

*FWD-Light*による
小型FWD試験方法

(地盤編)

株式会社東京測器研究所

目次

1. はじめに	1
2. 使用材料及び工具	2
3. 試験要領	3
3.1 事前準備	4
3.2 試験位置マーキング	4
3.3 小型 FWD 試験	4
3.3.1 適用範囲	4
3.3.2 試験方法	4
3.3.3 測定手順	6
1) 準備	7
2) 予備試験	8
3) 本試験	14
3.4 測定結果の整理	20
参考表-1 「小型 FWD 試験記録シート記入例」	23
参考表-2 「小型 FWD 試験データシート入力例」	24

1. はじめに

FWD (Falling Weight Deflectometer) は、載荷板上に重錘を自由落下させることにより衝撃荷重を加え、これにより生じた変位量を荷重中心と荷重中心から半径方向の位置で測定する装置である。

滑走路のコンクリート舗装、アスファルト舗装で使われている搭載あるいは牽引する車両のタイプが通常 FWD と言われている。FWD は、衝撃荷重が 49kN~196kN (5ton~20ton) であり、外部変位センサを 6 個~8 個設置して、舗装各層の弾性係数を逆解析によって求められる。

一方、小型 FWD は小型化、簡略化し人力もしくはキャリアで持ち運びを可能にしたタイプで、路床・路盤の土構造物の剛性評価として使われ始めた。更に、従来の適用分野以外にインターロッキング舗装や締固め管理の分野への活用方法が進められ、平成 14 年 12 月に「FWD および小型 FWD 運用の手引き」が土木学会舗装工学委員会より発行された。

国土交通省や地方公共団体では、舗装工事の発注を性能設計発注形式に移行する動きがあり、官庁または自治体の受取り検査時に検査・試験結果が重要になってきている。現在、FWD 試験の他に、平板載荷試験や現場 CBR 試験が行われているが、これらは反力装置が必要で、1 日で試験できる箇所が限られてしまう。

このような中、小型 FWD は持ち運びが容易で迅速な測定が可能であり、短時間で多数点の測定が可能である。小型 FWD 試験で得られた地盤反力係数 $K_{p, FWD}$ と K_{30} (道路の平板載荷試験で得られた地盤反力係数) の関係により、土構造物の剛性評価法として、また締固め管理値として用いることができる。さらに、変形係数 $E_{p, FWD}$ を求めることができる。

小型 FWD システムの概要としては、小型 FWD 本体の重錘を自由落下させ、そのとき発生する衝撃荷重と変位量を荷重計、加速度計を用いて測定する。変位量は加速度計の測定値を 2 回積分することで求める。また、外部変位センサ (KFDS-1A) を用いて 4 点までの外部変位を同時に測定することが可能である。荷重計、加速度計の出力は小型 FWD 本体内蔵の A/D 変換器でデジタル変換され、TML 独自の 2 線式伝送ラインの技術 (特許出願中) を用いて表示器に転送される。表示器では各種の解析結果を表示すると共に、メモリカードに記録する。

パソコンを用いた測定システムでは、計測・処理ソフトウェア (TC-7100) が必要となる。このシステムでは表示器に転送されたデータは、そのまま表示器を介してパソコンに転送され、荷重や変位等の波形表示と共に各種の解析を行う。

本書は、土木学会舗装工学委員会編「舗装工学ライブラリー2 : FWD および小型 FWD 運用の手引き (2002. 12)」を参考に、小型 FWD システム「FWD-Light」を使用した場合の地盤における小型 FWD 試験方法について適用する。

2. 使用材料及び工具

(1) 使用機器

- ・ 小型 FWD システム 標準セット (①～⑥)
 - ① 小型 FWD 本体 (載荷板 ϕ 100、重錘 5kg 付属) KFD-100A
 - ② 専用表示器 TC-351F
 - ③ コンパクトフラッシュメモリカード 32MB
 - ④ メモリカードアダプタ CF-ADP
 - ⑤ 5m ケーブル
 - ⑥ 携帯・収納アルミケース KFDF-21-1
- ・ 付加重錘 (10kg 用) KFDF-11-10
- ・ 付加重錘 (15kg 用) KFDF-11-15
- ・ 載荷板 (ϕ 150) KFDF-31-150
- ・ 載荷板 (ϕ 200) KFDF-31-200
- ・ 載荷板 (ϕ 300) KFDF-31-300
- ・ 計測・処理ソフトウェア TC-7100
- ・ ノート PC Windows
- ・ RS-232C ケーブル CR-5360
- ・ キャリア KFDF-41
- ・ 収納ケース (オプション収納用) KFDF-21-2
- ・ 簡易校正装置 KFDF-61

(2) その他材料・工具類

- ・ 小型 FWD 試験記録シート (P. 23 参考表-1)
- ・ 六角レンチ (M6 及び M8)
- ・ スコップ
- ・ 直ナイフ
- ・ 水準器
- ・ マーキング用スプレー
- ・ 巻尺
- ・ チョーク
- ・ 潤滑油
- ・ ウェス
- ・ 黒板
- ・ カメラ など

3. 試験要領

図-1に、試験手順のブロック図を示す。

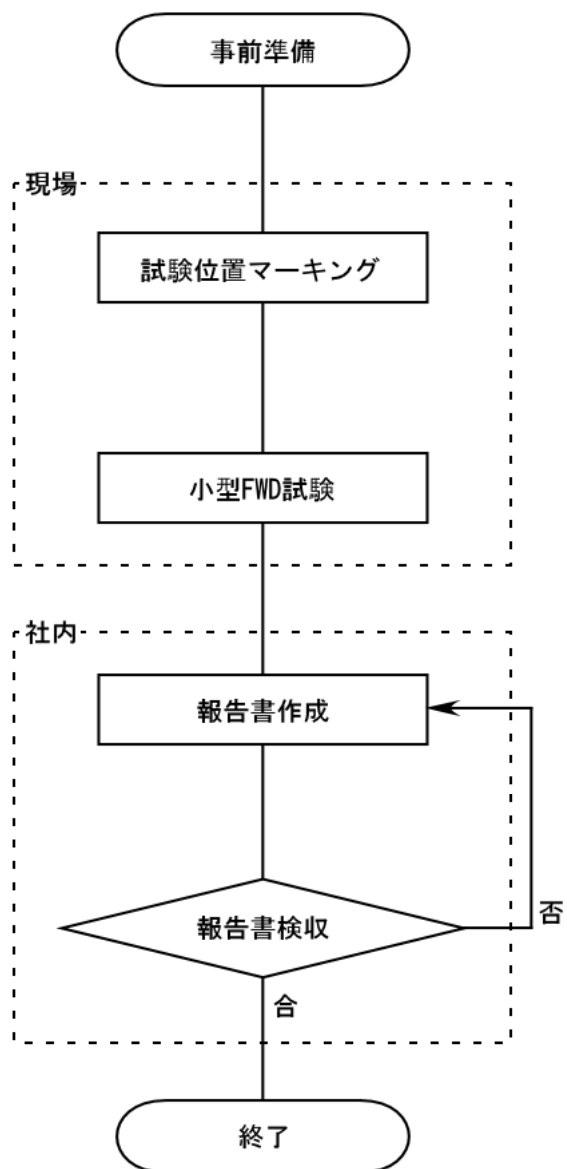


図-1 試験手順のブロック図

3.1 事前準備

試験を行うにあたり、試験条件（試験場所、日時、測定点数量、測定間隔、対象地盤の概要等）について確認し、試験が可能であるか判断する。試験の対象材料としては、一般的な土構造物（盛土材料、路床・路盤材料など）とする。但し、試験対象がアスファルト舗装、コンクリート舗装、インターロッキング舗装、枕木の場合については、ここに示す方法と異なるため、関係者と協議の上、試験方法を検討する。

試験条件に合わせて「2. 使用材料及び工具」等を用意する。また、試験日時に合わせて、機器の点検、動作チェック等を行う。動作チェック後は、専用表示器内のメモリやメモ리카ードのデータをクリアして充電する。動作チェックは簡易校正装置やゴム板の上で行うこととし、主な項目を以下に示す。

- (1) 本体、専用表示器を接続し、重錘を落下させた場合
 - ・専用表示器に計測値が表示されているか
 - ・専用表示器に計測データが保存されているか
 - ・計測値に異常がないか
 - ・重錘落下高さを3段階変化させた場合に荷重と変位のデータが直線分布するか
- (2) 本体、専用表示器、ノートPCを接続し、重錘を落下させた場合
 - ・計測・処理ソフトウェア上で計測できるか
 - ・計測値に異常がないか
 - ・ノートPCに計測データが保存されているか
 - ・重錘落下高さを3段階変化させた場合に荷重と変位のデータが直線分布するか

3.2 試験位置マーキング

試験位置をスプレー、チョーク等でマーキングする。マーキング後は、全マーキング位置を必ず確認する。また、対象地盤の試験前の状況についても確認する。

3.3 小型 FWD 試験

3.3.1 適用範囲

この試験は、狭隘で平板載荷試験や FWD による試験が困難な箇所もしくは施工延長が短く測定数量の少ない盛土工事などの場合、小型 FWD システム (FWD-Light) を用いて、原位置における盛土や切土、路床、路盤等の自然および人工地盤の剛性を評価する試験に適用する。

3.3.2 試験方法

予備試験により、対象となる地盤の剛性を概ね把握し、本試験にて、重錘の落下によって生じる変位が目標とする変位量となるように、地盤の剛性に応じた重錘の質量、落下高さを3段階以上選定し、変位量と載荷応力を測定する。なお、測定位置、測定間隔は、対象とする地盤に応じて設定する。

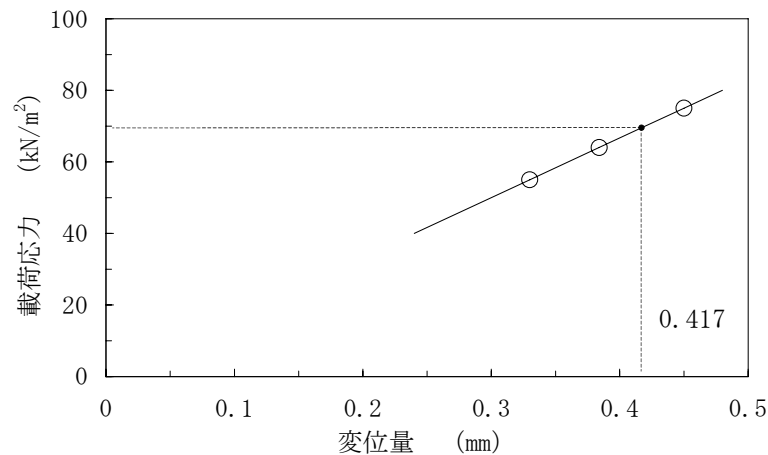
※試験方法は、土木学会舗装工学ライブラリー2：FWD および小型 FWD 運用の手引き (2002.12) に準ずる。

(1) 載荷荷重と重錘落下高さ

小型 FWD による地盤反力係数（以下 $K_{p, FWD}$ 値）は、平板載荷試験の K_{30} 値もしくは FWD による地盤反力係数 K_{FWD} 値と同様に測定した載荷応力を変位量で除することにより求める。この際に用いる変位量は、載荷板の大きさが通常の FWD によるものと異なるため、FWD の載荷板直下に生じたひずみと同程度のひずみレベルとなる変位量を用いることとし、FWD の基準変位量である 1.25mm に載荷板の直径比率を乗じた値（載荷板の直径が 10cm の場合は、

1. $25\text{mm} \times 10 / 30 = 0.417\text{mm}$ 、直径が 15cm の場合は、 $1.25\text{mm} \times 15 / 30 = 0.625\text{mm}$ 、直径 20cm の場合は $1.25\text{mm} \times 20 / 30 = 0.833\text{mm}$) を用いることとする。

従って、載荷板の直径が 10cm の場合、 0.417mm の変位量を得る荷重を与えることになるが、重錘質量や重錘落下高さを微調整しても、ちょうど 0.417mm の変位量を得ることは困難である。そのため参考図-1 に示すように重錘質量や重錘落下高さを変化させることにより、 0.417mm を挟む変位量を得るような測定を行うこととする。但しこの際に、変位量がなるべく 0.417mm に近くなるような重錘質量と荷重を設定する。



参考図-1 変位量-載荷応力の関係の一例 (1)

(2) 測定回数

1 測点における 1 設定落下高さでの重錘の落下回数は 6 回とする。これは、1 回目の落下による測定値が、載荷板と地盤面との接触不良等により、ばらつく可能性があるため、1 回目の落下を予備落下とし、2 回目以降の荷重と変位量を測定データとして記録する。但し、不良と思われるデータは測定回数に含めない。また、測定位置と測定間隔については、試験条件により関係者と協議の上、任意に設定する。

(3) 測定時の環境条件

測定時の気温は、測定装置が正常に作動する範囲で行うこととし、温度範囲が $0^{\circ}\text{C} \sim +40^{\circ}\text{C}$ の気温下で行うことが望ましい。また、降雨時や降雨直後の地盤が滞水しているような状態では、地盤の剛性を正しく評価することは困難であり、測定装置に対しても好ましくないため、避けるべきである。

3.3.3 測定手順

図-2 に、小型 FWD システムによる測定手順のブロック図を示す。

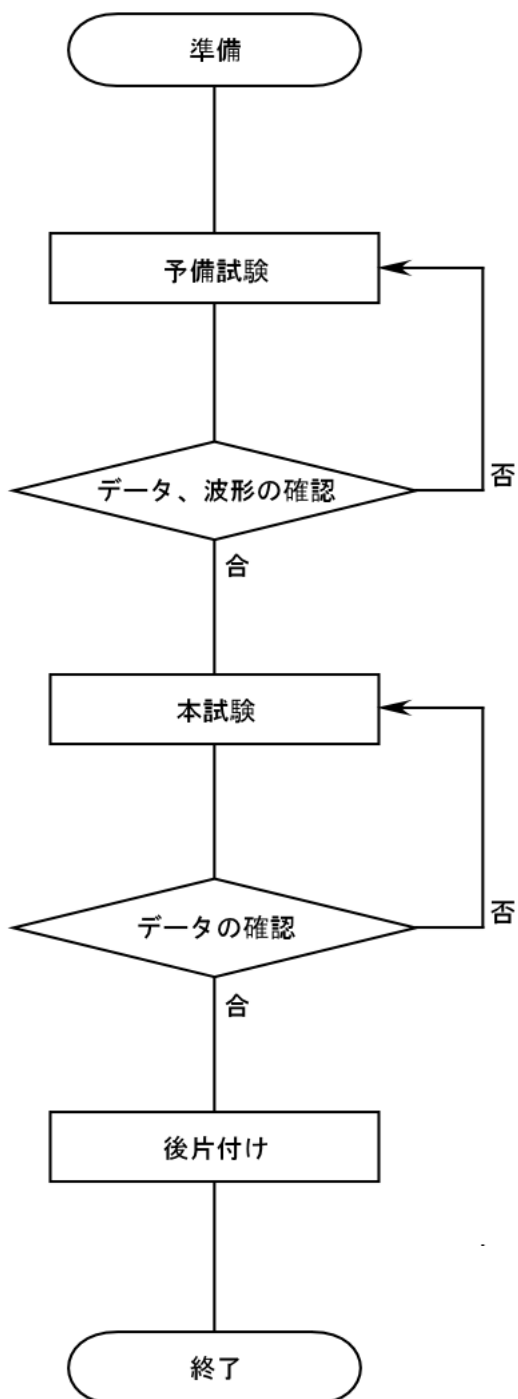


図-2 測定手順のブロック図

各工程の作業詳細を説明する。

1) 準備

はじめに、本体の載荷板の直径と重錘の質量を仮選定する。基本的に、載荷板については対象材料にあわせ（最大粒径の 3 倍以上の直径）、重錘については質量の大きい順から選定する。この理由として、荷重と変位量それぞれの 0-P 時間が質量の小さい重錘を高い位置から落下させる場合と、質量の大きい重錘を低い位置から落下させる場合では、後者のほうが長くなるからである。

①組立

あらかじめ小型 FWD 本体に水準器付グリッパ、載荷板、重錘を取付け、専用表示器にメモリカードを挿込んでおく。試験位置近傍にて小型 FWD 本体、専用表示器、ノート PC を図-3 に示すように接続する。

注) 小型 FWD 本体と専用表示器を入出力ケーブルで接続する場合、小型 FWD 本体側はコネクタを奥まで差込みリングネジで固定し、専用表示器側はコネクタを「カチッ」と音がするまで差込み固定する。

注) 予備試験を専用表示器のみで行う場合は、本試験の操作 방법에準ずる。

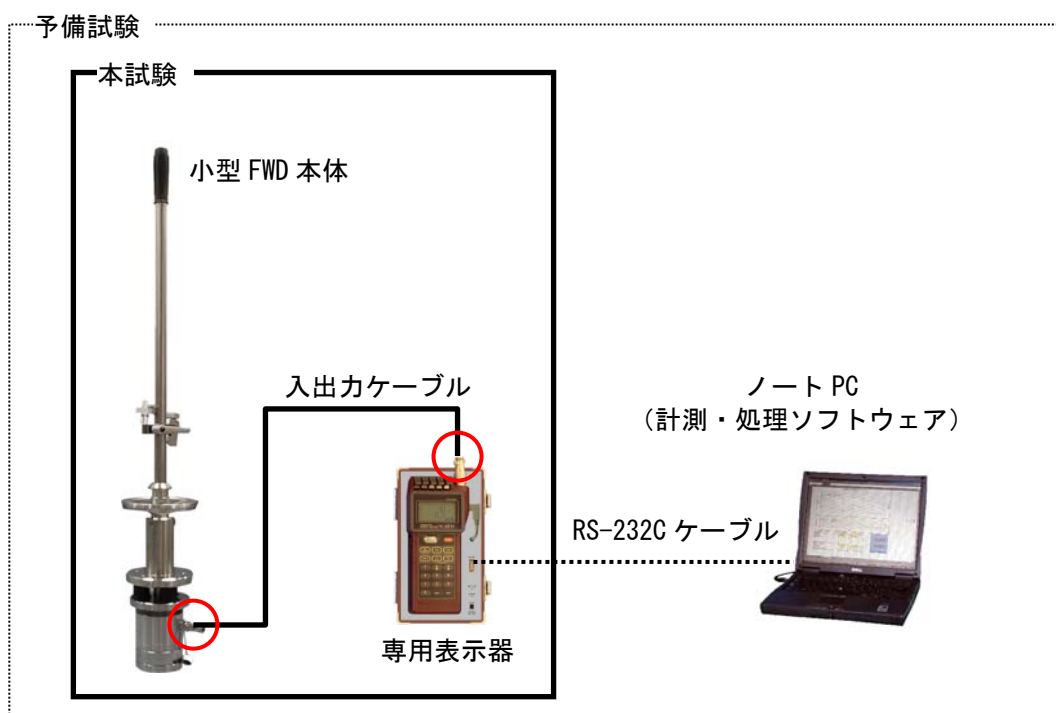
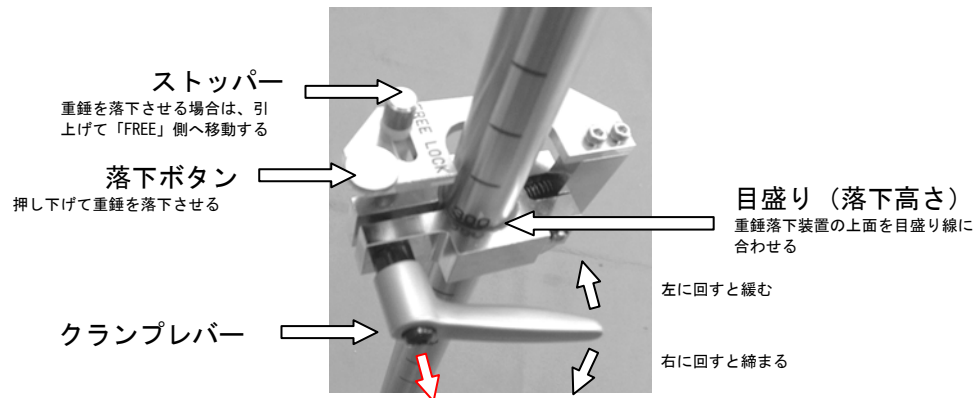


図-3 機器接続図

②重錘落下装置の固定

重錘を落下させた状態で重錘落下装置のクランプレバーを緩めてスライドさせ、適当な位置に固定する。

注) クランプレバーの止まり位置が重錘落下操作に邪魔な場合は、下図の赤矢印側にクランプレバーを引いて空回りさせ、とまり位置を修正する。



2) 予備試験

予備試験は、本試験に先立ち試験対象材料の剛性を概ね把握するために行う。つまり、載荷板の直径に応じた任意の変位量が得られるように小型 FWD 本体に装着する載荷板の直径、重錘の質量を選定し、重錘の落下高さを概ね把握する。また、計測・処理ソフトウェアで計測されたデータより、変位量の 0-P 時間が概ね 7ms~15ms 程度であること、波形に乱れがないことを確認する。試験位置により対象材料が異なる場合は、その都度予備試験を行う。測定手順を以下に示す。

①試験位置近傍の地盤面について、表面のルーズな材料を取り除き、できるだけ平滑にする。(碎石系の地盤を対象とする場合、地盤面を平滑にするのが困難な時は、敷き砂等をするるとよいが、敷き均した砂が厚すぎると、測定値に影響を及ぼすため、十分な注意が必要である。また、載荷板の直径は最低でも地盤材料の最大粒径の 3 倍以上とすることが望ましい。)

注) スコップなどで整形し、水準器で地盤の水平を確認する。



②予備試験位置に小型 FWD 本体を設置する。

注) 小型 FWD 本体上端にある水準器の気泡が赤丸内に入っていることを確認する。



③本体と地盤を安定させるために、重錘を低い位置（10～15cm）から 5 回程度落下させる。

注) 片手は小型 FWD 本体上端にあるグリップを握る。

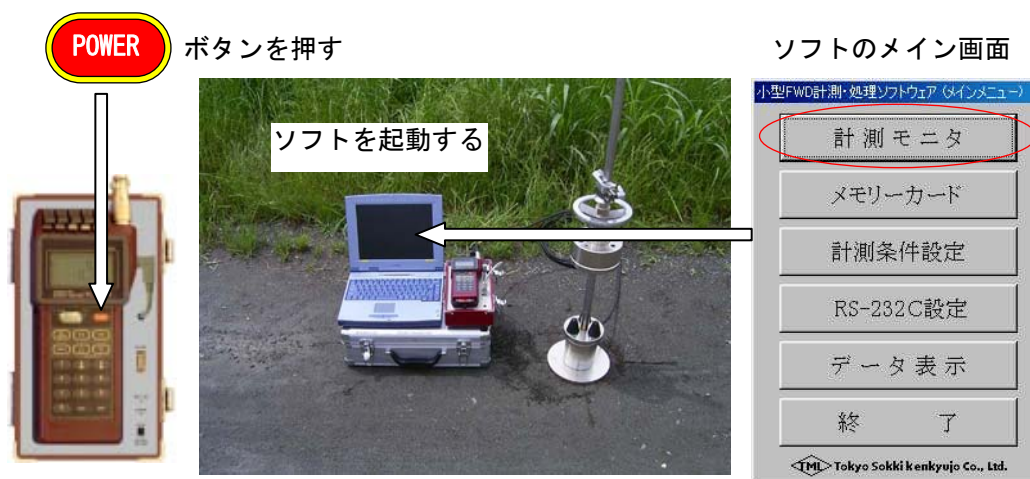


④任意の高さにセットした落下装置に重錘を固定する。



⑤専用表示器、ノート PC に電源を入れ、ノート PC 上で計測・処理ソフトウェアを起動後、メイン画面の計測モニタをクリックし、計測モニタ画面を表示する。

注) 電源を投入後、専用表示器では操作せず、待機画面にしておく。また、予備試験を専用表示器のみで行う場合は、本試験の操作方法来に準ずる。



⑥計測モニタ画面の試験条件をクリックし、試験条件の設定を行う。



⑦試験条件の各項目を入力、選択後、**OK**をクリックし、計測モニタ画面に戻る。

注) 載荷板直径とポアソン比は、地盤反力係数、変形係数の計算に必要なため、必ず正しい値を入力、選択する。

小型FWD計測・処理ソフトウェア (試験条件設定)

コメント ← 64 文字以内で入力

載荷板直径 100 (mm) ← 90, 100, 150, 200, 300mm を選択

落下高さ 200 (mm)

重錘質量 5 (kg) ← 5, 10, 15kg を選択

日付 2002/04/10 19:39:23

場所 ← 20 文字以内で入力

番号 0017 ← ファイル名

担当者名 ← 10 文字以内で入力

ポアソン比 0.300 ← 0.000~1.000 を入力

OK キャンセル

⑧計測モニタ画面の**初期値計測**をクリックし、**OK**を選択する。

小型FWD計測・処理ソフトウェア (計測モニタ)

変位 D0	K-TML	E-TML	変位 D1	変位 D2

試験条件

初期値計測 計測開始 履歴データ

荷重 P0	2 N
加速度 A0	-0.1 m/s ²
加速度 A1	-0.2 m/s ²
加速度 A2	0.1 m/s ²

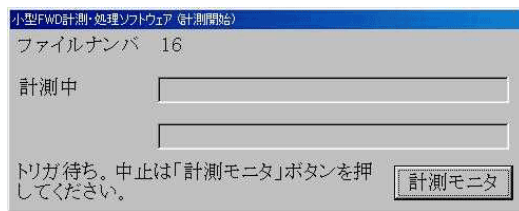
メインメニュー

小型FWD計測・処理ソフトウェア (初期値計測)

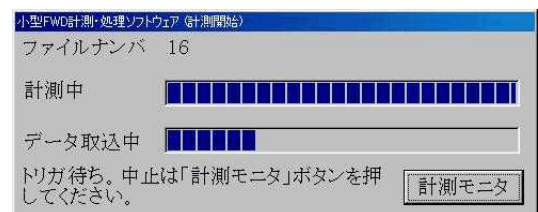
初期値を計測しますか?

OK キャンセル

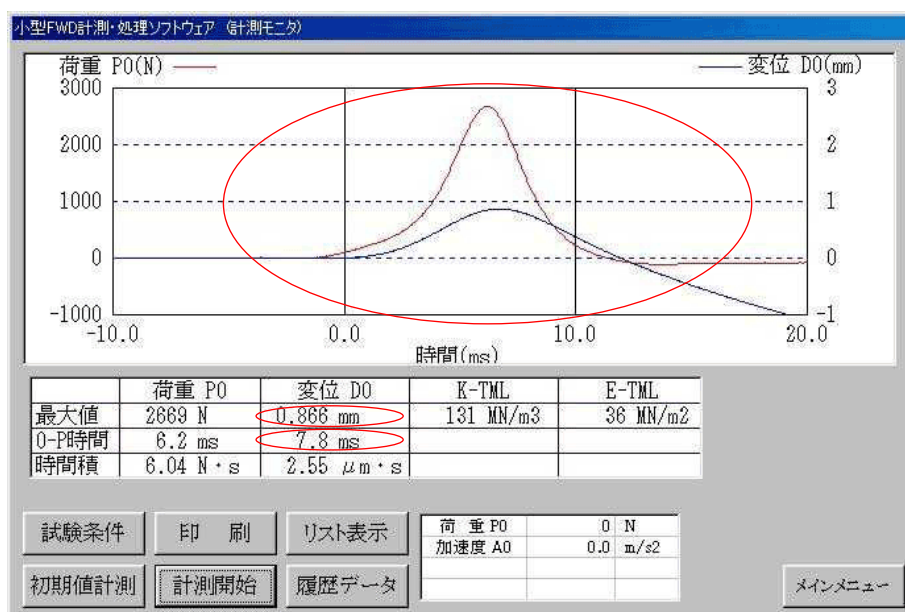
⑨計測モニタ画面の計測開始をクリックし、トリガ待ち（重錘落下待ち）にする。



⑩小型 FWD 本体の落下ボタンを押して重錘を自由落下させる。



- ⑪計測・処理ソフトウェアで計測された波形データ、0-P 時間を確認するとともに載荷板の直径に応じた規定の変位量が概ね得られるように重錘の質量と落下高さを調整する。



注 1) 測定結果が規定の変位量より大きい場合、落下高さを下げるか重錘質量を軽くする。

注 2) 測定結果が規定の変位量より小さい場合、落下高さを上げるか重錘質量を重くする。

例 1) 試験対象地盤の最大粒径が 10cm であったため、φ300 の載荷板を本体に装着し、仮に重錘質量 5kg、落下高さ 40cm で試験を行ったところ、0-P 時間が 5ms、変位量が 0.985mm であった。つまり、0-P 時間が 7ms 以上なく、規定の変位量の 1.25mm に達していない。この場合の調整方法は、0-P 時間を増やすために、落下高さを少し低くし、載荷応力を大きくするために、重錘質量を最大限重くする。

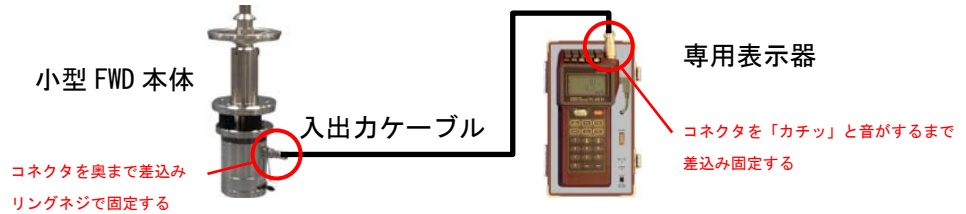
例 2) 試験対象地盤の最大粒径が 3cm であったため、φ100 の載荷板を本体に装着し、仮に重錘質量 5kg、落下高さ 5cm で試験を行ったところ、0-P 時間が 7.5ms、変位量が 0.652mm であった。つまり、0-P 時間は 7ms 以上あるが、規定の変位量の 0.417mm を越えてしまっている。この場合の調整方法は、重錘質量と落下高さをこれ以下に出来ないので、載荷応力を小さくするために、載荷板直径を大きくする。

- ⑫試験位置の剛性が概ね把握できたら、本試験に備え専用表示器とノート PC を切り離す。



3) 本試験

予備試験より、試験対象材料の剛性を概ね把握したら本試験を行う。本試験で使用する機器は、基本的に小型 FWD 本体と専用表示器のみとする。計測データに不具合が生じた場合はノート PC を接続し、計測・処理ソフトウェアでデータを確認する。測定手順を以下に示す。



①マーキングした試験位置の地盤面は、表面のルーズな材料を取り除き、できるだけ平滑にする。(碎石系の地盤を対象とする場合、地盤面を平滑にするのが困難な時は、敷き砂等をするとよいが、敷き均した砂が厚すぎると、測定値に影響を及ぼすため、十分な注意が必要である。また、載荷板の直径は最低でも地盤材料の最大粒径の 3 倍以上とすることが望ましい。)

注) スコップなどで整形し、水準器で地盤の水平を確認する。



②予備試験位置に小型 FWD 本体を設置する。

注) 小型 FWD 本体上端にある水準器の気泡が赤丸内に入っていることを確認する。



③本体と地盤を安定させるために、重錘を低い位置（10～15cm）から 5 回程度落下させる。

注) 片手は小型 FWD 本体上端にあるグリップを握る。



④予備試験の結果から、載荷板の直径に応じた任意の変位量が概ね得られる重錘の落下高さより 5～10cm 程度低い位置に落下装置を固定し、重錘をセットする。

注 1) 載荷板直径が 10cm の場合、規定の変位量は 0.417mm であるが、重錘質量や落下高さを微調整してもちょうど 0.417mm を得ることは困難である。そこで、重錘質量や落下高さを変化させることにより 0.417mm を挟む 3 点の変位量を得る測定を行うこととし、その 1 つはなるべく 0.417mm に近くなるように設定する。

注 2) ここでは、予備試験の結果より、載荷板の直径に応じた規定の変位量が重錘質量 15kg、落下高さ 40cm で概ね得られることがわかったので、落下高さを 30cm に設定した。地盤の剛性が低い場合（地盤反力係数 $K_{p, FWD}$ 値が約 $50\text{MN}/\text{m}^3$ 以下）は、少ない載荷応力の違いで、変位量が大きく変化するため、任意の変位量が概ね得られる重錘の落下高さとの間隔を狭めて設定すると良い。

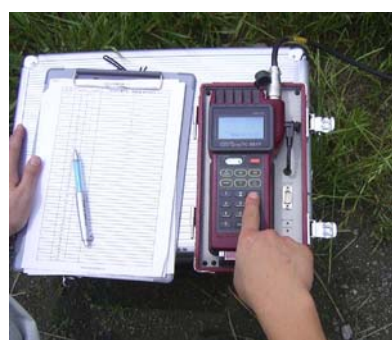


⑤専用表示器に電源を投入し、待機画面を表示させる。

注) 専用表示器に電源を投入すると小型 FWD 本体と通信し、自動的に初期値計測を行うため、待機画面が表示されるまでは本体に手を触れたりしない。



⑥試験条件の設定を行い、保存するデータのファイル名を指定する。



専用表示器の待機画面

<<Param. >>	12:00:00	現時刻 (時:分:秒)
Diameter	φ 100 mm	載荷板直径
Poisson's	0.300	ポアソン比
F-Name	A000 . CSV No. 00	計測番号

注 1) 試験条件の設定方法

待機画面で **3** (CONDITION) を押すと φ100 の所が反転し、試験条件設定画面に切換わる。

載荷板直径は **8** **9** を押し、選択する。

設定する項目を移動させる場合は、**△** **▽** を押す。

ポアソン比は、小数点以下 3 桁を数字キーで入力する。

コントラストを調整する場合は、**F3** (**Cont.**) を押し、**△** **▽** で調整する。

設定が終了したら **ENT** を押して確定する。

注 2) ファイル名の設定方法

待機画面のまま **8** **9** を押し、ファイル名のアルファベット部分を選択する。

待機画面のまま **△** **▽** を押し、ファイル名の数字部分を選択する。

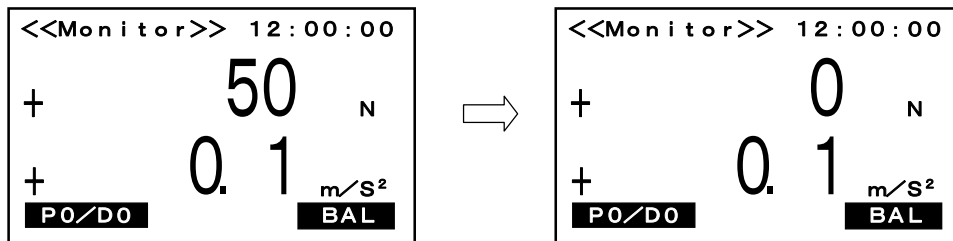
⑦⑥で設定した内容を参考表-1「小型FWD 試験記録シート」に記入する。

File No.	Data No.	Test No.	Comment (落下高さ、重錘重量、載荷)
000	1	測点1	φ200, 15kg
	2		
	3		
	4		
	5		
	6		
	7		

日付
 天候
 ファイル名
 測点 No.
 重錘質量
 載荷板直径
 落下高さ
 などを記入する。

⑧初期値計測を行う。(重錘の変更や小型 FWD 本体を移動した場合)

注) 待機画面から **5 MONITOR** → **F3** の順に押す。初期値計測後は **ESC** を押して待機画面に戻る。



⑨重錘を持ち上げた状態で専用表示器をトリガ待ち状態にして、本体の落下ボタンを押し、重錘を自由落下させ、計測結果画面で計測結果を確認する。

注) 待機画面から **4 MEAS.** を押し、トリガ待ち状態にする。

注) 測定結果画面から **F3** (**Next**) を押すと、変形係数、外部変位を表示する。戻る場合は **F3** (**Back**) を再び押す。

トリガ待ち画面

測定結果画面
 (重錘を落下させると自動的に表示する)

ファイル名

計測番号 No.	P0 [N]	DO [mm]	K-TML [MN/m³]	地盤反力係数
04	6754	0.500	75	
03	6754	0.500	75	
02	6754	0.500	75	
01	6754	0.500	75	

Moni. Cond. **Next**

変形係数

No.	E-TML [MN/m²]	D1 [mm]	D2 [mm]
04	124	0.023	0.011
03	135	0.023	0.012
02	161	0.025	0.012
01	168	0.026	0.013

Moni. Cond. **Back**

⑩同じ落下高さから 6 回重錘を落下させ、専用表示器に表示される最大荷重と最大変位量にバラツキがないことを確認する。

注) 測定結果画面から **ENT** を押すと、直接トリガ待ち画面になる。必ず重錘を落下装置にセットしてからトリガ待ち画面にする。

⑪1 測点で、重錘の落下高さを低い順から 3 箇所変化させ、⑩の作業を繰り返す。(つまり、1 測点あたり [一定の落下高さから 6 回] × [所定の落下高さ 3 箇所] の計 18 回の測定データを得る。)

注) 測定毎に測定結果画面でデータを確認し、不良データは測定回数に含めない。(重錘落下装置の操作方法は P. 8 を参照)



落下高さ 30cm から 6 回測定
(規定の変位量が概ね得られる落下高さの-10cm)

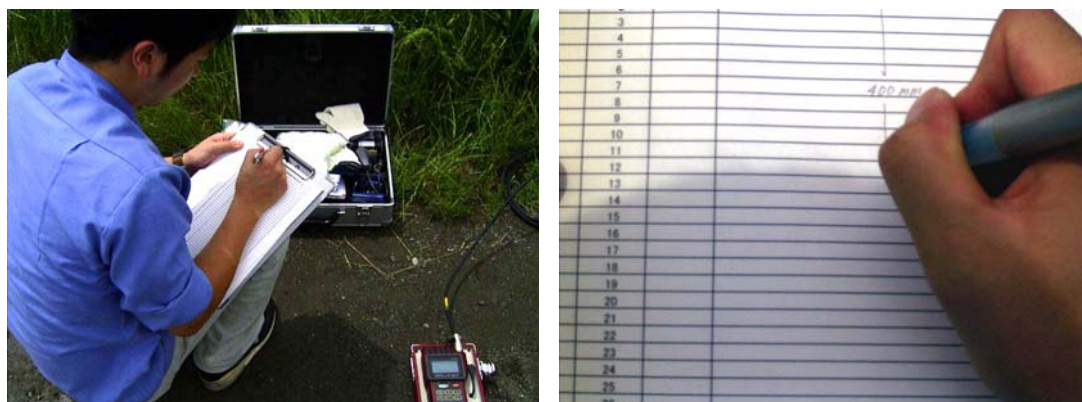


落下高さ 40cm から 6 回測定
(規定の変位量が概ね得られる落下高さ)



落下高さ 50cm から 6 回測定
(規定の変位量が概ね得られる落下高さの+10cm)

- ⑫測定後、測定データとの対応が取れるように載荷板直径、重錘の落下高さ、測定回数等を参考表-1「小型 FWD 試験記録シート記入例」のコメント欄に記入しながら測定を行う。



- ⑬測定データは必ず当日中に確認し、ノート PC の HD などにバックアップをとる。



- ⑭測定終了後、小型 FWD 本体の汚れを落とし、専用表示器と共に収納ケースに収納する。

注) 特に、小型 FWD 本体のロッド部分の汚れはきれいに落とし、潤滑油を塗布しておく。



3.4 測定結果の整理

測定結果は各測点毎に整理する。基本的には、測定したデータファイルをパソコンの表計算ソフト（Excel 等）で読み込み、参考表-1「小型 FWD 試験記録シート」と対応させ、「小型 FWD 試験データシート」に入力する。載荷板直径、重錘質量、重錘落下高さ等は、手入力し、1 測点における 18 回分の最大荷重、最大変位量の測定データは、「小型 FWD 試験記録シート」の地盤反力係数 K_{30} 相当値を算出する。小型 FWD による地盤反力係数 $K_{P, FWD}$ 値、地盤反力係数 K_{30} 相当値、変形係数 $E_{P, FWD}$ 値の算出方法を以下に示す。また、P. 24 の参考表-2 に、「小型 FWD 試験データシート入力例」を示す。

注) 測定毎に測定結果画面でデータを確認し、不良データは測定回数に含めない。

1) 地盤反力係数 $K_{P, FWD}$ 値及び K_{30} 相当値

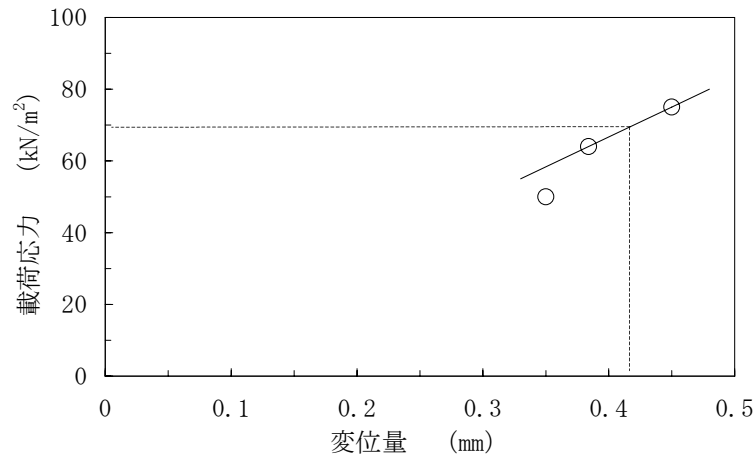
測定により得られた最大荷重と最大変位量について、各落下高さ毎に 6 回測定した値の 1 回目を除き、平均化する。さらに、最大荷重については、載荷板の面積で除することにより載荷応力を算出する。得られた各落下高さ毎の載荷応力と変位量の平均値をもとに、参考図-1 に示す関係図を作成する。関係図において、変位と載荷応力を一次回帰し、得られた一次回帰式から $K_{P, FWD}$ 値を算出するため、載荷板直径に応じた変位での載荷応力を求める。載荷板直径が 10cm、15cm、20cm の場合、それぞれ、0.417mm、0.625mm、0.833mm の時の載荷応力である。

$K_{P, FWD}$ 値は K_{FWD} 値と同様に載荷応力を変位量で除することにより求めるが、 K 値は載荷板の直径に反比例するため直径比率を乗じて補正を行う必要がある。直径 10cm の載荷板を用いた場合の算出例を以下に示す。

$$K_{P, FWD} = (P_{0.417} / \delta_{0.417}) \cdot (D_{10} / D_{30})$$

ここに、 $K_{P, FWD}$: 小型 FWD による地盤反力係数 (MN/m ³)
$P_{0.417}$: 変位量 0.417mm のときの載荷応力 (MN/m ²)
$\delta_{0.417}$: 変位量 0.417mm (0.000417m)
D_{10}	: 小型 FWD の載荷板の直径 10cm (0.1m)
D_{30}	: FWD の載荷板の直径 30cm (0.3m)

注) 小型 FWD システム FWD-Light の専用表示器に表示される地盤反力係数 K_{TML} 値は、上記式に従って、その都度測定された最大荷重より求まる載荷応力 P_x ($P_{0.417}$ に代入) と最大変位量 δ_x ($\delta_{0.417}$ に代入) を用いて算出しており、本来、定義されている小型 FWD による地盤反力係数 $K_{P, FWD}$ 値とは異なる。但し、予備試験時や本試験時において、載荷板の直径に応じた任意の変位量付近での K_{TML} 値は、 $K_{P, FWD}$ 値と近似するため、現場にて試験対象材料の剛性を概ね把握することができる。



参考図-2 変位量－载荷応力の関係の一例 (2)

ただし、参考図-2 に示すように、変位量－载荷応力の関係が線形にならない場合、変位量 0.417mm を挟む 2 つの変位量－载荷応力の関係から K 値を求めるものとする。

なお、道路の平板载荷試験が静的荷重による载荷であるのに対し、小型 FWD は衝撃荷重による载荷であるため、 $K_{P.FWD}$ 値と K_{30} 値の関係を把握する必要がある。

以下に、財団法人鉄道総合技術研究所編「鉄道構造物等設計標準・同解説—土構造物」(2007.1)，付属資料 31，pp. 494 および土木学会舗装工学委員会編「FWD および小型 FWD 運用の手引き」(2002.12)，pp. 73 に記載されている $K_{P.FWD}$ 値と K_{30} 値との関係を示す。

- ① ローム等の剛性の低い地盤の場合

$$K_{30} \text{ 値} = K_{P.FWD} \text{ 値}$$

- ② 砂系の地盤の場合

$$K_{30} \text{ 値} = (1/1.5) \cdot K_{P.FWD} \text{ 値}$$

- ③ 礫系の地盤の場合

$$K_{30} \text{ 値} = (1/2.0) \cdot K_{P.FWD} \text{ 値}$$

K_{30} 値と $K_{P.FWD}$ 値の間には概略上記の関係がみられるが、より正確な関係を求める場合には、試験盛土の際に、使用する盛土材料について K_{30} 値と $K_{P.FWD}$ 値との関係を把握する必要がある。

2) 変形係数 $E_{P, FWD}$ 値

小型 FWD から得られた最大荷重及び最大変位量より、下式に従い算出する。

$$E_{P, FWD} = \frac{(1 - \nu^2)P}{2rD}$$

ここに、 $E_{P, FWD}$: 小型 FWD システムによる変形係数 (MN/m²)
 P : 荷重の最大値 (MN)
 D : 最大変位量 (m)
 r : 載荷板の半径 (m)
 ν : ポアソン比

※変形係数を算出するための理論解には、載荷板の性状に基づいた 2 つの式が示されているが、剛性板載荷とした場合の Boussinesq 理論を採用している。参考に、たわみ性載荷とした場合の Burmister 理論について算出式を以下に示す。

載荷板半径 a で圧力 p_0 の円形一様載荷をしたときの距離 r だけ離れた位置での表面たわみ D より

$$E = 2ap_0 \frac{1 - \nu^2}{\pi D} \left[\left(1 - \frac{r}{a}\right)K(k) + \left(1 + \frac{r}{a}\right)E(k) \right] \quad (1)$$

ここに、

$$k = \sqrt{\frac{4r}{a} / \left(1 + \frac{r}{a}\right)^2}$$

$$K(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta}} \quad \text{第一種完全楕円積分}$$

$$E(k) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta} d\theta \quad \text{第二種完全楕円積分}$$

となる。

式 (1) は $r=0$ のときは $k=0$ 、 $K(0) = \pi/2$ 、 $E(0) = \pi/2$ より、

$$E = \frac{2(1 - \nu^2)ap_0}{D} \quad (2)$$

半径 a の載荷板の上に荷重 P が加えられる場合は $p_0 = P/\pi a^2$ を代入して

$$E = \frac{2(1 - \nu^2)P}{\pi rD} \quad (3)$$

ここに、 E : 変形係数 (MN/m²)
 P : 荷重の最大値 (MN)
 D : 最大変位量 (m)
 r : 載荷板の半径 (m)
 ν : ポアソン比

参考表-1 小型 FWD 試験記録シート記入例

FileNo.(**A001**) 小型FWD試験記録シート Date: ** ** *

Data No.	Test No.	落下高さ	重錘質量	載荷板直径	Comment
1	予備試験		5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	
2			5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	
3			5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	
4			5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	
5			5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	
6			5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	
7			5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	
8			5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	
9			5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	
10	No.1	20cm	5 / 10 / 15 / 25	100 / 50 / 200 / 300	
11			5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	
12			5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	
13			5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	
14			5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	
15			5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	
16		25cm	5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	
17			5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	
18			5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	
19			5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	NG
20			5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	$K_{p,FWD} \approx 160MN/m^3$
21			5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	
22			5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	
23		30cm	5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	規定の変位量付近の K_{TML} を概算 $K_{p,FWD}$ として記入し、現場にて剛性を把握する。
24			5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	
25			5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	
26			5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	
27			5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	
28			5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	
29	予備試験		5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	
30			5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	
31			5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	
32			5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	
33			5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	
34	No.2	30cm	5 / 10 / 15 / 25	100 / 50 / 200 / 300	
35			5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	
36			5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	
37			5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	
38			5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	
39			5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	
40		35cm	5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	
41			5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	
42			5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	
43			5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	
44			5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	
45			5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	
46		40cm	5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	
47			5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	
48			5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	
49			5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	
50			5 / 10 / 15 / 25	100 / 150 / 200 / 300	

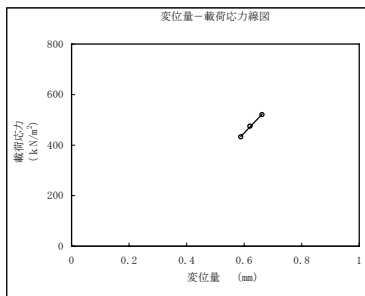
参考表-2 小型 FWD 試験データシート入力例 (Excelシート)

小型 FWD 試験データ									
調査名称	小型 FWD 試験								
調査日	平成	**	年	**	月	**	日	天候	晴れ
調査場所	〇〇県〇〇市〇〇			測点	No.10-1 (154k680m GL-30cm)				
地盤材料	礫系	ポアソン比	0.35	重錘質量	15 kg				
載荷板の直径	150 mm	波形	無	試験者名	東京 太郎・測器 次郎				
落下高さ		37.5 cm							
No.	荷重 N	変位量 mm	載荷応力 kN/m ²	地盤反力係数 K _{TML} 値 (MN/m ²)	変形係数 E _{TML} 値 (MN/m ²)				
1	7639	0.571	432	379	78				
2	7636	0.573	432	377	78				
3	7628	0.574	432	376	78				
4	7671	0.600	434	362	75				
5	7624	0.598	431	361	75				
6	7663	0.595	434	364	75				
平均	7644	0.588	433	368	76				
落下高さ		42.5 cm							
No.	荷重 N	変位量 mm	載荷応力 kN/m ²	地盤反力係数 K _{TML} 値 (MN/m ²)	変形係数 E _{TML} 値 (MN/m ²)				
1	8352	0.610	473	387	80				
2	8395	0.606	475	392	81				
3	8392	0.611	475	389	80				
4	8401	0.627	475	379	78				
5	8382	0.622	474	381	79				
6	8413	0.636	476	374	77				
平均	8397	0.620	475	383	79				
落下高さ		47.5 cm							
No.	荷重 N	変位量 mm	載荷応力 kN/m ²	地盤反力係数 K _{TML} 値 (MN/m ²)	変形係数 E _{TML} 値 (MN/m ²)				
1	9139	0.687	517	376	78				
2	9195	0.661	520	394	81				
3	9187	0.665	520	391	81				
4	9203	0.662	521	393	81				
5	9220	0.667	522	391	81				
6	9231	0.655	522	399	82				
平均	9207	0.662	521	394	81				

落下回数	荷重 N	変位量 mm	落下高 cm	重錘 kg	載荷板 mm	測点
回	N	mm	cm	kg	mm	
1	7639	0.571	37.5	15	150	No.10-1 (154k680m GL-30cm)
2	7636	0.573				
3	7628	0.574				
4	7671	0.6				
5	7624	0.598				
6	7663	0.595				
7	8352	0.61	42.5			
8	8395	0.606				
9	8392	0.611				
10	8401	0.627				
11	8382	0.622				
12	8413	0.636				
13	9139	0.687	47.5			
14	9195	0.661				
15	9187	0.665				
16	9203	0.662				
17	9220	0.667				
18	9231	0.655				

$K_{TML} = \text{載荷応力} / \text{変位量} \times \text{載荷板直径比率} = 517 / 0.000687 \times 150 / 300 = 376273 \text{ kN/m}^3$

平均値は各落下高さの2~6回目を平均



変位量 0.625 mmの載荷応力	478	kN/m ²
地盤反力係数 K _{P, FWD} 値	382	MN/m ³
地盤反力係数 K ₃₀ 相当値	191	MN/m ³
変形係数 E _{P, FWD} 値	79	MN/m ²
コメント		
回帰式 Y = 1190.8 X - 266.2		
※K ₃₀ 相当値 = K _{P, FWD} 値*1/2		

回帰式に代入

$= 1190.8 \times 0.625 - 266.2 = 478$

$= \text{規定の変位量での載荷応力} / \text{規定の変位量} \times \text{直径比率} = 478 / 0.000625 \times 150 / 300 = 382400 \text{ kN/m}^3$

$= K_{P, FWD} / \text{換算係数} = 382 / 2 = 191$

$= \text{各落下高さにおける平均変形係数の平均値} = (76+79+81) / 3 = 79$