

落橋防止用緩衝材への適用を目指したダイラタント流体材料に対する重錘落下実験

矢部 賢也¹・梶田 幸秀²・山崎 智彦³・松田 泰治⁴

¹学生会員 九州大学大学院 工学府建設システム工学専攻 (〒819-0395 福岡市西区元岡744番地)
²正会員 博(工) 九州大学大学院准教授 工学研究院社会基盤部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡744番地)
³正会員 九州大学技術職員 工学部技術部 (〒819-0395 福岡市西区元岡744番地)
⁴正会員 博(工) 九州大学大学院教授 工学研究院社会基盤部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡744番地)

1. はじめに

橋梁の落橋防止構造と横変位拘束構造には、衝撃的な力の作用を緩和させるため緩衝材の設置が推奨されている。緩衝材としては、剛性が小さい天然ゴムや、天然ゴムに対してエネルギー吸収能力を向上させた積層繊維補強ゴム、構造形状でエネルギー吸収を行うハニカム型緩衝材などが開発されてきた。

ゴム製緩衝材の場合、一般的にゴムの圧縮ひずみが50%から60%を超えると剛性が急激に大きくなるため、落橋防止構造と上部構造が衝突する際において、上部構造の速度が速い場合、つまり、上部構造の運動エネルギーが大きい場合、十分な緩衝効果が得られない可能性がある。そこで、本研究では、物体の変形速度（せん断速度）に応じて剛性が変化する非ニュートン流体の中で、変形速度が速くなると剛性が高くなるダイラタント流体に着目した。図-1に示すとおり、上部構造（衝突体）の载荷速度が遅い場合は全体が流体のままであるが、速度の速い上部構造が衝突した場合、上部構造と接触する部分のダイラタント流体は固化することで上部構造の動きに抵抗し、上部構造と接触しない部分（内部の部分）は、流体のまま剛性が小さい状態を保ち、力を緩衝することが期待される。そこで、落橋防止システム用緩衝材としてダイラタント流体を用いることができるかどうかを検討するため、本研究では、重錘を衝突物体と見なした衝突実験を実施し、衝撃力緩衝効果について検討を行った。

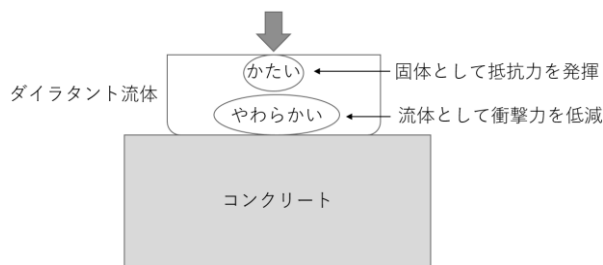


図-1 ダイラタント流体の衝撃吸収メカニズム

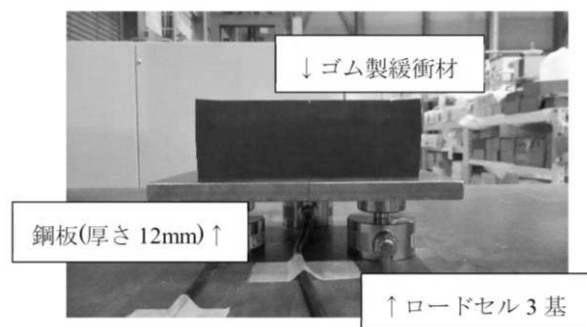


写真-1 実験状況

2. 低荷重域での衝突実験

(1) 実験概要

初めに、質量534gの小さな鉄球を用いた実験を行った。写真-1にゴム製緩衝材を用いた場合の実験状況を示す。厚さ12mmの鋼板の下にロードセルを3基設置し、鋼板が水平状態になるようにしている。

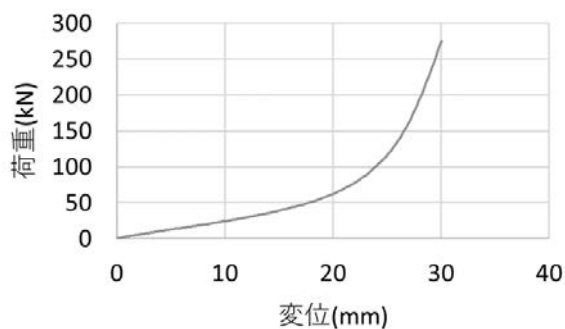


図-2 ゴムの静的圧縮試験結果

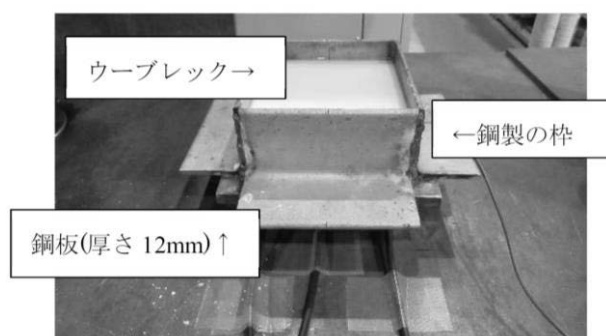


写真-2 ウーブレック試験体

続いて、硬度55度、150mm四方、厚さ50mmのゴムを鋼板の上に直に設置した。図-2に本実験で用いたゴムの静的圧縮試験結果を示す。実験の結果、初期剛性（圧縮変位20mmまでの線形剛性）は5.6MPaであった。

ダイラタント流体として、本実験ではウーブレック（水溶性片栗粉）を用意した。水に対する片栗粉の重量比を1.0から1.5まで0.1刻みで変化させ6種類のウーブレックを作製した。これを写真-2に示すように、内側寸法が150mm四方になるような鋼製の枠を作り、深さが50mmになるようにウーブレックを枠の中に注ぎ込んだ。このようにして用意したウーブレックとゴム緩衝材に対して、直径50.8mm、質量534gの鉄球を所定の落下高さから自由落下させ、3基のロードセルの合計荷重を計測した。計測時間間隔は 1×10^{-4} 秒（1万分の1秒）である。

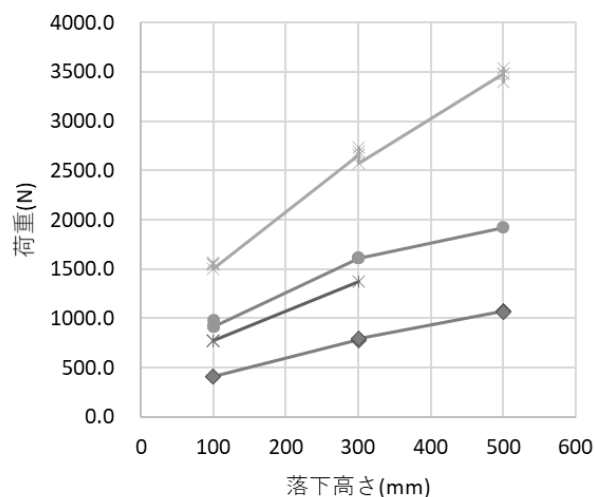


図-3 衝突荷重-落下高さ関係1

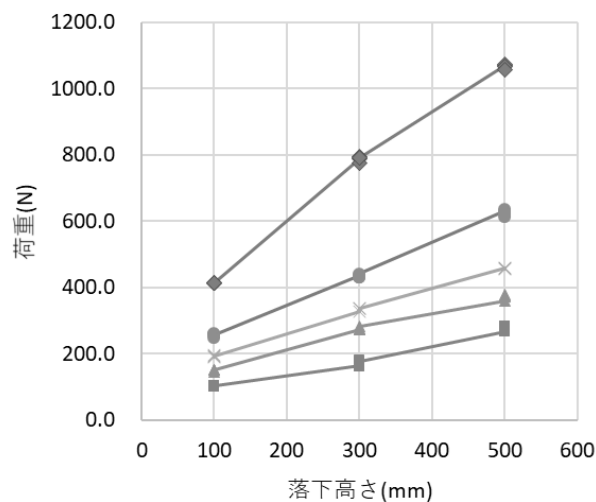
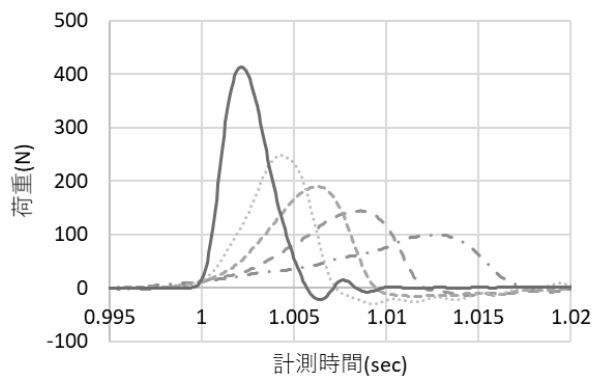


図-4 衝突荷重-落下高さ関係2

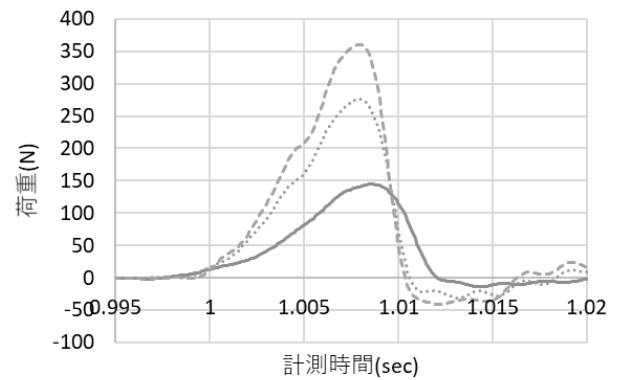
(2) 実験結果

図-3および図-4に落下高さと最大衝突荷重の関係を示す。重量比1.0と1.1の場合は、ダイラタンシーが起こらず、鉄球が水溶性片栗粉内をほぼ減速せずに通過し、鋼製枠の底面に衝突する結果となった。そのため図-3に示す通り、鉄球を直接ロードセル上の鋼板に当てた場合よりは、最大衝突力は低減されるが、ゴム製緩衝材の結果に比べ2倍程度の値となった。重量比1.2~1.5の場合は、ウーブレックによる緩衝が行われており、図-4に示すとおり衝突荷重は



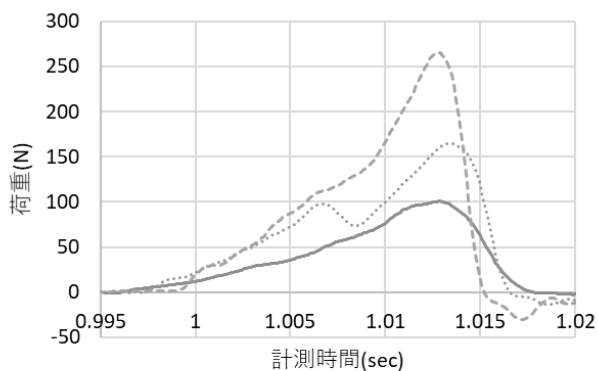
--- 1.2 --- 1.3 -.- 1.4 1.5 — ゴム

図-5 衝突荷重-時間関係（落下高さ100mm）



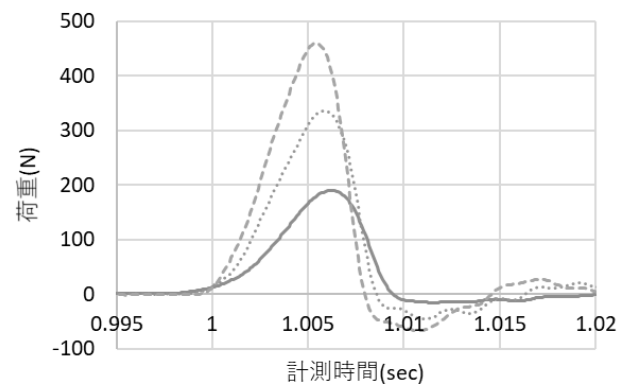
— 100mm 300mm -.- 500mm

図-7 衝突荷重-時間関係（重量比1.3）



— 100mm 300mm -.- 500mm

図-6 衝突荷重-時間関係（重量比1.2）

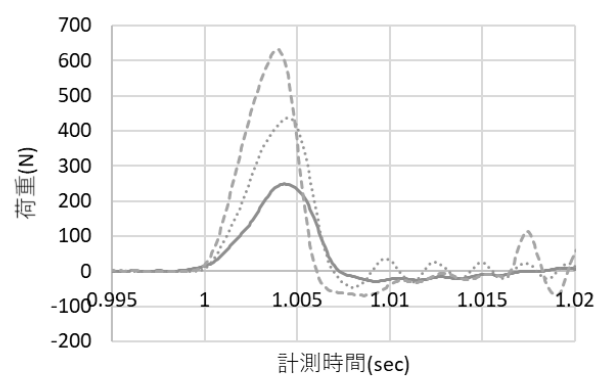


— 100mm 300mm -.- 500mm

図-8 衝突荷重-時間関係（重量比1.4）

濃度が上がるにつれて大きくなった。また、ウーブレックを用いると、ゴム緩衝材の場合に比べて、衝突荷重は約22%~55%に低減されることが分かった。

図-5に落下高さが100mmの場合の、時間と衝突荷重の関係を示す。衝突荷重が小さなケースほど衝突継続時間が長くなっていることが分かる。衝突現象は運動量（力積）で評価されることが多いが、衝突継続時間が長くなれば、力は小さくなるため、ウーブレックを用いた際の衝突荷重がゴム緩衝材の場合に比べて低減されたといえる。



— 100mm 300mm -.- 500mm

図-9 衝突荷重-時間関係（重量比 1.5）

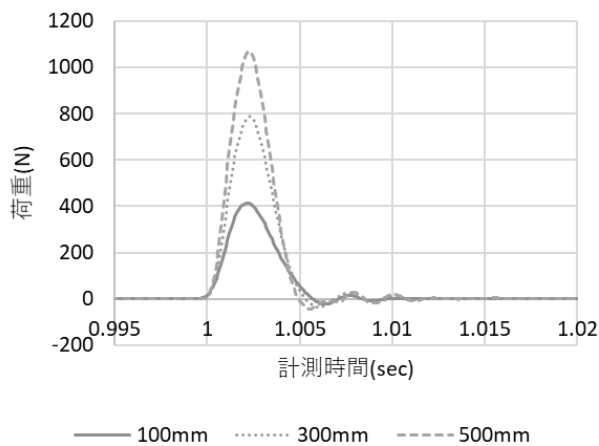


図-10 衝突荷重-時間関係 (ゴム)

		力積（測定値）				運動量（計算値）	
		ウーブレック重量比			ゴム		
		1.2	1.3	1.4	1.5		
落下高さ (mm)	100	0.93	0.87	0.86	0.82	1.22	0.75
	300	1.45	1.41	1.42	1.59	2.08	1.30
	500	1.78	1.77	1.80	1.77	2.66	1.67

単位：N・s

図-6から図-10に、各供試体ごとの時間と衝突荷重の関係を示す。落下高さが変わっても、衝突継続時間にほぼ変化は見られなかった。これは、ウーブレックの一つの特徴である変形速度に応じて剛性が変化する現象が発揮され、本検討の入力エネルギーならウーブレックの表面だけで鉄球の衝突を受け止め内部が流体のまま荷重を低減しているものと考えられる。

表-1に、緩衝材が受けた力積 (測定値) と、錘が与えた運動量 (計算値) の大きさを示す。ウーブレックでは、概ね両者は等しい。ゴム緩衝材では、力積 (測定値) が大きくなっている。これはウーブレックでは衝突後、鉄球は跳ね返らず、鉄球の運動量が全て力積となったが、ゴムの場合、衝突後、鉄球の跳ね返りを確認しており、その分力積が大きくなり、発生した最大衝突荷重も大きくなったと考えられる。

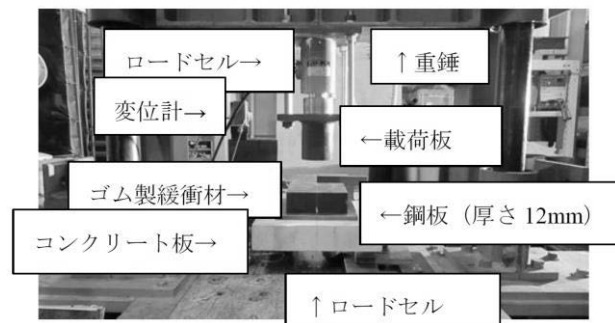


写真-3 実験状況

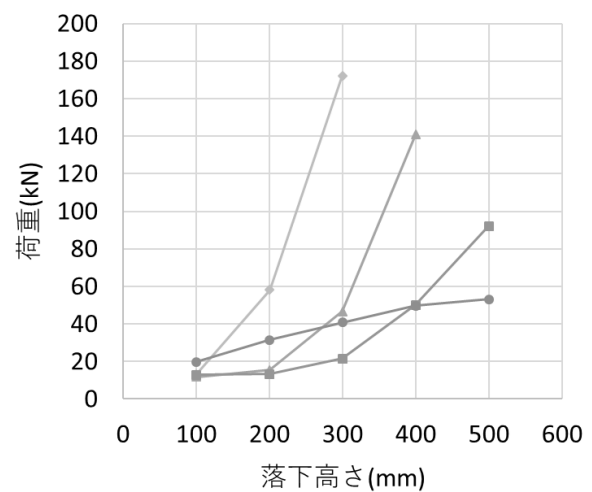


図-11 衝突荷重-落下高さ関係

3. 重錘落下実験

(1) 実験概要

続いて、質量127kgの重錘を用いた実験を行った。

写真-3 にゴム製緩衝材を用いた場合の実験状況を示す。ロードセルの上にコンクリート板と厚さ12mmの鋼板を敷き、その上に、硬度55度、150mm四方、厚さ50mmのゴムを設置した。また、載荷側として重錘の下に、ロードセルと直径85mmの円柱形の載荷板を設置した。載荷板と供試体が接触する面積は、各供試体の断面積の約1/4である。重錘およびロードセル、載荷板の合計質量は127kgである。

ウーブレックは重量比1.3, 1.4, 1.5のものを用いた。ウーブレックとゴム緩衝材に対して、合計質量127kgの重錘を所定の落下高さから自由落下させ、重錘の変位とロードセルの荷重を計測した。計測時

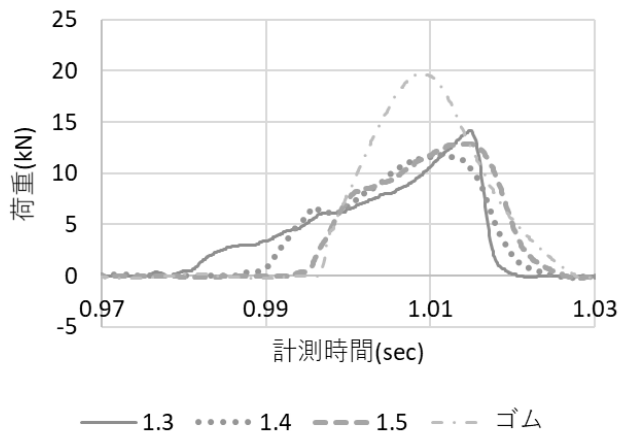


図-12 衝突荷重-時間関係（落下高さ100mm）

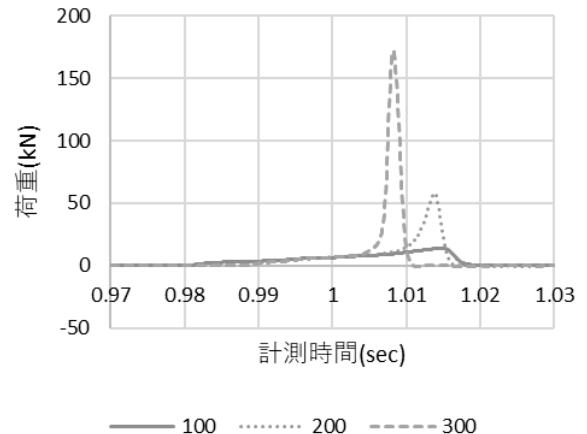


図-13 衝突荷重-時間関係（重量比1.3）

間隔は 1×10^{-4} 秒（1万分の1秒）である。

(2) 実験結果

図-11 に落下高さと最大衝突荷重の関係を示す。重量比 1.3 では落下高さ 100mm, 1.4 では 200mm, 1.5 では 300mm までのケースにおいては、ウーブレック中で載荷板が止まり、ゴムよりも高い緩衝効果が見られた。一方、それ以上の落下高さのケースでは、載荷板がウーブレック中で止まりきらず底の鋼板に衝突し、衝突荷重は大きくなっている。

ウーブレック中で完全に衝撃が吸収された場合、ウーブレックの衝突荷重はゴム緩衝材に比べて半分程度となっており、ウーブレックは高い緩衝効果を示した。しかし、低荷重域での実験結果とは違い、ウーブレックの重量比による衝突荷重の差は殆ど見られなかった。

図-12 に落下高さが 100mm の場合の、時間と衝突荷重の関係を示す。重量比 1.3 のみ荷重の立ち上がりが緩やかであるが、それ以外の特徴については、3 種類のウーブレックで大きく違いは見られなかった。

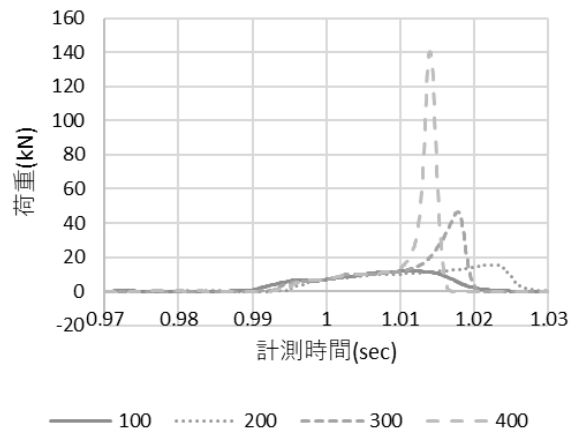


図-14 衝突荷重-時間関係（重量比 1.4）

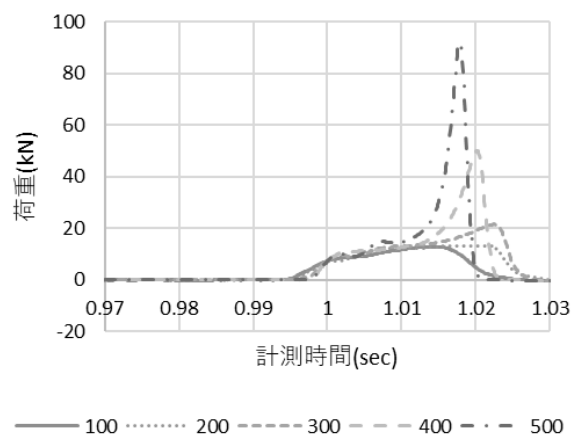


図-15 衝突荷重-時間関係（重量比1.5）

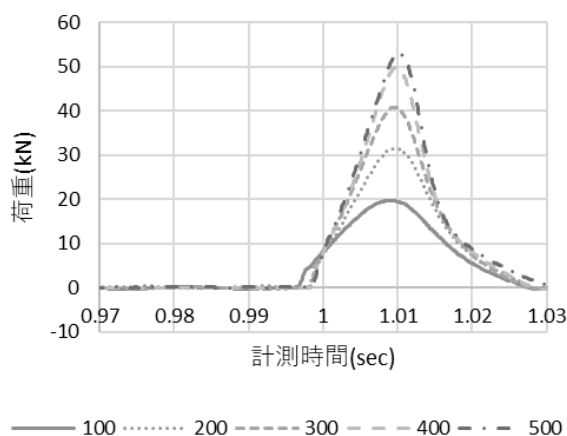


図-16 衝突荷重-時間関係（ゴム）

表-2 力積と運動量

		力積（測定値）				運動量（計算値）
		ウーブレック重量比			ゴム	
		1.3	1.4	1.5		
落下高さ (mm)	100	244.1	235.2	236.7	315.5	177.9
	200	321.4	311.6	306.2	438.3	251.6
	300	439.5	369.3	367.4	512.8	308.1
	400		465.5	419.3	577.5	355.8
	500			483.6	627.0	397.8

単位：N・s

図-13から図-16に、各供試体ごとの時間と衝突荷重の関係を示す。ウーブレック中で完全に衝撃が吸収されたケースにおいては、落下高さが変わっても、衝突継続時間にほぼ変化は見られなかった。底の鋼板に衝突したケースにおいては、落下高さが高くなるにつれて、衝突継続時間は短くなっている。荷重の立ち上がりは、重量比が大きいほど速くなっていることがわかる。

また、低荷重域での実験とは違い、どの重量比においても、衝突からしばらくの間は、落下高さによる波形の違いは見られなかった。その後、載荷板が底の鋼板に衝突したケースでは、鋼板に衝突した際の荷重が大きく出ている。

表-2に、緩衝材が受けた力積（測定値）と、錘が与えた運動量（計算値）の大きさを示す。ゴム緩衝材は、錘を跳ね返すため、力積（測定値）が大きくなっている。また、ウーブレックにおいて底の鋼板に衝突したケースでも、錘が少し跳ね返るため、衝突していないケースより力積（測定値）は大きくなっている。

(3) 与えたエネルギー量について

今回の実験、質量127kg、落下高さ500mm、衝突速度3.1m/sの場合、ゴムに発生する面圧は2.36N/mm²であり、ゴムの許容面圧である12N/mm²より小さい。過去の実験¹⁾より、許容面圧12N/mm²に達するにはおおむね2.8kN・mのエネルギーが必要であるため、質量127kgの重錘では落下高さが2250mm必要であり、落橋防止構造用緩衝材としてウーブレックを用いるならゴムと同サイズでは厳しいことがわかった。

4. 結論

低荷重域においては、ウーブレックの重量比が小さいほど緩衝効果は高くなった。よって、水に対する片栗粉の重量比を変更することによって、衝撃緩衝効果の操作が可能であることが分かった。また、ゴムよりも優れた衝撃緩衝効果を持つことが判明した。

一方、高荷重域においては、重量比が小さいと抵抗力が小さく、一定以上の高荷重には耐えられないことが判明した。

今回の実験では、ある運動量の衝突までは、ダイラタント流体であるウーブレックに高い緩衝効果があることが確認された。一方、ゴム緩衝材と同程度の寸法では、高荷重に耐えるのは難しいことがわかった。今後、ウーブレックの厚さを大きくして、衝撃緩衝効果にどのような差が出るのか検討を進めていく必要がある。

謝辞：本研究はJSPS 科研費 JP18K18886 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 園田佳巨，西本安志，石川信隆，彦坂熙：落橋防止用矩形状ゴム製緩衝材の性能評価法に関する基礎的考察，土木学会論文集，No.689/I-57，pp.215-224，2001.10.