

考虑不同级配影响的填石路基压实质量评价研究

卢正¹, 李梦威^{1,2}, 唐楚轩¹, 胡智³, 赵阳¹, 则志辉^{1,2}, 姚海林¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程安全全国重点实验室, 湖北 武汉 430071;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 浙江省交通运输科学研究院 浙江省道桥检测与养护技术研究重点实验室, 浙江 杭州 310023)

摘要: 如何对填石路基的压实质量进行快速、准确的评价, 是公路工程中一项亟待解决的难题。为此, 建立了模拟填石路基在冲击荷载下响应的离散元-有限差分耦合模型, 采用室内大型三轴试验标定了模型主要参数, 通过计算数据与现场试验的对比验证了模型的正确性。进一步深入分析了5种常见级配填石路基在不同压实状态下的动力响应结果, 讨论了级配分维度、孔隙率等对路基响应特征的影响。研究结果表明: (1) 填石路基孔隙率与回弹模量之间具备良好的指数关系, 在此基础上提出了沉降比的概念, 并且发现了沉降比与路基孔隙率之间的线性关系, 建议评价路基压实质量时同时将沉降比与回弹模量作为控制指标。(2) 建立了考虑填料级配与孔隙率的填石路基回弹模量预测模型, 发现填料级配对回弹模量影响显著, 且级配分维度越接近2.31, 回弹模量随孔隙率的降低速度越快。(3) 沉降比为0时对应路基理想压实状态, 在此基础上建立了考虑填料级配的路基理想状态临界回弹模量预测模型, 发现临界模量随着填料分维度 D 的增加先增大后减小, 在 $D=2.34$ 时出现极大值。上述研究可为公路填石路基压实质量控制和评价提供科学依据。

关键词: 填石路基; 冲击荷载; 离散元-有限差分耦合; 压实质量; 颗粒级配

中图分类号: TU 415.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2025)11-3346-09

Research on evaluation of compaction quality of rock-filled subgrade considering the influence of different gradations

LU Zheng¹, LI Meng-wei^{1,2}, TANG Chu-xuan¹, HU Zhi³, ZHAO Yang¹, ZE Zhi-hui^{1,2}, YAO Hai-lin¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering Safety, Institute of Rock and Soil Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory of Road and Bridge Detection and Maintenance Technology Research of Zhejiang Province, Zhejiang Scientific Research Institute of Transport, Hangzhou, Zhejiang 310023, China)

Abstract: Evaluating the compaction quality of rock-filled subgrades rapidly and accurately poses a pressing challenge in highway engineering. To address this, this study establishes a discrete element-finite difference coupling model to simulate the response of rock-filled subgrades under impact loading. The primary parameters of the model are calibrated using indoor large-scale triaxial tests, and the model's accuracy is verified through comparisons between calculated and field data. Furthermore, this study conducts an in-depth analysis of the dynamic response results of five commonly used gradations of rock-filled subgrades under varying degrees of compaction, discussing the influence of gradation fractal dimension and porosity on subgrade deformation response. The findings are as follows: (1) A good exponential relationship between subgrade porosity and resilient modulus is identified, and the concept of settlement ratio is introduced, with a linear relationship between settlement ratio and subgrade porosity being verified. It is suggested that both resilient modulus and settlement ratio should be used as control indicators when evaluating subgrade compaction quality. (2) A prediction function for subgrade resilient modulus considering fill gradation and porosity is obtained, revealing that particle gradation has a significant impact on resilient modulus. Specifically, as the gradation fractal dimension approaches 2.31, the resilient modulus increases more rapidly with decreasing porosity. (3) A settlement ratio of zero corresponds to the ideal compaction state of the subgrade. This study establishes a prediction model for the critical resilient modulus of the subgrade in its ideal state, considering

收稿日期: 2025-01-24

录用日期: 2025-06-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 42477205); 湖北省自然科学基金创新群体项目 (No. 2023AFA019); 浙江省交通运输科技计划项目 (No. 2024019); 中国博士后科学基金 (No. 2025M773267); 国家资助博士后研究人员计划 (No. GZC20252148)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (42477205), the Innovation Group Project of Natural Science Foundation of Hubei Province (2023AFA019), Zhejiang Provincial Transportation Science and Technology Project (2024019), China Postdoctoral Science Foundation (2025M773267) and China Postdoctoral Fellowship Program of CPSF (GZC20252148).

第一作者简介: 卢正, 男, 1982年生, 博士, 研究员, 主要从事土力学及路基工程方面的研究。E-mail: lzwhrsm@163.com

fill gradation, and finds that the critical modulus first increases and then decreases with increasing fractal dimension D , reaching a maximum when $D=2.34$. These findings aim to provide new methods and theories for evaluating the compaction quality of rock-filled subgrades in engineering.

Keywords: rock-filled subgrade; impact load; discrete element-finite difference coupling; compaction quality; particle gradation

1 引言

路基是道路结构中重要的组成部分,对路面起支撑的作用,在气候与列车的长期荷载下,路基往往被认为是最容易损坏的部分^[1-3]。常见的路基填料有黏土、砂土、级配碎石^[4]等,但随着我国公路体系深度发展,受经济与环境制约,大粒径碎石材料在山区丘陵地区公路路基设计中扮演着越来越重要的角色。什么因素制约着大粒径填石路基的强度、刚度,并且在工程中如何对其进行快速检测成为了亟待解决的问题。

陈铖等^[5]使用离散元方法建立了模拟粗粒土三轴试验的模型,发现有较大不均匀系数与曲率系数的粗粒土强度与变形较好,且不均匀系数越大,力链分布越均匀。陈逸飞^[6]通过离散元计算发现颗粒形状对粗粒土性能有较大影响,且球度越低的颗粒填料抗剪强度越高,剪胀性越明显。井国庆等^[7]同时使用室内三轴试验与离散元计算的方法研究了围压对道砟散体材料力学特性的影响,得到了增大围压可以降低道床沉降与变形的结论。杨宁宇^[8]使用室内试验结合离散元方法分析了细长比对颗粒材料临界状态线的影响,建立了考虑不同颗粒形状的散体材料弹塑性本构模型。以上学者的研究表明了颗粒形状、颗粒级配对粗粒土、碎石土等填料力学性质的重大影响,但是以上研究大多以室内试验为依托,使用的颗粒粒径小于正常的填石路基颗粒,得到的力学参数并不能直接反映工程中路基的力学特性。因此,若能使用现场测试方法,结合填料级配特性直接对路基力学特性或压实质量进行评价将有显著的工程意义。

针对以上问题,冲击荷载法是近年来新兴的一种路基检测方法,该方法与灌水法、灌砂法、贝克曼梁测试等传统方法相比,具有操作简单、测试高效,能做到无损检测、测试结果受人为因素影响小等优点,且使用动荷载作为基础的冲击荷载法与静载测试相比明显更符合路基服役期间的受力特点,测试结果较可靠。该方法原理如图 1 所示,通过自由落体的重锤撞击承载板,对待测路基施加冲击荷载,承载板上装置有压力传感器与位移传感器,可以完成对路基表面动力响应的监测,进而对路基填筑质量进行评价。George 等^[9]综合分析了加州承载

板、冲击荷载测试和循环三轴试验获得的结果,建立了三者之间的回归方程,认为冲击荷载法在路基路面评价中具有特别优势。Rafiei 等^[10]通过模型试验得到了冲击荷载法测得回弹模量与路基土压实度和含水率的经验公式,并且在实际工程中进行了验证。以上学者的研究表明,冲击荷载法测试结果能直接反映路基的部分力学特性。因此,本研究结合现场试验建立了模拟冲击荷载下大粒径填石路基响应的离散元-有限差分耦合模型,通过对不同级配不同孔隙率路基动力响应结果的分析,验证了冲击荷载法评价路基压实质量的合理性,通过分维度理论将填料级配特征量化,得到了考虑填料级配与孔隙率的路基回弹模量预测模型,并且讨论了不同级配的填料在理想压实状态下临界回弹模量的差异,为工程中填石路基压实质量的评价提供了参考价值。

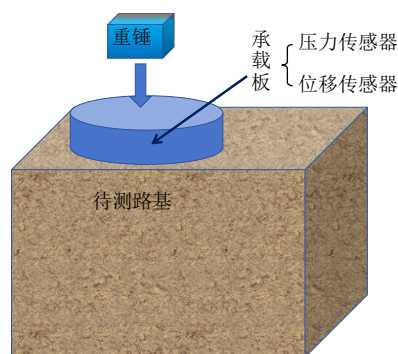


图 1 冲击荷载法原理示意图
Fig.1 Schematic diagram of the principle of impact loading method

2 模型建立

考虑到路基是以层为单位填筑的,新摊铺的路基填料碾压时塑性变形显著,而下部路基已达到目标压实度,碾压过程中产生的塑性变形较小。因此,根据实际工况,本研究采用离散元-有限差分耦合算法建立路基模型,新填筑层使用离散元模型,下卧层力学特性采用有限差分法模拟。为了真实地还原冲击荷载法测试的过程,本研究在路基模型表层构建了一个与实际承载板几何尺寸一致的刚性板元件,且在刚性板上施加半正弦荷载模拟自由落体重锤产生的冲击力^[11],以此刚性板的位移变化作为评估路基表层位移的量化指标。

参考《公路路基设计规范》(JTGD-2015)^[12], 上部新填筑路基层离散元模型厚度设置为 0.2 m。王龙等^[13]通过理论推导与有限元数值计算的综合研究发现, 在路基深度达到 0.6 m 时, 由冲击荷载诱发的动应力衰减至总应力的 20% 以下, 同时路基表面距离测试点 0.3 m 以外的区域应力响应趋于微弱。此外, 杨杰^[14]通过模型试验指出 100 kPa 冲击荷载有效检测深度约为 0.35 m。为削弱边界条件对模拟结果的潜在影响, 结合文献[13-14], 下卧已填筑路基的有限差分模型厚度设为 0.4 m, 模型边长确定为 0.8 m。在有限差分模型中, 边界处的垂直位移被固定为 0, 而离散元路基的边界则通过墙体进行约束, 并采用黏性阻尼将边界条件设置为透射边界^[15]。

离散元模型中填料的级配选择以及颗粒间的细观参数可根据具体研究需求灵活选定。鉴于填石路基主要由散体材料构成, 颗粒间的黏聚力可合理忽略, 因此, 本研究选用线弹性模型作为颗粒间的接触模型^[16]。为了提高模拟的精确度同时保证计算效率, 对于粒径大于 10 mm 的颗粒, 采用 4~7 个球进行堆叠的方式构建基本颗粒模型^[5, 17], 基本颗粒模型如图 2 所示。对于粒径小于 10 mm 的颗粒, 则按质量分数分配为 5~10 mm 的球颗粒^[18]。随机生成模型颗粒, 控制上部墙体对离散元路基施加静压力, 通过调整静压力的大小, 可以得到不同孔隙率的路基模型, 从而满足多样化的研究需求。

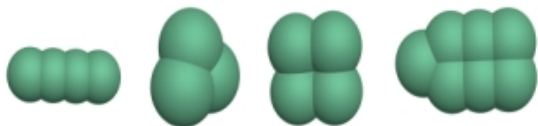


图 2 考虑形状的基本颗粒模型
Fig.2 Basic particle model considering shapes

3 模型验证

3.1 现场试验

为了校验模型的准确性, 本研究依托信阳-随州高速公路建设项目, 选取了谭家河乡某段正处于施工阶段的碎石土路基作为实地测试场地, 实施了冲击荷载现场测试, 并同步监测了测试过程中路基内部的应力动态变化, 以此作为评估模型正确性的重要依据。在测试点正下方埋设土压力盒, 土压力盒顶部至路基表面的垂直距离为 0.2 m。图 3 展示了土压力盒埋设作业的场景, 为确保测量数据的精确性, 在土压力盒的周围铺设了一层均匀的细沙, 以使其达到受力均匀的效果。待压路机充分碾压后,

在选定的测试点处进行冲击荷载试验, 图 4 为进行现场测试的图片。其中产生的冲击力约为 7 000 N, 承载板为直径为 0.3 m 的圆盘, 平均冲击应力约为 100 kPa, 冲击力作用时间约为 17 ms。

试验完成后, 将测试点路基填料取出, 进行室内试验。得到颗粒级配曲线如图 5 中蓝色实线所示, 颗粒密度为 2 500 kg/m³。



图 3 现场埋设土压力盒照片
Fig.3 Photograph of field embedding of soil pressure cell



图 4 现场冲击荷载法测试照片
Fig.4 Photograph of field impact load testing method

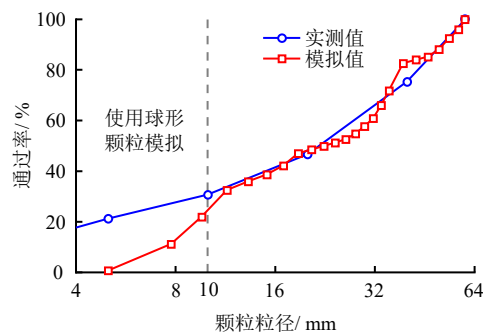


图 5 颗粒级配曲线
Fig.5 Particle size distribution curves

3.2 颗粒细观参数的标定

离散元模型中颗粒细观参数的恰当选择对后续计算的准确性具有显著影响。鉴于此, 本研究采用室内大三轴试验对模型进行标定, 其中三轴试样使

用现场取出的路基填料填筑，并且严格按照实测级配进行配置。图 6(a)展示了室内大三轴试验填筑试样的场景，试样直径为 0.3 m，高为 0.6 m，围压由压力室中水压提供，结合仪器基本情况，设计试验围压为 200 kPa。试验过程参考规范进行^[19]。

采用离散元方法对室内大三轴试验进行模拟，模型计算时颗粒级配按照第 2 节中设计的方法调整。模型围压使用圆柱体墙体提供，其中墙体被编写的伺服函数控制。试样下部墙体固定，顶压由上部墙体按 0.05 mm/s 的加载速率提供，设置上部墙体摩擦系数设为 0^[17]。随机生成试样后，得到的颗粒级配曲线如图 5 中红色虚线部分所示，可见模拟级配与实际级配吻合度较高。图 6(b)为模拟大三轴试验加载过程的图片。

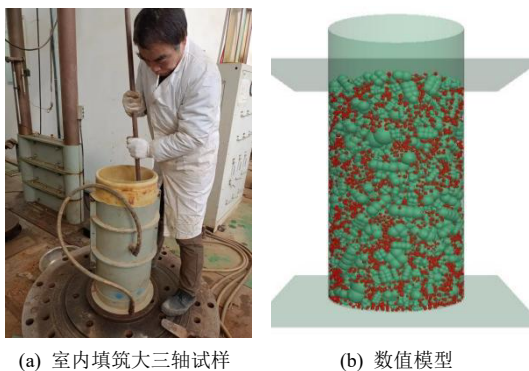


图 6 大三轴试验图
Fig.6 Illustration of large-scale triaxial experiment

经过多次计算与调整，当颗粒间细观参数如表 1 所示时，得到标定曲线如图 7 所示。此时，模拟的偏应力-应变曲线与实际观测值之间表现出了良好的吻合度，这表明所选参数能够准确代表颗粒间接触的一般规律。

3.3 模拟试验结果

按照以上数据设置模型参数，其中有限差分模型使用弹性本构，参考图 7 中偏应力-竖向应变曲线，回弹模量设为 120 MPa。图 8 是模型图片，当控制压实后的孔隙率为 0.297 4 时，路基表面位移对比图如图 9 所示。初始阶段，随着冲击力的持续增加，路基表面迅速响应，产生方向向下的位移，直至达到位移峰值。随后，随着冲击力的减小，路基变形逐步回弹，直至承载板与路基表面完全脱离，此期间位移量不断缩减。紧接着，由于惯性作用承载板继续向上运动，导致监测数据中出现了路基表面位移值为正的现象。最终，承载板回落并停留在路基表面的残余沉降位置。

表 1 离散元颗粒细观参数表
Table 1 Table of micro-parameters for discrete element particles

| 法向刚度 k_n / ($N \cdot m^{-2}$) | 切向刚度 k_s / ($N \cdot m^{-2}$) | 摩擦系数 |
|--------------------------------------|--------------------------------------|------|
| 8×10^7 | 4×10^7 | 0.8 |

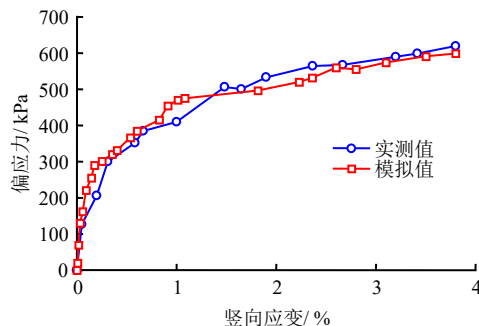


图 7 标定曲线图
Fig.7 Calibration curves

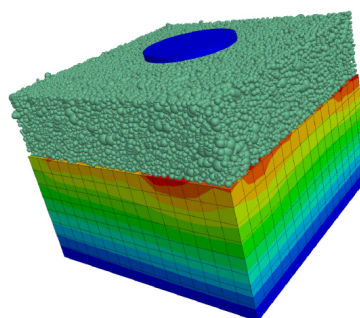


图 8 冲击荷载下填石路基响应模型
Fig.8 Response model of rock-filled subgrade under impact load

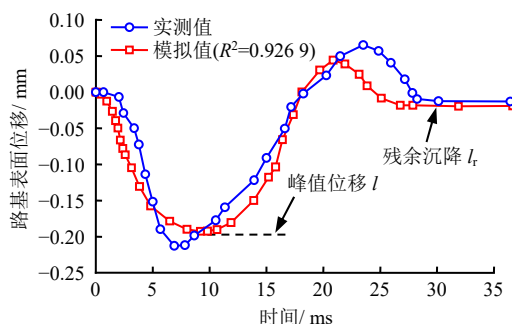


图 9 路基表面位移对比图
Fig.9 Comparison chart of subgrade surface displacement

与位移响应相同，在冲击力施加的过程中，路基内部迅速产生动压应力，且其强度随着冲击力的减弱相应降低，直至应力完全消散，路基内部应力

状态趋于平稳。期间，动应力存在峰值强度，该值的大小受模型阻尼的影响较显著，设置不同的阻尼值，动应力峰值将在一定范围内波动，将阻尼设置为 0.25 时，动应力计算值与实测值的对比如图 10 所示。为了加深数据的说服力，图 9、10 中均列出了实测值和计算值间的相关性系数，两者相关性系数均在 0.9 以上，可见此阶段的计算结果与实测数据一致性较高，这不仅验证了模型的准确性和可靠性，也证明了所选用标定参数的合理性。

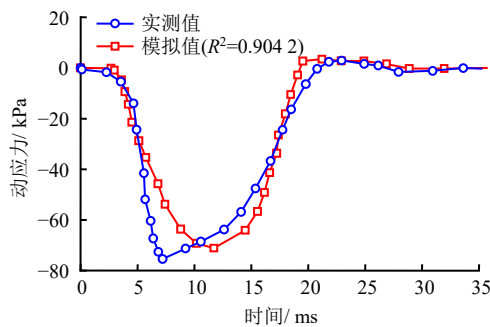


图 10 路基内部 0.2 m 深处动应力对比图
Fig.10 Comparison chart of dynamic stress at a 0.2 m depth inside the subgrade

4 填石路基压实质量评价分析

为了分析填料级配对路基性能的影响，本节分析了 5 种常见级配的填石路基在冲击荷载下的响应特征。5 种级配曲线如图 11 所示，J1~J5 为级配的编号，最大粒径为 120 mm，J5 最小粒径为 10 mm，其余级配最小粒径为 5 mm。

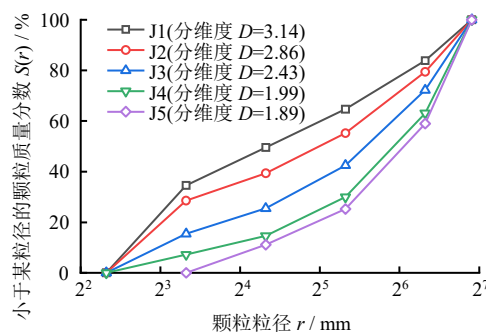


图 11 5 种常见填料级配曲线
Fig.11 Particle size distribution curves of five common fill materials

在不同压实程度的填石路基模型上分别进行冲击荷载计算，记录离散元路基孔隙率，记录路基表面位移-时程曲线。定义一次加载后路基表面残余沉

降与峰值位移的比值为沉降比：

$$p_1 = \frac{l_r}{l} \tag{1}$$

式中： p_1 为沉降比； l_r 为残余沉降 (mm)； l 为路基表面峰值位移 (mm)。

参考半空间弹性体在冲击载荷下的响应解，使用下式计算回弹模量，作为表示路基刚度或压实质量的参数。

$$E_p = \frac{\pi p R (1 - \mu^2)}{2l} \tag{2}$$

式中： E_p 为回弹模量 (MPa)； p 为冲击载荷 (kPa)； R 为承载板半径 (m)； μ 为泊松比。峰值位移与残余沉降含义参考图 9。

以 J3 级配填料的路基模型响应结果为例，图 12 详尽地展示了回弹模量 E_p 和沉降比 p_1 随孔隙率 n 变动的相关性趋势，其中回弹模量与孔隙率有良好的指数关系，沉降比与孔隙率有良好的线性关系，二者相关性系数均在 0.9 以上。图 12 的右侧到左侧是路基逐渐被压实的过程，此过程中随着孔隙率的降低，路基回弹模量逐渐增大，沉降比逐渐减小，表明路基受力引起的塑性变形逐渐减少，其刚度越来越大，填筑质量越来越好。该图直观地验证了冲击荷载法评价填石路基压实质量的有效性与可行性。并且鉴于沉降比与孔隙率之间的线性关系，建议在实际工程的路基压实质量评价中，并行考虑回弹模量与沉降比两大控制指标，以增大采集数据的利用率，提高路基压实质量检测的准确性。

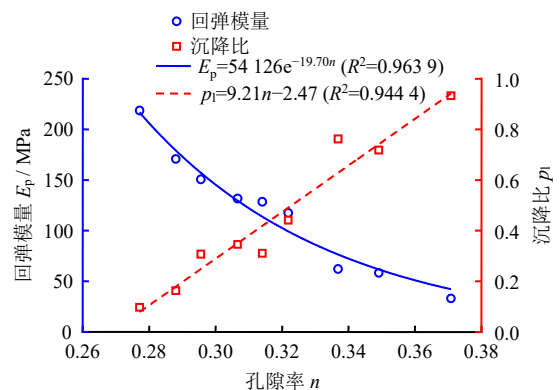


图 12 J3 级配路基回弹模量和沉降比随孔隙率变化图
Fig.12 Graph of resilience modulus and settlement ratio of J3 graded subgrade varying with porosity

表 2 给出了 J1~J5 这 5 种级配的路基模型回弹模量和沉降比随孔隙率变化的拟合关系，每组数据

均由 9~11 个相同级配不同孔隙率的离散元-有限差分耦合模型计算得出,拟合得到的相关性系数较高,可见该数学模型能较好地描述填石路基物理参数对力学特性的影响。其中回弹模量变化指数 A 、模量变化乘数 B 和沉降比变化系数 a 、沉降比截距 b 在一定程度上能够直接反映路基刚度随孔隙率变化的趋

势,因此,深入探讨路基级配特性对这些关键参数的具体影响,对提高路基压实质量检测的精度具有实际意义。

分形理论是量化填料级配特征的一种手段,该理论认为填料的颗粒级配曲线符合下式所示函数^[20]。

表 2 不同级配回弹模量、沉降比与孔隙率拟合参数表

Table 2 Fitting parameters for resilience modulus, settlement ratio, and porosity of different gradations

| 级配曲线 | 分维度 D | $E_p = Bc^{-An}$ | | | $p_i = an - b$ | | |
|------|---------|------------------|---------|---------|----------------|------|---------|
| | | A | B | R^2 | a | b | R^2 |
| J1 | 3.14 | 23.99 | 158 077 | 0.985 8 | 12.21 | 3.26 | 0.946 5 |
| J2 | 2.86 | 23.06 | 112 478 | 0.952 3 | 10.04 | 2.73 | 0.975 4 |
| J3 | 2.43 | 19.70 | 54 126 | 0.963 9 | 9.21 | 2.47 | 0.944 4 |
| J4 | 1.99 | 18.67 | 44 080 | 0.991 0 | 6.53 | 1.73 | 0.895 4 |
| J5 | 1.89 | 15.19 | 17 280 | 0.988 6 | 5.08 | 1.46 | 0.974 1 |

$$S(r) = \frac{r_{\max}^{3-D} - r_{\min}^{3-D}}{r_{\max}^{3-D} - r_{\min}^{3-D}} \quad (3)$$

式中: r_{\max} 为填料最大粒径 (mm); r_{\min} 为填料最小粒径 (mm)。其中,分维度 D 为该理论中的重要参数,不同取值的 D 对应着形态各异的颗粒级配曲线,因此可以使用 D 表示不同特征的填料级配。徐昞等^[21]将该理论用于道砟集料级配的研究上,发现道砟级配的分维度与道床的剪切力学特性之间存在着紧密的联系。Huang 等^[22]采用室内试验得到了道砟级配分维度与最大干密度之间的经验公式。本研究参考文献^[21-22],使用分形理论对路基填料的级配特征进行描述,将 J1~J5 级配曲线上的控制点代入下式进行参数拟合,可得到分维度 D 的取值,同时将 D 的大小列于图 11 和表 2 中。

将级配分维度 D 与表现填料一定力学性能的参数 A 和 B 进行拟合,拟合关系如图 13 所示,拟合公式如式为

$$A = 6.27D + 4.69 \quad (4)$$

$$B = 102\,189D - 174\,454 \quad (5)$$

二者相关性系数均在 0.9 以上,可见使用分维度研究级配对填石路基力学特性的影响是可行的。将式 (4)、(5) 代入回弹模量拟合指数,可以得到结合填料级配因素和压实程度预测路基回弹模量为

$$E_p = (102\,189D - 174\,454)e^{-(6.27D+4.69)n} \quad (6)$$

按照式 (6) 绘制考虑填料级配与孔隙率的路基回弹模量预测函数,如图 14 中曲面所示,图中三角

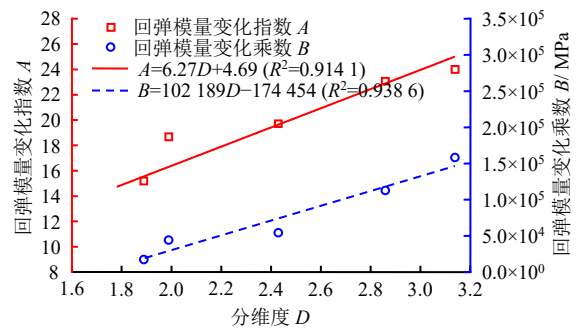


图 13 颗粒分维度对回弹模量变化参数的影响
Fig.13 Influence of particle fractal dimension on resilience modulus variation parameters

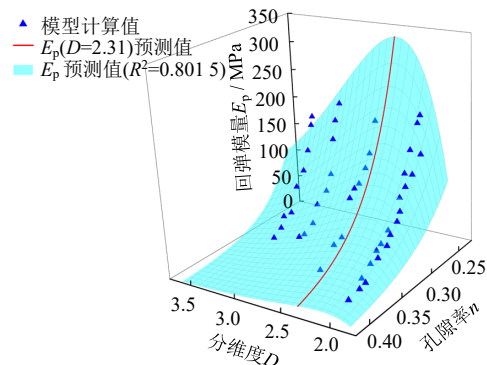


图 14 考虑级配与孔隙率的路基回弹模量预测函数图
Fig.14 Prediction function diagram of subgrade resilience modulus considering gradation and porosity

形为各种数值模型计算值,其均匀的分布在曲面两侧,相关性系数为 0.801 5,可见使用该函数对回弹模量进行预测是可行的。实际工程中现有的路基压实质量评价标准是,通过现场试验得到路基回弹模

量与孔隙率的经验公式,控制回弹模量大于一定值而保证路基孔隙率符合规范要求。显然现有标准没有考虑填料级配对回弹模量与孔隙率关系的影响,本文的研究结果在一定程度上可以对该缺陷进行补充,增大填石路基压实质量评价的精度。

对图 14 进行分析可知,当孔隙率不变时,随着级配分维度 D 的增大,弹性模量先增大后减小,因此取一定值时回弹模量出现极大值,将不同孔隙率下回弹模量极大值点相连接,得到曲线如图 14 中红色实线所示。该曲线为回弹模量预测函数的极值曲线,此时 $D=2.31$,通过进一步分析发现,分维度 D 越靠近 2.31,路基回弹模量变化越剧烈,孔隙率对路基刚度的影响越大,路基回弹模量随着孔隙率降低而增大的速度越快。

同理,将级配分维度 D 与 a 、 b 的关系进行拟合,拟合结果为

$$a = 5.13D - 4.02 \quad (7)$$

$$b = 1.34D - 0.97 \quad (8)$$

二者相关系数在 0.95 以上。由该式可知级配分维度越大,沉降比变化系数 a 越大,表明沉降比随孔隙率降低而减小的速度越快,冲击荷载引起的塑性变形随孔隙率降低而减小的速度越快。

$$n_m = \frac{1.34D - 0.97}{5.13D - 4.02} \quad (9)$$

式中: n_m 为路基理想压实状态下临界孔隙率。

当沉降比等于 0 时,表明路基在冲击荷载下没有明显的塑性变形,路基回弹模量较高,此时路基处于一种理想的压实状态。在沉降比拟合公式中令沉降比等于 0,可得路基在理想压实状态下的临界孔隙率 n_m ,式(9)为其表达式。路基理想压实状态下的孔隙率对应理想状态下的回弹模量,将 n_m 代入式(6)可以对理想状态下临界模量 E_{pm} 进行预测。 n_m 与 E_{pm} 均受级配分维度的影响,图 15 给出了两者在不同分维度下的预测曲线。由图可知,随着分维度 D 的增大,临界孔隙率单调减小,但减小的趋势越来越缓慢,且临界孔隙率变化区间较小。与之相反,临界模量变化范围较大,最低值为 114 MPa,最大值为 338 MPa,可见级配因素对临界模量影响较大。随着分维度的增大, E_{pm} 先增大后减小,在 $D=2.34$ 附近出现极值。当级配分维度过小时,路基内粗颗粒含量较多,在外力作用下易引起较大的变形,导致压实后路基模量较低。当级配分维度过大时,填料的细颗粒含量较高,作为骨料的粗颗粒

含量减小,同样降低了抵抗外力变形的能力。因此随着级配分维度的增大路基临界模量呈现先增大后减小的现象。吴莹等^[23]发现级配分维度在 2.0~2.8 内,堆石料的压实性能先增大后减小,该结论与本文结论一致。

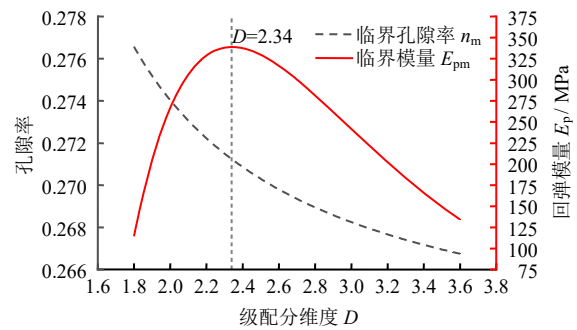


图 15 临界孔隙率与临界模量预测值
Fig.15 Predicted values of critical porosity and critical modulus

临界模量可以作为工程中填石路基压实质量评价的参考性指标,如果实测的回弹模量与临界模量相差较大,则说明该路基在受力作用下可能产生较大的塑性变形,路基刚度不满足要求,路基仍有较大的压实空间。该研究能对填石路基设计中填料级配的选择提供参考。例如,为了保证设计模量达到 260 MPa 时路基在冲击荷载作用下没有明显的塑性变形,则填料级配分维度需满足大于 $1.99 < D < 2.91$ 的条件。

5 结 论

本研究采用离散元-有限差分耦合方法构建了针对冲击荷载下填石路基动力响应的数值模型,并且通过室内大三轴试验与现场试验对模型进行了标定与验证。通过数值分析本文得到以下结论:

(1) 发现通过冲击荷载法得到的回弹模量 E_p 与填石路基孔隙率之间有良好的指数关系,验证了冲击荷载法评价填石路基压实质量的可行性。提出了以路基表面残余沉降与峰值位移之比作为沉降比的概念,并且验证了沉降比与路基孔隙率之间存在明确的线性关联。鉴于此,建议评价路基压实质量时同时将回弹模量与沉降比作为控制指标,以提升路基压实质量控制的精确度和全面性。该结论虽然由离散元方法模拟填石路基响应得到的,但其中涉及的物理量关系已经被广泛认同,因此结论的适用范围不仅局限于填石路基,提出的建议在砂土、黏土类路基上仍具有一定应用价值。

(2) 得到了考虑填料级配与压实程度的填石路基回弹模量预测公式, 发现当路基孔隙率维持恒定条件时, 观察到颗粒级配的分维度在 2.31 附近呈现极值效应, 即级配分维度越趋近于 2.31, 回弹模量随着孔隙率减小而增大的速度越快。该结论是在假设路基填料间黏聚力忽略不计的情况下得到的, 因此对应黏聚力显著的黏土填料等, 此结论的应用可能受到限制。

(3) 建立了考虑级配影响的填石路基在理想压实状态下的临界孔隙率与临界回弹模量预测模型。发现级配因素对临界模量影响显著, 最大值与最小值相差 3 倍左右。同时, 随着级配分维度的增加, 临界孔隙率呈现单调递减趋势, 而临界回弹模量先增后减, 在分维度为 2.34 时出现极大值。与上部结论类似, 在黏聚力显著的填料上, 预测模型的应用可能受到限制。

参 考 文 献

- [1] NABIZADEH H, SIDDHARTHAN R V, HAJJ E Y, et al. Validation of the subgrade shear strength parameters estimation methodology using light weight deflectometer: numerical simulation and measured testing data[J]. **Transportation Geotechnics**, 2019, 21: 100259.
- [2] TANG C X, LU Z, QIN L, et al. Coupled vibratory roller and layered unsaturated subgrade model for intelligent compaction[J]. **Computers and Geotechnics**, 2025, 177: 106827.
- [3] 张锋, 唐康为, 尹思琪, 等. 冻融粉质黏土的剪切波速与动态回弹模量及其转换关系[J]. **岩土力学**, 2023, 44(增刊 1): 221-233.
ZHANG Feng, TANG Kang-wei, YIN Si-qi, et al. Shear wave velocity and dynamic resilient modulus of frozen and thawed silty clay and their conversion relationship[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44(Suppl.1): 221-233.
- [4] 李永威, 徐林荣, 傅金阳, 等. 列车荷载作用下铁路路基填料渗透破坏机制[J]. **岩土力学**, 2024, 45(增刊 1): 299-308. LI Yong-wei, XU Lin-rong, FU Jin-yang, et al. Seepage failure mechanism of railway subgrade filling materials under train loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2024, 45(Suppl.1): 299-308.
- [5] 陈铖, 刘小清, 罗正东, 等. 颗粒级配对粗粒土强度与变形特性影响的研究[J]. **工程地质学报**, 2016, 24(6): 1191-1198.
CHEN Cheng, LIU Xiao-qing, LUO Zheng-dong, et al. Study of strength and deformation characteristic of unbound granular material with different grain composition[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2016, 24(6): 1191-1198.
- [6] 陈逸飞. 颗粒形状对粗粒土剪切特性影响的细观数值试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
CHEN Yi-fei. Mesoscopic view of the effect of particle shape on the shear properties of coarse-grained soil numerical experimental research[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.
- [7] 井国庆, 王子杰, 施晓毅. 多围压下三轴压缩试验与不可破裂颗粒离散元法分析[J]. **工程力学**, 2015, 32(10): 82-88.
JING Guo-qing, WANG Zi-jie, SHI Xiao-yi. Ballast triaxial tests and non-breakable particle discrete element method analysis under different confining pressures[J]. **Engineering Mechanics**, 2015, 32(10): 82-88.
- [8] 杨宁宇. 颗粒细长比对粗颗粒土的宏细观力学特性影响研究[D]. 长沙: 中南大学, 2022.
YANG Yu-ning. Macro- and meso- investigation on the effect of particle elongation on mechanical properties of coarse-grained soil[D]. Changsha: Central South University, 2022.
- [9] GEORGE V, KUMAR A. Studies on modulus of resilience using cyclic tri-axial test and correlations to PFWD, DCP, and CBR[J]. **International Journal of Pavement Engineering**, 2018, 19(11): 976-985.
- [10] RAFIEI K, KAVUSSI A, YASROBI S. Construction quality control of unbound layers based on stiffness modulus criteria[J]. **Journal of Civil Engineering and Management**, 2012, 18(1): 5-13.
- [11] TANG C X, LU Z, LIU G K, et al. Study on mechanism and application of PFWD for subgrade quality detection: semi-analytical approach and experiment[J]. **Road Materials and Pavement Design**, 2024, 25(2): 326-343.
- [12] 中交第二公路勘察设计研究院, JTGD30—2015 公路路基设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
CCCC Second Highway Consultants Co., Ltd. JTGD30—2015 Specifications for design of highway subgrades[S]. Beijing: China Communications Press, 2015.
- [13] 王龙, 夏浩然. PFWD 冲击荷载的影响深度及参数配置[J]. **哈尔滨工业大学学报**, 2019, 51(9): 62-67.

- WANG Long, XIA Hao-ran. Analysis on the action depth of PFWD impact load and parameters configuration[J]. **Journal of Harbin Institute of Technology**, 2019, 51(9): 62-67.
- [14] 杨杰. 基于 PFWD 的高速公路路基压实质量快速检测技术应用研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2022.
- YANG Jie. Application study on fast detection technology of expressway subgrade compaction quality based on PFWD[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2022.
- [15] 刘陈林. 基于颗粒流的大粒径填石路基强夯加固效果分析[D]. 合肥: 安徽理工大学, 2019.
- LIU Chen-lin. Analysis on reinforcement effect of dynamic compaction on large-diameter rockfill subgrade base on particle flow code[D]. Hefei: Anhui University of Science and Technology, 2019.
- [16] 杨贵, 肖杨, 高德清. 粗粒料三维颗粒流数值模拟及其破坏准则研究[J]. **岩土力学**, 2010, 31(增刊 2): 402-406.
- YANG Gui XIAO Yang, GAO De-qing. Study of three-dimensional particle flow numerical simulation and failure criterion for coarse-grained soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(Suppl.2): 402-406.
- [17] 齐阳, 唐新军, 李晓庆. 粗粒土应力诱发各向异性真三轴试验颗粒流模拟研究[J]. **岩土工程学报**, 2015, 37(12): 2292-2300.
- QI Yang, TANG Xin-jun, LI Xiao-qing. Stress-induced anisotropy of coarse-grained soil by true triaxial tests based on PFC[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(12): 2292-2300.
- [18] 金磊, 曾亚武, 李欢, 等. 基于不规则颗粒离散元的土石混合体大三轴数值模拟[J]. **岩土工程学报**, 2015, 31(5): 829-838.
- JIN Lin, ZENG Ya-wu, LI Huan, et al. Numerical simulation of large-scale triaxial tests on soil-rock mixture based on DEM of irregularly shaped particles[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 31(5): 829-838.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50123-2019 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development. GB/T 50123—2019 Standard for geotechnical testing methods[S]. Beijing: China Planning Publishing House, 2019.
- [20] 杨瑞华, 许志鸿. 密级配沥青混合料集料分形分维与路用性能的关系[J]. **土木工程学报**, 2007, 40(3): 98-103, 109.
- YANG Rui-Hua, XU Zhi-hong. Relationship between fractal dimension and road performance of dense- gradation asphalt mixture[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2007, 40(3): 98-103, 109.
- [21] 徐昉, 高亮, 王红, 等. 道砟级配的分形方法及对道床剪切性能影响[J]. **铁道学报**, 2016, 38(12): 94-101, 117.
- XU Yang, GAO Liang, WANG Hong, et al. Study of fractal method and influence of ballast gradation on ballast bed shear behavior[J]. **Journal of the China Railway Society**, 2016, 38(12): 94-101, 117.
- [22] HUANG Y B, LI Y J, TAN J. Relationship of fractal structure and compactibility of coarse grain soil in high speed railway subgrade[J]. **Applied Mechanics and Materials**, 2013, 2733(438-439): 1108-1111.
- [23] 吴莹, 马刚, 周伟, 等. 基于分形理论的堆石料级配优化研究[J]. **岩土力学**, 2016, 37(7): 1977-1985.
- WU Ying, MA Gang, ZHOU Wei, et al. Optimization of gradation of rockfill materials based on the fractal theory[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(7): 1977-1985.