

小型 FWD による地盤剛性評価について

Evaluation of stiffness for geomaterials on portable FWD

室蘭工業大学工学部 正員 木幡行宏 (Yukihiko Kohata)
室蘭工業大学大学院 学生員 更谷聡彦 (Akihiko Saratani)

1. まえがき

現在、盛土の施工管理は、道路の平板載荷試験による K_{30} 値を用いて評価をする場合が多い(例えば、¹⁾)。しかし、道路の平板載荷試験は多大な労力や測定時間を費やし、また、反力装置を必要とする、といった問題点がある。このことから反力装置を必要とせず、持ち運びが容易で比較的正確な測定を迅速に多数行うことができる重錘落下によるポータブルタイプの荷重・たわみ測定装置、小型の Falling Weight Deflectometer (以下、小型 FWD という。) による地盤反力係数 K 値の測定方法を、盛土の施工管理に適用する試みがなされているが、種々の地盤に対する剛性の評価が適切であるかどうかは未解明な部分が多い。

そこで、本研究では、過去の道路の平板載荷試験結果と小型 FWD の測定結果に関するデータを収集・整理して、種々の地盤に対する K_{30} 値と小型 FWD による K 値 (以下、 $K_{P,FWD}$ 値と示す。) の関係について比較・検討した。

2. 小型 FWD の概要

小型 FWD は、従来からある車載式の FWD をポータブルタイプにした荷重・たわみ測定装置である。小型 FWD の概要図を図 1 に示す。FWD 同様、載荷板に重錘を自由落下させることにより衝撃荷重を発生させ、そのときの荷重と載荷中心点におけるたわみ量を、荷重計と加速度計 (または、変位計) を用いて測定する。たわみ量は加速度値を 2 回積分することで求めることができる。このような測定で荷重とたわみ量の関係から $K_{P,FWD}$ 値を算出する。

3. 小型 FWD による $K_{P,FWD}$ 値の算出方法²⁾

小型 FWD で用いられる載荷板直径は、9, 10, 20 cm のタイプが多く、道路の平板載荷試験で一般的に用いられる載荷板直径 30 cm とは異なる。K 値は、載荷板直径に反比例することから、30 cm 相当の K 値を $K_{P,FWD}$ 値として算出するためには、載荷応力をたわみ量で除した値に載荷板の直径比率を乗じて補正を行う必要がある。

すなわち、次式より $K_{P,FWD}$ 値を求める。

$$K_{P,FWD} = \left(\frac{P_{P,FWD}}{P_{FWD}} \right) \cdot \left(\frac{P_{FWD}}{PLT} \right) \quad (\text{MN/m}^3) \quad (1)$$

ここに、

$P_{P,FWD}$: 小型 FWD のたわみ量 P_{FWD} 時の小型 FWD の載荷応力 (kN/m^2)

P_{FWD} : 小型 FWD のたわみ量 (mm)

P_{FWD} : 小型 FWD の載荷板直径 (cm)

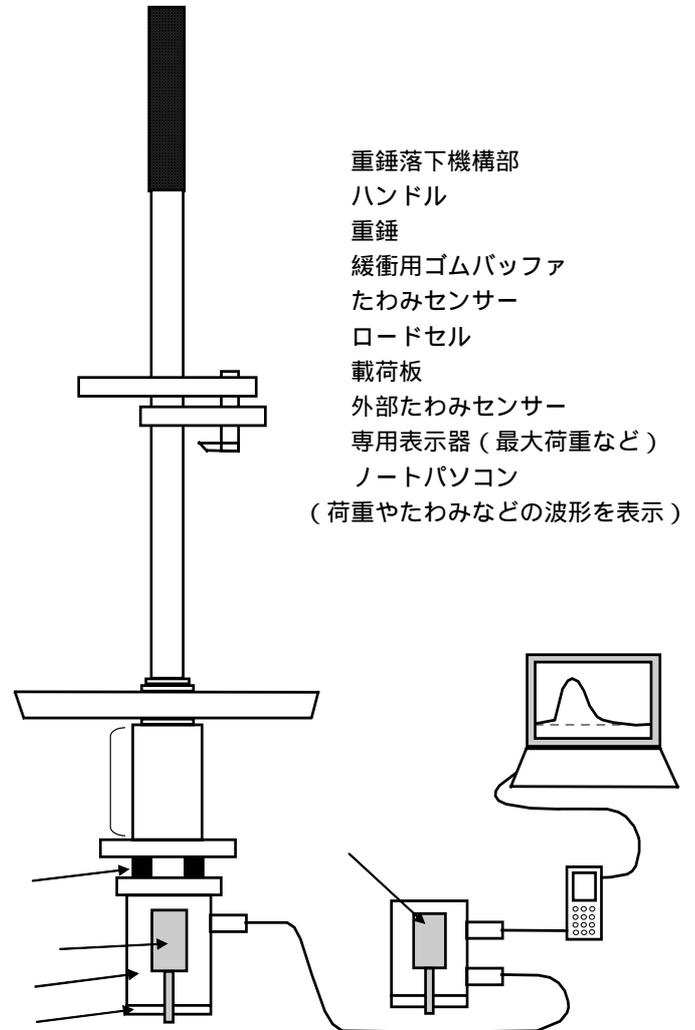


図 1 小型 FWD の概要図

PLT : 道路の平板載荷試験の載荷板直径 (30 cm)

また、K 値にはひずみレベル依存性があるため、(1)式の $P_{P,FWD}$ は、それぞれの載荷板直径に応じた載荷板直径 30 cm に相当するたわみ量 1.25 mm での載荷応力となる。すなわち、小型 FWD の載荷板直径が 9 cm, 10 cm, 20 cm であれば、たわみ量がそれぞれ 0.375 mm, 0.417 mm, 0.833 mm ($1.25 \text{ mm} \times P_{FWD}/30 \text{ cm}$) に対応する載荷応力となる。

4. K_{30} 値と $K_{P,FWD}$ 値の関係及び $K_{P,FWD}$ 値のばらつき の検討

K_{30} 値と $K_{P,FWD}$ 値との関係を地盤材料ごとに図 2~7 に示した。また、図 8~12 は、 K_{30} 値を区間ごとに分け、

その区間ごとの $K_{P,FWD}$ 値の変動係数について示したものである。表 1 には、 K_{30} 値と $K_{P,FWD}$ 値の関係から得られたそれぞれの地盤材料の相関係数を示す。

測定した地盤材料や剛性によって、 K_{30} 値と $K_{P,FWD}$ 値の関係は異なる傾向にある。すなわち、それぞれの地盤における K_{30} 値と $K_{P,FWD}$ 値との関係は、粘性土地盤のように剛性が小さい地盤では 1:1 の関係にあり(図 2)、粘性土よりもやや剛性が大きい砂系の地盤では 1:1.5 (図 3)、さらに剛性の大きい礫系の地盤では 1:2 の関係にある(図 4~6)。

データのばらつき程度を表す変動係数を見ると、図 8 に示す粘性土、図 9 に示す礫質砂における $K_{P,FWD}$ 値の変動係数は 20~30 %程度であるが、表 1 に示す相関係数は比較的大きな値を示していることから、 K_{30} 値~ $K_{P,FWD}$ 値関係は比較的良好な相関にあると言える。一方、図 10 に示す砂質礫においては、 K_{30} 値が大きくなるにつれ、 $K_{P,FWD}$ 値の変動係数は小さくなる傾向にあるが、表 1 に示す相関係数は粘性土や礫質砂に比べ小さく、全体的にはばらつきが比較的大きいと言える。

図 11 に示すクラッシュランの変動係数は、本研究で収集・整理したデータの中では最も小さく、ばらつきは小さい。しかし、 $K_{30}=150 \text{ MN/m}^3$ での $K_{P,FWD}$ 値に影響され

たためか、相関係数はあまり良い値を示していない。図 12 に示す再生クラッシュランの変動係数は、 K_{30} 値の区間ごとに大きく異なり、一定の傾向を示していない。また、相関係数は他の材料に比べ最も小さい値となった。これは再生クラッシュランの場合には、粒径幅が小さく、測定面の平面性が確保しにくいことに起因していると考えられる。

$K_{P,FWD}$ 値にばらつきが生じる要因として、砂系、礫系の地盤における締固め程度や、小型 FWD の緩衝用ゴムバッファなどによる影響が考えられる。小型 FWD の機種が異なると、緩衝用ゴムバッファの個数や硬度が異なるために、重錘の質量や落下高さが同一でも衝撃荷重の大きさは異なり、載荷エネルギーが異なってくる。過去の論文によれば⁷⁾、緩衝用ゴムバッファの硬度の違いによって、小型 FWD の地盤反力係数に影響を及ぼすことが報告されている。また、緩衝用ゴムバッファの温度や劣化によって、硬度が変化することも考えられる。

図 7 に、図 2~6 に示したすべての地盤材料のデータをまとめた。 K_{30} 値が 100 MN/m^3 程度以下では K_{30} 値と $K_{P,FWD}$ 値はほぼ 1:1 の関係ではあるが、これより大きい部分では平均的に見れば、1:2 の関係で代表されるようである。

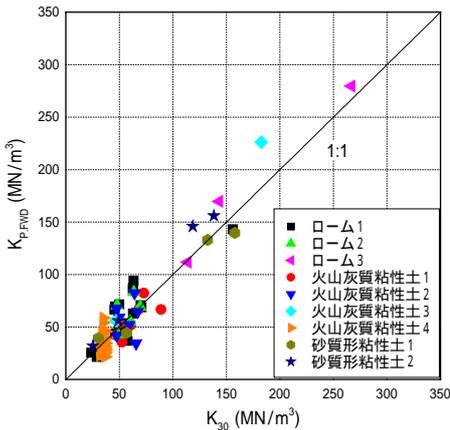


図 2 K_{30} 値と $K_{P,FWD}$ 値 (粘性土)

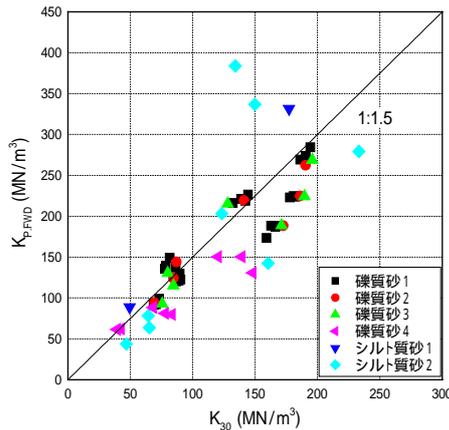


図 3 K_{30} 値と $K_{P,FWD}$ 値 (礫質砂)

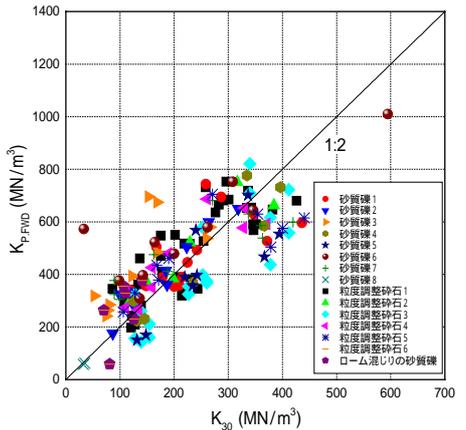


図 4 K_{30} 値と $K_{P,FWD}$ 値 (砂質礫)

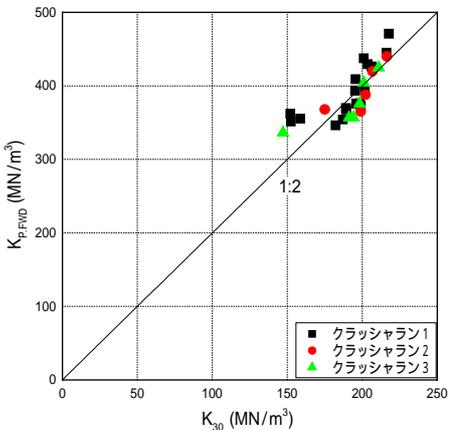


図 5 K_{30} 値と $K_{P,FWD}$ 値 (クラッシュラン)

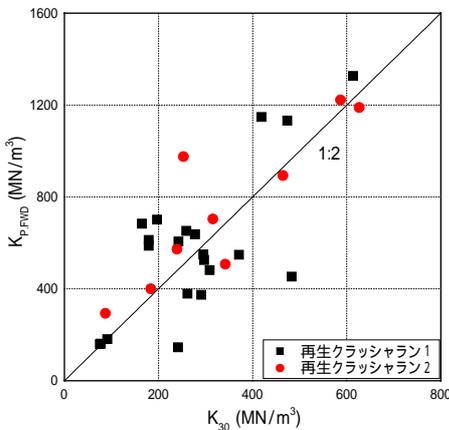


図 6 K_{30} 値と $K_{P,FWD}$ 値 (再生クラッシュラン)

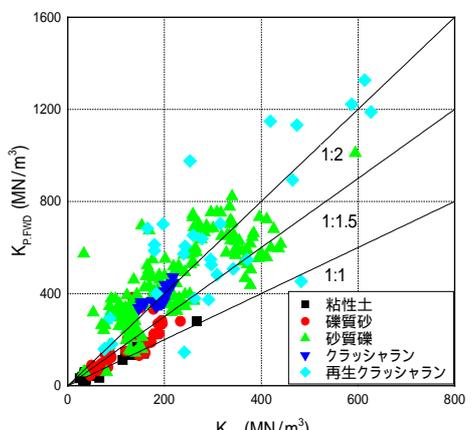


図 7 K_{30} 値と $K_{P,FWD}$ 値 (すべての地盤材料)

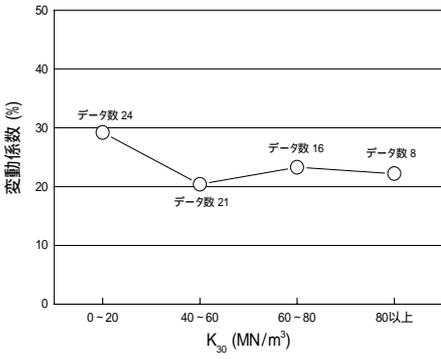


図 8 K_{P,FWD} 値の変動係数 (粘性土)

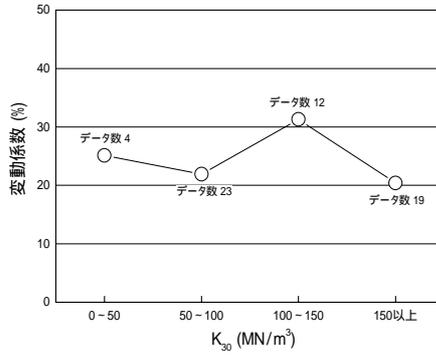


図 9 K_{P,FWD} 値の変動係数 (礫質砂)

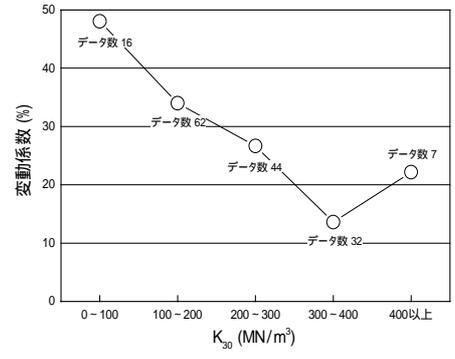


図 10 K_{P,FWD} 値の変動係数 (砂質礫)

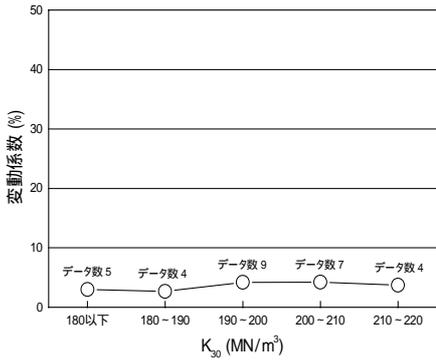


図 11 K_{P,FWD} 値の変動係数 (クラッシュラン)

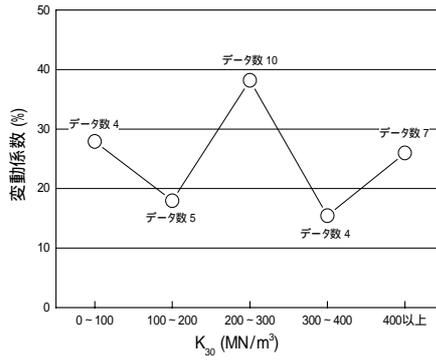


図 12 K_{P,FWD} 値の変動係数 (再生クラッシュラン)

表 1 K₃₀ 値と K_{P,FWD} 値の関係から得られた相関係数

地盤材料	相関係数
粘性土	0.953
礫質砂	0.825
砂質礫	0.786
クラッシュラン	0.758
再生クラッシュラン	0.769

5. K_{P,FWD} 値から K₃₀ への換算係数 a の検討

盛土の締固め管理では、K₃₀ 値を用いて剛性の管理を行う場合が多い。したがって、小型 FWD から得られる K_{P,FWD} 値を K₃₀ 値に換算することは有用である。そこで、本研究では収集・整理したデータについて、それぞれの K₃₀ 値に対する K_{P,FWD} 値を用いて(2)式のように換算係数 a を求めた。

$$a = \frac{K_{P,FWD}}{K_{30}} \quad (2)$$

一般に、土の剛性にはひずみレベル依存性や拘束圧依存性があるために、土の変形係数は一定値とはならない。また、土質種類によっても異なる。前述したように、K_{P,FWD} 値は K₃₀ 値に相当するものとなるように、ひずみレベル依存性や載荷板の大きさの影響を考慮して算出している。しかし、小型 FWD の機種により、緩衝用ゴムパフアの硬度の違いなどによって K_{P,FWD} 値は異なることが考えられる。したがって、K_{P,FWD} 値を K₃₀ 値に換算するためには、図 2~7 に示した K₃₀ 値~K_{P,FWD} 値関係をより詳細に検討する必要がある。図 13~18 に本研究で収集・整理したデータに関する K_{P,FWD} 値~換算係数 a の関係を示す。また、それぞれの土質ごとに、K_{P,FWD} 値~換算係数 a 関係における回帰式を求めると(3)~(8)式となった。

$$\text{粘性土} \quad a = 0.438 \times K_{P,FWD}^{0.211} \quad (3)$$

$$\text{礫質砂} \quad a = 0.588 \times K_{P,FWD}^{0.168} \quad (4)$$

$$\text{砂質礫} \quad a = 0.840 \times K_{P,FWD}^{0.154} \quad (5)$$

$$\text{クラッシュラン} \quad a = 1.011 \times K_{P,FWD}^{0.116} \quad (6)$$

$$\text{再生クラッシュラン} \quad a = 0.372 \times K_{P,FWD}^{0.274} \quad (7)$$

$$\text{すべての地盤材料} \quad a = 0.331 \times K_{P,FWD}^{0.300} \quad (8)$$

図 13 に示す粘性土では、(3)式から K_{P,FWD}=50 MN/m³ で換算係数はほぼ 1.0 を示しており、この剛性レベルでは、K_{P,FWD} 値=K₃₀ 値となっていることがわかる。図 14 に示す礫質砂では、K_{P,FWD}=250 MN/m³ で換算係数はほぼ 1.5 を示す。図 15 に示す砂質礫は、K_{P,FWD} 値が 60~100MN/m³ の範囲で換算係数 a は 0.7~6.0 まで広い範囲にばらついており、K_{P,FWD} 値から K₃₀ 値を精度良く推定することは難しいと思われる。同様の傾向は、図 17 に示す再生クラッシュランの場合にも見られる。一方、図 16 に示すクラッシュランの場合には、収集・整理したデータの剛性レベルがほぼ 400 MN/m³ あったためか、データのばらつきが小さく換算係数 a は 2.0 程度の値である。図 18 は、図 13~17 に示すすべてのデータを整理した結果である。図に示すように、全体的な傾向として、換算係数 a は地盤の剛性レベルが大きくなるとともに増加傾向にあり、概ね(8)式に示す傾向にある。

以上より、小型 FWD から得られる K_{P,FWD} 値から K₃₀ 値を推定する場合には、剛性レベルに応じて、(8)式を用いて換算係数 a を求めることにより概ね可能であることがわかる。ただし、砂質礫や再生クラッシュランの場合には、データのばらつきが大きかったことから、推定される K₃₀ 値の使用には、十分、注意する必要があると考えられる。

6. まとめ

過去に報告された文献より、道路の平板載荷試験結果

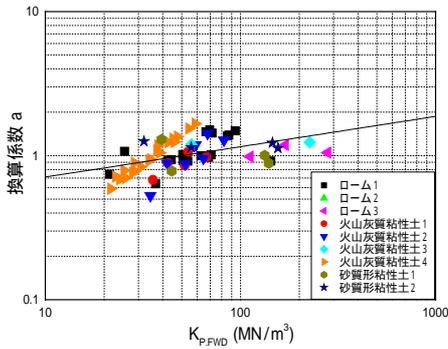


図 13 $K_{p,FWD}$ 値と換算係数 a (粘性土)

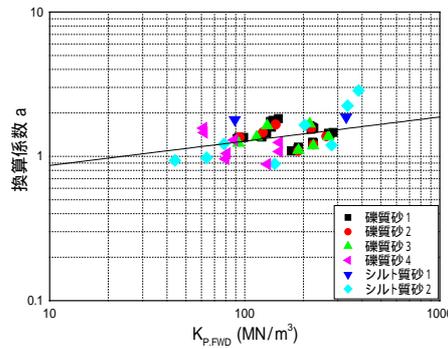


図 14 $K_{p,FWD}$ 値と換算係数 a (礫質砂)

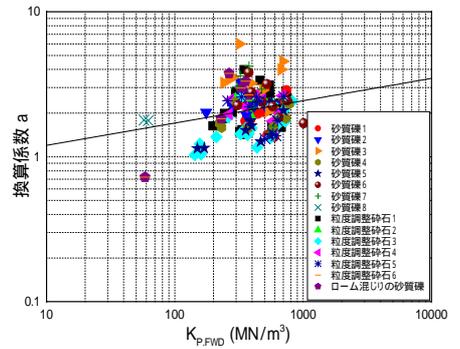


図 15 $K_{p,FWD}$ 値と換算係数 a (砂質礫)

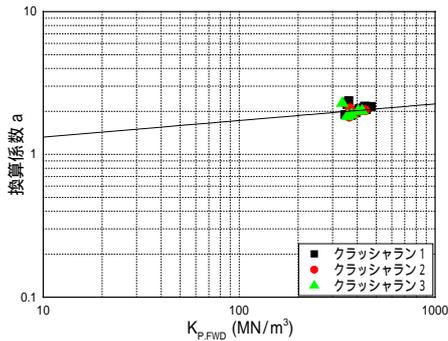


図 16 $K_{p,FWD}$ 値と換算係数 a (クラッシュラン)

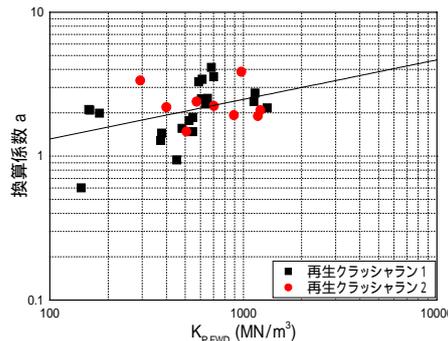


図 17 $K_{p,FWD}$ 値と換算係数 a (再生クラッシュラン)

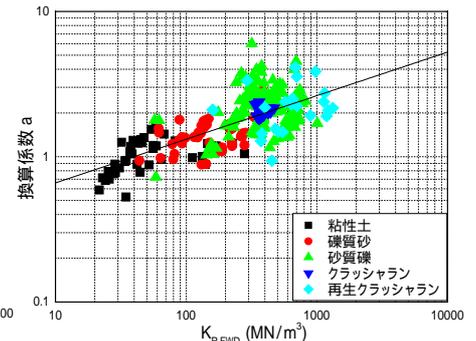


図 18 $K_{p,FWD}$ 値と換算係数 a (すべての地盤材料)

と小型 FWD の測定結果をもとに、種々の地盤に対する K_{30} 値と $K_{p,FWD}$ 値との関係を収集・整理した結果、以下に示す知見が得られた。

- 1) K_{30} 値 ~ $K_{p,FWD}$ 値関係において、粘性土のように剛性の小さい地盤では 1:1、砂系の地盤では 1:1.5、礫系の地盤では 1:2 となるものの、それぞれの測定データにばらつきが見られる。その要因として、載荷面の平面性の問題、砂系、礫系の地盤での締め固めによる影響、緩衝用ゴムバッファの硬度や個数による載荷エネルギーの影響などが考えられる。
- 2) $K_{p,FWD}$ 値から K_{30} 値を推定するための換算係数は、地盤の剛性が大きくなるとともに増加する傾向にある。
- 3) $K_{p,FWD}$ 値からそれぞれの剛性レベルに応じた換算係数を求めることで、小型 FWD による $K_{p,FWD}$ 値から K_{30} 値を推定することが可能であると思われる。ただし、砂質礫や再生クラッシュランの場合には、データのばらつきが大きかったことから、推定される K_{30} 値の使用には十分、注意する必要がある。

今後は小型 FWD の緩衝用ゴムバッファの個数や硬度などを考慮しながら、現場での試験データを蓄積して検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) (財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説，省力化軌道用土構造物，丸善，1999.11.
- 2) 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，丸善，2002.12.
- 3) 鴨ら：FWD による K 値と K_{30} 値との比較，第 54 回

- 土木学会年次学術講演会，第 部門，pp.384-385.
- 4) 鴨ら：小型の FWD を用いた鉄道盛土の剛性評価，第 34 回地盤工学研究発表会，pp.1847-1848.
- 5) 阿部ら：FWD による路盤・路床の支持力評価方法，第 2 回舗装工学講演会講演論文集，1997.12，pp.135-143.
- 6) 鴨ら：FWD を用いた盛土の剛性評価方法，土木学会舗装工学論文集 第 4 巻，1999.12，pp.47-52.
- 7) 丸子ら：小型 FWD を用いた粘性土地盤の剛性評価の検討，第 56 回土木学会年次学術講演会，第 部門，pp.110-111.
- 8) 関根ら：小型 FWD 機種間における測定値のばらつきの検討，第 60 回土木学会年次学術講演会，第 部門，pp.159-160.