构造地质与工程地质的基本关系

彭建兵, 马润勇, 邵铁全

(长安大学 地质工程与测绘工程学院, 陕西 西安 710054)

摘 要:构造地质学是研究各种地质构造及其成生演化的基础地质学,工程地质学主要是应用地质学理论尤其是构造地质学理论解决人类工程建设活动中与构造现象和构造活动有密切关系的地质问题的应用地质学。二者的研究目的虽然不同,但所研究的主要对象是相同的,即都是地质构造,所研究的又都是地球变化过程中的构造变动及其各类效应。文中讨论了构造地质学与工程地质学之间的基本关系,主要包括地质构造对工程地质环境和工程地质条件的控制作用;深部构造、浅部构造以及表层构造动力学特征与区域地壳稳定性之间的关系;构造结构面、构造应力场与岩土体稳定性的关系;活动构造与工程建筑安全性的关系以及地质构造与崩滑流、地裂缝、地面沉降等地质灾害的关系等问题。

关键词:构造地质; 工程地质; 区域稳定性; 岩土体稳定性; 工程安全性; 地质灾害
中图分类号:P642; P54 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2321(2004)04-0535-15

1 问题的提出

1.1 现代构造地质学的走向

构造地质学主要研究地球动力作用下所产生的各类构造的几何形态、组合形式、形成机制及其演化过程,探讨构造作用力的方向、方式和性质;研究的尺度包括大地构造、区域构造和显微构造;研究的基本目的是阐明地质构造在空间上的相互关系和时间上的发育顺序,探讨地壳演化和地壳运动等自然规律及其动力来源。

20 世纪以来,构造地质学从几何构造学逐步进入到成因构造学和实验构造学的研究层次,并从定性观察逐步转入半定量-定量化研究;研究尺度也从地壳浅表部逐步扩展深入到对岩石圈深部结构的研究;对地壳介质变形特征的研究从脆性、塑性扩展到流变性领域;对各种构造现象不再仅限于单纯的几何学研究,而是深入到运动学、动力学层次的研究,从而使构造地质学研究的领域进一步拓宽,内容更加广泛深入,研究思路也从静态走向动态动力学过程。特别是 20 世纪 60 年代板块学说的兴起,成为地球科学发展史中的一个里程碑,它首先从思想上用构造活动论替代了固定论,并从全球观出发建立起统一的动力学和运动学模式,为我们从行星尺度解释地球的结构、成分和内部作用过程提供了基本框架。

大陆岩石圈结构、构造比大洋岩石圈复杂得多,因而板块理论在解释大陆构造方面遇到不少难以解决的问题。例如,大陆岩石圈不是简单的刚板块而是存在构造变形,地形变观测结果和众多的活动断裂是最好的例证;大陆岩石圈中存在着若干软弱流变层,并可能控制和影响着大陆内部复杂的变形分带和应变分层等现象;大陆造山带、沉积盆地的形成与演化用板块理论无法做出令人满意的解释;大陆地震并不只是沿板块边界呈狭窄的带状分布,而是具有弥散状和呈层状的分布特征等。在此历史背景条件下,国际地学界在发展、应用板块构造理论的进程中,在新的研究层次上提出了全球动力学、大陆动力学和大洋动力学等新的前沿性探索领域,尤其是大陆动力学最受关注,其研究的重点主要集中在造山带和盆地的形成与演化,大陆岩石圈的分层结构及其流变性,大陆下地壳的构造性质及变形特征,大陆地震活动规律及其成因,大陆构造活动的动力学

收稿日期:2004-05-18;**修订日期**:2004-07-19
基金项目:国家西部交通建设重点科技资助项目(200131881213)
作者简介:彭建兵(1953—),男,教授,博士生导师,地质工程专业,主要从事工程地质、地质灾害和地震地质研究。E-mail: dicexy-1@chd.edu.cn

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

机制等方面,并取得了不少新成果[1~25]。

构造地质学的应用和服务范围伴随其自身的发展和人类需求的不断扩大而在不断地延伸和拓展。例如,随着找矿难度的增大,特别是在寻找大型、特大型隐伏矿及其定位预测中,矿田构造研究越来越发挥着突出作用;在油气的寻找中需要进行储油、储气构造的研究。从构造学角度来讲,全球变化问题实质上是由地质构造事件引起的全球环境的系列变化,其中涉及到对现代全球板块运动形式和运动速率、大陆板内主要活动带的现今地壳运动特征与应力分布、现今大陆地壳三维运动特征及动力学机制、新构造运动对海平面的升降影响和对大气圈影响、青藏高原隆升的环境效应等问题的研究;人们对水资源和工程建设的需求、地质灾害的预测、生存环境的保护等问题的解决,更需要构造地质学理论的指导。作为人类赖以生存与发展基地的大陆岩石圈,由于它的复杂性及其与资源、环境、地质灾害等因素密切相关,因此大陆构造、大陆动力学研究仍将是今后一个时期地球科学领域中的热点。

1.2 现代工程地质学的发展方向

工程地质学主要是应用地质学尤其是构造地质学理论解决工程建设中的地质问题,或者说是人类主要通过所掌握的构造地质学理论来指导解决工程建设和营运过程中的安全问题,因此它是一门应用地质学。

初期的工程地质研究主要包括两个方面,一是对工程建筑载体、工程建筑材料和工程建筑结构的地质体质量的评价;二是对工程建筑区地质环境的质量评价。由于在工程营运期,构造变动、环境变异与恶化可能会引发各类地质灾害,进而危害到工程建筑与人类安全,因此从20世纪60年代起,工程建筑施工与营运当中能否出现地质灾害,或者说工程场址区是否存在导致发生地质灾害的工程地质成灾条件,也纳入工程地质的研究范畴。其核心是工程场址地质环境与地质体(或岩土体)的稳定性评价或稳定性预测,从而标志着工程地质研究进入新的发展阶段。

与构造地质关系最为密切的工程地质问题是工程场址地质环境与地质体的稳定性问题,它包括地基稳定性、边坡稳定性、地下洞室稳定性、山体稳定性、地壳(或区域)稳定性等[26],其核心是区域稳定性问题。20世纪70年代以来,随着工程实践经验的不断积累和研究领域的不断扩大,工程地质界逐步形成了比较系统的区域稳定性评价理论和方法体系。代表性的主要有区域稳定工程地质学、区域地壳稳定性和"安全岛"等理论体系[27~29]。这些理论体系的基本依托是地质力学理论,其着眼点在本质上无多大区别,基本上都是研究地壳运动、构造与地震等因素对工程区的直接影响或因此而链生的危害评价和预测。此后又逐步扩展到因人类工程活动与场地工程地质条件耦合作用而诱发的诸如边坡稳定性、井巷稳定性、地面稳定性等问题的评价和预测。近年来一些学者提出的区域稳定动力学理论,吸收了现代构造地质学中的大陆动力学理论、地震学研究中的新成果以及岩石断裂力学理论,从而使得区域稳定性评价将大陆地壳动力学过程、构造活动性、地震活动性与岩土体工程地质条件和环境得到有机统一,实现了大到区域地壳、小到场地地基不同尺度下的稳定性问题的合理评价[30~32]。

20世纪80年代起,迅速发展起来的一些现代科学技术方法和手段可以实现对一些不良地质体进行人工改造,再加上人类工程活动空间和范围的不断扩大,一些稳定性很差的工程场地也不得不利用。在此历史背景条件下,工程地质研究的任务不再单纯是对场地条件的评价和选择,更主要的任务是搞清不良地质条件和地质环境的原因和性质,研究工程建筑如何避免和减少因不稳定因素产生的地质灾害,提出能够合理利用场地、改造不良地质体的具体措施,提供可实现工程建筑防灾的对策,同时还包括对施工阶段的不良地质条件的超前预报和地质控制施工[26,30~32]。

1.3 工程地质研究中的构造控制论

地质构造是指组成地壳的岩层和岩体在内、外地质动力作用下发生的各种构造变形,包括褶皱、断层、节理、劈理以及其他各种面状和线状构造。工程地质研究中常把其通称为结构面,并按其尺度分为不同的等级(表1)。大量的理论与实践表明,区域性断裂(不妨称其为超结构面)控制了区域地壳的稳定性,Ⅰ~Ⅴ级结构面的性质与组合形式控制了岩土体的稳定性、力学性能与变形破坏方式;滑坡、硐室突水、水库渗漏、坝基渗透变形、诱发地震以及许多地质灾害的发生均因结构面的存在所致[26~43]。

因此,无论是区域稳定问题、岩(土)体稳定问题、地下水渗流问题,还是地质灾害问题等,其关键影响因素取决于研究区地质体内各种规模、不同级次的断裂、裂隙、节理等地质构造的基本特性、相互

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1 岩体结构面分级与断裂构造的关系[26]

Table 1 Relation between essential features of structural interface and faults

级序	级结构面分级依据	力学效应	结构面类型	地质构造特征
Ⅰ级结构面	结构面延展长、贯通岩体，破碎带宽	形成岩体力学作用边界；控制岩体变形和破坏机制	软弱结构面	较大的断层
Ⅱ级结构面	延展规模与岩体相当，破碎带较窄	形成块裂岩体边界；控制岩体变形和破坏机制	软弱结构面	小断层，层间错动
Ⅲ级结构面	延展规模十几米至几十米，错动不夹泥或夹有泥膜	参与形成块裂岩体边界；划分岩体 Ⅱ级结构的重要依据	硬性结构面居多	大节理，不夹泥的小断层
Ⅳ级结构面	延展短、未错动、不夹泥，有的呈弱结合状态(如层面)	划分岩体 Ⅱ级结构类型基本依据；形成岩体力学性质结构效应基础	硬性结构面	普通节理，劈理，次生裂隙
Ⅴ级结构面	小且连续性差	岩体内形成应力集中	硬性结构面	断续小节理，隐节理

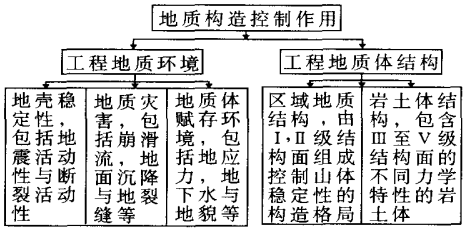


图 1 地质构造控制作用框图
(据孙广忠[26]修改)

Fig. 1 Schematic diagram showing control action of geologic structure

关系及其现代活动性。地质构造对工程地质环境和工程地质条件的控制作用，包括地壳稳定性、地质灾害、地质体赋存环境、山体稳定性、岩土体稳定性乃至地下洞室、边坡稳定性及其力学特性等(图 1)。

2 大陆动力学与区域地壳稳定性的关系

大陆动力学不仅是现代构造地质学研究的主攻方向，大陆岩石圈结构与动力学过程与区域地壳稳定性具有密切的关系。近期构造活动，尤其是第四纪以来的构造活动与环境、灾害问题，包括地震、火山、大型滑坡、地面沉陷及地裂缝等，都与大陆动力学过程有关。因此研究大陆动力学就是研究决定着我们环境的这一系统；对大陆系统历史的研究就是对环境历史的研究；对大陆岩石圈现代活动变形的研究就是对地质灾害的动力学模式的研究。

2.1 大陆深层构造动力学与地壳稳定性

区域深层稳定动力学系统涉及上地幔顶部至地表 10 km 以下深度的范围，重点在于确定地壳深部的变异层带，研究地幔成熟度和深部地壳活动状态。

大陆岩石圈具有显著的分层结构和流变性，岩石圈内发育多个流变层或软弱层，构成岩石圈内近水平状的薄弱带，成为岩石圈圈层运动与变形的动力学边界[16]，并在大陆地壳的动力学过程中起着重要作用，由此还决定了岩石圈具有分层动力学子系统。笔者将其划分为如下 4 个动力学子系统：

(1) 上地幔顶部流变层动力学子系统。上地幔顶部发育软流圈和上地幔低速-高导层等两个流变层，软流圈和低速-高导层与壳幔过渡层之间均为较硬的层位。这种软硬相间的层状结构在全球构造应力场作用下，软层可以出现潮汐运动，形成热柱或小尺度对流峰，使上地幔上隆，岩浆顺硬层中的张裂上涌，并以底辟作用对岩石圈和地壳底部施加力量，导致岩石圈弯曲和地壳减薄或加厚。它们所带来的热效应和力学效应还引发地壳各圈层间的拆离、剪切、增温、加厚或减薄，形成壳内低速层和流变层，发生相应的岩浆作用和构造作用。因此，搞清一个地区的软流圈及上地幔低速层存在与否，以及它们的埋深、厚度、现今活动性及其动力学特征，乃是区域深层稳定动力学研究的重要问题之一。

(2) 壳幔过渡流变层动力学子系统。许多资料表明，壳幔过渡流变层即莫霍面是一厚达数 km 的过渡带，且是大陆内部的活动性力学界面。在大陆构造活动区，莫霍面是地壳与地幔间的流变拆离面，地壳和地幔沿该流变带发生较大尺度的水平位移，从而引起大规模的造山带挤压碰撞、逆冲叠覆及裂陷区的地壳减薄伸展。因此，莫霍面不仅控制着大陆岩石圈运动学和动力学过程，也控制着深部和浅部的地质作用过程，成为影响区域地壳深层稳定性的一个重要因素。

(3) 地壳软弱层动力学子系统。以流变性、能干性、持力性和易震性等特征为标志，可将大陆地壳垂

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

向上分为软弱层和持力层两大类。其中低速层或拆离面为地壳软弱层,自下而上为中地壳 25～30 km 处的低速-高导层、上地壳 10 km 处的低速-高导层、上地壳浅变质岩层与深变质基底间的拆离面、沉积盖层与浅变质层之间的拆离面等。它们构成了地壳内大尺度的水平滑脱层,造山带的逆冲推覆、拆沉作用、伸展垮塌、变质核杂岩的拆离出露以及拉张区的伸展成盆,都以这些软弱层面作为迁移和滑动边界。因此,搞清这些层位的分布规律及其动力学特征,对区域地壳稳定动力学研究具有重要意义。

(4)地壳持力层动力学子系统。由软弱层所分隔的脆性地壳层即是地壳持力层或能干层,在地震学上称其为易震层或多震层。在力学意义上,持力层构成地壳内强应力支撑单元,其力学强度大,在地震孕育过程中起着区域蓄能和地区性高环境刚度的应力支撑和传递作用[44]。持力层在横向上多被断裂所切割,持力层与软弱层交界处为脆韧性过渡带,即地震易发带。持力层的分布规律、厚度、起伏状态、力学性质和破裂特征决定着持力层的动力学特征;持力层与软弱层之间动力学作用耦合关系和活动协调性决定了孕震条件及机理,弹塑性有限元分析结果表明,水平力作用下地壳软弱层与持力层间的耦合关系与应力分布具有明显的分层特征(图 2)。这些都是区域地壳稳定动力学研究中所必须注重的问题。

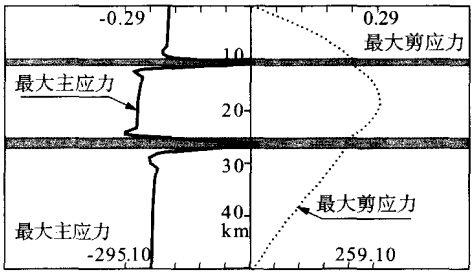


图 2 高藏高原东北缘区地壳应力-深度变化曲线[32]

Fig. 2 Curves showing crustal stress-depth in the northeast margin of Qinghai-Tibet Plateau

2.2 大陆浅层构造动力学与地壳稳定性

浅层构造的范围是近地表 10 km 以上的脆性上地壳,其构造变形作用可分为三类,即挤压推覆、扩张伸展和剪切走滑,并形成造山带、盆岭构造和盆地构造。这三类构造广泛发育于各层次的地壳构造变形中(图 3),控制着相应构造体制下的岩体建造组合、岩体结构特征和工程地质问题。工程场址也多位于这三类构造区带上,因此,浅层稳定动力学研究的主要内容是这三类构造区带的稳定动力学环境问题。

(1)造山带地壳动力学环境。造山带是重大能源工程场地选址区,因此对其结构、演化和动力学特征的研究,将直接为资源开发、灾害防治和环境保护提供科学依据。造山带按成因可分为逆冲推覆型、伸展型和走滑型等三类。其中,逆冲推覆型造山带中的逆冲断裂,往往与中深层次的软弱层或拆离面接轨,推覆体顺这些拆离面滑动和推覆运移。就区域稳定而言,这类造山带中的前锋带、冲起块体和飞来峰等构造部位的构造变形最强烈,断裂最密集,节理最发育,岩体最破碎(图 3),均属非稳定动力学环境,工程选址时,应尽量避开这类地区。伸展型造山带主要沿滑动方向出现后缘拉伸、中部剪切和前缘挤压,还可出现滑来峰。滑覆体前缘和滑来峰的稳定性较差,但构造变形弱于推覆体的前缘和飞来峰,因而其动力学环境优于挤压造山带;走滑变形在陆内造山带形成和演化过程中起着重要作用。一般来说,喜山期及其以后形成的新生山链多与走滑作用有关,且构造活动性较强,并多构成区域发震构造带。因此在造山带的区域稳定性研究中,特别要注意走滑断裂的活动性和控震性。

(2)盆地地壳动力学环境。盆地是大陆浅层主要构造单元之一,也是人类主要聚居区,因而其稳定动力学环境更为重要。盆地稳定动力学环境取决于盆地的成因类型。就区域稳定而言,压陷盆地的活动性较弱,但其邻近造山带一侧的稳定性较差,这是造山带前缘的逆冲断裂活动性较强、断裂具走滑特征以及前陆还存在持续拗陷的缘故;走滑盆地的活动性较强,多属非稳定动力学环境;伸展型盆地活动性最强,且盆地中心和盆缘的稳定性最差。这是因为盆地中心往往地壳减薄、浅层破裂发育,盆地边缘距边界活断层近,易受其牵动影响。此外,在盆地稳定动力学环境的研究中,特别要注意盆地结构的上下不一致和盆地内部的隐伏断层。其中,盆地上下结构不一致的转换处常常是发震构造部位,如邢台地震发生于浅部铲式正断层、深部高角度断裂与滑脱面汇而不交的部位[45];盆地内部的隐伏断裂易在其他因素诱发下发展成地表破裂带,直接威胁工程建筑的安全,如西安市地裂缝、大同地裂缝[46,47]等。

(3)盆岭区地壳动力学环境。盆岭构造是大陆浅层构造中的重要类型,以新生代断块作用为特色,

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

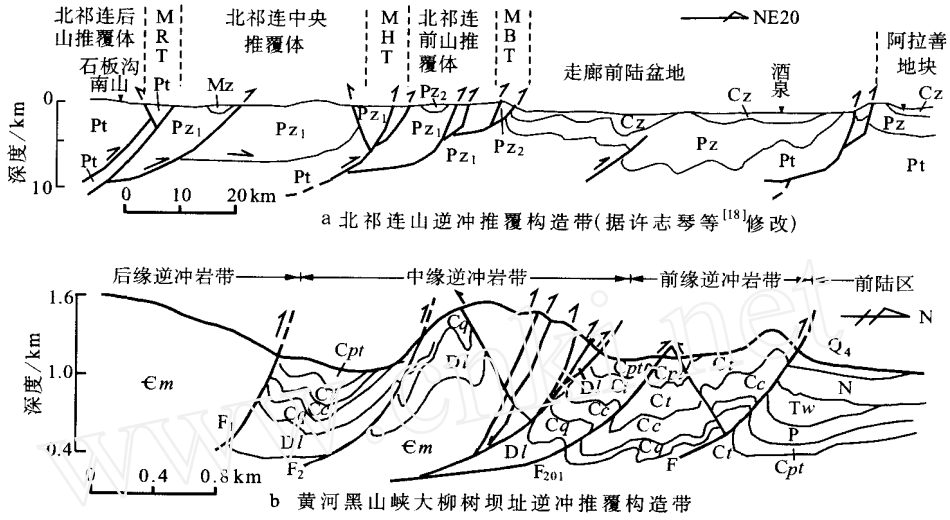


图3 青藏高原东北缘浅层逆冲推覆构造带剖面结构图

Fig. 3 Cross-section of shallow thrust-nappe tectonics in the northeast margin of Qinghai-Tibet Plateau

地壳薄、热流值高，由高角度正断层组成地堑、地垒、掀斜和犁式断层等镶嵌式组合。在盆岭区，变质核杂岩出露的隆起区是稳定动力学环境区，沉降区为非稳定动力学环境区。盆岭区的陡倾断裂向深部往往产状变缓，多交汇在中上地壳的滑脱面上，因此不应把它们视为深切下地壳或上地幔的深大断裂。

由上可见，在一个地区进行区域浅层稳定动力学研究时，首先必须查明所在区域的构造部位及其属性，然后进行稳定动力学环境的分区和分带，找出非稳定的区带，分析非稳定动力学环境下可能出现的工程响应，进而提出科学的避让与防治对策。

2.3 大陆表层构造动力学与地壳稳定性

地球表层是一个由岩石圈表层以及环绕它的水圈、生物圈和大气圈组成的复杂系统。这些圈层相互渗透、交织与共同作用，构成人类现今赖以生存发展的动态环境体系。地表表层演化的主要动力学模式是大气、水、生物、岩石等四个圈层乃至星体之间的内外动力相互耦合作用，反映在岩石圈表层的构造动力学效应主要表现为地表构造变形、断裂活动、地震活动、谷坡发育演化和破坏等方面的各类构造时效变形。其中，内动力作用是地壳层各圈层的共同作用行为；外动力作用包括了重力作用、物理化学风化作用、大气降水影响、地层的差异压实作用、地震振动作用、冰川作用和人类活动作用等。内外动力耦合作用影响和控制了地壳表层的稳定性。地壳表层内外动力耦合作用模式及其稳定性响应的表里关系可通过图4加以概括。

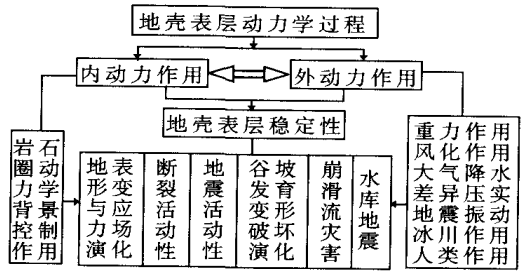


图4 地壳表层动力学模式及其响应

Fig. 4 Dynamic model of superficial crust and its response

地壳表层内外动力耦合作用通常具有明显的地域性，它是地质环境各组成要素、介质、结构、特性、边界、赋存环境在地表有规律地发生分化而引起的差异。如青藏高原大规模的隆升，在其周缘产生巨大的落差，派生出强大的重力流展，加强了周缘的构造活动。青藏高原隆升还导致了亚洲季风气候的产生，强烈的风化、剥蚀作用，使高原周缘河谷下切加剧而形成高山峡谷，引起众多高边坡稳定性、泥石流等灾害问题[33,48]。高原在被剥蚀、夷平过程中，必然伴有相应的搬运与异地堆积作用，于是山间、山前断陷盆地被各种未固结的松散沉积物所充填，裂谷盆地被厚层松散沉积物掩埋等等，以补偿内动力造成的力场差异。由此可见，内外动力的耦合作用是地壳表层演化的主要动力，内动力造成地表起伏，构成大型地貌单元，向着增强地势差异的趋向发展；外动力不断改造地形地貌，构成小型次级地貌单元并趋向于削平地表起伏，向着减弱地势的趋向发展。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

这种内外动力的相互作用贯穿在整个岩石圈表层演化过程中[49]。由于地貌对活动构造极为敏感,因此在区域表层稳定动力学研究中,必须对一个地区的地貌类型、地貌面、结构面与地貌组合关系等要素进行系统研究,搞清其时空分布和变化规律。在此基础上,才能把握住地壳表层的动力学过程,预测这种动力学过程在未来对地壳表层演化的作用及其对工程场地稳定性的影响度。

3 活动构造与工程安全性

活动构造指的是第四纪以来的构造变动,它贯穿着过去、现今和未来的持续发展的动力学过程,由于其与岩石圈动力学过程的密切关系而被纳入现代构造地质学的研究范畴之内,更是由于活动构造是场地区域稳定性和工程建筑安全性的直接影响因素之一,对人类工程安全构成巨大威胁,从而成为工程地质界最为关注的工程地质问题之一。活动构造对工程安全的危害,集中体现在两个方面,即工程抗震和工程抗断问题。

3.1 地震活动与工程建筑安全性

大陆区几乎所有的强震都是由断裂活动引起的。地震既是一种快速的或突变式的断层错动或岩石破裂过程,又是地壳构造变形能释放的主要途径。地壳由大小不同的构造单元以复杂的方式拼合而成,在内动力作用下不断发生着构造变形,并在一些特定构造部位产生应力集中现象。当应力积累的量达到某个极限并超过岩石或断层面阻抗强度时,岩石发生快速破裂或顺断层面快速滑动,并在其周围引起介质振动甚至产生地表破裂进而影响到建筑物的安全。

大量震例表明,构造条件对地震动特性影响非常显著。一般来说,从工程震害产生的原因和特点考虑,震害可以分为结构振动破坏和地面破坏两类。其中的振动破坏和地震动大小、特点有关,而地震作用的强度占主导地位,对工程建筑安全的具体影响程度由地壳稳定性评价中所得到的地震烈度来衡量。一般振动破坏主要通过介质点位移、能量传播实现,因此需要对场地开展断裂活动下的地震安全性评价以确定不同类型工程对活动断裂的安全避让距离和工程抗震设防标准。

当地震波所携带的能量超过场地所能够承受的应变能极限时,地面破坏效应发生,包括引起地面各类岩土体的变形、破坏、地基失效、结构面的位错和滑移等灾害。地震中的地面破坏效应将直接导致各类工程建筑的永久性破坏:第一种是地振动影响工程场地的地基和边坡工程地质条件和状态所引起的累积破坏乃至失稳。例如,场地若存在软弱松散的岩土体、高陡斜坡临空、软弱结构面控制下的不稳定体、地下空洞区等,它们在地振动作用下,其强度和稳定性迅速降低,产生不均匀变形、位移或位错、地基失效、滑坡、崩塌及地面沉陷或裂缝等失稳现象,从而对工程安全构成威胁。黄河黑山峡大柳树坝址存在的濒临失稳的松动岩体质量问题就是历史上多次地震活动与外动力耦合作用下的累进性破坏结果,由于该类问题工程危害隐蔽性强,因此容易被忽视或引发争论[32,35,50,51]。因此,场地工程地质条件尤其是构造条件,对震害的发生和作用特点具有重要影响,它决定地面破坏的种类、特点及其危害程度,在工程地质研究中应特别注意。第二种是地震中由于发震断层的直接错动并产生地震裂缝,造成跨越或位于这些断层、裂缝带的建筑物被直接拉断或扭断。

3.2 断裂活动与工程抗断问题

在工程地质领域所提出的工程抗断效应指的是工程场区断层运动引起的地表错动、破裂,包括地震引起的突然错动即粘滑错动、新生破裂和无震蠕滑错动。这种地表错动及破裂会直接导致建筑物发生变形或被错断而遭到破坏,从而影响到工程的正常运行或无法运行[32,35]。

活断层有粘滑和蠕滑两种错动方式,粘滑错动表现为间断性、周期性的突然错动,力学特征上体现的是对地壳应变能的长期积累和瞬时释放的一种循环过程。一旦发生突然错动,会伴随强烈地震的发生。根据震级大小,发震断层会产生不同幅度的错动,甚至会在主破裂带附近产生分支破裂和次生破裂,修筑于其上的建筑物自然会遭到破坏。如1999年的台湾9.21地震中,石冈坝被分支断裂所破坏,坝体两侧产生7.8 m的垂直位错。从统计资料来看,地震中所出现的断层破裂带中,不仅主断层上的错动量比较大,甚至离主断层距离达13.7 km之远的地段仍然会存在次生断层破裂效应,并因此把整个地震破裂带分成三个分带,即主断裂破碎带(Ⅰ带)、分支破裂带(Ⅱ带)与次生破裂带(Ⅲ带)(图5)[52]。例如在黄河黑山峡大柳树坝址区,距坝址1.5 km的现代活动断层对穿过坝址的数条分支断层

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的牵动量达 7 %～14 %，因此一旦发生 7 级以上强震，主要水工建筑物将面临工程抗断威胁[35,37,53]。

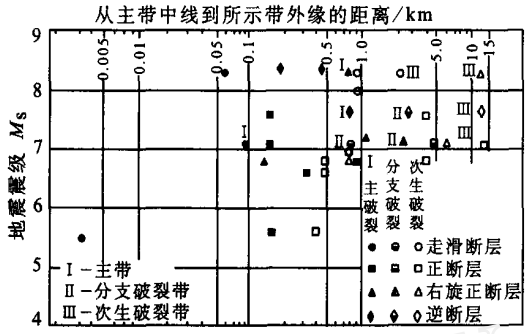


图 5 震级与破裂带宽的关系[52]

Fig. 5 Relation between earthquake magnitudes and ruptured zones

蠕滑是一种持续不断的、缓慢蠕动的断层错动过程，沿断裂两侧不断发生微小的相对位移。断层蠕滑不会有应力积累现象，因此一般不会发生强震，但随着时间的发展和小位移的不断积累，断层两侧会形成一定规模的相对位错量。如西安地区，由于地裂缝的长期缓慢活动，地裂缝所经之处，地面及地下建筑物遭到严重破坏，尤其是对城市地下铺设的供水、供气和排水系统造成严重威胁。

所以，无论是断裂的突发性错动还是蠕滑，都会给工程带来破坏，但其危害程度和破坏方式不完全相同，因此需要对活动断层的具体活动方式加以区分。然而，对两者进行严格区分并不容易，目前主要从地质构造变形特征、断层泥特性、历史和现代地震活动特征以及跨断层形变测量来加以分析。此外，断层的滑动方式也并不是单一性的，具有时空上的动态转化和复合存在特征，即断裂粘滑时会有一定量的蠕滑，而蠕滑性质的断裂，在某些部位因断层几何因素、断层面力学参数等因素而构成锁固点、端点等应力容易积累的优势地段而成为地震活动多发段；在时间上，有时会由粘滑逐步转化为蠕滑或由蠕滑转化为粘滑。例如，海原断裂极强的地震活动性反映了它的粘滑性，但是从跨断层地形变测量结果看，一些地段存在长期蠕滑，而有些地段的滑动过程极不均匀[54]。当然，断裂活动也不仅仅局限于一个面，而是如前所述的具有一定宽度的活动影响带。

此外，活断层的几何特征和运动特性不同，它们对工程场地的影响也各异。如走滑断层主要是断层面两侧相对的水平运动，这种断层发育易于形成河流，因此水工建筑物最易受到这种活断层的威胁；断层逆冲活动中由于其特殊的力学机制[55]，上盘容易产生较宽的地面变形和破坏，且往往伴有多个分支或次级断层的错动，且都是活动性强烈的发震断层，该类断层活动对工程的危害性最大(图 3b)；正断层在错动过程中以下降盘的地面拉裂、沉降和分支断层错动为主，渭河盆地工程危害问题与该类活动断裂有关[46]。断层的实际运动性质往往很复杂，位移矢量大多由不同的倾滑、走滑分量所合成，因而活断层的类型可以是走滑逆冲断层或走滑正断层等多种形式。为了确保工程安全，断裂带的影响宽度、准确定位、产状、活动方式与强度(包括运动速率)、活动历史、运动性质、演化序列以及活动规律(包括未来的活动趋势)等都是工程地质研究中需要解决的重要问题。一般而言，工程设施应避开活动断裂，但对某些特殊工程，如输油管道、输气管道、铁路、公路等线状分布的工程有时无法做到这一点，此时不仅要进行定性分析或危险程度的分类划分，而且要尽可能地做出定量评价并提出具体防灾措施。所以，关于活动断裂的研究对工程选址和工程安全意义重大[56]。

4 构造结构面及构造应力与岩土体稳定性

构造作用控制了地球运动系统中所有地质过程，岩体结构面是该系统运动作用的产物，其形成、演化及时空组合无时无刻不受其控制，通过结构面实现对构造应力场的调整并进而达到对岩土体稳定性的控制则是构造动态作用的体现。

4.1 构造结构面对岩土体稳定性的控制作用

所谓结构面，系指岩体中具有一定方向、力学强度相对较低、两向延伸(或具一定厚度)的地质界面(或带)，例如岩层层面、软弱夹层、各种成因的断裂、裂隙和节理等，反映了长期内外动力作用下的地质构造作用现象。考虑到影响结构面力学特性的主要因素，可将其划分为四种力学类型，即破裂结构面、破碎结构面、层状结构面和泥化结构面[26,42]；按其成因又可分为原生结构面和次生结构面亦即构造结构面。原生结构面以建造为物质基础，本质上体现的是介质内物理力学性能存在明显差异的界面或软弱薄层，一旦受力容易发生应力集中，经过后期内外动力作用之后会很容易地改造成构造结构面，所以在工程实际中，构造结构面对岩土体力学性能及其

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

稳定性具有主导控制作用。结构面具有以下几个基本力学特性:对垂直于结构面的拉应力基本上无阻抗力而极易被拉开;在垂直于结构面的压应力作用下易于压密或闭合而易造成填充物变形和破坏;顺结构面方向的弱约束作用导致在剪应力作用下容易产生剪切变形或滑移。

构造作用的层次性使得工程地质体内会对应产生不同尺寸的控制结构面,通常将结构面按其规模分为Ⅰ~Ⅴ五个级次[26,27](表1)。结构面特征和规模不同,对工程影响、控制的范围和方式各不相同,在有关工程地质问题分析中所处的地位和作用也不同。

Ⅰ级结构面泛指长度在数十km以上的区域性深大断裂带,尤其是活动断裂带反映了地壳层的现今动力学背景。Ⅰ级结构面一般而言是由近于平行的数个断层面组合而成的断裂带,其作用不仅仅只是影响山体、岩体稳定性,而且会影响、控制某个区域的构造应力场分布以及地块乃至地体的稳定性,甚至构成孕震、控震和发震断层。对工程安全的影响已不再仅局限于通过山体、工程岩体的失稳来体现。即便是岩体没有出现失稳,但构筑于其上的建筑物可能因断裂的地震活动而存在工程抗震及抗断等问题。因此,Ⅰ级结构面通常作为区域稳定性研究中的主要对象之一,或者作为一条断裂带加以专门研究。

Ⅱ级结构面与所研究的山体和岩体尺度相当,为规模在数百m至十数km的浅表中小断层或层间错动。Ⅱ级结构面影响的主要是山体、岩体的稳定性,因此会对大型工程的整体布局带来影响[27],甚至需要另行选址。如黄河黑山峡大柳树坝址不仅存在大面积的岩体松动问题,坝址处存在的数条中小规模断层使坝址所在岩体的完整性也遭受切割、破坏,岩体稳定性极差。一旦发生强震或库坝蓄水,均有可能导致断层的粘滑或加速蠕滑,届时将会对坝体、电站、引水隧洞、溢洪洞等大型水工建筑物构成严重威胁[35]。

Ⅲ级结构面指其尺度被限制在所研究的岩体或山体内部、长度在几十m至数百m的小断层、软弱错动面和大节理。Ⅲ级结构面影响的主要是山体内工程岩体的局部稳定性问题,典型的是道路、沟渠、露天采矿边坡、库岸边坡稳定性问题(如崩塌、滑坡等)最为常见。图6是作者在考察兰—临高速公路边坡灾害问题时,拍摄到的施工过程中坡体发生的顺层崩滑破坏现象。事实上,由于青藏高原的构造隆升作用,我国西部山区的各类工程岩土边坡不同类型的结构面十分发育,边坡稳定性问题最为突出[33]。



图6 兰—临高速公路边坡失稳滑塌

Fig.6 Slope failure in Lanzhou-Linxia freeway

Ⅳ级结构面泛指受控于Ⅲ级结构面之下断续分布的裂隙、节理、软弱层面和劈理等,尺度为几十cm至几m。Ⅳ级结构面的存在不仅破坏了工程岩土体的完整性,影响并控制着岩体的应力分布状态和岩体强度,而且很大程度上影响着岩体失稳变形机制和破坏方式。因此Ⅳ级结构面发育程度、分布状态和组合排列情况,成为评价岩土体工程地质性能的基本依据之一。

Ⅴ级结构面指不连续、无充填物、分布随机、为数甚多的微裂隙,它影响和控制着工程岩土块体本身的强度、变形机制以及破坏方式。实验室内的岩土力学性能测试结果基本反映了Ⅴ级结构面控制下的工程岩土体力学强度。

当然,构造作用不仅具有层次性,而且还具有相互间的关联性与系统性,因此各级结构面的发育、分布特征和演化过程存在相互影响和制约作用。在具体工程地质问题分析中,需要对不同级次结构面纳入到统一的构造作用系统内进行整体性和系统性的综合分析研究,做出合乎实际的稳定性评价。

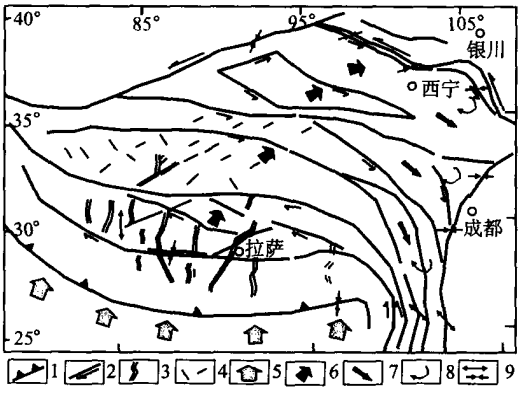
4.2 地应力场与岩体稳定性

地应力是地质构造运动和岩体自重等因素作用下的产物。地应力是决定区域稳定性和岩体稳定性的重要因素,地震活动、断层活动和水库诱发地震都是地应力局部集中的结果,而岩体稳定性受控于地应力作用下形成的各种结构面和现今地应力场与岩体的相互作用。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

地应力场的分布特征决定了地壳岩体断裂的运动特征,进而影响岩体的变形破坏方式。地壳内应力状态主要有三种典型情况[43]:(1) 潜在走向滑动型。应力场的中间主应力 σ_2 近于垂直,最大主应力 σ_1 和最小主应力 σ_3 近于水平,世界上绝大部分地区为该类应力状态。在这种应力状态区,如果发生破坏或再次活动,必然是沿走向与最大主压应力 σ_1 呈约 30～40°左右交角的陡立面产生走滑型的断裂活动。(2)潜在逆断型。应力场中最小主应力 σ_3 近于垂直,最大主应力 σ_1 与中间主应力 σ_2 近于水平。此种应力状态下发生的是逆冲破坏,即沿走向与最大主应力垂直的剖面 X 裂面产生逆断运动。(3)潜在正断型。应力场中最大主应力 σ_1 垂直,而其余两主应力水平分布。在此应力状态下发生的破坏(或再活动),必然是沿走向与最小主应力轴相垂直的面发生正断性质的运动。与地应力状态形成优势组合的岩体结构面,往往是岩体发生失稳破坏的控制边界。

总体上看,地壳运动决定了地应力的宏观分布状态,地应力状态控制了断层运动特性(图 7)。岩体地应力分布特征除了与统一的区域构造应力场有关之外,还受局部区域内的工程地质条件所约束和调节,包括岩体结构与岩性特征、岩体构造作用及其



7 青藏高原地壳运动、活动断裂与地应力状态示意图[34]

Fig. 7 Sketch showing crustal movement, active faults and crustal stress in Qinghai-Tibet Plateau

1—压性断裂带;2—走滑断裂;3—正断断陷带;4—共轭剪切断层;5—印度板块推挤方向;6—高原总体运动方向;7—内部块体滑动方向;8—次级块体旋转方向;9—地应力旋转方向

演化历史、地形地貌条件等因素。地应力异常(高地应力或低地应力)会导致岩体发生失稳、变形和破坏,并经常对各类建筑物的设计和施工造成直接影响。例如在高地应力区的地下工程出现的基坑底部的隆起、爆裂和沿已有倾斜结构面的逆冲错动;硐室边墙向临空面方向的水平位移和沿已有的近水平的结构面发生剪切错动;边墙或边坡岩体发生倾倒;隧洞拱顶裂缝掉块、边墙内鼓张裂、缩径等危害。在低地应力区施工中出现的隧洞围岩松动、塌方、掉块、断层突水等危害。在高坡低谷山区,由于河谷应力场释放与边坡卸荷而导致岸坡松弛破坏乃至出现崩滑灾害等。

5 地质构造与地质灾害

地质灾害是地球内外动力耦合作用的结果[4,49]。就地质灾害所涉及的内容而言,范围相当广泛,主要包括火山喷发、地震、滑坡、泥石流、地面沉陷、地裂缝等,它们多与地质构造作用有关[4]。在地球内动力作用驱动下,地壳每时每刻都在发生着构造变动作用,并导致地球表面山脉的隆起、盆地的伸展下陷或松散盖层发生变形,同时在内动力作用影响下,促使外动力作用得到进一步增强(包括作用规模增大和频度增加)。内外动力的耦合伴随而来的是各种地质灾害的频繁发生。地壳构造作用有缓慢和突变之分,由此可以将地质灾害分为缓变型地质灾害和突变型地质灾害。

5.1 地质构造与崩滑流灾害

崩塌、滑坡和泥石流(简称崩滑流)具有突发性强、分布范围广和一定隐蔽性的特点,其发育条件主要取决于四个方面:工程地质条件(地形地貌、新构造运动强度和方式、岩土体工程地质类型和地质构造条件)、水文气象条件(包括降水强度和降水量、水流速度和水流量)、植被发育程度和人类活动影响程度等。其中,在工程地质条件中,地质构造因素起主导控制作用。

产生突发性的崩滑流灾害的第一个必要条件是必须具备明显的地形地貌差异,这样才能形成岩土体失稳运动的重力势差。而地壳的构造隆升作用是引起地形地貌差异的根本原因,正是构造隆升作用导致山区、高原的加速隆升以及平原、盆地的加速沉降,这样两者地形高差变大,并造成更大的重力势差。山区与高原的河流坡降加大,又使河谷深切力度加大,并导致河谷与岸坡间重力势差增大。于是较高的重力势差为崩滑流灾害创造了基本运动条件;地壳的构造运动过程必然伴随岩体的变形与构造结构面的不断发育,而自重应力导致的卸荷松弛

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

以及表层的物理化学风化等外动力作用进一步加速了结构面的软化和岩体的破碎,这是地壳构造运动为崩滑流灾害创造的物质条件;构造运动强度控制了崩滑流灾害的强度和频度;构造运动方式决定了崩滑流灾害的发育机制与破坏运动方式;地质构造条件控制了崩滑流灾害的分布规律。此外,断裂裂

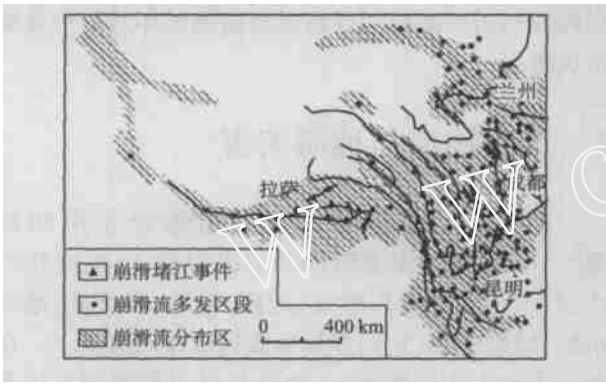


图 8 青藏高原区崩滑流分布图[48]
Fig. 8 Distribution of rockfalls, landslides and debris-flow in Qinghai-Tibet Plateau

隙的发育又会促进河谷的切深,导致边坡卸荷问题更加突出。山区、高原的加速隆升促进了气候变化幅度的进一步加大,从而导致风化作用的进一步加强。所有这些因素的耦合作用,导致地表岩土体内发育大量的结构面,造成岩土体强烈变形、破碎、力学性能大大降低或发展成为松散体,最终在地震或大气降水诱发下产生突发性的崩滑流灾害。例如,印度板块的推挤使高原持续隆升,使得山盆地形高差变大,周缘高山峡谷反差变大而导致重力势差的增加,从而使高原周缘区地质环境日趋恶劣,崩滑流非常发育(图 8)[48],因地震、突发性降雨等因素所导致的崩滑堵江事件时有发生[33]。

5.2 地质构造与地裂缝、地面沉降灾害

地裂缝是一种常见的岩土体地表破裂现象,常与火山、地震、塌陷等灾害相伴生。但近年来研究发现,地裂缝发育不仅限于此种情况,还与地壳伸展裂陷区的构造运动及断裂活动关系密切[46,57~61],即构造对地裂缝的发育具有控制性,其他因素为间接影响或属于诱发因素。尤其是 20 世纪以来,人类大规模的水事活动加速了该类地裂灾害的发育进程,同时在地裂缝发育的地区,还常常伴随有不同程度的地面沉降。

现代地裂缝最早在美国休斯敦附近的 Goose Creek 油田被发现,同时伴有地面局部沉降现象[62,63]。此后的几十年中,又先后在美国的其他地区以及中国、土耳其、利比亚等国相继出现地裂灾害问题。我国自 20 世纪 50 年代末于西安市发现第一条地裂缝之后,又先后在晋、陕、豫、冀、苏、鲁、皖等省相继出现地裂缝,到 80 年代起已酿成严重灾害。地裂缝所经之处,地面及地下建筑物遭到严重破坏,从而引起人们的高度关注。

从我国地裂缝分布情况来看,地裂灾害严重的几处主要分布在华北断陷盆地中的几条构造断裂带附近,即顺汾渭、郯庐和大别山等断裂带附近产出。其中汾渭盆地是我国最具代表性的伸展型断陷构造区域,受其大陆动力学背景控制,地裂缝带最典型,灾害也最严重。太原、韩城、大同、榆次、临汾等城市都遭受地裂缝的危害。西安地裂缝目前已发展到为

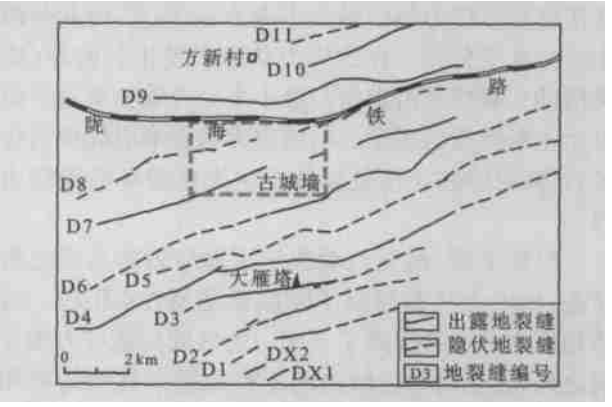


图 9 西安市地裂缝分布示意图
Fig. 9 Distribution of ground fissures in Xi'an region

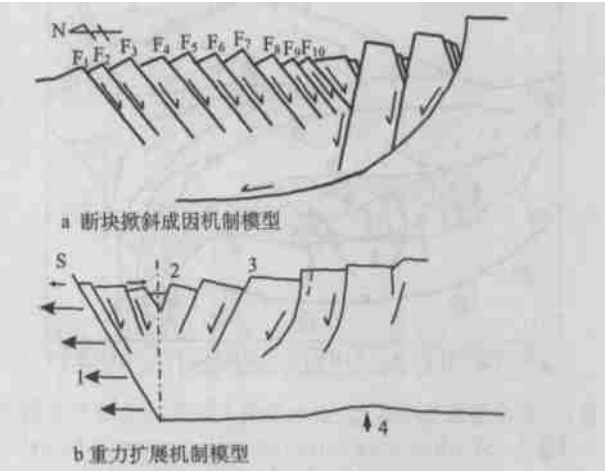


图 10 西安地裂缝的构造成因机制模型[60,61]
Fig. 10 Module showing genetic mechanism of ground fissures in Xi'an region

12 条(图 9),其发育次序是由北向南逐步产生。从目前研究结果来看,地裂缝的产出位置、分布特征、错动性质与其附近或深部断裂活动密切相关并受其

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

控制。就西安地裂缝而言,在渭河盆地伸展变形过程中,盆地出现沉降运动,受盆地边缘活断活动牵动使盆地内隐伏断裂活动并逐步向上扩展,从而诱发表土层破裂形成地裂缝灾害[46,57],在成因机制上虽然还有其他观点(图 10[60,61]),但地裂缝发育和运动特征、地面沉降与盆地伸展变形的动力学机制约束已成共识,具体表现在活动断层对地裂缝的形成具有较明显的控制作用,且显示出二者在空间、分布、产态和组合形态上均具有良好的一致性,同时在活动方式上也具有良好的一致性。

5.3 地质构造引发的其他地质灾害

地质构造的存在及其活动常常会诱发或链生大量的其他地质灾害事件。例如,渗流问题是水库正常营运的主要病害之一,它是由于库区大量发育的张性断层或结构面所致。

尽管水库诱发地震较少,但其危害性不容忽视,印度柯依那(Koyna)水库 1967 年发生 6.4 级地震,造成坝体、水利枢纽发电工程全部破坏,并危及下游,使 200 多人丧生,1 000 余人无家可归。我国新丰江水库 1962 年发生了 6.1 级地震,使大坝受到损害。水库诱发地震虽然与人类工程活动有关,但是研究表明,引起水库地震的主要工程地质因素仍然是构造因素,主要体现在以下几个方面[33,64,65]:在库坝区半径约 25 km 范围存在较大体积的蓄能体,即大尺度的活动断层,这是发生较大震级水库地震的基本条件;如果库区活动断裂较多、节理发育、裂隙和孔隙丰富,则具有良好的渗透环境,可以使库水迅速渗透到断层面使其抗滑力下降而产生错动、释放能量;当岩体破碎、裂缝发育,且裂缝的大小。深浅不一,会在不同深度产生不同强度的水库诱发地震。

在诸多地质灾害中,构造活动引起的地震对人类的危害性最大,除了地震本身的振动力导致地面失去原有平衡状态引起建筑物破坏之外,还会诱发或链生一系列其他地质灾害问题,如:地震使水体及土体破坏之后产生的地基沙土液化,导致其上部建筑物的沉陷或变形;地震导致的地裂缝造成建筑物或地下管线的破坏;地震在山区诱发崩塌、滚石、滑坡等地质灾害等。基于这一原因,在开展岩土体工程地质研究中,不仅要研究其准静态条件下的稳定性问题,还要考虑叠加有地震动力作用下的稳定性问题。

6 构造地质与工程地质耦合研究展望

由上可见,构造地质学是探询和研究各种地质构造现象及其相互关系的基础地质科学,工程地质学则是应用构造地质学理论解决工程建设中与构造现象有密切关系的工程地质问题的应用科学。二者的研究目的虽然不同,但所研究的主要对象是相同的,即都是地质构造,研究的都是地球变化中的构造变动及其各类效应;二者有着共同的价值,即都服务于人类科学研究、资源开发和人类生存环境与可持续发展。但各自所关注的侧重点不一样,工程地质学更关注新构造,尤其是第四纪以来的活动构造;而构造地质学所关注的是整个地质演化过程中产生的构造变动。因此,从地质时间尺度上看,构造地质学研究的是漫长的、缓变的、相对稳态的地质构造动力学演化过程,时间单位以百万年、千万年乃至亿年计;工程地质学研究的是晚近期以来非线性的、急剧的构造变动时段,时间单位以万年、千年乃至百年计。从空间尺度上,构造地质学不仅研究区域构造问题,而且还研究全球构造及其动力学问题;工程地质学则更注重研究与人类工程经济活动密切相关的、相对局域的表层构造变动及其工程环境灾害效应。从哲学上讲二者密不可分,相互关联,具有相互耦合性和互相促进的功能。如工程地质学在研究现代构造活动与地震活动问题中所发现的新问题,促进了大陆动力学乃至岩石圈动力学理论的发展;现代地球动力学理论的进步,又指导了现代工程地质学理论的发展。由此我们可以看到,人类在运用工程地质理论解决实际问题的同时,还在不断地发现和提出新的地质疑问,并把这些地质疑问提交给构造地质学寻求理论解答,由构造地质学得到的答案再反馈到工程实际中,继续指导工程地质学去更好地解决实际问题而服务于人类。

References[参考文献]:

[1] BAI Wenji, HU Xufeng, YANG Jingsui, et al. No relationship between mountain-building and collision for plate tectonics[J]. *Geological Review*, 1993, 39(2): 111-117(in Chinese). [白文吉,胡旭峰,杨经绥,等. 山系的形成与板块构造碰撞无关[J]. 地质论评,1993,39(2):111-117.]

[2] CUI Junwen, ZHU Hong, WU Changde, et al. *Deformation and Dynamics of the Lithosphere in Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau*[M].

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Beijing: Geological Publishing House, 1992(in Chinese). [崔军文,朱红,武长得,等. 青藏高原岩石圈变形及其动力学[M]. 北京:地质出版社, 1992.]

[3] CUI Zuozhou, YIN Zhouxun, GAO Enyuan, et al. *Velocity Structure and Deep-Seated Structure of Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992(in Chinese). [崔作舟,尹周勋,高恩元,等. 青藏高原速度结构和深部构造[M]. 北京:地质出版社, 1992.]

[4] Editorical Board for Lithospheric Dynamics Atlas of China, SSB. *Introduction to Lithospheric Dynamics of China*[M]. Beijing: Seismological Press, 1991. 91-270(in Chinese). [《中国岩石圈动力学地图集》编委会. 中国岩石圈动力学概论[M]. 北京:地震出版社, 1991. 91-270.]

[5] DZIEWONSKI A M, WOODHOUSE J. Global images of the earth's interior[J]. *Science*, 1987, 236: 37-48.

[6] FOWLER C M R. *The Solid Earth*[M]. London: Cambridge University Press, 1993.

[7] FUKAO Y. Seismic tomogram of the Earth's mantle: Geodynamic implications[J]. *Science*, 1992, 258: 625-630.

[8] HIRN A, JIANG M, SAPIN M, et al. Seismic anisotropy as an indictor of mantle flow beneath the Himalayas and Tibet[J]. *Nature*, 1995, 375: 571-574.

[9] KHAIN V E. Modern problems of geotectonics and geodynamics — From plate tectonics to global geodynamics[J]. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 1996, 26(4): 361-367(in Chinese). [KHAIN V E. 大地构造学和地球动力学现代问题——从板块构造学到全球动力学[J]. 长春地质学院学报, 1996, 26(4): 361-367.]

[10] LI Dewei. Some important directions of continental tectonics and dynamics[J]. *Earth Science Frontiers*, 1995, 2(1-2): 141-146(in Chinese). [李德威. 大陆构造与动力学研究的若干重要方向[J]. 地学前缘, 1995, 2(1-2): 141-146.]

[11] MA Zongjin, GAO Xianglin. Researches on continental preferred earthquakes layers and broken evolution of seismic focus[A]. *Researches on Continental Preferred Earthquakes Layers*[C]. Beijing: Seismological Press, 1992. 1-8(in Chinese). [马宗晋,高祥林. 大陆多震层的研究与震源体的破裂发展[A]. 大陆多震层研究[C]. 北京:地震出版社, 1992. 1-8.]

[12] RANALLI G, MURPHY D C. Rheological stratification of the lithosphere[J]. *Tectonophysics*, 1987, 132: 281-295.

[13] TENG Jiwen. Global geoscience transects and geodynamics[J]. *Progress in Geophysics*, 1994, 9(1): 40-58(in Chinese). [滕吉文. 全球地球科学大断面与地球动力学(I)[J]. 地球物理学进展, 1994, 9(1): 40-58.]

[14] TENG Jiwen. Global geoscience transects and geodynamics[J]. *Progress in Geophysics*, 1994, 9(2): 1-16(in Chinese). [滕吉文. 全球地球科学大断面与地球动力学(II)[J]. 地球物理学进展, 1994, 9(2): 1-16.]

[15] TENG Jiwen, ZHANG Bingming, HU Jiafu, et al. The research of deep medium and structural environment for earthquake "Pregnancy"[A]. CHEN Yuntai. *Advances in Seismology in China*[C]. Beijing: Seismological Press, 1997. 258-265(in Chinese). [滕吉文,张秉铭,胡家富,等. 地震"孕育"的深部介质和构造环境研究[A]. 陈运泰. 中国地震学研究进展[C]. 北京:地震出版社, 1997. 258-265.]

[16] WANG Shengzu. The multi-layer structural model of intra-continental plate deformation[A]. *Researches on Continental Preferred Earthquakes Layers*[C]. Beijing: Seismological Press, 1992. 10-18(in Chinese). [王绳祖. 大陆板块内部变形的多层构造模型[A]. 大陆多震层研究[C]. 北京:地震出版社, 1992. 10-18.]

[17] WOODHOUSE J, DZIEWONSKI A M. Mapping the lower mantle: Three dimensional modeling of earth structure by inversion of seismic wave forms[J]. *J Geophys Res*, 1984, 89: 5953-5986.

[18] XU Zhiqin, YANG Jingsui, JIANG Mei, et al. Continental subduction and uplifting of the orogenic belts at the margin of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Earth Science Frontiers*, 1999, 6(3): 139-151(in Chinese). [许志琴,杨经绥,姜枚,等. 大陆俯冲作用及青藏高原周缘造山带的崛起[J]. 地学前缘, 1999, 6(3): 139-151.]

[19] YANG Weiran. On layered structure of lithosphere[J]. *Earth Science*, 1983, 22(3): 23-32(in Chinese). [杨巍然. 论岩石圈的层状构造[J]. 地球科学. 1983, 22(3): 23-32.]

[20] YANG Wencai. *Introduction to Earth Interior Physics of Post-Plate Tectonics*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999(in Chinese). [杨文采. 后板块地球内部物理学导论[M]. 北京:地质出版社, 1999.]

[21] ZENG Rongsheng, DING Zhifeng, WU Qingju. A review on the lithospheric structures in Tibetan Plateau and constraints for dynamics[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1994, 37(Suppl II): 99-116(in Chinese). [曾融生,丁志峰,吴庆举. 青藏高原岩石圈构造及动力学过程研究[J]. 地球物理学报, 1994, 37(增刊 II): 99-116.]

[22] ZHANG Guowei, ZHANG Benren, YUAN Xuecheng, et al. *Qinling Orogen and Continental Geodynamics*[M]. Beijing: Science Press, 2000(in Chinese). [张国伟,张本仁,袁学诚,等. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京:科学出版社, 2000.]

[23] ZHANG Y S, TANIMOTO T. High resolution global upper mantle structure: Plate tectonics[J]. *J Geophys Res*, 1993, 98: 9793-9823.

[24] ZHU Zhicheng. *Thrust-Nappe Tectonics*[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1991(in Chinese). [朱志澄. 逆冲推覆构造[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1991.]

[25] ZHU Zhicheng. Extensional tectonics and detachment fault[J]. *Geological Science and Technology Information*, 1986, 6(1): 19-22(in Chinese). [朱志澄. 伸展构造和拆离断层[J]. 地质科技情报, 1986, 6(1): 19-22.]

[26] SUN Guangzhong. *Selections From Sunguangzhong's Geoengineering Papers*[M]. Beijing: Weaponry Industry Press, 1997(in Chinese). [孙广忠. 孙广忠地质工程文选[M]. 北京:兵器工业出版社, 1997.]

[27] GU Dezhen. *The Foundation of Engineering Geomechanics on Rock Mass*[M]. Beijing: Science Press, 1979(in Chinese). [谷德振. 岩体工程地质力学基础[M]. 北京:科学出版社, 1979.]

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[28] HU Haitao, YIN yueping. Theory and evaluation methods of regional crust stability "Safety Island" [J]. *Earth Science Frontiers*, 1996, 3 (1-2): 57-68 (in Chinese). [胡海涛,殷跃平. 区域地壳稳定性评价"安全岛"理论及方法[J]. 地学前缘,1996, 3(1-2): 57-68.]

[29] LIU Guochang. *Engineering Geology on Regional Stability* [M]. Changchun: Jilin University Press, 1993 (in Chinese). [刘国昌. 区域稳定工程地质[M]. 吉林:吉林大学出版社,1993.]

[30] PENG Jianbing. Fundamental principles for study on dynamics of regional stability[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2001, 9(1): 3-11 (in Chinese). [彭建兵. 区域稳定动力学研究(一)基本原则[J]. 工程地质学报, 2001, 9(1): 3-11.]

[31] PENG Jianbing. Fundamental principles for study on dynamics of regional stability[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2001, 9(1): 12-16 (in Chinese). [彭建兵. 区域稳定动力学研究(二)基本原则[J]. 工程地质学报, 2001, 9(1): 12-16.]

[32] PENG Jianbing, MAO Yanlong, FAN Wen. *Study of Dynamics on Regional Stability* [M]. Beijing: Science Press, 2001 (in Chinese). [彭建兵,毛彦龙,范文. 区域稳定动力学研究[M]. 北京:科学出版社,2001.]

[33] HUANG Runqiu, WANG Shitian, ZHANG Zhuoyuan, et al. *The Dynamic Process of Earth's Superficial Crust and Its Engineering Environmental Effects* [M]. Chengdu: Sichuan University Press, 2001 (in Chinese). [黄润秋,王士天,张倬元. 中国西南地壳浅表层动力学过程及其工程环境效应研究[M]. 成都:四川大学出版社,2001.]

[34] LUO Guoyu, WANG Peiqing, CHEN Huasheng, et al. *Theory and Method of Preferred Plane Analysis on Rock Slope* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992 (in Chinese). [罗国煜,王培清,陈华生,等. 岩坡优势面分析理论与方法[M]. 北京:地质出版社,1992.]

[35] MA Runyong. *The Tectonics Activity and Engineering Hazard Effects in the Northeast Margin of Qinghai-Tibet Plateau* [D]. Xi'an: Chang'an University, 2003 (in Chinese). [马润勇. 青藏高原东北缘构造活动及其工程灾害效应[D]. 西安:长安大学,2003.]

[36] PAN Jiazheng, HE Jing. *Hydropower Engineering in China (Engineering Geology Series)* [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000 (in Chinese). [潘家铮,何 . 中国水力发电工程(工程地质卷)[M]. 北京:中国电力出版社,2000.]

[37] MA Runyong, PENG Jianbing, ZHOU Lixin, et al. The study of fracture structure and the activity of F_{201} fault in Daliushu damsite district of Heishanxia Gorge [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2002, 10 (Suppl): 97-102 (in Chinese). [马润勇,彭建兵,周立新. 黑山峡大柳树坝址区断裂构造格局与 F_{201} 断层活动性研究[J]. 工程地质学报,2002,10(增刊):97-102.]

[38] SUN Guangzhong. *Mechanics on Rock Mass Structure* [M]. Beijing: Science Press, 1988 (in Chinese). [孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京:科学出版社,1988.]

[39] SUN Ye, TAN Chengxuan, LI Kaishan, et al. *Quantitative Assessment and Research of Regional Crust Stability* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998 (in Chinese). [孙叶,谭成轩,李开善,等. 区域地壳稳定性评价[M]. 北京:地质出版社,1998.]

[40] WANG Sijing, YANG Zhifa, LIU Zhuhua. *Rock Stability Analysis of Underground Engineering* [M]. Beijing: Science Press, 1979 (in Chinese). [王思敬,杨志法,刘竹华. 地下工程岩体稳定性分析[M]. 北京:科学出版社,1979.]

[41] WU Shuren. *Study of Engineering Geology on the Crustal Stability in the Qingjiang River* [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1995 (in Chinese). [吴树仁. 清江流域地壳稳定性工程地质研究[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1995.]

[42] ZHANG Xiangong, WANG Sijing, ZHANG Zhuoyuan, et al. *Engineering Geology of China* [M]. Beijing: Science Press, 2000 (in Chinese). [张咸恭,王思敬,张倬元,等. 中国工程地质学[M]. 北京:科学出版社,2000.]

[43] ZHANG Zhuoyuan, WANG Shitian, WANG Lansheng. *Analytical Theory of Engineering Geology* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990 (in Chinese). [张倬元,王士天,王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京:地质出版社,1990.]

[44] MA Zongjin, GAO Xianglin, REN Jinwei. The characters and dynamic model of global active tectonics [A]. *Researches and Applications of Modern Earth's Dynamics* [C]. Beijing: Seismological Press, 1994 (in Chinese). [马宗晋,高祥林,任金卫. 全球活动构造特征与动力学模型[A]. 现今地球动力学研究及其应用[C]. 北京:地震出版社,1994.]

[45] WANG Chunyong, ZHANG Xiankang, ZHAO Jingxian, et al. Study of fine structure in Xingtai Earthquake area and new knowledge of the seismotectonics [A]. *Advance in Solid Earth Geophysics in China* [C]. Beijing: Ocean Press, 1994. 31-40 (in Chinese). [王椿镛,张先康,赵静娴,等. 邢台地震区地壳细结构研究及对地震构造的新认识[A]. 中国固体地球物理学进展[C]. 北京:海洋出版社,1994. 31-40.]

[46] PENG Jianbing, ZHANG Jun, SU Shengrui, et al. *The Active Fractures and Geologic Disaster in Weihei Basin* [M]. Xi'an: Northwest University Press, 1992 (in Chinese). [彭建兵,张骏,苏生瑞,等. 渭河盆地活动断裂与地质灾害[M]. 西安:西北大学出版社,1992.]

[47] LI Shude, YUAN Renmao. The formation mechanism of ground fissurein in Datong City [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2002, 38(1): 104-108 (in Chinese). [李树德,袁仁茂. 大同地裂缝灾害形成机理[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2002, 38(1): 104-108.]

[48] PENG Jianbing, MA Runyong, LU Quanzhong, et al. Geological hazards effects of uplift of Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2004, 19(3): 457-466 (in Chinese). [彭建兵,马润勇,卢全中,等. 青藏高原隆升的地质灾害效应[J]. 地球科学进展, 2004, 19(3): 457-466.]

[49] WANG Sijing. Coupling of earth's endogenic and exogenic geological processes and origins on serious geological disasters [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2002, 10(2): 115-117 (in Chinese). [王思敬. 内外动力耦合作用与重大地质灾害的成因初探[J]. 工程地质学报, 2002, 10(2): 115-117.]

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[50] HAN Wenfeng. *Engineering Geological Research on the Loose Rock Mass at Daliushu of Heishanxia Gorge in Yellow River*[M]. Lanzhou: Gansu Science & Technology Press, 1993(in Chinese). [韩文峰.黄河黑山峡大柳树松动岩体工程地质研究[M].兰州:甘肃科技出版社,1993.]

[51] HU Haitao. *Typical Case-Study of the Engineering Geology Problems of the Daliushu Damsite in the Heishanxia Gorge of the Yellow River*[M]. Beijing: Seismological Press, 1993(in Chinese). [胡海涛.黄河黑山峡河段大柳树坝址工程地质专题研究[M].北京:地震出版社,1993.]

[52] WIEGEL R L. *Earthquake Engineering*[M]. [s.l.]: Prentice Hall, 1970.

[53] MA Runyong, PENG Jianbing, MEN Yuming, et al. Study of fracture structure framework and problems of engineering anti-fracturing in Daliushu damsite district of Heishanxia gorge[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2002, 13(4):46-50(in Chinese). [马润勇,彭建兵,门玉明等.黑山峡大柳树坝址区断裂构造格局与工程抗断问题研究[J].地质灾害与环境保护,2002,13(4):46-50.]

[54] CHEN Bing, ZHAO Zhencai, ZHU Yiqing. Primary discussion on recent abnormal features of across-fault deformation in Qilianshan - Haiyuan fracture belt and its mechanism[J]. *Inland Earthquake*, 1998, 12(3): 222-227(in Chinese). [陈兵,赵振才,祝意青.祁连山—海原断裂带跨断层形变近期异常特征研究及机理初探[J].内陆地震,1998,12(3):222-227.]

[55] MA Runyong, PENG Jianbing, MEN Yuming, et al. Study of mechanical mechanism on development of thrust fault[J]. *Journal of Northwest University*, 2003, 33(2): 196-200(in Chinese). [马润勇,彭建兵,门玉明,等.逆冲断层发育的力学机制研究[J].西北大学学报,2003,33(2):196-200.]

[56] DENG Qidong, LIU Baichi, ZHANG Peizhen, et al. Research of active fault in evaluating engineering safety and assessing amount of displacement[A]. *Research on Active Faults*(2)[C]. Beijing: Seismological Press, 1992. 236-246(in Chinese). [邓起东,刘百篪,张培震,等.活动断裂工程安全评价和位错量的定量评估[A].活动断裂研究(第2辑)[C].北京:地震出版社,1992. 236-246.]

[57] LI Yongshan. *Research on Ground Fissures in Xi'an Region and Active Faults in Weihe Basin*[M]. Beijing: Seismological Press, 1992(in Chinese). [李永善.西安地裂缝及渭河盆地活断层研究[M].北京:地震出版社,1992.]

[58] WANG Jingming. *Theory of Ground Fissures Hazards and Its Application*[M]. Xi'an: Shaanxi Science & Technology Press, 2000(in Chinese). [王景明.地裂缝及其灾害的理论分析与应用[M].西安:陕西科学技术出版社,2000.]

[59] WANG Lansheng, LI Tianbin, Zhao Qihua. *Epigenetic Time-Dependent Structure and Human Engineering*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994(in Chinese). [王兰生,李天斌,赵其华.浅生时效构造与人类工程[M].北京:地质出版社,1994.]

[60] Xi'an College of Geology, et al. *Study on Ground Fissures in Datong Engine Factory and Its Neighborhood Region*[M]. Xi'an: Shaanxi Science & Technology Press, 1991(in Chinese). [西安地质学院等.大同机车工厂及邻区地裂缝研究[M].西安:陕西科学技术出版社,1991.]

[61] ZHANG Jiaming. *Research on Ground Fissures in Xi'an Region*[M]. Xi'an: Northwest University Press, 1990(in Chinese). [张家明.西安地裂缝研究[M].西安:西北大学出版社,1990.]

[62] MINOR H E. Goose Creek oil field, Harris County, Texas[J]. *Bull Am Assn Petr Geol*, 1925, 9: 286-297.

[63] PRATT W E, JONHSON D W. Local subsidence of the Goose Creek oil field[J]. *J Geol*, 1926, 34(9): 557-590.

[64] DING Yuanzhang, CHANG Baoqi, XIAO Anyu, et al. *The Reservoir Induced Earthquakes*[M]. Beijing: Seismological Press, 1989(in Chinese). [丁原章,常宝琦,肖安予,等.水库诱发地震[M].北京:地震出版社,1989.]

[65] SIMPSON D W. Seismicity changes associated with reservoir loading[J]. *Engineering Geology*, 1976, 10:123-150.

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Basic relation between structural geology and engineering geology

PENG Jian-bing, MA Run-yong, SHAO Tie-quan
(College of Geological Engineering and Geometry, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: Structural geology is a basic geology that studies various phenomena of geologic structure and their occurrence and evolution. And engineering geology is an applied science, which mainly resolves practical problems that have close relationships with structural phenomena and tectonic activity in human engineering activity by utilizing the theory of geology and especially structural geology. Although the research purposes of both are different, the principal research objects are the same, namely the geologic structure; and both of them study diastrophism and all kinds of effects in the process of movement and change of the Earth. In this paper, we discuss the basic relations between structural geology and engineering geology, mainly including the constraints of geologic structure on the engineering geological environment and condition; the relation of the regional stability to the deep-seated-, shoal-seated- and superficial-structures; the relation of the rock mass stability to the structural interface and tectonic stress field; the relationship between the active structure and the safety of engineering architecture; and the relationship between the geologic structure and the geo-hazard development, such as rockfalls, landslides, mudflows, ground fissures and ground subsidence.

Key words: structural geology; engineering geology; regional stability; stability of rock mass and soil mass; engineering safety; geo-hazard

---

本刊编辑部声明:

为适应我国信息化建设需要,扩大作者学术交流渠道,本刊已加入《中国学术期刊(光盘版)》和"中国期刊网"、"万方数据——数字化期刊群"、"中文科技期刊数据库",并提供网络信息服务。作者著作权使用费与本刊稿酬一次性给付。如作者不同意将文章编入这些数据库,请在来稿时声明,本刊将作适当处理。目前,《地学前缘》编辑部已将近年期刊数据上网,提供全文浏览服务,欢迎登录中国地质大学(北京)学术刊物《地学前缘》主页,网址:http://www.cugb.edu.cn。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net