

基于物性指标的路基细粒土动态回弹模量 预估模型研究

谭伟

(中国市政工程西南设计研究总院有限公司,四川 成都 610000)

摘要:以某公路代表性路基细粒土为研究对象,制备不同含水率、压实度的试样,通过动三轴试验研究含水率、压实度、塑性指数、动偏应力和围压对动态回弹模量 M_r 的影响,利用Matlab工具箱进行全局最优化搜索,获取模型参数 k_t 与物理性质指标的关系,进而构建基于物性指标的动态回弹模量预估模型,并就预估效果与现行规范中的通用模型进行对比。试验结果表明: M_r 随动偏应力和含水率的增加呈非线性下降趋势,随围压和压实度的增加而增加, M_r 与 I_p 统一成反比关系;结合Matlab自带人工神经网络(ANN)工具包和遗传算法(GA),可以依据大量动态回弹模量试验数据,建立 k_t 与含水率 w 、压实度 K 、塑性指数 I_p 、细粒含量 $P_{0.075}$ 的关系式,构建动态回弹模量预估模型;与规范通用模型相比,该文所建立模型的预估误差平均值为5.03%,预估误差最大值不超过15%,预估效果得到了提升。因此,对于具体的公路路基建设项目,事先开展针对性的动态回弹模量试验以建立基于物性指标的预估模型具有一定价值。

关键词:路基细粒土;动态回弹模量;预估模型;人工神经网络;物理性质指标

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

0 引言

动态回弹模量作为衡量交通荷载作用下路基压实土抵抗变形能力的主要力学指标,被定义为循环偏应力与回弹应变的比值,其大小直接影响路面疲劳开裂的预测及厚度的设计。但路基压实土是由固体颗粒、水和气组成的三相体,其力学性质较一般金属和非金属材料要复杂得多,与应力状态、含水率、压实度、颗粒级配等密切相关^[1-4]。

为了更准确地预估路基压实土的动态回弹模量 M_r ,国内外众多学者对 M_r 的影响因素进行了研究。Chen等^[5]认为,在实际路基所处应力范围内,相对围压,偏应力对 M_r 的影响更为显著;Li等^[6]总结了细粒土路基动态回弹模量的主要影响因素,即偏应力、围压、含水率、干密度、压实方法、触变性和冻融循环效应;Magnan等^[7]发现随着含水率和细颗粒(粒径 $<0.075\text{ mm}$)含量的增加,偏应力对 M_r 的影响愈发明显;肖军华^[8]指出循环荷载作用下路基土存在类似临界动应力的临界回弹应变,路基土的塑性应变随着

回弹应变的增加而增大,在回弹应变较小时,塑性应变的增加比较缓慢,试样发生强化,而当达到一定的回弹应变大小时,塑性应变呈指数增长,路基土产生变形破坏;凌建明等^[9]对路基粉土和黏土进行了一系列回弹模量测试,结果发现回弹模量与围压和压实度呈正相关关系,与循环偏应力和含水率呈负相关关系。而在 M_r 预估方面,出现了考虑应力状态^[10-12]、湿度^[13-14]等一系列预估模型;朱金鹏等^[15]还开展了依据路基土静态回弹模量对动态回弹模量进行预估的工作。

目前,《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)^[16]已经引入路基土动态回弹模量作为路基的设计控制指标,还给出了路基土动态回弹模量的取值范围和通用模型,对实际工程具有一定的指导意义,但是规范提供的取值范围较广,而且由于区域地质环境的差异,通用模型的预估精度难免具有一定的局限性。本文以某公路6处代表性路基细粒土为研究对象,制备不同含水率、压实度的试样,通过动三轴试验研究含水率、压实度、塑性指数、动偏应力和围压对 M_r 的影响,并在该公路大量试验数据基础上建立考虑物

理性质指标的动态回弹模量预估模型,就预估效果与现行规范中的通用模型进行对比。

1 路基土动态回弹模量试验过程

研究线路区域属于亚热带季风性湿润气候,地
表崎岖,地貌类型复杂多样,山地多,丘陵平原少,线
路高填路基较多,对路基填筑材料的需求量较大,为

节约对外购土、运土成本,大量采用了沿线分布的第四系细粒土。为了研究主要筑路填料的动态回弹模量性质,在沿线主要取土场采取了6组代表性样品,依据《公路土工试验规程》(JTG E40—2017)^[17],通过室内试验得到天然含水率、最大干密度、界限含水率、颗粒级配等基本物理性质指标如表1所示, w_L 均小于50%,属于低液限土。

表1 试验用土的基本物理性质

土样 编号	天然含 水率 $w/\%$	最大干密度 $\rho_{dmax}/(g \cdot cm^{-3})$	最优含 水率 $w_{opt}/\%$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指数 I_p	粒径分布/ $\%$	
							$<0.075\text{ mm}$	$>2\text{ mm}$
I号	24.8	1.82	19.6	38.1	25.2	12.9	53.4	1.2
II号	25.6	1.75	20.2	46.3	20.6	25.7	69.2	4.5
III号	24.1	1.78	19.8	40.1	25.1	15.0	60.7	3.2
IV号	23.8	1.85	20.1	39.7	24.0	18.7	59.1	1.4
V号	25.8	1.80	18.3	43.2	21.2	22.0	64.2	2.3
VI号	22.9	1.91	20.5	35.7	23.8	11.9	55.1	1.2

将采集的天然土置于烘箱中烘干(图1),在3种含水率 $w[w_{opt}, w_{opt}+4\%, w_{sat}$ (饱和含水率)]和3种压实度 $K(93\%, 94\%, 96\%)$ 条件下制备试样,试样的编号如 I 93-1、I 93-2、I 93-3(I 代表 I 号土,93 代表 93% 压实度, -1、-2、-3 分别代表含水率为 $w_{opt}, w_{opt}+4\%, w_{sat}$)。动态回弹模量试验参照《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)^[16],在此不做详述。试验仪器为GDS动三轴试验系统(图2),加载波形为半正弦波,每个试样首先加载1000次以确保永久变形基本稳定,随后加载100次,取最后5次的回弹应变测量结果作为计算回弹模量的依据。加载过程中不排水,试样保持恒定含水率。加载应力选取路基土具有代表性的受力状态^[11],其中围压 σ_3 采用15 kPa、30 kPa、45 kPa、60 kPa,动偏应力 σ_d 采用30 kPa、55 kPa、75 kPa、105 kPa。



图1 天然状态土烘干

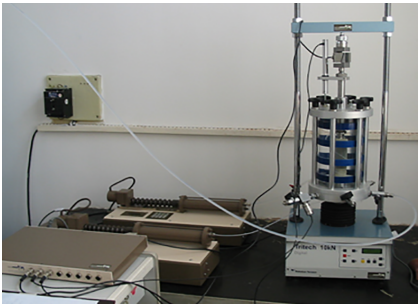


图2 GDS动三轴试验系统

2 试验结果分析

以 I 号土为例,对路基土动态回弹模量 M_r 的影响因素进行分析。

(1) 应力状态影响

图3为 I 号土试样在最优含水率、不同压实度下 M_r 随应力状态的变化曲线。由图3可知: M_r 随动偏应力增加呈非线性下降趋势, M_r 随围压增加而增加。由此可见: 动偏应力和围压均对路基细粒土 M_r 有较大影响, 动偏应力增大引起的剪切位移对细粒土结构有破坏效应, 而围压增大提高了细颗粒之间的咬合嵌固作用, 从而提高了试样的整体刚度。

(2) 压实度的影响

图4为 I 号土试样在不同应力状态下 M_r 随压实

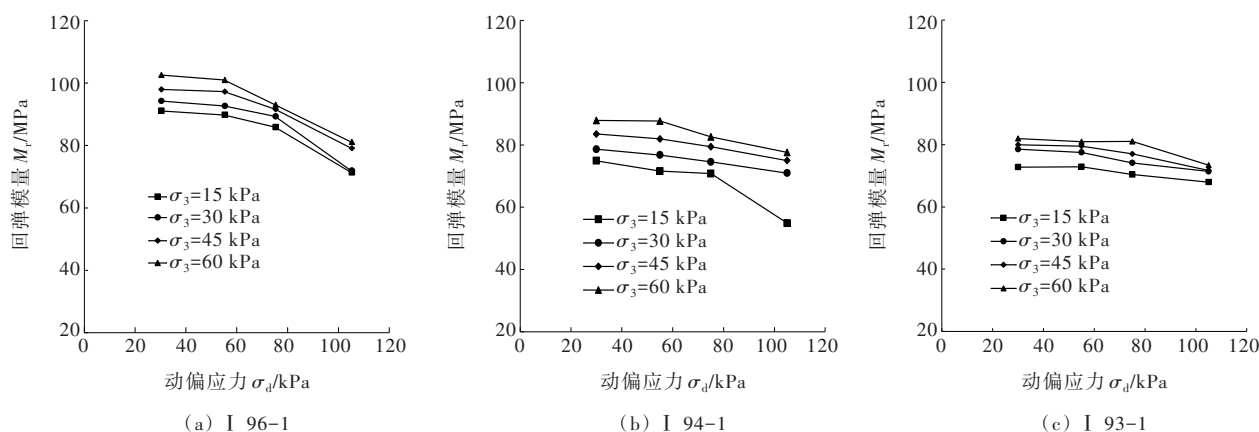


图3 I号土的动态回弹模量与应力状态的关系

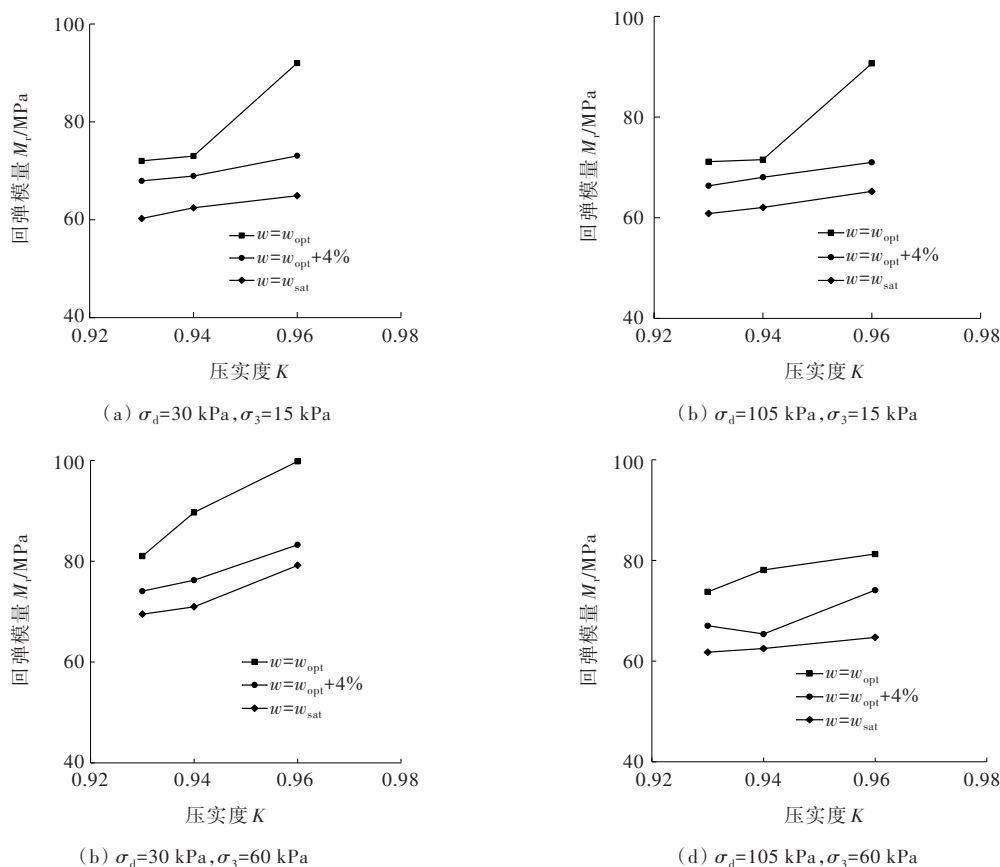


图4 I号土的动态回弹模量与压实度的关系

度 K 的变化曲线。由图4可知:随着压实度的提高,土颗粒排列更紧密,因此 M_r 有所提高,其中在最优含水率下,压实度增大对 M_r 的提升效果最为明显,而在 $w_{opt} + 4\%$ 和 w_{sat} 两种含水率条件下, M_r 随着压实度的增大基本呈线性上升趋势。

(3) 含水率的影响

图5为I号土试样在不同应力状态下 M_r 随含水率 w 的变化曲线。由图5可以看出:随着含水率增

大, M_r 非线性下降;当含水率从 19.6% 增加至 28.7% 时, I 号土的 M_r 平均降低 19%, 即含水率每增加 1%, M_r 平均降低 2.1%, 而且压实度越大, M_r 对含水率的变化越敏感。细粒土的黏聚力取决于颗粒间引力、基质吸力和胶结作用等因素,当含水率达到 w_{opt} 后继续增加时,水分将主要以孔隙水的形式赋存在土中,一方面导致弱结合水膜变厚,颗粒间距增大,颗粒间引力减小;另一方面使饱和度增大,基质吸力

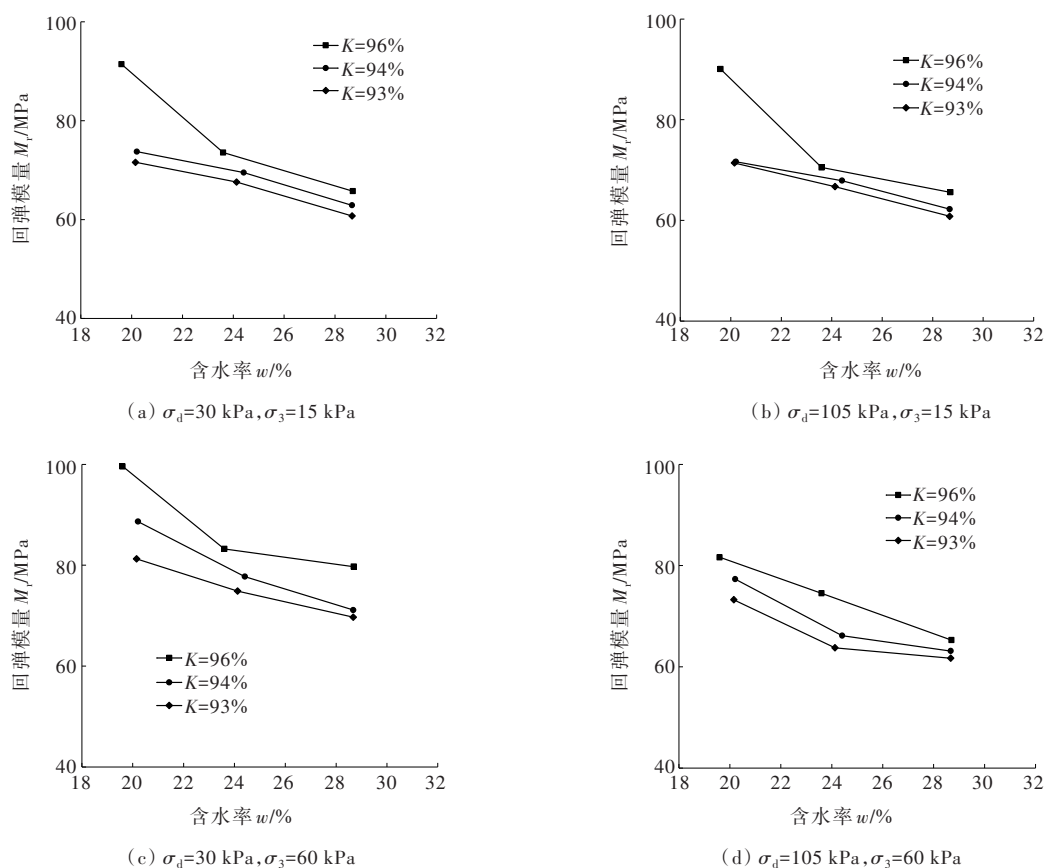


图5 I号土的动态回弹模量与含水率的关系

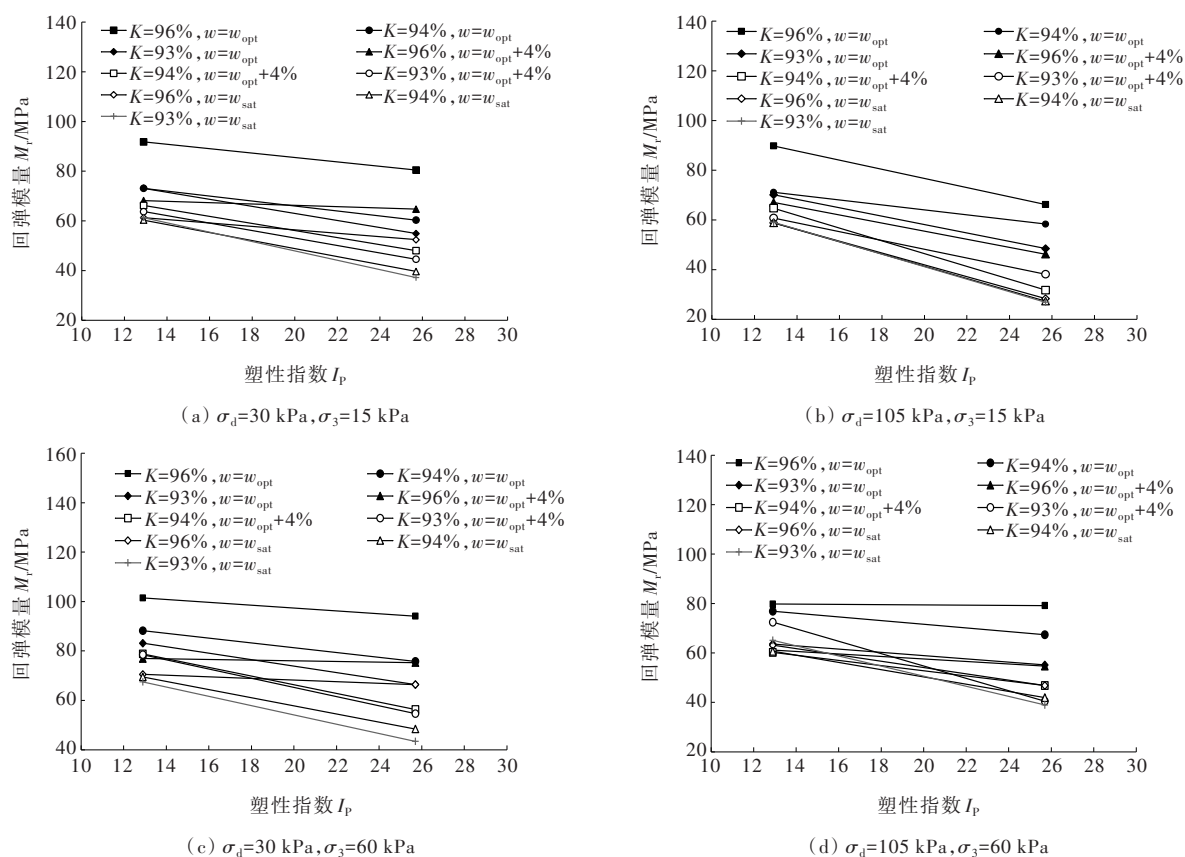


图6 动态回弹模量与塑性指数的关系

快速降低。因此,压实细粒土路基的动态回弹模量随含水率增加而显著下降。

(4) 塑性指数的影响

图6为I、II两种土试样 M_r 随塑性指数 I_p 的变化曲线。由图6可以看出 M_r 与 I_p 统一成反比关系,工程上应尽可能避免采用塑性指数过高的细粒土进行路基填筑。

3 考虑物性指标的预估模型建立

3.1 参数搜索方法

根据前文分析,围压和偏应力对路基土的动态回弹模量均有显著影响,因此,动态回弹模量预估模型应该采用既考虑围压影响,又考虑偏应力影响的复合模型,而且应解决没有量纲与不定值问题。考虑该现象的复合模型中,具有代表性的如AASHTO 2002^[16]中的模型:

$$M_r = k_1 p_{\text{air}} \left(\frac{\theta}{p_{\text{air}}} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{\text{oct}}}{p_{\text{air}}} + 1 \right)^{k_3} \quad (1)$$

式中: $\tau_{\text{oct}} = \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} / 3$; $\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$; k_i 为模型参数; p_{air} 为参考大气压(100 kPa)。

鉴于该模型的诸多优点,美国国家公路联合研究计划(NCHRP)通过开展路基路面性能的研究,推荐该模型作为路基土动态模量预估模型。式(1)中 k_1 、 k_2 、 k_3 的物理意义并不明确,不同土的模型参数需要通过试验获得,但在实际公路工程中,一般缺少开展大量动态回弹模量试验的条件,而含水率、压实度、细粒含量等物性指标较易获取。为了能在简单土工试验前提下合理确定该公路沿线范围内细粒土的动态回弹模量,该文拟构建模型参数 k_i 与物性指标的关系式,并最终导入式(1)模型中实现预估。

基于已开展的动态回弹模量试验,选择含水率 $w(\%)$ 、压实度 $K(\%)$ 、细粒含量 $P_{0.075}(\%)$ 、塑性指数 I_p 为物性指标,考虑到试验数据数量,利用Matlab软件中自带的向后反馈神经网络(ANN)工具包,并加入遗传算法(GA)以加快参数搜索速度,获取项目沿线范围细粒土 k_i 与 w 、 K 、 I_p 、 $P_{0.075}$ 的关系式。其中ANN-GA建模的思想是把20组样本数据作为训练集,将训练后的ANN视为一个预测函数,

结合动态回弹模量实测值构造目标函数,即适应度函数,再利用GA进行全局化搜索寻优,建模流程如图7所示。

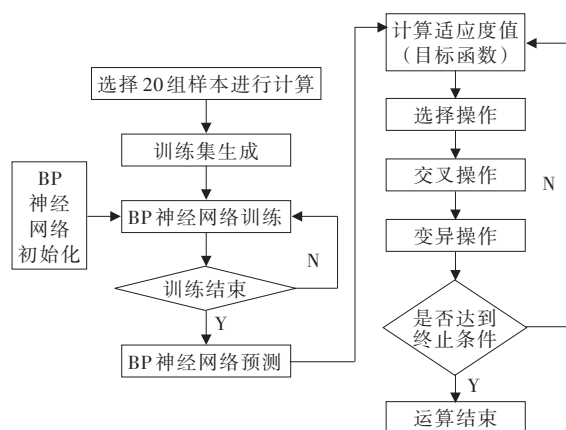


图7 k_i 与物性指标关系式建立流程

建立的向后反馈ANN的结构如图8所示,输入层有4个节点,分别为含水率、压实度、细粒含量和塑性指数,输出层为动态回弹模量 M_r ,训练过程如图9所示。随后建立目标函数[式(2)],以此作为适应度函数,再利用GA进行寻优,进化代数 n 取50代,交叉概率和变异概率分别设定为0.4和0.2,通过GA进行搜索时最佳个体的适应度变化曲线如图10所示,适应度的增加表明建立关系式的预估精度越来越大。

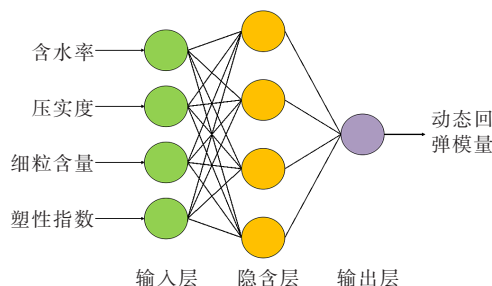


图8 ANN结构示意图

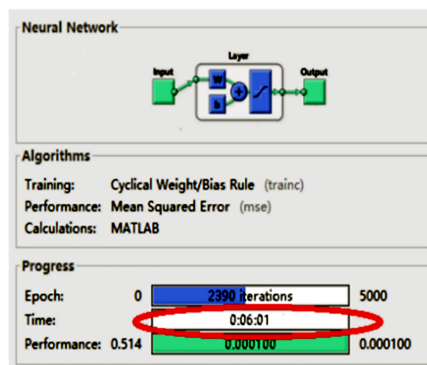


图9 ANN模型训练过程

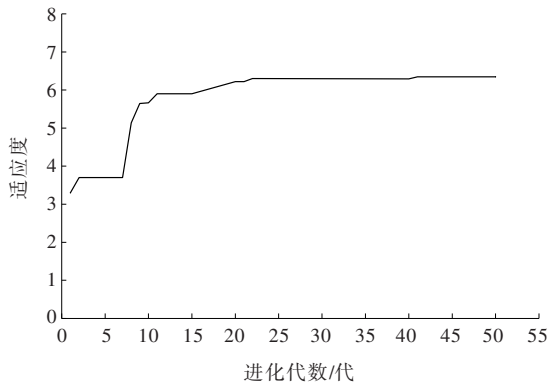


图10 适应度随进化代数的变化

$$F = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{M_{pi} - M_{mi}}{M_{mi}} \right)^2} \quad (2)$$

式中: M_{pi} 、 M_{mi} 为动态回弹模量预估值和实测值。

式(3)~(5)为利用 ANN-GA 建立的 k_i 与物性指标关系式:

$$k_1 = 1.184\ 8K - 0.034\ 9w - 0.133\ 5I_p - 1.150\ 9P_{0.075} \quad (3)$$

$$k_2 = 0.002\ 5K - 0.001\ 9w + 0.002\ 4I_p - 0.000\ 3P_{0.075} \quad (4)$$

$$k_3 = 0.048\ 3K - 0.022\ 5w + 0.522\ 8I_p - 0.516\ 6P_{0.075} \quad (5)$$

其中 k_1 为控制 M_i 大小的主要参数,由上述关系式可知压实度 K (正相关) 和细粒含量 $P_{0.075}$ (负相关) 对其影响程度较大; k_2 为体现体应力 θ 影响程度的参数, K 、 w 、 I_p 三者对 k_2 的影响较为平均,但 $P_{0.075}$ 的影响几乎可以忽略; k_3 为体现八面体剪应力 τ_{oct} 影响程度的参数, I_p 和 $P_{0.075}$ 两者对其的影响相对较大。

3.2 与规范通用公式预估结果的对比

将 3.1 节中式(3)~(5)代入式(1),从而利用各组试样的物性指标预估其动态回弹模量,再结合试验实测值可以计算预估误差,进一步将该误差与规范通用模型^[16]的预估误差进行对比,结果如表 2 和图 11 所示。

表 2 不同模型的预估效果(部分 I 号土)

测试应力条件		动态回弹模量 实测值/ MPa	预估误差/%	
体应力 θ / kPa	八面体剪应力 τ_{oct} /kPa		规范通用 模型	本文模型
75	14.14	94.78	-12.55	2.36
120	35.36	88.86	16.89	-4.35
120	14.14	97.96	17.34	6.12

续表2

测试应力条件		动态回弹模量 实测值/ MPa	预估误差/%	
体应力 θ / kPa	八面体剪应力 τ_{oct} /kPa		规范通用 模型	本文模型
165	35.36	95.77	-11.34	-10.35
165	14.14	102.02	17.76	7.56
190	25.93	100.81	-14.34	3.89
240	49.50	82.30	-11.80	-2.32
210	14.14	105.85	-7.11	4.35
235	25.93	105.30	6.47	3.98
预估误差平均值(绝对值)/%			12.84	5.03

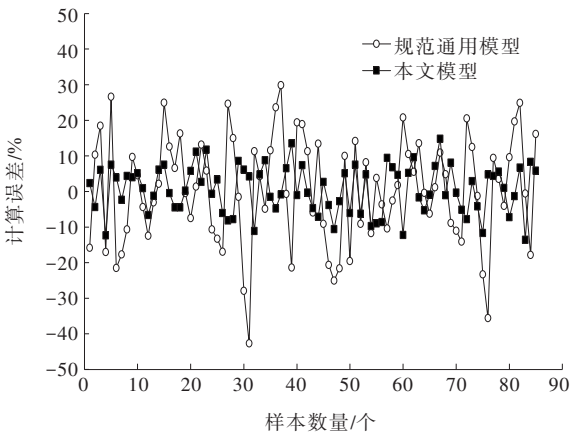


图11 大量试验样本的计算误差对比

从图 11 可以看出:由于土的地域性差异,利用规范通用模型对于本文线路沿线路基土动态回弹模量的预估误差较大,平均值达到了 12.84%,个别样本的预估误差接近 45%;而利用本文模型,预估误差绝对平均值为 5.03%,预估误差最大值不超过 15%,预估效果得到了提升。

由于不同交通荷载等级的路基内当量应力水平变化幅度较小,按照规范^[16]要求选取体应力 $\theta=70$ kPa 和 $\tau_{oct}=13$ kPa,利用本文建立模型在某公路路基建设中进行了应用,能够大致判断选择某种土进行填筑可能达到的路基回弹模量值,从而淘汰一些工程性质不佳的细粒土,以便更准确地进行交通荷载作用下的路基路面受力分析。综上所述,对于具体的公路路基建设项目,事先对代表性路基土开展一定数量针对性的动态回弹模量试验,并建立依据物性指标的预估模型具有一定价值,可利用此预估模型,通过含水率测试、击实试验等简单土工试验计算动态回弹模量,从而进一步为工程选料、路面疲劳寿命预测以及路基路面厚度的设计提供依据。

4 结 论

通过一系列动态回弹模量试验和相关预估模型建立,得到如下结论:

(1) 对于 I 号土, M_r 随动偏应力增加呈非线性下降趋势, M_r 随围压增加而增加。 M_r 随着压实度的提高而增加, 其中在最优含水率下, 压实度增大对 M_r 的提升效果最为明显。

(2) 随着含水率增大, M_r 非线性下降, 对于 I 号土, 含水率每增加 1%, M_r 平均降低 2.1%。 M_r 与 I_p 统一成反比关系, 工程上应尽可能避免采用塑性指数过高的细粒土进行路基填筑。

(3) 结合 Matlab 自带 ANN 工具包和 GA 算法, 可以依据大量动态回弹模量试验数据, 建立 k_t 与含水率 $w(\%)$ 、压实度 $K(\%)$ 、细粒含量 $P_{0.075}(\%)$ 、塑性指数 I_p 的关系式, 进而构建基于物性指标的动态回弹模量预估模型。

(4) 与规范通用模型相比, 本文建立模型的预估误差平均值为 5.03%, 预估误差最大值不超过 15%, 预估效果得到了提升。因此, 对于具体的公路路基建设项目, 事先开展针对性的动态回弹模量试验以建立基于物性指标的预估模型具有一定价值, 可利用此模型进一步为工程选料、路面疲劳寿命预测以及路基路面厚度的设计提供依据。

参考文献:

- [1] 徐艳玲, 唐伯明, 谢国栋, 等. 不同含水率下应力级位对粘性土回弹模量的影响[J]. 中外公路, 2011, 31(6): 68-72.
- [2] 张宜洛, 李宁, 邓展伟, 等. 内蒙古地区典型路基土动态回弹模量研究[J]. 中外公路, 2022, 42(4): 13-20.
- [3] 张军辉, 彭俊辉, 郑健龙. 路基土动态回弹模量预估进展与展望[J]. 中国公路学报, 2020, 33(1): 1-13.
- [4] 张锐, 滕煜晨, 刘闯. 路基回弹弯沉控制方法及试验验证[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2019, 16(2): 8-14.
- [5] CHEN D H, ZAMAN M M, LAGURO J G. Resilient moduli of aggregate materials variability due to testing procedure and aggregate type[C]//Transportation Research Record. Compaction of Difficult Soils and Resilient Modulus Testing. Transportation Research Board, National Research Council, 1994, 1462: 57-64.
- [6] LI D, SELIG ET. Resilient modulus for fine-grained subgrade soil[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(6): 939-957.
- [7] MAGNAN J P, NDIAYE M. Determination and assessment of deformation moduli of compacted lateritic gravels, using soaked CBR tests[J]. Transportation Geotechnics, 2015, 5: 50-58.
- [8] 肖军华. 提速列车荷载下粉土的力学响应与路基稳定性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- [9] 凌建明, 苏华才, 谢华昌, 等. 路基土动态回弹模量的试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(5): 919-925.
- [10] 朱俊高, 王元龙, 贾华, 等. 粗粒土回弹特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(6): 950-954.
- [11] 陈声凯, 凌建明, 罗志刚. 路基土回弹模量应力依赖性分析及预估模型[J]. 土木工程学报, 2007, 40(6): 95-104.
- [12] 冉武平, 王金山, 艾贤臣, 等. 粗粒氯盐渍土动态回弹模量试验研究与理论模型[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(9): 1746-1754.
- [13] 杨树荣, 洪祥生, 黄伟庆, 等. 非饱和粘性路基土回弹模量之研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 225-229.
- [14] 刘小平. 非饱和土路基水作用机理及其迁移特性研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2008.
- [15] 朱金鹏, 王志强, 林超. 山西省路基动静回弹模量相关关系研究[J]. 中外公路, 2016, 36(2): 29-33.
- [16] 中交第二公路勘察设计研究院有限公司. 公路路基设计规范: JTG D30—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [17] 交通部公路科学研究院. 公路土工试验规程: JTG E40—2007[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.