

加载方式对生物酶水泥复合固化红砂岩土 压缩模量的影响研究

何亮¹, 张海翔², 关宏信^{2*}, 李慧丽³, 杨海荣², 刘宏富²

(1. 湖南省衡永高速公路建设开发有限公司, 湖南 永州 421600; 2. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114;
3. 湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 湖南 长沙 410200)

摘要:水泥稳定类混合料的模量测试方法有多种, 而掺入生物酶会影响水泥稳定类材料的刚度特性。为了系统分析加载条件对生物酶水泥复合固化红砂岩土压缩模量的影响, 该文采用单调加载中间段法、逐级加载卸载顶面法和逐级加载卸载中间段法这3种静态模量试验方法, 以及顶面动态模量法和中间段动态模量法, 对生物酶水泥复合固化红砂岩土开展了压缩模量试验。试验结果表明: 由于加载频率的区别, 动态模量试验的荷载速率远高于静态模量试验的荷载速率, 影响了动态模量和静态模量的可比性; 当荷载水平、荷载速率相当时, 逐级加载卸载中间段法回弹模量与单调加载中间段法弹性模量比较接近, 而且采用单调加载中间段法更容易获得代表模量。

关键词: 道路工程; 生物酶水泥复合固化红砂岩土; 压缩模量; 静态; 动态; 荷载速率

中图分类号: U416.2

文献标志码: A

Influence of Loading Methods on Compression Modulus of Red Sandstone Soil Solidified with Biological Enzyme and Cement

HE Liang¹, ZHANG Haixiang², GUAN Hongxin^{2*}, LI Huili³, YANG Hairong², LIU Hongfu²

(1. Hunan Hengyong Expressway Construction and Development Co., Ltd., Yongzhou, Hunan 426100, China; 2. School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 3. Hunan Provincial Transportation Planning Survey & Design Institute Co., Ltd., Changsha, Hunan 410200, China)

Abstract: There are various methods to test the modulus of cement-stabilized mixtures. The stiffness performance of cement-stabilized materials will be affected after adding biological enzymes. In order to systematically analyze the influence of loading conditions on the compression modulus of the red sandstone soil solidified with biological enzyme and cement, compressive modulus tests were conducted on the red sandstone soil solidified with biological enzyme and cement by using three static modulus test methods including monotonic loading method of middle section, stepwise loading and unloading method of top surface, and stepwise loading and unloading method of middle section, as well as dynamic modulus method of top surface and dynamic modulus method of middle section. The experimental results show that the load rate of dynamic modulus tests is much higher than that of static modulus tests due to the difference in loading frequency, which affects the comparability between dynamic modulus and static modulus. When the load level and load rate are equivalent, the resilience modulus of the stepwise loading and unloading method of middle section is relatively close to the elastic modulus of the monotonic loading method of middle section. Moreover, the monotonic

收稿日期: 2024-04-06(修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号 52078064); 长沙理工大学研究生实践创新与创业能力提升项目(编号 CLSJXC23015)

作者简介: 何亮, 男, 高级工程师. E-mail: 1121807285@qq.com

*通信作者: 关宏信, 男, 博士, 教授. E-mail: guanhongxincs@163.com

loading method of middle section makes it easier to obtain representative moduli.

Keywords: road engineering; red sandstone soil solidified with biological enzyme and cement; compression modulus; static state; dynamic state; load rate

0 引言

掺入生物酶是提升土体强度的有效途径之一,已在道路工程得到应用^[1-2],目前的研究重点在于其强度机理和提升效果^[3-4],专门针对其模量特性的研究比较少^[5-6],而且生物酶固化土基本作为路基或者地基处治方案。公路工程挖方的红砂岩土常被移挖作填,但是其性能不稳定^[7],通常用水泥或石灰来进行固化^[3-4,8],未见单独采用生物酶固化红砂岩土的研究报道。湖南省衡永高速公路设置了试验路段,参照工程案例^[9],将沥青路面结构原设计方案中的底基层由水泥稳定碎石变更为生物酶水泥复合固化红砂岩土。由于所处应力状态不同,路面底基层模量的测试方法与路基模量不相同,导致有限的生物酶固化土模量的研究成果,不能直接被采用。鉴于此,对于用作高速公路底基层的生物酶水泥复合固化红砂岩土,有必要针对其模量特性开展研究。

水泥稳定类碎石是中国公路基层和底基层的主流材料,其模量对路面结构力学性能影响很大^[10],国内外采用多种方法研究其静态和动态模量,由于试验条件和模量类型的不同^[11-15],模量值不尽相同,如仲文亮等^[13]、吕松涛等^[14]、Xie等^[15]试验发现动态模量是对应静态模量的1.1~1.9倍;张晨晨等^[16]试验表明抗压模量的动静态的比值为1.8~2.8,弯拉模量的动静态的比值为1.2~1.4;程箭等^[17]的试验数据表明抗压动静态的比值为1.0~1.6;Liu等^[18]通过拉压模量测试分析了疲劳过程中弯曲模量的衰变规律;贾侃等^[19]从服役期间路面材料含损伤的角度,模拟测试了水泥稳定碎石对应的动态弯拉模量;Deng等^[20]采用震荡压实方法成型试件,并测试分析了水泥稳定碎石的弹性模量;张显安等^[21]分析了振动搅拌工艺对水泥稳定碎石的抗压回弹模量的影响。

为此,本文拟利用湖南省衡永高速公路生物酶水泥复合固化红砂岩土试验路段原材料,开展室内试验,对比分析加载条件对生物酶水泥复合固化红砂岩土压缩模量的影响,为其工程设计和应用提供依据。

1 生物酶水泥复合固化红砂岩土试件制备

试验所用红砂岩土来自湖南省衡永高速公路K24+200处的挖方弃土,试验所用生物酶为生物离子复合固化酶,技术性质见表1,水泥选用普通硅酸盐水泥PC42.5。

表1 生物酶的性质

Table 1 Property of biological enzyme

形态	颜色	气味	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	溶解性	可燃性	有害成分
液态	黑褐色	发酵味	1.003	完全溶于水	不可燃	无

在5%水泥剂量和0.02%生物酶用量的前提下,开展了击实试验,得到最佳含水率为9%,对应的最大干密度为 2.13 g/cm^3 ,7 d无侧限抗压强度为2.53 MPa,对照《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017),达到了重交通高速公路和一级公路底基层的要求(不小于2.5 MPa),也达到特重极重交通二级和二级以下公路基层的要求(不小于2.5 MPa)。

本文后续所有试验都采用在5%水泥剂量、0.02%生物酶用量、9%含水率条件下制备的试件。按照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG 3441—2024) T0843的方法,在96%压实度水平下静压成型 $\phi 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 圆柱体试件,与传统水泥稳定类混合料的制备过程不同之处在于,需要预先将计算好比例的生物酶加入水中混合均匀。试件经过标准养护(温度 $20 \text{ }^\circ\text{C}$,湿度97%)90 d后,用于开展后续模量试验。

2 静态抗压模量试验与结果

中国现行的《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)要求采用单调加载中间段法测试无机结合料稳定材料基层的静态弹性模量,《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG 3441—2024)还规定了半刚性材料的动态压缩模量测试方法,以及逐级加载卸载抗压回弹模量测试方法,即顶面法和承

载板法。

《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)一直采用抗压模量作为路基和路面结构层的计算参数,笔者以现行规范关于路面基层混合料的弹性模量试验方法为基础(后文称之为第一种方法,采用单调加载方式),还采用了逐级加载卸载方式测试中间段回弹模量(后文称之为第二种方法),同时,还根据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG 3441—2024),采用顶面法(后文称之为第三种方法,逐级加载卸载方式)测试回弹模量,3种方法均对试件圆周面无侧限,仅在轴向加压。

2.1 静态模量试验第一种方法与试验结果

本方法依据《无机结合料稳定类材料单轴压缩弹性模量试验方法(中间段法)》(GB/T 38989—2020),为便于表述,将其简称为单调加载中间段法。试验设备采用MTS,加载方式为以1 mm/min的速率(为便于分析,简称为位移速率)持续施加轴向压力直至试件破坏,由MTS采集荷载数据和整个试件的轴向位移,在试件高度方向的中段布置了引伸计测试该段的轴向变形,引伸计输出为应变数据。图1为试验图片,图2为该方法试验所得中段应变和时间-荷载典型曲线。



(a) 试验前试件 (b) MTS与引伸计



(c) 破坏后试件

图1 试件与试验设备

Figure 1 Specimen and experiment equipment

图2(a)虚线为30%破坏荷载对应的点,该点至原点接近直线,该线段的斜率(简称为荷载速率)约为0.5 kN/s。图2(b)的曲线初段也接近直线,一定程度上说明该方法所得近似为弹性模量。《无机结合料

稳定类材料单轴压缩弹性模量试验方法(中间段法)》(GB/T 38989—2020)规定采用30%破坏荷载对应的点来计算弹性模量,计算公式如下:

$$E = 1.2F_r / (\pi D^2 \epsilon_{0.3}) \tag{1}$$

式中: E 为弹性模量(MPa); F_r 为破坏时的最大荷载(N); D 为试件直径(mm); $\epsilon_{0.3}$ 为加载到最大荷载30%时的压应变,无量纲。

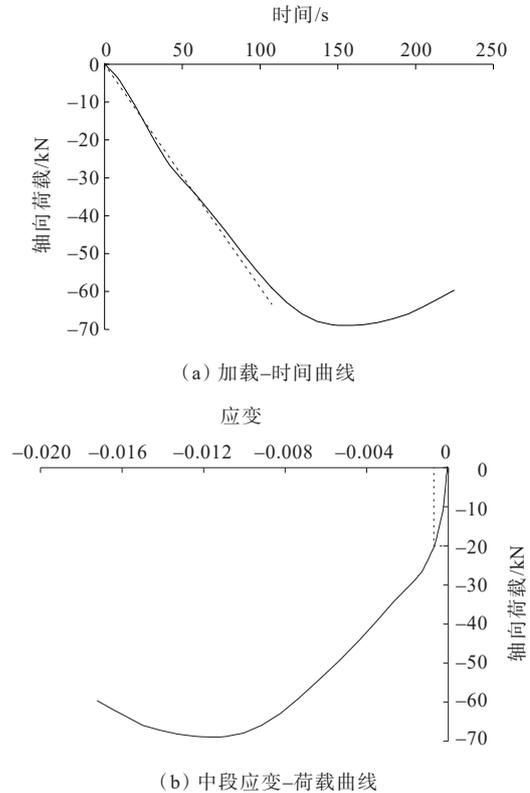


图2 单调加载方式下中段应变曲线和荷载曲线

Figure 2 Middle-section strain curve and load curve under monotonic loading

按照上述方法对生物酶水泥复合固化红砂岩土开展试验,从图2(b)的荷载应变曲线中,找到荷载最大点,将该荷载乘以0.3,返回原始数据中找到如图2(a)的虚线对应点,然后计算出弹性模量。经分析,生物酶水泥复合固化红砂岩土单调加载中段法弹性模量的平均值为1 856 MPa,标准差270.7 MPa,变异系数为14.6%,代表值为1 689 MPa。

2.2 静态模量试验第二种方法与试验结果

由图2可知:第一种方法采用总变形(总应变),包含可以恢复的弹性变形、塑性变形,这在加载后期表现明显。虽然计算弹性模量时对应的是30%破坏荷载时的应力应变状态,但是也不能排除永久变形的影响。为此,更改第一种方法的加载方式,采用传

统的回弹模量测试方法,即逐级加载卸载的方式,并采用试件中间段的应变来计算模量,并将其简称为逐级加载卸载中间段法。

试验设备采用MTS,在试件中采用引伸计测试中段应变。按照破坏荷载的10%、20%、30%、40%和50%作为逐级加载卸载周期的最大荷载。加载到设定最大荷载后,维持该荷载1 min,取此时的位移和应变作为最大值,然后开始卸载,卸载到最小荷载后等待30 s,取此时的位移和应变作为最小值。加载曲线见图3(a),每周期的荷载速率均为0.4 kN/s;图3(b)为引伸计测试所得中段应变随时间变化的典型曲线。

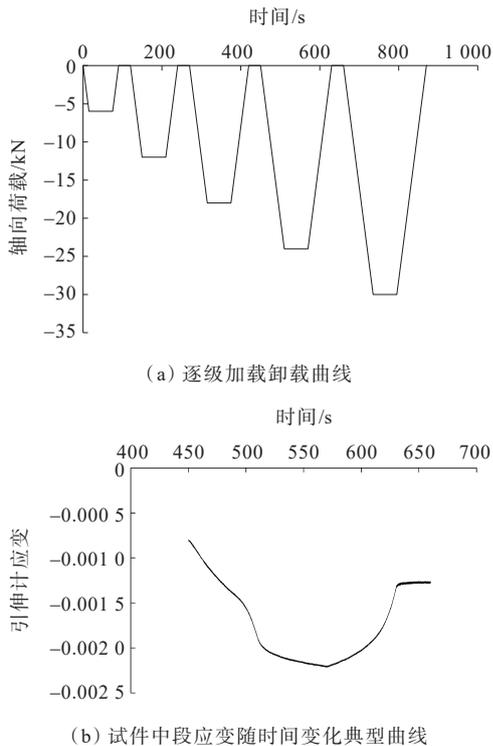


图3 逐级加载卸载方式下荷载曲线和中间段应变曲线
Figure 3 Load curve and middle-section strain curve under stepwise loading and unloading

各级荷载下回弹模量的计算,应力取用最大荷载对应的应力,引伸计所得应变为该级最大荷载维持1 min后的应变减去卸载结束30 s时的应变。

按照上述方法对生物酶水泥复合固化红砂岩土开展试验,得到逐级加载卸载中段法回弹模量的平均值为1 962 MPa,标准差265.7 MPa,变异系数为13.5%,代表值为1 798 MPa。

2.3 静态模量试验第三种方法与试验结果

为了进行对比,依据《公路工程无机结合料稳定

材料试验规程》(JTG 3441—2024),按照T0808顶面法测试了生物酶水泥复合固化红砂岩土的抗压回弹模量。试验条件均与第二种方法相同,而且与第二种方法同步测试,也就是说在进行第二种方法模量试验时,不仅采用引伸计数据作为轴向应变,还采用了MTS采集的轴向变形数据来计算回弹模量(本文也将其简称为逐级加载卸载顶面法),以便更好地进行对比。MTS采集的轴向位移随时间的变化典型曲线见图4。

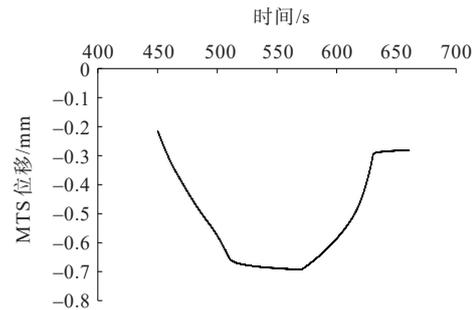


图4 顶面变形随时间变化典型曲线

Figure 4 Variation of top surface deformation with time

试验得到生物酶水泥复合固化红砂岩土逐级加载卸载顶面法回弹模量的平均值为551 MPa,标准差58.5 MPa,变异系数为10.6%,代表值为515 MPa。

3 动态压缩模量试验与结果

中国相关规范分别针对路基土、无机结合料稳定材料和沥青混合料规定了动态模量试验方法,考虑到本文生物酶水泥复合固化红砂岩土所处的底基层层位特点,采用基层材料动态模量方法开展试验,并且采用两种轴向变形测试方式,即顶面总变形(后文称之为第四种方法)和中间段变形(后文称之为第五种方法),分别计算动态压缩模量。

3.1 第四种方法动态模量及其试验结果

依据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG 3441—2024),按照T0857—2009测试生物酶水泥复合固化红砂岩土的动态压缩模量。

试验设备采用MTS,荷载波形采用半正矢波,波形频率为10 Hz,无间歇时间,加载曲线见图5(a)。加载序列为破坏荷载的10%、20%、30%、40%和50%,每级荷载作用200次,并根据其最后10次循环的数据来计算荷载振幅和变形振幅,以得到应力幅值和应变幅值,进而计算得到动态模量,其轴向应变

数据利用MTS采集的数据进行计算(本文也将其简称为顶面法动态模量),典型曲线见图5(b)。

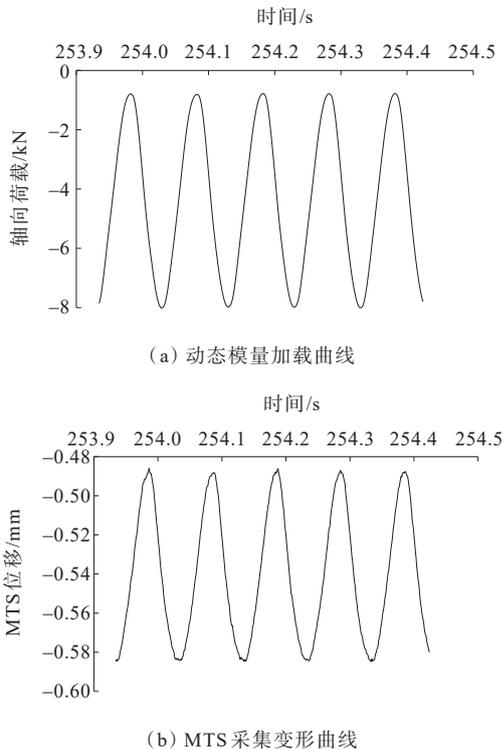


图5 顶面法动态模量试验的荷载曲线和中段应变曲线
Figure 5 Load curve and middle-section strain curve of dynamic modulus test of top surface

试验得到生物酶水泥复合固化红砂岩土顶面法动态回弹模量的平均值为553 MPa,标准差为65.4 MPa,变异系数为11.8%,代表值为512 MPa。

3.2 第五种方法动态模量及其试验结果

本方法在T0857—2009的基础上,采用中段法测试轴向位移,其他条件与3.1节相同且同步,即在按照第四种方法进行动态模量试验时,不仅采用MTS采集的变形数据来计算回弹模量,还同时采用引伸计数据作为轴向应变(本文也将其简称为中段法动态模量),典型曲线见图6。

按照上述方法对生物酶水泥复合固化红砂岩土开展试验,得到中段法动态回弹模量的平均值为2 479 MPa,标准差为331.1 MPa,变异系数为13.4%,代表值为2 274 MPa。

4 模量对比分析

前文采用了5种方法测试了生物酶水泥复合固化红砂岩土的静态模量和动态模量,既有现行规范

规定的试验方法,也有其他规范的方法,试验结果汇总于表2。本节将基于上述试验结果,对比分析各种试验方法的优劣。

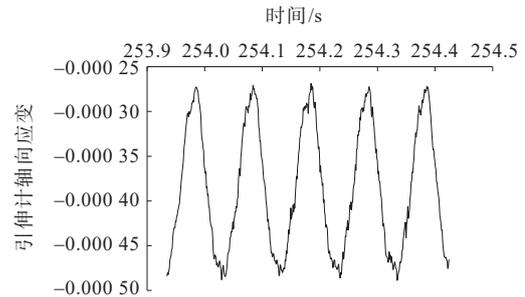


图6 中段应变随时间变化典型曲线

Figure 6 Variation of middle-section strain with time

表2 模量试验结果汇总

Table 2 Summary of modulus test results

方法	模量/MPa	
	平均值	代表值
单调加载中段法	1 856	1 689
逐级加载卸载中段法	1 962	1 798
逐级加载卸载顶面法	551	515
顶面法	553	512
中段法	2 479	2 274

4.1 静态法之间的比较

表2中前3种方法为静态模量,逐级加载卸载顶面法所得模量明显小于前两种方法所得的模量,主要因为单调加载中段法和逐级加载卸载中段法均采用试件中间段的应变,第三种方法采用的是试件总应变;而MTS加载时试件顶面与加载板之间不可避免存在摩擦力,这个摩擦力对试件中部影响相对最小,表现出第三种方法的应变大于第一种和第二种方法的应变,从而导致表2中的模量差距。

表2中第一种和第二种方法采用的应变均由中段法测试的变形计算而得,但是逐级加载卸载中段法所得模量为回弹模量,而单调加载中段法所得模量只能称之为弹性模量。单调加载中段法取单轴压缩强度试验的荷载位移曲线上30%破坏荷载对应的点来计算模量,虽然可以理解成低荷载阶段对应材料的弹性阶段,但是计算点的变形肯定包含塑性变形,会导致所得模量小于逐级加载卸载中段法所得回弹模量。

单调加载中段法采用的单调加载速率为1 mm/min,但是逐级加载卸载中段法的单个加载

卸载周期中,MTS设备很难同时对位移加载速率和最大荷载进行控制,故采用控制荷载速率的加载方式,如图3的荷载速率所示,而且其与图2的近似荷载速率比较接近,图2的等效加载速率约为0.5 kN/s,图3的加载速率为0.4 kN/s,这也是单调加载中间段法和逐级加载卸载中间段法所得模量比较接近的原因之一。

与多个加载卸载循环相比,单调加载中间段法荷载单调增加直至试件破坏,试验操作很简单,这是其突出的优势。

4.2 动态法之间的比较

表2中后两种方法均为动态模量,两者之间数值差别很大,两者在同一试验过程中选取不同的变形,顶面法动态模量取用试件轴向总变形,中间段法动态模量则只取用试件中间段的轴向变形。如前所述原因,采用中间段变形所得模量远大于顶面总变形所得模量。

4.3 静态动态方法之间的比较

表2中逐级加载卸载顶面法和顶面法动态模量都采用轴向总变形计算应变,所得模量在数值上都比较接近,其原因为:它们都采用循环加载卸载周期模式,如图5(a)所示单一周期加载曲线和图3(a)所示单一循环加载曲线,若换算成单周期荷载频率,动态方法为10 Hz,静态方法经等效后大约为0.07 Hz、0.13 Hz、0.20 Hz、0.27 Hz、0.33 Hz(分别对应图3的10%、20%、30%、40%、50%破坏荷载的加载序列)。这一方面说明生物酶水泥复合固化红砂岩土的模量对加载频率不太敏感,另一方面还在于静态方法的每周期最大荷载大于动态法的,即低频对模量的影响被荷载水平的影响抵消了一部分。而逐级加载卸载中间段法回弹模量和中间段法动态模量差距相对比较大,这应该与中间段法可以更真实地反映变形和应变有关。

5 讨论

生物酶水泥复合固化红砂岩土的动态模量受荷载水平的影响比较大,如图7所示,即不同荷载水平下得到的动态模量不同,导致模量代表值的计算或者选取非常困难。静态逐级加载卸载方法不仅存在不同荷载序列、不同荷载水平下的回弹模量也不相同,还存在代表值选取困难的问题。图7中中间段法

动态模量和顶面法动态模量后段比较平缓,这是因为试验所用的MTS设备性能限制所致,笔者在10 Hz频率下施加12 kN荷载时,其单调加载速率达到240 kN/s,MTS设备剧烈抖动,试验难以继续,故图7中动态模量试验的5级荷载水平只取2 kN、4 kN、6 kN、8 kN、10 kN,即便如此,图7中最后2个荷载水平下的动态模量试验结果也难以符合变化趋势,这应该是加载曲线控制有误所致。图7中逐级加载卸载方法下的5级荷载水平分别为6 kN、12 kN、18 kN、24 kN、30 kN,其荷载速率仅为0.4 kN/s,远低于动态模量的荷载速率,故能够得到有效的回弹模量,虽然没有动态模量曲线那么陡峭,但是也难以选取代表值。另外,图7中动态模量方法和逐级加载卸载方法下模量的差距是因为两者的荷载速率差距过大所致。

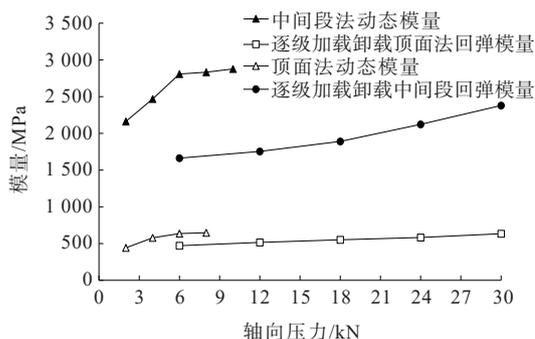


图7 不同荷载水平下的模量

Figure 7 Moduli under different load levels

相对而言,生物酶水泥复合固化红砂岩土在单调加载模式下,中间段法只取应力应变曲线上30%强度对应的点来计算压缩弹性模量,其结果自然具有唯一性。

考虑到对比条件的一致性,笔者还进一步对比分析了生物酶水泥复合固化红砂岩土逐级加载卸载回弹模量试验时30%最大荷载对应下的模量计算结果与单调加载中间段法弹性模量的试验结果。试验所用生物酶水泥复合固化红砂岩土的无侧限抗压强度试验的破坏荷载为60~70 kN。由于动态模量试验的荷载最大仅能到达10 kN(10 Hz频率下),无法加到破坏荷载的30%,故无法加入对比。分析逐级加载卸载方式下第三级荷载(最大荷载18 kN)所得中间段回弹模量,其回弹模量值为1 320~2 326 MPa,而单调加载静态弹性模量为1 592~2 274 MPa。这两个模量范围非常接近,即30%最大荷载的数据点

计算的弹性模量,与相当荷载下加载卸载所得中间段回弹模量结果相当。其主要原因是这两种方法都采用了中间段应变,而且荷载速率相当(两种方法分别为0.5 kN/s和0.4 kN/s),在一定程度上说明30%最大荷载时还近似处于线弹性阶段,如图2(b)曲线初段所示。

6 结论

(1) 5种试验方法中,生物酶水泥复合固化红砂岩土由单调加载中间段法所得代表模量具有唯一性,而其他方法下模量会随荷载水平发生变化,增加了代表模量的选择难度。

(2) 当生物酶水泥复合固化红砂岩土采用逐级加载卸载测试抗压回弹模量的荷载速率与单调加载中间段法的等效荷载速率相当时,两种方法所得的模量比较接近。

(3) 按照规范要求动态模量试验的荷载水平需要达到试件强度的50%以上,生物酶水泥复合固化红砂岩土动态压缩模量试验的荷载速率将过大(即使在10 Hz加载频率下),这对设备性能的要求很高,往往难以达到逐级加载卸载抗压回弹模量试验的荷载峰值水平,直接影响了静态抗压回弹模量试验结果和动态压缩模量试验结果的可比性。

本文只针对5%剂量水泥和0.02%剂量生物酶复合固化红砂岩土开展了模量试验,后续将继续开展水泥和生物酶其他剂量下的模量试验。

参考文献:

References:

- [1] 季节,梁犇,韩秉焯,等.中国道路工程中土壤固化技术综述[J].交通运输工程学报,2023,23(2):47-66.
JI Jie, LIANG Ben, HAN Bingye, et al. Review on soil solidified technologies in road engineering in China[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(2):47-66.
- [2] 张军辉,李海,杨豪,等.盾构渣土资源化再利用技术研究综述[J].中外公路,2022,42(6):1-11.
ZHANG Junhui, LI Hai, YANG Hao, et al. An overview on the "reuse potential" for managing shield tunnel spoils as resources[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(6):1-11.
- [3] 朱彦鹏,马滔,杨校辉,等.基于正交设计的红砂岩改良土抗剪强度试验和回归分析[J].岩土工程学报,2018,40(增刊1):87-92.
ZHU Yanpeng, MA Tao, YANG Xiaohui, et al. Shear strength test and regression analysis of red sandstone improved soil based on orthogonal design[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(sup 1):87-92.
- [4] 王帅,邹静蓉.干湿循环条件下水泥改良红砂岩土的力学特性试验研究[J].科学技术与工程,2020,20(13):5355-5362.
WANG Shuai, ZOU Jingrong. Experimental study on mechanical properties of cement-modified red sandstone soil under dry-wet cycle[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(13):5355-5362.
- [5] 文畅平.基于LADE-DUNCAN模型的生物酶改良膨胀土弹塑性本构关系研究[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(11):4190-4200.
WEN Changping. Study on elasto-plastic constitutive relation of bioenzyme-treated expansive soil based on LADE-DUNCAN model[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(11):4190-4200.
- [6] 陈龙旭,王帅,罗大天,等.干湿循环下红砂岩路基填料回弹模量控制研究[J].中外公路,2020,40(4):250-255.
CHEN Longxu, WANG Shuai, LUO Datian, et al. Study on resilient modulus control of red sandstone subgrade filler in drying-wetting test[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(4):250-255.
- [7] 陈福玲,温郁斌,单俊鸿,等.红砂岩集料对水稳基层强度与抗软化性能的影响[J].硅酸盐通报,2022,41(9):3138-3147.
CHEN Fuling, WEN Yubin, SHAN Junhong, et al. Influence of red sandstone aggregate on strength and softening resistance performance of cement stabilized base[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(9):3138-3147.
- [8] 王章琼,高云,沈雷,等.石灰改性红砂岩残积土工程性质试验研究[J].工程地质学报,2018,26(2):416-421.
WANG Zhangqiong, GAO Yun, SHEN Lei, et al. Engineering properties of lime-modified red sandstone residual soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(2):416-421.
- [9] 罗晓光,李增光,夏强.生物酶土壤固化筑路技术在高速公路底基层中的应用研究[J].公路工程,2014,39(1):99-102,115.

- LUO Xiaoguang, LI Zengguang, XIA Qiang. Rereach on application of TerraZyme stabilized soil construction technology in expressway subbase[J]. Highway Engineering, 2014, 39(1):99-102, 115.
- [10] 刘锋, 吴传海, 许新权, 等. 静态模量和动态模量条件下的沥青路面结构力学性能差异性分析[J]. 公路, 2023, 68(8): 68-74.
- LIU Feng, WU Chuanhai, XU Xinquan, et al. Difference analysis of mechanical properties of asphalt pavement structures under static modulus and dynamic modulus[J]. Highway, 2023, 68(8):68-74.
- [11] JI G S, MA S B, CHEN G, et al. Mechanical properties and prediction models of cement-stabilized macadam at different temperatures[J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2023, 16(2):385-401.
- [12] 孙雅珍, 李凯翔, 丁传超, 等. 稳定碎石土底基层材料力学参数试验研究[J]. 中外公路, 2018, 38(1):248-253.
- SUN Yazhen, LI Kaixiang, DING Chuanchao, et al. Experimental research on material mechanics parameter of stabilized macadam soil subbase[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(1):248-253.
- [13] 仲文亮, 吕松涛. 不同龄期对水稳基层强度与模量及其内在联系的影响研究[J]. 中外公路, 2014, 34(1):282-285.
- ZHONG Wenliang, LYU Songtao. Study on the influence of different ages on the strength and modulus of water-stabilized base and their internal relations[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2014, 34(1):282-285.
- [14] 吕松涛, 陈杰东, 张晖. 水泥稳定碎石拉压弯静态模量与动态模量比较分析[J]. 公路交通科技, 2016, 33(10):39-43, 59.
- LYU Songtao, CHEN Jiedong, ZHANG Hui. Comparative analysis of tensile, compression, flexural static modulus and dynamic modulus of cement-stabilized macadam[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33(10):39-43, 59.
- [15] XIE N S, LYU S T, HE Y H, et al. Load response and fatigue life of cement-stabilized macadam base structure considering dynamic and static load differences and tension-compression modulus differences[J]. Construction and Building Materials, 2023, 394:132060.
- [16] 张晨晨, 王旭东, 钱振东, 等. 半刚性基层材料不同模量试验与分析[J]. 公路交通科技, 2017, 34(6):53-60.
- ZHANG Chenchen, WANG Xudong, QIAN Zhendong, et al. Test and analysis on different moduli of semi-rigid base material[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34(6):53-60.
- [17] 程箭, 许志鸿, 李淑明, 等. 水泥稳定碎石静态模量与动态模量比较[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(1):63-66, 75.
- CHENG Jian, XU Zhihong, LI Shuming, et al. Comparison of compressive resilient modulus and dynamic modulus of cement-stabilized macadam[J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(1):63-66, 75.
- [18] LIU H F, YE R X, CHEN L Y, et al. Characterization of strength, modulus, and fatigue damage properties of cement stabilized macadam based on the double modulus theory [J]. Construction and Building Materials, 2022, 353:129002.
- [19] 贾侃, 沙爱民, 陆剑卿. 半刚性基层材料的有效模量值[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2009, 29(1):15-19.
- JIA Kan, SHA Aimin, LU Jianqing. Effective modulus value of semi-rigid base course materials[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2009, 29(1):15-19.
- [20] DENG C Q, JIANG Y J, TIAN T, et al. Resilient modulus and influencing factors of vertical vibration compacted cement-stabilized macadam[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2021, 22(11):1435-1445.
- [21] 张显安, 周宇豪, 李雪连, 等. 振动搅拌水泥稳定碎石的力学性能研究[J]. 中外公路, 2021, 41(4):332-336.
- ZHANG Xian'an, ZHOU Yuhao, LI Xuelian, et al. Study on mechanical properties of vibration-stirred cement stabilized macadam[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(4):332-336.