

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

01A3722 金松喜義

01A3724 河口直樹

指導教員 鳥野 清

1. はじめに

我々の研究室では、急速載荷試験による杭の鉛直支持力推定手法を提案し、実地盤での試験結果に対する検討から、十分適用できることを示した。また、模型杭に対して最大載荷荷重を変えて急速載荷試験を行い、提案手法により杭の静的支持力と別途行った静的試験結果と比較推定した。その結果、急速載荷試験の載荷荷重は、第1限界抵抗力（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限界抵抗力（押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。

本年度の研究は、提案した推定手法の適用範囲をより明確にする目的で、支持力特性の異なる模型杭に対して急速載荷試験を実施し、検討を行ったものである。

2. 模型地盤および試験方法

今回の実験試料は乾燥した岡垣砂を使用し、その物性値を表-1に示す。模型地盤の作成はアクリル製の土槽（φ300mm、高さ550mm）に空中落下法を用い、地盤の相対密度が $Dr=70\%$ となるようにした。ただし、相対密度を均一とするために、土槽底面から20cm毎に砂入れホッパーの高さを変え、3回に分けて投入した。また、杭先端部には発砲スチロール（φ100mm、高さ30mm）を設置し、鉛直支持力特性値が明確になるようにした。

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2種類の模型杭を示す。模型杭は直径50mm、長さ350mmの鋼管杭で、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。杭Aは杭周面に何の加工もしていない滑らかなもので、杭Bは杭の表面に砂を付着させて摩擦力を向上させている。

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、杭頭が制限値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

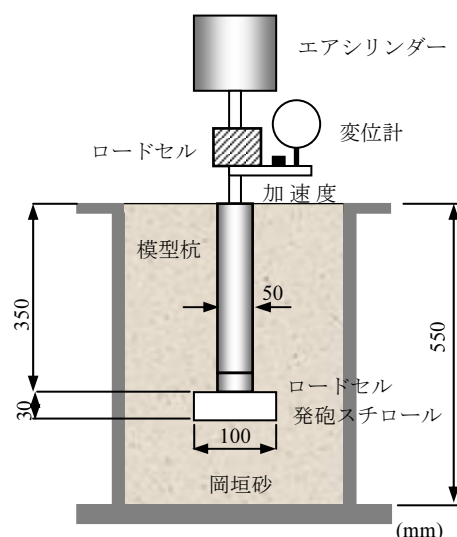


図-1 試験装置

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

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

図-3 に杭 A、B の静的試験結果を示す。図中の周面摩擦力は測定した杭頭部と先端部の荷重の差より算出したものである。先端支持力はどちらの先端地盤の条件も同じであるため、ほぼ同程度の値となっている。一方、杭 A の周面摩擦力は先端支持力の 1/2 程度となっており、杭 B の周面摩擦力よりかなり小さい。このため、杭 A は周面支持力が極限值となった以降でも、杭先端部および杭頭部の支持力も増加し続け、支持杭の挙動を示している。杭 B では周面摩擦力が極限值となった以降、杭先端支持力は増加しているものの、周面摩擦力が支配的なため、杭頭部の支持力は大きな増加を見せず、摩擦杭の挙動を示している。

図-4 は静的試験における杭頭部の載荷荷重と変位の関係を示したものである。試験は杭 A では 3 回実施し、杭 B では 2 回実施した。杭 A、杭 B 共に静的試験を数回づつ実施しているが、どちらの場合も試験回数にかかわらず同じような値となっているため、図-4 では代表的な値を示すこととした。試験結果から、第 1 限界抵抗力の平均値は杭 A では 0.17kN で杭 B では 0.43kN であった。また、第 2 限界抵抗力の平均値は杭 A が 0.37kN で杭 B が 0.60kN となっている。この結果から、杭 A では 0.17kN であった第 1 限界抵抗力が杭 B では 0.43kN に増加しており、杭の摩擦力が大きく増加していることが分かる。通常、周面摩擦力の降伏変位となる第 1 限界抵抗力時の変位は、杭 A では 0.4mm、杭 B では 1.7mm となっており、これからも杭の摩擦力が大きく増加していることが分かる。

4. 急速載荷試験結果

図-5 は杭 A の各ケースの急速載荷試験における荷重と杭頭変位の関係を示したものである。図-6 には杭 B の測定結果を示す。各測定値は 30Hz のローパスフィルタによるノイズ処理を行っている。また、静的試験結果も併せて示す。弾性範囲内では急速載荷試験と静的載荷試験の違いは見られないが、第 1 限界抵抗力以降は動的な影響が見られる。

ケース 1～2 では 1mm、ケース 3～5 では 2mm の変位でシリンダー内の空気圧による荷重がゼロとなるよ

試験方法	ケース	空気圧（制限変位）
急速 載荷 試験	杭 A	1 0.025MPa（1mm）
		2 0.050MPa（1mm）
		3 0.050MPa（2mm）
		4 0.060MPa（2mm）
		5 0.075MPa（2mm）
	杭 B	1 0.100MPa（1mm）
		2 0.125MPa（1mm）
		3 0.175MPa（1mm）
		4 0.150MPa（2mm）
		5 0.160MPa（2mm）

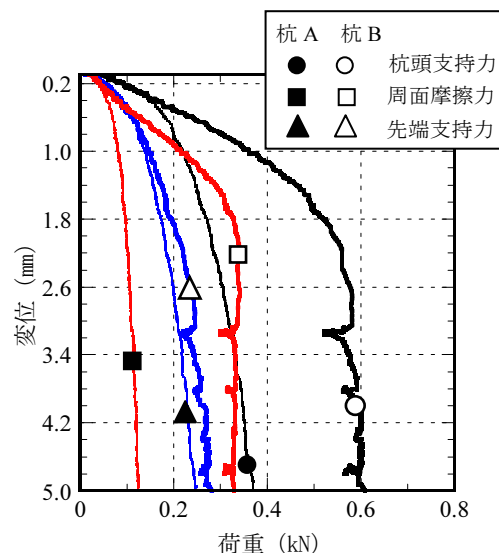


図-3 静的試験結果

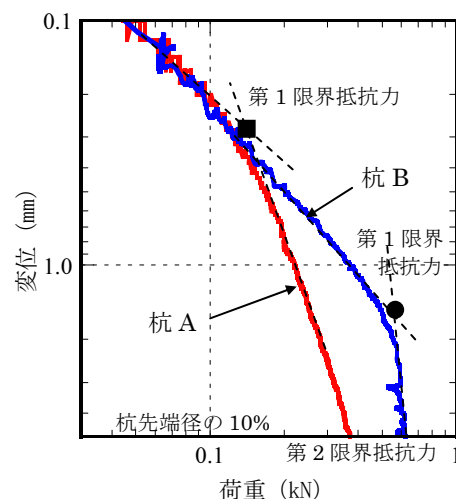


図-4 静的支持力

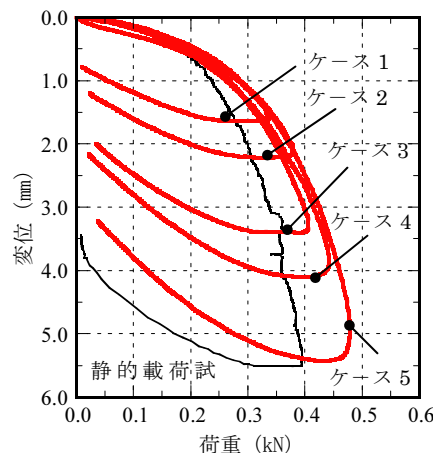


図-5 急速載荷試験と静的載荷試験(A 杭)

うに制御しているが、杭Aでは沈下が進行している。これは、杭体の加速度の影響であると考えられる。この傾向は、杭Bでも同様に見られる。

5. 支持力推定法

急速载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(2.27kg)+付加質量(1.17kg)、 c は減衰係数(N・sec/m)、 y は杭頭変位(m)である。

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

図-7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 $q(y)$ は载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 は除荷過程の勾配(N/m)、 y_r は载荷から除荷過程へ移行する変位(m)である。

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

また、減衰係数 c は急速载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-8に急速载荷試験の最大変位と算出した等価減衰定数 h_e と関係を示す。杭Aでは最大変位が増加しているにも関わらず、 h_e は0.24～0.28に分布しており大きな差が見られない。これは図-5から判るように最大変位が大きくなるにしたがって、履歴エネルギーと弾性エネルギーの増加が同程度となっているためである。杭Bでは最大変位が大きくなるにしたがって、 h_e は増加している。

式(1)～式(3)における未知量は復元力に関わる P_u 、 δy 、 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の二乗和が最小となるような値の組合せを P_u 、 δy 、 K の推定値とした。ただし、 P_u

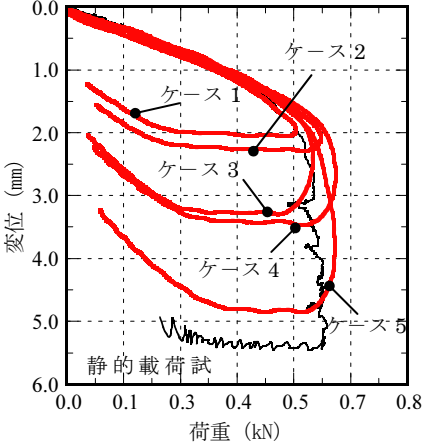


図-6 急速载荷試験と静的载荷試験(B 杭)

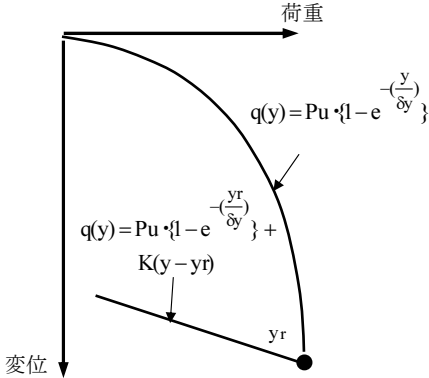


図-7 復元力特性

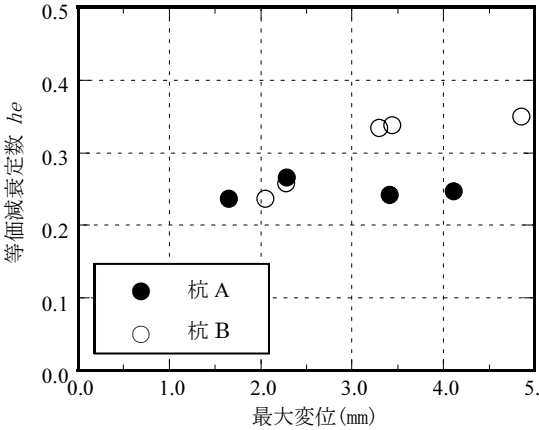


図-8 最大変位と等価減衰定数

表-3 推定結果一覧 (杭 A、杭 B)

杭 A	急速载荷試験		第 2 限界 抵抗力	推定値		杭 B	急速载荷試験		第 2 限界 抵抗力	推定値	
	最大荷重	最大変位		P_u	δy		最大荷重	最大変位		P_u	δy
ケース	kN	mm	kN	kN	mm	ケース	kN	mm	kN	kN	mm
1	0.336	1.645	0.370	0.356	0.59	1	0.537	2.050	0.605	0.668	1.25
3	0.400	2.284		0.424	0.77	3	0.596	2.273		0.690	1.19
4	0.406	3.409		0.432	1.17	4	0.577	3.291		0.583	0.79
5	0.442	4.108		0.466	1.36	5	0.631	3.436		0.641	0.86
5	0.478	5.437		0.492	1.49	5	0.630	4.845		0.626	0.97

は急速載荷試験の最大載荷荷重の2倍以下、 δy は杭径の10%以下であると仮定した。 P_u 、 δy 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。

6. 支持力推定結果と適用範囲

表-3に急速載荷試験の最大値と静的試験の第2限界抵抗荷重と推定した P_u 、 δy を示す。

図-9は杭Aにおける静的載荷試験結果と表-3のパラメータから得られる各ケースの静的な支持力の推定値を比較したものである。ケース1の推定値は静的載荷試験とよく一致しているが、他のケースにおいて、載荷荷重の増加とともに推定値は静的試験との差が大きくなっている。

図-10は杭Bの静的試験結果と表-3のパラメータより求めた静的支持力を比較したものである。全ケースとも静的載荷試験と荷重—変位曲線がほぼ一致している。

図-11に急速載荷試験の最大変位を杭径で除したものと、推定した P_u を静的載荷試験の第2限界抵抗力で除してものとの関係を示す。杭Aでは最大変位が増加するにしたがって推定精度が悪くなっている。図-5と図-9を比較してみると、ケース2～5で推定した静的な荷重—変位曲線が、急速載荷試験結果とほぼ同じになっているためと考えられる。また、等価減衰定数 h_e がケース1で0.24、杭径の10%以上変形しているケース5でも0.28と全ケースともほぼ同程度となっていることが影響していると思われる。

杭Bはケース1で推定した P_u が第2限界抵抗力に対して10%を多少越えるが、それ以外では10%以内の誤差となっている。また、最大変位が増加するにつれて誤差が減少し、推定精度は向上していることがわかる。

7. まとめ

急速載荷試験から、静的載荷試験に対応する荷重—変位関係を求める推定手法の適用範囲を明確にする目的で、支持力特性の異なる2種類の模型杭を用いた急速載荷試験を実施し検討を行った。

今回と昨年度の結果より、摩擦杭的支持力特性を持つ杭の急速載荷試験に支持力推定法を適用する場合には、最大変位が杭径の5%以上の観測データがなければ、静的試験の第2限界抵抗力相当の支持力推定は困難であることがわかった。

<参考文献>

- 1) 荒巻真二、鳥野清、麻生稔彦、落合英俊：杭周面摩擦力の速度依存性を考慮した剛体振動理論による急速載荷試験の支持力推定に関する検討、構造工学論文集 Vol.49A、pp.1223-1228、2003.3
- 2) 荒巻真二、鳥野清、落合英俊、田中順二：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

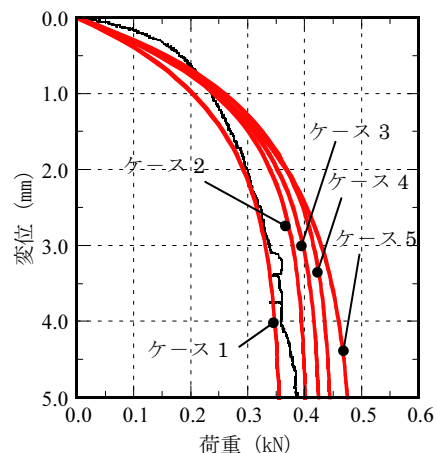


図-9 静的載荷試験と推定値（杭 A）

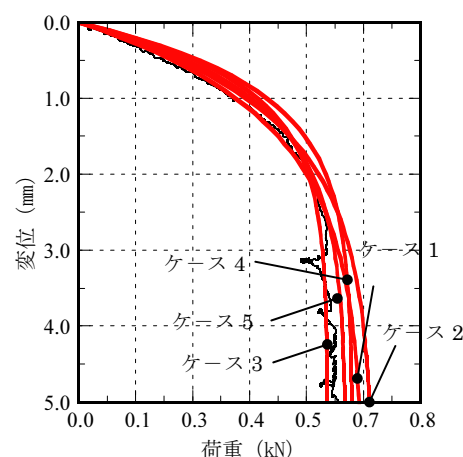


図-10 静的載荷試験と推定値（杭 B）

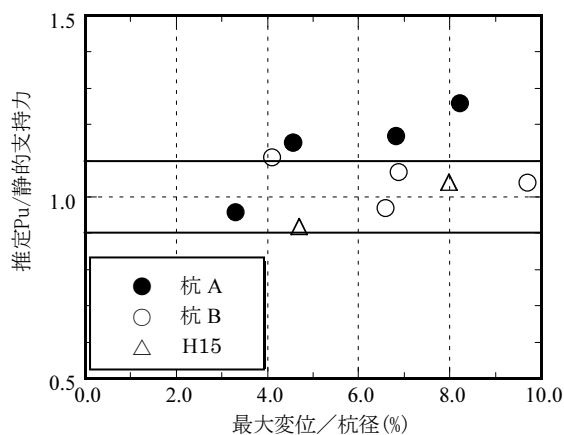


図-11 推定精度と適用範囲