第 I 部門

門 地震時における上水一電力システム間のライフライン相互作用について

京都大学工学部	学生員	○ 矢野 裕介
京都大学大学院工学研究科	正会員	Charles Scawthorn
京都大学大学院工学研究科	正会員	清野 純史

1. 研究の背景と目的

近年都市化が進み、人口及び私財・公共財の蓄積、都市 空間の高密度利用、ライフライン機能への依存、都市機能 の相互依存が進行した。その中で1995年兵庫県南部地震、 2004年新潟中越地震においては、各ライフラインシステム 間で災害が複合的に連鎖拡大し時空間的に波及するという、 ライフライン相互作用の影響が強く現れた。さらにこの分 野の研究は時間・空間的に複雑に絡み合った機構であるた めに、手法すら確立しているとは言い難いのが現状である。

本研究は、ライフライン内部の各設備間に働く相互作用 に着目し、その上でネットワーク全体の相互作用について 考えるという手法を提案するものである。また上水-電力 システム間の相互作用を取り上げており、例として京都市、 さらに自由に設定した架空の都市についての解析を行った。

2. 解析モデル及び解析手法

本研究では各システムのノードについて、単独で復旧を しているとしたときのノード(独立ノード)と、他ノード からの作用による影響を受けた場合のノード(依存ノード) とに形式上分けて考えている(図1)。

まず一つの独立ノードが機能被害を受けた時の復旧曲線 を表す式として式1を用いる。また各ノードの平常時の機能 状態を1.0とした時の、各時刻における機能状態を Capacity としている。

$$C_i(t) = 1 - D_0 exp\left\{-k(\frac{t}{t_d})\right\}$$
(1)

ここに、 $C_i(t)$ はノード i の時刻 t における Capacity、 D_0 は初期被害程度、k は補正係数、 t_d は復旧所要時間(日)を表す。

次に依存ノードの復旧について、本研究では各時刻をさ な循環的なネットワークに らに数ステップに分けて算出する。図1について、時刻0 は大きくなると思われる。

No de 3 No de 2

図 1: 本研究におけるネットワークモデル図

におけるノード I1 の Capacity 初期値を $C_{I1[0]}$ の様に表した時、これを時刻 1 のステップ 0 における値とする。この時依存ノード I1 のステップ 1 における Capacity $C_{I1[1]}$ を式 (2) によって算出する。

$$C_{I1[1]} = \alpha_{[I1-W1]}C_{W1[0]} + \alpha_{[I1-I1]}C_{I1[0]} + \alpha_{[I1-W2]}C_{W2[0]} + \alpha_{[I1-I2]}C_{I2[0]} + \alpha_{[I1-E1]}C_{E1[0]} + \alpha_{[I1-I3]}C_{I3[0]}$$
(2)

ここで $\alpha_{[I1-W1]}$ 、・・・はノード I1 がそれぞれのノードに依存している割合であり、各 α 値の総和は1である。各ノード間の依存割合、及び各ノードの初期値は図2に示した通りである。各独立ノードの初期値はそれぞれの復旧曲線から求めるほか、各依存ノードの初期値に関しては0としている。

同様に各ノードについての計算を考えると、図2の各依 存割合αを表した行列と初期値C_[0]の行列の積がステップ 1における各ノードの値である。さらにαの行列とステップ 1の値の行列の積を同様に計算することでステップ2の値を 求める。ここで本研究では各ノードについて、独立ノード の値と、計算で得られた依存ノードの値のうち小さい方の 値をそのステップの依存ノードの値とする。同様の計算を 繰り返し、各ノードの値が変動しなくなった時、その値を 時刻1における値とする。さらにこの値を時刻2のステッ プ0における値として同様の計算を繰り返し、各依存ノー ドの復旧曲線を得る。

このステップ毎の計算により、他ノードからの作用によ る影響を受けたノードによる作用が、その影響により変化 するというフィードバックを考慮している。この例のよう な循環的なネットワークにおいて、フィードバックの影響 は大きくなると思われる。

	W1	11	W 2	12	E1	13	C [0]
W 1	1	0	0	0	0	0	0.5
1	0.8	0	0	0	0	0.2	0
W 2	0	0	1	0	0	0	0.6
2	0	0.5	0.5	0	0	0	0
E 1	0	0	0	0	1	0	0.2
3	0	0	0	0.1	0.9	0	0

図 2: 各ノード間の依存関係及び初期値

Step 0 Step 1 Step 2 Step 3								
	C [0]	C [1]	C[2]	C[3]		C[f]		
W 1	0.5	0.5	0.5	0.5		0.5		
1	0	0.4	0.44	0.44		0.45		
W 2	0.6	0.6	0.6	0.6		0.6		
2	0	0.3	0.5	0.52		0.52		
E 1	0.2	0.2	0.2	0.2		0.2		
3	0	0.18	0.2	0.2		0.2		

図 3: 時刻1における各ステップの計算結果

Yusuke Yano, Charles Scawthorn and Junji Kiyono

3. 解析結果

今までに述べた手法により、上水道・電力システムに関 して、京都市及び仮想都市について解析を行った。

Case1 京都市

図4は京都市の上水道経路を示したものである。

独立ノードの復旧曲線に関しては過去の大地震における データ¹⁾²⁾、及び既往の京都市地震被害想定³⁾を参考に作成 した。各ノード間の依存関係は京都市上下水道局への調査 により決定した。これらの値を元に計算し得られた依存ノ ード及び独立ノードの復旧曲線の一部を図5に示す。

この結果より、地震被害が大きかった松ヶ崎浄水場(W7) などでは、独立ノードと依存ノードの復旧曲線がほぼ一致 する形となることが分かる。また地震被害のほとんどない 新山科浄水場(W4)では相互作用の影響が顕著である。さ らに上水道システムで最も相互作用の影響が大きく見られ たのはネットワークの末端である墨染(W11)である。し かし今回の場合隣接する夷川(W10)の地震被害が大きい 為に、相互作用の影響ではなく、夷川そのものの被害から の影響が大きいと思われる。

今回は上水道システムが受ける影響のみを評価したこと になるが、全体として上水道システムから受ける影響は復 旧所要期間の増加が大きく、電力システムからの影響は初 期被害の拡大が大きく見られた。

Case2 仮想都市

図6は仮想都市のネットワーク図である。また計算結果 の一部を図7に示した。

京都市の計算例ではネットワークが単純なため、得られ た復旧曲線が独立ノードの復旧曲線とあまり変化の無いも のとなった。そのため今回のケースでは依存関係を複雑に 設定して解析した。また、図に示した震源からの距離に応

じて独立ノードの初期被害、復旧所要日数が異なるように 設定した。

結果として、京都市のケースに比べて相互作用の影響が 大きくなっているのが分かる。特にノード 10、12、20、21 においては依存対象が循環しているため、各ステップ毎に 相互作用の影響が重なっており、一方向的な依存関係を有 するノードに比べて相互作用の影響が大きい。またノード 25 においては震源から遠い為に地震被害が小さく、また依 存関係を有するノードも地震被害が小さいが、相互作用の 伝播により初期被害、復旧日数ともに影響が見られる。

4. 結論及び今後の研究

各独立ノードの復旧曲線及びノード間の依存関係の数値 を前提とした計算手法である為に、それらの精確な算出が 必要である。特に独立ノードの復旧については、実際には大 地震においては相互作用の影響は無視できないものなので、 算出は困難であると思われる。また今回のケースでは二シ ステム間の相互作用のみ取り上げているが、地震時には多 数のシステム間で様々な種類、程度の影響が大きく見られ る。これを考慮した解析が必要である。さらにその解析を 参考として、復旧最適計画を立てることが望まれる。

参考文献

1) 阪神・淡路大震災の記録. 消防庁,1996.

2) Charles Scawthorn, Masakatsu Miyajima, Yusuke Ono, Junji Kiyono, Masanori Hamada. Lifeline Aspects of The 2004 Niigata Ken Chuetsu, Japan, Earthquake. Earthquake Spectra .Volume 22,No.S1,pp.S89-S110.

3) 京都市地域防災計画. 京都市消防局:

http://www.city.kyoto.jp/shobo/frame_bousaikei.html, 参照



図 4: 京都市の上水道経路図



図 6: 仮想都市のネットワー ク図



図 5: Case1 の復旧曲線



図 7: Case2 の復旧曲線

(d) ノード 20(E8)

(c) ノード 16(E4)

idependent (6)

fipede