

礫の繰り返し衝突を受ける鋼管はりの変形挙動に関する研究

防衛大学校 ○別府万寿博 森広毅

1. 緒言

現行の設計法では、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照査が行われている。一方で、実際の土石流は複数の礫を含んでいることから、鋼管はりに礫が複数回衝突することが考えられる。既往の研究では、礫が繰り返して鋼管はりに衝突する場合の変形はあまり検討されていない。本研究は、礫の繰り返し衝突を受ける鋼管はりの変形挙動について、数値シミュレーションを行ったものである。

2. 礫の繰り返し衝突によ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 1.0 m の礫および直径 ϕ 508 mm×板厚 t 19 mm×スパン 6m の鋼管はりモデルを作成して、礫を速度 10m/s で鋼管部材に衝突させる解析を行った。なお、計算時間を短縮するため 1/2 モデルを作成した。鋼管の両端は完全固定とした。図-1 に示す鋼管中央部の衝突点とその真裏の変位（はり変位）を出力した。鋼材の塑性判定は、Von-Mises の降伏条件に従うものとし、降伏応力は 245N/mm^2 とした。

解析ケースは、鋼管はりの中央に繰り返して 6 回衝突させる解析を行った。また、図-2 に示すように、1 回目ははり中央に衝突させ、2 回目は中央からスパン 1/4 (1.5m) の位置に 2 個の礫を衝突させる解析を行った。繰り返し衝突については、衝突解析を行った後に強制的に減衰を作用させて振動を収束させ、次の衝突解析を行うことで再現した。

2.2 スパン中央に対する繰り返し衝突

図-3 に、1 回の衝突における、はり中央に最大変位が生じた時刻の鋼管のへこみおよびたわみ状況を示す。なお、図中の緑は弾性、赤が塑性化した範囲を示す。図から、はり中央部に明瞭なへこみ変形が発生していることがわかる。また、はり中央と固定端において塑性ヒンジが形成されており、現行設計と同様のメカニズムを示している。はりの最大変位（鋼管断面最下部の最大変位）は約 8mm であった。図-4 は、6 回目の繰り返し衝突における、はり中央に最大変位が生じた時刻の鋼管のへこみおよびたわみ状況を示す。図から、はり中央部のへこみ変形が大幅に進展し、はりの最大変位も 78mm と大きくなった。はりの塑性化部分も全体的に進展した。

図-5 は、礫を 6 回衝突させたときのへこみ変位-時間関係を示している。図から、1 回目の衝突によるへこみは約 90mm であった。礫の衝突が繰り返されるたびにへこみも増加した。ただし、へこみ量は徐々に低下し、6 回目

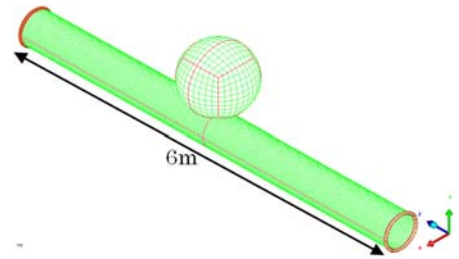


図-1 鋼管はりモデル（同じ位置に衝突）

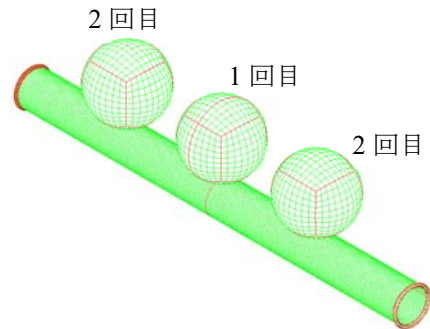
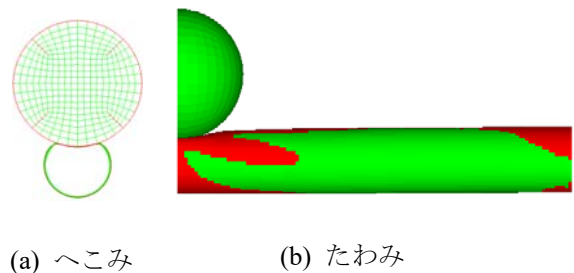


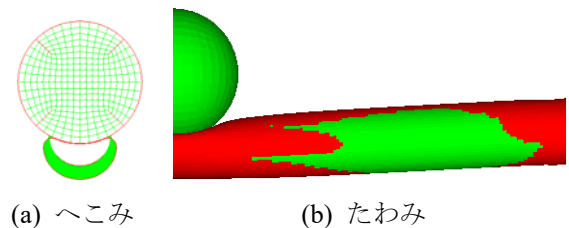
図-2 鋼管はりモデル（異なる位置に衝突）



(a) へこみ

(b) たわみ

図-3 1回の衝突による変形状況



(a) へこみ

(b) たわみ

図-4 6回の衝突による変形状況

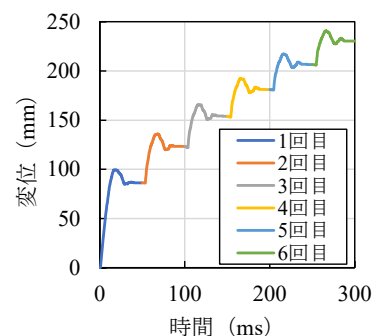


図-5 6回の衝突によるへこみ-時間関係

の衝突によるへこみは約 24mm であった。この理由は、図-6 に示す荷重-時間関係に示すように、1 回目の衝突における最大荷重は約 500kN であり、荷重の継続時間は約 28ms である。一方で、6 回目の衝突では、図-4 に示すように、それまでの衝突で生じたへこみによって、礫と鋼管はりとの接触面積が増加するため最大荷重は 1000~1500kN へ増加し、荷重の継続時間はやや低下するためと考えられる。

図-7 に、6 回の衝突によって生じたはり変位-時間関係を示す。前述したように、1 回目の衝突ではへこみ変形が卓越する一方で、はり変位は非常に小さい。しかし、繰り返し衝突によってへこみが進行すると、最大荷重が増加するため、徐々に残留変位が増加し、6 回目の衝突だけによる残留変位は 16mm となり、1 回目の衝突による残留変位の 4 倍に増加した。

2.3 異なる位置に対する繰り返し衝突

図-8 に、鋼管はりの中央部に礫を衝突させた後、スパン 1/4 の位置に 2 個の礫を同時に衝突させた場合の変形状況を示す。1 回目の衝突は図-3 と同じ結果である。2 回目の衝突の場合は、衝突位置から斜め方向へ進展する塑性領域が連結した。また、鋼管はり下部の塑性領域も拡大した。

図-9 に、鋼管はり中央部およびはり中央からスパン 1/4 (1.5m) の位置のへこみおよびはり変形-時間関係を示す。図中の 50ms までが 1 回目の衝突による応答であり、50ms 以降が 2 回目の衝突による結果を示している。図から、2 回の衝突によって、スパン中央とスパン 1/4 に生じるへこみ変形はほぼ同等であった。はり変形については、はり中央において 2 回目の衝突による残留変位が 4 倍程度大きくなった。これは、図-10 に示すように、2 回目の最大衝撃力は 1 回目の衝突の約 2 倍であり、継続時間は 1 回目とほぼ等しいこと、また 1 回目の衝突によってはり中央部の剛性が低下したため、はり変形が大きくなったものと考えられる。

3. 結 言

本研究では、礫の繰り返し衝突を受ける鋼管はり部材の変形挙動について数値解析的な検討を行った。解析の結果、繰り返し衝突を再現できることがわかった。また、へこみとはり変形の特徴について整理した。

謝辞: 本研究は、令和 3 年度における砂防鋼構造物研究会からの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

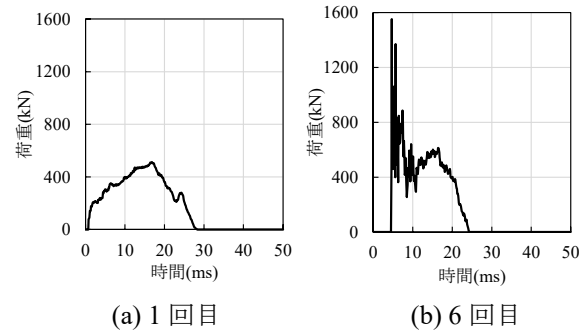


図-6 荷重-時間関係の例

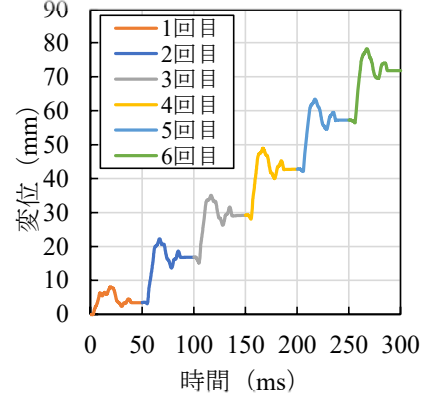


図-7 6 回の衝突によるはり変位-時間関係

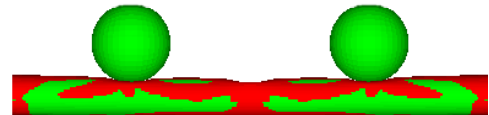


図-8 衝突位置を変化させた場合の変形状況

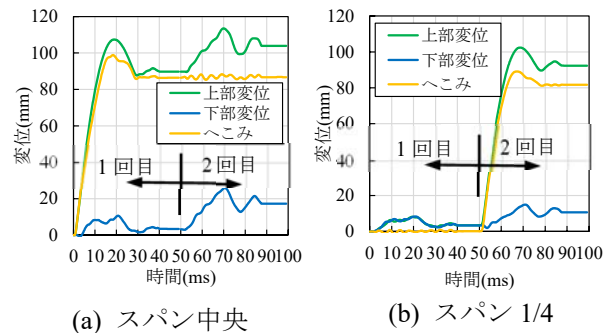


図-9 へこみおよびはり変形-時間関係

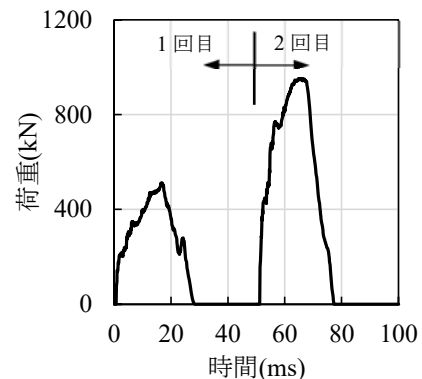


図-10 荷重-時間関係