

高阻尼橡胶隔震渡槽的设计和动力性能研究

丁晓唐, 周逸仁, 颜云燕

(河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要:以南水北调工程为背景,运用高阻尼橡胶隔震技术,并借鉴建筑与桥梁相关规范及设计经验对某渡槽进行隔震设计。采用 Housner 模型建立渡槽流固耦合有限元动力模型,分析隔震渡槽的动力特性和地震响应。结果表明:隔震后结构前三阶振型均为隔震振型;采用高阻尼橡胶支座隔震和铅芯橡胶支座隔震渡槽的结构振型一致,自振频率基本相同;地震动特性对地震响应结果影响很大,当地震波特征频率与结构基频越相近时,槽身和支座响应越大,采用隔震支座效果越明显;三向地震动输入下,隔震渡槽各部位响应峰值可供设计时参考。

关键词:高阻尼橡胶隔震支座;渡槽;动力特性;地震响应

中图分类号:TV672.3

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2013)01-0119-04

Research on design and dynamic performance of high damping rubber isolated aqueduct

DING Xiaotang, ZHOU Yiren, YAN Yunyan

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the background of the south – to – north water diversion project, the high damping rubber isolation technology was used for the isolation design of the aqueduct, the codes and design experiences of building and bridge were referred. A finite element dynamic model of the aqueduct is established, in which the fluid – structure coupling was considered by Housner model, which was used to analyze the dynamic characteristic and seismic response of isolated aqueduct. The results show that the first three vibration modes of the isolated structure are the isolation vibration. The structural vibration modes of the high damping rubber isolated and the lead – core rubber isolated aqueduct are the same, and their natural frequencies are basically the same. The seismic characteristics of the ground motion exert a great influence on seismic response. The closer the characteristic frequency of seismic wave gets to the fundamental frequency of the structure, the greater the response of the aqueduct body and support will be, and the more obvious effects the isolation bearings will have. Under three – direction ground motion input, the peak responses of isolated aqueduct can be referred in design .

Key words: high damping rubber isolated bearing; aqueduct; dynamic characteristics; seismic response

0 引言

南水北调工程是缓解中国北方水资源严重短缺局面的重大战略性工程,渡槽作为其中重要的输水建筑物,其顶部大质量的水体将对结构的动力性能产生重要影响,即流固耦合作用^[1]。减隔震技术中的隔震支座设置在槽墩与槽身之间,能隔离地震对槽身的作用,反过来减少了槽身地震惯性力对槽墩的作用,槽身与水体的流固耦合作用也会减小,从而保证槽身正常的输水功能^[2]。中国水利水电科学

研究院已对铅芯橡胶隔震支座和球型隔震支座在渡槽中的应用做了相关的研究,开发了相关产品,并在南水北调中线工程洛河渡槽的设计中得到了应用。目前,在隔震支座的工程应用中,铅芯橡胶支座是其中最为广泛应用的支座类型,但其在使用过程中橡胶逐渐老化、开裂,铅芯会对环境造成严重的污染,支座的力学性能也会受到不同程度的折减。因此,研究既对环境没有污染,又具备稳定性能的高阻尼橡胶隔震支座在渡槽上的应用有重要的社会和经济价值^[3]。但目前尚无渡槽减隔震设计的相关规范,

收稿日期:2012-11-13; 修回日期:2012-11-29

基金项目:江苏省南水北调工程科技创新项目(KJ CX - 200701)

作者简介:丁晓唐(1961-),女,江苏南京人,博士,副教授,研究方向为结构抗震与振动控制。

通讯作者:周逸仁(1987-),男,江苏苏州人,硕士研究生,研究方向为结构抗震与振动控制。

国内外相关的研究也较少。本文结合建筑和桥梁减隔震相关规范及设计经验,对隔震渡槽的高阻尼橡胶支座进行设计,运用 ANSYS 建立渡槽三维有限元模型,采用 Housner 模型考虑流固耦合作用,对高阻尼橡胶隔震渡槽进行了动力性能分析。

1 隔震支座设计

考虑到渡槽结构的对称性和规则性,设计时将隔震渡槽简化为单自由度模型,采用反应谱法计算水平地震力^[4]。根据《地震工程手册》^[5]中的设计流程,结合国内橡胶支座规范^[6],把非隔震结构的周期延长 2~5 倍对渡槽进行高阻尼橡胶隔震支座设计,并校核支座性能。

1.1 隔震支座分析模型

高阻尼橡胶支座的力学性能表现出高度的非线性。在实际的试验研究中高阻尼橡胶支座的滞回曲线为椭圆形或月牙形,但在地震响应分析中,很难直接采用实际的恢复力曲线,因此需要建立与其滞回曲线等效且数学表达简便的恢复力曲线模型。目前,高阻尼橡胶支座恢复力模型主要有等效线性模型、双线性模型以及修正双线性模型。由于修正双线性模型的参数确定依赖于试验研究,而目前国内相关试验研究成果较匮乏,故本文支座设计时采用等效线性模型,在对隔震渡槽进行时程分析时采用双线性模型模拟高阻尼橡胶支座在动力作用下的滞回性能,等效线性模型和双线性模型的主要参数有:水平等效刚度 K_h 、等效阻尼比 h_{eq} 、屈服力 Q_y 、屈服后刚度 K_d 和初始刚度 K_i 。双线性分析模型各参数之间的关系如图 1 所示。

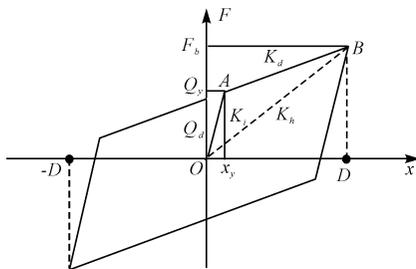


图 1 双线性模型

1.2 隔震支座设计

南水北调中线某渡槽工程场区地震动峰值加速度取为 0.2 g,相当于地震基本烈度为Ⅷ度,场地为Ⅱ类场地。槽身纵向单跨长 30 m,共 21 跨;槽身横向每联 2 槽,单槽净宽 7 m,侧墙净高 7.9 m,总高为 9.6 m,设计水位为 6.63 m。下部支撑采用钢筋混凝土空心薄壁墩,壁厚 1 m,墩高 10 m。渡槽槽身采

用 C50 混凝土,墩体、墩帽和承台采用 C30 混凝土。隔震支座布置在墩顶与槽身之间,每个单墩顶部布置 6 个支座,分别位于左右边梁及中梁下。非隔震渡槽基本周期通过建立有限元模型算得的结果是 0.34 s。本文在非隔震周期基础上放大 2~5 倍进行高阻尼橡胶隔震支座的设计。高阻尼隔震支座的设计流程如下^[7]:

①明确隔震结构的地质条件;②选择隔震支座设计剪应变 γ_{max} ,等效阻尼比 h_{eq} ,以及隔震结构的设计目标周期 T_D ;③计算等效水平刚度 K_h 和支座最大水平设计位移 D ;④选择材料性能,获得杨氏模量 E 以及剪切模量 G ;⑤根据支座设计位移 D 和设计剪应变 γ_{max} ,计算橡胶总厚度 T_r ;⑥计算有效面积 A ,本文采用方形支座,算得边长为 a ;⑦计算单层橡胶厚度 t_r ,以及橡胶层数 n ;⑧确定钢板厚度 t_s ;⑨对支座参数进行剪应变及稳定性校核。如不满足,重复步骤 2~8,直至满足设计要求为止。以 5 倍周期为例,等效线性模型参数的计算结果如表 1 所示。

表 1 高阻尼橡胶隔震支座参数 % , s, N/m, mm

γ_{max}	h_{eq}	T_D	K_h	D	T_r	n	a	t_s
150	0.22	1.69	1.234×10^7	65.71	70	7	1200	5

按照我国规范^[6]给出的高阻尼橡胶支座参数计算公式,双线性模型参数的计算结果如下:屈服前刚度 K_i 为 4.457×10^7 N/m,屈服后刚度 K_d 为 7.428×10^6 N/m,屈服力 Q_d 为 3.438×10^5 N。经校核,按 2~5 倍隔震周期设计的隔震支座均满足要求,相关校核步骤见文献^[7]。

2 隔震结构的动力分析方程及有限元解答

隔震结构的动力分析就是针对结构求解如式(1)的通用运动方程^[8]:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F(t) \quad (1)$$

式中: M 、 C 、 K 分别为结构的质量矩阵,阻尼矩阵和刚度矩阵; u 、 \dot{u} 、 \ddot{u} 分别为表示结构对应节点的位移向量、速度向量和加速度向量; $F(t)$ 为随时间变化的荷载函数。

在计算频率和振型时,忽略阻尼的影响,得到无阻尼自由振动方程

$$Ku + M\ddot{u} = 0 \quad (2)$$

假设各质点做简谐振动,各结点的位移可以表示为

$$u = \varphi \cos \omega t \quad (3)$$

式中: φ 为结点振幅列阵,即振型; ω 为该振型对应的频率。

由(2)、(3)两式,可得求解结构自振频率的方程

$$|K - \omega^2 M| = 0 \quad (4)$$

算出各阶频率,再由公式(2)解得相应的 n 个振型。

ANSYS 中运动方程的求解方法有模态叠加法和直接积分法。直接积分法即为对时间按步积分,在每个时间点,求解一组联立的静态平衡方程,本文采用直接积分法。

3 隔震渡槽动力特性研究

3.1 有限元模型的建立

为研究隔震渡槽的动力特性,建立隔震渡槽的三维有限元模型。将基础视为固结,为合理模拟相邻跨的质量,将相邻跨槽体和水体总质量的一半以集中质量的形式施加在墩顶。采用 Housner 弹簧质量模型模拟水体对侧墙和中墙的水平作用。渡槽上部槽身和下部槽墩均采用三维实体单元 SOLID45 模拟。支座双线性模型的恢复力特性可利用

COMBIN40 单元中的水平非线性弹簧单元模拟。采用两个弹簧单元 COMBIN40 模拟支座两个水平方向的恢复力特性,采用一个 COMBIN14 单元模拟支座垂直方向的恢复力特性。有限元模型见图 2,图中横槽向为 X 向,竖直向为 Y 向,顺槽向为 Z 向。

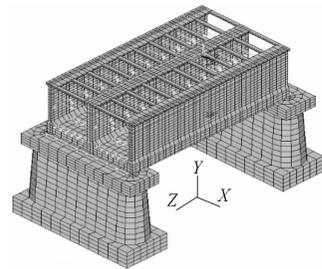


图 2 隔震渡槽有限元模型

3.2 动力特性分析

采用上述设计的高阻尼橡胶隔震支座,在双槽过水工况下对非隔震及隔震渡槽进行模态分析,并与文献^[9]中的铅芯橡胶支座隔震渡槽的模态分析结果进行对比,均以 5 倍隔震周期为例,具体结果见表 2。

表 2 非隔震与高阻尼橡胶及铅芯橡胶支座隔震渡槽自振特性对比

非隔震			高阻尼橡胶支座隔震			铅芯橡胶支座隔震			Hz
阶数	频率	振型	阶数	频率	振型	阶数	频率	振型	
第一阶结构(61)	2.909	整体纵向	第一阶隔震(21)	0.442	槽身纵向	第一阶隔震(21)	0.450	槽身纵向	
第二阶结构(62)	3.039	槽身横向	第二阶隔震(22)	0.517	槽身横向	第二阶隔震(22)	0.524	槽身横向	
第三阶结构(63)	4.132	整体竖向	第三阶隔震(63)	0.841	槽身转动	第三阶隔震(63)	0.855	槽身转动	
第四阶结构(64)	5.392	槽身扭转	第四阶结构(64)	4.541	槽身竖向	第四阶结构(64)	4.383	槽身竖向	

注:括号中的数字为其对应的实际阶数,不包括水体阵型。

由表 2 可以看出,非隔震结构的第一阶振型为槽身及槽墩整体纵向移动,结构基频为 2.909 Hz;而采用高阻尼橡胶支座隔震后则为槽身纵向平动,结构基频为 0.442 Hz;高阻尼橡胶支座隔震和铅芯橡胶支座隔震渡槽结构的前三阶振型皆为隔震振型且振型保持一致,而频率基本相同,2~4 倍隔震周期的结构也满足此规律。

4 隔震渡槽地震响应分析

为了检验高阻尼橡胶支座的隔震效果,需要运用时程分析法对 2~5 倍隔震周期的结构进行地震响应分析,本节仅以 5 倍隔震周期结构为例。

4.1 输入地震动特性对隔震效果的影响

为了检验分析隔震结构体系在不同类型地震动作用下的隔震效果,需要考虑不同类型的地震波,包括低频、中频、高频以及不同频谱组成的地震波。本

文选取了 4 条典型的地震波,即 Parkfield 波、El-centro 波、Taft 波和 San Francisco 波,地震波加速度幅值均调整为 0.2 g,持时 20 s,步长 0.02 s,均在顺槽向输入。

地震波的特征频率,是通过将其转化为傅氏谱求得的,在其基础上可以求得特征频率, Parkfield 波、El-centro 波、Taft 波和 San Francisco 波的特征频率分别为 1.3、1.8、3.3、4.8 Hz。

为了考察不同地震波输入条件下隔震渡槽的地震响应结果,图 3、4 分别列出了隔震渡槽在 Parkfield(P)、Taft(T)和 San Francisco(S)波输入条件下的支座剪力及槽身位移时程曲线。表 3、4 为非隔震和隔震渡槽渡槽关键位置的地震响应。

(1)由表 3、4 可以看出:当输入 T 波时,渡槽各关键位置的地震响应峰值的减少幅度都大于 70%,远大于其他 3 条波,减震效果明显。因为渡槽隔震

后结构基频避开了地震动的特征频率部分,基本周期也远离了场地特征周期。

表3 不同地震波输入下非隔震渡槽关键位置地震响应
m/s², mm, MPa

地震波	槽身 加速度	墩顶 位移	关键位置最大主拉应力			
			边墙底	中墙底	槽身底板	墩底
Parkfield	2.318	6.340	2.014	1.717	1.215	1.335
El-centro	3.155	8.658	2.384	1.951	1.378	1.770
Taft	6.506	17.650	5.371	4.372	3.081	3.470
San Francisco	2.625	5.266	1.751	1.538	0.972	1.074

(2)由图3、4及表3、4可以看出当地震波特征频率与结构基频越接近时,槽身和支座响应越大;而当地震波特征频率与结构基频比值越大,槽墩的响应越大。地震动特性对响应结果影响很大,不同地震波输入条件下,渡槽响应时程有很大差异,响应峰值也相差较大,在进行结构地震响应分析时,地震波的选择需要慎重考虑。

表4 不同地震波输入下隔震渡槽关键位置地震响应
m/s², mm, MPa

地震波	槽身 加速度	墩顶 位移	关键位置最大主拉应力			
			边墙底	中墙底	槽身底板	墩底
Parkfield	1.774	3.436	0.310	0.269	0.182	0.687
El-centro	2.009	3.896	0.222	0.194	0.130	0.784
Taft	1.930	4.042	0.308	0.272	0.182	0.788
San Francisco	1.710	6.439	0.173	0.157	0.103	1.278

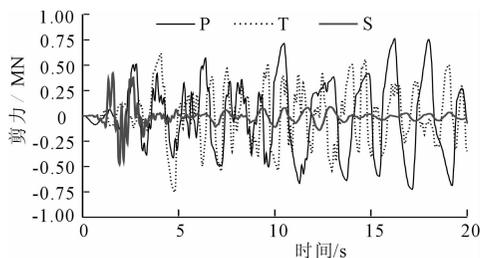


图3 隔震支座剪力时程曲线

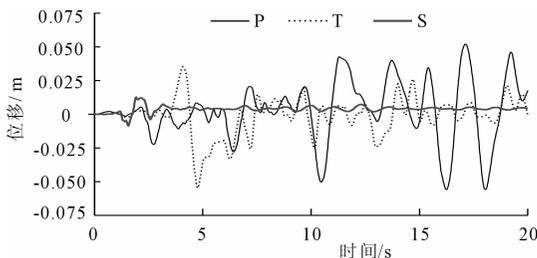


图4 隔震槽身位移时程曲线

4.2 三向地震动输入下的渡槽地震响应分析

在工程中,人们较关注的是结构的实际最大响应,而在进行结构抗震分析时,大多采用单向地震动

输入,但大量震害分析表明,由于地震动的本质是多维的,对于重要和复杂的结构物,仅考虑单向地震作用并不能够准确反应结构在实际地震作用下的响应情况,因此应考虑结构在多向地震动联合作用下的响应。加速度峰值按1(水平主向):0.85(水平次向):0.65(竖向)的比例调整。地震波选用EL-Centro(NS,WE,UP)波,分别将其加速度幅值调整为1.962 m/s²(NS)、1.668 m/s²(WE)和1.275 m/s²(UP),时长均为20 s,步长0.02 s。本文考虑X向(横槽向)为主方向和Z向(顺槽向)为主方向两种地震动输入情况,分别记作工况1和工况2。表5为两种工况下隔震渡槽各部位的地震响应峰值。

表5 隔震渡槽各部位响应峰值 mm, m/s², MPa, MN

工况	支座				槽墩	
	最大 位移	最大 加速度	侧墙底最大 主拉应力	槽底最大 主拉应力	支座 总剪力	槽墩最大 主拉应力
1	89.42	1.919	1.850	0.622	6.026	0.985
2	60.09	2.128	2.516	0.811	4.494	0.748

由表5可以看出:输入横槽向为主方向的三向地震动时,槽身位移、支座总剪力及墩底最大主拉应力都达到峰值;输入顺槽向为主方向的三向地震动时,槽身加速度、侧墙底最大主拉应力和槽底最大主拉应力达到峰值。

5 结 语

鉴于高阻尼橡胶支座的优越性及渡槽结构的特殊性,本文对南水北调某渡槽进行了高阻尼橡胶隔震支座的设计并对设计完成的隔震渡槽进行了模态分析和时程分析,主要工作如下:

(1)借鉴建筑与桥梁的相关规范及设计经验,对南水北调中线双泊河渡槽进行了高阻尼隔震支座设计,给出了设计步骤。

(2)渡槽在采用设计的隔震支座后,结构的第一阶振型从槽身及槽墩的纵向移动变为槽身纵向移动。采用高阻尼橡胶支座隔震和铅芯橡胶支座隔震渡槽的结构振型一致且前三阶频率均为隔震振型,其频率基本相同。

(3)选取了四条频谱特性不同的地震波,涵盖了低、中、高频,当地震波特征频率与结构基频越相近时,槽身位移和支座剪力越大,采用隔震技术效果越明显;而当地震波特征频率与结构基频比值越大,槽墩的响应越大。地震动特性对响应结果影响很

(下转第126页)

衰期对于模拟结果的影响程度也较高。

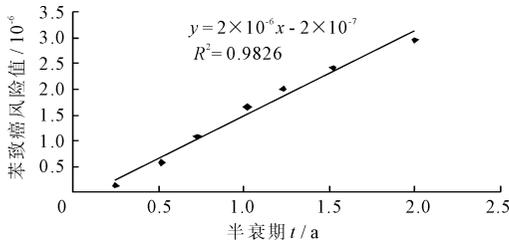


图4 半衰期 $t_{1/2}$ 与苯致癌风险值 R 关系

(2) 半衰期 $t_{1/2}$ 对苯致癌风险 R 的敏感性分析。经计算, local $SR = -3.556$; Range $SR = 3.457$ 。

5 结果讨论

(1) 经比较分析,不同参数表现出了对解析解模型的不同程度的敏感度,其中半衰期 $t_{1/2}$ 和渗透系数 K 对模拟结果的响应程度最大,呈线性关系,对模型表现出了较高的敏感性,有机碳分配系数 K_{oc} 次之,纵向弥散度 α_x 对解析解模型的响应程度最小。

(2) 在分析过程中,各参数对模型的影响程度都有一定的规律和特性。致癌风险随渗透系数和半衰期的变化呈线性相关,变化率稳定;随纵向弥散度的变化呈线性关系,但风险值的变化速率较小。

(3) 本次分析选择苯的致癌风险值为目标,研究了解析解模型对模拟计算污染物健康风险值的准确性,为模型的广泛应用提供了依据。但具有一定的主观性和单一性,还需进一步做全面周详的研究工作。

参考文献:

- [1] 高川博,姜斌,黄国强,等. 土壤污染物溶质运移模型研究进展[J]. 环境保护科学,2006,32(5):44-46.
- [2] Domenicopa. An analytical model for multidimensional transport of decaying contaminant species [J]. Journal of Hydrology,1987,91(1/2):49-58.
- [3] Martin-haydenjm,Robbinsga. Plume distortion and apparent attenuation due to concentration averaging in monitoring wells [J]. Ground Water,1997,35(2):339-346.
- [4] 程根伟,舒栋材. 水文预报的理论与数字模型[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006.
- [5] 薛红琴. 地下水溶质运移模型应用研究现状与发展[J]. 勘察科学技术,2008(6):17-22.
- [6] 于顺东,尤学一. WASP 水质模型检验及参数敏感度分析[J]. 水资源与水工程学报,2007,18(6):41-44.
- [7] Vogeltn, Mccartypl. Abiotic and biotic transformations of 1,1,1-trichloroethane under methanogenic conditions [J]. Environmental Science and Technology, 1987, 21(12):1208-1213.
- [8] 杜恩昊,张佳宝,唐立松. 一种溶质运移数学模型的应用研究[J]. 干旱区研究,2001,18(1):29-34.
- [9] EPA. Superfund public health evaluation manual [M]. Washington, US EPA, 1986.
- [10] 邹晓锦,仇荣亮,周小勇,等. 大宝山矿区重金属污染对人体健康风险的研究[J]. 环境科学学报,2008,28(7):1406-1412.
- [11] 王东红,原盛广,马梅,等. 饮用水中有毒污染物的筛查和健康风险评价[J]. 环境科学学报,2007,27(12):1937-1943.

(上接第122页)

大,不同地震波输入条件下,渡槽响应时程和响应峰值有很大差异,在进行结构地震响应分析时,地震波的选择需要慎重考虑。

(4) 对隔震渡槽输入三向地震动,当横槽向为主方向时,槽身位移、支座总剪力及墩底最大主拉应力都达到峰值;当顺槽向为主方向时,槽身加速度、侧墙底最大主拉应力和槽底最大主拉应力达到峰值,供设计时参考。

参考文献:

- [1] 张艳红. 大型渡槽抗震概论[M]. 北京:地震出版社,2004.
- [2] 陈玲玲,钱胜国,陈敏中,等. 大型渡槽减隔震设计研究[J]. 南水北调与水利科技,2008,6(1):212-215.

- [3] 朱昆. 高阻尼橡胶支座力学性能及其隔震效果分析研究[D]. 武汉:华中科技大学,2009.
- [4] 范立础,王志强. 桥梁减隔震设计[M]. 北京:人民交通出版社,2001.
- [5] Wai-fah Chen, Charles Scawthorn. Earthquake Engineering Handbook[M]. CRC Press, 2003.
- [6] 橡胶支座第2部分:桥梁隔震橡胶支座(GB20688.2-2006)[S]. 北京:中国标准出版社,2006.
- [7] 颜云燕. 大型渡槽高阻尼橡胶支座设计与地震响应分析[D]. 南京:河海大学,2011.
- [8] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,1998.
- [9] 丁晓唐,颜云燕,唐德嘉. 铅芯橡胶隔震双槽渡槽设计与动力分析[J]. 水电能源科学,2012,30(1):96-99.