

急速載荷試験による鉛直支持力推定法の適用範囲

01A3725 川邊泰徳

01A3738 高田紘匡

指導教員 烏野 清

1. はじめに

昨年度までの研究により、最大載荷荷重を変えた急速載荷試験と静的試験を模型杭に対して実施し、両者を比較・検討したところ、急速載荷試験の載荷荷重は第1限界抵抗（logP-logS 曲線に現れる明瞭な折点の荷重。ここで P：荷重、S：杭頭変位）と第2限界抵抗（押し込み抵抗が最大となった時の荷重。ただし、杭先端変位が先端直径の10%以下の範囲）の中間値以上（最大変位は杭径の約5%）であれば、静的支持力を推定することが可能であることを示した。しかしながら、試験ケースが少ないために正確な適用範囲を示したとは言いがたい。

本年度の研究は、昨年度に引き続き推定手法の適用範囲を明確にするため、昨年度使用した模型杭の直径と長さの比率を変え、実杭に近い模型杭で試験を行った。また、原位置で実施された実杭の急速載荷試験のデータについても同様の検討を行った。

2. 模型地盤および試験方法

今回の試験ではアクリル製の土槽（φ 300mm、高さ 1000mm）を試験地盤とし、実験試料として乾燥した岡垣砂を使用した。岡垣砂の物性値は表-1 に示すとおりである。試験方法として空中落下法を用いて地盤を作成し、その時土槽が非常に高いため、試料を7回に分けて投入している。また、地盤の相対密度を $Dr=50\%$ とするために、各層において砂を投入後、プラスチックハンマーを用いて土槽円周に沿って 100 回の震動を加えた。

試験装置の概略を図-1 に示す。載荷装置にはエアシリンダー（最大載荷力 10kN）を利用している。杭頭部の変位、加速度、荷重および杭先端部の荷重は変位計、加速度計およびロードセルを用いて計測した。サンプリング間隔は 0.5msec とし、ひずみ測定器（DRA - 110）を用いてパソコンに記録した。急速載荷試験の開始スイッチおよび静的載荷試験の圧力を加えるバルブ調整は手動で行った。

図-2 に使用した模型杭を示す。模型杭は直径 30mm、長さ 850mm の鋼管で、杭周面はスプレー糊で砂を付着させている。杭先端部にロードセルを取り付け、先端支持力を直接測定できるようにしている。試験ケースを表-2 に示す。荷重の載荷方法は表に示す空気圧をエアシリンダー内に流入させ、杭頭の変位が制

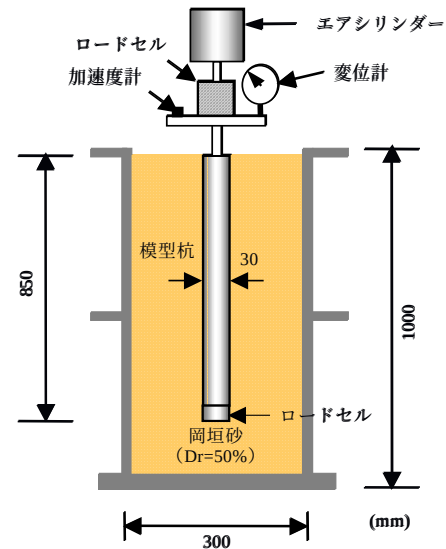


図-1 試験装置

表-1 砂の物性試験結果

試料名	岡垣砂
土粒子密度 ρ_s	2.640g/cm ³
最大密度 ρ_{max}	1.655g/cm ³
最小密度 ρ_{min}	1.423g/cm ³



図-2 模型杭(摩擦杭)

表-2 試験ケース

制限変位(mm)	空気圧	ケース番号
0.5	0.3	ケース①
	0.4	ケース②
	0.5	ケース③
		ケース④
	0.8	ケース⑤
1.0	0.4	ケース⑥

限変位まで変位したところで、シリンダー内部の空気を排出するようにした。また、静的支持力を把握する目的で静的試験（載荷速度 0.5mm/min）も併せて行った。

3. 静的試験結果

静的載荷試験は全部で 6 回実施した。杭頭部の荷重－変位関係はほぼ等しい結果が得られ、模型地盤がほぼ同一条件で作成されていることは確認した。図-3 に静的試験の結果の一例を示す。この図における周面摩擦力は、測定した先端支持力と杭頭支持力の荷重の差より算出したものである。先端支持力に比べ、周面摩擦力の杭頭支持力に対する割合が非常に大きい事がわかる。また、杭頭支持力は 3mm 程度の変位で降伏荷重となるが、6mm の変位でも明確な極限荷重（荷重－変位曲線で変位軸にほぼ平行とみなしうる時の荷重）まで至っていない。

図-4 は静的試験の値を対数目盛で示したものである。この図から現行基準での支持力特性値の第 1 限界抵抗力和第 2 限界抵抗力の値を見てみると、第 1 限界抵抗力は 1.9kN、第 2 限界抵抗力は 2.0kN であることがわかる。また、変位の値を見ると第 1 限界抵抗力の場合では 2.7mm、第 2 限界抵抗力では 3.0mm となり、第 1 限界抵抗力が第 2 限界抵抗力の非常に近い位置にある。

4. 急速載荷試験結果

図-5 は各ケースの急速載荷試験による杭頭部の荷重－変位関係を示したものである。各測定値には 15～30Hz のローパスフィルタによるノイズ処理を行った。シリンダー内の空気圧を制御する制限変位はケース①～⑤は 0.5mm、ケース⑥では 1.0mm となっているが、載荷時間が非常に短いため、シリンダー内の空気の制御へのタイムラグの影響により、制限変位以上の沈下量が発生している。ケース①、②、④、⑥において荷重－変位関係は載荷時ではほぼ直線的に変化している。しかし、荷重が除荷されても変位は回復せず、大きな残留変位が発生している。これは、支持力に対する周面摩擦力の割合が非常に大きいので、除荷過程において先端地盤のリバウンドや、杭体の慣性力などの影響が小さいためと考えられる。

5. 支持力推定法

急速載荷試験では杭の挙動を一質点系の剛体振動としてモデル化できるので、荷重 $P(t)$ が杭頭に作用した場合、運動方程式は式(1)となる。ここで、 m は杭質量(1.225kg)+付加質量 (0.75kg)、 c は減衰係数(N・sec /m)、 y は杭頭変位(m)である。

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + q(y) = P(t) \quad (1)$$

図-6に復元力特性を示す。今回の試験では乾燥砂を用いているので、復元力 $q(y)$ は載荷速度による強度増加は無視できるので次式とする。ここで、 P_u は極限支持力(N)、 δy は降伏変位(m)、 K は除荷過程

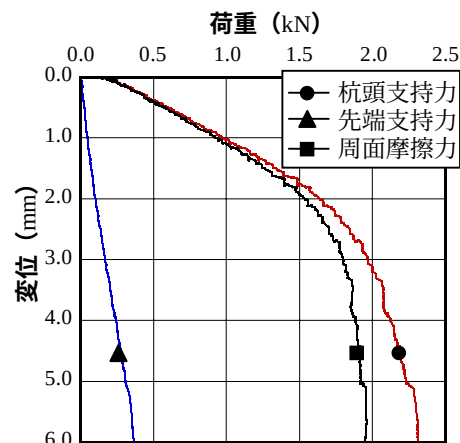


図-3 静的試験結果

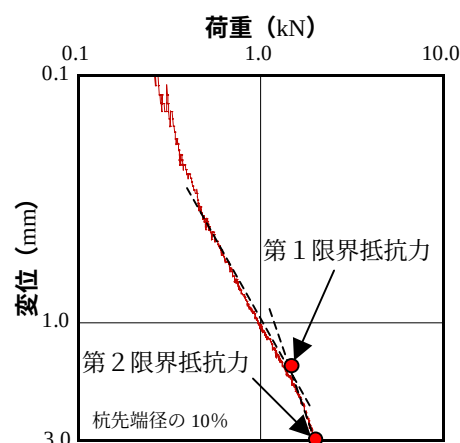


図-4 静的支持力

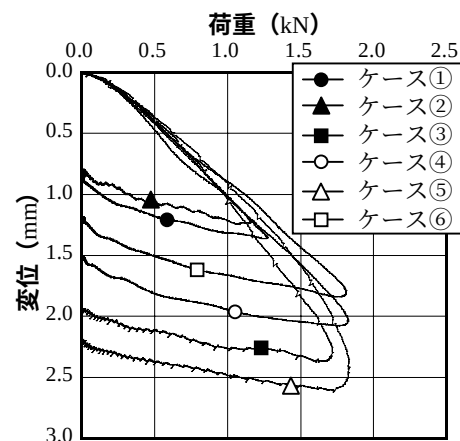


図-5 急速載荷試験結果

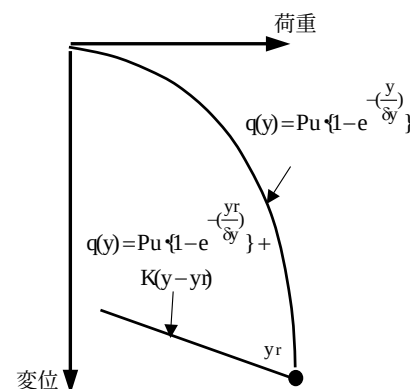


図-6 復元力特性

の勾配(N/m)、 y_r は載荷から除荷過程へ移行する変位(m)である。

$$\begin{aligned} \dot{y} > 0 \quad q(y) &= P_u \left[1 - e^{-(y/\delta_y)} \right] \\ \dot{y} \leq 0 \quad q(y) &= P_u \left[1 - e^{-(y_r/\delta_y)} \right] + K(y - y_r) \end{aligned} \tag{2}$$

また、減衰係数 c は急速載荷試験における荷重－変位の履歴曲線から算出できる等価減衰定数 h_e から求める。

$$c = 2h_e \sqrt{\partial q(y) / \partial y \cdot m} \tag{3}$$

ここで、図-7に急速載荷試験の最大変位と算出した等価減衰定数 h_e との関係を示す。初期の値を除けば最大変位の増加と共に減衰定数 h_e がほぼ直線的に増加している。

式(1)～式(3)における未知量は復元力に関わる P_u 、 δ_y 、 K である。そこで、未知量の初期値を全て0とし、順次、値を増加させながら剛体振動の応答計算を繰返し行い、応答変位と測定された杭頭変位の差を二乗し、その和が最小となるような値の組合せを P_u 、 δ_y 、 K の推定値とした。ただし、 P_u は急速載荷試験の最大載荷荷重の2倍以下、 δ_y は杭径の10%以下であると仮定した。 P_u 、 δ_y が推定できれば、式(2)より静的載荷試験と同等な杭の静的な荷重－変位関係を求めることが可能である。

表-3に推定値を示す。また、図-8はこの推定値を用いて、式(1)～(3)で計算した応答値と急速載荷試験の結果を比較したものである。ただし、紙面の都合上、ケース①、④、⑥についてのみ示す。各ケース最大荷重近傍で多少変位にズレが見られるが、ほぼ実験値と推定値は一致している。これは、図に示していない他のケースでも同様であった。これらの結果より表-3に示す推定値が妥当であると判断される。

図-9 は静的試験結果と式(2)より算出した $q(y)$ を比較したものである。1kN 程度までは各ケースとも大きな違いが見られないが、それ以降変形が進むに従って、各ケースで違いが発生する。ケース③、⑤では荷重－変位関係は静的試験と非常に良い一致を示しているが、 P_u の推定値を比較すると異なっている。今回の模型杭では、図-3 に示すように極限支持力を確認するためには 6mm 以上の変形が必要である。しかし、ケース③、⑤の急速載荷試験の最大変位量は 2.4、2.6mm 程度であり、極限支持力まで推定するには情報量が少ないため、 P_u の推定値が大きく異なると考えられる。

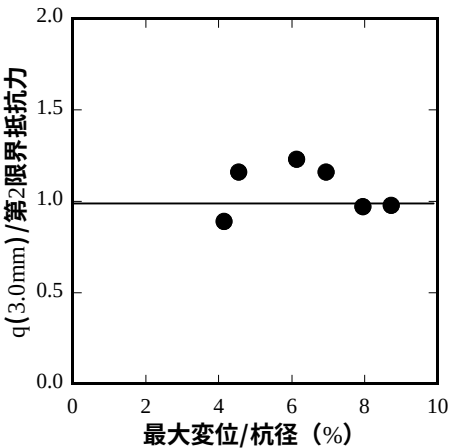


図-10 模型実験の推定精度

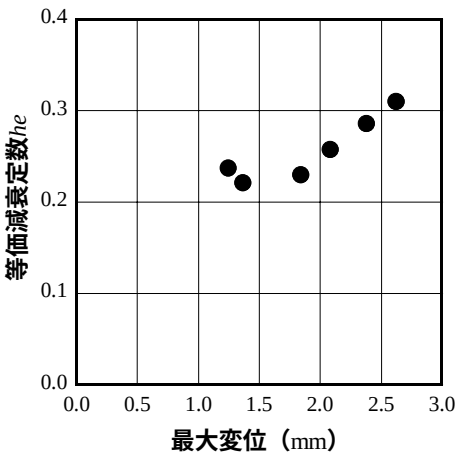


図-7 最大変位と等価減衰定数

表-3 推定値一覧

ケース	P_u (kN)	δ_y (mm)	K (kN/mm)
①	2.32	1.8	3.57
②	2.01	1.5	2.65
③	3.92	3.5	3.72
④	3.44	2.8	3.73
⑤	2.16	1.4	4.38
⑥	3.44	2.5	3.26

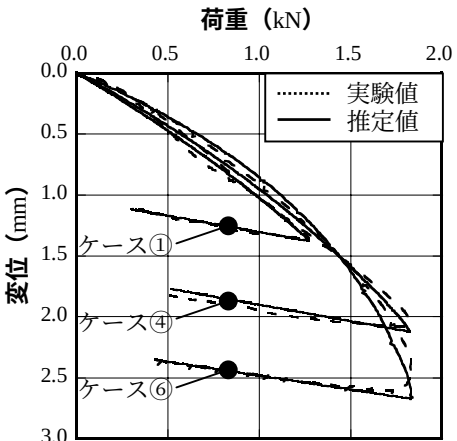


図-8 急速載荷試験と推定結果

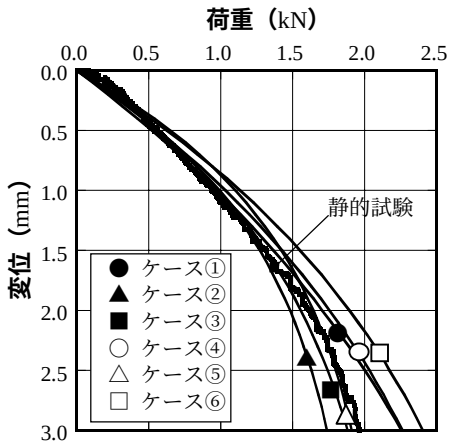


図-9 静的試験結果と $q(y)$ の比較

図-10 は、第 2 限界抵抗力と式(2)における $y=3\text{mm}$ 時の荷重の比と最大変位量/杭径の関係を示したものである。今回の試験は最大変位が杭径の 4～9%となったが、8%以上のケースのみ第 2 限界抵抗力と同等の推定値は得られた。5%以下のデータでうまく推定できなかった。今回の模型杭は降伏変位(2.7mm)が杭径の 10% 位置(第 2 限界抵抗力)に近いのである。

6. 実杭による推定精度の検討

表-4 に検討を行った杭の条件を示す。検討対象は全 14 ケースである。試験杭は HASAKI、SH94、SH95 の 3 グループに分類され、杭長(L)は杭径(D)の約 20～30 倍であり、今回の模型杭に近い寸法形状となっている。また、急速載荷試験の最大変位は HASAKI で杭径の約 10%、SH94 は 1～3%、SH95 で 3～14%である。表-5 には、模型杭に適用した解析手法で推定した $q(0.1D)$ 、 δ_y と静的試験結果から求めた第 2 限界抵抗力($P_{0.1D}$)と降伏変位を示す。

図-11 に $q(0.1D)/P_{0.1D}$ と最大変位/杭径の関係を示す。実杭の試験では最大変位が杭径の 5%以下のデータが多く、荷重－変位関係は弾性範囲内のデータのため推定値のバラツキが大きい。また、5%以上のデータは 3 点しか無いが、ほぼ静的試験の $P_{0.1D}$ を推定できている。模型実験からも分かるように、急速載荷試験の荷重－変位関係が弾性範囲内のデータでは推定することは困難であり、十分な荷重、変位のデータが必要である。

7. まとめ

急速載荷試験の静的支持力推定法の適用範囲を明確にする目的で模型実験を実施し、推定精度の検討を行った。また、実杭の急速載荷試験でも同様の検討を行った。その結果、模型杭の検討では、降伏変位が杭径の 9%程度あったため、5%程度のデータでは第 2 限界抵抗力を推定することは困難であった。また、実杭の検討においては、5%以内の観測データでは推定値にはバラツキが大きい。5%以上のデータでは精度よく推定することができる。

これまで実施した模型杭および実杭による検討から判断して、急速載荷試験の静的支持力推定法を適用する場合、必要な変位のデータ範囲は杭径の 5%以上が目安となる。

<参考文献>

荒巻、烏野、落合、田中：急速載荷試験の載荷荷重と静的支持力の推定精度、第 59 回年次学術講演会、2004.9

田中、荒巻、烏野：模型杭を用いた急速載荷試験による鉛直支持力推定法の適用範囲、第 60 回年次学術講演会、2005.9

表-4 実杭の条件

	杭種	杭径 D mm	杭長 L m	L/D	急速載荷試験(最大値)	
					荷重 kN	変位 mm
HASAKI	鋼管	400	13.0	32.5	3677.5	37.2
SH94T11	PHC	300	7.0	23.3	508.2	3.8
SH94T12	PHC	300	7.0	23.3	609.8	5.6
SH94T21	PHC	300	7.0	23.3	524.7	2.8
SH94T31	PHC	300	7.0	23.3	442.6	3.9
SH94T32	PHC	300	7.0	23.3	362.9	4.0
SH94T33	PHC	300	7.0	23.3	537.9	6.0
SH94T42	PHC	300	7.0	23.3	308.6	2.7
SH94T43	PHC	300	7.0	23.3	331.7	2.5
SH94T44	PHC	300	7.0	23.3	516.1	8.1
SH94T51	PHC	300	7.0	23.3	631.0	7.9
SH95T12	鋼管	400	12.0	30.0	1365.8	25.8
SH94T13	鋼管	400	12.0	30.0	1606.0	57.4
SH94T14	鋼管	400	12.0	30.0	1173.2	10.5

表-5 静的試験と推定値の比較

	静的試験		推定値	
	$P_{0.1D}$ kN	δ_y mm	$q(0.1D)$ kN	δ_y mm
HASAKI	3450	12.0	4381	19.0
SH94T11	470	2.0	930	4.2
SH94T12	470	2.0	1245	7.5
SH94T21	705	3.0	1056	3.8
SH94T31	705	3.0	605.0	2.6
SH94T32	705	3.0	1954.0	17.7
SH94T33	705	3.0	829	5.1
SH94T42	470	2.0	544	3.0
SH94T43	470	2.0	1328	8.2
SH94T44	470	2.0	629	4.3
SH94T51	470	2.0	833	4.8
SH95T12	1300	5.0	1292	5.0
SH94T13	1300	5.0	1233	7.3
SH94T14	1300	5.0	1568	7.2

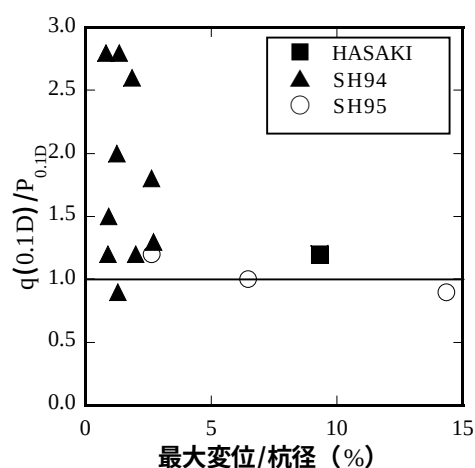


図-11 実杭の推定精度