

中国工程院第三次地下工程与基础设施公共安全 学术研讨会论文集

主 编 周丰峻

副主编 卢耀如 王梦恕 王复明



黄河水利出版社

中国工程院
第三次地下工程与基础设施公共安全
学术研讨会论文集

主 编 周丰峻

副主编 卢耀如 王梦恕 王复明

黄河水利出版社

图书在版编目(CIP)数据

中国工程院第三次地下工程与基础设施公共安全
学术研讨会论文集 / 周丰峻主编. — 郑州: 黄河水
利出版社, 2007.9

ISBN 978-7-80734-283-0

I. 中… II. 周… III. ①地下工程-安全技术-学术
会议-文集 ②基础设施-市政工程-安全技术-学术
会议-文集 IV. TU94-53 TU99-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 145913 号

出版社: 黄河水利出版社

地址: 河南省郑州市金水路 11 号

邮政编码: 450003

发行单位: 黄河水利出版社

发行部电话: 0371-66026940

传真: 0371-66022620

E-mail: hhsclbs@126.com

承印单位: 黄委会设计院印刷厂

开本: 787 mm × 1 092 mm 1 / 16

印张: 17.75

字数: 410 千字

印数: 1—1 000

版次: 2007 年 9 月第 1 版

印次: 2007 年 9 月第 1 次印刷

书号: ISBN 978-7-80734-283-0 / TU · 87

定价: 60.00 元

中国工程院第三次地下工程与基础设施 公共安全学术研讨会

(2007年9月21日~9月23日 中国·河南·郑州)

主办单位

中国工程院土木、水利与建筑工程学部

承办单位

郑州大学、水利部黄河水利委员会、河南省科学技术厅、河南省科学技术协会

学术委员会

主 任: 周丰峻

副主任: 卢耀如 王梦恕

委 员: 王 浩 王景全 冯叔瑜 吴中如 朱伯芳 宋振骐 张在明
张铁岗 张楚汉 陈厚群 林 皋 欧进萍 郑守仁 郑皆连
郑颖人 施仲衡 崔俊芝 葛修润 梁文灏

组织委员会

主 任: 申长雨

副主任: 苏茂林 孟少辉 何凤莲 高丹盈

委 员: 丁留谦 王力争 王光谦 王录民 王宗敏 王复明 刘汉龙
刘汉东 刘国际 刘新房 刘儒勋 何满潮 张 伟 张建民
李 杰 李术才 李庆斌 李宏男 沙爱民 陈云敏 陈建康
冷元宝 周 晶 尚宏琦 练继健 赵启林 郭大进 谈广鸣
袁 亮 徐礼华 黄 强 曾宪桃 蒋树屏 楼梦麟

秘书长: 王复明(兼)

编辑出版委员会

主 编: 周丰峻

副主编: 卢耀如 王梦恕 王复明

委 员: 李宗坤 乐金朝 邓苗毅

前 言

随着我国社会和经济建设的迅速发展,地下工程与基础设施公共安全问题日益突出,特别是矿山、地质、交通、水利、城建等各类安全事故时有发生,造成的危害与影响越来越大。由于多方面的原因,公共安全相关技术领域的研究较为薄弱,对地下工程和基础设施安全事故的发生机理、安全监测与监控、工程安全风险分析、灾害预测预报及应急处理等缺乏系统研究。

为了总结和交流地下工程与基础设施工程安全领域的最新研究成果,2007年9月21~23日在河南郑州召开了中国工程院第三次地下工程与基础设施公共安全学术研讨会。会议由中国工程院土木、水利与建筑工程学部主办,郑州大学、水利部黄河水利委员会、河南省科学技术厅、河南省科学技术协会联合承办,来自国内大学、科研院所、企业等单位的60余名专家、教授、学者出席了本次会议。会议涉及水利基础设施安全、地质与岩土工程安全、交通基础设施安全、矿山工程安全等多个专题。

本次学术交流会收到学术论文30多篇,内容主要涉及地下工程、岩土工程、矿山工程、水利工程、桥梁工程、隧道工程等基础设施安全问题的各个方面,反映了该领域最新的研究成果和发展动态,凝聚了作者的心血和智慧。我们将这些论文汇编成集,供大家学习或交流。

中国工程院院士



2007年9月

目 录

前 言

院士特邀论文

公共安全研究是紧迫的任务和神圣的使命	周丰峻	(1)
大坝抗震安全	林 皋	(5)
大坝与坝基安全监控理论和方法及其应用	吴中如 顾冲时 苏怀智	(25)
穿过隧道的滑坡工程治理研究——埋入抗滑桩的原理与设计	郑颖人 宋雅坤 雷文杰等	(35)
大型桥梁结构的整体安全性及对策	王景全 赵启林 潘大荣	(45)
我国公路桥梁安全状况及对策	郑皆连	(52)

水利基础设施专题

西藏易贡巨型滑坡与减灾方案研究	刘 宁	(57)
海底悬跨管道的状态识别和安全评价	周 晶 冯 新 李 昕等	(67)
强震条件下高土石坝的变形规律与安全性评价	张建民 张 嘎	(77)
高土石坝抗震性态分析与减灾对策研究	刘汉龙 丰土根	(94)
JC 法在梯级水库防洪安全中的应用	黄 强 原文林 席秋义等	(105)
堤防工程边坡稳定性影响因素分析	刘汉东 陈雅斌	(112)
构皮滩混凝土拱坝可靠度分析	解 伟 李红梅 李树山等	(119)
堤防工程健康诊断前期研究	江恩惠 冷元宝 张清明等	(125)
土石坝沉降遗传算法模型研究	李宗坤 姜景山	(132)

矿山、地质及岩土工程专题

煤与瓦斯突出的基本机理	丁雁生	(138)
废弃矿山的安全与环境灾害的评价体系研究	王来贵 潘一山	(148)
地下综合管廊抗震非一致激励大型振动台实验	李 杰 史晓军 孟 海等	(157)
强度折减法在丹江口水库二期工程库岸稳定性分析中的应用	徐礼华 宋志斌	(166)
复合地基桩土应力测试新方法	王广国 翟振威 肖昭然	(172)
BOTDR 技术及其在工程中的应用与展望	周 杨 冷元宝	(180)
探讨软破围岩中浅埋大跨人防工程锚固技术	于 江 王文波 朱湘森	(185)
激光三维扫描技术在隧道工程量测中的应用	李长征 鲁立三 冷元宝	(190)
大型深基坑中钢筋混凝土支撑的应用与快速拆除	王俊林 侯永钊 贾浩青等	(194)

浅议地下工程的安全监测	厉新光	王文波	于江	(198)
弹性波 CT 技术几个重要问题的研究	朱文仲	赵志忠		(202)
非连续屏障的隔振效果分析	徐平	夏唐代		(210)
输油管道沿线地质灾害危险度评估	马清文	王成华	孔纪名	(222)

交通基础设施专题

地震输入模型对大跨度空间结构地震反应的影响	楼梦麟	黄明开	林清	(229)
道路安全评价体系与方法	沙爱民	李天祥		(236)
高速公路交通安全事故原因分析及预防措施	傅香如	于江	王文波	(245)
预应力混凝土空心板梁桥的破坏性荷载试验	魏建东	蔡迎春		(248)
桥梁结构损伤识别遗传优化神经网络算法技术	邓苗毅	王复明	乐金朝等	(255)
隧道围岩材料特性参数反演与有限元数值分析	徐建国	王复明	蔡迎春	(260)
公路建设工程安全管理现状分析及对策研究	李志强	田建	陈济丁等	(267)
国外公路工程安全生产现状及启示			彭建华	(273)

公共安全研究是紧迫的任务和神圣的使命

周丰峻

(总参工程兵第三设计研究所 洛阳 471023)

摘要: 本文阐述了当前基础设施公共安全所面临的严峻形势;多角度论证了公共安全问题的解决需要建立系统的公共安全科学研究体系,采用科学和系统观点,从安全事故发生的机理出发,综合研究其预警、预防、治理和救援措施,贯穿理论和实际紧密结合,并从理论和实践的创新结合上推动公共安全科技进步和公共安全事业。

关键词: 公共安全 科学 系统 工程

1 序言

从 2004 年以来,公共安全已经作为我国十二年科技发展规划正式提出,受到了国家的高度重视。中国工程院作为科技发展规划的国家咨询单位,2005 年 5 月组织院士和专家完成了相关课题咨询后,于 2005 年 9 月开始确定了“地下工程和基础设施公共安全技术发展研究”课题,目前已经完成了 80 万字的咨询总报告和专题报告,并提出了 10 条重要咨询建议,受到了中国工程院的肯定。在两年半的课题咨询研究期间,还召开了 2 次地下工程和基础设施公共安全学术交流会以及 1 次香山科学会议。相应出版了 3 部会议论文集。

这次在郑州大学召开的中国工程院第三次地下工程和基础设施公共安全学术交流会学术界工程安全研究的继续和发展,借助学术交流促使公共安全学术研究更加深入的开展起来。

2 公共安全是最紧迫的任务

公共安全问题是我国发展经济建设、构建和谐社会的严重障碍,灾难事故的不断发生,惊人的伤亡数字,对经济社会造成了巨大的冲击和影响,成为国家和人民的心腹之患。目前各种迹象表明,在我国公共安全问题还没有得到有效的扼制。

(1)2007 年 8 月 5 日,湖北巴东县宜昌——万州铁路野山关隧道工作面发生突水突泥突巨石事故。这是继重庆酉阳县圆梁山岩溶地区隧道事故之后的第二条岩溶地区隧道大事故。野山关隧道事故是开挖工作面和地下暗河贯通造成的。野山关隧道事故突水 15 万 m^3 ,突泥突巨石 5.3 万 m^3 。突出巨石区总长度 300 m,隧道淤泥厚 2~3 m,受难人员

52 名,抢险救出 42 名,亡 10 人。

(2)2007 年 8 月 13 日下午,湘西凤凰县堤溪沱江大桥坍塌。大桥是由块石、混凝土块砌筑在弱风化泥灰岩基础上的石拱桥,桥基变形滑动导致坍塌。123 名施工人员,63 名生还,亡 60 人。

(3)2007 年 8 月 18 日,山东新泰市地表径流水溃入矿井,171 人被围在井下,据网上报道已无生还可能。

仅在 8 月份出现的灾难事故就充分说明,解决我国建设工程的公共安全问题任重而道远。目前,国家已经在行政管理、政策法规和应急救援方面加强了部署,但是事故灾难仍然没有得到有效扼制,这说明我们必须在更深层次上寻求制止事故恶性发展的技术对策,包括事故灾难的产生机理,工程安全评估和预防措施,以及应急救援对策。大力开展公共安全研究成为最为紧迫的任务。

3 公共安全是科学

随着工程建设的发展,面临的工程问题更加多样化,深层次的公共安全科学问题不断涌现出来。

(1)突发洪水波比暴雨流域洪水更为危险,高坝愈筑愈高,病害土石坝数量巨大。我们应从“75·8”河南板桥垮坝事故中深入研究,发现溃坝机理和洪水波演化的科学问题。研究圆梁山和野三关的岩溶水压和岩溶地质复杂相互作用科学,科学地预防巨大的岩溶地质灾害。

(2)病害桥梁与新型桥梁防风、防撞的结构整体牢固性和耐久性尚未得到科学的验证。美国 2007 年 8 月 1 日明尼苏达钢筋混凝土桥,由于疲劳产生裂缝而导致坍塌,应当引起对我国大量超期钢筋混凝土桥安全问题的重新审视和深入研究。

(3)我国煤矿愈挖愈深,目前很多煤矿深达 500 m 甚至 1 000 m,煤矿瓦斯压力高达 2~5 MPa,瓦斯突出愈来愈严重是煤层动力学的必然结果。完善瓦斯抽排工艺的科学程序,是解决深部瓦斯突出的根本途径。

(4)滑坡泥石流及堰塞湖坝溃决是陡坡山区和路堑施工极易出现的地质灾害。科学地研究土层失控条件,用高科技手段进行监测预报可以减少灾害突发产生的影响。

(5)爆炸可能在高压容器、煤气管道、巷道瓦斯、煤矿矸石山中发生。只有了解爆炸机理,采用正确的防护方法和抑爆措施,才能达到科学防止爆炸事故灾害的目的。

综观各种公共安全问题,显著特点是突发性和灾难性。这是由于各类事故灾难产生的物理本质的一致性所决定的。我们的责任就是要研究这些事故灾难产生的物理本质原因,寻找它们共同遵从的规律,从中找出预防与防护对策以及抗险和救援的一般方法。

洪水波、爆炸波、瓦斯突出、泥石流和突水突泥波动过程,其运动规律满足拟线性方程,有状态发生突变的波阵面,有压力势能或化学反应能提供可以突然释放的能量,有引发动态突发的诱导条件,如溃坝、火花、临界失衡等。这类安全事故和灾难的控制是多因素构成的,突发条件的发现和掌握比较困难,应当特别加强研究。

房屋建筑、桥梁结构、路堑边坡的突发破坏是由于结构强度降低、动态疲劳、临界稳定或者整体牢固性丧失造成的。破坏演化过程是渐进性的,问题是累积的,而破坏则

是突然的、不可逆转的。因而治理的办法必须是检测与监测成为预防的重要措施。掌握渐进破坏过程就能实现安全防范和治理的要求。

4 公共安全是系统工程

地下工程和基础设施公共安全是一个系统工程，从科学研究到工程实践，从科研梯队到工程团队，从装备研制到工程应用，必须贯穿理论和实际紧密结合，并从理论和实践的创新结合上推动公共安全科技进步和公共安全事业。其中重要的环节是：

(1)建立工程研究中心，以提供公共安全研究的试验研究平台，开展创新研究成灾机理和演化过程，监测、检测系统的可靠性。防护措施的有效性，并进行抗险救灾设备的功能检验。

(2)建立工程安全技术推广中心。为研制和集成安全装备和机具并为形成产业而努力，为建立安全技术推广和培训做工作，制定安全标准的规程，进行失险救灾器材效能试验。

(3)建立工程安全一级学科，培养专门人才队伍。

(4)建立工程公共安全一级学会。酝酿成立学会，可以使学术交流持续开展下去，结合工程实际，加强涉外交流。

(5)用集体智慧提高咨询能力。国家重大工程安全依靠广大的科技与工程队伍打牢基础，发现深层次公共隐患，创新提出系列预防和防护措施，防灾救援措施和化灾为利技术发展措施。

5 公共安全是社会和谐稳定的基础工程

国家发展教育，边远小学有希望工程，国家注意环境保护有绿色环保工程。实际上，构建和谐稳定社会首要还是生命保护工程，我国工程公共安全人员伤亡数字是发达国家的10倍，煤矿人员百万吨煤伤亡数字是美国的100倍。差距十分明显。国家重视安全，人民切盼安全，为了弥合差距，实现和谐社会构建对公共安全的要求，我们对基础性工程安全措施特别要做好工作。

(1)工程安全预测预报系统，岩溶和山岭隧道要发展微震仪、声发射监测系统，地质滑坡要发展GPS原位位移监测、裂隙变化监测系统，混凝土桥梁要发展非接触变形裂缝量测系统等。

(2)抗灾减灾机具，发展防制管涌排桩连续墙装备，发展公路铁路路基路堑锚杆、锚索装备，发展高速铁路隔震降噪设备技术，发展抢险工程复合支护技术。

(3)安全救援设备器材，义马煤矿成功运用的电话、供电、供水、供饮料的生命线工程，发展可以顶升坍塌结构的气囊器材。

(4)化灾为利的煤层抽气减压技术，用于防制瓦斯突出十分有用，但必须结合地质条件正确运用才会有效。

(5)洼地防淤水、防井灌综合技术，要综合发展GPS、地球物理勘探技术以及土层原位加固技术综合解决。

(6)隧道工程防坍塌、防突水突泥突石的综合技术。隧道工程塌方突水是高水压渗透

连通，不良地质扩大复合作用的必然结果。必须通过查明地质条件突变的边界(溶岩边界)，分别不同情况灌注砂浆、超细水泥浆和双液注浆；采用迂回辅洞，实施顶部和周边锚杆、锚索加固的综合措施来稳定已产生破坏的围岩，切断再次坍塌突水突泥路径。

6 公共安全是崇高的事业

工程公共安全是保护工程人员和相关人员生命为目的的事业，因而非常崇高、非常伟大，值得我们为之奋斗不息。工程兵有 18 个团待命抗险救灾，有组织有能力，但是技术不足、装备不足、经验不足。还必须有全国各行业的科技人员、工程人员的指导和帮助，提高水平才能满足任务要求。

这次会议，主要是应中国工程院土木工程学部要求而安排的，同时有河南省力学学会的共同参与和组织，使得工程安全学术讨论范围更为扩大，使得河南省力学发展和公共安全工程的研究更为紧密。通过这次会议，希望大家共同努力，使我国地下工程和基础设施公共安全研究水平有所提高，对我国工程公共安全技术和器材装备的发展有所促进，为公共安全这一崇高的事业，为构建和谐发展社会贡献力量。

大坝抗震安全

林 皋

(大连理工大学 大连 116024)

摘 要:我国大坝建设蓬勃发展,许多世界级的超高大坝已经或即将在西部山区进行建设。印度板块向欧亚板块碰撞的地震地质背景造成建坝地区地震活动频繁和剧烈。大坝抗震安全成为公共安全的重大问题。对这一问题的妥善解决,提出以下重要科学技术问题供研究和参考。①科学地进行大坝的抗震设防,采用两级或多级设防标准,合理地确定设防地震强度、频谱特性与地震动的输入模式,完善检验的内容与标准,大坝安全的风险分析。大坝性能设计是值得重视的发展方向。②加强筑坝材料动态特性与本构关系的研究。深入了解混凝土的速率敏感特性以及多轴动态强度的变化规律,研究其对大坝地震响应的影响。③在混凝土坝的地震响应分析方面,完善改进大坝—库水—地基系统的相互作用以及横缝动接触的计算模型,以便能更接近实际地反映拱坝在地震时的工作状态,并能通过实际检验。发展大坝地震损伤进程的数值计算模型与计算方法,便于工程实用,以便对大坝的抗震薄弱环节与抗震潜力做出可靠估计。为大坝的抗震安全评价打下基础。加强原体观测,积累大坝地震响应的实际资料。④在土石坝的地震响应分析方面。材料的动态特性与本构关系的研究仍有待加强,根据高土石坝发展的需要,特别要重视高围压下大颗粒堆石料动态特性的研究。土石坝的抗震安全评价技术发展较为缓慢,经验性的成分仍占有较大的比重,难以适应大坝建设发展的需要,需加强土石坝静、动力作用数值计算模型的研究,以便对土石坝的抗震性能、震害形态以及影响因素取得更为深入的认识。完善土石坝抗震安全评价的内容与评价标准。⑤对于坝基和河岸中潜在滑动体的地震稳定评价,工程实践中广泛采用的拟静力分析方法以及计算地震永久变形的 Newmark 刚体滑块方法有其局限性,不能反映地震失稳的实际机制,所建议的 3D-DDA 动力稳定分析方法值得发展。⑥新技术在大坝质量控制与健康监测的应用中具有广阔前途。发展快速、简便、精确的实时质量控制和结构损伤诊断技术,新型的损伤修复材料,具有重要意义。⑦大坝抗震工程措施的研究对保障大坝的抗震安全也具有重要作用。

关键词: 大坝 抗震 安全

1 大坝抗震安全的重要意义

大坝在人类文明的进程中发挥了重要作用。据一些文献的估计,大坝为人类服务的历史超过 5 000 年以上。近代坝工技术的发展经历了几个典型的历史阶段:①20 世纪 30 年代,以美国为中心,筑坝技术有了很大的进步。1936 年 221 m 高的胡佛坝的建成,解决了温度控制和防裂问题,成为大体积混凝土坝建设的一个里程碑。②20 世纪 50~70

年代,二次大战后的恢复时期,欧洲进入坝工建设的高潮,技术革新蓬勃发展。比较经济的双曲拱坝大量兴建,并使拱坝可在相对不良的地形、地质条件下开工建设。由于土石坝设计和施工技术的发展,大大放宽了对筑坝材料的要求,土石坝大量发展。出现了经济和安全方面都比较优越的新型面板堆石坝坝型。^③20世纪90年代以后,中国进入大坝发展的兴旺时期,成为世界建坝中心。无论从建坝数量、建坝规模和技术难度来说,中国都居于世界首位。据世界大坝会议的统计资料,2003年以前,全世界坝高15 m以上的大坝共有49 697座,我国占25 840座,超过50%。

大坝支撑着大型水库,关系到下游广大地区人民生命财产的安全。据粗略估计,从12世纪以来,全世界发生了2 000余起大坝事故,比较显著的大坝失事有200多起,带来了灾难性的后果。造成大坝事故的原因多种多样,主要有洪水、地震、坝基的复杂性与老化等。本文将主要论述大坝的抗震安全问题。地震的发生不确定性成分很多,发震强度、时间与地点均难以准确预测。我国大坝抗震还具有特殊重要的意义。GPS速度场的观测表明,印度板块对欧亚板块的碰撞,每年产生50 mm左右的挤压变形,引起中国大陆西部地区强烈的地震活动。而这一带,特别是西南地区是我国水力资源最为丰富的地区。根据我国能源发展的需要,将有大量200~300 m级的高坝和大型水库在金沙江、澜沧江、雅鲁江、大渡河、怒江和黄河上进行建设。这些大坝的高度和规模不少超过国外已建工程的水平。特别值得重视的是大坝的设防地震加速度成倍增长,远远超过历史上的最高水平。例如:1991年开工建设的二滩拱坝(高240 m)和小浪底心墙堆石坝(高160 m),设计地震加速度分别为0.144 g和0.15 g,这基本上代表了当时大坝抗震设防的水平。2002年后开工建设的小湾拱坝(高292 m),设计地震加速度0.308 g;溪洛渡拱坝(高278 m),设计地震加速度0.321 g;金安桥碾压混凝土重力坝(高156 m),设计地震加速度0.399 g。设计地震加速度较前翻了一番,现行水工抗震规范已无法满足这些大坝抗震设计的需要。更有甚者,2006年开工建设的大岗山拱坝(高210 m)设计地震加速度高达0.557 5 g;将要开工建设的龙盘拱坝(高296 m),设计地震加速度高达0.408 g。抗震设防的要求相应地又提高了一个量级。大坝的抗震安全成为设计中需要解决的关键技术问题。传统的大坝抗震设计方法和抗震安全评价标准面临严峻的挑战。这对我国大坝抗震科技工作者提出了新的要求。必须在科技发展的基础上,研究新的大坝抗震设计方法和新的大坝抗震安全评价准则。

大坝安全为公共安全的重大问题,受到世界各国的普遍关注。多次大地震中造成的大坝震害使大坝的抗震安全成为关注的重点之一。值得指出的是,美国大坝安全评审委员会2004年完成了大坝安全导则的更新,2005年出版了《联邦大坝安全导则:大坝抗震分析与设计》^[1]。欧洲地震活动性总体上不是很强,但全欧大坝会议工作小组于2004年提出报告对欧盟五个国家(奥地利、意大利、瑞士、罗马尼亚、英国)近期先后完成的大坝抗震安全评价导则进行了研究与比较^[2],指出其中强震活动区(罗马尼亚)、中强地震活动区(意大利)以及低强地震活动区(瑞士、奥地利、英国)导则的内容与特点,供欧盟有关国家参考。阪神地震后日本土木工程学会分别于1995、1996年和2000年先后三次修订了土木工程结构的抗震安全评价准则,日本大坝委员会于1999年成立了大坝抗震安全分委员会,为合理地进行大坝安全评价进行准备^[3]。印度于1991、1996、2001年先后三

次举办了大坝安全的国际研讨会^[4],研究大坝安全的新的趋向与安全导则的内容,并分析了印度的地震形势,强调了大坝的抗震安全。俄罗斯新的联邦水工结构安全法规于1997年起实施。其他如加拿大、新西兰、挪威、法国等都于近期制订了新的大坝安全规程与导则^[5]。

2 大坝抗震安全有关的科学技术问题

从国内外关于大坝抗震安全评价的发展现状来看,大坝抗震安全评价当前的发展水平远远满足不了科学地进行大坝抗震安全评价的需要。在我国和世界各国的坝工实践中,关于混凝土坝的地震响应主要采用弹性动力分析方法,依据弹性模型的计算结果来近似地估计地震损伤的程度和损伤的范围,有关大坝的抗震安全性在很大程度上仍然需要依靠工程师的经验和判断。一些先进国家,如美国、加拿大、日本、瑞士等国都感到很有改进的必要,并在酝酿着进行改革。对数量巨大的土石坝的抗震安全问题情况更不容乐观。著名学者 Finn 最近指出^[6],在土石坝的地震动动力响应分析方面,目前仍然基本上保留在20世纪70年代发展的等价线性化方法的基础上。这种方法只能在某些情况下可以对地震加速度的分布作出一定的近似估计,难以提供大坝抗震安全评价所需的许多重要信息。

20世纪80年代以后,在欧洲、美国、日本等国建坝高峰期已过,建坝数量大幅度回落。只有我国坝工建设蓬勃发展。一些建设中或规划建设的大坝都向超高大坝方向发展,拱坝达300 m级,土石坝达250~300 m级,面板堆石坝达200~250 m级。这些坝大部分建在强地震活动区。很少有国外的经验可资借鉴。而且国内外已建大坝很少经历过强震的考验。为了保障我国大坝的安全运行和抵御地震的破坏作用,深入开展大坝的抗震安全研究,实属必要。以下根据作者多年从事大坝抗震研究的一些体会,就有关大坝抗震安全的重要科学技术问题谈一些看法。

2.1 大坝的抗震设防标准与设计地震动特性参数的确定

由于地震发生的不确定性,以及所取得的强震记录仍属有限,各国现行大坝抗震设计规范采用的设防标准颇不统一。拟订的大坝的设计地震加速度以及设计地震反应谱都存在有比较大的差别。国际大坝会议抗震设计分委员会指出大坝抗震设防标准的完善是今后工作中值得重视的问题。从整个发展趋势来看,美国、加拿大和欧洲国家,都采用两级抗震设防标准。运行基准地震 OBE 指在大坝运行期内有较大可能发生的地震作用时,要求大坝保持正常运行功能,所受震害轻微。在最大设计地震 MDE 作用时,要求大坝至少保持蓄水能力,不发生溃坝但可容许大坝发生某种程度甚至严重的震害。OBE 一般都取为100年超越概率10%的地震,重现期为145年。但各国对 MDE 的规定,则有很大差别。一般需要考虑大坝的重要性,大坝失事所引起的人员伤亡和社会经济损失的大小等多方面因素进行综合决策。日本、俄罗斯和我国仍采用一级设防标准。日、俄基本上采用地震系数法,我国则接近按 MDE 进行设防。各国大坝的抗震安全都强调需要进行专门研究。对 OBE 作用的安全检验,一般采用弹性分析法。对 MDE 作用的安全检验各国都还没有具体规定,主要是目前对大坝地震损伤和破坏机理的认识还很不足,有待于作深入的研究。科学地进行大坝的抗震设防,确定设防的地震强度与频谱特性,

地震动输入模式以及安全检验的内容与标准等,有赖于地震工作者、地震工程工作者以及工程科技人员的共同努力。大坝的性能设计是值得重视的发展方向。

按 MDF 和 DBE 来确定大坝抗震设计和安全评价所需要的地震动参数,对大坝的抗震安全与经济效益有着十分重要的意义。地震动参数的内容包括峰值加速度、反应谱和振动的持续时间。我国国家标准——新的地震动参数区划图 GB18306—2001 在概率法基础上制订。我国有比较丰富的历史地震资料,这是相对有利的条件。但概率法只统计了抗震设计中地震动强度的大小,并未与震级、震中距等物理参数联系起来。还有,重要大坝的抗震设计要求重现期 5 000 年以上低概率的地震活动性参数,这方面可供统计分析的历史资料仍然十分有限,而且各地区的差异性也很大^[7]。对于靠近中原的华北、华中和华南地区,可供利用的资料一般为 500 年;对于东北、西北和西南地区则减少到 80 ~ 300 年。低概率条件下的地震动衰减关系的可靠性也较差。提高低概率水平地震动参数估计的合理性与可靠性仍然是今后努力的方向。大坝抗震设计中所应用的反应谱一般主要有标准反应谱与场地相关反应谱两种。标准反应谱不能考虑地震震级、震源距和场地特性的影响,对重要大坝设计要求采用场地相关反应谱。但按地震危险性分析概率法给出的场地设计反应谱为一致概率反应谱。这是一种包络性的反应谱,综合了场地周围各潜在震源区的整体贡献,而不是地震环境中真实样本的实现。一般,大地震出现概率低,小地震出现概率高,但大地震的中长周期成分地震动分量丰富,而小地震的短周期成分地震动分量丰富,这必然导致一致概率反应谱过高估计了对大坝抗震有重要意义的地震动的中长周期成分,为工程设计所难以接受。至今,我国大坝抗震设计仍然以标准反应谱作为设计依据。为了克服一致概率反应谱的缺点,研究者提出了“设定地震”或假想地震的概念。设定地震有具体的震级、震中距,同时具有概率含义。设定地震选择的 principles 是:①在场址产生的地震动应与给定的设防标准一致;②反映对场址地震动参数危险水平贡献较大的地震;③反映工程结构的动力特性,也就是说,对于同一场址不同的结构特性,将具有不同的设定地震。研究者提出了很多选择设定地震的方法,各有一定的特点,同时也有一定的局限性。应用于大坝的抗震设计还需要有进一步的工作。

2.2 关于大坝抗震安全的评价方法

近年来大坝安全评价方法发展的一个重要倾向是转向以风险分析为基准的方法^[8]。美国垦务局从 20 世纪 90 年代中期起对所属 400 多座大坝应用了风险性分析方法;美国联邦能源管理委员会(FERC)在 2004 年提出的大坝性能监测计划中,对所管辖下的 2 400 多座注册的大坝引入了风险概念;美国陆军工程师团 2005 年对所属的 600 多座大坝引入了风险分析方法。

风险分析方法强调了“潜在破坏模态分析”的重要性。要求识别大坝的各种破坏模态,了解破坏发展进程中大坝特性的变化及其发生机制,了解超越峰值强度后的材料剩余强度以判定大坝破坏发展进程的快慢程度。在大坝的健康诊断与安全监测中目前已强调了“性能指标”的内容,以便加深对破坏模态发展过程的了解并及早提出预警信号。为此,需要确定性能指标所相应的安全限值和预警限值。

风险分析要求进行大坝直至破坏的全过程分析。但是,在目前的技术水平下,我们对大坝地震损伤破坏特性及其产生机理的认识仍然是十分有限的。

大坝的性能设计也是一个值得重视的发展方向。

2.3 筑坝材料的动态特性及其对大坝地震响应的影响

这包括混凝土材料与土石材料的特性。本节主要讨论混凝土材料方面的内容，土石材料特性将结合土石坝的地震响应进行讨论。

混凝土的动态特性是指混凝土在地震、冲击、爆炸等荷载作用下的强度与变形特性。大量研究表明，混凝土是速率敏感性材料。不同性质的荷载(地震、冲击、爆炸)加载速率发生量级上的巨大变化，混凝土的动态特性也随之发生较大的变化(见图 1)。

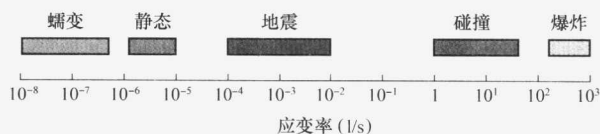


图 1 不同性质荷载的应变速率

20 世纪 50~60 年代以后，由于军事上的需要，混凝土动态特性的研究取得了比较大的进展。但是，现有研究成果也有许多不足之处。这就是：抗压强度研究较多，抗拉强度研究较少；单轴情况多，多轴情况相当少；单调加载情况较多，循环加载情况很少；小试件情况较多，较大试件很少；强度特性研究较多，变形特性(模量、峰值强度应变、泊松比、吸能能力等)研究较少。此外，环境因素(温度、湿度)的影响研究不足，产生率敏感性的物理机理的研究不足。从这方面看，混凝土材料的动态特性仍然是大坝抗震研究中的薄弱环节。下面简要介绍我们的部分研究成果。

2.3.1 单轴拉伸的率性特性及产生的物理机制的合理解释

我们研究了混凝土强度、弹性模量、峰值强度应变、泊松比、吸能能力等的率性影响。试验的应变率包括 $10^{-5}/s$ 、 $10^{-4}/s$ 、 $10^{-3}/s$ 、 $10^{-2}/s$ 、 $10^{-1}/s$ 和 $10^{-0.3}/s$ 等几个量级。并研究了温度、湿度等环境因素的影响。

对应变率效应的物理机制，国外研究认为混凝土孔隙中所含自由水对动态强度的增长发生重要作用，其产生的机理是水分的黏滞阻尼作用，称为 Stefan effect，作用力与黏滞力和运动速率成正比。有的研究者认为应变率高于 $10/s$ 以后，惯性力将起主要作用。国外研究成果主要基于小型试件。我们对动态加载试件的破坏形态进行了研究，发现还有一种物理机制发挥作用。我们观测到低应变率时，断口表面粗糙，高低不平；高应变率时，断口比较平整(见图 2)。这表明，低应变率时，微裂纹一般从强度较弱的骨料与砂浆相接触的界面开始扩展，断口崎岖不平。高应变率时，裂纹扩展速率增强，微裂纹将沿新的更短的路径进行扩展，并将骨料部分劈裂，所克服的阻力增大，从而动态强度增高。我们所测得的动态强度随应变的增长率一般较文献中基于小试件数据的数值来得高，说明阻力增强也是引起混凝土动态速率敏感性的一种新的物理机制。

对所获得的试验数据的规律性，我们都能从物理机制方面给以合理解释，说明如下。为简化计，以 DIF 表示动态强度增长率，则饱和试件的 DIF 一般高于自然含水量试件的 DIF。低强试件的 DIF 一般高于高强试件的 DIF，这是因为低强试件相对疏松，孔隙率高，含水率相应增高，黏滞阻力相应增强的缘故。但静力加载时，孔隙中水分的水

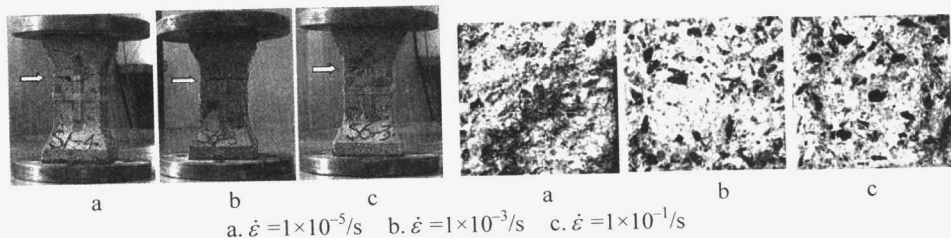


图2 拉伸试件的断裂形态

压力对分子产生外推作用,所以,饱和试件的静力强度低于自然含水量试件的强度。低温试件由于水分冻结,冰的作用使试件的静态强度较常温试件有所提高,低温下饱和试件的静态拉伸强度可达常温试件的 $6.32 / 2.21 = 2.86$ 倍。但由于水分冻结,黏滞作用减低,低温试件的动态强度增长率 DIF 则较常温试件来得低。应变率对动态弹性模量影响的物理机制和对强度影响的机理相同,所以对各种试件影响的规律也类似。但应变速率对弹性模量影响的程度要比对强度影响的程度来得小。这说明水分产生的黏滞阻尼作用对强度的影响要比对变形的影响来得小,这也是可以理解的。

2.3.2 变幅循环拉伸条件下的率性特性

地震荷载的特点是变幅循环作用,这方面混凝土的动态特性,文献中没有得到反映。试验中我们采用如图3所示的变幅循环加载方式来研究这种影响。

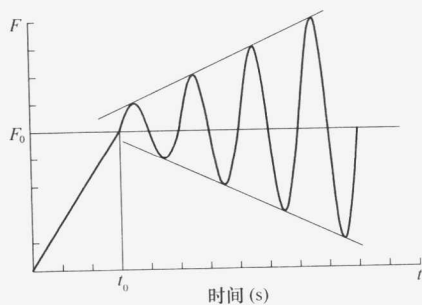


图3 变幅循环加载方式图

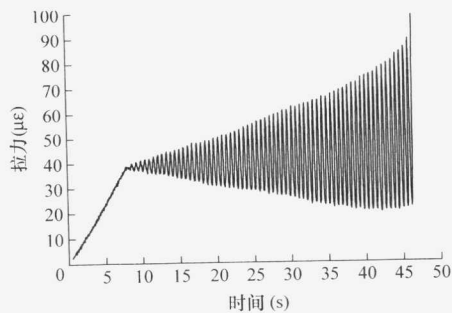


图4 循环加载时应变时程曲线

研究表明,变幅循环加载条件下,率性影响主要包括两个方面:一是每一循环的应变率,另一是振幅变化产生的应变率,两者相位差 $\pi/2$,数值上前一项起主要作用。从而可以按每一循环中的最大应变率来确定其强度。这就建立起了循环加载强度与单调加载强度间的联系。实际实施的效果是很好的,按单调加载强度估算的循环加载强度与实测值基本相符,参见表1。据此,可以很方便地判断出地震变幅循环荷载作用下的材料动态强度。循环加载时的变形特性如图4所示。图中表明随着循环数的增加和加载幅度的增强,试件中的微裂纹是逐步增长的,因为中轴线逐渐上移,不可恢复变形的幅值也随之增加。

初始静载幅度对动态强度的影响也是一个需要考虑的重要因素。根据我们对循环加载和单调压缩试验的结果看来,都具有相同的规律性。随着初始静载强度的增大,混凝土的动态强度趋于降低。图5表示动态抗压强度的试验结果。图中纵轴表示强度的比例,