2021 年 第 21 卷 第 31 期
2021, 21(31): 13491-06

科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering

ISSN 1671—1815
CN 11—4688/T

引用格式:刘 君, 牛军贤, 崔 明. 路基非饱和土动态回弹模量计算模型对比研究[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(31): 13491-13496.
Liu Jun, Niu Junxian, Cui Ming. Classification and comparison of modulus of resilience calculation models of subgrade unsaturated soil[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(31): 13491-13496.

路基非饱和土动态回弹模量计算模型对比研究

刘 君, 牛军贤, 崔 明
(中国有色金属工业西安勘察设计研究院有限公司, 西安 710054)

摘 要 作为路面结构设计的关键参数,对动态回弹模量的可靠计算一直是工程界不断探索的课题。收集并分析中外已有关于路基土回弹模量的计算模型,根据自变量的不同属性,将计算模型归为两大类,第一类为将应力水平作为变量(I 型),第二类是将表征湿度状态的基质吸力作为变量,这其中又分为两个子类,一是将基质吸力引入耦合到应力变量中(II_1 型);二是将基质吸力剥离出来作为独立变量(II_2 型)。然后结合 2 种土样的循环动三轴试验数据,对 3 类计算模型的可靠性及适用性进行对比评价。结果表明:将基质吸力作为单独变量(II_2 型)的计算模型能更真实地反映非饱和路基土动态回弹模量的变化规律,拟合度较高。

关键词 非饱和土; 路基土; 动态回弹模量; 计算模型; 对比研究
中图法分类号 U213.1; **文献标志码** A

Classification and Comparison of Modulus of Resilience Calculation Models of Subgrade Unsaturated Soil

LIU Jun, NIU Jun-xian, CUI Ming
(China Non-ferrous Metals Industry Xi'an Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

[**Abstract**] As a key parameter of pavement structure design, the reliable calculation of dynamic modulus of resilience has been a subject of constant exploration in the engineering field. The existing calculation models of subgrade soil resilient modulus at home and abroad were extensively collected and thoroughly analyzed. According to the different properties of independent variables, the calculation models were divided into two categories. The first one was to take the stress level as the independent variable (i.e. type I), the second was to take the matrix suction which represents the humidity state as the independent variable, which was divided into two sub categories, one was to introduce the matrix suction into the stress variable (i.e. type II_1). The second was to separate the matric suction as an independent variable (i.e. type II_2). Based on the cyclic dynamic triaxial test data of two kinds of soil samples, the reliability and applicability of the three calculation models were compared. The results show that the matrix suction as a separate variable and the stress variable in the form of product can more truly reflect the response law of resilient modulus.

[**Keywords**] unsaturated soil; subgrade soil; dynamic modulus of resilience; calculation model; comparative study

随着路基路面设计理论发展及工程实践积累,将动态回弹模量作为路基路面结构设计的核心参数已得到工程界普遍共识[1-2],且被越来越多的中外行业权威标准、规范所采纳,用以表征车轮往复荷载作用下路基土的应力-应变非线性力学特性和支撑能力。

获取回弹模量的常用方法主要有室内试验、现场试验及计算模型(数学方法)3 类。对于室内试验,即循环动三轴试验,试验手段常规、操作简便,但基质吸力的测试存在较大误差,一来在测试基质吸力方面受人为因素影响较大,且三轴加载会引起基质吸力的变化,因而采用试验结束的测值无法反映其变化过程。为此,学者们对传统循环加载动三轴仪不断加以改进,嵌入最新的测试技术[3](如基质吸力探头器、土水热耗散计等),旨在更可靠测量试验过程中实时的基质吸力。先进的测试技术也带来一系列弊端,如设备成本高昂、技术门槛高等。对于现场试验,因具体的物理力学边界条件,可获取可靠的测试结果。然而对于不同工况,需进行大量试验并配合室内试验对结果进行修正计算,工作量巨大。相比前 2 种方法,基于主要影响因子建立数学计算预估模型的方法,适应性强、计算精度高、

收稿日期: 2021-03-24; **修订日期**: 2021-08-10
基金项目: 陕西省自然科学基金(2017JM5043)
第一作者: 刘 君(1973—),男,回族,甘肃平凉人,硕士,高级工程师。研究方向:工程勘察设计测绘、路基工程、地灾治理、工程检测。E-mail:liujun123hy@163.com。

参数物理意义明确且节约时间资金成本,优势明显。为此,国内外学者基于不同影响因素建立诸多回弹模量预估模型,这些因素就包括应力状态[4-5]、湿度状态[6-7]以及物理指标[8-9]等。然而由于各个模型考虑的侧重点及主要因素不同,导致其适用范围受到很多限制且彼此间存在较大差异,使得研究成果难以在工程中得到参考应用。基于此,现对繁杂的既有预估模型进行深入剖析,将影响动态回弹模量主要因素进行辨别归类,可分为应力水平(表征约束程度)和基质吸力(表征湿度状态[10])。然后以二者或二者组合作为自变量,整合出 3 种回弹模量计算模型(代号为 I 型、II_1 型和 II_2 型),并结合试验数据进行对比评价,旨在探讨何种计算模型在数学逻辑上更合理,计算精度更高,考虑因素更全面,更符合实际路基土动态回弹模量的变化规律。

1 回弹模量计算模型

1.1 基本概念

Seed 等[11]从大量试验数据中分析得出在轮载作用下沥青路面疲劳损坏与路基土动态回弹特性息息相关,并首次提出路基土动态回弹模量的这一概念,建立对应数学模型,即

$$M_R = \sigma_d/\varepsilon_r \tag{1}$$

式(1)中:M_R 为材料动态回弹模量;σ_d 为偏应力最大值;ε_r 为回弹变形。

自从 Seed 等[11]提出回弹模量的定义后,中外学者基于不同影响因素相继提出诸多计算模型。总的来说,围绕约束程度和路基土湿度状态为主要影响因子,将计算模型分为两大类,即以应力水平为自变量的计算模型(I 型)和以基质吸力为自变量的计算模型(II_1、II_2 型)。

1.1 应力水平为变量的计算模型(I 型)

以应力水平为变量的计算模型(I 型)经过一个逐步趋于完善的过程。从最初仅仅将体应力作为自变量,后来又引入循环偏应力,再到引入八面体剪应力(可考虑中间主应力的影响)[12]。在 I 型计算模型中回弹模量最为典型的计算式为

$$M_R = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a}\right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1\right)^{k_3} \tag{2}$$

式(2)中:k_1、k_2、k_3 为模型参数;p_a 为标准大气压强;θ 为体应力,$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$,其中 σ 为主应力;τ_{oct} 为八面体应力,$\tau_{oct} = \sqrt{(\sigma_1-\sigma_2)^2 + (\sigma_1-\sigma_3)^2 + (\sigma_2-\sigma_3)^2}/3$。

式(2)被美国路面设计指南(AASHTO 2004)所采纳。由于式(2)中只有应力变量,而缺失反映湿度状态(随环境而变化)的变量,对路基土湿度状态对回弹模型影响的表征靠模型参数来反映。而模型参数的取值具有较强经验性,其适用性受到很大限制。

1.2 湿度状态为变量的计算模型(II_1 型)

过去采用含水率来衡量路基土湿度状态存在严重的缺陷,即在含水率相等的情况下路基动态回弹模量有较大差距。随着非饱和土力学理论研究的深入,采用基质吸力表征土的湿度状态在学术界取得了广泛共识,这一新理念在很大程度上推动了路基土回弹模型计算模型的发展。随后,许多学者在应力模型(I 型)的基础上,根据有效应力原理或热力学定律结合非饱和土力学原理,提出将路基土基质吸力作为新增自变量,并将其耦合引入应力变量中,从而得到计算模型 II_1 型[13],其中较为典型的计算式为

$$M_R = k_1 p_a \left(\frac{\theta + S_r^{k_0}\psi}{p_a}\right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1\right)^{k_3} \tag{3}$$

式(3)中:k_0 为模型参数,反映路基土赋水能力;ψ 为路基土基质吸力;S_r 为土体饱和度。

从式(3)可以看出,基质吸力 ψ 和体应力 θ 被耦合在一个乘积因子中作为整体变量来考虑。虽然该模型(II_1 型)考虑因素较为全面,但与体应力相比,基质吸力对路基土回弹模量的影响程度不同,因此在选择基质吸力影响程度系数(k_0、k_1)上受人为因素影响较大,从而降低了计算结果的可靠性和精度。

1.3 湿度状态为变量的计算模型(II_2 型)

为了解决上述矛盾,有学者建议将基质吸力从应力变量中剥离作为独立的变量建立计算模型[14],即 II_2 型。改进后的较为典型的回弹模量计算式为

$$M_R = k_0 p_a \left[\ln\left(\frac{\psi}{p_a} + e\right) + k_1\right] \left(\frac{\theta_m}{p_a}\right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1\right)^{k_3} \tag{4}$$

式(4)中:k_0、k_1、k_2、k_3 均为模型参数;θ_m 为体应力最小值($\theta_m = \theta - \sigma_d$),其中 σ_d 为偏应力;引入 θ_m 是为了将体应力中约束效应(硬化)和剪切效应(软化)分离开来。

从式(4)中可以看出,基质吸力 ψ 从应力变量(最小体应力 θ_m)中剥离出来作为独立的变量因子,这样很好地解决了式(3)需人为确定基质吸力对回弹模量影响系数的问题。

2 计算模型的验证对比

为对比 3 种计算模型(I 型、II_1 型、II_2 型)的可靠性,本文中参考文献[15]土样(A 土样)和文献[16](B 土样)的试验数据进行验证分析。2 篇文献中开

展的循环动三轴试验工况类别(不同应力水平及湿度范围)基本囊括了中国路基工程所处的所有状态,其试验参数及土样物性指标分别如表 1 和表 2 所示,其中动三轴加载波形均采用半正弦模式。

表 1　三轴试验参数

Table 1　Triaxial test parameters

试验参数	A 土样[15]	B 土样[16]
含水率/%	21.2, 23.5, 25.9, 28.2, 30.6	9.1, 11.3, 14.6, 16.1, 20.3
偏应力/kPa	10, 20, 30, 40	20, 40, 55, 70
围压/kPa	10, 20, 30, 40	30

表 2　试验组别

Table 2　Test group

土样	干重度/($kg\cdot m^{-3}$)	最佳含水率/%	液限/%	塑性指数/%	土类别
A	15.6	23.5	57	28	高液限黏
B	17.6	16.3	43	14	低液限粉

为了方便下文对计算模型拟合度进行评价,借用统计学中的概念,预测模型的拟合度通常由可决系数 R^2来度量,当可决系数 $R^2 \geqslant 0.9$ 时,认为拟合度良好;当 $0.7 \leqslant R^2 < 0.9$ 时,认为拟合度较好;当 $0.4 \leqslant R^2 < 0.7$ 时,认为拟合度合格;当 $R^2 < 0.4$ 时,认为拟合度不合格。

2.1　采用 I 型计算模型进行拟合

以式(2)代表 I 型计算模型,拟合 A、B 土样的动态回弹模量试验数据。由于式(2)缺乏表征湿度状态的变量,为了验证其对同一类土不同湿度状态下(见表 1,共 5 组含水率)动态回弹模量的计算精度,设置 2 种方案进行拟合,一是将不同湿度下的试验数据(以 5 个样本的形式)单独分开进行拟合,二是将所有湿度状态的数据(以一个样本的形式)统一进行拟合分析。图 1 所示为 A、B 路基土样动态回弹模量的计算值与试验值拟合情况。

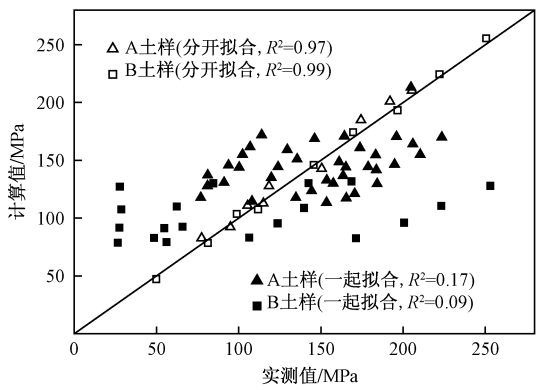

图 1　式(2)计算路基土回弹模量的拟合关系图

Fig. 1　Fitting relation diagram for calculating resilient modulus of subgrade soil by the equation (2)

从图 1 中可知,将不同湿度状态的土样(A、B)分开拟合与不同湿度状态土样捆绑一起进行拟合,可决系数 R^2差异很大。当将不同湿度土样试验值分开进行拟合时,A、B 土样的拟合均良好,可决系数 $R^2 > 0.97$;而当将所有湿度土样试验值一起进行拟合时,可决系数 $R^2 < 0.3$,拟合度不合格。出现这种现象的根本原因在于 I 型计算模型中缺少直接表征湿度状态的变量因子,运用式(2)分别拟合不同湿度状态的路基土(同一种土样 A 或 B)时,也即路基土湿度状态保持不变,因而影响回弹模量的主要是应力水平,因而拟合度很好;而运用式(2)将不同湿度状态的路基土一起进行拟合,得到的模型参数无法反应所有湿度状态,因而对回弹模量的拟合度就很差。因此,以应力为自变量的计算模型在计算路基土回弹模量方面只适用于湿度状态保持不变的土样,而路基土的湿度状态随时间和空间是不断变化的。可见,以应力为变量的 I 型计算模型仍存在较大不足。

2.2　采用 II_1型计算模型进行拟合

与 I 型计算模型最大的不同在于 II_1型引入了表征湿度状态对回弹模量影响的基质吸力变量,并将其与应力变量捆绑在一个变量因子中。以式(3)代表 II_1型计算模型,拟合 A、B 土样的动态回弹模量试验数据,图 2 表示 A、B 土样采用式(3)预估回弹模量计算值与试验值对比,经拟合得到的模型参数见表 3。对 A 土样,可决系数 $R^2 = 0.97$,对 B 土样,可决系数 $R^2 = 0.98$,采用式(3)估算动态回弹模量的拟合度均良好。

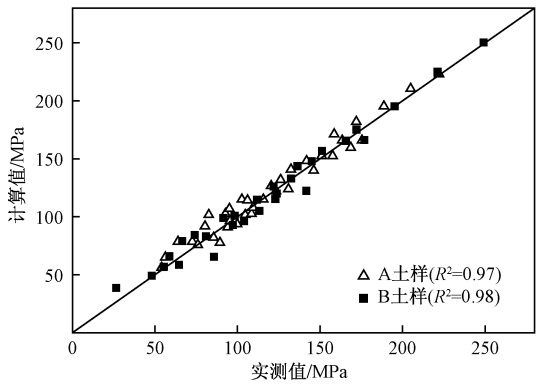

图 2　式(3)计算路基土回弹模量的拟合关系图

Fig. 2　Fitting relation diagram for calculating resilient modulus of subgrade soil by equation (3)

表 3　式(3)拟合分析结果

Table 3　Fitting analysis results by the equation (3)

土样	k_0	k_1	k_2	k_3	R^2	拟合度
A	3.67	0.61	0.87	−1.89	0.97	很好
B	1.13	0.49	2.96	−6.30	0.98	很好

式(3)应力变量中耦合了基质吸力因子,为了反映路基土动态回弹模量随基质吸力的变化规律,运用式(3)计算 A、B 土样在不同应力状态(偏应力 σ_d)下回弹模量随基质吸力的关系曲线,并与三轴试验值对比,如图 3 所示。

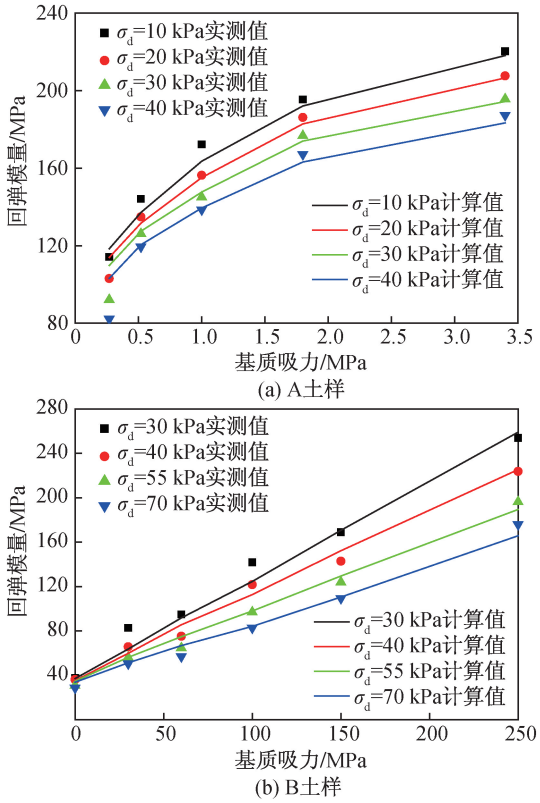

图 3 路基土动态回弹模量的式(3)计算值与实测值对比

Fig. 3 Comparison between calculated value and measured value of dynamic resilience modulus of subgrade soil in the formula (3)

从图 3 中可知,不同动循环偏应力 σ_d 下 A、B 土样动态回弹模量与基质吸力均呈非线性增加趋势,即基质吸力越大,路基土回弹模量也越大。对于图 3(a)中 A 土样,当基质吸力处于较低水平(1 MPa 以下)时,其对动态回弹模量增长贡献较大(曲线较陡),而当基质吸力处于较高水平(1 MPa 以上)时,对回弹模量的增长贡献逐渐减弱(曲线较缓)。

再来分析动循环偏应力对回弹模量的影响。在三轴试验研究中普遍认为,偏应力对散粒体材料(如路基土)有应力软化效应[17],随着循环偏应力的增大,土样回弹模量逐渐减小,即二者呈负相关关系。再结合图 3,当基质吸力不变的情况下,土样回弹模量与动循环偏应力呈负相关关系,而基质吸力与路基土动态回弹模量呈正相关关系。因此,式(3)同时将基质吸力(正相关)和隐含在体应力 θ 中的偏应力(负相关)耦合到一个变量因子中,这就必然导致计算模型参数 k_2 或正或负,这取决于基质吸力和动循环偏应力对土样回弹模量的影响程度。因此,以式(3)为代表的 II_1 型计算模型将基质吸力和循环偏应力因子捆绑作为变量的计算模型存在内在的缺陷。因此,将基质吸力从应力变量中分离出来作为独立变量更符合土力学客观规律。

2.3 采用 II_2 型计算模型进行拟合

由此发展了 II_2 型计算模型,其与 II_1 型最大的区别在于将表征湿度状态的基质吸力变量从应力变量中分离出来,单独作为变量因子对回弹模量产生影响,这样从根本上避免了应力变量与基质吸力变量内在捆绑效应。同时考虑到 II_1 型计算模型中体应力 θ 包含围压 σ_3 和循环偏应力 σ_d,若围压保持不变,体应力与循环偏应力呈正相关关系,则路基土回弹模量随体应力的增大而减小。而在三轴试验中,体应力对土样的力学行为表现为应力硬化,即起约束的作用,其与回弹模量的数学关系应为正相关关系才符合客观规律。为解决这一矛盾,文献[18]通过定义最小体应力 θ_m(只包含约束效应),将体应力中约束成分和剪切成分剥离开来。

以式(4)代表 II_2 型计算模型,拟合 A、B 土样回弹模量实测数据,图 4 所示为 A、B 土样采用式(4)预估回弹模量计算值与试验值对比,经拟合得到的模型参数见表 4。对 A、B 土样,可决系数 $R^2 > 0.97$,拟合度均很好。

运用式(4)计算 A、B 土样在不同应力状态(围压或偏应力)下路基土回弹模量随基质吸力的关系曲线,并与试验值对比,如图 5 所示。

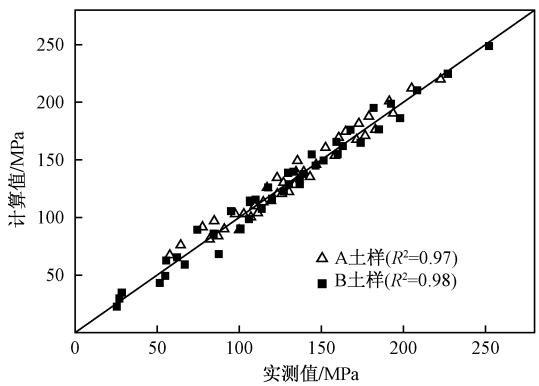

图 4 式(4)计算路基土回弹模量的拟合关系图

Fig. 4 Fitting relation diagram for calculating resilient modulus of subgrade soil by the equation (4)

表 4 式(4)拟合分析结果

Table 4 Fitting analysis results by the equation (4)

土样	k_0	k_1	k_2	k_3	R^2	拟合度
A	0.58	0.29	0.18	-1.22	0.97	很好
B	5.26	-0.88	1.00	-2.83	0.98	很好

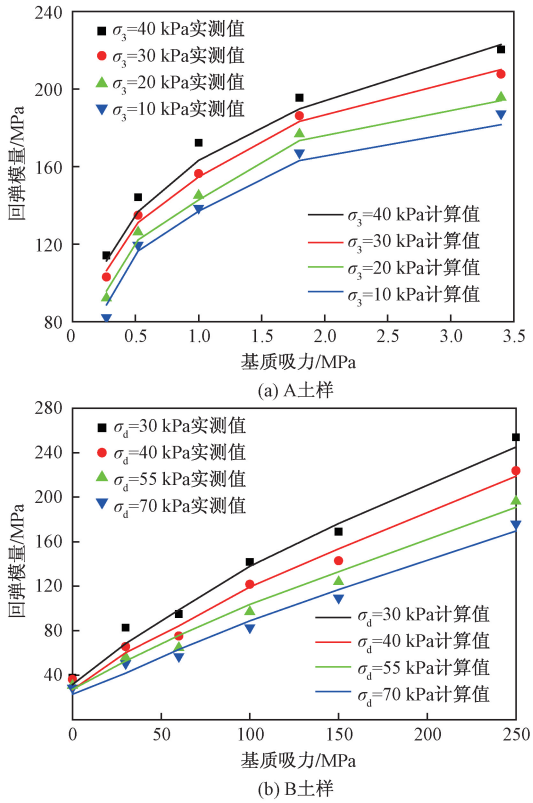

图 5　路基土动态回弹模量的式(4)计算值与实测值对比

Fig. 5　Comparison between calculated value and measured value of dynamic resilience modulus of subgrade soil in the formula (4)

从图 5 中可以看出,式(4)计算的在不同应力水平下(围压或偏应力)动态回弹模量随基质吸力的关系曲线大致呈非线性增加趋势,且与试验数据吻合较好。同时注意到不同应力水平下预估曲线并不是平行关系,这说明不同基质吸力下应力水平对路基土回弹模量的影响程度是不同的,这与实际情况也是相适应的。另外,图 5 也印证了围压的约束效应(硬化)对动态回弹模量的正贡献,及动循环偏应力的剪切效应(软化)对动态回弹模量的负贡献。

4　结论

通过对动态回弹模量计算模型的广泛调研分析,根据回弹模量的主要影响因素(应力水平和湿度状态),将计算模型分为 3 类(I 型、II_1 型、II_2 型),并结合 A、B 两种土样的试验数据对 3 类计算模型的可靠性进行比较评价。

(1)I 型计算模型中仅包含应力变量,优点在于数学表达式简单,能很好反映应力水平对动态回弹模量的影响,而湿度状态由模型参数表示,导致对多种湿度状态下同一种土拟合效果不理想。

(2)II_1 型计算模型是基于有效应力原理或热力学定律结合土力学原理推导得出,参数物理意义明确,且拟合度较高;缺点是将应力变量与基质吸力变量捆绑在一个变量因子中,在确定二者对回弹模量的影响程度系数的取值上受人为因素影响较大,且存在与土力学基本原理相悖的情形。

(3)II_2 型计算模型在 II_1 型基础上改进得到,其将基质吸力作为影响回弹模量的单独变量,避免基质吸力受应力变量的捆绑效应,且拟合效果良好。在没有地区经验的情况下,推荐采用 II_2 型计算模型预估路基土动态回弹模量。

参　考　文　献

[1] 马士杰. 粒料基层设计方法与永久变形控制指标研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
Ma Shijie. Research on granular base design method and permanent deformation control model [D]. Nanjing: Southeast University, 2015.

[2] 李鹏飞, 张海涛, 马盛盛, 等. 不同成型方法对沥青混合料回弹模量的影响[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(32): 322-325.
Li Pengfei, Zhang Haitao, Ma Shengsheng, et al. Influence of forming method on resilient modulus of asphalt mixture[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(32): 322-325.

[3] Sivakumar V, Kodikara J, O'Hagan R, et al. Effects of confining pressure and water content on performance of unsaturated compacted clay under repeated loading[J]. Geotechnique, 2013, 63(8): 628-640.

[4] Liu W, Shuai Q, Nie Z, et al. Effects of density and moisture variation on dynamic deformation properties of compacted lateritic soil [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2016, 2016: 5951832.

[5] 宋慧来, 薛明星, 冯怀平, 等. 重载铁路路基动回弹模量影响因素及预估模型[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(10): 4080-4086.
Song Huilai, Xue Mingxing, Feng Huaiping, et al. Influencing factors and predictive model analysis of dynamic resilient modulus of heavy haul railway subgrade[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(10): 4080-4086.

[6] 欧阳卫锋. 路基红粘土动态回弹模量影响因素及预估模型研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2016.
Ouyang Weifeng. Study on influencing factors and prediction model of dynamic resilient modulus of laterite soil subgrade[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2016.

[7] 王旭昊, 余祥晶, 李　程, 等. 粒料回弹模量室内试验方法[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(13): 5201-5209.
Wang Xuhao, Yu Xiangjing, Li Cheng, et al. Laboratorytesting methods for determining the resilient modulus of unbound granular materials[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(13): 5201-5209.

[8] 董　城, 刘文劼, 李　亮. 路基压实粉质黏土动态回弹模量的四参数预估模型及有限元实现[J]. 振动与冲击, 2018, 37(9): 61-67.
Dong Cheng, Liu Wenjie, Li Liang. Four-parameter prediction model and its FE realization for dynamic resilient modulus of sub-

grade compacted silty clay[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(9): 61-67.

[9] Jin J, Tan Y, Liu R, et al. Synergyeffect of attapulgite, rubber, and diatomite on organic montmorillonite-modified asphalt[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2019, 31(2): 04018388.

[10] 李冬雪, 凌建明, 钱劲松, 等. 湿度波动下黏质土路基回弹模量演化规律[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(7): 1051-1055.
Li Dongxue, Ling Jianming, Qian Jinsong, et al. Influence of moisture content change cyclicity on modulus evolution law of cohesive subgrade soil[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2013, 41(7): 1051-1055.

[11] Seed H B, Chan C K, Lee C E. Resilience characteristics of subgrade soils and their relation to fatigue failures in asphalt pavements[C]// International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements. Amsterdam: Elsevier, 1962: 611-636.

[12] Uzan J. Characterization of granular material[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 1985: 1022: 52-59.

[13] 钱劲松, 李嘉洋, 周 定, 等. 考虑吸力效应的非饱和黏土回弹模量预估模型[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 123-128.
Qian Jinsong, Li Jiayang, Zhou Ding, et al. Prediction model of resilient modulus for unsaturated clay soils considering the effect of matric suction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(1): 123-128.

[14] Zhang J H, Pei J H, Zheng J L, et al. Characterisation of stress and moisture-dependent resilient behaviour for compacted clays in South China[J]. Road Materials and Pavement Design, 2020, 21(1): 262-275.

[15] Zhang J H, Jiang Q P, Zhang Y Q, et al. Nondestructive measurement of water content and moisture migration of unsaturated red clays in South China[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2015, 2015: 542538.

[16] Ng C W W, Zhou C, Yuan Q, et al. Resilient modulus of unsaturated subgrade soil: experimental and theoretical investigations[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(50): 223-232.

[17] Xiao D, Jiang G L, Liao D, et al. Influence of cement-fly ash-gravel pile-supported approach embankment on abutment piles in soft ground[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018, 10(5): 977-985.

[18] 杨 俊, 童 磊, 张国栋, 等. 干湿循环对风化砂改良膨胀土无侧限抗压强度的影响[J]. 武汉大学学报(工学版), 2014, 47(4): 532-536.
Yang Jun, Tong Lei, Zhang Guodong, et al. Wet and dry cycle effects on unconfined compressive strength of weathered sand improved expansive soil[J]. Engineering Journal of Wuhan University (Engineering Edition), 2014, 47(4): 532-536.