

急速平板載荷試験による地盤特性の評価

その1 平板載荷試験結果に及ぼす平板寸法、載荷時間の影響

崎浜 博史* 根本 恒* 松澤 一行** 松本 樹典***

Estimation of Ground Properties by the Rapid Plate Loading Test

Part 1 Effects of plate size and loading duration on the plate loading test results

by Hirofumi SAKIHAMA, Hisashi NEMOTO, Kazuyuki MATSUZAWA and Tatsunori MATSUMOTO

Abstract

The purpose of this investigation is to establish an evaluation method of the ground properties by the rapid plate loading test, by which the ground properties can be density estimated in a short time. In the rapid plate test, the circular plates having diameters of 0.3m and 1.0m were tested using Spring Hammer device. An interpretation method called non-linear damping method was employed to estimate a corresponding static load-settlement relation from the rapid plate load test signals. In this paper, the influences of the plate size and loading rate on the observed load-settlement relations are presented and discussed, compared with the static cyclic maintained plate load tests on a plate of 0.3m diameter.

要 旨

本研究は、地盤特性を短時間に詳細かつ高密度に把握するための方法として、急速平板載荷試験による地盤特性の評価方法を確立することを目的としている。ここでは、急速載荷試験方法としてスプリングハンマー式載荷装置を用い、直径 0.3m および 1.0m の円形平板の試験を行った。試験シグナルから静的な荷重-沈下関係を求める解析法には非線形ダンピング法を用いている。本稿は急速平板載荷試験結果に及ぼす平板寸法および載荷時間の影響を調べるために実施した試験について述べるもので、従来の静的な平板載荷試験結果との比較・検討も行っている。

キーワード：平板載荷試験／急速載荷／静的載荷／平板寸法／荷重-沈下関係

1. はじめに

基礎に関する従来の法令、規・基準、指針では、建築物の基礎は良質な地盤に支持させるとともに、異種基礎を併用しないことを原則としている。しかし、性能規定化がなされた建築基準法では、本来の現象をより忠実に検討しようとする流れの中で、建築物の沈下、すなわち地盤の変形を考慮した設計が重要視されてきている。近年、フローティング基礎や、異種基礎の一つであるパイルド・ラフト基礎の適用事例が増えてきたこと背景には、より高いコストメリットの追求志向と相まって、このような環境変化の影響があるものと考えられる。

このような基礎形式の沈下量予測のためには、適切な地盤定数の設定が益々重要となってくる。また、通常、同一敷地内においても地盤特性のばらつきは少なからずあると考えられるため、これらの基礎形式を採用するにあたっては、当該敷地の地盤特性をより詳細かつ高密度に把握するよう努める必要がある。このようなニーズに対し、従来の静的な平板載荷試験では試験に要する時間が長く、工期・工費の面で不利であるため、よりニーズに合致した新たな試験方法が求められるようになるのは必至である。このような状況に鑑み、本研究では、短時間に多くの試験を実施できる急速平板載荷試験を用いて地盤

* 技術研究所振動基礎グループ *** 金沢大学工学部土木建設工学科

** (株)ウェッジ

特性を評価する方法の実用化を目指している[1][2]。急速載荷試験はもともと杭の支持力特性を確認するための試験であるが、地盤の平板載荷試験にも十分適用可能であると考えられる。

本稿では、急速平板載荷試験の結果に及ぼす平板寸法および載荷時間の影響を調べるために実施した試験の結果を報告する。

2. 試験地盤および試験方法

試験場所は千葉県印西市草深地内である。図1に試験地盤の土質柱状図と標準貫入試験の N 値の深度分布を示す。表層約 2m が埋戻し土、その下位にローム層、凝灰質粘土および粘土混じりの細砂が存在する。深度 8m までは N 値 2~3 程度であり、10m 以深から良好な支持地盤が存在する。この地盤を表面から、12m×5m の範囲で約 1.6m の深さまで掘削し（写真1）、この底面で平板載荷試験を実施した。試験位置（平板載荷 A）近傍で採取した試料 1-B-1 に対して行った室内土質試験の結果を表1に示す。この土は低密度、高含水率で、火山灰質粘性土（関東ローム）より軟らかい性状を呈する。

試験方法は写真2に示すスプリングハンマー式載荷装置[3]を用いた急速平板載荷試験（以後、SH 急速載荷試験と呼ぶ）によっており、これによって地盤の静的な荷重-沈下量関係を把握した。急速載荷試験シグナルの解析法には非線形ダンピング法（修正除荷点法）[4]を採用した。SH 急速載荷試験では質量 2.0ton の重錘を自由落下させ（落下高 $h = 0.2 \sim 1.2m$ ）、ばね（ばね定数 6228 kN/m）を介して載荷板に荷重を与え、ロードセルによって荷重を、光学式変位計によって載荷板の変位（沈下）量を、加速度計によって載荷板の加速度を測定した。

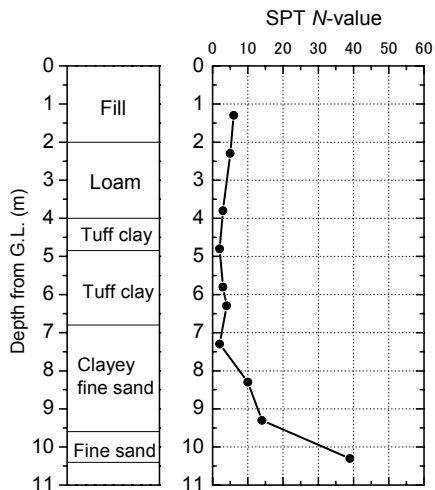


図1 試験地盤の柱状図と N 値の深度分布



写真1 試験地盤の掘削状況

表1 室内土質試験結果

試料 No.	1-B-1
試料採取位置 GL-(m)	1.70~2.00
湿潤密度 ρ_t (t/m ³)	1.13
乾燥密度 ρ_d (t/m ³)	0.548
土粒子の密度 ρ_s (t/m ³)	2.59
自然含水比 w_n (%)	107.1
間隙比 e	3.74
飽和度 S_r (%)	74.3



写真2 スプリングハンマー式載荷装置

平成 17 年 3 月 8 日および 9 日の 2 日間で直径 1m の大型平板の SH 急速載荷試験を 7 カ所、直径 0.3m の小型平板の SH 急速載荷試験を 6 カ所、計 13 カ所で行った（図2）。大型平板ではそれぞれ

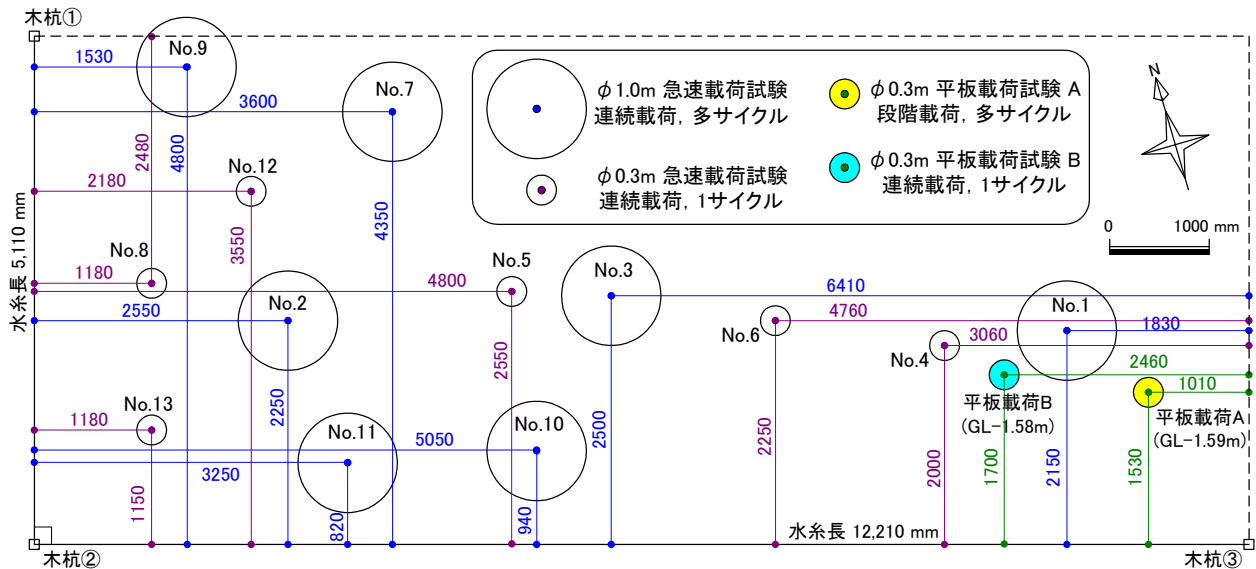


図2 急速平板載荷試験および静的平板載荷試験実施位置

2～5 回の繰返し急速載荷試験，小型平板については連続載荷方式による 1 回の急速載荷試験を実施した。

なお，同敷地においては，直径 0.3m の平板を用い，バックホウを反力とする段階載荷荷重保持方式の平板載荷試験（平板載荷 A）と，荷重保持時間を取らない連続載荷方式 1 サイクルの平板載荷試験（平板載荷 B）を行い，急速載荷試験結果との比較に供した。

3. 試験結果および検討

SH 急速載荷試験の測定シグナル例を図 3 に示す。この試験では，平板直径 1 m，ハンマー落下高さ 0.6 m である。平板質量 M_p は，0.18 ton である。載荷継続時間は概ね 100 ms を超えている。その他の SH 急速載荷試験でも，同様であった。

非線形ダンピング法で求めた荷重-沈下量関係の例を図 4 に示す。図中， F_{rapid} は載荷板に作用する荷重の測定値， F_{soil} は地盤抵抗力（動的+静的）， F_{static} は地盤の静的抵抗力である。 F_{soil} は，平板の測定加速度を α として， $F_{soil} = F_{rapid} - (M_p + M_s) \alpha$ の関係を用いて計算している。ここに M_s は載荷板下の土の付加質量である[5]。図 5 に，荷重保持方式および連続載荷方式による静的平板載荷試験（平板径 0.3m）で得られた，載荷応力 p と沈下関係を示す。荷重保持方式の荷重保持時間は，各載荷段階で 30 min である。

連続載荷方式では，載荷応力 230 kPa まで，載荷応力を数分で増加させた。連続載荷方式による載荷応力-沈下関係には，わずかに「飛出し効果（速度

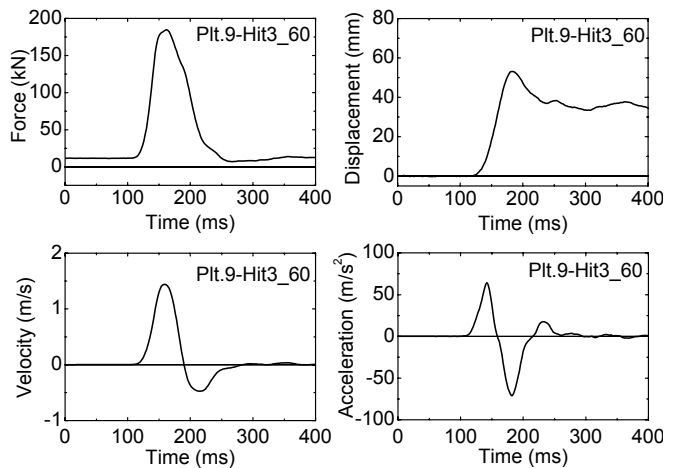


図3 急速載荷試験測定シグナル例

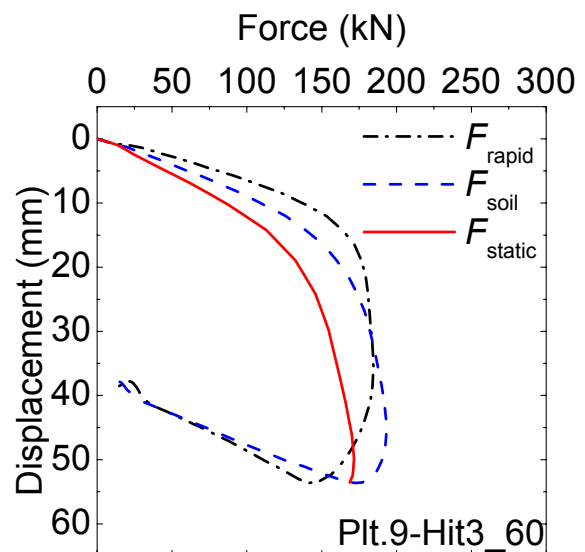


図4 非線形ダンピング法で求めた静的荷重-沈下関係

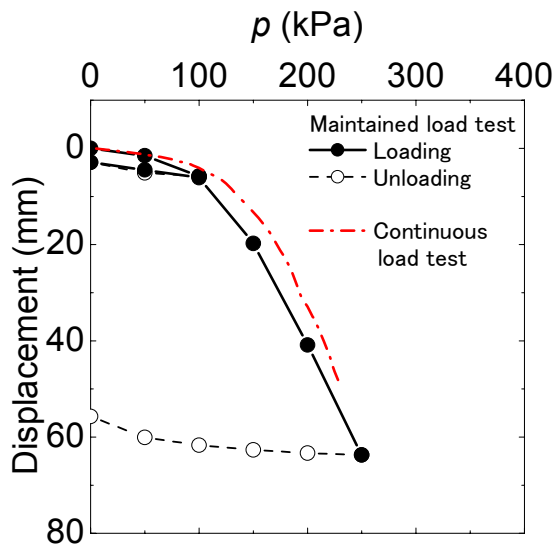


図5 荷重保持方式および連続載荷方式による静的平板載荷試験結果

効果)」が見られるが、両者の荷重-沈下関係はほぼ一致しており、両試験での地盤の初期ばね定数は一致しており、降伏応力もほぼ一致した。

平板載荷試験 No.9 では直径 1m の平板を用い、ハンマー落下高さ h を 0.2, 0.4, 0.6, 1.0m と順次増加させ、計 4 回の試験を連続的に実施した。この SH 急速載荷試験で、非線形ダンピング法によって求めた静的な載荷応力 p と沈下量関係を図 6 に示す。最初の試験 ($h = 0.2$ m) での降伏応力 p_y は、137 kPa 程度となった。2 回目以降の試験では、それまでの載荷履歴の影響を受けて、 p_y は増加している。その他の SH 急速載荷試験でも同様な結果となった。

基礎の沈下予測のためには、応力-変位関係の初期勾配 (初期地盤ばね定数 k_{v0}) の評価が重要である。そこで、図 6 に示すように k_{v0} と降伏応力 p_y を定義した。再載荷時の初期勾配は、初期載荷におけるものときほど変化しなかった。

図 7 は小型平板を用いた載荷試験から求めた静的応力-沈下量関係である。載荷時間が短いほど降伏応力は増加しているが、荷重保持方式の載荷試験 (荷重保持時間 30min) に比べて、SH 急速載荷試験 (これらの試験では、6 秒間でピーク荷重までを載荷) の降伏応力は、大きくても 25% 程度の増加にとどまっている。また、図 7 より、初期地盤ばね定数 k_{v0} に関しては載荷時間の影響は、ほぼ無視できることがわかる。

図 8 は、各載荷 (各打撃) で求めた静的応力-沈下量関係を示している。ただし、沈下量は各打撃における沈下量増分を表示している。同図には通常の

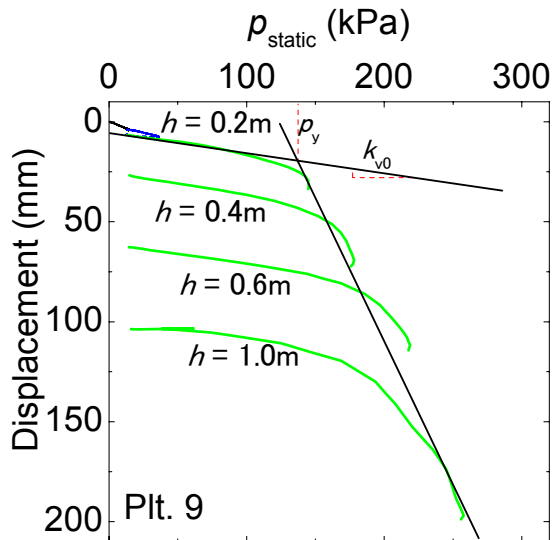


図6 初期地盤ばね定数と降伏応力の推定

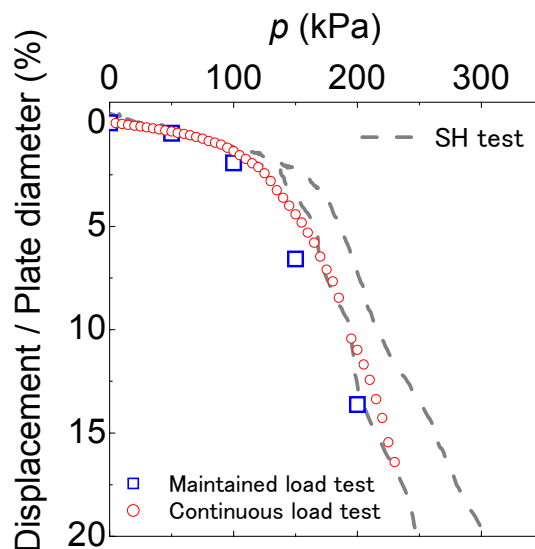


図7 小型平板の試験結果に及ぼす載荷速度の影響

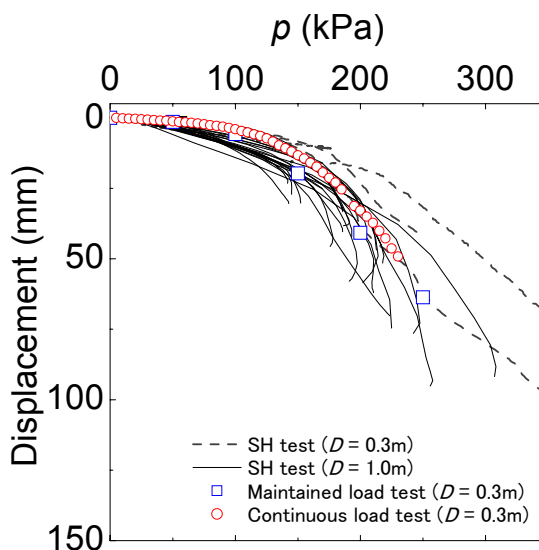


図8 全試験での荷重-沈下関係

荷重保持方式の平板载荷試験および連続载荷方式 1 サイクルの平板载荷試験の結果も併記している。図 8 から、直径 1m の大型平板による初期地盤ばね定数 k_{v0} の値は、直径 0.3m のものに比較して小さいことがわかる。すなわち、同じ载荷応力に対する沈下量は、大型平板の方が小型平板に比べて大きくなるという寸法効果が明らかに現れている。

図 9 は、試験地盤(12m×5m)内における平板の位置と初期载荷における降伏応力をまとめたものである。SH 急速载荷試験と通常の平板载荷試験での試験方法による結果の差はほとんどなく、それぞれの測点位置での地盤特性の差を忠実に現す結果が得られた。また、大型平板と小型平板による降伏応力の差は見られなかったが、これは、粘着力が卓越した地盤特性によるものと判断される。

次に、各試験ケースについて、弾性論に基づく式(1)によって k_{v0} から地盤の初期せん断弾性係数 G_0 を算定した結果を図 10 に示す。

$$G_0 = \frac{\pi a (1-\nu)}{4} \cdot k_{v0} \quad (1)$$

ここに、 ν : 地盤のポアソン比 (ここでは 0.3 と仮定した)、 a : 载荷板の半径である[6]。

小型平板 ($D = 0.3m$) を用いた SH 急速载荷試験結果から求めた G_0 の値は、通常の静的平板载荷試験結果から求めた値に近似している。SH 急速载荷試験結果から求めた G_0 のばらつきは試験方法の違い

によるものではなく、試験地盤固有のばらつきを表しているものと判断される。

大型平板 ($D = 1.0m$) を用いた SH 急速载荷試験結果から求めた G_0 の値は、小型平板を用いた場合の値より大きい。大型平板および小型平板を用いた場合の G_0 の平均値および変動係数を表 2 に示す。

大型平板を用いた場合の G_0 が大きくなる理由として、影響深さの違いが挙げられる。式(1)は本来、均一地盤に適用されるものである。しかしながら、実際の地盤では深さとともに、すなわち、有効土かぶり圧の増加につれて、せん断剛性が増加する。平板载荷試験では、平板直径が大きくなるほど地盤への影響範囲は深くなる。したがって、大型平板を用いた载荷試験の場合、小型平板に比べると、より深い地盤の平均的な G_0 値を反映しているものと考えられる。

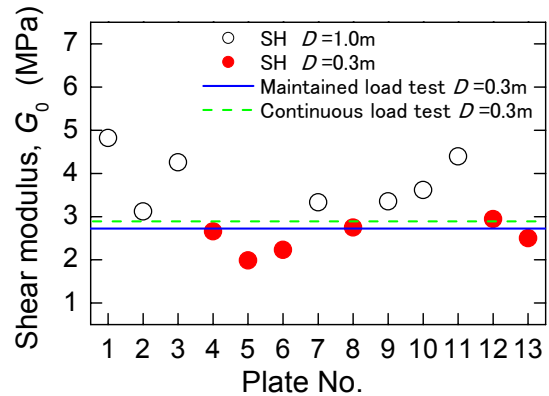


図 10 各測点のせん断弾性係数

表 2 G_0 の平均値および変動係数

	G_0 の平均値 (MPa)	G_0 の変動係数 (%)
大型平板の場合	3.84	17
小型平板の場合	2.51	14

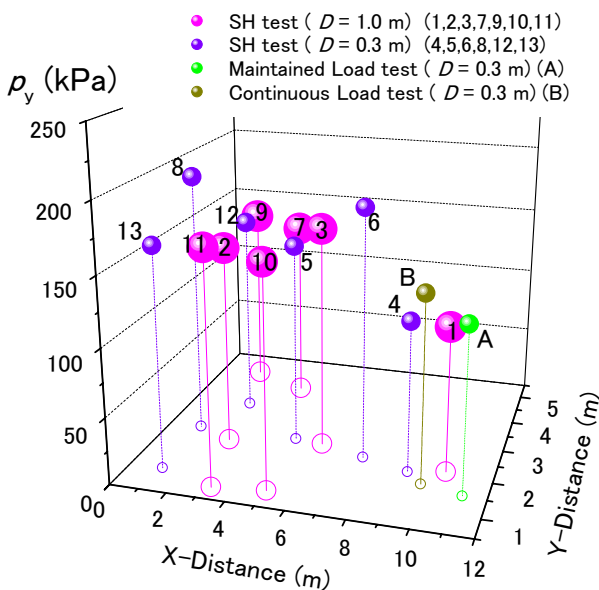


図 9 試験ピット内での降伏応力分布

4. おわりに

地盤特性を詳細かつ高密度に把握する目的で急速平板载荷試験を適用するにあたり、平板寸法および载荷時間が試験結果に及ぼす影響を調べるための試験を実施した。

スプリングハンマーを用いた急速平板载荷試験では十分な载荷継続時間が確保されており、非線形ダンピング法によって地盤の静的な荷重-沈下関係を精度高く推定することができた。また、平板の寸法を考慮した上で、地盤の初期せん断弾性係数 G_0 を評価した。

本稿は、敷地の地盤特性を急速平板載荷試験によって短時間に、かつ高密度に把握するための一事例である。このように敷地の地盤特性を高密度に把握することができれば、その情報をパイルド・ラフト基礎やフローティング基礎の合理的な設計に供することができる。本稿で示した例では試験位置をランダムに選定したが、実際の計画・設計に先立つ地盤調査の場合には整形なグリッドを設けて試験を実施することで、敷地内における地盤特性のばらつきが把握しやすくなるであろう。

今後、より多くのサイトにおいて同様の試験を行ってゆく予定である。

謝辞

本試験を実施するにあたり、多大なご協力を頂いた印西牧の原作業所の佐藤一伸統括所長、松本眞一郎所長をはじめとする関係各位に謝意を表します。

参考文献

- [1] 崎浜博史, 根本恒, 木下孝介, 松澤一行, 松本樹典: 平板載荷試験結果に及ぼす平板寸法, 載荷時間の影響 (その 1: 試験概要), 2005 年度日本建築学会大会学術講演梗概集, B1, pp.557-558, 2005
- [2] 松澤一行, 根本恒, 崎浜博史, 松本樹典: 平板載荷試験結果に及ぼす平板寸法, 載荷時間の影響 (その 2: 試験結果), 2005 年度日本建築学会大会学術講演梗概集, B1, pp.559-560, 2005
- [3] 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 the Appl. of Stress-Wave Theory to Piles, Selangor, Malaysia, pp. 351-358, 2004
- [4] 松本樹典, Middendorp, P., Bermingham, P., 統誠: 珪藻泥岩に打設された鋼管杭の急速載荷試験, 土木学会論文集, No.517/III-31 pp.13 - 24, 1995
- [5] Deeks, A.J., Randolph, M.F.: A simple model for inelastic footing response to transient loading, Int. Jour. for Num. and Analytical Methods in Geomech., 19, pp.307-329, 1995
- [6] 地盤工学会: 地盤工学・実務シリーズ 12, 基礎の沈下予測と実際, pp.159, 2000.5