



土工模袋砂竖向抗压强度及其影响因素*

莫海鸿¹, 杨春山^{1,2}, 陈俊生¹, 张立¹

(1. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510641; 2. 广州市市政工程设计研究总院, 广东 广州 510060)

摘要: 开展了不同尺寸、数量及充填度下的模袋砂单轴压缩试验, 深入研究模袋砂界面摩擦特性、充填度及尺寸对其抗压强度和破坏机理的影响。基于现有研究成果, 推导了综合考虑模袋砂间相互作用和充填度影响的模袋砂抗压强度计算公式。研究表明: 单个模袋砂试验抗压强度远大于多个模袋砂试验结果, 且随充填度的减小愈发显著, 因此现有针对单个模袋砂的试验研究存在不足。模袋砂抗压强度随着充填度的增加而减小, 尺寸效应对模袋砂受力变形规律影响很小, 而对其承载力影响明显。不同充填度模袋砂破坏机理不尽相同, 充填度较大时, 模袋砂很快进入张拉变形而破坏, 破坏主要发生在模袋缝制接口等相对薄弱处; 随着充填度的减小, 模袋砂破坏主要由砂应变局部化所致, 表现为接触界面处的渐进破坏, 因破坏不易发现而对实际工程较为不利。与试验结果对比表明, 完善后的理论计算方法可用于模袋砂整体张拉破坏时抗压强度预测。

关键词: 土工模袋砂; 抗压强度; 轴向压缩试验; 界面摩擦; 尺寸效应; 充填度影响

中图分类号: TU 411; U 6

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)05-0024-07

Compressive strength and influential factors of geotextile bag with sand

MO Hai-hong¹, YANG Chun-shan^{1,2}, CHEN Jun-sheng¹, ZHANG Li¹

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2. Guangzhou Municipal Engineering Design & Research Institute, Guangzhou 510060, China)

Abstract: The compression tests were conducted on geotextile bags with sand of different sizes, different volume and different compactness to explore influences of friction, compactness and size on the compressive strength and failure mode. The calculation formula of compressive strength considering the interface friction and compactness was proposed based on the existing theoretical research results. The results indicate that the compressive strength of a single sample is greater than that of many samples, so the existing studies on the single geotextile bag with sand have some deficiencies. The compressive strength of geotextile bag with sand decreases with the increase of the compactness. The sizes have a little effect on the mechanical and deformation and have significant effects on the ultimate bearing capacity. The failure mechanism of geotextile bag with sand is different under different compactness: it quickly produces the tensile deformation and failure when the compactness is large, and failure occurs mainly in the sewing interface which is relatively weak. With the decrease of the compactness, the geotextile bags show progressive failure caused by the strain localization, which is unfavorable because the failure is uneasy to find in the practical engineering. The comparison with the test results indicates that the theoretical calculation method can be used to predict the compressive strength when the tensile failure.

Keywords: geotextile bag with sand; compressive strength; axial compression test; interface friction; size effect; compactness influence

收稿日期: 2015-11-12

*基金项目: 国家自然科学基金项目(51108190)

作者简介: 莫海鸿(1955—), 男, 博士, 教授, 从事岩土工程方面的教学与科研工作。

模袋砂以其诸多优点^[1-4]在港口围堰、航道治理工程中得到了广泛的应用,同时相关理论的研究却严重滞后于工程实践,如何合理确定其抗压强度及破坏机理值得探讨。

Mastuoka H 等^[5-8]通过单一模袋砂无侧限压缩试验和理论计算研究,得到单个模袋砂轴向受压力学特性,且推导了极限抗压强度计算式。但研究对象限于单个模袋,忽视了模袋间的相互作用,且未考虑充填度的影响。

陈俊生等^[9]在 Mastuoka H 的试验研究基础上,进行了多个模袋砂的单轴压缩试验,得到相应的极限抗压强度与合理充填度。然而研究仅针对特定的模袋砂尺寸,且对模袋砂破坏机理未作合理解释。

白福青等^[10]在 Mastuoka H 理论研究基础上,推导了土工模袋极限抗压强度计算公式,仍未考虑模袋间的相互作用和充填度的影响,且模袋横向变形后作矩形假定仅适用于充填度较高的情况。

鉴于此,开展了不同尺寸、数量及充填度下模袋砂单轴压缩试验,深入分析了不同试验条件下模袋砂轴向力学特性及破坏机理,探讨了模袋砂间界面特性、充填度及尺寸对模袋砂抗压强度

的影响。而后完善了现有模袋砂抗压强度理论计算公式。

1 模袋砂轴向抗压试验

1.1 试验设备和材料

试验以广州洲头咀沉管隧道模袋砂围堰工程为背景,试件所用材料均与实际工程一致。模袋砂压缩试验型微机控制全自动压力试验机见图1。



图1 室内加载试验

试验模袋由聚丙烯土工布用尼龙线通过工业缝纫机缝制而成,参数见表1。模袋内的充填砂采用粒径为0.1~2 mm的粗颗粒,直剪试验内摩擦角 $\varphi = 32.4^\circ$,不均匀系数 $C_u = 2.0$,曲率系数 $C_c = 0.98$ 。

表1 土工模袋材料参数

单位面积质量/ (g/m^2)	厚度(2 kPa)/ mm	纬向断裂 强度/(kN/m)	经向断裂 强度/(kN/m)	纬向断裂 伸长/%	经向断裂 伸长/%	CBR 顶破强度/ kN
188	1.7	56	52	25	22	4

注:试样数5个。

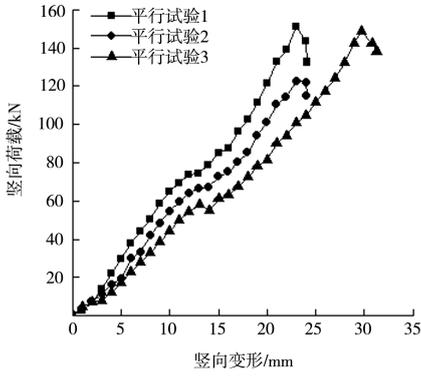
1.2 试验方法与步骤

为了考察不同数量、充填度及尺寸对模袋砂抗压强度和破坏形式的影响,分别设置试验中试样为单个与多个模袋砂,充填度分别为95%、75%与60%,模袋砂长×宽×高尺寸则分别取25 cm×25 cm×10 cm和20 cm×20 cm×10 cm。为消除试验的偶然性,同种试件进行3组平行试验。试验采用荷载控制方式,加载速率为2 kN/s,通过计算机数据采集及绘图系统记录加载过程中的荷载-变形曲线。

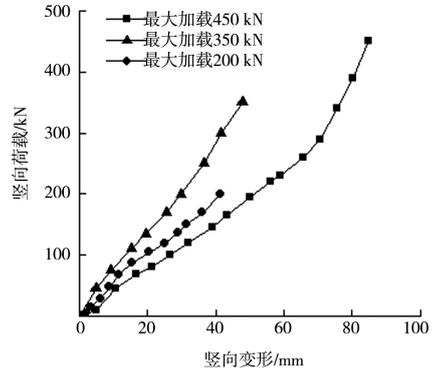
1.3 试验结果与分析

1.3.1 模袋砂极限抗压强度试验结果

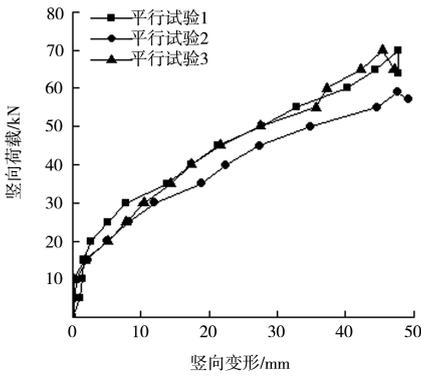
图2~4为不同试验条件下(表2)模袋砂荷载-变形曲线。模袋砂充填度为95%时(接近充满)极限承载力较小,荷载-变形曲线有明显的突变点,该突变点为实际破坏点,对应荷载为极限荷载;而对于75%和60%充填度的模袋砂,可承受较大的竖向荷载,且没有明显的突变点,故通过施加不同等级荷载来观察其破坏情况,从而确定其极限荷载。



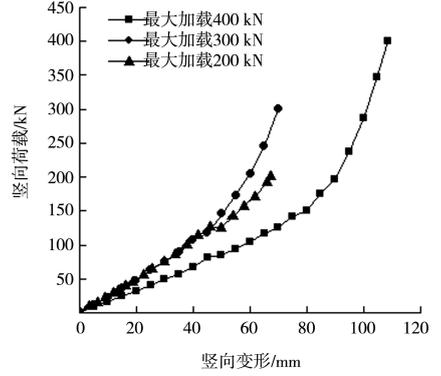
a) 试验1、3组平行试验



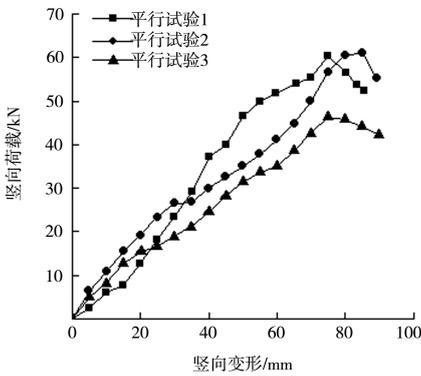
b) 试验5、3组平行试验



b) 试验4、3组平行试验

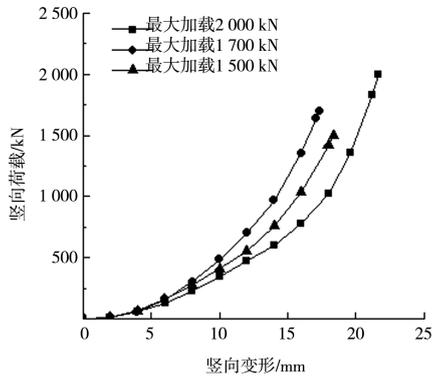


c) 试验8、3组平行试验



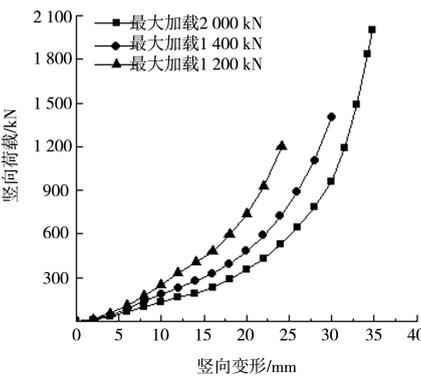
c) 试验7、3组平行试验

图3 充填度为75%试验结果

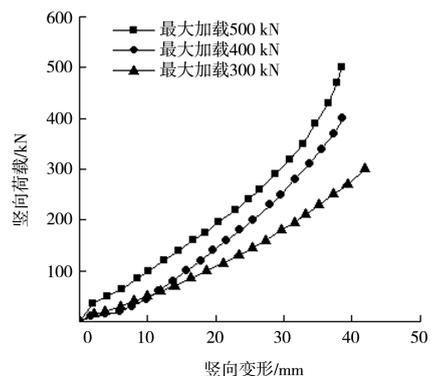


a) 试验3、3组平行试验

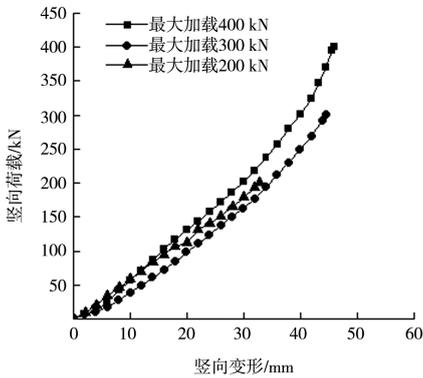
图2 充填度为95%试验结果



a) 试验2、3组平行试验



b) 试验6、3组平行试验



c) 试验9、3组平行试验

图 4 充填度为 60% 试验结果

由上述试验结果得到不同试验条件下的模袋砂极限承载力 (表 2), 可得到如下认识:

表 2 试验方案与抗压强度

试验编号	数量	充填度/ %	尺寸(长×宽×高)/ (cm×cm×cm)	极限荷载/ kN
1	1	95	25×25×10	80~150
2		75		1 200~1 400
3		60		1 500~1 700
4	3	95	20×20×10	60~90
5		75		200~350
6		60		400~500
7	3	95	20×20×10	40~50
8		75		200~300
9		60		300~400

1) 尺寸一定时, 单个模袋砂试验的极限荷载比多个模袋砂大, 且充填度愈小愈发显著; 这是因为多个模袋砂试验存在模袋砂之间的界面摩擦, 竖向荷载作用下加快了模袋张力的发展并出现破坏。因此针对单个模袋砂的试验研究与实际情况偏差较大。

2) 同尺寸模袋砂极限荷载随充填度的增加而显著减小; 充填度至 95% 时, 模袋砂荷载-变形曲线有明显的转折点, 较小荷载作用下发生破坏, 究其原因是充填度的增加使模袋实际受荷面积减小并迅速进入张拉变形, 促使应变超过模袋极限拉应变破坏。

3) 当充填度一致时, 模袋砂尺寸效应对其受力变形规律影响较小, 但对其极限荷载影响明显, 表现为宽高比越大 (扁平状) 极限荷载越大, 试

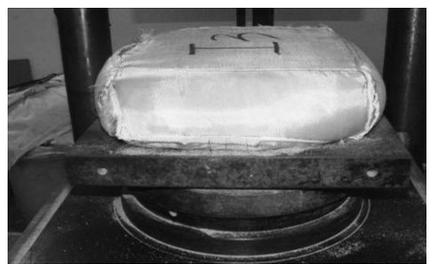
验宽高比增大 25% 则相应的极限荷载最大增加约为 67%。

4) 充填度为 75% 和 60% 时, 随着竖向荷载的增加, 模袋砂竖向逐渐压实, 荷载大到一定值后局部砂出现软化引起破坏, 破坏前受力-变形曲线斜率存在明显的增大, 由此可确定极限荷载。

1.3.2 模袋砂破坏形态影响因素

对于特定模袋与砂, 模袋砂尺寸和充填度对其抗压强度的影响可以抽象概括为充填度的影响, 故仅分析模袋砂数量 (模袋间界面摩擦) 和充填度的影响。

图 5~7 为不同充填度模袋砂典型破坏形态。从试验过程中模袋砂破坏外观特征来看, 单个模袋砂和多个模袋砂的破坏形式存在较大的差异: 多个模袋试验破坏主要集中在模袋砂间界面处, 而单个模袋破坏则出现在缝纫处, 究其原因是多个模袋砂中间试件与两侧模袋砂为柔性接触, 发生相对位移, 受力也更不均匀, 而单个试件仅存在刚-柔接触, 受力相对均匀不易破坏。局部接触破坏也从侧面说明试验所用模袋接缝强度大于模袋强度, 可为实际工程提供参考。



a) 试验1模袋典型破坏模式

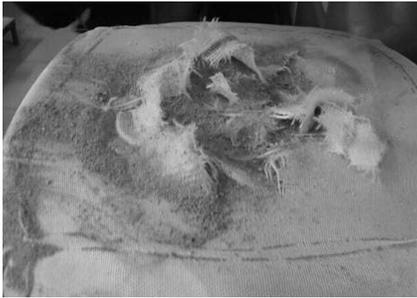


b) 试验4中间模袋典型破坏模式

图 5 充填度为 95% 模袋砂破坏形态

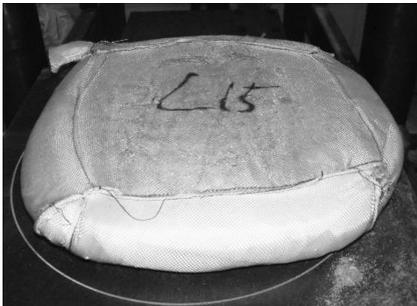


a) 试验2典型破坏模式

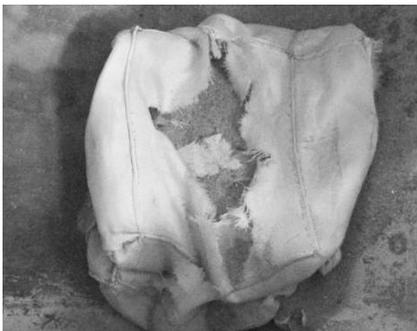


b) 试验5中间模袋典型破坏模式

图6 充填度为75%模袋砂破坏形态



a) 试验3典型破坏模式



b) 试验6中间模袋典型破坏模式

图7 充度为60%袋砂破坏形态

模袋砂破坏区域随着充填度的减小而增大，且其破坏机理也不尽相同。充填度为95%的模袋

砂在竖向荷载作用下，模袋张力迅速增大，模袋砂薄弱处率先破坏，如模袋的缝纫接口。而对于充填度为75%和60%的模袋砂，竖向荷载作用下模袋内局部砂出现软化引起应变局部化，从而形成剪切带，促使与其接触的模袋破坏；该类破坏大多出现在模袋砂界面处，因看不到而对实际工程较为不利。值得注意的是，现有研究均认为不同充填度模袋砂是模袋整体张拉达到极限拉应变引起的破坏，显然与实际情况不相符，设计施工需引起重视。

2 模袋砂轴向抗压强度理论计算

试验研究与现场经验发现，充填度小于80%的模袋砂在缝合处出现张拉破坏，此外在接触界面砂出现应变局部化也会引起破坏；考虑到实际工程实践中张开破坏现象相对明显，故本文重点探讨模袋砂发生张拉破坏时极限抗压强度计算。前述分析指出，现有抗压强度理论研究中未考虑模袋间的界面接触和充填度等因素的影响，与实际情况间存在偏差；因此有必要在既有研究成果的基础上，推导考虑模袋间界面摩擦作用和充填度等多因素影响下的模袋砂轴向抗压强度计算公式。

模袋与砂共同作用的增强机理大致可归纳为两类^[11]：一种为摩擦加筋原理，另一种为准粘聚力原理。此处采用准粘聚力原理，视模袋与砂共同作用强度的增加量为砂土额外粘聚力。图8为多个模袋砂总体计算模型。

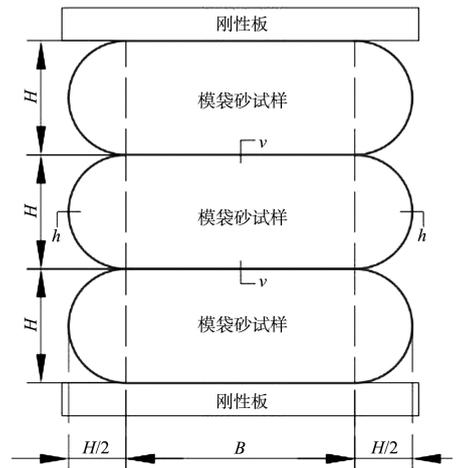


图8 模袋砂总体计算模型

在文献[6]计算模型推导基础上引入模袋之间的界面摩擦力:

$$f = \mu p_v \quad (1)$$

式中: μ 为模袋间的摩擦系数, 参考文献[11]计算公式计算; p_v 为竖向压应力。

假定充填物的体积是不会发生变化的, 且变形后为圆形状。取充填度为 w , 完全充满后模袋砂的体积为 V_0 , 当充填度为 w 时模袋砂体积为:

$$V = V_0 w \quad (2)$$

模型采用平面单元进行计算, 忽略沿长度方向的变形, 并且模袋在形体自由变化过程中的周长是不会发生变化的, 则有:

$$\begin{cases} V_0 = B_0 H_0 l_0 \\ V = B H l + 2 \times \frac{\pi H^2}{4} l \\ 2(B_0 + H_0) = 2B + \pi H \end{cases} \quad (3)$$

由此计算得到变形后模袋砂尺寸计算公式:

$$\begin{cases} H = w B_0 H_0 / (B_0 + H_0) \\ B = B_0 + H_0 - \pi w B_0 H_0 / [2(B_0 + H_0)] \end{cases} \quad (4)$$

式中: l_0 、 B_0 、 H_0 为模袋砂初始长、宽和高; l 、 B 、 H 为模袋砂变形后的长、宽与高。

通过水平和竖直剖面(图 8)截取中间模袋砂脱离体进行受力分析(图 9)。

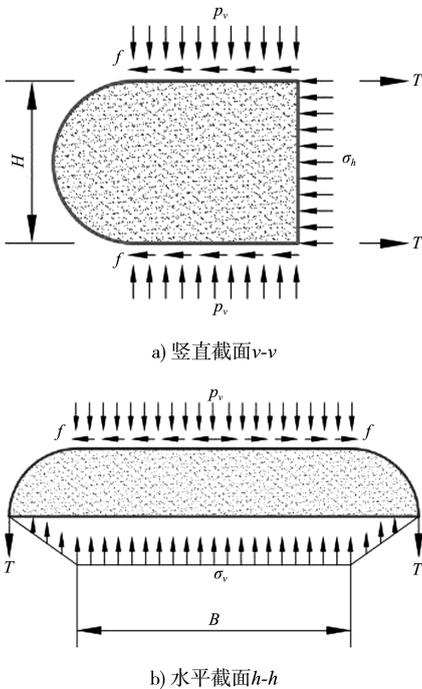


图 9 中间模袋应力状态

长度方向取单宽模袋砂水平与竖直方向受力平衡有:

$$\begin{cases} \sigma_h H + 2\mu p_v \frac{B}{2} - 2T = 0 \\ p_v B - \sigma_v B - \frac{\sigma_v H}{2} + 2T = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: σ_h 、 σ_v 为水平与竖向应力; T 为模袋产生的拉力, 参考文献[6], 通过式(6)计算。

$$T = \frac{E \delta_v (\pi \delta_v + 4B)}{2(H - \delta_v)(2B + \pi H)} \quad (6)$$

当模袋砂达到极限状态时, 水平与竖向应力满足:

$$\sigma_v = K_p \sigma_h \quad (7)$$

由 Rankine 土压力理论可知, 当模袋包裹的砂达到被动土压力时, 即当 $K_p = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$ 时, 满足

公式:

$$p_v = 2c \sqrt{K_p} \quad (8)$$

则由式(5)、(7)、(8)可得准粘聚力、极限抗压强度及极限承载力分别为:

$$\begin{cases} c = \frac{\frac{T}{B \sqrt{K_p}} \left(\frac{B}{H} K_p + \frac{K_p}{2} - 1 \right)}{1 + \mu \left(\frac{B}{H} K_p + \frac{K_p}{2} \right)} \\ p_v = \frac{\frac{2T}{B} \left(\frac{B}{H} K_p + \frac{K_p}{2} - 1 \right)}{1 + \mu \left(\frac{B}{H} K_p + \frac{K_p}{2} \right)} \\ F_v = \frac{2Tl \left(\frac{B}{H} K_p + \frac{K_p}{2} - 1 \right)}{1 + \mu \left(\frac{B}{H} K_p + \frac{K_p}{2} \right)} \end{cases} \quad (9)$$

把试验中的模袋砂试样参数代入上式, 计算得到尺寸为 25、25、10 cm 时多个模袋砂的竖向极限承载力, 与试验结果平均值对比见图 10。

由图 10 可知, 随着充填度的增大极限荷载计算值越接近试验结果; 当充填度为 85% 时, 两者数值相差约为 8%, 而充填度为 95% 时, 两者数值近乎一致; 与之相反, 随着充填度的减小, 计算值与试验结果的差值越大, 主要因其破坏机理不

同, 充填度较小时发生应变局部化诱发破坏与理论推导前提不符。通过对比分析可知, 本文完善后的理论计算方法可用于发生张拉破坏的模袋砂抗压强度预测, 该方法具备合理性。

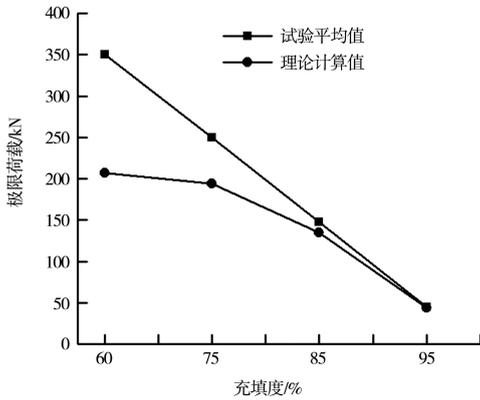


图 10 模袋砂试验与理论抗压强度

3 结论

1) 单个模袋砂的极限荷载较多个模袋砂大, 且随着充填度的减小愈发明显, 说明现有针对单个模袋砂的研究存在不足。

2) 模袋砂极限荷载随充填度的增加而减小; 尺寸效应对模袋砂受力变形分布影响很小, 但对其承载力影响显著, 表现为宽高比增大、极限承载力增大。

3) 充填度较大时, 竖向荷载作用下模袋砂很快进入拉伸变形, 荷载-位移曲线出现明显的转折点, 且在较小荷载作用下模袋缝制接口因整体张拉破坏。

4) 不同充填度模袋砂破坏机理不尽相同, 充填度较大时主要发生模袋整体张拉破坏; 而充填度较小时则由砂应变局部化引起局部模袋破坏, 破坏大多出现在模袋砂界面处, 实际施工往往不易发现。现有研究认为不同充填度模袋砂均为整体张拉破坏, 显然与实际情况不相符, 设计施工需引起重视。

5) 与试验结果对比表明, 修正后的理论计算方法可用于模袋砂整体张拉破坏时抗压强度预测;

但抗压强度计算式仅适用于张拉破坏的模袋砂, 对于小充填度应变局部化破坏的模袋砂极限抗压强度计算式尚待进一步研究。

参考文献:

- [1] 邱长林, 闫玥, 闫澍旺. 泥浆不均匀时土工织物充填袋特性[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(5): 760-763.
- [2] Liu S H, Gao J J, Wang Y Q, et al. Experimental study on vibration reduction by using soilbags [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2014, 42(1): 52-62.
- [3] Oberhagemann Knut, Makbul Hossain Md. Geotextile bag revetments for large rivers in Bangladesh [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2011, 29(4): 402-414.
- [4] 刘斯宏, 高军军, 王子健, 等. 土工袋技术在市政沟槽回填中的应用研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 765-771.
- [5] Matsuoka H. Tribology in soilbag [J]. Journal of Japanese Society of Tribologists, 2003, 48(7): 547-552.
- [6] Matsuoka H, Liu S H. New earth reinforcement method by geotextile bag [J]. Soils and Foundation, 2003, 43(6): 173-188.
- [7] Matsuoka H, Nakai T. Stress deformation and strength characteristics of soil under three different principal stresses [C]//Proceedings of Japan Society of Civil Engineering. Japan: [s.n], 1974: 59-70.
- [8] Matsuoka H, Liu S H, Yamaguchi K. Mechanical properties of soilbags and their application to earth reinforcement [C]//Proceedings of the International Symposium on Earth Reinforcement. Fukuoka: [s.n], 2001: 587-592.
- [9] 陈俊生, 莫海鸿, 刘叔灼, 等. 土工模袋砂单轴抗压强度试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S1): 2930-2935.
- [10] 白福青, 刘斯宏, 王艳巧. 土工袋加固原理与极限强度的分析研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(S1): 172-176.
- [11] 张立. 模袋砂力学特性分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.

(本文编辑 武亚庆)