

杭の鉛直載荷試験基準における限界抵抗力の考え方

杭の支持力, 載荷試験, 性能設計

鉄道総合技術研究所 国際○西岡 英俊  
東京理科大学 国際 菊池 喜昭  
杭の鉛直載荷試験基準改訂 WG

1. はじめに

「地盤工学会基準 杭の鉛直載荷試験方法・同解説 -第一回改訂版-」は、2002 年（平成 14 年）の改訂・刊行から 17 年が経過した。地盤工学会基準部地盤設計・施工委員会（委員長：木幡行宏室蘭工業大学教授）は、国際規格との整合性を高めるとともに、実務において今まで以上に鉛直載荷試験を活用して杭の設計・施工が合理化されるよう、2018 年度（平成 30 年度）より「杭の鉛直載荷試験基準改訂 WG（グループリーダー：菊池喜昭東京理科大学教授）」（以下、改訂 WG）を設置し、改訂作業を進めている。本稿では、試験結果として報告される指標のうち限界抵抗力の考え方について、改訂 WG における検討状況について報告する。なお、本稿では杭の鉛直載荷試験方法のうち主に静的な押し込み試験を対象とし、特に 2002 年に改訂された「押し込み試験方法 (JGS1811-2002)」を「現行基準」または「現行 JGS 基準」と表記する。

2. 従来の地盤工学会基準における限界抵抗力の考え方の変遷

地盤工学会において杭の鉛直載荷試験方法が初めて基準化されたのは 1971 年（昭和 46 年）であり、その中では「降伏荷重」および「極限荷重」が規定されていた。それから約 20 年後の 1993 年（平成 5 年）の改訂において、「杭の大径化・長尺化」や「打込み杭主流から場所打ち杭など施工法の多様化」が進み、「杭の支持力に関する基礎的研究や載荷試験事例蓄積などの進歩」や「今後限界状態設計法の導入が想定される」ことを考慮して大幅な見直しが行われ、「第 1 限界荷重」・「第 2 限界荷重」が導入された。その後、2002 年の改訂では、用語を「限界抵抗力」に改めるとともに、連続載荷方式の導入を踏まえて第 2 限界抵抗力の定義が変更されたが、1993 年の改訂に比べると比較的軽微な改訂に留まっている。これらの変遷を表 1 にまとめて示す。

表 1 現行 JGS 基準における限界抵抗力の名称と定義の変遷

制定 改訂	現・第 1 限界抵抗力		現・第 2 限界抵抗力	
	呼称	定義・判定法	呼称	定義・判定法
1971 年	降伏荷重	log P - log S 法, S - log t 法およびその他の方法を総合して決める。	極限荷重	荷重-沈下量曲線が沈下量の軸にはほぼ平行とみなされる荷重とする。
1993 年	第 1 限界荷重	log P - log S 曲線に現れる明瞭な折れ点の荷重をいい、S - log t 法, ΔS / Δlog t - P 法, 残留変位の急増点などを総合して判定する。ここに、P: 荷重, S: 杭頭変位量, t: 新規荷重段階における経過時間である。	第 2 限界荷重	杭先端直径の 10% の杭先端沈下量が生じたときの荷重と、杭頭の荷重-沈下量が沈下量軸にはほぼ平行とみなせる荷重のうち、小さい方とする。
2002 年 (現行)	第 1 限界抵抗力		第 2 限界抵抗力	押し込み抵抗が最大になったときの荷重とする。ただし、杭先端変位量が杭先端直径の 10% 以下の範囲とする。

なお、1993 年の改訂経緯は文献 1) に詳しいが、このうち呼称の改訂については「降伏荷重は国際的にあまり使用されていない、力学的意味があまり明確でない」、「極限荷重については呼称と実態が一致していない」、「本提案では沈下量で規定したこと等から現行の呼称は必ずしも適切ではない」等の意見があり、表 2 のような検討を経て、「多くの案が検討されたが、議論が百出し容易には決まらなかった。結果的に、限界状態設計法の導入を考慮し、支持力と変形を考慮した支持力の特性値として、第 1 限界荷重、第 2 限界荷重と呼称することを提案した。」との経緯が示されている。

表 2 1993 年改訂時の呼称の検討案 1) に加筆修正

旧呼称	限界状態	新呼称案
降伏荷重	(使用限界状態) 沈下量の使用限界 荷重-沈下量の弾性限界	○第 1 限界荷重 降伏荷重 A 点荷重 弾性限界荷重 支持力特性変化点荷重 摩擦限界荷重 比例限界荷重
極限荷重	(終局限界状態) 地盤抵抗の終局限界 沈下量の終局限界	○第 2 限界荷重 極限荷重 B 点荷重 基準支持力 塑性限界荷重

### 3. 海外基準における限界抵抗力の考え方

改訂 WG において、ISO および ASTM の載荷試験基準を対象に現行 JGS 基準における限界抵抗力に相当する取り扱いについて調査した。その結果、表 3 に示すようにこれらの海外基準では限界抵抗力に相当する取り扱いについてはほとんど記載されていないことが確認された。

### 4. 現行基準における課題

#### 4.1 第 1 限界抵抗力判定における個人差の影響

現行基準における判定法では、第 2 限界抵抗力は試験結果から機械的に判定することが可能であるが、第 1 限界抵抗力は「総合して判定する」という扱いとなっており、判定する技術者によって個人差が生じやすい。試験結果の普遍性・客観性の確保が強く求められる場合や、信頼性設計法を適用するために試験結果の誤差要因をできるだけ排除することが求められる場合には、このように個人差が生じやすいことが課題となる場合がある。

なお、現在、国内の実務においては、杭の鉛直載荷試験で得られる特性値として第 2 限界抵抗力は広く活用されているが、第 1 限界抵抗力はほとんど用いられていないのが実情である。この理由としては、直接的には各種の設計基準類自体が第 1 限界抵抗力にほとんど着目していないという点が大きいが、このような個人差が生じやすいこと（および個人差により結果の解釈が難しくなること）を実務者が敬遠している点も少なからず影響していると考えられる。

#### 4.2 性能設計概念・限界状態設計法への対応

現行基準における限界抵抗力は、表 2 に示すように 1993 年の改訂時に使用限界と終局限界という 2 つの限界状態の概念を取り入れた考え方であった。それから四半世紀以上が経過し、「土木・建築にかかる設計の基本（国土交通省、2002 年）」や「性能設計概念に基づいた基礎構造物等に関する設計原則（地盤工学会、JGS 4001-2004）」が制定され、それを踏まえて国内の設計基準類の多くも限界状態設計法あるいはそれを用いた性能設計へ移行したが、これらの多くでは要求性能およびそれに対する限界状態として安全性・終局限界および使用性・使用限界のほか、これらの中に「適用可能な技術でかつ妥当な経費および期間の範囲で修復を行えば構造物の継続使用を可能とする」ための修復性・修復限界が主に地震作用に対して設定されている。すなわち、現行基準における 2 つの限界抵抗力の考え方だけでは、修復限界を含めた 3 つの限界状態の概念に対応することが難しいという課題が生じている。

なお、現行基準における第 2 限界抵抗力は一般には終局限界として解釈される場合が多いが、実際には「杭先端変位量が杭先端直径の 10%」を超えても抵抗力が増加し続ける場合も多く、真の終局限界よりも手前にある修復限界に相当すると解釈することもできる。また、第 1 限界抵抗力の定義・判定法のうち、「 $S-\log t$  法」や「 $\Delta S / \Delta \log t - P$  法」など新規荷重段階における経過時間  $t$  に着目した判定法は長期的な作用に対するクリープ変形を考慮している点で使用性・使用限界の概念が明確に考慮されているといえるが、荷重保持を行わない連続載荷方式にも対応した「 $\log P - \log S$  曲線に現れる明瞭な折れ点」との定義や「残留変位の急増点」に着目した判定法は、地震作用のような短期的な作用を想定しているという点で部分的に修復限界の概念（例：JGS 4001-2004 の「1.8 耐震設計 1.8.5.3 修復限界の照査」における「基礎構造物として明瞭に非弾性的となる領域に達しないことを照査する」）も含んでおりと解釈することもできる。このように、杭の鉛直載荷試験基準としては、載荷速度や荷重保持時間の違い（段階載荷方式と連続載荷方式の違い、あるいは静的載荷試験と動的載荷試験の違い等）も含めて、限界抵抗力の考え方と性能設計概念・限界状態設計法との整合性を高めていく必要があると考えられる。

### 5. おわりに

本稿では、限界抵抗力の取り扱いについて、その変遷とともに現状の課題を整理した。今後、改訂 WG においては、これらの課題の重要性や緊急性も踏まえつつ、具体的な改訂の方針を決定していく予定である。ただし、その際には、実務において混乱を生じることが無いように配慮することも必要であると考えている（例えば、現在広く普及している第 2 限界抵抗力に関しては、その呼称や基本的な判定方法の継続性を十分に考慮する等）。会員各位におかれては、本稿を参考としつつ、DS において活発な議論をお願いしたい。

### 参考文献

- 1) 高野昭信, 青木一二三, 小粥康夫, 小笠原政文: 第 1 限界荷重, 第 2 限界荷重の意義と特徴について, 杭の鉛直載荷試験方法および支持力判定法に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp.47-54, 1991.

表 3 海外基準における限界抵抗力に相当する取扱いの調査結果

海外基準	限界抵抗力に相当する取扱い
ISO 22477-1 : Testing of piles: static compression load testing (2018 年制定)	基本的には抵抗力に関する何らかの特性値を算出することは規定されていない。ただし、「more optional parameter」との扱いで、Annex-A(informative)において、「critical creep load」の具体的な算定方法（第 1 限界抵抗力の $\Delta S / \Delta \log t - P$ 法と概ね同等）のみが示されている。
ASTM D1143M-07 : Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Compressive Load (2013 年改訂)	抵抗力に関する何らかの特性値を算出することは規定されていないが、「failure load」の定義に「変位が杭径の 15%に達したときの試験荷重」という第 2 限界抵抗力に近い定義が含まれているが、これは「試験を終了する目的」に用いる管理用の値であり、抵抗力の特性値という概念は含まれていない。