

耐震設計における信頼性と裕度について

—設備機器の耐震設計を例に—

- 1 はじめに
- 2 信頼性と設計裕度
- 3 設計裕度の計算例
- 4 むすび

青 木 繁*
鈴 木 浩 平*

要 約

地震によって構造物を構成する部材に生じる力(S)と強度(R)は確率量となることが知られている。このことを考慮して、構造物の地震に対する信頼性を確率論的に評価することがなされている。さらに近年、RがSに対してどの程度余裕をもっているかを表わす、設計裕度を評価することの重要性が指摘されている。本稿では、まず、信頼性と設計裕度の関係、設計段階に存在する不確定性について述べ、不確定性と信頼性の関係の実例を示す。さらに、著者らは許容限度内の塑性変形を許すことによって、設備機器の信頼性を向上させることができることを明らかにしたが、この信頼性向上のための手法が設計裕度の観点から見てどの程度有利であるかを計算した例を示す。

1 はじめに

耐震設計においては、地震によって構造物を構成する各部材に生じる力を計算する。この力に部材が十分に耐えられると判断されれば設計は完了し、耐えられないと判断されれば設計を変更する。当然のことながら、部材が耐えうる力(強度R)は部材に生じる力(S)よりも大きくとらなければならない。部材が構造物内で果たす役割が大きいほど、すなわち重要度が高いほど、 $R-S$ または R/S の値は大きくとられる。 R/S は安全率または安全係数としてよく知られている量であり、多くの構造物の設計に使われている。RをSよりも大

きくとする理由として、当然のことながら、そのように設計しないと構造物が破壊してしまうということがあげられるが、一方でRおよびSが確定的な値であることはなく、ある統計量を有するという実状があり、この統計量を考慮しても破壊が起こらないようにしなければならないことがあげられる。このようなことから、構造物の信頼性を確率論的に評価する必要性が指摘されている。さらに統計量を考慮した場合にはRはSと比較して大きければ大きいほどよいが、Rを大きくしすぎると、建設費は高くなり、構造物が本来の目的である機能を果たせなくなることもありうる。このようなことから、RがSと比較してどの程度大きいかが、すなわちどの程度の余裕をもって設計されて

* 東京都立大学都市研究センター・工学部

いるかを評価し、合理的な設計法を探ろうとする研究がなされるようになってきた。この余裕のことを“設計裕度” (design margin) とよぶ。

本稿では、まず信頼性と設計裕度について概説する。次に、設計段階において存在する種々の不確定性を分類し、その実例を示す。また、これらの不確定性と設計裕度の関係について述べ、地盤の不確定性を考慮した実例を示す。さらに、著者らは許容限度内の塑性変形を許すことによって設備機器の信頼性を向上させられることを明らかにしたが、この手法が設計裕度の観点からどの程度有利であるかを計算した例を示す。

2 信頼性と設計裕度

ここでは、信頼性と設計裕度の関係を示す。次に、設計段階に存在する不確定性を分類する。さらに、この不確定性と設計裕度との関係について述べる。信頼性を表わす量としては、構造物が破壊しない確率、すなわち信頼度と、構造物が破壊する確率、すなわち破壊確率 (1 - 信頼度) がある。以下では破壊確率を用いて信頼性を評価することにする。

2.1 設計裕度と破壊確率の関係

これまでのところ、設計裕度に関する明確な定義はないが、設計裕度をMとして式で示すと

$$M = R - S \quad (1)$$

または

$$M = R / S \quad (2)$$

となるであろう (Thoft-Christensen 他, 1982), (USNRC, 1981)。式(1)では $M > 0$ 、式(2)では $M > 1$ であれば構造物は破壊しないことになる。RおよびSが確定値であれば上記の関係が成り立つぎりぎりの値で設計すればよいが、実際には後述するようにRおよびSは確率量となるので、これを考慮した設計をしなければならない。

RおよびSが確率量である場合に、設計裕度を表わすひとつの指標として、次の式で示される信頼性指標 β がある (Thoft-Christensen, 1982)。

$$\beta = \bar{M} / \sigma_M \quad (3)$$

ここで、 \bar{M} は設計裕度の期待値、 σ_M は設計裕度の標準偏差を表わす。RとSが無相関であり、両者の分布が正規分布であるとすると、 β は

$$\beta = \frac{\bar{R} - \bar{S}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (4)$$

ここで、 \bar{R} および \bar{S} はそれぞれRおよびSの期待値、 σ_R および σ_S はそれぞれRおよびSの標準偏差を表わす。

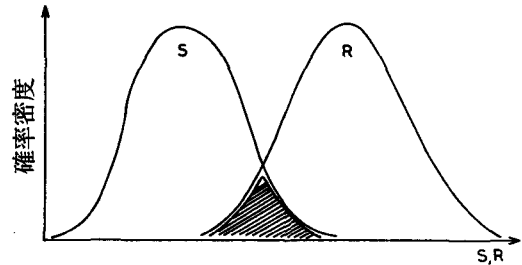


図1 構造物の破壊確率の概念

RおよびSが確率量である場合の両者の関係を図1に示す。RをSより相当大きくとつても、図中に斜線で示した $R - S < 0$ となる確率、すなわち破壊確率 P_f が存在し、この場合には P_f が許容される範囲内にあるかどうか問題となる。R - S < 0 となる確率を求めることは、式(4)において $\beta < 0$ となる確率を求めることに対応する。 β から P_f を求める式は

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (5)$$

ここで $\Phi(\cdot)$ は標準正規分布を表わし、 β と P_f の関係を示すと表1のようになる。 $\beta = 0$ が $P_f = 50\%$ に相当し、 β が大きいほど P_f は小さくなる。

表1 β と P_f の関係

β	P_f (%)
0	50.00
1	15.87
2	2.27
3	0.13

一方、破壊確率は構造物の応答が破定値である破壊レベルを越えるかどうかを判定することによって求めることが多い。この場合にはRが確定値ということになり、Sの分布が一定であればRが大きくなるほど P_f は小さくなる図2のような曲線が得られる。 \bar{M} および σ_M はそれぞれ次のようになる。

$$\bar{M} = R - \bar{S} \quad (6)$$

$$\sigma_M = \sigma_S \quad (7)$$

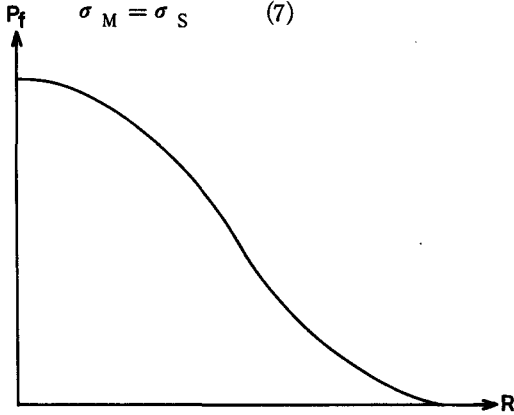


図2 強度と破壊確率の関係

Sの分布が正規分布であるとすれば、 \bar{S} は $P_f = 0.5$ に相当するSの値であり、 σ_S は $P_f = 0.86$ と $P_f = 0.5$ に相当するSの値の差、または $P_f = 0.5$ と $P_f = 0.16$ に相当するSの値の差であるから、 \bar{M} および σ_M はそれぞれ次のようになる。

$$\bar{M} = R - S \Big|_{P_f = 0.5} \quad (8)$$

$$\sigma_M = \left| S \Big|_{\substack{P_f = 0.86 \\ P_f = 0.16}} - S \Big|_{P_f = 0.5} \right| \quad (9)$$

ここで、 $S \Big|_{P_f = p}$ は $P_f = p$ となるSの値を表す。

2.2 設計段階における不確定性

構造物の信頼性や裕度を確率的に評価する必要性が指摘されているのは、設計の各段階で種々の不確かさ（不確定性）が存在するからである。このような不確かさは一般に次の2つに大別される。

- 1) 本質的な不規則性
- 2) モデル化の不確定性

本質的な不規則性

- 振動特性（固有振動数，減衰比，連成効果，弾塑性挙動）
- 材料特性（強度，寸法，弾性係数）
- 応答特性（応力，応答スペクトル）
- 入力特性（最大加速度，継続時間）

モデル化の不確定性

- 力学モデル
- 確率分布モデル

図3 本質的な不規則性とモデル化の不確定性

これらをまとめると図3のようになる。本質的な不規則性は何らかの方法でその統計的特性を求めることができる。一方、モデル化の不確定性は、解析をするために実機を力学モデルに置き換える、あるいは実験や調査などによって得られた確率分布に従来から数式で与えられている確率分布モデルをあてはめる場合に生じる誤差であり、求めることが困難な場合が多い。

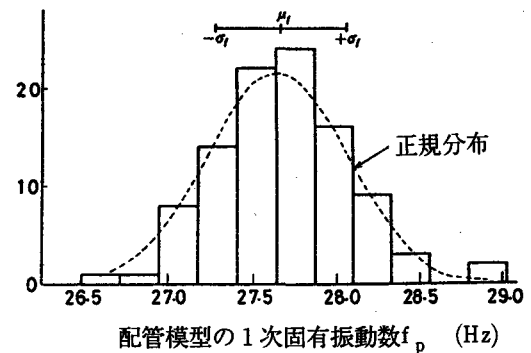


図4 配管模型の1次固有振動数 f_p

のヒストグラム

図4にこれらの不確定性の例を示す。このグラフは同一形状，同一寸法で作成された100本の配管模型の固有振動数の分布である。ヒストグラムは実験から得られた分布である。このように，同一仕様で作成されたものでも，材質の不均一性、

加工誤差などによって図のように固有振動数が変動する。さらに、解析を行う際に得られた分布に近い分布をもつ破線のような確率分布をあてはめる。破線で表わした分布とヒストグラムはよく対応してはいるが、厳密には両者には差がある。前者が本質的な不規則性であり、後者がモデル化の不規則性にあたる。

実際の確率論的な評価においては、両者の不確定性を別々に評価し、両者による不確定性を合成することによって全体の不確定性を評価する(USNRC, 1981)。

2.3 設計における裕度

設計において、RおよびSが統計的な特性を有することを考慮して、強度に余裕があるようにしなければならないが、どのような点に不確定性が存在するかを、設備機器の耐震設計を例に考察してみる。

設備機器は一般に建物の内部に設置されているために、耐震設計においては地盤特性だけでなく、建物の特性も考慮する必要がある。したがって、設計段階でこれら3者に関連するパラメータの値を決めて設備機器の強度を検討することになる。設計において、不確定性が含まれるパラメータの例を示すと次のようになる。

- ・地盤……せん断弾性係数, 構造減衰, 地層の厚さ
- ・建物……減衰, 振動数, 材料特性, 土との相互作用
- ・設備機器……減衰, 振動数, 材料特性

地盤に関するパラメータは、最大地動加速度と深い関係があり、この最大加速度の値によって建物や設備機器の応答も大きく変わってくる。さらに図3にも示したように、設備機器や建物の振動を解析する際に用いる力学モデルの設定における誤差などにも不確定性が含まれる。さらに、地震の発生する頻度の評価に用いられる確率分布の設定にも不確定性が含まれる。

以上のように、設備機器の設計においては各種の不確定性を考慮し、これらの不確定性が存在した場合でも設備機器が破壊しないように設計しな

ければならない。したがって、ここに設計裕度の問題が生じる。パラメータの値が全部確定値として得られるなら、この確定値から得られた応力が強度をわずかに下回っていればよいことになる。不確定性は一般に、標準偏差または変動係数(標準偏差と期待値の比)で評価されるが、上記のことは逆の見方からすれば標準偏差または変動係数が小さいほどパラメータの値は確定値として扱えるようになるので、設計裕度を小さくとることができることを意味している。しかしながら、標準偏差が小さくなるような信頼性の高いパラメータの値の分布を得るためには非常に多くのサンプルを用いた実験や調査が必要となり、このような実験や調査が不可能であるパラメータまたは本質的に変動の大きいパラメータがあれば、そのパラメータの標準偏差は大きくとらなければならない。

パラメータの不確定性と破壊頻度の関係を求めた例を図5に示す。この図は、地盤の最大せん断弾性係数の変動係数と設備機器を含むプラントの1年間当たりの破壊頻度の関係を表わしている

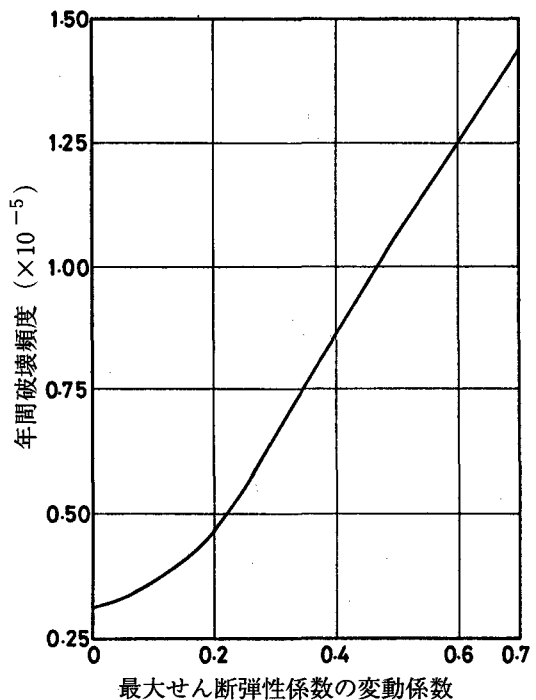


図5 地盤の最大せん断弾性係数の不確定性が破壊頻度に与える影響

(Michalopoulos, 1985)。この図によると、せん断弾性係数の変動係数の値が0.2から0.7に増加すると破壊頻度は3倍になる。したがって、実験や調査によって信頼性の高い、すなわち変動係数の小さいせん断弾性係数の分布が得られれば破壊頻度は小さくなり、設計裕度も小さくすることができる。しかしながら、信頼性の高い分布が得られない場合には破壊頻度が大きくなるので、設計裕度も大きくとらなければならない。

3 設計裕度の計算例

筆者らは、総合都市研究第17号(青木他, 1982)で、建物内に設置された設備機器の破壊特性の推定結果を示した。ここで設備機器に許容限度内の塑性変形を許すことによって線形系と比較して破壊確率を低減できる可能性が示された。

本章では、塑性変形を許容した場合に、線形系として設計した場合と比較してどの程度の設計裕度があるかを計算した例を示す。

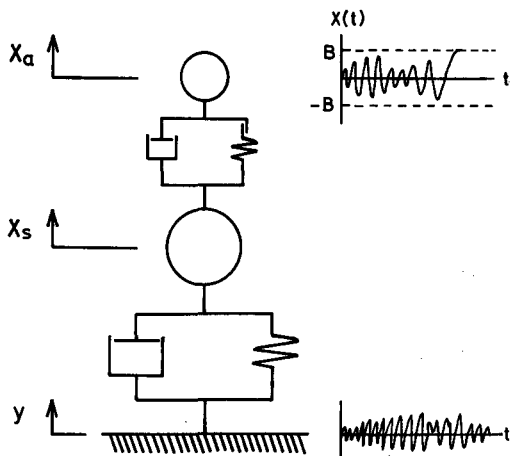


図6 設備機器の初通過問題

破壊特性の推定の概略を示すと次のようになる。設備機器の地震応答を求めるため、設備機器および建物をそれぞれ1質点系で模擬した図6に示す2質点結合系モデルを用い、建物の基礎部に地震波を入力として与える。設備機器を模擬した上質点系の応答の絶対値が最初に破壊レベルを超過し

た瞬間に設備機器が破壊するものとする初通過問題に着目し、多数の地震波を入力として設備機器の初通過破壊確率を求めた。入力地震波としては、図7に示す高圧ガス施設耐震設計用応答スペクトル(通産省, 1980)の第I種地盤(第三紀層)に対応する応答スペクトルに適合する非定常模擬地震波を用いた。地震波の振幅非定常性を表わす包絡関数は図8に示す関数(Jennings他, 1968)を用いた。このような模擬地震波を50波用いて、地震波が終了した時点における破壊確率を求めた。

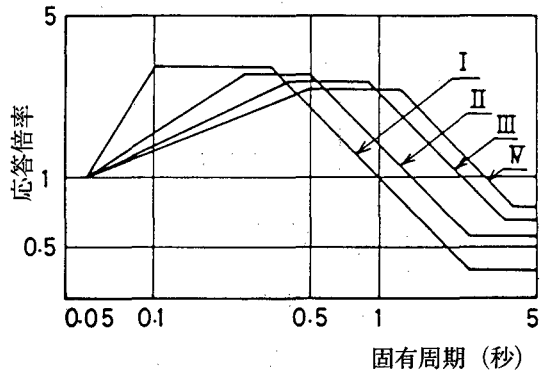


図7 高圧ガス施設耐震設計用応答スペクトル (減衰比5%)

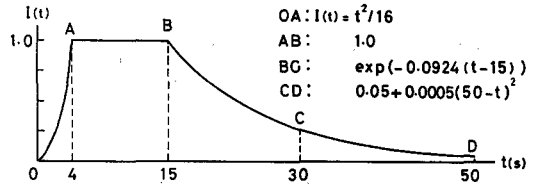


図8 地震波の振幅非定常性を表わす包絡関数

まず、設備機器が線形系である場合に絶対加速度応答に対して得られた破壊確率の推定例を図9に示す。この図は、設備機器の重量が建物の重量と比較して無視しうるほど小さい、すなわち重量比 $\gamma = 0$ であり設備機器および建物の減衰比 h_a および h_s をそれぞれ0.01および0.05、両者の固有周期 T_a および T_s をいずれも0.3sとした場合の破壊確率である。横軸は破壊レベルであり、図7で得られる建物の最大応答加速度で除した無次元量で表わしている。

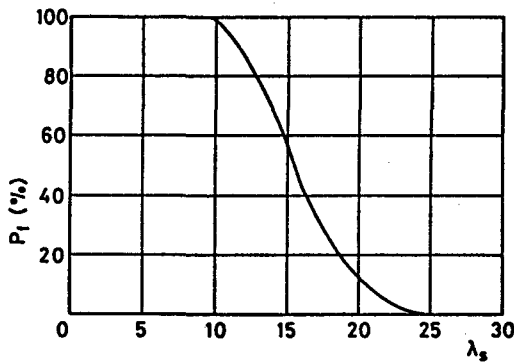


図9 線形系に対する初通過破壊確率
($\gamma=0, h_a=0.01, h_s=0.05, T_a=T_s=0.3s$)

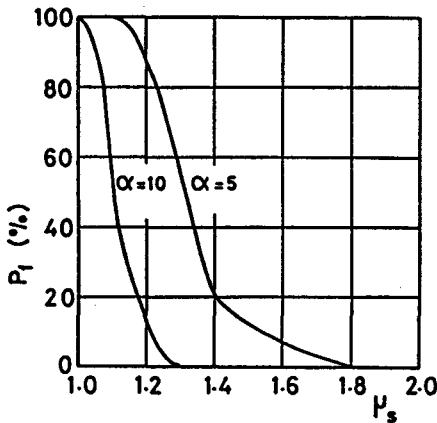


図10 非線形系に対する初通過破壊確率
($\gamma=0, h_a=0.01, h_s=0.05, T_a=T_s=0.3s$)

次に、設備機器の復元力特性が完全弾塑性履歴モデルで表わされる場合の破壊確率を図10に示す。この場合には加速度による破壊確率は非常に小さくなるが、塑性変形による破壊が支配的となるので、設備機器と建物の間の相対変位応答に着目した。図中の α は降伏力と建物の最大加速度応答の比であり、 α が小さいほど塑性変形しやすい。横軸は破壊レベルで、降伏変位で除して無次元化した量である。 $\alpha=10$ の場合には降伏変位の約1.3倍、 $\alpha=5$ の場合には約1.8倍以上の塑性変形が許容されれば、破壊確率はほぼ零となる。

以上の結果から、塑性変形が起こりうる場合でも線形系として設計した場合には、初通過問題に関する限り、式(4)から裕度の統計量を求めることができる。標準偏差は式(9)を用いて求める。

$P_f=0.16$ の場合の破壊レベルから標準偏差を求めると、

$$\alpha=10 \text{ のとき } \bar{M}=0.0114 \text{ cm/gal,} \\ \sigma_M=0.0094 \text{ cm/gal}$$

$$\alpha=5 \text{ のとき } \bar{M}=0.0217 \text{ cm/gal,} \\ \sigma_M=0.0093 \text{ cm/gal}$$

したがって、信頼性指標で表わすと

$$\alpha=10 \text{ のとき } \beta=1.21$$

$$\alpha=5 \text{ のとき } \beta=2.33$$

となる。当然のことながら、初通過問題に関しては、 $\alpha=5$ の場合の方が塑性変形による吸収エネルギー量が大きく、 $\alpha=10$ の場合と比較して設計裕度が大きい。

4 むすび

耐震設計における信頼性および設計裕度を評価する場合に考慮すべき種々の不確定性を示し、設計裕度と破壊確率の関係およびその関係を用いた設計裕度の計算例を示した。信頼性および設計裕度の確率論的評価に関する研究は現在も進められていて、解決されていない問題点もある。その問題点としてはたとえば次のようなことがあげられる。

1. 構造物の強度やそれに生じる力などの統計的な特性を把握できるほどの十分なデータが得られていないことが多く、期待値や分散の値を仮定して計算がなされる場合も多い。
2. 破壊様式間あるいはパラメータ間の相関特性を考慮すると計算が複雑になるので、相関特性を無視することが多い。このようにして信頼性を評価すると、過度に安全側の評価になることがある。
3. 人間が関与する場合のhuman errorに関して検討がなされているが、人間の誤操作は確率分布で表わせないような重大な事故を招く可能性があり、その評価について問題が多い。

これら以外にも問題点が多く、今後はひとつずつ問題点を解決するような方向で研究、調査が進められるであろう。

文献一覧

- Thoft-Christensen P., Baker M.J.
1982 Structural Reliability Theory and Its Applications, Springer-Verlag, pp81-93
- USNRC
1981 System Response Review, NUREG/CR-1706
Michalopoulos A.P., et al.
1985 "Effects of Variability in Soil-Structure Interaction Parameters on Probabilistic Seismic Risk Assessment", Proceedings of the 8th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, M2M1 1/2
- 青木繁, 鈴木浩平
1982 「機械設備の地震破壊特性について」
『総合都市研究』第17号, pp.69-76
- 通産省
1980 『高圧ガス製造施設等耐震設計基準』
- Jennings P.C., Housner G.W. and Tsai N.C.
1964 Simulated Earthquake Motions, Caltech.E.E.R.L. Report

ON RELIABILITY AND DESIGN MARGIN IN ASEISMIC DESIGN
—EXAMPLE OF ASEISMIC DESIGN OF MECHANICAL EQUIPMENT—

Shigeru Aoki* and Kohei Suzuki*

*Center for Urban Studies, Tokyo Metropolitan University
Comprehensive Urban Studies No.29, 1986, pp.101—108

It is well known fact that stress, S and resistance, R of the members which consist of structures subjected to earthquake excitations are statistical variables. Reliability of such structures is evaluated by considering this fact. Recently, it is pointed out that evaluation of a design margin is one of the significant problems. The design margin represents how much R is larger than S . In this report, relationship between reliability and design margin and uncertainty existing in design are mentioned. Then, an example of relationship between uncertainty and reliability is shown. Further, the authors has shown that the reliability of the mechanical equipment is developed by permitting permanent deformation within admissible range. One examples is shown which shows effectiveness of this method from the viewpoint of the design margin.