

27. 圧入工法における載荷試験の効率的実施方法に関する研究

圧入機による簡易的な静的載荷試験

株式会社技研製作所

石原 行博
 ○江口 正史
 森 敦
 戸田 行紀

1. はじめに

圧入工法は杭や矢板の施工技術の一つで、油圧力を用いて杭を地盤に貫入させる。補助工法を用いない「単独圧入」は、主に軟弱地盤での矢板の施工に適用される。他方、先端に切削刃の付いた鋼管杭を回転させながら押し込む「回転切削圧入」は、硬質地盤を含めた多様な地盤での鋼管杭の施工に適用される。近年、これらの矢板や鋼管杭を本設利用する動きが進んでおり、載荷試験データの蓄積が必要となっている。載荷試験には多大なコストと時間が必要とされ、そのデータの蓄積は容易ではない。筆者らは、載荷試験をコストと時間の両面で効率的に実施する方法についての検討を進めている。本論文では、圧入機を用いた簡易的な静的載荷試験（以下、簡易載荷試験）について、実際の実験事例を含めて報告する。

2. 簡易載荷試験の妥当性検証のための実証試験の方法

圧入機を用いた簡易的な静的載荷試験（以下、簡易載荷試験）は、通常静的載荷試験（以下、通常載荷試験）で必要となる大がかりな載荷装置、反力装置、計測装置を圧入機（図1）で代用することにより、載荷試験に要するコストと時間を削減することを意図したものである。簡易載荷試験と通常載荷試験の比較検証を目的として、実証試験を実施した。

実証試験では、回転切削圧入で施工した杭に対して、簡易載荷試験と通常載荷試験を、鉛直・水平それぞれについて実施した（表1）。地盤条件は図2に示すとおりで、試験杭は外径318.5mmの鋼管杭（閉端または開端）とした。

簡易載荷試験と通常載荷試験について、この実証試験で採用した方法の比較を表2に示す。簡易載荷試験では、載荷、反力確保、計測のすべてを圧入機で完結させることを前提とした。ただし、今回の実証試験では、計測の妥当性を確認するために

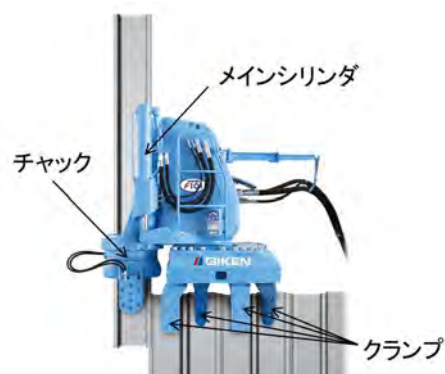


図-1 圧入機

表-1 実験ケース

試験 No.	試験杭	載荷試験方法
J2203-03	開端杭	簡易（鉛直）
J2203-04	開端杭	簡易（水平）
J2203-05	開端杭	通常（鉛直）
J2203-06	開端杭	通常（水平）

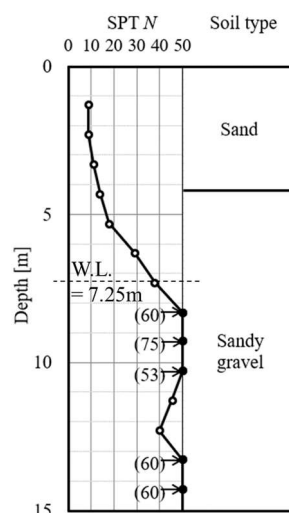


図-2 地盤条件

外付けの計測器も採用した。通常载荷試験では、载荷装置と計測装置は外付けのものを採用した。いずれの载荷試験も、基本的な試験方法は地盤工学会基準^{1),2)}に沿ったものとした。回転切削圧入の完了後から各载荷試験の開始までの時間（養生期間 t_T ）は、すべての試験で7日とした。

簡易载荷試験（鉛直）の実施状況を図3に示す。圧入機のチャックで試験杭を把持して圧入力を作させた。圧入力および杭頭変位は、圧入機に標準的に装備されている計測システムにより取得した。反力は、既設の反力杭壁を圧入機のクランプで把持することにより確保した。なお、簡易载荷試験の計測の妥当性を確認する目的で、基準梁に固定した外付けの変位計を用いて杭頭変位を計測した。

簡易载荷試験（鉛直）において、圧入機で達成される载荷速度は地盤工学会基準で規定されている载荷速度に比べて速いので、押し込みを断続的に実施することにより十分な载荷時間（30分）を確保した。また、試験杭に作用する杭頭荷重（ Q ）には、圧入力（ Q' ）だけでなく圧入機のチャックの重量（ W_C ）も含まれるので、杭頭荷重 Q は次式により算出した³⁾。

$$Q = Q' + W_C \quad (1)$$

通常载荷試験（鉛直）の実施状況を図4に示す。反力は、簡易载荷試験の場合と同様に、既設の反力杭壁を圧入機のクランプで把持することにより確保した。圧入機のチャックで把持した反力治具と杭頭との間に、油圧ジャッキとロードセルを設置し、油圧ジャッキで杭頭荷重を作用させながらロードセルで杭頭荷重を計測した。杭頭変位は、基準梁に固定した外付けの変位計を用いて計測した。

簡易载荷試験（水平）の実施状況を図5に示す。圧入機のチャックで把持した载荷用治具を試験杭に接触させ、圧入機の動作（リーダーマストの旋回動作）を用いて载荷用治具を水平移動させることにより、試験杭に水平荷重を作用させた。载荷用治具は試験杭と同じ外径の杭とし、試験杭との接触部分に突起を設けることにより、試験杭の水平変位や傾斜が進行しても一定の载荷高さ（地表面基準で0.15m）が維持されるようにした。载荷用治具（すなわちチャック中心）の水平変位（ δ_h' ）は、リーダーマストの回転角度の計測値（ θ_m ）と、リーダーマストの旋回中心からチャック中心までの距離（ $L_{(m-c)}$ ）（図6参照）とを考慮して、次式により算出した。この方法の妥当性の検証については次節で述べる。

$$\delta_h' = \theta_m \times L_{(m-c)} \quad (2)$$

反力は、既設の反力杭壁を圧入機のクランプで

把持することにより確保した。なお、簡易载荷試験の計測の妥当性を確認する目的で、基準梁に固定

表-2 簡易载荷試験と通常载荷試験の差異

(a) 鉛直		
	簡易载荷試験	通常载荷試験
载荷方法	連続载荷	連続载荷
载荷速度	载荷開始から除荷完了までが30分以上となるような速度	载荷開始から除荷完了までが30分以上となるような速度
载荷装置	圧入機	油圧ジャッキ
反力	反力杭（圧入機で把持）	反力杭（圧入機で把持）
荷重計測	圧入機	ロードセル
変位計測	圧入機	変位計
(b) 水平		
	簡易载荷試験	通常载荷試験
载荷方法	連続载荷	連続载荷
载荷速度	载荷開始から除荷完了までが30分以上となるような速度	载荷開始から除荷完了までが30分以上となるような速度
载荷装置	圧入機	油圧ジャッキ
反力	反力杭（圧入機で把持）	反力壁
荷重計測	圧入機	ロードセル
変位計測	圧入機	変位計



図-3 簡易载荷試験（鉛直）の実施状況

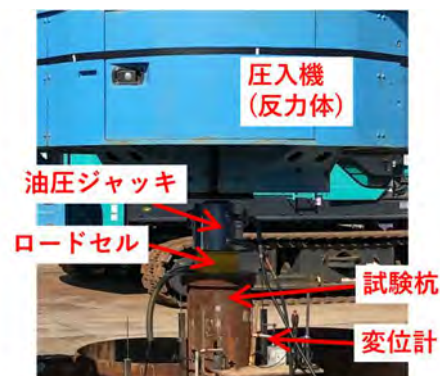


図-4 通常载荷試験（鉛直）の実施状況

した外付けの変位計を用いて、荷重高さ付近での試験杭の水平変位を計測した。

簡易荷重試験（水平）において、水平荷重は、リーダーマストを回転させる回転シリンダーの油圧の計測値から算出される荷重と、回転シリンダーと荷重用治具の把持部（チャック）との位置関係（図6）を考慮して、次式により算出した。

$$P_h' = \frac{P_{cl(l)} \times L_{(m-cl)} + P_{cl(r)} \times L_{(m-cl)}}{L_{(m-c)}} \quad (3)$$

ここで、 P_h' は圧入機で算出される水平荷重、 $L_{(m-cl)}$ はリーダーマスト回転中心と回転シリンダーとの距離、 $L_{(m-c)}$ はリーダーマスト回転中心とチャック中心との距離、 $P_{cl(l)}$ および $P_{cl(r)}$ はそれぞれ左側および右側の回転シリンダーで発揮される荷重、である。この方法の妥当性は、事前にキャリブレーションを実施して検証した。図7に示すように、圧入機のチャックで把持した荷重用治具と既設の杭との間にロードセルを挟み、簡易荷重試験の場合と同じ方法でロードセルに荷重を作用させて水平荷重（引張荷重）を計測した。水平荷重の計算値（ P_h' ）と実際の水平荷重 P_h （ロードセルによる計測値）との間には線形関係が認められた（図8）。この結果に基づき、 P_h' から P_h を求めるための補正式として次式を採用した。

$$P_h = r_h \times \left(P_h' - \frac{T_{0(m-c)}}{L_{(m-c)}} \right) \quad (4)$$

ここで、 $T_{0(m-c)}$ はリーダーマスト回転時の損失トルク、 r_h は低減係数、である。 $T_{0(m-c)}$ および r_h は圧入機に固有の値であり、今回の場合にはキャリブレーション結果をもとにそれぞれ 53 kNm および 0.9 とした。

通常荷重試験（水平）の実施状況を図9に示す。反力は、既設の反力壁（圧入機のクランプにより3本の反力杭が一体となっている）とした。試験杭と反力壁との間に、油圧ジャッキとロードセルを設置し、油圧ジャッキで荷重を作用させながらロードセルで荷重値を計測した。荷重高さは簡易荷重試験の場合と同等（地表面基準で 0.15 m）とした。水平変位は、基準梁に固定した外付けの変位計を用いて計測した。

3. 実証試験の結果と簡易荷重試験の妥当性

簡易荷重試験（鉛直）の結果を図10に示す。変位については、外付け変位計で計測したもの（ δ_v ）と圧入機のストロークセンサーで計測したもの（ δ_v' ）との2種類を示してある。圧入機のストロークセンサーで計測した杭頭変位 δ_v' を用いた場合、降伏点あたりまでの剛性が低い傾向となった。



図-5 簡易荷重試験（水平）の実施状況

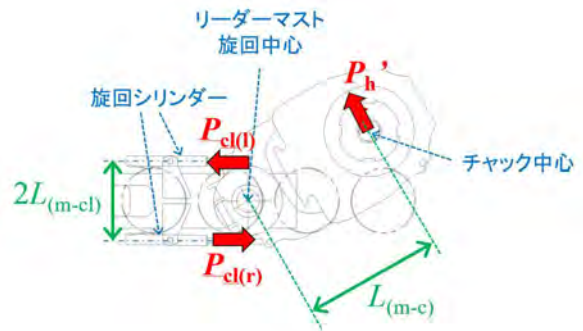


図-6 簡易荷重試験（水平）における水平変位と荷重の算出に必要な情報



図-7 簡易荷重試験（水平）における荷重計測のキャリブレーションの実施状況

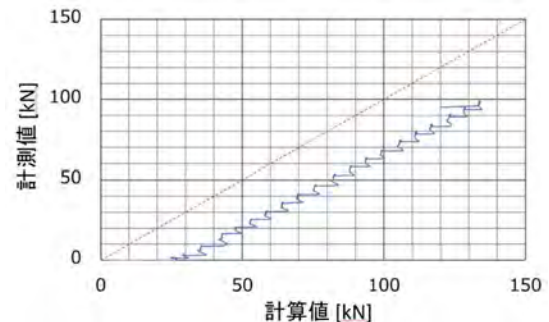


図-8 簡易荷重試験（水平）における荷重計測のキャリブレーションの実施結果

この要因は、杭に鉛直荷重を作用させた際の圧入機の微小な傾斜（図 11）などの影響が δ_v' に含まれていることだと考えられる。図 12 は、簡易載荷試験時の δ_v と δ_v' の相関を示したものである。この相関は、近似的に次式で表わされる。

$$\delta_v = \begin{cases} 0.04 \times (\delta_v')^2 & (\delta_v' < 50 \text{ mm}) \\ 0.95 \times (\delta_v' - 40) & (\delta_v' \geq 50 \text{ mm}) \end{cases} \quad (5)$$

簡易載荷試験（鉛直）の結果について、上式により δ_v' を補正した変位を用いた場合の荷重変位曲線と外付け変位計で計測した変位 δ_v を用いた場合の荷重変位曲線との比較を図 13 に示す。両者は除荷時を除いてよく一致した。



図-9 通常載荷試験（水平）の実施状況

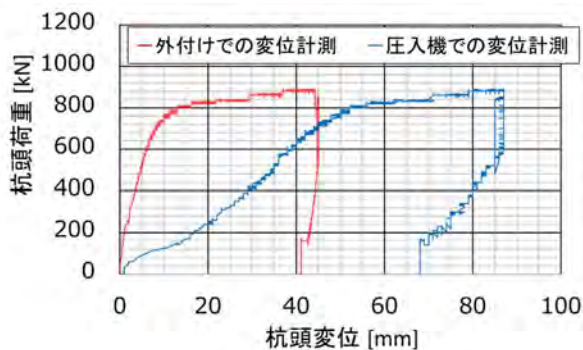


図-10 簡易載荷試験（鉛直）の結果

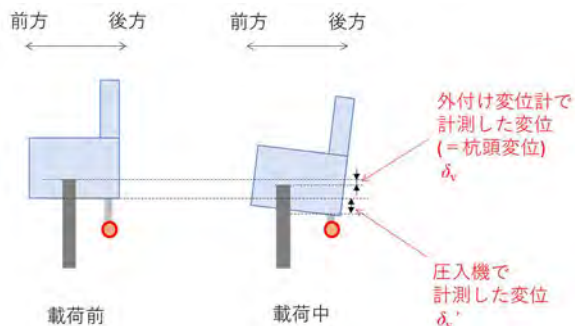


図-11 簡易載荷試験（水平）における荷重計測のキャリブレーションの実施結果

簡易載荷試験（鉛直）で得られた荷重変位曲線（変位を式 5 により補正したもの）と通常載荷試験（鉛直）で得られた荷重変位曲線との比較を図 14 に示す。両者は概ね一致しており、鉛直変位を補正した簡易載荷試験結果は通常載荷試験結果と整合することが確認された。

簡易載荷試験（水平）の試験結果を図 15 に示す。変位については、外付け変位計で計測したもの（ δ_h ）と圧入機で計測したもの（ δ_h' ）との 2 種類を示してある。いずれの場合も弾性的であったが、 δ_h' を用いた場合のほうが剛性が低い傾向となった。図 16 は、簡易載荷試験時の δ_h と δ_h' の相関を示したものである。この相関は、近似的に次式で表

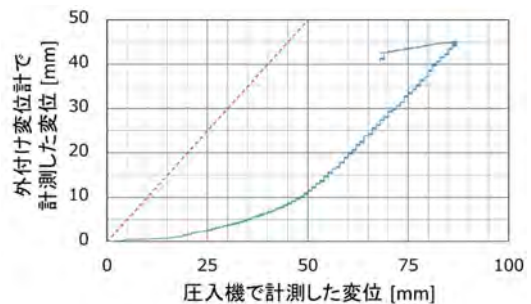


図-12 簡易載荷試験時の杭の鉛直変位 δ_v と圧入機で計測した鉛直変位 δ_v' の相関

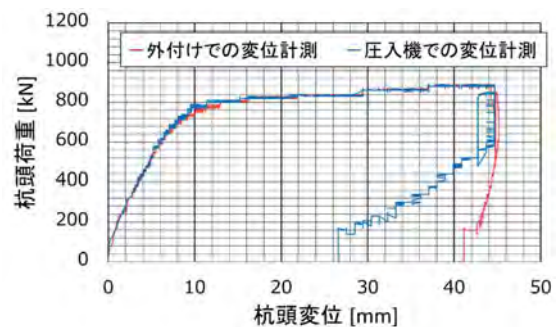


図-13 簡易載荷試験（鉛直）の荷重変位曲線で、式5で補正した変位を用いた場合と外付け変位計での変位計測値を用いた場合との比較

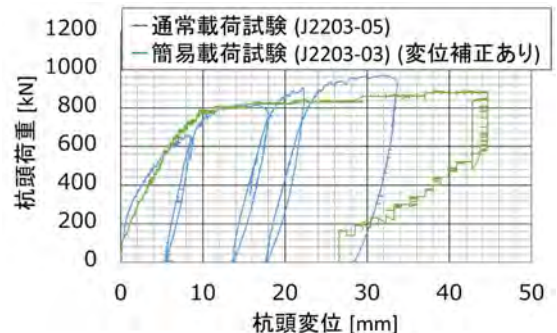


図-14 変位補正後の簡易載荷試験（鉛直）と通常載荷試験（鉛直）の荷重変位曲線の比較

わされる。

$$\delta_h = 0.8 \times (\delta_h' - 1) \quad (6)$$

簡易載荷試験（水平）の結果について、式 6 により δ_h' を補正した変位を用いた場合の荷重変位曲線と外付け変位計で計測した変位 δ_h を用いた場合の荷重変位曲線との比較を図 17 に示す。両者は除荷時を含めてよく一致しており、上式による変位の補正の有効性が確認された。

簡易載荷試験（水平）で得られた荷重変位曲線（変位を式 6 により補正したもの）と通常載荷試験（水平）で得られた荷重変位曲線との比較を図 18 に示す。両者は概ね一致しており、水平変位を補正した簡易載荷試験結果は通常載荷試験結果と整合することが確認された。

4. 結論

圧入機を用いた簡易的な静的載荷試験（簡易載荷試験）について、通常の静的載荷試験（通常載荷試験）との比較を通じてその妥当性を検証する目的で、実証試験を実施した。

密な砂地盤において回転切削圧入で施工された外径 318.5mm の鋼管杭に対して、簡易載荷試験と通常載荷試験を、鉛直・水平について実施した。その結果、簡易載荷試験では、計測に関して事前のキャリブレーションを行なうことにより、通常載荷試験と同等の試験結果を得られることが確認された。

5. 謝辞

本研究は、「宇宙建設革新プロジェクト」の一環として国土交通省の委託を受けて実施した。ここに記し、関係者に謝意を表す。

参考文献

- 1) 地盤工学会：杭の鉛直載荷試験方法・同解説, 271p., 2002.
- 2) 地盤工学会：杭の水平載荷試験方法・同解説, 64p., 2010.
- 3) Ishihara, Y., Ogawa, N., Mori, Y., Haigh, S. and Matsumoto, T. : Simplified static vertical loading test on sheet piles using press-in piling machine. Japanese Geotechnical Society Special Publication, 8th Japan-China Geotechnical Symposium, pp. 245-250, 2020.

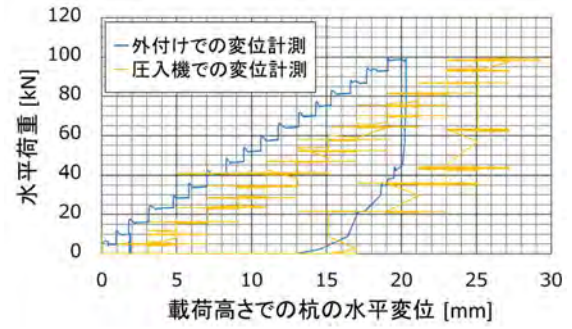


図-15 簡易載荷試験（水平）の結果

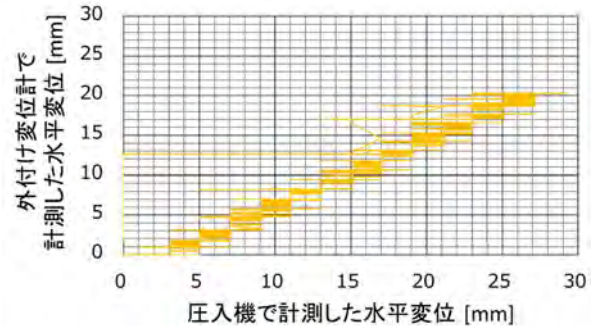


図-16 簡易載荷試験時の杭の水平変位 δ_v と圧入機で計測した水平変位 δ_v' の相関

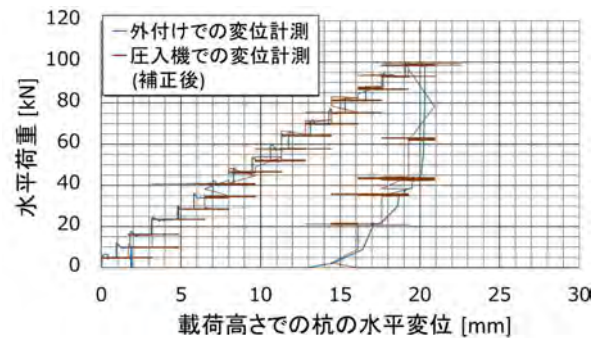


図-17

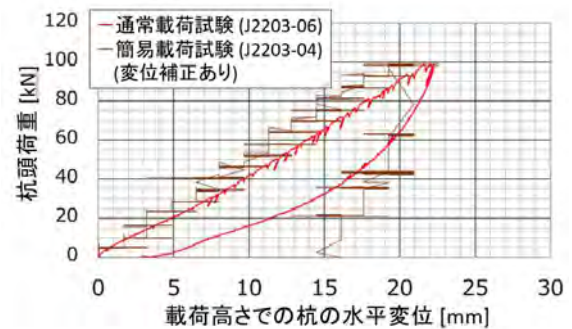


図-18 変位補正後の簡易載荷試験（水平）と通常載荷試験（水平）の荷重変位曲線の比較