

6.2 道路防災工の合理化・高度化に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究機関：平 18～平 22

担当チーム：寒地構造チーム

研究担当者：西 弘明、今野久志、岡田慎哉、表 真也

【要旨】

本研究は、道路防災工のうち落石対策工に関して、その設計法の合理化・高度化を目的に実施している。

道路防災工の性能照査型設計法に関する研究では、実規模レベルの大型 RC 梁に対して耐衝撃挙動に及ぼす重錘質量の影響を検討するために入力エネルギーが同一で重錘質量の異なる衝撃実験を実施した。その結果、性能照査設計法の性能規定指標となりうる残留変位は、入力エネルギーが同一の場合には重錘質量の増加と共に対数関数的に増加することが明らかとなった。また、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ことが分かった。

道路防災工の終局耐力評価手法の開発においては、落石覆道の耐衝撃性能評価に先立ち、小型 RC ラーメン模型に対する静載荷実験および重錘落下衝撃実験、さらに数値解析を実施し、耐衝撃性能に関する検討を行った。その結果、RC ラーメン構造の有する耐衝撃挙動が明らかとなり、数値解析による精度の高い検討が可能となった。

また、本研究では、道路沿いに設置される道路防災施設の新たな工法として、建設コストの縮減および施工性向上を目的として、杭付落石防護擁壁を提案し、さらに、コンクリート擁壁内の鋼管をH型鋼に置き換えるよう形式改善を図ってきた。本工法の耐衝撃性能についての実験的・解析的な検討結果を基に、設計施工要領（案）の策定を行った。

キーワード：道路防災工、重錘落下衝撃実験、ラーメン構造、杭付落石防護擁壁

I. 道路防災工の性能照査型設計法に関する研究

（RC 梁の性能照査型耐衝撃設計法）

1. はじめに

本研究では、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として、その基礎資料を得ることため、RC 部材の性能照査型耐衝撃設計法に関する研究を進めている。この中で、大型 RC 梁まで適用可能な設計式を提案するために、純スパン長が 8 m で静的曲げ耐力が 230 kN から 1,300 kN 程度までの大型 RC 梁と小型 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てきた¹⁻¹⁾。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 (kN・m)、残留変位を δ (m) として、以下の設計式を提案した。

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

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。

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

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(I-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り、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、が明らかになった¹⁻²⁾。

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、既往検討の大型 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の検討を併せて実施した。

2. 大型 RC 梁の重錘落下衝撃実験

2.1 試験体概要

図 - I-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

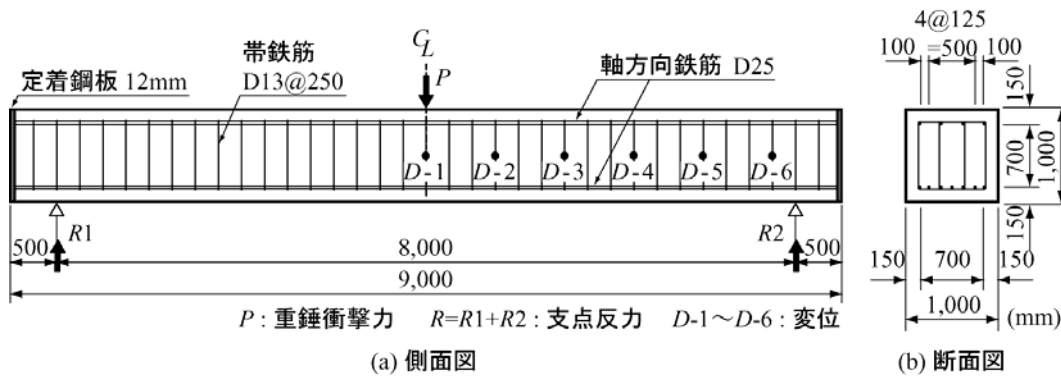


図 - 1-1 大型 RC 梁試験体の形状寸法および配筋状況



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

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として D25 を 7 本配置し (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、軸方向鉄筋の定着は、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 $f'_c = 29.2$ 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 $P_{usc} = 613$ kN、静的せん断耐力は $V_{usc} = 2,002$ kN、せん断余裕度 ($= V_{usc} / P_{usc}$) は、 $= 3.27 > 1.0$ 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 - 1-1 には、重錘質量 $W_m = 5t$ 、落下高さ $H = 4m$ における重錘落下衝撃実験の状況を示している。実験

表 - 1-1 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 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	

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、着脱装置を用いて大型 RC 梁のスパン中央部に自由落下させ、緩衝材を敷設しない状態で直接衝突させることにより行っている。また、実験は 1 試験体に対して一度だけ重錘を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いる。

表 - 1-1 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。

$W_m = 2t$ および $5t$ 重錘 (写真 - 1-1 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。 $W_m = 10t$ の重錘は、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。

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) および載荷点変位 δ の各応答波形である。

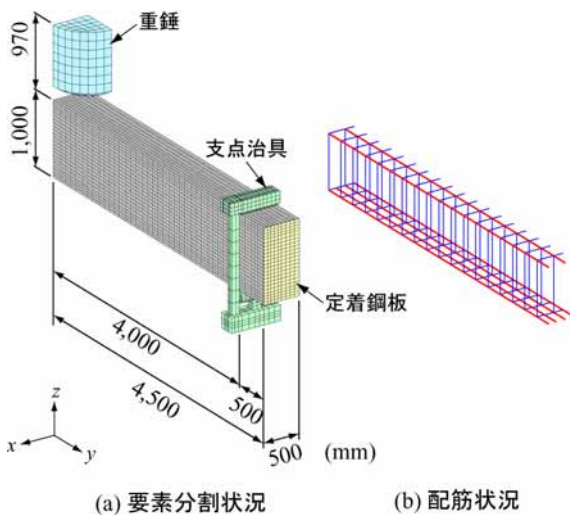


図 - 1-2 数値解析モデル

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) を用いている。

図 - 1-2 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。

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。

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、直接衝撃荷荷を受ける小型 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

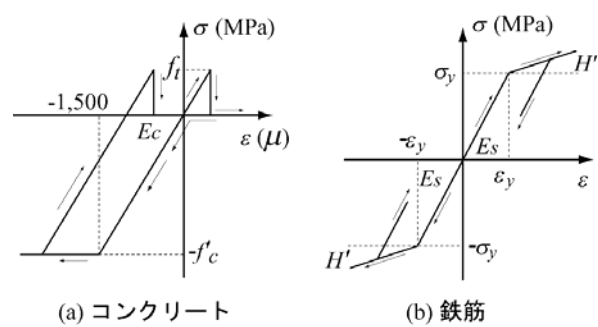


図 - 1-3 材料構成則モデル

合することが明らかになっている¹⁻³⁾。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 - 1-3 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 - 1-3(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。圧縮側に関しては、相当ひずみが 1,500 μ 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 - 1-3(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に関する全要素に関しては、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。

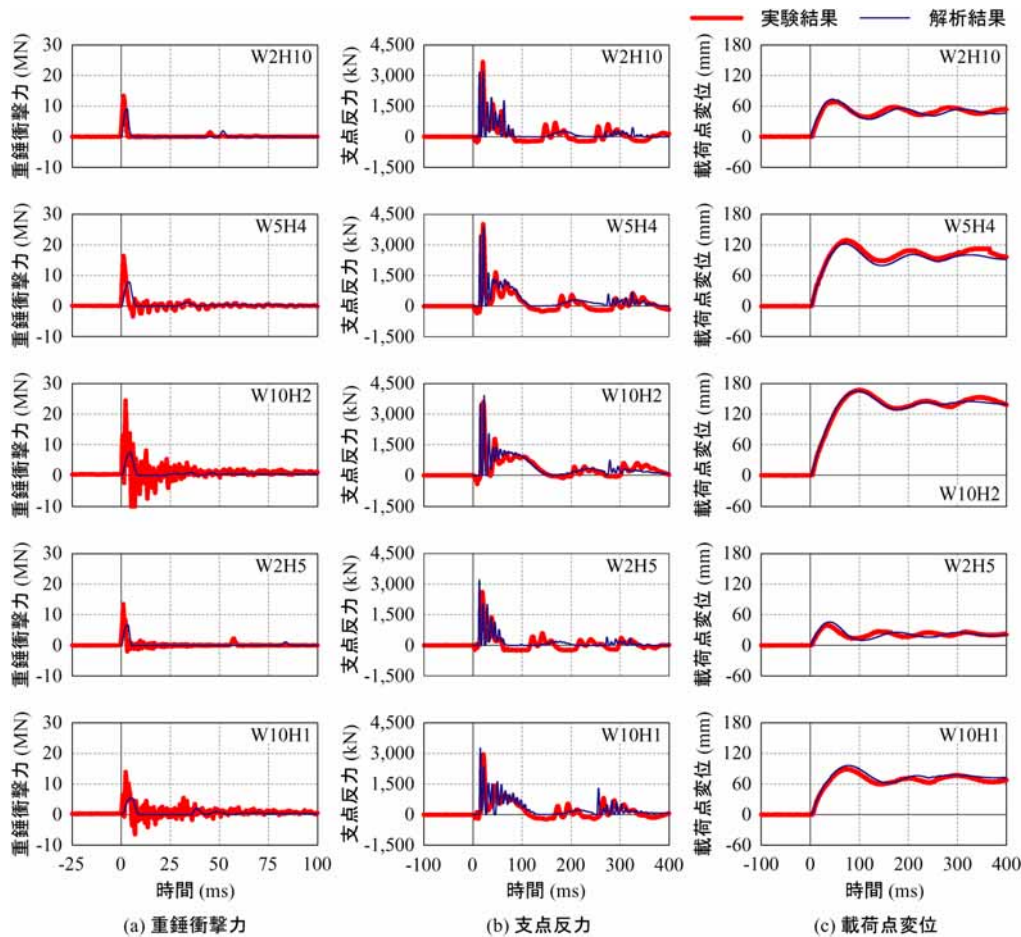


図 - 1-4 各応答波形に関する実験および数値解析結果

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 - 1-4 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 $W_m = 10\text{ t}$ 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。同一の入力エネルギー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、同一の入力エネルギーで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。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、同一の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。

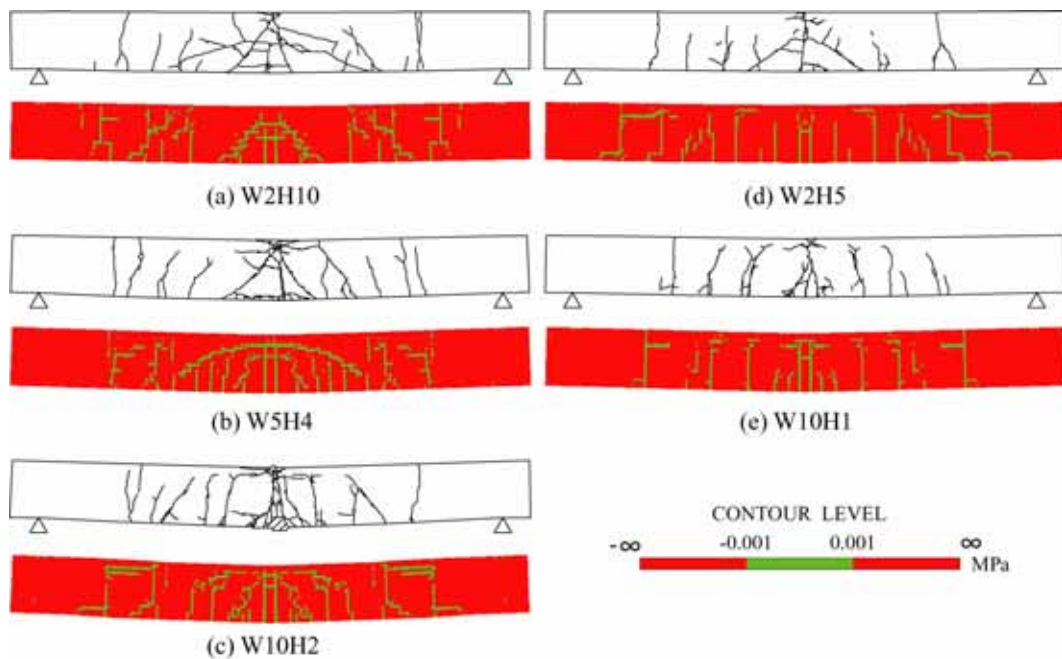


図 - 1-5 ひび割れ分布性状 (上図：実験結果、下図：解析結果)

載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、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

4.2 ひび割れ分布性状

図 - 1-5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、いずれの試験体も載荷点を中心に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載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、載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。特に載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載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 - 1-6、図 - 1-7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。

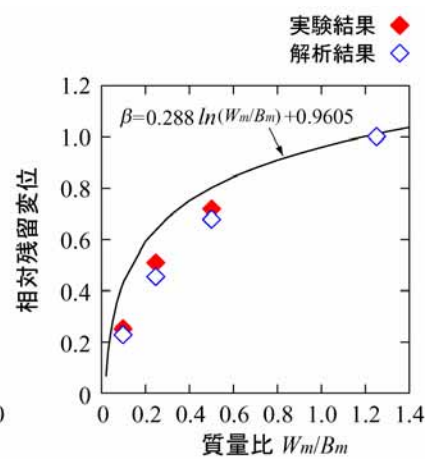
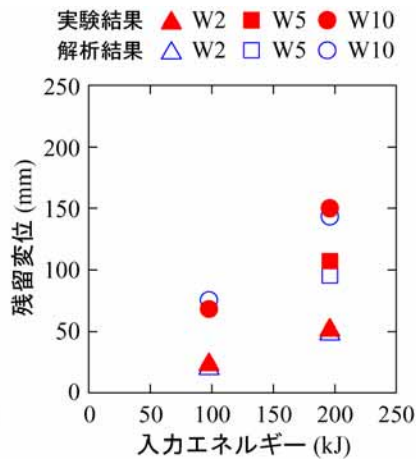
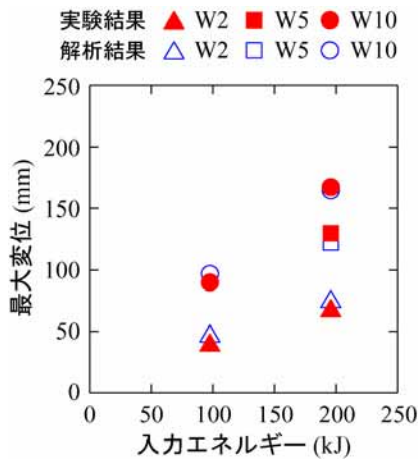


図 - 1-6 最大変位と入力エネルギー
の関係

図 - 1-7 残留変位と入力エネルギー
の関係

図 - 1-8 相対残留変位と質量比
の関係

4.4 残留変位と質量比の関係

図 - 1-7 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 - 1-8 には、入力エネルギーが $E = 196$ 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)は重錘自重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、上述の差異は重錘自重の考慮の有無が影響しているものと推察される。

今後は重錘自重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)の修正を実施する必要があるものと考えている。

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。

今後、これらの成果を、落石覆道等の耐衝撃挙動検討における数値解析に反映させる予定である。

参考文献

- I-1) 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
- I-2) 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
- I-3) 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

II. RC ラーメン構造に関する検討

1. はじめに

本研究では落石防護覆道の性能照査法の確立に寄与することを目的とし、小型のRC ラーメン模型(以降、ラーメン)に対する重錘落下衝撃実験を行い、その衝撃挙動について検討を行うこととした。また、実験では敷砂緩衝材の設置の有無をパラメータとし、緩衝材の効果についても検討を行っている。検討は、重錘衝撃力、内空断面変位、ひび割れ分布について、静的実験結果と緩衝材の有無に対する各々の衝撃実験結果を比較することで実施した。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図 - II-1 には、本実験に用いたラーメン模型の形状寸法を示している。ラーメン模型の形状は、実落石防護覆道断面形状の 1/4 程度の大きさとし、設計計算に用いる単位幅を模擬した幅としている。すなわち、梁材の断面寸法は 200 × 200 mm の正方形断面とし、梁部の純スパンを 2,000 mm、柱部の高さは 1,500 mm としている。

2.2 衝撃実験および静載荷実験概要

写真 - II-1 は、衝撃実験状況を示している。衝撃実験は、跳ね上がり防止治具として M22 ボルトを用いてフーチング部を固定し、梁部中央位置に所定の高さから質量 300 kg の鋼製重錘を自由落下させることにより行っている。また、敷砂緩衝材を有する場合には、重錘衝突点に砂箱を設置し、100 mm 厚の敷砂を設置している。なお、用いた敷砂の物性値は含水比 $w = 8.25\%$ 、湿潤密度 $t = 1.374 \text{ g/cm}^3$ である。

表 - II-1 には、本実験の実験ケースを示している。計測項目は、重錘に内蔵された起歪柱型ロードセルによる重錘衝撃力、非接触式レーザ変位計による変位とした。衝撃実験終了後には試験体側面のひび割れをトレースし、ひび割れ分布図を作成している。

3. 実験結果

3.1 重錘衝撃力

図 - II-2 には、単一載荷のケースにおける重錘衝撃力波形を示す。なお、波形は重錘衝突時の時刻を 0 として整理している。図より、重錘衝撃力は、敷砂緩衝材を設置しない場合には重錘衝突速度にかかわらず、衝突直後に発生する振幅が大きく周期の短い正弦半波状の第 1 波と、振幅が一定で波動継続時間が長い第 2 波により構成されていることが分かる。第 1 波目に発

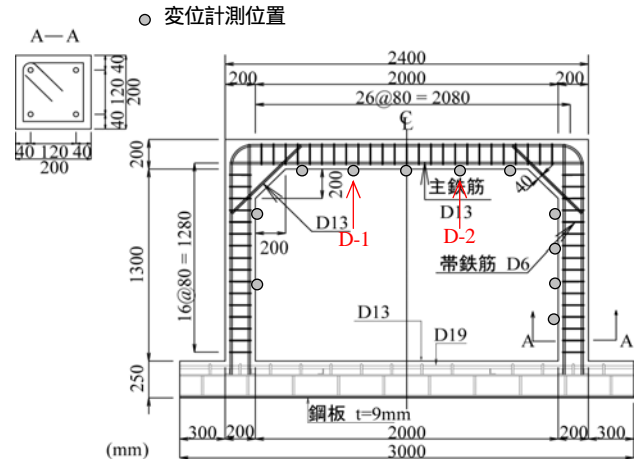


図 - II-1 形状寸法および配筋状況



写真 - II-1 衝撃実験状況

表 - II-1 実験ケース一覧

実験ケース	载荷方法	敷砂	衝突速度 V(m/s)
S	静的	-	-
II	衝撃(繰り返し)	無し	1,2,3,4,5
IS-4	衝撃(単一)	無し	4
IS-5			5
IS-6			6
SIS-6		有り	6
SIS-7			7

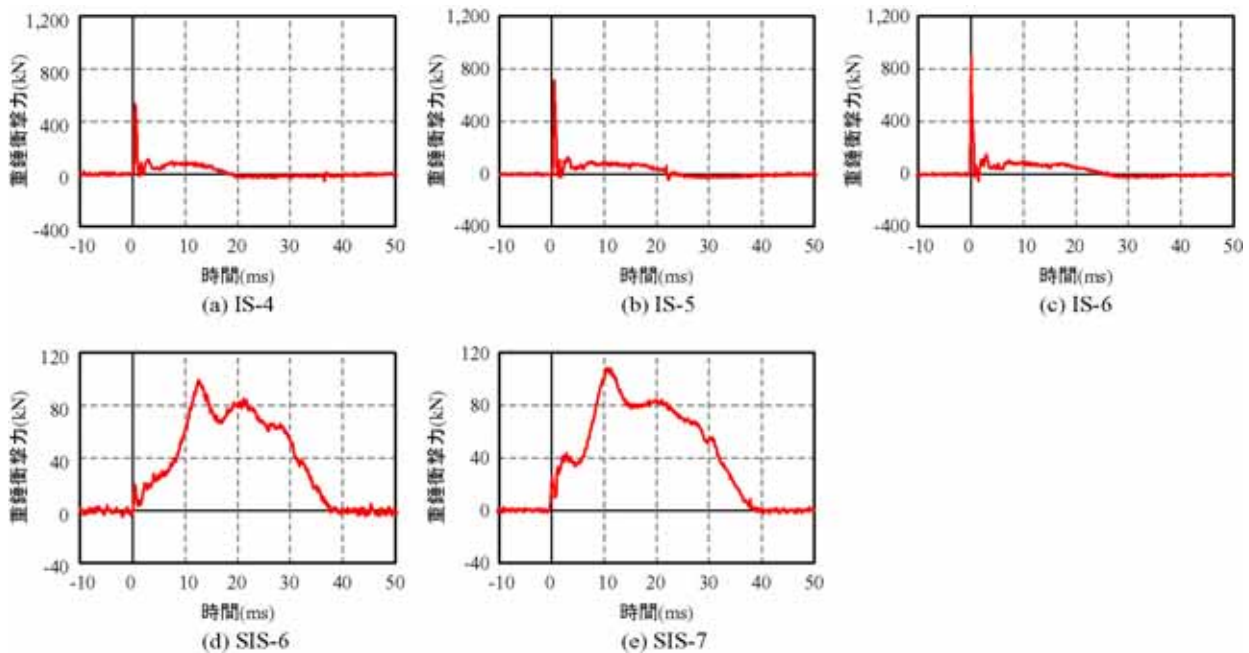


図 - II-2 重錘衝撃力波形

生している重錘衝撃力の最大値は、重錘衝突速度の増加に対応して増大していることが分かる。また、第 2 波目の応答時間に関しても、第 1 波目と同様に重錘衝突速度の増加に対応して、波動継続時間が長くなることが分かる。

これに対して、敷砂緩衝材を設置する場合の波形性状は、敷砂緩衝材を設置しない場合と比較して大きく異なり、衝突直後より周期が 35 ms 程度の正弦半波状の主波動が励起され、かつ周期の短い波形成分が励起している。また、その最大値は同一の衝突速度である IS-6 と比較して、大略 1/10 程度となっている。

これらのことより、敷砂緩衝材を設置することにより、重錘衝撃力は最大値が大幅に減少するとともに、波動継続時間も延長することが分かる。

図 - II-3 には、繰り返し载荷実験を含めた衝撃実験時の最大重錘衝撃力と衝突速度の関係を示している。図より、敷砂緩衝材の有無にかかわらず、最大重錘衝撃力は重錘衝突速度とほぼ比例の関係にあり、高い相関があることが分かる。

3.2 衝撃応答変位

図 - II-4 には、単一载荷時における変位応答波形を示している。なお、時刻は重錘衝撃力波形と同様に重錘衝突時の時刻を 0 としている。また、本実験では、载荷点直下においても変位計を設置していた。しかしながら、敷砂緩衝材を設置しない場合の一部の実験ケースにおいて、载荷点部下面に著しい損傷が発生したことより変位が測定不能となった。このため、本検討

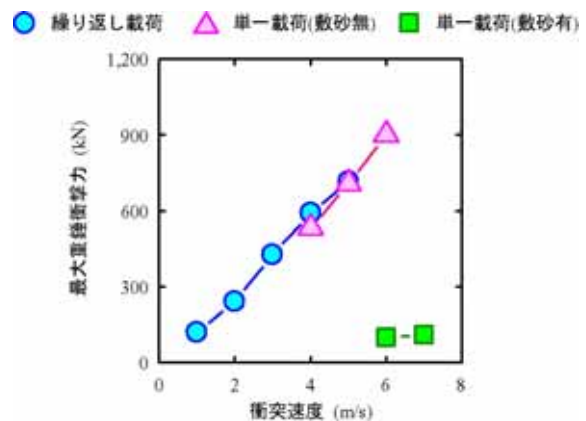


図 - II-3 最大重錘衝撃力 - 衝突速度関係(D-1/D-2)

では载荷点変位を検討項目から除外し、近傍の D-1/2 測点に関する変位波形について検討を行うこととする。

図より、変位波形は、敷砂緩衝材設置の有無および重錘衝突速度にかかわらずほぼ同一の応答性状を示していることが分かる。

敷砂緩衝材を設置しない場合には、重錘衝突より若干遅れて応答が励起し、緩やかに最大応答に至った後、残留変形成分を含む減衰自由振動状態に移行している。

敷砂緩衝材を設置する場合には、応答波形の励起が緩やかになり、最大応答値に至る時刻も遅延する傾向が確認できる。最大変位および残留変位に関しては、同一の衝突速度である IS-6 と SIS-6 とを比較すると、敷砂緩衝材を設置することにより、最大変位で 2/3 程度、残留変位で 1/2 程度に低減されていることが分かる。また、D-1、D-2 共、若干の振幅差が生じてい

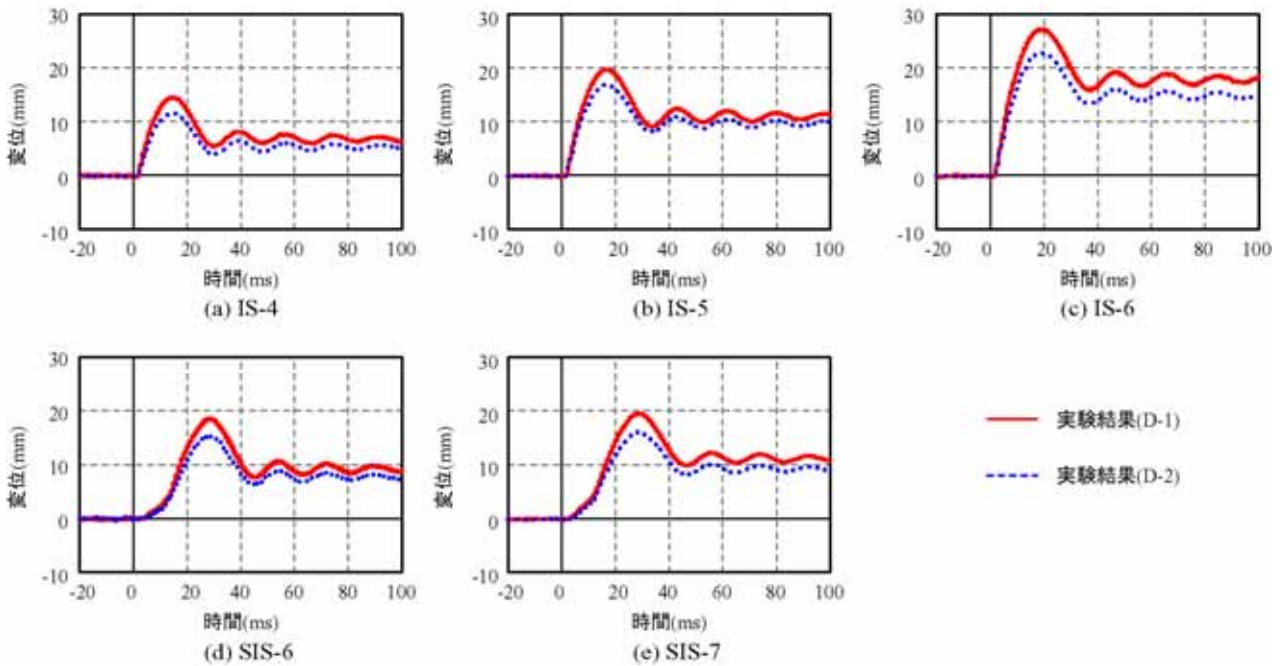


図 - II-4 変位波形(D-1/D-2)

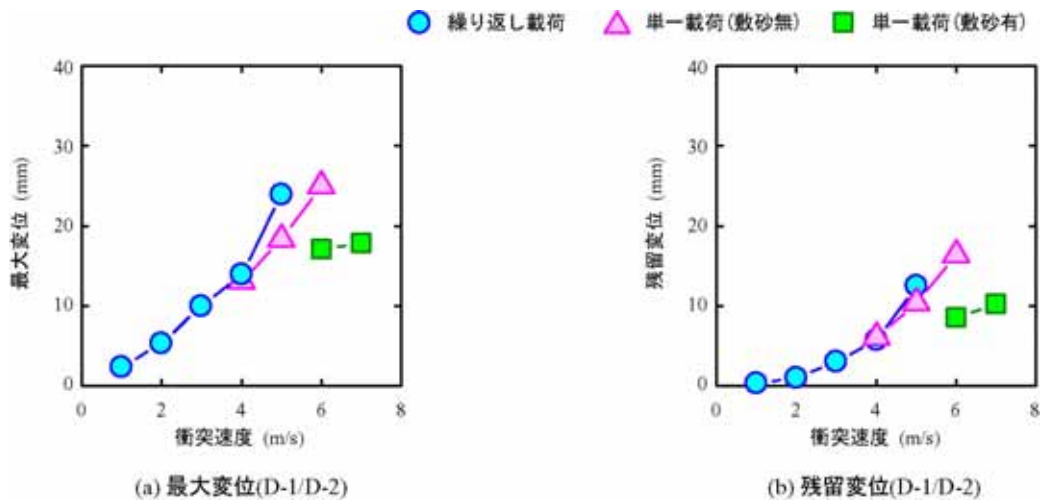


図 - II-5 各応答値 - 衝突速度関係(D-1/D-2)

るもののその差は小さく、実験結果はほぼ対称な応答を示していることが確認できる。

図 - II-5(a)には、繰り返し載荷実験を含めた衝撃実験時の最大応答変位と衝突速度の関係を示している。図より、重錘衝撃力の場合と同様に最大変位に関して、重錘衝突速度とほぼ線形の関係にあり、相関が高いことが分かる。

図 - II-5(b)には、同様に残留変位と重錘衝突速度との関係を示している。

図より、残留変位に関しても衝突速度との間に高い相関性が見られる。しかしながら、残留変位は衝突速度の増加に対応して、放物線状に増加する傾向が見られる。

このような応答性状により、本実験の範囲内では、各種応答の傾向が急変するような構造的終局状態には至っていないことが推察される。また、敷砂緩衝材を設置することで、最大変位、残留変位ともに低減可能であり、その緩衝効果が確認できる。

3.3 変形状

図 - II-6 には、変位分布性状を各時刻ごとに示している。なお、静的実験結果に関しては載荷点直下の変位量で、衝撃実験結果に関しては重錘衝突からの経過時間で整理している。なお、衝撃載荷実験では最大変位時、実験終了後についても整理している。図より、衝撃実験結果においては、重錘衝突速度の違いによる変形状の差異は確認できず、変位量の違いはあるも

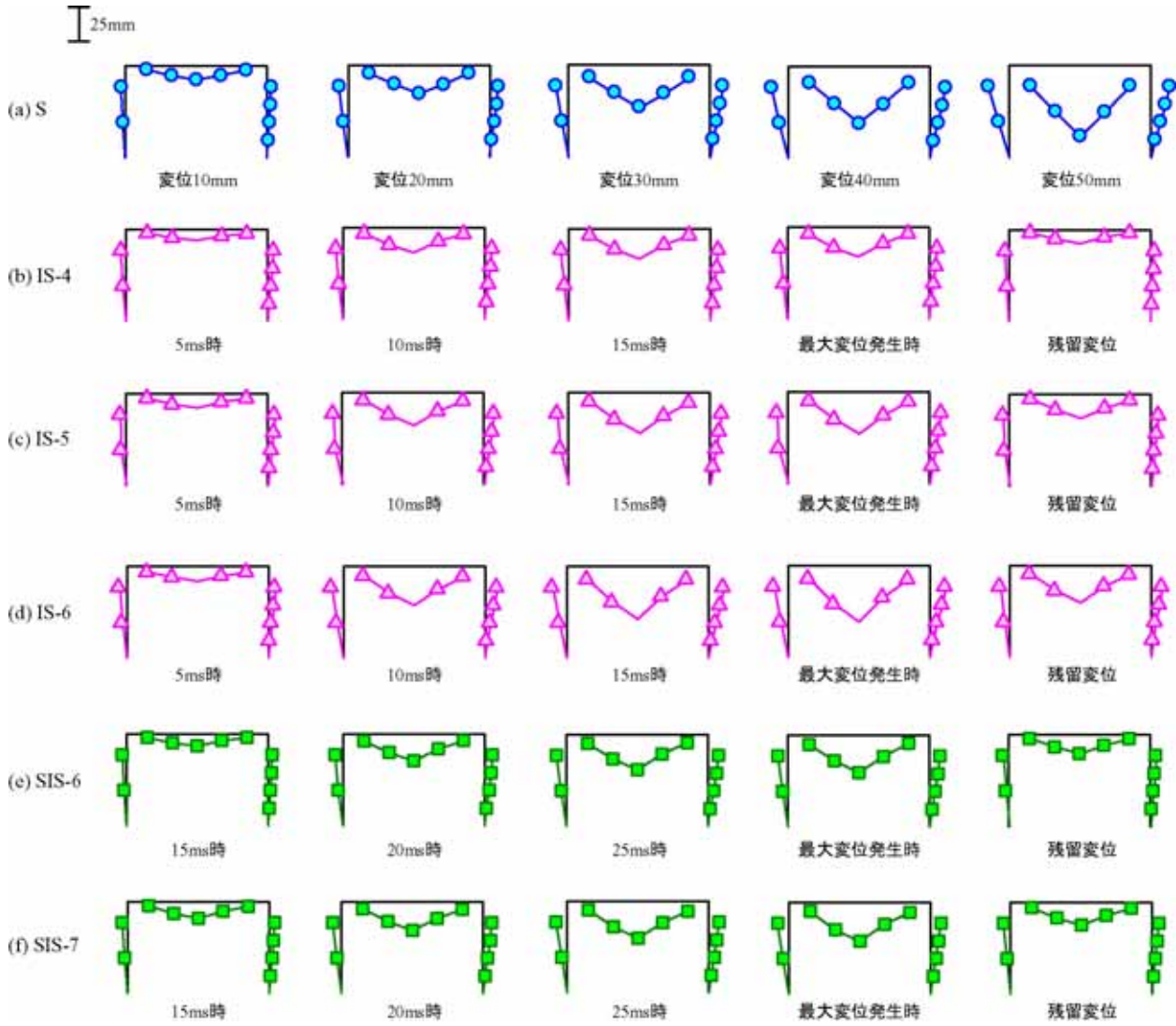


図 - II-6 変形性状

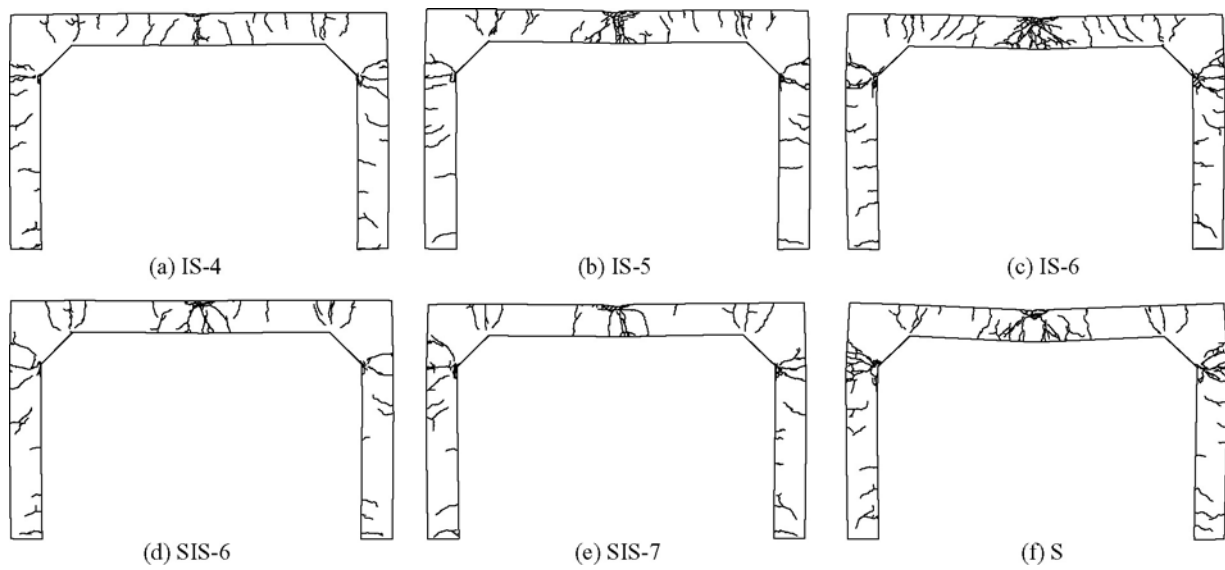


図 - II-7 ひび割れ分布性状

の、その変形性状は大略類似していることが分かる。また、敷砂緩衝材設置の有無による変形性状の差異についても、変位量の差以外には確認できない。

静的実験結果と衝撃実験結果を比較すると、変形性状に関してはほぼ同一であることが分かる。これより、RC ラーメン構造に関しては、構造が終局に至るまでは、衝撃応答性状は静的な変形性状とほぼ同一であるものと推察される。

3.4 ひび割れ分布性状

図 - II-7 には、実験終了時のひび割れ分布性状を示している。図より、衝撃実験結果、静的実験結果ともに、頂版部では載荷点近傍において正曲げによる曲げひび割れが、隅角部近傍においては負曲げによる曲げひび割れが確認できる。また、載荷点近傍に見られる斜めひび割れについても、同様に確認できる。

ここで、敷砂緩衝材設置の影響について着目すると、敷砂緩衝材を設置することで載荷点部の損傷が抑えられる傾向にあることが確認できる。さらに、せん断ひび割れである斜めひび割れの発生は抑制されていることが分かる。隅角部には、どの試験体においても特に損傷は見られない。側壁部では、全ての試験体において、隅角部近傍では外側に、基部近傍では内側に曲げによるひび割れが確認できる。載荷点および隅角部のハンチ下部に損傷が集中する傾向も、全試験体において同様の傾向を示している。

これらのことより、動的な破壊性状は静的な破壊性状とほぼ同一であるものと推察される。

また、敷砂緩衝材設置の有無については、変位分布性状に関して大きな差異が出現しないことから、載荷点近傍部における損傷程度に差異はあるものの、ほぼ同様の傾向を示すものと判断される。

以上より、RC ラーメン構造の衝撃応答特性は静載荷時のそれと類似しているものと考えられ、耐衝撃性能を評価する際に衝撃荷重を静的荷重に置換する手法によって、比較的良好に照査できる可能性が示唆された。

4. まとめ

本研究は、落石防護覆道の性能照査法の確立に寄与することを目的に、小型 RC ラーメン模型に対する重錘落下衝撃実験を行い、その耐衝撃挙動について検討を行ったものである。

本研究の範囲内で得られた結果をまとめると、以下の通りである。

(1)敷砂緩衝材の緩衝効果は確認されたものの、応答変

位性状および破壊性状に与える影響は軽微であった。

(2)静載荷実験結果と重錘落下衝撃実験結果の変位性状は、両者ほぼ同様の性状を示すことが確認された。

(3)RC ラーメン構造の耐衝撃性能は、衝撃荷重を静的荷重に置換することによって、比較的良好に照査できる可能性が示された。

今後は、静的な耐荷性能と耐衝撃性能との関係を詳細に検討し、耐衝撃性能照査手法の確立に向けて研究を進める。

III. 杭付き落石防護擁壁の耐衝撃挙動に関する研究

1. はじめに

支持層が深い場合で擁壁設置位置と斜面法尻が近接している箇所において、落石防護擁壁を設置する場合、置き換え基礎の施工に伴い、その斜面法尻を掘削しなければならず、斜面崩壊の危険が懸念される。これらのことから、斜面法尻の掘削を最小限に出来る新たな工法として、二層緩衝構造を併用した杭付落石防護擁壁構造の提案を行ってきた^{III-1)}。

本研究では、上記提案の二層緩衝構造を併用した杭付落石防護擁壁構造について、さらなる躯体規模の縮小化および施工性向上を目的に、図 - III-1 に示すような RC 壁部分の鋼管杭を H 形鋼に変えて壁厚のスリム化を図る構造形式(改良タイプ)に対する実規模衝撃実験¹⁾や衝撃応答解析を行い、性能照査確認の実施および設計法に関する検討を行ってきた。ここでは、これらの結果を基に策定した、本工法の設計施工要領(案)における設計手法の概要について述べる。

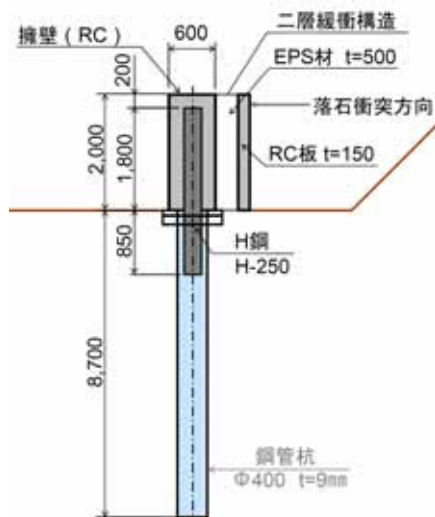


図 - III-1 杭付き落石防護擁壁 (改良タイプ) 概要

2. 設計施工要領(案)における設計手法の概要

2.1 設計方針および設計手法

二層緩衝構造を併用した杭付落石防護擁壁の設計方針および設計手法を以下に示す。

- (1)設計計算は、躯体に作用する落石衝撃力(伝達衝撃力)を求め、静的荷重として杭基礎を含む壁体に作用させ、2次元静的解析により設計する。
- (2)設計計算は、安定計算と断面計算を行う。
- (3)安定計算は、杭の支持力(押し込み力)および変位量の照査をする。
- (4)断面計算は、杭基礎および H 型鋼の応力照査を

行う。

- (5)落石荷重は、振動便覧式で評価する。
- (6)杭基礎の地盤への根入れ深さは $3/l$ とする。
(l は杭の特性値。($1/l$ の範囲で殆どの水平力に抵抗する) この 3 倍を根入れすることで、繰り返し荷重等に対し長期的に安定を図る。)

2.2 設計計算の流れ

設計計算の流れを図 - III-2 に示す。

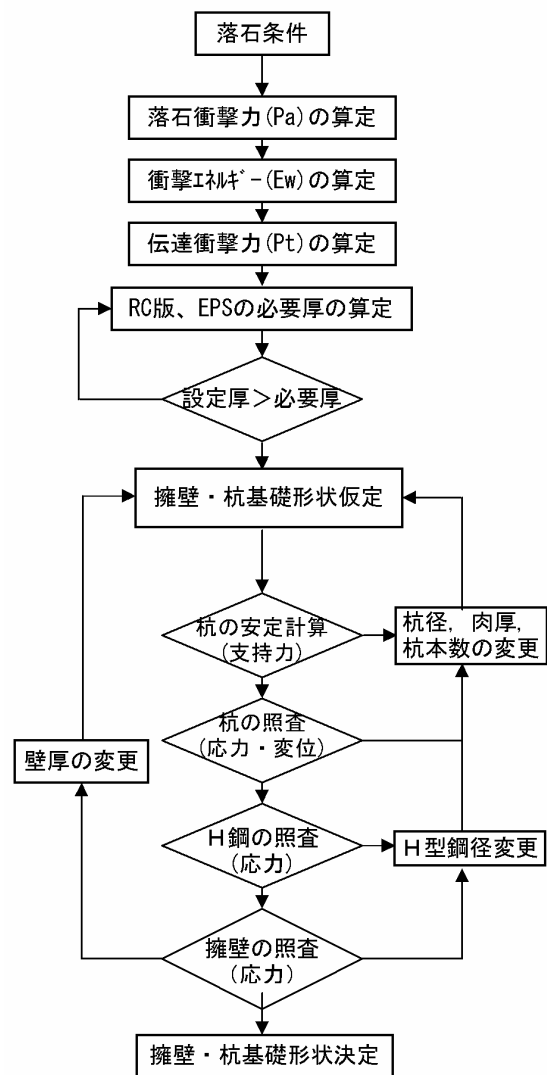


図 - III-2 設計計算の流れ

参考文献

- III-1) 岸 徳光、岡田慎哉、他：杭付形式 RC 落石防護擁壁の重錘衝突実験、第 9 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集、2008.12

RESEARCH FOR EFFICIENCY AND UPGRADING OF THE ROAD DISASTER PREVENTION STRUCTURES

Abstract : This study was conducted for the purpose of rationalizing and sophisticating design methods for rock-fall countermeasures to prevent road disasters.

In order to establish performance-based impact resistant design procedure for RC rock-sheds, falling-weight impact test of large scale RC girders and its numerical simulation were performed by varying heavy weights under identical input impact energy condition. As a result, 1) the relationship between residual displacement and weight of heavyweights were formulated, 2) dynamic response characteristics of RC girders can be appropriately simulated by using proposed numerical analysis method by considering the weight of heavy weight.

In addition, fallingweight impact test of small Rahmen-type RC models with/without sand cushion and its numerical simulation was performed. From this study, dynamic response characteristics of the RC model are similar to those under static loading and it can also be simulated appropriately.

And the new retaining wall against rock fall, which has the two-layered absorbing system and steel pipe piles, was developed and improved in this research. As a result, it was found that the retaining wall had sufficient impact resistance performance and the draft of guideline for the design & construction method was made.

Key words : road disaster prevention structure, falling-weight impact test, Rarmen-type RC structure, rock-falling defensive retaining wall with piles