

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

赖允瑾^{1,2}, 吴昌将^{1,2}, 张子新^{1,2}

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 基于刚体计算模型, 首先从理论上探讨座落在软岩地基上的悬索桥齿坎重力式锚碇的齿坎效应工作机制, 得出如下结论: 锚碇结构重心位置决定齿坎抗滑效应产生的方式和效果。其次, 以赣州赣江大桥作为工程为例, 通过现场模型试验分析不同应力水平下, 锚碇各级齿坎的应力分布情况, 进而研究齿坎的抗滑效应, 并检验齿坎效应的上述理论成果。最后, 利用 FLAC^{3D} 对重力式锚碇的受力特性进行三维数值模拟, 分别就有、无齿坎锚碇与软岩地基的共同作用情况, 包括齿坎各接触面抗滑力分布情况进行计算分析, 结果表明: 齿坎的存在改变基底应力分布, 减少锚碇的水平位移, 大幅度地提高极限抗滑力, 并最终改变锚碇破坏模式。研究表明, 现场模型试验结果与数值计算分析结果是一致的。基于上述研究成果, 讨论锚碇结构重心、齿坎高度、接触面以及地层参数等因素对锚碇结构齿坎效应的影响, 并提出带齿坎的重力式锚碇结构的设计原则。

关键词: 岩石力学; 齿坎; 重力式锚碇; 齿坎效应; 接触面; 模型试验; 极限抗滑力

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2010)03-0593-10

TEST AND NUMERICAL ANALYSIS OF EFFECT OF NOTCHED SILL OF GRAVITY ANCHORAGE ON SOFT ROCK GROUND OF SUSPENSION BRIDGE

LAI Yunjin^{1,2}, WU Changjiang^{1,2}, ZHANG Zixin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on the rigid calculation model, the formation mechanism of notched sill effect of gravity anchorage is analyzed for suspension bridge on soft rock ground. It reveals that the mode and performance of notched sill effect mainly depend on the centroid position of anchorage. Taking the anchorage project, Ganjiang suspension bridge on Ganjiang River for example, field model test for anchorage is conducted to investigate notched sill effect by studying the stress distribution of each step of notched sill subjected to different cable tension levels. The results from test validate the formation mechanism of notched sill effect. Additionally, three-dimensional numerical simulation is performed to disclose the mechanical characteristics of gravity anchorage with notched sill by means of the fast Lagrangian analysis of continua in 3 dimensions(FLAC^{3D}). The interaction between surrounding soft rock and anchorage both with and without notched sill is studied. It is concluded that the existing notched sill obviously influences the stress distribution on the bottom of foundation, decreases the horizontal displacement, greatly improves the anti-sliding capacity, and changes the instability mode

收稿日期: 2009-08-21; **修回日期:** 2009-10-26

基金项目: 江西省交通厅重点资助(082139); 上海市重点学科资助项目(B308)

作者简介: 赖允瑾(1966-), 男, 博士, 2003年于同济大学地下建筑与工程系结构工程专业获博士学位, 现任讲师, 主要从事岩石力学、地下结构等方面的教学与研究工作。E-mail: laiyunjin@online.sh.cn

of anchorage. The results from numerical simulation are in good agreement with ones from the field test. Moreover, the analyses of factors of notched sill effect, including the centroid position of anchorage, the height of notched sill and the parameters of interface and surrounding ground, are implemented for structural optimization design. Finally, some principles for designing anchorage structure with notched sill are suggested.

Key words: rock mechanics; notched sill; gravity anchorage; notched sill effect; interface; model test; ultimate anti-sliding force

1 引言

齿坎重力式锚碇已在相关桥梁工程中得到应用, 锚碇基础可以通过在基础底部设置齿坎构造, 利用齿坎前侧的地层抗力来增大锚碇抗滑稳定性, 进而减少重力式锚碇的自身重量, 达到安全经济的目的(见图 1)。然而现还未有较系统的齿坎结构设计理论, 目前一般齿坎只被视为构造措施, 作为安全储备或是不考虑齿坎所起的抗滑作用^[1]。因此, 如何正确地分析齿坎的抗滑作用, 齿坎和基础底部如何相互作用等问题有着积极的工程意义。

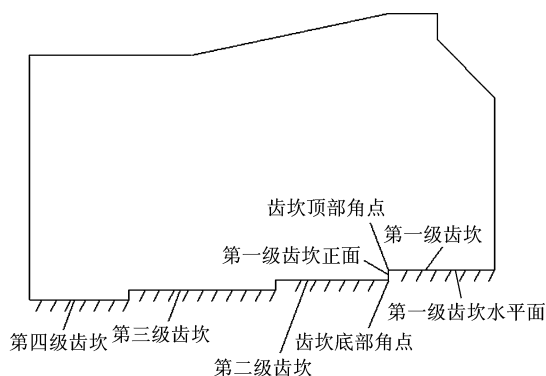


图 1 重力齿坎式锚碇示意图

Fig.1 Sketch of gravity anchorage with notched sill

关于齿坎结构, 国内外学者已作了一些研究工作, 主要集中在海洋基础、抗滑挡墙、水闸、地下基础等工程中。A. G. Young 等^[2, 3]针对不同齿长的齿坎结构在深水基础中抵抗波浪荷载、海底冲刷力的应用问题进行了研究, 认为重力式结构失稳模式取决于齿坎数量、设置的间距、设置的形式等因素, 并提出了楔形被动破坏、深部被动破坏、基底滑移破坏 3 种破坏模式。M. D. Mandar 等^[4]借助离心机模型试验和三维有限元数值分析的方法研究了在冰荷载作用下带有齿坎的海洋基础稳定性问题, 取得了较一致的结论。葛娟^[5]采用刚体极限平衡理论对齿坎式挡墙进行了分析, 提出了这种结构的破坏模式, 并计算出稳定安全系数。屠毓敏等^[6, 7]通过

室内模型试验, 研究了位于软弱地基中重力式挡墙的抗滑稳定性以及齿坎对挡墙的抗滑作用。俞亚南和高庆丰^[8]采用现场试验与数值模拟方法, 对齿坎式挡土墙抗滑稳定性进行分析, 并分析了影响齿坎式挡墙抗滑稳定性的各因素。陈志坚等^[9]根据应力监测数据, 分析了重力齿坎式锚碇与基岩接触面的传力机制, 揭示了齿坎前侧岩体抗力的分布及变化规律。此外, 关于重力式锚碇基础与基岩之间胶结面抗剪强度的研究, 其成果也不少^[10, 11]。然而, 关于齿坎式锚碇的抗滑稳定性还有待于进一步研究, 其应用仍缺乏相应的理论依据以及具体的设计理论和方法, 因此使用尚不普遍。为此, 本文基于刚体计算模型, 来解释齿坎抗滑效应的作用机制, 并借助现场模型试验对赣江大桥西锚碇齿坎的受力机制进行研究, 同时进一步采用数值模拟手段, 结合无齿坎的情况, 对重力式锚碇齿坎的抗滑效应作用进行分析, 来验证齿坎效应具有提高锚碇的抗滑稳定性作用, 并将试验结果与数值分析结果进行对比验证。最后, 考虑到如何充分发挥齿坎结构的抗滑效应, 重点研究了各因素对齿坎效应的影响, 从而能达到齿坎结构优化设计, 降低工程造价的目的。

2 齿坎抗滑效应机制分析

目前, 对于如沉井、地下连续墙基础等地下基础的抗滑与抗倾稳定性计算, 主要有 2 种计算模式^[12]: (1) 日本《道路标示方书》中的刚体计算模型, 认为基础是刚性的, 基础的竖向分力由地基反力抵抗, 倾覆弯矩由基础前侧地层压力与地基反力共同抵抗。(2) 将基础当作地基上的有限长梁处理, 计算出锚碇的受力状态后, 再进行抗滑移、抗倾覆安全稳定性验算。对于直接基础的重力式锚碇, 只要满足滑移的安全性要求, 抗倾覆要求一般就能够满足^[1]。抗滑移安全性的验算可利用下式计算:

$$K_c = \mu \Sigma P_i / \Sigma T_i \quad (1)$$

式中: K_c 为抗滑稳定安全系数, μ 为基底摩擦因数, ΣP_i 为竖向力总和, ΣT_i 为水平力总和。式(1)适用于

平底基础结构, 而带有齿坎阶梯状时, 需考虑这些措施所产生的抗滑力^[13]。

相比之下, 锚碇结构无论其刚度还是强度, 均较软岩地基高得多。因此, 根据刚体计算模型, 可认为锚碇近似于刚体作用在地基上。此时, 锚碇结构设计重心位置对基底齿坎的抗滑作用起着至关重要的决定作用。如图 2 所示, 当锚碇重心偏向锚碇前侧时, 在重力作用下, 锚碇结构围绕基底前端某点发生转动, 使得各级齿坎的正面与前侧岩体脱离, 因此齿坎结构正面未承担任何水平抗力; 随着主缆拉力荷载的作用, 锚碇结构同时产生了顺时针转动和平动位移, 转动位移使得齿坎正面与前侧岩体继续脱离, 而平动位移使得齿坎正面与前侧岩体靠近, 或是当水平接触面抗剪强度较弱时, 接触面产生足够的相对滑动位移使得齿坎正面与前侧岩体接触而相互作用, 齿坎抗滑作用开始逐渐体现出来。同理, 在重力作用下, 当锚碇重心偏向锚碇后端时, 各级齿坎正面与岩体已经开始接触, 随着主缆拉力的增大, 其接触程度更加紧密, 抗滑效应更明显。显然, 2 种齿坎抗滑效应产生的方式和效果完全不同, 后者更能充分有效地发挥齿坎的抗滑效应。由此可见, 如何科学、合理地设计锚碇结构的重心位置, 来保证各级齿坎充分利用前侧岩体抗力正常有

效工作, 最大程度发挥齿坎的抗滑作用, 是个非常有意义的问题。

3 现场模型试验研究

3.1 工程概况

赣州赣江公路大桥采用重力式锚碇的大跨度悬索桥结构形式, 锚碇基础建造于弱风化泥质粉砂岩中。根据相关规范^[14], 该地层属于软岩类别, 易于软化, 抗冻性差, 但完整性较好。西锚碇平面尺寸为 43.3 m×47.5 m, 承受每根 64.7 MN 的主缆拉力(仰角 21.947°), 并将其传递给地基岩体。为了提高抗滑力并优化锚体结构基底受力, 锚碇基础底部设置了齿坎型式, 每级齿坎台阶高 1 m。西锚碇结构型式如图 3 所示。

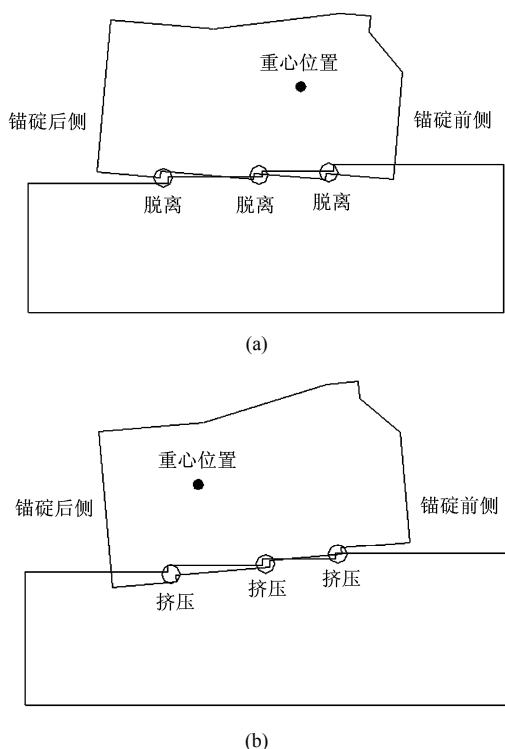


图 2 不同重心位置下锚碇与地基相互作用示意图

Fig.2 Sketches of interaction between anchorage and subgrade for different centroid locations of anchorage

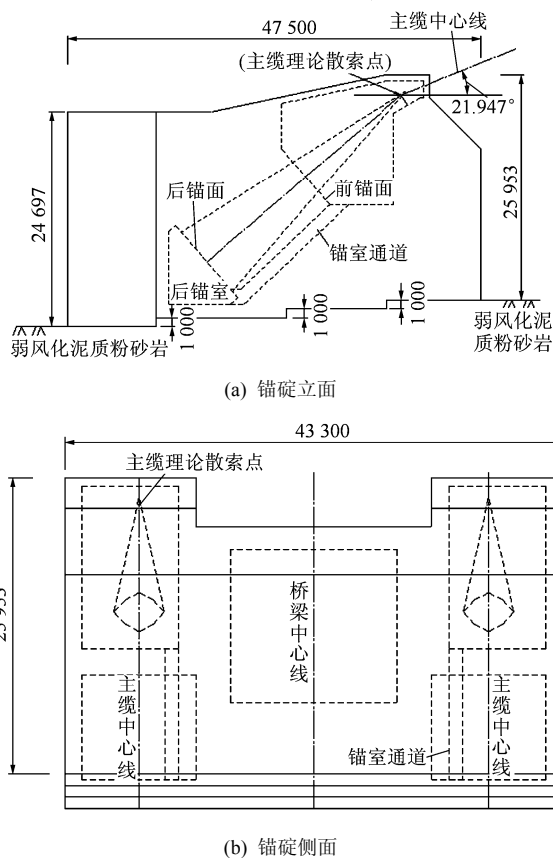


图 3 锚碇结构设计图(单位: mm)

Fig.3 Diagrams of anchorage structure design(unit: mm)

3.2 现场试验设计

(1) 试验研究目的

悬索桥锚碇基础设计是以弹性理论为前提, 并且其设计具有一定的安全系数, 因此, 根据相似理论以及静力模型试验的要求, 进行了弹性结构锚碇模型试验设计, 来模拟齿坎重力式锚碇与软岩地基

相互作用的力学变形性状，研究在不同应力水平下各级齿坎的受力状态与基底各接触面荷载承担比例，探讨锚碇基底接触面的受力机制，判断锚碇现设计方案是否满足设计要求，并对基底齿坎的抗滑效果进行评价。

(2) 现场模型试验设计思想

锚碇结构与地基之间的相互作用取决于自身的刚度、强度以及它们的相对刚度。锚碇结构的刚度与强度均较软岩地基高得多。无论采用何种结构形式，决定锚碇结构安全与稳定的关键因素是锚碇混凝土与基岩之间的胶结面能否提供足够的抗力以限制结构位移。基于这一认识，试验中将锚碇模型本体假设为刚体，所设计锚碇模型结构的自重、重心均应与实体符合相似原理，地层严格按相似理论设计。同时，锚碇结构主要承受了施工荷载和运营荷载，就其所完成的功能而言，锚碇结构在主缆拉力和自重应力下的变化性状是主要的。模型试验中将主缆拉力作用前视为初始状态，因此试验中量测的物理量均为主缆拉力作用下所产生的附加位移和应力。

(3) 相似常数及模型材料

模型试验中，相似现象的原型和模型 2 个系统中各对应物理量之比为量纲一的常数，该比例称为相似常数。相似常数的确定既要满足试验研究内容要求，还要最大限度减少尺寸及边界效应的影响。试验中，一般取 2 或 3 个相互独立物理量的相似常数为基本相似常数，其他物理量的相似常数可以由基本相似常数和各相似定理推导出。综合现场试验各因素，可先确定几何相似比 C_l 和容重相似比 C_γ ，后得模型与实体相似常数之间的关系。其中 C_σ , C_p , δ_m , σ_m , δ_p , σ_p 分别为应力相似比、集中力相似比、模型位移、模型应力、换算后的原型位移及应力。则有

$$C_l = C_\sigma / C_\gamma \quad (2)$$

$$C_\gamma = C_\sigma / C_l \quad (3)$$

$$C_\sigma = C_\gamma C_l \quad (4)$$

$$C_p = C_\gamma C_l^3 \quad (5)$$

$$\delta_p = \delta_m C_\sigma = \delta_m C_l \quad (6)$$

$$\sigma_p = \sigma_m C_\sigma = \sigma_m C_l \quad (7)$$

对于相似模型材料，模型试验选择在现场实际锚碇基底的软岩地层上进行，因此可确定材料容重相似比 $C_\gamma = 1$ ；同时考虑到锚碇结构混凝土与基岩

之间的相互作用以及锚碇结构相对软岩地基刚度很大，所以在模型设计时将锚碇视为刚体，模型分为为混凝土底座与上部钢板结构模型两部分，两部分之间通过底座中的预埋钢板焊接相连。其外形和原形相似，按几何相似比确定模型尺寸，通过内部调节钢板来调整锚碇自重和重心，保证模型和原型的质量和重心严格相似。根据锚碇原型尺寸和试验条件，取几何相似比 $C_l = 40$ ，再结合各相似指标关系式，可确定 $C_\sigma = 40$, $C_p = 64\ 000$ 。相关参数见表 1。

表 1 原型与模型试验物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of prototype and model

名称	锚碇重力/N	锚碇平面尺寸/m	基岩重度/(kN · m ⁻³)	锚索拉力/N
原型	9.39×10 ⁸	43.3×47.5	26.2	64.7×10 ⁶
模型	1.47×10 ⁴	0.433×0.475	26.2	1 011

(4) 加载与量测系统

结合现场的试验环境，并考虑到材料、人力、施工设备等条件，加载装置采用现场自制门式加载架进行加载，通过对悬挂的水箱进行人工注水来施加(见图 4)。加载架是由不同类型的槽钢或角钢焊接而成的钢结构门架，水箱挂载通过 4 根钢丝绳固定在调节横梁的中心点上，将拉力经由调节横梁传递至 2 根平行的钢丝绳，而后钢丝绳借助定滑轮改变拉力方向，最后将拉力作用在锚碇结构上。在锚碇和 2 根钢丝绳之间各串联拉力计，用以测定钢丝绳拉力。整个加载系统中，门式加载架相当于大桥的

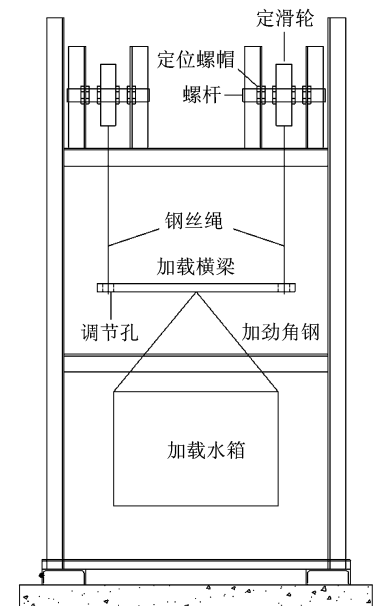


图 4 加载系统

Fig.4 Loading system of model test

主塔, 2 个钢丝绳类似于大桥两侧的主缆连接在锚碇锚拉点处。

量测系统主要包括位移和齿坎应力的量测。应力采用压力盒传感器进行测量, 来重点考察齿坎正面应力的分布情况。由于压力盒传感器的工作原理以及测量要求, 需要先于混凝土底座浇筑前预埋在指定的齿坎阶梯处。各级齿坎阶梯处的测点对称布置, 布设如图 5 所示(图中 1#~8#为测点编号)。最后, 整个模型试验的现场全景如图 6 所示。

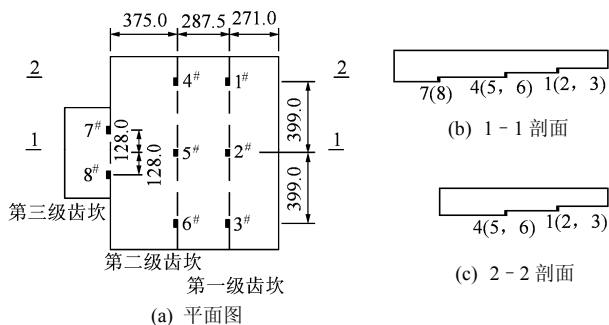


图 5 压力盒传感器布置示意图(单位: mm)

Fig.5 Placement of pressure cell sensors(unit: mm)



图 6 模型试验过程图

Fig.6 Process of model test

3.3 现场试验结果分析

图 7 为荷载 p 增至 1.0 kN, 约 1 倍试验设计值时齿坎各测点应力变化情况。由于试验中出现了暴雨, 致使第一级齿坎阶梯的 1#, 2#处测点端口发生异常, 因此该 2 点采集到的数据无效。从各点曲线可知, 随着锚索拉力的增大, 各测点处的附加应力值基本上一直处于零值状态波动或是非常小, 并没有出现规律性的增减变化, 这说明在锚索拉力的作用下各级齿坎未出现附加应力, 齿坎对锚碇的水平抗力没有贡献。因此, 可以判断锚碇在 1 倍拉力水平状态下, 水平抗力基本上靠锚碇基底水平面的摩擦力和黏聚力承担, 齿坎正面未产生抗滑效应, 可视为一种安全储备。

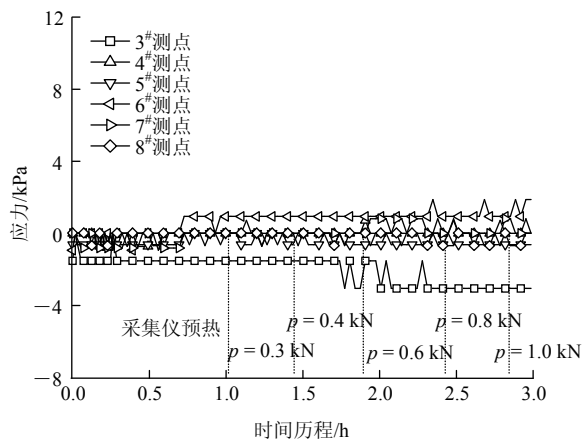


图 7 荷载增至 1.0 kN 各级齿坎处测点应力变化曲线

Fig.7 Stress variation of measuring points on each step of notched sill with tension increasing to 1.0 kN

同样, 为进一步考察齿坎的抗滑作用, 继续增大施加的拉力, 得到各级齿坎处测点应力随着时间变化的关系曲线(见图 8)。由图 8 可知, 当拉力增大至 4.0 kN, 约 4 倍的试验设计荷载时, 各级齿坎的测点附加应力始终保持在非常低的应力状态, 非常稳定, 偶尔有少些振荡, 主要是传感器本身对周围环境的敏感反应以及数据动态采集的原因。因此, 从采集的应力数据表明, 当荷载增至 4 倍试验设计荷载时, 锚碇基底水平面与基岩之间的摩擦力和黏聚力仍足够抵抗锚索拉力, 齿坎的正面未承载任何水平抗力, 因此锚碇模型的抗滑稳定性有较高的安全储备。

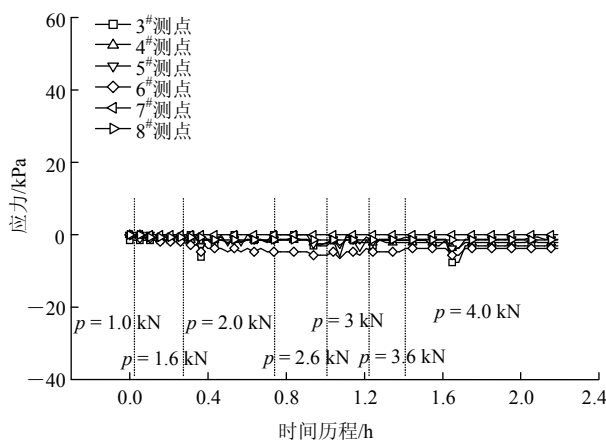


图 8 荷载增至 4.0 kN 各级齿坎处测点应力变化曲线

Fig.8 Stress variation of measuring points on each step of notched sill with tension increasing to 4.0 kN

4 齿坎效应数值模拟

由于数值分析方法具有重复性强、快捷方便等优势, 可通过建立不同的三维数值模型研究不同荷

载、不同重心位置、不同基底几何型式以及不同地质参数等条件下锚碇的稳定性。因此，作为现场模型试验结果的参照，本文以赣州赣江大桥的西锚碇为例，采用有限差分方法来研究锚碇结构的齿坎效应。

4.1 三维数值分析模型

根据提供的设计资料、地质条件，以及模型试验条件，建立三维数值分析模型。由于锚碇结构的对称性，为了提高计算效率，可选取一半模型进行计算，同时需要考虑到边界效应。最后计算模型如图9所示。另外，对无齿坎的锚碇结构在相同条件下也进行了数值模拟，以便二者结果相互对比。

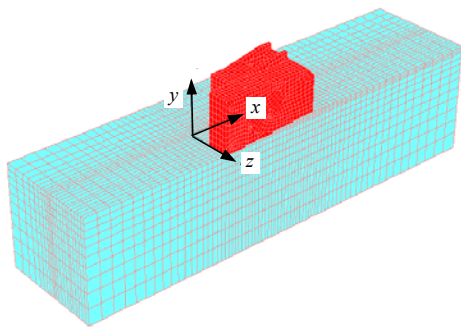


图9 三维数值计算模型

Fig.9 Three-dimensional simulation model

4.2 本构模型与计算参数

在数值模拟中，软岩地层服从莫尔-库仑屈服准则，锚碇结构则采用线弹性材料模拟。为了模拟结构与地基之间的共同作用，在各级齿坎正面和水平面设置了接触面单元来模拟。在FLAC^{3D}计算中，接触面采用摩尔库仑模型，其法向刚度与切向刚度与等效刚度 K_e 有关， K_e 的计算式为

$$K_e = \max \left(\frac{K + \frac{4}{3}G}{\Delta z_{\min}} \right) \quad (8)$$

式中： Δz_{\min} 为接触面相邻单元法向最小尺寸， K 为岩体的体积模量， G 为剪切模量。同时，参照现场剪切试验结果，最后选取法向刚度为 7.1×10^2 MPa，切向刚度为 1.05×10^2 MPa。

接触面参数还涉及到摩擦角和黏聚力2个参数，根据设计提供的参数、相关桥梁地基规范以及现场直剪试验的结果，内摩擦角取 21.8° ，对于混凝土基础与岩石地基之间的黏聚力，可不考虑该部分的影响。其他计算物理力学参数根据地质资料而确定，如表2所示。

表2 物理力学参数

Table 2 Physico-mechanical parameters

名称	重度 ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 /MPa	泊松比	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /($^\circ$)
弱微风化泥质粉砂岩	26.2	5.25×10^2	0.3	100	20
C30 混凝土	25.0	3.00×10^4	0.2	-	-

5 数值计算结果分析

5.1 极限抗滑力

设 ρ 为数值计算中主缆荷载 T 与实际工程中主缆设计荷载 P 的比值，图10为 ρ 与锚拉点水平位移的关系曲线。其特点是：对于有齿坎情况，当荷载相对较小时， ρ 与锚拉点位移呈现线性关系，随着 ρ 增加到3.50时，锚碇周围地层开始出现塑性区，关系曲线呈现非线性特征； ρ 继续增加到4.00后，塑性区迅速扩大，关系曲线出现了拐点，即极限抗滑力，这时锚碇结构出现相对滑动失稳现象。而无齿坎时，相同荷载作用下其位移均大于有齿坎的情况，而且 ρ 到达2.75时，锚拉点位移迅速增大，锚碇已经处于失稳状态。

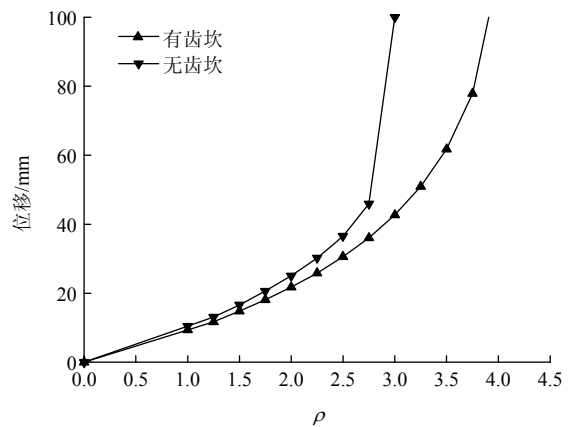


图10 ρ 与锚拉点水平位移关系曲线

Fig.10 Curves of ρ vs. horizontal displacement at anchoring point

5.2 锚碇失稳模式

现行的锚碇设计准则要求满足抗滑移和抗倾覆稳定性要求。计算表明，对于平底的重力式锚碇，当荷载增大到极限拉力的水平时，基底接触面已无法继续承受剪切力而产生滑移破坏；而对于齿坎式锚碇，由于齿坎的存在改变了基底应力分布，在齿坎水平接触面进入剪切屈服状态后，齿坎正面仍能抵抗水平力，直至齿坎前侧岩体剪切破坏为止，锚碇与部分岩体才发生共同失稳破坏。

5.3 抗滑力构成分析

由接触面的应力分布可知, 锚碇抗滑力主要由各级齿坎水平面剪切力和正面岩石抗力构成。通过 Fish 语言编制程序提取各应力组成, 当有齿坎锚碇结构处于极限状态, 即主缆拉力达到 4 倍设计荷载时, 水平面剪切力为 154 MN, 而齿坎正面抗力为 86.1 MN, 占总比例为 35.9%。由此可知齿坎存在的抗滑效应非常明显。图 11 为 ρ 不断增大的情况下, 水平面剪切力、正面岩石抗力与 ρ 之间的曲线, 从中可以看出水平面剪切力与正面岩石抗力在总抗力中的分配比例随 ρ 的变化情况。当主缆拉力较小时, 由于锚碇结构设计的重心位置处于锚碇前端, 各级齿坎的正面与前侧岩体脱离, 因此不承担水平抗力, 这一点正符合节 2 所述的齿坎抗滑效应的形成机制; 当 ρ 增大至 2.50 时, 齿坎正面与前侧岩体从脱离状态进入挤压作用后, 齿坎正面开始发挥抗滑效应, 承担的抗力也逐渐呈线性增大。

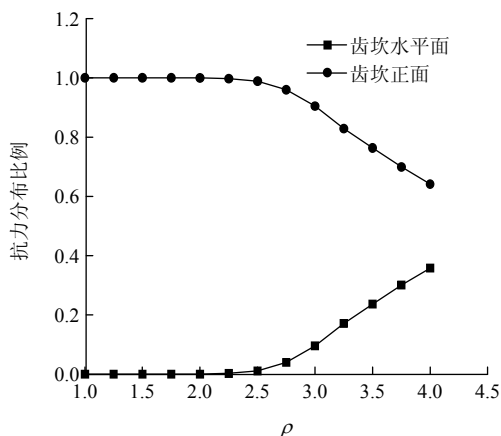


图 11 齿坎抗力分布比例与 ρ 的关系曲线

Fig.11 Curves of resistances distribution ratio vs. ρ on the interface at the bottom

图 12 给出了各级齿坎正面水平抗力的分布。各级齿坎正面的抗滑作用是不尽相同的, 当主缆拉力增加至 $2.50P$ 时, 各级齿坎才开始发挥抗滑作用; 而且, 随着拉力的增加, 各级齿坎抗力的增长速率也是不同的。从该锚碇结构的重心位置以及齿坎效应产生在拉力增长到一定程度的角度出发, 进一步从数值计算方面验证了锚碇重心的位置决定各级齿坎抗滑效应产生的方式。

6 齿坎效应的影响因素

6.1 锚碇重心与齿坎效应的关系

由于结构的重心位置对齿坎抗滑效应有决定作用, 因此为了研究最佳齿坎效应的结构重心设计原

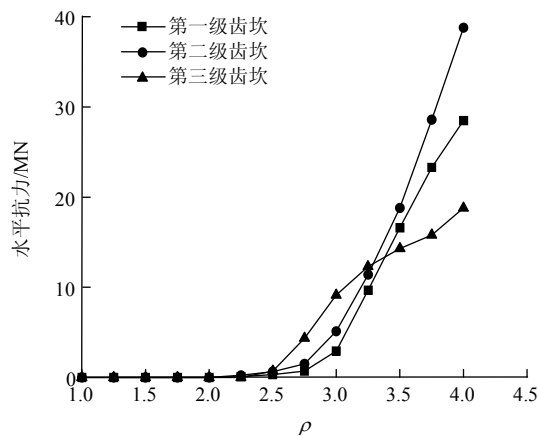


图 12 各级齿坎正面水平抗力分布

Fig.12 Resistance distribution on the front face of each notched sill

则, 针对不同重心位置条件下的锚碇与地基共同作用进行数值分析。当锚碇的重心改变时, 势必会改变锚碇的结构型式, 这样就很难评估重心对相同型式齿坎的抗滑效应影响。故基于锚碇相对于软岩地基为刚体的前提下, 可通过在锚碇后端施加竖向荷载以及改变锚碇的密度来调整锚碇 x 向的重心位置, 从而保证锚碇结构型式以及对地基的竖向荷载不变。对于刚性基础, 只有 x 向的重心位置决定基底应力的分布形式, 因此主要考虑 x 向对齿坎抗滑效应的影响。各坐标轴方向如图 9 所示。

针对赣江大桥西锚碇的结构设计型式, 将其重心向左(即 x 负向)分别偏移 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 和 3.0 m, 得到的齿坎接触面抗力分布比例如图 13 所示。随着重心偏移量增大, 齿坎正面所承担的荷载比例逐渐呈非线性增加, 而齿坎水平面相应地逐渐减少。由此可见, 齿坎正面分担水平抗滑力的作用逐渐增强。

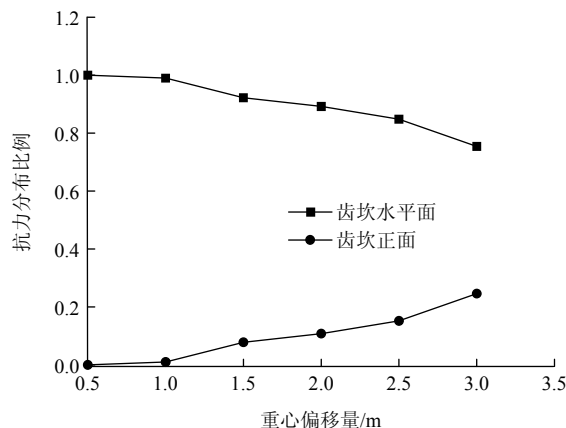


图 13 齿坎抗力分布比例与重心偏移量的关系曲线

Fig.13 Curves of resistance distribution ratio on the interface at the bottom vs. centroid position

同样，由图 14 可知，在不同主缆拉力的作用阶段，重心位置靠后的齿坎正面水平抗力均较重心位置稍靠前的情况大，而齿坎水平面的剪切力则相反。其中，图 14 中括号内的数值代表齿坎重心偏移量的情况。因此重心偏移量越大，其位置越是靠近锚碇后端，齿坎抗滑效应越明显。然而，当重心位置偏离过大时，将会导致锚碇后趾处的竖向应力过大而超过地基容许承载力。

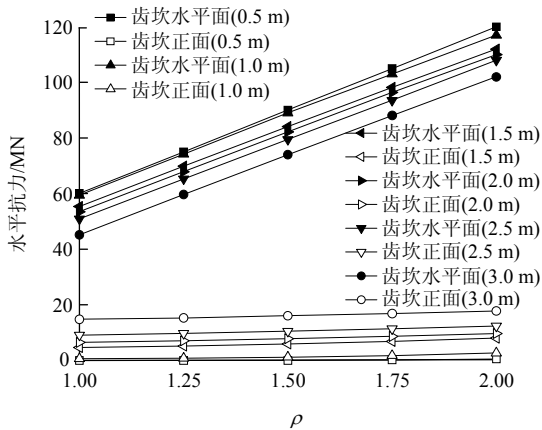


图 14 ρ 与各接触面水平抗力分布关系曲线

Fig.14 Curves of ρ vs. horizontal resistance distribution on each interface

6.2 齿坎高度与齿坎效应的关系

研究表明齿坎高度的增加对齿坎抗滑效应作用的发挥具有明显的增强作用。取齿高为 1.0, 2.0 和 3.0 m 分别进行数值计算，可得主缆拉力与锚拉点的水平位移曲线关系如图 15 所示，不同齿高下的 ρ 与接触面抗力分布关系曲线如图 16 所示。齿坎高度的增加能有效提高锚碇的极限抗滑能力，但对于锚拉点水平位移的限制作用没有明显效果；同时，在

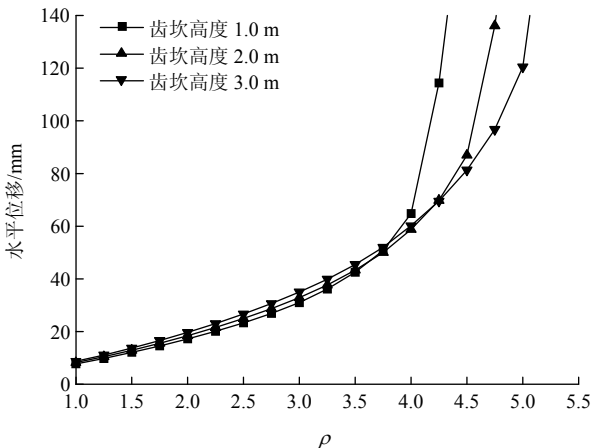


图 15 不同齿高下的 ρ 与锚拉点水平位移关系曲线

Fig.15 Curves of ρ vs. horizontal displacement at anchoring point with different heights of notched sill

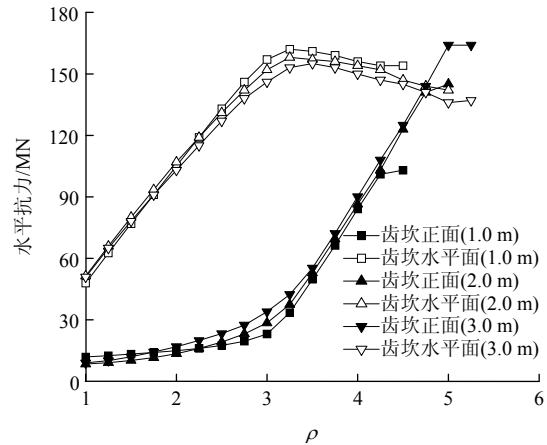


图 16 不同齿高下的 ρ 与接触面抗力分布关系曲线

Fig.16 Curves of ρ vs. resistance distribution on each interface with different heights of notched sill

主缆拉力水平较低时，齿坎高度越小，其正面所承担的水平荷载越大；当主缆拉力增大到一定程度之后，齿坎高度的增加可使其正面所承担的荷载增长更快。因此齿高与齿坎的抗滑效应并不是呈线性增长关系，而是还受外荷载水平的影响。

6.3 接触面参数与齿坎效应的关系

研究表明接触面参数摩擦角对齿坎效应的影响有非常明显的的作用。假定接触面黏聚力为 0，重心位置向锚碇后端偏离 2.0 m 时，分别考虑摩擦角 10.0°, 15.0°, 21.8° 三种不同的情况。图 17 为不同摩擦角下的 ρ 与接触面水平抗力承担比例关系曲线，括号内数值为接触面的摩擦角。

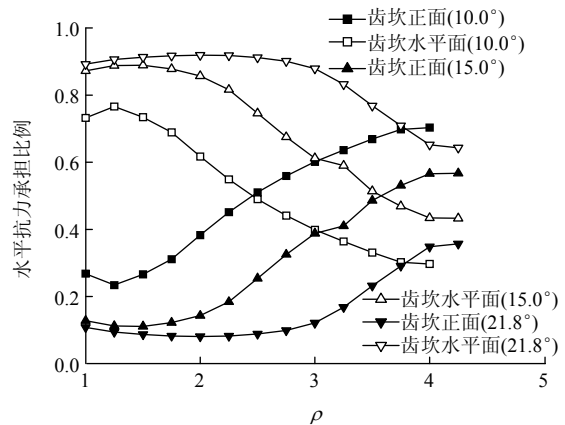


图 17 不同摩擦角下的 ρ 与接触面水平抗力承担比例关系曲线

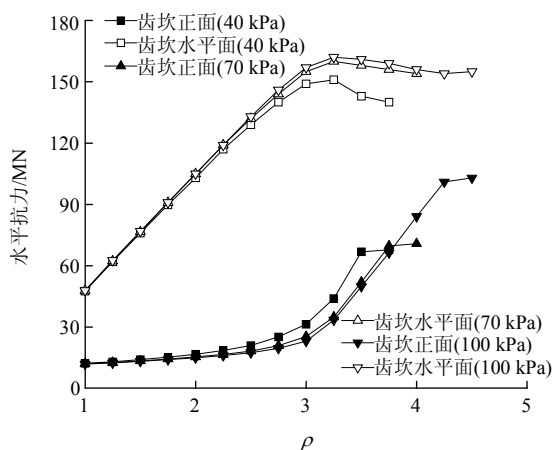
Fig.17 Curves of ρ vs. horizontal resistance distribution ratio on each interface with different friction angles of interface

随着主缆拉力增大，水平面的荷载承担比例则先增加后不断减少，齿坎正面的水平抗力承担比例

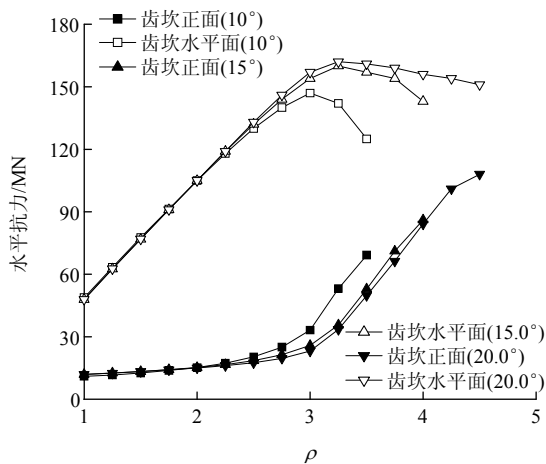
略微减少后不断增大, 直至齿坎前侧岩体进入屈服状态后基本保持不变, 这表明了水平接触面本应承担的水平力都转移到了齿坎正面; 同时, 相同条件下摩擦角越小, 齿坎正面承担的荷载比例就越大。因此, 水平接触面抗剪强度越弱, 则齿坎抗滑效应越明显。随着摩擦角的增大, 锚碇的极限承载力则有略微提高, 主要是因为基于齿坎式锚碇失稳模式, 此时极限承载力取决于齿坎的几何型式和其前侧岩体的抗剪强度。

6.4 地层参数与齿坎效应的关系

改变地层参数 c 或 ϕ 值 (c 为岩石黏聚力, ϕ 为内摩擦角), 在其他条件相同的情况下研究地层参数的变化对齿坎效应的影响。图 18 为地层参数 c 和 ϕ 值对齿坎各接触面水平抗力分布的影响, 括号内数值分别代表地层参数 c 或 ϕ 值。



(a) ϕ 值不变, c 值变化



(b) c 值不变, ϕ 值变化

图 18 ρ 与水平抗力分布关系曲线

Fig.18 Curves of ρ vs. horizontal resistance distribution

由图 18 可知, 在主缆拉力水平较低时, 地层参数的变化对各接触面水平抗力分布的影响较少, 这是因为地层仍处于弹性状态, 各接触面抗力呈线性

增加; 随着拉力的增大, 地质条件较差的部分地层进入塑性状态, 齿坎正面的应力发生重分布现象, 故其齿坎效应更加明显; 地质条件较差的锚碇和周围的地层进入失稳状态后, 地质条件较好时锚碇齿坎正面仍能继续承担水平荷载, 直至到达极限状态, 因此良好的地质情况可增加锚碇极限抗滑能力。

6.5 齿坎设计原则

依据齿坎效应作用产生的机制, 结构重心设计的位置应偏向基础的后端, 这样不仅有利于各级齿坎充分地发挥抗滑效应, 而且能增强锚碇结构的抗倾覆稳定性, 但是重心位置过于靠后将会导致锚碇后趾基底应力过大, 从而不能满足地基容许承载力的要求; 考虑到齿坎高度的增加与齿坎抗滑能力的提高并不是线性关系, 还受到外荷载水平的影响, 因此需综合各因素来确定临界齿高; 齿坎可针对前侧地基强度高、稳定性好, 能够提供较大地基反力的情况而设置。

7 结 论

综合软岩地基上重力式锚碇的齿坎抗滑效应现场模型试验和三维数值分析的研究成果, 主要结论如下:

(1) 锚碇结构的重心位置决定着齿坎效应作用的方式和效果。重心位置偏向锚碇整体结构的后端, 则可使各级齿坎的正面更早、更有效地承担水平抗力, 发挥抗滑作用; 重心位置靠前端时, 会使齿坎正面与前侧岩体发生脱离而不能尽早产生抗滑效应, 此时齿坎结构只能视为一种安全储备, 其抗滑效应还得取决于齿坎水平面的抗剪强度和主缆拉力水平。

(2) 对于赣州大桥西锚碇, 模型试验结果证明: 主缆拉力增大至 4 倍设计荷载时, 锚碇基底齿坎水平面仍承担了所有的水平抗力, 各级齿坎正面均未产生抗力, 表明齿坎水平面有足够的抗剪强度来承担水平剪切力。数值分析结果表明: 当主缆拉力较低时, 各级齿坎正面均不受正面抗力, 而当主缆拉力增加至 2.5 倍设计荷载时, 各级齿坎才开始发挥抗滑作用。因此, 从规律上讲, 模型试验与数值分析均验证了齿坎抗滑形成机制的正确性, 取得了较一致的结论。但是, 由于数值模拟的计算参数以及试验条件的影响可能导致二者数值上的差异。

(3) 对于赣州大桥西锚碇, 数值模拟结果还表

明: 由于设计的重心位置位于锚碇前端, 在较低荷载水平下, 齿坎的正面未承担抗滑力; 而外荷载不断增大后, 齿坎效应开始愈来愈明显。因此锚碇齿坎结构的抗滑效应可视为安全储备, 符合目前传统设计方法。此外, 与无齿坎式锚碇对比, 齿坎的存在改变了基底应力分布, 减少了锚碇的水平位移, 并较大幅度的提高了极限抗滑力, 同时也改变了锚碇失稳模式。

(4) 锚碇重心的偏移量有利于齿坎抗滑能力的提高, 锚碇向其后侧偏移量越大, 齿坎正面所承担的水平抗力比例就越大。在其他条件相同情况下, 接触面或地层参数相对较弱则更有利于齿坎抗滑效应的发挥, 而锚碇抗滑极限承载力决定了齿坎的几何型式和其前侧岩体的抗剪强度。

基于以上的研究成果, 应综合考虑各方面的因素来进行锚碇基础结构的优化设计, 以期充分发挥齿坎的抗滑效应。

参考文献(References):

- [1] 沈华春. 吊桥设计技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 1995.(SHEN Huachun. Suspension bridge design technology[M]. Beijing: China Communications Press, 1995.(in Chinese))
- [2] YOUNG A G, KRAFT JR L M, FOCHT JR J A. Technical considerations in foundation design of offshore gravity structures[J]. Journal of Petroleum Technology, 1976, 28(8): 925 - 937.
- [3] ANDENAE S, SKOMEDAL E, LINDSETH S. Installation of the troll phase 1 gravity base platform[C]// Offshore Technology Conference OTC 8122. Houston: [s.n.], 1996: 57 - 70.
- [4] MANDAR M D, JEAAN H, HON-YIM K. Physical and finite element modeling of lateral stability of offshore skirted gravity structures subjected to iceberg impact load[J]. Ocean Engineering, 2008, 35(16): 1 615 - 1 625.
- [5] 葛娟. 齿坎式挡墙的极限平衡理论分析[J]. 苏州大学学报(自然科学版), 2001, 17(2): 58 - 61.(GE Juan. Analysis of retaining wall with notched sill with limit equilibrium theory[J]. Journal of Suzhou University(Natural Science), 2001, 17(2): 58 - 61.(in Chinese))
- [6] 屠毓敏, 俞亚南. 齿坎抗滑作用的模型试验研究[J]. 水利学报, 2000, (12): 68 - 71.(TU Yumin, YU Yanan. Model test for sliding resistance of tenon[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, (12): 68 - 71.(in Chinese))
- [7] 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, 22(1): 157 - 161.(TU Yumin, JI Jianxing. Study of effect of key wall in the soft clay ground on sliding resistance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 157 - 161.(in Chinese))
- [8] 俞亚南, 高庆丰. 齿坎式挡土结构抗滑稳定性分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2003, 37(6): 652 - 656.(YU Yanan, GAO Qingfeng. Numerical analysis for stability against sliding of retaining wall with notched sill[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2003, 37(6): 652 - 656.(in Chinese))
- [9] 陈志坚, 董学武, 谢和平. 复杂受力条件下重力式结构基底应力的实测研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(1): 46 - 50.(CHEN Zhijian, DONG Xuewu, XIE Heping. Monitoring data-based study of foundation stress of gravity structures under complex loading conditions[J]. Journal of Hohai University(Natural Science), 2004, 32(1): 46 - 50.(in Chinese))
- [10] 吉林, 睦峰, 王保田. 润扬大桥锚碇基岩摩阻力试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 256 - 260.(JI Lin, XU Feng, WANG Baotian. Testing study of base resistance of the anchors at Runyang bridge[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(2): 256 - 260.(in Chinese))
- [11] 朱珍德, 邢福东, 渠文平, 等. 岩石-混凝土两相介质胶结面抗剪强度分形描述[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增1): 2 910 - 2 917.(ZHU Zhende, XING Fudong, QU Wenping, et al. Fractal description of shear strength of cementation plane between rock and concrete[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.1): 2 910 - 2 917.(in Chinese))
- [12] 赵启林, 陈斌, 卓家寿. 悬索桥锚碇及地基基础中的力学问题研究动态[J]. 水利水电科技进展, 2001, 21(1): 22 - 26.(ZHAO Qilin, CHEN Bin, ZHUO Jiashou. Research trends of mechanics problems between anchorage of suspension bridge and foundation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2001, 21(1): 22 - 26.(in Chinese))
- [13] 中华人民共和国行业标准编写组. JTG D63 - 2007 公路桥涵地基与基础设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.(The Professional Standard Compilation Group of People's Republic of China. JTG D63 - 2007 Specifications for design of ground base and foundation of highway bridges and culverts[S]. Beijing: China Communications Press, 2007.(in Chinese))
- [14] 中华人民共和国国家标准编写组. GB 50218 - 94 工程岩体分级标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1995.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB 50218 - 94 Standard for engineering classification of rock masses[S]. Beijing: China Planning Press, 1995.(in Chinese))