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^{*1}・岸 徳光^{*2}・三上 浩^{*3}・Schellenberg Kristian^{*4}

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 ¹⁾²⁾。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載荷により行っており,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。

喪一1には、本実験の実験ケースを一覧にして示している。表には敷砂緩衡材の設置の有無、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、英文字が敷砂緩衡材の有無(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)

	敷砂厚	重錘	コンクリート	衝突速度			
試験体名		直径	圧縮強度				
	(mm)	<i>d</i> (mm)	(MPa)	V (m/s)			
N6	0	60	37.4	6			
S6	100	00	32.2	6			
N15	0	150	26.3	6, 7, 8			
S15	100	150	32.2	6,7~10*			
*光 (…) 静花谷 組んに) 静花内板							

表一1 実験ケース一覧

*単一6m/s 載荷後, 繰り返し載荷実験



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_t は 1.37 g/cm³ であった。載荷方法は、予備実験のもとに所定の衝突 速度で 1 度だけ載荷する単一載荷を基本とした。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載荷を行った。 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 重載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に示すように載荷位置 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12mm)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載荷点直下の変位 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 破壞性状

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,載荷点を中心とする円形の押抜きせ 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,載荷点を中 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も,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、載荷 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、主に載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







(a) 重錘直径 d=60 mm

(b) 重錘直径 d=150 mm

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,載荷点から放射状 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 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=6m/s, N15試

験体の V = 8 m/s および S15 試験体の V = 10 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 試験体の場合には載荷位置からほぼ 45°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 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 m/s 時には、載荷位置からほぼ 45°の角



図-3 V=6m/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、敷砂緩衡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 重編編華力、支点反力および変位波形

図-3には、V = 6 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 δ 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2ms 経過して励起し、周期が6ms 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 10ms 程 度までは振幅の小さい一様な時間分布を示し、その後、 周期が20ms 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

試験体名	衝突速度	計算	最大重錘	最大	最大			
		静的耐力	衝撃力	支点反力	応答変位			
	V (m/s)	V _{pcd} (kN)	P _{ud} (kN)	R _{ud} (kN)	δ_{ud} (mm)			
N6	6	289.9	771.8	848.8	35.58			
\$6	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			

表-2 計算静的耐力および各種最大応答値一覧

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 δ_{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³⁾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 γ_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

-899-



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 敷砂緩鬱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²⁾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 版の重鍾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.