

第 4 回 鋼構造技術継承講演会
「経験豊富な先人に学ぶ次世代への承継技術」
配布資料

平成 28 年 12 月 2 日

土木学会 鋼構造委員会

鋼橋の設計実務における座屈設計

平成28年12月2日

(株)ワイ・シー・イー 尾下 里治

内容

1. 道路橋示方書の座屈設計の基本
2. 鋼橋の座屈設計の状況
3. 骨組構造における有効座屈長法
4. アーチリブ横繋ぎ材の座屈設計法
5. アーチ橋の面内座屈設計法
6. 鈑桁橋の横ねじれ座屈に対する設計法
7. まとめ
(参考文献)

1. 道路橋示方書の座屈設計の基本

- 1.1 耐力曲線と座屈パラメータ
- 1.2 柱部材の座屈パラメータ
- 1.3 梁部材の座屈パラメータ

1.1 耐力曲線と座屈パラメータ

部材ごとに規定された耐力曲線が基本¹⁾

許容応力度 $\sigma_{ca} = \sigma_{cr}/1.7$

座屈パラメータ

・柱部材

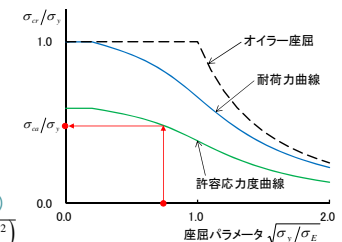
$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \cdot \frac{\ell}{r}}$$

・梁部材

$$\alpha = \frac{2}{\pi} K \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \cdot \frac{\ell}{b}}$$

・板(無補剛板、補剛板)

$$R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \cdot \frac{12(1-\mu^2)}{\pi^2 k}}$$



弾性座屈応力度を求める代わりに、上記パラメータで代用 4

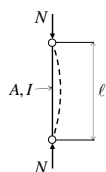
1.2 柱部材の座屈パラメータ

長さ ℓ で両端ピン支持された柱の弾性座屈軸力が基本

$$N_E = \pi^2 \frac{EI}{\ell^2} \quad (1)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{\sigma_y}{\sigma_E}} = \sqrt{\frac{N_y}{N_E}} = \sqrt{\frac{A\sigma_y}{\pi^2 EI}} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \sqrt{\frac{A}{I}} \cdot \ell = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \frac{\ell}{r} \quad (2)$$

ここで、 N_y : 降伏軸力
 N_E : 弾性座屈軸力
 A : 断面積
 I : 断面二次モーメント
 r : 断面二次半径



1.3 梁部材の座屈パラメータ

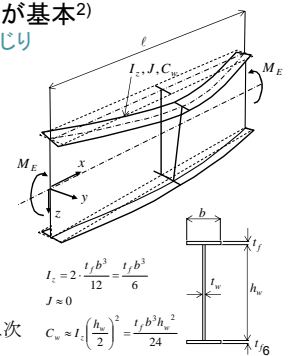
支間長 ℓ で両端単純支持された2軸対称断面梁の弾性横ねじれ座屈モーメント M_E が基本²⁾

スレンダナーな桁を想定して純ねじり定数 J に関する項を無視する

$$\begin{aligned} M_E &= \pi \sqrt{EI_z GJ \left[1 + \frac{EC_w}{GJ} \left(\frac{\pi}{\ell} \right)^2 \right]} \\ &= \frac{\pi}{\ell} \sqrt{EI_z GJ + E^2 I_z C_w \left(\frac{\pi}{\ell} \right)^2} \\ &\approx \frac{\pi^2 E}{\ell^2} \sqrt{I_z C_w} \quad (3) \end{aligned}$$

ここで、 C_w : そりねじり定数

I_z : 鉛直軸まわりの断面二次モーメント



$$I_z = 2 \cdot \frac{t_f b^3}{12} = \frac{t_f b^3}{6}$$

$$J \approx 0$$

$$C_w \approx I_z \left(\frac{h_w}{2} \right)^2 = \frac{t_f b^3 h_w^2}{24}$$

1断面桁の断面定数の算出に当ってフランジ厚分の誤差を無視する

弾性横ねじれ座屈モーメント

$$M_E \approx \frac{\pi^2 E}{\ell^2} \sqrt{\frac{t_f b^3}{6} \cdot \frac{t_f b^3 h_w^2}{24}} = \frac{\pi^2 E t_f b^3 h_w}{12 \ell^2} \quad (4)$$

降伏モーメント

$$M_y = \frac{\sigma_y I_y}{h_w/2} \approx \frac{2\sigma_y}{h_w} \cdot \frac{h_w^2}{2} \left(A_c + \frac{A_w}{6} \right) = \sigma_y h_w \left(A_c + \frac{A_w}{6} \right) \quad (5)$$

ここで、 t_f : フランジ厚

I_y : 水平軸まわりの断面二次モーメント

b : フランジ幅 A_c : フランジ断面積

h_w : 腹板高 A_w : 腹板断面積

7

式(4)と式(5)から座屈パラメータ α は、道示のように A_w/A_c と ℓ/b の関数で表される。

$$\alpha = \frac{\sqrt{\sigma_y}}{\sqrt{\sigma_E}} = \sqrt{\frac{M_y}{M_E}} = \sqrt{\frac{\sigma_y h_w \left(A_c + \frac{A_w}{6} \right)}{\frac{\pi^2 E t_f b^3 h_w}{12 \ell^2}}}$$

$$= \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \cdot \frac{\ell}{b} \sqrt{\frac{12 \left(A_c + \frac{A_w}{6} \right)}{t_f b}}$$

$$= \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \cdot \frac{\ell}{b} \sqrt{3 + \frac{A_w}{2A_c}}$$

$$= \frac{2}{\pi} K \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \cdot \frac{\ell}{b} \quad (5)$$

ここで、 $K = \sqrt{3 + \frac{A_w}{2A_c}}$

桁の固定点間距離

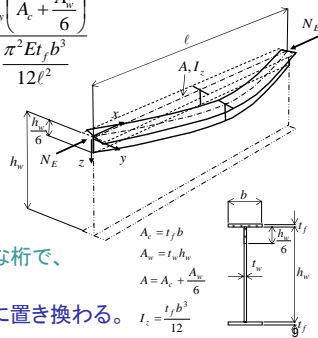
8

圧縮フランジとウェブ高の1/6からなるT形断面柱の座屈パラメータを誘導する。

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_y}{N_E}} = \sqrt{\frac{\sigma_y \left(A_c + \frac{A_w}{6} \right)}{\frac{\pi^2 E I_c}{\ell^2}}} = \sqrt{\frac{\sigma_y \left(A_c + \frac{A_w}{6} \right)}{\frac{\pi^2 E t_f b^3}{12 \ell^2}}}$$

$$= \frac{2}{\pi} \sqrt{3 + \frac{A_w}{2A_c}} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \cdot \frac{\ell}{b}$$

$$= \frac{2}{\pi} K \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \cdot \frac{\ell}{b} = \alpha \quad (6)$$



2軸対称断面のスレンダーな桁で、純ねじり定数を無視すると、

圧縮フランジの柱の横座屈に置き換わる。

$$A_c = t_f b$$

$$A_w = t_w h_w$$

$$A = A_c + \frac{A_w}{6}$$

$$I_c = \frac{t_f b^3}{12}$$

2. 鋼橋の座屈設計の状況

(板の局部座屈、軸力と曲げを受ける部材を除く)

2.1 骨組構造

2.2 桁橋

10

2.1 骨組構造の座屈設計

	圧縮部材の設計(有効座屈長 ℓ_e)		全体座屈の照査	
	面内	面外	面内	面外
トラス橋	弦材: 格間長 斜材: 0.9×骨組長	弦材、斜材とも格間長(骨組長)	L/b>30 全体横ねじれ座屈の照査 ①薄肉はりまたは組立柱にモデル化して弾性座屈荷重を照査 ②全体構造の固有値解析による有効座屈長法による照査	
ポネートラス橋	弦材: 格間長 斜材: 0.9×骨組長	弦材: U形フレームで弾性的に支持された柱モデルのHoltの式で ℓ_e 算出	文庫はないがトラス橋に準ずると思われる。	
下路式アーチ橋	格間長	格間長	なし	L/b>20 ①組立柱の簡易式での照査 ②全体構造の固有値解析による有効座屈長法による照査(安全率2)
ニールセンローゼ橋	格間長の2~3倍	格間長	なし	同上
上路・中路上式アーチ橋(補剛桁に軸力が生じない形式)	格間長	格間長	変位の影響が無視できない場合は幾何非線形を考慮した断面力で設計する。	下路式アーチ橋と同じ
ラーメン構造	道示: 表16.5.1の値	ラーメン全高の2倍	部材設計時に考慮	部材設計時に考慮
	全体構造の固有値解析で ℓ_e 決定	全体構造の固有値解析で ℓ_e 決定	部材設計時に考慮	部材設計時に考慮

11

2.2 桁橋の座屈設計

	圧縮フランジの設計(固定点間距離)	全体横ねじれ座屈の照査
従来型鉄桁橋	横桁、対傾構などの格点間隔 固定点間距離	L/b>18 ①薄肉はりモデル化して弾性座屈荷重を照査(安全率3) ②薄肉はり格子構造の固有値解析による有効座屈長法による照査
少数鉄桁橋	横桁間隔、但し剛性が低いことからポネートラスのHoltの方法を応用してU形フレームの必要剛性を確認 	①FEMによる弾塑性有限変位解析で照査 ②薄肉はり格子構造の固有値解析による有効座屈長法による照査

12

3. 骨組構造における有効座屈長法

- 3.1 有効座屈長法
- 3.2 適用可能な構造物
- 3.3 ニールセンローゼ桁の解析例
- 3.4 アーチ橋の固有値と座屈モード

13

3.1 有効座屈長法

全体骨組構造を線形座屈解析(弾性固有値解析)して固有値を求めて、右式から有効座屈長を算出する³⁾。

$$\ell_e = \pi \sqrt{\frac{EI}{\lambda N_C}}$$

λ : 固有値

N_C : 作用軸力

E : ヤング率

I : 断面 2 次モーメント

14

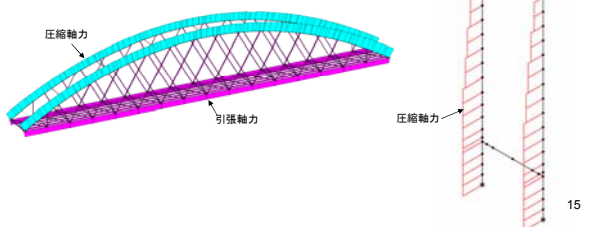
3.2 適用可能な構造物

軸力が支配的で断面変化が緩やかな構造物
例えば、

② ラーメンの柱部材

(斜張橋の塔)

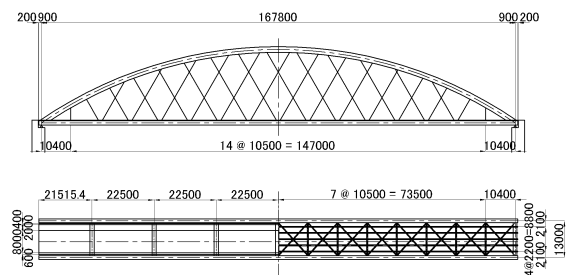
① アーチ橋のアーチリブ



15

3.3 ニールセンローゼ桁の計算例

(1) 一般図

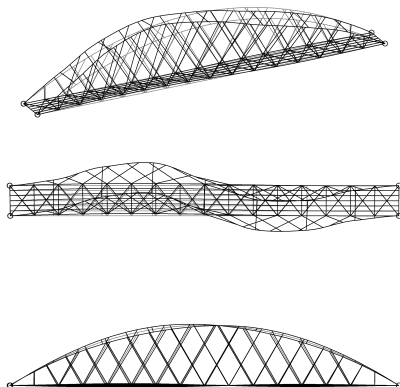


荷重は、死荷重と活荷重を満載固定載荷

16

(2) 面外座屈モード(1次)

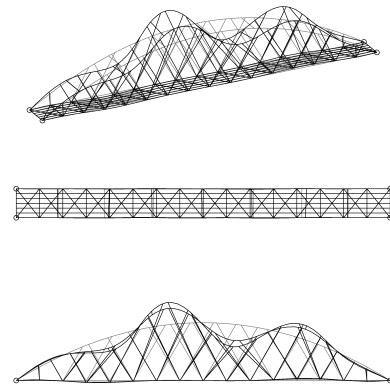
$\lambda=12.066$



17

(3) 面内座屈モード(9次)

$\lambda=31.027$



18

(4) アーチリブ1/4点での有効座屈長

アーチリブ軸力 $N_C = -9682.3 \text{ kN}$

	固有値 λ	断面2次モーメント $I(\text{m}^4)$	有効座屈長 $l_e(\text{m})$
面外	12.066	0.04332	27.056
面内	31.027	0.06259	20.280

面外の有効座屈長は、支材間隔よりも多少長めで、面内の有効座屈長は吊材間隔の2倍弱となり、妥当なものといえる。

19

3.4 アーチ橋の固有値と座屈モード

(1) 上路式アーチ橋

橋梁名 (運送年)	アーチ支間長 (梁間長) (m)	ライズ比	主構間隔 (L/B) (m)	座屈固有値と座屈モード	
				面内	面外
A (H2)	76 (92.370)	1/5.00	7 (10.7)	14.758	21.483
B (H8)	114 (120.337)	1/6.76	6 (19.0)	6.578	37.748
C (S48)	190 (203.616)	1/5.94	7.65 (24.8)	5.695	18.339

20

(2) 中路式アーチ橋

橋梁名 (運送年)	アーチ支間長 (梁間長) (m)	ライズ比	主構間隔 (L/B) (m)	座屈固有値と座屈モード	
				面内	面外
A (S39)	150 (160.438)	1/6.00	9 (16.7)	3.085	6.168
B (S55)	165.5 (175.925)	1/6.46	13.9 (11.9)	1.887	5.694
C (S48)	180 (189.546)	1/6.92	9.8 (18.4)	2.148	3.896

21

(3) 下路式アーチ橋

橋梁名 (運送年)	アーチ支間長 (梁間長) (m)	ライズ比	主構間隔 (L/B) (m)	座屈固有値と座屈モード	
				面内	面外
A (S55)	110.4 (117.79)	1/6.13	9.75 (11.3)	52.749	11.247
B (H2)	137.9 (146.198)	1/5.52	22.5 (6.13)	20.474	4.726
C (S55)	140 (147.83)	1/6.36	12 (11.7)	11.415	4.481
D (S55)	170.6 (179.92)	1/6.80	18 (17.1)	18.315	5.188
E (H8)	167.8 (178.448)	1/6.45	13 (13.0)	31.828	12.066

4. アーチリブ横繋ぎ材の座屈設計法

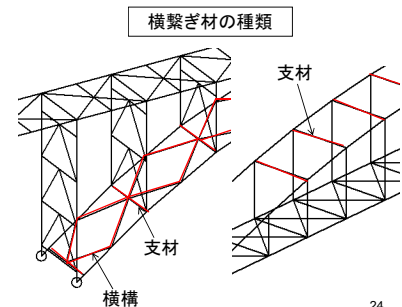
- 4.1 アーチ橋の面外座屈と横繋ぎ材
- 4.2 組立柱としてモデル化する近似計算法
- 4.3 アーチリブ構面のせん断剛性が座屈荷重に与える影響
- 4.4 アーチリブの面外座屈の形態
- 4.5 横繋ぎ材の設計指標の一つ
- 4.6 横構形式の必要断面積

23

4.1 アーチ橋の面外座屈と横繋ぎ材

アーチ橋の面外座屈については、前章の線形座屈解析による有効座屈長法によればよいが、予め部材配置や部材剛度の目安が付けられると便利である。

面外座屈については、主構間隔と支間長の比 L/a の他に、アーチリブの横繋ぎ材の剛性が影響することから、ここではアーチリブの面外座屈と横繋ぎ材の剛性との関係を説明し、目安となる必要剛性を示す(4.5,6)。



座屈設計ガイドライン
(2005年版)より

24

4.2 組立柱としてモデル化する近似計算法

アーチリブ構面だけを取り出してせん断変形を考慮した梁柱にモデル化して座屈強度を評価する。

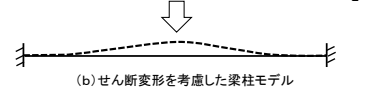
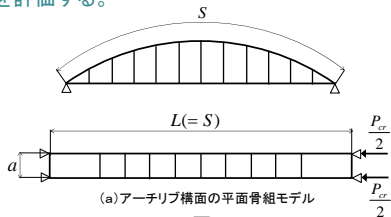
組立柱の座屈荷重

$$P_{cr} = P_{cr0} \frac{1}{1 + \frac{P_{cr0}}{GA_w}}$$

アーチリブ構面のせん断剛性

$$P_{cr0} = \frac{\pi^2 EI_g}{(L/2)^2}$$

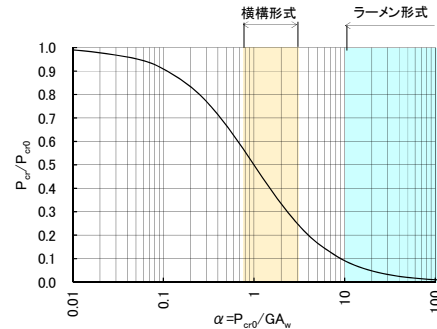
$$I_g = 2I_a + \frac{A_a a^2}{2} \approx \frac{A_a a^2}{2}$$



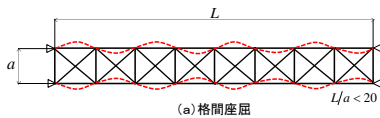
アーチリブ構面の面外座屈モデル²⁵

4.3 アーチリブ構面のせん断剛性が座屈荷重に与える影響

実橋の横繋ぎ材のせん断剛性では、せん断変形を無視した場合に比べて座屈荷重が1/2以下に減少する。



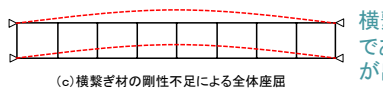
4.4 アーチリブの面外座屈の形態



アーチリブが格点間で座屈する理想的な形態。



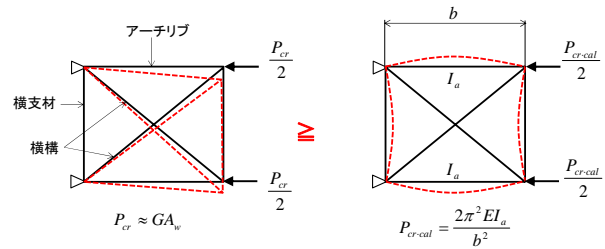
全体形状で決まるのでアーチリブの断面をアップさせるしかない。



横繋ぎ材の設計の仕方である程度は防ぐことができる。

4.5 横繋ぎ材の設計指標の一つ

格点間パネルのせん断座屈荷重が、アーチリブ単材の格間長を有効座屈長とする局部座屈荷重を下回らないように、横繋ぎ材を設計する。



(a) パネル間のせん断座屈

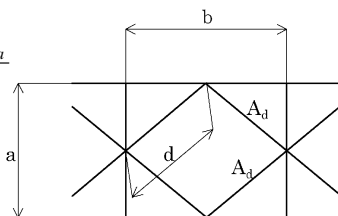
(b) アーチリブ単材の格間座屈

4.6 横構形式の必要断面積

ひし形トラスの場合

$$GA_w \geq P_{cr-cal} = \frac{2\pi^2 EI_a}{b^2}$$

$$A_{d-req} \geq \frac{8\pi^2 I_a d^3}{a^2 b^3}$$



- ・上式は、アーチ橋以外にトラス橋の横構にも適用可能。
- ・ラーメン形式横支材についても必要曲げ剛性が求められる。

その他の形式の必要断面積、必要剛度

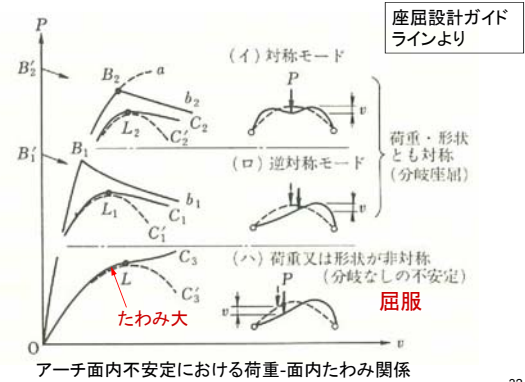
	横つなぎ材形式	A_w	$A_{d-req} \cdot I_{b-req}$
タイプ 1 トラス		$A_w = \frac{E}{G} \cdot \frac{ab^2}{d^3} \cdot \frac{1}{2A_d}$	$A_{d-req} = \frac{\pi^2 I_a d^3}{a^2 b^2}$
タイプ 3 トラス		$A_w = \frac{E}{G} \cdot \frac{ab^2}{2d^3 + b^3} \cdot \frac{1}{A_d + 4A_v}$	$A_{d-req} = \frac{2d^3}{a^2 b^2} \cdot \frac{b^3}{2\pi^2 I_a - 4A_v}$
タイプ 4 ラーメン		$A_w = \frac{E}{G} \cdot \frac{24}{ab} \cdot \frac{a^2}{I_b + I_a}$	$I_{b-req} = \left(\frac{abl_a}{\pi^2 I_a^2 - a^2} \right)$

5. アーチ橋の面内座屈設計法

- 5.1 アーチの面内不安定現象
- 5.2 アーチ橋の設計フロー
- 5.3 変位の影響の判定
- 5.4 実用的な変位の影響の計算方法
- 5.5 一般的な座屈設計適用の可能性

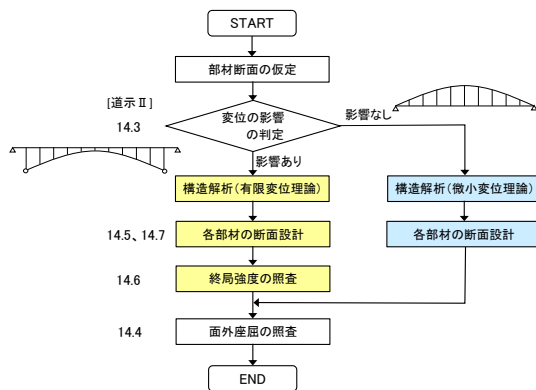
31

5.1 アーチの面内不安定現象



32

5.2 アーチ橋の設計フロー



33

5.3 変位の影響の判定

変位の影響による応力度の増加が、微小変位理論による場合の10%を超えない場合は変位の影響を無視できる。

$$M_D \leq 1.1M_E$$

$$M_D = M_E \cdot \frac{1}{1 - H/H_{cr}} \quad (\text{解14.3.1})$$

ここに、 M_D : 有限変位理論による曲げモーメント

M_E : 微小変位理論による曲げモーメント

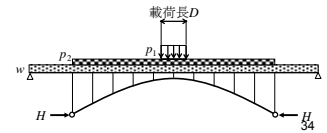
H : アーチの設計荷重による水平反力

H_{cr} : アーチの面内弾性座屈に対する限界水平反力

弾性座屈する荷重倍率 β 、つまり

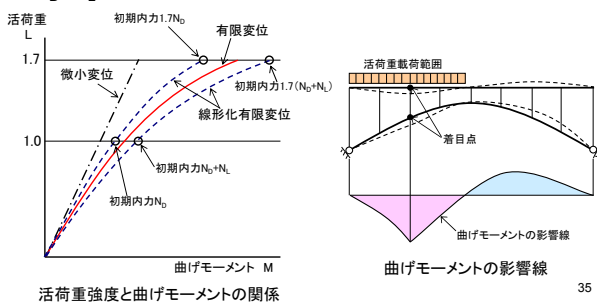
最小固有値が10を超える場合

$$\beta = \frac{H}{H_{cr}} \geq 10 \quad (\text{解14.3.2})$$



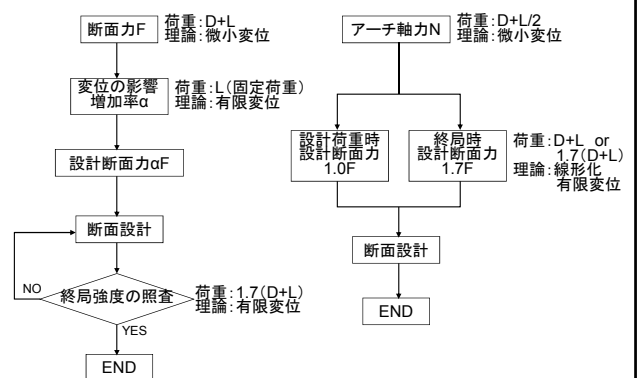
5.4 実用的な変位の影響の計算方法¹⁰⁾

- ・アーチリブの初期軸力による幾何剛性を考慮した線形化有限変位理論を適用。
- ・死荷重による軸力と活荷重による最大軸力の1/2の合計 ($N_D + N_L/2$) を導入。



35

①従来型の設計フロー ②合理化された設計フロー

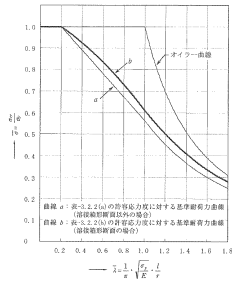


36

5.5 一般的な座屈設計適用の可能性

H24道示改訂 ⇒ 耐荷力算出精度が向上

- 柱の基準耐荷力曲線に溶接箱断面が追加
- 軸方向力と曲げモーメントを受ける部材の照査式改訂



$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{caz}} + \frac{\sigma_{bcy}}{\sigma_{bagy} \left(1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{eyy}}\right)} + \frac{\sigma_{bcz}}{\sigma_{baz} \left(1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{eaz}}\right)} \leq 1$$

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{caz}} + \sigma_{bag}(\alpha_y) + \sigma_{baz}(\alpha_z) \leq 1$$

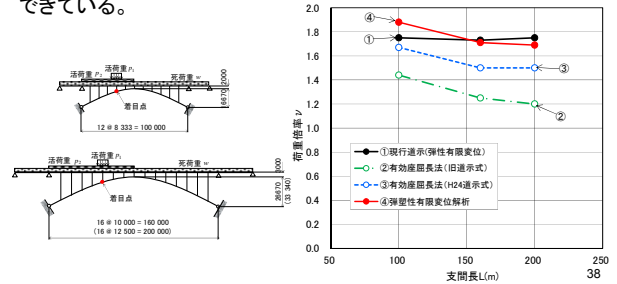
有限変位理論による場合は1 37

図-3.2.2 表-3.2.2の許容応力度に対する基準耐荷力曲線

上路式補剛アーチ橋の終局荷重倍率の試算結果

文献11)の現行道示で設計①した上路式補剛アーチ橋に弾塑性有限変位解析を適用した結果④を引用して、有効座屈長法を適用

下図より、旧道示式の有効座屈長法②では安全側過ぎるが、H24道示式③では弾塑性有限変位解析結果とも一定の安全率が確保できている。



6. 鋼桁橋の横ねじれ座屈に対する設計法

- 6.1 現状と問題点
- 6.2 薄肉断面梁の横ねじれ座屈解析
- 6.3 2主鋼桁橋送出し架設時の照査例
- 6.4 横ねじれ座屈の照査フロー

6.1 現状と問題点

道示で想定してる範囲を超えた橋梁形式の出現

少数主桁橋

- 主桁本数の減少
- 長支間床版の使用
- 横構の省略
- 横桁構造の簡素化



これまで鋼桁橋での座屈問題は、 $L/b > 18$ 程度と細長い場合の全体横ねじれ座屈が問題とされたが、 L/b が小さくても全体座屈の可能性はある。

6.2 薄肉断面梁の横ねじれ座屈解析^{13,14)}

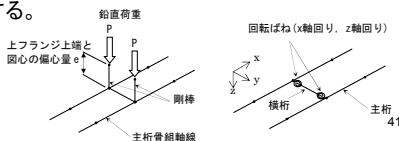
- (1) 薄肉断面梁柱の微小変位の剛性行列 K_E と幾何剛性行列 K_G ¹²⁾から、想定した荷重に対する固有値 λ を求める。

$$|K_E + \lambda K_G| = 0$$

- (2) 各部材の弾性座屈曲げモーメント M_{cri} から座屈有効長さ ℓ_{ei} を求める。(二軸対称断面でSt.Venantのねじれを省略)

$$\ell_{ei} = \pi \sqrt{\frac{E}{M_{cri}}} \sqrt{I_{\omega} C_{wi}}$$

- (3) モデル作成には、荷重載荷位置や主桁と横桁との接合条件を考慮する。

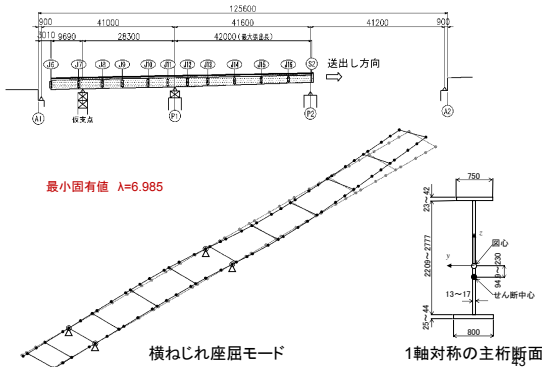


2主桁橋の架設時の横ねじれ座屈解析例

	横構無・全体座屈	横構有・格間座屈
FEM	最小固有値 $\lambda=4.464$	最小固有値 $\lambda=13.766$
薄肉梁の座屈解析	最小固有値 $\lambda=4.065$	最小固有値 $\lambda=13.269$

6.3 2主桁橋送出し架設時の照査例

鋼構造架設計施工指針[2012年版]¹⁵⁾より

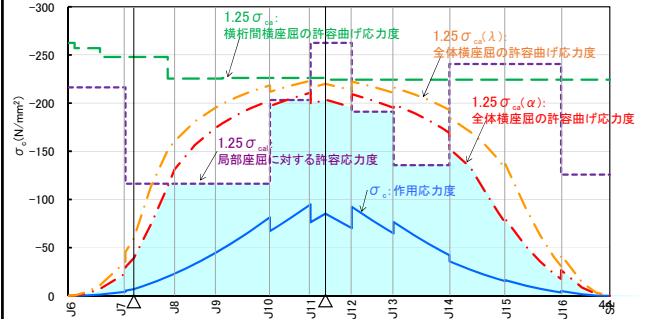


主桁下フランジの応力照査結果

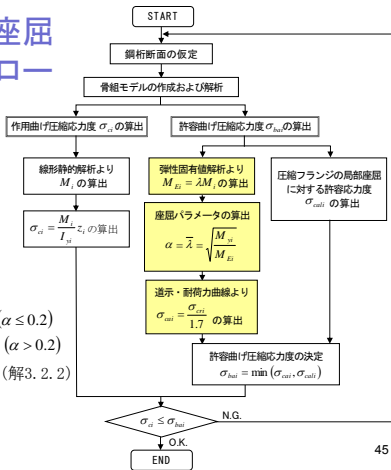
$\sigma_{ca}(\alpha)$:有効座屈長さから許容曲げ圧縮応力度を算出
 $\sigma_{ca}(\bar{\lambda})$:座屈パラメータ $\bar{\lambda}$ から許容曲げ圧縮応力度を算出

$$\ell_e = \pi \sqrt{\frac{E}{M_E} \sqrt{I_z C_w}}$$

$$\alpha = \bar{\lambda} = \sqrt{\frac{M_y}{M_E}}$$



6.4 横ねじれ座屈の照査フロー



道示・耐荷力曲線

$$\sigma_{ca}/\sigma_y = 1.0 \quad (\alpha \leq 0.2)$$

$$\sigma_{ca}/\sigma_y = 1.0 - 0.412(\alpha - 0.2) \quad (\alpha > 0.2)$$

……………(解3.2.2)

7. まとめ

- (1) 座屈パラメータ $\bar{\lambda}$ は、 ℓ/r 、 ℓ/b 、 b/t など部材寸法で規定されているが、本来は $\sqrt{\sigma_y/\sigma_E}$ で表される。
- (2) 弾性座屈応力度 σ_E の算出に、構造物によっては固有値解析を活用するのが合理的。
- (3) 固有値解析の対象構造
アーチ橋・ラーメン構造・桁橋(横ねじれ座屈)
- (4) 少数主桁橋の架設時の横ねじれ座屈照査には、薄肉断面梁の固有値解析による照査法が有効。

(参考文献)

- 1) 日本道路協会: 道路橋示方書・解説、Ⅱ鋼橋編、H24.3
- 2) 福本啓士: プレート・ガーダーのフランジの曲げ圧縮強度—道路橋示方書許容曲げ圧縮応力度規定の背景—、橋梁と基礎、1972.8
- 3) 西野文雄・三木千寿・鈴木篤: 道路橋示方書Ⅱ鋼橋編改定の背景と運用、13章ラーメン構造、橋梁と基礎、1981.10
- 4) 土木学会: 座屈設計ガイドライン、改訂第2版[2005年版]、pp.313-317、2005.10
- 5) 佐野泰如・北村明彦・尾下里治: 下路式アーチ橋の面外座屈に対する設計法の一提案、構造工学論文集、Vol.46A、2000.3
- 6) 佐野泰如・尾下里治: 上路式アーチ橋の面外座屈に対する設計法、横河ブリッジグループ技報、No.30、2001.1
- 7) 大森邦雄: 道路橋示方書Ⅱ鋼橋編改訂の背景と運用、11章アーチ、橋梁と基礎、1981.7
- 8) 尾下里治・大森邦雄: 線形化有限変位理論によるアーチ橋の設計法の提案、構造工学論文集、Vol.44A、1998.3

- 9) 倉西茂: 道路橋示方書Ⅱ鋼橋編改訂の背景と運用、[研究動向]アーチ橋、橋梁と基礎、1981.7
- 10) 尾下里治・大森邦雄: 線形化有限変位理論によるアーチ橋の設計法の提案、構造工学論文集、Vol.44A、1998.3
- 11) 高森博之・大森邦雄: 補剛桁が連続桁形式である上路式補剛アーチ橋の耐力解析、鋼構造論文集、1996.12
- 12) Hasegawa,A., Liyanage,K., Ikeda,T. and Nishino, F.: Aconcise and explicit, formulation of out-of-plane instability of thin-walled members, Proc. of JSCE, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol.2, No.1, 1985.4.
- 13) 尾下里治・江川定利・水口知樹: 鋼桁橋の横ねじれ座屈に関する設計法の提案、橋梁と基礎、2006.9
- 14) 尾下里治・水口知樹: 鋼桁橋の横ねじれ座屈に関する実用的設計法の提案、構造工学論文集、Vol.53A、2007.3
- 15) 土木学会: 鋼構造架設計施工指針[2012年版]、pp.249-255、2012.5

構造力学と鋼橋の設計法

早稲田大学 依田 照彦

平成28年12月2日

自己紹介 :

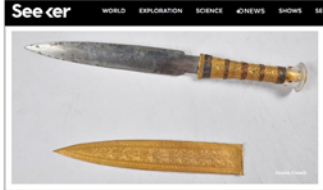
1970年 早稲田大学理工学部土木工学科卒業
 1978年 工学博士
 1987年 早稲田大学 理工学部土木工学科 教授
 2004年 鉄道鋼・合成構造物設計標準に関する委員会 委員長
 2005年 土木学会 鋼構造委員会 委員長

目次

- 第1章 設計とは
- 第2章 構造力学の基本
- 第3章 設計法の基本
- 第4章 性能設計法の基礎

第1章 設計とは

ツタンカーメンのナイフが隕石から作られたと結論(2016年5月20日)



画像は「Seeker」より引用

・刃の部分におけるニッケルとコバルトの割合が、鉄隕石と合致。
 ・地上の鉱山で採掘される鉄隕石から作られた鉄では、ニッケルの含有量が4%程度となるが、ツタンカーメンのナイフでは11%の値を示した。
 ・ツタンカーメンの時代、人は鉄の製錬技術を持たなかったが、鉄隕石を加工するだけの高い工業技術は有していた可能性が高い(3400年以上前)



チャンドラガプタの鉄柱 (インド 4世紀頃)



The Code of Hammurabi.

If a builder has made a house for a man and has completed it for him, he shall give him 2 shekels of silver for every SAR of the house for his fee.
 If a builder has made a house for a man and has not made his work sound, and the house which he has built has fallen down and so caused the death of the householder, that builder shall be put to death. If it causes the death of the householder's son, they shall put that builder's son to death.
 If it causes the death of the householder's slave, he shall give silver for slave to the householder. If it destroys property, he shall replace anything that it has destroyed, and, because he has not made sound the house which he has built and it has fallen down, he shall build the house which has fallen down from his own property.
 If a builder has made a house for a man and does not make his work perfect and the wall bulges, that builder shall put that wall into sound condition from his own silver.

ハムラビ法典

↓
経験則に基づく性能設計

“If a builder has made a house for a man and does not make his work perfect and the wall bulges, that builder shall put that wall into sound condition from his own silver.”

設計の考え方: 筋のよさが大切

ハムラビ法典は性能設計(約3700年前)

用・強・美: ローマ時代の技術者の言葉

- ◆用とは、使いやすく便利なこと
- ◆強とは、丈夫で長持ちすること
- ◆美とは、美しく魅力的であること

設計の目標

設計の目標は、構造物が

- 1) 建設時・供用中を通して荷重と変形に持ちこたえること
- 2) 通常の使用に対して適切に性能を発揮すること
- 3) 適切な耐久性を持っていること

構造力学の発展が設計法を変えた

- ◆ 初期の構造設計では、利用できる手段は、
 - ・ ニュートンの法則
 - ・ 弾性論
- ◆ これらの2つの手段が許容応力度設計法を生み出した。
- ◆ 鋼材は、比較的明確な降伏点まで、線形挙動を示すことが許容応力度設計法を支えた。

6

No.6

前世紀までの構造設計の流れ

- ・ 18世紀末期まで構造物は基本的にプロポーションをベースに設計された。
- ・ すべての素材で計算が直観に取って代わり、19世紀には理論が勢いを増した。
- ・ 現在の鋼構造の設計の慣行は、大半がその起源を19世紀の木材に遡る。
- ・ 1930年代の溶接の導入と塑性理論の発達には設計の考え方を大きく変えた。

技術は人なり

チャーチル(英国)の言葉

- ・ 過去を遠くまで振り返ることができれば、
未来もそれだけ遠くまで見渡せるだろう

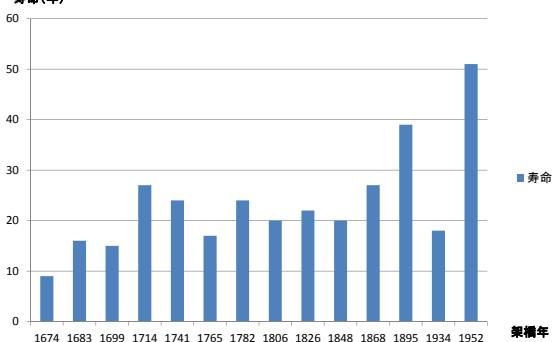
過去はどうであったか？



岩国錦帯橋の技術: 技術は人なり

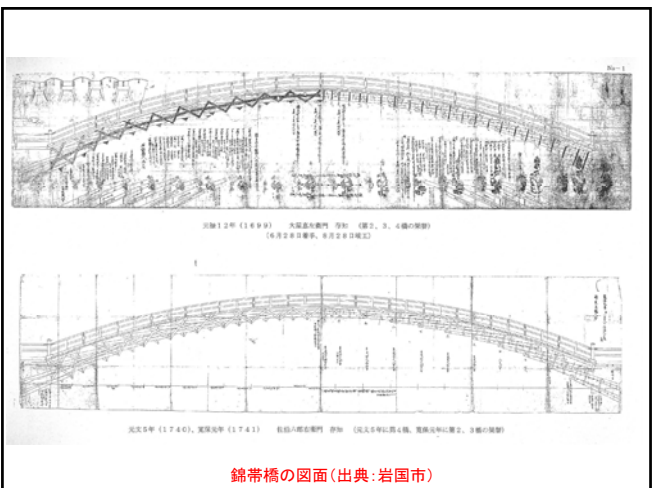
9

架け替え寿命(架け替えまでの年数)



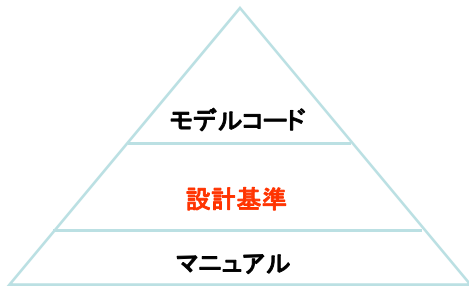
錦帯橋中央アーチの部の架け替え寿命

10



錦帯橋の図面(出典:岩国市)

設計基準の位置づけ



No.12

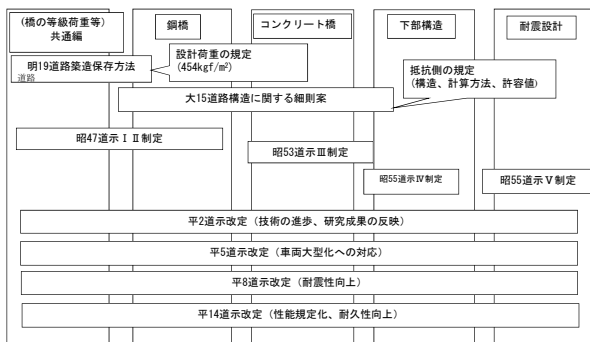
わが国の設計基準

- 多くの設計基準がある
- 構造物ごとに設計基準がある

	鋼	コンクリート	基礎
道路橋	○	○	○	○
鉄道橋	○	○	○	○
建築物	○	○	○	○
港湾施設	○	○	○	○
水道施設	○	○	○	○
.....	○	○	○	○

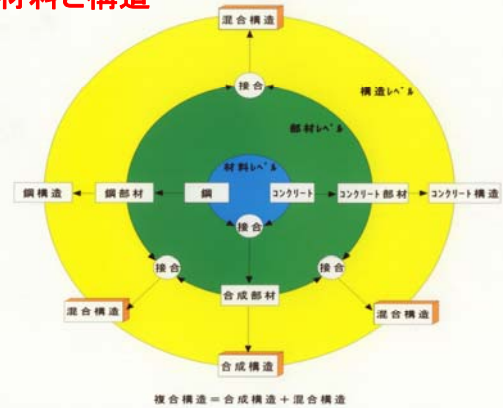
No.13

例：示方書改定の年譜



国土技術政策総合研究所資料より

材料と構造



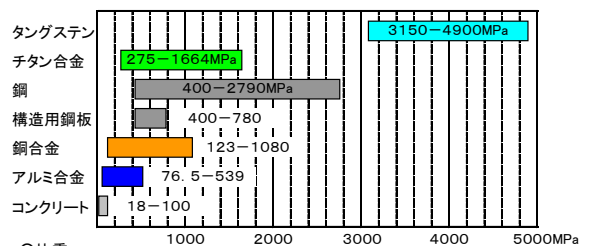
複合構造 = 合成構造 + 混合構造

橋梁用鋼材の発展

- 鑄鉄の時代 1780～1850年(70年間)
- 錬鉄の時代 1850～1900年(50年間)
- 鋼の時代 1880～現在(130年以上)

1681年: railwayという言葉が誕生
鉄道の幕開け: 蒸気機関車1800年代前半

鉄鋼の強度



○比重

鋼: 7.85 (g/cm³), アルミ: 2.7, コンクリート: 2.3

○単位質量あたりの強度

鋼: $400 \times 100 / 7.85 = 5096 \text{ N/cm}^3$ (5倍以上, コンクリートに比べ軽く強い)

コンクリート: $24 \times 100 / 2.3 = 1043 \text{ N/cm}^3$

日本橋梁建設協会より引用

第2章 構造力学の基本

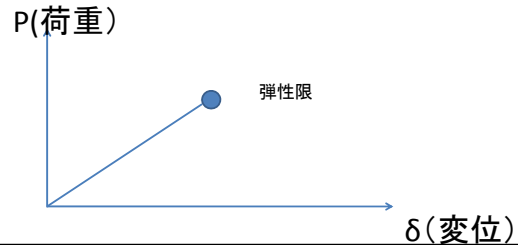
1. ニュートンの力学 (1687年、プリンキピア)

- 第1法則：慣性の法則。静止または一様な直線運動をする物体は、これに力が作用しないかぎり、その状態を保つ。
- 第2法則：物体が力の作用を受けるとき、力の向きに、力の大きさに比例した加速度が生じる。
- 第3法則：作用反作用の法則。力を他に及ぼした物体は、同じ大きさの反対向きの力を及ぼされる。

2. フックの法則 (1678年)

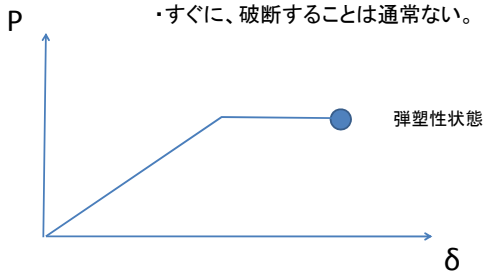
- 弾性体の変形は力に比例する。
 $P = ku$ (P: 力、u: 伸び、k: ばね定数)

- ◆ 初期の構造設計では、利用できる手段は、
 - ・ ニュートンの法則
 - ・ 弾性論 (比例関係)
- ◆ これらの2つの手段が許容応力度設計法を生み出した。
- ◆ 鋼材は、比較的明確な降伏点まで、線形挙動を示すことが許容応力度設計法を支えた。



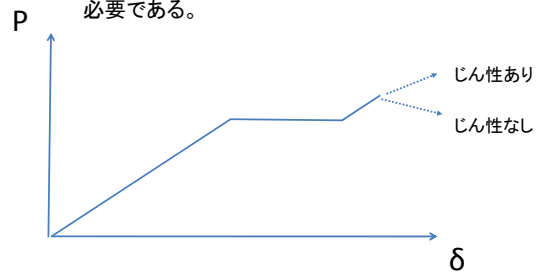
19

- ・ 鋼材は、降伏後も弾塑性挙動を示す。
- ・ すぐに、破断することは通常ない。



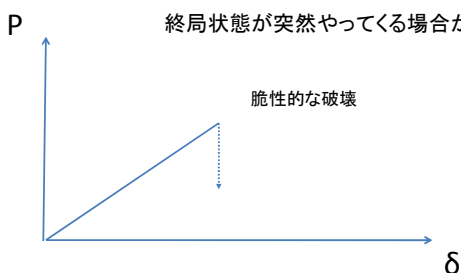
20

- 弾塑性挙動が終局状態に近づいた場合には注意が必要である。



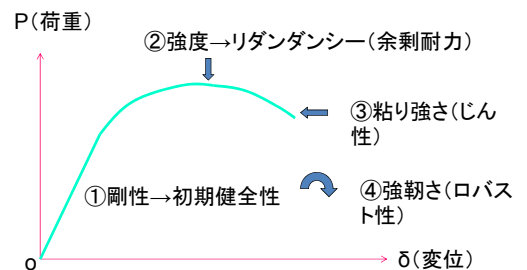
21

- 終局状態が突然やってくる場合がある。



22

構造物の基本的性能



23

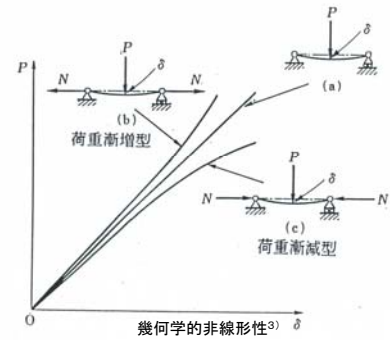
構造解析の基礎式

構造解析の基礎式	線形問題	幾何学的非線形問題
	微小変位解析	有限変位解析
応力-ひずみ関係	線形	線形
ひずみ-変位関係	線形	非線形
つり合い式	線形	非線形

構造解析の基礎式	材料非線形問題	複合非線形問題
	弾塑性解析	弾塑性有限変位解析
応力-ひずみ関係	非線形	非線形
ひずみ-変位関係	線形	非線形
つり合い式	線形	非線形

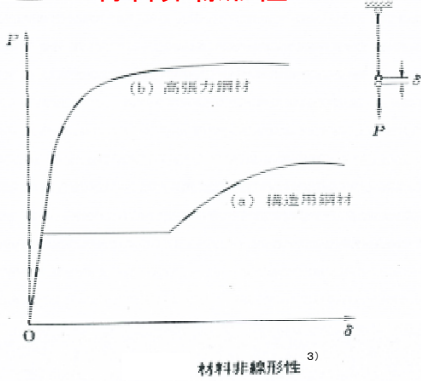
No.24

幾何学的非線形性



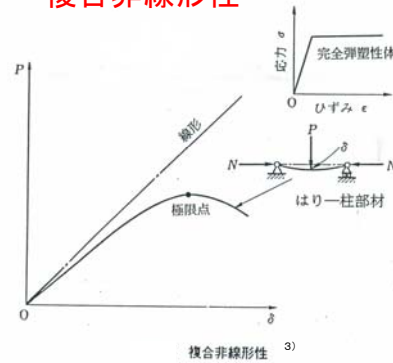
No.25

材料非線形性



No.26

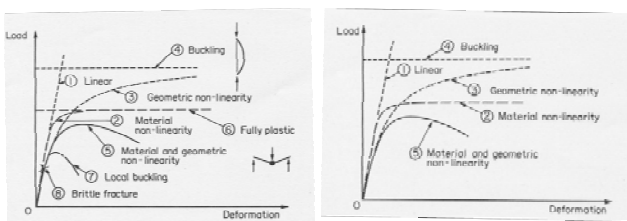
複合非線形性



No.27

鋼構造の挙動:破壊と座屈が鍵

- 部材の挙動
- 構造物の挙動



(Trahair, N.S.)⁹⁾

28

崩落前の米国の橋(I-35W)

「まさか」は必ず起こる!



出典: ミネソタ大学

米国ミネソタ州 I-35W橋の崩落事故



ミネアポリス I-35W(2007年8月)

(出典:MN/DOT) 30

I-35Wの崩落映像



31



事故現場の状況(2007年8月2日) (出典:MN・DOT)

32



ガセットプレートの変形: 局部の変形が全体の強度に関係

補修工事
中の事故
であった

(出典:MN/DOT)



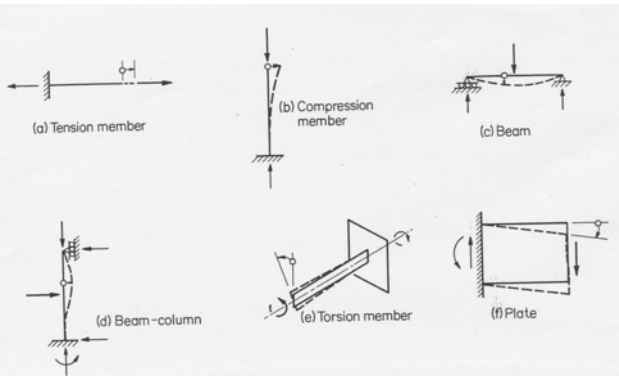
34

構造解析の使い分け

照査レベル	照査式	構造解析法
作用レベル (荷重レベル) 【構造物レベル】	$\gamma_g P_d \leq P_u$ (システムとしての安全係数)	非線形骨組解析 非線形有限要素解析
断面カレベル 【部材レベル】	$\gamma_i \frac{S_d}{R_d} \leq 1$ (部分係数: 限界状態設計)	線形骨組解析(格子解析)
応カレベル 【構造細目レベル】	$\sigma_{max} \leq \sigma_u / \gamma_s$ (強度低減係数)	線形有限要素解析

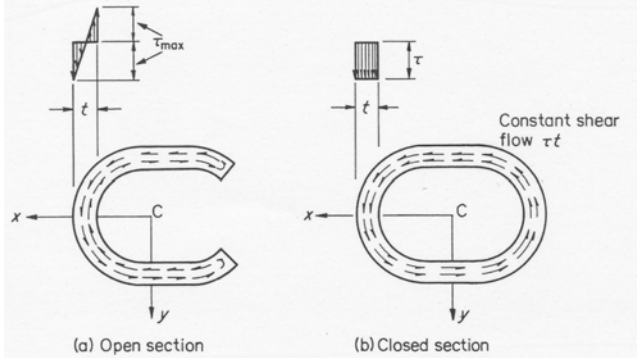
No.35

部材の伝える主な力⁹⁾



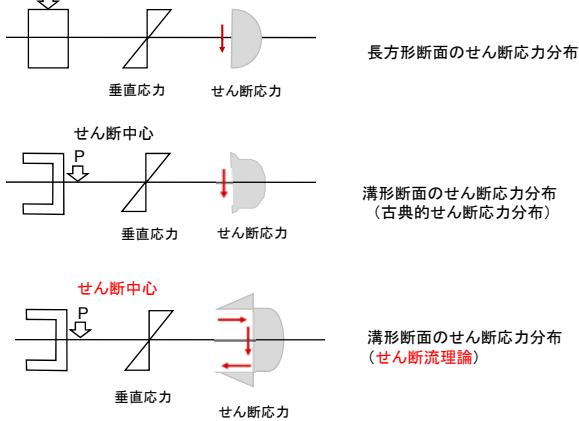
36 36

薄肉断面部材の一樣ねじりによるせん断応力⁹⁾



37

応力を流れとして理解



具体例: トラス橋格点部の設計と力学モデル

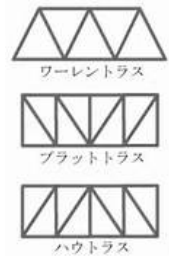
・明治初期に英国から輸入された錬鉄ワーレントラス(鉄道橋)はすべてリベット接合⇒格点が剛結

・1897年(明治30年)頃より、アメリカのピン(ヒンジ構造)トラスに変わる(プラットトラス)

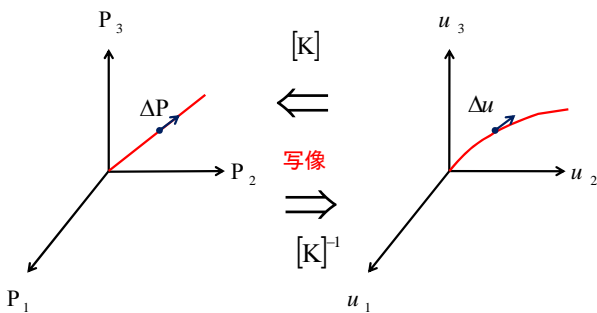
・大正時代には、ピントラスは振動が大きく、欠陥を生じやすかったため、ピンからリベットへ移行

・プラットトラスからリベット接合に都合のよいワーレントラスへと再移行

・その後、リベット接合から高力ボルト接合へ移行



構造解析



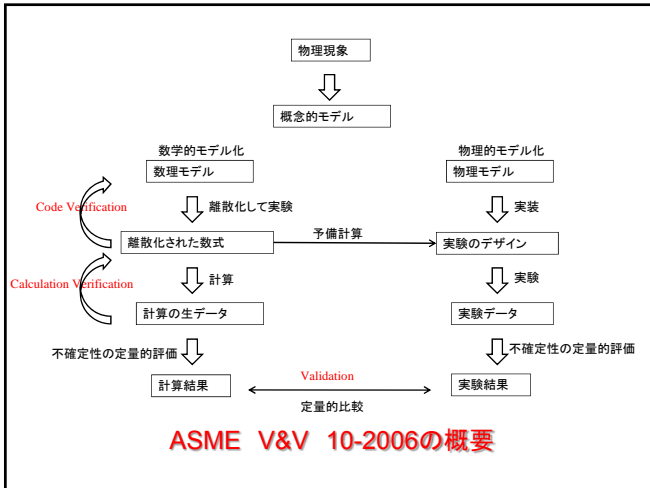
力-変位関係式: $\{P\} = [K]\{u\}$ (非線形関係)

増分型: $\{\Delta P\} = [K_T]\{\Delta u\}$ (線形関係)

構造解析の妥当性の判断

- 1) モデル化を行う際には、常に実際に生じている物理現象に立ち返らなければならない。
- 2) 実験は適切に行われれば、実験供試体については真実を語るのに対し、理論やモデルではある種仮定に基づいているので、真実とは限らない。
- 3) 構造解析(静力学問題の場合)で得られた結果が完全に正しいのは、力の一致、変形の一致、ひずみの一致が得られた場合のみである。
- 4) あらゆるモデルには、適用範囲があり、モデルの成り立ちをよく理解しておく必要がある。

日本学術会議 第19期メカニクス・構造研究連絡委員会構造工学専門委員会 2005年



今、考えていること(閑話休題) :

ICT技術が進歩した。だが、現在のコンピュータを利用した設計用の構造解析でも、有効数字は手計算の時代とあまり変わっていないかもしれない。2桁程度が信頼のおける有効数字である。

理由は、0.1mm程度のひび割れ現象の解析から、4Kmの吊橋の全体挙動の解析まで、 10^7 のオーダーの差がある。このオーダー差の中での解析は非常に難しい。

それであれば、……FEMとICTの組み合わせが

43

第3章 設計法の基本

技術者倫理⁴⁾:

- (1) Accountability: 説明責任が果たせる
- (2) Traceability: 根拠が追跡できる
- (3) Compliance: 法令規則が順守できる

No.44

安全性確保の考え方

構造物の設計法の歴史を振り返るまでもなく、構造物の安全性の照査は、最大値と想定される荷重に対する荷重応答S(断面力あるいは応力)と確率的に見て十分安全と思われる抵抗値R(断面力あるいは応力)とを比較して、

$$S \leq R \quad (3.1)$$

が成り立つように行うことが自然であり、合理的である。すなわち、十分大きな荷重に対する荷重応答Sと十分小さな抵抗値Rとを比較して安全性を確保しようという考え方である。

No.45

許容応力度設計法の始まり

しかしながら、確率統計の理論に基づいて荷重応答Sや抵抗値Rを十分安全側に取ったとしても、設計から施工に至るまでのあらゆる段階における未知の要因をSやRの中に含ませることはできず、無知係数とも呼べるような安全率 ν ($\nu \geq 1$)を考えることの必然性が多くの事故例を教訓に提案された。そして、式(3.1)の安全性照査式をさらに安全側に持っていくため、SとRとの間に一定の比で表される安全率を確保するという表現

$$S \leq R / \nu \quad (3.2)$$

がNavier(1826年)によって提案された。その後、長い間、式(3.2)が許容応力度設計法の安全性照査式として使われてきた。

No.46

許容応力度設計法 (ASD)

Σ 作用応力度 \leq 許容応力度

許容応力度設計法の利点は、その単純さにある。

一方、欠点としては、

- (1)異なるばらつきを持つ荷重の影響をひとつの安全率だけでは扱うことはできない。
- (2)供用荷重下にある構造物を解析しても、破壊時の構造物の挙動の評価に繋がらない。

No.47

限界状態設計法 (LSD)

限界状態設計法では次のことを考慮する。

- ① ある限界状態を超えるすべての可能性を考える。
- ② 構造モデルに含まれるすべての不確定性と、モデル自身の不確定性あるいは近似度を考える。
- ③ 目標とする信頼性を考える。

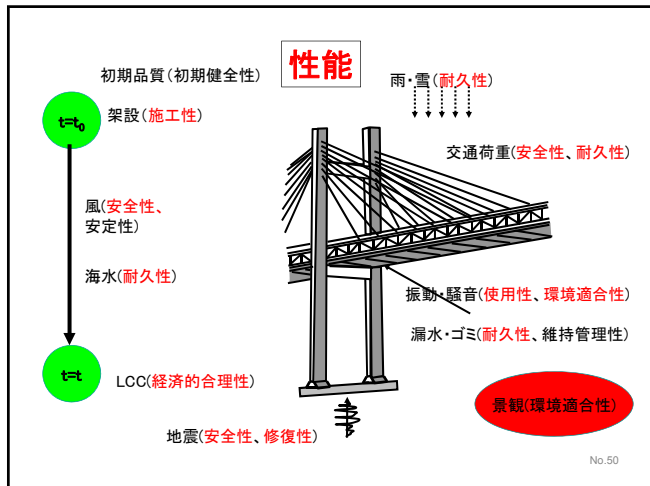
No.48

日本の鋼・合成構造標準示方書(2007年版)

- 先進性
 - 最新の技術の導入
 - 実験や非線形解析による照査に道筋
 - 道示、鉄道標準、港湾標準などで利用
- 国際性
 - 国際規格としての認知
 - アジアコードへの対応
 - 英文化
- 設計の自由度の拡大
- 要求性能や限界状態の明確化
- 耐久性、維持管理性の向上
- 安全性向上、長寿命化



▶ 49



要求性能の分類(土木学会鋼構造委員会)

要求性能	性能項目	照査項目の例	照査指標の例
安全性	構造安全性	部材耐力、構造系全体の耐力、接合部の耐力、安定性等	断面力、応力度
	公衆安全性	利用者および第三者への被害(落下物等)	—
使用性	走行性	通常時の走行性(路面の健全性、剛度)	路面の平坦度、桁のたわみ
	歩行性	通常時の列車走行性、乗り心地	桁のたわみ
	歩行性	通常時の歩行性(歩行時の振動)	桁の固有振動数
修復性*	地震後の修復性	損傷レベル(損傷に対する修復の容易さ)	応答値(損傷度)/限界値(損傷度)
	耐疲労性	変動作用による疲労耐久性	等価応力範囲/許容応力範囲
	耐腐食性	鋼材の防錆・防食性能	腐食環境と塗装仕様、LCC
	材料劣化抵抗性	コンクリートの劣化	水セメント比、かぶり
	維持管理性	維持管理(点検、塗装など)の容易さ、損傷に対する修復の容易さ	—
社会・環境適合性	社会的適合性	部分係数の妥当性(構造物の社会的な重要度の考慮)	部分係数(構造物係数等)
	経済的合理性	構造物のライフサイクルにおける社会的効用	LCC、LCU
	環境適合性	騒音・振動、環境負荷(CO ₂ 排出)、景観等	近隣住民に対する騒音・振動レベル、CO ₂ 構造形式・塗装色による景観創造性、モニュメント性等
	施工時安全性	施工時の安全性	断面力、応力度、変形
施工性*	容易性	製作や架設作業の容易性	—

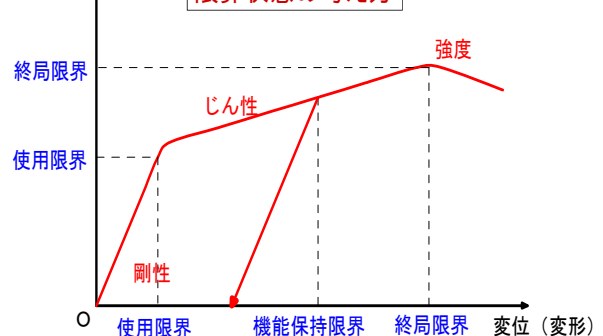
▶ 注) *修復性と施工性を構造物の要求性能として設定しているが、具体的な照査方法は耐震設計編および施工編による。

要求性能と限界状態⁴⁾

要求性能	性能項目	限界状態
安全性	構造物の安全性(終局、安定) 公衆安全性(第三者への被害) 地震(終局、安定) 施工安全性(終局、安定、健全性)	終局
使用性	走行性、歩行性 耐久性(疲労、Damage、腐食)	使用
修復性	地震後の修復性 維持管理計画	修復
社会・環境適合性	社会的な重要性 経済的合理性(LCC、LCU) 環境適合性(騒音、振動、景観、LCA)	最適性

No.52

限界状態の考え方



No.53

第4章 性能設計法の基礎

取り巻く環境の変化

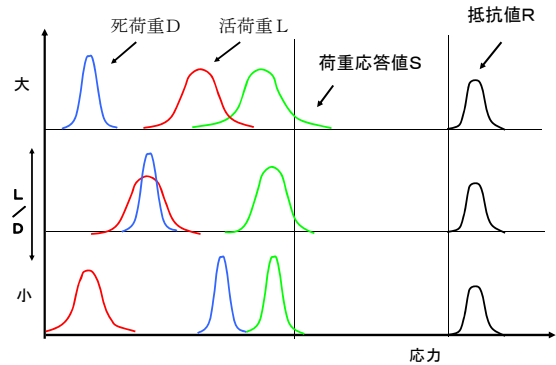
国際基準との整合への対応

新技術の迅速な活用・導入

コストダウン

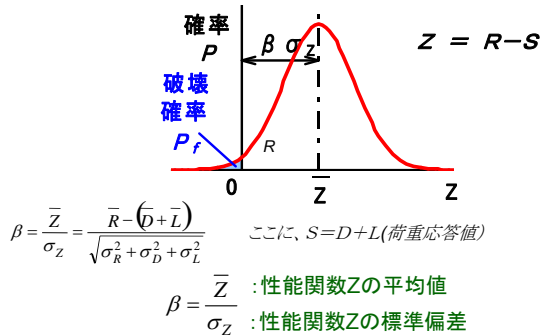
No.54

確率・統計的手法の必要性



No.55

信頼性指標 β の計算(死荷重と活荷重のみ)



No.56

(1) レベルⅢ²⁾

設計しようとする構造物が限界状態に達する確率が、あらかじめ設定された目標とする確率値よりも小さくなることを照査する方法がレベルⅢで、式(4.1)で表される。

$$P_f \leq P_{fr} \quad (4.1)$$

ここで、 P_f : ある限界状態に対して設計される構造物がその限界状態に達する確率、 P_{fr} : 目標とする確率値である。

(2) レベルⅡ²⁾

レベルⅡは、確率変数の1次および2次モーメント(平均および分散)で定義される信頼性指標 β と呼ばれる指標を用い、式(4.2)を満足するように構造物を設計しようとする照査フォーマットである。

$$\beta_T \leq \beta \quad (4.2)$$

ここで、 β : ある限界状態に対して設計される構造物が有する信頼性指標、 β_T : 目標とする信頼性指標である。

No.58

(3) レベルⅠ²⁾

この方式は、設計しようとする構造物(または構造物部材)の設計強度 R_d とこれに作用させる設計荷重応答 S_d の比が、予め設定された安全係数 γ_i よりも大きければ、安全性や使用性が確保されるという考えに基づくもので式(4.3)で表される。

$$\gamma_i \frac{S_d}{R_d} \leq 1 \quad (4.3)$$

ここで、 R_d : 抵抗の設計値、 S_d : 荷重応答の設計値、 γ_i : 安全係数である。このレベルⅠの照査フォーマットでは設計した構造物がどの程度の安全性や使用性を有するのか、その確率値との定量的な対応がレベルⅢ、Ⅱに比べて不明確になる。

No.59

信頼性設計法の3つのレベルのまとめ

設計レベル	設計水準	制御パラメータ
レベルIII	$P_{f_T} \geq P_f$	破壊確率
レベルII	$\beta_T \leq \beta$	信頼性指標
レベルI	$\gamma_i \cdot \frac{S_d}{R_d} \leq 1$	設計用値

No.60
No.60

設計の基本

照査方法

照査フォーマット ($\gamma_i \cdot \frac{S_d}{R_d} \leq 1$) の提示

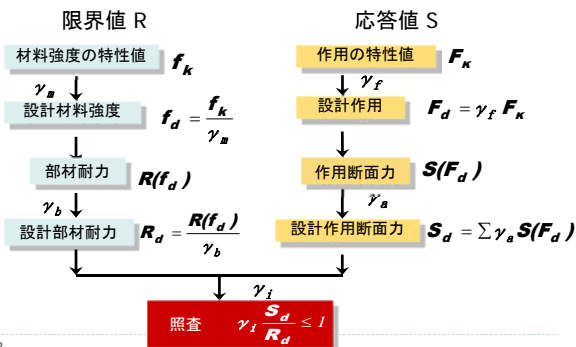
照査フォーマットの基本形(例)

$$\gamma_i \cdot \frac{\sum \gamma_a \cdot S(\gamma_f \cdot F_k)}{R(f_k / \gamma_m) / \gamma_b} \leq 1$$

S: 荷重応答
R: 抵抗
F_k: 設計荷重
f_k: 設計材料強度

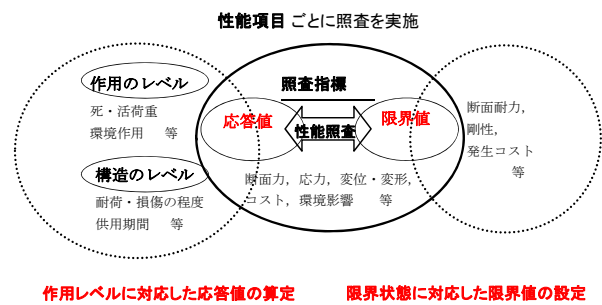
No.61

安全性照査の概念図



▶ 62

性能設計の基本⁴⁾



No.63

信頼性のレベル

レベル	照査式	パラメータ
レベル III	$P_{f_T} \geq P_f$	破壊確率
レベル II	$\beta_T \leq \beta$	信頼性指標
レベル I	$\gamma_i \cdot \frac{S_d}{R_d} \leq 1$	設計値

▶ 64

照査式と構造解析の対応

照査レベル	照査式	構造解析法
作用レベル (荷重レベル) 【構造物レベル】	$\gamma_g P_d \leq P_u$ (システムとしての安全係数)	非線形骨組解析 非線形有限要素解析
断面力レベル 【部材レベル】	$\gamma_i \cdot \frac{S_d}{R_d} \leq 1$ (部分係数: 限界状態設計)	線形骨組解析(格子解析)
応力レベル 【構造細目レベル】	$\sigma_{max} \leq \sigma_u / \gamma_s$ (強度低減係数)	線形有限要素解析

No.65

設計:創造力と想像力

計画・設計では、
創造力が大切

施工・維持管理・補修補強では、
想像力が大切



毎日・毎分・毎秒、訓練ができる！
[Attention Economy](#)⇒周りを見る

3規則

現場・現物・現状

ハインリッヒの法則(ひやり・ハットの法則)

300:29:1

(上り坂・下り坂・まさか)

災害防止の科学的方法(ハインリッヒ)

- ・事実の調査
- ・再発防止対策の樹立
- ・技術者の安全関心の喚起と維持

67

ご静聴ありがとうございました



参考文献

- 1) 日本鋼構造協会: ハイブリッド桁の限界状態設計法試案、JSSCテクニカルレポート、No. 83、2009年9月
- 2) 日本鋼構造協会: 土木鋼構造物の性能設計ガイドライン、JSSCテクニカルレポート、No. 49、2001年10月
- 3) 土木学会: 座屈設計ガイドライン[1987年版、2005年版]、1987年10月、2005年10月
- 4) 土木学会: 鋼・合成構造標準示方書、総則編・構造計画編・設計編、2007年3月
- 5) 日本橋梁建設協会: 鋼橋技術の変遷、2010年5月
- 6) 土木学会鋼構造委員会継続教育小委員会: 座屈基礎講座、2006年1月
- 7) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説(Ⅰ 共通編 Ⅱ 鋼橋編)、2012年5月
- 8) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼・合成構造物、丸善、2009年7月
- 9) N.S.Trahair: The Behaviour and Design of Steel Structures, Chapman and Hall, 1977

No.69