

$$\begin{aligned}
 r_m &= \frac{F_m}{F_p} \\
 &= \frac{m_m L_m g_m}{m_p L_p g_p} \\
 &= \frac{\rho_m L_m^4 g_m}{\rho_p L_p^4 g_p} \\
 &= \frac{1}{n^4} \times \frac{g_m}{g_p}
 \end{aligned} \tag{3-5-13}$$

ここで、式(3-5-10), (3-5-11), (3-5-12), (3-5-13)に示すモーメントの比が全て等しくなるためには式(3-5-14)の関係が成り立たなければならない。

$$r_i = r_c = r_e = r_m \tag{3-5-14}$$

式(3-5-10), (3-5-11), (3-5-12), (3-5-13)を式(3-5-14)に代入すると、次の条件式が導かれる。

$$\frac{T_m}{T_p} = \frac{1}{n} \tag{3-5-15}$$

$$\frac{c_m}{c_p} = n \tag{3-5-16}$$

$$\frac{g_m}{g_p} = n \tag{3-5-17}$$

模型に n 倍の重力と地盤に n 倍のダンピング係数を与えると、現象は $1/n$ の時間で再現される。長さの次元も $1/n$ となる。従って、速度(v)は式(3-5-18)の成立が必要条件となる。すなわち、模型の走行速度(v)は実物のそれと等しく与える必要がある。

$$\frac{v_m}{v_p} = 1 \tag{3-5-18}$$

なお、本実験では土の粘性を n 倍とする人工的な調整は施していない。しかし、くい打機から模型地盤に働く接地圧力を降伏支持力以下のレベルで与えるようにすることで、ダンピング力が運動に与える影響は減少させた。

履帯から地盤に働く接地圧力(q_a)に対すると極限支持力(q_u)の比を支持力安全率(F_s)と呼ぶ。遠心場走行実験では模型地盤の q_u の値を材料の種類を変えることによって、すなわちウレタンの種類とロームの締め固め圧力を変えることにより調整した。また q_a の値は遠心加速度の値を変えることにより調整した。なお、くい打機の安定特性は規模が異なっても基本的に同一と見なされるため、異なる遠心加速度を与えた実験の結果は比較可能なものと考えた。

3.5.5 実験コードと設定条件

本項では遠心場走行実験の実験コードとその実施における設定条件を以下の表に示す。なお、表中に示す羽化質量の搭載位置については、高さ 835mm を「上」、高さ 515mm の場合を「中」と表示している。また、走行速度はモーターの設定回転数により表示を区別している。25000rpm の場合を「普通」とし、15000rpm の場合を「低速」としている。次章に詳しく述べるが 25000rpm は走行速度が約 35cm/sec となり、15000rpm は約 20cm/sec に相当する。

F_s は支持力安全率の目安である。後述する不確実性を考慮した危険性の解析では、各実験毎に計測した載荷圧力(q_a)と極限支持力(q_u)の関係から求めた F_s を用いた。

表 3-5-2 はウレタン地盤における実験コードと設定条件を示す。総実験数は 21 ケースである。失敗実験は除外しており、解析対象とするデータの一覧である。なお、ウレタン種類の項目の中で、文字を赤の太字で示したケースは敷鉄板が敷設された実験を示す。

表 3-5-3 はローム地盤の種類を示す。先にも述べた通り、平坦かつ均質な地盤(FU)、平坦不均質な地盤(FN)、起伏を有する均質な地盤(UD)の 3 種類を作製し、走行実験に用いた。

表 3-5-2 ウレタン地盤における実験コードと設定条件

実験コード	ウレタン種類	安定度	付加質量	搭載位置	遠心加速度	F_s	走行速度	コメント
2009Mobile_1104D01	UF-1	15	150	上	10	1.5	普通	
1104D03	UF-1	10	440	上	10	1.5	普通	
1104D04	UF-1	10	440	上	10	1.5	低速	
1104D05	UF-1	5	980	上	7	1.5	普通	
1105D01	UF-1	5	980	中	6	1.5	普通	
1105D02	UF-1	10	440	中	7	1.5	普通	
1105D03	UF-1	10	440	中	7	1.5	低速	
1105D04	UF-1	15	150	中	10	1.5	普通	
1105D05	UF-2	15	150	中	9	0.8	普通	少し右カーブ
1105D06	UF-2	10	440	中	8	0.8	普通	
1105D07	UF-2	10	440	中	8	0.8	低速	
1105D09	UF-2	5	980	中	5	0.8	普通	
1105D11	UF-2	15	150	上	10	0.8	普通	
1106D01	UF-2	10	440	上	8	0.8	普通	
1106D02	UF-2	10	440	上	8	0.8	低速	
1106D03	UF-2	5	980	上	6	0.8	普通	
1106D04	UF-3	20	0		10		普通	現場実験の再現条件
1106D05	UF-3	20	0		10		低速	
1106D06	UF-2	5	980	上	15	NC	普通	敷鉄板 1 枚敷き(1.6mm 厚)
1106D07	UF-2	5	980	上	15	NC	普通	敷鉄板 2 枚敷き_重複(1.6mm 厚)
1106D08	UF-2	5	980	上	15	NC	普通	敷鉄板 1 枚敷き_交互(1.6mm 厚)

表 3-5-3 ローム地盤における異なる作製条件と地盤記号

地盤記号	状態	締め固め方法	締め固め圧力	締め固め養生時間
FU	平坦かつ均質な地盤(Flat Uniform)	1g 場における荷重載荷	150 (kPa)	12 時間
FN	平坦不均質な地盤(Flat Non-uniform)			
UD	起伏を有するが均質な地盤 (Up and Down)	サーチャージを利用した遠心力載荷による締め固め		1 時間

表 3-5-4 平坦な関東ローム地盤における実験コードと設定条件

実験コード	ローム地盤種類	安定度	付加質量	搭載位置	遠心加速度	F_s	走行速度	コメント
2009Mobile_1113D03	FN GL_091113	10	440	上	6	3.0	普通	シャベル投入の際に生じた程度の凹凸を平板で締め固め、アクリル窓側が低い
1113D05	FN (ditto)	5	980	上	5.5	3.0	普通	ワイヤー変位計が不良
1117D01	FU GL_091117	5	980	上	5.5	3.0	普通	
1117D02	FU (ditto)	10	440	上	6	3.0	普通	
1119D01	FN GL_091119	10	440	上	6	3.0	普通	人工的に凹凸を設けて資料を投入。5cm の凹凸、次に 10cm の凹
1119D02	FN (ditto)	5	980	上	5.5	3.0	普通	

表 3-5-4 は平坦な関東ローム地盤(FU と FN)における実験コードと設定条件を示す。総実験数は 6 ケースである。なお、実験コード 1113D03 と D05 では締め固め後の模型地盤に横断方向への傾斜が見られた。そのため、低地部分に盛土して再度締め固めた。なお、このケースでは予想に反してできあがった模型地盤の密度の差は小さかった。後述するベーン抵抗の値は変動が小さく現れた。そのため、1119D01 と 119D02 において FN 地盤を作製して再実験を行ったものである。

表 3-5-5 は起伏を有する関東ローム地盤(UD)における実験コードと設定条件を示す。地盤種類の項目の中で、文字を赤の太字で示したケースは敷鉄板が敷設された実験を示す。総実験数は 35 ケースである。

表 3-5-5 起伏を有する関東ローム地盤における実験コードと設定条件

実験コード	ローム地盤種類	安定度	付加質量	搭載位置	遠心加速度	F_s	走行速度	コメント
2009Mobile_1218D01	UD GL_091217	10	440	上	6	3	低速	
1218D02	UD (ditto)	10	440	上	6	3	普通	

基礎工事用大型建設機械の転倒防止に関する研究

1218D03	UD(ditto)	5	980	上	5.5	3	普通	転倒した
1224D01	UD GL_091222	10	440	上	6	3	普通	
1224D02	UD(ditto)	10	440	上	6	3	低速	
1224D03	UD(ditto)	5	980	上	5.5	3	普通	
1224D04	UD	10	440	上	6	NC	普通	敷鉄板 1 枚敷き(1.6mm 厚)
1224D05	UD	10	440	上	6	NC	普通	敷鉄板 2 枚敷き_交互 (1.6mm 厚)
2010Mobile_ 0105D01	UD GL_100105	10	440	上	6	3	普通	
0105D02	UD (ditto)	10	440	上	6	3	低速	
0105D03	UD (ditto)	10	440	上	6	3	普通	左側の壁に衝突
0105D04	UD	10	440	上	6	NC	普通	敷鉄板 1 枚敷き(1.6mm 厚)
0105D05	UD	10	440	上	6	NC	普通	敷鉄板 2 枚敷き_交互 (1.6mm 厚)
0105D06	UD	10	440	上	25	NC	普通	敷鉄板 2 枚敷き_交互 (1.6mm 厚)
0107D01	UD GL_100107	10	440	上	6	3	普通	
0107D02	UD (ditto)	10	440	上	6	3	低速	
0107D04	UD (ditto)	5	980	上	6	3	普通	
0107D05	UD	10	440	上	6	NC	普通	敷鉄板 1 枚敷き(1.6mm 厚)
0107D08	UD	10	440	上	6	NC	普通	敷鉄板 2 枚敷き_交互 (1.6mm 厚)
0113D02	UD GL_100112	10	440	上	6	3	普通	
0113D03	UD (ditto)	10	440	上	6	3	低速	
0113D05	UD	10	440	上	6	NC	普通	敷鉄板 1 枚敷き(1.6mm 厚)
0113D06	UD	10	440	上	6	NC	普通	敷鉄板 1 枚敷き(1.0mm 厚)
0113D11	UD	10	440	上	6	NC	普通	敷鉄板 2 枚敷き_交互 (1.0mm 厚)
0113D12	UD	10	440	上	25	NC	普通	敷鉄板 1 枚敷き(1.0mm 厚)
0115D01	UD GL_100114	10	440	上	6	3	普通	
0115D03	UD (ditto)	10	440	上	6	3	低速	
0115D04	UD (ditto)	5	980	上	6	3	普通	
0115D05	UD (ditto)	15	150	上	6	3	普通	
0115D06	UD (ditto)	15	150	中	6	3	普通	
0115D07	UD (ditto)	10	440	中	6	3	普通	

第3章 くい打機のモデル化と実験装置の開発

0115D10	UD	10	440	上	6	NC	普通	敷鉄板 1 枚敷き(1.6mm 厚)
0115D11	UD	10	440	上	6	NC	普通	敷鉄板 1 枚敷き(1.0mm 厚)
0115D12	UD	10	440	上	6	NC	普通	敷鉄板 2 枚敷き_交互 (1.0mm 厚)
0118D01	UD	10	440	上	25	NC	普通	敷鉄板 1 枚敷き(1.0mm 厚)

3.6 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)日本材料学会：ソイルミキシングウォール(SMW)設計施工指針(改訂版), 2002.
- 3) 南茂夫：科学計測のための波形データ処理, 1986.

第4章 遠心場走行実験

4.1 収録データの基本的な解析方法

4.1.1 自走中の揺動と車軸荷重の計測処理

(1) 解析対象データ

図4-1-1に実験結果の一例を示す。経過時間 $t_m=1.4$ 秒の地点で変位が増加している。これは模型が走行を開始したためである。走行距離が約 150mm の地点で、履帯（シュー長 140mm）全体が走行区間上に位置するとともに、速度は所定の速度に達している。その後、模型は定常走行に移り、 $t_m=3.4$ sec の時に容器端へ達している。計測した応答加速度には走行中の機体の揺れによる振動が現れている。また、車軸荷重は前輪が大きな値を示している。本研究では、走行速度が一定である、走行距離 150mm 以降のデータを解析対象区間とした。

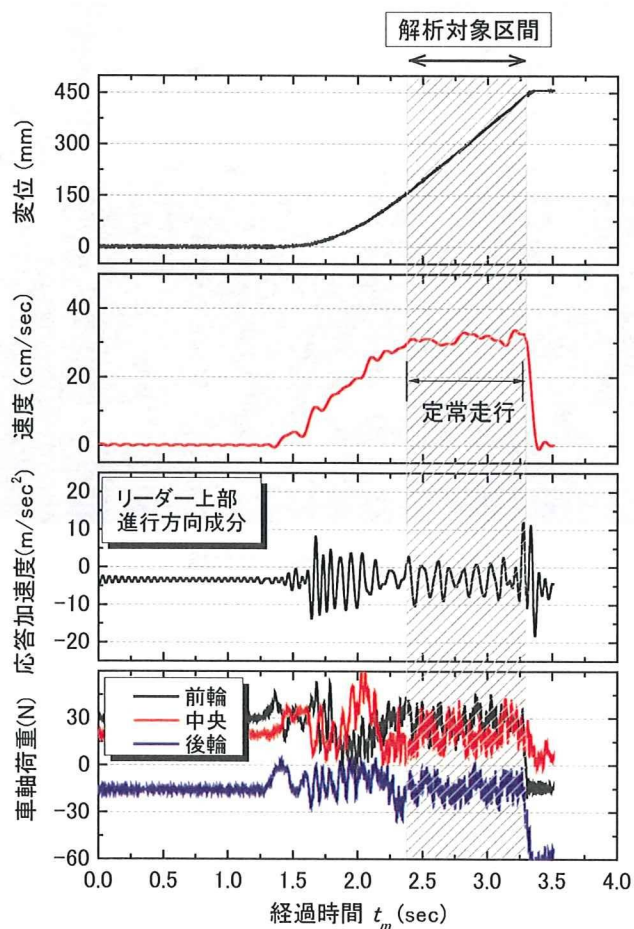


図 4-1-1 実験結果の例

(2) 応答加速度のデータ整理

応答加速度は解析対象区間の計測値を実大スケールに換算した後、電氣的なノイズを除去するため、ローパスフィルターを施した。

自走時の揺動解析は、高速フーリエ変換による周波数解析を行い、周波数成分を調べた。

(3) 車軸荷重のデータ整理

車軸に作用する荷重については、計測値に校正係数をかけて車軸荷重を算出した。さらに、各車軸の車軸荷重を有効面積で除して、接地圧力を求めた。ここで、有効面積とは、有効幅と履帯幅の積である。各車軸の有効幅を写真 4-1-1 に示す。履帯模型の長さは 140mm であり、各車軸の間隔は 35mm である。FR および CR, RR については有効幅を 35mm とし、FS と RS については 17.5mm とした。また、本研究では、全接地圧に対する各車軸の接地圧の比を、接地圧分布割合 R と定義した。

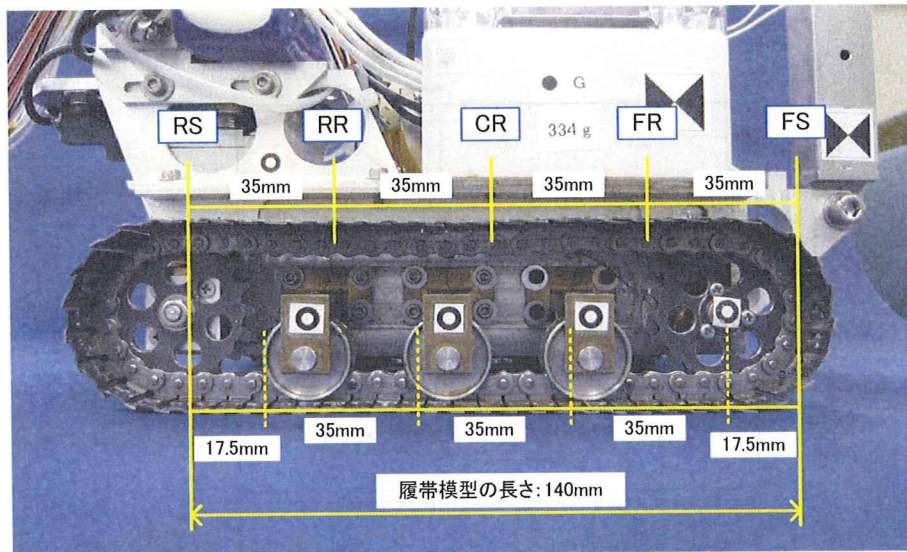


写真 4-1-1 各車軸の有効幅

(4) 高速度ビデオカメラのデータ整理

走行挙動の計測は、高速度ビデオカメラで記録した動画を用いて解析を行った。くい打機模型のリーダーと本体の10箇所には、解析用のマーカを設置した。写真4-1-2に、解析に用いたマーカを示す。なお、解析結果には、レンズの光学歪補正を施した。

挙動解析では、リーダー部分に設置した2個のマーカを結んだ線の傾斜と前輪(FS)の車軸の沈下量について解析を行った。

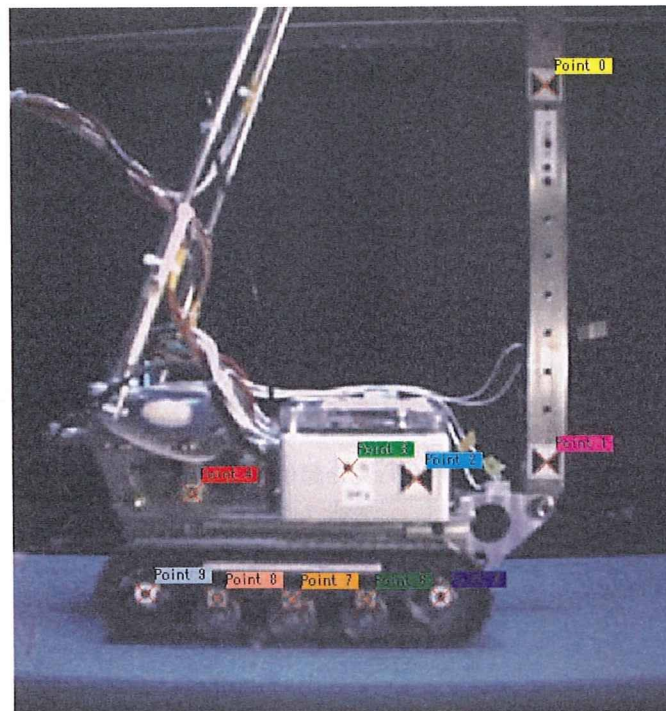
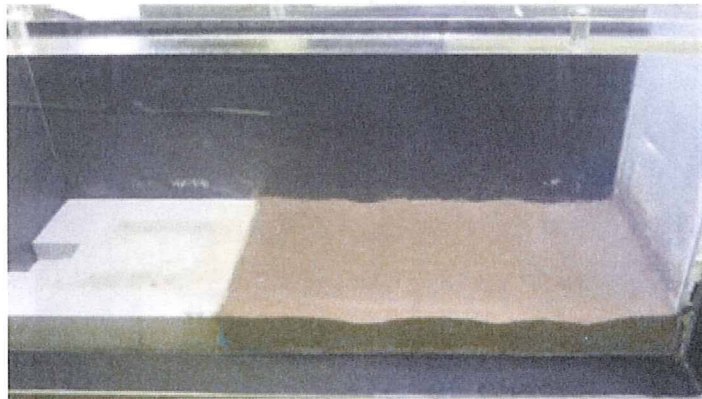


写真 4-1-2 各車軸の有効幅

4.1.2 関東ロームの模型地盤における起伏の指標化

本研究では写真 4-1-3 に示すような起伏を有する模型地盤を関東ロームで人工的に作製し、くい打機の模型を走行させ、そして機体の揺動を調べた。この起伏を有する模型地盤(UNシリーズ)の作製に関する詳細は第3章に譲るが、地盤の起伏が揺動に与える影響を検討した。この検討では、地盤に存在する起伏を独自の方法で指標化することとした。本項ではこの指標化の方法を述べる。



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 4-1-3 遠心場における締め固め後の地盤の様子

(1) 地表面スキャンによる起伏計測

本研究では地表面スキャナー装置を用いて模型地盤の起伏を計測した。この計測には写真 4-1-4 に示す地表面スキャナーを用い、起伏は写真 4-1-5 に示すようにレーザー変位計で計測した。なお、計測装置とセンサーの詳細は第3章に譲る。

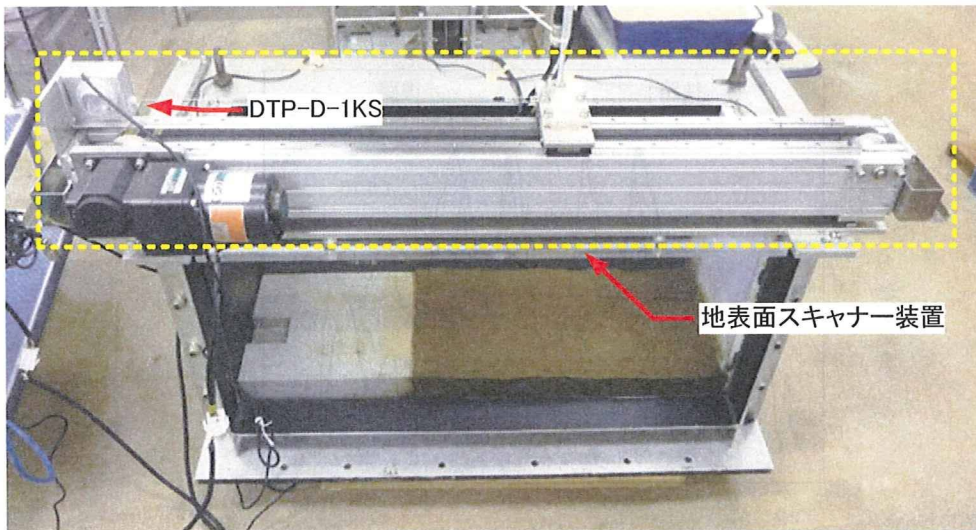


写真 4-1-4 地表面スキャナーを走行ボックスに搭載した様子

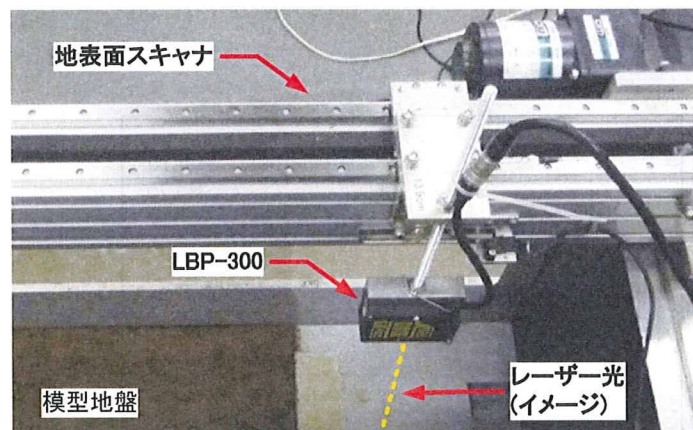


写真 4-1-5 地表面スキャナーに取り付けられたレーザー変位計(LB-300)

図 4-1-2 は計測された地表起伏(Δh)と走行地盤の走査距離(D_i)の関係を示す。 Δh は待機地盤の高さを基準とした値であり、沈下を正の値とする。スキャンは走行地盤を往復するよう
に実施しており、復路の走査距離は累積値である。図中に示した2つの曲線 L5.75 と R5.75
は左右の履帯が走行する位置の起伏を示す。

図 4-1-3 は先の図 4-1-2 に示した D_i と Δh の関係を FFT 解析²⁾した結果である。その解析
手法を述べる。FFT 解析では、はじめに式(4-1-1)に示すような波数($1/L$)と振幅(a_p)の関係で
整理される。ここで、波数は波長(L)の逆数である。従って、FFT 解析では D_i に対する Δh
の関係が周期的な様々の波に分解され、 L と a_p の関係で示される。

$$\Delta h = a_{p1} \sin \frac{2\pi}{L_1} D_i + a_{p2} \sin \frac{2\pi}{L_2} D_i + \dots + a_{pn} \sin \frac{2\pi}{L_n} D_i \quad (4-1-1)$$

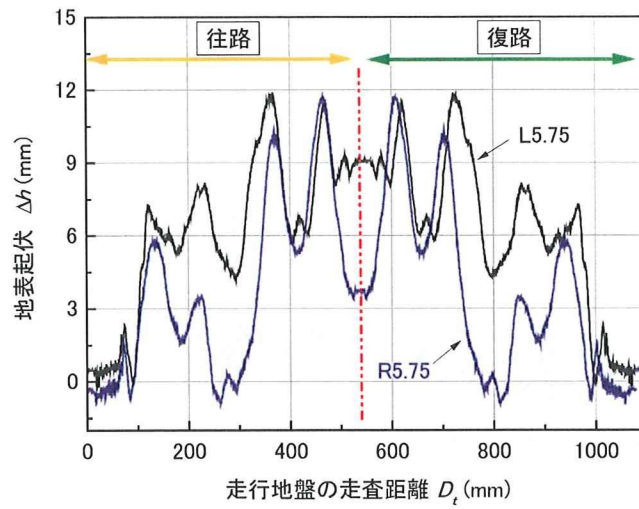


図 4-1-2 走行地盤の走査距離と起伏の関係(実験 GL_100107)

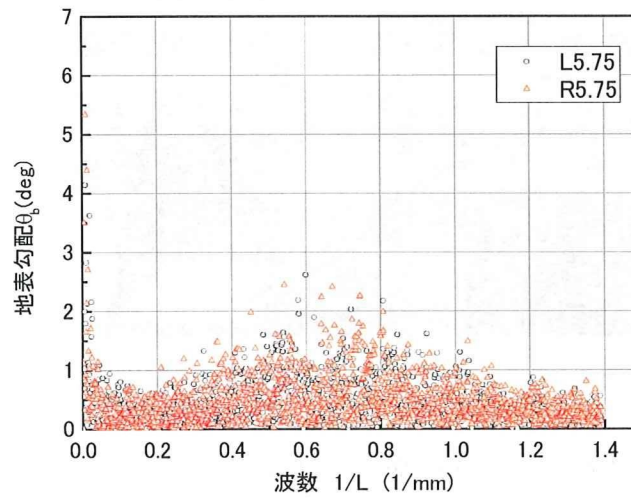


図 4-1-3 走査距離と起伏の関係から算出した地表勾配と波数の分布(実験 GL_100107)

次に、式(4-1-1)を距離 D_t に対して微分すると、式(4-1-2)のような傾きの関係が得られる。

$$\frac{d(\Delta h)}{d(D_t)} = 2\pi \frac{a_{p1}}{L_1} \cos \frac{2\pi}{L_1} D_t + 2\pi \frac{a_{p2}}{L_2} \cos \frac{2\pi}{L_2} D_t + \dots + 2\pi \frac{a_{pm}}{L_n} \cos \frac{2\pi}{L_n} D_t \quad (4-1-2)$$

ここで、各波長の波について傾きが最大となるのは D_t がゼロの時である。従って、 D_m が L_n に等しいときである。 n 次の波に対する最大傾斜角を地表勾配(θ_{bn})とする。 θ_{bn} は式(4-1-3)により求められる。図 4-1-3 はこの θ_{bn} と波数($1/L_n$)の関係をプロットしたものである。

$$\theta_{bn} = 2\pi \frac{a_{pn}}{L_n} \quad (4-1-3)$$

ここで、解析対象とする有効な波長 L の範囲は図 4-1-4 に示すように機体の重心位置 G_x との関係から式(4-1-4)の通り決定した。

$$G_x < \frac{L_n}{2} \quad (4-1-4)$$

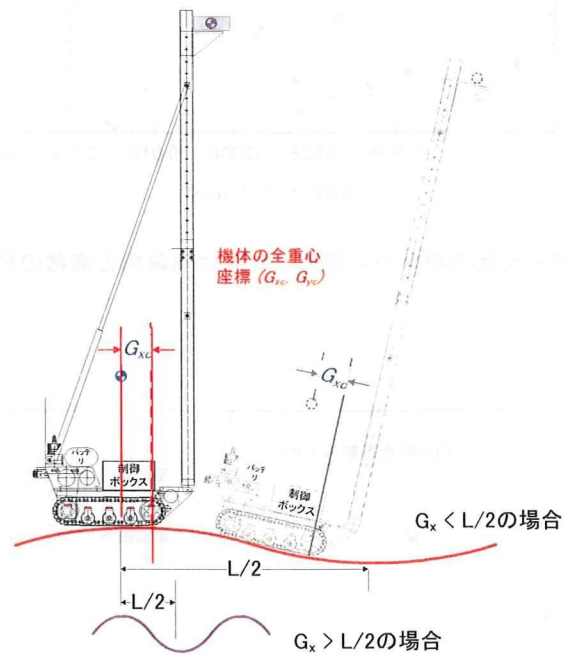


図 4-1-4 地表勾配を考慮する地盤の起伏波長 (L) と水平重心 (G_x) の関係

付加質量の搭載位置が上(835mm)で安定度が 10 度の場合、 G_x が約 40mm である。従って、地表傾斜を考慮する波数($1/L$)は約 0.0122 以下となる。

$$\frac{1}{L} < \frac{1}{2G_x} = \frac{1}{82} = 0.0122 \quad (4-1-5)$$

図 4-1-3 から $1/L$ が 0.0012 以下にある L5.75 と R5.75 の値について範囲を拡大して図 4-1-5 に示す。 θ_{bn} の値は 1 度付近に多く分布が見られるが、その最大値は約 5.3 である。 θ_b の値を統計処理してその頻度分布を図 4-1-6 に示す。 θ_b は 0 から 1 度の間に最も多く分布が見られる。この模型地盤の指標として、地表傾斜の平均値は 1.34 度であり、標準分布は 1.319 とわかる。変動係数は 0.984 となる。 θ_b の平均値を θ_{bv} とし、 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。

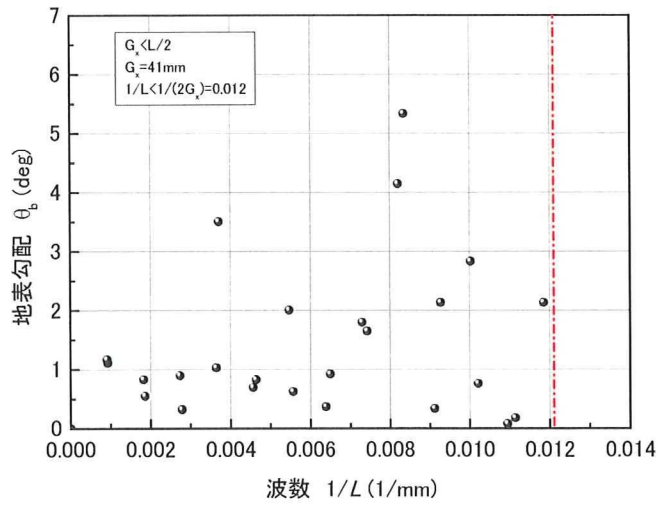


図 4-1-5 走査距離と起伏の関係から算出した最大傾斜角と波数の分布(実験 GL_100107)

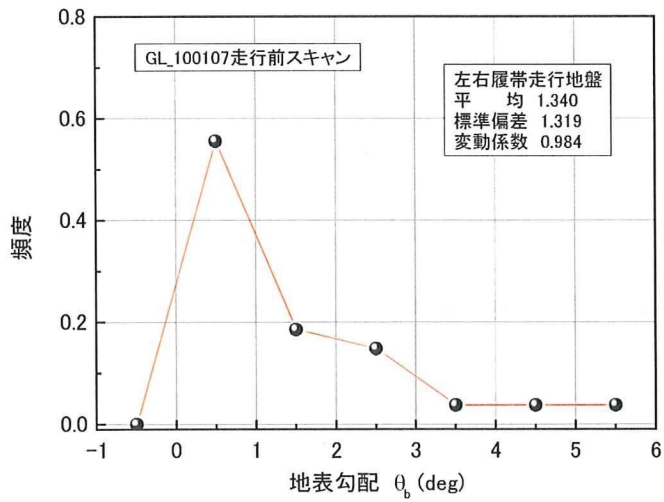


図 4-1-6 地表勾配(θ_b)の頻度分布(実験 GL_100107)

$$F_t = \frac{\theta_a}{\theta_{bv}} \tag{4-1-6}$$

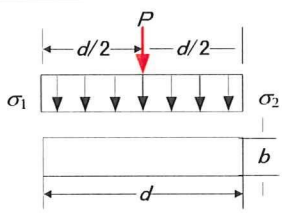
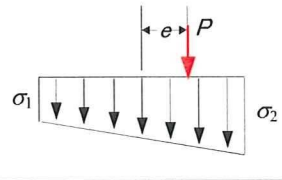
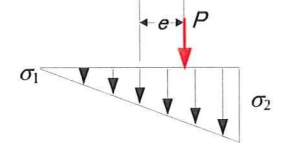
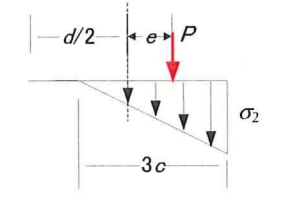
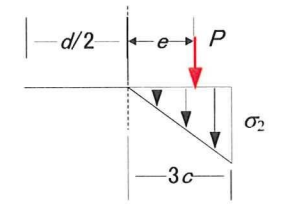
4.2 履帯に作用する理論接地圧

4.2.1 JISによる理論接地圧

日本工業規格の JIS A 8509-1 において、くい打機の安定性及び接地圧の計算方法が規定されている。くい打機の履帯面上に生ずる載荷圧力分布の種類とその最大値(σ_2)の計算方法は、表 4-2-1 のように示されている。機体重心の水平偏心量(e)と履帯諸元の相対的な関係に基づいて載荷圧力分布は5つに分類されている。

σ_2 の値は、 e の増加に伴って大きくなる。なお、設置条件については、構造規格と同様に水平で堅固な地盤が仮定されており、沈下により生ずる機械傾斜と、これに伴って増加する転倒モーメントによる σ_2 のさらなる増加の発生については考慮が明確でない。

表 4-2-1 載荷圧力の分類と最大圧力の関係式

集中荷重による 載荷圧力分布	集中荷重 P の 作用位置	載荷圧力の最大値(σ_2)と最小値(e)
	$e=0$ 中間に P	$\sigma_1 = \sigma_2 = P/bd$
	$e < d/6$	$\sigma_1 = \frac{P(1-6e/d)}{bd}$ $\sigma_2 = \frac{P(1+6e/d)}{bd}$
	$e = d/6$	$\sigma_1 = 0$ $\sigma_2 = 2P/bd$
	$e > d/6$ $c = d/2 - e$	$\sigma_2 = 2P/3bc$
	$e = d/3$	$\sigma_2 = 4P/bd$

4.2.2 接地圧分布割合の理論値の算出方法

各車軸に作用する接地圧力の理論値の算出方法を示す。本実験条件の履帯接地圧力は図4-2-1に示す三角形分布となり、最大接地圧 (σ_2) の算出式は式(4-2-1)の通り定義されている。

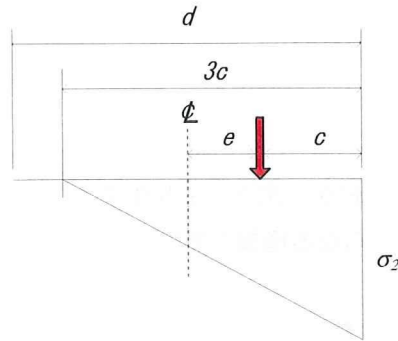


図4-2-1 履帯に作用する接地圧分布

$$\sigma_2 = \frac{2P}{3cb} \quad (4-2-1)$$

$$c = d/2 - e \quad (4-2-2)$$

ここで、 P はくい打機の総重量、 b は履帯の幅、 d は履帯長さである。
式(4-2-2)を式(4-2-1)に代入して式(4-2-3)を得る。

$$\begin{aligned} \sigma_2 &= \frac{2P}{3(d/2 - e)} \\ &= \frac{2P}{3bd \left(\frac{1}{2} - \frac{e}{d} \right)} \end{aligned} \quad (4-2-3)$$

式(4-1-3)の両辺を P/bd で除して無次元化する。

$$\sigma_2^* = \frac{2}{3 \left(\frac{1}{2} - \frac{e}{d} \right)} \quad (4-2-4)$$

図4-2-2の斜線部で示した全接地圧を次式により算出し、各車軸の面積との比が接地圧力分布割合の理論値となる。

$$A = \frac{2}{3(d/2 - e)} \times \frac{3c}{2} \quad (4-2-5)$$

第4章 遠心場走行実験

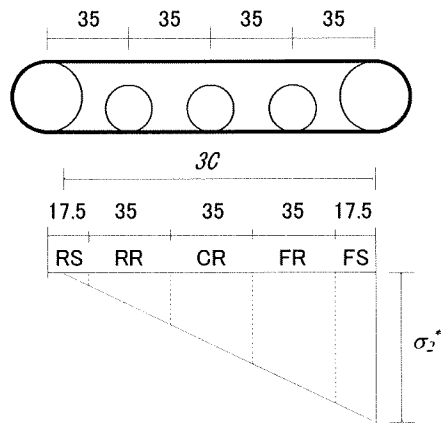


図 4-2-2 接地圧分布割合の算出法

4.3 均質平坦地盤 ($F_s=1.5$) の実験結果

ウレタンフォーム模擬地盤に対して弾性支持条件で行った遠心場走行実験の結果について述べる。くい打機模型の目標接地圧 p_m は、ウレタンフォームの極限支持力 q_u を短期的な安全率 ($F_s=1.5$) で除した値を目標値とした。使用したウレタンフォームは UF-1 であり、その極限支持力 q_u は 100kPa である。従って、くい打機模型の目標接地圧は 66kPa となる。

4.3.1 2009Mobile_1104D01

模型の安定度 15 度、付加質量は上部搭載、モーター回転数 25000rpm の条件で行った実験結果を示す。

図 4-3-1 に試験結果一覧、図 4-3-2 に応答加速度、図 4-3-3 に周波数解析結果、図 4-3-4 に接地圧力分布割合、図 4-3-5 に接地圧分布割合の理論値と実験値の比較、図 4-3-6 にハイスピードカメラの動画解析から求めた自走時傾斜角、図 4-3-7 に傾斜角の度数分布をそれぞれ示す。

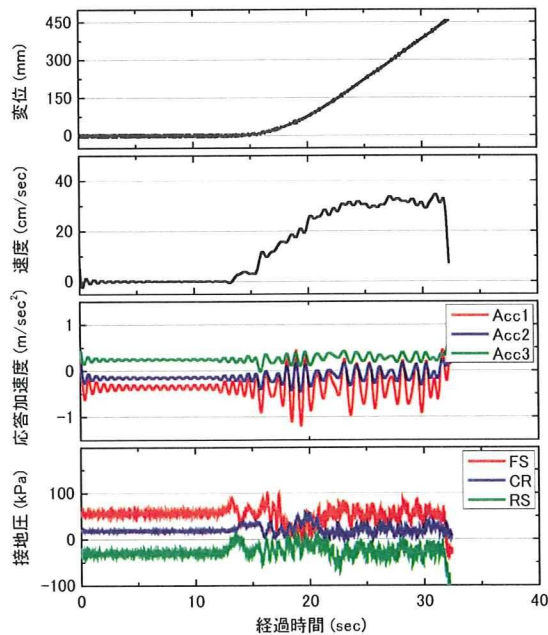


図 4-3-1 試験結果一覧

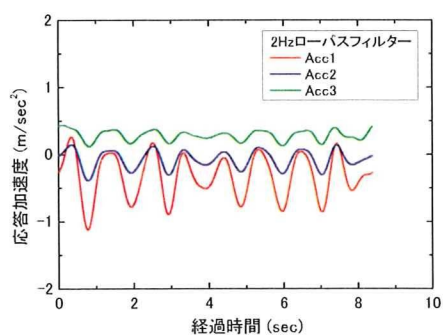


図 4-3-2 応答加速度

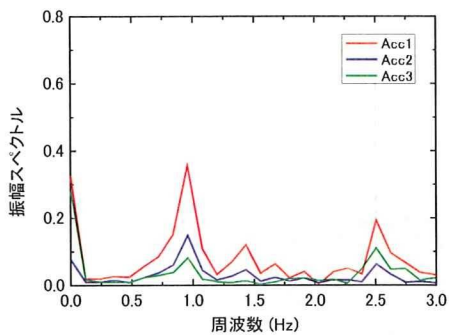


図 4-3-3 周波数解析結果

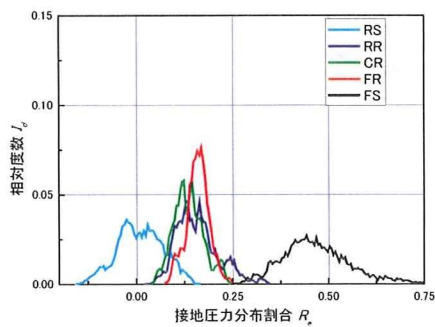


図 4-3-4 接地圧力分布割合

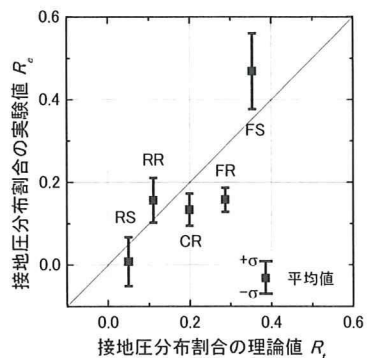


図 4-3-5 接地圧力分布割合の理論値と実験値の比較

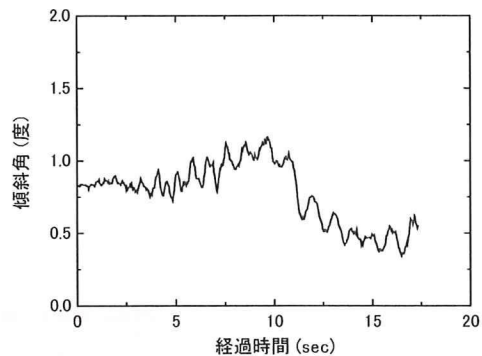


図 4-3-6 自走時傾斜角

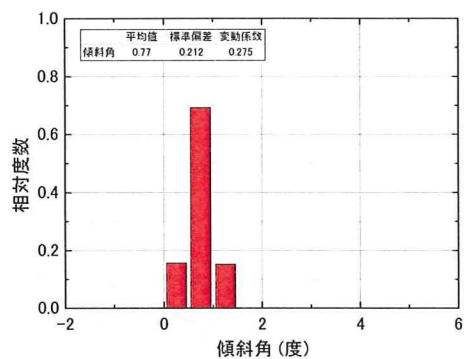


図 4-3-7 自走時傾斜角の度数分布

4.3.2 2009Mobile_1104D03

模型の安定度 10 度, 付加質量は中央搭載, モーター回転数 25000rpm の条件で行った実験結果を示す.

図 4-3-8 に試験結果一覧, 図 4-3-9 に応答加速度, 図 4-3-10 に周波数解析結果, 図 4-3-11 に接地圧力分布割合, 図 4-3-12 に接地圧分布割合の理論値と実験値の比較, 図 4-3-13 にハイスピードカメラの動画解析から求めた自走時傾斜角, 図 4-3-14 に傾斜角の度数分布をそれぞれ示す.

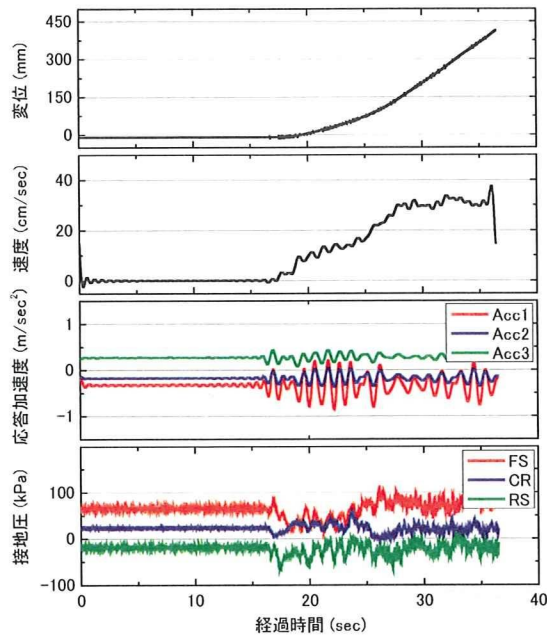


図 4-3-8 試験結果一覧

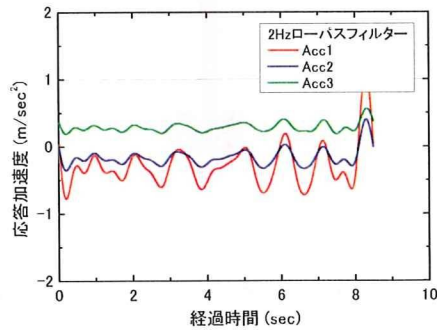


図 4-3-9 応答加速度

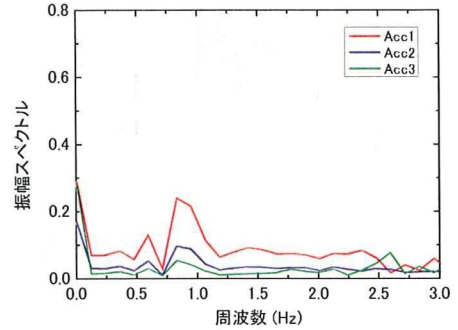


図 4-3-10 周波数解析結果