

各種緩衝材を設置した RC はりの衝撃応答と性能に関する実験的研究

Experimental study on the impact behavior and performance of reinforced concrete beam with some absorbing materials

橋紗代子*, 中村佐智夫**, 榎谷浩***

Sayoko TACHIBANA, Sachio NAKAMURA, Hiroshi MASUYA

* 修(工) 金沢大学大学院自然科学研究科 博士後期課程 (〒920-1192金沢市角間町)

** 日本サミコン株式会社 技術部 (〒950-0925 新潟市弁天橋通 1-8-28)

*** 工博 金沢大学大学院教授 自然科学研究科 (〒920-1192 金沢市角間町)

Protection structure against rock falls has a shock absorbing layer such as sand on the top of structure in many cases. We have performed a series of impact experiments to investigate characteristics of behavior of reinforced concrete beam with a rubber plate or sand layer on impact point and without any cushion. We measured the crack patterns, impact force, reaction force, load under sand layer and displacement of beam.

From experiment results, it has become clear that impact characteristics of behavior of reinforced concrete beam are quite different under the condition at the impact point and the span length. We have made them clear that the relationship between the mean impact force given by impulse and the natural period of a beam and that the transmission energy to the beam is different under the impact conditions. It also has become clear that the ability of shock absorption of the sand is excellent in this series of impact experiments. Finally, we have shown the simple example of performance based design for the reinforced concrete beam under impact utilizing the experimental results.

Key word: Reinforced concrete beam, absorbing material, impact test

キーワード: RC はり 緩衝材 衝撃実験

1. 序論

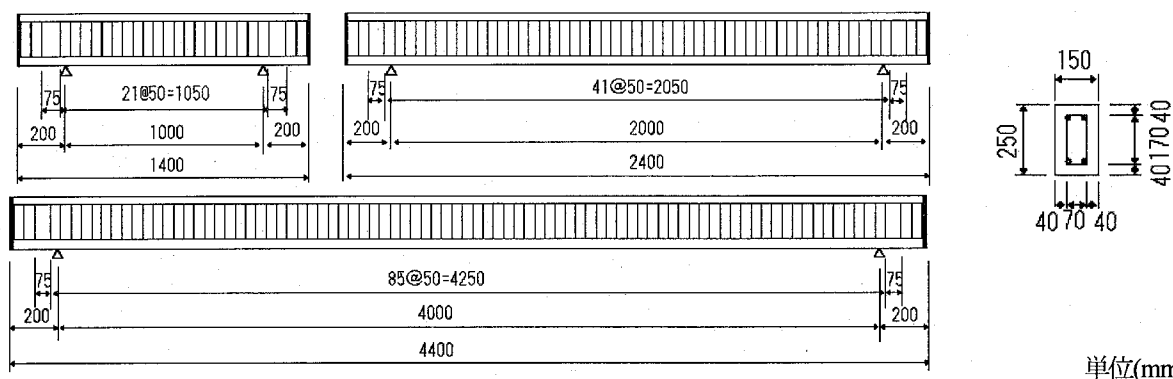
我が国は地形が急峻であり、地震と多雨多雪のため、地滑りや崖崩れ、雪崩などとともに、山岳地帯は落石に対して厳しい環境にある。このため各種防護構造物が山岳部に建設される。落石などによる衝撃を受ける構造物の力学的挙動は一般に複雑であり、構造物の破壊に至るまでの衝撃挙動は、構造物の種類、構造物を構成する材料特性に密接に関連している。特に、土木構造物は鋼やコンクリートから成る複合構造の場合が多く、問題を複雑としている¹⁾。

現在、ロックシェッドや落石防護柵などの落石構造物は、衝撃力の緩和などを目的として敷砂などの緩衝材を設置している場合が多い。落石などによる衝撃を受けた場合、緩衝材と構造物は一体となって挙動する。よって、それらの構造物の耐衝撃特性は緩衝材を含む構造物全体で評価されるのが望ましい²⁾。

また、近年、我が国では、衝撃分野の研究が盛んに行われており、低速度の衝撃に対する実験手法が標準化されつつある^{3), 4), 5), 6), 7)}。これらの研究の中で、RC や PC 構造物の耐衝撃性の研究が盛んに行われているが、緩衝材を有しない場合の研究が比較的多い。緩衝材を有する構造物の衝撃挙動を検討する場合、当然その影響を考慮した耐衝撃性、性能の検討が必要である。

よって、衝撃荷重を受ける構造物において、合理的かつ経済的な構造物を設計するために、性能照査型耐衝撃設計法に関する技術的な検討を行うことが急務とされている⁸⁾。国際的にもこの分野での設計概念が構築されていないのが現状である。

このような背景により、本研究では、最も基本的な部材である RC はりに対し、緩衝材として砂やゴムを設置した衝撃実験を行った。衝撃荷重、応答特性、エネルギー吸収について得られた知見を示し、性能照査型耐衝撃設計法検討のための基礎資料を提示する。



単位(mm)

図-1 供試体概要図

表-1 実験一覧

スパンL(mm)	载荷条件	衝突速度V(m/s)	
		繰返し落下	単一落下
1	静的载荷	-	
	直接衝突	1,2,3,4,5	5
	ゴム緩衝材(H=50mm)	1,2,3,4,5,6	6
	砂緩衝材(厚さ24cm)	1,2,3,4,5,6	6
	砂緩衝材(厚さ12cm)	1,2,3,4,5,6	6
2	静的载荷	-	
	直接衝突	1,2,3,4,5	5
	ゴム緩衝材(H=50mm)	1,2,3,4,5	5
	砂緩衝材(厚さ24cm)	1,2,3,4,5,6	6
	砂緩衝材(厚さ12cm)	1,2,3,4,5,6	6
4	静的载荷	-	
	直接衝突	1,2,3,4,5	5
	ゴム緩衝材(H=50mm)	1,2,3,4,5	5
	砂緩衝材(厚さ24cm)	1,2,3,4,5,6	6
	砂緩衝材(厚さ12cm)	1,2,3,4,5,6	6

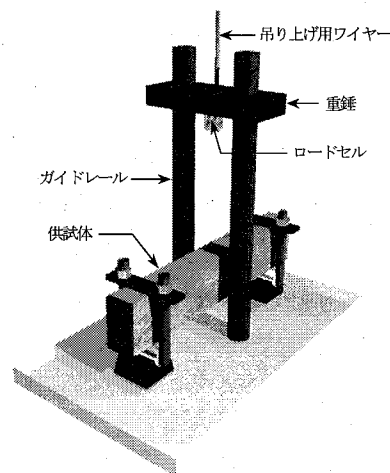


図-2 重錘落下式実験装置

表-2 コンクリートの配合表

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント 比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	混和材
25	8	53	37.5	144	272	707	1210	0.544

2. 実験概要

2.1 実験供試体および材料特性

実験には図-1に示すように、スターラップを50mm間隔に配置したスパン長1m, 2m, 4mですべて同断面の供試体を用いた。動的応答には供試体の固有周期の影響が重要であるため、スパン長の異なる供試体を用いた。衝突速度の違い、载荷点の条件の違いなどをパラメーターとし実験結果の比較・検討を行った。表-1に実験一覧を示す。衝突速度1m/sから1m/sずつ増加させる繰返し落下実験を1体行い、それを参考に従来使われているスパンの2%の最大変位量を生じさせることを基本とする単一落下実験を3体行った。衝突速度5m/sで2%のたわみに十分達しなかった場合はすべて6m/sである。ただし、実験室の空間的制約により最大衝突速度は6m/sであった。衝撃実験での衝突条件の種類は、衝突体の接触条件

により4種とした。表-2に使用したコンクリートの配合を示す。コンクリートは、普通セメントを使用し、粗骨材には最大寸法25mm、実積率65.1%、表乾状態における密度2.67g/cm³の砂利を用いた。細骨材には最大粒径2.5mm、粗粒率2.43、表乾状態における密度2.60g/cm³の砂を用いた。また、表-3にコンクリート(材齢28日時)の材料試験結果を示す。主鉄筋は圧縮側、引張側ともにD13、せん断補強筋にD6を使用した。供試体の設計曲げ耐力(P_{usc})はスパン長1mで66.6kN, 2mで33.3kN, 4mで16.7kNであり、せん断耐力(V_{usc})は91.1kNである。せん断余裕度 $\alpha(V_{usc}/P_{usc})$ はすべてのスパン長において $\alpha>1$ であるため静的载荷時に曲げ破壊が先行するはりである。本供試体では、各耐力算定時の部材係数は $\gamma_b=1.0$ とした。なお、コンクリートの材料係数 $\gamma_c=1.3$ 、鉄筋の材料係数 $\gamma_s=1.0$ とした。供試体の固有周期はスパン長1mで2.5ms, 2mで10.0ms, 4mで40.1msである。

表-3 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)	28.3
ポアソン比	0.18
鉄筋	
降伏応力(MPa)	D13 383
	D6 338
弾性係数(GPa)	D13 210
	D6 210

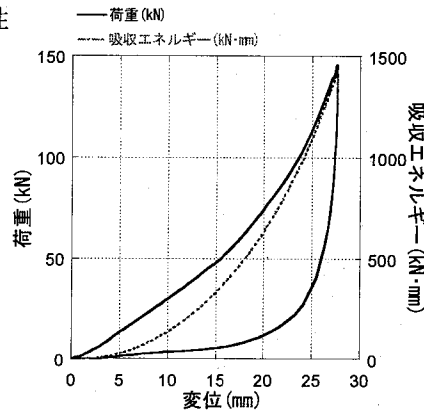


図-3 ゴムの特性値

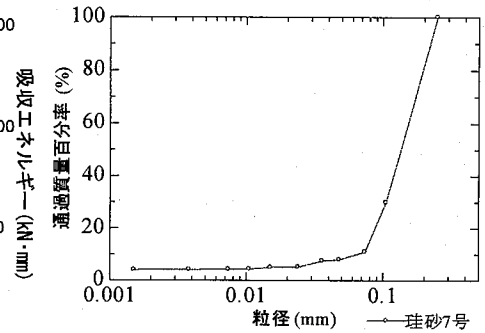


図-4 粒径加積曲線

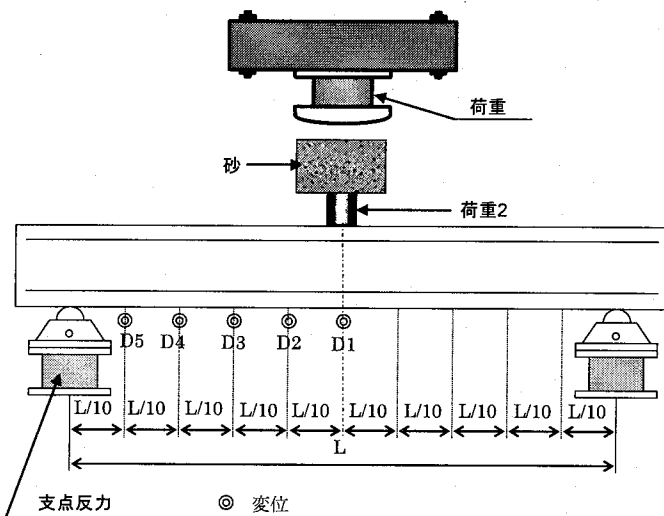


図-5 計測項目および計測位置

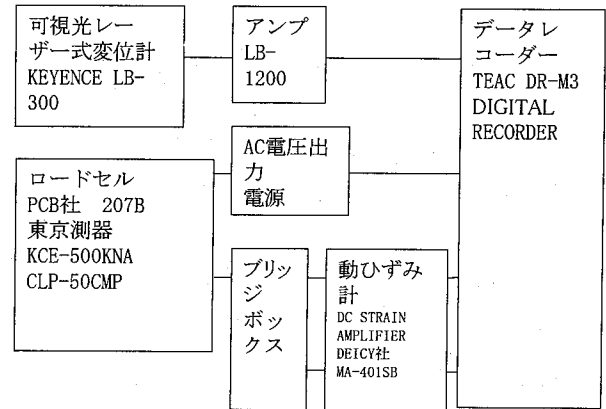


図-6 計測システム

2.2 実験方法

実験装置としては、静的実験には油圧式実験装置(島津製作所, UH-C500A)を使用し、スパン長 1m, 2m, 4m の供試体をそれぞれ 1 体ずつ使用した。衝撃実験には金沢大学構造工学研究室所有の重錘落下式実験装置を使用した。図-2 に用いた自由落下式衝撃実験装置の概要図を示す。用いた重錘は、鋼製の重錘の下にロードセルと曲率半径が 565mm で半径が 75mm である先端部を取り付けたものであり、総質量は 300kg である。

緩衝材としてゴムと砂を使用した。ゴムは寸法 150×150×50(mm)の天然ゴム(FV-65, シバタ工業(株))であり、ゴムの硬度は 65 度である。図-3 に使用した載荷点に設置したゴムの特性を示す。砂は図-4 にその粒径加積曲線を示す珪砂 7 号(太平洋セメント(株))である。幅、奥行き、高さが 300×400×300mm の鋼製の箱に 24cm と 12cm の厚さに敷き詰めて使用した。砂は 2cm 毎に鋼棒で突き固め密実になるように敷き詰めた。

2.3 測定方法

図-5 に計測項目および計測位置を示す。また図-6 用いた計測システムを示した。計測項目は、荷重、支点反力、変位である。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, 最大 450kN, 最大周波数 15kHz)で、支点反力は支持点部のロードセル(東京測器社, KCE-500KNA, 最大 500kN)で、変位はレーザー式変位計(KEYENCE 社, LB-300, 200mm, 最大周波数 915Hz)で計測を行った。変位は供試体の下面で測定した。砂緩衝材を設置したときは供試体と鋼製の砂箱の間にロードセル(東京測器社, CLP-500CMP, 最大 500kN)を設置し砂層下の荷重も測定している。ロードセルと砂箱は万力により一体化し供試体の上に設置した。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。

3. 実験結果及び考察

3.1 ひびわれ状況

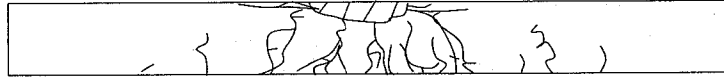
図-7 は、単一落下実験でのひびわれ図を示したものである。なお、スパン長 2m については参考のため静的載



(a) 静的載荷, $L=2\text{m}$



(b) 直接衝突, $L=2\text{m}$, $V_{col}=5\text{m/s}$



(c) ゴム有り, $L=2\text{m}$, $V_{col}=5\text{m/s}$



(d) 砂(厚さ 24cm) $L=2\text{m}$ $V_{col}=6\text{m/s}$



(e) 砂(厚さ 12cm), $L=2\text{m}$, $V_{col}=6\text{m/s}$



(f) 直接衝突, $L=1\text{m}$, $V_{col}=5\text{m/s}$



(g) 直接衝突, $L=4\text{m}$, $V_{col}=5\text{m/s}$



(h) 砂(厚さ 12cm), $L=4\text{m}$, $V_{col}=6\text{m/s}$

図-7 ひびわれ図

荷実験でのひびわれ図も示した。図の斜線部はコンクリートの剥離部を示している。図-7(a)より、曲げひびわれと斜め引張ひびわれが確認できる。図-7(b)より、はり中央部において斜め引張ひびわれが確認できる。静的載荷と比較すると載荷点中央にひびわれが集中している。図-7(c)より、ゴム有りの場合もはり中央部において斜め引張ひびわれが確認できる。載荷点近傍のひびわれ間隔が直接衝突より広がっていることがわかる。ひびわれ発生範囲は直接衝突とほぼ同程度の範囲であった。図-7(d), (e)より、全体的に曲げひびわれが確認できる。ひびわれ発生範囲は直接衝突と比べても同程度であるが、ひびわれ本数は減少している。すべてのスパンで同様な傾向を得られた。

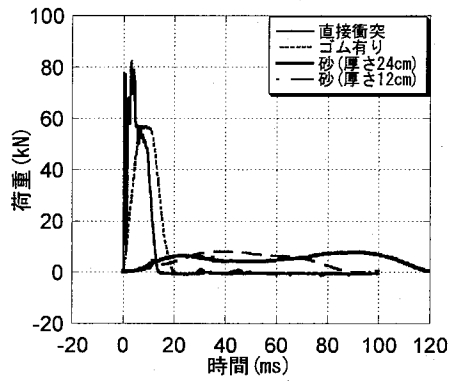
図-7(f)より、はり中央の上面でひびわれが確認でき、はり下面では斜め引張ひびわれと曲げせん断ひびわれが発生しており、より大きな衝撃を受けた場合には押しぬきせん断破壊にいたることが予想される。図-7(g)より、上面からのひびわれと下面からのひびわれがつながっている。これは負の曲げモーメント(上面に引張が生じるモーメント)が発生したことによるひびわれである。スパン長が長いほど、急激な衝撃によりモーメント反曲点を支

点の内側に発生しやすく、負の曲げモーメントによるひびわれが発生しやすいことが考えられる。図-7(h)より、砂(厚さ 12cm)を設置すると、ひびわれ発生範囲は同程度であるが、はり上面からのひびわれが直接衝突に比べ減少し、曲げひびわれが卓越していることがわかる。

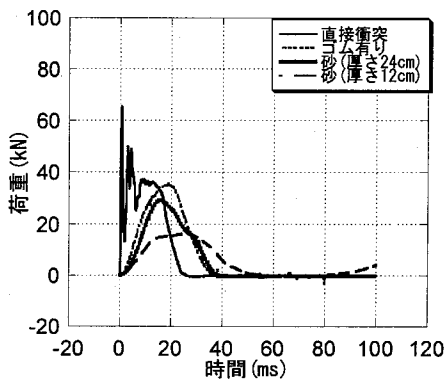
3.2 発生衝撃荷重

図-8 は繰返し落下実験での荷重波形を緩衝材別に示したものである。なお、すべて最初の衝突速度(1m/s)に関するものであり、供試体が破壊しない速度であるため、緩衝材、スパン長の違いが明確である。表-4 は、図-8 で示した荷重波形の特性値をまとめて示したものである。

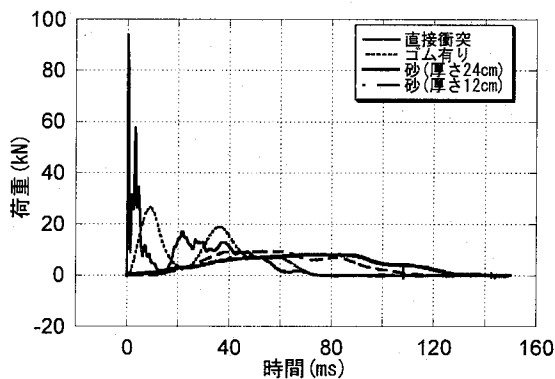
直接衝突の場合は、荷重の立ち上がりが急激である。その後急激な減少の後再度立ち上がり数回のピークを示した後緩やかに減少している。荷重継続時間はスパン長が大きくなると増加するが、いずれの場合も緩衝材がある場合に比べ短い。ゴム有りの場合、荷重は直接衝突に比べかなり穏やかで単調な波形になる。なお、スパン 4m では、はりの応答との相互作用により緩やかな 2 つの波



(a) $L=1\text{m}$, $V_{col}=1\text{m/s}$



(b) $L=2\text{m}$, $V_{col}=1\text{m/s}$

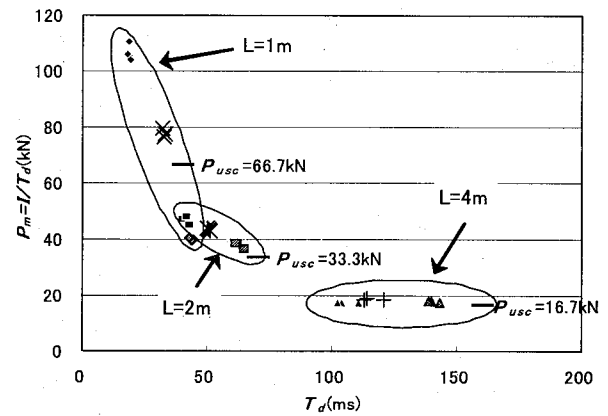


(c) $L=4\text{m}$, $V_{col}=1\text{m/s}$

図-8 荷重波形

表-4 荷重特性値

スパン	衝突条件	最大荷重 (kN)	荷重継続時間 (ms)	力積 (N·s)
1m	直接衝突	82.4	13.9	601.8
	ゴム	57.1	20.2	647.4
	砂(厚さ24cm)	8.0	121.2	633.5
	砂(厚さ12cm)	8.2	93.3	431.1
2m	直接衝突	65.4	25.9	674.5
	ゴム	35.7	37.2	694.4
	砂(厚さ24cm)	29.3	38.5	576.0
	砂(厚さ12cm)	16.7	55.7	488.8
4m	直接衝突	94.0	74.0	642.2
	ゴム	26.6	74.2	696.9
	砂(厚さ24cm)	8.4	140.1	631.6
	砂(厚さ12cm)	9.6	115.5	567.6



◆ 直接衝突, $L=1\text{m}$ ■ 直接衝突, $L=2\text{m}$ ▲ 直接衝突, $L=4\text{m}$
 × ゴム有り, $L=1\text{m}$ × ゴム有り, $L=2\text{m}$ + ゴム有り, $L=4\text{m}$
 ◇ 砂12cm, $L=1\text{m}$ □ 砂12cm, $L=2\text{m}$ △ 砂12cm, $L=4\text{m}$
 ◆ 砂24cm, $L=1\text{m}$ ■ 砂24cm, $L=2\text{m}$ ▲ 砂24cm, $L=4\text{m}$

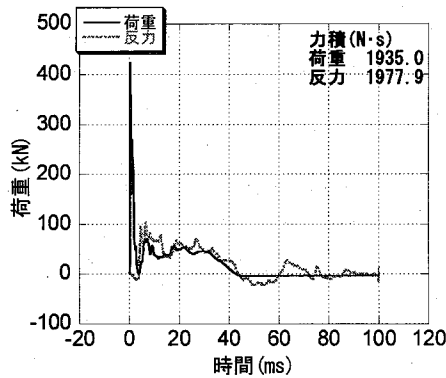
図-9 平均衝撃力と荷重継続時間

形が認められる。最大荷重は直接衝突に比べ小さく、継続時間は長くなっている。力積は、直接衝突に比べいずれの場合も大きいことがわかる。これはゴム有りの場合の跳ね返り速度が直接衝突より大きいためであると考えられる。1波目の衝突後から2波目の衝突前までの時間がゴム有りのほうが長かったことから、跳ね返り高さが高かったといえる。

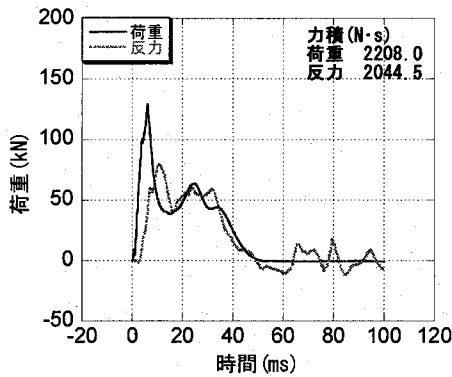
砂の場合、荷重波形はゴム有りの場合よりもさらに緩やかで単調な波形になっている。ここで示したスパン2mで厚さ12cmの場合の最大荷重が厚さ24cmより小さいが、他の場合は、砂厚が薄い方が、最大荷重は当然大きくなっている。これは、衝突速度(落下高さ 5.1cm)が小さいこともあり、ばらつきの影響と考えられる。最大荷重はゴム有りに比べても非常に小さく、継続時間は大きくなっている。力積はゴム有りの場合に比べて小さくなっている。これは、砂の見かけの剛性がゴムより非常に小さく砂の変形量が大きいため、緩衝効果が大きいといえる。

緩衝材の役割としては各種考えられるが、ここでは荷重波形の観察により、最大荷重の低減効果と継続時間の増加効果を確認することができた。

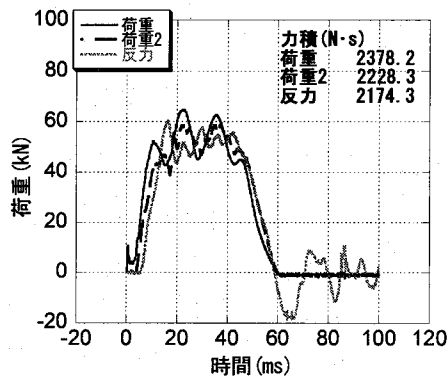
図-9 は単一落下実験で得られた衝撃応答において重要なパラメーターである荷重継続時間 T_d と力積 I を荷重継続時間 T_d で除した平均衝撃力 P_m の関係を衝突条件と RC はりのスパン長別に示したものである。なお、力積 I は荷重 P から算出した値である。図中には各スパン長の静的曲げ耐力 P_{usc} も記載した。各衝突条件において、スパン長が短いほど平均衝撃力が大きい傾向にある。またスパン長が短く荷重継続時間が短いほど衝突条件による差が大きいことがわかる。スパン 1m では平均衝撃力は直接衝突で最も大きく、ゴム有り、砂(厚さ 12cm)、砂(厚さ 24cm)の順で小さくなっており、直接衝突の場合に静的曲げ耐力を大きく上回っている。スパン長が長い 4m



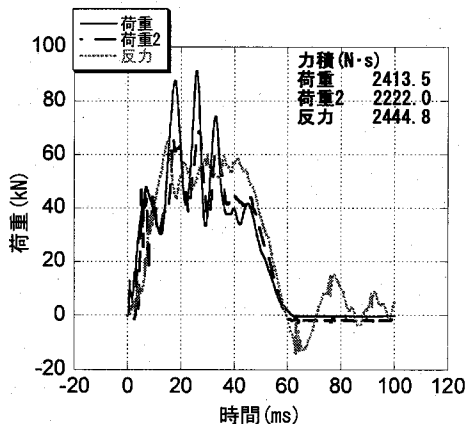
(a) 直接衝突 $L=2\text{m}$, 衝突速度 $=5\text{m/s}$, 重錘の運動量 $=1500\text{N}\cdot\text{s}$



(b) ゴム有り $L=2\text{m}$, $V_{\text{col}}=5\text{m/s}$, $I_{\text{col}}=1500\text{N}\cdot\text{s}$



(c) 砂(厚さ 24cm), $L=2\text{m}$, $V_{\text{col}}=6\text{m/s}$, $I_{\text{col}}=1800\text{N}\cdot\text{s}$



(d) 砂(厚さ 12cm), $L=2\text{m}$, $V_{\text{col}}=6\text{m/s}$, $I_{\text{col}}=1800\text{N}\cdot\text{s}$

図-10 荷重と反力波形

では、衝突条件による平均衝撃力の差が小さく、いずれも静的曲げ耐力と同程度の値であった

3.3 荷重と反力応答

図-10 はスパン 2m の供試体での単一載荷時の荷重と合支点反力応答を示したものである。2.2 で説明したように荷重 2 とは砂を設置した供試体において、砂箱の下に設置したロードセルで測定したものである。衝突速度は直接衝突とゴム有りが 5m/s , 砂を設置した場合が 6m/s である。

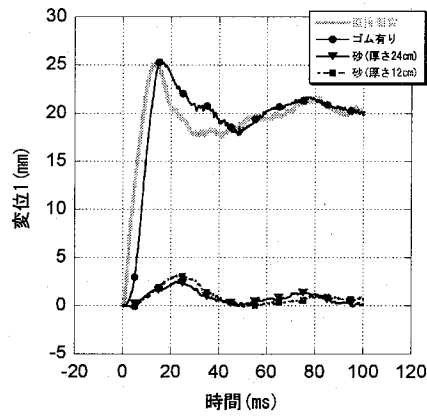
図-10(a) では、荷重波形は初期の急激な立ち上がりがある第 1 波目とその後再度立ち上がりピーク到達後緩やかに減少する第 2 波目が存在する。反力応答は衝撃初期での負の波形の第 1 波とその後緩やかに正方向に立ち上がりピーク到達後緩やかに減少する第 2 波目が存在する。荷重と反力の第 1 波目は異なるが、第 2 波目はほぼ類似した波形である。荷重の最大値は反力に比べ非常に大きい、力積の値は両者ほぼ同じであった。

図-10(b) より、荷重の最大値はやはり反力に比べ大きく、波形の立ち上がりに時間差があるがピーク到達後はほぼ類似した波形である。ゴム有りの場合より直接衝突に見られたほど急激な立ち上がりが消失し、初期に負の反力も発生していない。

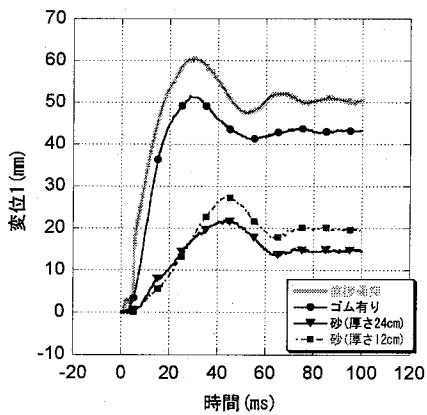
図-10(c) と図-10(d) は砂(厚さ 24cm)と砂(厚さ 12cm)を示したものである。どちらにおいても荷重波形は衝撃初期に急激に立ち上がり一旦減少する。その後、荷重が零になる前に再度立ち上がり、振動を繰り返した後減少している。荷重 2 の波形と反力波形は衝撃初期において荷重が発生せずその後立ち上がり振動した後減少している。荷重と荷重 2 の位相が一致しているが、反力は荷重、あるいは荷重 2 と位相のずれが認められる。

3.4 変位応答

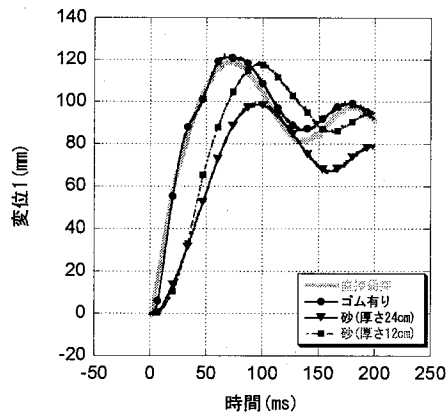
図-11 は単一載荷実験時の変位応答を示したものである。図-11(a) より、スパン 1m において、表-1 に示したように直接衝突の場合のみ衝突速度が 5m/s と小さいが最大変位はゴム有りの場合とほぼ同じ最大変位と挙動を示している。また、砂を設置した場合は直接衝突やゴム有りの場合の 10%程度であり、緩衝効果が大きいことがわかる。図-11(b) より、スパン 2m ではゴム有りの場合、同じ衝突速度の直接衝突に比べ最大変位は 15%程度小さい。衝突速度が 6m/s の砂を設置した場合は、直接衝突に比べ最大変位が半分以下とやはり非常に小さくなっている。図-11(c) より、最大変位は直接衝突、ゴム有り、砂(厚さ 12cm)で、ほぼ同じ値であるが、砂(厚さ 24cm)では 20%程度小さい。ゴム有りの場合、直接衝突と比較して最大変位や残留変位の減少が見られ、重錘がゴムに減り込み、入力エネルギーの一部がゴムの変形に費やさ



(a) スパン 1m



(b) スパン 2m

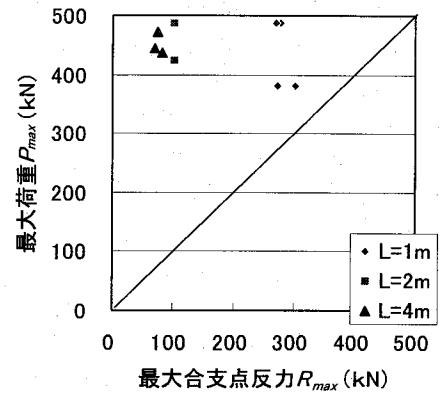


(c) スパン 4m

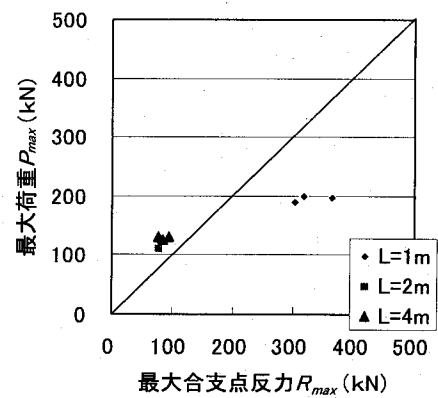
図-11 変位応答

表-5 変位特性値

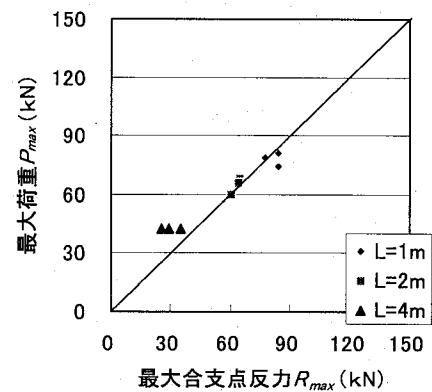
スパン	衝突条件	衝突速度 (m/s)	最大変位 (mm)	発生時間 (ms)
1m	直接衝突	5	25.2	14.3
	ゴム有り	6	25.5	16.0
	砂(厚さ24cm)	6	2.5	22.3
	砂(厚さ12cm)	6	3.2	24.7
2m	直接衝突	5	60.7	30.1
	ゴム有り	5	51.5	28.3
	砂(厚さ24cm)	6	22.0	42.7
	砂(厚さ12cm)	6	27.3	45.1
4m	直接衝突	5	119.9	69.7
	ゴム有り	5	122.6	65.6
	砂(厚さ24cm)	6	99.5	92.5
	砂(厚さ12cm)	6	119.2	96.3



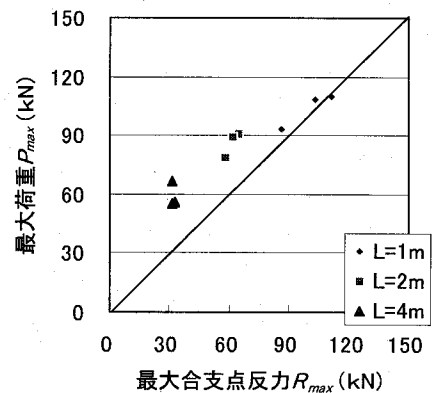
(a) 直接衝突, $V_{col}=5\text{m/s}$



(b) ゴム有り, $V_{col}=5\text{m/s}(L=2,4\text{m})$, $V_{col}=6\text{m/s}(L=1\text{m})$



(c) 砂(厚さ 24cm), $V_{col}=6\text{m/s}$



(d) 砂(厚さ 12cm), $V_{col}=6\text{m/s}$

図-12 最大荷重と最大合支点反力

れたためと考えられる。実験終了後のゴムに残留変位成分は生じていない。また、最大変位の発生時間はスパン1m, 2m の時と同様に、砂の場合明確に遅くなっている。

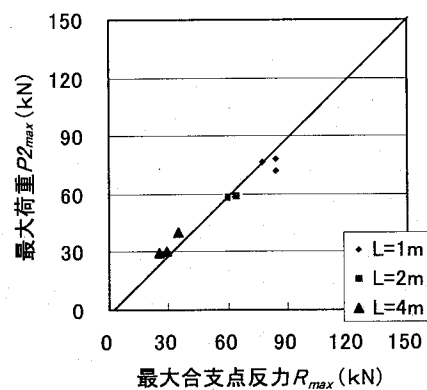
3.1の図-7で認められるように衝撃特有の負の曲げモーメントによるひびわれが少なくなったことを考えると、それ程大きな差はないが直接衝突やゴム有りの場合に比べ緩慢な挙動を示すことがわかる。

全体的に見て、砂を設置した場合には、他の場合に比べ最大変位発生時間が遅くなることや、最大変位が小さくなることにより、砂の高い緩衝効果が確認できた。

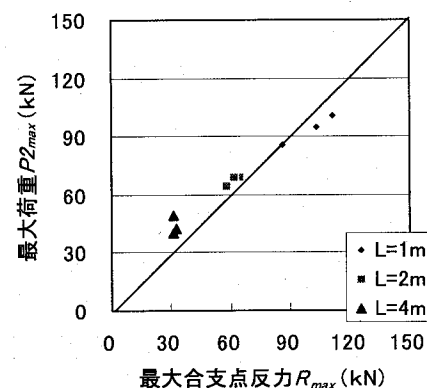
3.5 最大荷重と最大合支点反力

図-12は最大荷重 P_{max} と最大合支点反力 R_{max} の値を比較したものである。図-12(a)の直接衝突の場合、スパン1mでは最大荷重のほうが最大合支点反力よりかなり大きいことがわかる。スパン長が大きい程その傾向が明確である。図-12(b)のゴム有りの場合、スパン2mとスパン4mは最大荷重が最大合支点反力より大きく、スパン1mでは最大合支点反力のほうが大きい。直接衝突と比較して最大荷重は小さいが、最大合支点反力はほぼ同じ値である。これはゴムの設置により、衝撃時に発生する衝撃力は緩和されるが、応答として生じる反力にはその影響はほとんどないことがわかる。これは変位応答で認められた傾向と同じである。図-12(c), (d)は砂(厚さ12cm)と砂(厚さ24cm)の場合であるが、最大荷重と最大合支点反力は概ね同じ値であることがわかる。

図-13は砂箱の下で最大荷重 $P2_{max}$ と最大合支点反力 R_{max} を比較したものである。図-13(a)より、いずれの場合も最大荷重と最大合支点反力はほぼ同じ値である。図-12(c)と比較してスパン4mにおいて、最大荷重 $P2_{max}$ が最大荷重 P_{max} より小さい。これは重錘が砂の中に貫入している間に、衝撃力が消散していることによる。よって、直接供試体に作用する最大荷重と最大合支点反力はほぼ同じ値である。図-13(b)において、いずれの場合も最大荷重と最大合支点反力はほぼ同じ値である。図-12(d)と比較してスパン2m, 4mにおいて、最大荷重 $P2_{max}$ が最大荷重 P_{max} より小さくなっている。これも砂(厚さ12cm)の時と同様、重錘が砂の中に貫入している間に、衝撃力が消散していることによるものであるが、図-10を見ると振動成分により最大値は異なっているが、平均的にみて有意な差はないと考えられる。よって、砂を設置すると最大荷重と最大反力がほぼ1対1の相関にあり、これらの関係は静的なはり理論に近似できることがわかる。なおここで示した砂を緩衝材として用いた場合には、荷重として、発生荷重を用いても反力を用いてもその評価が可能であることがわかる。



(a) 砂(厚さ 24cm), $V_{col}=6\text{m/s}$



(b) 砂(厚さ 12cm), $V_{col}=6\text{m/s}$

図-13 最大荷重2と最大合支点反力

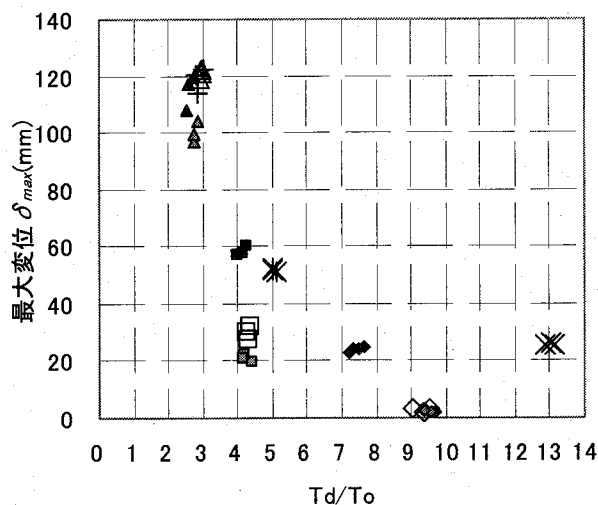


図-14 最大変位と荷重継続時間と固有周期の比

3.6 荷重継続時間と最大変位

図-14は、単一落下実験における荷重継続時間 T_d と一次固有周期 T_0 の比 T_d/T_0 と最大変位の関係を衝突条件と

スパン長別に示したものである。なお荷重継続時間 T_d は各実験値から得られた実測値であり、固有周期 T_0 は弾性理論値である。

スパン長が4mの場合には、いずれの場合も T_d/T_0 が3程度であり、最大変位にも衝突条件の差異はほとんど見られない。スパン長2mの場合は、 T_d/T_0 が4~5程度であり、直接衝突とゴム有りでは最大変位は60mm程度、砂を設置した場合はその約半分程度であった。スパン長が1mと短い場合、 T_d/T_0 が7~13程度と比較的幅広い値となるが、最大変位は、直接衝突とゴム有りで23mm程度、砂の場合は非常に小さく2mm以下であり緩衝効果が大きいことが確認できる。なお、砂厚が厚いほど最大変位は小さくなっている。

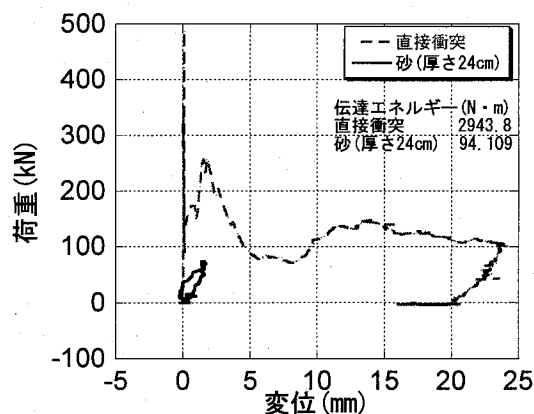
3.7 エネルギー伝達率

図-15は、スパン1mと4mでの直接衝突と砂(厚さ24cm)での荷重変位関係の一例を示したものである。伝達エネルギーは荷重-変位関係の下側の面積であり、はりの変形に費やされるエネルギーである。図-15(a)より、直接衝突の場合、変位が生じる前に荷重が急激に増加し最大値に達した後減少し、ピーク値の0.5~0.3倍の荷重を保ちながら、変位が単調増加している。砂緩衝材(厚さ24cm)の場合、荷重の増加に伴い変位が単調増加し、最大値に達した後の荷重減少時に、変位も単調減少している。複雑な関係を示す直接衝突と比べ、非常に関係が単純であり静的な場合に類似している。図-15(b)より、直接衝突の場合、変位を伴わない衝撃初期の大きな荷重発生後、荷重が増減を伴いながら変位が単調増加する領域が認められる。また、一旦荷重が消失した後も変位の増加が認められる。

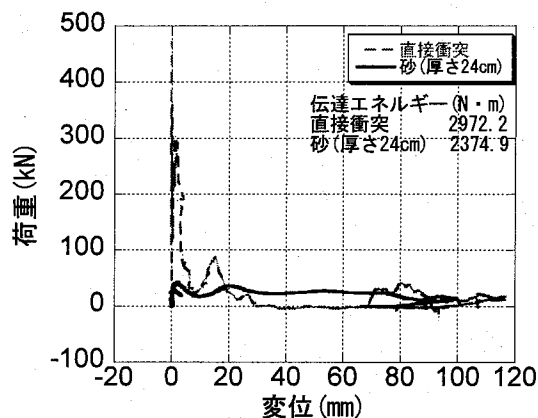
砂(厚さ24cm)の場合、荷重は比較的急激に増加した後緩やかに減少し、変位の単調増加が認められる。直接衝突に比べると単調な関係である。以上のように、緩衝材の有無またはスパン長に応じた動的弾塑性挙動の差異のため、荷重変位関係は大きく異なることがわかる。

図-16は単一載荷実験でのエネルギー伝達率を示したものである。エネルギー伝達率とは荷重-変位関係から求まるエネルギーを重錘の初期エネルギーで除したものである。スパン1mでは、直接衝突が一番大きくゴム有りの場合が少し小さい値となり、砂設置の場合はきわめて小さな値となる。スパン2mでは、直接衝突の場合とゴム有りではエネルギー伝達率は80%だが、砂を設置の場合は20%程度と非常に小さい値である。スパン4mでも、直接衝突の場合とゴム有りではそれほど有意な差が認められないが、砂設置の場合は一番小さく40%程度であった。

スパンが短い場合、ゴム有りによる緩衝効果が見られるが、スパンが長い場合はそれほど有意な差は無い。これは3.2の図-9に見られるように、スパン長が1m、2m



(a) $L=1\text{m}$, $V_{col}=5\text{m/s}$ (直接衝突), $V_{col}=6\text{m/s}$ (砂厚さ24cm)



(b) $L=4\text{m}$, $V_{col}=5\text{m/s}$ (直接衝突), $V_{col}=6\text{m/s}$ (砂厚さ24cm)

図-15 荷重変位応答の一例

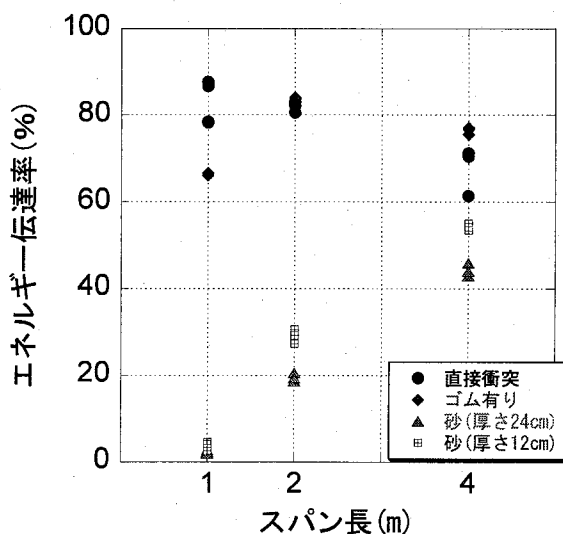


図-16 エネルギー伝達率

において顕著に平均衝撃力が直接衝突、ゴム有り、砂(12cm)、砂(24cm)の順に小さくなっていることに対応している。またスパン4mでは平均衝撃力はほぼ同程度であり、最大変位も同程度であるが、砂を設置した場合は初期エネルギーが大きいためエネルギー伝達率が減少している。砂を設置した場合においてエネルギー伝達率に

大きな差異が認められた。すなわち見かけ上、スパンが短い場合、伝達エネルギーが小さく、スパンが長い場合に伝達エネルギーが大きくなっている。本研究でスパン長が長い場合には、はりの静的曲げ耐力が小さく塑性変形が大きいため伝達エネルギーが大きくなっていると考えられる。

3.8 性能照査に関する一考察

性能設計とは、構造物が要求性能を満足していれば、どのような構造形式、材料、設計手法、工法などを用いても良いとする非常に合理的な設計の考え方である。この設計法では、構造物の性能の明示、国際標準化への対応、新技術の導入、コスト低減などが期待されるといわれている⁹⁾。米国ではVision2000と呼ばれる建築耐震性に関する要求性能マトリックスが提案されている¹⁰⁾。このマトリックスは縦方向に地震の設計レベル、横方向に性能レベルであり、要求性能(目的)との関係が明確に示されている。要求性能が専門家でない人にも理解しやすく選択しやすいものになっている。

表-6 衝撃作用レベルの設定

衝撃作用	確率(発生頻度)による説明
作用レベル1	数10年あるいは対象とする道路の供用期間中に1, 2度発生が予想される最大エネルギーを持つ作用
作用レベル2	100年以内に発生が予想される最大エネルギーを持つ作用
作用レベル3	強い地震振動などにより発生の可能性が否定できない最大級エネルギーを持つ作用

表-7 構造物あるいは部材の性能規定の設定例

性能規定	作用に対する損傷	安全	供用	補修
性能レベル1	健全性を保つ	人は安全	支障なし	必要なし
性能レベル2	損傷は限定されたものである	人は安全	支障なし	小規模な補修
性能レベル3	致命的な損傷はない	人は安全	規制が必要	補修の必要あり

落石などにより衝撃を受ける防護構造物あるいは部材では、一般構造物と異なり衝撃荷重を単に偶発作用と考えるには問題があり、発生頻度などに基づいた衝撃作用のレベル設定法について検討が行われている¹¹⁾。表-6に衝撃作用の設定例を示す。このようなレベル設定法は衝撃作用の種別により当然異なることが予想される。また、構造物あるいは部材の性能としては、例えば、表-7に示すような性能規定が考えられる。ここでは3つの分類を示したが、このような損傷程度に応じた分類は性能設計を行う上で必要なものである。

例えば、荷重作用レベル2として質量300kgの飛来物が5m/sで衝突する場合を考える。また、これをスパン2mの本研究で用いたRCはりで防護するものとする。性能レベルとしては、ひびわれを許容し、最大変形量あるいは残留たわみが30mm以下と設定する。この場合、表-5や図-11より判断すると、砂を緩衝材として用いた場合には予想変位は30mm以下であるため性能規定を満足することがわかる。一方、緩衝材を用いない場合と緩衝材としてゴム有りの場合には、少なくとも40mmを超え最大では60mm程度の変位が予想されるので性能規定を満足しないことにより、断面変更が必要になることがわかる。

ここで示した衝撃作用と損傷を認める性能規定の合理的な組み合わせを確立し性能照査型耐衝撃設計を確立するには、今後さらに衝撃を受ける部材や構造物の実験データの蓄積と再現性の高い解析法の開発が必要と考えている。

4. 結論

本研究では、緩衝材の衝撃緩衝効果を調べるために緩衝材と一体となったRCはりの衝撃実験を行い、衝撃荷重、応答特性、エネルギー吸収能などについて検討した。本研究で得られた主な結論は以下の通りまとめられる。

- 1) 緩衝材、またはスパン長の相違によるひびわれ状況について論じ、その特徴を示した。スパンが長くなるほど負の曲げモーメントによるひびわれが卓越し、また砂の設置により、曲げ破壊が卓越し、負の衝撃特有のひびわれが減少することが確認された。
- 2) 緩衝材、またはスパン長の相違による荷重応答、反力応答、変位応答について論じ、緩衝材と一体となった供試体の特性について示した。
- 3) 緩衝材の設置により最大荷重の低減と荷重継続時間が増加することがわかった。直接衝突とゴム有りの設置の場合と砂を設置した場合では挙動が異なることがわかった。
- 4) 力積により求まる平均衝撃力と衝突条件の関係を明らかにした。また、スパンが短い直接衝突の場合では、静的曲げ耐力よりも大きな荷重が発生することを確認した。
- 5) スパン1m, 2mにおいて平均衝撃力、最大変位、エネルギー伝達率が、いずれも直接衝突、ゴム有り、砂(12cm)、砂(24cm)の順に小さくなっており、またスパン4mでは、平均衝撃力と最大変位に衝突条件ごとの差がほとんど見られず、平均衝撃力と最大変位に相関があることを確認した。
- 6) 衝突条件とはりへのエネルギー伝達率の関係を示し、砂を用いた場合にエネルギー伝達率が他の場合に比べ非常に低いこと、また荷重-変位関係が非常に単調であることを明らかにした。

- 7) 砂を設置した場合のひびわれ状況, 荷重応答, 反力応答, 変位応答, エネルギー伝達率より, 砂の衝撃緩衝効果が大きいことを示した. また, RC はりは比較的緩慢な挙動を示し, 発生荷重と反力が同程度であることを示した.
- 8) 砂厚の違いが荷重応答, 反力応答, 変位応答, エネルギー伝達率に与える影響を論じ, 砂が厚い方が緩衝材の衝撃緩衝効果が大きいことを示した.
- 9) 衝撃作用を対象とする構造物の性能照査方法について論じ, 本実験結果を用いた衝撃作用を受ける RC 部材の性能照査の一例を示した.

謝辞

本研究の実験遂行およびデータ整理にあたり, 大菅崇之氏(株式会社ホクコン, 研究当時研究室4年生)には多大な協力を頂きました. ここに心より感謝いたします.

5. 参考文献

- 1) 山本満明, 榎谷浩, 音田奨, 堀江義徳, 熊谷貴秀: 鉄筋コンクリートはりに対する重錘落下衝撃実験とその挙動に関する考察, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.1683-1694, 2001.
- 2) 森北一光, 中田吉彦, 榎谷浩, 梶川康男: DEM・FEM 結合法によるロックシェッドの衝撃応答解析について, 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, Vol.4, pp.207-210, 1998.
- 3) 岸徳光, 安藤智啓, 井元勝慶, 河野良幸, 香月智, 上林厚志, 榎谷浩: 矩形 RC 梁の重錘落下衝撃実験挙動に関するラウンドロビンアナリシス, 構造工学論文集, Vol.49A, pp.1299-1310, 2003.
- 4) 藤井学, 宮本文穂, 森川英典: 衝撃を受ける鉄筋コンクリートはりの力学的挙動に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.360/V-3, pp.5168, 1985.
- 5) 中田吉彦, 榎谷浩, 西村洋平: 衝突体の運動エネルギーおよび運動量に着目した RC はりの衝撃特性に関する研究, 構造工学論文集 Vol.48A, pp.1493-1503, 2002.
- 6) 中田吉彦, 榎谷浩, 梶川康男, 熊谷貴秀: 重錘衝突による鉄筋コンクリートはりの衝撃特性に関する実験的挙動に関する研究 Vol.46A, pp.1831-1842, 2000.
- 7) 衝撃実験・解析法の標準化に関する研究小委員会: 衝撃実験・解析の基礎と応用, 構造工学シリーズ 15, pp.63-77; 2004.
- 8) 国土交通省: 土木建築に関わる設計の基本検討委員会: 「土木・建築にかかる設計の基本」, 2002.
- 9) 構造物設計国際標準研究小委員会: 活動成果報告書, 国際標準に基づく構造物の設計, 2000.
- 10) SEAOC: Performance based seismic engineering of buildings, Vision 2000 Committee, Final Report, 1995.
- 11) 榎谷浩: 性能照査設計法と落石防護構造物, 防災土木, 北陸 PC 防雪技術協会, Vol.12, pp.30-37, 2005.

(2005 年 9 月 10 日受付)