

## 5. 無人化施工における自動平板載荷試験機の開発

### 雲仙普賢岳火山砂防事業・無人化施工工事における技術開発

(株)熊谷組機材部  
(株)熊谷組機材部

○坂西 孝仁  
北原 成郎

#### 1. はじめに

雲仙普賢岳における砂防事業においては、立ち入り禁止区域での砂防施設（砂防堰堤・床固工）の施工に無人化施工によるRCCコンクリートの打設を実施している。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、ばらつきが大きく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が当社の無人化施工現場の赤松谷川6号床固工工事、おしが谷床固工工事（いずれも九州地方整備局雲仙復興事務所発注）の現場に合わせて実験機を開発し使用したのでその概要と実験状況等について報告する。

工事名	おしが谷床固工工事		
工事場所	長崎県島原市北上木場地先		
工期	平成22年 10月8日 ～平成23年3月30日		
工事内容	掘削工		7,148m <sup>3</sup>
	床固工 1号		1,458m <sup>3</sup>
	2号		2,428m <sup>3</sup>
	3号		2,057m <sup>3</sup>
	無人化施工設備		1式



写真-2 おしが谷床固工全景

#### 2. 工事概要

工事名	赤松谷川6号床固工工事		
工事場所	長崎県南島原市深江町上大野木場地先		
工期	平成22年 6月22日 ～平成23年3月15日		
工事内容	掘削工		12,300m <sup>3</sup>
	床固工 本堤		5,199m <sup>3</sup>
	垂直壁工		1,377m <sup>3</sup>
	側壁水叩工		875m <sup>3</sup>
	無人化施工設備		1式



写真-1 赤松谷川6号床固工コンクリート打設状況

#### 3. 試験機の仕様

##### 3.1 試験機開発目標

これまでの測定器に対しての課題から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は載荷、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りたい。

##### (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を製作したい。

##### (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にしたい。

#### (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したい。

### 3.2 試験機開発の課題

次に開発目標から推定される課題について検討をした。

#### (1) 自動化の課題

簡単な設定と操作で確実に動作する試験機にはどのようなインターフェイスにするかが重要なので

- ①使用するソフトの決定、安定的に自動化で試験実行するしくみ
- ②容易な設定で試験の自動化、地盤工学会仕様の帳票が可能である仕様の検討をすることにした。

#### (2) 地盤工学会仕様の試験機製作の課題

地盤工学会平板载荷試験の仕様に合わせて遠隔操作による試験機を製作するには

- ①反力にする物体
- ②2m以上になる変位計を固定する基準ばりの構造
- ③変位計の仕様

等の検討が必要になった。

#### (3) 独立型の課題

試験機を独立型にすると電源、油圧の確保の方式が問題になる。その対応としてバッテリーの採用が考えられるが、バッテリーで駆動できるか慎重に検討する必要がある。また運搬して分離回収を遠隔操作で実施する必要があるので

- ①バッテリー容量と機器のバランス
- ②確実な試験機の運搬回収方法

等の検討が必要になった。

#### (4) 通信の課題

Webカメラ搭載を考えると無線LAN方式が適切である。無線LAN方式には一般市販されているIEEE802.11aや11n等があるが、距離が200m以上や起伏のある地形では通信が安定しない場合が考えられる。特に平板载荷試験箇所はRCCコンクリートの底部となるので位置的にも市販の無線LANでは届かない。

この対策として普賢岳の現場で重機の制御、操作、画像伝送に実績のあるIEEE802.11jメッシュLANの導入があるが、使用頻度を考慮するとコストパフォーマンスが悪い等の問題があり

- ①どの様にすれば距離があっても安定した無線システムに出来るのか
- ②コストパフォーマンスの良いシステムの構築の検討が必要になった。

### 3.3 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-1 試験機仕様

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

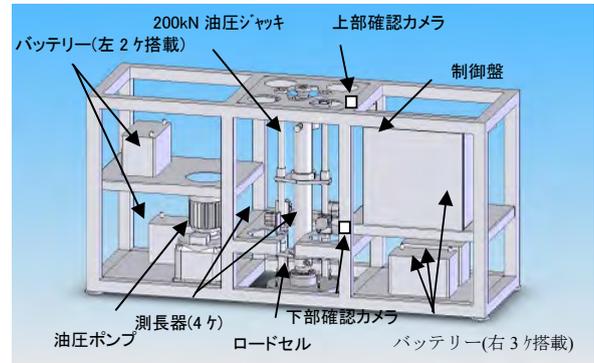


図-1 試験機全体図

#### (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度回転させて反力ウエイト代わりに試験で利用するので1m<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2300mm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□60mm肉厚6mm角パイプを使用している。変位計は有効長1000mm、精度0.01mm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「地盤の平板载荷試験(JGS1521)」の仕様に合わせた試験機の製作が可能になった。

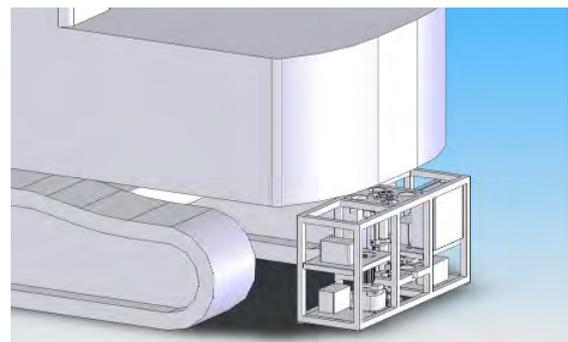


図-2 試験機試験イメージ図

## (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。バッテリーで稼動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、稼動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

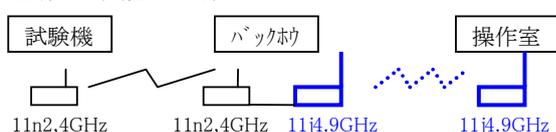


図-3 無線LAN中継イメージ図

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(4.9GHz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市販されている低コストなIEEE802.11n LANを使用してコストを抑えた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なる。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。

## (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

図-4はExcelの入力シートを示しています。シート名は「平板載荷試験プログラム」です。表には「サイクル」「重量」「工程時間」「工程回数」の列があり、データが入力されています。

サイクル	重量	工程時間	工程回数
1	63	10	10
2	63	10	10
3	63	10	10
4	107	10	10
5	107	10	10
6	107	10	10
7	254	10	10

図-4 パソコン入力シート

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書き込まれる。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するし、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

### 4.1 機械構成

#### (1) 油圧ジャッキ、測長器、ロードセル

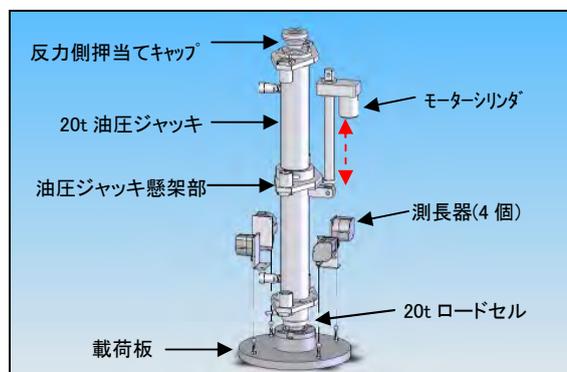


図-5 試験機油圧ジャッキ部詳細図

油圧ジャッキは200kNの揚力、ストロークは500mm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効く。

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。

ロードセルは油圧ジャッキに対応した定格容量200kN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の切ったプレート溶接し、ねじ止めするので容易に取り外しが可能である。

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5mm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。

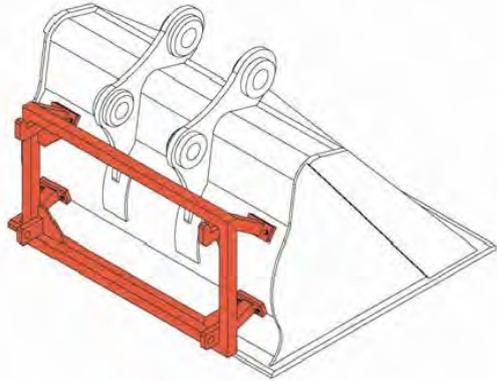


図-6 試験機運搬治具

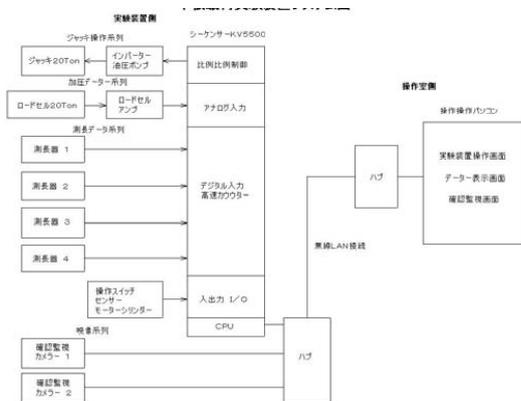


図-7 平板載荷試験機制御システム図

## 4.2 試験機側システム制御フロー

試験機側のシステムの中核であるシーケンサに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。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。

## 4.3 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、ズーム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。

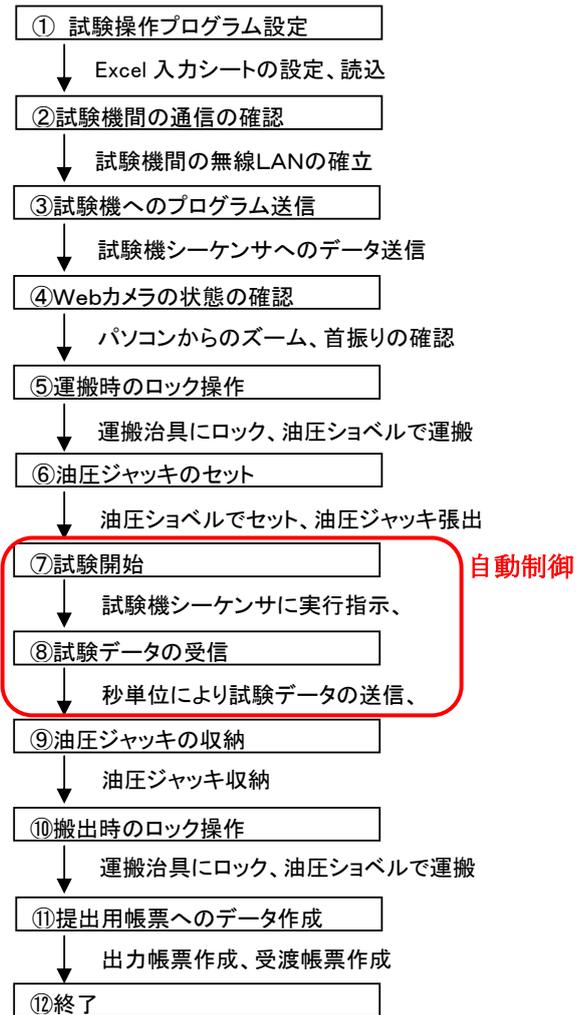


図-8 操作室側パソコン指示フロー図

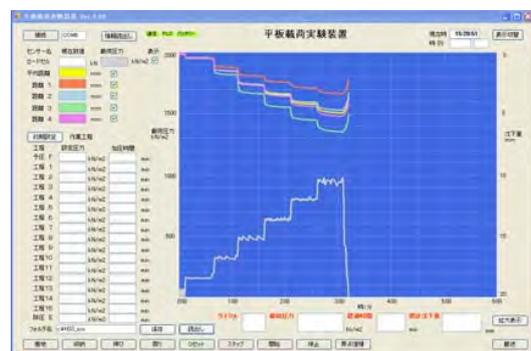


図-9 試験状況画面

## 5. 試験機の使用

実際の試験機使用を赤松谷川6号床固工とおし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。

### 5.1 試験内容

#### (1) 施工箇所

平板載荷試験の実施箇所については本堤部支川センター、と本川センター2箇所で行う。

(2) 試験実施日時

①赤松谷川 6 号床固工工事

2010 年 10 月 22 日 10 : 00 (左岸)

2010 年 12 月 2 日 10 : 00 (右岸)

②おしが谷床固工工事

2010 年 12 月 9 日 10 : 00 (1 号堤)

2010 年 12 月 17 日 10 : 00 (3 号堤)

2011 年 1 月 12 日 10 : 00 (2 号堤)

(3) 使用機械

表-2 使用機械一覧表

名称	用途	数量
バックホウ( 1.2m <sup>3</sup> )	装置の移動および反力	1 台
平板載荷試験装置	油圧ジャッキ制御、計測データ収集	1 式
カメラ車	走路などの確認用映像	4 台
中継車	重機操作、計測データの中継	1 台

(4) 試験方法

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。

(5) 計画最大荷重

設計地盤反力の 3 倍とする。

設計地盤反力は 234.7kN/m<sup>2</sup> (特記仕様書より)

計画最大荷重 234.7 kN/m<sup>2</sup> × 3 倍 = 704.1kN/m<sup>2</sup>

載荷板は、φ300mm (面積 0.07069m<sup>2</sup>) であるので、必要ジャッキ荷重は

704.1 kN/m<sup>2</sup> × 0.07069 m<sup>2</sup> = 49.772kN となる。

(6) 荷重段階

JGS1521 の規定から計画最大荷重を 5 ~ 8 段階以上に等分割する。今回の平板載荷試験では 6 段階に分けて載荷を行う。

1 段階の計測時間は 30 分であるので、30 分 × 6 段階 = 180 分、準備 30 分、撤収 30 分として、トータル 4 時間程度を計画している。

計画最大荷重 704.1kN/m<sup>2</sup> を 6 段階に等分割すると荷重ステップは 704.1 ÷ 6 = 117.6 ÷ 120 kN/m<sup>2</sup>

ジャッキ荷重ステップは

120kN/m<sup>2</sup> × 0.07069 m<sup>2</sup> ≒ 9 kN

(7) 平板載荷試験のスケジュール

表-3 試験スケジュール表

作業	ジャッキ荷重(地盤反力)	時間
セッティング		30 分
予備載荷		5 分
1 段階	9kN (127kN/m <sup>2</sup> )	30 分
2 段階	18kN (254kN/m <sup>2</sup> )	30 分
3 段階	27kN (381kN/m <sup>2</sup> )	30 分
4 段階	36kN (508kN/m <sup>2</sup> )	30 分
5 段階	45kN (635kN/m <sup>2</sup> )	30 分
6 段階	54kN (762kN/m <sup>2</sup> )	30 分
除 荷		5 分
撤 収		30 分
合計		

5.2 事前試験結果

2010 年 10 月 15 日 13 : 00 から事前試験を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 11nLAN 無線の 2.4GHz 帯を採用したが、周囲で 2.4GHz 帯を使用して混信しているため通信が確立しなかったので、急遽 5GHz 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。但しこれでも Web カメラ画像が途切れることが数回あった。

(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 5mm 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

油圧ジャッキの荷重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ことである。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 10cm 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設置したので試験には全く問題はなかった。

5.3 本試験

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)

①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。

②試験の 1 段階の 9kN (127kN/m<sup>2</sup>)、5 段階 45 KN (635kN/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)

① 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。

② 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。当初あった試験荷重の変動も逆支弁の取付により次第に収まり、バッテリーの容量も当初予想した消費量が少なかったため、十分容量があり支障なく試験が完了出来た。

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. まとめ

### (1) 完全自動で平板載荷試験が可能

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なければならぬが、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試験が可能になった。操作室のパソコン操作者の負担は大幅に軽減され精度良く工程通りに完了した。またシーケンサに実験プログラムを送信し動作する方式であったので、通信状態が悪くても確実に試験を終了することができた。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が逆支弁を取付け調整し試験荷重の変動も5%以内に収まりまずまずの結果だと思う。

### (2) 安定した無線システムの構築

無線システムも活用して安価に必要な十分な通信システムの構築が出来た。5GHz帯に変更後はおしが谷で一度通信が不安定になるケースがあったがその他は問題なく送受信ができ、試験の自動化に貢献した。

### (3) バッテリー駆動で機器動作

油圧ジャッキと油圧モータのバランスを考慮しながら低出力の機器を選択したことやインバータと細密な制御パターンで省エネに努めた結果、搭載バッテリーで二回以上の試験ができることがわかった。次回からはバッテリーの数量を減らして試験する予定である。

### (4) 地盤工学会仕様に準拠

試験機を独立させ箱型にして基準通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に準拠した試験機の製作が出来た。入力を一般的な Excel シートで入力しこれに上書きするシステムであったのでその後の出力帳票も市販平板載荷ソフトで容易に作成出来るので書類作成時間は半減した。

以上より当初の開発目標はクリア出来た。

## 7. おわりに

今回の開発には発注者、現場職員、協力業者の方々に多大な協力して頂いた。特に開発製作したイーメック谷口氏には詳細部に渡って指導受け、最終的に試験日まで完成することが出来た。今

後もこの開発で得たノウハウを活用して無人化機器の開発をしていきたいと思う。



写真-4 試験機運搬状況

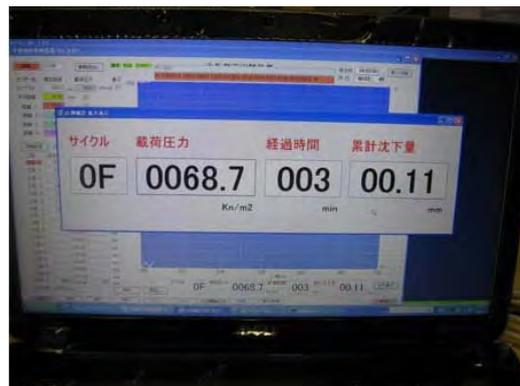


写真-5 パソコン試験画面



写真-6 試験状況