

室内土动力测试研究进展

张 茹¹ 李 洪¹ 费文平¹ 陈 锦²

(1. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065; 2. 四川省卫生干部学院, 四川 成都 610065)

摘要 对主要的室内土动力测试仪器及其特点进行总结, 指出室内土动力测试的研究方向与重点是试验研究材料的扩大与延伸、复杂应力状态下土动力特性研究、小应变下土动力参数的求取、土的动强度和液化及动力参数影响因素的探讨 4 个方面; 对动强度与液化基本概念作了较深入的探讨; 指出目前已提出的动本构模型主要有黏弹性、弹塑性和内时动本构模型 3 类, 其中在土体动力分析中应用最广的是等效非线性黏弹性模型。

关键词 室内土动力测试; 复杂应力; 动强度; 土体液化; 动本构模型

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1006-764X(2005)02-0062-05

Advances in soil dynamic indoor test//ZHANG Ru¹, LI Hong¹, FEI Wen-ping¹, CHEN Jin² 1. College of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. College of Sanitation Cadre of Sichuan Province, Chengdu 610065, China)

Abstract: The main instruments for soil dynamic indoor tests and their characteristics were summarized. The trend of and some key points in their development were presented, i. e. the expansion of test materials, research of soil dynamic properties under complicated stress state, acquirement of soil dynamic parameters under small strains, and some influencing factors on dynamic intensity, liquefaction and dynamic parameters. The basic concepts of dynamic intensity and liquefaction were further discussed, and some advances in the dynamic constitutive model were also reviewed.

Key words soil dynamic indoor test; complicated stress; dynamic intensity; soil liquefaction; dynamic constitutive model

中国位于世界两大地震活动带(环太平洋及喜马拉雅构造带)之间,地震区域广阔而分散,地震频繁而强烈。据历史记载,几乎中国各省都曾发生过破坏性地震。20 世纪全球发生的 7 级以上强震中,中国占 35%,有 3 次震级为 8.5 级以上的巨大地震发生在中国^[1]。中国是世界上地震灾害最为严重的国家之一。地震使城市房屋、工业厂房与设备、城市建设、交通运输、水电设施及临近的水利工程遭受严重破坏。

建筑物地基液化分析、修筑在震区的土石坝抗震设计时进行的动力分析,均需要有可靠的设计地震动及地基土或坝料静动力性质的资料。工程地区的各种地震动参数通常是由地震学家和地震工程学家通过地震危险性分析和设防基岩地震动的研究给出的,而地基土或坝料的静动力性质则由实验室试验得到。因此,室内土动力试验提供土体的可靠的动强度和动力参数取值是建筑物地基液化分析和土石坝地震动力分析准确性的关键。

1 室内土动力测试仪器

由于地震动载的随机性和复杂性,动力试验研究地震作用时通常将地震波看作是循环荷载作用于土上,在实验室中以等幅等周期的循环荷载模拟地震动荷载。土动力问题研究的应变范围很大,需要用不同的测试方法确定土体动力稳定计算中所用的参数。在室内可以做从小应变到大应变的试验,动强度与液化试验是研究试样大应变时的动力性质,而动模量阻尼比试验是研究试样小应变时的动力性质。

室内动力测试仪器有动三轴仪、振动剪切仪、共振柱仪、振动台、离心机等。动三轴仪使用方便,易于控制应力状态,因而得到了广泛的应用^[2]。振动剪切仪大致可分为振动单剪仪和振动扭剪仪两大类,可在试验室内更加真实地模拟实际地基地震前及地震时的应力条件。共振柱试验是据共振原理使一个圆柱形试样振动,改变其振动频率使其产生共振并测求试样的动弹模和阻尼比等参数。振动台试验是 20

基金项目: 国家重点基础研究 973 项目(2002CB412707)

作者简介: 张茹(1976—),女,山东德州人,讲师,博士研究生,从事岩土工程科研和教学工作。

世纪 70 年代发展起来专用于土的液化性状研究的室内大型动力试验.土工离心模型试验技术研究地震动力问题最先由英国剑桥大学在 20 世纪 70 年代末进行,由于离心机可满足应力水平相同的关键相似条件,加上近年来激振技术的不断改进和提高,它已逐步成为岩土工程研究领域的重要手段之一.黄文熙院士曾称土工离心机是岩土工程发展的一个里程碑.

2 室内土动力测试的研究方向与重点

现代土动力学自 1964 年日本新潟(Niigata)地震和美国阿拉斯加(Alaskan)地震、1976 年中国唐山地震后,受到了普遍高度重视及广泛深入的试验研究.查阅大量的文献资料,笔者认为近年来室内土动力测试的研究方向与重点可归纳为以下几点.

2.1 试验研究材料范围的扩大与延伸

当前,室内动力特性测试所研究的材料,不仅局限于砂性土和细粒土,还涉及到黄土、膨胀土、冻土等各种具有特殊性质的区域性土,并延伸至尾矿料、粉煤灰、海洋土及垃圾土等.例如:巫志辉等^[3]系统研究了陕北洛川标准剖面原状黄土的动变形和强度特性;汪兰民等^[4]研究了饱和黄土的液化机理,建立了饱和黄土孔隙水压力和应变的增长模型,定量研究了黄土液化的主要影响因素;雷胜友等^[5]研究了非饱和膨胀土在长期重复荷载下的动应力-应变关系、动强度特性及它们的主要影响因素;徐学燕等^[6]据大量的低温动三轴应力-应变试验资料给出了冻土的动弹模、动泊桑比、动剪模、动阻尼比的数值及它们与冻土温度和振动频率的关系;王余庆等^[7]使用动单剪仪对大石河 3 种尾矿砂样的动特性进行了研究,成果已用于大石河尾矿坝的震害分析;周健等^[8,9]对某电厂灰坝采用粉煤灰作为筑坝排水垫层的可行性进行了研究,并对某灰渣坝在 8 度地震作用下的稳定性进行了三维有效应力动力分析;简连贵等^[10]采用共振柱试验,研究了初始剪应力对海外回填土壤动态特性的影响;周健等^[11]利用循环三轴试验,分别模拟交通荷载和地震荷载,对城市垃圾土的动模量和振动残余应变试验结果进行分析并给出了计算公式.

2.2 复杂应力状态下土的动力特性研究

一般的动三轴仪以试件 45°斜面上应力模拟现场土的应力状态,不能真实反映地震时土的应力状态的复杂性.因此,一些学者使用循环扭剪仪模拟现场地震时的应力状态,研究土料的动力特性.例如:牛建新等^[12]使用国内研制的首台循环扭剪三轴仪研究了饱和砂的动强度和液化特性,系统地进行了

等压无预剪固结、等压有预剪固结和偏压无预剪固结的不排水试验;王洪瑾等^[13]利用空心圆柱扭剪仪对瀑布沟心墙土料系统地进行了复杂应力状态下初始主应力偏转角 α_0 以及中主应力参数 b 对土动力特性影响的试验研究.

2.3 小应变下土动力参数的求取

无论是动力模型,还是静力模型(例如 Duncan-Chang 模型),都定义初始动模量 E_{d0} 或动剪模量 G_{d0} 是 $\epsilon_d \rightarrow 0$ 的模量.土体此时处于弹性状态,因此是弹性模量或最大模量,即 $E_{dmax} = E_{d0}$, $G_{dmax} = G_{d0}$. E_{dmax} 和 G_{dmax} 是反映土动力特性的重要参数.但由于测量仪器的限制,常规动静三轴试验只能量测到 $\epsilon_d = 10^{-4} \sim 10^{-2}$,应变趋于零时的最大弹性模量则由试验曲线外延至应变为零处推求,因此求取的 E_{dmax} 或 G_{dmax} 也是该应变水平的模量.但对大多数土体而言,该应变水平对应的已不是土体的弹性状态,求取的模量也就不是符合原本物理意义的初始模量.对于大多数土体而言, $\epsilon_d = 10^{-6}$ 的模量比该应变水平对应的模量高 5 ~ 10 倍.杨桂芳就静力本构模型及其参数对计算结果的影响作了详细研究,表明静力参数的变化对计算结果有显著影响^[14],而动力参数的变化更将成倍地影响计算结果.这就是国内近 20 年来提供的 G_{dmax} 数值相差较大、计算的变形等结果明显或成倍地高于实测值的原因.因此,任何方法都必须是在足够小的应变条件下求取的 E_d 才能作为 E_{d0} . 这样才符合原本物理学定义的 $\epsilon_d \rightarrow 0$ 的 E_d 作为 E_{d0} (E_{dmax}) 的要求.

SL237-1999《土工试验规程》推荐使用共振柱试验量测土体小应变范围的动模量和阻尼比.事实上,Hardin 早在 1972 年就提出可由共振柱和现场波速法测求 G_{dmax} ,其后也有一些学者使用共振柱仪和动三轴联合测定全应变范围的动模量曲线,却无法克服试验点离散且衔接不好的缺点.因此,许多学者致力于小应变测量仪器的装置研究和改进.例如,大连理工大学引入日本学者 GoTo 和 Tatuoka 等人 1991 年开发的局部位移计(LTD)原理,在一台中型动三轴仪上配置了一种局部位移传感器,可测试从 $\epsilon_d = 10^{-5}$ 的小应变到破坏应变范围内土的动力特性.何昌荣 1994 年使用自制的电阻式应变仪,对 10 多项工程较准确地量测到 $\epsilon_d = 10^{-6} \sim 10^{-2}$,从而求得微应变下的动模量.

2.4 动强度和液化及动力参数影响因素的探讨

影响饱和土抗液化特性的主要因素有:①土性条件,主要指土的密实程度和颗粒特征;②起始应力条件,指动荷载施加前土体所承受的静应力状态,若为偏压固结,主要指固结应力比或初始剪应力的影

响 ③动荷条件,指动荷波形、振幅、频率、持续时间及作用方向等^[15,16]。

动模量阻尼比的影响因素有 13~15 个^[17],其中 4 个主要影响因素是动应变幅、固结围压力、固结主应力比或初始剪应力、孔隙比或相对密度,另外不同土类、粒径大小和级配、加荷频率和周次及饱和度等因素也有一定程度的影响^[18]。

对动强度和液化及动模量阻尼比的影响因素及各因素的影响程度,众多学者对不同土类展开了大量研究,但需指出的是,某些因素对土的影响并未形成一致结论,而且对于不同的土类,某些因素的影响也不尽相同,例如振动频率对黏性土的动力特性及动孔压发展变化的影响。因此,为获得准确可靠的土动力参数,并为今后的试验研究工作奠定基础,有必要对各影响因素作进一步探讨。

3 动强度与液化基本概念的探讨

人们对土动强度的认识是不断变化和发展的,严格地讲,关于土动强度的研究,迄今还不完善^[19~24]。汪闻韶^[21]将动力荷载分为冲击和循环两大类,详细论述了动力作用下土的强度问题。现今一般定义土的动强度为一定振次 N_f (一定时间)下,使土体达到某一破坏标准所需的动应力幅值。因此土的动强度与振次和破坏标准密切相关。破坏标准有孔压和变形两类:孔压标准又有极限平衡标准 $u_d = u_{cr}$ (u_{cr} 为临界孔隙水压力)和液化标准 $u_d = \sigma_{3c}$ 两种,变形标准可根据实际工程设计的需要选用 2.5%、5.0% 或 10.0%。此处关于破坏应变的概念具有两方面含义:一是试样达到真正破坏相应的应变;二是工程对象所能允许经受的破坏应变。前者从研究土性的变化出发,后者从研究工程对象稳定性出发。当然土性达到破坏时,由它做成的构筑物或地基自然发生破坏,所以上述两种含义基本一致。但土在各向不等压固结情况下受动荷载作用时,变形常连续增长,而土体并无明显破坏情况。此时,为了在设计上合理采用动强度指标,最好将二者联系起来确定不同建筑物设计时应该取用的破坏应变标准^[25,26]。经过多年试验实践,在选择破坏标准时很少用极限平衡条件来评定土体抗震稳定性,因此 SL237-1999《土工试验规程》对文献[25]下册进行修订时,没有列入极限平衡标准^[26]。

这里就土体的破坏问题进行简单讨论。土体的破坏一般以失稳作为衡量标准,亦即极限平衡问题。但在人类活动中对土体及其有关建筑物是否认为属于破坏,还需从实用上的安全度和经济上的合理性等方面进行考虑,所以是一个很复杂的问题。有些情

况中,土体虽未达到失稳,但是它的变形或裂缝达到一定程度后也可造成工程失效或建筑物的破坏,例如不均匀沉陷和漏水管涌所造成的破坏。有些情况中,土体虽已出现失稳条件,但由于失稳条件持续时间很短,且属于瞬间变化,土体可以产生一定损伤或变形,但尚未出现危害工程安全的明显迹象,例如地震等短暂无变荷载对非液化土体稳定性的影响就是这样。所以衡量一个土体破坏的标准,因情况而异,尤其在动力作用下的破坏标准,更有其特殊性^[21]。

液化实质上是动强度问题,但它因具有强度丧失的急剧性和突发性特点,而不同于一般的动强度问题。美国土木工程师协会岩土工程分会土动力学专业委员会对“液化”一词的定义是:“液化是使任何物质转化为液体状态的行为或过程。就无黏性土而言,这种由固体状态变为液体状态的转化是孔隙水压力增大和有效应力减小的结果”^[27]。在对土体的液化稳定问题做定量分析研究时,主要有“临界孔隙比”概念和“初始液化”概念。

前者以 Casagrande^[28]为代表,其基本出发点是剪切过程中,密砂剪胀,松砂剪缩,因此必然存在一临界孔隙比,在剪应力作用下体积不发生变化。若砂土层的孔隙比大于临界孔隙比,那么地震作用会使砂土层的体积减小,在不排水条件下孔隙水压力就会增高,可能发生液化破坏。后来,Casagrande 和 Castro^[29]重新调整了 Casagrande^[30]提出的“临界孔隙比”的概念和试验方法,进一步提出了“稳态抗剪强度”(steady-state shear strength)的概念,Poulos 等^[30]、Castro 等^[31]、Ishihara^[32]及 Bazier 等^[33]的工作都可以说是这方面研究的深入与继续。

后者以 Seed 和 Lee^[34]为代表,他们以动荷作用下饱和砂土的孔压值为依据,认为孔隙水压力上升至围压时为“初始液化”。从液化的应力状态出发,强调液化标志着土的法向有效应力等于零,土不具有任何抵抗剪切的能力。我国近年来的液化研究工作基本上接受并沿承了此种观点。

另外,谢定义^[23]认为应避免在液化用词涵义上无味纠缠,可以将土体处于液化应力条件的状态称为液化应力状态(简称液化状态),将土的结构破坏、孔隙水压力上升、强度降低的整个过程称为液化发展过程(简称液化过程),将现场喷砂冒水、大幅度滑流、土中建筑物上浮与地表建筑物下陷等现象称为液化宏观现象(简称液化现象)。这样,液化状态即为液化过程充分发展的结果且液化现象是液化过程中各种因素影响下发生的表现特征。

4 动本构模型研究概况

如前所述,在实验室中以等幅等周期的循环荷

载模拟地震动荷载作用于土上,土在受周期荷载作用时,应力应变关系不能以一条单纯的直线或曲线来表达,而是在每一个荷载循环内表现为一滞回圈,如图1所示.若将土视为黏弹性体,则此滞回圈表达了黏弹性体的能量耗散.不同荷载循环顶点(具有最大周期剪应力 $\pm \tau_m$ 和最大周期剪应变 $\pm \gamma_m$)的连线称为骨架曲线,骨架曲线通常非常接近于单调加载时的应力应变曲线.骨架曲线和滞回曲线分别反应了土在周期荷载作用下应力应变的两大特性,即非线性和滞后性^[19].为了模拟这两大特性,国内外学者做了大量研究,提出了许多动本构模型来描述骨干曲线和滞回曲线.

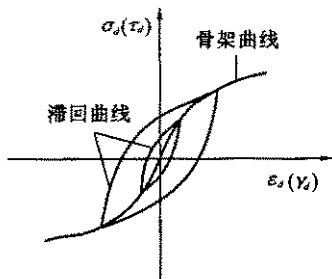


图1 滞回圈示意图

目前已提出的动本构模型主要分为3类,即黏弹性、弹塑性和内时动本构模型^[20-35].其中黏弹性动本构模型是将土体视为由一个或多个弹簧和黏壶组合而成的黏弹性模式,主要包括双直线模型,以及Hardin-Drebnich(等效非线性黏弹性模型或等效线性模型),Masing,Ramberg-Osgood,Seed等模型及其相应的修正模型.

在国内,沈珠江^①曾提出一个计算砂土液化变形的等价黏弹性模式,并详细论述了该模式动力变形计算参数的室内测定方法.沈珠江模式虽然仍属于黏弹性模型范畴,但它从一个荷载循环到下一个荷载循环之间可以允许产生塑性变形,因此克服了一般黏弹性模式的缺点,可以计算残余应变和位移,从而计算永久变形,有一定的实际意义.弹塑性动本构模型建立在弹塑性理论上,可考虑弹性和塑性应变,从而更加真实地揭示动荷载下建筑物的反应形态,但由于模型复杂,在实用上受到限制.内时动本构模型以内时参数量度材料对变形历史的记忆,其转换变量可表示土在受荷过程中的加密作用、体积应变、剪应变、孔压增长及其他各种不可恢复的非线性反应.

在众多模型中,等效非线性黏弹性模型概念明确,能较合理地确定土体在地震加速度作用下的剪应力和剪应变反应,因此在土体动力分析中应用最

广.另外,在实用上,为克服各模型拟合实测曲线的不足,多用实测的 $G_d-\gamma_d$ 和 $\lambda-\gamma_d$ 曲线经插值处理后直接作为计算参数输入^[16].

5 结 语

a. 指出室内动力测试仪器主要有动三轴仪、振动剪切仪、共振柱仪、振动台、离心机等,并对各测试仪器的特点作了简单总结.

b. 对室内土动力测试的研究方向与重点进行总结,内容包括4个方面:试验研究材料的扩大与延伸,复杂应力状态下的土的动力特性研究,试验仪器的改进和仪器测量精度的提高,动强度和液化及动力参数影响因素的探讨.

c. 将不同学者对动强度与液化基本概念的认识作了总结归纳.

d. 指出目前已提出的动本构模型主要分为黏弹性、弹塑性和内时动本构模型3类,并对各模型的特点作了简单比较,指出在土体动力分析中应用最广的是等效非线性黏弹性模型.

参考文献:

- [1] 陈厚群. 中国大坝的抗震设计与研究[J]. 水利学报, 2000 (第20届国际大坝会议专辑): 77—85.
- [2] 王杰贤. 动力地基与基础[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [3] 巫志辉, 谢定义, 余雄飞. 洛川黄土的动变形和强度特性[J]. 水利学报, 1994(12): 67—71.
- [4] 王兰民, 刘红玫, 李兰, 等. 饱和黄土液化机理与特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 89—94.
- [5] 雷胜友, 李克钊. 膨胀土动力性质的研究[J]. 成都科技大学学报, 1995(3): 20—24.
- [6] 徐学燕, 仲从利. 冻土的动力特性研究及其参数确定[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(5): 77—81.
- [7] 王余庆, 辛鸿博. 中国尾矿坝地震安全度(10)——用动单剪仪研究大石河尾矿砂的动特性[J]. 工业建筑, 1995, 25(3): 37—40.
- [8] 周健, 白冰. 粉煤灰作为筑坝排水垫层的动力特性试验研究[J]. 勘查科学技术, 2000(5): 7—11.
- [9] 周健, 董鹏, 戚佩江. 灰渣坝抗震稳定性的三维有效应力动力分析[J]. 水利学报, 2000(7): 44—48.
- [10] 简连贵, 张上君, 胡渊男. 初始剪应力对海外回填土壤动态特性之影响[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(4): 420—426.
- [11] 周健, 池毓蔚. 垃圾土室内动力试验研究[J]. 岩土力学, 1999, 20(4): 1—5.
- [12] 牛建新, 汪闻韶. 循环扭剪试验中饱和砂土的某些动力特性[J]. 水利学报, 1994(5): 77—83.
- [13] 王洪瑾, 马奇国, 周景星. 土在复杂应力状态下的动力

①沈珠江. 一个计算砂土液化变形的等价黏弹性模式. 南京水利科学研究院, 1983.

特性研究 J]. 水利学报, 1999(4): 57—64.

- [14] 杨桂芳. 静力本构模型试验、参数确定及参数对计算结果的影响分析 D]. 成都: 四川大学, 1999.
- [15] 谢定义. 土动力学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.
- [16] 吴世明. 土动力学 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [17] Bobby O H, Vincent P D. Shear modulus and damping in soils: measurement and parameter effects [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1972, 98 (SM6): 603—624.
- [18] 吴世明, 徐攸在. 土动力学现状与发展 [J]. 岩土工程学报, 1998, 20(3): 125—130.
- [19] 汪闻韶. 往返荷载下饱和砂土的强度、液化和破坏问题 [J]. 水利学报, 1980(1): 14—26.
- [20] 许才军, 周红波. 不排水循环荷载作用下饱和软粘土的孔压增长模型 [J]. 勘察科学技术, 1998(1): 3—7.
- [21] 汪闻韶. 土的动力强度和液化特性 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1997.
- [22] 张建民, 谢定义. 饱和砂土本构理论的研究进展 [J]. 力学进展, 1994, 24(2): 187—205.
- [23] 谢定义. 饱和砂土体液化的若干问题 [J]. 岩土工程学报, 1992, 14(3): 90—98.
- [24] 邵生俊, 谢定义. 饱和砂土的动强度及破坏准则 [J]. 岩土工程学报, 1991, 13(1): 24—33.
- [25] SDS01-79, 土工试验规程 [S].
- [26] SL237-1999, 土工试验规程 [S].
- [27] The Committee on Soil Dynamics of Geotechnical Engineering

Division, ASCE. Definition of terms related to liquefaction [J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1979, 104(GT9): 1197—1200.

- [28] Casagrande A. Characteristics of cohesionless soils affecting the stability of slopes and earthfills [J]. Journal of the Boston Society of Civil Engineers, 1936, 23(1): 257—276.
- [29] Castro G. Liquefaction and cyclic mobility of saturated sands [J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1975, 101(6): 551—569.
- [30] Poulos S J, Castro G, France J W. Liquefaction evaluation procedure [J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1985, 111(6): 772—791.
- [31] Castro G, Seed R B, Keller T O, et al. Steady-state strength analysis of Lower San Fernando dam slide [J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1992, 118(3): 406—427.
- [32] Ishihara K. Liquefaction and flow failure during earthquakes [J]. Geotechnique, 1993, 43(3): 351—415.
- [33] Bazier M H, Dobry R. Residual strength and large-deformation potential of loose silty sands [J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1995, 121(12): 896—906.
- [34] Lee K L, Seed H B. Cyclic stress conditions causing liquefaction of sand [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1967, 93(SM1): 47—70.
- [35] 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.

(收稿日期 2004-09-06 编辑 高建群)

(上接第 22 页)

- [14] 徐士良. FORTRAN 常用算法程序集 [M]. 第 2 版. 北京: 清华大学出版社, 1995. 501—511.
- [15] Al-Sheriadeh M S, Barakat S A, Shawagfeh M S. Application of a decision making analysis to evaluate direct recharging of an unconfined aquifer in Jordan [J]. Water Resources Management, 1999, 13(4): 233—252.
- [16] Srivastava K, Rai S N, Singh R N. Modeling water-table fluctuations in a sloping aquifer with random hydraulic conductivity [J]. Environmental Geology, 2002, 44(5): 520—524.
- [17] Hunt A G. An explicit derivation of an exponential dependence of the hydraulic conductivity on relative saturation [J]. Advances in Water Resources, 2004, 27(2): 197—201.
- [18] Freeze R A. A stochastic-conceptual analysis of one-dimensional groundwater flow in nonuniform homogeneous media [J]. Water Resources Research, 1975, 11(5): 725—741.

(收稿日期 2004-05-25 编辑 高建群)

(上接第 45 页)

4 结语

虚拟现实技术是一种全新的信息处理方式,正在被广泛应用于各个领域,它对仿真环境的改善将起重大作用^[3].使用这一技术实现的灌区虚拟现实系统为灌区建设的决策提供形象可靠的依据,为灌区提供了科学的管理手段.目前,全国大型灌区的建设作为国家试点项目,已先后在十几个省市建立试点.灌区虚拟现实系统的建设还有待进一步完善.

参考文献:

- [1] 钟正, 朱庆. 一种基于海量数据库的 DEM 动态可视化方法 [J]. 海洋测绘, 2003, 23(2): 10—19.
- [2] 刘仁义, 刘南. 基于 GIS 技术的淹没区确定方法及虚拟现实表达 [J]. 浙江大学学报, 2002, 29(5): 573—576.
- [3] 张续红, 苏建明, 胡庆夕. 虚拟现实技术在城市规划仿真中的应用 [J]. 计算机仿真, 2003, 20(7): 75—77.

(收稿日期 2004-08-30 编辑 高建群)