

載荷点を変化させた鋼製防護柵支柱に関する重錘落下衝撃荷重載荷実験

Drop-weight impact loading tests of steel posts for rockfall protection fence varying length of moment arm

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
(株)砂子組
室蘭工業大学大学院

○正員 近藤 里史 (Satoshi Kondo)
正員 小室 雅人 (Masato Komuro)
フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
正員 山元 康弘 (Yasuhiro Yamamoto)
学生員 沼田あずさ (Azusa Numata)

1. はじめに

わが国では、高度経済成長期に急傾斜地近くまで宅地開発が進み、また道路網も急崖斜面に沿って建設されてきた。一方、近年の大型台風の襲来や集中豪雨などによって、土石流などの自然災害が各地で発生している。急峻な沢地形には、土石流を抑制するために従来から多くの堰堤が設けられてきた。しかしながら、経年変化によって堰体内に土砂が貯まり満砂状態となり、さらに土石流発生時には流木や巨石も流下することから、それらを抑制するために堰堤上に鋼製支柱を親柱とする防護柵を設置する例も報告されている。また、急崖地に沿って建設されている道路では、**図-1**に示すような、落石防護擁壁の天端に落石防護柵が多数設置されている¹⁾。このような堰堤や落石防護擁壁は、通常重力式の無筋コンクリート構造であり、鋼製支柱は無筋コンクリート部に箱抜きして設置されるのが一般的である。

このような鋼製支柱の根入れ深さに関する現行設計は、落石対策便覧(以下、便覧²⁾)に基づいて行われているが、落石や土石流等による動的な作用は考慮せず、静荷重に置き換えて処理されている。しかしながら、実際に落石などの衝撃荷重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し、柵が機能を失うことが報告されている³⁾。したがって、落石防護柵の安全性向上のためには、支柱根入れ深さに関する現行設計法の妥当性を検証するとともに、落石衝突



写真-1 支柱基部の損傷例³⁾

荷重に対する合理的な設計法を確立することが極めて重要であるものと判断される。

このような背景より、本研究では、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、鋼製支柱において昨年度実施した曲げが卓越する場合⁴⁾に加え、曲げと共にせん断力も卓越する場合に着目し、重錘落下位置の異なる衝撃荷重載荷実験を実施して、その耐衝撃挙動や根入れ深さ、コンクリート躯体のひび割れ分布性状等について検討を行った。また、便覧²⁾から算定される必要根入れ深さを実験結果と比較することにより、その妥当性に関する検討も行っている。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

試験体の形状寸法と配筋状況は、L400 試験体と L800 試験体で同一であることより、既往の研究⁴⁾を参照頂くこととし、ここでは紙面の都合により省略する。なお、両試験体の形状寸法(幅×高さ×長さ)は、700×400×2,400 mm であり、支柱基礎部に相当するコンクリート躯体部の形状寸法は 700×400×1,300 mm である。また、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ている。

支柱に相当する H 形鋼は、室内実験であることより試験体の重量をできるだけ小さくしたいことから、実部材よりも桁高の小さい、H100×100×6×8 を使用した。ただし、H 形鋼のかぶり厚さは標準断面と同じ 150 mm となるように配慮している。なお、本実験では、衝撃荷重作用時の根入れ深さ(定着長)を明らかにするために、H 形鋼はコンクリート躯体内部を貫通するように配置することとし、その張出長さは 1000 mm とした。重錘落下位置は、

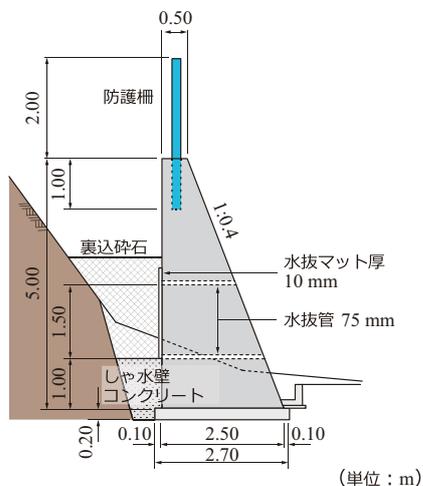


図-1 防護柵基礎を兼ねた落石防護擁壁の例

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



写真-2 衝撃荷重実験状況

の位置に添付している。写真-2には、実験装置と試験体の設置状況を示した。

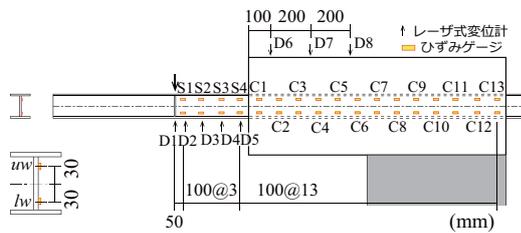


図-2 計測位置 (L400 試験体)

コンクリート端部から 800 mm もしくは 400 mm とし、載荷点部における H 形鋼の局部座屈を防止するために、載荷点ウェブ部に厚さ 6 mm の補剛材を添加した。

2.2 実験方法および計測項目

衝撃荷重実験は、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。

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 ケースの実験を実施した。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、実測衝突速度から換算した値である。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。また、H 形鋼の降伏応力 f_y および破断強度 f_u は、それぞれミルシートより、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。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) レーザ式非接触型変位計によるたわみ量 D_i 、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_u 、である。また、実験終了後には、コンクリート側面のひび割れ性状の観察を行った。なお、これらの物理量は、デジタルデータレコーダにて一括収録を行っている。そのサンプリング周波数は衝撃荷重時で 10 kHz とした。図-2には、変位計の設置位置とひずみゲージ添付位置を示している。なお、ひずみゲージはコンクリートとの付着性能をできる限り損なわないように H 形鋼の中立軸から上下 30 mm

3. 実験結果

3.1 各種時刻歴波形

図-3には、衝撃荷重実験から得られる重錘衝撃力 P_i および載荷点変位 D_i に関する時刻歴応答波形を示している。なお、横軸は重錘が H 形鋼に衝突した時刻を基準としている。(i) 図より、L800 試験体と L400 試験体の重錘衝撃力を比較してみると、L800 試験体では正弦半波あるいは台形状の波形に高周波成分が合成された波形性状を示している。最大重錘衝撃力は、重錘衝突初期に発生し落下高さ H の増加とともに増加する傾向を示す。しかしながら、 $t = 10$ ms 以降では $H = 0.1$ m の場合を除いて、いずれの場合も約 40 kN 弱で一定値を示した後に除荷状態に至っていることが分かる。これは、鋼材のひずみ硬化を無視し完全弾塑性体と仮定した場合の塑性荷重 $P_z (= 38.2$ kN) (塑性断面係数 $Z_p = 86.4 \times 10^3$ mm³ を考慮) に類似していることから、衝撃荷重実験によって基部近傍に塑性ヒンジが形成されたことに起因しているものと推察される。一方 L400 試験体の場合には、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。上述の正弦波が卓越する時点での中央値は約 70 kN 程度で一定値を示した後に除荷状態に至っている。これは塑性荷重 $P_z (= 73.0$ kN) とほぼ対応しており、L800 試験体と同様の傾向を示している。

また、主波動継続時間は、いずれの落下高さにおいても L400 試験体の場合が L800 試験体の場合の約 50 % 程度である。一方、塑性ヒンジ状態に至った時点における平均衝撃力を求めると、それぞれ 38, 58 kN 程度であり、L400 試験体は L800 試験体のほぼ 1.5 倍程度である。これは、静的な塑性モーメントの観点から考察すると、両者の塑性荷重の比を取ることにより 1.9 倍になることとほぼ対応している。

また、落下高さ $H = 0.1$ m の場合には、落下高さが低いことにより、高周波成分を除去した場合における最大衝撃力 P_{imax} が静荷重時での最大値 P_{smax} よりも若干小さく、かつ (ii) 図に示す応答変位波形において残留変位がほぼ零であることから、弾性的な応答性状を示しているものと判断される。

(ii) 図に示す載荷点変位波形を見ると、落下高さ H が

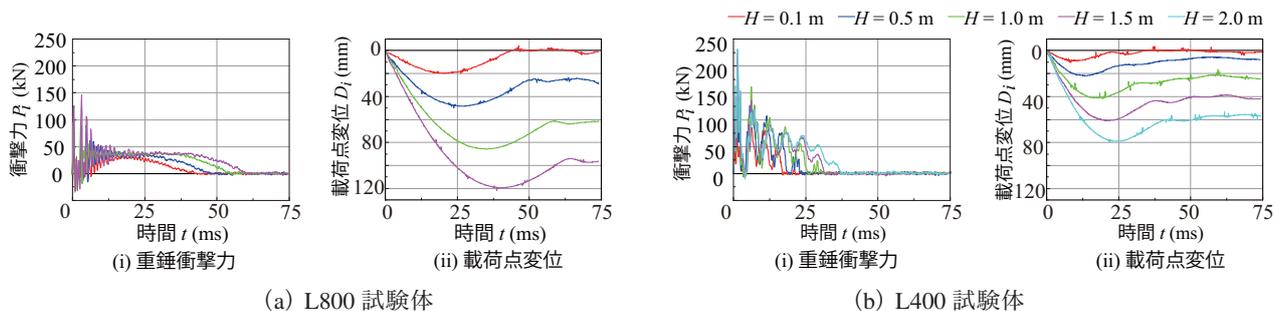


図-3 重錘衝撃力 P_i および載荷点変位 D_i に関する時刻歴応答波形の比較

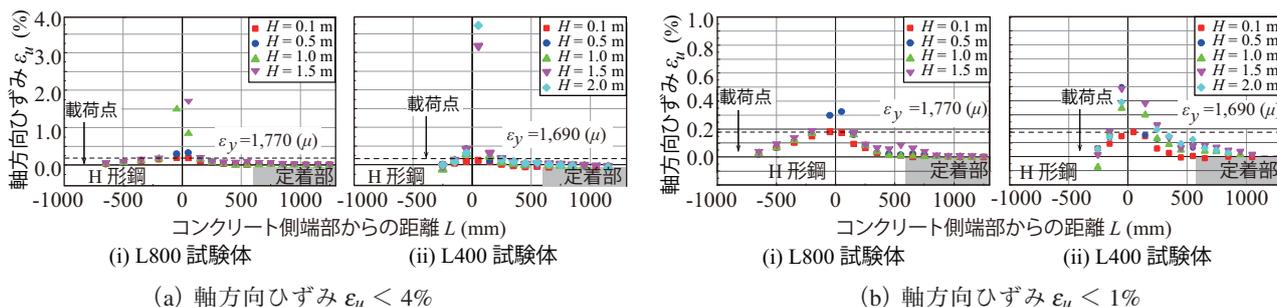


図-4 最大変位時におけるフランジ上縁の軸方向ひずみ分布(衝撃荷重載荷実験)

大きいほど最大変位も大きくなる傾向にあることが確認される。また、L400 試験体における最大変位及び主波動継続時間は、L800 試験体と比較して、衝撃力の主波動継続時間と同様にいずれも約 50 % 程度の値を示している。

3.2 ひずみ分布性状

図-4 には、最大変位時における H 形鋼上縁の軸方向ひずみ ϵ_u 分布を比較して示している。重錘落下位置近傍の S1 断面では、せん断変形成分が卓越し複雑なひずみ状態になっていることより除外した。

図より、弾性的な応答性状を示す $H = 0.1 \text{ m}$ に着目すると、軸方向ひずみは、L800 および L400 試験体共に載荷点から基部に向かってほぼ線形状に増加していることが分かる。一方、コンクリート躯体内部において軸方向ひずみは徐々に減少し、コンクリート躯体前面から 450 mm の位置ではほぼ零レベルに至っている。

$H = 0.5 \text{ m}$ の場合には、L800 試験体と L400 試験体共に、H 形鋼の躯体前面近傍に降伏ひずみを超えるひずみが発生している。さらに、落下高さが $H = 1.0 \text{ m}$ 以上の場合において、両試験体共に躯体前面近傍にさらに大きな軸方向ひずみが発生し、塑性ヒンジの状態に至っていることが窺える。

また、L800 試験体の場合には、重錘衝突位置近傍や躯体前面近傍を除き、落下高さ H にかかわらず H 形鋼の軸方向ひずみには、顕著な差が確認されない。一方、L400 試験体の場合には塑性ひずみを超えた領域が広がっており、その領域はコンクリート躯体内で広く分布している。これは、L400 試験体においてもコンクリート躯体前面近傍において塑性ヒンジが形成されたものの、入力エネルギーの増加と共に H 形鋼の支圧力も増加し、躯体前

面近傍が損傷したことによるものと推察される。そのため、L800 試験体ではいずれの落下高さにおいても、コンクリート躯体前面から概ね 450 mm 程度で軸方向ひずみは零を示しているのに対し、L400 試験体においてはコンクリート躯体前面から概ね 1000 mm 近傍において軸方向ひずみが零レベルに達している。

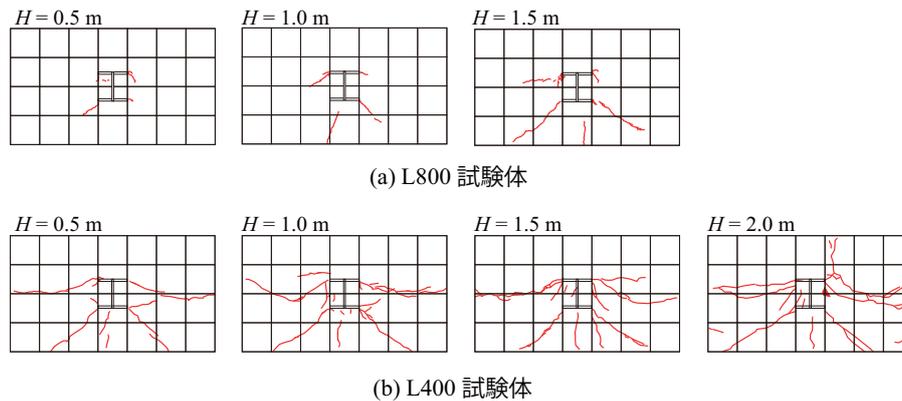
また L800 試験体では、コンクリート躯体前面近傍においてほぼ同程度のひずみを確認したが、L400 試験体ではコンクリート躯体内部の $L = 50 \text{ mm}$ 付近のひずみが卓越している。これは、L400 試験体の場合には、塑性ヒンジの位置が若干コンクリート内部に移行していることを暗示している。

3.3 ひび割れ分布

図-5 には、実験終了後の各試験体における正面のひび割れ分布性状を示している。図において、落下高さ $H = 0.1 \text{ m}$ の場合には、ひび割れが確認されなかったことにより省略した。

(a) 図に示す L800 試験体における落下高さ $H = 0.5 \text{ m}$ に着目すると、上下フランジ端部から下方に向かってひび割れが進展している。また、落下高さ $H = 1.0 \text{ m}$ の場合には、 $H = 0.5 \text{ m}$ と比較してひび割れがより進展している。なお、 $H = 1.0 \text{ m}$ の場合において、ひび割れが載荷点を中心に対称に分布していない。これは、重錘が若干偏心して衝突したことによるものと推察される。 $H = 1.5 \text{ m}$ の場合には、上フランジからのひび割れはほぼ水平に進展している。また、下フランジからのひび割れはほぼ 45° 下方に進展しており、せん断破壊によるものと推察される。

一方、(b) 図に示す L400 試験体の場合には、落下高さに関わらず L800 試験体よりもコンクリートの損傷が大き



図－5 実験終了後におけるひび割れ分布性状の比較

く、せん断成分が卓越していることを示唆している。落下高さ $H = 0.5 \text{ m}$ の場合には、載荷点を中心にほぼ対称にひび割れが進展しており、上フランジからほぼ水平に、また下フランジからはほぼ 45° 下方にひび割れが進展している。また、下フランジ中央部から鉛直下方に進展するひび割れも確認される。これは、大きな支圧力が作用しポアソン効果によって引張応力が発生したことによるものと推察される。落下高さ $H = 1.0 \text{ m}$ 、 1.5 m と大きくなるに従い、さらにひび割れが進展し、落下高さ $H = 2.0 \text{ m}$ では微小なコンクリートの剥落が確認された。

4. 根入れ深さに関する検討

便覧²⁾では、擁壁基礎における柵支柱根入れ部において、曲げモーメントと押し抜きせん断に対して照査をすることが規定されている。ここでは、便覧に基づいて算定される必要根入れ深さ d と実験結果の比較を試みる。

便覧に基づいた L800 試験体及び L400 試験体の必要根入れ深さ d は、それぞれ $d \approx 350 \text{ mm}$ 、 450 mm 程度であった。ここで、図－4 に示す H 形鋼の軸方向ひずみ分布と便覧に基づく必要有効深さ d を比較すると、L800 試験体の場合には、衝撃荷重載荷時において、H 形鋼が降伏ひずみに達する落下高さ $H = 0.1 \text{ m}$ の場合には $L = 450 \text{ mm}$ でほぼ零ひずみを示しているものの、それ以上の落下高さの場合には $L > 500 \text{ mm}$ となっており、実験結果の根入れ深さは便覧の値よりも大きく評価される。

一方、L400 試験体の場合において、H 形鋼が降伏ひずみに達する落下高さ $H = 0.1 \text{ m}$ の場合には $L = 500 \text{ mm}$ でほぼ零ひずみを示しているものの、それ以上の落下高さの場合には $L = 1000 \text{ mm}$ 程度に達している。これより、L400 試験体の場合においても、実験結果の根入れ深さは便覧値よりも大きく評価されることが明らかになった。

また、便覧では、塑性ヒンジの形成位置を根入れ深さ d の $1/2$ と仮定しているが、本実験結果からは、曲げが卓越する L800 試験体の場合には躯体前面部、曲げと共にせん断が卓越する L400 試験体の場合には躯体前面から約 50 mm 躯体内に入った箇所が発生しており、便覧の仮定とは異なる傾向にあることが確認された。ただし、これらの結果は、H 形鋼が躯体内を貫通させた状態下での実験に

基づいていることに留意する必要がある。

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、重錘落下衝撃荷重載荷実験を実施した。本研究で得られた事項を整理すると、以下のよう

- 1) 落下位置にかかわらず、コンクリート躯体前面近傍に塑性ヒンジが形成される。
- 2) その塑性ヒンジ発生位置は、曲げが卓越する場合にはコンクリート躯体前面に、また曲げと共にせん断力が卓越する場合には躯体前面が損傷することにより躯体内部に移行する傾向を示す。
- 3) 曲げと共にせん断力が卓越する場合には、コンクリート躯体のひび割れ等による損傷が大きくなることが明らかになった。
- 4) 実験結果の H 形鋼の根入れ深さは、便覧に基づいて算定した値よりも大きく評価される。

以上の結果を基に、今後は実支柱と同様に有限な根入れ長を設定した実験を継続して実施する予定である。

参考文献

- 1) (社)日本河川協会：建設省河川砂防技術基準(案)同解説設計編 II, 2008.
- 2) (公社)日本道路協会：落石対策便覧, 2017.
- 3) 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)
- 4) 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載荷実験, コンクリート工学年次論文集, Vol. 41, No. 2, pp. 691-696, 2019
- 5) (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説, III コンクリート橋編, 2012.
- 6) (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説, III コンクリート橋・コンクリート部材編, 2017.