

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.05.011

夏家南, 梁彬, 汤书明, 等. 土工布包裹对粗粒料三轴试验的影响研究[J]. 水利水电工程学报, 2018(5): 76-81. (XIA Jianan, LIANG Bin, TANG Shuming, et al. Triaxial test analysis of influences of geotextile on coarse-grained soil[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(5): 76-81. (in Chinese))

## 土工布包裹对粗粒料三轴试验的影响研究

夏家南<sup>1</sup>, 梁 彬<sup>2</sup>, 汤书明<sup>3</sup>, 朱俊高<sup>1</sup>

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 中设设计集团股份有限公司, 江苏 南京 210005; 3. 上海市隧道工程轨道交通设计研究院, 上海 200032)

**摘要:** 粗粒料三轴试验中,常使用在试样周围包裹土工布的方法防止橡皮膜被刺破。借助中型三轴仪,分别对粗粒料进行包裹土工布与未包裹土工布的常规三轴固结排水剪切试验,研究了土工布对试样强度和变形特性的影响。试验结果表明:对于相同的围压,包裹土工布试样的峰值强度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_t$ 都比未包裹土工布的要大;低围压下,包裹土工布使试样强度提高很大,但随围压的增加,强度提高的幅值呈幂函数形式减小。对于线性强度指标,包裹土工布试样的黏聚力 $c$ 是未包裹土工布试样的1.8倍,而内摩擦角 $\varphi$ 则减小了1.8°。对于非线性强度指标,包裹土工布试样的 $\varphi_0$ 是未包裹土工布试样的1.07倍, $\Delta\varphi$ 增加了5.5°。在相同围压下,包裹土工布试样的体积应变和侧向应变都比未包裹土工布试样的大;包裹土工布与未包裹土工布试样的体积应变差和侧向应变差受围压变化的影响较小。

**关 键 词:** 土工布; 粗粒料; 中型三轴试验; 强度特性; 变形特性; 橡皮膜

**中图分类号:** TU41

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-640X(2018)05-0076-06

近年来粗粒料被广泛应用于土石坝、铁路和公路路基、桥梁墩台、软基处理和高填方等工程,尤其在土石坝中粗粒料的应用越来越广泛。据统计,自20世纪50年代后期以来,世界各国采用堆石料的高土石坝占比达70%~80%,并且还有继续发展的趋势<sup>[1-3]</sup>。粗粒料作为主要的填筑材料用量巨大,它的力学性质对工程安全和正常使用起到关键性作用,因此,针对粗粒料的研究越来越多<sup>[4]</sup>。为了得到粗粒料的力学性质需对其进行常规三轴试验,但是粗粒料的试样表面凹凸不平且布满了棱边和尖角,即使是特制的厚橡皮膜也会在中等压力下被刺穿而发生漏水,所以必须采取一定的措施消除这种不利影响。国内外学者对橡皮膜的刺穿问题有了一定的研究,并在试验中采取了相应的措施。例如,孔德志等<sup>[5]</sup>在试验中采用了两层厚度分别为0.8和2.0 mm的橡皮膜,并在两层橡皮膜之间加设了3 mm厚的橡皮板;张启岳<sup>[6]</sup>在试验中采用了特制的粘附有正六角块的内衬膜,以及外套防漏膜;孔祥臣<sup>[7]</sup>在试验中采用两层1.5 mm厚的橡皮膜,并且在里层衬上由5块约4 mm厚的活动胶板;司洪洋<sup>[8]</sup>提出在内膜和外膜之间填砂的组合结构;国外的学者采用了在膜与试样间放入小块薄铜片、硅橡胶等方法<sup>[9-10]</sup>。

本文采用在试样表面包裹土工布的方法来保护橡皮膜,但是土工布的包裹对试样的径向变形有约束作用,从而影响到试样的变形和强度。因此,进行了包裹土工布和未包裹土工布的常规三轴固结排水对比试验,分析研究土工布对试样强度和变形的影响程度。

**收稿日期:** 2017-10-09

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51479052);水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室开放研究基金资助项目(YK915001)

**作者简介:** 夏家南(1992—),男,江苏盐城人,硕士研究生,主要从事土体基本性质及本构关系研究。

E-mail: hohaixjn@163.com

## 1 试验方案

### 1.1 试验土样

试验采用云南糯扎渡土石坝的坝壳粗粒料,该材料为正长石花岗岩,岩性新鲜和微风化,粒度均匀,棱角尖锐,其原级配如表1所示。由于试样直径为101 mm,《土工试验规程》<sup>[11]</sup>规定最大允许粒径为20 mm,因此必须对原级配进行缩尺。试验采用等量替代法进行缩尺,缩尺后级配如表1所示。

### 1.2 土工布特性

试验采用无纺土工布。无纺土工布是土工合成材料的一种,其物理力学特性如表2所示。

表1 坝壳粗粒料原级配及缩尺级配

Tab. 1 Original and scale gradation of coarse-grained materials of dam shell

| 粒组/mm | 原级配/% | 缩尺级配/% |
|-------|-------|--------|
| 60~40 | 18.4  | 0      |
| 40~20 | 27.2  | 0      |
| 20~10 | 21.3  | 46.2   |
| 10~5  | 17.7  | 38.4   |
| <5    | 15.4  | 15.4   |

表2 土工布物理力学特性

Tab. 2 Physical and mechanical properties of geotextiles

| 单位面积质量/(g·m <sup>-2</sup> ) | 抗拉强度/(kN·m <sup>-1</sup> ) |     | 断裂延伸率/% |    | 撕裂强度/kN |      | CBR 顶破强度/kN |
|-----------------------------|----------------------------|-----|---------|----|---------|------|-------------|
|                             | 横向                         | 纵向  | 横向      | 纵向 | 横向      | 纵向   |             |
| 165                         | 11.5                       | 9.6 | 61      | 68 | 0.31    | 0.27 | 2.1         |

### 1.3 试验方案

试样直径为101 mm,高度为200 mm。制样时土层分5层击实,控制干密度 $\rho_d$ 为1.90 g/cm<sup>3</sup>。进行包裹土工布的中型三轴试验时,制样过程中还需要将土工布(宽21 cm,长35~37 cm)卷成圈后放入对开膜内,并使其平整贴于对开膜内壁。

制样完成后对试样进行饱和固结。将压力室灌满水并密封,向压力室施加20 kPa的围压,使厚橡皮膜与标准橡皮膜及土工布贴紧。然后提高与试样底部相连的进水管水头,使进水管与排水管的的水头差在1 m左右。打开进水管与排水管阀门,使水在水头差的作用下从底部进入试样,从试样的顶部流出,排除试样内的空气,直到流入水量与流出水量相等,可以认为试样已经饱和。试样饱和后关闭进水管阀门,对其施加要求的围压,待排水管读数稳定后即认为固结完成。

由于不加土工布的三轴试验橡皮膜易刺破,因此对比试验只能在相对较低围压下进行,故分别进行围压为50,100,150,200,300和400 kPa的常规三轴固结排水剪切试验,高围压下土工布对试样强度特性和变形特性的影响可由低围压下的规律类比得出。

## 2 试验结果分析

### 2.1 强度特性分析

**2.1.1 峰值强度** 图1给出了包裹土工布与未包裹试样的应力应变对比曲线。由图1可见,在相同围压下,包裹土工布试样的应力应变曲线位于未包裹土工布试样曲线的上方,说明包裹土工布提高了试样强度。因此,在实际工程中,施加相同的 $\sigma_1-\sigma_3$ ,包裹土工布条件下产生的轴向应变 $\varepsilon_1$ 比未包裹土工布条件下的要小。

表3总结了各围压下包裹土工布与未包裹土工布试样的峰值强度,即 $(\sigma_1-\sigma_3)_f$ 。当围压为50 kPa时,包裹土工布试样的峰值强度比未包裹时提高了61.4%,但是随着围

表3 围压与峰值强度的关系

Tab. 3 Relationships between confining pressure and peak strength

| 围压/<br>kPa | 峰值强度/kPa |         | 峰值强度<br>差/kPa | 峰值强度<br>增加率/% |
|------------|----------|---------|---------------|---------------|
|            | 无土工布     | 有土工布    |               |               |
| 50         | 442.0    | 713.4   | 271.4         | 61.4          |
| 100        | 738.7    | 951.4   | 212.7         | 28.8          |
| 150        | 999.6    | 1 168.1 | 168.5         | 16.9          |
| 200        | 1 231.2  | 1 373.0 | 141.8         | 11.5          |
| 300        | 1 699.3  | 1 778.7 | 79.4          | 4.7           |
| 400        | 2 042.8  | 2 130.7 | 87.9          | 4.3           |

注:峰值强度增加率=峰值强度差/无土工布的峰值强度×100%。

压的增加,两组试样之间的峰值强度差值显著减小,且差值所占的比例也快速减小;在围压为 400 kPa 时,峰值强度仅仅相差 4.3%。根据这一趋势,绘制了峰值强度增加值与围压之间的散点图,发现两者之间的关系可以利用幂函数进行拟合(见图 2),相关系数  $R^2=0.982$ 。由此可以推测,当围压更高时,可认为两组试样的峰值强度相等,即土工布对于峰值强度的影响可以忽略。

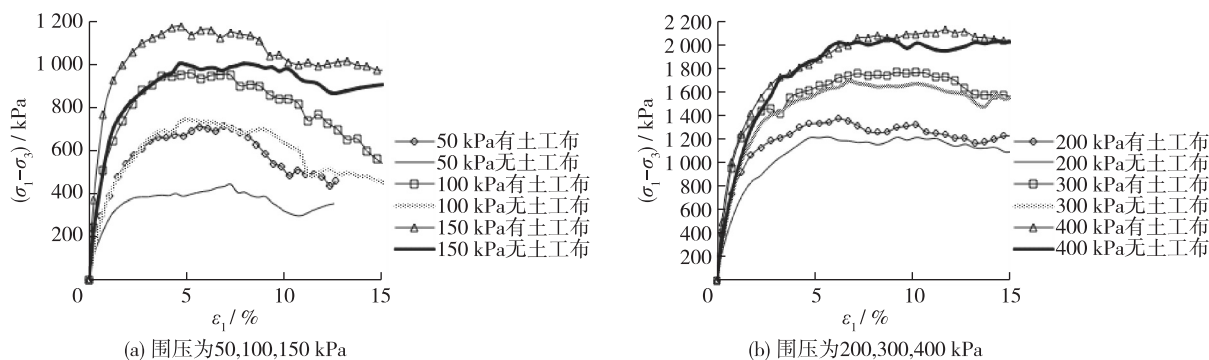


图 1  $(\sigma_1-\sigma_3)-\varepsilon_1$  关系对比曲线

Fig. 1 Relationship curves of  $(\sigma_1-\sigma_3)-\varepsilon_1$

**2.1.2 强度指标** 通过表 3 中的围压及峰值强度,计算得到包裹土工布与未包裹土工布试样的强度指标见表 4。从表 4 可以看出,线性情况下,包裹土工布试样的黏聚力  $c$  是未包裹土工布试样的 1.8 倍,而内摩擦角  $\varphi$  则减小了 1.8°;非线性情况下,包裹土工布试样的  $\varphi_0$  是未包裹土工布试样的 1.07 倍,  $\Delta\varphi$  增加了 5.5°。

综上所述,土工布对不同围压下试样的峰值强度及土体强度指标都有不同程度的提高。其原因在于,当试样发生侧向变形时,包裹在试样表面的土工布会被拉伸,从而产生限制试样变形的应力,本质上等同于对试样施加了附加围压。当试验围压较小时,附加围压所占的比例较大,因而能显著提高峰值强度;当试验围压逐渐加大时,附加围压所占比例逐渐减小,对峰值强度的提高效果也显著降低直至可以忽略。针对本文的粗粒料和土工布,是否包裹土工布的界限围压可以确定为 400 kPa(400 kPa 及以下时不需包裹土工布),因为此时峰值强度差仅为 4.3%,且无土工布时橡皮膜也不会被刺破。

## 2.2 变形特性分析

### 2.2.1 体积变形

图 3 给出了包裹土工布与未包裹土工布试样的  $\varepsilon_v-\varepsilon_1$  对比曲线。由图 3 可见,随着轴向应变  $\varepsilon_1$  的增加,试样的体积应变  $\varepsilon_v$  从剪缩向剪胀发展。在相同围压下,包裹土工布试样的  $\varepsilon_v-\varepsilon_1$  关系曲线位于未包裹土工布试样曲线的下方,说明包裹土工布提高了试样的剪胀性,即产生相同的轴向应变  $\varepsilon_1$ ,包裹土工布条件下产生的体积应变比未包裹土工布条件下的大。

表 5 总结了各围压下包裹与未包裹土工布试样在轴向应变  $\varepsilon_1$  达到 15% 时的体积应变。由表 5 可见,围压为 50 kPa 时,试样产生的体积应变较大,包裹土工布试样的体积应变比未包裹土工布试样的体积应变在数值上提高了 16.25%,但是随着体积应变数值的减小,体变变化率显著增加;在围压为 400 kPa 时,试样产生的体积应变较小,体变变化率达到了 122.53%。但是,体积应变差在此过程中变化较小,在不同围压下基本维持在 1% (体积应变差的平均值)。

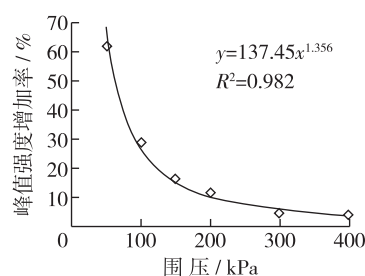


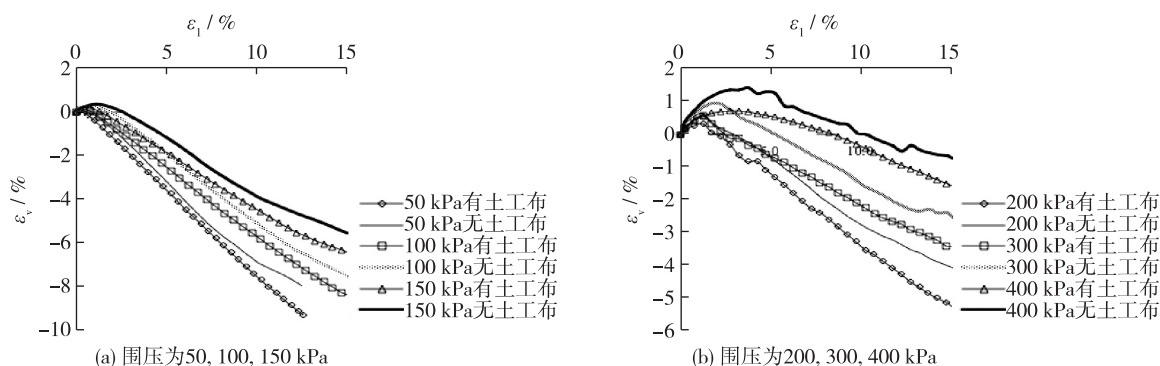
图 2 峰值强度增加率与围压的关系曲线

Fig. 2 Relationship between increase rates of peak strength and confining pressure

表 4 有土工布的强度指标对比

Tab. 4 Comparison between strength indexes with or without geotextile

| 试样   | 线性             |                  | 非线性                |                        |
|------|----------------|------------------|--------------------|------------------------|
|      | $c/\text{kPa}$ | $\varphi/^\circ$ | $\varphi_0/^\circ$ | $\Delta\varphi/^\circ$ |
| 加土工布 | 128.5          | 41.6             | 55.6               | 15.1                   |
| 无土工布 | 70.6           | 43.4             | 51.9               | 9.6                    |

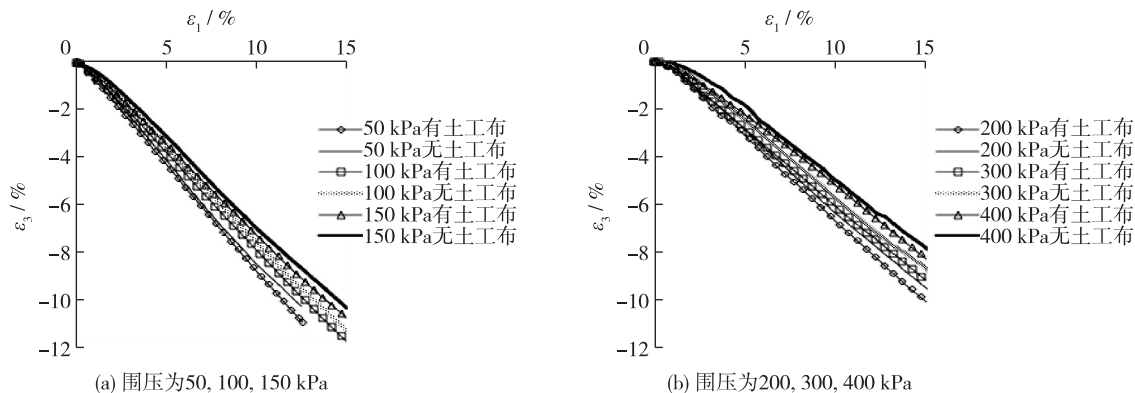
图3  $\varepsilon_v$ - $\varepsilon_1$ 关系对比曲线Fig. 3 Relationship curves of  $\varepsilon_v$ - $\varepsilon_1$ 表5 围压与体积应变( $\varepsilon_1=15\%$ )的关系Tab. 5 Relationships between confining pressure and volumetric strain ( $\varepsilon_1=15\%$ )

| 围压/<br>kPa | 体积应变/% |       | 体积应变差/% | 体变变化率/% | 围压/<br>kPa | 体积应变/% |       | 体积应变差/% | 体变变化率/% |
|------------|--------|-------|---------|---------|------------|--------|-------|---------|---------|
|            | 无土工布   | 有土工布  |         |         |            | 无土工布   | 有土工布  |         |         |
| 50         | -7.93  | -9.24 | 1.31    | 16.52   | 200        | -4.04  | -5.21 | 1.17    | 28.96   |
| 100        | -7.48  | -8.35 | 0.87    | 11.64   | 300        | -2.52  | -3.40 | 0.88    | 34.92   |
| 150        | -5.50  | -6.41 | 0.91    | 16.55   | 400        | -0.71  | -1.58 | 0.87    | 122.53  |

注:体变变化率=体积应变差/无土工布的体积应变 $\times 100\%$ 。

**2.2.2 侧向变形** 图4给出了包裹土工布与未包裹土工布试样的 $\varepsilon_3$ - $\varepsilon_1$ 对比曲线,由图4可见,包裹土工布与未包裹土工布试验得到的 $\varepsilon_3$ - $\varepsilon_1$ 曲线都具有以下特征:侧向应变 $\varepsilon_3$ 都是负值,即侧向都发生膨胀。在相同围压下,包裹土工布试样的 $\varepsilon_3$ - $\varepsilon_1$ 曲线位于未包裹土工布试样曲线的下方,这说明在相同的 $\varepsilon_1$ 下,包裹土工布条件下的侧向膨胀量比未包裹土工布条件下的大。

表6总结了各围压下包裹与未包裹土工布试样轴向应变 $\varepsilon_1$ 达到15%时的侧向应变。由表6可见,包裹土工布试样与未包裹土工布试样的侧向应变差以及侧变变化率随着围压的变化,没有发生显著改变,分别维持在0.5%(侧向应变差平均值)和5.17%(侧变变化率平均值)。

图4  $\varepsilon_3$ - $\varepsilon_1$ 关系对比曲线Fig. 4 Relationship curves of  $\varepsilon_3$ - $\varepsilon_1$

综上所述,土工布致使试样的体积膨胀和侧向膨胀都有一定程度的增加,且增加的量受围压的影响较小。理论上讲,土工布增加了对试样变形的约束,体积膨胀变形、侧向膨胀变形都应该减小,包裹土工布试验的  $\varepsilon_v$ - $\varepsilon_1$  关系、 $\varepsilon_3$ - $\varepsilon_1$  曲线都应在未包裹土工布试验的相应曲线的上方,但本试验得出的结果恰恰相反,袁铁柱<sup>[12]</sup>也得出了与本试验相同的结果。笔者分析认为,土工布的增加,只是包裹试样一周,并没有缝合,提供的侧向约束有限;但是,土工布阻挡了橡皮膜向土颗粒间嵌入,即减小了橡皮膜的嵌入量,使得测得试样排出水的体积减小,即体积应变  $\varepsilon_v$  在数值上是减小的,而侧向应变  $\varepsilon_3$  是通过  $\varepsilon_3 = (\varepsilon_v - \varepsilon_1)/2$  换算得到的,所以  $\varepsilon_3$  在数值上也是减小的。

表 6 围压与侧向应变 ( $\varepsilon_1 = 15\%$ ) 的关系

Tab. 6 Relationships between confining pressure and lateral strain ( $\varepsilon_1 = 15\%$ )

| 围压/<br>kPa | 侧向应变/% |        | 侧向应变差/% | 侧向应变<br>变化率/% | 围压/<br>kPa | 侧向应变/% |        | 侧向应变差/% | 侧向应变<br>变化率/% |
|------------|--------|--------|---------|---------------|------------|--------|--------|---------|---------------|
|            | 无土工布   | 有土工布   |         |               |            | 无土工布   | 有土工布   |         |               |
| 50         | -10.22 | -10.91 | 0.69    | 6.75          | 200        | -9.53  | -10.11 | 0.58    | 6.09          |
| 100        | -11.26 | -11.68 | 0.42    | 3.73          | 300        | -8.78  | -9.20  | 0.42    | 4.78          |
| 150        | -10.26 | -10.71 | 0.45    | 4.39          | 400        | -7.88  | -8.29  | 0.41    | 5.20          |

注:侧向应变变化率=侧向应变差/无土工布的侧向应变 $\times 100\%$ 。

### 3 结 语

用中型三轴仪对包裹土工布与未包裹土工布的粗粒料试样进行了常规三轴固结排水剪切试验,研究了土工布对其强度特性和变形特性的影响,得到如下结论:

(1) 三轴试样包裹土工布后,对试样的强度影响较大,低围压下的影响不可忽略;试样包裹土工布对其体积变形也有显著影响。

(2) 对于相同的  $\sigma_3$ ,包裹土工布的试样的  $(\sigma_1 - \sigma_3)$ - $\varepsilon_1$  关系曲线位于未包裹土工布试样曲线的上方,包裹土工布提高了试样强度。

(3) 包裹土工布与未包裹土工布试样的峰值强度差在低围压下较大,但随围压的增加呈幂函数形式减小,直至接近于 0。

(4) 线性情况下,包裹土工布试样的黏聚力  $c$  是未包裹土工布试样的 1.8 倍,而内摩擦角  $\varphi$  则减小了  $1.8^\circ$ ;非线性情况下,包裹土工布试样的  $\varphi_0$  是未包裹土工布试样的 1.07 倍,  $\Delta\varphi$  增加了  $5.5^\circ$ 。

(5) 对于相同的  $\sigma_3$ ,包裹土工布试样的  $\varepsilon_v$ - $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_3$ - $\varepsilon_1$  关系曲线位于未包裹土工布试样曲线的下方,包裹土工布限制了橡皮膜的嵌入。

(6) 包裹土工布与未包裹土工布试样的体积应变差和侧向应变差受围压变化的影响较小。

### 参 考 文 献:

- [1] 朱俊高, 轩向阳, 薄以霆. 表面振动压实仪法测定粗粒土密度的影响因素[J]. 水利水运工程学报, 2013(2): 15-19. (ZHU Jungao, XUAN Xiangyang, BO Yiting. Influence factors of dry density of coarse-grained soil measured by surface vibrating compactor[J]. Hydro-Science and Engineering, 2013(2): 15-19. (in Chinese))
- [2] 孙明辉, 朱俊高, 沈靠山, 等. 密实度对砂卵石料强度及变形特性的影响[J]. 水利水运工程学报, 2015(4): 43-47. (SUN Minghui, ZHU Jungao, SHEN Kaoshan, et al. Density effects on strength and deformation behavior of sandy gravel[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(4): 43-47. (in Chinese))
- [3] 张林洪, 刘荣佩, 谢婉丽. 等应力比路径条件下堆石料的应力应变特性[J]. 大坝观测与土工测试, 2001, 25(4): 46-49. (ZHANG Linhong, LIU Rongpei, XIE Wanli. Properties of stress and strain of rockfill under the path of equal stress ratio[J]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 2001, 25(4): 46-49. (in Chinese))

- [4] 郭庆国. 粗粒土的工程特性及应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1998. (GUO Qingguo. Engineering property and application of coarse grained soil[M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 1998. (in Chinese))
- [5] 孔德志, 张丙印, 孙逊. 钢珠模拟堆石料三轴试验研究[J]. 水力发电学报, 2010, 29(2): 210-215, 221. (KONG Dezhi, ZHANG Bingyin, SUN Xun. Triaxial tests on steel ball simulation rockfill [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(2): 210-215, 221. (in Chinese))
- [6] 张启岳. 用大型三轴仪测定砂砾料和堆石料的抗剪强度[J]. 水利水运工程学报, 1980(1): 24-38. (ZHANG Qiyue. Determination of shear strength of sand gravel and rockfill by large triaxial instrument[J]. Hydro-Science and Engineering, 1980(1): 24-38. (in Chinese))
- [7] 孔祥臣. 土石混合料压实特性的实验研究[D]. 重庆: 重庆交通学院, 2004. (KONG Xiangchen. Experimental research on impact feature of rock-soil mixed material[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2004. (in Chinese))
- [8] 司洪洋. 大型三轴试验的选型问题[J]. 勘察科学技术, 1988(1): 12-16. (SI Hongyang. Selection of large triaxial test[J]. Site Investigation Science and Technology, 1988(1): 12-16. (in Chinese))
- [9] PIRODDA L. Shadow and projection moire techniques for absolute or relative mapping of surface shape[J]. Optical Engineering, 1982, 21: 640-649.
- [10] TANG S, HUNG Y Y. Fast profilometer for the automatic measurement of 3D object shape[J]. Appl Opt, 1990, 29(20): 3012-3018.
- [11] SL 237—1999 土工试验规程[S]. (SL 237—1999 Soil test procedure[S]. (in Chinese))
- [12] 袁铁柱. 粗粒土的静力特性试验研究[D]. 新疆: 新疆农业大学, 2010. (YUAN Tiezhu. Experimental study on static characteristics of coarse grained soil[D]. Xinjiang: Xinjiang Agricultural University, 2010. (in Chinese))

## Triaxial test analysis of influences of geotextile on coarse-grained soil

XIA Jianan<sup>1</sup>, LIANG Bin<sup>2</sup>, TANG Shuming<sup>3</sup>, ZHU Jungao<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geo-mechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. China Design Group Co., Ltd., Nanjing 210005, China; 3. Shanghai Tunnel Engineering Rail Transit Design and Research Institute, Shanghai 200032, China)

**Abstract:** In the triaxial tests of coarse-grained soil, the geotextile is often used to wrap the specimen used to prevent the rubber membrane from being punctured. This method is widely applied to the practical works. Therefore, the testing analysis of the influences of the geotextile on the strength and deformation behaviors of the coarse-grained soil is carried out in this study. The coarse-grained soil wrapped by the geotextile and that without the geotextile are subjected to a series of drained triaxial compression tests using medium size specimens. The experimental analysis results show that the strength  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  of the specimens wrapped by the geotextile is larger than that of the normal specimens without the geotextile under the same confining pressure, and the increment ratio is decreasing with the increase of the confining pressure. In addition, the relationships between the increment ratio and the confining pressure can be expressed by a power function. The linear strength index of the specimens wrapped by the geotextile,  $\text{cohesion}_c$ , is 1.8 times than that of the normal specimens without the geotextile, and the internal friction angle  $\varphi$  is reduced by  $1.8^\circ$ . The nonlinear strength index of the specimens wrapped by the geotextile,  $\varphi_0$ , is 1.07 times that of the normal specimens without the geotextile, while  $\Delta\varphi$  is increased by  $5.5^\circ$ . The volumetric strain and the lateral strain of the specimens wrapped by the geotextile are larger than those of the normal specimens without the geotextile under the same confining pressure. The volumetric strain difference and the lateral strain difference of the specimens wrapped by the geotextile and the normal specimens without the geotextile are less affected by the confining pressure, which is a constant independent of the confining pressure.

**Key words:** geotextile; coarse-grained soil; medium triaxial test; strength characteristics; deformation characteristics; rubber membranes