

路基黏土动回弹模量特性及预估模型研究

刘 力

中煤科工重庆设计研究院(集团)有限公司 重庆 400016

摘要: 动回弹模量是土体抵抗弹性变形能力的直观反映。利用动三轴试验,针对某市政道路路基病害段土体,测试了不同压实度、含水率、动应力幅值和围压状态下路基土体的动回弹模量特性。结果表明,对于不同的应力环境,动回弹模量随动应力幅值的增大而减小、随围压的增大而增大;对于不同的土体初始状态,动回弹模量随含水率的增大而减小、随压实度的增大而增大。采用 Ni 模型对数据进行拟合分析,表明选用 Ni 模型作为路基黏土动回弹模量预估模型较为合适。

关键词: 路基; 动回弹模量; 预估模型

中图分类号: U416.1 **文献标识码:** A

Abstract: Dynamic resilience modulus is a direct reflection of soil resistance to elastic deformation. Dynamic triaxial test was used to test the dynamic resilience modulus of soil in a highway embankment under different compaction degree, moisture content, dynamic stress amplitude and confining pressure. The results show that the dynamic resilience modulus decreases with the increase of dynamic stress amplitude and increases with the increase of confining pressure under different stress environments. For different initial soil states, the dynamic resilience modulus decreases with the increase of water content and increases with the increase of compaction degree. The Ni model is used to fit the data, which shows that the Ni model is suitable for estimating the dynamic modulus of roadbed clay.

Keywords: subgrade; dynamic resilience modulus; estimated model

动回弹模量是反映动荷载作用下土体抵抗弹性变形能力的直观指标,并被纳入沥青路面结构设计重要参数。市政道路运营期间,在交通荷载的循环作用下,由于土体基本物理属性、密实度、含水率等因素的不同,道路路基土体呈现不同的回弹特性^[1]。准确把握道路路基土体的动回弹特性是保障路基土体服役性能的关键。

自 Seed^[2]提出动回弹模量的概念以来,关于动回弹模量的测试方法日渐成熟。通过室内试验,可以测定不同应力环境下的动回弹模量。如空心扭剪试验^[3],可以模拟复杂应力环境,但存在制样困难等问题。相对而言,动三轴试验具有试验原理成熟、操作简单、测试准确等优点,被广泛应用于动回弹模量测试中^[4]。此外,在动回弹模量测试中,陈声凯^[5]等基于大量统计结果,确定了符合沥青路面路基土特征的应力加载序列,为动回弹模量测试方案提供了依据。

动回弹模量预估模型经历了由单参数模型向多参数模型发展的过程。单参数模型^[6]虽然应用简单,但考虑因素较少,使得模型难以推广。Uzan^[7]和 Ni^[8]在单参数模型的基础上,提出了多参数模型,并解决了量纲问题。然而,由于路基土体性质的不同,模型选择应根据实际情况进行选取。

本文以某市政道路路基病害段土体为研究对象,分析土体基本物性参数,并利用动三轴试验测试不同压实度和含水率的病害土体在不同动应力幅值和围压组合下的动回弹模量,明确各因素对土体动回弹特性的影响,进而确定适用于该类土体的动回弹模量预估模型。

1. 试验材料及方案

1.1 试验材料

试验土体取自某市政道路路基病害段,根据 YS/T 5225-2016《土工试验规程》^[9]进行制样及土体基本物性参数的测试,试样直径和高度分别为 61.8 mm、125 mm,基本物性参数如表 1 所示。

表 1 基本物性参数

土样来源	液限/%	塑性指数/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)	土性
市政道路路基	37.8	14.4	1.9	低液限黏土

1.2 试验方案

本文采用动三轴试验测定土体的动回弹模量。在经历固结阶段后,对于市政道路荷载,需施加一个固定幅值、加载时间包含半正弦加载和恢复时间的波形,如图 1 所示。在图 1 中,加载时间为 0.2s,恢复时间为 0.8s,每一个加载周期为 1s。

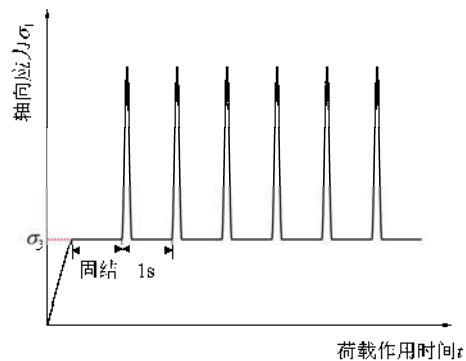


图 1 试验加载方式

为便于测定不同围压及动应力幅值下的土体动回弹特性,利用图 1 所示波形,在循环加载阶段采用表 2 所示的应力加载序列^[5]。动回弹模量的计算公式见式(1)。在计算每一加载序列的动回弹模量时,取最后 5 次动回弹模量的平均值作为序列动回弹模量值。

表 2 试件应力加载序列

加载阶段	围压应力 σ ₃ (kPa)	接触应力 0.2σ ₃ (kPa)	循环偏应力 σ _d (kPa)	最大轴向应力 σ _{max} (kPa)	荷载作用次数
0-预载	30	6	55	61	1000
1	60	12	30	42	100
2	45	9	30	39	100
3	30	6	30	36	100
4	15	3	30	33	100
5	60	12	55	67	100
6	45	9	55	64	100
7	30	6	55	61	100
8	15	3	55	58	100
9	60	12	75	87	100
10	45	9	75	84	100
11	30	6	75	81	100
12	15	3	75	78	100
13	60	12	105	117	100
14	45	9	105	114	100
15	30	6	105	111	100
16	15	3	105	108	100

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

式中: M_r 为动回弹模量; σ_d 为动应力幅值; ε_r 为弹性应变。

2 路基黏土动回弹模量特性分析

2.1 动应力幅值的影响

图 2 给出了各含水率 ($w=9.7\%$, 12.7% , 15.7%) 和各压实度 ($k=90\%$, 94% , 96%) 试样在围压为 60kPa 状态下, 动回弹模量随动应力幅值 ($\sigma_d=30\text{kPa}$, 55kPa , 75kPa , 105kPa) 的变化。由图可知, 在不同的含水率和压实度状态下, 动回弹模量均随动应力幅值的增大而减小。这是由于较高的动应力幅值产生较大的回弹应变, 从而使得动回弹模量减小。当压实度达到 96% 、动应力幅值达到 55kPa 后, 动回弹模量随动应力幅值的变化基本不变。

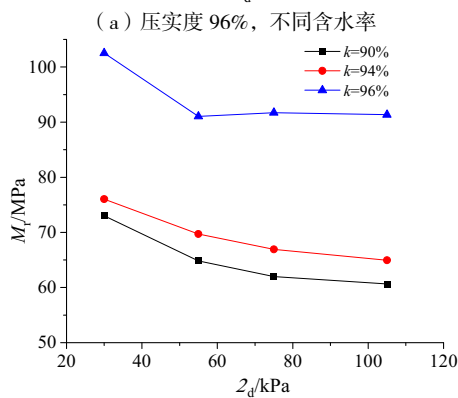
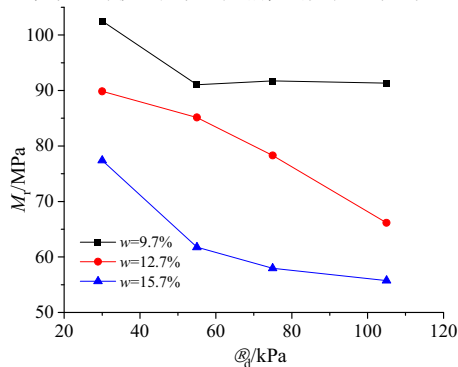
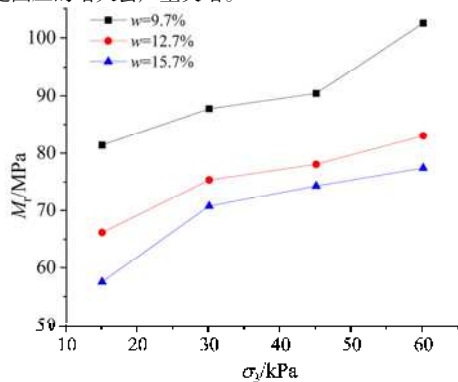


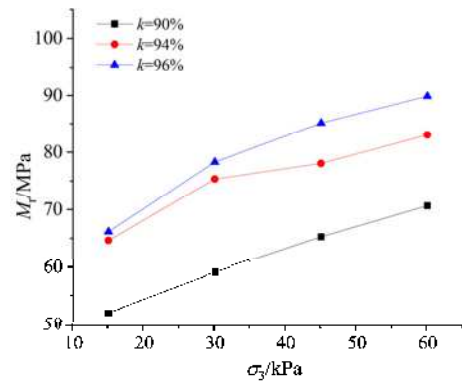
图 2 动回弹模量-动应力幅值关系曲线

2.2 围压的影响

图 3 给出了各含水率 ($w=9.7\%$, 12.7% , 15.7%) 和各压实度 ($k=90\%$, 94% , 96%) 试样在动应力幅值为 30kPa 状态下, 动回弹模量随围压 ($\sigma_3=15\text{kPa}$, 30kPa , 45kPa , 60kPa) 的变化。由图可知, 在不同的含水率和压实度状态下, 动回弹模量均随围压的增大而增大。这是由于较高的围压使得产生的回弹应变较小, 从而使得动回弹模量增大。当压实度为 96% 、含水率为 9.7% 时, 动回弹模量随围压的增大会产生突增。



(a) 压实度 96%, 不同含水率

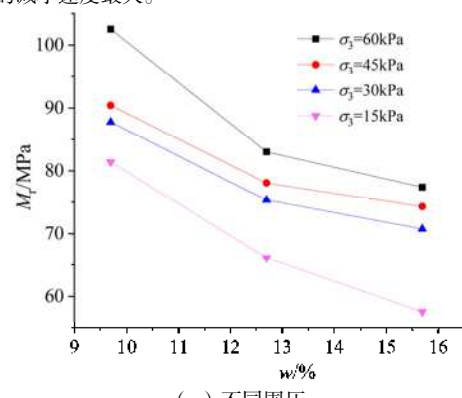


(b) 含水率 12.7%, 不同压实度

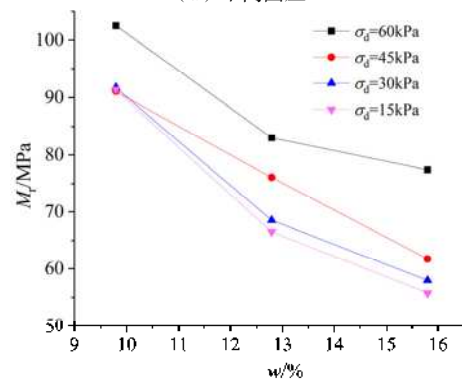
图 3 动回弹模量-围压关系曲线

2.3 含水率的影响

图 4 给出了各围压 ($\sigma_3=15\text{kPa}$, 30kPa , 45kPa , 60kPa) 和动应力幅值 ($\sigma_d=30\text{kPa}$, 55kPa , 75kPa , 105kPa) 状态下, 压实度为 96% 时土样的动回弹模量随含水率 ($w=9.7\%$, 12.7% , 15.7%) 变化曲线。由图可知, 在不同围压和动应力幅值状态下, 动回弹模量均随含水率的增大而减小。这是含水率的增大使得土体更易产生回弹应变, 从而使得动回弹模量减小。当围压仅为 15kPa 时, 动回弹模量的减小速度最大。



(a) 不同围压

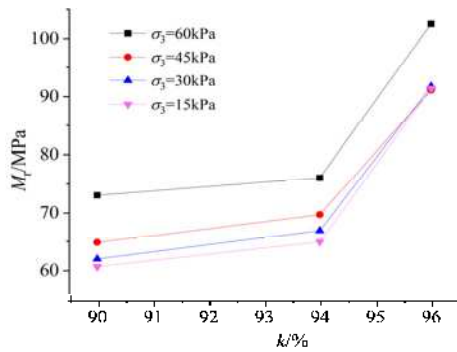


(b) 不同动应力幅值

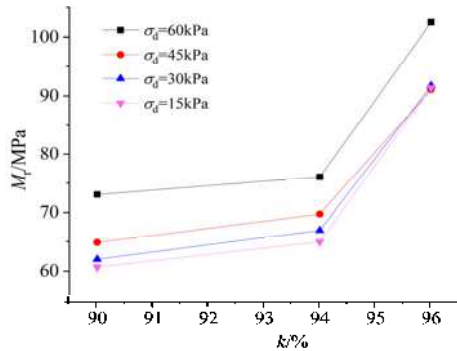
图 4 动回弹模量-含水率关系曲线

2.4 压实度的影响

图 5 给出了各围压 ($\sigma_3=15\text{kPa}$, 30kPa , 45kPa , 60kPa) 和动应力幅值 ($\sigma_d=30\text{kPa}$, 55kPa , 75kPa , 105kPa) 状态下, 含水率为 9.7% 时土样的动回弹模量随压实度 ($k=90\%$, 94% , 96%) 变化曲线。由图可知, 在不同围压和动应力幅值状态下, 动回弹模量均随压实度的增大而增大。这是由于压实度的增大使得土体回弹应变减小, 从而使得动回弹模量增大。当压实度超过 94% 后, 动回弹模量出现突增。



(a) 不同围压



(b) 不同动应力幅值

图5 动回弹模量-压实度关系曲线

3 路基黏土动回弹模量预估模型

综合分析前述结果可知,围压和动应力幅值是影响动回弹模量的两个显著因素,故选取 Ni 模型作为道路路基黏土动回弹模量的预估模型,如式(2)所示。

$$M_r = k_1 p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} + 1 \right)^{k_2} \left(\frac{\sigma_d}{p_a} + 1 \right)^{k_3} \quad (2)$$

式中: k_1 、 k_2 和 k_3 为拟合参数; P_a 为大气压,取 100kPa。

利用 Ni 模型对不同含水率和压实度的动回弹模量试验数据进行拟合分析,拟合参数及相关系数见表 3。由表可知,利用 Ni 模型进行的拟合分析,相关系数均在 0.9 以上,最大可达 0.99。因此,利用 Ni 模型进行路基黏土动回弹模量预估具有较高精度。

表 3 Ni 模型拟合结果

k/%	w/%	参数			R ²
		k ₁	k ₂	k ₃	
90		4.207	0.620	0.262	0.91
94	9.7	0.560	0.831	0.854	0.92
96		-4.854	-0.568	1.294	0.91
90		1.086	0.915	-3.259	0.99
94	12.7	2.749	0.700	-5.781	0.93
96		1.085	0.887	-2.241	0.96
90		4.407	-3.626	-0.426	0.91
94	15.7	0.628	0.584	-0.355	0.96
96		2.093	-1.395	-0.63	0.92

4 结论

本文以某市政道路路基病害段土体为研究对象,分析了压实度、含水率、动应力幅值和围压对土体动回弹模量特性的影响,并确定了适用于该类土体的动回弹模量预估模型。得到主要结论如下:

(1) 路基土体所处的应力环境对动回弹模量具有显著影响。在不同的含水率和压实度状态下,动回弹模量均随动应力幅值的增大而减小、随围压的增大而增大。表明较高的围压和较低的动应力幅值下路基土体抵抗弹性变形的能力更强。

(2) 路基土体的初始状态对动回弹水平具有显著影响。在不同围压和动应力幅值状态下,动回弹模量均随含水率的增大而减小、随压实度的增大而增大。表明较低的含水率和较高的压实度下路基土体抵抗弹性变形的能力更强。

(3) 采用 Ni 模型对不同压实度和含水率的路基黏土动回弹模量进行拟合分析时,相关系数均在 0.9 以上,表明选用 Ni 模型作为路基黏土动回弹模量预估模型具有较高精度。

参考文献:

[1]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.
[2]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.

[3]张亚娟.山西省黄土路基回弹模量研究[D].陕西:长安大学,2015.
[4]李志勇,董城,邹静蓉,等.湘南地区红黏土动态回弹模量试验与预估模型研究[J].岩土力学,2015,36(07):1840-1846.
[5]陈声凯,凌建明,张世洲.路基土动态回弹模量室内试验加载序列的确定[J].公路,2006(11):148-152.
[6]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.
[7]Uzan J. Characterization of granular materials [M]. Washington, D. C.: Transportation Research Board, National Research Council, 1985: 52-59.
[8]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.
[9]YS/T 5225-2016,《土工试验规程》[S].