

大跨径悬索桥地基基础安全监控模型的研究思路及技术路线

陈志坚¹, 周世忠², 卓家寿¹

(1. 河海大学土木工程学院, 南京 210098; 2. 江苏省交通厅, 南京 210004)

[摘要] 分析了江阴大桥南塔墩之地基和南锚碇之抗力体的层状岩质边坡稳定问题的复杂性及其安全监控模型建立的重要性和技术难点。阐述了建立边坡稳定原因量之塔墩荷载分布和锚碇剩余推力监控警戒模型、基于外部变形观测成果的边坡安全性综合评判模型以及基于内部剪切位移观测成果的边坡稳定性预测预报模型的研究思路和技术路线。

[关键词] 层状岩体; 边坡; 监测; 监控模型; 研究思路

[中图分类号] TU471.4 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2002)06-0020-05

综观国内外文明和经济发展史, 文明的起源、城镇的兴起, 经济的发展, ……, 无不与大江、大河休戚相关。所以, 许多工程场址分布于岸边, 尤其是跨越工程, 如输变电线路工程中的跨越塔、桥梁工程中的塔墩, 必以岸坡为地基, 而且它们多选择江面较窄的河段作为跨越点。显然, 江面较窄的河段必然水深流急。所以, 跨越工程中的塔墩多以水下高边坡为地基, 塔墩基坑的开挖则在水边线以上形成了人工边坡。对于悬索桥工程, 主体建筑之锚碇也需以岸坡为抗力体。为此, 它要求岸坡安全承受巨大的垂向荷载和向临空方向的水平推力。显然, 岸边工程的稳定问题是突出的, 而其典型当属大跨径悬索桥工程。

江阴大桥位于江苏省江阴市长江下游河段上, 江面宽约 1.4 km, 主桥采用一跨过江、主跨长 1 385 m 的悬索桥方案, 被列为国家重点建设项目, 也是我国已建的、规模最大的桥梁工程。大桥主塔墩(高约 190 m)地基基础需安全承受 120×10^4 kN 的垂向荷载。锚碇须安全承受 64×10^4 kN 的主缆拉拔力, 并将其传递给地基基础, 其水平分力为 55×10^4 kN。大桥的南塔墩、南锚碇和南引桥均位于西山山体上, 该山体三面临空, 由缓倾长江的层状砂、页岩组成, 塔墩、锚碇与山体的相互作用强烈。大桥南塔墩以不稳定结构的缓倾顺向坡

为地基, 南锚碇也以边坡为抗力体, 安全监控就成为确保大桥安全的必备措施。江阴大桥南岸地基基础安全监控实质上属层状岩质边坡工程的安全监控。本文结合“江阴大桥工程建设关键技术研究”课题, 开展了层状岩质边坡工程安全监控模型及其关键技术的研究工作, 因限于篇幅, 仅侧重介绍研究思路和技术路线。

1 层状岩质边坡稳定问题的复杂性

层状岩体是指分布有一组优势结构面(如层面)的岩体, 它们是复杂岩体的典型, 具有横观各向同性。自然界中具有层状构造的沉积岩占陆地面积的 2/3, 许多变质岩也具有层状构造特征。所以在人类工程活动中将遇到大量的层状岩体稳定问题。层状岩体中的优势结构面大多属于物质分界面, 在平行优势结构面方向, 岩体的组成基本相同, 而在垂直优势结构面方向, 岩体的组成则呈现频繁的软硬交替。由于优势结构面多属原生结构面, 所以褶皱作用强烈。因褶皱作用而产生的层间错动, 使已有优势结构面的物理力学性质进一步弱化, 甚至成为对岩体稳定起控制作用的泥化夹层。也由于优势结构面大多属物质分界面, 所以层状岩体中大量存在的裂隙发育情况受控于优势结构面的

发育与分布,且它们可组合成大量潜在滑裂面^[1],并决定了岩体力学性质和岩体质量。层状岩质边坡中分布的对稳定有重要影响的多层上层滞水,目前仍难以准确模拟。故其稳定性的准确评价十分困难。因此,监测手段成为确保其安全与稳定的必备措施。多年的实践和大量的检索表明,由于岩土体的复杂性,为了落实“为安全而监测”的宗旨,深入的定性分析和客观的定量评价十分必要。不同的稳定问题、不同的破坏机理、不同的破坏边界,其监测网点的布设、监测方法的选择以及监控模型的建立是不相同的。

2 悬索桥地基基础安全监控技术难点

监测作为确保岩土体及基础工程安全的重要措施之一,由于受工程施工、监测网点所处的恶劣环境以及人为因素的影响,漏测现象时有发生,监测成果也难免存在粗差,从而导致监测值出现因差错而引起的异常。因此,为了建立监控模型,根据监测资料对岩土体及基础工程的安全状况进行客观评价和预测,必须对监测资料进行误差分析,并准确判断监测值异常的性质,以保证资料的可靠性,还必须对漏测值进行完整性补充,以避免在对监测资料进行平均时产生人为的异常。

随着监测技术的发展,监测内容趋于多样化,监测点数量大幅增加,监测周期也越来越短。所以,监测成果数据十分庞大,监测资料的计算机管理势在必行。建立及(实)时、快速、简捷的监测数据处理系统十分必要,它是监测资料计算机管理系统的第二个子系统。监测资料计算机管理系统的第二个子系统是资料解释系统,从技术实现的角度来看也是监测资料管理系统中最为复杂的子系统。资料解释系统的作用在于通过对已有的经过可靠性分析和完整性补充的实测数据进行正分析、反演分析以及反馈分析,以综合评判建筑物及地基基础的运行性状和安全程度,并及时提出技术警报以及相应的处理建议。通常,一个完善的资料解释系统,应具备建立数学模型、检验模型、校正模型和使用模型,并进行合理解释和预测的功能。安全监测资料解释系统的主体是安全监控模型。

就目前的科学技术发展水平而言,安全监测仍仅能实现对现象(响应量)或作用(原因量)的观测。虽有大量观测数据,仍很难据以对建筑物及地

基基础的安全状况做出直接的评判和预测,它们之间的相关性的建立是极其复杂和困难的。“监测数据”与“安全状况”之间的关系就是安全监控模型,它包含控稳原因量监控警戒模型、和根据控稳原因量观测结果建立的安全性预测预报模型,也包含敏感响应量监控警戒模型,以及根据敏感响应量观测结果建立的安全性综合评判模型和预测模型。对于悬索桥地基之层状岩质边坡而言,什么是控稳原因量、什么是敏感响应量,却因坡而异,尚无章可循。

对于层状岩质边坡工程安全监控模型的建立,无论是安全性综合评判模型,还是安全稳定性预测预报模型,或是监控警戒模型,其建模的困难之处不仅在于其难而复杂,更在于尚不知从何入手、据何理论、依何方法。

无论是塔基水下边坡,还是基坑人工边坡,其稳定性都直接影响塔墩和跨越工程的安全。为了减少有巨大荷载作用的塔墩工程对边坡稳定的影响,深、大开挖应慎重对待,并应设法降低塔墩巨大荷载的作用面。江阴大桥采用了一种能有效减少塔墩荷载对边坡稳定影响的桩周摩擦失效嵌岩桩基础方案^[2],对于这种独特的桩基础形式,其传力机理和安全监控模型是值得深入研究的,也是江阴大桥工程建设关键技术的研究重点。由于悬索桥塔墩均属高耸建筑,而且主要荷载作用于塔顶,所以在地基基础安全监控模型研究中突出不均匀沉降的影响是十分必要的。悬索桥重力式锚碇的受力特点类似于重力坝,但还存在更不利的因素,如需安全承受主缆的巨大上拔力,而且力的作用点集中、传力机理复杂。此外,锚碇的边界条件也独具特色,它分布于河岸上,以塔墩地基和岸坡为抗力体。所以,其剩余推力对塔墩地基和岸坡稳定的影响也非常巨大。显然,其传力机理的研究十分必要,在建立安全监控模型时,既要考虑自身的安全稳定,又要考虑对塔墩地基和岸坡稳定的影响。对于岩体工程,在其屈服破坏之前的变形往往是微小的,为了实现安全监测防患于未然的目的,基于外部变形观测成果的边坡安全性综合评判模型的研究是十分必要的。为了克服外部变形观测成果无法判断不稳定体的分布深度及无法获知沿潜在滑面位移的缺陷,往往需辅以岩体内部水平位移观测手段。显然,基于潜在滑面剪切位移观测成果的边坡稳定性定量评价和预测预报模型的研究同样十分必要。

3 大坝安全监控及建模方法的启示

不容置疑,边坡工程安全监控理论及其建模关键技术是亟待深入研究的。参考大坝安全监控理论的成功经验和方法,有如下认识和启示:

安全监控模型的作用在于可据以对建筑物及地基基础的运营状况和安全稳定性做出合理、客观的综合评判,可及时、准确检出异常,并提出相应的技术报警和处理建议。建模的方法包括正分析、反演分析和反馈分析。

针对各个观测量单项分析的缺陷,有必要对地基基础安全状态进行综合评价。综合分析的内容包括同一监测项目多个测点监测值的综合分析;同一部位多种监测项目观测值的综合分析;同一建筑物不同部位监测成果的综合分析;仪器定点监测和目视巡查的综合分析等。综合分析应以系统工程方法论为指导,定性与定量分析相结合,并吸取现代科学技术的新思路、新理论,应用数值分析、层次分析、多目标评价、模糊综合评价、非定量数据的量化、灰色系统、神经网络等方法对实测资料进行综合分析。有条件时还可建立相应的专家系统。

当监测值出现异常,甚至超出监控指标时,应首先检查和分析客观值的可靠性、正确性与准确性,及时重测或加密观测或剔除不可靠数据。若异常值反映的是实际情况,应检查环境因素有无重大变化,监控指标是否与实际条件匹配。否则,应检查和分析地基基础内在因素有何变化,并及时向主管部门通报出现的情况和问题。当实测值或巡查结果反映结构和地基基础出现明显异常或险情时,应立即向有关部门报告情况,做出技术报警,并提出监控及处理建议。

监控指标可分为原因量监控指标和响应量监控指标两大类。常见的监控指标有变形和变位监控指标、渗流和扬压力监控指标、荷载和应力及其分布监控指标等。其中变位监控指标是评价和监控建筑物及其地基基础的重要指标,是国内外坝工及岩土工程界研究的重要课题。但由于影响变形变位的因素多(如地层岩性、地质构造、荷载分布、施工质量、施工进度、运行环境等)而复杂(尤其是地质条件和施工因素),所以拟定监控指标的难度较大,国外这方面的研究报道较少。我国学者吴中如院士等^[3-10]对混凝土坝等的变形监控指标进行了较为

系统的研究,提出了用于拟定混凝土坝位移安全监控指标的置信区间法、典型监控效应量的小概率法和极限状态法等。

综上所述,建筑物安全监控理论起源于大坝工程实践。目前已经广泛(似乎也仅)应用于大坝工程实践,但对于大坝安全至关重要的坝基安全监控理论的研究,却少见公开报道,其原因在于坝基的复杂性。对于悬索桥地基基础及复杂层状岩质边坡工程,其安全监控模型的研究虽有大坝安全监控理论可以参考,但建模的研究思路和技术路线还须另辟蹊径。

4 研究思路及技术路线

对于大跨径悬索桥之塔墩地基和锚碇抗力体的层状岩质边坡工程,其安全监控模型应包含重力式锚碇安全监控模型、塔墩荷载监控模型、边坡安全性综合评判模型以及边坡稳定性预测预报模型。建立模型的技术路线如图1所示。

对于边坡稳定性预测预报模型,采用反演及反馈分析法建立基于潜在滑面剪切位移的确定性模型,意欲根据实测的剪切位移客观评价并预测边坡在遭遇最不利工况时的稳定性。但对剪切位移的敏感性因素是变形参数,而对边坡稳定性的敏感性因素是抗剪参数。经深入分析,选定对边坡稳定有重要影响的包气带渗透力的度量指标(水力折减系数)为反演参数。为了建立该模型,须解决的关键问题有:a. 边坡控稳因素的分析;b. 稳定性敏感因素的确定及模拟^[11];c. 最不利滑面的确定^[1];d. 不作为反演参数的其他力学参数的准确确定^[12];e. 破碎岩体中高质量测斜孔埋设工艺的研究^[13]。对于江阴大桥南塔区南坡^[13],建立稳定性预测预报模型如式(1)所示。

$$K = 1.477e^{-0.11S}, \quad (R=0.995) \quad (1)$$

式中, K 为南塔区南坡沿最不利滑裂面(230夹层)在最不利工况下的稳定安全系数; S 为沿最不利滑面的实测剪切位移(mm); R 为相关系数。据此,可由实测的剪切位移预测该边坡遭遇最不利工况时的稳定性。由式(1)可知,当230夹层的实测位移达3.5 mm时,该边坡遭遇最不利工况时的稳定性无法保证。依此,可将3.5 mm视为230夹层剪切位移的警戒值。

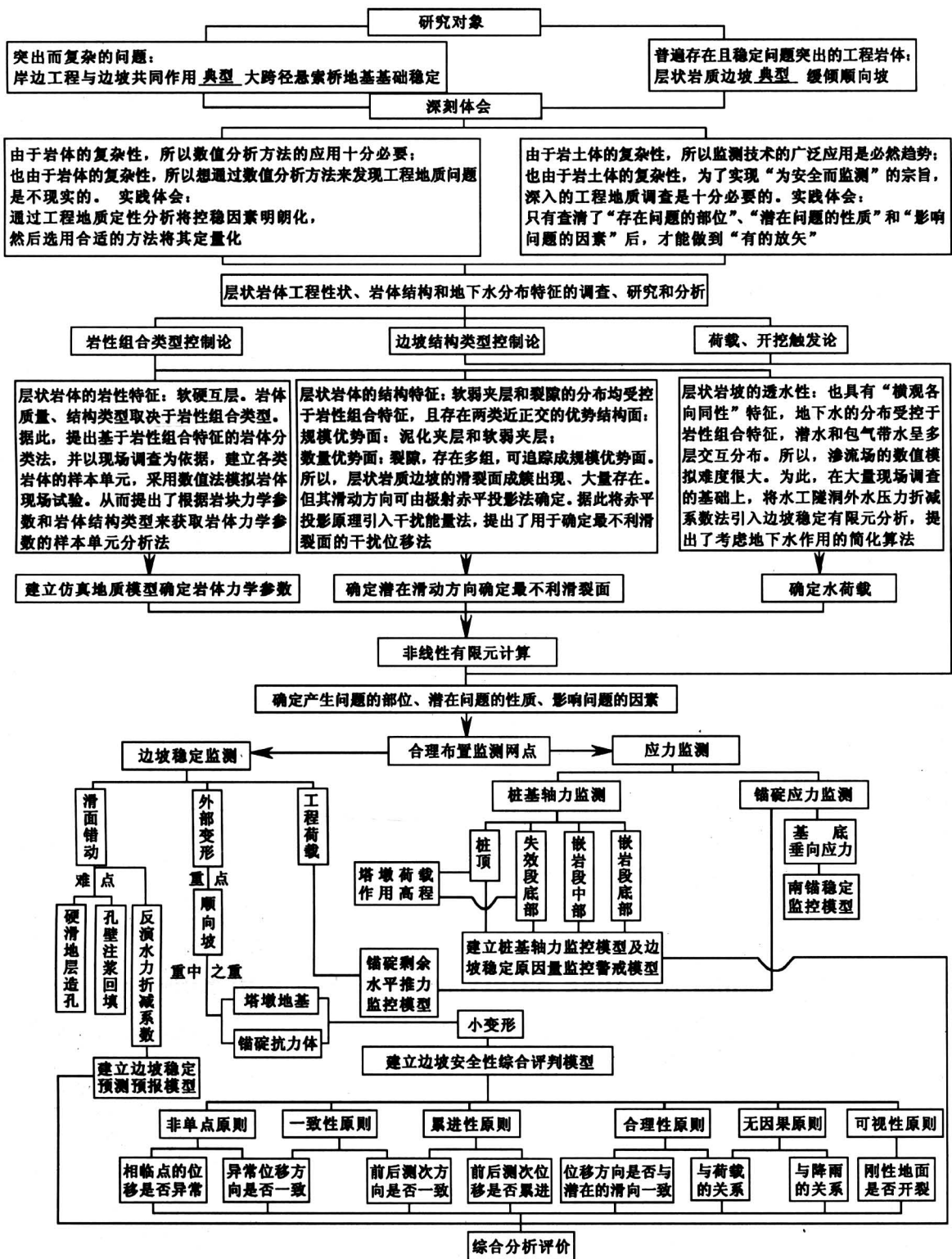


图 1 研究技术路线框图

Fig.1 The research and technique course

对于边坡安全性评判模型，采用模糊数学方法，建立基于边坡外部变形的综合评判模型，意欲根据实测的外部变形，对边坡安全性做出客观准确

的评价。为了建立该模型，须解决的关键问题除包括上述问题 a、c 外，还有：f. 暴雨入渗对边坡稳定影响的分析^[11]；g. 边坡破坏模式的事先预测；

h. 外部变形特征及监测资料可靠性的事先分析。

对于江阴大桥南岸地基基础,按地基和边坡的结构类型、荷载分布及边界条件,分4个区分别建立了考虑外部变形异常率因子、位移方向一致性因子、水平位移与沉降的协调性因子、位移方向累进性因子、位移大小累进性因子、位移方向合理性因子、位移与荷载关系合理性因子、降雨效应因子及可视性因子等9个因素,安全等级为正常、假异常、预警、技术警报的地基和边坡安全性综合评判模型。

对于塔墩荷载监控警戒模型,由于塔墩荷载是客观存在的,考虑到作用位置不同的荷载对边坡稳定性有截然不同的影响,故采用三维非线性有限元分析法,通过基桩轴力建立塔墩荷载分布的监控警戒模型^[2],意欲通过塔墩荷载分布的监控,确保塔基边坡的稳定性。为了建立该模型,须解决的关键问题除上述的a、c、d、e、f外,还有:i.摩擦失效嵌岩桩基础传力机理及塔墩地基最不利滑裂面迁移的深入分析。

对于重力式锚碇安全监控模型,在根据应力观测成果分析了锚碇传力机理后,采用三维非线性有限元分析法分别建立了锚碇外部变形监控模型(侧重考虑锚块尾部上翘、散索鞍水平位移以及两个散索鞍差异水平位移)、基底垂向反力(消散)监控警戒模型和前侧剩余推力监控警戒模型。以上各种模型的建立及关键技术的解决都有赖于层状岩体工程特性的深入分析。

参考文献

- [1] 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
- [2] 陈志坚. 江阴大桥南塔墩地基基础安全监控模型[J]. 岩土工程技术, 2001, (1):41~44
- [3] 吴中如,沈长松,阮焕祥. 水工建筑物安全监控理论及其应用[M]. 南京:河海大学出版社, 1990
- [4] 庄万康,张进平. 混凝土大坝安全监控中若干问题的探讨[J]. 大坝与安全, 1992, 6(2):14~31
- [5] 陆绍俊,沈长松,刑林生,等. 带缝重力拱坝安全监控指标拟定方法探讨[J]. 大坝与安全, 1992, 6(2):32~40
- [6] 王德厚. 浅论大坝安全判据研究[J]. 大坝与安全, 1992, 6(2): 49~54
- [7] 魏德荣. 大坝安全监控指标问题[J]. 大坝与安全, 1992, 6(3):23~26
- [8] 付冰清,薛果夫. 三峡永久船闸变形监控指标的研究[J]. 水文地质工程地质, 2000, 27(4): 5~7
- [9] 王德厚,赵全麟. 葛洲坝水利枢纽安全监测及预报模型的检验[J]. 人民长江, 1985, (3): 10~17
- [10] 范继舜. 关于岩坡稳定性的判别[J]. 水文地质工程地质, 1985, (3): 10~17
- [11] 陈志坚,吉林. 层状岩质边坡地下水分布特征及其控稳作用[J]. 河海大学学报, 2001, 29(1): 107~110
- [12] 陈志坚,卓家寿. 样本单元法及层状含裂隙岩体力学参数的确定[J]. 河海大学学报, 2000, 28(1): 14~17
- [13] 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

Technical Methods to Make Safety Monitoring and Forecast Models for the Foundation of Long Suspension Bridges

Chen Zhijian¹, Zhou Shizhong², Zhuo Jiashou¹

(1. Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Bureau of Communication of Jiangsu Province, Nanjing 210004, China)

[Abstract] After stating the complexity of stability problem and the importance and technical difficulty to make safety monitoring model for layered rocky slope of foundation of the south tower and resistance body of south anchorage in Jiangyin Yangtze Bridge, this paper introduces the technical methods to wake the model of tower load distribution, the monitoring and alarm model of residual anchorage thrust, j. e., cause factor of slope stability, the comprehensive fuzzy evaluation model for slope safety based on external deformation observation results and the forecast model for the stability of layered rocky slope based on observed internal shear displacement.

[Key words] layered rock mass; slope; monitoring and forecast model; technical methods