

一种固结桩式薄板丁坝及其桩体的抗倾覆能力

廖艺康¹, 李富春², 黄本胜³, 张民曦¹, 喻国良¹

(1. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240;

2. 中交四航局广州南沙工程有限公司, 广东 广州 511455; 3. 广东省水利水电研究院, 广东 广州 510635)

摘要:介绍一种新型且经济的、带固结桩的预制插板丁坝,其固结桩是该丁坝的主要抗倾覆构件。通过室内试验和三维扫描技术,在细砂基床上开展了固结桩的抗倾覆性能研究。结果表明:固化剂与土体反应后在桩周形成“脚靴”状固结体,显著提高了桩的抗倾覆力;固结桩的倾覆过程分为微偏阶段、倾斜阶段、倾覆阶段和拔移阶段;固结桩抗倾覆力主要受桩体几何形状、埋深、土体性质、固化剂注浆剂量和注入流量等因素的影响。通过量纲分析和试验数据拟合,提出了固结桩临界水平抗倾覆力及临界倾斜角的计算公式。

关键词:平板丁坝;固化剂;注浆;桩;抗倾覆力;细砂基床

中图分类号:TV863;U565 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2021)02-0082-07

A flashboard spur dike with consolidation pile and its anti-overturning ability//LIAO Yikang¹, LI Fuchun², HUANG Bensheng³, ZHANG Minxi¹, YU Guoliang¹(1. School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 2. Guangzhou Nansha Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 511455, China; 3. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510635, China)

Abstract: A new economical type of pre-cast flashboard spur dike with consolidation piles is introduced, of which the main anti-overturning component is the consolidation pile. The overturning resistance characteristics of the consolidation piles were intensively investigated by indoor experiment and 3-D scanning technology on a fine sand foundation bed. The results show that the grouting agent can react with the ambient soil and a large rigid bulbous body around the toe of the pile forms after the consolidation of the injected grouting agent, which can significantly improve the anti-overturning force of the pile. The toppling process of the consolidation pile can be divided into four different stages, including slight-tilting stage, tilting stage, toppling stage, and out-pulling stage. The anti-overturning force is mainly affected by the structural geometry, penetration depth, soil properties, grout volume and injection rate of the grouting agent. Formulas of the critical horizontal anti-overturning force and critical angle of inclination were proposed based on dimensional analysis and experimental data fitting.

Key words: flashboard spur dike; grouting agent; grout-injection; pile; anti-overturning force; fine sand foundation bed

丁坝是一种典型的水工建筑物,广泛应用于保护河岸^[1]和海岸线^[2]、保证航行安全^[3]和提供适当的水生栖息地^[4-5]。然而,传统结构丁坝有时难以满足工程建设的需要。例如,混凝土现浇丁坝工程造价高、进度慢、用料多,也不易拆卸改形;抛石丁坝的石块很容易被强水流和波浪冲走^[6]。在粉细砂河床或者软土地基中,河床抗冲刷能力低、易液化、不能承受过大荷载^[7],传统形式丁坝的应用局限性更加明显。因此,发展新型结构的丁坝以降低其建设

成本、提高其功效是国民经济的需求,具有十分重要的现实意义。

近年来,一些新型丁坝结构形式脱颖而出,如淹没插板和桩柱透水丁坝等。其中,淹没插板具有良好的导流性能,且安装容易,减少了大型设备对土床的扰动^[8],但其稳定性较差,易被强水流冲刷破坏。桩柱透水丁坝稳定性较好,既能引导来流,又能使部分流体透过坝身与主流相互作用,在坝后形成静水区,促进泥沙淤积,但桩体附近局部冲刷严重。水力

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0402607)

作者简介:廖艺康(1996—),男,硕士研究生,主要从事水工结构研究。E-mail:ykliao@sjtu.edu.cn

通信作者:喻国良(1963—),男,教授,博士,主要从事泥沙流变学以及海洋工程装备开发研究。E-mail:yugl@sjtu.edu.cn

插板透水丁坝综合了以上两者的优点,近年来得到了发展和应用^[9]。

目前,关于水力插板透水丁坝的研究大多集中在水流结构和冲刷上^[7,9-10]。虽然丁坝断面和坝头形式对稳定性的影响已得到了广泛的研究,但对丁坝抗倾覆力,尤其针对水力插板透水丁坝的抗倾覆力研究还很少。水力插板采用桩固定,不但要求桩数量较多,而且要求桩的插入深度足够大,造成施工难度增加,建设成本升高。如果桩插入的深度不足,在水力作用下水力插板往往容易倾覆,失去工程应有的效果。由此可见,水力插板的抗倾覆能力主要来自于桩体,如何使桩体在较小入土深度的条件下提供更大的抗倾覆力是提高水力插板丁坝稳定性的关键。土壤固化技术被广泛应用于保护水土流失、吹填工程和软基处理等领域^[11]。注浆作为一种特殊的施工方法,在土壤固化中得到了广泛的应用。固化剂浆液挤出后使周围土体产生挤压变形,并与土体发生化学反应从而压密土体、提高土体抗剪强度^[12-13]。张午迪^[14]将该技术运用于锚泊设备中,提出了海洋工程固结锚的概念并且获得了其抗拔力初步计算方法。类似地,该技术可以改造为固结桩应用于水力插板丁坝,为桩体提供抗倾覆力更强的基础。但以往固结锚是为抗拔而设计,而水力插板丁坝的桩应是为抗倾覆而设计,需要在固结锚的研究基础上,对固结桩的特性开展专门研究,解决平板固结桩丁坝抗倾覆的临界条件,以此发展一种结构新颖、不碍景观(多为淹没条件)、且成本效益良好的平板固结桩丁坝,为河道、航道整治、河岸保护、河道泥沙管理和水环境治理提供新的水工建筑物,也为海岸保护提供备选建筑物。

本文将水力插板与土体固化技术相结合,介绍一种固结桩式薄板丁坝的结构,通过室内试验研究不同固化剂注浆方法、土体性质和结构模型参数对其固结桩抗倾覆力的影响,通过量纲分析和回归分析,探讨固结桩的临界水平抗倾覆能力。

1 固结桩式薄板丁坝的结构

为了缩短施工时间,降低成本,喻国良等^[15-16]首次提出了将水力插板、土体固化技术与注浆技术相结合的丁坝新概念。固结桩式薄板丁坝的基本结构如图1所示,它的每一个单元由两根固结桩和一块水力薄板组成,多个单元组合可构成不同长度的丁坝,以满足不同工程需要。根据薄板的形式,丁坝可为透水或不透水两种形式。固结桩式薄板丁坝的工作原理如下:当平板丁坝安装时,首先将桩体通过打桩设备打入河床一定深度;随后,利用外部注浆装

置将土壤固化剂通过注浆喷孔以一定压力和流量注入注浆管;待固化剂材料充分固结后,将透水板沿桩身门槽插入土中,形成整体挡水(波)结构。可见,固结桩是该丁坝抗倾覆的决定性部件。

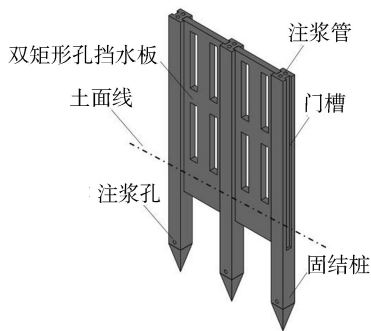


图1 固结桩式薄板丁坝的结构示意图

2 试验方案

2.1 试验材料

试验模型使用PLA塑料材料3D打印而成(图2),采用双管注浆结构,喷孔在桩身的前后表面各设一个。

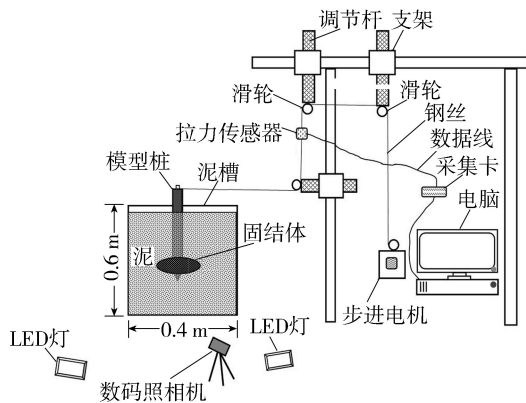


图2 固结桩模型及试验布置

试验土体为细砂,中值粒径 $d_{50} = 180 \mu\text{m}$,含水率为21.38%,塑性指数6.02,利用SZB-1.0便携式十字板剪切仪测得的不排水抗剪强度 $S_u = 1.01z + 0.0125 \text{ kPa}$,其中 z (单位为cm)为距离土体上表面的深度,土体湿密度为 2016 kg/m^3 。由于场地限制,本次试验模型桩体长度比尺为50,则不排水抗剪强度比尺也为50,试验土体的不排水抗剪强度的变化范围为 $0.27 \sim 0.29 \text{ kPa}$,其反映的原型不排水抗剪强度为 $13.5 \sim 14.5 \text{ kPa}$,与王志强^[17]野外试验的土床强度类似,基本上能反应软塑状态下细沙土床的抗剪强度。

在 $1g$ (g 为重力加速度)条件下,砂土的剪胀性与现场原型不能保证一致,但对于水平受荷桩的影响不大^[18-19]。为便于对不同工况下固结桩的抗倾覆力进行对比研究,试验中采用了 $1g$ 室内试验方法

构筑模型土床^[20]。

水泥、化学材料和有机高分子材料等常用于细砂的固化^[21-22]。超细水泥浆具有良好渗透性和流动性,可渗透入细砂层、粉砂层和粉土层^[23-24],并且可与混凝土结构较好黏合。这里选用超细水泥为固化剂, $d_{50}=0.9\ \mu\text{m}$,密度为 $3.32\ \text{g}/\text{cm}^3$,水灰比为 $1.5:1$,加入比例为 0.3% 减水剂以改善其可塑性能。

2.2 试验步骤

试验采用如图2所示的装置系统,在一个内径 $40\ \text{cm}$ 、高 $60\ \text{cm}$ 的圆柱形桶内进行。使用钢丝线一端与桩顶卸扣相连,另一端通过定滑轮与拉力传感器相连,再连接到步进电机的转子;步进电机与调速器相连以控制拉桩速度。滑轮组保证了钢丝绳沿水平方向拉动桩体倾覆。水平拉力采用NS-WL1型拉力传感器进行测量,通过拉力采集软件采集后在电脑上绘制出拉力曲线。

试验的主要步骤如下:

- 将试验土在桶中加水搅拌均匀后静置 $2\ \text{h}$ 。
- 将桩体模型缓慢插入土体直至指定埋深,插入过程中保持速度和方向不变以尽量避免扰动周围土体。
- 采用外注浆装置,按设计注浆流量由注浆管注入固化剂,使其反应 $24\ \text{h}$ 。
- 用十字板剪切仪测量并记录桩体注浆孔同深度处周围一定距离以土体的不排水抗剪强度 S_u ,防止扰动桩周土体。
- 启动步进电机,通过调速器以指定速度缓慢拉动钢丝线。
- 记录水平力和桩的倾斜角(桩轴线与初始位置轴线间的夹角)的随时间变化曲线。
- 取出桩体,冲洗结构物上的残余土体,用三维扫描仪记录其形状。
- 对下一模型重复上述步骤。

3 试验结果与分析

3.1 固结体及固结桩倾覆过程

图3显示了从试验土体中取出后的模型桩体及其三维扫描横截面图。可以看出,固化剂注入后,与土体发生反应,在桩身下端形成一个“脚靴”状坚硬结构,称为固结体。张午迪等^[25]研究表明,固结体的形状主要受埋深、注浆剂量、注浆流量等因素的影响。为此,本试验采用3种不同的注浆剂量、3种不同注浆流量和2种不同埋深。利用三维扫描仪扫描的固结体的形状参数如表1所示,其中 a 为固结体在水平力方向上的半长度, b 为垂直水平力方向上的半长度, c 为垂直方向上的半高度。结果表明,随着注浆流量的增加,形成的固结体的纵向高度减小,横向宽度增大。随着埋深的增加,固结体的表面积不断减小。固结体的形成增加了桩体与周围土体的总接触面积和桩体的总重量以及重心深度。此外,固化剂挤压土体并与之反应,增加了土体的不排水抗剪强度。

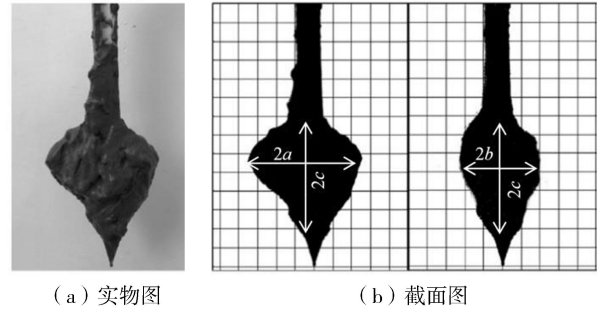


图3 “脚靴”状固结体及其三维扫描截面

为了探究固结桩的倾覆过程,开展了相同条件下固结桩和非固结桩的抗倾覆对比试验,假定桩尖为桩体倾覆的轴线,采用桩顶水平力值来反映其抗倾覆力。试验发现,固结桩的倾覆过程主要有4个阶段(图4、图5)。微偏阶段:桩的水平抗倾覆力迅速增大,桩体开始与后方土体分离,但桩体倾斜角无

表1 固结体形状参数

埋深 D/mm	抗剪强度 S_u/kPa	湿密度 $\rho_w/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	单孔注浆剂量 V/mL	注浆流量 $q/(\text{mL}\cdot\text{s}^{-1})$	固结体形状参数/ mm			固结体 表面积 S/mm^2
					a	b	c	
250	0.265	2016	100	0.5	35	31	50	23320
250	0.265	2016	100	1.0	38	29	50	22631
250	0.265	2016	100	2.0	42	22	50	22514
350	0.366	2016	100	0.5	33	27	51	22109
350	0.366	2016	100	1.0	39	25	50	21408
350	0.366	2016	100	2.0	41	23	51	20294
250	0.265	2016	150	0.5	38	34	58	28688
250	0.265	2016	150	1.0	40	32	58	26649
250	0.265	2016	150	2.0	43	25	58	25815
350	0.366	2016	50	0.5	26	26	42	16426
350	0.366	2016	50	1.0	29	24	43	16278
350	0.366	2016	50	2.0	34	19	43	14696

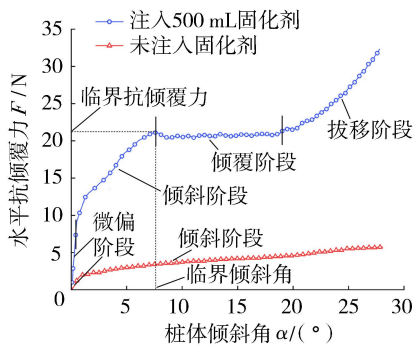


图4 固结桩与非固结桩倾覆过程受力对比

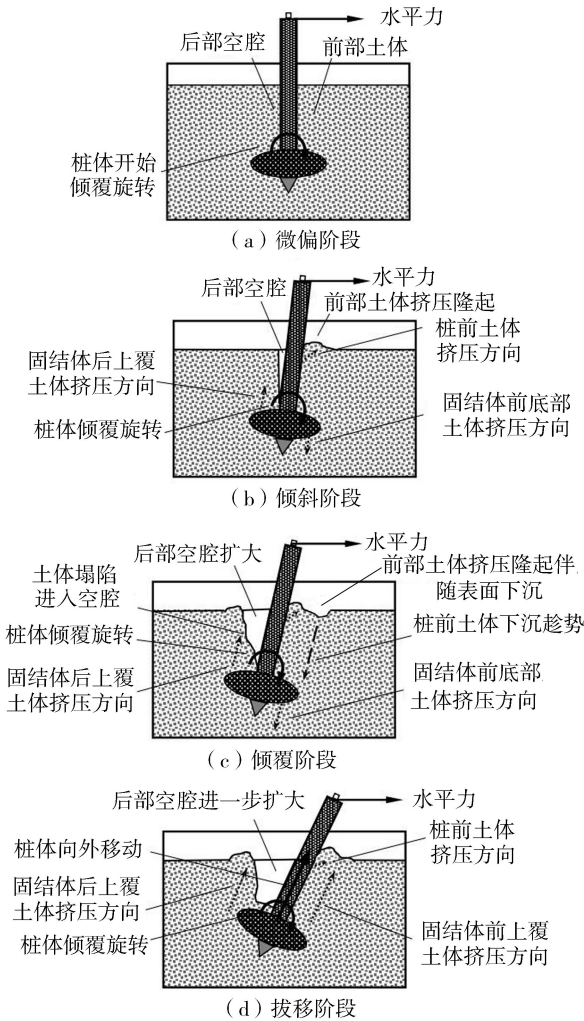


图5 固结桩倾覆过程示意图

明显变化(保持在 1° 的范围内),桩体无明显的倾斜,可视为静力阶段。倾斜阶段:桩体倾斜角开始发生明显变化,桩出现明显倾斜;桩前土体逐渐被挤压隆起,后部土体空腔出现;固结体旋转挤压周围土体,导致后方上覆土体被抬起,前方底部土体被挤压;桩体除受到作用在桩身的土压力和摩擦力外,还受到土体作用在固结体上的巨大的反向抗力作用(包括底部土压力和上覆土压力,图6),土体抗力的合力效果为抵抗固结桩倾覆旋转,因此水平力在此阶段以较缓的速度增加。倾覆阶段:桩体倾斜角持

续增大,固结体继续旋转挤压其下部土体,进而桩前土体整体出现下沉趋势;桩后空腔扩大,周围土体开始向内塌陷,导致固结体后上覆土体提供的反向抗力较小,进而使水平力在此阶段趋于稳定;桩体绕桩尖的倾覆旋转是该阶段的主要位移形式。拔移阶段:随着倾斜角继续增加,桩体开始出现向土体外拔出的移动,并成为此阶段主要的桩体位移形式;随着后部空腔进一步增大,周围土体不断塌陷,疏松的土体难以抵抗固结体的旋转,土体抗力的合力效果转为抵抗拔移;由于拔移过程中固结体的上覆土体不断受到挤压,水平力再次增大,但结构已完全失稳。

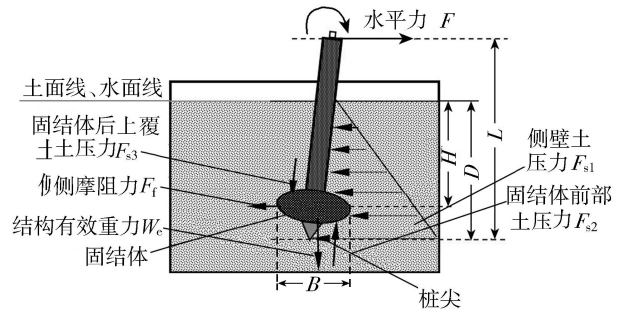


图6 固结桩倾斜阶段的受力示意图

未注入固化剂的非固结桩体的倾覆只有微偏阶段和倾斜阶段2个阶段,在后者中桩身除倾覆旋转外,在拔出土体前持续伴有向外的移动。这是由于在倾覆过程中,随着倾斜角的增大,固结桩上的复杂的合力效果逐渐从抗倾覆转变为抗拔移。而非固结桩体没有图6所示固结体上的反向抗力,桩体倾覆中受力模式没有发生明显的改变,作用在桩体上微弱的土压力和摩擦力成为整个过程的主要阻力。

固结桩进入拔移阶段后,其所受到的水平力继续增大。然而,在这一阶段,桩体倾角已经大于 10° 且伴有向外位移,桩体几乎没有抗倾覆能力。因此,本文在探讨固结桩的抗倾覆性能时,并未考虑该阶段的受力。综上,对于固结桩,将倾覆阶段的水平力的最大值定义为临界水平抗倾覆力,以表示桩体在失稳前所具有的最大抗倾覆力。发生此力时对应的桩倾斜角定义为临界倾斜角。如图4所示,当固结桩倾斜角约为 7.8° 时,达到临界水平抗倾覆力,其大小为 21.1 N 。而不加注浆固化剂的非固结桩体的最大抗倾覆力仅为 3.4 N 。结果表明,注入固化剂后,桩体的最大水平抗倾覆力提高了约7倍,说明了固结桩在抗倾覆方面的优越性。

3.2 固结桩水平抗倾覆力影响因素

图7为固结桩抗倾试验拉力曲线,可以看出不同固化剂注浆剂量和注浆流量下的固结桩拉力曲线与图4中固结桩的拉力曲线具有基本一致的趋势。表2中列出了各试验工况下固结桩的临界水平抗倾

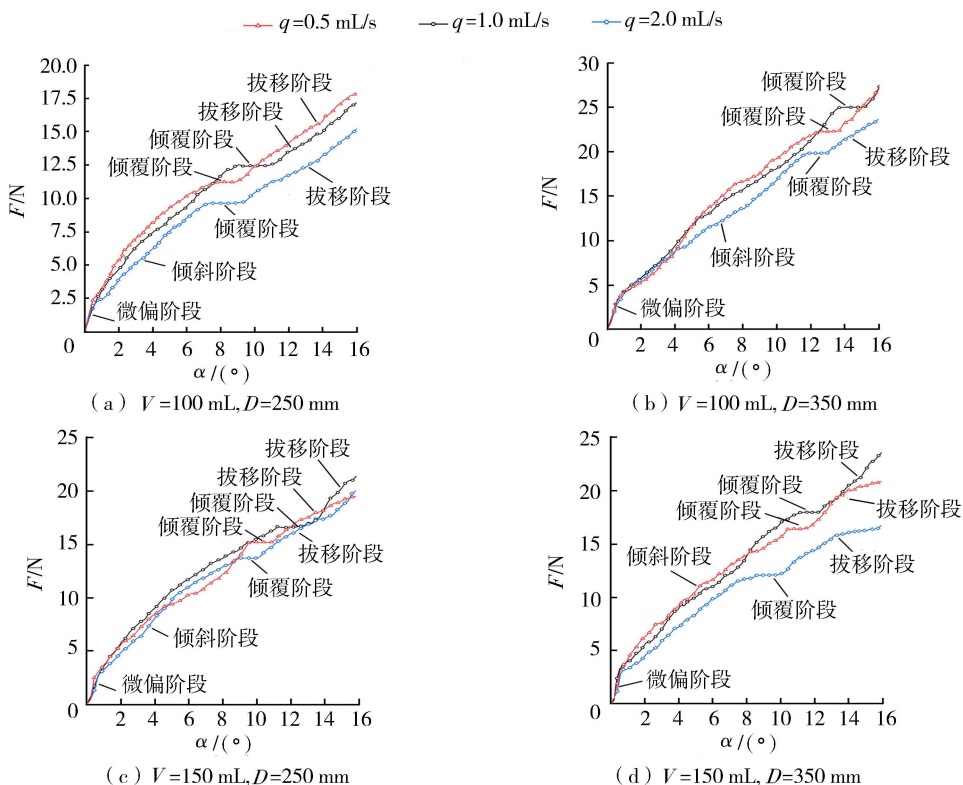


图7 固结桩试验拉力曲线

表2 水平抗倾覆力的试验结果

D/mm	L/mm	B/mm	F_c/N	$\alpha_c/(\text{°})$
250	450	24	11.22	8.41
250	450	24	12.51	9.09
250	450	24	9.63	7.54
350	550	24	22.26	12.58
350	550	24	24.97	13.94
350	550	24	19.81	11.88
250	450	24	15.23	9.78
250	450	24	16.67	11.23
250	450	24	13.74	9.55
350	550	24	16.42	10.79
350	550	24	17.95	11.55
350	550	24	12.08	9.51

覆力 F_c 和临界倾斜角 α_c 。可以看出,临界水平抗倾覆力及临界倾斜角均随着注浆剂量和埋深的增大而增大。但对于所有试验组,临界水平抗倾覆力及临界倾斜角的最大值均出现在注浆流量 q 为 1.0 mL/s 时,而最小值均出现在注浆流量为 2.0 mL/s 时。可见,水平抗倾覆力不随注浆流量的增大而出现连续的增大或减小趋势。

图8为临界水平抗倾覆力与注浆流量之间的关系。可见,桩体埋深或注浆剂量越大,注浆流量对临界水平抗倾覆力的影响越明显。埋深对临界抗倾覆力的影响大于注浆剂量的影响。例如,在 1.0 mL/s 注浆流量下,埋深从 250 mm 增加到 350 mm 后,临界抗倾覆力由 12.51 N 增加到 24.97 N ;而注浆剂量从 100 mL 增加到 150 mL 时,临界抗倾覆力仅增加到

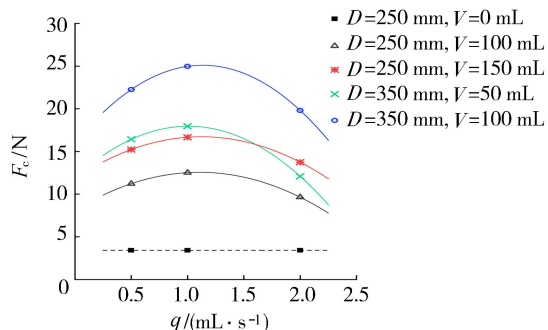


图8 临界水平抗倾覆力与注浆流量关系曲线

16.67 N 。另外值得注意的是,随着注浆流量的变化,抗倾覆力存在峰值,试验组的临界水平抗倾覆力对应的最佳注浆流量可能在 $1.0\sim 1.2\text{ mL/s}$,但需要多组数据加以确定。趋势线的交点表明在相同的注浆剂量下不同埋深-注浆流量组合的桩可以达到相同的抗倾覆力。

3.3 临界水平抗倾覆力及临界倾斜角计算公式

如前所述,固结桩在倾斜和倾覆阶段,动态受力情况非常复杂,因此,采用量纲分析法探究临界抗倾覆水平力及临界倾斜角。从表2可以看出,临界抗倾覆水平力及其对应的临界倾斜角主要与桩体埋深、固化剂注浆剂量、注浆流量和土体性质有关。因此, F_c 和 α_c 可表示为

$$F_c = f(D, L, B, V, q, d_{50}, S_u, \rho_w, g) \quad (1)$$

$$\alpha_c = f(D, L, B, V, q, d_{50}, S_u, \rho_w, g) \quad (2)$$

根据量纲分析:

$$F_c = S_u D^2 \varphi \left(\frac{\sqrt[3]{V^4 g}}{q^2}, \frac{\rho_w g D}{S_u}, \frac{d_{50} L}{B^2} \right) \quad (3)$$

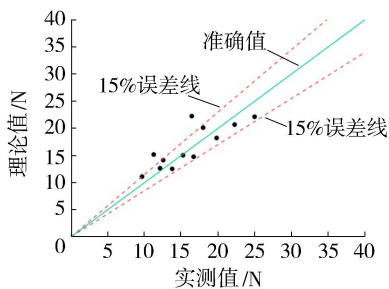
$$\alpha_c = \varphi \left(\frac{\sqrt[3]{V^4 g}}{q^2}, \frac{\rho_w g D}{S_u}, \frac{d_{50} L}{B^2} \right) \quad (4)$$

式中： $\frac{\sqrt[3]{V^4 g}}{q^2}$ 为固化剂对力的影响项， $\frac{\rho_w g D}{S_u}$ 和 $\frac{d_{50} L}{B^2}$ 为土体-桩形联合影响项，经过对表2中数据的回归分析，得到：

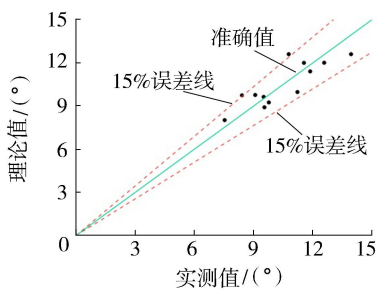
$$F_c = S_u D^2 \left[3.4221 \lg \frac{\sqrt[3]{V^4 g}}{q^2} - 0.165 \left(\lg \frac{\sqrt[3]{V^4 g}}{q^2} \right)^2 - 0.813 \frac{\rho_w g D}{S_u} + \left(33.895 - 5.5061 \lg \frac{\sqrt[3]{V^4 g}}{q^2} \right) \frac{d_{50} L}{B^2} \right] \quad (5)$$

$$\alpha_c = 43.1541 \lg \frac{\sqrt[3]{V^4 g}}{q^2} - 2.451 \left(\lg \frac{\sqrt[3]{V^4 g}}{q^2} \right)^2 - 10.845 \frac{\rho_w g D}{S_u} + \left(406.922 - 29.7661 \lg \frac{\sqrt[3]{V^4 g}}{q^2} \right) \frac{d_{50} L}{B^2} \quad (6)$$

临界水平抗倾覆力和临界倾斜角的计算值与实测值比较如图9所示。可以看出，相对误差基本控制在 $\pm 15\%$ 。



(a) 临界水平抗倾覆力



(b) 临界倾斜角

图9 固结桩临界水平抗倾覆力和临界倾斜角计算值与实测值比较

4 讨论

与现有的丁坝相比，固结桩式薄板丁坝具有以下优点：桩体注浆后可提供比非固结桩高7倍的水平抗倾覆力，从而可减少桩的埋深，方便施工；坝体结构简单，装配化程度高，既经济又省时。

值得注意的是，影响固结桩抗倾覆力的因素还

有很多。例如，桩体的抗倾覆力受固化反应时间的影响，而固化反应时间与温度、水灰比、添加剂和桩体周围的土质特性有关，这有待深入研究。此外，试验中施加的荷载是单调均匀的，而实际使用环境中桩体可能会受到波浪等不均匀荷载的作用而液化四周底床，固结桩的倾覆过程也将发生复杂变化，本文仅研究了桩体的抗倾覆性，桩体和薄板作为一个整体的抗倾覆力如何需在此基础上继续研究。

5 结论

a. 与非固结桩相比，固结桩具有强大的抗倾覆能力，可显著提高固结桩式薄板丁坝的稳定性。固化剂注入土体后将与土体发生反应，形成“脚靴”状的固结体，固结桩的水平抗倾覆力可达到非固结桩的7倍。

b. 固结桩在倾倒过程中分为4个不同阶段：微偏阶段，水平抗倾覆力迅速增加，桩体无明显倾倒现象；倾斜阶段，水平力缓慢增大，桩体倾覆过程明显可见；倾覆阶段，水平力变化很小，桩体持续倾倒；拔移阶段，水平力再次增大，桩开始向土体外移动。

c. 注浆剂量或埋深越大，固结桩的水平抗倾覆力越大。水平抗倾覆力随注浆流量的变化是非单调的，存在一个注浆流量使得水平抗倾覆力达到最大值，本文（细沙土床中1:50模型桩体，埋深25~35cm，固化剂剂量50~150mL）该值在1.0~1.2mL/s之间。

d. 提出了衡量固结桩抗倾覆能力的临界水平抗倾覆力和临界倾斜角的计算公式，为工程设计提供了计算依据。

参考文献：

- [1] AZINFAR H, KELLS J A. Backwater effect due to a single spur dike [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2011, 34(1): 107-115.
- [2] GAREL E, SOUSA C, FERREIRA O. Sand bypass and updrift beach evolution after jetty construction at an ebb-tidal delta[J]. Estuarine Coastal & Shelf Science, 2015, 167(DEC. 20PT. A): 4-13.
- [3] TANG Xuelin, DING Xiang, CHEN Zhicong. Experimental and numerical investigations on secondary flow and sedimentations behind a spur dike [J]. Journal of Hydrodynamics, 2007, 19(1): 23-29.
- [4] 李强, 刘锐, 李冰冻, 等. 航道整治丁坝对城区中小河流鱼类栖息地的影响研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(19): 57-62. (LI Qiang, LIU Rui, LI Bingdong, et al. Effect of spur dikes for waterway regulation on fish habitat in the small to middle scale municipal [J]. Science Technology and Engineering,

- 2016, 16(19): 57-62. (in Chinese))
- [5] KUHNLE R A, ALONSO C V, SHIELDS F D. Geometry of scour holes associated with 90° spur dikes[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 125(9): 972-978.
- [6] 缪吉伦, 张永祥, 周家俞. 治河工程中护岸导流新结构研究综述[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(3): 1-4. (MIAO Jilun, ZHANG Yongxiang, ZHOU Jiayu. Review of new structures of bank protection and water diversion in river regulation engineering [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, 28(3): 1-4. (in Chinese))
- [7] 王文森, 程永舟, 王小明, 等. 梯形透水潜坝附近水面线及透水率[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(2): 66-71. (WANG Wensen, CHENG Yongzhou, WANG Xiaoming, et al. Water surface profile and permeable rate near a trapezoidal permeable submerged dam [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(2): 66-71. (in Chinese))
- [8] 任志. 水力插板透水丁坝水流特性及冲淤规律试验研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2016.
- [9] FITZPATRICK F A. Monitoring channel morphology and bluff erosion at two installations of flow-deflecting vanes, North Fish Creek, Wisconsin, 2000-03 [R]. Madison: Center for Integrated Data Analytics Wisconsin Science Center, 2005.
- [10] 贺伟军. 水力插板透水丁坝水流结构数值模拟研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2018.
- [11] 张凯, 侍克斌, 李玉建, 等. 水力插板透水式双丁坝坝头局部冲刷优化试验[J]. 水电能源科学, 2017, 35(8): 79-82. (ZHANG Kai, SHI Kebin, LI Yujian, et al. Optimization test of jetty head scour depth of double hydraulic flashboard permeable spur dike [J]. Water Resources and Power, 2017, 35(8): 79-82. (in Chinese))
- [12] 宋南京, 陈新中, 赵洪义. 土壤固化剂的研究进展和应用[J]. 中国建材科技, 2009(1): 55-61. (SONG Nanjing, CHEN Xinzhong, ZHAO Hongyi. Research and application on soil stabilizer [J]. China Building Materials Science & Technology, 2009(1): 55-61. (in Chinese))
- [13] 马成伟, 王贵和, 肖晓阳, 等. 粉细砂地层条件下声频振动注浆的试验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(3): 58-64. (MA Chengwei, WANG Guihe, XIAO Xiaoyang, et al. Experimental study on audio frequency vibration grouting in fine silty sand layer [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(3): 58-64. (in Chinese))
- [14] 张午迪. 海工固结锚在粘性基底床上上拔时的受力特性 [D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- [15] 喻国良, 张午迪. 一种水下固结桩及其施工方法: CN108643177B[P]. 2019-06-07.
- [16] 喻国良, 孙慧, 王锐. 一种带孔插板式的导流、拦沙促淤水工建筑物及建设方法: CN108374385A[P]. 2018-08-07.
- [17] 王志强. 甘肃引洮工程重大工程地质问题研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2006.
- [18] ASHOUR M, NORRIS G. Modeling lateral soil-pile response based on soil-pile interaction [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(5): 420-428.
- [19] 朱斌, 熊根, 刘晋超, 等. 砂土中大直径单桩水平受荷离心模型试验[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10): 1807-1815. (ZHU Bin, XIONG Gen, LIU Jinchao, et al. Centrifuge modelling of a large-diameter single pile under lateral loads in sand [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(10): 1807-1815. (in Chinese))
- [20] 郑国兵, 黄朝焯, 袁文喜, 等. 深厚淤泥中双排钢板桩结构安全稳定性研究[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(4): 71-76. (ZHENG Guobing, HUANG Chaoxuan, YUAN Wenxi, et al. Research of safety and stability of double-row steel sheet pile structure in deep silt [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(4): 71-76. (in Chinese))
- [21] LIU Jun, HAN Congcong, YU Long. Experimental investigation of the keying process of OMNI-Max anchor [J]. Marine Georesources and Geotechnology, 2018(1), 1-17.
- [22] 樊恒辉, 高建恩, 吴普特. 土壤固化剂研究现状与展望[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(2): 141-146. (FAN Henghui, GAO Jianen, WU Pute. Prospect of researches on soil stabilizer [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2006, 34(2): 141-146. (in Chinese))
- [23] 杨爱武, 周金, 孔令伟. 天津滨海新区吹填软土固化试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(9): 2442-2448. (YANG Aiwu, ZHOU Jin, KONG Lingwei. Experimental study of solidification of soft dredger fill in Tianjin Binhai New Area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(9): 2442-2448. (in Chinese))
- [24] 刘源强, 徐卓涛, 徐奇威. 高水灰比次纳米级超细水泥基灌浆材料的研制生产及应用[J]. 广东建材, 2007, 23(11): 33-36. (LIU Yuanqiang, XU Zhuotao, XU Qiwei. Development, production and application of sub nanometer ultra fine cement based grouting material with high water cement ratio [J]. Guangdong Building Materials, 2007, 23(11): 33-36. (in Chinese))
- [25] 张午迪, 张民曦, 喻国良. 海洋工程固结锚的结构与特性初探[J]. 海洋工程, 2019, 37(1): 117-126. (ZHANG Wudi, ZHANG Minxi, YU Guoliang. Basic structure of solidified maritime anchor and preliminary study on its characteristics [J]. Ocean Engineering, 2019, 37(1): 117-126. (in Chinese))

(收稿日期:2020-11-23 编辑:郑孝宇)