

DOI: 10.11779/CJGE201404023

三轴试验测定掺砾心墙料邓肯模型参数简化方法的探讨

丁树云¹, 毕庆涛¹, 殷宗泽²

(1. 华北水利水电大学资源与环境学院, 河南 郑州 450045; 2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 提出一种能够缩短掺砾心墙料大三轴排水剪试验时间的方法, 即降低掺砾心墙料中细粒的含量。掺砾心墙料的强度和变形主要取决于粗粒部分, 试验表明, 适量降低细粒的含量, 没有改变原级配试样应力应变曲线的基本特征。而细粒含量的降低, 可以有效地提高试验过程中的排水速率。给出了降低的细粒含量与渗透系数之间的关系, 给出了降低细粒含量的掺砾心墙料大三轴试验步骤, 以及确定邓肯模型参数的简化方法。

关键词: 掺砾心墙料; 剪切速率; 邓肯模型参数; 大三轴试验

中图分类号: TU41

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)04-0763-05

作者简介: 丁树云(1981-), 女, 河南杞县人, 博士, 讲师, 主要从事土石料试验研究以及土力学方面的教学工作。

E-mail: syding2003@163.com。

Simplified method for measuring the Duncan model parameters of gravel-mixed core materials by means of triaxial tests

DING Shu-yun¹, BI Qing-tao¹, YIN Zong-ze²

(1. Resource and Environment College, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China; 2.

Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A method is proposed that shortening the time of large scale triaxial draining shear tests on gravel-mixed core materials by reducing the content of fine grains. The characteristics of strength and deformation of gravel-mixed core materials depend on the coarse grains. It is found that fundamental features of stress and strain curves of soil specimens do not change even though appropriate fine grains are reduced. With the decreasing amount of fine grains, the drain velocity in triaxial tests is improved considerably. The relationship between the content of fine grains which are reduced and the permeability coefficient of soil specimens is derived. The procedure of large scale triaxial tests on gravel-mixed core materials and the way to obtain the Duncan model parameters are given.

Key words: gravel-mixed core material; shear velocity; Duncan model parameter; large scale triaxial test

0 引言

随着心墙土石坝工程的不断兴建, 心墙土料由纯黏土发展到黏土中掺入砾石的掺砾黏性土料(又称砾质土), 小尺寸的三轴试验(直径 ≤ 10.1 cm)已不能满足工程计算对试验土料缩尺的要求。所以, 大型三轴仪(直径 ≥ 30 cm)试验被广泛应用到工程中^[1-3], 是高土石坝等大型工程设计不可缺少的室内试验。

然而, 正如大家所知, 掺砾心墙料的大三轴固结排水剪试验, 由于是黏性土料, 剪切速率须非常缓慢, 方能实现剪切过程中所引起的超孔隙水压力接近于零。试验需要数十天、甚至数月才能完成。如此长的试验时间, 是实际工作不愿接受的。一是因为试验仪器难以长时间保持稳压状态; 二是因为试验时间太长, 跟不上科研效率和工程设计的要求。

因此, 研究如何缩短掺砾心墙料大三轴排水剪切

试验的时间, 具有一定的意义。陈志波等^[4]曾提出将试样中心部分掏空, 然后充填渗透性较好的砂, 制成包含细长圆柱形排水砂芯的大三轴试样。此方法的原理与砂井地基理论一致。

提出另外一种能够缩短掺砾心墙料大三轴试验时间的方法。土石坝掺砾心墙的强度和应力变形特性主要取决于土中的粗颗粒部分。对于高土石坝, 心墙承受着较大的荷载, 其强度主要靠内摩擦力一项, 而黏聚力一项所占比例很小。掺砾心墙料的内摩擦力主要由粗颗粒提供, 而黏聚力由细颗粒提供。因此, 适量去除部分细颗粒不会显著影响到土料的强度。对于变形, 一般而言, 粗粒料的变形量小, 细粒料的变形量大。掺砾心墙中的砾石含量较高, 据不完全统计^[5-7],

世界上高度大于 100 m 的已建掺砾心墙高土石坝中, 心墙中砾石含量多数高于 50%, 有的甚至达到 70%。因此, 粗颗粒在掺砾心墙中起到骨架作用, 心墙料的变形主要取决于粗粒料。黏土心墙坝之所以发展成掺砾料心墙坝, 就是人们看中了掺砾后心墙变形大大降低, 从而使其与两侧堆石体间的沉降差大大减小。总而言之, 适量降低掺砾心墙料中细粒的含量, 不会对三轴试验的结果造成显著影响。

基于以上认识, 提出通过降低掺砾心墙料中细粒含量的方法, 以期缩短大三轴排水剪试验的时间。由于降低了部分细粒, 毕竟与原级配试样多少有些差异, 这些差异只能用修正系数的方法略作修正。研究的主要内容是降低细粒含量后, 土样的渗透性、变形特性以及模型参数的变化规律, 并给出确定原级配试样邓肯模型参数的简化方法。

1 剪切控制速率与固结系数

三轴排水剪试验耗用多少时间完全取决于剪切速率, 而试验控制的剪切速率应该满足所引起的超孔隙水压力小于围压的 5%。超孔隙水压力的消散与试样的固结系数 C_v 是密切相关的。

Gibson 等^[8-9]曾结合 Biot 固结理论和 Terzaghi 有效应力原理研究过三轴固结排水剪切试验的剪切速率问题。试验发现, 应变控制式三轴剪切过程中, 在试样发生破坏之前, 孔隙水压力持续上升; 剪破之后, 孔隙水压力逐渐降低。孔隙水压力 u 随时间 t 的变化曲线如图 1 所示。 u_f 为试样破坏时的孔隙水压力, t_f 为剪切至破坏时经历的时间。

于是, 只要保证了试验过程中剪切破坏时的孔隙水压力值 u_f 小于 $0.05u_0$, 就可以认为剪切过程中孔隙水压力能够及时消散, 就能忽略剪切过程中孔隙水压力对试验结果的影响。显然, u_f 与时间 t 是相关的。

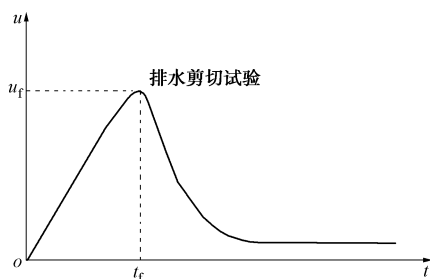


图 1 三轴试验的孔压曲线

Fig. 1 Pore pressure curve of triaxial tests

剪切破坏时试样的平均固结度 \bar{U}_f 可以表示为

$$\bar{U}_f = 1 - \frac{\int_0^H u_f dz}{\int_0^H \sigma dz} \quad (1)$$

三轴试验过程中发生的固结, 可以近似看成是外荷载随时间变化的一维固结问题。轴向荷载的加载速率记作 R , 根据文献[10], 破坏时试样沿高度平均的孔隙水压力为

$$\bar{u}_f = \frac{32H^2R}{\pi^4 C_v} \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{m^4} \left[1 - \exp\left(-\frac{m^2\pi^2}{4} T_v\right) \right] \quad (2)$$

式中, H 是最大排水距离, C_v 是固结系数, T_v 是时间因数。

破坏时试样沿高度平均的总应力 $\bar{\sigma} = R \cdot t_f$ 。于是, 式 (1) 进一步写成

$$\begin{aligned} \bar{U}_f &= 1 - \frac{\bar{u}_f}{\bar{\sigma}} \\ &= 1 - \frac{H^2}{3C_v t_f} \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{96}{\pi^4 m^4} \left[1 - \exp\left(-\frac{m^2\pi^2}{4} T_v\right) \right] \end{aligned}$$

忽略指数项, 上式最后简化为

$$\bar{U}_f = 1 - \frac{h^2}{\eta C_v t_f} \quad (3)$$

式中, h 是试样高度之半, 即 $h=H/2$; η 是系数, 取决于排水条件, 单面排水时 $\eta=0.75$, 双面排水时 $\eta=3.0$ 。

Bishop^[9]通过试验验证了 95% 的理论消散程度足以保证所测得的强度与真实值之间的误差可以忽略不计。于是, 令 $\bar{U}_f=0.95$, 试样剪切至破坏时的剪切历时为

$$t_f = \frac{20h^2}{\eta C_v} \quad (4)$$

为了确定试验剪切控制速率 $\dot{\epsilon}_a$, 仅有式 (4) 确定的剪切控制历时 t_f 还不够, 还需要知道试样剪切至破坏时的轴向应变 ϵ_a 。由于掺砾心墙料的三轴试验没有明显的强度峰值, 也就很难确定轴向应变 ϵ_a 达到多少时为破坏。不过根据大量的试验总结, 对于在轴向应变为 15% 之内没有出现强度峰值的土样, 人们认定 15% 作为破坏应变, 对应的强度为破坏强度。

于是, 试验的剪切应变控制速率

$$\dot{\epsilon}_a = \frac{15}{t_f} = \frac{3\eta C_v}{4h^2} \quad (5)$$

式中 固结系数 $C_v = k(1+e_1)/(a_v \cdot \gamma_w)$; k 为渗透系数; e_1 为初始孔隙比; γ_w 为水的重度; a_v 为压缩系数, 可由掺砾心墙料的压缩试验得到。式 (5) 适用于轴向应变为 15% 之内没有出现强度峰值的土类, 如掺砾心墙料等。

2 降低细粒含量的百分比

去除掺砾心墙料中部分细颗粒, 降低土样中细粒的百分含量, 可以提高土样的渗透性, 使得土样在剪

切过程中超孔压能及时消散, 从而可以增大三轴试验的控制剪切速率, 缩短试验时间。

降低细粒含量后的三轴试样是指在保证试样干密度不变的前提下, 去除一些细颗粒。所以, 降低了细粒含量的试样, 其总质量没有改变, 改变的仅是细粒土的质量。当然, 试样的粗颗粒会稍有增多, 级配也发生了少许变化。下文将没有降低细粒的原试样称为“原级配试样”。

显然, 去除多少细粒是需要研究的。去除的细粒越多, 试样的渗透系数就越大; 然而并不是去除的越多越好, 虽然这样做可以得到越短的试验时间, 但相对而言, 与原级配试样的差异就越大。反过来, 去除细粒的量如果过少, 将达不到缩短试验时间的简化目的。

式(5)表明, 试验的剪切速率和时间与固结系数 C_v 相关。由于掺砾心墙料的压缩性质主要取决于粗颗粒, 当去除部分细颗粒, 压缩系数 a_v 的变化很小。于是, 去除部分细粒后的心墙料的三轴剪切速率主要取决于渗透系数 k 。

所以, 当给定试验的剪切时间, 根据式(5)就可以确定需要的渗透系数。这个渗透系数对应的就是去除部分细粒后的土样。

于是, 为了确定去除细粒的量, 需要做渗透试验, 通过试验知道去除细粒某一含量下的试样渗透系数, 以便近似了解三轴试验过程需要的时间。渗透试验可用三轴仪来完成, 由于大三轴仪渗透试验需耗费大量时间, 故可采用中三轴仪来完成。应该指出的是, 去除细粒的量应尽量少一些, 使试样的强度和变形尽可能接近原土样。

下面以双江口水电站堆石坝的掺砾心墙料为例, 探讨去除不同细粒含量下试样的渗透系数。用混合法对设计级配缩尺后的中三轴试样的级配曲线如图2所示。其中, 级配中粗粒部分($0.075\text{ mm}<d<20.0\text{ mm}$)占试样总质量的55%, 细粒部分($d<0.075\text{ mm}$)占总质量的45%。同时, 根据重型击实试验结果, 确定了中三轴试样的制样干密度为 $\rho_d=2.04\text{ g/cm}^3$, 制样含水率为10.04%。

共进行5组试样的渗透试验, 分别是: 原级配试样和去除细粒的12.5%, 25%, 37.5%, 50% 4种情况。5组试验的围压均是100 kPa。试验室测得的渗透系数如表1所示。

将表1的数据点绘坐标图上(如图3), 可以得到渗透系数 k' 与去除细粒的含量 Δs 之间的关系, 即

$$k' = k_0 \cdot 10^{\lambda \cdot \Delta s} \quad (6)$$

式中, k_0 为100 kPa围压下原级配试样的渗透系数, k' 为降低细粒含量后试样的渗透系数, Δs 为去除细粒的

含量, λ 为系数, 无量纲。

由图3, 双江口堆石坝掺砾心墙料 $\lambda=5.0$ 。应说明的是, 试样在不同围压下, 系数 λ 可能是不一样的。不过, 假定试样的系数 λ 为定值, 不随围压而改变, 并用100 kPa围压试验来确定。

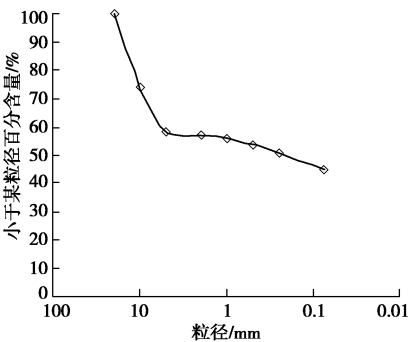


图2 掺砾心墙料中三轴试样的级配曲线

Fig. 2 Grading curve of gravel-mixed soil specimens

表1 降低细粒含量下掺砾心墙料的渗透系数

Table 1 Permeability coefficient of gravel-mixed soils with different contents of fine grains (cm/s)

试样	原级配	降低细粒的含量 Δs			
		12.5%	25.0%	37.5%	50.0%
k_0	5.42×10^{-7}	2.07×10^{-6}	1.18×10^{-5}	6.13×10^{-5}	1.06×10^{-4}

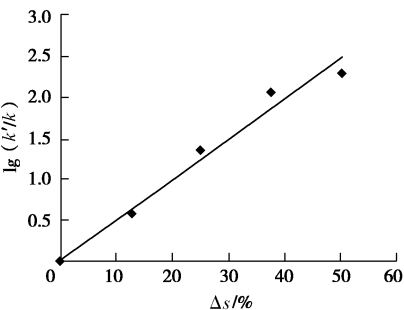


图3 降低细粒的含量与渗透系数的关系曲线

Fig. 3 Relationship between permeability coefficient and content of fine grains which are reduced

3 确定邓肯模型参数的简化方法

掺砾心墙料大三轴试验的主要目的是获取邓肯模型等本构模型的计算参数。采用降低细粒含量后的试样做试验, 可以节省可观的大三轴试验时间, 然而试样终究与原级配试样有差异, 整理出来的模型参数也会有出入。

为了得到原级配试样的邓肯模型参数, 可以采取修正系数的简化方法来解决。也就是说, 将降低细粒含量后的土样模型参数, 乘以一个修正系数 α , 得到没有降低细粒含量的原级配土样模型参数。

3.1 邓肯模型

土的邓肯模型是弹性非线性模型, 它被广泛应用

于土石坝的应力变形计算。模型的切线弹性模量和泊松比表示如下：

$$E_t = \left[1 - R_f \frac{(1 - \sin \varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cdot \cos \varphi + 2\sigma_3 \cdot \sin \varphi} \right]^2 K \cdot p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n, \quad (7)$$

$$\nu_t = \frac{G - F \lg(\sigma_3 / p_a)}{(1 - A)^2}, \quad (8)$$

其中，

$$A = \frac{D(\sigma_1 - \sigma_3)}{K \cdot p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \left[1 - \frac{R_f(1 - \sin \varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cdot \cos \varphi + 2\sigma_3 \cdot \sin \varphi} \right]},$$

邓肯模型参数中， c 为黏聚力， φ 为内摩擦角， R_f 为破坏比， K 为模量参数， n 为模量指数， G ， F ， D 为泊松比参数。

3.2 参数的试验方法和步骤

通过修正系数的方法获取模型参数，须解决的关键问题有二：①确定去除细粒的含量 Δs ，前面已经阐述；②确定修正系数 α 的值。修正系数 α 可以通过中三轴试验对比降低细粒含量前、后试样的模型参数而近似得到。具体的方法和步骤如下：

(1) 确定降低细粒的含量 Δs 。取若干 Δs ，做掺砾心墙料的渗透试验，得到降低不同细粒含量 Δs 的试样在围压 100 kPa 下的渗透系数 k' ，确定式 (6) 中的参数 λ 。这里的渗透试验，用中三轴仪来完成。根据渗透系数估计试验所需时间，并拟定合适的剪切控制应变速率，进而选择恰当的三轴试样中细粒的降低量 Δs 。

(2) 做中三轴排水剪试验，得到两种土样（原级配掺砾心墙料和降低细粒含量 Δs 后的试样）的邓肯模型参数，确定 3 个主要参数的修正系数，即

$$\alpha_c = \frac{c}{c'}, \quad \alpha_K = \frac{K}{K'}, \quad \alpha_G = \frac{G}{G'}.$$

式中， c ， K ， G 为不降低细粒含量的原级配试样邓肯模型参数， c' ， K' ， G' 为降低细粒含量 Δs 后的试样邓肯模型参数。须指出的是，为何仅修正模型参数中的 3 个，后面会有说明。

(3) 制备降低细粒含量 Δs 的掺砾心墙料大三轴试样，以步骤 (1) 拟定的剪切速率，作排水剪切试验，得到邓肯模型参数 c' ， K' ， G' ， φ' ， R'_f ， n' ， F' ， D' 。假定步骤 (2) 中三轴试验确定的 3 个修正系数也同样适用于大三轴试验，且其它参数不修正。这样，就可以得到没有降低细粒含量的原级配大三轴试样邓肯模型参数，即

$$c = \alpha_c c'; \quad K = \alpha_K K'; \quad G = \alpha_G G'; \\ \varphi = \varphi'; \quad R_f = R'_f; \quad n = n'; \quad F = F'; \quad D = D'.$$

其中， c ， φ ， R_f ， K ， G ， n ， F ， D 为原级配大三轴试样参数。

3.3 双江口心墙料模型参数的确定

河海大学岩土所的大三轴仪试样直径为 30 cm，高度为 60 cm。双江口堆石坝掺砾心墙料制样干密度为 $\rho_d = 2.04 \text{ g/cm}^3$ ，体积压缩系数为 $m_v = 0.023 \text{ MPa}^{-1}$ 。由前面渗透试验结果，以及式 (5)，当试样去除细粒的 12.5% 以后，剪切控制应变速率取 $0.0038\% \text{ min}^{-1}$ 可以保证剪切过程中的孔隙水压力及时消散，且剪切时间为 2.74 d，是较为理想的试验时间。于是，可以用去除细粒含量 12.5% 的试样作中三轴试验，来确定大三轴试样邓肯模型参数的修正系数。

当然，也可以用去除更多或更少细粒的试样来确定修正系数。不过，合理的确定细粒去除量，主要考虑两方面，一是要使试样的强度和变形尽可能接近原土料，因此希望去除的细粒少一些；二是要使试验时间短些，因此希望去除的细粒就多一些。掺砾心墙料取 12.5%，大体上是恰当的。

细粒含量降低前、后掺砾心墙料的各粒组含量如表 2 所示。

表 2 试样各粒组含量

试样	粒组			
	粗粒			细粒
	10~20 mm	5~10 mm	0.075~5 mm	<0.075 mm
原级配试样	26%	15.5%	13.5%	45%
降低细粒的 12.5% 试样	28.66%	17.08%	14.88%	39.38%

整理中三轴试验结果，原级配试样和去除细粒 12.5% 后的试样，它们的应力应变曲线、体变曲线的形状、走势和特征基本相似。所以，降低细粒含量后的试样没有改变原级配试样的基本特性，如压硬性和剪胀性。可以认为降低试样中细粒含量的 12.5%，对试样的力学性质影响较弱。

降低细粒含量 12.5% 后的掺砾心墙料与原级配土样的邓肯模型参数，如表 3 所示。比较两种试样的邓肯模型参数，发现差别较大的参数是黏聚力 c ，模量参数 K 和体变参数 G 。

降低土样中细粒的含量，必然会减少土样的黏聚力。降低细粒含量 12.5% 后，土样的黏聚力 c 是原始土样的 73%。土样的内摩擦角主要粗颗粒构成，由于降低细粒后，粗颗粒含量增量不大，对土样的摩擦角不会造成明显的影响。降低细粒含量 12.5% 后，土样的摩擦角 φ 几乎与原级配土样相等。邓肯模型中另外两个重要参数 K 和 G ，降低细粒含量 12.5% 后的土样分别是原级配土样的 116% 和 105%。

所以，双江口掺砾心墙料降低细粒含量 12.5% 以后，大三轴试样的邓肯模型参数修正系数为 $\alpha_c = 1.36$ ， $\alpha_K = 0.87$ ， $\alpha_G = 0.95$ 。

表 3 试样邓肯模型参数

Table 3 Duncan model parameters of soil specimens

模型参数	φ ($^{\circ}$)	c /kPa	R_f	K	n	G	F	D
原级配试样	35.0	15.8	0.81	630	0.29	0.43	0.17	3.0
降低细粒的 12.5%试样	35.8	11.6	0.80	723	0.29	0.45	0.17	3.0

需说明的是, 在整理降低细粒含量的试样与原级配试样的邓肯模型参数时, 为了突出主要参数的差异, 特保持两种试样的某些参数一致。如在表 3 中, 初始切线模量的两个参数 K 和 n , 保持了 n 不变; 切线泊松比的参数 G , F , D , 保持了 F 和 D 相同。降低了细粒含量的试样, 试验结果与原级配试样的差别不是很大, 要准确地整理出两种试样的邓肯模型参数, 并真实反映出每个参数之间的差异, 是很难办到的, 因为试验存在误差, 整理过程也存在误差。另外, 比较多参数的变化规律, 不易抓住主要方面。所以, 保持某些参数相同, 比较一些主要的参数, 找出规律, 是合理的。

4 结 论

降低掺砾心墙料中细粒的含量是增快大三轴剪切控制速率和缩短试验时间的一个可尝试途径。

(1) 由于掺砾心墙的强度和应力变形特性主要取决于土中的粗颗粒部分, 所以适量降低细粒的含量, 对试验结果影响不大。试验发现, 双江口掺砾心墙料降低细粒含量的 12.5% 以后, 和原级配试样相比, 应力应变曲线和体变曲线的形状特征基本相似, 没有改变原级配试样的基本特性, 如压硬性和剪胀性。

(2) 渗透试验表明, 降低掺砾心墙料中细粒的含量, 可以有效地提高渗透性, 从而加速三轴试验剪切过程中的排水速率, 缩短试验时间。

(3) 确定掺砾心墙料邓肯模型参数的简化方法和步骤为: ①确定降低的细粒含量; ②做中三轴剪切试验, 得到降低细粒含量的试样与原级配试样邓肯模型参数, 确定修正系数; ③制备降低细粒含量的大三轴试样, 以较短的时间做完试验, 通过修正系数的方法得到原级配大三轴试样的邓肯模型参数。

应该指出, 合理确定降低细粒的含量以及模型参数的修正系数, 是应用试验方法的关键。文中仅是用一种土样在粗略确定的细粒降低量下做试验, 发现方法可行, 原理正确, 有可能推广。建立修正系数与掺砾心墙料颗粒组成、细粒降低量之间的关系尚需进一步研究, 适量降低细粒含量后土样试验特征变化规律以及如何形成完善的试验方法, 尚待更多试验去总结。

参考文献:

[1] 刘萌成, 高玉峰, 刘汉龙, 等. 粗粒料大三轴试验研究进展

[J]. 岩土力学, 2002, 23(2): 217 - 221. (LIU Meng-cheng, GAO Yu-feng, LIU Han-long, et al. Development of study on a large scale triaxial test of coarse-grained materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(2): 217 - 221. (in Chinese))

[2] 邵磊, 迟世春, 贾宇峰. 堆石料大三轴试验的细观模拟[J]. 岩土力学, 2009, 30(增刊 1): 239 - 243. (SHAO Lei, CHI Shi-chun, JIA Yu-feng. Meso-mechanical simulation of a large scale triaxial test of rockfill materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(S1): 239 - 243. (in Chinese))

[3] 陈志波, 朱俊高. 宽级配砾质土三轴试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38(6): 704 - 710. (CHEN Zhi-bo, ZHU Jun-gao. Triaxial tests on widely graded gravelly soil[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2010, 38(6): 704 - 710. (in Chinese))

[4] 陈志波. 宽级配砾质土工程特性及其快速三轴 CD 试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2008. (CHEN Zhi-bo. Study on engineering properties and quick triaxial CD test of wide grading gravelly soil[D]. Nanjing: Hohai University, 2008. (in Chinese))

[5] 余挺. 砾质土防渗料在高土石坝上的应用[J]. 水电站设计, 2003, 19(3): 15 - 17. (YU Ting. Application of gravelly soil in high earth rockfill dams[J]. Design of Hydropower Station, 2003, 19(3): 15 - 17. (in Chinese))

[6] 李药, 胡军. 堆石坝技术中几个问题的研究现状[J]. 西北水资源与水工程, 1997, 8(1): 55 - 60. (LI Yao, HU Jun. Research status of several key issues in construction of rockfill dams[J]. Water Resources & Water Engineering, 1997, 8(1): 55 - 60. (in Chinese))

[7] 谭靖夷. 中国水利发电工程·施工卷[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000. (TAN Jing-yi. China water resources and hydropower engineering·Construction volumes[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000. (in Chinese))

[8] GIBSON R E, HENKEL D J. Influence of duration of tests at constant rate of strain on measured drained strength[J]. Géotechnique, 1954, 4(1): 6 - 15.

[9] BISHOP A W, HENKEL D J. 土壤性质的三轴试验测定法[M]. 陈愈炯, 俞培基, 译. 北京: 中国工业出版社, 1965. (BISHOP A W, HENKEL D J. Triaxial test method for soil[M]. CHEN Yu-jiong, YU Pei-ji, trans. Beijing: China Industry Press, 1965. (in Chinese))

[10] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. (YIN Zong-ze. Principle of geotechnical engineering[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2007. (in Chinese))