

压实度和含水率对高液限土宏微观力学特性的影响

胡利平¹, 刘鑫², 曾国东³

(1. 广东省交通运输工程质量监督站, 广东 广州 510420; 2. 河海大学隧道与地下工程研究所, 江苏 南京 210098;
3. 佛山市公路桥梁工程监测站, 广东 佛山 528042)

摘要:为了研究高液限土在压实度和含水率变化时的力学性能,开展了室内无侧限抗压强度试验,并基于PFC2D进行了数值模拟计算。研究表明:高液限土的宏观力学性能与压实度和含水率密切相关,微观力学性能与粒团形态、孔隙率、黏聚力、摩擦力等相关;随着高液限土压实度的增大,土样孔隙率减小,粒团形态趋于复杂,土样破坏应力逐渐增大,破坏应变逐渐减小,压实度与破坏应力、破坏应变呈线性变化关系;随着高液限土含水率的增大,土样黏聚力减小,摩擦力减小,土样破坏应力和破坏应变均逐渐减小,含水率与破坏应力、破坏应变呈线性变化关系。

关键词:高液限土;力学特性;压实度;含水率;颗粒流分析

中图分类号:TU411.3

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2014)S2-0004-03

近年来,高液限土逐渐用于路堤填筑,主要方法有直接填筑和改良填筑^[1-2]。当高液限土在用于路堤直接填筑时,其压实度的控制可适当低于标准值^[3-4]。一般而言,高液限土路堤填筑需满足强度与变形要求,即高液限土的力学性能满足要求。目前,国内外围绕高液限土的力学性能开展了较多的研究^[5-6],但较少从压实度变化角度研究其力学性能,从高液限土现场填筑碾压施工的角度分析,当含水率变化时,其干密度随之变化,此时高液限土的力学性能也发生变化,而这方面的研究也较少。另外,要掌握高液限土用于路堤填筑的物理力学特性,不仅需要进行宏观的试验,建立宏观高液限土应力-应变曲线;从微观角度而言,分析压实度和含水率等指标对土颗粒的微观结构的影响也显得尤为重要。为探寻高液限土路堤填筑过程中的力学性能,更好地指导现场施工,本文以某高速高液限土为试验对象,从高液限土压实度和含水率的变化角度开展其力学性能研究,并基于颗粒流分析程序(Particle Flow Code in 2 Dimensions, PFC2D)数值模拟技术^[7-8],克服传统连续介质力学模型采用宏观连续性假设所导致的不足,将在高液限土的压实度和含水率变化时,对无侧限抗压强度试验中土体结构的变化进行模拟,并将土体微观与宏观力学性质进行对比分析,验证宏

观规律的正确性。该研究可促进高液限土的力学性质研究,对于健全高液限土填筑方法也有积极作用。

1 无侧限抗压强度试验

试验采用的高液限土取自某高速公路地下2 m处,其含水率为34.1%,天然密度为1.78 g/cm³,干密度为1.33 g/cm³,孔隙比为1.03,饱和度为89.0%,压缩模量为3.51 MPa,渗透系数为2.55 × 10⁻⁷ cm/s,高液限土的粒径分布曲线如图1所示。

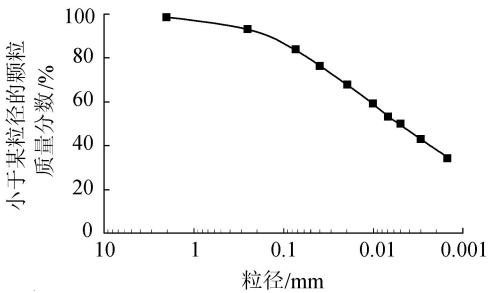


图1 试验采用的高液限土粒径分布曲线

试验中压实度为90%时,含水率分别为13%、17%、20%、23%和27%;含水率为20%时,压实度分别为85%、90%、95%和100%。利用压力机将高液限土静压成圆柱体试样,若每个试样的混合料质量为 M ,则

基金项目:广东省交通运输厅科技项目(科技-2012-02-013);广东省交通运输厅科技项目(科技-2013-02-003)

作者简介:胡利平(1971—),男,江西吉安人,博士,主要从事路基桥梁检测研究。E-mail: hlp12@163.com

$$M = PV(1 + W)K \quad (1)$$

式中: M 为混合料质量, g ; V 为试件体积, cm^3 ; P 为最大干密度, g/cm^3 ; W 为最优含水率, %; K 为要求达到的压实度, %。

将养护好的试样放到无侧限强度仪上进行试验, 试验过程中轴向应变速率宜为每分钟应变 1% ~ 3%。转动手柄, 使升降设备上升, 轴向应变小于 3% 时, 每隔 0.5% 应变读数 1 次; 轴向应变等于或大于 3% 时, 每隔 1% 应变读数一次, 试验宜在 8 ~ 10 min 内完成。当测力计读数出现峰值时, 继续进行 3% ~ 5% 的应变后停止试验, 当读数无峰值时, 试验应进行到应变达 20% 为止。

2 试验结果分析

2.1 不同压实度的试验结果

通过无侧限抗压强度试验, 得到含水率为 20% 时不同压实度的应力-应变关系曲线, 如图 2 所示。从图 2 可以发现, 随着压实度的提高, 土样破坏应力逐渐增大, 破坏应变逐渐减小, 进一步对压实度与破坏应力、破坏应变的关系进行拟合, 拟合结果见图 3、图 4。从图 3、图 4 可以发现, 高液限土的压实度与破坏应力、破坏应变均呈线性变化关系。

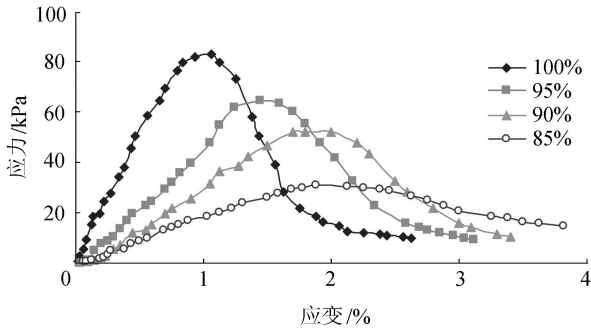


图 2 不同压实度试验的应力-应变关系曲线

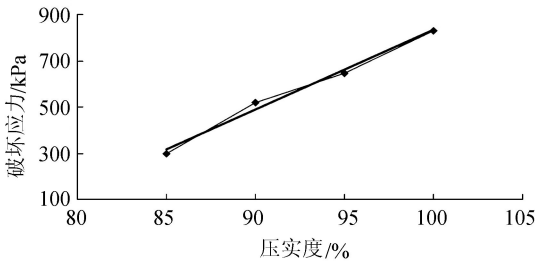


图 3 压实度与破坏应力的关系曲线

2.2 不同含水率的试验结果

高液限土作为一级公路路堤的填料时, 压实度一般在 90% 左右, 故室内试验制样时, 高液限土压实度控制在 90%, 不同含水率的应力-应变关系曲线如图 5 所示。

从图 5 可以发现, 随着高液限土含水率的提高,

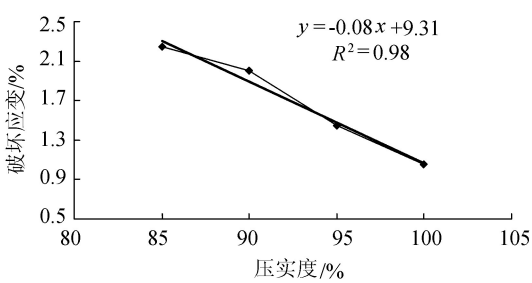


图 4 压实度与破坏应变的关系曲线

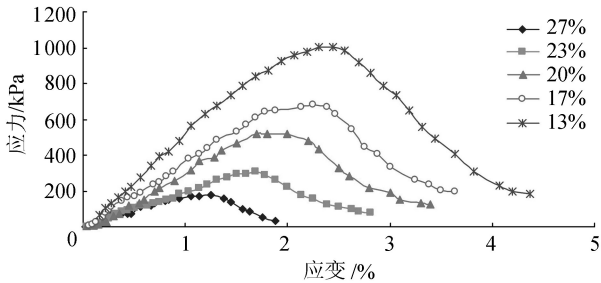


图 5 不同含水率试验的应力-应变关系曲线

土样破坏应力和破坏应变均逐渐减小, 进一步对含水率与破坏应力、破坏应变的关系进行拟合, 拟合结果见图 6、图 7。从图 6、图 7 可以发现, 高液限土的含水率与破坏应力、破坏应变均呈线性变化关系。

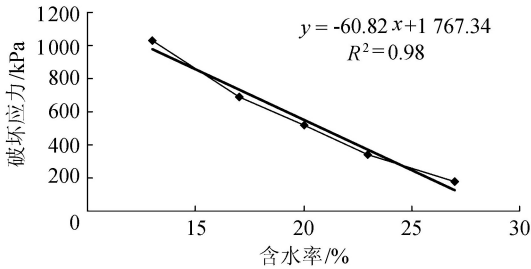


图 6 含水率与破坏应力的关系曲线

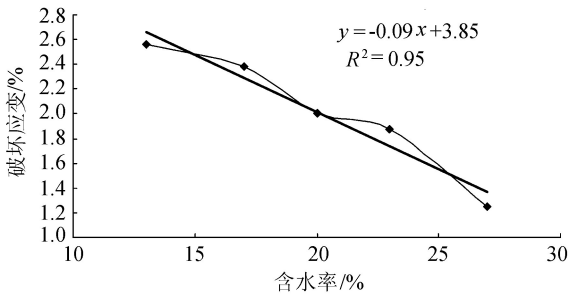


图 7 含水率与破坏应变的关系曲线

3 PFC2D 软件建模

土体的变形主要是由于内部介质发生相对滑动、滚动或者由于软弱截面的张开或闭合产生的, 而不是由颗粒自身的变形导致的。因此, 颗粒流方法在模拟过程中作了如下假设^[9]: ① 颗粒单元为刚性体, 本身不会破坏; ② 接触发生在很小的范围内, 即点接触; ③ 接触特性为柔性接触, 接触处允许有一定的重叠量; ④ 重叠量的大小与接触力大小有关, 与颗

粒大小相比,重叠量很小;⑤接触处可以有黏聚强度。

压实度和含水率对高液限土微观特性的影响主要体现在土颗粒的结构形态(矿物颗粒接触)、连接形式(胶结程度)、排列方式(孔隙特征)等方面。在用 PFC2D 数值模拟时,土颗粒的结构形态、连接形式、排列方式主要影响颗粒的连接形态(粒团的形态)、孔隙率(压实度)、黏聚力及摩擦力等 PFC2D 内置参数^[10-12]。通过 PFC2D 进行建模,土体颗粒的大小取 1mm。PFC2D 模拟无侧限抗压强度试验的初始状态及破坏状态如图 8 所示。

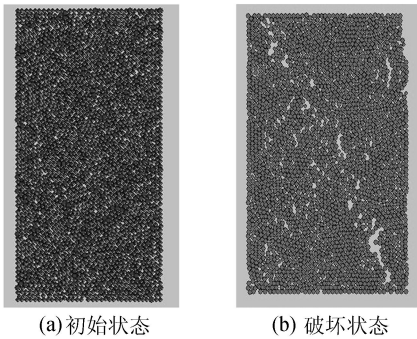


图 8 PFC 模拟无侧限抗压强度试验

4 数值模拟结果分析

PFC2D 模拟得到的应力-应变关系曲线如图 9 所示。从图 9(a)可以看出,粒团的形态越复杂,破坏应力越大,破坏应变越小。粒团越大、结构越复杂,粒团之间的接触点越多,摩擦力也越大,在相同法向压力下,颗粒之间越不容易发生相对移动,对应的峰值强度也就越大,且达到峰值强度时可调整的幅度较小,强度越会提前发生。

从图 9(b)可以看出,随着孔隙率 n 的减小,破坏应力增大,破坏应变减小。土样压实度越大,颗粒之间接触点也越多,摩擦力也越大,在相同法向压力下,颗粒之间越不容易发生相对移动,对应的峰值强度也就越大;压实度越大,土体颗粒结构的密实性越好,达到峰值强度时调整的幅度小,强度越会提前发生。

从图 9(c)可以看出,随着黏聚力 c 的增大,破坏应力和破坏应变都增大。土样颗粒之间的黏聚力越大,摩擦力也越大,在相同法向压力下,颗粒之间越不容易发生相对移动,对应的峰值强度也就越大;黏聚力越大,土体颗粒结构的连接性越好,颗粒越不容易分离,达到峰值强度时需要的变形越大,强度越会推迟发生。

从图 9(d)可以看出,随着颗粒之间摩擦力 f 的增大,破坏应力和破坏应变都增大。土样颗粒之间的摩擦力越大,在相同法向压力下,颗粒之间越不容易

发生相对移动,对应的峰值强度也就越大;摩擦力越小,在相同法向压力下,在较小的位移内颗粒调整的速度就越快,结构密实度越好,抗剪强度越提前发生。

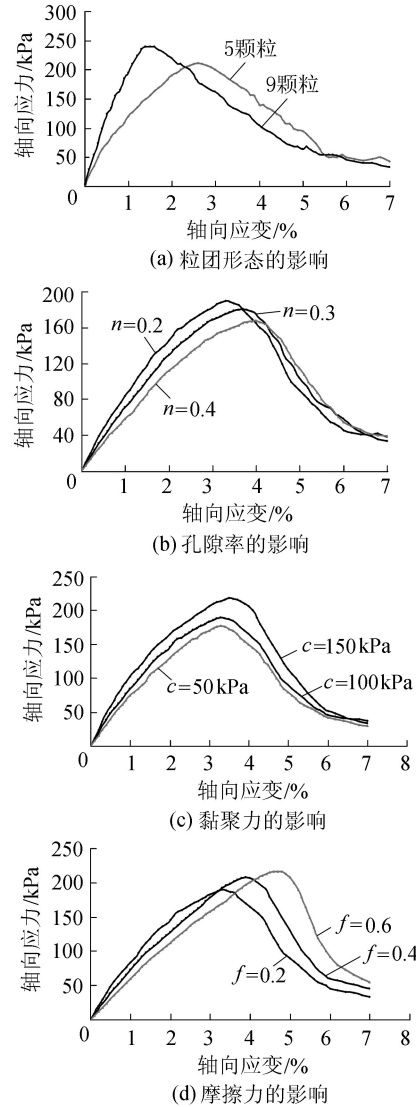


图 9 PFC2D 模拟的应力-应变关系曲线

5 宏观、微观力学特性对比分析

土体的微观参数如粒团形态、孔隙率、黏聚力、摩擦力等与宏观参数密切相关,从工程应用角度进行分析,高液限土在压实度和含水率变化时土体力学性质,其主要变化规律如下:

- a. 土体压实度增大,会使土体颗粒的紧密程度增加,颗粒之间的接触深度也会增加,颗粒的内摩擦力也会随之增大,对应的峰值强度增大。
- b. 压实度较小时,土体试样内部孔隙分布凌乱,个别位置存在较大孔隙,颗粒之间容易发生翻滚,小颗粒就容易填充到大颗粒形成的孔隙中,压实度越大,孔隙分布越趋向均匀,土体的结构密实度越好,颗粒越不容易发生翻滚,达到峰值强度时调整的幅度越小,强度越会提前发生。 (下转第 16 页)

表 1 为 3 次抽水降深过程中抽水井的水位降深数据,基于式(2)和式(3),计算不同降深下的渗透系数,然后求得平均渗透系数为 $2.42 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$,影响半径往西方向为 87m,往北方向为 71m。

表 1 场地黏性土层 Q₃ 抽水试验各阶段抽水井降深数据

抽水 降深 阶段	含水 层厚 度/m	静水 位高 程/m	动水 位高 程/m	水位 降深/ m	$Q/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	单位 涌水量 $q/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1})$
1	17.7	15.07	4.12	10.95	8.32	1.83
2	17.7	15.07	1.17	13.90	11.00	1.47
3	17.7	15.07	-4.97	20.00	10.80	0.79

3 结 论

a. 淮河防汛调度楼场地 Q₃ 黏性土层地下水流向为自北偏西 27.5°流向南东。地下水最大允许渗流速度为 $3.28 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 。

b. 黏性土层地下水平均渗透系数为 $2.42 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$,影响半径往西方向为 87m,往北方向为 71m。

(上接第 6 页)

c. 一般而言,土体含水率越大,土颗粒的水膜越厚,颗粒之间的摩擦力越小,颗粒在水的润滑作用下更容易翻滚,对应的峰值强度减小。

d. 当含水率超过一定范围后,颗粒周围会出现自由水,在压实过程中,水在颗粒表面起的润滑作用使颗粒之间的连接断裂。颗粒之间断裂,会使颗粒之间的黏聚力减低,接触点减小,摩擦力减小,在相同法向压力下,在较小的位移内颗粒调整的速度就越大,结构密实度越好,抗剪强度越提前发生。

6 结 论

a. 高液限土的宏观力学特性与压实度和含水率密切相关,微观力学特性与粒团形态、孔隙率、黏聚力、摩擦力等相关。

b. 随着高液限土压实度的增大,土样孔隙率减小,粒团形态趋于复杂,土样破坏应力逐渐增大,破坏应变逐渐减小,压实度与破坏应力、破坏应变呈线性变化关系。

c. 随着高液限土含水率的增大,土样黏聚力减小,摩擦力减小,土样破坏应力和破坏应变均逐渐减小,含水率与破坏应力、破坏应变呈线性变化关系。

参考文献:

[1] 刘鑫,洪宝宁. 高液限土工程特性与路堤填筑方案[J].

c. 考虑到人工挖孔桩本身的难度及深井降水对邻近蚌埠市中级人民法院的不利影响,建议改变桩基础形式。

参考文献:

[1] 王大纯,张人权,史毅虹,等. 水文地质学基础[M]. 北京:地质出版社,1986.
[2] 史长春. 水文地质勘察[M]. 北京:水利电力出版社,1991.
[3] 胡顺军,田长彦,宋郁东,等. 土壤渗透系数测定与计算方法的探讨[J]. 农业工程学报,2011,27(5):68-72.
[4] SL320—2005 水利水电工程钻孔抽水试验规程[S].
[5] SL31—2003 水利水电工程钻孔压水试验规程[S].
[6] SL345—2007 水利水电工程注水试验规程[S].
[7] 薛禹群,朱学愚. 地下水动力学[M]. 北京:地质出版社,1979.

(收稿日期:2014 - 09 - 03 编辑:刘晓艳)

河海大学学报:自然科学版,2011,39(4):436-443.

[2] GDJTG/TE01—2014 广东省高液限土路基修筑技术指南[S].
[3] JTGD30—2004 公路路基设计规范[S].
[4] JTG F10—2006 公路路基施工技术规范[S].
[5] 吴志刚,王保田. 高含水率黏土改良技术与改良土的力学性质研究进展[J]. 水利水电科技进展,2010,30(增刊1):166-169.
[6] 桂跃,高玉峰,宋文智,等. 高含水率疏浚淤泥生石灰材料化土闷料期内强度变化规律[J]. 河海大学学报:自然科学版,2010,38(2):185-190.
[7] 周健,池永. 颗粒流方法及 PFC2D 程序[J]. 岩土力学,2000,21(3):271-274.
[8] 李新坡,何思明. 节理岩质边坡破坏过程的 PFC2D 数值模拟分析[J]. 四川大学学报:工程科学版,2010,42(1):70-75.
[9] 孔祥臣,陈谦应,贾学明. 土石混合料振动击实试验的 PFC2D 模拟研究[J]. 重庆交通学院学报,2005,24(1):61-67.
[10] 石北啸,陈蕴生. 含水量对滑动带强度影响的细观结构试验[J]. 水利水电科技进展,2010,4(30):13-16.
[11] 廖雄华,周建,等. 黏性土室内平面应变试验的颗粒流模拟[J]. 水利学报,2012,12(12):11-17.
[12] 周建,池永. 土的工程力学性质的颗粒流模拟[J]. 固体力学学报,2004,25(4):377-382.

(收稿日期:2014 - 09 - 28 编辑:周红梅)