

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：32665

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14805

研究課題名（和文）路床・路盤材の性能評価試験の精度と各関係性に関する基礎的研究

研究課題名（英文）Fundamental study on the accuracy of performance evaluation tests of basecourse and subgrade soil and their relationship to each other.

研究代表者

山中 光一（YAMANAKA, Kohichi）

日本大学・理工学部・助教

研究者番号：80733287

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、路床土を対象に(1)室内試験より得られる性能指標の測定精度に関する検討、(2)現場計測試験より得られる性能指標の測定精度に関する検討、(3)各性能指標の関係性に関する一考察を行った。その結果、室内試験ではCBR試験よりMr試験の方が、現場試験では平板載荷試験より小型FWDを用いた試験の方が路床土を精度よく評価できることを示した。また、得られた結果より各指標の関係式を示した。さらに、小型FWDから得られるたわみとMr試験結果を用いた多層弾性理論から得られるたわみの関係は、設置圧分布を考慮した解析と載荷速度の影響を考慮した係数をMEPDGモデルに乗じることで一致することを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

道路舗装においても性能照査型に移行したにもかかわらずその普及は進んでいないのが現状であり、その要因である路床・路盤材の的確な評価方法の確立に加え、従来の仕様規定型と性能照査型で用いる評価指標の関連性を解明していく必要が求められている。

本研究は、性能照査型を進める上でも、各試験の精度および関係性を、本研究を行うことで明らかとなった問題点を踏まえて新たな知見を提示した研究であると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we focused on subgrade soil and carried out (1) a study on the measurement accuracy of performance indicators obtained from indoor tests, (2) a study on the measurement accuracy of performance indicators obtained from on-site measurement tests, and (3) an investigation on the correlation between each performance indicator. As a result, it was shown that Mr test could obtain more accurate measurement results than CBR test in indoor tests, and in on-site tests, the test using a portable FWD could measure subgrade soil more accurately than the plate loading test. In addition, this study also showed the correlation between each indicator based on the results obtained. Furthermore, it was shown that the deflection obtained from the portable FWD and that obtained from the multi-layered elastic theory using Mr test match by applying a coefficient that takes into account the influence of loading speed and analysis of the distribution of ground contact pressure to the model.

研究分野：舗装工学

キーワード：路床・路盤材 性能照査型設計 性能指標 測定精度 レジリエントモデュラス 小型FWD

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

道路舗装は、従来の仕様規定型から性能照査型へ移行しつつあるが、その利用頻度は未だに低い。舗装の設計に性能照査型を適用するためには、路床を含めた舗装各層の性能を把握することが重要である。特に地盤材料である路盤では、表・基層の荷重支持、路床への荷重分散、路床では路盤の支持が求められており、性能を把握したうえで設計・施工が行われなければ舗装の品質や耐久性の低下につながる。

路床・路盤材の性能評価では、仕様規定型で用いられていた CBR に関する知見は多く存在するが、性能規定型で用いられている指標の精度に関しては検討例が少なく、同条件の地盤で各試験結果を比較した例はない。また、従来の仕様規定型の考え方から性能照査型に移行するに伴い、様々な性能照査手法の検討がされているが、 M_r 等のように性能指標が性能照査型設計方法の設計用値として直接用いられているものもあり、路床・路盤材の性能値を的確に把握しないと舗装構造は異なるものになってしまうことから、的確に評価できる手法を明らかにする必要がある。また、性能照査型に移行したにもかかわらずその普及は進んでいないのが現状である。現行の舗装は仕様規定型の設計方法（主に T_A 法）で設計されたものがほとんどであり、性能照査型の設計（多層弾性理論を用いた理論的設計等）との関連性が明らかにされていないことに加え、試験等から得られた結果の判断基準が確立されていないことにある。

以上のように、路床・路盤材の的確な評価方法の確立に加え、従来の仕様規定型と性能照査型で用いる評価指標の関連性を解明していく必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、同様の条件下における模型地盤を用いて、提案されている路床土における各性能評価手法から得られる指標を測定し、(1)各測定値の精度を評価することで適切に路床を評価できる指標を明らかにする、(2)各評価値の関係性を明らかにすることを目的とした。本目的を達成のために、(1)室内試験より得られる性能指標の測定精度に関する検討、(2)現場計測試験より得られる性能指標の測定精度に関する検討、(3)各性能指標の関係性の把握の検討を行った。

3. 研究の方法

(1) 室内試験より得られる性能指標の測定精度に関する検討

締固め度を変化（締固め度 $D_c = 85, 90, 95, 100\%$ ）させて作製した室内試験用供試体に対して室内試験（CBR 試験 JIS A 1211, レジリエントモデュラス M_r 試験 E016T）を実施し、各試験結果のばらつきを変動係数により評価を行った。室内試験用供試体は、鉄製のモールド内に締固めにより作製をしたものを用いた。使用する地盤材料には、申請者らが従来の研究で使用してきた山砂を用いた。

なお、レジリエントモデュラス試験より得られる試験結果は、 M_r と応力のみであるため、細分化したモデル地盤を対象とした構造解析により細分化した各層の弾性係数を対象とした。構造解析で求める舗装内応力に関しては、多層弾性解析プログラム GAMES を使用して算出した。

(2) 現場計測試験より得られる性能指標の測定精度に関する検討

締固め度を変化（上記と同様）させて作製した模型地盤を用いて現場計測試験（小型 FWD 試験、平板載荷試験 JIS A 1215）より各試験結果のばらつきを変動係数により評価を行った。模型地盤は、大型土槽内に模型地盤（幅 1200mm、奥行き 1100mm、高さ 800mm）を作製した。平板載荷試験については、JIS A 1215 に準拠して実施をしたが、小型 FWD 試験に関しては、試験に用いる載荷板の大きさに応じた所定の変形量になるように落下高さを調整して試験を行った。

(3) 各性能指標の関係性に関する一考察

各性能指標の関係性について考察を行った。その際、弾性係数については、各層の中央における応力を多層弾性解析プログラム GAMES により算出し、算出した応力を MEPDG モデル（式）に入力することにより各層の M_r を算出した。これら算出した各層の M_r を GAMES の入力値として用いて路床上端のたわみ量の算出を行った。ここで得られたたわみ量を式に算出することにより弾性係数 E_{M_r} を求め各試験結果との関係性を示した。

$$M_r = k_1 \cdot p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3} \quad \delta = \frac{2F(1-\nu^2)}{C \cdot a \cdot E}$$

ここで、 $k_1 \sim k_3$ ：材料定数、 θ ：主応力和、 τ_{oct} ：八面体せん断応力（主応力下では $\sqrt{2}\sigma_d/3$ ）、 σ_d ：偏差応力、 p_a ：大気圧（=101.3 kPa）、 δ ：地表面のたわみ（mm）、 F ：荷重（N）、 ν ：地盤のポアソン比、 E ：地盤の弾性係数（MPa）、 a ：円形載荷板の半径（mm）、 C ：荷重分布による形状係数

(等分布： $C=\pi$)

4. 研究成果

(1) 室内試験より得られる性能指標の測定精度に関する検討

表-1, 表-2 は, CBR 試験と Mr 試験の変動係数の結果を示したものである。表より, 各締固め度における CBR の変動係数は 0.25 程度であった。また, Mr の変動係数は, Mr 試験より算出した MEPDG モデルの材料定数が異なることから, 算出した層にもよって変動係数が異なる。解析時の地盤内応力に注目すると, 地盤表面から 1m 以内は地盤表面に作用した荷重の影響を受けるが, 1m 以深は自重の影響により Mr が変化する傾向が見られた。この点を考慮し, 1m 以内の各層の変動係数の平均値を算出すると, 変動係数は 0.12 であり, CBR 試験と比較して Mr 試験の方が変動係数は小さい傾向であった。この結果より, CBR 試験と比較して Mr 試験の方が, 試験から得られる結果のばらつきは少ないものと考えられる。また, CBR 試験より得られた CBR の最大値と最小値の差に注目すると, 締固め度が大きくなるにつれ差が大きくなっていることがわかる。これらの値を基に設計 CBR を算出すると, 締固め度 100% の場合, 最大値では設計 CBR が 20% となるが, 最小値では設計 CBR は 9% となり, $E=10CBR$ から得られる弾性係数の値は大きく異なることがわかる。

以上のように, 路床の弾性係数においては, 両試験のばらつきを考慮すれば CBR を用いて算出する $E=10CBR$ の式から得られる弾性係数よりも, Mr 試験と構造解析から算出した弾性係数の方が適切に評価できると考えられる。

表-1 CBR 試験の変動係数

目標締固め度 D_c (%)	85	90	95	100
最大値 (%)	6.0	14.1	15.6	23.9
最小値 (%)	3.0	6.0	10.6	9.0
最大値と最小値の差 (%)	3.0	8.1	5.0	14.9
CBR 変動係数	0.248	0.107	0.250	0.217

表-2 Mr 試験の変動係数

Layer	z[m]	変動係数			
		$D_c=100\%$	$D_c=95\%$	$D_c=90\%$	$D_c=85\%$
1	0.1	0.146	0.129	0.164	0.069
2	0.3	0.169	0.136	0.092	0.097
3	0.5	0.137	0.145	0.060	0.125
4	0.7	0.131	0.155	0.041	0.136
5	0.9	0.119	0.156	0.035	0.140
6	1.5	0.095	0.150	0.030	0.134
7	2.5	0.084	0.133	0.028	0.112
8	3.5	0.099	0.119	0.029	0.095
9	4.5	0.115	0.107	0.029	0.082
10	5.5	0.128	0.098	0.029	0.073
11	6.5	0.138	0.089	0.029	0.065
12	7.5	0.146	0.082	0.029	0.059
13	8.5	0.152	0.075	0.028	0.054
14	9.5	0.156	0.069	0.028	0.050

(2) 現場計測試験より得られる性能指標の測定精度に関する検討

表-3, 表-4 は, 模型地盤を用いて実施した小型 FWD 試験と平板載荷試験の結果を示したものである。小型 FWD 試験に関しては, 概ね 0.13 程度であるが, 平板載荷試験に関しては最大で 0.29 もの変動係数が得られた。

以上の結果を踏まえると, 小型 FWD 試験により求めた $K_{P,FWD}$ により評価を行った方がよりの確な評価を行えるものと考えられる。

表-3 小型 FWD 試験の変動係数

目標締固め度 D_c (%)	85	90	95	100
最大値 (MN/m^3)	136.0	146.8	198.0	148.7
最小値 (MN/m^3)	98.0	108.0	129.5	113.4
最大値と最小値の差 (MN/m^3)	38.0	38.8	68.5	35.3
$K_{P,FWD}$ 変動係数	0.137	0.134	0.185	0.135

表-4 平板載荷試験の変動係数

目標締固め度 D_c (%)	85	90	95	100
最大値 (MN/m^3)	74.0	136.0	172.0	190.4
最小値 (MN/m^3)	45.0	69.0	115.0	150.4
最大値と最小値の差 (MN/m^3)	29.0	67.0	57.0	40.0
K_{30} 変動係数	0.198	0.290	0.175	0.117

(3) 各性能指標の関係性に関する一考察

Mr 試験から得られる結果は, Mr と偏差応力等の関係のみであり, Mr は作用する応力の大きさによって得られる値が異なる。そのため本研究では, Mr 試験結果を米国の力学的・経験的舗装設計ガイド (MEPDG) に示されている一般化モデル (式) に適用させ, 解析モデルを用いた構造解析より得られた地盤内応力における Mr を算出した。構造解析には, 図-1 に示した構造解析モデルを用いた。解析モデルは, 地盤表面から 1m までを 0.2m ごとに, それ以降は 10m までを 1m ごとに分割し, 路床を層構造とするために 10m 以深には半無限のベッドロック層を設けた。Mr は, 各層の中央における応力を多層弾性解析プログラム GAMES により算出し, 算出した応力を MEPDG モデルに入力することにより各層の Mr を算出した。これら算出した各層の

M_r を GAMES の入力値として用い、路床上端のたわみ量の算出を行った。ここで得られたたわみ量を式に算出することにより弾性係数 E_{Mr} を求め各試験結果との関係性を示した。

図-2 は、各試験結果より得られた試験結果と締固め度の関係性を示したものである。 $K_{P,FWD}$ と K_{30} については、試験数が3本であることから平均値を用いて示した。 CBR と E_{Mr} に限るが、 CBR については各締固め度とも得られた結果の変動係数は 0.25 程あるが、 E_{Mr} に関しては $D_c=90\%$ を除いて 0.04 ~ 0.07 程度であった。 E_{Mr} の $D_c=90\%$ に関しては 0.25 程度の変動係数であり、他の締固め度と比較して大きな値となった。

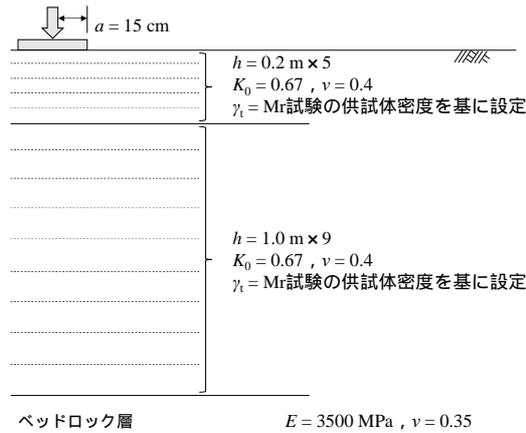
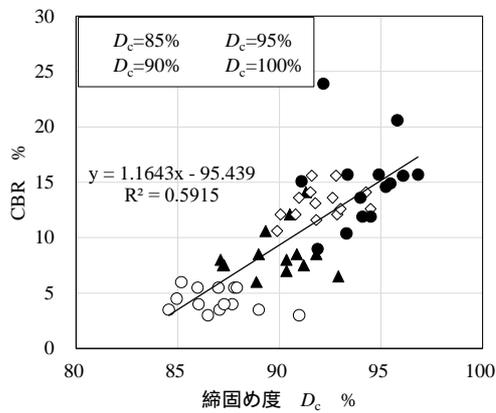
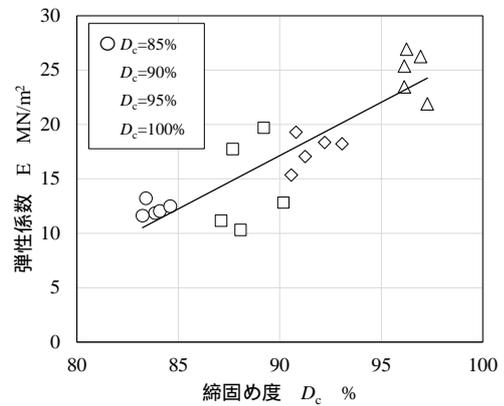


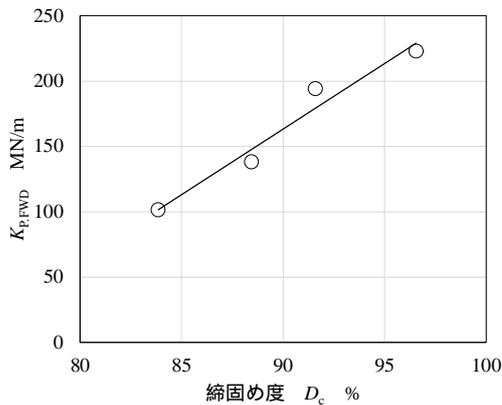
図-1 構造解析モデル



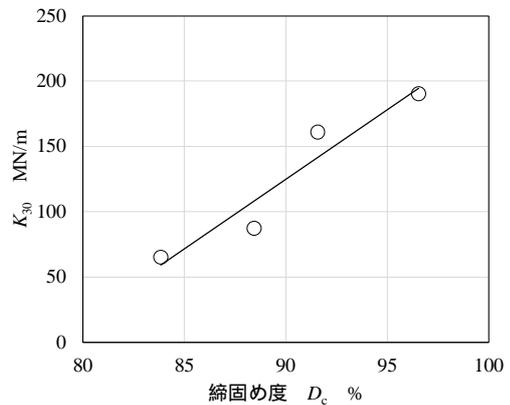
a) CBR



b) E_{Mr}



c) $K_{P,FWD}$



d) K_{30}

図-2 各試験結果と締固め度の関係

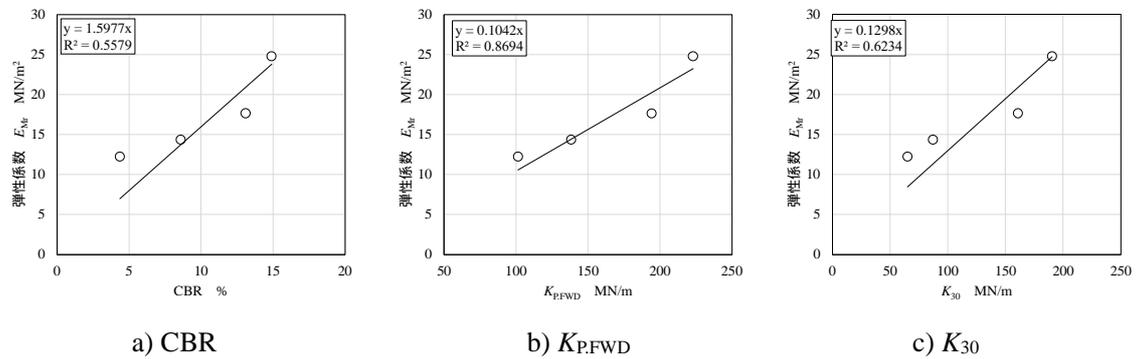


図-3 各試験結果と締固め度の関係

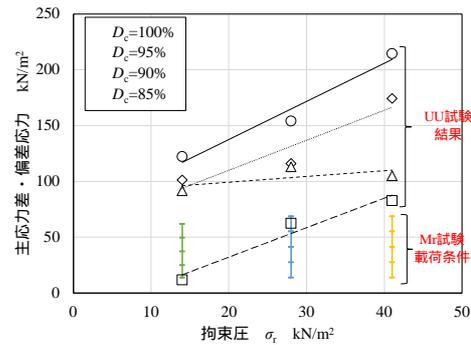


図-4 UU 試験における破壊強度と M_r 試験の载荷条件の関係

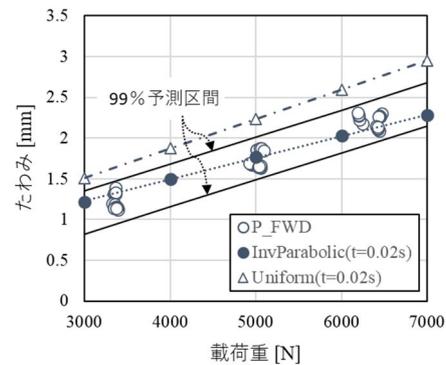


図-5 接地圧形状と载荷時間を考慮した順解析結果と小型 FWD 試験によるたわみの関係

図-3 は、本研究より得られた E_{Mr} と各試験結果から得られた指標との関係を示したものである。各図より、それぞれの関係性は $E_{Mr}=1.6CBR$ 、 $E_{Mr}=0.1K_{P,FWD}$ 、 $E_{Mr}=0.13K_{30}$ であった。また、それぞれの試験結果と E_{Mr} の関係は、 $E=10CBR$ のような線形関係ではなく非線形の傾向を示していることがわかる。特に、 CBR や K_{30} が小さい場合は線形関係の式から乖離する傾向であった。また、図-4 は UU 試験から得られた各破壊時の偏差応力と M_r 試験の载荷条件である偏差応力を拘束圧との関係で示したものである。図より、本研究で実施した $D_c=85\%$ の結果は、UU 試験から得られる破壊応力を超える応力を M_r 試験では载荷していることとなる。 M_r 試験と UU 試験は繰返し試験と静的試験の違いがあり、载荷によって供試体に作用する力積が異なることから $D_c=85\%$ の M_r 試験結果は破壊の傾向を示さなかったと考えられる。しかし、破壊強度を越えた载荷応力により算出した値が適切か否かは検討する必要がある。

また、本研究では、小型 FWD 試験から得られるたわみと M_r 試験結果を用いた多層弾性理論から得られるたわみの関係は一致しないことが知られているため、载荷速度と構造解析における設置圧分布を考慮した解析からその関係性について検討を行った。その結果、図-5 に示すように、構造解析時の設置圧分布の考慮および载荷速度の影響を考慮したキャリブレーションファクター を構造解析の MEPDG モデルに乗じることでよく一致することがわかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 山中 光一, 竹内 康, 川名 太, 峯岸 邦夫	4. 巻 26
2. 論文標題 路床のレジリエントモデュラスを用いた小型FWD試験の順解析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 舗装工学論文集第26巻	6. 最初と最後の頁 I_225-I_231
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejpe.77.2_I_225	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 穴倉直樹、山中光一、峯岸邦夫
2. 発表標題 路床土を対象とした Mr 試験と CBR 試験の測定精度
3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 荒木大空、山中光一、峯岸邦夫
2. 発表標題 路床土を対象としたレジリエントモデュラスと各試験結果の関係
3. 学会等名 第2回交通地盤工学に関する国内シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山中光一、峯岸邦夫、荒木大空
2. 発表標題 Mr試験とCBR試験の測定精度が路床上端の圧縮変形に及ぼす影響
3. 学会等名 第63回地盤工学シンポジウム
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------