

鋼橋の設計法

Dr. Hiroshi TANAKA

Yoshida-Gumi Co.Ltd

鋼橋設計法の分類

設計法	細区分
弾性設計法	許容応力度設計法 荷重係数設計法 限界状態設計法
塑性設計法	_____
最適設計法	_____

許容応力度設計法とは？

- 許容応力度設計法とは、各種の荷重によって鋼材各部材に発生する応力の合計が許容応力度を上回らないように部材断面を設計する方法をいう

許容応力度設計法のFORMAT

$$\sigma \leq \sigma_a$$

$$\tau \leq \tau_a$$

(4.6)_{1~2}

鋼材の許容応力度

許容応力度の 総称記号	作用力の区分	公式の詳細	安全率 γ の値
σ_a	引張 (曲げ引張)	$\sigma_{ta} = \sigma_y / \gamma$	$\gamma = 1.6 \sim 1.7$
	圧縮	$\sigma_{ca} = \sigma_{cu} / \gamma$	
	曲げ圧縮	$\sigma_{ba} = \sigma_{bu} / \gamma$	
τ_a	せん断	$\tau_a = \sigma_y / (\gamma \sqrt{3})$	

[注] σ_y : 降伏点、 σ_{cu} : 柱の座屈強度

σ_{bu} : 梁の横倒れ座屈強度

たわみの許容量 δ_a

$$\delta \leq \delta_a \quad (4.2)$$

信頼性と安全率

- i) 荷重強度のばらつき
- ii) 材料の強さのばらつき
- iii) 鋼橋を解析するときのモデル化による誤差
- iv) 製作・施工の誤差

変動量

- 平均

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i \quad (4.3)$$

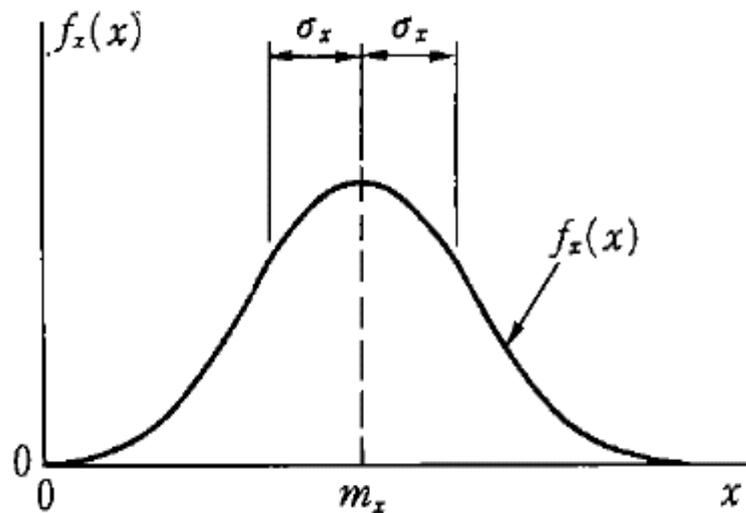
- 標準偏差

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.4)$$

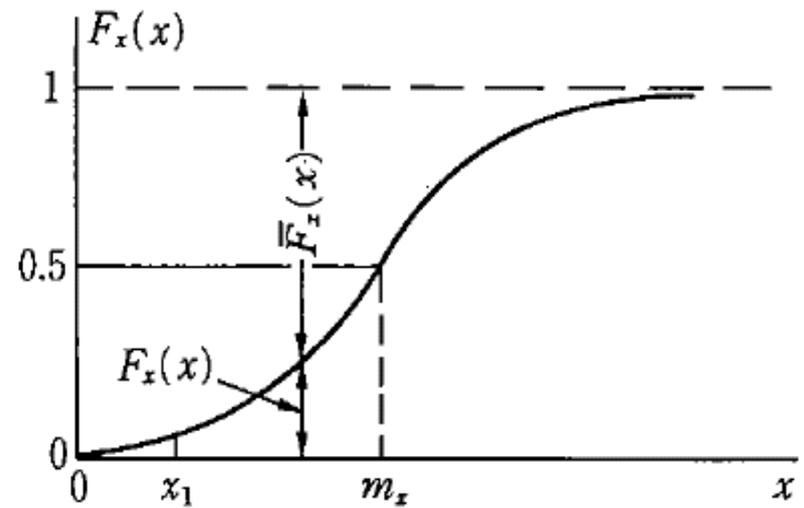
- 変動係数

$$v_x = \frac{\sigma_x}{m_x} \quad (4.5)$$

$f_x(x)$ と $F_x(x)$



(a) 確率密度関数 $f_x(x)$



(b) 累積確率密度関数 $F_x(x)$

$f_x(x)$ と $F_x(x)$ の関係

$$\frac{dF_x(x)}{dx} = f_x(x)$$

(4.6)₁

$$F_x(x) = \int_{-\infty}^x f_x(x) dx$$

(4.6)₂

x が x_1 より大きくなならない確立 P_f

$$P_f = F_x(x_1) = \int_{-\infty}^{x_1} f_x(x) dx \quad (4.7)$$

Pとkの関係

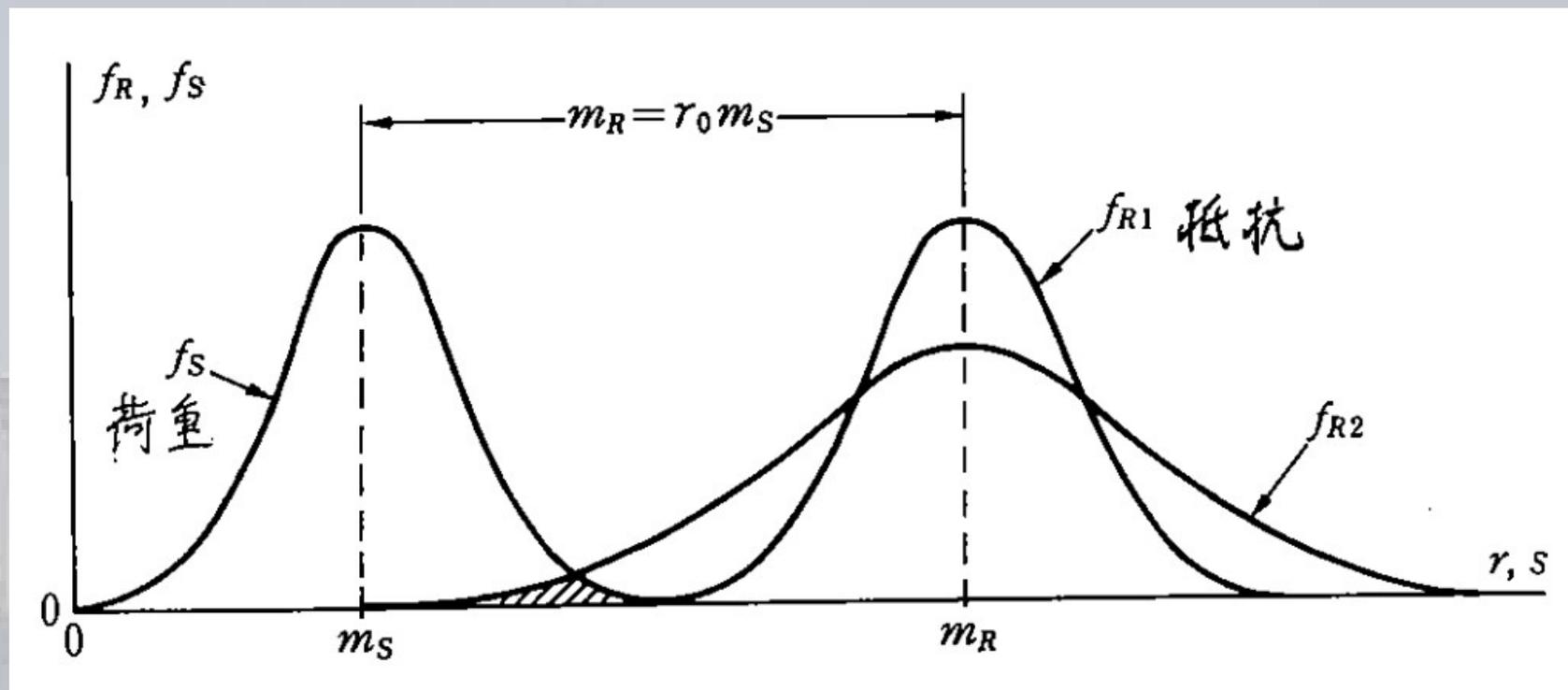
P(%)	k
20	0.842
10	1.282
5	1.645
2.5	1.960
2.275	2.000
1.0	2.326
0.135	3.0
0.0032	4.0
0.00003	5.0

特性値 x_p ($p\%$)と標準偏差 σ_x との関係

$$x_p = m_x \pm k\sigma_x$$

(4.10)

破壞確率 (P_f)



P_f の計算

$$P_f = \int_0^{\infty} \int_0^s f_R(r) f_S(s) dr ds = \int_0^{\infty} f_S(s) \left\{ \int_0^s f_R(r) dr \right\} ds = \int_0^{\infty} f_S F_R(s) ds$$

(4.11)

旧来の中央安全率 γ_0 とは

$$\gamma_0 = \frac{m_R}{m_S}$$

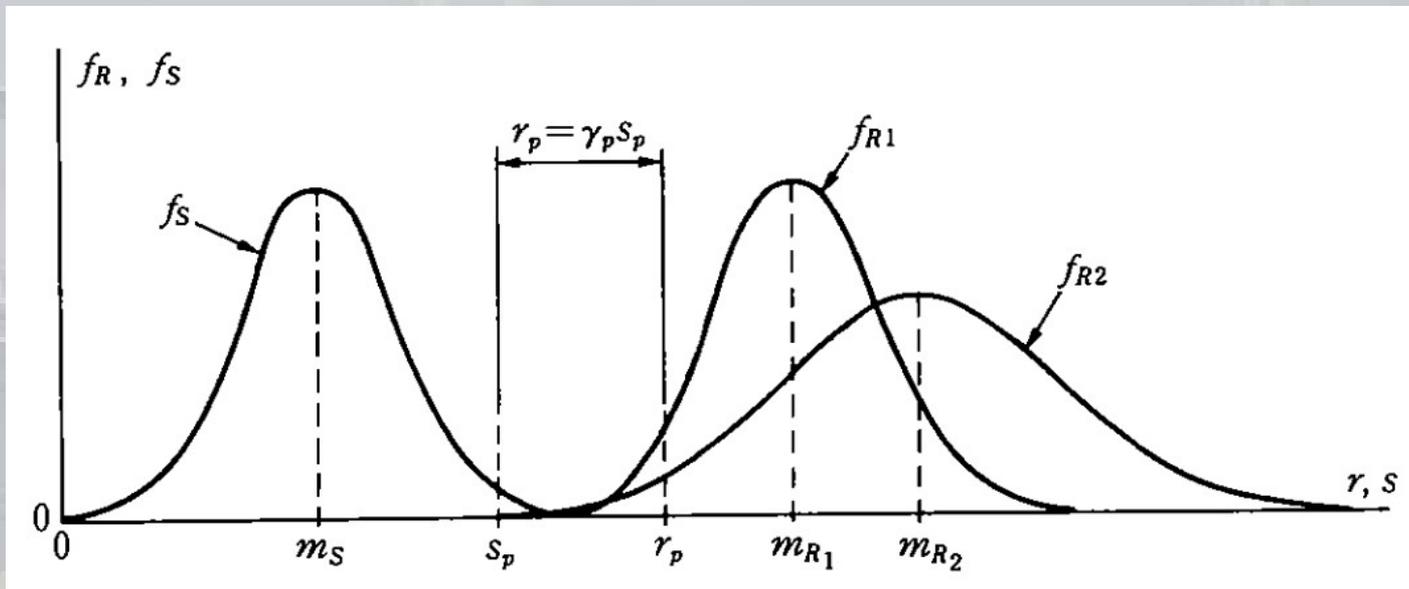
(4.12)

- これらのことから、同じ中央安全率 γ_0 をもつ場合でも、抵抗 R の標準偏差 σ_R の大きさにより、破壊確率 P_f には著しい差異が現れる。すなわち、図示のように、 f_{R1} と f_{R2} との場合では、大きいばらつきをもった f_{R2} の方が f_{R1} よりも破壊確率 P_f が大きくなる。したがって、ばらつき(標準偏差)が大きいものが同一の破壊確率 P_f を確保するためには、中央安全率 γ_0 を大きくしなければならない。

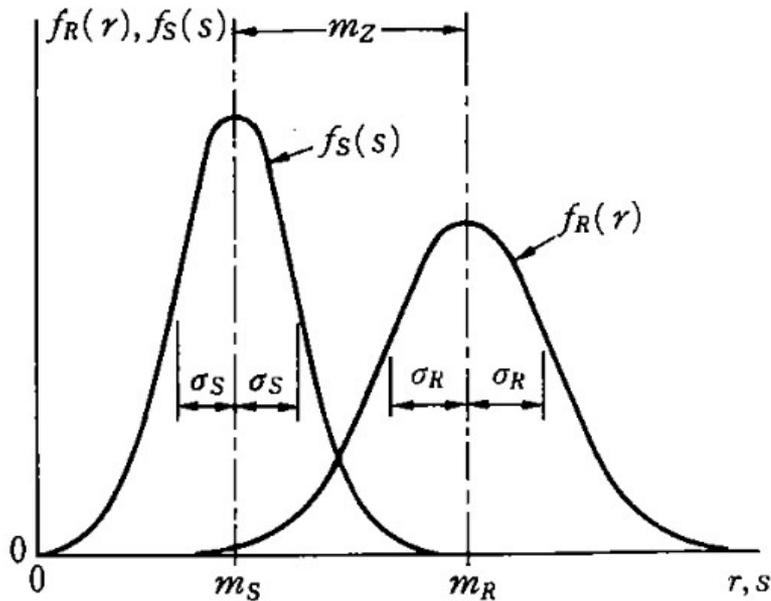
見かけの安全率 γ_p

$$\gamma_p = \frac{r_p}{S_p} \quad (4.13)$$

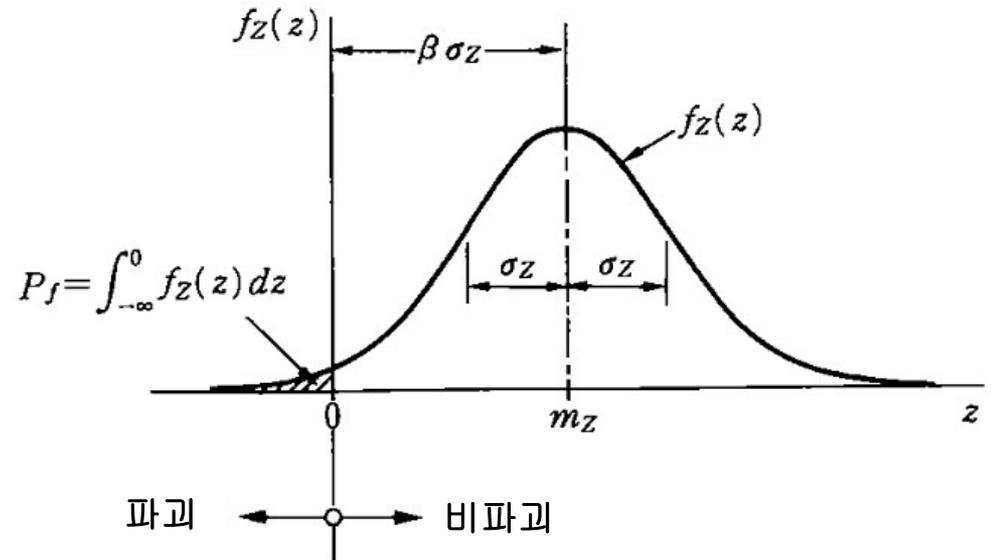
を決めるための特性値 r_p 及び S_p において、ばらつきが、
決定的な要因となる。



信頼性指標 (β)



(a) s と r の分布



(b) z の分布

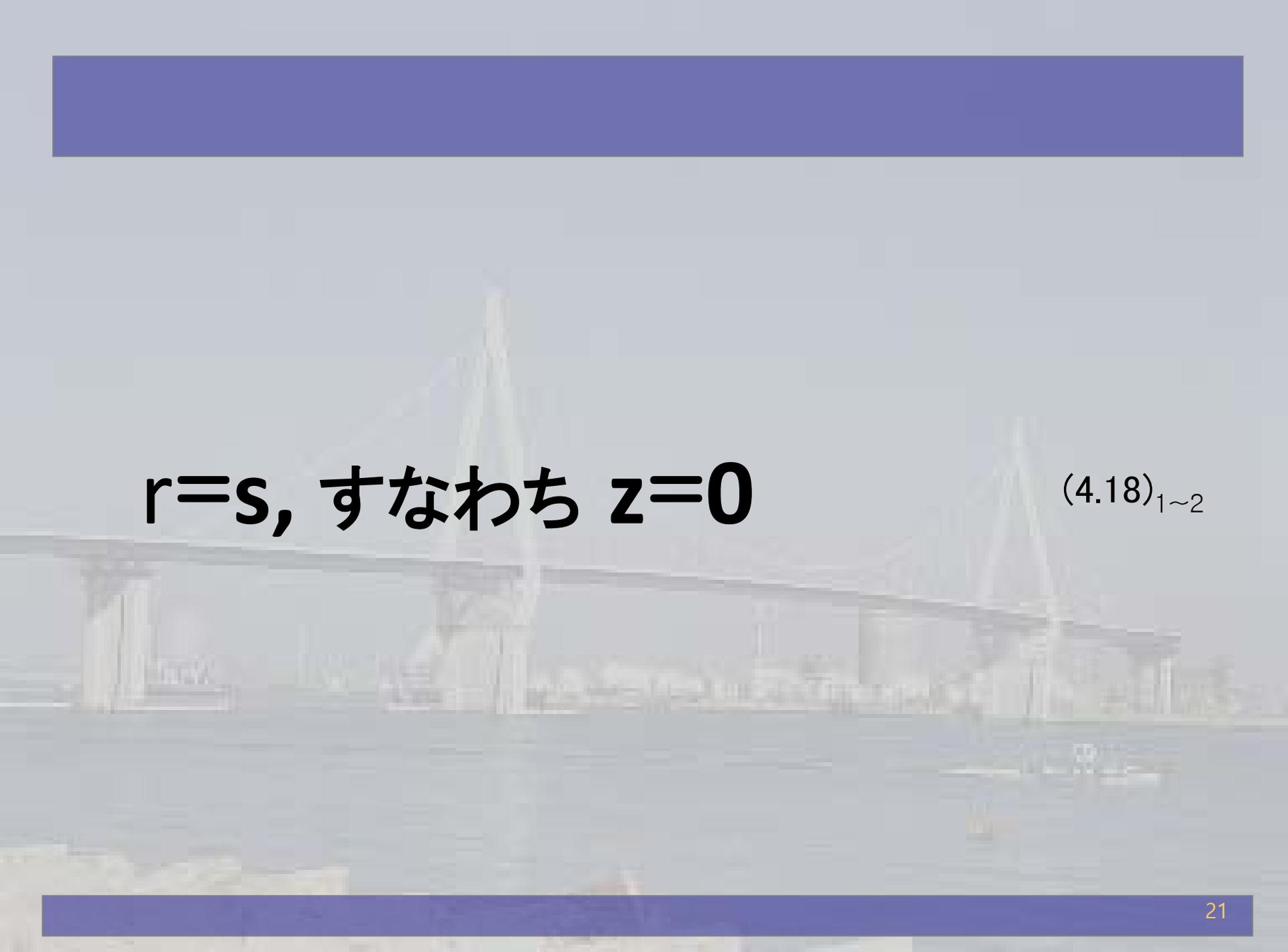
荷重の作用 S と抵抗 R 及び安全領域 Z の確立密度関数

その平均値 m_z は、

$$m_z = m_R - m_S \quad (4.16)$$

となり、また標準偏差 σ_z は、

$$\sigma_z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \quad (4.17)$$



$r=s$, すなわち $z=0$

$(4.18)_{1\sim 2}$

$$P_f = \int_{-\infty}^0 f_z(z) dz \quad (4.19)$$

中央値 m_z を、その標準偏差 σ_z を β 倍したものとして定義

$$m_z = \beta \sigma_z \quad (4.20)$$

(β)を信頼性指標(reliability index)

$$\beta = \frac{m_z}{\sigma_z} = \frac{m_R - m_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (4.21)$$

β 値の一例

安全性指標 β			
限界状態	損傷度		
	小	中	大
使用限界状態	2.0	2.5	3.0
終局限界状態	4.2	4.7	5.2

β と P_f との関係

β	5.2	4.7	4.2	3.7	3.2
P_f	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}

信頼性指標 β と安全率 γ との関係

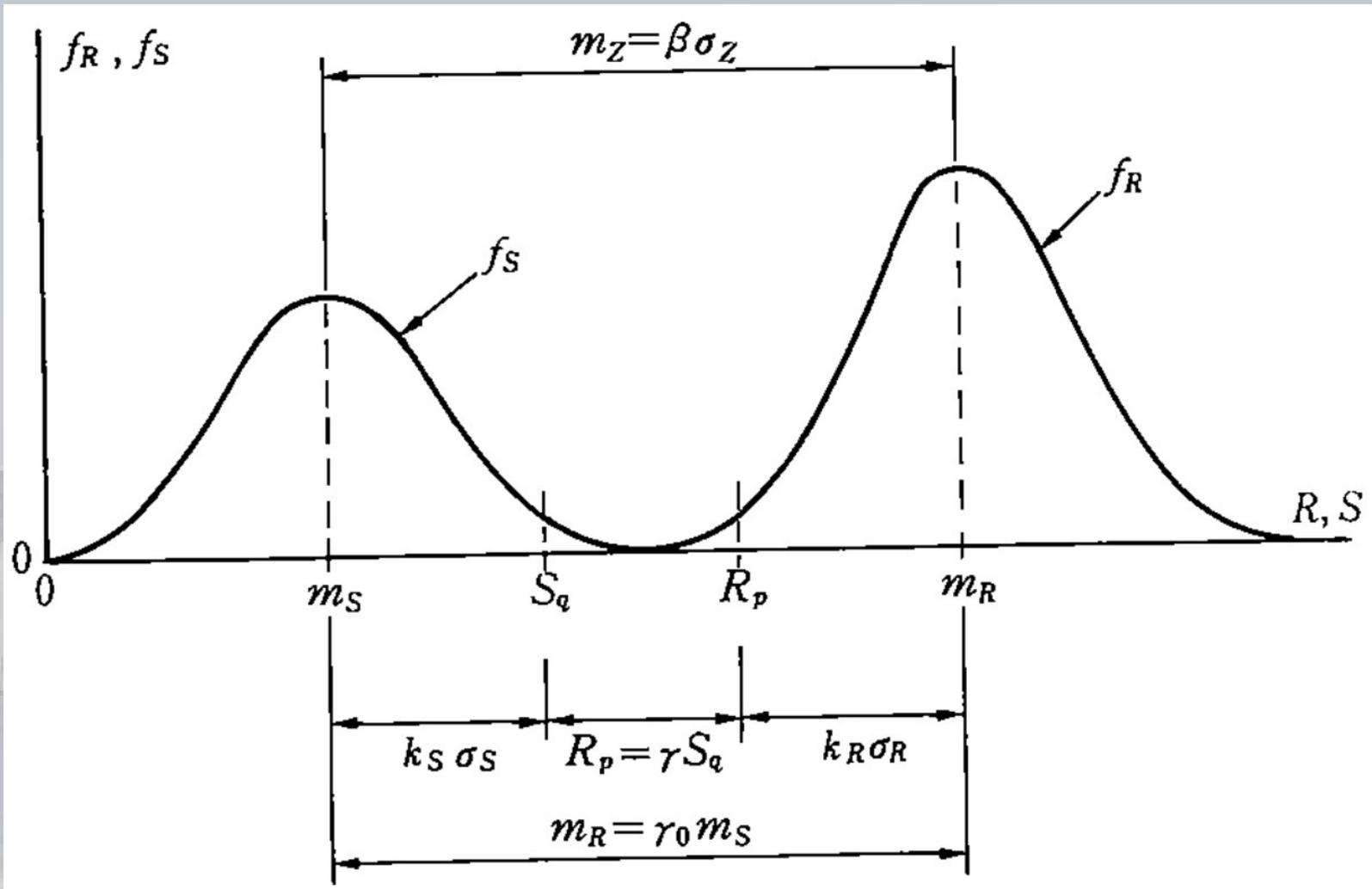
標準偏差の1.645倍で、超過確立5%の特性値

$$S_q = m_s + k_s \sigma_s \quad (4.22)$$

標準変なの1.645倍で、非超過確立5%の特性値を用い、

$$R_p = m_R - k_R \sigma_R \quad (4.23)$$

安全率 γ_0 , γ 及び安全率指標 β



中央安全率 γ_0 (平均どうしの比)は、

$$\gamma_0 = \frac{m_R}{m_S} \quad (4.24)$$

$$\gamma_0 = 1 + \beta \frac{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}{m_S} = 1 + \beta \sqrt{\gamma_0^2 \frac{\sigma_R^2}{m_R^2} + \frac{\sigma_S^2}{m_S^2}} = 1 + \beta \sqrt{\gamma_0^2 u_R^2 + u_S^2}$$

(4.25)

γ_0 に関する2次方程式を解けば、

$$\gamma_0 = \frac{1 + \beta \sqrt{v_R^2 + v_S^2 - \beta v_R^2 v_S^2}}{1 - \beta^2 v_R^2}$$

(4.26)

つぎのような線形化が許されうるものと仮定する。

$$\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} = \alpha_R \sigma_R + \alpha_S \sigma_S \quad (4.27)$$

$$\beta = \frac{m_R - m_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} = \frac{m_R - m_S}{\alpha_R \sigma_R + \alpha_S \sigma_S}$$

(4.28)

$$\gamma_0 = \frac{m_R}{m_S} = \frac{1 + \beta \alpha_S v_S}{1 - \beta \alpha_R v_R} \quad (4.29)$$

S_q と R_p との比

$$\gamma = \frac{R_p}{S_q} = \frac{m_R - k_R \sigma_R}{m_S + k_S \sigma_S} = \frac{m_R}{m_S} \frac{1 - k_R v_R}{1 + k_S v_S}$$

(4.30)

$$\gamma = \frac{1 + \beta \alpha_s v_s}{1 + k_s v_s} \frac{1 - k_R v_R}{1 - \beta \alpha_R v_R} = \gamma_s \gamma_R$$

(4.31)

レベル2の設計法の表示

部分安全係数 γ_S 及び γ_R は、次のように定義される。

荷重に対して：

$$\gamma_S = \frac{1 + \beta \alpha_S U_S}{1 + k_S U_S} \quad (4.32)$$

抵抗に対して：

$$\gamma_R = \frac{1 - k_R U_R}{1 - \beta \alpha_R U_R} \quad (4.33)$$

レベル1の設計法の表示

$$\gamma_S S_q \leq \frac{R_p}{\gamma_R} \quad (4.34)$$

- i) 部分安全係数 γ_S : 荷重に乗ずる安全係数で、抵抗には無関係のものである。
- ii) 部分安全係数 γ_R : 抵抗を除する安全係数で、荷重には無関係なものである。

荷重係数設計法と限界状態設計法

- レベル1を使いやすい以下の形にする。

$$\gamma_g \sum_{i=1}^k \gamma_{si} S_{ni} \leq \phi R_n \quad (4.35)$$

ここに、

S_{ni} : 設計仕方書に規定されている各種の設計荷重($i=1, 2, \dots, k$)によって求められる公称荷重作用(たとえば、再現期間50年における期待値)

R_n : 設計仕方書で規定されている公称強度

γ_g : 構造物の重要度や限界状態に達した社会的影響度などを考えた全体的な安全係数

γ_{si} : 各種の設計荷重($i=1, 2, \dots, k$)に対する部分安全係数(以下、荷重係数と呼ぶ)

$$\phi = 1/\gamma_R \quad (4.36)$$

: 強度に対する部分安全係数(以下、強度係数と呼ぶ)

ちなみに、式(4.35)において、荷重係数がすべて等しく、

$$\gamma_{si} = \gamma_s \quad (i=1, 2, \dots, k) \quad (4.37)$$

とおけ、また

$$\gamma = \frac{\gamma_g \gamma_s}{\phi} \quad (4.38)$$

と示すことができるならば、式(4.35)は次のように書ける。

$$\sum_{i=1}^k S_{ni} \leq \frac{R_n}{\gamma} \quad (4.39)$$

上式の左辺を応力度表示して $\sum_{i=1}^k \sigma_i$ あるいは $\sum_{i=1}^k \tau_i$ と示し、
右辺も応力度表示、すなわち許容応力度 $\sigma_n / \gamma = \sigma_a$ あるいは
 $\tau_n / \gamma = \tau_a$ で示すならば、

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \sum_{i=1}^k \sigma_i \leq \sigma_a = \frac{\sigma_n}{\gamma} \\ \tau &= \sum_{i=1}^k \tau_i \leq \tau_a = \frac{\tau_n}{\gamma} \end{aligned} \right\}$$

(4.42)_{1~2}

となる。これらは、式(4.1)_{1~2}に示した許容応力度設計法にほかならない。

- このように許容応力度設計法では、各種荷重すべてに対して同じ荷重係数を考えており、とくに死荷重が大きい鋼構造物では、不合理な設計法となる。これに反し、式(4.35)の荷重係数設計法では、荷重の強度のばらつきの様相や、以下で述べる限界状態の区分に応じ各種荷重に対しては、相異なった部分安全係数を信頼性に基づいて与えることができる。したがって、鋼構造物全体としてのバランスがとれた合理的設計を行いうるものである。

なお、式(4.36)を用いて、

$$\gamma_i = \gamma_R \gamma_g \gamma_S \quad (4.41)$$

と示せば、式(4.35)は、

$$\sum_{i=1}^k \gamma_i S_{ni} \leq R_n \quad (4.42)$$

とも上限することができる。すると、この場合の γ_i には荷重以外の諸要因も含まれる。そこで、式(4.42)に確立敵手法を適用し、より合理的な荷重係数 γ_i を決定することができる。

先にのべたBS 5400 Part 3^{4,9)}では、このような方法が適用されており、この方法を荷重係数設計法と区分して、とくに限界状態設計法と呼んでいる。

限界状態

- i) 使用限界状態：これは、通常の使用に適さなくなる限界状態で、たとえば著しい変形の発生、コンクリートのひび割れの発生、あるいは振動の発生はどがあげられる。
- ii) 終局限界状態：これは、耐荷力の喪失、あるいは鋼構造物が使用不可能となる限界状態で、たとえば、鋼構造物全体のついで合いが保持できなくなる状態をいい、不安定状態の発生、崩壊、あるいは疲労クラックの発生などがあげられる。

部分安全係数

AASHTO 仕方書の概要

照査項目	荷重種類	設計用荷重 S_D	照査内容	設計パラメーター
使用限界状態	使用荷重	$D+L+I$	疲労 活荷重による変形	活荷重による応力範囲 剛度
	超過荷重	$\beta_D D + \beta_L (L+I)$	永久変形	最大応力/降伏応力 摩擦継手のすべり
終局限界状態	最大設計荷重	$\gamma\{\beta_D D + \beta_L (L+I)\}$	ϕ_x 最大強度	まげ、せん断、およ に圧縮耐荷力

AISCによる設計用荷重 S_D

D+L (T 荷重の場合)	D+L (L 荷重の場合)
$1.2\{1.2D+3.0(L+I)\}$	$1.2\{1.1D+2.1(L+I)\}$

注：係数 1.2は全体的安定係数 γ_g に相当する。

AISCの強度係数 ϕ の値

引張部材	圧縮部材	曲げ部材	抗力ボルト摩擦 擦接合継手	鉄筋刻リ ト床版
0.95	0.7 ($l/r \leq 60$)	1.0 ($\lambda \leq 0.6$)	0.85	1.0
	0.6 ($l/r > 60$)	0.9 ($\lambda > 0.6$)		

荷重の組み合わせ

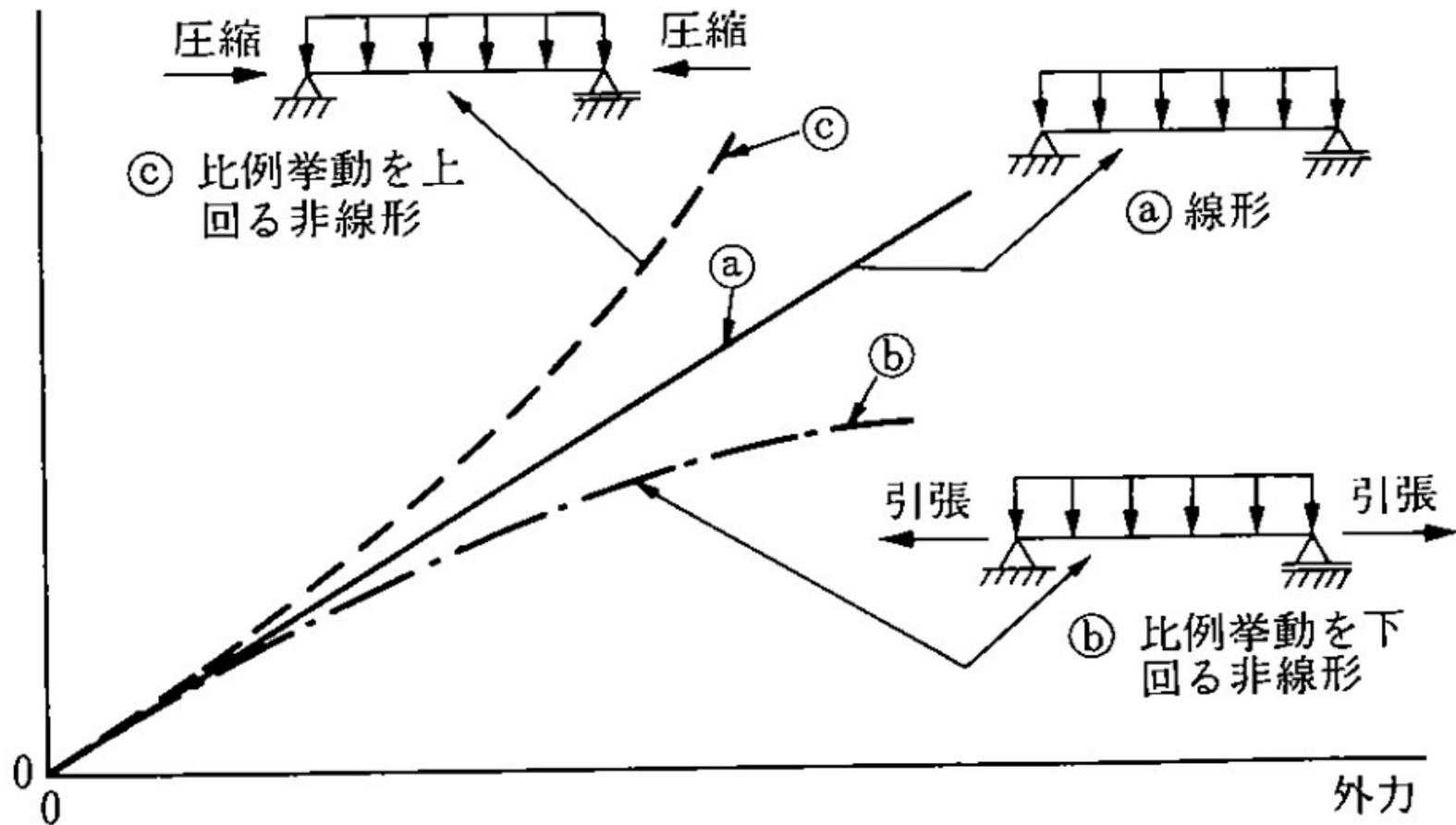
ヨーロッパ型の設計基準式^{4.11)}を用い、荷重の組み合わせ係数 ϕ_i も考慮して、式(4.35)を書き替えば、

$$S_D = \gamma_D D_n + \gamma_Q (Q_{n1} + \sum_{i=2}^k \phi_i Q_{ni}) \quad (4.44)$$

と示される。ここに、係数 γ_Q は死荷重以外の荷重に対する荷重係数である。

非線形挙動

断面力



結論

- 許容応力設計法は、長い歴史を持ち、実績のある設計法である
 - しかし、死荷重の大きな構造物では、許容応力設計法は不合理な設計法となる
 - 荷重係数設計法や限界状態設計法に、現在世界の設計法は移行しつつあるが、その確率的に正確なデータの蓄積が必要となっている。
- 以上

Thank You Very Much !!

