

### 30. 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

(独)労働安全衛生総合研究所 ○玉手 聡  
同 上 堀 智仁

#### 1 はじめに

移動式クレーンや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が、現場の支持力は目視や踏査により経験的に判断される場合も多く写真1に示すような支持力不足による転倒事故がたびたび発生している<sup>1)</sup>。本研究ではこのような転倒災害の防止を目的に、施工現場における簡易な地耐力評価の方法を検討している。地盤の支持力を直接的に調査する方法には平板載荷試験があるがその実施には時間を要し、必ずしも簡易でないという問題がある。

本研究ではドラグ・ショベル(重機)を反力に利用した現場支持力試験<sup>2)</sup>(以下、BC試験と言う)による簡易評価を検討している。本論文ではこの試験における載荷速度の違いが支持力計測に与える影響について、現場試験の結果を報告するとともに併せて実施した平板載荷試験とキャスポル試験の比較から、地盤の支持力評価における簡易試験の適用について考察する。



写真1 移動式クレーンの転倒事故

#### 2 平板載荷試験と現場支持力試験の比較

##### 2.1 載荷装置の構造

BC試験の方法は平板載荷試験<sup>2)</sup>(以下PL試験と言う)のそれと基本的に同じであるが、荷重の載荷方法が変位制御である点異なる(表1参照)。PL試験では計画最大荷重を5から8段階に分割し、段階的に荷重を載荷する(荷重制御)。載荷荷重は各段階で30分間の保持が標準とされるため、一カ所の試験には約4時間を要する。一方、BC試験は載荷速度( $v$ )を5mm/分に設定した場合、所要時間は

10分程度に短縮できる。

当研究所で試作したBC試験の装置を図1に示す。同装置は長さ855mm幅400mmの架台に載荷装置がユニット化して搭載されている。架台の4隅には車輪が備わり手押しにより現場内を自在に移動できる。この試験装置には図2に示す載荷ジャッキが備わり、AC電源により電動モータで駆動する。このジャッキは同心円状に3段の重複構造を有しておりシリンダーA、シリンダーB、シリンダーCが備わる。モータからの動力は減速機を介してウォームギヤに伝達され、ホイールギヤを回転させる。

表1 平板載荷試験と現場支持力試験の比較

	平板載荷試験 (JGS 1521-1995)	現場支持力試験 (今回検討)
載荷板	直径30cm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 (5mm/分)
反力装置	実荷重、アンカー、重機	重機
沈下量	基準より載荷板上の沈下4点を計測	載荷装置の伸張量から重機の浮き上がり量を引いた値
所要時間 (1箇所)	3時間~4時間	約10分

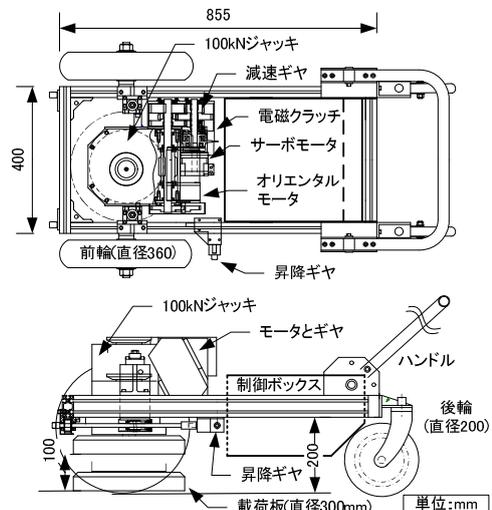


図1 現場支持力試験装置の概要

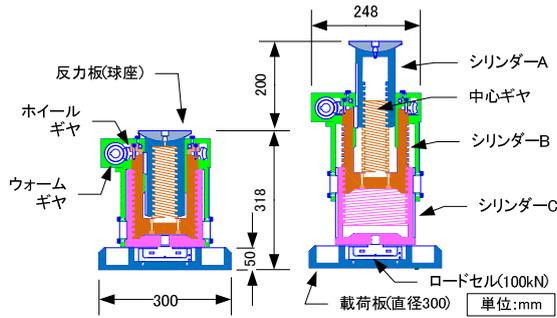


図2 荷重ジャッキの構造(左: 収縮時, 右: 伸張時)

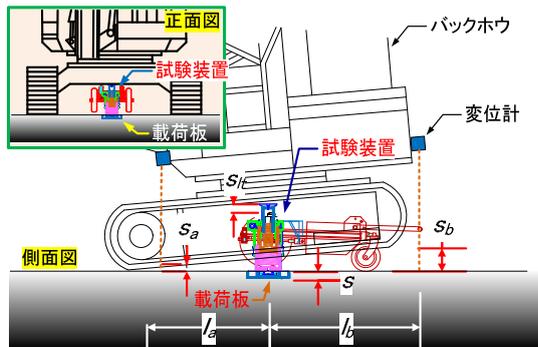


図3 機体の浮き上がり補正の方法

ホイールギヤはシリンダーBに結合しており、一体となって回転する。またシリンダーBの中心軸には円柱状のギヤ(以後、中心ギヤと呼ぶ)がありこれも結合している。中心ギヤ(外溝)はシリンダーAのギヤ(内溝)と係合する。一方、シリンダーBの外溝はシリンダーCの内溝と係合する。シリンダーAとCの内溝は逆向きとなっており、シリンダーBの回転によってAとCは同調して伸張したり収縮したりする。

このジャッキは収縮時で318mmとコンパクトであるが伸張時には518mmとなる。このコンパクトかつロングストローク可能な構造により、ドラグ・ショベルの下部に架台ごと挿入でき、容易で迅速な試験を可能とした。またジャッキは昇降ギヤによりさらに全体が100mm上下可能であり、これにより車載時や移動時には載荷板と地面の離隔も確保することができる。

ジャッキの下側には100kNロードセルと直径300mmの円形載荷板がシリンダーに剛結しており、載荷荷重を実測できる。上側には直径100mmの反力板がシリンダーにヒンジ結合(球座)しており、この部分が重機の下部構造体と接触して載荷反力を得る。

## 2.2 沈下量の計測方法

ジャッキのストローク量(\$s\_c\$)は変位計により直接測定する。なお、載荷板の沈下量(\$s\$)の値については図3に示すように、反力として用いた重機の

浮き上がりを式(1)のように補正する必要がある。ジャッキ位置における理論浮き上がり量(\$s\_{it}\$)を別に計測した前部と後部における機体の浮き上がり量 \$s\_a\$ と \$s\_b\$ 及び計測間隔 \$l\_a\$ と \$l\_b\$ を用いて式(2)のように換算する。なお \$l\_a\$ と \$l\_b\$ はPL試験の変位計測に定められた「載荷板と基準点の離隔1m以上」の基準を満足させている。\$s\_a\$ と \$s\_b\$ の計測には写真2のようにマグネットホルダーに取り付けたワイヤ式変位計を用いると、重機への設置も容易であり簡単に計測することができる。

$$s = s_c - s_{it} \quad (1), \quad s_{it} = \frac{s_b \cdot l_a + s_a \cdot l_b}{l_a + l_b} \quad (2)$$



写真2 重機を反力とした支持力試験の様子

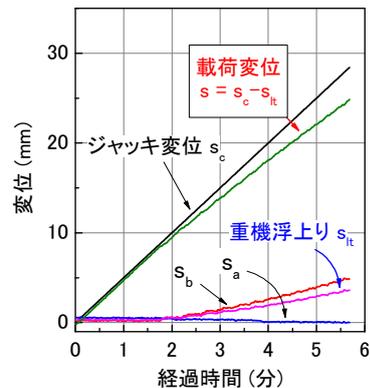


図4 各変位の時刻歴変化(BC\_2)

図4は現場支持力試験における測定変位の時刻歴を示す。\$v\$は \$s\_c\$ に対する設定値であり、5mm/分の一定した変位を確認できる。機体前方と後方の \$s\_a\$ と \$s\_b\$ については経過時間が3分付近から \$s\_b\$ に増加が見られ、式(1)で換算した \$s\_{it}\$ は5.5分の試験終了時に3.6mmまで増加している。その結果、式(2)から得られた \$s\$ の実速度は4.5mm/分となっており、浮き上がりにより約10%の減少が生じている。

## 3 現場試験

### 3.1 平板載荷試験と支持力試験の比較

図5は現場GB\_1におけるBC試験の結果とPL試験の結果を示す。表2は両試験の条件と結果を

示す。同現場では表土が0.5m程度の深さ掘削して取り除かれており、軟らかなシルトが載荷面に観察された。図5右に示す土質分布は地表から-2mまでがシルト質細砂でありそれ-1.3m付近に水位がある。深さ2mまでのN値は5であった。同図左の横軸は沈下量( $s$ )を載荷板の直径( $D$ )で除して無次元化して示す。3つの試験は約2mの離隔で実施したが、土質は見かけ上同じであった。載荷速度はBC\_1が1mm/分であり、BC\_2は5mm/分である。BC\_1とBC\_2では載荷速度が5倍異なるが両曲線はほぼ一致しており、比較した条件では差がほとんど見られない。 $s/D=0.05$ 付近では曲線が屈曲しており、その前後のから交点の $q_u$ 値を求め、その値を極限支持力( $q_u$ )と定義した。

また $s/D<0.05$ の載荷初期に見られる直線的な関係からその傾きを求め、その値を載荷応力係数( $K_i$ )と定義した。3つの試験から求めた $q_u$ と $K_i$ の値はほぼ一致しており、載荷方法が応力制御と変位制御で異なることによる影響、ならびに変位速度が異なることによる影響はほとんど確認されなかった。

表2 現場支持力試験の実施条件と結果

名称	位置	変位速度 (mm/分)	所要時間 (分)	$q_u$ (kPa)	$K_i$ (MPa)
BC_1	GB_1	5	8	192	4.1
BC_2	GB_1	1	40	204	4.3
PL_1	GB_1	7段階応力	140	204	5.0
PL_2	GB_2	8段階	248	223	14.8

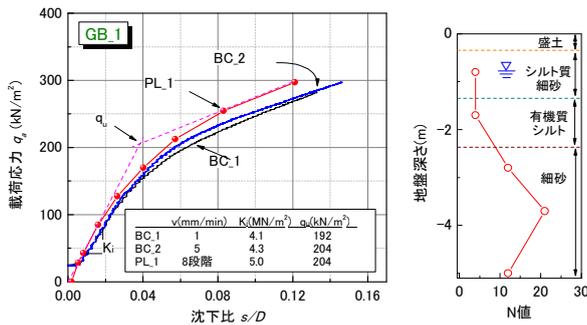


図5 GB\_1における載荷応力と沈下比の関係(左)と土質分布(右)

### 3.2 平板載荷試験とキャスポール試験の比較

図6は今回の試験とは別に当研究所の敷地内にて行った平板載荷試験(PL\_2)の結果を示す。試験は表面から約2m掘削した支持面において実施し、土質は均質な関東ロームであった。第1段階の載荷では $s/D$ 増分に対する $q_u$ 増分が第2段階のそれに比べて幾分か大きい、これは予備載荷による影響と見られる。 $s/D=0.015$ 付近では曲線に屈曲が見られる。第2から第3段階載荷における $q_u$ - $s/D$ 関係から $K_i$ を求め、さらに先と同様に $q_u$ も求めた。得られた値は後述するキャスポール試験の結果と比較した。

キャスポール試験はランマーを所定の高さから落下させることによって行う簡易支持力試験<sup>3)</sup>であり、地面と衝突した際の衝撃加速度がインパクト値( $I_a$ )で得られる。国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所はキャスポールの利用手引き<sup>3)</sup>を示しており、その中で $I_a$ と粘着力( $c$ )と地盤反力係数( $K_{30-C}$ )及びコーン指数( $q_c$ )との関係をそれぞれ式(3)と(4)のように示している。

$$c(\text{kN/m}^2) = 0.785 + 7.073 \cdot I_a \quad (3)$$

$$K_{30-C}(\text{MN/m}^3) = -37.580 + 8.55 \cdot I_a \quad (4)$$

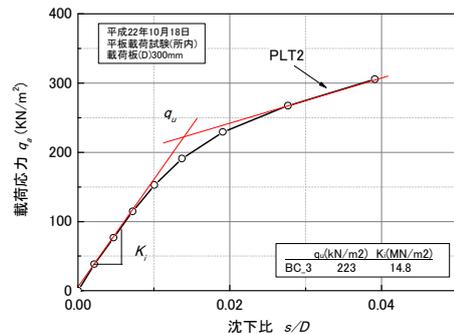


図6 GB\_2で行った平板載荷試験の結果(PL2)

表3は試験から得られた $I_a$ の平均値( $\mu$ )と標準偏差( $\sigma$ )ならびに、 $I_a$ から換算して求めた地盤反力係数と極限支持力を示す。また同表には現場支持力試験と平板載荷試験で実測した地盤反力係数と極限支持力も示した。

表3 キャスポール試験からの換算値と実測値の比較

位置	キャスポール試験							現場支持力試験		平板載荷試験	
	試験数	$I_a$ 値		$K_{30-C}$ (MN/m <sup>3</sup> )		$q_u-C$ (KN/m <sup>2</sup> )		$K_{30-B}$ (MN/m <sup>3</sup> )	$q_u-B$ (KN/m <sup>2</sup> )	$K_{30}$ (MN/m <sup>3</sup> )	$q_u$ (KN/m <sup>2</sup> )
		$n$	$\mu$	$\sigma$	$\mu_K$	$\sigma_K$	$\mu_q$				
GB1	14	8.55	1.68	35.56	14.41	375	73	14.0	198	16.7	204
GB2	101	9.54	1.07	44.06	9.18	418	46			49.3	223

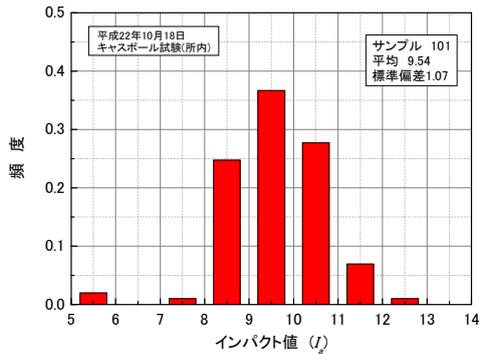


図8 キャスポール試験によるインパクト値の頻度分布

図8は所内で行ったキャスポール試験(GB\_2)によるインパクト値( $I_a$ )の頻度分布を示す。試験場所は地表から約2m掘削された地盤面であり、状態はほぼ均質な関東ロームであった。

頻度分布は  $I_a$  に対してほぼ標準正規分布を示し変動係数(標準偏差に対する平均値の比)は約0.11であった。地盤側の均質性は高く見られる一方で  $I_a$  値にはバラツキが見られ、キャスポール試験から求まる値に潜在する不確実性が改めて確認された。

図9は地盤反力係数( $K_{30}$ )と極限支持力( $q_u$ )の実測値とキャスポール換算値の比較を示す。 $K_{30}$ について地盤が軟弱なGB\_1では、キャスポールによる換算値( $K_{30-C}$ )は実測値( $K_{30}$ )よりも大きめに評価されておりこの場合、換算値から安全側の評価を導くためには、例えば式(5)のように平均値( $\mu_K$ )から標準偏差( $\sigma_K$ )の1.4倍以上の値を減じる必要がある。一方、均質な関東ローム地盤のGB\_2では  $K_{30-C}$  と  $\mu_K$  がほぼ一致しており評価の精度は地盤条件にも左右されることがわかった。

$$\mu_K - 1.4\sigma_K < K_{30} \quad (5)$$

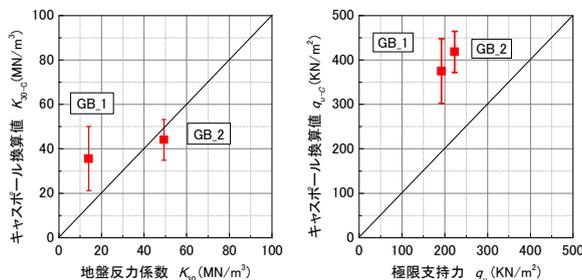


図9 地盤反力係数と極限支持力のキャスポール換算値と実測値の関係

$q_u$  の換算値( $q_{u-C}$ )は式(3)から得られた  $c$  の値を式(6)に代入して簡易に求めたものである。

$$q_{u-C} = \alpha \cdot c \cdot N_c \quad (6)$$

ここで、 $\alpha$ は形状係数でありここでは1.2、 $N_c$ は

支持力係数であり5.1とした。なお現場の土質は粘性土を仮定し、内部摩擦角は無視した。

$q_{u-C}$ の平均値( $\mu_q$ )はGB\_1とGB\_2に共通して実測値( $q_u$ )よりも大きい。両ケースにおいて換算値と実測値の関係から極限支持力を安全に推定するためには、式(7)のように平均値( $\mu_q$ )から標準偏差( $\sigma_q$ )の4.3倍以上を減じることとなる。

$$\mu_q - 4.3\sigma_q < q_u \quad (7)$$

以上より、キャスポール試験から求めた地盤反力係数と極限支持力の両換算値には実測値との差やその分布による不確実性が確認された。変動係数については現場毎に異なるものと思われるがほぼ均質な状態の地盤においても0.11程度認められた。 $I_a$ の信頼性は地盤条件や計測条件によっても大きく左右される。安全側に評価するためには安全の余裕がある程度大きく設定する必要があるものと考えられる。

#### 4 まとめ

地下水位が載荷面下約1.3mに位置し土質が軟弱なシルトの地盤条件において現場支持力試験と平板載荷試験を行った。載荷速度を1mm/分と5mm/分で比較した試験から得られた載荷圧力と沈下比関係には明確な差が見られず、また別に実施した平板載荷試験による関係ともほとんど一致することが確認された。載荷速度を5mm/分にすると試験時間は10分程度となり、従来の平板載荷試験に比べて時間を大きく短縮できることがわかった。引き続き現場実験によるデータの収集を行い現場支持力試験の適用性を検証したいと考えている。

また簡易支持力測定器(キャスポール)から得られるインパクト値( $I_a$ )から地盤反力係数と極限支持力の換算値を求め実測値と比較した。 $I_a$ の分布はほぼ標準正規分布的であり、換算値には一定の不確実性を生ずることが確認された。この不確実性を考慮して安全側に支持力を評価するためにはある程度の余裕を考慮する必要があるが、その指標値については今後さらに検討する必要がある。

#### 謝辞

今回の茨城県美浦村における現場実験は株式会社地盤試験所の協力により実施されたものであり、ご協力頂いた各位に深くお礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 玉手聡, 堀智仁: 大型建設機械の不安定性と転倒防止のための安全要件, 労働安全衛生総合研究所安全資料, JNIOSSH-SD-NO.28(2010), pp.5-18, 2011.
- 2) 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.
- 3) 国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所: 簡易支持力測定器(キャスポール)の利用手引き, pp.3-12, 2005.