

基礎工事用大型建設機械の転倒防止に関する研究

0105D04	UD	10	2.568	2.422	0.943	Flat	Div	NC
0105D05	UD	10	1.073	0.896	0.835	Flat	Div	NC
0105D06	UD	10	1.282	0.855	0.667	Flat	Div	NC
0107D01	UD GL 100107	10	1.597	1.251	0.783	1.340	7.5	3.8
0107D02	UD (ditto)	10	1.774	1.652	0.932	↓	7.5	3.8
0107D04	UD (ditto)	5	2.511	2.009	0.800	↓	3.7	3.8
0107D05	UD	10	1.307	1.406	1.076	Flat	Div	NC
0107D08	UD	10	0.931	0.996	1.070	Flat	Div	NC
0113D02	UD GL 100112	10	0.415	0.615	1.484	1.346	7.4	3.8
0113D03	UD (ditto)	10	1.501	2.767	1.843	↓	7.4	3.8
0113D05	UD	10	1.055	1.828	1.733	Flat	Div	NC
0113D06	UD	10	1.449	2.143	1.479	Flat	Div	NC
0113D11	UD	10	1.097	1.925	1.755	Flat	Div	NC
0113D12	UD	10	1.894	2.304	1.217	Flat	Div	NC
0115D01	UD GL 100114	10	1.356	1.694	1.250	1.549	6.5	3.8
0115D03	UD (ditto)	10	1.518	2.108	1.388	↓	6.5	3.8
0115D04	UD (ditto)	5	2.332	2.300	0.986	↓	3.2	3.8
0115D05	UD (ditto)	15	1.211	1.952	1.612	↓	9.7	3.8
0115D06	UD (ditto)	15	1.451	2.051	1.413	↓	9.7	3.8
0115D07	UD (ditto)	10	1.857	2.395	1.290	↓	6.5	3.8
0115D10	UD	10	1.284	1.506	1.173	Flat	Div	NC
0115D11	UD	10	1.515	2.211	1.460	Flat	Div	NC
0115D12	UD	10	1.293	1.376	1.064	Flat	Div	NC
0118D01	UD	10	1.824	1.735	0.951	Flat	Div	NC

1)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。

6.4.2 転倒に対する危険の確率の算出方法

遠心場走行実験では自走時の揺動について、加速度計による機体各部での応答加速度の水平成分と高速度カメラによる画像解析から求めた機体傾斜角を記録した。本解析では画像解析より求めた機体傾斜角の時刻歴データを用いた。転倒に対する危険性を評価するために、地盤の起伏が機体の傾斜に与える影響を確率的に評価した。

模型地盤の起伏条件は4.1節に述べた方法で解析を行い、その結果の一覧を6.4.1項に示した。ここでは明らかになった統計的な指標を用いて「転倒に対する危険の確率(P_T)」計算する方法を述べる。

転倒に関する限界状態関数を H_f と定義すると、 H_f の関係式は(6-4-4)によって表される。

$$H_f(\theta_b, \theta_r) = \theta_b - \theta_r \quad (6-4-4)$$

ここで、 θ_b は地表の勾配であり、 θ_r は揺動した機体の傾斜角である。 θ_b と θ_r は互いに独立であり、 H_f は正規分布に従うと仮定する。

転倒に対する安全と危険の条件は式(6-4-5)によって表される。

$$\begin{cases} H_f(\theta_b, \theta_r) > \theta_a & \text{安全} \\ H_f(\theta_b, \theta_r) < \theta_a & \text{危険} \end{cases} \quad (6-4-4)$$

ここで、 θ_a は構造規格が定める機体の安定度であり、限界傾斜角を意味する。この値は確定値として扱う。

転倒に対する危険の確率(P_T)は式(6-4-5)により求められる。

$$\begin{aligned} P_T &= P(H_f < \theta_a) \\ &= F_H(\theta_a) = \Phi\left(\frac{\theta_a - \mu_H}{\sigma_H}\right) \end{aligned} \quad (6-4-4)$$

ここで、 μ_H と σ_H は平均値と標準偏差である。 F_H は確率分布関数であり、 Φ は F_H によって表された標準正規分布である。

6.4.3 平坦地盤の転倒確率

図 6-4-1 は平坦均質地盤(FU 地盤)の傾斜安全率(F_t)と転倒に対する危険の確率(P_T)の関係を示す。図中に示す 2 つの曲線は安定度が 5 度と 10 度の場合を示す。計算に用いた揺動に関する統計値(平均値と標準偏差)のパラメータの値は、遠心場走行実験の結果により得られた値である。地表の起伏に関する統計値は地表面をスキャンしたデータを波形解析して求めた値である。

安定度 5 度と 10 度の両曲線は類似した関係を示す。同一 F_t に対する P_T の値は安定度 5 度の場合が 10 度の場合に比べて幾分か大きい。 P_T の値を 1% 以下とするために必要な F_t の値を表 6-4-4 に示す。安定度が 5 度と 10 度においては、ともに約 2.9 以上である。

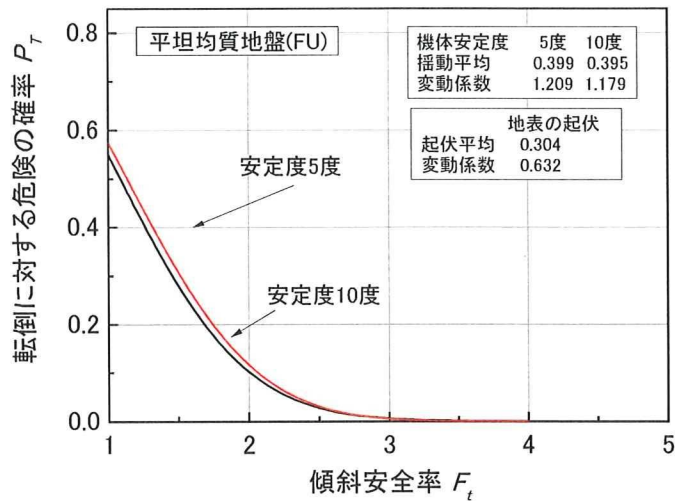


図 6-4-1 平坦均質地盤 (FU) における傾斜安全率 (F_t) と転倒に対する危険の確率 (P_T) の関係

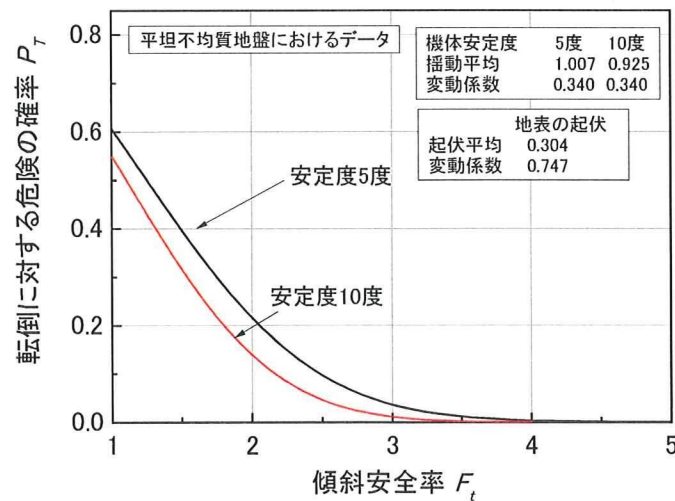


図 6-4-2 平坦不均質地盤 (FN) における傾斜安全率 (F_t) と転倒に対する危険の確率 (P_T) の関係

図6-4-2は平坦ではあるが密度が不均質な地盤(FN地盤)の傾斜安全率(F_i)と転倒に対する危険の確率(P_T)の関係を示す。先のFU地盤に比べて2つの曲線の差は大きくなっている。同一 F_i に対する P_T の値は安定度5度の場合が10度の場合に比べて大きい。 P_T の値が1%以下とするために必要な F_i の値は、安定度が5度の場合が約3.6であるのに対して、10度では3.1と小さい。

表6-4-4 転倒に対する危険の確率(P_T)が1%以下とするために必要な傾斜安全率(F_i)の値

安定度	5度	10度
平坦均質地盤(FU地盤)	2.857	2.857
平坦不均質地盤(FN地盤)	3.571	3.077
起伏地盤(UD地盤)	不明	4.545

6.4.4 起伏地盤の転倒確率

図 6-4-3 は起伏を有する地盤(UD 地盤) の傾斜安全率(F_t)と転倒に対する危険の確率(P_T)の関係を示す。先の FN 地盤に比べて 2 つの曲線の差は大きくなるとともに、 F_t に対する P_T の値は全体的に大きくなっている。先の 2 つの図と同様に、同一 F_t に対する P_T の値は安定度 5 度の場合が 10 度の場合に比べて大きい。 P_T の値が 1%以下とするために必要な F_t の値は、安定度が 5 度の場合には値が非常に大きくなり正確には確認できていない。安定度が 10 度の場合には約 4.5 以上である。

以上より、 F_t に対する P_T の関係は、機体に生じる応答特性、すなわち揺動の反応により関係は異なることがわかった。たとえ密度が均質で支持力のバラツキは少ない地盤であっても、起伏が存在する地盤では転倒の危険性は大きくなる。

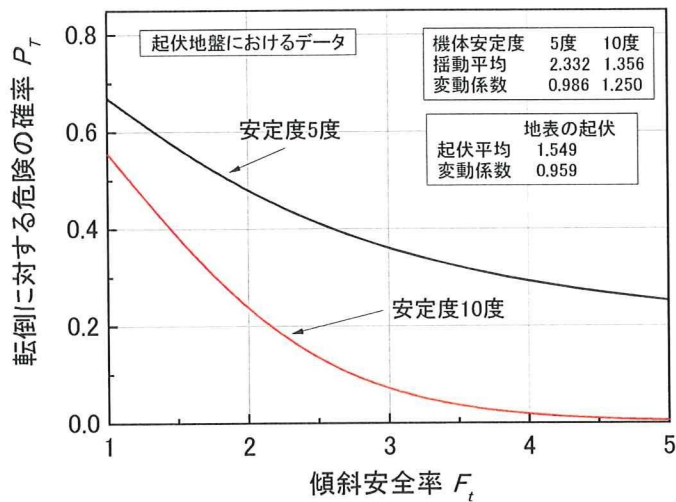


図 6-4-3 起伏地盤(UD)における傾斜安全率(F_t)と転倒に対する危険の確率(P_T)の関係

6.4.5 平坦地盤の揺動を基準とした転倒危険性の推定妥当性

平坦で均一な地盤(FU)において得られた機体の揺動に関する統計値を用いて、その他の2地盤、すなわち平坦不均一地盤(FN地盤)と起伏地盤(UD地盤)における転倒危険性を仮定的に評価する。

(1) 安定度5度の場合

図6-4-4は、傾斜安全率(F_t)に対する、転倒に対する危険の確率(P_T)の関係について、実揺動と仮定揺動を示す。実揺動とは平坦かつ均質な地盤(FU地盤)において得られた機体の揺動に関する統計値、すなわち揺動平均(傾斜角)とその変動係数、および地盤側の統計値にはFU地盤に関する起伏の統計値を用いて解析的に求めた関係である。仮定揺動とは、FU地盤において得られた機体の揺動に関する統計値を共通して用い、地盤側の統計値のみをFN地盤とUD地盤にかえて解析的に求めた関係である。

先に述べたとおり、地盤の起伏に関する変動係数は、FU、FN、UDの順に大きい。同一 F_t に対する P_T の値を比較すると、UDが最も大きく、次いでFNであり、FUは最も小さい。従って、地盤起伏の変動係数が大きくなると P_T は大きくなると推定される。

図6-4-5はFN地盤における実揺動と仮定揺動の比較を示す。実揺動と仮定揺動の両曲線を比較する実揺動の方が同一 F_t に対する P_T の値が大きい。これは、FN地盤における走行では、密度の不均質さに起因した支持力のバラツキが存在したために、くい打機の機体には揺動が増幅して生じたことを示している、すなわち、機体の揺動は地盤側条件との相互作用により増幅していることがわかった。

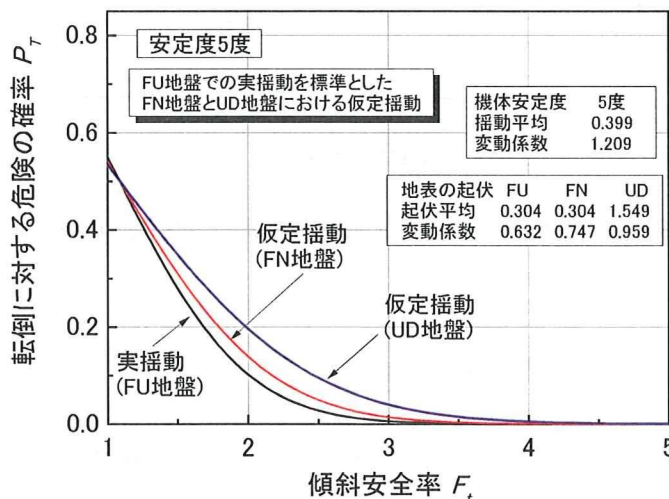


図6-4-4 FU地盤における揺動の統計値に基づいて推定したPTの比較

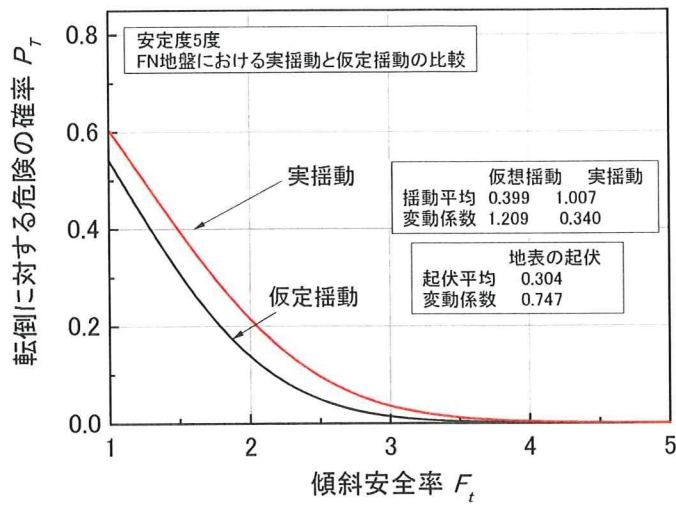


図 6-4-5 FN 地盤における仮定揺動(推定)と実揺動の比較

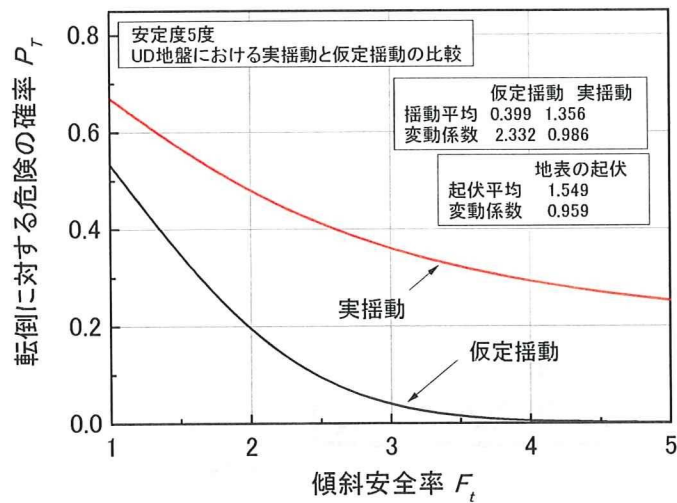


図 6-4-6 UD 地盤における仮定揺動(推定)と実揺動の比較

図 6-4-6 は UD 地盤における仮定揺動と実揺動の関係を示す。同一 F_t に対する P_T の値は実揺動と仮定揺動で大きく異なり、両 P_T の値の差は FN 地盤のそれに比べてさらに大きい。これは UD 地盤の起伏の存在が揺動を大きく増加させたことを意味する。

従って、転倒に対する危険の確率(P_T)は、地盤側の起伏特性とその相互作用により増幅する機体の揺動特性の両方を考慮して求める必要があり、地盤側の特性のみを指標として、転倒危険性を評価することは妥当でないことが明らかになった。

(2) 安定度 10 度の場合

図 6-4-7 は、安定度 10 度における F_t と P_T の関係について、実揺動と仮定揺動を示す。解析手法は先の安定度 5 度の場合と同様である。機体の揺動に関する統計値は、FU 地盤において得られた値を共通して用いる。地盤側の統計値については FU 地盤、FN 地盤、UD 地盤において得られた解析値を用いて、転倒に対する危険の確率(P_T)を求め、その結果を示す。

地盤の起伏に関する変動係数は、FU 地盤の実揺動と FN 地盤の仮定揺動に関する両曲線はほぼ一致しており、大きな差は見られない。UD 地盤については同一 F_t に対する P_T の値が他の 2 曲線よりも大きい。

図 6-4-8 は FN 地盤における P_T を推定した値と実際の値の比較を示す。実揺動と仮定揺動の両曲線を比較する実揺動の方が同一 F_t に対する P_T の値は大きい。しかし、差は顕著ではない。これは、先に示した安定度 5 度の場合に比べても差が小さい。機体安定度の増加は、不均質さに起因する揺動の発生を緩慢にしたために、推定値と実際の値は小さくなったものと考えられる。

図 6-4-9 は UD 地盤における実揺動と仮定揺動の比較を示す。同一 F_t に対する P_T の値は実揺動の方が大きい。しかし、こちらも先の安定度 5 度の場合に比較して差は大きく減少している。FN 地盤においても見られたように、安定度の増加により起伏に対する揺動の反応が緩慢となり、推定値と実測の値は小さくなるのがわかった。

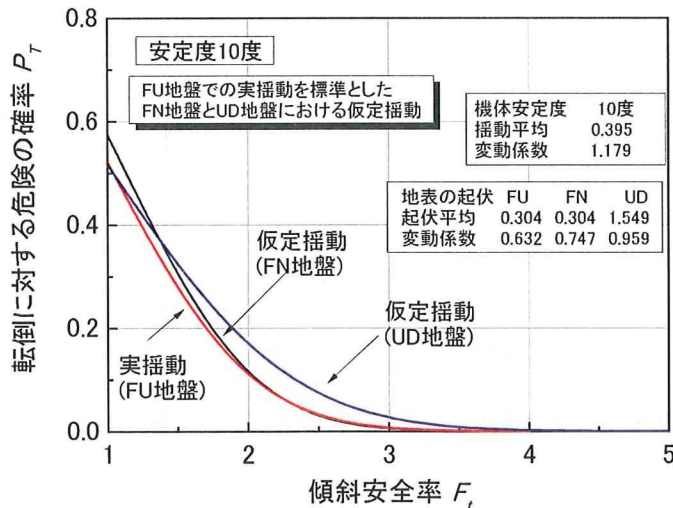


図 6-4-7 FU 地盤における揺動の統計値に基づいて推定した P_T の比較

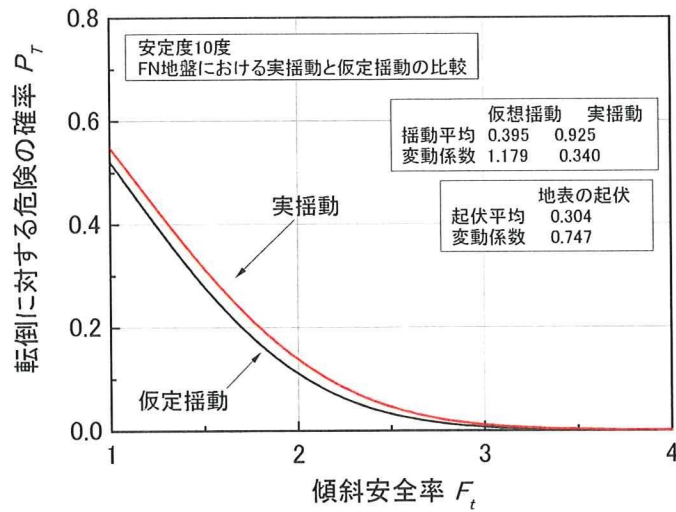


図 6-4-8 FN 地盤における仮定揺動(推定)と実揺動の比較

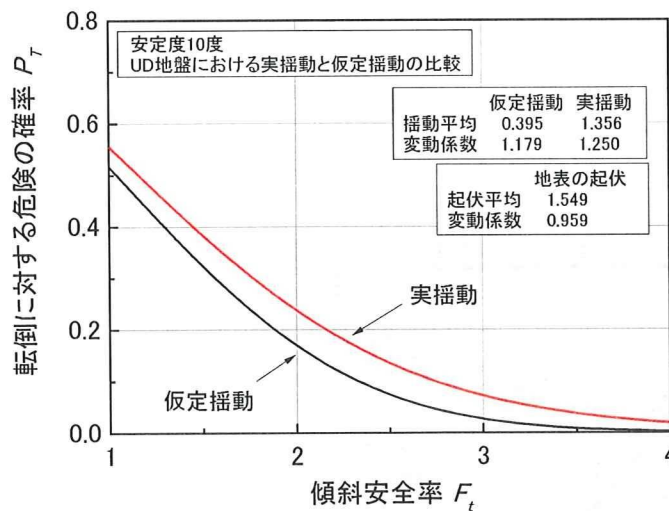


図 6-4-9 UD 地盤における仮定揺動(推定)と実揺動の比較

以上より、地盤側の起伏に関する指標のみをパラメータとして、転倒に対する危険の確率を求めることは適当でないことがわかった。安定度の増加は地盤の不均質さや起伏により生ずる揺動を緩慢にすることがわかった。従って、施工現場に生じる予期せぬ沈下や起伏による転倒を防止するためには、安定度の値を高く設定して作業することが望ましい。本解析では、安定度を 10 以上に設定し、かつ傾斜安全率 4 以上に設定すると、起伏の変動係数が約 1 の場合でも P_T の値を 2% 程度に低減できることが明らかになった。

6.5 まとめ

本章では、自走中のくい打機の挙動に与える、機械側の要因（安定度、重心位置等）と地盤側の要因（せん断強度のばらつき、地表面起伏）の影響について検討を行った。表 6-5-1、表 6-5-2 及び表 6-5-3 に遠心場走行実験の結果の一覧を示す。本節では、遠心場走行実験で明らかになった事項について述べる。

6.5.1 機械側条件による影響

(1) 安定度の違いによる影響

走行中のくい打機模型の挙動を高速度カメラで撮影し、解析を行った。平坦で強度のパラツキが非常に小さいウレタンフォーム地盤に対して、機体の安定度、付加質量の搭載位置、接地圧条件（弾性支持条件、塑性支持条件）を変えて遠心場走行実験を実施した。本実験結果から、安定度の増加とともに走行中に生じる傾斜角とその標準偏差が小さくなることがわかった。また、接地圧条件の違いによる比較をすると、弾性支持条件 ($F_s=1.5$) に比べ、塑性支持条件 ($F_s=0.8$) の傾斜角が大きいことが分かった。

(2) 接地圧力変動に与える影響

走行中に最も大きな接地圧が作用する FS（前輪）に着目し、走行時の揺動に伴う接地圧変動に与える影響を調べた。FS の接地圧分布割合の平均値は安定度の増加とともに減少する傾向が見られ、前述した傾斜角と同様の傾向であった。FS の標準偏差については、安定度の違いによる差は見られなかった。接地圧条件の違いによる比較をすると、弾性支持条件 ($F_s=1.5$) は、塑性支持条件 ($F_s=0.8$) よりも大きく、前述の傾斜角の結果とは異なる傾向を示した。この原因として、塑性支持条件では走行中に大きな揺動が発生し、それに伴い前輪だけではなく後輪にも大きな接地圧が作用したため、前輪の接地圧力分布割合が弾性支持条件よりも小さくなったことが考えられる。

6.5.2 重心高さによる影響

機械の重心高さの違いが揺動に与える影響を調査した。重心高さと傾斜角の関係に着目すると、高重心化に伴い傾斜角の平均値および標準偏差は増加傾向を示した。すなわち、トップヘビーになるほど、走行中に生じる傾斜および揺動が大きくなることが分かった。接地圧力分布と重心位置の関係も同様の傾向を示し、重心位置が高い場合、FS の接地圧力分布割合が大きくなる傾向を示した。

6.5.3 走行速度の影響

走行速度の違いが揺動に与える影響を検討した。比較した走行速度は約 22cm/sec と約 36cm/sec の 2 種類である。安定度（5 度、10 度）と付加質量搭載位置（上部搭載、中央搭載）を変えて実験を行った。その結果、全ての実験ケースにおいて、走行速度の違いによ

る影響は非常に小さく、平坦で均質なウレタンフォーム地盤では走行速度の影響が小さいことが明らかになった。

6.5.4 地盤側条件による影響

(1) 傾斜角に与える影響

関東ロームを用いて作製方法の異なる 3 種類の模型地盤を作製し、地盤条件の違いが実験結果に与える影響を調べた。作製した地盤は、せん断強度のバラツキが小さい「平坦均質地盤」、せん断強度のバラツキが大きい「平坦不均質地盤」、地表面起伏を有する「起伏地盤」である。平坦地盤では、不均質地盤の傾斜角は均質地盤の約 2 倍であり、せん断強度のバラツキが大きい場合、生じる傾斜角および揺動が大きくなることが確認された。また、平坦均質地盤と起伏地盤の結果の比較では、起伏地盤の傾斜角、標準偏差ともに大きく顕著な差が見られた。

(2) 接地圧の変動に与える影響

地盤条件の違いが接地圧変動に与える影響の検討を行った。接地圧変動については、揺動が大きいほど接地圧分布割合の平均値が小さく、標準偏差が大きいことがわかった。

6.5.5 地盤の破壊に対する危険性の解析

遠心場走行実験から得た接地圧分布割合の変動係数と、ハンドベーン試験により得たせん断強度の変動係数を用いて、信頼性工学的手法に基づいた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。その結果、平坦な地盤においても、せん断強度のバラツキが大きい場合、生じる揺動が大きくなり、地盤の破壊確率が顕著に大きくなることが明らかになった。また、起伏を有する地盤では、せん断強度のバラツキを有する地盤よりも地盤の破壊確率が高かった。そのため、せん断強度のバラツキが大きく、かつ起伏を有する地盤では地盤が破壊する確率が著しく大きくなることが明らかになった。

6.5.6 転倒に対する危険性の解析

転倒に対する危険性を評価するために地表面起伏を指標化し、地盤起伏が機体の傾斜に与える影響を確率的に評価した。その結果、平坦地盤では安定度の違いによる転倒に対する危険の確率 P_T に大きな差はないものの、起伏地盤では安定度の違いによる差が顕著であり、安定度 5 度の P_T は 10 度に比べ著しく大きな結果であった。そのため、密度が均質で支持力のバラツキが少ない地盤であっても、起伏が存在する地盤では転倒の危険性は大きくなることが分かった。安定度の増加は地盤の不均質さや起伏により生ずる揺動を緩慢にすることがわかった。従って、施工現場に生じる予期せぬ沈下や起伏による転倒を防止するためには、安定度の値を高く設定して作業することが望ましいことがわかった。

表 6-5-1 ウレタンフォームで平坦かつ均質な地盤を再現して行った遠心場走行実験の結果一覧

ファイル名	走行速度	付加質量 搭載位置	安定度	付加質量	重心位置			速度 cm/sec	安全率 Fs	傾斜角			接地圧分布割合(FS)				
					Gy	Gy/B	Gy/H			平均値	標準偏差	変動係数	理論値	実験値	標準偏差	変動係数	実験値/理論値
2009Mobile_1104D05	通常走行	上部搭載	5	980	25.981	1.856	0.306	40	1.5	1.120	0.533	0.476	0.865	0.534	0.085	0.160	0.61755591
2009Mobile_1104D03			10	440	20.151	1.439	0.237	36	1.5	0.930	0.274	0.295	0.415	0.540	0.073	0.135	1.301611036
2009Mobile_1104D01			15	150	16.509	1.179	0.194	36	1.5	0.774	0.212	0.274	0.353	0.468	0.092	0.196	1.325207395
2009Mobile_1105D01		中央搭載	5	980	21.809	1.558	0.257	36	1.5	1.098	0.247	0.225	0.604	0.635	0.093	0.146	1.050926616
2009Mobile_1105D02			10	440	18.158	1.297	0.214	36	1.5	0.907	0.241	0.266	0.435	0.592	0.101	0.172	1.360575043
2009Mobile_1105D04			15	150	15.806	1.129	0.186	36	1.5	0.866	0.267	0.308	0.360	0.448	0.086	0.192	1.244006659
2009Mobile_1104D04	低速走行	上部搭載	10	440	20.151	1.439	0.237	22	1.5	0.924	0.255	0.276	0.415	0.540	0.087	0.161	1.301924561
2009Mobile_1105D03		中央搭載	10	440	18.158	1.297	0.214	22.5	1.5	0.918	0.243	0.265	0.435	0.552	0.098	0.177	1.270247269
2009Mobile_1106D03	通常走行	上部搭載	5	980	25.981	1.856	0.306	35	0.8	1.733	0.952	0.549	0.539	0.418	0.049	0.117	0.775517018
2009Mobile_1106D01			10	440	20.151	1.439	0.237	36	0.8	1.452	0.685	0.472	0.415	0.363	0.067	0.185	0.876591742
2009Mobile_1105D11			15	150	16.509	1.179	0.194	37	0.8	1.211	0.581	0.480	0.353	0.357	0.061	0.169	1.010928962
2009Mobile_1105D09		中央搭載	5	980	21.809	1.558	0.257	37	0.8	2.402	1.466	0.610	0.604	0.520	0.114	0.219	0.861164936
2009Mobile_1105D06			10	440	18.158	1.297	0.214	37	0.8	1.937	0.754	0.390	0.435	0.503	0.027	0.053	1.157285796
2009Mobile_1105D05			15	150	15.806	1.129	0.186	37	0.8	1.249	0.436	0.350	0.360	0.345	0.037	0.108	0.956132075
2009Mobile_1106D02	低速走行	上部搭載	10	440	20.151	1.439	0.237	22.5	0.8	1.530	0.754	0.493	0.415	0.366	0.059	0.162	0.883344588
2009Mobile_1105D07		中央搭載	10	440	18.158	1.297	0.214	22.5	0.8	2.040	0.981	0.481	0.435	0.538	0.040	0.074	1.237308798

表 6-5-2 関東ロームで平坦な地盤を再現して行った遠心場走行実験の結果一覧

ファイル名	搭載 位置	モーター 回転数	安定度	付加 質量	重心位置			速度 cm/sec	安全率 Fs	傾斜角			接地圧分布割合(FS)					ハンドベーン			地盤の破壊確率				備考
					Gy	Gy/B	Gy/H			平均値	標準偏差	変動係数	理論値	実験値	標準偏差	変動係数	実験値/理論値	平均値	標準偏差	変動係数	FS=1.5	FS=2.0	FS=3.0	FS=4.0	
2009Mobile_1113D05	上部	25000	5	980	25.981	1.856	0.306	36	3.8	1.012	0.415	0.410	0.539	1.000	27.569	27.569	1.855	94.280	19.561	0.207	0.4919	0.4855	0.4710	0.4566	平坦不均質
2009Mobile_1113D03	上部	25000	10	440	20.151	1.439	0.237	36	3.8	0.887	0.296	0.334	0.415	0.204	42.742	209.181	0.493	94.280	19.561	0.207	0.4994	0.4980	0.4959	0.4937	
2009Mobile_1117D01	上部	25000	5	980	25.981	1.856	0.306	35	3.8	0.399	0.482	1.209	0.539	0.661	0.225	0.340	1.226	73.151	12.821	0.175	0.1222	0.0202	0.0007	0.0000	平坦均質
2009Mobile_1117D02	上部	25000	10	440	20.151	1.439	0.237	34	3.8	0.395	0.465	1.179	0.415	0.604	0.262	0.434	1.457	73.151	12.821	0.175	0.1621	0.0364	0.0017	0.0000	
2009Mobile_1119D02	上部	25000	5	980	25.981	1.856	0.306	37	3.8	1.007	0.343	0.340	0.539	0.474	0.301	0.635	0.879	73.605	26.043	0.354	0.2729	0.1465	0.0530	0.0266	平坦不均質
2009Mobile_1119D01	上部	25000	10	440	20.151	1.439	0.237	36	3.8	0.925	0.315	0.340	0.415	0.368	0.217	0.590	0.888	73.605	26.043	0.354	0.2644	0.1389	0.0499	0.0253	

表 6-5-3 関東ロームで起伏を有する地盤を再現して行った遠心場走行実験の結果一覧

ファイル名	搭載位置	モーター回転数	安定度	付加質量	重心位置			速度 cm/sec	安全率 F _s	地表勾配			傾斜角			接地圧分布割合(FS)					ハンドベーン試験			地盤の破壊確率					備考
					Gy	Gy/B	Gy/H			平均値	標準偏差	変動係数	平均値	標準偏差	変動係数	理論値	実験値	標準偏差	変動係数	実験値/理論値	平均値	標準偏差	変動係数	FS=1.5	FS=2.0	FS=3.0	FS=4.0	FS=5.0	
2009Mobile_1218D02	上部	25000	10	440	20.15 1	1.439	0.237	36	3.8	0.775	0.634	0.818	1.336	1.973	1.476	0.415	0.279	0.310	1.111	0.673	70.331	5.125	0.073	0.327	0.186	0.039	0.005		
2009Mobile_1218D01	上部	15000	10	440	20.15 1	1.439	0.237	23	3.8	0.775	0.634	0.818	1.375	1.752	1.274	0.415	0.261	0.186	0.710	0.631	70.331	5.125	0.073	0.243	0.084	0.004	0.000		
2009Mobile_1224D03	上部	25000	5	980	25.98 1	1.856	0.306	36	3.8	1.937	2.22	1.146	1.107	1.828	1.652	0.539	0.727	1.403	1.930	1.348	64.935	6.916	0.107	0.398	0.303	0.153	0.065	0.023	
2009Mobile_1224D01	上部	25000	10	440	20.15 1	1.439	0.237	36	3.8	1.937	2.22	1.146	0.624	1.513	2.426	0.415	0.703	1.379	1.961	1.695	64.935	6.916	0.107	0.400	0.306	0.157	0.068	0.025	
2009Mobile_1224D02	上部	15000	10	440	20.15 1	1.439	0.237	23	3.8	1.937	2.22	1.146	2.068	1.271	0.615	0.415	0.596	1.107	1.857	1.437	64.935	6.916	0.107	0.394	0.296	0.144	0.058	0.019	
2009Mobile_1224D04	上部	25000	10	440	20.15 1	1.439	0.237	36	NC	1.937	2.22	1.146	0.382	3.834	10.036	0.415	0.806	1.201	1.491	1.943	64.935	6.916	0.107	0.369	0.253	0.095	0.027	0.006	敷鉄板
2009Mobile_1224D05	上部	25000	10	440	20.15 1	1.439	0.237	36	NC	1.937	2.22	1.146	-0.620	2.504	-4.038	0.415	1.267	1.274	1.006	3.055	64.935	6.916	0.107	0.312	0.165	0.029	0.003	0.000	敷鉄板二枚敷き
2010Mobile_0105D01	上部	25000	10	440	20.15 1	1.439	0.237	36	3.8	2.033	1.654	0.814	1.193	4.549	3.814	0.415	1.657	61.177	36.918	3.996	74.242	9.287	0.125	-	-	-	-	-	
2010Mobile_0105D02	上部	15000	10	440	20.15 1	1.439	0.237	23	3.8	2.033	1.654	0.814	2.272	5.582	2.456	0.415	0.892	1.616	1.812	2.151	74.242	9.287	0.125	0.392	0.292	0.140	0.055	0.018	
2010Mobile_0105D04	上部	25000	10	440	20.15 1	1.439	0.237	36	NC	2.033	1.654	0.814	2.568	2.422	0.943	0.415	0.944	2.043	2.163	2.278	74.242	9.287	0.125	0.409	0.323	0.181	0.088	0.038	敷鉄板一枚敷き
2010Mobile_0105D05	上部	25000	10	440	20.15 1	1.439	0.237	36	NC	2.033	1.654	0.814	1.073	0.896	0.835	0.415	0.852	1.490	1.749	2.055	74.242	9.287	0.125	0.388	0.286	0.132	0.050	0.016	敷鉄板二枚敷き
2010Mobile_0105D06	上部	25000	10	440	20.15 1	1.439	0.237	36	NY	2.033	1.654	0.814	1.282	0.855	0.667	0.415	1.044	0.683	0.654	2.519	74.242	9.287	0.125	0.231	0.077	0.004	0.000	0.000	敷鉄板二枚敷き 25g
2010Mobile_0107D04	上部	25000	5	980	25.98 1	1.856	0.306	36	3.8	1.34	1.319	0.984	2.511	2.009	0.800	0.539	0.426	0.567	1.331	0.791	74.424	6.228	0.084	0.354	0.228	0.070	0.014	0.002	
2010Mobile_0107D01	上部	25000	10	440	20.15 1	1.439	0.237	36	3.8	1.34	1.319	0.984	1.597	1.251	0.783	0.415	0.324	0.858	2.652	0.781	74.424	6.228	0.084	0.425	0.353	0.226	0.131	0.068	
2010Mobile_0107D02	上部	15000	10	440	20.15 1	1.439	0.237	23	3.8	1.34	1.319	0.984	1.774	1.652	0.932	0.415	0.459	0.585	1.275	1.106	74.424	6.228	0.084	0.348	0.218	0.062	0.011	0.001	
2010Mobile_0107D05	上部	25000	10	440	20.15 1	1.439	0.237	36	NC	1.34	1.319	0.984	1.307	1.406	1.076	0.415	0.327	0.571	1.748	0.789	74.424	6.228	0.084	0.388	0.285	0.129	0.046	0.013	敷鉄板一枚敷き
2010Mobile_0107D08	上部	25000	10	440	20.15 1	1.439	0.237	36	NC	1.34	1.319	0.984	0.931	0.996	1.070	0.415	0.615	0.591	0.961	1.484	74.424	6.228	0.084	0.303	0.153	0.022	0.002	0.000	敷鉄板二枚敷き
2010Mobile_0113D02	上部	25000	10	440	20.15 1	1.439	0.237	36	3.8	1.463	1.397	0.955	0.415	0.615	1.484	0.415	0.330	0.634	1.922	0.796	81.669	8.342	0.102	0.398	0.302	0.152	0.063	0.022	
2010Mobile_0113D03	上部	15000	10	440	20.15 1	1.439	0.237	23	3.8	1.463	1.397	0.955	1.501	2.767	1.843	0.415	0.339	0.536	1.580	0.817	81.669	8.342	0.102	0.376	0.265	0.107	0.033	0.008	
2010Mobile_0113D05	上部	25000	10	440	20.15 1	1.439	0.237	36	NC	1.463	1.397	0.955	1.055	1.828	1.733	0.415	0.498	0.855	1.717	1.200	81.669	8.342	0.102	0.386	0.282	0.126	0.045	0.013	敷鉄板一枚敷き
2010Mobile_0113D06	上部	25000	10	440	20.15 1	1.439	0.237	36	NC	1.463	1.397	0.955	1.449	2.143	1.479	0.415	0.302	0.565	1.874	0.727	81.669	8.342	0.102	0.395	0.298	0.146	0.059	0.020	敷鉄板一枚敷き 1.0mm
2010Mobile_0113D11	上部	25000	10	440	20.15 1	1.439	0.237	36	NC	1.463	1.397	0.955	1.097	1.925	1.755	0.415	0.412	0.613	1.489	0.994	81.669	8.342	0.102	0.369	0.253	0.094	0.026	0.006	敷鉄板二枚敷き 1.0mm
2010Mobile_0113D12	上部	25000	10	440	20.15 1	1.439	0.237	36	NC	1.463	1.397	0.955	1.894	2.304	1.217	0.415	0.522	0.358	0.686	1.258	81.669	8.342	0.102	0.238	0.081	0.004	0.000	0.000	敷鉄板一枚敷き 25g
2010Mobile_0115D04	上部	25000	5	980	25.98 1	1.856	0.306	36	3.8	1.549	1.485	0.959	2.332	2.300	0.986	0.539	0.355	0.812	2.291	0.658	83.640	8.883	0.106	0.414	0.332	0.194	0.099	0.044	
2010Mobile_0115D01	上部	25000	10	440	20.15 1	1.439	0.237	36	3.8	1.549	1.485	0.959	1.356	1.694	1.250	0.415	0.253	0.739	2.922	0.610	83.640	8.883	0.106	0.432	0.366	0.248	0.155	0.089	
2010Mobile_0115D03	上部	15000	10	440	20.15 1	1.439	0.237	23	3.8	1.549	1.485	0.959	1.518	2.108	1.388	0.415	0.235	0.539	2.299	0.566	83.640	8.883	0.106	0.414	0.332	0.194	0.100	0.045	
2010Mobile_0115D05	上部	25000	15	150	16.50 9	1.179	0.194	36	3.8	1.549	1.485	0.959	1.211	1.952	1.612	0.353	0.291	0.485	1.669	0.824	83.640	8.883	0.106	0.383	0.276	0.120	0.041	0.011	
2010Mobile_0115D07	中央	25000	10	440	18.15 8	1.297	0.214	36	3.8	1.549	1.485	0.959	1.857	2.395	1.290	0.435	0.461	0.571	1.238	1.061	83.640	8.883	0.106	0.344	0.213	0.059	0.011	0.001	
2010Mobile_0115D06	中央	25000	15	150	15.80 6	1.129	0.186	36	3.8	1.549	1.485	0.959	1.451	2.051	1.413	0.604	0.326	0.501	1.538	0.540	83.640	8.883	0.106	0.373	0.260	0.101	0.030	0.007	
2010Mobile_0115D10	上部	25000	10	440	20.15 1	1.439	0.237	36	NC	1.549	1.485	0.959	1.284	1.506	1.173	0.415	0.429	0.741	1.726	1.035	83.640	8.883	0.106	0.386	0.283	0.127	0.046	0.013	敷鉄板一枚敷き
2010Mobile_0115D11	上部	25000	10	440	20.15 1	1.439	0.237	36	NC	1.549	1.485	0.959	1.515	2.211	1.460	0.415	0.483	1.471	3.045	1.165	83.640	8.883	0.106	0.435	0.372	0.257	0.165	0.098	敷鉄板一枚敷き 1.0mm
2010Mobile_0115D12	上部	25000	10	440	20.15 1	1.439	0.237	36	NC	1.549	1.485	0.959	1.293	1.376	1.064	0.415	0.550	0.747	1.358	1.327	83.640	8.883	0.106	0.357	0.233	0.076	0.017	0.003	敷鉄板二枚敷き 1.0mm
2010Mobile_0118D01	上部	25000	10	440	20.15 1	1.439	0.237	36	NC	1.549	1.485	0.959	1.824	1.735	0.951	0.415	0.674	0.452	0.672	1.624	83.640	8.883	0.106	0.235	0.078	0.004	0.000	0.000	敷鉄板一枚敷き 25g

6.6 参考文献

- 1) 越 昭三：数理統計概論，学術図書出版社，1983.
- 2) 星谷勝，石井清：構造物の信頼性設計法，鹿島出版会，1997.
- 3) CIRIA：Crane Stability on Site, Supecial Publication 131, 2003.
- 4) 松尾稔：地盤工学，技報堂出版，1984.

第7章 まとめ

7.1 概説

本研究は基礎工事用大型建設機械の転倒防止を目的に、安定設置に必要な支持地盤の要件を検討したものであり、平成19年度より3カ年計画で行った。本研究の主な構成は、1) 災害調査、2) 自走時におけるくい打機械の挙動解析、3) 履帯基礎の支持力解析であり、本年度（平成21年度）は、1)と2)と3)について実施した。本章では、報告書のまとめとして、各章で得られた知見を要約する。

7.2 第1章の要約

第1章は序論であり、本研究の背景、目的ならびに構成が述べられている。主な内容は、次の通りである。

- 1) 労働安全衛生規則では施工現場におけるくい打機械の設置に際して沈下防止の措置が義務づけられている。しかし、そのために必要な地盤の支持力条件については詳細が述べられておらず、その判断は事業者に委ねられている。
- 2) 車両系建設機械構造規格では、くい打機械の安定度（限界傾斜角）を定めている。しかし、設置地盤は水平堅固が仮定されており、沈下により生ずる機体傾斜が厳密には考慮されていない。
- 3) 都市開発における地盤改良工事や大型建築における基礎工事は不可欠である。その結果、くい打機の使用は近年増加しており、転倒防止措置の検討は急務な問題である。
- 4) 本研究で着目する機体と地盤の不安定要因を示し、その解明に必要な研究事項を示した。くい打機械に関する地盤工学的な問題点と本研究の構成が述べられている。

7.3 第2章の要約

第2章は過去の災害事例に基づく調査結果と転倒原因の考察が述べられている。発生時の作業状および災害原因の解明を目的に災害事例を分析した。主な内容は次の通りである。

- 1) 表層ケーシングとアースドリルとの距離が離れていたにもかかわらず、安定限界付近で引き抜くティッピング行為が行われていた。作業半径が大きく無理な引き抜きを行ったために転倒モーメントが安定モーメントを上回り転倒した。
- 2) 表層ケーシングの引き抜き時に、つり上げと同時に右旋回が行われた。この右旋回は水平分力を生じさせ、表層ケーシングと孔壁の間に生じる摩擦を増加させた。その結果、引き抜き荷重が増加し、転倒モーメントを増加させた。さらに、水平分力は機体

に反作用として左に旋回させようとする力，すなわち旋回モーメントを与えた．従って，同時旋回による負荷が機体を一層，不安定化させたと考えられる．

- 3) アースドリルによる補助吊り作業はマニュアルに記述された使用方法である．しかし，この補助吊り作業とは工事用品（表層ケーシング，鉄筋，トレミー管）を削孔へ吊り込む作業のことであり，引き抜きに使用してはいけない．
- 4) セメント安定処理した表層土の一軸圧縮強さを調査した結果，その値には大きな差が見られた．処理が不十分な箇所では期待した支持力が得られず，アース・ドリルの安定性は減少する．また，本件も含めて都市部の工事では旧建築物の解体を伴う場合が多く，表層付近の土質や強度が不明確となる場合も多い．さらに，現場は建築物の支持に杭基礎を必要とする強度条件の地盤である．以上のことから，基礎工事には支持地盤の不安定性による転倒の危険も潜在すると考えられる．

7.4 第3章の要約

第3章はくい打機のモデル化と実験装置の開発および実験条件が述べられている．主な内容は次の通りである．

- 1) くい打機模型を 1/25 スケールで設計し，実機と重心位置が等しくなるよう，モーターや減速機を配置した．重心の位置と機械の安定度は付加質量の位置を変えることで自由に変えられるようにした．本年度は，模型のいくつかの点において小規模な改善を行った．その結果，実験システムを高度化することができ，信頼性の高いデータを蓄積することが出来た．
- 2) 遠心場走行実験で使用した，遠心模型実験装置やデータ収録装置，センサー，高速度ビデオカメラ，実験容器，模型を作製するための試料に関する項目について記述した．
- 3) 遠心場走行実験の実験条件について述べた．

7.5 第4章の要約

第4章は遠心場走行実験のデータ整理の方法と実験結果の個別一覧を示した．主な内容は次の通りである．

- 1) 本年度に実施した遠心場走行実験は全部で 55 ケースであり，その内訳はウレタンフォーム地盤 16 ケース，関東ローム 39 ケースである．
- 2) ウレタンフォーム地盤では，くい打機の挙動解析を行う上で基礎的なデータを得るため，安定度や走行速度，支持力安全率を変えて実験を行い，それぞれの影響について調べた．関東ローム地盤では，作製方法の異なる 3 種類の模型地盤（せん断強度のばらつき的大小，起伏の有無）を作製して，安定度や走行速度，重心位置を変えて実験を行った．

7.6 第5章の要約

第5章は履帯基礎の支持力と敷鉄板の養生性能を調べる実験の概要と実験結果を示した。主な内容は次の通りである。

- 1) 履帯模型を作製し、支持力実験を行った。履帯模型の中心から偏心量を変えて載荷実験を行った。実験結果では、中央載荷での載荷荷重が最も大きく、偏心量の増加に伴って低下することがわかった。
- 2) 敷鉄板模型を作製し、支持力実験を行った。中央に載荷した荷重と偏心量を与えた際の荷重を比較すると、敷鉄板模型端部に載荷した場合には、中央載荷に比べ0.2程度に減少することがわかった。
- 3) 敷鉄板の敷設の状態を示す指標を定義した。敷設の状態を示す指標として重複量(R_L)と偏心度(R_E)の定義を行った。重複度は増加する事で、上部敷鉄板が偏心して敷設された形状となる。偏心度は増加する事で、上部敷鉄板が偏心して敷設された形状という2つの指標の定義を行った。
- 4) 敷鉄板模型を重ね敷きにして支持力試験を行った結果、敷き方の方法により得られる支持力が大きく異なることが明らかになった。

7.7 第6章の要約

第6章は遠心場走行実験の結果を解析し、自走中のくい打機の挙動に与える要因として、機械側条件（安定度、重心位置、速度等）と地盤側要件（平坦性、強度のばらつき、起伏）の影響について検討を行った。主な内容は次の通りである。

- 1) 走行中のくい打機模型の挙動を高速カメラで撮影し、解析を行った。平坦で強度のバラツキが非常に小さいウレタンフォーム地盤に対して、機体の安定度、付加質量の搭載位置、接地圧条件（弾性支持条件、塑性支持条件）を変えて遠心場走行実験を実施した。本実験結果から、安定度の増加とともに走行中に生じる傾斜角とその標準偏差が小さくなることがわかった。また、接地圧条件の違いによる比較をすると、弾性支持条件 ($F_s=1.5$) に比べ、塑性支持条件 ($F_s=0.8$) の傾斜角が大きいことが分かった。
- 2) 走行中に最も大きな接地圧が作用する FS（前輪）に着目し、走行時の揺動に伴う接地圧変動に与える影響を調べた。FS の接地圧分布割合の平均値は安定度の増加とともに減少する傾向が見られ、前述した傾斜角と同様の傾向であった。FS の標準偏差については、安定度の違いによる差は見られなかった。接地圧条件の違いによる比較をすると、弾性支持条件 ($F_s=1.5$) は、塑性支持条件 ($F_s=0.8$) よりも大きく、前述の傾斜角の結果とは異なる傾向を示した。この原因として、塑性支持条件では走行中に大きな揺動が発生し、それに伴い前輪だけではなく後輪にも大きな接地圧が作用したため、前輪の接地圧力分布割合が弾性支持条件よりも小さくなったことが考えられる。
- 3) 機械の重心位置が試験結果に与える影響について検討した。重心位置と傾斜角の関係

に着目すると、高重心化に伴い傾斜角の平均値および標準偏差は増加傾向を示した。すなわち、トップヘビーになるほど、走行中に生じる傾斜および揺動が大きくなることが分かった。接地圧力分布と重心位置の関係も同様の傾向を示し、重心位置が高い場合、FSの接地圧力分布割合が大きくなる傾向を示した。

- 4) 走行速度の違いが揺動に与える影響を検討した。比較した走行速度は約 22cm/sec と約 36cm/sec の 2 種類である。安定度 (5 度, 10 度) と付加質量搭載位置 (上部搭載, 中央搭載) を変えて実験を行った。その結果, 全ての実験ケースにおいて, 走行速度の違いによる影響は非常に小さく, 平坦で均質なウレタンフォーム地盤では走行速度の影響が小さいことが明らかになった。
- 5) 関東ロームを用いて作製方法の異なる 3 種類の模型地盤を作製し, 地盤条件の違いが実験結果に与える影響を調べた。作製した地盤は, せん断強度のバラツキが小さい「平坦均質地盤」, せん断強度のバラツキが大きい「平坦不均質地盤」, 地表面起伏を有する「起伏地盤」である。平坦地盤では, 不均質地盤の傾斜角は均質地盤の約 2 倍であり, せん断強度のバラツキが大きい場合, 生じる傾斜角および揺動が大きくなることが確認された。また, 平坦均質地盤と起伏地盤の結果の比較では, 起伏地盤の傾斜角, 標準偏差ともに大きく顕著な差が見られた。
- 6) 遠心場走行実験から得た接地圧分布割合の変動係数と, ハンドベーン試験により得たせん断強度の変動係数を用いて, 信頼性工学的手法に基づいた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。その結果, 平坦な地盤においても, せん断強度のバラツキが大きい場合, 生じる揺動が大きくなり, 地盤の破壊確率が顕著に大きくなることが明らかになった。また, 起伏を有する地盤では, せん断強度のバラツキを有する地盤よりも地盤の破壊確率が高かった。そのため, せん断強度のバラツキが大きく, かつ起伏を有する地盤では地盤が破壊する確率が著しく大きくなることが明らかになった。
- 7) 地表面起伏を指標化し, 機械の安定度および走行中に生じた傾斜角から傾斜安全率を定義した。
- 8) 転倒に対する危険性を評価するために, 地盤起伏が機体の傾斜に与える影響を確率的に評価した。その結果, 平坦地盤では安定度の違いによる転倒に対する危険の確率 P_T に大きな差はないものの, 起伏地盤では安定度の違いによる差が顕著であり, 安定度 5 度の P_T は 10 度に比べ著しく大きな結果であった。そのため, 密度が均質で支持力のバラツキが少ない地盤であっても, 起伏が存在する地盤では転倒の危険性は大きくなることが分かった。
- 9) 安定度の増加は地盤の不均質さや起伏により生ずる揺動を緩慢にすることがわかった。従って, 施工現場に生じる予期せぬ沈下や起伏による転倒を防止するためには, 安定度の値を高く設定して作業することが望ましいことがわかった。

7.8 健康危険情報

健康に危険を及ぼすような情報はなし。

7.9 研究成果による特許権等の知的財産権の出願・登録状況

特になし。

第8章 謝 辞

本報告は厚生労働科学研究費補助金(労働安全衛生総合研究事業)により実施した研究課題「基礎工事用大型建設機械の転倒防止に関する研究」について、平成21年度に得られた成果をまとめたものである。本研究の実施するにあたって、ご協力頂いた関係各位及び有用なるご助言等を下さった皆様に深く感謝を申し上げます。

また、東京都市大学工学部長の片田敏行教授には本研究の方針に関してご助言を頂きました。深く感謝致しております。また、本研究を卒業研究として取り組まれ、成果の発展に多大なる貢献をした東京都市大学大学院修士1年の前田周吾君と同大学4年の中島崇光君に心よりお礼を申し上げます。

さらに、中央労働災害防止協会の木下克巳企画課長および森永 悠様には労働安全衛生総合研究推進事業における若手研究者の育成活用(リサーチレジデント)事業を実施するにあたり、その管理と諸手続においてご協力を頂きました。深くお礼申し上げます。

くい打機の転倒災害の防止に貢献できるよう、更に調査研究に取り組んで参りたく思っております。また、研究成果を積極的に公表し、周知に努めて参りたく存じております。今後もしもご指導、ご鞭撻を賜りますようよろしくお願い申し上げます。

2010(平成22)年3月