

I-207 ライフライン系における地震時相互連関のリスク分析的考察

京 都 大 学 大 学 院 学 生 員 能 島 暢 呂
京都大学防災研究所 正 員 亀 田 弘 行
京 都 大 学 大 学 院 学 生 員 加 藤 多 郎

1. はじめに ライフライン系は相互依存性・相互補完性を持つため、地震時には種々の悪影響を及ぼしあうことが知られており、総合的都市地震防災対策を講じるためにはライフライン系間のハード・ソフトのインターフェースの効率的改善が不可欠である。本研究では、ライフラインの地震時相互連関をモデル化し、ライフライン全体系における被害最小化と地震防災対策の最適化を考えてゆくための基礎資料とすることを目標として、震害の各局面においてみられるライフライン系間の相互連関の様相を整理し、さらに、依存関係にある2つのシステムを対象として、地震時に生じる被害連関の度合いをクロス・インパクト係数という単一のパラメータで確率論的に評価するための基礎的な考え方を示す。

2. ライフライン系間の地震時相互連関 地震発生から復旧に至る過程におけるライフラインの被害相互波及や復旧障害などの様々な連関を表1にまとめた。相互連関の主たる要因は、ライフライン機能の相互依存体系の破壊と、復旧時に生じる種々の障害の2点である。前者の例としては、電力・情報通信システムのサービス停止から波及する他システムの動力喪失・中枢機能マヒや、交通機能マヒによる復旧の機動力低下などがあり、後者の例では埋設管破壊ヶ所の復旧の際の交通規制や作業錯綜、資機材の競合、代替システムの需要増加等の現象が挙げられる。また、各システムが他に及ぼすインパクトの強さは地震発生後時間的に変動する。このことには、平常時・緊急対応・復旧期において不可欠となるシステムが変化（電力・情報通信・道路交通が、動力源・情報収集伝達・復旧作業のうえでそれぞれ重要）することが関与しているとともに、一般的に電力・水道・ガスの順に早いとされる機能回復の早さや、ライフライン優先復旧の有無などが複合的に関連していると考えられる。

表1 地震被災時及び復旧期におけるライフライン系の相互連関

被影響 影響	電 力	ガ ス	上 水 道 ・工業用水道	下 水 道	ごみ・廃棄物処理	交 通		電 話	コンピュータ 通信
						道 路	鉄 道		
電 力	*	製造プラント機能停止 ホルダー機能停止 圧送機能停止	浄水場機能停止 取水・配水ポンプ機能停止 揚水機能停止	処理プラント機能停止 ポンプ機能停止	処理プラント機能停止	信号停止 電柱倒壊による 路面陥没	信号停止 動力源の喪失	電話局の機能低下	オンラインのマヒ データの喪失
システム管理・集中制御施設の機能マヒ、光源不足（バックアップ電源が無い場合）									
ガ ス	熱源代替としての 需要増	*	復旧作業の錯綜 復旧資機材の競合	復旧作業の錯綜 復旧資機材の競合	処理プラント機能停止	復旧作業にともなう交通規制 爆発による 道路損傷	特になし	特になし	特になし
上水道・ 工業用水道	特になし	復旧作業の錯綜 復旧資機材の競合 製造プラントの 冷却水不足	*	復旧作業の錯綜 復旧資機材の競合 水洗トイレ使用不能 下水の増減 （漏水、上水消費）	特になし	復旧作業にともなう交通規制 大口排水道管破裂 による漏水	特になし	交換機の 冷却水不足	コンピュータの 冷却水不足
自家発電機の冷却水不足									
埋設管・地下ケーブルへの浸水									
下 水 道		復旧作業の錯綜 復旧資機材の競合	復旧作業の錯綜 復旧資機材の競合	*	特になし	復旧作業にともなう交通規制 下水による漏水	特になし	地下ケーブルへの浸水・地絡不良	
ごみ・ 廃棄物処理	特になし	特になし	特になし	特になし	*	未処理廃棄物の 路上集積	特になし	特になし	特になし
道 路	給電車による 応急供給困難		給水車による 応急供給困難		ゴミ・廃棄物の 収集・運搬不能	*	代替システム として利用増	交通混乱による 電話連絡増	
鉄 道				復旧活動の遅れ（復旧人員の動員・復旧資材調達遅れ、復旧路の移動に支障） 資源・資機材の運搬に支障		代替システム として利用増	*	交通混乱による 電話連絡増	
電 話						復旧活動にともなう交通規制		*	電話回線の 使用不可
通 信									*
機電状況の情報伝達不能 システム管理・集中制御システムの機能マヒ（無検出されていない場合） 復旧活動のための情報不足（無検出されていない場合） （作業員不足、復旧指令、需要家からの被害通報・修理依頼、需要家への広報 行政機関・事業者や事業者相互の連絡）									

以上の議論は特定の地震に関するものではないが、既往地震の被害調査報告(1978年宮城県沖地震、1983年日本海中部地震、1923年関東大地震)を調べた結果、相互連関の影響は、(1)都市構造、(2)ライフライン系の被害の程度、(3)地震防災体制、(4)地震誘発火災の規模、などに左右され、かなりの違いがみられる。ここでは詳述できないが、(2)について簡単にまとめると、中程度の地震では、個々のシステムの被害が小さくても相互連関が生じるとサービス継続や復旧活動に支障をきたす一方、ライフラインの被害が全体的に甚大である場合、地震直後には相互連関が表面化しないが、回復が遅れたシステムが他のシステムに長期的に影響を及ぼすといえる。また(3)について、関東大地震の震害調査報告で当時の技術者・研究者が、バックアップ設備や地震後の情報通信の重要性など、相互連関の影響を視野にいたれた防災対策に関するコメントを残し、その後の教訓となっている点は特筆すべきことである。

3. クロス・インパクト係数による相互連関の定量化 クロス・インパクト法¹⁾は、多くの事象間の関係を構造モデルで記述し、相互の影響を考慮して各事象の生起確率を修正するシステム手法である。本研究ではこの考えを応用して、ライフライン系の地震時相互連関のインパクトを確率論的に表現することとした。ただしここでは問題を単純化するため、上記の時間変動性や復旧期の支障は除外し、機能的依存状態が破壊された場合のみを扱う。いま、2つのシステム①、②を考え、システム①がノードNでシステム②の機能に依存しているとする。システム①自体の障害によるノードNの機能喪失を事象 E_1 、システム②の機能がノードNで満たされない事象を E_2 とする。被害連関を考慮した場合、ノードNの機能喪失(事象 E_N)の発生確率は次のように表される。

$$P(E_N) = P(E_1) + \{1 - P(E_1)\} \cdot P(E_2) \cdot a_{2N}$$

ここに $P(\cdot)$ は確率を意味し、 a_{2N} はクロス・インパクト係数である。この係数は、システム①のシステム②に対する機能的依存度や、バックアップ系の有無といったシステム特性・防災体制の他に、バックアップ系の地震時信頼性、システム②の機能マヒの継続時間等を反映するもので、地震規模と被害連関の表面化の度合いの関係や、バックアップ体制の効果を表現することが可能である。

4. FTAを用いたクロス・インパクト係数の算出 本研究では、クロス・インパクト係数を求めてシステム②からの被害連関がノードNの機能喪失確率にどの程度寄与するかを算定するため、FTA(Fault Tree Analysis)を用いた。まずノードNの機能喪失を頂上事象とするFTを作成し、ブール演算を行って

システム②からの被害連関を含むミニマルカットセット群と含まないミニマルカットセット群に分離する。後者から係数 a_{2N} を計算すると同時に確率演算を行うことによって上式の $P(E_N)$ 、 $P(E_1)$ 、 $P(E_2)$ を求めると、システム①に対するシステム②の影響が確率論的に表現できる。FTAの基本事象の発生確率を地震動強度に応じて与え、クロス・インパクト係数およびノードNの機能喪失確率を計算した簡単な数値計算例を図1に示す。

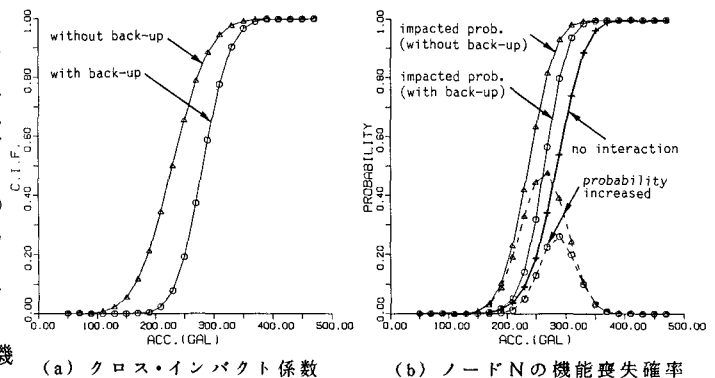


図1 クロス・インパクト係数とノードNの機能喪失確率

5. むすび 本論のモデルは多面的な相互連関の中の重要な側面である相互依存性を扱ったものであり、バックアップの有効性の評価を行う手がかりとなると考えている。今後さらに相互連関の様相を網羅するモデルに発展させてゆく方針である。

参考文献 1) Sage, A. P.: Methodology for Large-Scale Systems, McGraw-Hill Book Co., 1977., pp. 165-203.