

構成要素の個別性能を考慮したシステムの地震時復旧曲線

(株)篠塚研究所 正会員 ○中村孝明 静間俊郎, 東京都市大学 正会員 吉川弘道

1. はじめに

事業継続計画(Business Continuity Planning)の策定では, 事業停止となる可能性やどの程度の期間事業停止となるのかを定量的に推計する必要がある。地震時の復旧期間の定量評価については, システム信頼性手法をベースに建築設備の機能を対象とした研究¹⁾, 生産工場の製造機能に着目した研究²⁾, さらに道路網³⁾などがある。これらは対象を構成要素が連なるシステムとして捉えると共に, システム性能が復旧する過程を捉えた, いわゆる復旧曲線の評価を主課題としている。ところが, 構成要素は稼動するか否かの2対応を前提としたものであり, 固有の性能や余力を考慮したものではない。構成要素の持つ余力は, 発災時にはシステムとしての冗長性を補完する役目を持ち, 早期復旧に貢献する。本研究は, 構成要素の性能や余力を考慮した地震時復旧曲線を評価する方法を提案すると共に, 要素の性能が復旧曲線に与える影響を示す。

2. 復旧曲線の定義

復旧曲線は当初の性能が低下あるいは停止し, その後性能が完全に回復するまでの経時的なプロセスを描いた曲線と定義する。横軸は復旧に要する期間, 縦軸は当初の性能を1.0とした性能回復率である。地震被害の発生や復旧期間の不確実性を考慮すると, 図1に示すように無数の曲線が予想でき, その平均値を復旧曲線として代表する。また, 復旧曲線は復旧期間と性能回復率の2軸に描画されるため, 軸方向の平均値を採ると2種の曲線⁴⁾が求められる。本論では, 機能が限定されるシステムの復旧過程を把握するのに優れている図中T曲線 $R_T(r)$ を復旧曲線とする。式では以下ようになる。

$$R_T(r) = \int_0^{\infty} G_T(t|r) dt \quad (1)$$

ここに, $G_T(t|r)$ は性能回復率 r で横に切断し, 切断面を通過する曲線群の初通過確率分布の超過確率関数である。

3. 構成要素の性能を考慮したシステム性能

n 個の構成要素から成るシステムを想起し, 地震による構成要素(以下要素と記す)の被災を確率事象とする。

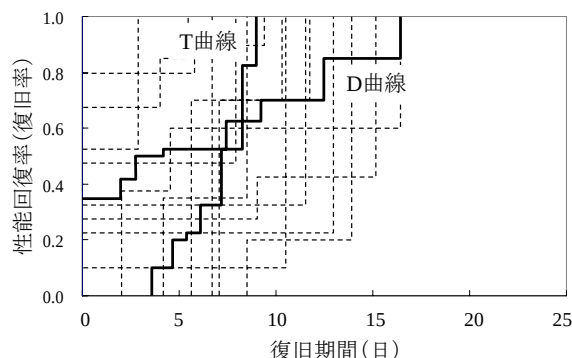
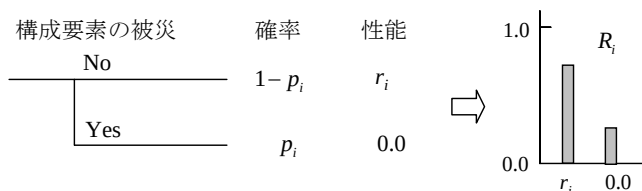


図1 復旧曲線の概念図

要素 i の持つ性能 r_i は被災により0.0になるとする。先ず並列システムでは, システムの性能は要素の性能の和として得られる。

$$R_{sys} = \sum_{i=1}^n R_i \quad (2)$$

ここに, R_{sys} はシステムとしての性能の確率変数を表す。 R_i は要素 i の性能の確率変数であり, 具体的には図2のようになる。図中 p_i は要素の損傷確率を表し Fragility Curve によって求めることができる。

図2 構成要素 i の損傷確率と性能の確率関数

直列システムでは要素の性能の最小値を採ることになり, 以下のようになる。

$$R_{sys} = \min_{i=1}^n R_i \quad (3)$$

一方, 図3は直列・並列が混在するシステムの例である。図の例では(2)式, (3)式を参照し, システム性能の確率変数は以下のようになる。

$$R_{sys} = \min(R_1, \min(R_3, R_4 + R_5) + R_2, R_6) \quad (4)$$

(2)式, (3)式の具体的な計算方法について示す。(2)式は多変数の確率和により求められるが, R_i は確率関数であるため(図2参照), イベントツリー等を用い離散的に計算

Key words: 事業継続計画, 復旧曲線, システム信頼性, システム性能, 地震リスク

連絡先: 東京都新宿区西新宿4丁目5-1 幸伸ビル3F TEL: 03-5351-3781 FAX: 03-5351-3783

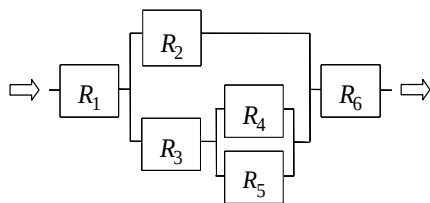


図3 直列と並列の混在システムの例

することができる。(3)式は要素間の損傷事象の独立を仮定すると、以下ようになる。

$$G_R(r) = \prod_{i=1}^n G_{Ri}(r) \quad (5)$$

ここに、 $G_R(r)$ はシステム性能の超過確率関数、 $G_{Ri}(r)$ は要素の性能の超過確率関数である。

次に、軽微や大破などの被災状況に応じて復旧期間が変わる。そこで、被災状況に応じた復旧期間 t を条件に要素の性能の確率関数を評価する。具体的には、既定の復旧期間以上になる要素の損傷確率(例えば軽微以上の確率)を使い(2),(3)式を計算する。これを既定の復旧期間の数だけ繰り返し、復旧期間 t を条件としたシステム性能の超過確率関数 $G_R(r|t)$ を求める。一方、復旧過程については以下の関係が導かれている⁴⁾。

$$G_T(t|r) = 1 - G_R(r|t) \quad (6)$$

(6)式より、性能を条件とした復旧期間の超過確率関数 $G_T(t|r)$ を求め、これを(1)式に適用すれば、復旧曲線を求めることができる。

4. 要素性能の影響シミュレーション

要素の性能の違いによる復旧曲線への影響について示す。図4は4要素から成る並列・直列システムを、性能が異なる3つのケースを取り上げ例示している。各ケースのシステムとしての当初の性能は100%とする。まず、Case1は各要素それぞれが100%の性能を持つので、構成要素の12あるいは34が同時に損傷しない限り、当初の性能(100%)を発揮できる。Case2は要素34が50%の性能であり、これらのどちらか一方が損傷した場合にはシステム性能は50%となる。Case3は全ての要素が50%の性能であり、どれか一つでも損傷すると50%の性能となる。Case1は構成要素に十分な余力があり、1つの要素が損傷しても当初の性能を維持できるが、Case2とCase3は1つの要素の損傷によってシステム性能は半減する可能性がある。

各構成要素の損傷確率を軽微0.2(軽微以上は0.3)、大破0.1とし、復旧には軽微1日、大破30日を要すると仮定する。また復旧は同時復旧とする。前記の定式化に従い復旧曲線を計算し、描画したものを図5に示す。図には復

旧期間(日)の期待値を付記している。図より、要素の性能によって復旧過程は異なり、余力のあるケース1が最も早く当初の性能を回復することが分かる。また、Case1の結果はminimal cut setを用いて計算することができ、一般的な並列システムの解となる。

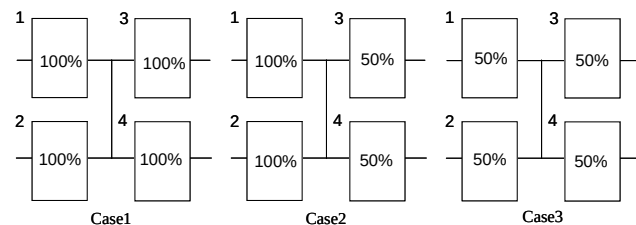


図4 要素の性能の違いを考慮した並列・直列システム

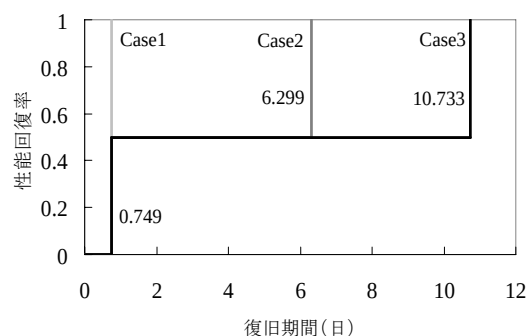


図5 性能の違いによる復旧曲線

5. まとめ

構成要素の性能や余力を考慮した地震時復旧曲線を評価する方法を提案した。4要素から成る並列・直列システムを例に要素性能の違いによる復旧曲線への影響について示した。その結果、要素の性能によって復旧過程は異なり、性能の余力によって早期に当初の性能を回復することが分かった。本手法は水道や道路システム、同一の製品を製作する生産工程など適用範囲は広い。なお、本提案は地震損傷の独立を仮定し、復旧は同時に行われる、などの前提がある。これらの改善点は今後の課題とする。

参考文献

- 1) 中村孝明, 遠藤透:BCP への貢献を目的とした建物の機能確保に関する研究, 建築学会総合論文誌, No.7 都市・建築に関わる安全・安心のフロンティア, pp.87-92, 2009.1
- 2) 中村孝明:BCP 策定支援情報としての操業停止評価と財務影響分析,土木学会第8回地震災害マネジメントセミナー講演集, 2007.3.
- 3) 静間俊郎, 中村孝明, 吉川弘道:地震損傷相関を考慮した施設群の機能停止評価, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.2, 2009.6
- 4) 静間俊郎, 中村孝明:復旧曲線の理論的考察とBCPへの適用, 土木学会第1回地震リスクマネジメントと事業継続性シンポジウム論文報告集, pp.231-236,2009.11