

剛性の高い自立式土留めの崩壊時の掘削深さ予測式の精度検証

中央大学大学院 学生会員 ○松本 尚也 中央大学 学生会員 福田 文香 正会員 西岡 英俊

1. はじめに

近接施工で周辺地盤への影響が懸念される個所での掘削工事には、一般的には自立式土留め工法よりも変位量が小さくなる切梁式土留め工法を用いる方が経済的となる場合が多い。しかしながら、掘削内部の施工性を確保する必要がある場合などでは、土留め壁の剛性を高めて切梁を不要とした自立式土留め工法を採用する場合もある。また、土留め壁の水平変位抑制には剛性の効果が高いことから土留め壁の剛性を高めることはメリットが大きい。現在の自立式土留めの設計法として、土留め壁の根入れ部が半無限長という仮定を満足するように、土留め壁の根入れ部の特性値 $\beta = \sqrt[4]{B \cdot k_H / 4EI}$ （ここに B ：抵抗幅， k_H ：水平地盤反力係数， EI ：土留め壁の曲げ剛性）と根入れ長 L の積を一定の値（2.5～3.0程度）以上とする方法^{例えば1)}が広く用いられている。しかし、この方法では、変形抑制の観点で壁体剛性 EI を増加させると、特性値 β が減少するため必要な根入れ長が増加することとなる。著者らはこれまで、土留めの崩壊までを簡易的に模擬できるアルミ棒積層体を用い掘削実験を行い、同一の根入れ深さで壁体の曲げ剛性のみ増加させても必ずしも危険側とはならない可能性があることを確認している²⁾。一方で、 βL の値を一定以上とする設計手法は、設計上の安全余裕を確保するための経験的な手法の一つとして豊富な設計・施工実績を有しているものであり、この条件を緩和するには地盤情報の不確実性などに対する応答の違いなどにも考慮して慎重に判断する必要がある。

そこで、土留め壁長は一定とした条件で、地盤の密度と土留め壁の剛性を变化させた模型実験を体系的に実施して、その崩壊に至るまでの挙動の違いを評価することとした。本報告では、土留め壁を半無限長と有限長の二つの条件での解析解と実験値を比較・評価することにより、これらの予測精度について検証した結果について報告する。

2. 実験および解析概要

実験は図-1 に示す長さ 150mm、直径 3mm、2mm、1.5mm のアルミ棒を重量比 1 : 1 : 1 で混合したアルミ棒積層体模型地盤を用いた掘削実験である³⁾。密度の違い（地盤のばらつき）による影響も考慮するため、地盤を作成する際に締固めの度合いを変えることで密度を変えている。再現性を確保するため最低限の締固めを行ったので密度に大きな差をつけることはできなかったが、本研究では単位体積重量 $\gamma = 20.9 \sim 21.5 \text{ kN/m}^3$ の地盤を緩い地盤、 $\gamma = 21.8 \sim 22.3 \text{ kN/m}^3$ の地盤を密な地盤として扱った。締固め方法や掘削実験の詳細な概要は参考文献³⁾を参照されたい。

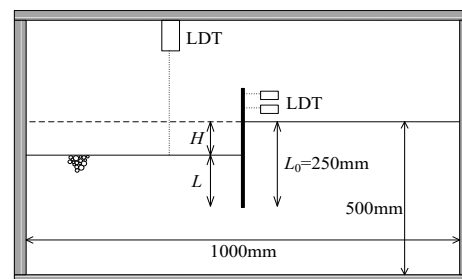


図-1 掘削実験の概要

本報告では、当該実験を対象として、掘削深さ H の 10% の変位が生じた段階を土留め壁の崩壊と見なし、崩壊掘削深さ H_c の実測値と解析解とを比較することで、解析解の適用性について検討する。以下に解析解の考え方を概説する。自立式土留め壁の根入れ部の水平変位 y は、弾性床支承上の梁として式(1)の微分方程式としてモデル化され、一般に掘削底面深さ ($x=0$) での境界条件として背面側からの主働土圧合力 P （別途実施した擁壁土圧実験結果から算出）を載荷高さ $h=H/3$ に作用させた場合の断面力（曲げモーメントおよびせん断力）が与えられる。

$$y = e^{-\beta x} C_1 \cos \beta x + e^{-\beta x} C_2 \sin \beta x + e^{\beta x} C_3 \cos \beta x + e^{\beta x} C_4 \sin \beta x \quad (1)$$

半無限長条件では、地中深部での影響が無視できると考えて積分定数 C_3 、 C_4 を 0 とし、式(1)の残り二つの積分定数 C_1 、 C_2 が求められる（いわゆる Chang の式）。一方、有限長条件では、4 つの積分定数を求めるため、土留め壁下端での境界条件も考慮する必要がある。本研究では一様な模型地盤であることから土留め壁先端でのせん断

キーワード 自立式土留め、アルミ棒積層体、Chang の式、杭の特性値、弾性床支承上の梁

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学理工学部都市環境学科 基礎・地下構造研究室 TEL : 03-3817-1804

力と曲げモーメントが0という条件を与えた式(2)を解いて積分定数を求めた。

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ e^{-\beta L}(A-B) & e^{-\beta L}(A+B) & -e^{\beta L}(A+B) & e^{\beta L}(A-B) \\ e^{-\beta L}B & -e^{-\beta L}A & -e^{\beta L}B & e^{\beta L}A \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Ph/(2EI\beta^3) \\ P/2EI\beta^2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで、 $A=\cos\beta L$ 、 $B=\sin\beta L$ である。なお、解析解を求める際に必要な β は掘削深さの1%変位時の地表面水平変位 δ を有限長、半無限長ごとに逆算し別々に求めた。これは実務においては、情報化施工を行って、掘削初期段階の変位計測結果から限界掘削深さの予測値を更新した状態に相当する。

3. 結果と考察

図-2 に一例として密地盤 $t=1.5\text{mm}$ 時の掘削深さ H -地表面水平変位 δ 関係の実測値および解析解を示し、合わせて崩壊掘削深さの実測値 $H_{c\text{-test}}$ と半無限長での解析値 $H_{c\text{-s}}$ 、有限長での解析値 $H_{c\text{-f}}$ も示した。図-2 より掘削深さの10%を土留め壁の崩壊とみなすことは妥当と考えられる。また、各解析解は弾性理論解であるが H - δ 関係の特徴をある程度表現できていることがわかる。全ての実験ケースについて同様に崩壊掘削深さの実測値と両解析値を求めた結果を図-3 に示す。有限長の解析値は実測値よりも常に小さい値となっており、安全側の評価となっていることがわかる。一方、半無限長の解析値は条件によっては実測値よりも過大評価となっており、設計上は危険側となる場合があることがわかる。

予測精度として解析値を実測値で除した値と、崩壊時の根入れ長 L_c と特性値 β の積 $\beta L_c = \beta(L_0 - H_{c\text{-test}})$ の関係を図-4 に示す。図-4 より、半無限長の解析値が危険側となるのは、概ね βL_c が2を下回る範囲であり、2.5 よりも小さいことがわかる。また、 βL_c が小さくなるほど解析値の誤差が大きくなっており、半無限長では危険側に誤差が大きくなり、有限長では安全側に誤差が大きくなっている。実験結果から、剛性が高いほど地盤条件の H - δ 関係に及ぼす感度が大きくなることが確認されており、この誤差の広がり地盤条件の予測誤差の感度が大きい条件と整合する。

4. おわりに

従来の半無限長での解析結果は、 $\beta L=2$ を下回ると危険側の予測となるほか、地盤の不確実性の影響も危険側に表れる傾向を有することが確認された。このことから、従来の設計上の制限値 (βL で2.5~3.0程度) は、これらに対する配慮として妥当なものと考えられる。一方、有限長で解析した場合には、 βL によらず安全側の予測となり、地盤の不確実性の影響も主に安全側に表れることから、必ずしも従来の制限値を考慮する必要は無いと考えられる。ただし、これ以外の極限釣合いでの検討結果への影響なども考慮する必要がある、今後検討していく予定である。

参考文献

- 1) 公益社団法人日本道路協会：道路土工 仮設構造物指針，pp.153-154，1999。
- 2) N. Matsumoto, H. Nishioka：A study on the effect an earth-retaining wall s rigidity and embedded depth on its behavior, Proceedings of the Second International Conference on Press-in Engineering, 2021。
- 3) 福田文香，松本尚也，西岡英俊：自立式土留めの壁体剛性と地盤の密度の関係に関する実験的研究，第49回土木学会関東支部研究技術研究発表会，2022。（投稿中）

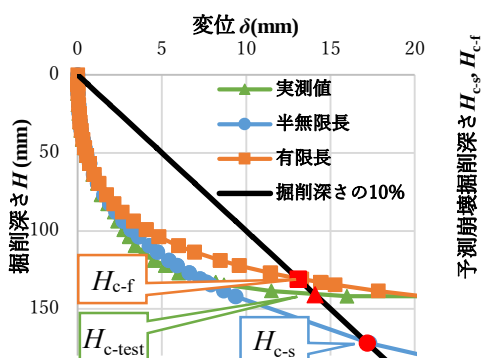


図-2 掘削深さ H -変位 δ 関係

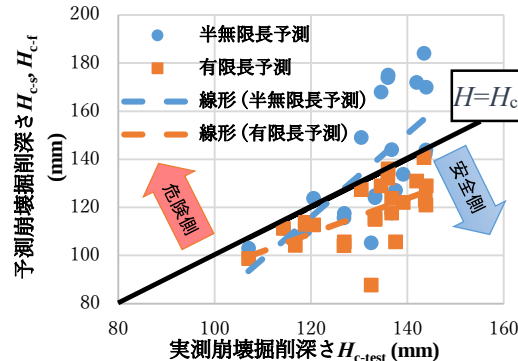


図-3 実測崩壊掘削深さと
解析崩壊掘削深さ

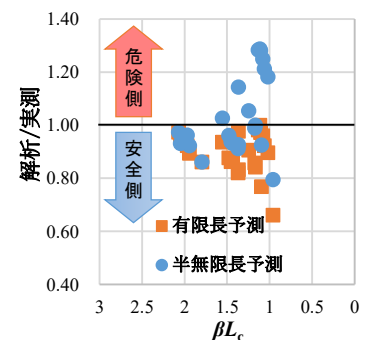


図-4 解析値/実測値と
対応した βL_c の関係