

城市给水系统灾害恢复力的地震鲁棒性分析

金书森, 王绍玉

(哈尔滨工业大学 管理学院 管理科学与工程, 哈尔滨 150001)

摘要: 基于灾害恢复力的概念和评价属性, 以城市给水系统地震损失模型为研究路径, 运用基于蒙特卡洛仿真的GIRAFFE模型, 通过升级输水干道评价了城市给水系统在M6.5和M7.0两个震级下的技术鲁棒性和组织鲁棒性。结果表明, 升级输水干道对系统的技术鲁棒性和组织鲁棒性效果明显, 且随着震级的提高而越发显著。此外, 输水干道的重要程度与震级强度无关, 但随着震后时间的推移, 其重要性取决于输水管道所处的系统位置, 即在震后0时, 处于系统枢纽位置的管道相对重要; 在震后24 h, 靠近供水源的管道则相对重要。

关键词: 恢复力; 技术; 组织; 鲁棒性; 城市给水系统; 地震

中图分类号: TU991.0

文献标志码: A

文章编号: 1674-4764(2012)S1-0209-06

Analysis on Seismic Robustness of Urban Water Supply System Based on Disaster Resilience

JIN Shumiao, WANG Shaoyu

(School of Management, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, P. R. China)

Abstract: Based on the concept and characteristics of disaster resilience, technical robustness and organizational robustness were discussed by updating trunk lines of urban water supply system for two different earthquake magnitudes, M 6.5 and M 7.0 respectively, where lifeline earthquake loss model was taken as a starting point. Monte Carlo based GIRAFFE model was adopted in this research. Result shows that retrofit of trunk lines is helpful for both technical robustness and organizational robustness, and the updating effect would become more significant as the earthquake magnitude increases. Furthermore, criticalness of pipelines is not determined by the earthquake magnitude, but as time goes it depends on their respective locations in the system and system configuration. At the moment instantly after earthquake, the pipelines which are located at the center of system would be more critical; while 24 hours later, the pipelines which are closer to the reservoir will become more critical.

Key words: resilience; technical; organizational; robustness; urban water supply system; earthquake

作为城市生命线工程重要组成部分的给水系统, 通过水源、水槽、管道、泵和阀等重要组件将水由水源传输到需求节点^[1]。给水系统一旦遭遇震害, 就会严重威胁城市的用水需求, 对紧急救援和灾后重建产生影响。具有恢复力的给水系统在应对地震时, 能够降低被地震打击的可能性, 减轻被打击的受损程度, 缩短恢复到正常水平的时间^[2]。如同灾害易损性和暴露性, 恢复力已经被国际灾害风险学界视为评价区域防灾减灾能力状况的重要标准。

联合国减灾战略(UNISDR)将基于自然灾害的恢复力定义为: 系统、社区或社会适应潜在灾害的能力, 它通过抵御、调整以达到系统功能和结构可接受的水平^[3]。Bruneau提出了恢复力的广义概念并建立了一般测量模型, 该模型涵盖了减轻灾害风险的所有措施, 旨在描述恢复力对减灾和恢复重建的影响, 但是他并没有对其进行量化分析^[4-5]; 基于Bruneau的研究, Chang和Shinozuka讨论了恢复力的定量评价模型, 分析了风险损失模型用于测量恢复力的适用程度和范围, 并将其应用于孟菲斯给水系统^[6]; Miles和Chang构建了

恢复力的社区概念模型, 对社区中居民、企业和生命线工程三者之间的关系给予了分析, 提出了恢复力的评价指标^[7]; Davidson和Cagnan构建了基于离散事件的电力系统地震恢复力模型, 分析了经济恢复到正常水平的路径, 并预测了电力系统遭遇未来地震的恢复过程^[8]; Cimellaro等分析了加利福尼亚医院在遭受不同地震场景后的恢复状况, 讨论了医院的直接和间接经济损失, 并建立了简化的灾害恢复力模型, 用以描述医院的震损, 灾前备灾和灾后响应对恢复力的影响^[9]。

当前, 国际灾害学界并没有对恢复力的概念和测量标准达成共识^[10-11], 都是根据各自的研究提出相应的恢复力概念和模型, 且大部分研究还只是停留在定性评价与定量概念模型阶段。此外, 对给水系统的地震恢复研究较少。传统的水力模型都是根据流体在密闭状态即无损状态下研发的, 在应对地震灾害发生管道震损时则无法解决管网出现的负压问题, 常常过高估计负压而导致节点供给小于需求, 无法保证用水需求^[12]。与Chang升级泵站抗震能力研究水系统地震

恢复力^[6]不同,以 Brueau 的恢复力概念和评价属性为基础,以给水系统地震损失模型为研究路径,通过升级输水干道材质,分别依据 2 个不同震级分析了给水系统的鲁棒性和组织鲁棒性,并讨论了地震管道的重要程度和优先升级顺序。

1 研究背景

1.1 理论依据

恢复力是系统抵御外来干扰如自然灾害和人为事故,且吸纳这些干扰并快速恢复到灾前水平的能力^[13]。准确地说,恢复力能够:1)减少灾害引发事故的概率;2)若事故无法避免,则减少该事故造成的经济损失和社会影响;3)缩短恢复到正常水平的恢复时间。图 1 描述了给水系统地震恢复力概念模型,系统绩效函数 Q 的取值范围为 0-1,当地震 M 在 t_0 时刻发生导致系统受损,系统经过时间 $t_{0+1} - t_0$ 恢复至震前正常水平 B 。

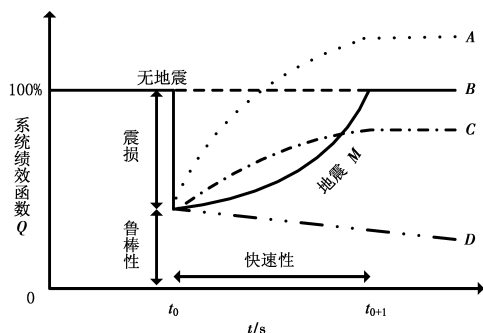


图 1 恢复力概念模型

则系统恢复力的损失可表示为

$$L_R = \int_{t_0}^{t_{0+1}} [1 - Q(t)] dt. \quad (1)$$

对于一定的震级 M , L_R 主要由 2 个参数决定,即震损和恢复时间。若震损越小且恢复时间越快,则系统恢复力的损失就越小。震损(包括系统物理损毁、系统功能失调、社会影

响和经济损失)由系统鲁棒性决定;恢复时间则由系统快速性决定。

恢复力可分为 4 个评价维度,即技术维、组织维、社会维和经济维^[4-5]。技术维评价物理系统应对灾害时所表现的绩效水平;组织维评价系统履行重要职能的能力;社会维判断减少受损系统引发社会消极影响的能力;经济维衡量减少承载体直接和间接经济损失的能力。技术维和组织维是系统自身的维度,社会维和经济维是系统所辐射的社区维度。这四维恢复力又存在四项共性:鲁棒性、快速性、冗余性和资源性。鲁棒性即强度,表示系统及其成分抵御灾害而呈现的稳健性,没有出现功能退化的特性;快速性指按时间顺序优先满足主要目标的特征;冗余性是系统及其元件可替换的程度;资源性评定现有资源可供调配的丰富程度。其中,鲁棒性和快速性是恢复力的本质属性,是恢复力提高后的最终表现;冗余性和资源性则是提高恢复力的有效途径。Bruneau 针对给水、电力和医院等生命线工程建立了约 80 个评价指标^[4]。

1.2 研究内容

依据简单实用且可测量的原则,建立了城市给水系统地震恢复力的评价依据(表 1 所示)。研究的主要内容为表中灰色背景部分,即给水系统地震恢复力的技术鲁棒性 R_T 和组织鲁棒性 R_O ,也就是给水系统输水管道的抗震强度和实现供水服务满意的能力。忽略快速性是因为:1)恢复水平尚无统一评价标准,例如若采取有效的应对措施且借此修复系统之前存在的问题,系统很有可能恢复至更高绩效水平 A (见图 1),若灾后没有实施积极有效的救灾方案,则系统灾后会降低到更低绩效水平 C (见图 1),甚至系统会随着时间的推移最终丧失其功能 D (见图 1)^[14];2)恢复时间无法确定,恢复水平的不同会导致恢复时间无法确定;3)恢复路径因救灾技术、预案准备和资源调配的不同而千差万别。由于目前尚无可供参考对比的评价标准,所以本研究侧重描述系统的抗震绩效水平。

表 1 给水系统地震恢复力评价依据

恢复力维度	评价依据	鲁棒性	快速性
技术(给水系统)	给水系统物理损毁程度	输水管道抗震强度(R_T)	99%输水管道在 n 周内修缮
组织(给水系统)	供水服务	地震供水满意度(R_O)	99%供水在 n 周内能得到满足
社会(涵盖社区)	安置人口数量规模	震后未转移人口数量	99%人口在 n 周内重返家园
经济(涵盖社区)	经济影响程度	GDP 未受损度	99%GDP 在 n 周内恢复

技术鲁棒性 R_T 可表示为

$$R_T = 1 - L_P(L_B, L_L), \quad (2)$$

式(2)中: L_P 是管道的震损,由管道断裂 L_B 和管道泄漏 L_L 决定; R_T 取值范围为 0~1。若管道震损越小,则管道抗震能力越强即技术鲁棒性越强;若管道震损越大,则抗震能力越差,技术鲁棒性越弱。

组织鲁棒性 R_O 可表示为

$$R_O = \sum_i^{n_i} S_i / \sum_i^{n_{i0}} D_i, \quad (3)$$

式(3)中: R_O 取值范围为 0~1,该值代表着地震供水满意度;

D_i 为节点 i 的震前用水需求; S_i 为震后供水量; n_{i0} 和 n_i 分别是震前和震后节点的满意数。 R_O 越大意味系统地震供水满意度越高,组织鲁棒性越强; R_O 越小意味系统地震供水满意度越低,组织鲁棒性越弱。

2 给水系统模型

以美国环保署开发的水力分析引擎软件 EPANET 的案例 3 为基础^[15],经过适当调整建立了给水系统模型。本系统占地面积约 10 km²,由 59 个需求节点和 117 根管道组成,管道总长约 66 km。模型包括 3 个水槽、2 个水库(水源)以及 2

个水泵,系统用水总需求为 40 634 L/min(如表 2)。水源分别位于正北方向的河和西北方向的湖,整体流向为从北至南,自西向东(图 2)。河供给用水总需求的 80%,湖供给

20%。管道的直径区间为 200~760 mm,直径大于或等于 610 mm 的管道为输水干道,而直径小于 610 毫米的管道是为输水支路,干道总长度为 22 km,约占管道总长 33.35%。

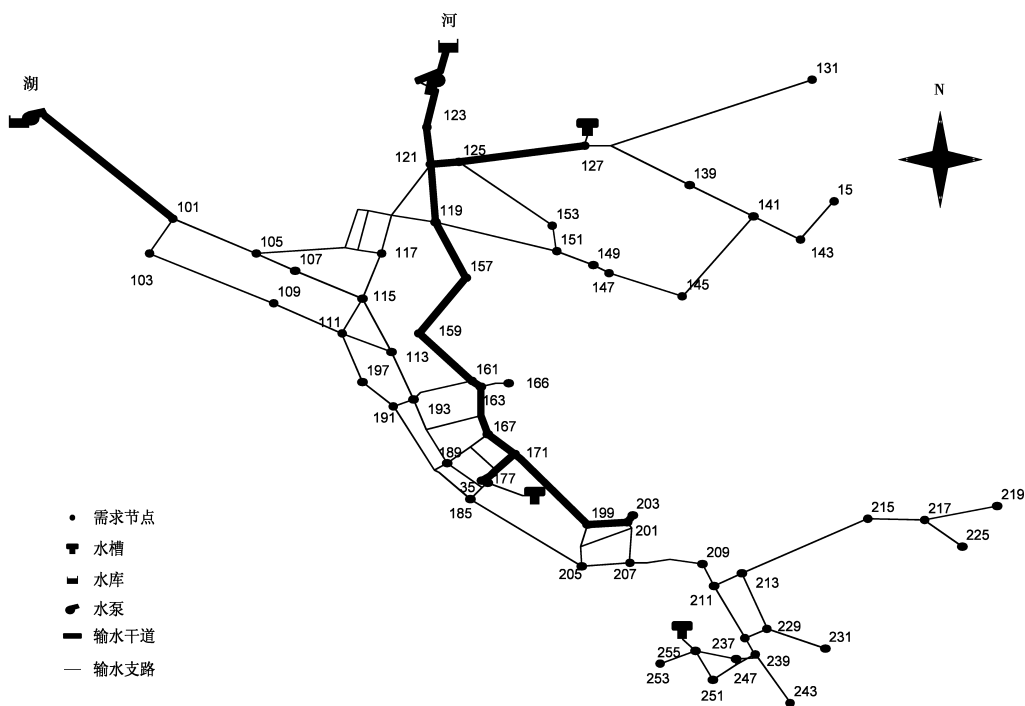


图 2 给水系统空间分布图

表 2 给水系统需求节点信息

节点	高程/m	需求/(L·min ⁻¹)	节点	高程/m	需求/(L·min ⁻¹)	节点	高程/m	需求/(L·min ⁻¹)
15	9.75	1000	145	0.30	105	203	0.61	17076
35	3.81	6503	147	5.64	32	205	6.40	247
101	12.80	719	149	4.88	103	207	2.74	263
103	13.11	504	151	10.21	547	209	-0.61	3
105	8.69	512	153	20.18	167	211	2.13	33
107	6.71	207	157	3.99	196	213	2.13	53
109	6.19	876	159	1.83	156	215	2.13	349
111	3.05	537	161	1.22	60	217	1.83	92
113	0.61	76	163	1.52	36	219	1.22	156
115	4.27	197	166	-0.61	10	225	2.44	86
117	4.15	446	167	-1.52	55	229	3.20	243
119	0.61	667	171	-1.22	-149	231	1.52	62
121	-0.61	158	177	2.44	220	237	4.27	59
123	3.35	4519	185	4.88	97	239	3.96	169
125	3.35	173	189	1.22	409	243	4.27	16
127	17.07	67	191	7.62	310	247	5.49	266
131	1.83	162	193	5.49	270	249	5.49	91
139	9.45	22	197	7.01	65	251	9.14	206
141	1.22	37	199	-0.61	452	253	10.97	153
143	-1.37	24	201	0.03	169			

3 研究方法

3.1 研究路径

基于孟菲斯给水系统的地震损失评估模型构建了研究路径^[16](图 3 所示),通过升级输水干道评价不同震级下的给水系统物理损毁和服务供给中断程度,进而求出管道的抗震

强度和系统供水满意度。系统物理损毁和供水中断可分析地震对水系统造成的损失;管道抗震强度和供水满意度可评价该系统的鲁棒性进而分析技术恢复力和组织恢复力。此外通过分析管道抗震能力和供水满意度的关系,可以分析管道在地震中的重要程度及其影响因素,为优先升级重要管道提供对策建议。

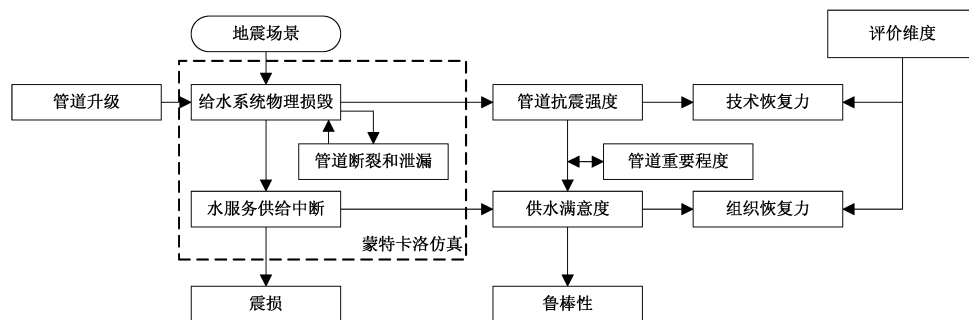


图 3 研究路径

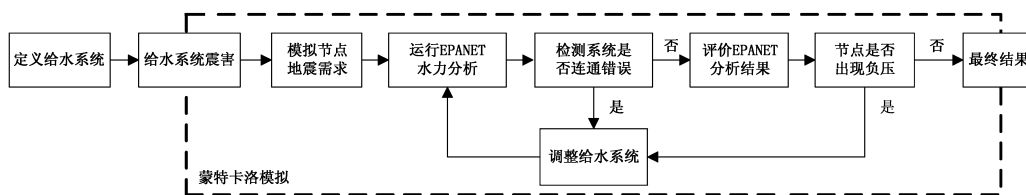


图 4 GIRAFFE 工作原理

3.2 GIRAFFE 模型

基于蒙特卡洛仿真的 GIRAFFE(graphical iterative response analysis of flow following earthquakes)模型被应用于本研究。传统的商业水力模型假设给水管网完全封闭,而一旦地震引发管道发生断裂或泄露时,这些模型就无法解决管道产生的负压问题,常常过高估计负压而无法保证正常用水需求^[12]。GIRAFFE 模型以 EPANET 内核为运算引擎,反复检测并删除系统的负压节点和相关管道^[17]。GIRAFFE 能够更加精确地计算震后系统中的管道流量、节点压力、节点用水需求和系统整体用水满意度等,从而保证灾后应急响应如消防用水和医院紧急救援,目前 GIRAFFE 已经作为决策支持工具正式被洛杉矶水电部门(LADWP)采用^[18]。

4 仿真结果

首先假设系统中所有输水管道(干道和支路)为生铁管,并计算出此系统(系统 1)在 M6.5 和 M7.0 2 个震级下的技术鲁棒性 R_T 和组织鲁棒性 R_O ;然后将干道升级为钢管,计算出此系统(系统 2)在两个震级下的 R_T 和 R_O 。根据美国生命联盟(AMERICAN LIFE ALLIANCE)^[19],生铁管在 M6.5 和 M7.0 的震损率分别为 0.35 和 0.85 次/公里,钢管分别为 0.0525 和 0.1275 次/公里;5%的震损源于管道断裂,95%的震损源于管道泄漏^[17]。分别对系统 1 和系统 2 在 2 个震级下运行 100 次仿真,结果详见表 3 和 4。

表 3 中, L_B 、 L_L 和 R_T 分别代表管道断裂、管道泄漏和技术鲁棒性即抗震强度。由表 3 可以看出,由于系统 1 抗震性

较差,在应对 M6.5 地震时,管道震损为 30.59%(包括断裂和泄漏),而鲁棒强度为 69.41%;当应对 M7.0 地震时,相应的震损和鲁棒强度分别为 60.46%和 39.54%。经过升级的系统 2 具有较强的抗震性,当应对 M6.5 级地震时,管道震损率为 25.74%而鲁棒强度为 74.26%;当应对 M7.0 级地震时,相应的管道震损和鲁棒强度分别为 51.1%和 48.9%。

表 3 给水系统技术鲁棒性对照表 %

系统	M6.5			M7.0		
	L_B	L_L	R_T	L_B	L_L	R_T
39154	1.75	28.84	69.41	4.38	56.08	
2	1.48	24.26	74.26	3.55	47.55	48.9
比较优势	-15.43	-15.88	6.99	-18.95	-15.21	23.67

表 4 中, R_O 代表供水满意度即组织鲁棒性, t_0 和 t_{24} 分别代表震后 0 时和 24 时。与储水量无上限的水源不同,水槽的蓄水是有限的,管道震损会引发水槽储水逐渐枯竭,随着时间推移会导致更多节点无法满足用水需求,故 $R_O(t_{24})$ 小于 $R_O(t_0)$ 。从表 4 可以看出,在 M6.5 地震下,系统 1 在震后 t_0 能满足 43.61%的用水需求,在震后 t_{24} 能满足 26.54%;而在 M7.0 地震时,随着管道震损加剧,相应的供水满意度为 21.18%和 5.61%。经过升级的系统 2 在应对 M6.5 级地震时,在震后 t_0 能满足 78.2%用水需求,在震后 t_{24} 能满足 64.91%用水;当应对 M7.0 级地震时,相应的供水满意度分

别降到 47.9%和 34.04%。

表 4 给水系统组织鲁棒性对照表

系统	M6.5		M7.0	
	$R_O(\%, t_0)$	$R_O(\%, t_{24})$	$R_O(\%, t_0)$	$R_O(\%, t_{24})$
1	43.61	26.54	21.18	5.61
2	78.2	64.91	47.9	34.04
比较优势	79.32	144.57	126.16	506.77

结合表 3 和 4,管道的升级效果对技术鲁棒性和组织鲁棒性都是很显著的。当系统 1 升级至系统 2 时,在面对 M6.5 级地震时,管道的断裂和泄漏分别相对减少 15.43%和 15.88%;技术鲁棒强度相对提高 6.99%,由技术鲁棒强度提高所引发的组织鲁棒性在震后 t_0 和 t_{24} 分别相对提高 79.32%和 144.57%;当应对 M7.0 地震时,输水管道的断裂和泄漏分别相对减少 18.95%和 15.21%,技术鲁棒强度相对提高 23.67%,由其引发的组织鲁棒性在震后 t_0 和 t_{24} 分别相对提高 126.16%和 506.77%。由此可看出干道的升级效果随着震级提高而越发显著。

在一个真实的给水系统中,输水干道的数目往往成百上千。如何利用有限的资源优先升级重要的输水干道并分析其影响因素,也是城市给水系统恢复力的重要研究内容。为此,本文通过研究管道抗震强度和供水满意度的关系,在系统 2 的基础上,进一步讨论了输水干道的抗震重要程度并分析其成因。其方法是假设系统 2 每条干道依次分别断裂的前提下,再对 M6.5 和 M7.0 两个地震进行仿真模拟并与表 4 对比,分析其断裂对系统造成的供水影响。

表 5 列出了震后 t_0 和 t_{24} 2 个时刻系统 2 的干道在 2 个震级分别依次断裂状态下对系统供水的影响排序。对于不同的震级但处于震后的相同时刻,管道的重要程度几乎是一致的。以震后 t_0 为例,在 M6.5 和 M7.0 震级下,位列前 8 名的管道影响排名中有 6 根管道是一致的。管道 189 在 t_0 时刻是最重要的管道,一旦断裂导致系统供水在 M6.5 和 M7.0 下只能分别满足 29.74%和 22.19%,与表 4 相比分别相对减少了 62%和 54%。图 5 列出了震后 t_0 时刻标有数字的重要管道空间分布,除管道 125 外,其余 5 根管道都位于系统的枢纽位置。由管道 189、187、179 和 177 的位置和排名可看出,越处于系统中枢位置的管道,其排名越靠前。如果这些管道发生断裂,则直接影响周边节点的用水需求。

表 5 输水管道地震重要程度对照表

序号	t_0						t_{24}					
	M6.5			M7.0			M6.5			M7.0		
	管道	$R_O/\%$	供水减少	管道	$R_O/\%$	供水减少	管道	$R_O/\%$	供水减少	管道	$R_O/\%$	供水减少
1	189	29.74	-0.62	189	22.19	-0.54	125	10.13	-0.84	125	3.44	-0.90
2	187	30.15	-0.61	125	22.24	-0.54	60	14.23	-0.78	329	5.16	-0.85
3	179	35.16	-0.55	187	24.96	-0.48	329	14.43	-0.78	60	5.32	-0.84
4	177	36.2	-0.54	123	26.61	-0.44	123	19.17	-0.70	123	11.48	-0.66
5	125	40.25	-0.49	179	26.84	-0.44	173	20.52	-0.68	175	13.48	-0.60
6	229	45.65	-0.42	177	28.72	-0.40	175	23	-0.65	129	14.23	-0.58
7	233	47.03	-0.40	229	28.88	-0.40	187	24.21	-0.63	173	14.46	-0.58
8231	47.35	-0.39	129	29.67	-0.38	179	24.26	-0.63	179	15.43	-0.55	

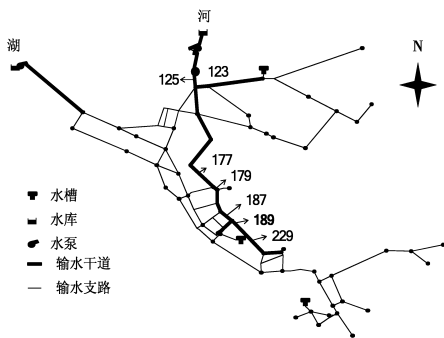


图 5 震后 t_0 时刻重要管道空间分布图

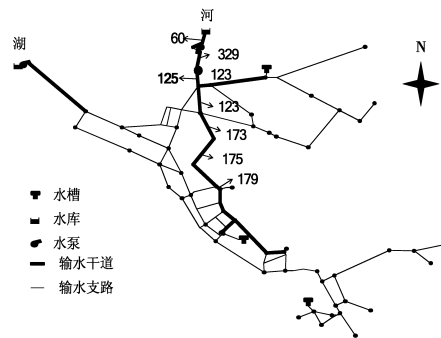


图 6 震后 t_{24} 时刻重要管道空间分布图

在震后 t_{24} 时,2 个震级中排名前 8 名的重要管道中有 7 根是一致的。管道 125 在 t_{24} 时刻是最重要的管道,一旦断裂系统供水在 M6.5 和 M7.0 下只能分别满足 10.13%和 3.44%,较表 4 分别相对减少 84%和 90%。图 6 列出了震后 t_{24} 时刻标有数字的重要管道空间分布。在 t_0 时刻管道在地震

瞬间发生断裂,系统的瞬时供水满意度与连接需求节点的管道是否震损有关,而与水源是否能持续输水无关;而在 t_{24} 时,系统的供水满意度就与连接水源的管道震损程度密切相关。图 6 中 7 根管道都非常靠近系统中最大的水源——位于正北方的河,若这些管发生断裂,则系统将无法输水给下游节

点,其影响将是全局的,而绝非一点一面。且随着水槽的储水逐渐枯竭,系统最终的供水满意度会趋近于0。这也解释了管道125的断裂对系统震后 t_{24} 时刻造成的影响大于管道189的断裂对震后 t_0 时刻系统的影响。虽然位于西北方向的干道101也直通另一水源——湖,但是该湖只供给系统20%的用水,其重要程度稍显不足。所以,震后 t_{24} 时管道的重要程度由其与水源的距离所决定,若管道越靠近水源,则该管道越重要。

管道125在震后 t_0 和 t_{24} 2个时刻都能位列重要管道,其主要原因是该管道不但紧邻水源而且与系统中第三大用水节点123直接相连。若该管道断裂,则在 t_0 时刻首先影响节点123的用水,而后随着时间推移威胁全局节点用水。这也解释了管道125在 t_0 时刻对系统产生的影响要小于在 t_{24} 给系统产生的影响。

5 结论

研究基于灾害恢复力的概念和评价属性,以给水系统地震损失模型为研究路径,分析了城市给水系统地震恢复力的技术鲁棒性和组织鲁棒性。结果表明,干道的升级对系统技术鲁棒性和组织鲁棒性效果明显,且升级效果会随着震级的提高而越发显著。干道经由生铁管升级至钢管,可以减少地震引发的断裂和泄漏,提高抗震强度,进而表现为系统技术鲁棒性得到提高,管道抗震能力的提高又会进一步促进系统供水满意度提升,组织鲁棒性会随着技术鲁棒性的增强而提高。输水干道的重要程度不因震级的不同而产生差异,但是随着震后时间的推移,其重要性取决于管道所处的系统位置。在震后 t_0 时刻,位于系统中枢位置的管道显得重要。在震后 t_{24} 时刻,靠近水源的管道则显得尤为重要,一旦连接水源的管道断裂则严重威胁全局节点用水。仿真结果接近真实水平,为进一步评价给水系统地震恢复力提供参考借鉴。

参考文献:

- [1] Clinton W J. Executive Order 13010 on critical infrastructure protection [R]. Washington, DC: Government Printing Office; 1996.
- [2] 张灵,陈晓宏,千怀遂. 北江下游防洪保护区恢复力诊断[J]. 水利学报, 2011(9): 1129-1134.
- [3] Unisdr. Living with risk: A global review of disaster deduction initiatives[R]. ISDR Secretariat, Geneva, Switzerland, 2002.
- [4] Bruneau M, Chang S E, Eguchi R, et al. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities[J]. Earthquake Spectra, 2003, 19(4): 733-752.
- [5] Bruneau M, Reinhorn A M. Exploring the concept of seismic resilience for acute care facilities[J]. Earthquake Spectra 2007, 23(1): 41-62.
- [6] Chang S E, Shinozuka M. Measuring improvements in the disaster resilience of communities[J]. Earthquake Spectra 2004, 20(3): 739-755.
- [7] Miles S B, Chang S E. Modeling community recovery from earthquakes[J]. Earthquake Spectra, 2006, 22(2): 439-458.
- [8] Davidson R, Cagnan Z. Restoration modeling of lifeline systems [R]. MCEER Research Progress and Accomplishments; 2003-2004, MCEER-04-SP01, May 2004.
- [9] Cimellaro G P, Reinhorn A M, Bruneau M. Framework for analytical quantification of disaster resilience [J]. Engineering Structures, 32(2010): 3639-3649.
- [10] Klein R J T, Nicholls R J, Thomalla F. Resilience to natural hazards: how useful is this concept? [J]. Environmental Hazards, 2003, 5(1-2): 35-45.
- [11] Manyena S B. The concept of resilience revisited[J]. Disasters, 2006, 30(4): 433-450.
- [12] Shi P X. Seismic response modeling of water supply system[D]. Cornell University, Ithaca, NY, 2006.
- [13] Bruneau M, Reinhorn A. Overview of the resilience concept [C]. Proceedings of the 8th U. S. National Conf. on Earthquake Engineering, Earthquake Engineering Research Institute, April 18-22, 2006, San Francisco, California, USA, Paper No. 2040.
- [14] Wang C H, Blackmore J M. Resilience concepts for water resource systems[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2009, 35(6): 528-536.
- [15] Rossman L A. EPANET 2 Users Manual. National management research laboratory, office of research and development[M]. U. S: Environmental Protection Agency, Cincinnati, 2000.
- [16] Chang S E, Svekla W D, Shinozuka M. Linking infrastructure and urban economy: Simulation of water disruption impacts in earthquake[J]. Environment and Planning B; Planning and Design, 2002, 29(2): 281-301.
- [17] Giraffe U M. Cornell University, School of Civil & Environmental Engineering, Ithaca, NY, USA, 2008.
- [18] Chang S E. Infrastructure resilience to disasters[J]. Winter Issue of The Bridge on Frontiers of Engineering, 2009, 39(4): 36-42.
- [19] Toppak S, Taskin F, Kon A C. Prediction of earthquake damage to urban water distribution systems: a case study for Denizli, Turkey[J]. Bull Eng Geol Environ, 2009, 68(4): 499-510.

(编辑 侯湘)