

論文 RC ラーメン模型の重錘落下衝撃挙動に関する実験的検討

岡田 慎哉^{*1}・岸 徳光^{*2}・今野 久志^{*3}・西 弘明^{*4}

要旨：本研究では、RC ラーメン構造形式の衝撃荷重載荷時の応答特性を明らかにすることを目的として、小型 RC ラーメン模型の重錘落下衝撃実験を実施し、衝撃応答特性の検討を行ったものである。検討結果を整理すると、1) 敷砂緩衝材の緩衝効果は確認されたものの、応答性状に与える影響は軽微である。2) 静的実験結果と衝撃実験結果の変位性状に関しては、ほぼ同様の性状を示すことが確認された。3) 耐衝撃性能は、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された。

キーワード：落石防護覆道, RC ラーメン, 重錘落下衝撃実験, 敷砂緩衝材

1. はじめに

我が国の国土特に北海道は、急峻な地形を呈している。そのため、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箇所が多い。このような地理条件の下に道路を整備する場合には、可能な限り安全となるルートを選定したうえで、斜面災害に対する対策を講じることが必然である。

道路の斜面災害対策の1つとして落石防護覆道が上げられる(写真-1参照)。落石防護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、山岳道路や海岸道路などに多数設置されている。

落石防護覆道の現在の耐衝撃設計法は、許容応力度法に基づいて行われる。すなわち、想定される落石の質量や落下高さなどの諸条件から、衝撃荷重を静的荷重に置換し、静的な断面設計を行うことで実施される。

著者らの過去の研究により、落石防護覆道の耐衝撃性能は、構造の限界状態までを考慮した場合には、大きな安全率を有している¹⁾ことが、明らかとなっている。これにより、限界状態設計法で落石防護覆道の耐衝撃設計を実施することが可能になれば、新設設計の場合には合理化によって構造のスリム化が可能となり、補強設計の場合には補強工を合理的かつ最低限に留めることができ、どちらの場合においても建設コストの縮減が見込まれる。また、現在の土木構造物の設計思想は、限界状態設計法を経て、性能照査型設計に移行しつつある。これらのことより、落石防護覆道においても性能照査型設計の導入が急がれる。

しかしながら、現状において落石防護覆道の設計に性能照査型設計を適用するには、限界状態の規定や、性能照査方法の確立など、課題も多い。さらに、落石防護覆



写真-1 落石防護覆道の一例

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、上下には頂版と底版が配され、おのおのの剛性がすべて異なるため、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配され、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、簡易に性能を照査することは難しい。

これらのことより、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。

*1 土木研究所寒地土木研究所 寒地構造チーム 研究員 修(工) (正会員)

*2 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科 教授 工博 (正会員)

*3 土木研究所寒地土木研究所 寒地構造チーム 主任研究員 博(工) (正会員)

*4 土木研究所寒地土木研究所 寒地構造チーム 総括主任研究員 博(工) (正会員)

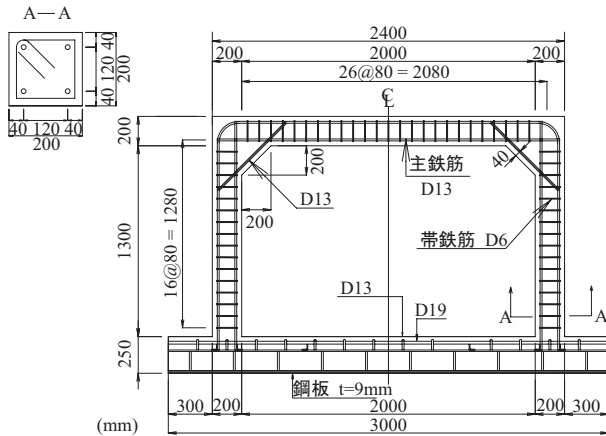


図-1 形状寸法および配筋状況

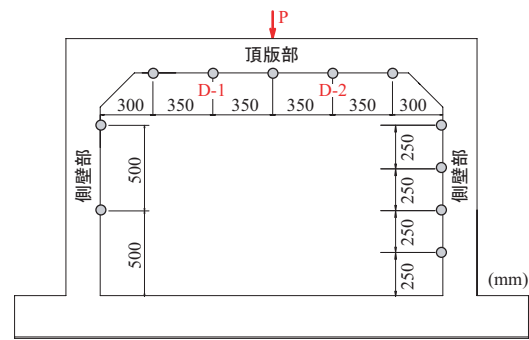


図-2 変位計測位置



写真-2 衝撃実験状況

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

表-2 実験ケース (試験体) 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			6
SIS-7			有り

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図-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200×200mmの正方形断面とし、梁部の純スパンを2,000mm、柱部の高さは1,500mmとしている。

表-1には、ラーメン模型に用いた材料強度を示している。ラーメン模型の軸方向鉄筋には、落石防護覆道と同程度の主鉄筋比となるようにD13を用い、芯かぶり

が40mmとなるように配置している。また、実構造における配筋およびせん断補強筋を模擬した帯鉄筋を配筋し、鉄筋比を実構造と同等となるように、D6を有効高さの1/2である80mm間隔で配筋している。また、柱基部の挙動が適切に把握できるようにするため、フーチング部は可能な限り剛構造とし、柱基部の固定条件が保持されるように、覆道断面方向長さ3,000mm、覆道軸方向幅800mm、高さ250mmとする矩形体とし、鋼製のアングルを埋設している。なお、フーチング下面には厚さ9mmの鋼板を配置している。

2.2 衝撃実験概要と静载荷実験の概要

写真-2には、衝撃実験状況を示している。衝撃実

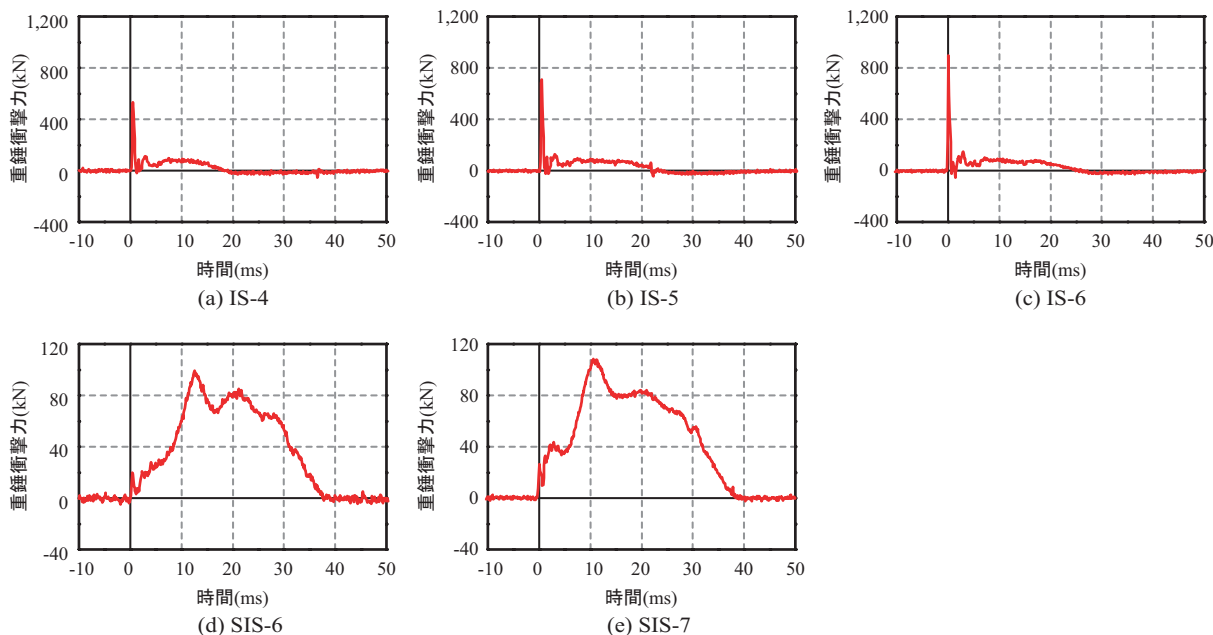


図-3 重錘衝撃力波形

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 $\rho_t = 1.374 \text{ g/cm}^3$ である。

衝撃荷重載荷方法は、第 1 回目衝突速度と増分衝突速度を 1 m/s として所定の衝突速度まで繰り返し重錘を落下させる漸増繰り返し法と、所定の衝突速度で一度だけ載荷する単一載荷法により実施した。

静載荷実験は、重錘衝突時と同一のフーチング治具を用い、重錘径と等価な矩形断面鋼板を介して油圧ジャッキを用いて載荷することにより実施した。表-2 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。なお、変位測定位置は 図-2 に示すとおりである。

3. 実験結果

3.1 重錘衝撃力

図-3 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

● 繰り返し載荷 ▲ 単一載荷(敷砂無) ■ 単一載荷(敷砂有)

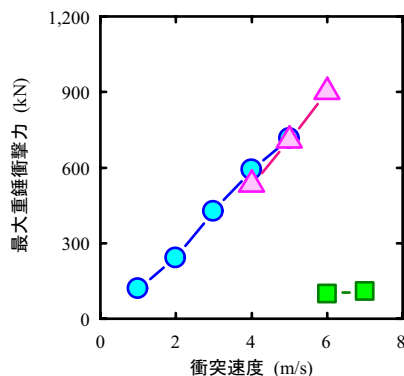


図-4 最大重錘衝撃力-衝突速度関係 (D-1 / D-2)

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

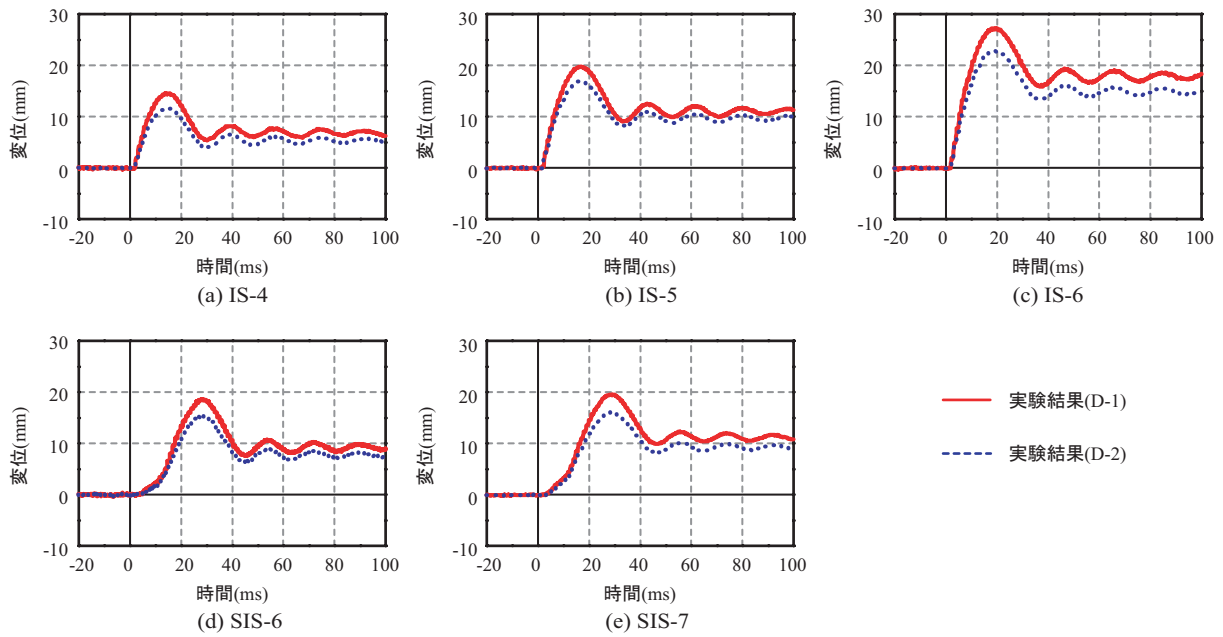


図-5 変位波形 (D-1 / D-2)

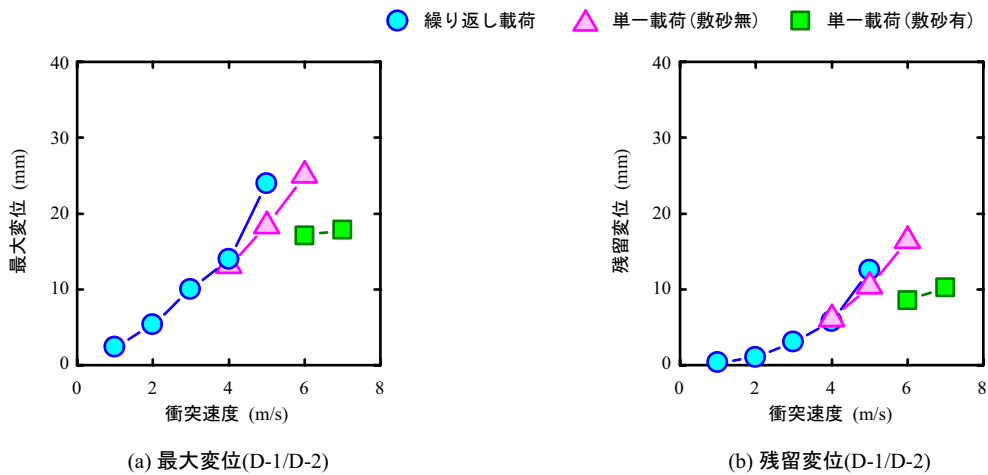


図-6 各応答値-衝突速度関係 (D-1 / D-2)

動継続時間も延長することが分かる。

図-4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-5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

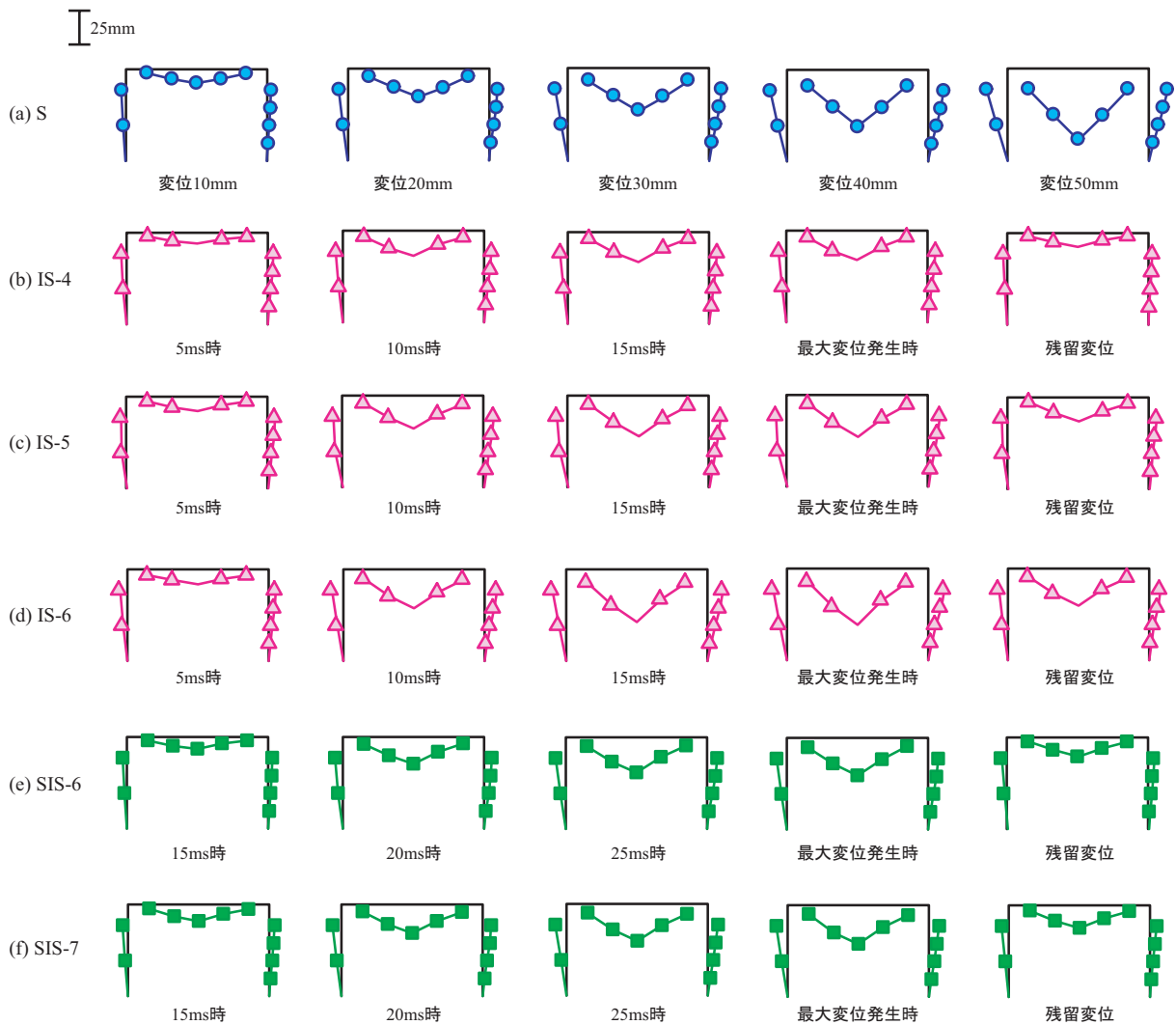


図-7 変形状

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-6(a)には、繰り返し荷重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も、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-6(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-7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荷重点直下の変位量で整理を、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、衝撃荷重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、変位量の違いこそあるものの、その変形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、

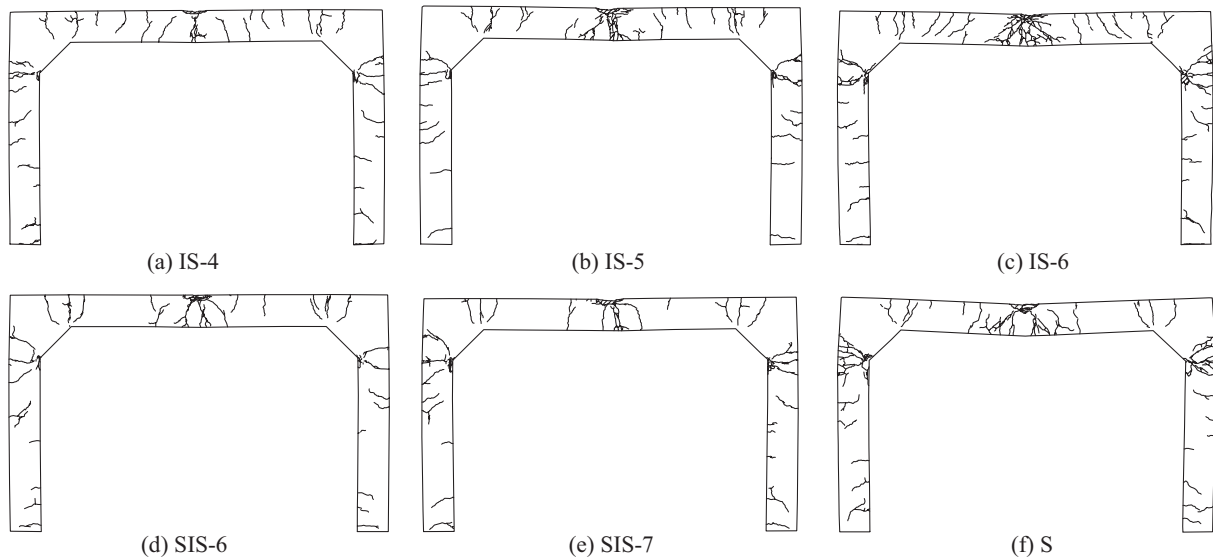


図-8 ひび割れ分布性状

衝撃応答性状は静的な変形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-8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、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。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、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荷重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) 静荷重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寄与できるように、研究を進める予定である。

謝辞：本検討を行うにあたり、室蘭工業大学建設システム工学専攻 千葉 知子さん、鈴木 健之くんには多大なご協力を頂いた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 岸 徳光, 岡田慎哉, 西 弘明, 三上 浩: ロックシェッドの終局時入力エネルギー量探索に関する数値解析的検討, 構造工学論文集, Vol.52A, pp.1273-1284, 2006.3