

載荷点を変化させた鋼性防護柵支柱の衝撃応答解析

Impact response analysis on steel post and foundation of rockfall protection fence varying loading point

室蘭工業大学大学院
室蘭工業大学大学院
室蘭工業大学大学院
室蘭工業大学大学院

○ 学生員 沼田あずさ (Azusa Numata)
正 員 小室 雅人 (Masato Komuro)
正 員 近藤 里史 (Satoshi Kondo)
フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

1. はじめに

我が国の山岳部や海岸線の道路沿いには、落石から道路交通や人命を守るために数多くの落石対策工が設置されている。その1つである落石防護柵は、道路際に直接設置される場合の他、落石防護擁壁の天端に設置される場合も多い。落石防護擁壁の上に設置する場合には、その支柱は無筋コンクリート躯体内に埋設されることとなる。この支柱の現行設計は、落石対策便覧¹⁾に基づいて行われているが、落石による動的な作用は考慮せずに静荷重に置き換えて実施されているのが現状である。

しかしながら、実際に落石を受けた鋼製支柱の被害状況を見ると、写真-1に示すように支柱埋込部のコンクリートが剥落する場合も報告されており²⁾、現行設計法の妥当性を検証するとともに、合理的設計法を確立することは喫緊の課題であるものと判断される。

このような背景より、著者等の研究グループでは、落石防護擁壁上に設置されている防護柵支柱の根入れ深さに関する合理的な設計法を確立することを最終目的に、鋼製支柱をモデル化したH形鋼をコンクリート躯体中を貫通させた試験体模型を作製し、曲げが卓越する場合³⁾に加え、曲げと共にせん断力も卓越する場合に対する重錘落下衝撃実験を実施している。

本研究では、これら一連の実験の中から、単一載荷による実験ケースを対象に、三次元弾塑性衝撃応答解析を実施し、実験結果と比較することによって解析手法の妥当性を検証すると共に、コンクリート躯体内の弾塑性応答性状について検討を行った。なお、本数値解析には、汎用構造解析コードLS-DYNA⁴⁾を使用した。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図-1には、一例としてL400試験体の形状寸法と配筋状況を示している。試験体の形状寸法(幅×高さ×長さ)は、700×400×2,400 mmである。基礎部に相当するコンクリート部の形状寸法は700×400×1,300 mmとし、実構造と同様に無筋コンクリート状態を再現するために、鉄筋の配筋は必要最低限に抑えた。従って、軸方向鉄筋は上下端にD19を各2本(かぶり:100 mm)とし、せん断補強鉄筋(D10)は、側面には100 mm間隔で13本、上下面には後方から7本のみを配置した。支柱に相当するH形鋼には、H100×100×6×8を使用した。

なお、本実験では、衝撃荷重作用時の必要定着長を明らかにするために、H形鋼はコンクリート内部を貫通するように配置することとし、その張出し長さはコンクリ



写真-1 支柱基部の損傷例

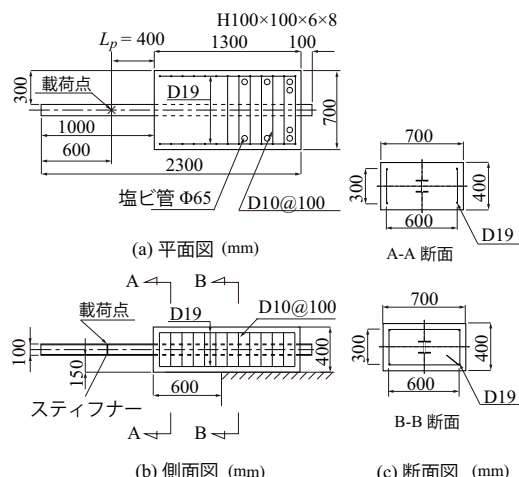


図-1 試験体の形状寸法および配筋状況 (L400 試験体)

ト端部から1,000 mmとした。H形鋼のかぶり厚さは150 mmである。重錘落下位置は、コンクリート端部から400 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。

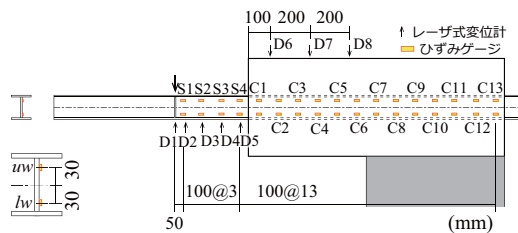
2.2 実験方法および計測項目

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高さから一度だけ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。コンクリート躯体(以後、単に躯体)部は、端部から700 mmまでを完全固定となるように、試験体側端部に空けた貫通孔にボルトを通して鋼製底版(厚さ:50 mm)に固定し、上から鋼板とボルト・ナットで挟み込むように固定している。

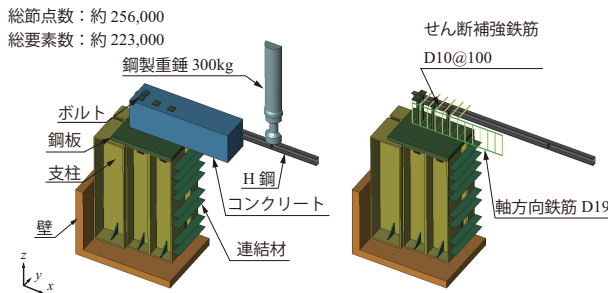
表-1には、本研究で対象とした試験体の一覧を示している。本研究では、重錘落下高さ H と重錘落下位置 L_p を変化させた全9ケースの実験を対象とした。表中の試験体名のうち、 H に付随する数値は設定重錘落下高さ(m)を示している。また、実測入力エネルギー E (kJ)は、実測

表－1 試験体一覧

試験体名	落下位置 L_p (mm)	設定重錘 落下高さ H (m)	実測入力 エネルギー E (kJ)
L800-H01	800	0.10	0.30
L800-H05		0.50	1.49
L800-H10		1.00	3.06
L800-H15		1.50	4.43
L400-H01	400	0.10	0.31
L400-H05		0.50	1.53
L400-H10		1.00	3.26
L400-H15		1.50	4.60
L400-H20		2.00	6.11



図－2 計測位置とその名称



図－3 有限要素モデル (L400 試験体)

衝突速度から換算した入力エネルギーである。

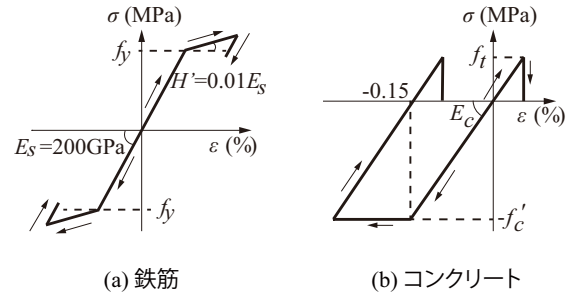
図－2には、L400 試験体におけるひずみゲージ及びレーザー式変位計の計測位置を示している。

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、(2)レーザー式変位計による変形量、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である。なお、実験終了後には、ひび割れ分布の観察を行った。

3. 数値解析概要

3.1 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。数値解析モデルは、実験における境界条件を適切に反映させるために、試験体の他、固定用治具(山留め材他)および剛体壁をモデル化し、対称性を考慮し1/2モデルとした。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た。



図－4 材料構成則

境界条件は、剛体壁および山留め材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)を定義している。また、本解析では衝撃载荷初期の応答に着目することとし、減衰および重力については考慮していない。

(1) H形鋼および鉄筋

図－4 (a)には、H形鋼に適用した応力－ひずみ関係を示している。ここでは、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 $\rho_s = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $E_s = 200 \text{ GPa}$ 、 $\nu_s = 0.3$ 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%と設定している。また、H形鋼の降伏応力 f_y および破断強度 f_u は、ミルシートより、L800 試験体では、354 MPa および 449 MPa、L400 試験体では、338 MPa および 449 MPa である。

なお、コンクリート躯体内の軸方向鉄筋およびせん断補強筋に関しては、予備解析の結果から降伏状態に至らないことが確認されたことから、弾性体と仮定した。

(2) コンクリート

図－4 (b)には、コンクリートに適用した応力－ひずみ関係を示している。本研究で適用したモデルは、圧縮側に関してはひずみが0.15%に達した時点で圧縮強度で完全降伏し、引張側に関しては引張強度に達した時点で応力が完全に解放されるモデル (LS-DYNA⁴) における材料物性 mat14) を適用した。コンクリートの圧縮強度 f'_c は、別途実施した材料試験から、それぞれL800 試験体では34.5 MPa、L400 試験体では26.9 MPaであった。なお、引張強度は、圧縮強度の1/10と設定している。

(3) 固定治具、鋼製底版、重錘および鉄筋

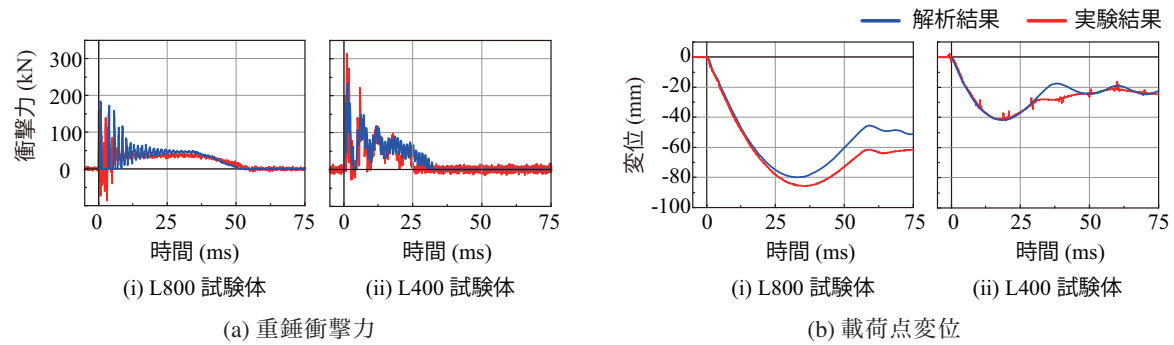
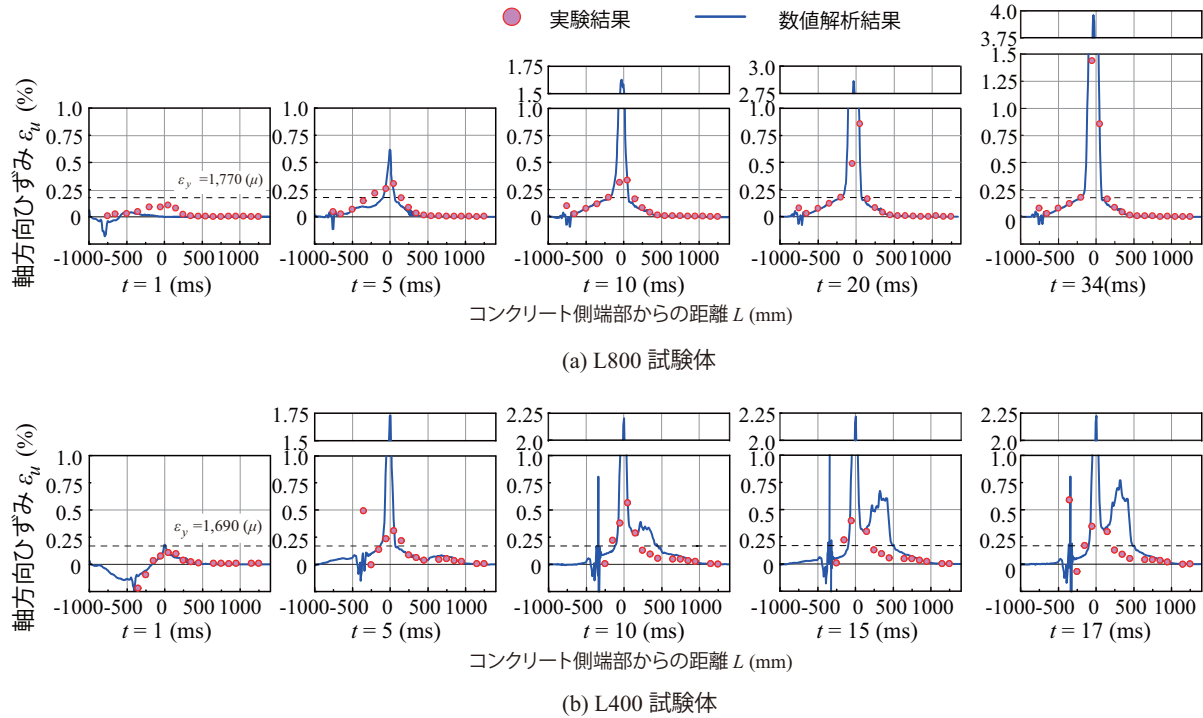
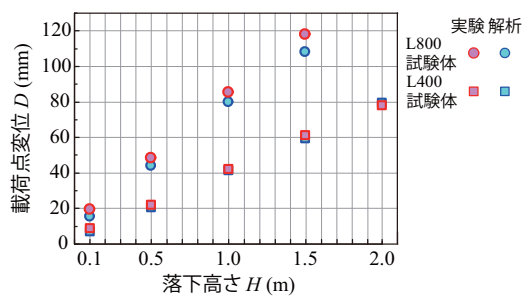
試験体の固定に使用した山留め材や鋼製底版、鋼製重錘および鉄筋に関しては、実験時に塑性変形が確認されていないことより、弾性体モデルを適用した。

弾性係数 E_s 、ポアソン比 ν_s および単位体積質量 ρ_s は、それぞれ $E_s = 200 \text{ GPa}$ 、 $\nu_s = 0.3$ 、 $\rho_s = 7.85 \text{ g/cm}^3$ と設定した。なお、重錘の単位体積質量 ρ_w は、重錘質量 300 kg を解析モデルの重錘体積で除した値を入力している。

4. 数値解析結果および考察

4.1 重錘衝撃力および载荷点変位に関する時刻歴波形

図－5には、一例として $H = 1.0 \text{ m}$ における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


 図－5 重錘衝撃力および荷点変位波形の比較 ($H = 1.0$)

 図－7 最大変位時におけるひずみ分布 ($H = 1.0$ m)

 図－6 落下高さ H と最大変位の関係

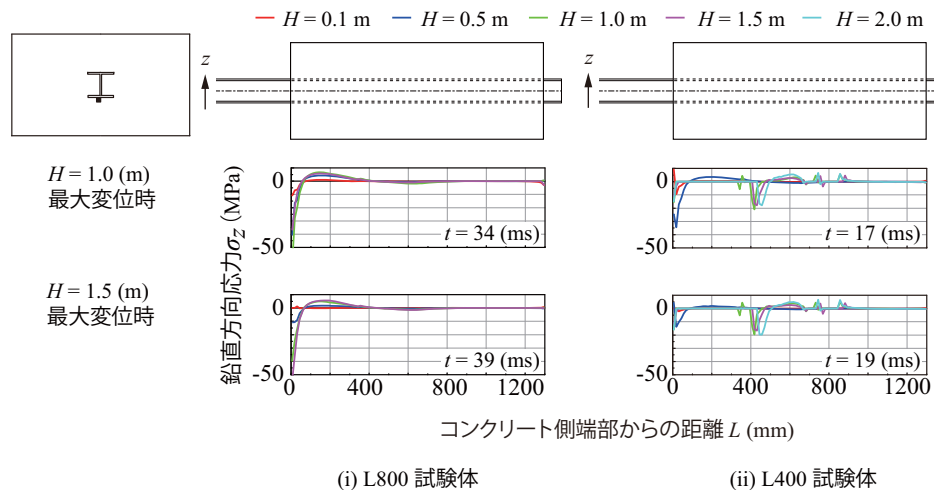
刻歴波形を実験結果と比較して示している。なお、横軸は重錘がH形鋼に衝突した時間を原点に取っている。

まず、(a)図に示す重錘衝撃力に着目すると、L800試験体において実験結果および数値解析結果共に正弦半波に高周波成分が含まれた波形性状を示している。一方、L400試験体においては、実験結果および数値解析結果共に大略台形状の波形の他、周期が5~6 ms程度の正弦波とそれ以上の高周波成分が合成された波形性状を示している。こ

の正弦波は、重錘と鋼材の相互作用によるものと推察される。

実験結果と数値解析結果の最大値を比較すると、L800試験体においては概ね同等の値を示しているが、L400試験体においては前者は約300 kNであるのに対し、後者は約250 kNと小さく示されている。また、継続時間を比較すると、L800試験体、L400試験体ともに、概ね同等の値を示している。

次に、(b)図に示す荷点変位に着目すると、荷点変位は正弦半波状の応答を示しており、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。L800試験体における数値解析結果の最大変位は、約80 mmであり、実験結果の約85 mmに対して94%程度となっている。また、残留変位においても解析結果は約50 mmであるのに対し、実験結果では約60 mmであり、前者が後者よりも84%程度小さい値を示している。一方、L400試験体においては最大値および残留変位ともに、実験結果とほぼ一致している。



図－8 最大応答時における H 形鋼ウェブ直下コンクリート要素の鉛直方向応力の軸方向分布

図－6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、L800 試験体においては $H = 1.5$ m で実験結果との誤差が大きく示されている。一方で L400 試験体においては落下高さと最大変位の関係をほぼ適切に再現可能であることが分かる。

4.2 試験体のひずみ分布

図－7には、 $H = 1.0$ m において各時刻における 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、H 形鋼の降伏応力から得られる降伏ひずみも合わせて示している。図中の横軸は、躯体前面端部からの距離である。図より、実験結果において、L800 試験体および L400 試験体は、両者ともに躯体前面近傍にて降伏ひずみを大きく超えるひずみが発生しており、塑性ヒンジが形成されているものと推察される。また、L800 試験体と L400 試験体の両者を比較すると、L800 試験体では躯体前面部にひずみが集中しているのに対し、L400 試験体では躯体内部にもひずみが発生し、ひずみ分布に広がりがあることが分かる。

解析結果と実験結果を比較すると、L800 試験体の場合には、 $t = 1$ ms においては実験結果は躯体前面部で塑性ひずみに近い値を示しているが、数値解析結果では未だ応力波が伝播していないような状況を呈している。その後、 $t = 5$ ms では実験結果は躯体前面で塑性ひずみを越える値を示すものの載荷点から線形な分布性状を示している。一方、数値解析結果では躯体前面で塑性ひずみを大きく越えているものの、ひずみは躯体前面で急激に増加する傾向を示している。 $t = 10$ ms 以降に関しては、数値解析結果は実験結果をほぼ適切に再現できていることが分かる。

一方、L400 試験体では、 $t = 1, 5$ ms においては、数値解析結果は実験結果を概ね再現できていることが分かる。 $t = 10$ ms 以降において、H 形鋼部は概ね実験結果を再現できている。しかしながら、躯体内部においては実験結果は単調に減少する傾向を示しているのに対して、数値解析結果では躯体前面から 500～900 mm においてひずみが再度増加傾向を示しており、実験結果との乖離が大きい。これは、数値解析において、躯体内部でのコンクリートが著

しく損傷する傾向を示したことによるものと推察される。

4.3 試験体の応力状況

図－8には、数値解析結果の落下高さ $H = 1, 1.5$ m 落下時の最大変位発生時における躯体内 H 形鋼ウェブ直下のコンクリートの鉛直方向応力分布図を示している。図より、L800 試験体の場合には前述のひずみ分布に対応して躯体前面部で最も大きな応力を示し指数関数的に減少していることが分かる。一方、L400 の場合には躯体前面部では L800 の場合と類似した性状を示しているが、躯体前面から約 450 mm 近傍で最大 20 MPa 程度の支圧応力が発生しており、上述のひずみ分布とほぼ対応した応答結果を示している。これは、躯体コンクリートの損傷と関連していると推察される。詳細は今後の課題としたい。

5. まとめ

本論文では、落石防護擁壁上に設置する防護柵支柱の根入れ深さを合理的に決定することを最終目的に、H 形鋼支柱を無筋コンクリート躯体中を貫通させて設置し、載荷位置を曲げが卓越する場合と曲げと共にせん断力も卓越する場合を対象に、弾塑性応答解析を行った。本研究で得られた事項を整理すると、以下のように示される。

- 1) 重錘衝撃力、載荷点変位の数値解析結果は実験結果を概ね再現が可能である。
- 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。

参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会：落石対策便覧，2017.12
- 2) 株式会社シビル ホームページ
<https://www.rcnet.co.jp/product/list/listless.php> (最終閲覧日：2019 年 11 月 12 日)
- 3) 近藤里史，小室雅人，岸 徳光，山元康弘：鋼製防護柵支柱に関する重錘落下衝撃荷重実験，コンクリート工学年次論文集，Vol. 41, No. 2, pp. 691-696, 2019
- 4) Hallquist, J. O., LS-DYNA Version R9 User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2016.