

循环荷载作用下市政道路路基土体刚度特性试验研究

刘力

中煤科工重庆设计研究院(集团)有限公司

DOI:10.12238/jpm.v4i7.6148

[摘要] 利用动三轴试验, 针对某市政道路路基土体, 测试了不同含水率及压实系数下的土体刚度特性。结果表明, 动回弹模量可直观反映试验全程的土体刚度, 且随着循环加载次数的增加, 呈现“快速增大→长期稳定”的变化特征。含水率和压实系数的变化主要使得动回弹模量-循环加载次数曲线发生整体平移, 且平移方向及程度存在明显差异。相比而言, 压实系数的变化可以显著调控路基土体刚度, 在工程建设中应加以重视。

[关键词] 道路; 路基; 刚度; 动回弹模量

[中图分类号] U416.1 **[文献标识码]** A

Experimental study on soil stiffness characteristics of municipal road subgrade under cyclic loading

[Abstract] By utilizing dynamic triaxial testing, the stiffness characteristics of the subgrade soil in a municipal road were examined under different moisture contents and compaction coefficients. The results indicate that the dynamic resilience modulus can effectively reflect the overall stiffness of the soil throughout the testing process, exhibiting a pattern of "rapid increase followed by long-term stability" as the number of cyclic loadings increases. The variations in moisture content and compaction coefficient primarily result in a global shift of the dynamic resilience modulus-cyclic loading curve, with noticeable differences in both the direction and magnitude of the shift. Comparatively, the changes in compaction coefficient can significantly regulate the stiffness of the subgrade soil, emphasizing the importance of considering them in engineering construction.

[Key words] road; subgrade; stiffness; dynamic resilience modulus

随着城市化建设的发展, 市政道路工程显著增多, 对市政道路路基工程的质量要求也日益提高^[1]。市政道路车辆密集, 路基土体处于长期经受循环动荷载的应力环境。针对现场土体, 掌握循环动荷载作用下的刚度特性是保障路基服役性能的关键。

土体刚度常采用动回弹模量^[2]或动弹性模量^[3]进行表征。动回弹模量由 Seed^[4]在 1962 年提出, 并逐渐成为路面设计的重要参数之一, 且在研究过程中建立了各类单参数^[5]和多参数^[6,7]预估模型。动弹性模量同样具有广泛的应用场景, 并成为土体刚度软化模型的重要构建指标^[8,9]。然而, 虽然众多学者对动回弹模量和动弹性模量进行了大量研究, 但针对市政道路研究较少, 由于土体性质的复杂性, 需针对具体运营场景进行深入分析。

本文针对某市政道路路基土体, 利用室内动三轴试验测试路基土体的应力-应变特征, 并针对试验全过程, 选取较为合适的刚度特性指标。针对不同含水率和压实系数土体, 分析土体刚度随循环加载次数的演化规律, 进而探究含水率和压实系数的变化对土体刚度特征的影响差异。研究成果可为该市政道路路基土体服役性能的保持提供一定参考。

1. 试验材料及方案

1.1 试验材料

试验土样取自某市政道路, 根据 YS/T 5225-2016《土工试验规程》^[10]进行制样及土体基本物性参数的测试, 制出压实系数分别为 0.9、0.93、0.96, 含水率分别为 8%、10%、12% 的动三轴土样, 试样直径和高度分别为 61.8 mm、125 mm, 基本物性参数见表 1。

表 1 试样物理参数

土样来源	液限 / %	塑性 指数 / %	最大干密度 / (g · cm ⁻³)	土粒 比重	土性
市政道路	33.4	12.1	1.85	2.6	低液限黏土

1.2 试验方案

本试验考虑市政道路交通荷载密集的特点, 以正弦波进行加载, 加载频率为 2Hz, 动应力幅值取 120 kPa。考虑路基土取土深度以及路基上部静荷载, 设置围压为 30kPa, 固结偏应力为 20 kPa。具体加载方案分为以下两个阶段:

(1) 偏压固结阶段。本阶段考虑路基上部荷载, 对试样进行偏压固结, 以消除制样缺陷等造成的影响, 保证土样以稳定状态进入加载阶段;

(2) 循环加载阶段。进行固结后，开始进行循环加载，以固结偏应力作为起振的基准值，以保证试样在受静荷载的基础上承受循环动荷载，模拟土体在承受上部结构静荷载的同时经受循环动荷载的实际加载情况。

2 循环荷载作用下土体应力-应变特性

图1表示的是压实系数 $K=0.9$ ，含水率 $w=10\%$ 的试样在经受动应力幅值为 120kPa 的循环荷载作用时的动应力-加载次数曲线。可以看出，试样在受载过程中的动应力幅值保持不变，且加载时程曲线的波峰和波谷都达到加载预期。由此表明试验仪器精度良好，试验结果具有较高的可信度

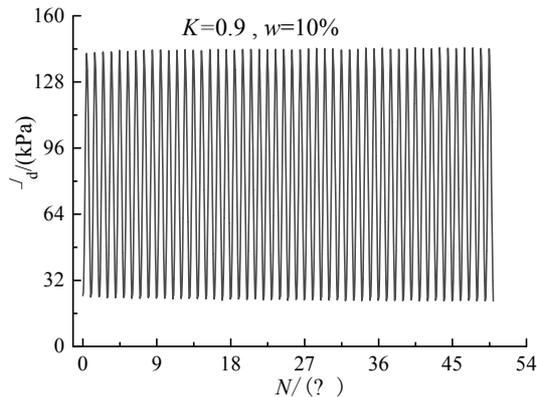


图1 动应力-加载次数曲线

滞回曲线可以在一定程度上反映土体的刚度特性。图2和图3分别为不同压实系数与不同含水率下的土样在循环荷载作用下的滞回曲线。可以看出，在循环加载前期土体迅速产生不可恢复的塑性变形，但随着循环加载的进行，塑性变形很快累积完成，并进入弹性稳定阶段。土体压实系数越高、含水率越低，土体塑性变形累积越小、累积速度越快，越容易进入弹性稳定阶段。由此可知，初始压实系数和含水率的变化会直接影响土体塑性变形的累积程度，从而使得土体呈现不同的刚度特性。

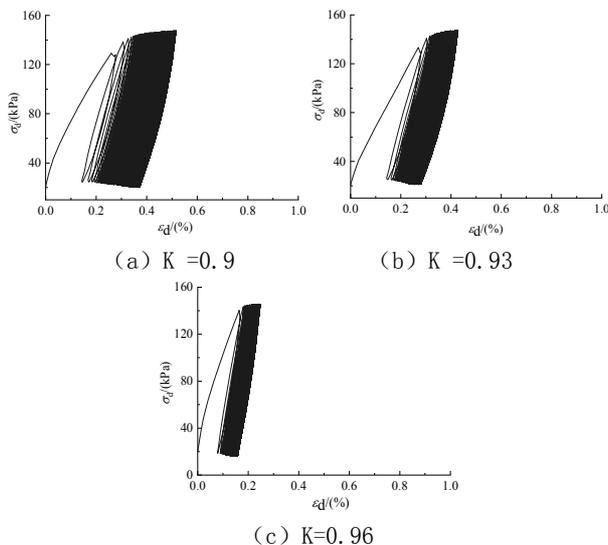


图2 不同压实系数下的滞回曲线

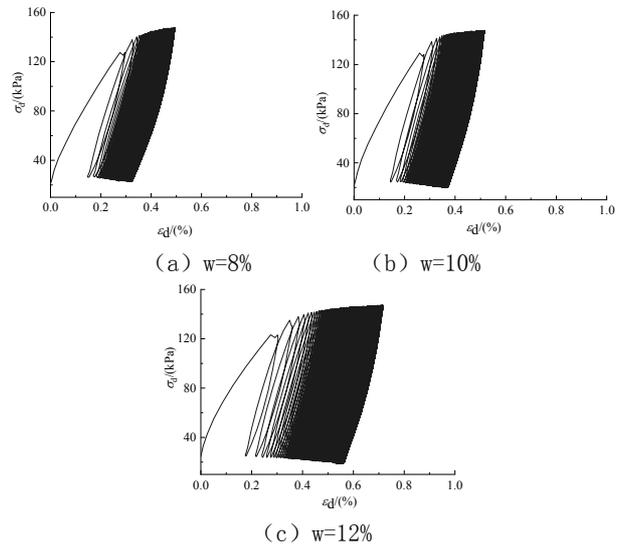


图3 不同含水率下的滞回曲线

3 循环荷载作用下土体刚度特性

3.1 刚度特性指标的确定

既有研究常用动回弹模量和动弹性模量表征土体刚度，计算式如式(1)和式(2)所示。基于试验数据，绘制循环加载5次和1000次的滞回曲线，以探讨动回弹模量和动弹性模量的差异，如图4所示。由图可知，当循环加载次数较少时，在单次循环加载作用下土体产生较大的塑性应变，从而使得滞回曲线无法闭合，此时的动回弹模量和动弹性模量差异较为显著；当循环加载次数较多时，单次循环加载作用下的滞回曲线完全闭合，动回弹模量和动弹性模量基本一致。因此，纵观整个加载过程，动回弹模量可以较好地表征土体在塑性应变较大和塑性应变较小时的刚度特性，本文选取动回弹模量作为反映土体刚度特征的指标。

$$M_r = \sigma_d / \varepsilon_r \quad (1)$$

$$E_d = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}} \quad (2)$$

式中： M_r 为动回弹模量； E_d 为动弹性模量； σ_d 为动应力幅值； ε_r 为回弹应变； σ_{\max} 和 σ_{\min} 分别为最大动应力和最小动应力； ε_{\max} 和 ε_{\min} 分别为最大动应变和最小动应变。

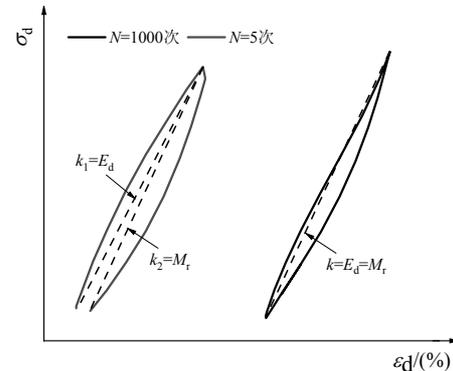


图4 不同循环加载次数下的滞回曲线

3.2 刚度特性分析

根据第3.1节确定的土体刚度特性指标,本节进一步分析含水率和压实系数的变化对动回弹模量的影响。基于实测的土体应力和应变数据,利用式(1)计算不同循环加载次数下的动回弹模量,并绘制不同含水率及压实系数下的动回弹模量-循环加载次数关系曲线,如图5所示。由图可知,在不同含水率和压实系数状态下,动回弹模量随着循环加载次数的增加均呈现“快速增大→长期稳定”的变化特征。此外,含水率和压实系数的变化对动回弹模量-循环加载次数曲线的影响具有显著的异同。含水率和压实系数的影响相似的是,两者的变化均可使得动回弹模量-循环加载次数曲线发生整体平移。含水率和压实系数的影响不同的是:1)含水率的增大使得动回弹模量-循环加载次数曲线整体向下平移,而压实系数的增大使得动回弹模量-循环加载次数曲线整体向上平移。2)含水率的变化使得动回弹模量-循环加载次数曲线的整体平移程度较小,而压实系数的变化使得动回弹模量-循环加载次数曲线的整体平移程度较大。

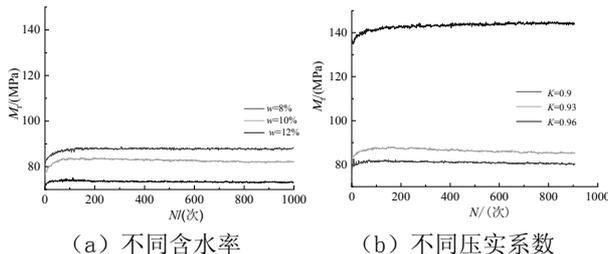


图5 动回弹模量-加载次数曲线

进一步针对弹性稳定阶段,计算最后5次加载下的动回弹模量均值,不同含水率及压实系数的计算结果见图6。由图可知,随着含水率的增加,在循环荷载作用下稳定的动回弹模量值近似呈线性减小;随着压实系数的增大,动回弹模量稳定值出现突变。表明调控道路路基土体的压实系数可以显著提高土体刚度。

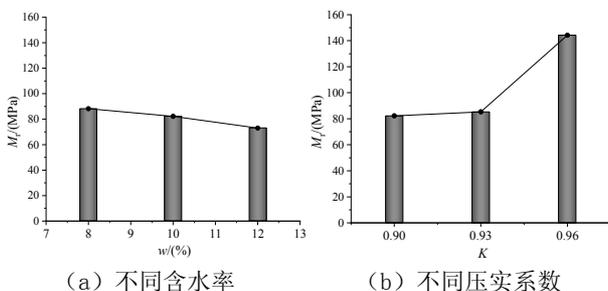


图6 含水率和压实系数对动回弹模量稳定值的影响

4 结论

本文以某市政道路病害段土体为研究对象,分析了循环荷载作用下土体刚度特性,得到主要结论如下:

(1) 在循环加载前期土体产生明显的塑性变形,并迅速累积完成进行弹性稳定阶段。土体压实系数越高、含水率越低,土体塑性变形累积越小、累积速度越快,越容易进入弹性稳定阶段。

(2) 通过对比不同加载次数下的滞回曲线特征,认为动

回弹模量可以更加直观地反映加载全程的土体刚度特性。在不同含水率和压实系数状态下,动回弹模量随着循环加载次数均呈现相似的变化规律,表现为“快速增大→长期稳定”的变化特征。

(3) 含水率和压实系数的变化对动回弹模量-循环加载次数曲线均有显著影响,两者的变化均使得动回弹模量-循环加载次数曲线发生整体平移,含水率越小、压实系数越大均使得动回弹模量-循环加载次数曲线整体向上平移。

(4) 随着含水率的增加,动回弹模量最终的稳定值近似呈线性减小;随着压实系数的增大,动回弹模量稳定值出现突变。表明压实系数的变化可以显著调控道路土体刚度,在施工过程中应加以重视。

[参考文献]

- [1]吴钟腾,万华.考虑交通循环荷载的沿海地区道路软土路基沉降研究[J].公路,2019,64(06):43-46.
- [2]彭俊辉,张军辉,郑健龙.考虑卸载时长的路基土动态回弹模量测试方法及试验研究[J].土木与环境工程学报(中英文),2021,43(06):17-26.
- [3]吴柯夫,鲁云岗.干湿循环条件下风化红砂岩粗粒土动弹性模量研究[J].湖南交通科技,2023,49(01):22-27.
- [4]Seed H B, Chan C K, Lee C E. Resilience characteristics of subgrade soils and their relation to fatigue failures in asphalt pavements[C]. Proceedings of the International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements Ann Arbor: University of Michigan, 1962: 611-636.
- [5]Allen J J, Thompson M R. Resilient Response of Granular Materials Subjected to Time-Dependent Lateral Stresses[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 1974, 510:1-13.
- [6]Uzan J. Characterization of granular materials [M]. Washington, D. C. : Transportation Research Board, National Research Council, 1985: 52-59.
- [7]Ni B, Hopkins T C, Sun L, et al. Modeling the resilient modulus of soils[C]// International Conference on the Bearing Capacity of Roads & Airfields. Libson: A A Balkema Publishers, 2002:1131-1142.
- [8]刘飞禹,蔡袁强,徐长节,等.循环荷载下软土动弹性模量衰减规律研究[J].浙江大学学报(工学版),2008,No.221(09):1479-1483.
- [9]蔡袁强,柳伟,徐长节,等.基于修正 Iwan 模型的软黏土动应力-应变关系研究[J].岩土工程学报,2007,No.178(09):1314-1319.
- [10]YS/T 5225-2016,《土工试验规程》[S].