

(47) ワイヤネットを支持面に用いた防護柵の実規模実験とその解析

Impact Test and Analyze of Rock fall Barrier on Wire Net

西田 陽一*, ベルゲル クリストフ**, 榎谷 浩**,
Yoichi Nishita, Hiroshi Masuya, Christogh Berger

* (株)プロテックエンジニアリング,技術開発部,副部長 (〒957-0106 新潟県北蒲原郡聖籠町蓮潟 5322-26)

** (株)プロテックエンジニアリング,技術開発部 (〒957-0106 新潟県北蒲原郡聖籠町蓮潟 5322-26)

*** 工 (博), 金沢大学教授, 理工研究学域 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

キーワード: 落石, 衝撃, 衝撃実験, 衝撃応答解析)
(rock fall, impact loading, impact test, impact response analysis)

1. はじめに

近年,我が国では気象の変動によりゲリラ豪雨と呼ばれる局地的な降雨が頻繁に発生し,がけ崩れや地すべりによる土砂災害が多く発生している.2010年も1000件を超える土砂災害により多くの被害が発生している.

土砂災害から住宅や道路などを防護する構造は,これまでコンクリート製のもたれ式擁壁や重力式擁壁のような剛構造が多く建設されているが,擁壁を施工するために不安定な斜面を掘削することや,狭隘な施工位置での土砂の搬出等に留意することがある.これらから土砂災害が発生する危険区域の斜面を可能な限り変革しない防護構造が望まれている.

また,現在の崩壊土砂を対象とした待ち受け擁壁の設計は,流下する土砂の速度から流体の衝撃力を静的な荷重として作用させ,部材の設計は許容応力度設計法に基づいて行われている.

このような剛な構造に作用する衝撃の研究では,土石流等の流体の衝突を対象とした研究から衝突後に立ち上がる波形の最大値までの作用時間 t と構造物の固有周期 T の比が小さいとき,図-1に示すようなピークをもつ衝撃波形を示すことが提案されている³⁾.

この衝撃力は,土砂の流れる速度や衝撃を受ける構造物の状態により大きく異なることが知られているものの,定量的な評価手法は確立されていない.

著者らは,柔な防護柵に土砂等の流体が作用したときに落石と同様,柔な構造物に作用する流体等の衝撃力が小さくなるものと仮定し,基礎的な実験を行ってきた.

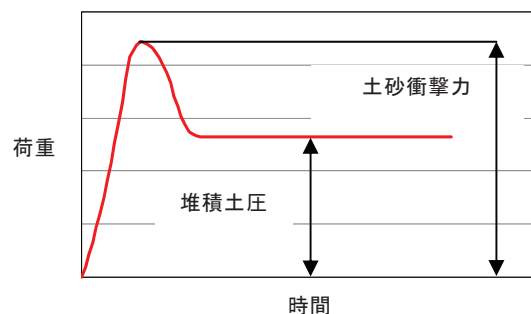


図-1 土砂衝撃力波形の概要

本研究では,狭隘な施工位置でも斜面の変革が少ない流動土砂を直接捕捉できる杭形式の防護柵の開発を目的とし,衝撃力が作用しても脆性的に破壊しない鋼管の内部に小口径鋼管を束に配置して補強した柱(以下LSTという)と流動土砂の衝撃力を柔軟に受け止め衝撃力を緩衝できるワイヤネットパネルを防護面に用いた防護柵の実規模モデルの衝撃実験を行った.

なお,土砂を流下させる実験は,大規模な斜面を必要とし実験が困難であるため,土砂の衝撃の最大値と残留する土圧力に着目し,残留する土圧力を大型土嚢によって等価なモーメントとして予め与え,その上に重錘を落下させる疑似荷重として部材挙動の確認を行った.

また,防護構造の性能を照査する手法の一つとして汎用解析コードLS-Dynaを用いた重錘単体の動的解析を試み,重錘の衝撃力,変位および支柱の支点反力を実験と比較し考察した.

2. 実験供試体

2.1 防護柵の概要

実験に使用した防護柵は、支柱、上弦材、ワイヤネットおよび金網から形成され、土砂や落石を柔軟に受け止め衝撃力を低減させる構造である。

2.2 実験供試体

図-2に、実験供試体を示す。

土砂の衝撃を受ける防護構造は、土砂を堆積させる空間が必要となるため、ある程度の高さを有している必要がある。このため供試体は、ネットの高さ4m、柱間隔5mの防護柵を想定し4主構3スパンとした。供試体の諸元を次に述べる。

支柱は、STK400、 $\phi 316.5\text{mm}$ 、 $t=6\text{mm}$ の鋼管内部に $\phi 60.5\text{mm}$ 、 $t=3.2\text{mm}$ の鋼管を19本配置し、外周をモルタル充填した構造であり、支柱が降伏した後も耐力を保持できる構造である。図-3に支柱の断面図を示し、図-4に基礎実験により得られた支柱の曲げモーメントと曲率の関係を示す。

防護面は、対角で500mmの方形に編みこんだワイヤロープネットを用い、ロープの構成は外辺ロープに一般用ワイヤロープFC6×24- $\phi 22\text{mm}$ 、編みロープにFC6×24- $\phi 12\text{mm}$ としている。

支柱とワイヤロープは、支柱に取り付けたブラケットにピンボルトで固定し、外辺のワイヤロープと編みロープはシャックルにより固定し、その接続部がスライドできることで局部的にロープが破断しない構造となっている。

更にワイヤネットの上には、土砂や落石がすり抜けないように $\phi 2.6\text{mm}$ の亀甲金網を鋼線で編みこみ設置している。

支柱頂部の上弦材は、ワイヤロープに張力が発生したときに支柱が面内方向に変形するため、これを抑制するためにSTK400、 $\phi 139.8$ 、 $t=4.5\text{mm}$ の鋼管を軸力抵抗部材として設置した。

3. 実験概要

3.1 実験方法

重錘落下実験は、土砂衝撃力の疑似荷重として大型土嚢を中央スパンに90kN、サイドスパンに60kN載荷し、その上に衝撃荷重として重錘を中央スパンに高さ1m～10mから落下させる漸増載荷とした。

重錘は、重錘をクレーンで所定の高さまで吊り上げ、エアシリンダーを用いた離脱装置にコンプレッサーからの空気を送り、重錘を切り離して落下させた。

写真-1に実験供試体および実験の状況を示す。

3.2 計測項目



写真-1 実験供試体および実験の状況

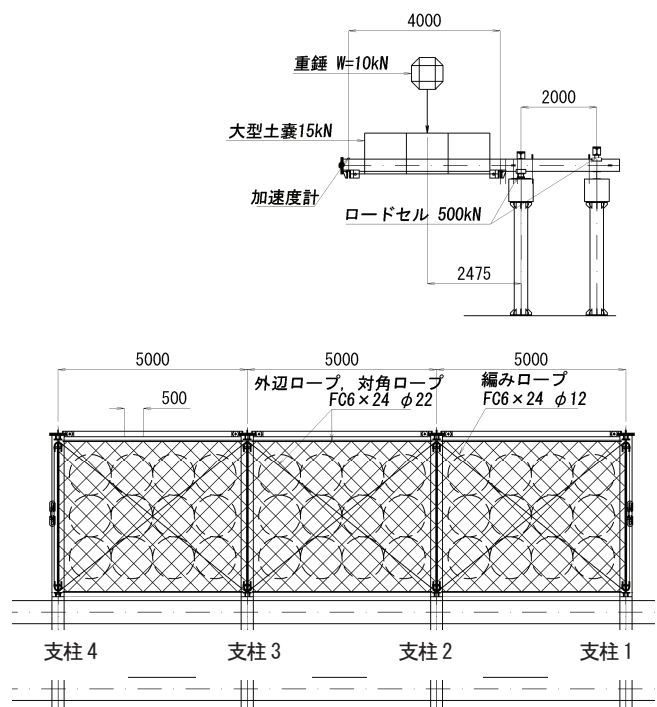


図-2 実験供試体

計測項目は、重錘の中央に設置した3軸の加速度計(容量100G：東京測器社製)による加速度、柱の下部に設置したロードセル(500kN：東京測器社製)による鉛直支点反力、柱のひずみおよび支柱頭部の変位を確認するために設置した加速度計(容量10G：東京測器社製)

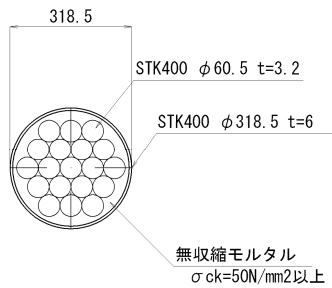


図-3 支柱の断面

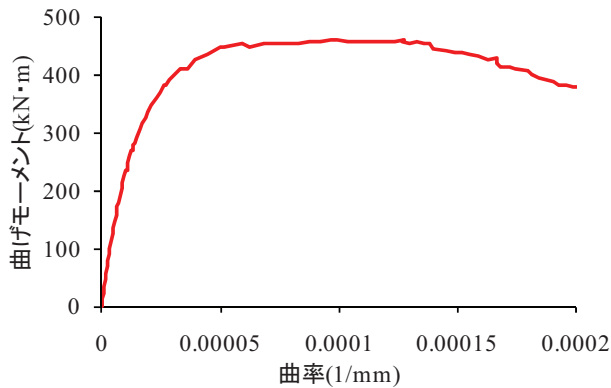


図-4 支柱の曲げモーメントと曲率の関係

とした。各センサーのデータは、5kHz でデジタルデータレコーダ（キーエンス社製：NR600）により計測を行った。また、変形状況を確認するために、高速ビデオカメラ（Vision Research 社製）を用い、毎秒 1000 コマの速度で撮影を行っている。

4. 実験結果

4.1 重錘衝撃力および支点反力

実験後の防護柵は、支柱が塑性化したものの、ロープの破断などの損傷はなく、重錘を捕捉することができた。ここでは、入力した重錘衝撃力と伝達された支点反力について考察を行う。

図-6 は、落下高さ 3m~10m の重錘衝撃力と載荷スパンである梁 No.2 と梁 No.3 の支点反力の合計の経時変化を示している。

重錘衝撃力の立ち上がりから最大値に到達するまでの作用時間は約 0.02sec であり、今回の実験では落下高さによることなく概ね同じであった。重錘衝撃力と支点反力の最大値を比較すると支点反力が重錘衝撃力の約 60% 程度であり、伝達される衝撃力が小さいことがわかる。

一方、過去に行われた敷砂上へ重錘落下実験²⁾では剛体に伝達される最大衝撃土圧力は、重錘衝撃力の 1.5~2.0 倍になるとの報告もある。しかしながら、今回実験を行った柔な防護柵の場合、衝撃力の作用時間が敷砂上の実験結果に比べ長いことから、応答値が小さくなるものと考えられる。

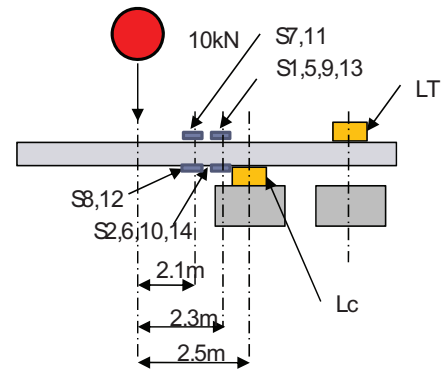
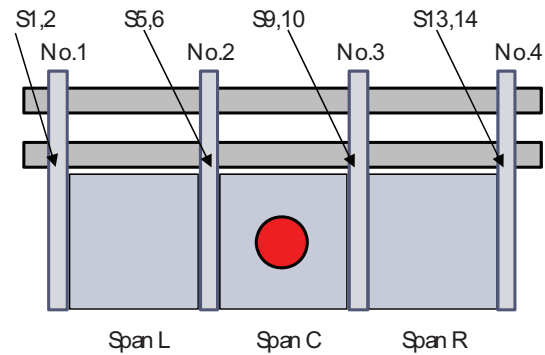


図-5 計測の概要

図-7 は、落石対策便覧における衝撃力と比較するために各衝撃力を落下高さ毎に示している。重錘衝撃力および支点反力は、ロックシェッドの設計に用いる敷き砂への衝撃力（ラーメ定数 100kN/m²）に比べて小さく、今回の実験の衝撃力をラーメ定数で評価した場合、100kN/m² 程度であると考えられる。

4.2 考察

今回の実験から、衝撃作用を受ける柔な防護柵の場合、作用する衝撃力は剛な擁壁に比べ小さくなることが確認された。

現在、土砂の衝撃力を考慮した待ち受け擁壁の設計では、土砂の衝撃力を静的な荷重に置き換えて設計をおこなっているが、防護柵の支柱を同様な手法で設計する場合、その衝撃力を低減できるものと考えられる。

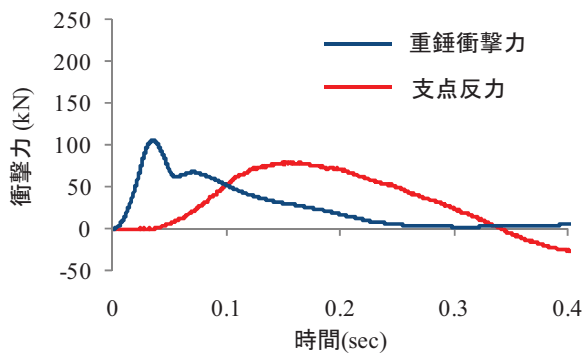
5. 解析

5.1 解析概要

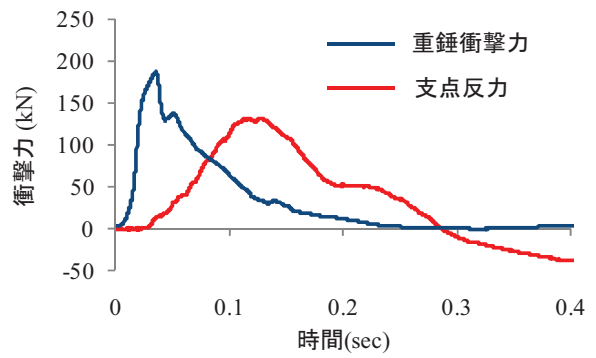
ワイヤロープを用いた防護柵の挙動は、大変形を伴うことからその性能を評価することが困難である。ここでは、動的解析汎用コード LS-Dyna を用い、質量 1t の重錘を高さ 10m から落下させた衝撃実験と解析結果を比較し、性能照査手法の一考察とした。

5.2 解析モデル

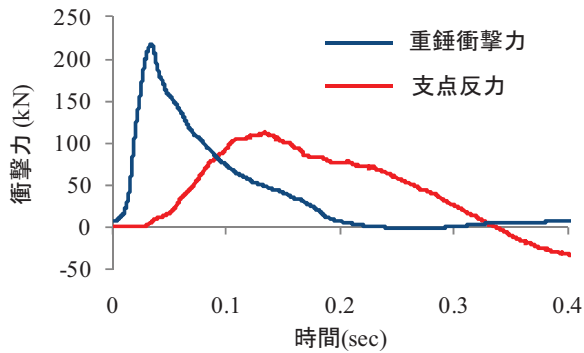
図-8 に解析モデルを示す。支柱の要素は、0.5m 間隔



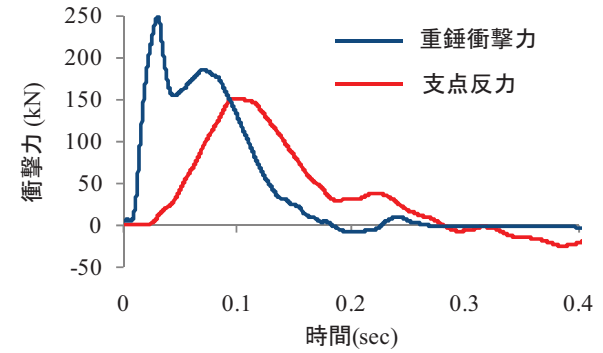
(a) 落下高さ 3m



(b) 落下高さ 5m



(c) 落下高さ 8m



(d) 落下高さ 10m

図-6 重錘衝撃力および支点反力の経時変化

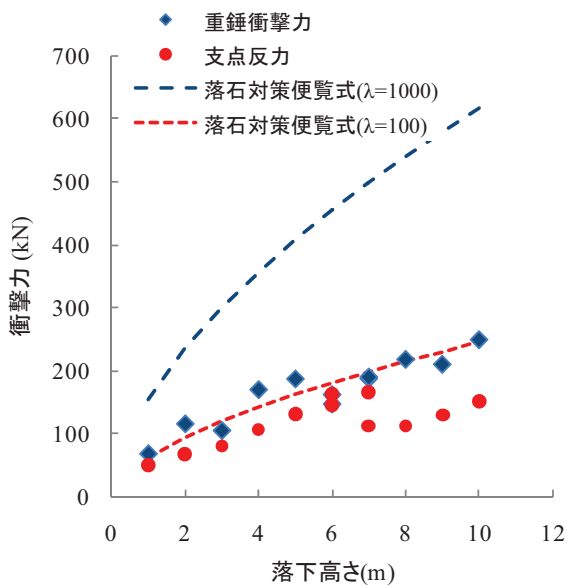


図-7 衝撃力と落下高さの関係

で分割し、曲げ剛性をモーメントと曲率で与える梁要素として与えた。構成則は、図-4の $M-\phi$ 関係である。

ワイヤロープは、圧縮に寄与しないケーブル要素として入力し、ロープの交点毎に要素分割した。また、外辺ロープと編みロープの交点は、編みロープの交点がスライドできるようにモデル化を行っている。材料の応力ひずみ関係を図-9に示す。なお、今回の解析では金網のモデル化を行っていない。

衝撃力は、载荷位置に質量 1t の重錘に初速度として 14m/sec を与えている。

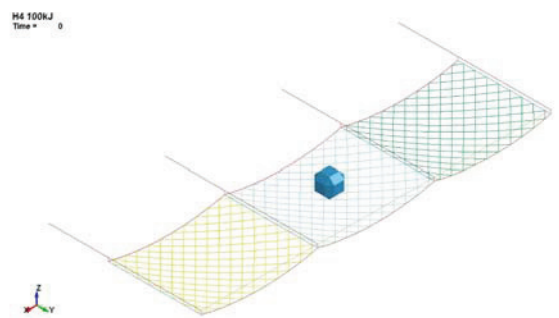


図-8 解析モデル

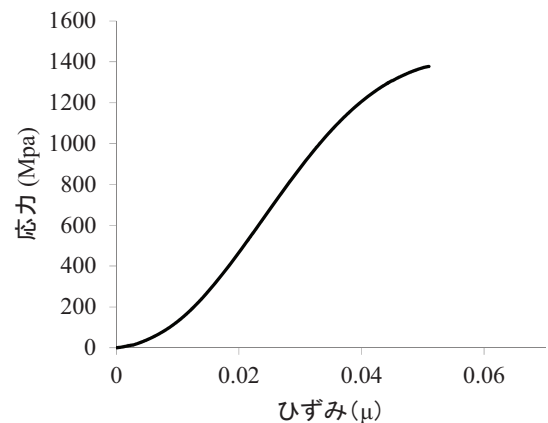


図-9 ワイヤロープの応力ひずみ関係

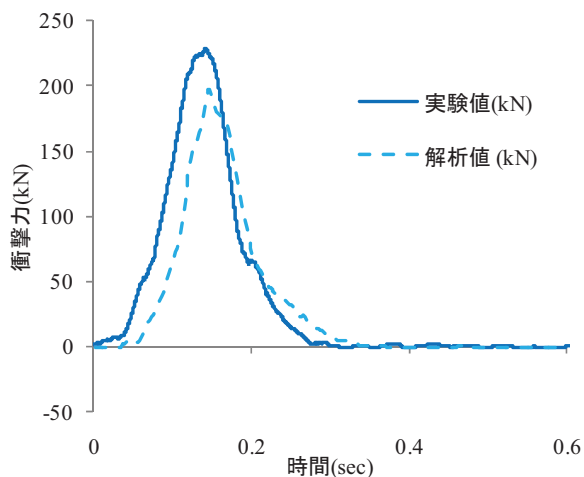


図-10 重錘衝撃力の経時変化

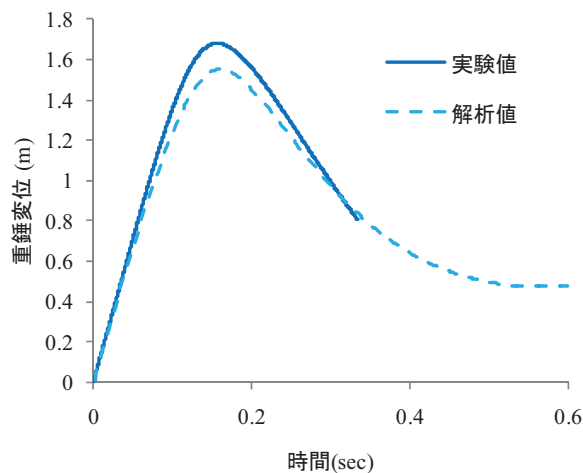


図-11 重錘変位の経時変化

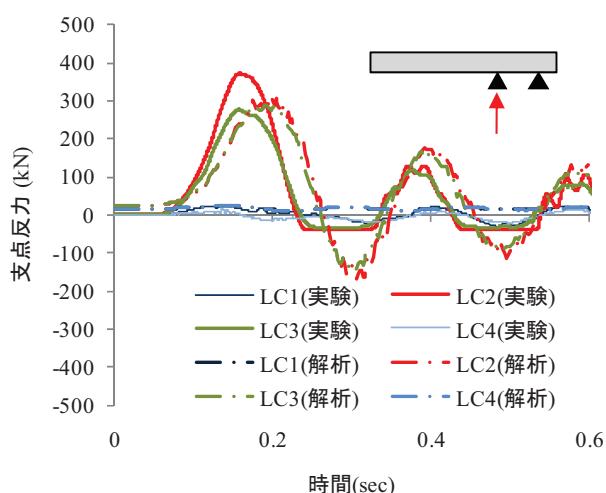


図-12(a) 圧縮側の支点反力の経時変化

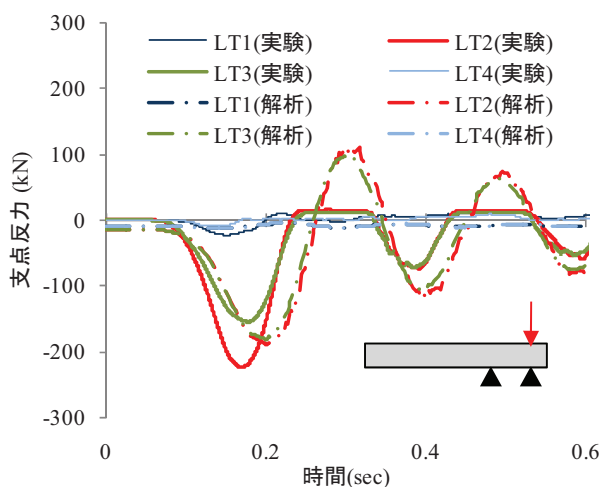


図-12(b) 引張側の支点反力の経時変化

5.3 解析結果

(1) 重錘衝撃力

図-10 は、重錘衝撃力波形を実験と比較して示している。図中の破線は解析結果を示し、実線は実験結果を示している。

図より、衝撃力および重錘変位の波形は概ね実験値を再現できているものと考えられる。

(2) 重錘変位

図-11 は、重錘変位波形を実験と比較して示している。

なお、実験値は、3 軸加速度計を積分して求めた合成成分を示している。解析結果と実験値を比較すると実験結果がやや大きいものの、概ね再現できているものと考えられる。図-13 に時刻歴の解析結果を示し、写真-2 に実験の状況を示す。

(3) 支点反力

図-12 は、支点反力波形を示している。実験値は圧縮型ロードセルにより計測したため、支柱が浮き上がる荷

重は、計測できていない。解析結果は、実験値に比べやや大きく、作用時間がやや長い、概ね実験を再現できているものと考えられる。

5.4 考察

LS-Dyna を用いた解析結果は、実験結果を概ね再現できており、本構造の性能照査の一手法として有効であるものと考えられる。

5. まとめ

小口径鋼管を内部に配置した支柱とワイヤネットを防護面に用いた防護柵の実規模実験および落石単独の解析を行い、部材の挙動を確認した実験と LS-Dyna を用いた動的解析から次のことがいえる。

- ・柔な防護柵に大型土嚢を載荷し、その上に重錘を落下させた衝撃実験から、防護柵に伝達される衝撃力は重錘衝撃力の約 60% であり、コンクリート擁壁等のような剛構造物に比べ設計衝撃力を小さくできるものと考えられる。これらから、本防護柵を擁壁と同じ手法で設計法を行う場合、衝撃力の低減ができるものと考えられる。

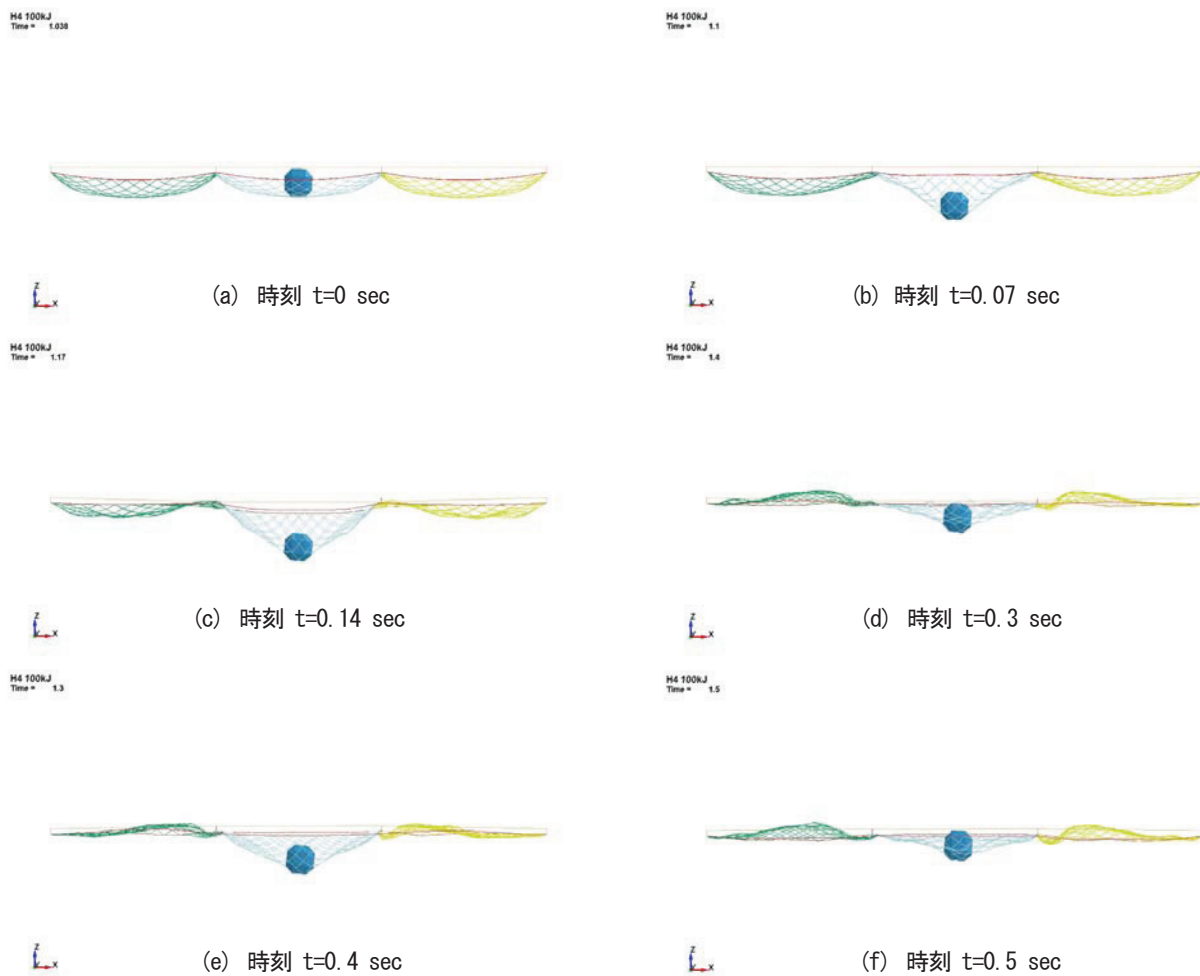


図-13 重錘変位を示す時刻歴

今後、柔な構造に作用する流体衝撃力の荷重低減効果を研究することで、建設コストの縮減が期待できるものと考えられる。

・防護柵上に土嚢を設置して得られた最大衝撃力は、ラーム定数 100kN/mm^2 に相当すると考えられる。

・LS-Dyna を用いた解析結果は、実験結果を概ね再現できており、性能照査の一手法として期待ができる。

参考文献

1) 伊藤正俊, 森口周二他: 模型斜面を用いた地盤材料の流動実験およびその再現解析: 第 41 回地盤工学研究発表会

2) 岸徳光, 中野修他: 野外実験による敷砂の緩衝性能: 土木学会構造工学論文集 1993

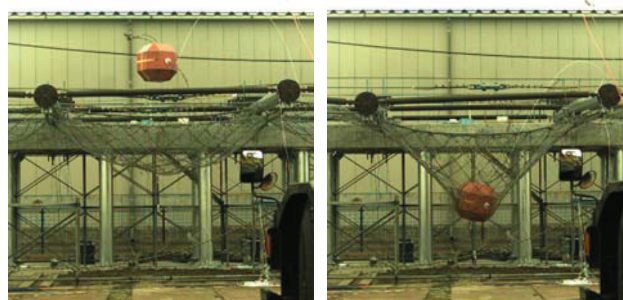


写真-2 実験の状況

3) 石川信隆, 井上隆太, 林健二郎, 長谷川祐治, 水山高久: 土石流モデルを用いた衝撃流耐力の測定実験について: 第 8 回 構造物の衝撃問題に関するシンポジウム