

実規模落石防護柵支柱の静的耐荷性状に関する載荷方法の影響

Influence of loading method on static load-carrying capacity of steel posts for prototype rockfall protection fence

(株)砂子組 ○正会員 近藤 里史 (Satoshi Kondo) 室蘭工業大学 正会員 小室 雅人 (Masato Komuro)
 室蘭工業大学大学院 正会員 林 茂樹 (Shigeki Hayashi) 勇建設 (株) 正会員 岡本 淳敏 (Atsutoshi Okamoto)
 室蘭工業大学 正会員 瓦井 智貴 (Tomoki Kawarai) (株)砂子組 正会員 佐藤 昌志 (Masashi Sato)
 室蘭工業大学大学院 学生員 竹内 観月 (Mizuki Takeuchi) 室蘭工業大学 名誉会員 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落石防護柵が数多く設置されている。その防護柵支柱は、コンクリート基礎に埋設される場合の他、落石防護擁壁天端に埋設される場合も多い。特に無筋コンクリート製である落石防護擁壁天端に埋設される場合には、一般に擁壁天端部に箱抜きして埋設される。

無筋コンクリート擁壁への防護柵支柱の根入れ深さに関する現行設計は、落石が衝突したことによる動的挙動は考慮せず、落石対策便覧(以後、便覧)¹⁾に即して静力学に基づいて行われている。しかしながら、支柱埋設部近傍のコンクリートが剥落するような事例も報告されていることから、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、著者らの研究グループは、既存の設計法の妥当性を検証し合理的な設計法を確立することを目的として、種々の小型実験や支柱を貫通設置した実規模実験を実施している。また、それらの実験結果に基づき、高さが2mの実規模落石防護擁壁天端に根入れ深さを変化させた落石防護柵支柱を埋設設置した場合における静荷重載荷実験²⁾も実施した。その結果、根入れ深さが300mmの場合には擁壁の押抜きせん断破壊によって終局に至ることが明らかになった。しかしながら、根入れ深さが700mmの場合において、最大荷重が支柱の計算全塑性荷重を上回り既往の実験結果と異なる性状を示した。その要因としては、押し込み型の載荷治具を用いたことにより、支柱変形時に設定位置への載荷と共に載荷点位置のずれ防止のために支柱に溶接したL形鋼を介して荷重が作用したことが想定される。

本研究では、静荷重載荷時における真の支柱の荷重-変位関係を得ることを目的に、支柱変形時に載荷治具の一部が支柱に接触することを防止した引張式載荷法に基づいて実験を実施し、既往の実験結果²⁾と比較する形で検討を行った。実験は、支柱の根入れ深さを700mmに限定し、既往の実験²⁾同様、擁壁本体は回転が生じないようにコンクリート基礎に定着固定させることとした。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図-1には、本研究に用いた試験体の形状寸法について示している。試験体は高さ2m、幅3m、天端幅0.5mであり、道路側の勾配は1:0.4である。なお、擁壁幅に関しては、実防護柵支柱が3m間隔に設置されることから、支柱1本分を考慮することとし3mと設定した。支柱は、根入れ深さを700mmとし、荷重作用点のウェブには局部座屈を防止するために厚さ6mmの補剛材を溶接している。なお、荷重載荷位置は、擁壁に対して最も厳しい載荷状態となるように擁壁天端から400mmの高さとした。

表-1には、本研究で対象とした試験体一覧を示している。表中の第1項目は載荷方法を示しており(C:押し込み型載荷、T:引張型載荷)、第2項目の“PS7”は実規模落石防護擁壁及び防護柵支柱を用い曲げと共にせん断が卓越する場合で支柱の根入れ深さが700mmの試験体であることを表している。表には、コンクリートの圧縮強度 f'_c 、支柱の降伏強度 f_y 、および各試験体の梁理論に基づいた静荷重載荷時における降伏荷重 P_y 、および全塑性荷重 P_p を示している。なお、支柱に用いたH形鋼(H200×100×5.5×8)の公称断面係数 Z_x および塑性断面係数 Z_{px} はそれぞれ $Z_x = 181 \times 10^3 \text{ mm}^3$ 、 $Z_{px} = 205 \times 10^3 \text{ mm}^3$ である。

2.2 実験方法および計測項目

図-2には、C-PS7試験体に関する静荷重載荷装置の概

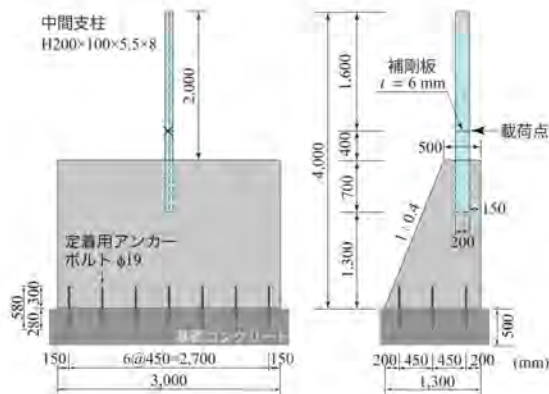


図-1 試験体の形状寸法

表-1 試験体一覧

試験体名	コンクリート 圧縮強度 f'_c (MPa)	支柱の 降伏強度 f_y (MPa)	降伏 荷重 P_y (kN)	全塑性 荷重 P_p (kN)
C-PS7 ²⁾	28	316	143	162
T-PS7	30	355	161	182

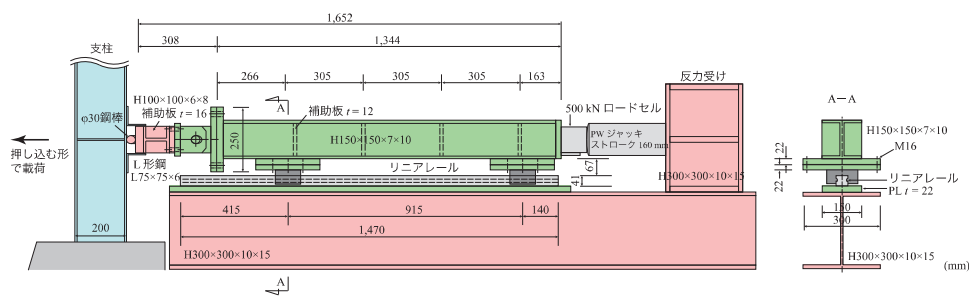


図-2 C-PS7 試験体に関する荷装置の概要図

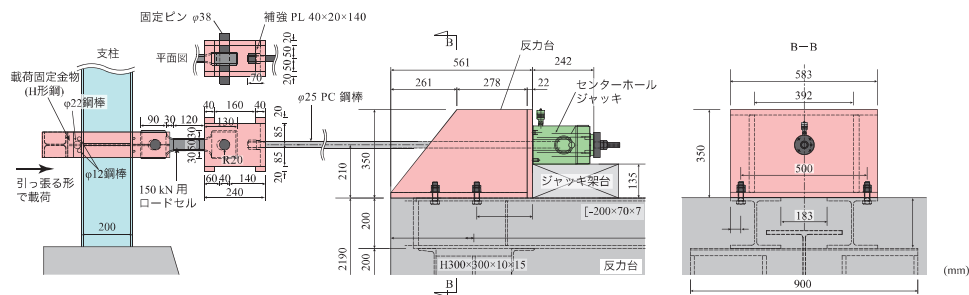


図-3 T-PS7 試験体に関する荷装置の概要図



写真-1 C-PS7 試験体の荷状況



写真-2 T-PS7 試験体の荷状況

要図を示している。C-PS7 試験体では、支柱が弱軸方向に変形した場合においても荷方向を一定に保持するために、H形鋼(H150×150×7×10)からなる荷治具をリニアウェイレール上に固定し、油圧ジャッキを用いて押し込む形で荷した。荷荷重はロードセルを用いて測定した。なお、荷重は支柱の変形に追従して支柱フランジ面に対して直角方向に荷できるように、荷治具の先端部にスライベルを設置し、回転を許容するようにした。支柱への荷部には径30mmの鋼棒を設置し、線荷重荷重状態を再現した。また、支柱にはその変形によって荷位置が上下にずれることを抑制するために、75mmのL形鋼を上下に溶接固定している。写真-1には実際の荷状況を示している。しかしながら、前項でも述べたように実験結果は実最大荷重が計算全塑性荷重を超えており、既往の結果とは明らかに異なった性状を示した。その要因は、前述のとおりスライベルを用いて支柱フランジ面に対して常に直角方向に荷するように考慮しているが、荷治具が支柱の変形と共に下L形鋼に接触したことによって、荷重が設定よりも低い位置から作用したことによるものと推察される。

図-3には、本実験で実施したT-PS7試験体に関する静荷重荷装置の概要図を示している。図に示されているよ

うに、T-PS7試験体の荷治具は、H100×100×6×8のH形鋼を用いて荷点部を外側から囲み込むようにし、シャックルを介してロードセルおよびPC鋼棒と連結している。荷重は、径22mmの鋼棒を荷点位置に固定(径12mmの2本の鋼棒を支柱に点溶接)し、支柱の変形に追従できるように設置したH形鋼(径12mmの鋼棒を用いて支柱に密着させ、上下方向への移動を防止)を介して作用させることとした。従って、支柱への荷重は径22mmの鋼棒以外からは作用しない構造となっている。ロードセルの両端部は径38mmの鋼棒を用いたピン構造としていることにより、支柱の変形に対しても抵抗なく荷が可能になっている。写真-2には実際の荷状況を示している。

図-4には、ひずみゲージの貼付位置を示している。ひずみゲージは、支柱とコンクリート間の付着特性への影響を極力小さくするためにウェブ部に接着することとし、その中心から両フランジに向かって70mm離れた点に、軸方向には50mm間隔を基本として貼付した。

本実験における測定項目は、(1)荷荷重 P_s 、(2)支柱に貼り付けたひずみゲージによる軸方向ひずみ ϵ_i 、(3)支柱および擁壁背面各点に設置したワイヤ式変位計からの水平方向変位 δ_s 、(4)支柱等の変位計測のバックアップとし

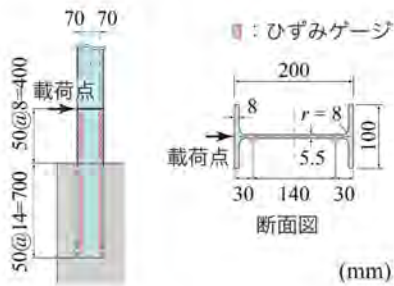


図-4 ひずみゲージ貼付位置

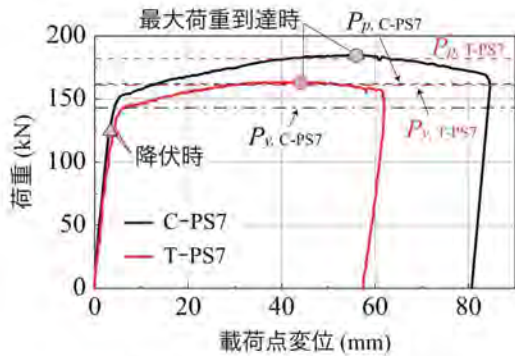


図-5 荷重-変位関係

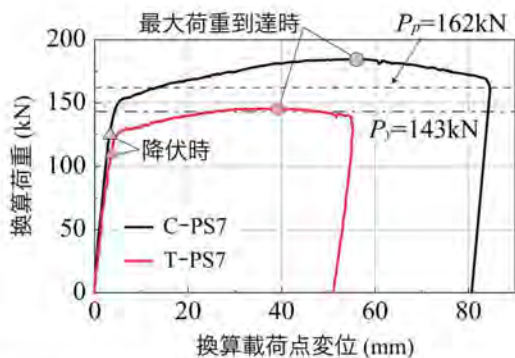


図-6: C-PS7の降伏強度を基に正規化した荷重-変位関係

での10 fpsでのカメラ撮影である。

3. 実験結果および考察

3.1 荷重-変位関係

図-5には、各試験体に関する荷重 P_y -荷重点変位 δ_y 関係を示している。また、表-1からも明らかなように、各支柱材料の降伏強度が違うことによって降伏荷重 P_y や全塑性荷重 P_p がそれぞれ異なる値となっている。図-6には、2試験体間の比較を容易に行うために、C-PS7試験体の降伏強度と降伏時変位を基にT-PS7試験体の結果を正規化した場合の比較図を示している。図には、降伏荷重 P_y 、全塑性荷重 P_p も合わせて明記している。また、表-2には、図-5および図-6より得られた曲線を基に各応答値を整理して示している。

図-6より、C-PS7試験体の結果に着目すると、荷重が126 kN程度で剛性勾配が徐々に変化し、変位が56 mm程度で最大荷重に到達後、徐々に荷重が低下していることが

表-2 各応答値一覧

試験体名	計測結果		降伏強度を正規化した場合		
	C-PS7	T-PS7	C-PS7	T-PS7	
降伏荷重	荷重 $P_{y,y}$ (kN)	126	125	126	111
到達時	変位 $\delta_{y,y}$ (mm)	3.3	4.0	3.3	3.6
最大荷重	荷重 $P_{y,max}$ (kN)	186	165	186	147
到達時	変位 $\delta_{y,max}$ (mm)	56.4	43.8	56.4	39.0

(注：C-PS7 試験体を用いて正規化)

分かる。また、前述のとおり最大荷重は全塑性荷重 P_p より20 kN程度大きな値を示していることが分かる。これより、擁壁天端を固定点と仮定した場合における荷重点までのアーム長は設定した長さよりも短く評価されることが推察され、前述のように荷重点位置のずれを防止するために溶接した下部L形鋼材部においても荷重が作用したことが裏付けられる。

これに対して、T-PS7試験体の結果に着目すると、最大荷重が147 kN程度となっており、降伏荷重 P_y より大きな値を示し、全塑性荷重 P_p よりも15 kN程度小さいレベルとなっている。最大荷重到達後、荷重は徐々に減少し、ほぼ梁理論に基づく降伏荷重レベルで変位が増加傾向を示している。このような性状は、実物大模型で支柱を貫通設置して実施した静荷重載荷実験結果³⁾と同様である。最大荷重値が全塑性荷重 P_p に到達しない要因としては、後述の損傷状況でも明らかなように、支柱載荷側基部においてフランジとコンクリート間に隙間が発生すること等により、固定点が擁壁内部に推移したことによるものと推察される。

図からも明らかなように、C-PS7試験体とT-PS7試験体は、両者類似した性状を示しているものの、C-PS7試験体の場合にはモーメントのアーム長が梁理論の仮定よりも短く評価されているのに対して、T-PS7試験体の場合には支柱を貫通させた場合³⁾と同様にアーム長が梁理論の仮定よりも長く評価されることが明らかになった。これより、T-PS7試験体の場合には設定荷重載荷に対して正しい挙動を示しているものと判断される。

3.2 各荷重レベルにおける支柱縁ひずみ分布

図-7には、荷重-荷重点変位曲線から評価した降伏時と最大荷重到達時における支柱の軸方向ひずみ分布を、各試験体で比較して示している。なお、各断面における縁ひずみは、ひずみゲージ出力と断面内の平面保持仮定の下に算定評価している。

図より、C-PS7試験体に関するひずみ分布に着目すると、降伏時には載荷側の引張側フランジにおける荷重点近傍を除き、引張側と圧縮側はともに荷重点から基部に向かってほぼ線形的に増加傾向を示していることが分かる。降伏時の引張側荷重点近傍においてひずみが発生していることは、前述したように支柱に溶接添加したL形鋼による影響も示唆される。最大荷重到達時のひずみ分布を見ると、擁壁内部のひずみ分布は降伏時におけるひずみ分布と類似しているものの、その値は大きい。また、気中部においても全域に渡って、0.4%を超過していることより、塑性ヒンジの形成とともに局部座屈の発生が推察される。

次にT-PS7試験体のひずみ分布に着目すると、降伏時お

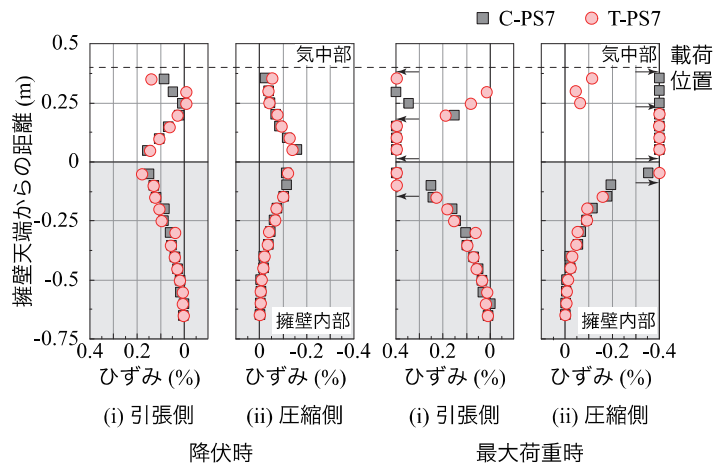


図-7 各時点における支柱の縁ひずみ分布

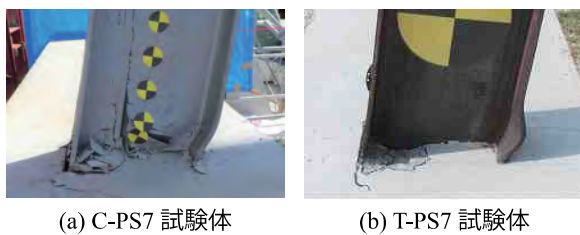


写真-3 実験終了後における支柱基部の変形状況

よび最大荷重到達時のいずれにおいても C-PS7 試験体と類似した分布性状を示している。降伏時の引張側荷点近傍部においては、最上部一点のみに引張ひずみが発生している。これは、前述の C-PS7 試験体では、上下へのずれ止めに L 形鋼を使用しているのに対し、径 12 mm の鋼棒を使用したことで、荷重がより集中荷重的に作用したことによるものと推察される。図からも明らかなようにひずみ分布は、降伏時および最大荷重到達時のいずれにおいても両試験体は同様な分布性状を示していることが分かる。

これより、軸方向ひずみ分布は根入れ深さが同様の場合には、荷重位置や荷重方法の違いによる影響は小さいことが明らかになった。

3.3 実験終了後における試験体の損傷状況

写真-3には、実験終了後における支柱基部の損傷状況の写真を示している。写真より、両試験体ともに圧縮側フランジには局部座屈が発生し、荷重側フランジとコンクリート表面に隙間が確認できるとともに、ウェブ近傍ではコンクリートの剥離が生じていることが分かる。その剥離領域はともに荷重側フランジ内側が非荷重側よりも広く示されているが、表面のみの剥離であり損傷の程度は小さい。これは、過去の実験結果と同様に荷重に対し根入れ深さが十分確保されていることにより、大きなせん断力の作用下においても曲げ作用によって塑性ヒンジが形成され、支柱の角折れによって多くの入力エネルギーが消費されたことによるものと推察される。また、写真より荷重方法の違いによる損傷への影響はほとんどないことが分かる。

4. まとめ

本論文では、高さ 2 m、幅 3 m の実規模落石防護擁壁に

実防護欄支柱を根入れ深さを 700 mm として埋設設置した試験体を対象に、荷重方法を変えた場合における静荷重載荷実験を実施した。荷重作用位置は擁壁天端から 0.4 m の高さで、曲げとせん断が卓越する場合である。本研究で得られた結果を整理すると、以下のように示される。

- 1) 荷重位置のずれを防止するために支柱荷重位置上下に L 形鋼を添接し押し込み型で荷重する場合には、スイベルを設置して支柱荷重面に対して直角方向から荷重するように考慮されているが、それが十分に機能せずに下部 L 形鋼材を介して荷重が作用するため、降伏荷重や塑性ヒンジ荷重は増加する可能性が示唆された。
- 2) 一方で、支柱変形後も設定荷点以外からの荷重の作用がないように荷重位置のずれ止めを鋼棒を用いて単純化し引張型で荷重する場合には、貫通型試験体の場合(引張型で荷重)と同様に降伏荷重や全塑性荷重は計算のそれらより小さい値を示すことが明らかになった。それは、固定端が支柱基部のコンクリートの損傷によって擁壁内部に移行し、アーム長が長くなることによるものと推察される。
- 3) 支柱の軸方向ひずみ分布は、荷重方法によって著しい影響は受けない。

謝 辞

本論文の作成にあたり、室蘭工業大学構造力学研究室の久井昭史君、高田柊君をはじめとする学生諸君には、実験計測、データ分析など多大な支援を頂いた。ここに記して、謝意を表する。

参考文献

- 1) (公社) 日本道路協会：落石対策便覧, 2017.
- 2) 林 茂樹, 小室雅人, 瓦井智貴, 岸 徳光：根入れ深さを変化させた実規模落石防護欄支柱の静荷重載荷実験, コンクリート工学年次論文集, Vol. 44, No. 2, pp. 937-942, 2022.
- 3) 林 茂樹, 小室雅人, 岸 徳光, 瓦井智貴, 近藤里史：実規模擁壁に貫通埋設させた防護欄支柱に関する曲げと共にせん断が卓越する場合の静的及び衝撃荷重載荷実験, 構造工学論文集, Vol. 68A, pp. 962-974, 2022.