

地震時損傷相関が産業インフラ構成施設の対策優先度に与える影響(その1)

ー機能停止確率評価手法と損傷相関の感度解析ー

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

1.はじめに

生産、物流などの産業施設や鉄道、道路などのインフラ施設は、広域に散在し、これらがシステムとして有機的に繋がることでその機能を果たす。システムを構成する施設等は、規模、構造形式など多種多様であり、建設年代や準拠する基準等により耐震性能も異なる。耐震補強といった地震対策を考える際、説明性の高いリスク情報を基に、要対策施設(部位)やその優先度(重要度)の意思決定を行っている所有・管理者は多い。一方で、施設間の地震被害事象の相関(以下、損傷相関)は、意思決定の拠り所となるリスク評価結果に少なからず影響を与えるとされ^{1),2)}、それに伴い対策施設やその優先度も変わる可能性がある。

本報は、地震時における施設間の損傷相関の程度が、システムを構成する施設の対策優先度に対し、如何に影響するかを検証する。具体的には、本報その1で単純なシステムモデル、その2で具体的なシステム機能モデルを対象とし、システム構成施設群の損傷確率の低減に対するシステム全体の機能停止確率への影響度合を考察する。

2.システム機能停止確率評価方法

以下に、同一敷地に立地する複数の施設を対象に、システム機能停止確率の評価方法を示す。図1に示すように、作用地震動 R を同一、耐力 C_i ($i=1\sim n$)を互いに独立と仮定する。施設の損傷は、確率分布で示される地震動 R の条件付きとして、全確率の定理より、下式で示される。

$$p(E_F) = \sum_{j=1}^m p(E_F | E_{R_j}) p(E_{R_j}) \quad (1)$$

ここに、 E_{R_j} は地震動の発生事象、 E_F は施設の損傷事象である。 j は離散化された作用地震動の要素を表し、 m はその総数である。

次に、 n 棟の施設の Fragility Curve を下式で定義する。

$$P_i(x) = F_{Ci}(x; c_{mi}, \zeta_{Ci}), \quad i=1\sim n \quad (2)$$

式(2)の $F_{Ci}()$ は、対数正規分布の累積確率関数(非超過確率関数)を表し、 c_{mi}, ζ_{Ci} は施設 i の耐力中央値と対数標準

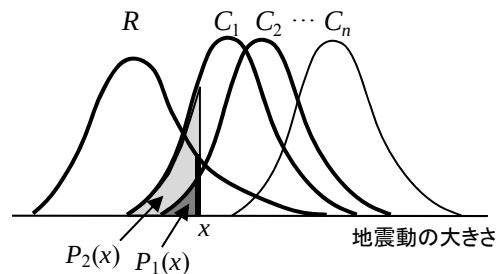


図1 作用地震動と耐力の分布

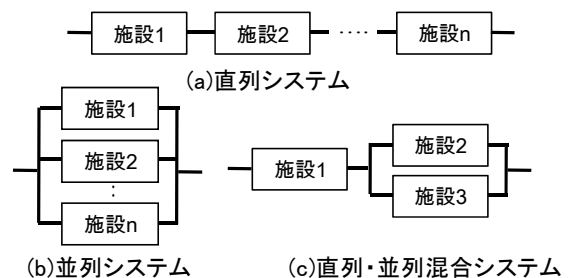


図2 システムモデル

準偏差である。 x は作用地震動を表す。

図2(a),(b)に示すような n 施設で構成される直列、並列システムの機能停止確率は、直列システム中少なくとも1施設が損傷する確率、並列システム中の全施設が損傷する確率として、それぞれ以下のように求める。

$$P_f(r_m) = \int_0^\infty \left[1 - \prod_{i=1}^n \{1 - P_i(x)\} \right] f_R(x; r_m, \zeta_R) dx \quad (3)$$

$$P_f(r_m) = \int_0^\infty \left[\prod_{i=1}^n P_i(x) \right] f_R(x; r_m, \zeta_R) dx \quad (4)$$

上式の $f_R()$ は作用地震動の確率密度関数であり、対数正規分布とする。 r_m, ζ_R は作用地震動の中央値と対数標準偏差である。また、図2(c)のような直列・並列混合システムの機能停止確率は、下式で示す。

$$P_f(r_m) = \int_0^\infty \left[1 - \{1 - P_1(x)\} \{1 - P_2(x)P_3(x)\} \right] \cdot f_R(x; r_m, \zeta_R) dx \quad (5)$$

一方、施設損傷の相関係数については、文献2)を参照し、下式により求める。

$$\rho_F = \frac{\zeta_R^2}{\zeta_F^2} \quad (6)$$

Key words: 産業インフラ施設, リスク評価, 損傷相関, システム機能停止, 対策優先度

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

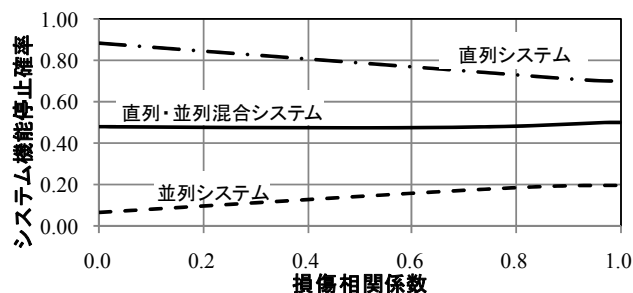


図3 損傷相関に応じたシステム機能停止確率

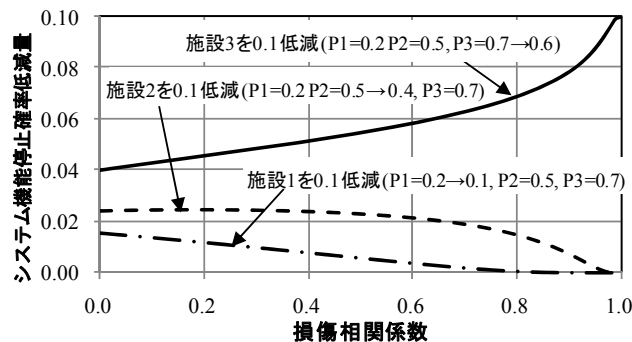
ここに、 ζ_R , ζ_F は、作用地震動および作用地震動と耐力のばらつきが複合した(以下、複合偏差)対数標準偏差である。施設損傷の相関の程度は、式(5)の ζ_{Ci} と ζ_R の関係により決まる。極例として、独立の場合は $\zeta_R=0.0$ 、完全相関の場合は $\zeta_{Ci}=0.0$ となる。

3. 損傷相関によるシステム構成施設対策優先度への影響

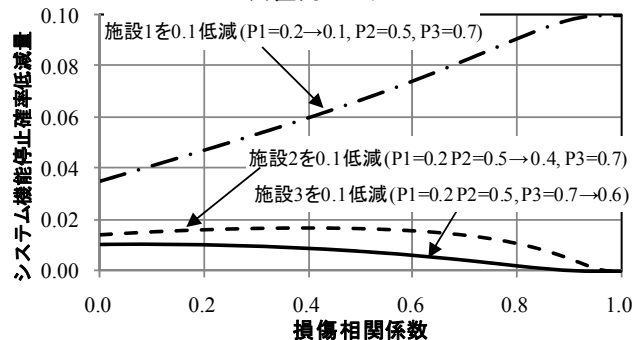
図2(a)~(c)に示した3システムモデルを対象とし、様々な損傷相関の条件において、システム構成施設群の損傷確率の低減に対し、システム全体の機能停止確率の影響度合を考察する。ここで、各システムは3施設で構成されているものとし、それぞれの損傷確率 P_1 , P_2 , P_3 を 0.2, 0.5, 0.7 とする。なお、複合偏差は、3施設同様に対数標準偏差で 0.5 とし、施設間の損傷相関は一定とする。

図3に3モデルの機能停止確率を損傷相関の程度に応じて示す。完全相関の場合、直列システムでは最も弱い施設、並列システムでは最も強い施設の脆弱性で停止確率は決まり、直列で 0.7、並列で 0.2 となる。また、直列・並列混合は $0.5(\max(0.2, \min(0.5, 0.7)))$ となる。

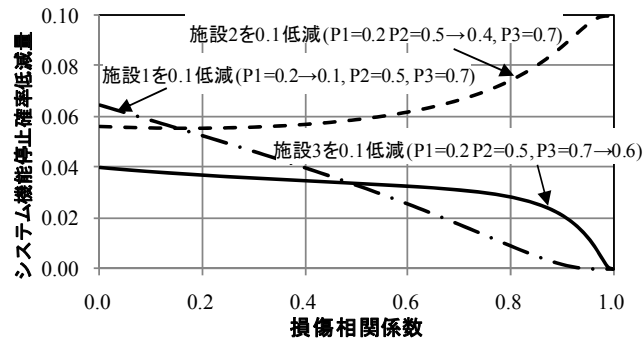
図4(a)~(c)に3施設について耐震対策を想定し、損傷確率をそれぞれ 0.1 低減した場合のシステム機能停止確率の影響度合(図3に示す停止確率からの低減量)を損傷相関の程度に応じて示している。直列システムの(a)では、脆弱な(損傷確率の高い)施設が、停止確率の低減に大きく影響している。ただし、完全相関では、最弱の施設の脆弱性のみが停止確率に影響するのに対し、損傷相関の程度が低くなるにつれ、最弱施設の脆弱性の影響は小さくなる。また、(b)の並列システムは、直列とは反対で、強い(損傷確率の低い)施設が、停止確率の低減に大きく影響している。停止確率は、完全相関では最も強い施設の脆弱性で決まるが、独立では最も強い施設の脆弱性の影響こそ高いものの、他施設との差は特に大きいものではなくなる。直列および並列システムを対象とした本例の場合、損傷相関の程度により、各施設で影響度合の大きさに差はあるものの、施設間の順位は変わらない。影響度合の大きさの順位は、直列では弱い施設、並列では強い施設順となる。



(a)直列システム



(b)並列システム



(c)直列・並列混合システム

図4 損傷相関に応じたシステム機能停止確率低減量

直列・並列混合システムの(c)では、システム機能停止への影響の高い施設の順位が、損傷相関の程度によって変わっている。同図より、停止確率の低減量の大きさについて、独立で施設 1, 2, 3 のであった順が、相関が高くなるにつれ、施設 1 の影響度合が低くなり、相関係数が 0.5 付近では、最も低くなっている。相関の高い箇所では、施設 2, 3, 1 の順で影響度合が大きくなっていることが分かる。

4. まとめ

システム機能停止への影響度合の高い施設の順位は、システムの構成にもよるが、損傷相関の程度に大きく依存する。システムの機能停止を重要視するのであれば、このような傾向は、対策に関する意思決定に大きく影響を与えることになる。

参考文献

- 1) 林孝幸, 福島誠一郎, 矢代晴美: 地震動強度の空間的相関がポートフォリオの地震リスクに与える影響, 建築学会構造系論文集, 第 600 号, pp.203-210, 2006.
- 2) 中村孝明: 相関を考慮した建物群の地震損失確率関数の評価, 建築学会構造系論文集, 第 623 号, pp.49-56, 2007.