

# 生命线工程网络抗震拓扑优化研究\*

李杰<sup>1,2</sup>, 刘威<sup>1,2</sup>, 卫书麟<sup>3</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院建筑工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 3. 中建国际(深圳)设计顾问有限公司上海分公司, 上海 200233)

**摘要:** 介绍了基于连通可靠度分析的生命线工程网络和基于功能可靠度分析的供水管网抗震拓扑优化分析方法。以管网造价为优化目标, 管网拓扑结构为优化参数, 抗震连通可靠度为约束, 建立了基于连通可靠度分析的生命线工程网络抗震拓扑优化模型。对于这样一个组合优化问题, 采用现代优化算法-遗传算法来进行求解可以获得造价低且满足管网抗震可靠度要求的最优网络。改用抗震功能可靠度为约束, 可以建立基于功能可靠度分析的供水管网的抗震拓扑优化模型, 这一问题可以采用模拟退火算法来进行求解, 实例分析表明模拟退火算法具有很好的效果。最后, 利用模拟退火算法, 对四川省都江堰市、绵竹市和德阳市供水管网进行了抗震拓扑优化改造分析, 给出了三个城市供水管网的恢复重建方案。

**关键词:** 连通可靠度; 功能可靠度; 拓扑优化; 遗传算法; 模拟退火算法

**中图分类号:** P315.9   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1000-811X(2010)S0-0004-06

## 0 引言

生命线工程系统是指维系现代城市与区域经济功能的基础性工程设施系统<sup>[1]</sup>。大多数生命线工程系统是以网络的形式分布在城市或较大的区域范围内, 如城市的供水、供燃气管网, 区域的电力网络等等。对生命线工程系统而言, 仅仅实现各个单体的抗震性能分析以及系统的整体性能评价是远远不够的, 更重要的是利用这些分析工具进行网络抗震性能的优化设计, 实现以最低的造价来保证系统具有足够的抗震性能<sup>[1]</sup>。

管网系统的抗震可靠性优化可以从提高系统单元的抗震可靠度和改进网络的拓扑结构两条路径来进行。研究表明<sup>[1]</sup>, 综合考虑工程实际中的各种因素, 改进网络拓扑结构要明显优于仅仅提高单元的抗震可靠度。在管网抗震拓扑优化方面, 文献[2]利用遗传算法初步进行了基于抗震功能可靠性的供水系统拓扑优化研究。文献[3]则采用遗传算法初步实现了基于连通可靠度分析的生命线管网拓扑优化。

本文首先建立了基于连通可靠度分析的生命线工程网络抗震拓扑优化模型, 介绍了应用遗传算法到这一问题进行求解的过程, 并对一个简单燃气管网进行了实例分析。分析表明遗传算法用于生命线工程网络抗震拓扑优化分析可以获得造价低且满足管网抗震可靠度要求的网络。然后, 改用抗震功能可靠度为约束建立了基于功能可靠度分析的供水管网的抗震拓扑优化模型, 介绍了模拟退火算法来进行求解这一模型的具体过程, 对一个简单的实例分析表明应用模拟退火算法可以取得很好的效果。最后, 基于功能可靠度分析的供水管网的抗震拓扑优化方法, 对四川省都江堰市、绵竹市和德阳市供水管网进行了抗震拓扑优化改造分析, 给出了三个城市供水管网的恢复重建方案。

## 1 基于连通可靠度的生命线工程网络抗震拓扑优化

### 1.1 管网优化模型的建立

工程实际中, 在保证安全合理的情况下, 经济性是优化改造和优化设计的主要目标。本文的

\* 收稿日期: 2010-09-25

基金项目: “十一·五”国家科技支撑计划(2006BAJ03B03)

作者简介: 李杰(1957-), 男, 河南开封人, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要从事生命线工程防灾和结构工程研究。

E-mail: lijie@tongji.edu.cn

管网系统优化以网络的拓扑结构为优化对象, 抗震可靠度为优化约束条件, 管网建设造价为优化目标来进行。

管网系统的造价一般可以写为:

$$C = \sum \gamma_{ij} c(l_{ij}, d_{ij}), \quad (1)$$

式中:  $l_{ij}$ 、 $d_{ij}$  分别为  $i$ 、 $j$  节点之间的管线长度和直径(m);  $\gamma_{ij}$  为连通系数, 铺设该管线取 1, 不铺设则取 0;  $c(l_{ij}, d_{ij})$  表示管线的造价, 通常可以用下列函数来估算:

$$c(l_{ij}, d_{ij}) = (a_1 + a_2 \cdot d_{ij}^{a_3}) \cdot l_{ij}, \quad (2)$$

式中:  $a_1$ 、 $a_2$  和  $a_3$  都是常数, 可以根据实际工程的造价采用回归方法得到。

以管网的造价为优化目标, 可以建立如下的优化模型:

$$\begin{aligned} \min \quad & C \\ \text{s. t.} \quad & P_{\min} \geq P_0, \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $P_{\min}$  为管网节点的抗震连通可靠度最小值, 可采用最小路递推分解算法<sup>[4]</sup> 获得;  $P_0$  为管网节点的抗震可靠度约束。

## 1.2 遗传算法在抗震拓扑优化中的应用

遗传算法是由美国科学家 Holland<sup>[5]</sup> 借鉴生物进化原则提出的一种自适应并行全局优化概率搜索算法。遗传算法近年来发展迅速, 在各个领域得到广泛应用<sup>[6-7]</sup>。

下面来介绍遗传算法应用到管网系统的拓扑结构优化问题的具体运算步骤与原理。

### 1.2.1 编码

采用 0~1 编码, 当基因值为 0 时, 表示该基因所对应的管线不铺设; 当基因值为 1 时, 表示铺设该基因对应的管线。所有优化参数对应的基因按照指定的次序排列起来, 就构成一条染色体。一个染色体对应管网的一种拓扑结构方案, 多条染色体构成遗传算法的一个种群。

### 1.2.2 生成初始种群

采用随机策略来生成一组个体。但是必须要注意的, 随机生成的管网拓扑结构可能是工程中无意义的解, 例如, 非连通图对应的管网结构在工程实践中无意义。所以, 在随机生成个体之后, 首先要进行管网拓扑结构的合理性判断。对于不合理个体, 进行简单的修补; 若修补后的个体仍为不合理方案, 则抛弃该个体, 重新生成新的个体。

### 1.2.3 个体评价

由于管网拓扑优化问题的优化目标是获得满

足抗震可靠度要求的最低造价管网, 而遗传算法中一般定义适应度高的解为比较优的解, 故定义染色体的适应度函数为:

$$F(X) = M - C(X) - S(X), \quad (4)$$

式中:  $M$  为预先指定的一个较大的数值;  $C(X)$  为个体对应管网的造价;  $S(X)$  为惩罚函数, 采用下式来计算:

$$S(X) = \begin{cases} 0, & P_{\min i} \geq P_0; \\ [\max(P_{\min j}) - P_{\min i}] \frac{C_{\max} - C_{\min}}{\max(P_{\min j}) - \min(P_{\min i})}, & P_{\min i} < P_0; \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $C_{\max}$ 、 $C_{\min}$  为当前群体中个体造价的最大值和最小值;  $P_{\min i}$  为当前群体中第  $i$  个体中节点连通可靠度的最低值;  $j = 1, 2, \dots, N$ ,  $N$  为当前群体中个体的数目。

### 1.2.4 遗传操作

遗传操作包括选择、交叉和变异操作。选择操作本文采用无放回的适应度比例方法和最佳个体保存方法。也即上一代最优的个体必然进入到下一代中, 并且上一代中的每个个体按照适应度的值以一定概率遗传到下一代中, 并且只遗传一次。交叉操作选择一点交叉方法进行。变异操作对个体的每一个基因位, 依一变异概率对其值作取反运算, 从而产生一个新的个体。

### 1.2.5 收敛判断

遗传算法通常的停止规则有计算达到固定的最大进化代数, 解群体间差异充分小等规则。本文采用的停止规则是计算达到固定的最大进化代数。

## 1.3 分析实例

图 1 为 10 个节点, 14 条边的简单供燃气网络系统, 源点为 1, 节点 2~10 为汇点, 其管线单元属性见表 1, 对于供燃气网络, 式(2)中的  $a_1$ 、 $a_2$  和  $a_3$  可以分别取为 -144.360 9, 4 313.3 和 1.0<sup>[8]</sup>, 故管网的总造价为 5 920 万元。

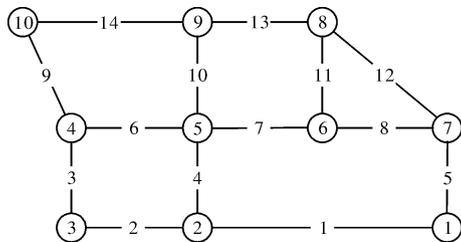
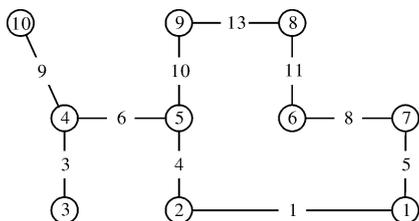


图 1 简单燃气管网

表 1 管网单元属性

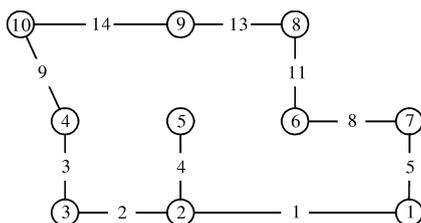
编号	管长/m	管径/mm	编号	管长/m	管径/mm
1	1 000	300	8	1 000	400
2	6 500	250	9	4 800	200
3	4 000	200	10	4 000	200
4	4 000	300	11	4 000	250
5	4 000	250	12	5 000	300
6	6 500	250	13	6 000	200
7	6 000	300	14	8 500	200

假设各管线单元抗震可靠度都为 0.9。设节点最低可靠度约束分别为 0.7、0.8 和 0.9，其相应的最优网络分别如图 2 - 图 4 所示。采用遗传算法对管网进行优化，算法分别计算 1 000 次，每次计算都是将算法从头开始重新计算。算法搜索到上述图 2 - 图 4 的最优结果的次数分别为 622、580 和 808 次。由此可以看出遗传算法具有较好的搜索能力，对于上述管网，搜索到最优网络的机会在 50% 以上。



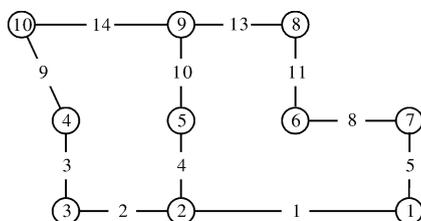
(造价 3 437 万元，最低可靠度 0.747)

图 2 可靠度约束为 0.7 时的最优网络



(造价 3 761 万元，最低可靠度 0.849)

图 3 可靠度约束为 0.8 时的最优网络



(造价 4 048 万元，最低可靠度 0.920)

图 4 可靠度约束为 0.9 时的最优网络

灾的重要性，需要保证其在地震后的功能，也即具有足够的供水能力来保证各种用水需求。而抗震连通可靠度只能说明从源点到用户存在一条通路的概率，而不能保证通路能否提供足够的水压来满足用户的用水需求。因此，对于供水管网需要进行基于功能可靠度的抗震拓扑优化，以保证其在地震作用下具有足够的供水能力。

以供水管网的造价为优化目标，可以建立如下的优化模型：

$$\begin{aligned} \min \quad & C \\ \text{s. t.} \quad & \beta_{\min} \geq \beta_0, \\ & d_{\min} \leq d_i \leq d_{\max} \end{aligned} \quad (6)$$

式中： $\beta_{\min}$ 为供水管网所有节点的抗震可靠度指标的最小值，可以采用供水管网抗震功能可靠性分析方法<sup>[9]</sup>得到； $\beta_0$ 为供水管网的允许抗震可靠指标限值；对于供水管网的造价，公式(2)中经验系数  $a_1, a_2, a_3$  可以分别取 62.105 1, 1 979. 7, 1. 486<sup>[10]</sup>； $d_{\min}$ 、 $d_{\max}$  分别为管网运行中经济管径的最小值和最大值。

## 2.2 模拟退火算法在供水网络系统抗震拓扑优化中的应用

模拟退火的思想最早是由 Metropolis<sup>[11]</sup>在 1953 年提出的，它源于对物体降温过程中的统计热力学现象的研究。Kirkpatrick 等人<sup>[12]</sup>在 1982 年正式提出模拟退火算法，并成功地将之应用在组合优化问题中。模拟退火的基本思想是对确定性算法引入随机扰动，使得当考察点达到局部极值时，算法过程有一个小概率“跳出”局部极值陷阱的能力。模拟退火算法是局部搜索算法的扩展，所以理论上来说，它是一个全局最优算法。

模拟退火算法用 Metropolis 算法产生组合优化问题解的序列，并利用下式中的 Metropolis 准则对应的转移概率  $P$  确定是否接受从当前解  $i$  到新解  $j$  的转移。

$$P_i(i \Rightarrow j) = \begin{cases} 1 & , f(j) \leq f(i); \\ \exp\left(\frac{f(i) - f(j)}{t}\right) & , f(j) > f(i); \end{cases} \quad (7)$$

式中： $f(i)$ 为解的能量函数，这里可以取为管网的造价。

模拟退火算法从初始优化方案出发，进行降温迭代寻找最优解。在降温过程中，不断地对当前管网进行随机扰动以产生新的管网是模拟退火算法应用到供水管网抗震拓扑优化的关键步骤。这里，对当前管网进行随机扰动产生新管网的操作步骤为：首先，随机地选出一定数量的管线；

## 2 基于功能可靠度的供水管网抗震拓扑优化

### 2.1 供水管网优化模型

由于供水管网对于地震后社会生活和抢险救

然后,对选出的各管线随机地进行状态改变,由此得到新的管网。如果新的管网不满足可靠度约束条件的解,采用罚函数来增大其能量函数。如果新的管网为不合理方案(如:非连通管网),这随机增加管线来进行简单地修补,若仍不合理则将其抛弃,重新生成一个管网。

设  $L_k$  表示 Metropolis 算法第  $k$  次迭代时产生的变换个数,  $t_k$  表示 Metropolis 算法第  $k$  次迭代时控制参数  $t$  的值,  $T(t)$  表示控制参数更新函数,  $t_0$  表示初始温度,  $t_f$  表示终止温度。这模拟退火算法应用到供水管网抗震拓扑优化的具体操作步骤为:

- ①随机产生一个管网作为算法初始解,以此作为当前最优点,并计算其能量函数值;
- ②设置初始温度、终止温度及控制参数更新函数:  $t_0, t_f, T(t)$ ;
- ③ $t_k = T(t_k - 1)$ , 设置  $L_k$ , 令循环计数器初值  $k = 1$ ;
- ④对当前最优点作一随机变动,产生一个新解,计算新解的能量函数,并计算能量函数的增量  $\Delta$ ;
- ⑤若  $\Delta < 0$ , 则接受该新解为当前最优点;若  $\Delta \geq 0$ , 则以式(7)计算的概率接受该新解为当前最优点;
- ⑥若  $k < L_k$ , 则  $k = k + 1$ , 转④;
- ⑦若  $t < t_f$ , 则转③;若  $t \geq t_f$ , 则输出当前最优点,算法结束;

在模拟退火算法中,温度参数是最关键的参数,包括起始温度的选取  $t_0$ 、温度的下降方法  $T(k)$  和终止温度  $t_f$  的确定等。

(1)起始温度  $t_0$  的选取:采用较大的值,这里取 1 000 000。

(2)温度下降方法  $T(k)$ :模拟退火算法的性能好坏主要取决于其温度下降方法,即温度更新函数,使其保持适当的温度下降速度。本文采用的温度下降方法为:  $t_{k+1} = t_k/k$ 。

(3)算法的终止温度  $t_f$ ,模拟退火算法从初始温度开始,通过在每一温度的迭代和温度的下降,最后达到终止温度  $t_f$  而停止。本文采用零度法,即令  $t_f$  为一个比较小的正数。

### 2.3 实例分析

图 5(a)为一个 17 个节点,27 条边的小型网络,考虑 VIII 度地震烈度背景对其进行拓扑优化设计。优化的约束条件分别为节点最低可靠度指标不得低于 1.28(对应于可靠度不低于 0.9),0.84(对应于可靠度不低于 0.8),0.53(对应于可靠度不低于 0.7)。图 5(b)、(c)、(d)分别为节点最小可靠度指标分别为 1.28,0.84,0.53 的供水管网最优拓扑结构布置图。表 2 给出了三种约束条件下的建造费用。可以看出,节点最小可靠度指标约束值  $\beta_0$  越大,相应的优化结构越复杂,相应的造价就越高。但不管哪种方案,相对原始方案而言,在造价上均有显著降低。图 6 为约束条件为 1.28 时模拟退火算法搜索过程中的点的搜索轨迹。由图可见,模拟退火算法能很快搜索到满足约束条件的解,并在众多解中,选出既满足约束条件又是造价最低的解。

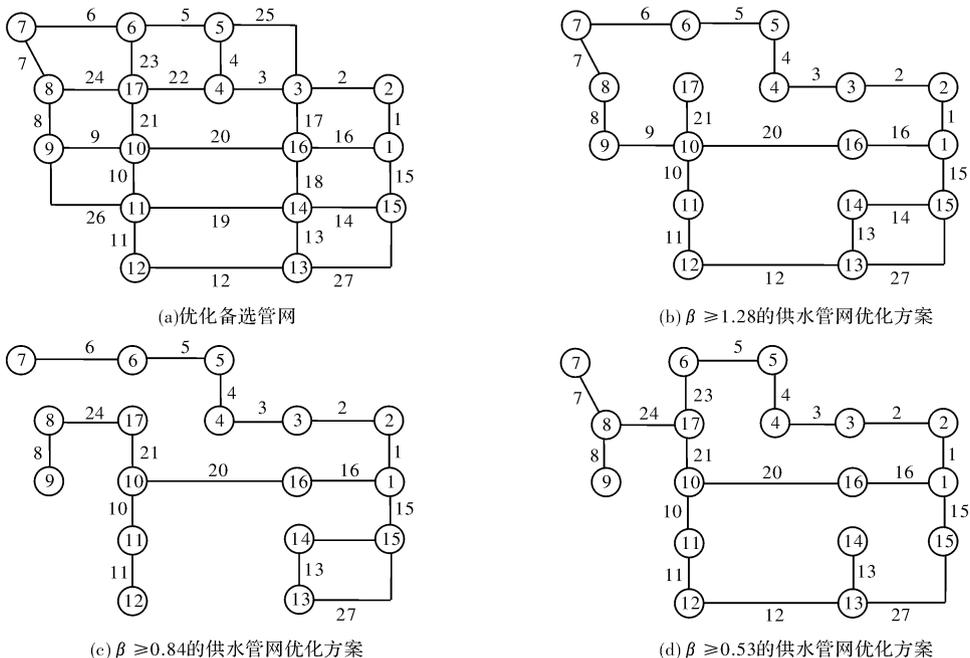


图 5 备选管网布置图及各可靠度约束下管网拓扑结构

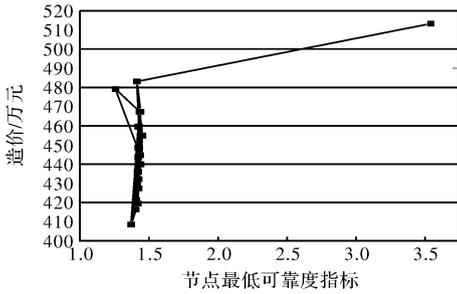


图6 管网拓扑优化搜索轨迹图

表2 各种约束条件下的系统造价

节点最小可靠度指标	造价/万元
0.53	356.9
0.84	373.2
1.28	408.5
原始方案	570.3

### 3 四川省供水管网恢复重建研究

2008年汶川大地震给四川省多个城市的供水管网造成了巨大的破坏，震后急需迅速展开恢复重建工作。在四川省建设厅、四川省给排水协会的支持和配合下，以震害调查为基础，利用上述模拟退火算法，对一批典型受灾城市的供水管网系统进行了震后恢复重建方案研究，这一研究的技术路线如图7所示。在这一工作中，以管网节点的最低抗震功能可靠度大于0.8为约束条件进行震后供水管网系统拓扑优化分析给出了震后恢复重建方案。图8-图10分别为都江堰市、绵竹市和德阳市供水管网恢复重建与优化改造方案。



图7 技术路线图

### 4 小结

本文以抗震连通可靠度为约束建立了一般生命线工程网络的抗震拓扑优化模型，采用遗传算法对这一模型进行了求解。同时，以抗震功能可

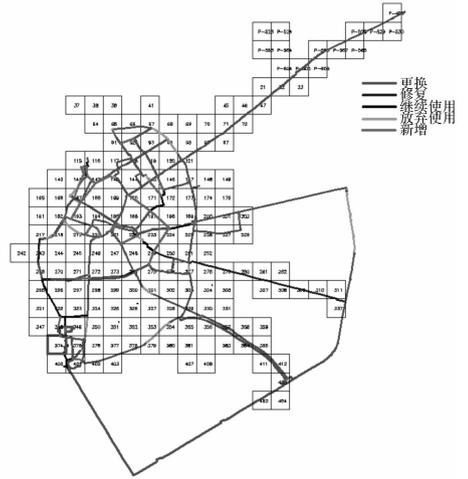


图8 都江堰市供水管网恢复重建方案

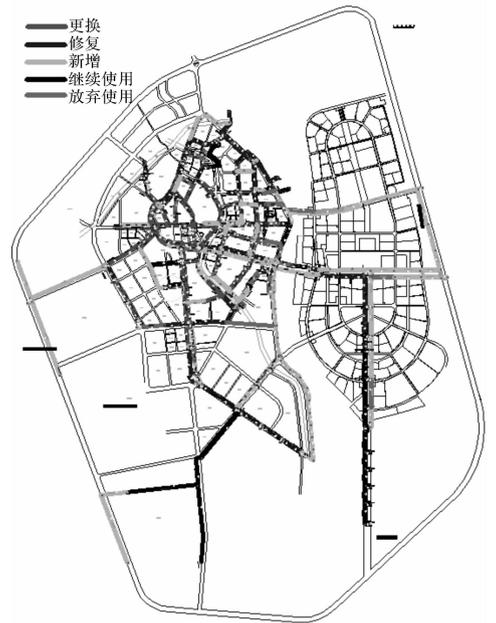


图9 绵竹市供水管网恢复重建方案



图10 德阳市供水管网恢复重建方案

靠度为约束建立了供水管网的抗震拓扑优化模型, 并采用模拟退火算法进行了求解。实例分析表明, 上述两种算法均能较好地用于网络的抗震拓扑优化分析之中。最后, 利用模拟退火算法, 对四川省三个城市的供水管网进行了拓扑优化分析, 给出了其灾后恢复重建方案。

## 参考文献:

- [1] 李杰. 生命线工程抗震——基础理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [2] 陈玲俐. 城市供水管网系统抗震可靠性分析与优化[D]. 上海: 同济大学, 2002.
- [3] 包元峰, 李杰. 基于遗传算法的生命线工程网络抗震优化设计[J]. 防灾减灾工程学报, 2006, 26(1): 21-27.
- [4] Li Jie & He Jun, A recursive decomposition algorithm for network seismic reliability evaluation [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2002, 31: 1525-1539.

- [5] Holland J H. Adaptation in Natural and Artificial Systems [M]. MIT Press, 1975.
- [6] C Gazen, C Ersoy. Genetic algorithms for designing multihop light-wave network topologies [J]. Artificial in intelligence engineering, 1999, 13: 211-221.
- [7] D Saha, M D. Purkayastha and A. Mukherjee. An approach to wide area WDM optical network design using genetic algorithm [J]. Computer Communications, 1999, 22: 156-172.
- [8] 王烜. 城市燃气管线网络系统优化设计研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.
- [9] 卫书麟, 李杰. 城市供水管网抗震功能可靠度分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2005, 25(4): 353-358.
- [10] 邵知宇. 给水管网分段线性优化模型[D]. 上海: 同济大学, 2001.
- [11] Metropolis N, Rosenbluth A, Rosenbluth M et al. Equation of state calculations by fast computing machines [J]. Journal of Chemical Physics, 1953, 21: 1087-1092.
- [12] Kirkpatrick S, Gelatt Jr C D, Vecchi M. P. Optimization by simulated annealing [J]. Science, 1983, 220: 671-680.

# Seismic Topology Optimization of Lifeline Networks Based on Seismic Reliability

Li Jie<sup>1,2</sup>, Liu Wei<sup>1,2</sup> and Wei Shulin<sup>3</sup>

(1. *Building Engineering Department, Tongji University, Shanghai 200092, China;*

2. *State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;*

3. *China Construction (Shenzhen) Design International Shanghai Branch, Shanghai 200233, China)*

**Abstract:** In this paper, seismic topology optimizations of lifeline networks based on connectivity reliability and water distribution networks based on functional reliability are introduced. Taking network's cost as optimization object and seismic connectivity reliability as constraint, a network topology optimization model based on connectivity reliability can be established. A genetic algorithm, a combinational optimization algorithm, is used to solve this model. Meanwhile, taking seismic functional reliability as constraint, a network topology optimization model of water distribution network based on functional reliability is established. For this model, a simulated annealing algorithm is employed to get the optimal network. Two case studies indicate that above two algorithms is suitable for the seismic topology optimization of networks with different reliability constraints. Moreover, using the simulated annealing algorithm, three actual water distribution networks in Sichuan is researched and corresponding retrofitting and recovery schemes are given.

**Key words:** connectivity reliability; functional reliability; network topology optimization; genetic algorithm; simulated annealing algorithm