神田 順氏の討論に対する回答

THE AUTHORS' ANSWER TO DISCUSSION BY DR. JUN KANDA

(Jun KANDA, J. Struct. Constr. Eng., AIJ, No. 504, 141-142, Feb. 1998)

坂本 順*, 森 保宏**

Jun SAKAMOTO and Yasuhiro MORI

The point of the discussion made by Dr. Kanda on the classification of design load into two classes is whether the ultimate and serviceability limit states are considered separately during the design stage. In the current deterministic design method, two levels of design load are determined separately. Under the principle of this method, the serviceability limit state is exceeded with probability 1.0 when the ultimate limit state is exceeded, and the thresholds of these two limit states and the event of exceedence are considered separately. It is reasonable for the probability-based design method to be based on the same principle for the smooth transition from the deterministic design method.

Keywords: structural reliability, limit state design, serviceability limit state, probabilistic load model, order statistics

構造信頼性, 限界状態設計, 使用性限界状態, 荷重の確率モデル, 順序統計量

拙稿 [I] を含めた一連の論文 [II], [III] は, 「決定論的方法によるレベル-1・レベル-2 の地震動強さや基準風速などを確率論的に設定する方法として, 順序統計量に基づいて2つのクラスの荷重の確率モデルを設定する手法を提示し, 具体的な応用考察を加えること」を内容としたものであり, 「性質が異なる2つの性能限界設計のそれぞれに用いる2つのクラスの荷重の確率論的構成法を新たに提案すること」を目的としたものである。拙稿における提案について, 互いに意見を述べて論じあうのは意義があることであり, 以下に, 神田氏の質疑事項について, 筆者らの見解を述べる。

(1) 神田氏の冒頭の指摘;

従来, 1) 信頼性理論を議論するには基準期間の設定が必要であり, それに応じて荷重モデルも考えられている。さらに, 例えば 2) 終局限界に対しては, 基準期間50年, 使用限界に対しては 基準期間1年 というような設定であり, その時, 3) 対象とする荷重モデルとしては, それぞれ50年最大値や年最大値 が用いられる

について, これが神田氏自身の主張か否かが明らかでないが, この記述には, (i) 論理が逆転している点, および (ii) 筆者らが疑問を抱く

点がある。

(i) については, 信頼性に基づく設計法の体系化における筆者らの考え方は,

- a) 時間的に不規則性・変動を伴う荷重 (ここでは, 積雪深, 基準風速, 地震動加速度などとそれらによる荷重作用とは区別せずに, 「荷重」の用語で略記する) については, それらを不規則時系列 (確率過程) としてモデル化する。
- b) 終局限界状態設計および使用性限界状態設計のそれぞれに用いる荷重モデルを設定する。
- c) 構造物の設計供用期間 (以下では「基準期間」の用語で略記する) を想定して, その期間における終局限界状態および使用性限界状態に対する信頼度を取り扱う, あるいは目標信頼度を満足するように設計を行う。

すなわち, 先ず, 荷重のモデルを構成して, それを用いて所定の基準期間における信頼度を評価するのが論理の筋道であると考え。

また, 神田氏は, N 年最大値 (例えば50年最大値) をもちだされているが, 信頼性解析・設計の基本は, N 年間における超過確率または非超過確率であり, この場合, N 年最大値 (確率変数) を必ずしも陽にもちだす必要はない。神田氏の指摘の末尾に記されている「そも

* 愛知工業大学工学部 教授・工博

** 名古屋大学大学院工学研究科 助教授・Ph. D.

Prof., Faculty of Engineering, Aichi Institute of Tech., Dr. Eng.
Assoc. Prof., Faculty of Engineering, Nagoya Univ., Ph. D.

そも最大値としての荷重の大きさを確率的手法により合理的に表現することが信頼性設計において必要である」の文言は、論理構成からの視点ではなく、1つの計算方法上（例えば、すべての荷重を確率変数で表して、Turkstra 則を適用する1つの便法上）の観点からの意見であると判断される。

(ii) の点（年最大値の荷重を用いること）については、筆者らは、使用性限界に対する信頼度を基準期間1年として評価することは、それが汎用的・合理的であるとは言えないと考える。使用性限界設計の枠組みにおいて、対象とする荷重作用・抵抗や性能要件を、どの範囲まで考えるかによって信頼度評価の基準期間の設定の合理性が判断されるものである。例えば、固定荷重、ある床用途の積載荷重、生起が希な地域における雪荷重や地震荷重を取り扱う場合、水圧・土圧、さらに、地盤・基礎の沈下やクリープ、疲労、耐久性などに対する信頼度評価・信頼性設計を含めて考えると、基準期間1年を用いるのは一般論的に疑問である。筆者らは、基本的には、建築物が使用されるとき、設計要件の機能・信頼度が満たされなければならない期間は、終局限界、使用性限界ともに同じ設計供用期間とする設計の枠組みが望ましいと考える。

(2) 拙稿で提示したクラスーU、クラスーSの荷重の確率モデルを終局限界・使用性限界状態設計・信頼度評価に用いることについての神田氏の指摘；

- 1) 使用性限界に対する信頼性指標が、設定された基準期間内に、使用性に関して限界状態を超える確率と対応しなくなってしまう、2) 構造物として使用性が満足されることを確率的に、要求条件として持っているとき、クラスーUの荷重によって使用性が満足されなくなっても、クラスーSの荷重によっても、満足されないという意味では同じである、3) 使用性を満足したいのは、基準期間の最大の荷重に対してであり、そこに上位の荷重を除くような条件がつくことは、建築主や利用者にとって意味をなさない

については、神田氏の偏った考えと誤解があると思われるので、以下に簡単な例を添えて筆者らの見解を述べる。

図-1に示すような時間的に不規則な荷重を受ける構造物を考える。ここでの説明例では、単位時間は1年、荷重は年生起事象とし、各荷重は互いに統計的に独立で同一の確率分布関数 $F_W(w)$ に従うものとする。また、構造物の終局限界抵抗および使用性限界抵抗は、簡単のため確定変数とし、それぞれ r_u および r_s 、基準期間を N 年とする。なお、以下では、終局限界状態は安全性にかかわる限界状態とする。この例では、単位期間において、

- a) 安全性がおかされる事象の確率 P_{fu} は、

$$P_{fu} = 1 - F_W(r_u) \quad (1)$$

- b) 安全性はおかされないが使用性がおかされる事象の確率 P_{fs} は、

$$P_{fs} = F_W(r_u) - F_W(r_s) \quad (2)$$

- c) 使用性がおかされない事象の確率 P_s は、

$$P_s = F_W(r_s) \quad (3)$$

図-1: 時間変動荷重

となる。a), b), c) の事象が、設計上での確率事象となり、これらの事象の全確率は1.0である。因みに、「使用性がおかされる確率」 $(1 - F_W(r_s))$ には、安全性もおかされる事象の確率が含まれる。同様なことは、基準期間 (N 年) においても言える。

ここでの論点は、設計において終局限界と使用性限界を個別に考えるか否かの考え方の問題である。従来の決定論的設計法における2段階設計（レベル-1・レベル-2の荷重強さに基づく設計、あるいは1次・2次設計）では、個別に2つの荷重強さが設定され、両者は荷重の再現期間に基づいて決定もしくは解釈されている。このような設計の基本原則は、図-1の例において、 r_u を超過する事象が生じる場合には必然的に（確率=1で） r_s の閾値がおかされること、また、 r_u と r_s の閾値とこれらの超過事象を個別に考えることを前提としており、確率論に基づく設計法においても同様な考え方をすることが、決定論的設計法との繋がりからも妥当であろう。このような観点から、拙稿では生起率と強さが異なる2つのクラス（集合）の荷重の確率モデルの構成手法を提案したものである。

(3) 神田氏の最後の指摘；

- 1) クラスーSの荷重モデルの設定により見かけの変動係数が小さくなったり、2) 使用性限界状態に対する信頼性指標の値を k_u/m を調整することで自由に換えられたりすることは、数字の操作に過ぎず、実質的に信頼性設計にとって利点をもたらすとは考えにくい、3) 恣意性が入ったクラス分けで、設計の目標を不鮮明にすべきではないと考える

については、神田氏の偏りのある見方であり、極言すると、決定論的方法による2つのレベルの荷重区分も数字の操作となり、また、荷重モデルの構成と信頼度評価には裁量の自由があってはならない、ということになる。統計・確率論は、設計における判断・意思決定を助ける1つの道具 (Tool) であり、そのみですべてが合理的に決定されるものではない。また、信頼性理論を導入した設計法における信頼度は、荷重モデルの構成と相互的に論じられるものであり、要は、荷重のモデル化や信頼度評価は、プロセスが明白であれば、設計における要求性能や荷重の特性などに応じて適切な裁量に任されるものであろう。なお、順序統計量による2つのクラス分けにおける区分順位については、拙稿では恣意性が含まれると記述したが、これは拙稿の研究段階では筆者らの判断によったことを意味したものであり、この点を含めて、荷重や荷重の組み合わせの合理的なモデル化については、確率論に基づく限界状態設計法の体系化において、なお、研究の余地が多く残されている。より進んだ見解は別の機会に述べる。

(1997年10月21日原稿受理, 1997年10月22日採用決定)