HOKUGA 北海学園学術情報リポジトリ
学校法人北海学園
北海学園大学
北海商科大学

タイトル	動的載荷装置FWDによる移動式クレーンに必要な地盤安定性の確保方法に関する研究
著者	上浦，正樹; KAMIURA，Masaki
引用	北海学園大学工学部研究報告(44)：1-17
発行日	2017-01-13

Hokkai-Gakuen Organization of Knowledge Ubiquitous through Gaining Archives.

動的載荷装置FWDによる移動式クレーンに必要な地盤安定性の確保方法に関する研究

上　浦　正　樹*

A Method suitable for Mobile Cranes Safety Requirements against Bearing Capacity of Ground using FWD

Masaki KAMIURA*

要　旨

移動式クレーンの作業時の転倒事故では，地盤の耐力不足により許容沈下の範囲を超えたケースが多くみられる．そこで地盤の耐力を確保するための法的根拠を調査したが，法令には移動式クレーン本体の傾斜の制限があるものの地盤に対する明確な基準がなく，マニュアル等の指針で一般的な地盤の剛性評価試験が示されているだけであった．さらに，この代表的な剛性評価試験である平板載荷試験では１か所の試験が４時間程度を要しており，短時間で測定できる別の方法が必要であることが明らかになった．そこで本研究では，舗装における地盤の剛性評価で，平板載荷試験の代わりに使用される動的載荷装置であるFWDに着目した．この装置は１か所を数分で測定できるが，クレーン転倒防止対策に活用した例がほとんどなかった．よって平板載荷装置などの既存のデータを活用して，FWDによって急激な地盤の破壊が生じないことを確認する方法を検討することとした．また，従来は最大沈下のみを対象としていたが，本研究では①移動式クレーン自体の許容沈下量，②移動式クレーンの自重による沈下量，③吊り上げ時の最大沈下量を対象に，これらの３項目に関する関係式を求めた．よって，これにFWDで測定された値を用いることで転倒の可能性を評価することとした．その結果，平板載荷試験の代わりにFWDを用いることが可能であることを確認した．

１．はじめに

クレーンとは原動機によって建設用機材などを吊り上げる機械である．移動式クレーンとは工場などに設置されているクレーンとは異なり，車体にクレーンを組み込み，吊り上げや運搬

* 北海学園大学工学部社会環境工学科
* Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Hokkai−Gakuen University

が可能な機械である．よって自走クレーンとも呼ばれる．移動式クレーンにはホィールクレーンやトラッククレーンがあるが，これらは下部走行体の四隅から水平方向にアウトリガーを張出して地盤に設置し，吊り上げ時に安定性を確保する方法を用いている．その際，地盤の耐力不足でアウトリガーが沈下し，移動式クレーン全体が転倒する事故が見られる．とはいえ，一般的には地盤の耐力を目視などでは容易に推定できない．そこで移動式クレーンを含めた建設機械等の転倒防止対策のために，その根拠を検討したところ，法令には移動式クレーン本体の傾斜の制限があるものの地盤そのものには明確な基準がなくマニュアル[1)]等の指針で一般的な地盤の剛性評価試験が採用されていた．この代表的な試験である平板載荷試験では１か所で４時間程度を要していたため，他の方法の開発が望まれていた．

そこで本研究では，舗装において平板載荷試験の代わりに地盤の剛性評価に用いられている小型FWDを含むFWDを移動式クレーンの転倒防止に必要な地盤耐力の評価に用いることとした．さらに地盤が関係する移動式クレーンの転倒を防止するには，沈下を一定内とすることが重要であるので，沈下量の評価が必要となる．そこで，沈下の概念を①移動式クレーン自体の許容沈下量，②移動式クレーンの自重による沈下量，③吊り上げ時の最大沈下量の３項目に整理することとした．なお，地盤耐力の確保を評価する方法として，吊り上げ時の最大沈下量が発生している段階で地盤に急激な破壊が生じないことが必要となる．そこで，FWDによる載荷試験によって最大沈下量付近の載荷荷重でも急激な破壊が生じないことを確認することとした．

以上から，それぞれの沈下量の評価方法は以下とした．

①「移動式クレーン自体の許容沈下量」では，移動式クレーンの性能から示される転倒の限界値を用いることとした．

②「移動式クレーンの自重による沈下量」では，地盤における即時沈下と圧密沈下のうち移動式クレーンの荷重は短期的なものと考えて即時沈下のみを弾性限界における最大値と見なすこととした．

③「吊り上げ時の最大沈下量」では沈下が塑性域に達したとみなして限界状態設計法における極限沈下の値と過去の文献[2)]から１／25スケールの模型を用い遠心模型載荷試験装置によって得られた結果に基づく沈下の限界値の両方の値を求め，小さい方の値を最大沈下量とした．

２．移動式クレーンの安全性に関する法令

2.1　労働安全衛生規則[3)]

労働安全衛生規則の第２編「安全基準」第２章「建設機械等」における第１節「車両系建設機械」では転倒防止に関する以下のような規則が定められている．

（調査及び記録）

第154条　事業者は，車両系建設機械を用いて作業を行うときは，当該車両系建設機械の転落，地山の崩壊等による労働者の危険を防止するため，あらかじめ，当該作業に係る場所について地形，地質の状態等を調査し，その結果を記録しておかなければならない．

（転落等の防止等）

第157条　事業者は，車両系建設機械を用いて作業を行うときは，車両系建設機械の転倒又は転落による労働者の危険を防止するため，当該車両系建設機械の運行経路について路肩の崩壊を防止すること，地盤の不同沈下を防止すること，必要な幅員を保持すること等必要な措置を講じなければならない．

（倒壊防止）

第173条　事業者は動力を用いるくい打機（以下，「くい打機」という．），動力を用いるくい抜機（以下，「くい抜機」という．）またはボーリングマシンについては，倒壊を防止するため，次の措置を講じなければならない．

一　軟弱な地盤に据え付けるときは脚部又は架台の沈下を防止するため，敷板，敷角等を使用すること．

二　施設，仮設物等に据え付けるときは，その耐力を確認し，耐力が不足しているときは，これを補強すること．

三　（以下　省略）

上記に下線は著者が追加したものである．このように労働安全衛生規則では地盤の耐力と不等沈下に言及している．このように労働安全衛生規則では地盤の耐力と不同沈下がないことを条件として，条件を満たさない場合は補強して条件を満足することを求めている．しかし，具体的に示されていない．

2.2　クレーン等安全規則[4)]

（作業の方法等の決定等）

第66条の２　事業者は，移動式クレーンを用いて作業を行うときは，移動式クレーンの転倒等による労働者の危険を防止するため，あらかじめ，当該作業に係る場所の広さ，地形及び地質の状態，運搬しようとする荷の重量，使用する移動式クレーンの種類及び能力等を考慮して，次の事項を定めなければならない．…　（略）　…

（アウトリガーの位置）

第70条の４　事業者は，前条ただし書の場合において，アウトリガーを使用する移動式クレーンを用いて作業を行うときは，当該アウトリガーを当該鉄板等の上で当該移動式クレーンが転倒するおそれのない位置に設置しなければならない．

上記では，同様に下線は著者が追加したものであるが，地形及び地質の状態に着目し転倒防

止のための方法が述べられている．

これらの規定があるが，実際は傾斜が発生すれば機械全体の重心の移動を伴うことから重心の移動速度が転倒に影響を与える．したがって，規定された傾斜に対し作業中に生じる傾斜や揺動を考慮して余裕が必要である．

2.3　移動式クレーン構造規格[5)]

この規格で安定度が定められている項がある．その例を記す．

（後方安定度）

第13条　移動式クレーンは，次の各号に掲げるジブ（クレーンの腕の部分）の長手方向の中心線を含む鉛直面と当該移動式クレーンの走行方向との状態に応じて，当該ジブが向けられている側のすべての転倒点にかかる荷重の値の合計値が…（略）…定める値以上である後方安定度を有するものでなければならない．

２　クローラクレーンは，ジブが向けられている側のすべての転倒支点にかかる荷重の値の合計値が，当該クローラクレーンの質量に重力加速度の値の15パーセントに相当する値を乗じて得た値以上である後方安定度を有するものでなければならない．

以下の項で，吊り上げ作業における構造的な安定度確保を目的としたものや走行中の安定に関する規格がある．例えば，走行時姿勢にある移動式クレーンは，左右に30度傾斜しても転倒しない構造を有しなければならない．しかし，移動式クレーンの前方安定度と後方安定度は，地盤は水平かつ堅固である前提で規定されている．

このクレーン等安全規則も労働安全衛生規則と同様に地盤の耐力と不同沈下がないことを条件としているが，その条件を満たす方法について具体的に示されていない．

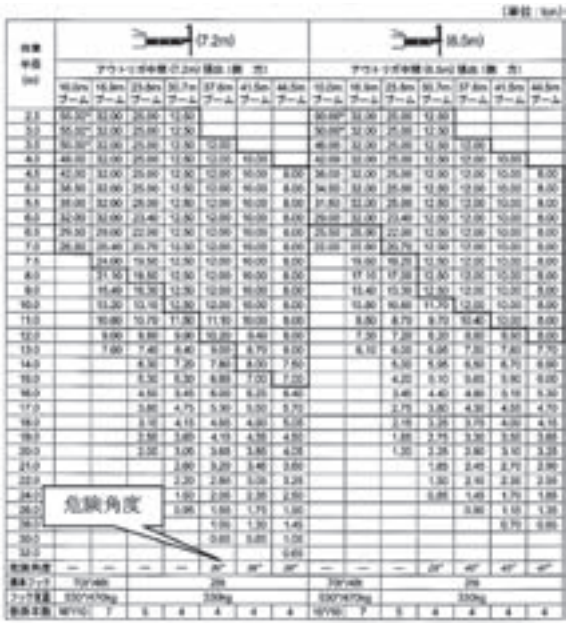
3．移動式クレーンの主な部位

移動式クレーンは**図１**に示すように下部走行体，上部旋回体，フロントアタッチメント（作業装置）の３つに分類できる．ここでフロントアタッチメントとは通常，ジブ，ペンダントロープ，などにより構成されている．また，アウトリガーは下部走行体の四隅から水平方向に張出して地盤に設置転倒を抑制する機能を有する．**表１**は最大の吊り上げトン数がジブの作業半径とブームの長さで制限されていることを示すものである．

このように移動式クレーンの性能として最大の吊り上げトン数が定められているが，移動式クレーンが設置されている地盤が所定の耐力と許容範囲内の沈下量であることが前提となっている．

図１　移動式クレーンの部位

表１　ジブの作業半径とブームの長さによる最大吊り上げ荷重



出典：http : //www.cranenet.or.jp/susume/images/susume12_07_16.gif

４．現状の転倒防止マニュアル

移動式クレーン，杭打ち機等の支持地盤養生マニュアル[6)]には「移動式クレーン等の作業地盤ではその荷重を安全に支持することが必要であり，搬入前に地盤調査を行い，地盤支持力を評価しておくことが望ましい」としている．よって地盤調査では最初に既往の資料による調査，及び現地踏査等を行い，また貫入試験等の地盤調査を実施することになる．

4.1　地盤耐力の推定

地盤耐力の推定方法として貫入試験等のサウンデイングにより推定する方法や平板載荷試験によって直接求める方法がある．一般的には移動式クレーン等の作用荷重は大きいため，地盤調査方法もある程度の深い層まで調査できることが望ましく，貫入能力のある調査方法が必要となる．よって調査の深さ，調査数量等は工事規模，移動式クレーン等の作用荷重に応じて適宜決定するとしている．また，調査の深さは既往の調査資料等で深さ方向に軟弱層が無い場合には３m程度を目安としている．ここで貫入試験によく用いられる標準貫入試験ではN値より支持力が簡易に推定され許容支持力が目安となる．なお移動式クレーン等の作用荷重は短期荷重であるため地盤支持力は短期許容支持力（安全率＝1.5）としている．一方，支持力による方法では，粘性土層に対しては乱さない試料を採取し一軸圧縮試験または三軸圧縮試験を行

う．これからN値等を推定することも可能であり，これより地盤支持力を求めることができる．また，載荷試験の荷重～沈下曲線より降伏支持力や極限支持力を求め，許容支持力とする方法もある．ただし，平板載荷試験の載荷板は径30cmであるため，表層付近の地盤支持力が求められる傾向にある．

ここで平板載荷試験の概要を示す．この試験は原地盤の表面に剛な載荷板を設置してこれに鉛直に荷重を与え，この荷重の大きさと載荷板の沈下量の関係から地盤の変形や強さなどの支持力特性を調べるための試験法である．この試験では載荷板とジャッキの間に荷重計が設置される．また，地盤変位の影響を受けないところに不動点として変位の基準点を設け，その地点から梁などをわたし，それから変位計を載荷板上部にセットする．そして，梁と載荷板の間の距離の変化を沈下量として計測する．これは荷重制御方式であり，載荷の増加パターンと荷重持続時間は試験の目的に応じて選択される．試験最大荷重は試験箇所の状態と構造物の設計応力を考慮して設定する．載荷荷重は試験最大荷重を５から８段階に等分割して設定され，荷重の保持時間は初期載荷の場合は30分，再載荷では５分とされている．したがって，試験には少なくても４時間程度は要することになる．

4.2 許容範囲内の沈下量

荷重による地盤の沈下には即時沈下と圧密沈下があるが，移動式クレーン等の荷重による場合は短期的な荷重と考えて即時沈下のみを対象とした．式（4.1）は即時沈下[7]を求めるものである．

$$S_s = I_s \frac{B\,(1-\nu^2)\pi}{E} q \qquad (4.1)$$

S_s ：即時沈下量

I_s ：形状係数

B ：敷鉄板等の短辺長さ（円形の場合は直径）

q ：敷鉄板等に作用する平均荷重

E ：地盤の変形係数（E＝28N（kgf/cm^2）で推定）

ν ：地盤のポアソン比（安全側にν＝0.3とする）

5．移動式クレーンの安定性で求められる地盤の性能

今まで示したように，移動式クレーンはアウトリガーによって安定度が飛躍的に増加する．しかし，この安定度は水平かつ堅固な支持地盤に設置されることが前提である．従って，アウトリガーで支える地盤では，荷重を支える地盤耐力と沈下及び沈下速度が所定の条件を満たす必要がある．

地盤の耐力には地盤の降伏支持力あるいは極限支持力がある．また，沈下はアウトリガーの沈下によって発生するクレーン機体の傾斜に関連する．沈下が生じることで機械は傾斜し，転倒モーメントが増大することとなる．さらに，沈下速度が速いとさらに転倒の危険性が増加する．

ここで，移動式クレーンの吊り上げ作業で発生した荷重に対し設置地盤の支持力が確保され，その沈下の際には地盤の許容支持力の範囲で発生した沈下がアウトリガーの許容沈下量であることが転倒しない条件となる．

5.1　移動式クレーンの荷重と地盤の沈下

移動式クレーンの作業手順を**図 2** に示す．最初に移動式クレーンの位置を決め，アウトリガーを地盤上にセットする（段階①）．この段階ではアウトリガーには荷重が作用していない．次にアウトリガーに移動式クレーンの自重を作用させる（**図 3**，段階②）．この段階で地盤が降伏状態に達していないと見なし，アウトリガーは地盤表面から沈下して安定する（沈下量**ds**）．さらにジブを用いて吊り上げ作業を行うとアウトリガーの 4 か所のうち最大荷重をうける 1 か所で偏った荷重が追加される結果（**図 4**，段階③），沈下量はさらに増加する（全体の沈下量**dj**）．以上のアウトリガーの沈下の変化を**図 5** に示す．

ここで信頼性解析に基づき，アウトリガーの転倒に検討を加える．信頼性解析の目的は移動式クレーンの荷重（Y）に対し，地盤の耐力または沈下（X）が保証することにある．信頼性解析では，この保証は安全確率として確率P（$X>Y$）によってのみ可能であるとしている．よって，その余事象に対する確率P（$X<Y$）は危険確率となる．以上から，情報の不確実さを考慮した移動式クレーンの転倒危険性を確率的手法により検討することとする．

地盤破壊に対する安全の確率（P_B）と転倒に対する安全の確率（P_U）を定義する．P_Bは地盤

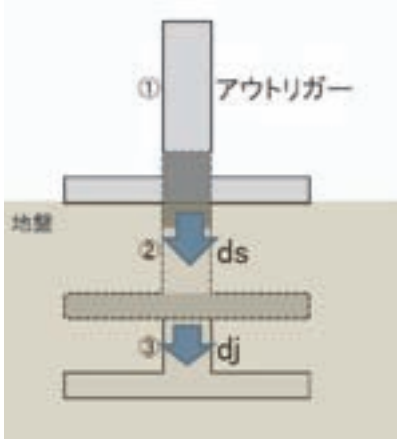


図 2　アウトリガーの沈下推移

図 3　移動式クレーンの自重による沈下（段階②）

図 4　吊上げ作業による沈下量の増加（段階③）

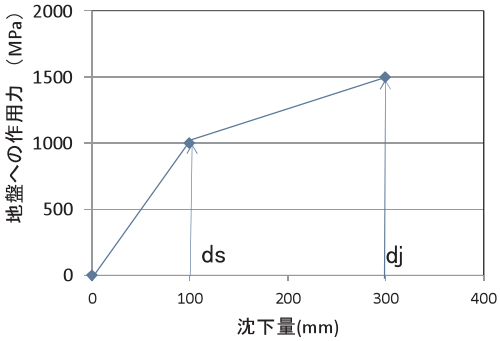


図 5　アウトリガーの沈下と地盤への作用力

の支持力とアウトリガー載荷圧力の関係であり，強度に関する確率的な値である．一方，P_Uはクレーンの安定限界における沈下量とアウトリガーの発生沈下量の関係であり，急激なアウトリガーの沈下を考慮した転倒の確率である．すなわち，P_Uは，移動式クレーンの諸元，つり荷の重さ，ジブの起伏角およびジブ長等によって左右される値であることから，クレーンの作業条件に依存する値である．

地盤破壊に対する安全の確率（P_B）は地盤に作用する荷重とこれに対して地盤が発揮する耐力の比較により求められる．ここで使用する値においてアウトリガーが地盤に作用する載荷圧力をq_aとし地盤の耐力または降伏支持力をq_yとする．これらのq_aとq_yの値は自然の地盤を対象にしていることから，ばらつきを含んで定められる．一方，P_Uは移動式クレーンの規模や作業半径，つり荷の重さなどにより変動する値である．よって重量目測の誤差や作業半径の誤差によりばらつきが生じる可能性がある．

よって，移動式クレーンはアウトリガーを設置しての作業が基本であるので，地盤に与える作用荷重はアウトリガーが作用することにより地盤が沈下して移動式クレーンの許容安定度5°に与える影響が対象となる．過去の施工実績を考慮してクレーン自体の安全限界に対応する地盤の沈下量d_c＝50mmとしている[8]．

5.2　動的載荷装置FWDによる力学的検討

動的載荷装置FWDの原理に基づき開発された小型FWDの標準仕様に装置では最大載荷荷重は5 kNであり，重錘の落下高さを倍に改良した装置でも10kNが限界である[9]．一方，FWDでは標準仕様に装置では最大載荷荷重は50kNと100kNの2種類がある．一方沈下量と載荷幅の比と載荷圧力に関する研究成果[10]では，地盤が均一であれば載荷板の形状によらず1本の載荷圧力―沈下量が得られることが認められている（**図 6**）．ここで沈下量d_jを極限支持力の最大沈下量と仮定すると，この図において載荷圧力は500kP/m^{2}前後から急激に沈下量が増加することが確認できる．そこで直径30cmにおける載荷板に載荷圧力には500kP/m^{2}を作用させるには，

載荷荷重は35kN以上確保する必要がある．このような観点からは，小型FWDは本試験では載荷荷重が不足するが，FWDは所定の載荷荷重が確保することが確認された．

次にFWDを用いた載荷・沈下試験を**図 6** に加えた．ここで，載荷圧力が余り変化しなくても沈下量／載荷幅（S/B）が大きくなる状態を極限状態と見なし，極限圧力と限界沈下量を定めた．この図では極限圧力を500kN/m^{2}とすると限界沈下量／載荷幅（S/B）は 6 %となり，載荷板直径30cmでは限界沈下量18mmとなる．この図の◎は小型FWDの最大荷重10kNのときの載荷圧力の位置を示している．

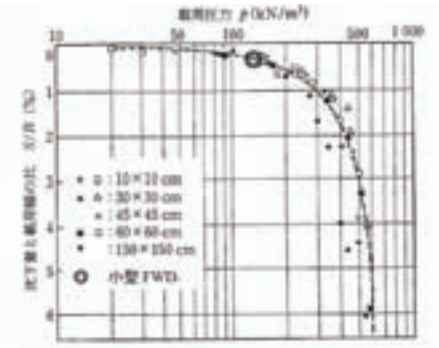


図 6　沈下量と載荷幅の比と載荷圧力
（文献10に加筆）

5.3　転倒に対する指標の選定

地盤の応力・変形では初期状態である変形量が小さい場合は比較的弾性変形に近い傾向が見られる．一方，変形量が増加するに従い，塑性変形に近い傾向が表れる．また**図 2** に示す自重による沈下（段階②）と吊り上げ作業による偏った荷重による沈下（段階③）の差によって転倒の可能性が異なる．このように転倒には多くのパラメータが関係している．本研究では既往の研究成果[11)]を参考に転倒の評価を行う．

この論文において玉手らは初期段階と降伏段階における地盤の応力・変形特性を脆性沈下指標（R_E）により評価している．ここで脆性沈下指標（R_E）とは，初期段階の沈下と載荷圧力の勾配K_0とし，沈下が弾性域から塑性域までの勾配をK_yとして（5.1）で定義している．

$$R_E = \frac{K_0}{K_y} \tag{5.1}$$

この指標を定めるためには，平板載荷試験などの現場試験が必要である．この試験は 1 回あたり 4 時間程度を有し改善が望まれている．これに対し本研究ではFWDを用いることとした．

次に段階②から段階③に関する沈下の差に対し，玉手らは不安定指標（I_r）を提案してい

る．この指標は**図 2** におけるパラメータを用いると（5.2）で定義している．

$$I_r = \frac{d_s}{d_j} \tag{5.2}$$

既往の研究において吊り上げ荷重20t模型クレーンのホィールクレーンの約１／25スケールの模型を用い遠心模型載荷試験装置によって脆性的破壊沈下指標（R_E）と不安定指標（I_r）の関係を求めている[12]．本研究では安全率に関係する指標とするため（5.3）に示す安定指標 $J_r = 1/I_r$ を導入する．これにより，転倒に関係する地盤条件は沈下量d_sとd_jによる安定指標（J_r）を用いることができる．

$$J_r = \frac{d_j}{d_s} \tag{5.3}$$

次に，移動式クレーン自体の転倒に対する安全率を考察する．２章で示したように移動式クレーンは労働安全衛生規則やクレーン等安全規則などによって設置される地盤に対し耐力と不同沈下がないことが条件で転倒に対する安全率が定められている．従ってクレーン自体の安全限界に対応する地盤の沈下量（d_c）が存在する．よってこの場合を段階②に相当する考え，地盤の沈下量をd_sとする．

よって，この状態におけるクレーン自体の転倒に対する安全率R_sは（5.4）とする．

$$R_s = \frac{d_c}{d_s} \tag{5.4}$$

以上から，文献12の結果を活用して移動式クレーン転倒安全率（R_s）と地盤安全指標（J_r）の関係を求めた（**図 7**）．この図で示した相関式J_r＝0.72log（R_s）の相関係数R＝0.93でかなり相関が高い．よってこの式から移動式クレーン転倒安全率（R_s）により地盤安全指標（J_r）が求めることができる．一方，全体の最大沈下量d_jは式（5.3）から求めた値とFWDで推定される極限支持力より求まる沈下量の両方に対し，小さい方の値を採用する．よってR_sとJ_rはそれぞれ独立していると見なすことができる．

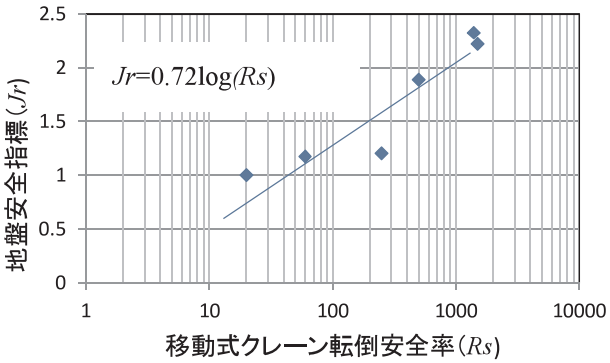


図 7　移動式クレーン転倒安全率（R_s）と地盤安全指標（J_r）

例えば，$d_s = 2$ mm，$d_s = 50$mmでは$R_s = 25$により$J_r = 1.0$となる．この結果より式（5.3）から$d_j = 2$ mmとなる．

これは前項で示した限界沈下量を用いると，限界沈下量18mmより小さいので$d_j = 2$ mmを採用する．

以上から，沈下量d_sを定めることできれば，移動式クレーン転倒安全率（R_s）の推定は可能である．

次に，地盤の弾性領域の最大沈下量d_sを式（5.5）に示す即時沈下量[13]とする．

$$d_s = \frac{B(1-\nu^2)\pi}{4E}p \tag{5.5}$$

ここで，d_s：即時沈下量　（mm）

B：載荷板の直径　（mm）

p：載荷板に作用する応力　（kPa）

E：地盤の変形係数　（kPa）

ν：地盤のポアソン比

これから地盤の変形係数EはFWDの載荷・沈下測定試験により推定することで，式（5.5）より沈下量d_sが推定できる．ここで載荷荷重49kN，載荷板直径300mm，ポアソン比（0.3）により最大沈下量d_s（mm）と地盤の変形係数E（kPa）の関係を**図 8** に示す．

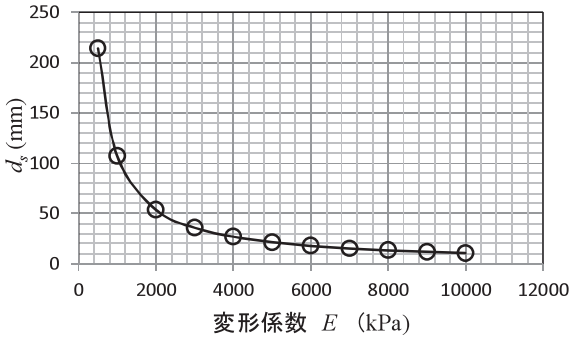


図 8　弾性領域の最大沈下量d_s（mm）と地盤の変形係数E（kPa）の移動

以上を総括して，弾性領域の最大沈下量d_sと全体の最大沈下量d_jの推定手順を**図 9** に示す．

5.4　FWDによる地盤の変形係数の推定

土の剛性は締固め度，乾燥密度，粒度，粒径，粒子形状などに依存している[14]ことを考慮すると，剛性に関する情報を得るには現場で載荷し地盤の変形を直接求める原位置載荷試験が望ましい[15]．原位置載荷試験のうち平板載荷試験は，反力フレームを現場に持ち込む必要がある

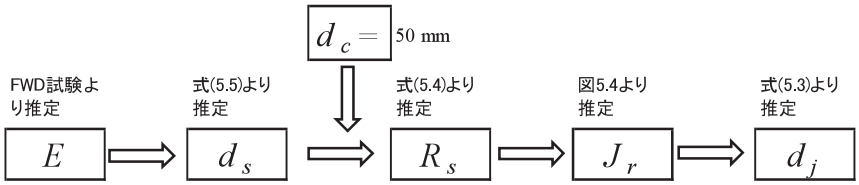


図 9 弾性領域の最大沈下量d_sと全体の最大沈下量d_jの推定手順

うえ測定時に多くの手間と時間を要していることから，車載タイプのFWDと小型FWDが開発された．この小型FWDは反力フレームを用いずに重錘を自由落下させ，載荷荷重と地盤の変位を自動計測することで効率よく地盤などの剛性を推定できる．

FWDまたは小型FWDによる載荷荷重と沈下測定の結果を用いて多層弾性理論[16]に基づき，逆解析により複数の層の各変形係数を推定することができる．近年，これらの測定結果のうち最大値のみを用いる静的逆解析では十分な精度は得られないとして時刻歴データを活用する動的逆解析に関する研究（例えばWave BALM[17]など）が進んできている．

ここで本研究に用いる逆解析の方法を述べる．小型FWDおよびFWDによる測定では，外部センサを用いることでn箇所の舗装表面の沈下の時系列データ$w_j(\mathrm{t})\,(j=1,\cdots,n)$を得ることができる．舗装を構成する層の層数が$m$の場合には，各々の層における変形係数と粘性係数が未知数となるため未知数の総数は$2m$となる．これらの未知数X_iを設定すれば，既往の研究[14]により小型FWD試験と同一の地点における沈下の時系列データ$z_j(X_{i,t})\,(i=1,\cdots,2m)$を算定することができる．次に，評価関数を式（5.6）で与えJが最小となるようなX_iを決定する．

$$J=\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{l}\{w_j(t_k)-z_j(X_i,t_k)\}^2 \tag{5.6}$$

ここで，

$w_j(t_k)$：時刻t_kにおける位置jでの計測沈下

$z_j(X_i,t_k)$：時刻t_kにおける位置jでの計算沈下

X_i：未知パラメータ（層の変形係数および減衰係数）

n：計測沈下と計算沈下の比較位置の箇所数

l：時系列データのデータ数

この関数の最小化にはGauss−Newton法を用いている．なお，この問題は非線形の最小化問題となるので繰り返し計算が必要となる．未知パラメータは，以下の式に基づいて更新を行う．

$$\sum_{i=1}^{2m}\sum_{k=1}^{l}\sum_{j=1}^{n}\frac{\partial z_j(t_k)}{\partial X_i}\frac{\partial z_j(t_k)}{\partial X_z}dX_i=\sum_{k=1}^{l}\sum_{j=1}^{n}(w_j(t_k)-z_j(t_k))\frac{\partial z_j}{\partial X_z} \tag{5.7}$$

$$(z=1,\ldots,2m)$$

式（5.7）は２m個の２m元連立方程式となるが，この解法において係数行列の条件数が大きくなることがあるので，最適化手法として打切り特異値分解を用いる[14]．

６．転倒に対する信頼性評価

6.1　限界状態関数と安全の確率

前章によって移動式クレーン転倒の安全性は移動式クレーン転倒安全率（R_s）により地盤安全指標（J_r）の両方で判断する必要があることが明らかになった．しかし，一般的には，地盤破壊の検討に必要な地盤の耐力に注目した検討がある．そこで最初にその過程を述べる．

確率変数q_aが正規分布$N(\mu_{qa}, \sigma_{qa})$に従い，また確率変数q_yが同様に正規分布$N(\mu_{qy}, \sigma_{qy})$に従うと仮定する．G_fを地盤破壊に関する限界状態関数と定義すると，G_fの関係は式（6.1）によって表される．

$$G_f(q_y, q_a) = q_y - q_a \tag{6.1}$$

このG_fは確率変数q_aと確率変数q_yの関数であることから，平均値μ_Gと標準偏差σ_Gは式（6.2），（6.3）となる．

$$\mu_G = \mu_{qy} - \mu_{qa} \tag{6.2}$$

$$\sigma_G^2 = \mu_{qa}^2 - \mu_{qy}^2 \tag{6.3}$$

以上から，G_fは正規分布$N(\mu_G, \sigma_G)$に従うことから，$(G_f - \mu_G)/\sigma_G$も標準正規分布に従う．これらにより確率密度関数φを用いて安全の確率P_sは式（6.4）となる．

$$P_s = P(G_f > 0) = \Phi\left(\frac{\mu_G}{\sigma_G}\right) \tag{6.4}$$

例えば，アウトリガーが地盤に作用する載荷圧力（q_a）の平均値500kPa，標準偏差50kPaに対し地盤の降伏支持力（q_y）の平均値600kPa，標準偏差30kPaとする．

$$\mu_G = \mu_{qy} - \mu_{qa} = 600 - 500 = 100$$
$$\sigma_G^2 = \mu_{qa}^2 - \mu_{qy}^2 = 50^2 + 30^2 = 58.3^2$$

以上から，安全の確率P_s＝0.956となる．

本研究では転倒に関係する検討なので，地盤条件は沈下量d_sとd_jによる安定指標（J_r）を用いることとし，クレーン自体の転倒条件は沈下量d_sとd_jによるクレーン自体の安全率R_sを用いることを前項で示した．よって．H_fを転倒に関する限界状態関数と定義すると，H_fの関係は

式（6.5）によって表される．

$$H_f(R_s, J_r) = R_s - J_r \tag{6.5}$$

H_fは正規分布$N(\mu_H, \sigma_H)$に従うとするとH_fは確率変数R_sと確率変数J_rの関数であることから，平均値μ_Hと標準偏差σ_Hは式（6.6），（6.7）となる．

$$\mu_H = \mu_{Rr} - \mu_{Js} \tag{6.6}$$

$$\sigma_H^2 = \mu_{Rr}^2 - \mu_{Js}^2 \tag{6.7}$$

これらにより確率密度関数φを用いて転倒の安全の確率P_Uは式（6.8）となる．

$$P_U = P(H_f > 0) = \Phi\left(\frac{\mu_H}{\sigma_H}\right) \tag{6.8}$$

6.2 安定指標J_rとクレーン自体の安全率R_sの平均値と標準偏差

安定指標（J_r）は地盤の沈下量d_sとd_jによって定められる．またクレーン自体の安全率（R_s）は地盤の沈下量d_sとd_cによって決まる．よって，地盤の沈下量d_s，d_j，d_cの各平均値と標準偏差により安定指標（J_r）とクレーン自体の安全率（R_s）のそれぞれの平均値と標準偏差を求めることができる．

⑴安定指標（J_r）の平均値と標準偏差

地盤の沈下量d_sが正規分布$N(\mu_{qs}, \sigma_{qs})$に従い，d_jも正規分布$N(\mu_{qj}, \sigma_{qj})$に従うと仮定する．その結果，安定指標（J_r）の平均値J_{rr}は式（6.9）により表される．

$$J_{rr} = \frac{\mu_{qj}}{\mu_{qs}} \tag{6.9}$$

この安定指標（J_r）は式（5.7）に示したように線形関数ではない．よって安定指標（J_r）の標準偏差σ_{rr}はTaylor展開による一次近似により求める．ここで安定指標（J_r）の確率変数Ja_rに対しd_sとd_jで偏微分すると，式（6.10），（6.11）が得られる．

$$\frac{\partial Ja_r}{\partial d_j} = \frac{1}{d_s} \tag{6.10}$$

$$\frac{\partial Ja_r}{\partial d_s} = -\frac{d_j}{d_s^2} \tag{6.11}$$

以上から，Taylor展開による一次近似式は式（6.12）となる．

$$Ja_r(\mathbf{d}_s,\ \mathbf{d}_j)=J_{rr}(\mu_{qs},\mu_{qj})-(\mathbf{d}_s-\mu_{qs})\frac{d_j}{d_s^2}+(\mathbf{d}_j-\mu_{qj})\frac{1}{d_s}$$
$$=\frac{\mu_{qj}}{\mu_{qs}}-(\mathbf{d}_s-\mu_{qs})\frac{\mu_{qj}}{\mu_{qs}^2}+(\mathbf{d}_j-\mu_{qj})\frac{1}{\mu_{qs}} \tag{6.12}$$

ここで**ds**，**dj**は独立した２変数を示している．一方，統計学に知見によれば[18]，２変数X_1，X_2に対し期待値E（X_1+X_2）は式（6.13）が成り立つ．同様に分散V（X_1+X_2）では式（6.14）が示されている．

$$E(X_1+X_2)=E(X_1)+E(X_2) \tag{6.13}$$

$$V(X_1+X_2)=V(X_1)+V(X_2) \tag{6.14}$$

ここで　$X_1=-(\mathbf{d}_s-\mu_{qs})\frac{\mu_{qj}}{\mu_{qs}^2}$, $X_2=(\mathbf{d}_j-\mu_{qj})\frac{1}{\mu_{qs}}$　とすると

$$V(X_1)=(\sum-(\mathbf{d}_s-\mu_{qs})\frac{\mu_{qj}}{\mu_{qs}^2}-0)^2=(\sigma_{qs}^2)\left(\frac{\mu_{qj}}{\mu_{qs}^2}\right)^2 \tag{6.15}$$

$$V(X_2)=(\sum(\mathbf{d}_j-\mu_{qj})\frac{1}{\mu_{qs}}-0)^2=(\sigma_{qj}^2)\left(\frac{1}{\mu_{qs}^2}\right)^2 \tag{6.16}$$

以上から安定指標（J_r）の標準偏差σ_{qJr}は式（６－17）となる．

$$\sigma_{qJr}^2=(\sigma_{qs}^2)\left(\frac{\mu_{qj}}{\mu_{qs}^2}\right)^2+(\sigma_{qj}^2)\left(\frac{1}{\mu_{qs}^2}\right)^2 \tag{6.17}$$

⑵クレーン自体の安全率（R_s）の平均値と標準偏差

クレーン自体の安全限界に対応する地盤の沈下量（d_c）が正規分布$N(\mu_{qc},\ \sigma_{qc})$に従うとする．また前項と同様に地盤の沈下量$d_s$が正規分布$N(\mu_{qs},\ \sigma_{qs})$に従うとする．

クレーン自体の安全率（R_s）の平均値R_{rr}は式（6.18）により表される．

$$R_{rr}=\frac{\mu_{qc}}{\mu_{qs}} \tag{6.18}$$

また，クレーン自体の安全率（R_s）の標準偏差σ_{qRr}は，⑴と同様に式（6.19）を導くことができる．

$$\sigma_{qRr}^2=(\sigma_{qs}^2)\left(\frac{\mu_{qc}}{\mu_{qs}^2}\right)^2+(\sigma_{qc}^2)\left(\frac{1}{\mu_{qs}^2}\right)^2 \tag{6.19}$$

7．まとめ

本研究は移動式クレーンの転倒防止に必要な地盤耐力の許容範囲を検討した．この過程で明らかになった項目は以下の通りである．

1）法令には移動式クレーン本体の傾斜の制限があるものの地盤そのものには明確な基準がなくマニュアルの指針で一般的な地盤の剛性評価試験が採用されていた．

2）地盤耐力の許容値を求める代表的な試験である平板載荷試験では1か所で4時間程度を要していた．よって，本研究では地盤耐力の許容値を短時間に推定できる方法として測定できる舗装において平板載荷試験の代わりに地盤の剛性評価に用いられている小型FWDを含むFWDを採用した．

3）移動式クレーンの転倒を防止するには，沈下を一定の範囲内とすることが重要であるので，沈下の概念を①移動式クレーン自体の許容沈下量を一般的に用いられているクレーンの転倒限界値，②移動式クレーンの自重による沈下量を地盤の弾性領域の最大沈下量，③吊り上げ時の最大沈下量を全体の最大沈下量　の3項目に整理した．そこで，クレーン自体の安全限界に対応する地盤の沈下量（d_c）はクレーンの転倒限界値を一般的に用いられている500mmとした．また，弾性領域の最大沈下量d_sは即時沈下量とし，この推定に必要な弾性係数はFWDの荷重沈下測定結果を動的逆解析する方法で求めることとした．全体の最大沈下量d_jは弾性領域の最大沈下量d_sを基本の求めることとした．

4）移動式クレーン転倒安全率（R_s）をd_c/d_sと地盤安全指標（J_r）をd_j/d_sと定義し文献のデータにより，この関係を求めた．その結果，かなり相関が高いことが明らかになった．よって移動式クレーン転倒安全率（R_s）を定めることで地盤安全指標（J_r）が得られることになった．

5）全体の最大沈下量d_jは，4）の関係から求めた値とFWDで推定される極限支持力より求められる沈下量の値を対象に，小さい方の値を採用することとした．これにより全体の最大沈下量djを求めることができ，移動式クレーン転倒安全率（R_s）と地盤安全指標（J_r）を定めることができた．従ってR_sとJ_rは独立していると見なし，地盤を含めた全体での移動式クレーン転倒安全率を求める上で移動式クレーン転倒安全率（R_s）と地盤安全指標（J_r）の両方で判断することとした．

6）以上の移動式クレーン転倒安全率（R_s）と地盤安全指標（J_r）で使用される各データの信頼性を信頼性理論を用いて発生確率で判断する手法を示した．

参考文献

1）社）日本建設機械施工協会：「移動式クレーン，杭打ち機等の支持地盤養生マニュアル（第2版）」，pp.65－101，2000

2）玉手聡，堀井宣幸，豊澤康男，末正直晃，片田敏行，高野裕亮：支持地盤の不安定性が沈下による移動式クレーンの転倒に及ぼす影響，土木学会論文集No.596／Ⅲ－43，pp163～174，1998
3）労働安全衛生規則：昭和四十七年九月三十日労働省令第三十二号に制定
4）クレーン等安全規則：昭和四十七年九月三十日労働省令第三十四号に制定
5）移動式クレーン構造規格：労働安全衛生法（昭和四十七年法律第五十七号）第三十七条第二項及び第四十二条の規定に基づき制定
6）社）日本建設機械施工協会：「移動式クレーン，杭打ち機等の支持地盤養生マニュアル（第２版）」，p.23，2000
7）山口柏樹：土質力学，技報堂出版，pp.342－344，1984
8）前掲６）のp.27
9）土木学会舗装工学委員会：FWDおよび小型FWD運用の手引き，丸善，pp.65－68，2002
10）「地盤調査法」改訂編集委員会：地盤調査の方法と解説，社）地盤工学会，p.500，2004
11）玉手聡，堀井宣幸，豊澤康男，末正直晃，片田敏行，高野裕亮：支持地盤の不安定性が沈下による移動式クレーンの転倒に及ぼす影響，土木学会論文集　No.596／Ⅲ－43，pp163～174，1998
12）玉手聡，末正直晃，片田敏行：支持地盤の脆性的破壊沈下による移動式クレーンの転倒危険性，土木学会論文集　No.729／Ⅲ－62，pp131～144，2003
13）フローリン（赤井浩一訳監修）：フローリンの土質力学　第１巻，森北出版，pp.334－338，1969
14）「地盤調査法」改訂編集委員会：地盤調査の方法と解説，社）地盤工学会，pp.499－501，2004
15）平川大貴，川原園美幸，龍岡文夫：砂礫盛土材の変形強度特性に与える締固め条件の影響，pp.253－266，土木学会論文集C，Vol.64，No.２，2008
16）竹原和也，小澤良明，尾本志展，松井邦人：FWD試験データの波形を考慮した力学モデルに関する検討，土木学会舗装工学論文集，第14巻，pp.139－145，2009
17）竹原和也，小澤良明，松井邦人：波動方程式の理論解に基づく空港舗装の逆解析，土木学会舗装工学論文集，第15巻，pp.161－168，2010
18）東京大学教養部統計学教室編：統計学入門，東京大学出版，pp.148－149，1996