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 refered. A finite element dynamic model of the aqueduct is established, in which the fluid – structure coupling was considered by Housner model, witch 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 refered 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 南水北调中线工程洺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,

基金项目:江苏省南水北调工程科技创新项目(KJCX - 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。

收稿日期:2012-11-13; 修回日期:2012-11-29

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。



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0.2g,相当于地震基本烈度为Ⅲ度,场地为 Ⅱ类场地。槽身纵向单跨长30m,共21跨;槽身横 向每联2槽,单槽净宽7m,侧墙净高7.9m,总高为 9.6m,设计水位为6.63m。下部支撑采用钢筋混 凝土空心薄壁墩,壁厚1m,墩高10m。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, m	m
γ_{max}	$h_{\scriptscriptstyle eq}$	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 × 10⁷ N/m,屈服后刚度 K_d 为7.428 × 10⁶ N/m,屈服力 Q_d 为 3.438 × 10⁵ 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]:

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

式中: $M \ C \ K \ D$ 别为结构的质量矩阵,阻尼矩阵和 刚度矩阵; $u \ u \ u \ D$ 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

$$Ku + M\ddot{u} = 0 \tag{2}$$

假设各质点做简谐振动,各结点的位移可以表示为

$$u = \varphi \cos \omega t \tag{3}$$

Hz

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

 $|K - \omega^2 M| = 0 \tag{4}$

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 座竖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

丰臣	隔震		高阻尼橡胶支座隔震			铅芯橡胶支座隔震		
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、Elcentro 波、Taft 波和 San Francsico 波,地震波加速度 幅值均调整为0.2g,持时20s,步长0.02s,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 Francsico 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 Francsico(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	ī地震	响应
			m/s^2 ,	mm,	MPa

此意迹	槽身	墩顶 关键位置最大主拉应力					
地辰彼	加速度	位移	边墙底	中墙底	槽身底板	墩底	
Parkfield	2.318 6	5.340	2.014	1.717	1.215	1.335	
El – centro	3.1558	8.658	2.384	1.951	1.378	1.770	
Taft	6.50617	7.650	5.371	4.372	3.081	3.470	
San Francsico	o 2. 625 5	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

加重冲	槽身	墩顶	关锁	建位置最	大主拉应	力
地辰仮	加速度	位移	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 Francsico	1.710	6.439	0.173	0.157	0.103	1.278



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⁄s ² , MPa, MN	I
-----	-------------	--------------------------------	---

			士应	槽墩		
ᆈ	最大	最大	侧墙底最大	槽底最大	- 又座	墩底最大
伔	位移	加速度	主拉应力	主拉应力		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, 对南水北调中线双洎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)





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 distortionand apparent attenuation due to concentration averagingin 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] Vogeltm, 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.