

隔震渡槽结构的能力谱分析方法

殷开娟, 周逸仁

(淮海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 基于位移的抗震设计理论,介绍了能力谱法的基本原理和实施步骤。以南水北调工程为背景,应用该方法对渡槽结构的抗震性能进行了研究,并与非线性时程分析结果作对比。考虑到渡槽结构的特殊性,在计算需求谱曲线时,采用基于水工建筑物抗震设计规范的等延性弹塑性需求谱。分析表明:能力谱法可以用于隔震渡槽结构的抗震性能评估。

关键词: 隔震渡槽; 能力谱; 时程分析; 侧向力加载

中图分类号: TV672

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)05-0174-05

Analysis method of capacity spectrum of isolated aqueduct

YIN Kaijuan, ZHOU Yiren

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

Abstract: Based on the displacement of seismic design theory, this paper introduced the basic principle and implementation of capacity spectrum method. With the background of the south to north water diversion project, it studied the seismic performance of an aqueduct structure, and then compared with the results of nonlinear time - history analysis. Considering the particularity of aqueduct structure, when calculating the demand spectrum curve, it used constant ductility elastoplastic demand spectrum which based on the code for seismic design of hydraulic structures. Analysis show that capacity spectrum method can be used for seismic performance evaluation of isolated aqueduct.

Key words: isolated aqueduct; capacity spectrum; time history analysis; lateral loading

渡槽是跨越河流、山谷、道路等的架空输水建筑物,是南水北调工程中极为重要的生命线工程。自古以来,我国就是一个多地震的国家。而在近期,地震发生的频率愈加频繁,因此渡槽的抗震安全性问题显得尤为重要。随着南水北调工程项目的实施与深入开展,国内已经有越来越多的学者致力于渡槽的抗震设计研究中。

基于性能的抗震设计理论^[1]是指结构在不同水平地震作用下的性能达到预期的性能目标,目前主要有3种基于性能的抗震设计方法,分别是基于力、基于位移和基于能量的抗震设计方法。传统的设计方法都是基于力的,但这种方法没有事先控制目标位移,计算结果相对保守,基于能量的设计方法还没有作为结构的抗震设计方法,基于位移的抗震设计方法虽然还处在研究阶段,但它可以在设计前

控制结构的目标位移,相比于前两者更加适用于结构的抗震设计。本文采用基于位移的能力谱分析方法。

能力谱方法是一种较简单的静力弹塑性分析方法,最初是由 Freeman 等人提出的,其后又进行了不断的改进。近年来,能力谱法已广泛运用在建筑、桥梁、基础隔震等结构中^[2-4],并取得了一定成果,而国内外对其在隔震渡槽中的应用还较少,在此基础上,本文采用基于位移的能力谱分析方法,研究其在隔震渡槽结构中的适用性。

1 基本原理

能力谱法作为 Pushover 分析最早也是目前比较广泛采用的一种方法,是基于能量原理的一些研究成果,试图将实际多自由度体系的结构的弹塑性反

应用等效单自由度体系的反应来表达,最初的目的是建立一种大震情况下结构抗震性能的快速评估方法。其基本思想是借助 Pushover 分析得到的基底剪力-顶点位移曲线,即 Pushover 曲线,转化成能力谱曲线,再构造需求谱曲线,将两者画在同一坐标系中,交点即性能点或目标位移点^[5]。具体步骤如下:

(1)对结构进行 Pushover 分析,得到结构的底部剪力-顶点位移曲线。通过公式(1)转化为能力谱曲线,如图1。

$$S_a = \frac{V}{\alpha_1 M}, S_d = \frac{\Delta_{roof}}{\gamma_1 X_{1,roof}} \quad (1)$$

式中: S_a 为谱加速度; S_d 为谱位移; α_1 为第一振型质量参与系数; γ_1 为第一振型参与系数; $X_{1,roof}$ 为第一振型顶点振幅。

振型质量参与系数与振型参与系数如下定义:

$$\alpha_1 = \frac{[\sum_{i=1}^N (m_i \varphi_{i1})]^2}{[\sum_{i=1}^N m_i][\sum_{i=1}^N (m_i \varphi_{i1}^2)]}, \quad \gamma_m = \frac{\sum_{i=1}^N (m_i \varphi_{im})}{\sum_{i=1}^N (m_i \varphi_{im}^2)} \quad (2)$$

式中: γ_m 为第 m 振型的振型参与系数; m_i 为第 i 层的质量; φ_m 为振型 m 在 i 层的振幅; N 为层数。

(2)若将我国《建筑抗震设计规范》(GB50011-2001)^[6]的设计反应谱曲线直接转化为弹性需求谱,将导致分析结果偏大,因此,在弹性需求谱的基础上,一般通过考虑等效阻尼比(ζ_{eff})或延性比(μ)两种方法,得到折减的弹性需求谱,即弹塑性需求谱。

(3)将能力谱和弹塑性需求谱叠加在同一坐标中进行比较,判断两曲线是否相交,交点即性能点,并根据交点对应的结构底部剪力、顶点位移来评估结构的抗震性能。若不相交,则说明抗震能力不足。

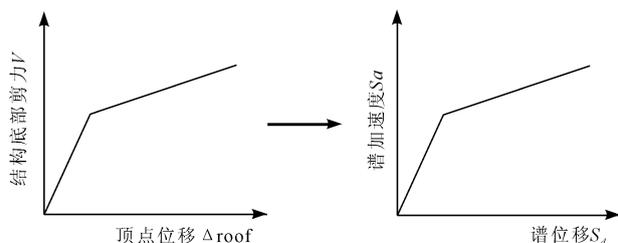


图1 双线性能力谱曲线

2 基于水工规范的弹塑性需求谱

隔震渡槽由于其结构的特殊性,需要对适用于隔震渡槽结构的弹塑性需求谱进行研究。目前主要有两种方法对设计反应谱进行折减^[7]:一种是采用等效阻尼比进行折减,如 ATC-40 采用的方法;一种是改进的能力谱法, Chopra、Goei 和 Fajfar 等都提出了这种方法,即通过 $R-\mu-T$ 关系得到弹塑性反应谱建立需求谱。

Vidic 在文献中提出,在单自由度系统采用双线性回复力模型且假设阻尼为 Rayleigh 阻尼时,关系如下:

$$\begin{cases} R_\mu = c_1(\mu - 1)^{c_R} \frac{T}{T_0} + 1, & T \leq T_0 \\ R_\mu = c_1(\mu - 1)^{c_R} + 1, & T > T_0 \\ T_0 = c_2 \mu^{c_T} T_g \end{cases} \quad (3)$$

式中: c_1 、 c_2 、 c_R 、 c_T 是由结构滞回性能和阻尼决定的参数,取值见表1。

表1 Vidic 模型参数

滞回模型	阻尼	c_1	c_2	c_R	c_T
Q型	质量成正比	1.0	1.0	0.65	0.3
Q型	瞬时刚度成正比	0.75	1.0	0.65	0.3
双线性	质量成正比	1.35	0.95	0.75	0.2
双线性	瞬时刚度成正比	1.10	0.95	0.75	0.2

若 R 值过大,则性能点所反映的结构能力偏小,结构不经济;若 R 值过小,性能点反映出的结构能力偏大,结构不安全。

水工抗震设计规范^[8]中的设计反应谱是以设计烈度(中震)计算得到的,当结构遭受到设计烈度的地震时,会产生一定的塑性变形,可以说水工抗震规范设计反应谱是非常适合隔震渡槽的能力谱法使用的。

图2为水工建筑物抗震设计规范中所采用的设计反应谱。

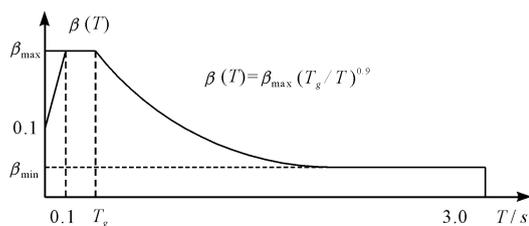


图2 水工设计反应谱

图中, β 称为动力系数, 或者称为放大系数, 它是质点加速度峰值 α_{\max} 和地面水平地震加速度代表值的比值, 即 $\beta = \frac{\alpha_{\max}}{\alpha_h}$; T 为结构的自振周期; β_{\max} 为设计加速度反应谱最大值的代表值; T_g 为不同类别场地的特征周期, 相当于地震波的主震周期, 当设计烈度不大于 8 度且基本自振周期大于 1.0 s 的结构, 特征周期 T_g 宜延长 0.05 s。

要得到弹塑性需求谱中的谱加速度, 只需要在水工抗震规范设计反应谱值乘以相应地震水平下的加速度大小, 7 度区为 0.1 g, 8 度区为 0.2 g, 9 度区为 0.4 g。

本文根据 Vidic 提出的强度系数折减模型中的第四种模型, 对水工规范反应谱进行折减、转换, 得到不同场地条件下的弹塑性需求谱。

3 侧向力加载

侧向力加载方式一直是静力弹塑性分析中的研究热点。对于低层建筑物或者以第一振型为主的结构, 通常采用倒三角分布和均匀分布模式, 而对于高层建筑物或高阶振型不可忽略的结构, 可以采用抛物线分布、振型组合分布及自适应分布模式^[9]。

本文采用 SAP2000 有限元分析软件建立隔震渡槽模型, 该软件中提供了 3 种 Pushover 分析的侧向力分布方式: ①Load Pattern, 表示自定义的静荷载工况或组合。②Accel, 表示作用于任意的整体 X、Y、Z 方向的均匀加速度, 在每个节点的力与分配给节点的质量成比例, 且作用在指定的方向。③Mode, 从指定的特征类型或 RITZ 类型振型的振型荷载。

对于一般的规则框架结构来说, Accel 相当于沿结构高度全长均布的侧向力分布方式; Mode 相当于倒三角侧向力分布方式。本文的隔震渡槽结构上部槽身质量要明显大于下部槽墩质量, 当采用 Accel 加载时, 上部结构的侧向力也要大于下部结构, 大致的布置方式如图 3(a) 所示; 对于 Mode 加载模式来说, 隔震渡槽结构的前二阶振型都是隔震支座的振型, 其在横槽向的大致的分布方式见图 3(b)。

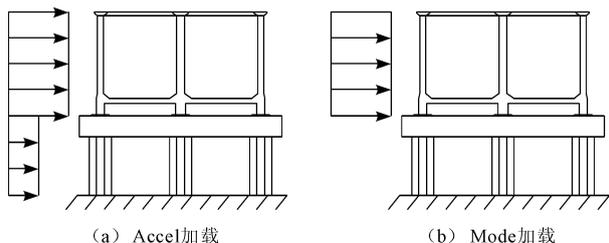


图 3 侧向力加载方式

图 3 表明, 两种侧向力分布方式都具有一定的合理性。相对于结构实际的地震力分布, 采用 Accel 加载的侧向力得到的结果要比实际结果大; 槽墩部分没有侧向荷载, 按 Mode 加载的侧向力分布方式得到的结果要比实际结果要小。本文选用按振型加载及均匀加速度加载两种侧向力分布方式对隔震渡槽进行能力谱法分析。

4 实例分析

4.1 工程概况及计算工况

沙河南 - 黄河南沙河段工程建筑物等级 1 级, 抗震设防烈度为 8 度, II 类场地。采用排架矩形渡槽方案, 槽身采用 C50 预应力混凝土结构, 跨度 30 m, 矩形 4 槽两联, 单槽净宽 7 m, 净高 7.8 m, 侧墙总高 9.5 m, 渡槽设计水位 6.38 m。单跨上部结构及水体总重为 5.141×10^6 kg。槽墩选用双排架结构, 每墩 6 根柱, 柱截面为端圆形, 即中间为 1.5 m \times 1 m 的矩形, 两端各加一个半圆, 槽墩及承台采用 C30 混凝土。选用高阻尼橡胶隔震支座, 每个单墩顶部布置 6 个。按水位处于设计水位时计算, 边支座承受的竖向力为 6.66 MN, 中支座承受的竖向力为 11.87 MN, 总竖向力为 50.38 MN。采用双线性模型模拟高阻尼橡胶支座的恢复力曲线。

用 SAP2000 有限元软件建立隔震渡槽模型, 为了简化模型, 去除槽墩墩底部原有的承台, 改成固定支座, 并由塑性铰来体现结构的塑性特性。用附加质量法考虑动水压力对槽身的作用, 水体与槽身的接触面采用 Shell 单元模拟, 按双槽满水位计算附加质量, 并将其附加到槽壁上。为考虑相邻跨的影响, 将相邻跨的槽身和水体总质量的一半加到承台处。隔震渡槽模型如图 4 所示, X 向为横槽向, Y 向为顺槽向, Z 向为竖直向。

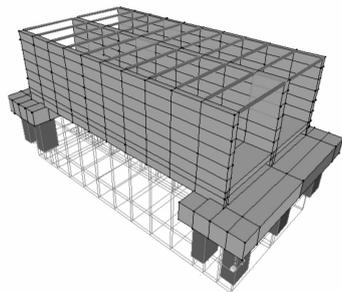


图 4 隔震渡槽模型

对隔震渡槽分别进行横槽向 (X 向) 和顺槽向 (Y 向) 的 Pushover 分析, 采用振型加载方式时, 选

取按结构第一、第二阶振型加载的侧向力分布方式。

在选择监测位移点时,框架结构一般会选择结构的顶层的形心位置;桥梁结果一般会选择桥墩墩顶,将承台作为梁来考虑,且忽略承台高度及承台对承载能力的影响,把承台仅看作是桥墩间的传力构件。由于渡槽结构的承台高度不可忽略,故本文选取支座底部和承台处的连接点以及槽墩顶部作为位移监测点,并将结果进行对比。

4.2 性能点的确定

输入不同加载方式的侧向力,得到结构的 Pushover 曲线,将 Pushover 曲线转化成格式的能力谱曲线,与 8 度地震烈度下的等延性弹塑性需求谱曲线绘制在一起,其交点就是结构的性能点。图 5 为隔震渡槽结构在工况 1 下的性能点求解图。

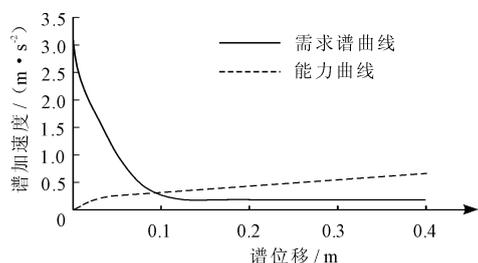


图 5 性能点求解图

同理可得,不同工况下,结构的性能点,见表 2。

表 2 不同工况下的性能点 $m, m/s^2$

工况	侧向力 加载方向	侧向力 加载方式	监测点 位移点	性能点 处 S_d	性能点 处 S_a
1	X	一阶振型	槽墩顶部	0.0903	0.264
2	X	均布		0.0456	0.408
3	Y	二阶振型		0.0638	0.205
4	Y	均布		0.0391	0.365
5	X	一阶振型	支座底部	0.0996	0.286
6	X	均布		0.0454	0.408
7	Y	二阶振型		0.0632	0.203
8	Y	均布		0.0391	0.367

4.3 时程分析

为了准确评价结构的抗震能力,对隔震渡槽结构进行非线性动力时程分析时选用不同类型的地震波,包括低频、中频、高频及人工合成的地震波。本文选取的地震波为 Parkfield 波、El - centro 波、Taft 波、San Francisco 波及基于二类场地、8 度设防、设计地震分组第二组的人工合成地震波,时长均为 20s,峰值均调整为 $1.962 m/s^2$ 。

表 3 为隔震横槽向和顺槽向在 8 度地震烈度情

况下,槽墩顶部位移、支座底部位移及底部总剪力的时程分析结果。

表 3 时程分析结果 mm, kN

地震波	横槽向(X向)			横槽向(Y向)		
	墩顶 位移	支座底 部位移	底部 总剪力	墩顶 位移	支座底 部位移	底部 总剪力
Parkfield 波	0.284	0.293	8374	0.578	0.559	8400
El - centro 波	0.561	0.581	16470	1.126	1.129	16940
Taft 波	0.422	0.438	12300	0.845	0.848	12480
San Francisco 波	0.239	0.245	7111	0.484	0.485	7291
平均值	0.376	0.389	11064	0.758	0.754	11278
人工波	0.356		10480	0.716		10770

由表 3 可以看出人工波算出来的结果同所选 4 条地震波所得结果的平均值比较接近,说明本文所选的地震波比较合理。

5 分析结果对比

取 4 条实测地震波所得结果的平均值作为结构的时程分析结果,将能力谱法得到的性能点由公式(1)反算得到结构基底剪力和监测点位移,与时程分析得到的结果进行对比。

表 4 为不同工况下能力谱法与时程分析结果对比。

表 4 能力谱法与时程分析结果对比 $mm, \%, kN$

工 况	监测点 位移	能力 谱法	时程 分析法	误差 剪力	能力 谱法	时程 分析法	误差
1	墩顶 底部 总剪 力	0.326	0.376	+4.7	9873	11064	-17.6
2		0.549	0.758	+11.9	15793	11278	+29.1
3		0.470	0.758	-38.2	7774	11278	-36.8
4		1.174	0.758	+53.4	15514	11278	+24.1
5		0.378	0.389	-2.8	10694	11064	-3.3
6		0.478	0.389	+22.8	13830	11064	+25.0
7		0.544	0.754	-27.8	8482	11278	-24.8
8		0.909	0.754	+20.5	14995	11278	+32.9

由表 4 可以看出,各侧向力分布工况下结构的墩顶位移和底部总剪力与时程分析相比均有较大差距。按振型加载的侧向力分布方式得到的能力谱法分析结果要比时程分析得到的结果小;选用均布加载的侧向力分布方式得到的能力谱法分析结果要比时程分析大,这与第 3 节中的结论是一致的。

表 5 为不同监测位移点的能力谱法得到的结果与时程分析的误差对比结果。

承台的侧向刚度很大,因此理论上支座底部的侧向位移应该等于槽墩顶部的位移。表 3 中槽墩顶

部和支座底部的时程分析结果误差基本在 0.1 mm 以下,可以认为两者的位移相同,即墩顶位移与支座底部位移相等,故表 5 中的误差可以看作是墩顶位移能力谱法与时程分析的误差。

表 5 不同监测位移点的能力谱法同时程

分析结果的误差对比 mm, %

槽向	横槽向		顺槽向	
墩顶位移	+ <u>16.5</u>	+10.0	+ <u>8.4</u>	-3.7
支座底部位移	+ <u>16.0</u>	+10.8	+ <u>3.2</u>	+4.1

注:表中下划线数字代表槽墩顶部作为监测位移点的能力谱法分析结果,非下划线数字代表监测位移点为支座底部的能力谱法分析结果;“+”表示能力谱法的结果比时程分析的结果大,“-”号表示能力谱结果小于时程分析结果。

由表 5 可以看出:总体上,选取支座底部作为监测位移点得到的结果的误差要比选取槽墩顶部作为监测位移点得到的结果小,可知,承台对渡槽的影响不可忽略。

6 结 语

本文基于位移的抗震设计理论,运用能力谱法对渡槽结构的抗震性能进行了研究,计算出的结构地震响应与非线性时程分析结果相近,说明能力谱法可以用于隔震渡槽结构的抗震性能评估。采用能力谱法对隔震渡槽的地震反应进行分析时,侧向力分布方式的不同对分析结果的影响很大,均布的侧向力分布方式得到的结果基本上大于按振型加载的侧向力得到的结果,这与前文理论推理一致;选用承台与支座的连接处作为监测位移点所得的能力谱分析与时程分析结果的误差和选用槽墩顶部作为监测位移点时相比有明显的减小,说明在运用能力谱法

对隔震渡槽进行分析时,简单的复制桥梁结构的做法,选择槽墩顶部作为监测位移点并不合适,应更多地考虑承台的影响。

参考文献:

- [1] Bertero R, Bertero V V. Performance - based earthquake - resistant design based on comprehensive philosophy and energy concepts [C] // . Proceedings of 11th World Conference on Earthquake Engineering, Elsevier science Ltd., 1996.
- [2] 刘立军,贾明明. 能力谱法在建筑结构抗震性能评定中的应用[J]. 建筑结构,2011,41(z1):241-244.
- [3] 熊二刚,梁兴文,张倩. 钢框架结构基于能力谱法的抗震设计方法研究[J]. 郑州大学学报(工学版),2010,31(1):6-10.
- [4] 周云,安宇,梁兴文. 基础隔震结构的能力谱分析方法[J]. 世界地震工程,2002,18(1):46-50.
- [5] 汪大绥,贺军利,张凤新. 静力弹塑性分析(Pushover Analysis)的基本原理和计算实例[J]. 世界地震工程,2004,20(1):45-53.
- [6] 中国建筑科学研究院. GB 50011-2001. 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [7] 梁仁杰,吴京,孟少平. 考虑两种不同折减方式的能力谱评价方法的比较[C] // . 第七届全国土木工程研究生学术论坛. 南京:东南大学,2009.
- [8] 孙勇,张志强,程文,等. 基于侧向力加载方式的 Pushover 分析方法[J]. 工业建筑,2009,39(5):47-52+55.
- [9] 中国水利水电科学研究院 电力工业部昆明勘测设计研究院 电力工业部西北勘测设计研究院. DL 5073-2000. 水工建筑物抗震设计规范[S]. 北京:中国电力出版社,2001.