

文章编号: 1000 - 7598 (2013) 01 - 0196 - 07

西江特大桥岩锚锚碇的承载特性研究

刘秀敏, 陈从新, 肖国峰, 鲁祖德, 王永卫

(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)

摘 要: 针对西江特大桥广州岸岩锚锚碇系统的承载稳定性问题, 采用工程地质勘察、室内及现场原位岩石力学特性试验、钻孔摄像及声波测试等手段, 获取承载边坡的岩体地质力学特性, 并建立边坡地质力学模型, 同时进行现场拉锚试验验证预应力锚索设计的可靠性。采用三维数值模拟方法研究锚碇系统在施加预应力和承担外荷载两种情况下, 边坡岩体的稳定性和锚碇群锚中不同位置的预应力锚索锚固力的分布特征。研究表明, 在桥梁施工荷载的拉拔作用下, 广州岸锚碇边坡整体稳定, 坡表变形为毫米级; 锚索锚固力呈不均匀分布形态, 主要集中在锚固段前 2 m 范围内, 最大值出现在锚固段端头; 锚碇群锚的锚固力应力集中程度由大到小依次是角锚、边锚、中间锚。超载试验表明, 整个锚碇系统的极限抗拔力不小于 8 倍设计荷载。锚索现场监测数值显示, 锚碇承载期间锚索索力基本稳定, 中间锚的索力小于角锚。研究方法及其成果可供类似的桥梁及抗倾拔工程中的岩锚锚碇设计及安全评价借鉴。

关 键 词: 岩质边坡; 锚碇; 预应力锚索; 锚固力; 数值模拟

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Bearing behavior of rock anchorage system for west river bridge construction

LIU Xiu-min, CHEN Cong-xin, XIAO Guo-feng, LU Zu-de, WANG Yong-wei

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Aiming at the bearing capacity of rock anchorages for West River Bridge construction on Guangzhou bank slope, the engineering geological investigation, indoor and in-situ rock mechanical tests, borehole camera, sound wave tests, etc. are carried out to gain the rock mass geomechanical characteristics and the slope's geomechanical model. Then anchorage tests are carried out to confirm the reliability of prestressed cables in-situ. The three dimensional numerical simulation is used to research the stability of the wall rock around anchorages when group cables prestressed and bearing load, as well as the distribution rule of prestressed cables' resistance arranged at different positions in an anchorage. The results indicate that the rock anchorage system is stable when the West River bridge constructed and the displacements of the slope's surface keep mm level; the prestressed cables' anchoring force turn out uneven distribution and mainly concentrate in 2 m scope on the front of anchoring section; in the prestressed cable group of one rock anchorage, the concentration degree of cable resistance is first the angle cable, next the side cable, last the middle cable which from a large to small in turn. The overload experiments show that the rock anchorage system's ultimate anti-pullout capacity is not smaller than 8 times of the designed pulling load. Prestressed cables' monitoring indicates that the axial force of cable is just stable during the whole period when the construction load increasing; and the middle cable's axial force is less than the angle cable's one. The research methods and results can be for reference in similar bridge constructions and anti-pullout projects.

Key words: rock slope; anchorage; prestressed cable; anchoring force; numerical simulation

1 引 言

岩锚锚碇是一种充分利用边坡(地基)岩体承载力的抗倾拔结构,是与重力式锚碇和隧道式锚碇等并行的承重结构之一。岩锚锚碇由外部混凝土锚墩和植入岩体的预应力锚索群组成,通过群锚带动

围岩体承载,相较于其他岩体开挖量巨大的锚碇形式,这种充分挖掘边坡(地基)抗拔力的承重方式具有保护环境、经济的突出优点。

锚碇中的预应力群锚首先施加预应力与围岩锚固,然后承担来自结构的拉拔荷载,其受力状态较普通仅起锚固作用的预应力锚索更为复杂。

收稿日期: 2011-09-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 10872207)。

第一作者简介: 刘秀敏,女,1981年生,博士,助理研究员,主要从事岩土工程稳定性控制方面的研究工作。E-mail: xmliu@whrsm.ac.cn

国外已有应用岩锚锚碇的先例,1997 年建成的澳大利亚 Glebe Island Bridge 就充分利用预应力锚索带动基础下岩层承受桥梁的上举力。目前,国内虽然已有采用岩锚锚碇建设拱桥的成功经验^[1],但岩锚锚碇基本为经验设计,很少对岩锚锚碇的承载特性进行全面系统的研究。

伴随着我国经济建设深入发展,山区桥梁及高层抗倾拔工程修建的越来越多,充分挖掘岩体承载力而又不受场地限制的岩锚锚碇必有广阔的应用前景,全面认识岩锚承载特性,从而推进预应力锚索在抗倾拔工程中的发展应用,具有重要的经济和现实意义。

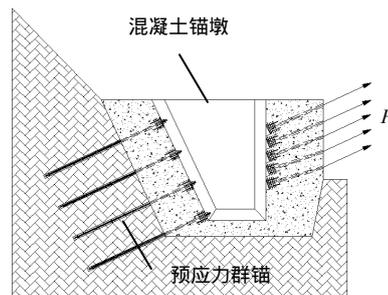
本文针对新建南广铁路西江特大桥工程广州岸岩锚锚碇系统的承载稳定性问题,基于室内外岩石物理力学试验,结合声波探测、钻孔摄像等工程地质勘察方法,确定边坡岩体的工程地质与力学特性,通过现场拉锚试验对设计锚索的抗拔力进行验证,采用三维数值模拟重点研究了在锚碇系统在施加预应力和承担外荷载两种条件下边坡的变形特征、预应力群锚锚固力的分布情况,以及该岩锚系统的安全储备等工程建设的关键性问题,最后对锚碇承载期间的锚索监测资料进行了总结分析。

2 工程概况

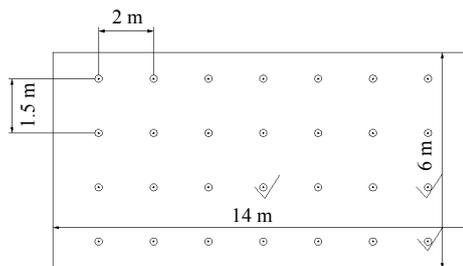
新建南广铁路西江特大桥工程位于中国广东省肇庆市区西北,该桥横跨西江,主桥拱脚中心距为 450 m,采用拱肋悬拼法施工,属目前世界上最大跨度的铁路钢箱拱桥。

该桥穿越西江国家一级水源保护区。为保护环境,节约投资,同时充分利用两岸(广州岸和南宁岸)桥址区边坡岩体的承载力,采用了性价比较高的岩锚锚碇承担拱桥吊装荷载。锚碇系统的稳定性直接决定了大桥施工建设的成败,因此,对岩锚承载特性进行准确、合理的评价至关重要。

广州岸岩锚系统由位于桥梁中心线两侧各 3 个镶嵌于边坡岩体内的锚碇组成。锚碇总设计荷载为 16 000 t,通过缆塔和扣塔主索传递给 6 个锚碇。其中,2 个缆塔锚碇的锚墩尺寸为 14 m×6 m×7 m,设置 3×7=21 根斜向锚索;4 个扣塔锚碇的锚墩尺寸为 14 m×10 m×6 m,设置 4×7=28 根斜向锚索,如图 1 所示;锚索横向间距为 2 m,纵向间距为 1.5 m,采用拉力集中型预应力锚索,锚孔直径为 130 mm,每根锚索由 9 根强度等级为 1 860 MPa 的高强度低松弛预应力钢绞线组成。锚碇中预应力锚索的相关设计参数列于表 1、2。



(a) 锚碇结构侧面图



(b) 锚碇中的预应力锚索间距

图 1 岩锚锚碇中的群锚布置

Fig.1 Arrangement of prestressed cables group in anchorage

表 1 锚碇锚索设置及设计荷载

Table 1 Prestressed cables setting and design loads

锚碇名称	与桥中线夹角/(°)	水平夹角/(°)	斜孔深度/m	锚固段长度/m	预应力荷载/kN	施工荷载/kN
GS1	3.0	25	35	10	1 350	1 350
GS2	3.0	25	45	10	1 350	1 350
GS3	0.0	20	45	10	1 050	1 050
GX1	-3.0	25	40	10	1 350	1 350
GX2	-3.0	25	40	10	1 350	1 350
GX3	0.0	20	65	10	1 050	1 050

表 2 钢绞线和注浆体参数表

Table 2 Parameters of steel strand and cement grout

类别	直径/mm	面积/mm ²	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	黏结强度/MPa	剪切模量/GPa
单根钢绞线	15.24	140	198	1 860		
注浆体					1.0	10

3 边坡地质与力学特性

3.1 基本地质特征

西江深切地表,广州岸桥址区位于泥盆系春湾组、老虎坳组和桂头上亚群地层中,岩层层面向 NNE,岩层倾角变化范围在 27°~78°之间,呈现出由上游到下游递减的趋势,区内岩层平均产状为 12°~52°。

广州岸锚碇区位于西江左岸 G321 国道旁山坡上,山坡高度约 150 m,国道修建时在坡脚处形成

了高约 30 m、坡度约 55°的较陡切坡，切坡上方山体坡度较为平缓，在 28°左右。桥址区域上下游发育有两条冲沟，上游冲沟长为 180 m，下游冲沟长为 350 m，平均深度小于 35 m。边坡的坡向倾向 238°，与桥轴线 (N68°E) (约为 10°) 相交。

根据现场标志性地质露头，按照岩层产状将桥址区地层分为 2 个主要地层，地层岩性主要为泥质砂岩和细粒石英砂岩，地层主要为石英粉砂岩和石英砂岩，结合钻孔分析及地质调查，获得过上下游锚碇中心线的地质概化剖面，如图 2、3 所示。

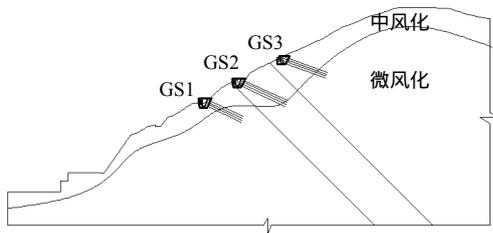


图 2 过上游锚碇中心的地质剖面
Fig.2 Geological section crossing upstream anchorages center

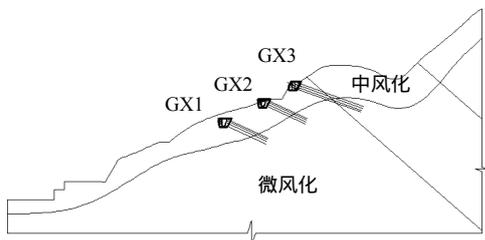


图 3 过下游锚碇中心的地质剖面
Fig.3 Geological section crossing downstream anchorages center

3.2 边坡岩体强度参数

边坡岩体性状是影响岩锚承载力的主要因素之一，在地质调绘的基础上对锚碇区钻孔，选取地层中风化和微风化岩芯，进行相关室内单轴和三轴力学试验，获取常规岩石力学参数。此外，进行了两类试验：一是在现场选取代表性的结构面（含层面和节理）试件，开展室内剪切试验，获取节理结构面剪切强度为 $\varphi = 33.4^\circ$ ， $c = 393.5$ kPa；层面结构面剪切强度为 $\varphi = 46.3^\circ$ ， $c = 151.5$ kPa；二是原位直剪试验，获取中风化岩石与混凝土胶结面的剪切强度参数，以充分考虑锚墩与岩面的结合强度，试验获取岩体与混凝土胶结面剪切强度为 $\varphi = 38^\circ$ ， $c = 151.0$ kPa。

基于试验所得的岩石力学参数值，对比岩石和

岩体声波波速测试结果，同时考虑岩体岩性、地质结构和风化程度，通过岩体基本质量指标 BQ 值的计算，对边坡岩体进行分级，最终参考国家岩体分级规范，确定的广州岸边坡岩体力学参数列于表 3。

表 3 边坡岩体主要参数表

地层	风化程度	密度 ρ / (g/m ³)	变形模量 / GPa	泊松比	凝聚力 / MPa	摩擦角 ψ / (°)	抗拉强度 / MPa	结构面	
								c / MPa	φ / (°)
中微	中	2.55	1.3	0.35	0.3	30	0.200	0.12	29
	微	2.61	6.0	0.30	0.7	39	0.233		
中微	中	2.67	4.0	0.30	0.6	33	0.243	0.19	34
	微	2.69	10	0.28	1.5	50	0.500		

4 现场拉锚试验

为验证预应力锚索设计参数和施工工艺的合理性、掌握锚索抗拔的安全程度、揭示锚索在使用过程中可能出现的影响其承载力的缺陷，在西江特大桥广州岸的锚碇区分别进行了 5 组拉锚试验，以便在正式施工前调整锚索结构参数或改进锚索施工工艺。

试验采用穿心千斤顶，张拉力由 YCW200B 型千斤顶提供，加载的外部反力通过钢梁和混凝土传递到岩层，千斤顶由 ZB4-500 型电动油泵提供油压。锚索位移的量测设备采用百分表，现场试验布置如图 4 所示。



图 4 GS2 锚碇处的现场拉锚试验
Fig.4 Anchor test of prestressed cable in GS2 anchorage

单根锚索的钢绞线采用整体分级循环张拉的方式^[2]，在每级荷载下稳压 5 min 后读数。锚索超张拉值为锚索施工荷载设计值的 1.6 倍。锚索张拉过程中，每级荷载加载后均量测锚索的伸长量并与理论伸长量进行比较，所得结果列于表 4。

表 4 锚索张拉伸长量对比

Table 4 Comparison of cable stretching values

锚索编号	荷载 /kN	孔深 /m	锚固段 /m	理论伸长 /mm	实测 /mm	理论 /实测
GS1	1 620	35	10	162	165	0.98
GS2	1 620	45	10	227	210	1.08
GS3	1 620	45	10	227	237	0.96
GX1	1 620	40	10	194	200	0.97
GX2	1 620	40	10	194	186	1.04

抗拔试验显示，5 根锚索的张拉总位移满足要求，图 5 为具有代表性的 GS2 锚碇位置处的锚索张拉曲线。预应力锚索逐级加荷产生的伸长量与钢绞线实测伸长值均为线性增加，从表 4 中锚索筋体的理论伸长量与实测伸长量比较可看出，锚索伸长量实测值与理论值基本吻合，两者的误差均在允许范围内，说明设计锚索提供了可靠的锚固力，满足设计要求。

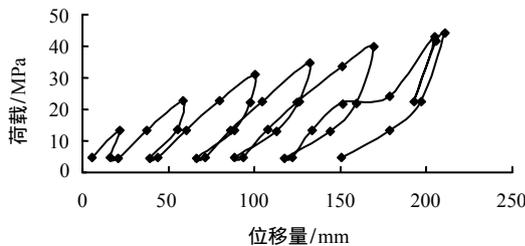


图 5 GS2 锚索张拉位移曲线

Fig.5 Tensioning curve of pre-stressed cable in GS2 anchorage

5 稳定性数值分析

岩锚锚碇系统的承载特性主要涉及两方面内容：抗拔荷载作用下锚碇区边坡岩体变形破坏特征和预应力锚索锚固力分布特征。

由于广州岸边坡地层岩性多变，6 个锚碇坐落的位置较为分散，锚碇结构和预应力群锚的作用机制均较复杂，影响锚碇承载稳定性的因素众多，针对西江特大桥的锚碇系统进行模型试验并不理想。

FLAC^{3D} 中内置的锚索单元可以细致地刻画预应力锚索的结构性能，已被众多研究者用来进行与预应力锚索的相关研究^[3-4]。

在广州岸边坡地质概化模型的基础上，建立三维计算模型，采用数值模拟研究锚碇在施加预应力和施工荷载两种情况下，边坡岩体的受力变形特征及锚碇中群锚的锚固力分布情况；为充分考虑岩体层面的影响，计算采用 FLAC^{3D} 中的 Ubiquitous 力学模型。

5.1 计算模型

取计算模型左右边界距桥中线 200 m，实际模

拟平面面积为 400 m×400 m，其中 X 轴垂直桥轴线，指向西江下游，Z 轴铅直向上，X、Y 轴与 Z 轴构成右手坐标系。模型底部边界位于 -70 m，高程为 0 处定为坐标原点。

模型包括 2 组地层，每组地层分为中风化和微风化两种岩性，如图 6 所示。每根预应力锚索的自由段设为一个锚索结构单元，为细致了解锚固力的分布状况，将锚固段划分为 5 个锚索结构单元，通过 FLAC^{3D} 内置的 SEL cable pretension 命令对锚索自由段施加预应力。网格模型共建有 889 711 个四面体单元、153 362 个节点、924 个锚索结构单元、1 078 个结构节点。

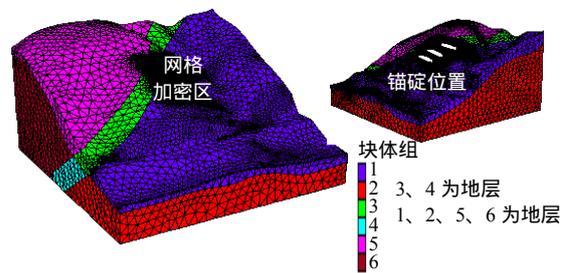


图 6 边坡网格模型及岩体分组

Fig.6 Slope's grid model and rock mass grouping

5.2 边坡受力及位移场分布特征

锚碇中的群锚施加表 1 中的预应力值张拉锁定后，锚碇围岩处于弹性受力状态，未出现塑性破坏区，边坡整体稳定。

坡表变形主要发生在 6 个锚碇周围，以每个锚碇为中心呈放射状向周围扩展（图 7 所示）。其中，GS2 的预应力群锚锚固段主要设置在中风化岩层中，岩体受力后变形较大，相应的 GS2 坡表围岩的位移最大，最大值为 0.57 mm。如图 8 所示，锚碇的群锚在边坡表层形成了一定范围的岩体压缩带，对岩体起到了增韧止裂的加固作用^[3-7]。此外，坡表岩体的压缩可以抵消岩锚承载时坡体向外的拉拔变形，有利于结构工程的位移控制。

大桥钢箱拱肋施工时，施工荷载由锚碇及边坡围岩体共同承担。计算表明，承担外荷载后锚碇影响范围内的岩体仍处于弹性受力状态，边坡整体稳定。

施加施工荷载后，边坡受锚碇拉拔作用，岩体变形范围明显扩大（图 9）；坡表岩体由于群锚张拉产生的压缩变形减小，最大值仍发生在 GS2 锚碇中心附近，由 0.57 mm 降至 0.13 mm；在群锚自由端岩体变形减小的同时，每个锚碇的群锚锚固段端头围岩变形有较大增加，最大位移发生在 GS2 群锚锚

固段端头处,为 0.62 mm。图 10 充分表明,锚碇系统的承载方式是预应力群锚带动边坡深部岩体抵抗桥梁的施工荷载。

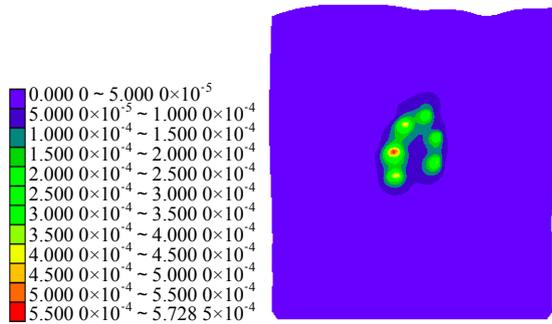


图 7 锚碇预应力张拉后的坡表位移 (单位: m)
Fig.7 Displacements of slope surface after cables tensioning (unit: m)

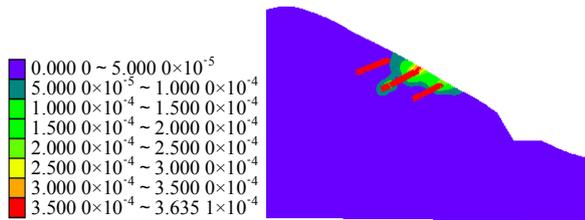


图 8 锚碇预应力张拉后过 GS2 中心剖面位移 (单位: m)
Fig.8 Displacements of slope crossing GS2 anchorage center after cables tensioning (unit: m)

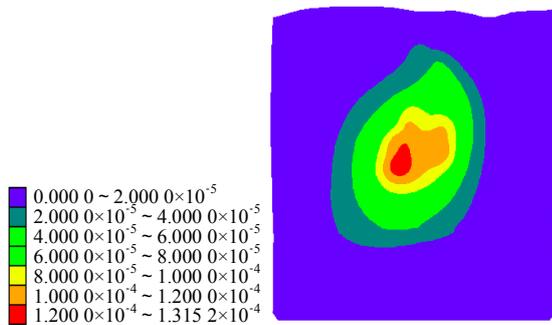


图 9 施工荷载作用下坡表位移 (单位: m)
Fig.9 Displacements of slope surface when anchorages bearing construction loads (unit: m)

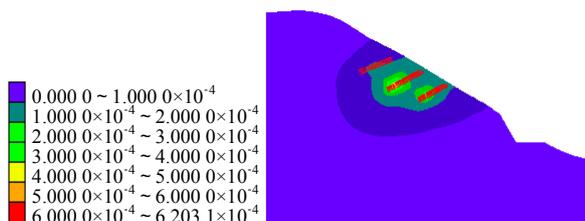


图 10 施工荷载作用下过 GS2 锚碇中心剖面位移 (单位: m)
Fig.10 Displacements of slope crossing GS2 anchorage center when anchorages bearing construction loads (unit: m)

5.3 预应力群锚受力特征

在 GS2 锚碇的预应力锚群选取 3 根有代表性的锚索,监测其在预应力张拉锁定后及承担施工荷载时的锚索轴力变化和锚固段剪应力变化。其中角锚相邻两根锚索,边锚相邻 3 根锚索,中间锚索相邻 4 根锚索,即图 1(b)中用“√”标示的锚索。监测结果如图 11、12 所示。

预应力锚索的锚固段剪应力主要集中在锚固段前端 2 m 范围内,在锚固段端头达到最大值,随后迅速衰减至微量。计算结果与已有的理论研究结论较为一致^[8-10]。

对每个锚碇的预应力锚群而言,在相同的张拉预应力作用下,锚固段应力集中的程度由大到小依次是角锚、边锚、中间锚,即受周边锚索应力场不同程度的影响,角锚的锚固端剪应力值最大、下降的速度快,分布范围最集中,边锚的锚固端剪应力小于角锚,中间锚的锚固端剪应力最小。相应的锚固段轴力也有类似的规律。

承担施工荷载后的锚索锚固力分布形态不变,但最大剪应力的量值均略有增加,如图 12 所示。

预应力群锚发生锚固段黏结破坏时,中间锚的锚固力将快速增大,最终大于边锚和角锚而最先发生破坏^[10];计算所得中间锚的锚固力小于边锚和角锚,表明锚碇中的群锚处于协同受力的安全状态。

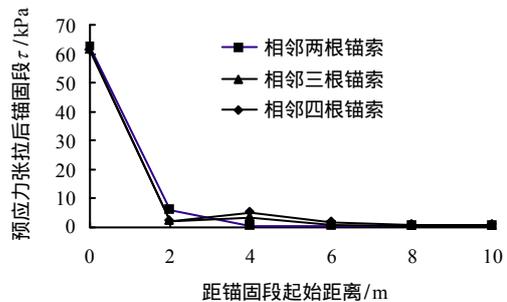


图 11 预应力张拉后锚固段剪应力
Fig.11 Shearing stress on anchoring section when cables tensioned

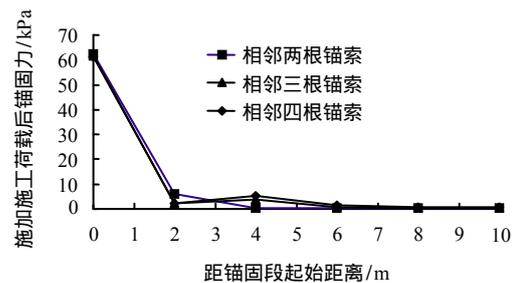


图 12 承担施工荷载后锚固段剪应力
Fig.12 Shearing stress on anchoring section when anchorages bearing construction loads

6 岩锚锚碇的破坏模式分析

破坏模式是建立简化力学分析模型的依据，以便进行锚碇安全度的工程评价。对广州岸的岩锚锚碇进行超载试验以确定锚碇系统的破坏模式。

当拉力达到 9 倍设计荷载时，GS2 的预应力群锚自由段钢绞线最先发生屈服破坏，锚碇失稳。坡表以每个锚碇为中心成圆形隆起破坏，图 13(a)所示，其中 GS2 和 GS1 锚碇周围的岩体破坏范围最大；破坏区呈碗状深入岩体约 20~30 m，如图 13(b)所示。当拉力达到 10 倍设计荷载时，GS1 锚碇的群锚也相继屈服破坏。

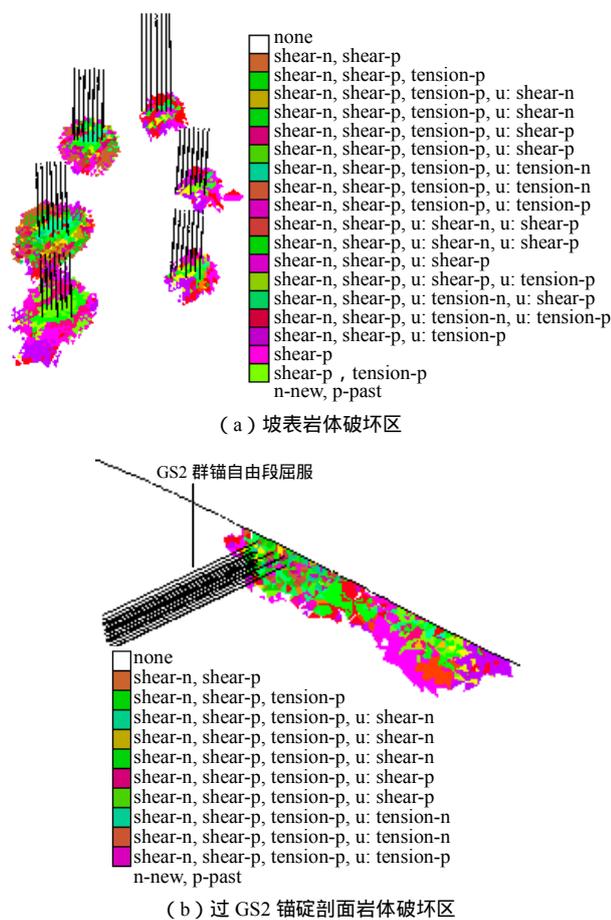


图 13 超载时的锚碇围岩破坏区
Fig.13 Rock mass destruction range when anchorages overloading

超载试验表明，该围岩条件下锚碇群锚自由段的屈服破坏先于锚固段的黏结破坏，钢绞线屈服同时带动表层岩体发生拉剪破坏。GS2 于 6 个锚碇中首先发生破坏，故在锚碇系统服役期间，应对 GS2 锚碇锚索及围岩变形进行重点监测。

7 施工期锚索索力监测

每个锚碇选取 5 根锚索（4 根角锚和 1 根中间

锚）安装锚索测力计，监测锚碇服役期间锚索索力的变化情况。锚碇群锚采用先中间锚后边锚的张拉顺序，根据实际施工荷载调整，每个锚索采用 1 000 kN 的预应力进行张拉。在大桥开始吊装施工时读取监测锚索的轴力作为初始值，由于 6 个锚碇不是同时建成，加之张拉顺序的影响，每个锚碇群锚的预应力损失有较大差别，所以读取的同一锚碇不同监测锚索的索力初始值也不尽相同。在大桥拱肋悬臂拼装施工阶段对锚索进行约一周一次的密集受力监测。图 14 为广州岸锚碇系统预应力张拉锁定后的坐落位置 图 15 为承担大桥施工荷载时的 GS2 锚碇，图 16 为 GS2 锚碇的索力监测时程曲线。



图 14 广州岸预应力锚碇系统
Fig.14 Anchorage system on Guangzhou bank slope

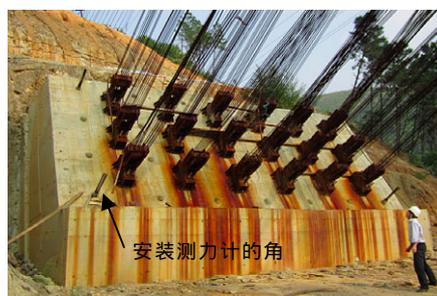


图 15 承担桥梁施工荷载的 GS2 锚碇
Fig.15 GS2 anchorages bearing bridge construction loads

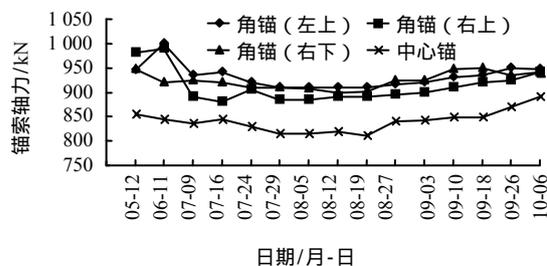


图 16 GS2 锚碇的部分锚索索力监测时程曲线（2011 年）
Fig.16 Time-history curves of monitoring cables in GS2 anchorages (2011)

监测结果显示，在锚碇受力初期，锚碇上部两根角锚的轴力有较大调整；2011 年 7 月份开始，锚

碇中的群锚基本开始协同受力,轴力稳定,波动幅度小于 5%,其中,中心锚的轴力明显小于角锚,根据锚索轴力与锚固段的剪应力的对应关系,可以判出锚固段的剪应力应为中心锚小于角锚,与数值计算中锚碇稳定状态下的群锚受力规律一致。8 月 19 日以后的监测数据显示,随着锚碇承受的拱桥吊装荷载逐级增大,群锚的索力整体略有上升,角锚的轴力逐渐趋于一致,中间锚的轴力也有较大增大,但都小于初始预应力张拉值;10 月中旬大桥主拱段吊装完毕,截止 2011 年 11 月 7 日凌晨西江特大桥钢箱拱肋顺利合拢,锚碇系统安全地完成了施工承载任务。

8 结 论

(1) 在设计荷载作用下边坡锚碇系统整体稳定。锚碇系统所设置的预应力群锚施加预应力后在广州岸边坡表层形成岩体压缩带,有利于减小锚碇承载时的岩体位移;在锚碇承载时,群锚带动边坡深部岩体承担桥梁施工荷载,锚固端岩体位移大于坡表位移,变形在毫米级水平。

(2) 单根预应力锚索的锚固力主要集中在锚固段前 2 m 范围内,在锚固端达最大值;在锚碇的预应力群锚中,锚固端应力集中程度由大到小依次是角锚、边锚、中心锚。

(3) 超载试验表明,西江特大桥锚碇系统的破坏为钢绞线屈服导致,整个岩锚系统的极限承载力不小于 8 倍设计荷载;在 6 个锚碇中,GS2 由于锚索锚固段置于中风化岩体中,围岩条件差,在超载条件下先于其他锚碇破坏,在大桥施工中应重点监测。

(4) 现场监测数据表明,在锚碇承载初期,角锚的索力有较大调整;随着施工荷载逐级增大,群锚开始协同受力,之后锚索索力基本趋于稳定,中心锚的索力始终小于角锚。

岩锚锚碇作为预应力群锚承担拉拔荷载作用的典型结构,拓展了预应力锚索加固岩体的功能,充分利用了岩体的承载力,具有广泛的应用前景。本文采取的研究方法及成果可供类似山区桥梁及抗倾拔锚碇工程参考借鉴。

参 考 文 献

[1] 周外男. 云南小湾大桥缆索吊机后锚碇设计[J]. 桥梁建设, 2002, (6): 39 - 42.
ZHOU Wai-nan. Design of rear anchorage of cable crane for Yunnan Xiaowan bridge[J]. **Bridge Construction**,

2002, (6): 39 - 42.
[2] 程良奎, 郑生庆, 贾金青, 等. CECS 22 - 2005 岩土锚杆(索)技术规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 2005.
[3] 丁秀丽, 盛谦, 韩军, 等. 预应力锚索锚固机理的数值模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 980 - 988.
DING Xiu-li, SHENG Qian, HAN Jun, et al. Numerical simulation testing study on reinforcement mechanism of prestressed anchorage cable[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(7): 980 - 988.
[4] 付敬, 盛谦. 高边坡预应力锚索加固的数值模拟分析[J]. 长江科学院院报, 1996, 13(3): 52 - 55.
FU Jing, SHENG Qian. Numerical modeling of high slope reinforced with pretensioned tendons[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 1996, 13(3): 52 - 55.
[5] 孙学毅. 边坡加固机理探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2818 - 2823.
SUN Xue-yi. Study on mechanism of slope reinforcement[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(16): 2818 - 2823.
[6] 唐树名, 曾祥勇, 邓安福. 预应力锚索群锚锚固边坡均质岩体的室内模型试验研究[J]. 中国公路学报, 2004, 17(3): 20 - 24.
TANG Shu-ming, ZENG Xiang-yong, DENG An-fu. Laboratory model test investigation of prestressed anchor cable group strengthened slope intact rock[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2004, 17(3): 20 - 24.
[7] 朱杰兵, 韩军, 程良奎, 等. 三峡永久船闸预应力锚索加固对周边岩体力学性状影响的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 853 - 857.
ZHU Jie-bing, HAN Jun, CHENG Liang-kui, et al. Research on rockmass properties near anchor with prestressing for TGP permanent shiplock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(6): 853 - 857.
[8] 尤春安, 战宝玉. 预应力锚索锚固段的应力分布规律及分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 925 - 928.
YOU Chun-an, ZHAN Yu-bao. Distributing characters and analysis of stresses in pre-stressed cables[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(6): 925 - 928.
[9] 尤春安. 压力型锚索锚固段的受力分析[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 828 - 831.
YOU Chun-an. Mechanical analysis of anchorage segment of pressure-type cable[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26 (6): 828 - 831.
[10] 刘秀敏. 岩锚锚碇设计理论研究[博士学位论文 D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2011.