

# 合入力エネルギー一定下での実規模 RC 桁の繰り返し重錘落下衝撃実験

Consecutive falling-weight impact test of large-scale RC girders under specified total input-impact energy

岸 徳光\*, 今野 久志\*\*, 山口 悟\*\*\*, 三上 浩\*\*\*\*, 玉木 美帆\*\*\*\*\*

Norimitsu Kishi, Hisashi Konno, Satoru Yamaguchi, Hiroshi Mikami, Miho Tamaki

\* 工博 室蘭工業大学大学院 教授 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

\*\* 博 (工) 寒地土木研究所 総括主任研究員 寒地構造チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3)

\*\*\* 寒地土木研究所 研究員 寒地構造チーム (〒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)

\*\*\*\*\* 室蘭工業大学 工学研究科 博士前期課程 建築社会基盤系専攻 土木工学コース (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

In order to establish a performance-based impact resistant design procedure for reinforced concrete structures, consecutive falling-weight impact loading tests were conducted under specified total input-impact energy. In this experiment, the girders have rectangular cross section of 1 m width and depth, and 8 m clear-span length. A 2,000 kg steel weight was used and total input-impact energy was specified as 196 kJ. Three kinds of falling height of weight were set: 3.33 m; 5 m; and 10 m. From this study, following results were obtained: (1) maximum and residual deflections were almost constant values for each input-impact energy; (2) deflections after the final loading were almost the same among all girders; and (3) accumulated residual deflections were proportional to the accumulated input-impact energy and the damage of the girder for each limit state can be precisely evaluated by means of this relationship.

*Key Words* : RC girder, consecutive impact loading, input-impact energy,

maximum deflection, residual deflection, accumulated residual deflection

キーワード : RC 桁, 繰り返し衝撃載荷, 入力衝撃エネルギー, 最大たわみ, 残留たわみ, 累積残留たわみ

## 1. はじめに

現在, 我が国では落石防護施設構造物等, 耐衝撃用途鉄筋コンクリート構造物は, 許容応力度設計法に基づいて設計が行われている。一方, 構造物の設計法に関する世界の趨勢は許容応力度法から性能照査型設計法への移行にある。我が国においても, 国土交通省からは, 静的や動的等の荷重の種類に関わらず, 土木・建築構造物に対しては性能照査型設計法の考え方に基づいた設計への移行が望まれている。このような背景の下, 土木学会構造工学委員会では小委員会を設置して, 同設計法に基づいた耐衝撃設計法の確立に向けた検討<sup>1),2)</sup>を行っている。一般に, 性能照査型設計法の確立に当たっては, 各限界状態に対応した断面設計を可能にすることや, 与えられた断面に関する各限界状態下での適切な照査を可能にすることが要求される。従って, 直近の課題は, 使用限界状態や終局限界状態の規定およびそれらに対応した照査法を確立することである。

このような状況下, 著者らは基本構造部材である

RC 梁に着目して, スパン長, 断面寸法, 鉄筋比, 静的耐力の異なる小型 RC 梁に関する単一載荷重錘落下衝撃実験を実施し, 入力エネルギー, 残留変位, 静的曲げ耐力から構成される実験式を提案している<sup>3)</sup>。この実験式に従えば, 入力エネルギーと各限界状態に対応した残留変位値を規定することにより, 要求される静的曲げ耐力値が算定可能となり, 断面寸法および鉄筋量を決定することが可能となる。

さらに, 入力エネルギー一定下においても, 衝突体の質量の大きさによって RC 桁の最大応答変位や残留変位が異なることを示し, 桁と衝突体の質量比の影響を考慮した修正式も提案している<sup>4)</sup>。この提案によって, 単一載荷の場合に対しては, 小型～大型に至るまでの RC 桁に関する合理的な耐衝撃設計が可能になるものと判断される。

一方で, 実構造物の場合には載荷状態の如何に関わらず設定した各限界状態に対して設計を実施しなければならない。このことは, 単一載荷のみならず繰り返し載荷の状況が想定される場合には, 累積損傷や残存耐力の各限界状態に対する照査を実施しなければなら

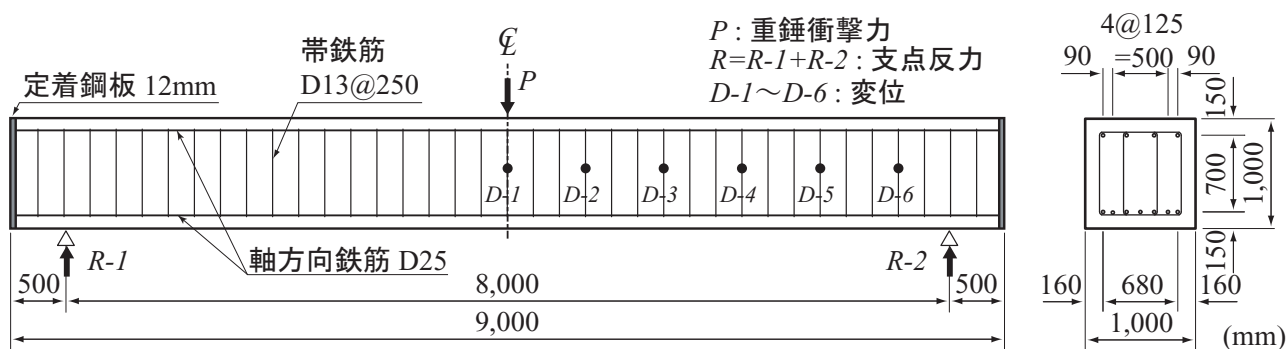


図-1 実験に用いた実規模 RC 桁の形状寸法および配筋状況

ないことを意味している。

繰り返し载荷時の累積損傷や残存耐力評価に関しては、玉井らによる RC 梁を対象とした鉄筋やコンクリートに累積損傷モデルを適用した研究<sup>5)</sup>や、白根ら<sup>6)</sup>、岩村ら<sup>7)</sup>、松林ら<sup>8)</sup>の防波構造物を想定した RC 部材に関する繰り返し衝撃荷重载荷実験に基づいた研究が挙げられる。

著者らも、一回の衝撃荷重载荷によって損傷を受けた RC 梁に対して、ひび割れ補修後の静的や動的な残存耐力評価に関する検討を行っている<sup>9)</sup>。その結果、静的耐力は鉄筋の塑性硬化によって処女载荷時よりも向上することや、補修の有無によらず初期の曲げ耐力や剛性は確保されること、累積残留たわみは大きくなるが各载荷時の残留たわみは処女载荷時と同程度であること等が明らかになっている。また、繰り返し衝撃荷重载荷時における動的挙動や累積損傷を数値解析的に評価可能にするために、小型 RC 梁を対象に数値解析を試み、実験結果と比較を行うことで提案手法の妥当性を検証している<sup>10)</sup>。さらに、実桁を対象に繰り返し衝撃荷重载荷時の数値解析を容易に実行可能にするために、著者らが提案しているエネルギー等価概念の適用性も検討している<sup>11)</sup>。

しかしながら、実桁を想定した繰り返し载荷時の実挙動性状に関する検討は行っていない。繰り返し载荷時の累積損傷や残存耐力も考慮した精度の高い性能照査型設計法を確立するためには、実証実験を実施して、単一载荷時と繰り返し载荷時における耐衝撃挙動の差異や、繰り返し载荷時における信頼性の高い数値解析手法を確立し、種々検討することが必須である。

このような観点から、本研究ではロックシェッド頂版部の耐衝撃設計を想定して、頂版厚を桁高、道路軸方向単位幅を桁幅、道路幅をスパン長とする実規模 RC 桁に関する繰り返し重錘落下衝撃実験を実施した。本実験では、敷砂緩衝材を設置しない状態で、合計の入力エネルギーを固定し、一回の入力エネルギーと繰り返し载荷回数を変化させた場合における最大たわみ、残留たわみ、累積残留たわみや累積損傷について実証的に検討を行った。以下にその概要と実験結果

表-1 静的設計値

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
$p_t$	$a/d$	$P_{usc}(\text{kN})$	$V_{usc}(\text{kN})$	$\alpha$
0.0042	4.71	600	1,369	2.28

表-2 コンクリートの力学的特性値

材 齢 (日)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比 $\nu_c$
29	26.2	16.3	0.203

表-3 鉄筋の力学的特性値一覧

鉄筋名称	鋼 種	降伏強度 $\sigma_y$ (MPa)	弾性係数 $E_s$ (GPa)	ポアソン比 $\nu_s$
D13	SD345	389	206	0.3
D25	SD345	400	206	0.3

について報告する。

## 2. 実規模 RC 桁を用いた重錘落下衝撃実験の概要

### 2.1 試験体の概要

本研究では、前述のように実規模構造物として RC 製ロックシェッドを取り上げ、その頂版に関する設計断面を対象として実験を行うこととした。すなわち、断面は、桁高を実ロックシェッドの頂版厚として多く採用されている 1 m、桁幅を単位の道路軸方向長さである 1 m とする矩形断面とし、純スパン長を実ロックシェッドの道路軸直角方向の幅と同程度である 8 m とした。

図-1 には、RC 桁の形状寸法と配筋状況図および各応答波形の測定番号を示している。軸方向鉄筋およびかぶり厚に関しては、比較的小さい落石荷重を想定した実ロックシェッドに対応させて、主鉄筋比を 0.42% とし、D25 を 7 本配置している。また圧縮側の軸方向鉄筋量は主鉄筋量の 50% を目安に D25 を 4 本配置した。なお、コンクリートのかぶり厚は実ロック

表-4 実験ケースの一覧

試験体名称	重錘落下高さ H (m)	重錘落下回数	合入力エネルギー E (kJ)
G1	3.33	3	196
G2	5.0	2	196
G3	10.0	1	196

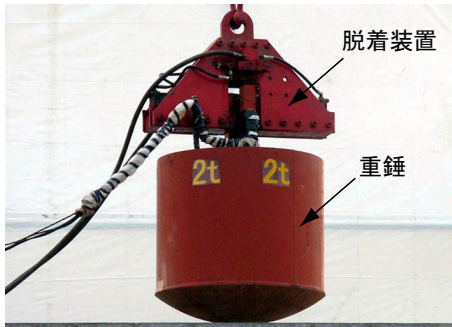


写真-1 重錘および重錘脱着装置

シェッドと同様に 150 mm としている。また、帯鉄筋は桁の有効高さの 1/2 以下となるように D13 を 250 mm 間隔に配置することとした。なお、曲げ破壊先行型とするために、図-1 に示すように中間帯鉄筋を配置してせん断耐力を大きくしている。その結果、計算せん断余裕度  $\alpha = 2.28$  となっている。また、軸方向鉄筋の定着は、定着長を節約するために桁端面に厚さ 12 mm の鉄板を配置してそれに溶接定着することとした。

測定項目は、後述のように重錘衝撃力を  $P$ 、両支点反力の合計を  $R$ 、スパンセンターの鉛直方向変位(以後、たわみ)を  $D-1$  とし、支点方向に向って 750 mm ピッチに  $D-2 \sim D-6$  としている。

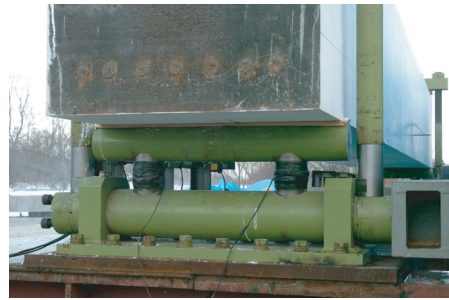
表-1 には RC 桁の静的設計値の一覧を示している。表中、静的曲げ耐力  $P_{usc}$  および静的せん断耐力  $V_{usc}$  はコンクリート標準示方書<sup>12)</sup>(以後、示方書)に基づいて算定している。試験体のせん断余裕度が  $\alpha (= V_{usc}/P_{usc}) > 1.0$  であることより、静载荷時には設計的に曲げ破壊型で終局に至ることが想定される。

表-2, 3 には、実験時におけるコンクリートおよび鉄筋の力学的特性値を示している。

試験体は 3 体製作し、合計の入力衝撃エネルギーが等しくなるように繰り返し载荷実験を行った場合において、最終の応答性状や、損傷状況について検討を行うこととした。

## 2.2 実験方法

本実験では、2,000 kg 重錘をトラッククレーンを用いて所定の高さまで吊り上げ、脱着装置を用いて RC 桁のスパン中央部に自由落下させることにより行って



(a) 支点反力測定用ロードセル付き支点治具



(b) 支点部跳ね上がり防止用押さえ金具

写真-2 支点治具

いる。なお、重錘は、写真-1 に示すような直径 1 m、高さ 97 cm で底部が半径 80 cm の球状である鋼製円筒の内部に鋼塊とコンクリートを充填して質量を調整している。

RC 桁は写真-2(a) に示すような支点反力測定用ロードセル付きの支点治具上に設置し、かつ重錘落下衝突時における桁端部の跳ね上がりを防止するために、写真-2(b) に示すような 50 mm の鋼棒と鋼梁からなる跳ね上がり防止用治具を用いて固定している。なお、跳ね上がり防止用治具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。従って、支点部の境界条件はピン支持に近い状態となっているものと推察される。

実験は、表-4 に示しているように、重錘落下衝撃エネルギーの合計が等しく 196 kJ となるように、G1 桁は落下高さを 3.33 m とする 3 回の繰り返し载荷、G2 桁は落下高さを 5 m とする 2 回の繰り返し载荷、G3 桁は落下高さを 10 m とする単一载荷を行うことにより実施した。各実験ケースは、桁の呼称に重錘の落下高さの概略(m)と落下回数をハイフンで結んで整理することとした。

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)、および軸方向各点の変位  $D-i$  ( $i = 1 \sim 6$ ) の各応答波形である。これらの測定において、重錘衝撃力に関しては、重錘頂部に設置した応答周波数特性が 1 kHz 以上で容量が 1,000 G のひずみゲージ型加速度計から得られる減速度に重錘質量を乗じて評価している。また、支点反力は、支点治具

に取り付けた周波数特性が 1 kHz 以上、容量が 1,500 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。各点の変位測定には、周波数特性が 915 Hz、最大ストロークが 200 mm の非接触式レーザ変位計を用いている。

なお、繰り返し载荷の場合には、各载荷時に残留たわみが生じる。しかしながら、本実験では各载荷時の計測変位ストロークを確保するためにセンサーを適宜移動させることより、各载荷実験毎に計測器の零バランスを取って測定している。そのため、本論文では、各载荷時に発生した分の残留たわみを単に「残留たわみ」とし、処女载荷時から考えている時点までの累積した残留たわみを、「累積残留たわみ」と定義する。従って、「まえがき」で記述している各残留たわみも、この定義に従うものとする。

各センサーからの出力波形は、加速度計およびロードセルはひずみゲージタイプであることより直流増幅器を、またレーザ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、サンプリングタイプ 0.1 ms でデジタルデータレコーダにて一括収録を行っている。なお、重錘衝撃力波形に関しては、ノイズを含んだ高周波成分を除去するため、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、各実験終了後には载荷部、桁側面に生じたひび割れ分布やかぶりコンクリートの剥離・剥落状況に関する記録写真を撮っている。さらに、桁側面や上面に生じたひび割れ分布もスケッチしている。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 各応答波形

図-2には、全桁に関する実験結果の重錘衝撃力、支点反力、たわみの各波形を比較して示している。図中、継続時間は、重錘衝突時を基準にして整理している。また、各波形とも、静载荷時の値を正として整理している。

図-2(a)には、衝突初期から 25 ms 間の重錘衝撃力波形を示している。図より、荷重継続時間および波形分布形状は、重錘落下高さや载荷の繰り返し回数に依存せずに、ほぼ 5 ms 程度でかつ 2 等辺三角形形状の分布を示していることが分かる。最大衝撃力に関しては、 $H = 10$  m 落下の場合である G3-10-1 の場合には 12 MN 程度を示しているが、G2 桁の場合には 2 次载荷の場合が 1 次载荷の場合より小さい値を示しており、繰り返し载荷による累積損傷の影響の可能性が示唆される。しかしながら、G1 桁の場合には 3 次载荷時に小さい値を示しているものの、2 次载荷時には 1 次载荷時よりも大きな値を示している。これは、各载荷時の入力エネルギーが小さいことにより、重錘衝突点位置が多少ずれたことの影響が大きく現れたことに

よるものと推察される。なお、3 次载荷時には、G2 桁の 2 次载荷時よりも若干小さな値を示しており、桁全体としては繰り返し载荷による累積損傷の影響が現れているものと判断される。

図-2(b)には、支点反力波形を示している。図より、いずれの場合も、主波動は正弦半波と高周波成分から構成されていることが分かる。また、主波動継続時間を調べると、落下高さが高い場合がより長く、かつ繰り返し载荷回数の増加と共に延びる傾向にあることが分かる。

最大支点反力値に着目すると、落下高さが  $H = 5$  m と 10 m の場合(G2/3 桁)には、繰り返し载荷回数に関わらず同程度の値を示している。一方、落下高さが  $H = 3.3$  m の場合(G1 桁)には、前者よりも若干小さくなる傾向を示しているが、繰り返し载荷回数による顕著な影響は見られない。これより、本実験で出現している最大支点反力は、重錘落下衝突後約 20 ms 経過後に発生しているものの、それが支点反力波形の第 1 波目に発生していることやその振動成分が高周波であることから、繰り返し载荷や入力エネルギー量による損傷程度に直接大きく影響されない、桁と支点治具間の局所的な相互作用等により発生したものであると推察される。

また、除荷後にはいずれの桁も減衰自由振動状態に移行している。なお、各桁において負反力が生じているのは、桁が自由振動により上方に変形したことを示している。ただし、負载荷状態の支点反力は、桁の跳ね上がりを防ぐために鋼梁を介して桁を締め付けた分の値までが測定可能となっている。

図-2(c)には、各桁の全たわみ波形を示している。図中、落下高さが  $H = 5$  m の場合の 2 次载荷時(G2-5-2)における D-1 点の波形は、かぶりコンクリート塊が変位計を直撃したことにより測定不能になっている。また、前述のとおり、繰り返し载荷時における累積分のたわみは考慮されていない。

図より、各たわみ波形の振幅は、重錘落下高さに対応して増加傾向にあることが分かる。G1/2 桁における繰り返し载荷時の応答を見ると、その振幅は繰り返し载荷回数の増加に対応して若干ではあるが増加傾向にあり、損傷の影響が現れていることが分かる。除荷後の自由振動状態における振動周期を調べると、処女载荷時の場合には、重錘の落下高さに対応して周期も延びており、入力エネルギーの増加によって損傷の程度も大きくなっていることが分かる。

一方、繰り返し载荷回数による影響を調べると、前述の入力エネルギーと同様に载荷回数の増加に対応して周期も延びていることが分かる。また、合計の入力エネルギーが等しい G1-3.3-3、G2-5-2、G3-10-1 の場合における振動周期を比較すると、G3-10-1 の周期が他よりも若干長い傾向にあるが、3 ケースとも大略類似

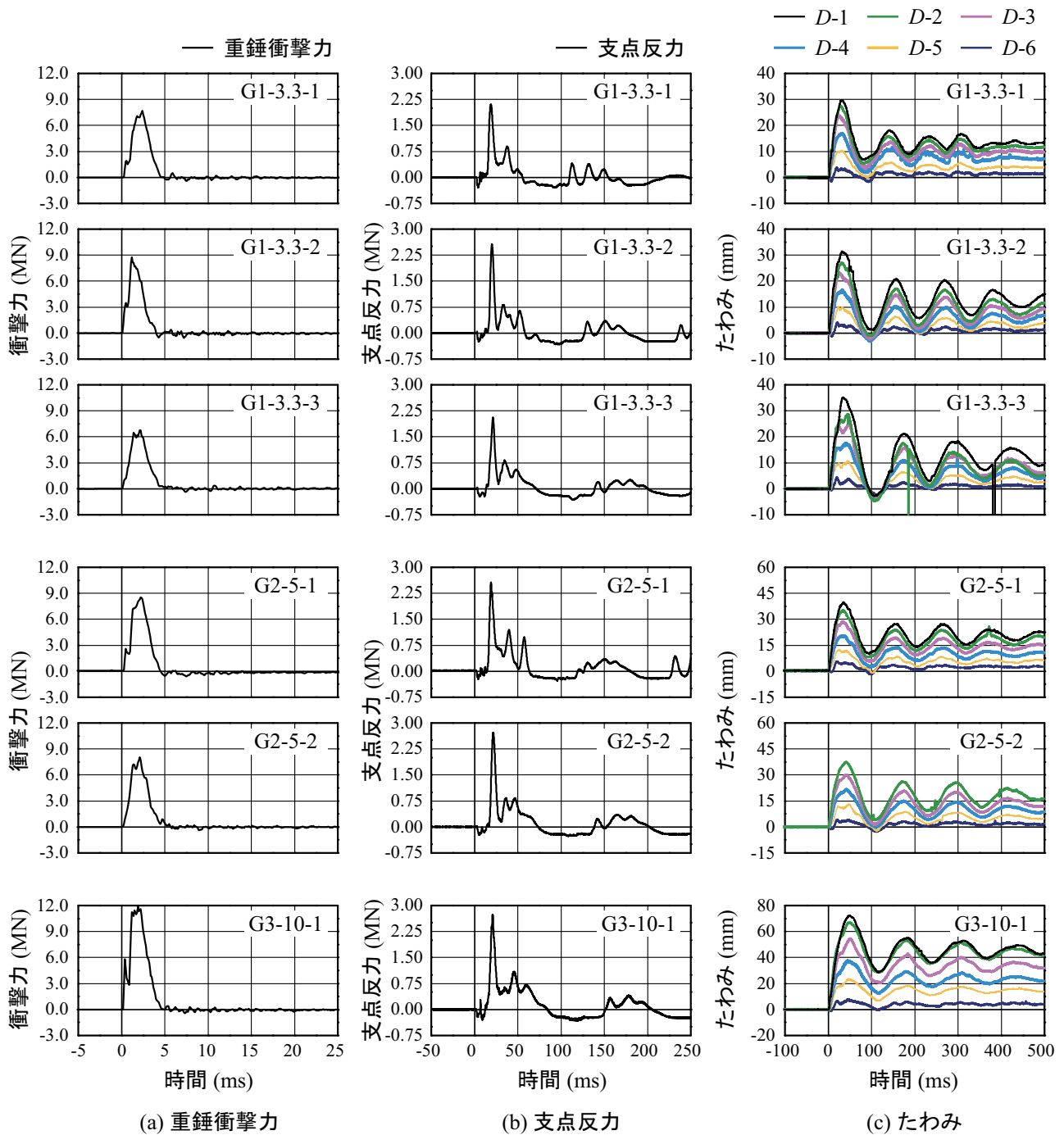


図-2 重錘衝撃力，支点反力，たわみの時刻歴波形に関する比較図

していることが分かる。このことは、入力エネルギーの合計が等しい場合には、桁の損傷は同程度であることを示唆している。

### 3.2 桁側面におけるひび割れ分布

図-3には、各実験終了後の桁側面におけるひび割れ分布を示している。図より、重錘落下高さが $H = 3.33\text{ m}$  (G1桁)の場合には、1次荷重時にはスパン方向に広く曲げひび割れが分布している。その後、2次、3次荷重時には荷重点近傍下縁部の斜めひび割れと上縁

かぶりに圧壊を示す水平ひび割れの進展が見られる程度で、その他の新たなひび割れは桁右側に発生している1本の曲げひび割れ以外見あたらない。これは、繰り返し荷重時には、既存のひび割れ部が繰り返し落下回数に対応して広く開口し、曲げ圧壊型で破壊する傾向にあることを暗示している。

重錘落下高さが $H = 5\text{ m}$  (G2桁)の場合には、重錘の落下高さが $H = 3.33\text{ m}$ であるG1桁の場合より曲げひび割れの本数は少ないものの、荷重点近傍部における斜めひび割れが顕在化していることが分かる。2次

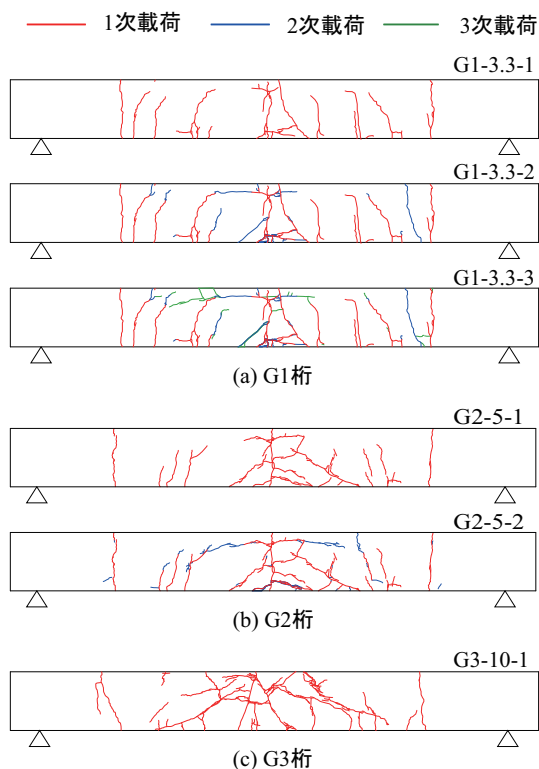


図-3 桁側面におけるひび割れ分布図

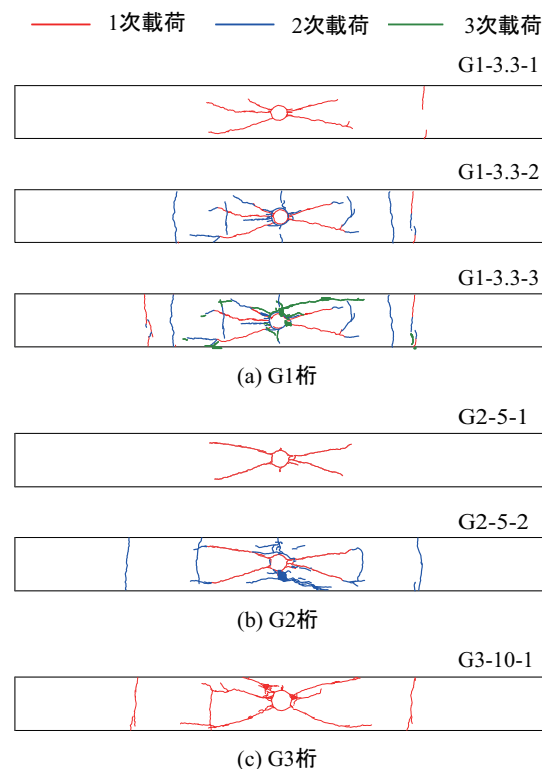


図-4 桁上面におけるひび割れ分布図

載荷時には載荷点近傍上縁部に生じていた水平方向のひび割れが大きく進展している以外は、顕著な変化は見られない。これは、重錘落下高さが  $H = 3.33 \text{ m}$  の場合と同様に、2次載荷時においても1次載荷時に発生したひび割れが単に大きく開口することによって衝撃荷重に抵抗し、曲げ圧壊型の傾向にあることを示唆している。

重錘落下高さが  $H = 10 \text{ m}$  (G3 桁) の場合には、載荷点部に広角の斜めひび割れと上縁から下方に伸びるひび割れが発生しており、落下高さが低い G1 桁や G2 桁の場合のような曲げひび割れの進展は見られない。従って、合計の入力エネルギーが等しい場合においても、処女載荷時における入力エネルギーの大きさに対応してひび割れ分布性状も異なってくるものと判断される。

これより、(1) 処女載荷時の入力エネルギーが小さい場合には曲げひび割れが卓越し、入力エネルギーの増加に対応して斜めひび割れの発生が顕在化してくることや、(2) 繰り返し載荷の場合には、新たなひび割れの発生は少なくかつ既存ひび割れが載荷回数に対応して大きく開口して、衝撃荷重に抵抗することが明らかになった。従って、合計の入力エネルギーが等しい場合においても、処女載荷時の入力エネルギーの大きさに対応して、ひび割れ分布性状も異なってくるものと判断される。

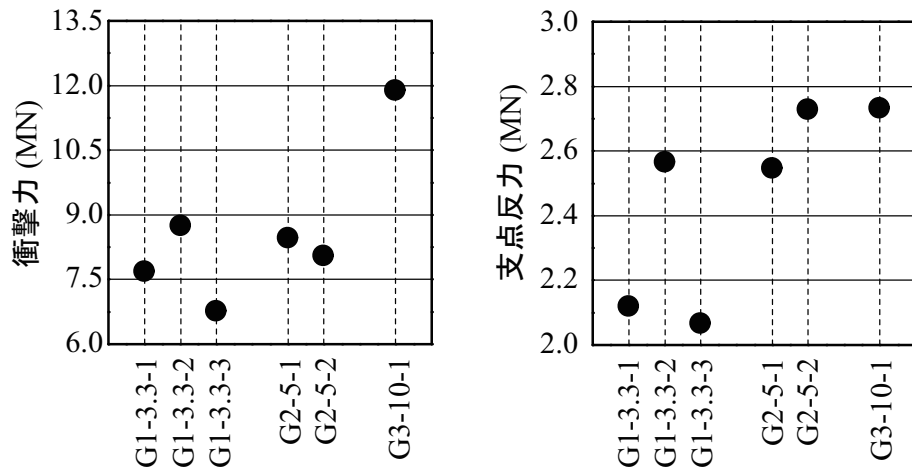
### 3.3 桁上面におけるひび割れ分布

図-4 には、各実験終了後の桁上面におけるひび割れ分布を示している。図より、いずれの落下高さにおいても、処女載荷時からの重錘衝突時における円形状の痕跡が示されているのが分かる。また、その痕跡から、重錘は、全実験ケースでほぼ桁の中央点に落下衝突していることが分かる。しかしながら、詳細に見ると、繰り返し載荷時には、スパン方向及び軸直角方向への多少の実験誤差が確認できる。ひび割れ分布を見ると、いずれの落下高さにおいても処女載荷時点から載荷点を中心に“X”状の割裂ひび割れが確認できる。それは入力エネルギーの増加や繰り返し載荷回数の増加に対応してより顕在化していることが分かる。また、ひび割れが桁側面の上縁から下縁に向かって進展している場合には、ほとんどのひび割れが上面で軸直角方向に貫通していることが確認できる。

合計の入力エネルギーが  $E = 196 \text{ kJ}$  となる場合においては、いずれの桁においても前述の通り中央部の桁上縁が圧壊の傾向を示している。その状況を裏付けるように、上面中央部で桁の軸直角方向に進展するひび割れや“X”状ひび割れは、図では明確に示されていないが、薄くのこぎり状になっていることを確認している。

### 3.4 最大重錘衝撃力と最大支点反力

図-5 には、最大重錘衝撃力と最大支点反力値を比較して示している。図より、前述の通り、いずれの場合も重錘の落下高さや繰り返し載荷回数に関する明確



(a) 最大重錘衝撃力 (b) 最大支点反力

図-5 最大重錘衝撃力および支点反力分布の比較図

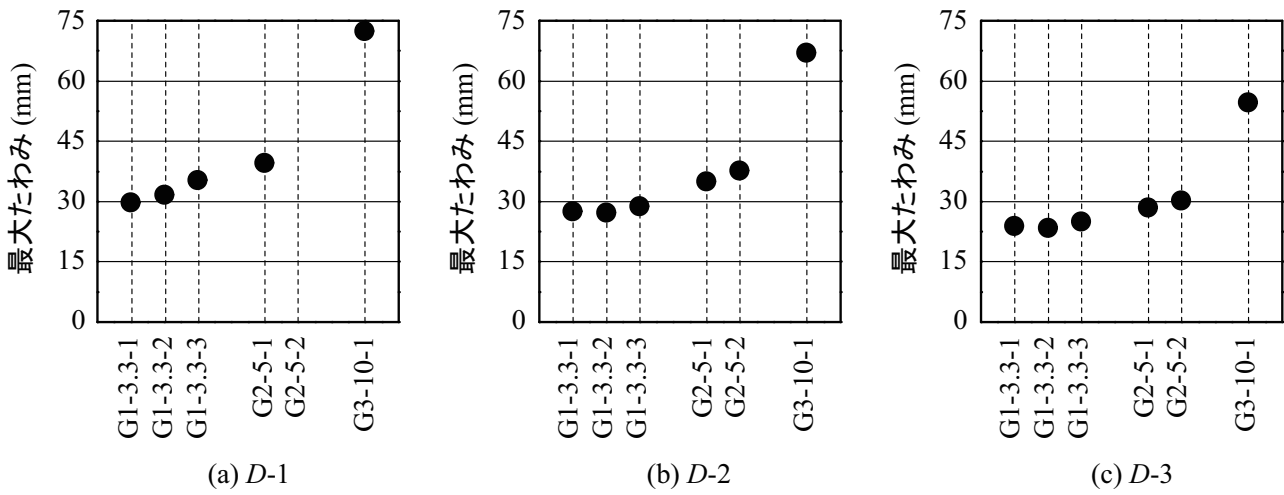


図-6 最大たわみ分布の比較図

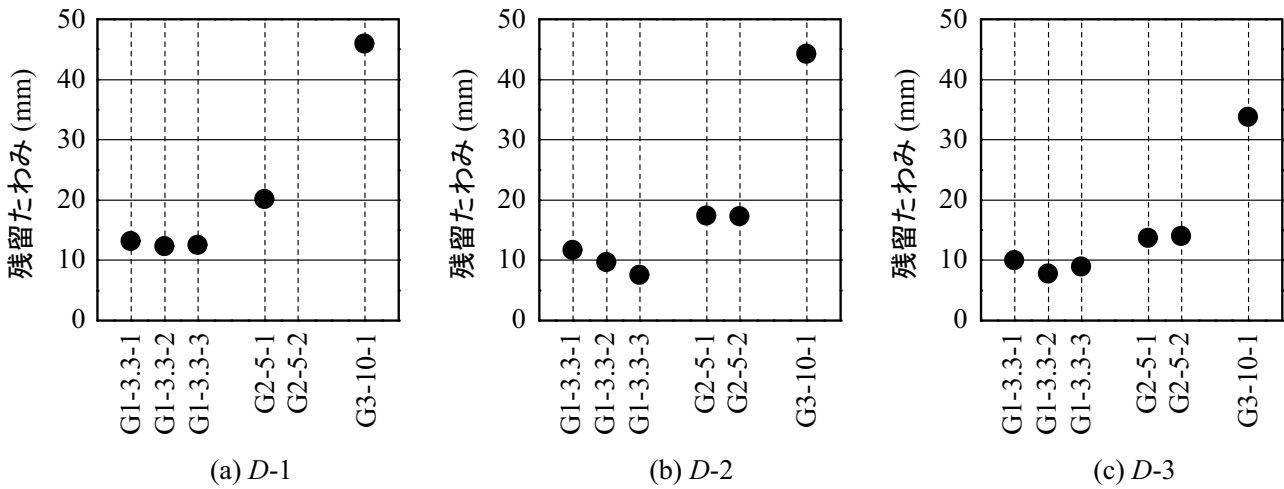


図-7 残留たわみ分布の比較図

な相関関係が示されていないことが分かる。

### 3.5 最大たわみ, 残留たわみ, 累積残留たわみ

図-6, 7には, 各実験結果における載荷点近傍 D-1 ~ D-3 における最大たわみと残留たわみ値を比較して示している。図より, 各最大たわみおよび残留たわみは, いずれも繰り返し載荷回数に関わらず重錘落下高さに対応して類似の分布性状を示していることが分かる。これは, 著者らの過去の研究<sup>10)</sup>からも明らかのように, (1) ひび割れの発生によって主鉄筋が塑性化していることや, 繰り返し載荷時には入力エネルギーに対応して主鉄筋にも塑性歪エネルギーが蓄えられることになること, (2) 従って, 入力エネルギーが等しい場合には等しい塑性歪エネルギーが蓄えられることより, 主鉄筋にひずみ硬化が期待できるものの, 対応してほぼ等しい最大たわみおよび残留たわみが生じることによるものと推察される。

図-8には, 図-7の結果の下に各桁に関する累積残留たわみ値を比較して示している。図より, 累積残留たわみは, 載荷回数に対応してほぼ線形に増加していることが分かる。合計の入力エネルギーが  $E = 196$  kJ の場合である G1-3.3-3, G2-5-2, G3-10-1 の値を比較すると, 測点 D-1/3 に関しては, G1 と G2 桁の場合で類似しているものの, G3 桁の場合には前者より若干大きい値を示している。また, 測点 D-2 に関しては, 重錘落下高さに対応して累積残留たわみも大きくなる傾向にあることが分かる。

一方で, 繰り返し載荷回数や各載荷時の入力エネルギーが異なる場合においても, 累積残留たわみやその軸方向分布が等しい場合には, 対応して主鉄筋やコンクリートの処女載荷時からの残留ひずみも類似し, かつ全体的なひび割れ分布やひび割れの開口度も同程度であることを意味している。従って, 累積残留たわみやその軸方向分布が類似している場合には, 損傷の程度も同程度であるものと判断される。

本研究の場合においても, このような考え方が成り立つものと仮定すれば, 本実験結果では合計の入力エネルギーが等しい  $E = 196$  kJ の場合において, 単一載荷時の損傷程度は, 各入力エネルギーが小さく繰り返し載荷を想定する場合のそれよりも大きいことが明らかになった。従って, 繰り返し載荷を想定する場合においても, 合計の入力エネルギーが等しい単一載荷時の損傷を評価することによって, 安全側で設計が可能になるものと判断される。

### 3.6 入力エネルギーと最大たわみ, 残留たわみの関係

図-9には, 各桁の処女載荷時の入力エネルギーに対する D-1 ~ D-3 における最大たわみおよび残留たわみの分布図を示している。図より, いずれの測点においても, 最大たわみと残留たわみは入力エネルギーと

ほぼ比例関係にあることが分かる。この関係は, 著者らが小型 RC 梁で明らかにしている特性<sup>3), 4)</sup>と同様であり, 実桁においても成立することが実証的に明らかになった。

スパン中央部に限定してその勾配を求めると, 最大たわみに関する勾配は  $\alpha_{def} = 0.387E$ , 残留たわみに関する勾配は  $\alpha_{rs} = 0.215E$  として求められる。ただし,  $\alpha_{def}$ ,  $\alpha_{rs}$  の単位は mm/kJ であり,  $E$  の単位は kJ である。

特に, 残留たわみの勾配に関しては, 先に著者らが重錘と桁の質量比の影響を考慮しかつ静的耐力を用いて導かれる, 次式のような算定式<sup>4)</sup>を提案している。すなわち,

$$\alpha_{rs} = 420\beta/P_{usc} \quad (1)$$

ただし,

$$\beta = 0.288 \cdot \ln r_M + 0.9605 \quad (2)$$

ここで,  $W$ : 重錘質量 (kg),  $B$ : 桁の純スパン内における全質量 (kg),  $r_M: W/B$ ,  $\beta$ : 質量比  $r_M$  に対する  $\alpha_{rs}$  の補正係数である。

上式に, 本研究における重錘と試験体の質量比  $r_M = 0.104$  と, 桁の静的耐力  $P_{usc} = 600$  kN を代入すると,  $\alpha_{rs} = 0.216$  として評価され, 両者がほぼ一致していることが分かる。また, 上式より最大たわみと残留たわみの比 ( $\alpha_{def}/\alpha_{rs}$ ) を求めると約 1.8 となる。この値も, 設計工学的に重要な指標になるものと判断される。

### 3.7 累積入力エネルギーと累積残留たわみの関係

図-10には, 繰り返し載荷時における累積入力エネルギーに対する D-1 ~ D-3 における累積残留たわみの分布図を示している。図より, 処女載荷, 繰り返し載荷の如何に関わらず, 累積入力エネルギーに対する累積残留たわみは, 図-9と同様にほぼ線形関係にあることが分かる。ただし, 単一載荷時の値が若干大きいことより, 繰り返し載荷が想定される場合においても, 単一載荷時の値を用いかつ累積入力エネルギーに関して線形関係を仮定することにより, 各限界状態に対して安全側で性能照査が可能になるものと判断される。

## 4. まとめ

本研究では, 耐衝撃用途 RC 構造部材の性能照査型耐衝撃設計法の確立に向けた検討の一環として, 実規模 RC 桁に関して, 単一載荷時と入力エネルギーの合計が等しい場合における繰り返し載荷時の耐衝撃性状を把握することを目的に, 純スパン長が 8 m の実規模 RC 桁を対象とした繰り返し載荷重錘落下衝撃実験を実施した。

本研究では, 2,000 kg 重錘を用い, 全入力エネルギーを 196 kJ とし, 重錘の落下高さを 3.33 m, 5 m,



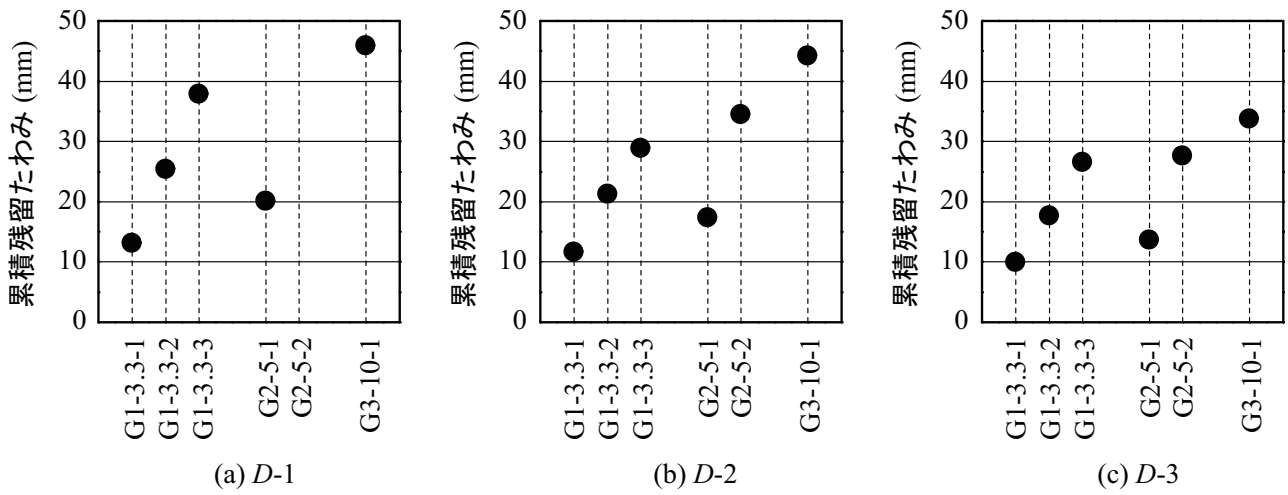


図-8 累積残留たわみ分布の比較図

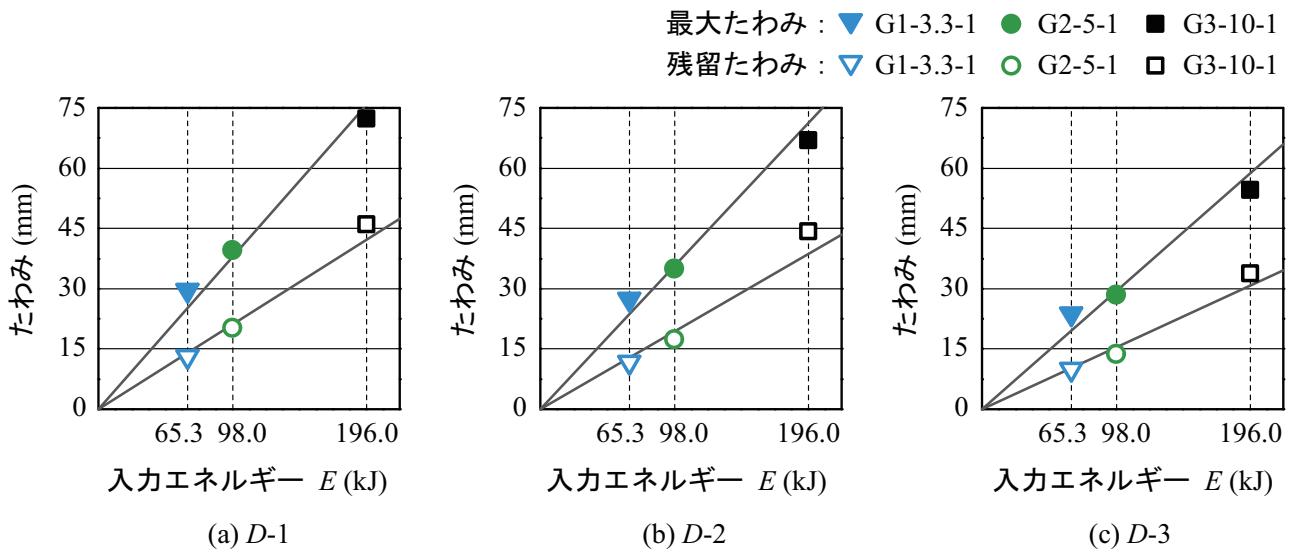


図-9 入力エネルギーに対する最大・残留たわみ分布図

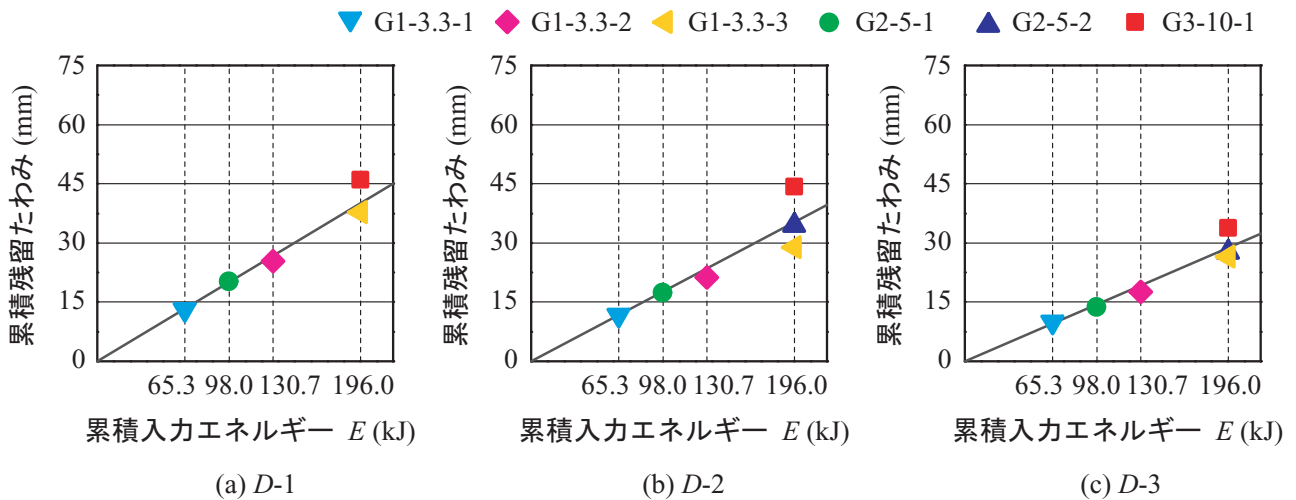


図-10 累積入力エネルギーに対する累積残留たわみ分布図

10 m の 3 種類を設定して、それぞれ繰り返し載荷回数を 3, 2, 1 回とする実験を実施した。本研究の範囲内で得られた結果を整理すると、以下のとおりである。

- 1) 最大重錘衝撃力や最大支点反力に関する繰り返し載荷回数や入力エネルギーの影響は、本実験の範囲内では明確には示されない。
- 2) 最大たわみと残留たわみは、設定した入力エネルギー間で繰り返し載荷回数に関わらず類似の値を示す。
- 3) 繰り返し載荷において、入力エネルギーの合計が等しい場合には、スパン中央部の累積残留たわみは、繰り返し載荷回数に関わらず類似の値を示す。ただし、単一載荷時の値が繰り返し載荷時の値よりも若干大きいことより、繰り返し載荷が想定される場合においても単一載荷時の値を用いて評価することにより、安全側で設計が可能になる。
- 4) 各落下高さに対する処女載荷時の各点における最大たわみと残留たわみは、入力エネルギーに対して線形に増加する。このときのスパン中央部の残留たわみ勾配は、先に著者らによって提案された、重錘質量の影響を考慮し静的耐力を用いて導かれた算定式による値とほぼ対応しており、算定式の妥当性が実証的に確認された。
- 5) 単一載荷と繰り返し載荷に関わらず、累積残留たわみは累積入力エネルギーとほぼ線形関係にある。ただし、単一載荷時の値が若干大きいことより、繰り返し載荷が想定される場合においても単一載荷時の値を用いた線形関係を仮定することにより、各限界状態に対して安全側で性能照査が可能になるものと判断される。

#### 参考文献

- 1) 構造工学技術シリーズ 52 性能照査設計の概念に基づく構造物の耐衝撃設計法, 土木学会, 2007.
- 2) 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, pp. 177-190, 2000.
- 3) 岸 徳光, 三上 浩: 衝撃荷重載荷時に曲げ破壊

が卓越する RC 梁の性能照査型耐衝撃設計法に関する一提案, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 53A, pp. 1251-1260, 2007.

- 4) 岸 徳光, 今野久志, 三上 浩, 岡田慎哉: 大型 RC 梁の性能照査型耐衝撃設計法に関する一提案, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 54A, pp. 1077-1088, 2008.
- 5) 玉井宏樹, 園田佳巨: 繰り返し衝撃荷重を受ける RC 部材の残存性能評価法の実現象への適用, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 55A, pp. 1366-1375, 2009.
- 6) 白根勇二, 岩波光保, 横田 弘, 山田岳史: 繰り返し衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの破壊挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol. 29, No. 3, pp. 739-744, 2007.
- 7) 岩波光保, 松林 卓, 横田 弘, 小野寺美昭: 繰り返し衝撃荷重を受ける二辺支持鉄筋コンクリート版の破壊挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 2, pp. 799-804, 2009.
- 8) 松林 卓, 岩波 光保, 川端 雄一郎, 三浦 紀明: 繰り返し衝撃荷重を受ける四辺支持鉄筋コンクリート版の押抜きせん断耐荷性能評価に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 2, pp. 715-720, 2010.
- 9) 岸 徳光, 今野久志, 西 弘明, 三上 浩: 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, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 51A, pp. 1695-1706, 2005.
- 10) 岸 徳光, 今野久志, 三上 浩: RC 梁の繰り返し重錘落下衝撃挙動に関する数値シミュレーション, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 55A, pp. 1225-1238, 2007.
- 11) 岸 徳光, 今野久志, 三上 浩: 実規模 RC 桁の繰り返し重錘落下衝撃挙動解析に関する破壊エネルギー等価概念の適用性検討, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 56A, pp. 1137-1148, 2010.
- 12) 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.

(2010 年 9 月 16 日受付)