

文章编号:1672-9331(2021)02-0026-07

基于含水率的重塑低液限黏土抗剪 强度关系模型试验

唐 凛¹, 杨晓松¹, 查旭东², 周光宇², 赵 宇³, 江 磊³

(1. 安徽省交通控股集团有限公司 养护管理部, 安徽 合肥 230088; 2. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 3. 安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司, 安徽 合肥 230088)

摘 要: 为了探究含水率对路基填料抗剪性能的影响, 以安徽省境内大别山区 G35 济广高速公路岳潜段典型重塑低液限黏土填料为研究对象, 采用室内直剪试验分析了不同含水率和干密度条件下该土样抗剪强度及强度参数的变化规律。试验结果表明: 含水率的增大可减小该土样的抗剪强度、黏聚力和内摩擦角, 且含水率对黏聚力的影响明显大于其对内摩擦角的影响。回归分析表明: 不同干密度下内摩擦角与含水率之间呈线性负相关关系, 而黏聚力与含水率之间呈自然指数函数负相关关系, 同时两组关系模型的回归参数与干密度之间也呈显著的线性相关性, 由此获得以含水率、干密度和垂直压力表征的摩尔—库伦抗剪强度关系模型。经验证该模型预测精度较高, 可为降雨入渗对该地区营运路堤边坡稳定性的影响分析提供抗剪强度参数衰变模型。

关键词: 低液限黏土; 直剪试验; 含水率; 抗剪强度; 黏聚力; 内摩擦角; 关系模型

中图分类号: U416.1⁺2

文献标志码: A

Experiment on shear strength relation model of remolded low liquid limit clay based on water content

TANG Lin¹, YANG Xiao-song¹, ZHA Xu-dong²,
ZHOU Guang-yu², ZHAO Yu³, JIANG Lei³

(1. Maintenance Management Department, Anhui Transportation Holding Group Co., Ltd., Hefei 230088, China;
2. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 3. Anhui Transport Consulting & Design Institute Co., Ltd., Hefei 230088, China)

Abstract: In order to explore the influence of water content on the shear behavior of sub-grade filler, the typical filler of remolded low liquid limit clay was taken as the research object, which was obtained from Yue-Qian Section of G35 Ji-Guang Expressway in Dabie Mountain Area of Anhui Province. The direct shear test in laboratory was carried out to analyze the change laws of shear strengths and strength parameters of the soil samples with different water content and dry densities. The test results show that the increase of water content can reduce the shear strengths, cohesion force and internal friction angles of the soil samples, and the influence of water content on the cohesion force is obviously greater than

收稿日期: 2020-11-19

基金项目: 安徽省交通运输科技进步计划项目(201839); 安徽省交通控股集团有限公司科技项目(AHJK-养-2019-0001); 国家自然科学基金资助项目(51878077)

通讯作者: 唐 凛(1970—), 女, 高级工程师, 主要从事高速公路养护管理方面的研究。E-mail: 264343955@qq.com

that on the internal friction angles. The regression analysis indicates that there is a linear negative correlation between internal friction angles and water content with different dry densities, while the negative correlation between cohesion force and water content is a natural exponential function. Meanwhile, there are also significant linear correlations between the regression parameters and the dry densities in the two groups of relation models. Thus, the relation model of Mohr-Coulomb shear strength was obtained expressed by water content, dry density and vertical pressure. It is verified that the model has high prediction accuracy, and it can provide the decay model of shear strength parameters for the influence analysis of rainfall infiltration on slope stability of operating embankment in the area.

Key words: low liquid limit clay; direct shear test; water content; shear strength; cohesion force; internal friction angle; relation model

降雨入渗是诱发边坡失稳最重要的自然因素之一,国内外学者针对坡体含水率变化导致的失稳土体抗剪强度及强度参数的衰变问题进行了大量的理论分析与试验研究^[1-4]。Cokca 等^[5]通过直剪和热电偶湿度试验研究了压实非饱和黏土的基质吸力、内摩擦角和黏聚力在最佳含水率情况下干侧和湿侧的变化规律;Al Aqtash 等^[6]采用不同含水率的直剪试验确定了土坯土的表观抗剪强度参数及其变化规律;Kuriakose 等^[7]提出采用含水率与液限之比(water content ratio, WCR)对饱和黏土的抗剪强度进行预测;Shimobe 等^[8]研究发现只有在液性指数为 0.8~1.3 时,重塑和原状黏土的不排水抗剪强度、液性指数和 WCR 之间才具有良好的相关性;Park 等^[9]通过剪切试验和数值模拟建立了黏土不排水抗剪强度与含水率的非线性预测模型;李金玉等^[10]结合理论和三轴剪切试验分析了在含水率变化的情况下,非饱和土抗剪强度指标——黏聚力和内摩擦角与基质吸力的相关关系;黄琨等^[11]通过直剪试验研究了重塑和原状非饱和粉砂土抗剪强度与含水率的关系;吕海波等^[12]采用快剪试验研究了 3 种成样方式下非饱和膨胀土抗剪强度与含水率的关系;陈鸿宾等^[13]、蒲黍條^[14]和罗文俊等^[15]研究了不同地区红黏土在不同含水率和干密度及不同状态下抗剪强度的变化规律;许旭堂等^[16]、张浪等^[17]和宋永山等^[18]研究了各种残积土抗剪强度的影响因素及其与抗剪强度的关系;尹松等^[19]分析了冻融循环及含水率对压实粉土抗剪性能的影响;王月春等^[20]通过

扫描电镜、基本土性和直剪试验研究了干湿循环作用下吸附结合水含量对高液限土抗剪强度的影响。

综上可知,含水率变化对非饱和土体的抗剪强度及强度参数影响显著,且当土质、土性不同时,影响规律也有所不同。为此,本研究依托安徽省境内大别山区 G35 济广(济南至广州)高速公路岳潜(岳西至潜山)段上行(K762+250)~(K762+400)处土质路堤边坡养护工程^[21],以该边坡的典型路堤填料为研究对象,通过制备不同含水率和干密度的重塑非饱和土试样,采用室内直剪试验分析含水率对该土样抗剪强度及强度参数的影响规律,并建立相应的关系模型,以期降雨入渗作用下山区营运高速公路路堤边坡稳定性的衰变分析提供参考依据。

1 试验方案

1.1 基本土性试验

试验所用土样为依托工程所在地(大别山区)的典型路堤填料,其基本性能指标如表 1 所示,相应的颗粒级配曲线见图 1。据土颗粒组成、界限含水率及塑性图可判定该土样为低液限黏土。

表 1 土样的基本性能指标

Table 1 Basic performance indexes of soil sample

| 液限 | 塑限 | 塑性指数 | 最佳含水率 | 最大干密度 |
|-----------------|-----------------|------------|-----------------|--------------------------------------|
| $\omega_L / \%$ | $\omega_P / \%$ | $I_P / \%$ | $\omega_0 / \%$ | $\rho_{d, \max} / (g \cdot cm^{-3})$ |
| 31.7 | 19.6 | 12.1 | 15.3 | 1.89 |

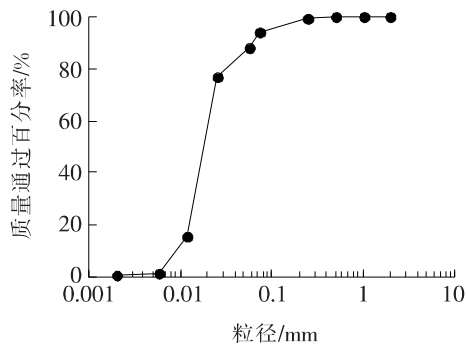


图1 土样颗粒级配曲线

Fig. 1 Grading curve of soil sample

1.2 直剪试验方案

为了分析该土样抗剪强度及强度参数随含水率的变化规律,采用压样法制备直径为 61.8 mm、高度为 20 mm 的圆柱体试样,并对其进行直剪试验。根据表 1 中土样塑限和最佳含水率的测试结果,按 4.0% 的间隔设定 4 种含水率试验方案,分别为 7.3%, 11.3%, 15.3% 和 19.3%。根据最大干密度的测试结果及现场压实度的衰变情况,干密度的取值为 1.65~1.85 g/cm³,并按 0.05 g/cm³ 的间隔设定 1.65, 1.70, 1.75, 1.80, 1.85 g/cm³ 5 种干密度试验方案。制备 4 种含水率、5 种干密度的圆柱体试样,共计 20 组,每组设定 100, 200, 300, 400 kPa 4 种大小的垂直压力,在每种垂直压力下进行一次平行试验。因此,共制备了 160 个圆柱体直剪试样。

2 试验结果分析

2.1 含水率对抗剪强度的影响

根据直剪试验结果,可得到不同垂直压力 p 及不同干密度 ρ_d 条件下的土样抗剪强度 S 与含水率 ω 的关系曲线,如图 2 所示。

从图 2 可以看出,在不同垂直压力作用下任一干密度土样的抗剪强度均随含水率的增大而逐渐减小,表明含水率的增大会减小土样的抗剪强度,而且垂直压力越大,降幅越明显。这主要是因为对于非饱和黏土而言,当含水率较低时,土颗粒表面的结合水膜较薄,使得土颗粒之间的黏结和咬合较牢固,不容易发生剪切破坏;当含水率增大时,土颗粒表面的结合水膜变厚且自由水增多,促使胶结物质溶解,导致土颗粒间的结合力和摩擦力减小,润滑作用增强,从而使土样的抗剪强度减小。

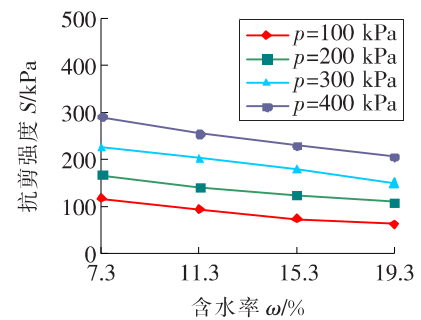
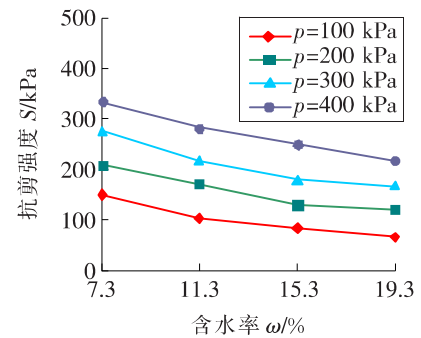
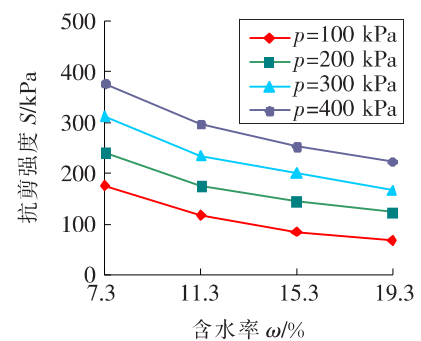
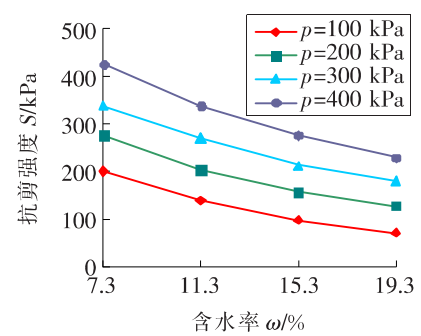
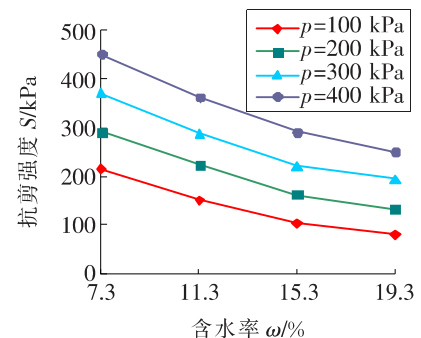
(a) $\rho_d=1.65 \text{ g/cm}^3$ (b) $\rho_d=1.70 \text{ g/cm}^3$ (c) $\rho_d=1.75 \text{ g/cm}^3$ (d) $\rho_d=1.80 \text{ g/cm}^3$ (e) $\rho_d=1.85 \text{ g/cm}^3$

图2 不同干密度土样抗剪强度与含水率的关系曲线

Fig. 2 Relationship curves between shear strengths and water content of soil samples with different dry densities

2.2 含水率对抗剪强度参数的影响

根据直剪试验结果,可得到不同干密度土样黏聚力和内摩擦角随含水率的变化曲线,如图 3 所示。

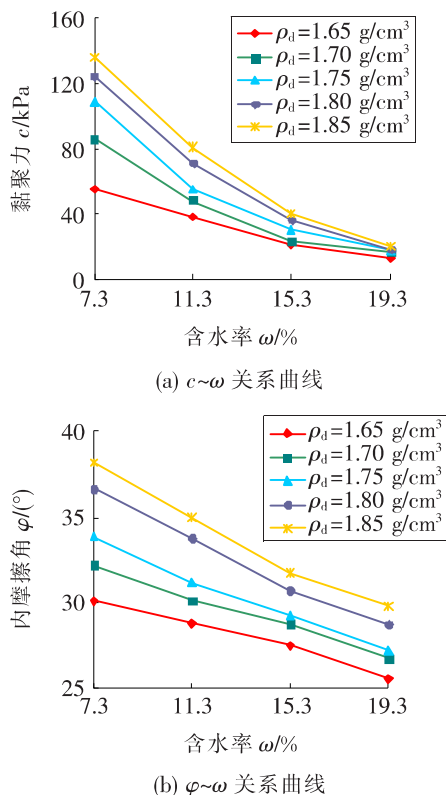


图 3 土样抗剪强度参数与含水率的关系曲线

Fig. 3 Relationship curves between shear strength parameters and water content of soil samples

分析图 3 可知:① 与抗剪强度变化规律相同,在任一干密度下,随着含水率的增大,土样的黏聚力和内摩擦角均呈现减小的变化趋势,表明含水率的增大使土体的抗剪强度参数值有所减小。② 在试验含水率范围内,当含水率由 7.3% 增大至 19.3% 时,干密度为 1.65 g/cm^3 土样的黏聚力从 55.2 kPa 降至 13.5 kPa,减小了 75.5%;内摩擦角从 30.1° 降至 25.5° ,减小了 15.3%。干密度为 1.85 g/cm^3 土样的黏聚力和内摩擦角分别减小了 85.4% 和 22.0%。在其他干密度的情况下也有类似结果,显示黏聚力的减小幅度明显大于内摩擦角的减小幅度,表明在干密度相同时,含水率对土样黏聚力的影响程度要明显大于其对内摩擦角的影响程度。这是因为随着含水率的增大,非饱和黏土颗粒之间的自由水增多,其产生的润滑作用在更大程度上削弱了土样的黏聚力。

3 抗剪强度关系模型的建立

由上述分析可知,该重塑低液限黏土土样的抗剪强度及强度参数随含水率和干密度的变化呈现出一定的变化规律,为此采用回归分析建立黏聚力 c 、内摩擦角 φ 与含水率 ω 、干密度 ρ_d 之间的回归模型,从而得出基于含水率变化的抗剪强度关系模型。

3.1 内摩擦角与含水率的关系分析

从图 3(b) 土样内摩擦角与含水率的关系曲线可以看出,在不同干密度下,随着含水率的增大,内摩擦角均呈现线性减小的变化趋势,所以内摩擦角 φ 与含水率 ω 之间的线性回归方程可表示为:

$$\varphi = a_1 \omega + a_0 \quad (1)$$

式中: a_1 和 a_0 分别为回归系数和回归常数。

由此,可得到不同干密度 ρ_d 下内摩擦角 φ 与含水率 ω 之间的回归模型,如表 2 所示。

表 2 不同干密度下内摩擦角与含水率之间的回归模型

Table 2 Regression models between internal friction angles and water content with different dry densities

| 干密度 $\rho_d / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ | a_1 | a_0 | 判定系数 R^2 |
|--|--------|--------|------------|
| 1.65 | -0.376 | 32.990 | 0.990 |
| 1.70 | -0.436 | 35.229 | 0.996 |
| 1.75 | -0.547 | 37.633 | 0.993 |
| 1.80 | -0.664 | 41.281 | 0.991 |
| 1.85 | -0.706 | 43.049 | 0.986 |

从表 2 可以看出,内摩擦角与含水率回归模型的判定系数均大于 0.98,表明二者之间具有显著的线性负相关性。同时,从回归参数 a_1 和 a_0 随干密度的变化曲线(见图 4)可以看出, a_1 和 a_0 与干密度之间总体呈线性关系,且 a_1 的绝对值随干密度的增大而逐渐增大,说明干密度越大,内摩擦角随含水率的变化越显著。

由此可得两个回归参数与干密度 ρ_d 之间的线性相关关系为:

$$a_1 = -1.776\rho_d + 2.562, R^2 = 0.979 \quad (2)$$

$$a_0 = 52.340\rho_d - 53.559, R^2 = 0.990 \quad (3)$$

式(2)和式(3)所表示的两个线性相关关系的判定系数均大于 0.97,说明相关性显著。据此,将

式(2)和式(3)代入式(1)中,可得到土样内摩擦角 φ 与含水率 ω 、干密度 ρ_d 之间的关系模型为:

$$\varphi = (-1.776\rho_d + 2.562)\omega + (52.340\rho_d - 53.559) \quad (4)$$

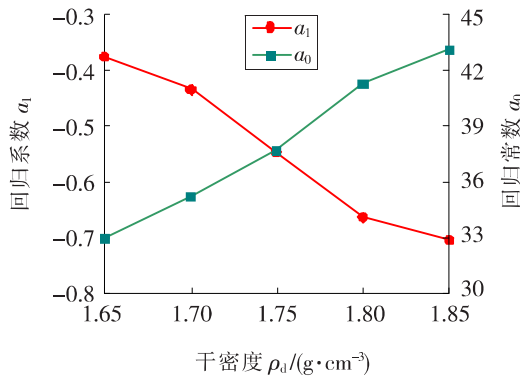


图4 回归参数 a_1 和 a_0 与土样干密度的关系曲线

Fig. 4 Relationship curves between regression parameters of a_1 & a_0 and dry densities of soil samples

3.2 黏聚力与含水率的关系分析

研究表明,黏聚力与含水率的关系要比内摩擦角与含水率的关系复杂得多,且不同的土样也会有很大的差异。从图3(a)土样黏聚力与含水率的关系曲线可以看出,二者之间呈非线性关系。进一步通过回归分析,发现二者之间的关系可用自然指数函数表示,即:

$$c = b_0 e^{b_1 \omega} \quad (5)$$

式中: b_1 和 b_0 分别为回归系数和回归常数。

由此,可得到不同干密度 ρ_d 下黏聚力 c 与含水率 ω 之间的回归模型,如表3所示。

表3 不同干密度下黏聚力与含水率之间的回归模型

Table 3 Regression models between cohesion force and water content with different dry densities

| 干密度 $\rho_d / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ | b_1 | b_0 | 判定系数 R^2 |
|--|--------|---------|------------|
| 1.65 | -0.119 | 137.280 | 0.994 |
| 1.70 | -0.137 | 225.716 | 0.982 |
| 1.75 | -0.150 | 314.150 | 0.997 |
| 1.80 | -0.159 | 412.143 | 0.998 |
| 1.85 | -0.162 | 469.615 | 0.994 |

从表3可以看出,各回归模型的判定系数均大于0.98,表明黏聚力与含水率之间具有显著的自然指数函数负相关性。类似地,从回归参数 b_1 和 b_0 随干密度的变化曲线(见图5)可以看出,随着干密度的增大, b_1 和 b_0 总体呈线性变化趋势,且 b_1 的绝对值逐渐增大,说明干密度越大,黏聚力对含水率的变化越敏感。

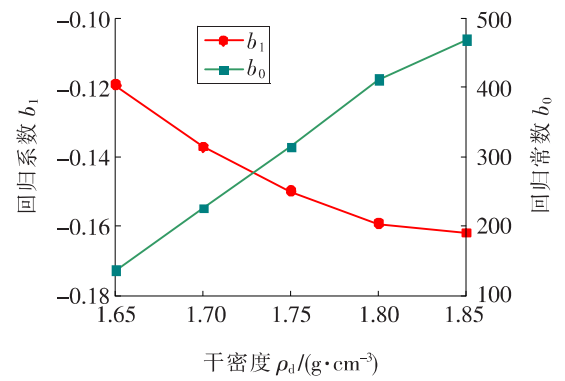


图5 回归参数 b_1 和 b_0 与土样干密度的关系曲线

Fig. 5 Relationship curves between regression parameters of b_1 & b_0 and dry densities of soil samples

由此,可得到两个回归参数与干密度 ρ_d 之间的相关关系为:

$$b_1 = -0.216\rho_d + 0.233, R^2 = 0.934 \quad (6)$$

$$b_0 = 1\,702.194\rho_d - 2\,667.059, R^2 = 0.994 \quad (7)$$

式(6)和式(7)所表示的两个相关关系的判定系数均大于0.93,说明相关性显著。据此,将式(6)和式(7)代入式(5)中,可得到黏聚力 c 与含水率 ω 、干密度 ρ_d 之间的关系模型为:

$$c = (1\,702.194\rho_d - 2\,667.059)e^{(-0.216\rho_d + 0.233)\omega} \quad (8)$$

3.3 摩尔—库伦抗剪强度模型的建立

根据摩尔—库伦准则,将式(4)和式(8)代入土体抗剪强度公式,可得到土样抗剪强度 τ_f 与含水率 ω 、干密度 ρ_d 之间的关系模型为:

$$\tau_f = \sigma \tan \varphi + c = \sigma \tan [(-1.776\rho_d + 2.562)\omega + (52.340\rho_d - 53.559)] + (1\,702.194\rho_d - 2\,667.059)e^{(-0.216\rho_d + 0.233)\omega} \quad (9)$$

式中: τ_f 为抗剪强度, kPa; σ 为垂直压力, kPa; φ 为内摩擦角, $^\circ$; c 为黏聚力, kPa; ρ_d 为干密度, g/cm^3 ; ω 为含水率, %。

式(9)即为依托工程路堤填料土体的抗剪强度与含水率、干密度和垂直压力之间的关系模型。由此,可通过实测坡体参数用该模型预测土体的抗剪强度。为了验证式(9)的预测精度,重新制备5个不同含水率和干密度组合的试件,在不同垂直压力作用下对其进行直剪试验。抗剪强度的预测值 τ_f 和实测值 S 之间的相对误差 e 可按式计算:

$$e = \frac{\tau_f - S}{S} \times 100\% \quad (10)$$

土样抗剪强度验证试验结果见表4。

表 4 土样抗剪强度验证试验结果

Table 4 Verification test results of shear strengths of soil samples

| 干密度 ρ_d / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) | 含水率 $\omega/\%$ | 垂直压力 p/kPa | 实测抗剪强 度 S/kPa | 预测抗剪强 度 τ_f/kPa | 相对误 差 $e/\%$ |
|---|--------------------|------------------------|---------------------------|--------------------------------|-----------------|
| 1.85 | 8.5 | 50 | 153.6 | 155.3 | 1.1 |
| 1.81 | 11.0 | 150 | 178.1 | 175.1 | -1.7 |
| 1.78 | 13.5 | 250 | 193.4 | 199.4 | 3.1 |
| 1.74 | 16.0 | 350 | 219.2 | 224.2 | 2.3 |
| 1.70 | 18.5 | 450 | 252.3 | 248.1 | -1.7 |

从表 4 可以看出,抗剪强度预测值与实测值之间相对误差的绝对值均小于 5%,且平均相对误差的绝对值小于 1%。说明该关系模型的预测精度较高,可满足工程应用的要求。同时,将式(9)中含水率 ω 转换为含水率比、干密度 ρ_d 转换为压实度进行无量纲化处理,可扩大其适用范围。

4 结论

选取安徽省境内大别山区 G35 济广高速公路岳潜段典型低液限黏土路基填料为研究对象,对所制备的 4 种含水率和 5 种干密度的试样进行了直剪试验,分析了该重塑土样抗剪强度及强度参数随含水率和干密度的变化规律,建立了相应的关系模型,并得到如下结论:

1) 在干密度相同的条件下,随着含水率的增大,所制备土样的抗剪强度、黏聚力和内摩擦角逐渐减小,且垂直压力越大,减小幅度越明显,同时含水率对黏聚力的影响比其对内摩擦角的影响更大。据此,分别建立了内摩擦角与含水率之间的线性负相关模型、黏聚力与含水率之间的自然指数函数负相关模型,且相关性显著,说明相应的关系模型可以很好地表征抗剪强度参数与含水率之间的变化关系。

2) 随着干密度的增大,所制备土样内摩擦角、黏聚力与含水率模型的回归参数的绝对值均逐渐增大,总体呈线性变化趋势,其中回归系数呈线性递减,而回归常数呈线性递增,说明干密度越大,抗剪强度参数对含水率的变化越敏感,由此得到了土样抗剪强度参数与含水率、干密度之间的关系模型。

3) 对获得的以含水率、干密度和垂直压力表征的摩尔—库伦土样抗剪强度关系模型进行试验

验证和相对误差对比分析,结果表明该模型预测精度较高,可用于预测依托工程路堤土体的抗剪强度,并可用于分析降雨入渗对该种土质营运路堤边坡稳定性衰变的影响。

〔参考文献〕

- [1] 李宁,刘冠麟,陈有亮,等. 降雨诱发浅层滑坡影响因素的解析分析[J]. 上海理工大学学报,2018,40(1): 65-75.
LI Ning, LIU Guan-lin, CHEN You-liang, et al. Analytic analysis on the influencing factors of rainfall-induced shallow landslide[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2018, 40(1): 65-75.
- [2] 王保林,何忠明. 降雨入渗条件下多层顺层软弱夹层土坡稳定性分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2018,15(1):8-13,29.
WANG Bao-lin, HE Zhong-ming. Stability analysis of multi-strata weak intercalation layer under rainfall infiltration condition[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology(Natural Science), 2018, 15(1): 8-13, 29.
- [3] 李荣建,白维仕,王治军,等. 降雨边坡试验研究进展及关键问题[J]. 科技导报,2019,37(14):59-65.
LI Rong-jian, BAI Wei-shi, WANG Zhi-jun, et al. Research progress and key problems of rainfall slope experiment[J]. Science & Technology Review, 2019, 37(14): 59-65.
- [4] 向延虎,江威. 降雨条件下含裂隙坡积土边坡的渗流特性研究[J]. 交通科学与工程,2020,36(2):29-34,39.
XIANG Yan-hu, JIANG Wei. Research on seepage characteristics of fissured soil slope under rainfall condition[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(2): 29-34, 39.
- [5] Cokca E, Erol O, Armangil F. Effects of compaction moisture content on the shear strength of an unsaturated clay[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2004, 22: 285-297.
- [6] Al Aqtash U, Bandini P. Prediction of unsaturated shear strength of an adobe soil from the soil-water characteristic curve[J]. Construction and Building Materials, 2015, 98: 892-899.
- [7] Kuriakose B, Abraham B M, Sridharan A, et al. Water content ratio: an effective substitute for liquidity index for prediction of shear strength of clays[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2017, 35: 1 577-1 586.

- [8] Shimobe S, Spagnoli G. Relationships between undrained shear strength, liquidity index, and water content ratio of clays[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79:4 817-4 828.
- [9] Park S S, Doan N P, Jeong S W. Numerical simulation of water content dependent undrained shear strength of clays [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2020, 38(5): 621-632.
- [10] 李金玉, 杨庆, 孟长江. 非饱和抗剪强度指标 c, φ 值与含水率 w 的关系[J]. 岩土工程技术, 2010, 24(5): 243-247.
LI Jin-yu, YANG Qing, MENG Chang-jiang. Relationship between water content w and unsaturated soil strength indices c and φ [J]. Geotechnical Engineering Technique, 2010, 24(5): 243-247.
- [11] 黄琨, 万军伟, 陈刚, 等. 非饱和土的抗剪强度与含水率关系的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2 600-2 604.
HUANG Kun, WAN Jun-wei, CHEN Gang, et al. Testing study of relationship between water content and shear strength of unsaturated soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(9): 2 600-2 604.
- [12] 吕海波, 董均贵, 吴畏. 不同成样方式下含水率与非饱和膨胀土抗剪强度的关系[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2018, 37(4): 123-129.
LYU Hai-bo, DONG Jun-gui, WU Wei. Relations between water content and shear strength of unsaturated expansive soils based on different sample-preparing method[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science), 2018, 37(4): 123-129.
- [13] 陈鸿宾, 陈学军, 齐运来, 等. 干密度与含水率对重塑红黏土抗剪强度参数影响研究[J]. 工程地质学报, 2019, 27(5): 1 035-1 040.
CHEN Hong-bin, CHEN Xue-jun, QI Yun-lai, et al. Effects of dry density and moisture content on shear strength parameters of remolded red clay soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(5): 1 035-1 040.
- [14] 蒲黍條. 含水率对不同状态红黏土抗剪强度的影响研究[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2019, 36(4): 93-100.
PU Shu-tao. Effect of water content on the shear strength of red clay in different plasticity[J]. Journal of Guizhou University(Natural Sciences), 2019, 36(4): 93-100.
- [15] 罗文俊, 王海洋, 刘焕强, 等. 不同含水率红黏土的抗剪强度试验研究[J]. 华东交通大学学报, 2020, 37(1): 119-126.
LUO Wen-jun, WANG Hai-yang, LIU Huan-qiang, et al. Experimental study on shear strength of red clay with different moisture content [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2020, 37(1): 119-126.
- [16] 许旭堂, 简文彬, 柳侃. 含水率和干密度对残积土抗剪强度参数的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(2): 364-369.
XU Xu-tang, JIAN Wen-bin, LIU Kan. The influence of water content and dry density on shear strength parameters of residual soil[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(2): 364-369.
- [17] 张浪, 雷学文, 孟庆山, 等. 重塑红棕色玄武岩残积土抗剪强度特性试验研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(4): 269-272.
ZHANG Lang, LEI Xue-wen, MENG Qing-shan, et al. Reshape the basalt red brown residual soil shear strength characteristics of experimental research [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(4): 269-272.
- [18] 宋永山, 徐晓, 杨帅, 等. 含水率对黄岛地区花岗岩残积土抗剪强度的影响[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2019, 38(4): 33-40.
SONG Yong-shan, XU Xiao, YANG Shuai, et al. Influence of water content on shear strength of granite residual soil in Huangdao area[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2019, 38(4): 33-40.
- [19] 尹松, 李力, 边亚东. 冻融循环作用下压实粉土的剪切强度性能试验研究[J]. 公路工程, 2019, 44(5): 42-46, 237.
YIN Song, LI Li, BIAN Ya-dong. Experimental study on shear performance of compaction silt under frozen-thaw cycle[J]. Highway Engineering, 2019, 44(5): 42-46, 237.
- [20] 王月春, 雅成宏, 雷军伟, 等. 干湿循环下吸附结合水对高液限土抗剪强度的影响[J]. 公路与汽运, 2020(4): 70-74.
WANG Yue-chun, YA Cheng-hong, LEI Jun-wei, et al. Effect of adsorbed binding water on shear strength of high liquid limit soil under dry-wet cycles [J]. Highways & Automotive Applications, 2020(4): 70-74.
- [21] 周光宇. 考虑降雨入渗影响的山区营运高速公路土质高路堤边坡稳定性分析[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2020: 21-23.
ZHOU Guang-yu. Analysis of slope stability for high soil embankment in operating mountainous expressway considering influence of rainfall infiltration[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2020: 21-23.