

# 断裂构造工程效应综述

陈红旗

魏云杰

(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家专业实验室,成都 610059)

**【摘要】** 在具体工程中,断裂构造特性决定了断裂构造工程效应,两者共同决定了对断裂构造的工程处理措施。通过对断裂构造工程勘察、工程效应和工程处理全过程的综合研究,理论解析了断裂构造工程效应研究的前沿课题,并结合工程实践,提出了基于理论模型的个性化断裂构造工程效应研究方案。

**【关键词】** 断裂;工程勘察;工程效应;地震;抗震;抗断

**【中图分类号】** P 642

## The Formulation of Fault Engineering Effect in Whole

**【Abstract】** For concrete engineering, the character of fault decides its engineering effect, they decide the engineering handling together. Through the formulation study in whole of fault engineering investigation, engineering effect and engineering handling, Studying the leading edge problem in the study of fault engineering effect. According to engineering practice, it is important to study the individuality model based on theoretical model for the fault engineering effect.

**【Key words】** fault; engineering investigation; engineering effect; earthquake; seismic design; breaking resistant design

### 0 引言

工程中经常遇到断裂构造问题,现行各类工程规范都基于避让原则对其作了描述,概括之外不外乎工程活断裂判据和工程活断裂避让两个方面,但由于工程类型不同、行业有别,以及断裂构造的复杂性,已有规定显得混乱无力,如工程活断裂判定时限不一致<sup>[1]</sup>、断裂理论依据不明确、断裂构造个性缺少考虑等等。随着国土资源开发密度、开发重度的增加和经济的发展,许许多多的工程建设不得不直接面对断裂构造,而且也逐步有能力从被动避让转向对断裂构造的主动再造。实际工程中这一观点并不陌生,但因忽视断裂构造致灾全过程的研究,致使工程效果很不理想。因此,开展断裂构造的工程效应研究具有较大的工程价

值和理论意义。

### 1 断裂构造工程勘察

断裂构造工程勘察是开展断裂构造工程效应研究的基础,我国已基本拥有区域断裂构造数据库,勘察工作只需在固定场区范围内进行详勘,勘察技术和地学多元信息处理精度已不成问题,而工程勘察范围的确定变得非常关键。

以往的断裂构造工程勘察范围只在地震安评中有明确规定,由于过多地倚重于统计学和地震波衰减,忽视了断裂个性(如断裂物化特征、断裂分级分段、断裂破裂扩展等),强调了工程抗震而丢了工程抗断。运用区域稳定工程地质学,基于断块体理论和断裂力学理论,利用场区断裂稳定性分区(段),按工程类

型进行断裂构造工程勘察范围确定,应属当行途径。

## 2 断裂构造工程活动性判定

断裂工程活动性的判定可针对性地为断裂构造工程灾害防治提供依据,但目前活动性判据远未搞清。已有断裂活动性判定主要依据活动时限,从工程抗震角度将断裂构造分为非工程活断层和工程活断层,由于缺乏对时限的有力支持,从而弱化了判定的科学性和工程安全性。这里问题的根源在于断裂构造与工程场地间的尺度可比性,前者活动时间属地质年代范畴,而后者仅为数十年的工程使用期;前者活动空间以千米标度,而后者才为米级。解决这一问题,首先应确定断层活动性指标,除最新活动年龄、沿断层发震情况以及断层滑动速率等熟知指标外,尚需深入研究断裂构造主次级破裂变形场以及被感生扰动的脆弱性。利用应力场这一对断裂构造活动较为敏感的因素,通过断裂构造对古今应力场影响的分析,可提出不同断裂的工程活动性评价方案。

## 3 断裂构造对地应力场的影响

地应力是区域构造稳定性评价、工程设计和施工的重要基础资料,在地应力集中区,断裂易于活动,而活动的断裂构造又将再造地应力,因此研究断裂构造对地应力场的影响,具有重要的工程意义。国内外对活断裂的地应力影响给予了足够的重视,早在1923年,太沙基(Terzaghi)就提出,深部存在的张开的垂直结构面可能就是低水平应力和  $K_H = \sigma_H / \sigma_v$  值小的证据。不仅活动断裂影响地应力,而且非活动断裂附近的地应力也存在(苏生瑞,2002)。由于影响地应力的因素复杂多样、实测地应力有限和研究方法不成熟,目前仍存在断裂对应力场转换的机理模式和断裂数力模型建立等技术难点,尚无定量或半定量的公式可供工程应用。

## 4 断裂构造工程效应

断裂工程效应给出了断裂构造工程影响的有效性,并直接决定了具体断裂构造的工程处理。现将常见的断裂构造工程效应分析如

下:

### 1) 环境效应

断裂提供了工程场地气液物质运移的通道,时因物质不正当转移而生多种环境灾害,从工程角度可分为水土的流失、环境应力场的改造、基础的腐蚀、工程施工的安全和工程使用的健康等问题。较为常见的具体工程灾害有地下水运移带来的地面变形、地表水渗流带来的水土流失、深埋隧洞的涌水突泥和毒气、以及水工构筑物内的析出物等。在遭受断裂构造负面环境效应的同时,某些情形也受益匪浅,断裂构造能够及时提供不同地质单元的工程信息,有助于地热开采、油气藏开采,以及地质工程灾害的预警预测。对环境效应的研究以往主要集中于物质运移的起点与终点,对致灾过程研究较为薄弱,开展过程模拟与过程控制研究应该成为进一步研究的重点。

### 2) 地形变效应

断裂造貌运动让我们直接了解到断裂构造的地形变效应,以往对发震断裂研究较多,主要围绕形变空间,其中,隐伏断裂的地形变效应是目前研究热点。从工程角度而言,形变致灾的关键在于断裂构造形变的两盘非对称性,这种非对称性决定了断裂构造场地工程环境应变能分布的复杂程度,因此对非对称性的研究可更好地服务于工程。已有研究方法有数值模拟和物理模拟两种,物理模拟以离心机模拟为主,后者由于大变形数值分析技术尚不成熟,尽管考虑断裂接触行为的数值分析开展较多,但可靠度较低。基于大地形变测量资料,通过数值拟合,研究断裂构造形变是笔者正在从事的研究工作。

### 3) 强度效应

断裂构造使场地整体强度弱化,从而导致场地岩土体滑移或地基强度的不足,这主要取决于断裂破碎带(断裂岩)的物化指标、组构和结构,以及裂面的摩擦接触行为。张咸恭、聂德新等(1986)对断裂岩工程性质作了深入研究,可资工程借鉴。依据断裂强度指标,进行

断裂构造的工程影响带划分,对一般性工程更具有意义。工程中将断裂构造作软弱层处理,主要考虑了断裂带的强度弱化,而作裂面处理则主要考虑到裂面的接触行为,如抗剪能力。如果有效地将二者融为一体,建立复合断裂模型,更能反映断裂构造强度效应。此外,带内含水量与断裂瞬时力学性质和蠕变特性关系密切,界限含水量的划分,将有助于掌握断裂的工程地质力学性质。

#### 4) 地震效应

论及断裂构造的地震效应,自然有发震断裂与非发震断裂之分。对断裂发震能力的评估属于地震学研究内容,而工程所关心的是既定发震背景下近场强地震动。近些年大震灾表明(1995,日本兵库县地震;1999,土耳其伊兹特地震;1999,中国台湾集集地震),近发震断裂的强震动是造成震灾的主要原因<sup>[2]</sup>。以往理论推测的近断裂地震动形态复杂、有大速度脉冲存在,也被近年的强震观测证实(如中国台湾集集 9.21 地震记录显示,近断裂加速度等值线呈花瓣状,最大地面速度推测达到 300 m/s)。丰富的强震观测记录为深化近断裂地震动研究提出了基础资料,当务之急是利用这些资料,开展近源谱的标定、特征周期和长周期幅值确定等研究<sup>[2]</sup>,进而对近源抗震设计谱加以修订。同时在地震地质条件类比的基础上,依据应力-弛豫动力学模式<sup>[3]</sup>,定量描述缺乏地震记录的断裂的破裂过程带来的近场地震动。

非发震断裂的地震效应反映在对地震波场影响和受地震波场影响两个方面。前者侧重于隔震效应研究,目前仍处于探索阶段,研究方法以实地考察、数值物理模拟为主;地震时的断裂感生破裂机理、方式、分布及其灾害是后者的主要研究内容,研究焦点在于发震断裂与非发震断裂间的相互作用问题。通过对二者的研究,可预测非发震断裂场地工程抗震抗断(裂)危险。因岩土体断裂力学形态非线性加之地震作用的随机性,使得这一研究相当困难,已有的工作主要是国防领域内的断裂构

造爆炸波动力学效应研究,其他具体场点研究也很难有可推广意义。因此,开展工程地质学、地震工程学、断裂动力学等多学科理论研究,辅以物理模拟校验,定量评价介质品质因子,将有望得出断裂构造地震效应研究的可拓性成果。

## 5 断裂构造工程处理

### 1) 避让措施

对断裂构造的工程避让方案可分时间避让和空间避让两种,主要是针对活断裂,但目前工程中对非活动断裂也参照活断裂情况处理。时间避让主要是指将工程使用期置于断裂构造稳定期内,但由于二者时间尺度通常不具可比性,故只作概念性吸收。但随着人类工程活动对断裂构造干扰能力加大,断裂活动的短期局部行为似乎可以采用时间避让的方案,师亚琴(2001)曾论证了时间避让跨西安地裂工程建筑的可能。专门对空间避让的研究较多,其中以董津城的研究成果最具说服力,在《建筑抗震设计规范》(GBJ11-89)修订过程中,许多专家曾提出增加发震断裂的工程避让距离<sup>[4]</sup>。应该说明,目前的避让距离是针对统计意义上的一般情况,尚无法保证避让距离外工程的绝对安全,对重大工程建筑尚应专门论证。这里的关键是避让距离设定的依据没有搞清楚,同时避让工程效果鉴定缺乏依据,这里防震三原则值得借鉴。

### 2) 强化措施

工程中多数情况下需对场地断裂构造施以补强措施,强化目的主要为围岩支护和基础补强,具体强化措施应以断裂类型及其工程破坏类型为依据。一般情形,张拉性断裂多属结构性破坏,扭剪应力断裂的泥化夹层最危险,而压性逆断裂常导致动态岩爆性失稳<sup>[5]</sup>。除考虑地质条件外,尚需兼顾工程类型进行方案优选。工程中常见的强化措施有注浆、锚喷、支护、桩基础等,但由于缺乏明确的理论依据,往往出现工程反复,造成工程浪费。

注浆主要用于大型工程,尤其隧洞围岩支护和挖掘超前加固(如对大瑶山隧道 F<sup>9</sup> 断层

的工程处理)。注浆机理、浆液配制和注浆结束标准设定是该项施工的技术难点,问题根源在于忽视断裂相关参数,缺乏对断裂物化性质、组构结构及力学性质的定量评价。

注浆常难以实施(尤其对高陡岩质边坡),近些年喷锚加固技术得到迅速发展,尽管许多学者对此作了深入研究,如李宁(1997)对群锚对断层的加固机理进行数值分析等,倘若能考虑到断裂构造的断续特性确定强化位置,将大大提高强化效果。另外喷射混凝土护壁厚度尚靠经验判定,尚需可资工程运用的理论成果。

支护工程能够最大限度地调动围岩自身承载能力,尤其在高应力区符合岩体施工的“先让后抗”原则。最佳支护时机的选择,有望大大提高支护工程的环境适应能力。

深基础常采用桩基础,桩端持力层在已有工程中一味地追求对断裂下盘的利用,其实某些断裂恰恰相反。在满足承载力需求条件下,若地层不再错动,利用上盘当属可行;一旦地层错动,桩端即使置于下盘,也会因地层错动而剪断。浅基础遇到断裂构造,可用浅层置换法强化。

### 3) 抗断设计

对于无法避开断裂构造的线状工程,进行抗断设计很有必要。笔者理论研究认为<sup>[6]</sup>:利用不同材料障碍物与断裂(缝)间的波阻抗失配,可进行场地工程抗断(裂)设计,具体措施可采用柔性、刚性或刚柔结合等三种方案,设置低弹模障碍物,通过塑性功的消耗降低基础继承破裂危险,拒断裂于外;利用高韧度材料抵抗断裂扩展,将断裂引向低风险区域;采用复合性措施,“先柔后刚”。南水北调工程在过断裂区采用了钢管波纹补偿器复合衬砌、钢筋混凝土复合衬砌、扩大的圆形隧洞与U形输水管槽组合等特殊结构措施,这些属上述理论成果的应用。在所有的抗断设计中,“抗、放结合”的柔性法则,对于消除断裂构造带来的场地永久大变形的工程影响相当适用,如设置沉降缝、采用分离式基础、选择工程轴向与断

裂的最佳夹角<sup>[7]</sup>。在跨断裂的路桥设计中,必须采用多跨跨越,各桥墩基础尽量远离裂面,若不可避免,则尽量减少桥墩个数。现有各种抗断设计都是具体场点的个性化设计,上升到适应场地不平衡与变形的抗断设计理论研究,可大大推动抗断工程设计的推广。

### 4) 抗断与抗震

抗断与抗震往往密切相关,但现有断裂构造的工程处理多从抗震角度出发。抗震属公里尺度,而抗断尺度多为数十米级;抗震侧重于能量传播角度的间接破坏,而抗断则侧重于直接变形破坏。为此,利用近断层脉冲地震动记录,联合开展抗断与抗震研究很有必要。

## 6 启示

断裂构造已成为工程中倍受关注的地质单元,断裂构造特性决定了断裂构造灾机理与方式,通过断裂构造工程效应的研究,可为断裂构造的工程处理提供依据。在断裂构造的工程处理中,开展基于理论模型的个性化研究,有助于国土资源的合理、高效地开发利用,也将大大提高工程安全度。

## 参 考 文 献

- 1 周本刚,冉洪流.工程活断裂鉴定的时限标准的讨论.工程地质学报,2002,10(3):274~277
- 2 张敏政.近年地震震害的几点启示.工程抗震,2001(1):11~15
- 3 T Inoue, T Miyatake. 3D simulation of near-field strong ground motion based on dynamic modeling. Bull Seism Soc Am, 1998, 88(6):1445~1456
- 4 董津城.发震断裂的安全距离鉴定简介—《建筑抗震设计规范》修订简介(五).工程抗震,1999(6):14~16
- 5 杜炜平,古德生.隧道通过断层区的力学特性与技术对策研究.西部探矿工程,2000(5):1~3
- 6 陈红旗.西安地裂缝地震动效应研究:[学位论文].西安:长安大学,2002
- 7 冯启民,赵林.跨越断层埋地管道屈曲分析.地震工程与工程振动,2001,21(4):79~87