

64-65

# 应力路径对砂的强度的影响

徐永福 编译

TUS21.1

(河海大学地质及岩土工程系 南京 210098)

影响砂强度的因素很多,除了砂的密度和应力水平外,应力路径也是一个重要的影响因素。Jeda<sup>[1]</sup>的研究成果表明,不同应力路径的试验中,砂破坏包络线的样式不同,从而砂的强度也不同,试验中没有产生剪切带。

一般认为,在低应力和高应力(出现砂粒压碎)水平时,砂的剪切阻力不同。对于低应力三轴压缩试验,Bolton 给出经验关系式:

$$\varphi'_f - \varphi'_c = 3I_R^0 \quad (1)$$

式中  $\varphi'_f$  是有效内摩擦角;  $\varphi'_c$  ( $\varphi'_{cv} = \varphi'_{crit}$ ) 是  $d\varepsilon_v = 0$  时的极限内摩擦角( $\varepsilon_v$  是体应变);  $I_R^0$  是相对膨胀指数,石英和长石的相对膨胀指数为:

$$I_R^0 = I_D(10 - \ln p'_f) - 1 \quad (2)$$

式中  $I_D = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}}$ , 是相对密度;  $e$ ,  $e_{\max}$ ,  $e_{\min}$  分别为空隙比及其最大、最小值;  $p'_f$  是破坏时的有效平均应力,为  $\frac{1}{3}(\sigma'_{af} + 2\sigma'_{rf})$ ;  $\sigma'_{af}$ ,  $\sigma'_{rf}$  分别为有效轴向应力和有效径向应力。破坏时的膨胀率为:

$$\left(-\frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_a}\right)_f = 0.3I_R^0 \quad (3)$$

## 1 实验

用 Zbraslav 冲积石英砂 ( $d_{10} = 0.125$  mm,  $d_{60} = 0.4$  mm,  $e_{\max} = 0.86$ ,  $e_{\min} = 0.43$ ,  $G_r = 2.6$ ) 做了两组试验:①标准试验( $\sigma'_c =$  常数,  $\sigma'_c = 0.1, 0.2, 0.4$  MPa), 试样是干砂和饱和砂两种;②有效平均应力恒定( $p' =$  常数,  $p' = 0.1, 0.4, 1$  MPa), 试样是饱和砂。

标准试样制成直径为 3.8 cm, 高 7.6 cm, 试样末端采用粗糙的平板。采用振动棒来加密砂样。

Zbraslav 石英砂的常规三轴排水压缩试验的结果,验证了 Bolton 关系式(1)~(3)。

a. 极限应力差对初始孔隙率的依赖性不很明显,并测出  $\varphi'_c$  的平均值是  $34.5^\circ$ 。

b. 标准试验中,砂的剪切强度随  $n_0$  呈线性变化。应力  $\sigma'_c$  对强度的影响不明显。就剪切阻力而言,砂的行为在物理上是同形的,即相同的  $\varphi'_f$  值表征了不同应力路径的强度。而在有效平均应力恒定的实验中,剪切强度明显地依赖于有效平均应力  $p'$  的值。

c. 不同孔隙率的试样在  $\sigma'_c =$  常数和  $p' =$  常数的试验中,破坏包络线是不同。 $p' =$  常数的试验中,包络线是非线性的。因此,砂的强度依赖于应力路径。在  $\sigma'_c =$  常数的试验中,Zbraslav 砂的破坏行为是同形的,而在  $p' =$  常数的实验是不同形的。

d. 在  $\sigma'_c =$  常数的试验中,Zbraslav 砂的试验结果与 Bolton 关系式相符合;而在  $p' =$  常数的试验中,纠正了 Bolton 关系式中没有考虑  $p'$  的影响,取代 Bolton 关系式(1)的公式是

$$\varphi'_f - \varphi'_c = 4.33I_R^0 \quad (4)$$

## 2 实验结果的物理解释

砂是由砂粒和空隙组成,可以把它们分别看成是密实区和松散区,这两部分共同决定了砂的孔隙率。当密实区达到一定的组分时,砂变成能受力的骨架,这时砂的行为不再

反映砂的平均孔隙率的特征,而反映了砂的有效孔隙率的特征。因此,可视之为一种极限现象,渗透理论提供了形象的解释,可以把这一现象比喻成凹凸不平的海底,随着海平面的下降,出现孤立的岛屿,当海平面下降到某一个极限(渗透界限),各个孤立的岛屿相连通。因此,砂的孔隙率存在某一个区间,当砂粒在峰值变形之前没有破坏,孔隙率没有均匀化时,砂的剪切阻力不依赖于初始孔隙率。

砂的变形功定义为

$$W_d = \int_0^{\epsilon_d'} (\sigma_d - \sigma_r) d\epsilon_d \quad (5)$$

变形功  $W_d$  与初始孔隙率  $n_0$  呈线性关系。在低应力区间,  $\sigma'_r = \text{常数}$  的变形功的数量比  $p' = \text{常数}$  的变形功大,这似乎表明,  $\sigma' = \text{常数}$  的实验中,砂的同形行为是受力骨架破坏的结果。实验表明,  $\sigma'_r = \text{常数}$  的实验中的强度值都在同一个带上,根据 Riabouchinski 理论,  $\sigma'_r = \text{常数}$  的试验行为在物理上是同形的(相似的)。在  $p' = 1 \text{ MPa}$  (常数)的试验中可得到同样的结论。然而,变形功  $W_d$  不能解释  $\sigma'_r = 0.1 \text{ MPa}$  实验中强度异常现象。

三轴体积应变历史也描述了结构变化。体积变形为:

$$S_t = \int_0^{\epsilon_d'} \epsilon_v d\epsilon_d \quad (6)$$

其中压缩部分为  $S_c$ 。曲线  $S_t/\sigma'_r \sim n_0$  和  $S_c/\sigma'_r \sim n_0$  的形状相同,这表明了在  $\sigma'_r = \text{常数}$  实验中,剪切阻力在物理上是同形的。在  $\sigma'_r = \text{常数}$  的实验中,体积应变历史有些异常,对  $n_0 < 35\%$  的试样,  $S_t/\sigma'_r \sim n_0$  的曲线有些离散,而  $S_c/\sigma'_r$  的值相当小。这些实验结果表明了剪切强度的异常。

### 3 结 论

- $p' = \text{常数}$  的实验破坏包络线是非线性的;而  $\sigma'_r = \text{常数}$  的实验中,  $\varphi_f$  是常数。
- 对于砂的剪切强度而言,在  $\sigma'_r = \text{常数}$  的试验中表现为物理上的同形,而  $p' = \text{常数}$  的实验中则显示出不同形。
- Bolton 关系式不适合  $p' = \text{常数}$  的实验,并修改为  $\varphi'_f - \varphi'_c = 4.33 I_R^0$
- 渗透理论给实验结果提供了物理解释。

### 参考文献

- Feda J. Stress-path dependent shear strength of sand. J of Geotechnical Engineering, 1994, 120 (6):958~974

(收稿日期:1994-12-12)

## 简 讯

▲最近,罗马尼亚为埃及新建的 Esna 水电站提供了 900 万美元的设备和技术援助。

▲阿尔巴尼亚政府拨巨额资金供今后两年全国水电站进行检修和更新,在此之前阿尔巴尼亚政府已获得一笔外国投资。

▲尼泊尔政府已决定拨款在农村地区兴建小水电站。

▲欧洲投资银行新近给希腊公共电力公司贷款 790 万美元以兴建小水电站。

▲加拿大力发展小水电,全国各地正在大规模兴建小型水电站,有些省份正在开展可行性研究。

▲加拿大魁北克水电公司最近与亚洲一些国家签订了一系列合同和备忘录。例如,与马来西亚私营国际财团签订了一项关于铺设 525 km 长的 500 kV 的输电线合同;与印尼公用电力公司签订了关于在爪哇岛兴建 300 MW (投资 7 亿美元)水电站的合同;与韩国电力公司签订了关于培训设计人员和铺设输电线路人才的合同。

(熊莉芸 供稿)