

考虑槽身与槽内水体流固耦合的渡槽地震反应计算

王 博¹, 陈 淮¹, 徐 伟¹, 彭基辉²

(1. 郑州大学环境与水利学院, 河南 郑州 450002; 2. 上海市水务局, 上海 200040)

摘要:基于考虑槽身与槽内水体流固耦合的渡槽薄壁梁段单元的动力分析模型, 计算了南水北调中线工程某渡槽结构的地震反应. 计算结果表明, 随着水位的上升, 渡槽结构地震反应增大; 考虑槽身与槽内水体流固耦合时, 渡槽结构的横向地震反应、伸缩缝相对折角小于不考虑流固耦合的情况, 而槽身横截面绕轴线转角却大于不考虑流固耦合的情况, 说明槽身与水体的相互耦合对渡槽结构地震反应影响显著. 因此, 在对渡槽结构进行地震反应计算时, 应采用能考虑相应水位的渡槽流固耦合动力分析模型, 并计算渡槽在不同地震波激励下的地震反应才能综合反映渡槽结构在地震作用下的实际情况.

关键词:渡槽; 流固耦合; 地震反应; 时程分析

中图分类号:TV312

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2005)03-0005-03

Seismic response analysis of aqueducts with consideration of fluid-solid coupling//WANG Bo¹, CHEN Huai¹, XU Wei¹, PENG Ji-hui²(1. School of Environment and Water Conservancy, Zhengzhou Univ., Zhengzhou 450002, China; 2. Shanghai Water Authority, Shanghai 200040, China)

Abstract: Based on the shell-beam element dynamic model for aqueducts with consideration of the fluid-solid coupling, the seismic response of an aqueduct structure in the South-to-North Water Transfer Middle Line Project was calculated. The results indicate that seismic response of the aqueduct structure grows with the rise of water level, and that the transverse seismic response and the relative rotation of expansion joints decrease, but the rotation angle of the aqueduct section around the longitudinal axis increases when the fluid-solid coupling is taken into account. Therefore, the fluid-solid coupling is of great influences on the seismic response of the aqueduct structure. As a result, it is proposed that the fluid-solid coupling dynamic model with different water levels considered should be used in the calculation of the seismic response, and that the seismic response of aqueducts under different shock waves should be calculated for comprehensive reflection of the behavior of aqueducts in actual earthquakes.

Key words: aqueduct; fluid-solid coupling; seismic response; time-history analysis

为调节我国水资源南北分布不平衡, 缓解北方地区水资源紧张压力, 我国决定兴建南水北调工程, 这是关系到我国整体生态形势和经济形势的重大工程之一, 现东、中线工程已经开工建设. 南水北调工程计划建造多座渡槽, 这些渡槽的抗震安全性是关系到南水北调工程能否正常运营的关键点之一^[1]. 目前对渡槽结构抗震性能的研究开展较少, 而且大多都集中在渡槽结构动态特性分析方面^[2~6], 对渡槽整体的结构地震反应计算研究较少^[7~11]. 现有研究中, 基本上采用将渡槽槽内水体质量固结于渡槽槽身而不考虑渡槽槽身与槽内水体的流固耦合作用, 有些研究即使考虑了流固耦合作用, 所采用的渡槽动力分析模型也过于简化. 本文在综合考虑渡槽薄壁结构的弯扭耦合等特性的基础上, 根据文献[12, 13]所建立的渡槽结构

考虑流固耦合的动力分析模型, 采用时程分析方法计算了南水北调中线工程某渡槽在不同地震波作用下的地震反应, 计算结果对该渡槽结构的抗震计算和设计有较好的参考价值.

1 渡槽抗震计算模型

渡槽结构空间动力计算采用薄壁梁段有限元法, 其基本思想是将渡槽沿跨长划分为若干薄壁梁段单元, 每个梁段单元有 2 个结点, 每个结点有 8 个自由度: $u_i, u_i', v_i, v_i', w_i, \varphi_i, \varphi_i', u_{i+1}$. 单元结点的横向、竖向、纵向、扭转位移列阵及水体等效质量横向位移列阵分别为 $u^e = [u_i \ u_i' \ u_j \ u_j']^T$, $v^e = [v_i \ v_i' \ v_j \ v_j']^T$, $w^e = [w_i \ w_j]^T$, $\varphi^e =$

基金项目: 河南省高校杰出科研人才创新工程资助项目(2003KYCX011); 河南省科技攻关资助项目(0496470008)

作者简介: 王博(1956—), 男, 河南商丘人, 教授, 博士, 从事水工结构抗震研究.

$[\varphi_i \quad \varphi_i' \quad \varphi_j \quad \varphi_j']^T, \mathbf{u}_r = [u_{ri} \quad u_{rj}]^T$. 根据 Housner 理论^[13], 考虑流固耦合的渡槽槽身薄壁梁段单元刚度矩阵和单元质量矩阵分别为^{[12]①}:

$$\mathbf{K}^e = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_u^e + \mathbf{K}_{u,u}^e & 0 & 0 & 0 & \mathbf{K}_{u,w}^e \\ 0 & \mathbf{K}_v^e & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{K}_w^e & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{K}_\varphi^e + \mathbf{K}_\omega^e & 0 \\ \mathbf{K}_{w,u}^e & 0 & 0 & 0 & \mathbf{K}_{w,w}^e \end{bmatrix}^e \quad (1)$$

$$\mathbf{M}^e = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{u,u}^e & 0 & 0 & \mathbf{M}_{u,\varphi}^e & 0 \\ 0 & \mathbf{M}_{v,v}^e & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{M}_{w,w}^e & 0 & 0 \\ \mathbf{M}_{\varphi,u}^e & 0 & 0 & \mathbf{M}_{\varphi,\varphi}^e & \mathbf{M}_{\varphi,w}^e \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{M}_{w,\varphi}^e & \mathbf{M}_{w,w}^e \end{bmatrix}^e \quad (2)$$

式中各分块矩阵的含义和表达式可见相关文献^{[11]①}.

求解渡槽地震反应时, 须用结构阻尼矩阵, 为简化计算, 可采用黏滞阻尼理论. 文献^[13]指出, 水体与结构之间相互作用的阻尼很小, 因此在建立渡槽槽身阻尼矩阵时可不计水体与结构之间相互作用的阻尼, 根据文献^[11], 本文计算所采用的渡槽结构阻尼矩阵为

$$\mathbf{C}^e = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{uu}^e & 0 & 0 & \mathbf{C}_{u\varphi}^e & 0 \\ 0 & \mathbf{C}_{vv}^e & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{C}_{ww}^e & 0 & 0 \\ \mathbf{C}_{\varphi u}^e & 0 & 0 & \mathbf{C}_{\varphi\varphi}^e & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^e \quad (3)$$

式中各分块矩阵的含义和表达式可见文献^[11].

根据渡槽支架的结构特点, 用空间梁单元模拟渡槽支架. 将连接渡槽槽身和渡槽支架的盆式橡胶支座模拟为弹性元件, 求出盆式橡胶支座的弹性应变能, 由变分原理确定盆式橡胶支座连接渡槽槽身和渡槽支架的刚度矩阵, 将其叠加到结构整体刚度矩阵中, 即可形成渡槽结构整体刚度矩阵. 渡槽支架底部边界条件, 按固定支承处理. 按照直接刚度法组集渡槽槽身和渡槽支架的单元特性矩阵, 即可得到渡槽结构的整体刚度矩阵 $\mathbf{K}$ 、质量矩阵 $\mathbf{M}$ 和阻尼矩阵 $\mathbf{C}$.

应用达朗伯原理, 可以得到在地震动输入时渡槽结构的地震反应方程:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{V}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{V}} + \mathbf{K}\mathbf{V} = -\mathbf{M}\ddot{\mathbf{V}}_g \quad (4)$$

式中: $\ddot{\mathbf{V}}$, $\dot{\mathbf{V}}$ 和 $\mathbf{V}$ 分别为渡槽整体结构的相对加速度、相对速度和相对位移列阵; $\ddot{\mathbf{V}}_g$ 为输入的地震波加速度列阵, 方程(4)采用 Wilson- θ 法求解.

2 渡槽结构地震反应分析

2.1 工程实例

南水北调中线工程某渡槽全长 114 m, 共分 3 跨, 每跨 38 m; 支架采用 H 形排架, 排架断面为圆形, 直径为 1 m; 上横梁采用矩形断面, 高 0.8 m, 宽 2 m; 中横梁为矩形断面, 高 0.8 m, 宽 0.6 m. 渡槽设计水位 2.70 m. 槽身混凝土为 300 号, 支架混凝土为 250 号. 渡槽槽身横截面计算简图见图 1.

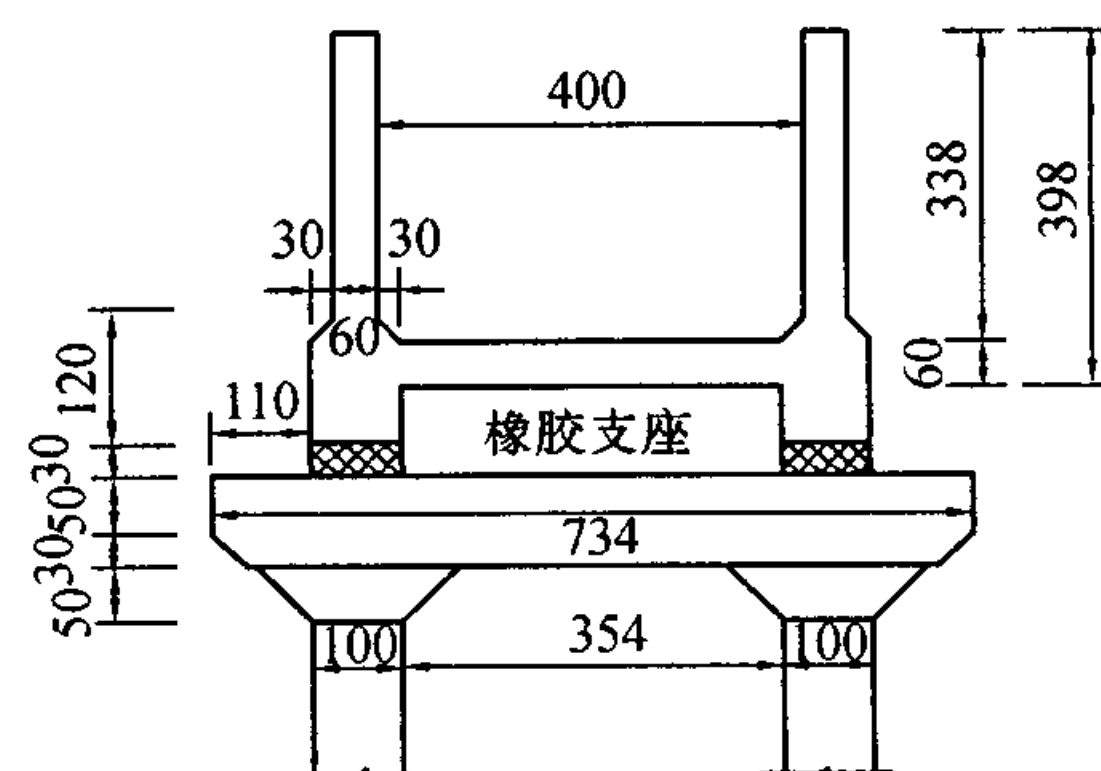


图 1 渡槽槽身横截面计算简图(单位: cm)

采用薄壁梁段单元对渡槽槽身进行有限元离散, 每 3.8 m 划分 1 个薄壁梁段单元, 每跨槽身划分 10 个单元, 整个渡槽槽身共划分 30 个渡槽薄壁梁段单元, 共计 33 个结点. 采用空间梁单元对渡槽支架进行有限元离散, 每个支架划分 36 个单元, 36 个结点(包括上、中横梁). 由设计规范可得出渡槽结构材料特性.

2.2 地震波的选取

在对渡槽结构进行地震反应计算时, 所选用的地震波波形对所研究渡槽结构的地震反应影响很大, 因此需要正确选择. 根据渡槽所处场地条件, 为全面反映渡槽在不同地震波作用下各方向的地震反应, 本文选用 EL-Centro 波、Taft 波、Pasadena 波作为渡槽结构地震地面运动加速度的输入, 各方向输入的地震波如下: 横向激振时分别输入 EL-Centro 波 EW 分量、Pasadena 波 X 分量、Taft 波 EW 分量, 纵向激振时分别输入 EL-Centro 波 NS 分量和 Taft 波 NS 分量, 输入地震波最大幅值为 0.2 g.

2.3 地震反应分析

根据渡槽实际情况, 分 5 种工况进行渡槽地震反应计算: ①工况 1: 渡槽槽内无水; ②工况 2: 渡槽槽内水位为设计水位的一半 ($h = 1.35$ m), 不考虑槽身与水体的相互耦合; ③工况 3: 渡槽槽内水位为设计水位的一半 ($h = 1.35$ m), 考虑槽身与水体的相互耦合; ④工况 4: 渡槽槽内水位为设计水位 ($h = 2.70$ m), 不考虑槽身与水体的相互耦合; ⑤工况 5:

①徐建国, 陈淮, 王博, 渡槽结构考虑流固耦合的动力建模研究. 郑州工学院, 2003.

渡槽槽内水位为设计水位($h = 2.70\text{ m}$),考虑槽身与水体的相互耦合。

渡槽输出位移分别为各跨跨中底板中点横向、纵向和竖向位移,各跨跨中横截面绕轴线转角,止水带处左、右节点相对折角.计算结果如下:

a. 渡槽各跨跨中底板中点横向位移.表 1 为渡槽各跨跨中结点在 EL-Centro 波 EW 分量激振下各工况时的最大横向位移,分析计算结果可知:各工况下各跨中点横向瞬时位移分布和趋势同步,但中跨跨中横向瞬时位移大于左右两跨瞬时位移,说明地震反应时渡槽整体结构中间结点位移最大.随着水位的升高,渡槽上部质量增加,横向地震反应位移都逐渐变大.考虑流固耦合时的各跨中点横向瞬时位移均小于不考虑流固耦合时的横向瞬时位移,说明水体-结构的相互耦合,对于本算例渡槽具有明显的 TLD 效应,能够降低结构的横向地震反应.纵向波作用下跨中结点横向位移很小。

表 1 跨中结点最大横向位移

渡槽部位	最大横向位移/mm				
	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5
左跨跨中	6.333 6	7.978 6	6.864 7	9.230 4	9.044 1
中跨跨中	46.617 1	49.957 3	47.418 9	50.767 0	48.026 0
右跨跨中	42.131 9	44.129 9	42.858 5	48.133 6	43.417 4

b. 渡槽跨中横截面绕轴线转角.表 2 是渡槽槽身在 EL-Centro 波 EW 分量激振下的各跨跨中横截面绕轴线转角最大值,分析计算结果可知:各工况下各跨中点绕轴线瞬时转角的分布和趋势同步,但中跨跨中结点绕轴线瞬时转角大于左、右两跨;考虑流固耦合时的转角较之不考虑流固耦合时的转角大.随着水位的升高,渡槽上部质量增加,各跨中点绕轴线转角逐渐变大,但两者的分布和趋势基本同步,说明流固耦合对结点绕轴线转角的影响仅限于反应数值的大小,而对反应分布影响不大.纵向波作用下的地震反应小于横向波作用下的地震反应。

表 2 跨中横截面绕轴线转角最大值

渡槽部位	绕轴线转角最大值/rad				
	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5
左跨跨中	0.0813179	0.0919375	0.0949927	0.1014202	0.1277753
中跨跨中	0.1233684	0.1275808	0.1356769	0.1379828	0.1562018
右跨跨中	0.1160667	0.1268982	0.1333779	0.1288472	0.1471708

c. 渡槽各跨跨中底板中点纵向位移.表 3 是渡槽在 EL-Centro 波 NS 分量激振下槽身各跨跨中横截面最大纵向位移,分析计算结果可知:沿地震波的传播方向最远点处渡槽槽身纵向位移最大;无论是否考虑流固耦合,随着槽内水位的增加,渡槽上部质量加大,在纵向波作用下,渡槽槽身结构纵向位移逐渐变大.考虑流固耦合时跨中横截面最大纵向位移略

大于不考虑流固耦合时的计算值,但影响不大.横向波作用下的渡槽槽身纵向位移很小。

表 3 跨中横截面最大纵向位移

渡槽部位	最大纵向位移/mm				
	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5
左跨跨中	0.445 8	0.709 4	0.709 8	0.915 8	0.923 2
中跨跨中	1.213 1	1.932 1	1.933 3	2.502 7	2.523 1
右跨跨中	1.640 4	2.611 9	2.613 5	3.426 5	3.455 2

d. 渡槽各跨跨中底板中点竖向位移.横向波和纵向波作用下的跨中竖向最大位移很小;考虑流固耦合时跨中竖向位移与不考虑流固耦合的竖向位移相差不大,说明流固耦合对槽身竖向位移的影响不是很明显。

e. 渡槽左、右止水带相对折角位移.表 4 是 EL-Centro 波 EW 分量激振下止水带最大横向相对折角.纵向地震波作用下止水带处最大横向相对折角很小.无论是否考虑流固耦合,左、右两止水带的相对转角瞬时值符号相反,符合扭转规律;无论是否考虑流固耦合,随着槽内水位的增加,渡槽上部质量加大,止水带相对转角逐渐增大;考虑流固耦合时的伸缩缝相对折角小于不考虑流固耦合时的计算值;右止水带的相对转角瞬时值都要大于左止水带相对转角的瞬时值。

表 4 槽身止水带最大横向相对折角

渡槽部位	最大横向相对折角/rad				
	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5
左止水带	0.1005934	0.1088430	0.1009734	0.1346819	0.1049254
右止水带	0.1941332	0.2105952	0.1966330	0.2448175	0.2078169

f. 在不同地震波输入激振下,渡槽地震反应规律相似,对于本文算例,在 EL-Centro 地震波激振下,渡槽地震反应最大。

3 结 语

a. 渡槽槽身与槽内水体的流固耦合和渡槽槽内水位的高低对渡槽结构的地震反应影响比较大,因此实际工程计算时应考虑槽身和水体的流固耦合相互作用,并对不同水位的渡槽进行地震反应综合分析。

b. 渡槽结构的地震反应在不同方向地震波激振下呈现不同反应形态,不同的地震波激振对渡槽地震反应也有影响,计算结果规律相同,数值有所差别,计算实际工程时应综合考虑合适的激振方向和地震波。

参考文献:

[1] 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.

(下转第 50 页)

偏大,与实测值误差很大.

4 结 语

a. 由于碳化深度现场检测中的误差和利用预测模型计算时参数 k 的取值偏差,致使碳化深度计算值和实测值有较大不同,因此,虽然国内外学者建立了不同的预测模型,但可以说目前碳化深度预测还停留在半定量化阶段,对有关模型进行优化还需要做大量的试验研究工作.

b. 建立混凝土碳化深度与混凝土 28 d 龄期抗压强度的关系模型很有意义,但是如果能建立实际龄期混凝土抗压强度、碳化深度与碳化龄期的关系,则对混凝土碳化耐久寿命的预测研究更有帮助.

c. 本文碳化深度预测计算是针对韦水倒虹工程进行的,由于仅有当地平均湿度和 CO_2 浓度等资料,考虑到管桥混凝土离河面很近,因此其实际碳化深度应比表 1 中预测值稍大.

参考文献:

[1] Parrrt A. Study of carbonation-induced corrosion[J]. Magazine

(上接第 7 页)

[2] 赵平,刘祚秋,陈文义,等.大型渡槽上、下部整体三维有限元分析[J].华北水利水电学院学报,1997,18(1):35—38.
[3] 陈淮,祁冰,杜晓伟.大型双槽渡槽结构振动特性分析[J].世界地震工程,2001,17(1):93—97.
[4] 徐建国,王博.渡槽结构动力性能的有限元分析[J].郑州工业大学学报,1999,20(2):67—69.
[5] 李正农,孟吉复.多槽体渡槽的自振特性分析[J].武汉大学学报(工学版),2001,34(4):11—16.
[6] 戴湘和,陈玲玲,吴杰芳.南水北调中线跨黄河渡槽抗震计算研究[J].长江科学院院报,2002,19(3):52—55.
[7] 李遇春,楼梦麟.排架式渡槽流-固耦合动力特性分析

of Concrete Research,1994,46(2):23—28.

[2] 方王景,梅国兴,陆采荣.碳化对混凝土性能影响的研究[J].水利水电技术,1996(2):58—64.
[3] 刘建生,苏跃.保护层已碳化的预应力钢筋混凝土管正常使用年限探讨[J].水利水电技术,1993(3):57—60.
[4] 金伟良,鄢飞.混凝土碳化指数的概率模型[J].混凝土,2000(1):35—37.
[5] 牛荻涛,董振平.预测混凝土碳化深度的随机模型[J].工业建筑,1999,29(9):1—6.
[6] 李文华,孟文清.基于神经网络的混凝土碳化预测研究[J].工业建筑,1999,29(1):1—4.
[7] 张誉,蒋利学.基于碳化机理的混凝土碳化深度实用数学模型[J].工业建筑,1998,28(1):16—19.
[8] 牛荻涛.混凝土结构耐久性与寿命预测[M].北京:科学出版社,2003.10—32.
[9] 陈迅捷,张燕弛.活性掺合料对混凝土抗碳化耐久性的影响[J].混凝土与水泥制品,2002(3):7—9.
[10] 冯乃谦.高性能混凝土结构[M].北京:机械工业出版社,2004.65—78.

(收稿日期:2004-11-04 编辑:熊水斌)

[J].水利学报,2000(12):31—37.

[8] 杜晓伟,陈淮,孙国均,等.大型双槽渡槽地震反应分析[J].世界地震工程,2003,19(2):23—26.
[9] 李遇春,朱墩,乐运国,等.大型高墩渡槽横向地震反应分析[J].武汉水利电力大学学报,1999,32(3):43—46.
[10] 张俊发,刘云贺,王克成.设置叠层橡胶支座梁式渡槽的地震响应分析[J].水利学报,1999(1):50—54.
[11] 王博.大型渡槽结构地震反应分析理论与应用[D].上海:同济大学,2000.
[12] 徐伟,陈淮,王博,等.考虑流固耦合的大型渡槽动力特性计算[J].水利水电技术,2004,35(4):20—22.
[13] 居荣初,曾心传.弹性结构与液体的耦联振动理论[M].北京:地震出版社,1983.115—154.

(收稿日期:2004-10-22 编辑:骆超)

(上接第 44 页)

6 结 论

本文方法仅适用于开较大扁矩形孔的梁,开孔后形成空腹桁架结构,上、下弦杆可看作为压(拉)弯剪构件.对于小圆孔、大圆孔、椭圆孔或狭长矩形孔等还需另外考虑.

参考文献:

[1] 王瑶.钢筋混凝土开孔梁非线性有限元全过程可视化仿真分析[D].南京:河海大学,2001.

[2] 刘荣桂.混凝土(RC/PC)开孔梁实验研究与理论分析[D].南京:东南大学,1999.
[3] Kennedy J B, Abdalla H A. Static response of prestressed concrete beams with openings[J]. Journal of the Structural Division, ASCE, 1992, 118(2): 488—504.
[4] 杨建明.预应力混凝土开洞梁的抗剪强度和抗裂度试验研究[D].南京:东南大学,1987.
[5] Wafa F F. Prestressed concrete beams with openings under torsion, bending[J]. Journal of Structural Engineering, 1989, 115(11): 1161—1166.

(收稿日期:2004-03-24 编辑:骆超)