

DOI: 10.11779/CJGE2021S1001

黏性土地基流土破坏的临界水力坡降研究

党发宁, 周玫*, 李玉涛, 丁九龙, 高俊
(西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

摘要:针对现行临界水力坡降计算公式不适用于求解黏性土临界水力坡降的情况,假定黏性土地基发生渗透破坏模式为圆柱形或倒圆台形,在太沙基临界水力坡降计算公式的基础上,分别推导了两种破坏模式下考虑土体抗剪强度影响的临界水力坡降解析式。此外,采用自制的渗透破坏仪研究了砂壤土、黄土在不同工况下发生渗透破坏时的临界水力坡降,结果表明:临界水力坡降随土层厚度、破坏半径的增大而减小,且试验结果与其相对应的公式计算结果最大误差不超过16%。

关键词:渗流破坏;抗剪强度;临界水力坡降;黏性土层厚度;破坏半径

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)S1-0001-06

作者简介:党发宁(1962—),男,1998年于西南交通大学固体力学专业获博士学位,现任教授、博士生导师,主要从事岩土工程数值分析、计算力学等方面的教学与研究。E-mail: dangfn@mail.xaut.edu.cn。

Critical hydraulic gradient of soil flow failure in cohesive soil foundation

DANG Fa-ning, ZHOU Mei, LI Yu-tao, DING Jiu-long, GAO Jun

(Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In view of the fact that the current formula for the critical hydraulic gradient is not suitable to solve the critical hydraulic gradient of cohesive soil, assuming that the seepage failure mode of the cohesive soil foundation is cylindrical or inverted circular, based on the formula for calculating the critical hydraulic slope proposed by Terzaghi, the analytical formula for the critical hydraulic slope under two failure modes considering the influences of the shear strength of the soil is derived respectively. In addition, the critical hydraulic slope of sandy loam and loess under different working conditions is studied by using the self-made permeation failure instrument. The results show that the critical hydraulic slope decreases with the increase of the soil thickness and failure radius, and the maximum error of the test results and the corresponding formula is less than 16%.

Key words: seepage failure; shear strength; critical hydraulic gradient; thickness of clay layer; failure radius

0 引言

渗透作用是大坝、基坑等工程失事的重要因素之一^[1-2],为了更好地预防和控制工程事故的发生,需对发生渗透破坏的临界条件进行深入探究。调研发现,目前国内外学者对土体发生渗透破坏的临界条件进行了大量研究且得到了一些有益结论,如 Terzaghi^[3]基于土体颗粒在水中的自重力、静水浮力和渗透力等作用的平衡原则,提出了著名的太沙基临界水力坡降计算公式,沙金焯在此基础上考虑了土颗粒的形状阻力^[2];Israr等^[4]和 Li等^[5]引入应力折减系数,给出了考虑土体内部颗粒间摩擦的水力坡降计算方法;王明年等^[6]结合土体有效应力和细颗粒应力折减,提出了砂性土细颗粒起动临界水力坡降计算公式;姜伏伟等^[7]将黏性土孔隙等效为均匀分布的圆管,从管道流角度分析黏性土的渗流破坏临界条件,建立了孔隙直径与临界条件的数学表达式;吴梦喜等^[8]基于土体的

颗粒级配曲线和孔隙率建立了发生管涌的临界水力坡降计算公式;罗玉龙等^[9-10]建立了由围压表示的管涌临界水力坡降经验公式;唐益群等^[11]用相似模型再现了流土从发生到破坏的全过程;Liang等^[12]基于渗流试验定义了与细颗粒局部移动和全局损失相对应的低、高临界水力坡降;杨建等^[13]党发宁等^[14]、蒋中明等^[15]通过室内试验研究了应力状态对土体临界水力坡降及渗透系数的影响。尽管土体渗透破坏临界条件理论公式较多,但到目前为止,尚无统一的方法计算黏性土地基发生流土破坏的临界水力坡降。

针对这一现状,本文在已有理论成果的基础上,考

基金项目:国家自然科学基金项目(51979225;51679199);水利部公益性行业科研专项项目(201501034-04);陕西省科技统筹创新工程重点实验室项目(2014SZS15-Z01)。

收稿日期:2020-12-15

*通信作者(E-mail: 844469945@qq.com)

考虑了黏性土抗剪强度的作用,推导了黏性土地基发生流土破坏时的临界水力坡降计算公式,通过与室内渗透试验结果进行对比分析,验证了本文所提计算公式的合理性。

1 建立黏性土地基临界水力坡降解析式

目前,计算地基发生渗透破坏的临界水力坡降多采用太沙基公式^[2]:

$$i_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = (1 - n)(G_s - 1) \quad (1)$$

式中 i_{cr} 为临界水力坡降; G_s 为土颗粒相对质量密度; n 为孔隙率(%)。

用式(1)计算临界水力坡降时,不考虑土体颗粒间的摩擦阻力影响^[16],但黏性土地基的临界水力坡降大小受其抗剪强度的影响,故该式不适用于求解黏性土地基的临界水力坡降。鉴于此,以下研究考虑黏性土抗剪强度影响的临界水力坡降计算公式。

假定有一双层建筑地基,上下层分别为黏性土层和砂砾石层,其中黏土层存在薄弱区域,且黏土层顶部与底部的水头差为 Δh ,当 Δh 超过某一临界值时,黏土层中的薄弱区域将发生渗透破坏。本文假定黏性土地基发生流土的破坏模式为圆柱体或倒圆台体,如图1所示。

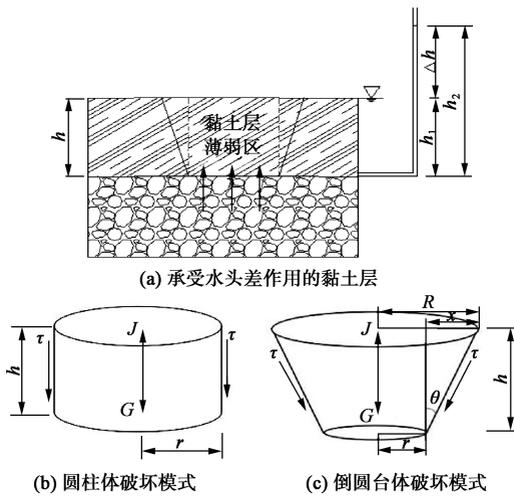


图1 黏土层渗透破坏示意图

Fig.1 Schematic diagram of seepage failure of clay layer

1.1 流土破坏模式为圆柱体

取半径为 r ,黏土层厚度为 h 的圆柱体为分离体分析其受力状态,如图1(b)所示。圆柱体受有向上的渗透力、向下的有效重力,当渗透力大于有效重力时,分离体产生向上运动的趋势,此时分离体的边界上还作用有向下的剪力。根据力的平衡条件得

$$J = G + \tau \quad (2)$$

其中, J 为总渗透力(kN),

$$J = j \cdot V = i\gamma_w \cdot \pi r^2 h \quad (3)$$

G 为土体的有效重力(kN),

$$G = \gamma' \cdot \pi r^2 h \quad (4)$$

τ 为分离体与周围土体之间的剪切力(kN)。理论上,当剪切力等于土体的抗剪强度乘以剪切面的面积时,式(2)中的水力坡降为黏性土地基发生渗透破坏的临界水力坡降。土体处于临界状态时的剪切力为

$$\tau = (c + \sigma \tan \varphi) \cdot 2\pi r h \quad (5)$$

将式(3),(4),(5)依次代入式(2)中得

$$i_{cr}\gamma_w \cdot \pi r^2 h = \gamma' \cdot \pi r^2 h (c + \sigma \tan \varphi) \cdot 2\pi r h \quad (6)$$

将式(6)移项并化简,得

$$i_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} + \frac{2(c + \sigma \tan \varphi)}{\gamma_w \cdot r} \quad (7)$$

式中, σ 是破坏面上的平均法向应力,由于破坏面竖直,平均法向应力理论上等于平均静止土压力,即

$$\sigma = \frac{1}{2}\gamma' h K_0 \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)就可得到破坏模式为圆柱体时黏性土地基的临界水力坡降计算公式:

$$i_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} + \frac{2\left(c + \frac{1}{2}\gamma' h K_0 \tan \varphi\right)}{\gamma_w \cdot r} \quad (9)$$

式中 γ_w 为水的重度,取 9.8 kN/m^3 ; γ' 为土体的有效重度 (kN/m^3); c 为土体的黏聚力(kPa); φ 为内摩擦角($^\circ$); K_0 为土的侧压力系数, $K_0 = 1 - \sin \varphi$ 。

1.2 流土破坏模式为倒圆台体

考察黏性土地基发生流土的破坏模式为倒圆台体时的临界水力坡降,设倒圆台分离体上下表面的半径分别为 R 和 r ,黏土层厚度为 h ,其母线与轴线的夹角为 θ ,如图1(c)所示。依据分离体上的重力、渗透力以及边界面上剪力在垂向的分力的平衡条件得

$$J = G + \tau \cos \theta \quad (10)$$

即

$$i_{cr}\gamma_w V = \gamma' V + (c + \sigma \tan \varphi) A \cos \theta \quad (11)$$

式中, V 和 A 分别代表倒圆台体的体积和侧面积。

由图1(c)可见,倒圆台分离体上下表面的圆半径差为 $x = h \tan \theta$,上下表面圆半径的关系为 $R = r + x = r + h \tan \theta$,圆台的母线长度为 $l = \sqrt{h^2 + (R - r)^2} = h \sqrt{1 + \tan^2 \theta}$,倒圆台的侧面积和体积的表达式分别为

$$A = \pi l (R + r) = \pi h \sqrt{1 + \tan^2 \theta} (2r + h \tan \theta) \quad (12)$$

$$V = \frac{\pi h}{3} (R^2 + r^2 + Rr) = \frac{\pi h}{3} [3r^2 + 3r h \tan \theta + h^2 \tan^2 \theta] \quad (13)$$

将式(12),(13)代入式(11)中,并进行化简、移项,可得

$$i_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} + \frac{2(c + \sigma \tan \varphi)}{\gamma_w} \cdot \frac{A \cos \theta}{V}$$

$$= \frac{\gamma'}{\gamma_w} + \frac{3(c + \sigma \tan \varphi)}{\gamma_w} \cdot \frac{(2r + h \tan \theta)}{[3r^2 + 3rh \tan \theta + h^2 \tan^2 \theta]}$$
(14)

式中, σ 是破坏面上的平均法向应力,

$$\sigma = \frac{1}{2} \gamma' h K_0 \cos \theta \quad (15)$$

将式(15)代入式(14)可得到破坏模式为倒圆台体时黏性土地基的临界水力坡降计算公式:

$$i_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} + \frac{3\left(c + \frac{1}{2} \gamma' h K_0 \cos \theta \tan \varphi\right)}{\gamma_w} \cdot \frac{(2r + h \tan \theta)}{[3r^2 + 3rh \tan \theta + h^2 \tan^2 \theta]} \quad (16)$$

当倒圆台分离体母线与轴线的夹角 $\theta = 0^\circ$ 时,式(16)退化为圆柱体式(9),说明式(16)是黏性土地基发生渗透破坏的临界水力坡降的最一般表达式。

2 关于黏性土地基临界水力坡降计算公式的讨论

黏土地基的倒圆台体破坏模式类似于倒置地基的冲切破坏,倒圆台分离体母线与轴线的夹角 θ 的取值可以仿照地基处理中应力扩散角的计算方法确定。董晓朋等^[17]研究发现:当基础埋深 $H = 0$ 时,应力从基底开始扩散;当基础埋深 $H > 0$ 时,应力从基底以上 $H/3$ 位置开始扩散,应力扩散角的变化范围与土体的内摩擦角近似相等。黏土层薄弱区底部作用向上的渗透力时,可将其看做基础埋深为 0 的基础模型进行分析,渗透力从黏土层底部开始向上扩散,倒圆台分离体母线与轴线的夹角 θ 就是所谓的应力扩散角,而应力扩散角一般可取为黏土的内摩擦角 φ ,即 $\theta = \varphi$ 。

通常情况下,饱和软黏土内摩擦角 φ 很小^[18],在实际工程中可忽略不计,且发生流土破坏时的黏性土层厚度一般小于 1 m,当土体内摩擦角 $\varphi = 0 \sim 10^\circ$ 时, $K_0 \cos \theta \tan \varphi = 0 \sim 0.14$,忽略 φ 与考虑 φ 两者计算结果误差不超过 5%,故可将式(16)简化为下式:

$$i_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} + \frac{2c}{\gamma_w \cdot r} \quad (17)$$

3 黏性土地基临界水力坡降计算公式合理性的室内试验验证

3.1 试验设备

自制试验仪器由加压装置、气压水压转换装置、渗透破坏装置组成,如图 2 所示。该仪器不仅可以控制

黏土层厚度及渗透破坏口大小,且能够对黏性土土样施加可控的变水头压力或常水头压力。

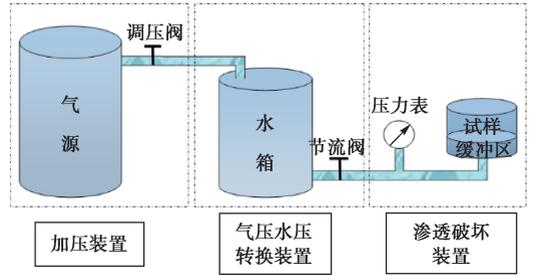


图 2 试验装置简图

Fig. 2 Schematic diagram of test facility

气压水压转换装置是参考三轴仪器的围压装置加工而成,其顶部有一进气孔,通过耐高压水管与气源相连,进而向水箱内施加气压;底部出水口通过耐高压水管与渗透破坏装置底部相连,以便向试样底部施加水压,通过节流阀和压力表来控制水流速度和测量水压大小。渗透破坏装置设在台座之上,利用自制反力架固定试验土样,反力架横梁上装有两螺杆,螺杆底部可安装不同内径的密封环与土样表面紧密接触,改变土样外露尺寸的同时防止在边壁处发生集中渗漏,见图 3。



图 3 渗透破坏装置

Fig. 3 Seepage failure device

3.2 试验方案

研究表明黏性土地基的临界水力坡降与土的自身物理特性相关,此外,还与黏土层厚度与破坏口半径有重要关系。因此,本文对黏土层厚度、破坏半径对临界水力坡降的影响进行研究。试验土样分别取彬县黄土和银川黄河滩砂壤土,均为重塑土,主要参数如表 1 所示,其颗粒级配如图 4 所示。

表 1 土样主要参数

Table 1 Main parameters of soil samples

土样类型	孔隙率	ρ_d /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	含水率 /%	相对质量密度	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$
砂壤土	0.8	1.50	14.5	2.70	5.25	15.84
黄土	0.6	1.70	16.0	2.71	20.50	24.01

研究黏土层厚度对临界破坏水力坡降的影响时,黄土、砂壤土各制备五组土样,黄土土样编号为 H1、H2、H3、H4、H5,砂壤土土样编号为 S1、S2、S3、S4、S5;

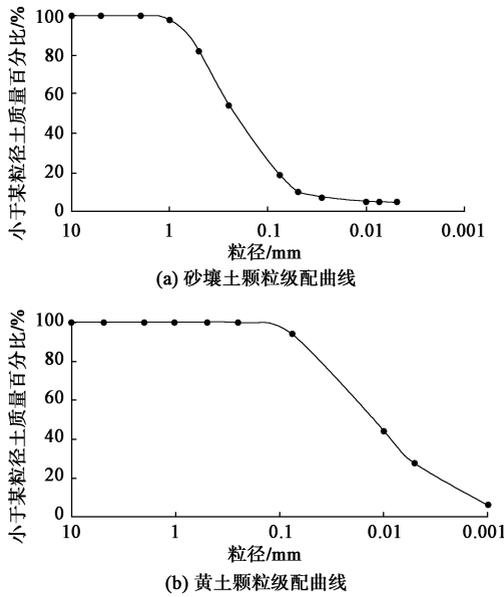


图4 土样颗粒级配曲线

Fig. 4 Grain-size distribution curves of soil samples

研究破坏半径对临界破坏水力坡降的影响时,两种土各制备五组土样,黄土土样编号为HR1、HR2、HR3、HR4、HR5,砂壤土土样编号为SR1、SR2、SR3、SR4、SR5;制样尺寸见表2。

表2 土样尺寸

Table 2 Sizes of soil samples

土样编号	破坏半径 r/cm	土样厚度 h/cm	土样编号	破坏半径 r/cm	土样厚度 h/cm
H1/S1	5	1	HR1/SR1	1	2
H2/S2	5	3	HR2/SR2	2	2
H3/S3	5	5	HR1/SR3	4	2
H4/S4	5	7.5	HR1/SR4	8	2
H5/S5	5	10	HR5/SR5	10	2

3.3 试验过程

试验开始前,保持水管与气源、水箱部分连接紧密,与破坏装置底部暂不连接,使管口呈敞开状态,并向水箱内注入约1200 ml水,打开气源,通过控制调压阀缓慢施加气压,待装有压力表的水管端口有水溢出时将其与渗透破坏底部连接紧密。进行试验时,采用逐级加压方式来实现渗透破坏的发生过程,通过调节调压阀,先给土样施加一个较小的水压,在该级水压下持续观察30 min,若30 min内渗流现象持续变化,则延长观察时间,待渗流现象稳定后,再增加水压(0.002 MPa)进行下一级水压下的观测,靠近渗透破坏临界点时以0.0005 MPa的量级进行逐级加压,当有大量土颗粒流失,单位时间内渗水量明显增大,土体明显隆起时则认为土样发生渗透破坏,将此时所施加的水压力值转化为水头高度 Δh ,试样渗透破坏时的临界水力坡降为 $i_{cr} = \Delta h/L$, L 为土样厚度(cm)。

3.4 试验结果

根据试验现象可知,土样渗透破坏可分为以下四个阶段:①土样顶部无隆起现象,有微量清水缓慢渗出,侧面无渗流通道形成;②随着水压力的增加,土样顶部微微隆起,清水渗出量逐渐增加;③土样上表面沿铁圈内边缘部分最早出现裂纹,上部隆起现象继续加剧,且上部开始出现微量土颗粒悬浮液;④随着渗透破坏试验的进行,土样表面裂纹逐渐扩大,土样隆起部分中央出现裂纹,内部形成渗流通道,突然出现大量土颗粒悬浮液,试样发生渗透破坏。如图5所示。

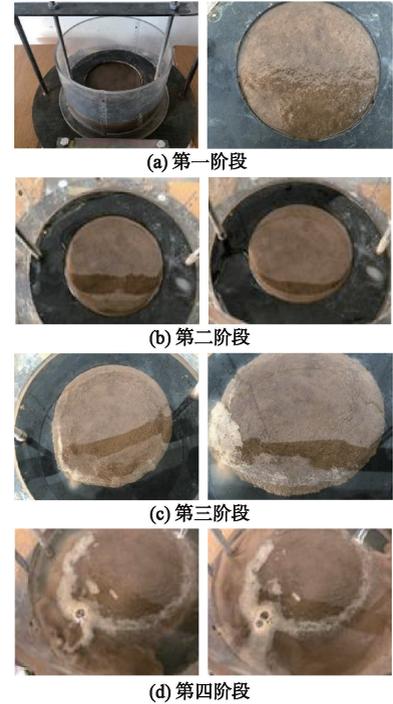


图5 渗透破坏过程图

Fig. 5 Diagram of seepage failure process

不同土样临界水力坡降试验结果与公式计算结果见表3,临界水力坡降与破坏半径、土层厚度的关系曲线见图6。

表3 各组土样临界水力坡降结果表

Table 3 Critical hydraulic gradient results of soil samples

土样	i_{cr}		土样	i_{cr}	
	计算	试验		计算	试验
HR1	281.79	240.0	H1	81.10	80.0
HR2	170.35	150.0	H2	74.56	73.3
HR3	94.87	100.0	H3	68.81	64.0
HR4	65.87	60.0	H4	62.60	58.7
HR5	50.54	45.0	H5	57.31	54.0
SR1	77.87	70.0	S1	21.70	20.0
SR2	46.06	45.0	S2	20.32	18.3
SR3	25.55	22.5	S3	19.08	16.0
SR4	17.86	15.0	S4	17.69	15.3
SR5	13.84	12.5	S5	16.48	14.0

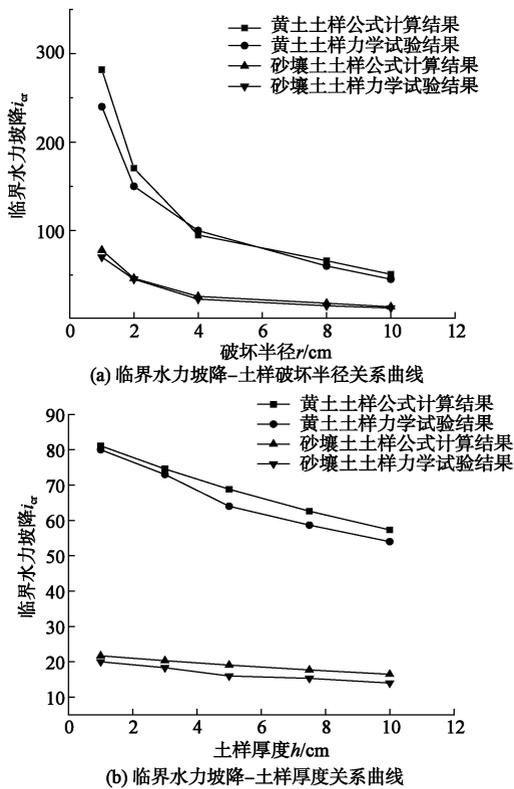


图6 公式计算结果与渗流试验结果对比

Fig. 6 Comparison between calculated and seepage test results

(1) 破坏半径对临界水力坡降的影响

综合图表分析可知,黏性土地基的临界水力坡降随破坏半径的增大而减小。因为破坏半径越大,土体黏聚力对周边土体的约束就越小,从而发生渗透破坏所需要的向上的渗透力就越小,临界水力坡降就越小。从图6(a)中可以发现,破坏半径一定时,黄土的临界水力坡降始终大于砂壤土的临界水力坡降,无论是对于黄土还是砂壤土,当其对应的破坏半径从1 cm增加至4 cm时,临界水力坡降下降幅度较大,分别下降了62.3%和17.4%;当破坏半径大于4 cm时,临界水力坡降下降趋势较为平缓。原因可能是,在本次模型试验中,当破坏半径等于4 cm时,刚好达到土样内部容易形成贯通渗流通道的临界条件,有利于土样的渗透破坏。另外,渗透破坏试验得到的临界水力坡降-土样破坏半径关系曲线与本文公式对应计算结果吻合良好;土样为黄土时,试验结果与公式计算值的最大差值小于15%;土样为砂壤土时,最大差值在16%以内。

(2) 土样厚度对临界水力坡降的影响

分析图6(b)中可知,土样厚度一定时,黄土的临界水力坡降始终大于砂壤土的临界水力坡降,其总体趋势均为黏性土地基临界水力坡降随土样厚度的增加而缓慢减小(注意此处是讲黏土层越厚,临界水力坡降减小并不是临界破坏水头减小),当土样厚度从1 cm增大至10 cm时,黄土土样和砂壤土土样的临界水力坡降分别下降了2.64%和0.58%。

土样为黄土时,试验测定的临界水力坡降与公式计算结果的最大差值小于10%;土样厚度较薄时,试验结果与公式计算结果差值很小,二者差值随土样厚度增大而增大,土样厚度由1 cm增大至5 cm时,差值从1.36%增大至7%左右;土样为砂壤土时,公式计算值与试验结果的最大差值小于15%,同黄土土样一样,土样厚度较薄时差值较小;出现这种现象的原因可能是土样越厚,土样饱和的难度越大,可能存在未完全饱和情况,少量土体呈团粒状形态,一些团粒状土体之间的孔隙也可能导致整个土体内部稳定性有所下降,不能较好发挥细颗粒的抗渗性能^[19]。

3.5 公式计算结果与参考文献试验结果对比

为了进一步验证公式(17)的合理性,取文献[20],[21]中的试验数据为原始数据,将其代入公式(17)进行分析比较。文献[20]中黏土、粉质黏土内摩擦角分别取 20° 、 23° ,黏聚力分别取22.5,15 kPa;文献[21]粉质黏土的内摩擦角取 22° ,黏聚力取9.5 kPa,结果见表4。可以看出公式计算结果与文献[20],[21]的试验结果接近。

表4 文献试验结果与公式计算结果

Table 4 Test experiments and calculated results of critical hydraulic gradient

土样类型	干密度 ($g \cdot cm^{-3}$)	初始 含水 率/%	制样 含水 率/%	土样 体积 / cm^3	文献 试验 i_{cr}	公式 计算 i_{cr}
黏土 ^[20]	1.70	5.1	20.1	120	110	119.96
粉质黏土 ^[21]	1.70	5.1	20.1	120	70	77.67
粉质黏土 ^[21]	1.61	22.5	20.0	120	45	49.17

4 结 论

本文基于太沙基临界水力坡降计算方法,建立了考虑土体抗剪强度影响的黏性土地基临界水力坡降计算公式,并通过室内渗透破坏试验进行验证。得到如下结论:

(1) 根据黏性土地基所受的向上的渗透力、向下的有效重力及剪切力之间的平衡关系推导出黏性土地基临界水力坡降计算公式,利用其计算的临界水力坡降与渗透破坏试验结果的最大差值约为16%,表明该公式可以较为准确地计算黏性土地基的临界水力坡降。

(2) 内摩擦角小于 10° 时,应力扩散角和内摩擦角对临界水力坡降的影响均可忽略不计。

参考文献:

- [1] 汝乃华,牛运光. 大坝事故与安全·土石坝[M]. 北京:中国水利水电出版社,2001. (RU Nai-hua, Niu Yun-guang. Embankment Dam·Incidents and Safety of Large Dams[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2001. (in Chinese))

- [2]毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 2版. 北京:水利电力出版社,2002;1-5. (MAO Chang-xi. Seepage Computation Analysis & Control[M]. 2nd ed. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 2002;1-5. (in Chinese))
- [3]TERZAGHI K. Der grundbruch an stauwerken und seine verhuetung[J]. Die Wasserkraft, 1922, **17**(24): 445-449.
- [4]ISRAR J, INDRARATNA B. Study of critical hydraulic gradients for seepage-induced failures in granular soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2019, **145**(7): 04019025.
- [5]LI M, FANNIN R J. A theoretical envelope for internal instability of cohesionless soil[J]. Géotechnique, 2012, **62**(1): 77-80.
- [6]王明年,江勇涛,于丽等. 砂性土细颗粒起动临界水力坡降计算方法[J]. 岩土力学, 2020, **41**(8): 2515-2524. (WANG Ming-nian, JIANG Yong-tao, YU Li. et. al. Analytical solution of startup critical hydraulic gradient of fine particles migration in sandy soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(8): 2515-2524. (in Chinese))
- [7]姜伏伟. 黏性土渗透破坏临界条件推导及试验探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2017, **13**(6):1472-1476. (JIANG Fu-wei. Discussion on formula derivation and test of critical hydraulic condition of cohesive soil[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, **13**(6):1472-1476. (in Chinese))
- [8]吴梦喜,高桂云,杨家修,等. 砂砾石土的管涌临界渗透坡降预测方法[J]. 岩土力学,2019,**40**(3):861-870. (WU Meng-xi,GAO Gui-yun, YANG Jia-xiu. et. al. A method of predicting critical gradient for piping of sand and gravel soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(3): 861-870. (in Chinese))
- [9]罗玉龙,速宝玉,盛金昌,等. 对管涌机理的新认识[J]. 岩土工程学报,2011,**33**(12):1895-1902. (LUO Yu-long, SU Bao-yu, SHENG Jin-chang. et. al. New understandings on piping mechanism [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(12):1895-1902. (in Chinese))
- [10]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坡降试验研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(S1):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[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(S1):73-78. (in Chinese))
- [11]唐益群,施伟华,张先林. 关于流土和管涌的试验研究和理论分析[J]. 上海地质, 2003, **24**(1):25-31. (TANG Yi-qun, SHI Wei-hua, ZHANG Xian-lin. The experiments study and theoretical analyses on piping and flow soil[J]. Shanghai Geology, 2003, **24**(1):25-31. (in Chinese))
- [12]LIANG Y, YEH T C J, ZHA Y Y, et al. Onset of suffusion in gap-graded soils under upward seepage [J]. Soils and Foundations, 2017, **57**(5):849-860.
- [13]杨建,蔡元奇,朱以文. 考虑应力状态的接触流土试验研究[J]. 人民长江, 2010, **41**(7): 79-81,101. (YANG Jian, CAI Yuan-qi, ZHU Yi-wen. Experimental study on contact soil flow considering stress condition [J]. Yangtze River, 2010, **41**(7):79-81,101. (in Chinese))
- [14]党发宁,刘海伟,王学武,等. 基于有效孔隙比的黏性土渗透系数经验公式研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(9): 1909-1917. (DANG Fa-ning, LIU Hai-wei, WANG Xue-wu, et al. Empirical formulas of permeability of clay based on effective pore ratio[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(9): 1909-1917. (in Chinese))
- [15]蒋中明,王为,冯树荣,等. 砂砾石土渗透变形特性的应力状态相关性试验研究[J]. 水利学报. 2013, **44**(12): 1498-1505. (JIANG Zhong-ming, WANG Wei, FENG Shu-rong, et al. Experimental of study on the relevance between stress state and seepage failure of sandy-gravel soil [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, **44**(12):1498-1505. (in Chinese))
- [16]张克恭,刘松玉. 土力学[M]. 3版. 北京:中国建筑工业出版社,2010. (ZHANG Ke-gong, LIU Song-yu. Soil Mechanics[M]. 3rd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese))
- [17]董晓朋,马建林,胡中波,等. 饱和砂土地基应力扩散效应的离心模型试验研究[J]. 铁道标准设计, 2018, **62**(1): 84-88. (DONG Xiao-peng, MA Jian-lin, HU Zhong-bo, et al. Study on foundation stress dispersion effect in saturated sand based on centrifugal model test [J]. Railway Standard Design, 2018, **62**(1): 84-88. (in Chinese))
- [18]麦远俭. 饱和软黏土的土压力[J]. 水运工程. 2000(9): 3-6. (MAI Yuan-jian. Earth pressure of saturated soft clay[J]. Port & Waterway Engineering, 2000(9): 3-6. (in Chinese))
- [19]周玫. 黏性土地基流土破坏的临界水力坡降研究[D]. 西安:西安理工大学,2020. (ZHOU Mei. Study on Critical Hydraulic Slope of Fluid Soil Failure on Cohesive Soil [D]. Xi'an: Xu'an University of Technology, 2020. (in Chinese))
- [20]刘建国. 黏性土渗透破坏试验及其数值模拟研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2015. (LIU Jian-guo. Experimental Research on Streugth of Unsaturated Expansive Soils [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015. (in Chinese))
- [21]贺强. 黏性土渗透破坏及长期渗透劣化试验研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2017. (HE Qiang. Experimental Study on Seepage and Long-term Seepage Degradation of Clay [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017. (in Chinese))