

# 基于智能压实特征值的压实稳定性模型

黄晓銮

福建林业职业技术学院建筑工程系,福建 南平 353000

**摘要:**为解决土体压实质量的稳定性问题,将判定稳定性问题转换为求解最佳碾压遍数,通过观察不同碾压遍数下压实特征值的变化规律,采用 $3\sigma$ 准则-位置剔除的综合方法筛选测试数据,剔除智能压实质量评价中出现的异常特征值,建立并推导压实特征值与碾压遍数的函数模型。结合现场检测数据,将该模型与采用传统筛选数据方法得到的压实特征值与碾压遍数的函数模型进行对比分析。结果表明:该模型可靠性更高,可为评判不同土体的压实稳定性提供参考。

**关键词:**智能压实;压实稳定性;最佳碾压遍数; $3\sigma$ 准则-位置剔除

**中图分类号:**U416.1<sup>+</sup>1

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-0032(2023)04-0092-06

**引用格式:**黄晓銮. 基于智能压实特征值的压实稳定性模型[J]. 山东交通学院学报,2023,31(4):92-97.

HUANG Xiaoluan. Compaction stability model based on intelligent compaction eigenvalue[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2023, 31(4): 92-97.

## 0 引言

路基的压实质量是道路正常运营和车辆安全行驶的重要保障。传统的路基压实质量检测方法主要采用碾压结束后的随机取样点测法,属于结果控制,很难及时发现压实不足的路段,易引起返工、拖延工期、增大成本等问题<sup>[1-3]</sup>。可采用智能压实技术解决此问题。智能压实技术基于压路机振动轮和土体相互作用原理,通过实时分析处理碾压过程中振动轮上加速度传感器的信号,得到表征土体压实质量的指标,评定路基压实状态。压实稳定性反映土体压实状态随碾压遍数变化的性质,表征填筑体物理力学性能的稳定程度,压实稳定性良好的土体可长期、有效地承受相应的重复荷载,保持良好的土体结构使用状态<sup>[4-8]</sup>。

和民锁<sup>[9]</sup>基于信号频谱分析研究压实遍数与智能压实特征值的相关性,发现路基压实特征值及压实质量评价指标均随碾压遍数的增大而增大,最终趋于稳定。闫国栋<sup>[10]</sup>发现智能压实指标(压实计测量值)随压实遍数的增大而增大,测试开始阶段曲线斜率较大,随后趋于0,表明压实计测量值随压实遍数的增大而增长减缓并趋于稳定。奥地利智能压实规范规定,当压实区域智能压实数据的变异系数小于0.2,且全部数据为0.8~1.5倍压实特征值时,该压实区域的压实均匀性合格<sup>[11]</sup>。Vennapusa<sup>[7]</sup>采用数理统计指标评价压实质量的缺陷,引入半方差模型,提出的压实均匀性评价指标的精度比传统压实评价指标更好,可靠性更高。美国明尼苏达州运输部(MnDOT)规定当所有压实数据均大于0.8倍压实特征值,0.9~1.2倍压实特征值范围外的压实数据占总智能压实数据的10%时,该检测区域通过压实均匀性检验<sup>[12]</sup>。徐光辉<sup>[13]</sup>分析不同压实数据的评判结果,综合变异系数指标,提出基于 $3\sigma$ 准则的压实均匀性评价方法,并通过相关实例验证可行性。部分智能压实质量评价体系基于简单的数理统计指标,如标准差、平均值、变异系数等,这些指标可较好地评价传统压实检测指标,但智能压实数据量较大,用普通的数理

收稿日期:2022-05-12

基金项目:福建省教育厅中青年教师教育科研项目(JAT201115)

作者简介:黄晓銮(1988—),女,福建古田人,讲师,工学硕士,主要研究方向为土木工程,E-mail:2361832355@qq.com。

统计方法无法揭示大量压实数据中的潜在信息。大多数已有研究仅考虑智能压实指标的数值,忽略智能压实指标的位置信息,无法可靠地筛选稳定性评价数据。

本文建立压实特征值与碾压遍数的函数模型,采用  $3\sigma$  准则-位置剔除综合方法剔除异常压实特征值,得到最佳碾压遍数,并结合现场试验数据,论证采用  $3\sigma$  准则-位置剔除综合方法评价压实质量的可靠性,以期可靠评价不同土体的压实稳定性。

## 1 压实稳定性评价方法

Facas 等<sup>[14]</sup> 基于数理统计理论,采用压实数据的变异系数评价压实均匀性。随压实遍数的增大,压实的变异系数增大,并最终趋于稳定。

通常采用均值变化率法判定智能压实稳定性,即通过同一碾压轮迹前、后 2 遍压实数据的变异系数  $E_{CV}$  的差异反映压实稳定性,第  $i$  遍与第  $i-1$  遍振动压实特征值的变化率

$$\delta_i = (E_{CV,i} - E_{CV,i-1}) / E_{CV,i-1},$$

式中:  $E_{CV,i}$  为第  $i$  遍振动压实特征值,  $E_{CV,i-1}$  为第  $i-1$  遍振动压实特征值。

$1-[\delta]$  为容许变化率,即稳定性控制指标。  $\delta_i \leq 1-[\delta]$  ( $i=i_{[\delta]}, i_{[\delta]}$  为对应的压实遍数) 时,可认为满足压实稳定性。随碾压遍数的增大,碾压前、后 2 次压实特征值的变化率逐渐减小,理论上趋于 0,现行智能压实规范一般采用  $[\delta] = 95\%$  评价压实稳定性<sup>[15]</sup>。

## 2 稳定性判定函数模型

### 2.1 函数模型建立

构建压实稳定性模型,需根据智能压实数据的变异系数变化曲线形态,选择负指数函数  $y = e^{-x}$ ,变换该函数,公式为:

$$y = C_1 - C_2 e^{-C_3 x},$$

式中  $C_1, C_2, C_3$  为 3 个常数。

根据指数函数的特殊性可知:  $x=0$  时,  $y = C_1 - C_2$ ;  $x \rightarrow +\infty$  时,  $y = C_1$ ;  $C_1$  为负指数函数的最大值。类比压实数据的变异系数压实曲线,可得:  $C_1 = E_{CV, \max}$ ,  $E_{CV, \min} = E_{CV, \max} - C_2$ , 其中,  $E_{CV, \min}$  为智能压实第 1 遍的压实值,  $E_{CV, \max}$  为压实曲线中压实值无限趋近的数字。

压实数据曲线函数可初步表示为:

$$y = E_{CV, \max} - (E_{CV, \max} - E_{CV, \min}) e^{-C_3(i-1)}. \quad (1)$$

令  $x = i-1$ , 式(1)变为:

$$y = E_{CV, \max} - (E_{CV, \max} - E_{CV, \min}) e^{-C_3 x}, \quad (2)$$

式(2)为压实稳定性模型,根据式(2)补充压实数据的变异系数压实曲线,结果如图 1 所示。

### 2.2 最优压实遍数求解

为求解满足稳定性要求的压实遍数  $i_{[\delta]}$ , 需将  $i_{[\delta]}$  包含到压实稳定性模型表达式中,并根据函数求解,步骤为:求解每遍压实的特征值→绘制压实特征值数据曲线→通过数值拟合,求解曲线函数→得到最优压实遍数  $i_{[\delta]}$ →求解常数  $C_4$ →通过函数求解  $i_{[\delta]}$ 。由式(2)可知,含有压实遍数  $i$  的系数项为  $-C_3(i-1)$ , 若使加入  $(i_{[\delta]}-1)$  项后的系数项与原系数项相同,原系数  $C_3$  变为  $C_4$ , 公式为:

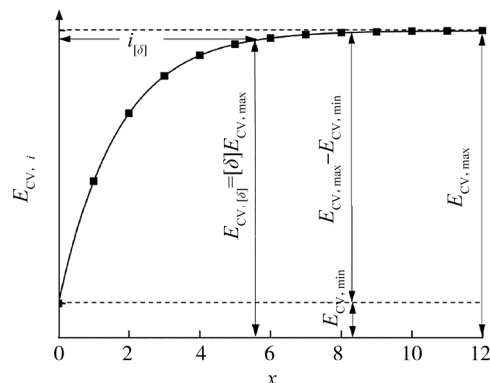


图1 压实特征值随压实遍数变化的曲线模型

$$\begin{cases} -C_3(i-1) = -C_4[(i-1)+i_{[\delta]}-1] \\ -C_3(i-1) = -C_4[(i-1)-i_{[\delta]}-1] \\ -C_3(i-1) = -C_4(i-1)(i_{[\delta]}-1) \\ -C_3(i-1) = -C_4(i-1)/(i_{[\delta]}-1) \end{cases} \circ$$

按除法原则添加 $(i_{[\delta]}-1)$ ,  $i=i_{[\delta]}$ 时,可消除 $i_{[\delta]}$ 并求解 $C_4$ 。如果根据压实特征值拟合求解得到 $C_3$ ,可求得 $i_{[\delta]}-1=C_4/C_3$ ,确定对应压实工况下最经济合理的压实遍数 $i_{[\delta]}$ 。压实稳定性模型函数式可改写为:

$$y=E_{CV,max}-(E_{CV,max}-E_{CV,min})e^{-C_4x/x_{[\delta]}}, \tag{3}$$

式中 $x_{[\delta]}=i_{[\delta]}-1=C_4/C_3$ 。

式(3)可表示压实数据的变化规律,如图 1 所示。求解式(3)中 $C_4$ 。由图 1 及相关定义可知, $i=i_{[\delta]}$ (即 $x=x_{[\delta]}$ )时, $E_{CV,[\delta]}=[\delta]E_{CV,max}$ ,将 $x=x_{[\delta]}$ 代入式(3),可得:

$$[\delta]E_{CV,max}=E_{CV,max}-(E_{CV,max}-E_{CV,min})e^{-C_4}, \tag{4}$$

对式(4)两边进行对数函数运算,求解可得:

$$C_4=-\ln[(E_{CV,max}-E_{CV,min})/E_{CV,max}]-\ln(1-[\delta])。$$

由 $i_{[\delta]}-1=C_4/C_3$ 可求得满足压实稳定性要求且最经济合理的压实遍数 $i_{[\delta]}$ 。

3 智能压实现场试验

在某高铁路基试验段(里程为 DK107+486.02—DK107+578.60)进行智能压实试验,现场填料及试验段部分参数如表 1 所示。现场采用 8208K-5 压路机,压路机主要标定参数如表 2 所示。

表 1 现场填料及试验段部分参数

| 松铺厚度/cm | 含水率/% | 不均匀系数 | 曲率系数 | 路基几何要素 |          |      |
|---------|-------|-------|------|--------|----------|------|
|         |       |       |      | 填高/m   | 坡度       | 宽度/m |
| 35      | 4.3   | 14.8  | 1.39 | 7.5    | 1 : 1.75 | 13.2 |

表 2 8208K-5 压路机主要标定参数

| 质量/t | 振幅/mm |      | 频率/Hz |     | 激振力/kN |     | 行驶速度/(km·h <sup>-1</sup> ) |
|------|-------|------|-------|-----|--------|-----|----------------------------|
|      | 低功率   | 高功率  | 低功率   | 高功率 | 低功率    | 高功率 |                            |
| 20   | 0.80  | 1.46 | 29    | 35  | 270    | 350 | 3                          |

3.1 计算方法

采集智能压实指标压实计测量值 $E_{CMV}$ ,  $E_{CMV}$ 由 Thurner 等<sup>[16]</sup>于 1980 年提出。振动轮加速度幅值与其谐波(如激振频率的整数倍)振幅的指标和压实土体的刚度相关,确定 $E_{CMV}$ 的计算方法并验证其适用性<sup>[17]</sup>,公式为:

$$E_{CMV}=CA_1/A_0,$$

式中: $C$ 为常数; $A_1$ 为对压路机振动轮加速度进行频谱分析后,对应的一阶谐波的振幅; $A_0$ 为振动轮加速度对应的基频振幅。

3.2 数据处理

基于稳定的速度、行驶路径等理想状态下的压路机求得特征值变化函数,理论压实路径及压实数据点分布是均匀直线。实际压实过程中,压路机轨迹及压实数据点位分布是沿行进方向左右凸出的曲线,不同碾压遍数对应数据的分布位置不完全一致。压实稳定性是相同位置不同碾压遍数对应的压实状态的变化情况,如果直接用 $3\sigma$ 准则剔除异常压实特征值,仅考虑智能压实指标的数值,忽略了智能压实指

标的位置信息。因此,还需进行位置剔除,如果某位置的数据在压实某 1 遍或几遍有缺失,则剔除此位置的数据,保证在相同位置每 1 遍压实都有对应的压实数据。

为得到更精确的数据,综合考虑数值-位置信息,采用  $3\sigma$  准则-位置剔除的综合方法,筛选用于稳定性评价的数据,比现有评价方法更合理,数据更可靠。进行现场试验时,为获得较详细的  $E_{CMV}$ ,每层填料压实 8 遍,筛选压实数据的有效值。

为验证  $3\sigma$  准则-位置剔除的数据筛选方法相较  $3\sigma$  准则的可靠性,选取任一层(试验选取第 3 层)的数据,分别采用  $3\sigma$  准则和  $3\sigma$  准则-位置剔除的方法筛选数据,按最大熵模型程序,分别求得压实 1~8 遍对应的特征值  $\lambda_i$  和压实前、后 2 遍特征值的变化率  $w$ ,如表 3 所示。根据表 3 的测量数据拟合曲线,如图 2 所示。

表 3 试验段第 3 层  $E_{CMV}$  压实数据特征值

| $i$ | $\lambda_i$  |                   | $w/\%$       |                   |
|-----|--------------|-------------------|--------------|-------------------|
|     | $3\sigma$ 准则 | $3\sigma$ 准则-位置剔除 | $3\sigma$ 准则 | $3\sigma$ 准则-位置剔除 |
| 1   | 21.8         | 22.3              | 0            | 0                 |
| 2   | 30.3         | 32.2              | 38.9         | 44.3              |
| 3   | 37.9         | 38.9              | 24.7         | 20.8              |
| 4   | 43.9         | 43.4              | 16.1         | 11.6              |
| 5   | 48.0         | 46.6              | 9.3          | 7.4               |
| 6   | 48.3         | 48.5              | 0.6          | 4.3               |
| 7   | 50.9         | 49.8              | 5.4          | 2.7               |
| 8   | 52.0         | 50.8              | 2.2          | 2.0               |

注: $w=(\lambda_{i+1}-\lambda_i)/\lambda_i\times 100\%$ 。

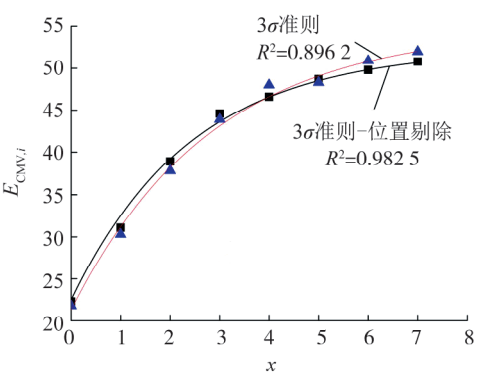


图 2 2 种数据筛选方式压实特征值的拟合曲线

由表 3 可知:采用  $3\sigma$  准则筛选数据,在第 5 遍压实结束后,压实稳定性满足要求;采用  $3\sigma$  准则-位置剔除方法,第 6 遍压实结束后,压实稳定性满足要求。

由图 2 可知, $3\sigma$  准则筛选数据拟合曲线的相关系数小于  $3\sigma$  准则-位置剔除方法。分析原始数据的坐标,发现第 5、7、8 次压实轨迹较曲折,部分相邻的碾压带重复被压,压实数据较大。重复压实区域较多,采用  $3\sigma$  准则无法提取数据;采用  $3\sigma$  准则-位置剔除综合方法可通过点位剔除重复压实区域,提高数据的可靠性。

采用  $3\sigma$  准则-位置剔除方法删除数据,根据最大熵模型程序对每遍压实数据求解最大熵模型对应的特征值,结果如表 4 所示。

表 4 试验段 3 层  $E_{CMV}$  压实数据特征值

| $i$ | $\lambda_i$ |       |       | $w/\%$ |       |       |
|-----|-------------|-------|-------|--------|-------|-------|
|     | 第 1 层       | 第 2 层 | 第 3 层 | 第 1 层  | 第 2 层 | 第 3 层 |
| 1   | 21.5        | 24.7  | 22.3  | 0      | 0     | 0     |
| 2   | 34.1        | 33.7  | 32.2  | 58.6   | 36.4  | 44.3  |
| 3   | 43.5        | 41.5  | 38.9  | 27.6   | 23.1  | 20.8  |
| 4   | 49.8        | 46.1  | 43.4  | 14.5   | 11.1  | 11.6  |
| 5   | 54.9        | 49.1  | 46.6  | 10.2   | 6.5   | 7.4   |
| 6   | 56.8        | 51.3  | 48.5  | 3.5    | 4.1   | 4.3   |
| 7   | 58.1        | 52.5  | 49.8  | 2.3    | 2.3   | 2.7   |
| 8   | 58.9        | 53.4  | 50.8  | 1.2    | 1.7   | 2.0   |

由表 4 可知,压实第 1、2 遍特征值明显增大。原因是实际压实第 1、2 遍时,土体由松铺状态迅速挤密,变化明显,压实特征值明显增大,符合压实原理。第 6 遍压实前、后 2 遍的压实值变化率较低,均小于 5%,满足现有智能压实规范。土体的密实度较高,若压路机继续压实,压实特征值变化较小。

压实 8 遍后,第 1、2、3 层的特征值为 50~60,不同层的特征值有一定差别,原因是压实第 1 层时,下层的土体结构较简单,即下卧层组成较简单,压实过程中产生的一阶谐波振幅较小。随层数的增加,下卧层组成较复杂,既有原地面的土体,又加入不同层的土体,一阶谐波的振幅随之增大,压实特征值相应减小。

3.3 相关性校验

为求解压实值变化函数,根据式(3)将 3 层压实特征值拟合对应的指数函数,曲线如图 3 所示。压实指标  $E_{CMV}$  代替指数函数的  $E_{CV}$ 。采用现有智能压实规范规定的稳定性评价标准,即变化率不超过 5%,指数函数中的  $[\delta]=95\%$ ,即  $i_{[\delta]}=i_{95\%}$ 。图 3 指引线表示前、后 2 遍压实值的变化率为 5%时对应的  $x$ ,可推导对应的压实遍数。

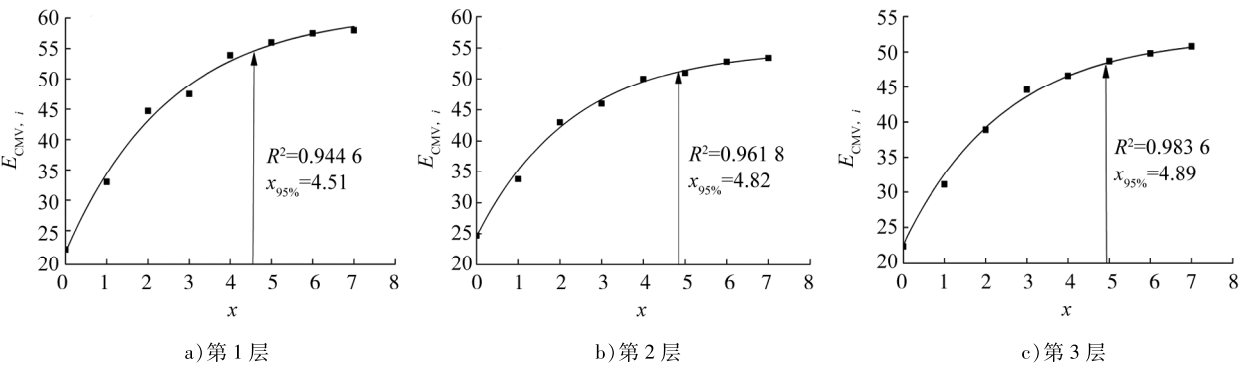


图 3 3 层  $E_{CMV}$  压实特征值拟合函数曲线

将 3 层拟合结果及相关参数汇总于表 5,并进行分析。由表 5 可知:采用  $3\sigma$  准则-位置剔除方法,试验段 3 层  $E_{CMV}$  数据的拟合曲线的相关系数均大于 0.900 0,所得函数精度较高,可靠性较好。该指数模型可准确描述 3 组  $E_{CMV}$  数据的趋稳过程,此类填料对应的  $E_{CMV}$  的适应性较好。3 层数据对应的  $i_{95\%}<6$ ,即压实到第 6 遍时可满足压实稳定性。

表 5  $E_{CMV}$  数据模型拟合结果

| 层数 | $x_{95\%}$ | $i_{95\%}$ | 最优碾压遍数 | 相关系数 $R^2$ |
|----|------------|------------|--------|------------|
| 1  | 4.49       | 5.49       | 6      | 0.944 6    |
| 2  | 4.82       | 5.82       | 6      | 0.961 8    |
| 3  | 4.89       | 5.89       | 6      | 0.983 6    |

4 结论

- 1) 观察不同压实遍数下压实特征值曲线的变化规律,由指数函数最基本形式推导不同压实遍数(包含达到压实稳定性所对应的压实遍数)对应的压实特征值与碾压遍数的函数模型。
- 2) 综合考虑智能压实数据的数值和位置信息,采用  $3\sigma$  准则-位置剔除的综合方法,筛选用于稳定性评价的数据,比仅采用  $3\sigma$  准则的方法更合理可靠。
- 3) 分析现场压实计测量值数据,拟合准确描述 3 组压实计测量值数据趋稳过程的函数,求解最优碾压遍数,压实第 6 遍时满足压实稳定性要求,为实际压实作业提供数据参考。

参考文献:

[1] LIU D, CHEN J J, LI S. Collaborative operation and real-time control of roller fleet for asphalt pavement compaction[J].

- Automation in Construction, 2019, 98:16–29.
- [2] ZHU X Y, BAI S J, XUE G P, et al. Assessment of compaction quality of multi-layer pavement structure based on intelligent compaction technology[J]. Construction and Building Materials, 2018, 161:316–329.
- [3] 赵秀璞. 路基智能压实控制技术研究[D]. 西安:长安大学, 2016:13–19.  
ZHAO Xiupu. Study on intelligent compaction control technology of subgrade[D]. Xi'an:Chang'an University, 2016:13–19.
- [4] MOONEY M A, RINEHART R V. In situ soil response to vibratory loading and its relationship to roller-measured soil stiffness[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(8):1022–1031.
- [5] FACAS N W, RINEHART R V, MOONEY M A. Development and evaluation of relative compaction specifications using roller-based measurements[J]. Geotechnical Testing Journal, 2011, 34(6):129–135.
- [6] COMMURI S, MAI A. Field validation of the intelligent asphalt compaction analyzer[C]//Proceedings of Mediterranean Conference on Control and Automation. [S.l.]:IEEE Computer Society, 2009:651–656.
- [7] VENNAPUSA P K R, WHITE D J, MORRIS M D. Geostatistical analysis for spatially referenced roller-integrated compaction measurements[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 136(6):813–822.
- [8] 吴梁. 路基土压实度检测技术研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2008.  
WU Liang. Research on the compaction degree detection technology of subgrade soil[D]. Chongqing:Chongqing Jiaotong University, 2008.
- [9] 和民锁. 高速铁路路基填筑质量检测方法控制指标及评价体系研究[D]. 长沙:中南大学, 2010.  
HE Minsuo. Research of test methods, acceptance criteria and evaluation system for compaction quality of highspeed railway subgrade[D]. Changsha:Central South University, 2010.
- [10] 闫国栋. 高速铁路路基连续压实质量控制研究[D]. 长沙:中南大学, 2010.  
YAN Guodong. Research on continuous compaction quality control of high-speed railway subgrade[D]. Changsha:Central South University, 2010.
- [11] WHITE D J, VENNAPUSA P R, GIESELMAN H H. Field assessment and specification review for roller-integrated compaction monitoring technologies[J]. Advances in Civil Engineering, 2011(2):783836. 1–783836. 15.
- [12] 田利锋. 路基连续压实质量评价方法研究[D]. 成都:西南交通大学, 2015.  
TIAN Lifeng. Study on evaluation method for compaction quality of continuous compaction control of railway subgrade[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University, 2015.
- [13] 徐光辉. 路基系统形成过程动态监控技术[D]. 成都:西南交通大学, 2005.  
XU Guanghui. Technique of dynamic monitor on forming process of subgrade system[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University, 2005.
- [14] FACAS N W, MOONEY M A. Characterizing the precision uncertainty in vibratory roller measurement values[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2012, 40(1):43–51.
- [15] 全国交通工程设施(公路)标准化技术委员会(SAC/TC 223). 公路路基填筑工程连续压实控制系统技术条件:JT/T 1127—2017[S]. 北京:人民交通出版社, 2017.
- [16] THURNER H, SANDSTRÖM Å. A new device for instant compaction control [C]//Proceedings of International Conference on Compaction. 1980, 2:611–614.
- [17] HU W, JIA X Y, ZHU X Y, et al. Investigating key factors of intelligent compaction for asphalt paving: a comparative case study[J]. Construction and Building Materials, 2019, 229:116876.

## Compaction stability model based on intelligent compaction eigenvalue

*HUANG Xiaoluan*

*Department of Architectural Engineering, Fujian Forestry Vocational and Technical College, Nanping 353000, China*

**Abstract:** To solve the stability issue of soil compaction quality, the stability problem is transformed into finding  
(下转第 108 页)