

# 無人化施工における自動平板載荷試験機の開発

## 雲仙普賢岳無人化施工工事における技術開発

坂西孝仁・北原成郎

「雲仙式無人化施工」と言われる雲仙普賢岳復興工事の無人化施工工事は数々の技術的イノベーションを生み出してきた。本稿で報告する無人化施工における平板載荷試験機の開発はその中の一つであり、既に取り組みれていた問題であるが、敢えて地盤工学会の仕様にこだわりながら、理想的な試験機システムを目指して一つ一つの機器を吟味して機器を完成させた。また事前試験時に発生した諸問題は今後の無人化施工における問題点の一端を示しており今後の課題の重要な一つとなると思われる。

キーワード：無人化施工，雲仙普賢岳，試験機，平板載荷試験

### 1. はじめに

雲仙普賢岳の災害復興工事における無人化施工の際、火山堆積物の流出を抑えるため、RCCコンクリートを打設する床固工を実施する。その打設前の地盤支持力判定には簡易支持力測定器を使用してきたが衝撃加速度の最大地盤反力係数の相関より地盤支持力を算定することから、地表面の影響を受けるため無人化施工は全ての地盤において使用が出来るものではなく信頼性が低かった。また重機一体載荷型も見受けられるが一体型の扱い易さがある一方、重機の振動や油圧の影響を受けることがあった。

こうしたことから遠隔操作で確実に地盤の平板載荷試験する本格的な試験機の開発が望まれていた。当社の無人化施工現場の雲仙普賢岳赤松谷川6号床固工、おしが谷床固工の現場で実験機を開発し、適用したのでその概要と実験状況等について報告する。

### 2. 従来試験機の問題点

以下に主な問題点を示す。その中で発生した問題点や要望から専用の試験機を開発することにした。

#### ①試験荷重の調整の難しさ

試験荷重は最高荷重を5ステップに分けて荷重を上げて行くが、規定値までの油圧ポンプの操作は手動のボタンをモニターを見ながら加減するので油圧の制御を細かく行う必要がありアジャストが大変である。特に除圧の際は負荷がないため下がり過ぎて調整が難しい状態である。

#### ②重機の振動が大きい

重機一体型で取り回しは大変良かったが油圧ポンプの電源供給で発電機や重機を稼働させる必要があり、振動の影響が若干あった。

#### ③データ送受信の無線が特定小電力無線では画像データが送れない。

最近は操作、画像送信、情報送信は全てLAN無線機で送信する方式が主流になってきているので従来の特定小電力429MHzの無線機では帯域が狭く対応が出来ない。

### 3. 試験機の仕様

#### (1) 試験機開発目標

これまでの試験機の問題点に対して以下の開発目標を決めた。

##### ①実験の完全自動化

試験中は操作室で試験担当者が載荷、除荷の操作をするが、手動であると油圧の調整が難しくバラツキが生じ精度が落ちるので、パソコンにより試験実行プログラムで実験をして負担軽減と精度の向上を図る。

##### ②地盤工学会仕様に準拠

無人化施工に合わせて遠隔操作で地盤工学会基準「地盤の平板載荷試験 (JGS1521)」による試験方法に準拠する試験機の製作。

##### ③独立型の採用

油圧ショベルのアタッチメントタイプにすれば油圧や電源の確保が容易であるが、試験中も振動の影響を受け試験に影響があるので試験機を独立型にして信頼

性が高いシステムを確立。

④安定した無線システム

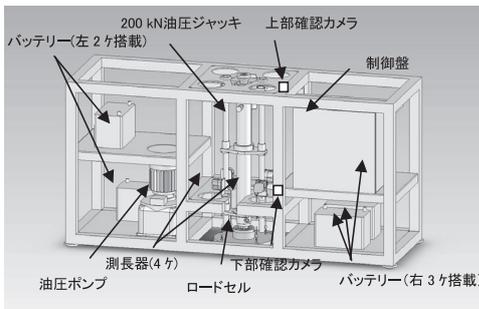
実験状況の確認のため Web カメラ等を装備して安定した無線システムを使用。

(2) 試験機基本仕様の決定

問題点を考慮して以下の仕様とすることにした(表一1, 図一1)。

表一1 試験機仕様

機器	規格
タイプ	試験機独立型
反力	1 m <sup>3</sup> 以上のバックホウ
ポンプユニット	常時圧力 72 MPa 電磁バルブ付
油圧ジャッキ	200 kN ストローク 500 mm
変位計	リニアエンコーダ有効長 1000 mm 精度 0.01 mm
通信方法	重機中継式 11n ⇄ 11j 無線 LAN 使用
電源	蓄電池 (12 V) × 4 ヶ

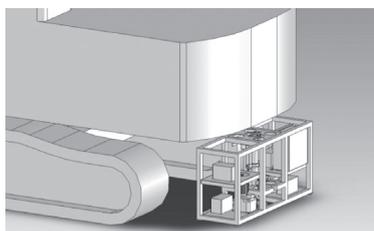


図一1 試験機全体図

①試験機独立型

重機の影響を無くするため独立型とし、油圧ショベルのバケットに専用運搬治具を取付けて試験箇所まで運搬設置回収する。設置した後油圧ショベルを180度旋回させて反力ウエイト代わりに試験で利用するので1 m<sup>3</sup>クラス以上の油圧ショベルが必要となる。

基準ばりの門型形状は試験機を箱形フレーム構造にすることにより載荷板を含めた横幅 2300 mm を確保し上部は機器類を搭載する設計とした。たわみが生じないように□60 mm 肉厚 6 mm 角パイプを使用している。変位計は有効長 1000 mm、精度 0.01 mm リニアエンコーダを使用することにした。これにより遠隔操作で地盤工学会基準「地盤の平板載荷試験 (JGS1521)」の



図一2 試験機試験イメージ図

仕様に合わせた試験機の製作が可能になった(図一2)。

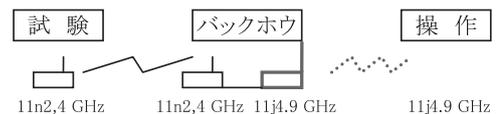
②バッテリー駆動

振動の問題などからバッテリー方式を採用して油圧ポンプも搭載した。バッテリーで稼働のため油圧ジャッキ、油圧ポンプの仕様を必要十分で極力低出力の機器を選択し、制御プログラムにより綿密にインバータ制御して電力消費を抑え、稼働推定時間の倍程度を考慮した容量のバッテリーを搭載した。

③重機の中継式無線 LAN の採用 (図一3)

バックホウ重機と操作室には出力が高くメッシュ LAN タイプの IEEE802.11j LAN 無線機 (4.9 GHz 帯) を使用して安定したデータの送受信を可能にした。

試験機と油圧ショベル間を IEEE802.11n 無線 LAN を使用してコストを抑えると共に安定した送受信が可能になり Web カメラを使用しても遅延の少ない画像や、ズーム機能、首振り操作がスムーズにできるようにした。試験機の運搬分離設置、試験状況を把握でき遠隔操作での試験が確実なものになる。



図一3 無線 LAN 中継イメージ図

④試験機にシーケンサ内蔵

試験を自動で操作するには操作室側のパソコンのプログラムにより無線を介して制御するのが通常であるが、前述した無線システムでも試験箇所によっては無線が安定しない場合も想定される。自動での試験中はこれにより、試験が止まってしまうことが想定される。そこで試験機側にシーケンサを内蔵して、操作室側からプログラムデータを送信、メモリしてから試験が始まるようにした。これにより通信が途絶えても試験は継続されると共に、データはメモリに蓄積されるのでデータの復旧も容易になる。

⑤ Excel を使用した入出力

試験プログラムの入力データは Excel シートで入力し出力データはこの上に上書きされる。提出用の出力帳票は、市販の平板載荷ソフトにこの EXCEL ファイルを読み込むだけで帳票が完成する仕様とした。これにより試験結果のまとめと沈下量曲線なども素早く終了し、作業時間低減が図れる。試験中の画面出力は、荷重と変位量の試験データを秒単位でパソコン画面に表示し、グラフ表示し、試験の経過の観察も容易にする。

### 4. 試験機の詳細

#### (1) 機械構成

##### ①油圧ジャッキ, 測長器, ロードセル (図-4)

油圧ジャッキは200 kNの揚力, ストロークは500 mmである。収納時, 試験機フレームに取り付けてあるモーターシリンダのロッドから油圧ジャッキ懸架部を介して吊り下げられている。この状態で試験機のフレームの中に収まり固定されて運搬が可能である。試験時にはモーターシリンダが伸びて(点線矢印)油圧ジャッキ懸架部が下がり載荷板が地面に着地する。この状態から油圧ジャッキを伸ばす。載荷板と油圧ジャッキはロードセルを介してダイレクトに接続されており, 荷重時の測定が直接に可能である。載荷板取付部は球状の受け皿で載荷板下が水平でない場合でも角度調整が利く。試験中油圧ジャッキは地盤と重機に挟まり独立している形になる。そして載荷板と基準ばりの代役となっている試験機フレームと測長器で4か所繋がっている状態である。従って油圧ジャッキに荷重をかけると沈下量が測れることになる。ロードセ

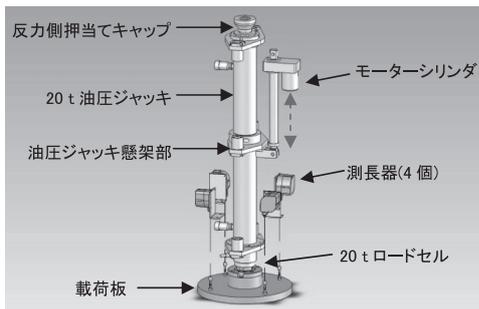


図-4 試験機油圧ジャッキ部詳細図

ルは油圧ジャッキに対応した定格容量200 kNであり, デジタル指示計と組み合わせで制御される。

##### ②試験機運搬治具

油圧ショベルにて運搬する際にバケットに取り付けた運搬治具はあらかじめバケットにねじ穴を切ったプレートで溶接し, ねじ止めするので容易に取り外しが可能である (図-5)。

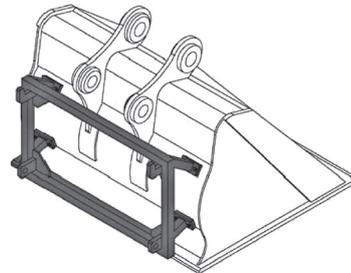


図-5 試験機運搬治具

運搬治具は上部のL字懸架部で試験機上部フレームを持上げる。試験機縦方向フレーム部の内側に差し込む構造でありクリアランスは5 mm程度であるが, 運搬時の振動の影響を抑えるために少なくした。そして治具の下部にはロックピンガイドがあり, 試験機側にある油圧制御のロックピンで固定される。一連の操作は操作室から Web カメラを確認しながら行う。

##### (2) 試験機側システム制御フロー (図-6)

試験機側のシステムの中核であるシーケンサはジャッキ操作系列, 加圧データ系列, 測長データ系列とその他から構成されていて最終的にはハブに集約されて無線 LAN により操作室のパソコンとデータの送受信を行う。

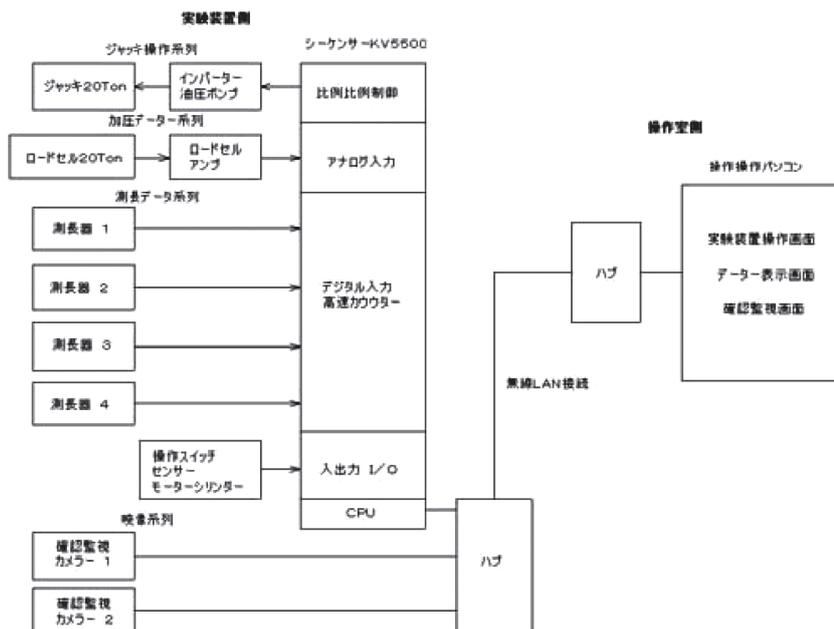


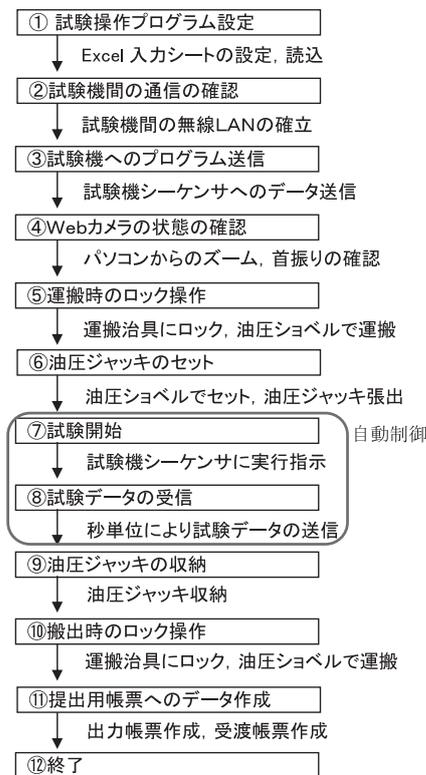
図-6 平板載荷試験機制御システム図

シーケンサにはメモリーカードが内蔵され操作室側から送られた制御プログラムを記憶して通信が途絶えても試験を継続し、測定データを蓄積する機能を有している。

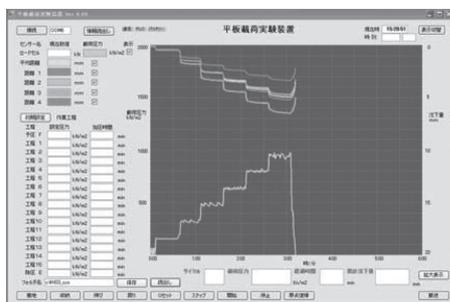
画像データは Web カメラの画像データと制御データがハブを介して LAN にて操作室と送受信される。

(3) 操作室側パソコン操作フロー

操作室側は試験機への操作プログラムの送信と試験機からのデータの受信, Web カメラの画像受信とカメラの首振り, ズーミングの操作の送信などをパソコンにより行う。その設定内容と操作順序について述べる (図一7, 8)。



図一7 操作室側パソコン指示フロー図



図一8 試験状況画面

5. 試験機の使用

実際の試験機を赤松谷川 6 号床固工とおしが谷床固工にて使用したので試験内容と結果について述べる。

(1) 事前試験結果

2010 年 10 月 15 日 13:00 から事前試験を赤松谷川 6 号床固工平板載荷試験前に開始したが以下の問題点があった。

①通信の確立

当初試験機と油圧ショベル間は 11 nLAN 無線の 2.4 GHz 帯をテストしたが、周囲で 2.4 GHz 帯を使用して混信しているため通信が確立しなかったため、急遽 5 GHz 帯に変更した。また重機の陰になるように無線 LAN を設置すると通信が安定しなかったため可視範囲に親機, 子機を設置した。但しそれでも Web カメラ画像が途切れることが数回あった。中継車を移動させて死角を無くした。

②運搬治具

油圧ショベルに取り付けた運搬治具にて試験機を遠隔操作で吊り下げなければならないが、最初はなかなかピックアップ出来なかった。クリアランスが 5 mm 程度と少ないことや油圧ショベルの車載カメラでは位置が分かり辛かったことが原因である。試験機に目印のマーキングを実施すると共に、懸架部フックにはグリスを塗布して滑りを良くした。これによりほぼ解決した。

③油圧ジャッキと電磁バルブ

油圧ジャッキの載荷には問題なかったが、油圧ポンプと電磁バルブのタイミングが悪く、加圧の際、電磁バルブが開くのが早い一時的に油圧が逃げて試験荷重値から乱高下してしまった。各段階の調整が必要でなかなか難しい調整であった。そこで逆支弁を取付け、電磁バルブが開閉したときの油量の逃げを抑えたところ変動が落ち着き、制御が問題なくいくようになった。

④その他

試験機が三点支持になる恐れがあったので当初は数種類の方法を検討したが、実際は隅四点に 10 cm の円錐の突起物を取付け様子を見た。しかし地盤が適度に沈み込み隅四点はしっかりと接地したので試験には全く問題はなかった。

(2) 本試験結果

5 回本試験を実施したが、以下の通りであった。

①赤松谷川 6 号床固工 (2 回試験)

(a) 回収の際油圧制御のロックピンが片側入らなかったがピンのクリアランスの問題であった。

(b) 試験の 1 段階の 9 kN (127 kN/m<sup>2</sup>), 5 段階 45 kN (635 kN/m<sup>2</sup>) で油圧の調整の変動が大きくなり、遠隔操作でプログラムの修正をした。

## ②おしが谷床固工（3回試験）

- (a) 1号堤で通信の途切れが発生した。通信状況が悪い場所なので1m程度場所をずらして試験をした。
- (b) Webカメラ画像が地形の関係で途切れることがあった。

全体として試験機の回収に手間取ることや無線が不安定になることはあったが、試験自体は大きな問題もなく終了した。今後の試験においては自動化で実用に入るものと確信した。

## 6. 課題

今後の課題について以下の様なことがある。

### ①完全自動試験の課題

試験本番は試験機を設置すれば基本的にパソコンのボタンを押すだけで完全自動化試験が可能になったが、事前に予備試験を実施してその地質に合わせた調整を実施した。その調整頻度が問題であるが、数か所のステップにおいて試験をしないと変動が大きくて使用できない場面もあった。これは油圧ポンプと油圧ジャッキのバランスもあると考える。油圧ポンプの容量がジャッキと比べて大きかったのでインバータ制御で調整することになったのが原因と考える。加えて油圧電磁バルブの動作レスポンスが若干遅かったため調整に手間取った。今後、調整点は一か所程度で試験前に簡易的に実施して試験に入れるように次回までには制御プログラムを含めて調整する予定である。

### ②無線システムの問題点

試験機から重機本体を介してのLAN無線システムを構築することは出来たが、民生用2.4GHz帯を調整なしに使用すると混信をしているのか無線の確立が出来なかった。従って使用の少ない5GHz帯に固定して変更しないと使用が難しいことも分かった。また無線LANは指向性が強いので、地形によっては受信できないことがある。中継局の設置や、アドホックタイプの5GHz帯無線LANシステムの導入が必要であるがコストとの兼ね合いとなる。また重機の無線機のみであればバッテリーの心配はないが、カメラ等の画像を使用するとバッテリー容量が足りないケースがあった。重機カメラは分離回収時のみ使用すれば良いので次回出荷時対策することにする。

### ③独立型の問題点

試験機を独立させ箱型にして基準ばりの代わりにさせたので端点の距離が十分確保でき、省スペースで無理なく機器の搭載が可能になった。またリニアエン

コーダを使用して精度よく計測が可能になり地盤工学会仕様準拠した試験機の製作が出来たが、当初の練習ではオペレータはなかなか試験機を回収できず、半日程度訓練した。運搬時のガタツキを減らすためにクリアランスを10mm程度としたためである。無人化施工では少し厳しいクリアランスだったようである。操作性改善のため、改良が必要である。次回までに機構を含めた改良検討を行いたい。

## 7. おわりに

今回は地盤工学会仕様準拠するという課題から試験機を製作したが、これとはまた別のアプローチもあったと思う。しかしあえてこだわるということも色々制約が多くあり、アプローチとしては面白いと感じた。この貴重な経験を基に今後も無人化施工の新技術の開発を続けていきたいと思う（写真—1, 2）。



写真—1 試験機運搬状況



写真—2 試験状況

J C M A



【筆者紹介】  
坂西 孝仁 (さかにし こうじ)  
株式会社  
土木事業本部 機材部  
副部長



北原 成郎 (きたはら しげお)  
株式会社  
土木事業本部 機材部  
部長