

## 各種緩衝材を設置したRCはりの衝撃実験

### IMPACT TESTS ON RC BEAMS WITH SEVERAL CUSHIONS

中村佐智夫\*、榎谷 浩\*\*、橘紗代子\*\*\*

Sachio NAKAMURA, Hiroshi MASUYA and Sayoko TACHIBANA

\*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)

\*\*工博 金沢大学大学院教授 自然科学研究科 (〒 920-8667 石川県金沢市小立野 2-40-20)

\*\*\*修 (工) 金沢大学大学院自然科学研究科 博士後期課程 (〒 920-8667 石川県金沢市小立野 2-40-20)

キーワード: RCはり、重錘衝突実験、緩衝材  
(RC beam, drop-weight impact test, cushion)

#### 1. はじめに

これまでRCやPC構造物の耐衝撃性に関する研究が盛んに行われているが、緩衝材のない部材についての研究が比較的多い<sup>10), 11), 12)</sup>。しかし、ロックシェッドは衝撃力を緩和させるために敷砂などの緩衝材を設置しており、その耐衝撃性は緩衝材を含む構造物全体で評価する必要がある<sup>6), 7), 9)</sup>。

著者らは緩衝材の影響を調べるために、各種緩衝材を設置した衝撃実験を行った。ここでは実験で得られた結果の一部を報告する。

#### 2. 実験概要

##### 2.1 実験供試体

実験には複鉄筋RCはりでスターラップを 50mm

間隔に配置したスパン長 1、2、4m の3種類の供試体を用いた。図-1に供試体の配筋図を示す。コンクリートは普通セメントを使用した。表-1に材齢 28 日時の材料試験結果を示す。鉄筋は主鉄筋は圧縮側、引張側ともに SD345 D13、スターラップは SD295 D6 を使用した。それぞれの降伏点、引張強さも表-1に示す。

##### 2.2 実験方法

実験装置は、静的実験には油圧式実験装置 (島津製作所、UH-C500A) を使用し、衝撃実験には図-2に示す金沢大学構造工学実験室所有の重錘落下式実験装置を使用した。重錘落下式実験装置の重錘は1枚当たり約 14kg の鋼板を重ねて、その下にロード

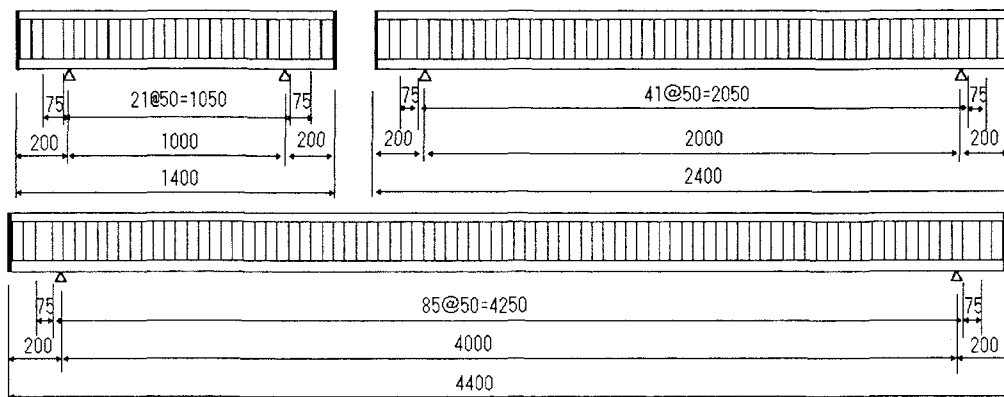


図-1 実験供試体

表-1 コンクリート・鉄筋の材料特性

コンクリート		
圧縮強度 (MPa)		28.5
引張強度 (MPa)		2.4
弾性係数 (GPa)		283
ポアソン比		0.18
鉄筋		
降伏点 (MPa)	D13	383
	D6	338
引張強さ (MPa)	D13	573
	D6	508

表-2 実験一覧

スパン	静的実験	緩衝条件*	繰返し落下	単一落下
1 m	1 体	NC	1-5m/s 1体	5m/s 4体
		R	1-6m/s 1体	6m/s 3体
		S 1	1-6m/s 1体	6m/s 3体
		S 2	1-6m/s 1体	6m/s 3体
2 m	1 体	NC	1-5m/s 1体	5m/s 3体
		R	1-5m/s 1体	5m/s 3体
		S 1	1-6m/s 1体	6m/s 3体
		S 2	1-6m/s 1体	6m/s 3体
4 m	1 体	NC	1-5m/s 1体	5m/s 3体
		R	1-5m/s 1体	5m/s 3体
		S 1	1-6m/s 1体	6m/s 3体
		S 2	1-6m/s 1体	6m/s 3体

(\*) NC:直接衝突 R :ゴム緩衝材 (H=50mm)  
S 1 :砂緩衝材1 (d=240mm) S 2 :砂緩衝材2 (d=120mm)

セルを固定し全体の質量を 300kg としたもので、衝突する先端部は半径 75mm の円柱の先端を曲率 565mm に加工してある。重錘は 2 本のガイドレールに沿って自由落下し、供試体の支点部は鋼治具によりリバウンドが防止されている。また、衝撃実験における緩衝材の条件は、直接衝突、ゴム、砂 (厚さ 240mm)、砂 (厚さ 120mm) の 4 種類とした。ゴムはシバタ工業株式会社製 FV-65 (150mm × 150mm × 50mm) を使用し、砂は 7 号珪砂を奥行き 400mm、幅、高さ 300mm、の砂箱に所定の高さに敷き詰めて使用した。また、荷重条件としては、スパンの 2%の変位量を生じさせることを基本とする単一落下実験と 1m/s から 1m/s ずつ順次衝突速度を増加させる繰返し落下実験を行った。

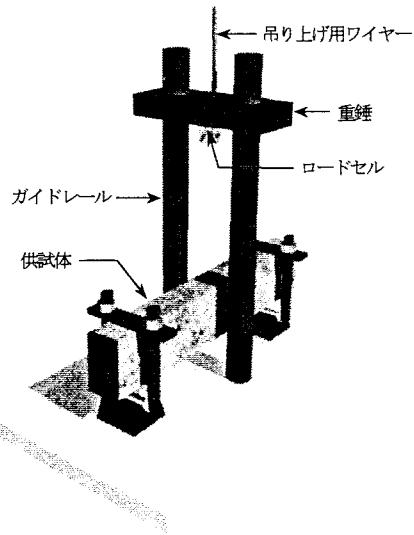
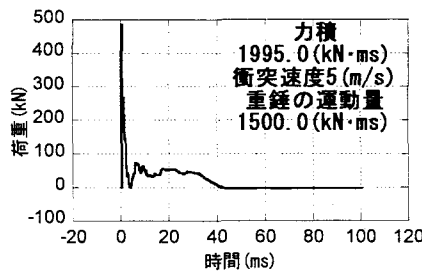
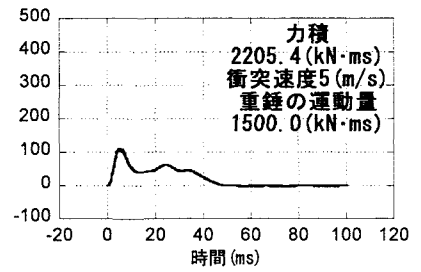


図-2 衝撃実験装置

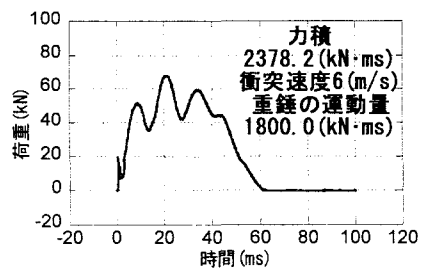
計測項目は、荷重、支点反力、変位、鉄筋のひずみである。荷重は重錘下部に取り付けたピエゾ式ロードセル (PCB 社、207B) で、支点反力は支持点部のロードセル (東京測器社、KCE-500A) で計測を行った。砂緩衝材を設置したときは供試体と鋼製に砂箱の間にロードセル (東京測器社、CLP-500CMP) を設置し砂層下の荷重として測定した。



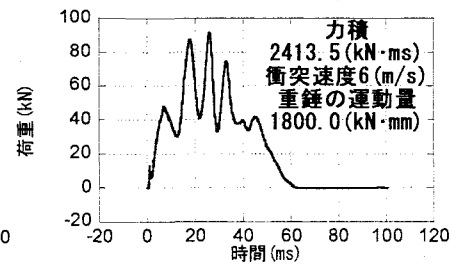
(a) 直接衝突 (NC)



(b) ゴム緩衝材 (R)



(c) 砂緩衝材 (S1)



(d) 砂緩衝材 (S2)

図-3 荷重時間曲線 (スパン 2m 単一落下)

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 衝撃力波形

各緩衝材におけるスパン 2m、単一落下の場合の荷重時間曲線を図-3に、荷重変位曲線を図-4

に示す。荷重は重錘下部のピエゾ式ロードセルの値である。

衝突速度 5m/s の直接衝突とゴム緩衝材を比較すると、直接衝突では衝突直後に 487kN の荷重が発生しているが、ゴム緩衝材では 112kN と小さくなっている。しかし、その尖頭的な荷重を除けば両者の荷重時間曲線はよく近似しており、平坦部の荷重は静的耐力 52.92kN と概ね一致している。また最大変位も直接衝突では 58mm、ゴム緩衝材では 53mm で尖頭的荷重の影響は少なく、大差ない結果であった。

砂緩衝材の場合は、10 ～ 10 数 ms の固有周期の振動成分が載っているが、平均的にみれば、静的耐力と概ね一致している。砂緩衝材の場合、衝突速度が 6m/s と直接衝突やゴム緩衝材の場合より大きいですが、最大変位は、厚さ 240mm の場合で 22mm、厚さ 120mm の場合で 32mm と小さく、砂緩衝材のエネルギー吸収により、部材のエネルギー吸収量が小さく押さえられることが確認できた。

### 3.2 エネルギー吸収率

図-5 に緩衝材別のエネルギー吸収率を示す。図中の値は複数の単一落下実験から得られたエネルギー吸収率の平均値である。エネルギー吸収率  $R$  は  $R = \text{吸収エネルギー} / \text{衝突エネルギー}$  で表される。吸収エネルギーは、荷重変位曲線における最大変位までの下側の面積とし、戻りの分は考慮していない。荷重として重錘下部のピエゾ式ロードセルで計測した載荷点荷重を用いたエネルギー吸収率を  $R_p$ 、支点反力を用いたものを  $R_r$ 、砂層下のロードセルの値を用いたものを  $R_{ps}$  とした。変位としては、スパン中央（載荷点）のより下面の変位を用いた。

また、図には大阪市大の園田が提案した運動量保存則によるエネルギー分担率<sup>3)</sup>を  $R_m$  として示している。

$R_m$  は以下の式で与えられる。

$$R_m = \frac{1}{1 + m/M}$$

$m$  : 緩衝材及び部材の崩壊モードに依存する質量  
 $M$  : 重錘の質量

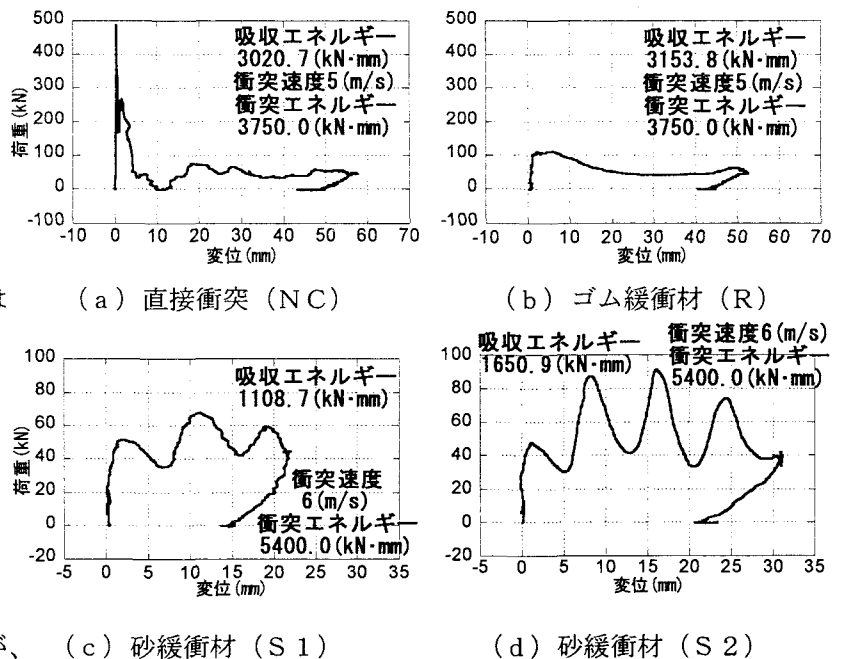


図-4 荷重変位曲線（スパン 2 m 単一落下）

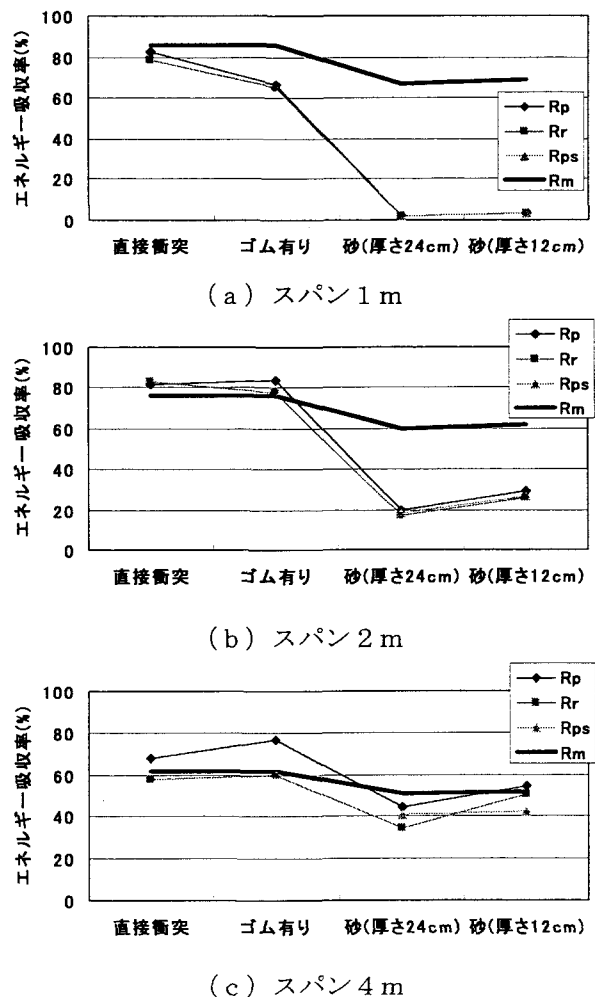


図-5 緩衝材の相違によるエネルギー吸収率の比較

図-5に示すようにスパン1mと2mに関しては、エネルギー吸収率は荷重の種類によらず同様の値となったが、スパン4mの場合はRpはRrやRpsに比べ大きめの値となった。

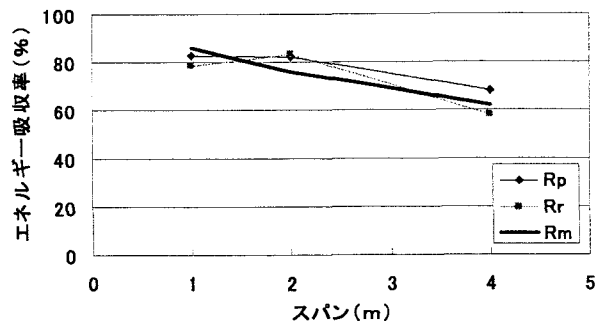
スパン1mでは、直接衝突のエネルギー吸収率に対するゴム緩衝材のエネルギー吸収率は約0.8で、砂緩衝材1は約0.03、砂緩衝材2は0.04～0.05であり、砂緩衝材の緩衝効果大きい。また砂緩衝材は厚い方が緩衝効果が大きかった。スパン4mでは、直接衝突のエネルギー吸収率に対するゴム緩衝材のエネルギー吸収量は1.0～1.1、砂緩衝材1は0.6～0.7、砂緩衝材2は0.8～0.9であり、緩衝材の効果が小さくなっている。

また運動量保存則によるエネルギー分担率Rmと実験で得られたエネルギー吸収率を比較すると、スパン1mでは、直接衝突の場合RmとRp,Rrは一致しているが、ゴム緩衝材の場合はRmは大きめの値を与え、砂緩衝材の場合Rmは20～30倍の値を与える。スパン2mでは、直接衝突とゴム緩衝材の場合はRmとRp,Rrは一致しているが、砂緩衝材の場合は、2～3.5倍の値を与える。スパン4mの場合はばらついてはいるが、Rmと実験で得られたエネルギー吸収率は、直接衝突、ゴム緩衝材、砂緩衝材2では一致しており、砂緩衝材1も差は小さい。

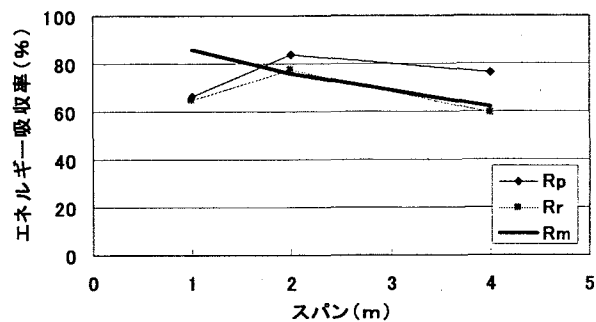
図-6は図-5と同様のデータを、緩衝材ごとにスパンとエネルギー吸収量の関係をグラフにしたものである。

直接衝突の場合は、スパンに係わらずRmと実験で得られたエネルギー吸収率はよく一致している。

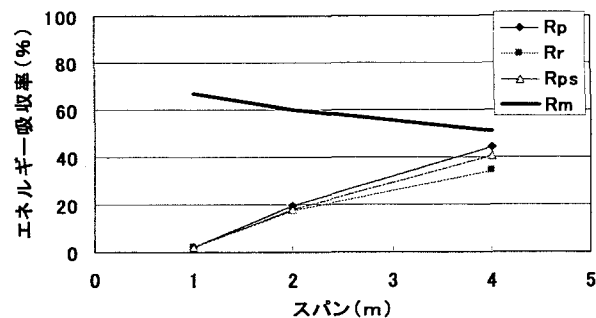
スパンが長くなるにつれエネルギー吸収率が小さくなるのは、崩壊に係わる部材の質量が大きくなるためと考えられる。ゴム緩衝材の場合はスパン2m以上ではRmと実験で得られたエネルギー吸収率は概ね一致している。スパン1mではスパン2mよりRmは大きくなっているが、実験で得られたエネルギー吸収率は小さくなっている。砂緩衝材の場合は、スパンが長くなるにつれRmは単調減少であるのに対し、実験で得られたエネルギー吸収率は単調増加であり、スパン4mでは砂緩衝材2はRmとほぼ一致し、砂緩衝材1でもRmとの差は小さくなっている。実験の範囲では、運動量保存則によるエネルギー分担率Rmはエネルギー吸収率のほぼ上限を与え、また構造物の剛性が高い方が緩衝材の効果が高いという結果となった。



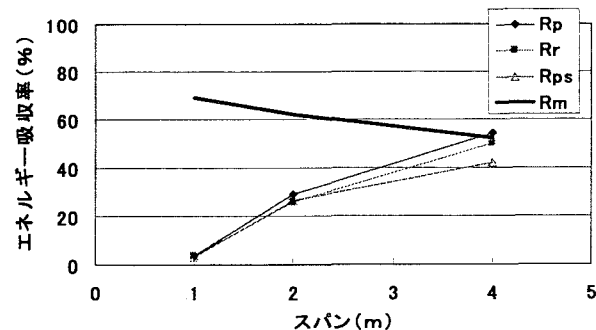
(a) NC : 直接衝突



(b) R : ゴム緩衝材



(c) S1 : 砂緩衝材1 (d=240mm)



(d) S2 : 砂緩衝材2 (d=120mm)

図-6 スパン長の相違によるエネルギー吸収率の比較

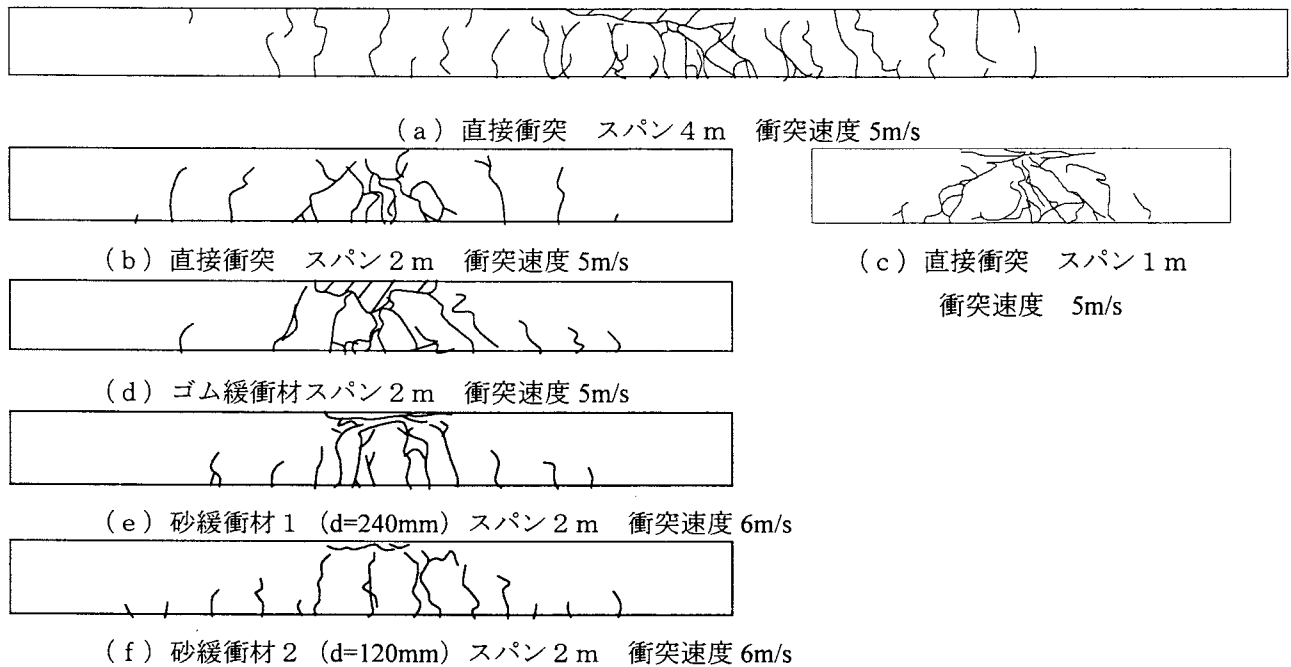


図-7 ひび割れ図

### 3.3 ひび割れ状況

図-7に単一落下実験のひび割れ図を示す。

スパン4mの直接衝突では、静的載荷実験では見られなかった供試体上面から下面に伸びるひび割れが多く見られ、上部からのひび割れと下部からのひび割れがつながっている。これは曲げ波の伝播によるひび割れであり、衝撃特有の破壊状況である。

スパン1mおよびスパン2mの直接衝突では、押し抜きせん断破壊によるひび割れが確認できる。

スパン2mで、緩衝材の破壊状況に対する影響を検討する。直接衝突、ゴム緩衝材は衝突速度5m/sであるのに対し、砂緩衝材1、砂緩衝材2は衝突速度6m/sであるにも関わらず図-4に示したように最大変位は小さく、ひび割れ発生量は少ない。

また、砂緩衝材の場合は、静的載荷実験の曲げ破壊に類似したひび割れ分布であった。

### 4. まとめ

本研究では、緩衝材が設置されたRCはりの衝撃挙動を解明するために、重錘衝突実験を行った。

得られた結論は以下の通りである。

- (1) RCはりが塑性変形する場合、直接衝突の場合は衝突直後に尖頭的な荷重が発生するが、その後静的耐力と同程度の平坦部が続く。
- (2) 緩衝材がある場合は、尖頭的荷重の値が小さくなるが、その後の荷重は近似している。
- (3) 運動量保存則から求まるエネルギー分担率は、

RCはりのエネルギー吸収率の上限を与える。

- (4) 直接衝突の場合は、運動量保存則から求まるエネルギー分担率と、実験から求まるエネルギー吸収率はほぼ一致する。
- (5) 緩衝材がある場合、スパンが長く剛性が小さい場合は、運動量保存則から求まるエネルギー分担率と実験から求まるエネルギー吸収率は一致するが、スパンが短い場合は実験で求まるエネルギー吸収率の方が小さい。本実験では20~30倍の違いがあるケースがあった。
- (6) 緩衝材の緩衝効果が大きいほど、運動量保存則から求まるエネルギー分担率と実験から求まるエネルギー分担率が一致するスパンは、長くなる。

今後は、運動量やエネルギーをコントロールした実験や、今回と異なる断面のRCはりに関する実験を行いエネルギー吸収率を予測する手法を確立していきたい。

#### 参考文献

- 1) 橘紗代子, 榎谷 浩, 中村佐智夫: 有限要素法 (ADINA) による RC はり衝撃挙動解析に関する研究, 応用力学論文集 Vol.7, pp.675-684, 2004.8
- 2) 土木学会: 構造物の衝撃挙動と設計法 構造工学シリーズ6, 平成6年1月

- 3)土木学会：ロックシェットの耐衝撃設計 構造工学シリーズ8，平成10年11月
- 4)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3月
- 5)園田恵一郎：落石覆工の設計法についての一提案，構造工学論文集 Vol.39A，pp.1563-1572，1993.3
- 6)園田佳巨，佐藤紘志，石川信隆：落石覆工のエネルギー分担率に関する一考察，第1回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，pp.119-122，1991.3
- 7)榎谷 浩，御嶽 譲，前川幸次：鋼製ロックシェットへの落石衝突実験について，第1回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，pp.123-126，1991.3
- 8)大塚久哲，佐藤弘史，長尾彰洋，横山功一：PRC桁の衝撃載荷時の挙動について，第2回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，pp.83-88，1993.6
- 9)中村佐智夫，榎谷 浩，藤井智弘，音田 奨：敷砂を緩衝材とするPC版上への重錘落下実験について，第3回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，pp.257-262，1996.5
- 10)岸 徳光，三上 浩，松岡健一，田村富雄：低速度衝撃を受けるRCはりの動的耐力とエネルギー吸収性能，第3回落石等によるシンポジウム講演論文集，土木学会，pp.305-310，1996.5
- 11)川合裕二，森嶋芳大，榎谷 浩，梶川康男：衝撃荷重を受けるRCはりの挙動についての実験的研究，第3回落石等によるシンポジウム講演論文集，土木学会，pp.311-314，1996.5
- 12)森嶋芳大，熊谷貴秀，中田吉彦，榎谷 浩：鉄筋コンクリートはりの衝撃弾塑性挙動，第4回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，pp.149-152，1998.6
- 13)岸 徳光，安藤智啓，三上 浩，松岡健一：RC梁の耐衝撃性に及ぼす断面寸法の影響，第4回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，pp.165-170，1998.6
- 14)中田吉彦，熊谷貴秀，榎谷 浩，梶川康男：重錘落下による構造部材の衝撃応答に関する実験的研究，第5回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，pp.275-278，2000.6
- 15)西村洋平，中田吉彦，橘紗代子，榎谷 浩，梶川康男：運動エネルギーおよび運動量がRCはりの衝撃挙動に及ぼす影響について，第6回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集，土木学会，pp.209-214，2002.7