

DOI: 10.16285/j.rsm.2019.1291

基于多元回归分析的连续压实监控技术

吴龙梁¹, 江辉煌^{1,2}, 唐建伟³, 高明显², 范少峰⁴, 闫晓夏²

(1. 中国铁道科学研究院, 北京 100081; 2. 中国铁道科学研究院 深圳研究设计院, 广东 深圳 518000; 3. 深圳市建筑工务署, 广东 深圳 518031; 4. 深圳市建设工程质量检测中心, 广东 深圳 518052)

摘 要: 现实中的碾压参数难以得到严格控制以满足连续压实控制技术的要求, 限制了该技术的适用范围和应用效果。为使碾压参数动态变化与工程实际相适应, 对碾压参数进行了多元回归分析, 并采用克里金插值法对连续压实控制指标的目标值/实测值进行全仓面化估计, 提出了以压实合格率作为质量评价指标的连续压实监测模型。开展了现场碾压试验, 建立了压实指标与碾压参数的多元回归关系, 结合克里金插值法对常规质量检测指标进行了反向预测分析, 验证了模型的有效性。工程实例分析表明, 针对我国南方地区广泛分布的花岗岩残积土填料, 遵循基于碾压参数多元回归的连续压实控制方法, 深圳机场 T4 扩建工程 2-1 区的常规质量检测均满足设计要求。基于碾压参数多元回归分析的连续压实质量监测能够有效控制工程碾压质量, 从而为连续压实控制技术的实际应用提供有益参考。

关 键 词: 连续压实控制; 碾压参数; 多元回归分析; 克里金插值法

中图分类号: U 416

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2020) 06-2081-10

Continuous compaction monitoring technology based on multiple regression analysis

WU Long-liang¹, JIANG Hui-huang^{1,2}, TANG Jian-wei³, GAO Ming-xian², FAN Shao-feng⁴,
YAN Xiao-xia²

(1. China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China; 2. Shenzhen Research and Design Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Shenzhen, Guangdong 518000, China; 3. Bureau Public Work of Shenzhen Municipality, Shenzhen, Guangdong 518031, China; 4. Shenzhen Construction Testing Center, Shenzhen, Guangdong 518052, China)

Abstract: In reality, the rolling parameters are often difficult to be strictly controlled to meet the application requirements of continuous compaction control technology, which greatly limits the scope of application and application effects of the technology. In order to adapt the dynamic variation of rolling parameters to the engineering practice, this paper performs multiple regression analysis for the rolling parameters, and uses Kriging interpolation method to estimate the target value/measured value of the continuous compaction control index. A continuous compaction monitoring model with the qualification rate of compaction as the quality evaluation index is proposed. The on-site rolling test is designed and carried out, and the multivariate regression relationship between compaction index and rolling parameters is established. The backward prediction analysis of conventional quality inspection index is conducted by combining Kriging interpolation method, which verifies the validity of the model. The continuous compaction control method based on the multivariate regression of rolling parameters is applied to the control of rolling construction quality of granite residual soil of District 2-1 of Shenzhen Airport T4 expansion project. The construction quality is verified to meet the design requirements by the conventional quality inspection method, demonstrating the effectiveness of the proposed method.

Keywords: continuous compaction control; rolling parameters; multiple regression analysis; Kriging interpolation method

1 引 言

连续压实控制技术相比传统压实质量控制方法具有实时、全面、连续监控等显著优点^[1-3], 已在

世界各地得到较为广泛的应用^[1, 4-9]。为了简化应用, 当前的连续压实控制技术未考虑碾压参数的影响, 通常是在假定碾压参数保持不变的理想条件下, 通过简单建立连续压实控制指标与常规质量检测指标

收稿日期: 2019-07-25

修回日期: 2019-11-22

基金项目: 中国铁路总公司科技研究开发计划重点课题 (No.2016G006-C); 深圳市建筑工务署技术研究课题 (No.THZQ-033-2018)。

This work was supported by the Science and Technology Research Program of China Railway Corporation (2016G006-C) and the Shenzhen Institute of Construction Industry Technical Research Project (THZQ-033-2018).

第一作者简介: 吴龙梁, 男, 1988 年生, 博士研究生, 主要从事连续压实控制方面的研究。E-mail: ramlee@126.com

的一元回归关系进行连续的压实监测和控制^[1]。然而,越来越多的工程实践表明^[6-11],碾压参数对连续压实控制的影响显著,不容忽视。尽管现行国内外连续压实控制技术规程^[12-14]均提出了严格的碾压参数控制要求,但由于现实中受到碾压机械性能和实际施工中人为因素干扰等因素的影响,往往难以实现碾压参数的精准控制^[6],严重影响到了连续压实控制技术的应用效果。

为此,国内外学者开展了大量研究^[6-11, 15-16],致力于将碾压参数引入到连续压实控制技术之中,得到了丰富的研究成果和经验。但遗憾的是,能够引入实际应用尤其是适用于我国基本国情的成果依然较少。总结原因如下:①碾压参数考虑不全面。大多数研究是基于单一变量的原则分析单个碾压参数对连续压实控制的影响,部分考虑了多个碾压参数共同作用的研究又往往缺少对工程实际的分析而选取到关键参数;②缺少必要的验证。既有研究或从统计学的角度研究碾压参数与控制指标的关系,或基于实测数据进行拟合分析,大多止步于理论成果的提出,缺少对研究成果的验证与分析;③研究对象缺少代表性。我国南方地区广泛分布有花岗岩残积土,属于典型的细粒填料,是我国工程建设中经常遇到的主要填料之一^[17-18],而目前针对花岗岩残积土填料连续压实控制的研究比较有限。另外,碾压参数对不同类型连续压实控制指标的影响有所不同^[8-10, 16]。国外关于碾压参数多元回归的研究大多基于刚度指标 K_s 和模量指标 E_{vib} , 该类指标需要特定的振动压路机,设备的进口费用昂贵,未能在我国广泛采用。而基于我国普遍采用的压实度计类指标 CMV 和动力学类指标 VCV 的研究相对较少。

有鉴于此,本文考虑到当前连续压实控制技术的局限性,首先结合工程实际确定多元回归分析的碾压参数,并建立基于碾压参数多元回归分析的连续压实监测模型。进而重点研究考虑碾压参数变动时的常规质量检测指标与 CMV/VCV 指标的多元回归关系,并验证模型的可靠性。最后通过工程实例分析,以期提高连续压实控制技术的适用性。

2 连续压实监测模型

2.1 多元回归模型

2.1.1 模型参数的确定

工程实践表明,连续压实控制与施工工艺参数、填料特性参数有关^[4-9, 13-14]。其中,施工工艺参数主要包括虚铺厚度、碾压遍数、行车速度、碾压

方向、振动频率和激振力等,填料特性参数主要包括填料成分、级配和含水率,将上述参数统称为碾压参数。现有经验表明^[2-3, 6-9],虚铺厚度、碾压遍数、行车速度、振动频率、激振力、填料类别和含水率对填筑层的压实质量有着重要影响。而其中的行车速度往往是通过司机踩油门的力度进行控制的,且在碾压过程中存在频繁启动和停止操作,因而行车速度存在较大波动且难以精准控制;振动频率和激振力虽然可以选择不同档位,但是实际中的振动频率和激振力会受到机械自身性能和实际使用条件的影响而产生一定幅度的波动,这与机械的标定值存在一定的差异而且不受人为控制;填料含水率容易受到地下水位和天气的影响而产生不确定性波动,同时实际工程中的含水率也往往难以实时、全面地检测。因此,相比其他碾压参数,行车速度、激振频率、激振力和含水率的不可控性和不确定性相对较强,是产生偏差的主要原因^[6-9, 11]。因此,本文选取上述 4 个参数作为多元回归模型的碾压参数。考虑到加速度与激振力呈正比且更易于获取,本文模型采用加速度幅值对激振力参数进行替换。此外,结合我国工程实际,分别选取 CMV 和 VCV 指标作为模型的连续压实控制参数,并参照我国现行填筑工程质量检测规范^[12-13],分别选取物理类指标压实度 K 和力学类指标动态变形模量 E_{vd} 作为模型的常规质量检测参数。

2.1.2 模型的建立

基于多元回归估计的基本原理,采用 2.1.1 节确定的模型参数,分别以常规质量检测参数和连续压实控制参数为因变量建立预测模型和评估模型。预测模型可根据振动测值对常规质量检测指标值进行反向预测,评估模型可根据常规质量检测指标的合格值确定振动测值的目标值。预测和评估模型均采用 F 检验法进行显著性检验。

预测模型:

$$R = f(MV, a, f, v, \omega) + \varepsilon \quad (1)$$

评估模型:

$$MV = g(R, a, f, v, \omega) + \varepsilon \quad (2)$$

式中: $f(\cdot)$ 、 $g(\cdot)$ 为回归函数; R 为常规质量指标值; MV 为振动测值; a 为加速度幅值; f 为频率; v 为行车速度; ω 为含水率; ε 为残差。

2.2 质量控制模型

2.2.1 参数的全仓面化

现实中,基于卫星定位的连续压实指标测量值

的位置往往与原位点测试位置不能完全对应上，加之各类参数采集（测量）的频率和方法也存在较大差异，以致测点处容易存在碾压参数缺失的问题，影响到碾压参数多元回归模型的正常使用。因此，本文采用普通克里金法对碾压面的碾压参数进行全仓面化插值估计，从而获得任意位置处的碾压参数。普通克里金方程组为^[19]

$$\left. \begin{aligned} Z^*(x_0) &= \sum_{j=1}^n \lambda_j Z(x_j) \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j \operatorname{cov}[Z(x_i), Z(x_j)] + \mu &= \operatorname{cov}[Z(x_i), Z(x_0)] \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中： $Z^*(x_0)$ 为待估点变量的估计值； $Z(x_j)$ 为各实测数据点值； λ_j 为克里金权重值； n 为给定范围内实测点的个数； $\operatorname{cov}[Z(x_i), Z(x_j)]$ 为点 x_i 与 x_j 的协方差； μ 为拉格朗日参数。

通过求解线性方程组（3）的第2、3项即可得到克里金权重值 λ 和拉格朗日参数 μ ，再将 λ 代入方程组的第1项便可得到待估点变量的估计值。其方差 σ^2 为

$$\sigma^2 = C(0) - \sum \lambda_i C(x_i - x_0) \mu \quad (4)$$

式中： $C(0)$ 为空间距离为0的两点间的协方差。

2.2.2 压实程度评估

根据式（2）得到考虑碾压参数变化的连续压实控制指标的目标值，并采用克里金插值法分别对连续控制指标的目标值和实测值进行全仓面化，进而根据式（5）即可评估任一位置的压实程度。

$$\left. \begin{aligned} [MV] &\leq MV, && \text{合格} \\ 0.9[MV] &\leq MV < [MV], && \text{基本合格} \\ MV &< 0.9[MV], && \text{不合格} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中： $[MV]$ 为目标值的克里金预测值； MV 为实测值的克里金预测值。

2.2.3 合格率计算及验收标准

根据式（5）得到任意位置处的压实程度评估

结果，利用压实程度合格部分的面积与碾压仓面总面积的比值（即压实合格率）作为评价压实质量的指标。压实合格率 Q 的计算公式为

$$Q = \frac{A}{A_0} \times 100\% \quad (6)$$

式中： A 为压实程度合格部分的面积； A_0 为碾压仓面的总面积。对于重要工程， A 为式（5）中压实程度评估为合格部分的面积之和。对于一般工程， A 为式（5）中压实程度评估为合格和基本合格两个部分的面积之和。

参考我国现行规范^[12-13]中的压实程度通过率标准，本文以压实合格率 Q 不小于95%，同时满足现行规范压实均匀性和稳定性要求为验收标准。

3 试验验证

3.1 试验概况

现场试验在深圳市南山区同乐学校邻近项目开展。该工程回填面积约 $3 \times 10^4 \text{ m}^2$ ，回填高度为4.5 m，填料为深圳地区广泛分布的花岗岩残积土，填料物理特性参数如表1所示。根据设计要求，该工程分层填筑厚度为30 cm，碾压遍数不少于6遍，压实度不小于0.93。试验时场地已回填至相对基底标高3.0 m处，且各碾压层的压实质量均已验收。

现场碾压施工采用SRM222C型振动压路机，该压路机由万邦重科公司生产，工作质量为22 t，激振频率为15 Hz，激振力为340/220 kN。在振动压路机上同时安装Dynapac公司生产的DCA型压实分析仪和广州中海达公司生产的连续压实控制设备分别采集CMV和VCV指标，同时将实时采集的振动加速度、频率、位置坐标等数据通过4G网络上传至远程控制平台以备后续分析。现场试验碾压设备如图1所示。常规质量检测指标 K 和 E_{vd} 分别采用灌砂法和轻型落锤仪进行检测并做好记录。

3.2 试验方案与实施

在试验区域松铺30 cm厚的填料，设置4条尺寸为2 m×50 m的试验测试条带，依次编号为1[#]、

表1 填料物理特性参数
Table 1 Physical characteristic parameters of filler

最大干密度 ρ_{dmax} ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	天然含水率 $\omega/\%$	最优含水率 $\omega_{\text{op}}/\%$	液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_P/\%$	塑性指数 I_P	颗粒(mm)组成/%			
						细砾 >2	砂粒 0.075~2.000	粉粒 0.005~0.075	黏粒 <0.005
1.94	29.8	12.5	69.9	38.3	31.6	12.7	23.3	29.8	34.2



图1 现场试验碾压设备
Fig.1 Field test rolling equipment

2[#]、3[#]、4[#]。测试条布置如图2所示。在每个测试条的中轴线处每隔2.5 m设置一个测点,共80个测点。试验时实时测量各测点处的碾压参数、连续压实控制指标,并在测点位置进行常规质量检测。抽取40个测点作为回归分析样本,剩余的40个测点作为模型检验样本对回归模型进行检验。为实现测试条的填料含水率差异,1[#]、2[#]、3[#]、4[#]测试条在松铺完成后依次晾晒5、9、29、33 h再进行碾压测试。根据现场碾压经验,碾压6遍以后填料已达到该条件下的最大压实程度,碾压遍数增加对压实程度的影响微小。因此,测试前各测试条均预先静碾1遍再强

振碾压6遍,以减小碾压遍数对测试的影响。为测取不同激振力、不同行进速度下的试验数据,对各测试条进行如表2所示的强、弱振与快、慢速碾压的组合测试,测试时采用相同的方向碾压。记录各测点处的碾压参数和连续压实控制指标参数,同时检测碾压完成后各测点处的压实度 K 和动态变形模量 E_{vd} ,建立回归模型并进行验证。



图2 测试条布置
Fig.2 Layout of test strips

表2 碾压工艺参数
Table 2 Rolling process parameters

测试条	碾压遍数	设计碾压工艺			实测碾压参数范围			
		激振力	车速/(km·h ⁻¹)	晾晒时间/h	加速度/g	频率/Hz	车速/(km·h ⁻¹)	含水率/%
1 [#]	1H+6S+1W	弱振	1.5 (慢)	5	1.4~2.0	14.7~17.2	1.52~1.82	15.2~19.2
2 [#]	1H+6S+1S	强振	1.5 (慢)	9	2.3~2.9	15.3~17.8	1.42~1.79	13.4~16.4
3 [#]	1H+6S+1W	弱振	3.0 (快)	29	1.5~1.9	15.6~17.2	2.67~2.91	12.2~15.6
4 [#]	1H+6S+1S	强振	3.0 (快)	33	2.4~2.9	15.6~17.2	2.52~2.83	9.8~14.3

注: H表示静碾; S表示强振碾压; W表示弱振碾压。

3.3 试验结果分析

3.3.1 多元回归模型验证

在每个测试条中相间抽取10个测点样本,得到了共40个样本的数据库,利用SPSS软件对样本数据进行不考虑碾压参数的一元回归分析和考虑碾压参数的多元回归分析。对常规质量检测指标和连续压实指标进行组合,分别建立了如表3所示的10个回归模型。表3中,模型1~4是常规检测指标与连续压实控制指标的一元回归模型,未考虑含水率在內的碾压参数。模型5~10是根据式(4)建立的多元回归模型,均考虑了碾压参数的作用。对上述模型进行 F 检验,结果显示在 $\alpha=0.05$ 置信度下各模型的显著性水平均小于0.05,表明上述回归模型

均能通过检验。同时对模型5~10的残差 ε 进行Kolmogorov-Smimov检验和正态分布 T 检验,发现模型残差均服从均值为0的正态分布,标准差为1.2%~4.3%。

表3中,各模型的回归决定系数 R^2 均大于0.5。由 R^2 的数学意义可知,表3中模型在数学上均具有强相关性,并且 R^2 越大,表明模型的相关性越强。多元回归模型的 R^2 均大于对应的一元回归模型,表明多元回归模型具有更好的拟合精度。在各组合模型中,VCV与 E_{vd} 组合的一元回归模型和多元回归模型的決定系数分别为0.71和0.91,均为同类型回归模型中的最大值,表明该组合在本试验条件下具有更好的适用性。初步分析原因可知,VCV与 E_{vd} 均

表 3 回归模型
Table 3 Regression model

回归方式	模型编号	常规检测指标	连续控制指标	回归模型	R^2
一元回归	模型 1	K	CMV	$K = 0.34CMV + 75.99$	0.57
一元回归	模型 2	K	VCV	$K = 0.42VCV + 71.54$	0.53
一元回归	模型 3	E_{vd}	CMV	$E_{vd} = 1.69CMV - 10.26$	0.66
一元回归	模型 4	E_{vd}	VCV	$E_{vd} = 2.07VCV - 30.67$	0.71
多元回归	模型 5	K	CMV	$K = 0.18CMV - 1.57\omega + 1.13f - 1.91a + 3.75v + 83.39$	0.78
多元回归	模型 6	K	CMV/VCV	$K = 0.36VCV - 0.07CMV - 1.47\omega + 0.67f - 3.26a - 2.36v + 97.50$	0.85
多元回归	模型 7	K	VCV	$K = 0.30VCV - 1.40\omega + 0.79f - 3.09a - 0.96v + 91.82$	0.86
多元回归	模型 8	E_{vd}	CMV	$E_{vd} = 0.98CMV - 5.48\omega + 2.63f + 3.02a + 14.29v + 19.64$	0.84
多元回归	模型 9	E_{vd}	CMV/VCV	$E_{vd} = 1.44VCV - 0.03CMV - 5.06\omega + 0.76f - 2.44a - 10.32v + 76.56$	0.88
多元回归	模型 10	E_{vd}	VCV	$E_{vd} = 1.41VCV - 5.03\omega + 0.81f - 2.37a - 9.71v + 74.08$	0.91

为力学指标，其基本原理相近，因而相关性较好。模型 6、9 的决定系数分别大于模型 5、8，说明在回归分析 CMV 指标的基础上增加考虑 VCV 指标时，模型精度有所提高。而模型 6、9 的决定系数分别小于模型 7、10，说明在回归分析 VCV 指标的基础上增加考虑 CMV 指标时，模型精度没有增加反而有所减小。由此可见，多元回归模型的精度与考虑的连续压实指标种类数量没有必然的联系。

由模型的参数估计值可知，连续压实控制指标与常规检测指标均呈正相关，表明随着 K/E_{vd} 的增加，连续压实指标 CMV/VCV 值会随之增大，这与实际工程经验相符合。由模型 5~10 可知， K/E_{vd} 与含水率 ω 均呈反相关，这与工程实际中填料含水率大于最优含水率时表现出的规律相符。另外， K/E_{vd} 与频率 f 均呈正比，表明本试验条件下振动频率越大得到的压实质量越好。结合实际可知，本试验条件下，频率越大，单位时间对填筑体做功也越大，压实效果因而越好。由此可见，多元回归模型具有明显的物理意义。需要指出的是，各影响因素相互独立是进行多元回归分析的基本假设条件，而部分碾压参数之间是相互影响的（例如频率影响激振力等）。因此，各碾压参数对因变指标的影响程度不能简单根据多元回归分析中的参数估计值确定。实际上，基于多元回归分析的连续压实控制是将各类碾压参数视为一个系统，从整体的角度综合考虑各碾压参数的共同作用，以期提高回归模型的精确度。

根据剩余 40 个测点的连续压实指标值和碾压参数，采用各回归模型对各测点的压实度 K 和动态变形模量 E_{vd} 进行反演预测，得到了各模型预测值与实测值的对比情况，如图 3 所示。

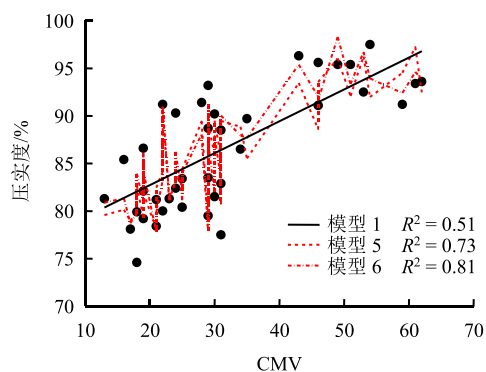
对比表 3 中的回归决定系数和图 3 中的预测决定系数可知，除去一元回归分析中的模型 2、4 的回

归决定系数小于预测决定系数之外，其余模型的回归决定系数均大于预测决定系数，说明总体上预测模型的精度小于回归模型。相比回归决定系数，多元回归预测模型决定系数的变化幅度在 -7.7%~ -4.5% 之间，而一元回归预测模型决定系数的变化幅度为 -10.5%~20.8%。一定程度上说明多元回归模型相比一元回归模型的预测波动性更小，具有更好的稳定性。图 3(b) 中模型 6、7 的预测图形相似且决定系数相同，图 3(d) 中模型 9、10 的预测结果也十分接近，表明在回归分析 VCV 指标的基础上增加 CMV 为回归因素的意义不大。综合分析回归/预测模型的决定系数可知，在与压实度 K 组合的各模型中，模型 7 具有较好的适用性；在与动态弹性模量 E_{vd} 组合的各模型中，模型 10 更具适用性。

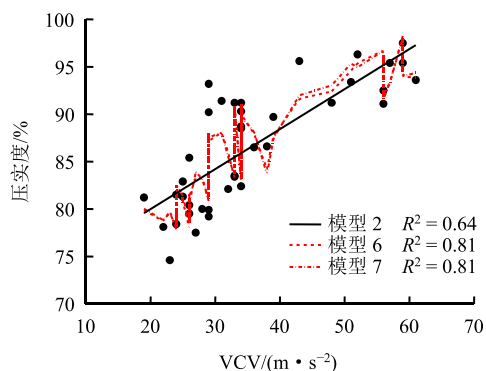
3.3.2 克里金方法的适用性验证

为了研究空间插值方法应用于连续压实控制技术的可行性，同时进一步检验模型的预测精度，采用普通克里金插值法对测点数据进行空间插值，分别得到了 K 和 E_{vd} 的空间分布预测结果，如图 4 所示。在利用 K 和 E_{vd} 的实测值进行克里金预测时，选取每个测试条 10、20、30、40 m 处的测点数据作为检验样本，即在 4 个测试条上共设置有 16 个检验点，其余 64 个测点数据作为空间样本进行克里金插值。同时，根据 64 个测点的碾压参数和连续压实指标采用不同回归模型反演计算得到的 K/E_{vd} 作为空间样本进行克里金插值预测。其中，根据 3.3.1 节结果可知，模型 6 和模型 7、模型 9 和模型 10 的预测效果十分接近，因此仅选取模型 7 和模型 10 进行计算分析。

由图 4(a) 可知，基于多元回归模型 5、7 的预测结果与基于实测值的预测结果相近。根据 3.2 节中的现场试验经验可知，在压实功一定的条件下，压



(a) 基于 CMV 的压实度预测



(b) 基于 VCV 的压实度预测

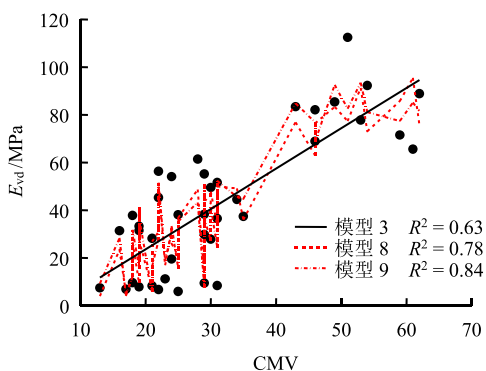
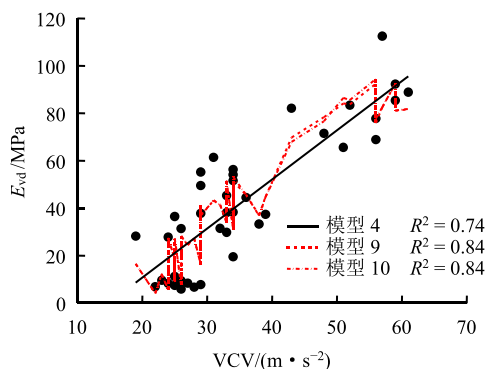
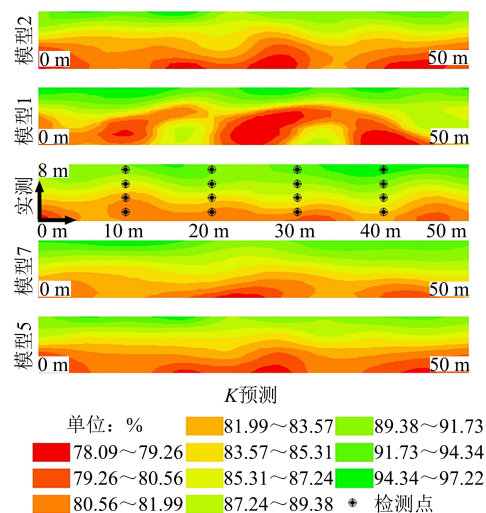
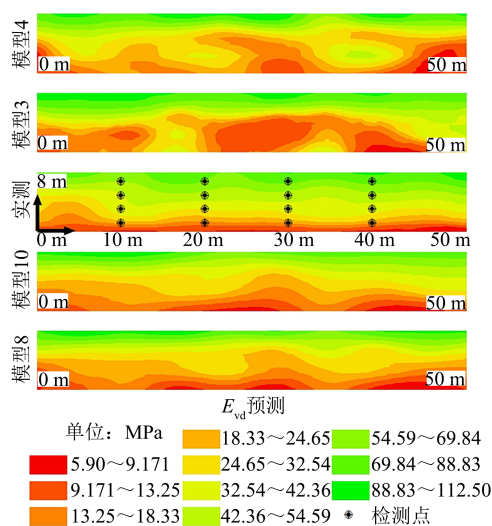
(c) 基于 CMV 的 E_{vd} 预测(d) 基于 VCV 的 E_{vd} 预测

图 3 预测模型检验结果

Fig.3 Testing results of predictive models

(a) K 插值预测结果(b) E_{vd} 插值预测结果图 4 K/E_{vd} 的克里金预测结果
Fig.4 Kriging prediction of K/E_{vd}

实度主要和细粒填料的含水率有关。1[#]测试条到 4[#]测试条的含水率逐渐接近最优含水率, 因此, 总体上压实度沿水平方向的变化较小, 而沿竖向 (1[#]到 4[#]测试条方向) 呈递增趋势。基于一元回归模型 1、2 的压实度预测结果沿水平方向存在较大的起伏差异, 而基于多元回归模型 5、7 和实测值的压实度预测结果能够较好体现“水平稳定, 竖向递增”的变化规律, 能够更好地与实际吻合。根据图 4(b)的 E_{vd} 预测结果分析可以得到相似的结论。由此可见, 基于多元回归分析的克里金插值预测方法能够较好地反映实际规律。

为了进一步分析克里金插值方法的精度并检验预测效果, 对插值结果进行误差分析, 结果如表 4 所示。在表中, 以均方根、标准均方根、标准平

均值作为评价克里金插值方法可靠性的分析指标。均方根越小，标准均方根越接近于 1，标准平均值越趋近于 0，表明插值方法越可靠。同时以相对误差作为检验插值预测效果的评价指标。相对误差越

小，说明预测值与实测值越贴近，预测结果越准确。需要明确的是，表 4 中各模型的预测误差实际上是包含了多元回归模型预测误差和克里金插值误差的综合误差。

表 4 插值结果的误差分析
Table 4 Error analysis of interpolation results

预测指标	样本来源	插值误差 (64 个样本)			预测误差 (16 个样本)	
		均方根	标准均方根	标准平均值/ 10^{-4}	平均相对误差/%	最大相对误差/%
K	实测	2.06	1.06	14.61	3.21	8.67
	模型 1	3.24	1.86	-766.32	12.51	19.56
	模型 2	3.82	2.06	-188.52	11.15	18.74
	模型 5	2.43	0.73	5.41	8.87	13.22
	模型 7	3.17	1.25	95.36	4.45	8.64
E_{vd}	实测	12.51	1.15	-98.43	8.82	24.37
	模型 3	15.99	0.83	-486.21	37.16	71.43
	模型 4	20.27	2.21	-480.33	32.55	65.20
	模型 8	11.81	1.27	-301.59	23.35	42.63
	模型 10	11.53	1.19	-152.90	18.64	33.84

由表 4 可知，模型 1、2、4 的标准均方根偏离 1 相对较远，且模型 1、2、3、4 的均方根相对其他模型较大，表明上述模型的插值精度相对较低而其余模型的插值精度相对较高。分析原因可知，一元回归模型仅考虑了常规质量检测指标与连续压实指标的相关关系，忽略了其他影响因素，与实际情况存在较大偏差。同等条件下，通过一元回归模型反演得到的压实度预测值存在更大的波动。而相邻空间的数据变化较大时往往会产生更大的插值误差，从而影响到插值的精确度。根据表 4 中的预测误差可知，基于 64 个样本实测值的克里金法预测值与 16 个检验样本实测值的平均相对误差均小于 9%，最大相对误差均小于 25%。表明克里金插值法具有较好的预测精度，能够应用于工程实际。相比其他模型，模型 7 和模型 10 的平均相对误差均较小，具有较好的预测效果。在本试验条件下，多元回归分析结合克里金插值法不仅能够较好反映真实规律，同时具备一定的工程应用精度。因此，基于多元回归分析的连续压实控制是可行的。

4 工程实例

4.1 工程概况

工程场地位于深圳机场扩建工程 2 标段 2-1 区，该区大体呈 $150\text{ m} \times 270\text{ m}$ 的规则矩形，碾压面积约为 $4 \times 10^4\text{ m}^2$ 。碾压区示意如图 5 所示。该碾压区填料采用花岗岩残积土，设计虚铺厚度 $\leq 30\text{ cm}$ ，压实度 ≥ 0.93 。碾压设备采用 SRM222C 型振动压路机，

该压路机的机械参数见 3.1 节。碾压质量的控制和验收采用本文连续压实监测模型进行。根据本文第 3 节的研究成果并结合工程实际，连续压实控制选用 VCV 作为评价指标，连续压实控制设备采用广州中海达公司生产的北斗压路机智能压实系统。为复核压实质量并进一步验证了本文模型的可靠性，在初次采用连续压实控制技术验收合格以后按照常规质量检测方法分别检测碾压区的物理指标 K 和力学指标 E_{vd} ，抽样检测数量为 21 个。 K 采用灌砂法检测， E_{vd} 采用轻型落锤仪进行动态平板载荷试验检测。碾压施工工艺严格按照现行技术规范和标准执行。



图 5 碾压区示意
Fig.5 Schematic diagram of rolling area

4.2 目标值的确定

碾压前，参照规范^[12-13]的要求在场地北侧开展

目标值的现场率定试验,得到了如表 5 所示的目标值回归模型。

由表 5 可知,模型 A、B 的均具有较强的相关性。本文采用决定系数较大的模型 A 作为应用模型,同时采用模型 B 作为对照参考。与通常的工程应用不同的是,模型 A 和模型 B 的目标值不再是恒定的,

而是将会随着施工时的碾压参数的实时变化而动态调整。多元回归时填料含水率 ω 难以实时采集,因此需预先在碾压区均匀选取 20 个检测点(每 2 000 m² 选取一个含水率测点)检测填料的含水率,再参考 3.3.2 节方法对碾压区的含水率进行插值预测。根据现场检测数据,填料的含水率变化范围为 10.8%~

表 5 目标值的回归模型
Table 5 Regression model of target value

模型编号	指标	回归模型	R^2
模型 A	E_{vd}	$[VCV] = 0.39[E_{vd}] + 14.26 + 0.31\omega - 0.73f + 3.217a + 2.31v$	0.83
模型 B	K	$[VCV] = 135[K] - 90.02 + 0.98\omega - 0.73f + 8.67a - 7.32v$	0.78

13.2%, 含水率插值预测误差约为 23%。

4.3 压实质量验收

在碾压区进行连续压实监测时,目标值将根据实时碾压参数进行动态调整。采用克里金法分别得到 VCV 实测值与目标值的空间分布结果,并根据两者结果采用式(5)判断任意位置处的压实程度,再根据式(6)计算压实合格率,当合格率不小于 95%时通过验收。在第 6 遍碾压完成后,根据模型 B 评估得到的压实合格率为 96.1%,表明碾压区达到连续压实控制质量验收标准。第 6 遍碾压的目标值分布和压实程度评价分别如图 6 和图 7 所示。

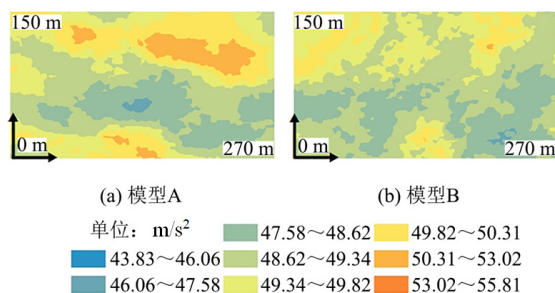


图 6 第 6 遍碾压的目标值分布
Fig.6 Distribution of the target value of the sixth rolling

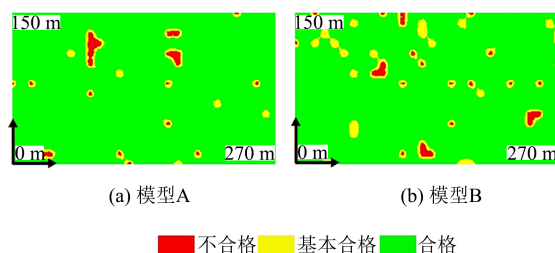


图 7 第 6 遍碾压的压实程度评价
Fig.7 Compaction evaluation of the sixth rolling

由图 6 可知,不同位置处的基于多元回归目标值是变动的,这是由于不同位置处的实时碾压参数

不同所引起的。目标值变化范围为 43.8~55.8 m/s²,变化率约为 27.4% (以最小值为基准)。由此可见,即便按照规范要求采取措施确保碾压参数保持一致的情况下,不可控的碾压参数波动仍然对目标值产生了显著的影响。由图 7 可知,不同模型的压实程度分布结果不同,这是由不同模型的目标值差异和实测值的分布情况共同决定的。考虑到机场扩建工程为重要工程,对质量要求严格,因此压实程度判定为合格的区域不包括图 7 中基本合格部分。结合图 6 和图 7 可知,模型 A 整体上的目标值相比模型 B 较大,但是模型 A 评估的合格面积与模型 B 相当。由式(5)可知,压实程度评估实际上是目标值与实测值的“匹配”问题。假定实测值是一个恒定的值,那么目标值要求越高,则评估为合格的面积就会越小。而实际上连续压实指标实测值是随着振动条件实时变化的,在目标值要求较高的情况下能够得到相近的合格面积,在相同的碾压条件下要求模型 A 对实测值具有更好的“针对性”,能够形成更好的“匹配”。因此,上述结果反映出了模型 A 具有更高的精确度,这与表 5 中的决定系数结果相吻合,从而也进一步验证了本文方法的可靠性。

采用本文方法通过验收后在碾压区随机抽取 21 个检测点进行常规质量检测,压实度和动态变形模量均满足设计要求。质量验收结果如表 6 所示。

由表 6 可知,随着碾压遍数的增加,合格率均有所增长,能够较好反映出实际规律。采用克里金法得到的验收结果与常规质量检测验收结果一致,表明了采用克里金法进行连续压实控制具有一定的可行性;对比表 6 中的结果可知,相比现行规范方法,采用克里金法进行质量验收更为合适。其主要原因在于,现行规范方法将碾压仓面离散成若干个独立的检测单元,往往容易得到压实度突变的评估结果。而采用克里金插值原理得到的是连续分布的

数据,更贴近压实程度连续变化的实际。另外在计算分辨率上,现行规范方法的合格率计算分辨率为 1 m^2 ,远远大于克里金法的计算分辨率。验收结果表明,基于碾压参数多元回归分析的连续压实监测模型的应用效果良好。截止目前,在2-1区碾压施工中采用本文方法进行质量验收的碾压面积累计约 $6\times 10^5\text{ m}^2$,碾压区的常规质量检测均满足设计要求。

表6 压实质量验收结果

Table 6 Acceptance results of compaction quality

合格率评估方法	评估模型 (合格标准)	合格率/%			验收结果 (第6遍)
		第4遍	第5遍	第6遍	
克里金法	模型A	64.4	88.3	96.1	合格
	模型B	68.9	86.1	95.4	合格
现行规范方法	模型A	55.7	84.9	91.7	不合格
	模型B	59.4	77.6	85.4	不合格
K检测	$\geq 93\%$	—	—	90.5	合格
E_{vd} 检测	$\geq 50\text{ MN/m}^2$	—	—	100	合格

5 结 论

现行连续压实控制技术规定了碾压参数相对不变的应用条件,而现实中的碾压参数往往难以实时、全面、精准的控制,严重限制了该技术的适用性。本文采用多元回归模型和克里金插值法评价碾压区的压实程度,利用压实程度合格率作为质量验收指标进行连续压实监测,有效地减小了实际工程中碾压参数动态变化对连续压实控制产生的不利影响。本文得到的主要结论如下:

(1)基于碾压参数多元回归分析的连续压实监控方法拓宽了现有连续压实控制技术的应用条件,使该技术应用更贴近实际,从而增加了现有技术的适用范围和准确性。

(2)遵循本文所提出的多元回归模型和评价方法,2-1区碾压质量均能满足设计要求,表明了将本文方法引入工程应用具有一定的可行性。

(3)本文工程应用研究只针对VCV指标和花岗岩残积土填料,所得到的多元回归模型及评估方法是否适用于其他连续压实控制指标和填料还需进一步的研究和讨论。

参 考 文 献

[1] 徐光辉. 路基连续压实控制动力学原理与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
XU Guang-hui. Dynamic principle and engineering

application for continuous compaction control of fill engineering of subgrade[M]. Beijing: Science Press, 2016.

- [2] CHRISTOPHER M S, KAM W NG, KHAIED K, et al. Benefit-cost analysis and application of intelligent compaction for transportation[J]. **Transportation Geotechnics**, 2016, 9(3): 26-32.
- [3] MANIK B, MOEEN N, SYED A I, et al. Quality control of subgrade soil using intelligent compaction[J]. **Innovative Infrastructure Solutions**, 2016, 1(1): 112-117.
- [4] 王翔, 焦倏, 聂志红, 等. 基于地统计学的路基连续压实均匀性评价[J]. 岩土力学, 2016, 37(12): 3545-3552.
WANG Xiang, JIAO Wei, NIE Zhi-hong, et al. Evaluation of roller-integrated compaction uniformity based on geostatistics[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(12): 3545-3552.
- [5] 张家玲, 徐光辉, 蔡英. 连续压实路基质量检验与控制研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(4): 1141-1146.
ZHANG Jia-ling, XU Guang-hui, CAI Ying. An investigation on quality inspection and control for continuously compacting subgrade[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(4): 1141-1146.
- [6] 刘东海, 王倩, 崔博, 等. 连续监控下土石坝碾压参数的控制标准及其确定方法[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(9): 1712-1716.
LIU Dong-hai, WANG Qian, CUI Bo, et al. Control standards for compaction parameters of earth-rock dams under continuous construction process monitoring[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(9): 1712-1716.
- [7] LIU D H, LI Z L, LIAN Z H. Compaction quality assessment of earth-rock dam materials using roller-integrated compaction monitoring technology[J]. **Automation in Construction**, 2014, 44(8): 234-246.
- [8] MICHAEL A, MOONEY M A, ROBERT V, et al. Intelligent soil compaction systems. National cooperative highway research program report 676[R]. Washington D.C.: Transportation Research Board, 2010.
- [9] MOONEY M A. Intelligent soil compaction systems[M]. [S. l.]: Transportation Research Board, 2010.
- [10] VAV S P J, MOONEY M A. Capturing nonlinear vibratory roller compactor behavior through lumped parameter modeling[J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 2008, 134(8): 684-693.

- [11] XIAO Peng-li, YUN Nan-teng, LI Li-xin, et al. Experimental investigation of characteristics of vibratory compaction system with different water saturation[J]. **Applied Mechanics and Materials**, 2010, 979(29): 155-163.
- [12] 中华人民共和国交通运输部. JT/T 1127—2017 公路路基填筑工程连续压实控制系统技术条件[S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. JT/T 1127—2017 Technical conditions for continuous compaction control system for highway subgrade filling project[S]. Beijing: China Communications Press, 2017.
- [13] 中国铁路总公司. Q/CR 9210—2015 铁路路基填筑工程连续压实控制技术规程[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
China Railway Corporation. Q/CR 9210—2015 Technical specification for continuous compaction control of railway subgrade filling project[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017.
- [14] European Committee for Standardization. PD CEN/ TS 17006: 2016 Earthworks continuous compaction control[S]. London: BSI Standards Limited, 2017.
- [15] DAVI J W, MARK J T. Field assessment and specification review for roller integrated compaction monitoring technologies[J]. **Advances in Civil Engineering**, 2011, 2011: 1-15.
- [16] CHRISTOPHER L, MEEHAN, DANIEL V, et al. Using continuous compaction control systems within an earthwork compaction specification framework. Delaware department of transportation research program report[R]. Newark, Delaware: Delaware Center for Transportation, University of Delaware, 2013.
- [17] 尹松, 孔令伟, 杨爱武, 等. 花岗岩残积土填料路用工程特性室内试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 2): 287-293.
YIN Song, KONG Ling-wei, YANG Ai-wu, et al. Indoor experimental study of road performance of granite residual soil for subgrade filling materials[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(Suppl.2): 287-293.
- [18] LING Jian-ming, LIN Sheng, QIAN Jin-song, et al. Continuous compaction control technology for granite residual subgrade compaction[J]. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 2018, 30(12): 255-261.
- [19] PETER A B, RACHAEL A M. Principles of geographical information systems[M]. New York: Oxford University Press, 1998.