

表-1 測定地盤の土の種類と測定項目

地盤の剛性	土の種類			道路の平板載荷試験	FWD	HFWD
① 剛性の低い地盤	粘性土地盤	関東ローム	自然地盤	○	—	○
			掘削地盤	○	—	○
② ①よりもやや剛性の高い地盤	砂質土地盤	礫質砂	土 槽	○	○	○
③ 剛性の高い地盤	礫質土地盤	粒度調整碎石 (M-30)	土 槽	○	○	○
		粒度調整碎石 (M-30)	試験盛土	○	○	○
		クラッシュラン (C-40)	現地盛土	○	—	○
		再生クラッシュラン (RC-30)	現地盛土	○	○	○

○：測定，—：未測定

表-2 材料の物理特性

			関東ローム	礫質砂	粒度調整碎石 (M-30)	クラッシュラン (C-40)	再生クラッシュラン (RC-30)
粒度分布	礫 分	(%)	0.0	18.3	71.5	82.6	70.4
	砂 分	(%)	13.5	75.4	20.0	13.9	26.1
	細 粒 分	(%)	86.5	6.3	8.5	3.5	3.5
	均 等 係 数		—	13	85.5	20	35
	曲 率 係 数		—	3	6.54	1.7	1.48
コンシステンシー	W _L (%)		181.7	—	—	—	—
	W _p (%)		94.3	—	—	—	—
	I _p		87.4	—	—	—	—
土粒子の密度		(g/cm ³)	2.771	2.664	2.710	2.750	2.674
最大乾燥密度		(g/cm ³)	—	1.938	2.312	2.025	1.921
最適含水比		(%)	—	11.9	5.4	6.2	10.6
土 質 分 類			VH2	SG-F	GS-F	G-S	GS

確立を目的として、土質の異なる地盤上で測定した K_{30} 値、 K_{FWD} 値、 K_{HFWD} 値について、地盤の剛性の違いによる K_{30} 値と K_{FWD} 値および K_{HFWD} 値との関係について検討した。

2. K値測定の概略

(1) 測定地盤の概要

盛土材料は、土工の切盛りのバランスを考慮し、現場で発生するものを用いるのが一般的である。しかし、鉄道では圧縮沈下に対するきびしい制限から、使用する材料は礫質土や砂質土が中心であり、粘性土については安定処理を行うことを基本としているため、盛土材料は購入土が一般的となっている。これまでに、安定処理を必要としない盛土材料を用いて構築した地盤・盛土等において、また、原地盤を想定して火山灰質粘性土（関東ローム）において道路の平板載荷試験、FWD、小型 FWD による試験を行っており、その地盤条件は表-1 に示すように3種 {① 剛性の低い地盤（粘性土地盤）、② ①よりもやや剛性の高い地盤（砂質土地盤）、③ 剛性の高い地盤（礫質土地盤）} に区分される。

それぞれの地盤材料の物理特性を表-2 に示す。

粘性土地盤は、関東ロームの自然地盤および、駅構内において掘削した関東ロームの地盤である。

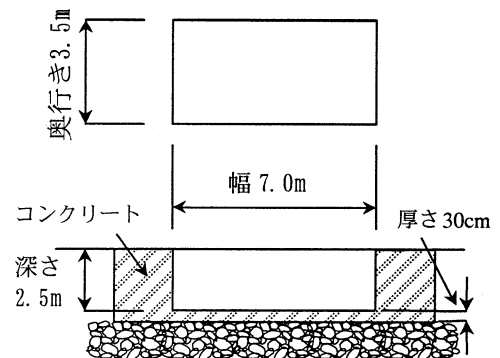


図-3 土槽の概要

砂質土地盤は、図-3 に示すような、幅 7.0m、奥行き 3.5m、深さ 2.5m の土槽に、締固め密度比を 95%、85%、80% に設定し、均一となるよう材料の敷均し厚さ、転圧回数に十分配慮して構築した 3 タイプの地盤である。

礫質土地盤は、砂質土地盤の場合と同じ土槽に構築した地盤と、関東ロームの地盤上に構築した試験盛土、現地の盛土である。土槽に構築した地盤は、粒度調整碎石（M-30）を用いて、砂質土の場合と同様締固め密度比を 95%、85%、80% に設定し、均一となるよう材料の敷均し厚さ、転圧回数に十分配慮して構築したものである。試験盛土は、粒度調整碎

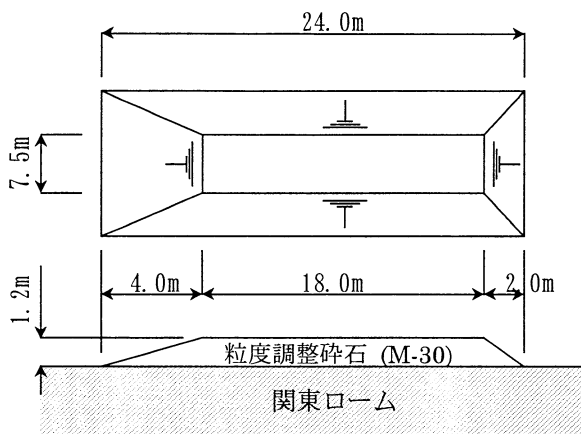


図-4 試験盛土の概要

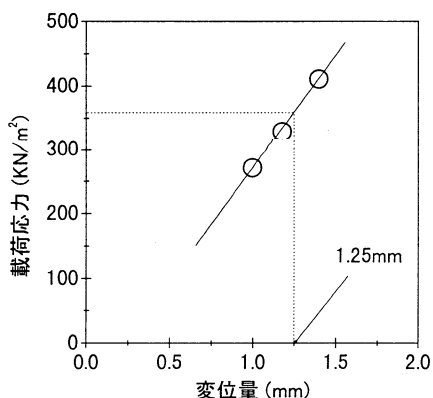


図-5 FWD による K 値の算出方法

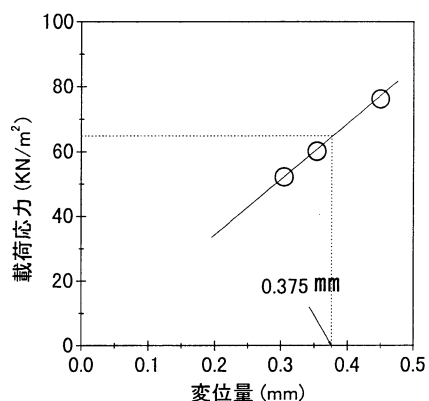


図-6 小型 FWD による K 値の算出方法

石 (M-30) を用いて、関東ロームの地盤上に図-4 に示す形状寸法の盛土を、土槽の場合と同様、締固め密度比を 95%, 85%, 80% に設定して、均一になるように敷均し厚さ、転圧回数に十分配慮して構築した 3 タイプの盛土である。現地の盛土は、クラッシャーラン (C-40) および再生クラッシャーラン (RC-30) を用いて構築されたものである。クラッシャーランを用いたものは、幅約 3.0~7.0m、高さ約 1.0~3.0m、再生クラッシャーランを用いたものは、幅約 16m、高さ約 5.0~6.5m の盛土である。

(2) K 値の算出方法

FWD による K 値は、FWD の载荷板の直径が道路の平板载荷試験に用いる载荷板と同じ 30cm であることから、道路の平板载荷試験と同様に载荷応力を変位量 1.25mm で除すことにより求めた。

ただし、測定の際に、重錘質量や重錘落下高さを微調整してもちょうど 1.25mm の変位量を得ることは非常に困難であるため、重錘質量を一定とし、重錘落下高さを変化させる事により、図-5 に示すように 1.25mm を挟む変位量を得るような測定を行い、変位量 1.25mm とそのときの载荷応力を用いて K 値を算出した。小型 FWD による K 値についても、FWD と同様の方法で測定を行った。ただし、小型 FWD は载荷板の直径が 9cm であるため、変位量は 1.25mm に载荷板の直径比率を乗じた 0.375mm を用いることとし、図-6 に示すように、0.375mm を挟む変位量を得るような測定を行った。また、K 値は、载荷板の直径に反比例することから、式(1)に示すように、载荷応力を変位量で除した値に、この補正も行って K 値を算出した。

$$K_{HFW} \text{ 値} = \left(\frac{P_{0.375}}{\delta_{0.375}} \right) \cdot \left(\frac{D_9}{D_{30}} \right) \quad (1)$$

ここに、

K_{HFW} 値：小型 FWD による K 値

$P_{0.375}$: 変位量 0.375mm のときの载荷応力

$\delta_{0.375}$: 変位量 0.375mm

D_9, D_{30} : 小型 FWD と平板载荷試験の载荷板直径

3. 測定事例

(1) 粘性土地盤

粘性土地盤で得られた K_{30} 値と K_{HFW} 値との関係を図-7 に示す。これから、 K_{30} 値、 K_{HFW} 値とも 40~90MN/m³ の範囲にあり、掘削地盤での測定結果にややばらつきがあるものの、地盤の剛性の低い場合には、 K_{30} 値と K_{HFW} 値はほぼ 1:1 の関係にあることがわかる。

(2) 砂質土地盤

土槽に構築した砂質土地盤での K_{30} 値と K_{FWD} 値、 K_{HFW} 値との関係を図-8 に示す。図-8 は、 K_{30} 値は 70~200MN/m³ の範囲にあり、 K_{FWD} 値、 K_{HFW} 値は 90~300MN/m³ の範囲にあることを示している。これより、粘性土地盤よりやや剛性の高い砂質土地盤の場合には、 K_{30} 値と K_{FWD} 値、 K_{HFW} 値は 1:1.5 の関係にあることがわかる。

(3) 礫質土地盤

a) 粒度調整碎石 (試験盛土)

粒度調整碎石で構築した試験盛土における K_{30} 値と K_{FWD} 値、 K_{HFW} 値との関係を図-9 に示す。同図か

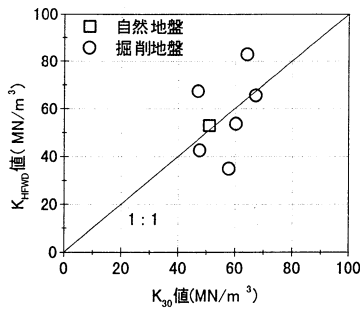


図-7 K_{30} 値と K_{HFWD} 値
(粘性土地盤)

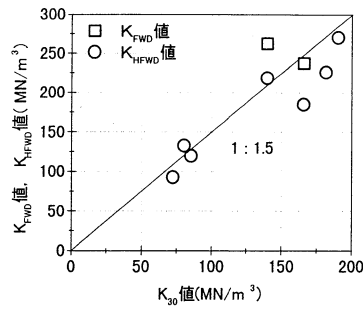


図-8 K_{30} 値と K_{FWD} 値,
 K_{HFWD} 値 (砂質土地盤)

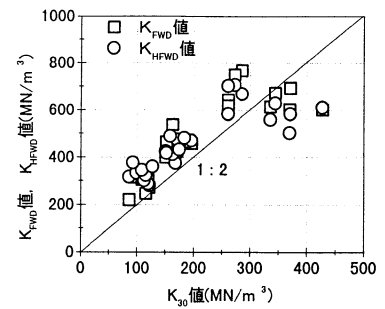


図-9 K_{30} 値と K_{FWD} 値,
 K_{HFWD} 値
(礫質土地盤, M-30 試験盛土)

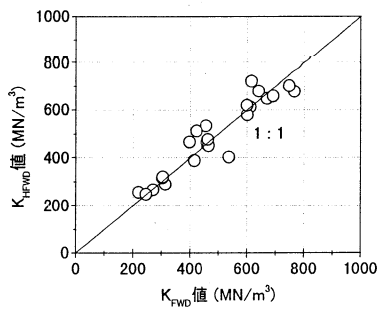


図-10 K_{FWD} 値と K_{HFWD} 値
(礫質土地盤, M-30 試験盛土)

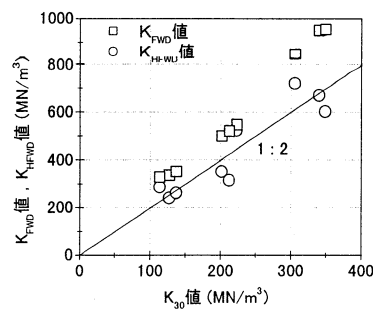


図-11 K_{30} 値と K_{FWD} 値,
 K_{HFWD} 値
(礫質土地盤, M-30 土槽)

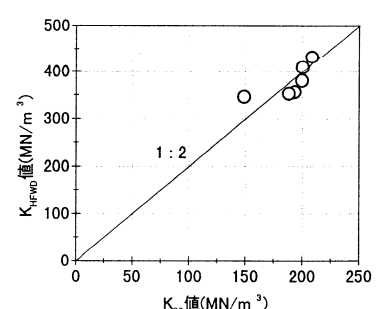


図-12 K_{30} 値と K_{HFWD} 値
(礫質土地盤, C-40 現地盛土)

ら、 K_{30} 値は $80 \sim 450 \text{ MN/m}^3$, K_{FWD} 値, K_{HFWD} 値は $200 \sim 800 \text{ MN/m}^3$ の範囲に分布しており、締固め密度比の大きい場合にばらつきが大きくなる傾向にあるが、これは K_{30} 値のばらつきの影響であり、 K_{30} 値と K_{FWD} 値, K_{HFWD} 値とは概ね 1:2 の関係にあることがわかる。また、図-10 に示すように、 K_{FWD} 値と K_{HFWD} 値はほぼ同じ値を示しており、載荷板の大きさの補正をすることにより同じ K 値が得られることもわかった。

b) 粒度調整碎石 (土槽)

粒度調整碎石で構築した土槽で得られた K_{30} 値と K_{FWD} 値, K_{HFWD} 値との関係を図-11 に示す。これより、 K_{30} 値は $100 \sim 350 \text{ MN/m}^3$, K_{FWD} 値, K_{HFWD} 値は $200 \sim 1,000 \text{ MN/m}^3$ の範囲に分布し、 K_{30} 値と K_{HFWD} 値は試験盛土の場合と同様概ね 1:2 の関係にあるが、 K_{30} 値と K_{FWD} 値については異なった傾向にあることがわかる。

c) クラッシュラン (現地盛土)

クラッシュラン (C-40) で構築した現地の盛土における K_{30} 値と K_{HFWD} 値との関係を図-12 に示す。図-12 は、粒度調整碎石を用いた試験盛土での K_{30} 値と K_{FWD} 値, K_{HFWD} 値との関係や、粒度調整碎石を用いた土槽での K_{30} 値と K_{HFWD} 値との関係と同じ傾向を示しており、 K_{30} 値と K_{FWD} 値, K_{HFWD} 値とは 1:2 の関係にあることがわかる。

d) 再生クラッシュラン (現地盛土)

再生クラッシュラン (RC-30) で構築した現地の盛土での K_{30} 値と K_{FWD} 値, K_{HFWD} 値との関係を図-13 に示す。これより、粒度調整碎石を用いた試験盛土やクラッシュランを用いた現地盛土の場合と同様に、 K_{30} 値と、 K_{FWD} 値, K_{HFWD} 値とは 1:2 の関係にあることがわかる。

4. 測定結果の検討

測定事例について整理した結果、静的荷重による K_{30} 値と動的荷重による K_{FWD} 値, K_{HFWD} 値には、剛性の低い粘性土地盤の場合にばらつきが見られるものの、砂質土地盤、礫質土地盤については、比較的よい相関が見られ、相関係数は 0.8 程度以上であった。ただし、粒度調整碎石を用いた地盤の場合、試験盛土では、図-10 に示したように K_{FWD} 値と K_{HFWD} 値とが、ほぼ等しい値となるのに対して、土槽では、図-14 に示すように K_{FWD} 値と K_{HFWD} 値とは載荷板の大きさの補正をしても同じ値が得られず、 K_{FWD} 値は K_{HFWD} 値の約 1.3 倍であった。

試験盛土と土槽との相違点は、粒度調整碎石層の厚さと、その下層の地盤剛性の違いである。試験盛土の場合、粒度調整碎石層の厚さは 1.2m、その下層

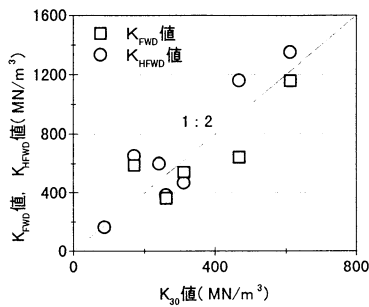


図-13 K_{30} 値と K_{FWD} 値,
 K_{HFWD} 値
(礫質土地盤, RC-30 現地盛土)

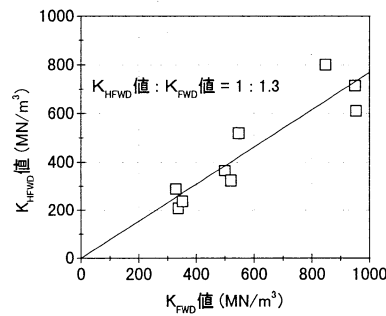


図-14 K_{FWD} 値と K_{HFWD} 値
(礫質土地盤, M-30 試験土槽)

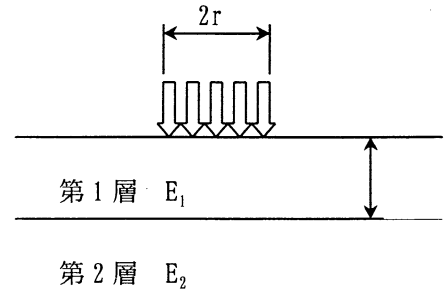


図-15 2層地盤のモデルの概略

は粘性土地盤（関東ローム）である。また、土槽は、粒度調整碎石層の厚さが2.5mであり、その下層はコンクリート版である。したがって、 K_{FWD} 値は、下層の剛性の影響を受けている可能性がある。

そこで、図-15 に示すような2層地盤のモデルにより円形載荷板の載荷による沈下の検討を行った。2層地盤において、円形載荷板の載荷による表面変位は式(2)で表せ、 F_w は変位係数と呼ばれる⁷⁾。

$$\omega = \frac{1.5pr}{E_2} \cdot F_w \quad (2)$$

$$F_w = \frac{1}{\left\{1 + \left(\frac{h}{r}\right)^2 \left(\frac{E_1}{E_2}\right)^{\frac{2}{3}}\right\}^{\frac{1}{2}} + \frac{E_2}{E_1}} \times \left[1 - \frac{1}{\left\{1 + \left(\frac{h}{r}\right)^2 \left(\frac{E_1}{E_2}\right)^{\frac{2}{3}}\right\}^{\frac{1}{2}}}\right]$$

ここに、

ω : 地盤表面の変位 E_1 : 上層の変形係数
 p : 接地圧 E_2 : 下層の変形係数
 r : 載荷板の半径 h : 上層の厚さ
 F_w : 変位係数

粒度調整碎石と関東ロームの剛性の比が約5倍程度あることと、粒度調整碎石とコンクリート版の剛性の比は一般に約100倍程度あることから、式(2)における F_w と h/r の関係を、 $E_1/E_2=5$ （上層の剛性が下層より高い場合）と $E_1/E_2=0.01$ （上層の剛性が下層より低い場合）について検討した結果を図-16 に示す。ここで、 $E_1/E_2=5$ の場合、 $F_w=1$ は $h=0$ を、 $F_w=0.2$ は $h=\infty$ を示している。また、 $E_1/E_2=0.01$ の場合は、 $F_w=100$, 0.01 は、それぞれ $h=\infty$, 0 を示している。

同図より、 $E_1/E_2=5$ のときには、 $h/r=10$ 、すなわち、上層の厚さが載荷板半径の10倍程度以上あれば下層の影響が小さくなることがわかる。また、

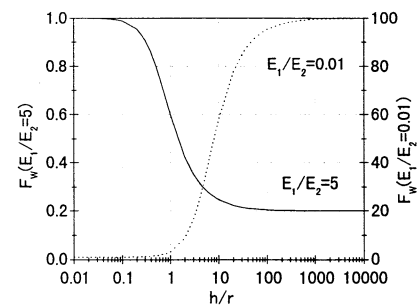


図-16 2層地盤の変位係数

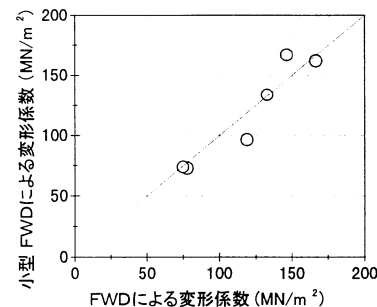


図-17 FWD, 小型 FWD による変形係数

$E_1/E_2=0.01$ のときには、上層の厚さが載荷板半径の40倍程度以上で F_w は90程度となり、下層の影響が少なくなることがわかる。試験盛土の場合は、上層の剛性が下層よりも大きく、上層の厚さが FWD の載荷板半径の8倍程度、小型 FWD の載荷板半径の27倍程度であるため下層地盤の剛性の影響が大きくなり、土槽の場合、地盤の剛性が土槽底面より小さく、地盤の深さが FWD の載荷板半径の17倍程度、小型 FWD の載荷板半径の55倍程度であったことから、土槽底面の影響を受けたものと考えられる。

次に、下層の影響を確認するために、粒度調整碎石層の変形係数を推定することとした。FWD については、土槽底面を非常に剛性の高い層と仮定し、 $D_0 \sim D_{750}$ の6個の変位データを用いて、多層弾性理論に基づく逆解析プログラム LMBS (Layer Moduli Backcalculation System) により推定した。また、小型 FWD については、変位データが2個と少なく、また、

粒度調整碎石層の厚さが、載荷板半径の約 55 倍であることから Boussinesq の式⁸⁾より推定した。その結果を図-17 に示す。図-17 は、FWD と小型 FWD から得られた粒度調整碎石層の変形係数はほぼ同じ値となることを示している。このことから、土槽での K_{FWD} 値はコンクリート底版の影響を受けており、コンクリート底版の影響を考慮すると K_{FWD} 値と K_{HFW} 値は 1:1 の関係にあり、 K_{FWD} 値、 K_{HFW} 値は K_{30} 値のほぼ 2 倍程度であると考えられる。

5. まとめ

以上の検討より得られた主な結果をまとめると以下の通りである。

(1) 平板載荷試験から得られる K_{30} 値と FWD から得られる K 値との関係は、地盤の種類によって以下のように変化する。

- ・地盤の剛性の低い粘性土地盤では、 K_{30} 値と K_{FWD} 値、 K_{HFW} 値との関係は、ほぼ 1:1 の関係にある。
- ・粘性土地盤よりやや剛性の高い砂質土地盤では、ほぼ 1:1.5 の関係にある。
- ・剛性の高い礫質土地盤では、ほぼ 1:2 の関係にある。

すなわち、地盤の剛性が低い範囲では、静的 K 値と動的 K 値はほぼ 1:1 の関係にあり、地盤の剛性が高くなるにつれて 1:2 の関係に近づくことがわかった。

(2) 2 層系地盤の場合、上層の厚さが載荷板の直径の約 40 倍程度以内では下層の剛性が上層より大きいと、上層表面で測定される K 値には下層の剛性が反映されることがわかった。

6. おわりに

過去の測定データをもとに、おおまかな土質ごとの静的 K 値と動的 K 値との関係を得たが、今後、FEM 解析等により今回得られた結果の詳細な検討を行う必要があると考える。

参考文献

- 1) (財)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，pp.41，1992.11
- 2) (財)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，pp.128，1992.11
- 3) 関根悦夫，村田修，阿部長門，丸山暉彦：FWD による鉄道盛土の締固め管理に関する研究，第 1 回舗装工学講演会講演論文集，pp.121～128，1996.12
- 4) 阿部長門，関根悦夫，村本勝己，中西太，丸山暉彦：FWD を用いた礫材料の締固め特性の評価，第 32 回地盤工学研究発表会，pp.2209～2210，1997.7
- 5) 阿部長門，関根悦夫，上浦正樹，三枝長生，丸山暉彦：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，pp.139～143，1997.12
- 6) 田附伸一，島峰徹夫，関根悦夫，阿部長門：FWD を用いた鉄道盛土の急速施工管理について，第 33 回地盤工学研究発表会，pp.2093～2094，1998.7
- 7) Palmer, L.A. and Barber, E.S. : Soil Displacement under a Circular Loaded Area, Proc.HRB, Vol.20, pp.279～286, 1940
- 8) 阿部長門，丸山暉彦，村田修，関根悦夫：FWD による鉄道盛土の締固め管理への適用について，土木学会第 51 回年次学術講演会概要集，第 V 部門，pp.40～41，1996.6

THE RIGIDITY EVALUATION METHOD OF EMBANKMENT USING FWD

Tomohiko KAMO, Etsuo SEKINE, Nagato ABE, Teruhiko MARUYAMA

The intensity of compaction in railway embankment is controlled by K_{30} -value in the plate loading test. However, the plate loading test takes much time and needs a large reaction equipment. Therefore, FWD was examined as a convenient method and substitution for plate loading test. As a result, K -value from FWD correlates with K_{30} -value, and it was confirmed that FWD could be applied to control compaction degree. For the purpose of using FWD practically as controlling compaction degree of embankment, test results was classified into every type of the soil, and relationship between rigidity of subgrade, K_{30} -value and K -value from FWD was summarized. As a result, it was found out that the relation between K -value from FWD and K_{30} -value were 1:1 when the rigidity of subgrade is low, also its relation became 1:2 when the rigidity is high.