# 落石防護柵支柱の根入れ深さを変化させた場合における静的耐荷性状

Static load-carrying capacity of steel posts for rockfall protection wall varying anchoring depths

室蘭工業大学大学院	○正会員	林	茂樹 (Shigeki Hayashi)	室蘭工業大学	正会員	小室	雅人 (Masato Komuro)
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)
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従来型落石防護柵が数多く設置さ れている.同防護柵支柱は,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防護擁壁天端に埋設される 場合には,一般に擁壁天端部を箱抜きして埋設される.

防護柵支柱の無筋コンクリート擁壁への根入れ深さに関 する現行設計は、落石衝撃による動的挙動は考慮せずに静 力学に基づき落石対策便覧(以後,便覧)<sup>1)</sup>に即して行われ 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では,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,実防護柵支柱よりも小さな断面を有する 鋼製支柱を用いた小型試験体による室内静荷重載荷および 衝撃荷重載荷実験を実施し,根入れ深さに関する検討を 行ってきた<sup>2)</sup>.さらに,室内実験における課題を解決する ために,実規模擁壁内に貫通設置した試験体を対象に,静 荷重および衝撃荷重載荷実験を実施し,支柱の軸方向ひず み分布に基づき必要な根入れ深さに関する検討を行ってい る<sup>3)</sup>.しかしながら,実防護柵支柱は根入れを有限長にし て埋設されていることより,その挙動は貫通設置した場合 とは異なることが想定される.合理的な設計法を確立する ためには,貫通設置した場合の検討結果を踏まえて,実構 造に即した境界条件の下での挙動性状の把握が肝要である ものと判断される.

このような観点から、本研究では設計的に厳しい条件と なる曲げとせん断が連成する場合に限定し、支柱の根入れ



図-1 試験体の形状寸法 (PS7 試験体)

深さを3種類に変化させた実規模擁壁を対象に静荷重載 荷実験を実施した.なお,設定の根入れ深さに関しては, 貫通設置した場合の実験結果<sup>3)</sup>を参考に,700 mm,500 mm, 300 mm と設定した.また,本実験では静荷重下における 支柱の根入れ深さに関する検討を行うことから,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、本研究で対象とした試験体の形状寸法の一例として、支柱の根入れ深さが700mmの場合について示している.試験体は高さ2m,幅3mの実規模擁壁模型に対して、根入れ深さを700,500,300mm(以後それぞれ、PS7,PS5,PS3試験体)に変化させた3体である.擁壁の天端幅は500mm,道路側の勾配は1:0.4となっており、支柱は擁壁天端の中央部に埋設させている.また、支柱の荷重作用点におけるウェブには、フランジの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、本研究では、支柱定着部に曲げとせん断が連成して作用させるために、荷重載荷位置を擁壁天端から0.4mの高さとした.

擁壁に用いたコンクリートの圧縮強度  $f'_c$ は、材料試験 結果より  $f'_c = 28$  MPa である.また、支柱に用いた H 形 鋼 (H200×100×5.5×8)の降伏強度は、ミルシートより  $f_y = 316$  MPa、公称断面係数  $Z_x$  および塑性断面係数  $Z_{px}$  は それぞれ  $Z_x = 181 \times 10^3$  mm<sup>3</sup>、 $Z_{px} = 205 \times 10^3$  mm<sup>3</sup> である. 2.2 実験方法および計測項目

図-2には、静荷重載荷治具の概要図を示している.実験では、支柱が弱軸方向に変形した場合においても載荷方向を一定に保持するために、H形鋼(H150×150×7×10)からなる載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載荷した.載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随して載荷できるように、載荷治具の先端部にスイベルを設置し、鉛直方向に約6°、水平方向に約2°まで回転を許容するようにした.支柱への載荷部には径30 mmの鋼棒を設置し、線荷重載荷状態を再現した.また、支柱には、その変形によって載荷位置が上下にずれることを抑制するために、75 mmのL型鋼を上下に溶接固定している.写 真-1には実際の載荷状況を示している.

図-3には、各試験体における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 付着挙動への影響を極力小さくするためにウェブ中心から 両フランジに向かって 70 mm 離れた点に、支柱軸方向に は 50 mm 間隔を基本として貼付することとした。



図-2 載荷装置の概要図



写真-1 載荷装置の設置状況





本実験における測定項目は、(1)載荷荷重  $P_s$ ,(2)支柱 に貼り付けたひずみゲージによる軸方向ひずみ  $\varepsilon_i$ ,(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  $\delta_s$ ,(4)支柱等の変位計測のバックアップとし ての 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-4には、各試験体に関する荷重 $P_s$  – 載荷点変位 $\delta_s$ 関係を、表-1には図-4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.また、図-4には、梁理論に基づいた降伏荷重 $P_v$ 、全塑性荷重 $P_p$ も合わせて明記している.

図より,根入れ深さが700 mmのPS7 試験体の結果に着 目すると,荷重が132 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 下していることが分かる.また,根入れ深さが500 mmの PS5 試験体に着目すると,PS7 試験体とほぼ類似の荷重-



西 - 问主 文正因休

表一	1	各応答値一	覧
----	---	-------	---

試験	降伏	降伏時	最大	最大荷重					
体名	荷重	変位	荷重	到達時変位					
	$P_{s,y}$ (kN)	$\delta_{s,y}$ (mm)	$P_{s,max}$ (kN)	$\delta_{s,max}$ (mm)					
PS7	132	3.5	186	56.4					
PS5	137	4.2	187	57.1					
PS3	116	4.0	143	12.7					

変位関係を示していることが分かる.  $\mathbf{表}-1$ に示す両試験 体の降伏および最大荷重は、ともに 135 kN 程度, 185 kN 程度となっていることからも確認できる. これは、後述の 軸方向ひずみ分布や実験終了後の試験体の損傷状況からも 分かるように、支柱基部において塑性ヒンジが形成されて おり、いずれの場合も必要な根入れ深さが確保されている ことから、耐荷性状に大きな差異が生じなかったものと推 察される. さらに、図中に示した梁理論に基づく降伏およ び塑性荷重と比較すると、剛性勾配が変化する荷重レベル は降伏荷重  $P_{y}$ よりも若干小さいものの、最大荷重は全塑 性荷重  $P_{p}$ よりも若干小さいものの、最大荷重は全塑 性荷重  $P_{p}$ よりも若干小さいものの、最大荷重は全塑

一方,根入れ深さが 300 mm の PS3 試験体を見ると,理 論降伏荷重 Py と同程度まで荷重が増大するものの,最大荷 重到達後は,後述するように擁壁躯体のひび割れ進展によ り荷重が急激に低下しコンクリートの剥離によって終局に 至っている.また,最大荷重が他の2試験体とは異なり, 塑性荷重レベルまで到達していないことから,基部近傍は



図-5 各時点における支柱の縁ひずみ分布

フランジの一部は降伏領域に入るものの, 塑性ヒンジの形 成までには至っていないものと判断される.

これより,支柱の根入れ深さが 300 mm と浅い場合には, 支柱基部近傍に塑性ヒンジが形成されず,かつコンクリートの剥離によって終局に至ることから,根入れ深さが十分 でないことが指摘される.

# 3.2 各荷重レベルにおける支柱縁ひずみ分布

図-5には、荷重-載荷点変位曲線から評価した降伏時 と最大荷重到達(表-1)時における支柱上下縁の軸方向ひ 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,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載荷点近傍を 除き,引張側と圧縮側はともに載荷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.また, 擁壁内部を見ると,引張側フランジでは天端から深さ0.65 m近傍で零ひずみまで減少していることが分かる. 圧縮側 フランジでは,零ひずみまで減少する領域は引張側より若 干浅く,深さ0.5 m程度となっている.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,後述するように塑性ヒンジの形成とともに局 部座屈やウェブの面外変形が生じていることが推察される.

次に PS5 試験体のひずみ分布に着目すると,降伏時および最大荷重時のいずれにおいても PS7 試験体と類似した分布性状を示している.なお,擁壁内部のひずみ分布は, PS7 と比較して支柱の根入れ深さが小さいことより,引張 側フランジにおいて零ひずみを示す深さが若干浅くなっている.ただし,最大荷重到達時には基部近傍に PS7 試験体 と同様に塑性ヒンジが形成されていることが推察される.

PS3 試験体のひずみ分布を見ると,他の試験体とは異なり,降伏時と最大荷重到達時が非常に類似した分布性状となっていることがわかる.最大荷重到達時には基部近傍で局所的に大きなひずみ値を示しているものの,その他の領域は0.2%以下となっている.天端からの深さ0.25 mのひ

ずみ値を他の2試験体と比較するとその値は小さい. これ は、PS3 試験体の場合には、最大荷重が他の試験体よりも 40 kN 程度小さいことや最大荷重到達後に急激に荷重が低 下していることより、支柱の根入れ深さが不足しているこ とも一つの要因であるものと推察される. すなわち、PS3 試験体の場合には、支柱全体としては損傷が軽微であり、 根入れ深さが不足していることから、かぶりコンクリート の剥離によって終局に至ったものと判断される.

以上より,静荷重載荷時における支柱の必要根入れ深さ は,曲げとせん断が連成する場合において,約500mm程 度であることが実験的に明らかになった.

# 3.3 実験終了後における試験体の損傷状況

**写真-2**には、実験終了後における支柱基部の変形状況 写真を示している。

(a), (b) 図に示す PS7, PS5 試験体に着目すると, 基部 近傍の圧縮側でフランジに局部座屈が発生するとともに, ウェブにも面外変形が確認されることから,支柱は載荷方 向とともに弱軸方向にも変形していることが分かる.ま た,両者ともに引張側フランジとコンクリート表面に隙間 が確認でき,ウェブ近傍ではコンクリートの剥離が生じて いる.ただし,剥離領域は表面のみと小さく,このような 変形状況は前述のひずみ分布とも対応しているものと判断 される.

一方,(c)の PS3 試験体の場合は,他の試験体と異なり 基部近傍に局部座屈の発生は見られず,かぶりコンクリー トが大きく損傷,剥離したことで終局に至ったことが分か る.これは,荷重に対して根入れ深さが浅いことから,無 筋コンクリート擁壁に押抜きせん断破壊が生じたことを示 唆している.

図-6には、PS3 試験体における擁壁のひび割れ進展状況を、写真-3には、実験終了後においてひび割れが完全 に開口し、剥離したコンクリート片を取り除いた損傷状況 を示している.図-6より、擁壁天端部を見ると、引張側 フランジ近傍から非載荷面方向に30°程度の角度で進展 する斜めひび割れが確認できる.また、圧縮側フランジ近 傍非載荷側には数本の縦に延びる曲げひび割れの開口も確 認できる.なお、便覧<sup>1</sup>では支柱のせん断破壊面は、圧縮



(a) PS7 試験体



(b) PS5 試験体



(c) PS3 試験体

写真-2 実験終了後における支柱基部の変形状況

側フランジ端部より 45°の角度で道路側に向けて形成され るものと仮定しているが,本実験では圧縮側フランジ端部 から進展するひび割れは確認できない.

**写真-3**より,押抜きせん断破壊領域を見ると,**図-6**で示したひび割れ進展領域はいずれも完全にブロック化し, 実験終了時には完全に剥離の状況に至っていることが分かる.

以上,試験体の損傷状況から,支柱の根入れ深さが500 mmよりも大きい場合には,支柱基部に塑性ヒンジが形成 されるとともに,局部座屈の発生によって終局に至る.こ れに対して,根入れ深さが300 mmの場合には,支柱基部 には塑性ヒンジが形成されず,かぶりコンクリートがブ ロック化して押抜きせん断破壊的な性状で終局に至ること が明らかとなった.

### 4. まとめ

本論文では,高さ2m,幅3mの実規模落石防護擁壁に 実防護柵支柱を埋設設置した試験体を対象に,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0.4mの高 さとし,支柱の根入れ深さを3種類に変化させた.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.

 支柱の根入れ深さが確保されている場合には、荷重は 塑性荷重よりも大きく、支柱基部近傍に塑性ヒンジが 形成される。また、擁壁天端には軽微は剥離損傷が生



図-6 PS3 試験体に関するひび割れ進展状況



(a) 天端



(b) 非載荷面

## 写真-3 PS3 試験体に関する実験終了時の損傷状況

じる程度である.

- 2) 一方,支柱の根入れ深さが不足している場合には、荷 重は降伏荷重程度まで増大するものの、基部には塑性 ヒンジが形成されず、擁壁の押抜きせん断破壊によっ て荷重が急激に減少し終局に至る。
- 本実験の場合における支柱の必要根入れ深さは 500 mm 程度と評価される.

今後は、同様な試験体に対して衝撃荷重載荷実験を実施、合理的な設計法の確立に向けた検討を継続して実施す る予定である.

#### 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) 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.
- 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.