

# 路床 CBR と弾性係数の関係式に関する検討

池田 茜<sup>1</sup>・竹内 康<sup>2</sup>・関根 悦夫<sup>3</sup>・川端 伸一郎<sup>4</sup>・山中 光一<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 日本道路株式会社 生産技術本部 技術部 (〒105-0004 東京都港区新橋 1-6-5)

E-mail : akane.iked@nipponroad.coc.jp

<sup>2</sup>正会員 東京農業大学 地域環境科学部 (〒156-8502 東京都世田谷区桜丘 1-1-1)

<sup>3</sup>正会員 株式会社 HRC 研究所 東京事務所 (〒101-0054 東京都千代田区神田錦町 2 丁目 5-4 第二亀谷ビル)

<sup>4</sup>正会員 北海道科学大学 工学部 都市環境学科 (〒006-8585 北海道札幌市手稲区前田 7 条 15 丁目 4-1)

<sup>5</sup>正会員 日本大学 理工学部 交通システム工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1)

土木学会 舗装工学委員会 舗装材料小委員会では、路床土の強度・変形特性を検討し、アスファルト舗装の性能照査型設計方法の発展に資するため、一斉試験として砂質土を用いた CBR 試験、レジリエントモデュラス試験を実施した。その結果、同一の乾燥密度における CBR のばらつきが大きく、含水比のみならず乾燥密度の影響も大きいことが明らかになった。レジリエントモデュラスは CBR 同様に乾燥密度や含水比の影響が大きいことが明らかになった。そして、CBR と弾性係数との関係について、本研究の結果を含めて国内外の研究結果を調査した結果、同一の CBR 値でも弾性係数は  $5 \times \text{CBR}$  から  $20 \times \text{CBR}$  の回帰線の範囲内に広く分布しており、CBR が小さい場合は  $20 \times \text{CBR}$  の回帰線に近づき、CBR が大きい場合は  $5 \times \text{CBR}$  の回帰線に近づく傾向が明らかになった。

**Key Words** : resilient modulus, elastic modulus, subgrade, design CBR,

## 1. はじめに

国内におけるアスファルト舗装の設計法は、仕様規定から性能規定へと変遷し、構造設計法は従来の  $T_A$  法から理論的な設計法へと移行している。舗装の構造設計は、 $T_A$  法も理論的・設計法も路床の支持力に基づいて行われ、 $T_A$  法では設計 CBR、理論的・設計法では弾性係数が用いられている。

性能照査において応答値を算定する際に多層弾性理論が一般的な構造解析手法として用いられている。多層弾性理論では、様々な設計条件に応じて材料定数(弾性係数やポアソン比)を変化させることで合理的な設計が可能となるが、材料定数、特に路床・路盤材料の弾性係数の決定には、レジリエントモデュラス試験(以下  $M_r$  試験と略す、量記号は  $M_r$  と称す。)を基本とする高度な試験と判断が必要となる。また、 $M_r$  試験を行わない場合は CBR から式(1)に示す換算式を用いて弾性係数を推定することがあるが、この換算式に用いられる CBR は Heukelom<sup>1)</sup>らが様々な周波数帯と荷重を設定できる Road Vibration Machine (道路振動器)によって測定した動的弾性係数を用いて導入したものである。Shell の設計法においても採用された実績を持つ。このほか、AI (米国アスファルト協

会)や英国等の舗装設計法においても同様の簡易式が用いられている<sup>2)</sup>。

$$E_{sg} = 10 \times \text{CBR} \quad (1)$$

ここに、 $E_{sg}$  : 路床の弾性係数(MPa)

CBR : CBR 試験による測定値(%)

路床の支持力の確認方法として CBR 試験が未だに多く利用されている。そのため、理論的・設計法において式(1)に示す簡易的な方法によって路床の弾性係数を求められることが多いのが現状である。CBR 試験は単純な貫入試験であるため厳密には土の剛性・強度を表していない等、多くの検討課題が含まれている。

そこで本研究は、アスファルト舗装の性能照査型設計方法の発展に資するため、路床土の強度・変形特性を把握することを目的として、砂質土を用いた室内 CBR 試験、 $M_r$  試験を実施した。そして、既往文献において竹内ら<sup>3)</sup>が整理した CBR と弾性係数の関係との整合性について検討を行った。なお、土木学会 舗装工学委員会 材料小委員会は舗装診断研究会 舗装診断装置検証委員会と共同で路床材料の剛性評価の検討を行っており、本研究はその一環として行ったものである。

表-1 試料の基本的性質

土粒子の密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.640
自然含水比 (%)	6.7
締固め方法	A-a 法
最適含水比 (%)	10.5
最大乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.939

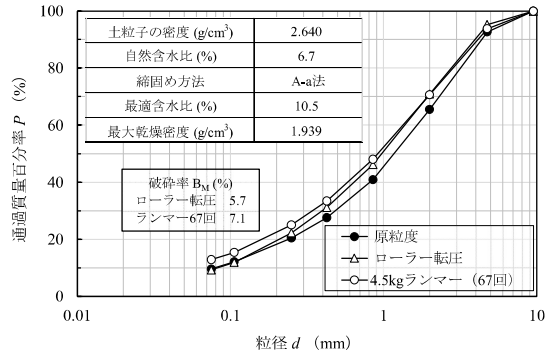


図-1 試料の粒径加積曲線

表-2 CBR 試験の供試体作製条件

条件	含水比	締固め条件	水浸条件
①	自然	4.5kg ランマー, 67回/層×3層	4日水浸
②	自然	4.5kg ランマー, 34回/層×3層	4日水浸
③	自然	4.5kg ランマー, 34回/層×3層	非水浸

※ 自然含水比=6.7%, 現場密度 (ローラー転圧) =1.882 g/cm<sup>3</sup>

表-3 参加機関の締固め方法と貫入装置

機関	締固め方法 (ランマー)	貫入装置
A・B	手動 (人力式)	ギア式 (電動)
C・D・E・F	自動 (機械式)	

表-4 M<sub>r</sub>試験の供試体作製条件

条件	設定条件		作製した供試体条件	
	乾燥密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	含水比 [%]	乾燥密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	含水比 [%]
①	1.940	6.7	1.914	6.5
②	1.880	12.0	1.892	11.3
③	1.880	6.7	1.883	6.6

## 2. 現場密度および含水比を考慮した室内 CBR 試験とレジリエントモデュラス試験

### (1) 試験概要

#### a) 使用材料

実験に用いた試料の粒度を図-1 に、基本的性質を表-1 に示す。試料は砂質土に分類されるまさ土である。図中に示すように破碎率 B<sub>M</sub> は 6~7%程度であり、粒子破碎が生じやすい試料である。

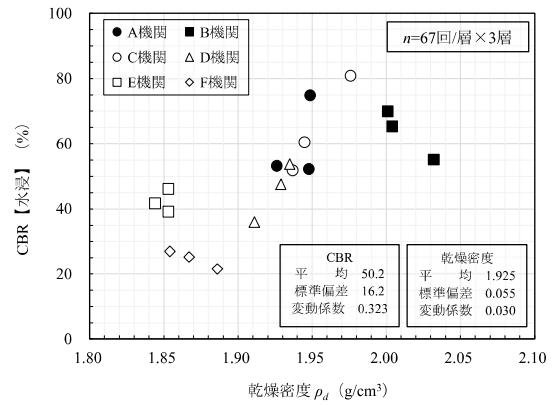


図-2 各機関で得られた設計 CBR (n=67 回)

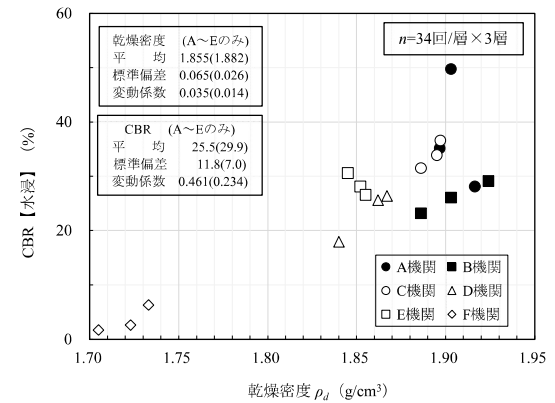


図-3 現場密度相当の CBR 【水浸条件】

### b) 試験方法

室内 CBR 試験の供試体作製条件を表-2 に示す。条件①は路床土を対象とした設計 CBR を算出するための条件である。以下、条件①で得られた CBR を設計 CBR と称す。条件②と③は本実験とは別に実施された原位置試験での現場密度に相当する乾燥密度を条件とした。原位置試験での現場密度に相当する乾燥密度は、事前にランマーの落下回数 (n) と乾燥密度の関係を求め、ランマーの落下回数 (n) を n=34 回とした。条件③は原位置での現場 CBR 試験<sup>4)</sup>で得られた CBR (以下、現場 CBR) との比較が可能な条件である。CBR 試験は奥村組土木興業(株)、千葉エンジニアリング(株)、(株) 佐藤渡辺、東亜道路工業(株)、日本大学、北海道科学大学の計 6 機関で実施した結果であり、表-3 に示す通り、締固め方法と貫入装置が異なる。

M<sub>r</sub>試験は、「舗装調査・試験法便覧 E016」に準拠し、載荷時間 0.1 秒、無載荷時間 0.9 秒のハーバーサイン波の載荷波形とし、拘束圧は 3 条件 (41.4kPa, 27.6kPa, 13.8kPa) とした。供試体は直径 100 mm、高さ 200 mm とした。表-4 に供試体の乾燥密度と含水比条件および試験実施時に作製した供試体の乾燥密度と含水比の結果を示した。載荷荷重と変位は三軸室の外部に設置した、それぞれロードセルと 2 本の差動トランス (LVDT) で取得した。

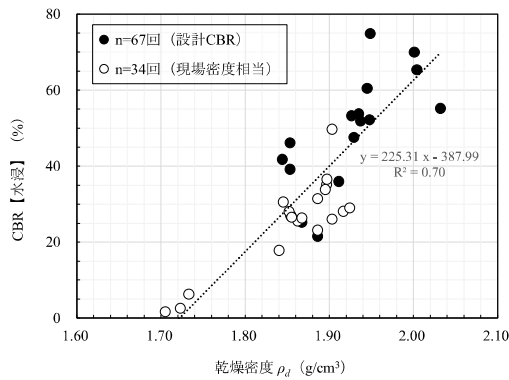


図4 乾燥密度と CBR の関係【水浸条件】

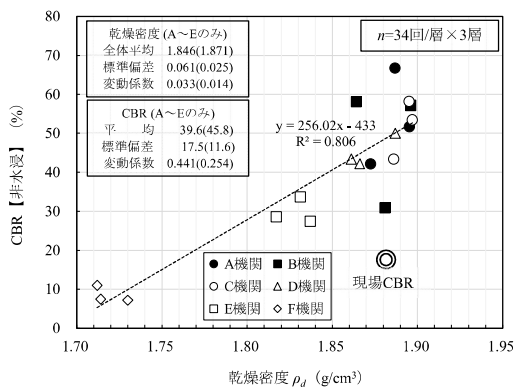


図5 現場密度相当の CBR【非水浸条件】

(2) 試験結果

図-2 は各機関で得られた設計 CBR (条件①,  $n=67$  回) である。この結果からランマーの落下回数も同一でも、締め装置の特性と思われる供試体密度のばらつきが大きく、その大小に応じて CBR も変化することが分かる。CBR は 20~80% の範囲で大きく変動しており、その変動係数は 0.323 と非常に大きい。●と■で示した 2 つの機関は人力でのランマー締めめであり、機械式の 4 機関と比較すると密度は総じて高い傾向にある。

図-3 は条件②の現場密度相当 ( $n=34$  回) の CBR である。 $n=67$  回 (図-2) とほぼ同様に供試体密度のばらつきが大きく、その大小に応じて CBR も変化していることがわかる。機関 F のみ特異な結果となったことから、図中に記した平均値などは、機関 F を除いた値を ( ) で併記した。図-4 は締め回数のみ異なる条件①と②の乾燥密度と CBR の関係であり、両者には明らかな相関関係がみられる。図-5 は、条件③、現場密度相当 ( $n=34$  回) の非浸水での CBR である。機関別の密度の大小関係など、傾向は他の条件と同一である。この相関式から、現場密度に相当する CBR を求めると 48.8% となり、図中に○で示した現場 CBR (17.6%) と比較すると 2.8 倍となる。よって、安易に現場の密度条件などを一致させて実施した CBR 試験結果を現場 CBR 結果の代用とすると危険側の評価となることを十分に理解することが必要である。

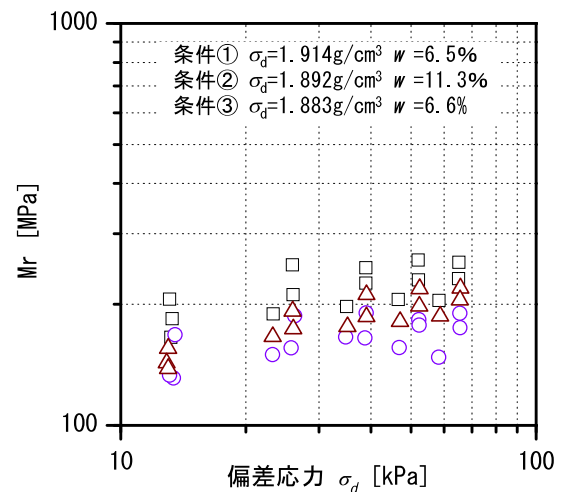


図6 偏差応力 $\sigma_d$ と  $M_r$  の関係

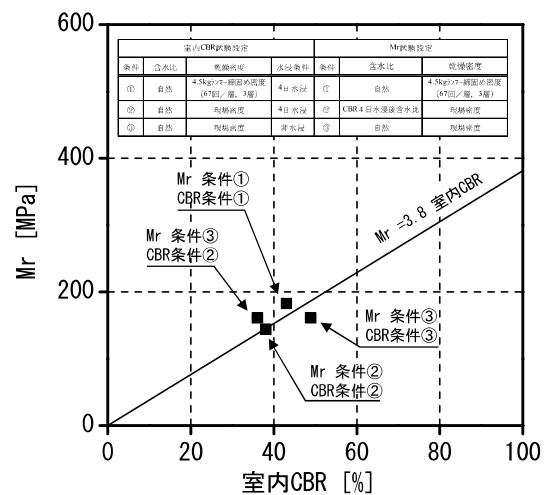


図7 室内 CBR と  $M_r$  の関係

次に  $M_r$  試験における偏差応力 $\sigma_d$ と  $M_r$ との関係を図-6 に示す。 $M_r$ は鉛直復元変位と平均偏差応力の最大値を用いて算出した値である。供試体条件製条件によらず、偏差応力 $\sigma_d$ の増加に伴い、 $M_r$ は増大することが分かる。乾燥密度が異なる条件①と条件③の  $M_r$ を比較した場合、偏差応力によらず、条件③より条件①の方が大きい。そして、含水比が異なる条件②と条件③を比較すると、条件②より条件③の方が大きい。よって、本試験で用いたまき土は、乾燥密度の増大に伴い、 $M_r$ は増加し、含水比の増加に伴い、 $M_r$ は減少する傾向を示した。

3. CBR と弾性係数との関係

(1) 本研究の CBR と弾性係数の関係

CBR と  $M_r$  の関係を図-7 に示す。CBR は表-2 に、 $M_r$  は表-3 に示した条件ごとの関係を示した。ここに示す  $M_r$

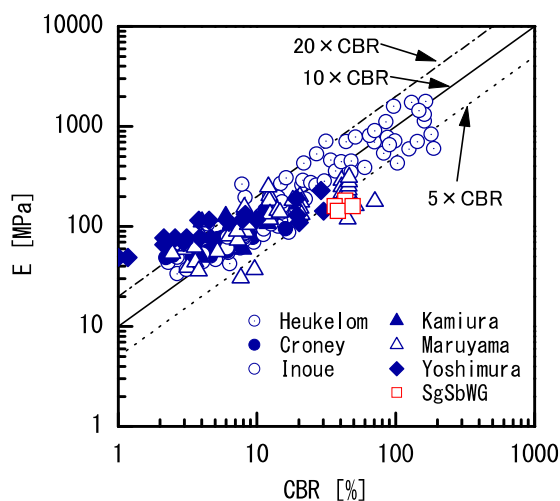


図-8 既往の研究と本研究による CBR と弾性係数の関係

は、既往研究<sup>9)</sup>を参照し、細分化した路床各層の中央における弾性係数から算出した路床上端のたわみを、既存のたわみ式<sup>9)</sup>に入れることで弾性係数を算出した。

CBRは $M_r$ 試験供試体の乾燥密度と図-4、図-5に示す乾燥密度とCBRの関係より得られた線形近似式より算出した値を用いた。図-5より、 $M_r$ とCBRは乾燥密度の増加、含水比の低下により増加傾向が見られる。 $M_r$ とCBRは正の相関を示し、本研究の結果は $M_r=3.8 \times \text{CBR}$ で示される。

## (2) 既往の研究データと本研究における CBR と弾性係数の関係

式(1)の適用性に関する研究が丸山ら他<sup>7)~11)</sup>によって行われている。図-8は、竹内らが参考文献1), 5)~9)に示されたデータをプロットしたものに、本研究の結果(凡例: SgSbWG と記載)を加えた図である。本研究の $M_r$ 試験実施時の供試体密度から算出した CBR 値 36~49 %の時の $M_r$ を縦軸にとり、記載した。本研究の結果は丸山らや吉村らの研究結果と同様の傾向を示しており、CBR が 20 % 以上の場合、 $5 \times \text{CBR}$  の回帰線に近づいている傾向が見て取れる。CBR が 20 % 以下の場合には  $20 \times \text{CBR}$  の回帰線に近づく傾向が明らかになった。

さらにデータ群は  $5 \times \text{CBR}$  から  $20 \times \text{CBR}$  の回帰線の範囲内に広く分布していることがわかる。また、CBR が 8 ~ 12 % のデータに注目すると、弾性係数は 20 ~ 300 MPa と大きな差が生じていることがわかる。このような弾性係数のバラツキは本研究の CBR 試験結果で示したとおり、CBR 値のばらつきが大きさが根底にあると推察される。アスファルト舗装の理論的設計において、弾性係数は重要な設計値であり、弾性係数のばらつきの影響は路床上面での鉛直方向ひずみから求める路床の永久変形解析結果にも直接的に受けることとなる。今後、竹内ら<sup>3)</sup>が示した信頼度を考慮したより合理的な簡易算出式を用いて設計値を定めることが必要と考える。

## 4. まとめ

今回の一斉試験は路床土の強度・変形特性を明らかにすることを目的として、まさ土に対して CBR 試験、 $M_r$  試験を実施した。その結果を以下に示す。

- (1) CBR 試験より、CBR は実施機関別の供試体密度のばらつきが大きく、その影響で CBR が変化することが明らかになった。そして、乾燥密度の影響も大きいため、CBR 試験供試体の密度管理が重要である。
- (2) CBR と  $M_r$  の関係より、CBR から  $M_r$  を推定する場合には乾燥密度、含水状態を十分に考慮することが必要であることがわかった。
- (3) CBR が大きい場合、 $5 \times \text{CBR}$  の回帰線に近づき、CBR 小さい場合は  $20 \times \text{CBR}$  の回帰線に近づく傾向が明らかになった。

最後に、一斉試験を行うに当たり材料のご提供を頂いた舗装診断研究会 舗装診断装置検証委員会に深謝する次第である。

## REFERENCES

- 1) Heukelom, W. and Klomp, A. J. G. : Dynamic Testing as a Means of Controlling Pavements during and after Construction, Proc. of Int. Conf. on Structural Design of Asphalt Pavements, pp.635-652, 1962.
- 2) 土木学会：地盤工学委員会 舗装工学研究小委員会報告書, pp.II-12~II-18, 1997.
- 3) 竹内康, 毛世華, 岡澤宏, 木幡行宏, 西澤辰男: 信頼性を考慮した路床弾性係数の簡易算出式の提案, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.67, No.3, I\_95-I\_101, 2011.
- 4) 公益社団法人 日本道路協会: 舗装調査・試験法便覧 (平成 31 年版) S041, 2019.
- 5) 山中光一, 竹内康, 川名太, 峯岸邦夫: 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, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.77, No.2, I\_225-I\_231, 2021.
- 6) Pavana K.R.Vennapusa and David J. White : Comparison of Light Weight Deflectometer Measurements for Pavement Foundation Materials, Geotechnical Testing Journal, Vol. 32, No. 3, pp.239-251, 2009.
- 7) 丸山暉彦, 姫野賢治, 林正則: FWD たわみ測定による舗装の健全度調査, 舗装, Vol.24, pp.3~8, 1989.
- 8) 吉村啓之, 中村悟志, 森嶋洋幸: FWD による路床 CBR の推定, 第 22 回日本道路会議論文集, pp.694~695, 2004.
- 9) 井上武美: アスファルト舗装の支持力性能の評価と修繕設計に関する研究, 早稲田大学博士論文, 1994.
- 10) 上浦 正樹: 多層弾性理論と供用性を考慮した鉄道貨物ヤード舗装の設計および維持修繕に関する研究, 長岡技術科学大学博士論文, 1996.
- 11) D. Croney and P. Croney : The Design and Performance of Road Pavements Second Edition, McGraw-Hill, 1991.