

含水砂层的剪切流变力学特性试验分析*

王芳¹, 刘晓丽¹, 王恩志¹, 刘中港^{1,2}, 魏天清²

(1. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 2. 四川铁能电力开发有限公司, 成都 610041)

摘要:通过十字板剪切流变仪试验,得到了剪切阻力、含水量、孔隙水压力与应变速率的变化曲线。试验表明,含水砂层的流变曲线呈现稳态流变阶段和加速流变阶段。稳态流变阶段又可分为弹性变形、初始流变和非加速流变过程。初始流变过程含水量和孔隙水压力上升,后保持稳定;经过较长时间的流变后,进入非加速流变阶段,剪切阻力呈现波动下降趋势;达到屈服抗剪强度时,进入加速流变阶段,应变速率迅速增大。通过对加速流变过程曲线进行拟合,得出加载剪应力、屈服抗剪强度和应变速率的关系。分析表明,干燥细砂的抗剪强度主要来自颗粒间的摩擦力,当含水量增加时,颗粒被水分子包围,削弱了颗粒间的作用力,其流变特性就发生了明显的变化;反映这一变化过程的主要参数是屈服抗剪强度,其与加载剪应力和含水量有关。

关键词:含水砂层;剪切流变;含水量;剪切强度;应变速率

中图分类号:O319.56 文献标识码:A 文章编号:1673-0836(2018)02-0323-09

Experimental Research on Shear Rheological Mechanical Properties of Water-bearing Sand Layer

Wang Fang¹, Liu Xiaoli¹, Wang Enzhi¹, Liu Zhonggang^{1,2}, Wei Tianqing²

(1. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, P.R. China;
2. Sichuan Tieneng Power Development Co.Ltd., Chengdu 610041, P.R. China)

Abstract: The vane shear rheometer was used to study the rheological properties of the water-bearing sand layer. The test curves including shear resistance, water content, pore water pressure and strain velocity were obtained. The results show that the rheological curves of the sand layer appear obvious different phases, stable rheological stage and accelerated rheological stage, with the water content increasing. The former stage experiences the elastic deformation, initial and non-accelerated rheological processes. When shear resistance achieves the yield resistance strength, the sand layer entered the accelerated rheological stage, and the strain velocity increases quickly. Based on the fitted curves of accelerated rheological stage, the relations between loading shear resistance, yield shear strength and stress velocity were obtained. The analysis indicate that the resistance strength of dry sand comes from the friction between particles, when the water content increases the particles are surrounded by the water which decreases the acting forces

* 收稿日期:2017-11-16(修改稿)

作者简介:王芳(1977-),女,河南焦作人,博士后,主要从事岩土力学试验研究方面的工作。

E-mail:qianlizhixing826@163.com

通讯作者:刘晓丽(1978-),男,山东泰安人,副教授,主要从事水岩耦合理论与应用及隧道风险评估方面的研究。

E-mail:xiaoli.liu@tsinghua.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金优秀青年基金(51522903);国家重点研发计划项目(2016YFC0501104);国家自然科学基金(51479094, 41772246);水沙科学与水利水电工程国家重点实验室自主课题(2016-KY-02, 2016-KY-05, 2015-KY-04)

between the particles. Therefore, the rheological properties change obviously. The yield resistance strength is the critical parameter to reflect the change process which is connected with the loading shear stress and water content.

Keywords: water-bearing sand layer; shear rheology; water content; shear strength; strain velocity

0 引言

在地铁隧道施工中,松散的含水砂层是一种常见的地层,砂层孔隙率大,渗透性强。隧道开挖扰动后,砂层稳定性差,极易发生涌水、涌砂的现象。近年来地铁隧道施工中发生的多起事故,都与隧道开挖影响范围内存在含水砂层有关。

含水砂层的研究主要有以下几个方面:

有关砂土渗流、力学特性的研究,Siva等^[1]采用三轴变形试验,对砂土进行不同排水边界条件下力学特性的分析。在砂土的细观力学特性方面,主要是利用离散元软件 PFC^{3D}和 PFC^{2D}分析渗流对砂土的影响,研究孔隙率、渗透系数、流速等细观参数的变化规律^[2]。张云等^[3]用幂函数拟合饱和砂性土的应力-应变-时间关系,该研究指出饱和砂层具有非线性蠕变特性。

在隧道穿越含水砂层研究方面,主要以地层加固方法和施工技术研究为重点。吉小明等^[4-5]总结了目前隧道工程中含水砂层稳定性问题的研究现状及存在的问题,并进一步开展了饱和含水砂层的力学、渗流特性与隧道围岩变形特性的研究。郭金敏等^[6]对饱和动态含水砂层中的注浆工艺进行了研究。张民庆等^[7]对含水砂层隧道围岩加固技术进行了研究。

针对含水砂层中地下工程涌水、涌砂现象的研究,郑刚等^[8]研究了地下水位以下砂土自不同宽度缝隙中流失的演化规律。彭泽瑞等^[9]根据北京地铁施工状况,总结饱和砂土层因管道漏水而造成的砂土悬涌塌方事故的情况。

砂性土层的流变特性已被工程现场监测所证实,含水砂层的变形中包含一定比例的流变变形^[10-13],是影响工程安全的重要因素之一。含水砂层在隧道开挖后流变变形的收敛性将直接影响隧道围岩的稳定,流变导致的沙土导水通道的形成是隧道施工及建成后影响稳定性的重要因素^[14-15],但是关于含水砂层剪切流变特性的研究较少。本文以细砂为试验材料,采用改进的十字板剪切流变仪作为主要设备开展降水条件下的剪切流变试验,监测获得含水砂层在流变过程中应变、

阻力、含水量、孔隙水压力的时间序列,通过分析多物理量的变化规律,研究含水砂层的剪切流变特性。通过不同含水量条件下的剪切流变研究,以确定含水量对砂土流变变形的影响,为砂土层中隧道开挖时的加固止水和降水提供理论依据。

1 剪切流变试验

1.1 试验装置

为研究含水砂层的剪切流变特性,自主研制了十字板剪切流变仪,试验装置包括三部分:动力装置、喷淋装置和数据采集装置(图1)。该装置的核心是产生动力的剪切流变仪,由十字板6、连接杆5、连承轴4、扭矩传感器3、扭矩电机2、光电编码器1、横梁8、立柱9和底座等组成。

十字板剪切仪具有易于携带、操作方便、数据可靠性较好等优点,因此在原位土力学试验中已经得到广泛应用。传统的十字板在力矩施加、变形量测精度等方面水平较低,同时不能应用于土体破坏后变形速率和阻力的检测。针对以上特点,本文中研究的扭矩由力矩电机输出,通过十字板(直径×高度=3cm×6cm)施加于其所形成的圆柱形试样表面,该力矩与土体所产生的阻力力矩形成平衡力系,施加扭矩后试样产生角位移。其中,阻力力矩由扭矩传感器采集,角位移由光电编码器以脉冲数形式记录。通过以上改进,实现扭矩输出和变形测量的自动化。

1.2 试验原理

采用上述十字板剪切流变仪进行试验,以细砂为研究对象。试验中将十字板埋置于设定深度,在打开喷淋装置的同时对十字板施加扭矩。随着含水量的增加,砂层的流变变形呈非线性增加,直至十字板转动导致砂层剪切破坏。在十字板旋转过程中,细砂产生一个高度为 H (十字板的高度)、直径为 D (十字板的直径)的圆柱状剪切面(见图2)。

假定圆柱状剪切面的侧面和上、下底面的抗剪强度都等于 τ_0 ,最大抵抗扭矩 T_0 等于侧面抵抗扭矩 T_1 与上、下底面抵抗扭矩之和 T_2 。由式(1)~式(4)建立剪切面上抗剪强度 τ_0 与扭矩 T_0 的关系:

$$T_1 = \frac{\pi D^2 H}{2} \tau_0 \quad (1)$$

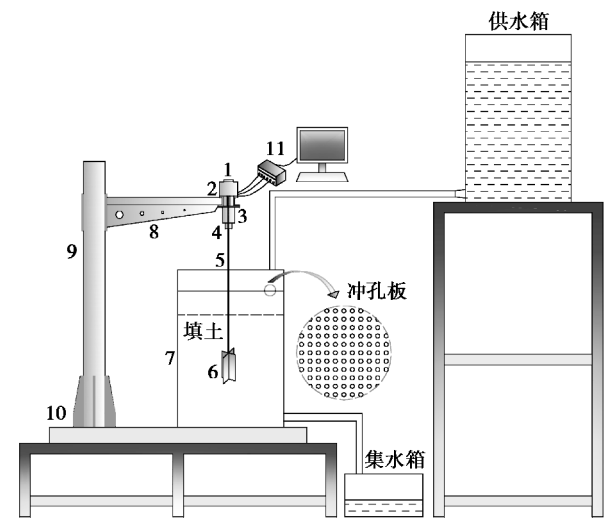


图1 试验装置示意图

Fig. 1 Sketch of test apparatus

$$T_2 = \frac{\pi D^3}{6} \tau_0 \tag{2}$$

$$T_0 = T_1 + T_2 \tag{3}$$

$$\tau_0 = \frac{6T_0}{\pi D^3 + 3D^2H} \tag{4}$$

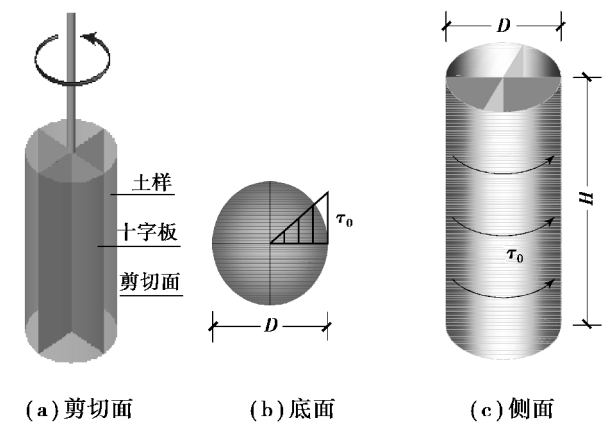


图2 试验原理示意图

Fig. 2 Sketch of test principle

1.3 试验过程

细砂的初始体积含水量为 3.16%, 孔隙率为 0.379, 级配曲线如图 3 所示, 试验过程如下。

1.3.1 填筑

试样箱的高度为 65 cm, 长度和宽度均为 50 cm, 十字板的底边距离箱底面 20 cm。在十字板相同高度处埋设孔隙水压力传感器和含水量传感器, 传感器距离十字板边缘 3 cm, 如图 4 所示。填筑高度为 40 cm, 填筑后的土样密度为 1.52 g/cm³ (图 5)。

1.3.2 降水

填筑完成后, 打开喷淋装置开始模拟降雨, 直

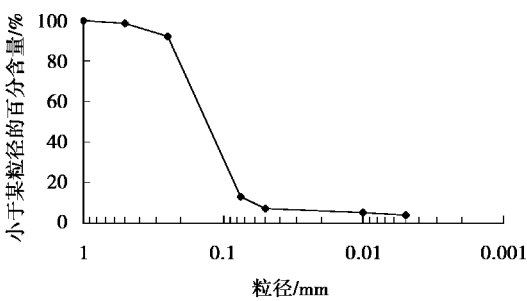


图3 细砂级配曲线

Fig. 3 Particle size distribution of fine sand

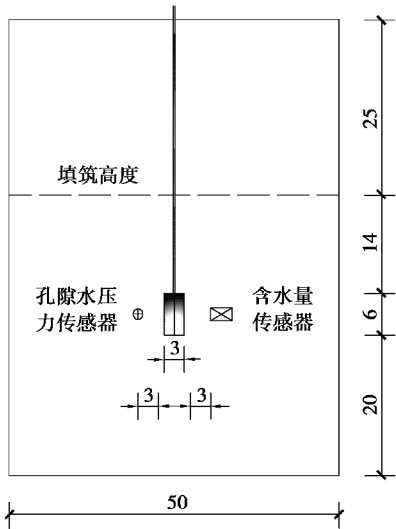


图4 传感器位置(单位:mm)

Fig. 4 Location of sensors(unit:mm)



图5 试验装置

Fig. 5 Test apparatus

至试验结束。为减少冲刷的影响, 在试样箱上放置水槽, 水槽底板是冲孔板, 均布直径 1 mm 的圆孔, 在水槽底部放置细密的纱网, 使砂层含水均匀 (如图 6 所示)。

1.3.3 加载

加载扭矩如表 1 所列, 砂层达到一定含水量时

抗剪强度降低,平衡状态被打破,十字板加速转动,表明砂层发生剪切流变破坏。

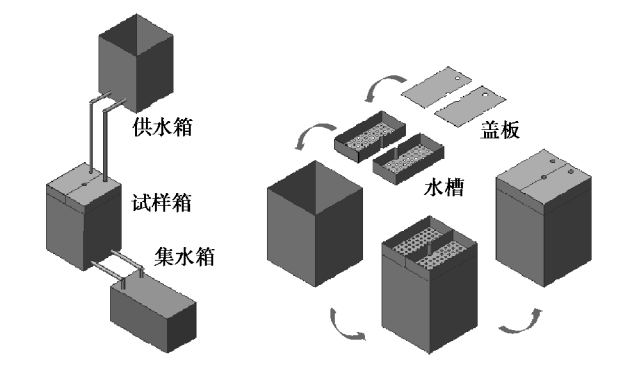


图 6 喷淋装置
Fig. 6 Spray device

2 试验结果

2.1 试验现象分析

共开展 10 级单试验加载(表 1)的切流变试验,根据试验现象分为 3 组,第 1 组 5 个试验在试验结束时十字板均未转动,该组试验加载的剪应力 2.110~5.288 kPa,最终体积含水量约为 33%~34%,孔隙水压力约为 2.4~2.6 kPa,砂土最终饱和度接近 100%左右。第 2 组共 4 个试验,在砂土含水量达到一定值时十字板出现快速转动,表明砂土加速流变。该组试验加载的剪应力为 6.554~10.873 kPa,随着剪切应力的增加,砂土剪切破坏时饱和度从 99%减小至 78%,孔隙水压力亦随之降低。表 1 数据揭示该组试验随着施加的剪切应力的降低,砂土产生加速流变时的孔隙水压力升高,从而使其有效应力降低。第 3 组有 1 个试验,天然含水量状态下十字板就出现加速转动。

表 1 加载剪应力与砂层的参数

| Table 1 Loading shear tress and parameters of sand layer | | | | | | |
|--|----------|---|----------------------------------|-----------------|-----------|-------------------|
| 分组 | 试验 编号 | 加载 扭矩 $T/$ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$) | 加载 剪应力 τ_0/kPa | 十字板加速转动时 | | |
| | | | | 体积 含水量 /% | 饱和度 /% | 孔隙 水压力 /kPa |
| 第 1 组 | D1 | 0.087 | 2.110 | 33.75 | 89.05 | 2.429 |
| | D2 | 0.096 | 2.327 | 33.43 | 88.21 | 2.465 |
| | D3 | 0.144 | 3.511 | 33.63 | 88.73 | 2.484 |
| | D4 | 0.180 | 4.372 | 33.78 | 89.13 | 2.563 |
| | D5 | 0.218 | 5.288 | 34.22 | 90.29 | 2.601 |

| 续表1 | | | | | | |
|-------|----------|---|----------------------------------|-----------------|-----------|-------------------|
| 分组 | 试验 编号 | 加载 扭矩 $T/$ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$) | 加载 剪应力 τ_0/kPa | 十字板加速转动时 | | |
| | | | | 体积 含水量 /% | 饱和度 /% | 孔隙 水压力 /kPa |
| 第 2 组 | D6 | 0.270 | 6.554 | 37.75 | 99.60 | 2.353 |
| | D7 | 0.301 | 7.299 | 36.06 | 95.15 | 1.977 |
| | D8 | 0.404 | 9.809 | 34.77 | 91.74 | 1.776 |
| | D9 | 0.447 | 10.873 | 32.89 | 86.78 | 1.567 |
| 第 3 组 | D10 | 0.701 | 17.021 | 3.16 | 8.34 | 0.01 |

2.2 流变过程分析

本文仅对产生加速流变的第 2 组的 4 个试验开展作进一步研究,分析试验过程中剪切阻力、孔隙水压力和体积含水量的演化规律(图 7)。

图 7 中曲线显示,各试验开始时应变速率趋于零;随着时间推移曲线斜率增大,应变速率增加,由此可将流变曲线分为稳态流变阶段和加速流变阶段。在稳态流变阶段,随着含水量逐渐升高,孔隙水压力上升,砂层产生流变变形,十字板受到的剪切阻力略有下降,这表明砂层的抗剪强度呈衰减趋势。稳态流变阶段持续时间长,应变速率较稳定,表明砂层需要较长的流变过程,才能达到其剪切屈服强度进而产生加速流变。在加速流变阶段,孔隙水压力和体积含水量处于相对稳定状态,试验现象为十字板加速转动,应变速率曲线上斜率急剧增大,同时剪切阻力迅速下降。

为了得出流变过程中多物理参数的变化规律,以下分别对稳态流变阶段和加速流变阶段的试验数据进一步深入研究。

2.3 稳态流变阶段

试验结果表明稳态流变阶段流变参数受含水量影响明显,从剪切阻力演化特点(图 8)来看,稳态流变阶段经历 3 个过程:弹性变形、初始流变和非加速流变过程。弹性过程表现为施加剪应力时产生瞬时的剪切变形,即扭矩施加后十字板产生的微小角应变,同时阻力瞬时微小衰减,应变值与其后两个过程产生的应变相比可以忽略不计。

初始流变过程中,阻力缓慢衰减,应变速率趋于零,表现为剪应力下的松弛作用。试验曲线显

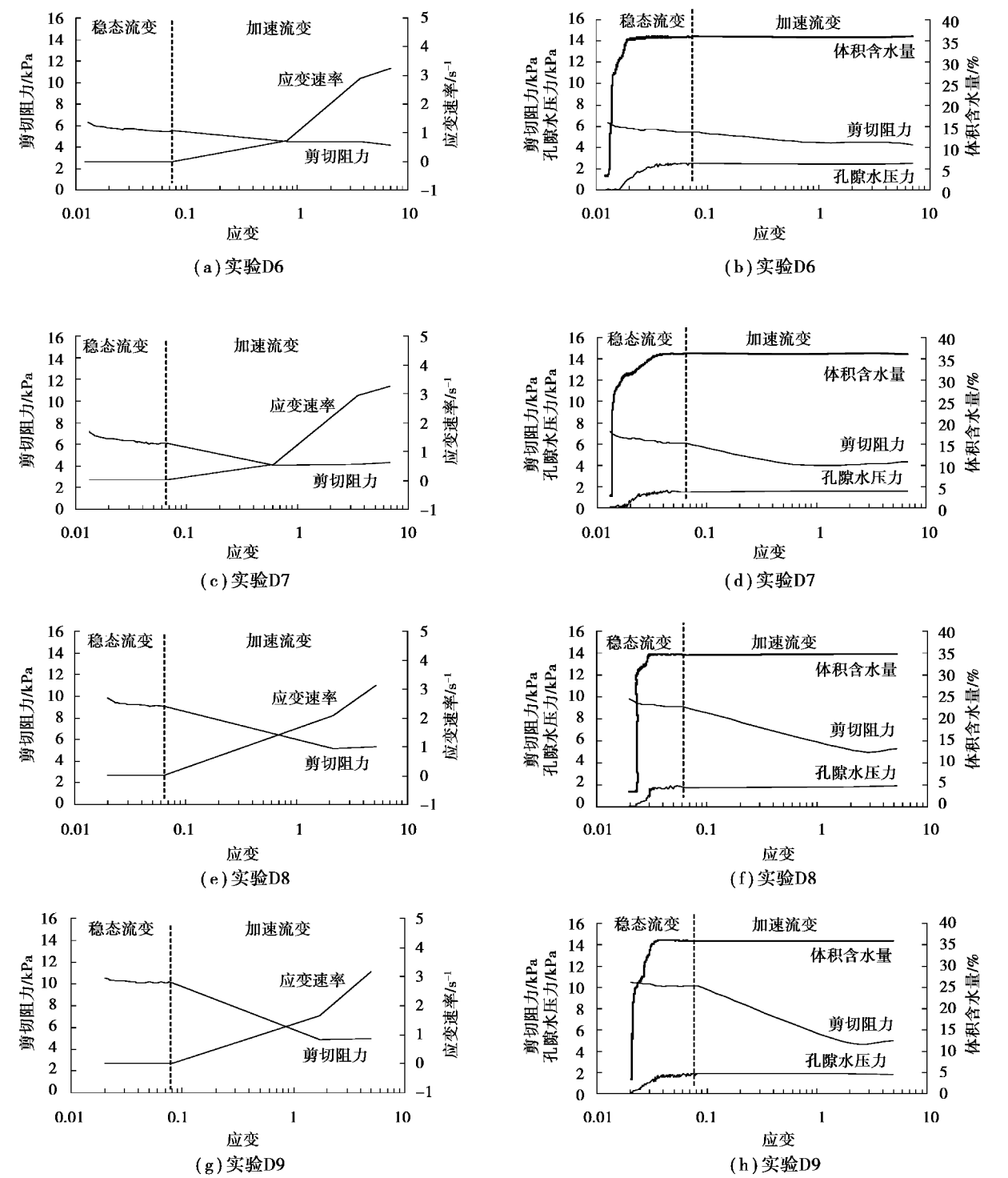


图 7 流变曲线

Fig. 7 Rheological curves

示,砂层含水量达到约 30%之前,十字板的应变速率基本为零。

非加速流变阶段,剪切阻力衰减速率加快,砂层含水量达到约 30%以后,进入非加速流变阶段。十字板出现一定的速率,但数值很小,应变速率基本保持在 0.000 s^{-1} 。这表明饱和度约为 85%(含

水量约为 30%)是砂土发生流变的重要指标点,砂土的力学性质会在这一位置发生巨大转变,由可抗剪的固体材料转变为类似于 Bingham 流体类的材料。其原因可能在于,当饱和度达到 85%以上时,砂土中的骨架结构由于水的作用发生了本质改变(如液化行为)。这一点也被大量的砂土类工程地

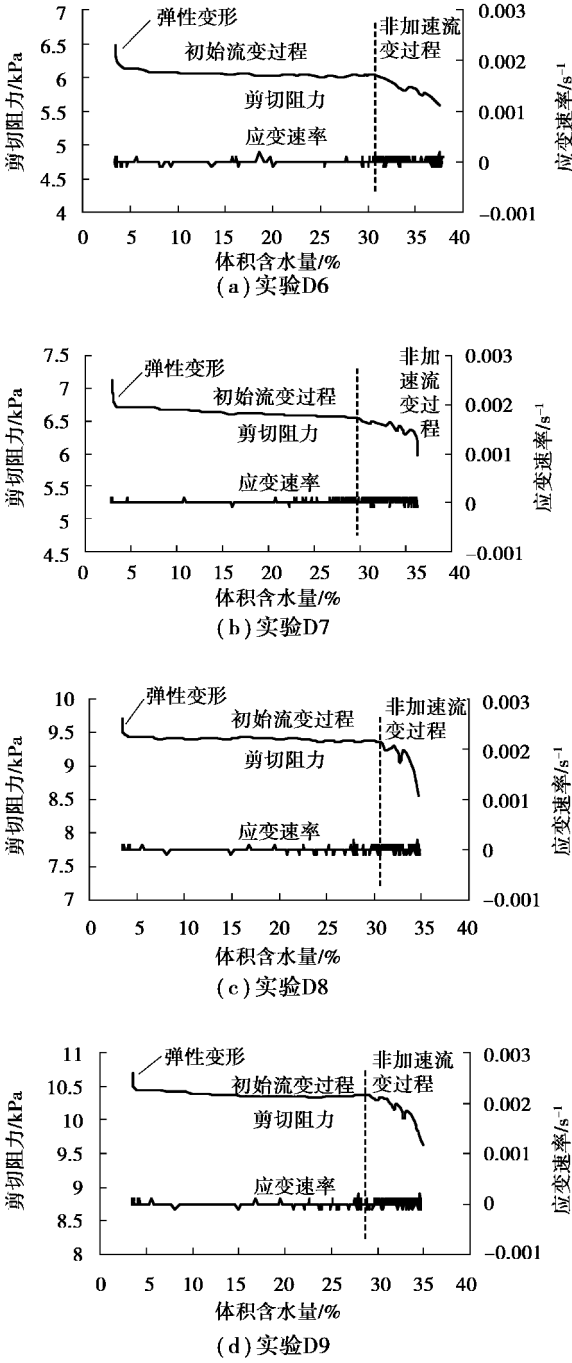
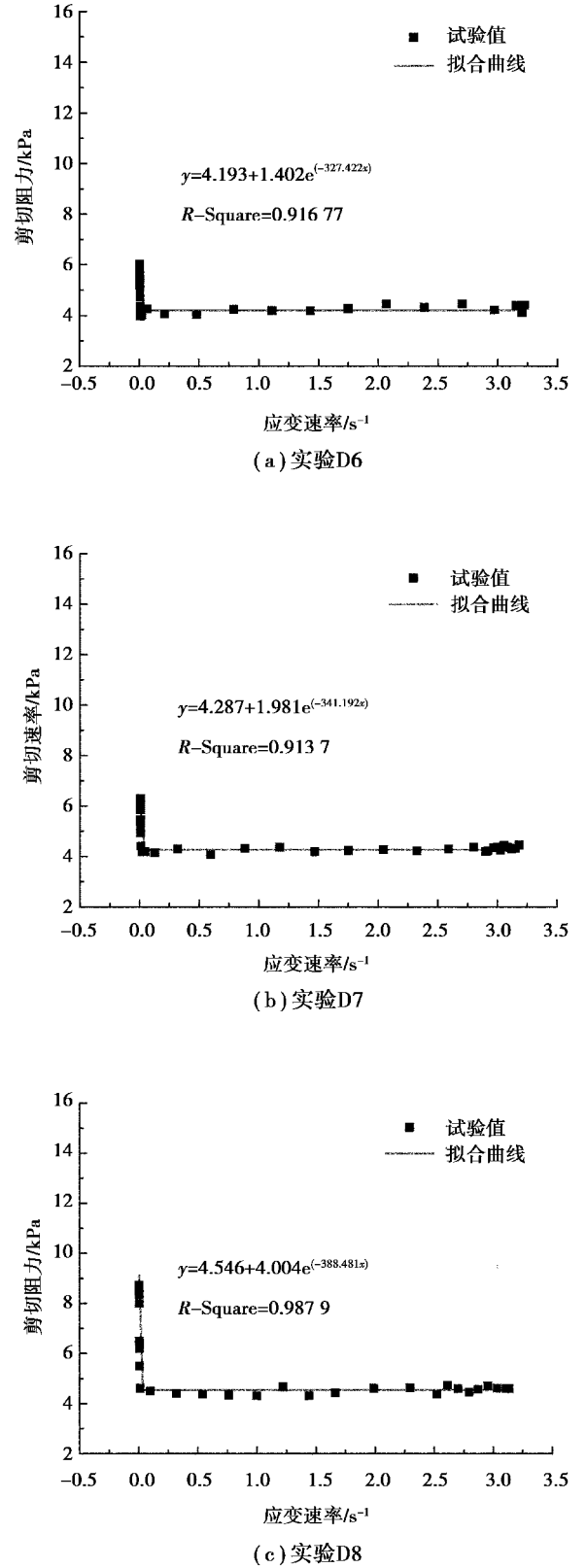


图 8 稳态流变阶段剪切阻力与应变速率与含水量的关系
Fig. 8 Relationship of shear resistance and strain velocity to water content during stable rheological stage

质案例所验证,所以控制砂土层的含水量极其重要。特别需要指出的是,降雨对于砂土含水量的影响非常剧烈,所以一般的砂土边坡稳定性会受到降雨的影响,而本研究的方法也可以为降雨情况下防止滑坡等严重地质灾害提供一个可以借鉴的试验手段。

2.4 加速流变阶段

加速流变阶段,应变急剧增加,剪切阻力急剧降低,表明这个过程中砂土的抗剪强度快速衰减至剪切屈服强度。试验结果(图 9)显示,第 2 组 4 个



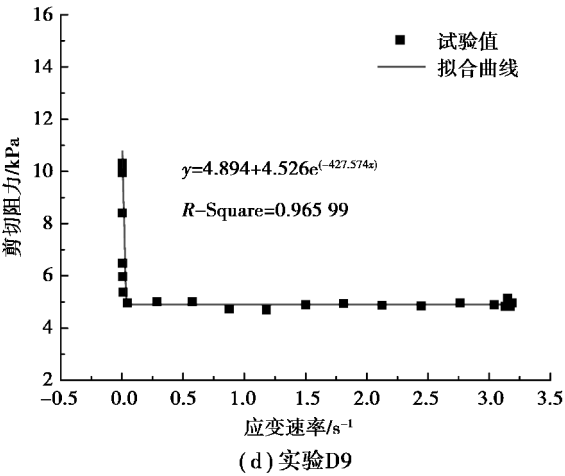


图 9 加速流变阶段剪切阻力与应变速率的关系
Fig. 9 Relationship between shear resistance and strain velocity during accelerated rheological stage

试验在不同加载剪应力条件下,应变速率均增加至 3.25 s^{-1} 。这表明对于同一种含水砂层,在不同的初始剪应力条件下存在加速流变速率极限值。

对试验结果进行拟合,得出加速流变过程中剪切阻力与应变速率的关系:

$$\tau_f = \tau_y + Ae^{-B\dot{\gamma}} \tag{5}$$

式中: τ_f 为加速流变阶段的剪切阻力; τ_y 为屈服剪切强度; $\dot{\gamma}$ 为应变速率; A 和 B 为衰减系数; $Ae^{-B\dot{\gamma}}$ 为加速流变阶段的阻力衰减值。

十字板加速转动时的受力平衡条件为:

$$\tau_0 = \Delta\tau + \tau_f + \tau_\alpha \tag{6}$$

式中: τ 为圆柱状剪切面上受到的阻力, $\tau = \tau_0$; $\Delta\tau$ 为稳定流变阶段的阻力衰减值; τ_α 为由转动加速度产生的惯性阻力,与其他两项相比,该项可以忽略不计。

由式(5)、式(6)可得加速流变过程中剪应力与应变速率的关系如式(7)所示:

$$\tau = \Delta\tau + \tau_y + Ae^{-B\dot{\gamma}} \tag{7}$$

表 1 和表 2 显示,随着加载剪应力的增大,对应的加速流变产生时砂土的含水量低,由含水量变化导致的阻力衰减幅度降低,加速流变时的屈服剪切强度增大。 $Ae^{-B\dot{\gamma}}$ 表示由加速流变引起的阻力衰减,该量是剪切应力的增函数,即加载剪应力增加,加速流变时的应变速率增大。

表 2 加速流变阶段各参数的关系

Table 2 Relation of parameters during accelerated rheological stage

| 试验 编号 | τ / kPa | $\Delta\tau$ / kPa | τ_y / kPa | A | B | $Ae^{-B\dot{\gamma}}$ / kPa |
|----------|-----------------|-----------------------|-------------------|-------|---------|--------------------------------|
| D6 | 6.554 | 1.113 | 4.193 | 1.402 | 327.422 | 1.248 |
| D7 | 7.299 | 1.102 | 4.287 | 1.981 | 341.192 | 1.910 |
| D8 | 9.809 | 1.086 | 4.546 | 4.004 | 388.481 | 4.177 |
| D9 | 10.873 | 1.053 | 4.894 | 4.526 | 427.574 | 4.926 |

通过对图 9 的分析可以发现,剪切阻力曲线都会出现一个急剧衰减的过程。其内在本质就是由于含水量的提高,导致砂土材料的力学性能发生剧烈改变。在改变前,其剪切抗力与应变率之比较高,而改变后则是呈现非常低的近似于直线行为。这恰恰说明前者情况下,材料反映出固体特征,而后者则是类似于流体行为。

对于流体其剪切力和剪切变形速率之间是线性关系,这一点被本文的试验中结果所验证。这表明对于砂土材料,其含水量过高以后就会展示出流体的行为。在未达到流体特性被起动之前,又具有一个屈服强度(这一点又类似为 Bingham 流体),这说明了砂土在不同含水量情况下的复杂力学特性。可见,其主要的特点就是在含水量连续增加的情况下,承载力急速的降低与变形的急速增加。

通过以上分析,得出含水砂层的剪切流变特性:

(1)干燥细砂的抗剪强度主要来自颗粒间的摩擦力,当含水量增加时,颗粒被水分子包围,削弱了颗粒间的作用力,砂层的流变特性和抗剪强度就发生明显的变化。加载剪应力越大,加速流变引起的阻力衰减就越大,屈服抗剪强度也越大,含水量相对较小。

(2)在施加剪应力的瞬间,细砂产生瞬时弹性变形,表明细砂具有弹性特征;在稳态流变阶段,砂层含水量和孔隙水压力逐渐升高,达到较高水平并维持相对稳定。这表明砂层需要较长时间的流变过程,使得其强度衰减,砂层成为剪切稀化流体状态,而阻力迅速降低,达到屈服剪切强度。

(3)随着含水量的增加,流变曲线出现明显的阶段性。流变曲线分为稳态流变阶段和加速流变阶段,稳态流变阶段又经历弹性变形、初始流变和非加速流变过程。初始流变过程经历时间长,剪切阻力基本不变,应变速率基本为零;非加速流变过程经历时间较短,剪切阻力呈波动下降趋势,应变速率无明显变化。加速流变阶段经历时间很短,剪切阻力迅速下降至屈服剪切强度,应变速率迅速增大。

3 结论

采用改进的十字板剪切流变仪对含水砂层进行剪切流变试验,得出以下结论:

(1)各级加载剪应力条件下,细砂的剪切流变曲线都出现明显的阶段性。

(2)根据十字板是否出现加速转动的现象,把试验分为 3 组。试验数据表明,加载剪应力和含水量是影响剪切流变发生的重要参数。

(3)根据剪切速率的变化,把流变曲线分为稳态流变阶段和加速流变阶段。对加速流变曲线进行拟合,得出加载剪应力与加速流变过程中应变速率的关系,表明屈服剪切强度受加载剪应力和含水量状态的影响,加载剪应力越大,该阶段的阻力衰减值也越大。

(4)含水砂层的剪切流变特性可以认为是由于含水量的增加,导致抗剪强度降低,颗粒间的摩擦阻力削弱,至屈服抗剪强度时发生剪切流变。

参考文献(References)

[1] Sivathayalan S, Logeswaran P. Behaviour of sands under generalized drainage boundary conditions[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44(2): 138-150.

[2] 周健,姚志雄,张刚. 砂土渗流过程的细观数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(7): 977-981.(Zhou Jian, Yao Zhixiong, Zhang Gang. Mesomechanical simulation of seepage flow in sandy soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(7): 977-981. (in Chinese))

[3] 张云,薛禹群,施小清,等. 饱和砂性土非线性蠕变模型试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(12): 1869-1873.(Zhang Yun, Xue Yuqun, Shi Xiaoqing, et al.

Study on nonlinear creep model for saturated sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(12): 1869-1873. (in Chinese))

[4] 吉小明,吕纬.含水砂层隧道围岩失稳破坏机制及控制研究现状综述[J].岩土力学,2009,30(增2): 291-296.(Ji Xiaoming, lü Wei. Review of research on instability failure mechanism and stability control of tunnel surrounding rock in water-bearing sandy ground [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(Supp.2): 291-296. (in Chinese))

[5] 吉小明,谭文.饱和含水砂层地下水渗流对隧道围岩加固效果的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增2): 3655-3662.(Ji Xiaoming, Tan Wen. Study of influence of groundwater seepage on reinforcement effect of tunnel surrounding rock in saturated water-bearing sand layer[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Supp.2): 3655-3662. (in Chinese))

[6] 郭金敏,汪建立,张超. 水泥-水玻璃双液注浆在饱和动水砂层隧道施工中的应用研究[J]. 煤炭工程, 2005(8):33-36.(Guo Jinmin, Wang Jianli, Zhang Chao. Research on application of cement and water glass double grouts to tunnel construction in dynamic water saturated sands[J]. Coal Engineering, 2005(8):33-36. (in Chinese))

[7] 张民庆,卓越,韩忠存,等. 广州地铁杨体区间饱和含水砂层施工[J]. 世界隧道,1998(6): 53-56.(Zhang Mingqing, Zhuo Yue, Han Zhongcun, et al. Construction under saturated sand layer in Yangqi—Tiyuwilu section of Guangzhou metro[J]. World Tunnel, 1998(6): 53-56.(in Chinese))

[8] 郑刚,戴轩,张晓双. 地下工程漏水漏砂灾害发展过程的试验研究及数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(12): 2458-2471.(Zheng Gang, Dai Xuan, Zhang Xiaoshuang. Experimental study and numerical simulation of leaking process of sand and water in underground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(12): 2458-2471. (in Chinese))

[9] 彭泽瑞,侯景岩,贺长俊. 城市地铁隧道施工中砂土悬涌塌方机理分析[J]. 市政技术, 2003, 12(1): 1-4.(Peng Zerui, Hou Jingyan, He Changjun. Analysis on landslide mechanism of sand boil in construction of urban metro tunnel [J]. Municipal Engineering

- Technology, 2003, 12(1): 1-4. (in Chinese))
 - [10] 吴林高, 缪俊发. 抽灌水作用下土层变形及应力-应变本构律的研究[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 1995, 20(5): 581-588. (Wu Lingao, Miao Junfa. Soil layer deformation and determination of the constitutive law on the stress-strain of soils under pumping-recharge [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 1995, 20(5): 581-588. (in Chinese))
 - [11] 廖威林, 周小文. 尾矿砂流变特性及其对溃坝尾砂下泄影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(增1): 282-287. (Liao weilin, Zhou Xiaowen. Study on the rheological characteristic of tailing slurry and its influence on tailing flow after dam-break [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(Supp.1): 282-287. (in Chinese))
 - [12] 游强, 游猛. 流变模型在建筑地基沉降预测中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(4): 748-751, 801. (You Qiang, You Meng. Application of rheological model in prediction of construction ground settlement [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(4): 748-751, 801. (in Chinese))
 - [13] 孙钧. 岩土材料流变及其工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. (Sun Jun. Geotechnical material rheology and its engineering application [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999. (in Chinese))
 - [14] 周德培. 流变学原理及其在工程中的应用[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1995. (Zhou Depei. The principle of rheology and its applications in engineering [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1995. (in Chinese))
 - [15] 孔超, 陈书勇, 张俊儒, 等. 流变地层地铁换乘站复合盖挖法施工力学分析[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(1): 128-135. (Kong Chao, Chen Shuyong, Zhang Junru, et al. Study on mechanical theory of compound cover method for metro transferstation in rheological stratum [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(1): 128-135. (in Chinese))
-
- (上接第 322 页)
- [5] 盛雪艳. 基于 PPP 模式的城市轨道交通项目风险管理研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2010. (Sheng Xueyan. Risk management research on PPP mode based on urban rail transit project [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2010. (in Chinese))
 - [6] 柯永建, 王守清. 特许经营项目融资 (PPP)-风险分担管理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011. (Ke Yongjian, Wang Shouqing. The financing in franchise project (PPP) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011. (in Chinese))
 - [7] 宋维佳, 乔治. 建筑企业“走出去”的风险管理研究-基于国际工程承包的视角[J]. 建筑经济, 2014, 35(11): 24-29. (Song Weijia, Qiao Zhi. Research on risk management of construction enterprises "going out" policy: based on the perspective international engineering contracting [J]. Construction Economy. 2014, 35(11): 24-29. (in Chinese))
 - [8] 张友棠, 肖辉. 基于 HHM 和 RFRM 的矿业企业跨国投资风险区域分析[J]. 财会月刊, 2011(21): 55-58. (Zhang Youtang, Xiao Hui. Regional analysis of transnational investment risk of mining enterprises based on HHM and RFRM [J]. Finance and Accounting Monthly, 2011(21): 55-58. (in Chinese))
 - [9] 朱启超, 匡兴华, 沈永平. 风险矩阵方法与应用评述[J]. 中国工程科学, 2003, 5(1): 89-94. (Zhu Qichao, Kuang Xinghua, Sheng Yongping. Risk matrix method and its application [J]. Engineering Science, 2003, 5(1): 89-94. (in Chinese))
 - [10] 孙红星. 发电企业风险分析与控制模型研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2014. (Sun Hongxing. Risk analysis and control models for power generation companies [D]. Bao Ding: North China Electric Power University, 2014. (in Chinese))
 - [11] 杨力, 刘程程, 宋利, 等. 基于熵权法的煤矿应急救援能力评价[J]. 中国软科学, 2013(11): 185-192. (Yang Li, Liu Chengcheng, Li Song, et al. Evaluation of coal mine emergency rescue capability based on Entropy Weight Method [J]. China Soft Science, 2013(11): 185-192. (in Chinese))