

基于冲击荷载法的碎石土路基力学特性及压实质量评价研究

李梦威^{1,2}, 卢正¹, 唐楚轩^{1,2}, 胡智³, 柴少强⁴, 刘永⁴

(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; 4. 中交一公局第七工程有限公司, 河南 郑州 451450)

摘要: 冲击荷载法是对路基施加冲击力分析响应信号进而评价路基压实质量的方法。研究冲击荷载下碎石土路基的响应机制, 有助于深入了解该类路基的力学特性, 以及加深对冲击荷载法评价路基压实质量原理的认识。首先充分考虑碎石土的真实状态, 使用离散元方法建立冲击荷载作用下碎石土路基动力响应模型, 并且通过大三轴试验标定了模型参数, 采用现场试验验证了模型的合理性。随后, 探讨不同压实度下路基动应力的衰减特征, 并与连续介质理论获得的结果进行比较, 进一步建立孔隙率与回弹模量之间的量化模型, 分析路基性能改变时路基表面响应的变化, 最后讨论不同冲击荷载与承载板半径对有效检测深度的影响。研究结果发现: (1) 孔隙率对碎石土路基内部动应力衰减影响显著, 孔隙率越小衰减越快; 并且采用连续介质理论获得的动应力普遍偏低, 最大相差 70% 以上; (2) 碎石土路基孔隙率与回弹模量之间有良好的线性关系, 验证了冲击荷载法评价路基压实质量的可行性; (3) 承载板半径对冲击荷载法有效检测深度有明显影响, 承载板半径为 0.15 和 0.2 m 时, 有效检测深度在 0.3 m 以内, 半径为 0.25 m 时, 有效检测深度在 0.3~0.4 m 范围。

关键词: 路基工程; 碎石土; 离散元; 冲击荷载; 压实质量

中图分类号: U 416

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2025)06-1649-09

Study on mechanical properties and compaction quality evaluation of gravel soil subgrade based on impact load method

LI Mengwei^{1,2}, LU Zheng¹, TANG Chuxuan^{1,2}, HU Zhi³, CHAI Shaoqiang⁴, LIU Yong⁴

(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; 4. No. Seven Engineering Co., Ltd. of CCCC First Highway Engineering Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 451450, China)

Abstract: The impact loading method is a technique used to assess the compaction quality of subgrade by applying impact forces and analyzing the resulting response signals. Investigating the response mechanism of gravel soil subgrade under impact loading enhances our understanding of its mechanical properties and improves the evaluation

收稿日期: 2024-08-23; **修回日期:** 2025-02-03

基金项目: 湖北省自然科学基金创新群体项目 (2023AFA019); 湖北省交通运输厅科技项目 (2020-186-1-9); 浙江省交通运输科技计划项目 (2024019) Supported by the Innovation Group Project of Natural Science Foundation of Hubei Province (Grant No. 2023AFA019), Science and Technology Projects of Hubei Provincial Department of Transportation and Communications (Grant No. 2020-186-1-9) and Zhejiang Provincial Transportation Science and Technology Project (Grant No. 2024019)

作者简介: 李梦威 (1999-), 男, 2022 年毕业于东华理工大学采矿工程专业, 现为硕士研究生, 主要从事填石路基力学特性与性能检测方面的研究工作。E-mail: limengwei22@mails.ucas.ac.cn

DOI: 10.3724/1000-6915.jrme.2024.0641

principles of subgrade compaction quality using this method. The actual working conditions of gravel soil subgrade were fully considered, and a dynamic response model was established using the discrete element method. The model parameters were calibrated through triaxial tests, and its validity was verified by field experiments. Subsequently, the attenuation characteristics of dynamic stress in the subgrade under different compaction densities were explored and compared with results from continuum medium theory. A quantitative model relating porosity to the resilient modulus was further developed. The variations in surface response of the subgrade with changes in its properties were analyzed, and the effects of different impact load amplitudes and plate radii on the effective detection depth were discussed. The findings are as follows: (1) Porosity significantly affects the attenuation of internal dynamic stress in gravel soil subgrade, with faster attenuation observed at lower porosity levels; the dynamic stress obtained using continuum medium theory is generally lower, with a maximum difference exceeding 70%. (2) There is a strong linear relationship between porosity and resilient modulus of gravel soil subgrade, validating the feasibility of using the impact loading method to evaluate subgrade compaction quality. (3) The plate radius significantly impacts the effective detection depth of the impact loading method, with effective detection depths within 0.3 m for plate radii of 0.15 and 0.2 m, and between 0.3 and 0.4 m for a radius of 0.25 m.

Key words: subgrade engineering; gravel soil; discrete element; impact load; compaction quality

1 引言

路基是路面的基础,路基的填筑质量是影响整个道路结构服役性能的关键因素之一。在气候作用及车辆的长期重复荷载下,路基往往被认为是最容易损坏的部分^[1],因此控制和评价路基的填筑质量非常重要。常用的路基压实质量评价方法有灌水法、灌砂法和贝克曼梁法等,但大多传统方法存在测试效率低、需要较多人员和机械配合的缺点。与之相比,使用冲击荷载法评价路基压实质量可以显著提高检测效率。冲击荷载法的原理是通过在待测路基表面施加冲击力,监测荷载作用过程中路基表面的位移等动力响应,进而基于监测结果对路基填筑质量进行评价的方法。

部分学者对冲击荷载下路基的动力响应机制进行了研究,为冲击荷载法的应用提供了理论基础。C. Tang 等^[2]建立了一种冲击荷载下考虑路基土应力依赖性的分层弹性模型。J. Zhang 等^[3]考虑路基土的非饱和特性,利用 Laplace-Hankel 变换和动力刚度矩阵法结合边界条件,求解了冲击荷载下非饱和土层控制方程的解析解,发现路基的饱和度对路基表面位移、孔隙水压力有显著影响。范海山等^[4]考虑路面结构黏弹性与路基模量沿深度方向的非均匀性,借助 Hankel-Laplace 积分和 Frobenius 法获得了沥青路面在冲击荷载下动力响应解析解。A. Loizos 等^[5-6]使用有限元方法计算了冲击荷载下均匀层状半空间模型的动态响应,发现动载引起的峰值位移小于静载引起的位移。尹紫红等^[7]使用有限元方法建立了

重载铁路轨道-路基-地基动力分析的耦合模型,分析了不同幅值的梯形冲击荷载对路基动位移的影响,发现动位移沿铁道线路对称分布,且动位移竖向线性衰减,衰减速度与冲击荷载幅值正相关。除此之外,V. George 等^[8-12]将冲击荷载法的测试结果与传统方法进行了对比,尝试找到两类测试方法的相关性。

对已发表的文献分析发现,目前学者研究路基在冲击荷载下的响应机制主要基于连续介质理论,使用的路基填料多为黏土、粉土甚至是沥青路面。但是当路基填料为粒径较大的砂砾石或碎石土时,填料表现出明显的非连续性和离散性,华阳等^[13]认为使用有限元方法分析冲击荷载引起的卵石层响应具有很大困难。王鑫^[14]发现使用有限元和离散元方法分析动力作用下碎石土堆积边坡的薄弱部位时,两者的预测结果存在偏差。因此使用连续介质理论来分析这种特殊填料的力学特性并评价其压实质量时,可能产生较大误差。J. Yu 等^[15]认为使用离散元方法能够很好的模拟碎石土的力学行为。深入研究碎石土路基在冲击荷载作用下的力学特性,不仅能够增进对冲击荷载法评价该类路基压实质量机制的理解,而且能够提升对路基压实过程、形变模式的认知深度。为此,本研究建立了冲击荷载下模拟碎石土路基响应的离散元模型,通过大三轴试验对颗粒间细观参数进行了标定,通过计算数据与现场试验结果的对比如验证了模型的合理性,随后阐述了碎石土路基上动应力随深度的衰减特性,对孔隙率与回弹模量的关系进行了量化分析,对路基性能改变引起的表面响应变化规律进行了讨论,最后分

析了不同冲击荷载法参数对其有效检测深度的影响。从而为分析碎石土路基的力学特性和评价其压实质量提供了理论依据和科学支撑。

2 冲击荷载现场试验

在信随高速公路谭家河乡段 K5+300 处在建的碎石土路基进行冲击荷载试验，为下文离散元模型的建立与验证提供试验依据。该处路基填料为开山石渣，原岩天然状态下单轴抗压强度 52.7 MPa，最大干密度为 1.932 g/cm³，最优含水率 5.2%，路基填筑过程控制填料含水率在最优含水率附近。在测试点下方埋设土压力盒，获取路基内一定深度处动应力随时间的变化曲线，图 1 为土压力盒埋设时照片，下方铺设了一层细沙用于确保土压力盒埋设水平，经测量土压力盒顶部距地面 0.2 m。埋设土压力盒后，使用压路机将测试点处路基进行充分碾压，然后进行测试，其中使用便携式落锤弯沉仪进行试验，冲击荷载由自由落体的 10 kg 重锤提供，产生的峰值荷载约 100 kPa，图 2 为进行冲击荷载现场试验的照片，为了减少试验误差，先预压 3 次待承载板与路基紧密贴合后，再加载 3 次取平均值。



图 1 埋设土压力盒
Fig.1 The placement of soil pressure sensor



图 2 现场试验冲击荷载测试
Fig.2 Field impact load test

测试完毕后，以测试点为中心进行灌水法试验，测得路基含水率为 5.4%，干密度为 1.829 g/cm³。将得到的填料进行筛分试验，得到颗粒级配曲线如图 3 所示。筛分后按形状选出不同粒径的典型代表颗粒，建立其颗粒团簇模型，5~60 mm 代表颗粒与对应的二维模型如表 1 所示，通过室内试验测得填料颗粒密度为 2 482 kg/m³。

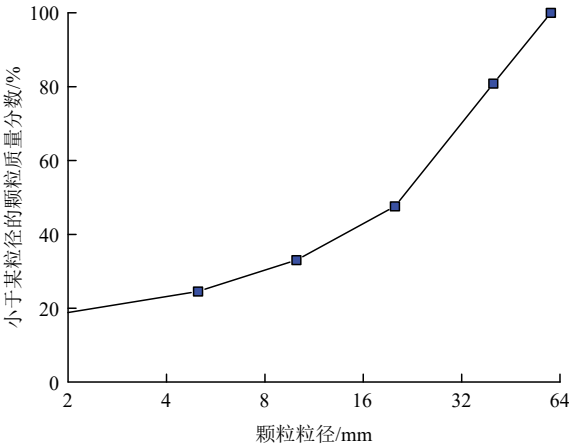


图 3 颗粒级配曲线
Fig.3 Curve of particle distribution

表 1 颗粒形状与模型
Table 1 Particle shape and model

颗粒大小/mm	真实形状	模型形状
40~60		
20~40		
5~20		

3 模型的建立与验证

3.1 模型原理

使用离散元方法进行模拟研究，模型的实现原理与冲击荷载法原理一致。在现场进行冲击荷载试验时，往往在路基上放置了一定大小的刚性承载板，以刚性板的位移值代替路基表面位移。所以建立模型时，首先建立承载板和路基模型，然后在承载板上施加冲击荷载，最后记录各项物理、力学参数随时间的变化。冲击力使用半正弦荷载模拟^[2]。参考杨贵等^[16-17]对砂土、碎石土的研究，颗粒间接触模型使用线弹性模型。

3.2 颗粒细观参数的标定

离散元模型颗粒细观参数的选择对后续计算正确性有较大影响，现采用大三轴试验对模型进行标

定,即通过对三轴试验的数值计算结果与室内试验结果的对比选择模型参数。使用现场取出的路基填料填筑室内大三轴试验的试样,试样为直径 0.3 m、高 0.6 m 的圆柱体。试样分 3 层进行填筑,每层 0.2 m,每填筑一层需使用击实锤对试样进行击实。结合试验仪器实际情况,设计三轴试验围压为 200 kPa。加载时由伺服系统控制试验围压保持恒定,加载速度为 0.05 mm/s,图 4(a)为大三轴试验加载时照片。

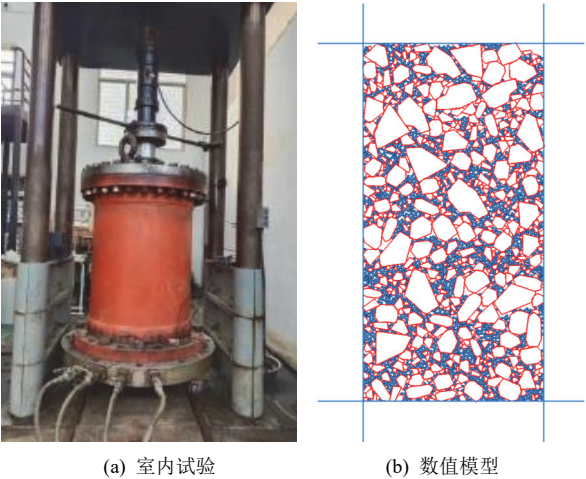


图 4 大三轴室内试验与数值模拟

进行大三轴离散元计算模拟时,模型边界由墙支撑,生成颗粒最小粒径为 5 mm,5 mm 以下颗粒按质量分数折算为 5 mm 的圆盘颗粒^[16-17]。设置左右墙体刚度为颗粒刚度的 0.1 倍,设置上部墙体摩擦因数为 0^[17-19]。并且保障加载过程中模型时刻处于平衡状态。大三轴数值模型如图 4(b)所示。

在模型中设置不同的颗粒细观参数,进行大量计算,使模拟的偏应力-应变曲线与实际相吻合。考虑到 100 kPa 冲击荷载引起的竖向位移峰值在 0.5 mm 以内,相对于单层厚度为 0.2 m 的路基,产生的平均应变小于 0.25%,因此模拟值与实际值需重点满足在小应变时的一致性。图 5 给出了竖向应变小于 1.75%之前的试验值与 3 种标定参数计算的偏应力-应变曲线,3 种标定参数列于表 2。由图可知,选择参数 3 时,摩擦因数较大时,模型有应变软化的趋势,选择参数 1 时,切向刚度较小时,相同竖向应变对应的偏应力较小。而选择标定参数 2 作为颗粒间细观参数时,模拟值与试验值吻合良好,该参数能有效反映出碎石土填料的力学行为,因此最终模型的标定参数选择参数 2。

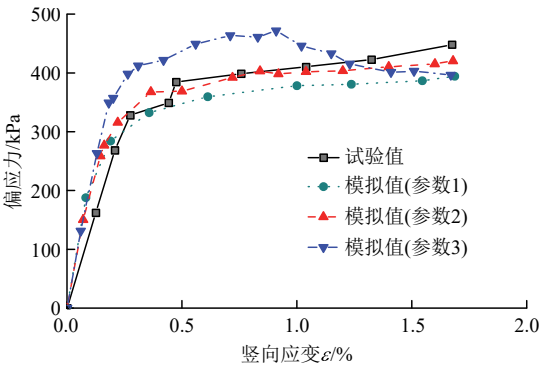


图 5 模型标定曲线
Fig.5 Model calibration curves

表 2 颗粒细观参数标定表

Table 2 Calibration table for microscopic parameters of particles

标定参数	法向刚度/ ($10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$)	切向刚度/ ($10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$)	摩擦因数
参数 1	4.0	5	0.7
参数 2	4.0	7	0.7
参数 3	4.0	7	0.8

3.3 模型其他参数设置

结合实际情况,模型中承载板的长度设置为 0.3 m,密度为 7850 kg/m^3 。合适大小的路基模型对确保计算的准确性和提高计算效率非常重要。结合王 龙和夏浩然^[20]对冲击荷载影响深度的研究结果,考虑计算效率,模型中路基厚度设置为 0.6 m,宽度为 1 m,且路基边界处使用黏性阻尼设置为透射边界^[18]。

根据现场试验,设置冲击载荷作用时间为 16 ms,此情况下模拟荷载与实际荷载产生的竖向应力如图 6 所示。路基使用特定级配与形状的颗粒分层压实得到,每层压实后的厚度控制在 0.2 m 左右,待该层压实后再进行下一层的填筑。

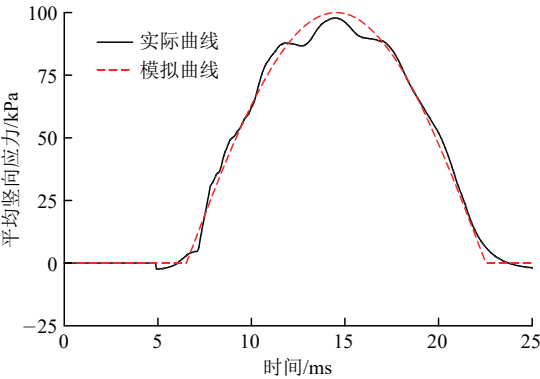


图 6 平均竖向应力对比曲线
Fig.6 Average vertical stress contrast curves

3.4 模型验证

参考 B. P. B. Hoomans 等^[21]提出的公式可将二

维情况下孔隙率转化为三维孔隙率:

$$n = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi\sqrt{3}}} (1 - n_{2d})^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

式中: n_{2d} , n 分别为二维与三维情况下的孔隙率。

当分层压实后路基模型的孔隙率 $n = 0.268\ 0$ 左右时, 模拟结果与试验结果吻合良好, 此时路基模型干密度约为 $1.816\ \text{g/cm}^3$, 与现场灌水法得到的干密度近似。图 7 为模型图片, 其中共有团簇颗粒 1 599 个, 为图中蓝色部分, 粒径为 5 mm 的圆盘颗粒 6 376 个, 为图中红色部分。图 8 为路基表面位移对比图。以路基表面下 0.2 m 处为中心, 建立 4 个相交的测量圆, 测量圆为图 7 中心白色部分, 用 4 个测量圆测试的平均动应力时程曲线与土压力盒实测动应力时程曲线进行对比, 对比图如图 9 所示。

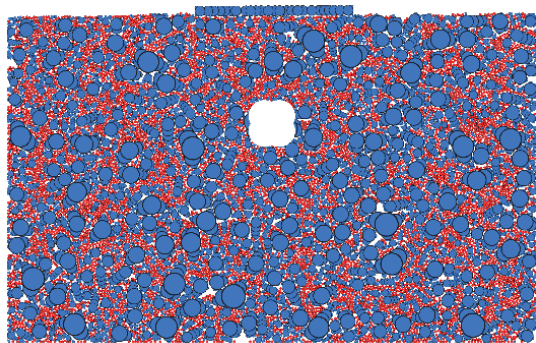


图 7 冲击荷载测试离散元模型

Fig.7 Discrete element model of impact load testing

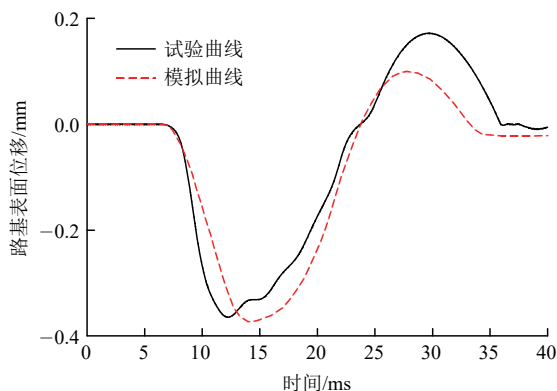


图 8 路基表面位移对比曲线

Fig.8 Subgrade surface displacement contrast curves

图 8 中位移时程曲线大于 0 的部分表示承载板受路基反作用力发生反弹的现象。竖向动应力为总应力减去没有加载时的静应力, 图 9 中出现动应力为正的情况, 表示此时所受压应力低于静止时压应力。计算结果与现场试验结果的对比较验证了模型的正确性, 也说明了模型标定参数选择的合理性。说明使用离散元方法可以准确地分析冲击荷载作用下碎石土路基的力学特性。

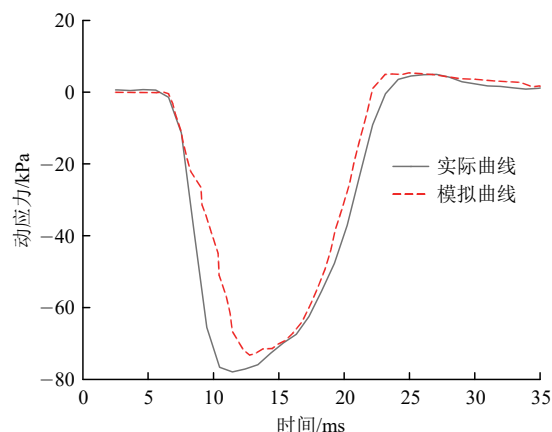


图 9 路基表面下方 0.2 m 处动应力对比曲线

Fig.9 Dynamic stress contrast curves at 0.2 m below the subgrade surface

3.5 模型中路基厚度合理性检验

根据杨杰^[22]设计的模型试验, 冲击荷载作用下的路基响应, 只有在路基厚度大于一定值时才是稳定的, 所以需要数值模型中路基厚度是否满足条件进行检验。分层压实后控制路基孔隙率 $n = 4$ 个不同值, 并且改变路基厚度, 使用下式计算回弹模量^[23]:

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

式中: E_p 为回弹模量, p 为路基表面平均压力, R 为承载板半径, μ 为泊松比, l 为路基表面位移。

不同孔隙率下路基厚度与回弹模量关系如图 10 所示。为了方便理解不同孔隙率代表的压实程度, 将孔隙率对应的压实度同样列于图中。其中使用 fix 命令可以做到改变路基厚度而不对模型中颗粒分布造成扰动, 路基的泊松比取 0.2^[24]。

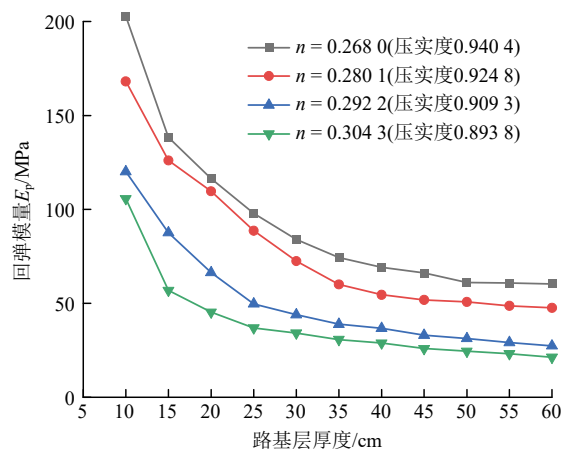


图 10 不同孔隙率下路基厚度与回弹模量关系

Fig.10 Relationship between subgrade thickness and resilient modulus under different porosities

由图 10 可知,随着路基厚度的增加回弹模量逐渐减小,但减小的趋势逐渐变缓,最终趋于稳定。当路基厚度大于 40 cm 时,4 种孔隙率情况下回弹模量均趋于稳定,这与杨杰^[22]的试验结果一致。可见模型中路基厚度选择为 60 cm 是满足条件的。

4 路基内部动应力衰减规律分析

考虑冲击载荷下不同压实程度的路基内部动应力随深度的衰减。图 11 是在不同孔隙率的路基模型上,施加冲击载荷后记录的动应力峰值随深度的变化结果,其中连续介质计算值为分层非饱和和多孔介质在均布冲击载荷下的竖向动应力计算值^[25]。由图可知,在 0.1 m 内,孔隙率对动应力影响较小,0.1 m 处孔隙率最大值与最小值动应力峰值相差约为 13%,此时使用离散元方法得到的结果与连续介质理论计算值吻合较好。在 0.1 m 外,对比使用 2 种方法得到的计算结果,发现相同深度处使用连续介质理论得到的动应力普遍偏低,与使用离散元方法得到的结果有较大差距,当孔隙率 $n = 0.268 0$ 时最大相差达到 55.92%,当孔隙率 $n = 0.304 3$ 时最大相差达到 72.68%,可见使用连续介质理论分析冲击载荷下的碎石土路基会存在较大误差。

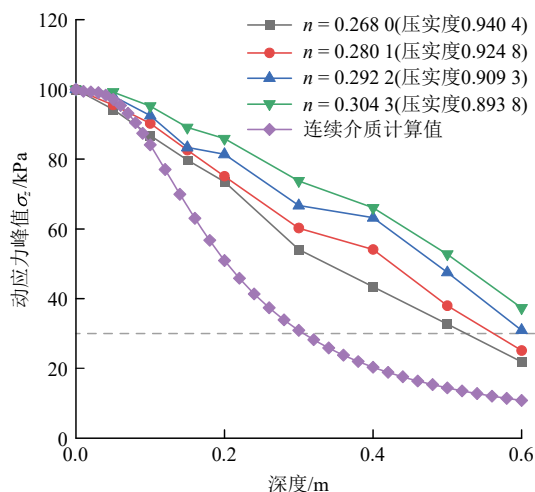


图 11 不同孔隙率下动应力随深度衰减曲线

Fig.11 Dynamic stress attenuation curves with depth under different porosities

在 0.1 m 外还可以发现,孔隙率对冲击载荷下路基内动应力有显著影响,相差最大时达到 38.03%。对比不同孔隙率下动应力峰值沿深度的分布,发现相同深度处孔隙率越小动应力峰值越小,可见碎石土路基上孔隙率越小动应力随深度的衰减

速度越大。

将动应力衰减至一定比例深度作为冲击荷载的影响深度,则碎石土路基上冲击荷载的实际影响深度相比于连续介质理论的计算值更大,且影响深度与路基压实程度有关,压实程度越低影响深度越大。将动应力衰减至路基表面压力 30% 的深度作为冲击荷载影响深度时,若碎石土路基孔隙率小于 0.280 1,则影响深度小于 0.6 m,若孔隙率大于 0.292 2,则影响深度大于 0.6 m。

5 冲击荷载下碎石土路基压实质量评价分析

5.1 表层路基压实质量与回弹模量相关性研究

为了分析冲击荷载法评价新填筑路基压实质量的可行性,考虑不同压实程度的路基在冲击载荷下所引起响应信号的差异。考虑到路基分层填筑的特点,假设每层填筑 0.2 m,且填筑新层时下部路基压实质量良好,改变路基新填筑层颗粒分布状态,记录新路基孔隙率 n ,进行大量模拟计算,通过式(2)计算路基的回弹模量 E_p ,并且对回弹模量与孔隙率进行相关性分析。其中为减少改变新路基状态时对下部路基颗粒分布的扰动,将离散元模型改进为离散-连续耦合模型,实现对模型的简化,模型上部 0.2 m 厚的新填筑路基使用离散元方法计算,下部 0.4 m 厚的已压实路基使用有限差分法模拟。有限差分模型中每 0.01 m 划分一个网格,共划分 4 000 个网格。结合图 5 有限差分模型回弹模量设置为 120 MPa,泊松比取 0.2。

图 12 为记录的 n 与 E_p 的关系,图中红色直线为其线性拟合,可以发现图中 256 个数据点均匀分布在拟合直线两侧,直线方程为

$$E_p = -435.87n + 162.41 \quad (3)$$

式(3)拟合系数 $R^2 = 0.837 2$,该式是图 3 所示级配的路基在不同压实程度下经过数值计算得到的拟合关系,压实程由疏松到密实,涵盖了全部路基填料密度变化范围。当级配条件发生变化时,公式具体参数可能发生改变,但是公式形式保持不变。在实际工程中,可根据特定的粒径分布,采用本文方法得到适用于工程的公式。

由图 12 可知,碎石土路基的孔隙率与冲击荷载法计算的回弹模量 E_p 具有良好的线性关系,孔隙率越大,回弹模量越小,因此冲击荷载法的测试结果可以代表路基的压实程度,验证了冲击荷载法评估

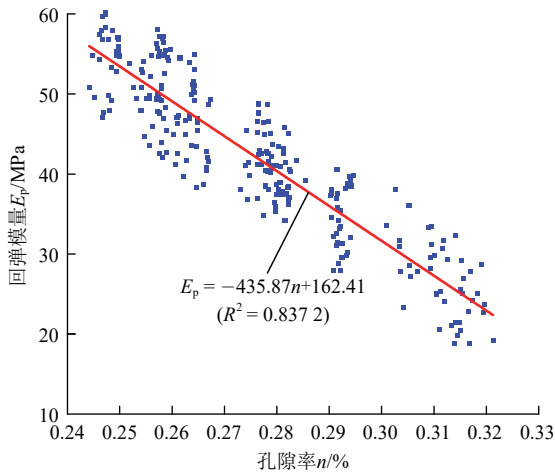


图 12 路基孔隙率与回弹模量关系

Fig.12 Relationship between surface porosity and resilient modulus of subgrade

新填筑碎石土路基压实质量的可行性。相同孔隙率下测试结果存在一定波动,原因是即使孔隙率相同也无法保证颗粒分布状态完全一致。

5.2 路基性能与路表响应信号的关联性分析

在部分路基未压实的情况下,为了分析冲击荷载法评估路基压实质量的有效性,以未压实路基厚度等于 0.1 m 为例,考虑路基性能的变化与路表响应信号之间的关系。由于节 5.1 分析了表层路基状态对其力学响应的影响,因此本节假设路基表层压实质量良好。使用离散-连续耦合模型进行分析,图 13 为模型示意图,上部离散元模型厚度为 0.1 m,孔隙率 n 在 0.2680 左右,在下部有限差分模型上设置 0.1 m 厚的变量层,改变变量层顶部距路基表面的距离 H 和回弹模量 E' ,保证其余部分 $E = 120$ MPa 不变,观测计算结果的变化。

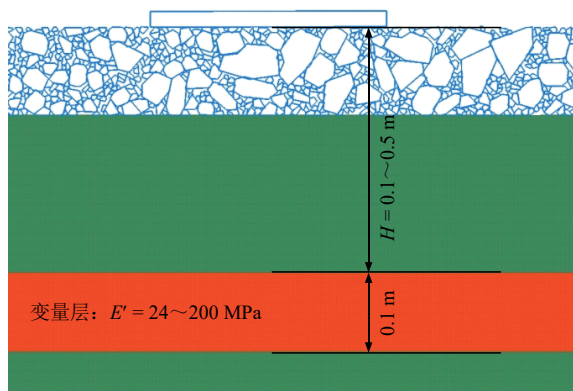


图 13 关联性分析模型示意图

Fig.13 Correlation analysis model diagram

图 14 为冲击荷载下位移响应随变量层回弹模量和深度变化的曲线,图中灰色横向虚线为在 $E' = E$

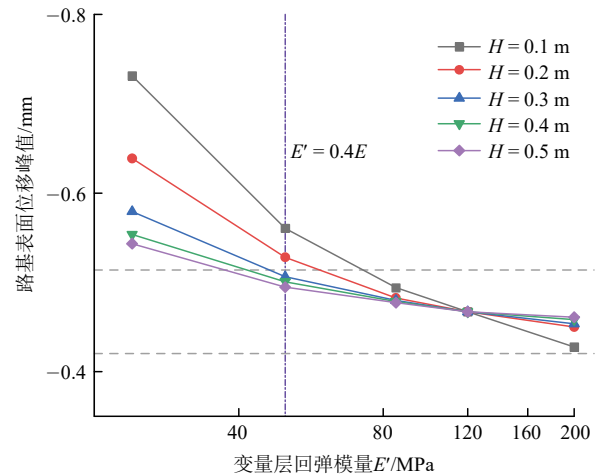


图 14 位移响应随变量层模量和深度的变化曲线

Fig.14 Displacement response curves with variable layer modulus and depth

的位移响应基础上将计算数据增大和减小 10% 的结果,图中蓝色竖向虚线为 $E' = 0.4E$ 。由图 14 可知, $H = 0.1$ m 时,随着路基回弹模量的改变,路基表面响应变化最大, $H = 0.5$ m 时变化最小,当 $H = 0.4$ 和 0.5 m 时,得到的路基表面响应一致性较高,可见随着埋深的增加,路基状态对其表面响应的影响越小,直至埋深达到 0.4 m 时该影响趋于稳定,这与图 10 的结果相吻合。还可以发现,当 $E' > E$ 时,路基表面位移变化较小,这是由于路基本部较软时路基表面响应由路基表层和底部的状态共同决定,路基本部较硬时路基表面响应主要由路基表层状态决定。

以原有测试结果的 10% 为界限区分压实程度时,0.6 m 内变量层回弹模量降低为 $0.2E$ 时均能被识别,当 $E' = 0.4E$ 时只有变量层在 0.3 m 内才能被识别, $E' = 0.7E$ 时 0.1 m 外无法被识别。只有当路基层完全位于冲击荷载有效检测深度内其压实程度才能被准确的检测,参考张安顺等^[26-27]相关研究,当压实度不足时,土体回弹模量降为原有模量的 30%~60%,因此判断冲击荷载有效检测深度时使用 $E' = 0.4E$ 作为路基未压实的标准,结合图 14 计算数据,发现承载板半径为 0.15 m 时,100 kPa 冲击荷载的有效检测深度在 0.3 m 以内。因此,当 0.1 m 厚的劣化层深度大于 0.3 m 时,无法使用该参数下的冲击荷载法对路基性能进行有效的评价。由此新填筑路基时建议单层填筑厚度小于 0.3 m。

5.3 不同冲击荷载参数下有效检测深度研究

受使用设备的影响,在实际工程中冲击荷载法的具体参数可能发生改变,例如更大的冲击力,更大的承载板半径。本节讨论不同参数的冲击荷载法

检测路基压实质量的有效性, 分析冲击力大小和承载板半径对冲击荷载法有效检测深度的影响。在节 5.1 模型的基础上, 保持承载板半径 $R = 0.15$ m, 将冲击荷载 p 改变为 100, 150, 220 kPa, 验证冲击力大小对路基表面响应的影响。保持冲击荷载为 $p = 150$ kPa, 设置承载板半径 R 为 0.2 和 0.25 m, 验证承载板半径对冲击荷载法有效检测深度的影响。测试结果如图 15 所示, 图中横向虚线表示的识别界限由节 5.1 给定方法确认。若计算所得回弹模量小于识别界限值, 则对应深度处的未压实层可以通过该参数的冲击荷载法检测识别。与之相反, 若得到的回弹模量大于识别界限值, 则表示变量层深度大于该参数冲击荷载法的有效检测深度。

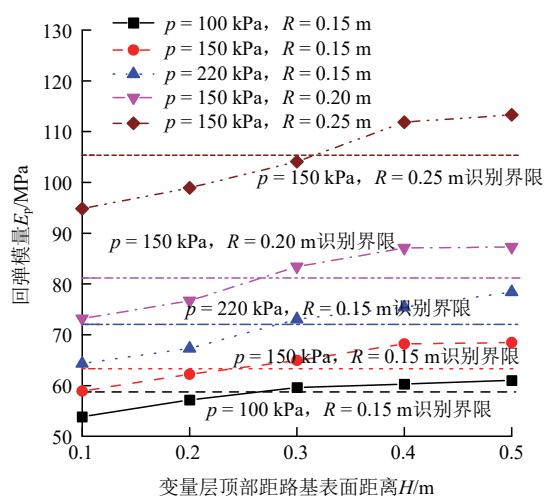


图 15 不同参数的冲击荷载法测试结果

Fig.15 Test results of impact loading method with different parameters

由图 15 可知, 增大冲击力大小对冲击荷载法有效检测深度影响较小, 承载板半径为 0.15 m 时, 100~220 kPa 的冲击荷载有效检测深度均在 0.3 m 以内。与之不同的是, 增大承载板半径能有效提高冲击荷载法有效检测深度, 冲击荷载为 150 kPa 时, 承载板半径为 0.15 和 0.2 m 时, 有效检测深度在 0.3 m 以内, 承载板半径为 0.25 m 时, 有效检测深度在 0.3~0.4 m 范围。

6 结 论

本文使用离散元方法建立了模拟冲击荷载下碎石土路基的动力响应模型, 通过对模型计算结果的分析得到以下结论:

(1) 碎石土路基上冲击荷载产生的动应力随深度的衰减特性与孔隙率相关, 孔隙率越小衰减越快, 相同深度处的动应力越小。对比相同深度处由连续

介质理论得到的动应力计算值与离散元分析结果发现, 前者普遍偏低, 二者相差较大, 最大差距在 70% 以上。将冲击荷载产生的动应力衰减至一定比例的深度作为影响深度, 则碎石土路基上冲击荷载影响深度更大, 且压实程度越低影响深度越大。

(2) 通过数值计算发现碎石土路基孔隙率与冲击荷载下计算的回弹模量之间有良好的线性关系, 验证了冲击荷载法评估路基压实质量的可行性。

(3) 随着路基埋深的增加, 其状态对路表响应的的影响越小, 因此冲击荷载法评价路基压实质量时存在有效检测深度。通过数值计算发现, 增大承载板半径可以有效增加有效检测深度, 而冲击力的大小对有效检测深度影响较小。承载板半径为 0.15 和 0.2 m 时, 有效检测深度在 0.3 m 以内, 承载板半径为 0.25 m 时, 有效检测深度在 0.3~0.4 m 范围。

参考文献(References):

- [1] NABIZADEH H, SIDDHARTHAN V R, HAJJ Y E, 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, LU Z, LIU G, 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.
- [3] ZHANG J, LU Z, TANG C X, et al. Forward calculation of displacement fields with multilayered unsaturated highway system induced by falling weight deflectometer using dynamic response method[J]. Transportation Geotechnics, 2023, 38: 100866.
- [4] 范海山, 张军辉, 郑健龙. 路基模量沿深度非均匀分布沥青路面动力解析解[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(6): 1 016 - 1 026.(FAN Haishan, ZHANG Junhui, ZHENG Jianlong. Analytical solution for dynamic response of asphalt pavement with subgrade modulus varying with depth[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(6): 1 016 - 1 026.(in Chinese))
- [5] LOIZOS A, BOUKOVALAS G. Pavement soil characterization using a dynamic stiffness model[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2005, 6(1): 5 - 15.
- [6] SENSENEY C T, GRASMICK J, MOONEY M A. Sensitivity of lightweight deflectometer deflections to layer stiffness via finite element analysis[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(7): 961 - 970.
- [7] 尹紫红, 朱仁政, 邱泓滔, 等. 弹射冲击荷载下重载铁路路基动位移空间分布特征[J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(4): 777 - 786. (YIN Zihong, ZHU Renzheng, QIU Hongtao, et al. Spatial distribution characteristics of dynamic displacement of heavy-haul railway subgrade

- system under launching impact load[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2021, 56(4): 777 - 786.(in Chinese))
- [8] 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.
- [9] KAVUSSI A, RAFIEI K, YASROBI S. Evaluation of PFWD as potential quality control tool of pavement layers[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2010, 16(1): 123 - 129.
- [10] LIND F, LIAU C C, LIN J D. Factors affecting portable falling weight deflectometer measurements[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(6): 804 - 808.
- [11] 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.
- [12] WEI G J, WANG B. PFWD's Application in the evaluation of structural strength of field hot regeneration asphalt pavement[J]. Advanced Materials Research, 2013, 723: 141 - 148.
- [13] 华 阳, 葛建立, 汤鹏扬, 等. 冲击载作用下座板与卵石炮位耦合特性仿真研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2023, 44(5): 14 - 21.(HUA Yang, GE Jinali, TANG Pengyang, et al. Simulation study on coupling characteristics of mortar base plate and pebble emplacement under impact load[J]. Journal of Gun Launch and Control, 2023, 44(5): 14 - 21.(in Chinese))
- [14] 王 鑫. 地震作用下碎石土堆积体边坡稳定性分析[硕士学位论文][D]. 成都: 西南交通大学, 2016.(WANG Xin. Stability analysis of gravel-soil accumulation slope under earthquake[M. S. Thesis][D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.(in Chinese))
- [15] YU J, WU C J, JIA C J, et al. Study of variation of pore properties in gravel soil under triaxial loading based on discrete element method[J]. Current Science, 2021, 121(6): 801 - 809.
- [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2): 402 - 406.(YANG Gui, XIAO Yang, GAO Deqing. Study of three-dimensional particle flow numerical simulation and failure criterion for coarse-grained soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(Supp.2): 402 - 406.(in Chinese))
- [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 Xinjun, LI Xiaoqing. 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.(in Chinese))
- [18] 刘陈林. 基于颗粒流的大粒径填石路基强夯加固效果分析[硕士学位论文][D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.(LIU Chenlin. analysis on reinforcement effect of dynamic compaction on large-diameter rockfill subgrade base on particle flow code[M. S. Thesis][D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2019.(in Chinese))
- [19] 金 磊, 曾亚武. 土石混合体宏观力学特性和变形破坏机制的三维离散元精细模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(6): 1540 - 1550.(JIN Lei, ZENG Yawu. Refined simulation for macro-and meso-mechanical properties and failure mechanism of soil-rock mixture by 3D DEM[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(6): 1540 - 1550.(in Chinese))
- [20] 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 Haoran. Analysis on the action depth of PFWD impact load and parameters configuration[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(9): 62 - 67.(in Chinese))
- [21] HOOMANS B P B, KUIPERS J A M, BRIELS W J, et al. Discrete particle simulation of bubble and slug formation in a two-dimensional gas-fluidised bed: A hard-sphere approach[J]. Chemical Engineering Science, 1996, 51(1): 99 - 118.
- [22] 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[硕士学位论文][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[M. S. Thesis][D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2022.(in Chinese))
- [23] 中华人民共和国行业标准编写组. JTG E60—2008 公路路基路面现场测试规程[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2008.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. JTG E60—2008 Field test methods of highway subgrade and pavement[S]. Beijing: People's Communications Publishing House Co. Ltd, 2008.(in Chinese))
- [24] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017: 177 - 178.(Editorial Board of "Engineering Geology Manual". Engineering geology manual[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2017: 177 - 178.(in Chinese))
- [25] 唐楚轩. 路基工程多场耦合动力响应与工程应用[博士学位论文][D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2024.(TANG Chuxuan. Multi-field coupled dynamic response and engineering application of subgrade engineering[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2024.(in Chinese))
- [26] 张安顺, 付 伟, 张军辉, 等. 长沙压实黏土剪切特性及应力-应变关系表征[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2025, 待刊.(ZHANG Anshun, FU Wei, ZHANG Junhui, et al. Shear properties and stress-strain relationships characterization of Changsha compacted clay[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology, 2025, to be pressed.(in Chinese))
- [27] 陈 永, 黄英豪, 王 硕, 等. 冻融循环对不同压实度下膨胀土力学特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(增2): 4299 - 4309.(CHEN Yong, HUANG Yinghao, WANG Shuo, et al. Effects of freeze-thaw cycles on mechanical properties of expansive soils at different compaction degrees[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(Supp.2): 4299 - 4309.(in Chinese))