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

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

１．緒　言

鋼製砂防堰堤に対する現行の設計法[1)]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．この中では，鋼製堰堤全体あるいは堰堤を構成している鋼管部材単体を対象として性能照査が行われる．本研究は，巨礫の衝突を受ける鋼管部材の変形挙動に関する基礎的検討として，鋼管はり単体および鋼管フレーム構造に対する数値シミュレーションを行ったものである．

２．巨礫の衝突を受ける鋼管はり単体の変形解析

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 φ508 mm×板厚 t19 mm の鋼管部材モデルを作成して，礫を鋼管部材に押込む解析および衝突解析を行った．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，スパンは 6.0 m とした．また，礫の変位速度は 0.1 m/s および 10.0 m/s 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（はり変形）を出力した．要素はシェル要素を用いて，鋼材は弾塑性体とした．

2.2　変形特性

図-2(a)に，押込み量（へこみ量）10cm における鋼管部材の塑性化状況を示す．図中の緑は弾性，赤が塑性化した範囲を示す．礫と鋼管の接触部から塑性化が始まり，載荷部裏側へ向かって塑性化が進行した．その後，へこみ量が 20 cm を超えると，載荷部と固定端部に塑性ヒンジが形成された．すなわち，載荷部のへこみ変形とともにはり変形が生じ，現行設計法で仮定した変形特性を示すことがわかる．図-2(b)に，衝突解析で得られた鋼管の塑性化状況を示す．図から，衝突部にへこみ変形が生じ，衝突部と固定端部に塑性ヒンジが形成され，押込み解析の結果と類似した変形性状を示した．図-3 に，衝突解析および押込み解析で得られた荷重－へこみ変形関係を比較して示す．図から，衝突解析と押込み解析結果はほぼ一致することがわかる．

３．巨礫の衝突を受ける鋼管はり単体の変形解析

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を作成した．礫の直径は 1.0，1.5，2.0 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 φ508 mm×板厚 t19 mm とした．鋼管フレーム構造の支点は固定端とし，鋼材の降伏関数は Johnson-Cook モデルを用いた．なお，ここでは鋼材のひずみ速度効果を考慮した．

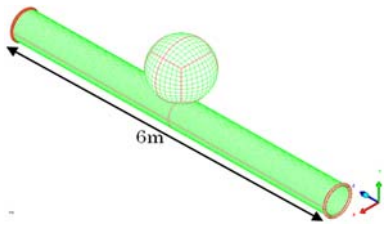
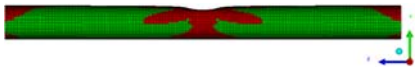


図-1　鋼管部材モデル

(a) 押し込み解析（変位 10 cm）



(b) 衝突解析（時刻 30 ms）

図-2　塑性化状況

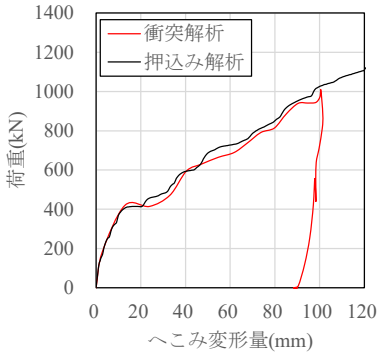


図-3　荷重－へこみ変形関係の比較

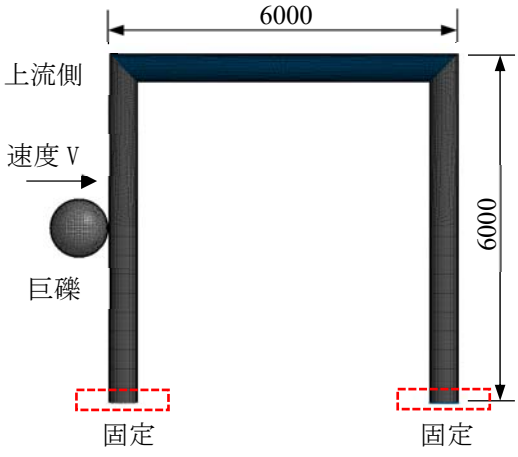


図-4　鋼管フレーム構造の解析モデル
（単位：mm）

3.2　変形特性

図-5 に，礫直径 1.0 m，衝突速度 4.0 m/s および 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 1.0×10^{-8} として表示している．衝突速度 4.0 m/s と 10.0 m/s では，図に示すように衝突部に相当塑性ひずみが集中する．図-5(a)から，衝突速度 4.0 m/s の場合には，衝突部のみに相当塑性ひずみが集中した．衝突速度を増加させると，鋼管フレームへ作用する荷重が増加するため，接合部を介して曲げモーメントが伝達される．そのため，衝突速度 10.0 m/s の場合には，図-5(b)に示すように接合部および下流側の支点にも相当塑性ひずみが発生し，塑性ヒンジを形成しつつある．図-6 は，衝突速度 4.0 m/s および 10.0 m/s における衝突部の相当塑性ひずみ分布を示している．図から，衝突速度が増加するにしたがって，相当塑性ひずみが生じる領域が拡大していることがわかる．

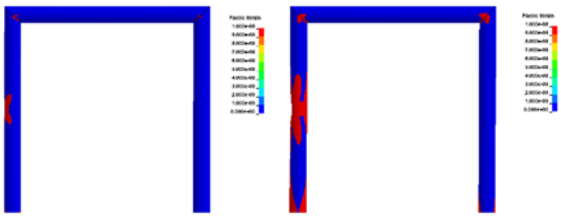
図-7 および図-8 は，それぞれ礫直径 1.0 m の場合の衝突部の荷重－へこみ変形関係および支点反力−天端変位（水平変位）関係を示している．図-7 から衝突速度を増加させると，荷重およびへこみ変形はいずれも大きくなることがわかる．鋼管はり単体の解析と比較すると，フレーム全体の変形が発生することやひずみ速度効果の影響を受けてへこみ変形がやや小さいが，鋼管単体と類似した応答を示した．図-8 に示す支点反力−天端変形関係から，衝突速度を増加させると徐々に鋼管フレーム全体の水平変位も増加し，衝突速度 10.0 m/s における最大水平変位は約 42mm であった．

3.3　巨礫直径が鋼管フレームの変形に与える影響

図-9 に，衝突速度 10.0 m/s で礫の直径を 1.5 m および 2.0 m へ増加させた場合における鋼管フレームの変形状況を示す．図中の色調は相当塑性ひずみ分布を示しており，最大値は 1.0×10^{-8} である．図から，礫の直径を大きくすると，局部的な変形およびフレーム全体の変形が大きくなることがわかる．いずれのケースも，特に接合部と支点に明瞭な塑性ヒンジが形成されている．直径 2.0 m のケースでは，上流側の支点に局部座屈が発生し，フレーム全体にも大きな変形が生じた．

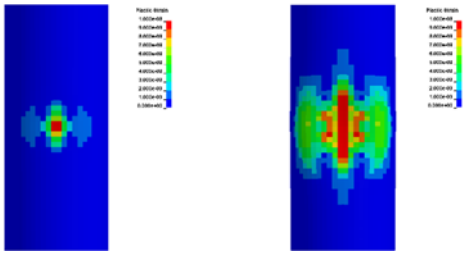
4．結　言

本研究は，巨礫の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．数値解析では，鋼管はり単体およびフレーム構造に対する衝突解析を行った．その結果，鋼管フレームにおいては上流側のフレームには鋼管はり単体と同様な変形が発生し，衝突速度が増加すると曲げモーメントが伝達されて，接合部や支点に塑性ヒンジが形成されることなどがわかった．また，礫の直径が大きくなると，局部変形やフレーム全体の水平変位が増加することがわかった．



(a) 速度 4.0 m/s　　(b) 速度 10.0 m/s

図-5　相当塑性ひずみ分布



(a) 速度 4.0 m/s　　(b) 速度 10.0 m/s

図-6　衝突部の相当塑性ひずみ分布

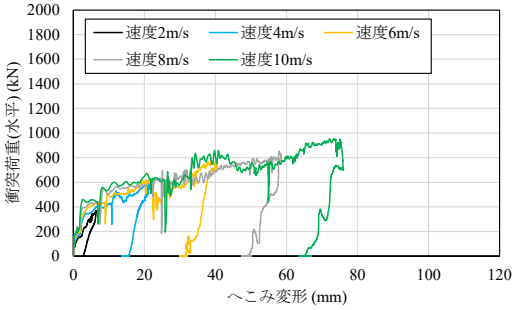


図-7　荷重－へこみ変形関係

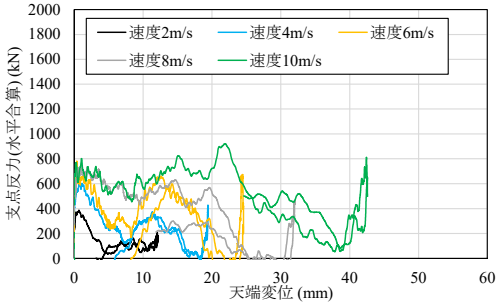
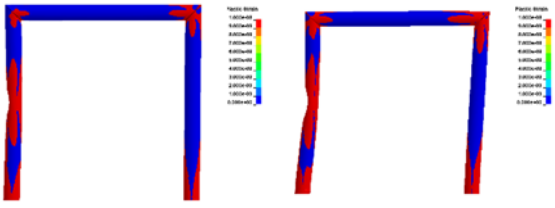


図-8　支点反力－天端変位関係



(a) 直径 1.5 m　　(b) 直径 2.0 m

図-9　巨礫直径が鋼管フレームの変形へ与える影響

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