

DOI : 10.16285/j.rsm.2017.06.002

细颗粒流失对砂砾石土本构关系的影响研究

吴梦喜^{1,2}, 叶发明³, 张琦³

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国电建集团成都水利水电勘测设计研究院, 四川 成都 610072)

摘 要: 采用悬挂式防渗墙的坝基砂砾石土中可能发生潜蚀 (suffusion) 侵蚀而流失细颗粒, 导致土体的强度和变形模量降低, 从而对坝基防渗墙及上部坝体造成不利影响。定量描述细颗粒流失量对砂砾石土应力-应变关系影响的模型是定量评估这种影响的基础之一。提出了研究这种本构模型的试验方案, 进行了三轴和侧限压缩试验研究了颗粒流失量对应力-应变关系的影响。颗粒流失未改变土体的应力-应变特性, 但降低了土体的强度和变形模量。通过建立模型参数与流失量的关系, 可以用同一个本构模型描述流失量时空变化的砂砾石土本构关系。基于邓肯 E-B 模型, 建立了模型参数与颗粒流失量之间的定量关系表达式, 从而实现了颗粒流失对应力-应变关系影响的定量描述方法。

关键词: 潜蚀; 细颗粒流失; 砂砾石; 本构模型

中图分类号: TU 441+5

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2017) 06 - 1550 - 07

Effect of fine grain loss on the stress-strain relationship of sand and gravel soils

WU Meng-xi^{1,2}, YE Fa-ming³, ZHANG Qi³

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Powerchina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu, Sichuan 610072, China)

Abstract: Sand and gravel soils in a dam foundation with a suspended cutoff wall may lead to fine grains loss due to the effect of suffusion, which further results in the reduction of strength and deformation modulus. As a result, the cutoff wall and the dam above the foundation experience an adverse impact. The effect of loss amount of fine particles on the stress-strain relationship of soil is known as one of preconditions to quantitatively assess the impact. In this study, an experimental program was presented to study the constitutive model. Triaxial and confined compression tests were conducted to investigate the effect of the loss amount of fine particles on the strength and stress-strain relations of sand and gravel soils. It is found that stress-strain characteristics of soil are not influenced by fine grain loss, but both the strength and deformation modulus are decreased. By establishing the relationship between model parameters and the amount of the loss, a single model was utilized to describe the stress-strain relationships of sand and gravels with spatio-temporal changes of particle loss amount. Based on Duncan E-B model, we proposed an expression to quantitatively describe the relationship between the loss amount of fine particles and the stress-strain of the soil, and parameters of the constitutive model were given as well.

Keywords: suffusion; fine grains lose; sand and gravel; constitutive model

1 引 言

潜蚀 (suffusion) 是指不稳定土体在渗流作用下细颗粒通过粗颗粒之间的孔隙而移动的渗透变形现象, 可以造成堤坝的破坏。美国蒙大拿州 Hauser 湖大坝 1908 年垮塌于初次蓄水 1 年之后, 是典型的

潜蚀导致的大坝失事^[1]。我国已经有大量的堆石坝直接修建于深厚覆盖层上^[2], 相当多的坝址覆盖层特别深厚, 由于技术经济原因采用悬挂式防渗墙。悬挂式防渗墙底端土体内渗透坡降较大。潜蚀的临界渗透坡降处于 0.13 ~ 0.30 之间^[3]。当坝基为内部不稳定的砂砾石层时, 容易发生潜蚀侵蚀。潜蚀侵

收稿日期: 2015-09-16

基金项目: 国家重点基础研究发展计划课题 (No.2013CB035903); 国家科技支撑计划课题 (No.2014BAB03B04)

This work was supported by National Basic Research Development Program of China (2013CB035903) and National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (2014BAB03B04).

第一作者简介: 吴梦喜, 男, 1967 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事水工结构与岩土工程数值方法研究。E-mail: wumx@imech.ac.cn

蚀未出露于坝基外部时难于发现,被发现时往往侵蚀已经十分严重。虽然未公开报道,我国确已经有深厚覆盖层坝基观察到了严重的管涌侵蚀现象,处理难度很大。潜蚀侵蚀增大土体的孔隙通道和渗透性,改变坝基的渗流场,增大坝基的渗流量,是大坝安全运行的隐患。坝基渗流场的改变和土体因侵蚀造成的压缩性增大对防渗墙及其上部结构的变形产生影响,已经有对这种影响进行试验研究的尝试^[4]。潜蚀侵蚀的细观机制及泥沙运动过程已有离散元颗粒流方法模拟^[5],但该方法由于计算规模的限制,尚难用到对坝基潜蚀进行直接模拟的尺度。潜蚀侵蚀是否会在坝基内部持续发展、侵蚀发展是否会最终造成坝基的渗透破坏、一定程度和范围的潜蚀对大坝结构不利影响有多大等是亟需回答的现实的共性工程问题,这些问题对砂砾石深厚覆盖层坝基上的重大工程设计至关重要。有限元法是复杂问题工程分析的有效手段,基于对复杂的渗流问题成熟的有限元方法^[6-7],笔者已经实现了潜蚀的有限元动态模拟,能给出坝基潜蚀侵蚀过程中的渗流场和侵蚀量及其随时间发展的过程,将另文发表。要定量分析管涌侵蚀对坝基和坝体应力变形的影响,首先需要建立管涌侵蚀对土体应力-应变关系的定量模型。由于细颗粒流失量是发生土体潜蚀侵蚀程度的客观描述指标,可以通过试验研究细颗粒流失量对内部不稳定砂砾石土应力-应变关系的影响,从而建立包含颗粒流失量指标的潜蚀土体的本构模型。本文采用三轴试验与侧限压缩试验方法,研究了颗粒流失量对应力-应变关系的影响,提出定量描述方法,为坝基一定程度的潜蚀侵蚀后坝基和坝体的应力变形进行定量评估提供了基础。

2 细颗粒流失对土体力学特性的影响

发生潜蚀侵蚀的土体,粗颗粒构成骨架,细颗粒能够在渗流作用下在粗颗粒构成的孔隙空间中运动。一般来说,细颗粒的流失并不引起土骨架的垮塌。潜蚀侵蚀过程中,细颗粒被渗流侵蚀带走,不耦合土体变形时,粗颗粒的体积含量与排列接触关系不变、土体的孔隙率和骨架颗粒之间的孔隙空间增加。在由较均匀大颗粒组成的土体中,假定处于最紧密状态,如果其孔隙中填有少量的很细小的可动颗粒,那么细小颗粒的流失仅会对土体的渗透特性有所影响,而对土体的变形特性影响很小,如人工堆石体。对于一般的天然砂砾石土体,由于细颗粒填充于粗颗粒之间,粗颗粒之间填充的细颗粒减少,通过细颗粒传力的路径减少,压缩性会增大。

由于粗颗粒构成土体的骨架,因此,推测砂砾石土的管涌侵蚀对土体的应力-应变特性不会有大的影响,但对土体的变形模量会有一定影响,因此,需要通过试验进行研究。

由于坝基土体的侵蚀量随着侵蚀时间和空间而发生变化,因此,研究侵蚀量对土体的强度和变形模量的影响,便于实现管涌侵蚀对坝基和坝体变形影响的模拟。

2.1 试验方案与内容

本文提出用砂砾石侵蚀前后的三轴和侧限压缩试验相互配合的方法来研究颗粒流失量对土体强度和变形特性或变形参数的影响。由于难以获得砂砾石土管涌直接侵蚀后给定侵蚀量的试样,因此,依据与管涌侵蚀后颗粒级配相同且孔隙率相等来配置制样。

根据原始土样的颗粒级配和干密度,在采用相似法剔除替换超径颗粒后,确定未侵蚀的颗粒级配和干密度,获得未侵蚀试样的配料表。对于管涌侵蚀后的试样,在未侵蚀试样的配料表的基础上,按照细颗粒流失量,扣减细颗粒重量。这样制作的试样,粗颗粒的体积含量始终不变,细颗粒的含量减少,颗粒组成与孔隙率与管涌侵蚀后情况相同。通过进行不同侵蚀量试样的三轴和侧限压缩试验,可以获得不同侵蚀程度的土体的应力-应变关系。

在三轴试验中,如果能同时记录等压固结时的变形模量,则有助于研究土体的压缩性。但由于橡皮膜嵌入的影响,等压固结的体积变形要准确测量是很难的。土体的侧限压缩试验,直接反映土体的压缩特性,可以用来研究砂砾石土体细颗粒侵蚀流失量对体积变形模量的影响。

试验用料为宽级配砂砾石土,最大颗粒粒径为 40 mm,原始土料小于等于 5 mm 颗粒占总重量的 25.48%。大于 5 mm 颗粒的比重为 2.83,小于等于 5 mm 颗粒的比重为 2.71。侵蚀后土样的配料表在侵蚀前配料表的基础上,5 mm 以下细颗粒含量按照侵蚀量扣减,然后制样到得的土样与相同侵蚀率的实际侵蚀土体的颗粒级配相同,孔隙率相等。三轴试验进行了 2 组,第 1 组为未侵蚀时的土体。侵蚀前试样干密度为 2.36 g/cm^3 ,孔隙率为 13.9%。第 2 组颗粒侵蚀重量占总体的 6.5%,试样干密度为 2.21 g/cm^3 ,孔隙率增大到 19.5%。三轴试验试样直径为 300 mm,高度为 700 mm,采用饱和固结排水剪。

侧限压缩试验试样高度为 180 mm,试样直径为 300 mm。侧限压缩试验一组 5 个试样,分别为

未侵蚀, 细颗粒侵蚀量占总土颗粒重量的 3%、6.5%、10%、15%的情况。共进行了 5 组。

下文将土体侵蚀量与总土颗粒重量的比率定义为侵蚀率。侵蚀率与体积侵蚀率不同, 体积侵蚀率是单位体积内流失颗粒的体积。对于土颗粒的比重相同的土体, 体积侵蚀率=侵蚀率×(1-初始孔隙率)。

2.2 三轴试验结果

两组常规三轴试验的应力-应变关系曲线分别见图 1、2, 其中 σ_1 为轴向应力, σ_3 为径向应力, ϵ_1 为轴向应变, ϵ_v 为体积应变。未侵蚀土样与颗粒侵蚀率 6.5% 的土样总体的应力-应变特性一致。6.5% 侵蚀率后土体强度与 1.15% 轴应变时割线变形模量对比见表 1。围压 3.0 MPa 试样侵蚀后的强度和体积变形模量比侵蚀前都要高, 显然该围压曲线可以归类为异常试验点, 从对比分析中剔除。土体在侵蚀后强度必然降低, 6.5% 颗粒侵蚀率时降低幅度显著。剪切模量和体积模量也都大幅度降低, 剪切模量的降低幅度是与围压正相关, 而体积模量的降低幅度与围压负相关。剪切模量的降低幅度比体积模量的降低幅度要大。

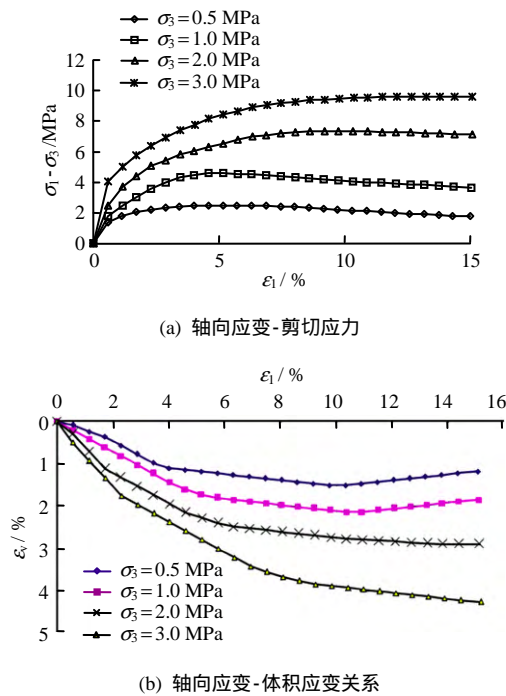
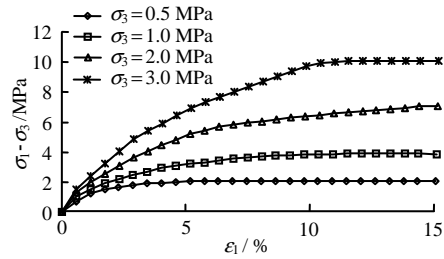


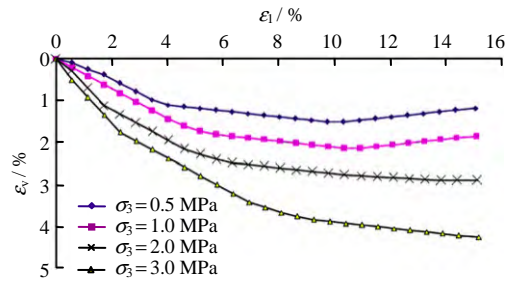
图 1 未侵蚀土样的三轴剪切试验
Fig.1 Triaxial shear of undamaged soil samples

2.3 侧限压缩试验结果

制样方法与三轴试验相同, 单位体积内大于 5 mm 颗粒含量相同, 通过减少小于等于 5 mm 颗粒含量, 获得细颗粒的流失试样。轴向压力与体积应



(a) 轴向应变-剪切应力



(b) 轴向应变-体积应变关系

图 2 颗粒侵蚀率 6.5% 时三轴剪切试验

Fig.2 Triaxial shear of soil samples with 6.5% grain loss

表 1 6.5% 侵蚀率后土体强度、1.15% 轴应变时变形模量的变化

Table 1 Strength changes after 6.5% grain loss and deformation modulus changes at 1.15% of the axial strain

围压 / MPa	峰值剪力 降低 / %	割线剪切模 量降低 / %	体变增加 / %	割线体积模 量降低 / %
0.5	16.4	31.4	20.2	25.3
1.0	16.4	39.6	17.8	24.9
2.0	10.7	57.1	14.1	20.2
3.0	-5.1	52.3	-10.9	-17.1

变关系如图 3 所示, 横坐标为垂直压应力 F 与大气压力 P_a ($=100$ kPa) 之比, 纵坐标体积应变 ϵ_v 即侧限压缩应变。图中原土样、颗粒流失量 3%、6.5%、10%、15% 土样的孔隙率分别为 13.9%、16.5%、19.5%、22.6% 和 26.9%。试验表明, 颗粒流失越多, 粗颗粒骨架之间的孔隙越大, 相同压力下的侧限压

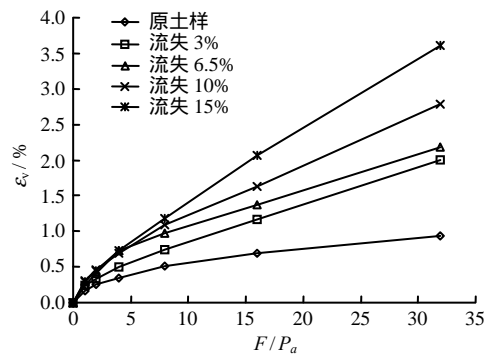


图 3 侧限压缩试验压应力与体积应变关系

Fig.3 Compressive stress vs volume strain in confined compression tests

缩量就越大。

从以上试验结果看，土体的强度和变形模量随着颗粒流失量增加而降低，但应力-应变特性并没有发生变化，因而在现有描述砂砾石土应力-应变本构模型的基础上，将现有适宜本构模型的模型参数作为侵蚀率的函数，从而可描述颗粒流失对土体应力-应变关系的影响。

3 颗粒流失对应力-应变关系的影响

邓肯 E-B 模型因其比较简单且参数容易测定，又能大体反映砂砾石土和堆石体的应力-应变关系，因而在我国堆石坝工程的有限元计算分析中得到最广泛应用。本文结合该模型研究颗粒流失对应力-应变关系的影响。

3.1 邓肯 E-B 模型

邓肯模型定义土体的切线弹性模量 E_t 的表达式为

$$E_t = \left[1 - \frac{R_f(\sigma_1 - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \right]^2 E_i \quad (1)$$

式中： σ_1 、 σ_3 为主应力； $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 为土体破坏时的主应力差； R_f 为参数； E_i 为初始切线模量。

根据 Mohr-Coulomb 破坏准则

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (2)$$

式中： c 、 φ 分别为土的凝聚力和内摩擦角。

E_i 与 σ_3 的关系为

$$E_i = kP_a(\sigma_3 / P_a)^n \quad (3)$$

式中： k 为弹性模量数； n 为弹性模量指数； P_a 为大气压力。

邓肯模型切线弹性模量计算公式共有 5 个参数，即 k 、 n 、 R_f 、 c 、 φ 。

切线体积模量 B_t 为

$$B_t = dp / d\varepsilon_v \quad (4)$$

邓肯 E-B 模型体积模量的计算公式如下

$$B_t = k_b P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^m \quad (5)$$

其中 k_b 为体积模量数， m 为体积模量指数。

E-B 模型的泊松比计算公式为

$$\mu_t = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{E_t}{3B_t} \right) \quad (6)$$

高堆石坝应力计算时砂砾石土常用非线性强度指标，此时 $c = 0$ ， φ 的表达式为

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta\varphi \lg[\max(1, \sigma_3 / P_a)] \quad (7)$$

式中： φ_0 为初始摩擦角； $\Delta\varphi$ 为高压时摩擦角降低率。

3.2 侵蚀率与土体强度的关系

根据三轴试验，回归出 2 组土样的非线性强度参数如表 2。

表 2 试样强度参数表
Table 2 Strength parameter of samples

试样	$\varphi_0 / (^\circ)$	$\Delta\varphi / (^\circ)$
初始土体	53	9.9
6.5%颗粒流失土体	46	4.8

强度参数与颗粒流失量的关系，需要通过至少 3 组试验才能建立起来，本文仅进行了 2 组三轴试验，因而建立这一关系还有赖于今后进一步试验研究后完成。

3.3 颗粒流失对变形模量的影响

表 3 为依据三轴试验结果回归的 2 组试验的邓肯 E-B 模型参数。其中 k 、 n 、 R_f 为剪切变形参数， k_b 、 m 为体积变形参数。

表 3 土样的邓肯 E-B 模型参数
Table 3 Parameters of Duncan E-B model

土样名称	k	n	R_f	k_b	m
未侵蚀土体	2 017	0.360	0.84	904	0.090
6.5%侵蚀率	1 427	0.154	0.77	282	0.321

由于侵蚀率与体积变形的关系既有三轴试验资料，又有侧限压缩资料，首先研究侵蚀率与体积变形参数的关系，再分析侵蚀率与体变参数的影响。

3.3.1 侵蚀率与体变参数关系

表 4 为邓肯 E-B 模型的体积模量 B 的计算结果，据此回归出未侵蚀土样 $k_b=904$ ， $m=0.09$ ，相关系数为 0.49；6.5%侵蚀率土体 $k_b=282$ ， $m=0.32$ ，相关系数为 0.97。从表 4 中体变模量与围压的关系来看，邓肯模型没有很好反映土体的压硬性。表 3 中 2 组体变参数 k_b 、 m 很难看出侵蚀率对体变参数影响的规律性。没有很好反映砂砾石细颗粒流失后的体变规律。其原因主要是参数回归时，用剪切时的体积应变与体应力的关系回归，没有包含固结应变和固结体应力，代表性不足，因此，利用侧限压缩试验的成果，反映土体的体积压缩与体应变的关系是十分重要的。

表 4 三轴试验中体积模量 B 的计算
Table 4 Volume modulus B in triaxial tests

围压/MPa	0.5	1.0	2.0	3.0
未侵蚀土体	977	1 174	1 370	1 071
6.5%侵蚀率土体	461	600	801	786

下面结合侧限压缩试验来分析基于邓肯 E-B 模型，侵蚀率对模型参数的影响。

侧限压缩试验中的侧压力即为小主应力 σ_3 ，按如下的半经验公式计算：

$$\sigma_3 = k_0 F = (1 - \sin \varphi) F \quad (8)$$

式中： F 为压缩应力； k_0 为侧压力系数； φ 为土料的内摩擦角。

本文在计算侧压力时 φ 统一取 40° ，则侧压力系数取为 0.36。可以将压缩应力-体变关系转换成体积应力-体变关系。

表 5 为侧限压缩试验中分段平均体积模量与段内最大压应力的关系。从表中可见，分段平均体积模量随着侵蚀率的增加而减小，低压力时减小幅度小，高压时减小幅度大。取荷载段的中值作为分段体积模量对应的应力水平，对表 5 的数据进行粗略回归，可得到表 6 所示的不同侵蚀程度砂砾石土邓肯 E-B 模型体变参数。从中可以看出， k_b 和 m 随着侵蚀率的增加变化趋势是减小的，规律性很好。可见用侧限压缩试验研究砂砾石土压缩变形模量与侵蚀率的关系是很好的选择。

表 5 压缩试验分段平均体积模量与压应力的关系

Table 5 The relationship between the segmented average volume modulus and the compressive stress in confined compress tests

侵蚀率 / %	σ_3 / MPa					
	0.36	0.72	1.44	2.88	5.76	11.52
0.0	333	688	1 290	1 332	2 663	3 590
3.0	229	688	688	917	1 086	1 101
6.5	235	356	356	938	1 147	1 131
10.0	184	369	491	590	851	786
15.0	195	382	389	523	516	594

表 6 压缩试验回归的体变参数

Table 6 Volume strain parameters regressed in confined compress tests

侵蚀率 / %	k_b	m
0.0	1 003	0.61
3.0	613	0.376
6.5	487	0.466
10.0	423	0.386
15.0	372	0.266

构造指数型公式，据表 6 拟合出邓肯 E-B 模型

体变参数随侵蚀率的拟合如图 4 所示。拟合公式如下

$$k_b = a_1(1 - \beta)^{b_1} \quad (9)$$

$$m = a_2(1 - \beta)^{b_2} \quad (10)$$

式中： a_1 、 b_1 、 a_2 、 b_2 为拟合参数，分别为 818.7、5.622、0.547、4.111， β 为侵蚀率，等于侵蚀流失土颗粒重量与初始颗粒的总重量之比。

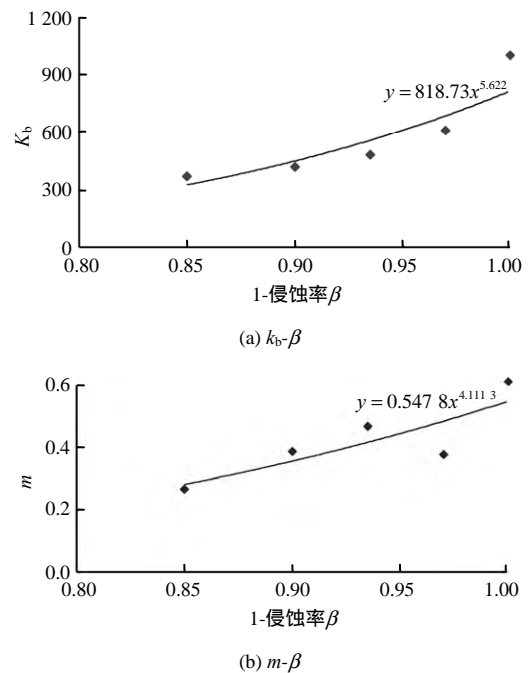


图 4 体变参数与侵蚀率关系

Fig.4 Relation between volume strain parameters and grain lose ratio

3.3.2 侵蚀率与剪变参数关系

表 7 为侵蚀前、后两种土体的剪应力-轴向应变的双曲线回归参数，初始切线模量回归的相关系数很高，说明用双曲线模拟常规三轴试验中轴向应变-剪切应力关系是很好的。根据初始切线模量，按照

表 7 土体轴向应变-剪切应力双曲线回归参数

Table 7 Hyperbola parameters of axial strain and shear stress of samples

是否侵蚀	围压 / MPa	E_t	R_t	相关系数
未侵蚀	0.5	4 099	0.86	1.000
	1.0	3 912	0.75	0.996
	2.0	5 283	0.84	0.999
	3.0	8 021	0.90	0.999
侵蚀率	0.5	1 902	0.81	0.998
	1.0	1 906	0.82	0.999
	6.5%	2 272	0.79	0.999
	3.0	2 465	0.65	0.996

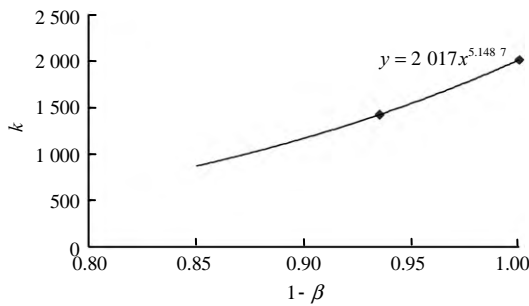
式 (3) 回归出表 3 中的 k 、 n 参数, 两种土体相关系数分别为 0.864、0.935。可见邓肯模型及其剪应变参数较好反映出了材料的轴向应变-剪切应力规律。对比 2 组试验, 土样侵蚀后初始切线模量显著降低, 围压越大, 降低的程度越大。 k 、 n 这两个参数都减小且变化幅度较大, R_f 也有所变化。

由于只有 2 组三轴试验, 剪切模量参数与侵蚀率之间的关系不能直接建立。由于初始剪切模量公式与体变模量公式形式上一致, 故参照其参数随着侵蚀率变化的公式构造如下:

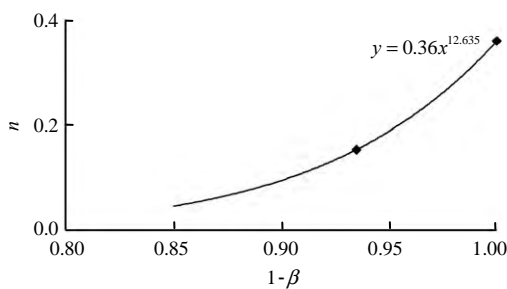
$$k = a_3(1 - \beta)^{b_3} \quad (11)$$

$$n = a_4(1 - \beta)^{b_4} \quad (12)$$

式中: 拟合参数 a_3 、 b_3 、 a_4 、 b_4 分别为 2 017、5.148、0.36、12.63。由图 5 中可见, 侵蚀率在 0~0.15 之间时, 土样的 k 、 n 参数均在砂砾石土邓肯模型参数的一般范围之内。



(a) k - β 关系曲线



(b) n - β 关系曲线

图 5 剪切变形参数与侵蚀率关系

Fig.5 Relationship between shear deformation parameters and grain lose ratio

管涌侵蚀对邓肯模型变形参数的影响共 10 个, 分别是 a_1 、 b_1 、 a_2 、 b_2 、 a_3 、 b_3 、 a_4 、 b_4 、 a_5 、 b_5 。2 个参数一组, 分别是对 K_b 、 m 、 k 、 n 、 R_f 的影响参数, 本次试验研究中砂砾石土的管涌侵蚀变形参数见表 8。

表 8 砂砾石土侵蚀对邓肯 E-B 模型参数影响参数表
Table 8 Influence of erosion on Duncan E-B model parameters of sand and gravel

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
818.7	0.547	2017	0.36	0.84	5.622	4.111	5.148	12.63	1.294

参数 R_f 主要反映应力水平对剪切模量的影响。侵蚀率增加, R_f 应该是下降的。假定满足如下公式

$$R_f = a_5(1 - \beta)^{b_5} \quad (13)$$

式中: a_5 、 b_5 分别为 0.84、1.294, 拟合结果见图 6。

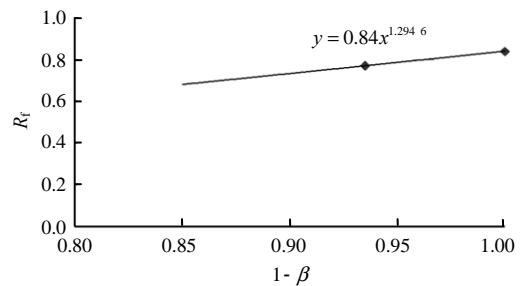


图 6 应力水平参数 R_f 与侵蚀率关系

Fig.6 Relationship between stress level parameter R_f and grain lose ratio

如果未侵蚀时土体的变形试验比较充分, 那么参数拟合时应使拟合公式通过侵蚀量为 0 的点, 以便计算侵蚀对变形影响时, 与未侵蚀的状态准确衔接。

4 潜蚀侵蚀过程中的应力-应变关系

潜蚀侵蚀过程中土体的应变可以分成两部分来计算: 砂砾石土体的变形模量降低(衰化), 从而在现有应力状态下的增量应变; 侵蚀土体的渗透系数发生变化或其他内外荷载的变化, 造成坝基有效应力场的改变而产生的增量应变。

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^0 + d\varepsilon_{ij}^\sigma \quad (14)$$

式中: $d\varepsilon_{ij}$ 为总的应变增量; $d\varepsilon_{ij}^0$ 为模量衰化引起的附加应变; $d\varepsilon_{ij}^\sigma$ 为应力增量引起的应变。

模量衰化引起的附加应变的计算可采用初应变增量法计算。等于时步初始应力状态下, 当前土体产生的总应变与初始土体产生的总应变之差。采用增量法计算时, 因变形模量为切线模量, 应将土体应力分成 N 等分, 积分计算应变。假定时步初侵蚀单元土体的应力为 σ_{ij}^0 , 初始应力状态下因模量变化引起的应变增量 $d\varepsilon_{ij}^0$ 可以用如下公式计算:

$$d\varepsilon_{ij}^0 = \sum_{M=1}^N [D_{ijkl}^{-1}(\frac{(M-0.5)\sigma^t}{N}, \beta_t) - D_{ijkl}^{-1}(\frac{(M-0.5)\sigma^t}{N}, \beta_0)] \frac{\sigma_{kl}^t}{N} \quad (15)$$

式中： D_{ijkl} 为切线弹性矩阵； t_0 和 t 分别表示时步初和时步末； i, j, k, l 表示坐标轴变量，下标重复表示求和。 N 为应变增量计算步数。

而应力增量引起的应变 $d\varepsilon_{ij}^\sigma$ 则按照下式计算：

$$d\varepsilon_{ij}^\sigma = D_{ijkl}^{-1}(\frac{\sigma^0 + \sigma^t}{2}, \beta_t) d\sigma_{kl} \quad (16)$$

式(1) 式(3) 式(5) 式(6) 式(9)~(16) 构成了砂砾石土管涌侵蚀影响下的邓肯 E-B 模型应力-应变关系。

上述模型与计算方法已经应用于悬挂式防渗墙坝基潜蚀对某深厚覆盖层上的堆石坝若干设计方案的应力变形的影响的计算分析。其方法将于另文发表。

5 结论和展望

本文通过减小内部结构不稳定的砂砾石土细粒土料的含量，来模拟渗流作用下不同颗粒侵蚀流失量的土体。进行了不同颗粒流失量的三轴试验和侧限压缩试验。表明颗粒流失只改变内部结构不稳定的砂砾石土的应力-应变定量关系而不改变其特性，可以通过建立本构模型参数与颗粒流失量之间的关系来计算侵蚀量时空变化的砂砾石土的变形模量。通过将侵蚀过程中土体的应变增量分成应力引起和模量衰化引起的应变增量两个部分，可以描述渗流侵蚀过程中土体的应力应变关系。结合邓肯 E-B 模型，建立了颗粒流失量对应力-应变关系影响的定量描述方法、公式及参数。

本文是研究潜蚀侵蚀对砂砾石应力-应变关系影响定量描述工作的尝试，研究工作处于探索的起步阶段，以期起到抛砖引玉的作用。工程应用的现实需求将推动试验研究工作的进一步开展，推动本构模型的进一步发展。

致谢： 本文的试验工作，由中国水利水电科学研究院岩

土研究所完成，特此感谢。

参 考 文 献

- [1] TERZAGHI K, PECK R B, MESRI G. Soil mechanics in engineering practice (third edition)[M]. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore: A Wiley Interscience Publication, JOHN WILEY & SONS, INC. 1995.
- [2] 周建平, 陈观福. 深厚覆盖层坝基防渗处理及混凝土防渗墙设计[C]//2004 水力发电国际研讨会论文集. 宜昌: 中国水电, 2004.
ZHOU Jian-ping, CHEN Guan-fu. Seepage prevention treatment of deep dam foundation and design of concrete cut-off wall[C]//Proceeding of International Symposium on Hydropower, Yichang: China Society for Hydropower Engineering, 2004.
- [3] SKEMPTON A W, BROGAN J M. Experiments on piping in sandy gravels[J]. *Geotechnique*, 1994, 44(3): 449 - 460.
- [4] 罗玉龙, 吴强, 詹美礼, 等. 考虑应力状态的悬挂式防渗墙-砂砾石地基管涌临界比降试验研究[J]. *岩土力学*, 2012, 33(增刊 1): 73 - 78.
LUO Yu-long, WU Qiang, ZHAN Mei-li, et al. Study of critical piping hydraulic gradient of suspended cut-off wall and sand gravel foundation under different stress states test[J]. *Journal of Soil and Rock Mechanics*, 2012, 33(Supp.1): 73 - 78.
- [5] 张刚, 周健, 姚志雄. 堤坝管涌的室内试验与颗粒流细观模拟研究[J]. *水文地质工程地质*, 2007, (6): 83 - 86.
ZHANG Gang, ZHOU Jian, YAO Zhi-xiong. Study on mesomechanical simulation of piping with model tests and PFC^{2D}[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2007, (6): 83 - 86.
- [6] WU M. A finite-element algorithm for modeling variably saturated flows[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 394: 315 - 323.
- [7] WU Meng-xi, YANG Lian-zhi, YU Ting. Simulation procedure of unconfined seepage in a heterogeneous field[J]. *Science China: Physics, Mechanics and Astronomy*, 2013, 56(6): 1139 - 1147.