

複数の損傷モードを考慮した屋外重要土木構造物のフラジリティー評価手法 ー曲げ破壊とせん断破壊を考慮した構造体のフラジリティー評価ー

日本大学	正会員	中村 晋	(独)原子力安全基盤機構	正会員	中村英孝
(独)原子力安全基盤機構	正会員	森 和成	(株)ニュージェック	正会員	○松本敏克
大成建設(株)	正会員	坂下克之	(株)バーテック	正会員	丹羽三郎

1. はじめに 確率論的な耐震性評価において、フラジリティー曲線が評価されることも多くなっている。複数の損傷モードが存在する場合には、個別の損傷モードに対するフラジリティー曲線は評価されるものの、これらを統合した損傷確率については議論されていないのが現状である。そこで本論では、屋外重要土木構造物を対象として(図-1)、主要な損傷モードである曲げ破壊およびせん断破壊等の複数の損傷モードを考慮し、構造体としてのフラジリティー曲線の評価する手法を構築するために、基礎的な検討を行った。

2. 屋外重要土木構造物の損傷モードの確率特性 屋外重要土木構造物の損傷モードは、曲げ破壊、せん断破壊、曲げせん断破壊に大別される。文献(1)によれば、曲げ破壊の評価基準の一つとして限界層間変形角 $1/100$ が挙げられる。これは曲げの破壊基準の概ね下限を表わすことが示されている。そのため、層間変形角 $1/100$ 以下での損傷モードはせん断破壊となる可能性が高い。一方、曲げせん断破壊の破壊基準は、層間変形角に応じた安全係数にて低減されたせん断耐力でもって規定されているが、 $1/100$ よりも大きな層間変形角となる場合にせん断耐力が低下する定式化がなされている(図-2)。以上より、層間変形角 $1/100$ を境にせん断破壊と曲げせん断破壊を仕分け、この2つの損傷モードを排反事象と仮定して、損傷モードの確率特性を考察した。曲げ破壊が生ずる確率を p 、せん断破壊が生ずる確率を q 、曲げせん断破壊が生ずる確率を r とすると、排反性より $q \cdot r = 0$ となるので、いずれかのモードで損傷する確率(構造体としての損傷確率) P_f は、(式1)で示される。すなわち、せん断破壊と曲げせん断破壊をひとまとめにして扱うことと同義であることを意味しており、以下ではこれらをまとめてせん断破壊 Q として扱うこととする。

$$\begin{aligned} P_f &= 1 - (1-p)(1-q)(1-r) = p + (q+r) - p(q+r) = 1 - (1-p)\{1 - (q+r)\} \\ &= 1 - (1-p)(1-Q) \quad (\text{ただし, } Q = q+r) \end{aligned} \quad (\text{式1})$$

3. フラジリティー曲線における不確実さ フラジリティー曲線は、一般には対数正規累積分布関数により近似的に表現される。評価の際に考慮される不確実さは、物理現象固有のランダム性に起因する偶然的な不確実さ、知識・データ不足などに起因する認識論的な不確実さに大別され、その大きさは対数標準偏差により表わされる⁽²⁾。屋外重要土木構造物の損傷モードごとのフラジリティー曲線の評価事例を示す(図-3,4)。図中には、偶然的な不確実さ β_r のみを考慮したフラジリティー曲線(以下、ランダム曲線と称す)、認識論的な不確実さ β_u を考慮したフラジリティー曲線を示している。 β_u を考慮したフラジリティー曲線は信頼度に応じて示されるが、 β_r と β_u のそれぞれの影響を平均的に二乗和平方根 ($\beta_c = \sqrt{\beta_r^2 + \beta_u^2}$) として考慮した曲線は、コンポジット・フラジリティー曲線と呼ばれている(以下、コンポジット曲線と称す)。

4. 構造体としてのフラジリティー曲線 構造体としてのフラジリティー曲線を以下の手順により評価した。①曲げ破壊およびせん断破壊のフラジリティー曲線のうち、ランダム曲線とコンポジット曲線のそれぞれを(式1)により連結する(図-5)。なお、連結された曲線は対数正規累積分布関数とはならない。②従来の評価と整合を図るため、得られた曲線を対数正規累積分布関数により近似する(図-5)。③その際、各曲線の中央値や β_r 、 β_c を同定し、 $\beta_u (= \sqrt{\beta_c^2 - \beta_r^2})$ を算定する。④連結で得られたコンポジット曲線の中央値を基準に、 β_r 、 β_u 、 β_c を用いてフラジリティー曲線を定式化する。評価結果を図-6に示す。次に、各損傷モードのフラジリティー曲線の近接度が連結した損傷確率に与える影響を考察した。曲げ破壊とせん断破壊のフラジリティー曲線が近接している場合は、連結により損傷確率が大きくなることが確認できる(図-5(b))。また、各損傷モードのフラジリティー曲線が乖離している場合は、連結したフラジリティー曲線は卓越する損傷モードのそれに一致する傾向にある(図-7)。この場合には、卓越する損傷モードのフラジリティー曲線を単独で評価しても、適切な評価が可能であると考えられる。

5. おわりに 屋外重要土木構造物の損傷モードの確率特性を分析した。そして、複数の損傷モードのフラジリティー曲線を連結して構造体としてのフラジリティー曲線の評価手法を提案した。

キーワード：地中構造物、フラジリティー評価、損傷モード、曲げ破壊、せん断破壊

連絡先：〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原1 日本大学工学部 Tel:024-956-8712

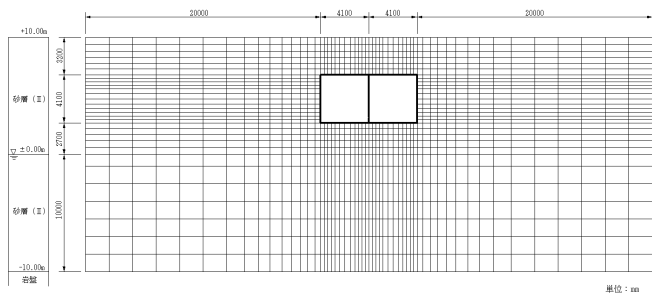


図-1 屋外重要土木構造物の例（海水管ダクト）

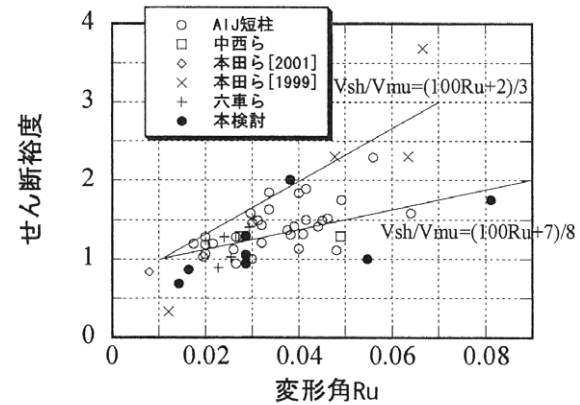


図-2 曲げせん断破壊回避のために必要なせん断裕度⁽¹⁾

認識論的不確実さを考慮したフラジリティー評価

不確実性とその考慮方法		中央値※	対数標準偏差
考慮する 不確実さ	偶然的な不確実さ	2048	0.1452
	認識論的不確実さ	—	0.2660
フラジリティー 曲線の種別	コンポジット・フラジリティー曲線	2048	0.3031
	95%信頼度曲線 (X=-1.65)	1320	0.1452
	50%信頼度曲線 (X=0)	2048	0.1452
	5%信頼度曲線 (X=1.65)	3176	0.1452

※ 対数平均を指数換算した値。単位は (Gal)

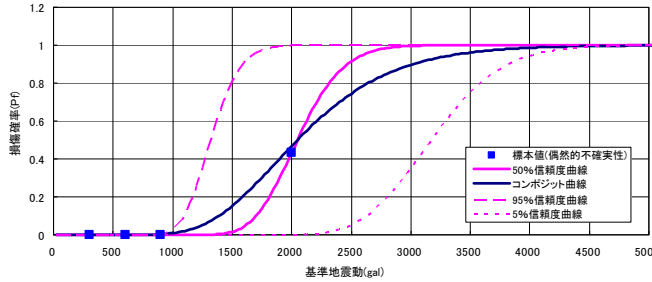
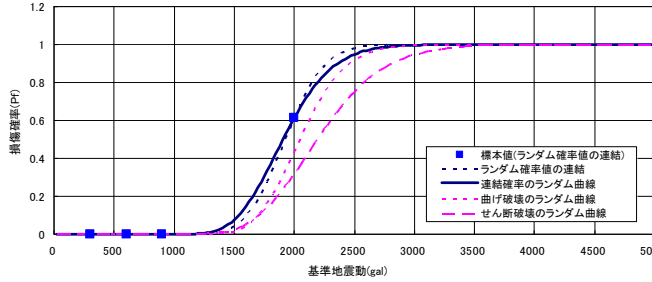


図-3 曲げ破壊に対するフラジリティー曲線



認識論的不確実さを考慮したフラジリティー評価

不確実性とその考慮方法		中央値※	対数標準偏差
考慮する 不確実さ	偶然的な不確実さ	2194	0.1945
	認識論的不確実さ	—	0.2120
フラジリティー 曲線の種別	コンポジット・フラジリティー曲線	2194	0.2877
	95%信頼度曲線 (X=-1.65)	1547	0.1945
	50%信頼度曲線 (X=0)	2194	0.1945
	5%信頼度曲線 (X=1.65)	3113	0.1945

※ 対数平均を指数換算した値。単位は (Gal)

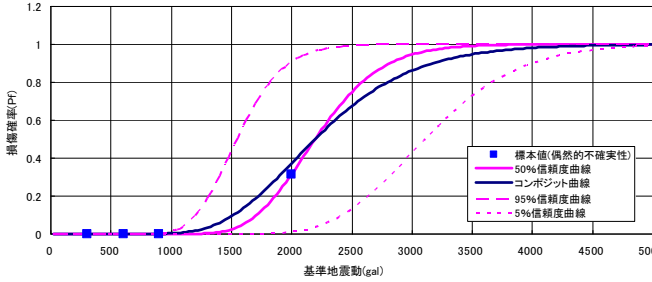


図-4 せん断破壊に対するフラジリティー曲線

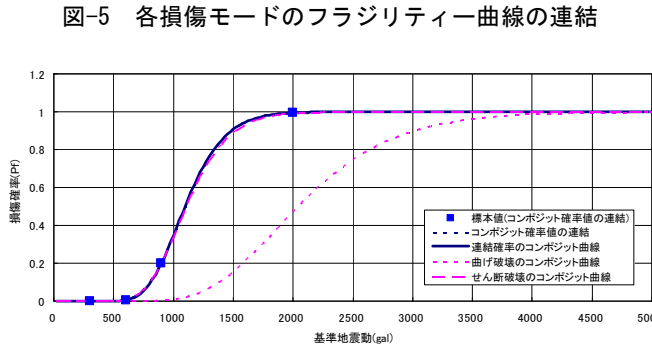
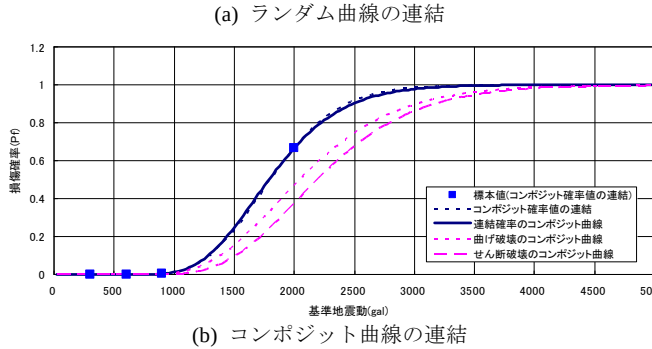


図-5 各損傷モードのフラジリティー曲線の連結

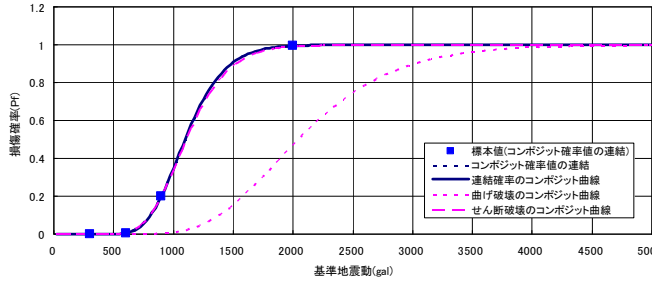


図-7 各損傷モードのフラジリティー曲線の連結
(せん断破壊のフラジリティーが卓越する場合)

認識論的不確実さを考慮したフラジリティー評価

不確実性とその考慮方法		中央値※	対数標準偏差
考慮する 不確実さ	偶然的な不確実さ	1789	0.1669
	認識論的不確実さ	—	0.1966
フラジリティー 曲線の種別	コンポジット・フラジリティー曲線	1789	0.2579
	95%信頼度曲線 (X=-1.65)	1294	0.1669
	50%信頼度曲線 (X=0)	1789	0.1669
	5%信頼度曲線 (X=1.65)	2475	0.1669

※ 対数平均を指数換算した値。単位は (Gal)

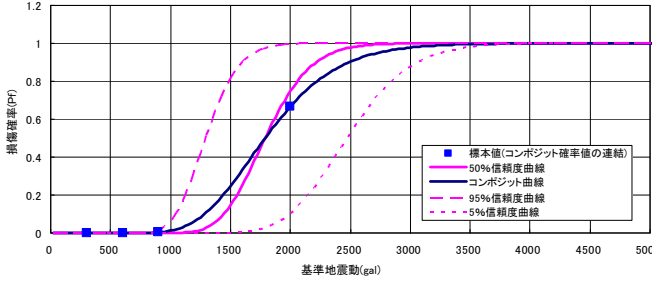


図-6 構造物としてのフラジリティー曲線

〔参考文献〕

- (1) 土木学会：原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル，2005.6
- (2) 日本原子力学会：日本原子力学会標準 原子力発電所の地震を起因とした確率論的安全評価実施基準：2007，2007.9