

実物大落石防護柵工の衝突実験再現シミュレーション

防衛大学校 学生会員 ○ 永井貫太, 小松喜治 正会員 堀口俊行
東京製鋼(株) 正会員 橋口寛史, 高橋利延

1. 緒言

我が国は急峻な地形が多く、地震や火山活動も活発であり、加えて台風や豪雨に多く見舞われる環境にある。一方で、交通需要の増加や都市開発により、困難な地形や地質条件を克服して交通網を拡大したため、落石災害が多く発生している。落石対策法として、ワイヤロープを用いた柵構造によって落石の道路への侵入を防止する落石防護柵が建設されている。特に、支柱頭部のワイヤロープで支持した構造はワイヤロープ支持式落石防護柵(以下、落石防護柵と呼ぶ。)であり従来の片持ち構造の柵と比較して支柱の基礎に生じる荷重が小さくなるため、部材が軽量となり、経済性、施工性に優れた特徴がある。

このような新しい構造は衝撃応答特性の把握および性能照査の手法として実規模の実験や解析による照査が行われている。著者ら¹⁾は、本研究に先立ち実物大の実験を実施している。その結果、落石対策便覧²⁾に最低限統一すべき性能照査について満足していることを確認した。しかし、限られた条件での実験であり、今後は解析を用いた性能照査が望まれる。

そこで本研究は、弾塑性解析手法を用いて実スケールでの落石防護柵の重錘衝突実験の再現シミュレーションを試みたものである。その際、実験と解析の張力～時間関係の再現性について比較検討する。

2. 実験の概要

2.1 供試体

実験供試体は、横ロープ、間隔保持材(横ロープ間の開き防止部材)、および金網からなる支持面を4本の支柱で支えた構造である(図-1)。各支柱は、下端を架台にヒンジ結合、頭部を吊ロープで支持しており、左右の末端支柱は、側方からもそれぞれ4本のサイドロープで支持している。また、吊ロープおよびサイドロープの端部は架台に固定している。なお、図-1の側面図に示すように、本実験では後述の試験方法の都合上、供試体の支持面が水平となるようにして架台に設置した。供試体は、50kJタイプを用いており、使用部材は図-1に示すとおりである。また、供試体の柵高は2.5 m、延長は18.0 m、支柱間隔は6.0 mである。重錘は多面体コンクリート製重錘を使用し、実験の前後の質量を測定し、0.17 tonであった。

2.2 実験方法

本実験は、写真-1のように、重錘をクレーンで落差33.0 mの地点まで持ち上げたのち、空圧式の離脱装置を用いて自由落下させ、供試体に衝突させた。ここで、重錘の落差 h については、衝突速度 v が式(1)を満たすように値を決定し、重錘の衝突目標位置は、柵の延長方向には全長の中央、柵の高さ方向には柵頭部より0.5 m下方の位置とした。

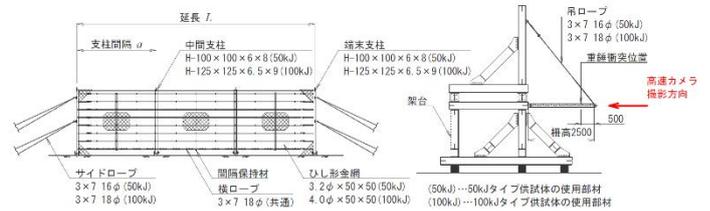


図-1 供試体の平面図および側面図

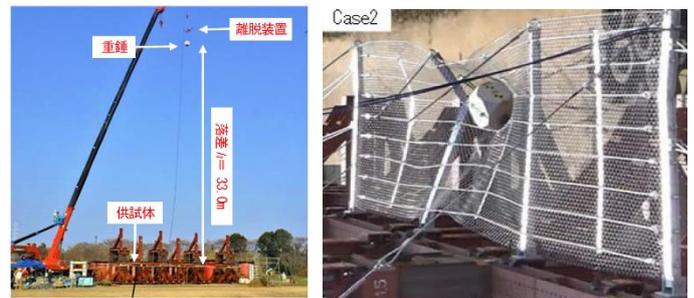


写真-1 実験状況

写真-2 供試体損傷状況

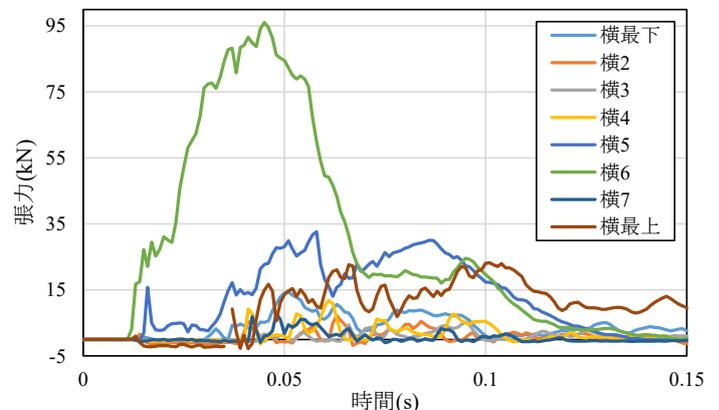


図-2 張力の時刻歴応答

$$v = \sqrt{2 \times 9.8 \times h} \geq 25.0 \text{ m/sec} \quad (1)$$

2.3 実験結果

図-2に、張力の時刻歴応答を示す。横ロープ6に着目すると、最大張力が96 kNであり、他のロープに比べて明らかに大きい。これは降伏応力(118 kN)に比べると81%であり、ロープ荷重のピーク付近で支柱が塑性変形したことによりエネルギーが吸収されたと考えられる。

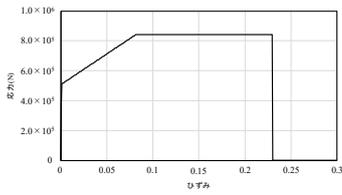
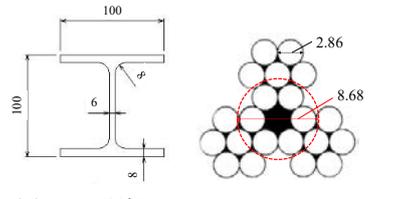
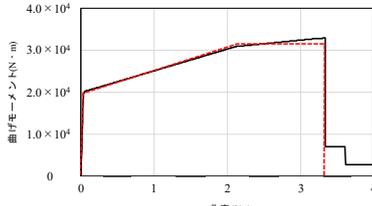


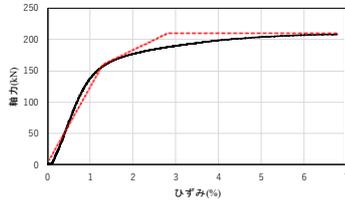
図-3 応力-ひずみ関係



(a) H型鋼 (b) ワイヤロープ
図-4 部材断面



(a) $M-\rho$ 関係



(b) $N-\epsilon$ 関係

図-5 曲げモーメントと軸力

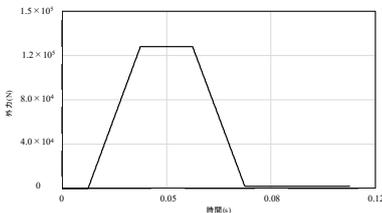


図-6 外力-時間関係

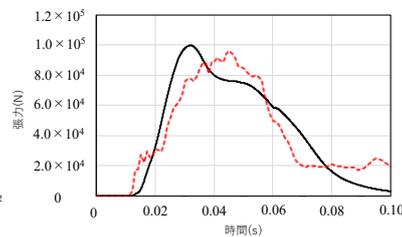


図-7 張力-時間関係

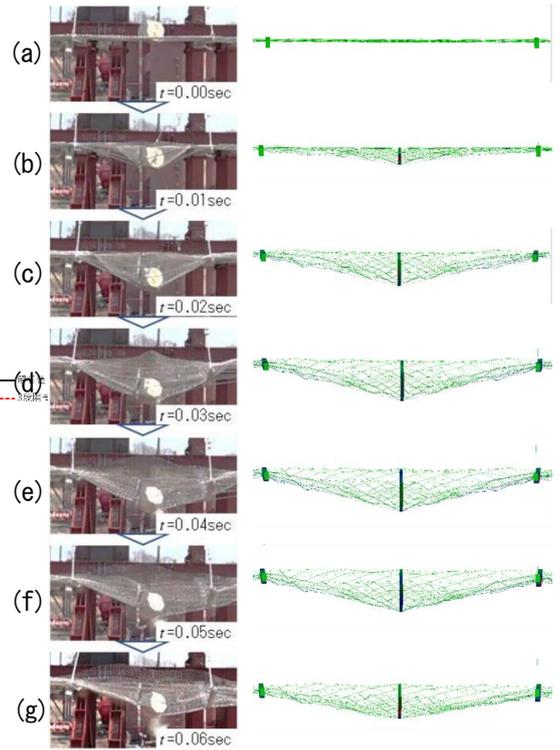


図-8 解析モデルの変形応答

3. 解析要領

本解析では、動的弾塑性解析を目的とした数値解析プログラムを使用した³⁾。まず、図-3に示すH型鋼およびワイヤロープの各部材断面と図-4に示すSS400の応力～ひずみ関係を基に断面分割法を用いてそれぞれの断面の曲げモーメント～曲率関係および軸力～ひずみ関係を求めた。これを3段階の弾塑性モデルとして近似させ、図-5のようにした。そのうえで弾性限界を表す関数 Φ_Y および塑性化を表す関数 Φ_P を用いて関連流れ則による塑性変形を求めた。なお、本解析は落石によって供試体に生じる外力を図-6のようにし、モデル化の入力値として与えている。これは落石が保有するエネルギーと等価である。

4. 解析結果

図-7に、横ロープ6の実験と解析の張力～時間関係を示す。実験では0.045 secで最大張力に達し、解析では0.035 secで最大張力に達する。最大張力に達する時間の差は0.01 secであり、これはワイヤロープの伝搬速度の影響によるものと考えられる。しかし、実験での最大張力96 kNであったが、解析での最大張力は99.4 kNあった。実験と解析における最大張力を比較すると、誤差は3.5%であり実験を概ね再現できている。

図-8に、実験と解析結果の変形応答図を示す。図-8(a), (b)とも実験と同じ傾向である。次に、実験では、図-8(c)の時刻0.02 secにおいて両側の中間支柱において変形が見られた。解析においても同様に中間支柱が変形している。その後、横ロープ7側の中間支柱には大きな変形は見られないが、横ロープ6側の中間支柱は時刻経過とともに変形が大きくなり、0.04 secで最大となった。一方、解析では0.03 secで最大となっている。また、図-8(d)の時刻0.03 secにおいて、支持面の最大張出力1.1 mに達した

のち、図-8(e)の時刻0.04 secでは張出力を維持し、0.05 sec以降は重錘を押し戻す挙動となった。図-8(f), (g)においても落石が押し込み、その後跳ね返すところまで再現できている。このように変形応答を概ね再現している。

5. 結言

本研究は、弾塑性解析手法を用いて落石防護柵の重錘衝突実験の再現性について検討したものである。

- (1) 提案手法は、実物大実験における変形応答を定性的に再現することができた
- (2) 実験の最大張力を弾塑性解析で概ね再現することができた。
- (3) 横ロープ張力のピーク付近で支柱が塑性変形しているが、ロープ張力が低減し、ロープは損傷していないことがわかる。
- (4) 今後は、様々な実験例を用いて、ワイヤロープの耐久評価手法としての適用性を検討していく。

参考文献

- 1)高橋利延, 橋口寛史, 堀口俊行: ワイヤロープ支持式落石防護柵の実規模重錘衝突実験, 第12回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, 2019.12
- 2)社団法人日本道路協会: 落石対策便覧, 2017.12
- 3)小松喜治, 堀口俊行, 香月智: 既設鋼製透過型砂防堰堤の補強効果に関する解析的検討, 第12回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, 2019.12