

DOI: 10.11779/CJGE201708003

水化针刺 GCL 剪切破坏机理的试验研究

林 海^{1, 2}, 施建勇², 钱学德^{1, 3}

(1. 南昌大学建筑工程学院, 江西 南昌 330031; 2. 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室(河海大学), 江苏 南京 210098;

3. 密歇根州环境保护厅, 密歇根 兰辛 48933)

摘要: 土工膨润土防水毯(GCL)的内部剪切强度是影响复合防渗衬里边坡稳定性的关键因素, 加筋纤维的存在使针刺GCL的内部剪切强度明显高于非加筋GCL。含水化GCL的复合防渗衬里结构剪切试验会发生应力小峰值现象, 但大都被研究人员忽视; 加筋纤维对GCL峰值剪切强度的贡献处于定性阶段。通过开展GCL内夹钠基膨润土的饱和剪切试验和理论分析, 证实应力小峰值现象为水化针刺GCL应力位移曲线的固有特征, 并且小峰值应力代表了GCL内夹膨润土的抗剪强度贡献。以应力位移曲线上的应力小峰值现象为基础, 将加筋纤维对GCL峰值剪切强度的贡献定量化, 结合破坏机理分析了针刺GCL内部剪切破坏和应力位移发展过程。考虑针刺GCL剪切强度各部分贡献, 提出了一种能反映针刺GCL破坏机理的峰值强度准则。

关键词: 针刺GCL; 破坏机理; 小位移应力峰值; 峰值强度; 强度准则

中图分类号: TU411.99 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)08-1374-07

作者简介: 林 海(1986-), 男, 江西上饶人, 讲师, 从事土力学与基础工程教学和环境岩土工程研究工作。E-mail: linhai@ncu.edu.cn。

Experimental research on shear failure mechanism of hydrated needle-punched GCLs

LIN Hai^{1, 2}, SHI Jian-yong², QIAN Xue-de^{1, 3}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. Key Laboratory of Geomechanics and

Embankment Engineering of the Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Michigan Department of
Environmental Quality, Lansing 48933, USA)

Abstract: The internal face of GCLs is one of the weak interfaces within the composite impermeable liners. Their internal shear strength is enhanced by the reinforced needle-punched fiber. Through comprehensive analysis of the existing internal shear test results of needle-punched GCLs and large simple shear test results of GCL+GM composite liners, small peak stress is found to appear at small displacements in internal shear stress-displacement curves of hydrated GCLs. By conducting shear tests on hydrated GCLs-encased sodium bentonite, combined with theoretical analysis, the occurrence of the small peak stress at small displacements is confirmed to be the inherent feature in the stress-displacement curve of hydrated GCLs, and the small peak stress represents the shear strength contribution from GCL-encased bentonite. On the basis of the small peak stress phenomenon in the stress-displacement curves of needle-punched GCLs, the contribution of the reinforced fiber to the shear strength is obtained quantitatively, and the whole process of internal shear failure and stress-displacement development of GCLs is analyzed based on the failure mechanism. Considering the contribution of each part of needle-punched GCLs to the shear strength, a peak shear strength criterion model which can reflect the failure mechanism of needle-punched GCLs is proposed.

Key words: needle-punched GCL; failure mechanism; stress peak at small displacement; peak strength; strength criterion

0 引言

土工膨润土防水毯(GCL)在填埋场和水利设施的防渗结构中应用广泛。由于内夹钠基膨润土水化后的剪切强度极低, GCL的内部和界面剪切强度特性引起了工程人员和学者的特别重视。关于GCL剪切强度的试验研究开始于20世纪90年代, 大量的剪切试验

表明, 针刺GCL相比其他同类产品表现出更大的内部抗剪强度^[1-4]。在上部法向压力较小的情况下, 复合衬

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41530637); 江西省青年科学基金项目(2016BAB216115); 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室开放基金项目(GH201404)

收稿日期: 2016-05-24

里中一般不会出现针刺 GCL 的内部剪切破坏。然而含 GCL 复合衬里的整体剪切试验表明, 在较高的法向压力条件下, 最危险滑动破坏面极有可能出现在水化针刺 GCL 内部界面^[5-6]。

Fox 等^[7]、Chiu 等^[8]和 Zornberg 等^[9]开展了大量的针刺 GCL 内部强度试验。针刺 GCL 的内部剪切强度会随含水率的增加而下降, 完全水化后的 GCL 峰值剪切强度大大低于干燥时的峰值强度。试验过程中, 针刺 GCL 的水化方法、加载方式和剪切速率都会一定程度地影响试验所得结果^[3, 10-11]。针刺 GCL 内部剪切应力位移曲线具有明显的峰值和后峰值软化特征^[9]。研究发现, 针刺纤维本身对抗剪强度的贡献在针刺 GCL 的峰值剪切强度中起主导作用^[10, 12-13]。然而已有研究难以将针刺纤维对抗剪强度的贡献定量化表示。

林海等^[6]通过开展含针刺 GCL 复合衬里的大型单剪试验, 发现了复合衬里在剪切过程中各界面的应力及位移发展规律。通过综合对比分析已有针刺 GCL 剪切试验和含 GCL 复合衬里单剪试验结果, 本文提出了水化针刺 GCL 内部剪切应力位移关系曲线的典型型式。为了对针刺 GCL 应力位移曲线上的应力小峰值现象进行解释, 开展了 GCL 内夹钠基膨润土的饱和剪切试验。通过分析文中将加筋纤维对 GCL 峰值剪切强度的贡献定量化, 结合破坏机理分析了针刺 GCL 内部剪切破坏和应力位移发展过程, 并提出一种能反映针刺 GCL 破坏机理的峰值强度准则。

1 试验方法和材料

利用改进的大型单剪仪, 开展了直径 300 mm 圆形针刺 GCL+糙面土工膜(GM)复合衬里试样的单剪试验, 复合衬里单剪试验布置如图 1 所示。设计加工制作了多块不锈钢薄层叠环, 用于复合衬里各界面的固定和位移量测。叠环的外部平面尺寸与下剪切盒相同, 中部留有直径 300 mm 的圆形试样测试区。通过将针刺 GCL 两侧土工布分别与叠环固定, 从而可以测量叠环的移动情况来分析试验过程中 GCL 内部及界面剪切位移。单剪试验时, 下剪切盒和上剪切盒之间

的相对位移 Δ_1 为复合衬里上下两端面的总位移; 上叠环和 GCL 上表面黏结并在整个试验过程中固定不动, 下叠环的位移 Δ_2 代表了针刺 GCL 的内部剪切位移; GCL/GM 界面位移 Δ_3 的数值等于 $\Delta_1 - \Delta_2$ 。剪切破坏可以任意在 GCL 内部或 GCL/GM 界面上发生, 试验能够判断出在一定法向应力条件下含 GCL 衬里内部剪切强度最薄弱层的位置。单剪试验装置的详细情况和复合衬里单剪试验步骤可参见文献[6]。

试验所采用的 GCL 由国内某公司生产, 产品为将约 5 kg/m² 的钠基膨润土夹持在一层有纺布和一层无纺布之间, 并采用纤维针刺加筋形成。GM 选用 1.5 mm 厚的单糙面 HDPE 膜, 其中光面便于试验固定, 糙面则进行试验测试。本文所采用的土工合成材料的岩土参数如表 1 所示。

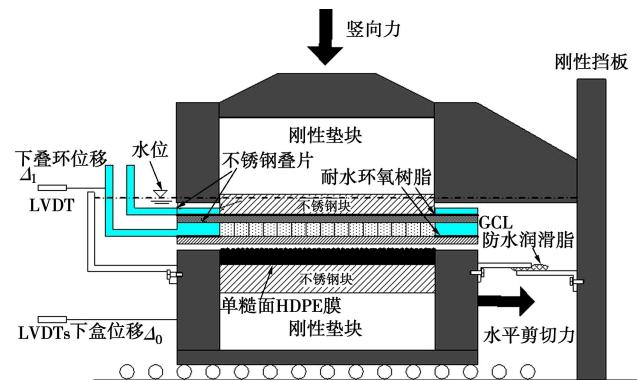


图 1 复合衬里单剪试验示意图

Fig. 1 Schematic diagram for set-up of simple shear tests

为了研究针刺 GCL 的内部剪切破坏机理, 进行了 GCL 内夹膨润土的水化饱和直剪试验。膨润土的制样过程依据土工试验规程 SL—237—1999。将膨润土配制成接近液限含水率(约 240%)的试样后装入直剪仪中, 分级加载竖向应力(50, 100, 200 kPa), 当试样分别在法向应力作用下固结沉降稳定(约 3~4 d 每级荷载)后开始剪切, 剪切速率设置为 0.02 mm/min 并保证膨润土剪切面一直处于浸水饱和状态。采用量力环、百分表来量测膨润土试样的竖向变形、剪切变形和剪切力。

表 1 土工合成材料的岩土参数

Table 1 Geotechnical parameters of geosynthetics

针刺 GCL					
厚度/mm	剥离强度/(N·10cm ⁻¹)	质量面积比/(g·m ⁻²)	膨胀系数/(ml·2g ⁻¹)	拉伸强度/(N·10 cm ⁻¹)	法向渗透系数/(cm·s ⁻¹)
6	114	5000	25	1560	4.32×10^{-9}
糙面土工膜					
厚度/mm	糙面高度/mm	密度/(g·cm ⁻³)	屈服强度/(N·mm ⁻¹)	屈服伸长率/%	刺入强度/N
1.5	0.26	0.94	27	12	521

2 应力位移曲线

由于在较小法向压力下复合衬里中 GCL 内部剪切强度远大于 GCL/GM 界面剪切强度, 从而使得 GCL 内部剪切发展不充分; 针刺 GCL 的内部剪切强度在高法向压力下得到充分调动。针刺 GCL 的无纺布侧与 GM 接触时的复合衬里(无纺 GCL+GM 复合衬里)在较高法向压力下的单剪应力位移曲线如图 2 所示。从图 2 中可以看出, 无纺 GCL+GM 复合衬里的单剪应力位移曲线在很小位移时都能找到一个应力小峰值或应力拐点现象。无纺 GCL+GM 复合衬里在 σ_n 为 725, 907, 1305 kPa 时都表现出内部剪切破坏的型式, 单剪应力位移曲线的型式和针刺 GCL 内部剪切应力位移曲线非常相近^[6]。针刺 GCL 的编织布侧与 GM 接触时的复合衬里(编织 GCL+GM 复合衬里)的单剪应力位移曲线如图 3 所示。尽管编织 GCL+GM 复合衬里在 σ_n 为 317, 910, 1820 kPa 时表现出不同的剪切破坏模式, 图 3 中可以看出应力位移曲线在很小位移时也能找到一个应力小峰值现象。应力小峰值现象是水化针刺 GCL+GM 复合衬里应力位移曲线上的固有特点, 它不随含 GCL 复合衬里的破坏模式改变而消失。

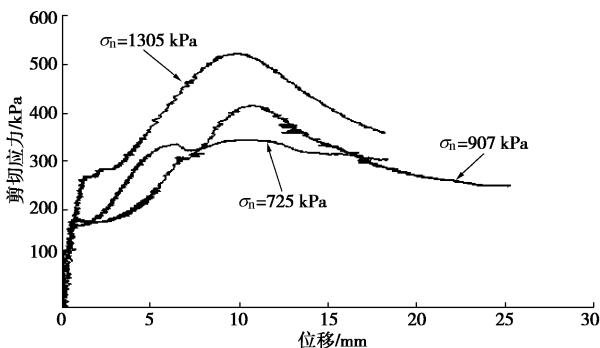


图 2 无纺 GCL+GM 复合衬里单剪应力位移曲线

Fig. 2 Shear stress-displacement curves for nonwoven GCL+GM composite liner

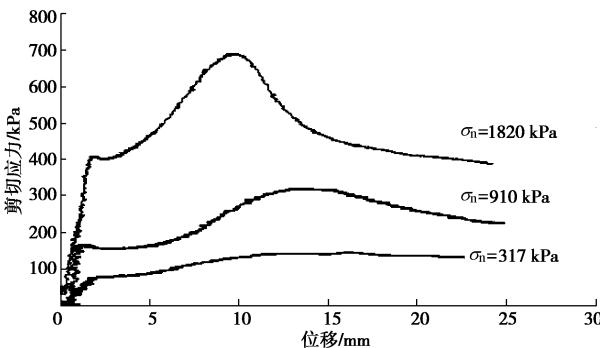


图 3 编织 GCL+GM 复合衬里单剪应力位移曲线

Fig. 3 Shear stress-displacement curves for woven GCL+GM composite liners

结合水化 GCL+GM 复合衬里中各界面位移发展规律发现, 应力小峰值现象应属于针刺 GCL 内部剪切应力位移曲线的特点。林海等^[6]给出了水化针刺 GCL+GM 复合衬里在不同法向压力等级下的单剪各界面位移发展规律, 试验数据显示单剪总位移在剪切初期 ($\Delta_0 < 3$ mm) 基本上等于 GCL 内部剪切位移。因此, 应力小峰值现象的出现与水化针刺 GCL 的内部剪切有关。综合已有针刺 GCL 剪切试验成果, 针刺 GCL 内部剪切应力位移曲线的型式如图 4 所示。剪切初始阶段剪切应力随位移发展近似直线增加, 并且在很小的位移时刻(一般小于 2 mm)达到应力拐点或小峰值应力(OA 段); 在位移量超过 A 点后的小段时间内, 针刺 GCL 内部剪切应力会随位移的增加而保持恒定或略有下降(AB 段), 之后针刺 GCL 的剪切应力随位移的增加非线性地增加并达到峰值剪切应力 τ_p (BC 段); 过峰值后, 针刺 GCL 内部剪切应力会随着位移的持续增加而降低, 并且最终会达到一个不随位移增加而减小的残余应力值 τ_r (CD 段)。Fox 等^[14]研究发现, GCL 或土工膜在剪切试验时, 不当的固定方式会使得材料沿固定面发生滑动, 进而导致所测应力位移关系曲线发生变化。于是, 许多学者把针刺 GCL 内部剪切应力位移曲线中的应力拐点(如图 4 中点 A)视为试验误差而忽略。

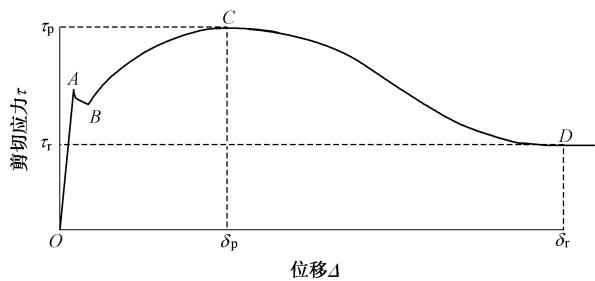


图 4 针刺 GCL 内部剪切应力位移曲线的型式

Fig. 4 Typical shear stress-displacement relationship for needle-punched GCL internal shear tests

3 小峰值应力

通过单剪试验发现, 水化针刺 GCL 剪切应力位移曲线都会表现出明显的应力小峰值现象, 试验过程中针刺 GCL 的一侧土工布面采用环氧树脂固定, 因此不存在固定界面发生滑移的情况, 并且重复试验证实小峰值应力的值具有很好的可重复性。本文 GCL+GM 复合衬里单剪试验应力位移曲线中小峰值应力对应的剪切位移基本在 1 mm 左右, 并且小峰值应力出现的位移不随法向压力而显著变化。Fox 等^[2]在分析针刺 GCL 内部剪切强度与 GCL/GM 界面强度的关系时, GCL 内部剪切应力位移曲线和 GCL+GM 复合界面剪

切应力-位移曲线在很小位移时都存在应力小峰值现象, 并且小峰值应力在相同法向压力条件下基本相等。因此, 应力位移曲线上的应力小峰值现象是水化针刺 GCL 内部剪切的固有特征。

针刺 GCL 是一种复合材料, 其抗剪强度包含分别来自内部膨润土和针刺纤维加筋方面的贡献。从 Fox 等^[7]开展的 3 种不同种类 GCL 内部剪切强度试验结果可以发现, 不同种类 GCL 的应力位移曲线在剪切位移很小时几乎重合(如图 5)。图 5 中 3 种 GCL 的加筋工法不一样, 但具有相同的钠基膨润土成分。于是可以推测, GCL 应力位移曲线上的小峰值应力应与 GCL 内部膨润土有关。针刺 GCL 的小峰值应力随法向应力的变化关系如图 6 所示。针刺 GCL 的小峰值应力会随着法向应力的增加而增加, 小峰值应力与法向应力表现出很好的线性关系。对于同种针刺 GCL 材料, 从 GCL 内部剪切应力位移曲线和 GCL+GM 复合衬里整体剪切应力位移曲线中可以得到几乎相等的小峰值应力。无论复合衬里中 GCL 编织布侧或无纺布侧与 GM 接触, GCL 复合衬里剪切应力位移曲线上的小峰值应力都位于同一条拟合直线上(如图 6)。

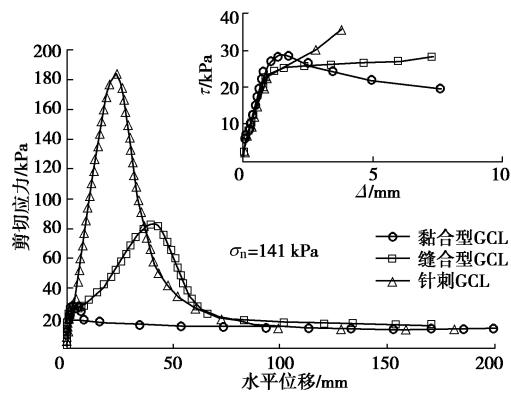


图 5 三种类型 GCL 的内部剪切应力位移曲线^[7]

Fig. 5 Internal shear stress-displacement curves for three different types of GCLs^[7]

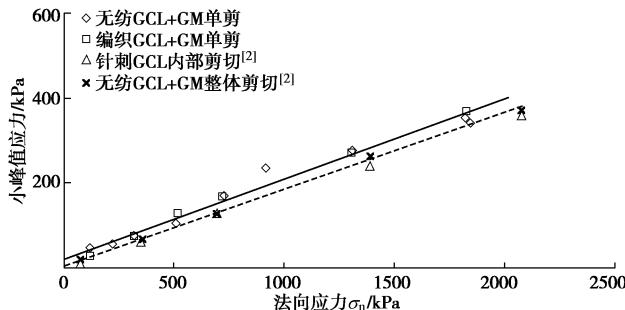


图 6 针刺 GCL 小峰值应力与法向应力的关系

Fig. 6 Small peak stress-normal stress relationships for needle-punched GCLs

水化膨润土直剪试验得到的应力位移关系如图 7

所示。钠基膨润土的剪切峰值强度一般在位移 1 mm 左右达到, 达到 4~6 mm 位移后的剪切强度下降不再明显。从水化膨润土达到峰值强度时的位移上看, 与针刺 GCL 应力小峰值出现时的位移量几乎吻合。水化膨润土的割线摩擦角在 50~200 kPa 的竖向应力范围内测得为 9° ~13.0°。本文 GCL+GM 复合衬里单剪试验拟合得到的小峰值应力拟摩擦角为 10.6°, Fox 等^[2]试验中截取的小峰值应力随法向应力变化的拟摩擦角为 9.9°。其他学者^[15-17]试验得到的钠基膨润土峰值强度摩擦角都接近 10° ~11°, 进一步证实 GCL 的剪切小峰值应力与水化膨润土的强度值非常接近。综合应力和位移值两方面的比较分析可得, 针刺 GCL 剪切应力位移曲线上的小峰值应力表征了内部膨润土的抗剪强度贡献。

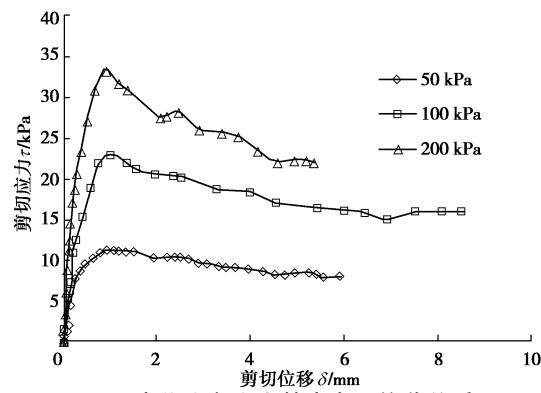


图 7 水化膨润土直剪应力-位移关系

Fig. 7 Shear stress-displacement curves for fully hydrated bentonite

4 剪切破坏机理

水化针刺 GCL 在剪切初期, 抗剪能力的调动主要与内夹膨润土有关, 此时加筋纤维的抗剪能力尚未能够显著调动。针刺 GCL 在剪切初期应力随位移近似直线增长, 并且在较小位移时达到一个小峰值应力(图 4 中的 OA 段)。小峰值应力的达到说明内夹水化膨润土已达到其峰值应力, 由于水化膨润土抗剪强度在经过峰值开始软化, 针刺 GCL 内部剪切应力在经过应力小峰值后出现下降趋势。随着 GCL 剪切位移的继续增加, 内部针刺加筋纤维逐渐进入受拉的状态, GCL 的剪切应力随位移增加开始显著提高(图 4 中的 BC 段)。针刺 GCL 达到峰值强度所需的位移一般在 10~30 mm, GCL 针刺加筋纤维在应变达到一定程度后从编织布侧被拉出或纤维自身被拉断, 针刺纤维拉伸对 GCL 内部抗剪强度的贡献开始消失。对于钠基膨润土夹持在单层无纺布和单层编织布之间的针刺 GCL, 内部剪切破坏面一般都处于编织土工布与膨润土界面。破坏主要表现为针刺加筋纤维从编织布侧被拉出, 也

有少部分的加筋纤维被拉断。由两层无纺布夹持的针刺 GCL 破坏主要表现为针刺加筋纤维的拉断, 和少部分纤维从无纺布中被拉出。当越来越多的加筋纤维退出对 GCL 内部抗剪强度的贡献, 针刺 GCL 的抗剪强度进入了后峰值的软化阶段(图 4 中 CD 段)。

当针刺加筋纤维拉伸对 GCL 内部抗剪强度的贡献全部消失, 并且加筋膨润土与夹持土工布界面上的土颗粒及加筋纤维随大位移剪切完成定向排列, 则此时针刺 GCL 达到完全残余应力状态, GCL 内部抗剪强度不再随位移继续减小, 即达到残余抗剪强度 τ_r (图 4 中 D 点)。由于加筋纤维的拉伸抗剪性质与其生产工艺及剪切方向有关。因此 GCL 在不同的方向上的抗剪强度有一定的差异性, 并且不同厂家生产的 GCL 内部抗剪强度也存在差异。

将针刺 GCL 内部剪切强度分解为两个部分, 分别为水化膨润土的强度贡献和针刺加筋纤维的强度贡献。其中, 小峰值应力值 τ_b 代表了内部水化膨润土的峰值抗剪强度, 则针刺纤维拉伸对 GCL 内部抗剪强度的贡献 τ_g 等于针刺 GCL 的剪切峰值强度扣除峰值位移时加筋膨润土的内部剪切应力 ($\tau_p - \tau_b$)。市场上的针刺 GCL 产品在出厂时采用剥离强度指标来定量化描述产品的加筋效果。Gilbert 等^[12]认为加筋纤维抗剪强度的贡献会随着法向应力增加而增加, 主要取决于加筋纤维的摩擦性能。Fox 等^[2, 7]通过试验得到, 当法向应力很大时, 针刺 GCL 中的加筋纤维更倾向于被拉断而非从土工布侧拉出。按照这一特点可以推断, 对于剥离强度相同的同批次 GCL, 存在一个临界压力 σ_{cr} , 当 $\sigma_n \geq \sigma_{cr}$ 时由于拉伸应力有限使得加筋纤维抗剪贡献能力 τ_g 不再随竖向应力 σ_n 的增加而发生明显变化。将本文单剪试验中 GCL 内部剪切破坏类型的试验结果以及 Fox 等^[2]的试验结果进行分析, 针刺纤维拉伸对 GCL 内部抗剪强度的贡献 τ_g 与 σ_n 之间的关系如图 8 所示。从图 8 中可以看出, 当法向压力达到某一值后, τ_g 的值随 σ_n 增加的变化趋势不明显, 证实了针刺 GCL 破坏机理的推断。

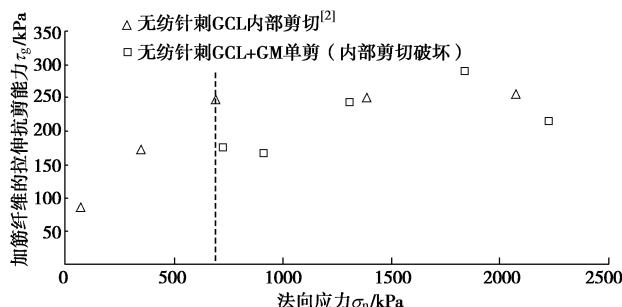


图 8 加筋纤维对抗剪强度的贡献与竖向应力之间的关系
Fig. 8 Relationship between shear strength contribution from reinforced fiber and normal stress

5 峰值强度准则

峰值强度准则是含 GCL 衬里边坡稳定性分析的关键, 目前有关 GCL 内部剪切强度强度准则多由试验数据直接拟合公式所得。基于上一节的分析, 将针刺 GCL 内部剪切峰值强度划分为两个部分: 水化膨润土的强度贡献 (τ_b) 和针刺加筋纤维拉伸的抗剪强度贡献 ($\tau_g = \tau_p - \tau_b$)。其中, 水化加筋膨润土的强度贡献 τ_b 与竖向压力 σ_n 成线性关系:

$$\tau_b = a + \sigma_n \cdot \tan \phi_s , \quad (1)$$

式中, a 和 ϕ_s 为常数, 它们分别代表加筋膨润土的黏聚力和内摩擦角。针刺加筋纤维的强度贡献 τ_g 可由分段函数表示, 当法向应力 σ_n 小于某临界应力值 σ_{cr} 时, τ_g 随 σ_n 的增加而增加, 而当法向应力 σ_n 大于临界应力值 σ_{cr} 时, τ_g 不再随 σ_n 的增加而变化 (图 8 中 $\sigma_{cr} = 692$ kPa)。当 $\sigma_n < \sigma_{cr}$ 时, τ_g 与 σ_n 的关系如图 9 所示。非线性公式能够很好地拟合 τ_g 与 σ_n 之间的关系:

$$\tau_g = A \cdot \sigma_n \cdot \left(\frac{\sigma_n}{p_a} \right)^B , \quad (2)$$

式中, A 和 B 为与针刺 GCL 聚合材料力学性质有关的常数。

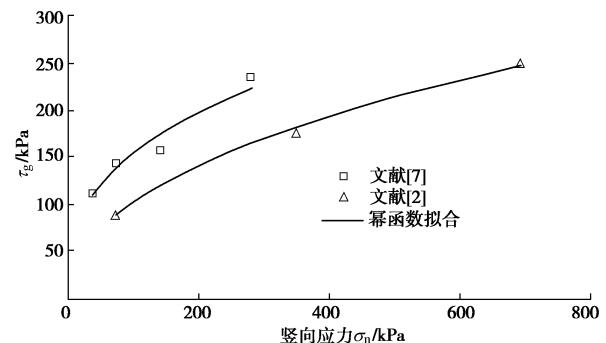


图 9 低压下 GCL 纤维拉伸对 GCL 抗剪强度的贡献

Fig. 9 Contribution of reinforced fiber under low normal stress to shear strength of GCLs

综合式 (1)、(2), 可以得到 GCL 内部剪切峰值强度准则模型:

$$\left. \begin{aligned} \tau_p &= \tau_b + \tau_g = a + \sigma_n \cdot \tan \phi_s + A \cdot \sigma_n \cdot \left(\frac{\sigma_n}{p_a} \right)^B \\ &\quad (\sigma_n < \sigma_{cr}), \\ \tau_p &= \tau_b + \tau_g = a + \sigma_n \cdot \tan \phi_s + B = c_p + \sigma_n \tan \phi_s \\ &\quad (\sigma_n \geq \sigma_{cr}) . \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

c_p 代表 $\sigma_n \geq \sigma_{cr}$ 时针刺 GCL 线性强度准则中的类黏聚力, 其在数值上等于常数 a 。式 (3) 在法向压力较小时保留了 GCL 屈服包线类似幂函数的曲线变化, 与 Chiu 等^[7]拟合的幂函数峰值强度表达式具有一定的相似性。针刺 GCL 峰值剪切强度准则的模型表达式 (3) 中, a 和 ϕ_s 分别为 GCL 应力位移曲线上小位移拐点应

力拟合得到的黏聚力和内摩擦角, A 和 B 为与针刺 GCL 聚合材料性质有关的参数。

为了证明所推导的 GCL 峰值强度模型的正确性, 需将式(3)对相关试验数据进行比较验证。由于剪切速率、试验仪器和 GCL 生产工艺和材料性质等对加筋纤维拉伸抗剪强度参数具有较显著的影响, 验证用的试验数据应该来自同一试验室进行的同类针刺 GCL 的剪切试验。用于验证的试验数据应涵盖低压和高压, 从而可以体现出分段模型的界限压力 σ_{cr} 的存在。针刺 GCL 内部剪切峰值强度准则分段模型式(式(3))是基于 Fox 等^[2, 7]中 GCL 内部剪切试验结果所建立, 强度准则自然符合较好。Fox 等^[7, 12, 14]的 GCL 剪切试验大部都在竖向压力较小时 ($\sigma_n < \sigma_{cr}$) 进行, 不能表现出式(3)分段形式。Chiu 等^[8]提供了涵盖很大压力范围的 GCL 内部剪切试验强度数据, 笔者在原文中给出了 GCL 峰值强度包线拟合方程

$$\tau_p = 6.4 \cdot \sigma_n^{0.59} \quad (4)$$

无法获取原文中各级压力下的应力-位移曲线, 所以无法确定参数 ϕ 和 a 。

考虑到加筋钠基膨润土的峰值强度摩擦角一般处于 $9^\circ \sim 13^\circ$, 假定针刺 GCL 内夹膨润土的内摩擦角 ϕ 为 10° , 由于水化膨润土的剪切黏聚力很小, 为了简化计算将 a 的值取为 0, 进而采用分段模型式(式3)拟合试验结果得到:

$$\left. \begin{aligned} \tau_p &= \sigma_n \cdot \tan 10^\circ + 0.69 \cdot \sigma_n \cdot \left(\frac{\sigma_n}{P_a} \right)^{-0.47} \\ &\quad (\sigma_n < 1190 \text{ kPa}), \\ \tau_p &= 255.49 + \sigma_n \cdot \tan 10^\circ \\ &\quad (\sigma_n \geq 1190 \text{ kPa}), \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中, σ_{cr} 的值约为 1190 kPa , σ_{cr} 值在实际工程中应根据其定义来确定, 即 $\tau_p - \tau_b$ 不再随 σ_n 而发生变化的临界转换压力。

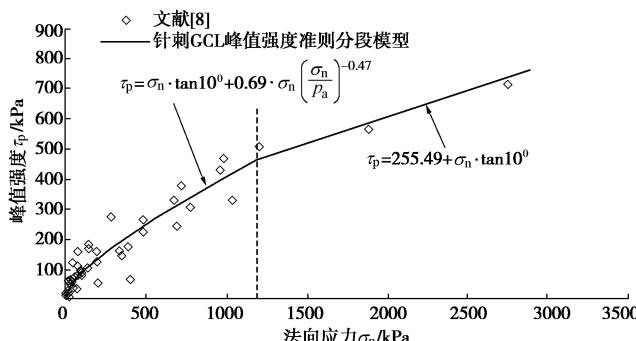


图 10 针刺 GCL 峰值强度分段模型

Fig. 10 Segmentation model for peak strength of needle-punched GCLs

针刺 GCL 峰值强度模型(式(5))与试验真实峰值强度值的对比如图 10 所示, 模型式与试验结果在全压力下都吻合较好。可见本文提出的 GCL 峰值强度模型(式(3))不但反映针刺 GCL 内部剪切强度机理, 而且能够和实际情况符合较好。

6 结 论

抓住针刺 GCL 剪切应力位移曲线上的小峰值应力特征, 通过已有试验成果分析并结合水化膨润土直剪试验, 分析了水化针刺 GCL 剪切破坏机理并提出新的峰值强度模型, 本文得到以下几点主要结论。

(1) 针刺 GCL 内部剪切应力位移曲线的典型样式如图 4 所示。针刺 GCL 内部界面剪切初期, 剪切应力会随着位移发展近乎直线增加, 在很小位移(一般小于 2 mm)时会出现应力小峰值现象。针刺 GCL 内部剪切应力位移曲线上的“小峰值应力”现象是材料水化剪切的固有特征。

(2) GCL 应力位移曲线上的应力小峰值表征了针刺 GCL 内夹膨润土的峰值强度。小峰值应力随法向压力的增加近乎线性增长, 不同加筋工法几乎不影响 GCL 剪切小峰值应力的大小。

(3) 法向压力较小时, 针刺加筋纤维对 GCL 内部剪切强度的贡献随法向压力的增加而增大; 当法向压力大于某临界压力值时, 由于拉伸应力有限使得加筋纤维的抗剪能力贡献不再随法向应力的增加而发生明显变化。

(4) 针刺 GCL 的内部剪切峰值强度可分为水化膨润土的强度贡献和针刺加筋纤维的抗剪强度贡献两部分, 峰值强度准则模型(式(3))能够反映针刺 GCL 的剪切破坏机理并且和试验结果符合较好。

参考文献:

- [1] 钱学德, 施建勇, 刘晓东. 现代卫生填埋场的设计与施工 [M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. (QIAN Xue-de, SHI Jian-yong, LIU Xiao-dong. Design and construction of modern sanitary landfills[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011. (in Chinese))
- [2] FOX P J, ROSS J D. Relationship between NP GCL internal and HDPE GMX/NP GCL interface shear strengths[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, 137(8): 743–753.
- [3] FOX P J, SURA J M, NYE C J. Dynamic shear strength of a needle-punched GCL for monotonic loading[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2015, 141(7): 04015025.

- [4] 徐超, 李志斌. 针刺 GCL 内部剪切强度的试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, **38**(5): 639 - 643. (XU Chao, LI Zhi-bin. Experimental research on internal shear strength of needle-punched GCL[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010, **38**(5): 639 - 643. (in Chinese))
- [5] EID H T. Shear strength of geosynthetic composite systems for design of landfill liner and cover slopes[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2011, **29**(3): 335 - 344.
- [6] 林海, 章玲玲, 阮晓波, 等. 水化针刺 GCL+GM 复合衬里的单剪破坏特征[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(9): 1160 - 1167. (LIN Hai, ZHANG Ling-ling, RUAN Xiao-bo, et al. Simple-shear failure characteristics of hydrated needle-punched GCL+GM composite liner[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(9): 1160 - 1167. (in Chinese))
- [7] FOX P J, ROWLAND M G, SCHEITHE J R. Internal shear strength of three geosynthetic clay liners[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, **124**(10): 933 - 944.
- [8] CHIU P, FOX P J. Internal and interface shear strengths of unreinforced and needle-punched geosynthetic clay liners[J]. Geosynthetics International, 2004, **11**(3): 176 - 199.
- [9] ZORNBERG J G, MCCARTNEY J S, SWAN J R H. Analysis of a large database of GCL internal shear strength results[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, **131**(3): 367 - 380.
- [10] FOX P J, STARK T D. State-of-the-art report: GCL shear strength and its measurement[J]. Geosynthetics International, 2004, **11**(3): 141 - 175.
- [11] NYE C J, FOX P J. Dynamic shear behavior of a needle-punched geosynthetic clay liner[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, **133**(8): 973 - 983.
- [12] GILBERT R B, FERNANDEZ F, HORSFIELD D W. Shear strength of reinforced geosynthetic clay liner[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1996, **122**(4): 259 - 265.
- [13] STARK T D, EID H T. Shear behavior of reinforced geosynthetic clay liners[J]. Geosynthetics International, 1996, **3**(6): 771 - 786.
- [14] FOX P J, KIM R H. Effect of progressive failure on measured shear strength of geomembrane/GCL interface[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, **134**(4): 459 - 469.
- [15] MESRI G, OLSON R E. Shear strength of montmorillonite[J]. Géotechnique, 1970, **20**(3): 261 - 270.
- [16] GLEASON M H, DANIEL D E, EYKHOLT G R. Calcium and sodium bentonite for hydraulic containment applications[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, **123**(5): 438 - 445.
- [17] TIWARI B, AJMERA B. A new correlation relating the shear strength of reconstituted soil to the proportions of clay minerals and plasticity characteristics[J]. Applied Clay Science, 2011, **53**(4): 48 - 57.