

第6章 履帯の支持力特性

6.1 载荷応力分布と分散計測

くい打機を設置する際には、静止時に作用する最大接地圧を算出し、作業床の地耐力と比較して安定性の検討を行っている。しかしながら、接地圧の理論式は地盤を剛体と仮定して算出するため、実際に作用する接地圧と理論値は異なる可能性がある。

また、くい打機の接地圧力分散を算出する際に、分散角に大きな値を用いて検討しているケースがある。砂質土のような内部摩擦角が比較的大きな試料では、荷重の分散効果が期待できるが、関東ロームのような圧縮性の高い火山灰質粘性土やその他の粘性土では、荷重の分散効果は小さいと考えられる。そこで、豊浦砂と関東ロームを用いて、载荷応力と接地圧力および土圧の分布を計測し、荷重の分散の分散効果を調べた。

6.1.1 試料および実験装置

本研究に使用した試料は、豊浦砂 ($\rho_s=2.650\text{g/cm}^3$, $\rho_{dmin}=1.335\text{g/cm}^3$, $\rho_{dmax}=1.645\text{g/cm}^3$) および関東ローム ($\rho_s=2.759\text{g/cm}^3$, $w_{opt}=102.0\%$) である。関東ロームは研究所の敷地内から採取した後、2mmふるいで粗粒分を取り除いた。

実験に用いた土槽の内寸は幅 500mm、奥行き 200mm、高さ 400mm である。载荷応力分布は写真 6-1-1 に示すように载荷板に小型ロードセルを 5 つ設置して計測した。図 6-1-1 に実験に用いた小型ロードセルの概要を示す。実験に用いたロードセルは、テック技販製の USL06-H5-200N-D であり、定格容量は 200N である。

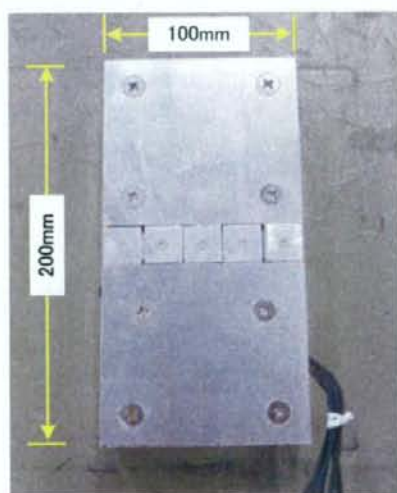


写真 6-1-1 実験に使用した载荷板

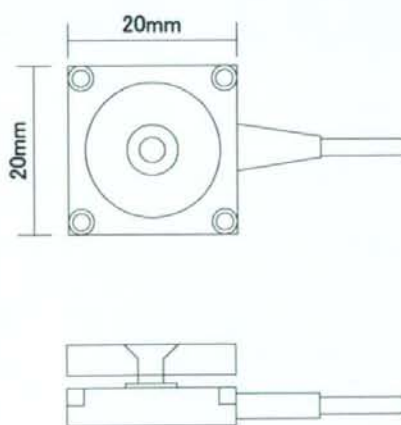


図 6-1-1 小型ロードセル

土圧分布の計測は、土圧計を 50mm 間隔に設置して計測した。写真 6-1-2 に設置した土圧計を示す。計測に用いた土圧計は共和電業製の PS-2KA と PS-5KA であり、定格容量はそれぞれ 200kPa と 500kPa である。写真 6-1-3 にセンサーの設置状況を示す。

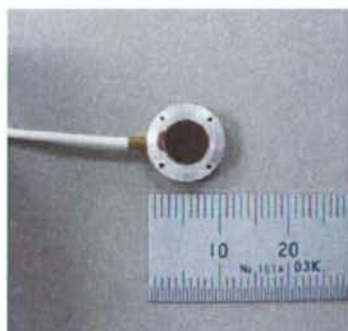


写真 6-1-2 実験で使用した土圧計

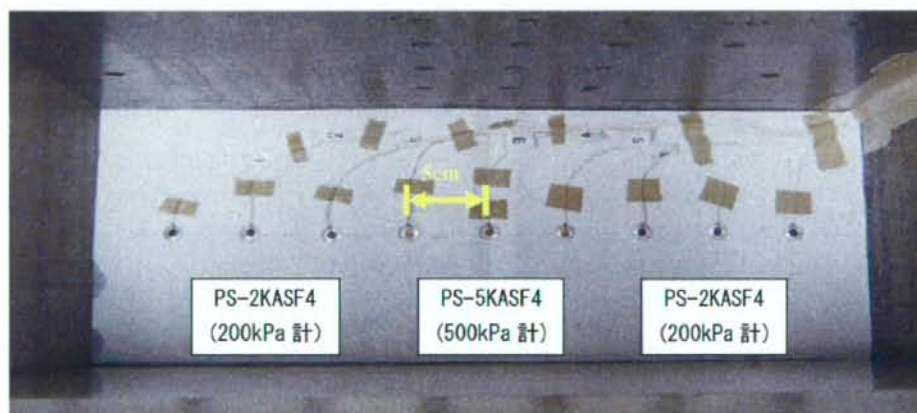


写真 6-1-3 センサーの設置状況

6.1.2 模型地盤の作製および実験の概要

豊浦砂は試料を堆積させた後にバイブレーターで締固めて模型地盤を作製した。締固め後の相対密度は $D_r=56.8\%$ であった。写真 6-1-4 に締固めの様子を示す。画像解析のターゲットとして、20mm の格子状の線を書いたメンブレンを設置した。

関東ロームはあらかじめ最適含水比になるよう含水比調整を行い、1 層約 5cm になるように試料を堆積させた後、締固め圧力 $\sigma=150\text{kPa}$ で 1 時間締固めを行った。3 層目は約 12 時間締固めを行った。締固め終了後、NSF-clay で 20mm のメッシュを作製し、メッシュの交点にリベットを設置して、画像解析のターゲットとした。

実験の概要を図 6-1-2 および写真 6-1-5 に示す。载荷はひずみ制御で行い、载荷速度は 2mm/min とした。载荷荷重および変位は、図に示す位置で計測した。



写真 6-1-4 模型地盤の作製

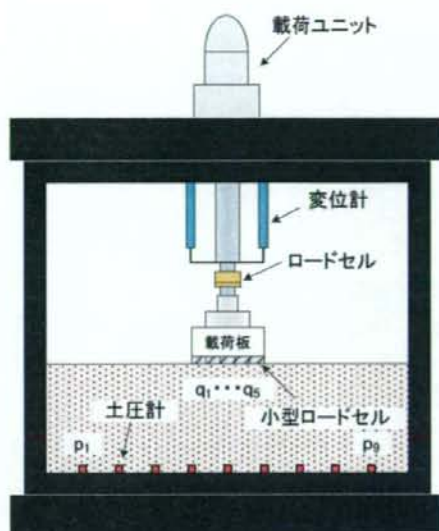


図 6-1-2 実験の概要

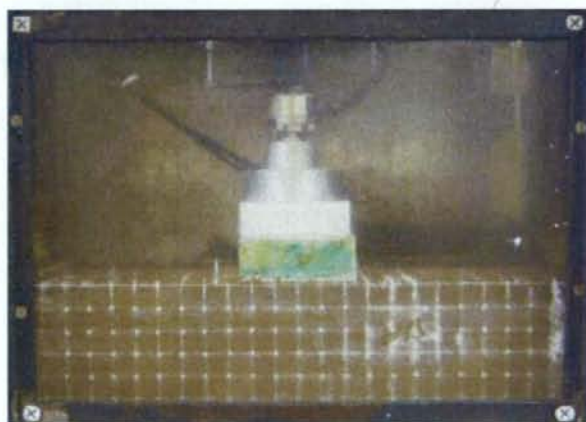


写真 6-1-5 荷重実験の様子 (関東ローム)

6.1.3 実験結果

(1) 応力-変位関係

載荷応力と変位の関係を図 6-1-3 に示す。豊浦砂は明確なピークを示しているのに対して、ロームの結果は、荷重の増加とともに沈下量が増加し、その傾きはだんだん緩くなるものの荷重に明瞭なピークは現れていない。両試料の応力-変位関係の差は、豊浦砂とロームで破壊のモードが異なるためと考えられる。

図 6-1-4 に、極限支持力で正規化した応力と変位を層厚で除した値の関係を示す。豊浦砂とロームでは破壊に至るまでの変位に差が見られ、豊浦砂では破壊に至るまでの変位が小さい。また、小さな沈下量で急激に荷重が増大し、明確な荷重の最大値が現れ、その後急激に荷重が下がり、沈下量の増加とともに一定の荷重で沈下が進んでいる。このように一度に地盤が破壊に至る形式を一般的に「全般せん断破壊」と呼ばれるのに対して、ロームのように明瞭なピークが現れずに沈下が進行するものを「局所せん断破壊」と呼んでいる。

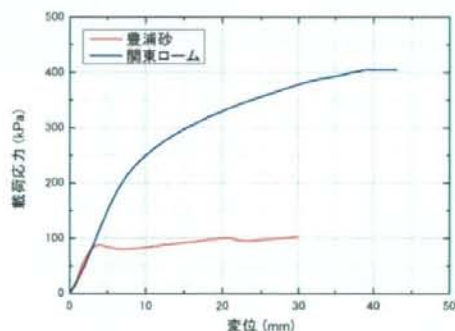


図 6-1-3 載荷応力-変位関係

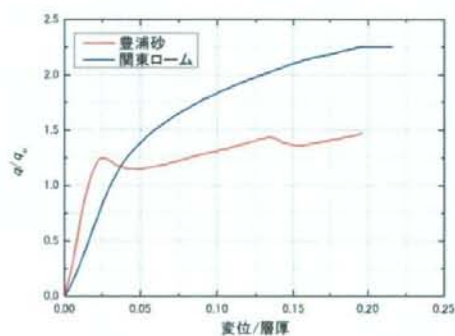


図 6-1-4 正規化した載荷応力と正規化した変位の関係

(2) 応力分布および土圧分布

図 6-1-5 および図 6-1-6 に豊浦砂の接地圧力分布と土圧分布の結果を示す。図 6-1-5 は $q/q_0=0.5$ の結果であり、図 6-1-6 は $q/q_0=1.0$ の結果である。剛な帯基礎の中心に集中荷重が作用する場合、基礎下に作用する接地圧の理論値は一様分布である。しかし、実験値と理論値を比較すると、接地圧力は一様に分布しておらず、部分的に理論値よりも大きな値を示している。

ブーシネスクは地盤を弾性体と仮定したときの剛性基礎版下の接地圧を式 (6-1-1) のように示している。

$$p = \frac{2q}{\pi B} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{2x}{B}\right)^2}} \quad (6-1-1)$$

ここで、 B は基礎の幅、 x は基礎の中心から接地圧を求める位置までの距離、 q は等分布荷重である。ブーシネスクが提案した式から算出した接地圧と、実験値を比較すると、分布形状が異なる。

接地圧力と土圧分布の関係を比較すると、 $q/q_0=0.5$ では、接地圧の最大値は 56kPa であるのに対し、土圧の最大値は 40kPa である。また、 $q/q_0=1.0$ では、接地圧の最大値は 105kPa であるのに対し、土圧の最大値は 88kPa である。载荷の条件にかかわらず豊浦砂の荷重分散効果は小さいことがわかった。

また、一般的に図 6-1-7 のように、一様な分布荷重に対して、深さ h の土圧は一様に分布すると仮定して算出している。しかし、本実験結果から、土圧の分布形状は一様ではなく、载荷直下の土圧が大きいことが明らかになった。

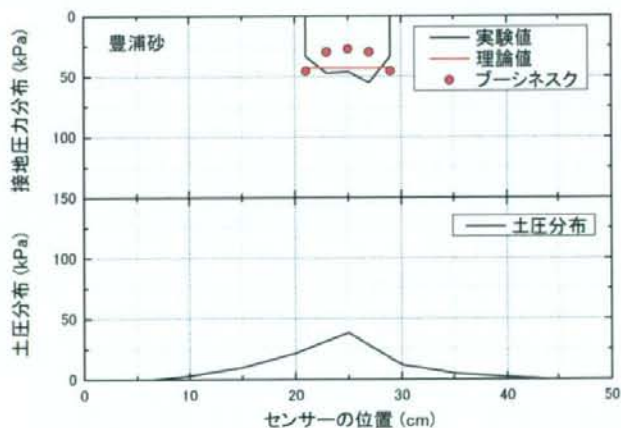


図 6-1-5 载荷応力分布および土圧分布 (豊浦砂、 $q/q_0=0.5$)

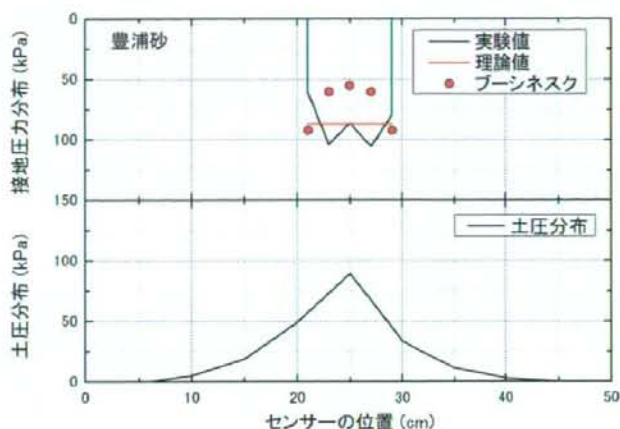


図 6-1-6 载荷応力分布および土圧分布 (豊浦砂, $q/q_s=1.0$)

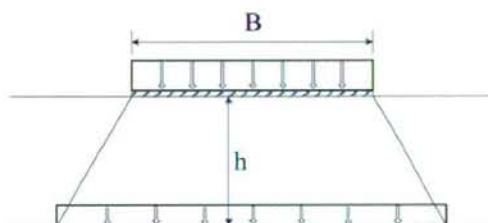


図 6-1-7 接地圧力分散の概念図

図 6-1-8 および図 6-1-9 に関東ロームの接地圧力分布と土圧分布の関係を示す。関東ロームの接地圧力分布は豊浦砂のそれとは異なり、 $q/q_s=0.5$ では、実験値は理論値に比べ全体的に高い値を示している。また、プーシネスクの提案式から求めた接地圧力は実験値と類似の分布形状であるが、プーシネスクの式で算出した値に比べ計測値の方が大きい値を示している。

また、 $q/q_s=1.0$ では、理論値と実験値の差は小さい。しかし、豊浦砂と同様に部分的に計測値は理論値よりも大きくなっている。

接地圧力と土圧分布の関係を比較すると、 $q/q_s=0.5$ では、接地圧の最大値は 227kPa であるのに対し、土圧の最大値は 51kPa である。一方、 $q/q_s=1.0$ では、接地圧の最大値は 307kPa であるのに対し、土圧の最大値は 147kPa である。以上の結果から、関東ロームは豊浦砂に比べ荷重が分散していることが明らかになった。この原因として、豊浦砂は圧縮性が少なく、荷重を粒子の摩擦で支持しているのに対して、関東ロームは圧縮性が高く、荷重を粘着力で支持しているため、荷重の分散範囲が大きく、それに伴って荷重分散が大きくなったと考えられる。

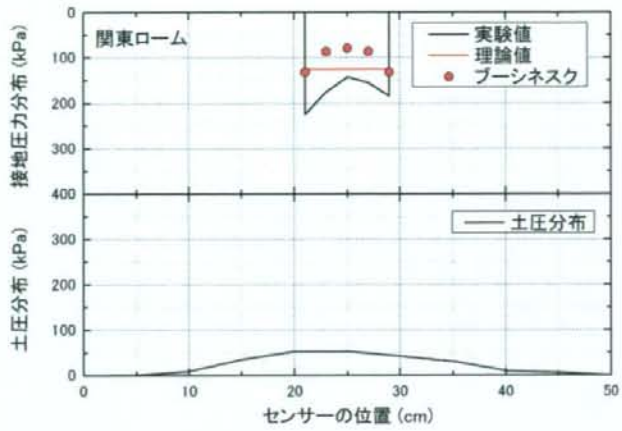


図 6-1-8 载荷応力分布および土圧分布 (関東ローム, $q/q_r=0.5$)

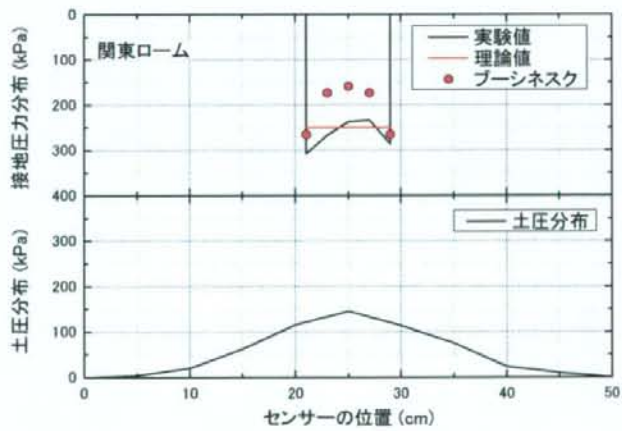


図 6-1-9 载荷応力分布および土圧分布 (関東ローム, $q/q_r=1.0$)

図 6-1-10 に接地圧力の実験値を理論値で除して正規化した結果を示す。豊浦砂では、 $q/q_p=0.5$ と $q/q_p=1.0$ に大きな差は見られない。また、計測値と理論値を比較すると、部分的に計測値が約 25% 大きいことが明らかになった。

一方、関東ロームでは、 $q/q_p=0.5$ と $q/q_p=1.0$ で差が見られ、载荷初期では理論値に比べ実験値は最大で 1.8 倍大きい。それに対して、载荷の進行に伴い、計測値が理論値よりも約 20% 大きくなっている。このことから、同一载荷条件でも、試料の違いにより接地圧の分布形状が異なることが明らかになった。

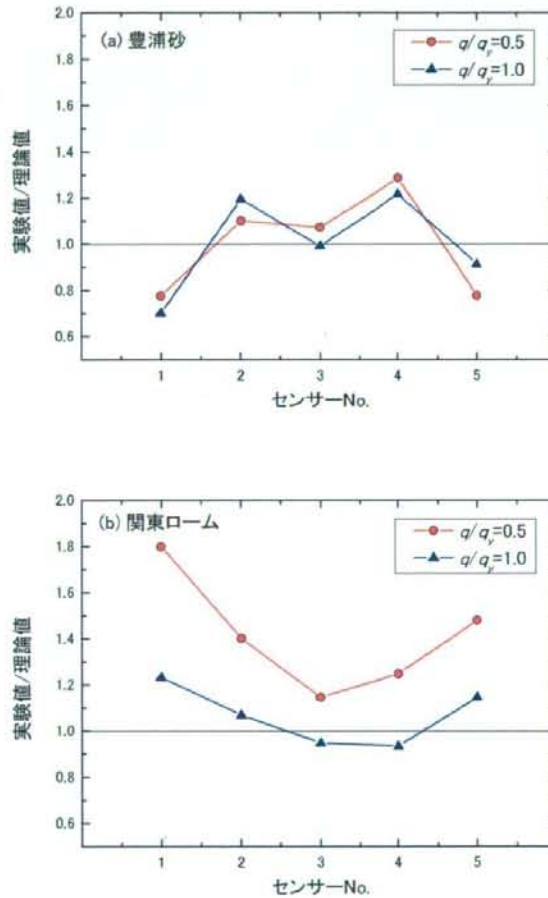


図 6-1-10 接地圧の実験値と理論値の比較
(a) 豊浦砂 (b) 関東ローム

図 6-1-11 に土圧分布を接地圧の理論値で除した結果を示す。豊浦砂では、 $q/q_y=0.5$ と $q/q_y=1.0$ で大きな差はなく、接地圧と土圧の最大値がほぼ等しい。これは、载荷の進行とともに基礎直下に主働くさびが形成されたためと考えられる。

それに対して、関東ロームでは、接地圧に比べ土圧が小さく、 $q/q_y=0.5$ で約 4 割であり、 $q/q_y=1.0$ で約 6 割である。先述したように、関東ロームは圧縮性の高い地盤材料であるため、豊浦砂の結果と異なる結果になったと考えられる。

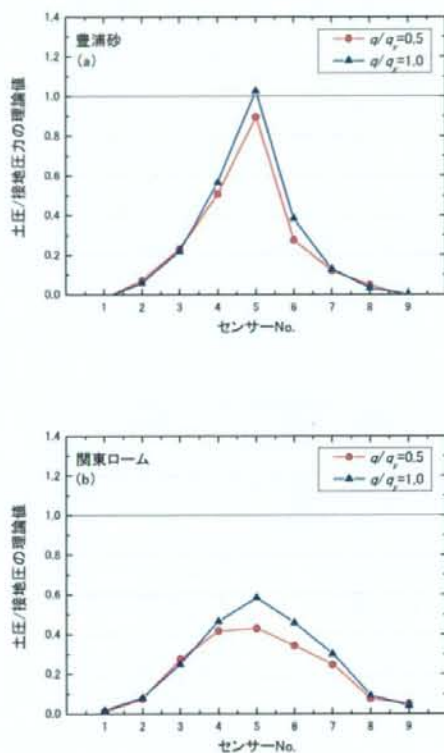


図 6-1-11 土圧分布
(a) 豊浦砂 (b) 関東ローム

(3) 分散角の算出

接地圧力の分散角 θ を算出するため、クローラーの接地圧の分散を求める式を用いて算出した。接地圧分布の概念図を図6-1-12に示す。

クローラーの接地圧による荷重強度 S_z は、式(6-1-2)で求めることができる。

$$S_z = \frac{B \times L \times P}{(B + 2 \cdot h \cdot \tan \theta) \cdot (L + 2 \cdot h \cdot \tan \theta)} \quad (6-1-2)$$

ここで、 B はクローラー幅、 L はクローラーの長さの1/2、 P は最大接地圧、 h は地盤の厚さである。

本研究では、奥行き方向の荷重分散がないため、土槽底面に作用する応力は式(6-1-3)で表すことができる。

$$\frac{B \times Q}{(B + 2 \cdot h \cdot \tan \theta)} = p \quad (6-1-3)$$

ここで、 Q は載荷応力の平均応力、 p は土槽底面に作用する土圧である。

上式から、分散角 θ を式(6-1-4)で算出することができる。

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{B - (p/Q) \cdot B}{2 \cdot h \cdot (p/Q)} \right) \quad (6-1-4)$$

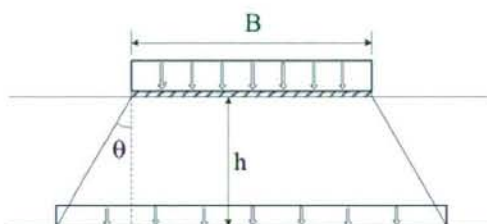


図6-1-12 圧力分散の概念図

分散角は中央の土圧計で計測した p を用いて算出した。図6-1-13に分散角と q/q_0 の関係を示す。本実験条件では、実験土槽の側壁の影響を受けない分散角の上限値は 50° である。

両試料とも荷重の進行とともに分散角は小さくなっている。豊浦砂の結果は、 $q/q_0=0.6$ 付近で分散角はゼロになっている。これは、荷重に伴い基礎下に主動くさびが形成され、接地圧が分散せずに、土圧計に作用したためと考えられる。

一方、関東ロームでは、荷重の増加に伴い分散角 θ は低下し、降伏応力付近で分散角 θ はほぼ最小値になっている。 $q/q_0=0.5$ の分散角を比較すると、豊浦砂は 2.2° であり、関東ロームは 22.3° である。以上の結果から、試料の違いにより分散角は著しく異なり、本実験結果では、豊浦砂に比べ関東ロームの方が荷重の分散が大きいことがわかった。

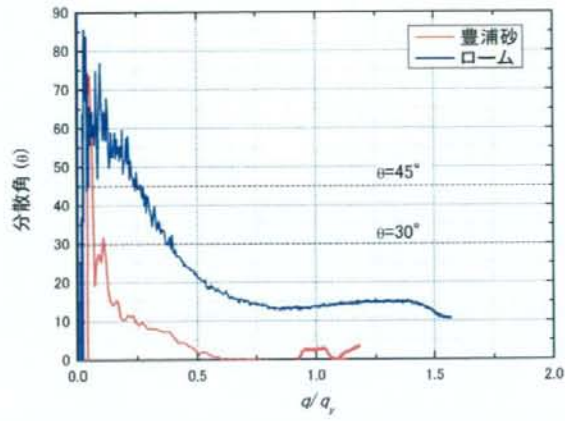


図 6-1-13 分散角と q/q_y の関係

6.2 地盤支持力と偏心荷重の関係

くい打機械の重心位置は履帯の中心位置より前方に位置しており、常に偏心荷重が作用する。本節では、偏心荷重と地盤支持力の関係について調べた。

6.2.1 試料および試験方法

試験に使用した試料は豊浦砂($\rho_s=2.65\text{g/cm}^3$, $\rho_{dmin}=1.335\text{g/cm}^3$, $\rho_{dmax}=1.645\text{g/cm}^3$, $D_r=56.8\%$)である。模型地盤は前節で述べた通り、試料投入後バイブレータで所定の密度に締固めて作製した。偏心荷重の載荷方法は写真 6-2-1 に示すように、載荷板の間に丸鋼を固定して載荷を行った。

試験は載荷位置を変えた 3 パターン (偏心量 $e=0$, $e=L/10=1.0\text{cm}$, $=L/4=2.5\text{cm}$) 行った。ここで、偏心量とは、載荷板中心からの距離である。



写真 6-2-1 支持力試験の様子 (偏心荷重)

6.2.2 偏心量と地盤支持力の関係

図 6-2-2 に载荷応力と変位の関係を示す。偏心量 e の増加に伴い極限支持力 q_u および载荷初期の傾き K_i が低下していることが確認できる。特に、 $e=2.5\text{cm}$ の q_u の低下が著しく、中央载荷条件 ($e=0\text{cm}$) の約 1/2 である。この原因として、履帯直下の主働くさびの大きさと、せん断面の形状が関係していると考えられる。中央载荷条件の接地圧力分布は一様分布であり、 $e=1.0\text{cm}$ は台形分布、 $e=2.5\text{cm}$ は三角形分布である。そのため、三角形分布である $e=2.5$ では、载荷板直下に形成される主働くさびは小さく、それに伴ってせん断面が浅くなり、支持力が著しく低下したと考えられる。

写真 6-2-2 は試験終了後の様子を示したものである。偏心量の違いによりせん断面およびすべり線の形成が異なっていることがわかる。中央载荷($e=0\text{cm}$)の場合、载荷板直下に主働くさびが形成されている。それに対して、偏心量の増加とともにすべり線が浅くなっていることが確認できる。

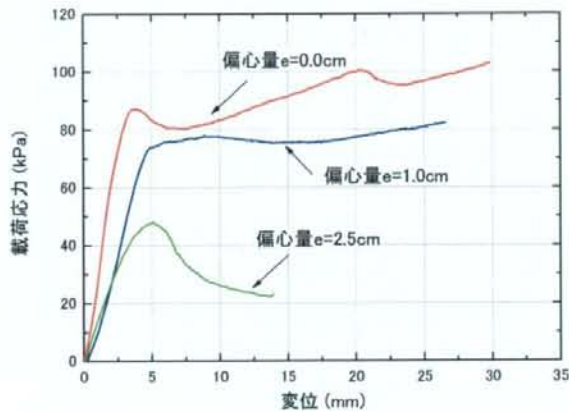


図 6-2-2 载荷応力-変位関係

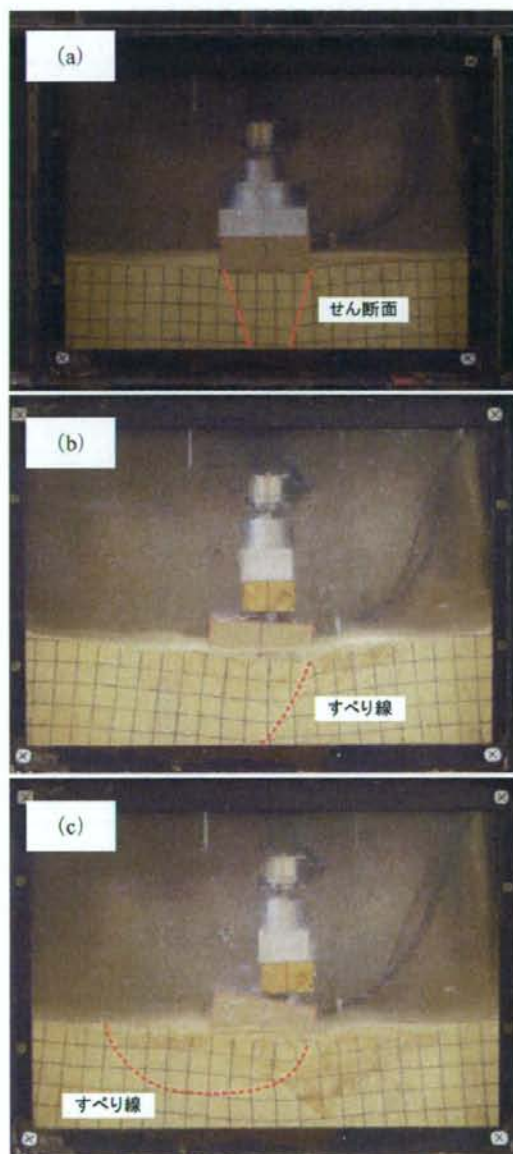


写真 6-2-2 試験終了後の様子

(a) 偏心量 $e=0.0\text{cm}$ (b) 偏心量 $e=1.0\text{cm}$ (c) 偏心量 $e=2.5\text{cm}$

図6-2-3に接地圧力と土圧の分布を示す。載荷応力 $\sigma=40\text{kPa}$ の結果を示した(a)では、中央載荷の結果は、ややばらつきはあるものの、ほぼ一定値となっている。それに対して、偏心量 $e=1.0\text{cm}$ の結果は中央載荷に比べばらつきが大きい。 $e=2.5\text{cm}$ では、荷重が片側に集中している。一方、土圧分布の結果を比較すると、 $e=2.5\text{cm}$ の結果は他の条件に比べやや低いものの、ほぼ同じ土圧分布を示している。

降伏応力条件の結果を示した(b)では、応力が異なるため、接地圧力および土圧分布の値は試験条件により異なるものの、概ね分布の形状は(a)と同じである。

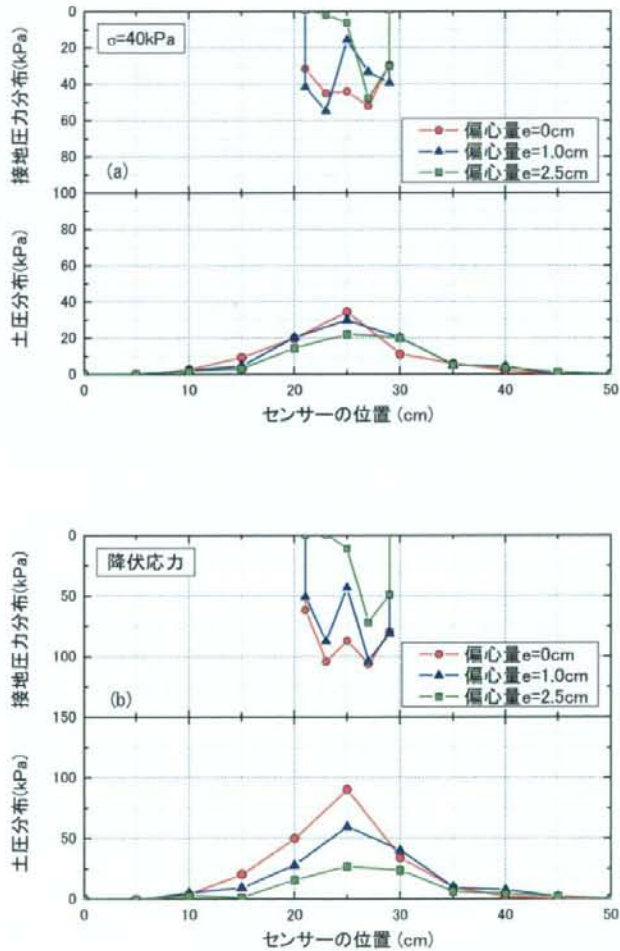


図6-2-3 接地圧力分布と土圧分布

(a) 載荷応力 $\sigma=40\text{kPa}$ (b) 降伏応力

図 6-2-4 に分散角と q/q_y の関係を示す。偏心量の増加とともに分散角は大きくなっている。 $q/q_y=0.5$ の分散角を比較すると、 $e=0$ は 2° 、 $e=1.0\text{cm}$ は 7° 、 $e=2.5\text{cm}$ は 24° である。 $e=2.5\text{cm}$ は他の結果に比べ分散角が大きい。これは、前述した通り、主働くさびの大きさとせん断面の形状が関係していると考えられる。

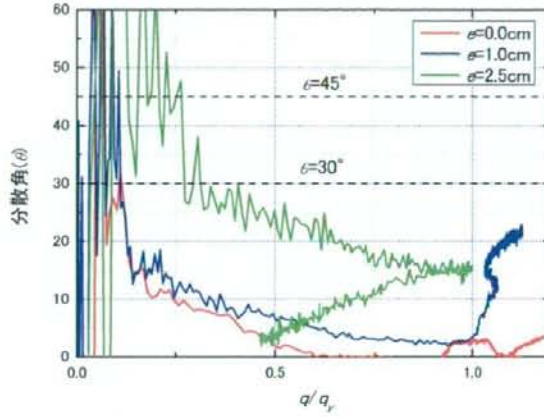


図 6-2-4 分散角と q/q_y の関係

偏心鉛直荷重を受ける帯基礎の支持力について、Meyerhofは有効幅 B' の概念を提案している^{1),2)}。図6-2-5に有効幅 B' の概念を説明した図を示す。鉛直荷重が基礎中心より e だけ偏心しているため、時計回りに回転しようとする力が作用する。これに伴い剛基礎の左端付近の接地圧は減少していく。土の引張強度は一般に小さく、無視することができるため、荷重は実質的に B' の部分で支持される。ここで、極限鉛直圧 σ_f^* の値は荷重の偏心がない場合と同じとしている。この仮定のもとに、極限鉛直荷重 V^* の推定値 V^* を次式で求めることができる。

$$\begin{aligned} V^* &= \sigma_f^* (B - 2e) = (\sigma_f^* \cdot B) \cdot (1 - 2e/B) \\ &= V_m \cdot (1 - 2e/B) \end{aligned} \quad (6-2-1)$$

ここで、 V_m は荷重の偏心がない場合の極限鉛直荷重を示す。上式を V_m で除して無次元化すると次式が得られる。

$$V^*/V_m = 1 - 2e/B \quad (6-2-2)$$

本実験結果と Meyerhof が提案した有効幅 B' を比較したのが図6-2-6である。実験値は Meyerhof の提案式の値よりもやや大きいものの大きな差はない。Meyerhof の提案した概念の応力は等分布に作用すると仮定しているのに対して、実際には等分布に作用しないため、結果に差が生じたと考えられる。しかしながら、Meyerhof の提案式と実験結果はよく対応していることがわかった。

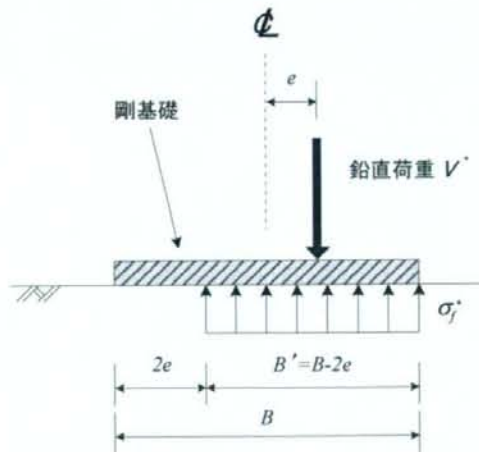


図6-2-5 有効幅 B' の概念図

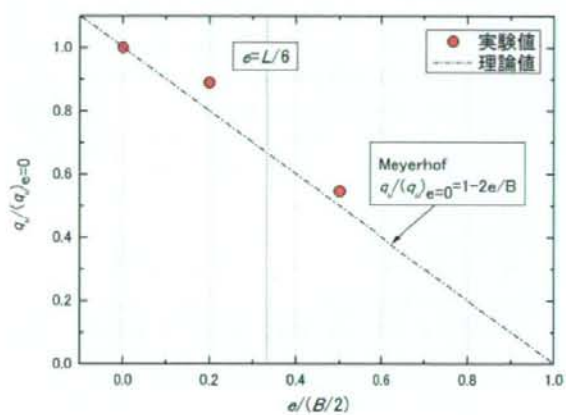


図 6-2-6 $\sigma_p / (\sigma_p)_{e=0}$ と正規化した偏心量の関係

6.3 履帯模型基礎による支持力実験

くい打機の重心は履帯中心から偏心しており、履帯接地圧分布は台形もしくは三角形に分布する。4.2節で前述した通り、荷重の偏心に伴って地盤の極限支持力が著しく低下することが明らかになった。しかし、4.2節で述べた実験条件は、奥行き方向の荷重分散を考慮しない、2次元的な応力分散についての検討である。実際の荷重は3次元的に分散するため、履帯模型基礎を作製し、載荷実験を行った。

6.3.1 履帯基礎の作製

作製した履帯模型基礎を写真 6-3-1 に示す。履帯模型基礎はステンレス製のベースにテック技販製の小型ロードセルが7個取り付けられたものである。ロードセルには写真に示すアルミ製の載荷板(25×40mm)が備わる。用いたロードセルはUSL06-H5-200N-Dが5個とUSL06-H5-500N-Dが2個である。定格容量はそれぞれ200Nと500Nである。

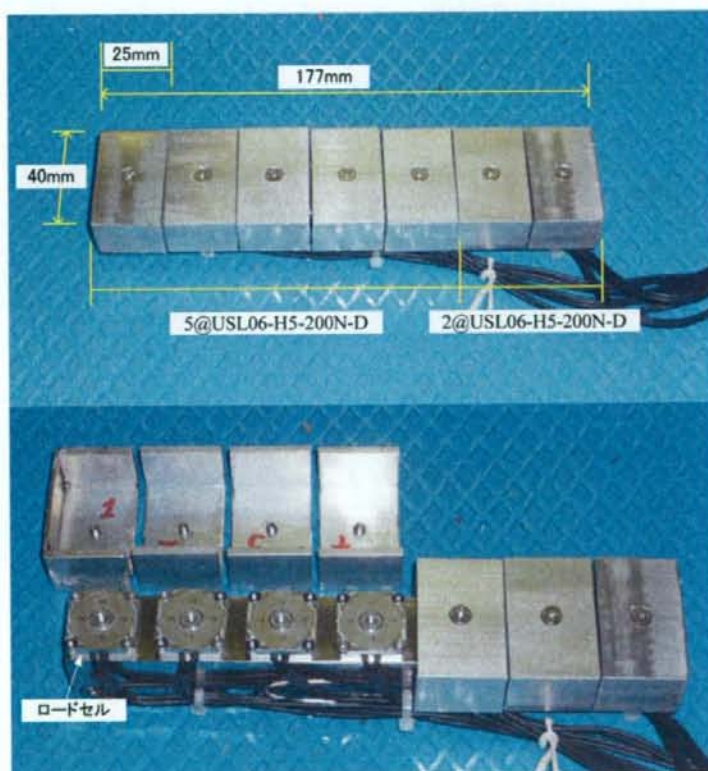


写真 6-3-1 作製した履帯模型基礎

6.3.2 実験の概要

(1) 試験機

試験に用いた荷重試験装置は、島津製作所製の精密万能試験機 Autograph である。写真 6-3-2 に試験装置を示す。試験の様子を写真 6-3-3 および写真 6-3-4 に示す。



写真 6-3-2 精密万能試験装置 (Autograph)