

表 3-2-2 検定結果

J I S A 1 2 1 4		砂置換法による土の密度試験		記録用紙		
調査名、調査地点		試験年月日		2007/6/19		
測定器番号		試験者		堀 智仁		
I. ジャーとピクノメータートップとの体積の検定						
測定番号		1	2	3	4	5
ジャーとピクノメータートップに水を満たした質量		m2	g	5961	5961	
測定器の質量		m1	g	1923	1923	
満たした水の質量		m2 - m1	g	4038	4038	
測定器中の水の温度		t	°C	26.5	26.5	
t°Cにおける水1g当たりの体積		k	cm³/g	1.00336	1.00336	
ジャーとピクノメータートップとの体積		V1	cm³	4051.6	4051.6	
平均値		V1 = 4051.6 cm³				
II. 試験用砂の密度の検定						
測定番号		1	2	3	4	5
ジャーとピクノメータートップに砂を満した質量		m3	g	7373	7374	7365
測定器の質量		m1	g	1923	1923	1923
満たした砂の質量		m4 = m3 - m1	g	5450	5451	5442
試験用砂の密度		ρ _{ds}	g/cm³	1.345	1.345	1.343
平均値		ρ _{ds} = 1.345 g/cm³				
III. 漏斗を満たすのに必要な砂の質量の検定						
測定番号		1	2	3	4	5
測定器と入れた砂の質量		m3	g	7373	7374	7365
漏斗を満たした砂を除き測定器に残った砂の質量		m5	g	5864	5861	5855
漏斗を満たすのに必要な砂の質量		m6 = m3 - m5	g	1509	1513	1510
平均値		m6 = 1510.75 g				
備考						
注1) ジャーとピクノメータートップとの体積 $V_1 = k (m_2 - m_1) \text{ cm}^3$						
注2) 試験用砂の密度 $\rho_s = m_4 / V_1 \text{ g/cm}^3$						

表 3-2-3 試験結果

J I S A 1 2 1 4		砂置換法による土の密度試験 (測定) 記録用紙		
調査名. 調査地点	羽田空港現場実験	試験年月日	2007/11/19	
測定器番号	No. 1, No. 2	試験者	堀 智仁	
測定器No.		土質名称		
試験用砂の乾燥密度	ρ_{ds} (g/cm ³) 1.345	漏斗を満たすのに必要な砂の質量	1510.75	
試験孔 No.		1	2	3
最大粒径 mm				
容器 No.				
容器質量	g	1920.00	1920.00	
試験孔から取り出した湿潤土の質量	m_T g	1183.00	888.00	
試験孔から取り出した土の炉乾燥質量	m_D g	712.77	738.55	
ジャーとピクノメータートップに砂を満たした質量	m_B g	7334.00	7341.00	
測定器と残った砂の質量	m_B g	4784.00	5115.00	
試験孔および漏斗に入った砂の質量	m_B g	2550.00	2226.00	
試験孔を満たすのに要する砂の質量	m_0 g	1039.25	715.25	
試験孔の体積	V_0 cm ³	772.68	531.78	
湿潤密度	ρ_t g/cm ³	1.531	1.670	
乾燥密度	ρ_d g/cm ³	0.922	1.389	
含水比	w %	65.97	20.24	
締固め度	ρ_d/ρ_{ds}	68.6	103.3	

表 3-2-4 物理試験結果

試料名	土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	最大粒径 D_{max} (mm)	均等係数 U_c	地盤材料の分類名
No.1	2.685	26.5	89.8	礫まじり細粒分質砂 (SF-G)
No.2	2.675	19	39.3	細粒分質礫質砂 (SFG)

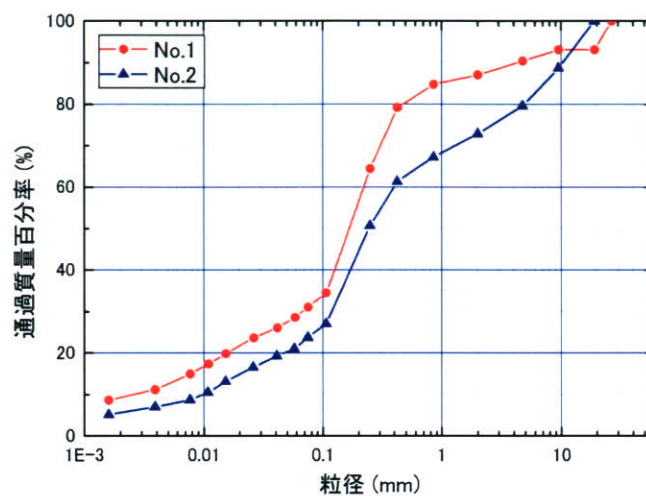


図 3-2-3 採取した試料の粒度分布

3.3 水準測量

3.3.1 水準測量の概要

水準測量²⁾は規準となる点の高さを測定するものである。本節では、走行路の不陸と、敷鉄板敷設後の不陸、走行後の敷鉄板の沈下量を測定した。図 3-3-1 に水準測量の概念図を示す。点 A の標高が既知で、点 B の標高が未知の場合、点 B の標高は後視(BS)と前視(FS)を計測し、次式で求めることができる。

$$\text{点Bの標高} = \text{点Aの標高} + BS - FS \quad (3-3-1)$$

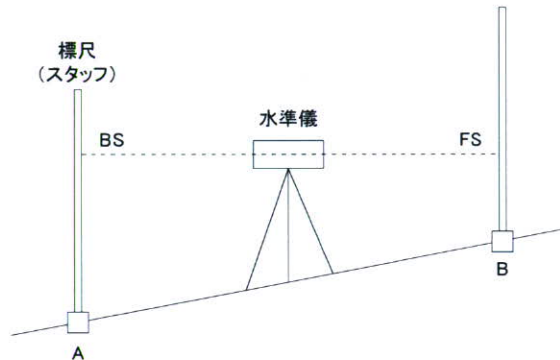


図 3-3-1 水準測量の概念図

3.3.2 測点箇所

(1) 走行路の不陸の測定

走行路にはあらかじめ 1.8m 間隔で金属製の小さな杭が設置されていたため、それを測点として地盤の高さを測定した。水準測量の様子を写真 3-3-1 に示す。



写真 3-3-1 水準測量の様子

(2) 敷鉄板の沈下量の測定

杭打ち機械の走行による敷鉄板の沈下量を調べるために、敷鉄板上の履帯が通過する場所と、敷鉄板の四隅の高さを走行前後に計測して、それぞれを比較した。図 3-3-2 は概要を示したものである。進行方向に対して左側の履帯が通過する地点を L、右側の履帯が通過する地点を R としている。敷鉄板の四隅と中央の高さは、1 枚目、11 枚目、21 枚目の敷鉄板で測定し、それぞれ点 1~5 とした。

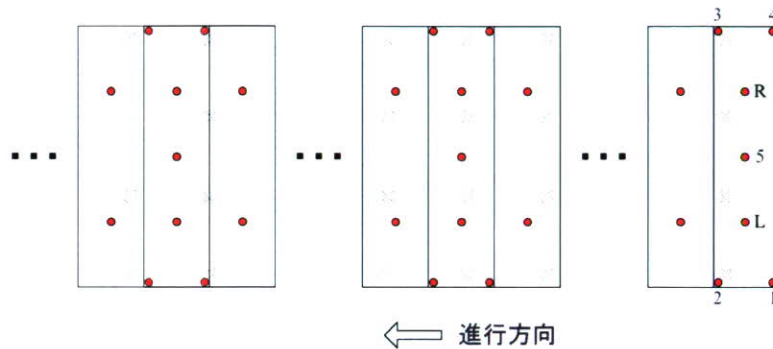


図 3-3-2 敷鉄板の沈下量の測定

3.3.3 測定結果

(1) 走行路の不陸

図 3-3-3 は、No.1-a を 0m としたときの高低差を示したものであり、ゆるやかな起伏がみられる。水準測量の結果から、走行路の最大の高低差は約 10cm であることがわかった。図 3-3-4 は、図 3-3-3 の contour 図を 3 次的に表した図である。

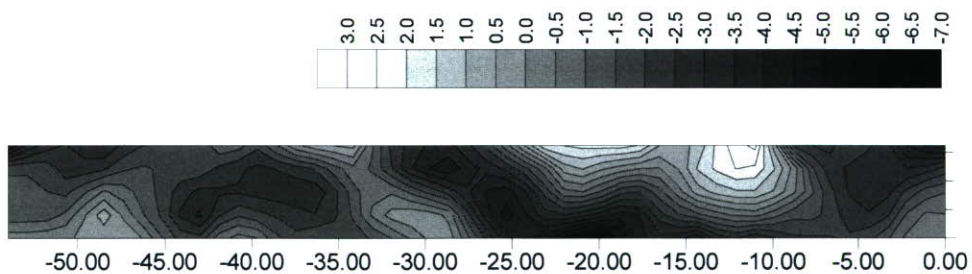


図 3-3-3 走行路の不陸 (contour 図)

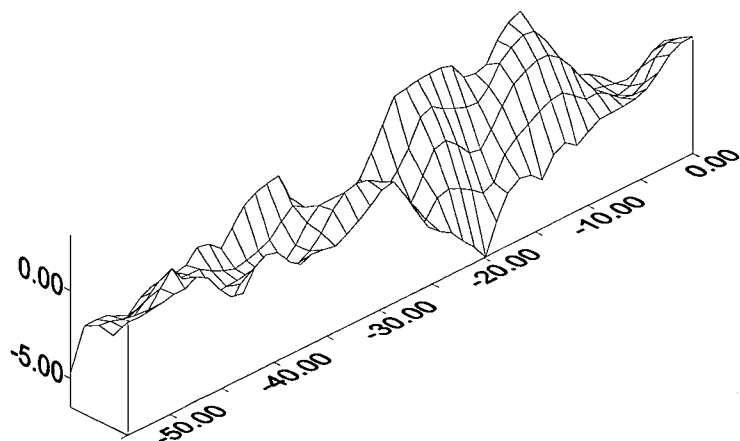


図 3-3-4 走行路の不陸 (3D 図)

(2) 敷鉄板敷設後の不陸

図 3-3-5 は地盤の不陸と敷鉄板敷設後の不陸を比較した図である。敷鉄板敷設後の不陸の測定は、図 3-3-2 に示す履帯の通過する L と R の 2 点で測定したものである。現地盤の最大高低差は 10cm であるのに対し、敷鉄板敷設後の高低差は 7.5cm であった。

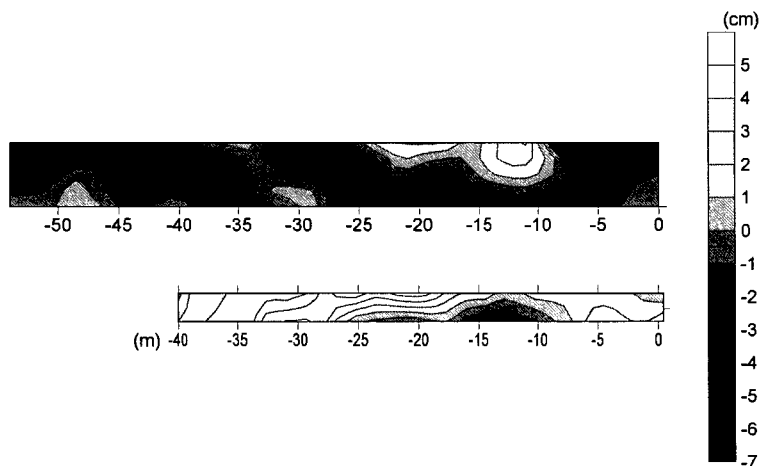


図 3-3-5 地盤の不陸(上)と敷鉄板敷設後の不陸(下)の比較

(3) 敷鉄板の沈下量

杭打ち機械の走行前後で水準測量を行い、敷鉄板の沈下量を測定した。図 3-3-6 に計測した敷鉄板の場所を示す。計測した敷鉄板は、No.1, No.11, No.21 の全部で 3 枚である。敷鉄板の 4 隅と中央、L と R の全 7 点の高低差を測定した。図 3-3-7 から図 3-3-9 は走行前と走行後の敷鉄板の高低差を示したものである。全ての結果で走行前後に有意な差はなく、機械の走行による敷鉄板の変形はほとんど認められない。走行前と走行後の差を図 3-3-10 に示した。それぞれの結果を見ると、敷鉄板の沈下量は約 1cm 程度であり、沈下量は非常に小さいことが明らかになった。また、現地盤の凹凸と比較すると、敷鉄板の沈下量は良く対応していることがわかった。

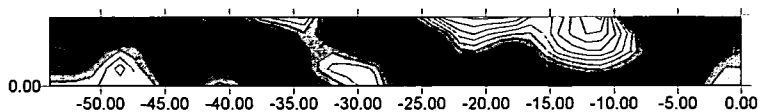
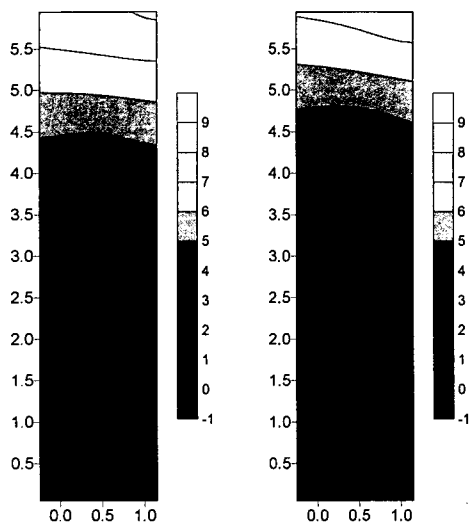
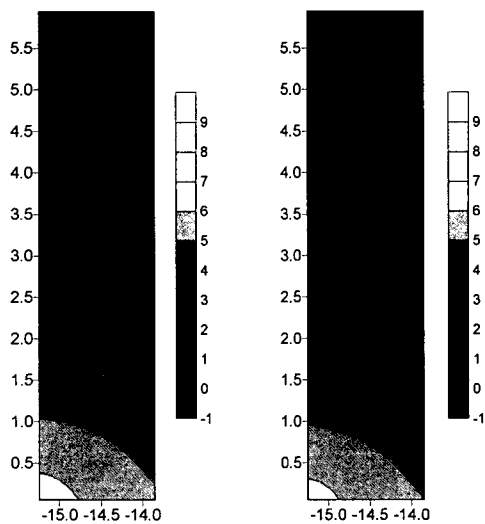


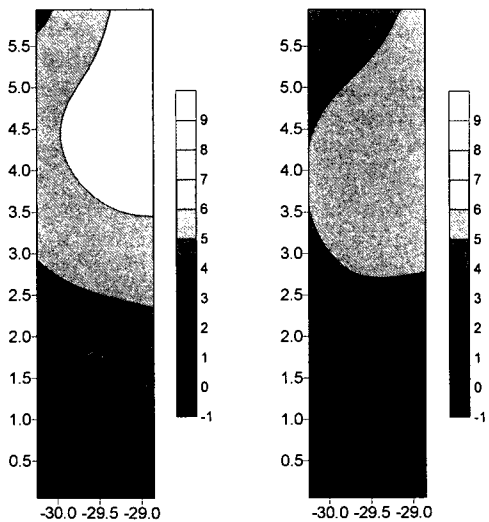
図 3-3-6 敷鉄板の位置(右から1枚目, 11枚目, 21枚目)



(a) 走行前 (b) 走行後
図 3-3-7 No. 1 の敷鉄板 (単位:mm)



(a) 走行前 (b) 走行後
図 3-3-8 No. 11 の敷鉄板 (単位:mm)



(a) 走行前 (b) 走行後
図 3-3-9 No. 21 の敷鉄板 (単位:mm)

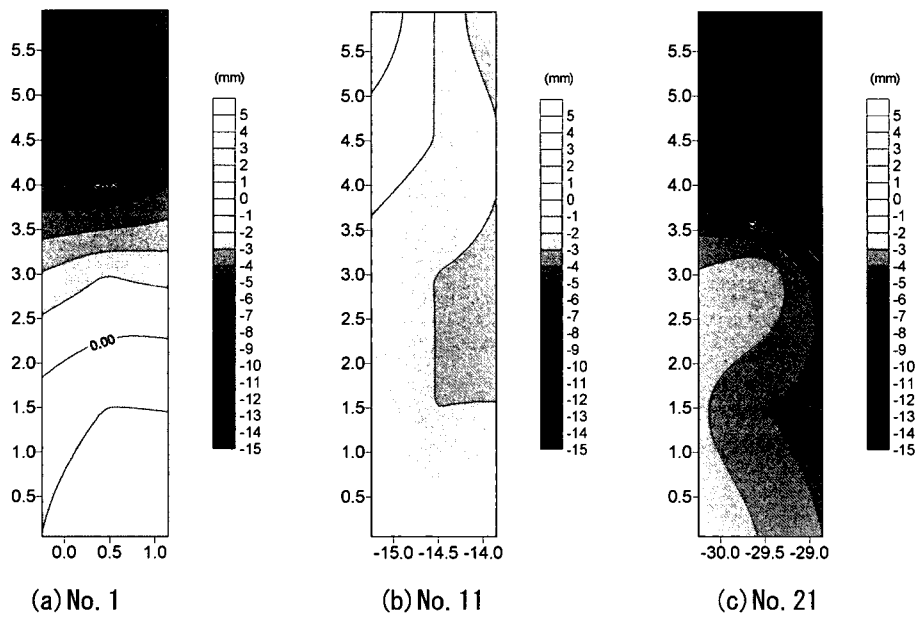


図 3-3-10 走行後の敷鉄板の沈下量

3.4 平板載荷試験

3.4.1 平板載荷試験の概要

走行路の地盤耐力を測定するために、2種類の平板載荷試験³⁾を行った。この試験では従来型の方法に比べ、実施が容易な試験装置を用いた。本節では試験装置の概要と試験結果について述べる。

(1) 安研式平板載荷試験装置

図3-4-1と写真3-4-1は平板載荷試験装置の概要を示したものである。この試験装置の大きな特徴は、装置の架台には4個の車輪が取り付けられているため、人力により容易な移動が可能であることと、ハンドルの角度が0度、45度、90度の3段階に調節可能な機構が与えられており、様々な状況における移動や設置が可能となっていることである。

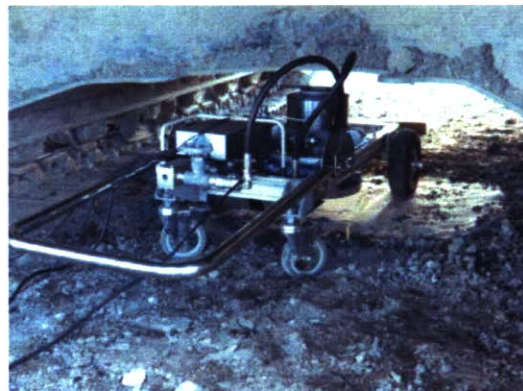
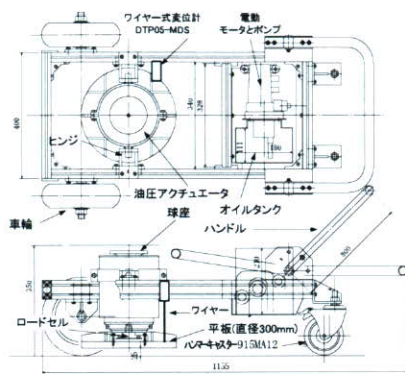


図3-4-1 安研式平板載荷試験装置の概要

写真3-4-1 安研式平板載荷試験

(2) 簡易式平板載荷試験装置

図3-4-2と写真3-4-2は簡易式平板載荷試験装置の概要を示したものである。簡易式平板載荷試験装置は、安研式平板載荷試験装置をさらに簡略化したもので、本研究で新たに製作したものである。この試験器の特徴は、アルミ製の載荷板であるため軽量で持ち運びが容易であることと、アクチュエーターに市販のボトルジャッキ（耐荷重量2t）を採用したため非常に安価である。また、電池式の指示器を使用することにより、電源のない場所でも試験を行うことが可能である。

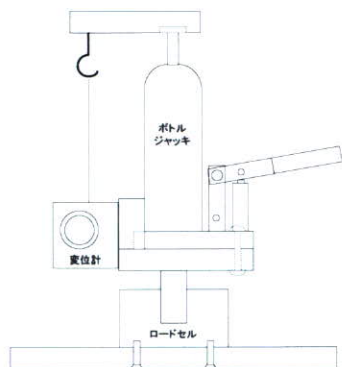


図3-4-2 簡易式平板載荷試験装置の概要

写真3-4-2 簡易式平板載荷試験

(3) 試験方法および試験箇所

a) 载荷位置の決定と地表面のならし

重機下部走行体の履帯の間において平板载荷試験を実施する。载荷位置は目視によって凹凸が少ない場所であることを確認した後、重機を移動する。アクチュエーターの反力を受ける重機側部分の構造も丈夫であることを確認した後、ストレートエッジで表面の凹凸を取り除き平坦に仕上げる。その後、ベディングエラーの影響を小さくするために、载荷箇所を砂を 2cm 程度敷きならす。

b) 重機機体変位量の測定

アクチュエーターの反力によって重機の機体が浮き上がる場合がある。そこで、写真 3-4-3 に示すように、重機の前後にワイヤー式変位計を設置して機体の浮き上がり量を調べた。

载荷にともない機体に浮き上がりが生じた場合、次に示す手順で変位を補正する。図 3-4-3 は補正変位量を算出するための概念図である。機体の前後に設置した変位計の値を X_1 , X_2 とすると、载荷位置の補正変位量は次式によって求める。

$$\begin{aligned} \Delta X_1 &= X_2 - X_1 \\ (A+B) : \Delta X_1 &= A : \Delta X_2 \\ \Delta X_2 &= \frac{A \cdot \Delta X_1}{(A+B)} \\ \therefore \text{補正変位量} &= X_1 + \Delta X_2 \end{aligned} \tag{3-4-1}$$

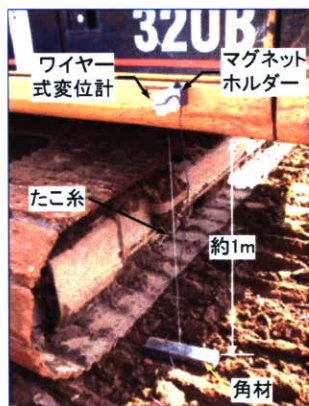


写真 3-4-3 機体変位量の測定

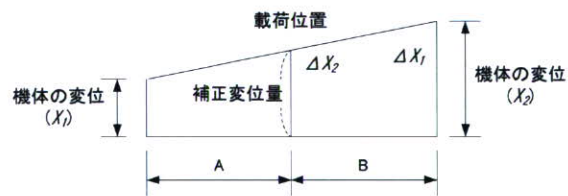


図 3-4-3 補正変位量

c) 試験箇所

図 3-4-4 は平板载荷試験を行った場所を示したものである。安研式試験装置で行った地点を P (4 地点), 簡易式試験装置で行った地点を S (2 地点) でそれぞれ示した。

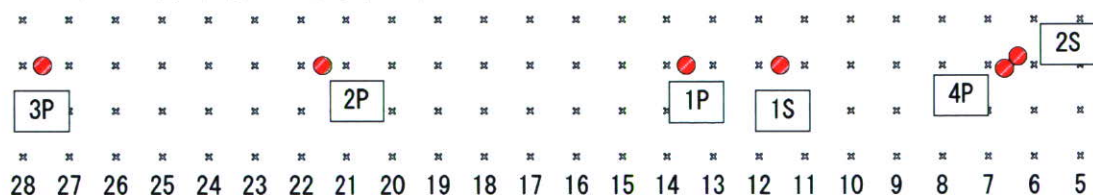


図 3-4-4 試験箇所 (P:安研式, S:簡易式)

(4) 試験結果

a) 試験装置の性能確認

安研式平板载荷試験は、油圧アクチュエーターに送るオイルの流量で変位をコントロールしている。搭載している油圧アクチュエーターは2重構造のシリンダーを有しているため、载荷途中で流量の調節が必要である。しかし、流量を調節するバルブは微調整が難しく、バルブを少し回しただけで変位速度が大きく変化する。一方、簡易式平板载荷試験はボトルジャッキで変位を与えるため、時間的にリニアな変位を与えることは不可能である。地盤の強度には一般的にひずみ速度依存性があるため、本実験で用いた2種類の平板载荷試験のひずみ速度の影響を調べる必要がある。

安研式と簡易式平板载荷試験の沈下比(s/D)と変位速度(mm/min)の関係を示したものが図3-4-5および図3-4-6である。沈下比とは、沈下量(s)を载荷板の直径(D)で除した値であり、 s はアクチュエータの伸長量から機体の浮き上がり量を引いた値である。試験では変位速度が5mm/minとなるように実験毎に手動で制御している。

変位速度の分布範囲は、試験毎に違いが見られ、2Pと3Pでは、速度がおおむね2~10mm/minに制御されている。それに対して、1Pでは大きなばらつきが見られる。これは前述したように、流量調整バルブの手動操作上の問題である。微小流量を一定に維持することが困難であり、载荷反力の増減によって変位速度には差が発生した。一方、簡易式平板载荷試験も同様に変位速度のばらつきは大きい。ボトルジャッキでの変位制御は、油圧アクチュエーターでの制御に比べ非常に難しいが、変位速度はおおむね目標値付近で制御されており、油圧アクチュエーターで制御した結果と大きな差はない。

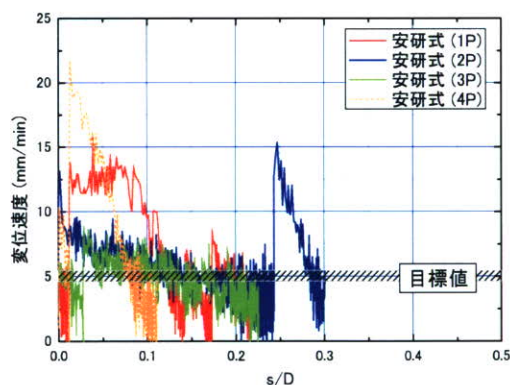


図3-4-5 変位速度と s/D の関係 (安研式)

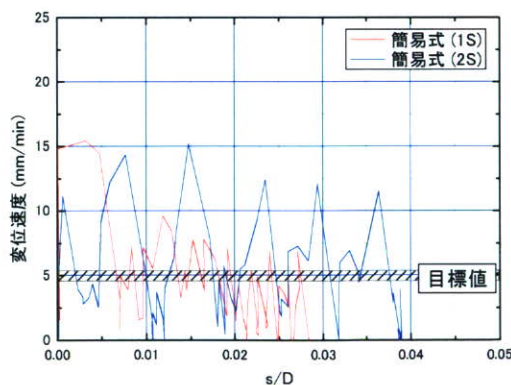


図3-4-6 変位速度と s/D の関係 (簡易式)

図3-4-7 および図3-4-8は载荷応力の増加に伴って変動するひずみ速度の様子を示したものである。どちらの結果も、载荷初期で変位速度のばらつきはあるものの100kN/m²以降では、変位速度はほぼ一定となっている。

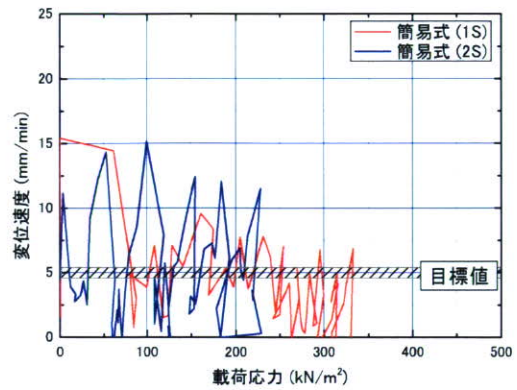
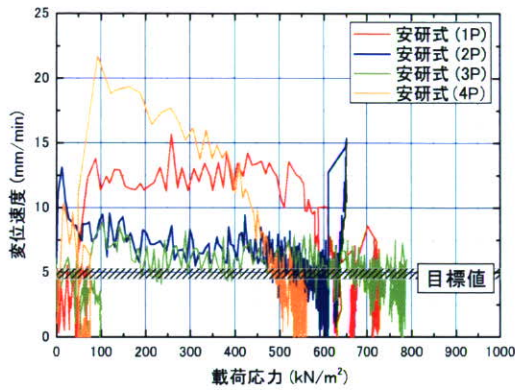


図 3-4-7 変位速度と載荷応力の関係 (安研式)

図 3-4-8 変位速度と載荷応力の関係 (簡易式)

b) 走行路の地耐力

図 3-4-9 は平板載荷試験で得られた載荷応力 q_a と沈下比 s/D の関係を示したものである。 s/D が $0 \sim 0.1$ の範囲では s/D 増分に対する q 増分は高く直線的な関係が見られる。さらにこの関係には $s/D=0.1$ 付近で屈曲点が見られ、明確なピークは見られない。同一地点で行った安研式 (4P) と簡易式 (2S) の結果を比較すると、曲線の傾きはほぼ等しく、アクチュエーターや変位速度の違いによらず、結果はよく対応している。

平板載荷試験の結果から走行路の降伏応力は $450 \sim 700 \text{ kPa}$ である。本実験で使用した杭打ち機械の最大接地圧 p_{max} は 194 kPa であるため、機械の接地圧に比べ地耐力は高いことがわかった。

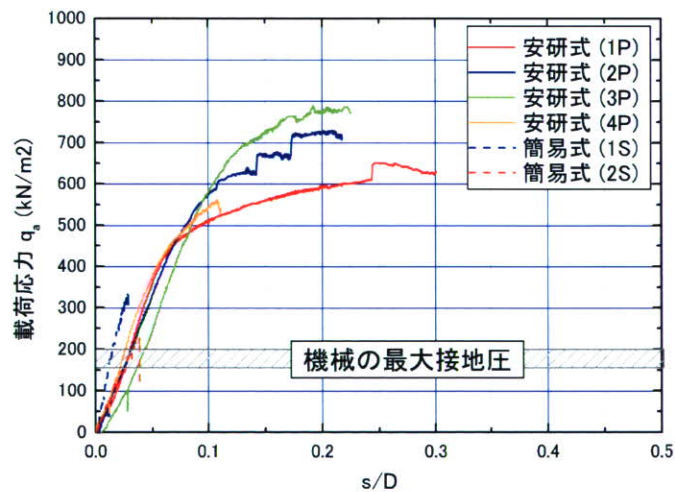


図 3-4-9 載荷応力と s/D の関係

c) 地盤反力係数

平板載荷試験から得られる荷重強さ-沈下量曲線から地盤反力係数 K を求めることができる。算出方法は以下の通りである。

$$K = \frac{\Delta p}{\Delta s} = \frac{p_2 - p_1}{s_2 - s_1} \quad (3-4-2)$$

ここに、 p_1, p_2 は荷重強さ、 s_1, s_2 は各々の沈下量である。

直径 30cm の載荷板による地盤反力係数は K_{30} 、直径 75cm の載荷板による地盤反力係数は K_{75} と呼ばれ、載荷板の直径によって地盤反力係数が異なる。主に地盤反力係数は道路や鉄道、空港滑走路の路盤の支持力やタンク構造物の基礎の支持力の目安として用いられている。地盤支持力係数の求め方は、各分野で異なり、鉄道の分野では直径 30cm の載荷板を用いて、沈下量 1.25mm に対応するものを K_{30} としている³⁾。空港滑走路の設計では、路床の地盤反力係数は、直径 75cm の載荷板を用いて沈下量 1.25mm に対応するものを K_{75} としている。また、タンク構造物では、直径 30cm の載荷板を用い、地盤工学会の定める方法によって求められる沈下量 5mm に対応する地盤反力係数が用いられている。本研究では、沈下 5mm に対応する地盤反力係数を K_{30} と定義した。表 3-4-1 に試験結果を示した。

表 3-4-1 地盤反力係数 K_{30}

試験箇所	試験の種類	地盤反力係数 K_{30} (MN/m ³)
1P	安研式	17.496
2P	安研式	21.215
3P	安研式	15.008
4P	安研式	23.677
1S	簡易式	45.259
2S	簡易式	21.215

現場実験では、平板載荷試験の他に、簡易支持力測定器を用いて地盤反力係数 K_{30} を求めた。簡易支持力測定器は、重錘を一定の高さから地盤に自由落下させたときに生ずる衝撃加速度の最大値と CBR 値、 K_{30} 値、 q_c 値などと相関させる衝撃加速度法を基本原理としている。図 3-4-10 は簡易支持力測定器の構造を示したものである。測定器は本体部と表示部とから構成されており、直径 50mm、質量 4.5kg の重錘を高さ 45cm から自由落下させ、重錘に内蔵してある加速度計で衝撃加速度を測定し、インパクト値に換算する。インパクト値 I_a は次式で算出する。

$$\text{インパクト値}(I_a) = \frac{\text{加速度}(gal)}{2.78 \times 980(gal)} \quad (3-4-3)$$

また、インパクト値 I_a と地盤反力係数 K_{30} には次式に示す関係がある。

$$K_{30} = -37.58 + 8.554I_a \quad (3-4-3)$$

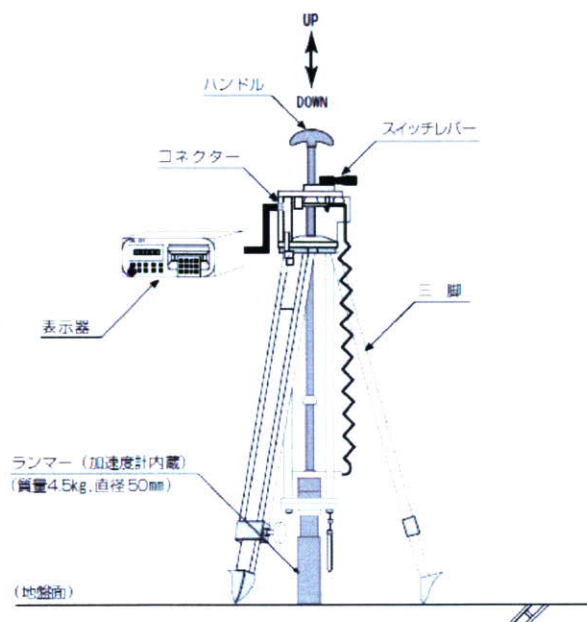


図 3-4-10 簡易支持力測定器の構造

簡易支持力測定器で得られた地盤支持力を図 3-4-11 に示す。簡易支持力試験は各測点毎に 9 回ずつ実施して、平均値と標準偏差、変動係数(=標準偏差/平均値)を求めた。表 3-4-2 に試験結果の一覧を示す。試験結果には総じてばらつきがみられ、とくに 2P 地点のばらつきが大きい。これは、現場密度試験の結果から、1P 地点に比べ 2P 地点の締固め度が大きく、粒径も大きいいため、結果にばらつきが生じたと考えられる。

平板載荷試験と簡易支持力測定器で得られた地盤反力係数を比較したものを図 3-4-12 に示す。簡易支持力測定器と平板載荷試験による地盤反力係数は大きく異なり、簡易支持力測定器による地盤反力係数は平板載荷試験の結果に比べ、2~4 倍高い値を示している。このように両者の地盤反力係数に差が生じた原因として、一つは、走行路の土質には礫が多く含まれており、その影響で簡易支持力試験の値が高くなったことが考えられる。もう一つの原因として、平板載荷試験は静的載荷であるのに対して、簡易支持力試験は衝撃を与える動的試験であるため、比較しているひずみレベルが異なるため結果に差が生じたことが考えられる。

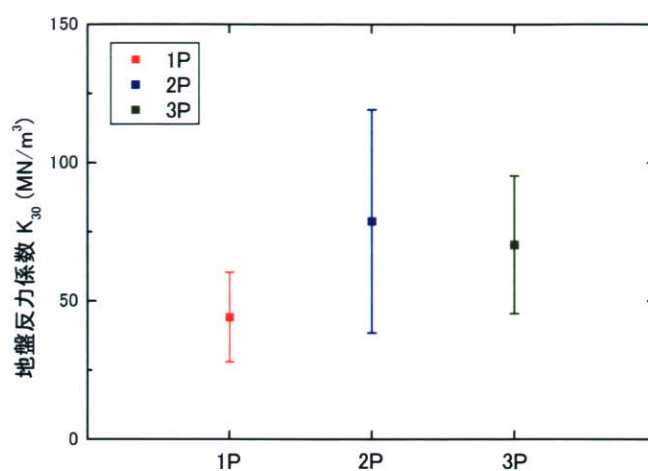


図 3-4-11 簡易支持力測定器と安研式平板載荷試験装置の比較

表 3-4-2 簡易支持力測定器の結果

測点	平均値	標準偏差 σ_d	変動係数 c_v
1P	44.16	16.23	0.368
2P	78.85	40.33	0.511
3P	70.30	24.91	0.354

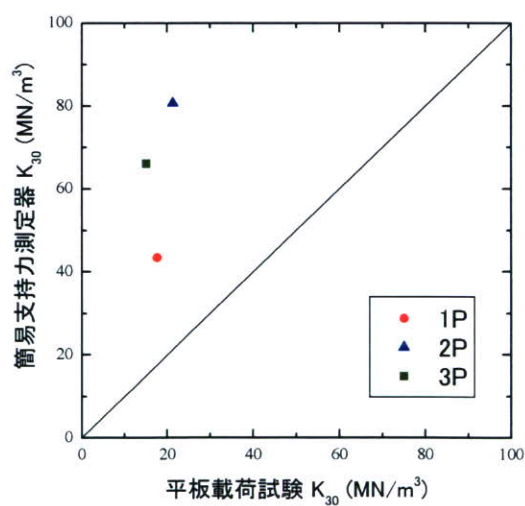


図 3-4-12 簡易支持力測定器と安研式平板載荷試験装置の比較

3.5 自走実験の実施と挙動計測

3.5.1 杭打ち機械の緒元

実験で使用した杭打ち機械は写真 3-5-1 に示すサンドコンパクション用機械⁴⁾であり、当該事業場では「動的 7 号機」と呼ばれていた。



写真 3-5-1 自走実験に使用した杭打ち機械の外観

3.5.2 自走地盤の位置

機械を自走させた地盤には敷鉄板を写真 3-5-2 に示すように進行方向に対して横向きに設置した。この敷鉄板は 1.5m×6m×25mm のものである。走行路の長さは約 60m である。地盤表面は前日にレベル測量を行って、不陸を調査した。当日には敷鉄板の面上を走行の前後にレベル測量し、残留沈下量を調査した。

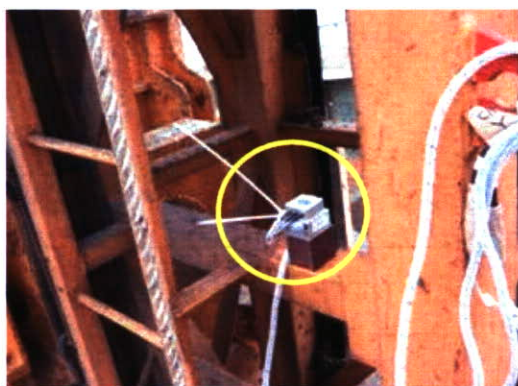


写真 3-5-2 敷鉄板が敷設された走行路の様子

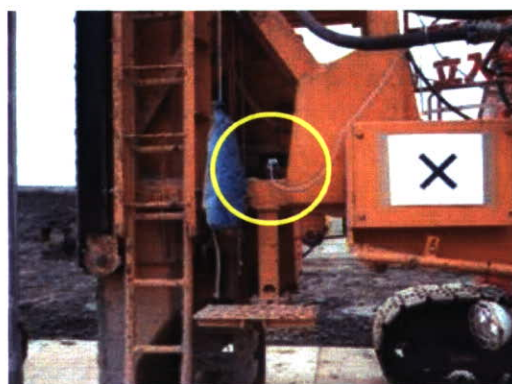
3.5.3 加速度計の設置

加速度応答の計測には表 3-5-1 に示す加速度計 3 台を用い、データの収録には表 3-5-2 に示す装置を用いた。加速度計の設置位置を図 3-5-1 に示す 3 個所であり、それぞれの設置状況を写真 3-5-3 に示す。Acc1 はリーダーの上部であり、その位置は高さ 19m である。この設置では写真 3-5-4 に示すように高所作業車を搭乗して行った。Acc2 はリーダーの下部であり、Acc3 は履帯を支持する補助輪の枠組み中央である。

3 つの加速度計は設置の向きを一致させ、X 軸は進行方向に対して後方を正、Y 軸は進行方向に対して右側を正、Z 軸は鉛直上向きを正とした。



a) Acc1 の設置状況



b) Acc2 の設置状況



c) Acc3 の設置状況

写真 3-5-3 加速度計の設置状況



写真 3-5-4 高所作業車にて加速度計 Acc1 を設置する様子



図 3-5-1 加速度計の設置位置

表 3-5-1 加速度計の緒元(共和電業製)

番号	型番(Ser.)	定格容量	設定レンジ ($\mu\epsilon$)	定格出力 ($\mu\epsilon$)	更正係数($g/\mu\epsilon$)	接続 ch(ロガー No)
Acc1	AS-5TG (FG2110015)	5g	2000	X 軸 : 1112 Y 軸 : 1102 Z 軸 : 1172	X 軸 : 0.004496 Y 軸 : 0.004537 Z 軸 : 0.004266	1 (1) 2 (1) 3 (1)
Acc2	AS-2TG (FG1890007)	2g	2000	X 軸 : 1064 Y 軸 : 1019 Z 軸 : 1052	X 軸 : 0.001880 Y 軸 : 0.001963 Z 軸 : 0.001901	5 (2) 6 (2) 7 (2)
Acc3	AS-2TG (FG1890006)	2g	2000	X 軸 : 1020 Y 軸 : 1022 Z 軸 : 1019	X 軸 : 0.001961 Y 軸 : 0.001957 Z 軸 : 0.001963	9 (3) 10 (3) 11 (3)

3つの加速度計は設置の向きを一致させ、X軸は進行方向に対して後方を正、Y軸は進行方向に対して右側が正、Z軸は鉛直上向きが正である。

表 3-5-2 データ集録に用いた装置

収録装置	モニターと制御	接続	ソフトウェア
共和電業製	NEC 製	BUFFALO	共和電業製
コンパクトレコーダ EDS-400A (3台)	ノートパソコン Lavi	LAN (ハブ経由)	ダイナミックデータ集録ソフトウェア DCS-100A

3.5.4 データ収録

データ収録装置及びモニター制御用パソコンを写真 3-5-5 のように上部旋回体のキャビン横に配置した。これらの電源は写真 3-5-6 のように車載した小型発電機によって供給した。

収録ソフトウェアに対する収録条件名は「羽田杭打ち機械_動揺試験.E4H」である。サンプリング周波数は 100Hz とし、20Hz のローパスフィルターを施した。なお、走行路から約 100m 離れた位置に他の SCP 打設が杭打ち機によって行われており、僅かであるが断続的に振動が混入する状況であった。



写真 3-5-5 上部旋回体に配置した計測装置



写真 3-5-6 車載した小型発電機

表 3-5-3 動揺データの収録ファイルと動作状況の対応

データファイル名 「.ks2」 & 「.csv」	エンジン 回転数 (rpm)	前進 or 後進	時刻	風速 (m/s)	風向	備考
TESTkui000.dat	0	No	11:27	4	南	計測前にイニシャル実行. 計測
TESTkui001.dat	1700	前進	11:42	4	南	計測から約 12 秒後に前進, それまでアイドリング
TESTkui002.dat	0	No	13:25	10	南南西	計測前にイニシャル実行. 約 1 分計測
TESTkui003.dat	0	No	13:29	7	南南西	約 1 分計測(2 回目)
TESTkui004.dat	2000	No	14:01	11	南西	アイドリング振動
TESTkui005.dat	2000	後進	14:06	11	南西	
TESTkui006.dat	1700	No	14:08	11	南西	アイドリング計測
TESTkui007.dat	2000	左カーブ	14:19	11	南西	平均曲率半径は約 25m
TESTkui008.dat	1700	後進	14:22	11	南西	

1) カーブの曲率は図 2 に示す敷鉄板の端部から曲線までの距離を実測し、これを解析して求めた。

表 3-5-3 は動揺データの収録ファイルと動作状況の対応を示す。収録データはバイナリー形式(ks2)とエクセル型式(csv)の 2 種類で同時保存した。

「Testkui000」ではエンジン停止状態においてイニシャルバランスを実行し、アイドリン