

杭の急速载荷試験

Rapid Load Testing on Piles

松 本 樹 典 (まつもと たつのり)

金沢大学大学院教授 自然科学研究科

1. はじめに

急速载荷試験は、杭の軸（鉛直）方向の荷重-変位（沈下）関係を調べる载荷試験方法の一つであり、静的载荷試験方法と衝撃载荷試験方法の中間的な载荷試験方法として位置付けられている。静的载荷試験では、反力装置（一般的には、反力杭、反力梁と载荷ジャッキ）が必要であり、試験に要する時間が長く、また費用も大きい。衝撃载荷試験は、いわゆる杭打ちを行い、杭頭近くで測定した動的シグナル（一般的には、加速度と力の時刻歴）を杭に作用する周面摩擦と先端抵抗を考慮した一次元波動理論に基づいて解析し、同定した地盤抵抗分布から静的な杭の荷重-沈下関係を評価する方法である。急速载荷試験では、杭頭に作用する荷重の载荷時間を衝撃载荷試験に比べて長くすることで、杭体中の波動伝播現象を無視できるようにし、比較的簡単な解析法（解釈法）によって静的な杭の荷重-沈下関係を評価できる。

2. 急速载荷試験の定義と試験装置

図-1は、急速载荷試験における杭頭に作用する力 F_{rapid} の一例である。荷重が時間と共にスムーズに増加した後、スムーズに減少することが望ましい。また、载荷時間 t_L は、杭体中の波動現象を無視しても差し支えないように、伝播速度 c の縦波が長さ L の杭を5往復する時間以上継続することが必要とされている¹⁾（相対载荷時間 $T_R = t_L / (L/2c) \geq 5$ ）。ちなみに、衝撃载荷試験の载荷時間 t_L は、5 ms 程度である。

急速载荷試験方法として、杭頭に設置した反力体をガス圧で打上げると共にそのガス圧で杭を载荷する方法であるスタナミック試験²⁾と杭頭に設置したクッションやばねを介して重錐を落下させる方法^{3)~8)}がある。

スタナミック試験（口絵写真-7）では、現在60 MN（国内では40 MN）までの载荷が可能である。重錐

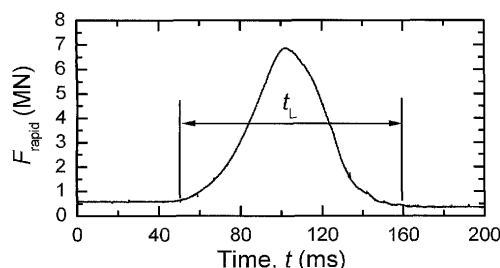


図-1 急速载荷試験における荷重特性の例

落下方式では、スプリングハンマー方式⁶⁾（口絵写真-8）では2 MN、軟クッション方式⁷⁾（口絵写真-9）では16 MN、Hybridnamic⁸⁾では35 MNまでの载荷が可能である。重錐落下方式では、繰返し载荷を比較的容易に行うことができる。

3. 急速载荷試験シグナルの解釈法

図-2は、急速载荷試験における杭と地盤のモデル化^{9),10)}である。杭は、その中の波動現象を無視することにより、質量 M の質点でモデル化する。ばねは、地盤の変形と杭自体の変形の両者を含んだ変位を表している。ダッシュポットは杭の貫入速度 v に依存する動的抵抗を表す。急速载荷試験では、杭頭に载荷される力 F_{rapid} および杭頭の変位 w と加速度 α を測定することが、一般的である。 F_{rapid} には、杭の慣性力 $F_a = M\alpha$ と地盤抵抗力 F_{soil} が含まれるため、まず式(1)によって、 F_{soil} を求める。

$$F_{\text{soil}}(t) = F_{\text{rapid}}(t) - F_a = F_{\text{rapid}}(t) - M \cdot \alpha(t) = F_w + F_v \quad (1)$$

F_{soil} は、静的抵抗 F_w と動的抵抗 F_v の和であると仮定する。すなわち、 F_{soil} から F_v を差し引くことで、静的抵抗 F_w を求めることができる。これには、幾つかの方法が提案されているが、これまでよく用いられているのが、除荷点法と呼ばれる方法¹⁰⁾である（図-3）。除荷点法では、減衰係数 C が一定であるとして、動的抵抗は杭の貫入速度に比例するものと仮定している。

$$F_v(t) = C \cdot v(t) \quad (2)$$

F_{soil} 曲線における最大変位点を「除荷点」と呼ぶ。この点では、杭の貫入速度 v は0となる。したがって、除荷点では、 $F_w(t) = F_{\text{soil}}(t)$ となる。さらに、除荷点における F_w は、その試験における静的最大抵抗 $F_{w(\text{max})}$ となる。 F_{soil} の最大値 $F_{\text{soil}(\text{max})}$ と $F_{w(\text{max})}$ の差から、式

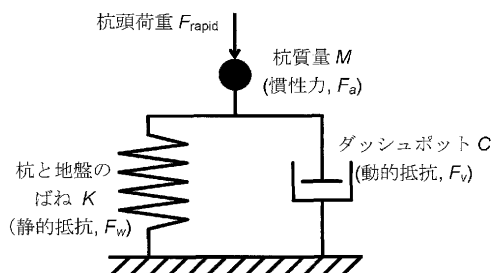
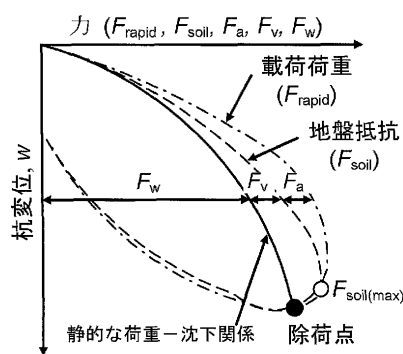


図-2 急速载荷試験における杭と地盤のモデル



図—3 除荷点法の概要

(3) によって減衰定数 C を決定する。式(3)で v^* は、 $F_{\text{soil}(\max)}$ 時の杭の貫入速度である。

$$C = [F_{\text{soil}(\text{max})} - F_{\text{w}(\text{max})}] / v^* \quad \dots\dots\dots (3)$$

このようにして求めた C の値から、次式によって、各時点での F_w を計算する。

$$F_w(t) = F_{soil}(t) - Cv \dots\dots\dots (4)$$

除荷点法は，比較的簡単な解析法であるが，たとえ相対載荷時間 T_R が 5 以上であっても，完全先端支持杭では，静的な荷重-沈下関係を良好に推定できない場合がある^{11), 12)}。また，摩擦杭であっても，初期の杭頭剛性を過大評価する傾向がある。すなわち，沈下量を過小評価しがちである。そこで，減衰係数を一定値ではなく，杭の沈下量（あるいは杭周囲のすべり破壊範囲の変化）に応じて，変化させる方法（例えば，非線形ダンピング法¹³⁾）も提案されている。先端支持杭の場合，杭体中の波動現象を考慮した Case 法¹⁴⁾によって，杭頭で測定した荷重と速度を利用して杭先端の荷重と速度を求め，これらのデータに非線形ダンピング法を適用することで，静的な杭先端荷重-沈下関係を良好に推定できる例も示されている¹²⁾。急速載荷試験は，杭だけではなく平板載荷試験にも適用されている¹⁵⁾。

4. 載荷試験の展望

衝撃載荷試験および急速載荷試験のメリットは、反力装置が必要ないため、短時間かつ比較的安価に試験が実施できることである。そのため、一つの杭工事現場で多数の杭に対して試験を実施することが可能となる。一つの現場で杭載荷試験数を増やすことで、合理的に安全率を低下させるといったことが、諸外国では基準化されている¹⁶⁾。また、杭の載荷試験結果を利用して、基礎構造物全体の沈下予測精度が向上する例も示されている¹⁷⁾。

参考文献

- 1) 地盤工学会：杭の鉛直載荷試験方法・同解説，2002.
- 2) Bermingham, P. and Janes, M.: An innovative approach to load testing of high capacity piles. *Proc. of the Int.*

- Conf. on Piling and Deep Foundations, London, pp. 409~413, 1989.
- 3) Gonin H. G. C. and Leonard M. S. M.: Theory and performance of a new dynamic method of pile testing. *Proc. of 2nd Int. Conf. of Appl. of Stress-Wave Theory to Piles*, Stockholm, pp. 403~410, 1984.
- 4) Schellinghouth, A. J. G. and Revoort, E.: Pseudo static pile load tester. *Proc. of 5th Int. Conf. on Appl. of Stress-Wave Theory to Piles*, Orland, pp. 1031~1037, 1996.
- 5) Matsumoto, T., Wakisaka, T., Wang, F. W., Takeda, K. and Yabuuchi, N.: Development of a rapid pile load test method using a falling mass attached with spring and damper, *Proc. 7th Int. Conf. on Appl. of Stress-Wave Theory to Piles*, Selangor, Malaysia, pp. 351~358, 2004.
- 6) Matsuzawa, K., Nakashima, Y. and Matsumoto, T.: Spring hammer rapid load test method and its validations, *Proc. Int. Conf. on Foundations*, University of Dundee, Scotland, pp. 223~234, 2008.
- 7) 久保 豊・妹尾博明・桑原文夫・小林 淳・阿部秋男: 重錘落下方式による杭の急速載荷試験の開発, 日本建築学会技術報告集, 第19号, pp. 105~108, 2004.
- 8) Miyasaka, T., Kuwabara, F., Likins, G. and Rausche, F.: Rapid load test on high bearing capacity piles, *Proc. 8th Int. Conf. on Appl. of Stress-Wave Theory to Piles*, Lisbon, Portugal, pp. 501~506, 2008.
- 9) Middendorp, P., Bermingham, P. and Kuiper, B.: 1992. Statnamic loading testing of foundation piles, *Proc. of 3rd Int. Conf. on Appl. of Stress-Wave Theory to Piles*, The Hague, Netherlands, pp. 581~588, 1992.
- 10) Kusakabe, O. and Matsumoto, T.: Statnamic tests of Shonan test program with review of signal interpretation, *Proc. 1st Int. Statnamic Seminar*, Vancouver, pp. 113~122, 1995.
- 11) Hayashi, T., Matsumoto, T., Yamada, K. and Asai, Y.: A Statnamic test case with high accelerations, *Proc. 1st Int. Statnamic Seminar*, Vancouver, pp. 105~112, 1995.
- 12) Matsuzawa, K., Nakashima, Y., Nakayama, M. and Matsumoto, T.: A piling method accompanying rapid load testing, *Proc. the 8th Int. Conf. on the Application of Stress-Wave Theory to Piles*, Lisbon, pp. 487~495, 2008.
- 13) Matsumoto, T., Tsuzuki, M. and Michi, Y.: Comparative study of static loading test and statnamic on a steel pipe pile driven in a soft rock, *Proc. 5th Int. conf. and Exhibition on Piling and Deep Foundations*, Bruges, pp. 5.3.1~5.3.7, 1994.
- 14) Rausche, F., Goble, G. and Likins, G. E., Jr.: Dynamic determination of pile capacity ASCE, *J. Geotech. Div.*, Vol. 111, No. 3, pp. 367~383, 1985.
- 15) Nemoto, H., Sakihama, H., Nakashima, Y., Matsuzawa, K. and Matsumoto, T.: Characteristics of bearing stratum for a building foundation estimated from rapid plate load tests, *Proc. Int. Conf. on Foundations*, University of Dundee, Scotland, pp. 1797~1808, 2008.
- 16) Matsumoto, T., Matsuzawa, K., Kitiyodom, P.: A role of pile load test—Pile load test as element test for design of foundation system, *Proc. the 8th Int. Conf. on the Appl. of Stress-Wave Theory to Piles*, Lisbon, pp. 39~58, 2008.
- 17) Sonoda, R., Matsumoto, T., Kitiyodom, P., Moritaka, H. and Ono, T.: A case study of piled raft foundation constructed using reverse construction method and its post-analysis, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 46, pp. 142~159, 2009 (accepted for publication).

(原稿受理 2009.1.13)