

重錘落下を受ける鋼製防護柵支柱の3次元弾塑性衝撃応答解析

室蘭工業大学大学院
室蘭工業大学大学院

学生会員
正会員

○沼田 あずさ
近藤 里史

室蘭工業大学大学院
室蘭工業大学大学院

正会員
フェロー
小室 雅人
岸 徳光

1. はじめに

本研究では、落石防護擁壁上に設置する防護柵支柱基部の耐衝撃挙動に着目し、H形鋼支柱を無筋コンクリート躯体に埋設した試験体に関する弾塑性衝撃応答解析を実施した。また、得られた解析結果を実験結果と比較することにより、解析モデルの妥当性を検討した。

2. 実験概要

図1には、試験体の形状寸法と配筋状況を示している。試験体の軸方向鉄筋は、上下端部にD19を各2本（かぶり：50 mm）とし、せん断補強鉄筋（D10）は、側面に100 mm間隔で13本、上下面には後方から7本のみ配置した。なお、試験体のせん断補強鉄筋は落石対策便覧に準拠して、コンクリート内に埋設されたH形鋼のフランジ端部から45°のせん断破壊面が形成されると仮定した場合においても、せん断補強鉄筋による影響が極力小さくなるように配慮した。重錘落下位置は、コンクリート端部から800 mmとし、重錘衝突時の局部座屈を防止するために、厚さ6 mmの補剛材を溶接している。なお、実験時におけるコンクリートの圧縮強度 f'_c は34.5 N/mm²であり、ミルシートによるH形鋼の降伏応力 f_y および破断強度 f_u は、それぞれ354, 449 N/mm²である。衝撃荷重載荷実験は、質量300 kg、先端直径200 mmの鋼製重錘を所定の位置から一度だけH形鋼に自由落下させる単一載荷法に基づいて行っている。実験ケースは落下高さを $H = 0.1, 0.5, 1.0, 1.5$ mに変化させた全4ケースである。本実験の測定項目は、(1) 重錘に内蔵された衝撃荷重測定用ロードセルによる重錘衝撃力 P_i 、(2) レーザ式変位計による変位量 D 、および(3) H形鋼に貼付したひずみゲージからの軸方向ひずみ ε_i である。図2には、本実験における変

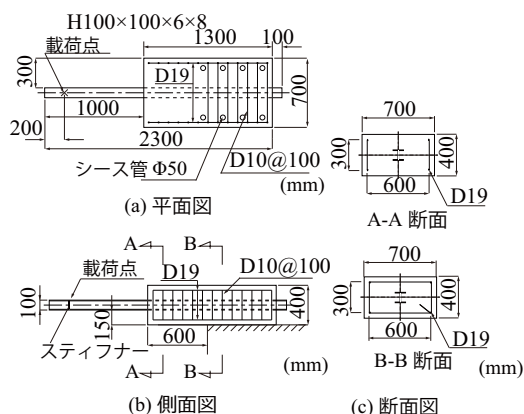


図1 試験体の形状寸法および配筋状況

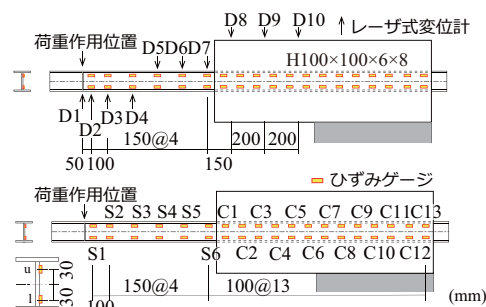


図2 計測位置とその名称

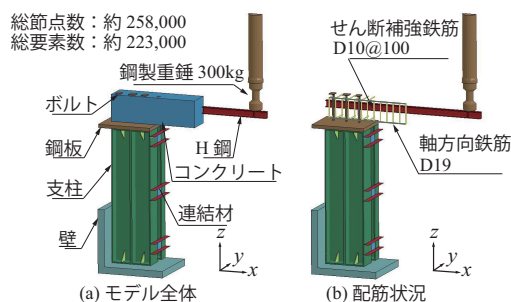


図3 有限要素モデル

位量および軸方向ひずみの計測位置を示している。

2.1 有限要素モデルおよび境界条件

図3には、本研究で用いた数値解析モデルを示している。鋼製底版と山留め材の固定に使用したボルト、コンクリート内部の軸方向鉄筋およびせん断補強鉄筋には2節点梁要素、山留め材の連結材には4節点シェル要素、それ以外はすべて8節点固体要素を使用し、対称性を考慮し1/2モデルとした。境界条件は、剛体壁の底面および側面を完全固定としている。試験体は、実験条件と同様となるように、鋼製底版からボルトを介して固定した。なお、試験体-鋼製底版の間には面と面との接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面（摩擦係数：0.4）を定義した。重錘とH形鋼の上フランジ間、鋼製底版と山留め材間、山留め材と剛体壁間にも、面と面との接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義した。ただし、摩擦は考慮していない。

H形鋼に適用した応力-ひずみ関係には、降伏後の塑性硬化を考慮したバイリニア型の構成則モデルを使用した。単位体積質量 ρ_s 、弾性係数 E_s およびポアソン比 ν_s に関しては、それぞれ $\rho_s = 7.85 \times 10^3$ kg/m³、 $E_s = 200$ GPa、 $\nu_s = 0.3$ と設定した。また、降伏の判定は、von Misesの降伏条件に従うこととし、塑性硬化係数 H' は弾性係数 E_s の1%と仮定している。

コンクリートに適用した応力-ひずみ関係には、圧縮

キーワード：落石防護柵支柱、落石防護擁壁、弾塑性応答解析

連絡先：〒050-8585 室蘭工業大学大学院 くらし環境系領域 社会基盤ユニット TEL/FAX:0143-45-5228

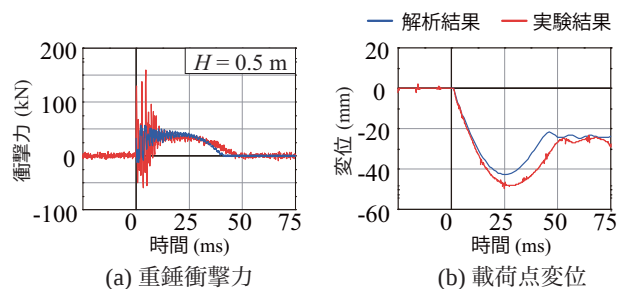
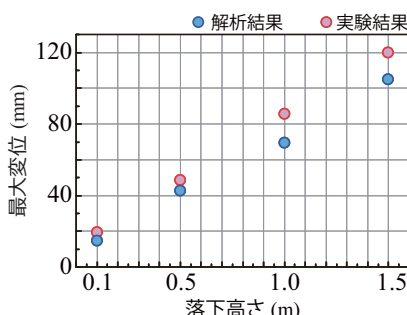
図4 各種応答波形の一例($H = 0.5$ m)

図5 落下高さと最大変位の関係

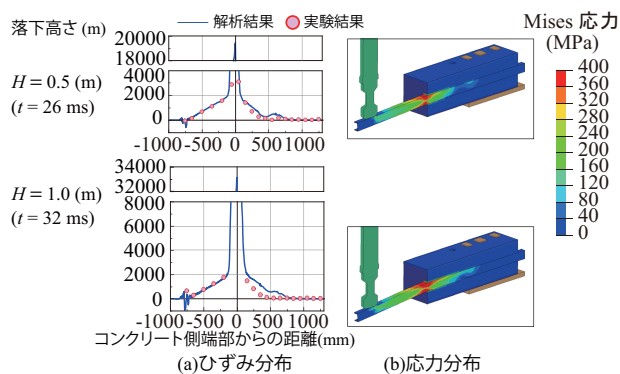


図6 H形鋼の軸方向ひずみ分布と応力分布

側は、圧壊現象を適切に評価できるように、圧縮強度に達した後に放物線状に軟化するモデル (LS-DYNA における材料物性 mat72R3) を適用した。引張側に関しても、引張強度に達した後、線形軟化しひずみが 0.2 % に達した段階で応力が完全に解放されるものとした。なお、引張強度は、解析プログラム内で自動的に評価され、圧縮強度の 1/10 程度となっている。

3. 数値解析結果および考察

3.1 重錘衝撃力および载荷点変位に関する時刻歴波形

図4には、数値解析結果から得られた重錘衝撃力および载荷点変位に関する時刻歴波形の一例として、落下高さ $H = 0.5$ m における結果を実験結果と比較して示している。なお、実験結果および解析結果ともに、横軸は重錘が H 形鋼に衝突した時間を零としている。まず、(a)図に示す重錘衝撃力波形に着目すると、実験結果および数値解析結果はともに台形状の分布に高周波成分が含まれた波形性状を示している。なお、実験結果と数値解析結果を比較すると、重錘衝突初期における解析結果は実験結果を過小評価する傾向にあるものの、全体的な波形性

状は概ね一致していることが分かる。

次に、(b)図に示す载荷点変位に着目すると、実験結果および数値解析結果はともに正弦半波状の応答性状を示しており、その継続時間は重錘衝撃力の継続時間とほぼ対応していることが分かる。また、実験結果と数値解析結果を比較すると、波形の立ち上がりは両者でよく一致しているものの、最大値に関しては数値解析結果が実験結果を過小評価する傾向にある。なお、 $H = 0.5$ m において残留変位が確認されることから、H 形鋼が降伏しているものと推察される。

図5には、全解析ケースから得られた最大変位と落下高さの関係を示している。図より、実験および数値解析結果の最大変位は、落下高さ H とほぼ線形の関係が確認されるものの、数値解析結果では、落下高さが $H > 1.0$ m で実験結果との誤差が大きく示されている。

3.2 試験体のひずみ状況

図6(a)には、落下高さ $H = 0.5, 1.0$ m における最大変位時の H 形鋼上縁の軸方向ひずみ分布 ϵ_u について、実験結果と数値解析結果を比較して示している。また、(b)図には、同時刻における Mises 応力分布を示している。なお、実験結果の軸方向ひずみに関しては、鋼材の平面保持を仮定してウェブ上下縁に貼付した 2 点のひずみゲージ出力 ($\epsilon_{uw}, \epsilon_{lw}$) を用いて線形変化を仮定することで換算した。(a)図より、実験結果および数値解析結果ともに、H 形鋼基部近傍部には降伏ひずみを超える軸方向ひずみが発生していることが分かる。また、重錘衝突近傍やコンクリート躯体内部近傍を除き、落下高さ H にかかわらず H 形鋼の軸方向ひずみには顕著な差が見られない。これは、H 形鋼の基部近傍に塑性ヒンジが形成されたことによるものと推察される。なお、数値解析結果と実験結果を比較すると、数値解析結果は実験結果を概ね再現していることが分かる。

次に、(b)図に示す応力分布に着目すると、基部近傍の上下のフランジに発生する応力は降伏応力 f_y を超えていることが分かる。また、落下高さ H の増大に従い、H 形鋼基部近傍に発生する応力は増加するものの、その領域は拡大せず基部近傍に集中していることが分かる。この現象は実験結果と類似したものであることを確認している。

4. まとめ

- 1) 重錘衝撃力、载荷点変位の数値解析結果は、実験結果を過小評価する傾向にある。
- 2) H 形鋼の軸方向ひずみ分布に関しては、実験結果をほぼ適切に再現が可能である。
- 3) H 形鋼の基部近傍に塑性ヒンジが形成されることを確認した。なお、この現象は実験結果と類似していることが明らかになった。