

复杂受力条件下重力式结构基底应力的实测研究

陈志坚^{1 2}, 董学武³, 谢和平²

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国矿业大学(北京校区), 北京 100083;
3. 江苏省苏通大桥建设指挥部, 江苏 南通 226009)

摘要:以大跨径悬索桥的锚碇工程为例, 阐述了岩质地基上重力式结构的受力特点及其基底应力监测的意义和方法. 根据 132 个应力测点在 4 a 内的 88 次实测资料, 分析重力式锚碇的传力机理. 研究成果表明, 在巨大上拔力和水平向拉力作用下, 锚碇基底应力的变化过程是复杂的. 在主缆力施加的初期, 锚块后侧基底应力即呈下降趋势, 而前侧则具有支点的作用, 基底应力呈上升趋势. 但随着主缆力的增大, 锚块前侧的支点作用丧失, 鞍部基底应力变化过程类似于锚块, 但不同步. 锚碇前侧水平向抗力几乎与基底摩阻力同时逐渐发挥, 所以, 虽然锚碇的抗滑稳定具有较大的安全储备, 但锚碇前侧抗力体仍需承受较大的水平推力.

关键词:重力式结构; 嵌岩锚; 接触应力; 压力盒; 应力监测

中图分类号: TU47 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1980(2004)01-0046-05

对于岩质地基上重力式结构的稳定问题, 以往的研究多采用一体多介质模型, 难以客观地反映工程体与岩体之间的相互作用, 故有必要研究两体力学模型. 岩体工程的变形破坏与地质体和工程体之间的相互作用密切相关, 而相互作用是通过接触面来实现的. 显然, 为了建立两体力学模型, 必须首先查清接触面的力学行为. 在基础与地基共同作用研究中, Goodman 和 Desai 等分别提出了无厚度和有厚度的接触面模型, 但这些模型不能很好地模拟工程体与岩体之间胶结、不规则曲面型接触的共同作用. 对于锚碇基底应力的研究, 由于国内外已建的采用重力式锚碇的大跨径悬索桥数量不多, 所以, 少见公开研究报道.

当工程载荷以水平力为主时, 重力式结构(如重力坝、重力式锚碇等)往往被作为首选的结构形式, 其抗滑和抗倾覆稳定问题均较突出, 且这些稳定问题取决于工程体与地质体之间接触应力的大小及分布. 但承受巨大水平力的重力式结构的受力条件复杂而多变, 故其基底应力的计算分析十分困难. 对于位于岸坡上的大跨径悬索桥的锚碇工程, 还需以塔基和岸坡为抗力体, 故其基底应力既决定了锚碇本身的抗滑稳定性, 还在很大程度上影响岸坡和塔墩地基的稳定性. 本文以江阴长江公路大桥^[1 2]南锚碇 132 个应力测点的 88 次实测资料为依据, 对重力式结构与岩基接触面的传力机理进行深入阐述.

1 江阴长江公路大桥南锚碇工程概况

江阴长江公路大桥主体工程的南锚碇和南塔墩集中布置于 3 面临空、呈舌状伸入长江约 200 m 的西山山体上^[3 4], 山梁宽约 100~400 m, 顶高程 74 m, 其北坡高约 130 m, 天然坡角 20°~35°. 山体主要由泥盆系中统定山组的砂、页岩组成, 岩层呈中厚-薄层状软、硬互层, 发育有 35 层软弱(泥化)夹层. 山体呈单斜构造, 岩层倾向长江, 倾角 20°~35°, 故山体北坡属具不稳定结构的缓倾向坡, 且坡腰处需安全承受 1 200 MN 的塔墩垂向荷载, 分布于坡后的南锚碇对其稳定也有重要影响. 南锚碇位置服从桥轴线的合理走向和跨径安排而位于西山山梁南端东坡, 处于黄山背斜的核部, 岩体中裂隙极为发育, 呈碎裂~散体结构. 锚碇基坑开挖面底高程 6.7 m, 西南侧开挖深度 66 m, 而东侧开挖深度不及 32 m. 显然, 锚碇地基岩体质量在东西方向存在较大差异, 东侧岩体质量明显比西侧差, 从而导致锚碇东、西两半幅的水平抗力、水平位移和沉降存在一定差异. 南锚碇的主要功能是安全承受 6.4×10^5 kN 的主缆拉力(仰角 24.2°), 并将其传递给地基岩体. 为了满足抗滑稳

定的要求,其重量约 2.35×10^6 kN,属现浇大体积混凝土结构.为了提高抗滑力,并优化锚体结构受力,南锚基坑前墙开挖成台阶状,共分 7 级台阶(也称齿坎),每级台阶高 3 m.27.7 m 高程以上称为前墙.南锚碇的组成结构如图 1 所示.

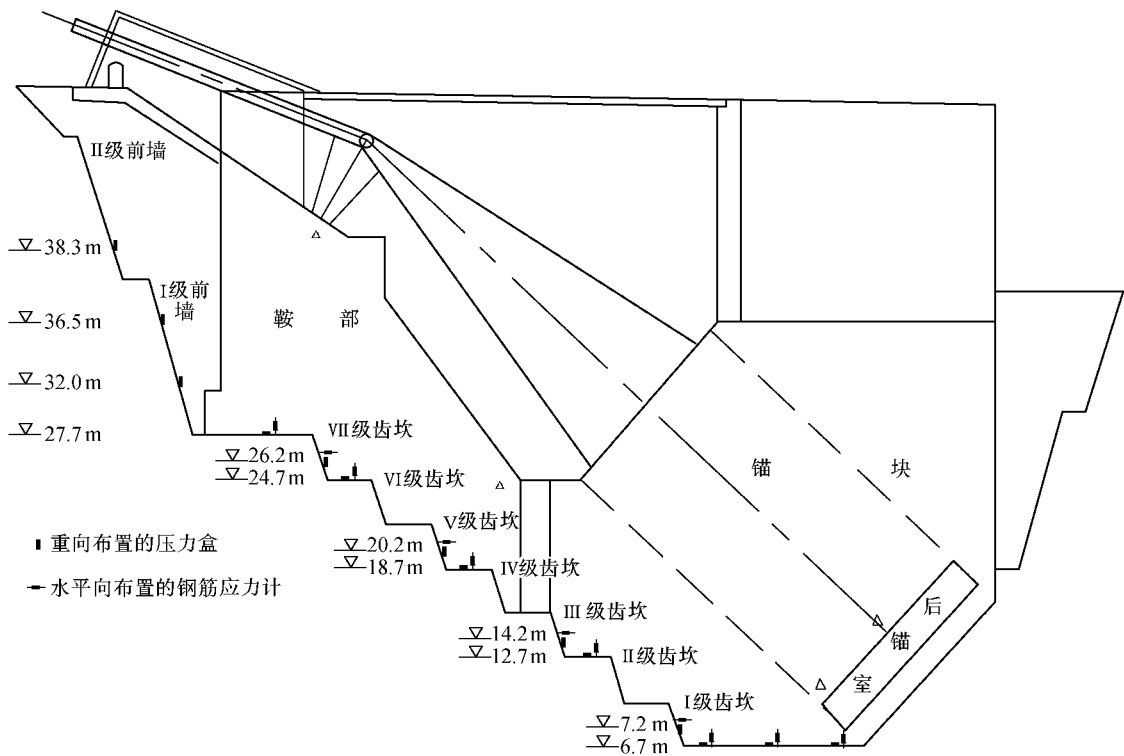


图 1 南锚碇组成结构及应力监测点分布

Fig.1 Structure of south anchorage and distribution of stress observation points

2 应力监测点的布设与观测

南锚应力和接触应力监测采用振弦式压力盒和钢筋计 2 种测试仪器,共埋设应力传感器 132 套(测点分布如图 1 所示).测点主要分布于东半幅,其中 59 个点用于观测垂向接触应力,55 个点观测水平向抗力,12 个点观测后锚面结构应力,6 个点观测鞍部结构应力,在近 4 a 时间内共进行了 88 次观测工作.

当将压力盒用于两个弹性体接触应力观测时,由于压力盒的实际受力条件与其率定受力条件有明显和明确的区别,故实际应力需按式(1)^[5]确定.分析研究表明:(a)被测部位的混凝土标号越高,则实测应力与实际应力的差值越大(实测应力偏小);(b)压力盒量程越大(侧壁越厚),其实测应力(偏小)与实际应力的差值也越大;(c)实测应力与实际应力之间的差值还与测距边界的远近有关.

$$p = \alpha K(f^2 - f_0^2)$$

(1)

式中: p ——测点部位的实际应力,MPa; K ——压力盒率定系数, 10^{-6} MPa/Hz²,本次采用的压力盒率定系数多在 $(0.5 \sim 2.0) \times 10^{-6}$ MPa/Hz² 范围; f_0 、 f ——压力盒的初始频率和实测频率,Hz; α ——测点的状态系数,根据压力盒所在部位的混凝土标号、地层岩性和压力盒尺寸,由有限元分析结果确定,一般在 5~14 之间,也可表示为^[6]

表 1 不同荷载作用下的 A 及 m 值

Table 1 Value of A and m under different loads

p /MPa	A	m	p /MPa	A	m
0.3	1.683 1	0.663 4	0.8	1.251 4	0.668 4
0.4	1.509 5	0.661 0	0.9	1.255 1	0.660 8
0.5	1.347 0	0.669 7	1.1	1.260 9	0.656 2
0.6	1.271 6	0.673 9			

$$\alpha = AE^m \quad (E \geq 0.7)$$

(2)

式中: E ——被测介质的弹性模量,GP a; A 、 m ——常数,与施加的载荷有关,按表 1 取值.

3 重力式嵌岩锚传力机理研究

锚碇的传力机理实质上是锚碇在主缆拉力和散索鞍反力作用下其基底的应力响应及变化规律. 为了分析锚碇的传力机理, 本文首先阐述锚碇所承受的主缆荷载及其施加过程.

3.1 锚碇所承受的载荷及其施加过程

a. 主缆架设. 时间为1998年7月15日至12月6日, 历时145 d. 2根主缆总重 1.68×10^5 kN, 作用于锚块的主缆拉拔力为 1.55×10^5 kN, 散索鞍反力为 4.946×10^4 kN.

b. 箱梁吊装. 时间为1999年2月9日至4月21日, 历时72 d. 主跨箱梁共44节, 重 1.75×10^5 kN, 由其产生的主缆力 2.914×10^5 kN, 散索鞍反力为 9.268×10^4 kN.

c. 桥面铺装和通车运营. 桥面铺装时间为1999年5月14日至8月18日, 历时96 d. 由其产生的主缆力为 7.8×10^4 kN, 散索鞍反力为 2.48×10^4 kN. 1999年9月28日实现通车运营, 按设计通车流量, 由其产生的主缆力 1.151×10^5 kN, 散索鞍反力为 3.666×10^4 kN.

3.2 锚碇浇筑期间其基底反力的观测成果分析

锚碇浇筑过程中, 其基底垂向反力(如图2, 下同)以自重应力为主, 但水平向抗力(如图3, 下同)的分布规律相对复杂, 其值介于锚体混凝土水平向自重应力和基岩水平向自重应力之间. 混凝土浇筑时产生的水化热对测点应力影响较大, 但具有较强的时效性, 大部分测点受其影响的时间不超过2个月. 从总体上看, 东半幅基底反力比西半幅小, 这与其刚度较小有关.

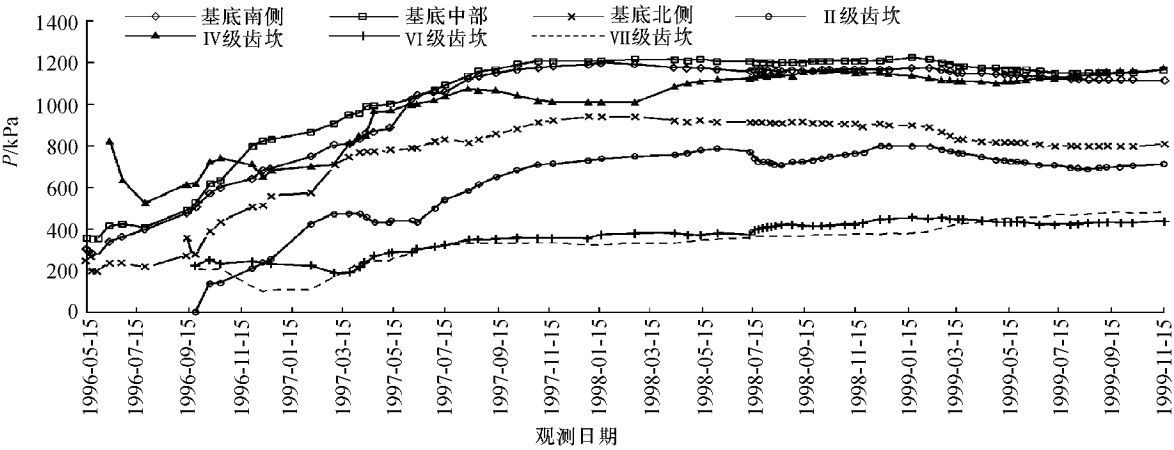


图2 南锚基底垂向反力变化过程
Fig.2 Vertical counter force at the bottom of south anchorage

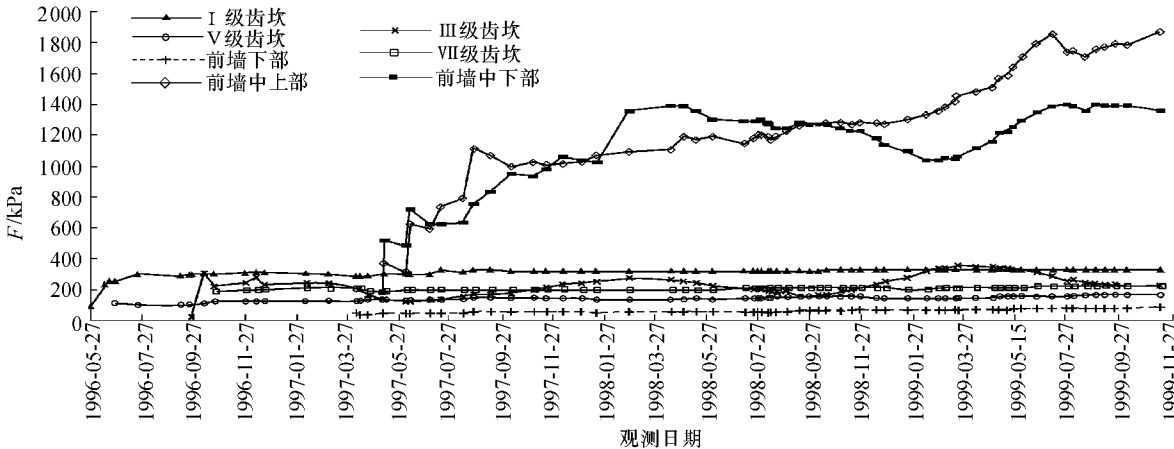


图3 南锚基底水平向抗力变化过程
Fig.3 Horizontal counter force at the bottom of south anchorage

3.3 架缆后锚块基底反力观测成果分析

架缆后锚块在 4.3×10^5 kN 主缆上拔力作用下,基底面垂向反力普遍减小,其中南侧 6 个测点的垂向反力平均减少 95 kPa,降低过程持续而平稳,与主缆力的相关性良好,但通车运营时,活载引起的降幅十分有限,锚块基底中部 6 个测点的垂向反力平均减小 65 kPa,降低过程主要集中在主缆架设和箱梁吊装期间,桥面铺装引起的降幅仅 18 kPa,通车运营基本上未使垂向反力降低,基底北侧 6 个测点的垂向反力平均减小 143 kPa,降低过程也集中在主缆架设和箱梁吊装期间,桥面铺装引起的降幅为 16 kPa,通车运营初期,北侧的垂向反力反而略有上升,架缆后,基底反力从南到北的降幅分别为 6.3%、5.3% 和 15.2%,由此可见,架缆后,南锚基底反力降幅不大,根据有限元计算结果,南锚碇的抗滑稳定性具有较大的安全储备。

锚块前侧基底(Ⅱ级齿坎台面)垂向反力的变化过程可分为两个阶段:在主缆架设期间(尤其是后期),基底反力不仅没有降低,反而大幅度增长,6 个测点平均上升 90 kPa,所以,在主缆架设期间,其作用类似于支点,随着箱梁吊装的进展,锚块前侧基底反力才开始出现降低,至桥面铺装完成时,6 个测点平均降低 114 kPa,降幅达 14%。架缆后,锚块在 4.7×10^5 kPa 主缆水平力作用下,前侧齿坎立面的水平向抗力普遍增大,其中,Ⅰ级齿坎立面 6 个测点平均增大 8.3 kPa,上升过程持续而平稳,Ⅲ级齿坎立面的水平向抗力变化过程比较复杂:在主缆架设初期,水平向抗力不仅没有增加,反而大幅度降低,6 个测点平均降低 126 kPa,其原因是:当主缆拉力不大时,锚块以其前侧下部为支点作前倾转动,当主缆架设完成 15% 时,Ⅲ级齿坎立面的水平向抗力才大幅度上升,至箱梁吊装完成时,其值上升 207 kPa,但在桥面铺装和通车运营初期,其值反而逐渐降低(平均降低 136 kPa),降幅达 38%。

3.4 架缆后南锚鞍部基底反力观测成果分析

架缆后,南锚鞍部在 2×10^5 kN 散索鞍反力作用下,基底垂向反力的变化过程如下:在散索鞍下的Ⅶ级齿坎台面上,其反力持续平稳上升,至通车运营时,10 个测点平均上升 160 kPa,升幅达 49%。其中主缆架设、箱梁吊装、桥面铺装和通车运营期间分别上升 58 kPa、69 kPa、24 kPa 和 9 kPa。在Ⅵ级齿坎台面上,其垂向反力的变化过程较复杂,在主缆架设期间,其值持续上升,4 个测点平均上升 75 kPa,升幅达 20%,但在箱梁吊装期间,随着散索鞍反力的增大,其值反而降低(平均降低 25 kPa),降幅为 5%。桥面铺装和通车运营初期,其值变化不大,Ⅳ级齿坎台面垂向反力的变化过程与Ⅵ级齿坎相似:主缆架设初期,其值持续上升,至主缆架设完成 25% 时,4 个测点平均上升 152 kPa,升幅达 15%,之后其值反而降低,至箱梁吊装完成时,降低了 55 kPa,降幅约为 5%,但在桥面铺装和通车运营期间,其值再次逐渐上升了 59 kPa。

架缆后,鞍部基底各级齿坎立面水平向抗力的变化过程如下:Ⅴ级齿坎立面的水平向抗力持续平稳上升,4 个测点平均上升 46 kPa,升幅为 38%。而散索鞍下Ⅶ级齿坎立面的抗力变化过程比较复杂,在主缆架设期间,其值维持缓慢下降趋势,在箱梁吊装、桥面铺装和通车运营期间,其值略有上升,这种变化趋势可能与Ⅶ级齿坎岩体在散索鞍巨大斜推力作用下产生较大剪应变有关。

3.5 架缆后南锚前墙水平向抗力分析

架缆后,南锚前墙水平向抗力普遍增大:下部 10 个测点平均增大 27.8 kPa,中下部的变化过程比较复杂,在主缆架设初期,其值出现短时间(约 1 个月)大幅度上升(约 299 kPa),升幅达 35%,之后又经大幅度升降,升降幅度均在 20%~30%。由于该高程上的 5 个测点变化规律基本一致,所以该规律并非偶然,其原因可能是测点距散索鞍和地表均较近,受力条件比较复杂所致。

3.6 南锚碇基底应力的变化规律

a. 锚块基底反力的变化规律。南锚浇筑期间,锚块基底垂向反力基本上以垂向自重应力为主,在主缆架设期间,Ⅰ级齿坎台面上的反力大幅度上升,而基底(高程 6.7 m)反力大幅度降低,说明在主缆架设期间,锚块存在以基底前侧为支点做前倾转动的趋势,之后锚块出现整体上抬趋势,垂向反力降幅为 6%~15%。由此可见,南锚碇地基岩体对其有较大的约束力,挂缆后基底附加应力损失不大,显然,基底摩阻力的损失也不大,南锚碇具有较大的抗滑稳定安全储备。架缆后,Ⅰ级和Ⅲ级齿坎立面水平向抗力分别平均上升 8.3 kPa 和 207 kPa。由此可见,虽然南锚碇具有较大的抗滑稳定安全储备,但锚块前侧的岩体仍承担一定的水平向推力,所以,由锚块传递的 4.7×10^5 kN 水平力是由基底水平面上的摩阻力和前侧立面上的水平向抗力共同承担的。

b. 鞍部基底反力的变化规律。架缆前,其分布相对复杂些,主缆架设期间,散索鞍反力较均匀地传递给

鞍部各级齿坎.箱梁吊装期间,随着散索鞍反力(斜推力)的增大,鞍部出现前倾转动的趋势,下部几级齿坎的垂向反力反而减小.所以,散索鞍反力主要由其底部的Ⅵ级齿坎承担.架缆后,由散索鞍产生的水平推力主要由Ⅴ级齿坎和前墙承担,其中Ⅴ级齿坎和前墙下部的水平向抗力分别平均增大46 kPa和27.8 kPa,前墙中部也呈现大幅度增长趋势,且变化幅度也较大,最大平均升幅可达29.9 kPa.

4 结 语

大跨径悬索桥工程在我国方兴未艾,随着跨径的一再突破,其地基基础的稳定问题越来越突出.由于锚碇组成结构、受力条件及其与基岩胶结面的复杂性,对其传力机理进行实测研究十分必要.虽然两个弹性体接触面的有些应力响应规律尚难以很好解释,但不失本文抛砖引玉之初衷.实测成果表明,即使锚碇本身具有较大的抗滑稳定安全储备,其作用于岸坡的向临空方向的水平推力仍是巨大的,锚碇基底摩阻力事实上未能充分发挥作用.此外,气温变化可通过改变主缆力而影响锚碇的基底应力,但是目前还无法分离这种影响,因为悬索桥的主缆属柔性结构,其拉力的变化主要取决于桥面系和风荷载.

参考文献:

- [1] JERFFREY S Y, 周世忠. Jiangyin Yangtze Bridge, China [A]. 见: 江苏省江阴长江公路大桥建设指挥部编. 江阴长江公路大桥工程建设论文集 [C]. 北京: 人民交通出版社, 2000. 530—533.
- [2] 周世忠. 江阴长江大桥建设中的重大技术问题 [J]. 桥梁建设, 2000 (2): 20—24.
- [3] 陈志坚, 卓家寿, 刘世君. 干扰位移法及层状岩质边坡滑动边界的确定 [J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 630—633.
- [4] 李造鼎. 岩体测试技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993. 163—166.
- [5] 陈志坚. 层状岩质高边坡稳定监测技术 [J]. 中国工程科学, 2001, 3(5): 86—91.
- [6] 陈志坚, 游庆仲, 林闽, 等. 振弦式压力盒在刚性接触面应力监测中的应用 [J]. 中国工程科学, 2002, 4(12): 80—85.

Monitoring data-based study on foundation stress of gravity structures under complex loading conditions

CHEN Zhi-jian^{1, 2}, DONG Xue-wu³, XIE He-ping²

(1. College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China;

2. China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;

3. Jiangsu Province Sutong Bridge Construction Headquarters, Nantong 226009, China)

Abstract: With the anchorage project of a long suspension bridge as an example, the stress characteristics of the gravity structure on rock foundations and the significance and methods of monitoring of the foundation stress are expounded. According to the observation data of 88 times' monitoring at 132 stress observation points during 4 years, the mechanism of load transfer in the gravity embedded anchorage is analyzed. The results show that the variation of the stress in anchorage foundations is complex under the action of huge uplift and horizontal tensile forces. At the early stage of application of the main cable force, the stress in the rear section of the anchorage foundation shows a trend of decrease, while the stress in the front section of the foundation increases because of the fulcrum function of the fore anchorage. With the increase of the main cable force, the fulcrum function of the fore anchorage is gradually lost. The variation of the stress in the saddle foundation is similar to but nonsynchronous with that in the anchorage. Owing to the nearly simultaneous actions of the horizontal resistance on the front section of the anchorage and the friction along the foundation, the fore anchorage must bear the large horizontal thrust, although there is a large margin of safety for stability against sliding of the anchorage.

Key words: gravity structure; embedded anchorage; contact stress; pressure cell; stress monitoring