

礫衝突の各種条件が鋼管部材の衝撃応答に与える影響解析

防衛大学校 別府万寿博 日鉄建材 ○國領ひろし 伊藤忠テクノソリューションズ 松澤遼  
防衛大学校 峯好古

1. 緒言

鋼製砂防堰堤に対する現行の設計法<sup>1)</sup>では、礫が鋼製堰堤の部材（鋼管はり）に衝突する場合を想定して、へこみ変形やはりの変形エネルギーを算定することで性能照査が行われている。今後は、複雑な衝突現象を考慮した解析や緩衝部材の性能照査が求められる。本研究は、礫衝突における礫の回転が変形に及ぼす影響および緩衝鋼管を設置したフレーム構造の応答について数値シミュレーションを行ったものである。

2. 回転運動を考慮した礫の衝突を受ける鋼管はりの変形解析

2.1 解析モデル

図-1に示すように、直径1.0mの礫および直径φ508mm×板厚t19mmの鋼管部材モデルを作成した。鋼管の両端は完全固定とし、スパンは6.0mである。鋼管の要素はシェル要素を用いて、鋼材は降伏応力235N/mm<sup>2</sup>の弾塑性体とした。鋼材の降伏関数はJohnson-Cookモデルを用い、ひずみ速度効果を考慮した。また、礫の変位速度は10.0m/sとした。礫については、鋼管へ斜めの角度で衝突したり、衝突方法に回転したりすることが考えられるため、図-2に示すように入射角を0°（垂直衝突）、45°および60°の3種類を設定した。また、回転については衝突方向に、0回転/s（回転なし）、3回転/sおよび16回転/sを設定し、入射角と組み合わせると合計9ケースの解析を行った。なお、鋼管と礫の摩擦係数については、静摩擦および動摩擦係数は等しいと仮定して、0.3を設定した。

2.2 荷重-変形関係

解析の一例として、図-3(a)に入射角0°（垂直衝突）のケースにおける0回転/sおよび3回転/sの荷重-変形関係を示す。図-3(b)は、3回転/sのケースにおける入射角0°および60°の結果を比較している。荷重は、礫と鋼管の接触力から算定した。また、変位は鋼管モデルの衝突位置の節点およびその真裏の節点における3方向自由度の合成変位とした。図-3(a)から、入射角0°の場合では、0回転/s（回転なし）において最大荷重約1150kNを示し、最大へこみ変形は75mmであった。なお、へこみ変形は、衝突位置の節点と真裏の節点の変位差から算定した。一方で、3回転/sの場合には、最大荷重が約1180kNへ微増し、最大へこみ変形は85mm程度と大きな変形を示した。この理由は、礫の回転を考慮することで、回転エネルギーが付加され、衝突時にせん断力が作用したためと考えられる。図-3(b)から、3回転/sにおいて入射角が60°になると、最大荷重は約680kNとなり、入射角0°に比べて最大荷重が43%程度小さくなった。また最大へこみ変形は約30mmであり、へこみ変形も大幅に低下した。この理由は、斜めに衝突することで偏心载荷となり、礫による衝撃力が低下するためである。

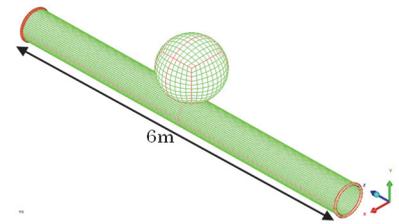


図-1 鋼管部材モデル

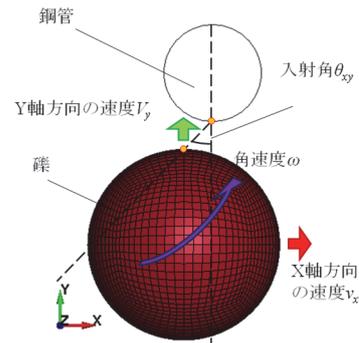
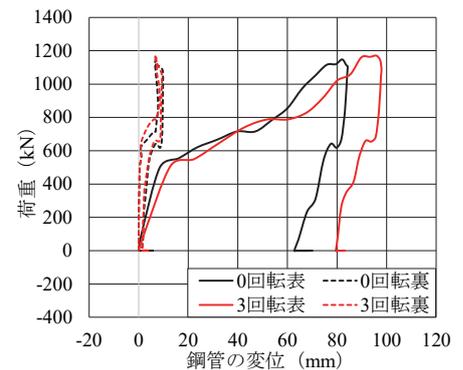
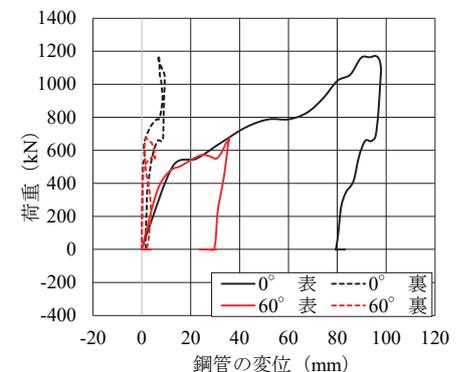


図-2 回転および衝突角（側面図）



(a) 入射角0°（0回転/s, 3回転/s）



(b) 3回転/s（入射角0°, 60°）

図-3 荷重-変形関係の比較

### 3. 緩衝鋼管付フレーム構造への礫衝突解析

#### 3.1 解析モデル

ここでは基礎的検討として、鋼管はり単体と同じスパン 6.0 m を用いて図-4 に示す鋼管フレーム構造モデル<sup>2)</sup>を作成した。礫の直径は 2.0 m とし、速度を 2.0~10.0m/s で変化させた。鋼管の直径および板厚は、鋼管単体の解析と同じであり、それぞれ直径  $\phi 508 \text{ mm}$  × 板厚  $t19 \text{ mm}$  とした。材料モデルは 2. と同じである。緩衝鋼管なしの鋼管フレーム構造の支点は固定端とした。緩衝鋼管付のモデルについては、緩衝鋼管なしのモデルに、同じ寸法の鋼管を前面に設置した。

#### 3.2 荷重および変形特性

図-5 に、礫直径 2.0 m、衝突速度 10.0 m/s における鋼管フレームの最終的な相当塑性ひずみ分布を示す。図中の相当塑性ひずみの最大値は  $1.0 \times 10^{-3}$  として表示している。図から、緩衝鋼管なしの場合には、衝突部に大きな塑性化領域が形成され、へこみ変形が発生した。また、フレーム隅角部の要素が塑性化し、塑性ヒンジが形成されている。緩衝鋼管ありの場合には、緩衝鋼管に同様のへこみ変形が発生した。また、緩衝鋼管の接合部にも塑性領域が形成された。接合部から伝達された力が後部のフレームへ作用し、フレーム隅角部の要素も塑性化し、塑性ヒンジを形成した。図-6 に荷重-時間関係を示す。荷重は、礫と鋼管の接触力から算定した。図から、緩衝鋼管を設置することによって最大荷重が約 10% 増加した。これは、緩衝鋼管に大きなへこみが発生したためと考えられ、荷重の第 1 波も約 100ms まで続いた。図-7 に、変位-時間関係を示す。変位については、緩衝鋼管なしのケースでは衝突点とその真裏の節点の変位を出力し、緩衝鋼管ありのケースでは、緩衝鋼管なしと同じフレーム構造の左柱の中央部の節点において出力した。図から、緩衝鋼管なしでは衝突部裏面において最大約 275mm の大きなはり変位を示したが、緩衝鋼管を設置すると最大はり変位は 166mm となり約 40% 程度小さくなった。

#### 4. 結 言

本研究では、礫の回転と入射角を考慮した鋼管部材への衝突および鋼管フレームにおける緩衝鋼管の影響について数値解析的な検討を行った。今後も、実際の礫衝突条件を考慮するとともに、緩衝効果についても検討を進める必要がある。

**謝辞：**本研究の一部は、砂防・地すべり技術センターから助成を受けて行われたものである。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 鋼製砂防鋼構造物委員会：鋼製砂防構造物設計便覧，砂防・地すべり技術センター，平成 21 年 7 月
- 2) 別府万寿博，松澤遼，國領ひろし，寺澤拓真，森広毅：巨礫の衝突を受ける鋼管部材の衝撃応答に関する解析的研究，令和 5 年度砂防学会研究発表概要集，令和 5 年 5 月

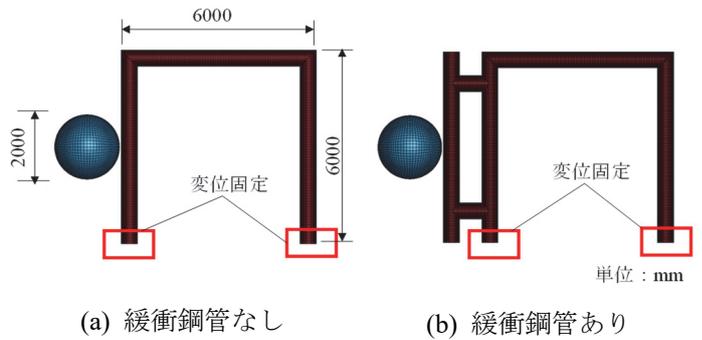


図-4 解析モデル

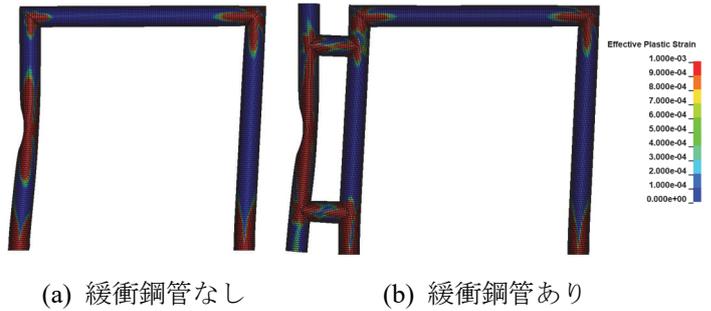


図-5 相当塑性ひずみ分布

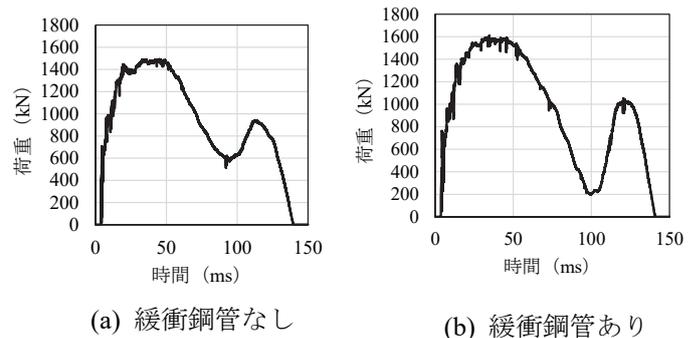


図-6 荷重-時間関係

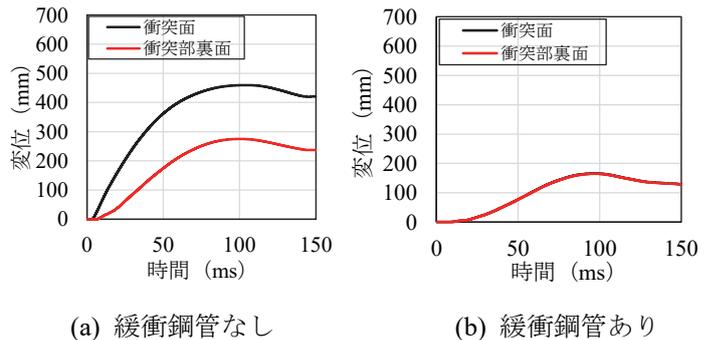


図-7 変位-時間関係