

锚碇沉箱基础与升浆基床摩擦性能研究

耿铁锁^{*1}, 陈亮^{1,2}, 张哲¹

(1. 大连理工大学 土木工程学院, 辽宁 大连 116024;

2. 大连普湾新区城市建设管理与行政执法局, 辽宁 大连 116299)

摘要: 针对国内首个采用沉箱基础的海上悬索桥, 主要对水下预填骨料抛石升浆基床与混凝土之间的摩擦性能, 以及碎石基床与混凝土结构的摩擦因数展开研究. 首先通过室内和现场实验得到碎石基床与混凝土结构的摩擦因数, 在此基础上采用数值分析方法得到水下预填骨料抛石升浆基床与混凝土结构之间的摩擦性能. 结果表明, 普通碎石基床与混凝土沉箱之间的摩擦因数在设计规范规定的 0.5~0.6 内, 而预填骨料抛石升浆基床与混凝土沉箱之间的摩擦因数为 0.7~0.8, 如考虑混凝土之间的黏结力膜作用, 摩擦因数可达 0.9.

关键词: 锚碇; 沉箱; 抛石升浆基床; 摩擦

中图分类号: U443.24

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb201505011

0 引言

目前世界上大多数悬索桥的锚碇都设在岸边的岩石基础上, 丹麦的大贝耳特海峡东桥^[1]锚碇较为特殊, 在 20 m 厚的冰碛黏土上铺设楔形碎石, 将预制沉箱安放在碎石基床上. 设计者对于碎石顶面与沉箱之间的滑动进行了有限元计算和实验研究. 又根据三轴实验得到碎石的材料特性, 通过黏土与碎石交界面的滑动实验了解黏土的扰动状态, 再进行有限元计算得到基础交界面的应力分布、滑动破坏形式, 通过计算结果最终采用一定角度的楔形碎石垫层能够更好地满足抗滑要求.

Li 等通过实验研究了海沙基础上沉箱在水平荷载下的失效机理^[2]. Madsen 等研究了在风和深水共同作用下沉箱稳定性^[3]. Zafeirakos 等研究了沉箱基础独柱式桥墩的抗震性能^[4]. Chiou 等通过实验分析了在竖向荷载下桥墩沉箱基础的力学性能^[5]. 天津大学摩擦系数研究课题组等对混凝土预制块体与块石基床间摩擦因数进行现场实验研究^[6]. 张文仲对预制混凝土或钢筋混凝土结构与抛石基床之间摩擦因数的取值问题进行实验研究^[7], 并取得了一定的实验成果. 碎石基床与混凝土之间的摩擦因数波动规律为正态分布^[8],

在取值保证率相同时, 基床应力越大摩擦因数越小, 对于油毡原纸及泥浆夹层对摩擦因数的影响做了相应的实验研究, 发现油毡原纸和泥浆夹层都会降低摩擦因数. 基本摩擦理论在实际工程中还不能准确表达和计算实际摩擦力, 结构与基床之间的摩擦性能大多先进行实验研究, 再依靠大型有限元软件模拟计算校核. 不同类型的基础形式、不同的施工方法都会对摩擦因数有直接的影响, 本文针对实际工程中的摩擦问题进行相应的实验研究和有限元计算, 以期为其他工程提供参考.

1 摩擦理论的发展

1.1 经典摩擦理论和黏着摩擦理论

最早对于无润滑状态下固体间相对滑动的问题作过研究, 得到经典的摩擦定律——阿芒顿库仑定律^[9], 摩擦力 $F = \mu N$ (μ 为摩擦因数, N 为法向荷载). 后来的机械嵌合理论认为, 静摩擦力是凸峰之间相互嵌合而阻止相对运动产生的力.

直到 20 世纪四五十年代, 提出了黏着摩擦理论^[10]. 黏着摩擦理论认为承载表面的相对运动阻力(摩擦力)是由表面相互作用引起的. 在荷载作用下, 接触点上的接触应力 σ 很大, 当达到物体的

压缩屈服极限 σ_b 时, 接点处发生塑性变形, 形成小平面接触, 直到接触面积增大到足以支承法向荷载为止。

真实接触面积与荷载的关系为

$$N_i = \sigma_b A_{ri} \quad (1)$$

$$N = \sum \sigma_b A_{ri} = \sigma_b A_r \quad (2)$$

式中: N 为荷载的法向部分, A_r 为真实接触面积的总和, σ_b 为压缩屈服极限。如图 1 所示。

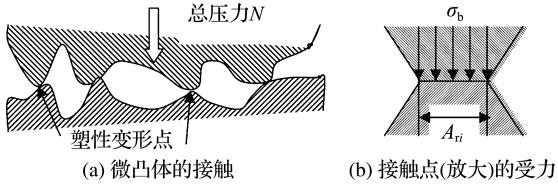


图 1 表面接触点的受力

Fig. 1 The force on surface contact points

在这些真实接触处, 出现牢固的黏结点。摩擦的过程, 就是在切向提供一个力, 剪断这些黏结点, 表面就可以发生滑动。摩擦力主要就是剪断这些黏结点的剪切力。

$$F_b = A_r \tau_b = (N/\sigma_b) \tau_b \quad (3)$$

$$\mu_b = F_b/N = \tau_b/\sigma_b \quad (4)$$

式中: F_b 为摩擦力的黏着分量, μ_b 为摩擦因数的黏着部分, τ_b 为较软黏结点部分的剪切强度极限, σ_b 为较软黏结点部分的压缩屈服极限。

塑性变形首先发生在摩擦中较软的一方, 剪断的也是较软的一方。所以式(3)、(4)中 σ_b 和 τ_b 都应取较软一方压缩屈服极限和剪切强度极限。

1.2 修正黏着摩擦理论

实际上真实接触面积的大小, 不仅与法向荷载有关, 也受荷载切向分量的同时作用。切向力 F 的作用很容易使接触面积扩大。真实接触面积的形成, 应该是切应力和压应力的合力达到材料压缩屈服极限时, 接触点处发生塑性变形。假设

$$k^2 = \sigma^2 + \alpha \tau^2$$

式中: σ 为接触点上的压应力, α 为待定值, τ 为接触点上的切应力, k 为两种应力的合力——合成应力, 即

$$k^2 = (N/A_r)^2 + \alpha (F_b/A_r)^2 \quad (5)$$

当合成应力达到材料压缩屈服极限时,

$$k^2 = \sigma_b^2 = (N/A_r)^2 + \alpha (F_b/A_r)^2 \quad (6)$$

此时真实接触面积上发生塑性变形, 面积不再继续扩大。经整理得

$$A_r^2 = (N/\sigma_b)^2 + \alpha (F_b/\sigma_b)^2 \quad (7)$$

将 $F_b/N = \mu_b$ 代入上式, 得

$$A_r = \frac{N}{\sigma_b} (1 + \alpha \mu_b^2)^{1/2} \approx \frac{N}{\sigma_b} \left(1 + \frac{\alpha}{2} \mu_b^2 \right) \quad (8)$$

由式(8)可以看出, 由于剪切力的联合作用, 真实接触面积有所增大。所以, 由此式求得的摩擦力比简单的黏着摩擦理论计算的要大。

2 实验研究和计算

2.1 摩擦因数室内实验

碎石铺在水池内, 将 $1.00 \text{ m} \times 0.60 \text{ m} \times 0.15 \text{ m}$ 混凝土板放置于碎石基床上, 混凝土板分别加载不同质量配重, 混凝土板及配重质量合计为 G , 钢丝绳拉力为 T , 拉力与水平面夹角为 α , 则摩擦因数 μ_1 的计算公式为 $\mu_1 = T \cos \alpha / (G - T \sin \alpha)$ 。按同样步骤在水池注水后进行水下实验, 得出摩擦因数 μ_2 的计算公式为 $\mu_2 = T \cos \alpha / (G - T \sin \alpha - F)$ 。测得碎石基床与混凝土块体之间在有水和无水不同基底压力下的摩擦因数。如图 2~4, 表 1、2 所示。

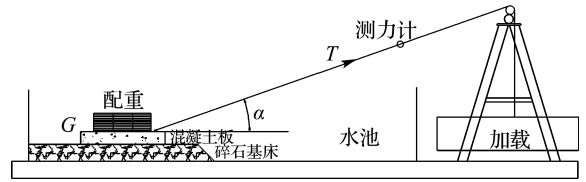


图 2 实验示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experiment



图 3 无水摩擦因数测定

Fig. 3 Determination of anhydrous friction coefficient



图 4 有水摩擦因数测定

Fig. 4 Determination of water friction coefficient

表 1 无水碎石基床与块体摩擦因数检测结果

Tab.1 Friction coefficient test results of anhydrous gravel bed and block

序号	G/kg	σ /kPa	T/kg	$\alpha/(^{\circ})$	μ_1
1	1 751	25.90	855	13.36	0.523
2	1 167	17.39	535	13.36	0.520
3	602	8.90	285	13.36	0.517

表 2 水下碎石基床与块体摩擦因数检测结果

Tab.2 Friction coefficient test results of gravel bed and block under water

序号	G/kg	σ /kPa	T/kg	$\alpha/(^{\circ})$	μ_2
1	1 751	24.99	800	13.36	0.519
2	1 167	15.99	510	13.36	0.517
3	602	7.60	240	13.36	0.511

根据实验数据可以得到无水时混凝土块体与碎石基床的摩擦因数 $\bar{\mu}_1=0.520$,水下混凝土块体与碎石基床的摩擦因数 $\bar{\mu}_2=0.516$,水会减小混凝土块体与碎石基床之间的摩擦因数,基底接触应力的的大小也是影响摩擦因数的因素.

2.2 摩擦因数现场实验

抛石升浆基床与混凝土块体之间摩擦因数测定:将 0.7 m×0.7 m×0.5 m 混凝土块体放置在 1.0 m×1.0 m×1.0 m 加满石块的水箱上,一起放入海中进行升浆,养护达到强度后进行加载摩擦实验,配重 5 t,采用千斤顶逐级施加荷载,每级递增 0.2 MPa. 混凝土块体滑动后,记录荷载 F_1 ,块体自重及配重为 G ,摩擦因数的计算公式为 $\mu_1=F_1/G$. 混凝土块体滑动一定位移后,重复两次施加荷载,记录荷载 F_2 、 F_3 ,计算摩擦因数 $\mu_2=F_2/G$, $\mu_3=F_3/G$. 如图 5、6,表 3~5 所示.



图 5 实验布置
Fig.5 Test arrangement

根据实验数据可以得到,预填骨料抛石升浆基床首次滑动需要很大的水平力,所得首次滑动摩擦因数 $\bar{\mu}=0.939$,第 2、3 次滑动摩擦因数 $\bar{\mu}=0.789$,小于首次滑动时的摩擦因数.

现场实验条件有限、实验次数较少、实验中的接触法向应力单一、试件制作升浆的质量等原因,

造成实验结果有离散性.



图 6 滑动位移
Fig.6 The sliding displacement

表 3 试块 1 摩擦因数实验结果
Tab.3 Experimental results of block 1 friction coefficient

实验次数	s/mm	σ /kPa	G/t	F/t	μ
1	15	114.3	5.6	5.15	0.919
2	35	114.3	5.6	4.24	0.757
3	25	114.3	5.6	4.13	0.738

表 4 试块 2 摩擦因数实验结果
Tab.4 Experimental results of block 2 friction coefficient

实验次数	s/mm	σ /kPa	G/t	F/t	μ
1	20	114.3	5.6	5.36	0.957
2	30	114.3	5.6	4.76	0.850
3	40	114.3	5.6	4.59	0.820

表 5 试块 3 摩擦因数实验结果
Tab.5 Experimental results of block 3 friction coefficient

实验次数	s/mm	σ /kPa	G/t	F/t	μ
1	18	114.3	5.6	5.27	0.941
2	40	114.3	5.6	4.52	0.810
3	35	114.3	5.6	4.24	0.757

2.3 数值模拟计算

采用 ABAQUS 建立有限元模型,模拟抛石升浆基床与混凝土块体之间的摩擦相互作用.

ABAQUS/Standard 接触算法,主要是利用 Newton-Raphson 方法建立的.它在每个增量步开始检查所有接触相互作用状态,在 ABAQUS/Standard 中的接触模型是基于表面的.首先,必须判断模型部件上哪一对表面可能发生彼此接触,然后创建可能发生接触的接触对.最后定义控制各接触面之间相互作用的本构模型.在接触分析过程中,如要使计算收敛,需要注意多种因素,如接触面单元网格、足够的约束条件、合理的接触面定义、接触参数等.如图 7 所示.

计算模型中预制混凝土材料按照强度 C30 取值,弹性模量为 3.0×10^4 MPa,泊松比为 0.2,质量密度为 2 400 kg/m³;升浆混凝土材料按照强度 C20 取值,弹性模量为 2.55×10^4 MPa,泊松比为 0.2,质量密度为 2 400 kg/m³. 预制混凝土

块体尺寸为 1.0 m×1.0 m,采用 10×10 个六面体单元分割;升浆混凝土尺寸为 3.0 m×3.0 m,采用 15×15 个六面体单元分割.定义两个面之间的法向接触为硬接触,切向接触为静摩擦-动摩擦指数衰减模式.采用 ABAQUS/Standard 接触算法中的有限滑移理论公式进行计算.

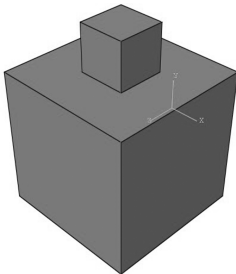


图 7 ABAQUS 模型图
Fig. 7 ABAQUS model diagram

考虑接触面之间的接触静摩擦和动摩擦,计算接触面之间的法向主应力 $\sigma=0.112$ MPa,切向应力 $\tau=0.085$ MPa,摩擦因数 $\mu=\tau/\sigma=0.759$,与实验测得的抛石升浆基床与混凝土块体之间的第 2、3 次滑动摩擦因数比较接近.如图 8、9 所示.

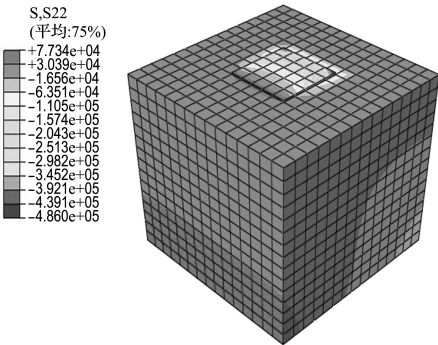


图 8 主应力云图 1
Fig. 8 The main stress nephogram 1

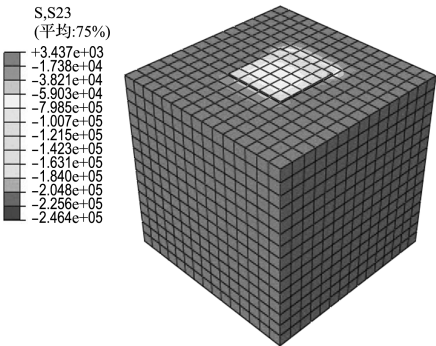


图 9 切向应力云图 1
Fig. 9 The tangential stress nephogram 1

考虑接触面之间的黏结力,通过膜条件模拟接触面之间的黏结力,计算法向主应力 $\sigma=0.112$ MPa,切向应力 $\tau=0.102$ MPa,摩擦因数 $\mu=\tau/\sigma=0.911$,与实验测得的抛石升浆基床与混凝土块体之间的首次滑动摩擦因数比较接近.如图 10、11 所示.

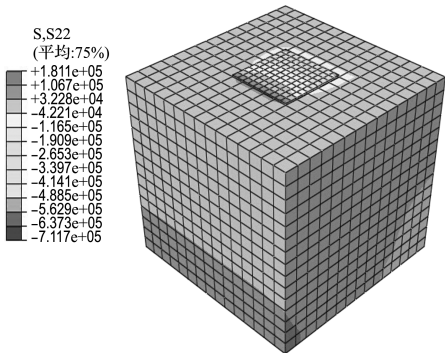


图 10 主应力云图 2
Fig. 10 The main stress nephogram 2

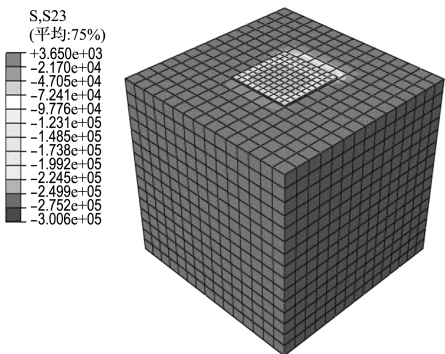


图 11 切向应力云图 2
Fig. 11 The tangential stress nephogram 2

3 结 语

本文经过实验研究和非线性有限元法分析预制混凝土块体和碎石基床之间的接触问题,以有限元软件 ABAQUS 作为计算分析工具,结合实验室及现场进行实验.有限元计算分析的结果和实验结果具有一致性,普通碎石基床与混凝土沉箱之间的摩擦因数在设计规范规定的 0.5~0.6 内,基底接触应力、水下等因素也影响摩擦因数.而预填骨料抛石升浆基床与混凝土沉箱之间的摩擦因数为 0.7~0.8,如考虑混凝土之间的黏结力膜作用,摩擦因数可达 0.9,为桥梁基础工程和其他水下工程建设提供参考.地震作用下接触问题变得更为复杂,动力学分析还需要大量的研究工作.

参考文献：

[1] 吉姆辛 N.J. 大贝耳特海峡:东桥[M]. 西南交通大

- 学土木工程学院桥梁工程系, 中铁大桥局集团武汉桥梁科学研究院有限公司, 译. 成都: 西南交通大学出版社, 2008.
- Gimsing N J. **The Great Belt: East Bridge** [M]. Bridge Engineering Department, School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Wuhan Bridge Science Research Institute Ltd., China Zhongtie Major Bridge Engineering Group, trans. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2008. (in Chinese)
- [2] LI Da-yong, FENG Ling-yun, ZHANG Yu-kun. Model tests of modified suction caissons in marine sand under monotonic lateral combined loading [J]. **Applied Ocean Research**, 2014, **48**:137-147.
- [3] Madsen S, Andersen L V, Ibsen L B. Numerical buckling analysis of large suction caissons for wind turbines on deep water [J]. **Engineering Structures**, 2013, **57**:443-452.
- [4] Zafeirakos A, Gerolymos N. Towards a seismic capacity design of caisson foundations supporting bridge piers [J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2014, **67**:179-197.
- [5] Chiou J S, Ko Y Y, Hsu S Y, *et al.* Testing and analysis of a laterally loaded bridge caisson foundation in gravel [J]. **Soils and Foundations**, 2012, **52**(3):562-573.
- [6] 天津大学摩擦系数研究课题组, 交通部第一航务工程局一公司. 混凝土预制块体与块石基床间摩擦系数的现场实验研究[J]. 港口工程, 1993(6):1-4.
- Tianjin University Research Group of Friction Coefficient, No. 1 Engineering Company Ltd. of CCCC First Harbour Engineering Company Ltd. Field experiment research on friction coefficient between precast concrete blocks and rubble mound foundation [J]. **Harbour Engineering**, 1993(6):1-4. (in Chinese)
- [7] 张文仲. 预制混凝土或钢筋混凝土结构与抛石基床之间摩擦系数的取值问题[J]. 港口工程, 1986(6):34-39.
- ZHANG Wen-zhong. The value problem of friction coefficient between precast concrete or reinforced concrete structure and rubble bed [J]. **Harbour Engineering**, 1986(6):34-39. (in Chinese)
- [8] 张文仲. 混凝土与基床之间摩擦系数取值保证率分析[J]. 港口工程, 1987(1):46-52.
- ZHANG Wen-zhong. The analysis of value guarantee rate of friction coefficient between concrete and bed [J]. **Harbour Engineering**, 1987(1):46-52. (in Chinese)
- [9] 黄平. 摩擦学教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- HUANG Ping. **Tribology Course** [M]. Beijing: Higher Education Press, 2008. (in Chinese)
- [10] 刘佐民. 摩擦学理论与设计[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2009.
- LIU Zuo-min. **Theory and Design of Tribology** [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2009. (in Chinese)

Research on friction property between anchorage caisson foundation and grouting bed

GENG Tie-suo^{*1}, CHEN Liang^{1,2}, ZHANG Zhe¹

(1. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Department of Urban Construction Management and Administrative Law Enforcement, Dalian Puwan New District, Dalian 116299, China)

Abstract: According to the first domestic offshore suspension bridge using caisson foundation, the friction property between prepacked aggregate riprap grouting bed and concrete under water, the friction coefficients between gravel bed and concrete structure are mainly studied. Firstly, the friction coefficients between gravel bed and concrete structure are obtained by laboratory and field experiments, and then, the friction property between prepacked aggregate riprap grouting bed and concrete structure under water is acquired by the numerical analysis method. The experimental results show that the friction coefficients between the common gravel bed and the concrete caisson are in the range of 0.5-0.6, which meets the corresponding code, and the friction coefficient between the prepacked aggregate riprap grouting bed and the concrete caisson is within 0.7-0.8, or even 0.9 considering the film cohesive force of concrete.

Key words: anchorage; caisson; riprap grouting bed; friction