

衝撃を受けるPC梁のせん断破壊挙動に及ぼす砂緩衝材の効果

BUFFER EFFECT OF SAND ON SHEAR DESTRUCTION OF PC BEAM BY IMPACT

畑野真吾*, 黒田一郎**, 古屋信明***, 山本佳士****, 中村佐智夫*****

Shingo HATANO, Ichiro KURODA, Nobuaki FURUYA, Yoshihito YAMAMOTO, and Sachio NAKAMURA

*防衛大学校 理工学研究科前期課程学生 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

**工博 防衛大学校助教授 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

***工博 防衛大学校教授 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

****工修 防衛大学校助手 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

*****日本サミコン (株) 技術部 (〒950-0925 新潟県新潟市弁天橋通 1-8-23)

キーワード: PC梁, 衝撃, せん断, 砂緩衝材, 緩衝効果

(PC beam, impact, shear, sand cushion, buffer effect)

1. まえがき

落石覆工には鉄筋コンクリート (以下 RC) 製やプレストレストコンクリート (以下 PC) 製および鋼製のものがあり, 近年PC落石覆工が多く建設されている。これは PC 落石覆工の耐荷力が大きいこと, プレキャスト化によって施工期間を大幅に短縮できること, などが理由である。

通常, 落石覆工に用いられるコンクリート梁は, 脆性破壊を防止して十分に变形させた後に破壊させるべく, 曲げ破壊がせん断破壊に先行されるように設計されるが^{1), 2)}, そのように設計された PC 梁でも, 衝撃荷重位置と支承位置によっては脆性的にせん断破壊をする危険性は避けられない^{3), 4)}。また, 実在の落石覆工の上面には敷砂等の緩衝材があつて, 衝撃荷重をある程度まで緩和もしくは分散するための処置が取られている^{1), 2), 5)}。しかし, 既往の研究では曲げ破壊における緩衝効果が対象となつていて⁶⁾, せん断破壊に対する効果については研究されていない。

そこで本研究では, 砂箱を設置し, これを介して PC 梁に衝撃荷重を与え, そのせん断挙動に及ぼすサンドクッション効果を評価するために重錘落下衝撃実験を実施した。ここでは, 主としてその実験結果を報告する。

2. 実験概要

(1) 供試体

表-1 に材料諸元を, 図-1 (a) (b) に PC 梁の形状寸法および断面寸法を示す。供試体の全長は PC 鋼より線 (有効緊張力 66.6kN/本) の定着長を十分確保するために 2000mm とし, 梁両端に厚さ 10mm の定着鋼板を設けている。スターラップは, 梁全長にわたって D6 鉄筋を 100mm 間隔で 19 本配置している。この量は, 通常設計される落石覆工 PC 梁においてせん断補強筋が一番少ない部類に相当する。

表-1 材料諸元

材料名	項目	数値等
コンクリート	水セメント比(%)	35
	セメント(kg/m ³)	389
	水(kg/m ³)	136
	細骨材(kg/m ³)	752
	粗骨材(kg/m ³)	1178
	載荷試験時の 圧縮強度(N/mm ²)	60.2
PC鋼より線 (SWPR7AN)	0.2%永久伸び強度 (N/mm ²)	1759
スターラップ, 組立筋 D6鉄筋(SD295A)	降伏強度 (N/mm ²)	388
緩衝砂	名称	珪砂7号
	平均粒径(D ₅₀)(mm)	0.22
	均等係数(D ₆₀ /D ₁₀)	1.5
	曲率係数 (D ₃₀ ² /D ₁₀ × D ₆₀)	0.84
	単位体積質量(kg/m ³)	2.6
	産地	岐阜県土岐

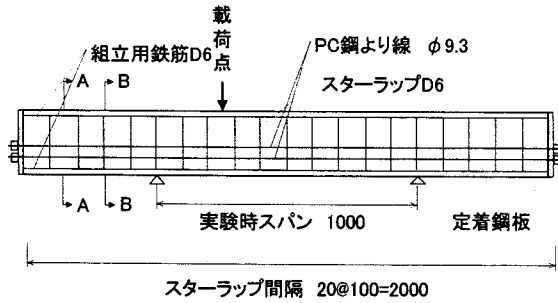


図-1(a) 供試体形状寸法

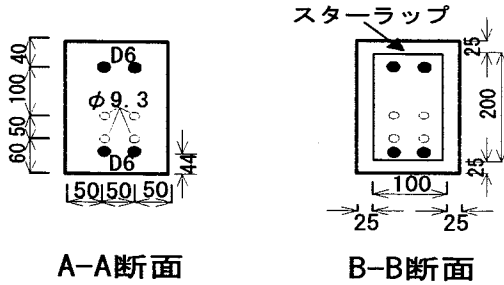


図-1(b) 供試体断面寸法

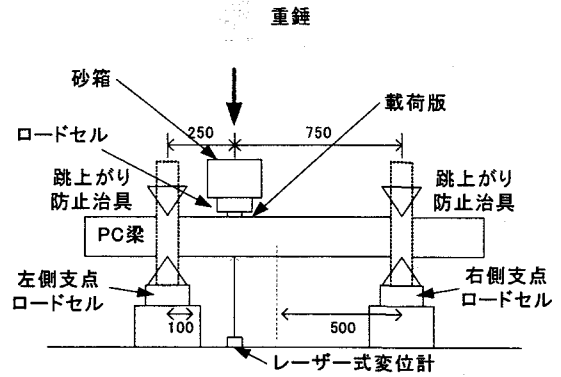


図-2 重錘落下衝撃実験の要領

表-2 計測項目及び計測器の性能・諸元

計測項目	計測器	性能・諸元
重錘加速度	加速度	測定範囲: 500G, 1000G 応答周波数: 7kHz
載荷点荷重	ロードセル	容量: 1000kN
変位	レーザー式変位計	測定範囲: 300±100mm 応答周波数: 915kHz

表-3 実験ケース及び結果の一覧

供試体名	最大荷重 P _{MAX} (kN)	残留変位 δ _R (mm)	衝撃載荷後の状態
75T-NC-1.4H-0.3t	488.5	1.3	△
75T-NC-2.3H-0.3t	698.8	12.9	×
75T-240S-2.3H-0.3t	129.4	記録なし	◇
75T-240S-4.0H-0.3t	194.8	0.2	◇
75T-240S-8.0H-0.3t	343.7	0.5	◇
75T-240S-11.0H-0.3t	431.4	1.9	○
75T-240S-13.0H-0.3t	432.3	3.6	○
75T-240S-15.0H-0.3t	494.6	5.1	△
75T-240S-16.0H-0.3t	536.9	5.4	△
75T-240S-17.0H-0.3t	552.7	72.6	×
75T-120S-8.0H-0.3t	457.7	1.1	△
75T-120S-8.2H-0.3t	577.6	8.7	△
75T-120S-8.5H-0.3t	509.3	37.7	×
75T-120S-9.5H-0.3t	533.8	12.8	×

・衝撃載荷後の状態の凡例

◇:無傷 ○:曲げひび割れ発生

△:せん断ひび割れ発生 ×:完全にせん断破壊

(4) 計測項目および実験ケース

表-2 に計測項目及び計測器の性能・諸元を示す。載荷点荷重は供試体と砂箱の間に設置したロードセルにより、支点付近の鉛直方向変位はレーザー式変位計により計測した。なお重錘加速度は、計測コードの取回しの制約から落下高さ 6m 未満のケースでのみ計測した。データは動ひずみ測定装置で収集・変換し、ローパスフィルター1000Hz でノイズカットを行い^{5), 7)}、これをデータとした。

表-3 に実験ケース及び結果の一覧を示す。供試体名については頭から、載荷板長さ(mm)-緩衝材厚(mm)・種類(SはSand)-落下高さ(m)-重錘質量(t)を示す。以

(2) 緩衝材

緩衝材として、PC 梁の上に鋼製の砂箱(幅 300mm, 長さ 400mm, 高さ 300mm)を設置し、中に珪砂 7 号(表-1)を入れて、その砂厚は約 120mm と 240mm とした。また、緩衝砂の効果を衝撃の緩和・荷重の分散の二面と考えた時、前者のみを抽出することを意図して、ロードセル下端と PC 梁の間には幅 150mm, 長さ 75mm, 厚さ 25mm の鋼板を挟んだ。

(3) 重錘落下衝撃実験要領

図-2 に重錘落下衝撃実験要領を示す。実験には防衛大学校所有の落錘式衝撃実験装置を用いた。これは最大 30m の高さから重錘を自由落下させ、供試体に衝突させる実験装置である⁵⁾。今回の載荷は、質量 0.3t の重錘を所定の高さから 1 回だけ落下させる単一重錘落下方式とし、載荷点部には砂箱(緩衝砂厚さ 240mm または 120mm)、その下に荷重計測用のロードセル、さらにその下に前述した目的のための鋼板(以降、載荷板と呼ぶ)を設置した。重錘先端形状は直径 100mm の半球状である。

載荷スパンは、確実にせん断破壊させるために 250mm+750mm の左右非対称(せん断スパン比: a/d≒ 1.3)とした。また、支点部においては、跳上がり防止用具で梁の上面を固定しているが、半円形断面支承の上に PC 梁を載せたままの状態であり、供試体と支承の間の摩擦が切れれば、梁軸方向には移動可能である。

降, 直接衝突を NC シリーズ, 砂厚 240mm を 240S シリーズおよび砂厚 120mm を 120S シリーズと呼ぶことにする。

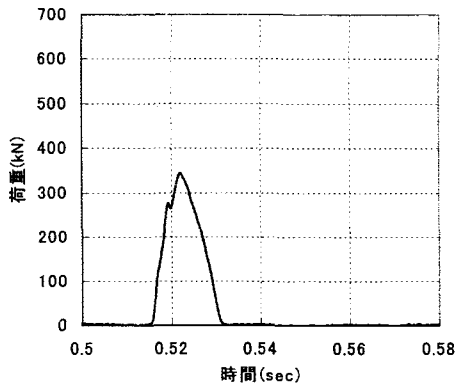
3. 実験結果と考察

(1) 時間暦応答

図-3(a)~(d)に 240S シリーズ, 図-4(a)~(c)に 120S シリーズの, 荷重~時間関係および変位~時間関係の

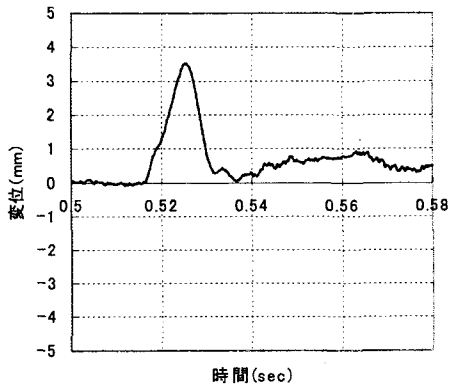
一例を示す。また, P_{MAX} (最大荷重) および δ_{MAX} (最大変位) の具体的な数値もそれぞれ記入した。

緩衝砂による P_{MAX} および δ_{MAX} の低減, すなわち緩衝効果が顕著に確認できる。例えば, 緩衝砂厚さを 120mm から 2 倍の 240mm とすると, 表-3 に示したように同じ落下高さ (8.0m) に対して, P_{MAX} は約 75% に, δ_R (残留変位) は約 45% に抑えることができた。

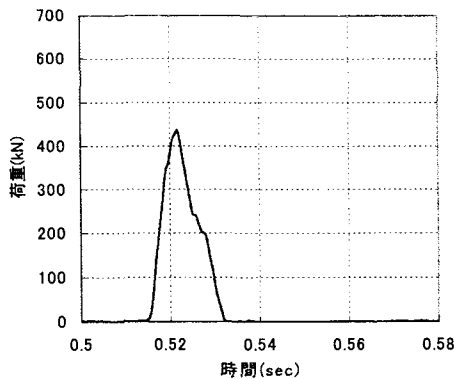


荷重~時間関係 ($P_{MAX}=343.7\text{kN}$)

図-3(a) 時刻暦応答 (75T-240S-8.0H-0.3t, 載荷後の状態: 無傷)

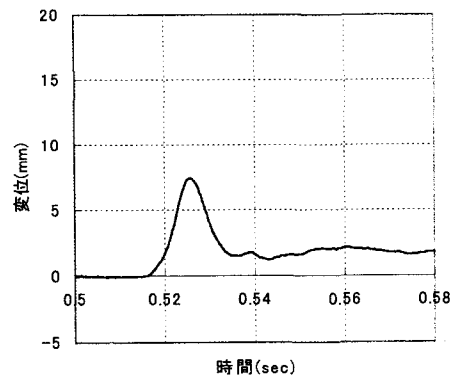


変位~時間関係 ($\delta_{MAX}=3.5\text{mm}$)

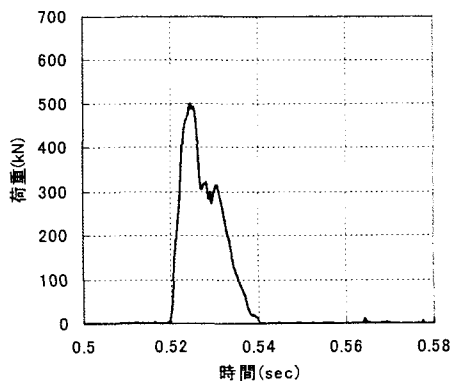


荷重~時間関係 ($P_{MAX}=431.4\text{kN}$)

図-3(b) 時刻暦応答 (75T-240S-11.0H-0.3t, 載荷後の状態: 曲げひび割れ)

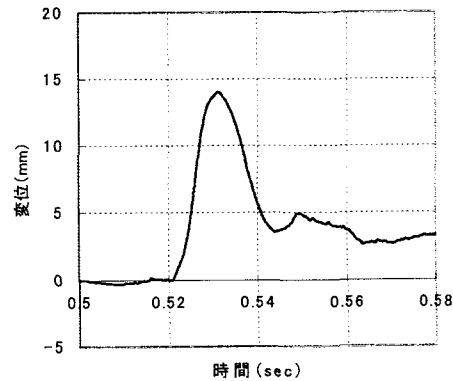


変位~時間関係 ($\delta_{MAX}=7.4\text{mm}$)

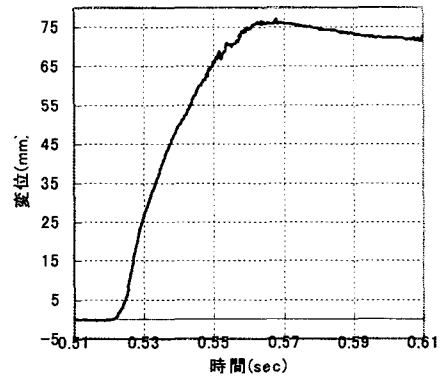
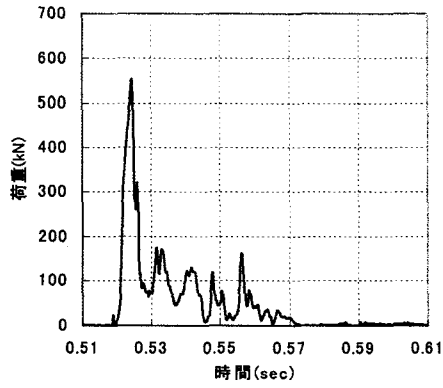


荷重~時間関係 ($P_{MAX}=494.6\text{kN}$)

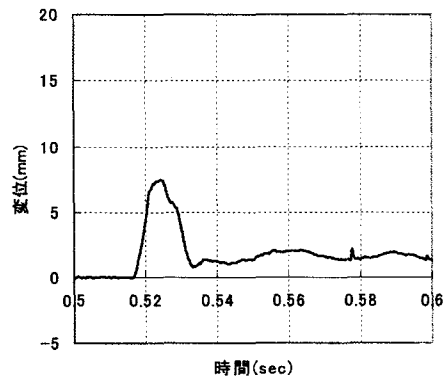
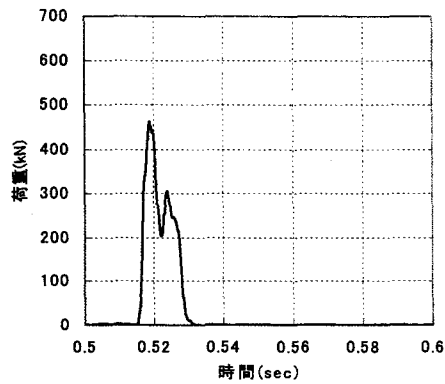
図-3(c) 時刻暦応答 (75T-240S-15.0H-0.3t, 載荷後の状態: せん断ひび割れ)



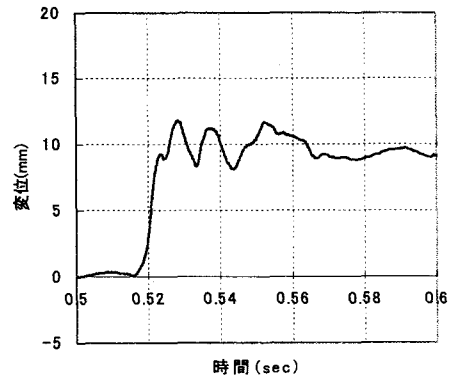
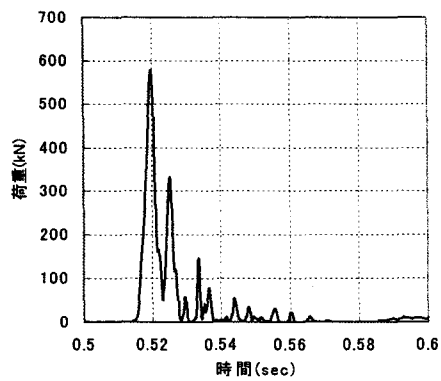
変位~時間関係 ($\delta_{MAX}=14.1\text{mm}$)



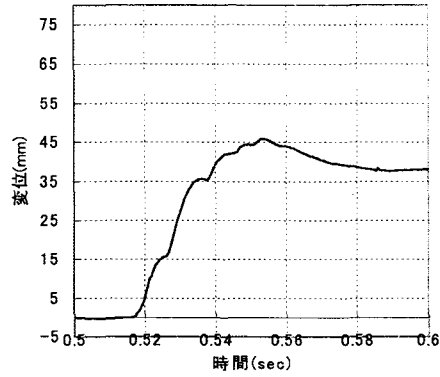
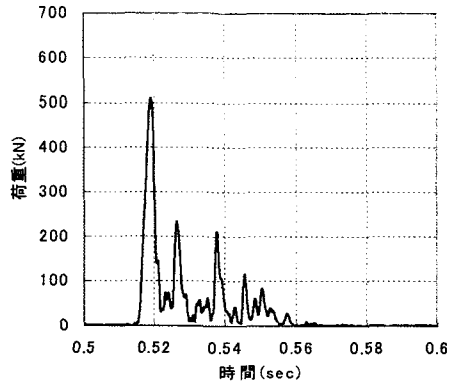
荷重～時間関係 ($P_{MAX}=552.7\text{kN}$) 変位～時間関係 ($\delta_{MAX}=76.2\text{mm}$)
 図-3(d) 時刻歴応答 (75T-240S-17.0H-0.3t, 載荷後の状態 : 完全にせん断破壊)



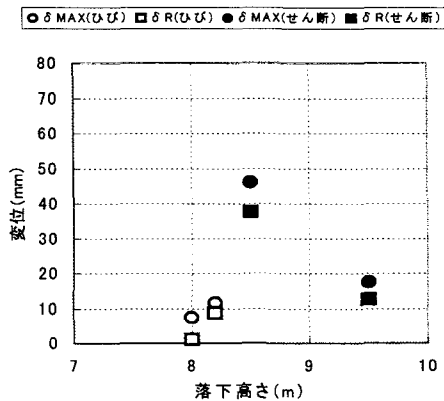
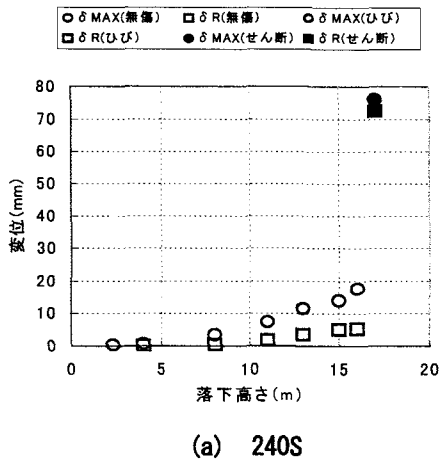
荷重～時間関係 ($P_{MAX}=457.7\text{kN}$) 変位～時間関係 ($\delta_{MAX}=7.5\text{mm}$)
 図-4(a) 時刻歴応答 (75T-120S-8.0H-0.3t, 載荷後の状態 : せん断ひび割れ)



荷重～時間関係 ($P_{MAX}=577.6\text{kN}$) 変位～時間関係 ($\delta_{MAX}=11.6\text{mm}$)
 図-4(b) 時刻歴応答 (75T-120S-8.2H-0.3t, 載荷後の状態 : せん断ひび割れ)



荷重～時間関係 ($P_{MAX}=509.3kN$) 変位～時間関係 ($\delta_{MAX}=46.1mm$)
 図-4(c) 時刻歴応答 (75T-120S-8.5H-0.3t, 载荷後の状態：完全にせん断破壊)



(a) 240S
 (b) 120S
 図-5 変位～落下高さ関係

(2) 変位～落下高さ関係

図-5 に変位 (最大及び残留) ～落下高さ関係を示す。なお、記号を変えて衝撃载荷後の PC 梁の損傷状態 (表-3 参照) も示してある。各シリーズともに δ_{MAX} および δ_R が急激に増加する落下高さがあり、これがいわゆる限界落下高さに対応していて、この前後で唯一回の

衝撃荷重载荷によって PC 梁がせん断破壊を起こしている。緩衝砂厚さを 2 倍にすることで、限界落下高さも概ね 2 倍になっていることがわかる。

図-6 は、緩衝材がない時の残留変位～落下高さ関係で³⁾、载荷板長さ 75mm の時の限界落下高さは 2m 前後であったから、このことから砂による緩衝効果は明らかである。

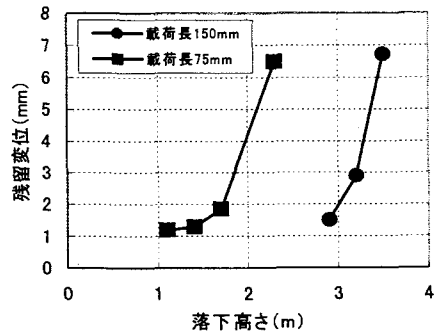


図-6 残留変位～落下高さ関係 (NC に相当)

(3) 最大荷重～落下高さ関係

図-7 に最大荷重～(落下高さ)^{3/5} 関係を示す。ここで (落下高さ)^{3/5} はいわゆる振動便覧式²⁾ に基づいている。

$$P_{max} = 2.455 \lambda^{2/5} W^{2/3} H^{3/5}$$

P_{max} : 最大衝撃力 (tf), λ : 敷砂緩衝材のラーメの定数 (tf/m²), W : 重錘重量 (tf), H : 落下高さ (m)。

NC, 240S, 120S の各シリーズについてラーメの定数を逆算すると表-4 のとおりとなる。現行設計要領²⁾では、ロックシェットの頂版上に 90cm 厚の敷砂緩衝材を設置し、 $\lambda=100tf/m^2$ と仮定して落石衝撃荷重を算出するように決められているが、今回の実験結果からするとやや危険側の設定になっていること、また緩衝砂およびその厚さに効果があること、は明らかである。

表-4 ラーメの定数

実験ケース	平均値(tf/m ²)	計算値(tf/m ²)の範囲
NC	9018	8341~9695
240S	232	143~278
120S	655	519~895

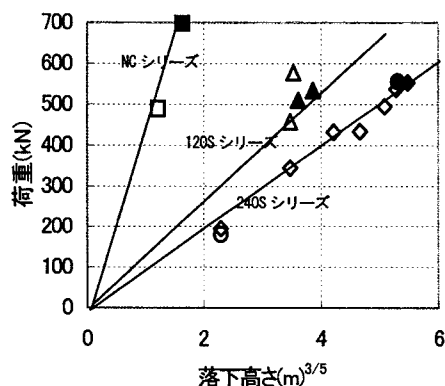


図-7 荷重～(落下高さ)^{3/5}関係

4. まとめ

本研究は、衝撃を受けてせん断破壊するPC梁の破壊挙動に及ぼす砂の緩衝効果について実験的研究を行い、その結果からPC梁がせん断破壊する際の限界落下高さ、伝達衝撃力と敷砂厚さとの関係を明らかにし、さらに直接衝突させた場合との比較を行った。本研究において得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 緩衝材を用いることにより、供試体に加えられるせん断損傷を抑えることができた。例えば、緩衝材

なし→砂 120mm→砂 240mmによって、限界落下高さは、おおよそ2m→8m→16mと大きくなった。

- (2) 砂厚を大きくした時の緩衝効果が、荷重変位およびラーメの定数によって確認できた。
- (3) 緩衝材を介しても、直接衝突と同様にリバウンド現象が現れた。

参考文献

- 1) 土木学会：ロックシェッドの耐衝撃設計 構造工学シリーズ8，平成10年
- 2) 社団法人日本道路協会：落石対策便覧，平成12年6月
- 3) 下山一貴：支点付近に荷重を受けるPC梁のせん断力学特性に関する研究，防衛大学校 修士論文，平成14年2月
- 4) 下山一貴，黒田一郎，古屋信明，中村佐智男：重錘落下実験によるPC梁のせん断破壊挙動，コンクリート工学論文集，第13巻第1号，P.109～P.118，2002年1月
- 5) 土木学会：衝撃実験・解析の基礎と応用構造工学シリーズ15，平成16年
- 6) 橘 沙代子：衝撃荷重下の鉄筋コンクリートはりの応答特性に関する研究，金沢大学修士論文，平成15年度
- 7) 別府万寿博，小暮幹太，酒巻 勝，大野友則：RCはり部材の衝撃実験における衝撃荷重の計測と波形処理法，土木学会論文集No.724/I-62，P.141～P156，2003.1