

図 4-4-5 に応答加速度の進行方向成分と左右方向成分を平面上に表した軌跡を示す。改良前は前後方向の揺れが大きく、楕円状に分布している。それに対して、改良後は円形状に分布している。

図 4-4-6 に昨年度実施した実大走行実験での応答加速度を示す。応答加速度の値に差が見られるものの、応答加速度はほぼ円形状に分布していることがわかる。すなわち、履帯形状の改良によって、実機の走行挙動をより忠実に再現することが可能となった。

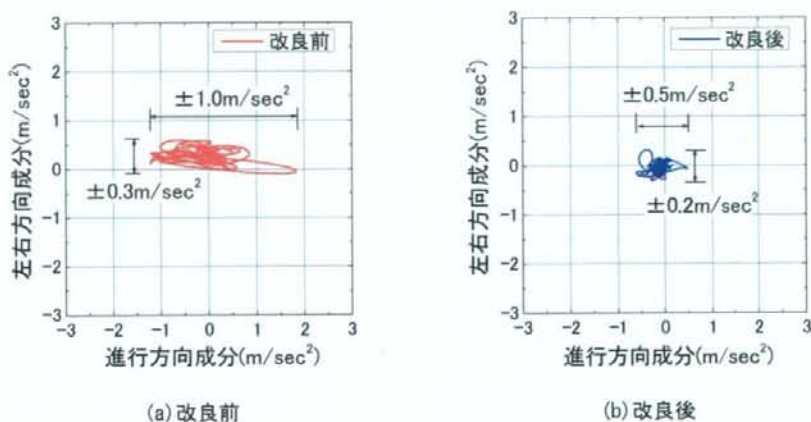


図 4-4-5 応答加速度の軌跡

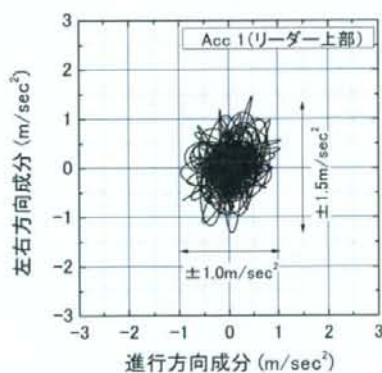


図 4-4-6 実大走行実験の応答加速度

図 4-4-7 に応答加速度に含まれる周波数成分を調べるため、高速フーリエ変換した結果を示す。両実験結果を比較すると、振幅スペクトルのピークは 0.4Hz 付近と 2.0Hz 付近に現れており、ほぼ同じ周波数成分を含んでいることがわかる。この結果から、履帯形状の改良に伴う揺動特性の変化がないことがわかった。

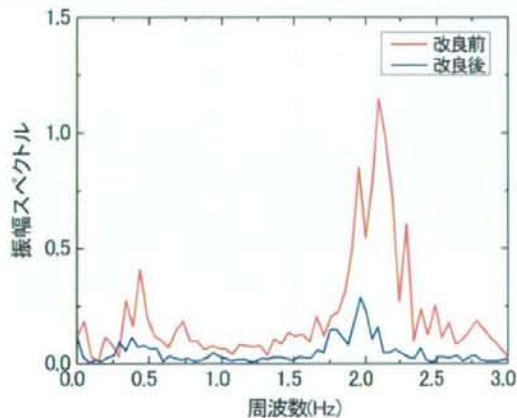


図 4-4-7 周波数解析結果

(2) 車軸荷重

図 4-4-8 に FS (前輪) の車軸荷重を理論値で除した後、度数分布を調べた結果を示す。車軸荷重の理論値の算出方法は 4.4 節で述べた方法で算出した。改良前の結果は、広い範囲に分布しており、値にばらつきが見られる。また、平均値は 0.765 であり、理論値よりも小さい。一方、改良後の結果は、分布の幅が狭くなるとともに、平均値は 1.027 となり理論値とほぼ一致している。このことから、車軸部の改良によって、本実験装置は挙動の再現性が向上するとともに、計測値の精度が向上したと考えられる。

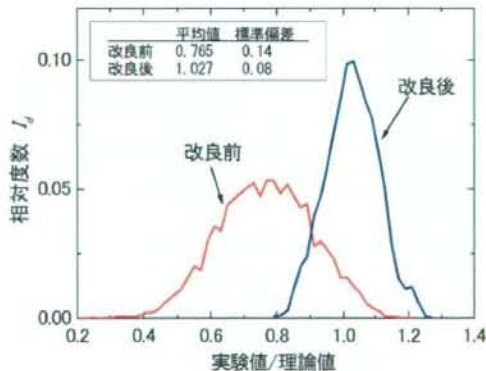


図 4-4-8 FS (前輪) の実験値と理論値の比較

4.5 まとめ

昨年度明らかになったくい打機模型の問題点の改良を行い、改良の効果を確認した。改良を行った箇所は、履帯の形状および前輪の車軸形状である。本節では、改良の効果を確認するために、実験を行った結果を述べる。

4.5.1 履帯の改良

履帯形状の問題として、履帯要素がスプロケットを通過して地面に接地する際に、開いた間隙が収縮し、それによって模型地盤を挟み込むことが確認された。この問題を解決するために、履帯要素の長さを5mmから8.5mmに変更し、履帯要素がオーバーラップするように改良を行った。その結果、履帯要素がスプロケットを通過する前後に見られた間隙がなくなり、模型地盤の噛み込みを解消することができた。改良前後の実験結果を比較した結果、履帯形状の改良により、前後方向の機体の揺れが小さくなり、実機の挙動をより忠実に再現することが可能となった。また、応答加速度の周波数成分には変化がなかった。

4.5.2 車軸の改良

前輪車軸形状の問題として、スプロケットの回転軸とアームの中心軸が同軸上にないため、走行時の履帯に生じる引張力が水平力となって車軸に働き、それに伴って車軸アーム部には“ねじれ力”が作用し、鉛直荷重の計測値に影響を与えることが確認された。この問題を解決するため、車軸アームがねじれる現象を極力小さくする目的でスプロケットの回転軸とアームの中心を同軸上に配置するとともに、アーム部分と車体が接する部分の板厚を増加させて剛性を高めた。

車軸形状の改良により、車軸荷重のばらつきが小さくなり、計測値と理論値がほぼ等しくなった。

4.5.3 荷重計測の改良

車軸部の改良により、車軸アームの表裏にひずみゲージを貼り付けることが可能になったため、ひずみゲージ2枚を用いる、2ゲージアクティブ法で計測を行った。この方法により、荷重の計測の分解能が高くなるとともに、荷重-応答ひずみ関係が直線的になり、計測値の精度が向上した。

4.6 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5章 挙動と不安定要因

5.1 同一安定度条件における重心位置が走行挙動に与える影響

5.1.1 実験の概要

くい打機械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を規定している。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、本節では、安定度5度、10度、15度の3つの条件で付加質量の位置を図5-1-1に示す、高さ835mmおよび140mmと変えて実験を行った。それぞれのモデルを、「高重心」、「低重心」と呼ぶことにする。

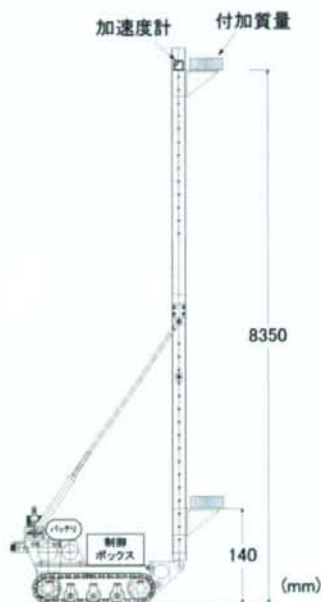


図 5-1-1 付加質量の位置

実験条件を表 5-1-1 に示す。遠心模型実験装置では、回転半径に比例して遠心力が増加するため、付加質量位置の違いにより、作用する遠心加速度が異なる。そのため、その影響を考慮して付加質量の重量を算出した。

遠心加速度については、履帯の最大接地圧がウレタンフォームの極限支持力 q_u を短期的な支持力安全率 $F_s=1.5$ で除した値 (67kPa) になるよう調節した。

模型地盤は、UF-1 を敷き並べた「一様地盤」である。

表 5-1-1 実験条件

安定度	重心位置	付加質量(g)	遠心加速度(G)
15 度	高い	150	14.5
	低い	220	12.0
10 度	高い	440	9.0
	低い	560	6.5
5 度	高い	980	6.5
	低い	980	4.5

5-1-2 実験結果

(1) 応答加速度

図 5-1-2 に Acc1 (リーダー上部) の応答加速度と経過時間の関係を示す。図中に示したデータは、走行距離 150mm 以降の定速走行時のものであり、実大スケールに換算した後、1.5Hz のローパスフィルターを施して、ノイズを除去している。同一安定度条件における応答加速度を比較すると、安定度 5 度以外では、低重心の応答加速度がやや大きい。

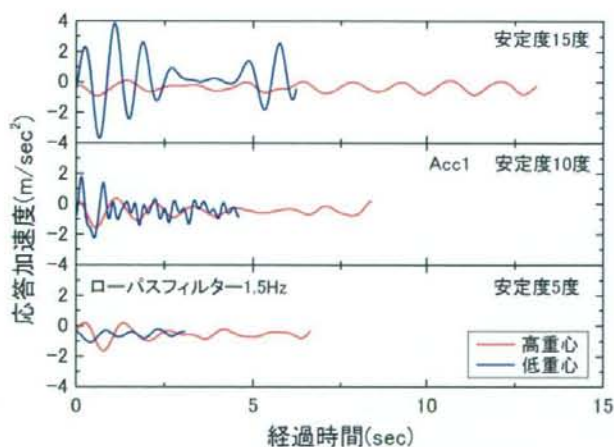


図 5-1-2 応答加速度と経過時間の関係

図 5-1-2 にそれぞれの応答加速度を周波数解析した結果を示す。重心位置の違いで周波数成分に差が見られ、高重心では 0.7~0.8 付近にピークが見られる。一方、低重心では 1~2Hz 付近にピークが見られ、揺れの周期が短い。このような差が生じた原因として、慣性モーメントの差が考えられる。高重心の場合、慣性モーメントが大きく回転しにくいいため、揺れが長周期的になったことが考えられる。反対に、重心が低い場合、回転しやすいため、短周期的な揺れが生じたと考えられる。また、安定度の違いによらず、同様の周波数成分を含んでいるため、地盤の反力係数の影響が支配的であると考えられる。

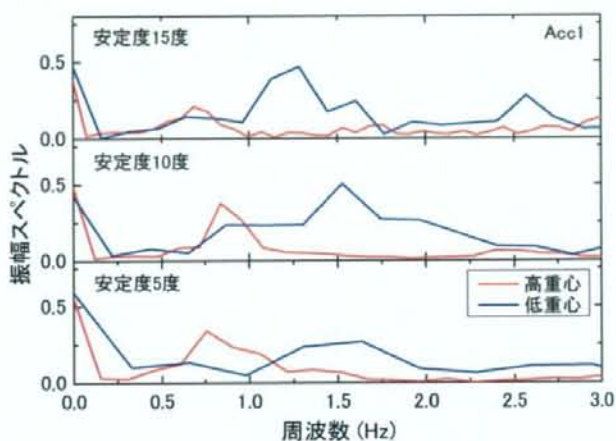


図 5-1-2 応答加速度の周波数解析結果

(2) 履帯に作用する接地圧

図 5-1-3 に典型的な履帯接地圧力と経過時間の関係を示した。図に示すデータは定速走行時における結果であり、5Hz のローパスフィルターが施されている。

各車輪の接地圧を比較すると、FS（前輪）に作用する接地圧が大きく、CR（中央補助輪）と RS（後輪）はほぼ等しい。また、CR は接地圧の増減が小さいのに対し、FS と RS の増減は大きく、位相が逆転している。そのため、接地圧力の結果からも、機体が揺動していることがわかる。

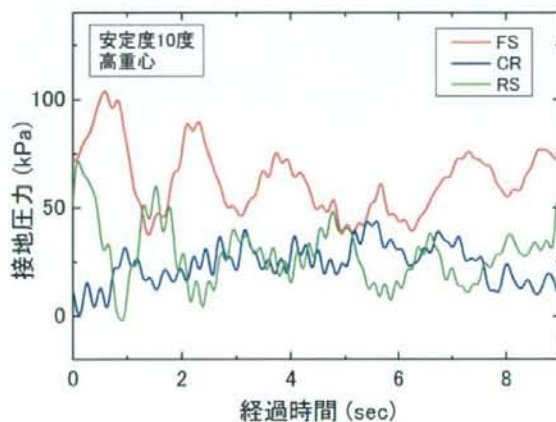


図 5-1-3 走行時の履帯に作用する接地圧力

(3) 履帯に作用する接地圧

計測した車軸荷重から、接地圧力分布割合を算出し、度数分布解析を行った。図 5-1-4 に安定度 15 度の結果を示す。重心位置の違いによる顕著な差は見られない。それに対して、図 5-1-4 および図 5-1-5 に示す、安定度 10 度および 5 度では、高重心に比べ、低重心の FS（前輪）が大きく、かつ広い範囲に分布している。これは、低重心の慣性モーメントが小さいため、機体に生じた揺れが大きかったためと考えられる。

表 5-1-2 に FS の接地圧力分布割合の平均値と標準偏差を示す。それぞれの結果を比較すると、安定度 15 度では重心位置の違いによる顕著な差は見られない。それに対して、安定度 10 度と 5 度では、平均値、標準偏差ともに低重心の値が大きい。このことから、安定度の低下に伴い、慣性モーメントの違いによる影響が強くなり、前輪の接地圧および接地圧変動が大きくなることが明らかになった。

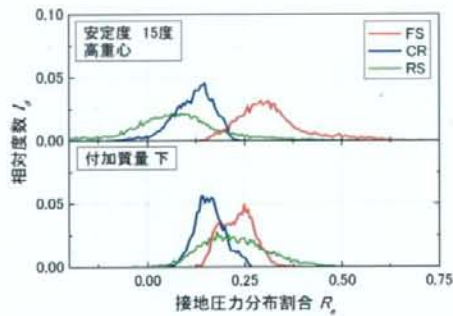


図 5-1-4 接地圧分布割合の度数分布（安定度 15 度）

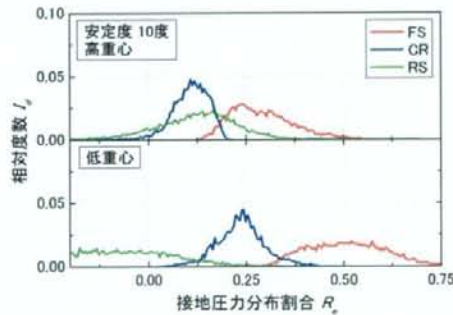


図 5-1-5 接地圧分布割合の度数分布（安定度 10 度）

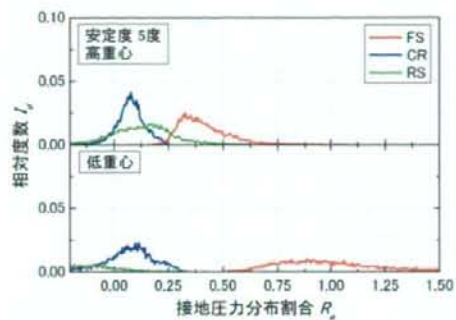


図 5-1-5 接地圧分布割合の度数分布 (安定度 5 度)

表 5-1-2 FS の接地圧分布割合の平均値および標準偏差

安定度	重心位置	平均値	標準偏差
15 度	高重心	0.316	0.088
	低重心	0.230	0.042
10 度	高重心	0.290	0.081
	低重心	0.510	0.105
5 度	高重心	0.409	0.113
	低重心	1.108	0.992

(4) ハイスピードカメラによる傾斜角の計測

走行中のくい打機械模型の挙動を実測するのは非常に困難であるため、ハイスピードカメラで記録した動画について画像解析を行い、走行中の傾斜角について調べた。本実験では、500コマ/秒で撮影を行った。写真 5-1-1 に測点の概要を示す。Point0 と Point1 を結んだ測線を基準に傾斜角を算出した。

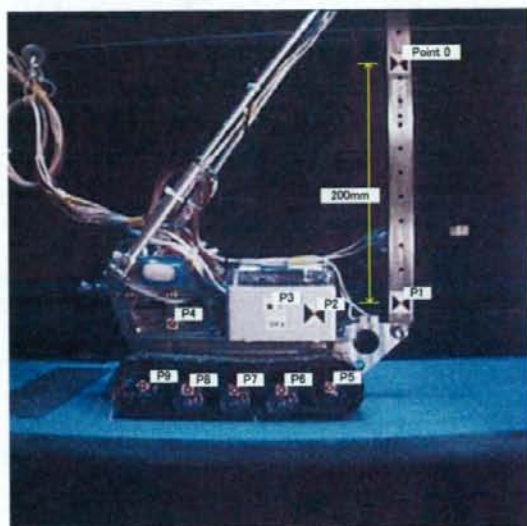


写真 5-1-1 測点の概要

図 5-1-6 に傾斜角と経過時間の関係を示す。前方方向の傾斜を経過時間は実大スケールに換算した値である。重心位置の違いによる影響を比較すると、全ての条件で、高重心に比べ低重心の傾斜角が大きいことがわかる。特に安定度 5 度では、重心位置の違いによる差は顕著である。表 5-1-3 に最大傾斜角の一覧を示す。

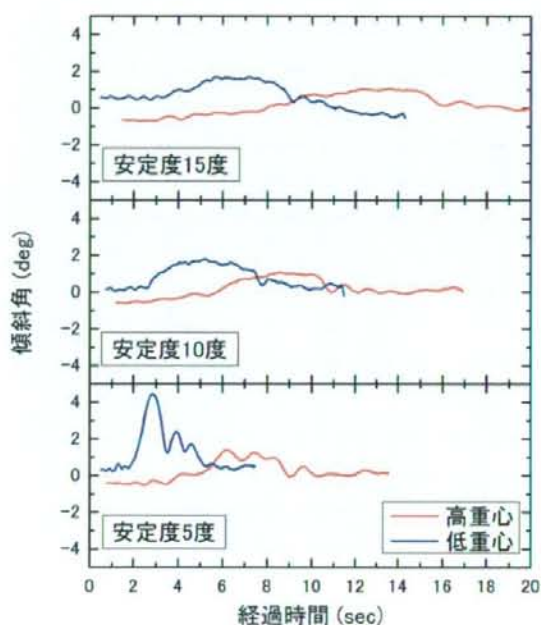


図 5-1-6 傾斜角と経過時間の関係

表 5-1-3 安定度と最大傾斜角

安定度	重心位置	最大傾斜角 (度)
15 度	高重心	1.1
	低重心	1.7
10 度	高重心	1.0
	低重心	1.8
5 度	高重心	1.4
	低重心	4.4

これまでの試験結果から、走行時に生じる揺れと重心位置には関係性があることがわかった。次に、慣性モーメントと最大傾斜角の関係について調査する。

図 5-1-7 に慣性モーメントの算出法の概要を示す。低重心および高重心の転倒支点（回転中心）から付加質量のまでの回転半径 r は式 (5-1-1) および式 (5-1-2) で表される。



図 5-1-7 慣性モーメントの算出法

$$r_H = \sqrt{x^2 + y_H^2} = \sqrt{0.104^2 + 0.84^2} = 0.846m \quad (5-1-1)$$

$$r_L = \sqrt{x^2 + y_L^2} = \sqrt{0.104^2 + 0.16^2} = 0.191m \quad (5-1-2)$$

高重心と低重心の慣性モーメント I_H および I_L は、式 (5-1-3) および式 (5-1-4) から算出することができる。

$$I_H = r_H^2 \cdot m \quad (5-1-3)$$

$$I_L = r_L^2 \cdot m \quad (5-1-4)$$

ここで、 m は、物体の質量である。表 5-1-4 に算出した慣性モーメントを示す。

表 5-1-4 慣性モーメントの一覧

安定度	重心位置	r_H or r_L	付加質量重量 m (kg)	慣性モーメント $I=r^2 \cdot m$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)
15	高重心	0.846	0.09	0.064
	低重心	0.191	0.20	0.007
10	高重心	0.846	0.27	0.192
	低重心	0.191	0.52	0.019
5	高重心	0.846	0.60	0.423
	低重心	0.191	0.91	0.033

図 5-1-8 に慣性モーメントと最大傾斜角の関係を示す。慣性モーメントと最大傾斜角には反比例のような関係が見られる。一般的には、慣性モーメントが大きい、すなわち回転しにくい場合、傾斜角も小さくなると考えられる。本実験結果においても、同様の傾向が見られる。しかしながら、慣性モーメントと最大傾斜角にはほぼ一意的な関係は見られるものの、ややバラツキが見られる。この原因として、傾斜角が同じであっても安定度の違いにより、相対的な安定性が異なるためと考えられる。そこで、本研究では、走行中に発生した傾斜角を機体安定度で除した値を前方危険度と定義して、前方危険度と経過時間の関係を調べた、図 5-1-9 に試験結果を示す。安定度 15 度および 10 度の前方危険度は概ね 0.2 以下であるのに対して、安定度 5 度では、それらよりも大きく、高重心で 0.3、低重心で 0.9 である。そのため、安定度 5 度条件は、他の安定度に比べて機体が不安定化していたと考えられる。

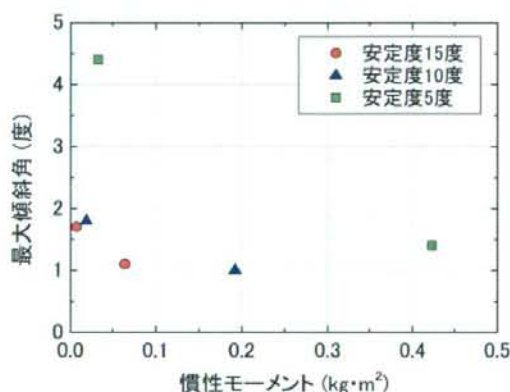


図 5-1-8 慣性モーメントと最大傾斜角の関係

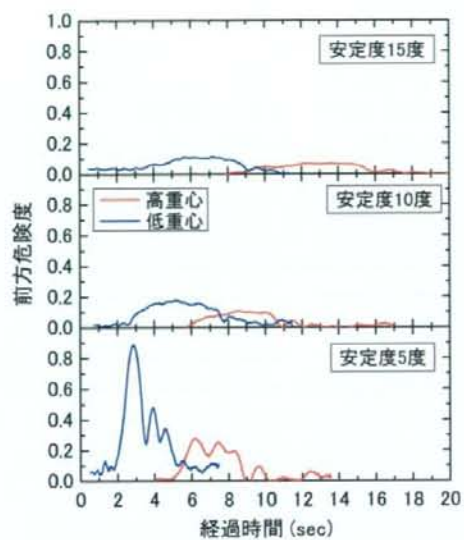


図 5-1-9 前方危険度と経過時間の関係

5.2 地盤反力分布の影響

5.2.1 実験の概要

2種類のウレタンフォームを用いて、2種類の模型地盤を作製した。一つは、UF-1を用いて理想的な水平堅固地盤を模擬した「一様地盤」である。もう一つは、履帯の接地長さの1/2のUF-1とUF-2を交互に配置した「交互地盤」である。遠心場走行実験は、「低接地圧」条件と「高接地圧」条件の2種類の遠心加速度を与えた。低接地圧条件は履帯接地圧 p_{max} がUF-1の極限支持力 q_u の2/3程度になるよう遠心加速度を調節したもので、弾性支持状態にある。それに対して、高接地圧条件は塑性的な沈下が伴う支持状態である。

5.2.2 実験結果

(1) 応答加速度

図5-2-1に一様地盤と交互地盤の応答加速度と経過時間の関係を示す。図中のデータは安定度15度で高重心の結果である。図5-2-1(a)に示した低接地圧条件では、一様地盤の応答加速度振幅 0.44m/sec^2 に対して、交互地盤では 0.60m/sec^2 であり、一様地盤に比べやや応答加速度が大きい。しかし、地盤条件の違いによる応答加速度の差は小さい。この原因として、接地圧が低い場合、地盤の弾性的な支持条件が支配的であるため、地盤条件の違いによる差が小さくなったと考えられる。一方、高接地圧条件では、地盤条件の違いによる差は顕著であり、一様地盤の振幅は 0.20m/sec^2 であるのに対し、交互地盤では 0.72m/sec^2 である。これは、交互地盤のUF-2通過時に大きな沈下が生じ、それに伴う大きな揺れが生じるためと考えられる。

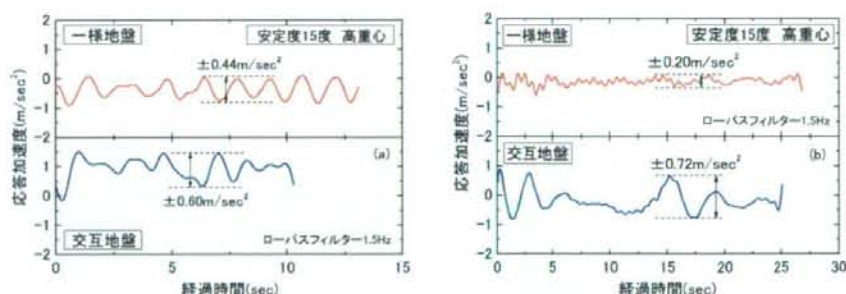


図5-2-1 一様地盤と交互地盤の応答加速度

(a) 低接地圧 (b) 高接地圧

図5-2-2に周波数解析結果を示す。低接地圧と高接地圧では周期がやや異なっており、低接地圧条件では $0.5\sim 1.0\text{Hz}$ 付近にピークが見られる。一方、高接地圧条件では $0\sim 0.5\text{Hz}$ 付近にピークが見られ、低接地圧条件に比べ、長周期的な揺れが生じている。この原因として、前述の通り、地盤の支持状態が支配的であるため、低接地圧では短周期的に揺れ、高接地圧では長周期的に揺れたと考えられる。

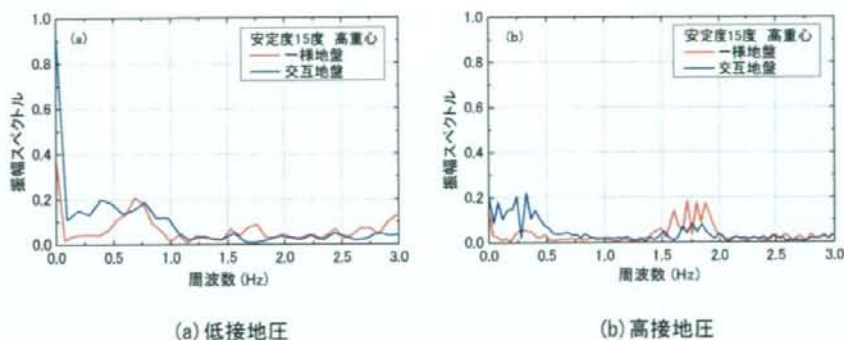


図 5-2-2 周波数解析結果

(2) 高速度カメラによる動画解析

図 5-2-3 にハイスピードカメラで記録した動画を解析し、得られた傾斜角を度数分布した結果を示す。両条件において一様地盤に比べ、交互地盤の傾斜角が大きいことがわかる。表 5-3-1 に応答加速度振幅と最大傾斜角 θ_{max} の一覧を示す。応答加速度と最大傾斜角は非常に良く対応していることがわかる。

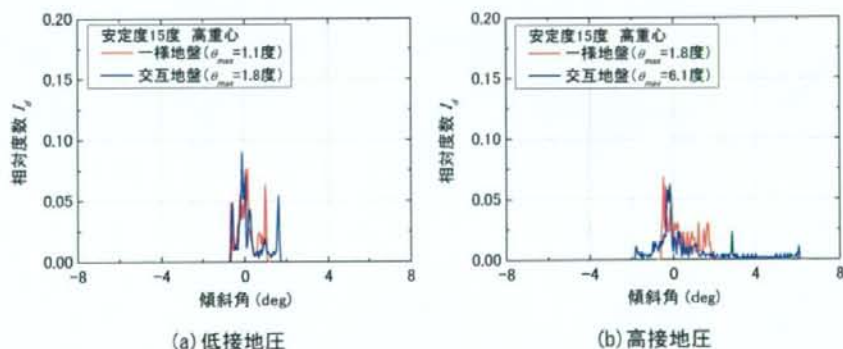


図 5-2-3 傾斜角の度数分布解析

表 5-3-1 実験結果一覧

試験条件	遠心加速度	応答加速度振幅 (m/sec ²)	最大傾斜角 θ_{max} (度)
一様地盤	低接地圧	0.44	1.1
交互地盤		0.60	1.8
一様地盤	高接地圧	0.20	1.8
交互地盤		0.72	6.1

(3) 車軸荷重

図 5-2-4 および図 5-2-5 に接地圧分布割合の度数分布解析結果を示す。一様地盤と交互地盤を比較すると、一様地盤では各車軸の最大相対度数 I_{dmax} は交互地盤に比べ大きく、各車軸の分布形状は類似であるのに対し、交互地盤は全体的に I_{dmax} が小さく、かつ広い範囲に分布している。すなわち、大きな揺れが生じている。

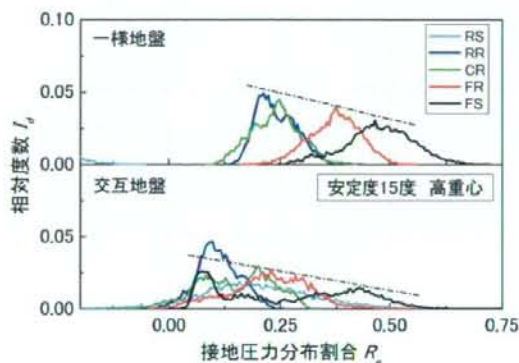


図 5-2-4 接地圧分布割合の度数分布解析（低接地圧）

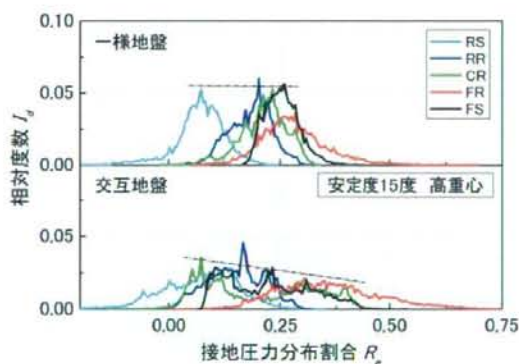


図 5-2-5 接地圧分布割合の度数分布解析（高接地圧）

図 5-2-6 および図 5-2-7 に接地圧分布割合の実験値と理論値の比較を示す。図中には、各車軸の平均値と、標準偏差をエラーバーで示した。

一様地盤に比べ交互地盤の、エラーバーは大きく、地盤支持力のバラツキが大きい地盤を走行した傾向が現れている。

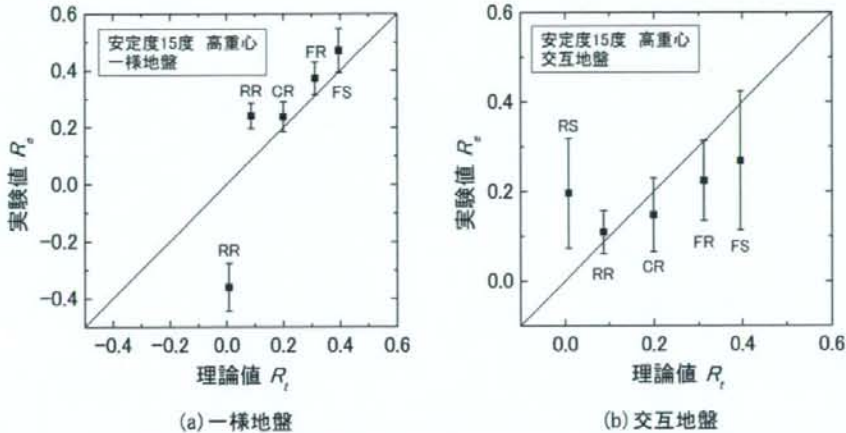


図 5-2-6 接地圧分布割合の実験値と理論値の比較 (低接地圧)

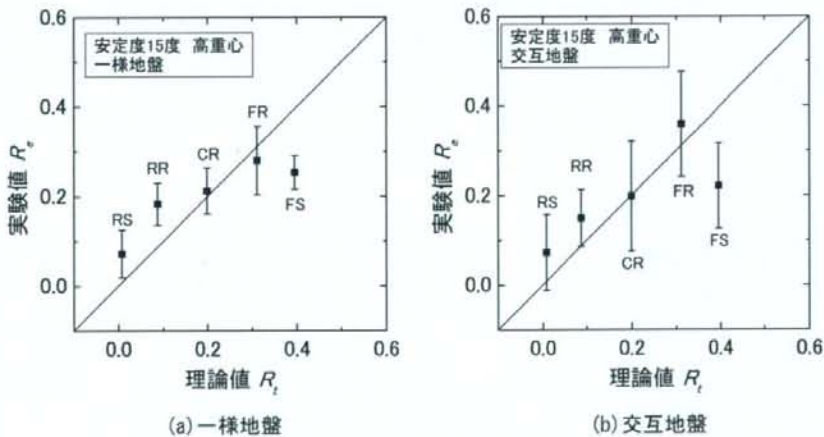


図 5-2-7 接地圧分布割合の実験値と理論値の比較 (高接地圧)

5.3 走行速度の影響

5.3.1 実験の概要

走行速度が模型の挙動と接地圧力変動に与える影響を調べるために、モーターの回転数を変化させて遠心場走行実験を実施した。実験で与えたモーターの回転数は 35000rpm と 10000rpm である。それぞれを高速走行、低速走行と呼ぶことにする。表 5-3-1 に実験条件の一覧を示す。

表 5-3-1 走行速度が応答加速度に与える影響

収録ファイル名	遠心加速度	付加質量位置	モーターの回転数 (走行速度)	地盤条件
2008Mobile_1024D09	5	上	10000 (14cm/sec)	一様
2008Mobile_1024D04		下	10000 (14cm/sec)	
2008Mobile_1024D10		上	35000 (45cm/sec)	
2008Mobile_1024D06		下	35000 (45cm/sec)	

5.3.2 実験結果

(1) 応答加速度

図 5-3-1 に応答加速度と経過時間の関係を示す。図中に示したデータは安定度 10 度の高重心と低重心の結果である。高重心の結果を示した(a)では、高速走行の応答加速度がやや大きいものの、低速走行と高速走行の応答加速度に大きな差はない。それに対して、低重心では応答加速度に差が見られ、高速走行の応答加速度が大きい。

また、低速走行では、重心位置にかかわらず応答加速度はほぼ等しく、大変興味深い結果である。

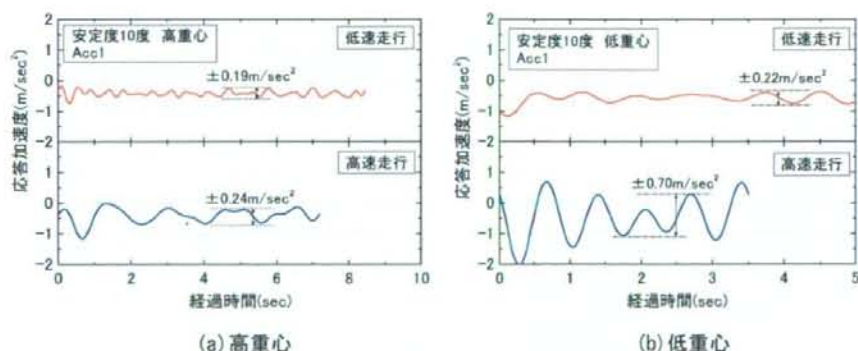


図 5-3-1 応答加速度と経過時間の関係