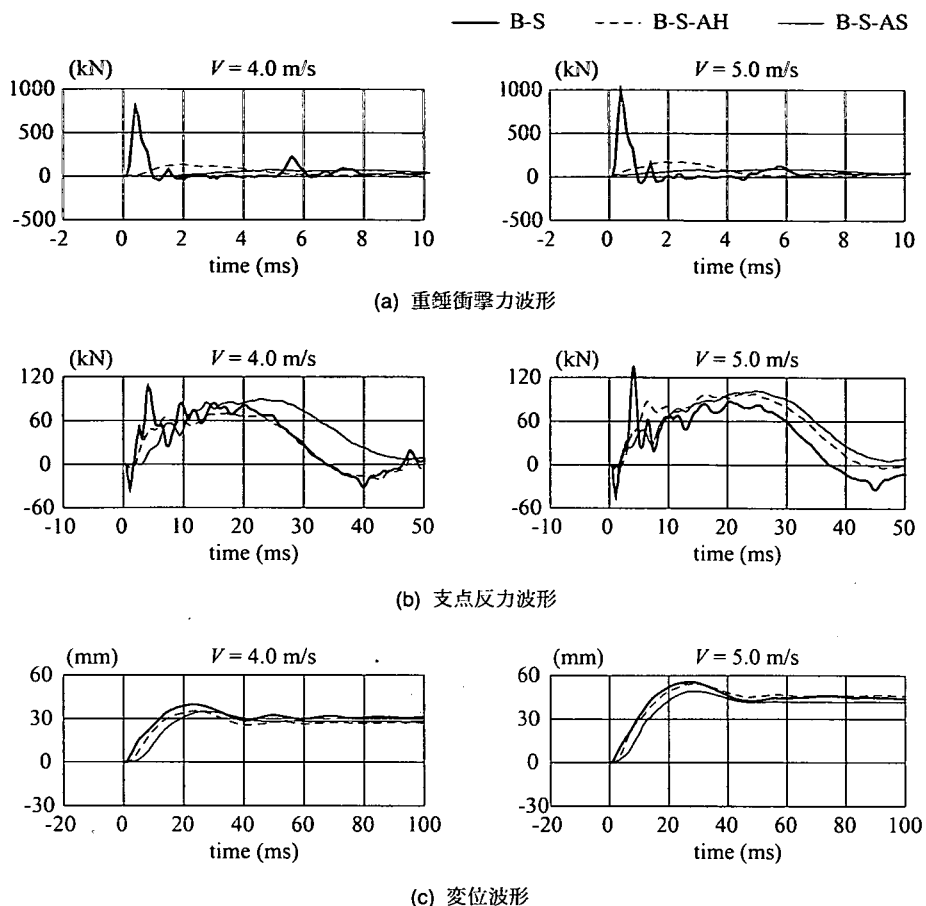


図-11 ゴム緩衝材設置の有無の影響 (各応答波形の比較；重錘先端部形状が曲率小の場合)

が分かる。すなわち、B-S 梁の場合には、衝撃初期に振幅が大きく継続時間が 1 ms 程度の三角形の波形成分が生じているのに対して、B-S-AH 梁および B-S-AS 梁の場合には振幅が B-S 梁の場合の 1/5 ~ 1/10 程度と小さく、継続時間が 5 ~ 10 倍程度と長い波形成分となっている。また、ゴム緩衝材の種類による影響としては、ゴムが軟らかいほど振幅が小さく継続時間が長くなっていることが分かる。

支点反力波形 R の場合も、緩衝材設置の有無やゴムの硬さの相違により、波形性状に差異が生じている。すなわち、緩衝材を設置しない B-S 梁の波形には衝撃初期に高周波成分が励起されている。また、継続時間は、衝突速度 $V = 4 \text{ m/s}$ の場合には軟質のゴム緩衝材を用いる B-S-AS 梁が、また $V = 5 \text{ m/s}$ の場合にはゴム緩衝材を用いる B-S-AH 梁および B-S-AS 梁とも B-S 梁に比べて長くなっている。しかしながら、最大応答値に関してはいずれの場合においても顕著な差異はなく、また全体的な波形も正弦半波状で類似した性状を

示している。

さらに、変位波形 δ について見ると、B-S-AS 梁の場合には、衝突速度 V によらず波形の立ち上がりが他の梁に比べて若干遅い。これは、軟質ゴムの場合には静的弾性係数が硬質ゴムの 1/4 以下と小さいために、重錘衝突時にゴムが大きく変形し、この変形に若干の時間を要することで、RC 梁の変位応答開始時間が遅くなったものと推察される。しかしながら、その他変位波形の最大値や残留変位値等は 3 梁で良く対応している。なお、実験終了後の硬質および軟質のゴムには残留変位成分が生じていないことを確認している。

図-12 に示されているひび割れ分布について見ると、いずれの梁も衝突速度 V にかかわらず梁下縁から上縁に進展する曲げひび割れが卓越した分布性状を示していることが分かる。しかしながら、ゴム緩衝材を設置しない B-S 梁の場合には、曲げひび割れが他の梁に比べて支点部近傍まで広範囲に分布し、かつ下縁から上縁に貫通するひび割れの本数も多い。これは、上

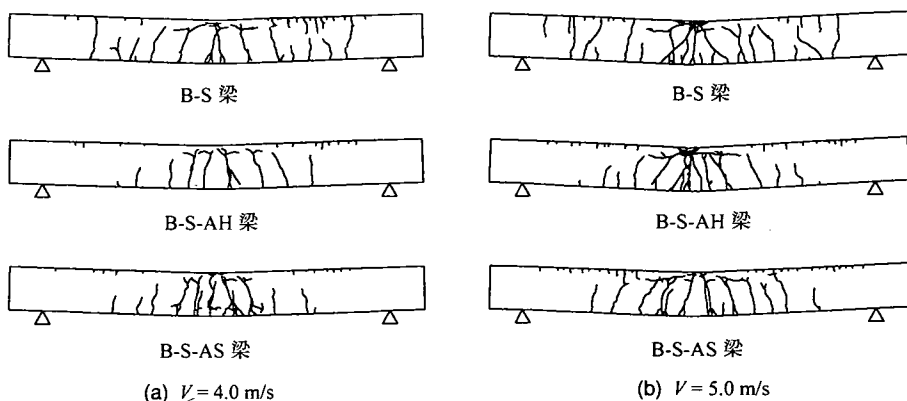


図-12 ゴム緩衝材設置の有無の影響(ひび割れ分布の比較；重錘先端部形状が曲率小の場合)

述したように、緩衝材を設置しない場合には、衝撃初期に振幅が750 kN以上で継続時間が1 ms程度の三角波状の衝撃力が作用することにより、波長の短い曲げ波動が支点に向かって伝播するため、載荷点部を中心に広範囲に損傷を受けるものと推察される。一方、ゴム緩衝材を設置する場合には、作用する衝撃力の振幅が小さかつ継続時間が長いことより、支点方向への曲げ波動伝播の影響が小さく、初期より低次の曲げ振動が卓越する傾向にあるためと考えられる。なお、B-S-AH 梁と B-S-AS 梁のひび割れ分布は大略類似している。

以上より、RC 梁上にゴム緩衝材を設置する場合は、重錘衝撃力の最大値が緩衝材を設置しない場合に比べて著しく小さくなるとともに、梁に生じる曲げひび割れの本数も少なくなることが明らかになった。支点反力波形に関しては、高周波成分の有無を除くと、ゴム緩衝材設置の有無やゴムの硬さによらず大略類似の正弦半波状の分布を示し、最大値も大略類似することが明らかになった。これは、重錘衝撃力よりも支点反力を用いることにより、より一般化した形で RC 梁の衝撃力評価や耐衝撃性の評価が可能であることを示唆している。また、変位波形に関しても、軟質ゴムを用いる場合には応答の立ち上がりが若干遅くなるものの、全般的な性状はゴム緩衝材設置の有無やゴムの硬さにかかわらず大略類似となることが明らかになった。

b) 重錘の先端部形状が曲率大の場合

図-13には、重錘衝突速度が $V = 4 \text{ m/s}$ における B-L 梁、B-L-AH 梁、B-L-AS 梁に関する重錘衝撃力波形 P 、支点反力波形 R および変位波形 δ を比較して示している。なお、ここでは重錘衝撃力波形 P は 50 ms 間の現象に着目して示している。まず、重錘衝撃力波形 P について見ると、ゴム緩衝材を設置しない B-L 梁の場合には、振幅が大きく継続時間の短い第1波と振

幅が小さく継続時間の長い第2波が連なった波形性状を示している。一方、ゴム緩衝材を設置した場合には、設置しない場合に比べて、第1波目の立ち上がり勾配や最大応答値が小さくなり、第1波目と第2波目の区別が明確でない波形となっている。また、全体の衝撃荷重継続時間も、ゴム緩衝材を設置しない場合と比較して長く、かつ軟質のゴム緩衝材ほどより長くなっている。なお、最大応答値はゴム緩衝材を設置することにより1/2程度に低減している。

次に、支点反力波形 R について見ると、ここでもゴム緩衝材を設置しない B-L 梁の波形には、衝撃初期に高周波成分が含まれていることが分かる。また、波形の第1波目の立ち上がり勾配は B-L 梁、B-L-AH 梁、B-L-AS 梁の順に緩やかになり、波形の継続時間もこの順番に対応して長くなっている。この傾向は、上述した重錘衝撃力波形 P の場合と同様である。一方、最大応答値に関しては、いずれも大略同程度となっており、重錘衝撃力波形 P ほどの差異は生じていない。

さらに、変位波形 δ について見ると、B-L 梁、B-L-AH 梁、B-L-AS 梁の順に、応答の立ち上がり時間が遅く、最大応答値も小さい。これは、重錘先端部が鋭角である場合には、重錘衝突時に重錘がゴム内に大きく貫入することにより、入力エネルギーの一部がゴムの塑性化に消費されるためと推察される。なお、曲率大におけるゴム緩衝材の残留変位量は、硬質および軟質の場合でそれぞれ 14 mm、21 mm であった。

図-14のひび割れ分布について見ると、ゴム緩衝材を設置しない B-L 梁の場合には、載荷点部にコンクリートの剥落が生じている。また、前述した曲率小の場合 (B-S 梁) と異なり、曲げひび割れがスパン中央部に集中して発生しており、支点近傍には生じていないことが観察される。これは、重錘衝撃力波形 P の最大値が B-S 梁の場合に比べて 1/4 程度と小さいことと対

応している。一方、ゴム緩衝材を設置する B-L-AH 梁および B-L-AS 梁の場合には、荷点部にコンクリートの剥落が見られない。しかしながら、曲げひび割れは、B-L 梁と同様にスパン中央部に集中して分布しており、各条件でのひび割れ性状は大略類似している。これより、重錘先端形状の曲率が大きい場合において、ゴム緩衝材を設置しない場合には、全体的な曲げひび割れの発生と共に荷点部の局所的な損傷も卓越する。一方、ゴム緩衝材を設置する場合には、局所的な損傷が抑制され全体的な曲げひび割れのみが卓越する傾向にあることが明らかになった。

以上より、重錘先端部形状が曲率大である場合には、重錘がゴム内に大きく貫入することにより、重錘衝撃力波形に関しては、緩衝材を設置しない場合の RC 梁の応答性状とは異なる性状を示すことが明らかになった。また、重錘衝撃力の最大値はゴム緩衝材を設置することにより、1/2 程度に低減している。しかしながら、支点反力波形や変位波形に関しては、最大応答値が若干異なるものの、それらの波動特性は大略類似であり、ゴム緩衝材設置の影響は小さいものと考えられる。また、ひび割れ分布に関しては、ゴム緩衝材を設置しない場合には全体的な曲げひび割れの発生と共に荷点近傍部の局所的な損傷が卓越するが、ゴム緩衝材を設置することにより局所的な損傷を抑制可能であることが明らかになった。

(4) 重錘の先端部形状の影響

実際の落石現象や航空機衝突問題等においては、衝突体の先端部形状やその曲率を特定することは困難である。このため、重錘の衝突部形状の差異が RC 梁の衝撃挙動に与える影響を確認しておくことは極めて重要である。ここでは、図-5 に示すような 3 種類の曲率を設定して、これらの先端部形状が RC 梁の耐衝撃挙動に与える影響に関して検討を試みることにした。

なお、これらの検討は、RC 梁上にゴム緩衝材を設置しない場合と設置する場合に対して行っている。前者の検討には、表-5 に示す B-S 梁、B-M 梁および B-L 梁の実験結果を用いている。また、後者の検討には、B-S-AH 梁、B-M-AH 梁および B-L-AH 梁の実験結果を用いている。

a) ゴム緩衝材を設置しない場合

図-15 には、B-S 梁、B-M 梁、B-L 梁に関する重錘衝撃力波形 P 、支点反力波形 R および変位波形 δ を比較して示している。ここでは、重錘衝撃力波形 P は 10 ms 間の応答に対して示している。図より、重錘衝撃力波形 P の場合には、衝突速度 V によらず重錘先端部の曲率が大きくなるほど振幅は小さく、継続時間は長く生じていることが分かる。重錘の先端部形状が曲率小

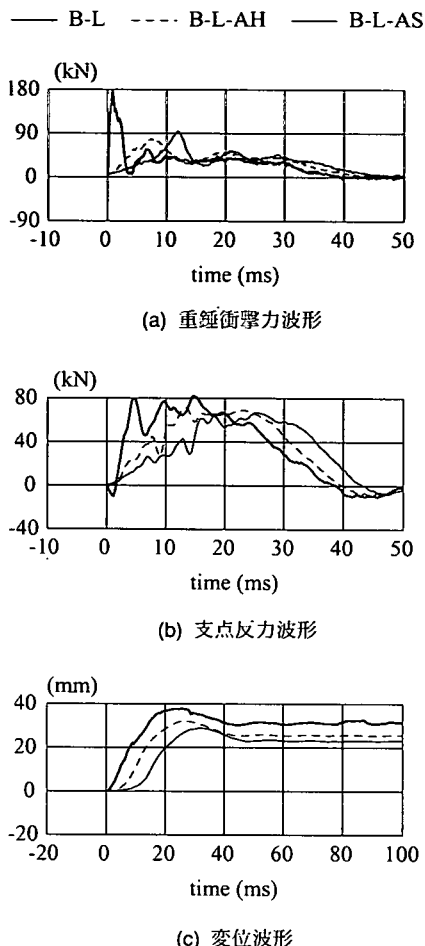


図-13 ゴム緩衝材設置の有無の影響 (各応答波形の比較; 重錘先端部形状が曲率大の場合, $V = 4.0$ m/s)

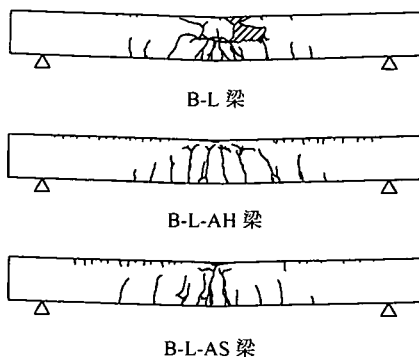


図-14 ゴム緩衝材設置の有無の影響 (ひび割れ分布の比較; 重錘先端部形状が曲率大の場合, $V = 4.0$ m/s)

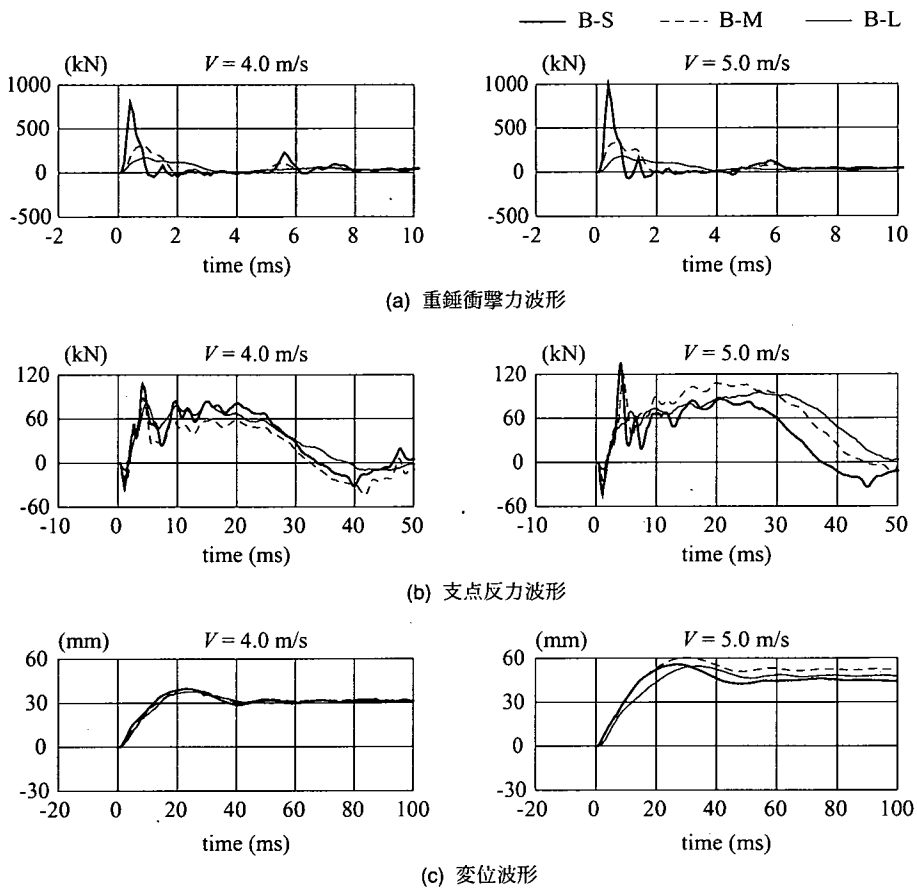


図-15 重錘の先端部形状の影響 (各応答波形の比較；ゴム緩衝材を設置しない場合)

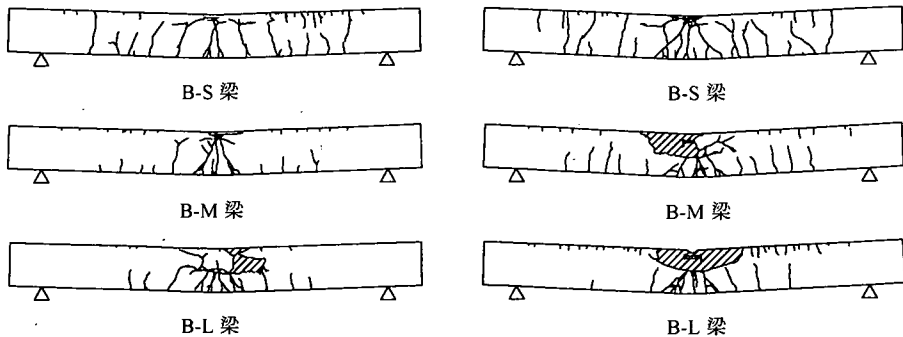


図-16 重錘の先端部形状の影響 (ひび割れ分布の比較；ゴム緩衝材を設置しない場合)

と曲率大である B-S 梁と B-L 梁の結果を比較すると、最大応答値は B-S 梁の場合が 4 倍程度大きく、逆に継続時間は B-L の場合が 3 倍程度長い。

次に、支点反力波形 R は、衝突速度 V の相違によらず、各波形は正弦半波の類似の波形性状を呈してい

る。詳細に見ると、 $V = 4 \text{ m/s}$ の場合には、振幅の大きさや応答の継続時間に顕著な差異は認められない。一方、 $V = 5 \text{ m/s}$ の場合には、曲率中、曲率大である B-M 梁と B-L 梁の継続時間が³⁾、曲率小である B-S 梁より長くなっている。これは、後述するひび割れ分布からも

— B-S-AH - - - B-M-AH — B-L-AH

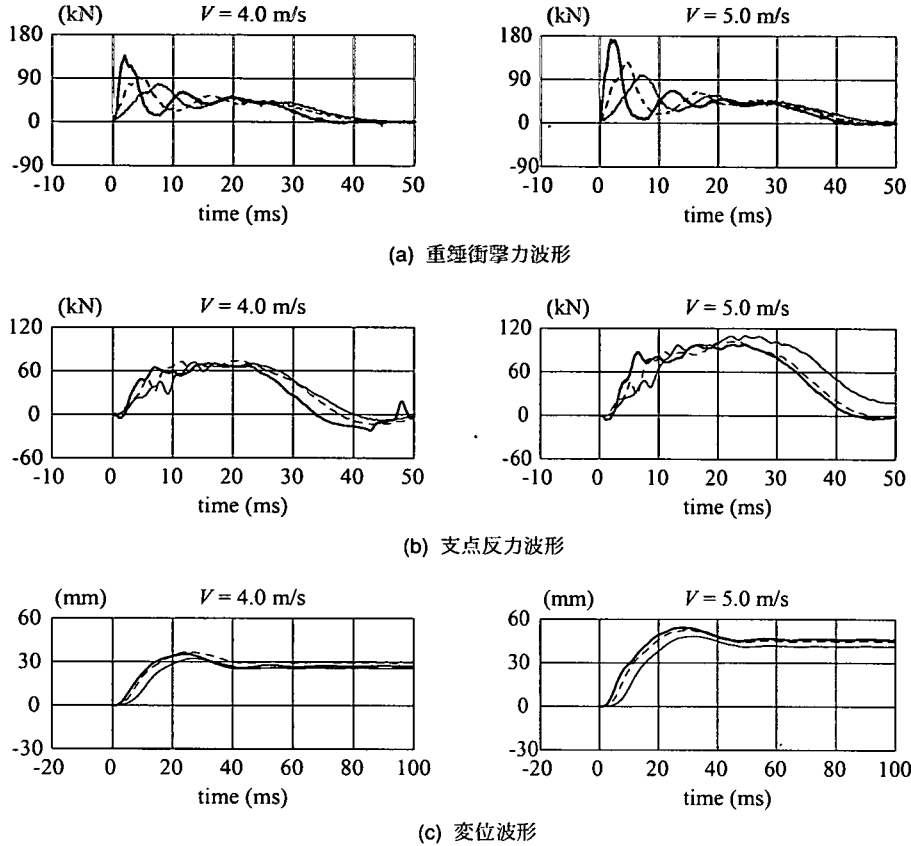


図-17 重錘の先端部形状の影響 (各応答波形の比較；硬ゴム緩衝材を設置する場合)

分かるように、B-M 梁と B-L 梁において衝突時に重錘がコンクリートに貫入したためと考えられる。

さらに、変位波形 δ について見ると、衝突速度 $V = 4 \text{ m/s}$ の場合には、各波形は応答の立ち上がりから残留変位に至るまでほぼ一致した波形性状になっていることが分かる。一方、 $V = 5 \text{ m/s}$ の場合には、B-L 梁において、最大変位値に至るまでの波形の勾配が他の梁よりも緩やかになっていることや、残留変位の大きさが各梁で若干異なっていることを除くと、各波形は大略類似している。

図-16 のひび割れ分布について見ると、衝突速度 V の大きさによらず、曲率小である B-S 梁には曲げひび割れがスパン全域に広範囲で生じている。また、重錘先端部の曲率が大きくなるほど、曲げひび割れがスパン中央部に集中することが分かる。曲げひび割れの分布性状の差異は、重錘衝撃力波形 P の最大値の大きさにも対応し、最大値が小さいほどひび割れが荷点部に集中する傾向を示している。なお、衝突速度 $V = 4$

m/s の場合には、重錘先端部が曲率大である B-L 梁で、また $V = 5 \text{ m/s}$ の場合には曲率中および曲率大である B-M 梁と B-L 梁で、荷点部にコンクリートの剥落が見られる。

以上より、RC 梁上にゴム緩衝材を設置しない場合には、支点反力波形および変位波形は重錘の先端部形状にかかわらずほぼ同様の波形性状を示すことが明らかになった。しかしながら、重錘衝撃力波形は重錘先端部の曲率が大きいほど最大応答値が小さく、衝撃初期に発生する波形成分の継続時間が長くなることも明らかになった。このことから、衝撃力評価や RC 梁の耐衝撃性評価を行う場合には、重錘衝撃力波形よりも支点反力波形を用いる方がより合理的に判断できるものと考えられる。なお、曲げひび割れは、重錘先端部の曲率が大きいほどスパン中央部に集中して生じることも明らかになっている。

b) 硬質のゴム緩衝材を設置する場合

図-17 には、B-S-AH 梁、B-M-AH 梁、B-L-AH 梁に

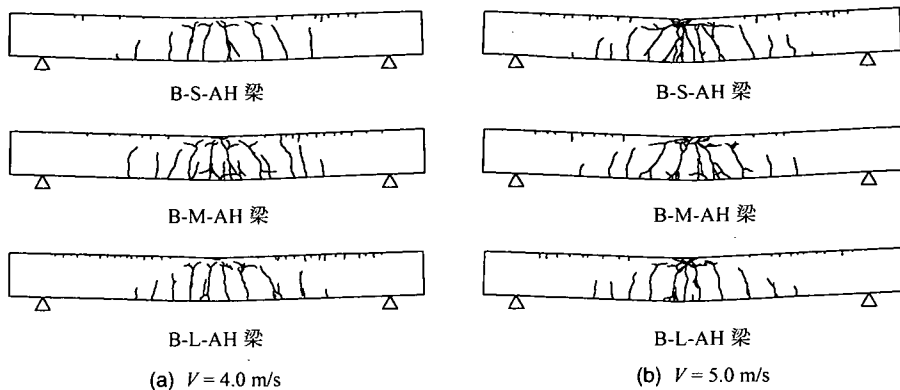


図-18 重錘の先端部形状の影響(ひび割れ分布の比較;硬ゴム緩衝材を設置する場合)

関する重錘衝撃力波形 P 、支点反力波形 R および変位波形 δ を比較して示している。ここで、重錘衝撃力波形 P は 50 ms 間の現象に対して示している。重錘衝撃力波形 P について見ると、衝突速度 V によらず、いずれの波形も衝撃初期に発生する継続時間の短い 1 波目の波形とその後の継続時間の比較的長い 2 波目の波形が合成された性状を示している。なお、前述したゴム緩衝材を設置しない場合と同様に、重錘先端部の曲率が大きいほど応答の立ち上がり勾配や最大応答値は小さく、継続時間は長くなっていることが分かる。

次に、支点反力波形 R について見ると、衝突速度 V によらず、各波形は正弦半波状の類似な性状を示していることが分かる。波形の継続時間は、 $V = 4 \text{ m/s}$ では B-M-AH 梁と B-L-AH 梁の場合で、また $V = 5 \text{ m/s}$ では B-L-AH 梁の場合で若干長く生じているものの、最大応答値は重錘の先端部形状の相違によらず各梁で良く対応している。さらに、変位波形 δ について見ると、いずれの衝突速度 V に対しても、B-L-AH 梁の場合には他の梁に比べて応答の立ち上がり時間が若干遅く生じていることが観察される。しかしながら、その差異は小さく、各波形は良く対応した性状を示している。

最後に、図-18 に示しているひび割れ分布について見ると、衝突速度 $V = 4 \text{ m/s}$ の場合には、荷点部を中心にほぼ半スパン間に、梁下縁から上縁に向かう曲げひび割れが発生しており、各 RC 梁で大略類似の分布性状を示していることが分かる。 $V = 5 \text{ m/s}$ の場合にも、各 RC 梁の曲げひび割れの分布は大略同様となっている。しかしながら、 $V = 5 \text{ m/s}$ の場合には、 $V = 4 \text{ m/s}$ の場合に比べて、荷点部コンクリートに剥落が見られ、生じるひび割れの本数も多少多くなっている。

以上より、RC 梁上に硬質ゴム緩衝材を設置する場合には、支点反力波形と変位波形は、重錘の先端部形状の相違によらずほぼ同様の応答性状を示すことが明らかになった。しかしながら、重錘衝撃力波形は、ゴム

緩衝材を設置しない場合と同様、重錘の先端部形状によって異なる応答性状を示すことも明らかになった。なお、曲げひび割れ分布は、重錘の先端部形状によらずほぼ類似している。

4. まとめ

本研究では、RC/PC 構造部材の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、コンクリート構造部材の最も基本である RC 梁に着目し、かつ各研究機関で一般的に用いられている重錘落下衝撃実験法を対象として、1) リバウンド防止用具設置の有無、2) 衝撃力の測定方法、3) ゴム緩衝材設置の有無、および 4) 重錘の先端部曲率が RC 梁の衝撃挙動に与える影響、を明らかにするために RC 梁を用いた重錘落下衝撃実験を実施した。また、RC 梁の耐衝撃性の評価方法に関しても検討を試みた。本検討結果から得られた結論を要約すると、以下のとおりである。

- 1) 重錘衝撃力波形、支点反力波形の低周波成分、荷重荷時の変位波形およびひび割れ分布は、リバウンド防止用具設置の有無によらずほぼ同様の性状を示す。
- 2) 応答波形に含まれる高周波成分の最大応答周波数と同程度の応答周波数を有するロードセルを用いる場合には、軸力のみが作用するように設置することにより静載荷用ロードセルでも十分な精度で衝撃力が測定可能である。また、実験時に静載荷用ロードセルを RC 梁上に設置する場合でも、支点反力波形や変位波形はこれを設置しない場合と同大略類似の応答性状を示す。
- 3) 用いるゴム緩衝材に塑性変形が生じない荷条件の範囲では、支点反力波形や変位波形は、ゴム緩衝材設置の有無やゴムの硬さによらず大略類似の

応答性状を示す。しかしながら、重錘衝撃力波形は、ゴム緩衝材設置の有無やゴムの硬さにより最大応答値に顕著な差異が生じる等、異なる応答性状を示す。

- 4) 重錘衝突部のコンクリートが剥落しない衝突速度のレベルでは、支点反力波形や変位波形は、重錘の先端部形状にかかわらず大略類似の応答性状を示す。しかしながら、重錘衝撃力波形は、重錘先端部の曲率が大きいほどその最大値が小さくなる等、異なる性状を示す。
- 5) ひび割れの発生本数や進展度合いは、静載荷用ロードセル設置の有無やゴム緩衝材設置の有無、重錘の先端部形状により異なってくるものの、一般的には梁下縁から上縁に向かう曲げひび割れが卓越した類似の分布性状を示す。
- 6) 1)～5)より、本実験範囲で設定した境界条件に対しては、支点反力波形や変位波形は載荷条件が異なる場合でも大略類似した応答性状となることが明らかになった。一方、重錘衝撃力波形は載荷条件や境界条件によっては異なる応答性状となる。したがって、衝撃力評価やRC梁の耐衝撃性評価には、重錘衝撃力波形よりも支点反力波形や変位波形を用いる方が合理的であるものと考えられる。

謝辞：本研究を行うにあたり、当時室蘭工業大学大学院建設システム工学専攻構造力学研究室の長谷川弘毅君（現札幌市）、盛田行彦君（現鹿島建設株式会社）および同大学院構造力学研究室在学中の小坂剛君には多大なる御支援を戴きました。ここに感謝の意を表します。また、本実験を実施するに当たり、株式会社共和電業様より静載荷用ロードセルを、株式会社シバタ工業様よりゴム緩衝材をご提供頂きました。ここに厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 伊藤千浩, 白井孝治, 大沼博志: 円飛来物の衝突に対する鉄筋コンクリート構造物の設計評価式, 土木学会論文誌, No.507/I-30, pp.201-208, 1995.
- 2) 井元勝隆, 大野友則, 佐々木晃, 小暮幹太: 重錘落下衝突を受けるRCはり部材の衝撃挙動と衝撃応答解析における材料の非線形特性, 構造工学論文誌, Vol.41A, pp.1201-1212, 1995.
- 3) 宮本文徳, 三戸雅文, 中村秀明: せん断補強筋を用いたRC版の3次元衝撃破壊挙動解析と耐衝撃性評価, 構造工学論文誌, Vol.43A, pp.1547-1554, 1997.
- 4) 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, 構造工学論文誌, Vol.44A, pp.1761-1771, 1998.
- 5) 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, 土木学会論文誌, No.619/I-47, pp.215-233, 1999.
- 6) 圓林栄喜, 香月智, 石川信隆, 太田俊昭: PCはりおよびRCはりのアンボンド化による動的じん性向上とその推定法, 土木学会論文誌, No.634/IV-45, pp.227-241, 1999.
- 7) 柴田俊文, 三上隆, 佐藤昌志, 須藤敦史: 剛球の梁への衝突における衝撃力の近似計算法, 土木学会論文誌, No.647/I-51, pp.167-176, 2000.
- 8) 山本満明, 榎谷浩, 音田奨, 堀江義徳, 熊谷貴秀: 鉄筋コンクリートはりに対する重錘落下衝撃実験とその挙動に関する考察, 構造工学論文誌, Vol.47A, pp.1683-1694, 2001.
- 9) 小林治俊, 荒木秀樹: 横等方性円筒シェルの衝撃応答について, 構造工学論文誌, Vol.47A, pp.1727-1734, 2001.
- 10) 竹本憲介, 圓林栄喜, 香月智, 石川信隆: 重錘落下実験によるPCはりの衝撃破壊挙動に関する一考察, 土木学会論文誌, No.675/I-55, pp.273-286, 2001.
- 11) コンクリート標準示方書(2002年制定) 構造性能照査編, 土木学会, 2002.
- 12) 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梁の耐衝撃設計法に関する一提案, 土木学会論文誌, No.647/I-51, pp.177-190, 2000.

(2002. 6. 17 受付)

EFFECTS OF BOUNDARY CONDITIONS ON IMPACT BEHAVIORS OF REINFORCED CONCRETE BEAMS SUBJECTED TO FALLING-WEIGHT IMPACT LOADS

Norimitsu KISHI, Tomonori OHNO, Hiroshi MIKAMI and Tomohiro ANDO

In this study, in order to investigate the effects of various boundary conditions on the impact behaviors of Reinforced Concrete (RC) beams under impact loadings, falling-weight impact tests were conducted on 22 simply supported rectangular RC beams and the following effects of the boundary conditions were discussed: 1) use of supporting apparatus; 2) measuring method for impact loads; 3) use of absorber with a hard/soft rubber; 4) nose-shape of steel-weight. From this study, it can be found that the dynamic responses of reaction force and mid-span displacement of RC beams may be similar, irrespective of the use of absorber with a hard/soft rubber and the nose-shape of steel-weight.