

図 5-3-2 に周波数解析結果を示す。高重心の結果を示した図 5-3-2 (a) では、走行速度の違いにより、周波数成分に僅かな差が見られる。低速走行では、0.7Hz、1.0Hz 付近にピークが確認できる。それに対して、高速走行では、0.6Hz にピークがみられるものの、分布の範囲は広い範囲にわたっており、多くの周波数を含んでいる。低重心条件においても、高重心条件と同様の傾向を示している。

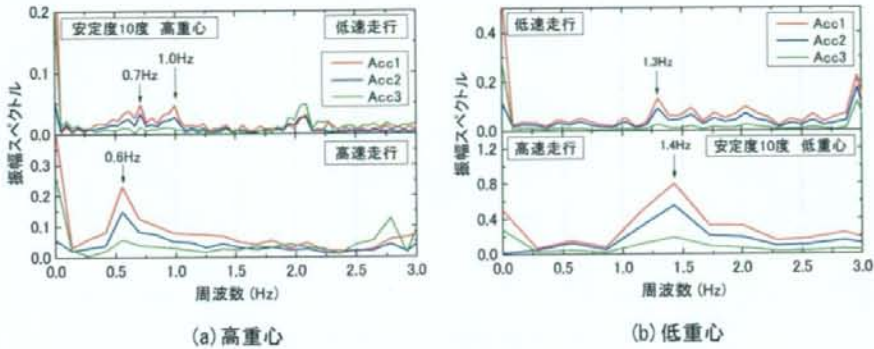


図 5-3-2 周波数解析結果

(2) ハイスピードカメラによる動画解析

図 5-3-3 にハイスピードカメラの動画を解析した結果を示す。高重心、低重心ともに走行速度の違いによる影響は見られない。この結果から、応答加速度には差が見られるものの、くい打機模型に生じる実際の揺れは走行速度に依存しないことがわかった。

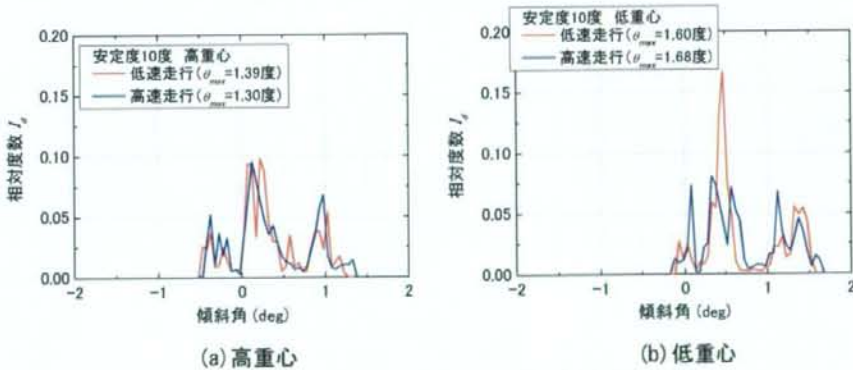
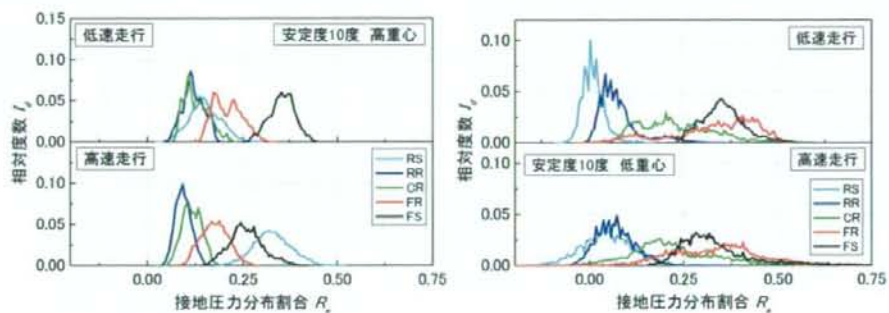


図 5-3-3 傾斜角の度数分布解析結果

(3) 接地圧分布割合

図 5-3-4 に接地圧分布割合を度数分布解析した結果を示す。同一重心条件で比較すると、走行速度の違いによる影響は見られず、各車軸の分布形状は類似している。



(a) 高重心

(b) 低重心

図 5-3-4 接地圧分布割合の度数分布解析結果

5.4 関東ローム地盤

5.4.1 実験の概要

(1) 試料

一般的に地盤の表層部分は圧縮性が高く、不飽和状態である。そのような地盤を再現するため、関東ロームを用いて模型地盤を作製した。関東ロームの物理特性を表 5-4-1 に示す。

表 5-4-1 関東ロームの物理特性

試料名	土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	液性限界 w_L (%)	塑性限界 w_P (%)	塑性指数 I_P	最適含水比 w_{opt} (%)
関東ローム	2.759	158.3	97.7	60.6	102.0

(2) 模型地盤の作製

本研究では、「平坦地盤」と、表面に凹凸を与えた「凹凸地盤」の2種類の地盤を作製した。

写真 5-4-1 にローム地盤の概要を示す。待機部には 250mm×290mm×50mm のウレタンフォームを設置し、残りの 490mm×250mm に関東ローム地盤を作製した。

最適含水比に含水比調整した関東ロームをシャベルで均一に堆積させた後、スクレーパーで平坦にした。投入する試料の目安は1層あたり 3.6kg である。

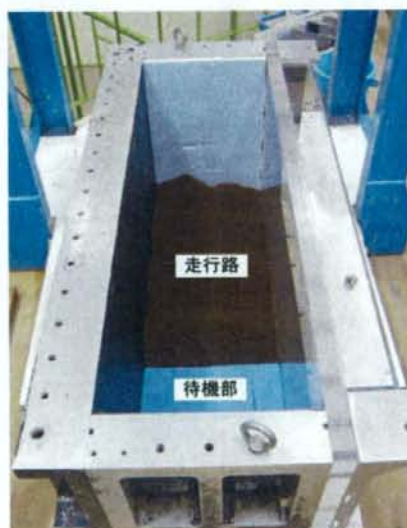


写真 5-4-1 ローム地盤

表面を平坦にした後、載荷板を設置して締固め圧力 150kPa で約一時間締固めを行った。「平坦地盤」を作製する場合は、1 層目と同様に 2 層目を作製し、締固め後の地盤厚さは 50mm である。写真 5-4-2 に締固めの様子を示す。

一方、「凹凸地盤」の作製は、所定の試料を堆積させた後に、写真 5-4-3 に示す載荷板(40mm×240mm)で、少しずつオーバーラップさせながら、締固め圧力 150kPa で締め固めて地盤を作製した。

締固め終了後、写真 5-4-4 に示すように、ハンドペーン試験の測点を 50mm の格子状に設けた。



写真 5-4-2 締固めの様子

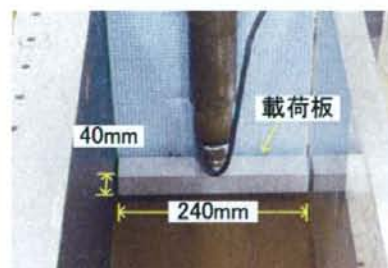


写真 5-4-3 凹凸地盤の作製の様子

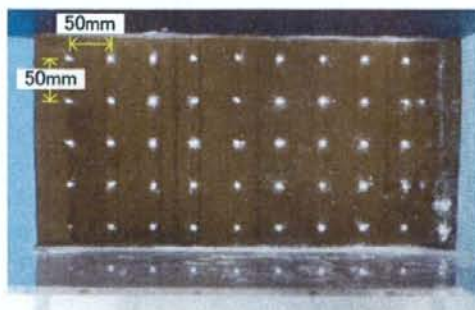


写真 5-4-4 ハンドペーンの試験箇所

(3) 模型地盤の起伏の計測

走行地盤の地表面の起伏を計測するために、地表面スキャナーを作製した。写真 5-4-5 に概要を示す。この装置には、2種類の変位計が搭載されている。一つは、キーエンス製のレーザー変位計(LB-300)であり、地表面の凹凸を計測するものである。もう一つは、KYOWA製のワイヤー式変位計(DTP-D-1KSP)であり、水平方向の変位を計測するものである。

計測は写真 5-4-6 に示す三測線で行った。図 5-4-1 に凹凸地盤の計測結果を示す。試験の結果から最大高低差は 15mm であることがわかった。



写真 5-4-5 地表面スキャナーの概要

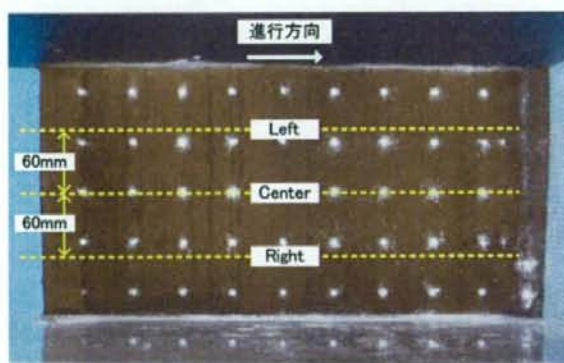


写真 5-4-6 地表面スキャナーの測線

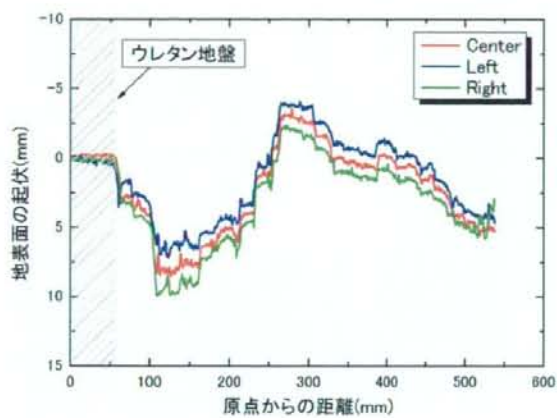


図 5-4-1 地表面の起伏 (凹凸地盤)

5.4.2 ハンドペーン試験と支持力試験の関係

作製した走行路の支持力分布をハンドペーン試験にて調査した。本節では、ハンドペーン試験と支持力試験を行い、せん断強度と極限支持力の関係を調査した。

写真 5-4-7 に試験に用いたハンドペーンを示す。用いた装置は、幅 10mm×長さ 20mm のペーンブレードが備わり、表層部に手で貫入した後に、最大回転モーメント M_{max} を記録するものである。計測した最大回転モーメントから式 (5-4-1) よりせん断強度を算出する。

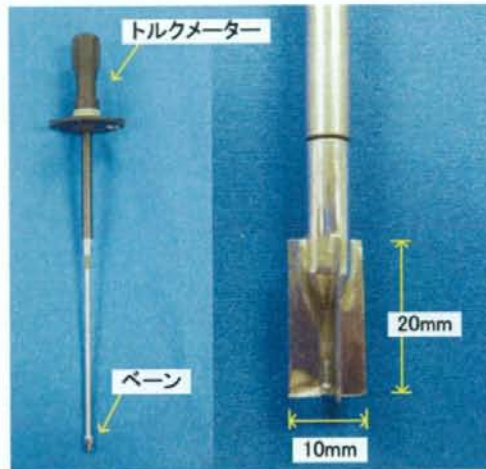


写真 5-4-7 ハンドペーン

$$M_{max} = r \left\{ \pi D H \cdot \frac{D}{2} + 2\pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \frac{2}{3} \cdot \frac{D}{2} \right\} \quad (5-4-1)$$

$$\therefore r = \frac{M_{max}}{\pi \left(\frac{D^2 H}{2} + \frac{D^3}{6} \right)}$$

ここで、 r はせん断強度 (N/m^2)、 M_{max} は最大回転モーメント ($\text{N}\cdot\text{m}$)、 D はペーンの幅 (直径) (m)、 H はペーンの高さ (m) である。

模型地盤の作製は、試験に用いた土槽は $360\text{mm} \times 360\text{mm} \times 210\text{mm}$ である。地盤の作製方法は、遠心場走行実験の模型地盤と同様の方法で作製した。図 5-4-2 にハンドベーン試験と支持力試験の調査箇所を示す。ハンドベーン (VST) の調査箇所は 5cm の格子状に測点を設定し、全 49 地点の調査を行った。支持力試験 (BCT) は図に示す 5 箇所で実施した。用いた載荷板は $30\text{mm} \times 30\text{mm}$ の長方形である。

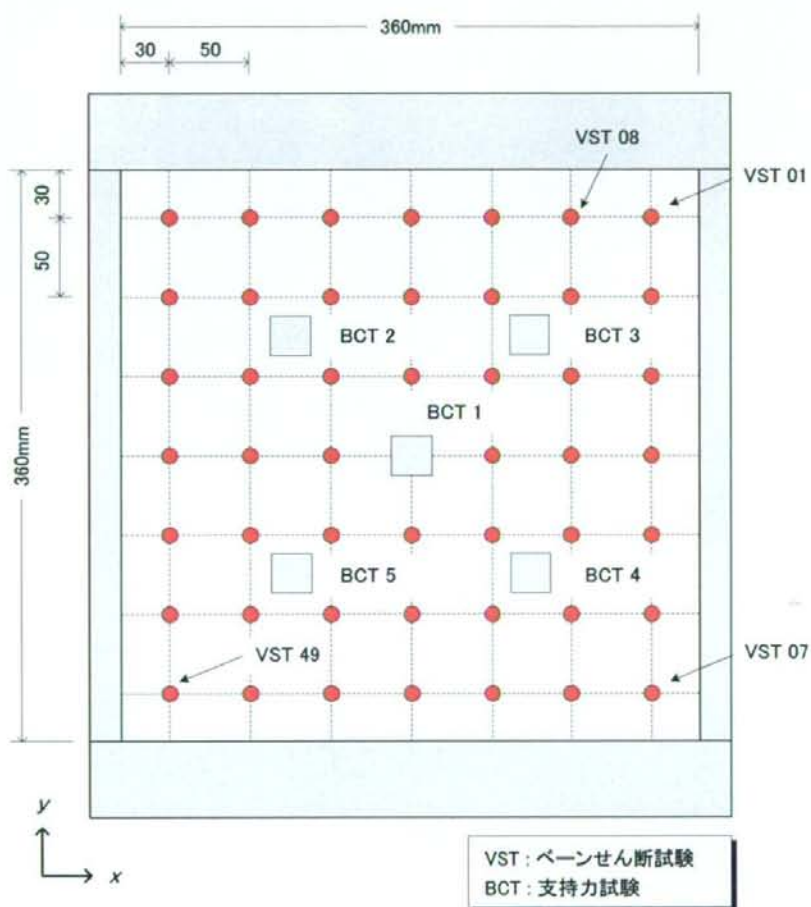


図 5-4-2 ハンドベーン試験と支持力試験の調査箇所

図5-4-3に計測したトルク値から換算したせん断強度の分布を示す。ハンドペーン試験で得られたせん断強度は30~110kPaと非常に大きなばらつきが見られる。図5-4-4に支持力試験の結果を示す。極限支持力は200~330kPaであり、ハンドペーン試験結果と同様なばらつきが見られる。

図5-4-5に極限支持力とせん断強度の関係を示す。極限支持力とせん断強度には強い相関性が見られる。そのため、ハンドペーン試験で地盤強度のばらつきを測定することが可能であると考えられる。また、地盤の強度にばらつきが生じた原因として、試料を容器に投入する際、均等になるよう投入しなかったため、スクレーパーで敷きならした際にロームが圧縮し、部分的に密度の偏りが生じたことが考えられる。

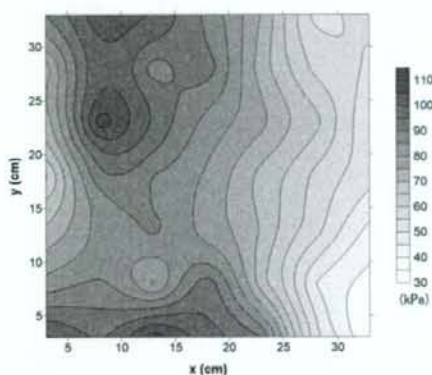


図5-4-3 ペーン試験結果

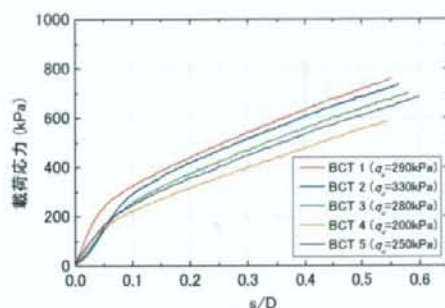


図5-4-4 支持力試験結果

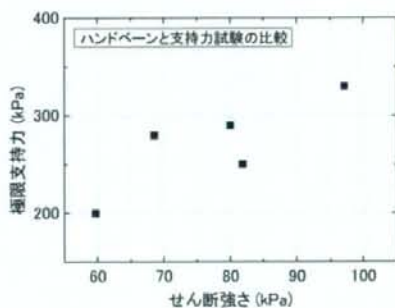


図5-4-5 ペーン試験と極限支持力の関係

前回の結果をふまえて、再実験した結果を図5-4-6~5-4-8に示す。前回に比べ、せん断強度と極限支持力のばらつきは小さく、両者はよく対応した結果である。

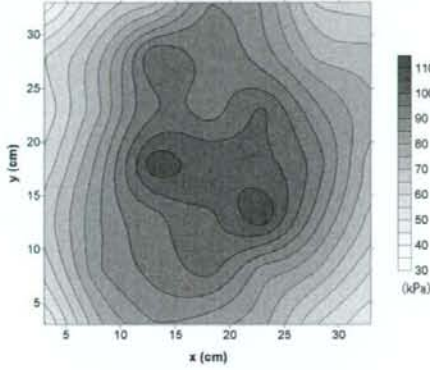


図 5-4-6 ベーン試験結果

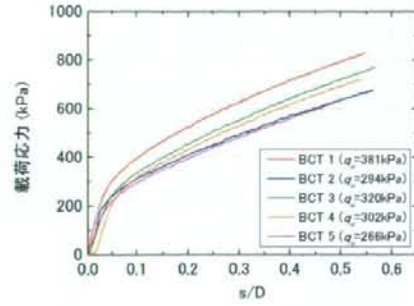


図 5-4-7 支持力試験結果

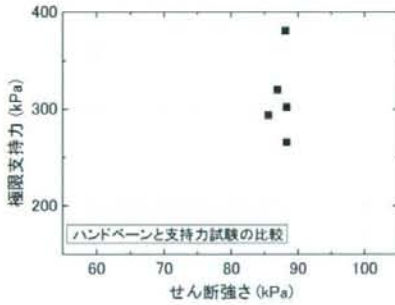


図 5-4-8 ベーン試験と極限支持力の関係

5.4.3 実験結果（平坦地盤）

(1) 走行路の強度特性

図 5-4-9 に関東ロームとウレタンフォーム（UF-1）の支持力試験結果の比較を示す。両試料の載荷応力-沈下比特性は非常によく似ており、 $s/D=0.04$ 付近に屈曲点が見られる。

遠心場走行実験後にハンドベーンを用いて走行路のせん断強度を測定した結果を図 5-4-10 に示す。走行路のせん断強度にはばらつきが見られ、部分的にせん断強度が大きい箇所が見られる。この原因として、遠心場走行実験の後にベーンせん断試験を実施したため、履帯の通過により地盤が締め固まったことが考えられる。しかしながら、進行方向のせん断強度のばらつきは小さい。

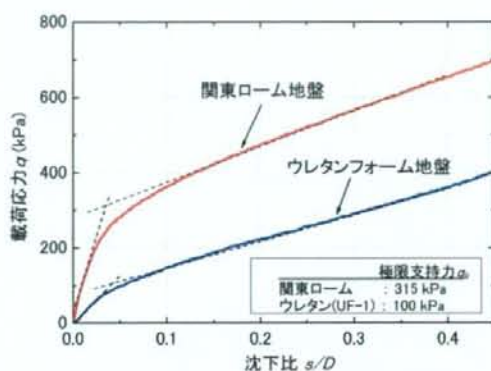


図 5-4-9 ローム地盤とウレタンフォーム地盤の支持力特性

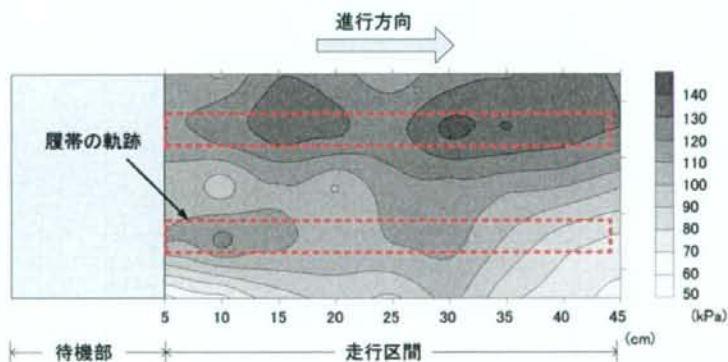


図 5-4-10 走行路のせん断強度

(2) 遠心場走行実験

図 5-4-11 に関東ローム地盤とウレタンフォーム地盤の応答加速度の比較を示す。実験条件は、安定度 10 度、高重心、遠心加速度は 25g である。

応答加速度の振幅を比較すると、関東ロームは 0.49m/sec^2 であるのに対して、ウレタンフォームは 0.14m/sec^2 である。関東ローム地盤の極限支持力は大きく、弾性支持条件であるのに対して、ウレタンフォーム地盤では、 q_u と履帯接地圧がほぼ等しく、塑性的な沈下が伴うため、応答加速度に差が生じたことが考えられる。

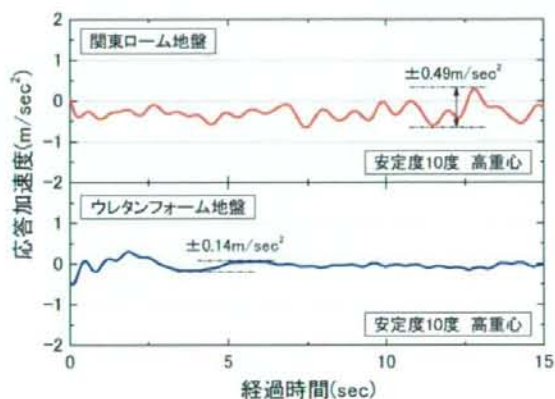


図 5-4-11 応答加速度

図 5-4-12 に周波数解析結果を示す。両試験結果に共通して、0.35Hz 付近にピークが見られ、長周期的な揺れが生じている。しかし、関東ローム地盤は、0.35~0.7Hz 付近にピークが見られ、やや高周波数成分を含んでいる。

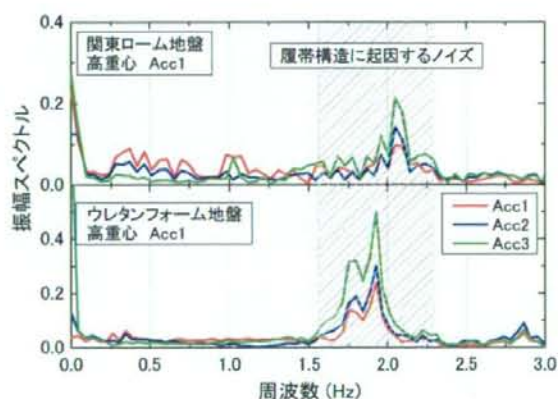


図 5-4-12 周波数解析結果

図5-4-13に接地圧分布割合の度数分布解析結果を示す。関東ローム地盤とウレタンフォーム地盤の結果を比較すると、関東ローム地盤のFSおよびFRは広い範囲に分布しており、走行時の揺動による影響が見られる。

図5-4-14に接地圧分布割合の理論値と実験値の比較を示す。実験値の平均値は地盤条件にかかわらず、ほぼ等しいが、標準偏差を比較すると関東ローム地盤のエラーバーが大きい。

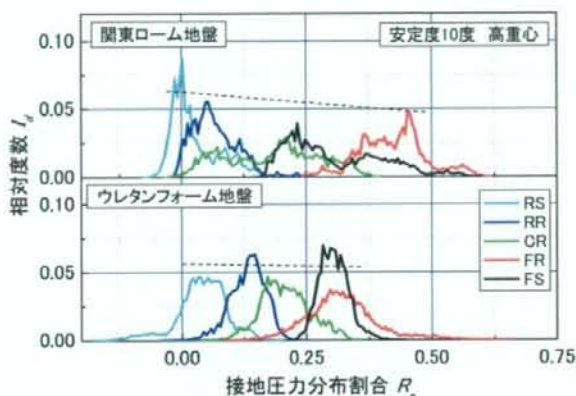
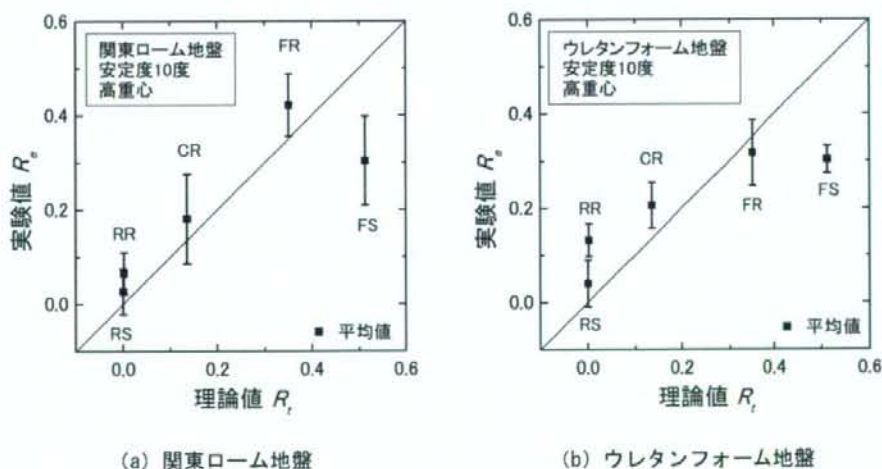


図5-4-13 接地圧分布割合の度数分布解析結果



(a) 関東ローム地盤

(b) ウレタンフォーム地盤

図5-4-14 理論値と実験値の比較

5.4.4 実験結果（凹凸地盤）

図 5-4-15 に平坦地盤と凹凸地盤の応答加速度の比較を示す。平坦地盤の応答加速度振幅が 0.46m/sec^2 であるのに対し、凹凸地盤の応答加速度振幅は 1.39m/sec^2 である。

図 5-4-16 に応答加速度と地表面の起伏を比較を示す。応答加速度と地表面の起伏はよく対応していることがわかる。

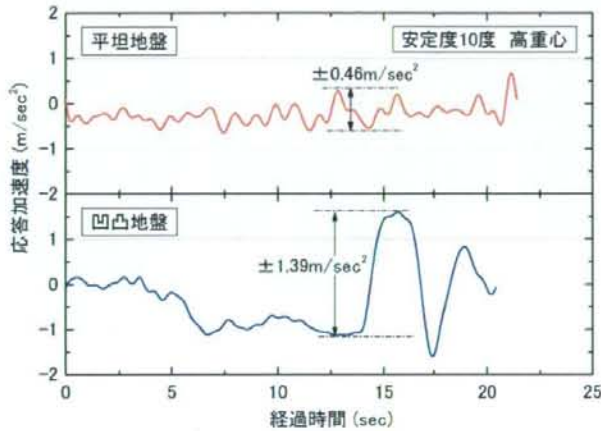


図 5-4-15 応答加速度

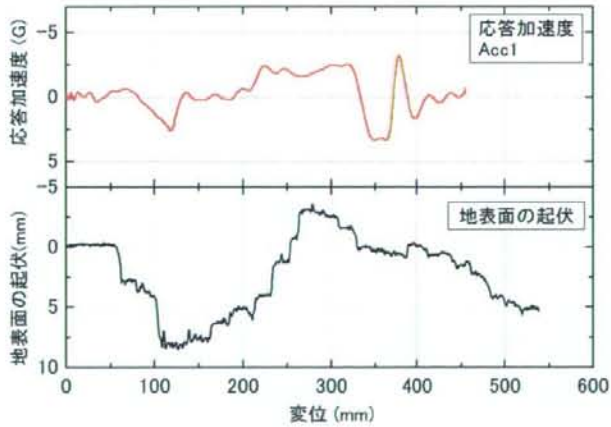


図 5-4-16 応答加速度と地表面の起伏の関係

図5-4-17に応答加速度の周波数成分と地表面の周波数成分の比較を示す。地表面の周波数成分は、進行方向の変位を模型の平均速度30cm/secで除して時間を算出し、周波数解析を行った結果である。応答加速度と地表面の周波数はほぼ一致している。

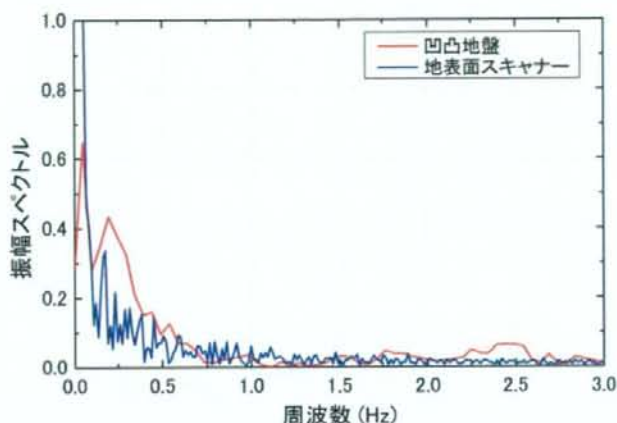


図5-4-17 応答加速度の周波数成分と地表の凹凸の周波数成分

図5-4-18に接地圧分布割合の度数分布解析結果を示す。平坦地盤と凹凸地盤を比較すると、平坦地盤は各車軸の最大相対度数 I_d はほぼ等しく、分布形状が類似である。それに対して、凹凸地盤は、各車軸の最大 I_d は0付近にあり、非常に広い範囲に接地圧分布割合が分布している。この原因として、履帯長さに対して地盤の凹凸が大きく、履帯と地表面の接触面が小さくなったため、値が広い範囲に分布したと考えられる。今後は、地盤を遠心圧密で作製する等、地表面の起伏をもう少し小さくする必要があると考えられる。

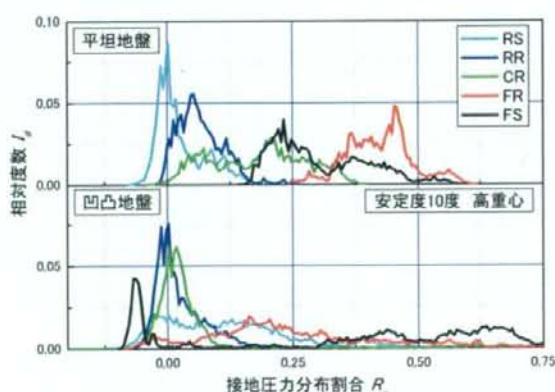


図5-4-18 接地圧分布割合の度数分布解析

5.5 地盤の破壊確率と支持力安全率の検討

5.5.1 地盤破壊確率の算出方法

遠心場走行実験より得られた履帯接地圧の変動係数と、模擬地盤の変動係数を用いて、不確かさを考慮した支持力地盤の破壊確率の検討を行った。

G_f を地盤破壊に関する限界状態関数と定義すると、 G_f は式(5-5-1)によって表される。

$$G_f(q_u, q_o) = q_u - q_o \quad \begin{cases} G_f(q_u, q_o) > 0 & \text{安全} \\ G_f(q_u, q_o) < 0 & \text{危険} \end{cases} \quad (5-5-1)$$

ここで、 q_o は履帯に生じる接地圧力であり、 q_u は地盤の極限支持力である。 q_o と q_u は互いに独立であり、 G_f は正規分布に従うことを仮定すると、地盤の破壊に対する危険の確率(P_{FP})は式(5-5-2)により求められる。

$$P_{FP} = P(q_u < q_o) = P(G_f < 0) \\ = F_G(0) = \Phi\left(\frac{0 - \mu_G}{\sigma_G}\right) = \Phi\left(-\frac{\mu_G}{\sigma_G}\right) = 1 - \Phi\left(\frac{\mu_G}{\sigma_G}\right) \quad (5-5-2)$$

ここで、 μ_G と σ_G は G_f の平均値と標準偏差である。 F_G は確率分布関数であり Φ は F_G によって表された標準正規分布関数である。

5.5.2 走行地盤に必要な支持力安全率の検討

遠心場走行実験より得られた履帯接地圧の変動係数と、模擬地盤の変動係数を用いて、不確かさを考慮した支持地盤の破壊確率の検討を行った。検討に用いたパラメータを表5-5-1に示す。支持力安全率は地盤の極限支持力 q_u をFSの履帯接地圧 q_o の平均値 μ_o で除した値である。支持力の変動係数(C_{vg})は、ローム地盤ではハンドベーン試験の結果より与え、ウレタン地盤には推定値を与えた。

表 5-5-1 接地圧力の支持力安全率と変動係数

地盤材料	安定度	重心位置	遠心加速度	支持力安全率 q_u/μ_o	変動係数	
					支持地盤 C_{vg}	接地圧力 C_{vp}
ローム	10度	高重心	25g	2.2	0.16	0.45
ウレタン				0.9	0.08	0.14

図5-5-1に支持力安全率 F_S と地盤の破壊確率 P_F の関係を示す。 C_{vp} と C_{vp} の値がともに大きいローム地盤の曲線は、両値がともに小さいウレタン地盤の上方に位置している。施工現場で慣用的に用いられることが多い短期的な安全率 $F_S=1.5$ で P_F を比較すると、その値は0.162と0.003であり、大きな差が生じていることがわかった。そのため、両変動係数は安全率を選択する上で、重要なパラメータであることがわかった。

本実験では、原地盤に存在する地表面の凹凸は考慮されていないため、実際の P_F はさらに大きくなることが考えられる。

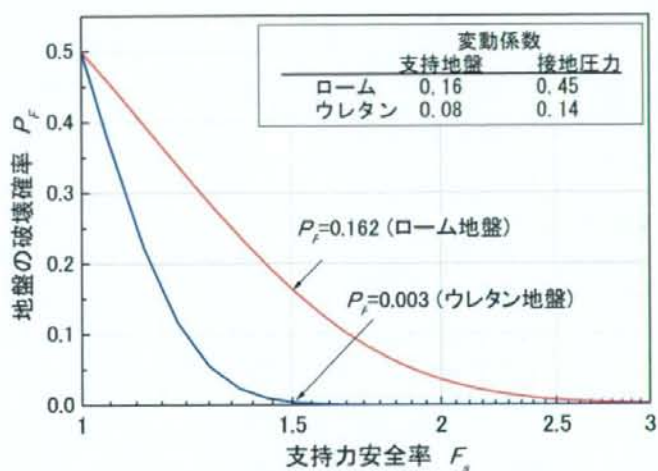


図5-5-1 地盤の破壊確率と支持力安全率の関係

5.6 まとめ

本章では、くい打機械の走行時の不安定要因を明らかにするために、安定度と重心位置の影響、地盤反力分布の影響、走行速度の影響、地表面の起伏の影響について検討した。

また、遠心場走行実験から得られた、走行路の支持力変動係数と、履帯接地圧の変動係数から、地盤の破壊確率と支持力安全率の関係について検討を行った。

5.6.1 同一安定度条件における重心位置の違いが走行挙動に与える影響

くい打機の転倒防止に関する国内外の関係規則では、機械が有すべき安定度について規定している。しかし、装備の構成や搭載位置により、同一安定度でも、重心位置が異なる場合がある。そこで、安定度と重心位置の違いが走行挙動に与える影響を調べた。その結果、同一安定度条件では、重心が低い場合の応答加速度と接地圧力の変動量が大きいことが明らかになった。

5.6.2 走行速度の影響

走行速度が走行挙動に与える影響を調べるために、高速走行と低速走行で実験を行った。応答加速度には走行速度の違いによる影響が見られ、高速走行の応答が大きかった。しかし、ハイスピードカメラによる動画解析の結果、走行時に生じた傾斜角は走行速度にかかわらずほぼ等しいことと、接地圧力分布の変動量に差が見られなかったことから、本実験条件での走行速度では、走行挙動に顕著な差がないことがわかった。

5.6.3 平坦地盤と凹凸地盤

(1) 模型地盤の強度特性評価

模型地盤の強度分布を調べるため、本研究ではハンドベーン試験により評価を行った。ハンドベーン試験によるせん断強度と支持力試験による極限支持力を比較した結果、ややばらつきはあるものの、せん断強度と極限支持力には相関関係が認められた。

(2) 地表面の起伏の影響

関東ロームを用いて、平坦地盤と凹凸地盤の2種類の条件で遠心場走行実験を行った。平坦地盤は、ウレタンフォーム地盤の走行挙動とほぼ等しい結果であった。それに対して、凹凸地盤は、履帯長さに対して、起伏の大きさが大きかったため、履帯と地表面の接触面が小さくなり、接地圧力の計測値に問題が生じた。そのため、今後は遠心圧密等で地盤を作製する必要がある。

5.6.4 地盤の破壊確率と支持力安全率の関係

遠心場走行実験から得られた履帯接地圧の変動係数と模型地盤の変動係数を用いて不確実さを考慮した支持地盤の破壊確率の検討を行った。その結果、両変動係数は安全率を選択する上で、非常に重要なパラメータであることがわかった。

本実験条件は理想的な水平地盤における結果であるため、今後は原地盤に存在する地表面の凹凸を考慮した安全率の検討を行う予定である。

5.7 参考文献

- 1) 労働調査会：安衛法便覧Ⅱ 平成19年度版，pp.512-516，2008.
- 2) (社)地盤工学会：地盤調査法，pp.242-248，1995.
- 3) 玉手 聡：移動式クレーンの安定設置に必要な地盤の支持力要件，NIIS-SD-No.22，2006.
- 4) 星谷勝，石井清：構造物の信頼性設計法，鹿島出版，1997.

