

# 論文 四辺単純支持 RC 版の耐衝撃性状に及ぼす敷砂緩衝材の影響

石川 博之<sup>\*1</sup>・岸 徳光<sup>\*2</sup>・三上 浩<sup>\*3</sup>・Schellenberg Kristian<sup>\*4</sup>

**要旨:** 本研究では、鉄筋コンクリート (RC) 版部材の耐衝撃性状に及ぼす敷砂緩衝材の影響を検討することを目的に、同一形状寸法の RC 版に対して敷砂緩衝材の設置の有無をパラメータとし、それぞれに対して重錘直径の異なる 2 種類の重錘を用いた重錘落下衝撃実験を実施した。その結果、1) 敷砂緩衝材を設置することにより、衝撃荷重強度を著しく低減し、荷重継続時間を延長させること等の緩衝効果が期待できること、2) その緩衝効果は重錘直径が大きいほど大きいこと、3) 最大支点反力を用いた動的応答倍率への敷砂緩衝材の有無や重錘直径の影響は小さいこと、等が明らかになった。

**キーワード:** RC 版, 敷砂緩衝材, 重錘直径, 耐衝撃

## 1. はじめに

落石衝撃荷重を受けるロックシェッド頂版部は、RC 版が用いられている場合が多い。著者らは既往の研究で衝撃荷重を受ける RC 版部材に関する実験的検討を行い、RC 版部材の耐衝撃挙動には重錘の直径 (重錘先端直径) の影響が非常に大きいことを明らかにしている<sup>1)2)</sup>。しかしながら、この結果は RC 版中央部に直接重錘を衝突させる直接荷重により行っており、緩衝工が設置されている実構造のロックシェッドとは状況が異なっている。そのため、著者らの直接衝突の実験結果と、実際の緩衝工を有するロックシェッドに落石衝撃荷重が作用した場合とでは、衝撃挙動に差異が生じる場合が想定される。

このような観点から、本研究では、RC 版の耐衝撃性状に与える敷砂緩衝材の影響を明らかにすることを目的として、敷砂緩衝材を設置した四辺支持 RC 版を対象に直径の異なる 2 種類の重錘を用いた重錘落下衝撃実験を実施した。本研究では、RC 版の形状寸法、鉄筋比、支持条件は全て同一とし、敷砂緩衝材の設置の有無および重錘直径 (60 mm, 150 mm) の影響に着目して比較、検討を行うこととした。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体の概要

図-1 には、本実験に用いた RC 版試験体の形状寸法、配筋状況および敷砂設置位置を示している。試験体は、2,000 × 2,000 × 180 mm、有効高さ 140 mm となるように下端鉄筋を配筋した RC 版である。下端鉄筋には D16 を用い、版中央部より 150 mm 間隔で格子状に

配筋している。なお、鉄筋は RC 版の 4 辺に設置した溝型鋼に溶接して定着を確保している。

表-1 には、本実験の実験ケースを一覧にして示している。表には敷砂緩衝材の設置の有無、重錘直径、コンクリートの圧縮強度、および衝突速度を示している。試験体名は、英文字が敷砂緩衝材の有無 (N: 敷砂無し, S: 敷砂有り) を示し、英文字に付随する数値は重錘の直

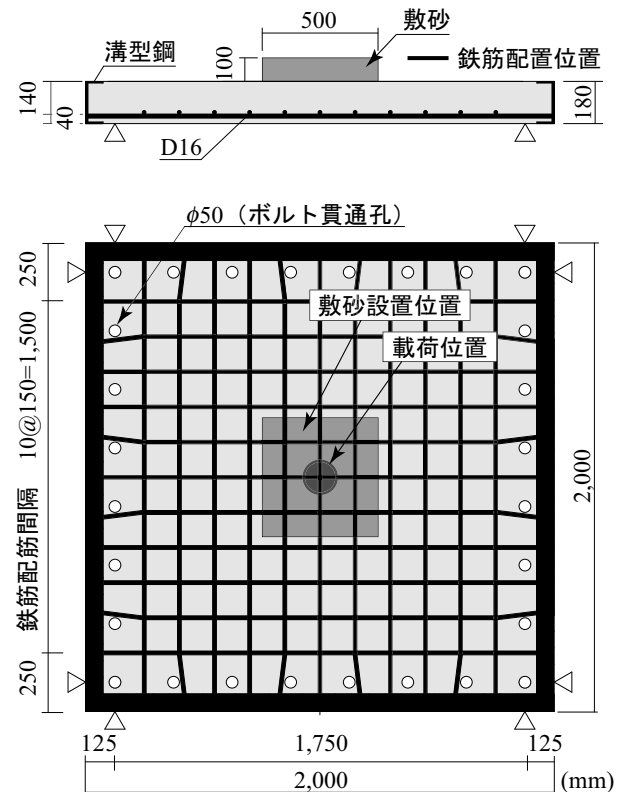


図-1 RC 版の形状寸法および配筋状況

\*1 土木研究所寒地土木研究所 寒地構造チーム 上席研究員 (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 三井住友建設 (株) 技術研究所 主席研究員 博 (工) (正会員)  
 \*4 Swiss Federal Institute of Technology Zurich (非会員)

表-1 実験ケース一覧

試験体名	敷砂厚 (mm)	重錘 直径 $d$ (mm)	コンクリート 圧縮強度 (MPa)	衝突速度 $V$ (m/s)
N6	0	60	37.4	6
S6	100		32.2	6
N15	0	150	26.3	6, 7, 8
S15	100		32.2	6, 7 ~ 10*

\*単一 6 m/s 载荷後, 繰り返し载荷実験

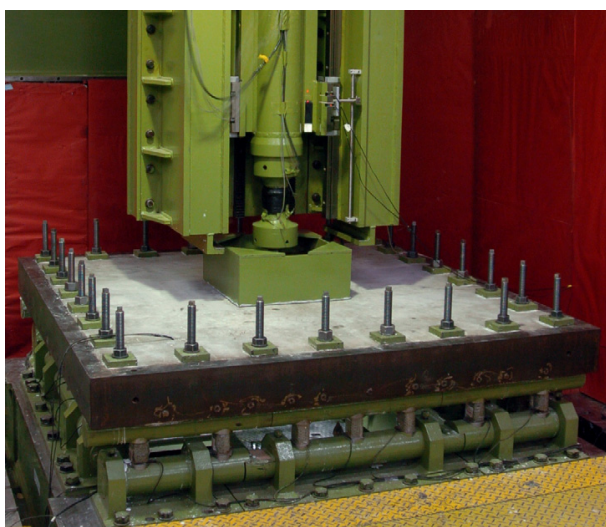


写真-1 実験状況

径 (cm) を示している。なお、コンクリートの圧縮強度は、26.3 ~ 37.4 MPa であり、鉄筋の降伏強度は S6, S15 試験体で 376 MPa, N15 試験体で 380 MPa, N6 試験体で 423 MPa であった。また、本実験に使用した敷砂の含水比  $w$  は 8.35 %, 湿潤密度  $p_r$  は 1.37 g/cm<sup>3</sup> であった。载荷方法は、予備実験のもとに所定の衝突速度で 1 度だけ载荷する単一载荷を基本とした。なお、S15 試験体は実験終了後における損傷が小さかったため、 $V = 7$  m/s から増分速度を 1 m/s として押抜きせん断ひび割れが発生するまで漸増繰り返し载荷を行った。これより、本実験に用いた試験体数は予備実験を除き全 6 体である。

## 2.2 実験方法

写真-1 には、本実験の実験状況を示している。支持部は、写真からも明らかなように、跳ね上がりを防止するために支持辺に沿って版をボルトで固定し、かつ回転を許容するピン支持に近い構造となっている。衝撃荷重载荷位置は版中央点とした。また、S6 試験体および S15 試験体においては、図-1 に示すように载荷位置を中心に 500 × 500 mm の範囲に高さ 100 mm まで敷

砂緩衝材を設置している。なお、敷砂緩衝材は、コンクリートパネル (厚さ 12 mm) で製作した枠内に、所定の厚さまで敷き詰めている。

本実験に用いた鋼製重錘は、直径にかかわらず 300 kg であり、衝突面は重錘の片当たりを防止するために 2 mm のテーパを有する球面状となっている。なお、重錘直径は、仮定される押抜きせん断ひび割れが下端鉄筋位置で支点と十分な距離が保持されるように設定した。

実験における測定項目は、重錘に内蔵されたロードセルによる重錘衝撃力  $P$ 、支点治具に設置した複数のロードセルによる合支点反力  $R$  (以後、支点反力) および非接触式レーザ変位計による载荷点直下の変位  $\delta$  (以後、変位) である。また、実験終了後には、RC 版裏面および版中央部切断面のひび割れを撮影し、破壊性状を観察した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 破壊性状

図-2 には、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。図には、N6 / S6 試験体および N15 / S15 試験体の  $V = 6$  m/s, N15 / S15 試験体の  $V = 8$  m/s, S15 試験体の  $V = 10$  m/s 時の結果を示している。なお、S 試験体の場合は、いずれも重錘が敷砂に貫入した状態で実験を終了しており、敷砂表面は重錘貫入部を除き、概ね平らに保持されている。

図-2 (a) より、N6 / S6 試験体の場合には、敷砂の有無にかかわらず、载荷点を中心とする円形押抜きせん断ひび割れの形成が確認できる。詳細に見ると、N6 試験体の場合には、押抜きせん断ひび割れの内部でコンクリートが剥落しており、対角線状の曲げひび割れも発生している。一方、S6 試験体の場合には、载荷点を中心とする同心円状の押抜きせん断ひび割れが確認でき、またその直径は N6 試験体に比較して若干大きい。しかしながら、N6 試験体の場合に見られるようなコンクリートの剥落は発生していないことから、その損傷は N6 試験体と比較して小さいことが推察される。

図-2 (b) より、N15 / S15 試験体の場合における  $V = 6$  m/s の結果を見ると、N15 試験体の場合には、载荷点を中心とする同心円状の押抜きせん断ひび割れが発生している。しかしながら、敷砂を設置した S15 試験体の場合には、明瞭な押抜きせん断ひび割れは確認できず、主に载荷点から放射状に広がる曲げひび割れがわずかに見られる程度である。これより、S15 試験体の場合には、N15 試験体の場合に比較して軽微な損傷に止まっているものと判断される。

また、 $V = 8$  m/s の場合には、N15 試験体には明瞭な押抜きせん断ひび割れが発生し、コンクリートの剥落が

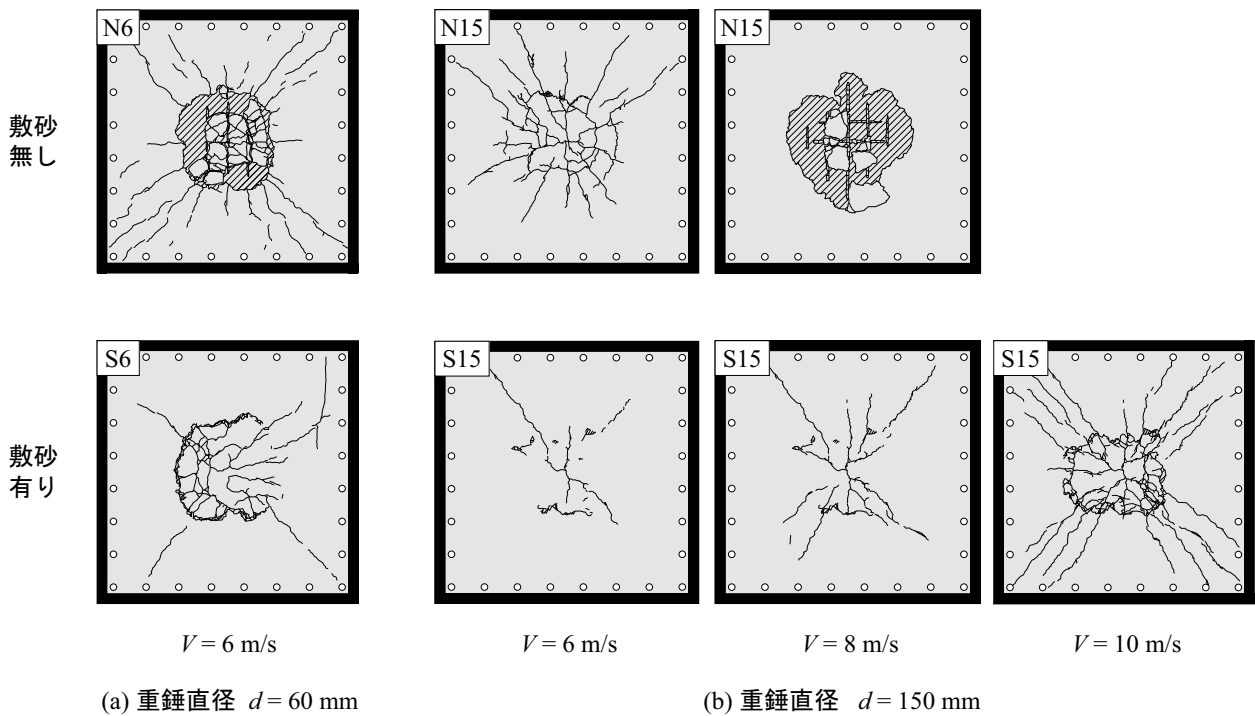


図-2 実験終了後における裏面のひび割れ分布性状

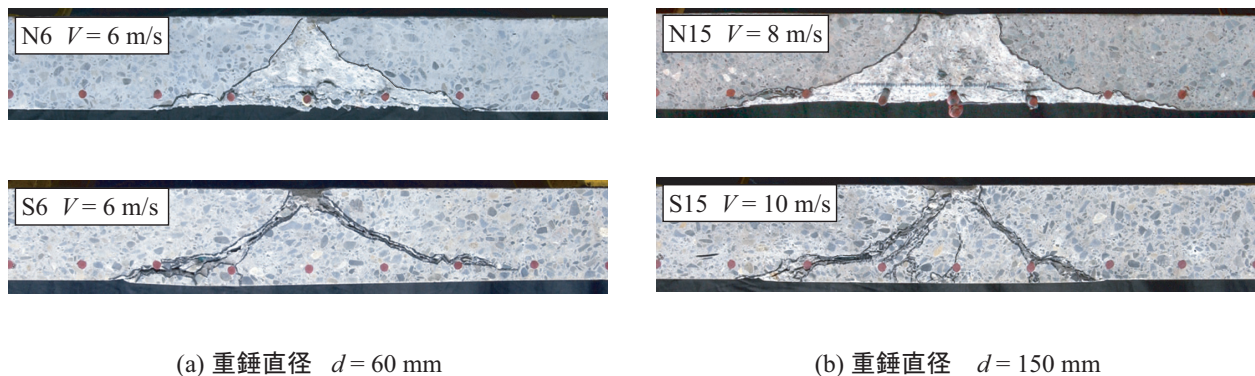


写真-2 実験終了後における切断面のひび割れ分布性状

生じている。一方、S15 試験体の場合には、未だ明瞭な押抜きせん断ひび割れは確認できず、荷点から放射状に広がる曲げひび割れが伸展するのみである。

S15 試験体の  $V = 10 \text{ m/s}$  の場合には、明瞭な押抜きせん断ひび割れが形成されているものの、押抜きせん断ひび割れ内のコンクリートは剥落していない。

以上より、RC 版は敷砂緩衝材の有無にかかわらず、押抜きせん断破壊により終局に至ること、また敷砂緩衝材を設置することにより、押抜きせん断破壊の抑制が可能であり、その抑制効果は重錘直径が大きい場合でより大きいことが明らかとなった。

### 3.2 RC 版の押抜きせん断性状

写真-2 には、N6 / S6 試験体の  $V = 6 \text{ m/s}$ 、N15 試

験体の  $V = 8 \text{ m/s}$  および S15 試験体の  $V = 10 \text{ m/s}$  実験終了後における版中央部切断面のひび割れ分布性状を示している。写真-2 (a) より、N6 / S6 試験体を比較すると、N6 試験体の場合には荷点位置からほぼ  $45^\circ$  の角度で押抜きせん断面が形成されていることが分かる。一方、敷砂を設置した S6 試験体の場合には、ひび割れ角度が鈍化し、緩やかな角度で押抜きせん断面が形成されている。

また、写真-2 (b) より、N15 試験体の  $V = 8 \text{ m/s}$  時には、重錘端部近傍においてほぼ鉛直に押抜きせん断ひび割れが生じ、下面に向かってそのせん断ひび割れ進展角度が鈍化する傾向を示している。これに対し、S15 試験体の  $V = 10 \text{ m/s}$  時には、荷点位置からほぼ  $45^\circ$  の角



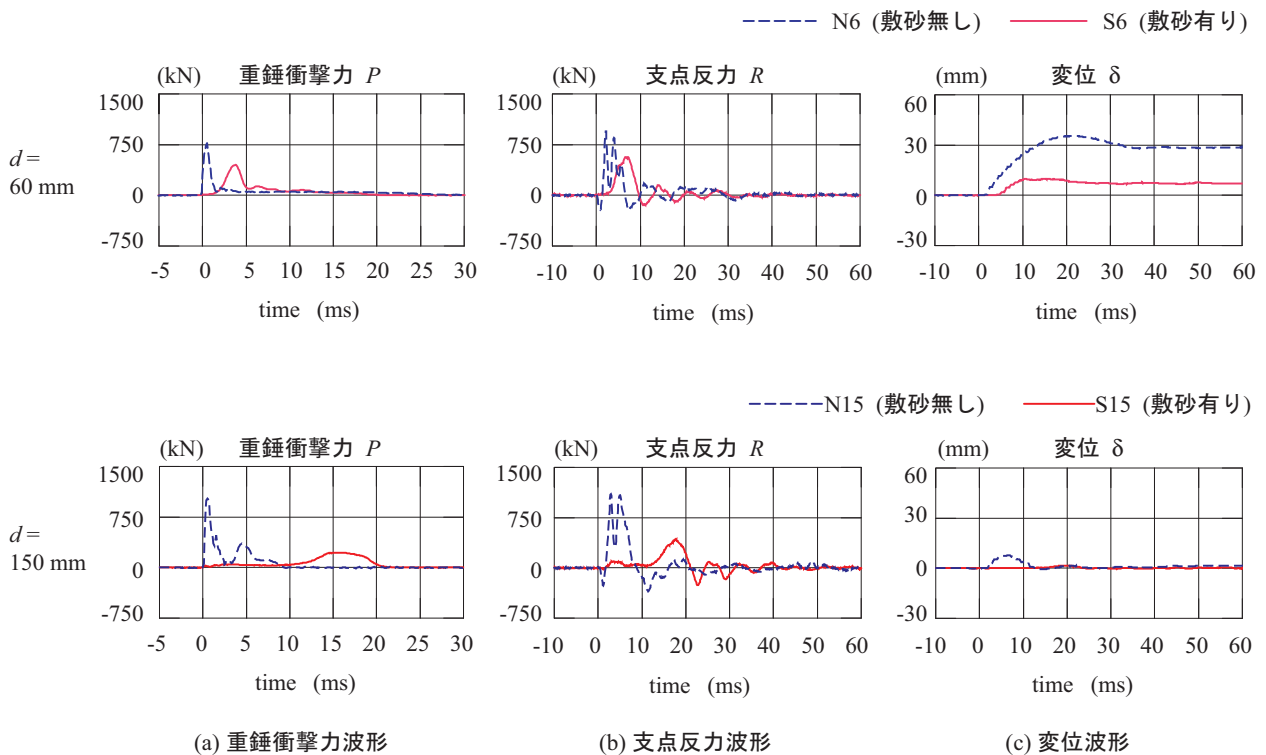


図-3  $V = 6 \text{ m/s}$  載荷時における重錘衝撃力、支点反力および変位に関する応答波形

度で押抜きせん断面が形成されている。

これらのことから、敷砂緩衝材を設置することにより押抜きせん断面の形成角度が鈍化し、より広域に押抜きせん断面が生じる傾向にあることが明らかになった。これは、敷砂緩衝材により衝撃荷重の作用面積が広がったことによるものと推察される。

また、S15 試験体の場合には、押抜きせん断により生じた貫通孔の径が重錘直径 (150 mm) よりも小さいことが分かる。これは、敷砂緩衝材を設置したことにより、重錘先端部が RC 版に直接接触せず、敷砂に生じた圧力が載荷点直下より広範囲に広がるものの、上縁の貫入に至る圧力の作用面積が狭まったためと推察される。一方、写真-2 (a) の重錘直径が 60 mm の場合において、貫入孔の径は敷砂の有無にかかわらず同程度である。これは、重錘の載荷面積が小さいことにより、載荷面下の敷砂が重錘貫入と同時に重錘周辺に排除される傾向を示し、敷砂緩衝材を設置していない場合と大差のない状態に至ったためと推察される。

### 3.3 重錘衝撃力、支点反力および変位波形

図-3 には、 $V = 6 \text{ m/s}$  載荷時における各試験体の重錘衝撃力  $P$ 、支点反力  $R$  および変位  $\delta$  に関する応答波形を重錘直径毎に示している。なお、時間軸は重錘衝撃力が励起した時刻を 0 ms として整理した。

図-3 (a) より、重錘衝撃力波形  $P$  は、N6 試験体の

場合には、衝突初期に励起する振幅が大きく周期の短い第 1 波と、その後の振幅が小さく周期が長い第 2 波で構成されている。これに対し、S6 試験体の場合には、衝突後約 2 ms 経過して励起し、周期が 6 ms 程度の振幅の大きい正弦半波状の第 1 波と周期が長く振幅の小さい第 2 波で構成されている。N15 試験体の場合には、衝突初期に振幅が大きく周期の短い波形が 2 波励起しているものの、全体的な性状は N6 試験体と類似である。これに対し、S15 試験体の場合には、衝突後 10 ms 程度までは振幅の小さい様な時間分布を示し、その後、周期が 20 ms 程度の正弦半波状の波形を示している。

以上より、敷砂緩衝材を設置することにより、主衝撃力が励起する時刻を遅延させ、さらに波動継続時間を延長し衝撃力を時間方向に分散することで、その最大応答値が低減することが分かる。

図-3 (b) の支点反力波形  $R$  より、敷砂緩衝材の無い N6 / N15 試験体の場合には、最大支点反力値は異なるものの、両者類似の性状を示していることが分かる。すなわち、衝突初期に周期が 6 ~ 8 ms 程度の正弦半波および、それに後続する減衰波と、周期が 1 ~ 2 ms 程度の高周波成分が合成された性状を示している。それに対して、S6 / S15 試験体の場合には、主振幅が大きい支点反力が励起する時刻は異なるものの、いずれも正弦半波状およびそれに後続する減衰波から構成される。

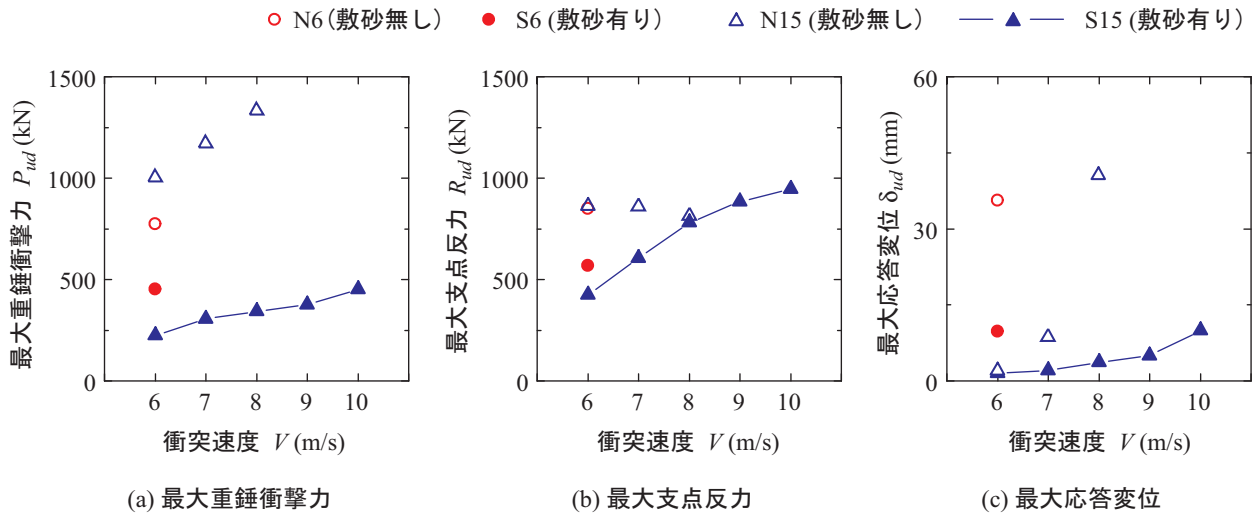


図-4 衝突速度と各種最大応答値の関係

表-2 計算静的耐力および各種最大応答値一覧

試験体名	衝突速度 $V$ (m/s)	計算 静的耐力 $V_{pcd}$ (kN)	最大重錘 衝撃力 $P_{ud}$ (kN)	最大 支点反力 $R_{ud}$ (kN)	最大 応答変位 $\delta_{ud}$ (mm)
N6	6	289.9	771.8	848.8	35.58
S6	6	269.1	449.1	534.5	12.28
N15	6	311.4	1024.1	861.4	7.70
	7		1191.9	859.6	16.1
	8		1352.9	814.0	40.92
S15	6	344.4	226.9	419.0	1.83
	7		306.4	594.3	2.51
	8		343.2	776.5	4.60
	9		374.7	881.1	6.19
	10		451.1	940.3	12.45

これより、重錘衝撃力の場合と同様に支点反力の場合においても、敷砂緩衝材を設置することにより最大支点反力は低減される傾向にあることが分かる。

図-3 (c) より、N6 / N15 試験体の場合における変位波形は衝突初期から増加の傾向を示し、正弦半波状を呈している。それに対して、S6 / S15 試験体の場合には、衝撃力波形と同様に変位波形も遅延して励起している。また、S6 / S15 試験体の最大応答変位および残留変位は、敷砂緩衝材の緩衝効果により N6 / N15 試験体の場合よりも小さく示されている。

### 3.4 最大応答値と衝突速度との関係

図-4 には、最大重錘衝撃力  $P_{ud}$ 、最大支点反力  $R_{ud}$  および最大応答変位  $\delta_{ud}$  と衝突速度との関係を示してい

る。表-2 には、計算静的耐力と各種応答波形から得られる最大応答値を一覧にして示している。表中、計算静的耐力  $V_{pcd}$  はコンクリート標準示方書<sup>3)</sup>に基づき表-1 におけるコンクリート強度を用いて算出している。なお、部材係数  $\gamma_b$  は 1.0 とし、敷砂による影響は考慮していない。

図-4 (a) より、最大重錘衝撃力に関しては、 $V = 6$  m/s の場合において、S6 試験体は N6 試験体の約 60 %、S15 試験体は N15 試験体の 25 % 程度の値を示しており、敷砂緩衝材の緩衝効果が現れていることが分かる。また、衝突速度の増加とともに最大重錘衝撃力はほぼ線形に増加する傾向にある。

図-4 (b) より、S 試験体の最大支点反力は、 $V = 6$

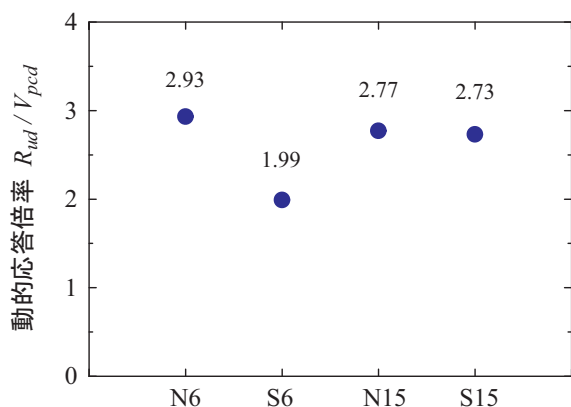


図-5 各試験体における動的応答倍率

m/s 時で、N 試験体の 50～60% 程度となっていることが分かる。しかしながら、N15 試験体の場合には衝突速度の増加に対応して最大支点反力が低下する傾向を示している。これに対して、S15 試験体の場合には衝突速度の増加とともに最大支点反力も線形に増加する傾向を示している。これは、N15 試験体の  $V = 6$  m/s 時に既に押抜きせん断面が形成されたことにより、これ以上の衝突速度においては塑性化が進展するのみであるためと考えられる。一方、S15 試験体の場合には、敷砂緩衝材を設置することにより RC 版に作用する衝撃力が緩和されるため、押抜きせん断面を形成する時の衝突速度がより大きな速度に移行したためと推察される。

図-4(c)より、N15 試験体の最大応答変位は、衝突速度に対して二次放物線的に増加する傾向にあることが分かる。これは、RC 版に明瞭な押抜きせん断面が形成されたためと考えられる。一方、S15 試験体の場合には、最大応答変位は衝突速度に対して線形に増加するものの、そのレベルは小さいことが分かる。これは、敷砂緩衝材を設置することにより、N15 試験体と同一の衝突速度に対しても、RC 版は未だ健全な状態が保持されていることを暗示している。

### 3.5 敷砂緩衝材設置時における動的応答倍率

図-5 には、各試験体における動的応答倍率を示している。本論文では、動的応答倍率を支点反力(動的耐力)を計算静的耐力で除した値として定義する。また、本研究では、各試験体の最大支点反力を動的耐力として動的応答倍率を算出することとした。

図-5より、S6 試験体を除く試験体の動的応答倍率は、敷砂の有無および重錘直径にかかわらず大略 2.7～2.9 程度であり、直接衝突の場合<sup>2)</sup>と大差がないことが分かる。なお、S6 試験体の場合には、他の試験体の場

合と比較して動的応答倍率が小さく評価されている。これは、図-2 に示すひび割れ分布より、S6 試験体に関しては押抜きせん断によって損傷しているものの、せん断コーンが完全に押抜けてはいないことより、未だ終局に至っていないためと推察される。

以上より、押抜きせん断破壊に至る RC 版において、動的応答倍率は緩衝材の有無や衝突体の大きさの影響が小さいことより、衝撃押抜きせん断耐力評価に適した指標であるものと判断される。

## 4. まとめ

本研究では、重錘落下衝突によって衝撃荷重を受ける RC 版の耐衝撃性状に与える敷砂緩衝材の影響を検討するために、2 種類の重錘直径を用い、敷砂緩衝材の有無に着目した重錘落下衝撃実験を実施した。本研究の範囲内で明らかになった事項をまとめると、以下の通りである。

- (1) 重錘衝撃力を受ける RC 版に敷砂緩衝材を設置することにより、衝撃荷重強度の著しい低減効果や荷重継続時間が延長すること等の緩衝効果が期待できる。また、その緩衝効果によって、重錘衝撃力、支点反力、変位の最大応答値は敷砂緩衝材を設置しない場合に比して 20～60% 程度に低減される。
- (2) 敷砂緩衝材を設置することによる緩衝効果は重錘直径が大きいほど大きくなる傾向にある。
- (3) 静的耐力に対する最大支点反力の比である動的応答倍率は、敷砂緩衝材の有無や重錘直径の影響が小さいことより、RC 版の押抜きせん断破壊に着目した耐衝撃性能評価に適した指標であるものと判断される。

## 参考文献

- 1) 岸 徳光, 三上 浩, 今野 久志, 相良 光利: RC 版の重錘落下衝撃挙動に及ぼす重錘直径の影響, 土木学会北海道支部論文報告集 第 63 号, A-36, 2007.2
- 2) 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 2008.3 (掲載予定)
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書 (2002 年制定) 構造性能照査編, 2002.