

衝撃荷重を受けた RC 梁のひび割れ補修前後における残存衝撃耐力

Residual impact resistant capacity of retrofitted RC beams

岸 徳光*, 今野 久志**, 西 弘明***, 三上 浩****

Norimitsu Kishi, Hisashi Konno, Hiroaki Nishi and Hiroshi Mikami

*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)

**博(工) 北海道開発土木研究所主任研究員 構造研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3)

***博(工) 北海道開発土木研究所副室長 構造研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3)

****博(工) 三井住友建設(株)技術研究所 主席研究員 (〒270-0132 千葉県流山市駒木 518-1)

Regarding RC beams damaged due to impact loading, in order to investigate the upgrading effects of impact resistant capacity of the RC beams after repairing cracks, static and impact loading test for thirteen RC beams were conducted. Here, impact velocity and with/without crack repairing were taken as variable. The results obtained from this study are as follows; 1) static load carrying capacity of the RC beams damaged due to impact loading previously is higher than that of virgin one due to strain hardening effects of the rebar, 2) frequency and amplitude of the impact response of the RC beams at the second impact loading are almost the same and both initial load carrying capacity and flexural stiffness are ensured regardless with/without crack repairing after the first impact loading, 3) crack repairing is useful to keep concrete blocks from falling and for cracks to be dispersed.

Key Words : RC beam, crack repairing, epoxy resin, impact resistance

キーワード : RC 梁, ひび割れ補修, エポキシ樹脂, 耐衝撃性

1. はじめに

道路の安全対策用施設構造物の 1 つに落石防護構造物がある。この種の代表的な構造物にはロックシェッドや落石防護擁壁がある。ロックシェッドの場合には、頂版上に緩衝材を設置して衝撃力を緩和し、弾性設計により断面設計が行われている。現在は、敷砂緩衝材の他、上層敷砂層、芯材 RC 版、下層発泡スチロール材から成る三層緩衝構造¹⁾も実用化されている。北海道開発局では、これらの緩衝材を適用した場合の RC 製ロックシェッドを対象に、三次元弾性衝撃応答解析結果に基づいて作成された各断面力算定用ノモグラムを用いる設計手法を提案し、実務²⁾に供している。一方、落石防護擁壁の場合には、落石が直接擁壁に衝突する場合を想定しているものの、小落石による衝突を前提としているため、擁壁を剛体と仮定し無筋コンクリート製を前提に設計³⁾が行われている。しかしながら、現実には落石の衝突によってひび割れやコンクリート片の剥離剥落が発生していることから、耐衝撃性を向上させるために、RC 構造とする研究や簡易緩衝構造を設置した衝撃緩和法に関する研究^{4) 5) 6)}が推進されている。

このように、耐衝撃用途 RC 構造物を対象とした合

理的な衝撃緩和法や耐衝撃設計法の開発⁷⁾に関する検討が種々行われている。しかしながら、RC 構造物に対する補修・補強前後の衝撃耐力評価法が確立されていないことから、万が一衝撃荷重载荷によって損傷を受けた場合には、人命尊重および安全性を考慮して補修・補強を施すことなく改築される場合が多い。これより、耐衝撃用途 RC 構造物の補修・補強前後における衝撃耐力評価法を確立することは、経済的で健全な社会資本整備の観点からきわめて重要な課題であるものと考えられる。

このような観点から、本論文では衝撃荷重载荷によって 1 度損傷を受けた RC 梁のひび割れ補修前後における耐衝撃性を把握することを目的として、曲げ破壊型 RC 梁を用いた重錘落下衝撃実験を実施し、損傷部の補修前後における衝撃耐力等の補修効果について検討を行った。本研究では、衝撃荷重による RC 梁の損傷の程度を変化させるために、重錘落下による衝突速度を 3 種類設定した。損傷した RC 梁の補修は 0.2 mm 以上のひび割れ部を対象にエポキシ樹脂を注入することにより実施している。また、補修前後の RC 梁の耐衝撃性は、RC 梁が単一载荷によって終局に至る場合と同一の衝突速度を設定して重錘落下衝撃実験を実施し、検討を行っている。

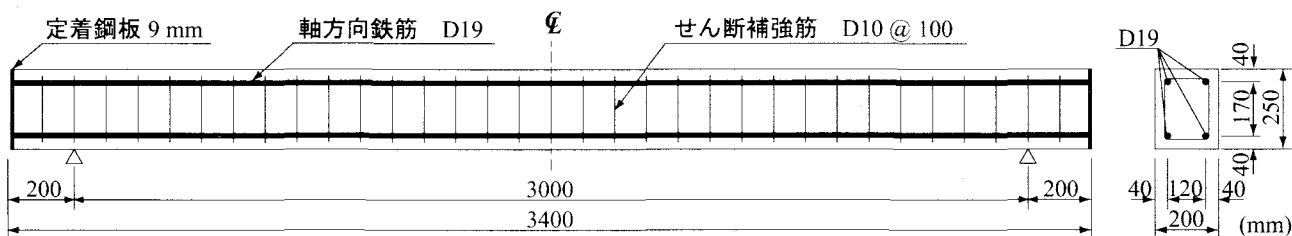


図-1 RC 梁の形状寸法および配筋状況

表-1 静的設計値および実測耐力一覧

主鉄筋比	せん断 スパン比	計算 曲げ耐力	計算 せん断耐力	計算 せん断余裕度	実測* 曲げ耐力	実測 せん断余裕度
p_t	a/d	P_{usc} (kN)	V_{usc} (kN)	α	P_{us} (kN)	α'
0.011	7.14	57.2	289.5	5.06	65.2	4.44

*:終局の定義は変位が純スパン長の1% (30mm) に達したときとしている。

表-2 コンクリートの力学的特性値

材令 (日)	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
47	23.7	1.94	20.4	0.26

表-3 鉄筋の力学的特性一覧

鉄筋名称	材質	降伏強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
D19	SD345	404	206	0.3
D10	SD295A	404	206	0.3

表-4 実験ケース一覧

試験体名	1次載荷時 衝突速度 V (m/s)	補修の 有無	静載荷実験 の有無	2次載荷時 衝突速度 V (m/s)
S-N	-	無	有	-
I4S-N	4	無	有	-
I4S-R		有		
I4I-N		無		
I4I-R		有		
I5S-N	5	無	有	-
I5S-R		有		
I5I-N		無		6
I5I-R		有		
I6S-N	6	無	有	-
I6S-R		有		
I6I-N		無		6
I6I-R		有		

2. 実験概要

2.1 試験体の概要

図-1 には、本実験に用いた RC 梁の断面寸法および配筋状況を示している。RC 梁の形状寸法（梁幅×梁高×純スパン長）は $200 \times 250 \times 3000$ mm である。軸方向鉄筋は D19 を上下端に 2 本ずつ配筋した複鉄筋配置とし、せん断補強鉄筋には D10 を 100 mm 間隔で配筋している。また軸方向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、RC 梁の静的設計値および実測耐力一覧を示している。表中、静的曲げ耐力 P_{usc} および静的せん断耐力 V_{usc} は、コンクリート標準示方書⁸⁾に基づき算定している。各試験体は、せん断余裕度が $\alpha (= V_{usc} / P_{usc}) > 1.0$ であることより、静載荷時には設計的に曲げ破壊型で終局に至ることが想定される。また、表中には、静載荷実験より得られた実測静的耐力 P_{us} 、および V_{usc} を P_{usc} で除して算定した実測せん断余裕度 α' も合わせて示している。なお、別途実施した静載荷実

験は、3点曲げ載荷法に従って実施している。表-2、表-3 には、実験時のコンクリートおよび鉄筋の力学的特性値を示している。

2.2 実験ケース

本研究では重錘落下衝撃荷重載荷による 1 次載荷後の静的耐力把握のための静載荷実験と 1 次載荷後の耐衝撃性を検討するための衝撃実験（以後、2 次載荷）を実施している。1 次載荷における重錘の衝突速度には 3 ケース設定している。表-4 には本実験ケースの一覧を示している。試験体名において、“I” は重錘落下衝撃実験を、“S” は静載荷実験の実施を意味している。また、“R” と “N” はそれぞれ 1 次載荷後の補修の有無

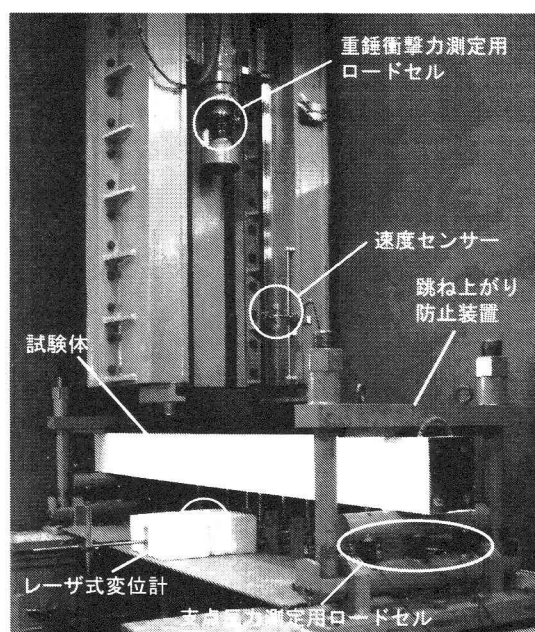


写真-1 実験状況

を示している。第1項目のInS/Iにおいて、整数 n は1次载荷における衝突速度 V (m/s)を意味しており、S/Iは1次载荷後の実験状況を示している。Sは1次载荷後の静的耐力照査のための静载荷実験を、Iは耐衝撃性検討のための重錘落下衝撃実験の実施を意味しており、後述のとおり全て等しく $V=6$ m/sと設定している。なお、S-N試験体は静载荷実験のみを実施する試験体であり、静的耐力照査の基準試験体である。したがって、本実験で用いた試験体数は全13体である。

2.3 実験方法

重錘落下衝撃実験において、RC梁試験体は支点反力測定用ロードセル付きの支点上に設置し、かつ重錘落下衝突時における試験体端部の跳ね上がりを防止するために、写真-1に示すように跳ね上がり防止装置を用いて固定している。なお、跳ね上がり防止装置は支点と共に軸を中心に回転できるように工夫されている。したがって、支点部の境界条件はピン支持に近い状態になっているものと推察される。

重錘落下衝撃実験は、重錘をRC梁のスパン中央部に所定の高さから自由落下させる(以後、衝撃载荷)ことにより行っている。用いた重錘は、質量が300 kg、载荷点部の直径が150 mmの円柱状鋼製重錘である。重錘底部は、衝突時の片当たりを防止するために、高さが2 mmのテーパを有する球面状となっている。重錘は十分に剛な重錘落下用鋼製ガイド塔に固定された2本のリニアウェイレールを介して、落下時およびRC梁に衝突後もその姿勢が前後、左右に正確に制御されている。また、重錘の落下高さに関しては、予め速度センサーを用いた予備実験によって落下高さと設定衝

突速度との関係を検定し、この検定表のもとに決定している。本実験では、同一試験体に対して2回の载荷を行っている。各試験体は全て同一の条件の下に実験を行うために、補修の有無にかかわらず1次载荷終了後に試験体を試験装置から取り出し、ひび割れ分布のスケッチや開口したひび割れ部へのエポキシ樹脂注入による補修を行っている。

1次载荷における各衝突速度は、別途実施した漸増繰り返し重錘落下衝撃実験結果において、RC梁が破壊に至った衝突速度である $V=6$ m/sを終局衝突速度とし、その同一速度($V=6$ m/s)および、-1, -2 m/sである $V=4, 5$ m/sとした。2次载荷時の衝突速度は、全てのRC梁に対して、本論文で設定した終局衝突速度である $V=6$ m/sとした。

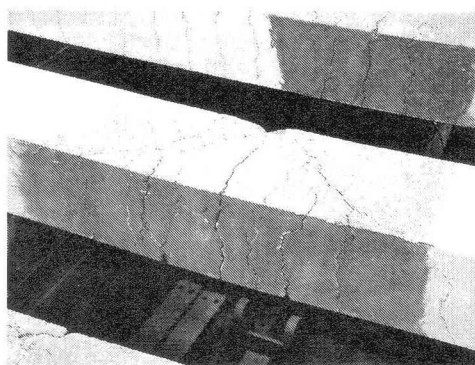
ここで、漸増繰り返し重錘落下衝撃実験とは、初速度および増分速度を1 m/sとして梁が終局に至るまで繰り返し衝撃载荷実験を行う方法である。繰り返し载荷実験時における梁の終局は、既往の研究⁹⁾より累積残留変位が純スパン長の2% (60 mm)程度とした。また、上述のように、本実験での終局に至る衝突速度は累積残留変位が82.4 mmに達した $V=6$ m/sとした。

本実験における測定項目は、重錘衝撃力 P 、合支点反力 R (以後、支点反力)および载荷点変位 δ (以後、変位)の各応答波形である。これらの測定には、写真-1からも明らかなように、重錘衝撃力に関しては重錘に取り付けた周波数特性4.0 kHz、容量1,470 kNの起歪柱型の衝撃荷重測定用ロードセルを用いており、支点反力に関しては支点治具に取り付けた周波数特性2.4 kHz、容量490 kNの起歪柱型の衝撃荷重測定用ロードセルを用いている。また、载荷点変位は周波数特性が915 Hz、最大ストロークが200 mmの非接触式レーザ式変位計を用いている。各センサーからの出力波形は、ロードセルの場合には歪ゲージタイプであることより直流増幅器を、またレーザ式変位計の場合には専用のアンプユニットを介して増幅した後、一括して広帯域用データレコーダ(応用周波数40 kHz)に収録している。その後、0.1 msのサンプリング間隔によりA/D変換を施している。支点反力波形、変位波形に関しては、ノイズを含んだ高周波成分を除去するために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。また、実験終了後には梁側面に生じたひび割れ分布を記録している。

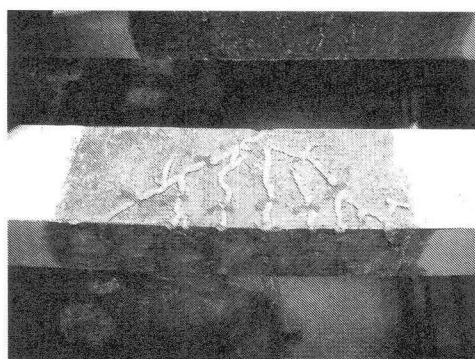
2.4 補修概要

1次载荷によって損傷を受けたRC梁の補修は耐久性上有害であるとされている幅0.2 mm以上のひび割れ部を対象にエポキシ樹脂を注入することにより行っている。

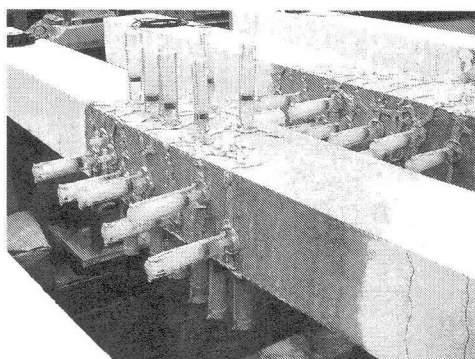
写真-2には、補修の状況を示している。写真をもとに補修の手順を概説すると、1) ひび割れ分布のス



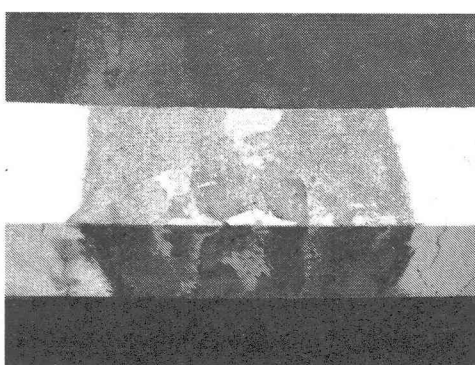
(a) RC 梁表面に塗布した
ポスターカラーの除去



(b) パテによるひび割れ部の密封



(c) エポキシ樹脂をひび割れ部に注入



(d) パテの除去

写真-2 ひび割れ発生部への樹脂注入状況

表-5 補修材料特性値

材料名	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)
エポキシ樹脂	60 以上	30 以上

ケッチの後、ひび割れ幅が 0.2 mm 以上開口している部分を中心に、ひび割れスケッチ用に RC 梁表面に塗布したポスターカラーを除去する（写真-2a）；2) 0.2 mm 以上開口しているひび割れ部を対象として、エポキシ樹脂が表面に漏れないようにするためにパテを用いて密封する（写真-2b）；3) 注入針を介してエポキシ樹脂をひび割れ部に注入する（写真-2c）；4) エポキシ樹脂がひび割れ部に十分浸透し、かつ固化したことを確認の後パテを除去し、ひび割れスケッチ用のポスターカラーを塗布する（写真-2d）。以上により、補修の一連の作業を終了している。表-5 には、補修に用いた材料の物性値を示している。

3. 実験結果および考察

3.1 1 次載荷後の静的耐荷性状

図-2 には、各衝突速度による重錘落下衝撃実験（1 次載荷）後において、補修を施した場合（以後、補修有り）と施さない場合（以後、補修無し）における静的荷重－載荷点変位（以後、変位）曲線を静的処女載荷実験結果と比較して示している。なお、静載荷実験では、いずれの試験体においても最大変位が 90 mm 程度に達した時点で除荷することとしている。

図-2(a) より、I4S 試験体の場合には、主鉄筋降伏後の荷重－変位曲線が処女載荷時、補修無し、補修有り試験体の順に大きいことより、衝撃荷重載荷後の耐荷力は処女載荷時より大きく、かつ補修有りの場合が補修無しの場合よりも大きいことが分かる。これは、1 次載荷後の静載荷の場合には、1 次載荷時の除荷経路を経由して載荷されることにより、主鉄筋の歪硬化による効果等によって処女載荷時に比較して見かけ上耐力が向上するためと判断される。補修の有無による差は補修を施すことによってコンクリートや主鉄筋とコンクリート間の付着等の健全度が回復したことによるものと推察される。また、初期の剛性勾配は補修無しの場合が小さく、補修有りと処女載荷時の場合が類似している。これより、1 次載荷時の衝突速度が小さく損傷の程度が小さい場合における RC 梁の健全性は、ひび割れの補修によってある程度回復することが明らかになった。

図-2(b) より、I5S 試験体の場合には 1 次載荷後の補修の有無にかかわらず類似した荷重－変位曲線を示している。すなわち、補修を施した後においても梁の健全性は回復傾向を示さず、補修無しの場合と同様の結

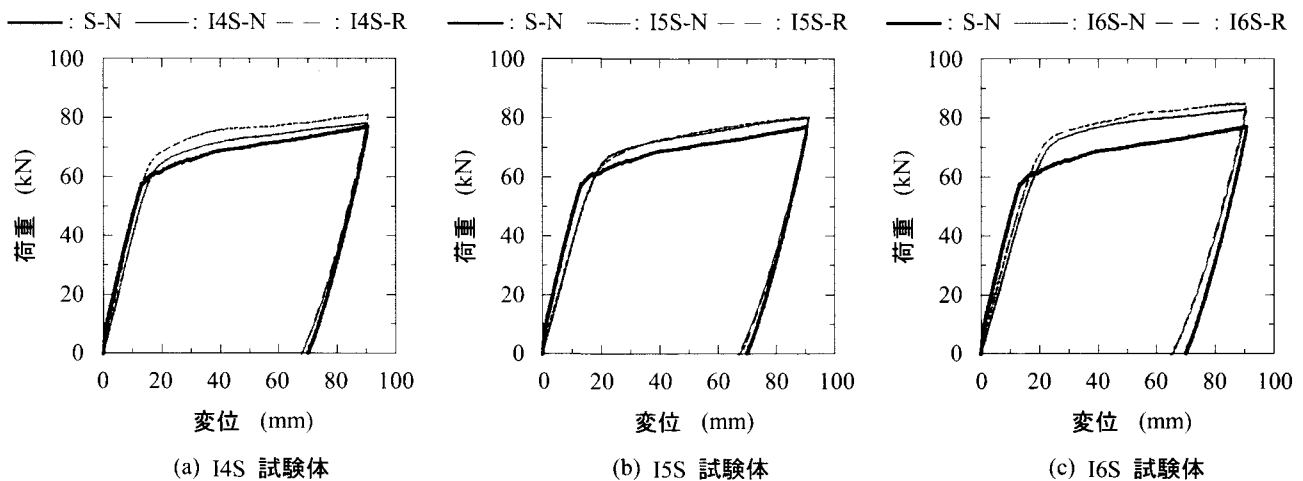


図-2 補修の有無による1次載荷後の静載荷時における荷重－変位曲線の比較図

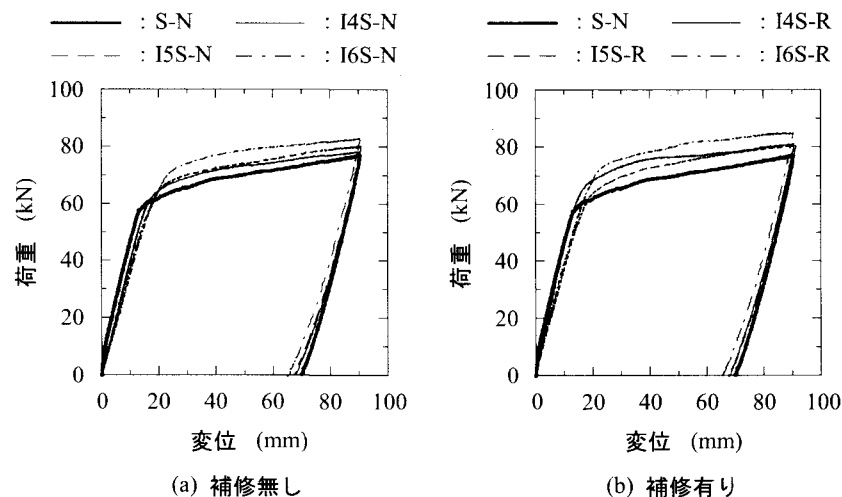


図-3 衝突速度が異なる場合の1次載荷後の静載荷時における荷重－変位曲線の比較（処女載荷との比較）

果を示している。このような傾向は、後述の 図-2(c) の I6S 試験体に関する結果においても示されている。

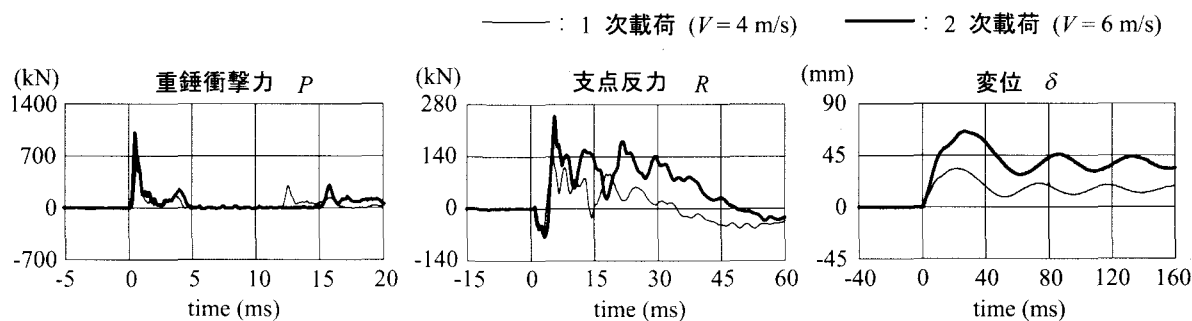
これより、1次載荷による損傷の程度が大きい場合には、0.2 mm 以上の開口ひび割れを対象とする補修のみでは健全性が十分に回復されないものと推察される。しかしながら、耐荷荷重はいずれのケースにおいても処女載荷時に比較して大きいことより、1次載荷に限定する場合には、ひび割れ補修の有無にかかわらず終局に至る程度の衝撃荷重載荷後においても十分な残存耐力を有していることが明らかになった。ただし、1次載荷において既に I4S, I5S, I6S でそれぞれ 15.2 mm, 26.0 mm, 38.5 mm 前後の残留変位が発生していることより、累積残留変位が大きくなることは勿論である。

図-3 には、補修の有無に分けて整理した場合の各荷重－変位曲線を処女載荷時の結果と比較して示している。図-3(a) の補修無しの場合における結果より、

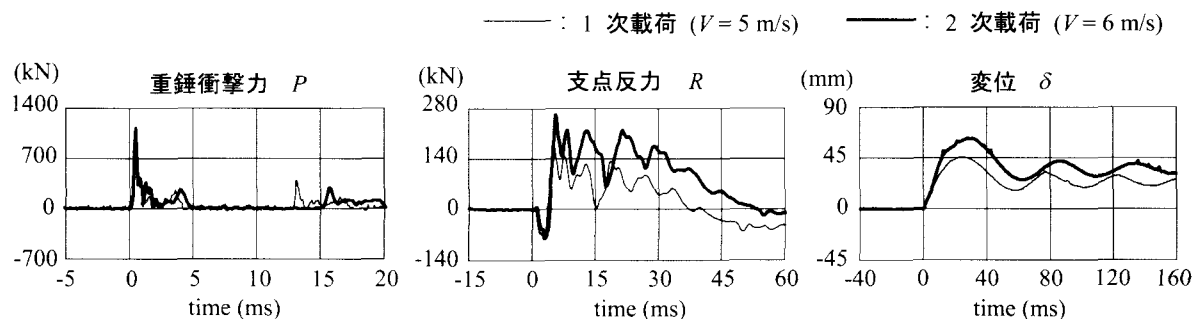
1次載荷後の耐荷性状は若干なりとも衝突速度の大きさに対応して改善されていることが分かる。また、処女載荷時の耐荷性状は最も劣っている。

一方、図-3(b) の補修有りの場合における結果より、I4S 試験体の場合には前述のとおり補修を施すことによって、第1剛性勾配が処女載荷時と同程度に回復していることが分かる。その後、主鉄筋の塑性化が進行する第2剛性勾配の領域では、初期には I6S 試験体の耐荷荷重が最も大きく、I4S, I5S 試験体の順に低下している。しかしながら、変位が 60 mm 程度以上になると、I4S と I5S 試験体の耐荷性状は類似して来る。

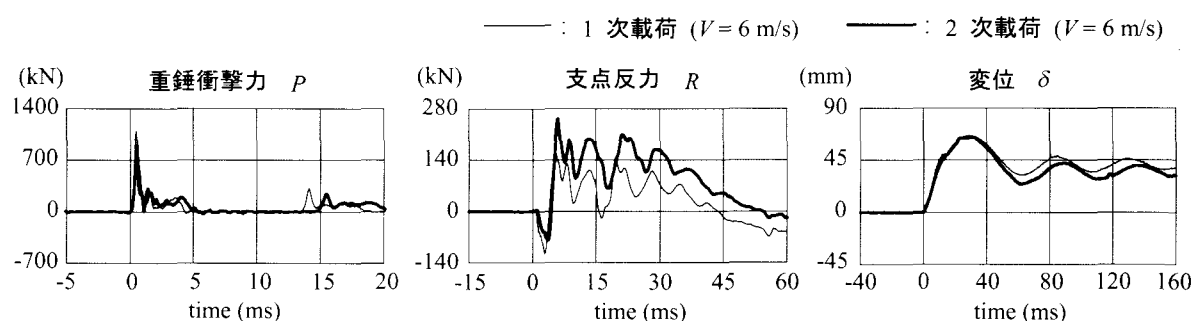
以上より、耐荷力のみに限定すれば、1次載荷によって損傷を受けた RC 梁の耐荷力は処女載荷時よりも向上することが明らかになった。これは、1次載荷によって主鉄筋が塑性化するため、再載荷時には主鉄筋の歪硬化によってあたかも降伏点が上昇したかのよう



(a) I4I-N 試験体



(b) I5I-N 試験体



(c) I6I-N 試験体

図-4 各種応答波形 (補修無しの場合における載荷履歴の影響)

表-6 最大応答値の一覧 (補修無しの場合における載荷履歴の影響)

試験体名	載荷	衝突速度 V (m/s)	最大重錘衝撃力 P_{ud} (kN)	最大支点反力 R_{ud} (kN)	最大変位 δ_{max}
I4I-N	1 次載荷	4	748.3	161.1	33.92
	2 次載荷	6	1012.8	267.0	65.89
I5I-N	1 次載荷	5	996.7	201.0	45.74
	2 次載荷	6	1126.0	270.7	62.40
I6I-N	1 次載荷	6	1097.3	182.6	66.13
	2 次載荷	6	897.5	266.7	64.89

に挙動するためと推察される。なお、ひび割れ開口部を補修することによる耐力向上効果は損傷の程度が小さい場合には多少期待できるものの顕著には期待できないことが明らかになった。

3.2 1 次, 2 次載荷時の応答波形の推移状況

(1) 補修無しの場合

図-4 には、補修を施さない InI-N 試験体に関する 1 次, 2 次載荷における各応答波形の推移状況を比較し

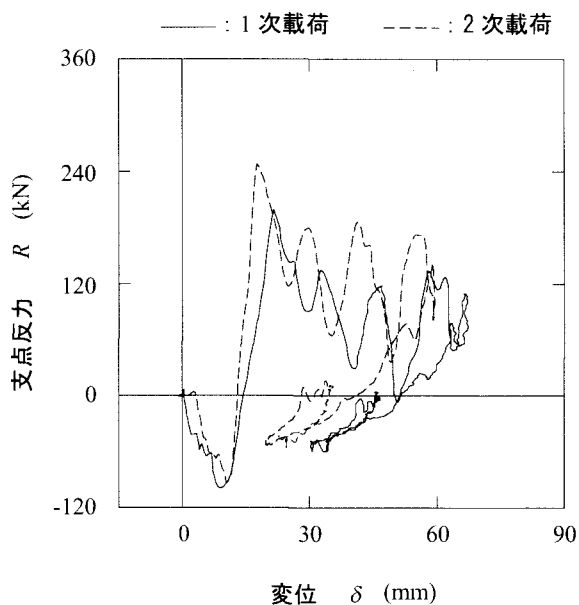


図-5 支点反力-変位曲線 (I6I-N 試験体)

で示している。また、表-6 には、その時の1次、2次
 载荷における各応答波形の最大値を一覧にして示して
 いる。図より、重錘衝撃力波形 P の第1主波動の立ち
 上がりに関しては、いずれの試験体も1次载荷と2次
 载荷で大差のないことが分かる。ただし、リバウンド
 によって15 ms 前後に出現する第2波目の波形は、1
 次载荷時には衝突速度が小さいほど早期に発生してい
 るが、2次载荷時には衝突速度の違いにかかわらずほ
 ぼ同一時間経過後に出現している。これは、2次载荷
 時の第1主波動発生時における損傷の程度が同程度で
 あることを示唆している。

一方、支点反力波形 R に関しては、2次载荷時に
 おける反力の増加傾向は1次载荷時の衝突速度に対応
 して多少差があるものの大略類似している。すなわち、
 初期の立上りから60 ms までの主波動全体が類似の
 波形性状を保持した状態で正の反力方向に推移してい
 る。推移の程度は、衝撃初期より30 ms 程度経過後の
 時点で比較すると、1次载荷時の衝突速度が最も小
 さいI4I-N 試験体で最も大きく、I6I-N 試験体で最も小
 さい。また、2次载荷時の分布波形は1次载荷時の衝
 突速度の大小にかかわらず大略類似している。これは、
 2次载荷時の衝撃エネルギーが終局に至る程度の場合
 には、载荷履歴にかかわらず大略類似の損傷状態に陥
 ることを示唆している。

変位波形 δ に関しては、支点反力波形と同様に1
 次载荷時の衝突速度が小さいほど2次载荷時の増加割
 合が大きく示されている。しかしながら、I6I-N 試験
 体の場合には、最大支点反力が2次载荷時に84 kN 程
 度増加しているのに対して、最大変位は1次载荷と2
 次载荷で同程度の値を示している。以下にこの現象につ

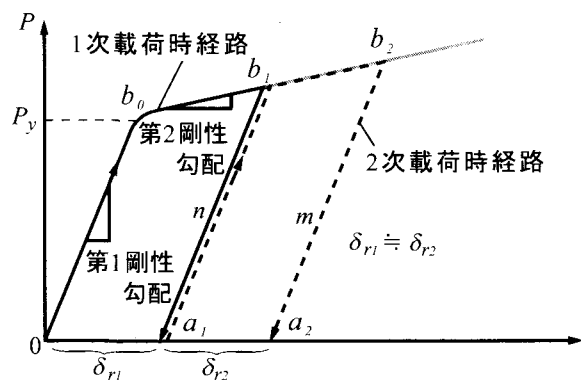


図-6 擬似静的荷重-変位関係の模式図

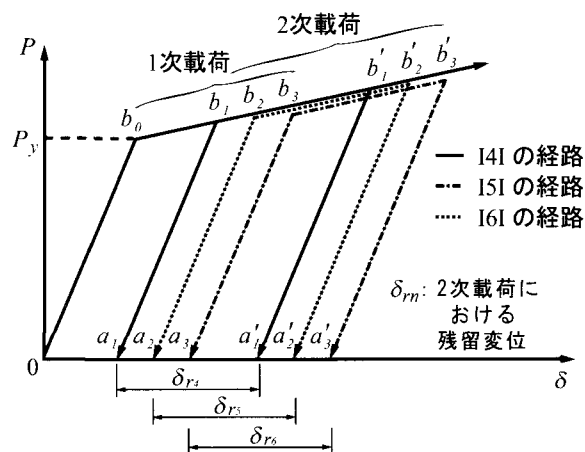
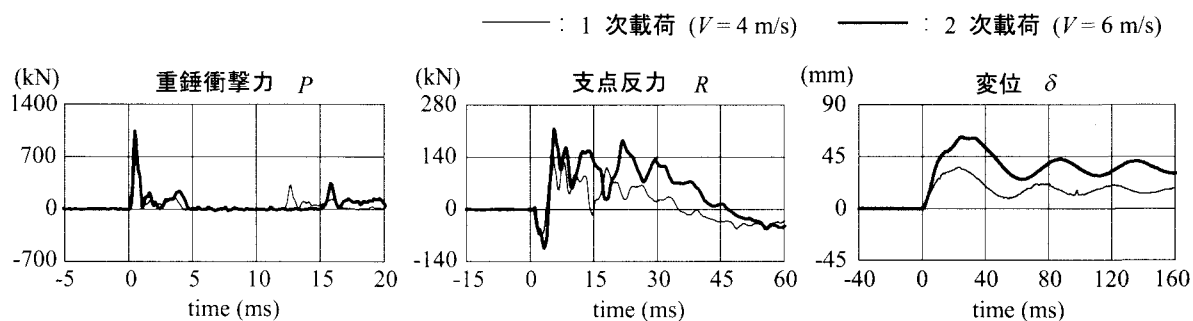


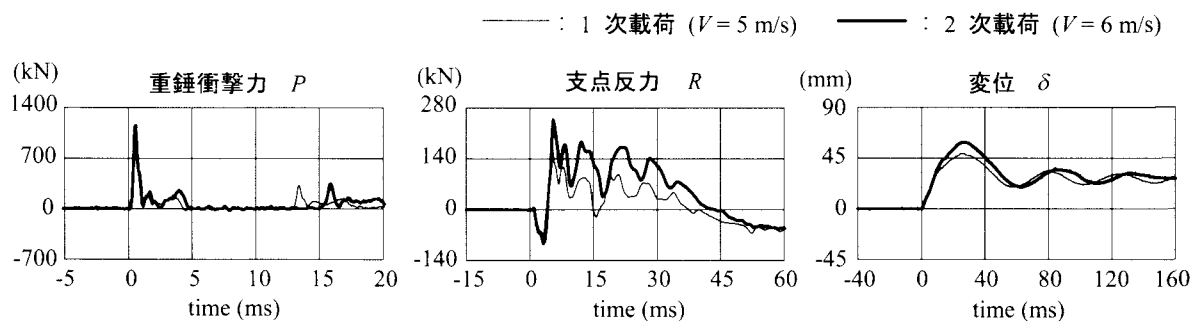
図-7 各試験体の1,2次载荷における擬似
 静的荷重-変位関係の模式図

て荷重-変位関係を用いて考察する。

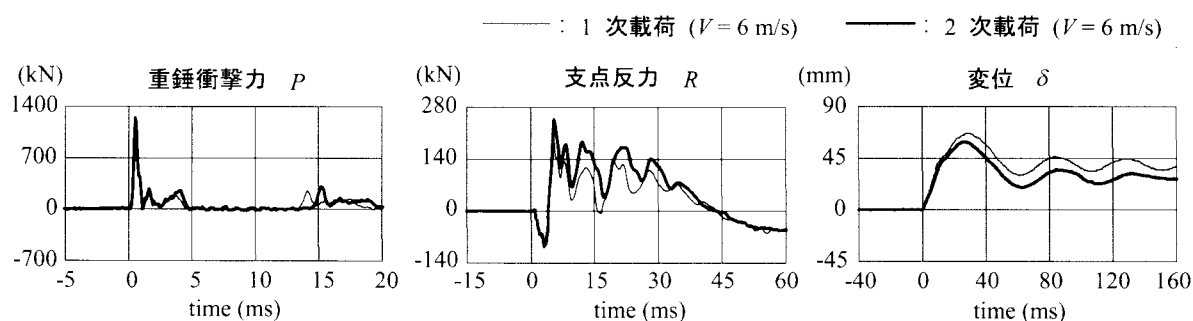
重錘衝撃力波形の主波動が変位零の状態
 で励起しているのに対して、支点反力波形と変位波形の低周波成分が
 大略類似している実験結果に基づき、荷重-変位
 関係評価の1つとして支点反力が静载荷時と同様に載
 荷荷重と等価であるものと仮定し支点反力-変位曲線
 を求めると、I6I-N 試験体の場合には 図-5 のよう
 に示される。図より、载荷初期に最大支点反力値を示す
 ものの変位の増加に対して除荷傾向を示していること
 が分かる。これは、支点反力に関する動的応答特性と
 しての高周波成分の振幅が大きく影響していること
 によるものである。従って、このような支点反力-変位
 曲線を模式的に用いて上述の現象を解明することは困
 難であるものと判断される。一方、変位波形が単調な
 低周波振動を呈していることから、擬似静的荷重-変位
 関係によって変位波形が生成されると仮定すれば、図-2、
 3 に示された荷重-変位曲線を用いた検討が可能とな
 る。すなわち、図-2、3 の静载荷時における荷重-変
 位曲線から類推すると、前述のI6I-N 試験体に関する
 1次载荷時の载荷荷重は、残留変位が生じていること



(a) I4I-R 試験体



(b) I5I-R 試験体



(c) I6I-R 試験体

図-8 各種応答波形 (補修有りの場合における載荷履歴の影響)

表-7 最大応答値の一覧 (補修有りの場合における載荷履歴の影響)

試験体名	載荷	衝突速度 V (m/s)	最大重錘衝撃力 P_{ud} (kN)	最大支点反力 R_{ud} (kN)	最大変位 δ_{max}
I4I-R	1 次載荷	4	809.5	176.5	35.85
	2 次載荷	6	1039.8	226.4	62.31
I5I-R	1 次載荷	5	1020.1	196.1	50.10
	2 次載荷	6	1153.9	221.5	62.72
I6I-R	1 次載荷	6	1125.9	208.1	67.27
	2 次載荷	6	1247.6	255.9	59.50

より、第 2 剛性勾配の領域において除荷しているものと
の考えられる。一方、2 次載荷時の載荷荷重は 1 次載
荷時における除荷経路を經由し、やがて第 2 剛性勾配
を有して増加するため、1 次載荷時よりも大きな値を

示すものと考えられる。この時の 2 次載荷時の 1 次載
荷後からの残留変位は 1 次載荷時と同程度として示さ
れる。

これを、図-6 に示した荷重-変位関係の模式図を

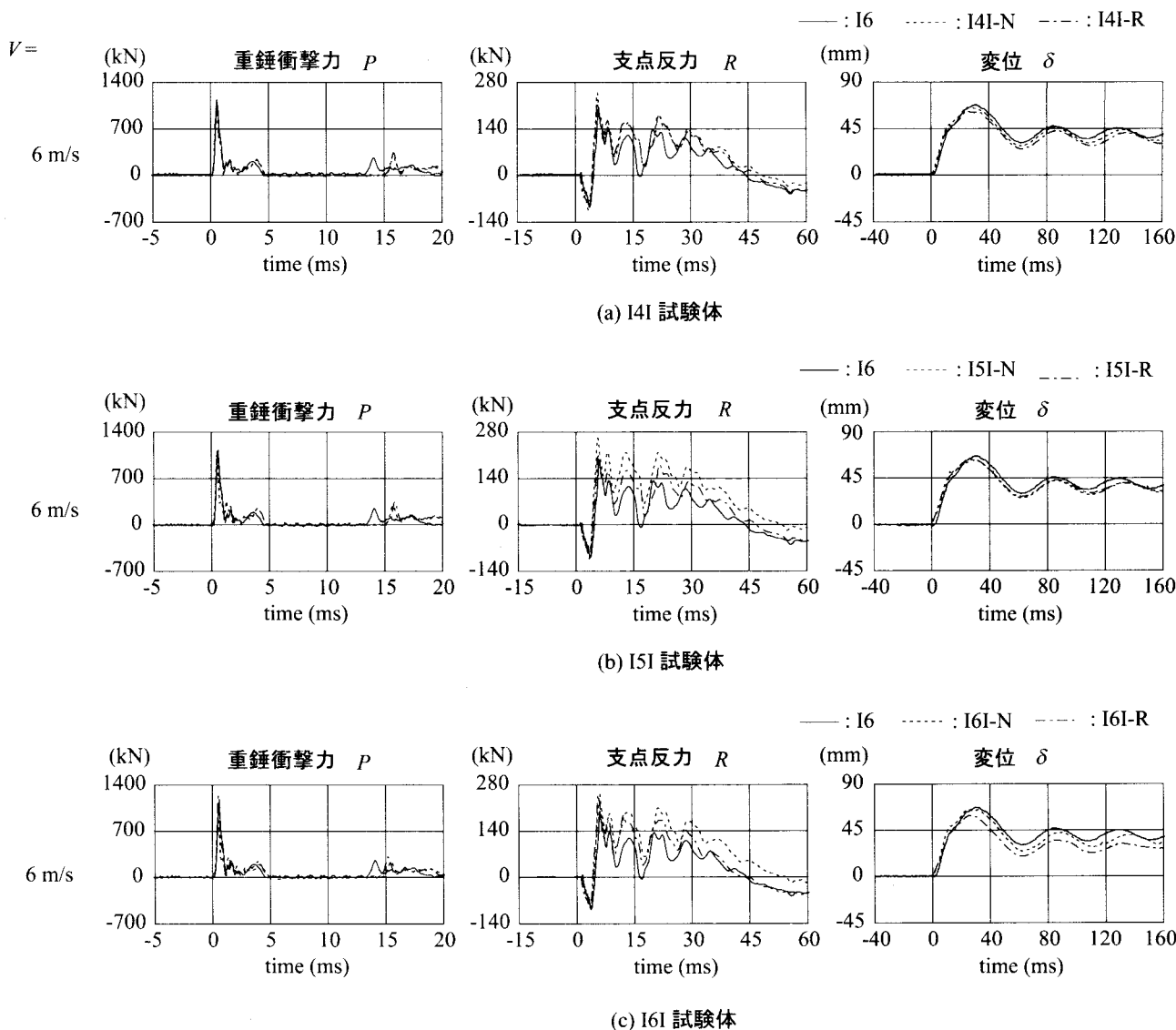


図-9 各種応答波形 (補修の有無の影響)

用いて説明すると、I6I-N 試験体の支点反力は、1 次載荷時には $0-b_0-b_1$ を經由して大略第 1 剛性勾配を有して除荷状態に至り a_1 点で静止する。また、2 次載荷時には、1 次載荷時の除荷経路である a_1-b_1 を經由して増加し、さらに第 2 剛性勾配を有して b_2 点まで増加し、その後除荷状態に陥り最終的に a_2 点で残留変位を生じ静止する。ここで 1 次載荷時の残留変位 δ_{r1} と 2 次載荷時の残留変位 δ_{r2} は大略等価となる。

また、I4I-N, I5I-N 試験体に関する変位波形分布においていずれの試験体の場合も 2 次載荷時の波形分布が類似の性状を示していることから、上述と同様にこれらの変位波形が擬似静的荷重載荷によって得られたものであると仮定すると、図-7 の模式図を用いて以下のように推察される。すなわち、I4I-N 試験体の場合には 1 次載荷時には a_1 点で静止状態に至る。その後、2 次載荷時には $a_1-b_1-b_1'$ を經由して除荷に至り a_1'

点で静止する。同様に、I5I-N 試験体の場合も 1 次載荷時には b_0-b_2 を經由して a_2 点で静止する。また 2 次載荷時には、 $a_2-b_2-b_2'$ を經由して除荷に至り a_2' 点で静止する。I6I-N 試験体の場合も同様に、1 次載荷時には b_0-b_3 を經由して a_3 点で静止する。さらに 2 次載荷時には、 $a_3-b_3-b_3'$ を經由して除荷に至り a_3' 点で静止する。なお、2 次載荷時の残留変位は 3 試験体で大略類似であることより、 $\delta_{r4}, \delta_{r5}, \delta_{r6}$ を I4I, I5I, I6I 試験体の 2 次載荷時における残留変位とすれば、 $\delta_{r4} \simeq \delta_{r5} \simeq \delta_{r6}$ になるものと推察される。

(2) 補修有りの場合

図-8 には、2 次載荷時の前に開口ひび割れ部にエポキシ樹脂注入を施して補修を行う場合において、図-4 と同様に繰り返し載荷による各応答波形の推移状況を比較して示している。また、表-7 には、その時の 1 次、2 次載荷における各応答波形の最大値を一覧にし

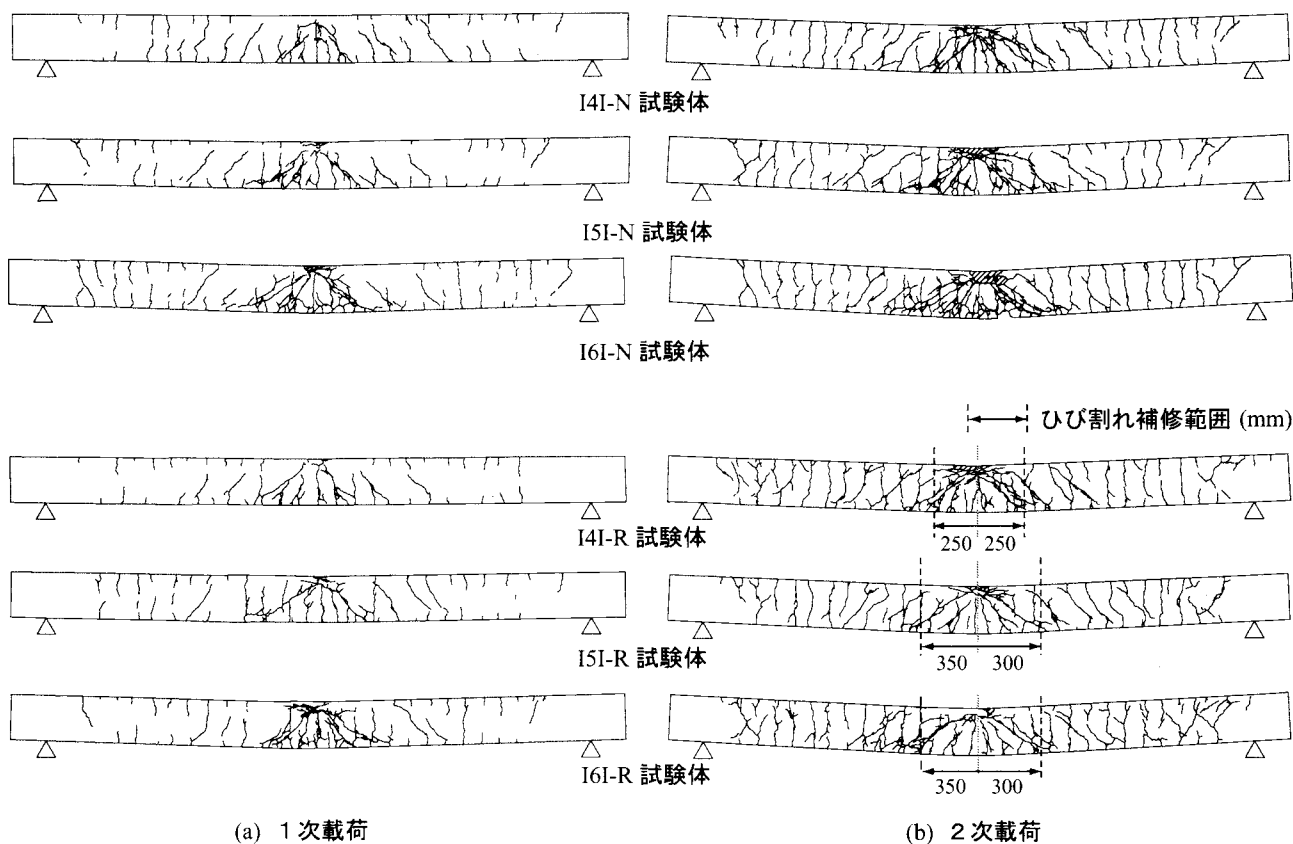


図-10 ひび割れ分布性状

て示している。重錘衝撃力波形 P に関しては、いずれの試験体においても2次載荷時の最大重錘衝撃力が1次載荷時よりも大きく、かつ3試験体で同程度の値となっている。

支点反力波形 R に関しては、補修無しの場合と同様に2次載荷時に振幅がほぼ直流成分的に増加する傾向を示している。変位波形 δ に関しては、I4I/I5I-R試験体の場合に2次載荷時の応答値が減少傾向にあるものの、2次載荷時の応答値は1次載荷時よりも大きく図-4の補修無しの場合と類似の応答性状を示している。しかしながら、I6I-R試験体の場合には、除荷後の自由振動状態における固有振動周期が同程度であるものの2次載荷時における応答波形は1次載荷時よりも小さい。これは、1次載荷終了後における試験体移動時に残留変位が多少回復し、その状態でエポキシ樹脂注入が行われたこと等によるものと推察される。

(3) 補修の有無の影響

図-9には、各RC梁の2次載荷時の各応答波形に関する補修の有無およびI6試験体に関する各応答波形との比較を1次載荷時の衝突速度毎に示している。

図より、重錘衝撃力波形 P に関する比較図を見ると、各試験体の波形性状は補修の有無にかかわらず良く一致しており、かつそれらはI6試験体に関する波形ともほぼ対応している。すなわち、衝撃初期に継続時間が

短く振幅の大きい正弦半波(第1波)と後続の継続時間の比較的長く振幅の小さい正弦半波(第2波)から構成されている。これより、補修の有無の重錘衝撃力波形への影響や繰返し載荷の影響は小さいことが明らかとなった。

支点反力波形 R に関する比較図を見ると、各試験体で波動の振幅や継続時間は多少異なるものの、波形性状は大略類似していることがわかる。すなわち、約8ms経過後に最大値を示し、その後主波動は40~50ms程度の正弦半波状の分布を示していることが分かる。詳細に見ると、I4I-R/N試験体に関してはほぼ同様の波形を示していることより補修の影響は小さいことが推察される。しかしながら、I5I, I6I試験体では、最大値を示した後の振幅や継続時間が-N試験体に比べて-R試験体で若干小さく示されている。一方、I6I-R/N試験体の支点反力波形を $V = 6 \text{ m/s}$ の処女載荷であるI6試験体に関する波形と比較すると、I6試験体の振幅が若干小さいことが分かる。これは、繰返し載荷の場合には、載荷点部がより平滑化され、衝撃力が若干大きくなることによるものと推察される。

変位波形 δ に関する比較図を見ると、補修の有無にかかわらずほぼ同様の波形性状を示していることが分かる。すなわち、変位波形 δ は重錘衝撃力波形、支点反力のような高周波成分は見られず正弦波状の分布を

示していることが分かる。詳細に見ると、いずれの場合も I6 試験体の振幅が若干大きく示されているものの、波形の固有振動周期は変化していない。このことは、2 回以内の繰り返し载荷に限定して考えると、補修の有無にかかわらず、また単一载荷、繰り返し载荷にかかわらず擬似静的には同程度の曲げ剛性が確保されていることを示しているものと推察される。また、逆に曲げ剛性に関しては、補修による回復は期待できないことが分かる。

3.3 ひび割れ分布性状

図-10 には、各試験体の衝撃実験終了後のひび割れ分布性状を示している。また、各試験体における 1 次载荷におけるひび割れ分布性状もあわせて示している。

(1) 補修の有無の影響

ひび割れ分布性状は、各試験体ともにスパン全域にわたって梁の上下縁から真っ直ぐに進展する曲げひび割れや、载荷点部近傍から梁下縁に約 45° の角度で進展する斜めひび割れが確認できる。なお、上縁から曲げひび割れが進展するのは、衝撃初期に曲げの主波動が支点に向かって伝播する場合において、波動先端部が固定端と類似の変形状態になることによるものと考えられる。

まず、補修の有無によるひび割れ分布性状の差異について検討すると、I4I-R/N 試験体では補修の有無によらずほぼ同様のひび割れ分布性状を示していることより、1 次载荷時の衝突速度が小さく損傷が小さい段階ではひび割れ発生に関する補修による効果の小さいことが分かる。I5I-N 試験体では、载荷点部にひび割れが集中しているのに対し、I5I-R 試験体では、分散して発生していることが分かる。これにより、補修を施すことにより 2 次载荷時にはひび割れが分散する傾向のあることが分かる。さらに、I6I 試験体の場合には、-N 試験体の場合に载荷点部におけるコンクリートの剥落が見られるのに対して、-R 試験体では、そのような現象は現れていない。

以上のことより、1 次载荷時の衝突速度が大きく衝撃エネルギーが大きい場合には、ひび割れ部に補修を施すことにより、ひび割れの分散効果やコンクリートの剥落防止効果を期待することができることが明らかになった。

(2) 補修効果の影響

まず、1 次载荷についてみると、衝突速度の増加とともにひび割れの本数が増大していることがわかる。しかし、補修後の試験体と比較すると、1 次载荷による損傷状態によらずほぼ同様のひび割れ分布性状を示していることが分かる。このことより、補修を行うことで衝突速度にかかわらず、1 次载荷による損傷をある程度まで回復することができることが推察される。

4. まとめ

本研究では、衝撃荷重载荷によって損傷を受けた RC 梁のひび割れ補修後の耐衝撃性を把握することを目的として、曲げ破壊型 RC 梁を用いて重錘落下衝撃実験を実施し、補修の有無の影響や補修効果に着目して検討を試みた。すなわち 1 次载荷として、設定した 3 ケースの衝突速度に関する重錘落下衝撃実験を実施した。その後、ひび割れ開口部にエポキシ樹脂を注入することによる耐衝撃性向上効果を検討するために、樹脂注入有無の場合に対する設定した終局衝突速度での 2 次载荷を行うものである。なお、1 次载荷後の樹脂注入前後における静的耐力向上効果を検討するための静载荷実験も行っている。本実験の範囲内で得られた結果を整理すると、以下のとおりである。

- 1) 1 次载荷後の静的耐力は処女载荷時よりも向上する。これは 1 次载荷によって主鉄筋が塑性化するため、再载荷時には主鉄筋の歪硬化によってあたかも降伏点が上昇したかのように挙動するためと推察される。
- 2) 1 次载荷後の静的耐力に関して、ひび割れ開口部を補修することによる耐力向上効果は損傷の程度が小さい場合には多少期待できるものの顕著なものではない。
- 3) 補修の有無によらず、各応答波形の周波数特性や応答振幅は同程度であり、初期の耐力力や曲げ剛性は確保されている。
- 4) 従って、各载荷時の残留変位は同程度であるが、累積残留変位が大きくなるのは勿論である。
- 5) ひび割れ部を補修することによって、ひび割れの分散効果やコンクリートの剥落防止効果が期待できる。

謝辞：本研究を行うにあたり、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澤田純之君、津田裕介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) 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、小林治俊 1998.11
- 2) 道路防災工調査設計要領（案）落石対策編、北海道開発局建設部道路建設課監修、2001.3
- 3) 落石対策便覧、社団法人 日本道路協会、2000.6
- 4) 岸 徳光、川瀬良司、今野久志、岡田慎哉：二層緩衝構造を用いた落石防護擁壁模型の重錘衝突実験と数値解析的検討、構造工学論文集、土木学会、Vol. 48A、2002.3、pp. 1567-1578
- 5) 川瀬 良司、岸 徳光、今野 久志：二層緩衝構造を設置した落石防護擁壁の転倒安定性評価法に関する一検討、構造工学論文集、土木学会、Vol.

50A, 2003.3, pp. 1327-1336

- 6) 川瀬良司, 岸 徳光, 今野久志, 池田憲二: C 製および RC 製落石防護擁壁の耐衝撃設計法の構築に関する一検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 25, No. 2, 2003.7, pp. 1129-1134
- 7) 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, 土木学会論文集, No. 647/I-51, 2000.4, pp. 177-190

8) 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.

- 9) 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考案, 土木学会論文集, No.647/I-51, pp.177-190, 2000.

(2004 年 9 月 17 日受付)