

## 杭の押し込み試験における第1限界抵抗力（クリープ）の判定法の提案

杭, クリープ, 鉛直載荷試験

中央大学 国際○西岡 英俊  
地盤試験所 正 亀井 秀一  
東京理科大学 国際 菊池 喜昭愛知工業大学 国際 渡邊 康司  
システム計測 正 中里 彰人  
杭の鉛直載荷試験基準改訂 WG 幹事会

## 1. はじめに

地盤工学会では、2018年度より「杭の鉛直載荷試験基準改訂WG」（以下、改訂WG）を設置して、地盤工学会基準「杭の押し込み試験方法（JGS1811-2002）<sup>1)</sup>」（以下、現行基準）の見直し作業を進めてきた。その見直し作業の一つが、第1限界抵抗力に技術者による個人差が生じやすいという課題<sup>2)</sup>の改善であった。

この点について、改訂WGでは、載荷方式に応じて得られる情報を区分するために、従来の第1限界抵抗力を、多サイクル方式での除荷時の残留変位挙動から評価する「第1限界抵抗力（残留変位）」と段階的な荷重保持載荷によって得られた荷重とクリープ速度の関係から求める「第1限界抵抗力（クリープ）」に分離することを提案した<sup>3)</sup>。本報では分離した後者の具体的な判定方法を提案する。

## 2. 現行基準における判定法の概要と課題

現行基準では、第1限界抵抗力は、杭頭における荷重 $P$ と変位量 $S$ の関係を両対数目盛りで表した $\log P$ - $\log S$ 曲線に現れる明瞭な折れ点に対応する荷重と定義されている。ただし、その判定に際しては、 $S$ - $\log t$ 法と $\Delta S/\Delta \log t$ 法、残留変位量の急増点などを総合して判断するとされている。

新規荷重段階（各段階の荷重保持時間は30min以上）における経過時間の常用対数 $\log t$ と変位 $S$ の関係（ $S$ - $\log t$ 曲線、図1）は、一般に荷重が小さい範囲では傾きが小さく、荷重が大きくなると勾配が急になり、下に凸な曲線となる。この直線性が失われる限界の荷重を求めるのが $S$ - $\log t$ 法である。また、この $S$ - $\log t$ 曲線の傾き、すなわち $\Delta S/\Delta \log t$ の値と荷重 $P$ との関係から $\Delta S/\Delta \log t$ の値が急増する点の荷重 $P$ を求めるのが、 $\Delta S/\Delta \log t$ 法である（図2）。

しかし、実際には変化点は明確には表れない場合も多く、これらの方法による判定結果にばらつきが生じやすい。こ

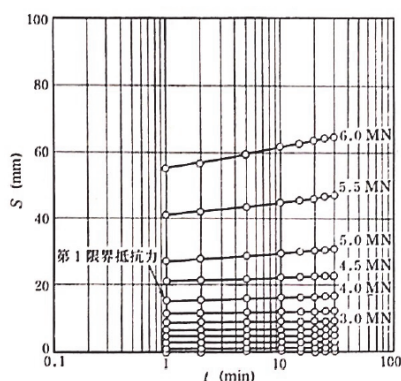
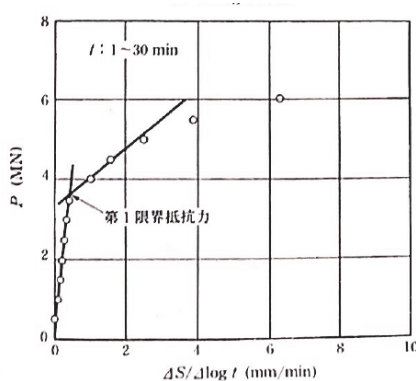
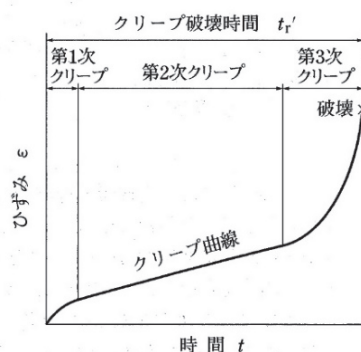
のほか、 $\log P$ - $\log S$ 曲線の折れ点や残留変位量の急増点とも完全には一致しないため、これらを総合して判断した結果に、技術者による個人差が生じやすくなっているのが現状であった<sup>2)</sup>。

## 3. 新しい第1限界抵抗力（クリープ）の考え方

地盤材料のクリープ現象は、「一定応力の下でひずみが時間とともに変化する現象」のことであり、一般的に図3に示すクリープ曲線<sup>4)</sup>のように、ひずみ速度が時間とともに減少する1次クリープと、ひずみ速度がほぼ一定値に落ち着く2次クリープ、さらにその後の破壊に至る3次クリープに分けられる。

これに対して、鉛直荷重を受ける杭のクリープ現象は、「一定の杭頭荷重の下で変位が時間とともに増加する現象」と解釈でき、主に杭周辺の地盤材料のクリープ現象の重ね合わせとして、図3と同様に1次クリープから順に移行していくと考えられる。具体的には、 $S$ - $\log t$ 曲線が直線状となる範囲が1次クリープに、その直線性が失われて下に凸な曲線となった範囲が2次クリープに相当すると解釈できる。なお、適切に設計された杭であれば、杭体材料のクリープ現象は相対的に小さく、その影響は無視できる。

このような解釈を踏まえ、新たに分離する第1限界抵抗力（クリープ）を「荷重保持中も時間に比例して変位が増加する2次クリープ領域に移行する状態の抵抗力」と考えることとし、その具体的な判定基準を「 $S$ - $\log t$ 曲線の直線性が明瞭に喪失する段階の荷重」と定義することを提案する。この考え方は、基本的には現行基準の $\Delta S/\Delta \log t$ 法と同様であるが、その直線性の変化を定量的に評価するための指標として、荷重保持中の $S$ - $\log t$ 曲線の傾きの変化量に着目することを提案する。以下にその具体的な判定方法を示す。

図1  $S$ - $\log t$ 法の概要<sup>1)</sup>図2  $\Delta S/\Delta \log t$ 法の概要<sup>1)</sup>図3 クリープ曲線<sup>4)</sup>

Determining Method of the First-Limit-Resistance (Creep) in Static Axial Compressive Load Test of Single Piles

H. NISHIOKA (Chuo University), K. WATANABE (Aichi Institute of Technology)

S. KAMEI (Jibanshikenjo), A. NAKAZATO (System Measure), Y. KIKUCHI (Tokyo University of Science)

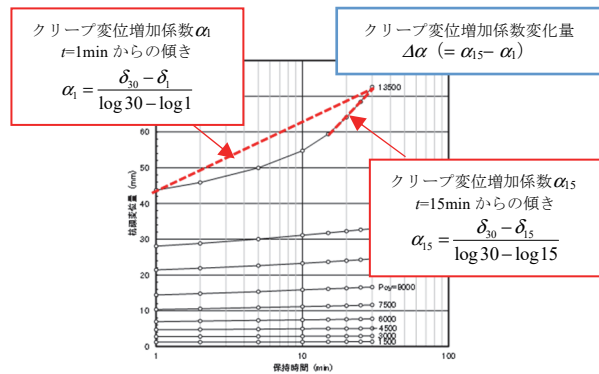


図4 クリープ変位増加係数変化量 $\Delta\alpha$ の求め方

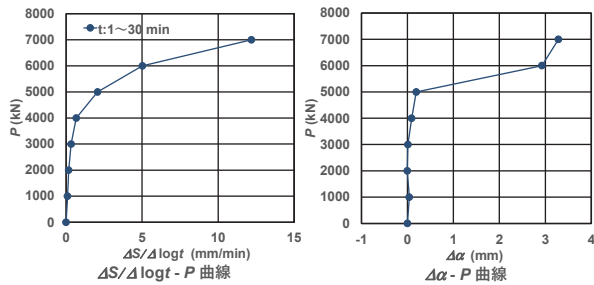


図5  $\Delta S/\Delta \log t$ 法と提案手法での判定の比較

4. クリープ変位増加係数変化量 $\Delta\alpha$ による判定法

$t=1\text{min}$  時点および  $t=15\text{min}$  からそれぞれ荷重保持終了時点 ( $t=30\text{min}$ ) までの区間での  $S-\log t$  曲線の傾きを求め、これをクリープ変位増加係数 $\alpha_1$  および $\alpha_{15}$ と定義する (図4)。 $S-\log t$  曲線が直線性を保持していれば $\alpha_1$  と $\alpha_{15}$ は同じ値になり、下に凸の形状となれば $\alpha_1$  よりも $\alpha_{15}$ の方が大きな値になる。そこで、これらの差をクリープ変位増加係数変化量 $\Delta\alpha$ と定義し、 $\Delta\alpha$ が有意な正の値を示した荷重段階を第1限界抵抗力(クリープ)と判定することを提案する。

提案手法の有効性を確認するため、ある既往の荷重試験事例について、現行基準の $\Delta S/\Delta \log t$ 法で用いる $\Delta S/\Delta \log t-P$ 曲線と、提案手法で用いる $\Delta\alpha-P$ 曲線を比較した例を図5に示す。現行基準では $\Delta S/\Delta \log t-P$ 曲線は緩やかに変化しており「急増する荷重」を判定する際に個人差を生じやすいのに対して、提案手法では、ある荷重段階まではクリープ変位増加係数変化量 $\Delta\alpha$ はほぼゼロであり、「有意な正の値を示す荷重」の判定には個人差は生じないことがわかる。

なお、このクリープ変位増加係数変化量 $\Delta\alpha$ は、計測誤差の影響を受けるため、「有意な正の値」を判定するための閾値を定める必要がある。そこで既往の段階荷重方式での荷重試験事例のうち、第2限界抵抗力 $R_2$ まで得られている全21事例を対象に、荷重荷重 $P$  ( $R_2$ で正規化) と $\Delta\alpha$ の関係を分析した結果を図6に示す。 $P/R_2 \approx 0.5$ を下回る範囲では、 $\Delta\alpha=0.5\text{mm}$ 以下となっていることが確認でき、この値を「有意な正の値」を判定する閾値として提案する。

5. 60分クリープ変位増加量  $\Delta\delta_{60}$ による制限

杭の条件によっては、限られた保持時間 (一般に30分間) の押し込み試験中は $S-\log t$ 曲線は直線性を保持しているものの、その勾配(クリープ変位増加係数 $\alpha_1$ )が比較的大きな値を示すことがある。このような場合には、荷重試験

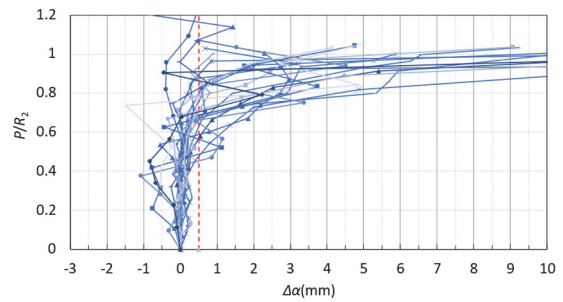


図6 荷重試験全21事例の $\Delta\alpha-P/R_2$ 曲線

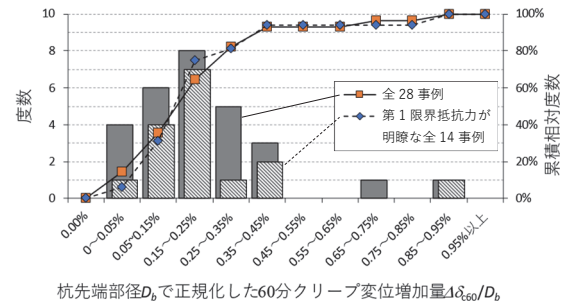


図7 現行基準による第1限界抵抗力作用時の60分クリープ変位増加量 $\Delta\delta_{60}$ のヒストグラム

中は2次クリープへの移行が確認されなかったとしても、実際の構造物で長期間の荷重を受けた場合に2次クリープに移行してしまう恐れもある。このような事態を回避するため、第1限界抵抗力(クリープ)は、クリープ変位増加係数 $\alpha_1$ 自身が既往の実績から定めた一定の値を上回らない範囲に制限することを提案する。

具体的には、クリープ変位増加係数 $\alpha_1$ よりも考え方が明確となる60分クリープ変位増加量 $\Delta\delta_{60}$  ( $= \alpha_1 \cdot \log 60$ )が杭先端部径 $D_b$ の0.5%を超える荷重段階を第1限界抵抗力(クリープ)と評価することを提案する。この基準値は、既往の荷重試験事例(現行基準による第1限界抵抗力が明瞭に判定できた全13事例)における第1限界抵抗力での荷重保持段階での $\Delta\delta_{60}$ の分布(図7)の大半が $D_b$ の0.5%以下となったことを根拠として設定したものである。

6. おわりに

本稿では、押し込み試験における新しい第1限界抵抗力(クリープ)の考え方と具体的な判定法を提案した。現行基準よりも判定のばらつきが小さくなり、またその意味も明確となることから、例えば、長期的な作用に対する使用性を第1限界抵抗力(クリープ)で直接照査する等、杭の荷重試験結果を活用した設計での活用が期待される。本提案内容を今後の基準改訂に反映させる予定である。

参考文献

- 1) 地盤工学会編：地盤工学会基準 杭の鉛直荷重試験方法・同解説—第1回改訂版—, 2002.5
- 2) 西岡英俊, 菊池喜昭, 杭の鉛直荷重試験改訂WG: 杭の鉛直荷重試験基準における限界抵抗力の考え方, 第54回地盤工学研究発表会, pp.913-914, 2019.7
- 3) 渡邊康司, 中里彰人, 亀井秀一, 西岡英俊, 菊池喜昭: 杭の押し込み試験で得られる鉛直支持力特性に関する新たな代表指標値の検討, 第56回地盤工学研究発表会, No.12-8-3-07, 2021.7
- 4) 地盤工学会編：地盤工学用語辞典, p.196, 2006.