

文章编号:1671-1637(2026)08-0061-12

级配粗粒土机场道基累积塑性应变 特征及预估模型

李冬雪^{*1}, 孟晓慧², 钟杰², 李聪³

(1. 重庆交通大学 交通运输学院, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074;

3. 桂林电子科技大学 建筑与交通工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要:为揭示颗粒级配、应力状态与湿度条件耦合作用下粗粒土道基累积塑性变形演化规律,解决机场道基长期循环荷载下不均匀沉降问题,采用分形维数单指标替代传统双指标表征粗粒土级配,基于 Talbot 分形级配方程确定粗粒土最优级配区间,并选取 4 组典型级配开展重复加载三轴试验,系统研究了级配、循环动荷载及干湿循环作用对压实粗粒土累积塑性应变的影响规律;通过对比典型累积变形预估模型,筛选出适用于粗粒土道基填料的基础模型,分析模型拟合参数与分形维数、循环应力比、湿度状态的统计关联,提出可同时考虑三者耦合影响的修正预估模型并验证精度。研究表明:循环应力比对累积塑性应变发展具有显著控制作用,将偏应力与围压的比值控制在较低水平(不大于 1.23)可有效抑制累积塑性变形发展;随分形维数增大,累积塑性应变呈先减小后增大的趋势,当粗粒土达到最大干密度(分形维数为 2.49)时,其累积塑性应变最小;干湿循环作用显著加剧了粗粒土的塑性变形,当循环次数大于 7 时,土体变形由塑性安定阶段过渡至塑性蠕变阶段;基于 Monismith 模型构建的修正预估模型,对不同循环应力比、分形维数及湿度条件下粗粒土道基的累积塑性应变具有良好预测效果。研究成果可为机场道基变形控制、级配优化、长期服役安全评价提供理论依据与技术支持。

关键词:机场道基;预估模型;动三轴试验;累积塑性应变;分形维数

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

DOI:10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.241

Cumulative plastic strain characteristics and prediction models of graded coarse-grained soil airport subgrade

LI Dong-xue^{*1}, MENG Xiao-hui², ZHONG Jie², LI Cong³

(1. College of Traffic & Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. School of Architecture and Transportation Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi, China)

Abstract: To reveal the evolution law of cumulative plastic deformation of coarse-grained soil subgrade under the coupling effect of particle gradation, stress state, and moisture condition, and to solve the differential settlement problem of airport subgrade under long-term cyclic loading, fractal dimension was adopted as a single index to replace the traditional dual indices for characterizing the gradation of coarse-grained soil. The optimal gradation interval of coarse-

出版历程:2026-01-07 收稿,2026-03-13 修回,2026-03-20 录用

基金项目:国家自然科学基金项目(51908095);重庆市自然科学基金项目(CSTB2023NSCQ-MSX1044)

* 通信作者:李冬雪(1983-),女,黑龙江哈尔滨人,副教授,工学博士,博士后,E-mail:lidongxue@cqjtu.edu.cn.

引用格式:李冬雪,孟晓慧,钟杰,等.级配粗粒土机场道基累积塑性应变特征及预估模型[J].交通运输工程学报,2026,26(8):61-72.

Citation:LI Dong-xue, MENG Xiao-hui, ZHONG Jie, et al. Cumulative plastic strain characteristics and prediction models of graded coarse-grained soil airport subgrade[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(8): 61-72.

grained soil was determined based on the Talbot fractal gradation equation, and four groups of typical gradations were selected to carry out repeated loading triaxial tests. The influences of gradation, cyclic dynamic loading, and dry-wet cycles on the cumulative plastic strain of compacted coarse-grained soil were systematically investigated. By comparing typical cumulative deformation prediction models, a basic model suitable for coarse-grained soil subgrade fillers was screened out, the statistical correlations between model fitting parameters and fractal dimension, cyclic stress ratio, and moisture state were analyzed, and a modified prediction model simultaneously considering the coupled effects of the three factors was proposed and its accuracy was verified. The results show that cyclic stress ratio has a significant control effect on the development of cumulative plastic strain, and controlling the ratio of deviator stress to confining pressure at a low level (less than 1.23) can effectively inhibit the development of cumulative plastic deformation. With the increase of fractal dimension, the cumulative plastic strain decreases first and then increases. When the coarse-grained soil reaches the maximum dry density (fractal dimension is 2.49), its cumulative plastic strain is the smallest. Dry-wet cycles significantly aggravate the plastic deformation of coarse-grained soil, and the soil deformation transits from the plastic shakedown stage to the plastic creep stage when the number of cycles is greater than 7. The modified prediction model established based on the Monismith model has a good prediction effect on the cumulative plastic strain of coarse-grained soil subgrade under different cyclic stress ratios, fractal dimensions, and humidity conditions. The research results can provide a theoretical basis and technical support for deformation control, gradation optimization, and long-term service safety evaluation of airport subgrade.

Keywords: airport subgrade; prediction model; dynamic triaxial test; cumulative plastic strain; fractal dimension

Publication history: Received 2026-01-07; Received in revised form 2026-03-13; Accepted 2026-03-20

Funding: National Natural Science Foundation of China (51908095); Natural Science Foundation of Chongqing (CSTB2023NSCQ-MSX1044)

* **Corresponding author:** LI Dong-xue, associate professor, PhD, E-mail: lidongxue@cqjtu.edu.cn.

0 引 言

粗粒土是机场建设过程中常用的道基填料,道基填料作为典型的弹塑性体,在飞机荷载作用下将产生土颗粒破碎、相对位置重新排布及土中孔隙水排出等变形响应,随着荷载作用次数的不断增加,在竖向逐渐形成累积塑性应变^[1-4]。塑性应变通常从细观上对道面结构造成永久性损伤,理论上,基顶每产生 1 mm 永久变形,将引起 0.68 mm 的路表弯沉、0.014 3% 的基层应变与 0.021 5% 的面层应变^[5-6]。过量的塑性应变会加剧道面不均匀变形,或者加速沥青层底面疲劳开裂^[7]。可见,准确预估道基土的累积塑性应变,对提升道面结构的长期使用性能具有重要意义。

土体累积塑性应变的研究主要依托模拟试验,基于试验结果可辨识如应力、湿度、加载次数等影响

塑性应变的关键因素,进而构建表征其变形特性的模型,实现对累积塑性应变的预测^[8-9]。鉴于该研究聚焦于长期性能,试验加载常需数十万至数百万次循环,导致试验周期冗长,实施难度较高^[10-11]。除室内试验外,亦可开展现场足尺结构的加速加载模拟试验,但此类试验需投入巨额资金及人力资源^[12-15]。

当前研究普遍基于室内重复加载三轴试验,考察土类、偏应力、湿度及荷载作用次数等因素对累积塑性应变的影响规律。迄今建立的循环荷载作用下压实土体累积塑性应变预测模型呈现以下特征:其一,模型以经验型为主,自变量多选用作用次数、偏应力或围压等^[16];其二,模型中逐渐引入应力(应变)水平参量,如大气压力、静偏应力、静强度、弹性应变等应力(应变)参量^[17];其三,模型通常包含多个拟合参数,这些参数被表达为湿度、干密度、级配、颗粒含量等因素的函数^[18]。为提升预测精度,模型

结构趋于复杂、参数数量不断增加,导致模型的建立与应用过程所需的试验工作量亦显著增大。然而,将所有影响因素完全纳入预测模型难以实现,还会造成公式推导异常复杂。因此,参数数量少、物理意义明确、参数易于获取的模型更具工程应用价值。

同种岩性不同级配的粗粒料,在荷载作用下的变形规律差异显著^[19-21],干密度、级配、颗粒含量三者具有显著的相关性^[22-23],因此级配控制参数在累积塑性应变预估模型中尤为关键。目前,完整、准确地描述土体颗粒级配组成的唯一方法是绘制级配曲线(粒径分布曲线)。中国的土工试验规范规定,可采用不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 双指标协同评价土的级配优劣,如当 $C_u > 5$ 且 $1 < C_c < 3$ 时,级配良好。但理论上,相同的 C_u 和 C_c 条件下,其限制粒径、中间特征粒径和有效粒径并不唯一,这种粒组含量的不确定性,导致采用双指标定量表述土体级配对其物理(力学)性质的影响时存在诸多不便。目前,Fuller 等^[24-27]均提出了级配方程,然而受限于普适性不足,这些方程均未获得广泛应用。现阶段应用最广泛的为 Talbot 等^[28]提出的基于分形理论的级配方程,该方程因形式简洁、使用便捷,被广泛应用于级配粗粒料力学性质影响的相关研究。

基于上述分析,本研究采用分形维数这一单参数级配指标,替代传统的不均匀系数与曲率系数双参数,表征粗粒土的级配组成;运用 Talbot 分形级配方程,推导计算出重庆地区典型粗粒土的最优级配范围;选取分形维数、循环应力比及干湿循环次数作为控制变量,开展室内重复动三轴试验,系统探究上述因素对压实粗粒土累积塑性应变演化规律的影响;基于试验数据,通过对比现有文献中的典型预估模型,筛选出适用于粗粒土道基填料的累积塑性应变预估模型基准形式,深入解析模型拟合参数与级配控制参数、应力状态及湿度状态变量间的统计关联性,进而构建可综合反映级配特征、应力水平及湿度状态影响的修正预估模型,并验证模型的准确性。研究成果可为粗粒土道基填料的塑性变形控制设计提供理论依据。

1 粗粒土级配筛选

1.1 粗粒土的分形维数

土是典型的复杂多孔介质,其颗粒大小分布、排列、孔隙网络等结构均具有分形特征。粗粒土的分形特性一般采用颗粒分形模型表征,考虑到粒径数

量关系较难根据试验直接获得,研究中大多采用颗粒质量-粒径分布的分形模型,即^[28]

$$P_i = \left(\frac{d_i}{d_{\max}} \right)^{3-D} \quad (1)$$

式中: d_i 为颗粒 i 粒径; P_i 为粒径小于 d_i 的颗粒累积质量百分数; $d_{\max}$ 为最大粒径; D 为分形维数。

级配控制指标不均匀系数 C_u 与曲率系数 C_c 的计算公式为

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (2)$$

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} d_{60}} \quad (3)$$

式中: d_{60} 、 d_{30} 、 d_{10} 分别为限制粒径、中间特征粒径和有效粒径,依次表示土中小于该粒径的颗粒质量为 60%、30%、10% 时所对应的粒径。

由式(1)可得

$$d_i = d_{\max} p_i^{1/(3-D)} \quad (4)$$

将式(4)代入式(2)、(3),可得到以分形维数 D 表征的级配良好粗粒土的取值范围为 $D \in [1.89, 2.63]$ 。

1.2 试验土样

在 $D \in [1.89, 2.63]$ 区间内选取 9 个级配配制土样,并开展击实试验,结果如图 1 所示。

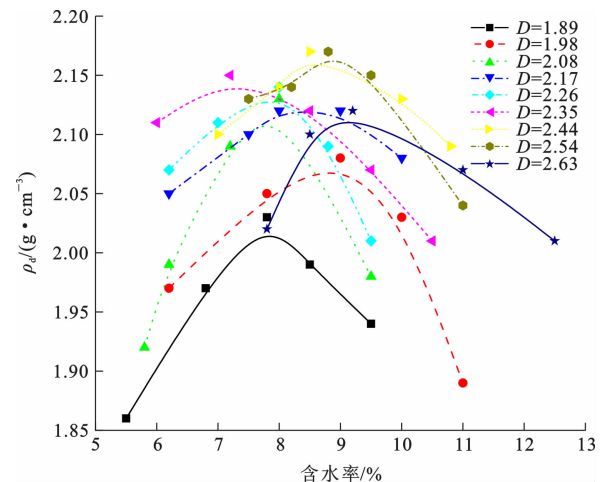
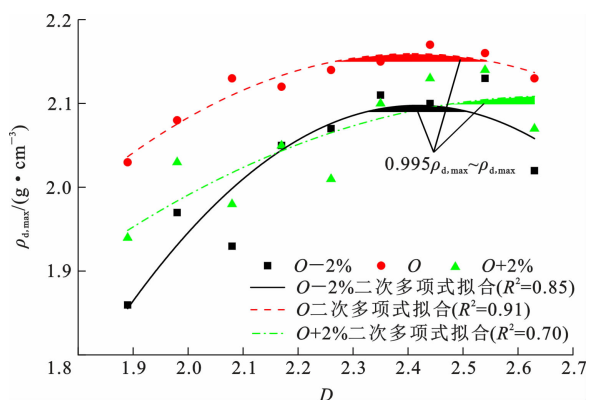


图 1 击实试验结果

Fig. 1 Compaction test results

提取 9 组土样在最佳含水率 O 、偏干燥 ($O-2\%$) 及偏湿润 ($O+2\%$) 条件下的干密度 ρ_d , 绘制不同含水率下最大干密度 $\rho_{d,\max}$ 与分形维数 D 曲线,如图 2 所示。由图 2 可知,压实土样的最大干密度 $\rho_{d,\max}$ 均随分形维数 D 的增大先升高后降低,呈现单峰抛物线变化特征,且可用二次多项式曲线进行拟合 ($R^2 > 0.70$)。不同含水率条件下,拟合曲线的峰值位置和峰值高度存在明显差异,反映出含水率对

图2 不同含水率下 $\rho_{d,max}$ 与 D 关系曲线Fig. 2 Relationship curves between $\rho_{d,max}$ and D

粗粒土最优级配具有显著影响。本研究将最优级配区间定义为:干密度为 $[0.995\rho_{d,max}, \rho_{d,max}]$ 范围时所对应的分形维数区间。其中,最佳含水率时,最优级配区间为 $D \in [2.26, 2.55]$,峰值干密度最高,为 $2.16 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$;含水率偏高 ($O+2\%$) 时,最优级配区间向分形维数更大的方向偏移,此时 $D \in [2.48, 2.63]$,本次未对该拟合曲线进行数据外推;含水率偏低 ($O-2\%$) 时,最优级配区间收窄至 $D \in [2.32, 2.51]$ 。

总体而言,含水率升高时,水分可充分润滑土颗粒,促进细颗粒填充粗颗粒间的孔隙,使得最优级配向更大分形维数(颗粒更细、级配更不均匀)方向偏移;含水率降低时,颗粒间的摩擦阻力增大,过细或过粗的级配均难以压实,最优级配区间随之收窄,且更接近中等分形维数。最佳含水率条件下,粗粒土的最优级配区间最宽、峰值干密度最高,是工程中最理想的压实状态。

图3为原始土样及4组试验土样的级配曲线,可知:原始土样细颗粒含量偏低、中等粒径颗粒富集,级配曲线陡变,颗粒粒径分布连续性差;试验土样颗粒级配则位于最佳含水率对应的最优级配区

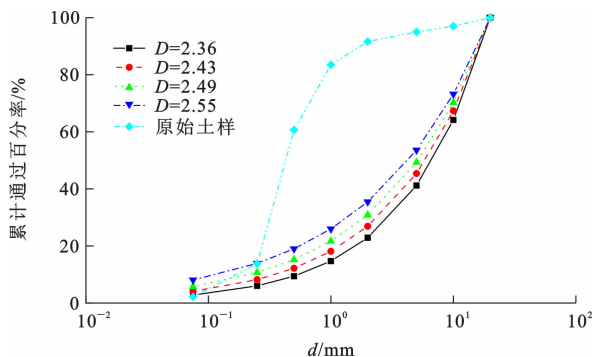


图3 原始土样及4组试验土样的级配曲线

Fig. 3 Gradation curves of original soil sample and four test soil samples

间内。

2 动三轴试验方案

2.1 试样制备

根据规范要求,制作直径为 100 mm、高度为 200 mm 的标准圆柱形试样,按最佳含水率和压实度 96% 作为控制条件备料。

2.2 试验加载方案

根据《民用机场沥青道面设计规范》(MH/T 5010—2017)道面结构层的厚度及容重对道基深度 1~5 m 处的围压进行推算,选取围压为 28 kPa 代表道基顶面所处围压状态。飞机滑行时,道基顶面的最大动应力幅值约为 100 kPa^[2],为研究不同动应力幅值下道基土体的累积塑性变形特性,选取等效循环应力比 R_c 为 0.50、0.86、1.23、1.78。其中, R_c 为动应力 σ_d 与 2 倍围压 σ_3 的比值,即

$$R_c = \sigma_d / 2\sigma_3 \quad (5)$$

飞机起降滑行过程中,振动频率与飞机的滑行重量、移动速度有关^[1],支线客机产生的振动频率约为 1 Hz,飞机动荷载对道基影响随着速度的增加而减小^[2,4]。综合考虑飞机实际振动频率及仪器测试精度,试验中荷载频率统一选用 1 Hz,动应力 σ_d 采用半正弦波方式加载^[29],加载总次数为 10 000 次。

由于南方湿热多雨地区气候干湿分明、水位涨落频繁,道基内部湿度常高于最佳含水率,所以试样干湿循环的目标含水率选取最佳含水率 O 和 $O+2\%$,干湿循环次数 C_w 选取 1、3、7 次。干湿循环试验严格按照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)中试验方法 T 0192-2019 进行控制,吸湿与脱湿控制条件为:采用电子天平准确称量,通过顶面透水石均匀地将所需加水量渗透入试样,置于密闭保湿器中宜不小于 48 h(不同土质可根据实际条件调整,但应保证土样含水率的不均匀性小于 1%),以确保试样浸润均匀。

试验以累积轴向应变达到 10% 或循环次数达到 10 000 作为试验停止条件。动三轴试验采用 SCDSY-10 型三轴试验仪,如图 4 所示,试验方案如表 1 所示。

3 试验结果

3.1 循环应力比对累积塑性应变的影响

图 5 绘制了围压 28 kPa、分形维数 $D = 2.49$ 时,不同循环应力比 R_c 下粗粒土试样的累积塑性应



图 4 动三轴试验系统
Fig. 4 Dynamic triaxial test system

表 1 加载试验方案

Table 1 Loading test scheme

试样 编号	分形维数	围压/ kPa	循环 应力比	初始含水 率/%	干湿循 环次数
1	2.36	28	1.23	7.00	1
2	2.43			7.60	
3	2.49			7.80	
4	2.55			8.20	
5	2.49		0.50	7.80	1
6			0.86		
7			1.23		
8			1.78		
9			1.23		0
10					1
11					3
12					7

变 ϵ_p 随荷载重复作用次数 N 的变化规律。由图 5 可知, R_c 对试样 ϵ_p 的影响显著, R_c 越大, ϵ_p 发展速率越快。当 R_c 较小时(如 $R_c=0.50、0.86、1.23$), 加载前期($N=400$ 次)试样的塑性变形较快发展, 但随着 N 的增加, ϵ_p 增长速率逐渐衰减, 当加载至一定循环周次后, 试样进入加载稳定阶段。根据安定理论^[30-32], 此时试样的 ϵ_p 基本处于相对安定或微弱增长的状态, 即塑性安定状态。当 R_c 较大时(如 $R_c=1.78$), 试样在循环伊始就产生较大塑性变形, 且塑性变形速率持续增大, $N=5\,000$ 次时, ϵ_p 达到 5%, 试样的应变行为表现为增量塑性破坏。

图 6 给出了不同加载次数 N 下, 累积塑性应变 ϵ_p 与循环应力比 R_c 的关系曲线。 R_c 越大, ϵ_p 的发展速率越快, 二者的增长趋势符合指数函数($R^2=0.99$); 当 R_c 超过临界值时, 试样会在较短的荷载作

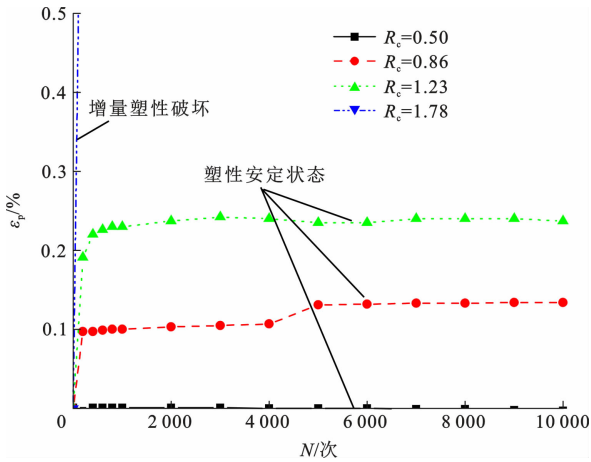


图 5 不同 R_c 时 ϵ_p 与 N 关系曲线
Fig. 5 ϵ_p - N curves at different R_c values

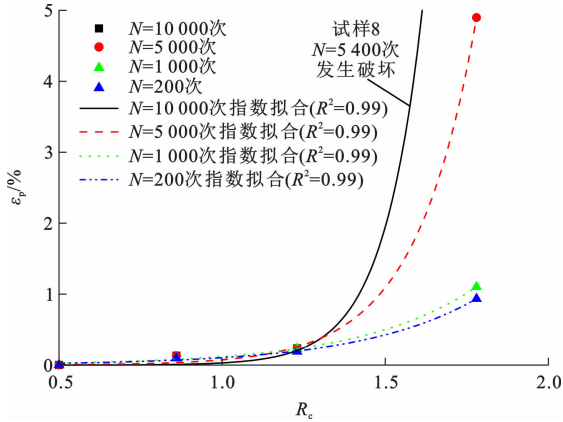


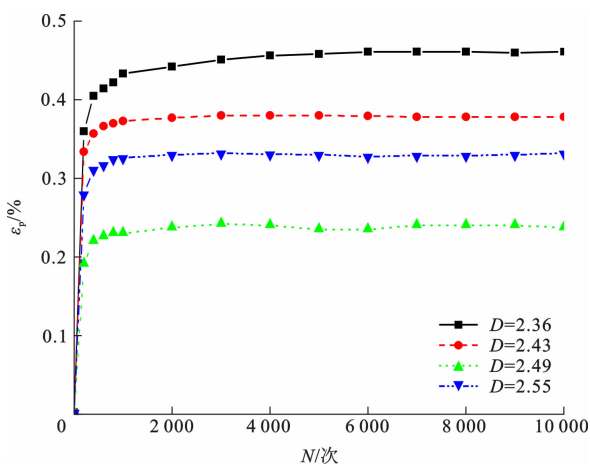
图 6 不同 N 时 ϵ_p 与 R_c 关系曲线
Fig. 6 ϵ_p - R_c curves at different N values

用次数内发生结构破坏。

对循环应力比的分析结果说明: 该指标是调控粗粒土道基土累积塑性应变发展趋势与破坏模式的核心因素, 本试验条件下存在一个临界循环应力比阈值(1.23~1.78)。当循环应力比低于该阈值时, 粗粒土试样在长期循环荷载作用下可维持塑性安定状态, 累积塑性应变的增长速率随循环周次增加逐渐衰减并趋于稳定; 当循环应力比高于该阈值时, 试样易进入增量塑性破坏阶段, 累积塑性应变随循环次数快速递增, 且变形速率持续放大, 最终导致结构失稳。这一规律对粗粒土道基工程设计具有重要的指导意义: 实际工程中, 需通过合理优化道基结构参数、控制道基动荷载强度等方式, 将循环应力比控制在安定阈值范围内, 避免道基因累积塑性变形过大而出现过早破坏或永久变形超标等问题, 保障道基的长期服役性能与稳定性。

3.2 分形维数对累积塑性应变的影响

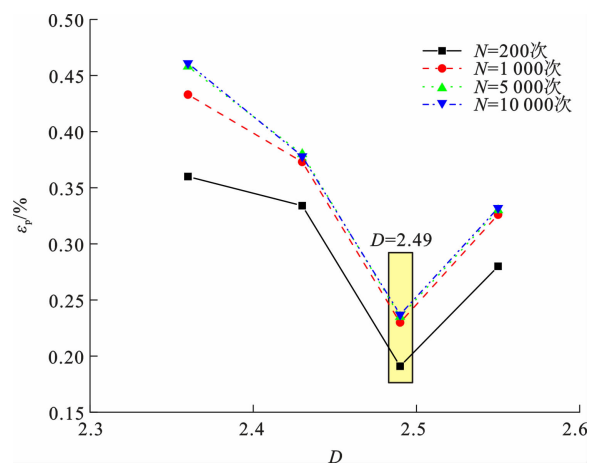
图 7 绘制了围压为 28 kPa、 $R_c=0.86$ 时, 不同分形维数的粗粒土试样轴向 ϵ_p 随 N 的变化情况。

图7 不同 D 时 ϵ_p 与 N 关系曲线Fig. 7 ϵ_p - N curves at different D values

在 4 种分形维数水平下,试样均呈现相同的变形特征:加载初期 ϵ_p 迅速增长, $N > 400$ 次后,应变增速逐渐趋于稳定;经过 10 000 次重复加载后,4 组试样的最终 ϵ_p 分别为 0.461%、0.378%、0.237% 和 0.332%,表明在 $D \in [2.26, 2.55]$ 内,压实粗粒土在循环荷载作用下的 ϵ_p 均处于塑性安定状态。

图 8 给出了围压为 28 kPa、 $R_c = 0.86$ 时, $N = 200, 1\,000, 5\,000, 10\,000$ 次下试样 ϵ_p 与 D 的关系曲线。 D 对 ϵ_p 的发展规律有显著影响,随着 D 增大, ϵ_p 呈现先减小后增大的趋势, $D = 2.49$ 的压实粗粒土试样 ϵ_p 最小,且不同 N 均保持最小值,说明该分形维数下的试样抵抗塑性变形的能力最优。该现象源于粗粒土的级配结构特性:土体达到最优级配时,大颗粒形成稳定骨架,中小颗粒充分填充骨架孔隙,颗粒间嵌锁作用与接触面积均处于最佳状态,从而最大限度抑制循环荷载下的塑性变形。而当粗颗粒占比过高时,易导致级配离散,骨架孔隙填充不足使接触点减少,稳定性下降,塑性应变快速累积;或当细颗粒含量显著增加,则颗粒间嵌锁作用减弱,循环荷载易引发细颗粒滑移与重排列,同样加剧塑性变形。

对分形维数的分析结果表明,该指标是表征粗粒土级配合理性的关键量化指标,其对累积塑性应变的影响具有明确的规律性与工程指导价值。最优级配对应的分形维数($D = 2.49$)可作为粗粒土道基填料级配设计的核心参考参数。结合前文循环应力比的影响规律,当道基土的分形维数处于 $[2.26, 2.55]$ 时,即使在较高的循环应力比条件下,仍能维持较好的抗塑性变形能力,这为复杂交通荷载下的道基稳定性设计提供了重要的理论依据与技术支持。

图8 不同 N 时 ϵ_p 与 D 关系曲线Fig. 8 ϵ_p - D curves at different N values

3.3 干湿循环对累积塑性应变的影响

图 9 为粗粒土 ϵ_p 与 N 的关系曲线。由图 9 可知, ϵ_p 随 N 的演化呈现明显的阶段性特征:对于干湿循环次数 $C_w = 0$ 的试样, ϵ_p 随 N 增加呈平缓上升趋势,在 N 达到 1 000 次时仍维持在 0.5% 以下;对于 $C_w = 1, 3, 7$ 次的试样, ϵ_p 在加载前期 ($N < 200$ 次) 快速增长,随后增长速率放缓并逐渐趋于稳定,且 C_w 越大,稳定阶段的 ϵ_p 越大。例如, $C_w = 7$ 的试样在 $N = 10\,000$ 次时, ϵ_p 达到 2.2%, 远高于 $C_w = 0$ 时的 0.32%。

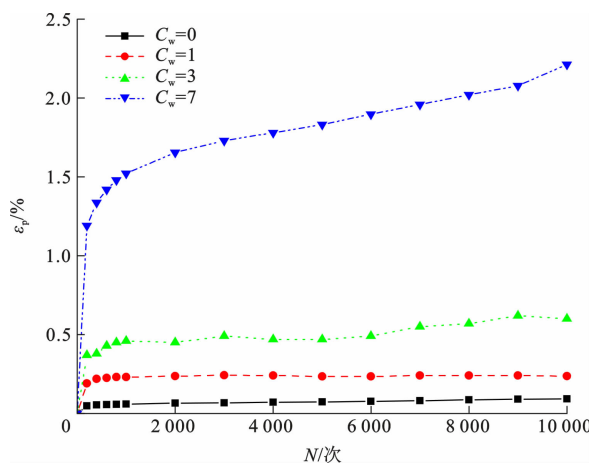
图9 不同 C_w 时 ϵ_p 与 N 关系曲线Fig. 9 ϵ_p - N curves at different C_w values

图 10 给出了粗粒土 ϵ_p 随 C_w 的关系曲线。 C_w 对 ϵ_p 的发展具有显著影响,随着 C_w 的增加, ϵ_p 的增长幅度明显增大,表明试样的湿化损伤随 N 增加而逐渐累积。具体而言,与未经历干湿循环 ($C_w = 0$) 的试样相比,加载前期 ($N = 200$ 次), $C_w = 1, 3, 7$ 对应的 ϵ_p 分别增大了 2.90、6.55、23.31 倍;在加载进入后期阶段后,该比例逐渐趋于稳定,分别维持在约 1.55、5.45、22.81 倍,试验结束后,实测试样含水率

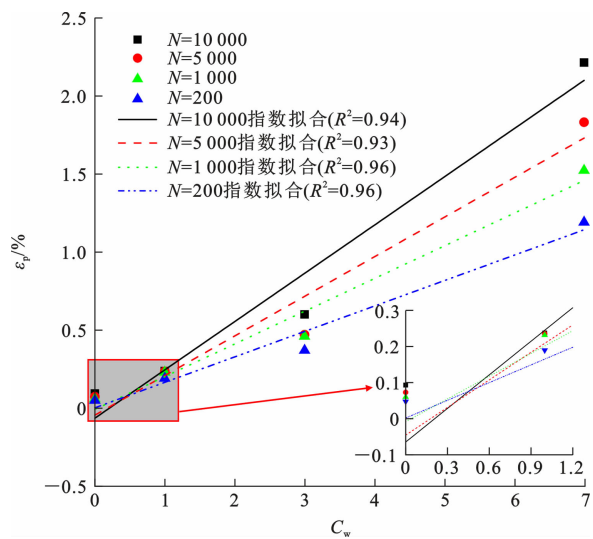


图 10 不同 N 时 ϵ_p 与 C_w 关系曲线

Fig. 10 ϵ_p - C_w curves at different N values

分别为 8.30%、8.70%、9.50%。值得注意的是,在 $C_w=7$ 次的条件下,试样 12 的累积塑性应变 ϵ_p 已增长至 2.2%,出现由塑性安定向增量破坏状态过渡的现象,表明干湿循环的重复作用导致土体力学性能发生了显著退化。

对于干湿循环的分析结果说明,该指标显著加剧了粗粒土的塑性变形,尤其是在多次循环后,土体结构逐渐弱化,变形积累更为明显。从微观角度分析,干湿循环过程中,土体内部孔隙水压力反复变化,导致颗粒间的有效应力交替增减,进而破坏了颗粒间的胶结作用和骨架结构。多次循环后,土体孔隙率增大,颗粒排列趋于松散,使土体在循环荷载作用下更容易发生塑性滑移,最终表现为累积塑性应变的显著增加。因此,在实际施工与运营过程中,需严格控制道基土的湿度状态,避免反复干湿变化带来的湿化损害,从而保障道基的长期稳定性和服役性能。

4 累积塑性应变模型及参数分析

4.1 基于拟合优度与误差指标的性能量化评价

表 2 为现有文献中几种典型的累积塑性应变预测模型,基于动三轴试验获取的试样累积塑性应变试验数据进行拟合分析,系统比较各模型的预测精

表 2 常用的累积塑性应变预测模型

Table 2 Commonly used predict models for cumulative plastic strain

编号	模型提出者	模型公式
1	Monismith 等 ^[33]	$\epsilon_p = aN^b$
2	Barksdale ^[34]	$\epsilon_p = a[1 + b \lg(N)]$
3	Paute 等 ^[35]	$\epsilon_p = a[1 - (N/100)^{-b}]$

注: a 、 b 为拟合参数。

度、参数敏感性及适用性;在此基础上,结合粗粒土的级配曲线特征与颗粒组成的影响机制,提出融合力学机理与经验表达的累积塑性应变预估模型,该模型可更有效地反映粗粒土在复杂应力状态下的累积变形规律。

为系统评估不同经验模型对压实粗粒土循环加载下累积塑性应变的预测能力,本文首先针对特定工况($R_c=1.23$ 、 $D=2.49$)下的试样 3 进行了对比分析,随后扩展至 11 组(试样 5 的 ϵ_p 接近 0,未参与拟合),以决定系数 R^2 及均方根误差(RMSE)作为核心评价指标。

图 11 给出了试样 3 轴向累积塑性应变实测值与不同模型的预测值对比。从整体拟合效果来看,3 种模型的决定系数 R^2 均大于 0.8,表明其对累积塑性应变发展趋势的捕捉能力均达到可接受水平。其中,Monismith 模型的拟合精度最优($R^2=0.98$),其预测曲线与实测数据点在整个加载区间($N=0\sim 10\,000$ 次)内的贴合度最高,尤其是在加载后期($N>1\,000$ 次),能够准确反映应变增长速率趋于平缓的特征,与实测的“快速累积-平稳增长”规律高度一致。这一优势可归因于 Monismith 模型在构建时充分考虑了材料循环硬化与损伤演化的耦合效应。相比之下,Barksdale 模型($R^2=0.84$)与 Paute 模型($R^2=0.89$)的预测曲线在加载中期至后期出现了一定的幅值偏差:Barksdale 模型在高循环次数下持续上升,偏离实测稳定平台,表现为高估,而 Paute 模型则在加载初期的应变增长速率预测略快于实测值。Monismith 模型在本工况下的高精度预测能力,可为同类材料在循环荷载作用下的寿命评估与结构安全设计提供更可靠的理论依据。

为进一步对比分析预估模型的拟合效果,分别采用 3 种预测模型对 11 组试样实测值进行拟合,拟合结果的决定系数 R^2 及均方根误差 RMSE 如图 12 所示。拟合结果表明,Monismith 模型的 R^2 均值为 0.964,显著高于 Barksdale 模型(0.825)和 Paute 模型(0.667),显示出对试验数据更强的解释能力;其 RMSE 均值为 0.035,虽略高于 Paute 模型(0.028),但远低于 Barksdale 模型(0.057),且在各试样中无明显异常波动,预测稳定性更优。

从单试样表现来看,Monismith 模型在绝大多数工况下的 R^2 均处于最高水平,尤其在高围压、大应变等复杂应力状态下仍能保持稳定拟合,例如在试样 11 中,其 R^2 达到 0.98,显著优于另外 2 种模型。相比之下,Barksdale 模型在类似工况下 R^2 明

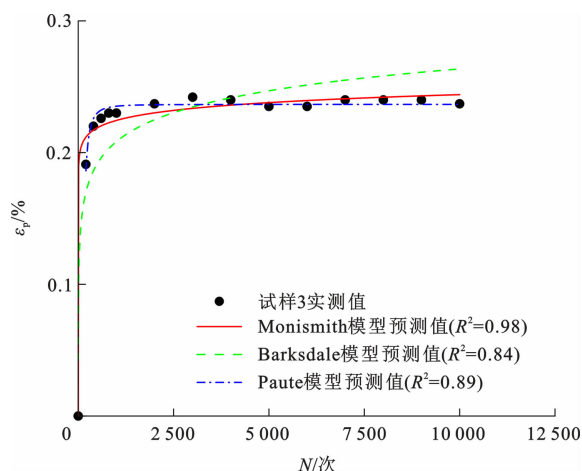
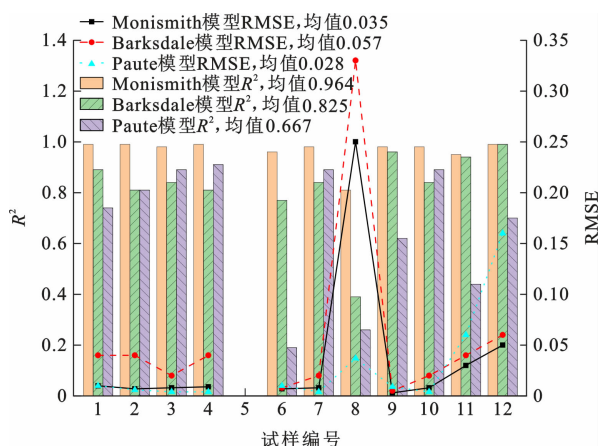
图 11 ϵ_p 实测值与不同模型预测值的对比(试样 3)Fig. 11 Comparison of ϵ_p between measured values and predicted values of different models (sample 3)

图 12 不同累积塑性应变预测模型的比较

Fig. 12 Comparison of different cumulative plastic strain prediction models

显下降,如试样 9 中 R^2 降至 0.75 以下,且 RMSE 出现异常峰值(大于 0.30),表明其对极端应力状态的适应性较差。Paute 模型虽在 RMSE 数值上表现最优,但 R^2 整体偏低,尤其在低应力水平试样(如试样 6、8)中 R^2 不足 0.75,存在过拟合风险,泛化能力不足。

进一步分析发现,Monismith 模型的优势不仅体现在 R^2 ,其在不同应力状态下的累积塑性应变拟合中也展现出更强的一致性。其他试样在不同应力路径下的试验数据同样支持这一结论,即 Monismith 模型能够更精准地捕捉压实粗粒土在动荷载作用下的非线性力学响应规律,而另外 2 种模型在复杂工况下的预测偏差显著增大。综合拟合优度、预测精度及模型鲁棒性,Monismith 模型展现出全面优势,可为工程设计与数值模拟提供可靠依据。因此,选取 Monismith 模型作为基准模型用于后续

压实粗粒土内动三轴试验结果的拟合分析。

4.2 修正的预估模型

采用 Monismith 基准预测模型对不同循环应力比、分形维数与干湿循环次数下,压实粗粒土试样轴向塑性应变随荷载重复作用次数的累积数据进行拟合分析,得到各试样(不同试验工况)对应的模型参数 a 、 b 。既有研究表明:模型参数 a 主要控制累积塑性应变 ϵ_p 随应力水平的增长,与动应力幅值、围压等有关;模型参数 b 主要控制 ϵ_p 随 N 的增长,与土的类别及物理状态有关。

为揭示基准预测模型的参数识别机制,系统分析了拟合参数 a 、 b 与 R_c 、 D 及 C_w 的统计相关性,结果如图 13 所示。由图 13 可知: a 与 R_c 呈现显著的线性正相关关系,线性拟合优度 $R^2=0.56$ 。随着循环偏应力比的升高, a 数值呈阶梯式上升,说明 R_c 是驱动 a 增大的核心因素,直接反映了动应力水平对土体塑性应变演化的主导控制作用。 b 同样与 R_c 表现为良好的线性正相关,拟合优度 $R^2=0.58$,显示出随应力水平的提高, b 呈现稳步增长的变化趋势。

a 与 D 成弱线性正相关($R^2=0.24$),数据离散程度相对较高,表明分形维数对 a 的影响机制较为复杂,其调控作用弱于 R_c 。 b 与 D 亦呈线性正相关,但拟合优度较低($R^2=0.39$)。从统计特征看, b 的均值为 0.03、中位数为 0.03, a 的均值为 0.26、中位数为 0.28,二者在 D 变量区间内分布相对集中,说明分形维数变化对 b 存在一定影响,但非线性扰动较小。

a 与 C_w 呈现极强的线性正相关,拟合优度高达 $R^2=0.95$ 。随着 C_w 的增加, a 呈现近乎完美的线性增长,证实 C_w 是控制 a 取值的主导敏感因素,反映了干湿循环劣化效应对土体结构强度的累积损伤效应。相比之下, b 与 C_w 的线性相关性极弱($R^2=0.1$),数据点分布散乱。统计显示, b 的均值为 0.12、中位数为 0.13,表明在干湿循环作用下, b 基本保持稳定,受干湿循环影响极小。

综上所述,模型 a 、 b 对不同试验变量的响应机制具有明确的分异性: a 主要受 R_c 与 C_w 显著影响,且对 C_w 最为敏感;而 b 则主要依赖于 R_c ,对 D 和 C_w 的变化不敏感。该规律明确了模型各参数的物理意义及主控变量,为修正模型结构、实现多因素耦合下的精准参数标定提供了关键理论依据。

基于上述参数敏感性分析,通过引入 D 、 R_c 及 C_w ,对基准模型参数进行多因素耦合修正,可得到

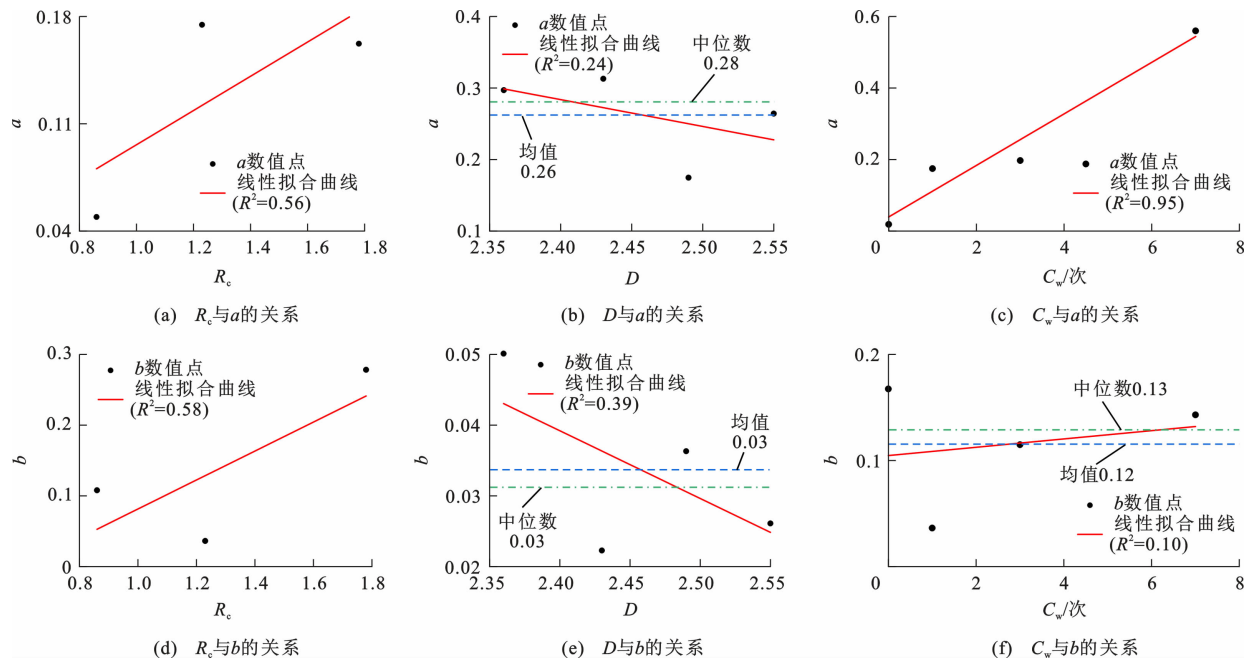


图 13 Monismith 模型拟合参数与试验变量之间的相关性分析

Fig. 13 Correlation analysis between fitting parameters and test variables of Monismith model

修正后的压实粗粒土轴向累积塑性应变预测模型, 如式(6)所示

$$\begin{cases} \epsilon_p = a N^b \\ a = -0.644\ 37 + 0.126\ 78 R_c + \\ \quad 0.199\ 69 D + 0.076\ 55 C_w \\ b = -0.707\ 40 + 0.222\ 01 R_c + \\ \quad 0.206\ 10 D + 0.007\ 67 C_w \end{cases} \quad (6)$$

本文建立的累积塑性应变预测模型是基于特定试验工况构建的,具有明确的适用边界。初始含水率控制在最佳含水率 7.80%,加载次数上限为 10 000 次。在该范围内,模型可有效预测不同分形维数、不同循环应力比及不同干湿循环次数下级配粗粒土的累积塑性变形。模型中各参数应用范围如表 3 所示,其取值均在本次试验条件所覆盖的区间内,因此在实际工程应用时需遵循表中给定的参数范围,以确保预测结果的可靠性。

表 3 预测模型参数应用范围

Table 3 Application range of prediction model parameters

模型参数	$N/\text{次}$	R_c	D	$C_w/\text{次}$
应用范围	$1 \sim 1.0 \times 10^4$	$0.50 \sim 1.78$	$2.36 \sim 2.55$	$0 \sim 7$

4.3 修正预估模型的验证

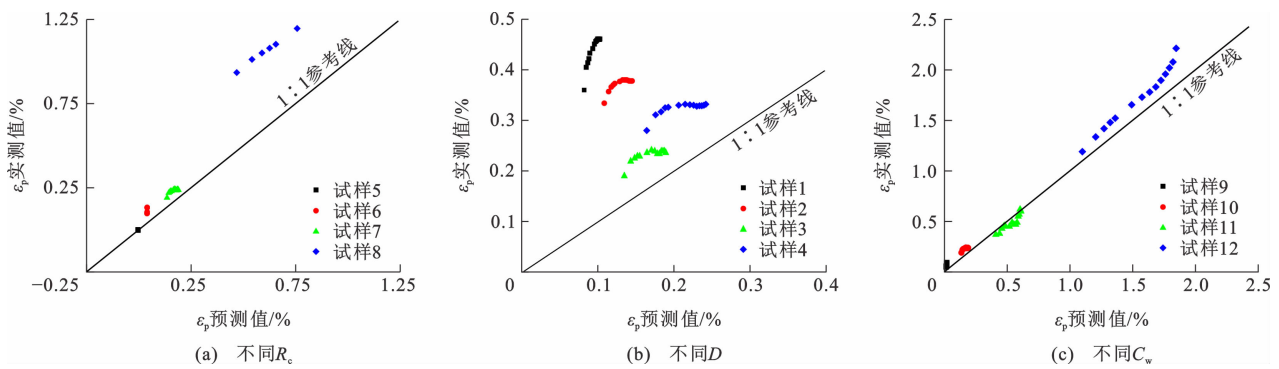
为了验证修正后的预测模型[式(6)]的准确性,本研究将模型验证数据中轴向 ϵ_p 的实测值与预测值进行了比对分析。总体来看,模型对不同 R_c 、 D 及 C_w 工况下的 ϵ_p 均具有一定的预测能力,预测值与实测值整体趋势一致,能够基本反映各因素对粗

粒土变形发展的控制作用。

不同工况下 ϵ_p 实测值与预测值的对比见图 14,可知:在不同 R_c 条件下,模型对低、中、高应力比下的应变响应均能实现可靠预测,未出现明显的系统性偏差。在中低循环应力比条件下,模型预测值与实测值较为接近,数据点集中分布于 1:1 参考线附近;但在高循环应力比 $R_c=1.78$ (试样 8)处,数据点明显位于 1:1 参考线上方,表明模型对高应力比工况下的累积塑性应变存在明显低估,如图 14(a)所示。这与参数 a 、 b 对 R_c 具有显著敏感性的分析结果一致,同时也反映出模型在高应力水平下的非线性响应刻画仍存在一定不足。

针对不同 D ,各试样 ϵ_p 的预测值与实测值整体呈现相似的变化趋势,但精度存在明显差异。其中试样 1($D=2.36$)与试样 2($D=2.43$)的数据点显著偏离至 1:1 参考线上方,模型对低分形维数工况的 ϵ_p 存在明显低估,试样 3($D=2.49$)与试样 4($D=2.55$)试样的预测精度相对较高,如图 14(b)所示。结合参数敏感性分析可知,模型参数 a 、 b 与 D 的相关性较弱,对低分形维数、高应变条件下土体变形机制的表征不足,从而产生较为明显的预测偏差。

对于不同 C_w ,各干湿循环次数下 ϵ_p 的预测值与实测值均较为吻合,数据点紧密分布于 1:1 参考线附近,整体预测精度较高,如图 14(c)所示。这与参数敏感性分析中参数 a 对 C_w 具有极强线性相关性的结论一致,表明模型能够较好地反映干湿循环

图 14 不同工况下 ϵ_p 实测值与预测值的对比Fig. 14 Comparison of measured and predicted ϵ_p under different conditions

劣化对粗粒土 ϵ_p 的影响规律。

综上,该修正预估模型在不同试验工况下均表现出较强的适用性与可靠性,尤其在低 R_c 和 C_w 主导的工况中预测精度优异,但在高分形维数、高应变条件下的适应性仍有提升空间。后续可通过优化参数对分形维数的响应机制,进一步提升模型在复杂级配条件下的预测性能,为粗粒土在循环荷载作用下的累积塑性变形预测提供更全面的支撑。

5 结 语

(1)在相同的颗粒级配和湿度条件下,循环应力比 R_c 对累积塑性应变 ϵ_p 的发展具有显著影响。当 R_c 较小时(不大于 1.23), ϵ_p 随着 R_c 的增大呈线性增长,线性增长率为 0.32 ($R^2=0.99$);当 R_c 达到 1.78 时, ϵ_p 随 R_c 增大呈增量塑性破坏特征,增长趋势符合指数函数关系 ($R^2=0.99$)。将循环应力比控制在较低水平(不大于 1.23),可有效抑制粗粒土道基的累积塑性变形发展。

(2)在相同荷载和湿度条件下,分形维数 D 对累积塑性应变 ϵ_p 的发展具有显著影响。随着 D 增大, ϵ_p 呈现先减小后增大的趋势,当 $D=2.49$ (对应最大干密度的最大值 $\rho_{d,max}=2.160 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) 时,试样在各加载阶段的 ϵ_p 均为最小值,表明采用分形维数 D 指标可准确筛选出粗粒土道基累积塑性应变最小的级配工况。

(3)干湿循环作用显著加剧了粗粒土的塑性变形,且湿化损伤随循环次数增加逐渐累积;多次循环后,土体孔隙率增大,颗粒排列趋于松散,在循环荷载作用下更容易发生塑性滑移,最终表现为累积塑性应变的显著增加。因此,在实际施工与运营过程中,需严格控制道基土的湿度状态,避免反复干湿变化带来的湿化损害,从而保障道基长期稳定性和服役性能。

(4)通过对比分析目前文献中的轴向累积塑性应变预测模型,选择了 Monismith 模型作为粗粒土道基累积塑性应变预估模型的基准模型。所建立的修正预估模型在中低应力比、不同干湿循环次数工况下具有较高的预测精度与可靠性,但在高循环应力比 ($R_c=1.78$) 以及低分形维数 ($D=2.36, 2.43$) 高应变条件下均出现明显低估现象,说明模型对强动荷载与劣级配耦合作用下的非线性变形响应表征仍存在不足。后续可通过引入高应力、高级配劣化下的非线性修正项,进一步提升模型在多种工况下的预测稳定性与适用性。但需指出,受限于单一湿度工况的试验方案,模型目前未考虑湿度变化对土体微观结构与力学性能的长期弱化效应,湿度参数的引入及模型的进一步优化将是后续深化研究的主要方向。

参考文献:

References:

- [1] 凌道盛,张凡,赵云,等.飞机荷载作用下非均匀道基动力响应分析[J]. 土木工程学报, 2017, 50(2): 97-109.
LING Dao-sheng, ZHANG Fan, ZHAO Yun, et al. Dynamic response analysis of inhomogeneous subgrade subjected to moving aircraft loads[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(2): 97-109.
- [2] 赵云.飞机荷载作用下高填方机场道基动力响应及累积沉降研究[D]. 杭州:浙江大学, 2018: 85-97.
ZHAO Yun. Dynamic responses and accumulative settlement of subgrade under aircraft load in high-filled airport[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018: 85-97.
- [3] 刘兆鹏,徐西永,寇璟媛,等.不同压实条件下富水粉土道基变形规律的数值研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(增1): 397-405.
LIU Zhao-peng, XU Xi-yong, KOU Jing-yuan, et al. Numerical study on the deformation law of water-rich silt road base under different compaction conditions[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(S1): 397-

- 405.
- [4] 凌建明,王增逸,刘诗福,等.飞机滑跑激振和着陆冲击的动载预估模型[J].交通运输工程学报,2026,26(8):1-19.
LING Jian-ming, WANG Zeng-yi, LIU Shi-fu, et al. Dynamic load predictive model for aircraft taxiing excitation and landing impact [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(8): 1-19.
- [5] 臧宏阳.基于路基不均匀特性的沥青路面动力响应研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016:69-87.
ZANG Hong-yang. Dynamic response of asphalt pavement supported by uneven subgrade[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016: 69-87.
- [6] 刘彦君.飞机荷载下川西高原机场道基土变形特性研究[D].广汉:中国民用航空飞行学院,2025:62-74.
LIU Yan-jun. Investigation on deformation characteristics of high-plateau airport subgrade soil in western Sichuan under aircraft loading[D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2025: 62-74.
- [7] 高启聚,郭忠印,丛林,等.重复荷载作用下粘性路基土的永久变形预估[J].同济大学学报(自然科学版),2008,36(11):1521-1525.
GAO Qi-ju, GUO Zhong-yin, CONG Lin, et al. Evaluation of permanent deformation of clayed subgrade soils under cyclic loading [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2008, 36(11): 1521-1525.
- [8] 易文妮,刘津丞,余虔,等.循环荷载作用下非饱和盐化粉土动力特性[J].哈尔滨工业大学学报,2023,55(6):125-133.
YI Wen-ni, LIU Jin-cheng, YU Qian, et al. Dynamic characteristics of unsaturated salinized silt under cyclic loading [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2023, 55(6): 125-133.
- [9] 任华平,刘希重,宣明敏,等.循环荷载作用下击实粉土累积塑性变形研究[J].岩土力学,2021,42(4):1045-1055.
REN Hua-ping, LIU Xi-zhong, XUAN Ming-min, et al. Study of cumulative plastic deformation of compacted silt under cyclic loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(4): 1045-1055.
- [10] 黄文杰.干湿循环及动载耦合下花岗岩残积土动力变形特性研究[D].长沙:中南大学,2024:50-60.
HUANG Wen-jie. Study on dynamic deformation characteristics of granite residual soil under the coupling of dry-wet cycle and dynamic load [D]. Changsha: Central South University, 2024: 50-60.
- [11] 罗其奇,张升,叶新宇,等.飞机荷载作用下湿化粉土道基变形特性研究[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(7):2188-2199.
LUO Qi-qi, ZHANG Sheng, YE Xin-yu, et al. Investigation on deformation characteristics of wetting silt subgrade under aircraft loading [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(7): 2188-2199.
- [12] DU Y F, CUI X Z, JIN Q, et al. Test equipment and prediction model for the service performance of subgrades under long-term traffic loads: A review [J]. Transportation Geotechnics, 2026, 56: 101812.
- [13] ZHANG C L, JIANG G L. Full-scale model testing of the dynamic response of lime-stabilized weathered red mudstone subgrade under railway excitation [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 130: 105999.
- [14] 张莎莎,曹俱源,张毅,等.道面覆盖作用下砾质硫酸盐渍土道基水盐迁移及侵蚀特征[J].交通运输工程学报,2025,25(5):131-144.
ZHANG Sha-sha, CAO Ju-yuan, ZHANG Yi, et al. Water and salt migration and erosion characteristics of gravel sulfate salty soil subgrade under effect of pavement covering [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2025, 25(5): 131-144.
- [15] 章定文,刘文俊,侯爵,等.循环湿化条件下粉土联合石灰改良弱膨胀土的动力累积变形特性[J].交通运输工程学报,2025,25(4):71-79.
ZHANG Ding-wen, LIU Wen-jun, HOU Jue, et al. Dynamic cumulative deformation characteristics of weak expansive soil improved by silt and lime under cyclic wetting [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2025, 25(4): 71-79.
- [16] BIAN X C, JIANG H G, CHENG C, et al. Full-scale model testing on a ballastless high-speed railway under simulated train moving loads [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, 66: 368-384.
- [17] 张军辉,张安顺,彭俊辉,等.循环荷载下路基黏土永久变形特性及力学模型[J].中国公路学报,2024,37(6):34-45.
ZHANG Jun-hui, ZHANG An-shun, PENG Jun-hui, et al. Characterization and mechanics modeling of permanent deformation of subgrade clay under cyclic loading [J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(6): 34-45.
- [18] 郑可扬,肖源杰,王萌,等.循环移动轮载下粗粒土路基填料永久变形特性及安定分析[J].岩石力学与工程学报,2020,39(9):1930-1943.
ZHENG Ke-yang, XIAO Yuan-jie, WANG Meng, et al. Permanent deformation characteristics and shakedown analysis of coarse-grained embankment materials under moving wheel loads [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(9): 1930-1943.
- [19] 孔亮,季亮亮,曹杰峰.应力路径和颗粒级配对比土变形影响的细观机制[J].岩石力学与工程学报,2013,32(11):2334-2341.
KONG Liang, JI Liang-liang, CAO Jie-feng. Deformation mesomechanism of sands with different grain gradations under different stress paths [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(11): 2334-2341.
- [20] 凌华,傅华,韩华强.粗粒土强度和变形的级配影响试验研究[J].岩土工程学报,2017,39(增1):12-16.
LING Hua, FU Hua, HAN Hua-qiang. Experimental study on effects of gradation on strength and deformation of coarse-grained soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,

- 2017, 39(S1): 12-16.
- [21] 肖源杰,李文奇,于群丁,等. 透水性级配碎石基层填料永久变形特性及预估模型[J]. 中国公路学报, 2022, 35(12): 12-23.
XIAO Yuan-jie, LI Wen-qi, YU Qun-ding, et al. Permanent deformation behavior and prediction models of unbound permeable aggregate base materials[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(12): 12-23.
- [22] SUKKARAK R, PRAMTHAWEE P, JONGPRADIST P, et al. Deformation analysis of high CFRD considering the scaling effects[J]. Geomechanics and Engineering, 2018, 14(3): 211-224.
- [23] MAKEDON T, TREMOPOULOU E, DIMOPOULOS G. The influence of gradation on the in situ compaction of geomaterials in road construction[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2009, 68(1): 81-87.
- [24] FULLER W B, THOMPSON S E. The laws of proportioning concrete[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1907, 59(2): 67-143.
- [25] SWAMEE P K, OJHA C S P. Bed-load and suspended-load transport of nonuniform sediments[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1991, 117(6): 774-787.
- [26] 朱俊高,郭万里,王元龙,等. 连续级配土的级配方程及其适用性研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(10): 1931-1936.
ZHU Jun-gao, GUO Wan-li, WANG Yuan-long, et al. Equation for soil gradation curve and its applicability[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(10): 1931-1936.
- [27] 吴二鲁,朱俊高,王 龙,等. 粗粒料的单参数级配方程及其适用性研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(3): 831-836.
WU Er-lu, ZHU Jun-gao, WANG Long, et al. Single-parameter gradation equation for coarse-grained soil and its applicability[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(3): 831-836.
- [28] TALBOT A N, RICHART F E. The strength of concrete; Its relation to the cement aggregates and water[J]. Bulletin, 1923, 137: 1-118.
- [29] 蔡迎春,郑元勋,刘忠玉,等. 飞机荷载作用下粉砂土路基动力响应研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2863-2868.
CAI Ying-chun, ZHENG Yuan-xun, LIU Zhong-yu, et al. Study of dynamic response of silty sand subgrade loaded by airplane[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(9): 2863-2868.
- [30] GUO L, WANG J, CAI Y Q, et al. Undrained deformation behavior of saturated soft clay under long-term cyclic loading[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 50: 28-37.
- [31] CAI Y Q, WU T Y, GUO L, et al. Stiffness degradation and plastic strain accumulation of clay under cyclic load with principal stress rotation and deviatoric stress variation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2018, 144(5): 04018021.
- [32] WERKMEISTER S, DAWSON A R, WELLNER F. Permanent deformation behavior of granular materials and the shakedown concept[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2001(1757): 75-81.
- [33] MONISMITH C L, OGAWA N, FREEME C R. Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading[J]. Transportation Research Record, 1975, 537: 1-17.
- [34] BARKSDALE R D. Compressive stress pulse times in flexible pavements for use in dynamic testing [J]. Highway Research Record, 1971(34): 32-44.
- [35] PAUTE J L, HORNYCH P, BENABEN J P. Repeated load triaxial testing of granular materials in the French network of laboratories des ponts et chaussees flexible pavement[C]// CORREIA A G. Flexible Pavements: Proceedings of the European Symposium Euroflex. Rotterdam: Balkema, 1996: 53-64.