

サーモグラフィを用いた回転貫入杭周囲の土の乱れに関する研究

新井 マウリシオ 淳^{*1}・藤井 衛^{*2}・永田 誠^{*3}・小松 吾郎^{*4}

Study on the Visualization of Soil Turbulence Surrounding the Screw Pile Using Thermography

by

Mauricio Jun ARAI, Mamoru FUJII, Makoto NAGATA, Goro KOMATSU

(Received on September 30, 2005 & accepted on January 14, 2006)

Abstract

Using of a screw pile in building foundations results in turbulence in the surrounding of the pile. The actual area of soil turbulence cannot be easily evaluated due to difficulty in accessing the area beneath the surface. It has been found that the bearing capacity of the pile was affected by the shear stress of soil under the tip of the pile. The area influenced is decided only on the basis of estimation from the results of load tests. This article proposes a method of visualization using thermography suitable for evaluation of possible construction methods of pile and ground improvement.

Keywords: Screw pile, Distortion, Bearing capacity, Visualization

1. 目的

杭の支持力の分野において、杭先端の地盤の破壊に関する考え方には数多くある。しかし、それらのほとんどは理論あるいは載荷試験の結果に基づく解析結果から推定されたものにすぎない。例えば、埋め込み杭は、打ち込み杭に比較して、先端支持力が小さいと言われている。そして、その原因是、地盤のゆるみにあることもわかっている。しかし、どのように地盤がゆるんでいるのか、全くわからない状況である。もし、地盤の中で、そのようなゆるみあるいは締まりの状況を実際に見ることができれば、杭の貫入にともなう地盤破壊に関する多くの情報を得ることができる。この問題を解決する1つの手段として、可視化手法の適用が考えられる。

可視化手法は、本来、流体工学の分野で用いられてきた調査手法であり、地盤工学の分野ではあまり知られていなかった。地盤工学の分野において、筆者らは、可視化手法として、これまで着色砂や地盤改良土の健全性の評価としてフェノールフタレンを利用してきたが^[1-4]。現在、温度を利用した可視化に注目している。けい砂と笠岡粘土を7:3の比率で混合し、含水比を7%とした人工地盤を用いると、筆者らはその温度分布の映像が最も鮮明に写し出せることを見出した。そして、人工地盤の中に模型の回転貫入杭を貫入させ、杭周囲の土の乱れをサーモグラフィで用いた可視化によってとらえられることを明らかにした。なお、この時、サーモグラフィの他に参考までにコーンペネトロメータや着色砂を用いて、強度の分布や地層の変形についても調査した。本論文は、これらの人工地盤の作製方

法や杭の貫入に伴うサーモグラフィによる映像の紹介及びその評価の方法についてまとめたものである。

2. 実験項目

実験は、次の3つの項目について行った。

- i) 人工地盤作製のための砂と粘土の粒度配合
- ii) 回転貫入杭の貫入速度と地盤の乱れ
- iii) 回転貫入杭先端の応力伝達分布

i) については、今回の模型地盤を作製するために、けい砂7号と笠岡粘土の最適配合比を決定するために行った。ii) については、回転貫入杭の貫入速度を4種類に変化させ、貫入に伴う杭周辺の土の乱れをサーモグラフィによって可視化できるかどうかを調査した。iii) については、貫入可能なある深さまで回転貫入杭を設置し、この状態で杭頭部に極限荷重を作用させ、その杭の先端部の地盤の応力伝達領域がサーモグラフィによって可視化できるかどうかを検証した。

3. サーモグラフィ装置

実験で使用したサーモグラフィ装置は、Fig.1に示すような原理に基づいており、試験体（模型地盤の断面）から放射される

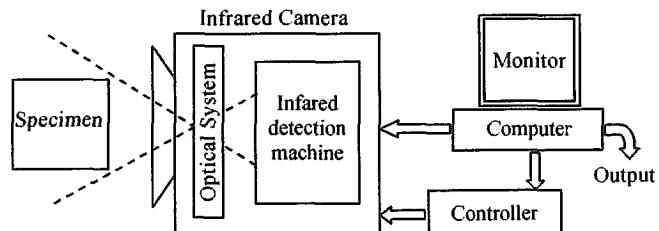


Fig.1 Thermography System

* 1 工学研究科建築学専攻 工修

* 2 工学部建築学科教授 工博

* 3 新日鐵株式会社

* 4 大同コンクリート工業 工修

熱を赤外線検出器でとらえ、これをコンピュータによって温度情報として処理し、モニター上に温度分布としてとらえるものである。また、その装置の仕様を Table 1 に示す。

Table 1 Specification of thermography equipment

	Item	Contents
Camera	Number of optical scanning lines	240 to the perpendicular view of a heat picture
	Decomposition capability of horizontal picture	300 or more
	View angle	30°(H) × 28°(V)
	Focal length	16cm ~ ∞ of whole camera part surfaces
	Detection wavelength region	L range 1.2 ~ 5.6μm, M, H range 3.6 ~ 4μm (H_2O , CO_2 gas penetration wave length belt)
	Temperature measurement range	-40 ~ 2000°C (automatic change of a three-step range)
Controller	Number of optical scanning lines	240 to the perpendicular view of a heat picture
	Number of display pixels	512(H) × 240(V)
	Display form	Non-interlaced TV framedisplay by digitalized data memory built in
	Zoom Function	View angle is displayed by 30°, 25°, 20°, 15°, 5°
	Temperature range	1, 2, 3, 5, 7, 10, 20, 30, 50, 70, 100, 200, 300, 500, 700 15 step switching

4. 実験方法

4.1 人工地盤の作製と測定方法

けい砂 7 号と笠岡粘土の配合比を 9 : 1, 7 : 3, 6 : 4, 5 : 5, 4 : 6, 3 : 7, 2 : 8, 1 : 9 の 8 種類とし、その配合土の含水比を 7% に調整した。けい砂 7 号と笠岡粘土の粒度分布曲線を Fig.2 に示す。その配合土を $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ の型枠を用いて、密度が 1.20g/cm^3 となるように突き棒によって締め固める。その後、一軸圧縮試験機を用いて試験体上部に 50N/mm^2 になるまで荷重かけ、除荷することを確認し、そして型枠の一方をはずし、断面の半分を削り取る。装置を温度（約 18.0°C ）の室内に設置し、削り取った表面の温度分布をサーモグラフィにより調査した。

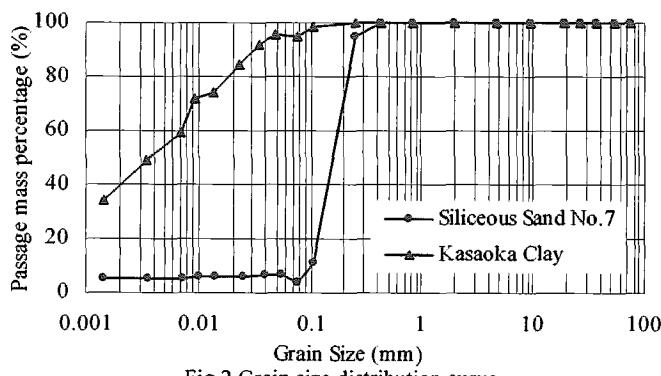


Fig.2 Grain size distribution curve

4.2 回転貫入杭の貫入速度と地盤の乱れ

貫入装置と使用した回転貫入杭は Fig.3 に示すようなもので、回転軸に取り付けたモーター（回転部）が上下昇降できる機構となっている。推力は実際の杭打ち機のオーガー駆動機と同様に深度方向にかけられるようになっている。また、この装置は、その推力をロードセルにより測定し、トルクも測定できる機構となっている。軸径が 48.7mm 、翼径が 72.8mm 、ピッチが 13.7mm 、掘削刃の高さが 18.2mm である。模型土槽は鋼製であり、直径が 260mm 、高さが 500mm である。また、この槽は 2 つ割れになっており、杭設置後、地盤を垂直方向に切断できる機構となっている。地盤は、i) の実験結果に基づき、けい砂 7 号と笠岡粘土を 7 : 3 で混合し、含水比が 7% になるように調整したものを使用した。人工配合土の粒度分布曲線を Fig.4 に示す。人工地盤は、次のように作製した。まず、模型槽に土を 5 層に分けて入れ、各層毎に木のハンマーを用いて、10 回の打撃を加えて締め固めた。締め固め後の乾燥密度は、 10.2kN/m^3 であった。この状態の地盤に対し、4 種類の貫入速度 (45mm/min , 90mm/min , 270mm/min , 450mm/min) で杭を設置した。それぞれの貫入速度を 1 回転当たりの貫入量であらわすと Table 2 のようになる。

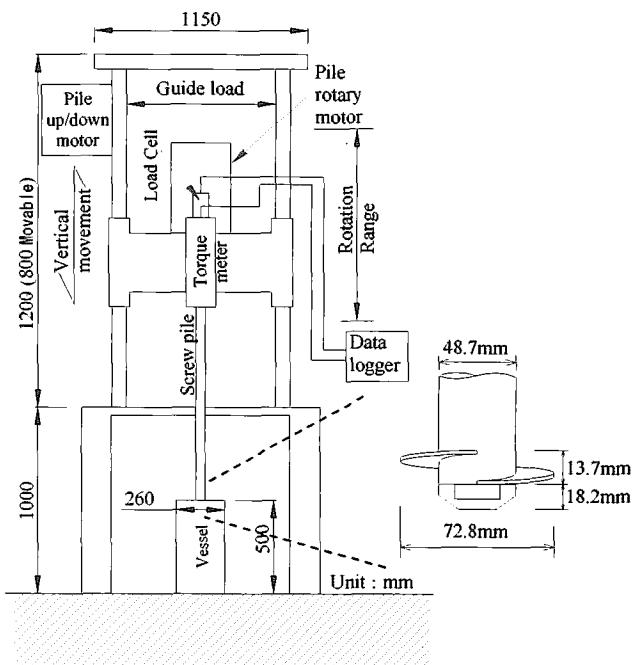


Fig.3 Penetration equipment and the detail of screw pile

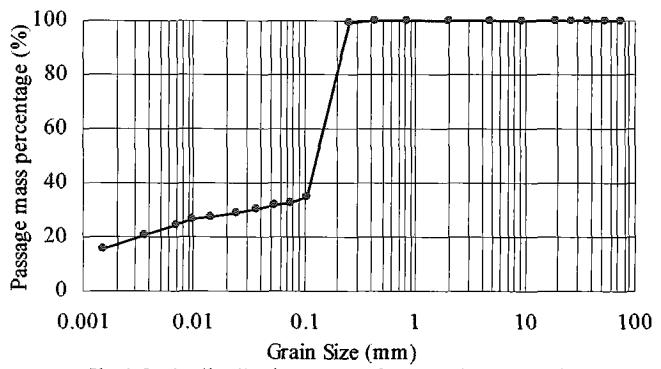


Fig.4 Grain distribution curve of 7:3(sand : clay) ratio

Table 2 Penetration speed and penetration quantity per rotation

Penetration Speed (mm/min)	45	90	270	450
Penetration quantity/ rotation (mm)	1.125	2.25	6.75	11.25

杭の設置後、土槽の枠の一方をはずし、横に倒して土の半分を除去した。そして、その切断面に対して Fig. 5(左)に示すように赤外線カメラを当て、サーモグラフィにより切断面の温度分布を表した。



Fig.5 Measurement situation by thermography (left), hardness examination (center) and the position of a layer position situation

その後、Fig. 5 (中) に示すように、20mm メッシュの交点にコーンペネトロメーターを押し込み、土の固さを調べた。また、Fig. 5 (右) に示すように濃色層 (20mm) を 80mm ごとに設けた。

4.3 回転貫入杭先端の応力伝達分布

ii) で作製した人工地盤に対して、 12.7kN/m^3 の密度になるように地盤を締め固めて、Fig.3 に示す回転貫入杭を 45mm/min の貫入速度で深さ 250mm まで貫入させた。その後、Fig.6 に示すように、杭頭部に極限荷重を作用させた。そして、ii) と同様に切断面の温度分布をサーモグラフィによって現わした。

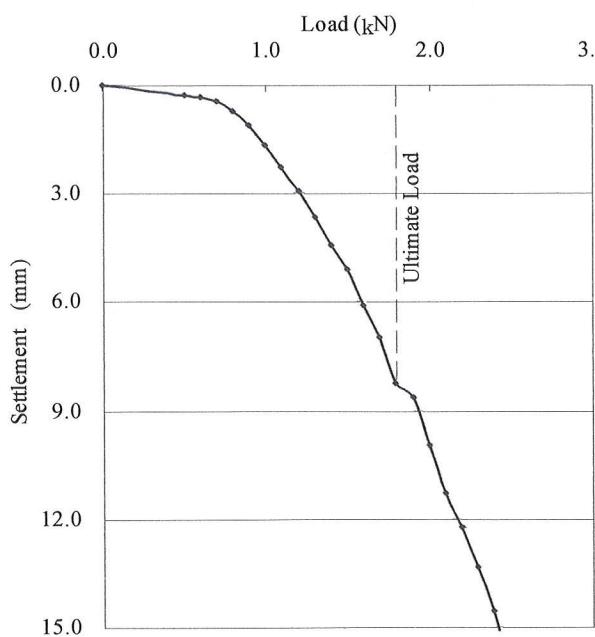


Fig.6 Load × Settlement curve

5. 実験結果と考察

5.1 人工地盤作製のための砂と粘土の粒度配合

Fig. 7 は、けい砂と笠岡粘土の配合比率を変えた試料土断面のサーモグラフィによる温度の分布状況を示したものである。写真中の黒い部分は温度が高く、青色に近くなればなるほど低いことを意味しているため、試験体上端および下端に見える黒い三角部分は、内部で圧縮されているととらえることができる。ここで良い配合を明らかにするための条件として、試験体の密度が高く、強度が高い必要があることから、圧縮領域が多く、円柱の試験体の内部負荷がクロスすることが理想である。その現象を、サーモグラフィで見た場合、上端と下端に三角の圧縮領域がどれだけきれいに映しだされるかが重要となり、それによつて判断することができる。以上のことを見えて fig.7 をみると、砂と粘土の比率が 7:3 の場合が、圧縮領域と引張領域のバランスがよく、可視できることから、もっとも締りがよく強度の高い配合であるといえる。

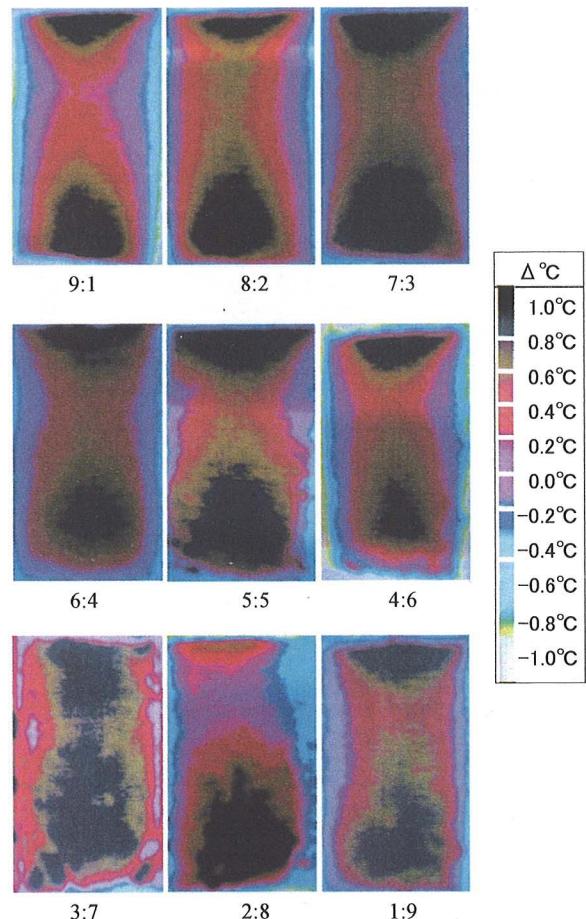


Fig. 7 Temperature distribution of the soil sample by the various kinds of mixture ratios (sand:clay proportion). 0.0°C correspond the temperature of soil before experiment

5.2 回転貫入杭の貫入速度と地盤の乱れ

Fig.8 は、それぞれの貫入速度 45~450mm/min に対するコーンペネトロメーターによる固さ分布、着色層による変化、サーモグラフィによる温度分布を示したものである。Fig.8 (左) の固さ分布に着目すると、杭の貫入前は、コーンペネトロメータ

一による貫入力が 5~10N であったのに対し、貫入速度 45mm/min, 90mm/min では杭周辺地盤の貫入力量が 40~50N ま

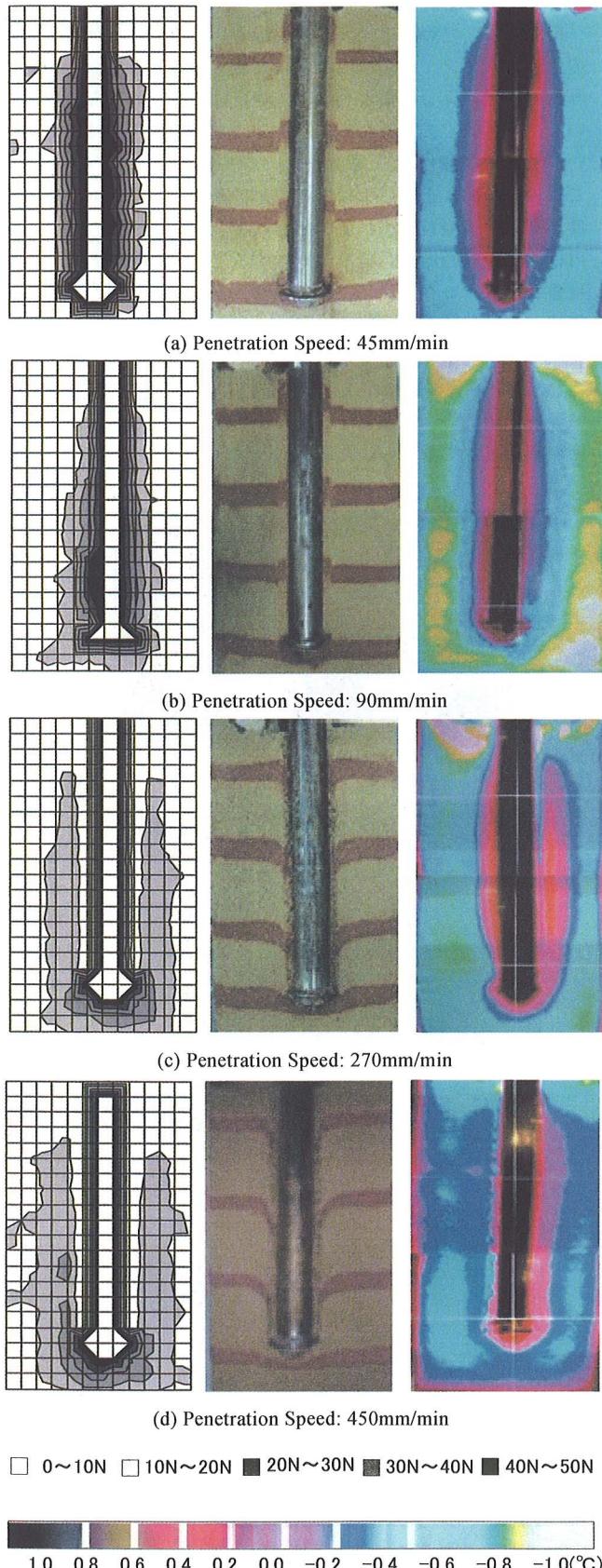


Fig.8 Results of hardness distribution(left), change of a coloring layer(center) and thermography image (right)

で増大し、さらに貫入速度を速めて 270mm/min, 450mm/min とすると 5N 以下に低下する結果となった。これにより貫入速度 270mm/min, 450mm/min で杭外周地盤が乱されていることがわかる。Fig.8 (中) の着色層の変化を見ると貫入力と同様に、杭外周地盤が乱されていることが目視でも確認できる。また、Fig.8 (右) のサーモグラフィによると、実験前の温度を基準にした場合、杭の貫入前後で、1°C の差が生じ、fig.8(左)で示した貫入力の分布図と同様の分布となった。

次にサーモグラフィの温度差に着目し、貫入速度と貫入前後の地盤の温度上昇について考察を行った。fig.8 (右) の貫入速度ごとのサーモグラフィ画像を見ると Fig.8 (a)(b) は、色の分布から見て、温度上昇範囲が狭いといえる。これは、羽根の推進力が作用している状態をあらわしていると考えられる。一方、Fig.8 (d) は、温度上昇範囲が広いことが確認できる。これは、駆動機からの押し込み力によって杭が強制的に圧入された状態をあらわしていると考えられる。以上のことから、サーモグラフィでも強度や地盤の乱れの分布を判別することが可能であると考えられる。

5.3 回転貫入杭先端の応力伝達分布

Fig.9 は、回転貫入杭に極限荷重を作らせた状態下でのサーモグラフィによる温度分布を示したものであり、Fig.10 はコーンペネトロメーターによる強度分布を示したものである。

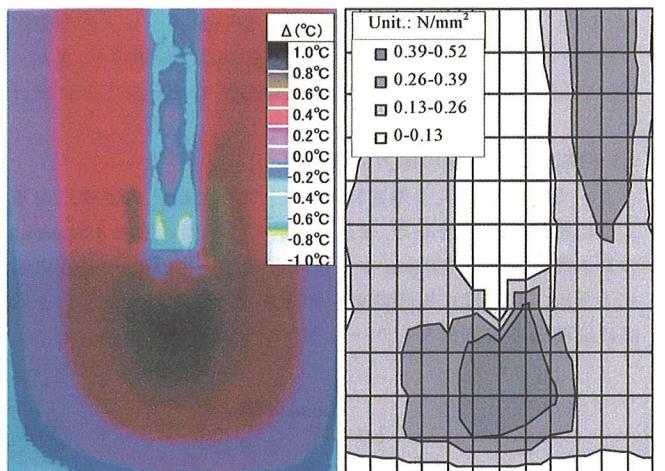


Fig.9 The temperature distribution by screw pile under ultimate load
Fig.10 The strength distribution by hardness tester

強度分布は、コーンペネトロメーターの測定箇所を限定し、局部的な部分からコンターラインを引くことで作製するため、全体的な把握は、困難である。しかし、サーモグラフィによる画像を用いれば、強度の分布のみではなく、全体的な強度の伝達傾向も読み取ることが可能となる。つまり、両試験を併用すると、地盤にとって必要な強度とその伝達方向、さらに地盤の乱れなどの情報を得ることが出来るといえる。参考までに、Table 3 にコーンペネトロメーターの値とその測定点におけるサーモグラフィによる温度の値を示す。

Fig.9 によると、特に羽根直下の領域に高い温度分布が見られる。その鉛直方向の長さは、羽根の直径分に相当する。回転貫入杭の先端支持力を計算する時は、羽根径に相当する領域の土の N 値を対象にしている。そして、サーモグラフィは、そのことが正しいことを裏付けている。

Table 3 Hardness tester's value and temperature variation

Hardness Tester Value (N/mm ²)	Temperature (Δ°C)
0.15	0.0~0.5
0.30	0.5~0.8
0.40	0.8~1.0

6. まとめ

本論文の結論をまとめると、以下のようになる。

- 1) サーモグラフィによる温度分布が最も明瞭に現れる砂と粘土の配合比率は、7:3である。
- 2) 杭の貫入に伴って発生する杭周辺の土の乱れは、サーモグラフィによってとらえることが可能である。着色層やコーンペネトロメーターを用いると、この状況をより正確にとらえることができる。
- 3) 回転貫入杭の頭部に極限荷重を作用させることによって発生する杭先端部の応力の伝達分布領域は、サーモグラフィによって明瞭にとらえることができる。

このように、本論文で提案するようなサーモグラフィ法により、これまで推測の域を出なかった杭周辺の土の乱れや応力の伝達分布領域を明瞭にとらえることが可能となった。この方法は、杭だけではなく、あらゆる分野にも応用が可能であり、この研究の意義は大きい。

参考文献

- 1) 藤井 衛, 梶田 理, 田村 昌仁: 改善翼の混合性能に関する可視化実験, 第34回地盤工学研究会発表会, pp.323~324, 1999
- 2) 小松吾郎, 藤井 衛, 田村 昌仁, 川村 政史: 着色砂とサーモグラフィによる改善翼の貫入性状の可視化, 第35回地盤工学研究会発表会, pp.425-426, 2000
- 3) 大関 敏広, 川村 政史, 藤井 衛, 田村 昌仁, 渡辺 一弘: ソイルセメントのフェノールフタレン反応について, 第36回地盤工学研究会発表会, pp.793~794, 2001
- 4) 新井 マウリシオ 淳, 河野 文顕, 須々田 幸治, 藤井 衛: 深層混合処理工法の改善翼の性能評価手法に関する一提案, 第38回地盤工学研究会発表会, pp.1041~1042, 2003