

文章编号: 0253-3782(2004)02-0193-10

研究地震情况下生命线系统 相互作用的综合方法^{*}

姚保华^{1,2)} 谢礼立³⁾ 火恩杰¹⁾

1) 中国上海 200062 上海市地震局

2) 中国上海 200092 同济大学

3) 中国哈尔滨 150080 中国地震局工程力学研究所

摘要 分析了生命线系统相互作用的机理, 给出了系统相互作用的分类方法和分类结果, 并对各类生命线系统相互作用的研究方法进行了系统的总结和分析。对于功能型系统相互作用, 提出了一种综合性的研究方法。另外, 还给出了一个基于 WebGIS 的多生命线系统震后恢复辅助决策方法。同时, 对生命线系统相互作用的研究难点和应用前景进行了探讨。

关键词 生命线系统 相互作用 WebGIS

中图分类号: P315.9 **文献标识码:** A

引言

生命线系统相互作用是指在地震情况下, 一个生命线系统与同一区域其它生命线系统之间所存在的相互影响。也就是说, 一个生命线系统的可靠性, 除了与系统自身的抗震性能有关外, 还取决于对该系统起支持作用的或物理上与该系统相邻布设的其它生命线系统的抗震性能。例如, 供水系统的正常运转离不开供电系统的支持, 交通系统中桥梁的坍塌将导致布设于桥梁之上的通信电缆的破坏。显然, 生命线系统之间的相互作用将直接影响到生命线系统地震灾害损失的预测、震后损失的评估、抗震加固计划重点的选取和生命线工程系统抗震设防标准的制定、震后应急工作的部署和次生灾害控制的策略以及救灾资源的合理分配等等。

从 1971 年圣费南多地震开始, 生命线工程系统抗震问题得到了各国学者的极大关注, 成为大中城市防震减灾研究的重要课题之一, 并取得了比较丰硕的研究成果。然而, 这些研究一般只侧重于解决单一生命线系统的震后功能预测、系统抗震可靠度等问题, 对于不同系统之间的相互影响问题则考虑不多。从 20 世纪 80 年代中期开始, 以日本和美国学者为代表, 开始了对生命线系统相互作用的探索和研究。日本土木学会关西分会于 1991 年成立了“生命线系统相互作用研究和城市地震信息管理系统开发委员会”, 以进一步对此问题进行专门研究(Nojima, Kameda, 1991)。

随着我国国民经济建设的飞速发展, 并考虑到近几年国内外城市破坏性地震的频繁发

* 上海市科技发展基金(01251203)资助项目。

2002-11-06 收到初稿, 2003-02-14 收到修改稿, 2003-02-25 决定采用。

生, 对生命线系统的深入研究很具有现实意义. 研究系统相互作用情况下的生命线系统可靠性评价和震后恢复策略, 是生命线系统未来的重要方向.

1 生命线系统相互作用机理

事实上, 生命线系统的相互作用经常可以在地震中观察到, 尤其是在大地震中. 例如: 1989年Loma Prieta 6.9级地震(美国地震工程研究会, 1990)、1995年阪神7.2级地震(中国赴日地震考察团, 1995)、1976年唐山7.8级地震(刘恢先, 1986)和1999年台湾集集7.6级地震(Lee, Loh, 1999)等. 这些现代城市地震灾害警示着人们, 生命线系统之间的相互作用与单一生命线系统的功能一样具有同等的重要性.

生命线系统之间的相互作用可以用表格的形式定性地加以汇总归纳(Kameda, Nojima, 1992), 如表1所示. 由表1可见, 供电和通讯的功能失效严重地降低了其它生命线系统的

表1 生命线系统相互作用震害特性

影响系统	被影响系统				
	供电系统	供气系统	供水系统	交通系统	通信系统
供电系统	*	<ul style="list-style-type: none"> ○ 气源厂、球罐站、压力调节装置失效 ○ 中心控制系统失效 ○ 照明中断 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 水厂、泵站的电动机失效 ○ 中心控制系统失效 ○ 照明中断 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 交通信号无法使用 ○ 地铁、电车停驶 ○ 中心控制系统失效 ○ 照明中断 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 通信中心功能失效 ○ 在线服务中断 ○ 数据丢失 ○ 中心控制系统失效 ○ 照明中断
供气系统	□ 作为替换物的过量使用(如:供热)	*	<ul style="list-style-type: none"> △ 修复工作复杂化 △ 抢占修复机械 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 由于输气管线破坏而隔离造成道路堵塞 	
供水系统	<ul style="list-style-type: none"> ● 水淹地面管线 ○ 独立的电厂缺少冷却剂 	<ul style="list-style-type: none"> △ 修复工作复杂化 △ 抢占修复机械 ○ 冷却剂短缺 ○ 独立的电厂缺少冷却剂 	*	<ul style="list-style-type: none"> ○ 由于输水管线破坏造成道路堵塞 ● 水漫路面 ○ 独立的电厂缺少冷却剂 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 电话交换机等缺少冷却剂 ● 水淹地面管线 ● 绝缘失效 ○ 独立的电厂缺少冷却剂
交通系统	<ul style="list-style-type: none"> △ 电瓶车不能使用 △ 延滞修复(如:组织人员、材料、机械等) ○ 材料、燃料无法输送 ○ 通勤中断 	<ul style="list-style-type: none"> △ 延滞修复(如:组织人员、材料、机械等) ○ 材料、燃料无法输送 ○ 通勤中断 	<ul style="list-style-type: none"> △ 洒水车不能用 △ 延滞修复(如:组织人员、材料、机械等) ○ 材料、燃料无法输送 ○ 通勤中断 	*	<ul style="list-style-type: none"> □ 电话超负荷使用
通信系统	<ul style="list-style-type: none"> ○ 中心控制系统失效 △ 修复工作通讯不便(如:组织人员、答复用户报告损失、宣传工作、与管理部门的联系) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 中心控制系统失效 △ 修复工作通讯不便(如:组织人员、答复用户报告损失、宣传工作、与管理部门的联系) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 中心控制系统失效 △ 修复工作通讯不便(如:组织人员、答复用户报告损失、宣传工作、与管理部门的联系) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 交通堵塞 ○ 中心控制系统失效 △ 修复工作通讯不便(如:组织人员、答复用户报告损失、宣传工作、与管理部门的联系) 	*

注: ○ 功能性灾害的蔓延; ● 物理灾害的蔓延; △ 阻碍修复; □ 对替代系统的影响; * 影响系统与被影响系统为同一系统.

服务能力, 也对震后恢复工作产生阻碍作用; 交通不畅也使其它生命线系统的机动能力降低, 而这对恢复工作是关键性的因素; 相反, 在对沿路布置的地下设备(如供水管道、供气管线等)进行修复时, 又反过来造成路面交通状况的恶化, 甚至交通完全中断.

2 生命线系统相互作用的分类与对策

各个生命线系统之间的相互作用是纵横交错、非常复杂的. 为了从中理顺线索、抓住重点, 首先必须进行科学的分类, 然后才能根据各个类型的特点分门别类地加以研究和分析. 本研究通过对国内外实际震害调查的总结, 并综合国际上不同学者的分类方法(Nojima, Kameda, 1991; Charles, Scawthorn, 1993), 将生命线系统的相互作用划分为以下 6 种类型:

类型 A. 功能型相互作用, 即两系统功能上的依存造成一个系统的失效使得另一系统也同样无法正常发挥作用. 典型的例子就是, 供电中断会造成供水系统的服务能力降低. 其地震对策可采取增加生命线网络的冗余度和添置必要的备用设备, 并保证备用设备有较高的抗震性能等方法.

类型 B. 布设型相互作用, 即一个系统的失效对相邻布设的另一个系统产生影响或直接造成损害. 例如, 交通系统中的桥梁地震时坍塌, 会使得沿桥布设的管线系统(如通讯电缆)也随之被破坏; 来自邻近的破裂水管中的水会改变通信光纤的光学特性, 使其传输性能下降. 减少该类型相互作用影响, 共同沟(common duct)不失为一种理想的布设方法. 因为专门设计的共同沟的抗震性能较高, 并且各种生命线系统管线均在共同沟内部进行了科学的设计和安置.

类型 C. 替换型相互作用, 即一个系统的失效造成对可替换系统的过量需求. 例如, 供气系统中断供气, 将使得作为可替换能源的电力消耗明显增加. 有效的应急行动和增加网络冗余度是较好的地震对策措施. 对于遭受震害而使其功能降低或失效的系统进行及时的修复, 可以减轻或避免对可替换系统的需求.

类型 D. 恢复型相互作用, 即震后恢复过程中有关的生命线系统恢复程序计划、修复进度安排方面的冲突. 例如, 同一路段的埋地管线之间(供水-供气、供电-供水等)在震后修复过程中如果各自为战, 在彼此之间可能产生一定的干扰或牵制作用. 解决办法是制定一个科学合理的最优恢复计划.

类型 E. 递增型相互作用, 即起始阶段的问题递增式地对一个生命线系统产生影响. 例如, 随着地震中火灾规模的增加, 越来越多的房屋被烧塌, 水管破裂部位也越来越多, 供水压力下降也就越来越明显, 这样进一步削弱了供水能力, 从而使火势越来越大, 大火中的地面交通状况也就越来越糟. 该类相互作用对震后应急效率提出了更高的要求.

类型 F. 广义相互作用, 即一个生命线系统内部元件(如: 变电站内相连的电子设备)之间也可能存在相互作用(Der Kiureghian *et al*, 1999). 另外, 诸如宿主结构物或固定支撑物之类的辅助设施生命线与主生命线之间也存在有相互作用的问题(Felix, Jeremy, 1995), 如: 通讯系统的发展目前已经达到关键设备不太可能发生直接地震破坏的地步, 其破坏大多是由控制中心的房屋和通讯设备的固定支撑结构的破坏所引起. 为减少该类相互影响, 在制定抗震设防标准时, 应对辅助设施生命线部分给予足够的重视, 同时对已有结构物和设备支撑结构进行抗震鉴定和加固.

3 生命线系统相互作用的研究方法

3.1 功能型相互作用的研究

Hoshiya 等(1984)以及 Hoshiya 和 Ohno(1987)首次对生命线系统相互作用进行了研究, 他们以草图的形式对震害影响模型进行了描述.

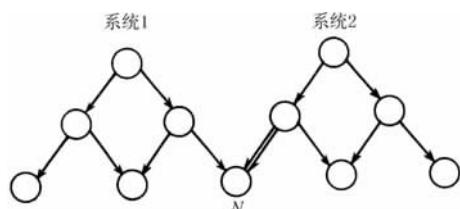


图 1 功能性相互作用网络系统

Nojima 和 Kameda(1991)以一个综合性的表格形式对生命线震害相互作用问题进行了概括(表 1), 并基于生命线网络系统地震风险概率模型, 将系统相互作用问题定量地利用一个称为交叉冲击系数的单一参数进行计算. 图 1 所示的两个生命线网络系统, 如果系统 1 本身在供给节点与 N 节点之间出现故障(称为事件 E_1)或者系统 2 在 N 节点处失效(称为事件 E_2), 则系统 1 的 N 节点功能就会出现异常(称为事件 E_N). 发生事件 E_N 的概率为: $P(E_N) = P(E_1) + [1 - P(E_1)] \times P(E_2) \times a_{2N}$. 交叉冲击系数 a_{2N} 反映了特定系统的属性. 例如: 节点 N 对系统 2 的功能依存、防灾准备情况(如备用设备)等. 在使用概率方法计算交叉冲击系数时采用的是故障树分析方法.

Charles 和 Scawthorn(1993)在表 1 的基础上, 提出了以矩阵形式进行功能型相互作用定量分析的设想. 即: $D_f = LD_i$. 式中, D_f 为考虑相互作用时, 生命线系统最终功能状态的标量; D_i 为不考虑相互作用时, 生命线系统起始功能状态的标量; L 为生命线系统相互作用量化矩阵.

Shinozuka 和 Tanaka(1996)则利用地理信息系统(GIS)技术, 对正常情况和受震害情况下的供水系统进行连通性分析和流分析, 在 Monte Carlo 模拟中结合各变电站对供水系统泵站的服务范围, 将供水、供电系统间的相互作用问题考虑了进来, 从而提出了一个设定地震下区域性的供水、供电系统间相互作用的分析方法. 并利用 GIS 技术, 形象地表现出了相互作用的影响效果(如: 各节点处的水头和流速的变化).

温瑞智等(2000)利用 GIS 软件 Arc/Info 中的网络分析模块(Network), 在大庆油田防震减灾信息系统的研究中, 对电力系统与输油系统服务、电力系统与供水系统等两两系统之间的功能影响进行了探讨.

在上述分析方法之中, 各种分析方法都存在有一定的局限性. Hoshiya 和 Ohno(1987)的草图式的图表震害关联模型过于简单、粗糙; Nojima 和 Kameda(1991)侧重于相互作用机理和模型的分析; Charles 和 Scawthorn(1993)只是提出了相互作用矩阵的概念, 并没有给出矩阵中各元素的确定方法; 温瑞智等(2000)仅是在简单化的模型上进行了探讨, 并且网络源点(如电厂等)不受地震破坏的假设也并不完全符合实际情况. Shinozuka 和 Tanaka(1996)的研究成果虽利用了多年来对当地生命线系统性能所进行的多学科的综合研究成果和非常详细的城市基础数据, 但其分析方法中也没有考虑供水泵站中备用电源的作用等.

本研究集各方法之所长, 提出一种综合性的功能型相互作用研究方法. 图 2 为方法的框图(以供水系统和供电系统为例). 例如, 在已有详细数据库的基础上, 首先根据连通性分析和流分析等方法, 可分析出地震时供水系统和供电系统的功能状态(赵成刚, 冯启民, 1994; 高惠瑛, 2000), 然后根据交叉冲击系数的计算方法, 得出两系统间的相互影响. 其

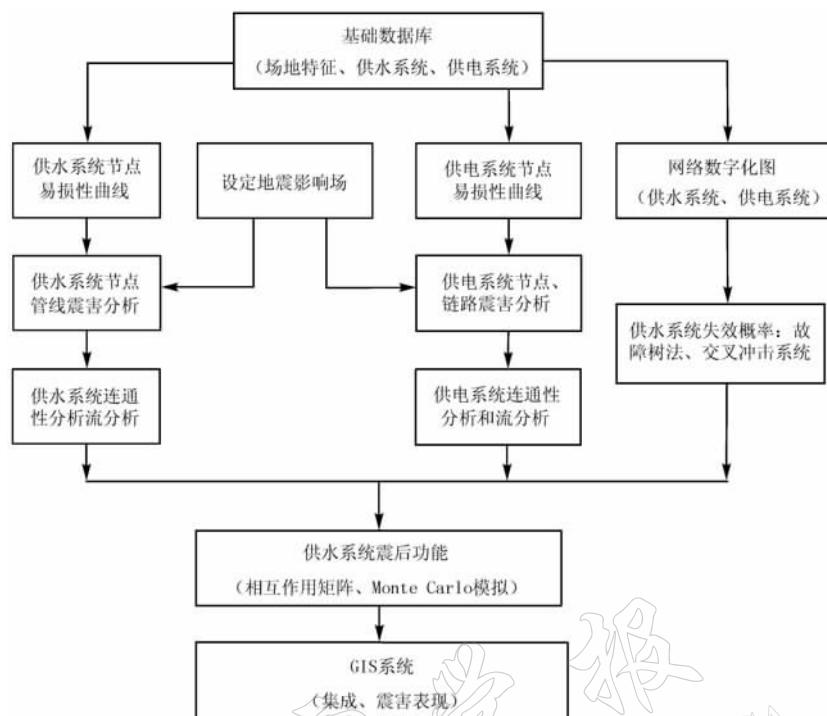


图 2 功能型相互作用的分配框图

结果可为下列形式:

$$\begin{bmatrix} 0.83 \\ 0.20 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.1 \\ 0.0 & 1.0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.9 \\ 0.2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)表明, 供电中断将明显地对供水系统的功能产生影响. 式中元素含义为:

1) 若不考虑系统之间相互影响, 震后供水系统维持了 90% 的功能, 供电系统维持了 20% 的功能; 考虑相互影响之后, 供水系统由于受供电系统部分功能失效的影响, 则所维持的功能只有 83%. 由于供水系统对供电系统基本上没有影响, 故供电功能仍为 20%.

2) 此相互作用矩阵 L 表明, 90% 的供水能力是由供水系统本身的功能所决定的(如重力流), 10% 与供电有关(如水泵用电).

同理, 也可分析和表达多个系统之间的相互作用. 区域性分析时, 可充分利用 GIS 软件的功能, 最终分析成果可在 GIS 中进行集成和表现.

3.2 恢复型相互作用的研究

Zhang (1992) 将生命线系统的恢复过程建模为马尔可夫过程, 即认为某个生命线系统对其他生命线系统恢复的影响程度是该生命线系统临界状态和当前所预计状态的函数, 并通过计算机仿真对该方法的可行性进行了验证. 结果表明, 生命线系统相互作用对城市重建速度和重建成本都有非常明显的不利影响.

苏幼坡和刘瑞兴(2001)通过影响度分析对生命线系统相互作用的影响程度进行了评价, 依据影响度序, 提出了各生命线震后恢复的时序.

Yasunori 和 Kimiro(2000)从时间和空间两个方面, 对 1995 年阪神地震震后实际恢复数据进行了详细分析. 结果表明, 在生命线恢复过程中只依靠单一生命线系统有很多问题

难以解决,而多个生命线系统的集成方法对于减少震害负面影响是非常重要的.

有关在生命线系统震后恢复工作中,如何将现代信息技术——WebGIS 应用于系统相互作用的研究,后面将专门介绍.

3.3 其它类型相互作用的研究

布设型相互作用. Felix(1998)在对通信系统震害影响的研究过程中,开发了一个基于 GIS 的系统建模工具,以便比较容易地识别和评价相邻布设系统之间的相互影响问题. 美国 INTECH 公司在加里福利亚州 Cajon Pass 区域,对相距不远而布设在一起的各种生命线系统进行了详细的研究. 结果揭示布设型相互作用使各生命线系统更具易损性,震后的恢复难度更大,恢复时间大大延长.

广义型相互作用. Der Kiureghian 等(1999)对变电站内部的电气设备(如变压器、断路器、电容组等)之间的相互影响问题进行了研究. 他们将每个设备均建模为具有分布质量、阻尼和刚度特性的线性单自由度系统,然后通过被称为反应率的参数,对该相互作用问题进行了定量评价. Felix 和 Jeremy(1995)将安装通信设备的建筑物和其它支持结构称之为“设施生命线”,并与其它生命线系统一道,综合分析了相互作用问题.

递增型相互作用和替换型相互作用. 由于影响机理复杂,研究成果很少.

由上可见,生命线系统相互作用的研究,经历了机理分析、模型建立、GIS 应用等几个发展阶段. 目前,随着现代信息技术的发展,应用 GIS 技术、从区域整体上进行系统分析,已经成为一个必然的选择.

4 生命线系统相互作用与 WebGIS

如前所述,对于恢复型生命线系统相互作用的问题,不同的学者从不同的角度对其进行研究. 但受当时技术条件的限制,仍有不少问题无法得到完满解决.

Yasunori 和 Kimiro(2000)在对阪神地震中生命线系统实际震后恢复过程进行分析后认为,应该重视对各生命线系统恢复时序的研究,综合考虑系统之间的相互影响,以最终获得所有生命线系统恢复过程的“总体”最佳. 其中,最重要的是收集和共享各生命线系统受损点的位置和恢复行动随时间的变化情况等有关信息. 鉴于影响因素非常之多,并且随时空而变,因此,强烈建议研制一个综合性的生命线系统相互之间密切协作的系统体系,使得各系统的修复信息可以及时地相互共享,从而使各生命线系统均制定出有效的恢复时序.

Hang(2001)在编制震后生命线系统安全性评估与修复指导手册时认识到,如果行政管理部门能掌握到所有生命线系统及其相互影响的完整信息,那么,他们就能够作出正确的决策. 因此,建议创建一个与综合防灾系统相结合的生命线灾害信息管理专家系统,以正确地对生命线震害变化趋势进行控制,并继而迅速地推动各类灾害恢复工作的展开,从而加强整体防灾功能.

但是,他们对于该类系统体系如何研制,利用什么工具、采取何种方式实现等问题,均给不出任何相应答案. 而目前 Internet 网络的飞速发展以及 WebGIS 软件的开发应用,为城市防震减灾工作提供了一个非常理想的支撑条件(姚保华等, 2000). 本研究提出了一个综合性的、基于 WebGIS 的多生命线系统震后恢复辅助决策方法.

下面以图 3 中的供水管线震后恢复工作为例加以说明. 该图为各生命线系统(包括交

通系统、供水系统、电力系统、输气系统)的地图集成结果,各系统以不同线型表示。地震后,这些生命线系统或重或轻地受到了不同程度的影响,现计划对供水系统中的第65号管线(箭头所指)进行修复。分析该管线所处环境,除供水系统本身因素外,修复时可能存在以下几个方面的问题:①供电系统的影响。变电站的破坏将影响供水修复工程机械的正常使用;②交通系统的影响。若道路或桥梁遭震害使交通中断,则供水维修机械无法前往待修点。另外,交通系统与供水系统之间也可能存在递增型相互作用;③输气系统的影响。与待修管线紧邻埋设输气管线若遭受震害而引发火灾或爆炸,会使供水修复工具的使用受到限制,人身安全受到威胁。

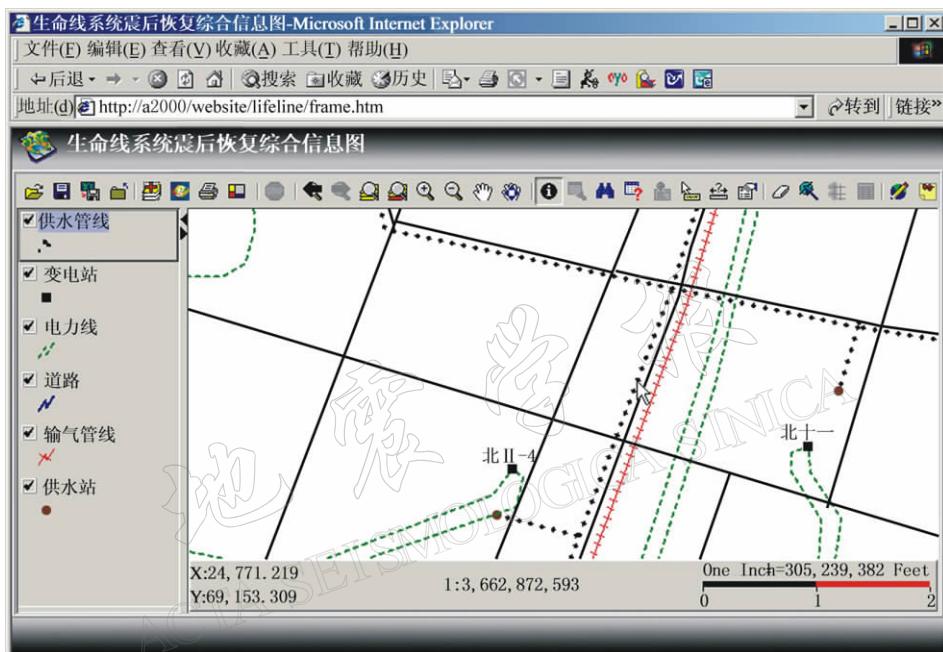


图3 生命线系统震后恢复综合信息图

所以,为了有效地开展第65号供水管线的恢复工作,一方面做好供水管线本身维修的准备工作,另一方面,也必须对附近的电力线、变电站、输气管线、道路交通等的震害情况和当前的性能状况进行比较详细的了解。有及时的信息交流和共享为基础,决策人员则可有根据地制定出比较合理的震后恢复策略和恢复时序。为此目的,我们以ESRI公司的ArcIMS 3.1为WebGIS开发平台,以Custom Java Viwer为基础,选择胖客户端、瘦服务器的模式,开发了一套生命线综合信息管理系统。利用该系统对多个生命线系统信息进行分布式集成和分析处理的大致步骤如下:

- 1) 在各个生命线部门网站上扩展ArcIMS功能,将本部门的震后恢复过程和修复信息以电子地图的形式进行发布,并尽可能快地进行数据更新。
- 2) 任何一个生命线抢修部门,均可使用通用浏览器,通过域名或网址访问其它生命线系统网站,视需要分布式地调用其它网站中的有关电子地图,并在现场进行各系统的数据集成,如图4所示。
- 3) 在所集成的地图上进行有关信息的查询和分析(如:实时交通状况查询、缓冲区分

析、任意两点距离量测等);然后,为生命线系统震后恢复工作提供进一步的辅助决策意见.例如,变电站的功能状况决定了相邻管线维修工作的安排与否;道路通行能力可为抢修力量的通行路径选择提供参考.

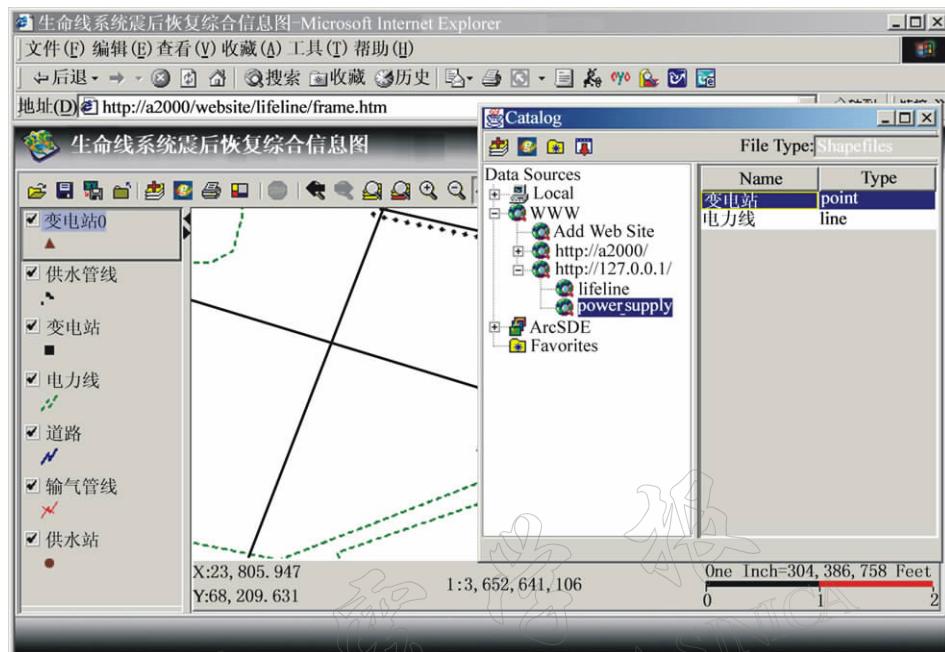


图4 与其它生命线系统进行分布式集成

4) 用户还可在地图上, 可视性地进行信息交流和信息反馈. 例如, 对所查到的信息提出疑义或在地图上对他人的疑义给出回答.

可见, 通过上述方法, 可以实现各生命线系统的信息共享, 从而能够综合考虑系统之间的影响, 制定比较理想的恢复时序, 有助于获得所有生命线系统恢复过程的“总体”最佳. 另外, 根据生命线系统震后恢复实践, 下列经验也可同时加以借鉴:

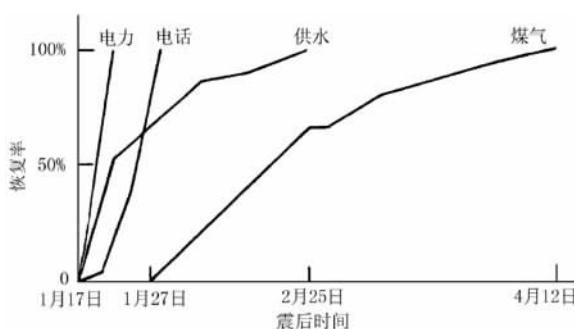


图5 阪神地震中的生命线系统恢复曲线

修复的必要性取决于该生命线系统的震害程度、与此管线有关的用户数量等. 修复的容易性取决于线路中破损点的多少和其它有关生命线系统的干扰程度.

1) 鉴于影响震后恢复因素的复杂程度, 分析时应考虑主要影响因素. 例如, 可给予供电系统较高的优先权, 因供电系统恢复较快, 电力供应恢复正常可保证所有其它系统恢复工作的动力供给. 从阪神地震中生命线系统恢复曲线(图5)可以看出, 电力在地震当天即开始部分恢复, 恢复效率最高.

2) 管线修理的优先级确定也应考虑到修复的必要性和修复的容易性.

5 结论与建议

综上所述, 可以得出以下结论:

1) 错综复杂的生命线系统相互作用可划分为 6 种类型. 对其进行科学分类, 有利于理顺线索、抓住重点. 不同类型的生命线系统相互作用, 可以采取不同的分析方法进行研究和解决.

2) 应用 WebGIS 技术, 可以很好地解决各生命线系统之间的信息准实时共享、查询和分析等问题, 为研究震后恢复过程中生命线系统相互影响, 制定合理的恢复策略提供了基础技术条件.

3) 目前国内外对生命线系统相互作用的研究显现出以下几个趋势: ① 重视对实际生命线系统震害经验, 从时间和空间的全方位角度总结和分析生命线系统相互作用问题; ② GIS 技术不断得到应用. 通过 GIS 技术的系统化管理, 使系统间的相互影响可以较容易地得以识别, 并可进行多种有效分析; ③ 单个生命线系统的震后恢复与所有系统综合恢复的全局优化问题越来越受到重视.

4) 生命线系统相互作用研究仍然受到一些因素的制约. 例如, 收集到所研究区域内各生命线系统的符合相互作用分析所需详细程度的基础资料, 尚存在相当的难度; 缺少明确的生命线系统组成部件的易损性模型等.

根据我国目前的生命线系统研究现状, 我们建议可以参照美国在 Memphis 市的研究经验, 选择一个比较理想的城市或地区作为试验场, 集中地震研究部门、高等学校、各生命线系统管理部门的有关专业人员, 联合研究、重点攻关, 对生命线问题(包括系统间相互作用问题)进行多方面、多学科的综合研究. 也只有这样才会使研究真正有所成效, 否则, 过于简单化的研究或局限条件太多的分析都不能够全面地揭示系统之间相互作用的机理和相互影响的强度, 其研究成果的使用价值也就相当有限, 在此基础上所进行的决策措施也都是明显片面的.

参 考 文 献

- 高惠瑛. 2000. 基于 GIS 供水系统地震反应分析[D]: [学位论文]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 49~67
- 刘恢先. 1986. 唐山大地震震害(三)[M]. 北京: 地震出版社, 567~576
- 美国地震工程研究会著. 1990; 中国石油化工总公司抗震办译. 1991. 洛马普里埃塔地震考察[M]. 北京: 地震出版社, 51~80
- 苏幼坡, 刘瑞兴. 2001. 城市生命线震害的相互影响与震后恢复的时序分析[J]. 工程抗震, (2): 27~30
- 温瑞智, 陶夏新, 谢礼立. 2000. 生命线系统耦联[J]. 自然灾害学报, 8(2): 15~20
- 姚保华, 陶夏新, 温瑞智, 等. 2000. WebGIS 的发展与防震减灾信息系统[J]. 自然灾害学报, 9(3): 64~70
- 赵成刚, 冯启民. 1994. 生命线地震工程[M]. 北京: 地震出版社, 7~23
- 中国赴日地震考察团. 1995. 日本阪神大地震考察[M]. 北京: 地震出版社, 51~58
- Charles S, Scawthorn S E. 1993. Lifeline interaction and post-earthquake functionality: case study for fire following earthquake[A]. In: Kawashima K, Sugita H eds. *Proceedings of 5th US-Japan Workshop on Earthquake Disaster Prevention for Lifeline System*[C]. Tsukuba Science City, Japan: Public Works Research Institute, 441~450
- Der Kiureghian A, Sackman J L, Hong K J. 1999. Seismic interaction in connected electrical substation equipment[J]. *PEER Center News*, 2(4): 1~4
- Felix S W. 1998. Concentration, system modeling and telecommunications performance[A]. In: Schiff, Anshel J eds.

- Proc of the Workshop on Performance Criteria for Communication Services Under Earthquake Conditions, MCEER-98-0008[C].* Buffalo, N Y: Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, 53~68
- Felix S W, Jeremy I. 1995. Effects of lifeline interaction on seismic performance of communications networks[A]. In: O' Rourke, Michael J eds. *Proc of 4 th U S Conference on Lifeline Earthquake Engineering , TCLEE Monograph No. 6[C].* New York: American Society of Civil Engineers, 557~564
- Lee G C, Loh C H. 1999. *Preliminary Report from Mceer-Ncree Workshop on the 921 Taiwan Earthquake[M].* Buffalo, N Y: Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, 1~14
- Hang T H. 2001. Guidelines and procedure for post earthquake safety evaluation and retrofitting of underground lifeline system[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Seismology*, 3(1): 43~50
- Hoshiya M, Ohno H. 1987. Inter-chain effect of lifelines on their seismic performance(in Japanese) [J]. *Proc of JSCE* No. 386: I-8: 387~396
- Hoshiya M, Ohno H, Yamamoto K. 1984. A seismic damage influence model between lifeline systems (in Japanese) [J]. *Proc of JSCE*, No. 374, I-8: 323~331
- Kameda H, Nojima N. 1992. Developments of lifeline earthquake engineering[A]. In: Kameda H ed. *Proc of Workshop on China-Japan Joint Research for Earthquake Disaster Prediction and Mitigation[C].* 170~186
- Nojima N, Kameda H. 1991. Cross-impact analysis for lifeline interaction[A]. In: Cassaro M A ed. *Lifeline Earthquake Engineering, TCLEE Monograph 4[C].* Los Angeles: American Society of Civil Engineers, 629~638
- Shinozuka M, Tanaka S. 1996. Effects of lifeline interaction under seismic conditions[A]. In: *Proc of 11 th WCEE[C].* Pergamon: Elsevier Science Ltd, Paper No. 348
- Yasunori H, Kimiro M. 2000. Optimum restoration model considering interactions among lifeline systems-interactions among restoration activities of lifeline utilities[A]. In: computer file. *Proc of 12 th WCEE[C].* Upper Hutt, New Zealand: New Zealand Society for Earthquake Engineering, Paper No. 1 742
- Zhang R H. 1992. Lifeline interaction and post-earthquake urban system reconstruction[A]. In: Eshghi S ed. *Proc of 10 th WCEE[C].* Rotterdam: A A Balkema Publishers, 5 475~5 480

A COMPREHENSIVE STUDY METHOD FOR LIFELINE SYSTEM INTERACTION UNDER SEISMIC CONDITIONS

Yao Baohua^{1,2)} Xie Lili³⁾ Huo Enjie¹⁾

1) *Earthquake Administration of Shanghai, Shanghai 200062, China*

2) *Tongji University, Shanghai 200092, China*

3) *Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China*

Abstract: The mechanism of lifeline system interaction is analyzed and the method and its corresponding result for categorizing the lifeline system in terms of interaction are presented. Various methods for the different kind of interaction are reviewed in this paper. For the function interaction of the lifeline system, an all-round study method is recommended. A WebGIS based aided decision-making method for the post-earthquake restoration of multi-lifeline system is also presented. Meanwhile, some key-points for lifeline system interaction are discussed.

Key words: lifeline system; interaction; WebGIS