

I-561 ライフラインネットワークの信頼性解析におけるパーコレーション理論の応用

日本国土開発(株)	正員	○ 蕎麦切克己
東北大学工学部	正員	中川 昌美
東北学院大学工学部	正員	佐武 正雄
攻玉社工科短期大学	正員	大野 春雄

1. はじめに

ガス、電気、水道など市民生活を大きく支配している都市供給システムは、ライフラインシステムと呼ばれ、複雑なネットワークを形成する。これらのネットワークの信頼性解析などを行なう場合、ネットワークグラフ上の交点及び連結線はそれぞれサイト及びボンドと呼ばれる。本解析では、物理的被害に関するサイトあるいはボンドの確率論的な性格とネットワークの持つ幾何学的な性格を兼ね備えた幾何確率モデルに適用できるパーコレーション理論を通して、震害を受けたライフラインネットワークの供給能力を考察する。

2. ネットワークのモデル化

本解析では、軟弱地盤上に造成された住宅地などに埋設されているライフラインネットワークを解析の対象とする。その領域中のある正方形の部分領域を選択し、これを解析領域の地盤形状とする。ライフラインの信頼性は、管の材質、管径、継ぎ手の種類などにもよるが、それらが埋設されている地盤に最も大きく影響される。そこで、この正方形領域をさらに細かい正方形メッシュに分割し、その各々のメッシュの中での地盤の軟弱さあるいは管路網の様子などを整理し、それらの代表値及び代表する形状で近似することにする。具体的には、各メッシュの中心に一つのサイトを設け、そこからそのメッシュに隣接する4つのメッシュのサイトに連結するようにボンドを敷設する。実際にはループなども伴った複数の管路が出入りして成り立っているメッシュ間の輸送を一本のリンクの輸送で近似することにした。このようにして得られた解析領域に埋設されるライフラインの形状は図1に示すような正方形格子で近似されたものとなる。尚、地盤の軟弱度は、サイト及びボンドの信頼度という形で反映させるが、ここでは、一様に軟弱な地盤に埋設されたライフラインにおける被害は、様々な信頼性要因の複雑な相互影響により引き起こされるものであるという仮定に基づき、サイト及びボンドには一律に一定の信頼度を与えた。

3. パーコレーション理論について

パーコレーション理論は不規則な媒質中における粒子、流体のランダムな運動を統計的に扱う理論である⁽¹⁾。ここでは、各需要家へ網の目のような供給経路で内容物を輸送する複雑なライフラインネットワークを不規則な媒質、ガスなどの内容物を流体と解釈し、パーコレーション理論を応用して災害時におけるネットワークの機能評価を試みる。

ネットワークはサイトとボンドとから成り、任意の2つのサイトを結ぶ経路が成立するとき、それらのサイトは“連結されている”と言い、その連結の確率は、各々のサイト又はボンドが正常に機能する確率、サイト確率 p_s およびボンド確率 p_b に従う。複数のサイトとボンドによって一続きにつながった経路をクラスター(図2で点線によって囲まれた部分)と言い、ネットワークの両端を結びつけるような大きさになったときのクラスターをパーコレーションクラスターと言う。またネットワークに内容物が行き渡る確率である浸透確率 P に対するサイトまたはボンド確率の関数形が厳密に導かれるのは樹木グラフの場合のみであり、ここでは、モンテカルロ法で求められた浸透確率で近似している。解析すべきネットワークの全サイト数当たりのクラスター内のサイト数 $R(p_s, p_b)$ を用いると、浸透確率は $P(p_s, p_b) = R(p_s, p_b) / p_s$ で表される。

4. 解析結果と考察

今回はサイト数400のモデルを用いた。図3・4には例として、サイトにのみ被害が発生すると仮定し、 $(p_s, p_b) = (0.5, 1.0)$ 及び $(0.85, 1.0)$ の場合の解析領域の浸透状況を示した。図中における“0”は機能不可能なサイトを表し、“1”は機能可能なサイトを表すものとする。さらに、図5では、浸透確率をパラメータとしたときの p_s と p_b の関係を示す。図3・4では、クラスターの大きさ、形状に相異がみられる。 $p_s=0.5$ の場合、複数のクラスターが点在しており、大きな被害を引き起こす可能性のあるサイトの信頼確率であるといえる。また、 $p_s=0.85$ の場合、パーコレーションクラスターが存在し、領域の端から端まで供給可能であり、比較的被害を小さくおさえられる信頼確率であるといえる。以上は、いずれも、 $p_b=1.0$ とし、被害はボンドにのみ発生すると仮定したときのネットワークの信頼性を考察したが、本来、被害はサイト及びボンドのどちらにも発生するものであり、混合パーコレーションの問題として取り扱われ、その時の信頼性の様子を図5に示してある。先にも述べたように、こ

の浸透確率はモンテカルロシミュレーションにより近似されており、臨界点の確定が困難であった為、 $P=0$ の曲線は含まれていないが、例えば、斜線を施した領域内にある p_s と p_b を組み合わせたような強度を持つボンドとサイトを使用すれば、 $P<2$ の信頼性を持ったネットワークを設計することになる。

5. あとがき

ここでは、災害時に於けるネットワークの内容物の輸送の問題を、混合パーコレーションの問題として取り扱い、主に、ネットワークの信頼確率について考察した。最後に、ネットワークの持つ幾何学的な性格の表現の一つとして、そのフラクタル性が挙げられる。図6に625のサイトからなるネットワーク上において $(p_s, p_b) = (0.5, 1.0)$ の状態で形成されたフラクタル次元1.9のパーコレーションクラスターを示す。尚、このフラクタル次元はクラスターの中心から r の距離内にあるサイトの総数 $N(r)$ が $N(r) \sim r^D$ という関係にあることから求められた。今後、地盤の軟弱さと p_s あるいは p_b の関係等についても考察を加え、さらに現実に即した解析内容に発展させたい。

参考文献

(1) Dietrich Stauffer (1985) : Introduction To Percolation Theory

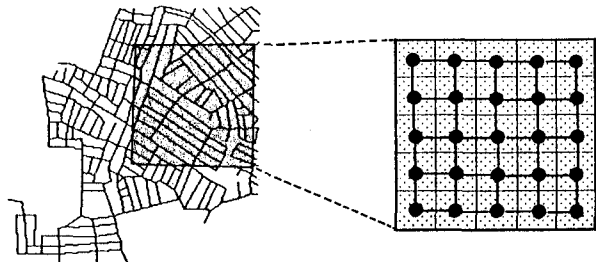


図1 ネットワークのモデル化

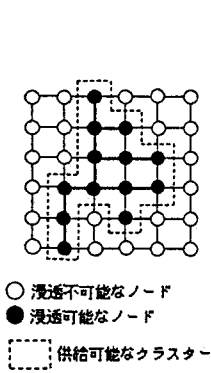


図2 クラスター

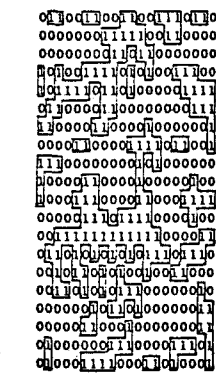


図3 点化するクラスター

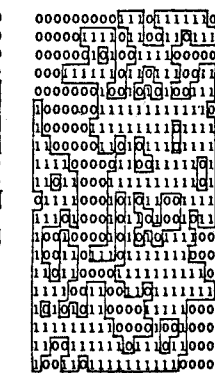


図4 パーコレーションクラスター

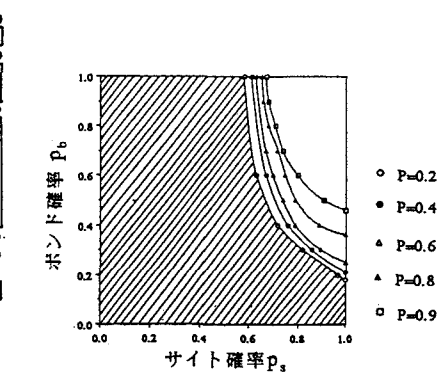


図5 混合パーコレーション

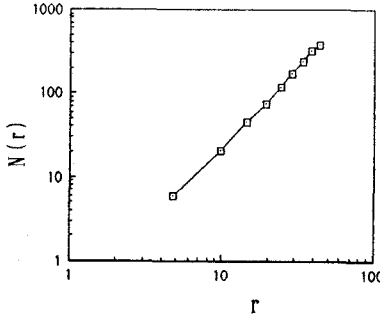
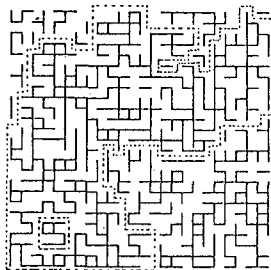


図6 パーコレーションクラスター
(フラクタル次元1.9)