

文章编号:1006-2106(2017)01-0041-06

重力式锚碇水平极限承载力估值公式探讨*

尹小涛^{1**} 严飞² 周磊¹ 王东英¹ 邓琴¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 2. 云南省交通规划设计研究院 陆地交通气象灾害防治技术国家工程实验室, 昆明 650041)

摘要:研究目的:当前基于摩擦设计的重力式锚碇的水平极限承载力估值偏保守,没有考虑锚碇结构与地基协同作用,联合承载的估值结果与实际偏差较大。本文利用平硐岩基摩擦试验、重力式锚碇基底深部位移监测和数值仿真试验等手段,探讨重力式锚碇与岩基的协同作用和联合承载机制。

研究结论:(1) 极限试验破坏形态揭示了重力式锚碇不是单纯的摩擦承载,而是锚-岩联合承载;(2) 锚碇-岩基联合极限承载分为两个阶段和三个效应,初期为基底摩擦极限承载,摩擦效应;之后,前部齿坎夹持岩体剪切破坏极限承载,锚岩系统联合承载性能达到极限,夹持效应;基底上覆土重量对上述两部分都有提高,回填效应;(3) 提出了考虑上述效应和联合承载机制的重力式锚碇水平极限承载力估算公式,经工程案例检验,公式极限估值 $9.6P$ 与数值仿真确定的极限值 $8.0P$ 接近,说明公式精度有保证,符合实际破坏模式;(4) 该研究成果可用于新型重力式锚碇的设计和安全监控领域。

关键词:重力式锚碇;协同作用;联合承载机制;水平极限承载力估算公式

中图分类号:TU457 文献标识码:A

Exploration on the Horizontal Limit Bearing Capacity Formula of Gravity Anchorage

YIN Xiao-tao¹, YAN Fei², ZHOU Lei¹, WANG Dong-ying¹, DENG Qin¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. National Engineering Laboratory for Surface Transportation Weather Impacts Prevention, Yunnan Provincial Plan Design and Research Institute of Communications, Kunming, Yunnan 650041, China)

Abstract: Research purposes: Horizontal limit bearing capacity under current design of gravity anchorage based on friction design condition is often conservatively estimated. The estimated value without consideration of synergy and joint bearing mechanism of gravity anchorage and base is greatly deviated from practical one. Using friction test of rock base in adit, monitoring section of deep displacement under base bottom and numerical simulation experiment, the synergy and joint bearing mechanism of gravity anchorage and base is discussed in the paper.

Research conclusions: (1) Fail mode presented by limit test proves that gravity anchorage is not friction bearing, but anchorage and base joint bearing. (2) The limit bearing capacity of anchorage & rock base can be divided into two stages and contains three effects, first being friction effect supported by friction limit bearing capacity of anchorage base bottom, second is clamping effect presented by clamping rock mass shearing limit capacity, third is buried depth effect enhanced the former two limit bearing parts by refilling soil weight on base and structure. (3) The estimation formula for

* 收稿日期:2016-07-21

基金项目:云南省交通科技项目(云交科2011(LH)12-a;云交科2014(A)01);陆地交通气象灾害防治技术国家工程实验室开放基金(NELBP201501)

** 作者简介:尹小涛,1975年出生,男,副研究员。

horizontal limit bearing capacity of gravity anchorage with above three effects considered is built, which is checked by project case, limit result of formula being $9.6P$ is close to that of numerical test being $8.0P$, these prove precision of the formula and conform to practical fail mode. (4) The achievement above can be used in design and monitoring fields of new type gravity anchorage.

Key words: gravity anchorage; synergy mechanism; joint bearing mechanism; estimation formula of horizontal limit bearing capacity

1 前言

重力式锚碇多利用自身重量和基底摩擦提供锚固作用, 体型一般较大, 结构形式简单。其优点在于: 适用范围广, 安装简单, 安全储备相对较高; 缺点在于: 体型较大, 不符合集约型社会发展的标准。

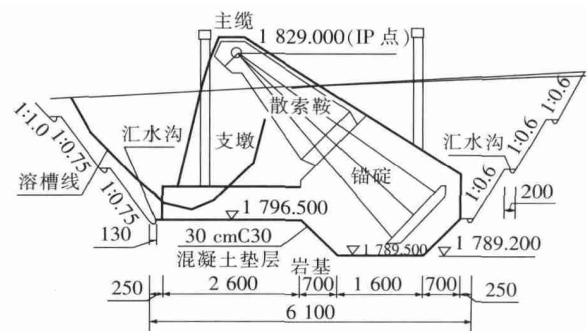
重力式锚碇设计和稳定性的计算, 都涉及到极限承载的问题。对于该问题的研究, 最早的是 Taylor 在 1982 年提出了相对完备的重力式锚碇的基本设计准则和计算方法^[1]。随后海上重力式锚碇得到了大力发展, 美国海军工程师手册中给出了考虑剪力键、浮力和冲刷作用的重力式锚碇极限水平承载力估算公式^[2]。我国规范^[3]也给出了重力式锚碇的摩擦系数建议值和摩擦设计的基本原则及方法。另外, 朱栓来^[4]还探索了利用分项系数的方法在设计中区别对待恒荷载和活荷载。但是, 目前设计理论过于注重锚碇结构本身, 没有反映锚碇与地基的协同作用, 无法适应新型锚固形式发展的需要。

对于真实的重力式锚碇与地基的相互作用机制研究, 主要有以下几种形式: 一是, 通过现场地基摩擦性能试验, 方便利用简单的摩擦公式评估重力式锚碇所能提供的承载力^[5]; 二是, 通过监测评估重力式锚碇的安全状态, 反推作用机制和设计理论^[6]; 三是, 通过室内模型试验弄清楚重力式锚碇与地基的相互作用机制、破坏模式和所能提供的承载力^[7]; 四是, 通过数值仿真试验, 揭示重力式锚碇与地基的相互作用机制、破坏模式和承载力性能, 评估全面, 评估模型可以相对复杂和精细, 问题主要在于仿真涉及到的本构关系和输入参数的合理性和正确性, 需要先弄清楚材料自身的物理力学性质^[8]; 五是, 通过现场试验、室内模型试验、监测和数值试验综合分析新型带齿坎^[9]和根键^[10]重力式锚碇的作用机制和承载机制, 丰富了锚碇形式, 也间接推动了设计理论。通过研究发现, 单纯将锚碇作为一个独立的结构承载体系, 研究其承载性能是不合适的, 现实中锚碇和地基是联合承载的; 单纯的摩擦设计相对保守, 尤其是对带齿坎和根键的重力式锚碇, 据此设计浪费很大。

本文在分析重力式锚碇和地基协同作用及联合承载机制的基础上, 探索符合工程实际和真实变形破坏机制的重力式锚碇与地基联合作用下的承载力估算公式, 依托实际工程评估传统设计和考虑联合承载机制的设计的差异。

2 重力式锚碇与地基协同作用机制

带齿坎重力式锚碇的重心后移有利于齿坎发挥效用^[8], 当前重力式锚碇多采用这类型式, 如普立特大桥宣威岸重力式锚碇, 其设计图和建成图如图 1 所示。



(a) 设计图



(b) 建成图

图 1 重力式锚碇系统示意图(长度单位: cm, 高程单位: m)

2.1 重力式锚碇-岩基联合承载和协同作用机制验证

2.1.1 现场试验发现的混凝土-岩基联合承载现象

根据锚碇基底和平硐摩擦试验, 可发现很多混凝土-岩基联合承载现象, 典型试验点如图 2 所示。该岩基摩擦试验点测得的混凝土-岩基强度参数为黏聚力 1.35 MPa , 约为最低值 0.64 MPa 的 2.11 倍。高值的原因在于, 混凝土底板在法向力作用下带动部分岩

体协同变形破坏。



图 2 典型混凝土 - 岩基联合承载破坏照片

2.1.2 钻孔测斜剖面揭示的锚岩协同作用机制

在普立特大桥宣威岸重力式锚碇安全监控中,沿支墩基底轴向布设的两个测斜孔形成的岩基深部水平位移监测剖面如图 3 所示。

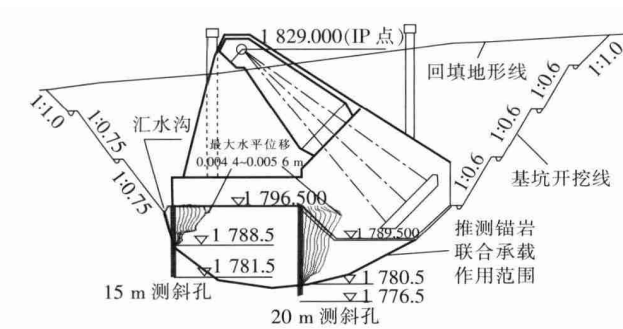


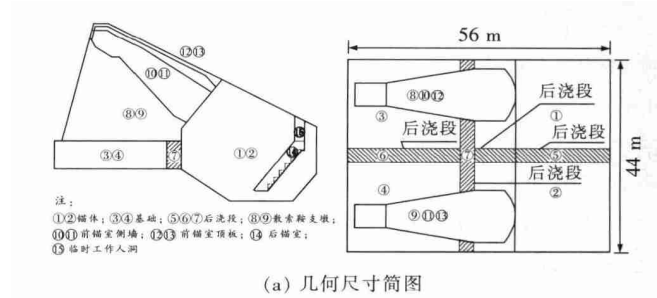
图 3 岩基深部水平位移监测剖面

由图 3 可知,重力式锚碇和支墩结构在工程荷载作用下确实夹持了部分岩体共同承载,水平变形量最大的位置依然在基底,量值不大,说明工程安全。深部水平变位符合夹持岩体的剪切滑动变形破坏规律。支墩与锚碇基底高差 7 m,可是中部测斜孔揭示的滑动面深度最深约 16.0 m,前部测斜孔该值约 8.0 m,说明极限状态下不仅是齿坎部位简单的楔形夹持剪切破坏,锚碇基底也会带动部分岩体变形,具体带动厚度与齿坎高度、锚碇基底尺寸和岩基性质相关。

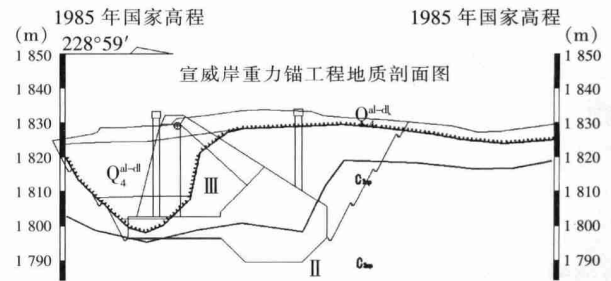
2.1.3 数值仿真试验揭示的锚 - 岩协同作用机制

数值建模参考普立特大桥宣威岸重力式锚碇设计和工程地质条件,采用 FLAC^{3D} 建模,四面体、六面体和五面体单元混合剖分,单元 215 440 个,节点 52 125 个。底面全约束,侧面法向约束。锚碇选用弹性本构,岩土体采用弹塑性本构。建基面进入中微风化白云质灰岩,试算后确定模型岩基厚度 31 m,其中锚碇与岩基接触采用薄层单元进行模拟,参数为考虑咬合作用黏聚力的摩擦试验结果。数值仿真模型如图 4 所示。

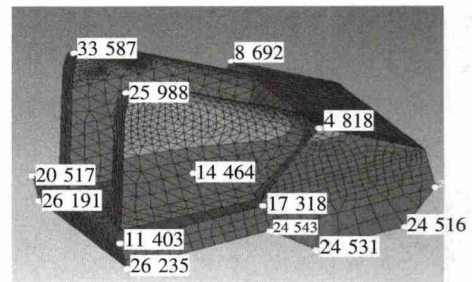
不同地层岩土体的物理力学参数建议值由设计和勘察提供,如表 1 所示。



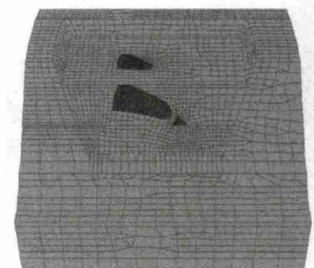
(a) 几何尺寸简图



(b) 地质剖面



(c) 网格化锚碇



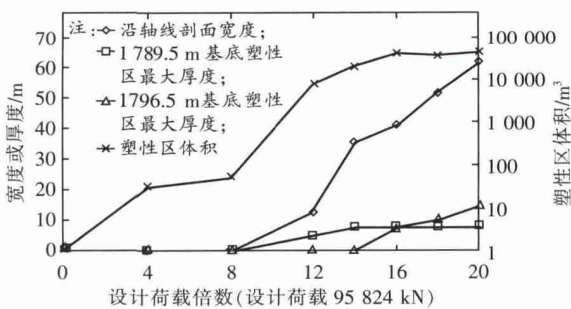
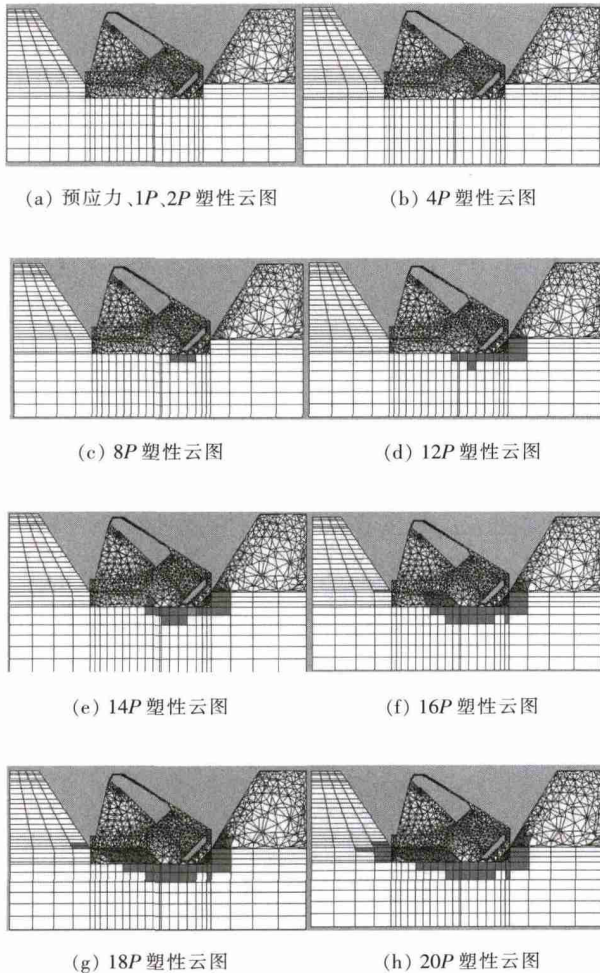
(d) 网格化模型

图 4 数值仿真模型

表 1 计算参数表

岩体名称	天然重度 / (kN/m ³)	内摩擦角 / (°)	黏聚力 / MPa	弹性模量 Ee / GPa	泊松比 μ	抗拉强度 / MPa
覆盖层	18.9	27.0	0.035	0.038	0.35	0.0
白云质灰岩	26.5	40.0	0.85	8.0	0.22	0.7
锚体	25.0	35.0	1.50	30.0	0.20	1.1
锚 - 岩界面	25.0	34.3	0.71	7.89	0.23	0.6
回填土	16.5	32.0	0.020	0.030	0.35	0.0

数值模拟中,先平衡初始地应力;再模拟基坑开挖;接着浇筑锚碇;张拉预应力,预应力施加量为2倍的设计荷载,约为 $2 \times 95\,824\text{ kN}$,以面力的形式施加在前、后锚面;最后在前锚面成倍数施加缆力,逐步增加直到极限状态,设计荷载为 $95\,824\text{ kN}$ (简称 P),最终加载到20倍的设计荷载终止。将0~20倍设计荷载作用下的重力式锚碇和岩基联合承载系统纵剖面塑性区云图进行整理,所得结果如图5所示。



(i) 轴线剖面塑性区扩展与加载关系曲线

图5 重力式锚碇-岩基塑性区扩展过程图

由图5可知,在 $8P \sim 12P$ 加载下,重力式锚碇基底从出现塑性直到贯通,代表了 $1\,789.5\text{ m}$ 高程基底的极限承载状态;在 $12P \sim 20P$ 加载下,前部齿坎部位的塑性区逐步贯通至前部基底前趾表面,代表了 $1\,796.5\text{ m}$ 高程基底也达到了极限状态。至此,整个锚碇基底($1\,796.5\text{ m} + 1\,789.5\text{ m}$ 基底)全部塑性区贯通。从图5(i)可知, $1\,789.5\text{ m}$ 基底也会夹持部分岩基联合承载,在在 $8P \sim 14P$ 之间,逐步达到最大夹持厚度 $4.7 \sim 7.9\text{ m}$,监测值为 8.0 m ; $1\,796.5\text{ m}$ 基底从 $14P$ 开始夹持直到 $20P$ 达到最大厚度 14.8 m ,监测值为 16.0 m ,夹持量与监测值接近。这说明重力式锚碇与岩基联合承载,极限承载分为锚碇基底和支墩齿坎基底极限承载2个阶段。

2.2 锚-岩协同作用及联合承载机制

当前,重力式锚碇的设计一般仅考虑基底摩擦效应。新型锚碇一般通过增强基底摩擦性能、扩大夹持范围、发挥阻滑结构的抗剪强度和增加上覆岩土材料重量等增加承载,不再是单纯的摩擦承载。由于基底夹持岩土体的量很难量化评估,一般仅考虑齿坎和其他夹持结构所带动岩土体的抗剪强度,所以承载有基底摩擦极限承载(先)和齿坎夹持岩体剪切极限承载两部分(后)。重力式锚碇联合承载机制示意图如图6所示。

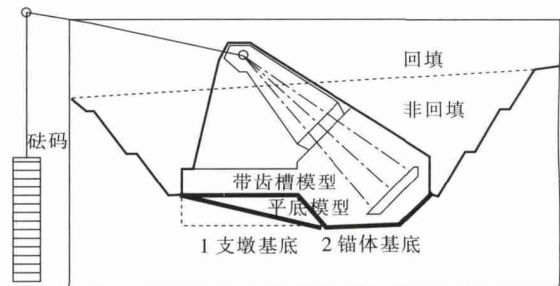


图6 重力式锚碇联合承载机制示意图

2.2.1 摩擦效应

承载初期,可以认为基底受力均匀,摩擦居主导。基底应力一般不超过岩基的容许承载力。该阶段的承载力估算公式如下:

$$\tau_{ak} = \sigma_{n1} \times \tan\varphi \times S_1 + \sigma_{n2} \times \tan\varphi_2 \times S_2 \quad (1)$$

式中 下标1和2——支墩基底和锚体基底;

下标n——法向;

φ ——相应部位混凝土与岩基摩擦角。

有研究认为,应该再按就低原则考虑底板侧壁带来的摩擦承载部分,由于侧压力难于准确测定,所以不好考虑。

2.2.2 夹持效应

有研究表明:前部台阶和齿坎的存在可以很好地改善锚岩系统的抗滑稳定和抗倾覆稳定特性。设计中应计入夹持岩土体的剪切破坏提供的承载力,可按下式考虑:

$$\tau_{ak} = (\sigma_{n1} \times \tan\varphi_1 + c) \times S_1 + \sigma_{n2} \times \tan\varphi_2 \times S_2 \quad (2)$$

式中 c 和 φ_1 ——齿坎和支墩基底夹持岩体抗剪强度参数;

φ_2 ——锚碇基底摩擦角。

2.2.3 回填效应

回填效应对承载力的提高和变形控制的改善是有利的。同样由于侧压力难以准确评估,所以其贡献通过底板及结构上部上覆土重考虑,可按下式考虑:

$$\sigma_n = \frac{(G_a - F_v) + G_s}{S_b} \quad (3)$$

式中 G_a ——锚碇结构;

F_v ——桥梁荷载竖向分量;

G_s ——底板上覆土重量;

S_b ——基底面积。

2.3 考虑联合承载与否对承载性能评估带来的影响

普立特大桥宣威岸重力式锚碇最不利组合下设计荷载 191 064 kN,支墩和锚碇基底摩擦系数分别为 0.3和0.6,混凝土量 16 332.4 m³ 和 26 286.0 m³;钢

材 992.2 t,混凝土容重按 25.0 kN/m³ 考虑,荷载中心作用与水平面夹角约 46.5°。

按当前摩擦设计,代入公式(1)则:

$$\sigma_n = \frac{25.0 \times (16\,332.4 + 26\,286.0) + 9\,922 - 2 \times 95\,824 \times \sin 46.5^\circ}{56 \times 44} = 380.0 \text{ (kPa)}$$

$$\tau_{ak0} = [(380.0 \times 0.3) \times 22 \times 26 + (380.0 \times 0.6) \times 22 \times 16] = 145\,479.5 \text{ (kN)}$$

$$K_0 = \frac{145\,479.5}{95\,824 \times \cos 46.5^\circ} = 2.2$$

考虑夹持+摩擦效应,代入公式(2),夹持岩体参数 $c = 850$ kPa, $\varphi = 40^\circ$ 则:

$$\tau_{ak1} = [(380.0 \times 0.3 + 850) \times 22 \times 26 + (380.0 \times 0.6) \times 22 \times 16] = 631\,664.0 \text{ (kN)}$$

$$K_1 = \frac{631\,664.0}{95\,824 \times \cos 46.5^\circ} = 9.6$$

如夹持岩体参数折半,即 $c = 425$ kPa, $\varphi = 40^\circ$,代入公式(2)则:

$$\tau_{ak2} = [(380.0 \times 0.3 + 425) \times 22 \times 26 + (380.0 \times 0.6) \times 22 \times 16] = 388\,564.0 \text{ (kN)}$$

$$K_2 = \frac{388\,564.0}{95\,824 \times \cos 46.5^\circ} = 5.9$$

考虑夹持+摩擦+回填效应,代入公式(2),上覆土体积 47 344 m³,容重 16.5 kN/m³ 则:

$$\sigma_n = \frac{25.0 \times (16\,332.4 + 26\,286.0) + 16.5 \times 47\,344 + 9\,922 - 2 \times 95\,824 \times \sin 46.5^\circ}{56 \times 44} = 697.1 \text{ (kPa)}$$

$$\tau_{ak2.1} = [(697.1 \times 0.3 + 850) \times 22 \times 26 + (697.1 \times 0.6) \times 22 \times 16] = 753\,049.9 \text{ (kN)}$$

$$K_{2.1} = \frac{753\,049.9}{95\,824 \times \cos 46.5^\circ} = 11.4$$

$$\tau_{ak2.2} = [(697.1 \times 0.3 + 425) \times 22 \times 26 + (697.1 \times 0.6) \times 22 \times 16] = 509\,940.8 \text{ (kN)}$$

$$K_{2.2} = \frac{509\,940.8}{95\,824 \times \cos 46.5^\circ} = 7.7$$

考虑摩擦+回填效应,上覆土参数同上,代入公式(1)则:

$$\tau_{ak0.2} = [(697.1 \times 0.3) \times 22 \times 26 + (697.1 \times 0.6) \times 22 \times 16] = 266\,849.9 \text{ (kN)}$$

$$K_{0.2} = \frac{266\,849.9}{95\,824 \times \cos 46.5^\circ} = 4.0$$

由计算结果可知,纯摩擦设计,计算所得抗滑移安全系数为 2.2。考虑齿坎夹持岩体的剪切破坏特征,则安全系数提高至 9.6(岩体强度)和 5.9(岩体强度折半),可分别提高 4.4 和 2.7 倍。叠加回填效应,则安全系数为 11.4(岩体强度)、7.7(岩体强度折半)和

4.0(纯摩擦),可分别提高 5.2、3.5 和 1.8 倍;相对于考虑夹持的工况,安全系数增幅 18.8%(岩体强度 11.4/9.6)和 30.5%(岩体强度折半 7.7/5.9)。

综上,重力式锚碇的设计需要在摩擦设计的基础上,增补考虑夹持效应和回填效应。

3 基于联合承载的重力式锚碇水平极限承载力估值公式

重力式锚碇实际承载性能的发挥是在锚碇结构和地基共同作用下进行的,先是锚碇基底摩擦性能逐步发挥达到极限;接着是齿坎夹持岩土体的剪切破坏继续承载达到极限;最后随着回填,上覆土压重间接增强重力式锚碇的水平承载能力。综合考虑 3 个效应的承载力公式如下:

$$\tau_{ak} = (\sigma_n \times \tan\varphi_1 + c) \times S_1 + \sigma_n \times \tan\varphi_2 \times S_2 \quad (4)$$

式中 下标 1——齿坎夹持承载;

c 和 φ_1 ——夹持岩土体抗剪强度参数;
 S_1 ——支墩基底面积;
 下标 2——基底摩擦承载;
 φ_2 ——锚碇基底摩擦角;
 S_2 ——锚碇基底面积;
 σ_n ——考虑回填修正的法向应力,计算公式见公式(3)。

基于安全考虑,公式(4)中,上覆土重为有效容重;夹持岩体建议取残余强度。公式没有考虑底板和锚碇侧壁的摩阻力、前后部的土压力,主要是侧压力难以测定,且数据不稳定,如需考虑可按实测的低值考虑。

抗滑移安全系数的计算公式如下:

$$K = \frac{\tau_{ak}}{F_h} \quad (5)$$

式中 τ_{ak} ——锚碇-地基联合水平极限承载力;
 F_h ——桥梁荷载水平分量。

图5塑性区分段贯通确定的极限承载力值约为 $8P \sim 14P$ 。根据本文估值公式,参数分别取岩体强度、残余强度,则估值约在 $7.7P \sim 11.4P$ 之间,均远大于纯摩擦设计估值。

4 结论

(1) 重力式锚碇和岩基在工程荷载作用下联合承载,初期为基底摩擦极限承载;之后,前部齿坎夹持岩体剪切破坏极限承载,锚岩系统联合承载性能达到极限;埋深通过上覆土重量起作用,对两部分都有提高。

(2) 宣威岸重力式锚碇在 $8P \sim 14P$ 工程荷载下达到第一阶段摩擦极限承载;在 $14P \sim 20P$ 工程荷载下达到第二阶段摩擦+夹持极限承载。 P 为设计荷载,该处为 95 824 kN。说明基于纯摩擦的设计不能反映锚碇-岩基系统的真实破坏形态和承载性能。

(3) 重力式锚碇-岩基联合承载机制依次为摩擦效应+夹持效应+回填效应,并提出了相应的水平极限承载力估值公式,经工程案例检验,公式极限估值均值 $9.6P$ 与数值仿真确定的极限值 $8.0P$ 接近。

参考文献:

- [1] TAYLOR R J. Interaction of Anchors with Soil and Anchor Design[R]. California: Naval Civil Engineering Lab, 1982.
- [2] BARTHOLOMEW Charles A. US Navy Salvage Engineer's Handbook[M]. USA: US Navy, 1992: G1 - G36.
- [3] JTG/T D65—05—2015 公路悬索桥设计规范[S]. JTG/T D65—05—2015, Specification for Design of Highway Suspension Bridge [S].
- [4] 朱栓来. 悬索桥锚碇设计采用分项系数法的建议[J]. 西南公路 2011(4): 19-21.
Zhu Shuanlai. Suggestion on Partial Safety Factor Used in Anchorage Design of Suspension Bridge[J]. Southwest Highway 2011(4): 19-21.
- [5] 刘洋, 赵明阶, 郑升宝. 青草背长江大桥北锚碇摩阻力试验[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2011(5): 911-915.
Liu Yang, Zhao Mingjie, Zheng Shengbao. Test Study on the Friction Resistance of the North Concrete Anchor of Qingcaobei Yangtze River Bridge [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science) ,2011 (5): 911-915.
- [6] 卢江, 朱晓文, 赵启林. 悬索桥锚碇基础的计算与安全监控技术进展[J]. 贵州工业大学学报: 自然科学版, 2008(4): 240-244.
Lu Jiang, Zhu Xiaowen, Zhao Qilin. Development of Safety Monitoring and Control of Suspension Bridge's Anchorage Foundation Based on Design and Calculation [J]. Journal of Guizhou University of Technology (Natural Science Edition) 2008(4): 240-244.
- [7] 李家平, 张子新, 黄宏伟, 等. 宁波庆丰大桥锚碇室内相似模型试验研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2005(8): 1011-1016.
Li Jiaping, Zhang Zixin, Huang Hongwei, etc. Research on Similarity Model Test of Anchorage of Qingfeng Suspension Bridge in Ningbo [J]. Journal of Tongji University(Natural Science) ,2005(8): 1011-1016.
- [8] 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): 593-602.
Lai Yunjin, Wu Changjiang, Zhang Zixin. Test and Numerical Analysis of Effect of Notched Sill of Gravity Anchorage on Soft Rock Ground of Suspension Bridge [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2010(3): 593-602.
- [9] 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): 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(1): 157-161.
- [10] 殷永高, 孙敦华. 悬索桥根式锚碇基础初步分析[J]. 土木工程学报, 2010(11): 102-113.
Yin Yonggao, Sun Dunhua. A Preliminary Study of Root Anchorage Foundation for Large Span Suspension Bridges [J]. China Civil Engineering Journal , 2010 (11): 102-113.