第IV部門

従属故障を考慮した道路網信頼性解析について

大阪府立工業高等専門学校　正 員 ○ 若林　拓史
愛媛大学農学部　柳本　裕史

1．はじめに

システムの信頼性解析は，システム規模が拡大するにつれて，指数的に計算量が増加しきわめて解析が困難である．このため，厳密解法に対して種々の近似解析法が提案されてきたが，それでも大規模システムの解析には種々の困難が存在する．筆者らが提案してきている交点法は，道路網が有している特性，例えば電気通信回路等の他のシステムでは長大な迂回が冗長性の重要な要素であるのに対し，交通では長大な迂回はしない，等の諸特性を考慮した解析法である．小数点以下数桁以上の厳密性（例えば，アポロ計画等ではテンナイン，すなわち0.9999999999といった信頼度が問題にされる）よりは，道路網の整備水準を議論するために必要な精度を確保し，同時に大規模システムの信頼性解析がきわめて容易という大きな特徴を有している．しかしながら，交点法を含めて従来の信頼性解析のきわめて多くが，ユニットの故障の独立性を前提としてきた．これは，解析法が信頼性グラフ理論を基礎としていること，数学的記述の容易性に起因していると考えられる．

一方，現実のシステムでは，ユニット間の故障が他のユニットの故障との従属性を有していることが多く，道路網の信頼性解析においてもこの問題の明示的考慮がなされていないという問題が残されている．従属故障の解析については，近年研究が進展してきているが，適用可能な従属故障のタイプはかなり限定されており，真の従属故障を考慮した方法とはいえない．これに対し，現場において従属故障の考慮は，長期にわたって蓄積された経験と技術者の工学的判断による数値計算上での補正で行われている．このことは，ユニット間の故障に従属性があっても，独立性の前提で構築された信頼性解析法が有用に利用されていることを示している．しかし，このような独立性を前提としても，信頼度計算の実行可能性がなかなか保証されないという問題があることは，上記で述べたとおりである．交点法においても，リンク間の故障に従属性が存在しても，道路網整備代替案の効果の推定や交通管理運用策の代替案比較には利用可能であるという立場に立っている．道路網における従属性の考慮は，その主たる原因が交通量に起因するために，ある程度の単純化が可能かもしれない．本研究では，計算の実行可能性を保証しながら，従属性をできるだけ考慮できる道路網信頼性解法を考察する．

2．基本的考え方

従属性を考慮した信頼性解析法の構築にあたっては，以下の事項が要件となる．

(1) 従属性の考慮はシステム信頼度の計算実行可能性という条件と両立させる必要がある．

(2) 計算実行可能性を目指して開発されてきた従来の方法と，可能な限り調和する方法であること．

(3) 境界条件を満足させること．または，独立性に基づいた方法論を包含すること．

(4) 計算に際して，入力データが入手容易であること．あるいは，利用可能なデータに基づく手法で

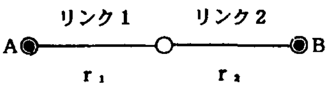

図-1　直列システム

図-2　完全従属の場合の直列システムの等価的表現

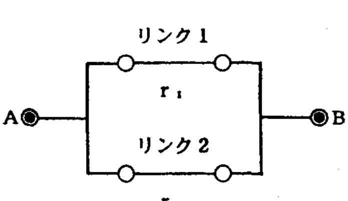

図-3　並列システム

Hiroshi Wakabayashi,　Hirohumi Yanagimoto

あること．

以上の条件を考慮しながら，以下に述べるような考え方で信頼性解析法を考察する．

いま簡単のため，図-1のような2リンクによる直列システムを考える．簡単のため$r_1 = r_2 = r$とし，各リンクの故障が独立であれば，AB間の信頼度は，$R = r_1 \cdot r_2 = r^2$で与えられる．例えば$r_1 = r_2 = 0.9$ならば，$R = 0.81$である．ところが，両リンクに正の完全な相関がある場合，すなわち一方のリンクが故障（機能）するときには必ずもう一方のリンクも故障（機能）する場合は，$R = r = 0.9$のままである．この場合のシステムは図-2のように表現できる．また，図-3のような並列システムの場合には，AB間の信頼度は，$R = 1 - (1 - r_1) \cdot (1 - r_2) = r^2$で与えられる．しかし，両リンクが完全相関である場合には，$R = 1 - (1 - r)$となり，システムは図-2と同じとなる．

リンク故障の従属性を次のように考える．いま，リンク1と2の間に何らかの関連性を表す指標σ_{12}を導入する．σ_{12}は，区間[0,1]の変数で，0に近いほどリンクどうしの独立性が高く，1に近いほど従属性の度合いが高くなるものとする．図-1のシステムを対象にノード間信頼度Rを，

$$R = r_1^{(1-\sigma_{12}/2)} \cdot r_2^{(1-\sigma_{12}/2)} \tag{1}$$

で定義すると，$\sigma_{12} = 0$（独立の場合）のとき，$R = r_1 \cdot r_2$，となり，$\sigma_{12} = 1$（完全従属の場合）には，$R = r_1^{1/2} \cdot r_2^{1/2}$，となり，特に$r_1 = r_2 = r$のときには，$R = r$，となって，上記の場合を統一的に表現でき，中間的な状態も連続的に表現できる．また，図-3のような2ユニット並列システムに対しても同様の考え方が可能である．

3．従来の信頼性解析でこの考え方が採用されなかった理由

この方法は単純な方法といえるかもしれないが，従来の信頼性解析法とは調和しにくい方法である．すなわち，従来の信頼性解析法では，近似解析法であっても，計算過程に論理積や論理和，あるいはブール演算（$r \cdot r = r$となる演算原則でr^2とはならない）が存在している．これらの計算原理は，重みや累乗の概念と相反するために，上記のような計算式が許容されなかったものと考えられる．

4．ネットワーク信頼性解析への拡張

単純なシステムでは，2．で述べた考え方で対処可能であるが，構成リンク数が増大し，道路がネットワーク構成された場合への拡張性を考える必要がある．道路網がネットワーク表示された場合には，ノード間信頼度は信頼性グラフ理論を用いて表現が可能である．このとき，対象ノード間のミニマルパス，ミニマルカットを考えると，ノード間の信頼度は，ミニマルパスからなる並列システム表示，あるいはミニマルカットからなる直列システム表示で表現可能である．ミニマルパスに関しては，lリンクから構成されるミニマルパスの信頼度R_pを，式(1)の表現を拡張して，

$$R_p = r_1^{(1-f_1)} \cdot r_2^{(1-f_2)} \cdot \ldots \cdot r_l^{(1-f_l)} \tag{2}$$

で表現すると考える．同様に，lリンクから構成されるミニマルカットの信頼度R_kを，

$$R_p = 1 - (1 - r_1)^{(1-g_1)} \cdot \ldots \cdot (1 - r_l)^{(1-g_l)} \tag{3}$$

で表現する．

ここで，f_iやg_iは，リンク間の従属性を表す変数となっている．このように表現することで，多リンクから構成されるパスやカットの従属性を考慮した表現が可能となる．そして，このようなパス，カットを利用して従来どおりの信頼性解析（交点法）を実行すれば，信頼性解析が行えるのではないかと考えられる．そして，どのようにしてf_iやg_iを求めることができるのかという問題に帰結する．

5．分析の方法

この方法を検証するためには，リンク信頼度やノード間信頼度の定義を明確にした上で，リンク交通量やリンク信頼度の共分散等の関連性を表す指標を求め，何らかのモデルを用いて直接観測されるノード間信頼度と推定されるノード間信頼度を比較する必要がある．また，上記の共分散やリンク信頼度の相関性は実際の道路網を対象とした場合には入手が困難なため，その次の段階として，その代理変数を求める必要がある．

ここでは，まず4．で述べた方法で信頼度が求められるのかを知る上から，代理変数として道路網における密接関連性指標を少し変えて用いることにした．紙面の関係から，計算結果は当日発表する．