

令和 2 年 6 月 4 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18886

研究課題名（和文）ダイラタント流体を用いた落橋防止システム用緩衝材の適用可能性の検討

研究課題名（英文）Study on applicability of shock absorbing material for unseating prevention system of bridges by using dilatant fluid

研究代表者

梶田 幸秀 (Kajita, Yukihide)

九州大学・工学研究院・准教授

研究者番号：10403940

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,400,000円

研究成果の概要（和文）：ダイラタント流体として水溶性片栗粉に対する重錘自由落下実験を行い衝撃力緩衝効果を確認した。比較対象として、橋梁分野でよく用いられている天然ゴムを用いた。ダイラタント流体は、衝突物体を流体中で制止させることができれば、天然ゴムよりも優れた衝撃力緩衝効果を示すが、本実験の範囲内では、実橋梁に設置するためには少なくとも天然ゴムのサイズより3倍以上のサイズのダイラタント流体を設置しないといけないことがわかった。数値解析においては、OpenFoamを用い、非圧縮性流体である水に水を落とした場合の容器底面の荷重については再現でき、水面形状も妥当な結果を得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ダイラタント流体は天然ゴムよりも安価であり、容器を工夫すれば任意の形状で設置できる。このダイラタント流体の衝撃力緩衝効果を定量的に把握することができれば、社会基盤施設の衝撃力緩衝材として活用できるのではないかと考えた。現時点では、実規模橋梁に対して用いるためには、天然ゴムの3倍以上のサイズが必要であることがわかった。そのため実橋梁に用いるためには、他の装置との併用などの対策も必要と考えられるが、橋桁よりももう少し重量が軽い構造物に対しては、十分な有用性があると考えているため、今後も引き続き検討していきたい。

研究成果の概要（英文）：We performed a weight dropping test on water-soluble starch as a dilatant fluid to confirm the shock absorbing effect. For comparison, we used natural rubber, which is often used in the field of bridges. The dilatant fluid has a shock-absorbing effect superior to that of natural rubber if the colliding object can be restrained in the fluid. But within the scope of this experiment, it was found that a dilatant fluid with a size three times or more larger than that if we install it to the real size bridges.

In the numerical analysis, OpenFoam was used, and the load on the bottom of the container when an water ball was dropped into water, which was an incompressible fluid, was reproducible, and the water surface shape was also reasonable.

研究分野：地震工学

キーワード：ダイラタント流体 水溶性片栗粉 重錘自由落下実験 天然ゴム 衝撃力緩衝効果

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

橋梁の落橋防止構造（上部構造と下部構造の橋軸方向の相対変位が桁かかり長を超えないようにするための構造）と横変位拘束構造（上部構造の橋軸直角方向変位を抑制するための構造）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、剛性が鋼やコンクリートに比べて小さく（柔らかく）、荷重作用時に衝突する物体の運動エネルギーを吸収できるような材料が望まれるため、剛性が小さい天然ゴムや、エネルギー吸収能力を高め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。

ダイラタント流体とは、ゆっくりとした変形に対しては液体のように振る舞い、急激な変形に対しては、あたかも固体のような抵抗力を発揮する性質がある物体である。この流体を緩衝材として用いれば、衝突速度が遅い場合は、ゆっくりとした変形になり、液体のように振る舞うため、剛性が小さく、衝突力を低減する緩衝効果が期待できる。衝突速度が速い場合は、衝突体と接触した部分のダイラタント流体が固化することで、衝突体の運動エネルギーを吸収でき、衝突体と接触していない部分は流体の状態を保ち、落橋防止構造に伝わる衝撃力は低減できるのではないかと考えた。

### 2. 研究の目的

そこで、ダイラタント流体として水溶性片栗粉（ウーブレック）を準備し、重錘落下実験を行い衝撃力緩衝効果について明らかにし、ダイラタント流体の衝撃力緩衝効果について考察を行うため、ゴム製緩衝材を用いた実験も実施し、橋梁の落橋防止システム用緩衝材として広く用いられているゴム製緩衝材との比較を行うことで、落橋防止システム用緩衝材への適用可能性を検討することを本研究の目的とした。

### 3. 研究の方法

研究目的を達成するため、重錘落下衝撃载荷実験を行い、ダイラタント流体の衝撃力緩衝効果を確認する実験を実施するとともに、また、流体解析用のオープンソースプログラムであるOpenFoamによるシミュレーションを行うことで、ダイラタント流体材料による衝突荷重の低減効果を確認することとした。ただし、OpenFoamの解析については、圧縮性流体であるダイラタント流体を用いたシミュレーション解析までは実施できず、非圧縮性流体である水に水を落とした場合のシミュレーションにとどまっている。

### 4. 研究成果

#### (1) 同一体積におけるゴム製緩衝材とダイラタント流体の重錘落下実験結果

写真-1に示すとおり、ロードセルの上に厚さ50mm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、载荷側として重錘の下に、ロードセルと直径85mmの円柱形の载荷板を設置した。载荷板と供試体が接触する面積は、供試体の断面積の約1/4である。重錘およびロードセル、载荷板の合計質量は127kgである。また、水溶性片栗粉（ウーブレック）については写真-2に示すとおり鋼製の枠に入れ、ゴム緩衝材と同じく、150mm四方、厚さ（深さ）50mmである。なお、ウーブレックは重量比（片栗粉の重量/水の重量）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。計測時間間隔は $1 \times 10^{-4}$ 秒（1万分の1秒）である。

図-1に落下高ささと最大衝突荷重の関係、図-2に载荷板のウーブレックに対する貫入深さと落下高さの関係を示す。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、ウーブレック中で载荷板が止まり、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、载荷板の貫入深さが供試体の厚み50mmを上回っており、载荷板がウーブレック中で止まりきらず容器の底の鋼板に衝突し、衝突荷重は大きくなっている。

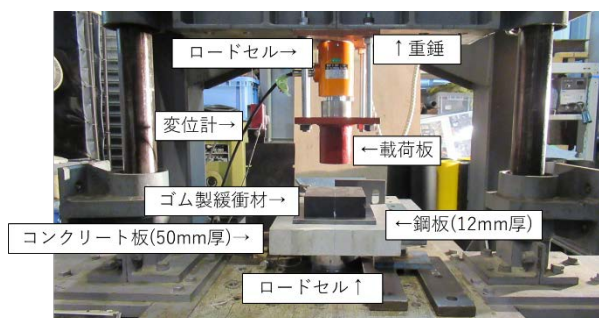


写真-1 重錘落下実験全景

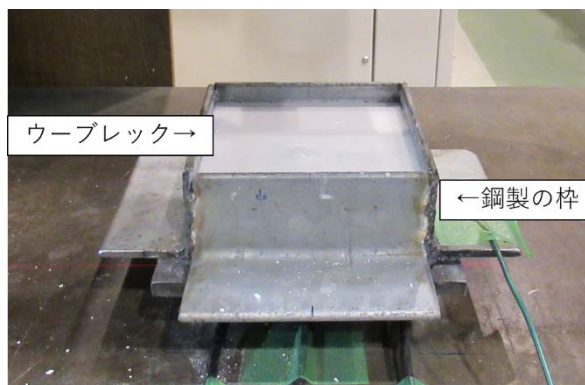


写真-2 ウーブレック

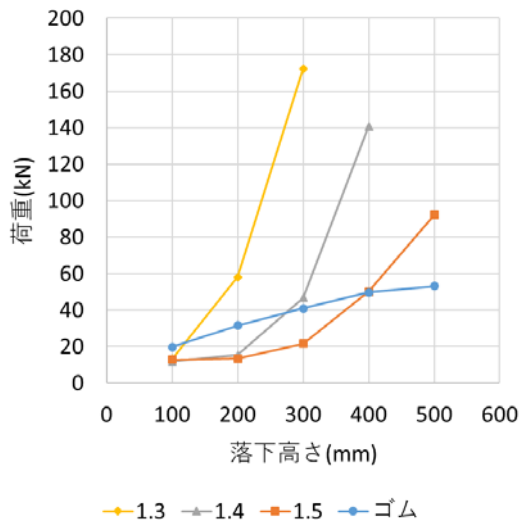


図-1 重錘落下高さと同最大荷重の関係

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すことがわかった。図-3に重錘の落下高さが100mmの場合、時間と衝突荷重の関係を示す。ゴム製緩衝材に比べてウーブレックでは荷重の上がり方が緩やかである。これは、載荷板に接していない部分は流体のまま、剛性が小さいままの状態を保っているものと思われる。ゴム製緩衝材は、きれいな山形を描くのに対して、ウーブレックでは時間と荷重の関係がすこし複雑な形になることが分かった。

今回の実験では、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/mm<sup>2</sup>であり、ゴムの許容面圧である12N/mm<sup>2</sup>よりも小さい。園田らによる過去の実験<sup>1)</sup>より、許容面圧12N/mm<sup>2</sup>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。

(2)ダイラタント流体の深さを变化させた場合の重錘落下実験結果

本実験では、ダイラタント流体の厚みを変えながら実施し、その厚みと衝撃力緩衝効果の関係について検討を行った。使用した実験装置は、写真-1で示したものと同じであるが、ウーブレックについては、重量比を1.5として内側寸法250mm四方の容器に深さが50mm、100mm、150mmとなるように注ぎ込み、それぞれに対して所定の高さから重錘を自由落下させ、ロードセルの荷重を計測した。

表-1に載荷板と容器底面との接触判定の結果を、図-4に落下高さと同最大衝突荷重の関係を示す。ウーブレックの厚さが50mmの場合、落下高さが400mmでは、載荷板がウーブレック中で止まりきらず容器底面に衝突し、衝突荷重が大きくなっている。厚さが100mmの場合では、落下高さが600mm以下、厚さが150mmの場合では、落下高さが1000mm以下であればウーブレック中で完全に衝撃が吸収された。完全に衝撃が吸収された場合、つまり、載荷板がウーブレック中で静止した場合においては、ウーブレ

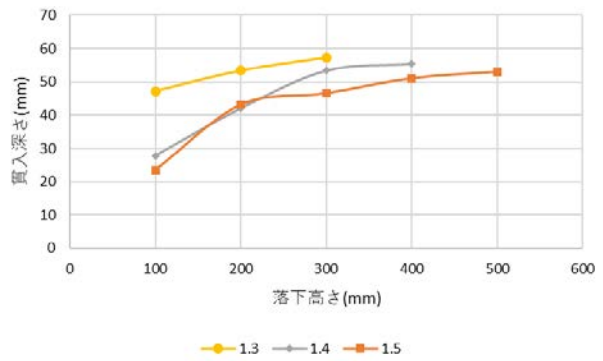


図-2 重錘落下高さと同載荷板の貫入深さ

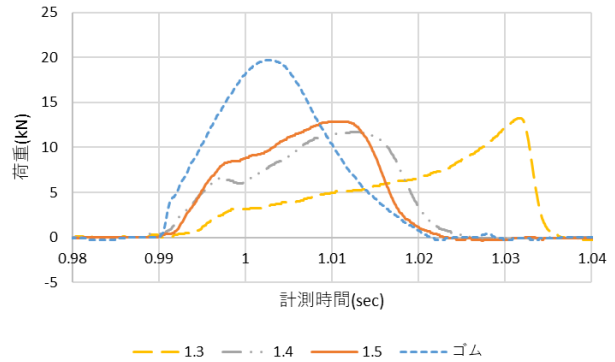


図-3 時間と同荷重の関係 (落下高さ100mm)

表-1 載荷板と容器底面の接触判定

落下高さ (mm) \ 厚さ (mm)	厚さ (mm)		
	50	100	150
200	○	○	○
400	×	○	○
600	-	○	○
800	-	×	○
1000	-	-	○

○：接触せず ×：接触

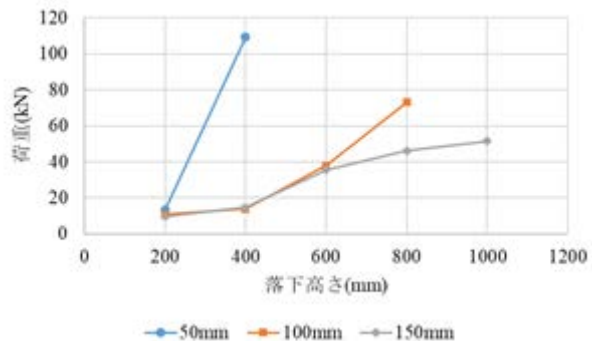


図-4 重錘落下高さと同荷重の関係

ックの厚さの違いによる衝撃荷重の差はほとんどなかった。

本来ならば、落下高さ 2250mm まで実験すべきであったが、この容器には蓋がついておらず、実験後のウーブレックの飛散が激しかったため、現状では落下高さ 1000mm で実験を終了した。ウーブレックを用いた場合は、衝突体がウーブレック中で静止できるかどうかが緩衝効果に大きな影響を与えることが分かった。

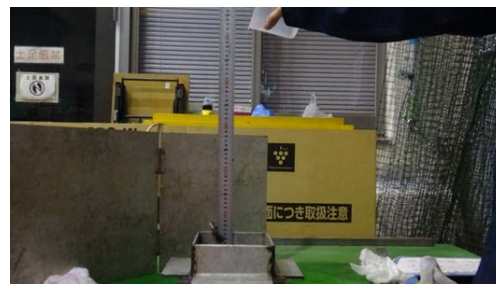


写真-3 水の自由落下の様子

(3)非圧縮性流体（水）に対する OpenFoam によるシミュレーション解析

流体解析ソフト OpenFoam を用いて、衝撃に対するダイラタント流体の挙動を詳細に把握することを試みた。しかし、圧縮性流体であるダイラタント流体の解析は難しいため、まずは非圧縮性流体である水の落下実験とその解析を行うこととした。

写真-3 に実験状況を示す。内側寸法が 150mm×150mm×65mm である鋼製の容器を用意し、ダイラタント流体の実験と同じく、水を深さ 50mm 注いだ。容器の下にロードセルを 3 基設置し、プラスチックコップに入れた 64g の水を所定の高さから容器に自由落下させ、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  $1 \times 10^{-4}$  秒（1 万分の 1 秒）である。

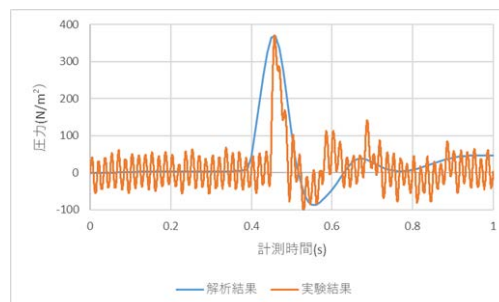


図-5 容器底面中央の圧力の時刻歴

図-5 に容器底面の中央要素の鉛直方向圧力と時間の関係を示す。実験結果については、ロードセルで得られた荷重を鋼製容器の断面積で除し、鉛直圧力と見なした。解析結果の方が、荷重の立ち上がりは緩やかではあり、底面に圧力が作用している時間は解析の方が約 0.06 秒長い、最大圧力や、下向きの圧力が作用した後に負圧が生じる現象などは再現できることがわかった。今後は、本来の目的である、圧縮性流体のダイラタント流体の解析に取り組んでいきたい。

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.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 矢部賢也
2. 発表標題 ダイラタント流体の落橋防止システム用緩衝材への適用に関する基礎検討
3. 学会等名 平成30年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yukihide Kajita
2. 発表標題 Basic study on the application of dilatant materials to shock absorbers for unseating prevention structure systems
3. 学会等名 The 5th workshop with NCREE and Kyushu University (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 梶田幸秀
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第22回橋梁等の耐震設計シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 梶田幸秀
2. 発表標題 ダイラタント流体による落橋防止システム用緩衝材への適用を目指した重錘落下実験
3. 学会等名 第12回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮本大輝
2. 発表標題 ダイラタント流体の厚さの違いによる衝撃力緩衝効果に関する基礎的検討
3. 学会等名 令和元年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考