

文章编号:1007-6492(1999)01-0029-04

大型箱型结构二维非线性有限元分析

周飞平, 李鹏辉, 周鸿钧

(郑州工业大学水利与环境工程学院, 河南 郑州 450002)

摘 要: 为在一般线性分析的基础上更进一步了解结构的受力特点及可能的破坏方式, 用二维材料非线性有限元对南水北调中线工程淇河倒虹吸箱型结构进行了分析, 成功地模拟了倒虹吸箱型结构在 5 种较不利工况下的开裂过程, 分析了其在 5 种工况下各自的安全程度, 指出了最不利工况. 为该设计提供了有价值的参考资料.

关键词: 非线性有限元; 局部弧长法; 钢筋混凝土; 箱型结构; 破坏过程

中图分类号: O 242.21;TV 312 **文献标识码:** A

0 引言

南水北调中线工程是世界上一项空前浩大的跨流域的特大型的调水工程. 其总干渠在河南省段长为 700 余公里, 交叉建筑物甚多, 其中河渠倒虹吸是河渠交叉建筑物中数量最多的一种, 从沙河南到漳河南渠段就有河、渠倒虹吸 50 余座, 总长达 16 000 余米. 由于倒虹吸设计流量大 ($630 \sim 800 \text{ m}^3/\text{s}$), 流速小, 管身规模较已建成的倒虹吸工程大得多. 倒虹吸的断面, 通常采用带掖的箱型结构, 因为箱型结构与其它形式的断面相比, 具有施工方便, 受温度和地基不均匀沉陷的影响小等优点. 这种大型的箱型结构, 其箱壁较厚, 一般情况下杆件的跨高比小于 6, 用结构力学的方法计算难以得到准确的结果, 特别是难以考虑地基的影响, 往往得到较大的内力值. 通常建议采用有限元对箱型结构进行分析, 能较准确地了解倒虹吸箱型结构的受力状态, 以便进行合理的设计.

但是倒虹吸箱型结构为混凝土材料, 而混凝土材料本身是非线性的, 即材料本身的非线性应力—应变关系, 因此用线性材料的方法计算所得的结果显然是有局限性的. 通过非线性有限元分析, 可以了解混凝土结构从加载到破坏全过程荷载变形状态以及裂缝分布与发展规律, 从而可以揭示出结构的薄弱部位和环节, 以便改进结构设计.

材料非线性有限元技术的发展, 特别是非线性方程组求解技术与本构关系的数值模拟, 使得

非线性分析中迭代过程的收敛性与稳定性大大提高, 从而可以利用有限元技术来模拟实际工程结构的工作与破坏过程.

采用 NSPS 程序的非线性有限元技术对箱型结构进行破坏过程的模拟, 探讨裂缝的发展过程. 该程序采用单轴状态下的 3 个简单数值模型来模拟混凝土材料的本构关系, 每一种模型都可以用于有应变软化、应变硬化、塑性、卸载的重复加载等情况的材料, 整个应力—应变曲线能够在这些模型中模拟出来. 该程序用局部弧长法求解非线性有限元方程组, 它是在荷载—变形空间, 利用一个一阶线性约束方程强迫迭代过程沿着一个圆弧路径趋向于破坏状态, 并且在约束方程中使用破坏区的相对位移而不是绝对位移以消除来自破坏区的变形信息, 从而保证了数值解法的稳定性和收敛性.

1 非线性有限元方程组求解技术——局部弧长法

局部弧长法^[1]利用荷载向量系数 λ 来控制结构实际所承受的荷载, 并将荷载向量系数的增量 $\Delta\lambda$ 作为未知量. 迭代过程可以写成:

$$\begin{aligned} (\Delta U)_i &= U_F + \Delta\lambda \cdot U_P; \\ \lambda_{i+1} &= \lambda_i + \Delta\lambda_i; \\ U_{i+1} &= U_i + \Delta U_i; \\ (i &= 1, 2, 3, \dots). \end{aligned} \quad (1)$$

未知量 $\Delta\lambda$ 需要由附加的约束方程来求解.

收稿日期:1998-11-06;修订日期:1999-01-16

作者简介:周飞平(1972—),男,湖南省隆回县人,郑州工业大学硕士研究生.

局部弧长法的约束方程为控制单元内的一阶线性方程并强迫迭代方程沿着一个圆弧路径趋近于结构的平衡状态:

$$\sum_{e=1}^m (\delta_1)_e^T \cdot (\hat{q})_e = \Delta^2, \tag{2}$$

式中: m 是结构内控制单元的数量; 下标 1 和 i 分别代表当前荷载段中第 1 次和第 i 次迭代; Δ 是给定的圆弧长度; δ 是控制单元内的相对位移向量增量, 可以根据节点位移向量增量 $\delta_1 = (\Delta U)_1$; $\hat{q} = \hat{q}_{-1} + (\Delta U)_i$ ($i = 2, 3, 4$) 来计算, 假设单元内节点个数为 n , 则

$$\delta = [\delta_1 - \delta_n, \delta_2 - \delta_1, \delta_3 - \delta_2, \dots, \delta_n - \delta_{n-1}]^T. \tag{3}$$

将式 (1) 和式 (3) 代入式 (2), 并注意对于每一个荷载增量段迭代开始时 $U_F = 0$, 则可以求解荷载向量系数的增量 $\Delta\lambda$:

$$\Delta\lambda_1 = \frac{\Delta}{\sum_{e=1}^m (U_P)_e^T \cdot (U_P)_e};$$
$$\Delta\lambda_i = \Delta\lambda_1 - \frac{\sum_{e=1}^m (U_P)_e^T \cdot (\hat{q}_{-1} + U_F)_e}{\sum_{e=1}^m (U_P)_e^T \cdot (U_P)_e} \quad (i = 2, 3, 4, \dots), \tag{4}$$

式中: U_P 是单元的相对参考位移向量; U_F 是不平衡节点力产生的单元的相对位移向量.

2 淇河倒虹吸管型结构二维非线性有限元分析^[2,3]

2.1 概况

淇河倒虹吸管身为 6 孔, 每孔断面面积为 $6\text{ m} \times 6\text{ m}$, 以 3 孔为一联, 分成两联, 顺水流方向每节管长为 15 m , 管身材料为混凝土, 标号为 300#, 弹性模量为 $E_1 = 3 \times 10^4\text{ MPa}$, 泊松比 $\mu_1 = 0.167$, 容重为 25 kN/m^3 . 淇河地基为粘土岩, 弹性模量 $E_2 = 30\text{ MPa}$, 泊松比 $\mu_2 = 0.3$, 浮容重为 10 kN/m^3 , 饱和容重为 20 kN/m^3 , 土的内摩擦角为 25° (水下亦为 25°). 淇河在 100 年一遇洪水时, 管道不通水, 此时河道水深为 14.22 m . 当管道过水时, 倒虹吸进口水面至倒虹吸顶板底面的水深为 13.32 m . 倒虹吸管身修建时采用先开挖, 修建完成后回填土, 管顶填土高 2.6 m , 开挖边坡距管道外边线为 5 m , 边坡为 1:2, 考虑到倒虹吸结构本身对称, 地基均一, 所受荷载也对称,

因此计算时, 取一联对称结构进行计算. 在进行二维非线性有限元计算时, 取顺水流方向为 1 m 厚的箱形结构进行计算. 箱形结构顶板和柱子厚度为 0.9 m , 底板厚度为 1 m .

2.2 有限元离散、荷载计算及结构受力分析

2.2.1 有限元离散

模型整体坐标原点位于箱形结构的左下角, X 轴正向指向右, Z 轴正向指向上. 为考虑地基对结构的影响, 地基所取范围右边以对称轴为界, 左边横向取 54 m (约为箱型结构长度的 2.5 倍), 深度取 21 m (约为箱型结构高的 2.7 倍). 对所取计算范围计算范围内的地基, 其右侧为对称轴, 只有垂直位移而无侧向位移, 故采用水平链杆支撑; 其左侧视为无垂直位移和水平位移, 采用铰结支撑, 其底部亦采用铰结支撑. 地基表面部分, 除倒虹吸管型结构外, 其余回填土部分对地基的作用按回填土高度转化为线性分布荷载考虑, 计算模型如图 1 所示. 倒虹吸管型结构和地基大都采用四边形等参元, 总共 424 个单元, 506 个结点.

2.2.2 计算工况

(1) 工况 I: 河道有水, 倒虹管内无水; (2) 工况 II: 河道无水, 倒虹管内全有水; (3) 工况 III: 河道无水, 倒虹管左管有水; (4) 工况 IV: 河道无水, 倒虹管中管有水; (5) 工况 V: 河道无水, 倒虹管右管有水.

2.2.3 计算荷载

由于各工况荷载不同, 其破坏极限荷载也不相同, 因而对各种工况分别采用不同的水头 P 计算: (1) 工况 I, $P = 50\text{ m}$; (2) 工况 II, $P = 30\text{ m}$; (3) 工况 III, $P = 30\text{ m}$; (4) 工况 IV, $P = 30\text{ m}$; (5) 工况 V, $P = 30\text{ m}$.

2.2.4 成果分析

各工况荷载下箱型倒虹结构裂缝开展过程列于图 2~图 6. 从图中可以看出:

工况 I 时, 当外荷载水头为 $0.269P = 13.456\text{ m}$ 时, 在左孔左上角出现第一条裂缝, 随着荷载的增加, 在左孔顶板左端外侧出现裂缝, 右边墙外侧顶部出现裂缝, 直到外荷载为 $0.81P = 40.5\text{ m}$ 时 3 孔内侧均出现裂缝而破坏. 如图 2 所示, 而箱型倒虹结构在工况 I 时承受的外水头为 14.42 m , 因而在运行过程中可能出现裂缝, 但由于是在侧墙的外侧, 其对结构的要求为限裂的, 根据配筋及裂缝计算可知, 经过配筋处理后, 其满足抗裂要求, 是安全可靠的.

工况 II 时, 当外荷载水头为 $0.52P = 15.57\text{ m}$

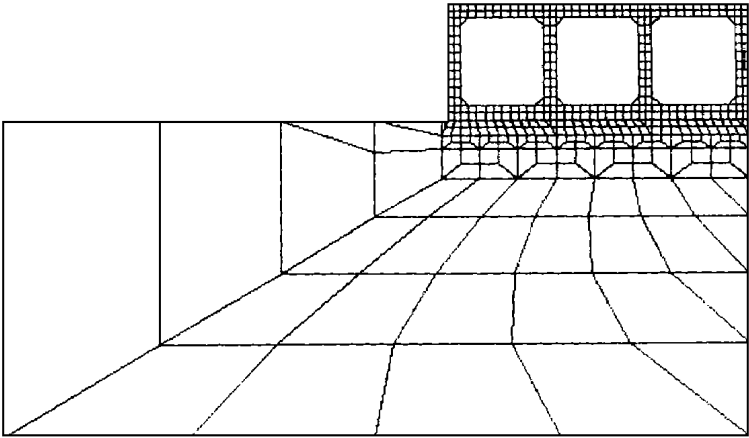


图 1 倒虹吸网格剖分图

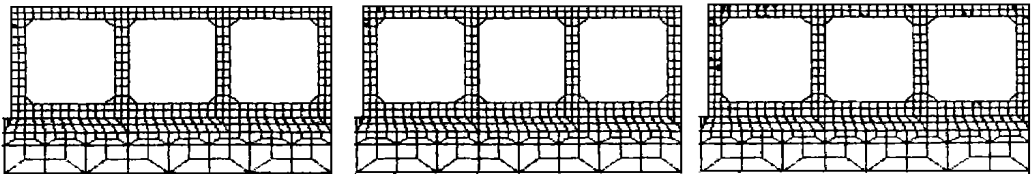


图 2 工况 I 裂缝发展过程图

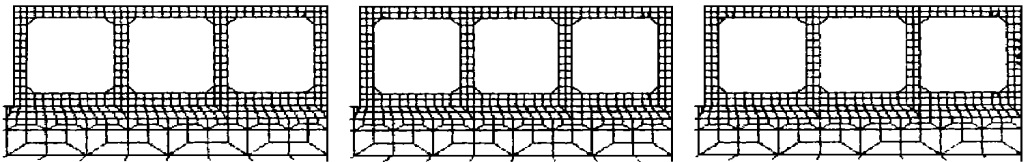


图 3 工况 II 裂缝发展过程图

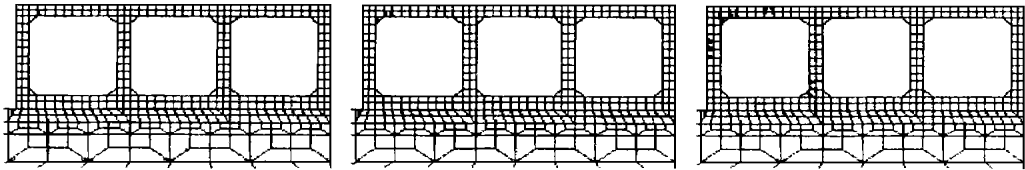


图 4 工况 III 裂缝发展过程图

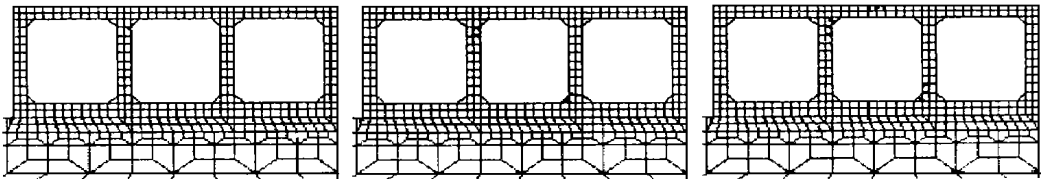


图 5 工况 IV 裂缝发展过程图

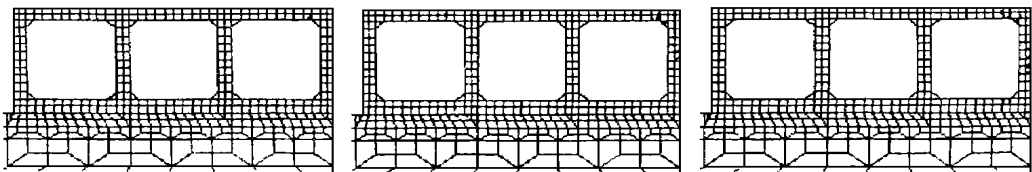


图 6 工况 V 裂缝发展过程图

时,在右孔顶板右端内缘出现第一条裂缝,随着水头的增加,相继在右孔底板内缘和左孔顶板左端内缘出现裂缝,当水头增至 $0.8314P=25\text{ m}$ 时,整个结构裂缝严重开展而导致破坏.如图 3 所示,由于实际结构承受的水头为 13.32 m ,故不会引起什么问题,应当说运行是安全的.

工况Ⅲ时,当外荷载水头增加到 $0.596P=17.88\text{ m}$ 时,左孔顶板内缘出现第一条裂缝,随着外荷载水头的增加,在左孔左隔墙左侧底部出现裂缝,当外荷载水头增至 $0.911P=27.33\text{ m}$ 时,结构裂缝普遍开展而导至破坏.如图 4 所示,由于在工况Ⅲ时,结构实际承受的水头仅为 13.32 m ,结构是安全运行的.

工况Ⅳ时,当外荷载水头达到 $0.546P=17.38\text{ m}$ 时,中孔左中墙右边上端出现第一条裂缝,随着外荷载水头的增加,在左隔墙左侧上部和右隔墙左侧下部出现裂缝.当外荷载水头增加至 $0.258P=22.74\text{ m}$ 时,中孔顶板跨中外缘产生裂缝而破坏.如图 5 所示,由于实际结构承受的水头为 13.32 m ,故结构是安全运行的.

工况Ⅴ时,当外荷载水头为 $0.502P=15\text{ m}$ 时在右孔顶板右端内缘出现第一条裂缝,随着荷载的增加,在右边墙外侧中部继续出现裂缝,当外荷载水头增至 $0.795P=29.9\text{ m}$ 时,结构裂缝开展而破坏.如图 6 所示,由于工况Ⅴ时,水头为 13.32 m ,故结构是安全运行的.

从以上分析可以看出:在Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ,Ⅴ工况

下,外荷载水头的超载百分率分别为 17% , 34% , 30% , 12% ,故从安全的角度来说,工况Ⅴ和工况Ⅱ是较不利的,这与二维线性有限元所得的结果是一致的.

2.2.5 结 论

从以上分析可知:

(1) 工况Ⅰ在外荷载水头 14.42 m 作用时,已产生裂缝,因此该工况是最不利的.

(2) 在Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ,Ⅴ工况下,外荷载水头的超载百分率分别为 17% , 34% , 30% 和 12% ,故从安全的角度来说,工况Ⅴ和工况Ⅱ是较为不利的.这与二维线性有限元所得结果是一致的.

3 结 论

对南水北调中线的淇河倒虹吸箱型结构进行二维非线性有限元分析,确定了最不利工况,对各工况下箱型结构的破坏过程进行了模拟,确定了初裂的位置,裂缝发展过程和破坏荷载,为设计提供了有价值的参考数据.

参 考 文 献

- [1] 段云岭.非线性方程组的解法:局部弧长法[J].力学学报,1997,29(1):116—121.
- [2] 段云岭,周鸿钧.溢洪道闸墩非线性有限元分析[J].计算力学学报,1997,14(增刊):116—121.
- [3] 谢贻权,何保福.弹性和塑性力学中的有限元法[M].北京:机械工业出版社,1981.

Two Dimensional Non-linear FEA for the Large Box-framed Structure

ZHOU Fei-ping, LI Peng-hui, ZHOU Hong-jun

(College of Hydraulic and Environmental Engineering, Zhengzhou University of Technology, Zhengzhou 450002, China)

Abstract :To comprehend the character of the structure under the load cases and its possible crack mode in more detail on the base of generic linear analysis the box-framed structure of the reverse siphon of the Qi-he of the Middle Route of South-to-North Transfer was analysed with the two dimensional material non-linear FEA and the crack process of the box-framed-construction was simulated successfully under the five load cases. The construction's reliability degree under the five load cases were analysed and the worst load case was pointed out some valuable reference information was provided for the design.

Key words :Non-linear FEA; load arc-length method; reinforced concrete; box-framed structure; failure process