

# 急速平板載荷試験による地盤特性の評価

## その2 固結砂質地盤に対する試験の適用性

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 2 Applicability of the rapid plate loading test to hard sandy ground

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 in a short time. In the previous paper, the influences of the plate size and loading rate on the observed load-settlement relations were investigated by carrying out the static and the rapid plate loading tests on the cohesive soil ground in Inzai City, Chiba Prefecture. In this paper, applicability of the rapid plate loading test was examined by carrying out the same tests on a hard sandy ground in Setagaya-ku, Tokyo. In addition, estimation of load-settlement relations based on laboratory soil test results was attempted. Through the above tests, variation of the ground properties in a relatively narrow test area was estimated.

#### 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。前報では、千葉県印西市の粘土質地盤を対象に静的および急速の平板載荷試験を実施し、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とともに、試験の適用性を検証した。これに引き続き、東京都世田谷区の固結砂質地盤を対象に同様の試験を実施し、その適用性を検証するとともに、試験サイトの狭い範囲内における地盤特性のばらつきや、室内土質試験結果を用いた荷重 - 沈下関係の推定を試みた。

キーワード：平板載荷試験 / 急速載荷 / 静的載荷 / 荷重 - 沈下関係 / 砂質地盤

#### 1. はじめに

近年、建築基準法の性能規定化に伴い、建築基礎においても荷重と沈下の関係などの性能を明確化し、より合理的な設計に反映させようとする動きが活発化してきている。このような設計においては地盤特性の評価が一段と重要な意味を持ち、設計者は適切な地盤定数を設定するために可能な限り多くの地盤情報が得られるよう努める必要がある。

急速載荷試験は杭の支持力を迅速に確認するための手法として発展してきた試験であるが、最近になって、これを地盤の支持力確認に適用しようとする試みがいくつか見られるようになった[1]。この試

験のメリットは、短時間に多くのポイントで試験を実施して、より信頼性の高い地盤情報を提供できることにある。従来の静的な平板載荷試験の場合、実施するポイント数は敷地の広さにもよるが、1~2箇所程度というのが通例である。しかし、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、その試験で得られた地盤定数が敷地の地盤特性の代表値として信頼に足るものかどうか判断に迷うこともある。そこで、急速載荷試験によって多くのポイントのデータが得られれば、地盤定数のばらつきを把握し、より高い信頼性を求められる設計に反映させることが可能となる。

\* 技術研究所振動基礎研究室 \*\*\* 金沢大学工学部 土木建設工学科

\*\* (株)ウェッジ

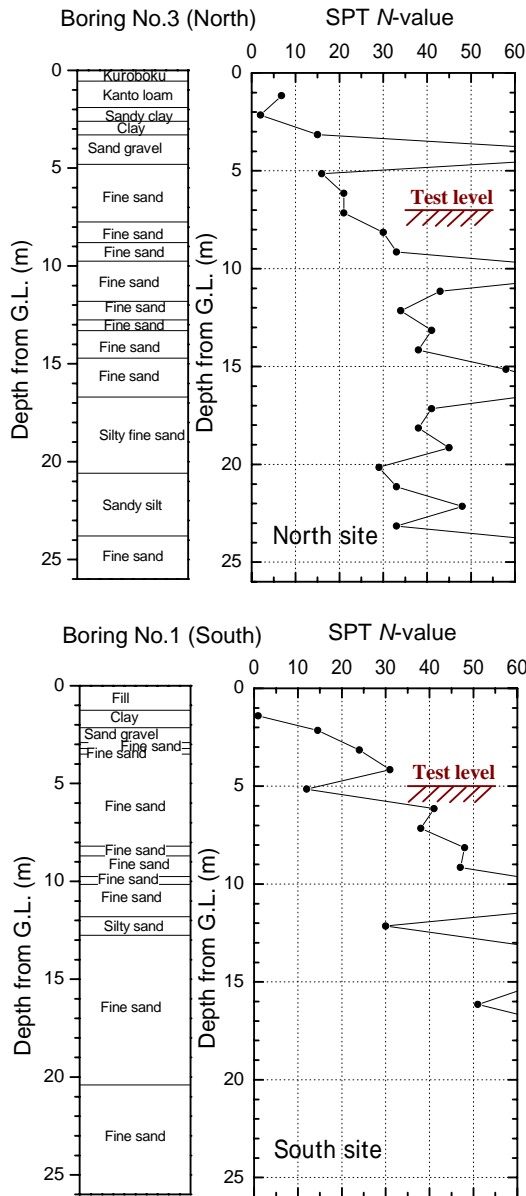


図1 試験地盤の土質柱状図とN値の深度分布

著者らは、2005年3月に千葉県印西市の粘土質地盤を対象にスプリングハンマー式の載荷装置を用いた急速平板載荷試験を実施し、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とともに、その適用性を検証した。詳細は文献[2]に譲るが、結果として、その適用性は良好であることが確認されている。さらに、この試験研究の一環として2006年1月から2月にかけて、東京都世田谷区の固結砂質地盤を対象に同試験を実施し、その適用性を検証するとともに、試験サイトの狭い範囲内における地盤特性のばらつきや、室内土質試験結果を用いた荷重-沈下関係の推定を試みた。本稿ではその結果について報告する。

表1 試験の諸元

(a) North Site				
試験名	平板径 D	試験実施日	試験方式	備考
N_RS1 ~ 6	0.3 m	2006/1/19, 1/21	急速載荷	6 points, 18 tests
N_RM1 ~ 6	0.6 m	2006/1/20	急速載荷	6 points, 9 tests
N_SS1	0.3 m	2006/1/18	静的載荷 1	1 point
N_SS2	0.3 m	2006/1/18	静的載荷 2	1 point
土質試験	-	2006/1/23 ~ 27	表2参照	Block sampling
(b) South Site				
試験名	平板径 D	試験実施日	試験方式	備考
S_RS1 ~ 9	0.3 m	2006/2/1 ~ 2	急速載荷	9 points, 18 tests
S_SS1	0.3 m	2006/1/30	静的載荷 1	1 point
S_SS2	0.3 m	2006/1/30	静的載荷 2	1 point
土質試験	-	2006/1/31 ~ 2/24	表2参照	Block sampling

1:連続載荷方式 2:荷重保持方式

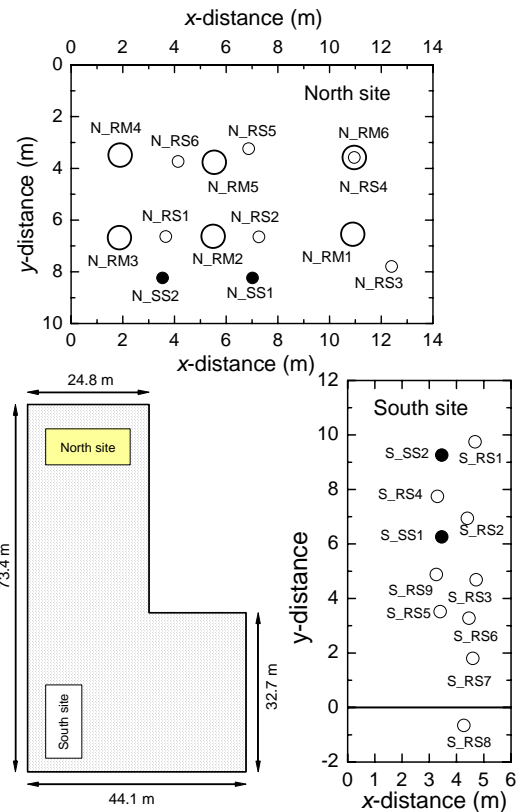


図2 試験サイトと載荷試験位置の平面配置

## 2. 試験地盤および試験方法

試験地は東京都世田谷区内の建設現場で、武蔵野台地から目黒川沿いに形成された河谷低地へと移行する斜面地にあたる。この敷地の北側および南側の2箇所に試験サイトを設けて急速載荷試験をはじめ各種試験を実施した。図1に両試験サイト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。敷地内では地表面が南側に傾斜しているため、図中に記載した両サイトの試験面の標高差は実際には0.2mである。今回対象としている砂層のN値は深度方向に顕著な変動が見られ、試験面付近のそれは北側で大きく、20程度を有しているのに対し、南側では12程度である。同地盤はシルト分が介在し、

固結状を呈する。

試験の諸元を表 1 に、載荷試験位置の平面配置を図 2 に示す。北側サイトでは平板直径  $D = 0.3$  m および  $0.6$  m の急速平板載荷試験をそれぞれ 6 箇所実施し、南側サイトでは  $D = 0.3$  m のみを 9 箇所実施した。急速平板載荷試験は写真 1 に示すスプリングハンマー式載荷装置[3]を用い、得られた試験シグナルから静的な荷重 - 沈下関係を求める解釈法には非線形ダンピング法（修正除荷点法）[4]を採用した。急速載荷試験では質量 2.0



写真 1 急速平板載荷試験装置



写真 2 静的平板載荷試験（北側）

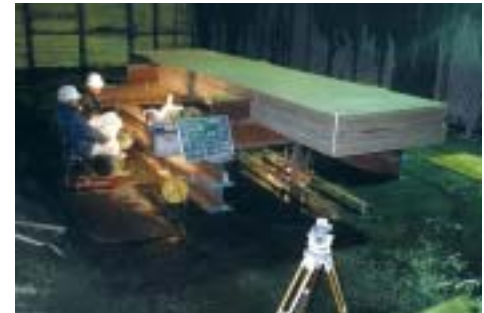


写真 3 静的平板載荷試験（南側）

ton の重錘を自由落下させ、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。今回用いた載荷装置は昨年実施したときのものより異なり、重錘の揚重機構を有している。重錘の落下高さ  $h$  は、北側サイトにおける直径 0.3 m の平板に対しては  $h = 30$  cm（最大載荷応力  $p_{max}$ ：約 3500 kPa）および 50 cm（ $p_{max}$ ：約 5000 kPa）を基本とし、直径 0.6 m の平板に対しては  $h = 135$  cm（ $p_{max}$ ：約 2000 kPa）とした。南側サイトにおける直径 0.3 m の平板に対しては  $h = 50$  cm および 80 cm（ $p_{max}$ ：約 6200 kPa）とした。

このほか、直径  $D = 0.3$  m の平板を用いた 2 種類の静的平板載荷試験を両サイトににて実施した。一つは連続載荷方式で、荷重保持をせずに 30 秒あたり 5 kN (71 kPa) の一定速度で荷重を連続的に増加させるものである。もう一つは荷重保持方式（多サイクル）で、従来の地盤工学会の基準に準拠したものである。これらの平板載荷試験時には、試験面付近に地下水位が確認されている。各サイトでの静的平板載荷試験の様子を写真 2、写真 3 に示す。載荷時の反力として北側サイトでは構台杭を、南側サイトでは敷き鉄板を用いた。また、各サイト近傍から 1 箇所ずつ採取したブロックサンプルを各種室内土質試験に供した。

表 2 室内土質試験結果

		North Site	South Site
general	wet density, $\rho_t$ (kg/m <sup>3</sup> )	1820	1901
	dry density, $\rho_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	1335	1425
	soil particle density, $\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	2695	2710
	natural moisture content, $w_n$ (%)	36.4	33.4
	natural void ratio, $e_n$	1.019	0.902
	degree of saturation, $S_r$ (%)	96.2	100.5
grain	gravel fraction (%)	0.0	0.0
	sand fraction (%)	81.8	84.1
	silt fraction (%)	11.3	11.4
	clay fraction (%)	6.9	4.5
	maximum grain size (mm)	0.425	2.00
classification	earth materials	細粒分質砂 (SF)	細粒分質砂 (SF)
UU-test	cohesion, $c_u$ (kPa)	79.0	217.0
	internal friction angle, $\phi_u$ (deg.)	26.6	20.4
CU-test	cohesion, $c'$ (kPa)	174.0	-
	internal friction angle, $\phi'$ (deg.)	19.4	-
CD-test	cohesion, $c_d$ (kPa)	84.8	-
	internal friction angle, $\phi_d$ (deg.)	33.0	-

### 3 . 試験結果

#### 3.1 室内土質試験

表 2 に室内土質試験の結果を示す。湿潤密度、自然含水比および粒度特性等の物理試験の結果からは、両サイトの試験面の地盤は工学的には連続した同一地盤であるとみなせる。しかし、UU 条件の三軸圧縮試験結果を比較すると、粘着力  $c_u$ 、内部摩擦角  $\phi_u$  ともに差異が認められる。試料間の強度特性のばらつきを抑えるために、UU 試験に対しては 5 試料の平均値を採用したが、本地盤のようにシルト

分が介在する試料に対しては、示量的な特性を示すことが知られている。そのため、南側での  $c_u$ 、および  $p_u$  は地盤の代表値としては過大な結果である可能性が高い。

三軸圧縮試験で得られた粘着力と内部摩擦角を用い、Terzaghi の支持力公式に基づき地盤の極限支持力  $p_u$  を算定した(表 3 参照)。北側の CD 試験結果を用いた  $p_u$  (CD)は UU の約 1.8 倍、CU 試験のそれは UU の約 1.4 倍となった。

表 3 支持力公式による地盤の極限支持力

試験サイト	North Site			South Site
	UU	CD	CU	UU
排水条件				
粘着力 (kPa)	$c_u$ 79.0	$c_d$ 84.8	$c'$ 174.0	$c_u$ 217.0
内部摩擦角 (deg.)	$\phi_u$ 26.6	$\phi_d$ 33.0	$\phi'$ 19.4	$\phi_u$ 20.4
$p_u$ (kPa)	$D=0.3m$	2213	3960	2986
	$D=0.6m$	2219	3977	2987
				-

### 3.2 静的荷重試験

静的平板荷重試験で得られた荷重 - 沈下関係を図 3 および図 4 に示す。南側の試験では反力装置の容量制限から最大沈下量は 2~3 mm 程度にとどま

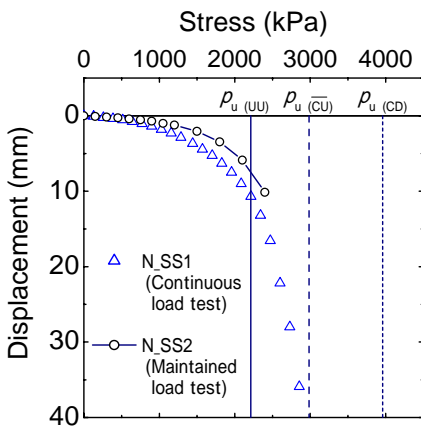


図 3 静的荷重試験による荷重 - 沈下関係 (北側)

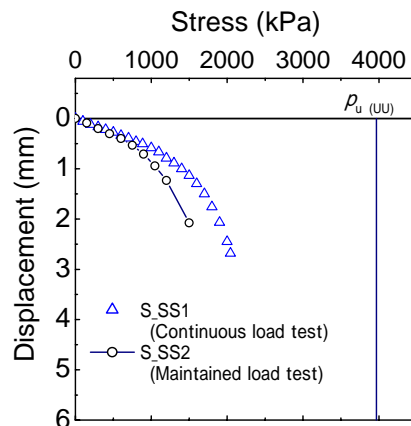


図 4 静的荷重試験による荷重 - 沈下関係 (南側)

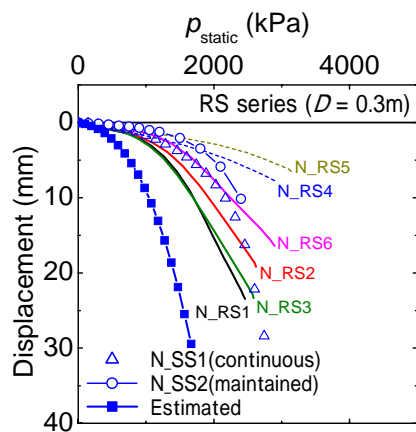


図 5 急速荷重試験による荷重 - 沈下関係 (北側:  $D=0.3m$ )

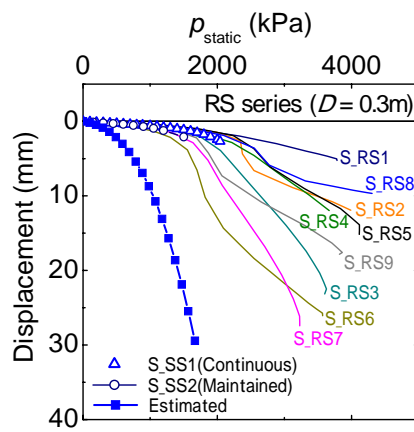


図 6 急速荷重試験による荷重 - 沈下関係 (南側:  $D=0.3m$ )

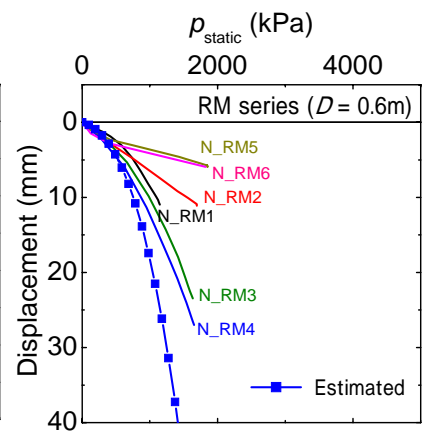


図 7 急速荷重試験による荷重 - 沈下関係 (北側:  $D=0.6m$ )

っている。荷重保持をしない連続荷重方式とした S\_SS1 は、荷重保持方式の S\_SS2 より荷重が大きくなる傾向を示したが、北側サイトでは逆に荷重保持方式の方がやや大きな値を示した。通常、荷重速度が速い場合に飛び出し効果によって荷重が大きくなる傾向が見られるが、この試験地盤ではむしろ狭い範囲内での地盤強度の違いがより顕著に試験結果に影響したものと考えられる。図中には前述の支持力公式で求めた地盤の極限支持力を示しているが、北側の  $p_u$  (UU)は平板荷重試験結果に比べると非常に小さいといえる。

### 3.3 急速荷重試験

図 5 および図 6 に両サイトにおける平板直径 0.3 m の急速荷重試験から非線形ダンピング法による解析を行って得られた地盤の静的な荷重 - 沈下関係を示す。試験では同一の測点で 2 回の打撃による測定を行ったが、ここでは初期の打撃から得られた曲線を記載している。また、同図には前述した静的荷重試験から得られた曲線も併記した。急速荷重試験による曲線は明確な折れ点を判別できるものがほとんどであるが、北側サイトの破線で描いた N\_RS4 と N\_RS5 は初期打撃ではないため、それらとは異なる傾向を示している。N\_RS4 は直径 0.6 m の N\_RM6 を実施した後に同じ位置で 0.3 m の荷重を行ったものであり、N\_RS5 は初期打撃のデータが取れなかったために第 2 打撃のデータを参考までに

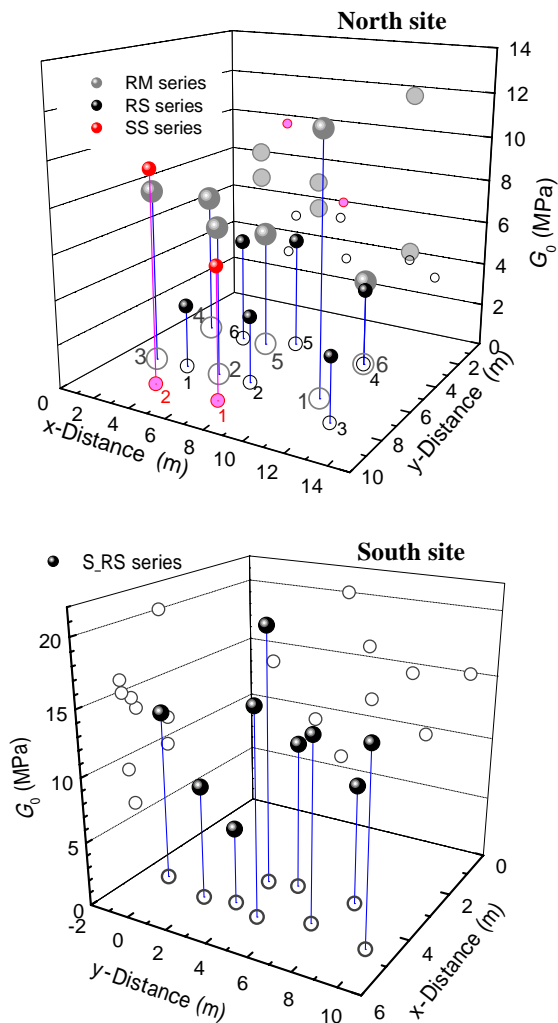


図8 試験サイト内での  $G_0$  の分布

示したものである。一方、急速載荷試験の降伏以前の曲線は静的載荷試験による曲線にかなり近似している。南側の静的載荷試験は沈下量 2~3 mm 程度までの載荷にとどまったが、図6に示す急速載荷試験との比較によれば、ほぼ降伏に至る直前であったことがわかる。

図7は北側サイトにおける平板直径 0.6 m の急速載荷試験で得られた地盤の静的な荷重 - 沈下関係である。これも初期打撃から得られた曲線を記載しているが、平板が大きいため試験機的能力範囲内では地盤の降伏応力にまで達していないものもある。

各試験の荷重 - 沈下関係から得られた初期地盤ばね定数  $k_{v0}$  を用いて、ポアソン比  $\nu$  を 0.3 と仮定して弾性論に基づく式[2]によって地盤の初期せん断弾性係数  $G_0$  を算定した。その結果を図8に示すが、敷地内での  $G_0$  の分布に目立った傾向は認められず、ばらついていることがわかる。各サイトの  $G_0$  の値

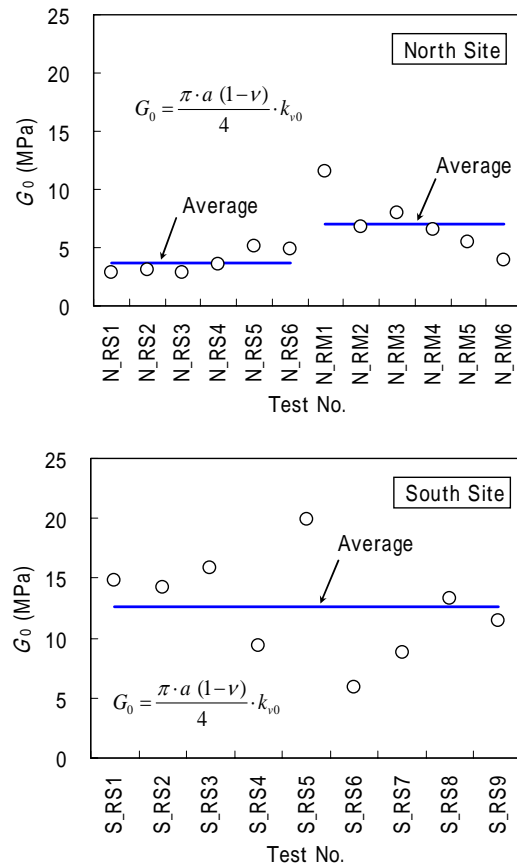


図9 各サイトの  $G_0$  の比較

表4  $G_0$  の平均値および変動係数

試験サイト	North		South	
平板径 $D$ (m)	0.3	0.6	0.3	0.6
平均値 (MPa)	3.73	7.04	12.6	-
変動係数 (%)	27.1	36.7	33.5	-

を図9に改めて示すとともに、ばらつきを評価した結果を表4に示す。 $D = 0.3$  m について南側と北側の結果を比較すると、南側の  $G_0$  の平均値は北側の約3倍あるが、変動係数もやや大きい。一方、北側の  $D = 0.3$  m と 0.6 m を比較すると、平均値、変動係数ともに  $D = 0.6$  m の場合が大きくなっている。大型平板では影響深さも大きくなることで、より深い地盤の特性を反映して値が高くなるものと考えられる。

北側サイトではブロックサンプリング試料を用いて変形特性を求める繰返し三軸試験（非排水条件）を実施しており、図10に示す  $G/G_0 \sim$  関係が得られている。この結果を利用して同サイト地盤の荷重 - 沈下関係を基礎指針[5]に示される即時沈下量の算定式(1)を用いて推定することを試みた。

$$S_E = I_s \cdot \frac{1 - \nu^2}{E} \cdot q \cdot B \quad (1)$$

図 10 の  $G/G_0 \sim$  関係を今津・福武[6]に準じた関数形でフィッティングして求めた変形係数を式(1)に代入し、得られた沈下量  $S_E$  を影響深さ  $H_i$  で除して軸ひずみ を求める。それを  $\gamma = (1 + \dots)$  で換算したせん断ひずみ を  $G/G_0 \sim$  関係式に代入して変形係数を求め、再び式(1)に代入して  $S_E$  を算定する。これを繰返し収斂計算することによって、ある荷重時の沈下量が一つ求まる。荷重値  $q$  を変化させて同様の計算を行うことで図 5~7 の プロットで示したような荷重 - 沈下関係の推定値が得られる。なお、影響深さ  $H_i$  は一般にいわれている「基礎幅  $B$  (ここでは平板径  $D$ )  $\times 1.5$ 」を仮定した。また、沈下係数  $I_s$  は載荷板の剛性が十分に大きいとみなして 0.785 とし、  $\gamma$  は 0.3 を仮定した。 $D = 0.6$  m の初期には幾分整合性も見られるが、 $D = 0.3$  m とともに平板載荷試験の結果よりも沈下が大きく算定される結果となった。一般に、室内試験で得られる変形係数は原位置のものより小さくなるため、この推定値も何らかの補正を施した変形係数を用いることが適切と考えられる。また、ここでは北側サイト近傍で採取した試料による繰返し三軸試験の結果を用いているが、その推定値を南側サイトでの載荷試験の結果と比較してみた。工学的には同一地盤とみなせる両サイトであるが、図 6 に示すように北側サイトの試料に基づく推定値と南側での載荷試験結果の乖離は、より大きい。この点においても両サイト地盤の特性の違いを見ることができる。

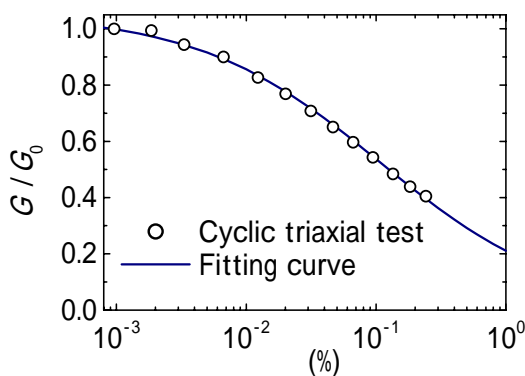


図 10  $G/G_0 \sim$  関係

#### 4. おわりに

同一試験サイト内の固結砂質地盤を対象に静的および急速の平板載荷試験を実施し、ここで用いた急速載荷試験方法が従来の静的な方法によるものと同様の結果をもたらすことが確認された。前報におい

て検証した粘土質地盤とともに、今回の砂質地盤においても適用性は良好であるといえる。

また、急速平板載荷試験を比較的狭いエリア内で複数箇所実施して得た荷重 - 沈下関係に基づいて、地盤特性のばらつきを評価することを試み、同一敷地内ながら南側と北側サイトでは幾分性状が異なる（南側の固結度がより高く、ばらつきも大きい）ことが確認された。

さらに、室内土質試験の結果を用いて地盤の荷重 - 沈下関係の推定を試みた結果、原位置の平板載荷試験結果よりも沈下量が大きく算定されることが確認された。

#### 謝辞

本試験を実施するにあたり、多大なご協力を頂いた首都圏事業本部第四建築事業部の小松 健 統括所長、金平 博樹 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]例えば、二木幹夫、安達俊夫：急速平板載荷試験による地盤評価法について（その 1：試験法の概要とその利用）、1999 年度日本建築学会大会学術講演梗概集, B1, pp.673-674, 1999.
- [2]崎浜博史、根本恒、松澤一行、松本樹典：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）、安藤建設技術研究所報, Vol.11, pp.107-112, 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., 続誠：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]日本建築学会：建築基礎構造設計指針，pp.123-124, 2001.
- [6]今津雅紀，福武毅芳：砂礫材の動的変形特性，第 21 回土質工学研究発表会，pp.509-512, 1986.