

不同地震波作用方向的大型渡槽动力响应分析

杨杰^{1,2}, 成婷婷^{1,3}, 程琳¹, 于崇祯¹

(1. 西安理工大学 水利水电学院 陕西 西安 710048; 2. 陕西省西北旱区生态水利工程重点实验室, 陕西 西安 710048; 3. 广联达软件股份有限公司西安客户服务中心, 陕西 西安 710048)

摘要:以南水北调中线工程中某大型渡槽结构为研究对象,采用 ADINA 软件中的势流体单元研究考虑流固耦合作用下渡槽结构的动力响应规律。本文对渡槽结构在顺槽向、双向和三向地震波作用下的动力响应分别进行了仿真研究。并分析了附加质量法和 ADINA 完全流固耦合法在计算流固耦合问题上的异同,及多维地震波对结构动力响应的影响。结果表明:水深及地震作用方向对渡槽结构的动力响应影响较大,且应在双向地震波作用下来研究结构的动力响应问题。

关键词: 大型渡槽;流固耦合;势流体;地震多向性

中图分类号:TV632.3

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2016)01-0195-06

Analysis of dynamic response of large aqueduct under different directions of seismic wave

YANG Jie^{1,2}, CHENG Tingting^{1,3}, CHENG Lin¹, YU Chongzhen¹

(1. Faculty of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Key Laboratory of Ecological Water Conservancy Project of Shaanxi Province in Northwest Arid Area, Xi'an 710048, China;

3. Customer Service Center of GLODON Co., Ltd in Xi'an, Xi'an 710048, China)

Abstract: Taking a large aqueduct in the south-to-north water diversion project as the research object, the paper used the potential fluid element in software ADINA to analyze the dynamic response law of aqueduct structure by considering the fluid-structure coupling interaction. The paper studied the dynamic response of the aqueduct structure under the gateway, two-way and three-way seismic waves respectively. It analyzed the similarities and differences of the two methods such as additional quality standard and scaled complete fluid-structure coupling method of ADINA in the problem of calculating fluid-solid coupling, and the impact of multi-dimensional seismic waves on the dynamic response of structure. Result showed that the water depth and direction of seismic have more influence on the dynamic response of aqueduct structure. It is necessary for us to study the problem of dynamic response under the action of two-way seismic wave.

Key words: large aqueduct; fluid-structure interaction; potential fluid body; diversity of earthquake

水资源短缺已经成为全球面临的主要危机之一^[1]。中国的水资源现状更为严峻——存在时间和空间上双重分布不均的问题。渡槽作为一种重要的输水建筑物,在水资源空间调度工程中具有广泛应用,其中最为典型的实例为南水北调工程^[2]。在该工程中,渡槽为主要的输水渠道之一,在抗震设防

中为甲类建筑物,因此,对渡槽结构的动力响应分析十分有必要^[3]。目前,该渡槽结构的动力分析主要依托于《水工建筑抗震设计规范》(DL5073-2000)^[4]中对于水工建筑物的规定,并且大部分关于渡槽结构的动力响应问题都是在单向即顺槽向地震作用的基础上研究的。而实际地震波的作用方向

收稿日期:2015-05-25; 修回日期:2015-06-15

作者简介:杨杰(1971-),男,四川大邑人,博士,教授,主要从事水工结构仿真分析、水库大坝安全评价及除险加固理论方法研究。

通讯作者:成婷婷(1990-),女,陕西咸阳人,硕士研究生,主要从事水工结构仿真分析,水库大坝安全评价与除险加固理论方法研究。

是多向且随机的,这样仅考虑顺槽向地震作用与实际情况相差较大,使结构偏于危险。在渡槽的分析设计中,对于涉及到动力方向的问题,目前尚缺乏明确的参考依据^[5]。文献[4]规定:“一般情况下,水工建筑物可只考虑水平向地震作用,设计烈度为8、9度的1、2级下列水工建筑物:土石坝、重力坝等壅水建筑物,地区才考虑竖向地震的作用。对于渡槽这种特殊的水工建筑物,长悬臂、大跨度或高耸的水工混凝土结构,应同时计入水平向和竖向地震作用”。因此,在考虑大质量水体的作用时,渡槽结构的竖向地震荷载将不同于一般的水工结构、桥梁和建筑结构等,不可忽略不计。目前,对于不同地震方向作用下渡槽结构的动力研究并不多,大多集中在拱坝和隧道等方面,如杜修力等^[6]运用显式有限元与外推人工边界结合的方法研究拱坝在同一地震波横河向、顺河向以及三向地震波输入时的地震响应;刘新佳等^[7]在研究地震非均匀自由场输入下的拱坝非线性反应时考虑了横河、顺河和竖河向地震波的单独作用。何建涛等^[8]在进行拱坝非线性地震反应分析时亦考虑了三向地震作用。皇民等^[9]研究了在X、Y、Z三向地震波分别作用时隧道结构的动力响应,得出横向为隧道的最危险地震方向。此后,对于渡槽结构的研究也逐渐展开:徐梦华等^[10]就流固耦合对渡槽结构的纵向地震响应进行了分析研究;王博等^[11]研究了不同地震作用下的渡槽结构动力响应,但仅就每种地震波顺槽向分量的作用进行了研究。冯领香等^[12]针对筒支梁式渡槽,进行了

多跨联合纵向地震动力分析。本文在此研究背景下,考虑流固耦合作用,利用ADINA有限元软件^[13]模拟不同向地震波对渡槽结构的动力响应。

1 考虑液体作用的渡槽结构计算方法

研究水体与结构的相互作用,涉及到水体简化的问题。目前,考虑流固耦合作用的槽内水体简化方法大体上分为两种:线性方法和非线性方法。其中线性方法即把水体当做附加质量作用于结构上,与结构一起进行动力研究,主要有Westergarrd附加质量法、Housner模型法等。非线性方法在于研究流体的非线性晃动对渡槽的影响,有边界元法、ALE型有限元法等^[14]。本文采用Westergarrd附加质量法和ADINA完全流固耦合方法(ALE型有限元法)进行对比分析,来研究水体对于渡槽结构的影响。

1.1 Westergarrd附加质量法

附加质量法是将水体对结构的影响用附加于结构上的质量来代替,该法由Westergarrd于1933年首次提出,并给出了刚性重力坝在水平地震荷载作用下的附加动水压力分布。将该法应用于渡槽结构的动力分析,则槽体一侧单位面积上水体的附加质量计算公式如下^[15]:

$$M_{w(z)} = \frac{7}{8} \eta \rho \sqrt{hz} \quad (1)$$

式中: $M_{w(z)}$ 为距离水面 z 处的附加质量,kg; η 为折减系数(见表1); ρ 为水的密度, m^3/s ; h 为渡槽内水深,m; z 为计算水深,m。

表1 有限宽度水域时附加质量折减系数

有限宽度 B/h											
0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	1.20	1.40	1.60	1.80	2.00	2.50	≥3
0.16	0.30	0.47	0.56	0.66	0.74	0.80	0.85	0.89	0.92	0.96	1.00

注:表中B为水面宽度,在本文中渡槽宽度为4m,对于B/h数值表中没有的采用线性插值法求得。

该法为改进的Westergarrd附加质量法,将无限水域下的附加质量法通过折减系数转换为有限宽度水域下的附加质量法。已被多位专家学者应用于渡槽结构的动力响应分析中。计算简单,但忽略了坝体变形和水体的晃动作用,反映了水体对于结构的影响而忽略了结构对水体的影响。

1.2 ALE有限元法

ALE(Arbitrary Lagrangian - Eulerian)即任意拉格朗日网格法,其概念首先出现在流体动力学的有限差分法中,后来被引入到有限元中来解决带自由

液面的液体流动问题。目前,已被广泛应用于解决大范围移动边界(或接触面)问题中,并且在液体大幅度晃动、流固耦合方面取得了很大进展^[16]。在ALE有限元方法中,当由网格的运动来跟踪自由液面的运动时,对自由液面上节点的速度来说,其约束条件为:节点速度与流体质点速度在法向方向上的分量相等,而对节点速度的切向分量没有约束。

在ADINA中,耦合面上液体节点的位移和速度由固体变形成得到,由此引起体积改变的液体区域内的可任意移动液体节点的位移增量除通过求解La-

place 方程得到外,还可以通过定义 Leader Follower 点对模型中非物理移动边界上液体网格的移动进行人为控制。

2 工程概况及参数选取

2.1 工程概况及模型简介

本文以南水北调中线工程某大型渡槽为例,该渡槽全长 236.21 m,属于一级水工建筑物,工程所在场地为二类工程场地^[17-18]。防洪标准按 50 年一遇设计,100 年一遇校核;满槽水深 2.47 m。

该渡槽结构共 3 跨,本文取中间跨为研究对象。单跨跨长 28 m,设有 5 个拉杆,尺寸为 200 mm × 200 mm,侧墙高 2.77 m,侧墙与底板厚度均为 200 mm;槽体与支架间设置盆式橡胶支座,尺寸为 800 mm × 800 mm × 600 mm。下为横梁,尺寸为 5.6 m × 2 m ×

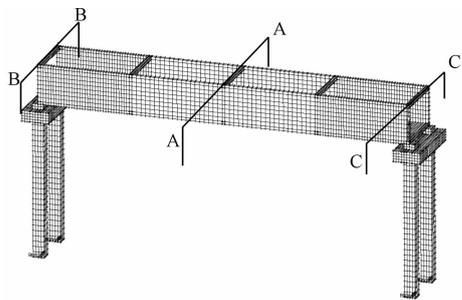


图 1 渡槽结构的 ADINA 计算模型

2.2 地震参数选取

地震波选用实际强震记录波 EL - Centro 波,该波是 1940 年美国 Imperial 山谷地震记录,比其他有相似周期的地震波能量更大,为二类工程场地的典型代表。其各个方向的加速度峰值分别为: E - W 向: 2.101 m/s²; N - S 向: 3.417 m/s²; 垂直向: 2.363 m/s²。经观察地震波加速度时程曲线及地震波选取原则^[19],取 20 s 为研究对象,步长取 0.02 s,共计 1 000 步。

3 动力响应分析

3.1 纵向地震波作用下结构响应分析

本文分 5 种工况来研究考虑流固耦合作用时纵向地震作用下结构的动力响应,分别为: 工况 1 (空槽)、工况 2 (半槽水流固耦合)、工况 3 (半槽水附加质量)、工况 4 (满水流固耦合) 及工况 5 (满水附加质量)。分析各关键点的最大最小应力及位移随时间的变化规律。计算结果见表 2 (关键点主应力对比表) 及图 3 (关键点位移时程图)。

各关键点位移动力响应——位移时程图见图 3。

0.8 m,下部支架高 10.4 m。不考虑基础影响,直接赋予支架接触底面端为固定约束,对模型进行简化处理,省去承台及灌注桩结构。槽身为 C25 钢筋混凝土结构,密度取 2 500 kg/m³,弹性模量为 3.5 × 10¹⁰ Pa,泊松比为 0.167,将支座与排架视为一体,其材料参数为:密度:2 500 kg/m³,弹性模量为 2.8 × 10¹⁰ Pa,泊松比为 0.167,阻尼比均取为 0.05。

模型中单元为 8 节点单元,其中结构单元 8 576 个;半槽水时水体单元 8 560 个,共 17 136 个单元,23 626 个节点;满槽时水体单元 17 120 个,共 25 696 个单元,31 834 个节点。有限元模型图见图 1。经过观察计算结构中各个时刻最大值出现的位置,取如图 1、2 所示断面、关键点进行应力及位移时程分析。断面 C - C 的关键点分布同断面 B - B。

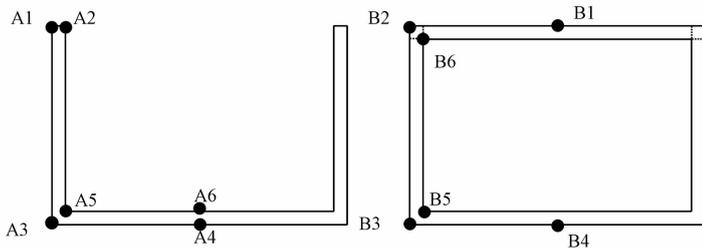


图 2 各断面关键点位置示意图

由表 2 可以得到地震波作用下水位对结构应力的影响,为了更清楚的对比两种方法在计算水体与结构相互作用的差别,将工况 4 与工况 5 的计算结果进行对比,见表 3。

由以上数据可得:地震作用下水体对渡槽结构的应力影响很大,关键点的应力随水位的增大而增大,且在 B5、C6 点出现不同程度的应力集中。

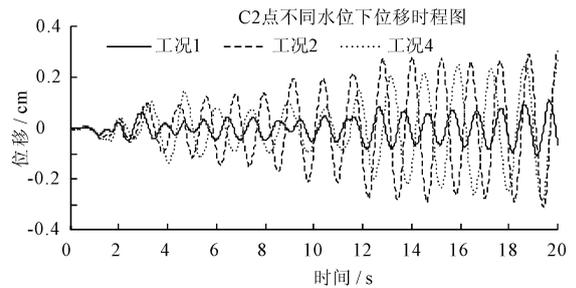
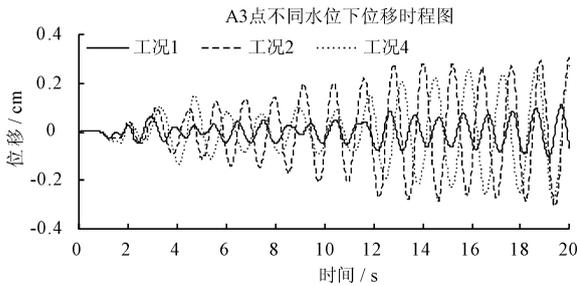
有水工况下,两种方法对结构动力响应的影响:不同部位影响不同,跨中断面附加质量法的结果较完全流固耦合法偏大,而跨端断面恰好相反。利用关键点的位移计算结果绘制得位移时程图(图 3,仅以 A3、C2 点为代表)。

由图 3(a)得:水体对于结构位移的影响较大,水体的存在会使得结构晃动更为剧烈;由图 3(b)可得附加质量法计算的结果相对于流固耦合较小,而完全流固耦合法因考虑了水体晃动的作用,可看出由于水体的晃动,使得结构的位移出现了一定的滞后性,在地震波后期(12s 后),结构的位移持续增大,而并未因地震波频率的削弱而减小。

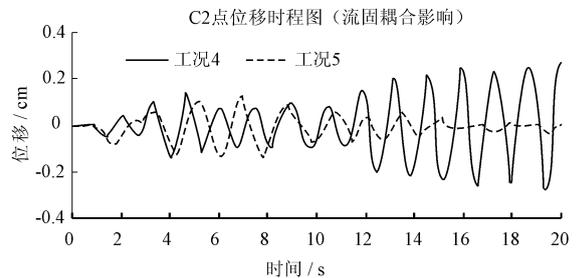
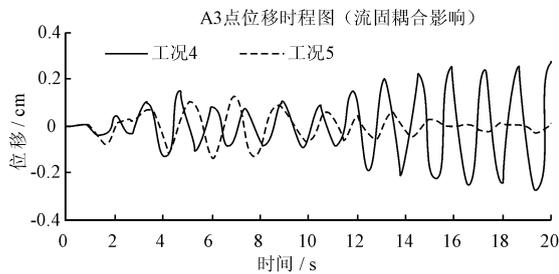
表2 纵向地震波影响下关键点的第一、第三主应力对比表

MPa

关键点	Y向地震各种工况最大主应力对比表					Y向地震各种工况最小主应力对比表				
	工况1	工况2	工况3	工况4	工况5	工况1	工况2	工况3	工况4	工况5
A1	0.40	0.74	1.00	1.54	2.25	-2.00	-3.88	-5.11	-6.27	-6.95
A2	1.54	3.06	4.07	4.60	5.22	-0.35	-1.40	-1.68	-2.57	-1.98
A3	1.44	2.88	3.83	4.35	4.94	-0.25	-0.55	-0.81	-0.69	-0.88
B1	0.91	2.54	2.01	3.47	1.64	-0.89	-2.49	-2.11	-2.28	-1.56
B2	0.44	1.16	1.09	1.07	1.04	-0.33	-2.22	-0.74	-1.18	-1.63
B4	0.34	1.33	0.65	1.04	0.80	-0.87	-0.92	-2.07	-2.23	-2.37
B5	6.91	7.54	7.72	9.62	9.60	-8.16	-8.47	-8.68	-9.61	-9.96
B6	0.39	1.13	0.86	1.59	0.81	-0.47	-1.12	-0.87	-1.04	-0.76
C1	0.90	2.50	1.84	3.13	1.65	-0.77	-2.56	-2.17	-2.49	-2.16
C2	0.38	1.16	1.14	1.16	1.07	-0.33	-0.93	-0.74	-1.07	-1.74
C4	0.79	2.35	1.43	1.90	1.23	-1.47	-3.81	-3.54	-4.22	-3.66
C5	8.64	11.56	7.96	10.91	10.07	-9.17	-9.19	-9.19	-9.78	-9.51
C6	0.65	1.70	1.29	2.14	1.09	-0.55	-1.82	-1.55	-1.80	-1.62



(a) 不同水位下位移对比图



(b) 不同计算方法下位移对比图

图3 关键点 A3、C2 位移时程图

3.2 多维地震波作用下结构动力响应对比

为研究同一地震波不同方向共同作用下渡槽结构的动力响应,先后对渡槽结构施加 X、Y 双向及 X、Y、Z 三向地震波(竖向地震波的折减系数取 0.5),并将计算结果相互对比。在进行多维地震波动力响应分析时,取工况 1、4、5 进行分析,计算结果见表 4。将双向地震作用下的应力与 Y 向单独作用时进行对比,三向与双向对比,见表 5(仅对比各断面控制点的应

力相对增长率)。由以上数据分析可得:

(1) X、Y 双向共同作用下的应力普遍大于 Y 向单独作用下的应力,且有的点甚至是 Y 向地震单独作用下的 6 倍多。由此可得在进行渡槽结构动力分析时,不能仅仅考虑单向地震作用,而应该同时考虑 X、Y 双向地震波的影响。

(2) 对结构在三向地震共同作用的结果与双向进行对比分析发现:三向地震作用下各节点的应力

较双向地震作用下的应力有所变化,但并无明显的规律,有增有减,且增减的幅度都不大,平均在 20% 左右,最大为 82.93%。因此,Z 向地震波对于结构应力的影响相对来说并不大,在进行结构设计时,可根据结构特性,结合规范,决定是否可忽略 Z 向地

震波的作用。

4 结 论

本文对渡槽结构在 Y 向及多向地震波作用下的动力响应进行研究。主要得到以下结论:

表 3 两种方法最大、最小主应力对比表

MPa, %

关键点	最大主应力			最小主应力		
	工况 4	工况 6	附加质量相对于流固耦合应力的涨幅	工况 4	工况 5	附加质量相对于流固耦合应力的涨幅
A1	1.54	2.25	45.67	-6.27	-6.95	10.86
A2	4.60	5.22	13.63	-2.57	-1.98	-23.06
A3	4.35	4.94	13.59	-0.69	-0.88	28.33
B1	3.47	1.64	-52.8	-2.28	-1.56	-31.57
B2	1.07	1.04	-3.06	-1.18	-1.63	-46.4
B4	1.04	0.80	-23.72	-2.23	-2.37	6.15
B5	9.62	9.60	-0.14	-9.61	-9.96	3.57
B6	1.59	0.81	-49.08	-1.04	-0.76	-26.89
C1	3.13	1.65	-47.46	-2.49	-2.16	-13.22
C2	1.16	1.07	-7.83	-1.07	-1.74	-30.69
C4	1.90	1.23	-35.51	-4.22	-3.66	-13.18
C5	10.91	10.07	-7.72	-9.78	-9.51	-2.74
C6	2.14	1.09	-49.36	-1.80	-1.62	-10.19

表 4 多维地震波作用下结构最大、最小主应力对比表

MPa

关键点	双向地震作用下 最大主应力			双向地震作用下 最小主应力			三向地震作用下 最大主应力			三向地震作用下 最小主应力		
	工况 1	工况 4	工况 5	工况 1	工况 4	工况 5	工况 1	工况 4	工况 5	工况 1	工况 4	工况 5
A1	0.84	2.59	2.72	-3.22	-8.36	-9.36	0.91	2.62	2.80	-4.72	-9.41	-8.09
A2	1.40	6.39	8.29	-0.86	-5.23	-5.34	2.00	8.27	8.43	-1.74	-5.77	-4.60
A3	1.66	4.45	5.14	-0.69	-0.89	-1.45	1.94	5.19	5.30	-0.51	-1.62	-0.94
B1	1.41	3.51	1.67	-1.43	-2.28	-1.58	1.59	3.97	1.84	-1.03	-2.25	-1.90
B2	2.04	3.60	4.10	-1.44	-4.05	-4.05	2.36	4.69	4.86	-2.42	-4.17	-4.64
B4	1.20	1.41	1.57	-1.09	-2.47	-2.90	1.21	1.62	1.59	-1.37	-2.63	-2.90
B5	7.67	10.49	10.52	-9.41	-10.87	-11.49	8.92	11.05	11.27	-9.14	-12.23	-12.30
B6	1.86	3.91	4.19	-2.46	-3.61	-3.86	2.92	4.87	5.58	-2.95	-4.59	-5.53
C1	1.44	3.16	1.73	-1.36	-2.58	-2.23	1.55	4.18	1.99	-0.87	-2.62	-1.94
C2	1.62	4.18	4.52	-1.40	-3.98	-4.23	2.37	4.26	4.63	-2.40	-4.00	-4.61
C4	2.06	2.42	1.81	-5.08	-4.82	-4.44	2.15	2.67	2.23	-2.22	-4.89	-4.33
C5	10.22	12.45	11.56	-10.60	-11.67	-11.46	7.61	10.90	7.98	-7.99	-12.03	-8.70
C6	2.51	4.26	4.16	-2.29	-4.67	-4.08	2.36	5.19	4.38	-2.18	-4.49	-4.45

表5 不同向地震波共同作用下结构最大、最小主应力对比表

MPa

关键点	相对增长率						相对增长率					
	双向最大主应力			双向最小主应力			三向最大主应力			三向最小主应力		
	工况1	工况4	工况5	工况1	工况4	工况5	工况1	工况4	工况5	工况1	工况4	工况5
A1	112.01	67.39	20.99	60.78	33.42	34.80	7.51	1.27	2.71	46.67	12.58	-13.61
A2	-8.73	39.08	58.68	147.95	103.26	169.80	42.66	29.42	1.70	103.13	10.30	-13.98
A3	15.34	2.41	4.16	175.42	28.74	63.59	17.03	16.68	3.14	-26.03	82.93	-35.07
B5	11.04	9.12	9.57	15.32	13.12	15.37	16.25	5.32	7.12	-2.88	12.44	7.09
B6	641.34	145.99	416.83	421.56	247.41	407.89	56.75	24.50	33.35	19.59	27.24	43.45
C5	18.17	14.09	14.78	15.62	19.33	20.49	-25.54	-12.44	-30.96	-24.56	3.10	-24.10
C6	288.04	98.52	282.90	317.92	158.82	152.14	-5.86	22.01	5.40	-4.81	-3.79	9.02

注:A相对于B的增长率=(A-B)/B,表中增长率,双向的表示和Y向的对比,三向的为和双向的对比。

(1)对Y向地震波单独作用下结构的动力响应计算结果表明:结构的动应力随槽内水深的增加而增大:两种方法在计算结构动力响应时,不同部位有不同的影响,跨中部位附加质量法的计算结果大于完全流固耦合,跨端断面恰好相反。通过位移时程计算结果可得出,水体晃动对于结构的位移影响较大,附加质量法计算的位移时程与地震波时程变化大体一致,而流固耦合由于考虑了水体的晃动作用,结构位移有一定的滞后性,更符合实际。

(2)二维地震波作用下结构的动力响应计算结果表明:X、Y向地震波共同作用时,结构的应力普遍大于Y向单独作用下的应力,有的点的应力为Y向单独作用时的6倍多。由此可得在进行渡槽结构动力分析时,仅考虑单向地震作用是不合理的,应同时考虑X、Y双向地震波的影响。

(3)将结构在三向地震共同作用的结果与双向的计算结果对比得:三向地震作用下,各节点的应力较双向地震作用下的应力变化并无明确的规律,有增有减,且增减的幅度均不大。因此,在进行结构设计时,应综合考虑结构特性,结合规范综合决定是否可粗略Z向地震波作用。

参考文献:

- [1] 陈家琦,王浩,杨小柳. 水资源学[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [2] 王博,陈淮,徐建国,等. 大型渡槽结构抗震分析理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,2013.
- [3] 陈厚群. 南水北调工程抗震安全性问题[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2003,1(1):17-22.
- [4] 中国水利水电科学研究院. DL5073-2000 水工建筑物抗震设计规范[S]. 北京:中国电力出版社,2000.

- [5] 吴轶. 大型梁式渡槽地震反应分析及设计方法研究[D]. 广州:华南理工大学,2004.
- [6] 杜修力,陈厚群,侯顺载. 拱坝一地基系统的三维非线性地震反应分析[J]. 水利学报,1997,28(8):7-14.
- [7] 刘新佳,徐艳杰,金峰,等. 地震非均匀自由场输入下的拱坝非线性反应分析[J]. 清华大学学报(自然科学版) 2003,43(11):1567-1571.
- [8] 何建涛,陈厚群,马怀发. 拱坝非线性地震反应分析[J]. 地震工程与工程振动,2012,32(2):68-73.
- [9] 皇民,潘炳玉,高波. 地震波作用方向对隧道结构动力响应的分析[J]. 公路,2012,1(1):212-215.
- [10] 徐梦华,莫海鸿. 流固耦合对大型渡槽纵向地震响应的分析[J]. 武汉理工大学学报. 2010,32(11):50-53.
- [11] 王博,陈淮,徐伟,等. 考虑槽身与槽内水体流固耦合的渡槽地震反应计算[J]. 水利水电科技进展,2005,25(3):5-7+50.
- [12] 冯领香,魏建国,白永兵,等. 渡槽结构多点输入的抗震分析[J]. 河北农业大学学报,2007,30(2):104-107.
- [13] 岳戈,陈权,等. ADINA应用基础与实例详解[M]. 北京:人民交通出版社,2008.
- [14] 邵岩,赵兰浩,李同春. 考虑流固耦合的渡槽动力计算方法综述[J]. 人民黄河,2005,27(11):55-56.
- [15] 高兑现,李正农,唐永胜,等. 渡槽结构地震反应分析[J]. 水力发电学报,2004,23(5):40-43+31.
- [16] 岳宝增,李笑天. ALE有限元方法研究及应用[J]. 力学与实践 2002,24(2):7-11.
- [17] 盛海洋. 中线南水北调荥阳段工程地质条件与问题分析[J]. 山西建筑 2012,38(36):53-55.
- [18] 中华人民共和国建设部. GB50021-2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京:水利电力出版社,2002.
- [19] 白峻昶,靳金平. 时程分析用地震波选取的探讨[J]. 山西建筑 2007,33(3):62-63.