

土体渗透稳定性判定准则

常东升, 张利民

(香港科技大学 土木与环境工程学系, 中国 香港 999077)

摘 要: 土体的渗透稳定性是指在渗流条件下宽级配土体内粗颗粒阻止细颗粒流失的能力, 土体的渗透稳定性受几何条件、水力条件和物理条件的影响。从几何条件出发, 通过对收集的 167 种土的室内渗透侵蚀试验结果的分析, 基于对土体渗透稳定性控制变量地研究, 将土分成良好级配土和间断级配土两大类; 基于细粒 (小于 0.063 mm) 含量的不同, 将每类土又细分为 3 类, 针对不同细类土提出了不同的渗透稳定性几何判定准则。从水力条件出发, 研究了应力状态对土体渗透侵蚀起动及破坏水力梯度的影响。试验结果表明, 起动水力梯度和破坏水力梯度都随着围压的增大而增大, 是由于增大围压使得颗粒间的摩擦力增大的结果。

关 键 词: 土石坝; 渗透稳定性; 渗流; 侵蚀; 大坝安全

中图分类号: TV 641

文献标识码: A

Internal stability criteria for soils

CHANG Dong-sheng, ZHANG Li-min

(Department of Civil and Environmental Engineering, The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong 99907, China)

Abstract: Internal stability refers to the ability for the coarse fraction of a broadly-graded soil to prevent the loss of its fine fraction due to seepage flow. The internal stability of a soil is influenced by geometric conditions (i.e. grain sizes and their distribution and pore sizes and their distribution), hydraulic conditions (i.e. hydraulic gradient and flow direction), and mechanical conditions (i.e. compaction efforts). From the geometric standpoint, soils are classified into two groups: well-graded and gap-graded, based on the information of 167 soils in a laboratory test dataset and understanding on the control variables for internal stability. Each group is further divided into three categories according to the fines content (< 0.063 mm). Finally, new internal stability criteria for each category of well-graded and gap-graded soils are proposed. From the hydraulic point of view, the influence of complex stress states on the initiation and development of seepage erosion is investigated. It is found that both the initiation hydraulic gradient and the failure hydraulic gradient increase with confining pressure. This is mainly due to the increase of friction between particles.

Key words: embankment dam; internal stability; seepage; erosion; dam safety

1 概 述

土体的渗透稳定性是指渗流条件下级配较宽的土体内粗颗粒阻止细颗粒流失的能力。土体的渗透稳定性受几何条件 (颗粒级配、颗粒形状、孔隙结构等)、水力条件 (水力梯度、渗流方向等) 和物理条件 (压实度、黏聚力等) 的影响^[1-4], 一旦细颗粒流失, 整个土体的渗透性会增大, 同时土体的抗剪强度也会降低。对土石坝来说, 这一现象通常在坝体的局部位置发生, 所以由于细粒的流失可能会导致坝体产生局部沉降^[5]或集中渗透, 从而产生管涌,

最终导致坝体的溃决。间断级配土料的渗透稳定性通常很差^[6], 据文献[7-8]统计, 土石坝约 1/3 以上是以渗透侵蚀的形式破坏, 其中土料的渗透稳定性差是其中一个重要的原因。国内外对土料渗透稳定性已经作了大量的研究工作, 从土体几何条件的角度出发, 通过大量的实验^[2-5, 9-12]提出了判定土体渗透稳定性的几何准则。表 1 总结了几种国内外常用的判定土体渗透稳定性的几何准则, 如 Istomina 准则^[13]、Kezdi 准则^[13]、Kenney 和 Lau 准则^[2]、Burenkova 准则^[9]、毛昶熙准则^[12]等, 但大多数几何准则的出发点都是为了设定一个安全界限, 而不是

区分渗透稳定性好和渗透稳定性差的土体。同时,每种准则只适于特定的土,当土体有明显的细粒(小于 0.063 mm)含量时,预测的结果与实验结果出入很大^[3],从微观的角度目前对土体渗透稳定性控制变量仍然缺乏系统地研究。不同类型的土体,其控制变量可能不一样,从水力条件的角度,国内在这方面的研究较为全面,提出了多个临界水力梯度 i_c 公式,如吴良骥^[14]、沙金焯^[15]、刘杰^[16]等的公式,见表 2,文献[17]指出间断级配土的临界水力梯度是良好级配土的 1/3~1/5,但是几乎所有的临界水力梯度公式都没有考虑应力状态的影响,而应力状态对土体的临界水力梯度可能有明显影响^[18]。本文通过收集国内外土体渗透稳定性室内实验数据的,从各类土体的渗透稳定性控制变量的角度提出土体渗透稳定性的几何判定准则,并采用改进的三轴试验仪,研究应力状态对土体临界水力梯度的影响。

表 1 常用的判定土体渗透稳定性的几何准则
Table 1 Summary of commonly used geometric criteria for soil internal stability

参考文献	适用土料	几何准则
Istonima (1957 年) [见 Kovacs ^[13]]	砂石土	$C_u \leq 10$, 渗透稳定性好 $10 \leq C_u \leq 20$, 渗透稳定性一般 $C_u \geq 20$, 渗透稳定性差
Kezdi (1969 年) [见 Kovacs ^[13]]	各类土	$(d_{15c}/d_{85t})_{\max} \leq 4$, 渗透稳定性好
Kenney 和 Lau ^[2]	粗粒土	$(H/F)_{\min} \geq 1.0$, 渗透稳定性好
Burenkova ^[9]	无黏性土	$0.76 \lg(h'') + 1 < h' < 1.68 \lg(h'') + 1$, 渗透稳定性好
毛昶熙 ^[12]	无黏性土	$p_f \geq 100/4(1-n)$, 渗透稳定性好

表中: C_u 为粒径不均匀系数; d_{15c} 为粗粒部分 15% 质量百分数所对应的粒径; d_{85t} 为细粒部分 85% 质量百分数所对应的粒径; H 为土体任意粒径 d 对应的质量百分数; F 为土体任意粒径 d 和 $4d$ 之间颗粒对应的质量百分数; $h''=d_{90}/d_{60}$, $h'=d_{90}/d_{15}$, 其中 d_{90}/d_{60} 表示粗粒部分颗粒的不均匀程度, d_{20}/d_{10} 表示细粒部分颗粒的不均匀程度; d_f 为质量百分数为 i 所对应的粒径; p_f 为掺合后土料中填料的重量百分数; n 为孔隙率。

2 土体渗透稳定性的几何判定准则

几何条件是决定土料渗透稳定性的内因,本文收集了国内外 167 种土的室内渗透侵蚀实验数据^[2-4, 9-12, 17-27],包括土体的物理力学参数,实验水力条件以及最终的试验结果,各土体的详细信息参见文献[28]。试验土体的级配较宽,从黏土到碎石不等,多数试验采用向下或向上的渗流方式,尽管不同的试验采用的水力梯度不尽相同,但绝大多数试验采用的水力梯度都超过了表 2 中公式计算的理论值,因此施加的水力梯度足够侵蚀土体内本身不稳定的部分。各个试验都采用相似的试验步骤,所

以收集的试验资料具有可比性。这里以 Kenney 和 Lau^[2]提出的几何准则为例,判定所收集的土料的渗透稳定性如图 1 所示。由图可以看出,这一准则主要从设定稳定界限的角度出发,而不是从区分稳定或不稳定的角度出发,用这一准则判定土体的渗透稳定性显得过于保守^[3],其他几个准则也主要是从设定稳定界限的角度出发。

表 2 常用的判定土体渗透稳定性的水力准则
Table 2 Summary of commonly used hydraulic criteria for soil internal stability

参考文献	适用土料	水力准则
Terzaghi ^[29]	无黏性土	$i_c = (G_s - 1) / (1 + e)$ 向上渗流
吴良骥 ^[14]	无黏性土	$i_c = (G_s - 1) \frac{d}{d + ed_{\text{OK}}}$ 向上渗流
		$i_c = (G_s - 1) \frac{d}{d + ed_{\text{OK}}} \tan \phi$ 水平渗流
沙金焯 ^[15]	多孔介质	$i_c = (G_s - 1)(1 - n)\alpha d / d_{\text{OK}}$ 向上渗流
		$i_c = (G_s - 1)(1 - n)\alpha d \tan \phi / d_{\text{OK}}$ 水平
刘杰 ^[16]	无黏性土	$i_c = 2.2(1 - n)^2 (G_s - 1) \frac{d_s}{d_{20}}$ 向上渗流
Skempton, Brogan ^[18]	砂石土	$i_c = \beta(G_s - 1) / (1 + e)$ 向上渗流
毛昶熙 ^[12]	无黏性土	$i_c = C(G_s - 1) \frac{d}{d_f} [4p_f(1 - n)]^2$

表中: G_s 为土的相对密度; e 为孔隙比; d 为流失颗粒的粒径; d_{OK} 为颗粒的等效粒径; ϕ 为土体内摩擦角; α 为颗粒形状系数; β 为折减系数; C 为系数; d_f 为填料最大粒径。

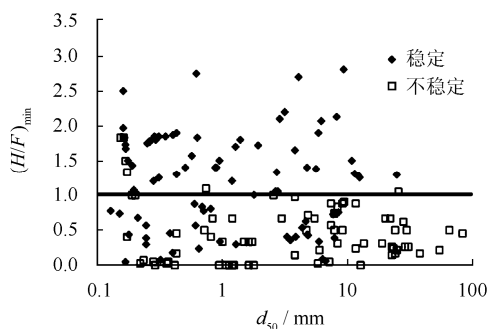


图 1 基于数据库对 Kenney 和 Lau 准则的评估
Fig.1 Evaluation of Kenney and Lau's criterion based on the dataset

通过对收集土料的分析发现,其级配大体上分成良好级配和间断级配两类。良好级配土和间断级配土的区别在于土体内各粒径的颗粒是否很好被反映出来,如土体中缺乏某一粒径或某几种粒径,或者某几种粒径颗粒的含量明显偏少,则为间断级配土,否则为良好级配土。文献[3, 18]指出,细粒(小于 0.063 mm)含量对土体的渗透稳定性影响较大,本文基于文献[30]对心墙材料的划分规律,根据细粒含量将良好级配和间断级配的土分别细分为

3 类, 良好级配土的分类为: ①细粒含量小于 10%, ②细粒含量介于 10%和 20%之间, ③细粒含量大于 20%; 对间断级配土的分类为: ①细粒含量小于 10%, ②细粒含量介于 10%和 35%之间; ③细粒含量大于 35%。

对于级配良好的土体, 当细粒含量小于 10%时土体的渗透稳定性主要受粗粒和中间粒径部分颗粒的影响, 统计分析得出 d_{90}/d_{60} 和 d_{20}/d_{10} 控制这一类土体的渗透稳定性。图 2 为 d_{90}/d_{60} 与 d_{20}/d_{10} 的关系式, 可见当其比值大于 1.05 时土体的渗透稳定性较好, 比值小于 0.51 时土体的渗透稳定性较差; 当细粒含量介于 10%~20%时, 细粒的含量对土体的渗透稳定性有较大的影响, 随着细粒含量的增加, 土体趋于稳定, 如图 3 所示。其渗透稳定性判定准则为

$$(H/F)_{\min} > -0.04P + 0.8 \quad (1)$$

式中: P 为细粒含量 (%)。

当细粒含量增加到一定程度, 土体的渗透稳定主要由细粒含量决定。由图 3 可见, 细粒含量超过 20%时所有的实验结果都是稳定的, 这是由于随着细粒含量的增加, 土体粗粒形成的孔隙易被细粒填满, 孔隙的有效粒径减小。同时, 细粒容易形成团状结构, 抗渗透侵蚀能力增强, 所以其渗透稳定性增强。

对间断级配的土体, 控制其渗透稳定性的主要变量是间断比 G_r , 如图 4 所示。间断比定义为

$$G_r = d_{\max} / d_{\min} \quad (2)$$

式中: $d_{\max}$ 为间断区间内最大粒径 (mm); $d_{\min}$ 为间断区间内最小粒径 (mm)。

从图 5 中可以看出, 第一类间断级配土的渗透稳定性主要受间断比的影响。当 $G_r < 3.0$ 时, 土体渗透稳定性较好, 是因为当间断比小于一定值时, 粗骨架形成的孔隙易被细粒填满, 孔隙的有效粒径变小, 形成的结构较稳定。对第二类间断级配土统计显示, 随着细粒含量的增加, 土体的渗透稳定性趋于稳定, 如图 6 所示, 判定准则为

$$G_r < 0.3P \quad (3)$$

当细粒含量超过 35%时, 所有试验都是稳定的 (图 6)。此时土体的骨架是由细粒形成的, 粗颗粒只能浮在细粒形成的骨架内。所以不存在细粒从粗粒孔隙间侵蚀的过程。同时, 由于细粒含量较高, 形成的孔隙的有效直径较小, 渗透系数也相应降低。又由于细粒之间的微观电化学力, 使得其渗透稳定性大大增强。

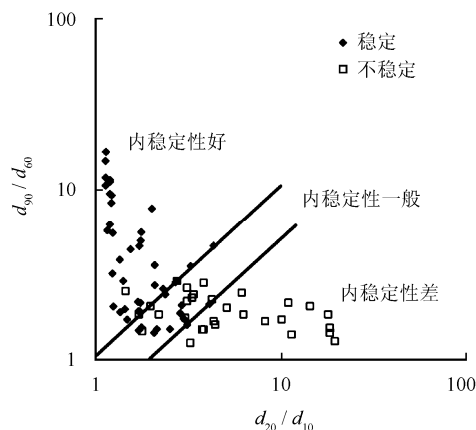


图 2 第一类良好级配土的渗透稳定性判别

Fig.2 Evaluation of internal stability for well-graded soils with fines contents less than 10%

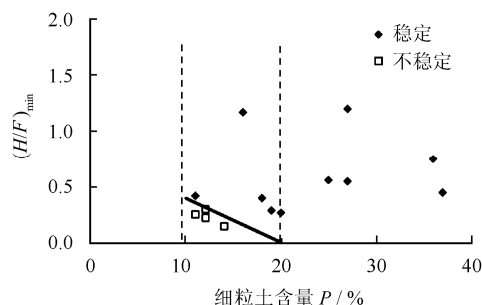


图 3 第二、三类良好级配土的渗透稳定性判别

Fig.3 Evaluation of internal stability for well-graded soils with fines contents larger than 10%

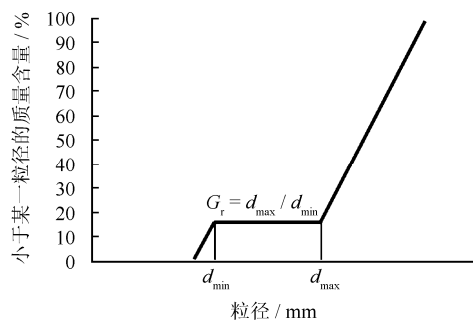


图 4 间断级配土体间断比示例

Fig.4 Illustration of gap ratio for gap-graded soils

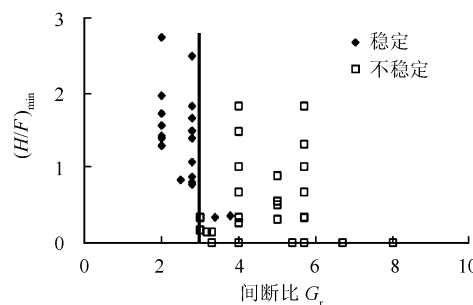


图 5 第一类间断级配土的渗透稳定性判别

Fig.5 Evaluation of internal stability for gap-graded soils with fines contents less than 10%

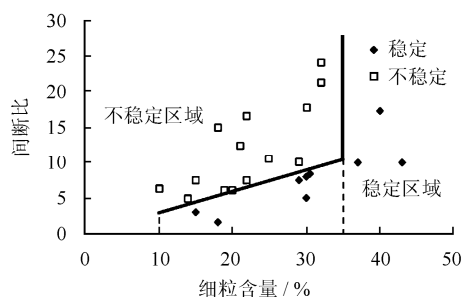


图6 第二、三类间断级配土的渗透稳定性判别
Fig.6 Evaluation of internal stability for gap-graded soils with fines contents larger than 10%

基于理论推导,文献[12]提出了判定土体渗透稳定性准则,这里以有详细孔隙率记录的文献[3—4]中的土体为例,对比文献[12]与本文提出的渗透稳定性几何判定准则的适用性,共有25类土体的试验资料,其中15类土体试验结果为渗透稳定性较好,10类土体试验结果为渗透稳定性较差。基于文献[12]的理论判定准则,其中15类渗透稳定性较好的土体中12类被准确地预测,10类渗透稳定性较差的土体中5类被判别为渗透稳定性较好。而采用本文提出的判定准则来判别,15类渗透稳定性较好的土体中12类被准确预测,且所有10类渗透稳定性较差的土体都被判定为渗透稳定性较差。最后,将本文提出的基于不同控制变量判定土体渗透稳定性的几何准则总结于表3。

表3 本文建议的土的渗透稳定性几何判定准则
Table 3 Suggested geometric criteria for internal stability of different types of soil

级配情况	细粒含量/% (< 0.063 mm)	几何准则
良好级配	< 10	$\frac{d_{90}}{d_{20}} / \frac{d_{60}}{d_{10}} > 1.05$, 渗透稳定性好
		$\frac{d_{90}}{d_{20}} / \frac{d_{60}}{d_{10}} < 0.52$, 渗透稳定性差
		$0.52 < \frac{d_{90}}{d_{20}} / \frac{d_{60}}{d_{10}} < 1.05$, 渗透稳定性一般
	$10 \sim 20$	$(H/F)_{\min} > -0.04P + 0.8$, 渗透稳定性好
间断级配	> 20	渗透稳定性好
	< 10	$G_r < 3.0$, 渗透稳定性好
	$10 \sim 35$	$G_r < 3P$, 渗透稳定性好
	> 35	渗透稳定性好

3 应力状态对土体渗透侵蚀水力梯度的影响

水力条件是决定土体渗透稳定性的外因。通常采用临界水力梯度来判定土体渗透侵蚀起动的极限状态。通过对单个颗粒在渗流条件下的受力分析,

假设粗骨架形成一定直径的孔隙管道,利用极限平衡分析法,推导出颗粒起动的临界水力梯度(表2)。然而,土体的临界水力梯度受多个因素的影响,如细粒含量、颗粒级配、干密度、应力状态等。

目前国内外在应力状态对渗透侵蚀起动方面的研究较少。笔者通过对传统三轴试验仪的改进,进行了间断级配土(粗粒部分1.18~5.00 mm,占65%;较细部分0.09~0.15 mm,占35%)在不同围压下的渗透侵蚀试验。试验仪器如图7所示,由4个系统组成,包括控制水头的供水系统、控制应力状态的三轴系统、侵蚀土体收集系统和渗流水体收集系统,通过慢慢调节供水系统中水箱内的水压来提高进水水头。进水压力可以通过供水系统中的压力表读取,土体侵蚀量是通过定时取出收集盒烘干后来量测的,渗流水体的收集主要是为了研究渗流侵蚀过程中土体渗透系数的变化。在三轴仪的控制系统内设置需要的应力状态,渗透侵蚀试验过程中这一应力状态将保持恒定。

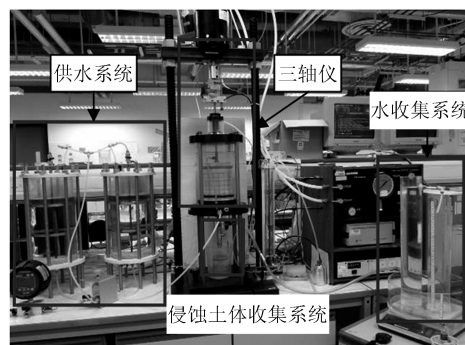


图7 改进的考虑复杂应力状态的渗透侵蚀仪
Fig.7 Seepage erosion testing apparatus under complex stress state

本次试验的土体属于第一类间断级配土体(细粒含量小于10%),其间断比为7.9。按照本文提出的判定间断级配土体渗透稳定性的几何准则判断(图5或表3),试验土体属于渗透稳定性较差的土体。土体的其他物理力学性质见表4。试样的制备采用静力压实法(速率为1.25 mm/min),土体的初始含水率为最优含水率(6.5%),共分8层压实,每层的厚度为12.5 mm。试样的初始压实度为93%。试样的直径和高度都为100 mm。试验过程包括试样饱和,固结试验和渗透侵蚀测试。试样的饱和采用水头法,同时给试样施加一个很小的围压(10 kPa)。固结过程中的围压是一步一步施加的(每分钟增加1 kPa)。渗透侵蚀试验采用向下的渗流方向,水力梯度逐级增大(当水力梯度小于1.0时,每10分钟增大0.15;当其介于1.0、2.0之间时,每10分钟增

大 0.25, 当其大于 2.0 时, 每 10 分钟增大 0.5)。当每 10 分钟侵蚀土体的质量小于 0.2 g 时, 增加水力梯度至下一级, 否则保持不变, 最终施加的水力梯度为 8.0。试验过程中对试样的变形、土体渗透系数及土体的侵蚀量进行实时测量。试样的竖向变形采用 LVDT 量测, 轴向变形采用 PIV 方法测量。土体的渗透系数通过对渗流水量的量测, 按 Darcy 定律计算。侵蚀土体每 10 分钟收集一次, 后经烘干量测其质量。

表 4 试验土体的物理力学性质
Table 4 Physical properties of the test soil

最大干密度 (kg/m^3)	最优含水率 (%)	平均粒径 (mm)	颗粒不均 匀系数	土的相 对密度
1 895	6.5	1.62	17	2.61

图 8 为试验过程中侵蚀土体的质量随时间的变化关系。试验结果显示, 在整个试验过程中存在两个较为重要的水力梯度即起动水力梯度和破坏水力梯度。当施加的水力梯度达到特定值时, 细颗粒开始被侵蚀, 相应的水力梯度称为起动水力梯度。随着水力梯度的进一步增大, 当达到特定值时随着渗透侵蚀的进行, 试样的竖向和轴向变形发生突变, 对应的水力梯度称为破坏水力梯度, 当水力梯度达到破坏水力梯度时侵蚀速率和渗透系数都有突变。从图 9 围压对起动水力梯度的影响可以看出, 随着围压的增大, 起动水力梯度也相应增大。主要原因是由于围压的增大使得颗粒之间的接触力增大, 粒间摩擦力也增加, 起动这些颗粒所需要的渗透力也相应增大。围压的增大也使得土体的孔隙率变小。从表 2 可见, 随着孔隙率的降低, 临界水力梯度增大。表 2 中的公式都是针对向上或水平方向的渗流, 对于向下的渗流, 目前也通常采用 Terzaghi 理论公式作为参考讨论其向下的临界水力梯度^[5, 31], 基于 Terzaghi 公式^[29]计算本研究中不同围压向下渗流的临界水力梯度见图 9。由图可以看出, 随着围压的增加, 基于理论公式计算的水力梯度小于实测值。以 10 kPa 和 200 kPa 围压为例, 由于围压的增加使得孔隙率减小了约 6%, 但起动水力梯度从 0.7 增加至 1.7, 而计算的理论值从 1.07 增加至 1.11, 因此应力状态对起动水力梯度的影响非常显著, 不能单从增大应力状态会降低孔隙率的角度判定临界水力梯度在不同应力状态下的变化, 当水力梯度达到起动水力梯度时, 并不意味着细颗粒被全部侵蚀掉, 由于围压的作用会达到新的稳定状态。试验过程中的水力梯度是逐步增大的, 所以在达到破坏水力梯

度之前时, 侵蚀速率是慢慢增大的。图 10 为围压对破坏水力梯度的影响。由图 10 可见, 随着围压的增大, 破坏水力梯度增大明显。当水力梯度达到破坏水力梯度时, 较容易被侵蚀的细颗粒已经被侵蚀掉, 所以此时侵蚀的颗粒可能主要是为骨架颗粒提供横向支撑的细颗粒。由于这些颗粒被侵蚀, 试样的轴向和竖向变形产生突变, 随着围压的增大, 颗粒需要克服更大的摩擦力才能被侵蚀, 需要的渗透力也增大, 从而破坏水力梯度相应增大。

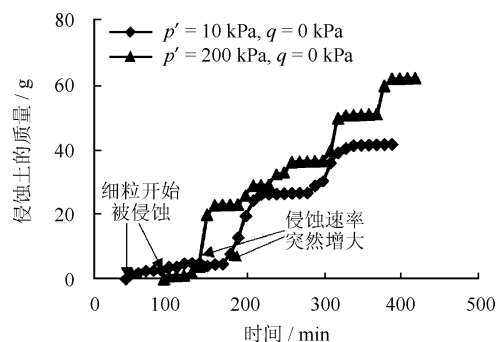


图 8 不同围压下侵蚀土体的质量随时间的变化
Fig.8 The relationship between eroded weight and time under different confining pressure

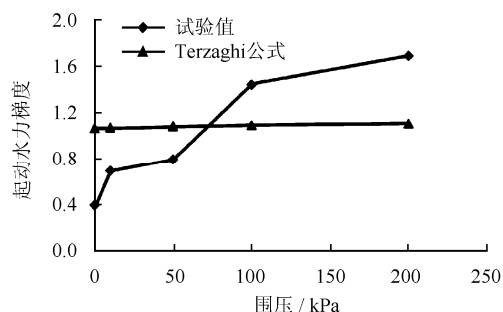


图 9 围压对起动水力梯度的影响
Fig.9 Effect of confining pressure on hydraulic gradient that initiates internal erosion

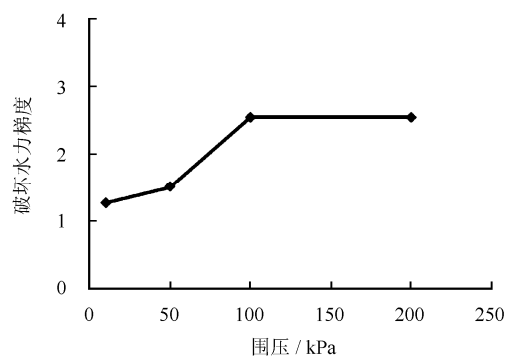


图 10 围压对破坏水力梯度的影响
Fig.10 Effect of confining pressure on hydraulic gradient that induces the sample failure

4 结 语

本文收集了 167 种土体的渗透侵蚀试验数据, 首先将其分成两大类: 良好级配土和间断级配土。基于细粒 (小于 0.063 mm) 含量及渗透稳定性控制变量的不同, 将每类又细分为 3 类。统计显示, 当细粒含量超过一定量 (良好级配土为 20% 和间断级配土为 35%) 时, 土体的渗透稳定性很好; 当细粒含量小于 10% 时, 细粒含量对其渗透稳定性影响不大。对于细粒含量介于两者之间的土体 (良好级配土为 10%~20%; 间断级配土为 10%~35%), 随着细粒含量的增加, 土体的渗透稳定性趋于变好。各类土体的渗透稳定性几何判定标准可参照本文推荐的几何准则 (表 3)。

不同围压下间断级配土体渗透侵蚀试验显示, 土体渗透侵蚀的启动水力梯度和破坏水力梯度都随围压的增大而增大, 这是由于增大围压使得颗粒间的摩擦力增大和孔隙率变小, 启动时所需的渗透压力增大, 相应的水力梯度也增大。当水力梯度达到破坏水力梯度时, 侵蚀的颗粒可能主要是那些对粗颗粒提供横向支撑的细粒, 一旦这些颗粒被侵蚀掉, 试样的变形会发生突变。

参 考 文 献

- [1] SCHULER U. How to deal with the problem of suffusion[C]//Research and Development in the Field of Dams. Switzerland: [s. n.], 1995: 145—159.
- [2] KENNEY T C, LAU D. Internal stability of granular filters[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1985, 22: 215—225.
- [3] WAN C F, FELL R. Assessing the potential of internal instability and suffusion in embankment dams and their foundations[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2008, 134(3): 401—407.
- [4] FANNIN R J, MOFFAT R. Observations on internal stability of cohesionless soils[J]. **Geotechnique**, 2006, 56: 497—500.
- [5] WAN C F. Experimental investigation of piping erosion and suffusion of soils in embankment dams and their foundations[D]. Australia: University of New South Wales, 2006.
- [6] FELL R, FRY J J. The state of the art of assessing the likelihood of internal erosion of embankment dams, water retaining structures and their foundations[C]//Internal Erosion of Dams and their Foundations. London: Taylor & Francis, 2007: 1—23.
- [7] ZHANG L M, XU Y, JIA J S. Analysis of earth dam failures: A database approach[J]. **Georisk**, 2009, 3(3): 184—189.
- [8] FOSTER M, FELL R, SPANNAGLE M. The statistics of embankment dam failures and accidents[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2000, 37: 1000—1024.
- [9] BURENKOVA V V. Assessment of suffusion in non-cohesive and graded soils[C]//Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering. Karlsruhe, Germany: [s. n.], 1993: 357—360.
- [10] HONJO Y, HAQUE M A, TSAI K A. Self-filtration behaviour of broadly and gap-graded cohesionless soils[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Filters and Drainage in Geotechnical and Environmental Engineering. Montreal: [s. n.], 1996: 227—236.
- [11] ABERG B. Washout of grains from filtered sand and gravel materials[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1993, 119(1): 36—53.
- [12] 毛昶熙. 管涌与滤层的研究: 管涌部分[J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 209—215.
MAO Chong-xi. Study on piping and filters: part I of piping[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(2): 209—215.
- [13] KOVAS G. Seepage hydraulics[M]. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1981.
- [14] 吴良骥. 无黏性土管涌临界坡降计算[J]. 水利水运科学研究, 1980, (4): 90—95.
WU Liang-ji. Calculation of critical hydraulic gradient for piping in cohesionless soils[J]. **Hydro-Science and Engineering**, 1980, (4): 90—95.
- [15] 沙金焯. 多孔介质中的管涌研究[J]. 水利水运科学研究, 1981, (3): 89—93.
SHA Jin-xuan. Study on piping in porous media[J]. **Hydro-Science and Engineering**, 1981, (3): 89—93.
- [16] 刘杰. 土的渗透稳定与渗流控制[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992.
- [17] SKEMPTON A W, BROGAN J M. Experiments on piping in sandy gravels[J]. **Geotechnique**, 1994, 44: 449—460.
- [18] BENDAHDANE F, MAROT D, ALEXIS A. Experimental parametric study of suffusion and backward erosion[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2008, 134(4): 57—67.
- [19] U S Army Corps of Engineers. Filter experiments and

- design criteria[R]. U. S. A: [s. n.], 1953.
- [20] ADEL H D, BAKKER K J, BRETELER M K. Internal stability of minestone[C]//Proceedings of International Symposium on Modelling Soil-Water-Structure Interactions. Rotterdam: [s. n.], 1988: 225—231.
- [21] LAFLEUR J, MLYNAREK J, ROLLIN A L. Filtration of broadly graded cohesionless soils[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1989, 115(12): 1747—1769.
- [22] SUN B C. Internal stability of clayey to silty sands[D]. USA: University of Michigan, 1989.
- [23] CHAPUIS R P, CONTANT A, BAASS K A. Migration of fines in 0-20 mm crushed base during placement, compaction, and seepage under laboratory conditions[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1996, 33: 168—176.
- [24] MOFFAT R. Experiments on the internal stability of widely graded cohesionless soils[D]. Canada: University of British Columbia, 2005.
- [25] LAFLEUR J, NGUYEN P H. Internal stability of particles in dam cores made of cohesionless broadly graded moraines[C]//Internal Erosion of Dams and their Foundations. London: Taylor & Francis, 2007: 151—158.
- [26] LI M X. Seepage Induced Instability in Widely Graded Soils[D]. Canada: The University of British Columbia, 2008.
- [27] CIVIDINI A, BONOMI S, VIGNATI G C, GIODA G. Seepage-induced erosion in granular soil and consequent settlements[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2009, 9(4): 187—194.
- [28] CHANG D S, ZHANG L M. Internal stability criteria for soils under seepage[C]//Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering. 2011, to be published.
- [29] TERZAGHI K. Soil mechanics: A new chapter in engineering science[J]. **Journal of Institution of Civil Engineers**, 1939, 12: 106—141.
- [30] SHERARD J L, DUNNIGAN L P. Critical filters for impervious soils[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1989, 115(7): 927—947.
- [31] RICHARDS K S, REDDY K R. Critical appraisal of piping phenomena in earth dams[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2007, 66: 381—402.

上接第 240 页

- rock strength with increase of intermediate principal stress[J]. **Acta Mechanica Solida Sinica**, 1985, 6(1): 72—80.
- [4] 俞茂宏. 双剪理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [5] 宋俐, 张永强, 俞茂宏. 压力隧洞弹塑性分析的统一解[J]. **工程力学**, 1998, 15(4): 57—61.
- SONG Li, ZHANG Yong-qiang, YU Mao-hong. Plastoelastic unified analysis of pressure tunnel[J]. **Engineering Mechanics**, 1998, 15(4): 57—61.
- [6] 于学馥, 郑颖人, 刘怀恒, 等. 地下工程围岩稳定分析[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1983.
- [7] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [8] 胡小荣. 具有非线性强度包络线的双剪双参数统一强度准则改进式及其特征分析[J]. **岩石力学与工程学报**, 2005, 24(22): 4048—4051.
- HU Xiao-rong. Improved expressions of two-parameter double shear unified failure criterion with nonlinear failure envelopes and their behavior analysis[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(22): 4048—4051.
- [9] 胡小荣. 具有抛物线型强度包络线的双剪双参数统一强度准则改进式及其应用[J]. **中国有色金属学报**, 2004, 14(12): 2029—2034.
- HU Xiao-rong. Improvement of two-parameter twin shear unified failure criterion with parabolic failure envelope and its application in elasto-plastic analysis on wall rock around tunnel[J]. **The Chinese Journal of Nonferrous Metals**, 2004, 14(12): 2029—2034.
- [10] 张常光, 张庆贺, 赵均海. 考虑应变软化、剪胀和渗流的水工隧洞解析解[J]. **岩土工程学报**, 2009, 31(12): 1941—1946.
- ZHANG Chang-guang, ZHANG Qing-he, ZHAO Jun-hai. Analytical solutions of hydraulic tunnels considering strain softening, shear dilation and seepage[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(12): 1941—1946.
- [11] 赵彭年. 松散介质力学[M]. 北京: 地震出版社, 1995.
- [12] 任青文, 邱颖. 具有衬砌圆形隧洞的弹塑性解[J]. **工程力学**, 2005, 22(2): 212—217.
- REN Qing-wen, QIU Ying. Elastic-plastic solution of circular tunnel with liner[J]. **Engineering Mechanics**, 2005, 22(2): 212—217.