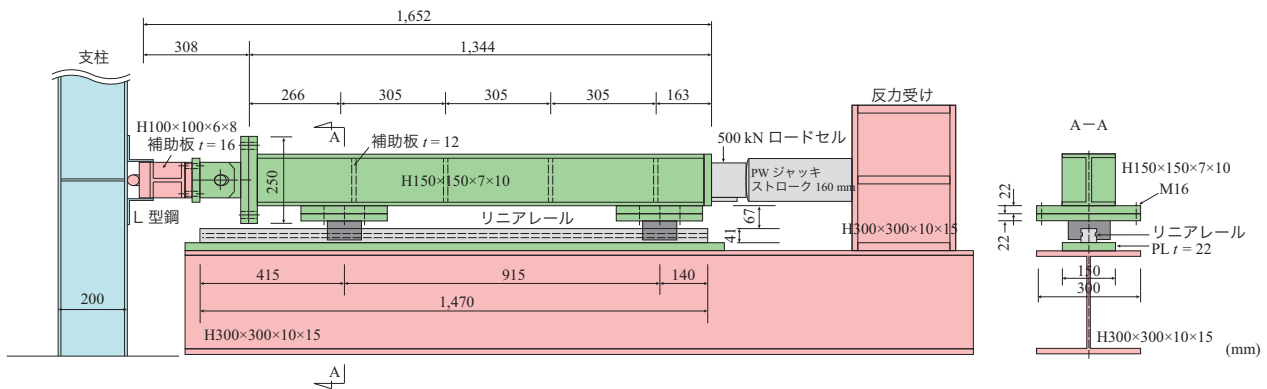
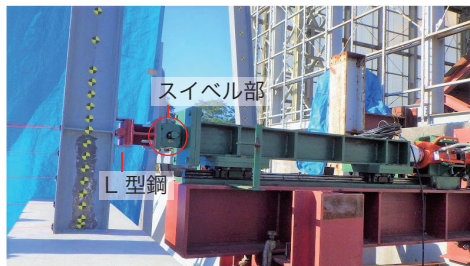
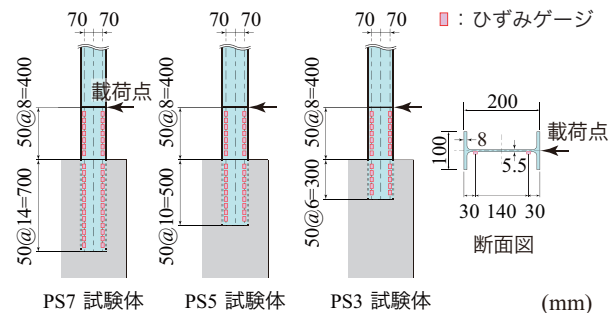




図－２ 荷重装置の概要図



写真－１ 荷重装置の設置状況



図－３ ひずみゲージ貼付位置

り、支柱は擁壁天端の中央部に埋設させている。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 $t = 6 \text{ mm}$ の補剛材を溶接している。なお、本研究では、支柱定着部にせん断が卓越して作用させるために、荷重載荷位置を擁壁天端から 0.4 m の高さとした。また、本実験では静荷重載荷実験であることから、擁壁底部はアンカー筋を用いてコンクリート基盤上に定着固定することとした。

コンクリートの圧縮強度は、材料試験結果より $f'_c = 28 \text{ N/mm}^2$ 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 $f_y = 316 \text{ N/mm}^2$ 、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には静荷重載荷治具の概要図を、写真－１には実際の荷重状況を示している。実験は、支柱が弱軸方向に変形した場合においても荷重方向を一定に保持するために、H 形鋼 (H150×150×7×10) からなる荷重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重した。荷重荷重はロードセル (容量：500 kN) を用いて測定した。なお、荷重は支柱の変形に追従して荷重できるように、荷重治具の先端部にスィベルを設置し、回転を許容するようにした。支柱への荷重部には径 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、その変形によって荷重位置が上方にずれることを抑制するために、75 mm の L 形鋼を上下に溶接

固定している。

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。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 ε_s 、(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ての 10 fps でのカメラ撮影、である。

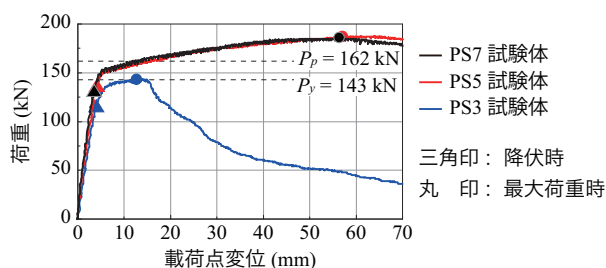
各センサーからの出力波形はデジタルデータレコーダにて一括収録を行っており、そのサンプリング周波数は 10 Hz とした。

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 －荷重点変位 δ_s 関係を、表－１には降伏時及び最大荷重時における荷重及び変位を示している。また、図中には、実験結果の降伏時および最大荷重到達時の荷重点変位 δ_{sy} 、 δ_{smax} 、梁理論に基づいた降伏荷重 P_y 、全塑性荷重 P_p を明記している。

図より、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



図－４ 荷重－変位関係

る。また、PS5 試験体に着目すると、PS7 試験体とほぼ類似の荷重－変位関係を示していることが分かる。ここで、表－１に示す両試験体の降伏および最大荷重に着目すると、それぞれ 135 kN、187 kN 程度となっており、類似の応答性状を示していることが確認できる。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、支柱基部近傍に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荷重 P_y および塑性荷重 P_p 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、最大荷重は既報⁴⁾の実験結果とは異なり全塑性荷重 P_p よりも 25 kN 程度大きいレベルまで到達している。これは、既報⁴⁾の場合には最大荷重が全塑性荷重よりも小さい結果となっていることから、支柱の載荷点部が変形に伴って上方に推移することを抑制するために L 形鋼を溶接したことによって、荷重が設定載荷点位置よりも低い位置に載荷されている可能性も示唆される。

一方、PS3 試験体を見ると、荷重は梁理論に基づく降伏荷重 P_y と同程度まで増大するものの、最大荷重到達後は、後述のように擁壁躯体のひび割れ進展によって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推察される。

これより、支柱の根入れ深さが 300 mm と他の試験体に比べて浅い場合には、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可能性が示唆される。

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代表的な変位時における支柱縁ひずみ分布を、試験体ごとに示している。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た。

図より、PS7 試験体に関するひずみ分布に着目すると、載荷点近傍の載荷側フランジにおいて引張ひずみが生じ

表－１ 各荷重および変位一覧

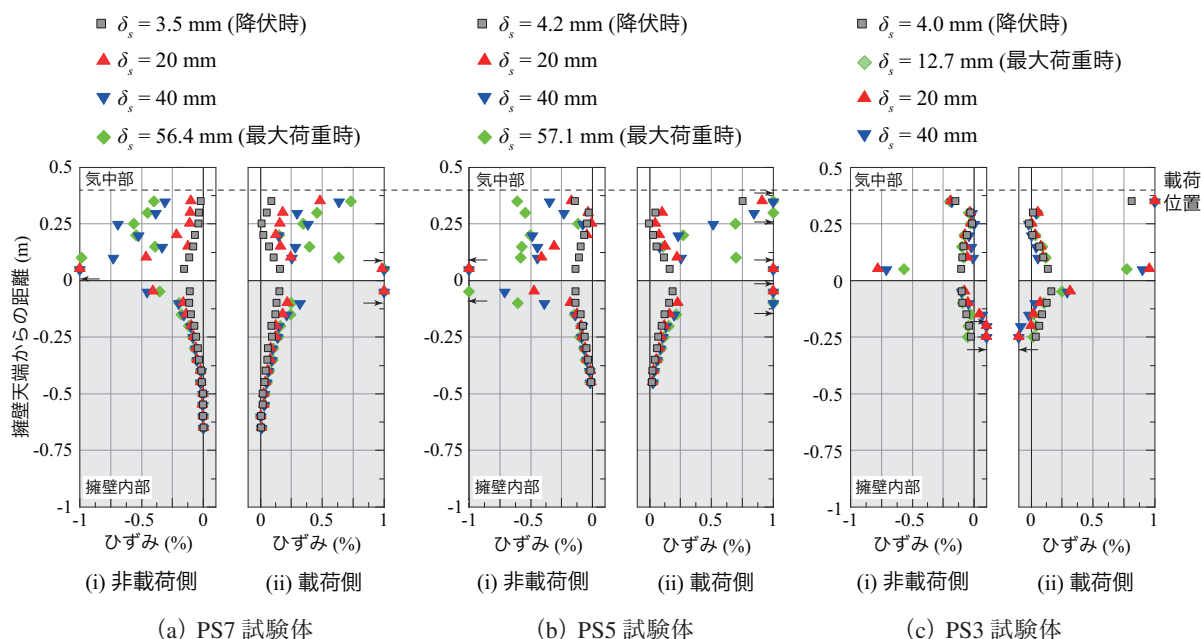
試験体名	降伏荷重 $P_{s,y}$ (kN)	降伏時変位 $\delta_{s,y}$ (mm)	最大荷重 $P_{s,max}$ (kN)	最大荷重時変位 $\delta_{s,max}$ (mm)
PS7	132	3.5	186	56.4
PS5	137	4.2	187	57.1
PS3	116	4.0	143	12.7

ている。このようなひずみ分布は PS5、PS3 試験体の場合にも生じている。これは、線載荷状態を再現するために載荷点部に丸棒を設置しているものの、載荷治具が載荷点部に設置した L 形鋼に接触したこと等によって、荷重が想定通りに集中荷重状に載荷されなかったことによるものと推察される。降伏時のひずみ分布を見ると、載荷側フランジにおける載荷点近傍を除き、載荷側と非載荷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、載荷側フランジでは天端から深さ 0.6 m 近傍で零ひずみまで減少していることが分かる。非載荷側フランジでは、零ひずみまで減少する領域は載荷側より若干浅く、深さ 0.5 m 程度となっている。

降伏時の最大ひずみは、気中部基部近傍部で発生しており、降伏ひずみ ($\epsilon_y \approx 0.16\%$) に漸近していることが分かる。降伏時以降のひずみ分布を見ると、最大ひずみは気中部基部近傍部で発生し、降伏ひずみを大きく超えた値を示している。このことは、支柱基部近傍に塑性ヒンジが形成されていることを暗示している。擁壁内部の基部近傍におけるひずみ分布は変位の増加と共に増加傾向にあるが、天端からほぼ 500 mm 前後で零ひずみに収斂していることが分かる。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、後述するように支柱基部近傍部は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、前述の荷重－変位関係と対応して、いずれの場合においても 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、載荷側フランジにおける零ひずみを示す深さが PS7 と比較して若干浅くなっていることが分かる。ただし、降伏荷重を超えた時点以降で基部近傍に PS7 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、PS7 や PS5 試験体とは異なり、降伏時と最大荷重到達時には類似した分布性状を示していることが分かる。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、その他の領域では 0.2 % 以下の値となっている。擁壁内部の天端からの深さが 0.25 m の点におけるひずみ値は、他の 2 試験体と比較して小さく、最大荷重時以降には正曲げのひずみに転じていることが分かる。これは、最大荷重



図－5 各載荷点変位時における支柱の縁ひずみ分布

が他の2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によるものと推察される。

以上より、せん断が卓越する場合における静荷重載荷時の支柱の必要根入れ深さは、約500 mm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。

写真－2 (a), (b)図に示すPS7, PS5試験体に着目すると、非載荷側フランジの基部近傍には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、両者ともに載荷側フランジと擁壁天端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確認できる。ただし、剥離領域は表面のみと小さい。このような変形および損傷状況は、前述のひずみ分布ともよく対応しているものと判断される。

一方、写真－2 (c)のPS3試験体の場合は、他の2試験体と異なり基部近傍に局部座屈の発生は確認できず、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、根入れ深さが浅いことから、擁壁内において押抜きせん断破壊が生じたことを示唆している。

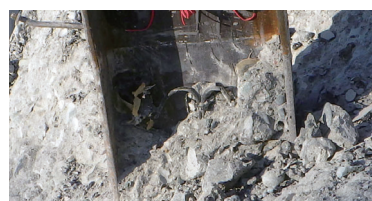
図－6にはPS3試験体における擁壁のひび割れ進展状況を示している。また、写真－3には、実験中のひび割れ発生時の状況や、実験終了後においてひび割れが完全に開口した部分を取り除いた損傷状況を示している。図－6より擁壁天端部を見ると、載荷側フランジ近傍から非載荷面



(a) PS7 試験体



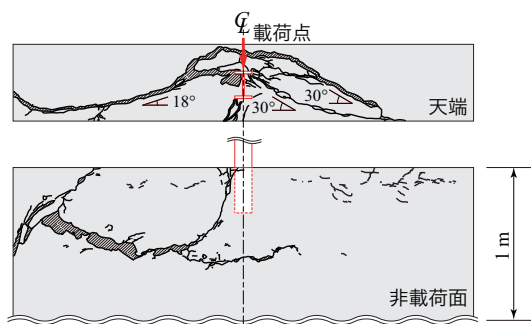
(b) PS5 試験体



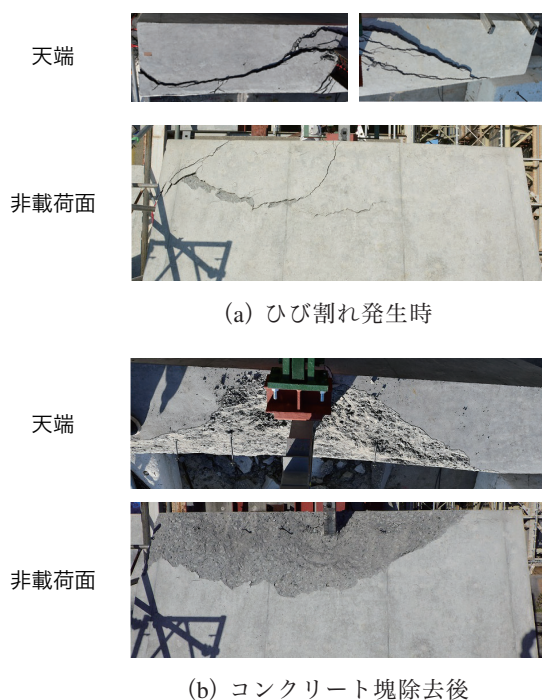
(c) PS3 試験体

写真－2 実験終了後における支柱基部の変形状況

方向に左右でそれぞれ30°、18°程度の角度で進展する斜めひび割れが確認できる。また、非載荷側フランジ近傍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¹⁾では支柱のせん断破壊面は、後述の図－7(a)からも明らかなように非載荷側フランジ端部から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。しかしながら、本実験では非載荷側フランジ端部から進展するひび割れは確認できない。



図－6 PS3 試験体に関するひび割れ進展状況



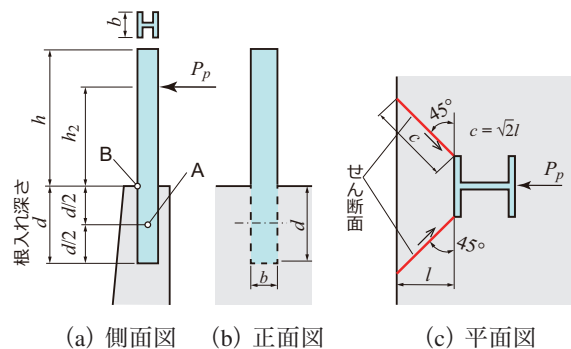
写真－3 PS3 試験体に関する損傷状況

写真－3より、擁壁の押抜きせん断破壊の状況を見ると、図－6で示したひび割れはブロック化し、実験終了時には剥離の状況に至っていることが分かる。なお、コンクリート塊除去後のせん断破壊面の角度を調べると、42°程度であった。

以上、試験体の損傷状況から、支柱の根入れ深さが500mm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支柱は終局に至る。これに対して、根入れ深さが300mm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. 設計根入れ深さと実験結果との比較

便覧¹⁾では、擁壁上に設置する防護柵支柱の根入れ深さ



図－7 支柱の必要根入れ深さに関する設計の考え方¹⁾

は、支柱であるH形鋼の非載荷側フランジによる支圧応力も含めた曲げ圧縮応力と、非載荷側フランジ両端部からの押抜きせん断応力に対して照査することが規定されている。ここでは、便覧¹⁾に基づいて照査算定される必要根入れ深さ d_r と実験結果の必要根入れ深さ d_{sl} との比較を試みる。

図－7には、便覧¹⁾で規定されている照査のための力学モデルを示している。便覧¹⁾では、軸力と曲げモーメントに対して、次式によって示される躯体前面部のB点(図－7(a)参照)における支圧応力度 σ がコンクリートの許容曲げ圧縮応力度 σ_a に割り増し係数 α を考慮した値以下となるように規定されている。

$$\sigma = \frac{P_p}{A} + \frac{M}{Z} \leq \alpha \sigma_a \quad (1)$$

ここに、 A :断面積($=b \cdot d$, b :H形鋼のフランジ幅), Z :断面係数($=\frac{b \cdot d^2}{6}$), α :割増係数($=1.5$), M :A点の支柱曲げモーメント(図－7(a)参照)であり、次式で与えられる。

$$M = P_p \left(h_2 + \frac{d}{2} \right) \quad (2)$$

ここに、 h_2 :落石荷重の作用高さである。

一方、押抜きせん断に対しては、図－7(c)に示すようなせん断破壊面が形成されると仮定し、せん断破壊面に発生するせん断応力度 τ が許容押抜きせん断応力度 τ_a 以下となるように規定されている。

$$\tau = \frac{P_p}{2ld} \leq \tau_a \quad (3)$$

ここに、 l :かぶり厚である。

なお、本研究では、コンクリートの許容曲げ圧縮応力度 σ_a および押抜きせん断応力度 τ_a は、実験研究であることを前提に各試験体に関するコンクリートの圧縮強度 f'_c を設計基準強度 σ_{ck} と等価であると仮定して、道路土工・擁壁工指針⁵⁾に準拠して決定した。

計算の結果、許容曲げ圧縮応力度 σ_a および押抜きせん断応力度 τ_a は、いずれの試験体においてもそれぞれ $\sigma_a = 8.25 \text{ N/mm}^2$, $\tau_a = 0.43 \text{ N/mm}^2$ として求まる。従って、便覧に基づいて算定される必要根入れ深さは、軸力作用下の

表－２ 擁壁天端から $d/2$ の位置におけるかぶり厚 l_a を用いた場合の根入れ深さ

試験体名	許容押抜きせん断応力度 τ_a (N/mm ²)	かぶり厚 l_a (mm)	算定根入れ深さ $d_{r,s}$ (mm)
PS7	0.43	290	649
PS5		250	753
PS3		210	897

曲げモーメントに対しては式(1)を用いて $d_{r,b} = 786$ mm、押抜きせん断に対しては式(3)を用いて $d_{r,s} = 1,255$ mm となり、最終的な設計根入れ深さは $d_r = d_{r,s} = 1,255$ mm として評価される。一方、本実験によって得られた必要根入れ深さは、前述のとおり $d_{sl} = 500$ mm 程度となっており、設計根入れ深さよりも小さい。なお、室内での小型試験体による既往の実験結果³⁾の場合には、設計根入れ深さと実験結果より得られた必要根入れ深さは、ほぼ対応していることより、本実験とは異なる結果となっている。これは、室内実験の場合には実験装置の制約により支柱には H100×100×6×8 の H 形鋼を用いているため、塑性断面係数が本実験の場合の 1/2.4 程度と小さく、対応して塑性ヒンジ荷重も小さくなることが大きな要因であるものと推察される。

ここで、式(3)に示すかぶり厚 l に関して、図－7(a)において擁壁天端から $d/2$ の位置におけるかぶり厚 l_a を用いた場合について、その根入れ深さの検討を試みた。また、PS3 試験体の実験結果(写真－3)より、載荷側フランジ両端部よりせん断破壊面が形成されていることを考慮し、せん断ひび割れを載荷側フランジ端を基点とし、擁壁天端から $d/2$ の位置におけるかぶり厚を考慮してせん断破壊部の厚さを l_b (以後、かぶり厚さ)とした場合についても同様に検討を試みた。

表－２、表－３には、それぞれのかぶり厚 l_a, l_b を用いて算定した各試験体の根入れ深さを一覧にして示している。表－２に基づいて適合の可否を調べると、PS7 試験体の場合には適合し、PS5 および PS3 試験体の場合には必要根入れ深さを満たしていないことにより否となり、実験結果とは対応していない。

一方、表－３では PS3 試験体の場合のみが必要根入れ深さを満たすことができず否となっており、実験結果とおおむね対応していることが分かる。

5. 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 0.4 m 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

表－３ せん断ひび割れが載荷側フランジ端から進展すると仮定した場合の根入れ深さ

試験体名	許容押抜きせん断応力度 τ_a (N/mm ²)	かぶり厚 l_b (mm)	算定根入れ深さ $d_{r,s}$ (mm)
PS7	0.43	490	384
PS5		450	418
PS3		410	459

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) 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。
- 3) 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。
- 4) 便覧¹⁾に基づいて照査する場合において、載荷側のかぶり厚として支柱の根入れ深さを考慮した平均かぶり厚を用い、かつ押抜きせん断ひび割れが載荷側フランジ両端部から発生すると仮定して評価した必要根入れ深さは、実験結果と対応する。

以上の結論を踏まえ、本研究と同様の試験体を用いた衝撃荷重載荷実験を実施して、支柱の根入れ深さに関する合理的な設計法の確立に向け検討を行いたいと考えている。

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.
- 3) 近藤里史, 小室雅人, 岸 徳光, 山元康弘：コンクリート躯体中に埋設された落石防護柵支柱の必要根入れ深さに関する実験的研究, 砂防学会誌, Vol 74, No. 4, pp.3-14, 2021.
- 4) 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.
- 5) (公社)日本道路協会：道路土工・擁壁工指針(平成 24 年度版), 2012.