

水泥改良土的拉伸强度特性及其计算方法

魏洪山, 王伟志, 徐永福, 白宇帆, 严祯强, 王浩

Tensile strength characteristics and calculation methods of the cement stabilized soil

WEI Hongshan, WANG Weizhi, XU Yongfu, BAI Yufan, YAN Zhenqiang, and WANG Hao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202202025>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

含裂隙膨胀土无侧限抗压强度特征试验研究

An experimental study of the unconfined compressive strength characteristics of the expansive soil with cracks

李关洋, 顾凯, 王翔, 施斌 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 62-70

粉煤灰基地聚物加固土的强度及抗冻融性能试验研究

Laboratory investigation on the strength and freezing-thawing resistance of fly ash based geopolymer stabilized soil

陈忠清, 朱泽威, 吕越 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 100-108

基于可靠度方法的全基质吸力段土-水特征模型研究

A study of the soil-water reliability model in the whole matric suction range

刘青灵, 简文彬, 许旭堂, 聂闻 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 92-100

考虑基质吸力的非饱和土邓肯-张统计损伤修正模型

The Duncan-Chang statistical damage correction model of unsaturated soil considering matric suction

谭维佳, 魏云杰, 王俊豪, 高敬轩 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 84-91

冻融循环作用下黄土无侧限抗压强度和微观规律的试验研究

Effect of freezing-thawing cycles on mechanical properties and microscopic mechanisms of loess

刘乐青, 张吾渝, 张丙印, 谷遇溪, 解邦龙 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 109-115

电镀场地重金属铬污染土固化率及稳定性研究

A study of the curing rate and stability of heavy metal chromium contaminated soil at electroplating sites

王露艳, 刘干斌, 周晔, 陈航, 陈斌 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 183-189



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202202025

魏洪山, 王伟志, 徐永福, 等. 水泥改良土的拉伸强度特性及其计算方法 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(6): 81-89.
WEI Hongshan, WANG Weizhi, XU Yongfu, *et al.* Tensile strength characteristics and calculation methods of the cement stabilized soil[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(6): 81-89.

水泥改良土的拉伸强度特性及其计算方法

魏洪山¹, 王伟志¹, 徐永福², 白宇帆², 严祯强¹, 王 浩¹

(1. 上海铁路枢纽工程建设指挥部, 上海 200003; 2. 上海交通大学土木工程系, 上海 200240)

摘要: 水泥改良土具有强度高、变形小、施工操作简单、质量控制容易和经济效益显著等优点, 被广泛应用于路基填筑、基坑回填、边坡防护和地基换填。水泥土裂缝影响路基工程的正常运行, 甚至可能危及铁路路基安全。因此, 铁路路基设计需要对路基填土的抗拉强度有一定程度的了解, 水泥改良土抗拉强度的确定具有重要意义。水泥改良土的抗裂性能是影响工程应用的重要因素, 拉伸强度是衡量水泥土抗裂性能的关键指标。本文基于常规无侧限压缩仪自行设计了直接测量水泥改良土拉伸强度的单轴拉伸试验方法, 系统地研究了水泥掺量(A)、龄期(t)、含水率(w)和干密度(ρ_d)对水泥改良土单轴拉伸强度(σ_t)的影响, 水泥改良土的单轴拉伸强度随水泥掺量、龄期和干密度增加而增加, 随含水率增加而减小, 建立了水泥改良土的单轴拉伸强度与 e/A (e 是水泥改良土的孔隙比)之间的指数函数关系。结合水泥改良土的无侧限抗压强度和基质吸力的测试结果, 建立了单轴拉伸强度与无侧限抗压强度和基质吸力之间的相关关系。

关键词: 水泥改良土; 钻渣; 单轴拉伸强度; 无侧限抗压强度; 基质吸力

中图分类号: TU411.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)06-0081-09

Tensile strength characteristics and calculation methods of the cement stabilized soil

WEI Hongshan¹, WANG Weizhi¹, XU Yongfu², BAI Yufan², YAN Zhenqiang¹, WANG Hao¹

(1. Shanghai Railway Key Project Construction Headquarters, Shanghai 200003, China; 2. Department of Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Cement stabilized soil has the advantages of high strength, small deformation, simple construction operation, easy quality control and remarkable economic benefits. It is widely used in subgrade filling, foundation pit backfilling, slope protection and foundation replacement. Soil-cement cracks affect the normal operation of roadbed engineering and may even endanger the safety of railway roadbed. Therefore, the design of cracks and deformation structures of railway subgrade or foundation requires a certain degree of understanding of the tensile strength of the compact-filled soil, and it is of great significance to determine the tensile strength of the cement-improved soil. The crack resistance of the cement stabilized soil is an important factor affecting engineering application. Tensile strength is the key parameter to measure the crack resistance of the cement stabilized soil. In this paper, a direct test method to measure the tensile strength of the cement stabilized soil is designed in the

收稿日期: 2022-02-16; 修订日期: 2022-03-25

投稿网址: www.swdggcdz.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1509800); 上海铁路局集团有限公司科研项目(2020150)

第一作者: 魏洪山(1977-), 男, 正高级工程师, 主要从事铁路建设管理工作。E-mail: weihongshan@163.com

通讯作者: 徐永福(1967-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事非饱和土力学和特殊土地基处理科研与教学工作。

E-mail: yongfuxu@sjtu.edu.cn

conventional unconfined compression apparatus. The effects of cement content, curing age, water content and dry density on the tensile strength of the cement stabilized soil are systematically studied. The tensile strength of the cement stabilized soil increases with the increasing cement content, curing age and dry density, and decreases with the increasing moisture content. The exponential function relationship between the tensile strength and e_t/A (e_t is the void ratio of cement stabilized soil) is established. The correlation between the tensile strength and unconfined compressive strength and matrix suction is also statistically established.

Keywords: cement stabilized soil; bored pile mud; uniaxial tensile strength; unconfined compressive strength; matric suction

水泥改良土的固化过程犹如沉积岩的造岩过程,水泥起到胶结物作用,水泥加入土中就如同硅质胶结的人工快速造岩过程,形成坚硬的水泥改良土^[1-2]。水泥改良土无侧限抗压强度的研究成果很多,如:王许诺等^[3]开展了系列冻结水泥土无侧限抗压性能室内试验研究,发现温度对水泥土抗压强度的影响显著,水泥土无侧限抗压强度随温度降低、水泥掺入比增加呈线性增大,随养护龄期增加呈对数增大。耿凯强等^[4]根据单轴压缩试验研究了砒砂岩水泥土的能量耗散与强度衰减的关系,砒砂岩水泥土单轴受压破坏过程中,破坏总能量和耗散能均呈“S”状增长,弹性应变能呈先增加后减小的“凸”状趋势发展。陈鑫等^[5]揭示了尺寸效应和加载速率效应对冻结水泥改良土力学特性的影响规律,随着高径比增加,应力-应变曲线出现明显弹性屈服点,峰后脆性增强,试样破坏形式由劈裂破坏变为单一剪切破坏,推荐试验采用高径比宜为 1.62 ~ 2.02,冻结水泥土抗压强度与加载速率的关系可用幂函数表示。

水泥改良土的拉伸强度是防治裂缝产生和衡量抗冲蚀性能的重要力学指标^[6-8]。水泥改良土的拉伸强度试验主要有土梁弯曲试验(图 1a)^[9-10]、轴向压裂试验(图 1b)^[11-12]、径向压裂试验(图 1c)^[8,13]、三轴拉伸试验(图 1d)^[14-15]和单轴拉伸试验(图 1e)^[16-18]。根据土梁弯曲试验、轴向压裂试验和径向压裂试验分别给出拉伸强度 σ_t 的计算公式为:

$$\sigma_t = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (1)$$

$$\sigma_t = \frac{2PL}{\pi Ld} \quad (2)$$

$$\sigma_t = \frac{P}{\pi(Dh - d^2)} \quad (3)$$

$$\sigma_t = \sigma_3 - \frac{P}{\pi D^2} \quad (4)$$

$$\sigma_t = \frac{P}{\pi D^2} \quad (5)$$

式中各符号意义如图 1 所示。

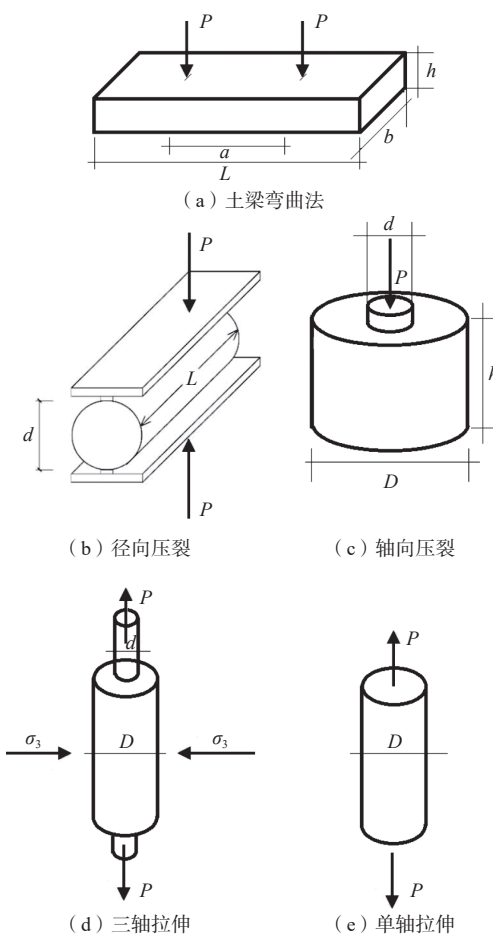


图 1 拉伸强度试验方法

Fig. 1 Method of tensile strength tests

Consoli 等^[7-8]根据径向压裂试验测量了水泥改良土的拉伸强度,建立了拉伸强度与 n/C (n 是孔隙率, C 是水泥含量)之间的指数函数关系。

土梁弯曲试验、轴向压裂试验和径向压裂试验为间接测试方法,间接测试法操作简单,但试验结果不能直接反映实际拉伸强度^[19-22]。三轴拉伸试验和单轴拉伸试验为直接测试方法,其中单轴拉伸试验结果物理意义直接明了,但拉伸仪器与土样间的连接是个

关键技术难题^[23-26]。

针对单轴拉伸试验中拉伸仪器与土样间连接难的问题,在试样制作方法上做了很多改进。David 等^[16]在拉伸试验盒里设置金属棒,保证土样与拉伸试验盒固定在一起,测量直接拉伸强度,如图 2(a)所示。Ibarra 等^[23]在柱状土样中部用圆形板刮除部分土体,形成哑铃状的拉伸试验土样,如图 2(b)所示。Lakshmikantha 等^[24]、Stirling 等^[25]研发了双三角形拉伸试验土样的制作方法,如图 2(c)所示。Tamrakar 等^[27]研制了双球形拉伸试验土样,用于测量直接拉伸强度,如图 2(d)所示。

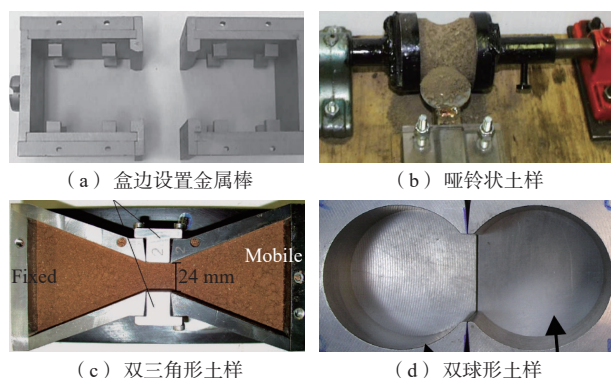


图 2 直接拉伸试验的土样改进方法

Fig. 2 Improved method of soil samples for direct tensile test

研制特殊形状的拉伸试验土样,能够确保拉伸应力直接施加在土样上。但特殊形状拉伸试验土样仍有不足之处:土样制作复杂,土样很难保证均匀、各向同性;拉伸应力作用的地方容易产生应力集中,造成拉伸强度失真;与间接试验方法类似,采用特殊形状土样直接测量的拉伸强度与真正意义上的拉伸强度仍有差别。Namikawa 等^[28]对比了直接拉伸试验与土梁弯曲试验测得的水泥改良土的拉伸强度,土梁弯曲试验测得的水泥改良土拉伸强度相对小一些。与非饱和土的拉伸强度不同,非饱和土的拉伸强度是基质吸力的函数^[29-30],水泥改良土的拉伸强度主要取决于水泥的加固改良作用,取决于水泥掺入量和土样的密实程度。水泥改良土的拉伸试验操作困难,对水泥改良土的拉伸强度研究成果很少,水泥改良土的计算方法更是很少。土的无侧限压缩试验操作非常简单,对水泥改良土的无侧限抗压强度研究非常充分,Consoli 等^[7]、Lorenzo 等^[31]建立了水泥改良土的无侧限抗压强度与土样密实度(n 或 e_v)和水泥含量(C)或水泥掺量(A)的相关关系。类似地,水泥改良土的拉伸强度是与土样密实度和水泥含量或水泥相关参量的函

数。本文采用直接拉伸试验测量了水泥改良土的拉伸强度,分析了水泥掺量、龄期、含水率和干密度对水泥改良土单轴拉伸强度的影响,采用水泥土的孔隙率(e_v)与水泥掺量(A)之比(e_v/A)作变量,提出水泥改良土的拉伸强度与 e_v/A 的相关关系,用于计算水泥改良土的拉伸强度。

1 拉伸试验

1.1 试验材料

钻渣取自沪苏湖城际铁路上海段施工 VII 标钻孔灌注桩施工现场(图 3),呈淡黄色,钻渣的有机质含量为 0.5%。钻渣颗粒分布曲线如图 4 所示,粒径大于 0.075 mm 的颗粒质量占比为 28%,小于 50%,属于细粒土,归类为粉土。钻渣在塑性图上的位置如图 5 所示,钻渣都落在 B 线左侧、A 线附近,塑性指数除个别点外均大于 10,钻渣属于低液限黏土或低液限粉土,可以定名为低液限粉质黏土。



图 3 钻渣试样

Fig. 3 Sample of the bored pile mud

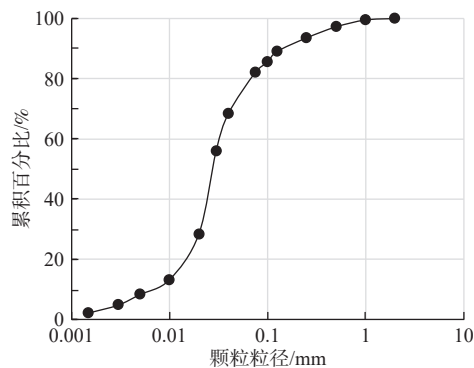


图 4 钻渣的颗分曲线

Fig. 4 Particle-size distribution curve of the bored pile mud

1.2 试验方法

将钻渣风干、敲碎,称取一定质量的干土,按照目标含水率喷洒蒸馏水、充分拌合,装入保鲜袋密封保

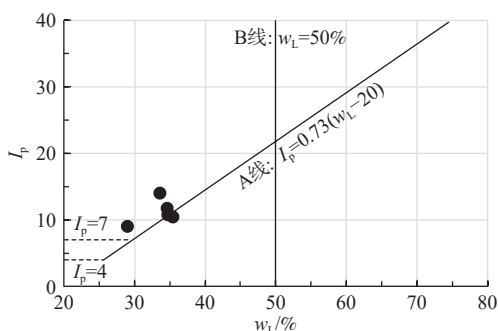


图 5 钻渣在塑性图上的位置

Fig. 5 Plasticity chart of the bored pile mud

存, 静置 12 h。按计算好的水泥掺入量添加水泥, 充分拌合后立即开始制样(每组 3 个), 用作单轴抗拉试验。根据目标干密度和含水率计算单个土样的质量, 分 5 等份在三瓣膜内逐层击实, 制成水泥土试样高度 $h=80$ mm、直径 $d=39.1$ mm, 每层土之间用小刀均匀刮毛, 保证土样的整体性和均匀性。脱模后将试样用保鲜膜包裹严实, 放入保鲜袋中, 贴上标签, 放入保湿缸中养护至规定龄期, 进行单轴拉伸试验。

采用单轴拉伸试验直接测量水泥改良土的拉伸强度, 试验装置由单轴压缩仪改造而成, 实时记录竖向拉力与拉伸位移。采用等速率位移加载, 拉伸速率为 0.4 mm/min, 设置数据采集频率为 1 次/2s, 直至试样破坏。水泥土试样与单轴试验仪的顶、底座间采用 AB 胶粘结, 土样与顶、底座之间的胶结力要求大于试样的拉伸强度, 底座为有机玻璃圆盘, 用 G 型夹将圆盘固定在试验仪底座上, 如图 6 所示。



图 6 土样与顶、底座间的固定方法

Fig. 6 Fastened method of the test sample

水泥改良土的水泥掺入量(A)定义为:

$$A = \frac{m_c}{m_s} \cdot 100\% \quad (6)$$

式中: m_c ——水泥质量;

m_s ——干土质量。

水泥改良土拉伸试验的应力-应变关系曲线如图 7 所示。在拉伸试验中, 水泥改良土表现为脆性特征, 在达到拉伸强度之前, 拉伸应力随着应变增加而增加。达到拉伸强度后, 拉伸应力突然下降, 表明此时试样已经破坏。随着水泥含量增加, 水泥改良土的拉伸强度增加; 随着龄期增加, 水泥改良土的拉伸强度增加; 随着干密度增加, 水泥改良土的拉伸强度增加; 随着含水率增加, 水泥改良土的拉伸强度减小。

水泥改良土拉伸试验的破坏模式表现为垂直于拉伸应力的平面破坏形式, 如图 8 所示。水泥改良土在直接拉伸试验中出现明显的拉伸断裂面, 拉伸断裂面垂直于施加拉伸的方向。

2 拉伸强度特性

2.1 影响因素分析

水泥改良土的拉伸强度主要受水泥掺入量、龄期、含水率和干密度影响, 拉伸强度与水泥掺入量、龄期、含水率和干密度的相关关系如图 9 所示。如图 9(a)所示, 拉伸强度与水泥掺入量呈线性正相关关系, 干密度为 $1.6, 1.7$ g/m³ 试样拉伸强度与水泥掺入量相关直线的斜率接近。水泥改良土的抗压强度与水泥掺入量呈线性相关, 因此水泥改良土的拉伸强度和抗压强度一样, 都与水泥掺入量呈线性相关。

如图 9(b)所示, 拉伸强度与龄期的对数呈线性正相关关系, 对于干密度为 $1.5, 1.6, 1.7$ g/cm³ 试样, 随着干密度增加, 拉伸强度与龄期的对数相关直线的斜率增大, 即随着干密度增加, 拉伸强度与龄期增加的幅度增加。与抗压强度一样, 水泥改良土的拉伸强度与龄期的对数呈线性相关。

如图 9(c)所示, 拉伸强度与含水率呈线性负相关关系, 对于干密度为 $1.5, 1.6, 1.7$ g/cm³ 试样, 随着干密度增加, 拉伸强度与含水率相关直线的斜率减小, 即随着干密度增加, 拉伸强度与含水率减小的幅度增加。

如图 9(d)所示, 拉伸强度与干密度近似地呈指数正相关关系, 对于龄期为 $28, 60$ d 的试样, 随着龄期增加, 拉伸强度与干密度相关直线的斜率减小, 即随着龄期增加, 拉伸强度与干密度增加的幅度减小。

2.2 与抗压强度的相关关系

水泥改良土的拉伸强度与抗压强度的相关关系如图 10 所示。钻渣和水泥改良土的拉伸强度与抗压强度都呈正比例关系, 用统一的公式表示为:

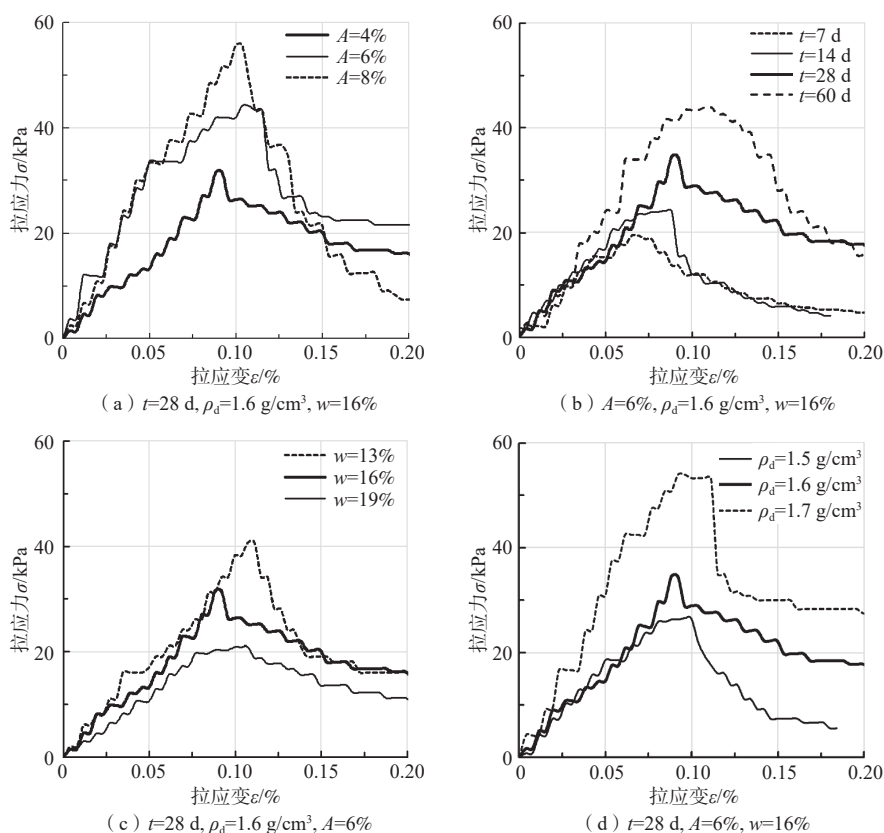


图 7 水泥改良土的拉伸试验曲线

Fig. 7 Tensile stress-strain curves of the cement stabilized soil



图 8 水泥改良土的拉伸破坏形式

Fig. 8 Failure mode of the cement stabilized soil

$$\sigma_t = k \cdot \sigma_c \quad (7)$$

式中: σ_t 、 σ_c ——拉伸强度和抗压强度;

k ——比例系数。

钻渣的比例系数 $k=0.06$, 水泥改良土的比例系数 $k=0.11$ 。水泥改良土的拉伸强度有很大增加, 抗裂性能得到显著改善。

2.3 与基质吸力的相关关系

钻渣和水泥改良土土-水特征曲线如图 11 所示,

土-水特征曲线表示了钻渣和水泥改良土基质吸力与重力含水率的关系, 基质吸力采用滤纸法测量。如图 11(a)所示, 钻渣(没有掺入水泥的素土)土-水特征曲线在最左侧, 随着水泥掺量增加, 水泥改良土的土-水特征曲线向右侧移动。相同含水率、水泥掺量越大, 水泥改良土的基质吸力越大。根据 Young-Laplace 方程, 基质吸力与孔隙半径成反比, 基质吸力越大, 孔隙半径越小。水泥掺量越大, 水泥改良土的基质吸力越大、孔隙半径越小。如图 11(b)所示, 随着龄期增加, 水泥改良土的土-水特征曲线向右侧移动。龄期越大, 水泥改良土的基质吸力越大、孔隙半径越小。如图 11(c)所示, 随着干密度增加, 水泥改良土的土-水特征曲线向右侧移动。干密度越大, 水泥改良土的基质吸力越大。水泥改良土的基质吸力随干密度增加是必然的, 因为干密度越大, 水泥改良土的孔隙越小。

水泥改良土拉伸强度与基质吸力的相关关系如图 12 所示, 土样的干密度 $\rho_d=1.6 \text{ g/cm}^3$ 、水泥掺量 $A=4\%$ 。

从图 12 中看出, 水泥改良土拉伸强度与基质吸力呈幂函数正相关关系:

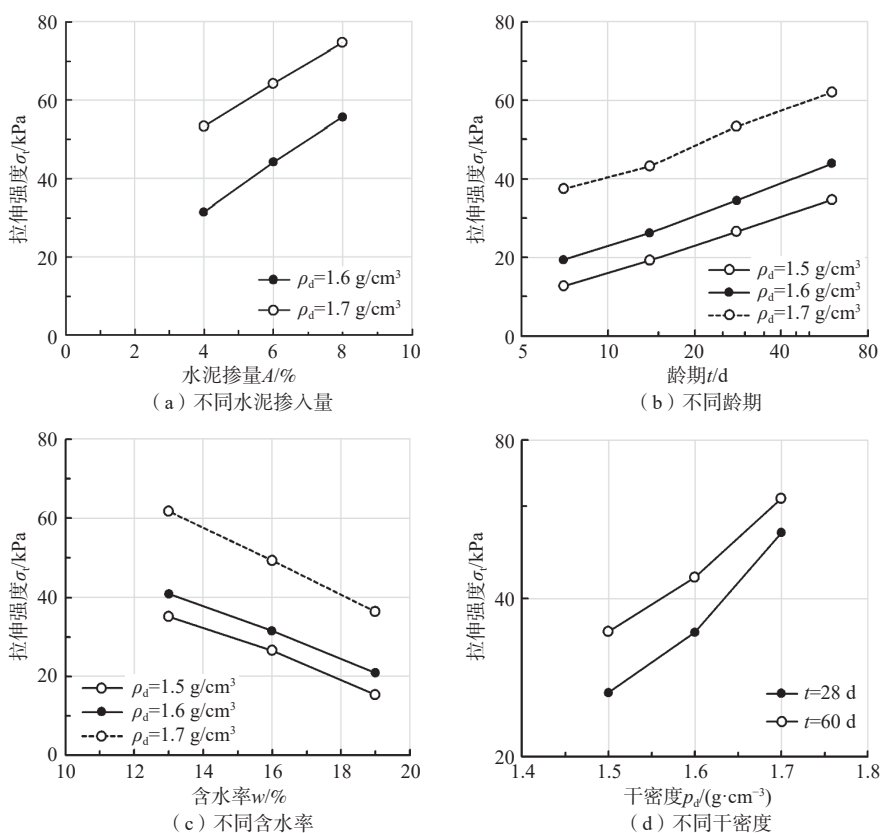


图 9 水泥改良土的拉伸强度的影响因素

Fig. 9 Factors affecting the tensile strength of the cement stabilized soil

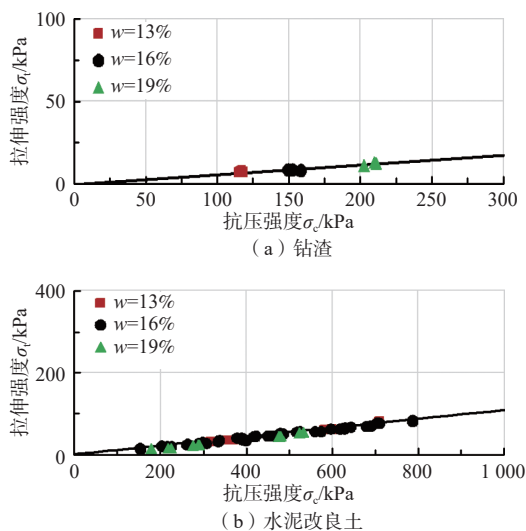


图 10 拉伸强度与抗压强度的相关关系

Fig. 10 Relationship between the tensile strength and compressive strength

$$\sigma_t = a \cdot \sigma_c^b \quad (8)$$

式中: a 、 b ——拟合系数。

随着龄期增加, 幂函数的指数 b 增加, 表明随着龄期增加, 水泥改良土的拉伸强度随基质吸力增加幅度增大。

3 拉伸强度计算

水泥改良土的拉伸强度取决于土样的物理状态、水泥掺入量和龄期。水泥改良土的物理状态包括含水率和土粒比重, 水泥改良土的孔隙率 e_t 表示为:

$$e_t = \frac{G_s(1+w_t)\rho_w}{\rho} \quad (9)$$

式中: w_t ——龄期为 t 的水泥改良土的含水率;

G_s ——土的比重;

ρ 、 ρ_w ——水泥改良土的密度和水的密度。

引用参量 e_t/A 作为变量表示水泥改良土的拉伸强度, 并假设水泥的重度等于土粒的重度:

$$\frac{e_t}{A} = \frac{\frac{V_v}{V_s}}{\frac{m_c}{m_s}} = \frac{\frac{V_v}{V_s}}{\frac{V_c \gamma_c}{V_s \gamma_s}} = \frac{V_v}{V_c} \quad (10)$$

式中: V_v 、 V_c 、 V_s ——孔隙体积、水泥体积和土粒体积;

m_c 、 m_s ——水泥质量和土粒质量;

γ_c 、 γ_s ——水泥重度和土粒重度。

因此, 假设土粒的重度与水泥颗粒的重度相等, 参量 e_t/A 的数值近似等于水泥改良土的孔隙体积与水

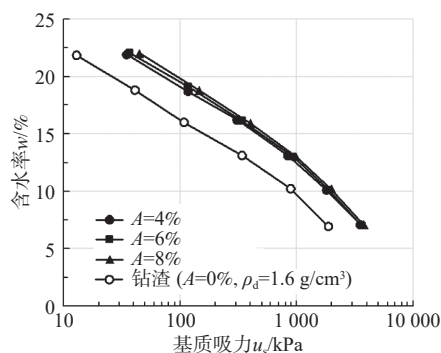
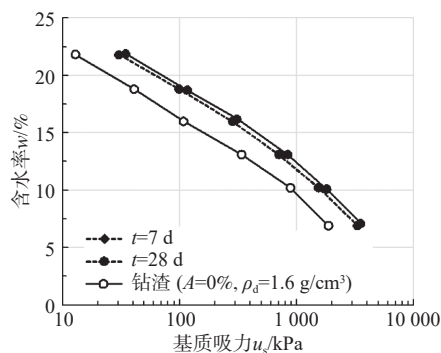
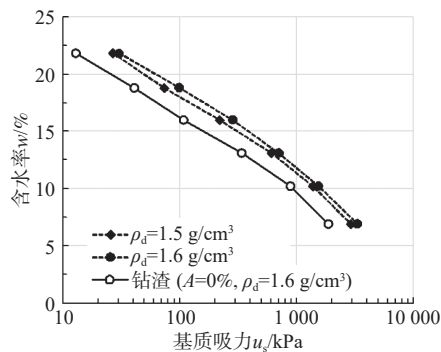
(a) $\rho_d=1.6 \text{ g/cm}^3$, $t=28 \text{ d}$ (b) $A=4\%$, $\rho_d=1.6 \text{ g/cm}^3$ (c) $A=4\%$, $t=7 \text{ d}$

图 11 钻渣和水泥改良土的土-水特征曲线

Fig. 11 Soil-water characteristic curves of the bored pile mud and cement stabilized soil

泥体积之比, 可以作为独立的变量表示水泥改良土的拉伸强度。

水泥改良土拉伸强度与 e_i/A 的相关关系如图 13 所示。水泥改良土拉伸强度的对数与 e_i/A 呈线性负相关关系:

$$\sigma_t = M \cdot p_a \cdot \exp[-N \cdot (e_i/A)] \quad (11)$$

式中: M 、 N ——统计常数, 这里 $M=1.7$ 、 $N=-0.073$;

p_a ——大气压力, $p_a=100 \text{ kPa}$ 。

M 与固化剂的类型、含量有关, N 与土质条件有关。与水泥改良土的无侧限抗压强度类似^[31], 以 e_i/A 作为变量表示水泥土的拉伸强度, 式(11)提供了水泥

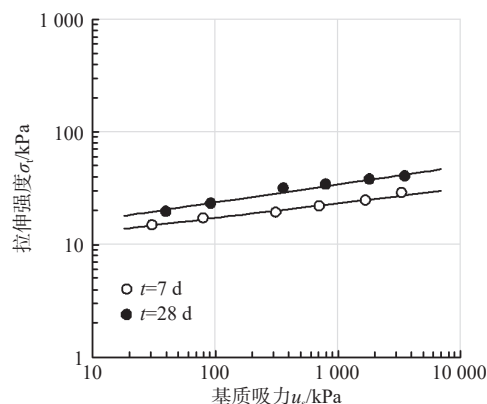
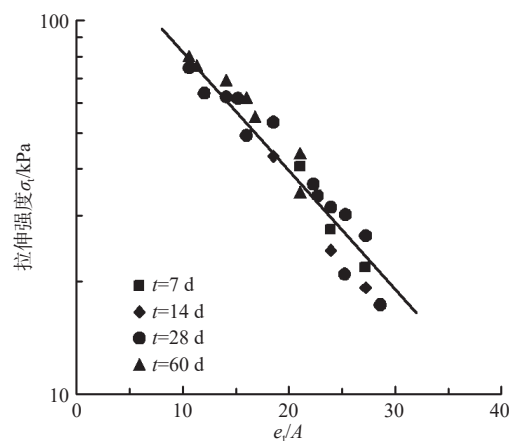


图 12 水泥改良土拉伸强度与基质吸力的相关关系

Fig. 12 Relationship between the tensile strength and matric suction of the cement stabilized soil

图 13 水泥改良土拉伸强度与 e_i/A 的相关关系Fig. 13 Relationship between the tensile strength and e_i/A of the cement stabilized soil

改良土拉伸强度的计算方法。图 13 中不同龄期水泥改良土拉伸强度的对数与 e_i/A 具有很好的相关性, $R^2=0.954$, 证明了水泥改良土拉伸强度用变量 e_i/A 表示是可行的, 且有很好的相关性。龄期为 t 的水泥改良土的孔隙比 e_i 根据式(9)计算, 计算 e_i 的公式中包含了水泥含水率和龄期的影响, 因此孔隙比 e_i 同时体现了含水率和龄期的影响。另外, 结合水泥相关参量的影响, 变量 e_i/A 同时包含了水泥掺量、含水率和龄期的影响, 几乎包含了水泥改良土主要影响因素, 因此, 变量 e_i/A 适宜表示水泥改良土的拉伸强度, 公式(11)很可能是反映水泥改良土材料特性的表达式。

4 结论

(1) 基于对单轴压缩仪的改进, 提出了水泥改良土拉伸强度的直接测量方法。水泥改良土的拉伸强度随水泥掺入量、龄期和干密度增大而增大、随含水

率增大而减小。

(2)水泥改良土的拉伸强度与无侧限抗压强度呈正比、与基质吸力呈幂函数正相关关系。

(3)水泥改良土拉伸强度表示为 e_i/A 的指数函数关系, 即 $\sigma_t = M \cdot p_a \cdot \exp[-N \cdot (e_i/A)]$, 为水泥改良土拉伸强度计算提供了理论方法。

参考文献 (References) :

- [1] 杨滨, 顾小安, 黄寅春, 等. 水泥土的强度特性[J]. 公路, 2006, 51(7): 130 - 135. [YANG Bin, GU Xiaolan, HUANG Yinchun, et al. Strength characteristics of cement-stabilized soil[J]. Highway, 2006, 51(7): 130 - 135. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 邢皓枫, 张好, 李浩铭. 高含盐水泥土的力学特性及微观结构研究[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(3): 102 - 109. [XING Haofeng, ZHANG Hao, LI Haoming. Mechanical characteristics and microstructure of salt-rich cement-soil[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(3): 102 - 109. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 王许诺, 杨平, 鲍俊安, 等. 冻结水泥土无侧限抗压试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(3): 79 - 84. [WANG Xu-nuo, YANG Ping, BAO Jun-an, et al. Test research on unconfined compressive strength of freezing cement soil[J]. Hydrogeology & Eng Geology, 2013, 40(3): 79 - 84. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 耿凯强, 李晓丽. 单轴压缩下红色砒砂岩水泥土的能量演化机制研究[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(5): 134 - 141. [GENG Kaiqiang, LI Xiaoli. Energy evolution mechanism of red Pisha-sandstone cement soil under uniaxial compression[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(5): 134 - 141. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 陈鑫, 张泽, 李东庆. 尺寸和加载速率对冻结水泥土单轴压缩影响[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(6): 74 - 82. [CHEN Xin, ZHANG Ze, LI Dongqing. Effect of size and loading rate on the uniaxial compression characteristics of frozen cement soil[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(6): 74 - 82. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 朱俊高, 梁彬, 陈秀鸣, 等. 击实土单轴抗拉强度试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2007, 35(2): 186 - 190. [ZHU Jungao, LIANG Bin, CHEN Xiuming, et al. Experimental study on uniaxial tensile strength of compacted soils[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2007, 35(2): 186 - 190. (in Chinese with English abstract)]
- [7] CONSOLI N C, CRUZ R C, FLOSS M F, et al. Parameters controlling tensile and compressive strength of artificially cemented sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(5): 759 - 763.
- [8] CONSOLI N C, DA FONSECA A V, CRUZ R C, et al. Voids/cement ratio controlling tensile strength of cement-treated soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, 137(11): 1126 - 1131.
- [9] VISWANADHAM B V S, JHA B K, PAWAR S N. Experimental study on flexural testing of compacted soil beams[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22(5): 460 - 468.
- [10] 凌道盛, 徐泽龙, 蔡武军, 等. 压实黏土梁弯曲开裂性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(7): 1165 - 1172. [LING Daosheng, XU Zelong, CAI Wujun, et al. Experimental study on characteristics of bending cracks of compacted soil beams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(7): 1165 - 1172. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 郭飞, 何昌荣, 朱安龙, 等. 黏性土抗拉强度的轴向压裂法试验研究[J]. 水电站设计, 2005, 21(2): 66 - 68. [GUO Fei, HE Changrong, ZHU Anlong, et al. Experimental study on tensile strength of clay by axial fracturing[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2005, 21(2): 66 - 68. (in Chinese)]
- [12] 刘正和, 杨录胜, 廉浩杰, 等. 砂岩钻孔轴向预制裂缝定向压裂试验研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(7): 2057 - 2065. [LIU Zhenghe, YANG Lusheng, LIAN Haojie, et al. Experimental study of directional fracturing in sandstones with prefabricated cracks in the axial direction of borehole[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(7): 2057 - 2065. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 沈忠言, 刘永智, 彭万巍, 等. 径向压裂法在冻土抗拉强度测定中的应用[J]. 冰川冻土, 1994, 16(3): 224 - 231. [SHEN Zhongyan, LIU Yongzhi, PENG Wanwei, et al. Application of the radial-splitting method to determining tensile strength of frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1994, 16(3): 224 - 231. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 周鸿逵. 三轴拉伸试验中试样的断裂机理[J]. 岩土工程学报, 1984, 6(3): 11 - 23. [ZHOU Hongkui. The mechanism of fracture of soil samples in triaxial tensile test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1984, 6(3): 11 - 23. (in Chinese with English abstract)]

- [15] 刘俊新, 陈忠富, 徐伟芳. 压实粘性土三轴拉伸试验研究[J]. *浙江工业大学学报*, 2012, 40(2): 183 – 187. [LIU Junxin, CHEN Zhongfu, XU Weifang. Experimental research on triaxial extension of compacted clay[J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*, 2012, 40(2): 183 – 187. (in Chinese with English abstract)]
- [16] DAVID SUITS L, SHEAHAN T C, NAHLAWI H, et al. A direct tensile strength testing method for unsaturated geomaterials[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2004, 27(4): 11767.
- [17] TOLLENAAR R N, VAN PAASSEN L A, JOMMI C. Experimental evaluation of the effects of pull rate on the tensile behavior of a clay[J]. *Applied Clay Science*, 2017, 144: 131 – 140.
- [18] TRABELSI H, ROMERO E, JAMEI M. Tensile strength during drying of remoulded and compacted clay: the role of fabric and water retention[J]. *Applied Clay Science*, 2018, 162: 57 – 68.
- [19] BECKETT C T S, SMITH J C, CIANCIO D, et al. Tensile strengths of flocculated compacted unsaturated soils[J]. *Géotechnique Letters*, 2015, 5(4): 254 – 260.
- [20] DENIZ AKIN I, LIKOS W J. Brazilian tensile strength testing of compacted clay[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2017, 40(4): 20160180.
- [21] MASOUMI H, ROSHAN H, HEDAYAT A, et al. Scale-size dependency of intact rock under point-load and indirect tensile Brazilian testing[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2018, 18(3): 04018006.
- [22] ASTM STP 740: Laboratory Shear Strength of Soil[S]. American Society for Testing and Materials, 1981: 130 – 144.
- [23] IBARRA S Y, MCKYES E, BROUGHTON R S. Measurement of tensile strength of unsaturated sandy loam soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2005, 81(1): 15 – 23.
- [24] LAKSHMIKANTHA M R, PRAT P C, LEDESMA A. Experimental evidence of size effect in soil cracking[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2012, 49(3): 264 – 284.
- [25] STIRLING R A, HUGHES P, DAVIE C T, et al. Tensile behaviour of unsaturated compacted clay soils—A direct assessment method[J]. *Applied Clay Science*, 2015, 112/113: 123 – 133.
- [26] VARSEI M, MILLER G A, HASSANIKHAH A. Novel approach to measuring tensile strength of compacted clayey soil during desiccation[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2016, 16(6): D4016011.
- [27] TAMRAKAR S B, MITACHI T, TOYOSAWA Y, et al. Development of a new soil tensile strength test apparatus[C]//Geo-Frontiers Congress 2005. Austin, Texas, USA. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2005: 1 – 10. [http://dx. doi.org/10.1061/40785\(164\)26](http://dx.doi.org/10.1061/40785(164)26).
- [28] NAMIKAWA T, KOSEKI J. Evaluation of tensile strength of cement-treated sand based on several types of laboratory tests[J]. *Soils and Foundations*, 2007, 47(4): 657 – 674.
- [29] YIN P H, VANAPALLI S K. Model for predicting tensile strength of unsaturated cohesionless soils[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2018, 55(9): 1313 – 1333.
- [30] SALIMI K, CERATO A B, VAHEDIFARD F, et al. General model for the uniaxial tensile strength characteristic curve of unsaturated soils[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2021, 147(7): 04021051.
- [31] LORENZO G A, BERGADO D T. Fundamental parameters of cement-admixed clay—New approach[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, 130(10): 1042 – 1050.

编辑: 张明霞