

34. 大型建設機械の設置地盤における現場地耐力試験とその性能比較

(独)労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所 ○玉手 聡
同 上 堀 智仁
(株)東洋スタビ 若原 千恵
同 上 田村 繁雄

1 はじめに

移動式クレーンを含めた大型の建設機械の転倒防止には支持地盤の安定確保が不可欠である。しかしながら、作業現場の地耐力は目視や踏査によって経験的に判断される場合も多く、その判断を誤ったことによる転倒事故がたびたび発生している¹⁾。本研究ではこのような転倒災害の防止を目的に、作業現場において簡易に実施可能な地耐力試験の方法を検討した。その方法をここでは現場地耐力試験と呼び、以下では、BCTと略して言う。BCTはドラグ・ショベルなどの建設機械の自重を反力に、載荷板を介して荷重を静的に載荷する試験であり、試験時間が10分から20分程度の短時間で終了することを特徴とする。本研究では、BCTの適用性を調査することを目的に、地盤条件が異なる5カ所の現場で試験を行った。この試験では平板載荷試験の結果との比較を行うとともに、BCTの載荷速度の違いが結果に与える影響も調査した。本論文では、一連の試験から得られた結果を示し、その結果に基づいてBCTによる簡易な地耐力確認の実施を提案する。

2 現場地耐力試験の概要

2.1 試験方法の検討

表-1は平板載荷試験²⁾(以下、PLTと言う)と現場CBR試験³⁾とBCTの比較を示す。PLTはJISと地盤工学会で基準化された試験法であり、地盤の支持特性を直接的に調査できる方法である。PLTは、直径300mmの載荷板から段階的に作用させる載荷圧力 q とそれに対する変位量 S の関係から地盤の支持特性や変形特性を求める載荷試験である。しかしながら、各段階では荷重を30分保持する必要があるため、実施には少なくとも2.5時間から4時間を要することとなる。そのため、建設機械等を設置する度毎にこれを実施することは、現実的には困難という問題があった。

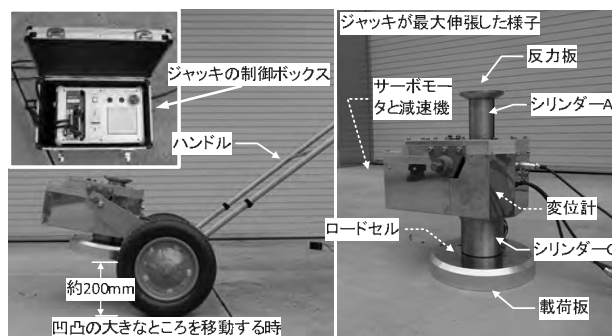


図-1 現場地耐力試験(BCT)装置の外観と構成

現場CBR試験(以下、CBRと呼ぶ)では、直径50mmの載荷板を1mm/分の一定速度で貫入させ、貫入量が2.5mmと5.0mmの時の載荷圧力を記録する。したがって、試験に要する時間は5分と短く、効率性が高い。しかしながら、載荷板が小さいために評価範囲はPLTよりも狭く限定されるという問題があった。そのためCBRは通常、道路施工における路床と路盤の品質管理に用いられている。

今回の地耐力確認ではPLTに準じた性能を目標としたことからBCTでは、載荷板の形状と大きさをPLTと同じ直径300mmのものとした。ただし、試験時間を短縮するために、載荷方法はCBRの変位制御を参考とし、BCTでは変位速度の標準値を5mm/分に設定した。この値はCBRの1mm/分に対して、BCTとCBRの載荷板の直径比が6倍であることなどを考慮したものである。これによって、BCTの試験時間は10分から20分程度となり、PLTに比べて大幅な時間短縮が可能となった。以上のように、BCTはPLTとCBRを応用した方法であり、地耐力評価の基本的な部分についてはPLTに準じることとしている。

2.2 試験装置と試験方法

図-1は開発したBCT装置を示す。詳細は既報^{1),4),5),6),7)}に譲り、ここではその概要を述べる。本装置には載荷と計測の両機能が

表-1 平板載荷試験と現場 CBR 試験と現場地耐力試験の比較

	平板載荷試験(PLT) JGS 1521:2012	現場 CBR 試験(CBR) JIS 1222:2013	現場地耐力試験(BCT) <今回提案>
載荷板	直径 300mm の円形	直径 50mm の円形	直径 300mm の円形
載荷方法	荷重制御 (計画最大荷重を 5 から 8 段階で載荷)	変位制御 (1mm/min)	変位制御 (5mm/min)
反力装置	実荷重又はアンカー	実荷重(ダンプトラックなど)	実荷重(建設機械)
沈下量	基準よりから載荷板上の 4 点の沈下を計測	架台に対する貫入ピストンの変位を 2 点で計測	載荷ジャッキの伸張量から建設機械の浮き上がり量を補正して計算
所要時間 (1箇所)	2.5 時間から 4 時間	5 分	10 分から 20 分

車輪付きの架台にユニット化して搭載されており、手押しで現場内を自在に移動できるものとなっている。載荷ジャッキは電動モーターで動作する仕組みである。ジャッキはシリンダーA とシリンダーC がそれぞれ上下に伸張する構造であり、上昇した反力板はドラグ・ショベルなどの建設機械の下部走行体に接合する。これによって、載荷板にはその自重を反力とした荷重が作用する。この荷重を載荷板の面積で除した値が載荷圧力 q である。

BCT 装置は建設機械の後部（カウンターウエイト側）から手押しで挿入して設置することが可能であり、PLT の準備に際して必要な建設機械下部での装置の組み立てが BCT では不要である。載荷板の沈下量 S は、BCT 内の変位計で直接計測するジャッキのストローク量 s_c から反力として用いたドラグ・ショベルの浮き上がり s_{it} を差し引いて間接的に求める方法を採用し、試験を簡易に実施できるように改善されている。

3 現場実験

3.1 表層軟弱地盤(GB1)における実験

茨城県稲敷郡阿見町の現場(GB1)において BCT と PLT を行った。表-2 は試験の実施箇所とそのコード名を示す。GB1 では図-2 に示す No.1, No.2 及び No.3 の 3 ポイントにおいて BCT を 4 試験と PLT をそれぞれ 1 試験行った。同試験は施工建築物の周囲で行ったためポイント間の距離は 130m から 250m と離れている。各ポイントでは PLT を中心に BCT はそれを囲むように 1m 間隔で行った。図-3 は GB1 の代表地点で行った標準貫入試験から得られた N 値と土質の分布を示す。表面から深さ 0.9m (GL-0.9m) にはロームを主体とした盛土が堆積する。さらに、GL-3.8m までは有機質シルト、有機質土、粘土の層が続いて存在している。この深さまでは N 値が 1 または 2 の軟弱な層が分布しており水位は GL-2.6m に存在する。GL-3.8m 以深では細

砂及び中砂を主体とする層が分布し、N 値は最大 50 まで増加している。なお、表面から GL-1.15m までの浅い部分については N 値が得られておらず硬軟は不明である。

写真-1 は試験の様子を示す。ドラグ・ショベルの下部走行体と上部旋回体の向きは平行に設置して載荷試験を行った。機体の浮き上がり量は前部と後部で計測した。

BCT ではジャッキを標準値の 5mm/分 で変位させた。試験の終了は載荷圧力 q が上限の 1400kN/m² に到達するかジャッキの伸張量が最大に達するまでを基本とした。

図-4 は 3 ポイントにおける q と沈下量 S の関係を示す。ここで、BCT では PLT のような予備載荷を行ってないため q - S 関係には表面の緩みによる影響が載荷初期の部分に現れていた。そのため、本結果の比較では最急部勾配における接線と S 軸の交点を修正原点としてデータを再整理した。3 ポイントの結果に共通して BCT と PLT の曲線には良い一致が見られる。一方、3 ポイントの地耐力には差が見られ No.3 の q - S 曲線は No.1 と No.2 のそれに比べて上方に位置している。すなわち、No.3 の地耐力は No.1 と No.2 のそれに比べて高い。 $q < 400$ kN/m² で S の増加に対する q の増加が高く現れ(傾きが大きく)、 $q > 400$ kN/m² ではその傾きを減少させている。

JGS 1521-2012 の方法に従って極限支持力 q_a を求め、PLT に対する BCT の誤差を計算したところ 3 ポイントで 2% から 20% であり平均は 13% であった。また、地盤反力係数 K_v については 2% から 19% であり平均 8% の誤差であった。松尾は地盤調査から得られた土のせん断強さのデータを例示する中でその変動係数 V_{cu} の値は 0.2 から 0.4 程度と述べている⁸⁾。GB1 での PLT に対する BCT の誤差は 20% 以下であり、通常の

表-2 GB1 の試験箇所と実験コード

地盤の状態	表層軟弱地盤		
場所とコード	茨城県稲敷郡阿見町内(GB1)		
ポイント	No.1	No.2	No.3

現場地耐力試験	BCT_1 -a, b, c, d	BCT_2 -a, b, c, d	BCT_3 -a, b, c, d
平板載荷試験	PLT_1	PLT_2	PLT_3

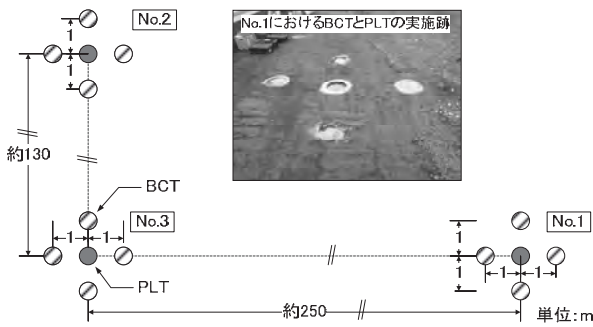


図-2 GB1における試験ポイントの位置関係

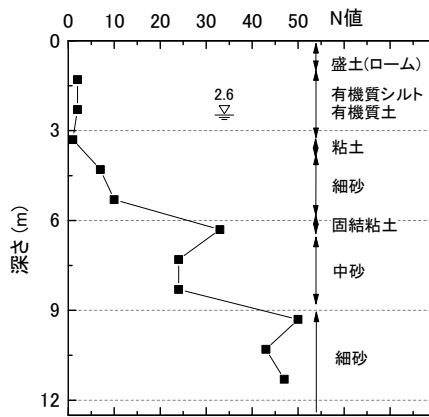


図-3 GB1のN値と土質分布

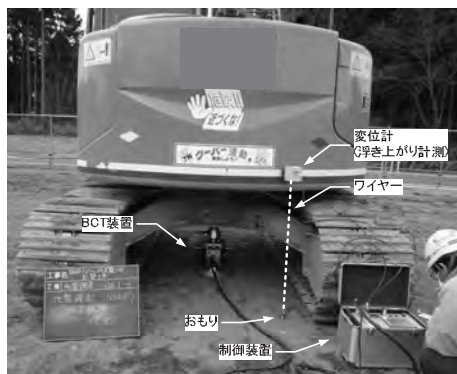
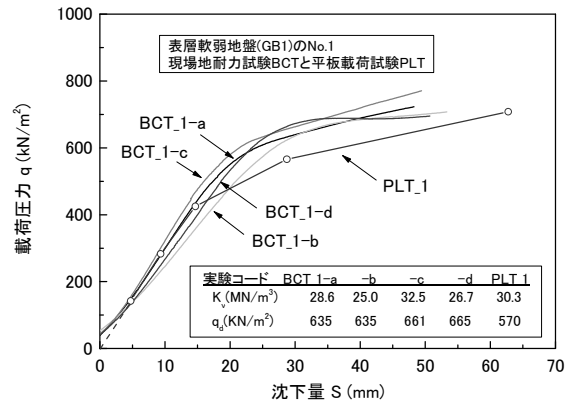
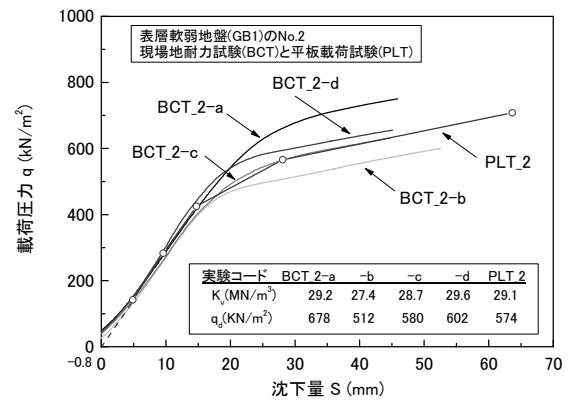


写真-1 GB1のNo.1における実験の様子

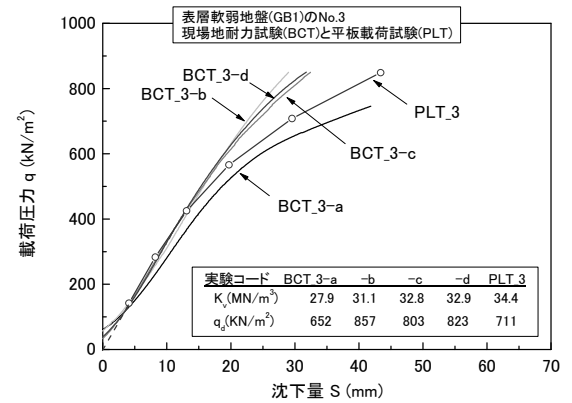
地盤調査における変動の範囲内の程度であったと見ることができる。したがって、BCTではPLTと概ね一致する結果が得られることがわかった。



a) No.1の結果



b) No.2の結果

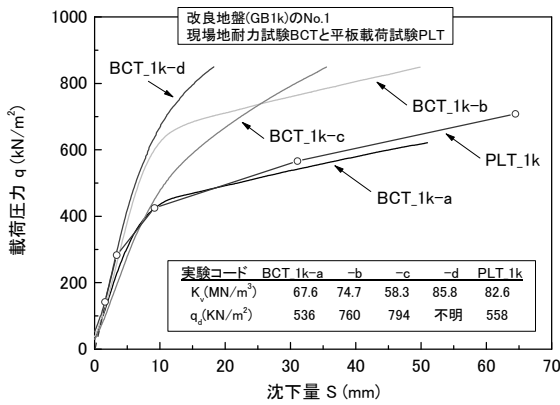


c) No3の結果

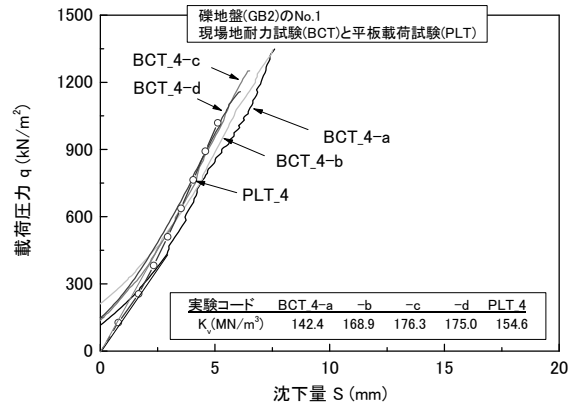
図-4 GB1における現場地耐力試験と平板載荷試験から得られた載荷圧力と沈下量の関係

3.2 表層改良地盤 (GB1k) における実験

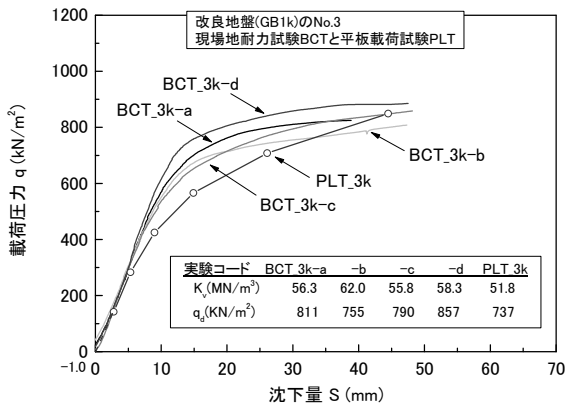
GB1では先の試験終了後に表層をセメント混合処理する地盤改良が施された。その方法は散布車でセメントを散布した後にスタビライザーで深さ1mまで攪拌混合するものであった。混合後には表面をブルドーザで整地した後にタイヤローラーで転圧した。この地盤改良から7日の養生期間を経てから改めて両試験を行った。



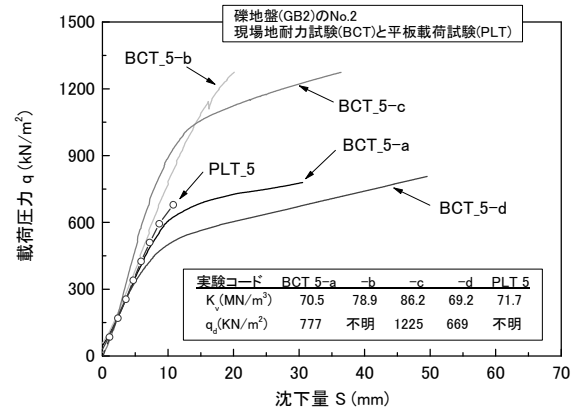
a) No. 1 の結果



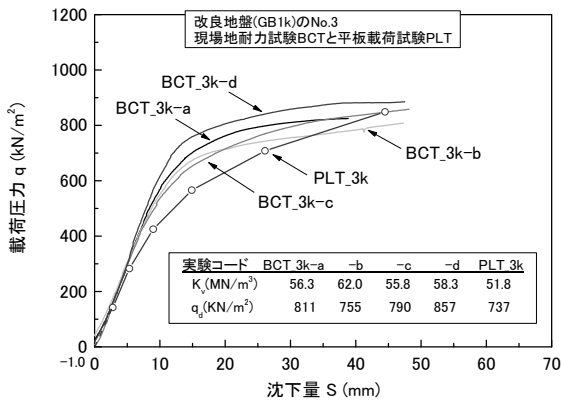
a) No. 1 の結果



b) No. 2 の結果



b) No. 2 の結果



c) No. 3 の結果

図-5 GB1の地盤改良後に行った現場地耐力試験と平板載荷試験の結果

表-3 GB2の試験箇所と実験コード

地盤の状態	礫地盤	
場所とコード	東京都練馬区大泉町内(GB2)	
ポイント	No.1	No.2
現場地耐力試験	BCT_4-a, b, c, d	BCT_5-a, b, c, d
平板載荷試験	PLT_4	PLT_5

図-6 GB2での現場地耐力試験と平板載荷試験から得られた載荷圧力と沈下量の関係

図-5は改良後に先と同じポイント近傍で行った試験の結果を示す。先の図-4と比較して改良後地盤の曲線には大きな差が見られる。このような結果のバラツキは各ポイント内のみならずポイント間にも現れている。ローム(火山灰質粘性土)は改良強度が得にくい土質であり、さらに混合ムラによってその差は大きくなる。現場で作製した改良土と実験室のその(室内/現場)強度比は最大3倍にもなる⁹⁾とされており、作製方法と養生環境によって強度にはかなりの差を生じることが知られている。No.1のPLT_1kとBCT_1k-aのように良く一致した結果がある一方で、BCT_1k-dのように q_d を判別できないほど S 増分に対する q の増分が大きくなる結果が見られた。したがって、改良地盤そのものの位置的な強度差が大きいことからBCTの再現性をここで議論することは適当でない。しかしながら、現場はこのような強度差が発生しうる状況であることもGB1kの結果から明らかとなり、転倒防止にはBCTのような試験による

地耐力確認が必要なことがわかった。GB1kでは改良地盤に生じる強度のバラツキを再確認するとともに、BCTはその分布をピンポイントで調査できることがわかった。すなわち、転倒災害の防止にBCTによる調査は有効なことがわかった。

3.3 礫地盤(GB2)における実験

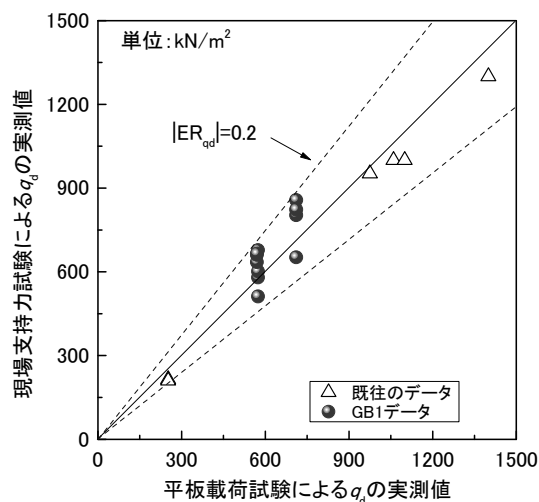
東京都練馬区大泉町内の現場(GB2)においてBCTとPLTを行った。表-3は試験の実施箇所とそのコード名を示す。No.1とNo.2の両ポイント間の距離は20m程度である。N値と土質柱状図は未調査であったが、No.1では武蔵野礫層を主とする堅固な面が観察されていた。一方、No.2は表面が覆土されており、そこには施工による乱れが見られた。図-6はGB2におけるBCTとPLTの結果を示す。No.1ではS増分に対するq増分が大きくqが1200 kN/m²以上でも曲線に明確な屈曲は見られない。BCTとPLTを比較すると曲線はほぼ一致しておりK_vも142.4 MN/m³から176.3 MN/m³で差は小さい。平均に対する誤差は2%から4%程度であることから、非常に堅固な地盤においても両試験の結果は良く一致することがわかった。一方、覆土されたNo.2ではBCTの結果に大きな差が見られ、q_dの値は669kN/m²から計測範囲外(1200 kN/m²以上)に分布する。このような比較的大きな差は覆土の厚さや表面の乱れによって生じたものと考えられる。

GB2(No.2)の結果から、同一現場内では地耐力が位置によって大きく異なるケースが確認され、その差は目視で判別困難なものであった。そのため、建設機械の設置では改めてBCTのような試験による定量的確認が必要なことがわかった。

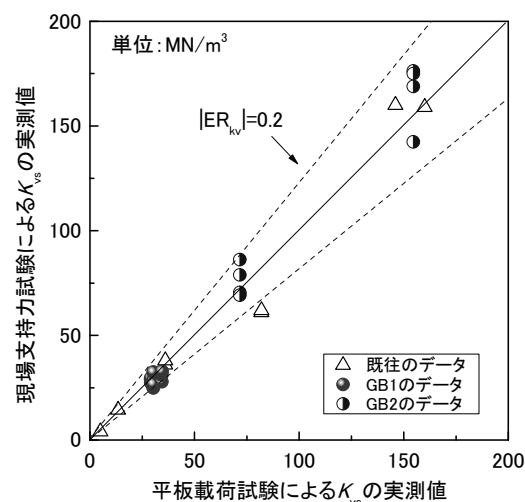
3.4 BCTとPLTの結果比較

図-7はBCTとPLTから得られたq_dとK_vの比較を示す。同図には今回取得したデータに加えて既報¹⁾に報告したデータもプロットしている。なお、GB1kにおける地盤改良後のデータはこれに含めておらず、その理由は先にも述べたとおり地盤改良そのものによる土のせん断強さのバラツキが大きいため、このデータから結果の再現性を議論するのは適当で無いため対象から除外した。

q_dとK_vに共通してPLTの結果とBCTの結果には1:1の比例関係が認められ、軟弱な地盤から堅固な地盤までの幅広い条件で両試験の結果には良い一致が見られた。さらに、誤差率ERを式(1)と式(2)のように定



a) 極限支持力 q_dの比較



b) 地盤反力係数 K_vの比較

図-7 現場地耐力試験と平板载荷試験の結果の比較

義してPLTに対するBCTの誤差を計算した。

$$ER_{q_d} = \frac{q_{d(BCT)} - q_{d(PLT)}}{q_{d(PLT)}} \quad (1)$$

$$ER_{k_v} = \frac{K_{v(BCT)} - K_{v(PLT)}}{K_{v(PLT)}} \quad (2)$$

ここで、ER_{q_d}はq_dの誤差率でありq_d(BCT)はBCTのq_d値を意味しq_d(PLT)は同様にPLTの値をである。ER_{k_v}はK_vの誤差率でありK_v(BCT)はBCTのK_vでありK_v(PLT)は同様にPLTの値である。

q_d(BCT)とK_v(BCT)の実測値はともにERが0.2程度の幅に分布している。先に述べたように精度良く調査されたN値や土のせん断強さの変動係数Vが0.2から0.4と言われている⁸⁾。一方、PLTに対するBCTの誤差も

約 20%以内に分布している。Vは収集したデータの平均値に対する標準偏差であるが、ERはPLTのデータを基準としてBCTの値を比較したものである。

VとERは異なる指標であることから直接的な比較は本来適当でないが、ERはVの範囲内となっていることから、BCTによる誤差はほぼ地盤側の強度的なバラツキによるものと推定することができる。したがって、BCTとPLTの試験法自体の違いが結果に与える差は非常に少ないと考えられる。

施工では効率性と経済性が求められ、仮設の地耐力確認でも同様と思われる。BCTとPLTに要する時間と労力の差を考えれば、BCTの有効性は明らかである。特に現場での転倒防止では、BCTはPLTによる調査を十分補完するものと言える。なお、大型機械では設置面(基礎サイズ)の増大によって影響範囲も拡大する。BCTはPLTと同様なスケール効果による適用の限界²⁾もあることから、BCTによる浅い部分の調査に加えて、工事前に行われた深い部分の地盤調査のデータも参考に地耐力は総合的に検討される必要がある。

4 まとめ

本研究では建設機械の転倒を防止するために仮設の地耐力を効率的に確認するための方法「現場地耐力試験」(BCT)を考案し、これを実施するための試験装置を開発した。そして、同装置による現場実験の結果が平板載荷試験(PLT)による結果とほぼ一致することを確認した。特に、今回取得したデータとこれまでに蓄積した試験データを総合した解析からは、PLTに対するBCTの誤差率が0.2程度の範囲内であり、これは精度良く行われた通常の地盤調査の変動係数と同レベルかそれ以下であった。したがって、BCTはPLTとほぼ同一の試験結果を示しつつ、10分から20分という短時間で迅速かつ容易に実施可能な試験であることから、建設機械を設置する作業現場の地耐力を確認する手段としてBCTの利用を提案する。

現在BCTは(公社)地盤工学会が発行する基準書において「基準以外の方法」として紹介されており¹⁰⁾、また、国土交通省が提供する「公共工事投における新技術情報システム」(NETIS)に登録されている(KT-160051-A)¹¹⁾。BCTの適応性については今後も実験的調査を継続する予定であり、様々な地盤条件におけるデータを蓄積して

本試験の有効性を検証したいと考えている。

参考文献

- 1) 玉手聡, 堀智仁: 作業現場における地耐力確認の方法—移動式クレーンを含めた建設機械等の転倒防止対策—。労働安全衛生総合研究所技術資料。JNIOSH-TD-NO.3. 2015.
- 2) (公社)地盤工学会: 地盤調査の方法と解説, 第8編載荷試験第3章平板載荷試験, pp.697-723, 2013.
- 3) (公社)地盤工学会: 地盤調査の方法と解説, 第8編載荷試験第3章平板載荷試験 3.4 現場CBR試験, pp.723-729, 2013.
- 4) 玉手聡, 堀智仁: 重機を反力とした簡易な支持力試験の検討, 第45回地盤工学研究発表会, 平成22年度発表講演集, pp.33-34, 2010.
- 5) 玉手聡, 堀智仁: 現場の地耐力確認を目的とした簡易試験法の実験的検討, 平成22年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集, pp.93-96, 2010.
- 6) 玉手聡, 堀智仁: 地盤の支持力調査における簡易試験法の適用に関する実験的考察, 日本建設機械化協会, 平成23年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集, pp.137-140, 2011.
- 7) 玉手聡, 堀智仁: 載荷速度の違いが支持力計測に与える影響, 第46回地盤工学研究発表会, 発表講演集, pp.159-160, 2011.
- 8) 松尾稔. 地盤工学—信頼性設計の理念と実際—。1984. 64-72.
- 9) 社団法人セメント協会: セメント系固化剤による地盤改良マニュアル(第4版), pp.93-111, 2012.
- 10) (公社)地盤工学会: 地盤調査の方法と解説, 第8編載荷試験第3章平板載荷試験 3.5 基準以外の方法, pp.729-731, 2013.
- 11) 現場地耐力試験システム: 公共工事等における新技術活用システム(NETIS), KT-160051-A, 国土交通省関東地方整備局, 2016.