

层状岩质高边坡稳定监测技术

陈志坚

(河海大学土木工程学院, 南京 210098)

[摘要] 以江阴大桥南塔区层状岩质高边坡及地基基础安全监测为例, 阐述其安全监测设计的原则、监测网点的合理布置、破碎边坡岩体中测斜孔埋设技术以及边坡稳定安全监控模型的建立。提出基于外部变形观测成果的边坡稳定性判别准则, 基于剪切位移、桩基轴力和水平推力观测成果的边坡稳定安全裕度定量评价方法。

[关键词] 江阴大桥; 塔墩; 边坡稳定; 监测; 测斜孔; 监控模型

在工程活动中往往涉及大量的层状岩质边坡, 岸边高、重、大建筑物(如悬索桥的塔墩)往往以高边坡为地基。所以, 边坡稳定对岸边工程的安全运营具有重要意义, 而岸边工程对边坡稳定的影响往往是巨大的, 显然, 建立有效、高效的边坡稳定安全监测系统是十分必要的。文章以江阴大桥为例阐述了层状岩质边坡安全稳定监测网的建网原则、超深测斜孔埋设技术以及边坡稳定监控预报模型的建立。

1 层状岩质边坡稳定性评价

江阴大桥主跨跨径达 1 385 m, 是目前中国第一、世界第四的大跨径悬索桥, 也是国家“两纵两横”公路主干线之同江—三亚沿海国道中十分关键的过江设施。大桥主体建筑由南塔、北塔、南锚、北锚、主梁和主缆构成。其中, 南塔、南锚和南引桥座落于南北长约 750 m、东西宽 100~400 m 的西山山体上。该山体三面临空、呈舌状伸入长江约 200 m, 山顶高程约 74 m, 大桥南塔墩和南引桥位于山体北坡的西侧, 该边坡为高约 130 m (下部 60 m 为水下边坡) 的缓倾顺向坡, 天然坡角 20~35°。由于桥位区南岸沿江带状平地狭窄(宽 4~6 m), 所以南塔东支墩承台基坑的开挖在塔区南侧形成了高约 40 m 的永久人工边坡, 在南塔区东侧

形成了长约 80 m、宽约 60 m 的单薄山梁。人工边坡设置 6 级台阶, 每级台面高差 7 m, 台面宽 1~2 m, 开挖坡度 1:0.75, 坡面采取了现浇 20 cm 厚钢筋混凝土和表层浆砌块石护坡方案, 在 2 退坡和 3 退坡上还布置了 24 根 600 kN 预应力锚索。南塔和南引桥的分布如图 1 所示, 南塔作用于地基基础的垂向荷载约 120×10^4 kN。由于引桥桥面高程约 51 m, 低于西山山顶, 所以采用重力式嵌岩锚方案的南锚碇, 其基坑(底高程 6.7 m)也由开挖山体形成(开挖土石方 23×10^4 m³), 锚碇体积约 9.9×10^4 m³, 为现浇钢筋混凝土结构, 其主要功能是安全承受 64×10^4 kN 的主缆拉力(仰角 24.1977°), 并将其传递给地基岩体, 锚碇前侧距南塔区人工边坡坡顶约 240 m。显然, 大桥兴建对西山北坡的影响是复杂而巨大的, 既有因开挖而改变了边坡局部的稳定边界条件和地下水补排条件, 又在边坡坡腰处作用有巨大的垂向荷载, 在边坡后缘作用巨大的水平推力。由于西山北坡的稳定性对大桥的安全运营具有重要意义, 它既是南塔墩和南引桥的地基, 又是南锚碇的抗力体, 塔区南侧人工边坡的稳定也直接危及塔墩安全。所以, 西山北坡稳定安全监测至关重要。

西山山体主要由泥盆系中统定山组的薄层—中厚层砂、页岩呈互层状组成, 地层分布主要受黄山

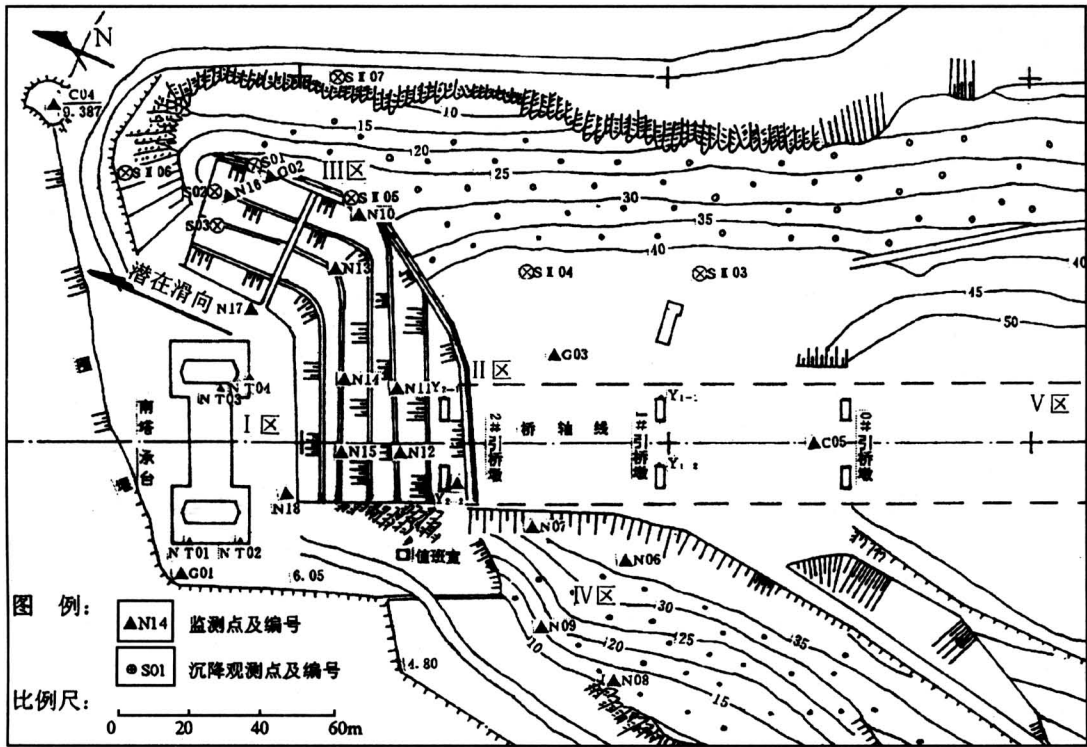


图1 主体建筑及监测点分布图

Fig.1 Distribution of main buildings and monitoring spots

背斜控制。黄山背斜褶皱舒缓，轴面走向近东西，核部位于南锚碇区。所以，西山山体总体呈向北倾斜的单斜构造，北坡为顺向坡，地层倾向 NNW—NNE，倾角 20°~30°。东坡为横向坡，西北坡为斜向坡，桥轴线与岩层倾向的夹角约 25°。岩体中缓倾角的软弱夹层（共 33 层）和陡倾角的裂隙（共 5 组）发育，但未见断层分布。软弱夹层主要为泥夹碎屑型和碎屑夹泥型，构成了西山北坡的潜在底滑面。在 5 组裂隙中近南北、近东西和北西向的 3 组裂隙比较发育，裂隙间距约为岩层层厚的 1~2 倍，切割深度受软岩夹层和层面限制。在大量的层与层之间的陡倾角裂隙中还存在切层的长大裂隙，其间距一般为 3~4 m，延伸长度可达 20~30 m，切层深度大于 5 m，这些切层裂隙构成了西山北坡潜在滑动边界中的纵、横切割面。显然，西山北坡潜在滑裂面成簇存在，为了定量评价和监测边坡的稳定性，文献 [2] 用干扰位移动法分区确定出其最不利滑动边界。

2 监测设计原则与监测网点布置

2.1 监测设计原则

为切实贯彻“为安全而监测”的宗旨，边坡安全监测系统设计时应做到“目的明确，合理建网，方案可行，经济安全”。在江阴大桥西山边坡及地基基础安全监测网设计时遵循如下基本原则：**a.** 目的明确，对重点部位、重要因素进行重点监测，实行“全网少测、简网勤测，初期多测、后期少测”的观测方案。**b.** 侧重响应量观测，适当进行原因量观测。**c.** 以外部（宏观）监测为基础，并辅以边坡和地基基础内部位移和应力监测。**d.** 既保证现场观测的质和量，更注重对观测资料的整理、分析和利用。

江阴大桥南塔区边坡安全监测的基本目标：监测并判断“边坡是否安全，若有异常，异常产生于什么部位，属于什么性质，发展趋势如何，对工程的影响多大，是否处理，如何处理”。为此，需结合勘探资料进行专项现场调查，根据层状岩体岩性组合特征、岩体结构特征、潜在滑动边界和破坏模式以及工程荷载和开挖的影响等，对边坡岩体按稳定性进行分区，并明确各区的主要控稳因素，从而确定重点监测部位和因素。

2.2 监测网点的布置

根据监测设计原则,边坡稳定监测网点的布置,将西山边坡分为Ⅵ个区(如图1所示)。

I区为塔基水下边坡。三维非线性有限元计算结果表明,天然状态下该区最不利潜在滑体的稳定安全系数 K 为1.4,但作为塔墩地基,其坡顶承受 120×10^4 kN垂向荷载,最不利潜在滑体的 K 降为1.28,若考虑地震荷载则 K 为1.1,显然该区应作为监测重点。为了提高水下边坡及南塔地基基础的稳定性,南塔桩基础(24根直径2.8 m,长35 m的钻孔灌注桩,承台厚6 m)上部20 m采取桩周摩擦失效处理,承台与基岩之间采取软木垫层隔离措施,以使边坡上部26 m厚的岩体不受工程荷载影响,为了检验软木垫层隔离效果和桩周摩擦失效处理效果,布置了桩基轴力监测系统,共在13根桩中布置了64套振弦式钢筋应力计,其中有3根桩在其桩顶、摩擦失效段底部、嵌岩中部和桩底的4个断面上布点监测。为了监测地表以下26 m深处岩体的变形与稳定,在承台顶面布置外部变形监测点4个(监测点分布如图1所示,下同),为了监测边坡浅部岩体的变形与稳定,在承台周边布置外部变形监测点3个。

Ⅱ区为塔墩南侧永久人工边坡。虽然其上分布的引桥墩工程荷载(约 16×10^4 kN)对其稳定影响不大,但工程开挖在较大程度上改变了稳定边界条件,天然状态下该区最小安全系数 K 为1.5,边坡开挖后 K 值降为0.9,为此该区采取了预应力岩锚加固。此外,该区稳定直接危及主塔安全,所以应重点监测。根据最不利滑裂面的分布特征,分别在该区的二级、四级和五级马道上各布置外部变形监测点2个,在其坡顶布置深度分别为82.5 m和75 m的测斜孔2个。

Ⅲ区为塔墩东侧单薄山梁。工程开挖后其最小安全系数约1.1,虽然该区稳定性不影响主塔安全,但作为Ⅱ区人工边坡的抗力体,其稳定性仍应给予重视。根据该区潜在滑裂面的分布特征,在山梁的前缘、中部和后缘分别布置外部变形监测点2个、4个和3个。

Ⅳ区为西山西北坡。该区为斜向坡,基本不存在基岩稳定问题,不作为监测重点。但因基岩面坡度较大,存在局部坡积物(厚3~5 m)顺层滑动问题,为此也根据基岩面坡度和坡积物分布特征布置外部变形监测点4个。

V区为西山东坡。该区为横向坡,不存在基岩

稳定问题,覆盖层也较薄,所以不布置监测点。

Ⅵ区为锚前抗力体。其监测的重点是由锚碇传递的水平推力,为此在锚碇前墙布设了55套振弦式压力传感器(布设高程分别为7.2, 14.2, 20.2, 26.2, 32.0, 36.5, 38.3 m)。

地下水动态监测同样是工程建筑物安全监控的一项重要内容,但是,由于大桥塔基边坡三面临空,岩体破碎,透水性强,地下水动态与降水关系不明显,故课题组未开展地下水动态监测。

3 破碎岩体中测斜孔埋设技术

裂隙发育的砂、页岩互层状岩体在勘探工程中属“硬滑”地层,钻进难度大,孔壁上往往分布大量“探头石”,极易造成卡钻事故,也给测斜管埋设造成很大困难。也因裂隙发育,岩体透水性大,当边坡临空条件好,尤其是人工边坡,钻进中冲洗液回水困难,容易造成埋钻、烧钻事故。为此,钻进过程中稳定浆液(属宾汉流体)的使用是重要的。本次使用的稳定浆液配合比为水灰比0.6:1,膨润土2%,RC-M减水剂0.6%;也可采用低压回填低标号水泥砂浆的二次钻进方法,施工时每完成2~3个回次钻进(进尺为10~15 m)后,低压回填水泥砂浆,待砂浆初凝后(6~8 h)进行二次钻进,如此往复直至终孔。回填砂浆宜用粉细砂拌制,因其只起临时止水和防止“探头石”露出孔壁的作用,所以可用低标号砂浆。

该工艺的实施避免了卡钻、埋钻、烧钻事故,也确保了测斜管的顺利埋设。基岩中测斜孔埋设的另一技术难点是测斜管与孔壁之间的回填注浆。为了便于水平位移观测成果分析,钻进中应严格取芯(岩芯采取率 $\geq 90\%$),避免夹层漏取。为此,要求采用双层(或三层)单动金刚石钻进,所以钻孔口径受到限制,通常采用110 mm。由于测斜管采用外接接头,接头外径为82 mm,所以测斜管与孔壁之间的空隙较小,当孔深大于40~50 m时,采用孔口压浆的方法难以保证测斜管与孔壁之间的砂浆回填密实。为此当孔深较大时,宜采用加强尼龙丝的塑料软管从孔底压浆工艺:测斜管埋设时,在与主测方向垂直的测斜管外侧对称捆绑2根塑料软管与测斜管同时下入钻孔内,塑料软管与测斜管之间约1~2 m用胶带纸捆扎固定。为了使测斜管保持铅垂状态并居中,避免下管时磨破塑料软管,在每节管接头的下端宜设置定向导轮(如图2所

示) 一付, 导轮内径宜略比测斜管外径大, 以便于用钉子将导轮卡在测斜管上。当测斜管埋设完成后, 使用泥浆泵通过预埋的塑料软管向孔底压入用粉细砂拌制的水泥砂浆 (粉细砂必须筛选, 不得混入粒径大于 2 mm 的粗颗粒), 直至压入的砂浆由孔口翻出地表, 压浆过程中压力和浆液稠度的调整和控制十分重要。

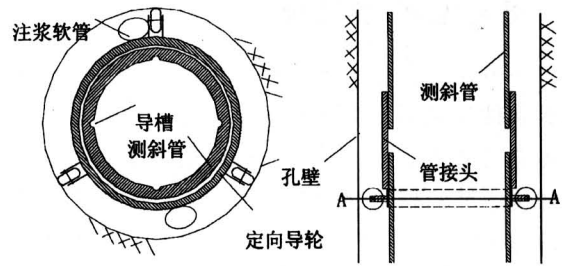


图 2 测斜孔埋设示意

Fig.2 The structure of hole with clinometer

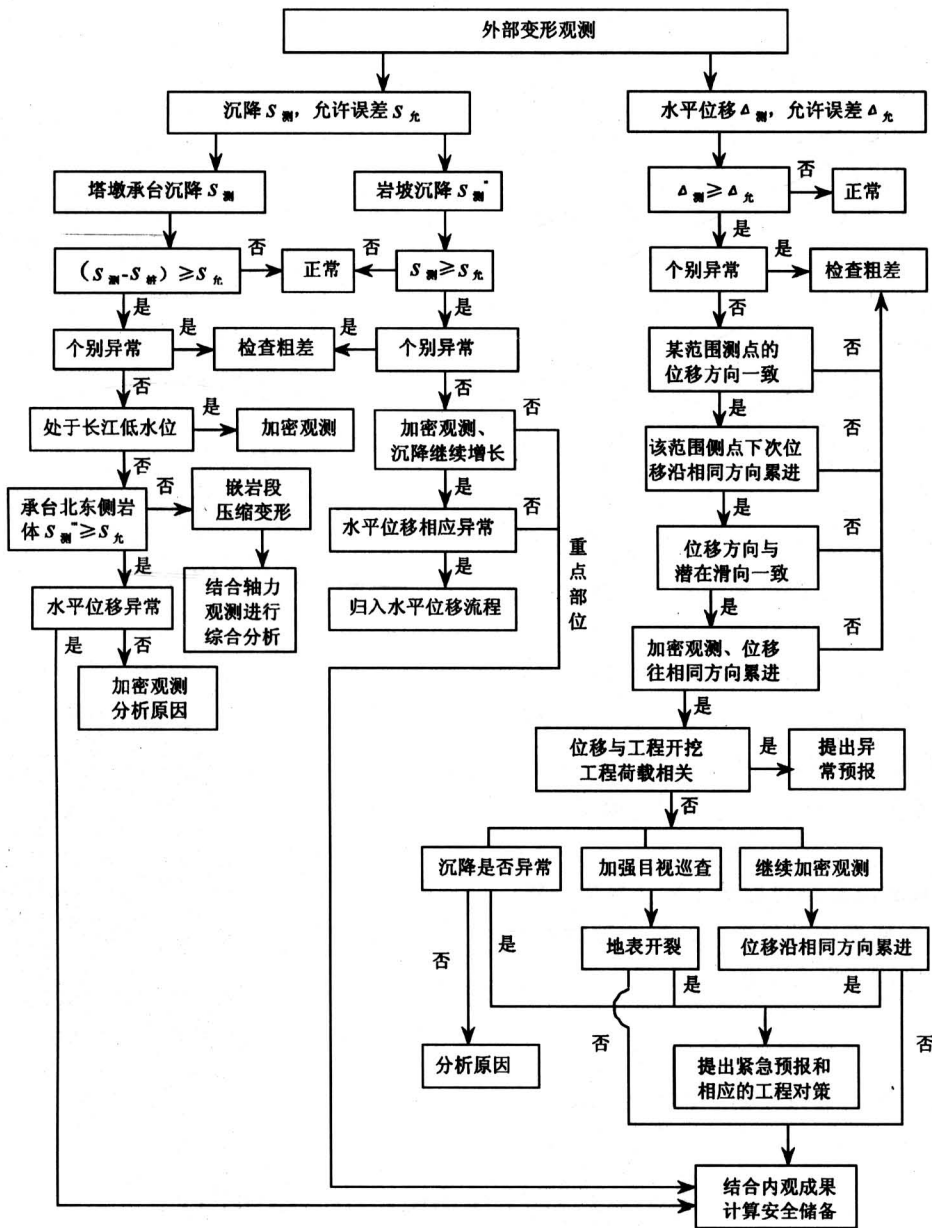


图 3 基于外观成果的边坡安全监控流程

Fig.3 Flow-chart of slope stability monitoring and predicting based on the results of external monitoring

4 稳定监控预报模型

一般而言，在工程荷载作用下或因开挖而导致边界条件（包括水文地质边界条件）改变后，边坡岩体总会产生一定的变形，如何根据实测的变形场来评价边坡的稳定性则是值得深入研究的。对于重要的边坡，尤其是作为重要建筑物地基的边坡，除了必须确保其在正常组合荷载作用下的稳定性外，还必须保证其在非常荷载组合条件（如地震条件和特大暴雨）下的稳定性，而且需留有一定的安全储备。显然，完善的安全监测系统除了能根据已有观测成果对施工期间和正常运营条件下的地基基础安全状况作出合理评价外，还必须具有较强的预报、预测功能。值得指出的是，在边坡岩体内出现塑性区之前，边坡的变形往往是微小的，当观测频度较大时，其变形值往往不会比允许的测量误差大多少。而且对于岸边工程来说，多数测点离江面较近，观测成果受气象因素和水位高低影响较大。

4.1 基于外观成果的边坡稳定性评价

外部变形观测以其灵活性、宏观性以及观测精度的可预见性而成为常用的监测手段。然而，边坡表面的实测位移值通常由3部分组成：含裂隙岩体的变形、沿缓倾软弱夹层（即潜在底滑面）的剪切位移以及允许的测量误差，而且这3部分位移往往不易明确分离。所以，基于外观成果的边坡及地基基础稳定性合理评价的深入研究是十分必要的。江阴大桥的实践表明，对于层状岩质边坡，图3所示的监控判别模型是有效的。图中 $S_{\text{桩}}$ 为桩基摩擦失效段压缩变形引起的沉降，取 $95 \times 10^{-4} P$ (mm)，其中 P 为观测时段桩顶荷载 (kN)； $S_{\text{允}}$ 取 2 mm； $\Delta_{\text{允}}$ 取 3 mm。

4.2 基于内部观测成果的边坡稳定安全裕度计算

为了确定潜在底滑面的位置并计算边坡的安全裕度，尚需结合内部观测成果做深入分析，如图4。

5 结语

不同岩体结构的边坡以及同一边坡的不同部

位，由于其结构类型、边界条件、受力方式等的不同而表现出不同的变形破坏特征。在边坡安全监测系统建立时，为了落实“为安全而监测”的宗旨，深入的地质调查和合理的稳定性分析是十分必要的，在查清了各区的破坏模式、潜在滑裂面和潜在滑向后，方能确保在监测网点布置时“有的放矢”，也为观测成果的合理分析奠定了基础。影响观测成果的因素是多方面的，在岩质边坡破坏之前其可测变形往往是微小的，为了防患于未然，合理的安全监控模型是十分必要的。

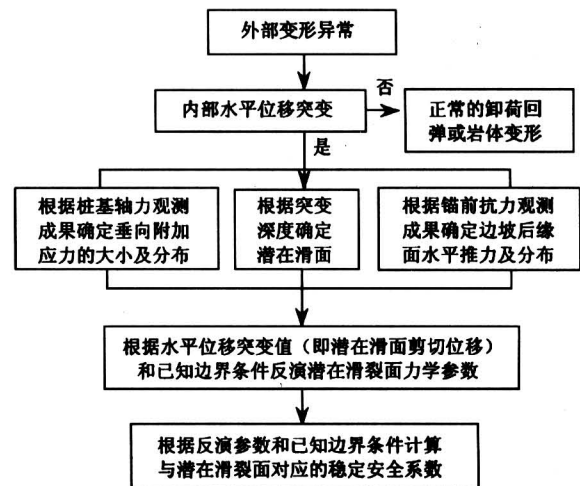


图4 基于内观成果的边坡稳定性计算流程

Fig.4 Flow-chart of slope stability based on the results of internal monitoring

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] 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. 328~348

[3] 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

Monitoring Technology to Stability of Layered Rocky High Side Slope

Chen Zhijian

(College of Civil engineering, HoHai University, Nanjing 210098, China)

[Abstract] Based on the example of monitoring to the stability of the layered rocky high slope, base and foundation of the south tower of Jiangyin Bridge, the discipline of monitoring mesh design to its stability, the rational arrangement of monitoring spots, the embedding technology of hole with clinometer in fragmentary rock mass in high slope and the establishment of the monitoring and predictive model to the stability of high slope are elucidated. The discriminating discipline for the high slope stability based on the monitoring deformation result, and the quantitative evaluation method based on shear-slip, axial force and horizontal pushing force for the stability of high slope are suggested in the article.

[Key words] Jiangyin Bridge; tower; side slope stability; monitoring; hole with clinometer; monitoring and predictive model

中国的数字地震观测与研究

地震,是威胁人类生命和财产安全的大敌,地震发生后,首要的任务就是快速准确地确定地震发生的地点和大小,做出震后趋势判定,以便采取有效的抗震救灾措施。为此,地震部门要建设台站,快速收集和处理由震源发出的地震波信息,实施地震定位和速报,这就是地震观测。

在“八五”、“九五”期间,中国地震局不失时机地确立了中国数字地震观测与研究的攻关项目,并集中组织地震系统内有关传感技术、通信技术、计算机与网络技术人才,用几年时间,完成了国际上需要 10 年或更长时间才能完成的仪器设备的研制和建网工作。

国家数字地震台网,通过卫星设备,将地震仪检测到的地震波形,全实时地传送到位于北京的国家数字台网中心,实施全国范围及国外大地震的监测和速报。在一般的情况下,国家数字地震台网对于国内大地震,速报可以缩小到 15 min 以内。

数字地震观测,可完整地获得一次大震及其余震系列的丰富信息,为深入研究震源破裂过程提供了前所未有的基础性资料。尤其目前用数字地震波形资料可以很好地反演出地震矩张量,建立震源三维破裂图像,为研究大陆地震的震源机理和地震预报提供了有力的工具。如 1999 年 9 月 21 日台湾省大地震的震源破裂过程就是根据中国和邻区数字地震台网资料获得的。这次地震有自深而浅的三次破裂迁移过程,既有效地解释了地表高达 8 m 的断层垂直错位破坏现象,又为该次地震的震情发展趋势提供了有力的依据。

中国的数字地震仪器设备已经走向世界,运行在许多国家的台站上,并得到了国际同行的认可和好评。最近,中美两国地震科学家联手探索北纬 30°地球动力学研究项目,已正式启动。这一切都标志着我国的数字地震观测技术和数字地震研究已与国际接轨,并正在进入国际先进行列。

在对地研究方面,人们把地震观测系统形象地称为“对地哈勃望远镜”。数字地震观测系统;可以像哈勃望远镜帮助人们认识太空一样,帮助人们认识地球构造及其运动变化规律。因此,在人类进入数字时代的 21 世纪中,数字地震观测系统必将成为人类探索地球奥秘,实施“数字地球”计划,改善人类生存环境,创造美好未来的必不可少的重要工具。