

論文 大型 RC 梁の重錘落下衝撃挙動への重錘質量の影響に関する実験および数値解析的検討

今野 久志^{*1}・岸 徳光^{*2}・岡田 慎哉^{*3}・三上 浩^{*4}

要旨: 本研究では、ロックシェッド等の道路防災構造物の性能照査型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に、大型 RC 梁を対象として、入力エネルギーが同一で重錘質量が異なる場合の耐衝撃挙動に及ぼす重錘質量の影響について、重錘落下衝撃実験および数値解析的検討を行った。検討の結果、重錘重量を考慮した状態での衝撃応答解析によって実験結果の最大変位および残留変位を精度よくシミュレート可能であることや、入力エネルギーが同一の場合には過去の研究成果と同様に重錘質量の増加とともに残留変位が対数関数的に大きくなることが実験結果からも明らかとなった。

キーワード: 性能照査型耐衝撃設計, RC 梁, 重錘落下衝撃実験, 数値解析, 質量比

1. はじめに

現在、落石防護施設の一つであるロックシェッドの断面設計は、許容応力度法の下に行われている¹⁾。しかしながら、過去の被災事例等からも同種の構造物では耐力的に非常に大きな安全余裕度を有していることが明らかになっている²⁾。近年、様々な構造物の設計が許容応力度設計法から性能照査型設計法へ移行してきている。ロックシェッド等の設計においても各性能に対する断面設計を可能とする性能照査型の耐衝撃設計法の確立が望まれている。しかしながら、構造物の主要な構成要素である梁部材でさえも、合理的な耐衝撃設計法が確立されていないのが現状である³⁾。このことから、筆者らはロックシェッド等の耐衝撃用途構造物の性能照査型耐衝撃設計法を確立することを最終目的に、RC 部材に関する同設計法の開発研究を推進している。

この中で、筆者らは過去に実施した種々の小型 RC 梁の単一衝撃荷重荷実験結果を統一的に整理した結果、入力エネルギーと残留変位は線形関係にあり、その勾配は静的曲げ耐力の逆数と高い相関関係にあることを明らかにしている。これらの関係を基に、曲げ破壊が卓越する RC 梁に限定して性能照査型耐衝撃設計法の確立に資する設計法を提案している⁴⁾。さらに、大型 RC 梁まで適用可能な設計法を提案することを目的として、純スパン長が 8 m で静的曲げ耐力が 230 kN から 1,300 kN 程度までの 9 断面の大型 RC 梁と 1 断面の小型 RC 梁に対して、入力エネルギーや質量比(重錘質量/RC 梁の支点間質量)をパラメータとする全 120 ケースの数値解析を実施し、残留変位に着目して統一的な整理を行った⁵⁾。その結果、静的曲げ耐力を P_u (kN)、質量比に関する残留変位の補正係数を β 、入力エネルギーを E (kJ)、残留変位を δ (m) と

して、以下の設計法を提案している。

$$P_u = 0.42\beta E / \delta \quad (1)$$

また、質量比に関する残留変位の補正係数 β は、以下のように示される。

$$\beta = 0.288 \ln(W_m / B_m) + 0.9605 \quad (2)$$

ここで、 W_m / B_m : 質量比

W_m : 重錘質量 (t)

B_m : RC 梁の支点間質量 (t)

上記(2)式は、質量比が 1.25 の場合の残留変位を 1.0 としたときの各解析結果の相対残留変位と質量比の関係より求めた近似曲線である。これらの評価式から、1) 同一の入力エネルギーに対しては質量比が大きい場合に残留変位が大きいこと、2) 質量比の小さい領域ほど残留変位への影響が大きく、質量比が 1.0 以上では影響が非常に小さいこと、が明らかになっている⁶⁾。

そこで、本研究では、大型 RC 梁の重錘落下衝撃挙動、特に残留変位に及ぼす重錘質量の影響を実験的に検証するために、上記数値解析において質量比の影響を検討した際の大型 RC 梁と同一断面寸法の試験体を製作し、重錘質量を変化させた重錘落下衝撃実験を実施した。さらに、上記実験に対する数値解析的検討を併せて実施したので、その結果について報告する。

2. 大型 RC 梁の重錘落下衝撃実験

2.1 試験体概要

図-1 には、重錘落下衝撃実験に使用した大型 RC 梁の形状寸法および配筋状況を示している。試験体は梁幅、梁高ともに 1 m の矩形断面であり、梁長は 9 m、純スパン長は 8 m である。引張側の軸方向鉄筋は D25 を 7 本配置

*1 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地基礎技術研究グループ 主任研究員 博(工) (正会員)

*2 室蘭工業大学大学院教授 工学研究科 くらし環境系領域 工博 (正会員)

*3 国土交通省 北海道開発局 博(工) (正会員)

*4 三井住友建設(株) 技術研究開発本部 技術開発センター 主席研究員 博(工) (正会員)

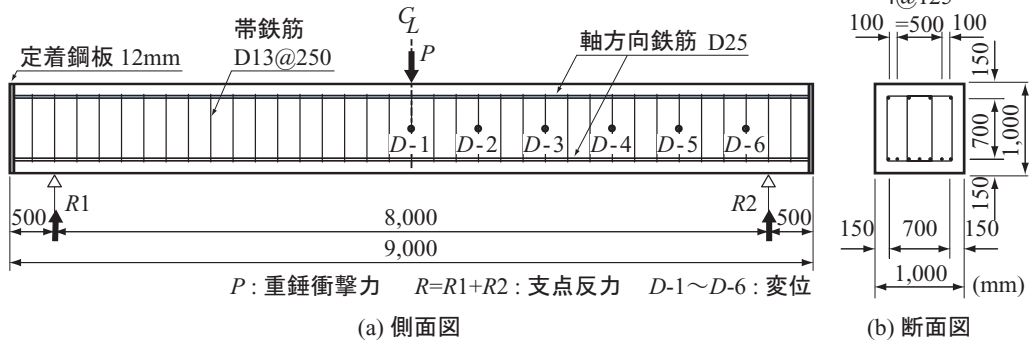


図-1 大型 RC 梁試験体の形状寸法および配筋状況



写真-1 重錘落下衝撃実験状況 ($W_m = 5\text{ t}$, $H = 4\text{ m}$)

(主鉄筋比 0.42%)、圧縮側の軸方向鉄筋は引張側鉄筋比の 50% を目安に D25 を 4 本配置している。また、コンクリートのかぶり厚は 150 mm としている。帯鉄筋の配置間隔は、梁の有効高さの 1/2 以下とすることとし、D13 を 250 mm 間隔で配置している。なお、軸方向鉄筋は、定着長を節約するために梁両端面に厚さ 12 mm の鋼板を配置して溶接定着している。実験時のコンクリートの圧縮強度は $f'_c = 29.2\text{ MPa}$ であり、軸方向鉄筋 (D25) および帯鉄筋 (D13) の降伏点および引張強さはそれぞれ 382 MPa, 578 MPa および 401 MPa, 558 MPa である。コンクリート標準示方書に基づいて算定した大型 RC 梁の静的曲げ耐力は $P_{usc} = 613\text{ kN}$ 、静的せん断耐力は $V_{usc} = 2,002\text{ kN}$ である。従って、せん断余裕度 $\alpha (= V_{usc} / P_{usc})$ は、 $\alpha = 3.27 > 1.0$ であり、設計的には静載荷時に曲げ破壊型で終局に至る断面設計となっている。

2.2 実験方法および実験ケース

写真-1 には、重錘質量 $W_m = 5\text{ t}$ 、落下高さ $H = 4\text{ m}$ における重錘落下衝撃実験の状況を示している。実験は、重錘をトラッククレーンにより所定の高さまで吊り上げ、着脱装置を用いて梁のスパン中央部に自由落下させることによって行っている。なお、本実験では、緩衝材を敷設しない状態で一度だけ直接梁に衝突させる単一載荷実験としている。試験体は、支点反力測定用ロードセル付き

表-1 実験ケース一覧

実験ケース	重錘質量 W_m (t)	梁質量 B_m (t)	質量比 W_m / B_m	落下高さ H (m)	入力エネルギー E (kJ)
W2H10	2	20	0.1	10	196
W5H4	5		0.25	4	
W10H2	10		0.5	2	
W2H5	2	20	0.1	5	98
W10H1	10		0.5	1	

の支点治具上に設置し、かつ鋼製治具を用いて重錘落下衝突時における梁端部の跳ね上がりを防止しており、支点は回転を許容するピン支持に近い状態となっている。

表-1 には、実験ケースの一覧を示している。実験ケース名は、重錘を意味する W と重錘質量 (t) および落下高さを意味する H と高さ (m) を用いて表示している。さらに、表中には重錘質量 W_m (t)、梁の支点間質量 B_m (t)、質量比 W_m / B_m 、重錘の落下高さ H (m)、入力エネルギー E (kJ) を示している。

本実験では、同一入力エネルギー下における重錘質量の RC 梁に関する耐衝撃挙動への影響を検討する目的から、重錘質量を $W_m = 2, 5, 10\text{ t}$ の 3 種類 (質量比はそれぞれ $W_m / B_m = 0.1, 0.25, 0.5$) としている。また、入力エネルギー E は、過去の解析結果を参考に $E = 196\text{ kJ}$ とし、落下高さ H を変化させて同一の入力エネルギーとした 3 ケース、入力エネルギー E を上記の 1/2 である $E = 98\text{ kJ}$ とし、重錘質量を $W_m = 2\text{ t}$ および 10 t (質量比 0.1 および 0.5) とした 2 ケースの合計 5 ケースについて重錘落下衝撃実験を実施している。

$W_m = 2\text{ t}$ および 5 t 重錘 (写真-1 参照) は、いずれも直径 1 m、高さ 97 cm、底部より高さ 17.5 cm の範囲が半径 80 cm の球状である同一形状寸法のものである。各重錘は、内部に充填した鋼塊およびコンクリートの体積比率を調整して所定の質量にしている。 $W_m = 10\text{ t}$ 重錘は、直径 1.25 m、高さ 95 cm、底部より高さ 30 cm の範囲が半径 1 m の球状となっている。

2.3 測定項目

実験における測定項目は、重錘衝撃力 P 、合支点反力

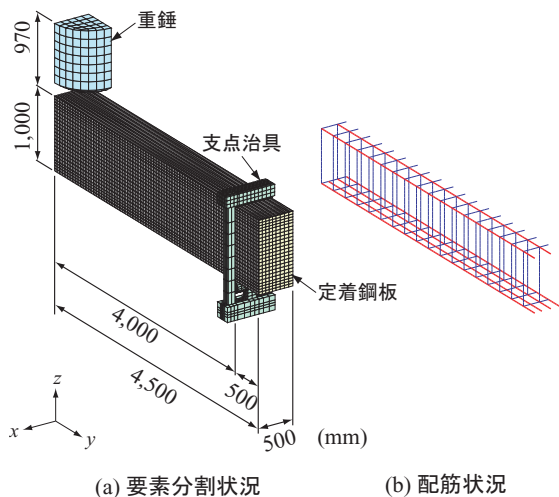


図-2 数値解析モデル

R (以後、支点反力), および载荷点変位 δ の各応答波形である。これらの測定において、重錘衝撃力は重錘に設置したひずみゲージ型加速度計 (応答周波数 1 kHz 以上, 容量 1,000 G) から得られる加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起歪柱型衝撃荷重測定用ロードセル (応答周波数 1 kHz 以上, 容量 1,500 kN) を用いて計測を行っている。変位計測には、レーザ式非接触型変位計 (応答周波数 915 Hz, 計測範囲 200 mm) を用いている。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の場合には共に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、サンプリングタイム 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、波形収録後に 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。

3. 数値解析

3.1 数値解析モデルおよび解析条件

本数値解析には、陽解法に基づく非線形衝撃応答解析用汎用コード LS-DYNA (ver.971)⁷⁾ を用いている。

図-2 には、本数値解析に用いた大型 RC 梁の要素分割状況および配筋状況を示している。数値解析モデルは、大型 RC 梁の構造および荷重条件の対称性を考慮して梁幅方向 (x 方向) およびスパン方向 (y 方向) にそれぞれ 2 等分した 1/4 モデルである。要素分割は、梁幅方向に 9 分割、梁高方向に 23 分割であり、総節点数および総要素数はそれぞれ 29,357 および 33,046 となっている。適用した要素タイプは、軸方向鉄筋および帯鉄筋要素には軸剛性、断面積、重量を等価とした梁要素を用い、その他の要素は全て 8 節点の 3 次元固体要素とした。

要素の積分点に関しては、固体要素に対しては 1 点積分を、鉄筋のモデル化に用いている梁要素に対しては断

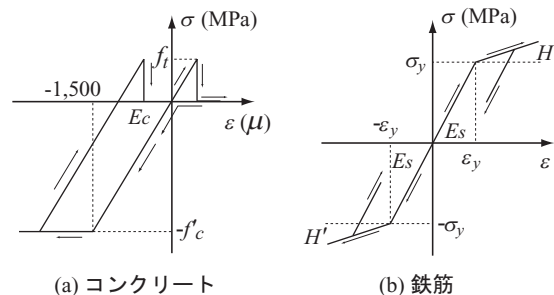


図-3 材料構成則モデル

面方向に 2×2 の Gauss 積分を用いている。

コンクリートと重錘および支点治具の要素間には、面と面との接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義している。また、コンクリートと軸方向鉄筋要素間、コンクリートと帯鉄筋要素間、完全付着を仮定している。

衝撃荷重は、重錘要素を大型 RC 梁に接触する形で配置し、その全節点に設定した衝突速度を初速度として付加することにより梁に衝突させ、発生させることとした。なお、全解析時間は、重錘が大型 RC 梁に衝突した時点から RC 梁がほぼ定常状態に至るまでの 400 ms 間とした。

減衰定数は、事前解析を行って、応答波形に関する解析結果を実験結果と比較することにより質量比例分のみを考慮するものとし、鉛直方向最低次固有振動数に対して 1.5% を設定している。なお、直接衝撃荷重を受ける小型 RC 梁等の数値解析では、重錘重量を無視する場合においても、解析結果が実験結果とよく整合することが明らかになっている⁸⁾。しかしながら、大型 RC 梁に関する事前解析を実施した結果、動的応答性状への重錘重量の影響が無視できないことが明らかになった。このことより、本研究ではより精度の高い衝撃応答解析手法を確立することを目的に、入力エネルギーが等しくかつ重錘質量が異なる場合を対象に、重錘重量を考慮した数値解析を実施し、実験結果との比較検討によりその妥当性を検証することとした。

3.2 材料物性モデル

図-3 には、本数値解析に用いたコンクリートおよび鉄筋の材料構成則モデルを示している。図-3 (a) に示すように、コンクリート要素には圧縮側に対しては折線近似による相当応力-相当ひずみ関係、引張側に対しては破壊圧力に達した段階で引張力を伝達しないとする弾塑性体モデルを適用した。また、圧縮側に関しては、相当ひずみが $1,500 \mu$ に達した状態でコンクリートが降伏するものと仮定し、完全弾塑性体のバイリニア型にモデル化した。降伏の判定には Drucker - Prager の降伏条件式を採用している。なお、引張強度は過去の小型 RC 梁に関する数値解析の場合と同様に圧縮強度の 1/10 と仮定している。

図-3 (b) には、軸方向鉄筋および帯鉄筋に関する材料構成則モデルを示す。軸方向鉄筋要素に用いた物性モデ

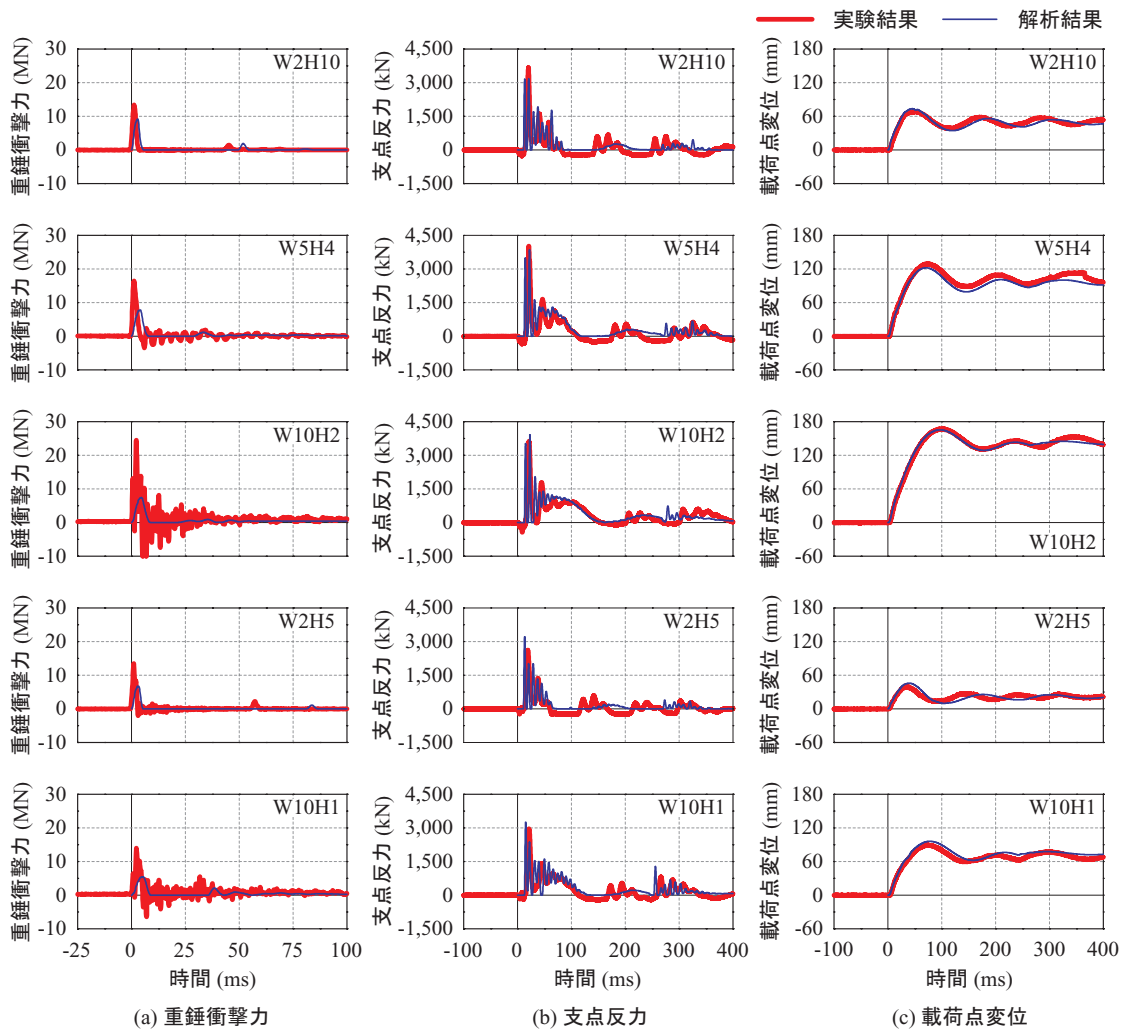


図-4 各応答波形に関する実験および数値解析結果

ルは、降伏後の塑性硬化係数 H' を考慮した等方弾塑性体モデルである。降伏の判定は、von Mises の降伏条件に従うこととした。塑性硬化係数 H' は、弾性係数 E_s の 1% と仮定している。

重錘、支点治具および定着鋼板要素に関しては、実験時に塑性変形が確認されていないことより、弾性体モデルを適用している。要素の弾性係数 E_s 、ポアソン比 ν_s 、単位体積質量 ρ_s には公称値を用いることとし、全部材で等しく、それぞれ $E_s = 206 \text{ GPa}$ 、 $\nu_s = 0.3$ 、 $\rho_s = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ と仮定している。

コンクリートおよび鉄筋の強度および弾性係数については、試験体の材料物性値を使用している。

4. 実験結果と数値解析結果の比較検討

4.1 各種応答波形

図-4には、各実験ケースにおける実験結果および解析結果の重錘衝撃力、支点反力、載荷点変位に関する各応答波形を重ねて示している。

重錘衝撃力波形についてみると、重錘質量が $W_m = 10 \text{ t}$ の場合における W10H2 および W10H1 の実験結果は、高

周波成分から成る波形性状を示しているものの、いずれの実験結果も重錘衝突直後に急激に立ち上がりピーク値を迎える正弦半波状の波形性状を示している。同一入力エネルギーの場合における実験結果を比較すると、重錘質量が大きく落下高さが低い場合には、最大応答値が増加の傾向を示し、かつ最大応答値までの経過時間および波動継続時間は長くなる傾向を示している。

一方、解析結果は、いずれも単純な正弦半波状の波形性状を示しており、同一入力エネルギーの場合には重錘質量の増加とともに実験結果と同様の傾向を示していることが分かる。しかしながら、最大応答値は重錘質量の増加とともに減少しており、実験結果と異なる傾向が示されている。この原因については、重錘質量の大きい場合における実験時の高周波成分の発生原因の究明や数値解析時における重錘衝突部コンクリートのひずみ速度効果の影響等、今後検討を要するものと考えている。

支点反力波形についてみると、実験結果は重錘衝撃力波形より若干遅れて励起しており、重錘衝突初期の振幅の大きい高周波成分とその後続く周期が長く振幅の小さい正弦半波が合成されたような波形性状を示している。

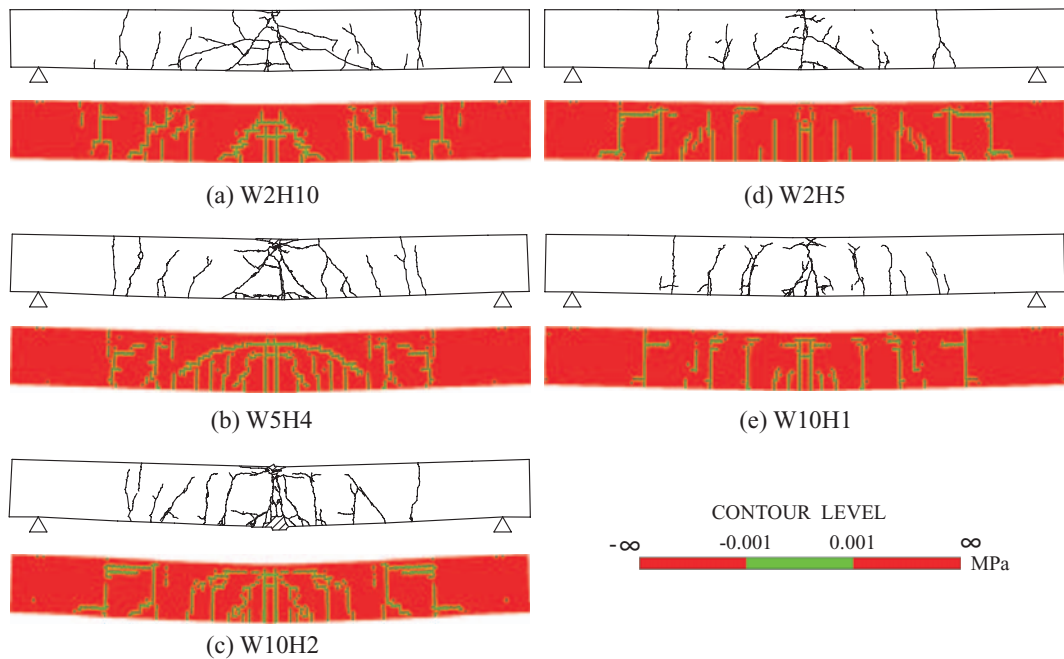


図-5 ひび割れ分布性状

また、波動の継続時間は重錘質量の増加に対応して長くなる傾向が示されている。支点反力の最大応答値を比較すると、入力エネルギーが大きい場合が小さい場合に比較して大きくなる傾向を示している。一方、同一入力エネルギーの場合には、重錘質量の大小によらずほぼ同程度の値を示していることが分かる。

解析結果は、波動の立ち上がりから重錘衝突初期の高周波成分の発生およびその後続く周期が長く振幅の小さい正弦半波の波形性状等、波形の最大応答値や波動継続時間を含めて実験結果の波形性状をよく再現していることが分かる。

荷点変位波形についてみると、実験結果はいずれの場合も衝撃荷重初期に正弦半波状の第1波が励起された後、残留変位を伴いながら減衰自由振動状態に移行していることが分かる。また、同一の入力エネルギーにおいては、重錘質量の増加とともに最大変位と残留変位および周期が増加する傾向を示している。すなわち、入力エネルギーが等しい場合には、RC梁の最大応答変位や残留変位は重錘質量の大きさに対応して増加する傾向にあることが分かる。

解析結果は、W2H5において若干周期のずれがみられるものの、いずれの解析結果も重錘衝突後に最大変位を示す第1波目の正弦半波から除荷後の減衰自由振動波形に至るまでや最大応答値から残留変位量、周期ともに実験結果をよく再現していることが分かる。

4.2 ひび割れ分布性状

図-5には、実験終了後の各試験体のひび割れ分布図および解析結果の最大変位時における第一主応力図を示している。なお、解析結果はひび割れ発生位置を特定でき

るようにするために、第一主応力が零近傍応力 (± 0.001 MPa) 状態を示す要素を緑色で示している。

実験結果より、いずれの試験体も荷点を中心として下縁から上縁に伸びる曲げひび割れと、斜めひび割れおよび荷点近傍上縁部には圧壊状態にあることを示す水平方向のひび割れが発生している。入力エネルギーが同一である実験結果のひび割れ状況を比較すると、重錘質量が小さく落下高さの大きいW2H10の場合には、荷点近傍における斜めひび割れが発生している。また、重錘質量が大きく落下高さの小さいW10H2の場合には、曲げ破壊型のひび割れが卓越している。特に荷点であるスパン中央部の損傷が著しく、梁は角折れの傾向を示している。

一方、解析結果を見ると、実験結果と同様にいずれの梁においても下縁から上縁に伸びる曲げひび割れの発生が確認できる。また、入力エネルギーが等しい場合において、重錘質量が小さく落下高さの大きい場合には荷点部に斜めひび割れが顕在して発生している。さらに、重錘質量の増加に対応して局所的な斜めひび割れの発生は低減し、曲げひび割れが卓越していく傾向を示している。このようなひび割れ分布性状は大略実験結果に対応していることが分かる。

4.3 最大変位および残留変位と入力エネルギーの関係

図-6、図-7には、実験結果および解析結果の最大変位と入力エネルギーの関係、および残留変位と入力エネルギーの関係を示している。図より、解析結果の最大変位および残留変位は実験結果と非常によく整合していることが分かる。同一の入力エネルギーに対しては、最大変位および残留変位ともに重錘質量の増加に対応して増加の傾向にあることが分かる。また、重錘質量が等しい

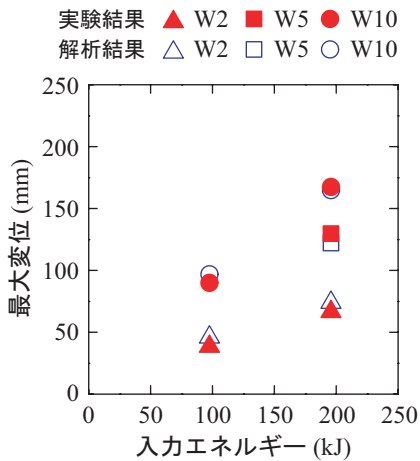


図-6 最大変位と入力エネルギーの関係

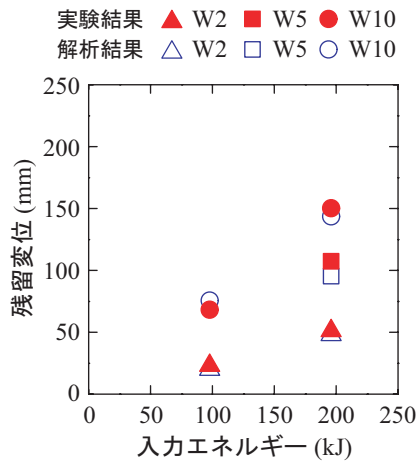


図-7 残留変位と入力エネルギーの関係

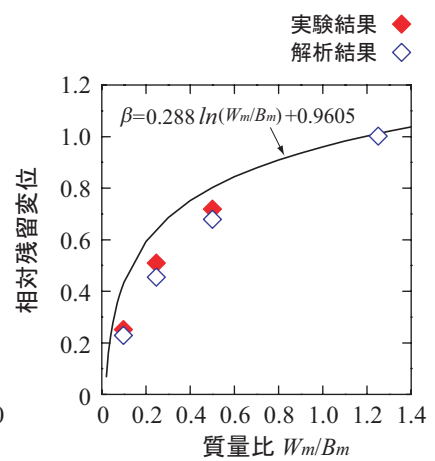


図-8 相対残留変位と質量比の関係

場合において、最大変位および残留変位は、入力エネルギーに対してほぼ線形に増加している。これらの傾向は、過去に実施した大型 RC 梁に対する数値解析結果とよく整合している。

4.4 残留変位と質量比の関係

図-7より、数値解析による大型 RC 梁の残留変位は実験結果と非常によく整合していることが明らかとなった。これらの結果を基本にして、図-8には、入力エネルギーが $E = 196 \text{ kJ}$ で質量比が $W_m / B_m = 1.25$ の場合における数値解析結果の残留変位を基準にして質量比-相対残留変位図を式(2)の結果と共に示している。図より、相対残留変位は過去の研究結果と同様に、質量比の増加とともに対数関数的に増加していることが分かる。しかしながら、相対残留変位値は式(2)の値よりも小さい傾向にある。式(2)は重錘重量を考慮しない場合の解析結果に基づいて定式化されたものであることより、上述の差異は重錘重量の考慮の有無が影響しているものと推察される。

今後は重錘重量を考慮した数値解析によるパラメータスタディを実施し、前述の式(1)、(2)の修正を実施したいと考えている。

5. まとめ

本研究では、道路防災構造物の性能照査型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に、大型 RC 梁を対象として、入力エネルギーが同一の場合における重錘質量の耐衝撃挙動への影響について、重錘落下衝撃実験および数値解析により検討を行った。本研究により得られた結果を整理すると、以下のとおりである。

- 1) 入力エネルギーが同一の場合、相対残留変位は過去

の研究成果と同様に質量比の増加とともに対数関数的に増加することが実験結果からも明らかとなった。

- 2) 直接衝撃荷重を受ける大型 RC 梁の場合には、重錘重量を考慮した衝撃応答解析を行うことにより、その最大変位および残留変位を精度よく評価可能である。
- 3) 提案の数値解析手法により、重錘落下衝撃を受ける大型 RC 梁のひび割れ性状を大略評価可能である。

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：落石対策便覧，2000.6
- 2) 熊谷守晃：ランベツ覆道における落石災害に関する報告，第2回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，pp.286-290，1993.6
- 3) 土木学会：構造工学シリーズ15 衝撃実験・解析の基礎と応用，2004.3
- 4) 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，Vol.53A，2007.3
- 5) 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，Vol.54A，2008.3
- 6) 今野久志，三上 浩，岡田慎哉，岸 徳光：大型 RC 梁の重錘落下衝撃挙動における重錘質量の影響に関する解析的検討，平成19年度土木学会北海道支部論文報告集(第64号)，2008.1
- 7) John O.Hallquist：LS-DYNA User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2006.
- 8) 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，土木学会論文集，No. 619 / I-47, 1999.4