

基于室内试验的动态回弹模量与变形模量的比较与公式修正研究

纪厚强¹, 冯元正¹, 郭超宇², 王建立¹, 束冬林³, 方明镜²

¹安徽省交通控股集团有限公司, 安徽 合肥

²武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉

³安徽省高速公路试验检测科研中心有限公司, 安徽 合肥

收稿日期: 2023年8月17日; 录用日期: 2023年9月14日; 发布日期: 2023年9月25日

摘要

动态回弹模量测试仪(DEMT)是在动态变形模量Evd测试仪(PFWD)与车载式落锤弯沉仪(FWD)检测原理基础上研制而成。本研究旨在探究公路路基DEMT现场检测中动态回弹模量的真实值, 比较分析PFWD动态变形模量与DEMT动态回弹模量定义上以及公式计算的差异, 修正采用DEMT进行动态回弹模量检测时塑性变形对结果的影响。通过定制钢模制备不同掺灰量与不同压实度的土样试件, 并使用高精度游标卡尺测量DEMT测试前后试件高度差。试验结果表明, 掺灰条件下, 压实度越低, 试件可被压缩区间越大, 受到冲击荷载时产生的塑性变形越大, 压实度为90%, 测试回弹模量值时初始塑性变形最大, 为0.0532 mm, 压实度为96%时, 总变形中初始塑性变形最小, 为0.0201 mm。由此可见, 路基土试样进行动态回弹模量测试时塑性变形在总变形中的占比随压实度的增加而减小, 且同一压实度试件随回弹模量测试次数的增加塑性变形占比逐渐减小。

关键词

动态回弹模量, 塑性修正, 模拟现场试验, 细粒土路基

Indoor Test-Based Comparison and Formula Correction of Dynamic Resilient and Deformation Modulus

Houqiang Ji¹, Yuanzheng Feng¹, Chaoyu Guo², Jianli Wang¹, Donglin Shu³, Mingjing Fang²

¹Anhui Transportation Holding Group Co., Ltd., Hefei Anhui

²School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei

³Anhui Expressway Test and Inspection Research Center Co., Ltd., Hefei Anhui

Received: Aug. 17th, 2023; accepted: Sep. 14th, 2023; published: Sep. 25th, 2023

文章引用: 纪厚强, 冯元正, 郭超宇, 王建立, 束冬林, 方明镜. 基于室内试验的动态回弹模量与变形模量的比较与公式修正研究[J]. 交通技术, 2023, 12(5): 438-448. DOI: 10.12677/ojtt.2023.125048

Abstract

The Resilience modulus Tester (DEMT) is developed based on the principles of the Dynamic Deformation Modulus Evid Tester (PFWD) and the Falling Weight Deflectometer (FWD). This study aims to explore the true values of the Resilience modulus (DEMT) in on-site testing of highway subgrade. A comparative analysis is conducted between the dynamic deformation modulus measured by PFWD and the Resilience modulus measured by DEMT. The differences in modulus definitions and formula calculations are analyzed, and the influence of plastic deformation on the results when using DEMT for Resilience modulus testing is corrected. Custom steel molds were used to prepare soil specimens with different fly ash contents and compaction degrees. The height difference of the specimens before and after DEMT testing was measured using a high-precision vernier caliper. The experimental results show that under fly ash conditions, the lower the compaction degree, the larger the compressible range of the specimen, and the greater the plastic deformation induced by the impact load. When the compaction degree is 90%, the initial plastic deformation is the largest, measuring 0.0532 mm. When the compaction degree is 96%, the initial plastic deformation is the smallest, measuring 0.0201 mm in the total deformation. Therefore, it can be observed that the proportion of plastic deformation in the total deformation during Resilience modulus testing of subgrade soil samples decreases with the increase of compaction degree. Moreover, for specimens with the same compaction degree, the proportion of plastic deformation decreases gradually with an increase in the number of rebound modulus tests.

Keywords

Resilience Modulus, Plastic Correction, Simulated Field Test, Fine-Grained Soil Subgrade

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

高速公路路基压实质量能够直接影响路基的服役能力、路面荷载、抗车辙能力、抗病害能力[1]等。当前路基压实质量检测主要使用我国规范[2]中推荐的环刀法、灌砂(水)法或沉降差等传统试验方法。其优势在于检测精度高,但是其中灌砂(水)法由于需要开挖试坑,因而不仅会破坏路基,而且劳动强度大,人为干预因素大,检测效率低。目前,除了规范规定的检测方法外,广泛应用于公路路基压实质量检测的方法可分为波法和经验法。波法主要包括瑞雷面波法[3],瞬态冲击波法[4]和核子密度仪法[5]等,波法是利用波在不同密度材料中传播时其能量损失或传播速度不同的原理建立起来的,此方法无需开挖试坑,故检测效率高。但是,由于人们对波在路基中传播规律与认识机理不足,这类方法检测精度较差,难以满足工程检测要求。谭宝贵[6]引进分级加载和地基沉降分析的分层总和和分析思想,结合增量广义虎克定律和 Duncan-Chang 模型,建立了以路基土体初始孔隙率、泊松比、粘聚力和内摩擦角等为参数的路基贯入荷载位移分析模型。基于上述静力贯入位移分析模型,根据实测路基静力贯入荷载位移曲线,引进自适应遗传模拟退火优化反演分析方法,建立了基于静力贯入试验的路基压实度检测方法,该方法不仅仅可以对公路路基沉降变形进行计算,而且具有快速检测和效率高等特点。工程参数法[7]即为根据路基材料类型、级配、最大干密度、最佳含水率、碾压遍数、松铺厚度和压实厚度等指标间接评定路基压实质量的一种方法,这类方法减少了现场压实度检测环节,但间接评定难度较大,评价效果不稳定,一般多

用于土石混填路基。

随着路基工程建设的发展,路基压实质量检测方法逐渐由指标片面、过程繁琐的传统检测技术向快速高效、数据精确的新型检测技术方向发展。便携式落锤弯沉仪 PFWD 作为小型动力检测设备,因变形模量与压实度、孔隙率具有较好的相关性[8] [9],以动态变形模量作为路基压实质量控制指标,能够有效检测路基压实质量,快速获取结果,减少路基检测所需时间[10]。邱文利[11]、孙璐[12]、胡志文[13]等针对不同类型的路基填料,通过将便携式落锤弯沉仪 PFWD 所测得的动态变形模量值与压实质量指标进行相关关系标定,达到快速、无损检测路基压实质量的目标。动态回弹模量测试仪(DEMT) [14]是在动态变形模量 E_{vd} 测试仪 PFWD 与车载式落锤弯沉仪 FWD 检测原理基础上研制而成,检测原理基本一致。DEMT 在实际测试过程中,落锤自由下落对承载板与路基产生荷载的时间很短,通常不超过 25 ms,研究人员通过改变落锤下落距离及锤重来进行试验[15],结果表明:使用 DEMT 进行测试时,检测荷载以及检测位置的形变曲线通常为线性关系,即理论上认为路基在这个过程中不出现塑性变形,荷载已经解除,所测的形变为弹性形变,可以将测量的动态变形模量值视作实际的路基动态回弹模量值。但相关测试所在检测作业面刚度大,塑性变形影响较小,未能说明不同压实度情况下路基应力应变曲线也为线性关系。在 DEMT 实际工程应用中,检测人员发现路基填筑层压实刚度不足时,塑性变形不能被忽略,将动态变形模量值视作动态回弹模量值不可行。

基于此,本文通过模拟现场的室内试验,比较分析 PFWD 动态变形模量与 DEMT 动态回弹模量,对两种模量定义上以及公式计算的差异进行分析。通过制备不同掺灰量与不同压实度的土样试件,研究填土路基填筑层动态回弹模量测试前后回弹变形和总变形的相关关系,修正 DEMT 动态回弹模量计算公式中总变形所包含的塑性变形对回弹模量值的影响,修正后的回弹模量值可与路基压实度的值进行标定,为采用 DEMT 实现路基压实质量的快速检测打下理论基础。

2. 动态回弹模量测试原理

动态回弹模量[16] (Resilience modulus)是指在瞬时动态脉冲荷载下,动态偏应力与回弹或可恢复应变之间的比值。动态回弹模量测试原理是利用一定质量的落锤由一定高度自由垂直下落,落锤沿导向杆冲击承载板,产生冲击荷载。在冲击荷载的作用下,承载板在竖向产生位移。通过承载板内部的荷载传感器和位移传感器记录下荷载和位移。根据记录的荷载和位移峰值,可以利用弹性半空间的 Boussinesq 公式确定动态回弹模量[17] [18]。图 1 展示了刚性承载板下弹性半空间结构受力图。

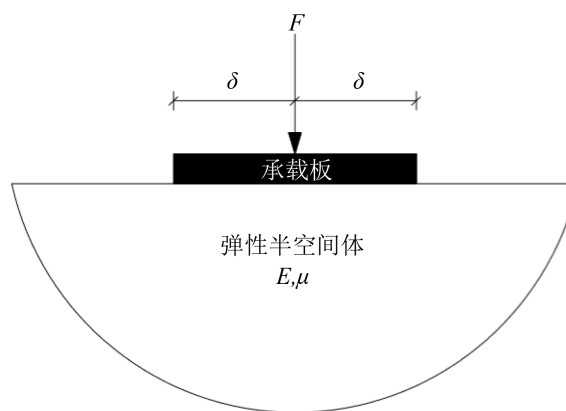


Figure 1. Force diagram of the elastic half-space body of the subgrade under a rigid bearing plate

图 1. 刚性承载板下路基弹性半空间体受力图

DEMT 模拟车辆高速行驶时对公路路面产生的冲击, 传递至路基表面的冲击效应。路基表面受到动力加载并使路基产生一定变形[19]。DEMT 检测设备的承载板直径可根据不同检测材料粒径的不同而进行改变, 相应的根据所需的最大冲击荷载, 可以改变不同的落锤质量与高度。本室内试验所采用 DEMT 设备落锤质量为 12 kg, 落锤高度为 100 mm, 承载板直径为 450 mm, 可产生 10,490 N 的最大冲击荷载。将落锤提升至 100 mm 高度后使其自由下落, 落锤冲击置于检测填筑层某一位置处的承载板, 从而产生与正弦波类似的冲击荷载, 承载板内置的传感器记录冲击荷载, 冲击荷载作用于承载板时, 承载板与检测填筑层一起出现竖向变形(设备传荷示意如图 2 所示), 形成弯沉、动应力以及动应变等参数。根据弹性半空间理论与布辛奈斯克公式[20]计算出动态变形模量指标, 见公式(1)。

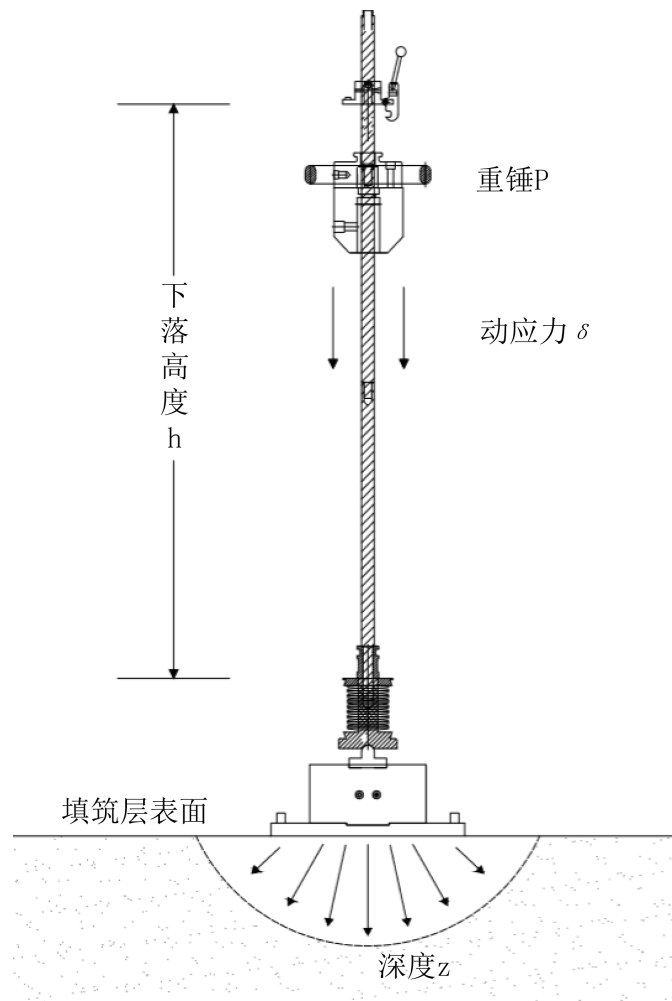


Figure 2. Schematic diagram of equipment load transmission
图 2. 设备传荷示意图

动态变形模量 E_d 计算公式如下:

$$E_d = \frac{P(1-\mu^2)}{D \cdot l} \quad (1)$$

式中: E_d ——路基动态回弹模量, MPa; P ——承载板压力, N; D ——承载板直径, mm; μ ——路基材料泊松比; l ——承载板中心处的回弹变形, mm。

DEMT 承载板中位移传感器记录冲击荷载产生的竖向变形为总变形。根据弹性半空间理论假设,需将实际测试场地视作完全弹性,忽略了实际填筑材料一般并非完全弹性。实际上,DEMT 所测总变形中存在一部分塑性变形,这使得实测的动态变形模量需经过修正得到动态回弹模量。

3. 动态回弹变形修正试验

3.1. 试验过程

本次试验用土来源为阜淮高速安徽段项目大刘庄取土场。通过前期线路勘测数据,全线土样均为皖北地区典型细粒土土样,填土物理力学性质差异较小。经过室内试验测出天然土样相关参数,如表 1 所示:含水率 23.2%,液限 40.1%,塑限 22.1%,塑性指数 18.0,通过击实试验得到的最大干密度为 1.89 g/cm³,最佳含水率为 13.1%。细粒土路基压实度 93%、94%、96%时分别对应的 CBR 值为 6.4%、11.6%、15.4%。

Table 1. Experimental soil parameters

表 1. 试验用土参数

填料类型	含水率(%)	液限(%)	塑限(%)	塑性指数	最大干密度(g/cm ³)	最佳含水率(%)
低液限黏土	23.2	40.1	22.1	18.0	1.89	13.1

为探究公路路基现场动态回弹模量检测中的真实值,研究不同压实度情况下动态回弹模量检测产生的总变形中塑性变形和弹性变形的占比。通过定制钢模制作与现场路基压实度一致的细粒土路基试件,应用高精度游标卡尺测量 DEMT 测试前后试件的高度差,经过重复加载,累积计算得到动态回弹模量总变形中塑性变形占比。

试验在无围压条件下进行,使用低液限黏土作为原材料进行试验。结合公路施工路基压实层厚度等实际情况,DEMT 承载板直径选用 300 mm,定制一套钢模,钢模成型试件尺寸为直径 300 mm,高度 200 mm 的圆柱形试件。为排除其他因素干扰,设置平行试验,同一土壤试件制作 2 个。试验试样分为两类,第一类为无掺灰条件下不同压实度试件(其他参数相同),分别标记为“压实度-掺灰量-标号”,例如,90-0-1,表示压实度为 90%,掺灰量为 0%,编号为 1 的试件。第二类试件参数同实际施工参数相同,编号方式与第一类相同,土样试件分别为压实度 90%掺灰量 0%、压实度 93%掺灰量 3%、压实度 94%掺灰量 4%、压实度 96%掺灰量 6%、压实度 96%掺灰量 8%,测量现场情况下,动态回弹变形在不同压实度不同掺灰量条件下塑性变形的占比。

试验过程如图 3 所示,步骤如下:

- 1) 计算试验所需原料总质量,单个试件所需原料质量,测试材料相关参数,包括含水率、最大干密度、液塑限、掺灰量等。
- 2) 对土样中的大块颗粒进行破碎,称取所需纯净水,石灰,搅拌均匀,并装入容器中,闷料。
- 3) 将定制钢模放入万能试验机,使用压缩成型的方式结合试件高度分 3 次加入配置好的材料,使用加压盖板压缩至计算高度。
- 4) 使用脱模桶脱模,取出成型的土样,试件制作完成后放置于背光处保存,并覆盖保湿塑料袋,防止水分蒸发开裂。
- 5) 使用游标卡尺与钢直尺测量试件初始高度,而后使用 DEMT 测量,一组测试过程 DEMT 测试次数为 6 次,测量完毕后重新测量土样高度,记录数据,此高度与初始高度之差为所产生的塑性变形,本次测量需保证地面平整,将高度测量基准—脱模桶视作刚度无限大,无变形。
- 6) 重复步骤(5),直至测量塑性变形小于 0.01 mm,停止测量,记录并处理数据。

3.2. 试验结果

图 3 为无掺灰条件下不同压实度土样在加载过程中塑性变形量随测试次数的变化曲线。试验数据表明,不同压实度试件中,初次测试下塑性变形量最大,初始塑性变形量随压实度增加而减小。压实度越高,土壤密实状况越好,测量时产生的塑性变形越小;同一试件,塑性变形随测量次数的增加而减少。例如,试件压实度为 90% 时,回弹变形中塑性变形随测量次数的增加而减小;将压实度作为单一变量时,塑性变形值随压实度增加而减小,土壤压实度越高,土壤内部空隙越少,更难以被压缩,试验结果与实际情况相符。

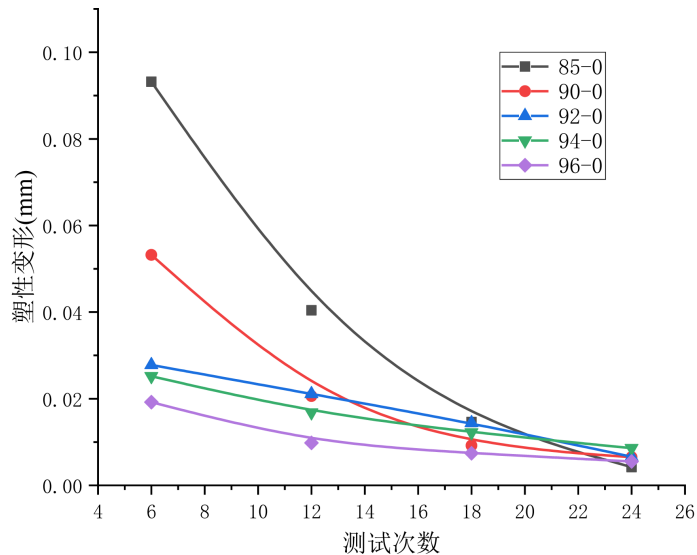


Figure 3. Plastic deformation variation curve with the number of tests for non-fly ash content specimens

图 3. 无掺灰土样塑性变形随测试次数的变化曲线

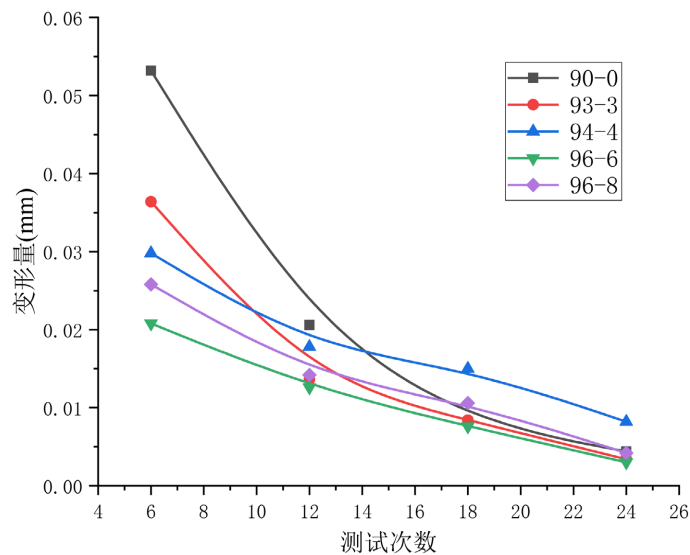


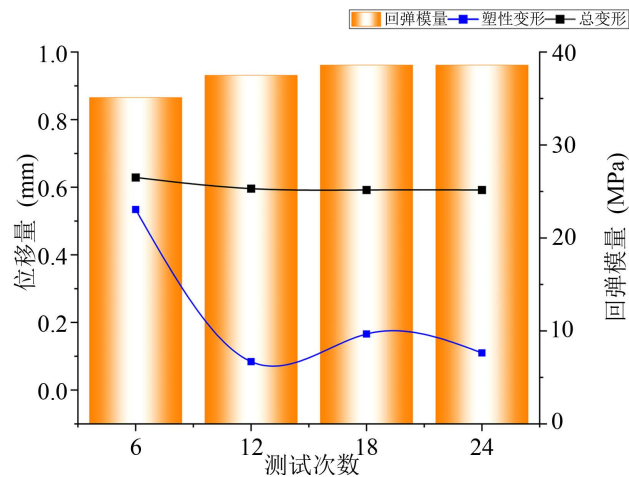
Figure 4. Variation of plastic deformation of specimens with different compaction degrees and fly ash content in engineering practice with the number of tests

图 4. 工程实际压实度及掺灰量试件塑性变形随测试次数的变化

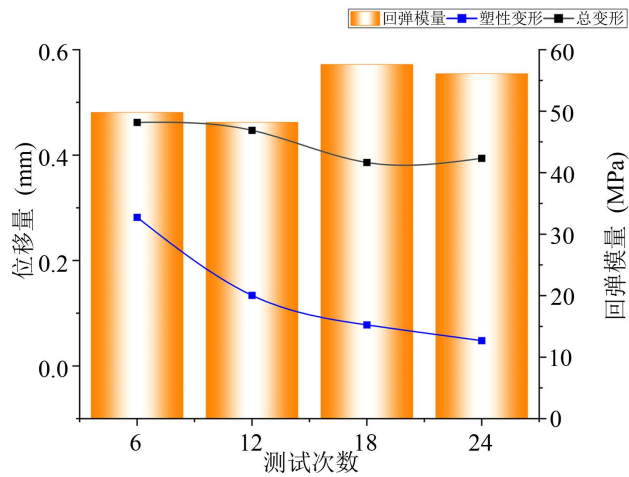
图 4 为还原工程实际压实度及掺灰量的试件在加载过程中塑性变形随测试次数的变化曲线。采用工程设计掺灰量与最佳含水率制作试件，公路路基设计中常用的压实度有 90%、93%、94%、96%。试验结果表明，掺灰条件下，压实度越低，试件可被压缩区间越大，受到冲击荷载时产生的塑性变形越大，压实度为 90%，测试回弹模量值时初始塑性变形最大，为 0.0532 mm；压实度为 96%时，总变形中初始塑性变形最小，为 0.0201 mm。随回弹模量测试次数的增加，同一压实度试件测量塑性变形逐渐减小。

由图 3、图 4 可以看出，掺灰条件下，土样受到动力加载所产生总变形中塑性变形占比与无掺灰条件下差距很小，有无掺灰对细粒土路基塑性变形能力影响很小，细粒土路基压实度指标对其塑性变形能力影响较大。

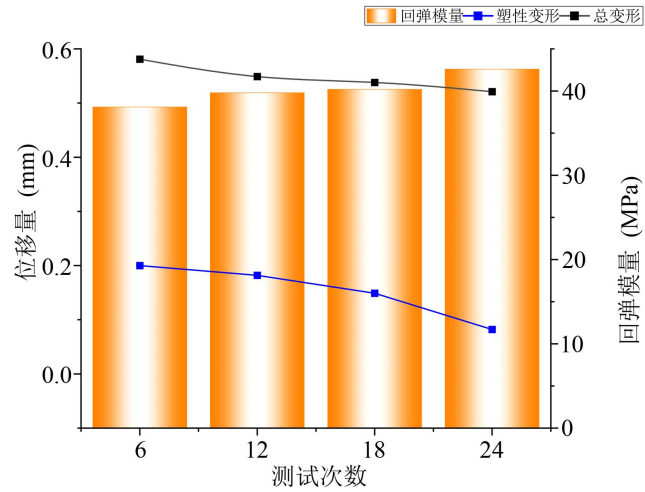
图 5 为工程现场实际压实度与掺灰量条件下试件回弹模量、总变形与塑性变形。不同参数试件，塑性变形与总变形随测试次数的增加而减小，而动态回弹模量增加。这表明土壤颗粒在多次加载和卸载过程中重新排列、紧密结合，从而减小了土壤的可塑性和变形能力，增强了土壤的弹性恢复能力。其次，不同压实度条件下，总变形与塑性变形随着压实度的增加而减小。这符合土体压实理论和工程实际情况。随着压实度的增大，土壤颗粒之间的接触更加紧密，土壤的结构更加稳定。在同样的外部荷载下，土壤的平均应力水平降低，从而产生的总变形和塑性变形也相应减小。因此，增大压实度可以有效地减小土壤的变形能力，提高土壤的工程性能。



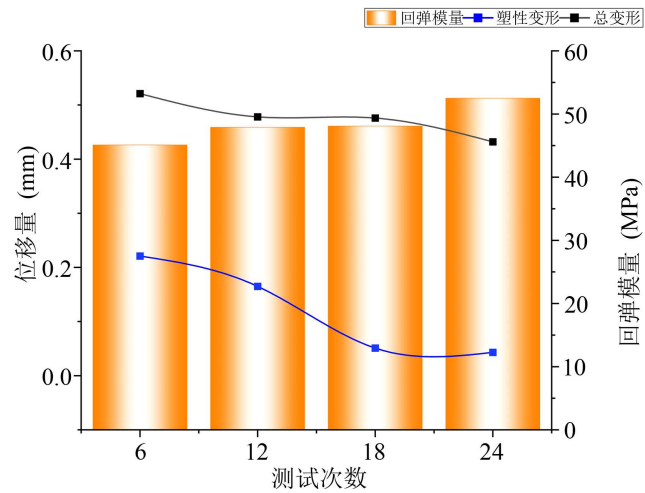
(a) 90-0 试件



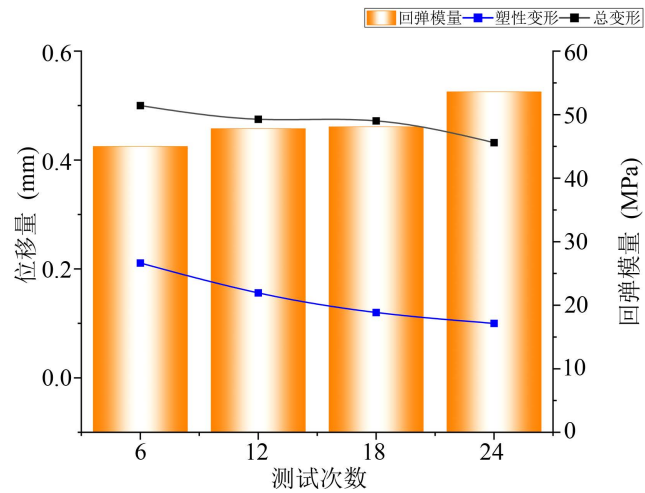
(b) 93-3 试件



(c) 94-4 试件



(d) 96-6 试件



(e) 96-8 试件

Figure 5. Dynamic rebound modulus, total deformation, and plastic deformation of different specimens under actual engineering conditions
图 5. 工程实际情况下不同试件回弹模量、总变形以及塑性变形

4. 动态回弹模量公式修正

动态回弹模量与冲击荷载、承载板竖向变形有关，承载板竖向变形为承载板与同测点土体的共同变形，即认为动力冲击荷载作用下，承载板测量的竖向变形中包含塑性变形与弹性变形，结合工程实际与试验测量数据，如图 6 所示，在不掺灰条件下，压实度分别为 90%、92%、94%、96%时，塑性变形占比分别为 64.5%、58.5%、45.6%、40.0%，塑性变形在总变形中的占比随压实度的增加而减小；如图 7，在工程设计压实度与设计掺灰量条件下，压实度分别为 90%、93%、94%、96%时，塑性变形占比分别为 64.5%、56.2%、43.7%、39.2%、40.6%，塑性变形占比同样随压实度增加而减小。根据塑性变形占比实测数据，得出弹性变形与压实度关系如图 8 所示。

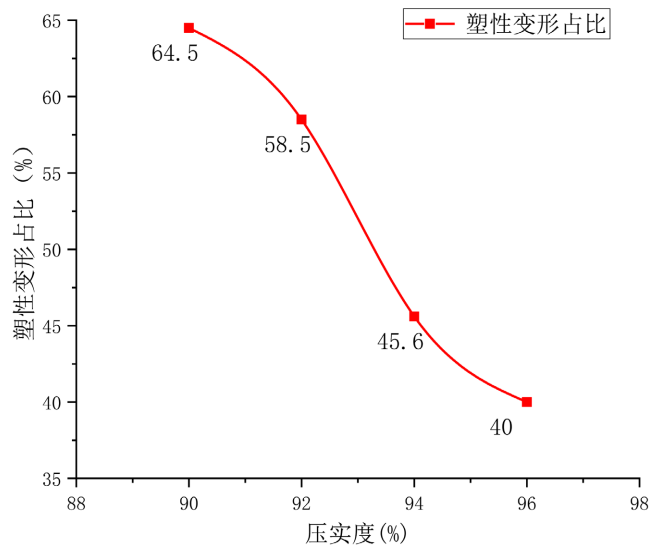


Figure 6. Proportion of plastic deformation in soil samples under different compaction conditions without adding lime

图 6. 不掺灰、不同压实度条件下土样塑性变形占比

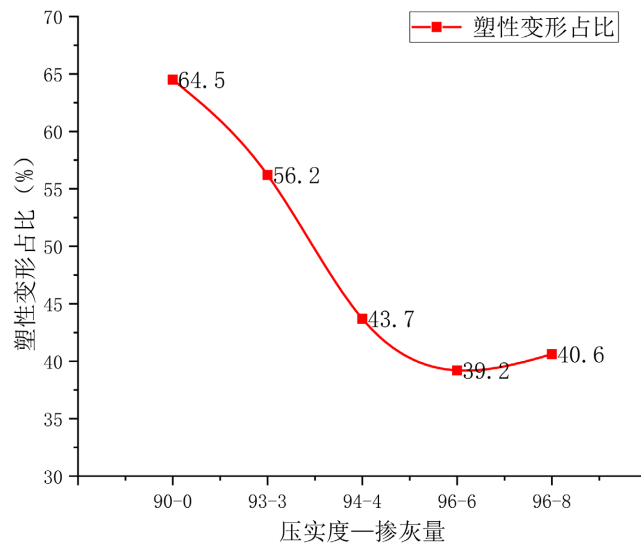


Figure 7. Proportion of plastic deformation in soil samples under different compaction conditions with lime addition

图 7. 掺灰、不同压实度条件下土样塑性变形占比

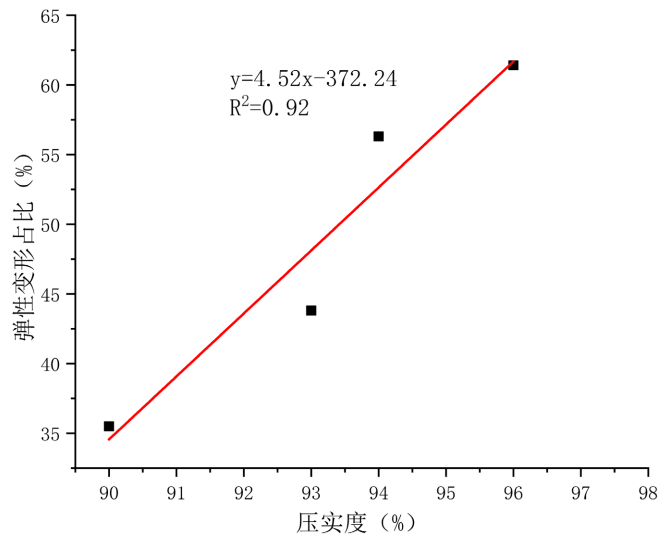


Figure 8. Relationship between elastic deformation and compaction degree

图 8. 弹性变形与压实度关系

根据以上数据以及公式(1), 采用修正公式法修正承载板中心的回弹变形, 动态回弹变形与压实度关联性最高, 不考虑掺灰量的影响。将公式(1)修正为公式(2), 如下所示:

$$E_d = \frac{P(1-\mu^2)}{D \cdot \alpha l} \quad (2)$$

α 为动态回弹变形量的修正参数, 表示总变形中弹性变形的占比, 满足一次函数, 与压实度相关, 公路检验标准压实度设计值分别为 90%、93%、94%、96%, 则修正参数函数表达式为(3):

$$\alpha = 4.52x - 372.24 \quad (3)$$

式中: α ——回弹模量修正系数; x ——压实度, %。

5. 结论与展望

本文分析比较了动态回弹模量与动态变形模量之间的不同, 并通过室内试验对动态回弹模量变形量进行了修正。

1) 结合工程实测数据与理论分析, 动态回弹模量与动态变形模量主要区别在于是否忽略冲击荷载作用下产生的塑性变形。

2) 动态回弹模量测试中塑性变形的占比随压实度设计值增大而减小, 同一压实度条件下塑性变形随测试次数的增加而减小。

3) 通过塑性变形占比数据, 结合系数修正法得出动态回弹变形量的修正参数, 修正参数与压实度关系满足线性函数, 随压实度增加而增加。

参考文献

- [1] 蔡玉洁, 王伟. 动态回弹模量测试仪在高速公路路基压实质量检测上的应用[J]. 科学技术创新, 2021(9): 139-140.
- [2] 中华人民共和国交通运输部. 公路路基路面现场测试规程[S]. 北京: 交通部公路科学研究院, 2019.
- [3] 李炳秀, 何明峰. 瞬态瑞雷面波法检测路基填筑质量的定量分析[J]. 铁道勘察, 2018, 44(4): 55-59.

- [4] 张献民, 王建华. 公路工程瞬态激振无损检测技术[J]. 土木工程学报, 2003, 36(10): 105-110.
- [5] 蒋宣艳. 公路工程路基压实度检测技术研究[J]. 交通世界, 2022(24): 147-149.
- [6] 谭宝贵. 基于 Duncan-Chang 模型的静力贯入路基压实度确定方法[J]. 工程技术研究, 2018(4): 27-28.
- [7] 何兆益, 吴国雄, 朱洪洲. 山区高填方土石混填路堤压实质量控制研究[J]. 公路交通科技, 2002, 19(3): 28-31.
- [8] 张军辉, 胡健坤, 彭俊辉, 等. 基于人工神经网络的路基土回弹模量预估方法[J]. 中南大学学报(英文版), 2021, 28(3): 898-910.
- [9] Zhao, Y., Lu, Z., Yao, H.-L., *et al.* (2020) Experimental Study of Dynamic Resilient Modulus of Subgrade Soils under Coupling of Freeze-Thaw Cycles and Dynamic Load. *Journal of Central South University*, **27**, 2043-2053. <https://doi.org/10.1007/s11771-020-4429-4>
- [10] 胡堃. 基于便携式落锤弯沉仪的填石路基压实质量检测分析[J]. 交通科技与管理, 2023(2): 155-157.
- [11] 邱文利, 杨杰, 杨广庆. 便携式落锤弯沉仪 PFWD 设备检测特性研究[J]. 交通世界, 2022(22): 157-159, 166.
- [12] 孙璐, 王登忠. 基于便携式落锤弯沉仪动态弯沉的路基压实度无损检测与评估[J]. 公路交通科技, 2012, 29(12): 41-47.
- [13] 胡志文, 程培峰, 李泽闯, 董乃宝. 基于沉降差和动态变形模量的含巨粒土路基压实质量控制[J]. 森林工程, 2022, 38(1): 124-131.
- [14] 王建立, 束冬林, 孙狂飙, 等. 一种中粗粒填料公路路基动态回弹模量快速测试仪[P]. 中国专利, CN210090163U. 2019-02-26.
- [15] 宋慧来, 薛明星, 冯怀平, 等. 重载铁路路基动态回弹模量影响因素及预估模型分析 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20(10): 4080-4086.
- [16] Monismith, C.L., Seed, H.B., Mitry, F.G. and Chan, C. (1967) Predictions of Pavement Deflections from Laboratory Tests. *2nd International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, Ann Arbor, 7-11 August 1967.
- [17] Lin, T., Ishikawa, T., Yang, J. and Tokoro, T. (2022) Evaluation of Climate Effect on Resilient Modulus of Granular Subgrade Material. *Cold Regions Science and Technology*, **194**, Article ID: 103452. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103452>
- [18] Alnedawi, A., Ullah, S., Azam, A., *et al.* (2022) Integrated and Holistic Knowledge Map of Resilient Modulus Studies for Pavement Materials: A Scientometric Analysis and Bibliometric Review of Research Frontiers and Prospects. *Transportation Geotechnics*, **33**, Article ID: 100711. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100711>
- [19] 张献民, 刘小兰. 基于路表应变和基频的基顶当量回弹模量研究 [J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(6): 1182-1189.
- [20] 罗宏, 赵明华, 曹文贵, 胡天浩. 基于静载试验的土石混填路基压实度检测新方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(S2): 4496-4502.