**引用格式**: 谭成轩,张鹏,王继明,等,2023. 原位地应力测量与实时监测在强构造活动区深埋地下工程中应用的思考[J]. 地质力学学报,29(6):757-769. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023122

**Citation:** TAN C X, ZHANG P, WANG J M, et al., 2023. Considerations on the application of in-situ stress measurement and real-time monitoring in deep underground engineering in strong tectonic activity region [J]. Journal of Geomechanics, 29 (6) : 757–769. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023122

# 原位地应力测量与实时监测在强构造活动区深埋地下工程中应 用的思考

谭成轩<sup>1,2,3</sup>, 张 鹏<sup>1,2,3</sup>, 王继明<sup>4</sup>, 丰成君<sup>1,2,3</sup>, 戚帮申<sup>1,2,3</sup>, 王惠卿<sup>5</sup>, 李 滨<sup>1,2,3</sup>, 陈群策<sup>1,2,3</sup>, 吴满路<sup>1,2,3</sup>, 孙炜锋<sup>1,2,3</sup>, 秦向辉<sup>1,2,3</sup>, 张重远<sup>1,2,3</sup> TAN Chengxuan<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Peng<sup>1,2,3</sup>, WANG Jiming<sup>4</sup>, FENG Chengjun<sup>1,2,3</sup>, QI Bangshen<sup>1,2,3</sup>, WANG Huiqing<sup>5</sup>, LI Bin<sup>1,2,3</sup>, CHEN Qunce<sup>1,2,3</sup>, WU Manlu<sup>1,2,3</sup>, SUN Weifeng<sup>1,2,3</sup>, QIN Xianghui<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Chongyuan<sup>1,2,3</sup>

1. 中国地质科学院地质力学研究所,北京100081;

- 2. 自然资源部新构造与地壳稳定性科技创新团队,北京 100081;
- 3. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室,北京100081;
- 4. 中国联合工程有限公司,浙江杭州 310051;
- 5. 中国地质环境监测院,北京 100081
- 1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;
- 2. Scientific and Technical Innovation Team of Neotectonics and Crustal Stability Assessment, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;
- 3. Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;
- 4. China United Engineering Corporation Limited, Hangzhou 310051, Zhejiang, China;
- 5. China Institute for Geoenvironmental monitoring, Beijing 100081, China

# Considerations on the application of in-situ stress measurement and real-time monitoring in deep underground engineering in strong tectonic activity region

Abstract: The concentration, complexity, and significant anisotropy of in-situ stress make it a pressing and challenging issue in engineering geology safety in strong tectonic activity areas. This paper firstly analyzes the application and existing problems of in-situ stress measurement in deep-buried underground engineering in strong tectonic activity areas. Then, it focuses on the application method, technology, and roles of real-time in-situ stress monitoring in deep underground engineering within tectonically active regions. Finally, it discusses the problems that need to be considered in the application of in-situ stress measurement and real-time monitoring. The results show that in the strong tectonic activity area, relying solely on limited deep hole in-situ stress measurements to determine overall stress design parameters for deep underground engineering is inadequate. A comprehensive study of the three-dimensional in-situ stress field is necessary to reveal its spatial distribution characteristics. Different in-situ stress design parameters should be used for different positions of the deep-buried underground project to avoid engineering waste or engineering damages caused by large or small in-situ

E-mail: tanchengxuan@tom.com

E-mail: zhangpeng0713@sina.com

基金项目:中国地质调查局项目(DD20160267, DD20190317, DD20221738)

This research is financially supported by the Geological Survey Projects of the China Geological Survey (Grants No. DD20160267, DD20190317, and DD20221738)

**第一作者:**谭成轩(1964一),男,博士,研究员,主要从事活动构造、构造应力场、区域地壳稳定性评价等研究。

通讯作者:张鹏(1986一),男,博士,副研究员,主要从事地应力测量、构造应力场、岩体稳定性评价等研究。

收稿日期: 2023-07-29; 修回日期: 2023-10-28; 责任编辑: 吴芳

stress design parameters. In the strong tectonic activity area, the disk core density is inversely proportional to the measured magnitude of the in-situ stress, and the depth range that has yet to form in the cake-shaped core often has the highest in-situ stress and the most concentrated stress, and the deep underground engineering should avoid this depth range. While a major earthquake or major engineering geological problem occurs, real-time monitoring of in-situ stress can dynamically reveal the relative change trend and evolution process of the in-situ stress magnitude of a specific structural site. It can calculate the absolute value of the in-situ stress measurements. Regional crust stability and deep-buried engineering geological safety risks can be quickly evaluated, and quantitative in-situ stress design parameters and the stress-strain reserved threshold for preventing deformation and breaking can be provided for the damage repair of deep-buried engineering and the risk of fault activity can also be assessed. The research results will offer geological security for the planning, construction, and safe operation and maintenance of major projects in strong tectonic activity areas.

Keywords: strong tectonic activity area; cake-shaped core; in-situ stress measurement; real-time monitoring of in-situ stress by piezomagnetic inductance; stress-strain reserved threshold

摘要: 强构造活动区,因其原位地应力集中突出、变化复杂、各向异性显著,已成为亟待解决的重大 工程地质安全问题和挑战。文章首先分析了原位地应力测量在强构造活动区深埋地下工程应用的经验和 不足,然后研究了原位地应力实时监测在强构造活动区深埋地下工程中的应用方法、技术及作用,最后 给出了原位地应力测量与实时监测在强构造活动区深埋地下工程中应用建议。研究表明在强构造活动 区,不能仅仅依据有限深孔地应力测量结果确定深埋地下工程总体地应力设计参数,而应开展三维地应 力场综合研究,揭示其三维地应力场空间分布特征,针对深埋地下工程不同位置采用不同的地应力设计 参数,避免因地应力设计参数偏大或偏小造成工程建设浪费或工程病害;在强构造活动区,饼状岩芯密 度与地应力测量大小成反比,在饼状岩芯发育深度范围之下未来会形成但仍未形成饼状岩芯的深度范围 往往地应力最高、应力最为集中,深埋地下工程应避免该深度范围;原位地应力实时监测可以动态揭示 某一构造部位地应力大小的相对变化趋势和演化过程,并可计算地应力绝对测量,就可以快速评价区域 地壳稳定性、深埋地下工程地质问题发生后,不用开展新的地应力绝对测量,就可以快速评价区域 地壳稳定性、深埋地下工程地质安全风险等,为深埋地下工程损毁修复提供量化设计地应力参数及预防 变形破坏应力应变预留阈值,评价断层活动危险性。研究成果可为强构造活动区重大工程规划建设和安 全运维提供科学依据。

关键词: 强构造活动区; 饼状岩芯; 原位地应力测量; 压磁电感法地应力实时监测; 应力应变预留阈值 中图分类号: P315.72+7; P642.2 文献标识码: A 文章编号: 1006-6616 (2023) 06-0757-13 DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023122

0 引言

在青藏高原强构造活动区,由中国开展的交通 (铁路、公路)、水电工程规划建设和安全运维方兴 未艾、如火如荼,同时也面临大型工程地质安全问 题和挑战(郭长宝等,2017;彭建兵等,2020;薛翊国 等,2020),如交通深埋隧道活动断裂错断(梁宽等, 2022;薛善余等,2022;朱爽等,2022)与硬岩岩爆和 软岩大变形(Hoek, et al., 1997, 1998; Martin, et al., 2003;刘高等,2005;郭啟良等,2006;张文新等, 2013;张鹏等,2017a;王庆武等,2018;严健等,2019; Sun et al., 2021;魏鹏等,2022)、水电深埋地下厂房 变形破坏(张勇等,2012;黄书岭等,2014;陈长江等, 2016; Song et al., 2016;杨静熙等,2019)、大型水库谷 幅变形(杨强等,2015;高克静等,2018;程恒等, 2020;邹旭明,2022)等,究其内动力机制无不与现今 区域构造活动诱发地应力变化息息相关。因此,探 索思考原位地应力测量与实时监测在强构造活动 区深埋地下工程中应用的相关理论、方法和技术已 成为重大工程建设亟待解决的地球科学问题。

在强构造活动区,无论是构造应力还是非构造 应力各向异性更为显著、应力集中更为强烈、局部 地应力场特征更为突出、区域地应力场代表性更 差,如何利用重大工程沿线和场址有限的深孔地应 力测量结果支撑服务重大工程规划建设,一直是工 程规划、设计和建设技术人员与地学工作者探索的 关键科学问题(王连捷等,1991;谭成轩等,2003, 2004,2006,2014; Tan et al.,2004;王成虎等,2009, 2011b,2014,2019;孙炜锋等,2021;张玉玺,2021;张 重远等,2022;秦向辉等,2023)。

因此,论文首先分析原位地应力测量在强构造 活动区深埋地下工程中应用的经验和不足,然后重 点研究原位地应力实时监测在强构造活动区深埋 地下工程中的应用方法技术及其作用和意义,最后 给出原位地应力测量与实时监测在强构造活动区 深埋地下工程中的应用建议,以期为强构造活动区 重大工程规划建设和安全运维提供理论支撑。

# 原位地应力测量在强构造活动区深 埋地下工程的应用分析

#### 1.1 高地应力的界定与评价

高地应力是一个相对概念,它与岩体经历的构 造运动和地质历史、岩体结构和强度等因素有关。 对于高地应力的判定,尚无统一规定,国内外常用

#### 表1 地应力判定划分标准

#### Table 1 Standard for determining in-situ stress classification

的地应力判定划分标准如表1所示。从表中可以看 出,中国与其他一些国家的地应力判定划分标准差 别较大,反映不同国家高地应力的定义及其内涵存 在差异(王成虎等,2009;李国良等,2020;张广泽等, 2022)。此外,国内外不同学者所运用的高地应力 的判据也存在较大的差异(王成虎等,2009,2011a)。

#### 1.2 原位地应力测量结果在深埋地下工程中的应用分析

关于地应力测量在青藏高原强构造活动区深 埋地下工程中的应用,国内学者进行了大量的探索 研究(廖椿庭和施兆贤,1983;吴满路等,2008;张重 远等,2013;王成虎等,2014,2019;唐浩等,2015;王 庆武等,2016;王栋等,2017;严健等,2019),取得了 宝贵的经验和认识。然而,由于强构造活动区地质 体在横向和纵向上的各向异性、极度复杂性和不可 知性,对于深埋地下工程,已采用的各种方法仍有 一定的局限性,不能完全科学合理地评价地应力状 态,很难得到可靠的地应力状态指导深埋地下工程 的结构设计、施工建设和安全运维(王成虎等, 2019;徐安等,2022)。

应力级别	强度应力比 $\sigma_{\rm c}/\sigma_{\rm max}$										
	国外				国内				σ/MPa	陶振室法・S/S	杨子文法· <i>Β</i> /σ
	法国隧 道协会	日本应用 地质协会	苏联顿 巴斯矿区	日本国 铁隧规	岩土工程 国家标准	铁路工程 行业标准	公路工程 行业标准	水电工程 国家标准	o <sub>max</sub> / ivii a	Hugh I 12. OHmax Ov	127 7 721, 160 max
低地应力	>4	>4	>4	>6	>7	>7	>7	>7	<10	1.0~1.5	10~100
中等地应力	2~4	2~4	2.2~4	4~6				4~7	10~20	1.5~2.0	4~10
高地应力	<2	<2	<2.2	<4	4~7	4~7	4~7	2~4	20~40	>2	2~4
极高地应力			-		<4	<4	<4	<2	≥40		<2

注: σ<sub>c</sub>为岩石饱和单轴抗压强度, MPa; σ<sub>max</sub>为最大地应力, MPa; S<sub>Hmax</sub>为最大水平主应力, MPa; S<sub>v</sub>为垂向主应力, MPa; R=245×(σ<sub>c</sub>/300)<sup>09</sup>Kw<sup>099</sup>, Kw为岩体的完整性系数

为此, 王成虎等(2009)系统总结了一般原位地 应力状态分析评价的4个步骤:首先对工程区的原 地应力实测点工程地质特征进行研究, 一般采用地 质体强度指标(GSI)系统对测点岩体进行详细的围 岩分类和评价(Hoek et al., 1998);其次利用 Hoek-Brown强度理论对工程岩体的强度参数进行估算 (Hoek et al., 1997); 然后利用 Sheorey 模型拟合分析 实测原地应力值(Sheorey, 1994); 最后综合考虑地 应力判定划分标准对原位地应力测量结果进行评 价, 确定应力级别。谭成轩等(2006)讨论了地应力 测量及其地下工程应用值得注意的问题: 地应力测 量前应充分考虑测量孔位的选定和地形地貌、岩 性、断裂等的影响;地应力测量后应对测值的各种 影响因素和可靠性进行分析、进行岩石力学性质校 正(秦向辉等,2012)和对比分析以及测值的代表性 分析等(孙元春等,2022);工程应用应考虑具体工 程所处不同构造部位、不同岩性、不同岩体结构、 不同深度等局部地应力状态的变化和差异,此外, 工程本身不同的设计结构、尺寸等引起的局部地应 力状态变化也需予以充分考虑。根据Hoek and Brown (1997)的现场实地研究,发现地下洞室开挖面附近 的岩体最大强度约为岩块单轴抗压强度的40%; Martin et al.(2003)也通过在各种岩体中的广泛研究 发现在完整岩体和中等节理化岩体中,岩体强度约 为室内试验所得单轴抗压强度的50%。因此,在一 般研究论证的情况下,可以近似地取岩体整体强度 为岩块单轴抗压强度的50%。

近年来,青藏高原及其周缘铁路规划建设过程 中大量深孔地应力测量和工程应用进一步证明(刘 高等,2005;郭啟良等,2006;张文新等,2013;张鹏 等, 2017a; 王庆武等, 2018; 严健等, 2019; Sun et al., 2021;张重远等, 2022),在强构造活动区深埋地下工 程规划设计中更需要综合考虑原位地应力测量结 果的各种影响因素, 应对地应力测量结果进行影响 因素校正综合分析,而不能直接用若干个深孔地应 力测量结果确定深埋地下工程总体的地应力设计 参数,这也是为什么中国几乎所有的重大工程在规 划设计阶段都进行了地应力测量工作,但在工程建 设过程中或运行期仍然会出现因地应力导致的工 程病害的原因。基于工程实践和地应力测量经验, 以及强构造活动区地质构造、地层结构和岩性、地 形地貌等复杂性和差异性,在综合考虑原位地应力 测量结果各种影响因素的基础上,需要依据强构造 活动区深埋地下工程围岩岩体结构构造、岩性、地 形地貌等地质特征构建三维地质模型,开展三维地 应力场仿真数值模拟,揭示其三维地应力场空间分 布特征(谭成轩等, 2006; 王成虎等, 2011b), 实现深 埋地下工程不同位置采用不同的地应力设计参数, 并且近水平孔或平硐地应力测量也验证了距离山 体坡面不同水平深度地应力状态的差异性(李宏 等,2006;谭成轩等,2008;孙炜锋等,2021),避免因 地应力设计参数偏大或偏小造成工程建设浪费或 工程病害。

#### 1.3 饼状岩芯钻孔原位地应力测量结果分析

强构造活动区一般在深切峡谷的谷底和坡脚, 也有在山脊之下(如喜马拉雅东构造结多雄拉山 脊),钻孔中由于高地应力导致的饼状岩芯极度发 育(白世伟和李光煜,1982),地应力测量结果变化 较大,并在钻孔中一定深度范围地应力测量值异常 增大,出现显著的地应力集中。针对这种现象,基 于地应力测量现场经验和钻孔岩芯观察,文章尝试 从岩体结构方面解释其成因机制和变化规律。大 量饼状钻孔岩芯观察和地应力测量结果表明:①饼 状岩芯一般在钻孔一定深度自浅部往深部发展; ②由于饼状岩芯发育导致岩体结构损伤,饼状岩芯 密度与地应力测量大小成反比,在饼状岩芯发育深 度范围内地应力大小往往不是最高、也不是最集 中,而在饼状岩芯发育深度范围之下未来会形成但 仍未形成饼状岩芯的深度范围内往往才是地应力 最高、最为集中的,这种现象在河北省昌黎县碣石 山坡脚一处钻孔地应力测量中被发现(图1,图2), 该钻孔饼状岩芯发育的深度范围为430~450 m,从 图2可以看出,在该深度范围之上地应力测量值没 有出现显著增大的现象,而在该深度范围之下 453.50 m地应力测量值则明显增大。由于所使用高 压泵量程限制,从压裂曲线可以看出该深度段没有 压裂成功,但从压力数值上明显高于该饼状岩芯深 度范围之上的测量深度段,也明显高于 453.50 m之 下的测量深度段。

(1. 44.9.0

图1 河北省昌黎县钻孔饼状岩芯

Fig. 1 Cake-shaped core drilled in Changli County, Hebei Province

2 原位地应力实时监测在强构造活动 区深埋地下工程应用分析

#### 2.1 原位地应力实时监测方法简介

原位地应力实时监测包括钻孔压磁电感法、分 量应变法、体应变法、压容法等(王连捷等,1991)。 压磁电感法在 20世纪 60年代由李四光先生倡导、 在全国范围内得到了应用和推广,其地应力实时监 测是通过压磁应力传感器核心元件实现的(邱泽 华,2010;谭成轩等,2020)。压磁应力传感器是基于 一种特殊铁磁材料(含镍 65% 的铁镍合金)的"磁致 伸缩原理"研制的,主要由特殊铁磁材料制造的心 轴及其上绕制的线圈构成(图 3)。所谓"磁致伸缩 原理"就是铁磁材料在外力(F)作用下其磁导率(µ) 发生变化,反之,其磁导率(µ)的变化可以反映外力 (F)作用的改变。具有这种特性的铁磁材料通常称



图 2 河北省昌黎县钻孔水压致裂地应力测量压力-时间曲线

Fig. 2 Pressure-time curves of hydrofracturing stress measurement in boreholes in Changli County, Hebei Province



图 3 压磁法地应力实时监测原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the principle of real-time in-situ stress monitoring by piezomagnetic inductance method

为压磁材料。依据电磁学原理,当铁磁材料磁导率 (μ)发生变化时,会引起线圈的电感量(L)发生变 化,进而线圈的阻抗值(Z)发生变化,最后导致线圈的电压值(V)发生变化。通过测量电压值(V),并依

据四者之间的换算关系,获得由于外力(F)作用导致的应力(o)变化量。通过实时监测线圈电压值的变化量,依据室内围压标定曲线,即可得到作用于监测探头中测量元件的应力变化。

根据广义胡克定律( $\sigma = E\varepsilon$ ,其中地壳岩石弹性 模量(E)一般为10<sup>4</sup>~10<sup>5</sup> MPa量级大小、 $\varepsilon$ 为应变 值),应力变化相比较应变会相对显著,实践证明进 行地应力(如压磁电感法地应力等)实时监测较为 有效(张鹏等,2017b;谭成轩等,2019)。

原位地应力实时监测可以动态揭示某一构造 部位地应力大小的相对变化趋势和演化过程,并可 计算地应力实时监测期间不同时域地应力状态绝 对值(丰成君等,2014;张鹏等,2017b),而不用开展 新的地应力绝对测量。

#### 2.2 原位地应力实时监测结果分析

2.2.1 西藏林芝八一台站地应力实时监测结果

在地应力测量和结果分析的基础上,考虑钻孔 岩体完整性、岩石强度、区域构造应力场方向等, 确定在94.50m深度安装四分量压磁电感地应力监 测探头,其4个测向分别位于北西290°(测向a)、北 东 20°(测向 b, 监测深度最大水平主应力方向)、北 东 65°(测向 c)和北西 335°(测向 d)。

自 2015 年 1 月 24 日以来,林芝八一钻孔四分 量压磁电感地应力监测探头已经稳定、连续获得了 地应力相对变化监测数据(图4)。2015年4月 25日14时11分尼泊尔Ms8.1级地震发生后,北东 20°地应力相对大小减小了约95 kPa,北东65°地应 力相对大小减小了约30kPa,北西290°地应力相对 大小减小了约25 kPa, 北西335°地应力相对大小减 小了约10kPa(图4)。总体来看,平行俯冲方向即北 东方向地应力相对大小减小较多,而垂直俯冲方向 即北西方向地应力相对大小减小较少。尼泊尔 M\_8.1级地震导致该地应力实时监测台站4个测向 地应力变化,是由于印度板块向欧亚板块俯冲诱发 位于上盘的林芝地应力实时监测台站及其周围地 壳浅表层向西南同震位移而出现的张性效应(张贝 等,2015),该地应力实时监测台站较好地揭示了尼 泊尔 Ms8.1级地震的构造作用动力学机制和远场 效应。



图 4 林芝地应力实时监测结果与 2015 年尼泊尔地震事件 Fig. 4 Results of stress monitoring in Linzhi with the 2015 Nepal earthquake event

为详细分析尼泊尔 M<sub>s</sub>8.1级地震对林芝地应力 实时监测台站附近及其区域震前、同震及震后应力 调整的影响情况,根据地应力实时监测曲线的变化 幅度特征,将 2015年1月24日0:00至2015年8月 25日23:00时间段的地应力实时监测数据分为3个 阶段分别计算地应力状态。

(1)地应力缓慢增加阶段:2015年1月24日
0:00至2015年4月25日14:00,与2015年1月24日
0:00相比,在尼泊尔*M*<sub>s</sub>8.1级地震发生之前(2015年)

4月25日14:00) 各测向分量总体趋势为缓慢增加。

(2)尼泊尔 M<sub>s</sub>8.1级地震同震快速变化阶段:
2015年4月25日14:00至4月25日23:00,与2015年4月25日14:00相比,在地震发生之后10个小时(2015年4月25日23:00),各测向分量呈现同震突然降低状态。

(3) 震后地应力调整阶段:2015年4月26日 0:00至8月25日23:00,与2015年4月26日0:00相比,在尼泊尔*M*<sub>s</sub>8.1级地震发生之后(2015年8月 25日23:00),各测向分量总体趋势呈相对平稳状态。 2.2.2 最大、最小水平主应力变化分析

假设 a、c、b 三个测向相互夹角为 45°,并且 3 个测向上正应力(或正应力变化量)分别为  $\sigma_a$ 、 $\sigma_c$ 、  $\sigma_b$ ,最大、最小水平主应力分别为  $\sigma_{Hmax}$ 、 $\sigma_{hmin}$ ;  $\sigma_{Hmax}$ 与 b 测向的夹角为  $\theta$ (图 5),则由公式(1)可计算出  $\sigma_{Hmax}$ 、 $\sigma_{hmin}$ 和  $\theta$ :

$$\sigma_{\rm Hmax} = \frac{\sigma_{\rm a} + \sigma_{\rm c}}{2} + \sqrt{\frac{(\sigma_{\rm b} - \sigma_{\rm a})^2 + (\sigma_{\rm b} - \sigma_{\rm c})^2}{2}}$$
$$\sigma_{\rm hmin} = \frac{\sigma_{\rm a} + \sigma_{\rm c}}{2} - \sqrt{\frac{(\sigma_{\rm b} - \sigma_{\rm a})^2 + (\sigma_{\rm b} - \sigma_{\rm c})^2}{2}}$$
$$\tan 2\theta = \frac{\sigma_{\rm a} - 2\sigma_{\rm b} + \sigma_{\rm c}}{\sigma_{\rm a} - \sigma_{\rm c}} \tag{1}$$

建立直角坐标系 xoy, 其中 x 正方向与正东方向



图 5 4 个测向 (夹角 45°) 正应力与最大水平主应 力示意图

Fig. 5 Diagram between normal stresses of four directions (angle of 45 degrees) and maximum horizontal principal stress

一致, y 正方向与正北方向一致, 根据二维平面应力 状态下应力张量坐标转换关系, 由公式(1)获得的 主应力变化量经计算得到其在坐标系 xoy 下的平面 应力分量变化。而林芝八一钻孔地应力实时监测 台站采用的是四分量压磁电感地应力监测探头, 故 基于四分量任意 3 个测向上的正应力变化量, 即 ①(测向 a、c、b), ②(测向 b、d、a), ③(测向 c、b、 d)和④(测向 d、a、c), 通过计算可以得到二维平面 应力张量 σ<sub>xx</sub>、σ<sub>yy</sub>、τ<sub>xy</sub> 及 σ<sub>Hmax</sub>、σ<sub>hmin</sub> 和 θ, 其中 τ 为剪应 力(张鹏等, 2017b)。

### 2.3 原位地应力实时监测在强构造活动区深埋地 下工程地质安全评价中的作用和意义

2023年在喜马拉雅构造带北侧,某铁路处于完整岩体中的深埋隧道路基在铁路运营多年后发生滞后岩体变形破坏,附近地应力实时监测显示北东方向有长期缓慢积累增大趋势,而北西方向有长期缓慢松弛减小趋势(图6),由此也引起工程建设者们对强构造活动区深埋地下工程长期安全运维风险的反思。该深埋隧道在建设时其强度可以抵抗高地应力作用而不被破坏,但随着工程区地应力在北东方向有长期缓慢积累增大(图6),当高地应力 超过隧道设计强度时将发生滞后型变形破坏。中国青藏高原强构造活动区大量深埋地下工程均遇



红色箭头点线表示北东方向地应力呈长期缓慢积累增大趋势:绿色箭头点线表示北西方向地应力呈长期缓慢松弛减小趋势

图 6 西藏山南地区乃东县地应力实时监测结果

Fig. 6 In-situ stress real-time monitoring results in Naidong County, Shannan region, Tibet

The red arrow dotted line indicates a long-term slow and cumulative increase trend of the NE in-situ stress, while the green arrow dotted line indicates a long-term slow and relaxed decrease trend of the NW in-situ stress.

速率和趋势,按工程使用周期,在工程设计时考虑 预防变形破坏强度预留阈值设置,就可以避免类似 工程病害发生。

目前,在重大工程规划建设之前,尤其是在强 构造活动区,为科学合理开展工程规划和确定相关 设计参数,一般在工程沿线和场址均开展深孔原位 地应力测量(王成虎等, 2009, 2011b, 2014; 张玉玺, 2021; 张重远等, 2022; 秦向辉等, 2023), 积累了丰富 的工程实践经验,但原位地应力实时监测几乎为空 白,仅有个别重大工程结合相关项目工作部署有原 位地应力实时监测(张鹏等, 2017b)。为此, 当大地 震或重大工程地质问题发生后,为揭示其原位地应 力状态变化和内动力机制,一般再进行原位地应力 测量(Liao et al., 2003; 郭啟良等, 2009; 张鹏等, 2017a)。虽然这种工作思路也可以达到研究目的和 解决相关问题,但不能动态揭示工程沿线和场址地 应力大小的相对变化趋势和演化过程,无法预测未 来重大工程地质问题发生的可能性和危险程度,并 且需要付出更多的人力、物力、财力和时间,造成 更大的社会和经济影响。2022年1月8日青海门 源 Ms6.9级地震诱发兰新客专大梁隧道损毁及其修 复过程就是一个典型案例(张玉芳等, 2023),由于 考虑社会和经济效益,大梁隧道很快完成了隧道应 力应变等监测,并修复通车,但是在大梁隧道损毁 修复过程中,该构造部位没有进行原位地应力实时 监测,在缺少应力应变积累速率量化数据的情况 下,将很难科学合理地考虑结构和强度设计参数、 预防变形破坏应力应变预留阈值等。因此,在强构 造活动区,开展原位地应力实时监测对于深埋地下 工程地质安全评价具有重要作用和意义。

3 建议

# 3.1 强构造活动区深埋地下工程原位地应力测量 的建议

在上述研究工作的基础上,建议强构造活动区 深埋地下工程原位地应力测量在以下方面进行实 践与探索。一是目前强构造活动区深埋地下工程 原位地应力测点一般沿工程规划线路最大埋深段 正上方山峰、深切峡谷段谷底、断裂带两盘等进行 部署(张重远等,2022;秦向辉等,2023),工程实践证 明无疑是必要的,但在最大埋深段正上方山峰进行 原位地应力测量钻探施工和测试难度极大、费用极 高,青藏高原某铁路宝灵山深孔地应力测量证明最 大埋深段地应力不是最大的,地应力集中现象不显 著,基本属于青藏高原正常地应力梯度,建议可以 考虑适当调整地应力测点位置而减小施工和测试 难度、节约成本;二是除深切峡谷段谷底之外,高山 山坡坡脚(尤其是反向坡)距坡面一定水平深度往 往也是地应力易集中的位置(谭成轩等, 2008; 孙炜 锋等,2021),很容易诱发岩爆、大变形等工程地质 问题,需要高度关注;三是开展钻孔饼状岩芯发育 高程、岩性、饼厚度、密度、饼状岩芯发育段长度、 饼状岩芯侧面和端面断口特征等统计分析,研究饼 状岩芯发育与构造活动强度、构造地貌演化过程、 岩石强度、应力状态、钻探工艺等相互关系;四是 加强地应力测量研究成果对深埋地下工程规划设 计的应用指导和实践,比如:傍山深埋地下工程应 避开应力卸荷区和应力集中区,选择原始应力区; 深埋地下工程除需关注饼状岩芯发育深度范围,更 需关注饼状岩芯发育深度范围之下未来会形成但 仍未形成饼状岩芯的深度范围,当新的饼状岩芯形 成时往往会导致深埋地下工程变形破坏。

# 3.2 强构造活动区深埋地下工程原位地应力实时 监测的建议

地应力测量和实时监测实践证明,当大地震发 生后,无论是近场还是远场(尤其是强构造活动区) 的地应力状态及其构造应力场往往会发生显著变 化(Liao et al., 2003; 郭啟良等, 2009; Lin et al., 2011, 2013; 谭成轩等, 2015; 张鹏等, 2017b), 直接影响区 域地壳稳定性、深埋地下工程地质安全等。在初始 绝对地应力测量的基础上,通过原位地应力实时监 测和解析计算分析,可以动态揭示大地震发生后近 场或远场地应力大小的相对变化趋势和演化过程, 并可计算地应力实时监测期间不同时域地应力状 态绝对值(丰成君等, 2014; 张鹏等, 2017b), 快速实 现以下评价分析:一是配合岩石力学和构造应力场 综合分析、数值模拟等方法,及时量化评价区域地 壳稳定性、深埋地下工程地质安全风险等;二是依 据地应力实时监测获取的地应力动态变化速率,为 深埋地下工程损毁修复提供量化设计地应力参数 及预防变形破坏应力应变预留阈值;三是运用岩石 力学摩尔库伦强度理论,分析断层活动危险性,开 展地震地质研究(范玉璐等, 2020, 2021; Fan et al., 2022a, 2022b)

# 4 结论

文章通过对原位地应力测量和地应力实时监测在强构造活动区深埋地下工程应用的分析和思考,获得主要结论如下。

(1)在强构造活动区,深埋地下工程不同位置 应采用不同的地应力设计参数,避免因地应力设计 参数偏大或偏小造成工程建设浪费或工程病害。

(2)在强构造活动区,饼状密度与地应力测量 大小成反比;在饼状岩芯发育深度范围之下,未来 会形成、但仍未形成饼状岩芯的深度范围往往地应 力最高、应力最为集中,深埋地下工程应避免该深 度范围。

(3)原位地应力实时监测可以动态揭示某一构造部位地应力大小的相对变化趋势和演化过程,并可计算地应力实时监测期间不同时域地应力状态绝对值;当大地震或重大工程地质问题发生后,不用开展新的地应力绝对测量,就可以快速评价区域地壳稳定性、深埋地下工程地质安全风险等,为深埋地下工程损毁修复提供量化设计地应力参数及预防变形破坏应力应变预留阈值,评价断层活动危险性。

#### References

- BAI S W, LI G Y, 1982. Research on stress field around dam area of Ertan hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1(1): 45-56. (in Chinese with English abstract)
- CHEN C J, LIU Z X, LIU J Y, 2016. Study on deformation and failure characteristics of surrounding rock of Jinping Class I hydropower station under high geostress conditions[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 32(3): 5-10, 64. (in Chinese)
- CHENG H, ZHANG G X, LIAO J X, et al., 2020. Analysis on characteristics and influencing factors of valley deformation of high arch dam[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 51(5): 65-70. (in Chinese with English abstract)
- FAN Y L, TAN C X, ZHANG P, et al., 2020. A study of current in-situ stress state and its influence on tectonic stability in the Xiongan New Area[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(4): 481-491. (in Chinese with English abstract)
- FAN Y L, ZHANG P, GAO Y, et al., 2021. Study of in-situ stress state and tectonic stability of Liyang seismic area in the Yangtze River Delta region[J]. Progress in Geophysics, 36(5): 1842-1852. (in Chinese with English abstract)

FAN Y L, FENG C J, ZHANG P, et al., 2022a. Impact of Tohoku-Oki

3.11 M9.0 earthquake on the fault slip potential of the active Quaternary faults in Beijing city: new insights from in situ stress monitoring data[J]. Sensors, 22(13); 4888.

- FAN Y L, ZHANG P, FENG C J, et al., 2022b. Analysis of fault slip potential of active faults in Tangshan seismic region after the Tohoku-Oki 3.11 M9.0 earthquake based on in situ stress monitoring data[J]. Frontiers in Earth Science, 10: 970595.
- FENG C J, ZHANG P, SUN W F, et al., 2014. The application of in situ stress measuring and real-time monitoring results to analyzing the fault activity hazard at Ming tombs borehole in Changping District, Beijing[J]. Acta Geoscientica Sinica, 35(3): 345-354. (in Chinese with English abstract)
- GAO K J, ZHAO W G, WANG R K, et al., 2018. Influence of valley contraction on deformation and stress state of high arch dam[J]. Science Technology and Engineering, 18(16): 92-100. (in Chinese with English abstract)
- GUO C B, ZHANG Y S, JIANG L W, et al., 2017. Discussion on the environmental and engineering geological problems along the Sichuan-Tibet railway and its adjacent area[J]. Geoscience, 31(5): 877-889. (in Chinese with English abstract)
- GUO Q L, WU F Q, QIAN W P, et al., 2006. Study on relationship between deformation of surrounding rock and in-situ stress in Wushaoling deepburied railway tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 25(11): 2194-2199. (in Chinese with English abstract)
- GUO Q L, WANG C H, MA H S, et al., 2009. In-situ hydro-fracture stress measurement before and after the Wenchuan M<sub>s</sub>8.0 earthquake of China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 52(5): 1395-1401. (in Chinese with English abstract)
- HOEK E, BROWN E T, 1997. Practical estimates of rock mass strength[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 34(8): 1165-1186.
- HOEK E, MARINOS P, BENISSI M, 1998. Applicability of the geological strength index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens schist formation[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 57(2): 151-160.
- HUANG S L, DING X L, LIAO C G, et al., 2014. Initial 3D geostress field recognition of high geostress field at deep valley region and considerations on underground powerhouse layout[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 33(11): 2210-2224. (in Chinese with English abstract)
- LI G L, LI N, DING Y J, 2020. Research on key prevention and control technologies for large-deformation high geostress soft rock tunnel[J]. China Railway(12): 69-73. (in Chinese with English abstract)
- LI H, AN Q M, WANG H Z, et al., 2006. Study on in-situ stress measurement in V-shaped river valley[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 25(S1): 3069-3073. (in Chinese with English abstract)

LIANG K, HE Z T, JIANG W L, et al., 2022. Surface rupture characteristics

of the Menyuan  $M_s6.9$  earthquake on January 8, 2022, Qinghai Province[J]. Seismology and Geology, 44(1): 256-278. (in Chinese with English abstract)

- LIAO C T, SHI Z X, 1983. In-situ stress measurements and their application to engineering design in the Jinchuan mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2(1): 103-112. (in Chinese with English abstract)
- LIAO C T, ZHANG C S, WU M L, et al., 2003. Stress change near the Kunlun fault before and after the Ms 8.1 Kunlun earthquake[J]. Geophysical Research Letters, 30(20): 2027.
- LIN W R, SAITO S, SANADA Y, et al., 2011. Principal horizontal stress orientations prior to the 2011 M<sub>w</sub> 9.0 Tohoku-Oki, Japan, earthquake in its source area[J]. Geophysical Research Letters, 38(7): L00G10.
- LIN W R, CONIN M, MOORE J C, et al., 2013. Stress state in the largest displacement area of the 2011 Tohoku-Oki earthquake[J]. Science, 339(6120): 687-690.
- LIU G, ZHANG F Y, LI X Z, et al., 2005. Research on large deformation and its mechanism of Muzhailing tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 24(S2): 5521-5526. (in Chinese with English abstract)
- MARTIN C D, KAISER P K, CHRISTIANSSON R, 2003. Stress, instability and design of underground excavations[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40(7-8): 1027-1047.
- PENG J B, CUI P, ZHUANG J Q, 2020. Challenges to engineering geology of Sichuan-Tibet railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 39(12): 2377-2389. (in Chinese with English abstract)
- QIN X H, TAN C X, SUN J Z, et al., 2012. Experimental study of relation between in-situ crustal stress and rock elastic modulus[J]. Rock and Soil Mechanics, 33(6): 1689-1695. (in Chinese with English abstract)
- QIN X H, CHEN Q C, MENG W, et al., 2023. Determination of the current in-situ stress field of the Tongmai-Bomi section in the northern margin of the eastern Himalayan syntaxis[J]. Acta Geologica Sinica, 97(7): 2126-2140. (in Chinese with English abstract)
- QIU Z H, 2010. A review of component borehole observation of stress-strain in China[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 30(5): 42-47. (in Chinese with English abstract)
- SHEOREY P R, 1994. A theory for *in situ* stresses in isotropic and transverseley isotropic rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 31(1): 23-34.
- SONG S W, FENG X M, LIAO C G, et al., 2016. Measures for controlling large deformations of underground caverns under high in-situ stress condition-A case study of Jinping I hydropower station[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 8(5); 605-618.
- SUN W F, GUO C B, ZHANG G Z, et al., 2021. In-situ stress measurement of Guodashan tunnel horizontal borehole in West Sichuan and the engineering significance[J]. Geoscience, 35(1): 126-136. (in Chinese with English abstract)

- SUN X M, ZHAO C W, TAO Z G, et al., 2021. Failure mechanism and control technology of large deformation for Muzhailing Tunnel in stratified rock masses[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 80(6): 4731-4750.
- SUN Y C, XIN M G, WANG Y, et al, 2022. Measurement and Regression Analysis of the Tunnel Geostress of a Heavy Haul Railway[J]. Railway Investigation and Surveying, 48(1): 16-20, 44. (in Chinese with English abstract)
- TAN C X, SUN Y, WANG L J, 2003. Some problems of in-situ crustal stress measurements[J]. Journal of Geomechanics, 9(3): 275-280, 260. (in Chinese with English abstract)
- TAN C X, WANG R J, Sun Y, et al., 2004. Numerical modelling estimation of the 'tectonic stress plane' (TSP) beneath topography with quasi-U-shaped valleys[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41(2): 303-310.
- TAN C X, SHI L, SUN W F, et al., 2004. Research on tectonic stress plane[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 23(23): 3970-3978. (in Chinese with English abstract)
- TAN C X, SUN W F, SUN Y, et al., 2006. A consideration on in-situ crustal stress measuring and its underground engineering application[J]. Acta Geologica Sinica, 80(10): 1627-1632. (in Chinese with English abstract)
- TAN C X, ZHANG P, ZHEN H H, et al., 2008. An analysis on in-situ crustal stress measurements and major engineering geology issues at the dam site area of Jinping first stage hydropower station[J]. Journal of Engineering Geology, 16(2): 162-168. (in Chinese with English abstract)
- TAN C X, ZHANG P, FENG C J, et al., 2014. An approach to deep borehole crustal stress measuring and real-time monitoring and its application in seismogeology research in capital Beijing region[J]. Acta Geologica Sinica, 88(8): 1436-1452. (in Chinese with English abstract)
- TAN C X, HU Q Y, ZHANG P, et al., 2015. Present tectonic stress adjustment process before and after Japan M<sub>w</sub>9.0 earthquake in North and Northeast China and its research significance[J]. Earth Science Frontiers, 22(1): 345-359. (in Chinese with English abstract)
- TAN C X, ZHANG P, LU S L, et al., 2019. Significance and role of in-situ crustal stress measuring and real-time monitoring in earthquake prediction research[J]. Journal of Geomechanics, 25(5): 866-876. (in Chinese with English abstract)
- TAN C X, YANG W M, ZHANG C S, et al., 2020. Study on active structure and regional crustal stability in Beijing-Tianjin-Hebei Collaborative Development Area[M]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)
- TANG H, LI T B, MENG L B, et al. , 2015. Back analysis of ground-stress field for Erlangshan deep buried tunnel on Sichuan-Tibet railway[J]. Railway Engineering(3): 65-69. (in Chinese with English abstract)
- WANG C H, GUO Q L, DING L F, et al., 2009. High in-situ stress criteria for engineering area and a case analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 30(8): 2359-2364. (in Chinese with English abstract)

- WANG C H, GUO Q L, JIA L, 2011a. Theoretical analysis of high stress criterion based on the Hoek-Brown criterion[J]. Rock and Soil Mechanics, 32(11): 3325-3332. (in Chinese with English abstract)
- WANG C H, ZHANG Y S, GUO Q L et al., 2011b. New integrated analysis method to analyze stress regime of engineering area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 33(10): 1562-1568. (in Chinese with English abstract)
- WANG C H, XING B R, CHEN Y Q, 2014. Prediction of stress field of superlong deep-buried tunnel area and case analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 36(5): 955-960. (in Chinese with English abstract)
- WANG C H, GAO G Y, YANG S X et al., 2019. Analysis and prediction of stress fields of Sichuan—Tibet railway area based on contemporary tectonic stress field zoning in western China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 38(11): 2242-2253. (in Chinese with English abstract)
- WANG D, LI T B, JIANG L W, et al., 2017. Analysis of the stress characteristics and rock burst of ultra deep buried tunnel in Sichuan-Tibet railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 34(4): 46-50. (in Chinese with English abstract)
- WANG L J, PAN L Z, LIAO C T, et al., 1991. In-situ stress measurement and its application in engineering[M]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)
- WANG Q W, JU N P, HUANG J, et al., 2016. Regression analysis of initial geostress field of Sangzhuling super-long tunnel[J]. Science Technology and Engineering, 16(25): 137-143. (in Chinese with English abstract)
- WANG Q W, JU N P, DU L L, et al., 2018. Three dimensional inverse analysis of geostress field in the Sangri –Jiacha section of Lasa –Linzhi railway[J]. Rock and Soil Mechanics, 39(4): 1450-1462. (in Chinese with English abstract)
- WEI P , REN X H, JIAO H X, et al, 2022. Study on optimization inversion of initial in-situ stress field within slate area[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 53(1): 190-198. (in Chinese with English abstract)
- WU M L, MA Y, LIAO C T, et al., 2008. Study on recent state of stress in depth 1 000 m of Jinchuan mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 27(S2): 3785-3790. (in Chinese with English abstract)
- XU A, QUAN X J, WANG B, et al, 2022. Inverse Analysis of the Initial Stress Field in High Ground Stress Soft and Hard Rock Tunnels[J]. Railway Standard Design, 66(8): 137-142. (in Chinese with English abstract)
- XUE S Y, XIE H, YUAN D Y, et al., 2022. Seismic disaster characteristics of the surface rupture of Menyuan *M*<sub>s</sub>6.9 earthquake in 2022[J]. China Earthquake Engineering Journal, 44(2): 458-467. (in Chinese with English abstract)

XUE Y G, KONG F M, YANG W M, et al., 2020. Main unfavorable geolo-

gical conditions and engineering geological problems along Sichuan-Tibet railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 39(3): 445-468. (in Chinese with English abstract)

- YAN J, HE C, WANG B, et al., 2019. Inoculation and characters of rockbursts in extra-long and deep-lying tunnels located on Yarlung Zangbo suture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 38(4): 769-781. (in Chinese with English abstract)
- YANG J X, HUANG S L, LIU Z X, 2019. Relationship between deformation failure and strength-to-stress ratio of surrounding rock of large-scale underground hard rock caverns under high geo-stress[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 36(2): 63-70. (in Chinese with English abstract)
- YANG Q, PAN Y W, CHENG L, et al., 2015. Mechanism of valley deformation of high arch dam and effective stress principle for unsaturated fractured rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 34(11): 2258-2269. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG B, CHENG H H, SHI Y L, 2015. Calculation of the co-seismic effect of M<sub>8</sub>8.1 earthquake, April 25, 2015, Nepal[J]. Chinese Journal of Geophysics, 58(5): 1794-1803. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG C Y, WU M L, LIAO C T, 2013. In-situ stress measurement and study of stress state characteristics of Jinchuan No. 3 mine[J]. Rock and Soil Mechanics, 34(11): 3254-3260. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG C Y, DU S H, HE M C, et al., 2022. Characteristics of in-situ stresses on the western margin of the eastern Himalayan syntaxis and its influence on stability of tunnel surrounding rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 41(5): 954-967. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG G Z, JIA Z Q, FENG J, et al., 2022. Definition for dual-index high geostress and classification standard for rock burst and large deformation in railway tunnels[J]. Journal of Railway Engineering Society, 39(8): 53-58, 65. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG P, SUN Z G, WANG Q N, et al., 2017a. In-situ stress measurement and stability analysis of surrounding rocks in the north section of deep buried tunnel in Muzhailing[J]. Journal of Geomechanics, 23(6): 893-903. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG P, QU Y M, GUO C B, et al., 2017b. Analysis of in-situ stress measurement and real-time monitoring results in Nyching of Tibetan plateau and its response to Nepal *M<sub>s</sub>*8.1 earthquake[J]. Geoscience, 31(5): 900-910. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG W X, ZHANG J G, TANG S W, et al., 2013. Ground stress characteristics and their influence on tunnel deformation: case study on Muzhailing tunnel[J]. Tunnel Construction, 33(2): 116-121. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y, XIAO P X, DING X L, et al., 2012. Study of deformation and failure characteristics for surrounding rocks of underground powerhouse caverns under high geostress condition and countermeasures[J]. Chinese

Journal of Rock Mechanics and Engineering, 31(2): 228-244. (in Chinese with English abstract)

- ZHANG Y X. 2021. Characteristics of current in-situ stress field about Sejila mountain traffic corridor[J]. Journal of Engineering Geology, 29(2): 394-403. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y F, YUAN K, ZHOU W J, et al., 2023. Study on structural deformation characteristics and surface crack distribution of girder tunnel across Lenglongling fault caused by Menyuan earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 42(5): 1055-1069. (in Chinese with English abstract)
- ZHU S, ZHAN W, LIANG H B, et al., 2022. Coseismic deformation characteristics before the Menyuan, Qinghai M 6.9 earthquake from GNSS observation data[J]. China Earthquake Engineering Journal, 44(2): 370-379. (in Chinese with English abstract)
- ZOU X M, ZHONG J F, CHEN Z, et al, 2022. Numerical simulation methodbased study on causation of sudden change of seismicity after impoundment of Xiluodu Reservoir[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 53(10): 186-197.

#### 附中文参考文献

- 白世伟,李光煜,1982. 二滩水电站坝区岩体应力场研究[J]. 岩石力 学与工程学报,1(1):45-56.
- 陈长江,刘忠绪,刘建友,2016.高地应力条件下锦屏一级水电站地 下厂房围岩变形破坏特征研究[J].水电站设计,32(3):5-10,64.
- 程恒,张国新,廖建新,等,2020.高拱坝谷幅变形特征及影响因素分析[J].水利水电技术,51(5):65-70.
- 范玉璐,谭成轩,张鹏,等,2020. 雄安新区现今地应力环境及其对构造稳定性影响研究[J]. 地球学报,41(4):481-491.
- 范玉璐,张鹏,高研,等,2021.长三角溧阳震区地应力环境及构造稳 定性分析[J].地球物理学进展,36(2):1842-1852.
- 丰成君,张鹏,孙炜锋,等,2014.北京昌平十三陵钻孔地应力测量与 实时监测在断层活动危险性分析中的应用探讨[J].地球学报, 35(3):345-354.
- 高克静,赵文光,王仁坤,等,2018.谷幅收缩对高拱坝变形及应力状态的影响[J].科学技术与工程,18(16):92-100.
- 郭长宝,张永双,蒋良文,等,2017. 川藏铁路沿线及邻区环境工程地 质问题概论[J]. 现代地质,31(5): 877-889.
- 郭啟良,伍法权,钱卫平,等,2006.乌鞘岭长大深埋隧道围岩变形与 地应力关系的研究[J].岩石力学与工程学报,25(11):2194-2199.
- 郭啟良,王成虎,马洪生,等,2009. 汶川 M,8.0 级大震前后的水压致 裂原地应力测量[J]. 地球物理学报,52(5):1395-1401.
- 黄书岭,丁秀丽,廖成刚,等,2014.深切河谷区水电站厂址初始应力 场规律研究及对地下厂房布置的思考[J].岩石力学与工程学 报,33(11):2210-2224.
- 李国良,李宁,丁彦杰,2020.高地应力软岩大变形隧道防控关键技 术研究[J].中国铁路(12):69-73.
- 李宏,安其美,王海忠,等,2006.V型河谷区原地应力测量研究[J]. 岩石力学与工程学报,25(S1):3069-3073.

- 梁宽,何仲太,姜文亮,等,2022.2022年1月8日青海门源 M<sub>8</sub>6.9 地震的同震地表破裂特征 [J]. 地震地质,44(1):256-278.
- 廖椿庭,施兆贤,1983.金川矿区原岩应力实测及在矿山设计中的应 用[J].岩石力学与工程学报,2(1):103-112.
- 刘高,张帆宇,李新召,等,2005.木寨岭隧道大变形特征及机理分析 [J].岩石力学与工程学报,24(S2):5521-5526.
- 彭建兵,崔鹏,庄建琦,2020. 川藏铁路对工程地质提出的挑战[J]. 岩 石力学与工程学报,39(12):2377-2389.
- 秦向辉,谭成轩,孙进忠,等,2012.地应力与岩石弹性模量关系试验 研究[J].岩土力学,33(6):1689-1695.
- 秦向辉,陈群策,孟文,等,2023.喜马拉雅东构造结北缘通麦-波密段 现今地应力场特征研究[J].地质学报,97(7):2126-2140.
- 邱泽华,2010.中国分量钻孔地应力-应变观测发展重要事件回顾 [J].大地测量与地球动力学,30(5):42-47.
- 孙炜锋,郭长宝,张广泽,等,2021.川西郭达山隧道水平孔地应力测量与工程意义[J].现代地质,35(1):126-136.
- 孙元春,辛明高,汪洋,等,2022.某重载铁路隧道地应力测试与反演 分析[J].铁道勘察,48(1):16-20,44.
- 谭成轩, 孙叶, 王连捷, 2003. 地应力测量值得注意的若干问题[J]. 地质力学学报, 9(3): 275-280,260.
- 谭成轩,石玲,孙炜锋,等,2004.构造应力面研究[J].岩石力学与工 程学报,23(23):3970-3978.
- 谭成轩,孙炜锋,孙叶,等,2006.地应力测量及其地下工程应用的思考[J].地质学报,80(10):1627-1632.
- 谭成轩,张鹏,郑汉淮,等,2008.雅砻江锦屏一级水电站坝址区实测 地应力与重大工程地质问题分析[J].工程地质学报,16(2): 162-168.
- 谭成轩,张鹏,丰成君,等,2014.探索首都圈地区深孔地应力测量与 实时监测及其在地震地质研究中应用[J].地质学报,88(8): 1436-1452.
- 谭成轩,胡秋韵,张鹏,等,2015.日本 M<sub>w</sub>9.0级大地震前后华北和东 北地区现今构造应力作用调整过程与研究意义探讨[J].地学前 缘,22(1):345-359.
- 谭成轩,张鹏,路士龙,等,2019.原位地应力测量与实时监测在地震 预报研究中的作用和意义[J].地质力学学报,25(5):866-876.
- 谭成轩,杨为民,张春山,等,2020.京津冀协同发展区活动构造与区域地壳稳定性研究 [M].北京:地质出版社.
- 唐浩,李天斌,孟陆波,等,2015. 川藏铁路二郎山深埋隧道的地应力 场反演分析 [J]. 铁道建筑 (3): 65-69.
- 王成虎, 郭啟良, 丁立丰, 等, 2009. 工程区高地应力判据研究及实例 分析[J]. 岩土力学, 30(8): 2359-2364.
- 王成虎, 郭啟良, 贾龙, 2011a. 基于 Hoek-Brown 强度准则的高应力判 据理论分析 [J]. 岩土力学, 32(11): 3325-3332.
- 王成虎,张彦山,郭啟良,等,2011b. 工程区地应力场的综合分析法 研究[J]. 岩土工程学报,33(10):1562-1568.
- 王成虎,邢博瑞,陈永前,2014.长大深埋隧道工程区地应力状态预测与实例分析[J].岩土工程学报,36(5):955-960.

- 王成虎,高桂云,杨树新,等,2019.基于中国西部构造应力分区的川藏铁路沿线地应力的状态分析与预估[J].岩石力学与工程学报,38(11):2242-2253.
- 王栋,李天斌,蒋良文,等,2017. 川藏铁路某超深埋隧道地应力特征 及岩爆分析[J].铁道工程学报,34(4):46-50.
- 王连捷, 潘立宙, 廖椿庭, 等, 1991. 地应力测量及其在工程中的应用 [M]. 北京: 地质出版社.
- 王庆武,巨能攀,黄健,等,2016.桑珠岭特长隧道初始地应力场反演 分析[J].科学技术与工程,16(25):137-143.
- 王庆武,巨能攀,杜玲丽,等,2018.拉林铁路桑日至加查段三维地应 力场反演分析[J].岩土力学,39(4):1450-1462.
- 魏鹏,任旭华,焦红星,等,2022.板岩区初始地应力场优化反演研究 [J].水利水电技术(中英文),53(1):190-198.
- 吴满路,马宇,廖椿庭,等,2008.金川二矿深部1000m中段地应力测 量及应力状态研究[J].岩石力学与工程学报,27(S2):3785-3790.
- 徐安,全晓娟,汪波,等,2022.高地应力软硬岩隧道初始应力场反演 分析[J].铁道标准设计,66(8):137-142.
- 薛善余,谢虹,袁道阳,等,2022.2022 门源 M<sub>8</sub>6.9 地震地表破裂带震 害特征调查 [J]. 地震工程学报,44(2):458-467.
- 薛翊国, 孔凡猛, 杨为民, 等, 2020. 川藏铁路沿线主要不良地质条件 与工程地质问题[J]. 岩石力学与工程学报, 39(3): 445-468.
- 严健,何川,汪波,等,2019.雅鲁藏布江缝合带深埋长大隧道群岩爆 孕育及特征[J].岩石力学与工程学报,38(4):769-781.
- 杨静熙,黄书岭,刘忠绪,2019.高地应力硬岩大型洞室群围岩变形 破坏与岩石强度应力比关系研究[J].长江科学院院报,36(2): 63-70.
- 杨强,潘元炜,程立,等,2015.高拱坝谷幅变形机制及非饱和裂隙岩 体有效应力原理研究[J].岩石力学与工程学报,34(11):2258-2269.

- 张贝,程惠红,石耀霖,2015.2015年4月25日尼泊尔 M<sub>8</sub>8.1大地震的 同震效应[J].地球物理学报,58(5):1794-1803.
- 张重远,吴满路,廖椿庭,2013.金川三矿地应力测量及应力状态特征研究[J].岩土力学,34(11):3254-3260.
- 张重远,杜世回,何满潮,等,2022.喜马拉雅东构造结西缘地应力特 征及其对隧道围岩稳定性的影响[J].岩石力学与工程学报, 41(5):954-967.
- 张广泽,贾哲强,冯君,等,2022.铁路隧道双指标高地应力界定及岩爆大变形分级标准[J].铁道工程学报,39(8):53-58,65.
- 张鹏,孙治国,王秋宁,等,2017a.木寨岭深埋隧道北段地应力测量 与围岩稳定性分析[J].地质力学学报,23(6):893-903.
- 张鹏,曲亚明,郭长宝,等,2017b.西藏林芝地应力测量监测与尼泊 尔 M<sub>8</sub>8.1级强震远场响应分析 [J].现代地质,31(5):900-910.
- 张文新,张建国,唐绍武,等,2013.木寨岭隧道地应力特征及对隧道 变形影响的研究[J].隧道建设,33(2):116-121.
- 张勇,肖平西,丁秀丽,等,2012.高地应力条件下地下厂房洞室群围 岩的变形破坏特征及对策研究[J].岩石力学与工程学报, 31(2):228-244.
- 张玉芳, 袁坤, 周文皎, 等, 2023. 门源地震对跨冷龙岭断层的大梁隧 道结构变形特征和地表裂缝分布规律研究[J]. 岩石力学与工程 学报, 42(5): 1055-1069.
- 张玉玺,2021. 色季拉山交通廊道现今地应力场特征研究[J]. 工程 地质学报,29(2): 394-403.
- 朱爽,占伟,梁洪宝,等,2022. 青海门源 6.9级 地震同震及震前 GNSS 变形特征分析[J]. 地震工程学报,44(2):370-379.
- 邹旭明,钟菊芳,陈竹,等,2022.基于数值模拟方法的溪洛渡水库蓄水后地震活动性突变原因分析[J].水利水电技术(中英文),53(10):186-197.