

倒虹吸混凝土管道的地震反应分析

徐平¹, 唐献富², 夏唐代³(1. 郑州大学水利与环境工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 河南省水利勘测设计院, 河南 郑州 450002;
3. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要:基于土体的等效粘弹性模型, 结合场地典型剖面的土体特性以及室内实验确定的各力学参数, 采用时域积分和迭代的方法研究了沁河倒虹吸管道在地震作用下的反应, 分析了管道截面中间底部点绝对地震位移、顶部点相对于底部点的地震动位移及管道动静综合主应力的变化规律; 并根据有限元时程法的分析结果, 按照混凝土承载能力极限状态设计式, 对管身混凝土的抗拉、抗压安全度进行校核。结果表明, 在人工地震波、调整后的 El Centro 和 Pulgas 地震波分别输入的情况下沁河渠道倒虹吸管道均满足抗震要求。

关键词:倒虹吸管道; 地震反应; 等效粘弹性模型; 有限元

中图分类号: P315.9; TU 435

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2007)04-0352-05

Analysis on Earthquake Response of the Inverted Siphon Concrete Pipes

XU Ping¹, TANG Xian-fu², XIA Tang-dai³

(1. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China;

2. Hydraulic Survey and Design Institute of Henan Province, Zhengzhou 450002, China;

3. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Adapting the equivalent viscoelastic model considering the characteristics of the soils at the site and some mechanics parameters such as maximum shear modulus, dynamic elastic modulus and damping ratio, determined by tests, the earthquake responses of Qinhe inverted siphon pipes are studied based on the method of integral in time domain and iteration, and distribution regularity of the absolute displacement at the bottom center of the pipes, relative displacement of the top center to the bottom center of the pipes, and dynamic and static synthesis principal stresses are analyzed. According to the analysis results of finite elements method and the design equation of concrete limit bearing capacity, the security degree of resistance capacity of tensile and compress for the concrete pipes are checked. The results indicate that Qinhe inverted siphon pipes satisfy with earthquake-resistance requirements effected when man-made, the adjusted El Centro and Pulgas seismic waves inputted individually.

Key words: Inverted siphon pipe; Earthquake response; Equivalent viscoelastic model; Finite element method

0 引言

在我国南水北调工程沿线布置了众多的桥梁、渡槽、倒虹吸、节制闸及分水闸等建筑物工程。震害资料表明, 埋藏较浅、土质松散、震级大、震中距小的地下结构物易发生地震破坏, 对于高地震烈度区的

浅埋建筑结构其地震破坏率高达 75%, 中等、严重破坏率达到 25%, 因此对南水北调沿线的倒虹吸结构进行抗震分析具有十分重要的工程意义。

地下结构的抗震理论和分析方法与地上建筑物

收稿日期: 2007-04-26

作者简介: 徐平(1977-), 男(汉族), 山东五莲人, 博士, 讲师, 主要从事土动力学方面的研究。

有所不同。地震作用下地下结构的运动将受到周围土体的限制,因此制约地下结构反应大小的不是地震产生的惯性力,而是地震引起的周围土体的变形。在地震荷载作用下,大尺寸地下箱型管道的变形主要有三种形式:轴向变形、弯曲变形和横向挤压变形。此外,对于软弱和斜坡场地地震引起的土体永久变形(土体沉降和横向扩展)会给管道带来严重破坏,震害表明横向挤压变形是管道地震破坏的主要形式,也是管道抗震设防的控制性指标。

有限元作为一种计算方法在倒虹吸结构计算中得到了应用^[1-5];文献[2、3]探讨了三维节理元在倒虹吸结构分析中的应用;文献[4、5]分析了各种预定工况下倒虹吸结构顶板、底板、边侧墙和中隔墙的受力状态。但关于倒虹吸结构的抗震分析的研究较少。

倒虹吸管道的抗震性能不仅取决于截面的强度,管道接头的性质等也很重要。限于篇幅本文没有给出全方位的分析,只给出了调整后的 E1 Centro 和 Pulgas 地震波作用下,沁河倒虹吸结构管身横截面的抗震分析。

1 工程概况

沁河渠道倒虹吸的主体工程为 I 级建筑物,主要由进口渐变段、进口检修闸、倒虹吸管身段、出口控制闸和出口渐变段等组成,全长 1 183 m,其中进口渐变段长 60 m,管身段水平投影长 1 015 m。倒虹吸管身横向为 3 孔箱形钢筋混凝土结构,单孔孔径 6.9 m×6.9 m(宽×高),管身顶板和边墙厚 1.1 m,底板厚 1.2 m,中隔墙厚 0.9 m。管顶设计标高为 94.0m,管底设计标高为 84.8 m,如图 1 所示。

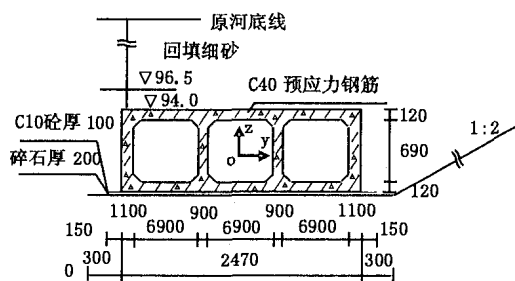


图 1 沁河渠倒虹吸槽段管身横剖面

Fig. 1 Cross sections of Qinhe inverted siphon pipes.

沁河倒虹吸工程位于黄、沁冲积平原。沁河为一宽浅游荡型河道,自西向东流经本区。地层共划分 12 层:(1)黄土状轻粉质壤土,层厚漫滩内一般为 0.2~1.0 m,堤外一般 1.0~3.0 m;(2)细砂层,厚约 6 m;(3)细砂夹杂砾石,厚 10.0~20.6 m,分布

于河槽;(4)黄土状重粉质壤土,厚 3.1~7.1 m;(5)黄土状中粉质壤土,厚 4.7~8.5 m;(6)黄土状重粉质壤土,厚 6.0~10.7 m,局部仅 2.6 m;(7)中砂,厚 1.6~10.5 m;(8)重粉质壤土,厚 3.7~12.3 m;(9)细砂,厚 0.6~7.0 m;(10)重粉质壤土,厚 5.3~14.1 m;(11)细砂,厚 0.9~7.7 m;(12)重粉质壤土,最大厚度 6.85 m。

2 倒虹吸砼管道抗震分析

本文基于土体的等效粘弹性模型,采用时域积分和迭代的方法计算沁河倒虹吸管道、土层的地震反应。

2.1 倒虹吸砼管道和各土层的物理、力学参数

倒虹吸管道采用的是 C40 钢筋混凝土,施工垫层的混凝土为 C10。分析时取混凝土的动弹性模量为其静弹性模量的 1.3 倍,即:C40 混凝土动弹性模量取 $E_d = 4.225 \times 10^{10} \text{ Pa}$,C10 混凝土动弹性模量取 $E_d = 2.275 \times 10^{10} \text{ Pa}$,混凝土的泊松比取 $\nu = 0.167$,阻尼比取 0.05。

等效粘弹性模型是用粘弹性体的等价剪切模量和等价阻尼比这两个参数来描述土的弹塑性动力表现^[6-7]。本文采用的土体的最大剪切模量由单孔速度检层法测得的剪切波速换算得到,剪切模量、阻尼比随剪应变的变化规律是根据试验数据确定的。试验在 MTS810/TESTSTAR 土动三轴试验系统上采用控制动应力的方法在不同应力条件下记录动应力和动应变随时间的变化,从而计算得到动剪切模量和阻尼比在不同动应变时的变化曲线。

2.2 输入地震加速度时程

由场区地震地质环境可知,沁河倒虹吸工程建筑场地为 III 类,地震设防水平峰值加速度为 0.1 g,场地特征周期为 0.4 s。由于该工程场区没有强震记录,所以用于分析沁河倒虹吸管道地震反应的加速度时程只能通过人工合成地震波的方式和调整其它地区记录的地震数据的方法获得。

依据文献[8]的规定,本文计算倒虹吸管道的地震反应时共采用了三条地震波,其中一条是以规范给定的设计反应谱为目标谱人工生成的模拟地震加速度时程,另外两条地震波是在已有的地震加速度记录基础上调整得到的,分别为:(1)美国加利福尼亚 Imperial Valley 地震(M 7.0)时 E1 Centro 站记录调整后得到的加速度数据(加速度幅值为 0.1 g);(2)美国 1989 年加利福尼亚 Loma Prieta 地震(M 7.0)时 Pulgas 站记录调整后得到的加速度数据(加

速度幅值为 0.1 g 。通过采用频域积分方法可以进一步得到位移时程曲线,及与加速度时程相应的反应谱曲线。

2.3 计算结果分析

由于沁河渠道倒虹吸管道的长度远大于宽度,故可将倒虹吸管道在河道饱水时的地震反应简化为二维平面问题。地震输入是依据文献[8]中的相关规定,取地面下 50 m 处设计地震加速度代表值为地面的 $1/2$;竖向设计地震加速度的代表值取水平设计地震加速度代表值的 $2/3$ 。

计算时共划分了 $5\,234$ 个平面应变单元、 $5\,212$ 个有限元节点,此外在计算区域的两侧和底边均设置了人工透射边界,以模拟无限地基辐射阻尼的影响(图版 I 图 2)。

限于篇幅,本文仅给出人工地震波、调整后的 El Centro 地震波和 Pulgas 地震波输入的三个工况,倒虹吸管道截面中间顶点相对于底点的相对地震位移及管道的综合动静总主应力的分布云图,如图 3~11 所示。而倒虹吸管道截面的绝对位移、绝对加速度及周围土层的相关分析没有给出。

2.3.1 人工地震波

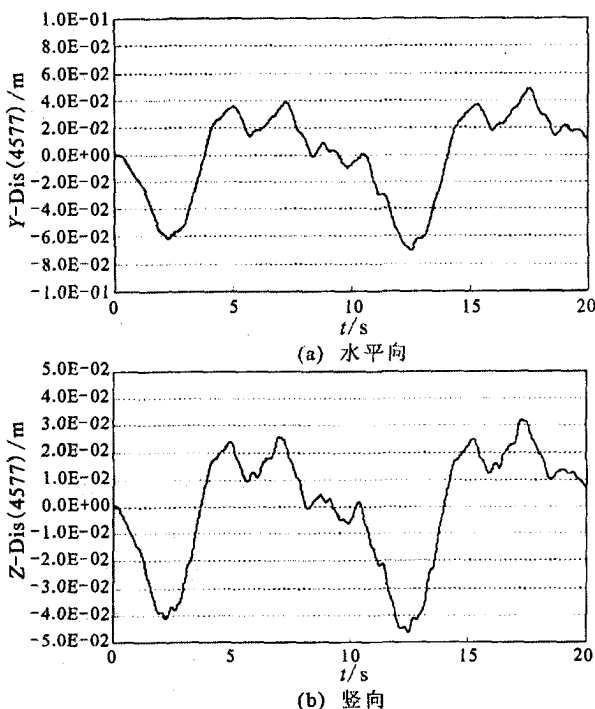


图3 人工地震波下管道中间底点地震动绝对位移

Fig. 3 Absolute displacements of the bottom center on the pipes in man-made seismic wave.

从图 3 可以看出,倒虹吸管道截面中间底部点的水平向和竖向地震动绝对位移都随着时间 t 的增

大呈近似波浪线变化,周期接近 10 s ,水平向位移最大绝对值即峰值绝对值的最大值为 0.071 m ,竖向位移最大绝对值为 0.052 m ,都是发生在时程接近 12.7 s 时。

从图 4 可以看出,倒虹吸管道截面中间顶部点相对于底部点的水平向和竖向位移都随着时间 t 的增大呈急骤的波动变化。相对地震位移反应了管道截面中间顶部和底部的相对错动,是分析倒虹吸管道结构稳定性的一个重要因素,相对地震位移越大说明管道越不稳定,越容易受到地震作用的破坏。对于本例,水平向相对地震位移的最大绝对值为 0.886 mm ,而竖向相对地震位移的最大绝对值仅 0.037 mm 。

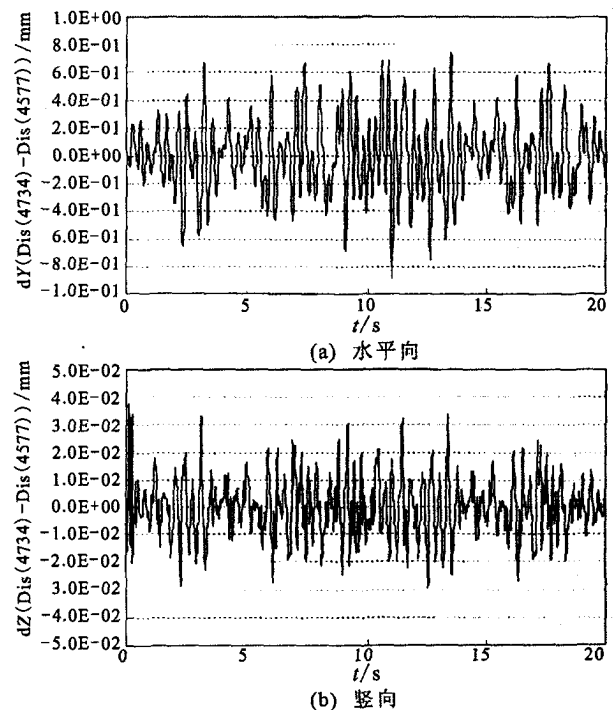


图4 人造波下管道中间顶点相对于底点的地震动位移

Fig. 4 Relative displacements of the top center to the bottom center on the pipes in man-made wave.

从图 5(图版 I 图 5)可以看出,在同时回填土层自重、管道自重、预应力钢筋及管道内静水压力作用时,管道的最大综合主应力为 0.441 MPa (拉应力),而最小综合主应力为 -3.295 MPa (压应力)。

2.3.2 El Centro 地震波

从图 6 可以看出,倒虹吸管道截面中间底部点的水平向和竖向地震动绝对位移都随着时间 t 的增大呈近似波浪线变化,当 t 取 8 s 和 13 s 时,水平向位移绝对值取得最大值,为 0.03 m ,竖向位移绝对

值也取得最大值,为 0.02 m。

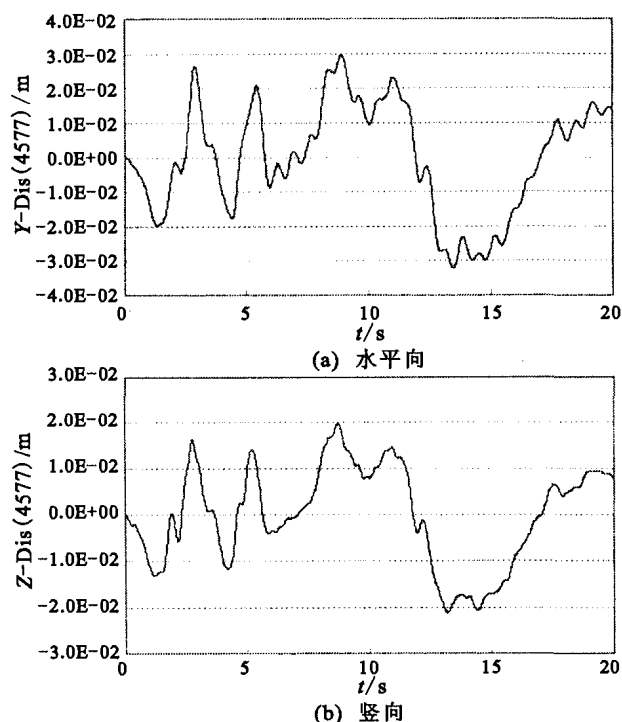


图6 El Centro地震波下管道中间底点地震动绝对位移

Fig. 6 Absolute displacements of the bottom center on the pipes in El Centro seismic wave.

从图7可以看出,倒虹吸管道截面中间顶部点相对于底部点的水平向相对地震位移的最大绝对值为 1.23 mm,而竖向相对地震位移的最大绝对值比水平向小得多,仅为 0.04 mm。

从图8(图版I图8)可以看出,管道的最大综合主应力和最小综合主应力都发生在相邻管的侧壁上,最大综合主应力为 0.577 MPa,最小综合主应力为 -3.382 MPa。

2.3.3 Pulgas地震波

从图9可以看出,倒虹吸管道截面中间底部点的水平向和竖向地震动绝对位移都随着时间 t 的增大呈近似波浪线变化,当 t 取 8 s 和 14 s 时水平向位移绝对值取得最大值,为 0.028 m,竖向绝对位移的最大值为 0.02 m 和 0.019 m。

从图10可以看出,倒虹吸管道截面中间顶部点相对于底部点的水平向相对地震位移的最大绝对值为 0.89 mm,而竖向相对地震位移的最大绝对值仅 0.041 mm。

从图11(图版I图11)可以看出,管道的最大综合主应力和最小综合主应力也都发生在相邻管的侧壁上,管道的最大综合主应力为 0.453 MPa,最小综

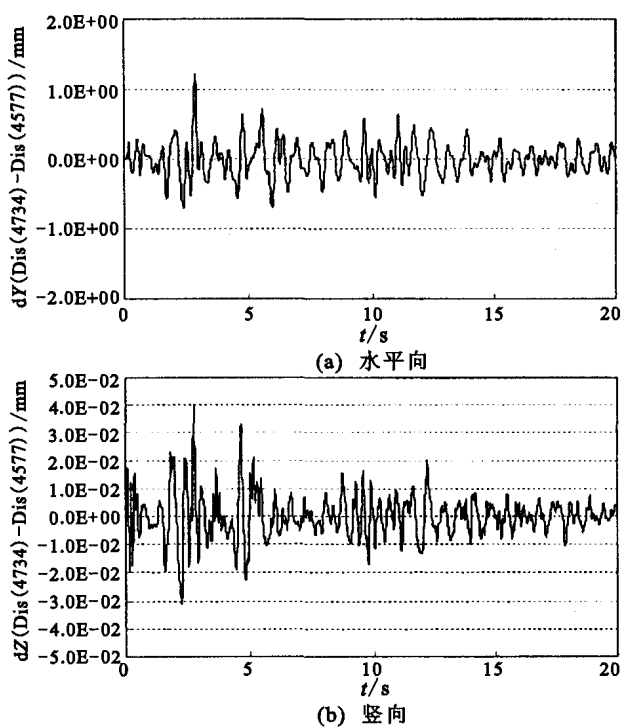


图7 El Centro波下管道中间顶点相对于底点的地震动位移

Fig. 7 Relative displacements of the top center to the bottom center on the pipes in El Centro wave.

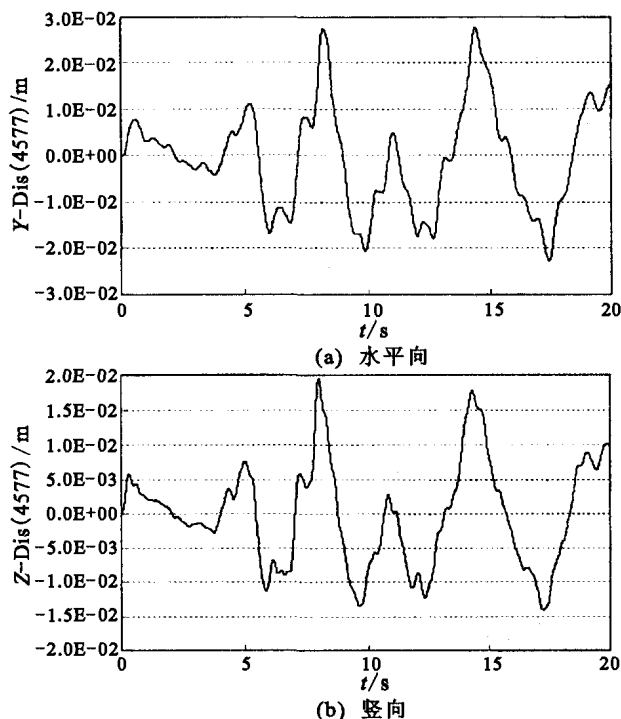


图9 Pulgas地震波下管道中间底点地震动绝对位移

Fig. 9 Absolute displacements of the bottom center on the pipes in Pulgas seismic wave.

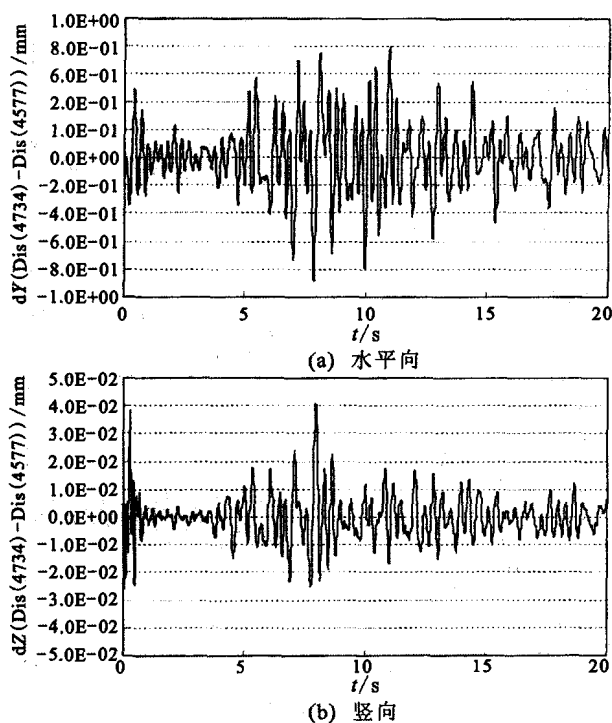


图 10 Pulgas 波下管道中间顶点相对于底点的地震动位移

Fig. 10 Relative displacements of the top center to the bottom center on the pipes in Pulgas wave.

合主应力为 -3.318 MPa。

比较三种工况的计算结果,即图 3~5、图 6~8 与图 9~11 可得:在调整后的 E1 Centro 和 Pulgas 地震波作用下,管道截面中间底部点的水平向和竖向地震动绝对位移的最大值小于人工地震波作用时得到的值,而管道截面中间顶部点相对于底部点的水平向相对地震位移的最大绝对值,及管道的最大综合主应力和最小综合主应力的绝对值均略高于人工地震波作用时得到的值。

2.4 倒虹吸管道抗震安全性分析

由文献[8]可知,基于概率极限状态设计原则,可采用作用和抗力的分项系数和结构系数表达的承载力极限状态设计式:

$$\gamma_0 \psi S(\cdot) \leq R(f_k / \gamma_m, \alpha_k) \gamma_d \quad (1)$$

式中 γ_0 为结构的重要性系数; ψ 为设计状况系数; $S(\cdot)$ 为作用效应函数; $R(\cdot)$ 为结构抗力函数; f_k 为材料性能的标准值; γ_m 为材料性能的分项系数; α_k 为几何参数的标准值; γ_d 为承载力极限状态结构系数。

由于沁河渠倒虹吸工程为 I 级建筑物,根据相关规范规定,取 $\gamma_0 = 1.1$, $\psi = 0.85$, $\gamma_m = 1.5$, $\gamma_d =$

1.3(抗压), $\gamma_d = 0.7$ (抗拉)。由于倒虹吸管道采用 C40 混凝土材料,参照文献[4],取倒虹吸管身混凝土抗压强度标准值为 27 MPa,抗拉强度标准值为 2.45 MPa,并考虑地震时混凝土动强度较静态时提高 30%。

最后,对沁河渠道倒虹吸管道在回填土层自重、管道自重、预应力钢筋及管道内静水压力和 VII 度地震作用下的强度抗震安全进行复核,即根据以上有限元时程法的分析结果,按照承载力极限状态设计式,对管身混凝土的抗拉、抗压安全度进行校核,结果见表 1 和表 2。

表 1 沁河渠道倒虹吸管身砼抗拉强度安全校核结果

工况	$S(\cdot)$ / MPa	$R(\cdot)$ / MPa	$\gamma_0 \psi S(\cdot)$ / MPa	$R(\cdot) / \gamma_d$ / MPa	是否满足式(1)
工况一	0.441	2.123	0.412	3.033	是
工况二	0.577	2.123	0.540	3.033	是
工况三	0.453	2.123	0.424	3.033	是

表 2 沁河渠道倒虹吸管身砼抗压强度安全校核结果

工况	$S(\cdot)$ / MPa	$R(\cdot)$ / MPa	$\gamma_0 \psi S(\cdot)$ / MPa	$R(\cdot) / \gamma_d$ / MPa	是否满足式(1)
工况一	3.295	23.40	3.08	18.0	是
工况二	3.382	23.40	3.162	18.0	是
工况三	3.318	23.40	3.102	18.0	是

从表 1 和表 2 可以看出,对于三种计算工况(水平和竖向人工地震波、调整后的 E1 Centro 和 Pulgas 地震波输入),沁河渠道倒虹吸管道的抗拉强度和抗压强度安全均可满足抗震要求。

3 结论

本文基于土体的等效粘弹性模型,采用时域积分和迭代的方法研究了沁河倒虹吸管道在地震作用下的反应。结合倒虹吸管道所在场地典型剖面的土体特性探讨了倒虹吸管道在场地饱水时、在 VII 度地震作用下的地震变形和应力规律,并根据以上有限元时程法的分析结果,按照承载力极限状态设计式,对管身混凝土的抗拉、抗压安全度进行校核。结果表明,在人工地震波、调整后的 E1 Centro 地震波和调整后的 Pulgas 地震波分别作用下,沁河渠道倒虹吸管道的抗拉强度和抗压强度安全均可满足抗震要求。

(下转 376 页)

- 用[J]. 地球物理学报, 1997, 20(3): 145-149.
- [5] 冯志生, 王建宇, 蒋延林, 等. 地磁 z 分量整点值空间相关法在江苏地区地震预报中的初步应用[J]. 地震学刊, 1998, (3): 1-5.
- [6] 林美, 沈斌. 地磁场垂直分量相关分析与地震的对应关系[J]. 地震研究, 1982, 5(2): 1-5.
- [7] 冯志生, 王建宇, 梅卫萍, 等. 江苏地区地磁 Z21 测值空间相关异常及其标志体系[J]. 地震地磁观测与研究, 2000, 21(1): 44-49.
- [8] 冯志生, 张苏平, 梅卫萍, 等. 基于数字地磁资料的滤波幅相法初步应用研究[J]. 地震, 2006, 26(1): 93-98.
- [9] 丁鉴海, 卢振业, 黄雪香. 地震地磁学[M]. 北京: 地震出版社, 1994.
- [10] 陆远忠, 陈章立. 地震预报的地震学方法[M]. 北京: 地震出版社, 1985: 252.
- [11] 徐常芳. 地壳内高导层成因、高温高压下及电阻率(二)[J]. 地震学报, 1996, 18(3): 287-291.

(上接 356 页)

[参考文献]

- [1] 孙东坡, 彭文启, 刘培斌. 河流交叉工程平面二维水沙数值模拟[J]. 水利学报, 1999(2): 62-66.
- [2] 赵海燕, 周鸿钧, 邓莉辉. 三维节理元在倒虹吸结构中的应用[J]. 上海交通大学学报, 1999, 33(6): 731-733.
- [3] 赵海燕, 邓莉辉. 南水北调工程倒虹吸结构三维节理元计算模型的建立[J]. 上海交通大学学报, 2000, 34(4): 517-519.
- [4] 赵顺波, 李晓克, 胡志远, 等. 大型倒虹吸预应力混凝土结构模型试验研究[J]. 水力发电学报, 2006, 25(1): 40-44.
- [5] 李晓克, 赵顺波, 刘树玉, 等. 大型倒虹吸结构预应力钢筋张拉施工顺序研究[J]. 水利水电技术, 2005, 36(6): 68-71.
- [6] 郑颖人, 沈珠江, 龚晓南. 岩土塑性力学原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [7] 尚守平, 刘方成, 王海东. 基于阻尼的地震循环荷载作用下黏土非线性模型[J]. 土木工程学报, 2007, 40(3): 74-82.
- [8] 中华人民共和国水利部. 水工建筑物抗震设计规范(SL203-97)[S]. 北京: 中国水利电力出版社, 1997.

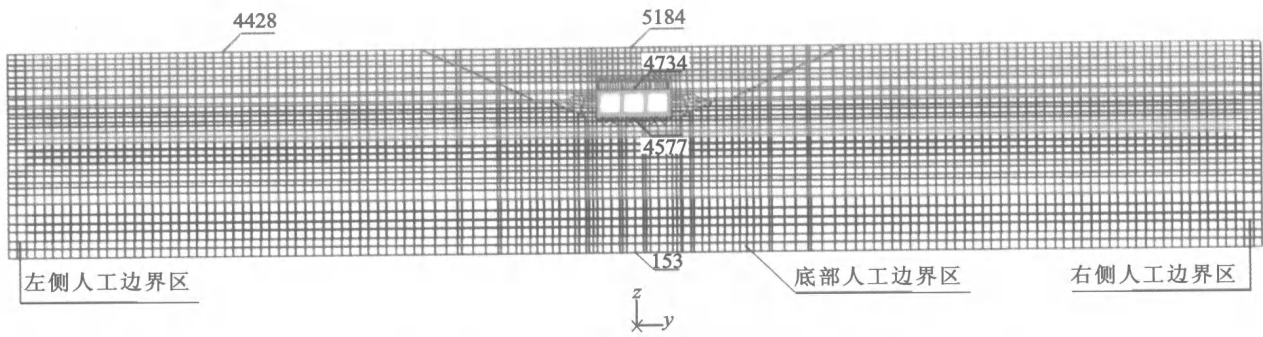
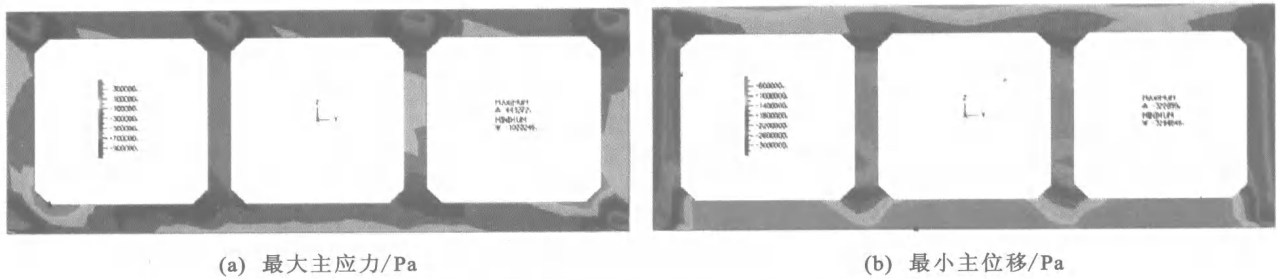


图2 倒虹吸管道及周围土层的有限元网格划分

Fig.2 Finite element grid generation of inverted siphon pipes and adjacent soils.

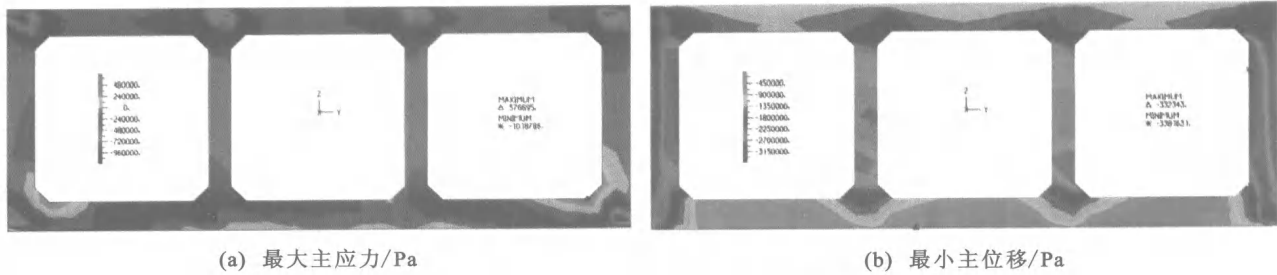


(a) 最大主应力/Pa

(b) 最小主应力/Pa

图5 人造地震波下管道的综合动静主应力

Fig.5 Dynamic and static synthesis principal stresses on the pipes in man-made wave.

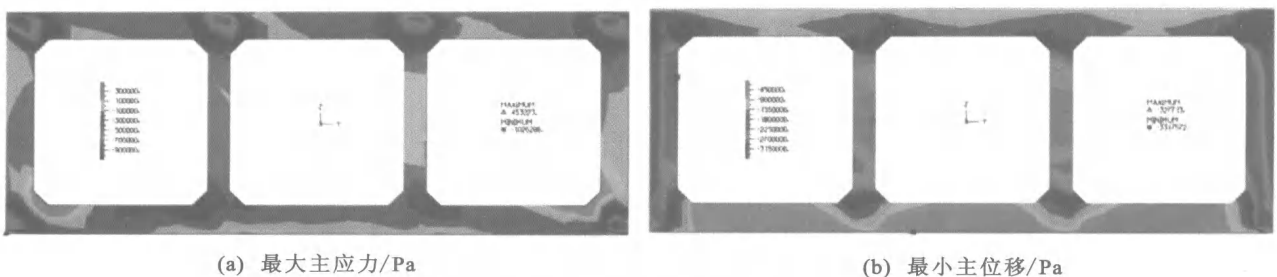


(a) 最大主应力/Pa

(b) 最小主应力/Pa

图8 E1 Centro地震波下管道的综合动静主应力

Fig.8 Dynamic and static synthesis principal stresses on the pipes in E1 Centro wave.



(a) 最大主应力/Pa

(b) 最小主应力/Pa

图11 Pulgas地震波下管道的综合动静主应力

Fig.11 Dynamic and static synthesis principal stresses on the pipes in Pulgas seismic wave.