

# 機械設備の地震時破壊特性の推定について

青木 繁\* 鈴木 浩平\*

## 要 約

各種の施設内の重要な機械設備が破壊された場合、十分な都市機能を維持することが困難となるため、とくに大地震時においても重要な機械設備は極力破壊を避けるように設計されなければならない。大地震が発生したときの危険度の評価が各方面で行われているが、重要な機械設備の破壊特性を推定することが、都市の地震に対する危険度を評価するうえで、重要な要素のひとつとなっている。

本稿では、都市機能維持と密接に関係する機械設備の破壊特性の考え方について概説し、著者らが行った解析について述べる。

地震危険度を評価する上で重要な要素のひとつとなっている。設計に当たっては、破壊確率を十分に小さくするようにしなければならない。

## 1. はじめに

大地震時に、電力施設や通信施設などのような都市機能維持施設内の変圧器、通信機器、コンピュータなどが破壊された場合、十分な都市機能を維持することが困難となる。また、大都市およびその周辺にある産業施設内の有毒物を含む貯そうタンクや配管などが破壊されると、都市住民に重大な影響をおよぼすことが予想される。このようなことから、各施設内における機械設備は、大地震の際にも破壊しないで、その機能を十分に維持できるように設計されなければならない。

以前に設計は安全率を用いて設計されていた。安全率は、材料の強度(引張強さや降伏点など)と設計応力(設計に使われる公式などから得られる応力)との比で表わされ、1より大きい値をとる。安全率は強度や設計応力に不確定な要素があると、それを補うために大きな値をとらなければならない、経験的に決められることも多かった。

一方で、地震波などの不規則な荷重に対しては、統計的な取扱いが必要となる。そこで、とくに重要な機械設備の地震時における安全性を確率論的に評価する必要性がでてきた。この安全性を定量的に示す量として、構造物の破壊確率  $P_f$  および信頼度  $P_s=1-P_f$  がある。

最近、各方面で地震危険度の評価が行われている。(東京都防災会議, 1978) 地震危険度は、地震の発生確率の推定から始まり、多くの要素を考慮して評価されるが、その中で、機械設備の破壊確率を推定することが、

## 2. 機械設備の破壊確率

一般に構造物の破壊確率は、概念的に示すと図1のようになる。 $R$ は構造物の強度、 $S$ は構造物に作用する応力であり、図の曲線はそれぞれ  $R$  および  $S$  の確率密度関数を表わしている。破壊は  $R$  が  $S$  より小さくなったときに起こり、その確率  $P_f$  は次の式で与えられる。

$$P_f = \int_0^{\infty} \int_0^s p(S, R) dR dS \quad \dots(1)$$

ここで  $p(S, R)$  は  $S$  と  $R$  の結合確率密度関数

地震が発生したために起こる機械設備の破壊確率は、次のようないくつかの条件付確率と、その条件である事

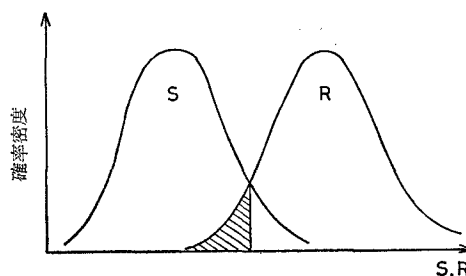


図1 構造物の破壊確率の概念

\* 東京都立大学都市研究センター・工学部

象が起こる確率をかけ合わせるによって求められる。(Shinozuka, 1978)

$$P(F) = P(F|O) \times P(O|S) \times P(S|I) \times P(I|E) \times P(E) \quad \dots(2)$$

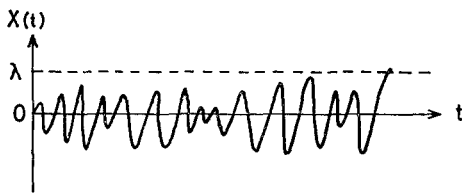
式(2)で  $P(x|y)$  は  $y$  が与えられたときに  $x$  が起こる確率、すなわち条件付確率を表わす。 $P(E)$  は地震が発生する確率、 $P(I|E)$  は地震が発生したときに震度が  $I$  以上である確率、 $P(S|I)$  は震度が  $I$  以上で応答スペクトルがある一定でレベルに達する確率、 $P(O|S)$  は応答スペクトルがある一定のレベルに達して応力超過が起こる確率、 $P(F|O)$  は応力超過が起こって実際に破壊する確率を表わす。

一般に機械設備の設計に対しては、応答スペクトルまたはそれが設置されている床面の床応答スペクトルが与えられることが多く、機械工学の立場からは  $P(O|S)$  および  $P(F|O)$  に関心がある。さらに、通常の解析では、応力などの注目している量がある一定の基準に達したときに破壊するものとすることが多い。したがって、本稿では式(2)の  $P(O|S)$  に注目する。また、ここでは応力について述べたが、必要に応じて加速度、変位あるいは後で述べる累積損傷量が用いられる。

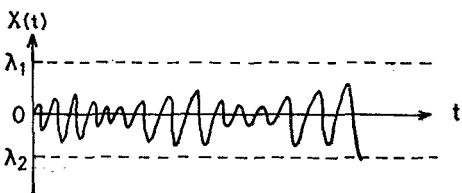
### 3. 破壊のメカニズム

構造物の破壊のメカニズムとして、大きく分けて次の2つに分けられる。

- 1) 初通過破壊
- 2) 累積疲労破壊



(a) 片側通過問題



(b) 両側通過問題

図2 初通過破壊

初通過破壊は、図2(a)に示すように、構造物の応答が最初に破壊レベルを越えたとき、すなわち  $x(t) > \lambda$  となったときにその構造物の破壊が起こる。図2(a)に示すように、破壊レベルがひとつの場合を片側通過問題、図2(b)のように破壊レベル2がつの場合を両側通過問題という。また、図3のように速度と変位などのように異なる2つ以上の応答  $x(t)$ 、 $y(t)$  を考慮する場合もある。脆い材質の構造物が衝撃的な力を受けた場合などはこのメカニズムで破壊が起こる。

累積疲労破壊は、構造物が繰返して作用する力のために疲労が累積して破壊する場合である。材料に一定の振幅の繰返し応力を加えると、ある繰返し数(サイクル数)で破壊してしまう。このときの応力振幅と破壊までのサイクル数を示すと図4のようになる。このようなメカニズムで破壊する場合を累積疲労破壊という。

地震波などのような不規則な波は振幅が変動するので、機械設備も不規則な力を受けることになる。このような不規則波に対しては、累積疲労の度合を表わす  $D$  値が用いられる。 $D$  値は次のように与えられる。

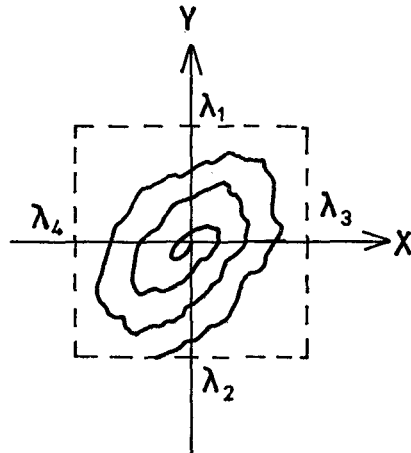


図3 初通過破壊(2つの応答を考慮する場合)

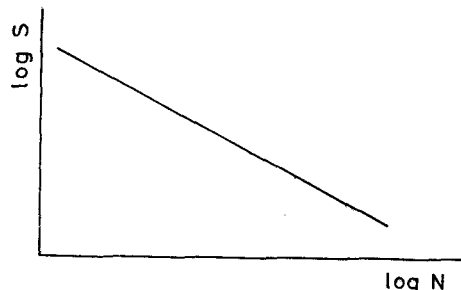


図4 応力振幅と破壊までのサイクル数の関係

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \quad \dots(3)$$

ここで、 $N_i$  は  $S_i$  の繰返し応力を加えたときに材料が破壊するまでのサイクル数、 $n_i$  は  $S_i$  の大きさの応力を受けたサイクル数

破壊の基準として  $D=1$  のときに破壊するとするのが Miner 則であるが、実際には破壊するときの  $D$  の値は確率量となる。(市川, 1980)

#### 4. 破壊確率に影響を与える確率量

構造物の応答が確率量となるためには、次の3通りの組み合わせが考えられる。

- 1) 入力が確率量で構造物が確定系であるとき
- 2) 構造物の振動特性や強度などが確率量で入力確定量であるとき
- 3) 入力および構造物の振動特性や強度が確率量であるとき

1) については1. で述べたように地震波は再現性がなく、不規則な波であることから、入力として地震波のような不規則な波を扱う場合は入力を確率量として扱わなければならない。

2) については、設計の段階で材料の寸法を指定したとしても加工誤差や測定誤差などの影響で長さや径などがばらつく。したがって、構造物の振動特性(固有振動数や減衰比など)を確率量として扱う必要性がでてくる。また、材料の強度(引張強さなど)が確率量となることも多くの実験で確かめられている。

3) については、入力も構造物の振動特性や強度も確率量とする場合である。

以下に、1) について著者らが行った初通過破壊確率に関する解析について述べる。

#### 5. 機械設備の初通過破壊確率の推定

各種の施設内に設置された重要な機械設備の両側通過問題における初通過破壊確率をシミュレーション法によって推定し、履歴復元力特性を考慮したときの破壊確率の低減効果について検討する。図5に応答解析の流れの概略を示す。機械設備はそれが設置されている建屋などの主構造物系から地震入力を受けるため、主構造物系の振動特性も考慮しなければならない。ここでは簡単のため、機械設備および主構造物系をそれぞれ1質点系で模擬した。

##### 5.1 入力地震波

入力地震波としては、耐震設計用応答スペクトルに適合する模擬地震波を用いる。耐震設計用応答スペクトル

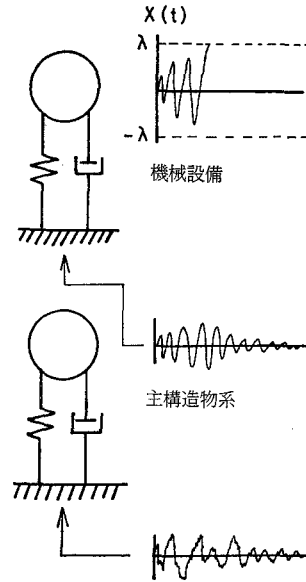


図5 応力解析の流れ

としては図6に示す高圧ガス施設の耐震設計用応答スペクトル(通産省, 1980)を用いる。図中のローマ数字は地盤種別(鈴木, 1980)を表わす。本解析では、多くの機械設備の固有周期が存在する領域に近い周期域で応答倍率が高くなる第I種地盤の応答スペクトルを用いた。さらに、地震波の振幅特性は時間とともに変化する非定常性をもつ。このため、包絡線をかけて振幅特性に非定常性をもたせた。包絡線は図7に示す4種類の分割型包絡線(Jennings 他, 1968)を用いた。図7でABの部分为主要動に対応する。図8にCタイプの包絡線を用いて作成した模擬地震波の一例を示す。

##### 5.2 解析結果

図8に示したような模擬地震波をそれぞれの包絡線に対して50波作成し、特定の時刻ごとに次の式で破壊確率  $P_f(t)$  を推定した。

$$P_f(t) = N_f(t) / N \quad \dots(4)$$

ここで、 $N_f(t)$  は時刻  $t$  までに機械設備の応答  $x(t)$  が  $\lambda$  または  $-\lambda$  を越えた数、 $N$  は模擬地震波の数

$P_f(t)$  を推定する場合、 $x(t)$  として何に注目するかが問題となる。ここでは比較的短周期域にある構造物を対象としているので、力による破壊を想定し、 $x(t)$  として機械設備の絶対加速度応答に注目する。構造物の振動特性を決めるひとつのパラメータとして減衰比がある。解析に当たって、機械設備および主構造物系の減衰比は一般的に使われている値として、それぞれ0.01および0.05

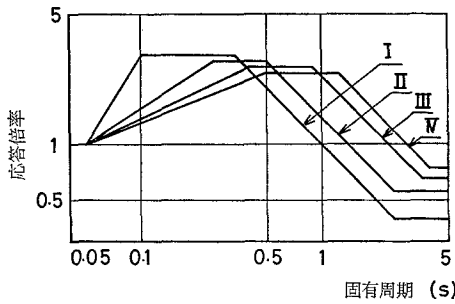


図 6 目標応答スペクトル (減衰比 5%)

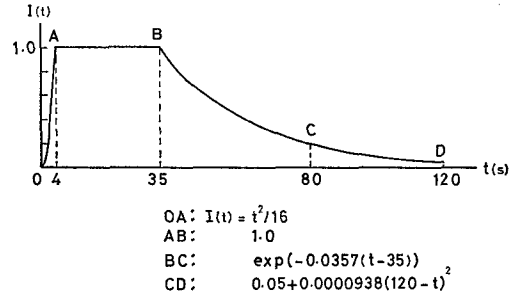


図 6 (a) 包絡線 A

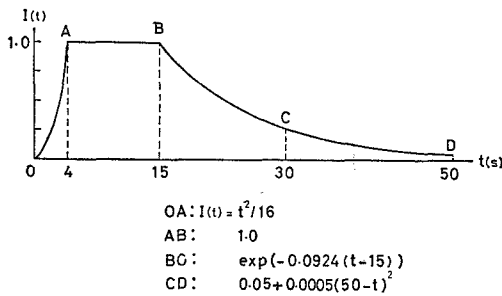


図 6 (b) 包絡線 B

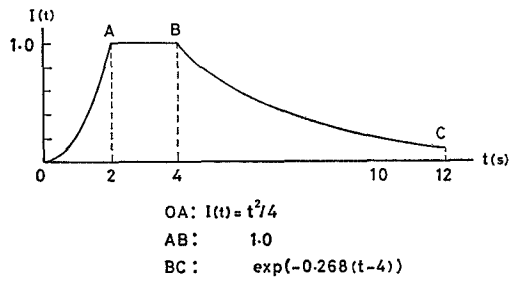
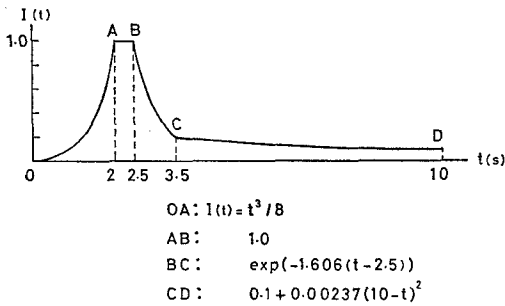


図 6 (c) 包絡線 C



(d) 包絡線 D

図 7 模擬地震波作成に用いた包絡線

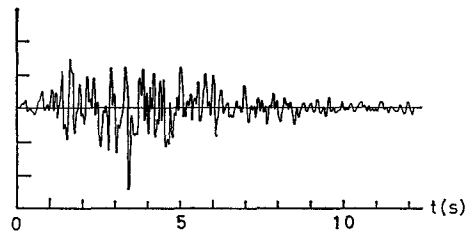


図 8 模擬地震波の一例 (包絡線 C)

とした。

まず、機械設備と主構造物系の固有周期が一致する機械設備にとって耐震設計上最悪条件となる場合の  $P_f(t)$  について検討する。 $\lambda$  として次の式で示される値を用いる。

$$\lambda = \frac{\text{破壊するときの機械設備の応答倍率}}{\text{目標応答スペクトルで与えられる応答倍率}} \dots(5)$$

機械設備と主構造物系の地震応答量の比の期待値は著者らの解析から(青木他, 1981),  $T_a = T_s$  のとき約10となるので、 $\lambda$  が10以上の場合に対して  $P_f(t)$  を推定した。

Cタイプの模擬地震波を用いて推定した  $P_f(t)$  を図

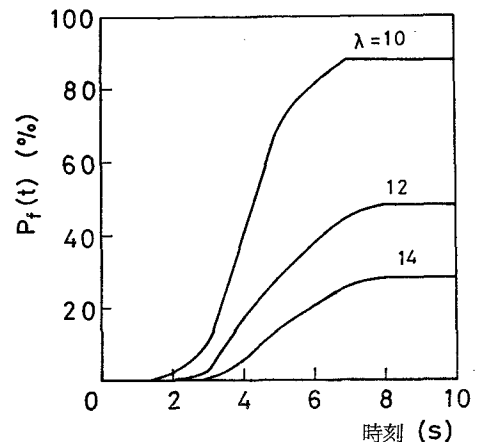


図 9 機械設備の破壊確率 ( $T_a = T_s = 0.2s$ , 包絡線 C)

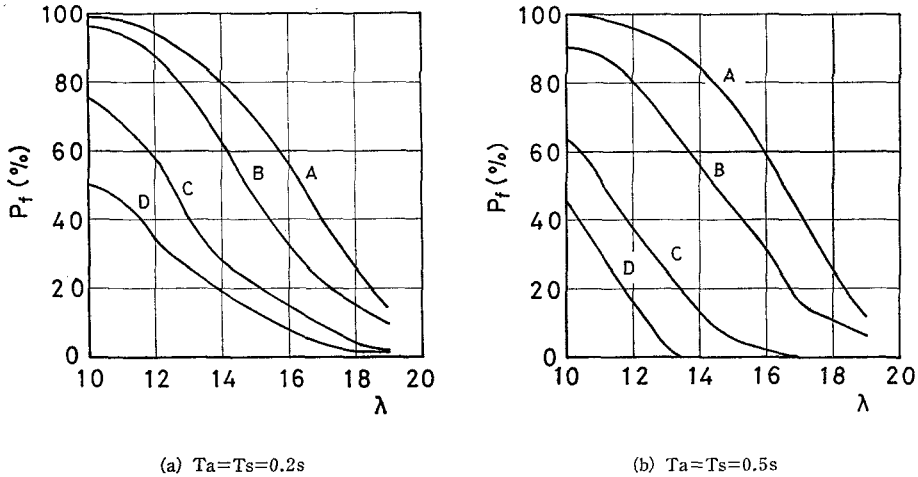


図 10 機械設備の破壊確率

表 1 機械設備の破壊確率

( $T_a=T_s$ , 包絡線 B)

$T_s \backslash \lambda$	0.2s	0.3s	0.4s	0.5s	$\bar{P}_f$
10	96	100	100	90	97
11	94	96	96	88	94
12	88	88	84	80	85
13	74	82	76	68	75
14	62	62	52	56	58
15	50	52	34	46	46
16	32	38	28	32	33
17	22	36	22	16	24
18	16	28	10	12	17
19	10	18	6	6	10

表 2 機械設備の破壊確率

( $T_a/T_s=1.2$ , 包絡線 B)

$T_s \backslash \lambda$	0.15s	0.2s	0.3s	$\bar{P}_f$
5.0	90	94	92	92
5.5	76	74	82	77
6.0	48	58	52	53
6.5	28	42	28	33
7.0	14	24	8	15
7.5	8	2	6	5
8.0	4	2	0	2
8.5	2	0	0	1

9に示す。この図では  $T_a=T_s=0.2s$  とした。地震入力が始まってからほぼ7~8秒以上経過すると、 $P_f(t)$  が一定となっている。すなわち、これ以上の時刻では破壊が起こらなくなっている。実際の地震時における機械設備の安全性を考えると、地震入力終了したときに破壊していないことが重要である。したがって、以後は  $P_f(t)$  が一定となったときの値を破壊確率とよび、 $P_f$  で表わすことにする。図10(a), (b) にそれぞれ  $T_a=T_s=0.2s$  および  $0.5s$  としたときの  $P_f$  を4種類の包絡線に対して推定した結果を示す。両図から、A, Bタイプの包絡線のように比較的 main motion が長いとき、それぞれの  $\lambda$  に対して固有周期に対する  $P_f$  の変動が小さくなる特徴がみられる。表1に包絡線Bを用いて推定した  $P_f$  の値を示し、右の欄にそれぞれの固有周期にわたって

平均した期待  $\bar{P}_f$  値を示した。 $\bar{P}_f$  は比較的 main motion の長い地震入力を受けたときの破壊確率の推定のための重要な指標となることが期待される。

次に、 $T_a$  と  $T_s$  が異なる場合の  $P_f$  について検討する。この場合も適用できる周期の範囲は狭くなるが、比較的 main motion の長い地震動入力に対して表1と同様に、それぞれの  $\lambda$  に対して固有周期による  $P_f$  の変動が小さくなる傾向がみられた。そこで表2にBタイプの包絡線を用いて推定した  $P_f$  および  $\bar{P}_f$  を、 $T_a/T_s=1.2$  の場合について示した。

### 5.3 破壊確率の低減

機械設備の復元力特性に、図11に示すような完全弾塑性履歴特性を考慮したとき、エネルギー吸収効果によって破壊確率を低減させられることが期待される。この履歴

特性は、振幅が小さく復元力が降伏力以下のときは、復元力と振幅の関係は直線的に変化するが(図11のAB)、振幅が降伏変位を越えると復元力が一定となる(図11のBC)。振幅が小さくなるとABに並行な直線に戻る(図11のCD)。この節では、どの程度破壊確率を低減させられるか検討する。

完全弾塑性履歴特性では、降伏力がひとつのパラメータとなる。降伏力  $F$  は次の式で定める。

$$F = \alpha \times \text{目標応答スペクトルで与えられる 応答倍率} \dots\dots\dots(6)$$

式(6)で  $\alpha$  は降伏力の大きさを表わすパラメータで、 $\alpha$  が小さいほど降伏力が小さくなって、塑性変形しやすい。図12に  $\alpha=10$  としたときの  $P_f$  を示す。この場合、機械設備の加速度は、降伏力に相当する加速度をそれほどは上回らないので、降伏力に対応する  $\lambda$  以上では  $P_f$  は急速に小さくなる。

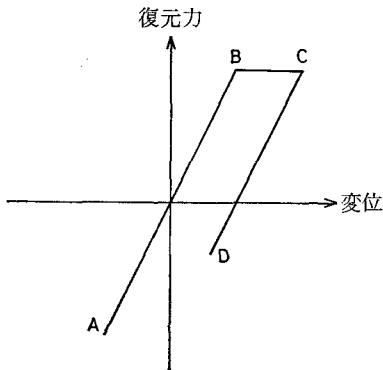


図 11 完全弾塑性履歴特性

一方、完全弾塑性履歴特性では永久変形が大きくなって破壊することもあるので、機械設備の主構造物系に対する相対変位に注目して  $P_f$  を推定する。破壊レベルとしては次式で示される  $\mu$  を用いる。

$$\mu = \frac{\text{機械設備が破壊するときの相対変位}}{\text{降伏変位}} \dots(7)$$

図13(a), (b)にそれぞれ  $\alpha=10$  および5としたときの  $P_f$  を示す。図13(a)から、包絡線Aを用いた場合をのぞいては、 $\mu$  が1.3以上では  $P_f$  はほとんど零となる。したがって、この程度の塑性変形が許容されるならば破壊確率を十分に低減させられる。また図13(b)から、 $\mu$  が1.8以上では  $P_f$  がほとんど零となる。

以上のように、機械設備にある程度の塑性変形が許容

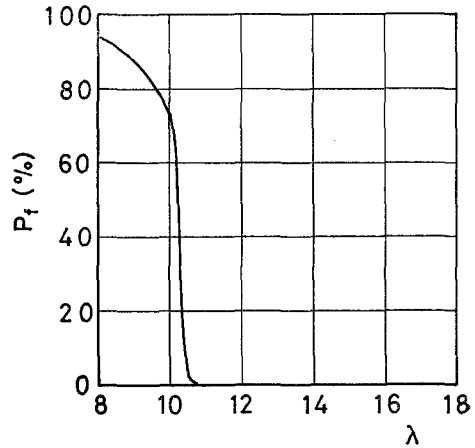
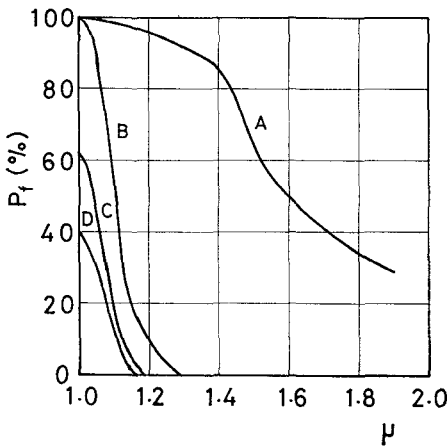
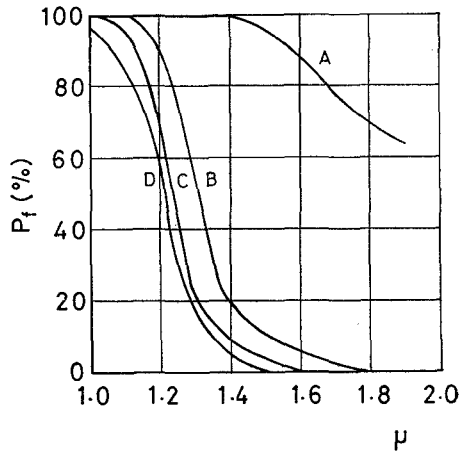


図 12 機械設備の破壊確率 ( $T_a=T_s=0.2s$ ,  $\alpha=10$ )



(a)  $\alpha=10$



(b)  $\alpha=5$

図 13 機械設備の破壊確率 ( $T_a=T_s=0.3s$ )

されるならば、破壊確率を低減させられることが明らかになった。ここでは簡単のために完全弾塑性履歴特性の場合について検討したが、実際の構造物の複雑な履歴特性の場合も同様にエネルギー吸収効果が期待できるので、ここで示した方法は、破壊確率の低減のためのひとつの有用な手段といえる。

## 6. ま と め

大地震時における都市機能維持に密接に関係する重要な機械設備の破壊特性について概説し、初通過破壊確率に関する解析結果について述べた。

今後は破壊確率を低減させる方法、および推定された破壊確率を地震危険度評価にどのように繰入れていくかが問題となるであろう。また、機械設備の破壊のメカニズムも実験などによって解明される必要があるであろう。

## 文 献 一 覧

東京都防災会議

- 1978 『東京区部における地震被害の想定に関する報告書』

Shinozuka

- 1978 『地震時耐力の信頼性評価に関する研究経過報告書』

市川 昌弘

- 1980 「信頼性工学——機械構造物の強度信頼性——」『日本金属学会会報』第19巻，第7号，pp. 487～493。

通産省

- 1980 『高圧ガス製造施設等耐震設計基準』

鈴木 浩平

- 1980 「高圧ガス施設の地震対策の現状と問題点」『総合都市研究』第11号，pp. 79～93。

P.C. Jennings, G.W. Housner, and N.C. Tsai

- 1964 Simulated Earthquake Motions: Cal. Tech. E.E.R.L. Report

青木 繁・鈴木浩平

- 1981 「付加構造物系の地震応答量の簡易推定法——床応答増幅係数による推定法——」『日本機械学会論文集』第47号，第422巻，pp. 1286～1295。

## ESTIMATION OF FAILURE CHARACTERISTICS OF MECHANICAL EQUIPMENT DURING EARTHQUAKE EXCITATION

Shigeru Aoki and Kohei Suzuki

Center for Urban Studies, Tokyo Metropolitan University

*Comprehensive Urban Studies*, No. 17, 1982, pp. 69-75

When important mechanical equipment in many facilities lose their performance during earthquake excitation, it is difficult to maintain usual life conditions. It has been important to estimate failure characteristics of important mechanical equipment for estimation of risks during earthquakes.

This paper is a summary which considers the failure characteristics of mechanical equipment and analysis which is concerned about the failure characteristics of such equipment.