



海底滑坡冲击管线动力行为的模型试验研究

戴自立 陈舒阳 朱崇强

Model test on the dynamic behavior of submarine landslides impacting the submarine pipeline

DAI Zili, CHEN Shuyang, ZHU Chongqiang

引用本文:

戴自立, 陈舒阳, 朱崇强. 海底滑坡冲击管线动力行为的模型试验研究[J]. 北科大: 工程科学学报, 2025, 47(10): 2002–2011. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2025.01.02.002

DAI Zili, CHEN Shuyang, ZHU Chongqiang. Model test on the dynamic behavior of submarine landslides impacting the submarine pipeline[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2025, 47(10): 2002–2011. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2025.01.02.002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2025.01.02.002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于IPSO–GRU深度学习算法的海底管道缺陷尺寸磁记忆定量反演模型

Metal magnetic memory quantitative inversion model based on IPSO–GRU algorithm for detecting submarine pipeline defect
工程科学学报. 2022, 44(5): 911 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2020.11.06.001>

气压诱发非饱和土变形破坏的试验与数值研究

Experimental and numerical studies on gas pressure induced deformation and failure of unsaturated soil
工程科学学报. 2023, 45(12): 2140 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2022.11.06.001>

降雨和地震条件下浅层黄土滑坡三维稳定性评价

Three-dimensional stability evaluation of shallow loess landslides under rainfall and earthquake conditions
工程科学学报. 2022, 44(3): 440 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2020.10.08.002>

管道内气液两相流流激力研究进展

Research progress of fluctuating force caused by internal gas–liquid flow
工程科学学报. 2021, 43(1): 129 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2020.07.14.001>

冲击荷载下含层理介质动态裂纹扩展特性研究

Dynamic crack propagation characteristics of media with bedding under an impact load
工程科学学报. 2023, 45(5): 701 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2022.03.20.001>

基于A–RAFT模型的垂直管道输送测速方法

Vertical pipeline velocity measurement method based on A–RAFT model
工程科学学报. 2024, 46(12): 2159 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2024.03.27.001>

海底滑坡冲击管线动力行为的模型试验研究

戴自立¹⁾, 陈舒阳¹⁾, 朱崇强²⁾✉

1) 上海大学力学与工程科学学院, 上海 200444 2) 同济大学土木工程学院, 上海 200092
✉通信作者, E-mail: cqzhu@tongji.edu.cn

摘 要 海底滑坡作为常见的海洋地质灾害, 往往具有体积大、速度快、冲击致灾效应显著等特点, 容易造成海洋工程结构的重大破坏, 导致极大的经济损失和人员伤亡, 严重威胁海洋工程建设和资源开发. 本文针对海底滑坡冲击海底管线的动力过程, 研发了一套物理模型试验装置, 模拟了海底滑坡与管道的动力耦合相互作用, 研究了失稳滑坡体冲击作用下管道的受力特征, 并获取了翔实的试验数据. 区别于以往研究仅关注垂直管线的冲击力, 本试验同时关注了冲击力及垂直向上的升力, 对于揭示海底滑坡与管线相互作用行为具有促进作用. 基于试验数据, 系统分析了海底滑坡方量、滑坡坡度、海底管线直径、悬跨高度等因素对管道受力状态的影响规律, 发现了海底滑坡对管线的冲击力与坡体方量、运动速度的平方、以及管线直径成正比; 进一步, 管线所受垂直向上的升力峰值约为冲击力峰值的 1/5. 本研究结果不仅可以深化海底滑坡与管线相互作用行为的认识, 同时可为海底管线系统的设计和安全评估提供科学依据.

关键词 海底滑坡; 海底管线; 冲击力; 升力; 模型试验

分类号 TG142.71

Model test on the dynamic behavior of submarine landslides impacting the submarine pipeline

DAI Zili¹⁾, CHEN Shuyang¹⁾, ZHU Chongqiang²⁾✉

1) School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China
2) College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China
✉Corresponding author, E-mail: cqzhu@tongji.edu.cn

ABSTRACT Submarine landslides are a common marine geological disaster characterized by large volume, fast speed, significant disaster-causing effect, and huge range of impact, which can damage marine engineering structures, resulting in significant economic losses and casualties, and seriously threatening ocean engineering construction and resource development. These are especially dangerous to submarine pipelines and cables, which are both essential for offshore energy transport and international communication. To study the dynamic process of a submarine landslide impacting a submarine pipeline, a physical model testing device was developed, consisting of a transparent cubic tank, an automatic valve to release landslides, adjustable slopes, and a simulated pipe with four pressure sensors to measure the impact force and lifting force during the whole impact process. The device accurately simulates the interaction between the submarine landslide and pipeline, investigating the force characteristics of the pipeline under the impact of the landslide to obtain informative test data. Based on the images and data from the test, the mechanism of submarine landslides sliding and impacting pipelines could be summarized into four stages: erosion initiation, impacting pipeline, passing pipeline, and landslide accretion. In contrast to previous studies that only focused on the impact force on pipelines along the slide, both the impact force and vertical lifting force—which may also lead to pipeline destabilization when pipelines are struck by landslides—are the focus of the model test,

contributing to a more comprehensive understanding of the interaction mechanisms between submarine landslides and pipelines. The test data uncovered the influence of submarine landslide volume, landslide slope, submarine pipeline diameter, and span height on the impact force, which is systematically analyzed by illustrating the time history and peak force of these different factors. It was found that both the peak impact force and lifting force occurred at the beginning of the impact on the pipeline when the landslide front reached the pipeline. The impact force then decreased sharply to near zero, while the lift force also decreased but ultimately remained oscillating around a small residual value. The impact force of the submarine landslide on the pipeline is directly proportional to the slope volume, the square of the landslide velocity, and the diameter of pipeline. The peak impact force on the pipeline is negatively correlated with the span height of the pipeline. Furthermore, the peak value of the vertical lifting force is approximately 1/5 of the peak impact force. Compared with the empirical formula, the phenomenon and analyzed results of the modeling test shows that finer soil particles are more likely to be eroded by water and are prone to turbidity currents. This suggests that the particle gradation of submarine landslides affects the motion state and impact characteristics of submarine landslides to some extent, which is not considered in this test and requires further study. The results of this study not only deepens the understanding of the interaction between submarine landslides and pipelines, but also provides a scientific basis for future submarine pipeline design and safety assessment of submarine pipeline systems.

KEY WORDS Submarine landslide; Undersea pipeline; Impact force; Lifting force; Model test

海底滑坡是海底松散沉积物在内外动力作用下发生的一种滑动迁移的地质现象,主要发生在大陆架坡折带、深水大陆坡及近海三角洲地带,普遍具有方量大、速度快、影响范围广的特征,是一种极具破坏力的海洋地质灾害^[1-3]。海底管线被称作海洋生命线^[4],通常平铺在海床上或浅埋在海床表面以下,直径范围在 0.1 ~ 1.0 m 左右。油气管道选线时通常会绕避不稳定斜坡区^[5],但由于长距离运输的特征,海底管线往往不可避免地穿越一些海底滑坡易发区。因此,海底滑坡的冲击已经被认为是引起海底管线破坏失效的一个重要原因^[6-8]。据统计,全球共有 430 多根海底电缆遭到过海底滑坡的冲击破坏^[9]。例如,1929 年加拿大东纽芬兰的 Grand Banks 海底滑坡切断了 12 条横跨大西洋的通信电缆,造成重要经济损失^[10-12]。Krause 等^[13]报道了 1966 年新大不列颠海沟的海底滑坡将一根海底电话电缆冲出近 280 km 远。2006 年台湾西南海域地震触发的海底滑坡在流动过程中破坏了 14 根海底电缆,严重影响中国与东南亚各国的通讯长达 12 h^[14-15]。2009 年日本静冈县骏河湾海底滑坡造成了海底管道的严重破坏^[16]。由此可见,海底滑坡作为一种破坏力极强的海洋地质灾害,其巨大的冲击力常会造成海底管线系统破坏,致灾效应显著。

目前,针对海底滑坡动力冲击行为特征的模拟预测已经成为海洋工程地质领域的研究热点之一。由于极端复杂的海底环境,海底滑坡通常难以直接观测,因此物理模型试验是目前研究海底滑坡动力冲击行为的主要方法。例如,缪成章^[17]利用自制的水槽模型箱研究了慢速滑动泥流对管道的冲击作用,分析了管道外径、埋深、坡度对冲击力

的影响。Haza 等^[18]基于重力流的概念设计了水槽模型试验,模拟海底滑坡对管道的冲击过程,分析了高岭土含量对滑坡冲击行为的影响。Zakeri 等^[19]根据大量的模型试验数据提出了一种估算管道所受水平向冲击力的经验公式,分析了滑坡体粘性土含量对其动力冲击行为的影响规律。Wang 等^[20]利用自行研发的旋转水槽试验装置模拟了海底滑坡冲击电缆的动力过程,分析了滑坡体方量、运动速度、电缆直径对冲击力的影响。Boylan 等^[21]通过土工离心模型试验研究了海底滑坡对管线的法向冲击作用,并结合流体力学与土力学理论提出了冲击力的计算方程。Sahdi 等^[22]通过离心机模型试验研究了海底滑坡对模型管道的法向作用,提出了一种结合土力学和流体力学的冲击力经验计算方法。Zakeri 等^[23]利用离心模型试验研究了不同不排水剪切强度、冲击速度和管径对于水下土体对管道冲击作用的影响,并提出了一种快速有效地估算冲击力的方法。上述研究基于模型试验分析了海底滑坡在其运动方向上对管线的冲击力,取得了较好的研究结果。近年来,学者们陆续发现,除了滑坡运动方向上的冲击力之外,管线还受到垂直于滑坡运动方向的升力作用,这种向上的升力同样会对管线系统造成损害。例如,Kumar 等^[24]在试验中发现海底管道在受到滑坡冲击时会上升隆起,于是对海底管道受到的向上升力进行了研究,发现滑坡体中粘性土的含量对管道所受升力影响较大。Fan 等^[25]指出海底滑坡对管道的升力可能造成管道隆起、下推、振荡等失稳破坏模式,当悬挂管道靠近海床时,升力的大小可能接近冲击力。他们采用计算流体力学的方法研究了

不同雷诺数下海底滑坡对管道产生的升力作用。Zakeri 等^[19]在悬空管道模型中观测到了明显的升力及其振荡现象, 并指出该升力峰值可达总冲击力的 25% ~ 96%, 在工程中不可忽视。然而, 目前针对海底滑坡对管线动力冲击行为的研究正处于起步阶段, 大多数集中于水平冲击力的测量与预测, 已有工作虽普遍承认升力在引发管道失稳方面的重要性, 但对于升力的变化规律、影响因素等分析仍然较少。

本文设计了一套水下土体运动冲击模拟管线的水槽模型试验装置, 用来模拟海底水下环境中滑坡体对海底管线的动力冲击行为, 通过同步测量管线所受冲击力与升力, 系统分析其受滑坡体方量、管线悬跨高度、管径等因素对冲击力和升力影响规律, 研究结果可为海底管线系统的设计和安全评估提供科学依据。

1 试验设置

1.1 试验装置

为了模拟海底滑坡所处的海底水下环境, 本

文设计了如图 1 所示的长方体水槽模型箱, 其尺寸为 2.5 m×0.6 m×1.4 m。模型箱前后两侧为透明的有机玻璃, 便于观察和记录水下环境中滑坡体的运动状态。水槽内设置了 A、B 两个斜坡, A 的坡度为 60°, 作为滑坡物源区, B 设计为 30°、45°和 60°三个可调节的坡度, 作为滑坡运动加速区。物源区和运动加速区中间设有电动闸门, 该闸门系统由闸门、钢丝绳、滑轮和重物组成, 闸门通过钢丝绳绕过两组定滑轮与重物相连。试验开始时, 解开锁定的自绞轮盘卡扣后, 重物的自重使闸门迅速向下打开, 从而释放滑坡体。在本试验中, 闸门的运动位移为 0.5 m, 用时约 0.3 s, 平均速度为 1.67 m·s⁻¹, 相比其他水下滑坡试验^[26-27], 本试验所涉及的海底滑坡模型试验的打开方式速度快, 稳定性高, 基本满足海底滑坡试验的瞬时释放条件。斜坡 B 坡脚附近设置有一根模拟管线, 管线两端装有两个压力传感器, 分别测量滑坡体运动过程中对管线的冲击力和升力, 其中冲击力传感器安装在沿滑坡体运动方向, 升力传感器安装在垂直滑坡体运动方向。

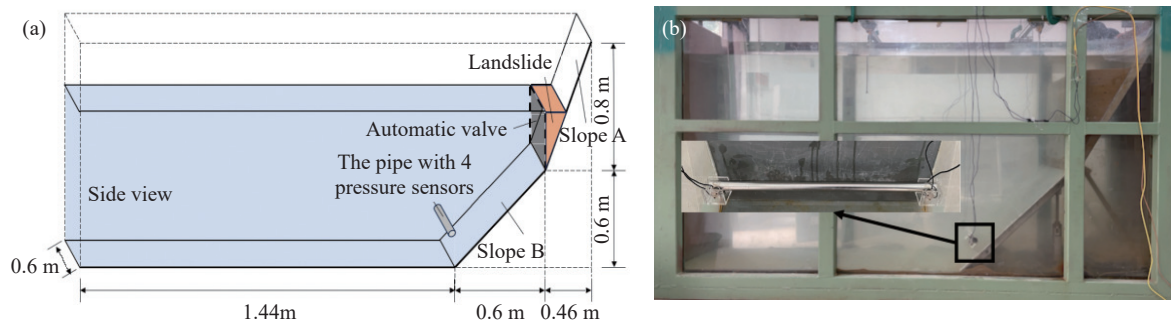


图 1 海底滑坡模型试验装置。(a) 示意图; (b) 实物图

Fig.1 Model test device of submarine landslide: (a) Schematic diagram; (b) picture of the device

1.2 相似准则

鉴于物理模型试验中难以同时满足所有物理量的相似准则, 本文在试验设计中采用控制主导物理量、次要物理量近似处理的原则构建模型。滑坡体采用几何相似比约为 1 : 350 进行缩尺, 主要用于确保滑坡体在模型水槽中具有完整的运动路径和合适的速度演化过程; 而考虑到管道模型需安装力传感器、保持结构完整性及具备一定刚度, 管线部分则采用 1 : 10 缩尺。尽管滑坡体与管线缩尺不完全一致, 该处理方式的合理性和有效性已在相关研究中得到证实。如 Zakeri 等^[19]在其滑坡冲击管线试验中分别采用约 1 : 200 ~ 1 : 400 的滑坡体相似比与 1 : 10 和管道相似比, 仍能有效反

映其相互作用过程中的响应趋势。

为体现滑坡体滑移过程中惯性与重力作用的动力相似性, 本文试验中参考了 Ji 等^[28]采用的动力相似设计思路, 认为滑坡体滑移过程以重力主导, 适用于 Froude 相似准则构建模型体系。Froude 数定义为:

$$Fr = \frac{v_1}{\sqrt{gL}} S \quad (1)$$

其中: v_1 为滑坡体前缘滑动速度, g 为重力加速度, L 为滑移路径特征长度。以本试验中典型工况估算, 滑坡体滑移速度约为 0.3 ~ 0.8 m·s⁻¹, 路径长度约为 1.2 m, 计算得 Fr 数值范围为 0.12 ~ 0.32, 处于惯性-重力平衡主导区间。尽管试验未构建严

格的“原型-模型”比例体系, 但该 Froude 数区间与已有相关研究保持一致, 可在揭示滑坡冲击机制及其对管线受力响应方面具有代表性与合理性.

1.3 试验材料

在海底水动力环境下, 沉积物主要以细颗粒土体为主. 因此, 目前的海底滑坡相关试验材料主要有黏土、粉砂、细砂等^[29-31]. 本文试验选取细砂作为海底滑坡的试验材料, 其物理力学性质如表 1 所示.

表 1 试验材料的物理力学性质

Table 1 Physical and mechanical properties of the test material				
Natural weight, $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	Mean grain size, d_{50}/mm	Effective grain size, d_{10}/mm	Cohesion, c/kPa	Internal friction angle, $\varphi/(^{\circ})$
20.5	0.267	0.109	0.0	22.0

1.4 试验工况

为研究滑坡体方量、坡度、管线直径等参数对海底滑坡冲击力的影响规律, 本文试验设计中设置滑坡体体积、坡度、管线直径与悬跨高度为四个主要变量, 各变量取值依据如下: 滑坡体方量与坡度的设置参考了文献中滑坡冲击模型试验常见的取值范围^[19, 28], 同时结合海底滑坡自然地形特

征, 并综合考虑试验滑坡体滑移稳定性、冲击速度调控及试验装置的空间尺寸限制, 最终设置坡度为 30° 、 45° 、 60° , 滑坡体方量设置为 0.030 、 0.0386 、 0.0477 m^3 ; 根据工程常见输送管道口径范围, 并结合试验传感器布设要求, 模拟管线的直径 D 分别设为 20 、 30 、 50 mm ; 参考现有文献中对滑坡冲击管道受力影响因素的总结^[8], 结合实际海底管道悬跨状态变化, 管线的悬跨高度 h 设置为 $0.5D$ 、 $1.5D$ 、 $3.0D$. 每个试验工况重复三次, 以保证试验结果的准确性并避免试验的偶然性.

2 试验结果

闸门落下后, 滑坡体在重力作用下沿斜坡 B 向下运动. 整个运动过程大约持续 4 s , 其运动冲击情况如图 2 所示. 当 $t=0.4 \text{ s}$ 时, 由于滑坡体与周围水体的相对运动, 坡体表面开始被侵蚀, 逐渐形成浊流; 当 $t=1.2 \text{ s}$ 时, 滑坡体前缘运动至斜坡 B 坡脚, 开始冲击模拟管线; 当 $t=2.0 \text{ s}$ 时, 滑坡体主体通过模拟管线, 继续沿水槽底部向前运动; 当 $t=4.0 \text{ s}$ 时, 大部分滑坡体堆积在斜坡 B 坡脚附近, 少量细颗粒土体在滑坡体前缘形成浊流.

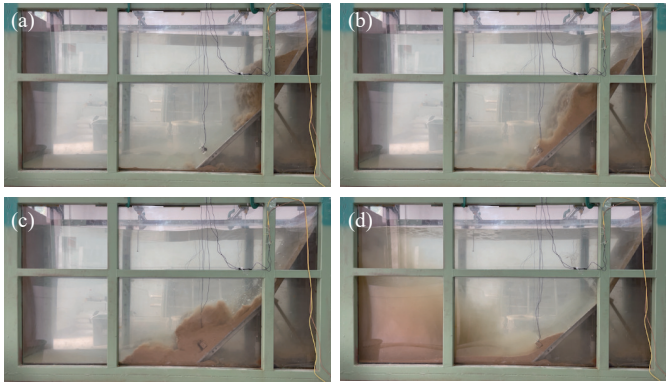


图 2 不同时刻滑坡体构型图. (a) $t=0.4 \text{ s}$; (b) $t=1.2 \text{ s}$; (c) $t=2.0 \text{ s}$; (d) $t=4.0 \text{ s}$

Fig.2 Landslide mass configuration at different times: (a) $t=0.4 \text{ s}$; (b) $t=1.2 \text{ s}$; (c) $t=2.0 \text{ s}$; (d) $t=4.0 \text{ s}$

2.1 滑坡方量对管道所受冲击作用的影响

滑坡体在运动过程中冲击管线, 通过管线两端的压力传感器测得滑坡体运动过程中管线所受的冲击力和升力, 如图 3 所示. 在试验开始后 1.2 s 左右, 滑坡体前缘开始冲击管线, 测得冲击力迅速上升, 滑坡体方量 V 对其冲击管道的时间影响较小, 如图 3(a). 当 $t=2.0 \text{ s}$ 左右, 滑坡体主体通过模拟管线, 冲击力达到峰值. 滑坡体对管线的峰值冲击力随其方量的增长而增长. 峰值过后, 冲击力迅速衰减并趋近于 0. 图 3(b) 为不同方量的滑坡体对

管线的冲击力峰值. 由于滑坡体的动能与其质量成正比, 因此方量越大的滑坡体对管线的冲击力越大, 两者基本呈正相关.

滑坡体在水下运动过程中, 由于受到周围水体的阻力作用, 坡体表面的土体容易被水体侵蚀形成浊流, 并具有向上运动的趋势, 如图 2(b) 和 (c) 所示. 因此, 管线除了受到滑坡体运动方向上的冲击力外, 还受到垂直于运动方向上的力. 本文将管线受到的垂直于滑坡运动方向的作用力定义为“升力”, 试验中通过管线上方的两个压力传感器

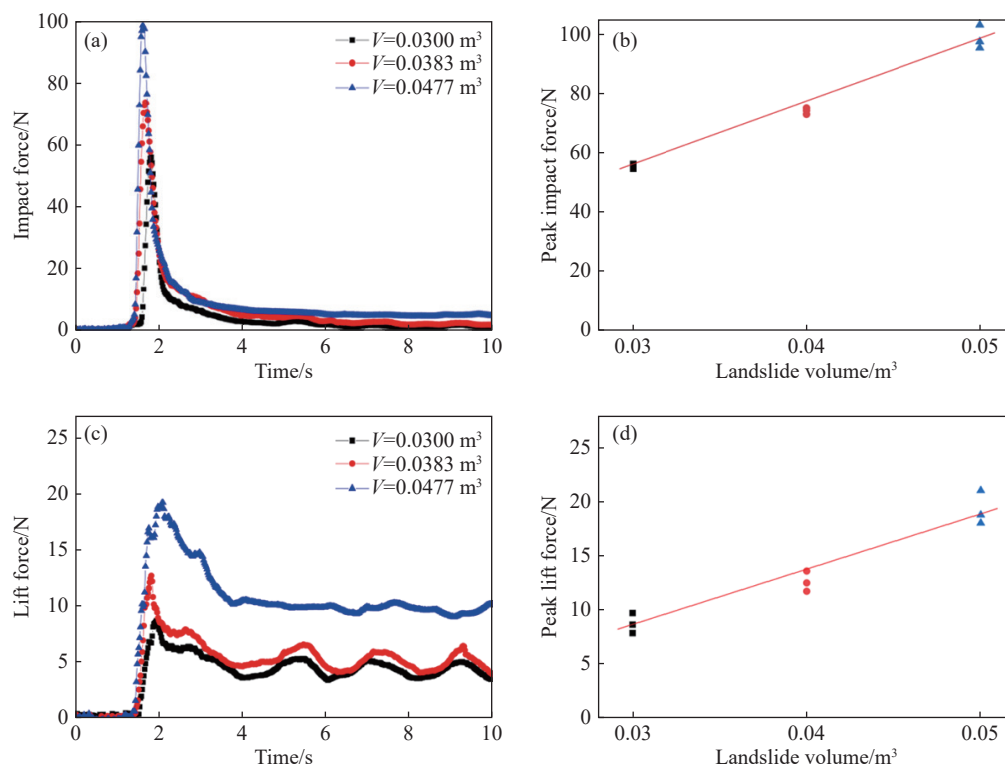


图3 不同方量滑坡体对管线的冲击力和升力。(a) 冲击力时程曲线; (b) 冲击力峰值与滑坡体体积的关系; (c) 升力时程曲线; (d) 升力峰值与滑坡体体积的关系

Fig.3 Impact force and lift force on the pipeline exerted by the submarine landslide with different volumes: (a) time history of impact force; (b) relationship between peak impact force and landslide volume; (c) time history of lift force; (d) relationship between peak lift force and landslide volume

测量, 结果如图3(c)所示. 与冲击力相比, 升力的值相对较小, 约为冲击力的 1/5. 与冲击力相同的是, 升力随着滑坡体的运动也是先增加而后减少. 然而由于管线具有一定的悬跨高度, 滑坡体通过后, 少量残留颗粒堆积于管道下方, 形成向上的支撑. 因此, 堆积在管道周围的滑坡体颗粒使管道所受升力继续保持在一个较小的残余值, 而不是减小为 0. 图3(d)为不同方量的滑坡体对管线的峰值升力. 随着滑坡体方量的增大, 升力的峰值也随之增大, 基本呈线性相关. 因此, 滑坡体的方量对其冲击力和升力均具有显著影响.

2.2 管道悬跨高度对管道所受冲击作用的影响

铺设在海底的管线在海底洋流的作用下, 其周围的土体会被冲刷侵蚀, 导致管线出现悬跨现象. 为了探究管线的悬跨高度对其受到海底滑坡冲击力的影响, 本试验设计了 3 种不同的管线悬跨高度, 分别为 $0.5D$, $1.5D$ 和 $3.0D$, 其中 D 为管线直径. 图4为体积为 0.0383 m^3 的滑坡体冲击不同悬跨高度管线时测得的冲击力和升力. 总体而言, 不同悬跨高度的管线, 其承受的冲击力在演化过程上基本一致: 当滑坡体冲击管线时, 冲击力会迅

速攀升至峰值, 随后快速回落, 最终趋于零. 与之相比, 升力则明显小于冲击力, 在达到峰值后逐渐减小, 且过程中会出现一定幅度的波动. 值得注意的是, 悬跨高度的差异对管线所受的冲击力和升力均存在影响, 二者的峰值均随悬跨高度的增大而有所减小. 图4(b)和(d)显示了管线悬跨高度对其所受冲击力和升力的影响规律. 随着悬跨高度的增大, 滑坡体流经管线时, 管线上部的覆土厚度和压力变小, 从而导致其所受冲击力明显减小. 对于升力, 悬跨高度为 $1.5D$ 和 $3.0D$ 的管线所受峰值升力较为接近, 说明在悬跨高度达到一定值时, 其升力的峰值变化较小.

2.3 管道直径对管道所受冲击作用的影响

为研究管线直径对其所受冲击力和升力的影响, 本试验选取了三种不同的管线直径, 分别为 20、30 和 50 mm, 试验中保持不同管线的圆心位置相同. 试验测得的冲击力和升力如图5所示. 随着管线直径的增大, 管线受滑坡体的冲击面积也相应增大, 因此冲击力和升力的峰值呈现出与管线直径正相关的变化趋势, 如图5(b)和(d). 同时, 直径越大的管线对于滑坡体的阻碍作用也越大, 滑

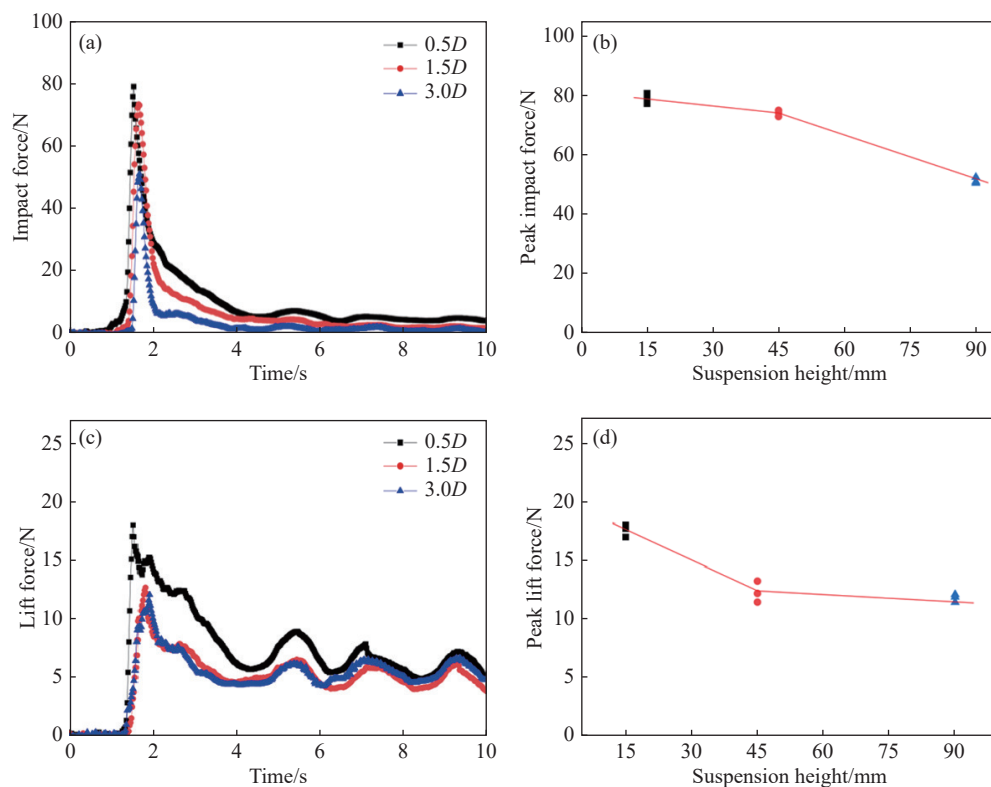


图4 不同悬跨高度管线受到的冲击力和升力. (a) 冲击力时程曲线; (b) 冲击力峰值与悬跨高度的关系; (c) 升力时程曲线; (d) 升力峰值与悬跨高度的关系

Fig.4 Impact force and lift force of pipeline with different suspension heights: (a) time history of the impact force; (b) relationship between the peak impact force and suspension height; (c) time history of lift force; (d) relationship between peak lift force and suspension height

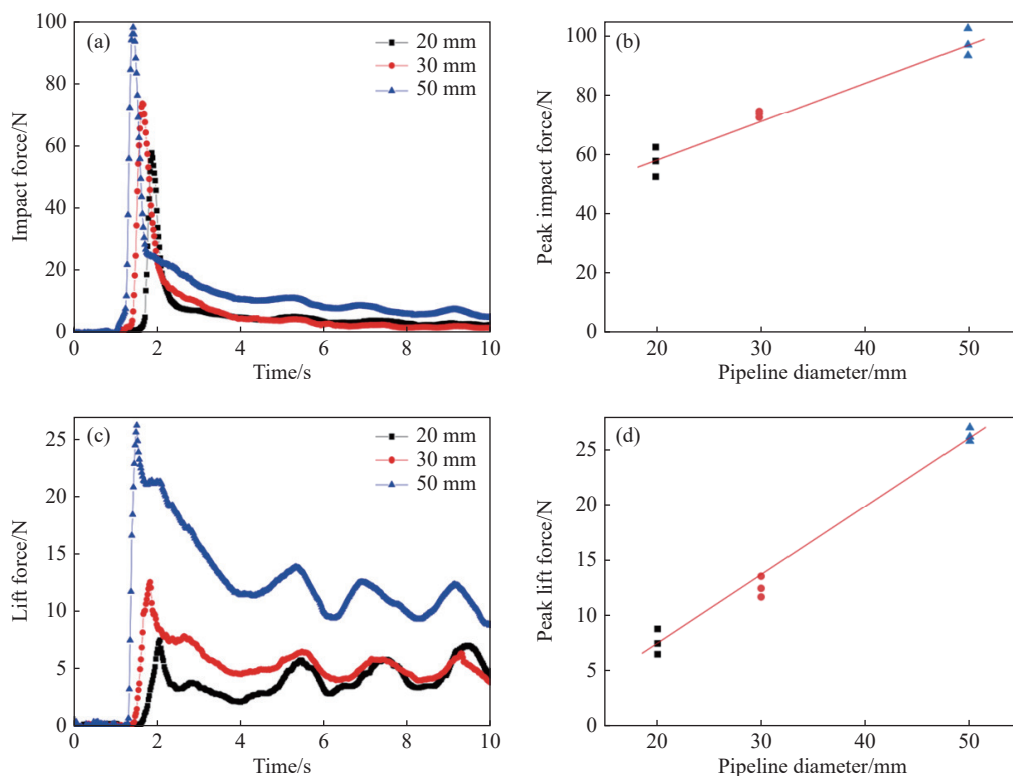


图5 不同直径的管线受到的冲击力和升力. (a) 冲击力时程曲线; (b) 冲击力峰值与管线直径的关系; (c) 升力时程曲线; (d) 升力峰值与管线直径的关系

Fig.5 Impact force and lift force of pipeline with different diameters: (a) time history of the impact force; (b) relationship between peak impact force and pipeline diameter; (c) time history of lift force; (d) relationship between peak lift force and pipeline diameter

坡体运动结束后堆积在管道附近的滑坡体颗粒也越多, 因此在滑坡体运动后期, 较大直径管线的升力在一定范围内波动的数值也越大。

2.4 坡度对管道所受冲击作用的影响

海底地形地貌复杂多样, 包括大陆架、大陆坡、海盆、海岭和海沟等几种类型。海底滑坡在沿着不同的海底地形运动时往往呈现出不同的运动特征和动力特性。本文设计了 3 种不同的地形坡

度(30° , 45° , 60°)来研究其对海底滑坡冲击力的影响。图 6(a)和(b)为试验测得的不同坡度上管线受到的冲击力。由于斜面坡度的变化, 滑坡体的运动速度发生改变, 坡度越陡, 滑坡体速度越快, 越早冲击到模拟管线。冲击力迅速增加的起始时刻, 以及峰值冲击力出现的时刻也随着坡度的在增大而有显著的变早。随着坡度的增加, 管道受到的峰值冲击力也随之增加。

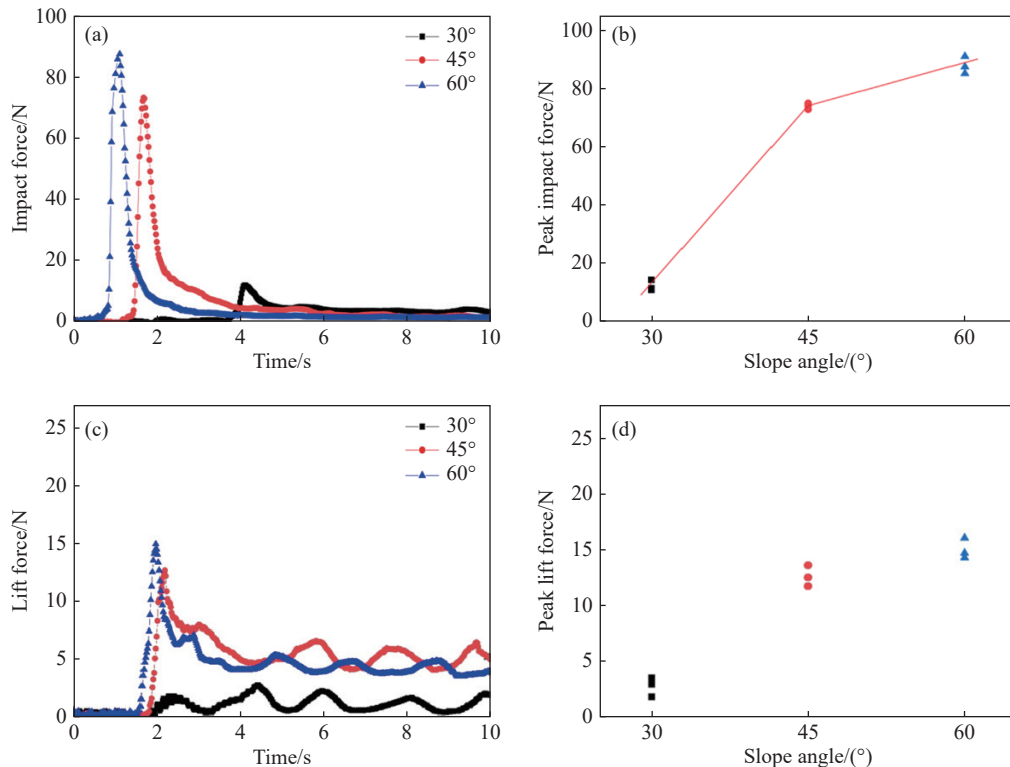


图 6 不同坡度上的管线冲击力. (a) 冲击力时程曲线; (b) 冲击力峰值与坡度的关系; (c) 升力时程曲线; (d) 升力峰值与坡度的关系

Fig.6 Impact force of the pipeline on different slopes: (a) time history of the impact force; (b) relationship between peak impact force and slope angle; (c) time history of lift force; (d) relationship between peak lift force and slope angle

图 6(c)为不同坡度下管道升力的时程曲线, 随着坡度的增大, 尽管升力响应较冲击力整体数值较小, 但其峰值随着坡度增加仍呈现出一定增长趋势。坡度为 45° 和 60° 时的时程曲线与前几种工况的特征相似, 然而 30° 时的时程曲线有较大变化, 由于坡度较缓, 滑坡体的运动速度较慢, 滑坡体的运动不再是整体一起滑动, 而是分离成几部分运动, 因此对管道的拖曳力作用较小, 导致 30° 坡度时管线受到的升力峰值并不明显, 表现为一定频率的上下振荡。

图 6(d)为升力峰值与坡度的对应关系, 结果显示在坡度由 30° 增至 60° 时, 升力峰值有明显提升, 表明地形坡度在一定程度上强化了滑坡体对管线的垂直方向作用力。这可能与坡度增大导致

滑坡体速度增加, 入水冲角变化相关, 进而影响其对管线上方水体的扰动。

3 讨论

在海底滑坡运动过程中, 滑坡体与周围水体发生强烈的流固耦合作用, 形成海底浊流, 如图 2 所示。现有研究表明, 海底滑坡形成的浊流具有明显的非牛顿流体特征^[20, 24, 30]。为了研究非牛顿流体的动力特征, Pazwash 和 Robertson^[32] 通过试验测试了非牛顿流体的冲击力并分析了其影响因素, 结果表明非牛顿流体的冲击力与其流动速度密切相关。在本文的试验中, 随着斜面 B 的坡度变陡, 滑坡体的运动速度变大, 其对管线的冲击力也相应增大, 如图 6(b)所示。因此, 滑坡体的运动速度

对其冲击力的影响较大,该结论也与 Wang 等^[20]的旋转水槽试验结果吻合. Zakeri 等^[19]在悬空管道模型中指出升力峰值可达冲击力的 25% ~ 96%, 本文实测升力值约为冲击力的 1/5, 亦处于该经验范围内.

为了定量分析海洋浊流对管线的冲击力和升力与其流动速度的关系, Randolph 和 White^[33]从岩土工程的视角提出了海底滑坡对管线的冲击力预测公式:

$$F = C_d \left(\frac{1}{2} \rho v_2^2 \right) D \quad (2)$$

式中: F 为冲击力, C_d 为与雷诺数相关的系数, ρ 是密度, v_2 是浊流速度, D 为管线直径. 该预测公式表明, 浊流对管线的冲击力与其流速的平方和管线的直径成正比. 管线直径决定了其受到冲击的受力面积, 受力面积越大, 受到的总的冲击力越大, 本文通过实测数据验证了这一规律, 如图 5(b) 和 (d) 所示. 流速方面, 通过试验记录的海底滑坡整个运动过程, 可以计算滑坡体冲击管线时的前缘速度, 从而得出管线所受滑坡体的峰值冲击力与滑坡体流速平方的关系如图 7 所示. 随着滑坡体流速的增大, 其峰值冲击力随之增加, 与流速的平方大致成正比, 该结果也与经验公式吻合.

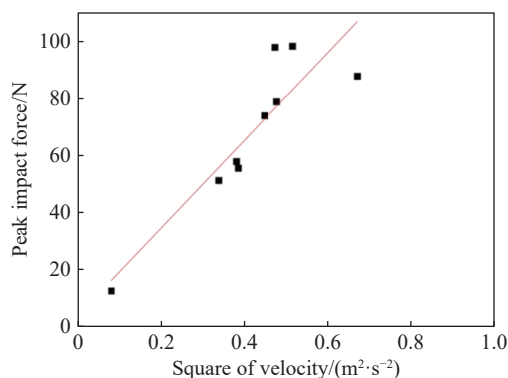


图 7 滑坡体冲击力与速度关系

Fig.7 Relationship between the impact force and landslide velocity

公式(1)为海洋浊流对管线的冲击力, 然而在实际的海底滑坡运动过程中, 并非所有的滑坡体都转化为了浊流, 更多的是处于浊流和块体滑移并存的混合状态, 因此公式(1)中的浊流密度 ρ 往往难以直接测量或计算. 另一方面, 在滑坡体冲击管线的过程中, 块体的动能与其质量线性相关, 在本文的模型试验中也观测到了冲击力与滑坡体体积的正相关性, 如图 3(b), 然而该结果无法在公式(1)中得到体现.

Kumar 等^[24]在研究海浪与滑坡联合作用下海

底管线升力行为时发现, 当滑坡体为高含水率的粘土质材料时, 产生的升力峰值约为总冲击力的 15% ~ 20%, 与本文试验中测得升力峰值约为冲击力的 1/5 高度吻合, 表明不同试验条件下升力比例具有一定规律性. 此外, Zakeri 等^[19]在离心模型试验中观测到升力峰值约可达冲击力的 25% ~ 96%, 略高于本文所得数值. 该差异可能源于其采用的是粘性较强的泥流材料与悬空管线布设条件, 增强了滑坡体与管道之间的耦合强度.

本文的模型试验现象显示, 在海底滑坡运动过程中, 较细的土体颗粒更容易被水体侵蚀, 形成浊流, 说明滑坡体的颗粒级配在一定程度上影响着海底滑坡的运动状态及其冲击特征. 事实上, 实际海底滑坡常由不同粒径组合的粉砂、粘土和细砂构成, 具有更强的非牛顿特性与粘聚性. 然而本文的试验尚未考虑颗粒级配的影响, 因此上述结果在实际工程应用中仍具有一定的局限性.

本研究基于物理模型试验, 系统探讨了滑坡体方量、坡度、管线直径与悬跨高度等因素对冲击力与升力的影响规律, 相关结论可为海底管线的抗滑坡设计提供如下参考建议:

(1) 减小管线悬跨高度有助于降低冲击力与升力的峰值, 建议在滑坡高发区优先采用小悬跨布设, 或设置支撑装置以提高管线稳定性;

(2) 大直径管道在滑坡冲击下受力显著增强, 升力波动范围更大. 对于管径较大的区域, 应考虑采用局部埋设、局部加强或抗浮设计以降低失稳风险;

(3) 滑坡体方量与冲击力呈正相关, 坡度越陡, 冲击越剧烈, 建议在前期选线阶段结合地形地貌开展滑坡风险分区评估, 合理避开高风险区段或采用差异化防护措施;

(4) 结合本研究的试验数据特征, 可为实际工程建立简化滑坡冲击力估算模型, 为设计提供量化基础.

4 结论

本文基于自主设计的海底滑坡水槽模型试验装置, 探究了海底滑坡冲击管线的动力行为, 分析了滑坡体方量、坡度、管线直径、悬跨高度这四个变量对管线所受滑坡冲击力和升力的影响规律, 得到如下结论:

(1) 海底滑坡沿着斜坡向下运动过程中冲击模拟管线, 沿着滑坡运动方向的冲击力峰值与滑坡体体积和管线直径呈正相关. 管线的悬跨高度

越高, 滑坡体经过时管线上覆土压力越小, 管线所受冲击力峰值越小。

(2) 滑坡体在水下运动时, 受周围水体影响, 坡体表面土体不断被侵蚀, 形成浊流。在浊流抬升作用下, 管线受到与滑坡体运动方向垂直的升力。相同工况下, 管线所受升力的峰值大约为冲击力的 1/5。

(3) 在较陡的斜坡上, 滑坡体的运动速度较快, 其冲击力较大。基于试验数据拟合可得, 滑坡体对管线的冲击力峰值与其运动速度的平方成正比。

(4) 本研究不仅揭示了滑坡冲击对海底管线系统的受力规律, 也为管线布设方案、结构形式优化与抗滑坡设计提供了可量化的试验参考, 具有一定的工程推广价值。

参 考 文 献

- [1] Zhu Z P, Wang D, Zhang W C. Catastrophic submarine landslides with non-shallow shear band propagation. *Comput Geotech*, 2023, 163: 105751
- [2] Nian T K, Shen Y Q, Zheng D F, et al. Research advances on the chain disasters of submarine landslides. *J Eng Geol*, 2021, 29(6): 1657
(年廷凯, 沈月强, 郑德凤, 等. 海底滑坡链式灾害研究进展. 工程地质学报, 2021, 29(6): 1657)
- [3] Dai Z L, Lan B S, Li X F. Simulation of the evolution process of submarine landslides based on sph approach. *J Eng Geol*, 2025, 33(1): 213
(戴自立, 蓝柏森, 李小锋. 基于 SPH 方法的海底滑坡运动演化过程模拟. 工程地质学报, 2025, 33(1): 213)
- [4] Xing H Y, Wang S, Yi M, et al. Metal magnetic memory quantitative inversion model based on IPSO-GRU algorithm for detecting submarine pipeline defect. *Chin J Eng*, 2022, 44(5): 911
(邢海燕, 王松弘泽, 弋鸣, 等. 基于 IPSO-GRU 深度学习算法的海底管道缺陷尺寸磁记忆定量反演模型. 工程科学学报, 2022, 44(5): 911)
- [5] Zhang M Y, Wang S X, Sun Z Z, et al. Comprehensive evaluation of landslide risks of oil and gas pipelines based on cloud theory. *Chin J Eng*, 2018, 40(4): 427
(张满银, 王生新, 孙志忠, 等. 基于云理论的油气管道滑坡危险性综合评价. 工程科学学报, 2018, 40(4): 427)
- [6] Wang L Z, Miao C Z. Pressure on submarine pipelines under slowly sliding mud flows. *Chin J Geotech Eng*, 2008, 30(7): 982
(王立忠, 缪成章. 慢速滑动泥流对海底管道的作用力研究. 岩土工程学报, 2008, 30(7): 982)
- [7] Fan N, Jiang J X, Nian T K, et al. Impact action of submarine slides on pipelines: A review of the state-of-the-art since 2008. *Ocean Eng*, 2023, 286: 115532
- [8] Guo X S, Fan N, Zheng D F, et al. Predicting impact forces on pipelines from deep-sea fluidized slides: A comprehensive review of key factors. *Int J Min Sci Technol*, 2024, 34(2): 211
- [9] Canals M, Lastras G, Urgeles R, et al. Slope failure dynamics and impacts from seafloor and shallow sub-seafloor geophysical data: Case studies from the COSTA project. *Mar Geol*, 2004, 213(1-4): 9
- [10] Hampton M A, Lee H J, Locat J. Submarine landslides. *Rev Geophys*, 1996, 34(1): 33
- [11] Schnyder J S D, Eberli G P, Kirby J T, et al. Tsunamis caused by submarine slope failures along western Great Bahama Bank. *Sci Rep*, 2016, 6: 35925
- [12] Schulten I, Mosher D C, Piper D J W, et al. A massive slump on the St. Pierre slope, a new perspective on the 1929 grand banks submarine landslide. *J Geophys Res Solid Earth*, 2019, 124(8): 7538
- [13] Krause D C, White W C, Piper D J W, et al. Turbidity currents and cable breaks in the western new Britain trench. *Geol Soc America Bull*, 1970, 81(7): 2153
- [14] Hsu S K, Kuo J, Lo C L, et al. Turbidity currents, submarine landslides and the 2006 Pingtung earthquake off SW Taiwan. *Terr Atmos Ocean Sci*, 2008, 19(6): 767
- [15] Hu G, Li L L, Satake K, et al. Source characteristics of the 2006 Pingtung earthquake doublet off southern Taiwan and the possible contribution of submarine landslides to the Tsunami. *Earth Planet Sci Lett*, 2024, 643: 118921
- [16] Matsumoto H, Baba T, Kashiwase K, et al. Damage of deep ocean water pipes due to the Suruga Bay earthquake on 11 August, 2009. *J Jpn Soc Civ Eng Ser B2 (Coast Eng)*, 2010, 66(1): 1341
- [17] Miao C Z. *Submarine Slide and Its Influence on the Submarine Pipeline* [Dissertation]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007
(缪成章. 海底滑坡及其对海底管线的影响[学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2007)
- [18] Haza Z F, Harahap I S H, Dakssa L M. Experimental studies of the flow-front and drag forces exerted by subaqueous mudflow on inclined base. *Nat Hazards*, 2013, 68(2): 587
- [19] Zakeri A, Høeg K, Nadim F. Submarine debris flow impact on pipelines: Part I: Experimental investigation. *Coast Eng*, 2008, 55(12): 1209
- [20] Wang F W, Dai Z L, Zhang S. Experimental study on the motion behavior and mechanism of submarine landslides. *Bull Eng Geol Environ*, 2018, 77(3): 1117
- [21] Boylan N, Gaudin C, White D J, et al. Modelling of submarine slides in the geotechnical centrifuge // *Proceedings of the 7th international conference Physical Modelling in Geotechnics*, Zurich, 2010: 1095
- [22] Sahdi F, Gaudin C, White D J, et al. Centrifuge modelling of active slide-pipeline loading in soft clay. *Géotechnique*, 2014, 64(1): 16
- [23] Zakeri A, Hawlader B, Chi K. Drag forces caused by submarine glide block or out-runner block impact on suspended (free-span) pipelines. *Ocean Eng*, 2012, 47: 50

- [24] Vijaya kumar A, Neelamani S, Narasimha Rao S. Wave pressures and uplift forces on and scour around submarine pipeline in clayey soil. *Ocean Eng*, 2003, 30(2): 271
- [25] Fan N, Sahdi F, Zhang W C, et al. Effect of pipeline-seabed gaps on the vertical forces of a pipeline induced by submarine slide impact. *Ocean Eng*, 2021, 221: 108506
- [26] Lu T Q, Lu H C, Liu H. Experimental investigation of tsunami waves generated by submerged granular collapse on a slope. *Chin Q Mech*, 2022, 43(1): 14
(路天庆, 陆昊成, 刘桦. 水下散体颗粒滑坡产生海啸波的实验研究. *力学季刊*, 2022, 43(1): 14)
- [27] Sun Y H, Zhang W T, Wang X L, et al. Numerical study on immersed granular collapse in viscous regime by particle-scale simulation. *Phys Fluids*, 2020, 32(7): 073313
- [28] Ji H, Liu W K, Yang K, et al. Physical model experiment on the influence of water depth on the underwater pipeline surface impacted by landslide surge. *Sci Rep*, 2021, 11(1): 19301
- [29] Sorlie E R, Hartnik L O, Tran Q A, et al. Physical model tests of clay-rich submarine landslides and resulting impact forces on offshore foundations. *Ocean Eng*, 2023, 273: 113966
- [30] Shan Z G, Gao S, Sun M J, et al. Physical model tests and numerical simulations to determine mechanism of offshore submarine landslides under effect of sea waves. *Rock Soil Mech*, 2022, 43: 541
- [31] Takahashi H, Fujii N, Sassa S. Centrifuge model tests of earthquake-induced submarine landslide. *Int J Phys Model Geotech*, 2020, 20(4): 254
- [32] Pazwash H, Robertson J M. Forces on bodies in Bingham fluids. *J Hydraul Res*, 1975, 13(1): 35
- [33] Randolph M F, White D J. Interaction forces between pipelines and submarine slides—a geotechnical viewpoint. *Ocean Eng*, 2012, 48: 32