

図 3-4-2 にウレタンフォームで作製した模型地盤の種類を示す。模型地盤は待機地盤と走行地盤より構成される。待機地盤は幅 250mm、長さ 280mm の面積を有し、50mm の層圧を与えた。待機地盤はくい打機の模型を最初に設置する場所である。この位置で、模型に働く重力が $1g$ から ng に増加する。従って、沈下が生じて模型に傾斜が生じることのないよう、待機地盤には強固なウレタンフォーム UF-3 を配置した。所定の遠心加速度に到達後に、模型は走行地盤に向かって自走を開始させた。

走行地盤は長さ 490mm でありこの値は容器の長さより緩衝材の厚さを引いた走行可能な正味の距離である。走行地盤は先に述べた 3 種類のウレタンフォーム、UF-1、UF-2 及び UF-3 を配置した。これにより、異なる支持力安全率の条件を再現した走行実験を可能にした。

3.4.2 関東ローム地盤の条件と種類

施工現場の表層地盤を再現するために関東ロームを用いた。その理由は、表層地盤は埋め戻しや盛土されており、不飽和な含水状態が多い。この不飽和な地盤条件を実験的に安定して再現するために関東ロームを試料に用いることとした。

試料は東京都清瀬市梅園にて採取したものであり、その物理的な特性を表 3-4-2 に示す。細粒分の含有率が 93.8%であり、このうち粘土分は 48.5%である。地盤材料の分類上は砂混じり火山灰質粘性土となる。A-c 法により行った締固め試験の結果、最適含水比(w_{opt})は 102.0%である。従って、本研究では試料の含水比を予め w_{opt} に調整し、その後、静的に締固めて模型地盤を作製した。

表 3-4-3 は模型地盤の作製条件、一軸圧縮強さ及び極限支持力の値を示す。一層当たりの締固め後の層圧が約 25mm となるように試料の分量を予め調整して実験容器に投入する。そして、後述する 2 つの方法により地盤表面に 150kPa の圧力を静的に与えて締固めた。

表 3-4-2 関東ロームの物理特性

土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.759
砂分(0.075~2mm)%	6.2
細粒分(0.075mm 未満)%	93.8
シルト分(0.0050.075mm)%	45.3
粘土分(0.005mm 未満)%	48.5
液性限界 w_L (%)	158.3
塑性限界 w_p (%)	97.7
塑性指数 I_p	60.6
地盤材料の分類名	砂混じり火山灰質粘性土 (II 型)VH ₂ -S
最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)	0.665
最適含水比 w_{opt} (%)	102.0

表 3-4-3 模型地盤の作製条件と極限支持力

含水比(w)	締固め圧力(p_c)	締め固める層圧 (1 層当たり)	標準締固め 養生時間	一軸圧縮 強さ(q_{1u})	極限支持力 (q_u)
102.0(%)	150(kPa)	25(mm)	12 時間	40(kPa)	306(kPa)

表 3-4-4 関東ロームにより作製した模型地盤の条件

名称	状態	締め固め方法	締固め圧力	締固め 養生時間
FU	平坦かつ均質な地盤	1g 場における荷重載荷	150(kPa)	12 時間
FN	平坦不均質な地盤			
UD	起伏を有するが均質な地盤	サーチャージを設置した 遠心力による載荷		1 時間

同一条件で作製した供試体の一軸圧縮強さの平均値は約40kPaである。また30mm×30mmの正方形断面を有するフーチングを用いて支持力試験を実施した。図3-4-4は支持力試験の結果を示す。平坦均質に作製した実験容器内の5箇所において試験を実施した。得られた曲線には若干の差が見られる。曲線に現れる屈曲点前後において2つの接線を求め、その交点における載荷応力の値を極限支持力(q_u)と定義した。 q_u の平均値は153kPaであることがわかった。

関東ロームを試料に用いた模型地盤は3つの条件で作製した。この模型地盤の作製条件を表3-4-4に示す。本研究では施工現場に潜在する地盤側の不安定条件がくい打機の転倒危険性に与える影響を明らかにするための検討を行った。特に、関東ロームを用いた検討では、支持力分布の変動性(バラツキ)と平坦さの違いが自走時の揺動に与える影響の解明を試みた。模型地盤は、「平坦かつ均質な地盤」(Flat and Uniformより、FU地盤と呼ぶ)、「平坦不均質な地盤」(Flat and Non-uniformより、FN地盤と呼ぶ)、「起伏を有するが均質な地盤」(Up and Downより、UD地盤と呼ぶ)の3種類を作製した。各地盤の作製方法の詳細については、以下に述べる。

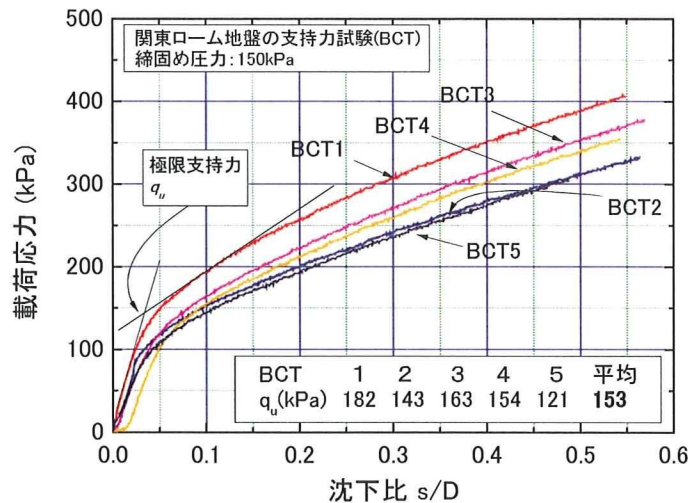


図3-4-4 関東ローム地盤の支持力試験の結果

3.4.3 平坦かつ均質な地盤(FU)の作製方法

関東ローム地盤は、含水比の値をあらかじめ最適含水比(102%)に調整した。走行ボックスの内壁には写真 3-4-2 のようにシリコングリス(信越化学 KS-63G)を塗布した。これは後述する締め固めにおいて上部から与える载荷圧力が壁面部の摩擦によりロスすることを少なくするためである。すなわち下層に働く载荷圧力を上層と等しくするために行った。

試料は、後述する締め固め後の層厚が約 2.5cm/1 回当たりとなるように分量をあらかじめ調整し、写真 3-4-3 に示すように走行ボックスへ投入した。この投入では写真 3-4-4 に示すようにシャベルで少量ずつ行って、極力平均に配置するようにした。また、密度の違いはせん断強さのバラツキを生じるので、圧縮しないように静かに投入した。

投入後の試料の分布をさらに均一化させるために、写真 3-4-5 に示すブレードを用いて平坦化させた。この平坦化ではブレードの傾きを鉛直に固定し、前後にスライドさせた。ブレードの上部には下端に平行に目盛りがマーキングされている。ブレードはこの目盛りに合わせてアルミ製のアングル材に治具で固定する。スライドの際にはブレードが傾斜して試料を圧縮しないよう、確実に鉛直を維持するよう注意した。

写真 3-4-6 は载荷板の設置と静的締め固めの様子を示す。木製の载荷板(1)を試料の上部に設置し、さらにその上部には補強材(チャンネル材)を直交する向きに設置した。そして、载荷装置に取り付けられた载荷板(2)を補強材に押し当てた。補強材は载荷板(1)の剛性不足によるたわみを防止するために用いた。締め固め圧力が 150kPa となる载荷荷重を与えた。



写真 3-4-2 走行ボックスの内壁にグリスを塗布する様子



写真 3-4-3 分量をあらかじめ調整した関東ローンを走行ボックスに投入する様子



写真 3-4-4 走行ボックスに試料を投入した様子

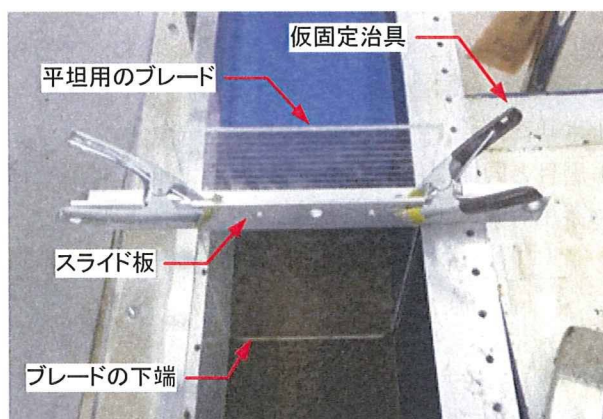


写真 3-4-5 投入した試料を平坦に分布させる方法



写真 3-4-6 載荷板を設置して地盤を静的に圧縮する様子

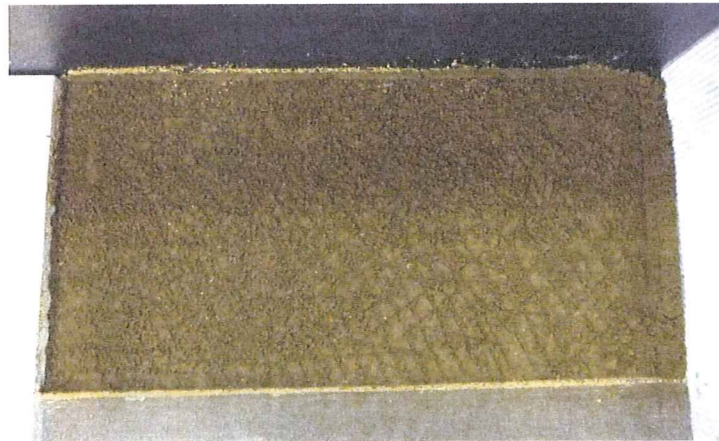


写真 3-4-7 1層目の表面にケガキを与えた様子

締め固め時間は、初めの1層目については1時間とした。1層目の締め固めが終了後に荷重を一旦除荷した。次にこの上部に試料を追加投入した。なお、1層目と2層目の間に境界が生じないように、その表面には写真3-4-7に示すようなケガキ傷を与えた。これにより1層目と2層目を一体化させた。

2層目の投入後は1層目と同様な作業を繰り返して、静的に地盤を締め固めた。なお、2層目投入後の締め固め養生時間は12時間である。

3.4.4 平坦不均質な地盤(FN)の作製方法

地盤の表面は平坦であるが、その密度分布が不均一な模型地盤を作製した。以後、本文では平坦不均質な地盤または略してFN地盤と呼ぶ。本項ではこの地盤の基本的な作製方法を述べる。

FN地盤は、1層目の作製方法はFU地盤と同じ方法である。2層目の作製方法は1層目の上部に試料を不均質に配置させる。その配置方法を写真3-4-8に示す。試料は2次元的な起伏を与えて投入した。これは地盤の密度分布を走行方向に繰り返し変化させるためである。密度の違いはせん断強さを変える。その結果、さらに地盤反力係数と極限支持力も変化する。なお、2次元状の起伏を与えた理由は、走行するくい打機に対して左右方向の揺動を意図的に与えないためである。

2層目の試料を配置後に、1層目と同様に載荷板を設置して静的に締固めた。締固め圧力(p_c)と養生時間(t_c)は先のFU地盤と同じであり、 $p_c=150\text{kPa}$ であり $t_c=12$ 時間である。

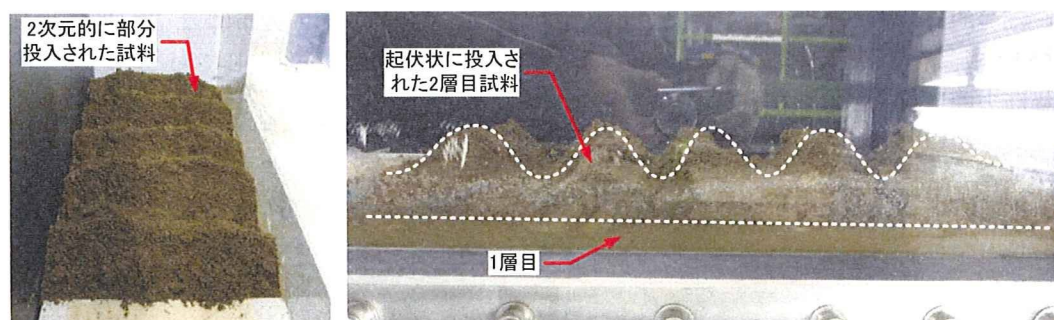


写真3-4-8 平坦不均質な地盤を作製する際の試料の配置状況



写真3-4-9 2層目投入後の締固め



写真 3-4-10 2次元的な密度分布が再現されたFU地盤

締め固めが終了後の地盤表面の様子を写真 3-4-10 に示す。表面は平坦に作製されているが、部分的に色彩が異なる。これは密度の違いを表している。その分布は 2 次元的に現れている。従って、くい打機の走行方向に対しては密度が繰り返し変化しているものの、その横断方向に対してはほぼ一様に作製された。

3.4.5 起伏を有するが均質な地盤(UD)の作製方法

地盤の表面に起伏は存在するが密度の分布が均質な地盤を作製した。以後、本文では起伏を有するが均質な地盤または略してUD地盤と呼ぶ。本項ではこの地盤の基本的な作製方法を述べる。

この地盤の作製では、2層分の試料(7.3kgf)を一度に投入した。これは、地盤表面の起伏を試行錯誤して再現した結果、至った最善の方法である。なお、試料の投入においてはその分布が均質となるように、シャベルで少量ずつ容器内に配置させた。また、投入後にはFU地盤と同様にブレードを用いて表面を平坦に仕上げた。

次に、載荷板を地盤表面に設置し、予備的な载荷を行った。これは最終的な地盤に過大な起伏を発生させないための処置である。この荷重は手動で与えた。従って、この荷重レベルは5kgf程度であり、圧力に換算すると0.4kPaと僅かなものである。



写真 3-4-11 試料を投入と載荷板による予備载荷の様子



写真 3-4-12 予備起伏の作製に用いた2つの円筒

予備起伏の作製には写真 3-4-12 に示す直径の異なる2つの円筒を用いた、一つは半径が55mmのもの(以降、R55と呼ぶ)であり、もう一つは半径は34mmのもの(以降、R34と呼ぶ)である。

図 3-4-4 は予備起伏を与えた位置と半径を示す。予備起伏は走行地盤の3箇所に設けた。左から予備起伏1, 2, 3と呼ぶ。予備起伏1は走行区間の左(スタート位置)から15mmの位

置に設けた. その作業の様子を写真 3-4-13 に示す. 円筒の端面を内壁(アクリル窓と背面側)に押し当て, 円筒の載荷面を地盤表面と平行にした. そして, 手で静かに力を加えて下端に 10mm の沈下を与えた.

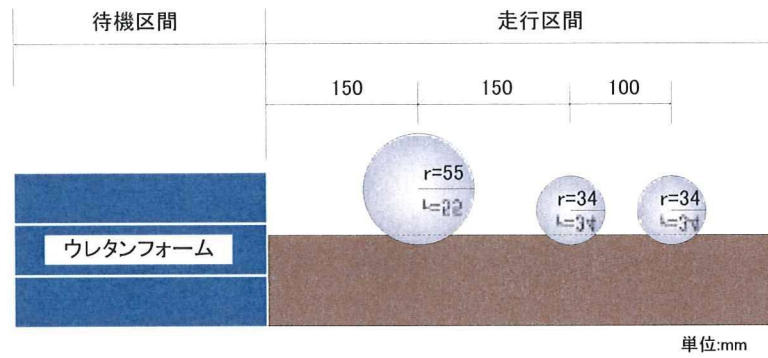


図 3-4-4 地盤表面に与えた予備起伏(左から No. 1, 2, 3)の半径と位置



写真 3-4-13 地盤表面に予備起伏 1 を与える様子

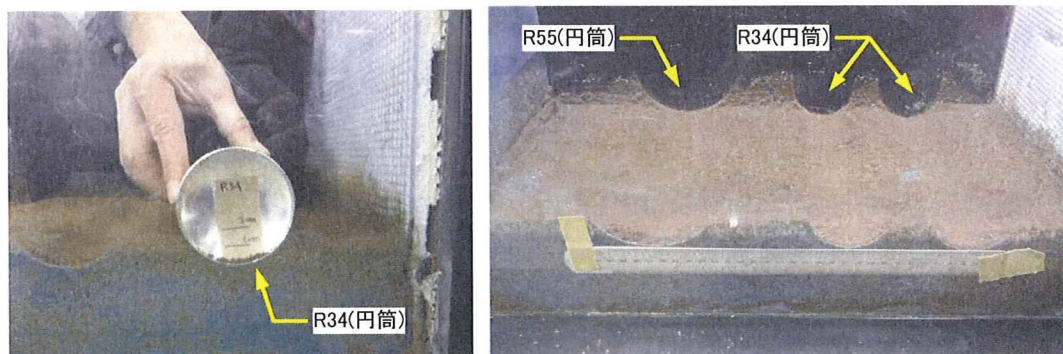


写真 3-4-14 地盤表面に予備起伏 3 を与える様子



写真 3-4-15 予備起伏を与えた後の载荷板による再载荷とサーチャージ用の準備

続いて、予備起伏2は予備起伏1から150mm離れた位置に設けた。次に用いた円筒はR34である。同様に载荷面の平行を維持しつつ、10mm沈下させた。さらに、同様にして予備起伏3をさらに100mm離れた位置に設けた。写真3-4-14は予備起伏3を与える様子を示すと共に、作業後の地盤の様子を示す。表面には異なる間隔で2次元的な起伏が設けられている。使用した円筒の違いにより起伏傾斜の変化割合が異なっている。

3つの予備起伏を設けた後に、再度载荷板を表面に設置し、手で静かに荷重を载荷して表面を整えた。この時の荷重は同じく5kgf程度であった。

続いて、遠心場における締め固めを行った。この締め固めでは模型地盤の表面に写真3-4-15に示すようなビニールバックに豊浦砂を充填した。この豊浦砂は模型地盤に上載荷重(サーチャージ)となって働く。豊浦差に遠心加速度を与えてサーチャージを作用させた。サーチャージは地盤の沈下に追従する。そのため、地盤に働く締め固め圧力は理論上一定となる。その結果、地盤には起伏が生じるが、一定の圧力で締め固められる。その結果、地盤の密度はほぼ均質な状態が再現され、極限支持力もバラツキが少なくなる。

地盤表面に与える圧力(σ_{v0})は、先の2つの地盤FUとFNと等しく150kPaとした。また、遠心装置の中心から模型地盤表面までの距離(r_0)は2.25mである。また、豊浦砂の単位体積重量は 1.5g/cm^3 である。

遠心加速度の値は半径と各速度の2乗に比例する。従って、サーチャージ内の鉛直応力は図3-4-5に示すように2次曲線的に増加し、その関係は式(3-4-1)で表される。そして、回転半径とサーチャージの層圧(h)の間には式(3-4-2)の関係が成り立つ。

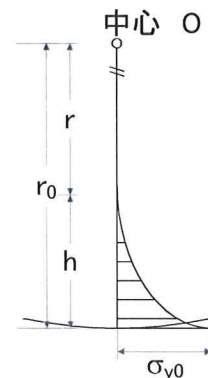


図 3-4-5 遠心場におけるサーチャージの载荷圧力

$$\sigma_{v0} = \frac{\omega^2 \gamma_s}{g} (r+h)h \quad (3-4-1)$$

$$r_0 = r + h \quad (3-4-2)$$

ここで、 g は重力加速度であり 9.8m/sec^2 である。 ω は角速度であり、遠心加速度50gにお

いては 5π である。

これらを代入して、 h の値を求めると約 18cm である。従って、実験ではビニールバックに深さ 18cm の豊浦砂(質量 34kg)を投入した。

写真 3-4-16 は遠心装置に搭載した走行ボックスとその内部の様子を示す。走行ボックスは回転方向に直交する向きに搭載した。図 3-4-6 は遠心場における締め固めの際に計測した砂表面の沈下量と経過時間の関係である。約 10 分で遠心加速度は約 50G に増加している。遠心加速度の増加に伴って沈下量は増加している。50G に到達後、沈下量の増加は緩慢となり、微増を示す。経過時間が 40 分を過ぎると沈下の増加はほとんど見られなくなっている。50 分頃に遠心加速度を減少運転させ 55 分頃に停止した。遠心加速度の減少に伴って沈下量には若干法バウンドが見られた。以上の結果に基づいて、遠心場における締め固めは 50G 場における载荷時間を 40 分とすることに決定した。

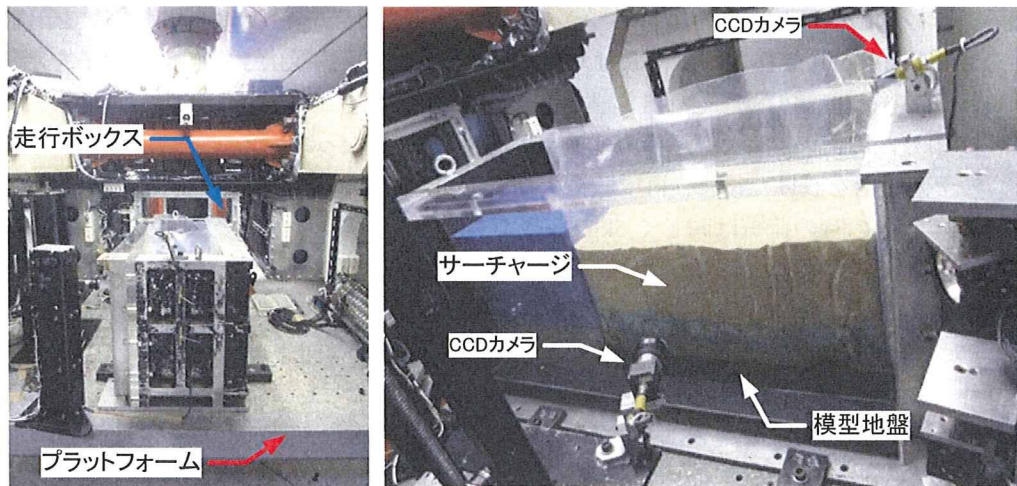


写真 3-4-16 遠心装置に搭載した走行ボックスと内部の様子

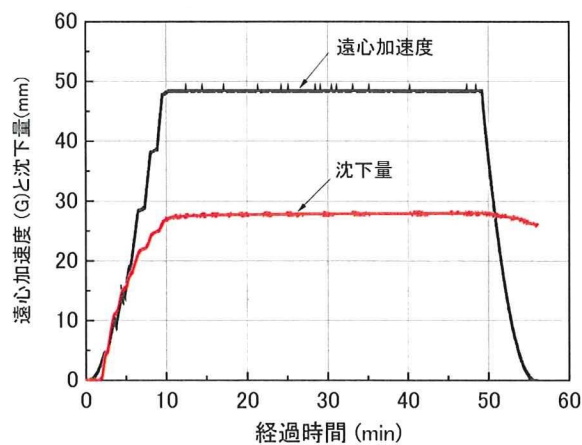
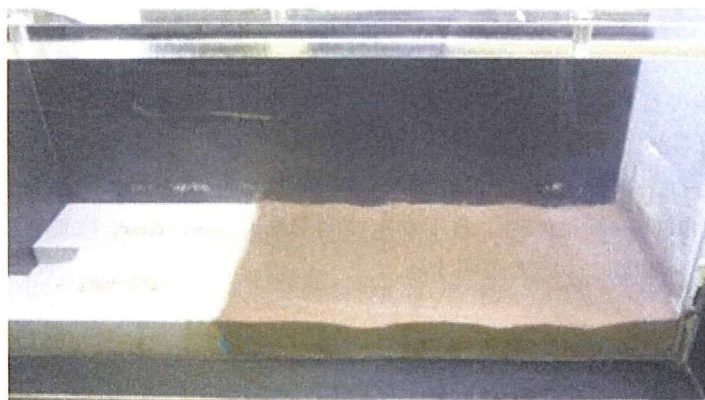


図 3-4-6 遠心場での締め固めにおける沈下の推移



1) 横から見た起伏地盤



2) 進行方向に対して見た起伏地盤

写真 3-4-17 遠心場における締め固め後の地盤の様子

写真 3-4-17 は締め固め後の地盤の様子を示す。緩やかな起伏が形成されており、その形状は 2 次元的である。関東ロームで作製した模型地盤の表面高さは自走実験の前後に後述するスキャナーで計測した。また地盤支持力のバラツキを評価するためにハンドベーン試験を行った。

3.5 実験条件

遠心場走行実験の目的は、くい打機が自走する際には、どのような危険の要因が存在するのか(What)を明らかにすることと、その要因がどのくらい危険なものなのか(How)を明らかにすることである。本実験では転倒に与える要因を大きく2つに大別して、実施条件を構成させた。一つは機械側条件による不安定要因であり、もう一つは地盤側条件による要因である。以下に両要因について説明する。

3.5.1 機械側条件による不安定要因

くい打機の安定性を左右する機械側条件として、次の事項に着目した。

- 1) 安定度
- 2) 重心位置
- 3) 走行速度

安定度とは、車両系建設機械構造規格の第3条で定められた値であり、くい打機の限界傾斜角を意味するものである。くい打機のリーダー部分には、アースオーガやサンドコンパクション等の装置が搭載される。自走時にはこれらの装置が上方につり上げられ、トップヘビーな条件で走行する。

写真 3-5-1 は前方の安定度と重心の関係を示す。前輪を原点Oとし、水平方向をx軸とし、これに直交する方向をy軸とする。機体に対する質量の搭載条件により重心は異なる。写真に示す3つの重心はx軸とy軸の位置が異なるものの、同一直線上に分布している。従って、3つの場合は安定度が同じである。

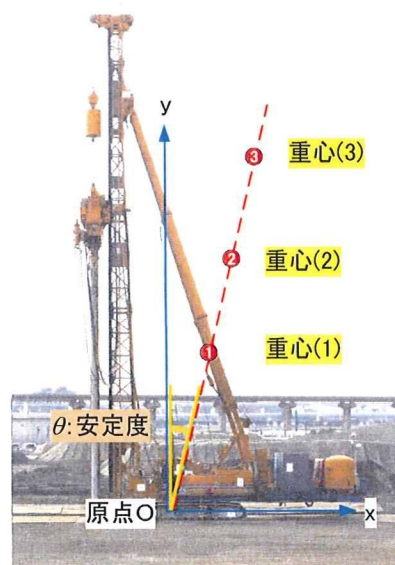


写真 3-5-1 前方の安定度が同じで重心位置が異なる場合

これは、安定度が静的な釣り合いによる安定限界の指標であることを意味している。一方、原点O回りの回転運動ではOから重心までの距離の2乗に比例して慣性モーメントは大きくなり、その揺動は周期に依存した応答となる。従って、動的な安定性は重心の質量とその位置の影響を受ける。

本研究ではくい打機が自走する際の動的不安定化に着目して、安定度と重心位置をパラメータとした実験を行った。自走する際の走行速度も揺動の周期に影響することが考えられる。そのため、実験では2つの異なる走行速度で自走させ、応答を比較した。

以上より、機械側条件による不安定要因として、安定度、重心、走行速度に着目してこれらの条件を変えた実験を行うこととした。

3.5.2 地盤側条件による不安定要因

くい打機の安定性を左右する地盤側条件として、次の事項に着目した。

- 1) 支持力安全率
- 2) 平坦さ

安定度は水平堅固な面に対する設置を前提とした値である。しかし、実際の施工現場は、その程度に差はあるものの起伏が存在する。そのため、設置されたい打機には初期傾斜が生じ、さらに自走すると揺動が生じる。従って、設置される現場の平坦さは転倒危険性を左右する。

これに加えて、支持地盤には載荷応力の増加に対して沈下増加を生じる。履帯面に生じる接地圧力は通常、前輪部分が最大となり、後輪側に向かって減少する。この接地圧力の分布形状は x 方向に対する重心位置をパラメータに変化する不等分布であり、その分布形状は台形から三角形に変化する。

支持地盤には接地圧力に対応した沈下が生じるため、履帯面には不同沈下が生じる。その結果、機体には傾斜が生じ、安定度を減少させる。また、支持力安全率の値によって、不同沈下の量は異なり、転倒に与える危険性も変わる。

従って、機体に与えるべき安定度の値は、地盤側条件である起伏や支持力の条件に応じた余裕を備える必要がある。しかし、この余裕がどの程度必要なのかは、機械側条件にも関係する。従って、くい打機の不安定化は機械側条件と地盤側条件が相互に関連して生じる現象といえる。

そこで本研究では、地盤側条件による不安定条件として支持力安全率と平坦さの値に着目して、これらの条件を変えた実験を行うこととした。

3.5.3 搭載する付加質量の計算

本研究では、安定度と重心位置を変えて遠心場走行実験を実施した。模型に与えた安定度の値は、次の4種類とした。

- 1) 5度：構造規格に示された最低基準の値
- 2) 10度：欧州(EN)規格で規定する最低基準の値
- 3) 15度：比較の為に設定したより安定な条件の値
- 4) 20度：平成19年度に実施した実大現場実験で使用したくい打機の安定度の値

ただし、これらの値は1g場に「おける見かけの安定度」であり、遠心場における値は異なる。遠心場走行実験における、安定度の計算方法を以下に述べる。

図3-5-1はくい打機の模型に搭載する付加質量と重心の関係を示す。付加質量を除いたくい打機本体の質量を M とし、その重心を (G_x, G_y) とする。リーダー部に搭載する付加質量を m とし、その搭載位置は (x_a, y_a) である。

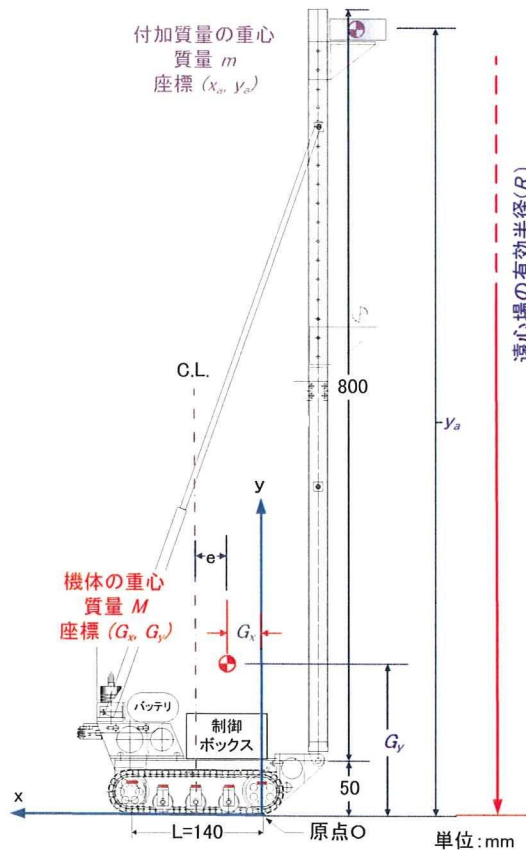


図 3-5-1 付加質量の搭載高さで重心

本実験では m の搭載高さ (y_a) は 835mm 、 515mm の2種類とした。 M と m の質量とその重心を考慮した $1g$ 場での重心位置を (G_{x0}, G_{y0}) とすると、式(3-5-1)と式(3-5-2)の関係が成り立つ。

$$(M + m) \cdot G_{x0} = M \cdot G_x + m \cdot x_a \quad (3-5-1)$$

$$(M + m) \cdot G_{y0} = M \cdot G_y + m \cdot y_a \quad (3-5-2)$$

1g 場での安定度(θ)は式(3-5-3)の通りである.

$$\tan \theta_1 = \frac{G_{x0}}{G_{y0}} \quad (3-5-3)$$

式(3-5-1)と式(3-5-2)を式(3-5-3)に代入して, m について解くと式(3-5-4)が得られる.

$$m = \frac{M(G_x - G_y \tan \theta)}{y_a \tan \theta - x_a} \quad (3-5-4)$$

遠心模型実験装置は, 回転半径に比例して遠心力が増加する. そのため, 付加質量に働く遠心力は, その搭載高さによって異なる. その結果, くい打機模型に働く荷重が異なるため, 遠心場での重心位置と 1g 場のそれには違いが生じる.

機体(のみ)の重心(G_x, G_y)を基準とすると, m と遠心場における換算質量(m')の関係は式(3-5-5)で表される.

$$m' = m \left(\frac{R - G_y}{R - y_a} \right) \quad (3-5-5)$$

ここで, R は遠心場における有効半径であり, 回転中心から模型地盤の表面までの距離であり, その値は 2.25m である.

従って, 付加質量を搭載したくい打機模型全体の遠心場における重心(G_{xc}, G_{yc})は, 式(3-5-5)と式(3-5-6)の関係で表される.

$$(M + m') \cdot G_{xc} = M \cdot G_x + m' \cdot x_a \quad (3-5-6)$$

$$(M + m) \cdot G_{yc} = M \cdot G_y + m' \cdot y_a \quad (3-5-7)$$

表 3-5-1 は遠心場走行実験において搭載した付加質量とその搭載位置の条件を示すとともに, 重心と安定度の関係を 1g 場と遠心場で比較して示す.

1g 場における見かけの安定度(呼称)に比べて遠心場の値は, 平均して約 1 度増加している. また, 1g 場の重心に比べて遠心場のそれは y_a が 835mm の場合に変化が大きく x_a は増加し, y_a は減少する. また, この変化は m が大きいほど影響が大きい.

表 3-5-1 遠心場走行実験における付加質量と搭載位置の設定

見かけの 安定度	5 度		10 度		15 度	20 度
	搭載質量 (m)	980g	980g	440g	440g	150g
搭載高さ (y_a)	835mm	515mm	835mm	515mm	835mm	835mm
重心 (G_{x0}, G_{y0})	(16.7, 311.5)	(16.7, 234.7)	(34.8, 230.9)	(34.8, 191.2)	(47.0, 176.6)	(54.2, 144.6)
重心 (G_{xc}, G_{yc})	(28.4, 259.8)	(23.7, 218.1)	(41.5, 201.5)	(38.9, 181.6)	(49.6, 165.1)	(54.2, 144.6)
安定度	6.2	6.2	11.6	12.1	16.7	20.6
重心の 偏心度 (e/L)	0.30 ($1/3 < e/L < 1/6$)	0.33 ($1/3 < e/L < 1/6$)	0.20 ($1/3 < e/L < 1/6$)	0.22 ($1/3 < e/L < 1/6$)	0.15 ($e/L > 1/6$)	0.11 ($e/L > 1/6$)
接地圧の 分布形状	三角形	三角形	三角形	三角形	台形	台形

3.5.4 遠心場走行実験と動的相似則

自走に伴って揺動するくい打機の挙動，すなわち動的な不安定化現象を実験的に再現するために，回転運動に関する相似則を満足させる必要がある．式(3-5-8)と式(3-5-9)は実機と模型について，履帯の車軸を支点とする回転運動の方程式を示す．

$$I_p \cdot \ddot{\theta}_p + C_p \cdot \dot{\theta}_p + k_p \cdot \theta_p + F_p = 0 \quad (3-5-8)$$

$$I_m \cdot \ddot{\theta}_m + C_m \cdot \dot{\theta}_m + k_m \cdot \theta_m + F_m = 0 \quad (3-5-9)$$

ここで，添え字 p が実機を示し， m は模型を示す．相似比率が n 倍の時，慣性質量を I ，傾斜角を θ ，ダンピング係数を c ，時間を T ，接地面積を A ，腕の長さ l ，地盤の弾性係数 k ，ひずみを ε ，重力加速度を g である．

実機と模型の運動を等しく再現するためには，両式にある各項を等しくする必要がある．慣性モーメントの比 r_i は式(3-5-10)により表される．

$$\begin{aligned} r_i &= \frac{I_m \cdot \ddot{\theta}_m}{I_p \cdot \ddot{\theta}_p} \\ &= \frac{\rho_m L_m^5 (\theta_m / T_m^2)}{\rho_p L_p^5 (\theta_p / T_p^2)} \\ &= \frac{1}{n^5} \times \left(\frac{T_p}{T_m} \right)^2 \end{aligned} \quad (3-5-10)$$

土の粘性によるダンピング力のモーメントの比 r_c は式(3-5-11)で表される．

$$\begin{aligned} r_c &= \frac{C_m \cdot \dot{\theta}_m}{C_p \cdot \dot{\theta}_p} \\ &= \frac{c_m L_m A_m \dot{\theta}_m}{c_p L_p A_p \dot{\theta}_p} \\ &= \frac{1}{n^3} \times \frac{c_m}{c_p} \times \frac{T_p}{T_m} \end{aligned} \quad (3-5-11)$$

地盤反力によるモーメントの比 r_e は式(3-5-12)で表される．

$$\begin{aligned} r_e &= \frac{K_m \cdot \theta_m}{K_p \cdot \theta_p} \\ &= \frac{k_m \varepsilon_m L_m A_m \theta_m}{k_p \varepsilon_p L_p A_p \theta_p} \\ &= \frac{1}{n^3} \end{aligned} \quad (3-5-12)$$

そして転倒モーメント r_m の比は式(3-5-13)で表される．