

緩衝ゴムを設置した RC 梁の耐衝撃挙動

Impact resistant behavior of cushion rubber set RC beams

鈴木健太郎*, 小室雅人**, 岸徳光***, 瓦井智貴****, 三上浩*****

Kentaro Suzuki, Masato Komuro, Norimitsu Kishi, Tomoki Kawarai, Hiroshi Mikami

*修(工), (株) 構研エンジニアリング, 防災施設部 (〒065-8510 札幌市東区北 18 条東 17 丁目 1-1)

**博(工), 室蘭工業大学教授, 大学院工学研究科もの創造系領域 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

***工博, 室蘭工業大学特任教授, 大学院工学研究科もの創造系領域 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

****博(工), 室蘭工業大学助教, 大学院工学研究科もの創造系領域 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

*****博(工), 三井住友建設(株), R&D センター 上席研究員 (〒270-0132 千葉県流山市駒木 518-1)

キーワード: 緩衝ゴム, RC 梁, 衝撃荷重載荷

Keywords: cushion rubber, RC beams, impact loading

1. はじめに

1990 年代頃から現在に至るまで, RC 梁や RC 版等の基本的な構造部材の耐衝撃挙動に関する種々の理論的実験的検討が継続的に行われている^{1),2)}. また, 実構造物の場合には, 落石などの衝突が想定される箇所にはあらかじめ緩衝材が設置され, 衝撃力を緩和させるような措置が取られている. 緩衝材としては, 敷砂や碎石あるいは EPS 材などを用いる場合の他, 地震時の橋梁の桁端衝突を緩和するための落橋防止システムに着目すると緩衝ゴムが採用されている.

実災害を想定すると, 一般的には衝突位置が不確定な場合が多く必ずしも緩衝ゴムの適用が工学的に適切ではない場合も考えられるが, 衝突位置がある程度特定できる場合や衝突の可能性のある領域がそれほど広くない場合には緩衝ゴムを設置して衝突による損傷を低減する手法も一工法として考えられる.

緩衝ゴムを設置した場合の構造物の応答については, 土木学会構造工学委員会衝撃関連小委員会による硬質あるいは軟質ゴムを RC 梁の載荷点部に設置した場合における重錘落下衝撃荷重載荷実験結果に関する報告がある. 当委員会では, 衝突速度や重錘の先端形状を変化させた数種類の実験も行っており, ゴムを設置することで変形量が若干抑制されるものの, ゴム設置の有無によって梁の応答や変形性状に顕著な差異が無いことを報告している¹⁾.

また, 橋ら³⁾は, 載荷点部に天然ゴムを設置した RC 梁を対象に重錘落下衝撃荷重載荷実験を実施し, ゴムが構造物の応答に及ぼす影響について検討を実施している. その結果, 緩衝ゴムを設置することによって最

大載荷点変位が 15% 程度低減することや, 提案の数値解析手法を用いることで実験結果を概ね再現可能であることを示している. このように衝撃荷重載荷部に緩衝ゴムを設置することにより, 衝撃強度の緩和や衝撃荷重載荷点部の損傷も軽減可能になることから, 構造部材の一層の耐衝撃性向上も期待できるものと考えられる. しかしながら, ゴムを緩衝材として用いた場合における構造体の耐衝撃挙動に着目した既往の検討は試験体数が非常に限られており, 未だ十分に検討が行われていないものと判断される.

このような観点から, 本研究では載荷点部に緩衝ゴムを設置した場合における RC 梁の耐衝撃挙動に関する基礎資料を収集することを目的として, 著者らの既往の研究⁴⁾と同様の形状寸法を有する矩形 RC 梁を対象に, 写真-1 に示すように重錘落下衝撃荷重載荷実験を実施した. 本研究では, 鋼製の 300 kg 重錘を用い, 緩衝ゴムを設置した場合と設置しない場合を対象に, 繰り返し載荷時におけるゴムの緩衝効果を検討す

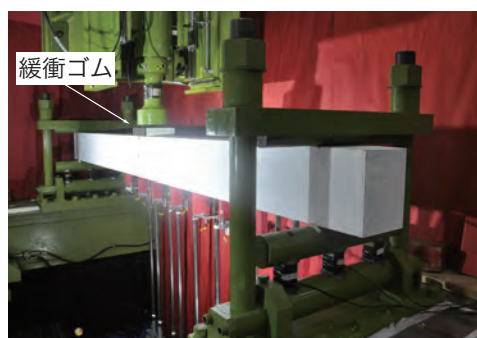


写真-1 衝撃荷重載荷実験状況

表-1 試験体一覧

試験体名	荷重方法	緩衝ゴムの有無	設定重錘落下高 H (m)	終局時重錘落下回数	実測衝突速度 V (m/s)	実測入力エネルギー E (kJ)	コンクリート圧縮強度 f'_c (MPa)	主鉄筋降伏強度 f_{ya} (MPa)	せん断筋降伏強度 f_{ys} (MPa)	計算曲げ耐力 P_{usc} (kN)	計算せん断耐力 V_{usc} (kN)	せん断余裕度 α
N-S	静的荷重	無し	—	—	—	—	32.4	381.7	461.9	55.0	329.0	5.98
N-CI-HI	落下高一定	無し	1.0	3	4.59°	3.15°	34.3	393.7	373.1	57.1	284.3	4.98
R-CI-HI	繰り返し荷重	有り			4.45°	2.97°	32.4	379.4	363.5	54.9	277.6	5.05

* 終局に至るまでの全荷重の平均値

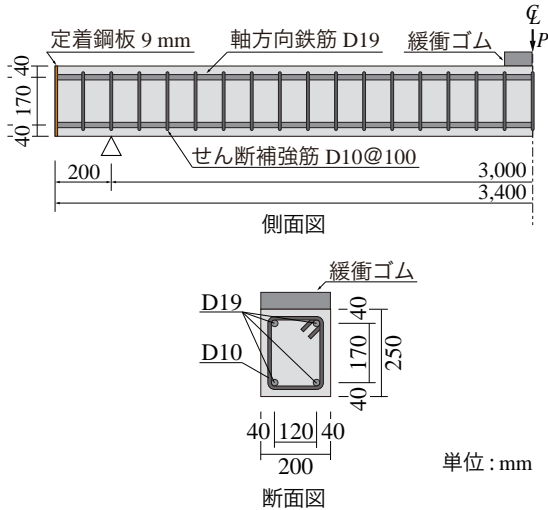


図-1 R 試験体の形状寸法および配筋

るために、比較の入力エネルギーの小さい衝撃荷重による繰り返し衝撃荷重載荷実験を実施した。なお、別途実施した静的荷重実験⁴⁾との損傷状況の比較も行っている。

2. 実験概要

2.1 試験体の形状寸法および材料の力学的特性

表-1には、本実験に用いた試験体の一覧を示している。試験体は、荷重方法や緩衝ゴム設置の有無を変化させた全3体である。表中の試験体名のうち、第一項目は緩衝ゴムの有無(N:緩衝ゴム無し, R:緩衝ゴム有り)を示し、第二項目は荷重方法(S:静荷重載荷, CI:落下高さ一定繰り返し衝撃荷重載荷)、第三項目のHに付随する数値は衝撃荷重載荷時における設定落下高(m)を示している。本研究では落下高さを $H = 1$ mと設定した。また、表には実験時の実測衝突速度 V と、 V から算出した実測入力エネルギー $E (= MV^2/2)$ も合わせて示している。なお、表には本実験に用いた各試験体のコンクリートの圧縮強度 f'_c 、主鉄筋およびせん断補強筋の降伏強度 f_{ya}, f_{ys} も併せて示している。

表-1に示されている計算曲げ耐力 P_{usc} は、土木学会コンクリート標準示方書⁵⁾に準拠して各材料の応力-ひずみ関係を設定し、平面保持を仮定した断面分割法により算定した。なお、計算時の梁の終局状態

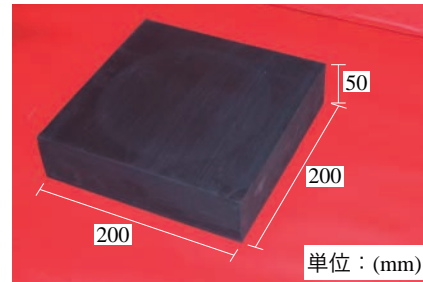
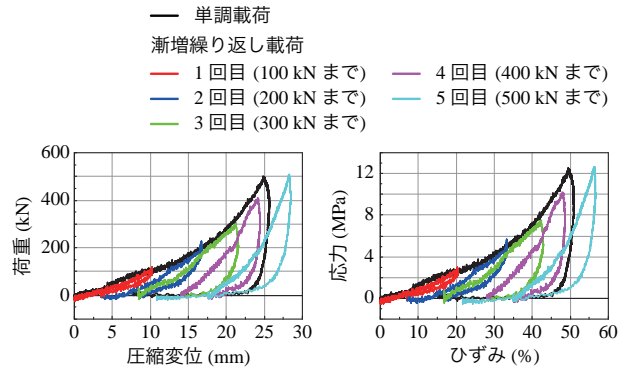


図-2 緩衝ゴムの形状寸法



(a) 荷重-圧縮変位関係 (b) 応力-ひずみ関係

図-3 緩衝ゴムの静的圧縮試験結果

は、上縁コンクリートの圧縮ひずみが $3,500 \mu$ に達した時点とした。計算せん断耐力 V_{usc} は同コンクリート標準示方書⁵⁾に準拠して算定している。また、断面分割法の詳細については文献(6), (7)を参照されたい。

図-1には、試験体の形状寸法と配筋、および緩衝ゴムの設置位置を示している。本実験に用いた試験体の形状寸法(梁幅 × 梁高 × スパン長)は、 $200 \times 250 \times 3,000$ mmである。また、軸方向鉄筋は上下端にD19を各2本配置し、定着長の節約のために梁軸方向端面に設置した厚さ9 mmの定着鋼板に溶接固定している。さらに、せん断補強筋にはD10を用い、100 mm間隔で配筋している。

図-2には、R試験体において設置した緩衝ゴムの形状寸法を示している。本研究では通常緩衝用として用いられる硬度65の天然ゴムを採用し、その形状寸法(幅 × 長さ × 高さ)は、梁幅および重錘円柱部直径を考慮して $200 \times 200 \times 50$ mmとした。

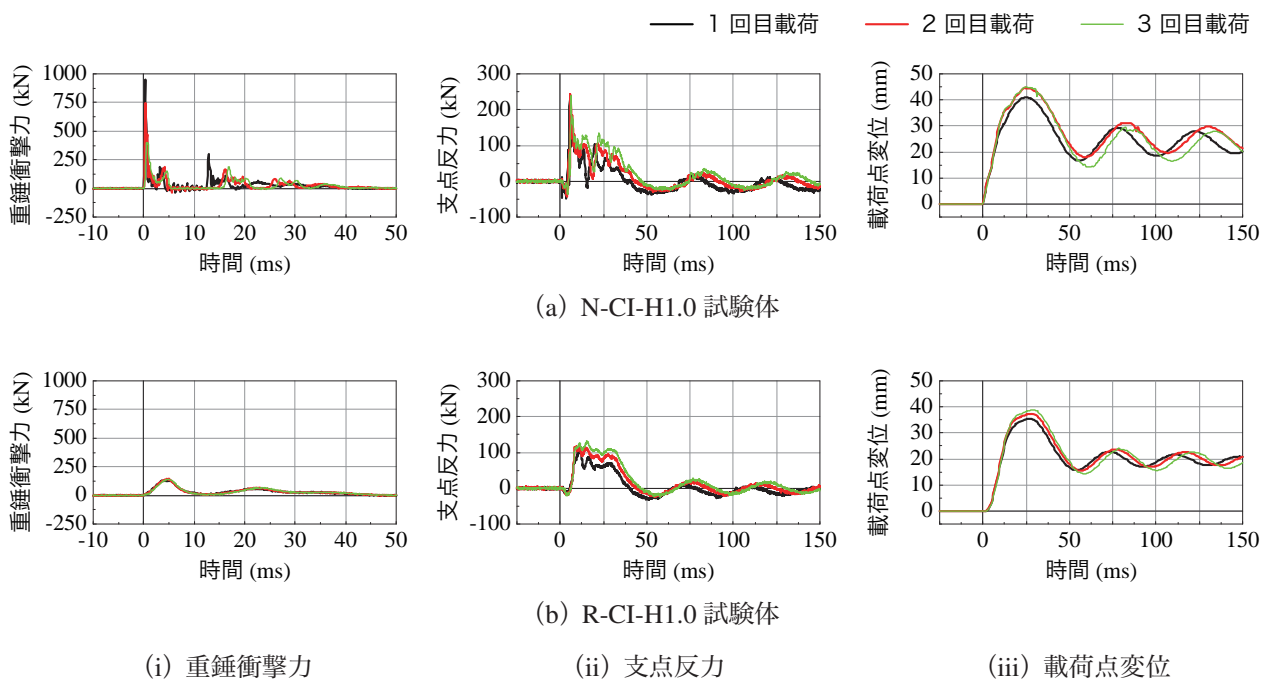


図-4 衝撃荷重载荷時における各種時刻歴応答波形

図-3には、緩衝ゴムの基本的な材料特性を把握するために実施した静的圧縮試験の結果を示している。試験は図-2の緩衝ゴムを対象に、载荷用鋼版を介して一度に500kNまで载荷する単調载荷と、100kNずつ荷重を増加させながら500kNまで载荷と除荷を繰り返す漸増繰り返し载荷の2ケースを実施した。なお、圧縮変位に関しては、高速度カメラを用いて緩衝ゴム上下の载荷用治具に貼付したターゲットマーカーの相対変位量を計測し算出した。

図-3(a)に示す荷重-圧縮変位関係に着目すると、単調载荷において500kNの荷重到達時に25mm程度圧縮変形し、大変形によってゴムが損傷したことで除荷後7.5mm程度の残留変位が生じている。繰り返し载荷においても、変形量に差異は見られるものの単調载荷とほぼ同様な傾向が確認できる。また、100、200kN载荷程度では、残留変形が小さく緩衝ゴム単体でのエネルギー吸収が小さいことも見て取れる。

図-3(b)には圧縮試験から得られた荷重-圧縮変位関係を基に、载荷前の緩衝ゴムの面積あるいは高さから換算した応力-ひずみ関係を示している。図より500kNまで载荷することで、約50%のひずみが発生し12MPa程度の応力に到達することが確認できる。

2.2 実験方法および測定項目

写真-1には、衝撃载荷時における実験装置とR試験体の設置状況を示している。衝撃荷重载荷実験は、質量300kg、円柱部直径が200mmで载荷点部が円形状に150mmまで絞られ、高さ2mm球形状になっている鋼製重錘を、 $H=1$ mからRC梁が終局に至るま

で繰り返し落下させることとした。重錘落下位置は梁のスパン中央部に限定している。また、R試験体の場合には、载荷点部に図-2に示す緩衝ゴムを設置しており、一载荷ごとに新品のゴムと取り替えた後に実験を実施している。なお、試験体の両支点部は、回転を許容し、矩形鋼製梁によって浮き上がりを拘束した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、合支点反力(以後、単に支点反力)、载荷点変位である。なお、重錘衝撃力と支点反力は、起歪柱型の衝撃荷重測定用ロードセルを用いて計測しており、変位はレーザ式非接触型変位計を用いて計測した。さらに、実験時にはひび割れ分布および変位計のバックアップとして高速度カメラ撮影も行っている。また、本研究においては残留変位がスパン長の2%程度(=60mm)となった時点を終局として実験を終了することとした。

静的荷重载荷の場合には、梁幅方向に400mm、梁軸方向に100mmの载荷板をスパン中央部に設置し、容量200kNの油圧ジャッキを用いて荷重を作用させている。なお、N-S試験体の詳細に関しては文献4)を参照されたい。

3. 実験結果

3.1 各種時刻歴応答波形

図-4には、衝撃荷重载荷実験に関する全ケースの重錘衝撃力、支点反力、载荷点変位の各時刻歴応答波形を示している。いずれも3回目载荷において終局と判断し実験を終了している。なお、载荷毎の応答値を

示しており、繰り返し载荷による累積値は考慮していない。また、図中の横軸は、重錘が試験体に衝突した時刻を零としている。

図-4(i)の重錘衝撃力波形に着目すると、黒線で示す1回目载荷のN試験体の場合には、重錘がRC梁に衝突後1ms程度で最大約1,000kNを示す第一波が励起していることが分かる。その後、最大値が250kN程度で継続時間が3ms程度の第2波が後続し、12ms程度で再度重錘が衝突し衝撃力が励起していることが確認できる。一方で、1回目载荷のR試験体の場合には、衝突初期に最大125kN程度で継続時間が10ms程度の正弦半波の波形が確認でき、緩衝ゴム設置の有無によって、その波形性状は大きく異なっていることが分かる。また、最大衝撃力に関しては、緩衝ゴムを設置することで1/6程度まで低減していることも読み取れる。

2,3回目载荷の繰り返し载荷時に着目すると、N試験体の場合には、载荷回数が増加に従って最大衝撃力も低下していく傾向にある。これは後述のひび割れ状況からも分かるように、载荷点部の圧壊が徐々に進行していくことに起因していると考えられる。また、圧壊によってスパン中央部の曲げ剛性の低下が進行していくため、10ms以降の衝撃力の立ち上がり時間も徐々に遅れていることが確認できる。一方で、R試験体の場合には、いずれの载荷回数においても同様の波形性状を示していることが分かる。これは、緩衝ゴムを設置したことによって、载荷点部の圧壊が抑制されたことが一因と考えられる。

図-4(ii)の支点反力波形に着目すると、黒線で示す1回目载荷のN試験体の場合には、重錘衝突直後に負値を示した後、継続時間が40ms程度で最大約250kNの反力を示す高周波成分が合成された正弦半波の波形性状を確認できる。また、50ms以降には減衰自由振動状態に移行していることも分かる。なお、反力が負値を示しているのは、実験開始前にリバウンド防止用の梁を締め付け、支点反力測定用ロードセルの零バランスを取った状態下において、衝撃初期の上向きのリバウンド力が作用したことによるものである。但し、締め付け力以上の負反力は計測できないことは、勿論である。緩衝ゴムを設置した場合には、設置していない場合の高周波成分を取り除いたような波形性状を示していることが見て取れる。また、ゴムを設置したことで、最大値に到達するまでの時間が長くなっていることも確認できる。この傾向は重錘衝撃力波形性状と対応しているものと判断できる。

2,3回目载荷の繰り返し载荷時も1回目载荷時と同様な波形性状を示しており、緩衝ゴムの有無によらず载荷回数が増加に伴って、主波動の継続時間が徐々に延びている傾向が見取れる。これは、ひび割れの進展によって梁全体の剛性が低下していくためと推察

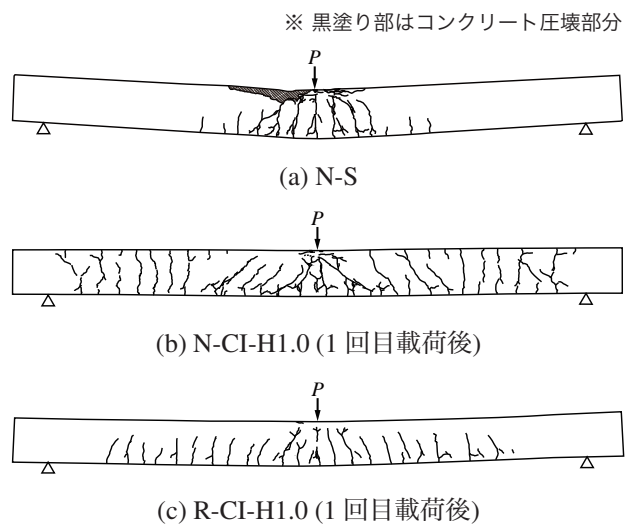


図-5 静的载荷および1回目衝撃荷重载荷後のひび割れ分布の比較

される。

図-4(iii)の载荷点変位波形に着目すると、緩衝ゴム設置の有無に関わらず、25ms程度で最大値に到達後、減衰自由振動状態に移行している様子が確認できる。最大変位に着目すると、黒線で示す1回目载荷のN試験体の場合には、約40mm、R試験体の場合には約35mmとなっており、ゴムの設置により最大衝撃力が1/6程度に低減されたのに対して最大変位は10%程度の減少に留まっている。これは、後述するようにいずれのケースにおいても衝撃力波形を用いて評価した力積がほぼ等しいことに起因するものと考えられる。また、残留変位に関しても、ゴムを設置しない場合と設置する場合において、それぞれ24,20mmとなっており、载荷後の損傷程度に顕著な差異が無いことも確認できる。

2,3回目载荷の繰り返し载荷時に着目すると、载荷回数が増加に伴って梁に損傷が累積されるため若干変形量が大きくなっているものの、緩衝ゴム設置の有無に関わらずその傾向は概ね同程度であると考えられる。

3.2 実験終了後における試験体の損傷状況

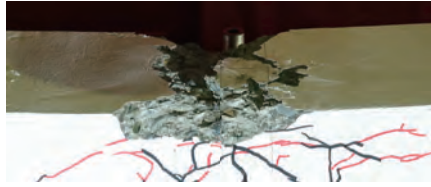
図-5には、静的载荷および1回目衝撃荷重载荷終了後の試験体側面におけるひび割れ分布を比較して示している。また、黒塗り部は圧壊による損傷領域を示している。

まず、図-5(a)に示す静的载荷実験結果に着目すると、载荷点直下において等間隔に曲げひび割れが生じており、スパン中央部近傍のみに損傷が集中している傾向が確認できる。また、斜めひび割れは発生していない。载荷点部は広い範囲で圧壊が進行している様

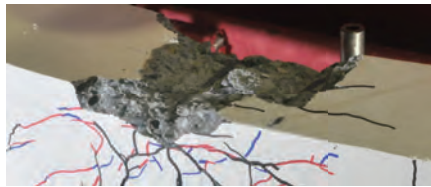
1回目
載荷後



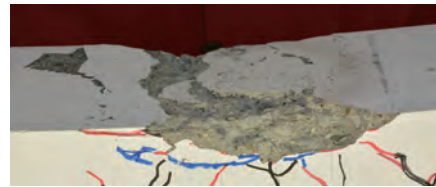
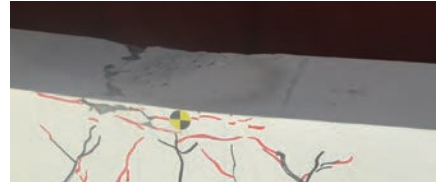
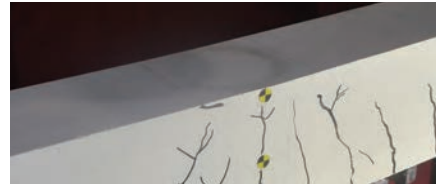
2回目
載荷後



3回目
載荷後



(a) N-CI-H1.0 試験体



(b) R-CI-H1.0 試験体

図-6 落下高さ一定繰り返し衝撃荷重載荷実験終了後の載荷面の損傷状況

子も見て取れ、梁全体が角折れの傾向を示している。

次に、図-5 (b) に示す緩衝ゴムを設置しない場合における衝撃荷重載荷実験結果に着目すると、載荷点近傍下縁部には、静荷重載荷時とは異なり曲げひび割れに加えて多数の斜めひび割れが顕在化していることが分かる。また、支点近傍部における上縁から下縁に向かうひび割れは、重錘衝突直後に載荷点直下に曲げひび割れが発生した後、曲げ波が両端固定梁のような状態で支点近傍に伝播していくことを暗示している。載荷点部においては、静荷重載荷時と同様に、圧壊の傾向が確認できる。

図-5 (c) に示す緩衝ゴムを設置した場合の衝撃荷重載荷実験結果に着目すると、載荷点直下において曲げひび割れが生じることは勿論であるが、緩衝ゴムを設置しない場合と比較して、斜めひび割れの発生角度が大きくなり、かつその本数は少ないことよりゴムの緩衝効果によってせん断変形が抑制されたものと推察される。また、支点部近傍においては上縁から下縁に進展するようなひび割れは確認できないことより、図-4 (i) の重錘衝撃力波形と対応して、緩衝ゴムを設置することで衝撃的な作用が緩和された状態で応力が伝播したものと推察される。

図-6 には、衝撃荷重載荷実験における各載荷後の載荷点部周辺の損傷状況を比較して整理している。

図-6 (a) の N 試験体に着目すると、1 回目載荷において圧壊現象が現れており、3 回目載荷には載荷点部の上縁かぶりコンクリートが完全に剥落しせん断補強鉄筋が露出している様子が分かる。一方で、図-6

(b) の R 試験体に着目すると、1 回目載荷においてはほぼ圧壊の傾向は現れず、2 回目載荷においても緩衝ゴムを設置することによって圧壊を大きく抑制していることが分かる。3 回目載荷には、圧壊現象が現れ始め終局に至っているものの、緩衝ゴムを設置しない場合と比較して、その損傷程度は小さいことが分かる。なお、試験体側面のひび割れ分布状況に関しては載荷回数に伴い、ひび割れが進展すると共に発生本数が多くなることを確認している。

3.3 入力エネルギーと各種最大応答値の関係

図-7 には、本研究で実施した衝撃荷重載荷実験の全ケースに関して最大重錘衝撃力、力積、繰り返し衝撃荷重載荷による累積値を考慮した絶対最大変位および累積残留変位について、実測累積入力エネルギー（以下、単に累積入力エネルギー）を横軸に取って比較して示している。なお、力積は、図-4 に示す重錘衝撃力波形の 0～50 ms に着目して算出することとした。また、残留変位は、実験終了後に重錘を取り除いた状態においての値であり、各ケースにおける実測入力エネルギーは表-1 に示す通りである。

図-7 (a) より、最大重錘衝撃力の分布性状を見ると、1 回目載荷時には前述のようにゴムを設置することで、1/6 程度まで最大衝撃力を抑制可能であることが分かる。また、繰り返し載荷によって、最大衝撃力は、緩衝ゴムを設置しない場合において載荷回数毎に 200～300 kN 程度低下していく傾向が確認できる。一方で、緩衝ゴムを設置した場合には、載荷回数によ

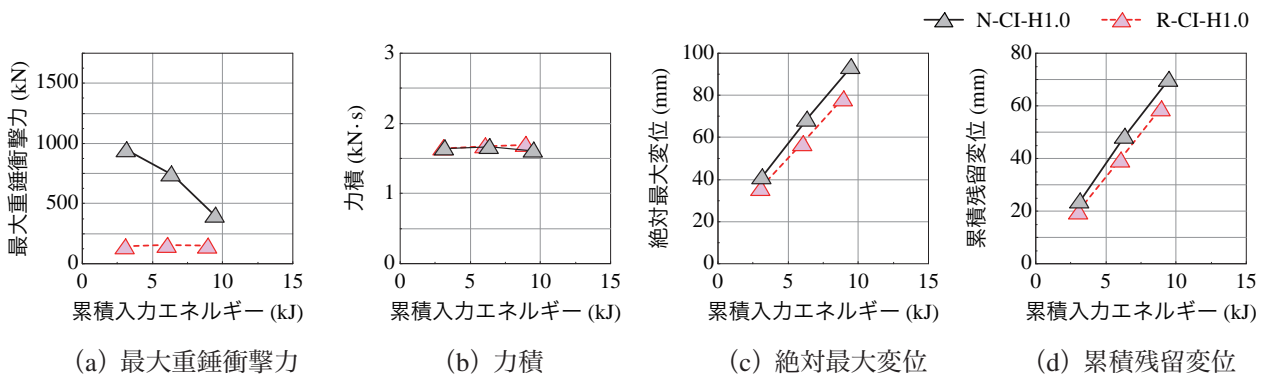


図-7 累積入力エネルギーと各種応答値の関係

らずほぼ同程度の値を示していることが分かる。これは、図-6に示すように、ゴム設置の有無によって圧壊の進行度合いが大きく異なることに起因しているものと推察される。

図-7(b)より、力積の分布性状に着目すると、最大重錘衝撃力分布とは異なり、ゴム設置の有無による影響は非常に少ないことが確認できる。これは、梁の応答変位への緩衝ゴムの影響が比較的小さいことを意味している。また、本実験の荷重レベルにおいては、緩衝ゴム単体が吸収するエネルギーも小さいことを暗示しており、図-3の結果に対応していることが分かる。なお、ゴムを設置しない場合においては、載荷回数の増加によって力積が若干減少傾向にある。これは、載荷点部の圧壊が進行することによって、最大衝撃力が減少傾向にあることと対応している。

図-7(c)より、絶対最大変位の分布性状を見ると、累積入力エネルギーの増加に伴って、最大変位も線形に増加する傾向にあることが分かる。なお、その勾配は緩衝ゴムを設置した場合が小さい。

図-7(d)より、累積残留変位の分布性状は、絶対最大変位とほぼ同様な傾向を示していることが分かる。また、いずれの試験体に関しても60 mm程度まで残留しており、終局状態に至っていることが見て取れる。

4. まとめ

本研究では、載荷点部に緩衝ゴムを設置したRC梁の耐衝撃挙動に関する基礎資料の収集を目的に、緩衝ゴムを設置しない場合も含め落下高さ一定繰り返し衝撃荷重載荷実験を実施した。

本研究の範囲内で得られた結果を整理すると、以下のように示される。

- 1) 緩衝ゴムを設置することにより、衝撃荷重載荷時において、最大衝撃力を大幅に低減可能である。
- 2) また、緩衝ゴムの設置によって、衝撃荷重強度の緩和と分散化が図られることで載荷点部の圧壊の

進行を抑制可能である。

- 3) しかしながら、緩衝ゴム設置の有無によらず衝撃力による力積がほぼ同程度であることにより、緩衝ゴムを設置することによって梁の最大変位や残留変位を最大衝撃力と同程度の割合に抑制することは難しい。

謝辞

本研究で使用した緩衝ゴムはシバタ工業(株)からご提供頂きました。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：衝撃実験・解析の基礎と応用，土木学会構造工学シリーズ 15, 2004.
- 2) 土木学会：防災・安全対策技術者のための衝撃作用を受ける土木構造物の性能設計－基準体系の指針－，土木学会構造工学シリーズ 22, 2013.
- 3) 橘紗代子，榎谷浩，中村佐智夫：衝突条件が異なる衝撃力を受ける鉄筋コンクリートはりの有限要素法による挙動解析，応用力学論文集, Vol. 9, pp. 571-579, 2006.
- 4) 瓦井智貴，小室雅人，岸徳光，三上浩，Le Huy Sinh：衝撃荷重載荷時におけるAFRPシート接着曲げ補強RC梁の破壊形式に関する実験的検討，構造工学論文集, Vol. 65A, pp. 901-911, 2019.
- 5) 土木学会：2017年制定 コンクリート標準示方書 [設計編], 2018.
- 6) 岸徳光，三上浩，栗橋祐介：AFRPシートで曲げ補強したRC梁の曲げ耐荷性状に関する実験的研究，土木学会論文集, Vol. 683/V-52, pp. 47-64, 2001.
- 7) 岸徳光，三上浩，栗橋祐介：AFRPシート緊張接着曲げ補強RC梁の曲げ耐荷性状に関する実験的研究，土木学会論文集 E2, Vol. 72, No. 2, pp. 165-180, 2016.