

岩盤を支持層とする杭基礎に対する 急速載荷試験の適用性の検討

今 広人・七澤利明・河野哲也

1. はじめに

道路橋の設計基準である道路橋示方書¹⁾では、岩盤に支持された杭の支持力に関しては、標準的な推定式を示すに至っていないため、鉛直載荷試験を実施して評価を行うのがよいとされている。しかし、強度の高い岩盤を支持層とする場合、静的に鉛直載荷試験を行う際の載荷装置が大掛かりとなり、試験期間や費用が課題になるという問題があった。ここで、より簡易に実施できる急速載荷試験によって支持力特性を精度よく評価することができれば、高い支持力が期待できる硬岩等の支持層において、合理的な設計が可能になると期待される。

急速載荷試験により支持力を評価するためには、静的載荷試験により評価される支持力と比較する必要があるが、これまで岩盤支持層を対象とし極限支持力まで比較した事例はなく、両試験により得られた支持力の関係性は把握できていない。そこで、岩盤を支持層とした杭（模型杭・実杭）を用いて、静的載荷試験と急速載荷試験を実施し、両試験の支持力を比較することで、急速載荷試験の実務における適用性を検討することとした。

2. 鉛直載荷試験方法について

杭の支持力特性を評価する鉛直載荷試験方法²⁾は、加力方法の違いから静的載荷試験と動的載荷試験に分類され、静的載荷試験は荷重保持時間の有無により段階載荷方式と連続載荷方式があり、動的載荷試験は杭頭への荷重の作用時間に応じて急速載荷試験と衝撃載荷試験に分類される。静的載荷試験は油圧ジャッキを杭頭に設置して反力杭などの反力装置を用いて載荷することから大掛かりな載荷装置が必要となる。一方、動的載荷試験では主に重錘を杭頭に落下させて載荷することから比較的簡易な装置で試験が実施できる。

動的載荷試験のうち衝撃載荷試験は、急速載荷試験よりさらに短い載荷時間で載荷するため、衝撃力により杭体に発生する軸方向の波動現象を無視できず、全抵抗成分のうち動的抵抗が大きくなり、確認できる静的抵抗（本来の杭の支持力特性）が小さくなる。このことから、本研究では現在主流である多サイクルでの軟クッションを介して重錘を落下する方式の急速載荷試験に着目することとした。

3. 模型杭による比較試験

3.1 概要

モルタルもしくはソイルセメントで模擬した岩盤を支持層とした模型杭に対して静的載荷試験及び急速載荷試験を実施し、試験方法による支持力の違いを確認した。また透水性の低い粘性土地盤では、杭先端地盤に発生する過剰間隙水圧による影響で急速載荷試験から得られた先端抵抗が静的載荷試験に比べて1.5～2.0倍程度の過大評価する可能性がある³⁾と報告されていることから、飽和／不飽和の条件を設けるとともに過剰間隙水圧を計測した。

3.2 試験方法

図-1に模型試験装置を示す。試験は鋼製土槽内にモルタルもしくはソイルセメントを用いて岩盤を作製し、その中心に設置した杭の杭頭部に静的もしくは動的な荷重を作用させるものである。杭は先端閉塞の鋼管（杭径D：89.1mm）を用いて、杭径分を岩盤に根入れさせた。

表-1に模型杭による試験ケースを示す。試験は岩盤の硬さの影響と、急速載荷試験時の岩盤の過剰間隙水圧の影響を確認することを目的として、一軸圧縮強度を硬岩相当にした場合（HS）、軟岩相当にした場合で飽和状態（SS）と不飽和状態（SU）のケースで実施した。計測項目は、静的載荷試験では杭頭の荷重・変位とし、急速載荷試験では杭頭の荷重・変位・加速度とした。またHS、SSのケースでは静的載荷試験、急速載荷試験ともに、杭先端地盤の間隙水圧を計測した。

載荷方法として静的載荷試験では土槽上側に設けた梁を反力として、油圧ジャッキで載荷した。載荷荷重は、HSの場合には50kNピッチ、SS・SUの場合には10kNピッチで増加させて、新規荷重時には3分間の荷重保持を行った。急速載荷試験では杭頭に10mmの軟クッションを敷いた上で、多サイクルでの重錘落下方式により載荷した。

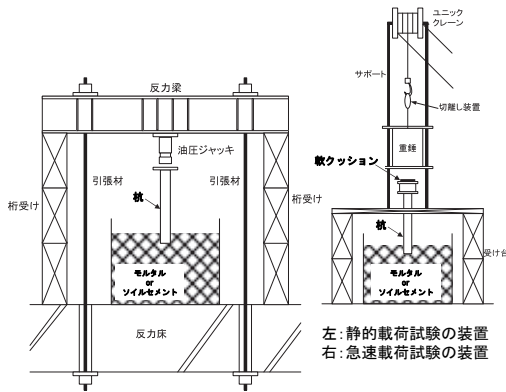


図-1 模型試験装置

表-1 模型杭による試験ケース

試験No.	岩盤条件		載荷試験方法
	岩盤の硬さ	飽和条件	
HS-S	硬岩	飽和	静的載荷試験
HS-R			急速載荷試験
SS-S	軟岩	飽和	静的載荷試験
SS-R			急速載荷試験
SU-S		不飽和	静的載荷試験
SU-R			急速載荷試験

※S：静的載荷試験、R：急速載荷試験

3.3 試験結果

図-2に静的載荷試験で得られた荷重変位関係と、急速載荷試験で得られた荷重変位関係及び除荷点法²⁾により整理した結果を示す。いずれのケースにおいても、初期勾配は静的載荷試験と急速載荷試験の結果が近似している。また、表-2に静的載荷試験と急速載荷試験の除荷点法の結果から杭頭変位が0.1D以下の範囲で計測された最大値として評価した極限支持力 R_u と、 R_u の急速載荷試験/静的載荷試験での比率を示す。いずれのケースにおいても、静的載荷試験での R_u は、急速載荷試験での R_u よりもやや大きな値が得られている。これは、岩盤を模擬した土槽が床に固定されていなかったため、急速載荷試験の重錘落下時の衝撃により土槽全体が振動し、結果として水平方向の残留変位が少し生じたことによる影響が要因と考えられる。特に落下エネルギーが大きなHSでは大きく振動したことによる影響で静的載荷試験と大きなかい離が生じた。SSについては、急速載

荷試験と静的載荷試験の R_u の値はほぼ同じであった。これは、過剰間隙水圧の発生によって先端抵抗が大きくなったことが影響した可能性がある。一方で、SUでは急速載荷試験の結果は静的載荷試験の結果を上回らず、今回の模型試験の結果からは急速載荷試験により支持力を過大に評価する可能性は低いものと考えられる。

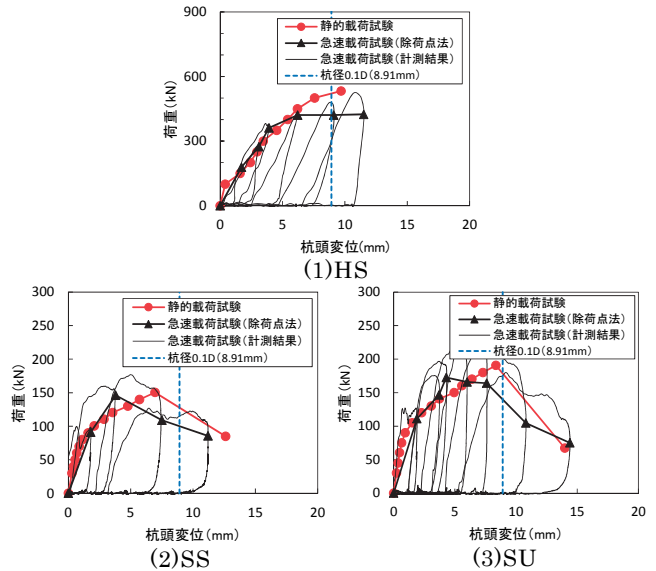


図-2 模型杭による比較試験での荷重変位関係

表-2 静的載荷試験と急速載荷試験の載荷試験結果

試験No. (q_u :一軸圧縮強度, S_r :飽和度)	極限支持力 R_u (kN)		最大水圧 (MPa)
	静的	急速	
HS $q_u=18.9\text{N/mm}^2$ $S_r=76.1\%$	HS-S(静的)	522	0.07
	HS-R(急速)	421	0.22
	急速/静的	0.81	-
SS $q_u=5.1\text{N/mm}^2$ $S_r=98.1\%$	SS-S(静的)	150	0.01
	SS-R(急速)	146	2.5以上※
	急速/静的	0.97	-
SU $q_u=6.4\text{N/mm}^2$ $S_r=67.9\%$	SU-S(静的)	197	-
	SU-R(急速)	173	-
	急速/静的	0.88	-

※水圧計のレンジが振り切れたため、最大容量を記載する

4. 実杭による比較試験

4.1 概要

岩盤を支持層とした実杭に対して、静的載荷試験及び急速載荷試験を実施し、試験方法による支持力の違いを確認する。

4.2 試験方法

写真-1に実杭での載荷試験装置を示す。試験は杭径分を岩盤に根入れさせた同一の杭を用いており、静的載荷試験終了後に所定の養生期間を確保して、急速載荷試験を実施した。表-3に示す実杭による試験ケースは、杭工法及び杭先端の岩盤が異なる条件で実施した。計測項目は、静的載荷試験では杭頭の荷重・変位に加えて杭先端の変位と

し、急速载荷試験では杭頭の荷重・変位・加速度に加えて杭先端の変位を求めるために杭先端に加速度計を設置した(図-3)。なお、急速载荷試験における除荷点法では杭体の慣性力を求める際の加速度の値は、杭頭部の支持力では杭頭で計測した値を、杭先端部の支持力では杭先端で計測した値を用いることとした。また両試験では杭の支持力特性を把握するために、杭体表面にひずみ計を設置しており、周面摩擦力と先端支持力を分離して求めた。



(1)静的载荷試験 (2)急速载荷試験

写真-1 実杭での载荷試験装置(No.1)

表-3 実杭による試験ケース

試験No.	杭工法	杭径 D(mm)	岩盤条件		载荷試験方法
			岩盤の硬さ	飽和条件	
No.1	No.1-S 鋼管ソイル	1000*	軟岩 $q_u=1.4N/mm^2$	飽和	静的载荷試験
	No.1-R セメント杭工法				急速载荷試験
No.2	No.2-S 中掘り杭工法	800	硬岩 $q_u=20.7N/mm^2$	飽和	静的载荷試験
	No.2-R				急速载荷試験

*鋼管ソイルセメント杭はソイルセメント柱径とする

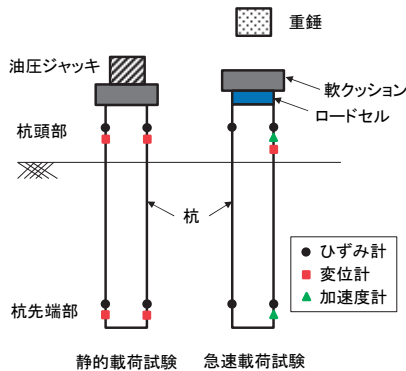


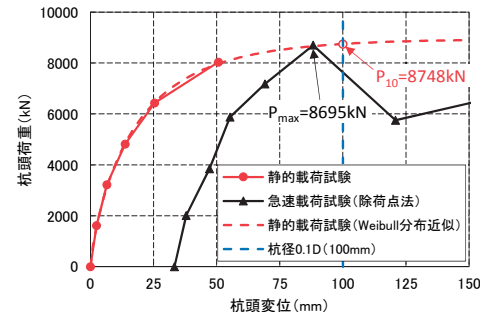
図-3 計測項目

4.3 試験結果

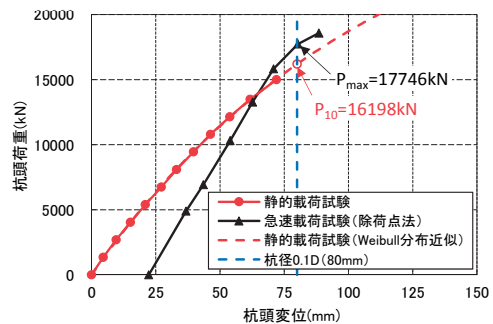
4.3.1 杭頭部での荷重変位について

静的载荷試験と急速载荷試験から得られた杭頭部での荷重変位関係を図-4に示す。同一の杭を用い試験を実施したため、急速载荷試験の杭頭変位には静的载荷試験終了時の残留変位が含まれる。急速载荷試験での極限支持力は模型杭による試験と同様に杭頭変位が0.1D以下の範囲で計測された最大値とし、静的载荷試験での極限支持力は試験値をWeibull分布関数(図中の破線)で近似し

て、杭頭変位が0.1D時に得られる値で評価した。杭頭部での極限支持力の急速载荷試験/静的载荷試験での比率は、No.1で0.99倍、No.2で1.09倍と概ね同じ値となった。



(1) No.1



(2) No.2

図-4 実杭による比較試験での荷重変位関係(杭頭部)

4.3.2 杭先端部での荷重変位について

図-5に杭先端部での荷重変位関係を示す。ここで、杭先端荷重は杭先端から1D上方位置で計測された軸力とし、杭先端変位は静的载荷試験においてはダイヤルゲージにて直接変位を計測した。一方、急速载荷試験では杭先端部に設置した加速度計の2階積分で間接的に算出した。なお、急速载荷試験の杭先端変位には静的载荷試験終了時の残留変位が含まれる。急速载荷試験での極限支持力は杭先端変位が0.1D以下の範囲で計測された最大値とし、静的载荷試験での極限支持力は試験値をWeibull分布関数で近似して、杭先端変位が0.1D時に得られる値で評価した。杭先端部での極限支持力の急速载荷試験/静的载荷試験での比率は、No.1で0.56倍、No.2で0.70倍と大きな差がみられた。これは急速载荷試験特有の計測方法(杭先端変位の算出方法)や動的成分による影響といった計測方法の精度や限界が要因となり、結果として先端支持力と周面摩擦力を適切に分離できなかったものと考えられる。一方で、杭頭部では荷重や変位を直接測定していることから、静的载荷試験での結果と概ね同じ値となったと考えら

れる。

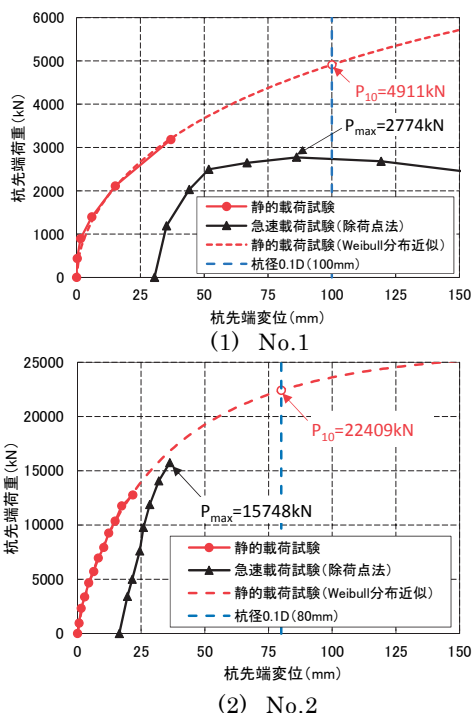


図-5 実杭による比較試験での荷重変位関係（杭先端部）

5. 試験結果の比較

表-4 に杭頭部における模型杭および実杭での試験結果の一覧を示す。模型杭および実杭において異なる杭工法や岩盤条件で比較試験を実施したところ、地盤の飽和、不飽和にかかわらず、杭頭部での急速載荷試験と静的載荷試験から得られる極限支持力の比率は 0.81~1.09 と概ね一致する結果であった。杭先端地盤の過剰間隙水圧による支持力への影響については、模型杭や実杭による比較試験から、試験値に差異を生じさせる程の影響は確認されなかった。表-5 に杭先端部における実杭での試験結果の一覧を示す。杭先端部での急速載荷試験と静的載荷試験から得られる極限支持力の比率は 0.56~0.70 で大きな差が生じる結

果となった。

表-4 杭頭部における極限支持力の比較結果の一覧

	杭頭部における極限支持力(kN)				
	模型杭			実杭	
	軟岩 (飽和)	軟岩 (不飽和)	硬岩 (飽和)	軟岩 (飽和)	硬岩 (飽和)
静的載荷試験	150	197	522	8748	16198
急速載荷試験	146	173	421	8695	17746
急速/静的	0.97	0.88	0.81	0.99	1.09

表-5 杭先端部における極限支持力の比較結果の一覧

	杭先端部における極限支持力(kN)	
	実杭	
	軟岩 (飽和)	硬岩 (飽和)
静的載荷試験	4911	22409
急速載荷試験	2774	15748
急速/静的	0.56	0.70

6. まとめ

今回の結果から岩盤を支持層とする場合は、杭頭部で評価される極限支持力においては、急速載荷試験を用いた場合にも静的載荷試験と同等とみなして評価してよいと考えられる。このことから、例えば特殊な岩盤条件の下で施工された杭が、設計で推定した杭頭部の支持力を満足するかどうかを確認する試験として、急速載荷試験を適用することが考えられる。一方で、支持力推定式が確立されていない杭工法の開発などで支持力特性（杭先端支持力の算定等）を把握する手段として適用することは現状では困難であり、計測方法など今後解決すべき課題があることがわかった。

参考文献

- 1) (公社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編、2017.11
- 2) (社) 地盤工学会：杭の鉛直載荷試験方法・同解説 第一回改定版、2002.5
- 3) Brown, M. J. and Powell, J. J. M. : Comparing rapid load pile testing for driven and CFA piles in London Clay, Proc.9th Int. Conf. on Testing and Design Methods for Deep Foundations, IS-Kanazawa 2012 , pp281-288, 2012.1

今 広人



土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 交流研究員、博士 (工学)
Dr. Hirohito KON

七澤利明



研究当時 土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 上席研究員、現 国土交通省 国土技術政策総合研究所道路構造物研究部構造・基礎研究室長
Toshiaki NANAZAWA

河野哲也



研究当時 土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 主任研究員、現 国立大学法人 富山大学大学院理工学研究部 准教授、博士 (工学)
Dr. Tetsuya KOUNO