

软弱土层输水隧道 地震响应及减震措施研究

刘金云 杨 光 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

软弱土层输水隧道 地震响应及减震措施研究

刘金云 杨 光 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是一本学术性专著,除介绍一些与本书内容有关的必备知识外,着重系统论述了软弱土层输水隧道在地震作用下的分析和减震措施研究。全书共分5章,内容包括:绪论,软弱土层输水隧道考虑流—固耦合的地震响应动力特性分析,影响软弱土层输水隧道地震反应的因素研究,输水隧道的内水简化模型及减轻衬砌震害灾害的工程减震措施研究,软弱土层输水隧道的物理模型试验相似技术的研究。

本书可供土木工程、水利水电工程等专业的高等院校教师和高年级本科生、研究生以及相关的工程技术人员学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

软弱土层输水隧道地震响应及减震措施研究 / 刘金云, 杨光著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2013. 3
ISBN 978-7-5170-1284-9

I. ①软… II. ①刘… ②杨… III. ①软土—过水隧洞—抗震措施—研究 IV. ①TV672

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第229722号

书 名	软弱土层输水隧道地震响应及减震措施研究
作 者	刘金云 杨 光 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京时代澄宇科技有限公司
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	175mm×245mm 16开本 8.25印张 196千字
版 次	2013年3月第1版 2013年3月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	26.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

众所周知，水资源、能源是人类生存、生活、发展的必需品，是制约我国经济高速持续发展战略的主要因素之一，所以我国输水工程的建设势在必行。而我国又是地震高发区，地质条件复杂，输水隧道不可避免要穿越河流、海湾，周围通常为沙砾层、黏土层、淤积层等构成的软土地层，这就使我们研究在地震作用下软弱土层大管径输水隧道考虑流—固耦合的动力响应特性及其震害影响因素是很有必要的。更何况，输水隧道与一般的地下结构又有所不同，它不仅存在着土体和衬砌的相互作用，而且还存在着衬砌与水体的相互作用，所以其振动特性比地下结构或地面结构要复杂得多。无论从理论分析还是从震害现象看，是否考虑内水的影响是当前输水隧道讨论的热点。由于这方面的工作难度较大，研究历史不长，有很多问题没有很好的解决，各国抗震规范都还没有给出考虑流—固耦合作用的结构抗震计算与设计方法。随着重大生命线工程和复杂水利工程的兴建（如核电站、海洋平台、大型水坝等），需要对结构的抗震分析和设计考虑得更精细、更全面一些，这一问题已引起了越来越多学者的极大重视。到目前为止，有关大型输水隧道的抗震分析及隔震减震措施研究已取得了一些研究成果，散见于各类文献中，但还没有一本系统介绍这方面研究成果的专著。

作者自 2001 年起，便开始从事地下结构——输水隧道地震动反应分析及隔震减震措施方面的研究工作，在考虑输水隧道内水的情况下的地震动理论、地震反应分析及减震措施等方面取得了一系列的研究成果，在这一领域作了可贵的尝试。本书从理论和工程实际入手，以作者的研究成果为主线，并纳入了目前世界上有关方面的最新研究成果，是一本内容丰富，自成系统的专著，力图反映地震动的实际作用方式和结构反应的主要特性，力图理论与实际相结合，这是本书的两个基本出发点。

全书分为 5 章：第 1 章绪论，介绍地下结构地震作用动力分析及隔

震减震措施研究的国内、外发展趋势；第2章软弱土层输水隧道考虑流—固耦合的地震响应动力特性分析，主要根据固体、流体的基本运动方程及土体、衬砌、流体所选取的计算模型，建立基于势流体的流—固耦合运动方程，并应用实例进行验证和分析；第3章影响软弱土层输水隧道地震反应的因素研究，主要介绍输水隧道埋深、围土性质、结构特性及地震动输入机制等，对衬砌、环缝接头、竖井等部位的地震响应进行全面系统地研究；第4章输水隧道的内水简化模型及减轻衬砌震害灾害的工程减震措施研究，主要介绍势流体几种简化模型在输水隧道抗震设计中的应用和不同围岩的输水隧道的不同部位的工程减震方案及综合振动控制措施；第5章软弱土层输水隧道的物理模型试验相似技术的研究，主要在验证了模型试验材料与原型材料均相同和均不同的模型试验相似准则的基础上，根据动力模型试验的截面刚度相似，提出了动力模型试验的惯性半径相似技术。

本书能够完成，得到了大连理工大学导师林皋院士、陈健云教授谆谆教导和悉心指导，渗透着导师的心血和教诲。值此专著出版之际，谨向他们致以崇高的敬意和深深的谢意。并相信该书的出版，必将对地下结构输水工程的抗震分析与减震措施的研究工作起到一定的推动作用。

书中研究成果得到了国家自然科学基金委员会面上基金项目(50209002)、黑龙江省教育厅科学技术面上项目(12531441)和黑龙江八一农垦大学校基金课题(B2008-9)的资助，在此表示衷心感谢。

本书由黑龙江八一农垦大学工程学院刘金云和杨光合著，其中第2章、第3章、第5章由刘金云撰写，第1章、第4章由杨光撰写。由于作者水平有限，书中必有疏漏及错误之处，恳请读者批评指正。

著 者

2013年3月

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 输水隧道及地下结构抗震国内外研究现状和发展趋势	1
1.2 地下结构抗震分析的研究方法	11
参考文献	16
第2章 软弱土层输水隧道考虑流—固耦合的地震响应动力特性分析	28
2.1 引言	28
2.2 基于势流体的流—固耦合运动方程	30
2.3 基于势流体的流—固耦合有限元运动方程的算例分析	35
2.4 带有竖井的输水隧道地震响应分析	44
参考文献	46
第3章 影响软弱土层输水隧道地震反应的因素研究	47
3.1 输水隧道横截面地震反应分析中的影响因素研究	47
3.2 输水隧道三维整体地震反应分析中的影响因素分析	52
3.3 考虑多点地震动输入时输水隧道地震动响应的分析和研究	57
参考文献	62
第4章 输水隧道的内水简化模型及减轻衬砌震害灾害的工程减震措施研究	64
4.1 势流体的几种简化模型在输水隧道抗震设计中的应用	64
4.2 减轻输水隧道衬砌震害灾害的工程减震措施研究	68
参考文献	82
第5章 软弱土层输水隧道的物理模型试验相似技术的研究	84
5.1 引言	84
5.2 模型的相似理论	85
5.3 与原型材料相同的动力模型试验的相似技术	95
5.4 用有机玻璃—明胶—内水模拟输水隧道的动力模型试验的相似技术	102
5.5 用原状土—有机玻璃—内水来模拟输水隧道的动力模型 试验的相似技术	107
参考文献	121
撰写本专著期间所发表的学术论文及科研情况	123

第 1 章 绪 论

1.1 输水隧道及地下结构抗震国内外研究现状和发展趋势

1.1.1 隧道及地下结构抗震研究的发展概况

因为地震隧道及地下结构同地面建筑一样也会发生震害^[1-6]，所以隧道及地下结构抗震理论是随着地面建筑抗震理论的发展而发展起来的。由于地下结构物所受振动程度远小于地面建筑，有关该问题的研究起步较晚。20 世纪 50 年代以前，国内外隧道及地下结构的抗震设计都是以日本学者大森房吉提出的静力理论为基础来计算地下结构的地震力。20 世纪 60 年代初，苏联学者在抗震研究中将弹性理论用于地下结构（拟静法）计算，以此求解均匀介质中关于单连通和多连通域中的应力应变状态，得出了地下结构地震力的精确解和近似解^[7]。前苏联在修建贝—阿干线（BAM）地震高烈度区铁路隧道时十分重视隧道衬砌的抗震设计，在塔什干、埃里温地下铁道建设中也采用了抗震的车站和区间隧道结构^[7,8]。20 世纪 60 年代末，美国旧金山海湾地区在建设快速地铁运输系统（BART）时，对地下结构抗震进行了深入研究，他们提出了地下结构并不是抵御惯性力而是具有吸收强加变形的延性，同时还不丧失其承受静载荷等新的设计思想，并以此为基础提出了抗震设计标准^[8]。美国在 20 世纪 80 年代洛杉矶（LOSANGELES）地下铁道的设计中，对地震荷载做了充分的考虑。20 世纪 70 年代，日本学者从地震观测资料着手，通过现场观测、模型试验，建立了数学模型，并结合波的多重反射理论，提出了响应位移法、应变传递法、地基抗力法等实用计算方法，使地下软基隧道和成层地基的抗震研究获得重大进展^[9-11]。而且在沉管隧道的设计中，他们还率先采用了反应位移法；另外为了防止和减轻地震对隧道造成的危害，他们又将隧道抗震的思想贯穿到选线、设计、施工、维修、改造的全过程^[11]。Dasgupta^[12]（1982 年）曾提出用衍生方法（Cloning Method）来建立地基动力阻抗矩阵，Wolf 和 Song^[13]（1994 年）在此基础上对该方法加以发展。后来，Wolf 和 Song 又相继提出了阻尼影响抽取法^[14]、标度边界有限元法^[15]模拟动力地基无限域的影响，为地下结构动力分析中地基动力阻抗矩阵的计算提供了新的途径。我国学者在地下结构抗震方面也做了部分工作^[2,16-22]。

近几十年来，随着地下结构数量的增多和地下结构震害的频繁出现，地下结构抗震问题日益受到世界各国地震工作者的高度重视。特别是 1995 年日本阪神大地震

后, 由于神戸市地铁结构发生严重破坏, 引起众多地震学者的关注, 使地下结构抗震研究出现前所未有的热潮, 成为地震工程界重要的研究方向。

尽管隧道及地下结构的抗震研究取得了很大进展, 但地下结构的抗震设计方法直到 20 世纪 70 年代后, 才开始在日本的水道、沉管隧道以及核电厂等抗震设计规范中逐步得到体现^[23]。国内相关的规范规定基本上仍然采用的是地面结构的抗震设计方法。一般铁路隧道的抗震措施均按 1988 年颁布的铁路工程抗震设计规范^[24]的有关规定执行, 2006 年颁布的新的铁路工程抗震设计规范^[25]在该问题上与以前规范基本一致。规范中关于隧道的抗震强度和稳定性验算条文是参照既有设计经验, 本着突出重点、区别对待的原则制定的。根据震害调查和试算, 规范将抗震试算范围, 大致定在四类围岩以下的洞口、浅埋、偏压隧道和明洞, 地震烈度为 7~9 度。验算方法规定为附加地震力的静力法, 只验算水平地震力对隧道强度和稳定性的影响, 不验算深埋隧道的抗震性。强震区隧道的设计思路是普遍采用加强衬砌, 增大刚度, 抵抗地震作用力的方法。实际上, 把埋在地层中的隧道结构和地面结构一样采用静力法进行计算, 往往不能反映实际, 且计算结果过于保守。同时, 一味增大刚度来抵抗地震力的设计思路值得商讨。此外, 规范对于隧道是否需要设置抗震缝以及如何设置的问题也没有具体规定。另外, 在我国地下铁道设计中, 由于研究工作开展不够, 目前规范^[26]对抗震设计尚无具体规定。在公路设计中, 有关隧道抗震设计的规定^[27]也非常简单, 基本上沿用铁路隧道设计的相关规定仍然采用静力法验算隧道的结构抗震强度和稳定性。

1.1.2 流体与固体耦合研究的发展概况

在工程领域中, 流体和固体的相互作用大致分成三类: 第一类问题的特点是流体与固体二者之间具有较大的相对速度, 如航空、航天工程中的机翼与空气的动力耦合问题, 被称为气动弹性力学问题; 第二类问题重点研究的是液体域与固体域的动力相互作用, 其特点是二者之间相互作用时间较长, 相对位移有限, 被称为流体弹性力学问题, 一般的民用工程如坝体与库水, 波浪与海岸结构, 水塔, 储液池、罐, 渡槽, 输水隧道、隧洞等的流—固耦合, 以及近年来发展起来的建筑结构减震装置 TLD (调频液体阻尼器) 及 TSD (调频晃动阻尼器) 等; 第三类问题则为二者之间相互作用的时间很短, 流体的密度急剧变化的特殊问题, 如域内爆炸, 物体在液面高速溅落以及潜射导弹的出水过程。本文所关注的问题则是第二类流—固动力耦合问题。

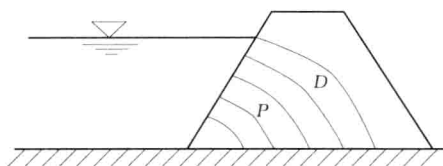


图 1.1 渗流问题图

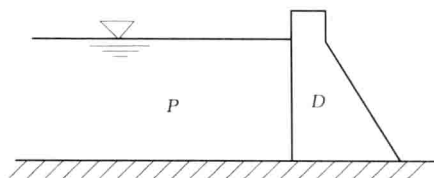


图 1.2 流—固耦合问题

从总体上来看,其中对于第二类的流—固耦合问题又可分为重叠型与接触型两类。重叠型问题是指固体和流体部分或全部地相互重叠在一起,难以明显地分开,使得描述其物理性质的方程,尤其是本构方程需要针对具体的物理现象才能建立起来,如图 1.1 所示的渗流问题^[28-31]。接触型问题是指固体和流体的耦合作用仅发生在交界面上,固体和流体有各自的描述方法和力学性能特征,其联系在于两相耦合面上的力学平衡及运动协调。如图 1.2 所示的流体与固体的相互作用^[32-41]。

重叠型和接触型问题的求解原则是相同的,它们需要分别对流体和固体建立运动的控制方程。它们的区别在于:前一类问题中,需要对全部重叠区域建立耦合控制方程;而后一类问题中,各介质的不同变量只在接触面上通过边界条件互相耦联。

流—固动力耦合理论的研究,主要伴随涉及流—固耦合工程系统的出现,规模增大及破坏现象的发生及增多而发展的。一般认为 1933 年 Westergaard^[42]首次对无限高、刚性垂直坝体,在半无限域库水、无面波影响、受谐波激励情况下作用在坝体上的动水压力研究,标志着第二类流—固耦合理论研究的起始。经 Westergaard 之后,田野正^[43]对 Westergaard 的解答进行了讨论,在同样假定条件下给出了较完整的数学解答,克服了 Westergaard 解答只有在坝的自振频率远高于外激励频率才正确的条件;1958 年小坪清真^[44]则研究了弹性坝体振动及不规则地面运动情况下,重力坝上的动水压力分布,并通过中等高坝的实例指出了 Westergaard 解答偏小。

在此期间,我国学者对此也开展了较广泛的研究,钱令希^[45]用电模拟和计算相结合研究了满库时坝体的自振问题,刘恢先^[46]用模型试验结果进行理论分析确定坝的自振特性,郑哲敏^[47,48]、王前信^[49,50]对不可压缩的理想水体,应用速度势函数研究了一侧有半无限水域的悬臂梁的自振频率和振型的理论解答,居荣初^[51,52]将其扩展到水中圆柱体结构的微幅自由振动,及其外部和内部的水对自振特性的影响,导出了动水压力和自振频率的计算方法,这些研究成果拓宽了 Westergaard 的解答,但是这些成果都是在不可压缩水体、无面波产生的条件下得到的。王克成^[53]指出了居荣初的研究中不考虑水的可压缩性,不计面波条件下,构造的速度势函数,不能满足圆柱体与水接触的连续条件,并给予修正。

Zienkiewicz^[54]的研究表明在讨论坝与库水的相互作用时,不计水的可压缩性,将带来较大的误差,尤其是在不规则激励下,计算坝的动水压力必须考虑水的可压缩性影响。Bustanante, et al^[55]研究指出,面波对动水压力的影响与水深和激励周期有关,当 $H/T > 4.2H^{0.5}$ 时, $\epsilon < 5\%$; 当 $2.6H^{0.5} < H/T < 4.2H^{0.5}$ 时, $20\% > \epsilon > 5\%$; 当 $H/T < 2.6H^{0.5}$ 时, $\epsilon > 20\%$ (式中: H 为水深, m; T 为外激励周期, s; ϵ 为相对误差率)。由此可以看出,对于一般的坝面而言, H/T 远大于 $4.2H^{0.5}$, 面波对坝上的动水压力影响不大,其研究限于小幅振动情况。

Chopra^[56,32-34]在刚性坝面、可压缩库水、微幅振动条件下,探讨了坝在竖向地

震荷载作用下的动水压力,其在结论中给出,竖向地震荷载产生的动水压力是比较大的,不能被忽略。其后 Chopra 在考虑坝—库水—地基相互作用对动水压力的影响时表明,坝体柔性对动水压力有决定性的影响,库水和坝基条件对坝体的动水压力也具有重要影响,不考虑其相互作用,坝体地震荷载是不正确的,Chopra 的研究仅局限于坝的基本振型,即指定的位移曲线。

以上的研究工作,主要集中在无限水域或半无限水域的流—固耦合问题。几乎与 Westergaard 研究坝—水耦合的同时, Hoskings^[57] 在 1934 年进行了储液罐由模拟地震引起的动水压力问题,完成了储液罐中液体晃动的特性研究,对这类问题作了开创性工作; Jacobsen 和 Ayre^[58] 则进行了刚性储液罐遭受瞬态运动时动水压力的试验研究。值得提出的是, Housner^[59,60] 于 1957 年提出至 1963 年完善了刚性矩形和柱形储液池水体的简化模型,将储液罐内流动效应分为脉冲分量(罐内液体随罐体作同步运动的液动效应)和对流分量(罐内液体晃动部分的液动效应)两部分,对流体用等效原则简化为弹簧质量系统。在类似储液罐的流—固耦合内流问题抗震计算研究的领域, Housner 模型简单实用,受到众多学者的青睐,在五、六十年代就被广泛采用。但 Housner 模型把结构当作为刚性的假定,是不合适的,尤其对固体刚度较低时, Housner 的结果偏小,低估了水体的晃动效应,1964 年在阿拉斯加大地震中,按 Housner 理论设计的储液罐等结构,遭到很大破坏,也证明了这一点。Housner 模型对刚度较大的结构,其响应值是与实际水体的响应值是比较接近的^[61,62],后人在对某些固体域刚度较大的类似储液罐结构,作初步研究时仍采用此模型。如李宏男^[63,64]、刘云贺^[65]在探讨水箱减震时,宋金峰^[66]、张俊发^[67]在探讨渡槽的地震响应时,对水体的处理都采用了 Housner 简化模型。Newmark^[68]在分析储液池时指出,水体面波对研究坝体动水压力是可以忽略的,而水的可压缩性则是重要的,但对于通常尺寸的水池,刚好与此相反,可略去水的可压缩性,而不能忽略面波的影响作用。

至此,20 世纪 60 年代以前,在流—固耦合的研究中,解答都是采用解析法进行的,对流体域的响应是以固体与流体接触边界的固体加速度或位移作为已知条件而得到的,固体域的响应是以流体的动水压力作为外荷载而得出的,这种求解方法使流体与固体的响应相对独立,减少了运算工作量,但这种求解没能实现流体与固体的真正耦合。另外,流体和固体的动力耦合的解析解,包含复杂的级数形式,由于级数求解的困难,解析法不可能将众多因素的影响同时考虑,只能在探讨某些量时,对其他因素进行某些假定,而得到特殊解,对某些复杂边界问题不可能给出解答,使得对问题的研究受到很大的限制。

20 世纪 70 年代开始,数值计算方法和计算机计算手段突飞猛进的发展,给流体与固体耦合作用的研究带来了新的活力,众多学者采用有限元^[28,29,69,70]、边界

元^[61,62,71]及其混合法^[72,73]等数值方法结合坝—库水—地基系统、储液池等涉及流体—固体耦合的研究领域做了大量工作,使流体—固体耦合数值法研究得到较大发展。

Zieniewicz 等人^[74]在用有限元分析储液罐振动问题时,提出了解决流—固耦合振动的要点,认为可以用一个附加质量阵来修正固体质量矩阵,从而将流—固耦合振动问题简化为修改结构的问题,流—固耦合的作用通过流体的附加质量来反映。这一方法较简单,但附加质量的大小与激励频率相关,对于宽频带的地震输入,附加质量的大小是较难确定的。

Chopra 及合作者在用有限元分析结构与地基^[35]、结构与土壤^[75]相互作用的基础上,采用所谓的子结构法研究了地震荷载作用下重力坝—库水—基础的相互作用,将水、坝、基础当做相互独立的子结构,并对每一个结构划分为二维有限元分析,该处理方法对流体固体接触边界处理过于简单,仅将接触面考虑为连续无相对运动的,另外,该研究也没有计入表面波的影响,仅讨论了小幅振动情况。其后 K. L. Fok、Chopra 等^[76,77]将二维分析发展到了三维,仍用子结构的概念进行了三维拱坝的研究,使研究领域发展到了空间,但其对流体—固体耦合处理尚未见新的发展。

陆鑫森、Clough^[78]发展了杂交子结构法,将浮动结构剖分为一系列杂交型子结构,每个子结构又由若干个固体单元及其周围的流体单元混合而成,将所有的杂交“超单元”组合后再引入流—固界面相容性条件,而得流—固系统矩阵方程组,这种耦合由流体惯性矩阵完成,类似于附加质量法。

Shantaran、Bath 等人^[79]在结构和流体域中以位移为基本未知量,建立了有限元方程,进行了流—固耦合的非线性分析,实质上是把流体域作为无剪切模量的固体,即流体域的处理方法与固体域一致,固体域与流体域的耦合采用通常的位移连续条件得到。

A. T. Chuang^[30,31,37-39]分析板在水中运动时,首先计入了非线性表面波的影响,分析了非线性表面波对动水压力的影响,其后,楼梦麟^[61]用边界元法研究了渡槽内水体的非线性晃动问题,考虑了水体的非线性表面波,两位学者的研究采用了固体域刚性的假定条件。

1990 年 Tesi 和 Lee^[80]的研究工作,则标志着坝—水动力相互作用时域分析的深入开展。之后, R. Yang^[81,82]在用时域分析坝—库水相互作用时,提出了一个流—固接触面瞬态边界,它是由波动方程给出的半解析解,并应用有限元求解。

张海建^[83]考虑了固体域的几何非线性,分别给出了流体域压力方程和固体域动力学方程,进行了耦合分析,采用 Newmark 方法进行求解,每一时间步利用固体域的加速度响应,求流体域耦合荷载,从而计算出此步的流体压力场,进而利用已知压力场求得固体域耦合荷载,采用修正的牛顿法进行平衡迭代直至收敛,得到新

的位移、速度、加速度矢量,进入下一时间步,按此求解顺序依次循环,直到求得所需时刻下的各物理量。

另外, J. Donea 等人^[84-87]将流体力学中的 ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) 应用于流—固耦合系统的分析中。在流体力学中常采用 Lagrangian 系统描述流体微团的运动,其特点是坐标系随液体质点共同运动,能比较准确、清楚地描述流体质点在任意时刻的位置,但在有限元计算时网格很容易畸变而无法进行运算;另一类是采用 Euler 坐标系进行描述,坐标系不随流体的运动而运动,流体质点相对坐标系运动,这样可克服 Lagrangian 坐标系中网格畸变而影响计算的不利因素,但不能精确描述流体质点任一时刻的位置,因此也存在较大弊端。到七、八十年代人

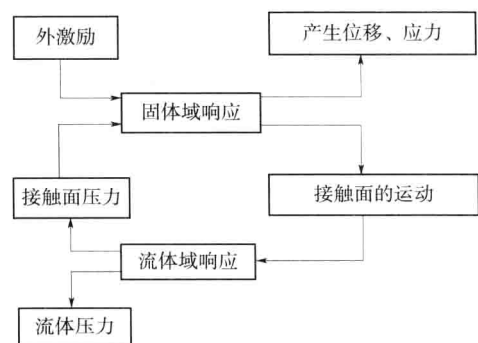


图 1.3 流—固耦合问题的反馈图

们将 Lagrangian 与 Euler 坐标系统联合使用,发展任意拉格朗日欧拉坐标系统 (ALE)^[88,89],吸取了上述两种坐标系统的优点,而克服了各自的缺点,被认为是一种很好的处理流—固耦合系统中流体大位移和固体小位移的方法,在 80 年代以后得到迅猛发展,研究学者大量涌现^[40,69,70],但此种方法并没有真正解决流体—固体相互作用问题,其对流体—固体的耦合计算没能摆脱如图 1.3 所示反馈系统的求解模式。

由此可以看出,对流体—固体的耦合分析并不是同步的,因此,此种方法并不是流体—固体真正意义上的耦合。要实现流体—固体真正意义上的耦合,应能使流体域响应与固体域响应从一个方程中解出。一个域的响应结果作为另一个域的输入是达不到真正耦合目的的。

以后的发展中, Liu^[90-93]、F. H. Howdn^[94]等许多学者注意了流体—固体耦合的真正意义,利用流体—固体表面法向速度相等的约束条件 $\dot{u}_n^f - \dot{u}_n^s = 0$ 及相互作用压力相等条件采用虚功原理等各种方法给出耦合矩阵,将流体域与固体域进行了耦合,给出了耦合后的方程,但求解上 Liu 给出的仍是将流体与固体域响应由两个方程解出,通过迭代给出其响应值,也并未达到真正耦合。F. H. Howdn 也研究了同类问题,但没有明确给出求解方法。

国内学者在 70 年代后,也进行了很多有价值的工作。黄玉盈^[30,31,95-97]在假定水体为无漩、无粘,无面波作用下,应用板的基本理论,采用解析法分析了中厚浮板与水的耦联振动问题。傅作新^[98,99]在挡水坝动水压力方面做了较多的工作,分别探讨了刚性坝和弹性坝的动水压力,考虑了地基与库水的相互作用及库底底泥吸收的影响,王克成等^[100]则用无穷元方法研究了重力坝—库水—地基耦合系统的地震响

应。其研究均是在小幅振动的条件下进行的。施小民^[101]应用 Langrange 方法进行了斜坝面在水平地震时的动水压力计算,并给出了理论解,他的研究与傅作新的研究存在相同的假定条件。於大三^[102]在考虑坝为二维刚性体,作简谐运动,上游库底水平,水为无黏性不可压缩理想流体无表面波影响情况下,给出了地震荷载作用下的具有任意坝面的动水压力的解析解。章青^[103]讨论了坝为剪切变形的一维变截面梁,水体作微幅振动时,坝—水—地基动力相互作用动水压力频率域内的半解析解,在数值求解上仍然是分布迭代求解方法。宋崇民等^[44]都在流体固体相互作用方面做了工作,但在分析方法上都没有突破小振幅、无面波的假定。沙德松^[73]在讨论固—液耦联振动时将固体域用有限元,流体域用边界元,流体为无粘、不可压缩的理想流体,采用势流理论考虑了流体非线性表面波的影响。杜修力、陈厚群等人^[104]分析了拱坝系统三维非线性地震波动分析,将二维的研究发展到了三维,但对水体的处理上采用了附加质量法。吴一红^[105]采用伽辽金法建立了小振幅流—固耦合系统的有限元方程,针对研究对象,仅由面力和速度在交界面上的连续条件,给出了含流体势函数及其一阶、二阶导数和固体位移、速度、加速度的有限元耦合方程。通过试函数给出动水压力,由于在构造势函数时无法计入反映流体固体间的动力相互作用,因而不能真正反映流—固动力相互作用的内在机理。

由此可见,流体与固体的动力耦合理论及对工程应用,经过半个多世纪的发展,已经取得了较多的研究成果,但由于问题的复杂性,还远没有达到理论与实践的统一,对流体与固体的耦合仍没有一个较完善的理论体系和处理方法,对流体与固体耦合方程的求解,还存在着许多问题。

1.1.3 减轻输水隧道及地下结构震害灾害的工程减震措施的研究概况

随着地震工程学科的发展,人们愈来愈认识到对于释放巨大能量的地震而言,单纯的抗震防护对策是难于奏效的,正如墨西哥地震工程学家 E. 罗森布鲁斯^[68]在谈到抗震设计时说的那样“为了满足我们的要求,人类所有的财富是不够的,大量的一般建筑将成为碉堡”。也就是说我们的要求要适度。因此,在建筑抗震设计中提出了“小震不坏、中震可修、大震不倒”的设计原则。但在输水工程设计中,涉及巨大体积的水体,在地震作用下不但不能倒,而且所造成的破坏不能使水体大量外流,不能影响生活,对防御地震的能力要求更高,所以寻求输水工程的震灾防御体系和设计原则是势在必行的。

隔震、减震这一思想首先是在结构上被提出的。受现代控制论的影响,上世纪 70 年代萌发了由“抗震”向“控震”发展的抗灾防护观念,由于“控震”更能在发展比较充分的抗震研究的基础上发挥人的主观能动性,使得较传统的抗震体系有难以比拟的优越性,因此,在输水隧道地震防御研究中开展结构振动控制的研究,不仅具有重大的学术意义,而且具有广泛的应用前景,结构振动控制的思想被美国

J. T. P Yao^[106]于1972年提出后,得到各国地震工程研究者的重视,从而开展了工程结构地震响应控制的一个新的研究领域。

振动控制方法主要分为两大类:其一是不需要外部能源仅靠控震元件本身在振动中表现出来固有特性来调配系统,减少振动的响应,称为被动控制;其二则是由外部能源,通过驱动设备来改变控震系统的特性,使结构系统得到最优的配置,减少振动响应,称为主动控制。若将这两类方法混合应用,则称为混合控制。被动控制应用方便,受到广泛的应用,主动控制需外部能量要求条件高,使用受到限制,但主动控制能更有效地控制振动响应,在经济、科学发展允许条件下,是主要的发展方向。

在工程结构被动控制研究中,首先是以建筑结构基底隔震为主导而开展的,其思想通过置于基础和上部结构间的柔性减震装置,在地震过程中使上部结构产生接近于刚性运动,从而达到减震效果。因此,自70年代起,在国外就开始研究了许多控震装置,如叠层钢板橡胶支座^[107](Rubber Bearing,简称RB)、铅销叠层钢板橡胶支座(Lead Rubber Bearing,简称LRB)、铅挤压阻尼器、柔刚阻尼器等^[108],C. Q. Cai^[109]、R. W. Blakely^[110]、Y. K. Wen^[111]对控震系统进行了简化(主要是等效线性化)方法的理论分析,并在工程上得到了一定的应用。80年代以美N. Mostaghel^[112,113]、G. J. Younis^[114]、I. G. Tadjbakhsh^[115]、G. C. Folionte^[116]等为代表的研究者对各种形式的控震系统进行了在特定地震波作用或随机输入的地震反应分析,其采用的方法基本上还是等效线性化的方法^[116,110,111],取得了许多有益的成果。90年代研究更加活跃,涉及控震系统的方方面面,Liu su^[117]对常用的六种隔震控震系统进行了在El—Centro(1940年)、Meicoity(1985年)波激励下,特定参数条件下的对比分析,取得一些定性的结论,对工程应用起到一定的参考价值。文献[118—120]对有外部能源的主动控制系统进行了实验研究和理论研究,证明其比被动控制具有更好的控震效果。Jangid^[121]讨论了带有滑动支承的单层结构在振动周期相同条件下的双向水平地震激励下的地震反应,作者指出,双向比单向激励的加速度反应减小,而滑动位移增大。

在国内结构振动控制的研究起步较晚,在80年代后期才有研究成果报导,但在我国地震工程学者的努力下基本上接近了国际水平。同济大学^[122]、华中理工大学^[123-126]、原四川成都科技大学^[127,128]、建设部研究院及刘贺云参加的原西安公路交通大学都分别在结构振动控制、消能的试验、理论及工程应用方面作出了许多贡献。现已结合我国的具体情况,完成了控震元件,如钢板叠层橡胶、铅销叠层橡胶、聚四氟乙烯滑板支座和U形钢片等的物理力学性能试验和某些控震元件的动力剪切试验^[122,125],并进行了大比尺控震体系模型的振动台实验^[128],为控震理论的研究提供了条件。控震系统的理论研究也从不同角度,采用不同的方法进行了研究。朱宏

平^[124,125]用波传播理论对基底隔震系统进行了研究,周福森^[129]用能量耗散法也探讨了基底隔震系统,王肇民^[130]对电视塔结构 TMD 风振结构控制进行了实验和理论研究,方重^[131]对主动 TMD (AMD) 振动控制系统的参数进行了分析,给出了一些指导性的意见。我国地震工作者已经在减、控震研究领域取得了丰硕成果,并建设了一批基底隔震的试点工程。

地震对地面结构所造成的破坏是人所共知的,地面结构的抗震研究也达到实用阶段,各国已制订了各种地面结构物的抗震设计规范。但对地下结构的地震破坏却知之不多,地下结构的抗震研究才刚刚开始,现在还没有地下结构抗震设计的规范。目前国内除了对地下管线的抗震作过一些分析外,对于地铁车站及区间隧道等大型地下结构的抗震问题还很少涉猎。这是因为和地面结构相比,面波随着埋深的增加急剧衰减,对地下结构的影响较小;地下结构周围的岩土介质把从震源传来的地震波能量中的高频成分吸收,使地下结构受到的地震作用大大减小;同时地下结构数量不多,并且大部分是小型地下结构,如地下管线等,因而地下结构震害数量较少、程度较轻,地下结构严重震害事例更是寥寥无几,工程界只片面强调地下结构受四周地层制约抗震性能较好的一面,人们简单认为地下结构在地震时是安全稳固的,致使其抗震研究严重滞后于地面结构。随着地下空间开发和地下结构建设规模的不断加大,地下结构的抗震设计及其安全性评价的重要性、迫切性愈来愈明显。又由于目前对地下结构的地震作用机理还较少了解,从理论分析和数值计算角度进行抗震设计尚无成熟方法,因而依据以往经验采取适当抗震措施,就成为地下结构抗震设计的主要手段之一。长期以来,人们认为地下建筑物具有较强的抗震性能,可以不必对其响应和灾变破坏机理进行分析。但是,近年来世界范围内发生的一系列大地震,如 1994 年美国加州北岭地震和 1995 年日本的阪神地震,这些地震都使不少地下结构遭受震害破坏,使结构发生开裂、坍塌和破坏。在一些情况下,地下结构在地震作用下的破坏同样很严重,特别是大跨度的地下洞室。

地下结构传统的抗震措施是采用衬砌加厚或全断面加筋补强的措施,似乎认为刚度越强,抗震效果越好,但工程实践表明,这一设计思想并不合理。所以,目前主要通过两种途径^[132]进行减震。第一种途径是通过改变隧道衬砌本身的性能(刚度、质量、强度、阻尼)来减轻隧道衬砌的内力,如减小隧道地下结构的刚性,使之易于追随地层的变形,从而减小地下结构的响应。由于第一种减震方法一般难以满足实际需要,为此,提出第二种途径,是在隧道衬砌和地层之间设置减震层或注浆加固层或在管片衬砌接头部位设置减震装置^[133-136]等,使地层的变形难以传递到隧道上,从而使隧道的地震反应减小。而对于沉管隧道衬砌接头的设计研究见文献^[137, 138]等。这为地下结构的抗震研究提供一种新的技术储备。

但总体来看,地下结构减震技术研究还很不充分,距离实际应用还有较大的差距。

1.1.4 输水隧道及地下结构的动力模型试验研究概况

理论的预言一定要通过实践的检验来证实,而试验是最有效的实践,在结构发展史上,每个新假设和新理论的出现都是由试验来检验的。而新的试验技术的出现和发展又反过来揭示出新的规律,提出新的问题,促进结构更新发展。地下输水工程动力模型试验就是伴随着工程结构的发展史产生和发展的。

对于结构动力模型试验相似问题,国内外学者进行了总结和归纳^[139-148]。17到19世纪欧洲人从理论和实践两方面为相似理论的建立已经进行了许多先驱的工作。1638年伽利略在“关于两门新科学的对话”中曾说明,威尼斯人在比照相似的小船而建造大船时发现桅柱如只按几何尺寸简单放大则强度不够。这种对桅柱强度的认知其实已经深入到相似理论的实质内容。应该认为这是最早的相似科学的萌芽。1686年牛顿在理论上对其三定律就完全是用两个物体作相似的运动来表达、论证的。此外又提出后来被称为牛顿数的 $F/(\rho V^2 l^2)$ 的相似准数。

在实践上,有资料说明英国在1741年之前就已进行过大量炮舰的水池拖拽试验。到19世纪,在理论上,法国J.B. 傅立叶(1882年)提出了物理方程必须是齐次的,A.L. 柯西(1823年)提出弹性体和声学现象的相似准数 $\rho V^2/E$,贝尔特朗(1848年)提出相似准数 $FL/(MV^2)$,麦克斯韦耳从电磁学提出因次的表达符号。

在实验方面,弗洛德由船模试验提出相似准数约在1872年前后,这已经是在英国拽船试验以后100多年了,可见相似准则是人们经过长期大量试验以后才摸索得出的。法格在1875年前后进行了栋窗模型试验,雷诺层流和紊流试验在1883年。随后在19、20两个世纪之交的1900年,莱特兄弟首次进行了风洞试验。从这些历史上著名的科学家的摸索和发现过程,可以清楚看出,相似理论和其他学科一样,都是随着社会生产的需要、基础科学和有关相邻学科理论以及观察、实验、量测技术的前进而发展起来的^[139]。

国内专家以及学者对相似问题早在20世纪中叶建国初期即开始了理论研究,林皋院士1958年即在水利学报上发表了对模型试验的模拟与相似问题进行分析的研究成果^[140],随后的几十年中,徐挺、王丰、周美立等对模型相似问题进行了系统的研究,并撰写了许多相关著作^[149-154]。另外,左东启等在杂志和期刊上发表了一些富有工程指导意义的研究成果^[143-147]。

由于计算方法和计算技术的发展,对结构进行非线性分析,了解其在地震、爆炸等各种动力荷载作用下的响应与破坏形态已不十分困难。但是,由于材料的本构模型和本构参数等许多问题还没有很好地得到解决,即使对混凝土重力坝这样简单的结构,对其在强震作用下发生震害的裂缝部位、裂缝走向以及裂缝的扩展范围等,

不同作者通过非线性分析得出的结果仍然千差万别^[155]。结构动力模型试验与破坏试验仍是了解结构非线性动力响应与地震破坏形态的一种重要手段。由于影响结构动力破坏的因素很多,保持模型与原型间的相似性比较困难,许多研究者在这方面作了很多努力^[156-158]。但是由于问题的复杂性,很多情况还不能得出令人满意的结果。通过进行模型试验的实践与体会,我们认为处理模型相似问题,包含有一定的技巧,如果处理得当,就可以通过弹性动力模型试验或动力模型破坏试验获得更多的有用信息,从而加强对结构动力特性和破坏形态的认识。如林皋院士指出的各适用于不同的情况的结构动力模型试验的3种基本相似换算关系^[159]。

1.2 地下结构抗震分析的研究方法

研究和解决考虑流—固耦合体系的输水工程的抗震问题有三种基本方法:原型观测、实验研究和理论分析^[160,161]。三种方法取长补短,彼此影响,从而促使此理论不断发展。

1.2.1 原型观测

原型观测是通过隧道及地下结构在震后的变形破坏特征和实测的动力特性,了解其地震响应特点。严格来讲,地震后岩土体与结构物的变形是一个场的概念,而模型试验很难模拟这一点,所以,地震时原位现场资料的采集成为隧道及地下隧道结构抗震研究中必不可少的手段之一^[162]。它主要包括震害调查和地震量测两大类。

1. 震害调查

震害调查是在地震结束后进行的,要受观测时间、手段和条件的限制。但震害是真实的“原型试验”结果,一直受到人们的重视。目前,这方面收集的资料正在不断增加。一些学者根据地震后隧道和地下结构的破损情况,对地震的动力作用规律进行了分析和总结。如 ASCE^[163] 在 1974 年公布了 Los Angeles 地区的地下结构在 1971 年 San Fernando 地震中所受到的震害; JSCE^[164] 于 1988 年总结了日本一些地下结构(包括一条沉管隧道)在震害中的破损情况; 1995 年的日本阪神大地震造成现代地下隧道结构(如地铁)首次遭到大规模的破坏后, Nakamura 等人^[165] (1996 年)进行了广泛的震害调查,收集了大量的资料。此外, Duke and Leeds (1959 年)、Stevens^[166] (1977 年)、Dowding 和 Rozen^[167] (1978 年)、Owen 和 Scholl (1981 年)、冈本舜三^[168] (1984 年)、Sharma 和 Judd^[169] (1991 年)、Power 等^[170] (1998 年)以及 Kaneshiro 等^[171] (2000 年)学者都曾对地震中地下结构的破坏情况进行过总结和分析。其中, Dowding 和 Rozen^[167] (1978 年)根据 71 座铁路隧道和水工隧洞的地震破坏调查资料,得出了隧道地震损坏与震级、烈度和震中距