

基于抗滑安全的悬索桥重力式锚碇优化

陈维, 张海太, 杨小兵

(云南丽香高速公路投资开发有限公司, 云南 昆明 650501)

摘要: 该文以香丽高速公路虎跳峡金沙江悬索桥丽江岸重力式锚碇为依托工程, 设计了平底和带齿坎两类典型的重力式锚碇形式, 基于传统基底摩擦承载和考虑结构—地基联合承载的抗滑力估值公式, 利用传统的墩台基础抗滑安全系数计算公式, 探讨其抗滑安全性, 所得主要结论如下: ① 摩擦承载适用于平底锚碇的抗滑力估值; 新型带齿坎重力式锚碇的抗滑力由后部基底摩擦承载和前部齿坎夹持岩体剪切承载两部分组成, 考虑联合承载的抗滑力估值公式适用于此类锚碇。带齿坎锚碇的抗滑力是平底锚碇抗滑力的 1.5 倍。齿坎的设置形成前高后低结构, 有利于整体抗倾覆; ② 传统的摩擦承载抗滑安全系数 $k_c = 2.42$; 基于联合承载抗滑安全系数 $k_c = 3.66$, 均大于规范要求的稳定系数标准(2.0)。丽江岸重力式锚碇满足抗滑要求; ③ 抗滑稳定系数为 2.0 时, 基于摩擦承载的锚碇混凝土最小用量比初始用量可节约 44%; 基于联合承载的锚碇混凝土最小用量比初始用量可节约 87%。丽江岸重力式锚碇可通过增设齿坎和锚碇减重进行优化。上述公式和方法可用于重力式锚碇抗滑安全系数计算和基于抗滑安全的锚碇设计优化。

关键词: 虎跳峡金沙江悬索桥; 重力式锚碇; 摩擦承载; 联合承载; 抗滑安全系数; 设计优化

1 前言

悬索桥发明于 19 世纪初, 目前已发展成为大跨径桥梁的主要形式, 有自锚式和地锚式两类, 自锚式直接

将主缆锚固在加劲梁上, 没有体型庞大的锚碇, 对地层没有特殊要求, 缺点是钢材用量大、建造和后期维护费用高; 地锚式, 对地层有要求, 岩性好, 则采用岩锚形式; 地层较差, 则采用重力式锚碇; 地层中等, 则采用隧道式锚碇。有一定体型的锚碇, 主缆锚固在锚碇上, 通

(5) 杆件逐步失效过程中的内力释放会使结构的地震响应增大, 同时它还影响桥梁整体损伤演变历程、发生倒塌的模式与强震作用下群桩基础连续倒塌机制。

参考文献:

- [1] 王克海. 桥梁抗震研究[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007.
- [2] 叶爱君, 管仲国. 桥梁抗震[M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [3] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京: 地震出版社, 2006.
- [4] 胡晓斌, 钱稼茹. 结构连续倒塌分析与设计方法综述[J]. 建筑结构, 2006(S1).
- [5] 范振华. 地震作用下超高墩刚构桥倒塌破坏关键问题研

究[D]. 武汉理工大学博士学位论文, 2013.

- [6] 叶爱君, 鲁传安. 基于 Pushover 分析的群桩基础抗震性能分析方法[J]. 土木工程学报, 2010(2).
- [7] 彭卫兵, 史贤豪, 王毅, 等. 基于 OpenSees 大应变单元的拱桥倒塌过程模拟[J]. 防灾减灾工程学报, 2014(3).
- [8] PANAGIOTAKOSTB, FARDIS M N. Deformations of Reinforced Concrete Members at Yielding and Ultimate[J]. ACI—Structural Journal, 2001, 98(2): 135—148.
- [9] 安风明. 基于 OpenSees 的群桩体系桥梁连续倒塌分析[D]. 长安大学硕士学位论文, 2015.
- [10] ELWOOD K J, MOEHLE J P. Dynamic Shear and Axial—Load Failure of Reinforced Concrete Columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 134(7): 1 189—1 198.

收稿日期: 2018-06-05

基金项目: 云南省交通科技项目(编号: 2014(A)01, 2011(LH)12-a); 国家自然科学基金资助项目(编号: 51778609)

作者简介: 陈维, 男, 大学本科, 教授级高工. E-mail: 36465695@qq.com

过结构与地基协同作用提供承载。基于网络数据和文献信息,将中国 2000 年以来已建、在建和拟建的采用地锚式悬索桥信息统计列于表 1。限于调研的范围和信息获取手段,为不完全统计信息。由表 1 数据可知,地锚式已成为未来悬索桥的主要锚固选型。

表 1 2000 年以来中国已建和拟建的地锚式悬索桥

桥名	主跨/m	建成年份	锚固形式
重庆鹅公岩大桥	600	2000	隧道式锚碇
重庆忠县长江大桥	560	2001	隧道式锚碇
重庆万州长江大桥	580	2004	隧道式锚碇
西藏角笼坝大桥	345	2004	隧道式锚碇
润扬长江大桥	1 490	2005	重力式锚碇
贵州坝陵河大桥	1 088	2009	西岸隧道式锚碇
			东岸重力式锚碇
湖北四渡河大桥	900	2009	宜昌岸隧道式锚碇
			恩施岸重力式锚碇
舟山西垵门大桥	1 650	2009	重力式锚碇
湖南矮寨大桥	1 176	2012	隧道式锚碇
南京长江四桥	1 418	2012	重力式锚碇
云南普立特大桥	628	2015	普立岸隧道式锚碇
			宣威岸重力式锚碇
湖北伍家岗长江大桥	1 160	在建	江北岸隧道式锚碇
			江南岸重力式锚碇
云南华丽高速金沙江大桥	1 435	拟建	隧道式锚碇
云南香丽高速金沙江大桥	660	拟建	香格里拉岸隧道式锚碇
			丽江岸重力式锚碇

当前重力式锚碇是基于结构自重和主缆力联合作用下基底摩擦承载进行设计,设计理论简单,相对保守。仅反映了结构与地基协同作用机制的部分承载机理,结构与地基联合承载的阶段特征和承载部位的空间演化机理没有全面反映。

该文以云南省香(格里拉)一丽(江)高速公路金沙江悬索桥丽江岸重力式锚碇为依托工程,利用现场进行的混凝土岩强度试验和基底承载力试验,在规范建议的基底摩擦承载和文献[16]揭示的结构—地基联合承载的基础上,探讨平底锚碇和带齿坎锚碇的抗滑安全性,为锚碇优化设计和安全监控提供依据。

2 工程概况及计算方案设计

2.1 香丽金沙江大桥工程概况

香丽高速公路金沙江地锚式悬索桥距虎跳峡镇约

3 km。香格里拉岸,山势陡峭,覆盖层薄,采用隧道式锚碇;丽江岸,地势较缓,局部覆盖层较厚,采用重力式锚碇。地层整体反倾,两岸边坡整体稳定,仅存在局部稳定问题,桥位立面见图 1。

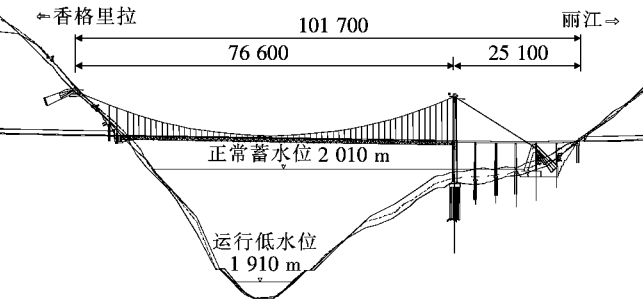


图 1 桥位立面图(单位:cm)

香格里拉岸地形陡峻,基岩出露,隧道式锚碇的抗滑安全性问题不大。丽江岸重力式锚碇基底局部出露碎石土、部分为强风化板岩,大部分为中风化板岩,设计要求对碎石土全部采用素混凝土换填至基岩;强风化板岩根据基底混凝土—岩摩擦试验和载荷试验基岩是否满足承载和抗滑验算要求,不满足也要采用素混凝土换填至中风化板岩。因此,该文仅研究工程问题较多的丽江岸重力式锚碇在不同工况下的抗滑安全性,为优化设计服务,重力式锚碇的具体几何尺寸见图 2。

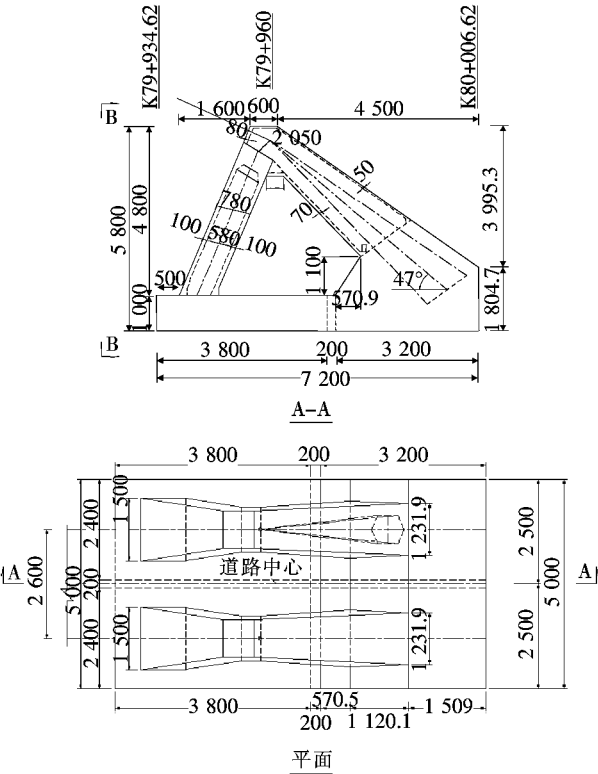


图 2 丽江岸重力式锚碇几何尺寸(单位:cm)

根据重力式锚碇基底出露的地层岩性,勘察设计单位根据现场(现场混凝土岩剪切试验测定)和室内试验提供了岩土体参数建议值(表 2)。

表 2 岩土体物理力学参数

岩性	重度/ (kN· m ⁻³)	弹性 模量/ GPa	泊松 比	黏聚 力/ MPa	内摩 擦角/ (°)
板岩(中风化)	28.5	3.5	0.30	0.23	29.0
劈理密集带	28.5	1.7	0.32	0.10	28.0
混凝土— 岩接触面	—	—	—	0.26	30.6

根据勘察报告和现场载荷试验,结合地区经验,综合确定丽江岸重力式锚碇基底出露的碎石土承载力为 280 kPa,强风化板岩为 550 kPa,中风化板岩为 1 100 kPa。两根主缆最不利组合下的总缆力为 4.0×10^5 kN,锚块入射角为 47° ;支墩入射角为 30° 。丽江岸重力式锚碇部分混凝土总量为 40 484 m³,钢材用量为 1 297.6 t;支墩部分混凝土总量为 23 712 m³,钢材用量为 1 299.4 t。

2.2 计算工况设计

传统重力式锚碇的设计与抗滑安全验算都是基于结构地基摩擦承载进行的,JTJ/T D65—05—2015《公路悬索桥设计规范》第 8.4.1 条规定,锚碇的稳定性应满足表 8.4.1 的抗滑动稳定性系数不小于 2.0 的标准,抗滑安全系数计算建议参考墩台基础相关规定;8.4.4 条规定了重力式锚碇的实体部分的验算,建议采用三维有限元方法验算。

JTG D63—2007《公路桥涵地基与基础设计规范》第 4.4.2 条规定了墩台基础的抗滑安全系数 k_c 的计算公式:

$$k_c = \frac{\mu \sum P_i + \sum H_{iP}}{\sum H_{ia}} \quad (1)$$

式中: k_c 为墩台基础的抗滑安全系数; $\sum P_i$ 为竖向力总和; $\sum H_{iP}$ 为抗滑水平力总和; $\sum H_{ia}$ 为滑动水平力总和; μ 为基底与地基之间的摩擦因数。

3 丽江岸重力式锚碇抗滑安全性评价

3.1 抗滑安全性评价

3.1.1 平底锚碇基底摩擦承载下抗滑安全系数计算

根据丽江岸重力式锚块部分混凝土总量、钢材用

量及支墩部分混凝土总量、钢材用量数据,假设混凝土重度取 25.0 kN/m^3 ,则:

$$\text{锚块重量: } G_{\text{anchor}} = V_{\text{concrete}} \times \gamma + G_{\text{steel}} = 40\,484 \times 25 + 12\,976 = 1\,025\,079 \text{ kN}$$

$$\text{支墩重量: } G_{\text{buttress}} = V_{\text{concrete}} \times \gamma + G_{\text{steel}} = 23\,712 \times 25 + 12\,994 = 605\,794 \text{ kN}$$

不同重力式锚碇模型见图 3。

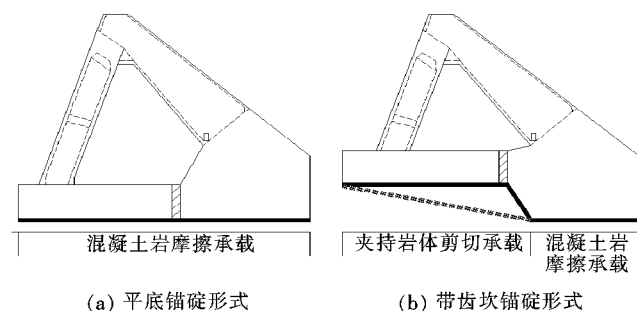


图 3 不同重力式锚碇模型

根据图 3(a)可知:锚碇部分基底面积为 $32 \text{ m} \times 50 \text{ m} = 1\,600 \text{ m}^2$;支墩部分基底面积为 $40 \text{ m} \times 50 \text{ m} = 2\,000 \text{ m}^2$ 。锚碇入射角 $\theta = 47^\circ$,主缆力 $P = 4.0 \times 10^5$ kN,定义为 P_1 ;支墩转角作用力是桥梁荷载(入射角 30°)和主缆荷载(入射角 47°)的合力,合力斜向下与垂线夹角 38.5° ,左右幅合计 122 740 kN(单幅大小 61 370 kN),定义为 P_2 ,则:

$$\sigma_{n,1} = \frac{G_{\text{anchor}} - P_1 \times \sin \theta}{S_1} = \frac{1\,025\,079 - 292\,428}{1\,600} = 458 \text{ kPa}$$

$$\sigma_{n,2} = \frac{G_{\text{buttress}} + P_2 \times \cos 38.5}{S_2} = \frac{605\,794 + 96\,083}{2\,000} = 351 \text{ kPa}$$

代入式(1),基底摩擦因数取 0.59,则:

$$k_c = \frac{\mu \times \sigma_{n,1} \times S_1 + \mu \times \sigma_{n,2} \times S_2}{P_1 \cos 47 + P_2 \sin 38.5} = \frac{432\,264 + 414\,108}{272\,921 + 76\,375} = 2.42$$

抗滑移稳定性满足规范规定的抗滑移安全系数 k_c 不小于 2.0 的规定。

3.1.2 带齿坎锚碇基底联合承载下抗滑安全系数计算

根据文献[16]提出的考虑结构—地基联合承载机制的重力式锚碇水平极限承载计算公式:

$$\tau_f = (\sigma_{n,2} \times \tan \varphi_2 + c) \times S_2 + \sigma_{n,1} \times \tan \varphi_1 \times S_1 \quad (2)$$

式中: S_2 为支墩基底面积(m^2); φ_2 为齿坎夹持岩体摩

擦角($^{\circ}$); c 为夹持岩体黏聚力(kPa); φ_1 为锚碇基底摩擦角; S_1 为锚碇基底面积; $\sigma_{n,1}$ 和 $\sigma_{n,2}$ 分别为锚碇和支墩基底法向应力(kPa),假设图3(b)斜截面上的法向应力与基底相同。

根据图3(b), $S_2=40\text{ m}\times 50\text{ m}=2\,000\text{ m}^2$, $\varphi_1=29.0^{\circ}$, $c=230\text{ kPa}$; $S_1=32\text{ m}\times 50\text{ m}=1\,600\text{ m}^2$, $\varphi_2=30.6^{\circ}$, $\sigma_{n,2}=351\text{ kPa}$, $\sigma_{n,1}=458\text{ kPa}$,代入式(2),则有:

$$\tau_f=(351\times 0.55+230)\times 2\,000+458\times 0.59\times 1\,600=1\,278\,452\text{ kN}$$

则:

$$k_c=\frac{1\,278\,452}{349\,296}=3.66$$

抗滑移稳定性也满足规范要求。相对于平底设计,考虑齿坎和结构—地基联合承载(夹持岩体剪切承载+锚碇基底摩擦承载)的抗滑安全系数是平底锚碇基底摩擦承载计算结果的1.51倍。

3.1.3 抗滑安全性评价小结

考虑到基底碎石土、强风化板岩的素混凝土换填,再加上基坑底板高度范围的素混凝土回填,无形中都在加大扩展了底板的面积,回填设计见图4。

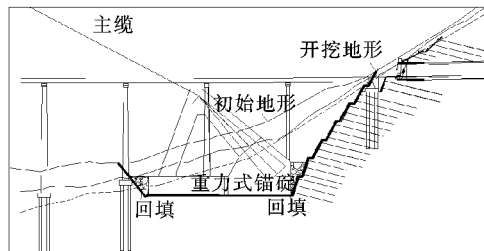


图4 重力式锚碇回填设计

根据前后左右回填部分的面积等效,即三角形截面等效为矩形,前部回填高度10 m,水平距离10 m,三角形截面面积50 m²,等效矩形截面10 m \times 5 m;假设两侧与此类同;后部回填高度18 m,水平距离8 m,三角形截面面积72 m²,等效矩形截面18 m \times 4 m,转角部位的误差忽略,可认为底板面积扩展不小于(72 m+5 m+4 m) \times (50 m+5 m+5 m)=4 860 m²,是原面积的1.35倍。回填混凝土方量=50 m² \times 50 m+72 m² \times 50 m+50 m² \times 72 m \times 2=13 300 m³,增加混凝土重量332 500 kN,则:

$$k_c=\frac{846\,372+332\,500\times 0.59}{349\,296}=2.98$$

抗滑安全系数是原值的1.23倍,实际安全性能再考虑到基底换填工况,比该值还要高。抗滑安全性能有保障。

带齿坎结构的引入,不仅可以极大地改善锚碇的抗滑安全性能,充分发挥地基岩体的剪切承载性能,同时可以极大地改善结构的抗倾覆特性。

3.2 基于抗滑安全性的优化设计

3.2.1 平底锚碇基底摩擦承载下的优化设计

规范要求 $k_c\leq 2.0$,假设 k_c 按2.0考虑,则需要水平抗力 $2\times 349\,296=698\,592\text{ kN}$,支墩部分提供的摩阻力414 108 kN假设不变,仅优化锚碇部分的重量,则:

$$G_{\text{anchor}}=698\,592-414\,108+P_1\times \sin 47^{\circ}=576\,912\text{ kN}$$

假设,所需钢筋数量不变,则承载力为12 976 kN,混凝土重度取25 kN/m³,则所需锚碇混凝土最小体积:

$$V_{\text{anchor}}=\frac{576\,912-12\,976}{25}=22\,557\text{ m}^3$$

锚块部分设计混凝土总量40 484 m³,计算所需锚碇混凝土用量约是锚碇设计用量的56%。

当前锚碇体型在满足结构验算的同时,可以缩减约44%用量。

3.2.2 带齿坎锚碇基底联合承载下的优化设计

规范要求 $k_c\leq 2.0$,假设 k_c 按2.0考虑,则需要水平抗力 $2\times 349\,296=698\,592\text{ kN}$,支墩部分提供的摩阻力846 100 kN假设不变,仅优化锚碇部分的重量,则:

$$G_{\text{anchor}}=698\,592-846\,100+P_1\times \sin 47^{\circ}=144\,920\text{ kN}$$

假设,所需钢筋数量不变(承载力12 976 kN),混凝土重度取25 kN/m³,则所需锚碇混凝土最小体积:

$$V_{\text{anchor}}=\frac{144\,920-12\,976}{25}=5\,278\text{ m}^3$$

锚块部分设计混凝土总量40 484 m³,计算所需锚碇混凝土用量约是锚碇设计用量的13%。

因此,当前锚碇体型在满足结构验算的同时,可以缩减约87%混凝土用量。

3.2.3 优化设计小结

不管是基于传统的摩擦设计,还是基于联合承载设计,在综合考评抗滑稳定性的基础上,丽江岸重力式锚碇的体型和混凝土用量至少可以缩减44%。

支墩底部设置齿坎,可以充分发挥夹持岩体的剪切承载,夹持承载部分提供的抗滑力846 100 kN是摩擦承载(414 108 kN)的2.0倍。联合承载机制下抗滑力是传统摩擦承载下的1.5倍。同时齿坎的设置,与

锚碇基底形成前高后低结构,有利于整体抗倾覆。

综上,丽江岸重力式锚碇的优化有两个方向:①增设齿坎,即台阶;②锚碇减重。

4 结论与展望

(1) 传统的墩台基础抗滑安全系数计算公式,仅考虑了重力式锚碇基底的摩擦承载部分,适用于平底锚碇形式;新型带齿坎重力式锚碇不仅后部基底摩擦承载,而且前部齿坎夹持岩体剪切承载,考虑联合承载的抗滑力估值公式适用于此类锚碇。支墩底部设置齿坎,可以充分发挥夹持岩体的剪切承载,夹持承载部分提供的抗滑力(846 100 kN)是摩擦承载部分(414 108 kN)的 2.0 倍。联合承载机制下抗滑力(1 278 452 kN)是传统摩擦承载提供抗滑力(846 372 kN)的 1.5 倍。同时齿坎的设置,与锚碇基底形成前高后低结构,有利于整体抗倾覆。

(2) 依托香丽高速公路虎跳峡金沙江地锚式悬索桥丽江岸重力式锚碇,传统的摩擦承载抗滑安全系数 $k_c=2.42$;基于联合承载抗滑安全系数 $k_c=3.66$,均大于规范要求的稳定系数标准 2.0。丽江岸重力式锚碇满足抗滑要求。

(3) 基于抗滑稳定系数不小于 2.0,基于摩擦承载,反推得到的锚碇混凝土最小用量为 22 557 m³,比初始用量可节约 44%;基于联合承载,锚碇混凝土最小用量为 5 278 m³,比初始用量可节约 87%。

(4) 丽江岸重力式锚碇可通过增设齿坎和锚碇减重进行优化。

参考文献:

- [1] 周孟波.悬索桥手册[M].北京:人民交通出版社,2003.
- [2] LI Jian-hui, FENG Dong-ming, LI Ai-qun, etc. Determination of Reasonable Finished State of Self-Anchored Suspension Bridges[J]. Journal of Central South University, 2016(23): 209-219.
- [3] HAN Yan, CHEN Zheng-qing, LUO Shi-dong, etc. Calculation Method on Shape Finding of Self-Anchored Suspension Bridge with Spatial Cables[J]. Frontiers of Architecture and Civil Engineering China, 2009, 3(2): 165-172.
- [4] ZHANG Zhe, WANG Hui-li, QIN Shi-feng, etc. Limit Span of Self-Anchored Cable-Stayed Suspension Cooperation System Bridge Based on Strength[J]. Frontiers of Architecture and Civil Engineering China, 2009, 3(3): 286-291.
- [5] KIM H K, LEE M J, CHANG S P. Non-Linear Shape-Finding Analysis of A Self-Anchored Suspension Bridge[J]. Engineering Structure, 2002(24): 1 547-1 559.
- [6] LEES H, LEE H H, PAIK I, etc. Evaluation of Load and Resistance Factors for the Reliability-Based Design of the Main Cables of Earth-Anchored Suspension Bridges[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2016, 20(6): 2 457-2 468.
- [7] SHIN S U, JUNG M R, PARK J, etc. A Deflection Theory and its Validation of Earth-Anchored Suspension Bridges under Live Loads[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2015, 19(1): 200-212.
- [8] 谭新, 徐厚庆, 彭伟. 悬索桥重力式锚碇摩阻系数试验及取值方法[J]. 地下空间与工程学报, 2015(2).
- [9] 刘万春, 林智敏. 岩溶地区重力式锚碇设计[J]. 公路, 2014(10).
- [10] 刘明虎. 悬索桥重力式锚碇设计的基本思路[J]. 公路, 1999(7).
- [11] 冉隆举, 邹济韬. 渡槽重力式锚碇承载性能分析[J]. 公路交通技术, 2015(5).
- [12] 张丽丽. 大跨度悬索桥重力式锚碇抗滑稳定性试验研究[J]. 建筑资讯, 2016(3).
- [13] 李怀亮, 黄山田, 王晓飞, 等. 重力锚水平承载力特性的有限元分析[J]. 中国港湾建设, 2016(1).
- [14] 黄奶清, 李亚平, 程利鹏, 等. 悬索桥重力式混凝土锚碇稳定性验算与数值分析[J]. 河南城建学院学报, 2014(3).
- [15] 范菊. 悬索桥锚碇系统及接触摩擦问题的研究[D]. 大连理工大学硕士学位论文, 2012.
- [16] 尹小涛, 严飞, 周磊, 等. 重力式锚碇水平极限承载力估值公式探讨[J]. 铁道工程学报, 2017(1).
- [17] 赖允瑾, 吴昌将, 张子新. 软岩地基悬索桥重力式锚碇齿坎效应的试验研究与数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010(3).
- [18] 屠毓敏, 吉建兴. 软黏土地基中齿坎抗滑效应的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003(1).