

支持条件を変化させた RC 版の衝撃荷重載荷実験

Impact loading tests on RC slabs with various support conditions

室蘭工業大学大学院

室蘭工業大学大学院

三井住友建設（株）

室蘭工業大学大学院

○学生会員 又坂 文章 (Fumiaki Matasaka)

フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)

正会員 栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)

1. はじめに

近年の異常気象により豪雨や大型台風が多発し、岩盤斜面の崩落や落石災害が多発している。そのため、既設の落石防護構造物においては、設計時に想定された落石よりも大きな衝撃荷重が作用することが予想される。この場合、従来の許容応力度法による耐衝撃設計では危険側の評価となる可能性もあると考えられる。従って、今後既設の落石防護構造物を安全かつ効率的に維持管理するためには、その耐衝撃性能を評価可能な手法を確立することが肝要である。

著者らは、これまで落石覆工頂版部に用いられる RC 版の耐衝撃性を検討するため、四辺支持 RC 版の静的および衝撃荷重載荷実験を行い、RC 版の静的耐荷挙動や耐衝撃挙動に及ぼす重錘直径、版厚、鉄筋比およびコンクリート強度等の影響について検討するとともに、RC 版の耐衝撃

設計手法を提案している^{1),2)}。しかしながら、これらの実験的研究は、いずれも支持条件が四辺支持の場合に限定されており、実構造物を想定した種々の支持条件に関する検討には至っていないのが現状である。特に落石防護用途の道路構造物において、その頂版部は壁や柱で支持されるため、一対辺支持他对辺自由(以後、二辺支持)もしくは一辺支持+他对辺点支持となるのが一般的である。

このような背景より、本研究では、RC版の耐衝撃挙動に及ぼす支持条件の影響を検討することを目的に、支持条件を四辺支持、二辺支持および一辺支持＋二隅角支持の3種類に変化させたRC版の衝撃荷重載荷実験を実施した。

2. 実験概要

表-1 には、本実験に用いた RC 版の一覧を示している。

また、別途実施した静載荷実験の結果も示している。なお、

表-1 試験体一覧

試験 体名	支持条件	載荷方法	衝突速度 (m/s)	計算押抜き せん断耐力 V_{pcd} (kN) (1)	実測押抜き せん断耐力 P_{ts} (kN) (2)	(2)/(1)
S4-S	四辺支持	単一	4.0, 4.5	251.6	296.3	1.18
S4-I		繰返し	4.0 → 4.5			
S2-S	二辺支持	単一	4.0, 4.5		292.2	1.16
S2-I		繰返し	4.0 → 4.5			
S1-S	一辺＋二隅角支持	単一	4.0, 4.5		278.8	1.11
S1-I		繰返し	4.0 → 4.5			

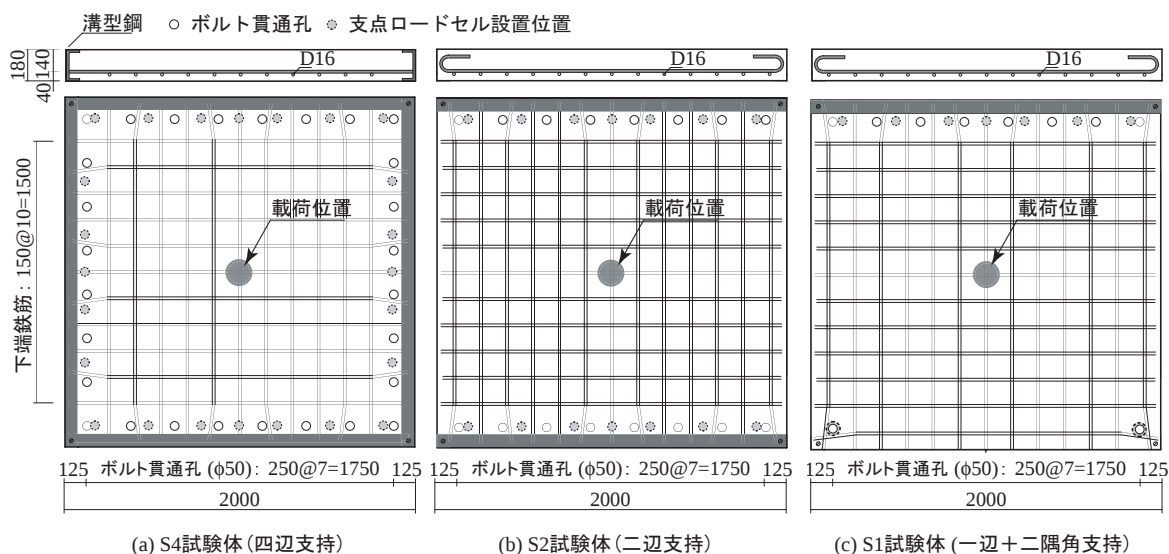


図-1 試験体の形状寸法および配筋状況

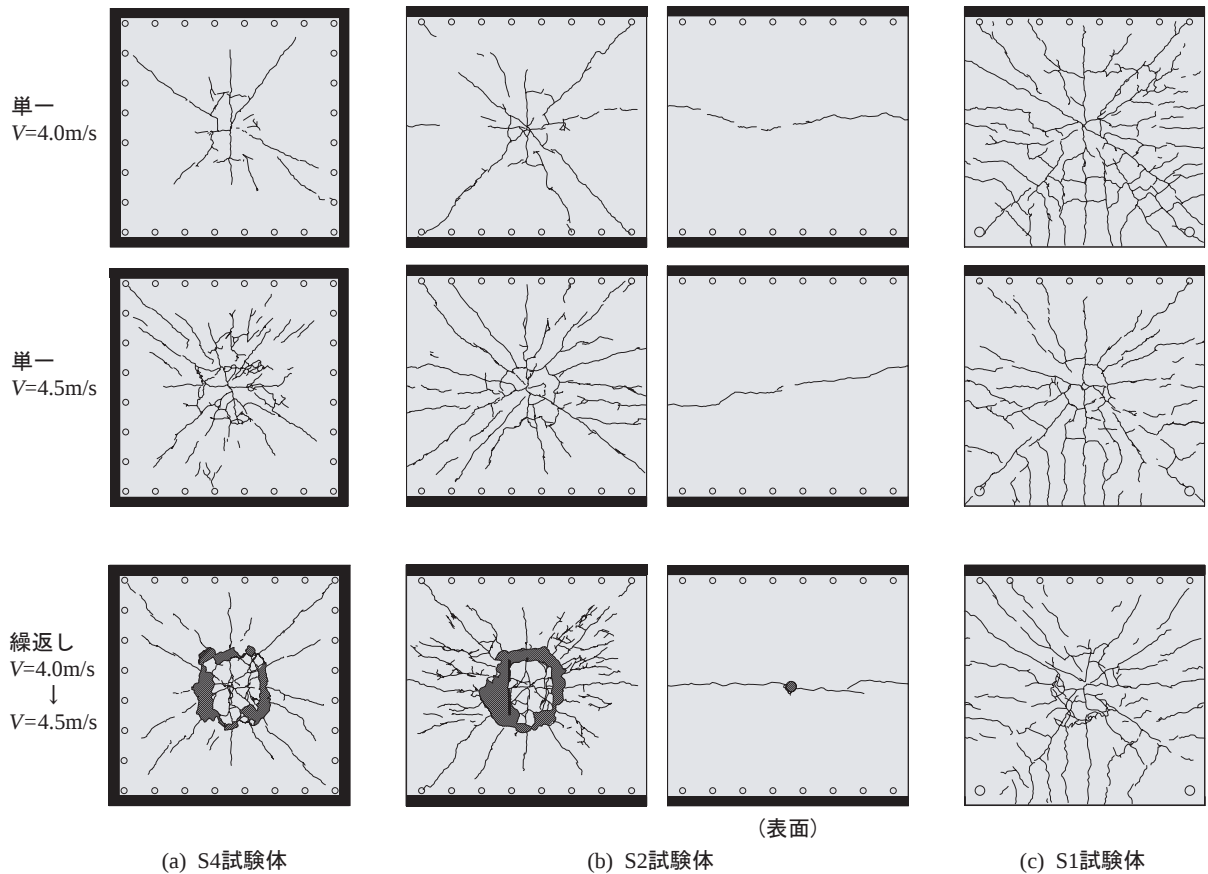


図-2 実験終了後における RC 版裏面のひび割れ分布性状

表中の計算押抜きせん断耐力 V_{pcd} は、コンクリート標準示方書 [設計編]³⁾ に準拠して算出したものである。試験体数は、支持条件を 3 種類、荷重方法を静荷重を含む 3 種類に変化させた全 9 体である。表中の試験体名のうち、第一項目は支持条件 (S4: 四辺支持, S2: 二辺支持, S1: 一辺+二隅角支持) を示し、第二項目は荷重方法 (S: 単一荷重, I: 繰返し荷重) を示している。いずれの支持条件においても支点部は、回転を許容し試験体の浮き上がりを拘束するピン支持に近い構造となっている。衝撃荷重荷重位置は RC 版の中央とし、質量 300 kg、先端直径 90 mm の鋼製重錘を所定の高さから一度だけ自由落下させる単一荷重と初回の衝突速度を 4 m/s、その後の衝突速度を 4.5 m/s とする繰返し荷重により実験を行った。

図-1 には、試験体の形状寸法および配筋状況を支持条件ごとに示している。本実験に用いた RC 版は、寸法が 2,000 × 2,000 × 180 mm の単鉄筋 RC 版である。鉄筋には D16 を用い、版中央部より 150 mm 間隔で格子状に配置している。なお、鉄筋の定着方法は支持条件によって異なっている。すなわち、四辺支持の場合には、RC 版の四辺に配置した溝型鋼に鉄筋を溶接固定している。また、二辺支持の場合には、RC 版の両支点側の一对辺に溝型鋼を配置して鉄筋を溶接固定し、他対辺では鉄筋を折り曲げて定着させている。一辺+二隅角支持の場合には、一辺支持側の一辺にのみ溝型鋼を配置し、他の三辺では鉄筋を折り曲げて定着を図っている。

実験時におけるコンクリートの圧縮強度は 26.6 MPa であり、鉄筋の降伏強度は 374 MPa であった。測定項目は、重

錘衝撃力 P 、合支点反力 R 、(以後、支点反力) および荷重点直下の変位 δ (以後、変位) である。また、実験終了後には、RC 版の裏面を撮影し、ひび割れ性状を観察している。

3. 衝撃荷重実験結果

3.1 ひび割れ分布性状

図-2 は、実験終了後における各 RC 版裏面のひび割れ分布性状を示している。なお、S2 試験体に関しては、RC 版表面にもひび割れが見られたため、表面のひび割れ分布性状も合わせて示している。

図より、単一荷重実験において、S4 試験体の場合には、放射状のひび割れその他、版中央部には押抜きせん断破壊に起因する円形状のひび割れが見られる。S2/I 試験体の場合には、放射状のひび割れその他、自由端に直交する形で曲げひび割れが発生している。また、版中央部には S4 試験体と同様、円形状のひび割れが見られる。これらの傾向は、各 RC 版において衝突速度が大きい場合ほど顕著に現れることが分かる。なお、S2 試験体の場合には荷重面においても曲げに起因するひび割れが発生している。

繰返し荷重実験の結果より、S4/2 試験体の場合には、単一荷重時と同様の放射状のひび割れや曲げひび割れが見られるものの、RC 版の中央部が押し抜け、かぶりコンクリートが大きく剥落していることがわかる。これに対し、S1 試験体の場合には押抜きせん断破壊の兆候が見られるものの著しい損傷には至っていない。

3.2 時刻歴応答波形

図-3 より、重錘衝撃力波形は、繰返し荷重の $V = 4.0$ m/s

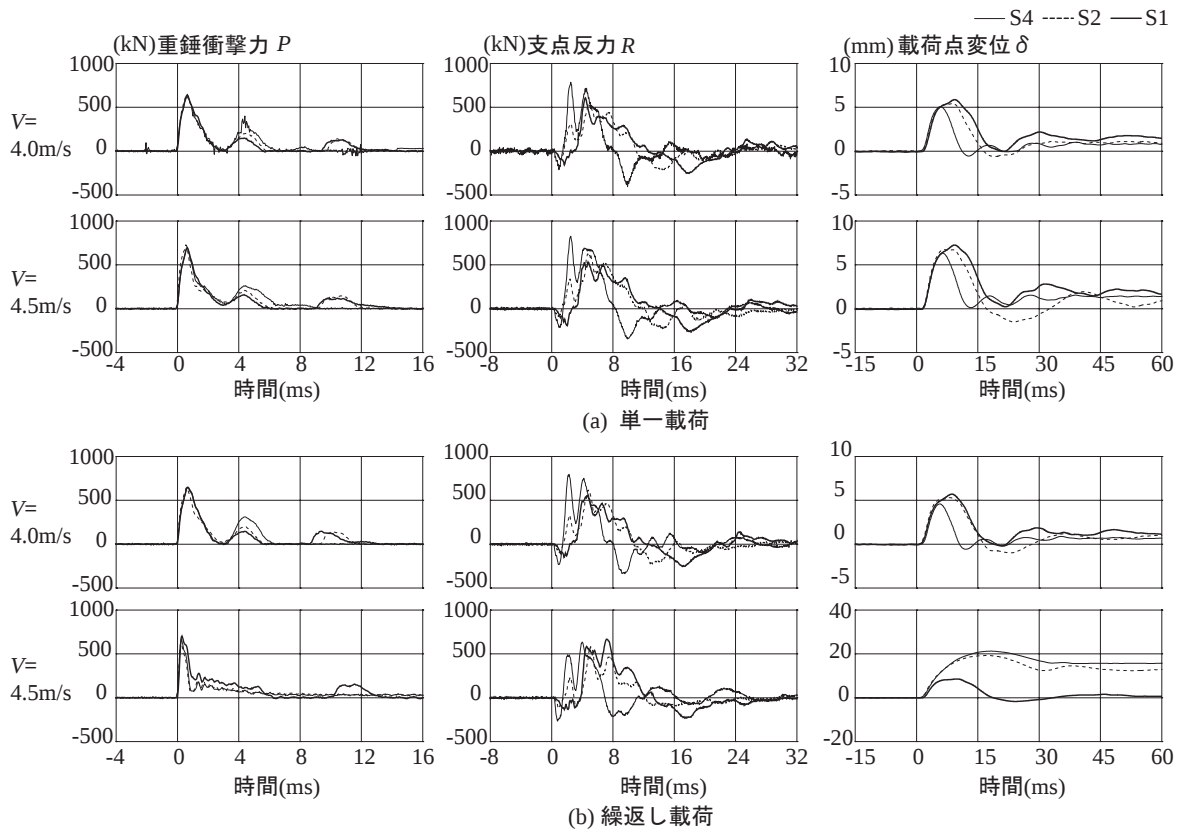


図-3 重錘衝撃力、支点反力および載荷点変位に関する応答波形

と単一載荷の場合には、振幅が大きく継続時間が2 msec程度の第1波に振幅が小さい第2波が後続する性状を示している。繰返し載荷の $V=4.5$ m/sでは、第2波目のピークが消失し第1波目に連続する波形となっている。これは、ひび割れ分布性状に見られたように、RC版が押抜きせん断破壊により抵抗力を失っていることを示すものである。なお、重錘衝撃力波形の性状に及ぼす支持条件の影響は極めて小さい。

支点反力波形は、いずれのRC版も衝突速度 V によらず、継続時間の長い三角形波に高周波成分が合成された波形性状を示している。S4試験体の場合には、全般的にS2/S1試験体に比較して支点反力が早期に励起し、その振幅は大きくかつ主波の継続時間は短くなる傾向にある。これは、S4試験体の場合には、S2/S1試験体に比較して見かけの曲げ剛性が高いことによるものと考えられる。

載荷点変位波形を見ると、単一および繰返し載荷の $V=4.0$ m/sは、同様の支持条件であることより、各RC版の波形性状もほぼ同様であることがわかる。すなわち、S4試験体の場合には最大振幅が5 mm程度、継続時間が10 msec程度の第一波が励起した後、減衰自由振動を示し、最終的には変位が1 mm程度残留している。これに対し、S2/S1試験体の場合には全体的な波形性状はS4試験体の場合とほぼ同様であるものの、第1波目のS4の最大振幅や継続時間は、S4試験体よりも大きく長くなっている。継続時間はS4試験体よりも大きい。

単一載荷の $V=4.5$ m/sの場合は、いずれのRC版も $V=4.0$ m/sの場合よりも最大振幅および第一波目の継続時間が大きくなる傾向にあるものの、全体的な波形性状は同様で

ある。ただし、S2試験体の場合は、第一波が励起した後、変位が零レベルまで復元し、さらに負の変位を示している。これは、版が上側に反り上がっていることを示している。実験時においては、図-2にも示しているように、RC版上面に曲げひび割れの発生を確認している。

繰返し載荷の $V=4.5$ m/sの場合には、S4/2試験体において変位が急激に増加し、15 mm程度の残留変位が認められる。これは、版中央部が著しく押し抜けたためである。なお、S1試験体の場合には、最大振幅が8 mm程度となっているものの残留変位はみられない。

3.3 各種応答値と衝突速度との関係

図-4には、重錘衝撃力 P_{ud} 、支点反力 R_{ud} 、最大変位 δ_{ud} および残留変位 δ_{rd} と衝突速度 V との関係を示している。なお、前述の通り、単一および繰返し載荷の $V=4$ m/sは同一条件による実験である。図より、 $V=4.0$ m/s時の各RC版の各応答値は、単一および繰返しの場合でほぼ対応していることより、実験の再現性は十分に確保されているものと判断される。

重錘衝撃力 P_{ud} は、S2試験体の繰返し載荷の場合を除き衝突速度 V の増加に伴って大きくなる傾向にある。支点反力 R_{ud} は、S4試験体の繰返し載荷およびS2試験体の単一載荷の場合を除き、いずれの場合も衝突速度 V の増加に伴って増加している。S4試験体の R_{ud} はS2/S1試験体の場合よりも大きくなる傾向にあることより、RC版の耐衝撃性を支点反力で評価すると、四辺支持の場合が最も耐衝撃性に優れているものと判断される。ただし、S4試験体の繰返し載荷の場合には、 $V=4.5$ m/sにおいて R_{ud} が低下していることより、繰返し載荷に対する抵抗性が他に比べて低

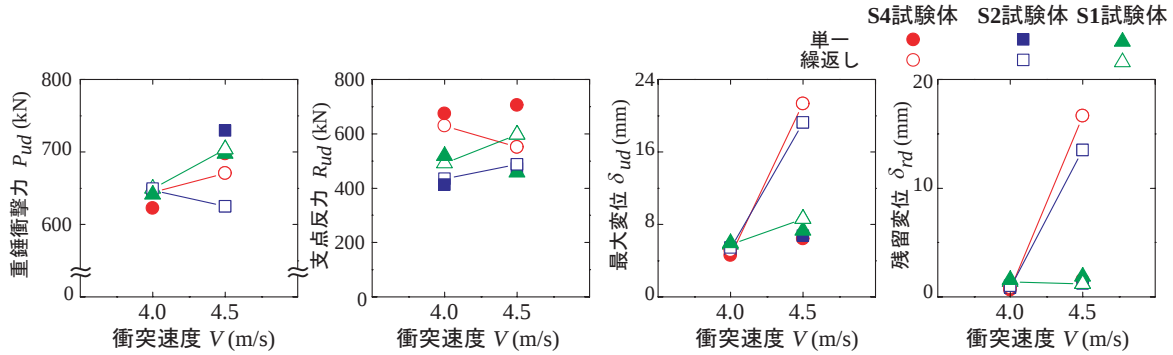


図-4 各種応答値

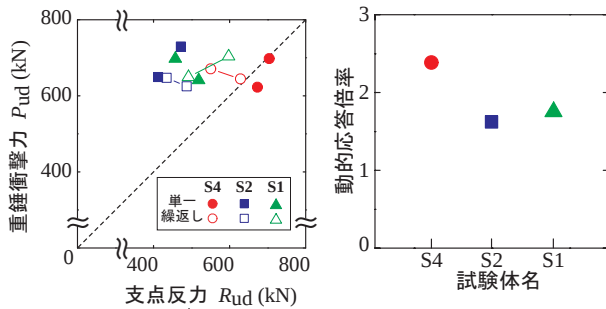


図-5 重錘衝撃力と
支点反力との関係

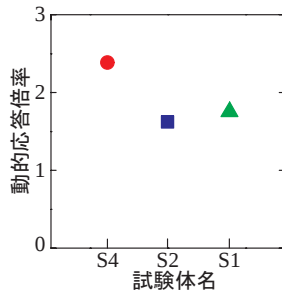


図-6 動的応答倍率

いことが示唆される。

最大変位 δ_{ud} および 残留変位 δ_{rd} は、共に同様の分布性状を示している。すなわち、 $V=4.0$ m/s においてはいずれの試験体もほぼ同様の値を示しているものの、 $V=4.5$ m/s において、S4/2 試験体の繰返し载荷時の最大、残留変位は大きく増加している。これは、前述の通り押抜きせん断破壊を生じているためである。

以上のことより、単一载荷時における耐衝撃性は、四辺支持の場合が最も優れていることが明らかになった。一方、繰返し载荷時における耐衝撃性は、1) 四辺支持の場合に支点反力が低下していること、および 2) 四辺および二辺支持の場合において顕著な押抜きせん断破壊に至っていることを考慮すると、一辺+二隅角支持の場合が最も優れていると判断される。

図-5 には、重錘衝撃力 P_{ud} と支点反力 R_{ud} との関係を示している。図より、支点反力 R_{ud} は支持条件の影響を受ける傾向にあるのに対し、重錘衝撃力 P_{ud} は支持条件にほとんど影響されていないことが分かる。このように、支持条件が RC 版の耐衝撃性や破壊性状に影響を及ぼしているにもかかわらず、重錘衝撃力にはその影響が反映されていないことより、RC 版の耐衝撃性や動的耐力は支点反力を用いて評価することが妥当であるものと考えられる。

図-6 には、支持条件と動的応答倍率の関係を示している。ここで、動的応答倍率は最大支点反力を静的耐力で除して求めた。図より、S4 試験体の場合には、2.4 程度となっ

ており、既往の研究と対応する結果となっていることがわかる。一方、S2/1 試験体の場合は 1.5 程度と S4 試験体よりも大幅に小さい。これは、S2/1 試験体は S4 試験体と静的耐力は同程度であるものの、曲げ変形が卓越する支持条件であるため、支持部に伝達される衝撃力(支点反力)が小さく、結果的に動的応答倍率の低下に至ったものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、RC 版の耐衝撃挙動に及ぼす支持条件の影響を検討することを目的に支持条件を三種類(四辺支持、二辺支持、一辺+二隅角支持)に変化させた RC 版の衝撃荷重載荷実験を行った。本実験で得られた結果をまとめると以下の通りである。

- 1) 重錘衝撃力波形は、支持条件によらずほぼ同様の性状を示す。
- 2) 支点反力および载荷点変位波形は、四辺支持の場合に最も周期の短い波形性状を示す。
- 3) 载荷点変位波形において、二辺支持の場合には最大変位到達後、変位が負の値を示し RC 版が反り上がる性状を示す。
- 4) 単一载荷時の耐衝撃性は四辺支持の場合が、繰返し载荷時の耐衝撃性は一辺+二隅角支持の場合が他の支持条件よりも優れている。
- 5) 動的応答倍率は、四辺支持の場合で 2.4 程度、二辺支持および一辺+二隅角支持の場合で 1.5 程度である。

参考文献

- 1) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋祐介: 矩形 RC 版の衝撃耐荷挙動に及ぼす重錘直径の影響, 構造工学論文集, Vol.54A, pp.1034-1043, 2008
- 2) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋祐介: 低速度衝撃を受ける四辺単純支持 RC 版の耐衝撃設計法に関する一提案, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.1327-1336, 2009
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書 [設計編], 2007 年制定