
一般セッション | 6. 地盤と構造物 (動的問題を含む)

杭基礎④

2020年7月21日(火) 15:10 ~ 16:40 第9

[21-9-4-03] 杭の載荷試験においてひずみ測定値からの軸力と区間沈下量の算定法の一提案

A Proposal of Calculation Method of Axial Force and Section Settlement from Measured Strain in Load Test of Pile

*小椋 仁志¹ (1. ジャパンパイル)

*Hitoshi OGURA¹ (1. JAPAN PILE CORPORATION)

キーワード：杭の載荷試験、ひずみ、軸力

Load Test of Pile, Strain, Axial Force

杭の載荷試験では、ひずみ計を取り付けて杭体の各部の軸力を求めることも多い。筆者は、ひずみ計の値から軸力を算定する際の問題点や注意点などについて DS資料として紹介した。本報では、続いて圧縮剛性が異なる杭を継いだ場合の軸力の算定方法と、区間沈下量の算定方法を提案する。

杭の載荷試験においてひずみ測定値からの軸力と区間沈下量の算定法の一提案

杭の載荷試験 ひずみ 軸力

ジャパンパイル 国際会員 小椋 仁志

1. はじめに

杭の載荷試験では、ひずみ計を取り付けて杭体各部の軸方向力（以下、軸力）を求めることも多い。筆者は、ひずみ計の値から軸力を算定する際の問題点や注意点を、JGS54のDS-1（杭の鉛直載荷試験方法の改訂に向けて）資料¹⁾で紹介した。以下は、その概要である。

㊦ すべてのひずみ計 $\epsilon_{iA} \sim \epsilon_{iD}$ (i : 断面番号、A~D: 一つの断面に4点設置する場合の平面位置記号) と杭頭荷重 P_0 との関係、軸力分布を算定するデータに絞って断面ごとに描き、他と異なる傾向を示す値（異常値）をチェックする。異常値がなければ、4点の平均値を i 断面のひずみ値 ϵ_i とし、異常値があればその点と対面する点の測定値を除外した2点の平均値を ϵ_i とする。

㊧ ϵ_i から軸力 P_i を求める算定式として、現行基準の解説には次式が記載されている。

$$P_i = (E_c A_c + E_s A_s) \epsilon_i = E_c A_c \epsilon_i \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 E_c : コンクリートのヤング係数、 A_c : コンクリートの断面積、 E_s : 鋼材のヤング係数、 A_s : 鋼材の断面積、 A_e : 換算断面積 $A_e = A_c + E_s/E_c \times A_s$

$E_c A_e$ を圧縮剛性と呼ぶが、 E_c も A_e も実際の値は公称値とはかなり異なる。このため、既製コンクリート杭や鋼管杭では杭頭部だけでも杭体の肉厚を測定し、 E_c は試験杭の製造工場に問い合わせる必要がある。場所打ち杭では、孔壁測定の結果等からひずみ計位置の実際の杭径（掘削径）から A_e を把握し、 E_c は杭体からひずみ計各断面位置のコアを採取して測定しておくのが望ましい。

㊨ 断面積が軸方向で変化する杭の場合、圧縮剛性は断面積に比例しない。このため、断面変化部にはひずみ計を取りつけない、軸対称 FEM などによって断面変化部の圧縮剛性を求めておく等の対応が必要になる。また、根固め部等を持つ埋込み杭の場合も、軸対称 FEM などによって根固め材や充填材が加わる杭先端部や杭周部の圧縮剛性を求めておくのが望ましい。

㊩ 既製杭では、施工の前に試験杭に圧縮力を加えて圧縮剛性を測定しておくことができるが十分ではない。このため、載荷試験中に周面抵抗の影響のない杭頭付近のひずみ計の測定値から圧縮剛性を求める方法を推奨する。

㊪ ㊩で得られた杭頭荷重 P_0 とひずみ ϵ の関係は、キャリブレーションカーブ（以下、Cal.カーブ）として定式化する。Cal.カーブには、累乗関数 ($P_0 = a\epsilon^b$) を、 $P_0 \sim \epsilon$ 関係の非線形性を考慮できること、 $\epsilon=0$ の時には $P_0=0$ となること、 $(\log P_0) = (\log a) + (b \log \epsilon)$ の形にすると係数 a, b が容易に算定できることなどから推奨する。

以上の DS-1 資料に続いて、本報では圧縮剛性が異なる杭を継いだ場合の軸力の算定方法と、区間沈下量の算定方法を提案する。

2. 剛性が異なる継杭の軸力の算定方法

既製杭では圧縮剛性の異なる杭を継いで用いることが多い。例えば、図1のように下杭はPHC節杭（圧縮剛性は軸部の剛性）、中杭は節部径のPHCかPRC杭（節なし）、上杭は節部径のPHCかPRC杭（節なし）、上



図1 継杭の例

杭は水平力に対応するためのSC杭とすることはよく行われている。この場合、下杭、中杭、上杭の圧縮剛性はかなり異なるため、載荷試験時に求めた上杭のCal.カーブは中杭や下杭には適用できない。軸対称 FEM 等によって中杭や下杭の圧縮剛性と上杭のそれとの比を求めておくことが考えられるが、継杭とする杭の組合せは千差万別であり、その都度軸対称 FEM 等を行うのは現実的ではない。

そこで本報では、図2のように上側の杭の最下断面2点（図では①と②）の軸力（同 P_1 と P_2 ）を結ぶ線を、下側の杭の最上断面（同③）まで延長（外挿）して求めた値をその断面位置の軸力（同 P_3 ）とし、これとひずみの測定値から新たなCal.カーブを求める方法を提案する。下側の杭の軸力は、新たなCal.カーブによって求める。このとき、上側の杭の最下断面と下側の杭の最上断面の位置はできるだけ近づけておく必要がある。また、②~③間の地盤は、①~②間と同じであることが望ましい。なお、上側の杭と下側の杭の外径が異なる場合は、①~②間の周面抵抗力を求め、②~③間も同じ値になるように P_4 を決めることになる。図3に一例として、ある継杭（断面番号は図2と同じ）の載荷試験結果による $P_0 \sim \epsilon_1$ 関係と $P_3 \sim \epsilon_3$ 関係および Cal.カーブ ($P_0 = 27.3\epsilon_1^{0.979}$ 、 $P_3 = 78.67\epsilon_3^{0.764}$) を示す。 $P_3 \sim \epsilon_3$ 関係の Cal.カーブは、 $P_0 \sim \epsilon_1$ 関係に比べ相関性は悪く非線形性は強くなる傾向がある。

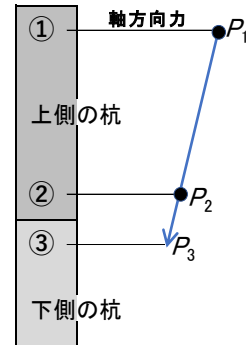


図2 下側の杭の軸力の算定方法

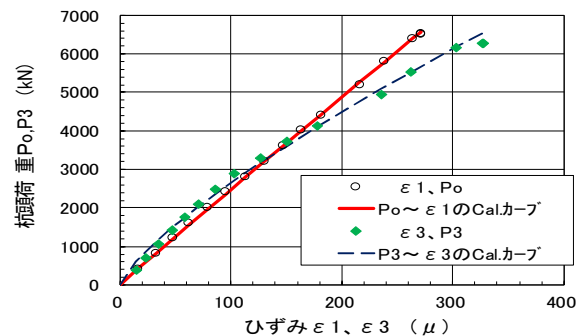


図3 Cal.カーブの例

なお、図1の下杭のような拡張杭の場合、拡張部と軸部の断面積は大きく異なるため、下杭の最上断面（拡張部）の軸力と測定ひずみ値によるCal.カーブから軸部断面の軸力を求めることはできない。しかし、下杭の最上断面を軸部まで下げると、中杭の最下断面との距離が長すぎて適切ではない。この場合、便法ではあるが拡張部と軸部とは材料は同じコンクリートであることから非線形性は大きく異なると思われるため、指数部分 ($P_i = a\epsilon_i^b$ の b) は同じとし係数部分 (同 a) を断面積の比によって修正するのが妥当な方法と考えられる。

3. 区間沈下量の算定方法

現行基準では、ひずみ計を設置した断面の区間沈下量 $S_{i,i+1}$ の算定式として次式を示している (図4 (a))。

$$S_{i,i+1} = (S_i + S_{i+1}) / 2$$

$$S_i = S_1 - \sum \{ (\epsilon_j + \epsilon_{j+1}) / 2 \times l_{j,j+1} \} \dots \dots \dots (2)$$

$$S_1 = S_0 - \epsilon_1 \cdot l_{0,1}$$

ここに、 S_i 、 S_{i+1} : i 断面と $(i+1)$ 断面の沈下量 (mm)、 ϵ_j 、 ϵ_{j+1} : j 断面と $(j+1)$ 断面のひずみ量 (μ)、 $l_{j,j+1}$: j 断面と $(j+1)$ 断面間の距離 (区間長、mm)、 S_0 : 杭頭沈下量 (mm) この方法 (ここでは、台形方式と呼ぶ) は、断面間の周面抵抗力度がほぼ同じで縮み量も一定との仮定のもとに成立している。しかし、断面間で周面抵抗力度が大きく変わる場合 (例えば、軟弱粘性土層と硬い砂礫層、フリクションカット部分と無処理部分、など) は成立しない。

そこで、同図 (b) のように一つの断面のひずみ計が分担する「分担長 L_i 」を導入し、この区間のひずみ量は測定された値が代表すると考えると、ひずみの測定値に L_i を乗じた値が区間縮み量となる。本報ではこれを「長方形方式」と呼び、台形方式に代わるものとして提案する。

表1に、杭頭荷重が5800kN時の区間周面抵抗力度と区間沈下量を計算した例を示す。この例では、上側の杭として長さ26m、外径900mmのSC杭、下側の杭として長さ9m、節部径900mm、軸部径700mmのPHC拡張節杭を想定し、杭頭から0.5~25.5mの間はフリクションカット処理が施されているものとしている。表中の「境界深度」は直上と直下のひずみ計断面の平均深度とするのが原則であるが、断面間で周面抵抗力度が大きく変わる場合には適宜変更して地盤の境目やフリクションカット処理などの深度を採用することができるのが長方形方式の利点である。表

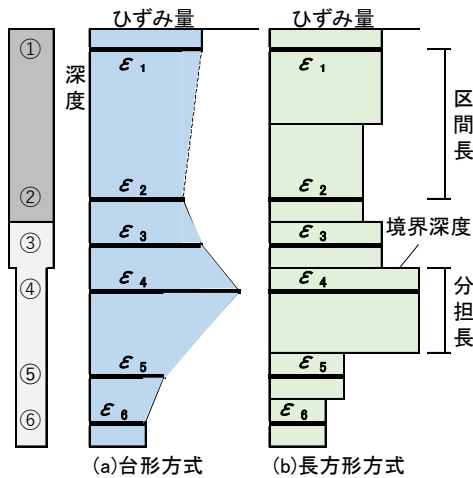


図4 区間縮み量の算定方法

1の例では、④~⑤断面間の境界深度として、平均深度ではなく地盤が変化していると想定したGL-32.0mを採用している。分担長は、上下の境界深度間の距離となる。

区間縮み量 (ひずみの測定値と区間長の積) を杭頭から杭先端沈下量の測定位置まで累積すると、「ひずみ計による杭体縮み量」が得られる (表1の例では9.94mm)。一方、載荷試験では杭頭沈下量とともに杭先端沈下量も測定するのが一般的であり、これらの沈下量の差が「沈下計による杭体縮み量」となる (同 $31.09 - 21.73 = 9.36\text{mm}$)。二つの杭体縮み量には数%のゲージ長さで分担長区間のひずみを代表していることや測定値のばらつきが大きいことを考えると、沈下計 (変位計) による杭体縮み量の方がはるかに信頼できる。このことを考慮して、表1では補正係数 (同 $9.36/9.94 = 0.94$) を導入することによって「ひずみ計による杭体縮み量」を「沈下計による杭体縮み量」に合せている。区間沈下量は、杭頭沈下量から補正累積縮み量を減じた値となる。

各荷重階の載荷荷重ごとに表1の計算を行い、それによって得られた区間周面抵抗力度 $\tau_{i,i+1}$ ~ 区間沈下量 $S_{i,i+1}$ 関係の一例を、図4に示しておく。

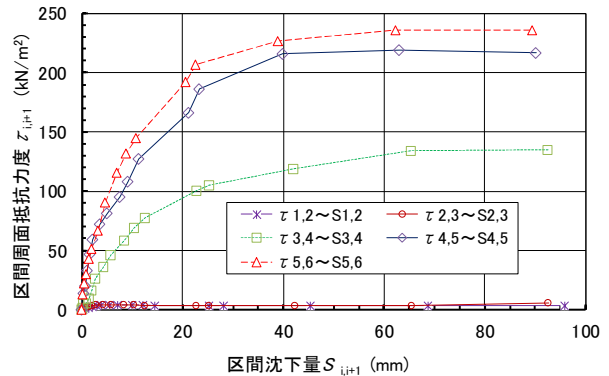


図5 区間周面抵抗力度~区間沈下量関係の例

4. おわりに

本報では、圧縮剛性が異なる杭を継いだ場合の下側の杭の軸力の算定方法と、長方形方式による区間沈下量の算定方法を提案した。ひずみ測定を伴う載荷試験の際には、本報を参考にいただければ幸いである。

参考文献

- 1) 小椋仁志：杭の載荷試験においてひずみ測定値から軸力を算定する際の問題点とその検討、第54回地盤工学研究発表会 DS-1 (杭の鉛直載荷試験方法の改訂に向けて) 資料、pp.4~5、2019.7

表1 区間周面抵抗力度と区間沈下量の計算表の例

断面番号	深度 (GL-m)	ひずみ ϵ_i (μ)	区間長 (m)	軸力 (kN)	軸力差 (kN)	区間周面摩擦力度 (kN/m ²)	境界深度 (GL-m)	分担長 (m)	区間縮み量 (mm)	累積縮み量 (mm)	実測沈下量 (mm)	縮み量 $S_0 - S_p$ (mm)	補正縮み量 (mm)	補正累積縮み量 (mm)	区間沈下量 (mm)
杭頭	0.00			5789							31.09	9.36			31.09
			0.30		0	0.00				0.00				0.00	
①	0.30	237.8		5789				13.00	3.09			補正係数 0.94	2.91		
			25.40	247		3.44	13.00		3.09				2.91		28.18
②	25.70	227.5		5542				13.00	2.96				2.79		25.39
			0.60		6	3.44	26.00		6.05				0.16		
③	26.30	262.0		5536				0.65	0.17						
			0.70		208	105.10	26.65		6.22					5.86	25.23
④	27.00	610.8		5328				5.35	3.27				3.08		
			6.00		3155	185.98	32.00		9.49				0.35		22.15
⑤	33.00	190.8		2173				1.93	0.37						
			1.85		1082	206.90	33.93		9.85					9.28	21.80
⑥	34.85	78.0		1091				1.08	0.08				0.08		
			0.15				35.00		9.94					9.36	21.73
杭先端	35.00										21.73				