

ISM, FSMによるライフラインの地震被害波及過程の構造同定

武蔵工業大学 工学部 星谷 勝
産業能率大学 地域科学研究所 ○大野 春雄
武蔵工業大学 大学院 山本 欣弥

1. はじめに

近年、都市の巨大化とともに、都市機能の中核をなすライフライン系システムも巨大化、複雑化をまねてきている。もし、地震等により、ライフライン系システムの機能が停止する事になれば、それは都市の機能の停止を意味しており、住民に与える影響は大きなものがある。そこで、都市防災上、ライフライン系システムの信頼性、耐震性の検討は非常に重要である。

又、ライフライン系システムは、電力、上下水道、都市ガス、交通、通信等、多くのサブシステムから構成される。サブシステムは、互いに影響を及ぼし合い機能的に複雑なネットワークを構成している。これにより、ある一つのサブシステムの機能が停止がライフライン系システム全体の機能を停止させることも起こりうる。そこで、ライフライン系システムの信頼性、耐震性の検討を行う際、ライフライン系システムのサブシステム間の相互関連性を考慮に入れる必要がある。しかし、現在までのライフラインに関する研究において、この相互関連性を考慮しているものは少なく、又、相互関連性自体明確に示されていない。

そこで、本研究においては、ライフライン系システムのサブシステム間の相互関連性を明確に示すことを目的とし、ライフライン系システムの地震による被害の波及過程を多階層有効グラフとして表わす。これには、グラフ理論の応用である、ISM (Interpretive Structural Modeling)、FSM (Fuzzy Structural Modeling) を手法として用いる。又、有効グラフ作成においては、その膨大なデータの処理を行う為、大型電算機を用いる。

2. 構造同定

2-1. 被害項目の抽出

十勝沖、新潟、宮城県沖地震等の調査報告書とライフラインの各サブシステムの構成を基にグリーンストーン工法により401項目を抽出し、KJ法を用いて、類似項目の整理統合を行い、65項目にまとめた。同時に、被害項目を地震による直接被害項目 (Level 1)、Level 1の項目により、間接被害項目 (Level 2)、Level 2の項目により支障をきたし、末端需要家に影響を及ぼす項目 (Level 3) の3グループに分類を行った。尚、これらの65項目は各ライフライン・サブシステム (電力、都市ガス、上下水道、下水、通信、交通) に分類できるよう整理された。

次に、各被害項目の二項関係行列 (f_{ij}) を作成する。ISMでは、二項関係であるが、FSMに於ける解析を考慮に入れ、0.0~1.0の距離尺度上に二項関係を求めた。

次に、各被害項目の二項関係行列 (f_{ij}) を作成する。

ISMでは、二項関係であるが、FSMに於ける解析を考慮に入れ、0.0~1.0の距離尺度上に二項関係を求めた。

2-2. ISMによる構造同定

あるシステムS, S = { S₁, S₂, S₃, …, S_n } であるとす、この集合S上に二項関係Rが定義されるとする。すなわち、要素S_iと要素S_jが

$$\text{直接関係し得るとき} \quad S_i \ R \ S_j \quad - \quad (1)$$

$$\text{直接関係しないとき} \quad S_i \ \bar{R} \ S_j \quad - \quad (2)$$

- * 1. 変電設備破壊 (変電所、トランスなど)
- * 2. 電線切断 (配電線、地中配電線、引き込み線など)
- * 3. 配電装置破壊 (柱上変圧器落下破壊、電柱転倒など)
- 4. 水力発電所破壊
- 5. 火力発電所破壊
- 6. 原子力発電所破壊
- 7. ダム崩壊
- * 8. 指令系統・管理機能破壊 (電力、ガス、上下水道など)
- * 9. ガス埋設管破壊、突出
- 10. ガス膨脹器破壊 (ガスガバナーステーションなど)
- 11. 燃料供給施設破壊 (貯蔵施設、パイプラインなど破壊)
- 12. ガスタンク破壊 (ガス供給所破壊)
- 13. 水源破壊 (河川、地下水源、ダムなど破壊)
- 14. 水関係破壊 (貯水層、受水層、高架水塔など破壊)
- * 15. 水道管破壊 (水道橋、送水管、導水管、配水管など破壊)
- 16. 浄水場破壊
- 17. 給水設備破壊
- 18. 消火栓破壊
- 19. 下水収集施設破壊 (雨水ます、汚水ます、など破壊)
- * 20. 下水管、マンホールの破壊
- * 21. 下水処理場施設破壊 (沈殿池、エアレーションタンクなど)
- 22. ポンプ場破壊
- * 23. 電話線切断 (海底ケーブル、放送回線、パラボラアンテナなど切断)
- 24. 電話局破壊
- 25. 電話機破壊
- * 26. 異常騒音
- 27. 交通管制システム破壊
- * 28. 道路構造物破壊 (路体、法面、盛土、橋梁、トンネルなど破壊)

と、表わす。また、関係Rは集合Sの各要素Eを行と列に持つ二値行列として表現される。この行列Aを

$$S_i R S_j \quad \text{ならば} \quad a_{ij} = 1 \quad - (3)$$

$$S_i \bar{R} S_j \quad \text{ならば} \quad a_{ij} = 0 \quad - (4)$$

と置く。

この二値行列Aに単位行列Iを加えブール積が得られた行列Tを可到達行列と呼ぶ。

$$(A + I)^{P+1} = (A + I)^P = T \quad - (5)$$

次に、行列Tより多階層有向グラフを得るために集合Sの各要素 S_i に対し R 可到達集合 $R(S_i)$ および先集合 $A(S_i)$ を定義する。

$$R(S_i) = \{ S_j \in S \mid T_{ij} = 1 \} \quad - (6)$$

$$A(S_i) = \{ S_j \in S \mid T_{ji} = 1 \} \quad - (7)$$

集合 $R(S_i)$ は要素 S_i から到達可能なすべての要素Eを含む。いま、 $R(S_i) \cap A(S_i) \in R(S_i)$ と $A(S_i)$ の共通集合として

$$S_o = \{ S_i = S \mid R(S_i) \cap A(S_i) = R(S_i) \} \quad - (8)$$

について考える。 S_o はその中に属するもののような要素に到達しないような要素の集まりであるから、 S_o に属する要素E第1レベル(top Level)の要素と定義する。 S_o に属する任意の2つの要素は互いに到達可能の不可能のいずれかである。

構造同定を行う時、項目間の二項関係行列を二値行列に変換する為には、境界値 P ($P \leq f_{ij} \rightarrow 1, P > f_{ij} \rightarrow 0; P = 0.4, 0.5, 0.6, 0.7$)を規定し、ISMの直接関係行列Eを求めた。そして、構造モデルにより求めた被害波及構造モデルを多階層有向グラフとして表わす(図-7)。この構造モデルにおいて①→②は、被害項目①が被害項目②に影響を及ぼす事を表わす。又、二重楕円は、その中の項目すべてが互いに影響を及ぼし得ることを表わす。二重楕円に向かう矢印は、その中のすべての項目に向かい、出ることを表わし、二重楕円からの矢印は、その中のすべての項目から出ることを表わす。

ISMによる解析のプログラムは、最初BASICによる訂読式のものをを用いる予定であったが、二項関係行列が65×65と膨大であり、又、所有のマイプロコンピュータの容量が足りない為、FORTRAN77で作り直した。二項関係行列は、アンケート方式により求めたため、各ジャンルの算術平均をとることで得るが、分散の大きいものについてはデルファイの手修正ルーチンを取り整理した。

表1-2 間接被害項目(Level 2)

29. 停電
30. ショート
31. 放射能汚染
32. ダム崩壊による水没
33. 爆発
34. ガス中毒
35. ガス圧低下
36. 埋設管による道路、鉄道軌道破壊
37. ガス供給停止
38. ガス漏れ
39. 水圧低下
40. 漏水
41. 断水
42. 洪水・水没
43. 下水汚物の放出、流出
44. 悪臭
45. 下水処理不能、低下
46. 河川汚染
47. 通信・電話処理不能、低下
48. 情報混乱(避難、誘導情報不足、混乱など)
49. 交通機関の事故
50. 救援活動不能
51. 復旧活動不能
52. 交通障害(交通渋滞、通行規制など)
53. 火災
54. パニック
55. テマ
56. 死傷者発生(生き埋め など)

表1-3 間接被害による被害項目(Level 3)

57. 公共機関(政府機関、警察署、消防署、刑務所、郵便局、電話局など)
58. 製造業(工場、一般会社など)
59. 娯楽業、映画業などのサービス業
60. 教育、医療機関、銀行
61. 住民の家庭生活(暖房設備、料理不能、水洗便所使用不能、物価高騰など)
62. 卸売業、小売業(食品、食料、薬品屋、デパート・スーパー、ガリンスランド、ホテル、旅館、クリーニング屋、営業納品業など)
63. 運輸関係(道路、港、鉄道、信号、飛行機、駅、列車、船など)
64. 放送、新聞関係(テレビ、ラジオ使用不能、コマーシャル不能、通信教育不能、踏案内機能、テレホンショッピングなど)
65. 社会的影響(犯罪増加、疫病発生など)

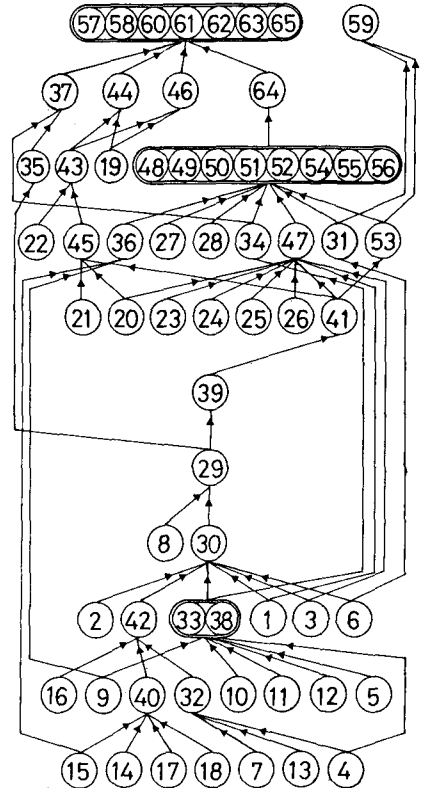


図-7 ISMによる被害波及構造モデル(P=0.6)

2-3, F S Mによる構造同定²⁾

あるシステム S , $S = \{S_1, S_2, S_3, \dots, S_n\}$ とし, 二項関数のあつまり従属行列 $A \in A = \{a_{ij}\}$ と定義する。ここで, 行列 A は $n \times n$ 行列であり, その要素 a_{ij} は $a_{ij} = f_n(S_i, S_j)$, $0 \leq a_{ij} \leq 1$ で与えられる。左はメンバーシップ関数である。ここで F S M による構造同定を行う場合, あつまり従属行列 A は次の三つの条件を満足しなければならない。i) あつまり非反射律 $\forall (S_i, S_i) \in S \times S$ の時 $f_n(S_i, S_i) \leq P$
 ii) あつまり半推移律 $\forall (S_i, S_j) = S \times S$, $(i \neq j)$ の時 $f_n(S_i, S_j) < P$ or $f_n(S_j, S_k) < P$
 iii) あつまり半推移律 $\forall (S_i, S_j), (S_j, S_k), (S_i, S_k) \in S \times S$; $(i \neq j, j \neq k, i \neq k)$ に対し $M = \bigvee_{j=1}^n (f_n(S_i, S_j) \wedge f_n(S_j, S_k)) \geq P$ の時 $f_n(S_i, S_k) \geq M$ ここで, P は境界値。
 以下の条件を満足してあるあつまり従属行列 A を用いて次の手順でシステム S の構造を決定する。

1) S の要素を, 最上層レベル集合 $L_0(S)$, 中間レベル集合 $L_i(S)$, 最下層レベル集合 $L_b(S)$, 独立レベル集合 $L_{is}(S)$ に分類する。ここで, 各レベル集合は次のように定義される。

$$L_0(S) = \{S_k \mid \bigvee_{j=1}^n a_{kj} < P \leq \bigvee_{j=1}^n a_{jk}\}$$

$$L_i(S) = \{S_k \mid P \leq \bigvee_{j=1}^n a_{kj}, P \leq \bigvee_{j=1}^n a_{jk}\}$$

$$L_b(S) = \{S_k \mid \bigvee_{j=1}^n a_{kj} < P \leq \bigvee_{j=1}^n a_{jk}\}$$

$$L_{is}(S) = \{S_k \mid \bigvee_{j=1}^n a_{kj} < P, \bigvee_{j=1}^n a_{jk} < P\}$$

2) $L_b(S) = \{S_1, S_2, \dots, S_k\}$ とする。このとき次の条件のいずれかを満足する Q_i をアロフとする。

- i) $\forall S_i, S_m \in L_b, B(S_i) \cap B(S_m) \neq \emptyset$ ならば $Q_i = \bigvee_{j=1}^n B(S_i)$
- ii) 集合 $S^{(k)} \in L_b(S)$ より順番目に任意に u 個取り出し構成された集合とし, $S^{(1)} = \{S_1^{(1)}, S_2^{(1)}, \dots, S_k^{(1)}\}$, $S^{(2)} = \{S_1^{(2)}, S_2^{(2)}, \dots, S_k^{(2)}\}$,
 $\dots, S^{(k)} = \{S_1^{(k)}, S_2^{(k)}, \dots, S_k^{(k)}\}$ とする。このとき, $S^{(1)} \subset L_b(S)$, $S^{(2)} \subset L_b(S) - S^{(1)}$,
 $\dots, S^{(k)} \subset L_b(S) - S^{(1)} - S^{(2)} - \dots - S^{(k-1)}$ の関係が成立するものとする。このとき $\bigcap_{i=1}^k B(S_i) \neq \emptyset$ が $\bigcap_{i=1}^k B(S_i^{(1)}) = R_1$ ならば, $(i, j = 1, 2, \dots, k, i \neq j)$ ならば, $Q_1 = \bigvee_{j=1}^k B(S_i^{(1)})$, $Q_2 = \bigvee_{j=1}^k B(S_i^{(2)})$,
 $\dots, Q_k = \bigvee_{j=1}^k B(S_i^{(k)})$, $1 < k \leq t$ である。ここで, $B(S_i)$ は $L_b(S)$ に属する要素 S_i が従属する $L_i(S)$ の要素の集合

iii) 同一アロフ Q_i に属する要素をとり, 要素間の従属関係を示す小行列を単一ハイアラーキ行列 $A^{(k)}$ とよぶ。

iv) あつまり構造パラメータ λ の値を設定し, それぞれの単一ハイアラーキ行列 $A^{(k)}$ に関し図-2に示す流水図に従い, システムの構造の決定を行う。ここで, S_j に対するレギュラー行 S_{ik} , $k = 1, 2, \dots, n$ の消却は $\{a_{ij}^*\} = \{a_{ij}\} \wedge \{\bar{a}_{i1}\} \wedge \dots \wedge \{\bar{a}_{in}\}$ により $\{a_{ij}^*\} \{a_{ij}\} \in \{a_{ij}^*\}$ であつかえることにより行う。

尚, $\{\bar{a}_{ik}\} = \frac{1 - \{a_{ik}\}}{1 + \lambda \cdot \{a_{ik}\}} \quad \because \{a_{ik}\};$ 列ベクトル

F S M におけるある二項関係を示すメンバーシップ関数 $M(x)$ とするとそのあつまり補集合は図-3の(2)式により求められる。このあつまり補集合を制御するパラメータとし

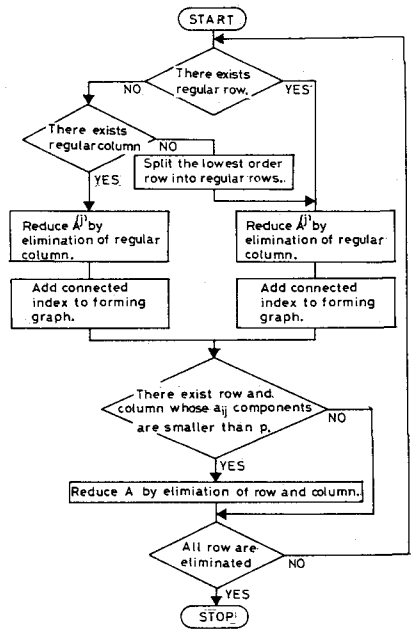


図-2 グラフ化のフロー²⁾

MEMBERSHIP FUNCTION
 $M(x) = (1 + 1 / (x - 10.0))^{1.8} - 1.0$ ----- (1)

COMPLEMENT OF $M(x)$
 $\bar{M}(x) = (1 - M(x)) / (1 + \lambda \cdot M(x))$ ----- (2)

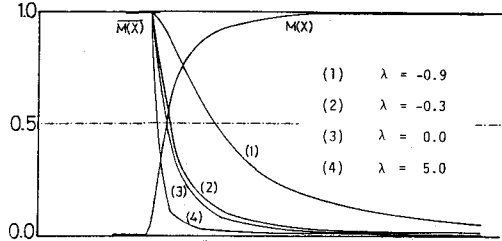


図-3 あつまり構造パラメータ (λ) の性質

であり、構造パラメータ (λ) があり、その意味は重要である。図-3に $\lambda = -0.9 \rightarrow (1)$, $\lambda = -0.3 \rightarrow (2)$, $\lambda = 0.0 \rightarrow (3)$, $\lambda = 5.0 \rightarrow (4)$ のあり、補集合 $\bar{M}(x)$ を示す。 $\lambda = 0.0$ のときでは、(2) 式より $\bar{M}(x) = 1 - M(x)$ となり普通集合の補集合である。この λ の範囲が $-1 < \lambda < \infty$ であることから、例えば普通集合 M の補集合が 0.5 の場合 $\lambda = -0.9$ (図-3の(1)) のあり、補集合は 0.91 である。すなわち λ を負にしたとき、そのあり、補集合は又大きく評価され、逆に λ を正にした場合小さく評価される。このことは λ によ、F S M のあり、二項関係もどのように評価するの明示が出来ると思われ。

F S M による構造同定の解析ルーチンとして、まず最初に適当な (P, λ) を与え、求められた有向グラフにフuzzy 検討し、そして別の (P, λ) を入力し逐次そのグラフにフuzzy 検討しながら、ここを示す被害波及構造に最も適した構造グラフを決定した。その結果である境界値 $P = 0.6$, $\lambda = -0.3$ の有向グラフを図-4に示す。

3. まとめ

本研究では、地震によるライフラインシステムの被害波及の構造を主観的および経験的な方法を駆使して数値解析法をもち社会システムより複雑な構造を同定する手法を用い明確に示すものと試みたものである。その手順として、I S M を適用するににより基本的な構造を把握し、この結果のら、問題点を抽出した。そして、これらの問題点の考慮とあり、理論を適用して構造同定手法をもち各項目間のあり、取り込んだ特性関数 (ここはメンバーシップ関数) を用いて F S M により被害波及構造モデルを同定した。

この被害波及構造モデルの考察は参考文献4)に於けることとする。ここは I S M, F S M の解析から得られる多階層有向グラフを作成する計算ルーチンを中心とし、この手法の有用性について以下に述べる。

- 1) I S M はともども対話式計算過程をせしめることが重要である。このことは有向グラフの修正法として逐次、直接行列にスタートバックする必要があり、このくり返しにより最適なグラフを決定する。この F S M では、あり、構造パラメータ (λ) によ、最適な有向グラフを求めることが可能であり対話式にする必要をうける。
- 2) F S M では有向グラフの連結度が求まり、I S M のような $0, 1$ の関係を示す有向グラフではないため意志決定の指標となるより有向グラフを構築できる。
- 3) 今回の被害波及構造モデルを作成するうえでの基礎となる資料は二項関係行列である。これを求めるにはアンケートを用いたが、このアンケートに対する不確実性を考慮して F S M の有向性は非常に高く評価できる。
- 4) F S M の特徴として (P, λ) により自由度のある構造同定が可能となり現実性の高い構造モデルの検討がこれらのパラメータにより即座にできるということができる。

4. 参考文献

- 1) 河村; (1977) 複雑な社会問題を取扱う一手法 (Interpretive Structural Modeling), 計測と制御 PP, 157-161
- 2) E. TAZAKI, M. AMAGASA; (1979) Structural Modeling in a class of Systems Using Fuzzy Sets Theory, International Journal for Fuzzy Sets, Vol 2 PP. 87-103
- 3) 田崎; (1979) あり、理論による社会システムの構造化, 数理科学, No. 191
- 4) 星谷, 大野, 山本; (1983) 地震被害波及構造モデルに基づくライフライン機能の相互関連性について, 第17回地震工学研究発表会, PP 331-334, 土木学会,

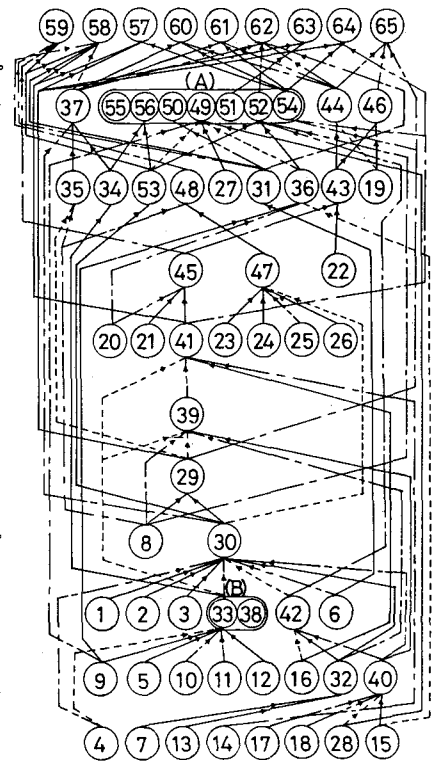


図-4 F S M による被害波及構造モデル ($P = 0.6, \lambda = -0.3$)