

基于突变理论的城市配水系统脆弱性评价模型

牛志广, 姜巍, 陆仁强, 张宏伟

(天津大学 环境科学与工程学院, 300072 天津)

摘要: 根据突发事件作用下城市配水系统供水功能的突变性特征, 基于突变理论, 提出一种新的配水系统脆弱性评价模型. 以地震灾害为例, 首先, 根据地震作用下配水管网的破坏机理及历史震害资料, 提出配水系统的脆弱性评价指标体系; 然后, 根据影响配水系统供水功能因素的主次关系, 确定配水系统的状态函数及主次控制变量, 建立配水系统功能转变的尖点突变模拟模型, 并通过对该模型归一公式的导出及配水系统脆弱性分级标准、取值原则的确定, 最终提出一种新的配水系统脆弱性评价数学模型. 华北某区配水系统的实例应用表明, 该模型具有理论与实际可行性, 可为配水系统的安全设计提供决策依据.

关键词: 突变理论; 配水系统; 地震; 脆弱性; 评价模型

中图分类号: TU991.33

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2012)10-0135-04

Research on the vulnerability assessment model of water supply systems based on catastrophe theory

NIU Zhi-guang, JIANG Wei, LU Ren-qiang, ZHANG Hong-wei

(School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, 300072 Tianjin, China)

Abstract: According to the catastrophe characteristics of the water supply systems when it damaged by emergency, a new vulnerability assessment model was proposed based on catastrophe theory. Taking the earthquake disaster as an example, firstly, according to the damage mechanism of water supply systems under earthquake and the historical earthquake data, the vulnerability assessment indicators was established. Secondly, according to the relationship among the control factors of water supply systems' functions, the status function and control variables were determined. Thirdly, the cusp catastrophe mathematical model was established, and the normalized formula was derived and the vulnerability classification standard was determined. Then, based on the research results above, the new vulnerability assessment model of water supply systems was proposed. At last, the water supply system of north china was taking as a case study. Through application we could found that the model was theoretical and practical feasibility. It could be used to supply the decision support for the design of water supply systems.

Key words: catastrophe theory; water supply systems; earthquake; vulnerability; assessment model

城市配水系统是一个极其复杂的系统, 很容易受到蓄意破坏、系统事故、自然灾害等多种威胁. 根据以往研究成果可知^[1], 城市供水风险的大小由威胁发生的概率、严重程度及系统自身脆

弱性 3 个因素决定. 配水系统面临威胁(本文以地震灾害为例)的严重程度和发生概率是人为无法控制的, 但是, 供水部门可以改变结构参数使配水系统的脆弱性降低, 达到对供水风险的控制. 另一方面, 配水系统脆弱性是其在特定的威胁发生时, 由于社会、经济、自然等多个因素的作用, 所表现出的固有敏感性和人类应灾能力, 因此, 配水系统的脆弱性是针对特定威胁的. 以往在配水系统脆弱性评价方面的研究, 多借助于数值分析模型, 以机理性研究为主^[2-3], 但是, 配水系统脆弱性由

收稿日期: 2011-11-20.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51008207); 科技部对欧盟科技合作专项经费项目(1006); 天津市科技支撑计划重点项目(10ZCGYSF02000).

作者简介: 牛志广(1977—), 男, 博士, 副教授.

通信作者: 牛志广, nzg@tju.edu.cn.

管径、管材、接口形式和周边环境等多个控制变量决定,配水系统的复杂性使得这些机理性研究不太适合实际管理的需要.为此,根据地震发生时配水系统供水功能转变的突变特征,结合以往的研究基础,建立了基于突变理论的配水系统脆弱性综合评价数学模型.

1 突变理论基础

在社会或自然现象中,如地震的发生、水的沸腾等,这种由量变、渐变的过程发展到突变、质变的过程随处可见.为有效解决上述非连续的突变过程,法国数学家 Rene Thom 基于拓扑学、结构稳定性等数学基础提出了突变理论. Rene Thom 证明,当系统的控制变量 u_i 的个数不多于 4,状态变量 x_i 的个数不超过 2 时,最多有 7 种基本突变形式^[4]. 突变理论在研究某种过程从某一稳定态跃迁到另一稳定态时,首先假设系统的状态可以用一组参数表征,当系统处于某一稳定态时,对应这一稳定态的函数便取唯一的极值,而当参数在一定范围变化,其函数的极值大于 1 个时,该系统便处于不稳定态.当系统从一种稳定态进入某个不稳定态时,参数的微小变化便可使系统从不稳定态转入一种新的稳定态,系统的状态便在这一瞬间发生突变. 突变理论的主要优势就是通过对临界点附近非连续变化现象的分析来实现对突变过程的解释. 因此,突变理论在物理、化学及社会科

学等多学科都得到广泛应用^[5-6].

2 基于突变理论的配水系统脆弱性综合评价模型

2.1 配水系统脆弱性评价指标体系

根据上述脆弱性的定义可知,配水系统的脆弱性指数 (V) 由灾损敏感性 (V_s) 和应灾能力 (V_d) 两个评价指标共同决定. 灾损敏感性由配水系统的自身结构特征决定,是其遭受某一特定威胁后的损失程度,而配水系统应灾能力是供水部门为保障配水系统在特定威胁作用下的供水安全而采取的措施,反映了供水部门应对威胁发生时的主观能动性.

根据大量历史地震资料及刘遂庆等对 2008 年“5. 12”特大地震现场调研资料分析可知^[7-8],配水系统的抗震能力主要由管径、管材、连接方式、管龄及所在区域的土壤环境 5 个因素决定,因此,本文从这几个方面对配水系统面临地震威胁时的灾损敏感性进行评价. 而与配水系统相伴的人类应灾能力从人力、财力、物力等 3 方面进行评价,考虑到这几个因素均与配水系统所在城市的经济地位有直接关联,通常配水系统所属城市的经济实力越雄厚,用于防震减灾及灾后重建的资金就越有保障,配水系统恢复正常供水功能的时间就越短,建立如下配水系统脆弱性评价指标体系(见表 1、2).

表 1 配水系统脆弱性评价指标体系 1

等级类别	抗震能力	抗震指数	管材	管径/mm	管龄/a	土壤类型	城市
A 类	高	0. 8	钢管、球墨铸铁管	≥1 000	<10	坚硬	省会级城市
B 类	中等	0. 6	UPVC 管、PE 管	500 ~ 1 000	10 ~ 20	中硬	地市级城市
C 类	低	0. 4	灰口铸铁管	250 ~ 500	20 ~ 30	中软	县级城市
D 类	很低	0. 2	水泥管	<250	>40	软弱	乡、镇区域

表 2 配水系统脆弱性评价指标体系 2

等级类别	接口形式	抗震能力	抗震指数
A 类	柔性接口	高	0. 8
B 类	刚性接口	低	0. 4

2.2 配水系统控制变量的选择及尖点突变模拟

根据突变理论可知,配水系统不连续构造的个数只由控制变量 u_i 的个数确定,而与状态变量 x_i 无关. 本文将配水系统的整体脆弱性指数 V 作为状态变量,将灾损敏感性指数 V_s 、应灾能力指数 V_d 作为配水系统的控制变量. 根据历史资料分析可知,配水系统脆弱性主要由 V_s 决定,而 V_d 的贡献次之,因此,将 V_s 作为主控制变量 u_1 , V_d 作为次控制变量 u_2 .

根据突变理论,对于配水系统尖点突变现象,描述该配水系统的势函数为

$$F(V) = V^4 + V_s V^2 + V_d V. \tag{1}$$

因此,配水系统的供水功能状态可以用 3 维空间中的相点 (V, V_s, V_d) 表示,为避免 V_s 、 V_d 出现负值,可得到如下配水系统供水功能的尖点突变模型^[9]:

势函数: $F(V) = (V - V_0)^4 + (V_s - V_{s0}) \times (V - V_0)^2 + (V_d - V_{d0}) \times (V - V_0)$,

突变流形 $M: 4(V - V_0)^3 + 2 \times (V_s - V_{s0}) \times (V - V_0) + (V_d - V_{d0}) = 0$,

分叉集 $B: 8 \times (V_s - V_{s0})^3 + 27 \times (V_d - V_{d0})^2 = 0$.

式中 V_0 、 V_{s0} 、 V_{d0} 为配水系统固有的特征参数。

根据一元三次方程求根公式和盛金判别法可知,上述配水系统的分叉集方程便是配水系统尖点突变模型的稳定判据,方程 $4(V - V_0)^3 + 2 \times (V_s - V_{s0}) \times (V - V_0) + (V_d - V_{d0}) = 0$ 可以有 1 个或者 3 个实根,实根的数目可由判别式 $\Delta = 8 \times (V_s - V_{s0})^3 + 27 \times (V_d - V_{d0})^2$ 的值来确定: (1) 当 $\Delta < 0$ 时,配水系统位于不稳定的状态区域,有可能发生突变; (2) 当 $\Delta > 0$ 时,配水系统控制参数的稳定变化使得状态参数 V 也随之稳定变化,配水系统功能是稳定的,不会发生突变; (3) 当 $\Delta = 0$ 时,配水系统处于临界平稳状态。

根据上述突变模型的分叉集方程还不能对配水系统的脆弱性进行评价,需借助归一公式对配水系统脆弱性的主次关系进行演算^[10],目的是将控制变量及状态变量的取值范围限制在 $[0, 1]$ 内,尖点突变模型的的归一公式为

$$V_{V_s} = V_s^{1/2}, V_{V_d} = V_d^{1/3}.$$

(2)

其中: V_{V_s} 、 V_{V_d} 分别表示灾损敏感性指数 V_s 、应灾能力指数 V_d 对配水系统整体脆弱性指数的贡献度。

2.3 配水系统脆弱性的突变评价准则

在采用突变理论对城市配水系统脆弱性进行综合评价时,需考虑“非互补”准则和“互补”准则. 当主次控制变量 u_i 对于状态变量 x 的贡献不可相互替代时,按照上述归一公式(2) 确定状态变量 x 的值,要依据“非互补”的取值原则,即将突变级数值 x_{u_i} 中的最小值作为配水系统的 x 值. 当主次控制变量 u_i 对于状态变量 x 的贡献可以互相弥补不足时,则依据“互补”的取值原则,即取各 x_{u_i} 的平均值作为配水系统的 x 值. 而根据上述配水系统突变模型的主、次控制变量之间关系可知,表 1、2 中的脆弱性评价指标之间遵循“互补”原则。

2.4 配水系统脆弱性分级标准

根据上述分析可知,配水系统整体脆弱性的大小由灾损敏感性指数 V_s 和人类应灾能力指数 V_d 共同决定,由于 V_s 和 V_d 对于 V 值的贡献具有相反的作用,在计算 V 值时,首先对 V_s 和 V_d 作同向归一处理, V 值便介于 $[0, 1]$ 内, V 值越大表示配水系统的脆弱性越高,即越容易被破坏. 同时,基于以往的研究结果,根据 V 值的大小可确定如表 3 所示的配水系统脆弱性分级标准. 依据上述计算的脆弱性指数 V 值及表 3,可对城市配水系统的脆弱性等级进行评价。

表 3 配水系统脆弱性分级标准

项目	脆弱性等级			
	A 类	B 类	C 类	D 类
V	0 ~ 0. 1	0. 1 ~ 0. 4	0. 4 ~ 0. 6	0. 6 ~ 1. 0
抗灾能力	高	中等	低	很低

3 实例分析

3.1 研究对象

以华北某区配水系统为例,该区配水管网共 56. 975 km,最大管径为 DN1 000,最小管径为 DN50,共包括 108 个节点和 125 根管段,管段分别用 1 ~ 125 表示. 根据该区供水部门提供的数据统计分析可知,该区配水管道的材质种类较单一,主要是灰口铸铁管和球墨铸铁管. 球墨铸铁管采用承插式楔型接头和柔性接口,灰口铸铁管采用石棉水泥刚性接头和承插式接口. 该区配水管网按照不同管材、管龄、管径的累计管长及所占比例见表 4 ~ 6. 根据勘察资料可知,该区配水管网所在地区的地层场地属于 III 类土^[11],为抗震不利地段。

表 4 华北某配水管网不同管材管长的统计结果

管材	管长/m	比例/%
灰口铸铁管	74 870	62. 5
球墨铸铁管	40 600	33. 9
其他	4 300	3. 6

表 5 华北某配水管网不同管龄管长的统计结果

敷设时间	管长/m	比例/%
1980—1990 年	5 300	4. 4
1990—2000 年	57 650	48. 1
2000 年至今	56 820	47. 5

表 6 华北某配水管网不同管径管长的统计结果

管径	管长/m	比例/%
1 000	6 150	5. 1
800	20 350	17. 0
700	6 050	5. 1
600	31 770	26. 5
500	27 050	22. 6
400	19 820	16. 5
300	8 580	7. 2

3.2 配水系统脆弱性评价结果

根据华北某区供水管理地理信息系统统计资

料可得每一根管段的管材、管径、管龄、管道连接方式,该区配水系统所处地区地层场地为 III 类土,同时该区为省会级城市. 根据表 1 和 2 确定上述灾损敏感性评价指标及应灾能力评价指标的值,利用尖点突变模型分别计算灾损敏感性指数 V_s 和人类应灾能力指数 V_d 后,便可以根据式(2)得出该区配水系统的整体脆弱性指数 V 为 0.163 7, 根据表 3 可知,该区配水系统的脆弱性等级为 B 类.

4 结 语

针对配水系统面临地震威胁时其供水功能转变的突变性特征,提出一种新的城市配水系统脆弱性评价方法. 首先,根据历史震害资料及配水系统抗震机理分析结果,提出配水系统脆弱性评价指标体系及分级标准;通过对配水系统状态变量及主次控制变量的确定,建立配水系统尖点突变模拟模型,并通过归一公式的导出及取值原则的确定,提出配水系统整体脆弱性指数的计算方法. 应用结果表明,提出的城市配水系统脆弱性评价数学模型具有实际可行性,可作为供水管理部门进行配水系统的安全设计或改造时的决策依据.

参考文献:

- [1] 陆仁强,牛志广,张宏伟. 城市供水系统风险评价研究进展[J]. 给水排水, 2010, 36(增刊): 4-8.
- [2] LEE M, MCBEAN E A, GHAZALI M, *et al.* Fuzzy-logic modeling of risk assessment for a small drinking-water supply system [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2009 135(6): 547-552.

- [3] OGAWA Y, KOIKE T. Structural design of buried pipelines for severe earthquakes [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2001, 21(3): 199-209.
- [4] FORBES G J, HALL F L. The application of catastrophe theory in modelling freeway traffic operations [J]. Transportation Research Part A: General, 1990, 24(5): 335-344.
- [5] KNEMEYER A M, ZINN W, EROGLU C. Proactive planning for catastrophic events in supply chains [J]. Journal of Operations Management, 2009, 27(2): 141-153.
- [6] YANG Kun, WANG Tongxu, MA Zhitao. Application of cusp catastrophe theory to reliability analysis of slopes in open-pit mines [J]. Mining Science and Technology, 2010, 20(1): 71-75.
- [7] 王绍伟,王永,钱正华,等. “5.12”地震灾区供水系统受损及恢复调研与分析[J]. 中国给水排水, 2009, 25(20): 1-5.
- [8] 熊易华,罗万申,陈洵. 汶川“5.12”地震给排水设施震损情况与启示[J]. 给水排水, 2009, 35(10): 21-24.
- [9] 康宇虹,徐照宇. 股票价格突变模型的建立与分析[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2007, 12(1): 100-104.
- [10] BARUNIK J, VOSVRDA M. Can a stochastic cusp catastrophe model explain stock market crashes [J]. Journal of Economic Dynamics and Control, 2009, 33(10): 1824-1836.
- [11] 彭艳菊,唐荣余,吕悦军,等. 天津滨海场地土类别特征及其对地震动的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(2): 46-52.

(编辑 刘 彤)