

西部水工程中的岩土工程问题

汪小刚¹, 邢义川¹, 赵剑明¹, 张文煊²

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100044; 2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026)

摘要: 围绕西部大开发和南水北调大西线中的水工程建设, 归纳提炼了 4 个最具代表性的岩土工程问题: 黄土、冻土等特殊土工程问题, 深埋长隧洞地质灾害和超前预报问题, 高土石坝变形稳定及抗震安全性问题, 深厚覆盖层工程特性和处理技术问题。就这些西部水工程中的岩土工程问题的研究现状、发展趋势和工作展望进行了探讨。

关键词: 中国西部; 岩土工程; 研究现状; 展望

中图分类号: TU44

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2007)08-1129-06

作者简介: 汪小刚(1965-), 男, 江苏如皋人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事岩土力学特性试验和数值分析方面的科研工作。E-mail: wangxg@iwhr.com。

Geotechnical engineering problems associated with construction of water resources projects in western China

WANG Xiao-gang¹, XING Yi-chuan¹, ZHAO Jian-ming¹, ZHANG Wen-xuan²

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China; 2. University of Science and Technology of

China, Hefei 230026, China)

Abstract: In the water resources projects of the west route of South-to-North Water Transfer Project associated with the development of Chinese western regions, four most representative problems in the field of geotechnical engineering were put forward, including engineering problems of loess, frozen soils and other special soils, geological disasters of deep-buried long tunnels and their forecast problems, safety problems of deformation, stability and earthquake resistance of high earth-rock dams, and engineering problems of deep alluvial layers and their treatment technology. The current research status, development trends and future prospects of these geotechnical engineering problems encountered in the construction of water resources projects in the western region of China were discussed.

Key words: western China; geotechnical engineering problem; current research status; prospect

0 引言

水资源是西部地区最具战略意义的资源, 合理开发和有效利用水资源在西部大开发和南水北调战略中具有极其重要的地位和意义。鉴于西部地区特殊的地域环境, 在如控制性的高坝大库、深埋长大输水隧洞、大型输水渠系等。水工程建设中必然要遇到黄土、冻土等特殊土工程问题、深埋长隧洞地质灾害和预报问题、高土石坝变形稳定及抗震安全性问题、深厚覆盖层工程特性和地基处理技术问题等。对这些问题的研究现状、发展趋势和工作展望, 分别简要论述如下。

1 西部建设中的黄土、冻土等特殊土工程问题

1.1 西部建设中的黄土工程问题

我国约有 64 万平方公里黄土区域, 是世界上分布最广泛的地区, 主要分布在西北、其华北平原及东

北的南部地区。我国西北地区黄土层最厚、最完整、分布连续且特征较为典型。西部大开发战略中的基础设施建设、生态环境改善都与黄土密切相关, 不可避免的会遇到各种黄土病害问题。黄土工程的病害问题主要是由于黄土遇水产生突然的、不均匀的和不可逆的湿陷变形所引起的, 常见的有: 黄土地基湿陷引起的建筑物的倾斜、裂缝, 过沟黄土高填方路基的不均匀沉降变形, 挖方渠道和黄土塬边坡的塌滑破坏, 土坝坝肩的湿陷裂缝与管涌, 因黄土湿陷产生负摩擦导致的桩基破坏, 黄土隧洞围岩的失稳等。

围绕黄土工程问题, 广大的岩土工程工作者进行了长达半个世纪的研究, 在黄土力学性质与工程应用方面取得了长足的进展。

(1) 试验研究方法方面, 从简单的侧限压缩、直

剪试验,发展到三轴压缩及更为复杂的应力条件试验;从室内实验、模型试验发展到大型的现场原位试验。

(2) 黄土强度特性研究方面,从单纯研究黄土的抗剪强度发展到增湿强度、断裂破坏强度及长期强度的研究。

(3) 黄土本构模型研究方面,从线弹性模型发展到非线性弹性模型、弹塑性模型及损伤力学模型。

(4) 黄土湿陷变形研究方面,从浸水饱和湿陷变形发展到增湿湿陷变形;从单调增湿变形发展到增湿、减湿和间歇性湿陷变形;从浸水湿陷量的研究发展到湿陷敏感性分析。

(5) 黄土动力特性研究方面,从动强度、动孔压的研究发展到震陷量和控制标准的研究。

(6) 黄土的结构特性研究方面,从黄土的微观性状研究、结构强度研究发展到量化结构参数的研究。

(7) 非饱和黄土特性研究方面,从非饱和黄土的孔隙压力特性研究发展到孔隙流体运动规律的研究,从非饱和黄土强度的研究发展到固结变形的研究。

(8) 黄土工程应用研究方面,由某一工程局部黄土的研究发展到黄土地区分布规律和经验关系的研究;由对黄土力学特性的描述发展到对黄土力学特性的改造和工程加固处理。

到目前为止,关于黄土性质的研究成果虽然很多,但从工程实际应用的角度出发,有许多问题依然未能很好的解决。随着科学技术的进步和我国国民经济建设的发展,尤其是西部大开发战略的实施,对黄土地区工程问题的研究提出了一系列新的课题,今后的发展趋势和研究重点应放在以下5个方面。

(1) 黄土的强度理论是黄土地区工程建设的关键理论问题。应进一步抓住黄土是长期地质作用过程的产物这一特征,探索和建立考虑黄土成因和沉积历史的强度理论,包括黄土的破坏条件、黄土的断裂破坏强度、黄土的长期强度等。

(2) 针对我国西北地区多处在干旱和半干旱地区的实际情况,继续深化非饱和黄土理论的研究,包括非饱和黄土的孔隙压力特性、非饱和黄土的应力变形特性以及非饱和黄土孔隙流体的运动规律;同时抓住黄土具有较强的结构性和水敏性的特点,研究和探索定量描述黄土结构性的有效参数和黄土浸水湿陷的内在机理,建立可综合考虑黄土湿度、密度、组构耦合效应的非饱和黄土的本构模型。

(3) 由于西部地区多位于高地震烈度区,应继续加强黄土动力特性的研究工作,进一步揭示黄土在地震作用下所产生的震陷甚至类似砂土液化现象的本质和机制,建立以考虑震陷为主的动力本构模型。

(4) 结合大量工程实例的分析和室内模拟试验,研究黄土与建筑物在增湿、地震条件下的相互作用性状,建立相应的数值模拟分析方法和安全评价准则,进一步完善黄土地区建筑物的设计方法和标准。

(5) 根据黄土的特性和本质规律,研究开发新的工程处理材料和工程处理措施。

1.2 西部建设中的冻土工程问题

我国是世界上第三大冻土面积分布国,永久性冻土与季节性冻土区域面积占国土总面积的60%以上,西北又是我国的主要寒区地带,随着我国西部大开发战略的实施,广阔的寒区工程建设中将会遇到越来越多的冻土工程问题,特别是南水北调西线工程将穿越高海拔、高寒地区(海拔4000m左右),这一问题更为突出。冻土在冻结时有较大的冻胀力,表现为冻胀性;融化时表现为融陷性。由冻到融,冻土的密度、可压缩性、强度指标均有成倍的变化。冻土物理特性的变化对相关建筑物会产生显著的影响。穿越寒区的南水北调西线工程建筑物有水库、引水枢纽、引水隧洞、明渠、抽水站和输水管道等。在季节冻土地区,引水隧洞、渠道等建筑物由于冻胀的作用会产生裂缝,斜歪以至倒塌;在多年冻土地区,则由于冰融化为水时体积会缩小使土体产生不均匀热融沉陷,造成建筑物的开裂和破坏。在多年冻土地区,输水隧洞,渠道,水坝这些建筑物在运行过程中,库岸原来的冻结残坡积层将融化,形成热融滑塌和冻融泥石流,洞线和渠线地下富冰区由于环境的改变发生溶化形成溶洞,也可能使永久冻土或多年冻土变为季节性冻土,产生新的地质灾害。

20世纪50年代以来,由于经济建设的需要,冻土力学特性的研究也在不断深入,大致可归纳为以下4个方面的研究^[7]:①即冻土的宏观力学和细观力学性质的研究;②正冻土中热质迁移理论研究;③正冻土中的水分迁移理论研究;④正冻土的水、热、力与变形耦合模型研究。同时,取得了许多丰硕的科研成果,这些成果在工程实际应用中产生了巨大的社会经济和生态效益,特别是在西藏铁路建设中发挥了重要作用。但是由于冻土的复杂性,上述研究仍存在不少问题没有得到解决。例如,在宏观力学和微观力学特性研究中,微观物理量与宏观力学量未建立确定的联系;冻土复杂的热传导系数的变化规律很难把握,热传导边界条件影响很难有效确定;建立的半经验模型、流体力学模型、刚冰模型和热力学模型都存在一定的局限性。

随着21世纪西部大开发战略的实施和南水北调工程的建设,西部特殊的气候和地域条件,冻土问题将日益突出,必须加以解决。笔者认为,下一阶段,

应在已有工作的基础上,继续深化以下6方面的研究工作。

(1) 选择多个典型地区开展冻土地温、季节溶化深度、下沉变形量、冻胀量的原位观测,为深入研究冻土问题提供基础和依据。

(2) 在不同初始状态、不同应力路径和不同应力水平条件下,开展冻土溶化全过程力学特性的室内试验研究,并采用一些新的试验手段(如离心模拟试验),在室内可控条件下,完整展现冻土熔化过程中,冻土和建筑物的相互作用性态以及应力变形和破坏特征。

(3) 通过对原位观测资料和室内试验成果的系统分析,深入研究冻土冻胀融沉的内在机制,在全面考虑冻土中骨架、冰、水、气四相介质与水、热、力及变形耦合作用的基础上,建立能综合反映冻土在复杂外部环境条件下部分溶化或全部溶化的本构模型。进一步考虑载荷因素(载荷大小、载荷形式、加荷速率等)和结构因素(结构物尺寸和形式、边界热力条件等),提出建筑物与冻土环境之间相互作用的数值模拟分析方法。

(4) 以大量的室内外试验资料和已有的研究成果为基础,提出考虑自然条件(土质因素、水分因素、温度因素)和工程条件(载荷因素、结构因素)的建筑物设计原则和设计方法。

(5) 针对工程需要,开发新型的抗冻保温材料和冻害防治技术。

(6) 根据水利工程特点,开展大型水利工程对冻土环境的影响研究。

2 南水北调西线工程深埋长隧洞地质灾害问题

深埋超长隧洞是南水北调西线工程面临的突出问题。其中:①一期工程引水线路有6条引水隧洞,达曲—贾曲线路中,最长隧洞洞段长73 km,洞段长度目前居世界第一,该段隧洞埋深一般在500~600 m之间;②二期和三期工程,隧洞需跨越大河流的分水岭,洞段长度将会更大,最大隧洞埋深可达数千米,属超埋深越岭长大隧洞。

南水北调西线引水隧洞工程具有以下明显的特点:①由于线路长,距离远,埋深大,跨越的地质单元多,遇到的地层构造及不良地质体多而复杂,不可避免的会遇到各种各样的地质灾害问题,如岩爆、涌水、塌方等;②由于引水隧洞常跨越大河流的分水岭,地形条件十分恶劣,加之埋深大,勘探钻孔十分困难,且有效率低,勘探洞也难于布置,地表地质界线又很

难直接延伸到隧洞线上,由此导致地质结构难以准确控制,地质界线更难于勘察准确,只能在施工期通过前方地质条件的超前勘测和超前预报来加以解决。

国内外学者在岩爆、涌水、塌方等地质灾害的发生条件,影响因素,破坏机理等方面开展过一些研究工作。如加拿大Laurentian大学的P K Kaiser教授等在岩爆的破坏机理及防治措施等方面进行了大量的研究工作;陆家佑等对岩爆的发生机理进行了初步探讨;孙广忠等结合实际工程对岩爆和涌水灾害的预报及防治方法等进行了经验性的总结。但磊等结合具体工程对隧洞开挖过程中不稳定块体的形成条件、判断模式等开展了较为深入的研究,初步建立了隧洞开挖过程中不稳定块体塌方的预报和防治系统,但这些成果还远远满足不了西部水工程建设的实际需求。

因此,结合西线工程的特点,开展一系列的超前研究,包括深埋隧洞地质灾害的成灾基础理论、施工期前方地质条件的超前勘测技术、施工期地质超前预报方法及地质灾害防治技术等方面的研究工作,为最大限度地减少西线工程施工期地质灾害的发生提供有力的工具,对于保证西线引水工程的顺利实施,具有十分重要的意义。

笔者认为当前这方面科研工作的主要目标就是要通过研究建立起一套集地质信息处理、工程地质条件预报、地质灾害预报、超前防治方案拟定等多项内容为一体的地质超前预报体系,并开发相应的视窗化深埋长隧洞施工期地质超前预报软件系统。具体研究内容如下。

(1) 针对深埋长隧洞施工期可能诱发地质灾害的影响因素、形成条件、发生规律、作用机理、破坏判据等开展研究,完善地质灾害超前预报的基础理论体系。包括:①岩体在卸荷状态下的应力应变和强度特性,二次应力场对围岩稳定性的影响;②塌方形成的影响因素及其关系,围岩失稳破坏的机制;③岩爆的形成机理、发生规律、强度划分、预测方法及破坏判据;④突水灾害的形成机制,突水预报方法、防突层的临界厚度及破坏判据。

(2) 为了给施工期地质超前预报提供有效的分析手段,需要对隧洞围岩稳定性的分析评价方法进行系统的研究。包括:①对目前工程中常用的围岩稳定性分析评价方法(如工程地质分析方法、数值计算方法、模型试验分析方法,以及现场测试分析方法等)进行系统的总结,研究各种分析评价方法的适用性,提出适应于深埋长隧洞地质条件特点的围岩稳定性分析评价方法;②开展围岩稳定性超前预报新方法的研究,主要思路是应用岩体三维节理裂隙网络模拟技术,建立地下隧洞开挖空间的三维裂隙网络模拟图,

预测施工掌子面前方的节理裂隙分布规律,运用该技术的自动搜索功能,分析预测隧洞开挖面及前方可能出现的不稳定块体。

(3) 通过对隧洞地质条件的遥感、物探、化探、钻探等多种勘测技术及围岩变形、应力等方面监测技术的分析对比,提出符合深埋长隧洞地质勘测工作特点的与各项勘测内容相适应的勘测及监测技术方法;研究地震波反射技术(TSP)、微地震技术、声发射技术、电磁波测地技术等,开发隧洞地质灾害无损检测预报新技术、新方法;总结并汲取以往工程中隧洞施工期地质灾害防治措施的成功经验,提出适应于深埋长隧洞施工期各种地质灾害的超前防治技术;并根据监测信息反馈进行支护设计新技术的研究。

(4) 在上述工作的基础上,以交互式程序开发技术为工具,以模块化功能设计为指导思想,研制具有地质信息管理、综合地质信息分析处理、工程地质条件预报、地质灾害成灾预报、超前防治方案拟定以及监测反馈支护设计等多项功能的地质超前预报软件系统,为深埋长隧洞在施工期,进行快速、及时、有效的地质超前预报提供有力的工具。

3 高土石坝变形稳定及抗震安全性问题

我国 80%的水能资源分布在西部,随着经济建设的迅速发展和西部大开发战略的实施,在我国西部高坝大库的建设也必将越来越多。在这些高坝大库中,高土石坝占了相当的比例,象紫坪铺、瀑布沟、大柳树、公伯峡、糯扎渡等高坝都是非常重要的骨干工程。南水北调的大西线工程中也建设多座 200~300 m 级的高坝,而土石坝为首选坝型。在西部建设的这些土石坝不仅坝高在世界上名列前茅,而且多位于强震区,地震频率高、强度大,变形稳定特别是抗震安全问题显得尤为突出。

近年来,随着我国高坝建设的发展,尤其是通过“七五”、“八五”、“九五”国家科技攻关,人们对高土石坝筑坝材料的工程力学特性以及应力变形和稳定分析评价开展了大量的研究工作,在坝料的工程力学特性和测试技术以及高土石坝应力变形和稳定分析理论方面都取得了一系列的研究成果,但随着工程建设的发展,还需要对坝料在高应力和复杂应力条件下的应力变形特性、不同坝料间的接触面特性、特别是高土石坝的长期变形特性、预测方法及其对大坝稳定性和安全性的影响等进行深入的研究工作。

在高土石坝抗震研究方面,由于目前对强震作用下结构及筑坝材料的非线性问题的认识尚不深入,非线性动力本构模型、库水-坝体-地基系统的动力相

互作用、多耦合效应、非线性求解方法等方面的理论尚未成熟,加之缺少更多震害实例的对比分析,使得目前很难通过理论分析和数值计算得到地震作用下高坝的真实动力响应,难以搞清在地震作用下结构是如何破坏的,即高坝地震灾害机理不清楚,从而不能够很好地对地震作用下高坝的抗震安全性进行准确评价,严重影响了高坝大库抗震设计的可靠性、经济性和科学性,制约了高坝大库建设的发展。

围绕这方面的问题,下一阶段的重点研究工作应放在以下 4 个方面。

(1) 根据我国高土石坝坝料的使用情况,选择有代表性的坝料,在大型高压蠕变试验仪上进行坝料长期变形特性的试验研究,并结合现场已有观测资料的总结分析,建立能描述坝料长期变形特点的计算模型,提出实用的高土石坝长期变形的预测分析理论和方法。同时进一步结合室内坝料试验、离心模型试验、现场测试及反分析技术等,研究高应力和复杂应力条件下的坝料工程性质,建立合理完善的高土石坝应力变形和稳定分析方法。

(2) 通过试验和理论分析,重点研究动应力条件下的非线性本构模型、孔压计算模式,残余变形计算模式、地震动输入、库水-坝体-地基系统的动力相互作用,固体-流体、线性-损伤(非线性)、连续-离散等的多耦合效应以及高精度的数值模拟和非线性计算方法等,建立高土石坝多耦合三维非线性地震反应分析及坝体抗震稳定分析的理论和方法,并通过震害实例分析和动力模型试验对分析方法进行验证和改进。

(3) 在对典型震害进行深入分析和研究的基础上,通过室内试验(包括动力模型试验)和现场测试等,重点研究坝料的非线性动力特性、结构的非线性地震反应及其动力损伤和破坏特征。研究不同场地类别、地震动参数、坝型、坝料特性等基本控制参数与土石坝地震反应和抗震安全性的各主要指标的相互关系,以及上述基本控制参数和地震反应指标与坝体主要震害形式之间的内在联系,进一步揭示高土石坝在地震作用下的灾害机理,建立高土石坝地震安全评价与震害预测的基本理论、方法和标准。

(4) 根据已有的工程实践经验,利用相关的坝料动力特性资料和地震反应分析成果,对各种抗震方法和工程抗震措施进行系统的归纳和总结,研究其针对性、可靠性、经济性,并根据结构的破坏特征和工程措施的作用机理,提出合理的高土石坝抗震设计的基本理论和方法。

4 深厚覆盖层工程特性及其处理技术问题

鉴于我国西部地区的地域特点,许多待建或在建的水利电力枢纽将不可避免地处于深厚覆盖层上,且多处于高地震烈度区,有些工程覆盖层甚至深达几百米,地震烈度在9度以上。在如此高的地震烈度区和如此深的覆盖层上,修建高坝,目前尚无成熟的工程经验可供借鉴,许多关键性的工程技术问题需要研究解决。

对于深厚覆盖层工程特性及其处理技术的研究,历来是水电工程界广泛关注的问题。在覆盖层工程特性研究方面,我国过去主要侧重于室内试验研究,随着覆盖层厚度的加大,勘探和取样难度越来越大,原位结构性对土料的静、动力特性的影响也愈加显著,迫切需要发展更加简便实用的深厚覆盖层的现场勘测技术,并建立现场测试和室内试验联合确定材料工程力学特性参数的方法。

在覆盖层与坝体、防渗体静动力相互作用工作性状的分析方法方面,目前国内外主要发展了以等效线性模式为基础的分析方法和程序。但是,对土料,特别是高应力、复杂应力条件下的粗粒土,在地震动力作用下的应力-应变关系、剪胀(或剪缩)特性及永久变形特性的研究还很不够,有必要进一步完善已有的分析方法,同时开发能够考虑上述特性的非线性本构模型、计算方法和程序。有关计算分析中地震输入机制,目前的计算多以均匀场输入为基础,很少考虑行波的影响。对于覆盖层深厚、开阔的坝址,其影响将会十分突出,必须予以考虑。

在深厚覆盖层以及覆盖层与坝体、防渗体静动力相互作用安全性状的评价方法和控制标准方面,目前大多以应力和强度稳定性作为依据,而以变形及变形协调指标作为评价标准的则较少见到,对深厚覆盖层而言,以变形作为安全评价依据和控制标准是十分必要的。

国外对深厚覆盖层的处理多采用挖除的办法,如日本的高濂坝,坝高176 m,坝址有30~40 m厚的沉积层,因其透水性大,心墙以下部分全部挖除。当沉积层很深而不便挖除或挖除很不经济时,也可采用灌浆处理(如法国的Serre-Poncon坝)或类似于混凝土防渗墙的混凝土管柱排(如加拿大的马尼克3级坝,高180 m)。也有采用部分挖除的办法,如日本的七仓坝,高125 m,覆盖层深25~40 m。有的坝虽建在深覆盖层地基上,但在处理时,则采用了区别对待的办法,如110 m高的阿斯旺堆石坝,沉积层深达225 m,

在经过详细的勘探、试验和研究后,认为河床沉积层很密实,所以不需另行加密,大坝防渗采用了水平铺盖加防渗墙及河床部分垂直帷幕灌浆相结合的综合工程处理措施。这些经验都值得很好地借鉴。

为满足西部水利水电工程建设的实际需求,围绕深厚覆盖层工程特性及其处理技术问题,需进一步开展以下5方面的研究工作。

(1)考虑到工程所涉及的覆盖层一般都具有分布范围广,地层变化复杂的特点,为快速、准确的把握深厚覆盖层的厚度、成层及分布状况,需在传统的钻孔勘探和跨孔法波速测试方法的基础上,开发和应用以面波和CT层析等新技术为代表的剪切波速的测试技术,研究采用剪切波速作为场地类别、土体类型划分及其工程性状评价的实用方法和标准。

(2)为了考虑覆盖层土体原位结构性的影响,解决原状土取样难度大的问题,应着重研究和开发以原位剪切波速为基础,联合旁压、压载等现场测试和室内试验成果,综合确定覆盖层工程力学特性参数的测试技术和分析方法。同时,应进一步通过室内试验,重点研究包括砂土、砂砾料等土体在高应力、复杂应力和大应变状态下的流变、永久变形以及覆盖层土体在高固结应力下的渗透和渗透变形特性,建立反映这些特性的本构模型,为深入了解和把握覆盖层土体的工程力学特性提供理论基础。

(3)研究覆盖层与防渗体接触面的静动力本构关系,特别是高应力下的本构关系;研究深厚覆盖层基岩的地震动输入机制,对包括深厚覆盖层在内的自由场进行分析,探讨不同行波速度、入射方向和波型对基岩地震输入分布(包括时差、相位、频率和振幅)的影响效应;建立和完善适用于深厚覆盖层特点并能考虑其与上部建筑物共同作用的静、动力数值分析方法和程序。

(4)系统研究和分析覆盖层、防渗体在各种不同工况下的应力应变、渗透、液化以及永久变形特性,建立和完善主要以静、动力永久变形、渗透稳定为评价依据的综合评价方法和标准,为工程设计和工程处理措施的选用提供依据。

(5)充分消化和吸收国内外成熟的工程处理技术和经验,针对深厚覆盖层的工程特点,对垂直防渗、水平防渗和组合防渗等防渗结构型式的防渗效果进行对比研究,提出适合于不同工程情况的经济、可行、合理的渗流控制型式和相应的工程处理措施。

5 结 语

西部大开发和南水北调水工程建设不可避免将会遇到黄土、冻土等特殊土工程问题、深埋长隧洞地质

灾害问题、高土石坝变形稳定及抗震安全性问题、深厚覆盖层工程特性及其处理技术等一系列的关键岩土工程问题。围绕这些问题,迫切需要开展深入系统的研究工作,在研究中应注重多学科交叉与渗透,注重多方法、多技术途径的结合:现场测试和室内试验结合,物理模拟与数值模拟结合,常规手段与高新技术结合,宏观研究与细观研究结合,定性分析与定量分析结合,理论研究与实际应用结合。通过研究,从深层次上较好地解决问题,为我国西部大开发战略实施和南水北调等重大水工程的建设提供技术保证,不仅具有重要理论意义和工程实践价值,而且具有广阔推广应用前景,能够产生很高的经济效益和社会效益。

参考文献:

- [1] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科学技术出版, 1997. (LIU Zu-dian. Loess mechanics and engineering[M]. Xi'an: Shanxi Science and Technology Press, 1997. (in Chinese))
- [2] 谢定义. 黄土力学特性与应用研究的过去、现在与未来[J]. 地下空间, 1999, 19(4): 273 - 284. (XIE Ding-yi. The past, present and future of the research on mechanical characteristics and application of loess[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 1999, 19(4): 273 - 284. (in Chinese))
- [3] 邢义川, 骆亚生, 李 振. 黄土的断裂破坏强度[J]. 水力发电学报, 1999, 18(4): 36 - 44. (XING Yi-chuang, LUO Ya-sheng, LI Zhen. The rupture failure strength of loess[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1999, 18(4): 36 - 44. (in Chinese))
- [4] 沈珠江. 黄土的损伤力学模型探索[C]//第七届全国土力学与岩土工程学术讨论会议文选集. 北京: 建筑工业出版社, 1994. (SHEN Zhu-jiang. Approach to damage mechanic model of loess[C]//Conference of 7th Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 1994. (in Chinese))
- [5] 邢义川, 谢定义, 李 振. 非饱和土应力传递机理与有效应力原理[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 53 - 57. (XING Yi-chuan, XIE Ding-yi, LI Zhen. Stress transmission mechanism and effective stress principle of unsaturated soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 53 - 57. (in Chinese))
- [6] 苗天德, 魏雪霞, 等. 冻土蠕变过程的微结构损伤理论[J]. 中国科学(B 辑), 1995, 25(3): 309 - 317. (MIAO Tian-de, WEI Xue-xia, et al. Microstructure damage theory for the creep process of frozen soil[J]. Science in China (Series B), 1995, 25(3): 309 - 317. (in Chinese))
- [7] 李 宁, 程国栋, 徐学祖, 等. 冻土力学的研究进展与思考[J]. 力学进展, 2001, 31(1): 95 - 102. (LI N, CHEN G D, XU X Z, et al. The advance and review on frozen soil mechanics [J]. Advances in Mechanics, 2001, 31(1): 95 - 102. (in Chinese))
- [8] 汪小刚. 土工构筑物、边坡与环境土工发展水平综合报告[C]//全国第八届土力学及岩土工程会议论文集. 南京: 万国学术出版社, 1999. (WANG Xiao-gang. Comprehensive report on the development of geotechnical structure, slope and environmental geotechnical engineering[C]// Conference of 8th Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Nanjing: International Academic Publishers, 1999. (in Chinese))
- [9] 贾志欣, 汪小刚. 包含定位长大裂隙的节理岩体连通率的计算及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(4): 457 - 461. (JIA Zhi-xin, WANG Xiao-gang. Persistence computation and application of joined rock mass including[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(4): 457 - 461. (in Chinese))
- [10] 汪闻韶. 剪切波速在评估地基饱和砂层地震液化可能性中的应用[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(6): 655 - 658. (WANG Wen-shao. Utilization of shear wave velocity in assessment of liquefaction potential of saturated sand under level ground during earthquakes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(6): 655 - 658. (in Chinese))
- [11] 赵剑明, 汪闻韶. 关于水利工程震害及抗震研究的几点思考[J]. 清华大学学报, 2000, 40(S1). (ZHAO Jian-ming, WANG Wen-shao. Several considerations about earthquake damage and earthquake resistance research in hydraulic engineering[J]. Journal of Tsinghua University, 2000, 40(S1). (in Chinese))
- [12] 赵剑明, 汪闻韶, 张崇文. 土石坝振动孔压影响因素的研究[J]. 水利学报, 2000(5): 54 - 59. (ZHAO Jian-ming, WANG Wen-shao, ZHANG Chong-wen. Study on influence factors of seismic pore water pressure in earth-rock dams[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000(5): 54 - 59. (in Chinese))
- [13] 刘小生, 王钟宁, 赵剑明, 等. 面板堆石坝振动模型试验及动力分析研究[J]. 水利学报, 2002(2): 29 - 35. (LIU Xiao-sheng, WANG Zhong-ning, ZHAO Jian-ming, et al. Advancement of technology on shaking table model test and dynamic analysis of CFRD[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(2): 29 - 35. (in Chinese))