

## RC ラーメン構造の耐衝撃挙動に関する実験的検討 および数値解析手法の妥当性検討

Experimental study on impact resistant behavior of Rahmen-type RC structures and its numerical simulations

岡田 慎哉\*, 岸 徳光\*\*, 西 弘明\*\*\*, 今野 久志\*\*\*\*

Shin-ya Okada, Norimitsu Kishi, Hiroaki Nishi and Hisashi Konno

\*修(工), 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 条 3 丁目 1 番 34 号)

\*\*工博, 室蘭工業大学 理事・教授, 工学部 建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27 番 1 号)

\*\*\*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 条 3 丁目 1 番 34 号)

\*\*\*\*博(工), 寒地土木研究所 主任研究員, 寒地構造チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1 番 34 号)

In order to establish performance-based impact resistant design procedure for RC rock-sheds, falling-weight impact test of small Rahmen-type RC models with/without sand cushion was conducted. And its numerical simulation was performed by means of three-dimensional elasto-plastic finite element method and its applicability was investigated comparing with experimental results. The results obtained from this study are as follows: 1) absorbing effects of the sand cushion are significant but dynamic response characteristics of the model can't be much affected by sand cushion; 2) dynamic response characteristics of the RC model are similar to those under static loading; and 3) dynamic response behavior of the RC model under falling-weight impact loading can be better simulated by using proposed numerical analysis method.

*Key Words : Rahmen structure, Impact response, Impact response analysis, Performance verification method*

キーワード： ラーメン構造, 衝撃挙動, 衝撃応答解析, 性能照査法

### 1. はじめに

我が国の国土は山岳地帯が大部分を占め、急峻な地形を呈していることから、海岸線や山岳部の斜面に沿って交通網が整備されている場合が多い。このような地理条件の下に道路網を整備する場合には、計画立案の段階において可能な限り安全となるルートを選定した上で、斜面災害に対する対策を講じることが必要である。道路における斜面災害対策の1つとして、写真-1に示すような落石防護覆道（以下、落石覆道）が挙げられる。落石覆道は、比較的大きな落石エネルギーに対応した落石対策工であり、沿岸道路や山岳道路などに多数設置されている。

現在、落石覆道は一般に以下の要領<sup>1)</sup>で設計が行われている。すなわち、1) 対策対象となる落石の比高や斜面の状態から、落石衝突エネルギーを決定する。2) 決定された落石衝突エネルギーに対して、落石対策便覧で規定している衝撃力算定式を用いることにより最大衝撃力を決定する。3) この最大衝撃力を静的荷重に置き換えて、骨組解析により断面力を算定する。4) 求められた断面力に対して、許容応力度法を適用し、断面設計を行う。

しかしながら、過去の被災事例の検証や数値解析的



写真-1 落石防護覆道の例

検討から、許容応力度法により設計された落石覆道は、設計入力エネルギーに対して、大きな安全余裕度を有していることが明らかとなっている<sup>2)</sup>。これより、落石覆道に対する限界状態設計法を確立し、その設計法の下で耐衝撃設計を実施することが可能になれば、大幅な建設コストの縮減を実現することができる。すなわち、新設覆道の場合には設計の合理化によって構造のスリム化が可能となり、既設覆道の場合

には補強工を合理的かつ最低限に留めることが可能になる。

一方、我が国における土木構造物の設計思想は、許容応力度法から限界状態設計法を経て、性能照査型設計法に移行しつつある。このような状況下において、土木学会では耐衝撃設計に関しても性能照査型設計を実現するために、その設計手法の確立に向けた検討を行っている。著者らも、重錘落下衝撃実験結果に基づき、小型 RC 梁を対象とした三次元弾塑性衝撃応答解析法の適用性<sup>3)</sup> 検討や、さらにはその解析手法を踏襲した場合における実規模 RC 桁への適用性<sup>4)</sup> に関する検討を行ってきた。また、実規模 RC 部材に関する簡易で合理的な衝撃挙動解析法の確立を目的に、要素分割数を低減した場合においても工学的に妥当な数値解析結果を得るための方策として、破壊エネルギー等価の概念を導入して換算引張強度を評価する手法を提案<sup>5)</sup> している。

しかしながら、現状において落石覆道の設計に性能照査型設計法を適用するためには、各種限界状態の規定や照査方法の確立など、課題も多い。さらに、落石防護覆道は一般的に箱型の断面を有しており、左右には柱部と側壁部、上下には頂版と底板が配置されており、剛性が全て異なる。そのため、衝撃荷重作用時の挙動は複雑なものとなる。また、覆道上部には緩衝材が設置され、落石衝突により構造物に作用する衝撃荷重を評価することも難しく、容易に性能を照査することは困難である。

これらのことより、本研究では落石防道の性能照査法の確立に寄与することを目的とし、小型 RC ラーメン模型（以下、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。また、本実験では敷砂緩衝材の設置の有無が耐衝撃挙動に及ぼす影響についても検討を行っている。検討は、重錘衝撃力、内空変位、ひび割れ分布について、静載荷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。

また、落石覆道の基本構造となる RC ラーメン構造形式の衝撃応答特性や耐衝撃性能を適切に評価可能な数値解析手法を確立することを目的に、前述の著者らが提案した衝撃応答解析手法<sup>5)</sup> による本実験の再現解析を行い、実験結果と比較する形で RC ラーメン構造への適用性に関する検討も行っている。

なお、本研究の弾塑性衝撃応答解析には、陽解法に基づく非線形動的構造解析用汎用コード LS-DYNA (ver. 971)<sup>6)</sup> を用いている。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

図-1 には、本検討で実験に用いたラーメン模型の

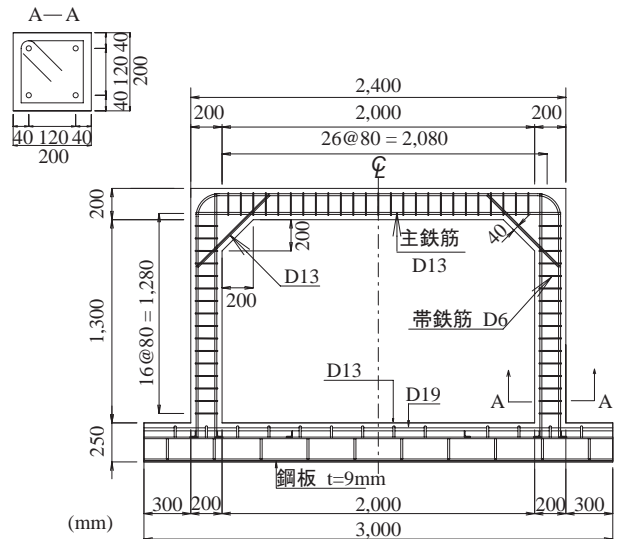


図-1 形状寸法および配筋状況

表-1 材料一覧

材料	圧縮強度 / 降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)
コンクリート	25.3	-
主鉄筋 D13	391	569
帯鉄筋 D6	365	532

形状寸法および配筋状況を示している。ラーメン模型は、衝撃挙動の把握が容易にできるように、梁部、側壁部、柱部とも同一断面を有する部材で構成される単純なラーメン構造とし、さらに版効果が出現せず、平面骨組構造として挙動するように正方形断面とした。また、ラーメン模型の大きさは、実験装置の大きさの制約などから実落石覆道の 1/4 程度の縮尺模型とした。すなわち、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、柱部の高さを 1,500 mm としている。

表-1 には、実験時における材料強度を一覧にして示している。

ラーメン模型の配筋は、実落石覆道の頂版部と同程度の鉄筋比を有するように配慮して設定した。すなわち、軸方向鉄筋は、鉄筋比約 1.2% となるように D13 を 4 本用い、かぶりを 33 mm として配筋した。また、帯鉄筋は、鉄筋比約 0.4% を有するようにかつ軸方向鉄筋との径のバランスを考慮し、D6 を用いて断面有効高さの 1/2 である 80 mm 間隔に配筋している。

フーチング断面は、ラーメン模型の幅方向長さ 3,000 mm、奥行き方向長さ 800 mm、高さ 250 mm とする矩形体とした。なお、フーチングには鋼製アングル材を埋設するとともに、底面には設置面の平滑性を確保するために厚さ 9 mm の鋼板を配置している。



写真-2 衝撃実験状況

表-2 実験ケース一覧

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

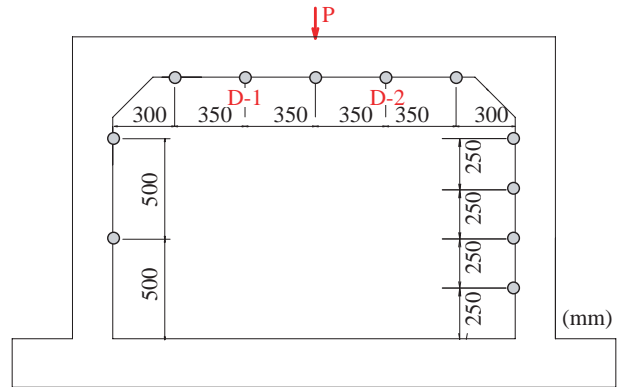


図-3 変位計測位置

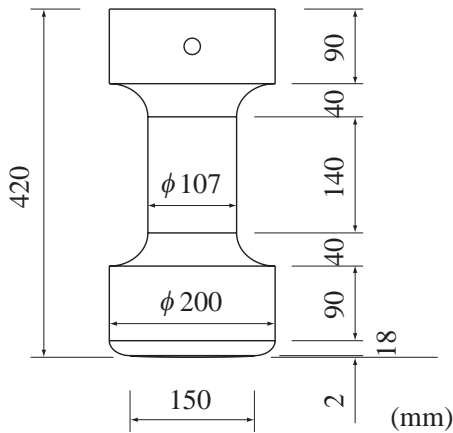


図-2 重錘先端形状

## 2.2 衝撃実験概要

写真-2には、衝撃実験状況を示している。衝撃実験は、ラーメン模型の梁中央位置に所定の高さから鋼製重錘を自由落下させる重錘落下方式により行っている。なお、ラーメン模型のフーチング部は、跳ね上がり防止を目的として、M22 ボルトを用いて実験装置の架台に固定している。また、敷砂緩衝材を考慮する場合には、梁中央部の重錘衝突部に、砂箱による周辺拘束の影響が発生しないように、十分に大きな500 mm × 500 mm の砂箱を偏心しないように設置し、その中

に厚さ100 mmの敷砂を設置することとした。用いた敷砂の物性値は、含水比  $w = 8.25\%$ 、湿潤密度  $\rho_t = 1.374 \text{ g/cm}^3$  であった。

荷重載荷方法は、所定の衝突速度で一度だけ載荷する単一載荷と、1回目の衝突速度を1 m/sとし1 m/s毎に衝突速度を漸増させる繰返し載荷の2方法とした。図-2には、実験に用いた重錘の形状を示す。実験に用いた重錘は、質量が300 kg、衝突部直径が150 mmの円柱状鋼製重錘であり、底部には衝突時の片当たりを防止するために高さ2 mmのテープを施している。なお、静載荷時の結果と比較するために、静的載荷実験も併せて実施している。静的載荷実験は、衝撃実験と同一箇所に重錘径と等しい矩形載荷盤を設置し、油圧ジャッキを用いて実施している。

表-2には実験ケースの一覧を示している。本研究では、敷砂緩衝材を設置しない場合に関しては、最初に重錘の最終衝突速度を  $V = 5 \text{ m/s}$  とする繰返し載荷実験を実施し、その後  $V = 4 \text{ m/s}$ 、 $5 \text{ m/s}$ 、 $6 \text{ m/s}$  とする単一載荷実験を実施した。また、敷砂緩衝材を設置する場合には単一載荷実験のみを実施した。その時の重錘衝突速度は、緩衝材を設置しない場合の実験結果と比較することを考慮し、 $V = 6 \text{ m/s}$  と  $7 \text{ m/s}$  とした。その他、前述の通り、静的載荷実験を1ケース実施している。

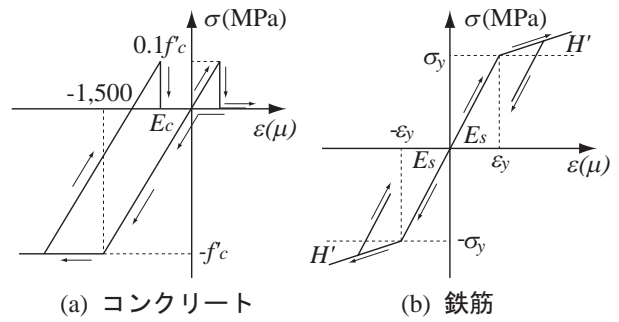
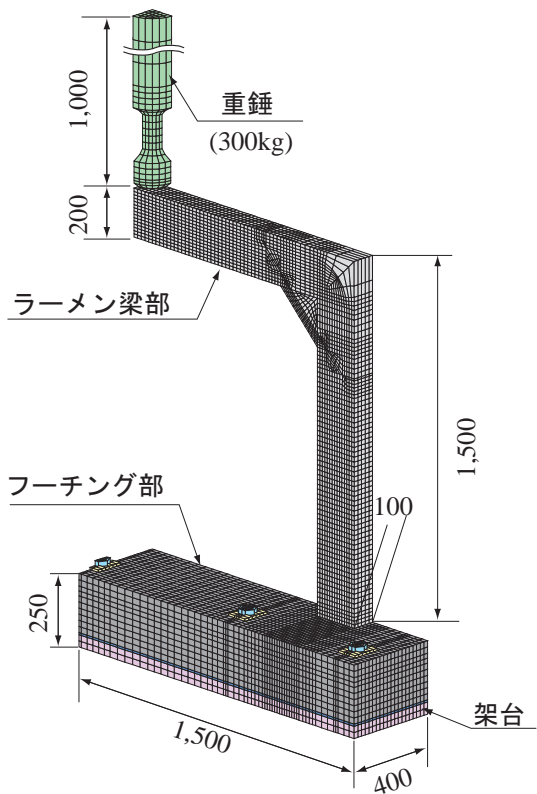


図-5 各材料の応力-ひずみ関係

計測項目は、重錘衝撃力およびラーメン模型内面における法線方向変位である。これらの計測にはそれぞれ起歪柱型ロードセルおよびレーザ式非接触型変位計を用いている。図-3には、変位計測位置を示している。また、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. 数値解析概要

#### 3.1 数値解析モデル

図-4には、本数値解析で用いた要素分割モデルおよび配筋モデルを示している。なお、本研究では、敷砂を設置しない場合における単一載荷実験のみを対象として解析を行うこととする。

解析モデルは、構造および荷重条件の対称性を考慮して、スパン方向および断面幅方向の中心線位置で2等分した1/4モデルとしている。各要素において、コンクリート、重錘およびフーチング部には8節点の三次元固体要素を、鉄筋には2節点の梁要素を用いている。要素の積分点数は、三次元固体要素には衝撃応答時の大変形にも追従可能とするため1点積分を用い、鉄筋要素には $2 \times 2$  Gauss 積分を用いている。解析モデルの総節点数、総要素数は、それぞれ34,127, 30,784である。

境界条件は、実験状況を極力再現して解析するために固定治具をすべてモデル化し、架台底面を完全固定とした。なお、モデルの対称境界面には全てシンメトリ条件を入力している。また、コンクリートと鉄筋の要素間は完全付着と仮定し、重錘とコンクリート、フーチングと架台、フーチング固定用ボルト穴とボルトの要素間には、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。

減衰定数は、質量比例項のみを考慮するものとし、事前に本解析モデルにより固有振動数を解析的に求め、既往の研究<sup>3)</sup>と同様に、構造の鉛直方向最低次固有振動数に対して0.5%と設定している。なお、衝撃力は載荷位置に配置した質量300kgの重錘に初速度を入力することにより与えている。

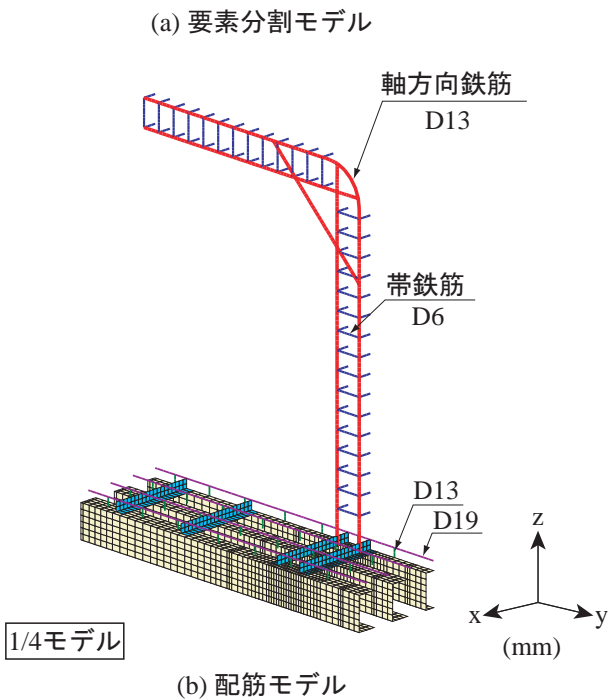


図-4 解析モデル図

これらの実験ケース名は、第1文字目は静的載荷実験と衝撃載荷実験に関する指標 (S: 静的載荷実験, I: 衝撃実験), 2文字目は単一載荷と繰返し載荷に関する指標 (S: 単一載荷実験, I: 繰返し載荷実験), また敷砂を設置する場合には3文字目としてSを付している。単一載荷実験の場合には、さらにハイフンの後に衝突速度 (m/s) を付している。

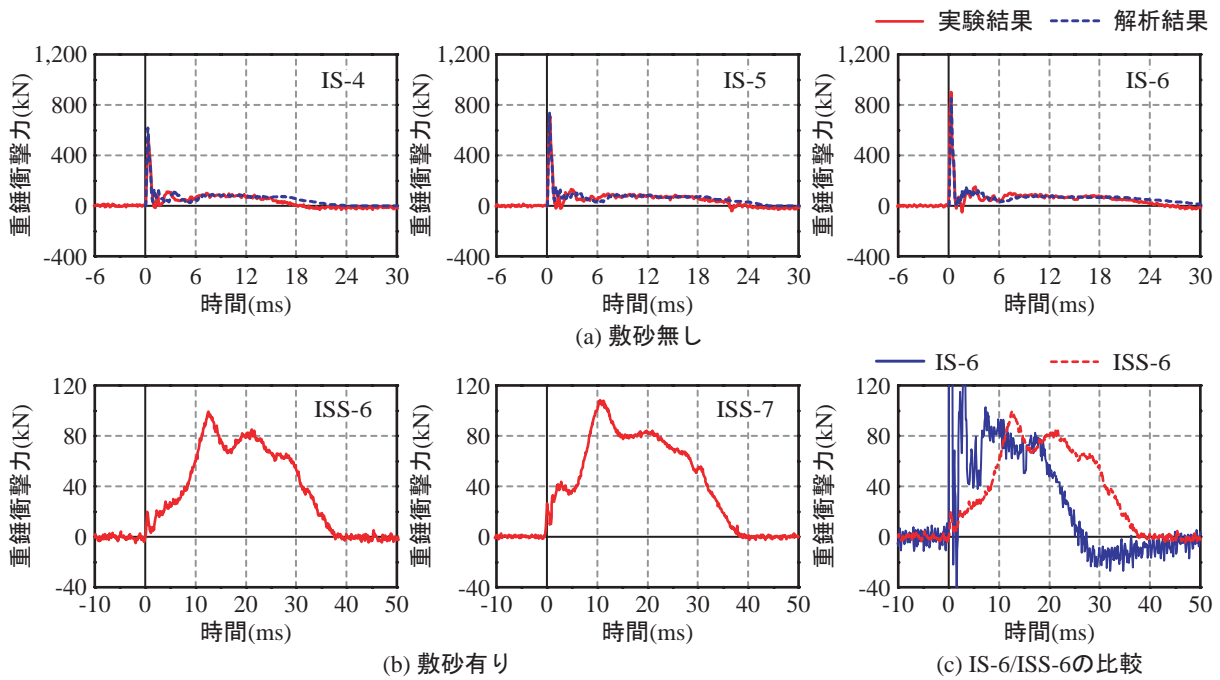


図-6 重錘衝撃力波形分布

### 3.2 材料物性モデル

図-5(a)には、本数値解析で定義したコンクリートに関する相当応力-ひずみ関係を示している。モデルは完全弾塑性体のバイリニア型としてモデル化し、そのひずみが $1,500\ \mu$ に達した段階で降伏するものとした。本研究では、強度試験から得られた圧縮強度 $f_c$ を降伏応力として定義することとし、この2値から弾性係数を定めるものとした。さらに、引張側に関しては、引張強度 $f_t$ を超過した場合に、それ以降一切の引張応力を伝達しないものとするカットオフを定義している。これによりひび割れによる損傷を模擬している。

なお、本解析モデルでは、試験体寸法や配筋状況等を考慮して、形状の再現性から軸方向要素長を $20\ \text{mm}$ としてモデル化を行っている。本解析では、引張強度 $f_t$ に関しては、既往の数値解析結果<sup>5)</sup>を参考に、軸方向要素長 $35\ \text{mm}$ の場合において一要素に一本の貫通ひび割れが発生する時の破壊エネルギーを基本に、要素長が異なる場合においても等価な破壊エネルギーでひび割れの発生を評価可能にするように換算引張強度を設定することとした。なお、換算引張強度を適用しない従前の解析手法を用いる場合には、基準要素より要素長が小さい場合において、既往の検討結果と同様に応答値が過大になることを確認している。コンクリートの物性値は、単位体積質量 $\rho = 2.4\ \text{g/cm}^3$ 、ポアソン比 $\nu = 0.167$ とし、要素の換算引張強度は要素長 $20\ \text{mm}$ に対して $f_{20} = 3.17\ \text{MPa}$ と設定した。なお、降伏の判定には、Drucker-Pragerの降伏条件式を採用している。

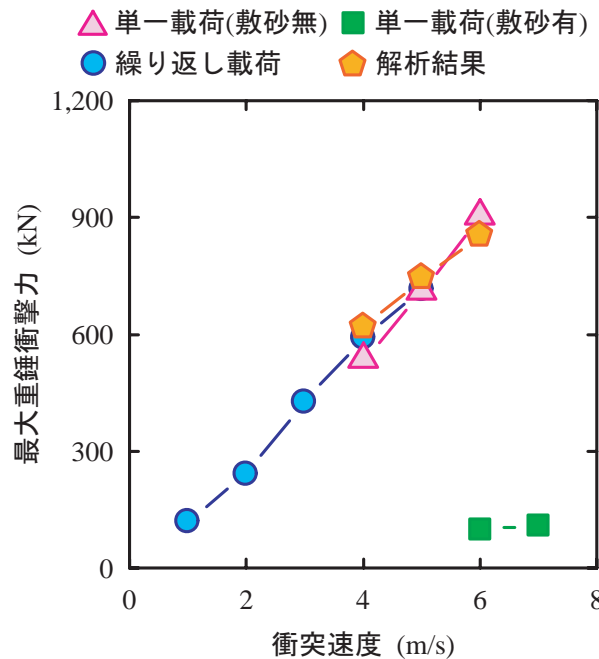


図-7 最大重錘衝撃力-衝突速度の関係

図-5(b)には、鉄筋要素に関する応力-ひずみ関係を示している。鉄筋要素は、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とし、バイリニア型にモデル化した。塑性硬化係数 $H'$ は、初期弾性係数 $E_s$ の1%と定義している。降伏の判定は、von Misesの降伏条件に従うこととした。各材料定数は、弾性係数 $E_s = 206\ \text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu = 0.3$ 、単位体積質量 $\rho = 7.85\ \text{g/cm}^3$ 、降伏応力は実験結果の値を用いた。なお、フーチング内部の鉄筋に関しては、応答値が弾性範囲

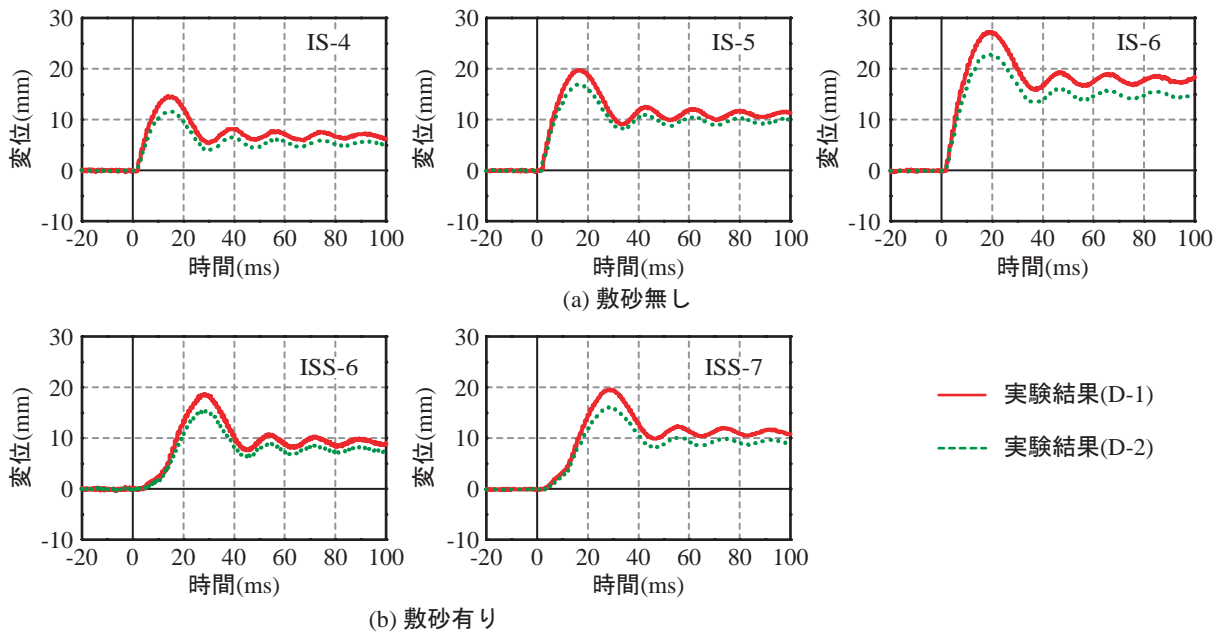


図-8 変位波形 (D-1/D-2) に関する実験結果と解析結果の比較

内であるものと推察されることより、解析コストの削減を図るため弾性体と仮定した。

本実験の衝突速度の範囲内では、重錘の衝突速度やその衝突エネルギーの大きさから、ひずみ速度効果が解析結果の応答性状に与える影響は小さいものと判断し、これを考慮していない。

#### 4. 実験結果および解析結果

##### 4.1 重錘衝撃力

図-6には、単一载荷時の実験ケースに関する重錘衝撃力波形を示している。波形は、縦軸には重錘衝撃力を、横軸には時間を重錘衝突時点を原点に取って整理している。また、IS-4、IS-5、IS-6試験体に関しては、比較のために数値解析結果も示している。図中の実線および破線はそれぞれ実験結果および数値解析結果である。

図より、重錘衝撃力波形は、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、その後生じる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波目に生じ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波の波動継続時間に関しても、同様に重錘衝突速度の増加に対応して伸びていることが分かる。

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っている。すなわち、衝突直後より周期が35ms程度の正弦半波状の主波動が励起され、かつ周期の短

い波形成分も励起している。また、その最大値は同一の衝突速度であるIS-6試験体とISS-6試験体を比較すると、大略1/10程度となっている。(c)図より、ISS-6試験体における応答性状は、IS-6試験体の第2波の応答性状とその周期に若干の差異が認められるものの大略対応していることが分かる。これより、敷砂緩衝材を設置しない場合において最大応答値を示す第1波目の応答波形は、重錘が試験体のコンクリートと衝突した瞬間の局所的な応答であり、これが敷砂緩衝材を設置することで消失したものと推察される。その後の第2波目は重錘が試験体全体を押し込んでいる状態と考えられ、敷砂緩衝材の有無にかかわらず同様に生じているものと考えられる。

これらのことより、敷砂緩衝材を設置することにより、衝撃初期の衝突位置における局所的な応答が消失し、重錘衝撃力は最大値が大幅に減少するとともに、波動継続時間が延長されるものと推察される。

次に、敷砂緩衝材を設置しない場合の単一载荷時の実験結果と解析結果を比較すると、解析結果は第1波の最大値に若干の差異が生じているものの、第2波の応答値、応答時間ともによく一致しており、これらの傾向をよく再現していることが分かる。

図-7には、数値解析結果を含めた最大重錘衝撃力と衝突速度との関係を示している。図より、敷砂緩衝材を設置しない場合の最大重錘衝撃力には重錘衝突速度との強い相関関係が見られ、衝突速度とほぼ比例の関係にあることが分かる。これより、重錘衝撃力波形の第1波は衝突速度と比例して大きくなるものと考えられる。なお、敷砂緩衝材を設置した場合には、ほぼ一定の応答を示している。また、前述のとおり、解析

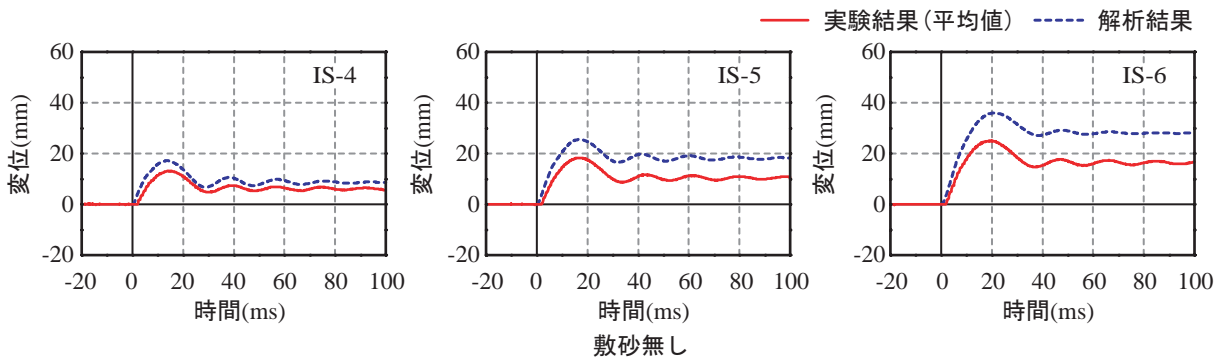


図-9 変位波形に関する実験結果と解析結果の比較

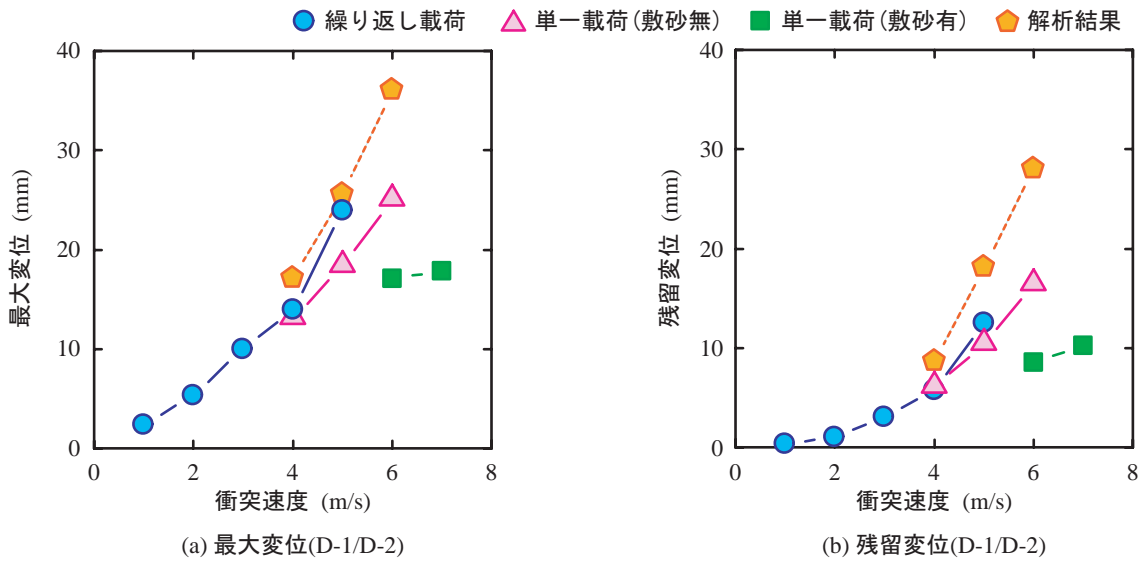


図-10 実験結果における最大変位および残留変位と衝突速度の関係

結果は実験結果と良く対応しており、本解析手法を用いることにより重錘衝撃力を精度よく評価可能であることが明らかになった。

#### 4.2 衝撃応答変位

図-8には、単一载荷時における各実験ケースの応答変位波形を示している。なお、図は重錘衝撃力波形と同様に、縦軸に鉛直変位量を、横軸に時刻を取り、重錘衝突時の時刻を原点に取っている。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ものの、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により、変位が測定不能となった。このため、本検討では、载荷点変位を検討項目から除外し、近傍のD-1/D-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、最大変位や除荷後の振動周期が異なるものの、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類似の波形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、残留変位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、敷砂緩衝材を設置しない場合に比較して、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。同一の衝突速度であるIS-6試験体とISS-6試験体の応答値を比較すると、最大変位および残留変位に関しては、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程度に低減されることが分かる。このことより、敷砂緩衝材を設置しない場合において励起される継続時間が短く振幅の大きい第1波目重錘衝撃力は、変位応答性状に与える影響が大きいことが推察される。また、測点D-1、D-2ともに、若干の振幅差が生じてい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-9には、载荷点近傍における応答変位波形に関する実験結果を解析結果と比較して示している。なお、本検討では、载荷点近傍の計測点D-1およびD-2

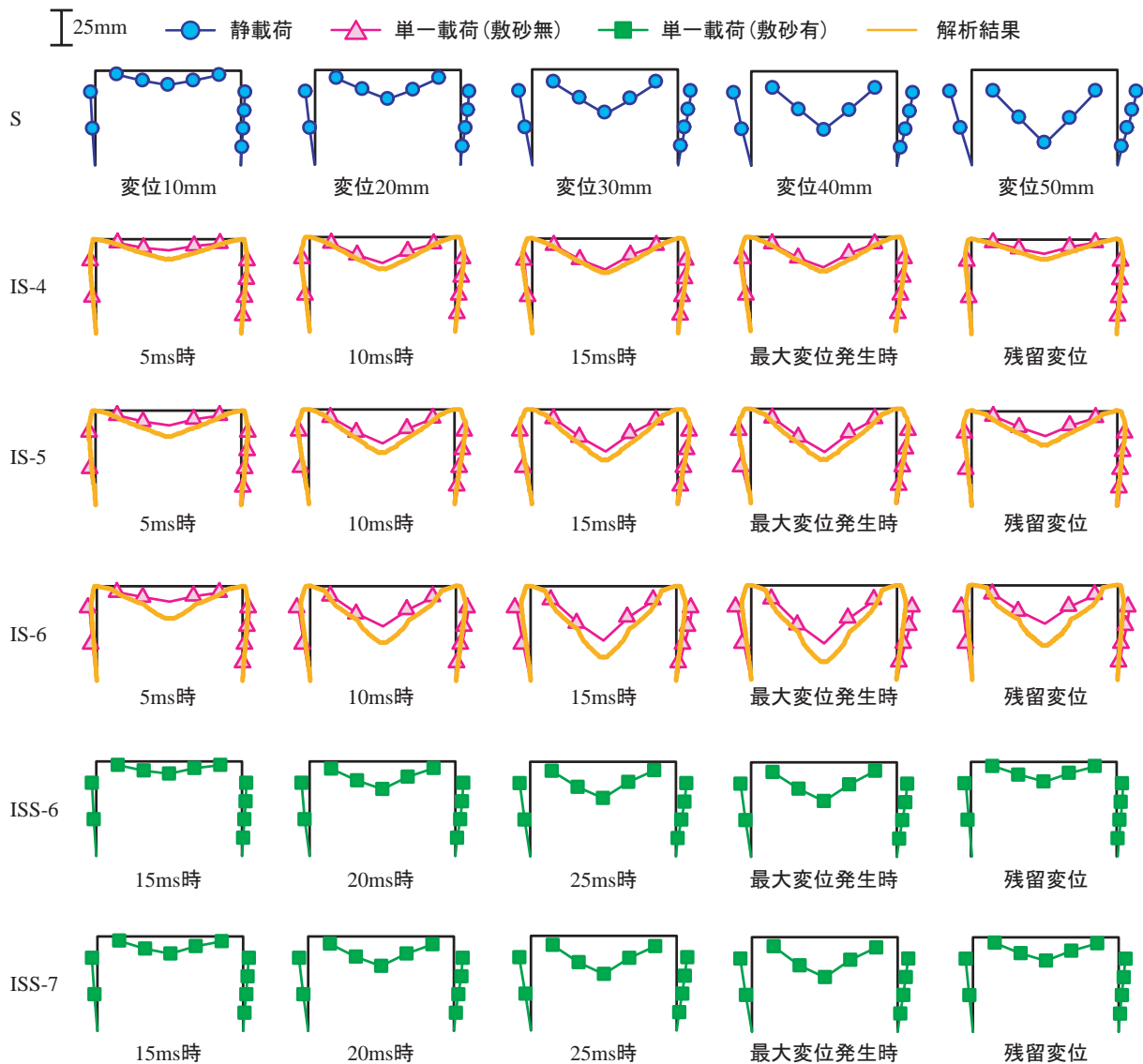


図-11 各経過時点および最大変位発生時における変位分布と残留変位分布

に若干の差異が生じているが、解析モデルは完全対称として計算を行っているため、結果の比較においてD-1とD-2の平均値を用いて比較検討することとした。図より、解析結果は、最大変位発生時刻、自由減衰振動の推移状況や自由振動の振動数などの性状をよく再現しているものの、最大変位および残留変位成分については若干過大評価する傾向を示している。

図-10(a)には、数値解析結果も含めた最大応答変位と衝突速度と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は、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。また、これらの傾向は数値解析でも同様に現れている。

図-10(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、残留変位は最大変位分布と異なり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。これ

より、残留変位は衝突速度よりも衝突エネルギーとの相関が高いことが伺える。また、数値解析結果は実験結果に対して若干過大評価を与えるものの、特性的には実験結果と同様の傾向が確認できる。

このような応答性状により、本実験の範囲内では、いずれの実験ケースにおいても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、残留変位をともに低減可能であることが明らかとなった。

### 4.3 変形状

図-11には、ラーメン全体の変位分布を重錘衝突時点からの経過時間毎および最大変位時、実験終了後について示している。なお、静載荷実験結果に関しては載荷点直下の変位量毎に整理している。また、単一載荷の場合には、比較のために解析結果も重ねて示し



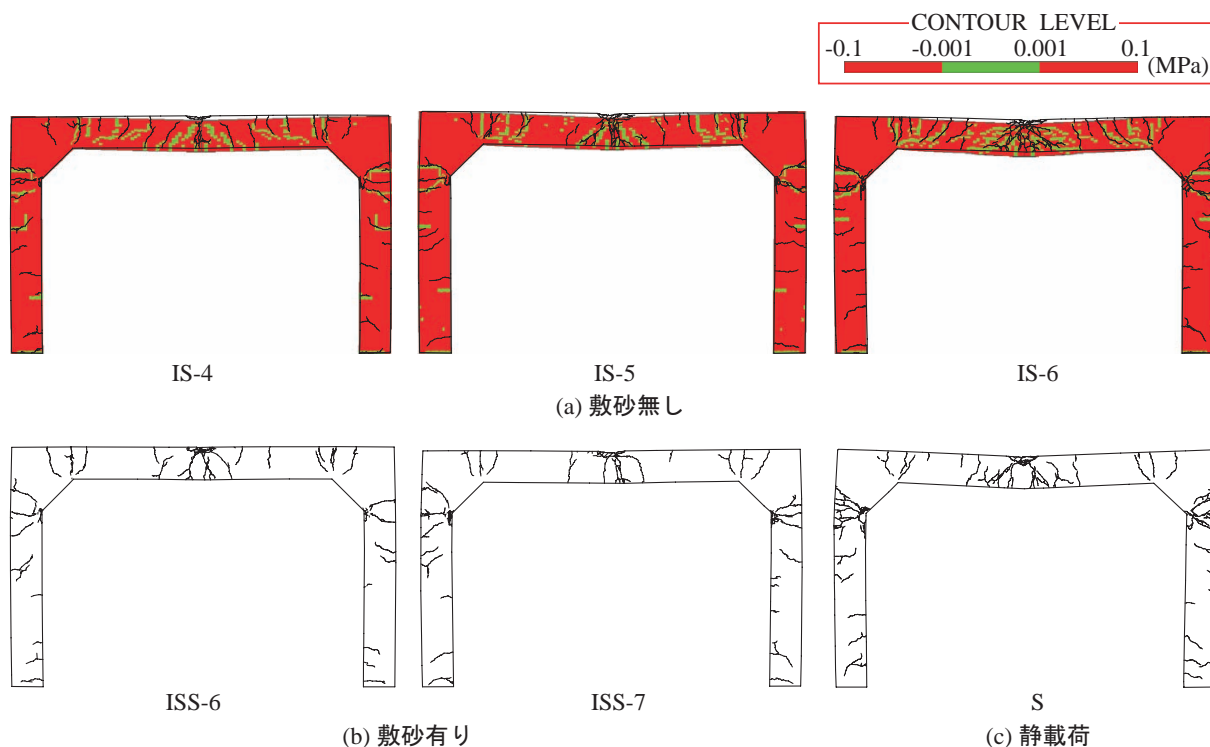


図-12 ひび割れ分布に関する実験結果と解析結果の比較図

ている。図中、荷重点直下の変位計測値が欠測した実験ケースについては、隣接する左右2点の計測値から直線補完して算出した変位量を平均化して連続的に図示するようにしている。

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性状の差異は確認できず、変位量の違いこそあるものの、その変形性状はほぼ同様の傾向を示している。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明瞭な差異は確認できない。さらに、静載荷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類似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、衝撃荷重載荷時の変位分布は終局に至るまで静載荷時の変形分布とほぼ同様であるものと推察される。

数値解析結果について、IS-4 試験体に関する実験結果を数値解析結果と比較すると、衝突初期においては若干の差異があるものの、いずれの時点においても数値解析結果は実験結果とよく対応していることが分かる。一方、IS-6 試験体に関する解析結果は、衝撃荷重載荷初期より荷重点近傍の変形が大きく示されている。これは、実験時に荷重点近傍の損傷が著しくひび割れによる開口が顕在化していることを確認していることより、提案の解析手法がこのような状態まで精度よく追従できないことを示唆している。

これらの結果より、解析結果は、衝突速度が大きい場合に実験結果を過大評価する傾向にあるものの、本実験の範囲内では工学的に安全側で評価可能であるも

のと推察される。また、柱部の水平変位に関しては、解析結果が実験結果を若干過小評価する傾向がみられる。これは、後述するように解析結果の損傷性状が実挙動を十分に再現していないことに起因しているものと推察される。

#### 4.4 ひび割れ分布性状

図-12 には、実験終了時のひび割れ分布を示している。なお、敷砂緩衝材を設置しない場合については、数値解析結果を重ねて示している。図-5(a) に示したコンクリートの応力-ひずみ関係に従うと、図中の緑色で示された領域（コンクリート要素の第一主応力が  $-0.001 \sim 0.001$  MPa の範囲）はひび割れが発生して除荷状態になっているか、もしくは載荷状態で発生応力が小さい要素であることを示すこととなる。従って、変形が大きく示されている領域ではひび割れが発生し除荷状態になっているものとして評価可能である。

図より、衝撃実験結果と静的実験結果ともに、梁部では荷重点近傍において正曲げによる曲げひび割れが、また隅角部近傍においては負曲げによる外縁での曲げひび割れが確認できる。また、荷重点近傍に見られる斜めひび割れに関しても、同様に確認できる。ここで、敷砂緩衝材設置の影響に着目すると、敷砂緩衝材を設置することにより荷重点部の損傷が抑制され、せん断破壊的なモードから曲げ破壊的なモードに推移する傾向にあることが確認できる。いずれの試験体

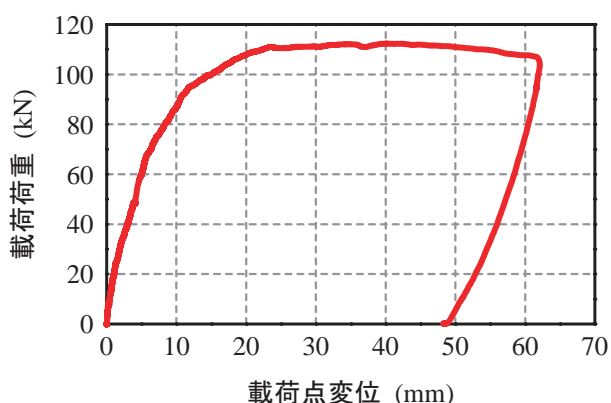


図-13 静載荷時における荷重-載荷点変位関係

においても、隅角部には著しい損傷は見られない。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類似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。

なお、数値解析結果は、これらのひび割れ状況についてもよく再現していることが分かる。特に IS-4、IS-5 試験体の場合に関しては、実験結果におけるひび割れ分布をよく再現している。ただし、IS-6 試験体に関しては、実験結果に比較して柱部のひび割れの発生が少ない。これは、実験結果ではハンチ下部における損傷領域に明瞭な圧壊が確認されているのに対し、数値解析ではこの柱の圧壊が出現していないことから、実験結果に対応した損傷状況が詳細に再現されていないためと推察される。

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ことが明らかになった。このような結果は、RC ラーメン構造の耐衝撃性能が静解析的な手法を用いることによって照査可能であることを暗示している。

## 5. 性能評価手法に関する基礎的考察

前述の検討により、ラーメン模型においては、衝撃荷重載荷による損傷モードと静的荷重載荷による損傷モードに大きな差異はないことが明らかになった。このことより、許容応力度法設計の場合に用いられる手法と同様に、衝撃荷重を損傷が大略等価となるような静的荷重に置換することが可能になれば、複雑な衝撃

応答解析を行うことなく、静的な解析により性能を照査することが可能であるものと考えられる。

本章では、静載荷実験結果を基本に、その荷重の置換手法について検討を行う。

図-13 には、静載荷実験結果における荷重-変位関係を示している。図は横軸に載荷点変位、縦軸に載荷荷重を取って整理している。

図より、載荷荷重は変位量が 10 mm 程度まではほぼ線形に増加し、その後徐々に剛性勾配が低下し、変位量が 20 mm を超えるとほぼ一定となり、変位のみが増加する傾向を示している。

これを衝撃実験における最大変位と比較すると、敷砂緩衝材を設置しない場合には、衝突速度  $V = 2 \text{ m/s}$  において、5 mm 程度の最大変位が生じている。この変位に関して荷重-変位関係から換算静的荷重を求めると、およそ 60 kN の荷重と等価と考えられる。次に、衝突速度  $V = 4 \text{ m/s}$  の場合について同様に求めると、20 mm 程度の最大変位に対して換算静的荷重はおよそ 110 kN となる。これは、静載荷実験における最大荷重とほぼ等価となる。さらに、 $V = 6 \text{ m/s}$  の場合には、最大変位が約 40 mm 程度となるものの、換算静的荷重は  $V = 4 \text{ m/s}$  の場合と同様に 110 kN 程度となる。

これより、衝撃荷重による変位を換算静的荷重により再現しようとする場合には、変位が小さい領域では変位と荷重が対応し、換算荷重に置き換えることが可能である。一方、変位が大きく、完全塑性状態で荷重がほぼ一定となる領域においては、換算静的荷重を特定することは困難であることが明らかになった。

よって、各限界状態を規定する最大変位が弾性的な挙動を示す範囲内であれば、静的な換算荷重に置き換えることが可能であるが、塑性領域に達する場合には換算静的荷重へ置換することは困難となることより、衝撃的な入力荷重から直接的に変位を推定する手法を検討する必要があるものと考えられる。

## 6. まとめ

本研究では、落石覆道の性能照査型設計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。また、併せて著者らが提案している RC 梁の衝撃応答解析手法による数値解析を行い、実験結果と比較することによりその妥当性について検証した。本研究において得られた結果をまとめると、以下のとおりである。

実験結果より、

- (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、両者類似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、静的な照査手法で検討できる可能性が示された。
- (4) 構造の終局状態まで考慮に入れる場合には、衝撃荷重の静的荷重置換法では検討は難しく、衝撃荷重により生じる変位を推定する必要がある。

解析結果より、

- (1) 重錘衝撃力波形に関しては、解析および実験結果の最大値に若干の差異があるものの、波形性状は精度よく対応している。
- (2) 応答変位波形に関しては、最大変位および残留変位値に差異が見られるものの、最大変位発生時刻や自由減衰振動等の波形性状は良く対応している。
- (3) ひび割れ特性に関しては、解析結果は柱部の損傷状況を若干過小評価しているものの、ラーメン構造全体の損傷状況を良く再現している。

今後は、衝撃荷重から変位量を推定する方法を検討し、耐衝撃性能照査手法の確立に寄与できるように、研究を進める予定である。

**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可知典久君、鈴木健之君に多大なるご支援を戴いた。ここに記して謝意を表す。

#### 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：ル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) 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，pp.215-233，1999.4
- 4) 岸 徳光，A.Q.Bhatti，今野久志，岡田慎哉：重錘落下衝撃荷重載荷時の大型 RC 桁に関する衝撃応答解析法の適用性検討，構造工学論文集，Vol.52A，pp.1261-1272，2006.3
- 5) 岸 徳光，A.Q.Bhatti，三上 浩，岡田慎哉：破壊エネルギー等価の概念を用いた大型 RC 桁に関する衝撃応答解析手法の妥当性検討，構造工学論文集，Vol.53A，pp.1227-1238，2007.3
- 6) John O.Hallquist：LS-DYNA User's Manual，Livermore Software Technology Corporation,2000.6

(2008年9月18日受付)