

## 不同初始条件下高液限土的力学特性研究

张婉璐<sup>1,2</sup>; 谢军<sup>3</sup>; 徐锴<sup>1,2</sup>; 程潇<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学岩土工程科学研究所, 南京 210098; 2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 南京 210098; 3. 广州市市政工程设计研究院, 广州 510100)

**摘要:** 通过直剪试验和无侧限抗压强度试验, 研究不同含水率和压实度条件下高液限土的抗剪强度、饱和前后的无侧限抗压强度及其变化规律等。结果表明: 高液限土在最优含水率和塑限附近, 粘聚力下降幅度明显增大; 低含水率时, 在水的作用下强度急剧降低, 含水率越大, 饱和后强度衰减越小; 低含水率、高压实时, 土体强度能完全满足路基规范要求。

**关键词:** 高液限土; 抗剪强度; 压实度; 含水率

**中图分类号:** U414

**文献标识码:** A

### Study on mechanical properties of high liquid limit soil under different initial conditions

ZHANG Wan-lu<sup>1,2</sup>; XIE Jun<sup>3</sup>; XU Kai<sup>1,2</sup>; CHENG Xiao<sup>1,2</sup>

(1. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China; 3. Guangzhou Municipal Engineering Design & Research Institute, Guangdong Guangzhou 510100, China)

**Abstract:** Shear strength and unconfined compressive strength pre and after saturation of high liquid limit soil in different water content and compactness, were studied by the direct box shear test and unconfined compression strength test. The results show that the decrease amplitude of cohesion of high liquid limit soil increase apparently nearby the optimum water content and plastic limit; the strength of soil reduces sharply on the action of water in low water content and the greater the moisture content, the smaller the strength after saturation decayed; the strength of soil can completely fit the subgrade code in the low water content and high compactness.

**Key words:** high liquid limit soil; shear strength; compactness; water content

浙江龙泉地区分布着大量不能直接用于路堤填料的高液限土, 高液限土作为一种不良地质土, 具有液限高、天然含水率高、持水能力强、强度低、水稳定性差等不良性质, 若直接用于填筑路堤, 会引起多种危害。因而, 国内外目前对于高液限土做了大量的研究<sup>[1-5]</sup>, 其中国外对于高液限土的研究主要集中在对工后稳定和变形的影响, 如 Al-lam<sup>[6]</sup>通过试验得出含水率的改变将直接影响土体的特征; A. S. AL-Homoud<sup>[7]</sup>指出在干湿循环作用下高液限土土体的强度和膨胀性会发生疲劳效应。但是, 由于高液限土种类繁多, 加之有明显的

地域性, 受到地质、气候、水文等条件差异的影响。并且, 从国内现有的大量的高液限土路基工程来看, 各个地区对高液限土的利用也都有一定的差别。

本文则主要针对高液限土的力学特性, 来研究含水率和压实度这两个路基填料的重要指标对其抗剪强度以及水敏感性的影响。而目前针对高液限土的水稳性、抗剪强度指标及其变化规律的研究比较少<sup>[8-10]</sup>, 所以确定抗剪强度对于研究路基稳定性、边坡稳定性具有重要的意义。

### 1 试验内容

试验用土取自浙江龙泉至福建浦城高速公路具有代表性的 K15 + 780 断面右侧边坡, 取土深度为 3 m。土体含水率 35.2%, 孔隙比 1.12, 最优含水率 21.8%, 最大干密度 1.69 g/cm<sup>3</sup>, 18.2%。

#### 1.1 直剪试验

高液限土的制样干密度为 1.56 g/cm<sup>3</sup>, 按 16%、19%、22%、24%、26%、28%、30% 7 种含水率制备 7 组试样, 每组 4 个样, 上覆压力分别为 100、200、300、400 kPa。将制备好的试样, 分别在不同的垂直压力下, 施加水平剪应力, 求得破坏时的剪切应力。直剪试验选用南京土壤仪器厂生产的 ZJ 型应变控制式直剪仪, 试验结果如表 1 所示。

#### 1.2 无侧限抗压试验

针对不同含水率、不同压实度的高液限土进行无侧限抗压强度试验, 设计 88%、90%、93%、95% 四种压实度, 含水率分别为 18%、20%、22%、24%、26%、28%、30%。

#### 1.3 饱和前后无侧限抗压强度试验

设计 17%、20%、24%、26%、28%、31% 6 种不同含水率, 按 93% 压实度, 利用三轴对开膜制作直径 39.1 mm、高 80 mm 的试样。试验步骤: 对于饱和前的无侧限抗压强度试验, 将击实后的试样从对开膜中取出, 放入密封塑料袋内, 静置一昼夜后进行测试; 对于饱和后的无侧限抗压强度试验, 将击实后的试样连同对开膜放入饱和器内, 抽气饱和 12 h 后进行强度测试。

表 1 不同含水率下对应的抗剪强度指标

Tab. 1 Shear strength index under different water content

含水率/%	16	19	22	24	26	28	30
粘聚力 /kPa	104.6	89.3	58.7	53.8	43.4	19.0	12.4
摩擦角 /°	36.1	34.8	30.7	25.5	24.0	21.4	22.5

### 2 试验结果与分析

#### 2.1 含水率对抗剪强度的影响

图 1 给出了高液限土抗剪强度与含水率的关系, 可知, 高液限土的抗剪强度随着含水率的增加呈阶段性变化, 低含水率时 (16% ~ 19%) 两条包

线相近, 强度下降缓慢; 19% 含水率接近最优含水率, 含水率从 19% 增加至 22%, 土颗粒之间的胶结物质开始迅速溶解, 抗剪强度急剧降低; 26% 含水率是一关键点, 该含水率接近高液限土的塑限而且饱和度较高, 随着含水率进一步增加, 孔隙水压力急剧降低引起抗剪强度大幅降低, 而含水率超过 28% 后, 土体接近饱和, 含水率对强度的影响几乎为零。抗剪强度的表达式为:

$$\tau = \begin{cases} 462.66e^{-9.1\omega} + \sigma \tan(55.91 - 119\omega), & 16\% < \omega < 26\% \\ 503329e^{-36.1\omega} + \sigma \tan(55.91 - 119\omega), & 26\% < \omega < 30\% \end{cases}$$

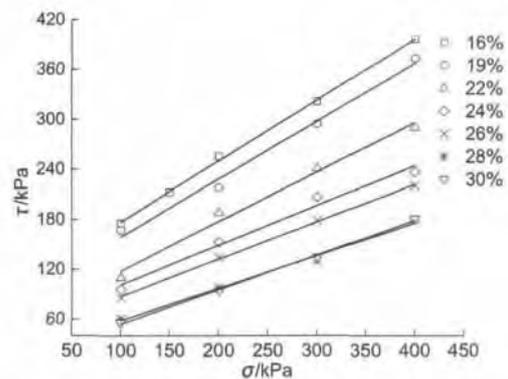


图 1 不同含水率下的抗剪强度包线

Fig. 1 Shear strength envelope under different water content

#### 2.2 含水率与粘聚力和内摩擦角的关系

现有的文献资料中对粘聚力多采用指数拟合<sup>[8-10]</sup>, 本文也将粘聚力取对数值进行拟合, 记为  $1nc$ , 见图 2。可以很明显看出, 取对数后的粘聚力值  $1nc$  与含水率  $\omega$  的拟合结果相关性较高。并且粘聚力随着含水率不断减小, 且大约含水率在 26% 时, 减小幅度陡然增大, 是因为: 粘性土的粘聚力主要受结合水膜、颗粒间胶结物以及毛细水作用影响<sup>[8]</sup>。低含水率时土粒间距较小, 颗粒间的水膜连结作用强, 土体粘聚力大, 而且 26% 是塑限含水率, 也就是土体可塑状态与半固体状态的临界点, 因此塑限含水率以上一定范围内土体强度迅速下降。

进行回归分析, 得到如下关系:

$$c = 462.66e^{-9.1\omega}, 16\% < \omega < 26\%$$

$$c = 503329e^{-36.1\omega}, 26\% < \omega < 30\%$$

土体的内摩擦角随着含水率的变化如图 3 所示, 其随着含水率的增大而减小, 含水率介于 16% ~ 30% 之间时二者呈负线性相关, 内摩擦角在 36°

~21°范围内变化,且该范围比较小。根据非饱和土原理可知,基质吸力与含水率成反比关系,含水率越大,毛细水现象越弱,负孔隙水压力逐渐消失,由毛细水压力所引起的摩擦阻力也越小,导致内摩擦角降低。

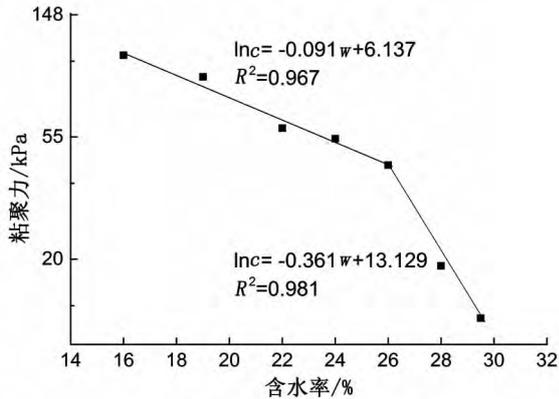


图2 Inc与含水率关系

Fig.2 Relationship between Inc and water content

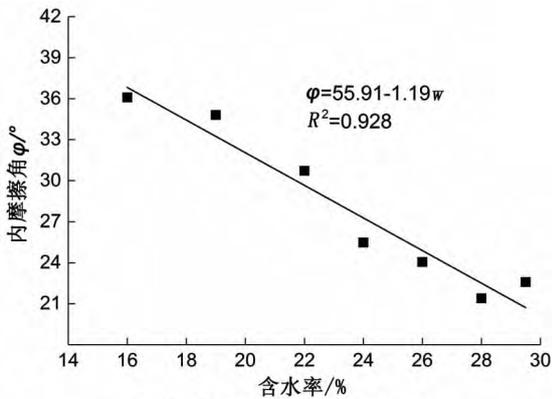


图3 内摩擦角与含水率关系

Fig.3 Relationship between internal friction angle and water content

2.3 含水率和压实度对无侧限抗压强度的影响

图4、5 显示了含水率、压实度与无侧限抗压强度的关系,可以看出:

1) 高液限土的无侧限抗压强度整体上随着含水率的增加而下降,而且随着压实度的增加,这种变化越明显。低含水率、高压实时,土体具有较高的强度,95% 压实度下,18% 含水率的试样  $qu$  高达 1 MPa,20% 含水率时  $qu$  为 0.8 Mpa。

2) 压实度低于 95% 时,不同含水率下高液限土的  $qu$  均低于 0.7 MPa,特别是含水率大于 26% 时,强度不到 0.5 MPa,土体抵抗变形的能力严重下降。这说明低压实度或较高含水率的高液限土均不满足公路路基规范要求。

3) 压实度对高液限土的强度影响显著,压实度越大,土体结构排列越紧密,抗剪强度越高。含水率越低,压实度对无侧限抗压强度的影响越明显。18% 含水率时,88% 压实度对应的  $qu$  为 0.44 MPa,压实度提高至 90% 时  $qu$  提高了 35%,93% 压实度时提高了 52%,95% 压实度时提高了 135%。这说明了低含水率时,压实度越大,无侧限抗压强度与压实度的关系曲线越陡。如果高液限土在较干的状态下填筑,适当地提高压实度效果较好。

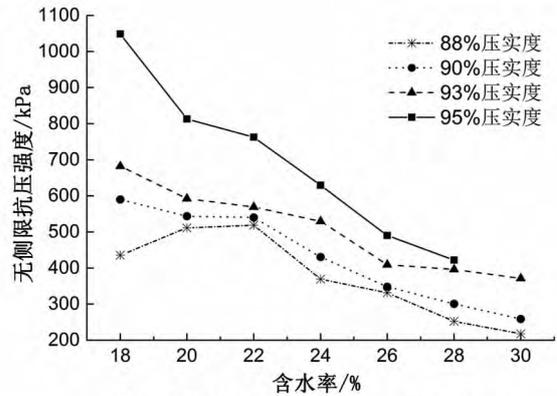


图4 含水率与无侧限抗压强度关系

Fig.4 Relationship between unconfined compressive strength and water content

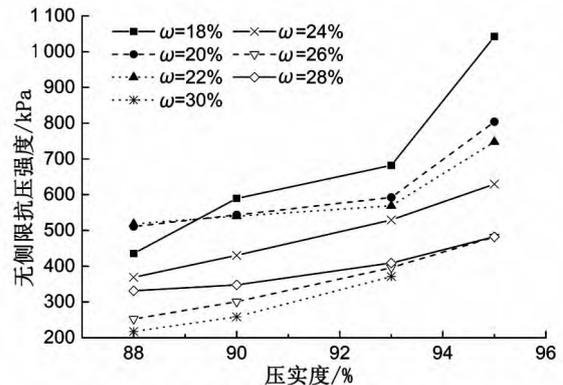


图5 压实度与无侧限抗压强度关系

Fig.5 Relationship between compactness and water content

2.4 含水率对饱和前后无侧限抗压强度的影响

不同含水率下高液限土饱和前后的无侧限抗压强度及其衰减率见表2、图6,图表中不同初始含水率对应试样不同的初始状态。

可以看出,高液限土浸水饱和后强度下降,且根据其衰减率很明显的发现饱和后  $qu$  受初始状态的影响较大,随着初始状态含水率的增大,其饱和前后  $qu$  衰减率不断减小,如 17% 含水率的试样

饱和后衰减率为 94% ,24% 含水率时衰减率为 76% 。而在 31% 含水率的试样饱和后强度出现增加、衰减率出现负值,这主要是由于 31% 含水率时接近饱和,水很难再进入土体的孔隙内。

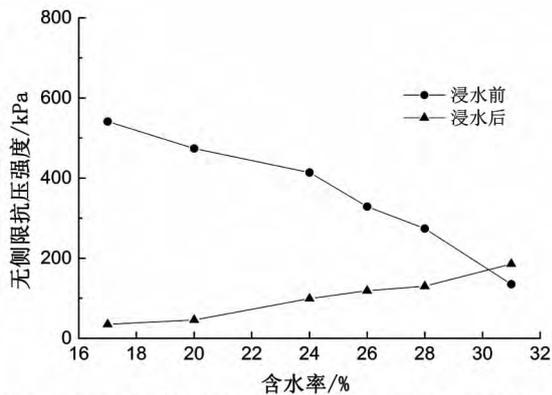


图6 饱和前后饱和前后含水率与无侧限抗压强度关系

Fig. 6 Relationship between unconfined compressive strength and water content pre and after saturation

### 3 结论

1) 较高压实度下,随着含水率的增加,土体由脆性破坏逐渐转化成塑性破坏,抗剪强度呈阶段性变化,含水率在最优含水率和塑限附近,强度包线间距明显增大。

2) 通过直剪试验得出,粘聚力与含水率呈指数负相关性,摩擦角与含水率呈线性负相关性。受结合水膜厚度、胶结物质、毛细水作用等因素的影响,在最优含水率和塑限附近,粘聚力下降幅度明显增大。

3) 含水率和压实度对高液限土的无侧限抗压强度  $q_u$  有着显著的影响。低含水率、高压实度时,土体强度能完全满足路基规范要求。同压实度下  $q_u$  与含水率呈线性负相关性;同含水率下,

$q_u$  与压实度成正比,且含水率越大时,强度随压实度变化越显著。

4) 高液限土的水敏感性强,不同含水率下,饱和前后无侧限抗压强度变化明显。低含水率时,在水的作用下强度急剧降低,含水率越大,饱和后强度衰减越小。

### 参考文献:

- [1] 杨书燕. 高液限粘土微结构分析与强度机理的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2003.
- [2] 刘银生. 高液限粘土适于直接填筑分类指标研究[J]. 中南公路工程, 2003(1): 59-62.
- [3] 容玲聪, 刘银生, 赵纯健, 等. 高液限土路堤纵向裂缝形成分析[J]. 公路, 2003(11): 142-144.
- [4] 朱勇, 邓百洪, 方建勤, 等. 高速公路路堤高液限土的变化机理及工程处理方法的研究[J]. 工程建设, 2006, 4(2): 22-25.
- [5] 傅丹霞, 鲁厚玉. 高液限高含水弱膨胀土填料的试验研究[J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2003, 6(3): 222-225.
- [6] ALLAM. Effect of wetting and drying in shear strength[J]. Geotech. Engrg. ASCE 1981, 107(4): 681-687.
- [7] A S AL-HOMOUD. Cyclic swelling behavior of clays[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995(7): 562-565.
- [8] 孔令伟. 荆门膨胀土的水稳性及其力学效应[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 727-731.
- [9] 刘顺青. 高液限土和红黏土的水敏感性研究[J]. 深圳大学学报: 理工版, 2013, 30(1): 78-82.
- [10] 胡昕. 高液限土和煤系土抗剪强度的水敏感性研究[J]. 四川大学学报, 2010, 42(1): 54-58.

(责任编辑 王利君)