

动力锚跨介质侵彻特征的可视化试验研究

刘明潇, 孟奔, 代宏飞, 孟亚旭, 刘俊国

(华北水利水电大学 港口、航道与海洋发展研究中心, 河南 郑州 450046)

摘要:【目的】利用动力锚在溃口环境下快速生根力锚的快速生根锚固点,可以满足堤防溃口抢险的迅速、高效要求,但目前对动力锚在跨越不同介质的侵彻运动特性的研究还很少,因此针对抢险要求研究带索动力锚跨越不同介质时的侵彻运动特性十分必要。【方法】采用透明介质 Slime 凝胶,设计研发了一套可视化的侵彻试验装置,以概化动力锚为研究对象,采用不同初始条件进行了带索动力锚的侵彻试验研究。通过多组次试验,获取了侵彻轨迹、速度、界面震荡及锚固力等实测数据。【结果】锚体侵彻轨迹近似遵循三次函数变化规律,锚体停滞前明显向界面法线内侧偏转;进入凝胶后速度衰减很快,发射初始条件对锚体侵彻特性有重要影响,锚体侵彻深度与推发射力近似呈对数函数的响应关系,侵彻深度与锚固力具有较好的正相关性,呈现指数函数变化特征。【结论】锚体速度衰减与轨迹变化的函数关系近似,且锚体偏转受发射角度影响较大。锚体发射初始条件除影响侵彻深度外还会直接影响锚固力。研究成果有助于促进跨介质侵彻理论与抢险动力锚的设计研发。

关键词:可视化侵彻;透明凝胶;动力锚;初始条件;运动轨迹;速度衰减

中图分类号: TV476

文献标识码: A

江河的堤坝溃决严重威胁着沿河民众的生命财产安全,一旦发生溃堤决口,溃口的抢险堵复刻不容缓。当面对一些落差较大、流速较高的大型溃口时,堵复抛投物很难抵挡高速水流的冲击,在到达溃口河底时就会被水流冲走^[1]。虽然也有许多堵口技术在研究^[2-4],但现有技术与施工装备很难做到快速堵复,有时不得不采用沉船、沉车堵口,这都临时应急之策。目前有研究者提出借用海工锚固的动力锚技术,向溃口河底发射动力锚快速形成锚固点,便于堵口钢网石笼等物料的及时投放与稳定^[5-6]。了解动力锚在溃口河床土体中的侵彻运动规律、跨越不同介质时的界面效应、入土侵彻深度、速度衰减规律以及关键影响因素,对于动力锚的设计和这项溃口抢险新技术的应用都是十分必要的。

国内外在高速弹体对土体的侵彻研究方面主要采用试验与数值模拟的方法。美国桑迪亚实验室最先开始这方面的实验与理论分析^[7-9]。我国张华昌等^[10]、肖钦民等^[11]提出一种用于海上油气平台固定的火箭埋设锚,并对火箭锚在不同类型土质中的锚固力进行了研究。景彤等^[12]、姚鹏等^[13]采用理论研

究和现场试验相结合的方法,对火箭锚在沙质和淤泥条件下的侵彻轨迹进行分析。在土介质侵彻深度模拟计算方面,YOUNG C W^[14]最早提出了经验公式,并给出了弹体重量、截面积、弹体头型系数、侵彻速度等影响因素。孙宇新等^[15]设计了产生超空泡的钻土弹,开展了以 500 m/s 初速度对细土靶的垂直侵彻模型试验,发现超空泡钻土弹能够有效提升侵彻深度。IVAN L 等^[16]、OMIDVAR M 等^[17-18]使用透明砂和高速摄像机研究了球形弹丸侵彻到饱和颗粒靶心的过程,侵彻速度范围 60~150 m/s。CHIAN C S 等^[19]、BEN-DOR G 等^[20]进行了弹丸侵彻沙质的试验研究,表明弹丸头部形状对侵彻有明显影响;同时发现弹丸质量和沙体压实度对侵彻也有较大影响。周玉兵等^[21]对初始攻角为 5°、8°和 15°的钻地弹进行在土壤中侵彻的数值模拟,得出了初始攻角对弹体侵彻土壤的运动轨迹和规律的影响。MOHAMMAND A 等^[22]专门总结了用于预测土壤介质侵彻物体对渗透的响应的分析、经验、试验和计算方法。LEE J 等^[23]研究分析了弹丸对由土壤和岩石组成的双层土工材料的高速冲击现象,发现弹

收稿日期/Received: 2025-04-09

修回日期/Revised: 2025-08-14

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3011400/2023YFC3011405);水利部重大科技项目(SKS2022030);华北水利水电大学硕士研究生创新能力提升工程(NCWU-202416004)。

第一作者:刘明潇(1986—),女,副教授,博导,博士,从事河流动力学及河流工程方面的研究。E-mail: liumingxiao@ncwu.edu.cn。

通信作者:刘俊国(1977—),男,教授,博导,博士,从事水文水资源方面的研究。E-mail: liujunguo@ncwu.edu.cn。

丸在穿透土壤时会损失约 38.7% 的动能,而在穿透岩石时则会损失约 61.3% 的动能。ADS A 等^[24]基于高速相机和数字图像相关技术,实现了弹丸侵彻黏土时土壤结构相互作用的可视化,结果发现半球形头弹体在侵彻中的受到阻力比球形头弹体与锥形头弹体均高出约 20%。高圣智等^[25]对高速弹体侵彻对充液结构的破坏及防护开展了研究,而张雯杰等^[26]则通过对油水两相分层流界面的力学分析,提出了界面波受力计算模型,通过数值拟合发现油水界面波的变形与两相速度有关;对于带索动力锚在不同介质中的侵彻研究相对较少,尤其是在介质中侵彻过程的可视化图像采集方面,鲜有研究;缺乏对土体侵彻全过程直观的观测分析。笔者通过调查筛选,采用透明 Slime 凝胶作为可与土体类比的典型侵彻介质,研发制做一套能重复进行的可视化侵彻试验及锚固力量测的试验装置,可以进行带索动力锚侵彻特性及穿越界面效应的精细试验研究,为抢险动力锚的设计提供试验数据及可行性验证。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象与模拟方法

以堤防溃口抢险专用动力锚及多介质侵彻环境做为研究对象。动力锚概化体型为头部尖圆锥形

圆柱体,如图1所示。锚体直径 $d=0.2\text{ m}$,当量长 $L=1.2\text{ m}$,长径比为6,重量 $G=294\text{ kg}$,末端连接锚索,锚体按相似理论模拟制作。

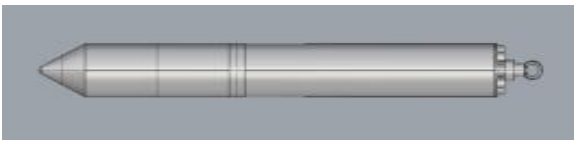


图1 锚体型3D效果示意图

Fig.1 The Anchor Body Shape Diagram

多介质侵彻环境包括溃口水体（水深6~8 m）与溃口堤防土体（多为黏细黄土,干密度 $1\ 800\text{ kg/m}^3$ ）。透明水体按相似理论模拟,而土体模拟则需考虑侵彻过程可视化。经多方筛选采用聚乙烯醇 (Polyvinyl alcohol,PVA) 模拟土体,其化学式为 $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$,俗称Slime凝胶,如图2所示。Slime凝胶在常温下为透明介质,可以类比均质黏土特性（主要是黄河下游滩地土体）,黄河下游滩地土体主要物理指标见表1。直观研究高速运动物体在透明黏滞介质中的运动轨迹与运动特征,子弹在透明凝胶中的可视化运动如图3所示。通过调制控制凝胶密度与黏度,可以达到与模拟土体黏度基本相似,配置好的Slime凝胶的主要物理指标见表2。

表1 黄河下游滩地土体主要物理力学指标

Tab.1 Main physical and mechanical indexes of soil in the lower Yellow River

土壤名称	黏粒含量/%	含水率/%	密度/ (g/cm^3)	黏度/ $(\text{Pa}\cdot\text{s})$
干黏土	14.3~24.4	15.0~41.2	1.42~1.59	10.0~23.0
饱和黏土	34.3~41.9	27.4~36.1	1.36~1.46	15.0~27.0

表2 Slime凝胶主要物理指标

Tab.2 Main physical and mechanical indexes of gel

黏度/ $(\text{Pa}\cdot\text{s})$	pH值	平均分子量	密度/ (g/cm^3)
21.0~30.0	5~8	110 000~130 000	1.26~1.31



图2 常见的透明 Slime 凝胶

Fig.2 The common gels

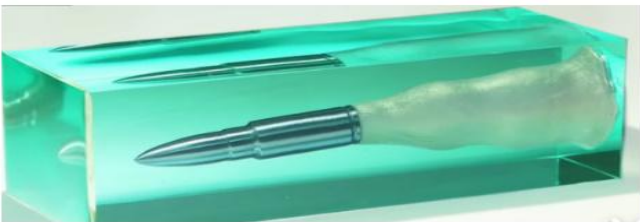


图3 子弹在透明凝胶中的可视化运动

Fig.3 Visualization of bullet movement in gel

根据黏细黄土的黏结力特征值调制凝胶黏度的程序如下：凝胶的配比是使用低于 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 的去离

子水与PVA粉末按一定比例混合均匀,加热混合溶液至 $95\text{ }^\circ\text{C}$ 使PVA完全溶解,配制成饱和PVA凝胶;然

后加入凝胶质量五分之一的硼砂（硼酸钠 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ）、凝胶质量十分之一的纯甘油（丙三醇 $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$ ），充分搅拌而成。作者将配制好的 Slime 凝胶与常见黄河堤防土体（干土与饱和土）进行相同条件黏度（标准拉拔片锚固力）试验，结果比较情况如图4所示。由图4可知，Slime 凝胶与黄河天然饱和黏土的锚固力拉拔曲线趋势基本一致，

同时通过抗剪性能相似理论的分析与试验，保证配置好的 Slime 凝胶的力学性质与土体（黏细黄土）的力学性质相似。此外，国外也有人研究认为，Slime 凝胶能够很好模拟天然土体的黏滞行为^[27]，这表明两种介质的黏滞特性及拉拔力具有可比性，可以使用 Slime 凝胶模拟土体进行可视化侵彻试验研究。

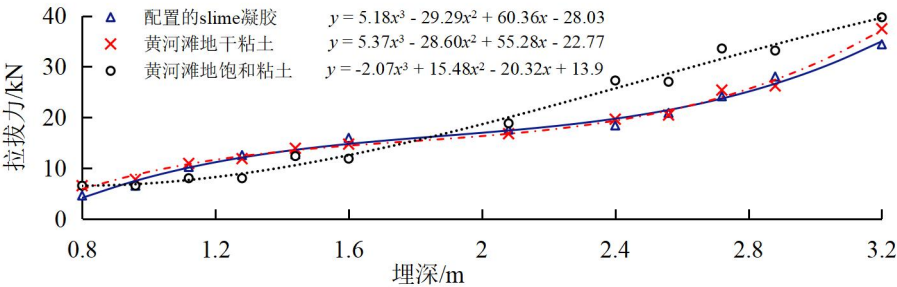


图 4 不同配比的 Slime 凝胶与土体力学性能测试

Fig.4 Mechanical properties of Slime gel and soil with different proportions were tested

1.2 可视化侵彻试验模型

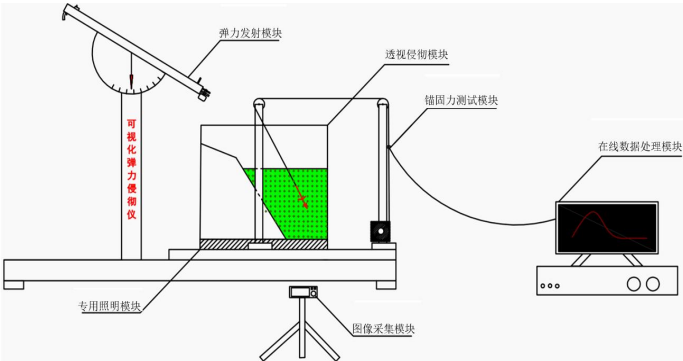
为了直观研究动力锚的运动轨迹、速度衰减及界面效应等侵彻特性，依据相似理论，按1:16的几何比尺设计了可视化侵彻试验模型，模型动力锚采用弹力冷发射控制初速度(发射弹力)。试验模型包括弹力发射模块、透视侵彻模块、图像采集模块、锚固力测试模块以及辅助照明设施和接收图像信息的电脑终端，仪器布置及功能示意如图5所示。

1) 弹力发射模块主要由钢结构发射架与可调弹力筋与模型钻地锚构成，稳固的发射架基座可以使发射器自由旋转，利用配置的偏角仪调整发射角度；采用调节弹力筋弹性系数和张紧度控制动力锚的初速度(发射力)，采用可视化侵彻介质与常见溃口土体力学性能关系换算实际侵彻锚固力。

2) 透视侵彻模块由透明侵彻箱和模拟土体的透明凝胶组成，侵彻箱壁面有标定参考坐标系，便于图像记录侵彻轨迹。

3) 图像采集模块由多机位高速摄像机及三脚架及支座组成，对锚体侵彻过程进行高帧率高清动态录制，利用蓝牙功能遥控实时传输信息到电脑，运用图像识别软件将侵彻轨迹数字化。分析锚体通过不同介质时的界面特征及界面效应。

4) 锚固力测试模块。锚固力测试装置包括移动轨道，锚固力测试门架和动态拉拔仪等，对于侵彻过程结束后的锚体进行现场锚固力测试，如图5所示。侵彻箱下部配有辅助照明设备，使透明侵彻箱内光线均匀、明亮无反射，有利于采集清晰完整的侵彻图像。系统以可视化侵彻为核心，利用图像识别、设备远端控制等技术，实现对侵彻过程、界面效应、锚固力的一体化试验研究。



(a) 各模块示意图



(b) 试验系统

图 5 可视化侵彻试验系统

Fig.5 Visualization of bullet movement in gel

1.3 试验流程与工况

侵彻及拉拔试验操作流程如下：首先在侵彻箱中放入调制好设定黏度的透明凝胶做为侵彻介质，上部设置水体。根据试验设计要求,调整发射架发射角度,选择弹力筋规格(已率定)控制发射弹力;然后调整侵彻箱下部照明设备,确保箱内清晰透明,设置录像设备;将锚体装入发射槽,将弹力筋拉至设计长度,利用弹力发射锚体至侵彻箱中,同时利用手机蓝牙远程遥控录像设备,观测记录锚体侵彻全过程与越过水、凝胶不同介质界面时产生的界面效应,得到侵彻试验影像;最后将锚索接入拉力传感器,以稳定速率将锚体从侵彻介质中拉出,采集锚固力拉拔实时数据,录制拉拔过程影像,记录拉拔破坏特征;利用 tracker 追踪软件分析锚体侵彻速度与运动轨迹（文中数据均折算至原型）。

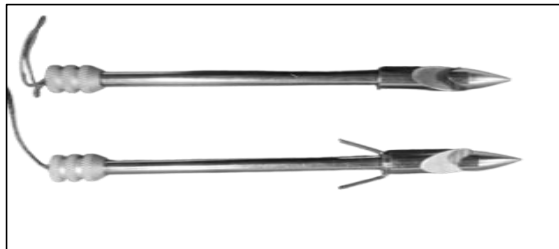
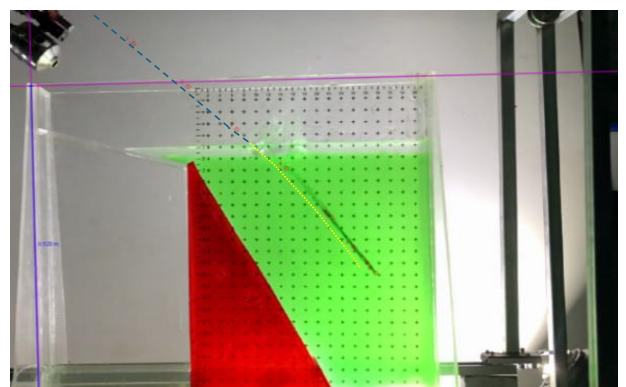
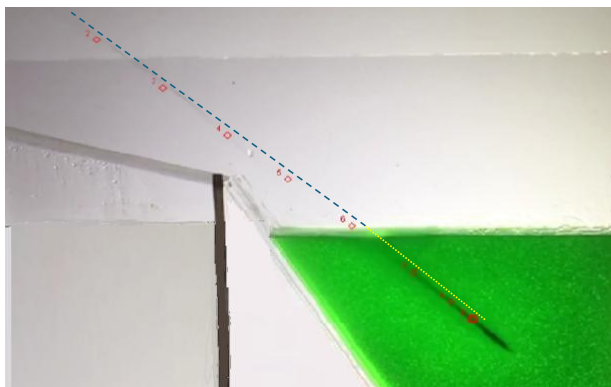


图6 特制带索锚锚具
Fig.6 Special cable anchor

利用弹力发射器进行不同初始发射力(亦即初始惯性力) F_i 和不同发射角 θ (发射方向与水平线的内夹角)的试验,见表3。试验 Slime 凝胶的密度 $\rho=1260\text{ kg/m}^3$,剪切模量 $G=0.12\text{ GPa}$,凝胶深度 $H=7.2\text{ m}$;凝胶上方保持水深为 $0.32\sim 0.8\text{ m}$ 。



(a) 入射角度 40° ,发射力 152.8 kN ,水深 0.4 m ,拍摄帧率 250 fps (b) 入射角度 60° ,发射力 169.6 kN ,水深 0.48 m ,拍摄帧率 250 fps

图7 锚体不同发射角度与运动轨迹

Fig.7 Different launching angles and motion trajectories of anchor

表3 试验工况

Tab.3 Test conditions

初始惯性力/kN	发射角度/ $^\circ$			
	30	40	50	60
123.7	✓	✓	✓	✓
152.8	✓	✓	✓	✓
169.6	✓	✓	✓	✓

2 锚体跨介质侵彻试验成果分析

2.1 锚体的侵彻轨迹

通过对锚体侵彻过程的图像拍摄与利用 Tracker 软件进行图像识别与数字化处理,得到模型锚体在 Slime 凝胶中不同时刻的精确位置(红色小方框)与侵彻轨迹曲线,如图7与图8所示。由图7可以看出:在空气中锚体轨迹基本沿直线运动,在遇到水面时由于介质密度突然增大,运动轨迹向界面法线的左侧略有偏移;在由水体进入凝胶的界面时,介质密度再次突然增大,运动轨迹向界面法线的左侧进一步偏移,速度迅速衰减;图7也同样呈现这一变化特点,不同发射角的运动轨迹各有差异,但进入凝胶后都不同程度的向界面法线左侧偏移,特别是锚体停滞前最后时刻的勾头偏移现象很明显。另外,在相同初始惯性力发射条件下,发射角 θ 越大,锚体在凝胶中的勾头偏移现象越严重。经拟合分析锚体运动轨迹均近似遵循三次函数规律变化,可用一般多项式函数表达:

$$y = a_1x^3 + a_2x^2 + a_3x + c \quad (1)$$

式中: y 和 x 分别为锚体在某时刻的纵横坐标; a_1 、 a_2 、 a_3 和 c 分别为锚体轨迹特征参数,主要与锚体发射角和初始发射力有关。

不同条件轨迹函数关系及各参数取值详见图8,相关系数均大于0.9。

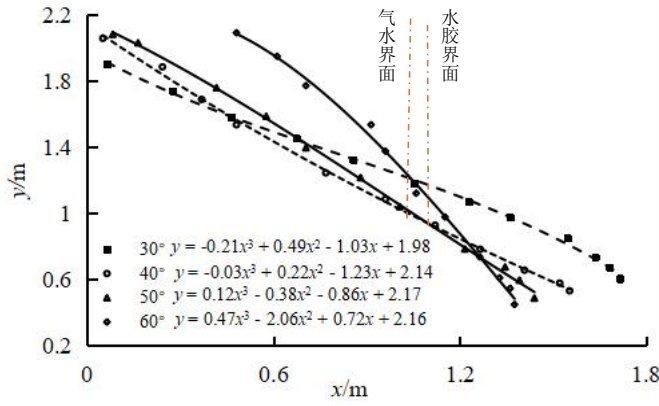


图8 锚体不同发射力、不同发射角度下的运动轨迹对比

Fig.8 Trajectory comparison of the anchor under varying launch forces and angles

2.2 锚体的速度衰减

利用 Tracker 软件分析锚体侵彻轨迹,还可以获取锚体运动速度在侵彻过程中的变化,如图 9 所示。锚体在受到初始发射力和重力作用下有一个短暂的加速过程,然后在气水交界面首先受到界面影响速度迅速降低,在穿越水体进入凝胶时受介质黏性影响,速度很快就衰减为零,时间不到 0.02 s。根据试验数据分析,锚体速度衰减与运动轨迹相似,也基本遵循三次函数变化规律,见图 9 中的拟合函数。可以看到介质特性对速度影响很大,进入凝胶后速度衰减梯度很大,而发射角度对速度的影响则不大。

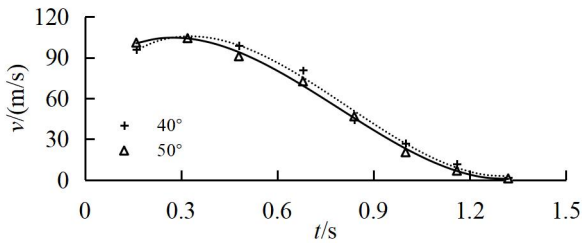


图9 初始发射力 169 kN 作用下不同入射角锚体速度衰减过程

Fig.9 Attenuation process of anchor velocity with different incident angles under initial launching force 169 kN

2.3 初始条件对侵彻深度与锚固力的影响

锚体发射初始条件除对侵彻轨迹和速度有影响外,还对侵彻深度和锚体锚固力有重要影响。计算低速弹体侵彻深度的经典理论 Young 公式^[14]表明,弹体侵彻深度与初速度、弹体形状、介质密度等因素密切相关,基本模式见下式;且周燕^[28]研究发现发射推力越大、弹体初速度越大,侵彻深度越大。

$$H_p = \xi m^\sigma \ln(1 + \frac{v^2}{2S}) = k \ln(1 + \frac{v^2}{2S}) \quad (2)$$

式中: H_p 为侵彻深度, m; S 为介质参数; ξ 为形态系数; m 为单位截面弹体质量, kg/m^2 ; σ 为质量影响指数; V 为弹体初速度, m/s , 其值取决于发射推力; $k = \xi m^\sigma$ 为综合系数。式 (2) 的速度适用范围与动力锚一致。

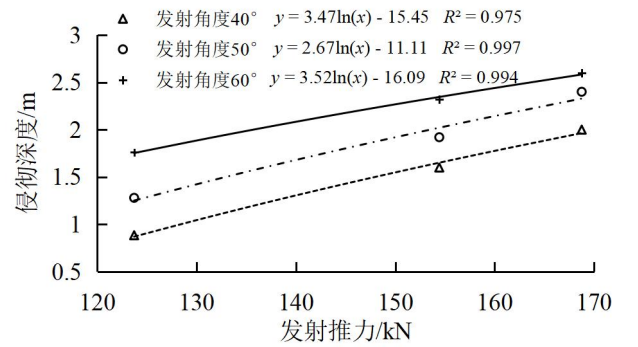


图10 锚体不同发射力、不同发射角度下的侵彻深度

Fig.10 Penetration depth of the anchor under different launch forces and angles

根据本文动力锚试验结果得到发射推力与侵彻深度的关系,如图 10 所示。同样也得到发射推力越大,锚体侵彻深度就越大;同时还发现发射角 θ 增大,锚体侵彻深度也相应增加,反映初始条件对侵彻深度的影响。图 10 中的曲线表明:决定锚体初速度的发射推力与侵彻深度相关性很强,与理论 Young 公式相似,也存在对数函数关系,见下式:

$$H_p = a \ln(F_i) + b. \quad (3)$$

式中: H_p 为侵彻深度; F_i 为发射力; a 和 b 分别为侵彻指数与侵彻系数。

a 和 b 均与发射角度有关。 a 的变化范围为 1.04~1.36, b 的变化范围为 2.84~4.29,两个参数均具有发射角越大,其值越小的特点,且上式主要适用于发射力小于 170 kN,深度小于 8 m 的均质黏性土体;

上式注重体现了给定锚体发射初始条件的影响,而侵彻介质物理特性的影响没有反映,故与 Young 公式有一些差异。参考现有火箭(动力)锚现场侵彻试验数据及相关文献^[6,10-12],见表4;根据已有工程试验数据和模型缩尺关系,同时结合现有试验条件,最终选取锚体的初始发射力为 123.7、152.8、169.6 kN,同时还采用不同发射角进行侵彻试验;在锚体侵彻结束后,对锚体进行拉拔测试,获取了对应的最大锚固力值,并通过多组重复试验确保数据可靠性。通过分析试验数据给出了锚体发射初始条件-侵彻深度-锚固力之间的关系,如图 11、12 所示。

图 11 给出了不同初始条件(发射力与发射角)时,锚体锚固力与发射角的相关关系曲线,表明发射推力越大、发射角越大,锚体获得的锚固力越大。图 12 则给出了锚体侵彻深度与最大锚固力的相关关系。两图体现的侵彻特性与表 4 显示发射推力-入土深度-最大锚固力数据的对应关系完全一致。由图 12 也可以看出,锚体侵彻深度与锚固力有着很好的相关性,可表述为如下函数关系:

$$F_a = 2.493e^{0.3569H_p} \quad (4)$$

式中: F_a 为锚体锚固力; H_p 为侵彻深度,所得系数与指数与侵彻介质的物理属性有关,上式的适用条件与式(4)一致。

表 4 火箭锚参数与侵彻深度和锚固力的关系^[6]

Tab.4 Correlation of anchor parameters with penetration depth and holding capacity^[6]

动力锚型号	锚长/m	锚重/kg	发射推力/kN	入土深度/m	最大锚固力/kN
HJM-5	0.56	42	53.0	3~4	49.0~58.8
HJM-10	1.0	80	95.8	8~10	78.4~98.0
HJM-15	1.4	150	118.0	8~12	78.4~117.6
HJM-45	2.5	471	—	8~12	78.4~117.6
HJM-100	3.6	1200	—	8~12	78.4~117.6

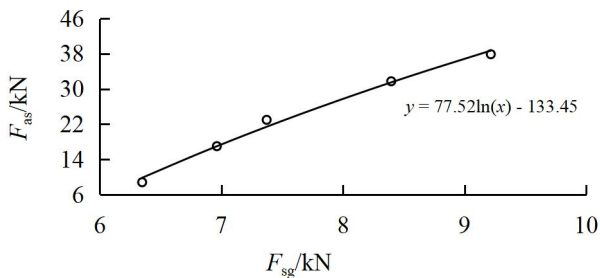


图 13 相同侵彻深度下凝胶锚固力与土体锚固力对应关系

Fig.13 Correspondence Between Gel and Soil Anchoring Forces at Identical Penetration Depths

为了让凝胶试验结果与实际土体建立关系,笔者对同样侵彻深度的凝胶与土体(黄河堤防土体)进行了同样条件的拉拔试验,获取了两者锚固力的对应关系,如图 13 所示(已折合原型)。

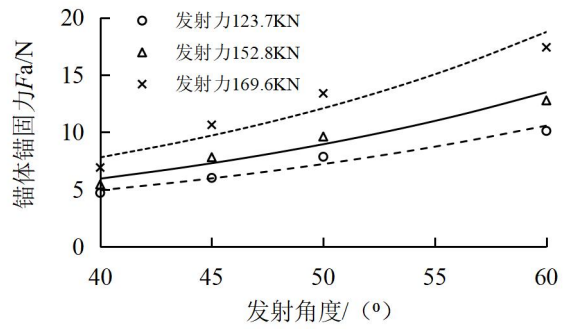


图 11 不同发射力和发射角度下的锚体锚固力对比
Fig.11 Anchoring force comparison of anchors with varying launch parameters

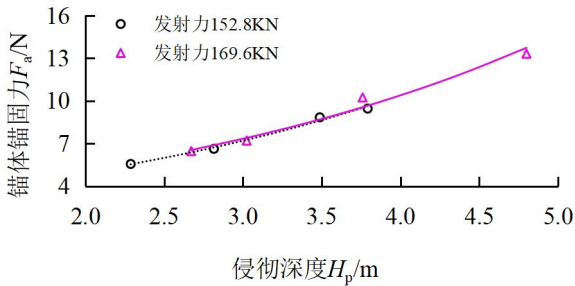


图 12 锚体侵彻深度与凝胶中的锚体锚固力关系
Fig.12 Relationship between Anchor Penetration Depth and Holding Force in Gel

由图 13 可以看出,两种介质在同样侵彻深度时的锚固力具有较好的正相关关系,呈现对数函数变化特征,可表示为一般形式:

$$F_{as} = \alpha \ln F_{sg} \quad (5)$$

式中: F_{as} 为某一侵彻深度的土体锚固力; F_{sg} 为同一侵彻深度的凝胶锚固力;系数 α 与 β 指数与侵彻介质的物理属性有关,当凝胶的深度为 0.5~1.0 m 时, $\alpha=77.515$, $\beta=133.45$ 。

另外,土体的锚固力还与土体粒径有关,分析不同粒径的土体拉拔试验得到,土体粒径越小,介质越致密,则锚固力就越大,如图 14 所示。

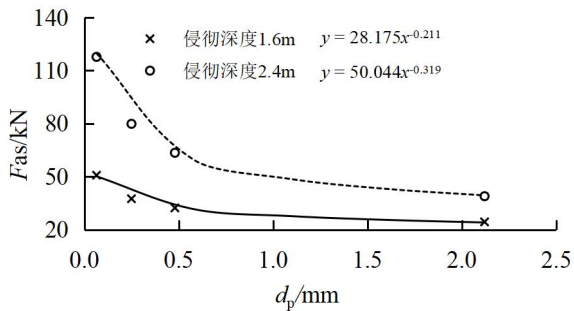


图 14 相同侵彻深度下土体粒径与锚固力关系
Fig.14 Relationship between soil particle size and Anchoring Force at Identical Penetration Depths

3 结论

1) 采用透明 Slime 凝胶做为概化侵彻介质,研发的可视化侵彻试验及锚固力测试装置可以为抢险带索动力锚的侵彻特性研究提供良好的试验平台,同时利用土体-凝胶锚固力关系曲线,通过一体化拉拔试验还可以获取动力锚的锚固力参数。此外,本文主要研究了黄河下游滩地干黏土与饱和黏土与 Slime 凝胶的关系,即本研究的模拟公式适用于黏性土体(如黄河黏土,黏粒含量 34.3%~41.9%);而对于砂土或砾石土,需进行进一步研究,对相关参数进行修正。

2) 借助 Traker 软件进行图像识别分析,发现锚体侵彻轨迹近似遵循三次函数变化规律;在进入凝胶后锚体向界面法线左侧偏转,在侵彻结束前最甚;锚体进入凝胶后速度迅速降低,速度衰减规律与轨迹变化函数关系近似,发射角度对速度衰减的影响不大;锚体轨迹偏转角与锚体发射角度呈线性关系,锚体发射角度越大,锚体的轨迹偏转角越大。

3) 锚体侵彻深度与发射推力近似呈对数函数的响应关系,与 Young 理论模式基本一致,同时发射角度也通过侵彻系数与指数影响侵彻深度;锚体发射初始条件影响侵彻深度同时还直接影响锚固力的大小,侵彻深度与锚固力具有较好的正相关性,呈现指数函数的变化特征。

参考文献

[1] LIU M X, LUO Y R, QIAO C, et al. The hydraulic and boundary characteristics of a dike breach based on cluster analysis[J]. Water, 2023, 15(16): 18.

[2] 孙东坡, 张耀先, 王二平, 等. 堵口土工包沉落试验研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2002(8): 33-43. [SUN D P, ZHANG Y X, WANG E P, et al. Experimental study on sinking of closure geotextiles[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2002(8): 33-43.]

[3] 耿明全, 陈银太, 朱太顺. 黄河堤防堵口进占技术研究[J]. 人

民黄河, 2003(3): 26-27, 33. [GENG M Q, CHEN Y T, ZHU T S. Study on the technology of the entrance of the Yellow River embankment[J]. Yellow River, 2003(3): 26-27, 33.]

[4] 朱太顺. 防汛抢险关键技术研究[J]. 人民黄河, 2003(3): 79-83. [ZHU T S. Research on key techniques of flood control and emergency rescue[J]. Yellow River, 2003(3): 79-83.]

[5] 路景志, 胡铁钊, 臧克俭. 火箭埋设锚在海上油气开采作业中的应用[J]. 中国海上油气(工程), 1992, 4(2): 19-22. [LU J Z, HU T Z, ZANG K J. Application of rocket embedded anchor in offshore oil and gas exploitation[J]. China Offshore Oil and Gas(Engineering), 1992, 4(2): 19-22.]

[6] 马洪福. 阵列锚技术在堤防溃口堵复中的应用研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2019. [MA H F. Research on the application of array anchor technology in dike breach plugging[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2019.]

[7] ANONYMOUS U S. Army engineer research and development center[J]. NASA Tech Briefs, 2021, 45(11): 60-62.

[8] WU W M, ALTINAKAR M S, AL-RIFFAI M, et al. Earthen embankment breaching[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 137(12): 1549-1564.

[9] SHAMS A, JALALISENDI M, PORFIRI M. Experiments on the water entry of asymmetric wedges using particle image velocimetry[J]. Physics of Fluids, 2015, 27(2): 027103.

[10] 张华昌, 吕兆华, 隋华. 火箭锚侵彻轨迹研究[C]//第十三届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 工程科技 II 辑, 2007: 130-135. [ZHANG H C, LV Z H, SUI H. Research on penetration trajectory of rocket anchor[C]//Proceedings of the 13th China Ocean (Coast) Engineering Symposium. Engineering Science and Technology II, 2007: 130-135.]

[11] 肖钦民, 宋瑞. 动力锚的创新研究与应用拓展[J]. 机电设备, 2015, 32(6): 62-65, 71. [XIAO Q M, SONG R. Innovative research and application development of power anchor[J]. Mechanical and Electrical Equipment, 2015, 32(6): 62-65, 71.]

[12] 景彤, 陈智刚, 郑延斌, 等. 模拟弹低速侵彻土壤靶的试验与模拟仿真[J]. 弹箭与制导学, 2019, 39(5): 13-16, 22. [JING T, CHENG Z G, ZHENG Y B, et al. Test and simulation of simulated projectile penetrating soil target at low speed[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2019, 39(5): 13-16, 22.]

[13] 姚鹏, 徐波, 高有涛. 高速及超高速钻地弹侵彻土壤深度及轨迹的研究[J]. 测试技术学报, 2013, 27(6): 521-528. [YAO B, XU B, GAO Y T. Research on the penetration depth and trajectory of high-speed and ultra-high-speed earth penetrating projectiles into soil[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2013, 27(6): 521-528.]

[14] YOUNG C W. Penetration Equations. Applied Research Associates, Inc. Sandia National Laboratories, 4300 San Mateo Blvd. NE, Suite A-220 Albuquerque NM 87110, 1997. DOI: 10.2172/562498.

[15] 孙宇新, 孙其然, 周玲, 等. 超空泡钻土弹侵彻土壤试验研究[C]//第九届全国爆炸力学实验技术学术会议摘要集. 工程科技 II 辑, 2016: 55. [SUN Y X, SUN Q Y, ZHOU L, et al. Experimental study on supercavitating earth penetrator penetrating into soil [C]//Abstracts of the 9th National Conference on Explosive Mechanics Experiment Technology. Engineering Science and Technology II, 2016: 55.]

- [16] IVAN L, GUZMAN M, ISKANDER M. Observations of projectile penetration into a transparent soil[J]. *Mechanics Research Communications*, 2015, 70: 4-11.
- [17] OMIDVAR M, MALIOCHE D J, BLESS S, et al. Phenomenology of rapid projectile penetration into granular soils[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 85: 146-160.
- [18] OMIDVAR M, ISKANDER M, BLESS S. Soil-projectile interactions during low velocity penetration [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 93: 211-221.
- [19] CHIAN C S, T V C B, SARMA A. Projectile penetration into sand: Relative density of sand and projectile nose shape and mass[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 103: 29-37.
- [20] BEN-DOR G, DUBINSKY A, ELPERIN T. Localized interaction models with non-constant friction for rigid penetrating impactors[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2007(44): 2593-2607.
- [21] 周玉兵, 郭锐, 周昊, 等. 初始攻角对钻地弹斜侵彻土壤影响的数值模拟[J]. *机械制造与自动化*, 2014, 43(5): 117-119. [ZHOU Y B, GUO R, ZHOU H, et al. Numerical simulation of the effect of initial angle of attack on the oblique penetration of earth penetrating projectile into soil[J]. *Machine Building & Automation*, 2014, 43(5): 117-119.
- [22] MOHAMMAND A, SACED A, JAVED M. Advances in projectile penetration mechanism in soil media[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(19): 6810.
- [23] LEE J, CHOI Y. Investigation on high velocity impact of projectile on double layered geomaterial[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2022, 26(5): 1-8.
- [24] ADS A, ISKANDER M, BLESS S. Soil-projectile interaction during penetration of a transparent clay simulant[J]. *Acta Geotechnica*, 2020, 15(3): 815-826.
- [25] 高圣智, 侯海量, 白雪飞, 等. 高速弹体侵彻下充液结构的破坏特性及防护技术研究进展[J]. *舰船科学技术*, 2021, 43(1): 1-10. [GAO S Z, HOU H L, BAI X F, et al. Research progress on the failure characteristics and protection technology of liquid-filled structures under high-speed projectile penetration[J]. *Ship Science and Technology*, 2021, 43(1): 1-10.]
- [26] 张雯杰, 尚作萍, 张宏兵, 等. 油水两相分层流界面波变形及破坏力学特性研究[J]. *力学与实践*, 2022, 44(1): 59-66. [ZHANG W J, SHANG Z P, ZHANG H B, et al. Study on the mechanical properties of interface wave deformation and failure of oil-water two-phase stratified flow[J]. *Mechanics in Engineering*, 2022, 44(1): 59-66.]
- [27] TABE K, ISKANDER M G, HOMMA S. Transparent aquabeads to visualize flow in porous material[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 239/240/241/242: 2602-2605.
- [28] 周燕. 钻地弹土中弹道影响因素的数值模拟研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009. [ZHOU Y. Numerical simulation study on influence factors of trajectory in soil-drilling projectile[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009.]

Experimental Study on Visualization of Medium Penetration Characteristics of Dynamic Anchor

LIU Mingxiao, MENG Ben, DAI Hongfei, MENG Yaxu, LIU Junguo

(Research Center for Ports, Waterways and Marine, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: **【Objective】** The rapid root anchoring point of the dynamic anchor can be quickly established in the breach environment, which can meet the requirements of rapid and efficient emergency response for dike breaches. However, there is currently little research on the penetration motion characteristics of the dynamic anchor when crossing different media. Therefore, it is very necessary to study the penetration motion characteristics of the dynamic anchor with a rope when crossing different media in response to emergency requirements. **【Methods】** This study employed a transparent Slime gel medium and developed a visual penetration test apparatus. Using a generalized dynamic anchor model, a series of penetration tests were conducted under different initial conditions. Multiple sets of experimental data were obtained, including penetration trajectory, velocity, interface oscillation, and anchoring force. **【Results】** The analysis shows that the penetration trajectory of the anchor approximately follows a cubic function pattern, with significant deflection toward the inner side of the interface normal before coming to a stop. The velocity decays rapidly after entering the gel, and the initial launch conditions significantly affect the penetration behavior. The penetration depth exhibits a logarithmic relationship with the launch force, while it correlates positively with the anchoring force, following an exponential functional trend. **【Conclusion】** The functional relationship between velocity decay and trajectory change is similar, and the deflection of the

anchor is greatly influenced by the launch angle. Besides affecting penetration depth, the initial launch conditions also directly influence the anchoring force. The research findings contribute to the theoretical study of cross-media penetration and support the design and development of dynamic anchors for emergency applications.

Keywords: visualization penetration; transparent gel; dynamic anchor; initial conditions; motion trajectory; velocity attenuation