

図 6-1-17 に弾性支持条件でのトップヘビー指数と傾斜角の関係を示す。弾性支持条件では、付加質量搭載位置の違いによる差は比較的小さく、トップヘビー指数の増加に伴い傾斜角がやや増加している。それに対して、塑性支持条件の結果を示した図 6-1-18 では、付加質量搭載位置の違いによる差が見られ、トップヘビー指数が高くなるに従い、傾斜角の平均値と標準偏差も大きくなっていることが分かる。

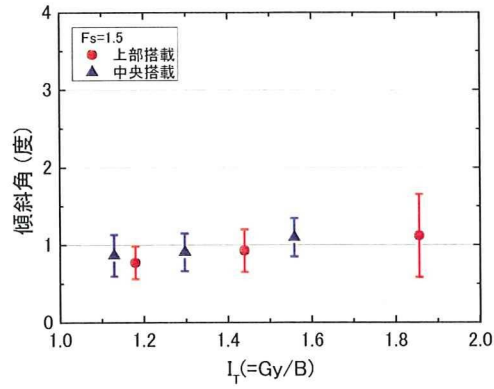


図 6-1-17 トップヘビー指数と傾斜角の関係（中央搭載, $F_s = 1.5$ ）

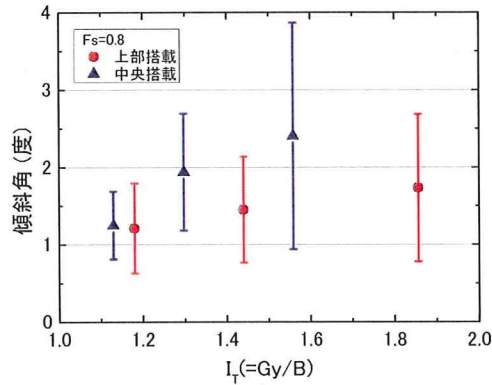


図 6-1-18 トップヘビー指数と傾斜角の関係（中央搭載, $F_s = 0.8$ ）

(2) 接地圧力変動に与える影響

図 6-1-19 に上部搭載条件での FS (前輪) の接地圧力分布割合とトップヘビー指数の関係を示す。トップヘビー指数が高くなるに従い、FS の接地圧力分布割合に僅かな増加傾向が見られる。それに対して、エラーバーで示した標準偏差については、トップヘビー指数の違いによる大きな差は見られない。一方、図 6-1-20 に示した中部搭載条件では、トップヘビー指数の違いによる接地圧力分布の増加が明確である。

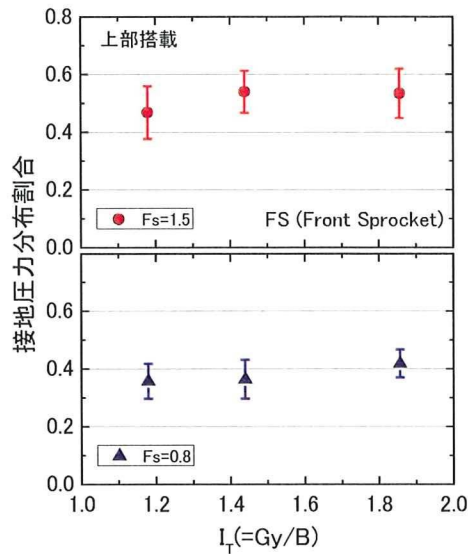


図 6-1-19 トップヘビー指数と FS の接地圧分布割合の関係 (上部搭載)

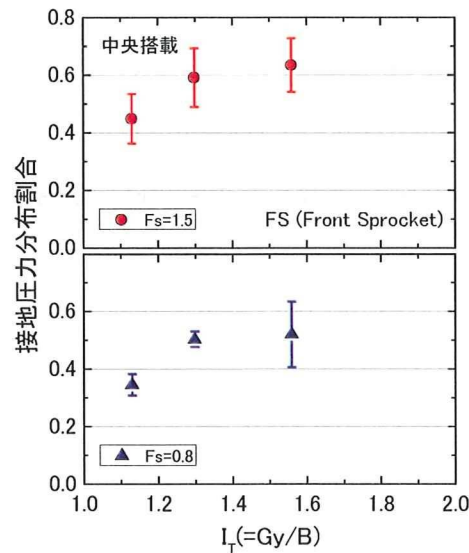


図 6-1-20 トップヘビー指数と FS の接地圧分布割合の関係 (中央搭載)

図 6-1-21 に弾性支持条件 ($F_s=1.5$) における FS の接地圧分布割合とトップヘビー指数の関係を示す。付加質量搭載位置の違いによる差は少なく、トップヘビー指数の高さが大きくなるに従い、FS の平均値は増加傾向を示している。

図 6-1-22 に塑性支持条件 ($F_s=0.8$) の結果を示す。塑性支持条件では、弾性支持条件に比べ、全体的に標準偏差が小さい傾向を示している。

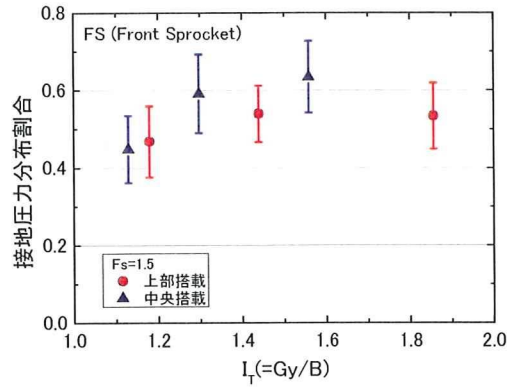


図 6-1-21 トップヘビー指数と FS の接地圧分布割合の関係 ($F_s=1.5$)

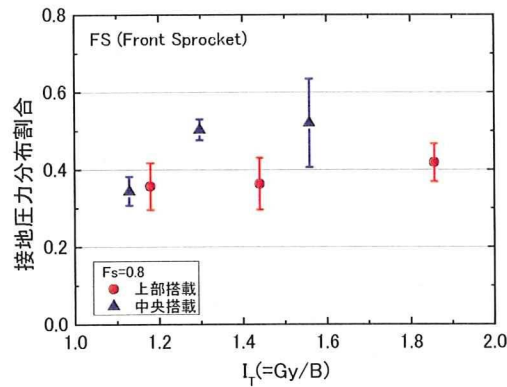


図 6-1-22 トップヘビー指数と FS の接地圧分布割合の関係 ($F_s=0.8$)

図 6-1-23 に FS の実験値 R_e を理論値 R_t で除した値とトップヘビー指数の関係を示す。トップヘビー指数が低い条件では $R_e/R_t > 1$ であり、理論値よりも実験値が大きい。しかし、トップヘビー指数が高くなるとともに、その関係は $R_e/R_t < 1$ になる。一方、塑性支持条件の結果を示した図 6-1-24 においても、トップヘビー指数が高くなるに従い、 $R_e/R_t < 1$ となっている。

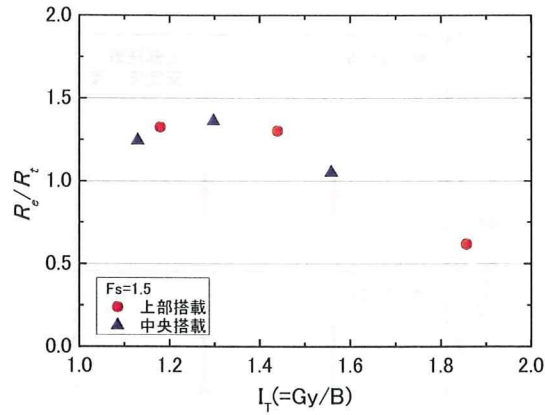


図 6-1-23 トップヘビー指数と FS の R_e/R_t の関係 ($F_s=1.5$)

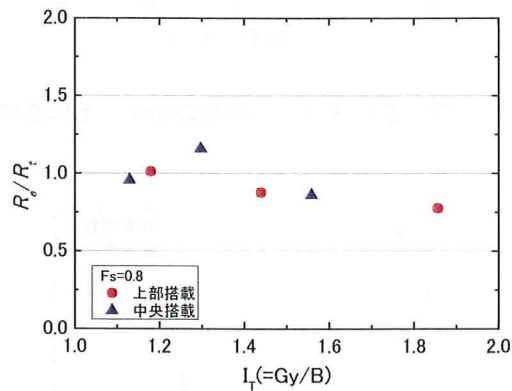


図 6-1-24 トップヘビー指数と FS の R_e/R_t の関係 ($F_s=0.8$)

6.1.3 走行速度が与える影響

本項では、走行速度が揺動に与える影響について検証した。図 6-1-25 に上部搭載条件における走行速度と傾斜角の関係を示す。支持条件の違いおよび走行速度の違いによらず、傾斜角の平均値および標準偏差には差が見られない。中央搭載条件の結果を示した図 6-1-26 においても、同じ傾向を示しており、平坦で地盤支持力のばらつきが少ない地盤では、走行速度が試験結果に与える影響が小さいことがわかった。

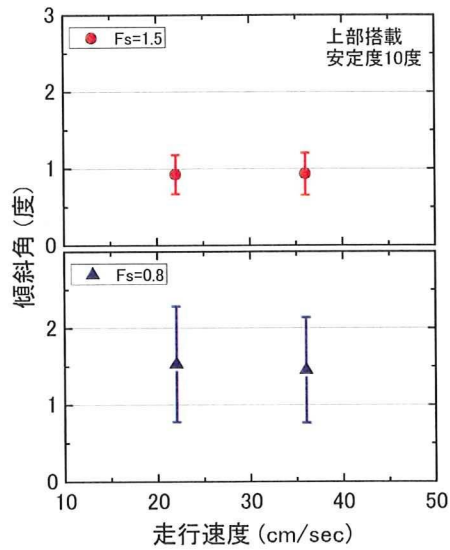


図 6-1-25 走行速度と傾斜角の関係（上部搭載）

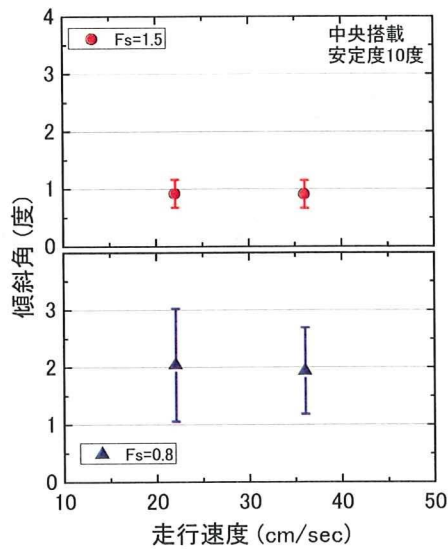


図 6-1-26 走行速度と傾斜角の関係（中央搭載）

図6-1-27に上部搭載条件における走行速度とFS(前輪)の接地圧分布割合の関係を示し、図6-1-28に中央搭載条件の結果を示す。前述した傾斜角の結果と同様に、FSの接地圧分布割合には、走行速度の違いによる顕著な差は見られない。

以上の結果から、平坦で均質な地盤では、走行速度の違いが傾斜角および接地圧分布割合に与える影響は非常に小さいことが明らかになった。

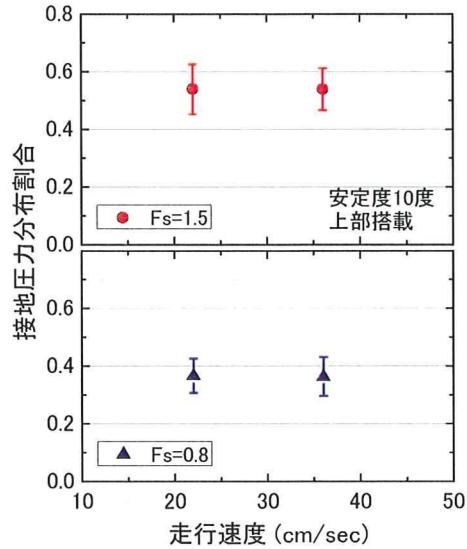


図6-1-27 走行速度と前輪の接地圧力分布割合の関係（上部搭載）

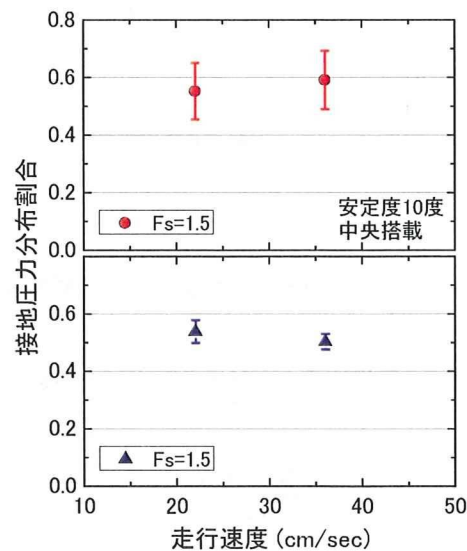


図6-1-28 走行速度と前輪の接地圧力分布割合の関係（中央搭載）

6.2 地盤側条件による影響

本節では関東ロームを用いて、せん断強度のばらつきが大きい地盤とばらつきが小さい地盤を作製し、くい打機模型の揺動に与える影響について検討を行った。

6.2.1 傾斜角に与える影響

図 6-2-1 に平坦地盤における傾斜角と安定度の関係を示す。均質地盤および不均質地盤ともに、安定度の違いによる影響は小さいことが分かる。地盤条件と傾斜角の関係に着目すると、均質地盤の平均傾斜角が約 0.4 度であるのに対し、不均質地盤の平均傾斜角は約 1 度であり、均質地盤に比べ傾斜角が大きい。表 6-2-1 にハンドベーン試験の結果を示す。

両地盤条件のせん断強度の平均値はほぼ等しい。一方、標準偏差と変動係数は、均質地盤に比べ、不均質地盤は約 2 倍大きな値である。そのため、不均質地盤ではせん断強度のばらつきの影響により走行中に発生する傾斜角が大きくなったものと考えられる。

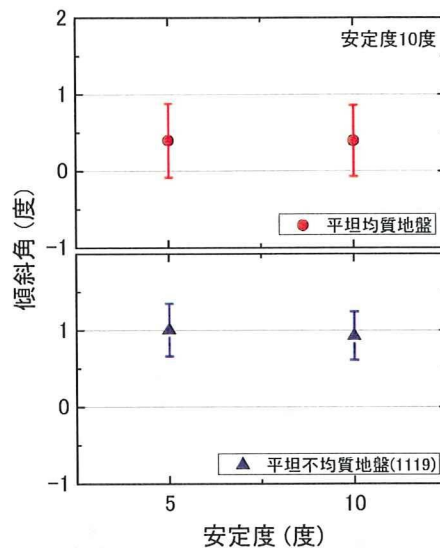


図 6-2-1 平坦均質地盤と平坦不均質地盤における傾斜角と安定度の関係

表 6-2-1 平坦地盤におけるハンドベーン試験結果

地盤条件	ハンドベーン試験結果		
	平均値 (kPa)	標準偏差	変動係数
平坦均質地盤	73.15	12.82	0.175
平坦不均質地盤	73.60	26.04	0.354

図 6-2-2 に平坦均質地盤および起伏地盤における安定度と傾斜角の関係を示す。平坦地盤と起伏地盤では結果に顕著な差が見られ、平坦均質地盤では平均傾斜角が 0.4 度であるのに対して、起伏地盤では 1.5~2.5 度である。また、エラーバーで示した標準偏差についても同様の傾向を示しており、起伏地盤の標準偏差が非常に大きくなっている。一方、それぞれの地盤条件での結果を比較すると、平坦地盤は安定度の違いによる傾斜角の差は小さい。それに対して、起伏地盤では、安定度の増加とともに生じる傾斜角は小さくなっている。標準偏差については、平坦均質地盤と同様に安定度の違いによる顕著な差は見られない。

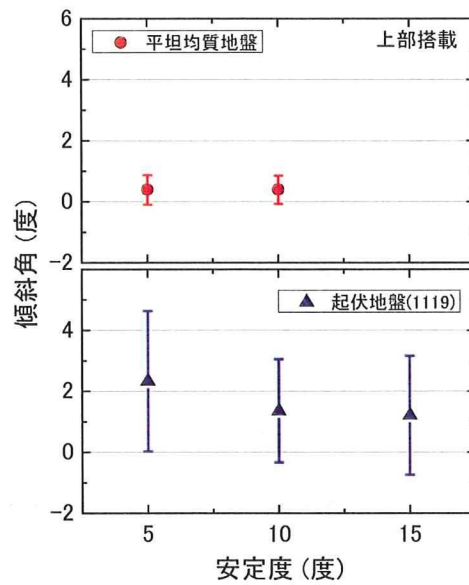


図 6-2-2 平坦均質地盤と起伏地盤における傾斜角と安定度の関係

図 6-2-3 に起伏地盤における付加質量搭載位置の違いが傾斜角と安定度に与える影響を示す。平均傾斜角を比較すると、上部搭載に比べ中央搭載条件の方がやや高い値を示している。標準偏差については顕著な差は見られないものの、中央搭載条件の方がやや大きな値を示している。安定度と傾斜角の関係については、付加質量の搭載条件にかかわらず、安定度の増加に従い、平均傾斜角がやや小さくなっている。

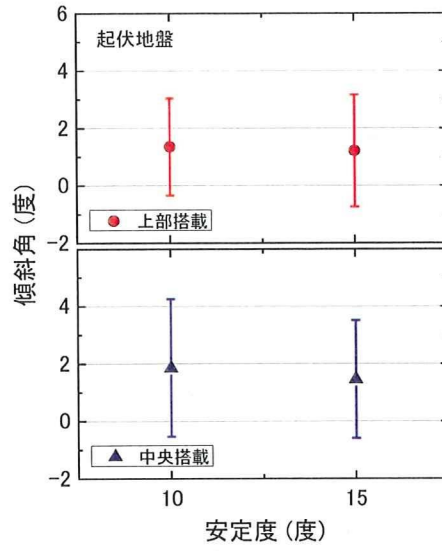


図 6-2-3 起伏地盤における付加質量搭載位置の影響

6.2.2 接地圧の変動に与える影響

図6-2-4に平坦地盤におけるFSの接地圧分布割合と安定度の関係を示す。平均接地圧力分布割合は安定度の増加に伴い減少する傾向を示している。均質地盤と不均質地盤を比較すると、平坦均質地盤の平均接地圧力分布割合は不均質地盤比べ高い値を示している。

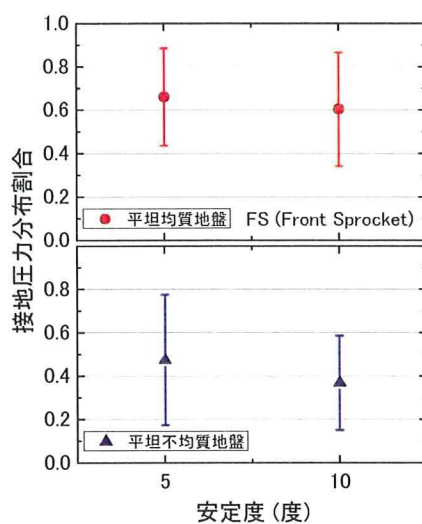


図6-2-4 平坦地盤におけるFSの接地圧力分布割合と安定度の関係

図 6-2-5 に平坦均質地盤と起伏地盤における接地圧分布割合と安定度の関係を示す。安定度の増加とともに接地圧分布割合の平均値はやや低下している。また、平坦地盤と起伏地盤の結果を比較すると、平坦地盤の接地圧分布割合は起伏地盤よりも大きい。しかしながら、エラーバーで示した標準偏差を比較すると、起伏地盤の標準偏差は非常に大きく、自走による揺動の大きさを反映した結果であると言える。

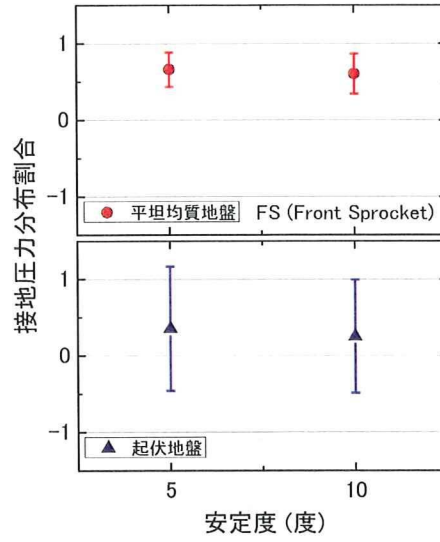


図 6-2-5 地盤条件の違いが FS の接地圧力分布割合と安定度の関係

6.3 支持地盤の破壊に対する危険性の解析

6.3.1 地盤の破壊確率の算出方法

遠心場走行実験から得られた接地圧力分布とハンドベーン試験により得られたせん断強度の変動係数¹⁾を用いて、信頼性工学的的手法²⁾に基づいた地盤の破壊確率と支持力安全率の関係性を調べた。

地盤破壊に関する限界状態関数を G_f と定義すると、 G_f の関係式は式(6-3-1)によって表される。

$$G_f(q_u, q_a) = q_y - q_a \quad (6-3-1)$$

$$\begin{cases} G_f(q_u, q_a) > 0 & \text{安全} \\ G_f(q_u, q_a) < 0 & \text{危険} \end{cases}$$

ここで、 q_a は履帯に作用する最大接地圧である。 q_u は支持地盤の降伏支持力である。 q_a 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_F)は式(6-3-2)により求められる。

$$P_F = P(q_a > q_u) = P(G_f < 0) \quad (6-3-2)$$

$$= F_G(0) = \Phi\left(\frac{0 - \mu_G}{\sigma_G}\right) = \Phi\left(-\frac{\mu_G}{\sigma_G}\right) = 1 - \Phi\left(\frac{\mu_G}{\sigma_G}\right)$$

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。

6.3.2 平坦地盤の地盤破壊確率

図 6-3-1 に平坦均質地盤の支持力安全率 F_s と地盤の破壊確率 P_F の関係を示す。図中には解析に用いた FS（前輪）の接地圧力分布割合から求めた変動係数 C_{vp} と、ハンドペーン試験により求めたせん断強度の変動係数 C_{vg} の値を示している。

安定度 5 度と 10 度の破壊確率 P_F を比較すると、安定度 10 度は 5 度に比べてやや上に位置している。これは、接地圧の変動係数 C_{vp} の差に起因している。

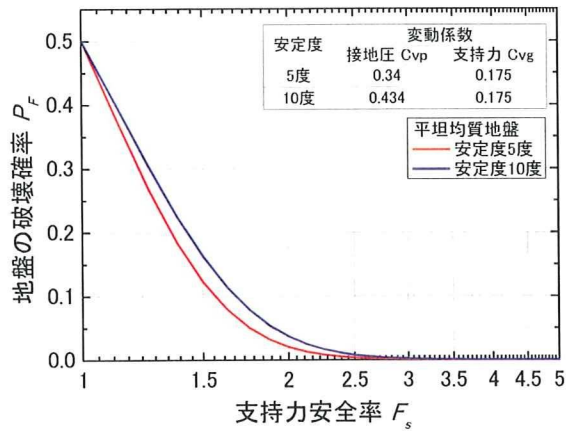


図 6-3-1 平坦均質地盤の支持力安全率と地盤の破壊確率の関係

図 6-3-2 に平坦不均質地盤の支持力安全率と地盤の破壊確率の関係を示す。平坦不均質地盤では、安定度の違いによる差が小さい。

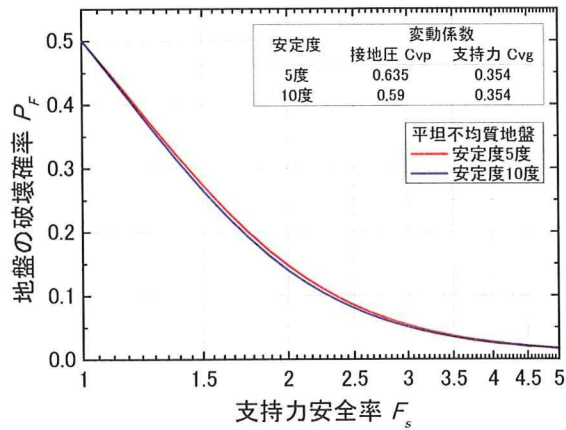


図 6-3-2 平坦不均質地盤の支持力安全率と地盤の破壊確率の関係

図 6-3-3 に安定度 5 度における平坦均質地盤と平坦不均質地盤の比較を示す。両地盤条件の結果を比較すると、均質地盤に比べ、不均質地盤の結果が上に位置しており、破壊の確率が高くなっている。表 6-3-1 に支持力安全率 $F_s=1.5, 2.0, 3.0$ および 4.0 における地盤の破壊確率を示す。こ $F_s=1.5, 2.0, 3.0$ の値は移動式クレーンを設置する際に選択すべき値として CIRIA³⁾が示している。

くい打機の安定設置の検討に用いられる短期の支持力安全率 $F_s=1.5$ の P_F を比較すると、均質地盤は 0.122 であるのに対し、不均質地盤では 0.273 であり、地盤強度のばらつきにより、地盤の破壊確率が倍増している。

松尾は地盤調査から求められた土の非排水せん断強さの変動係数は 0.2 から 0.4 に分布する⁴⁾と述べており、不均質さを模擬した模型地盤の変動係数は実際の条件にも合致している。

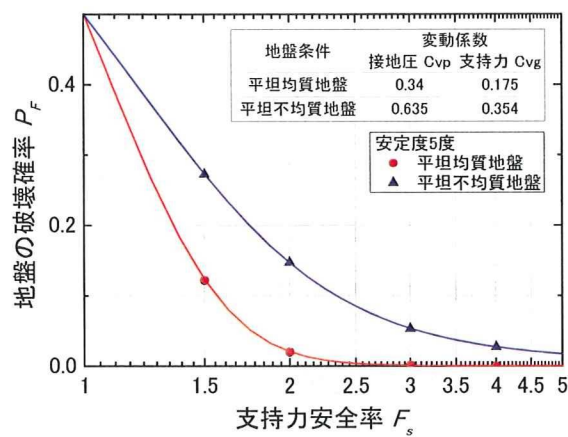


図 6-3-3 平坦均質地盤と平坦不均質地盤の比較（安定度 5 度）

表 6-3-1 地盤条件と地盤の破壊確率（安定度 5 度）

地盤条件	地盤の破壊確率 P_F			
	$F_s=1.5$	$F_s=2.0$	$F_s=3.0$	$F_s=4.0$
平坦均質地盤	0.122	0.020	0.001	0
平坦不均質地盤	0.273	0.147	0.053	0.027

図 6-3-4 に安定度 10 度における平坦均質地盤と平坦不均質地盤の比較を示す。安定度 10 度においても地盤強度のばらつきの影響により、平坦不均質地盤の破壊確率が高くなっている。表 6-3-2 に各支持力安全率での地盤破壊確率を示す。施工現場で慣用的に用いられている支持力安全率 $F_s = 1.5$ の値を比較すると、均質地盤では 0.162 であり、不均質地盤では 0.264 である。以上の結果から、地盤強度のばらつきが大きい場合、接地圧変動もそれに伴って大きくなり、地盤の破壊確率が高くなることがわかった。

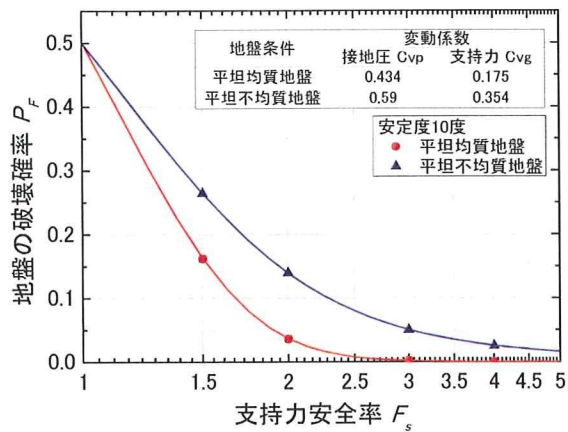


図 6-3-4 平坦均質地盤と平坦不均質地盤の比較 (安定度 10 度)

表 6-3-2 地盤条件と地盤の破壊確率 (安定度 10 度)

地盤条件	地盤の破壊確率			
	$F_s = 1.5$	$F_s = 2.0$	$F_s = 3.0$	$F_s = 4.0$
平坦均質地盤	0.162	0.036	0.002	0
平坦不均質地盤	0.264	0.139	0.050	0.025

6.3.3 起伏地盤の地盤破壊確率

図 6-3-5 に起伏地盤における安定度 5 度および 10 度の地盤破壊確率 P_F と支持力安全率 F_s の関係を示し、表 6-3-3 に支持力安全率と地盤の破壊確率の一覧を示す。安定度の違いにかかわらず地盤の破壊確率が非常に高く、 $F_s=1.5$ の P_F は、安定度 5 度で 0.414 であり、10 度では 0.432 である。また、安定度 5 度に比べ、安定度 10 度の破壊確率が高くなっている。これは接地圧の変動係数の影響である。

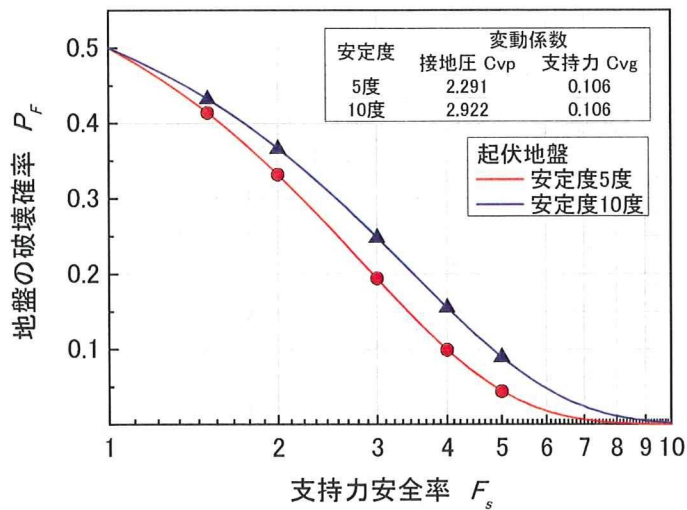


図 6-3-5 起伏地盤の支持力安全率と地盤の破壊確率の関係

表 6-3-3 起伏地盤の支持力安全率と地盤の破壊確率一覧

安定度	地盤の破壊確率				
	$F_s=1.5$	$F_s=2.0$	$F_s=3.0$	$F_s=4.0$	$F_s=5.0$
5 度	0.414	0.332	0.194	0.099	0.044
10 度	0.432	0.366	0.248	0.155	0.089

6.3.4 平坦地盤と起伏地盤の破壊確率の比較

図 6-3-6 および表 6-3-4 に安定度 5 度における平坦不均質地盤と起伏地盤の支持力安全率と地盤の破壊確率の関係を示す。平坦地盤に比べ起伏地盤の結果は上に位置しており、起伏地盤の破壊確率が大きいことが分かる。

平坦地盤のせん断強度の変動係数 C_{vg} は、起伏地盤に比べ 3.3 倍大きな値であるため、平坦地盤は強度のばらつきが大きい地盤である。しかし、起伏地盤の破壊確率は平坦地盤よりも高いため、せん断強度のばらつきよりも、地表面の起伏の方が地盤の破壊確率に与える影響が大きいことが分かった。

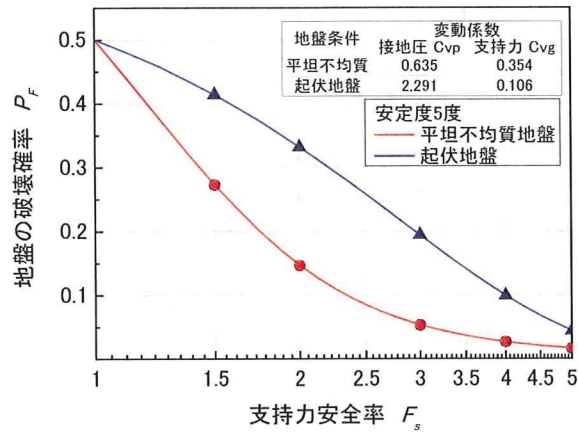


図 6-3-6 平坦不均質地盤と起伏地盤の比較 (安定度 5 度)

表 6-3-4 地盤条件と地盤の破壊確率 (安定度 5 度)

地盤条件	地盤の破壊確率				
	$F_s = 1.5$	$F_s = 2.0$	$F_s = 3.0$	$F_s = 4.0$	$F_s = 5.0$
平坦不均質地盤	0.273	0.147	0.053	0.027	0.017
起伏地盤	0.414	0.332	0.194	0.099	0.044

図 6-3-7 および表 6-3-5 に安定度 10 度における平坦不均質地盤と起伏地盤の支持力安全率と地盤の破壊確率の関係を示す。安定度 10 度においても前述した 5 度の結果とほぼ同様の傾向を示しており、起伏地盤の破壊確率が高くなっている。

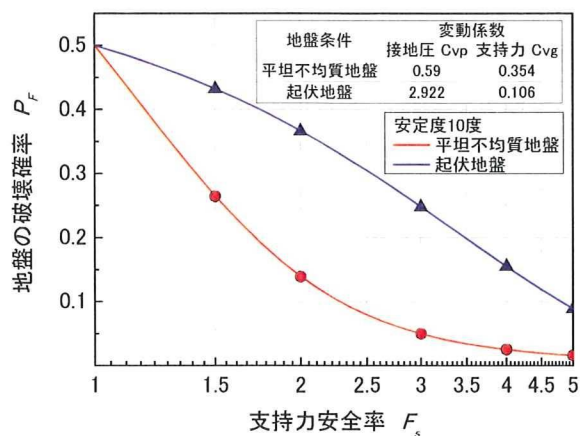


図 6-3-7 平坦不均質地盤と起伏地盤の比較（安定度 10 度）

表 6-3-5 地盤条件と地盤の破壊確率（安定度 10 度）

地盤条件	地盤の破壊確率				
	$F_s = 1.5$	$F_s = 2.0$	$F_s = 3.0$	$F_s = 4.0$	$F_s = 5.0$
平坦不均質地盤	0.264	0.139	0.050	0.025	0.016
起伏地盤	0.432	0.366	0.248	0.155	0.089

6.4 転倒に対する危険性の解析

6.4.1 設置地盤の平坦性に関する指標化の検討

3種類の模型地盤を関東ロームで作製した。その一つは、「平坦で均質な模型地盤(FU)」, もう一つは「平坦で不均質な模型地盤(FN)」, そして「起伏を有する模型地盤(UD)」である。4.1節に述べた解析手法により模型地盤の起伏条件を指標化した。

地表起伏の指標化に関する解析方法の詳細は4.1節に譲り、本項では概要のみを述べる。地表スキャナーで計測した地表の起伏を各波長成分(L_n)に分解して振幅成分(a_n)を求める。そして、式(6-4-1)によって各波長成分(L_n)毎に最大傾斜角(θ_{bn})を計算する。ここで、機体の前輪から重心までの水平距離(G_x)とし、 G_x と波長の関係から解析対象とする L_n を決定した。 G_x と L_n の関係は式(6-4-2)のとおりである。

$$\theta_{bn} = 2\pi \frac{a_n}{L_n} \quad (6-4-1)$$

$$G_x < \frac{L_n}{2} \quad (6-4-2)$$

式(6-4-2)の条件に当てはまる θ_{bn} について頻度解析を行い、その起伏平均(θ_{bv})、標準偏差(σ_b)、および変動係数を求める。この3つのパラメータを「地表の起伏に関する統計値」とよぶ。そして、 θ_{bv} に対する機体の安定度(θ_a)の比を傾斜安全率(F_t)と定義する。

$$F_t = \frac{\theta_a}{\theta_{bv}} \quad (6-4-3)$$

F_t は地盤の平坦さを表す第一の指標であり、この値が大きいほどくい打機は地表の傾斜に対して安定であることになる。関東ロームによる模型地盤は表6-4-1に示すとおり全9ケースであり、その内訳はFUが1ケース、FNが2ケース、UDが6ケースである。

全ケースの模型地盤を解析して求めた θ_{bv} 、 σ_b 、および変動係数を示す。平坦な地盤では共通して θ_{bv} が起伏地盤よりも小さく、その値は0.3から0.4である。一方、起伏地盤(UD)の θ_{bv} はケースによって差があり、0.775から1.549に分布している。UDの θ_{bv} がの値にバラツキが多い理由は、作製の試行錯誤の過程において、凹凸の規模に変動が生じたためである。最終実験のGL_100114は起伏の間隔とその凹凸の大きさが適度の配置されており、最も良好に起伏地盤を模擬できている。

標準偏差(σ_b)の値は、平坦地盤では0.2から0.3に分布しており、ほぼ平坦に作製でき手いたことがわかる。変動係数は0.7前後に分布している。UD地盤では σ_b が0.634から2.22までの広範囲に分布しており、変動係数も平坦地盤に比べて大きい。

表6-4-2と表6-4-3は全走行実験における地盤の傾斜安全率と支持力安全率を示す。

表 6-4-1 関東ロームで作製した模型地盤の起伏とせん断強さに関する統計量

地表 スキャン データ	ローム 地盤 種類 ¹⁾	地表の起伏に関する統計値			土のせん断強さに関する統計値		
		起伏平均 θ_{bv} (度)	標準偏差 σ_b (度)	変動係数 (θ_{bv}/σ_b)	ベーン 抵抗平均 τ_r	標準偏差 σ_r	変動係数 (τ_r/σ_r)
GL_091113	FN	0.404	0.299	0.740	94.280	19.561	0.207
GL_091117	FU	0.304	0.192	0.632	73.151	12.821	0.175
GL_091119	FN	0.304	0.227	0.747	73.605	26.043	0.354
GL_091217	UD	0.775	0.634	0.818	70.331	5.125	0.073
GL_091222	UD	1.937	2.22	1.146	64.935	6.916	0.107
GL_100105	UD	2.033	1.654	0.814	74.242	9.287	0.125
GL_100107	UD	1.340	1.319	0.984	74.424	6.228	0.084
GL_100113	UD	1.346	1.294	0.961	81.669	8.342	0.102
GL_100114	UD	1.549	1.485	0.959	83.640	8.883	0.106

1) FU は平平均質な地盤, FN 平坦不均質な地盤, UD は起伏地盤である

表 6-4-2 平坦地盤の走行実験における傾斜安全率と支持力安全率

実験コード 2009Mobile_	ローム 地盤 種類	機体の 安定度 (θ_a)	揺動 (傾斜) 平均 (θ_r)	標準 偏差 (σ_r)	変動 係数 (θ_r / σ_r)	起伏 平均 θ_{bv} (度)	傾斜 安全率 ($F_r = \theta_a / \theta_{bv}$)	支持力 安全率 F_s
1113D03	FN GL_091113	10	0.887	0.296	0.334	0.404	24.8	3.8
1113D05	FN (ditto)	5	1.012	0.415	0.410	↓	12.4	3.8
1117D01	FU GL_091117	5	0.399	0.482	1.209	0.304	16.4	3.8
1117D02	FU (ditto)	10	0.395	0.465	1.179	↓	32.9	3.8
1119D01	FN GL_091119	10	0.925	0.315	0.340	0.304	32.9	3.8
1119D02	FN (ditto)	5	1.007	0.343	0.340	↓	16.4	3.8

表 6-4-3 起伏地盤の走行実験における傾斜安全率と支持力安全率

実験コード	ローム 地盤 種類 ¹⁾	機体の 安定度 (θ_a)	揺動 (傾斜) 平均 (θ_r)	標準 偏差 (σ_r)	変動 係数 (θ_r / σ_r)	起伏平 均 θ_{bv} (度)	傾斜安全 率 ($F_r = \theta_a / \theta_{bv}$)	支持力 安全率 F_s
2009Mobile_ 1218D01	UD GL_091217	10	1.375	1.752	1.274	0.775	12.9	3.8
1218D02	UD (ditto)	10	1.336	1.973	1.476	↓	12.9	3.8
1218D03	UD (ditto)	5				↓	6.5	3.8
1224D01	UD GL_091222	10	0.624	1.513	2.426	1.937	5.2	3.8
1224D02	UD (ditto)	10	2.068	1.271	0.615	↓	5.2	3.8
1224D03	UD (ditto)	5	1.107	0.828	1.652	↓	2.6	3.8
1224D04	UD	10	0.382	3.834	10.036	Flat	Div	NC
1224D05	UD	10	-0.620	2.504	-4.038	Flat	Div	NC
2010Mobile_ 0105D01	UD GL_100105	10	1.193	4.549	3.814	2.033	4.9	3.8
0105D02	UD (ditto)	10	2.272	5.582	2.456	↓	4.9	3.8
0105D03	UD (ditto)	10				↓	4.9	3.8