

建設現場の地盤養生に関する実験的検討

敷鉄板を用いた地盤養生

堀 智 仁

基礎工事用機械（以下、くい打機という）のような大型建設機械の転倒災害を調査すると、機械が移動中、敷鉄板の端部に履帯が位置した際に転倒した事例が多く見受けられる。くい打機を設置する際、敷鉄板の中央付近に履帯が設置された条件で安定性の検討がなされているが、機械は施工時に現場内を移動するため、敷鉄板の端部に履帯が位置した場合、敷鉄板の荷重分散効果が小さくなり、想定よりも大きな接地圧が地盤に作用する。機械の移動を想定した適切な敷鉄板の敷設方法については十分な知見がない。そこで本研究では、敷鉄板の敷設方法について分類し、それぞれの荷重分散効果について模型実験による検討を行った。さらに、小型のくい打機模型を作製し、遠心場走行実験を行い、敷鉄板の敷設方法と走行挙動の関連性を調べた。

キーワード：地盤養生、敷鉄板、大型建設機械、転倒防止

1. はじめに

くい打機のような大型建設機械の転倒災害は、建設現場内で作業している労働者のみならず、付近の民家等を損壊し、第三者をも巻きこむ災害に発展する危険性がある。過去に発生した転倒災害を調査すると、くい打機が現場内を移動中、履帯が敷鉄板の端部に位置した際に転倒した事例や、敷鉄板による地盤養生が不十分であったことが原因で転倒に至った事例が多く見受けられた。

労働安全衛生規則第173条¹⁾では、くい打機の転倒を防止するため、履帯の沈下防止措置として敷板、敷角等の使用を義務付けている。しかし、現在の規則やマニュアル等^{2), 3)}では敷鉄板の定量的な設置基準は述べられていない。また、くい打機の安定設置に関する現行の検討方法では、地盤上に敷鉄板を設置する場合、敷鉄板の荷重分散効果を考慮して地盤に作用する接地圧を求めている。その際、敷鉄板の中央付近に履帯が位置した状態を想定している。筆者らのこれまでの研究から、敷鉄板模型に対して載荷位置を変えて支持力実験を行った結果、敷鉄板中央部に載荷した場合に比べ、敷鉄板端部では荷重分散効果が著しく低下することを確認している⁴⁾。

本研究では、敷鉄板の重ね敷きの敷設方法について分類し、それぞれの敷設効果について実験的に検討を行った。さらに、小型のくい打機模型を作製して、遠心場走行実験を行った。敷鉄板の敷設方法と走行中に

発生する揺動の大きさについて調べ、敷鉄板の適切な地盤養生方法について検討した。

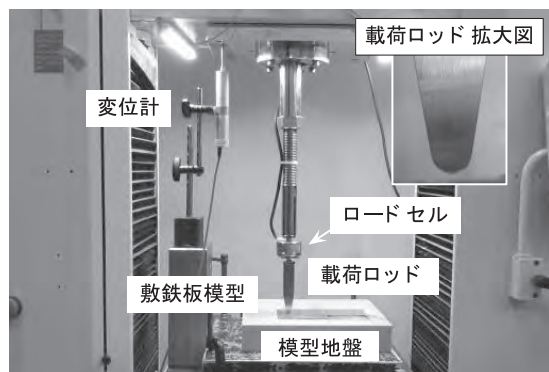
2. 実験の概要

(1) 敷鉄板模型を用いた載荷実験

敷鉄板模型は一般的に使用されている敷鉄板(1.5 m×6 m×25 mm)の1/25スケール(60 mm×120 mm×1 mm)で作製した。ただし、長さについては実験装置の都合上1/50とした。

模型地盤は、ウレタンフォーム($\rho=28\text{ kg/m}^3$)を用いて作製した。この材料は均質な材料であり、実験の再現性を確保する目的で用いた。一般的な地盤材料と異なる点は、引張強度を有していることである。載荷実験において沈下量の増加とともに引張強度の影響が大きくなり、支持力を高めに示す傾向がある。この点は粒状体である地盤材料と性質が異なる。そのため本研究では引張強度の影響が小さい弾性域付近の値により評価を行った。なお、模型地盤の寸法は360 mm×360 mm×100 mmである。

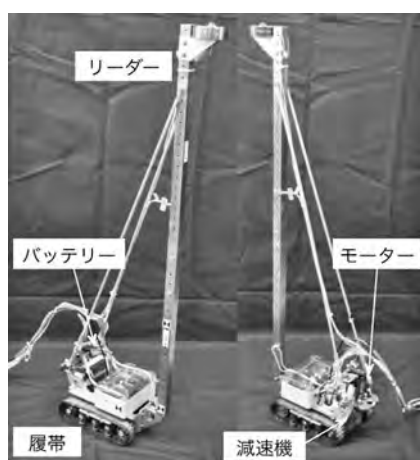
本研究で用いた載荷装置は、島津製作所製の精密万能載荷試験装置AG-100kNIS(Autograph)である。この装置は高精度の低速変位制御により最大負荷容量100 kNまで載荷することが可能である。載荷荷重はくい打機のフロント荷重を模擬した載荷ロッドを介して線荷重を与えた。図—1に載荷実験の様子を示す。



図一 1 载荷実験の様子

(2) くい打機模型を用いた遠心模型実験

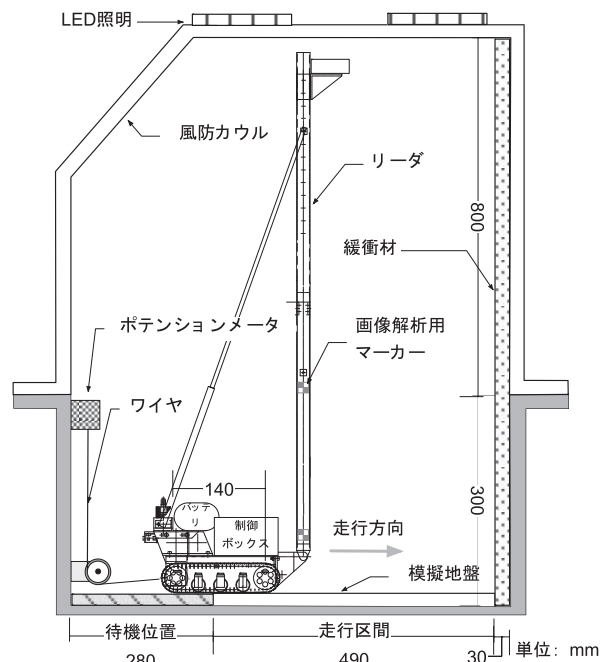
くい打機の模型を遠心場で走行させて機体に生じる揺動を解析した。作製した小型模型を図一 2 に示す。実機を 1/25 スケールで再現した遠心場で遠隔操作が可能な実験装置である。モーター等の部品は重心位置が実機と等しくなるように配置されている。模型に遠心加速度 (n) を与えることにより、実機と同レベルの接地圧力を再現し、模型を実大と同じ速度で走行させることによって、動的な相似則は満足され、実大の $1/n$ 時間で現象は再現される⁵⁾。



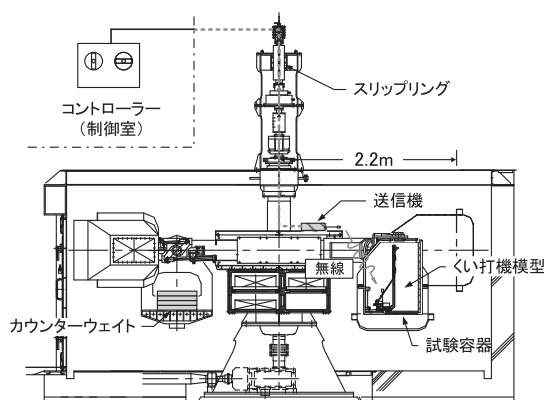
図一 2 くい打機模型

実験に用いた容器の寸法は幅 250 mm、長さ 800 mm、高さ 300 mm である。容器上部には遠心装置の回転に伴う影響を排除する為に風防カウルを設置し、模型全体を覆っている。

走行時の移動距離はワイヤー変位計で測定した。実験容器内を走行する模型の概念図を図一 3 に示す。図一 4 には、遠心実験装置に搭載した試験容器と制御イメージを示す。機体の前方の安定度 (θ_u) は 6.2 度とし、実大の走行速度は 1.2 km/h とした。ここで安定度とは、機械が最も不利となる状態での限界傾斜角を意味し、前後左右の方向に対して満足しなければ



図一 3 実験容器内における模型の走行



図一 4 遠心模型実験装置に搭載した試験容器

ならない値である。なお、実験条件の詳細については後述することにする。

3. 実験条件

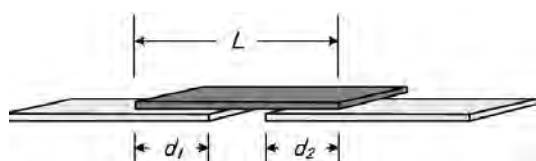
(1) 敷鉄板の敷設に関する分類

敷鉄板を重ねて敷設した場合、荷重が作用する有効面積が大きくなり、地盤に作用する圧力が小さくなることが期待される。敷鉄板を敷設する際には、種々の条件が考えられる。本研究では、敷鉄板を 2 次元的にモデル化し、敷鉄板の長さを L 、両端における下部敷鉄板との重複長さを d_1 および d_2 と定義した。図一 5 にその概要を示す。

表一 1 に敷鉄板敷設方法の分類を示す。大分類として、「一枚敷き」と「二枚敷き」に分類した。次に、中分類として二枚敷きに関して、「部分重複」と「全

表—1 敷鉄板の敷設方法の分類

大分類	中分類	小分類
・一枚敷き $\frac{d_1+d_2}{L} = 0$		
・二枚敷き $\frac{d_1+d_2}{L} > 0$	・部分重複 $0 < \frac{d_1+d_2}{L} < 1$	・反面交互 $d_1 = d_2$
	・全体重複 $\frac{d_1+d_2}{L} = 1$	・偏心交互 $d_1 \neq d_2$
		・完全重複 $d_1 = 0, d_2 = L$



図—5 敷鉄板の重複方法

$$R_L = \frac{d_1 + d_2}{L} \quad (1)$$

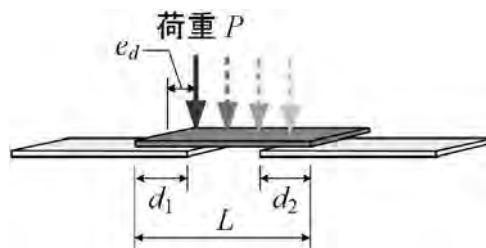
(b) 偏心度

偏心度 (R_E) の関係式を式 (2) に示す。偏心度の値が増加することにより、上部敷鉄板が偏心して設置される。

$$R_E = \frac{d_2 - d_1}{L} \quad (2)$$

(3) 载荷条件

敷鉄板模型を種々の敷設方法で設置し、载荷実験を行った。その際、敷鉄板の重複度 R_L 、偏心度 R_E および荷重 P の载荷位置 (e_d) を変数とした。载荷試験は上部敷鉄板端部から $L/8$ ($=15 \text{ mm}$) ずつ e_d を増加させた全7地点において行った。これは、機械の移動を模擬したものである。図—7に概要を示す。表—2に载荷位置を示す。载荷荷重はウレタンフォーム地盤の弾性範囲内である 100 N まで与えた。表—3に実験名称と実験条件を示す。実験ケースは R_L と R_E を変えた全9ケースである。なお、荷重は変位制御 (载荷速度 0.5 mm/min) で与えた。



図—7 荷重の载荷位置

表—2 敷鉄板の载荷位置

変数	载荷位置						
e_d/L	0.125	0.25	0.375	0.5	0.625	0.75	0.875

体重複」を定義した。部分重複は $(d_1 + d_2)/L < 1$ であり、全体重複は $(d_1 + d_2)/L = 1$ である。すなわち、部分重複は下部敷鉄板に隙間があるのに対して、全体重複は隙間がない状態である。小分類として、全体重複に関して、 d_1 と d_2 の値の違いにより、「半面交互」、「偏心交互」、「完全重複」とそれぞれ定義した。その概要を図—6に示す。

(2) 敷設の状態を示す指標

敷鉄板の重複設置を行うにあたり、敷設の状態を示す2つの指標を定義した。1つは重複度であり、もう1つは、偏心度である。

(a) 重複度

重複度 (R_L) の関係式を式 (1) に示す。重複度の値が増加することにより、連続する下部敷鉄板の隙間が小さくなる。

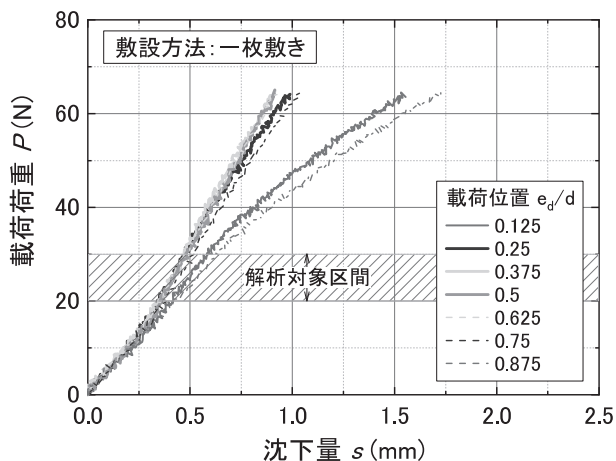
表—3 実験名称と敷鉄板の敷設条件

実験名	重複度 R_L	偏心量 R_E	敷設状況
Cs1	0	0	一枚敷き
Cs2	1/4		部分重複
Cs3	2/4		
Cs4	3/4		
Cs5	4/4	0	半面交互
Cs6		1/4	偏心交互
Cs7		2/4	
Cs8		3/4	
Cs9		4/4	完全重複

4. 実験結果

(1) 解析対象データ

一枚敷きの敷鉄板に対して、載荷位置を変えて行った実験結果を図—8に示す。図中のデータは荷重 (P) - 沈下 (s) 関係が直線関係を示す弾性域付近のデータである。なお、ここでの沈下量とは、各載荷地点での値である。載荷位置の違いにかかわらず、 $P=20 \sim 30 \text{ N}$ では、荷重 P と沈下量 s に直線関係が見られる。本研究では、この載荷荷重の範囲を解析対象データとした。

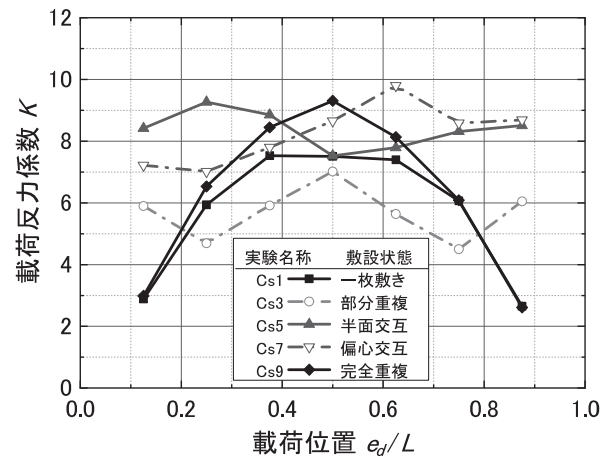


図—8 解析対象データ

(2) 載荷反力係数と載荷位置の関係

図—9に各載荷条件での載荷反力係数 (K) と載荷位置 (e_d/L) の関係を示す。ここで、 K とは支持力実験における弾性域での荷重 - 沈下関係から求めた傾きである。図中に示したデータは直線関係を示した範囲 ($20 \text{ N} < P < 30 \text{ N}$) から求めた値である。同一荷重に対して発生する沈下量 (s) を比較した場合、 K の増加は s を減少させる。したがって、 K の値が大きいほど地盤の養生効果が高いことを意味する。

一枚敷きの条件 (Cs1) では、曲線が上に凸の形状



図—9 載荷反力係数と載荷位置の関係

を示す。中央載荷 ($e_d/L=0.5$) で K は最大値を示すが、鉄板の両端に載荷した条件では K が小さい。したがって、敷板の両端付近では地盤の養生効果が小さいことがわかる。

二枚敷きで半面交互させた Cs5 では、 K はほぼ一定の値を示し、載荷位置の違いによる K の差は小さい。すなわち、半面交互では載荷位置の違いにかかわらず一定の地盤養生効果が得られている。

二枚敷きで完全重複させた Cs9 では曲線が上に凸の形状を示し、Cs1 と類似した結果である。中央載荷 ($e_d/L=0.5$) に対する K の値を比較すると Cs1 のそれに比べて大きい。これは敷鉄板を重ね敷きにより、鉄板の厚さが2倍になり曲げ剛性が増加したためと考えられる。それに対して、両端付近では K の増加は見られず、一枚敷きの結果とほぼ同じ値であった。この原因として、二枚敷きによる荷重分散の影響に比べ、荷重の偏心に伴う有効載荷面積の減少による影響が大きく、両端付近の載荷反力係数 K の増加がみられなかったことが考えられる。

部分重複を与えた Cs3 では、Cs1 に比べて曲線がやや平坦になっており、安定した分散効果が得られているが、Cs5 (半面交互) に比べて K の値は全体的に小さい。また、全体重複で偏心交互させた Cs7 では全体的に K の値は大きくなっているものの、その変動は Cs5 に比べて大きい。

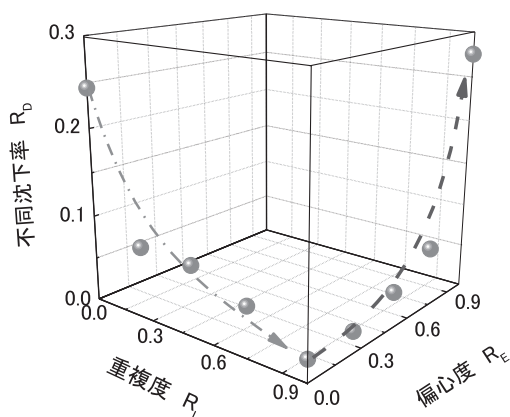
敷鉄板上を通過する移動荷重により生じた沈下量の最大値と最小値の差を不同沈下量 (Δs) とし、単位荷重増分 (ΔP) に対する Δs の割合を不同沈下率 (R_D) と定義した。式 (3) にその関係式を示す。 R_D が増加すると機体に生じる傾斜は大きくなり、転倒の危険が高くなることを意味する。

$$R_D = \frac{\Delta s}{\Delta P} \quad (3)$$

図—10に R_L および R_E と R_D の関係を示す。 $R_E=0$ すなわち対称に設置され、かつ偏心が無い場合は、 R_L の増加に伴って R_D は減少している。そして $R_L=1.0$ の半面交互条件では、 R_D が最小となっている。すなわち、敷鉄板の隙間を小さくすることで、生じる沈下量が減少することを意味する。

一方、 $R_L=1.0$ では R_E の増加に伴い R_D も大きくなり、完全重複($R_E=1.0$)で、 R_L は最大となっている。

以上の結果から、敷鉄板の敷設方法により敷設効果が異なることが明らかになり、重複度が大きく、かつ偏心度が小さい条件では、最も敷設効果が大きいことがわかった。また、重ね敷きであっても、完全重複条件では一枚敷きと同等の敷設効果しか得られないことが明らかになった。



図—10 不同沈下率 R_D に与える重複度 R_L と偏心度 R_E の関係

(3) 遠心模型実験による揺動解析

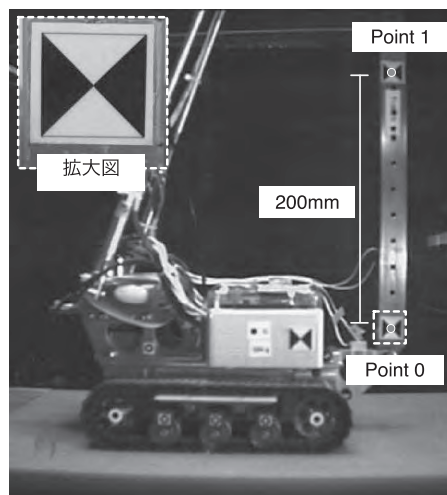
(a) 実験条件

遠心模型実験の条件を表—4に示す。敷鉄板の敷設条件は、一枚敷き(CMT1)、半面交互(CMT2)および完全重複(CMT3)の3ケースである。遠心加速度は、支持力の安全率が0.8となるよう設定した。すなわち、敷鉄板を設置しない場合、くい打機模型が転倒することを意味する。

走行実験の様子は図—11に示すように、側方より高速度カメラを用いて走行挙動を記録した。動画は

表—4 実験条件

実験名称	遠心加速度	支持力安全率	機体の安定度	重複度 R_L	偏心度 R_E	敷設条件
CMT1	15G	0.8	6.2	0	0	一枚敷き
CMT2				1	0	半面交互
CMT3				1	1	完全重複



図—11 高速度カメラによる揺動解析

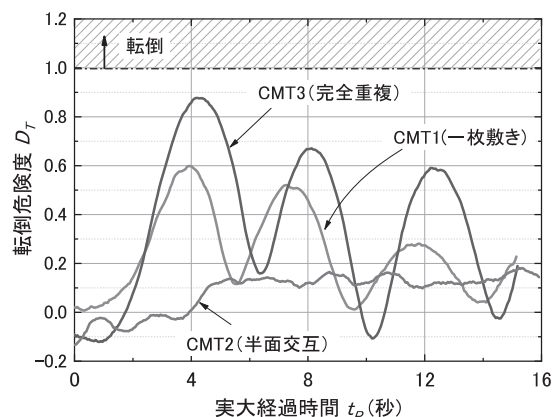
500 fpsで撮影し、1 pixelの精度は約0.8 mmである。模型リーダー部の上下に測定点を設けて、それぞれをPoint0、Point1とし、Point0とPoint1を結んだ測線の傾斜角を画像解析により算出した。本研究では、走行中に発生する傾斜角を揺動傾斜角(θ_s)と呼び、模型の安定度(θ_u)に対する θ_s の比を転倒危険度(D_T)と定義した。式(4)にその関係式を示す。

$$D_T = \frac{\theta_s}{\theta_u} \quad (4)$$

(b) 実験結果

図—12に実大スケールに換算した経過時間(t_p)と D_T の関係を示す。CMT1(一枚敷き)とCMT3(完全重複)では t_p の増加に対して D_T が大きく変動している。これは、自走中の機体に大きな揺れが生じていることを示す。一方、CMT2(半面交互)では僅かな変動が見られるものの、その値は小さくほぼ一定と見なされる。このことから、敷鉄板の敷設の仕方によって転倒の危険性は左右されることが分かる。

表—5は遠心場走行実験による D_T の比較を示す。CMT3の最大 D_T は0.9と最も大きく、次いでCMT1



図—12 転倒危険度と経過時間の関係

表—5 遠心場走行実験の結果

実験名称	敷設条件	最大 D_T	最小 D_T	ΔD_T	危険度
CMT1	一枚敷き	0.621	0.007	0.614	大
CMT2	半面交互	0.179	-0.116	0.295	小
CMT3	完全重複	0.899	-0.104	1.003	大

が0.6, CMT2が0.2である。したがって、自走中の転倒危険性はCMT3が最も高かった。この結果は、図—10に示した載荷試験の結果においても、敷鉄板を完全重複させたCs3では R_D が最大となっており、遠心模型実験の結果は載荷実験の結果と一致するものである。

以上のことから、重ね敷きの条件において完全重複条件では、一枚敷きに比べ機体に発生する揺動が大きくなる可能性があることが実験より明らかになった。また、敷鉄板を用いて地盤養生をする際には、下部敷鉄板の隙間が小さくなるように配置し、二枚の下部敷鉄板を架橋するように上部敷鉄板を設置する方法が最良と考えられる。

5. おわりに

敷鉄板模型を作製し、敷鉄板の敷設方法と地盤の養生効果について模型実験により検証を行った。その結果、敷鉄板の敷設方法の違いにより、地盤の養生効果に大きな差が認められた。具体的には、重複度 (R_L) が大きく、かつ偏心度 (R_E) が小さい場合、最も地盤養生効果が大きいことがわかった。一方、重ね敷きであっても、「完全重複」条件では一枚敷きと同等の

地盤養生効果しか得られないことが明らかとなった。

くい打機模型を作製し、敷鉄板の敷設方法と機械の揺動の関係を遠心模型実験により調査した。その結果、敷鉄板の敷設方法の違いにより揺動に差が見られた。一枚敷きと完全重複では大きな揺動が現れ、転倒の危険性は大きく現れた。それに対して、半面交互では、模型の揺動は僅かであり、転倒の危険性は非常に小さいことがわかった。

敷鉄板模型による載荷実験およびくい打機模型による遠心場走行実験の結果から、敷鉄板の敷設方法を工夫することにより、安全性が大きく向上することが実験により明らかになった。

J C M A

《参考文献》

- 1) 労働調査会：安衛法便覧I，労働安全衛生規則第173条，P.967, 2007L.
- 2) 指針改定委員会ワーキンググループ：改訂 移動式クレーン・基礎工事用機械の転倒防止指針，P.27, 1993.
- 3) (社)日本建設機械化協会：移動式クレーン，杭打機等の指示地盤養生マニュアル，pp.33-40, 1994.
- 4) 堀智仁，玉手聡，吉川直孝，伊藤和也：敷鉄板模型による接地圧分散に関する基礎的研究，安全工学シンポジウム2010講演予稿集，pp.450-453, 2010.
- 5) 堀智仁，玉手聡，末政直見：くい打機の自走実験による揺れと履帯接地圧力の計測，土木学会論文集C，Vol.66, No.2, 2010.

〔筆者紹介〕

堀 智仁 (ほり ともひと)

(独)労働者健康安全機構

労働安全衛生総合研究所 建設安全研究グループ

主任研究員

