

公路路基水泥改良土强度与液性指数的关系研究

冯卡¹, 赵民²

(1. 北京交通职业技术学院 路桥系, 北京市 102200; 2. 东南大学 交通学院)

摘要:该文研究了某二级公路路基中路基土液性指数和水泥掺量对路基改良土强度性能的影响,选取了3种不同液性指数的素土作为研究对象,并掺入水泥进行改良,通过击实试验确定水泥改良土的最优含水率和最大干密度,并测定不同水泥掺量下改良土的加州承载比、无侧限抗压强度和回弹模量,最终建立基于液性指数的无侧限抗压强度预测模型。试验结果表明:对于粉质黏土和粉土水泥掺量建议为10%,而对于黏土水泥掺量建议为9%;该文建立的预测模型可以用于预测不同水泥掺量下各类细粒土的无侧限抗压强度,从而指导实际工程中的水泥用量,同时可以判断在某一水泥掺量下,何种湿度状态的细粒土可以被用来改良。

关键词:水泥改良土;无侧限抗压强度;加州承载比;最优含水率;最大干密度;液性指数

1 前言

中国南方地区气候湿热,存在大量液限高、孔隙大、压缩性强、水稳性差的细粒土,难以满足路基的填筑要求,而路基是路面结构的基础,路基强度与稳定性是保证路面使用寿命的先决条件。为此,多年来公路工作者一直针对各个工程案例开展细粒土改良方案研究,试图找到能够利用当地土为主要原料的廉价路基填筑材料。

目前,改良土中的石灰、粉煤灰、水泥和石灰或水泥粉煤灰称为无机结合料,这些无机结合料改良土比起改良前的土在工程技术性能等各方面均有不同程度的提高和改善。其中水泥改良土因取材方便和施工简便,在不良路基土改良处理中得到了广泛应用。水泥掺入土体后,与水发生水化作用产生 Ca^{2+} 被土体中的矿物质吸附,促使分散的土粒凝聚形成密实结构,从而可有效地稳定土体,提高强度和水稳性。Hoan 指出影响填料改良效果的因素包括土类型、含水率、水泥用量、混合程度、养护时间、压实混合物的干密度;Osinubi 建立了改良土的强度与养护时间、含水率、水泥掺量之间的经验关系式;王鹏云等研究了不同养生龄期下偏高岭土和水泥剂量对水泥土强度和水稳性的影响;周海龙等研究了水泥剂量和养生龄期对水泥土无

侧限抗压强度的影响规律;叶博以阎良高速公路沿线黄土为研究对象,通过无侧限抗压强度试验研究了水泥剂量、压实度、含水率及养护龄期对水泥改良黄土无侧限抗压强度的影响,发现水泥剂量、压实度与水泥改良黄土抗压强度呈现良好的线性增长关系,水泥改良黄土抗压强度与含水率可构建二次函数关系;张莹莹对电石渣改良土的无侧限抗压强度(UCS)预测方法进行研究,得到了不同龄期、不同压实度下基于28d龄期UCS的其他龄期UCS的预测方法,且预测结果与实测结果拟合度较高;储诚富等通过分析含水率、水泥剂量对水泥土无侧限抗压强度的影响关系,建立了预测室内水泥土强度公式。在改良土的动力研究方面,邓长青研究了软弱路基土经水泥改良后的动力特性,配置了不同含水率、改良剂类型、改良剂掺量的改良土试样,发现改良土的回弹模量和累积塑性应变均受到界限含水率的影响;郭文琦研究了掺入超细水泥对原状土动力特性的改善效果,发现随着超细水泥掺量增加,砂土的抗液化性能增强,动剪切模量比增大,最大阻尼比减小。

水是路基土工程性质的重要影响因素,而土的含水率受环境变化而不断演变。液性指数既与土赋存环境下的实际含水率有关,也与土自身的液限、塑限等参数有关,因而是联系土实际湿度状态与自身性能的重要指标,而目前对于改良土强度与液性指数的关系研

收稿日期:2020-07-24(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(编号:78865567)

作者简介:冯卡,男,硕士,讲师,E-mail:FFKK54321@aliyun.com

究较少,若是能在已知液性指数的情况下预测改良土强度,将能极大地提高工作效率。该文采用3种不同液限的路基土作为试验对象,通过标准击实试验确定不同水泥掺量下水泥改良土的最优含水率(OMC)和最大干密度(MDD),并测定不同含水率下路基土的加州承载比(CBR)和无侧限抗压强度(UCS),最终建立基于液性指数的单轴抗压强度预测公式,可以用于指导路基细粒土改良达到强度要求时的水泥用量和含水率控制值。

2 试验材料

试验用土取自江苏省某二级公路路基施工现场,该公路穿越湖泊、沼泽地区,广泛分布工程性质不佳的高液限细粒土,如果简单地把该类土作弃方处理,会增加长距运土带来的工程费用,在当前节能环保要求不断提高和工程建设成本控制的要求下,有必要在改善该类土工程性质的基础上对其进行充分利用。因此,需开展水泥改良土室内试验研究。为了使试验结果更具有普适性,选择了现场3种类型的细粒土进行试验,分别为粉质黏土、粉土和黏土,均属于高液限土,其基本物理性质见表1。改良剂为普通波特兰水泥,细度为1.2%,烧失量为1.02%,安定性合格,初凝时间为265 min。

表1 试验用土的基本物理力学性质

土类型	液限/ %	塑限/ %	塑性 指数	相对 密度	分类
粉质黏土	83.0	37.4	45.6	2.73	CH
粉土	69.7	49.0	20.7	2.70	MH
黏土	76.9	47.8	31.8	2.70	MH

3 试验过程

对改良土开展击实试验、 CBR 试验、无侧限抗压强度试验和回弹模量试验,试验前将试验用土风干碾碎,对于每一类型土,配置了5种水泥掺量(0%、4%、7%、10%和13%),路基土和水泥被充分均匀混合,并配置了7种含水率,开展击实试验以确定不同水泥掺量试样的最大干密度、最优含水率,随后参照试验要求制备 CBR 试样、无侧限抗压强度试样、回弹模量试验试样,制备完成后均进行7 d龄期的养护。击实试验、 CBR 试验参照JTG E40—2007《公路土工试验规程》,

无侧限抗压强度试验参照JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》,回弹模量试验参照JTG D30—2015《公路路基设计规范》,具体试验过程在此不做详述。

4 试验结果分析

4.1 击实试验和 CBR 试验

图1为最大干密度(MDD)和最优含水率(OMC)随着水泥掺量增加的变化趋势,其中 OMC 从击实试验得到的击实曲线中获取。

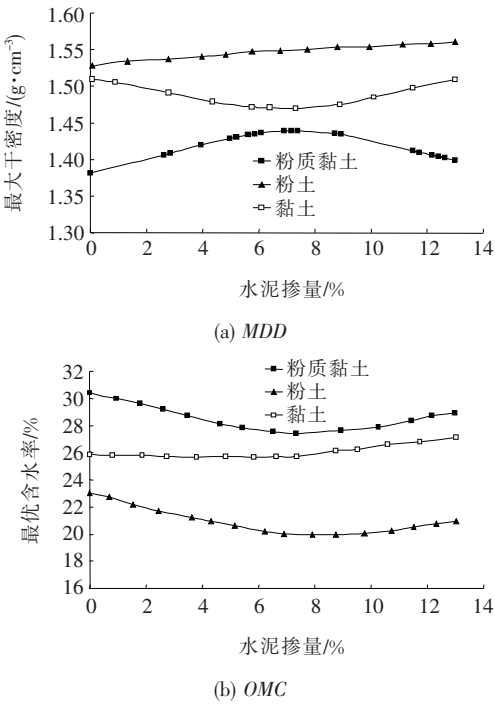


图1 最大干密度和最优含水率与水泥掺量的关系

由图1可以看出:粉质黏土受水泥掺量影响最显著,其 MDD 和 OMC 在水泥掺量为7%~8%时达到明显的极值;粉土的 MDD 随水泥掺量的增加而上升,其 OMC 变化趋势与粉质黏土类似;黏土的 MDD 先减后增,最优含水率则缓慢增加。总体来看,与未掺入水泥相比(素土),掺入水泥(最大掺量13%)对3种细粒土的 MDD 影响不大,波动范围在5%以内,可以忽略; OMC 的变化相对明显,对于粉质黏土和粉土, OMC 最大下降2%~3%,对于黏土, OMC 略微上升。

图2为加州承载比(CBR)随着水泥掺量增加的变化趋势,由图2可以看出: CBR 的变化趋势比较一致,其中黏土的上升趋势最为明显。根据JTG D30—2015《公路路基设计规范》,路堤填料的 CBR 值至少

应达到 3%，由此可以看出，为达到要求值，粉质黏土和粉土的水泥掺量为 10%~11%，而黏土的水泥掺量约为 9%。

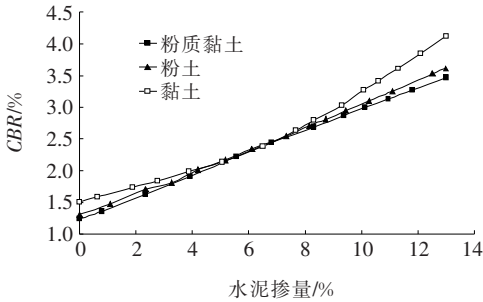
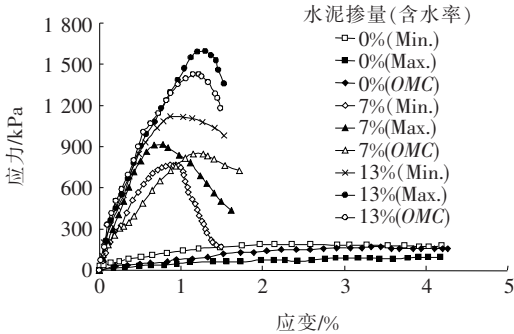


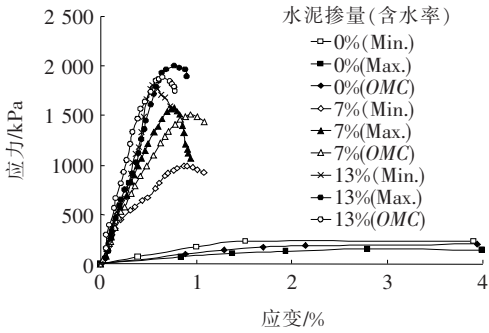
图 2 CBR 值与水泥含量的关系

4.2 无侧限抗压强度试验

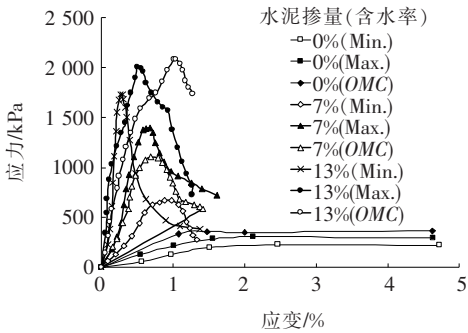
图 3 为无侧限抗压强度试验得到的不同水泥掺量



(a) 粉质黏土



(b) 粉土



(c) 黏土

图 3 改良土的应力—应变曲线

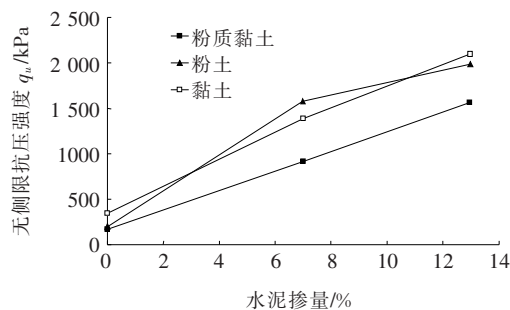
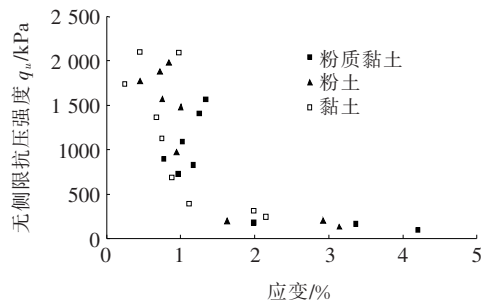
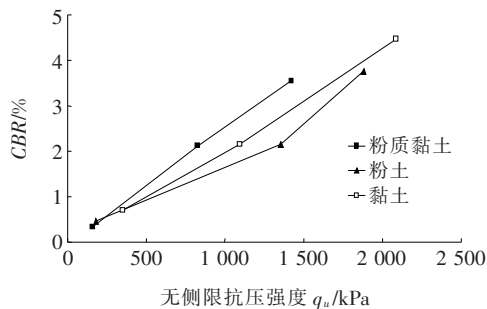
及不同含水率下土的应力—应变关系曲线。图例中 Min 表示含水率为 $OMC - 2\%$ ，Max 表示含水率为 $OMC + 2\%$ 。

由图 3 可以看出：素土试样（水泥掺量 0%）都表现出应变硬化特征，随着应变增加，应力有所小幅增加但很快趋于平稳。而掺入 7% 和 13% 水泥后，改良土表现出应变软化特征，出现峰值强度，试样破坏后应力降低至残余强度。总体来看，素土破坏时为高应变低应力状态，而改良土破坏时为低应变高应力状态，掺入水泥后土存在由“延性”向“脆性”的变化趋势。同时，含水率也对应力—应变关系及强度有明显影响，对于素土试样，含水率越小则强度越高；而对于改良土试样，在 OMC 的基础上适当提高含水率反而有助于提高强度，这是由于多出的水分使得水化作用更加充分所致。

图 4 为无侧限抗压强度 q_u 与水泥掺量和破坏应变的关系。其中破坏应变取峰值强度对应的应变（应变软化）或应力趋于平稳时的应变（应变硬化）。从图 4(a) 可以看出：所有试样的 q_u 随着水泥掺量的增加而上升，水泥改良可以显著提高细粒土的强度，掺入 7% 和 13% 的水泥后，粉质黏土的 q_u 增加了 392% 和 753%，粉土的 q_u 增加了 631% 和 817%，黏土的 q_u 增加了 293% 和 490%。图 4(b) 为破坏应变与 q_u 的关系，破坏应变一般为 0.5%~3.5%，与 q_u 成反比，其中改良土的破坏应变普遍小于 1%，进一步体现了水泥改良土的脆性。

尽管中国行业标准对路基改良土无侧限抗压强度 q_u 无明确要求，但根据国外一些行业标准要求，低交通量下 q_u 应大于 0.8 MPa。图 5 为含水率为 OMC 时 CBR 与无侧限抗压强度 q_u 的关系。结合图 4(a)，可以看出当达到 CBR 要求值（3%）时，改良土的 q_u 均超过了 0.8 MPa，因此，该文 3.1 节中建议的水泥掺量同样满足无侧限抗压强度要求。

根据上述试验结果，可以发现：水泥掺量和含水率是影响改良土无侧限抗压强度 q_u 的主要因素。水泥与土拌和后，水泥的矿物成分先与水进行强烈的水解和水化反应，存在团粒化作用、硬凝作用、碳酸化作用等，在土颗粒间形成坚固的联结，这是土强度大大提高的主要原因。水泥的水解和水化反应需要较长时间，而且需要有足够的水分来维持，因此，若对细粒土进行路拌水泥改良后马上压实，掺入水泥前细粒土的含水率可以略高于 OMC（1.1~1.2 倍）。

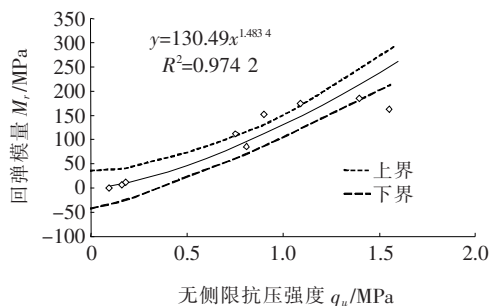
(a) q_u -水泥掺量关系(b) q_u -破坏应变关系图4 无侧限抗压强度 q_u 与水泥掺量和破坏应变的关系图5 CBR 与 q_u 的关系

4.3 回弹模量

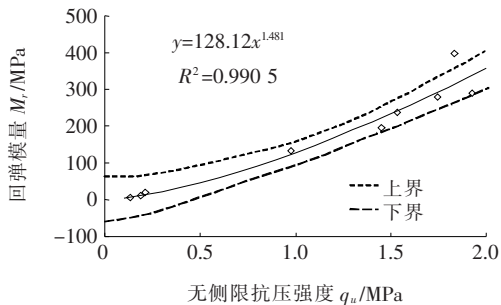
图6为不同无侧限抗压强度下回弹模量试验数据及回归预测模型,上界和下界之间区域代表了回归曲线95%的置信区间。由图6可以看出:幂函数比较适合表述回弹模量与无侧限抗压强度的关系,所有类型土的 R^2 均高于0.96。根据预测模型,随着 q_u 的增加,黏土回弹模量的上升最为明显,这也间接说明了掺入水泥对黏土刚度的提升十分有效。

5 无侧限抗压强度预测模型

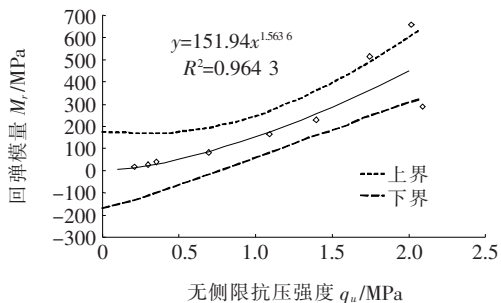
土液性指数既与土赋存环境下的实际含水率有关,也与土自身的液限、塑限等参数有关,用来反映土的软硬程度,若是能在已知液性指数的情况下预测改良土强度,将能极大提高工作效率。因此,该文基于液



(a) 粉质黏土



(b) 粉土



(c) 黏土

图6 回弹模量试验数据及回归预测模型

性指数 I_L 建立 q_u 预测模型,预测效果如图7所示。由图7可知:该多项式预测模型可以用于预测不同水泥掺量下各类细粒土的无侧限抗压强度,以使其达到最低要求值,从而指导实际工程中的水泥用量。同时可以判断在某一水泥掺量下,何种湿度状态的细粒土可以被用来改良。例如,对于粉质黏土改良[图7(a)],若采用7%的水泥掺量,为达到0.8 MPa的无侧限抗压强度要求,则应当选取液性指数低于-0.15的细粒土,若放宽至采用13%的水泥掺量,则可以选取液性指数低于-0.1的细粒土;对于素土,由图7可以看出:无论湿度状态或液性指数如何改变, q_u 都很难达到0.8 MPa,因此细粒土的强度很难通过翻晒或者简单的物理处理达到填筑要求,这进一步证明了在该工程进行细粒土水泥改良的必要性。

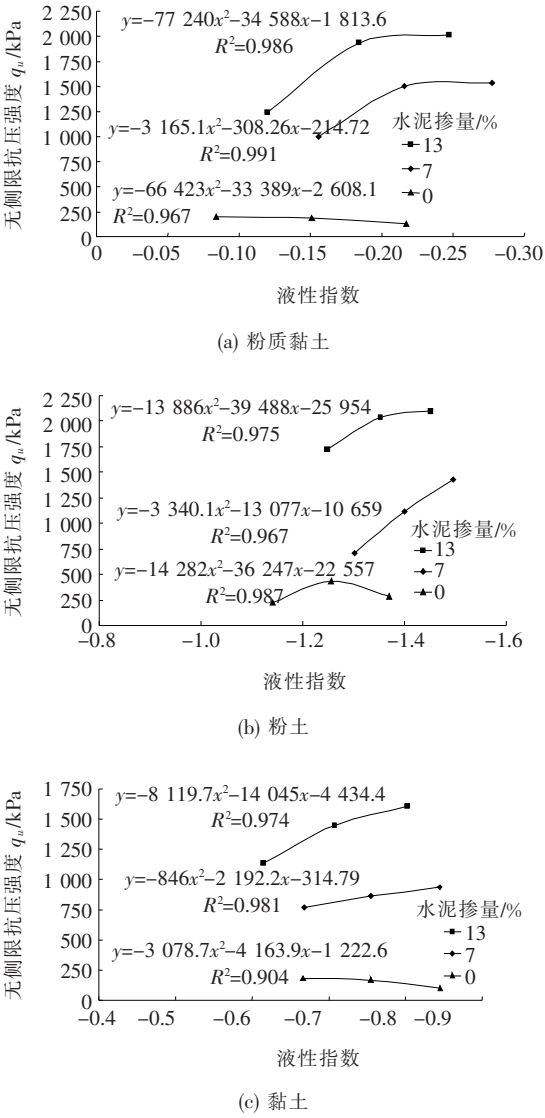


图 7 水泥改良土无侧限抗压强度与液性指数的关系

6 结 论

- (1) 根据无侧限抗压强度试验,加入水泥可以大大提高土的强度;素土破坏时为高应变低应力状态,而改良土破坏时为低应变高应力状态,掺入水泥后土存在由“延性”向“脆性”的变化趋势。
- (2) 根据低等级公路对 CBR 和无侧限抗压强度的要求,建议路堤改良土为粉质黏土和粉土时,水泥掺量约为 10%,为黏土时水泥掺量约为 9%。

(3) 该文建立的预测模型可以用于预测不同水泥掺量下各类细粒土的无侧限抗压强度,从而指导实际工程中的水泥用量,同时可以判断在某一水泥掺量下,何种湿度状态的细粒土可以被用来改良。

参考文献:

[1] 崔宏环,裴国陆.含赤泥土壤固化剂改良粉质黏土的路用性能研究[J].中外公路,2018(3).

[2] 叶观宝,徐超,李束,等.水泥土添加剂的室内研究[J].中国公路学报,2006(5).

[3] 王贤昆,庞建勇,王强.复合水泥土无侧限抗压强度正交试验研究[J].岩土工程,2015(15).

[4] Meei-Hoan H, Tarmizi A, Chan CM, et al. Leachability and Strength of Kaolin Stabilized with Cement and Rubber[J]. Int. J. Sust. Construct. Eng. Technol, 2011, 2: 89-104.

[5] Shafique MSB, Edil TB, Benson CH, et al. Incorporated Fly Ash Stabilized Subbase into Pavement—A Case Study [J]. Geotech. Eng, 2004, 157(4): 239-249.

[6] 王鹏云,杨永亮,王林浩,等.偏高岭土对水泥土强度及渗透系数的影响[J].科学技术与工程,2018(10).

[7] 周海龙,申向东,薛慧君.小龄期水泥土无侧限抗压强度试验研究[J].山东大学学报(工学版),2014(1).

[8] 叶傅.水泥改良黄土无侧限抗压强度试验研究[J].湖北理工学院学报,2019(3).

[9] 张莹莹,程志豪,周沛延,等.电石渣改良土的无侧限抗压强度预测方法[J].中外公路,2017(3).

[10] 储诚富,洪振舜,刘松玉,等.用似水灰比对水泥土无侧限抗压强度的预测[J].岩土力学,2005(6).

[11] 邓长青,曾超.控制 CBR 条件下路基化学改良土的动力特性研究[J].中外公路,2018(4).

[12] 郭文琦,王士民,刘川昆,等.佛山地铁 2 号线盾构穿越地层中砂土动力特性及改良方法[J].铁道建筑,2020(1).

[13] JTG E40-2007 公路土工试验规程[S].

[14] JTG E51-2009 公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].

[15] JTG D30-2015 公路路基设计规范[S].

[16] Public Work Department of Malaysia. Design Guide for Alternative Pavement Structures Low—Volume Roads [S]. Department of Road Engineering and Geotechnic, 2012.