

供水系统地震风险评估及升级优化

王绍玉^{1,2}, 金书森¹

(1. 哈尔滨工业大学 管理学院, 150001 哈尔滨; 2. 哈尔滨工业大学 建筑学院, 150001 哈尔滨)

摘要: 为了评估供水系统地震风险和确定关键供水管道,建立了系统震后供水率 S 、管道升级收益指数 U 和管道断裂影响指数 B 3 项评价指标,并运用基于蒙特卡洛仿真的地震作用下流体的图解迭代响应分析 (GIRAFFE) 方法对供水系统在地面峰值速度 $v_G = 50 \text{ cm/s}$ 时进行了风险分析. 仿真结果表明, S 的分布特征与节点的用水需求分布关系密切, U 能作为首要指标并通过一次运算来确定系统中的单个关键供水管道和最大收益管道组合,它是管道断裂影响指数和管道断裂程度共同作用的结果. 由单个关键供水管道组成的升级组合并不是最佳的升级优化策略,升级最大收益管道组合能最大程度地提高系统震后供水绩效并降低地震风险.

关键词: 供水系统;地震风险评估;管道升级;管道断裂;蒙特卡洛仿真;关键供水管道;最大收益管道组合

中图分类号: X43

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2013)02-0020-06

Risk evaluation and optimization of water supply system under earthquake

WANG Shaoyu^{1,2}, JIN Shumiao¹

(1. School of Management, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China;

2. School of Architecture, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China)

Abstract: To evaluate seismic risk and identify critical pipelines of water supply system, water supply index (S), pipeline update profit (U) and pipeline break consequence (B) are set up to describe system seismic performance, and the graphical iterative response analysis of flow following earthquakes (GIRAFFE) based on Monte Carlo simulation is applied to the hypothetical water supply system for peak ground velocity $v_G = 50 \text{ cm/s}$. The simulation result shows that the distribution of S is related to nodes' demand pattern in the system. Calculated by running single Monte Carlo simulation, U could be used as primary indicator to identify individual critical pipelines and maximum benefit portfolio, and it is the consequence of B and pipelines' damage probability. Updating the group with largest individual critical pipelines is not the best strategy for the system, and the system seismic performance would be most improved by updating maximum benefit portfolio.

Key words: water supply system; seismic risk evaluation; pipeline update; pipeline break; Monte Carlo simulation; critical water supply pipeline; maximum benefit portfolio

供水系统是生命线工程的重要组成部分,一旦遭遇震害,不但会弱化震后消防抢救能力,而且会扰乱当地居民和工商业的正常生产生活. 1906 年美国 San Francisco 地震,由于 3 条主要输水管道遭受破坏,以致由地震引发的火灾无法及时扑灭,大火持续燃烧三天三夜^[1]. 1994 年美国北岭

地震,圣费尔南多峡谷北部 3 条主要输水管道破坏,导致数周停水^[2]. 为了减轻地震灾害对供水系统造成的破坏,将供水中断引发的效应最小化,供水系统地震风险评估以及关键供水管道的确认研究成为重中之重.

大量文献都分析了供水系统的地震绩效水平及其可靠性,Markov、O'Rourke 和 Scawthorn 等基于 1906 年 San Francisco 大地震和 1989 年 Loma Prieta 大地震对旧金山供水系统和震后该系统对消防能力的影响进行了研究^[3-5];Chang 等对美国孟菲斯供水系统进行了地震风险分析^[6];Wang

收稿日期: 2012-07-04.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70671033);

国家科技支撑计划项目(2009BAK56B03).

作者简介: 王绍玉(1956—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 金书森,hljjsm@gmail.com.

和 Shi 等对美国加州洛杉矶供水系统评价了地震绩效水平^[7-8];韩阳对城市地下管网系统的地震可靠性进行了研究^[9];何双华对供水管网系统抗震加固优化进行了分析^[10].但是,很少有文献分析供水系统的地震关键供水管道.关键供水管道对地震作用下的系统供水能力和可靠性有重大影响.本文通过建立供水系统地震绩效评价指标来评估其地震风险并确认系统中的关键供水管道.首先建立了基于系统震后供水率 S 、管道升级收益指数 U 和管道断裂影响指数 B 的评价指标;其次引入了供水系统模型并介绍了分析过程;然后运用基于蒙特卡洛仿真的 GIRAFFE 方法对供水系统在地面峰值速度 $v_c = 50 \text{ cm/s}$ 时进行风险评估,确认了系统的单个关键供水管道和最大收益管道组合;最后分析了管道升级收益指数和管道断裂影响指数之间的数量关系,为决策者进行管道升级提供了依据.

1 供水系统地震绩效评价指标

1.1 系统震后供水率

供水系统地震风险可用系统震后供水率 S 表示,它以各个节点的震后用水满意度作为度量标准, S 为系统震后供水总量与震前供水总量的比值,即

$$S = \sum_{j=1}^{n_j} Q_j / \sum_{j=1}^{n_0} Q_j. \quad (1)$$

式中: Q_j 为节点 j 的用水流量需求; n_0, n_j 分别为震前和震后用水得到满足的节点数量. S 描述了系统震后供水满意的程度,其取值在 $0 \sim 1$ 之间, 0 和 1 分别代表了震后无供水和震后满供水两种极值情况.

由于震后伴随着抢修工作,如关闭阀门以隔离系统的受损部件,这会引发 S 剧烈变化,本文 S 为震后瞬间的系统供水率,通过分析期望值和概率分布来评估供水系统的地震风险.

1.2 管道断裂影响指数

管道断裂影响指数 B_j 描述了管道 j 的地震断裂对系统震后供水所产生的影响,即

$$B_j = \frac{E(S) - E(S | L_j)}{1 - E(S)}. \quad (2)$$

式中: $E(S)$ 为 S 的期望值, $E(S | L_j)$ 为管道 j 在断裂条件下 S 的期望,理论上 $E(S | L_j) < E(S)$, 因为 $E(S)$ 不仅包括了管道 j 的断裂,而且包括了管道 j 的无损. B_j 实质上是测量管道 j 的断裂对系统震后供水率 S 带来的消极影响,值越大说明管道 j 的断裂对系统产生的影响越大.

1.3 管道升级收益指数

管道升级收益指数 U_j 描述了管道 j 的升级对系统震后供水所产生的影响,表示为

$$U_j = \frac{E_{up_j}(S) - E(S)}{1 - E(S)}. \quad (3)$$

式中: $E_{up_j}(S)$ 为管道 j 在升级条件下 S 的期望.

管道升级是指若相同地震再次发生,则升级之后的管道断裂概率 $P_{up}(L_j)$ 比升级之前的断裂概率 $P(L_j)$ 急剧减小. U_j 实质上是测量管道 j 的升级给系统震后供水率 S 带来的积极影响. B_j 和 U_j 分别反映了管道 j 的断裂和升级给系统带来的整体影响,有助于确定系统的关键供水管道,但是 U_j 能更好地体现供水系统升级优化的效果,所以 U_j 将作为首要指标来确认系统的关键供水管道, U_j 值越大说明其管道越关键,值小说明管道升级效果越不明显.作为互补指数 U_j 与 B_j 密切相关,可通过分析两者数量关系来讨论系统特征.

2 研究对象

本文以美国环保署 EPA 提供的供水管网模型^[11]作为研究对象,如图 1 所示.该供水系统占地约 10 km^2 ,包括 59 个用水节点、117 根管道、3 个蓄水槽、2 个水源和 2 个水泵. 117 根管道总长约 66 km ,59 个用水节点需水总量为 $40\,634 \text{ L/min}$.位于系统正北方向的河流和西北方向的湖泊作为水源供水给用水节点,水体总流向为自北向南及从西至东,由河流供给总需求的 80%,由湖泊供给总需求的 20%.表 1 总结了用水节点的基本信息,包括节点名称、高程和流量需求.大部分节点的流量需求小于或等于 $1\,000 \text{ L/min}$,但是节点 203、35、123 的用水需求分别为 $17\,076$ 、 $6\,503$ 、 $4\,519 \text{ L/min}$,共占系统总需求的 69%.系统中 117 根管道的直径为 $200 \sim 760 \text{ mm}$.直径大于或等于 610 mm 的管道为输水干道,这些管道由钢管组成,剩余管道则为输水支路,由铸铁管组成.

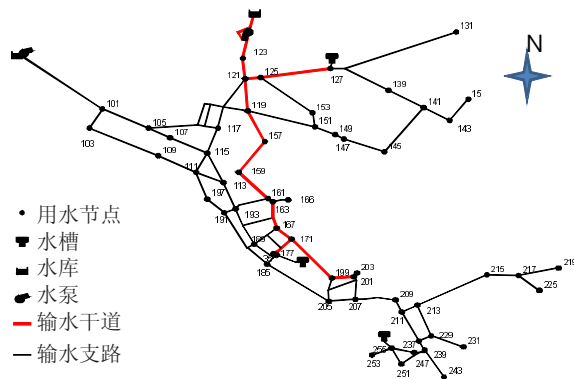


图1 供水系统空间分布图

表 1 系统用水节点基本信息

节点	高程/ m	流量需求/ (L · min ⁻¹)	节点	高程/ m	流量需求/ (L · min ⁻¹)
15	9.75	1 000	167	-1.52	55
35	3.81	6 503	171	-1.22	149
101	12.80	719	177	2.44	220
103	13.11	504	185	4.88	97
105	8.69	512	189	1.22	409
107	6.71	207	191	7.62	310
109	6.19	876	193	5.49	270
111	3.05	537	197	7.01	65
113	0.61	76	199	-0.61	452
115	4.27	197	201	0.03	169
117	4.15	446	203	0.61	17 076
119	0.61	667	205	6.40	247
121	-0.61	158	207	2.74	263
123	3.35	4 519	209	-0.61	3
125	3.35	173	211	2.13	33
127	17.07	67	213	2.13	53
131	1.83	162	215	2.13	349
139	9.45	22	217	1.83	92
143	-1.37	24	219	1.22	156
141	1.22	37	225	2.44	86
145	0.30	105	229	3.20	243
147	5.64	32	231	1.52	62
149	4.88	103	237	4.27	59
151	10.21	547	239	3.96	169
153	20.18	167	243	4.27	16
157	3.99	196	247	5.49	266
159	1.83	156	251	9.14	91
161	1.22	60	253	10.97	206
163	1.52	36	255	8.23	153
166	-0.61	10			

3 基于蒙特卡洛仿真的 GIRAFFE

基于蒙特卡洛仿真的地震作用下流体的图解迭代响应分析(Graphical iterative response analysis of flow following earthquakes, GIRAFFE)方法被用于评价供水系统的地震风险和确认关键供水管道. GIRAFFE 方法能准确地解决供水系统在地震作用下产生的节点负压问题,从而能更加有效地评价地震供水效用. 该处理方法曾经用于分析 1989 年 Loma Prieta 大地震下的旧金山供水系统^[3]和 1994 年北岭地震下的洛杉矶供水系统^[10].

假设地震场景统一服从地面峰值速度 $v_G =$

50 cm/s. 管道维修率 λ (维修次数/km)可通过管道地震维修次数与地面峰值速度的回归关系统计获得, Jeon 和 O' Rourke 基于北岭地震对不同材质的管道维修率与地面峰值速度的关系进行了分析^[12],研究表明,在 $v_G = 50$ cm/s 时,直径 ≥ 610 mm 的钢管的管道维修率 $\lambda = 0.017 8$ 次/km,直径小于 610 mm 的铸铁管的管道维修率 $\lambda = 0.125 4$ 次/km.

4 风险评估结果

通过运行 10 000 次样本的蒙特卡洛仿真,结果显示 S 的取值在 0.05 ~ 1 之间,均值为 0.93,标准差为 0.14. 图 2、3 分别描述了 S 的概率质量函数 f_s 和累计分布函数 $F_s(F_s = \sum_{s_i \leq s} f_s)$. 如图 2 所示,大部分样本的 S 为 0.89 ~ 1,当 $S \leq 0.89$ 时,样本数量急剧减小. 图 3 描述了由 3 段近乎于直线组成的半对数形式的累计分布曲线,它有两个特征点 $S = 0.40$ 和 $S = 0.89$. 首先曲线以较大斜率升至点 $F_s = 0.03(S = 0.40)$,接着以较小的斜率升至点 $F_s = 0.1(S = 0.89)$,最后以更大的斜率到达点 $F_s = 1(S = 1.00)$. 斜率在点 $S = 0.40$ 发生变化是因为有一部分样本 $0.25 \leq S \leq 0.40$,而斜率在点 $S = 0.89$ 发生变化则是因为绝大部分样本的 $S > 0.89$.

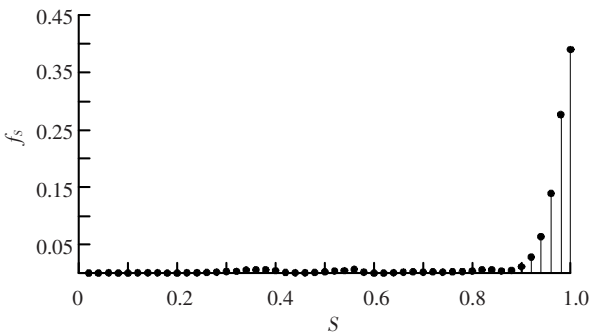


图 2 系统震后供水率 S 的概率质量分布

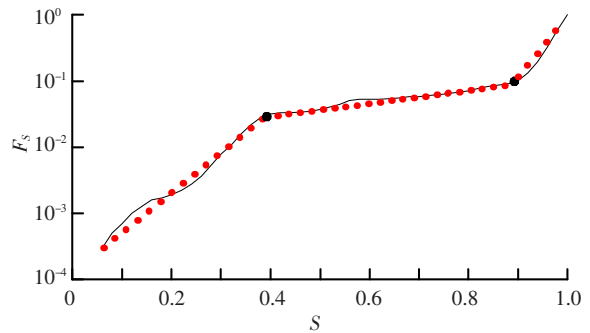


图 3 系统震后供水率 S 的累计分布

表 2 描述了节点 35 和 203 的用水不满意率. 当 $S < 0.40$ 时,节点 35 和 203 的不满意率都为 1;当 $S < 0.89$ 时,节点 35 和 203 的不满意率分别

为 0.52 和 0.57. 需要说明的是节点 35 和 203 的用水需求分别为 6 503、17 076 L/min, 这两个节点的总需求为 23 579 L/min, 约占系统总需求的 58%. 若这两个节点的震后用水不能得到满足, 那么系统震后供水率 S 至少会减少 58%, 导致 $S < 0.40$, 所以 S 的分布特征与系统中的节点用水需求分布密切相关.

表 2 节点 35 和 203 的用水不满意率

节点	用水不满意率	
	$S < 0.40$	$S < 0.89$
35	1.00	0.52
203	1.00	0.57

5 关键供水管道的确认

评估供水系统地震风险的重要步骤之一就是确定系统中的关键供水管道. 若 U 越大, 则管道越关键; 若 U 越小, 则管道越不关键. 基于条件样本可确定供水系统的单个关键供水管道和最大收益管道组合.

5.1 基于条件样本的关键供水管道

通常情况下, 计算管道 j 的升级收益指数 U_j 需要在该管道经过升级之后再对系统进行仿真运算. 但是在现实生活中, 复杂的供水系统往往由成千上万条管道组成, 而计算每个管道的 U 就得对其依次分别计算, 计算繁重且效率低下. 以本系统为例, 供水系统由 117 根管道组成, 就要分别对 117 根管道依次进行仿真运算, 进而排名得出关

键供水管道. 但是, 如果假设升级之后的管道断裂率 $P_{up}(L_j) = 0$, 则可基于已知条件样本且只运算 1 次蒙特卡洛仿真便可确认关键供水管道, 从而避免了重复运算. 在第 4 节进行系统风险评估运算时, 若管道 j 在大量样本中发现完好无损, 便可假想该管道是在升级条件下对系统进行的风险评估. 例如, 在 10 000 次样本的地震仿真中发现管道 171 在 9825 次仿真样本中完好无损, 那么就可以认为在这 9 825 次地震中管道 171 是经过升级的, 进而 U_{171} 可通过下列公式求出.

$$U_j = \frac{\frac{1}{m_2} \sum_{i=1}^{m_2} S_i - \frac{1}{m_1} \sum_{j=1}^{m_1} S_j}{1 - \frac{1}{m_1} \sum_{j=1}^{m_1} S_j}.$$

(4)

式中: m_1 为样本总数, m_2 为管道 j 在无损状态下的样本数.

为了验证式(4)的正确性, 表 3 基于单次仿真计算了本系统的 10 根单个关键供水管道, 并与这 10 根管道分别在升级条件下进行多次仿真进行了对比. 通过表 3 可看出对比结果较理想, 理论上第 3 列应和第 2 列完全相同, 出现差异的原因在于统计误差. 此外, 还对这 10 根管道在 $P_{up}(L_j)/P(L_j) = 0.1$ 时, 即升级之后管道断裂率是升级之前管道断裂率的 10% 进行了多次仿真, 并与单次仿真进行对比, 结果表明基于单次仿真的管道 U_j 值可以代替多次仿真的 U_j .

表 3 基于单次和多次仿真的 10 大单个关键供水管道对比

管道 编号	单次仿真的 U_j	多次仿真的 U_j		单次和多次仿真差值	
		$P_{up}(L_j) = 0$	$P_{up}(L_j)/P(L_j) = 0.1$	$P_{up}(L_j) = 0$	$P_{up}(L_j)/P(L_j) = 0.1$
101	0.16	0.17	0.15	0.01	0.01
329	0.13	0.14	0.11	0.01	0.02
229	0.11	0.11	0.09	0	0.02
177	0.08	0.07	0.07	0.01	0.01
175	0.05	0.06	0.06	0.01	0.01
187	0.05	0.04	0.03	0.01	0.02
321	0.05	0.03	0.03	0.02	0.02
153	0.04	0.05	0.03	0.01	0.01
133	0.03	0.03	0.03	0	0
171	0.03	0.01	0.03	0.02	0

5.2 最大收益管道组合

利用有限的资源优先升级关键的管道组合是供水系统风险管理的重要研究内容. 在对供水系统的管道组合进行升级决策时, 通常应考虑成本收益. 若可供调配的升级资源越丰富, 则管道组合

升级收益指数 U 和系统震后供水率 S 就会越大. 本文通过描绘管道组合升级收益指数 U 和相应的管道升级数量讨论成本收益. 管道组合的关键程度也可基于条件样本计算求出, 式(4) 同样适用于确认系统的关键管道组合, 管道组合升级收益

指数 U 越大则该组合越关键,最大 U 值的管道组合称为最大收益管道组合。

图 4 为最大收益管道组合曲线,显示了由系统中 10 根管道组成的最大收益管道组合及其相应的 U 值。按照其升级顺序,若升级第 1 根管道 101 时,则 $U_{101} = 0.16$;当按序升级至第 10 根管道 183 时,则 $U_{101-183} = 0.69$ 。图 5 展示了最大收益管道组合的空间分布,位列第 1 名的管道 101 紧邻湖泊水源,此外,这 10 根管道中有 7 根管道为输水干道,且直通系统中最大的两个用水节点 203 和 35。需要注意的是,最大收益管道组合中的 10 根管道与表 3 中 10 根单个关键供水管道并不一致,即由单个关键供水管道组成的升级组合并不是最佳的优化策略。图 4 中 10 根 U 值管道组合曲线描述了升级 10 根单个关键供水管道与相应 U 之间的关系,由图可知,升级 10 根单个关键供水管道的 U 值小于升级最大收益管道组合的 U 值,即升级 10 根单个关键供水管道所提高的系统震后供水率 S 没有升级最大收益管道组合效果明显。

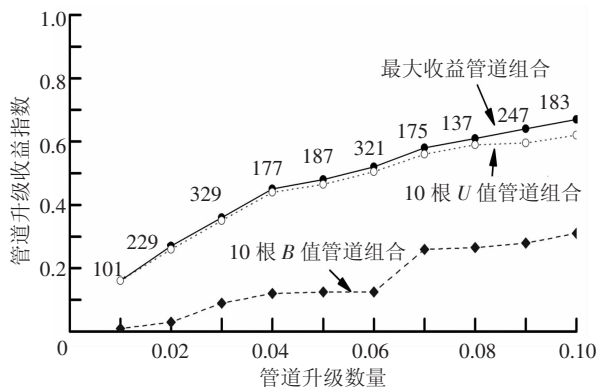


图 4 管道升级收益指数与升级数量的关系

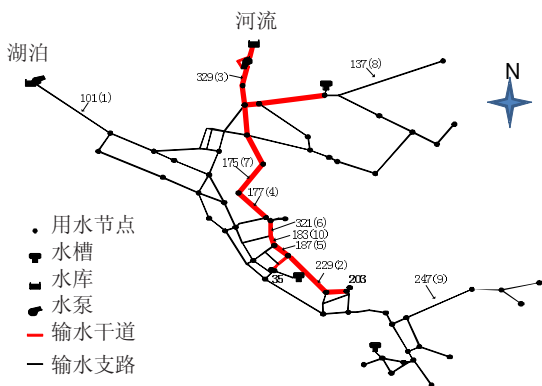


图 5 最大收益管道组合空间分布图

6 管道升级收益指数与管道断裂影响指数的数量关系

管道升级收益指数 U 是衡量管道升级后对

系统震后供水率 S 所带来的积极影响;而管道断裂影响指数 B 是衡量管道地震断裂给 S 带来的消极影响。通过进一步分析,可获取两个指数的数量关系,根据全概率公式为

$$E(S) = E(S|L_j)P(L_j) + E(S|\bar{L}_j)P(\bar{L}_j). \quad (5)$$

式中: $P(L_j)$ 和 $P(\bar{L}_j)$ 分别为管道 j 的地震断裂率和地震无损率。

$$1 = \frac{E(S|L_j)P(L_j)}{E(S)} + \frac{E(S|\bar{L}_j)P(\bar{L}_j)}{E(S)}. \quad (6)$$

式(6)左边由 $P(L_j) + P(\bar{L}_j)$ 替代可得

$$\frac{E(S|\bar{L}_j) - E(S)}{E(S)} = \frac{E(S) - E(S|L_j)}{E(S)} \frac{P(L_j)}{P(\bar{L}_j)}. \quad (7)$$

根据式(2)、(3),继而可得

$$U_j = B_j \frac{P(L_j)}{P(\bar{L}_j)}. \quad (8)$$

由式(8)可知, U_j 是 B_j 和 $\frac{P(L_j)}{P(\bar{L}_j)}$ 共同作用的结果。

B_j 描述了管道 j 的断裂给系统带来的后果,它反映了系统特征,如连通性、冗余性和除管道 j 之外其他管道的断裂情况等; $\frac{P(L_j)}{P(\bar{L}_j)}$ 则描述了管道 j 自身的断裂程度。式(8)意味着当决策者分析管道升级时,应同时考虑管道断裂影响指数和管道自身的断裂程度。式(8)的推演结果符合真实供水系统的管道升级优化策略。在实际情况中,总是优先升级那些大流量和容易断裂的管道,大流量意味着高 B 值,而容易断裂则意味着高 $\frac{P(L_j)}{P(\bar{L}_j)}$ 值。

管道断裂影响指数 B_j 可同样基于条件样本求出,即

$$B_j = \frac{\frac{1}{m_1} \sum_{j=1}^{m_1} S_j - \frac{1}{m_3} \sum_{i=1}^{m_3} S_i}{1 - \frac{1}{m_1} \sum_{j=1}^{m_1} S_j}. \quad (9)$$

式中: m_1 为样本总数, m_3 为管道 j 发生断裂的样本数。

为了证明式(8)的正确性,通过统计系统中 117 根管道的 U_j 、 B_j 和相应的管道断裂率 $P(L_j)$,验证了三者之间的关系,如图 6 所示。

研究表明,管道升级收益指数 U_j 比管道断裂影响指数 B_j 更适合作为首要指标来升级管道,其主要原因是升级由 B_j 组成的管道组合并不能显著提高系统震后供水率 S ,如图 4 中 10 根 B 值管道组合升级曲线所示,升级这 10 根管道的 $U < 0.40$,小于最大收益管道组合的 $U = 0.69$,验证了以管道断裂影响指数 B 决定的管道升级组合并不

是最佳的优化方案.

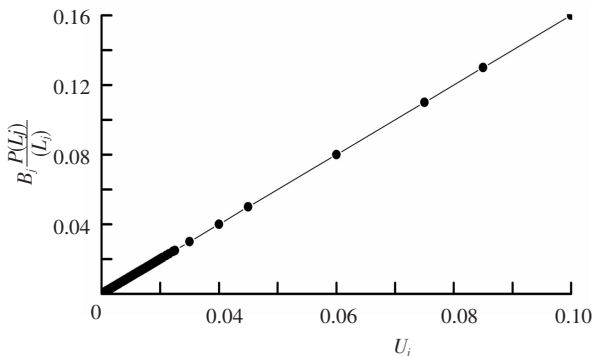


图6 管道升级收益指数与管道断裂影响指数的关系

7 结 论

1) 运用基于蒙特卡洛仿真的 GIRAFFE 方法评估了供水系统地震风险和确定了关键供水管道. 系统震后供水率 S 可用来描述震后风险水平; 管道升级收益指数 U_j 和管道断裂影响指数 B_j 可测量管道 j 对系统的影响, U_j 更有助于确定系统中的关键供水管道.

2) 升级最大收益管道组合是最佳的升级优化策略, 其升级顺序与单个关键供水管道的排序并不一致.

3) 管道升级收益指数 U_j 是管道断裂影响指数 B_j 和管道断裂程度 $\frac{P(L_j)}{P(L_j)}$ 共同作用的结果, B_j 能反映供水系统的特征, 如连通性、冗余性和除管道 j 外其他管道的断裂情况; 而 $\frac{P(L_j)}{P(L_j)}$ 则描述了管道 j 的自身断裂程度.

参考文献

[1] ARIMAN T, MULESKI G E. A review of the response of buried pipelines under seismic excitations [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1981, 9(2): 133 - 152.

[2] Earthquake Engineering Research Institute. Northridge earthquake of January 17, 1994: preliminary reconnaissance report [R]. Oakland: EERI, 1994.

[3] MARKOV I, GRIGORIU M, O'ROURKE T D. An evaluation of seismic serviceability water supply networks with application to the San Francisco auxiliary water supply system, technical report NCEER-94-0001 [R]. New York: Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, 1994.

[4] O'ROURKE T D, BONNEARU A L, PEASE J W, *et al.* Liquefaction and ground failures in San Francisco [J]. Earthquake Spectra, 2006, 22(S2): 91 - 112.

[5] SCAWTHORN C, O'ROURKE T D, BALCKBURN F T. The San Francisco earthquake and fire of 1906: enduring lesson for fire protection and water supply [J]. Earthquake Spectra, 2006, 22(S2): 135 - 158.

[6] CHANG S E, SVEKLA W D, SHINOZUKA M. Linking infrastructure and urban economy: simulation of water disruption impacts in earthquakes [J]. Environ Plan B Plan, 2002, 29(2): 281 - 301.

[7] WANG Y. Seismic performance evaluation of water supply systems [D]. New York: Cornell University, 2006.

[8] SHI P. Seismic response modeling of water supply system [D]. New York: Cornell University, 2006.

[9] 韩阳. 城市地下管网系统的地震可靠性研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2002.

[10] 何双华. 供水管网系统抗震可靠性分析及加固优化研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2009.

[11] ROSSMAN. EPANET 2 users manual [M]. Cincinnati: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, 2000.

[12] JEON S S, O'ROURKE T D. Northridge earthquake effects on pipelines and residential buildings [J]. Bull Seismol Soc Am, 2005, 95(1): 294 - 318.

(编辑 魏希柱)