

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2010.04.008

高土石坝建设关键技术问题述评

丰土根^{1 2}, 杨 贵^{1 2}, 花剑岚³, 刘汉龙^{1 2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098 ;

2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098 ;

3. 南京市水利规划设计院有限责任公司, 江苏 南京 210022)

摘要 :在总结国内外土石坝建设关键技术问题研究成果的基础上, 针对中国西部高土石坝建设特点, 着重讨论高应力条件下土石料的试验方法、强度变形特性与本构模型、长期变形特性、动力特性与本构关系以及土与结构接触面力学特性等关键技术问题, 并探讨了进一步研究的方向和主要科学问题。

关键词 :高土石坝 ; 土石料 ; 应力变形 ; 长期变形 ; 动力特性

中图分类号 :TV641.1 **文献标志码 :**A **文章编号 :**1000-1980(2010)04-0392-10

水电作为绿色可重复利用的能源受到极大的重视。根据规划, 到 2020 年, 我国需开发水电 1.7 亿 kW。土石坝因能适应复杂地形和地质以及可就地取材等而在水电建设中受到高度重视^[1]。在西部大开发中, 将修建 100 m 级、200 m 级乃至 300 m 级的高土石坝, 如 232 m 高的水布垭面板堆石坝、261.5 m 高的糯扎渡心墙堆石坝、293 m 高的两河口心墙堆石坝等。这些工程由于坝高库大, 坝址所在地区地形、地质条件复杂, 环境恶劣, 地震烈度高, 一旦失事, 将产生灾难性的后果。高坝设计中的应力变形关键问题、高边坡与深埋地下洞室等岩土工程问题都急需解决。大坝高度的增加将给现在所掌握的一般筑坝技术和设计理论带来挑战。20 世纪 80 年代以来, 我国已经在土石坝筑坝料研究方面取得很大进展, 但由于坝高显著变化、受力条件复杂以及以前研究条件的限制等原因, 仍有许多问题的研究不够成熟。为此, 本文在总结国内外土石坝建设关键技术问题研究成果的基础上, 针对高土石坝建设的特点, 着重讨论高应力条件下土石料的试验方法、强度变形特性与本构模型、长期变形特性、动力特性与本构关系, 土与结构接触面力学特性等关键问题, 并探讨进一步研究的方向和主要科学问题。

1 高应力条件下土石料试验方法

1.1 粗粒土组构测试与定量分析方法

土石料作为一种散体材料, 土颗粒间相互位置排列和粒间作用力对土石料的力学性质有重要影响, 许多问题都涉及土石料组构问题。虽然人们很早就认识到散体材料的离散特征, 然而依据实际物理现象构建数学模型时, 却几乎一直沿用连续介质力学的方法。土石料组构是指土颗粒组成和土颗粒的几何排列方式, 组构研究的主要内容是土颗粒的空间排列及相互作用的综合特性。组构研究大体分为 3 个阶段^[2], 即组构量的量化阶段、力学效应分析阶段和组构力学模型建立阶段, 关键在于解决组构量的量化问题, 这是建立组构力学模型最基本的任务。目前, 由于解决组构量的量化问题未能找到合适方法, 组构力学效应分析和组构力学模型构建难于深入。虽然在某些方面取得了一些成果^[3-6], 但土石料组构量与宏观力学性质的关系仍处于未知状态。要改变目前组构研究停滞状态, 必须建立高效、便捷、精确的组构测试方法, 只有获得了土石料的组构信息, 其他研究才成为可能。

目前用于组构测试的方法通常有 X 线、扫描电镜、透射电镜等, 对于土石料, 要监测受力变形过程中试

收稿日期 :2010-01-15

基金项目 :教育部科学技术研究重点项目(109077);国家自然科学基金(50639050, 50825901);水利部公益性行业专项经费项目(200801014)

作者简介 :丰土根(1975—), 男, 浙江金华人, 副教授, 主要从事土动力学与工程抗震、道路堤坝与软土地基处理研究。E-mail :tgifeng75@

yahoo.com.cn

样内部结构的动态变化,最为合适有效的技术应该是计算机断层X线技术(computerized tomography,CT)。近年来,CT在岩土试验中得到较为广泛的应用,主要用于研究岩体、膨胀土、红黏土和非饱和土等的损伤演化^[7-10]。目前,采用CT进行土石料组构研究的机构还不多见,只是长江科学院的水利部岩土力学与工程重点实验室在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所的CT三轴仪上进行过探讨性试验,CT图像非常清晰可靠,能够准确地反映颗粒的位置和形态。但该设备用于研究土石料组构的最大不足是只能进行试样横向断面扫描。在土石料三轴试验过程中,轴对称试样中的土颗粒变位的主要方向是纵(轴)向,横向断面扫描难以反映试样的组构变化。实现纵向断面扫描最大的难点是,不仅要求三轴压力室侧壁是非金属的,而且要求提供轴向压力的装置(即液压千斤顶)也是非金属的。长江科学院自主研制的全非金属三轴压力室(包括非金属液压千斤顶)可以实现纵、横向断面扫描。

数值模拟是土石料组构研究的另一重要手段,DEM法(distinct element method)是当前国内外较为流行的数值方法,最初用于研究节理系统或多块体在准静力或动力条件下的力学问题,后由Cundall等^[11]将其进一步推广应用于模拟颗粒介质的力学行为。其基本原理是用最简单的几何形状的离散单元来代表颗粒或块体的真实几何形状,将散粒体分离成离散单元的集合,利用牛顿第二定律建立每个单元的运动方程,用动态松弛法迭代求解,从而求得散粒体的整体运动性态。两单元间法向和切向的作用力由假定的力与相对位移的关系确定。文献[12-13]介绍了采用离散元法模拟砂土剪切试验和堆石料动力试验的情况。由于DEM法缺乏描述多体系统中颗粒或块体受力后运动和接触行为的完整运动学理论,因此,是否可以先通过小尺寸的室内组构与力学特性试验研究,再通过DEM法数值模拟推广应用到现场实际级配土石料是非常值得探讨的问题。

1.2 土石料缩尺效应研究

缩尺效应造成的室内试验成果与实际工程变形特性间的差异是土石料试验研究的瓶颈问题。随着大、重型振动碾压机械的使用和击实能量的提高,坝体填筑材料的最大允许颗粒已由原来的300~400 mm提高到目前的600~800 mm,而且随着碾压机械能量的加大,冲击碾压、填筑密度和最大粒径还有提高的趋势。王继庄^[14]对粗粒料试验方法研究进行了回顾,通过D300 mm、D100 mm和D39.1 mm系列三轴试样对标准砂、砂砾石和2种碎石料的不同胶膜层厚、不同允许最大粒径、制样密度,以等压固结排水剪的试验方法测定变形参数,从而对影响粗粒料变形特性和体积弹性模量的因素进行比较分析,得出了粗粒料试样直径 $D < 300$ mm时,对峰值强度的影响不太,但对其体应变及变形参数则有不可忽视的影响的结论,并认为粗粒料的测试技术、试验路径、胶膜楔入等问题有待进一步研究。国内外许多学者^[15-16]研究过径径比(即最大允许粒径与试样直径之比 $d_{\max}/D$)问题,目前的采用值为0.2。常用的级配模拟方法主要有3种:相似级配法、等量替代法和剔除法。相似级配法虽可保持原始级配不均匀系数及曲率系数不变,但却使得细料含量增大,难免影响材料的工程性质;等量替代法虽可保持细料含量一定,但却会造成粗颗粒含量均化,使粗细颗粒填充关系变差,亦会影响材料的工程性质;剔除法仅适用于超径料含量较少的材料。由此可见,这3种方法都有其局限性。酆能惠等^[17]在分析土石料强度与变形特性影响因素的基础上,通过大量室内对比试验研究了3种粗粒料的强度与变形特性,以及室内试验缩制而产生的缩尺效应,建立了粗粒料的强度和变形参数与缩尺比(原级配最大粒径/试验级配最大粒径)的关系式,通过外推得到原型土石料的强度和本构模型计算参数。由于受设备能力的限制,最小缩尺比仍然是较大的,这种外推方法可能是有风险的。总体来看,缩尺效应问题一直受到国内外研究者的重视,但研究深度不足。

土石料的内摩擦角随颗粒尺寸的增大而增大,随试样尺寸的增大而减小,试验过程中应力水平对试验结果也有较大影响,其影响程度超过试样尺寸的变化影响。从偏于保守的角度出发,用30 cm的试样,相应的最大粒径6 cm进行三轴仪试验,所得强度指标作为实际的大粒径土石料的强度指标,是可以接受的^[18]。然而,大试样与小试样在应力应变关系曲线上的差异,对确定本构模型参数,对应力变形计算结果会有什么影响,有多大影响,目前还不清楚。尺寸效应对200~300 m级高土石坝应力变形的影响,实际上还没有研究过。此外,大颗粒剔除后,不同的颗粒级配方法(相似级配法和等量替代法)会带来怎样的影响,也需要进行系统研究。

1.3 掺砾心墙料的固结试验方法

近年来,我国的高土石坝得到迅猛发展,200 m甚至300 m级的高土石坝已经在建设或规划设计中。为减小心墙应力拱效应,心墙料常采用掺砾黏性土。砾质土心墙料中既含有颗粒较粗的碎石料,又含有大量的细

粒黏性土。据统计,100 m 以上高土石坝中有 70% 的坝用这种土料作为心墙防渗料^[19]。在建和已建成的 200 m 以上的高土石坝,用这种土料作为心墙防渗料的坝所占比例更高^[20]。掺砾黏性土颗粒大,进行强度变形试验需采用大型三轴仪,但它又含有相当大比例的黏性土,渗透性较小,大试样排水难,30 cm 的大试样进行三轴仪排水剪试验,所需固结时间很长。若小试样 3.9 cm 所需固结时间为 1 d,则 30 cm 试样所需固结时间为 60 d。加偏应力的时间也很长。这不仅满足不了工程需要,而且长时间稳压,试验机械也无法实现。如何通过排水剪试验获得相应强度和变形指标,目前尚无合理方法。

2 土石料强度变形特性与本构模型

2.1 土石料颗粒破碎研究

目前,颗粒破碎的研究主要集中在颗粒破碎原因、形式及影响因素、颗粒破碎量的估算以及颗粒破碎对强度变形的影响等方面。Lee 等^[21-23]通过对堆石粗粒料在高围压下的三轴试验发现,颗粒破碎试验材料的颗粒级配随着外荷载的施加而逐渐变化,颗粒破碎的程度主要决定于原始试样级配、颗粒破碎强度以及应力水平。Marsal^[23]从统计学角度对粗粒料颗粒进行了分类,定义了颗粒名义直径、形状系数、颗粒接触点数、土体体积颗粒密度和面积颗粒密度等概念,导出了颗粒接触点数、接触点力、破碎应力等的表达式。Miura 等^[24]也进行了颗粒表面积因素方面的研究。Hyodo 等^[25]通过对 silica 砂均匀级配和良好级配的一维高压压缩试验(最大竖向压力 90 MPa)发现,级配不同颗粒破碎的性状不同,压缩系数也不同。颗粒破碎的量化应该以颗粒的量化指标为基础,颗粒的量化类型主要有 2 种,即从颗粒群体统计角度入手和从单个颗粒角度入手,传统的以颗粒直径为控制的粒组描述方法是从颗粒群体角度入手的。Federico^[26]从统计角度量化了颗粒土体的颗粒结构,对单个颗粒从形态学、几何学、能量学等多方面进行描述,采用的指标主要包括粒径、长径、短径、体态丰度等指标。对于颗粒破碎的研究,目前主要还是先从颗粒群体角度用直径进行度量,然后定义相应的颗粒破碎指标。颗粒破碎对强度的影响较大,因而研究相对较多。Marsal^[23]进行了围压高达 2.5 MPa 不同坝壳料的三轴剪切试验,发现随着围压的增大,摩尔库伦强度包线明显地非线性下弯。这说明高围压下颗粒破碎加剧,将造成土体抗剪强度进一步降低。Maksimovic 等^[27-28]通过对粗粒料抗剪强度的研究,得到了与以上类似的结论。同时 Marcu 等^[28]指出抗剪强度的降低将影响到土石坝边坡的稳定。

郭庆国^[29-30]采用标准砂进行了三轴剪切试验,发现当围压达到 1.5 MPa 时,颗粒破碎明显加强,摩尔圆抗剪强度包线也在此压力之后明显弯曲。吴京平等^[31]对人工钙质砂进行了三轴剪切试验研究,发现颗粒破碎的发生使钙质砂剪胀性减小,体积收缩应变增大,峰值强度降低。刘汉龙等^[32-33]通过试验并结合大量已有资料归纳出粗粒料颗粒破碎量与三轴剪切峰值内摩擦角之间的关系。魏松等^[34]对某花岗岩粗粒料进行了大量的三轴颗粒破碎试验,研究了不同应力状态下以及湿化引起的颗粒破碎情况。Naylor 等^[35]在研究高达 48 m 的模型坝 Beliche Dam 施工填筑时发现,颗粒破碎引起了土体静止侧压力系数(K_0)的增加和蠕变的逐渐加大。汪明元等^[36]指出,颗粒破碎是粗粒料流变的一个重要因素。梁军等^[37-38]进行了粗粒料的流变颗粒破碎试验,发现随着流变的发展,颗粒破碎量也在逐渐增加。王辉^[39]的研究表明,粗粒料浸水湿化时颗粒会破碎。魏松^[40]对湿化变形过程中的颗粒破碎进行了深入研究。到目前为止,颗粒破碎对湿化变形影响的定量分析还未见报道。

2.2 复杂应力条件下土石料强度变形特性与本构模型

随着土石坝高度量级的增加,土石料所受压力逐步增大。例如 300 m 高的土石坝,其压力将达到 6 MPa 以上,围压也将达到 3 MPa 以上。由于当围压和水压较高以及应力路径发生变化时,土石料的颗粒结构将发生变化,因此其压缩变形特性试验研究以及在此基础上建立相应的本构模型将显得非常重要。土石料存在显著的各向异性,其变形特性受应力路径与应力历史的影响较强。实际上,土是弹塑性体,而塑性变形与过程相关。任何一个方向的应力变化都将产生塑性功,应力路径不同,所做塑性功不同,所产生的塑性应变也有所不同。常规三轴试验为轴对称加载条件,而实际工程的应力条件复杂,不少接近平面应变情况。例如,堆石坝应力条件先后经历 3 个阶段:填筑期相当于等主应力比的简单加荷过程,蓄水期水位反复升降相当于加荷与卸荷过程,运行期则存在蠕动变形情况。这些应力条件与常规三轴试验下的应力条件相差较大。因此,有必要开展粗粒料在复杂应力路径下变形特性的研究,为建立符合实际的本构模型提供依据。

土存在显著的各向异性,许多学者都已注意到了这一点,然而还没有引起足够的重视。常用本构模型都

不能准确反映这一点。真三轴仪试验表明,从小主应力方向加荷所引起的各向变形,远小于从大主应力方向加荷所产生的相应变形。各常用本构模型都是依据常规三轴仪试验,从大主应力方向连续加荷的试验结果来建立并确定参数的。对土石坝来说,水荷载无论作用在混凝土面板或混凝土防渗墙上,还是土质防渗心墙上,都是从小主应力方向施加的。这无疑会使计算产生不小的误差,甚至会将混凝土面板中的压应力算成拉应力。此外,由于碾压坝体材料还存在初始的各向异性,采用不考虑各向异性的常用模型,对土石坝应力变形的计算结果会有多大影响,如何改进,是一个亟待解决的问题。另一个问题是:土体的剪胀剪缩特性会显著影响侧向变形,而水压力作用下土体侧向变形的大小对混凝土防渗墙、土质心墙、混凝土面板中的应力都有重要影响。土体的侧向膨胀变形,会使得防渗体后面邻近的土体在水压力作用下有沿防渗体纵向张拉的趋势,进而引起防渗体内该方向上的拉应力。土体剪胀性愈强,这一因素所对应的防渗体内拉应力愈大。当然,水压力还会直接导致防渗体内产生压应力。可见土体的剪胀性对防渗体应力变形有着重要的影响。目前已有不少模型,如南水模型、椭圆抛物双屈服面模型等,可以同时反映剪胀和剪缩性,但复杂受力条件下所反映的剪胀和剪缩性是否合理,参数如何确定才更符合实际,都有待通过试验深入研究。

关于粗粒土本构模型,国内做了一些研究。如司洪洋等^[41-42]对邓肯模型的应用及其参数确定问题进行了研究,但其研究只局限于粗粒土的大型普通三轴试验,所得到的仅仅是轴对称三轴应力状态下的应力应变特性,对粗粒土在复杂应力状态下的性质几乎没有涉及。实际上,大坝处于三维受力状态,即使处于平面应变状态,其应力应变特性也与轴对称的普通三轴应力状态有较大差别。因此,进行粗粒土的真三轴试验,揭示复杂应力状态下粗粒土的应力变形性质,准确了解粗粒土的力学行为,从而为准确预测土石坝的工作性态提供更为可靠的本构模型是十分必要的。

3 土石料长期变形特性

3.1 土石料蠕变特性

若干堆石坝的运行实态和原型观测结果表明,坝体在建成蓄水后,其变形并未结束,在一定时期内仍然发展,这说明堆石具有流变性质^[43-44]。一个典型的实例就是罗马尼亚里苏坝^[45],高约60 m,水库运行2 a后,由于左岸坝肩面板与趾板间产生显著相对位移,导致周边缝止水的破坏,漏水逐渐加大。满库运行4 a后,靠近右岸坝肩面板产生了一系列主要裂缝。采用弹塑性应力应变模型的有限元分析已不能有效地解释这一现象,只有采用与时间效应有关的流变模型才能将里苏坝所测到的事故反映出来。国外还有关于堆石的流变效应引起混凝土护面局部碎裂的实例^[44],而且在大多数情况下堆石的流变在现场观测中都表现得比较明显。国内一些地方利用岩性单一的软岩或多种岩性软硬相兼的石碴料作为坝体土石料,这些材料的蠕变性也是比较显著的^[46]。堆石体蠕变的机制、规律及其影响因素以及相应的蠕变计算模型等是必须研究的课题。

目前,堆石体流变的研究虽然取得了一些成果^[47-49],但仍存在如下2个问题:(a)试验做得较少。长江科学院、南京水利科学研究院做了一些试验,但维持时间较短,土石料大三轴仪试验,能保持长期荷载不变的很少。(b)一些流变计算方法^[50-51]还缺乏实际检验,参数确定更是没有把握。因此,研制适应长期加荷要求的大型高压长期变形试验仪,开展长期变形特性试验,建立反映实际的长期变形模型,并实现有限元数值全仿真模拟很有必要。

3.2 浸水变形和干湿循环问题

降雨造成的浸水变形、干湿循环和水位变动引起的荷载循环也是引起后期变形的一个重要原因。土石料浸水湿化时产生的变形,会导致坝体的应力应变状态发生变化,从而会产生不利于坝体安全运营的应力调整和变形^[39-52]。如心墙坝,浸水变形往往使坝顶发生横向的伸长变形而造成纵向裂缝;混凝土面板堆石坝,下游尾水或坝顶雨水侵入造成的坝体土石料的湿化变形将影响面板的应力及周边缝的变位,严重的会造成面板开裂,使防渗设施失效^[53]。在土石坝粗粒料由于环境或运行条件的改变所造成的干湿循环过程中,坝体的工后变形对大坝安全运行影响较大。从目前国内已建成的土石坝的监测资料看,土石坝在蓄水后的变形是不可忽视的,也不乏由于湿化变形危害坝体安全甚至造成溃坝的例子,如委内瑞拉的埃尔伊西罗坝蓄水后下游坝坡出现纵向裂缝。墨西哥的英菲尔尼罗坝(1964年)蓄水后引起坝顶快速下沉和向上游变位。如果因降水或渗漏使堆石体湿化甚至饱和,有可能产生较大的湿陷变形。三轴仪浸水变形试验有直接和间接2种方法^[54-55]。前者指加载到一定的应力状态浸水直接得到浸水变形,但这种试验相对复杂而且工作量大;后者指

进行干、湿 2 种状态下的应力应变试验,用同一应力下的 2 种状态应变之差作为浸水变形,其误差较大.虽然关于浸水变形和干湿循环问题的研究^[40-56-58]已经做了不少,但究竟如何进行合理的浸水变形试验,考虑浸水后干燥再浸水的干湿循环影响还是值得研究的.

另外,关于复杂应力条件下的粗粒料湿化变形如何计算模拟的问题,目前还未得到很好的解决.因此,粗粒料的浸水湿化和干湿循环变形,是目前高土石坝设计中急需解决的关键问题之一.

4 土石料动力特性与本构关系

4.1 土石料动力强度变形特性

由于大多数高土石坝位于我国西南和西北高烈度地震区,高坝设计必须注意抗震问题.动力分析的基础是材料的动力特性,因此土石料动力特性及其本构关系研究尤为重要.土石料的动力特性试验包括动强度和动变形.动强度试验是为了确定土石料的动强度指标.动强度指的是试样在某循环动周次 N_f 下,使试样达到某破坏标准的等幅动剪应力值.在土石坝抗震稳定分析中,通常规定轴向应变达到 5% 为破坏标准.动力变形特性试验测试的内容包括最大剪切模量 $G_{\max}$ 、动剪模量 G 及阻尼比 D 随动剪应变 γ 的变化关系.土石料的动本构模型与静本构模型一样也包括黏弹非线性模型和弹塑性模型 2 种类型.但与静力分析不同的是动力弹塑性模型由于模型理论和参数确定的复杂性,还远远未达到工程应用的程度,因此,实际工程广泛使用的仍然是黏弹性模型^[59].目前的研究还是集中在对黏弹性模型的改进和提高方面^[60-61].与静力问题类似,高土石坝动力特性试验研究中面临的主要问题仍然是缩尺效应问题.如何修正黏弹性模型和如何选取合理的模型参数等是值得进一步研究的课题.

4.2 加筋土石料的动力强度变形特性

坝顶加速度放大作用是高土石坝抗震的一个重要问题.对于处于地震设防烈度较高的两河口 300 m 级的高坝,由于坝体的动力放大作用,坝体上部的地震加速度较下部大,在坝顶附近地震加速度最大,因此抗震设计时考虑坝体上部约 40 m 范围的堆石体内每 2 m 铺设 1 层土工格栅,以提高坝体上部的抗震性能.如何评价土工格栅加筋的效果也是一个非常值得研究的课题.加筋土的静力特性研究国内外已取得不少成果^[62-64],但加筋土石料的动力特性研究还是空白.加筋能够明显限制土体的侧向变形,增加坝体的整体性.在土石坝抗震分析时,对每层筋材进行模拟工作量太大且会遇到众多的动力接触面问题,因此,进行地震作用下加筋土石料综合特性的研究很有必要.

4.3 地震永久变形问题

地震永久变形是土石坝抗震设计的一个重要内容.早在 1965 年,Newmark 就建议采用地震永久变形作为土石坝抗震稳定性的评价标准.即使抗震计算得到的坝体安全系数满足规定的要求,在一定强度的地震作用下,坝体安全系数可能在某一个时段瞬时小于 1,但并不意味着坝体将完全破坏,实际上只要地震作用后坝体的变形在允许的范围内,可认为坝体是安全的.根据地震永久变形的大小和分布能够判断坝体的抗震性能与抗震稳定性.因此采用地震永久变形作为坝体的抗震稳定性评价标准比采用单一的安全系数作为坝体的抗震稳定性评价标准更为合理.

永久变形计算包括滑动体变形和整体变形分析 2 个部分.滑动体变形分析方法是 Newmark 基于极限平衡理论提出来的,该方法假设永久变形是由于滑动土体沿着最危险的滑动面在地震荷载作用下发生瞬态失稳时的滑动位移所产生的,当土体内某一点加速度超过材料的屈服加速度时,沿破坏面就会发生滑动,加速度减去屈服加速度积分 2 次就得到永久位移. Markdisi 等^[65-66]对 Newmark 法进行了改进.整体变形分析方法将地震前后坝体及其地基均假定为连续体,土的本构关系采用通常的黏弹性模型,先通过室内试验得到残余应变模型,再按照连续介质理论进行计算.从永久变形产生机制来看,这类方法又分为 2 种:(a)软化模量法.该方法认为地震荷载作用下土体发生软化,静剪切模量降低,从而产生不可恢复的残余变形,地震永久变形等于按降低的剪切模量所算得的静应变与地震前静应变之差.这种方法是 Lee 提出来的,后来 Serff 等^[67]又提出了初步近似估算法、线性修正模量法、非线性修正模量法.(b)等效结点力法^[68].该方法认为地震荷载对变形的影响可用一组作用于单元结点上的静结点力(即等效结点力)代替,按照试验确定的动应力与残余变形关系曲线进行计算,地震永久变形即为在等效结点力作用下产生的附加变形.

目前的整体变形计算方法,大多只考虑剪切变形,考虑体积变形的较少,而实际上体积变形的影响是很

大的,但过去体积变形的测试方法精度不够.因此,开展土石料振动三轴试验研究,精确测试体积变形,建立同时考虑剪切变形和体积变形的地震永久变形分析方法是迫切需要解决的一个问题.

5 土与结构接触面力学特性

混凝土防渗墙、混凝土面板是土石坝设计中的关键结构,它们与土共同作用承受荷载.土与混凝土防渗墙、混凝土面板之间接触面的变形特性及模型,对混凝土防渗体的计算应力有很大影响.接触面特性的研究,包括模型及其参数合理选用非常重要.用直剪试验配合无厚度的 Goodman 单元虽然可以模拟土与混凝土的错动滑移,但不能反映法向变形,所得法向应力常常会出现较大误差.国外 Potyondy^[69]最早采用直剪仪研究了土与混凝土接触面的力学特性,Clough 等^[70]建立了直剪试验的剪应力与剪切位移的非线性弹性本构关系.国内殷宗泽等^[71-73]研究了细粒土与混凝土、砂与钢板等接触面力学性质,卢廷浩等^[74]对薄层单元接触面模型应用问题进行了研究.近年来,张嘎等^[75-76]对粗粒土与结构物接触面静力特性、循环剪切特性进行了研究,周小文等^[77]进行了混凝土面板与垫层间接接触面的单剪试验研究,王伟^[78]基于能量耗散理论建立了接触面三参数模型.在坝体填筑和库水位升高、下降的过程中,防渗体与土(河床覆盖层)接触面的受力变形很复杂,应力路径也是变化的,接触面性质对防渗体结构受力变形和功能发挥有重要影响,甚至会直接影响到大坝的安危.

至今,防渗体与土接触面力学特性的研究较少,未弄清接触面应力变形与强度特性,还没有建立人们普遍认可的接触面本构模型.由于接触面应力路径的研究有重要学术价值和工程背景,研究成果可以推进理论发展,指导工程实践,因此,进行防渗体与土接触面应力路径单剪试验研究,很有必要,也很迫切.

6 结 论

高土石坝建设是我国当前水电建设,特别是西部优势能源开发利用的关键.即将兴建的世界一流的两河口水电站工程,需要相应的突破传统概念和方法的新的一流研究成果的科技支撑.针对上述复杂应力条件,进行土石料工程特性和变形规律的系统研究,建立相应的理论和分析方法,解决高土石坝颗粒破碎特性、土石料长期变形特性、土石料强度变形特性、土石料动力特性、接触面力学特性和防渗体渗透特性研究等难题,并开展相应的数值理论分析,保证高土石坝安全与长期稳定性,对高土石坝建设有重要的推动作用.

参考文献:

- [1] 王柏乐,刘瑛珍,吴鹤鹤.中国土石坝工程建设新进展[J].水力发电,2005,31(1):63-65.(WANG Bai-le,LIU Ying-zhen,WU He-he.New development of China earth and stone dam project construction[J].Water Power,2005,31(1):63-65.(in Chinese))
- [2] 刘爱平,崔春龙.岩土体显微组构与力学性能关系研究现状与展望[J].西南科技大学学报:自然科学版,2003,18(2):75-78.(LIU Ai-ping,CHUI Chun-long.Study actualities and prospect of relation between microfabric and mechanical properties of rockmass and soil[J].Journal of Southwest University of Science and Technology:Natural Science Edition,2003,18(2):75-78.(in Chinese))
- [3] 程展林,吴良平,丁红顺.粗粒土组构之颗粒运动研究[J].岩土力学,2007,28(增刊):29-33.(CHENG Zhan-lin,WU Liang-ping,DING Hong-shun.Research on movement of particle of fabric of granular materia[J].Rock and Soil Mechanics,2007,28(Sup):29-33.(in Chinese))
- [4] 吴为义.颗粒材料组构关系与本构关系的研究[D].武汉:武汉水利电力学院,1988.
- [5] ODA M.A mechanical and statistical model of granular materia[J].Soils and Foundations,1974,14(2):25-38.
- [6] 钟晓雄,袁建新.颗粒材料的剪胀模型[J].岩土力学,1992,13(1):1-10.(ZHONG Xiao-xiong,YUAN Jian-xin.Shear dilating model of granular material[J].Rock and Soil Mechanics,1992,13(1):1-10.(in Chinese))
- [7] 葛修润,任建喜,蒲毅彬,等.岩土损伤力学宏观试验研究[M].北京:科学出版社,2004.
- [8] 卢再华,陈正汉,蒲毅彬.原状膨胀土剪切损伤演化的定量分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(9):1428-1432.(LU Zai-hua,CHEN Zheng-han,PU Yi-bin.Quantitative analysis on damage evolution of intact expansive soil during triaxial shear ing tes[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23(9):1428-1432.(in Chinese))
- [9] 黄质宏,朱立军,蒲毅彬,等.三轴应力条件下红黏土力学特性动态变化的CT分析[J].岩土力学,2004,25(8):1215-1219.(HUANG Zhi-hong,ZHU Li-jun,PU Yi-bin et al.CT analysis of dynamic change of mechanical properties of red clay under triaxial stress[J].Rock and Soil Mechanics,2004,25(8):1215-1219.(in Chinese))
- [10] 施斌,姜洪涛.在外力作用下土体内部裂隙发育过程的CT研究[J].岩土工程学报,2000,22(5):537-541.(SHI Bin,JIANG

- Hong-tao. A study on the development of failures inside soil under the external force using CT technique[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2000 22(5) :537-541.(in Chinese))
- [11] CUNDALL P A ,STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Geotechnique ,1979 29(1) :47-65.
- [12] 周健 ,池毓蔚 ,池永 ,等 .砂土双轴试验的颗粒流模拟[J]. 岩土工程学报 ,2000 22(6) :701-704.(ZHOU Jian ,CHI Yu-wei ,CHI Yong ,et al. Simulation of biaxial test on sand by particle flow code[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2000 22(6) :701-704.(in Chinese))
- [13] 杨贵 ,刘汉龙 ,陈育民 ,等 .堆石料动力变形特性的尺寸效应研究[J]. 水力发电学报 ,2009 28(5) :121-126.(YANG Gui ,LIU Han-long ,CHEN Yu-min ,et al. Research on size effect of rock-fill materials on dynamic deformation property[J]. Journal of Hydroelectric Engineering 2009 28(5) :121-126.(in Chinese))
- [14] 王继庄 .粗粒料的变形特性和缩尺效应[J]. 岩土工程学报 ,1994 16(4) :89-95.(WANG Ji-zhuang. Deformation characteristics and reduced scale effect of coarse-grained material[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering ,1994 16(4) :89-95.(in Chinese))
- [15] 张启岳 .用大型三轴仪测定砂砾料和堆石料的抗剪强度[J]. 水利水运科学研究 ,1980(1) :25-38.(ZHANG Qi-yue. Shear strength of sand gravel and rockfill materials tested by using large scale triaxial apparatus[J]. Hydro-Science and Engineering ,1980(1) :25-38.(in Chinese))
- [16] HOLTZ W G ,GIBBS H J. Triaxial shear tests on previous gravelly soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division ,1956 ,82(1) :1-22.
- [17] 酆能惠 ,朱铁 ,米占宽 .小浪底坝过渡料的强度与变形特性及缩尺效应[J]. 水电能源科学 2001 19(2) :39-42.(LI Neng-hui ,ZHU Tie ,MI Zhan-kuan. Strength and deformation properties of transition zone material of Xiaolangdi dam and scale effect[J]. Water Resources and Power 2001 19(2) :39-42.(in Chinese))
- [18] 刘萌成 ,高玉峰 ,刘汉龙 ,等 .粗粒料大三轴试验研究进展[J]. 岩土力学 ,2002 23(2) :217-221.(LIU Meng-cheng ,GAO Yu-feng ,LIU Han-long ,et al. Development of study on a large scale triaxial test of coarse-grained material[J]. Rock and Soil Mechanics ,2002 23(2) :217-221.(in Chinese))
- [19] 饶锡保 ,何晓民 ,刘鸣 .粗粒含量对砾质土工程性质影响的研究[J]. 长江科学院院报 ,1999 16(11) :21-25.(RAO Xi-bao ,HE Xiao-min ,LIU Ming. Influence of coarse grained content on engineering properties of gravelly soil[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute ,1999 16(11) :21-25.(in Chinese))
- [20] 余挺 .砾质土防渗料在高土石坝上的应用[J]. 水电站设计 2003 19(3) :15-17.(YU Ting. Application of chisley soil impermeable material in high embankment dams[J]. Design of Hydroelectric Power Station 2003 19(3) :15-17.(in Chinese))
- [21] LEE K L ,FARHOOMAND I. Compressibility and crushing of granular soils in anisotropic triaxial compression[J]. Canadian Geotechnical Journal ,1967 4(1) :68-86.
- [22] LESLIE D D. Large-scale triaxial tests on gravelly soils[C]//Proceedings of the 2nd Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Sao Paulo [s. n.] ,1963 :181-202.
- [23] MARSAL R J. Large-scale testing of rockfill material[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division ,ASCE ,1967 93(SM2) :27-43.
- [24] MIURA N ,O-HARA S. Partial-crushing of decomposed granite soil under shear stresses[J]. Soils and Foundations ,1979 19(3) :1-14.
- [25] HYODO M ,HYDE A F L ,KONAMI T. Cyclic shear behaviour of crushable carbonate sand[C]//Proceedings of 7th International Conference on Behaviour of Offshore Structures MIT ,Volume 1 ,Geotechnics. Boston [s. n.] ,1994 :205-216.
- [26] FEDERICO F. Statistical analysis of fabric of granular soil[C]//Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rio de Janeiro [s. n.] ,1989 :707-711.
- [27] MAKSIMOVIC M. Nonlinear failure envelope for coarse-grained soils[C]//Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rio de Janeiro [s. n.] ,1989 :731-734.
- [28] MARCU A ,LUCA E ,CRACIUM F. Nonlinear rockfill parameters and stability of dams[C]//Proceedings of the 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. New Delhi [s. n.] ,1994 :955-958.
- [29] 郭庆国 .粗粒土的工程特性及应用[M]. 北京 :中国水利水电出版社 2003.
- [30] 郭庆国 .关于粗粒土抗剪强度特性的试验研究[J]. 水利学报 ,1987(5) :59-65.(GUO Qing-guo. Experimental study on shear strength characteristics about coarse-grained soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering ,1987(5) :59-65.(in Chinese))
- [31] 吴京平 ,褚瑶 ,楼志刚 .颗粒破碎对钙质砂变形及强度特性的影响[J]. 岩土工程学报 ,1997 19(5) :49-55.(WU Jing-ping ,CHU Yao ,LOU Zhi-gang. Influence of particle breakage on deformation and strength properties of calcareous sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering ,1997 19(5) :49-55.(in Chinese))
- [32] 刘汉龙 ,秦红玉 ,高玉峰 ,等 .堆石粗粒料颗粒破碎试验研究[J]. 岩土力学 ,2005 26(4) :562-566.(LIU Han-long ,QIN Hong-

- yu ,GAO Yu-feng ,et al. Experimental study on particle breakage of rockfill and coarse aggregate[J]. Rock and Soil Mechanics ,2005 ,26 (4) :562-566.(in Chinese))
- [33] 秦红玉.考虑颗粒破碎的粗粒料损伤模型试验研究[D].南京 :河海大学 ,2002.
- [34] 魏松 ,朱俊高.粗粒料三轴湿化颗粒破碎试验研究[J].岩石力学与工程学报 ,2006 ,25(6) :1252-1258.(WEI Song ,ZHU Jun-gao. Study on wetting breakage of coarse-grained materials in triaxial tes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering ,2006 ,25(6) :1252-1258.(in Chinese))
- [35] NAYLOR D J ,MARANHA DAS NEVES E ,MATTER D ,et al. Prediction of construction performance of Belice dan[J]. Geotechnique ,1986 ,36(3) :359-376.
- [36] 汪明元 ,何晓民 ,程展林.粗粒料流变研究的现状与展望[J].岩土力学 ,2003 ,24(增刊) :451-454.(WANG Ming-yuan ,HE Xiao-min ,CHENG Zhan-lin. Current situation and prospect of studies on rheology property of course stuff[J]. Rock and Soil Mechanics ,2003 ,24(Sup) :451-454.(in Chinese))
- [37] 梁军.高面板堆石坝流变特性研究[D].南京 :河海大学 ,2003.
- [38] 梁军 ,刘汉龙.面板堆石料的蠕变试验研究[J].岩土工程学报 ,2002 ,24(2) :257-259.(LIANG Jun ,LIU Han-long. Creep test for rockfill of CFRI[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering ,2002 ,24(2) :257-259.(in Chinese))
- [39] 王辉.小浪底堆石料湿化特性及初次蓄水时坝体湿化计算研究[D].北京 :清华大学 ,1992.
- [40] 魏松.粗粒料浸水湿化变形特性试验及其数值模型研究[D].南京 :河海大学 ,2006.
- [41] 司洪洋.确定土石坝坝壳料邓肯模型参数的几个问题[J].水力发电 ,1983 ,19(8) :31-35.(SI Hong-yang. Several problems of determining the earth rockfill dam parameter of Duncan mode[J]. Water Power ,1983 ,19(8) :31-35.(in Chinese))
- [42] 司洪洋.论土石坝应力应变计算中的邓肯模型[J].水利水电工程学报 ,1985 (1) :89-98.(SI Hong-yang. Discussing the earth rockfill dam stress-strain calculation of Duncan mode[J]. Hydro-Science and Engineering ,1985 (1) :89-98.(in Chinese))
- [43] 李国英 ,赵魁芝 ,米占宽.堆石体流变对混凝土面板坝应力变形特性的影响[J].岩土力学 ,2005 ,26(增刊) :117-120.(LI Guo-ying ,ZHAO Kui-zhi ,MI Zhan-kuan. Influence of rheological behaviors of rockfills on stress-strain behaviors in concrete faced rockfill dan[J]. Rock and Soil Mechanics ,2005 ,26(Sup) :117-120.(in Chinese))
- [44] 沈珠江 ,鲁布革心墙堆石坝变形的反馈分析[J].岩土工程学报 ,1994 ,16(3) :1-13.(SHEN Zhu-jiang. Back analysis of deformation of Lubuge earth core rockfill dan[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering ,1994 ,16(3) :1-13.(in Chinese))
- [45] 傅志安 ,凤家骥.混凝土面板堆石坝[M].武汉 :华中理工大学出版社 ,1993.
- [46] 方宜生.利用红层石渣筑坝勘察与试验问题的探讨[C]//四川省水利学会工程地质与岩土力学论文选集.成都 :成都科技大学出版社 ,1994 :29-36.
- [47] 梁军 ,刘汉龙 ,高玉峰.堆石蠕变机理分析与颗粒破碎特性研究[J].岩土力学 ,2003 ,24(3) :479-483.(LIANG Jun ,LIU Han-long ,GAO Yu-feng. Creep mechanism and breakage behaviour of rockfill[J]. Rock and Soil Mechanics ,2003 ,24(3) :479-483.(in Chinese))
- [48] 沈珠江 ,赵魁芝.堆石坝流变变形的反馈分析[J].水利学报 ,1998(6) :1-6.(SHEN Zhu-jiang ,ZHAO Kui-zhi. Back analysis of creep deformation of rockfill dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering ,1998(6) :1-6.(in Chinese))
- [49] 李国英 ,米占宽 ,傅华 ,等.混凝土面板堆石坝堆石料流变特性试验研究[J].岩土力学 ,2004 ,25(11) :1712-1716.(LI Guo-ying ,MI Zhan-kuan ,FU Hua ,et al. Experimental studies on rheological behaviors for rockfills in concrete faced rockfill dan[J]. Rock and Soil Mechanics ,2004 ,25(11) :1712-1716.(in Chinese))
- [50] 沈珠江 ,左元明.堆石料的流变特性试验研究[C]//第六届土力学基础工程学术会议论文集.上海 :同济大学出版社 ,1991 :443-446.
- [51] 王勇 ,殷宗泽.一个用于面板坝流变分析的堆石流变模型[J].岩土力学 ,2000 ,21(3) :227-230.(WANG Yong ,YIN Zong-ze. A rheology model of rockfill used in the rheology analysis of concrete face rockfill dan[J]. Rock and Soil Mechanics ,2000 ,21(3) :227-230.(in Chinese))
- [52] 李广信.高土石坝初次蓄水及水位骤降情况应力变形分析计算总报告[R].北京 :中国水利水电科学研究院 ,1990.
- [53] 李全明 ,于玉贞 ,张丙印 ,等.黄河公伯峡面板堆石坝三维湿化变形分析[J].水力发电学报 ,2005 ,24(3) :24-29.(LI Quan-ming ,YU Yu-zhen ,ZHANG Bing-yin ,et al. Three-dimensional analysis for the wetting deformation of Gongboxia concrete faced rock-fill dam on the Yellow Rive[J]. Journal of Hydroelectric Engineering ,2005 ,24(3) :24-29.(in Chinese))
- [54] 张少宏 ,张爱军 ,陈涛.堆石料三轴湿化变形特性试验研究[J].岩石力学与工程学报 ,2005 ,24(增刊 2) :5938-5942.(ZHANG Shao-hong ,ZHANG Ai-jun ,CHEN Tao. Triaxial slaking test research on rock fill deformation feature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering ,2005 ,24(Sup 2) :5938-5942.(in Chinese))
- [55] 李鹏 ,李振 ,刘金禹.粗粒料的大型高压三轴湿化试验研究[J].岩石力学与工程学报 ,2004 ,23(2) :231-234.(LI Peng ,LI

- Zhen ,LIU Jin-yu. Slaking test study of coarse aggregate under high triaxial stress condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2004 ,23(2) :231-234.(in Chinese))
- [56] 魏松 ,朱俊高. 粗粒料湿化变形三轴试验中几个问题的探讨[J]. 水利水运工程学报 ,2006(1) :19-23.(WEI Song ,ZHU Jun-gao. Discussion on some problems in triaxial wetting test of coarse-grained materials[J]. Hydro-Science and Engineering ,2006(1) :19-23.(in Chinese))
- [57] 李广信. 堆石料的湿化试验和数学模型[J]. 岩土工程学报 ,1999 ,21(5) :58-64.(LI Guang-xin. Experimental study and mathematic simulation on wetting behavior of rock fill[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering ,1999 ,21(5) :58-64.(in Chinese))
- [58] 殷宗泽 ,赵航. 土坝浸水变形分析[J]. 岩土工程学报 ,1990 ,12(2) :1-8.(YIN Zong-ze ,ZHAO Hang. Deformation analysis of earth dam during reservoir filling[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering ,1990 ,12(2) :1-8.(in Chinese))
- [59] 刘汉龙 ,余湘娟. 土动力学与岩土地震工程研究进展[J]. 河海大学学报 :自然科学版 ,1999 ,27(1) :6-15.(LIU Han-long ,YU Xiang-juan. Advance in soil dynamics and geotechnical earthquake engineering[J]. Journal of Hohai University :Natural Sciences ,1999 ,27(1) :6-15.(in Chinese))
- [60] 沈珠江. 一个计算砂土液化变形的等价黏弹性模型[C]//第四届全国土力学及基础工程学术会议论文集. 北京 :建筑工业出版社 ,1986 :199-207.
- [61] 郑大同 ,王惠昌. 循环荷载作用下土的非线性应力应变模型[J]. 岩土工程学报 ,1985 ,5(1) :65-76.(ZHENG Da-tong ,WANG Hui-chang. Nonlinear stress-strain models of soils under cyclic loadings[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering ,1985 ,5(1) :65-76.(in Chinese))
- [62] 孙丽梅 ,刘垂远 ,何昌荣 ,等. 加筋土不同布筋方式的三轴试验研究[J]. 水电站设计 ,2005 ,21(2) :60-65.(SUN Li-mei ,LIU Chui-yuan ,HE Chang-rong ,et al. Triaxial test study on reinforced soil at different reinforcing patterns[J]. Design of Hydroelectric Power Station 2005 ,21(2) :60-65.(in Chinese))
- [63] 舒子亨 ,王勇. 加筋土应力应变和强度特性的试验研究[J]. 内蒙古水利 ,1999 (3) :5-6.(SHU Zi-heng ,WANG Yong. Experiment study on stress-strain and strength characteristics of reinforced soil[J]. Inner Mongolia Water Resources ,1999(3) :5-6.(in Chinese))
- [64] 雷胜友. 加筋黄土的三轴试验研究[J]. 西安公路交通大学学报 ,2000 ,20(2) :1-5.(LEI Sheng-you. Study on reinforced loess by triaxial test[J]. Journal of Xi 'an Highway University 2000 ,20(2) :1-5.(in Chinese))
- [65] MARKDISI F I ,SEED H B. Simplified procedure for estimating dam and embankment earthquake-induced deformations[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division ,1978 ,104(7) :849-867.
- [66] 陈生水 ,沈珠江. 强震区域土石坝永久变形的计算[J]. 河海大学学报 ,1990 ,18(2) :117-120.(CHEN Sheng-shui ,SHEN Zhu-jiang. Calculation on permanent deformation of earth-rockfill dams in areas of high seismicity[J]. Journal of Hohai University ,1990 ,18(2) :117-120.(in Chinese))
- [67] SERFF N ,SEED H B ,MARKDISI F I ,et al. Earthquake induced deformation of earth dams. Report No :EERC76-4[R]. Berkeley : University of California ,1976 :
- [68] 刘汉龙 ,陆兆溱 ,钱家欢. 土石坝地震永久变形分析[J]. 河海大学学报 ,1996 ,24(1) :91-96.(LIU Han-long ,LU Zhao-zhen ,QIAN Jia-huan. Earthquake-induced permanent deformation of earth-rock dams[J]. Journal of Hohai University ,1996 ,24(1) :91-96.(in Chinese))
- [69] POTYONDY J G. Skin friction between various soils and construction materia[J]. Geotechnique ,1961 ,11(4) :339-353.
- [70] CLOUGH G W ,DUNCAN J M. Finite element analysis of retaining wall behavior[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division ,1971 ,97(12) :1657-1673.
- [71] 殷宗泽 ,朱泓 ,许国华. 土与结构材料接触面的变形及其数学模拟[J]. 岩土工程学报 ,1994 ,16(3) :14-22.(YIN Zong-ze ,ZHU Hong ,XU Guo-hua. Numerical simulation of the deformation in the interface between soil and structural materia[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering ,1994 ,16(3) :14-22.(in Chinese))
- [72] 吴军帅 ,姜朴. 土与混凝土接触面的动力剪切特性[J]. 岩土工程学报 ,1992 ,14(2) :61-66.(WU Jun-shuai ,JIANG Pu. Dynamic shear characteristics of soils-concrete interface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering ,1992 ,14(2) :61-66.(in Chinese))
- [73] 胡黎明 ,濮家骊. 土与结构物接触面物理力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报 ,2001 ,23(4) :431-435.(HU Li-ming ,PU Jia-liu. Experimental study on mechanical characteristics of soil-structure interfac[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2001 ,23(4) :431-435.(in Chinese))
- [74] 卢廷浩 ,鲍伏波. 接触面薄层单元耦合本构模型[J]. 水利学报 ,2000(2) :71-75.(LU Ting-hao ,BAO Fu-bo. A coupled constitutive model for interface thin-layer elemen[J]. Journal of Hydraulic Engineering 2000(2) :71-75.(in Chinese))

[75] 张嘎 ,张建民 .粗粒土与结构接触面的静动本构规律[J].岩土工程学报 ,2005 ,27(5) :516-520.(ZHANG Ga ,ZHANG Jian-min . Monotonic and cyclic constitutive law of interface between structure and coarse grained soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering ,2005 ,27(5) :516-520.(in Chinese))

[76] 张嘎 ,张建民 .土与土工织物接触面力学特性的试验研究[J].岩土力学 ,2006 ,27(1) :51-55.(ZHANG Ga ,ZHANG Jian-min . Experimental study on behavior of interface between soil and geotextil[J]. Rock and Soil Mechanics ,2006 ,27(1) :51-55.(in Chinese))

[77] 周小文 ,龚壁卫 ,丁红顺 ,等 .砾石垫层-混凝土接触面力学特性单剪试验研究[J].岩土工程学报 ,2005 ,27(8) :876-880.(ZHOU Xiao-wen ,GONG Bi-wei ,DING Hong-shun ,et al . Large-scale simple shear test on mechanical properties of interface between concrete face and gravel underlayer[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering ,2005 ,27(8) :876-880.(in Chinese))

[78] 王伟 .基于能量耗散原理的土与结构接触面模型研究及应用[D].南京 :河海大学 ,2006 .

Review of key technical problems in construction of high earth-rockfill dams

FENG Tu-gen^{1 ,2} , YANG Gui^{1 ,2} , HUA Jian-lan³ , LIU Han-long^{1 ,2}
(1 . Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;
2 . Geotechnical Engineering Institute , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;
3 . Nanjing Water Planning and Designing Co . , Ltd . , Nanjing 210022 , China)

Abstract : The existing results in the construction of worldwide earth-rockfill dams were summarized . With regard to the construction of high earth-rockfill dams of hydropower development in West China , many key technical problems of earth-rock materials were emphatically discussed , including the test methods under high stress conditions , the strength deformation properties and constitutive models , the long-term deformation properties , the dynamic properties and constitutive relations as well as the mechanical properties of contact faces between soils and structures . On such a basis , the research interests and the main scientific problems in the future were discussed based on the above analyses .

Key words : high earth-rockfill dam ; earth-rock material ; stress deformation ; long-term deformation ; dynamic property

.....

· 简讯 ·

海上风电和风能应用技术研讨会将于 2010 年 10 月在宜昌举行

由中国长江三峡集团公司、河海大学、中国水利水电科学研究院和华东勘测设计研究院联合主办的海上风电和风能应用技术研讨会将于 2010 年 10 月在湖北省宜昌市举行 . 本次研讨会旨在加强与海上风电开发程度高、研究技术水平一流的国外研究机构或企业之间的技术交流与合作 , 了解国外海上风电技术发展的最新成果 , 为我国海上风电开发明确发展方向并提供思路目标 . 会议主题为 (a) 中国海上风资源与风电介绍 . (b) 海上风电技术交流 . 主要内容为 : 风场资源评估技术、激光雷达测风技术、发电量预测和风电功率短期预测模型 ; 风机在线实时监测与故障故障诊断技术 ; 电网接入与输出技术 ; 海上风机基础和结构设计技术 ; 风机、塔架防腐技术 ; 海上风电机组施工、维护技术和装备 ; 海上风电机组关键技术、可靠性和效率 . (c) 风能应用技术交流 . 主要内容为 : 新能源(风能和太阳能) 在海水淡化和制氢中的应用技术 ; 风能与抽水蓄能电站联合运行技术 ; 储能与控制技术 .

有关本次研讨会的内容 , 可访问 <http://www.hhu.edu.cn/notes/20100623-2.htm> .
(本刊编辑部供稿)