

I-567

被災したネットワーク構成要素の重要度評価

清水建設(株) 大崎研究室 正員 奥村 俊彦

1. はじめに

ライフラインシステムの耐震対策においては、想定される地震に対する被害の予測とともに、被害を受けた場合の復旧戦略を策定しておくことが重要である。ネットワークの機能の早期回復を目的として最適な復旧順位を決定するためには、全ての復旧順位の中で最適となるものを選ぶ必要があるが、この方法は中小規模のネットワークに対しても現実的な方法とは言えず、大規模なネットワークにも適用可能な復旧順位決定方法の開発が望まれる。本報告は、ネットワーク上の複数のリンクに被害が生じた時に、ネットワークの機能(ここでは接続性)の早期回復を目的とした復旧順位決定のための指標として、新たな重要度指標を提案するものである。ここでは、提案する重要度指標の持つ意味とその簡易算定法を示すとともに、簡単な適用例をもとにその有用性を示す。

2. 重要度の定義

ノードとリンクから成るネットワークにおいて複数のリンクが破壊した時に、これら各々のリンクがネットワークの機能低下にどの程度寄与しているかを考える。ここでは、ネットワークの有する機能を「接続性」、すなわち供給ノードと接続しているノードの総数で評価するものとする。

図-1に示したネットワークにおいて、破線で示した4本のリンク①, ②, ③, ④が破壊しているものとする。この時、図から明らかなように、①のリンクが破壊していることにより接続性を失っているノードの数は3個(直接には2個)である。同様に、②によるものは1個、③によるものは迂回路があるため0個であり、④によるものは2個である。別の見方をすれば、例えば、リンク①の修復は、それより末端側にある3個のノードの接続性を回復するための必要条件だと言い換えることができ、リンク①を修復しない限りこれら3個のノードは回復しない(ただし、この場合には②が破壊していることから、リンク①の修復はこれらのノード復旧のための十分条件とはなっていない)。

さて、ネットワークの機能の早期回復を考える場合、上に示した「そのリンクを修復しなければ機能が回復しないノードの数」を破壊したリンクの重要度として定義すると、この重要度は復旧順位決定のための1つの指標となり得る。図-1の例では、重要度の高いものから①→④→②→③の順に修復した場合が、接続性の早期回復の観点からは最適の結果を与えている。

3. 重要度の算定方法

2.で定義した重要度は、以下に示すように管路網の流量解析法を応用して近似的に算定することができ。一般に、管路網の流量解析の基礎方程式は、(1)で示される連続式と(2)の流量式から成る。

$$\sum_j Q_{ij} + p_i = 0 \quad \cdots (1) \quad Q_{ij} = \frac{1}{R_{ij}} |E_i - E_j|^a \quad \cdots (2)$$

ただし、 Q_{ij} はリンク*ij*内の流量、 p_i はノード*i*における需要水量、 E_i はノード*i*における水頭、 R_{ij} はリンクの抵抗を表す係数である。

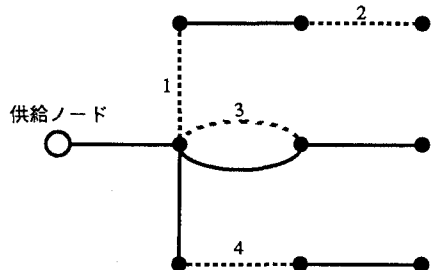


図-1 被災したネットワークの例

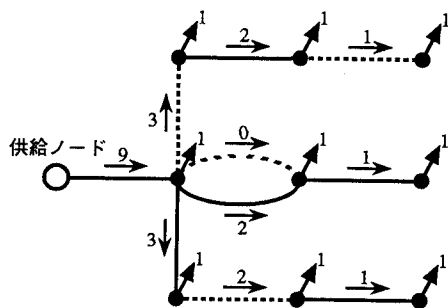


図-2 流量解析を応用した重要度評価法

さて、先に示したネットワークにおいて、供給ノードを除く全てのノードにそれぞれ単位の需要水量 $p_i=1$ が与えられているものとする。このとき、健全なリンクを抵抗 R_{ij} の非常に小さなリンク、破壊したリンクを R_{ij} の非常に大きなリンクに置き換えると、各リンク内の流量は図-2に示すようになる。すなわち、健全なリンクでは水頭の損失がほとんどないため、迂回路が存在する場合には破壊リンクを避けて流れるが、迂回路がない場合には、大きな水頭の損失を生じても破壊リンク内を流れざるを得ない。ここでは、実際の流れを計算するのが目的ではないから、式(2)において $\alpha=1$ 、すなわち線形の式を仮定すると、破壊リンク内での損失水頭はその下流側にあるノードの数に比例して得られることになり、これをそのまま重要度として用いることができる。ただし、この算定方法では、あるノードに対して並列する複数の経路が存在し、しかもそれらがいずれも破壊している場合には、重要度が分散されてしまうことになり、2.で定義した重要度とは異なったものが得られることに留意する必要がある。なお、特定のノードに重みを付けたい場合には式(1)の p_i に重み付けすれば良く、リンクの重みは式(2)の R_{ij} で考慮することができる。また、上記の説明からわかるように、供給ノード以外のノードの総数を n とすると、すべてのリンクの重要度は、 n 元の連立方程式を1度解くことにより算定できる。

4. 計算例

図-3に示ネットワークにおいて、破線で示した13本のリンクが破壊リンクしており、結果として24個のノードの接続性が失われている。これらの破壊リンクを、3.で示した方法で算定した重要度に基づく復旧順位で修復した場合の機能回復度を検討する。比較のため、各ステップでの最適順位による場合(破壊リンクのうち1本だけを修復した時に機能が回復するノードの数が最大となるようなリンクをそのステップでの修復リンクとする場合)の結果も併せて示す。両手法による破壊リンクの復旧順位は、それぞれ

- ・提案した重要度に基づく順位 : 22 → 23 → 3 → 11 → 12 → 24 → 5 → 9 → 7 → 21 → 20 → 16 → 26
- ・各ステップでの最適順位 : 3 → 5 → 9 → 7 → 11 → 12 → 16 → 20 → 21 → 22 → 23 → 24 → 26

である。また、それぞれの復旧順位で修復した時に、供給ノードとの接続が回復したノード数の示したのが図-4の機能回復度曲線である。これからわかるように、4ステップ目までは、各ステップでの最適順位を用いる方が機能回復度は良いが、それ以降では提案した重要度に基づく順位の方がかなり良好な結果を与えている。これは、本手法による重要度がネットワークの末端までの情報を含んだものであるのに対して、各ステップでの最適順位が1ステップ分の情報だけから決定されているためである。例えば、本手法で最初に修復されるのはリンク22であるが、これを修復することにより回復するノードが23だけであるため、各ステップでの最適順位では後回しとなっており、結果として機能の回復が遅れている。

5. おわりに

本研究では「そのリンクを修復しなければ機能が回復しないノードの数」を破壊したリンクの重要度と定義し、この重要度を近似的に算定する方法を提案した。また、この重要度を指標として復旧順位を決定することが、機能の早期回復の上で非常に有効な復旧戦略となり得ることを示した。なお、冗長性の高いネットワークへの適用性、あるいは接続性以外の機能に対する有用性については今後の検討課題である。

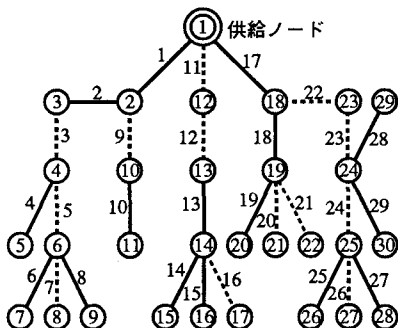


図-3 計算に用いたネットワーク

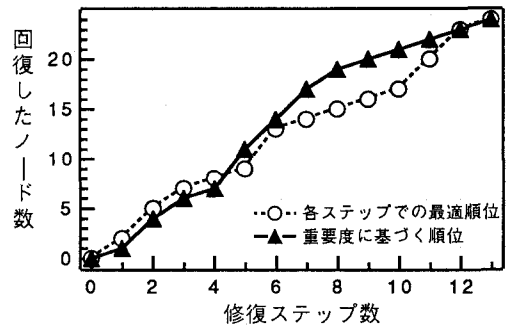


図-4 機能回復度曲線