

衝突位置の異なる貫通型落石防護柵支柱の弾塑性衝撃応答解析

室蘭工業大学大学院 学生員 ○竹内 観月 室蘭工業大学大学院 正会員 小室 雅人
 室蘭工業大学大学院 正会員 瓦井 智貴 勇建設(株) 正会員 林 茂樹
 室蘭工業大学大学院 名誉会員 岸 徳光

1. はじめに

本研究では、落石防護擁壁天端に設置する防護柵支柱の根入れ深さに関する合理的な設計手法を確立することを最終目的として、別途実施した载荷位置を変化させた防護柵支柱モデルの衝撃荷重実験¹⁾を対象に三次元弾塑性衝撃応答解析を実施した。ここでは、実験結果との比較によって数値解析手法の妥当性を確認するとともに、支柱の根入れ深さに関する解析的検討を行った。なお、本数値解析には、構造解析用汎用コード LS-DYNA(ver. R9)を使用している。

2. 実験概要

防護柵支柱モデルに関して、擁壁部の形状寸法は、実擁壁と同様に高さ 2 m、幅 3 m とし、擁壁の天端幅が 500 mm、道路側の勾配は 1 : 0.4 とした。支柱は、実防護柵に通常使用されている H 形鋼 (H200 × 100 × 5.5 × 8) を用い、擁壁天端中央に設置するとともに擁壁底部まで貫通させている。また、衝撃荷重作用位置の支柱ウェブには、フランジの局部座屈を防ぐために厚さ 6 mm の補剛材を溶接した。

表 1 には、実験ケースを一覧にして示している。試験体名 FH に付随する数値は擁壁天端からの衝突高さ (m) を表しており、1.4、0.6、0.4 m と衝突位置を 3 種類に変化させた。表には、実験時の実測衝突速度 V 、コンクリートの圧縮強度 f'_c および H 形鋼の降伏応力 f_y も併せて示している。

衝撃荷重は、ロードセル一体型の重錘(質量: 1,000 kg) を 4 本の PC 鋼棒を用いて門型クレーンの上部吊桁に吊り下げ、振り子式により支柱に衝突させることによって载荷した。なお、実験は各試験体に対して一度だけ重錘を衝突させることとし、落下高さはいずれも $H = 1$ m とした。また、落石防護擁壁モデルはコンクリート基盤上に設置し、载荷による擁壁の運動を回転のみに制限するため、擁壁の道路側端部には L 型鋼のストッパーを設けている。

表 1 実験ケース一覧

試験体名	载荷位置 L (m)	設定重錘落下高さ H (m)	実測重錘衝突速度 V (m/s)	実測入力エネルギー E (kJ)	コンクリート圧縮強度 f'_c (MPa)	H 形鋼降伏強度 f_y (MPa)
FH14	1.4	1.0	5.30	14.0	33.0	350
FH6	0.6		5.65	15.9		
FH4	0.4		4.41	9.7		

測定項目は、1) 重錘衝撃力 P 、2) 重錘の衝突速度 V 、コンクリート擁壁模型の回転 θ や支柱の変形 δ_x を評価するための高速度カメラ撮影(2,000 fps)、および 3) 支柱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。

3. 衝撃応答解析概要

図 1 には、数値解析モデルの一例を示している。使用した要素は全て 8 節点固体要素とし、H 形鋼支柱のフランジおよびウェブは板厚方向に 4 ないし 6 分割した。また、幅方向の要素長は 2 ~ 4 mm 程度、軸方向には 10 mm 程度を基本にして、要素分割を行った。

衝撃荷重は、重錘要素を支柱と接する形で配置し、表 1 に示す実測重錘衝突速度 V を重錘要素の全節点に付加することで与えた。拘束条件は、基礎地盤の底部および側面を完全固定、重錘吊り下げ治具の上部をピン支持とした。接触条件については、重錘と支柱間、擁壁とストッパー間には剥離・滑りを考慮した面と面の接触を定義しており、実験時と同様に擁壁の回転が可能となるように設定した。支柱と擁壁間には剥離・滑りを考慮した面と面の接触(摩擦係数: 0.3)を定義した。また、本解析では、重力を考慮し、自重解析を実施した後、衝撃荷重を作用させている。減衰定数 h は質量比例成分のみを考慮することとし、予備解析に基づき 5% と設定した。

図 2 には、本数値解析で用いた H 形鋼支柱およびコンクリート擁壁の応力-ひずみ関係を示している。支柱には降伏後の塑性硬化による影響を無視し、(a) 図に示すようなバイリニア型の完全弾塑性体モデルを適用した。単位体積質量 ρ_s およびポアソン比 ν_s は、 $\rho_s = 7.85 \times 10^3$ kg/m³、 $\nu_s = 0.3$ とした。なお、降伏応力は表 1 に示す値を用い、降伏判定には von Mises の降伏条件を適用した。

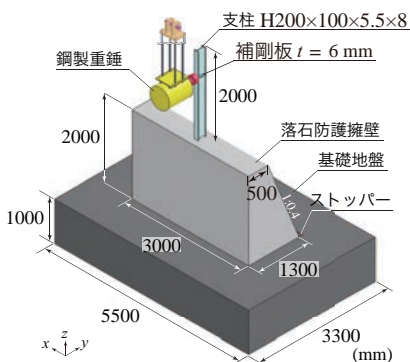


図 1 FE モデル (FH14 試験体)

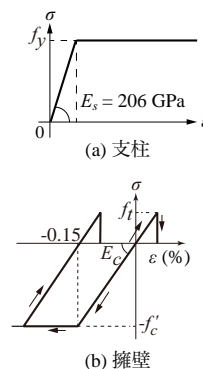


図 2 材料構成則

キーワード: 鋼製支柱, 落石防護擁壁, 衝撃荷重, 有限要素法

連絡先: 〒 050-8585 室蘭工業大学大学院 もの創造系領域 社会基盤ユニット TEL/FAX 0143-46-5228

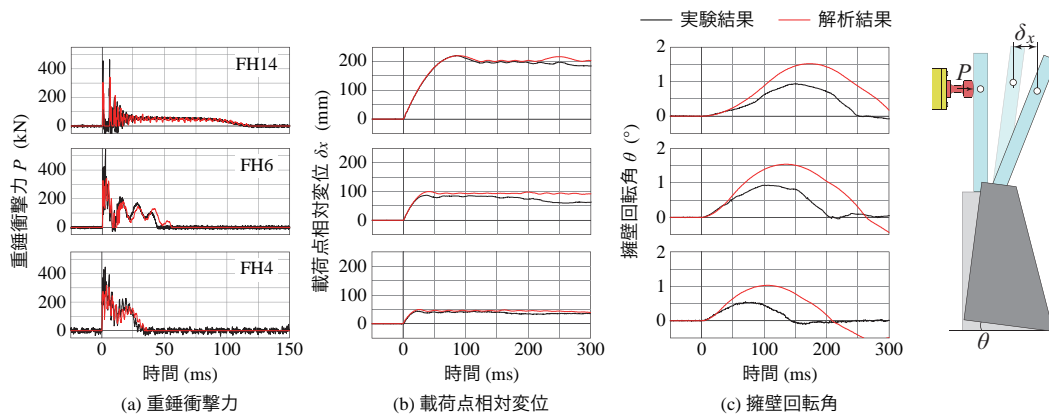


図3 各種時刻歴応答波形の比較

(b) 図には、擁壁の応力-ひずみ関係を示している。圧縮側は圧縮強度に到達した段階で完全降伏するバイリニア型、引張側は引張強度に到達した段階で引張応力を伝達しないモデルを採用した。圧縮強度 f'_c は、材料試験結果に基づき表1に示す値を用いた。引張強度は圧縮強度の1/10と仮定した。単位体積質量 ρ_c およびポアソン比 ν_c は、 $\rho_c = 2.35 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $\nu_c = 0.167$ を用いた。

4. 数値結果および考察

図3には、数値解析より得られた全3ケースの各種時刻歴応答波形を実験結果と比較する形で示している。なお、荷重点変位は擁壁の回転成分を除去した相対変位である。

(a) 図に示す重錘衝撃力波形に着目すると、実験結果は、FH6/4 試験体で衝突初期の継続時間が10 ms程度の正弦半波と高周波成分を伴う第一波およびその後の低周波成分から構成されていることが分かる。一方、FH14 試験体の場合には、正弦半波の波形が示されずに高周波成分のみが励起している。また、荷重初期以降の低周波成分が卓越する領域に着目すると、荷重位置が低いほど周期が短く振幅が大きく示されるとともに、継続時間も短くなる傾向にあることが分かる。数値解析結果に着目すると、実験結果をほぼ適切に再現していることが分かる。(b) 図に示す荷重点の相対変位波形に着目すると、荷重位置の高さの増加に対応して相対変位が大きくなっていることが分かる。この傾向は、数値解析結果でも同様にである。(c) 図に示す擁壁の回転角波形を見ると、実験結果では、FH14/6 試験体に関しては最大1°、FH4 試験体は0.5°程度となっている。一方で、数値解析結果は、いずれの場合も実験結果よりも過大に評価しており、その再現が難しいことが分かる。

図4には、FH14 および FH4 試験体における最大支柱変位発生時の支柱軸方向緑ひずみ分布を、実験結果と解析結果を比較する形で示している。また、数値解析結果から得られる支柱の軸方向ひずみコンター図も合わせて示した。

実験結果の気中部のひずみ分布に着目すると、FH14 試験体の場合には、荷重点から基部に至るひずみ分布は圧縮

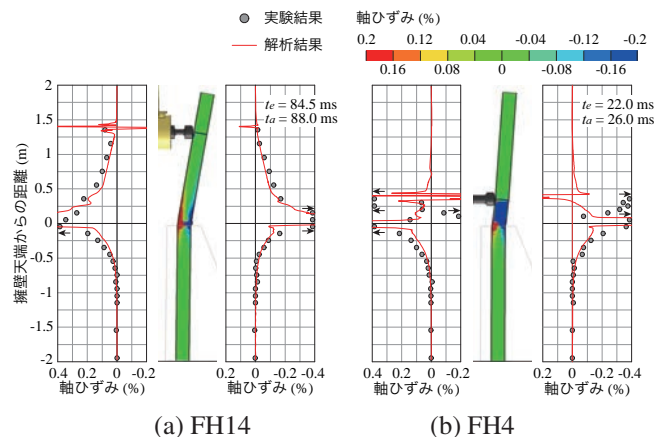


図4 支柱の軸方向ひずみ分布の比較

側と引張側ともにやや放物線状の分布性状を示している。また、支柱基部近傍において0.2%を超えるひずみが発生しており、降伏域に達していることが分かる。FH4 試験体に関しては、ひずみ分布が乱れており、片持ち梁のひずみ分布性状とは大きく異なっている。一方、擁壁内部に着目すると、いずれの試験体もその分布は類似しており、荷重位置の影響は小さいことが分かる。

次に、数値解析結果に着目すると、荷重点近傍では非常に大きなひずみが発生しているものの、荷重点から基部に至るひずみ分布は実験結果を概ね再現していることが分かる。なお、支柱軸方向ひずみが零となる根入れ深さは、実験結果では500~750 mm程度であるのに対し、数値解析結果では800 mm程度として評価される。

5. まとめ

- 1) 各種時刻歴応答波形に関して、解析結果は衝撃力波形および支柱の荷重点変位を概ね適切に評価可能である。
- 2) 支柱の軸方向ひずみ分布に関する解析結果は、実験結果と大略一致する。また、解析結果による支柱の必要根入れ深さは800 mm程度と評価され、実験結果よりも若干大きい。

参考文献

- 1) 岡本淳敏, 近藤里史, 小室雅人, 岸徳光: 実規模擁壁に貫通させた防護柵支柱の静的及び衝撃荷重載荷実験, コンクリート工学年次論文集, Vol. 43, No. 2, pp. 463-468, 2021.