

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.06.014

安装螺旋列板的水下管道水动力特性模型试验研究

胡克¹,王广生²,陈松贵¹,鱼童²

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所港口水工建筑技术国家工程研究中心,天津 300456;
2. 中国港湾工程有限责任公司,北京 100027)

摘要:为了揭示自由液面变化对安装螺旋列板的水下管道水动力载荷的影响,并检验螺旋列板在部分脱落状态下的涡激振动抑制效果,通过安装螺旋列板的水下管道水动力模型试验,研究了不同雷诺数下近自由液面区域(浸没深度与管道直径比值为1~4)和近假底区域(离底间隙与管道直径比值为1~4)阻力系数变化,分析了螺旋列板在30%长度破损情况下的涡激振动抑制效果。试验结果表明:当水下管道从4倍直径浸没深度逐渐接近自由液面时,其阻力系数逐渐增大;当水下管道从4倍直径离底间隙逐渐靠近假底时,其阻力系数逐渐减小;随着雷诺数增大,30%破损的螺旋列板对涡激振动的抑制效率变化与螺旋列板全覆盖方案基本一致,均呈下降趋势,但仍然具有较好的抑制效果。

关键词:水下管道;螺旋列板;涡激振动;水动力特性;阻力系数

中图分类号:P751 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2025)06-0119-05

Model test study on hydrodynamic characteristics of submarine pipelines with spiral strakes

HU Ke¹, WANG Guangsheng², CHEN Songgui¹, YU Tong²

(1. National Engineering Research Center for Port Hydraulic Construction Technology, Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering of Ministry of Transport, Tianjin 300456, China;
2. China Harbor Engineering Company Ltd., Beijing 100027, China)

Abstract: To reveal the influence of free surface variation on the hydrodynamic loads of submarine pipelines with spiral strakes installed and verify the vortex-induced vibration (VIV) suppression effect of spiral strakes under partial detachment, hydrodynamic model tests were conducted on submarine pipelines equipped with spiral strakes. The tests investigated the changes in drag coefficient in the near-free-surface region (with a ratio of immersion depth to pipeline diameter is 1-4) and the near-false bottom region (with a ratio of bottom clearance to pipeline diameter is 1-4) under different Reynolds numbers. Additionally, the VIV suppression effect of spiral strakes was analyzed when 30% of their length was damaged. The test results show that when the submarine pipeline is immersed from a depth of four times the diameter to approaching the free surface, its drag coefficient gradually increases; when the submarine pipeline approaches the false bottom from an initial distance of four times the diameter, its drag coefficient decreases. With the increase in the Reynolds number, the suppression efficiency of VIV by the 30% damaged spiral strake exhibits a trend similar to that of the full-coverage scheme, both showing a decrease. Nevertheless, it still maintains a considerable suppression effect.

Key words: submarine pipeline; spiral strake; vortex-induced vibration; hydrodynamic characteristic; drag coefficient

海底管道输送是海洋石油运输的重要方式之一。当水流经过水下管道时,会产生尾涡。如果释放的漩涡频率等于管道自身的固有频率,就会出现“频率锁定”现象,并产生较大振幅的振动,进一步可能引起海底管道疲劳破坏。水下管道的涡激振动问题是一个海流、管道以及海床之间相互作用的多场耦合问题^[1-2],需

基金项目: 国家自然科学基金项目(52039005,52001149);中央级科研院所基本科研业务专项资金项目(TKS20230102)

作者简介: 胡克(1986—),男,助理研究员,博士,主要从事船舶与海洋工程水动力研究。E-mail:huke_tj@126.com

通信作者: 陈松贵(1987—),男,副研究员,博士,主要从事港口与近岸工程水动力研究。E-mail:chensg05@163.com

引用本文: 胡克,王广生,陈松贵,等. 安装螺旋列板的水下管道水动力特性模型试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(6): 119-123.

HU Ke, WANG Guangsheng, CHEN Songgui, et al. Model test study on hydrodynamic characteristics of submarine pipelines with spiral strakes[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(6): 119-123.

要进行深入研究。

当前对于光滑圆柱涡激振动现象的研究已经取得了很多成果,工程上抑制涡激振动的主要方法是在圆柱表面安装螺旋列板,其原理在于加装螺旋列板能够显著改善圆柱尾流形式,从而达到抑制振动的目的^[3]。关于螺旋列板对涡激振动的影响研究,王增波等^[4]针对螺旋列板覆盖的海洋立管,选取不同深度处的横截面进行绕流模拟,分析了漩涡脱落形态和阻力系数,验证了螺旋列板对涡激振动的抑制作用;吴浩等^[5]对各种被动抑振措施的研究成果进行了总结,指出螺旋列板装置具有较好的抑制性能,能够有效减小涡激振动响应振幅;沙勇等^[6]分析了螺旋列板的螺距、高度以及覆盖率对立管涡激振动的影响规律;杨加栋等^[7]系统介绍了螺旋列板的设计、制作和安装方法及其影响因素;鞠少栋等^[8]运用计算流体动力学方法,通过数值模拟研究了螺旋列板的螺高、螺距和螺旋数等参数对抑振效果的影响规律,进而优化螺旋列板的设计参数。

目前关于螺旋列板的涡激振动抑制机理已有了系统研究。例如:高云等^[9-11]通过试验研究了柔性立管在安装螺旋列板前后的涡激振动响应特性,分析了螺旋列板抑制装置的螺距变化对立管应变、位移响应等参数的影响;Bearman 等^[12]试验研究了螺旋列板和球状突起的抑振效果,发现对于端部固定的圆柱,螺旋列板和球状突起均能抑制涡激振动,尾流区不会出现规律的漩涡脱落;李琳^[13]在实验室水池对横向布置的管道进行拖曳试验,研究了螺旋列板对涡激振动的抑制效果;宋吉宁等^[14]研究了 3 根附属控制杆对涡激振动的抑制作用,结果表明该措施能够明显降低立管的横向振幅,但是基本不改变立管的振动频率。

水下管道周围可能存在自由液面变化以及冲刷引发的“悬空”现象,这些现象会导致水下管道的水动力系数变化,进而影响管道的受力情况。Miyata 等^[15]对自由液面处的圆柱进行阻力系数的试验研究(雷诺数 $Re=5\times10^4$),发现特罗哈尔数在 0.35 处出现显著阶跃,同时阻力值也明显增大;但是该试验研究中没有针对安装螺旋列板后水下横管的阻力系数开展研究。

鉴于螺旋列板存在局部脱落的风险,为确保其长期抑振性能的稳定性,研究螺旋列板的覆盖率对抑振效果的影响至关重要。Trim 等^[16]通过水池拖曳试验,研究了均匀流作用下不同形式及覆盖率的螺旋列板对立管涡激振动的抑振效果;沙勇等^[6]研究了不同螺旋列板覆盖率对立管涡激振动疲劳的影响,结果表明螺旋列板的覆盖率越大,对抑制立管涡激振动疲劳的效果越好。

以上研究表明,在管道结构上安装螺旋列板是抑制涡激振动的有效措施。准确评估螺旋列板的水动力载荷以及破损状态对保障水下管道结构的安全性至关重要。为此,本文先进行固定管道试验,研究浸没深度和离底间隙的变化对安装螺旋列板的水下管道水动力特性的影响规律;然后通过自激振荡试验评估不同流速下螺旋列板破损对管道振动响应和阻力系数的影响机制。

1 试验方法

模型试验在交通运输部天津水运工程科学研究所的大比尺波浪水槽中进行。该水槽长 456 m、宽 5 m,最大深度为 8 m,最大造流速度为 1.6 m/s,试验段水深为 2 m。模型试验包含固定管道试验和自激振荡试验两部分。

1.1 固定管道试验装置

为了测量水下管道的平均阻力系数,先进行固定管道的模型试验,试验装置示意图如图 1 所示。在管道模型端部安装了三分力仪,其采样频率为 120 Hz。在三分力仪与管道模型之间安装有直径为 1.5 m 的挡流板。管道模型端部与挡流板之间留有 1 cm 的间隙,以避免挡流板对水动力测量的干扰。在管道模型的前端布置了流速仪,用于测量来流流速。



图 1 固定管道试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup for fixed pipeline

水下管道模型长度为 4.58 m,裸管直径为 11.5 cm。试验使用的螺旋列板表皮厚度为 10.05 mm,鳍高为 3.2 cm,平均螺距为 1.45 cm,螺旋列板为三螺旋结构,安装时紧固在管道外壁。

1.2 自激振荡试验装置

针对安装螺旋列板的水下管道(以下简称“非裸管”)可能出现脱落的情况,本文选取螺旋列板脱落 30%(部分覆盖)的情形进行试验研究。先进行裸管的自激振荡试验(图 2),利用位移传感器测量管道的垂向运动幅值 A_0 ;然后在相同流速条件下分别对螺旋列板全覆盖和部分覆盖(70%覆盖率)两种方案进行试验,测量得到对应的垂向运动幅值 A_1 。水下管道的涡激振动抑制效率 η 可表达为

$$\eta = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\%$$

(1)

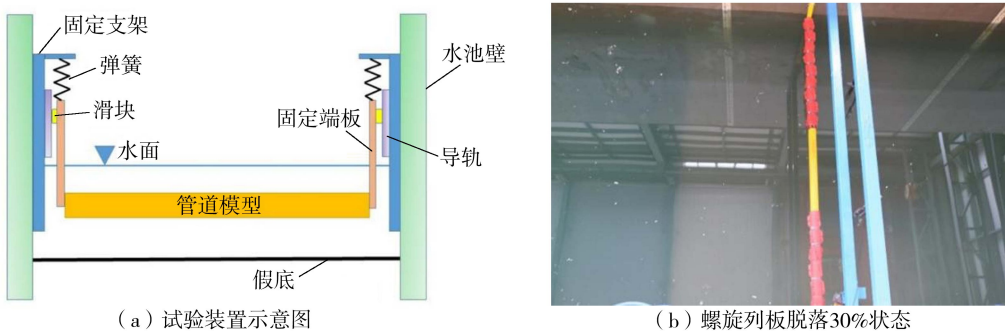


图 2 水下管道自激振荡试验装置

Fig. 2 Self-excited oscillation experiment device of submarine pipeline

2 试验验证

为了验证裸管模型,与文献[17]的光滑圆柱阻力试验结果进行对比分析。将裸管模型放置于自由液面以下 1 m 处,在 0.2~1.2 m/s 的流速范围内测量了不同雷诺数下的阻力系数,结果如表 1 所示。

由表 1 可知,两者的试验结果基本一致。在雷诺数 23 837~136 629 范围内,圆柱的阻力系数介于 1.12~1.23 之间,该取值范围与圆柱绕流阻力系数的公认区间相符,由此验证了本文水下管道模型水动力试验结果的准确性。此外,本文还开展了浅水浸没状态下裸管阻力系数试验,并与 Miyata 等^[15]的试验结果进行对比。Miyata 等^[15]研究的参数为浸没深度 D 与圆柱半径 B 之比(D/B),取值范围为 1~4。本文参数为浸没深度 D 与圆柱直径 d 之比(D/d),取值范围为 1~4。选取 $D/d=1$ 和 $D/d=2$ 两个工况,其浸没深度分别对应 Miyata 等^[15]试验中 $D/B=2$ 和 $D/B=4$ 两个工况的值。对比结果表明,本文试验的阻力系数(两个工况分别为 1.25 和 1.22)略低于 Miyata 等^[15]的试验结果(分别为 1.34 和 1.31)。这可能是由于 Miyata 等^[15]试验中用于固定圆柱的夹具位于管道中间,对水流产生了干扰,从而增加了测试区域模型的阻力。

表 1 无限水深下裸管的阻力系数试验结果对比

Table 1 Comparison of drag coefficient experimental results of bare pipeline at infinite water depth

Re	阻力系数	
	本文试验	文献[17]试验
23 837	1.14	1.12
54 845	1.19	1.22
91 656	1.21	1.23
124 932	1.19	1.21
136 629	1.16	1.20

3 试验结果与分析

本文首先对不同浸没深度和离底间隙下非裸管与裸管进行了阻力测定,然后针对螺旋列板破损情况,研究其抑制效率以及阻力系数的变化规律。试验流速分别设定为 0.2、0.5、0.8、1.1 m/s。

3.1 不同浸没深度下水下管道的阻力系数

鉴于工程实际区域的水深会发生变化,试验先测量了靠近自由液面时不同浸没深度下非裸管与裸管的阻力系数,结果见图 3。由图 3(a)可见,随着 D/d 从 1 增大至 4,非裸管的阻力系数从 1.82 逐渐减小至 1.34;由图 3(b)可见,裸管的阻力系数也随浸没深度增加呈递减趋势,随着 D/d 从 1 增大至 4,裸管的阻力系数从 1.22 下降至 0.42。这主要是因为水下管道靠近自由液面时,管道上下两侧的流场不再对称,受到自

由液面张力的影响,在水深相对较小的情况下阻力较大。对比图 3(a)和图 3(b)可见,在相同条件下非裸管的阻力系数高于裸管。

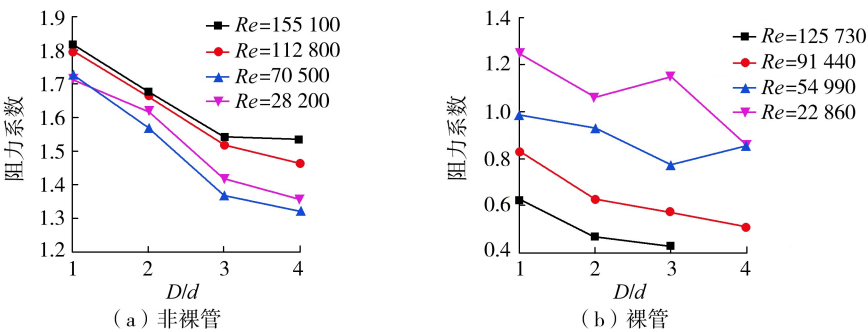


图 3 不同浸没深度水下管道的阻力系数

Fig. 3 Drag coefficient of submarine pipelines at different immersion depths

3.2 不同离底间隙下水下管道的阻力系数

图 4 为不同离底间隙(D^*)下非裸管与裸管的阻力系数,可以看出,当 D^*/d 从 1 增大至 4 时,非裸管与裸管的阻力系数均呈现递增趋势,非裸管的阻力系数从 0.82 增大至 1.59,裸管的阻力系数从 0.48 增大至 1.42。通过对比裸管和裸管阻力系数可以发现,螺旋列板虽然整体上增大管道的阻力系数,但并未改变阻力系数随离底间隙的增大而递增,随浸没深度的增大而减小的变化趋势。通过对比图 3(a)和图 4(a)可知,当 D^*/d 从 1 增大至 4 时,靠近刚性假底侧的阻力系数变化幅值大于靠近自由液面侧的变化幅值,表明刚性壁面对管道周围的流场的干扰效应更大。

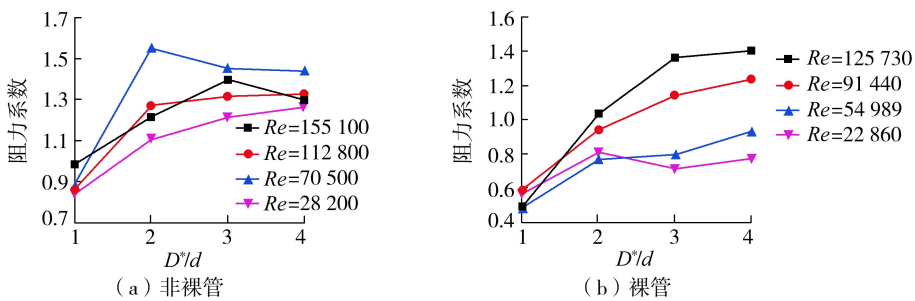


图 4 不同离底间隙下水下管道的阻力系数

Fig. 4 Drag coefficient of submarine pipelines at different distance from false bottom

3.3 破损情况下水下管道的涡激振动

图 5 为不同雷诺数下全覆盖和部分覆盖螺旋列板的涡激振动抑制效率,可以看出,在雷诺数较低时抑制效果较好,随着雷诺数的增大,全覆盖和部分覆盖方案的抑制效率均呈下降趋势。在本文试验的雷诺数范围内,螺旋列板的抑制效率均保持在 95% 以上,其最低值 95.3% 出现在雷诺数约为 2.2×10^5 时。吴仕鹏等^[18]的研究发现,当安装螺旋列板的立管长度破损比为 20% 时,其平均抑制效率仍可达 95%。由此可见,部分覆盖方案的抑制效果虽低于全覆盖方案,但仍然具有较好的涡激振动抑制效果。值得注意的是,随着雷诺数的增大,两种方案的抑制效率降幅呈现不同比例,这一现象的内在机理值得在后续工作中进行更深入的研究。

图 6 给出了裸管、部分覆盖与全覆盖螺旋列板水下管道的阻力系数,在低雷诺数下,三者的阻力系数相差不大。随着雷诺数的增大,全覆盖方案的阻力系数明显增大,而部分覆盖方案的阻力系数增长速率则相对较为缓慢。从整个试验雷诺数范围来看,裸管、部分覆盖方案和全覆盖方案的平均阻力系数分别为 0.79、1.07 和 1.32。与裸管相比,部分覆盖和全覆盖方案的阻力系数分别增大了 35.4% 和 67.1%。值得注意的

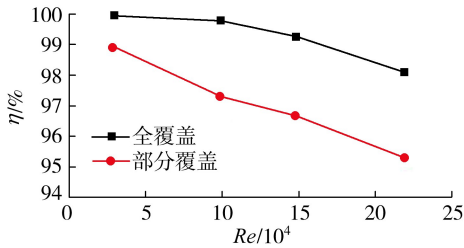


图 5 不同雷诺数下全覆盖和部分覆盖螺旋列板的涡激振动抑制效果

Fig. 5 VIV suppression effects of full-coverage and partially-covered spiral strakes under various Reynolds numbers

是,尽管部分覆盖方案仅覆盖 70% 长度,但其阻力可达到全覆盖方案的 81.1%,这表明螺旋列板脱落后,管道阻力不会随覆盖长度的减小而呈相同比例的减小。

4 结 论

- a. 随着浸没深度减小,非裸管与裸管的阻力系数均逐渐增大。在相同条件下非裸管的阻力系数高于裸管。
- b. 当非裸管靠近假底时,随着离底间隙减小,其阻力系数逐渐递减。在雷诺数相同、浸没深度和离底间隙相同的情况下,近假底时非裸管的阻力系数小于近自由液面时。
- c. 随着雷诺数的增大,70%覆盖方案的抑制效率变化与全覆盖方案基本一致,均呈现下降趋势,但仍然具有较好的抑制效果。

参考文献:

[1] 杜升涛,王超琳,杨博,等. 水流强度对淹没式方桩局部冲刷特性的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(2): 92-100. (DU Shengtao, WANG Chaolin, YANG Bo, et al. Influence of flow intensity on local scour characteristics of a submerged square pile[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(2): 92-100. (in Chinese))

[2] 贺瑞,宋俞良,郑金海. 局部冲坑对导管架刚度影响的模型试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(5): 66-74. (HE Rui, SONG Yuliang, ZHENG Jinhai. Experimental study on the impact of local scour hole on the stiffness of jacket foundation[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(5): 66-74. (in Chinese))

[3] ZHOU T, RAZALI S F M, CHENG L. Investigation on suppression of vortex-induced vibration using helical strakes [C] // International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2010: 891-900.

[4] 王增波,黄维平,苑健康,等. 立管扰流装置 Helical Strakes 的数值模拟分析[J]. 石油化工高等学校学报,2011,24(4): 79-83. (WANG Zengbo, HUANG Weiping, YUAN Jiankang, et al. Numerical analysis on the Helical Strakes around riser[J]. Journal of Petrochemical University, 2011, 24(4): 79-83. (in Chinese))

[5] 吴浩,孙大鹏. 深海立管涡激振动被动抑制措施的研究[J]. 中国海洋平台,2009,24(4): 1-8. (WU Hao, SUN Dapeng. Study on suppression measures for vortex-induced vibration of the deepwater riser [J]. China offshore Platform, 2009, 24 (4): 1-8. (in Chinese))

[6] 沙勇,曹静,张恩勇,等. 抑制涡激振动的螺旋列板设计参数研究[J]. 海洋工程,2013,31(1): 43-48. (SHA Yong, CAO Jing, ZHANG Enyong, et al. Helical strakes for marine risers VIV suppression and its design parameters selection [J]. The Ocean Engineering, 2013, 31(1): 43-48. (in Chinese))

[7] 杨加栋,张晓灵,杜宝银,等. 螺旋列板:深水立管涡激振动抑制装置[J]. 海洋技术,2010,29(4): 88-92. (YANG Jiadong, ZHANG Xiaoling, DU Baoyin, et al. Helical stakes; vortex induced vibration suppression devices of deepwater risers [J]. Ocean Technology, 2010, 29(4): 88-92. (in Chinese))

[8] 鞠少栋,陈国明,盛磊祥,等. 基于 CFD 的深水隔水管螺旋列板几何参数优选[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2010, 34(2): 110-113. (JU Shao dong, CHEN Guoming, SHENG Leixiang, et al. CFD-based optimization for geometric parameters of deepwater riser helical strakes [J]. Journal of China University of Petroleum, 2010, 34(2): 110-113. (in Chinese))

[9] 高云,付世晓,宋磊建. 柔性立管涡激振动抑制装置试验研究[J]. 振动与冲击,2014,33(14): 77-83. (GAO Yun, FU Shixiao, SONG Leijian. Experimental investigation on the suppression device of VIV of a flexible riser [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(14): 77-83. (in Chinese))

[10] GAO Yun, FU Shixiao, REN Tie, et al. VIV response of a long flexible riser fitted with strakes in uniform and linearly sheared currents [J]. Applied Ocean Research, 2015, 52: 102-114.

[11] GAO Yun, YANG Jiadong, XIONG Youming, et al. Experimental investigation of the effects of the coverage of helical strakes on the vortex-induced vibration response of a flexible riser [J]. Applied Ocean Research, 2016, 59: 53-64.

[12] BEARMAN P, BRANKOVIĆ M. Experimental studies of passive control of vortex-induced vibration [J]. European Journal of Mechanics B/Fluids, 2004, 23(1): 9-15.

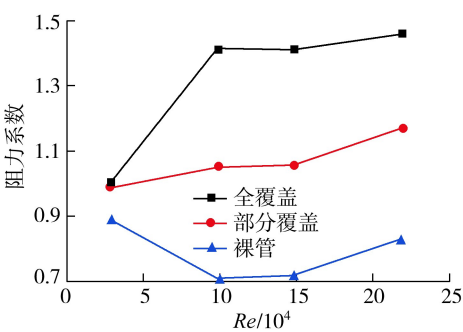


图 6 不同雷诺数下不同覆盖程度水下管道阻力系数对比

Fig. 6 Comparison of submarine pipeline drag coefficients at different spiral coverage degrees under different Reynolds numbers

reinforced soil[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2025,47(4):1-9. (in Chinese))

[21] AYELDEEN M,NEGM A,EL-SAWWAF M,et al. Enhancing mechanical behaviors of collapsible soil using two biopolymers[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,2017,9(2):329-339.

[22] 阮波,阮晨希,邓林飞,等. 聚丙烯纤维加筋水泥搅拌土拉压性能试验研究[J]. 铁道科学与工程学报,2021,18(1):95-103. (RUAN Bo,RUAN Chenxi,DENG Linfei,et al. Experimental study on unconfined compressive strength and splitting tensile strength of polypropylene fiber reinforced cement mixing soil[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2021,18(1):95-103. (in Chinese))

[23] 李丽华,刘文,白玉霞,等. 椰壳纤维-石灰协同作用改良黏土性能试验研究[J]. 水文地质工程地质,2025,52(1):130-140. (LI Lihua,LIU Wen,BAI Yuxia,et al. Experimental study on the synergistic effect of coir fiber and lime to improve soil performance[J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2025,52(1):130-140. (in Chinese))

[24] YETIMOGLU T, INANIR M, INANIR O E. A study on bearing capacity of randomly distributed fiber-reinforced sand fills overlying soft clay[J]. Geotextiles and Geomembranes,2005,23(2):174-183.

[25] 蔡奕,施斌,高玮,等. 纤维石灰土工程性质的试验研究[J]. 岩石工程学报,2006,28(10):1283-1287. (CAI Yi,SHI Bin,GAO Wei,et al. Experimental study on engineering properties of fibre-lime treated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2006,28(10):1283-1287. (in Chinese))

[26] 黄晓如,璩继立. 含水率和加筋条件对棕榈加筋土的影响[J]. 上海理工大学学报,2019,41(4):395-402. (HUANG Xiaoru,QU Jili. Influence of water content and reinforcement conditions on palm reinforced soil[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology,2019,41(4):395-402. (in Chinese))

[27] TANG Chaosheng,SHI Bin,ZHAO Lizheng. Interfacial shear strength of fiber reinforced soil[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2010,28(1):54-62.

[28] 荣德政,唐朝生,曾浩,等. 纤维加筋土坯的蒸发过程及抗拉强度特性[J]. 岩土工程学报,2021,43(4):670-678. (RONG Dezhen,TANG Chaosheng,ZENG Hao,et al. Evaporation process and tensile behavior of fiber-reinforced rammed earth[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2021,43(4):670-678. (in Chinese))

[29] 朱旭芬,郑加强,魏继红,等. 纤维-水溶性聚合物加固砂土抗剪强度特性试验研究[J]. 水利水电科技进展,2023,43(6):50-59. (ZHU Xufen,ZHENG Jiaqiang,WEI Jihong,et al. Experimental study on shear strength of fiber-water soluble polymer composite modified sand[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(6):50-59. (in Chinese))

[30] CHADUVULA U,VISWANADHAM B V S,KODIKARA J. A study on desiccation cracking behavior of polyester fiber-reinforced expansive clay[J]. Applied Clay Science,2017,142:163-172.

(收稿日期:2025-01-03 编辑:熊水斌)

(上接第 123 页)

[13] 李琳. 带浮力块的柔性立管涡激振动特性研究[D]. 上海:上海交通大学,2012.

[14] 宋吉宁,吕林,张建侨,等. 三根附属控制杆对海洋立管涡激振动抑制作用实验研究[J]. 海洋工程,2009,27(3):23-29. (SONG Jining,LYU Lin,ZHANG Jianqiao,et al. Experimental investigation of suppression of vortex induced vibration of marine risers by three control rods[J]. The Ocean Engineering,2009,27(3):23-29. (in Chinese))

[15] MIYATA H,SHIKAZONO N,KANAI M. Forces on a circular cylinder advancing steadily beneath the free-surface[J]. Ocean Engineering,1990,17(1/2):81-104.

[16] TRIM A D,BRAATEN H,LIE H,et al. Experimental investigation of vortex-induced vibration of long marine risers[J]. Journal of Fluids and Structures,2005,21(3):335-361.

[17] SARPKAYA T. In-line and transverse forces on cylinders in oscillatory flow at high Reynolds numbers[J]. Journal of Ship Research,1977,21(4):200-216.

[18] 吴仕鹏,王晓飞,赵福臣,等. 螺旋列板涡激振动抑制效率试验研究和分析[J]. 中国造船,2022,63(3):159-166. (WU Shipeng,WANG Xiaofei,ZHAO Fuchen,et al. Experimental study on suppression efficiency of vortex induced vibration for spiral plate[J]. Shipbuilding of China,2022,63(3):159-166. (in Chinese))

(收稿日期:2024-07-02 编辑:雷燕)