

### 課題3

## 柱部材の破壊モードと耐荷力の算定(耐震設計入門)

### 0. はじめに

柱部材は、上載荷重を支持し下部工にその荷重を伝達する垂直部材として機能する。このような柱部材には偏心軸力に加えて地震力による過大水平力を想定するする必要があり、耐震性評価など設計上重要な要件を含んでいる。

ここでは、柱部材の曲げ/せん断耐荷力を算定するとともに破壊モードの判定についても考え、コンクリート構造部材の耐震設計の入門編とするものである。

### 1. 単柱部材の構造特性

#### 1.1 変形モードと断面力分布

単柱形式の垂直柱部材には、基本的に、上載死荷重(軸力  $N$  として働く)と地震力による水平荷重  $P$ (曲げモーメント, せん断力として働く)が同時に作用し、図1のようにまとめることができる。図1では、(a)上端自由片持ち梁形式(土木橋梁構造物)、(b)両端固定の逆対象構造物(建築建屋構造)、に大別して変形と断面力分布を示した。したがって、設計上危険断面となるのは、前者(a)の場合柱基部、後者(b)では上端と下端であり、その断面に対する設計照査が必要となる。(ただし、段落し配筋、断面の急変部で危険断面となることがあり、別途検討が必要である。)

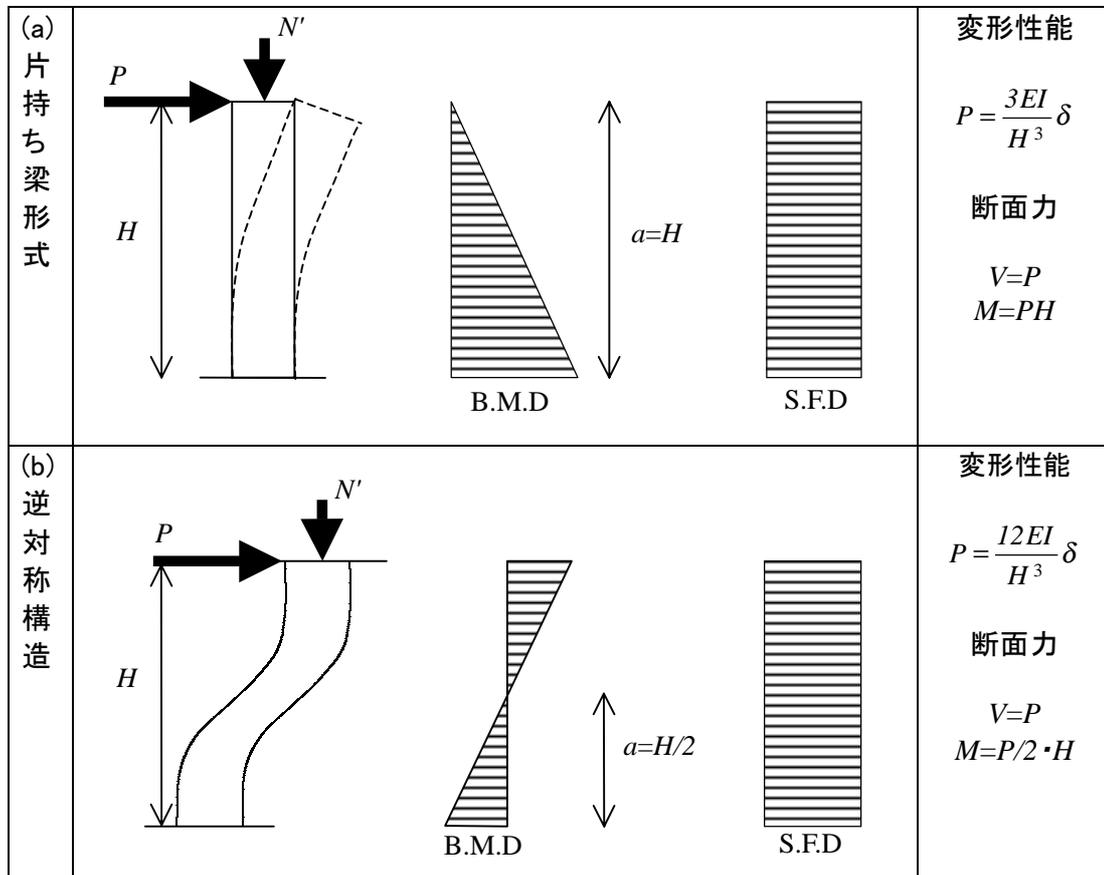
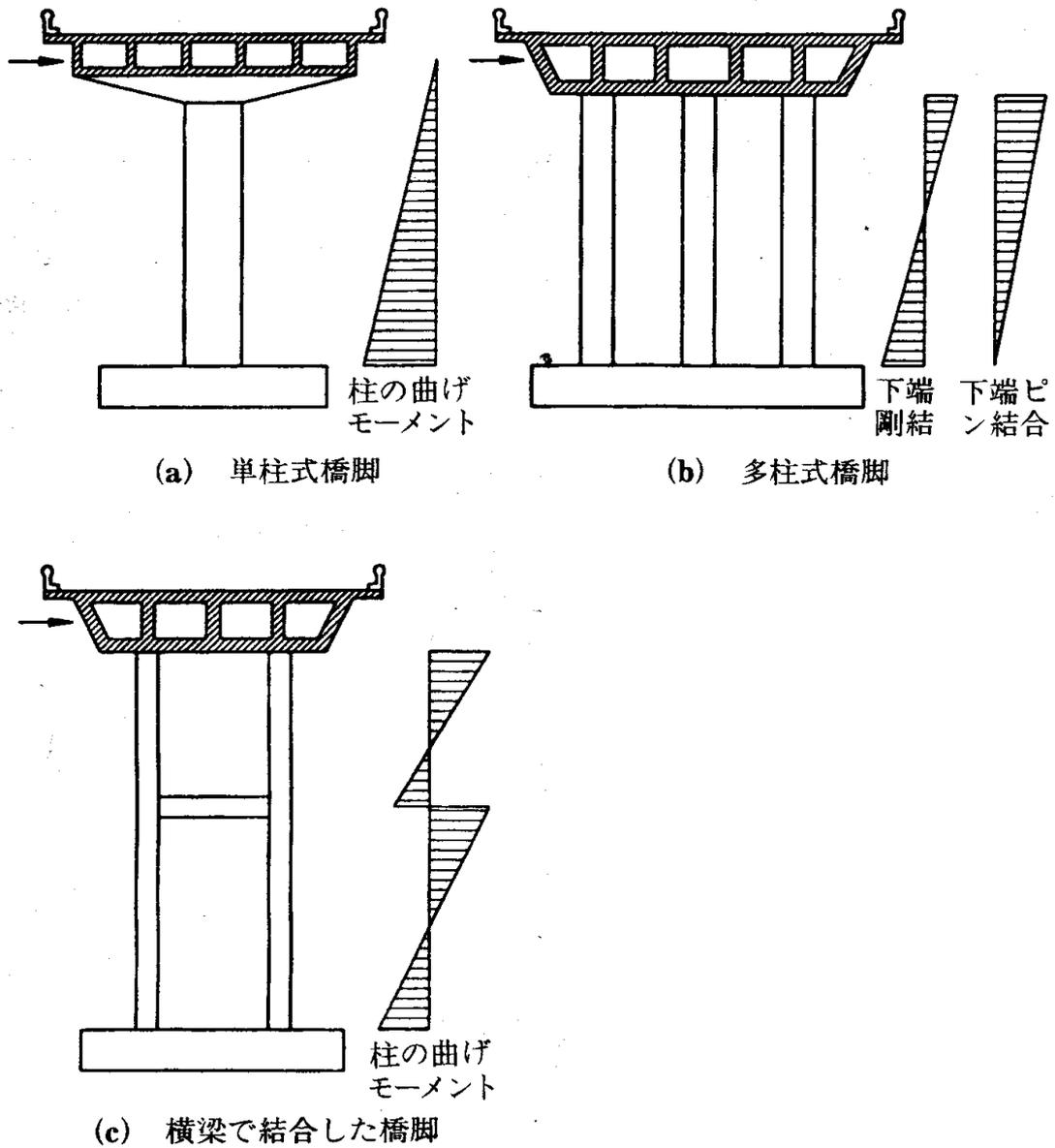


図-1



橋脚の構造形式

## 1.2 耐荷力の算定

対象となる柱部材の危険断面における耐荷力を算定する場合、曲げ耐力(課題1にて学習した方法)およびせん断耐力(課題2の方法)を求め、両者のうち小なる耐荷力がその部材の終局耐荷力となる。別途設定された設計外力に対して十分な耐荷力を有することはもちろんのこと、靱性的な破壊モード(例えばせん断破壊を回避すること)を保證することも重要な課題である。

## 2. 破壊モードの判定と耐荷力の算定法

### 2.1 諸条件の準備

まずは、解析のための準備として、①構造特性、②荷重特性、③断面条件、④材料条件、を設定する必要がある。これら4条件は、次のような項目が含まれる。

- ①構造特性：柱部材の構造特性(支持条件、柱長  $L$ 、せん断スパン  $a$ )
- ②荷重条件：上載荷重、水平荷重
- ③断面諸元：断面形状・寸法、  
軸方向筋(位置と配筋量)、  
せん断補強筋(配置間隔と配筋量)
- ④材料条件：コンクリート → 弾性係数、圧縮強度、終局ひずみ  
鉄筋 → 弾性係数、降伏強度

### 2.2 耐荷力算定と破壊モード

これら断面の両耐荷力  $M_u$  および  $V_y$  が求まると、今度はこれらを水平荷重  $P$  に換算した水平耐力として表し、比較する必要があり、これは次式で得られる。

$$\text{曲げ耐力} : P_u = M_u / a,$$

$$\text{せん断耐力} : P_s = V_y$$

ここで、せん断スパン  $a$  は、次式のように与えられる。

(a) 上端自由片持ち梁形式:  $a=L$

(b) 逆対称構造:  $a=L/2$

従って、両水平耐荷力のうち、小さい方がその部材の耐荷力となり、次式で示される。

$$P_{\max} = \min \{P_u, P_s\}$$

同様に、破壊モードも次式で判別することができる。

$$P_u < P_s : \text{曲げ破壊}$$

$$P_u > P_s : \text{せん断破壊}$$

ただし、このような2つの破壊モードの中間的な性状を示す曲げせん断破壊も議論されており、例えば、道路橋示方書<sup>1</sup>(V耐震設計編)に示された地震時保有水平耐力法では、次のように分類している。

①  $P_u \leq P_s$  : 曲げ破壊型

②  $P_s < P_u \leq P_{s0}$  : 曲げ損傷からせん断破壊移行型

③  $P_{s0} < P_u$  : せん断破壊

ここで、 $P_s$ 、 $P_u$ については、前述のとおりであるが、新たに $P_{s0}$ は、 $P_{s0}$ :正負交番作用の影響がない場合(示方書での $C_c=1.0$ 、課題2における $\zeta=1$ の場合)のせん断耐力を意味する。

### 2.3 せん断余裕度と保有靱性

ここで、せん断余裕度を  $P_s/P_u$  として定義すると、このせん断余裕度が大きいほどせん断破壊を防止することができる。言換えると、万一過大な地震力により終局に至った場合、靱性に富む安定的な破壊モードを確保することができる。理論的には、せん断余裕度が  $> 1$  であれば、曲げ破壊となるが、地震時の繰返し大変形によりせん断耐力  $V_y$  が劣化し( $\zeta$ が減少し)、せん断余裕度をある程度  $1$  より大きい値を確保する必要がある。

これまでのコンクリート研究室の実験によれば、

$$V_y/P_u < 0.7, \text{ かつ } P_s/P_u > 1.8$$

のとき、せん断破壊、および曲げせん断破壊が生じないとしている(池谷修論<sup>2</sup>参照)。

土木学会コンクリート標準示方書<sup>3</sup>(耐震設計編)によれば、

「特別の検討を必要としない場合、塑性ヒンジを形成する区間では、 $P_s/P_u \geq 2.0$ を満足する必要がある」としている。

上記に示した道路橋示方書の3破壊形式の場合、(許容)保有水平耐力  $P_a$  および許容靱性率  $\mu_a$  を以下のように算定する。

①のとき:  $P_a = P_u$ ,  $\mu_a = 1 + (\delta_u - \delta_y) / \alpha \delta_y$

②のとき:  $P_a = P_u$ ,  $\mu_a = 1.0$

③のとき:  $P_a = P_{s0}$ ,  $\mu_a = 1.0$

ここで、 $\delta_y$ :降伏時変位,  $\delta_u$ :終局変位,  $\alpha$ :安全係数を示す

### 3. 計算プログラム (SMNExcel) の概要

このようなせん断耐力の算定および図化を行うため、Microsoft の表計算プログラム Excel97 を用いた計算プログラム SMNExcel を作成し、以下にその概要を示す。

#### 3.1 解析フロー1 (軸力 $N$ をパラメータとした場合)

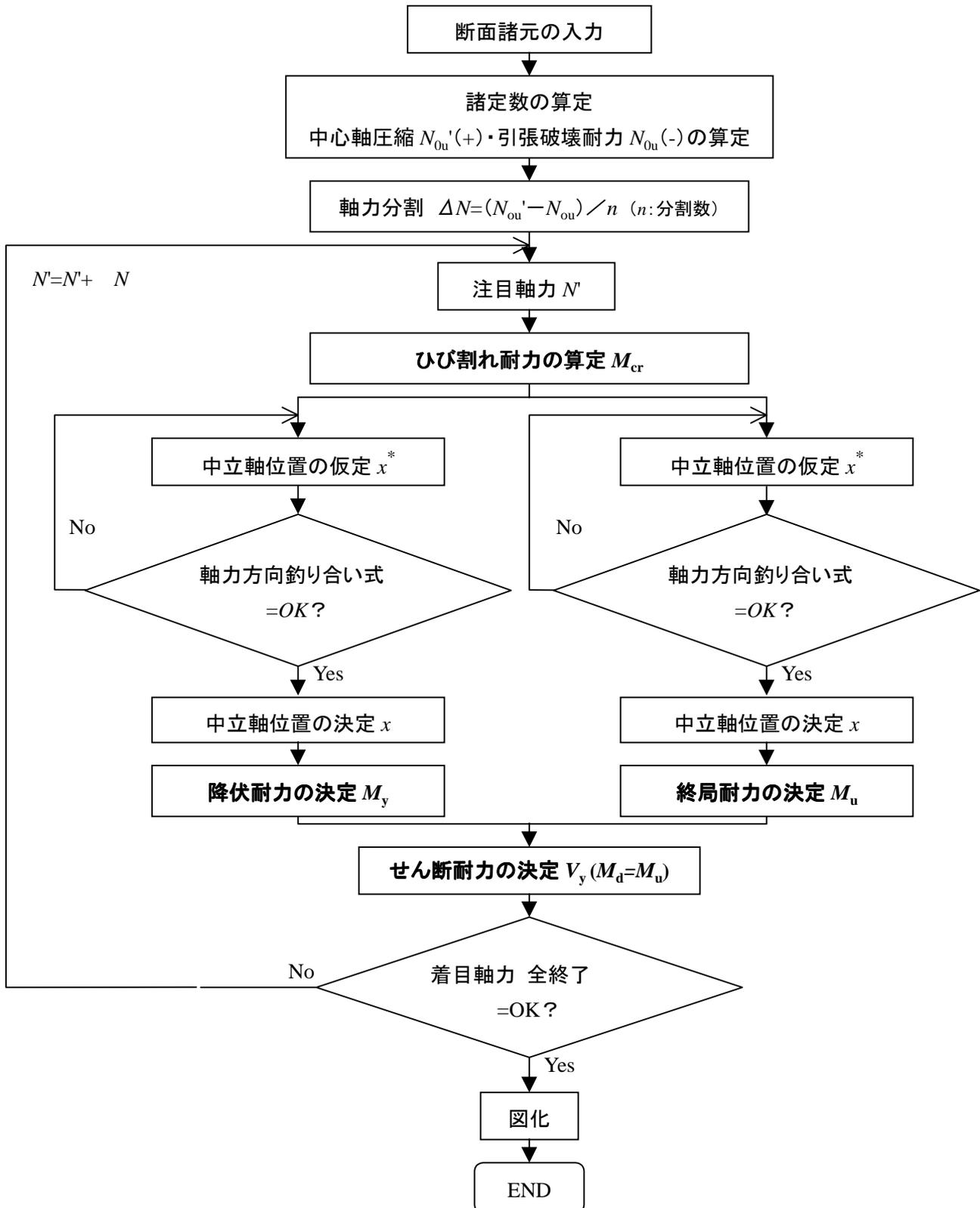


図-2(a) 計算プログラム SMN-Excel の解析フロー (軸力  $N$  をパラメータとした場合)

3. 2 解析フロー2(軸力  $N$  を一定とした場合)

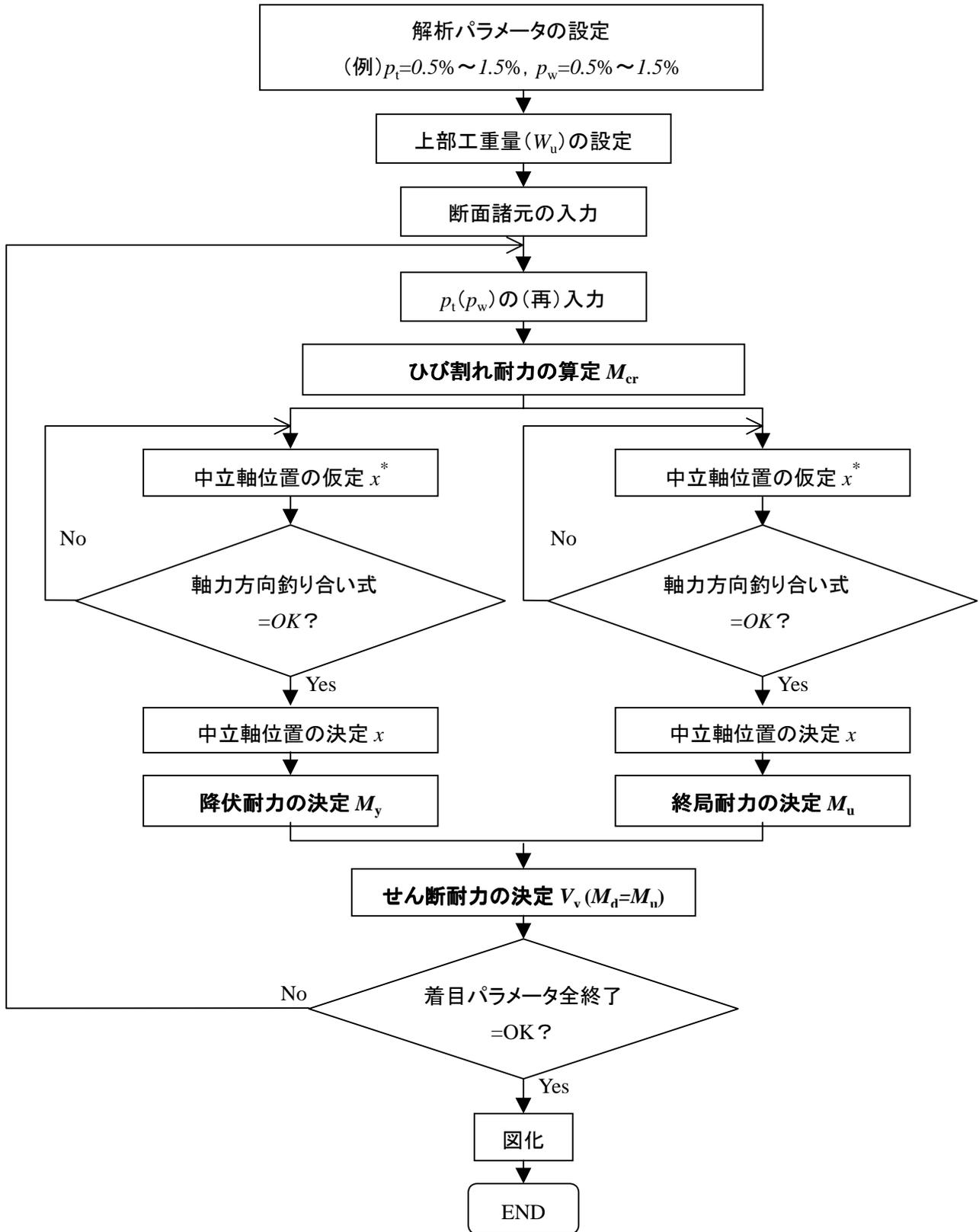


図-2(b) 計算プログラム SMN-Excel の解析フロー(軸力  $N$  を一定とした場合)

### 3.3 入力条件の設定と諸定数の算定

SMNExcel における入力諸条件（左表）とそれらによって算出される諸定数・諸強度（右表）を示す。（これは SMNExcel の画面イメージと同じものである）

入力条件			諸定数		
	$b = b_w$	90 (cm)		$A_{s2}$	95.256 (cm <sup>2</sup> )
	$h$	90 (cm)		$A_{s1}$	95.256 (cm <sup>2</sup> )
	$d_2$	6 (cm)		$A_w$	1.27 (cm <sup>2</sup> )
	$d_1$	84 (cm)		$A_g$	1.01412 (m <sup>2</sup> )
	$p_{t2}$	1.26%		$x_g$	44.40 (cm)
	$p_{t1}$	1.26%		$I_g$	0.08365 (m <sup>4</sup> )
	$p_w$	0.02%		$W_g$	0.183 (m <sup>3</sup> )
	$f_{cd}'$	300 (kgf/cm <sup>2</sup> )		$y_c$	45 (cm)
	$f_{yd}$	3000 (kgf/cm <sup>2</sup> )		$y_t$	39 (cm)
	$f_{yd}'$	3000 (kgf/cm <sup>2</sup> )		$x_b$	59.65 (cm)
	$f_{wy}$	3000 (kgf/cm <sup>2</sup> )			
	$\alpha_s$	90 度			
	$S_s$	15 (cm)			
	$E_s$	2.10E+06 (kgf/cm <sup>2</sup> )			
	$E_c$	2.10E+05 (kgf/cm <sup>2</sup> )			
	$\varepsilon_{cu}'$	0.0035			
	$\varepsilon_y, \varepsilon_y$	0.00143			
せん断スパン比	$a$	3.25 (m)			
上部工重量	$W_u$	200 (tf)			
材料係数	$\gamma_c$	1.00			
	$\gamma_s$	1.00			
部材係数	$\gamma_{bc}$	1.00			
	$\gamma_{bs}$	1.00			
	$\gamma_b$	1.00			

### 3. 4 結果出力と図化

- ・計算結果の出力として、以下の結果がそれぞれ算出される。

#### その1:軸力と曲げモーメントとの関係(断面耐力)

簡易法による相互作用図

無筋コンクリートの相互作用図

ひび割れモーメント  $M_{cr}$  と軸力  $N'$  の関係 ( $M_{cr} - N_c'$ )

降伏モーメント  $M_y$  と軸力  $N'$  の関係 ( $M_y - N_y'$ )

終局モーメント  $M_u$  と軸力  $N'$  の関係 ( $M_u - N_u'$ )

#### その2:軸力とせん断耐力との関係(断面耐力)

せん断耐力  $V_y$  と軸力  $N'$  の関係 ( $V_y - N'$ ) . . .  $V_s$  パラメータ

せん断耐力  $V_y$  と軸力  $N'$  の関係 ( $V_y - N'$ ) . . . パラメータ

#### その3:柱部材の耐力比較(曲げ耐力 V. S. せん断耐力)

曲げ耐力  $P_u$  , せん断耐力  $P_s$  の比較 ( $P_u , P_s - N$ ) . . .  $A_w$  パラメータ

せん断耐力と曲げ耐力の比  $P_s / P_u$  と軸力  $N$  の関係 ( $P_u / P_s - N$ ) . . .  $A_w$  パラメータ

- ・図化

その1は ~ の計算結果を併記し図化される。その2, その3はそれぞれ図化される。表示単位は以下のものが出力される。

#### その1

実単位  $M$  [tf・m],  $N'$  [tf],

無次元表示  $M / bd^2f_c'$ ,  $N / bdf_c'$

#### その2

実単位  $V_y$  [tf],  $N'$  [tf],

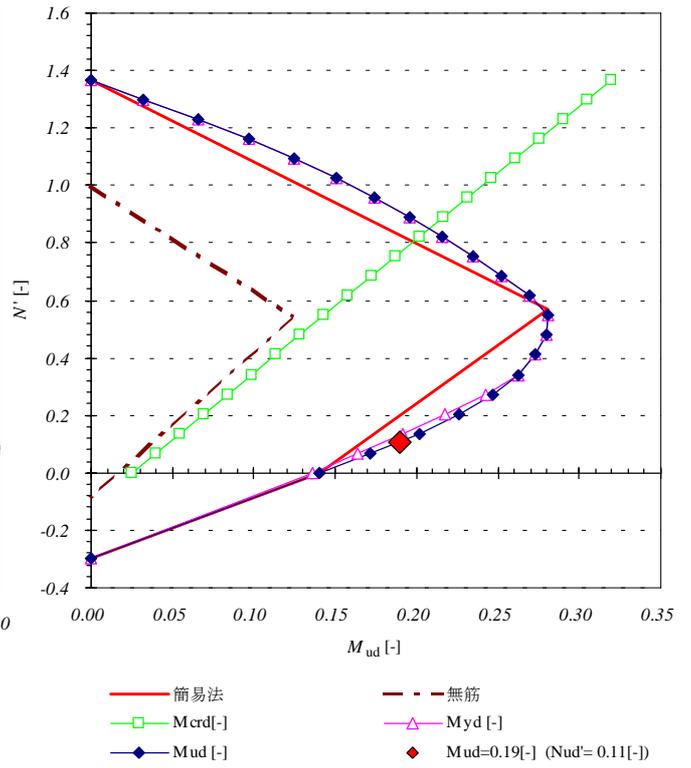
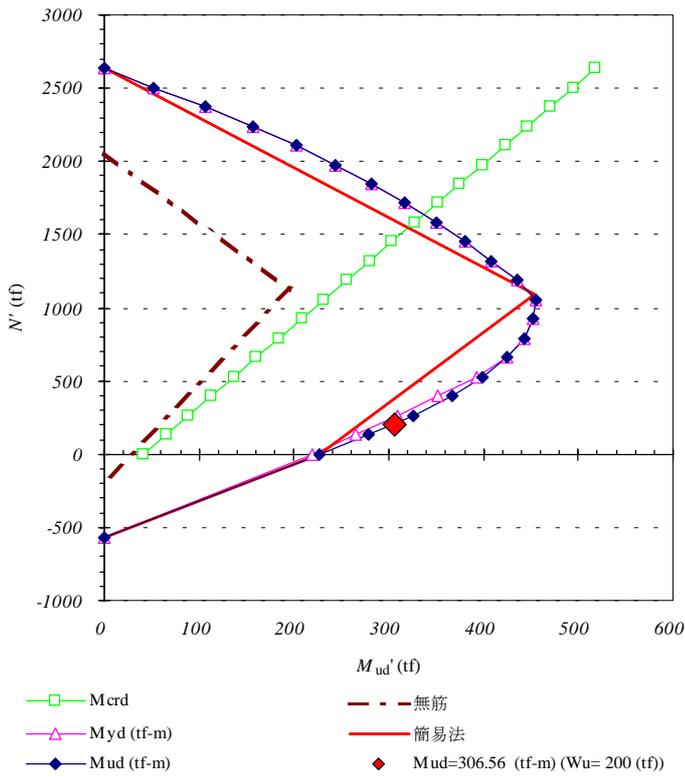
#### その3

実単位  $P_u$  [tf],  $P_s$  [tf],  $N'$  [tf],

無次元表示  $P_s / P_u$ ,  $N' / bdf_c'$

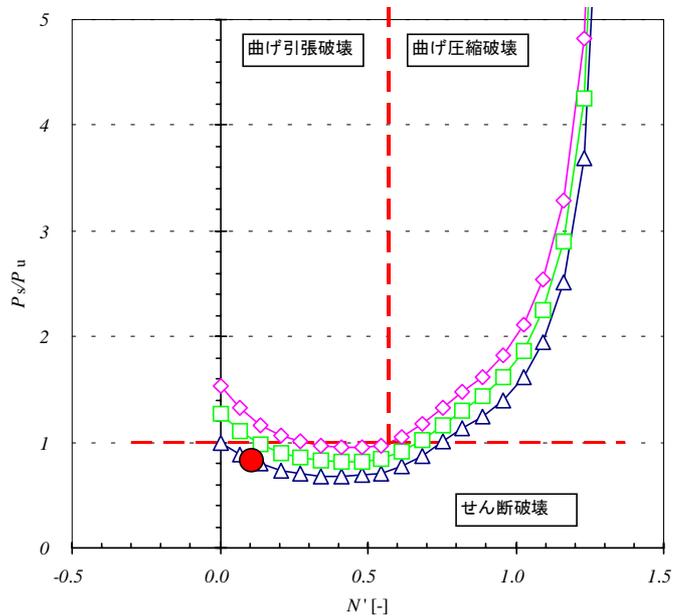
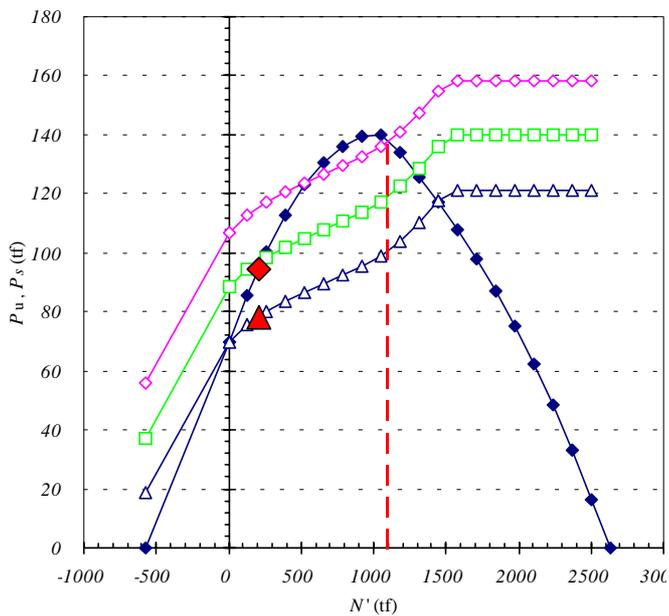
【計算例】

①軸力と曲げの相互作用図



②曲げ耐力せん断耐力と軸力の関係

- ◆ Pud :  $\gamma c=1 \quad \gamma s=1 \quad \gamma bc=1 \quad \gamma bs=1 \quad \gamma b=1$
- ◇ Psd (3Aw)
- Psd (2Aw)
- △ Psd(標準)
- ▲ せん断耐力: Pud = 78.34(tf) (Wu=200(tf))
- ◆ 曲げ耐力 : Pud = 94.33(tf) (Wu=200(tf)) ∴ せん断破壊
- 釣り合い破壊点  $N'=1095$  (tf)
- △ Pud/Psd :  $\gamma c=1 \quad \gamma s=1 \quad \gamma bc=1 \quad \gamma bs=1 \quad \gamma b=1$
- 2Aw
- ◇ 3Aw
- せん断余裕度 : Psd/Pud = 0.83 ( $N'=0.107$ ) ∴ せん断破壊
- 釣り合い破壊点  $N'=0.568$  (tf)

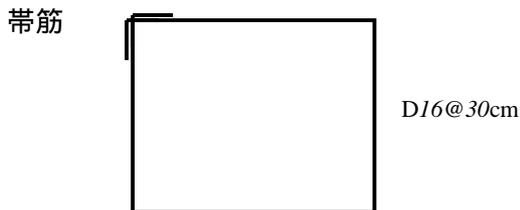
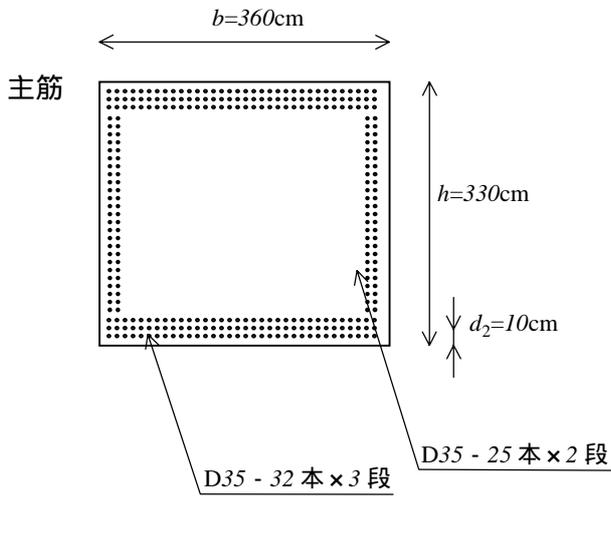


## 4. 課題計算

### 4.1 課題計算#1

下図のような2種の標準複鉄筋長方形断面について(課題#1と同断面),表1の条件に従い軸力と曲げの相互作用図を求めよ.

Type A 道路橋高架橋の断面<sup>4)</sup>



Type B 鉄道高架橋の断面<sup>5)</sup>

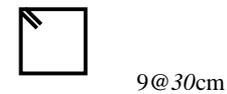
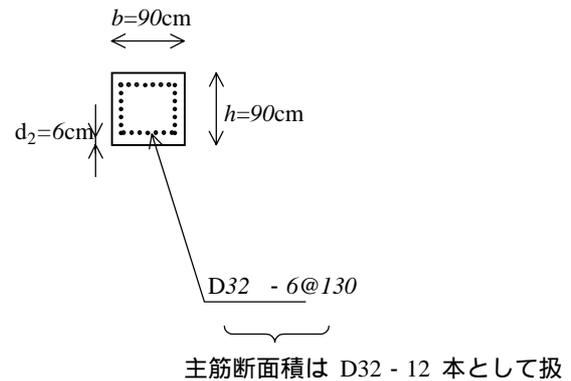


表 1

標準断面		道路橋高架橋	鉄道高架橋
断面寸法	$b$	360cm	90cm
	$h$	330cm	90cm
	$d_1$	320cm	84cm
	$d_2$	10cm	6cm
帯筋 (せん断補強筋)	$A_w$	D16	9
	$S_s$	30cm	30cm
鉄筋量 (主筋)	$A_{s1}$	D35-146 本	D32-12 本
	$A_{s2}$	D35-146 本	D32-12 本
柱高さ	$H$	10.60m	3.25m
上部工重量	$W$	3256tf	200tf
材料強度	$f'_c$	270 (kgf/cm <sup>2</sup> )	
	$f'_y = f'_{wy} = f'_{wy}$	SD30	

側方鉄筋や段配筋は計算プログラム (SMNExcel) 上は考慮できないので, 1 段に集約させ概算として上記数値を用いる.

#### 4.2 課題計算#2

表2を参考にして標準断面の鉄筋比，材料強度を数種選択し，曲げと軸力の相互作用図（破壊包絡線）および，せん断耐力と軸力の相互作用図を求め，その結果を併記（無次元表示）せよ．

表2

鉄筋比 (主筋)	$p_{t1} = p_{t2}$	0.5% ~ 1.5%
帯筋	$A_w$	D10 ~ D19
	$S_s$	10cm, 15cm, 20cm, 30cm
材料強度	$f'_c$	210, 240, 270, 300, 350, 400 (kgf/cm <sup>2</sup> )
	$f_y = f'_y$	SD30, SD35, SD40

#### 4.2 課題計算#3

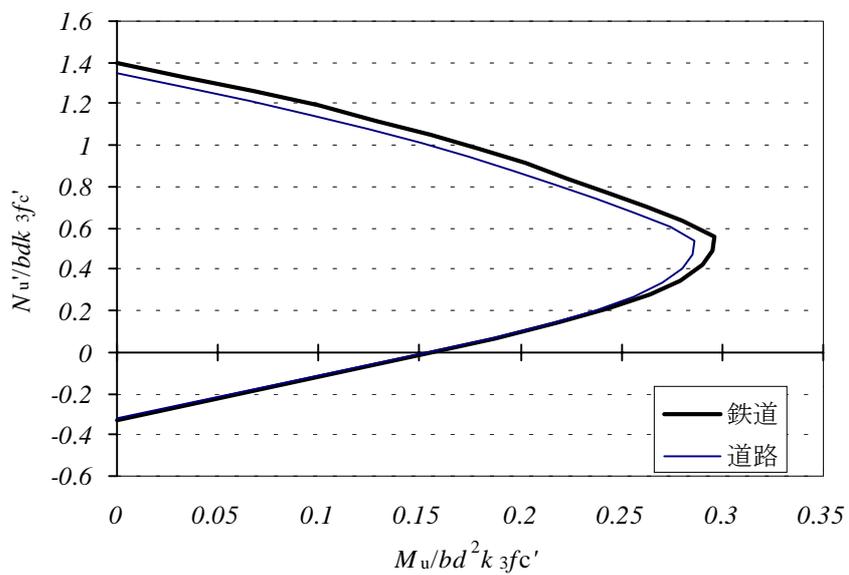
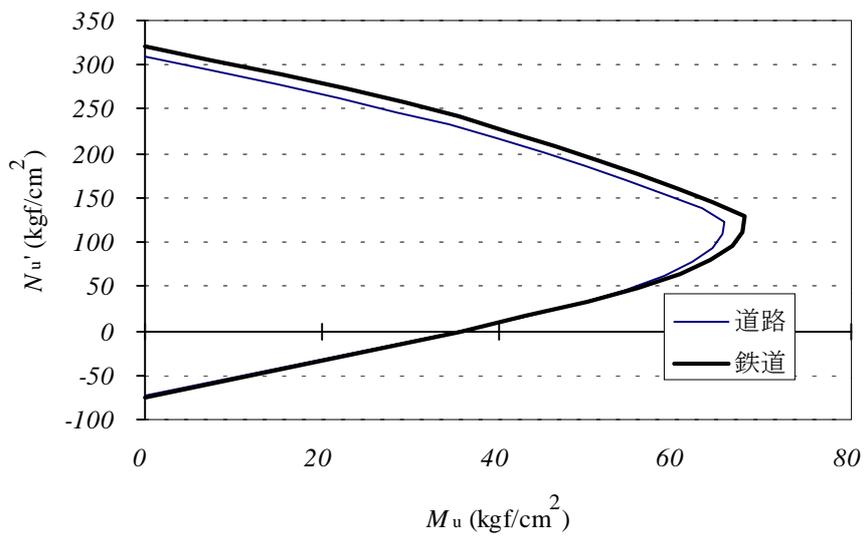
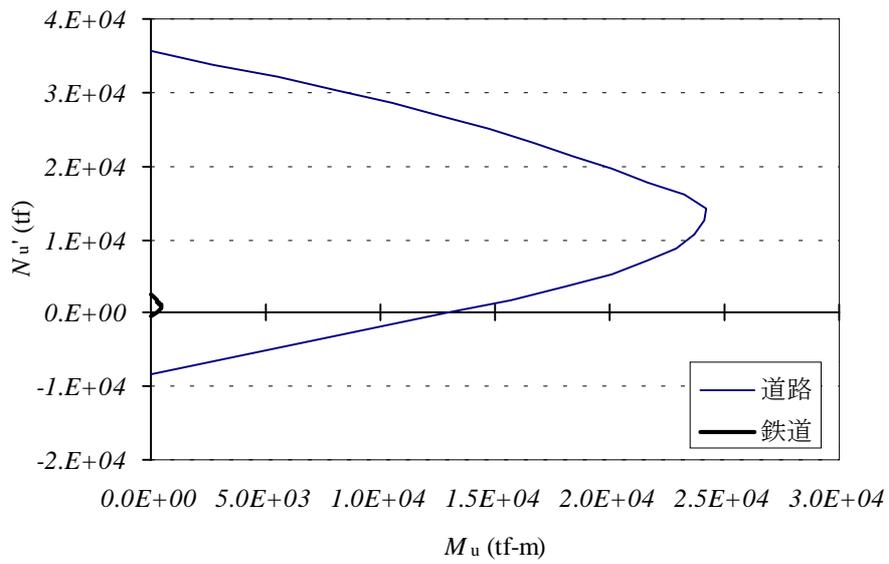
表3を参考にして標準断面における安全係数の影響を考察せよ．(曲げと軸力の相互作用図（破壊包絡線）および，せん断耐力と軸力の相互作用図を求めるとよい)．

表3

安全係数	c	1.0 ~ 1.3 (1.3)
	s	1.0 ~ 1.1 (1.0)
	bc	1.0 ~ 1.2 (1.3)
	bs	1.0 ~ 1.3 (1.15)
	b	1.0 ~ 1.2 (1.15)

※( )は示方書値

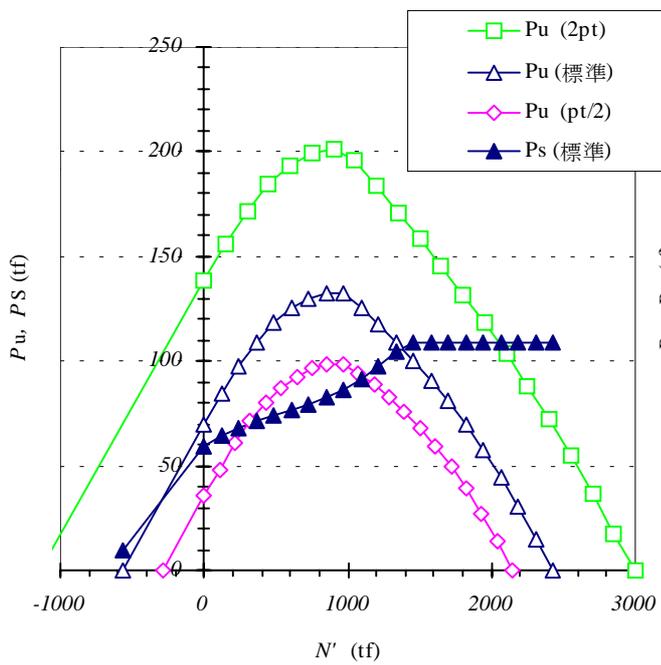
【#1 計算例】



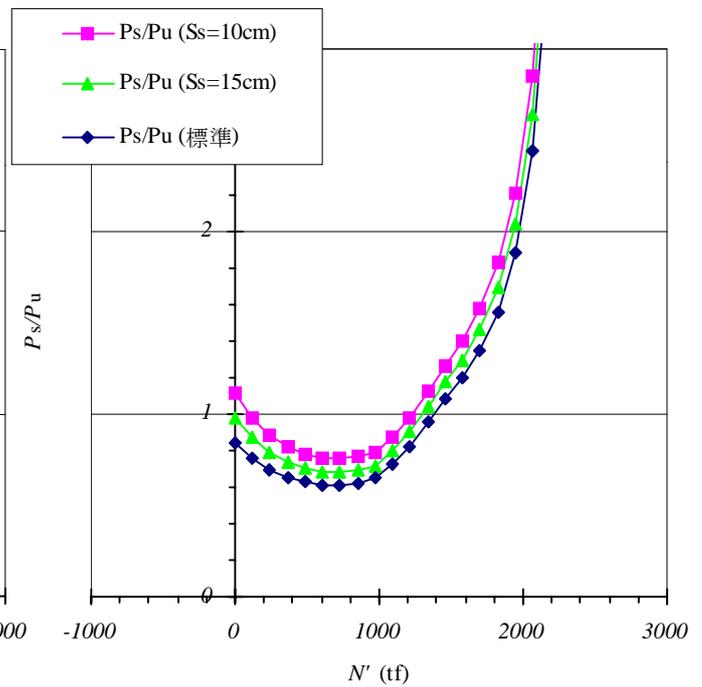
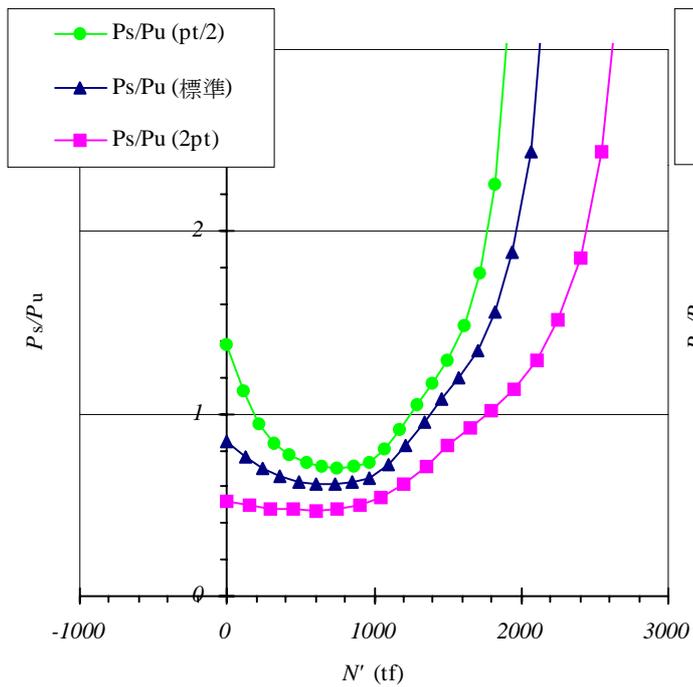
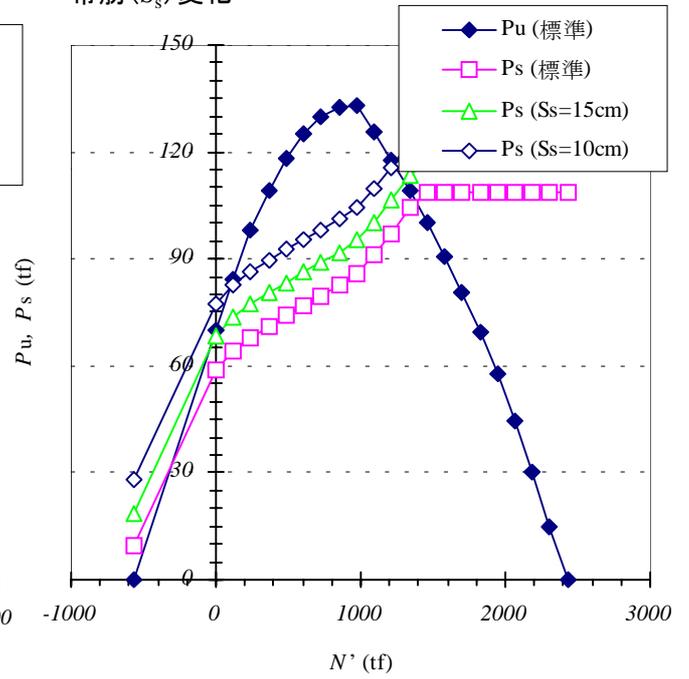
【#2 計算例】

鉄道橋の例

主筋 ( $p_t$ ) 変化

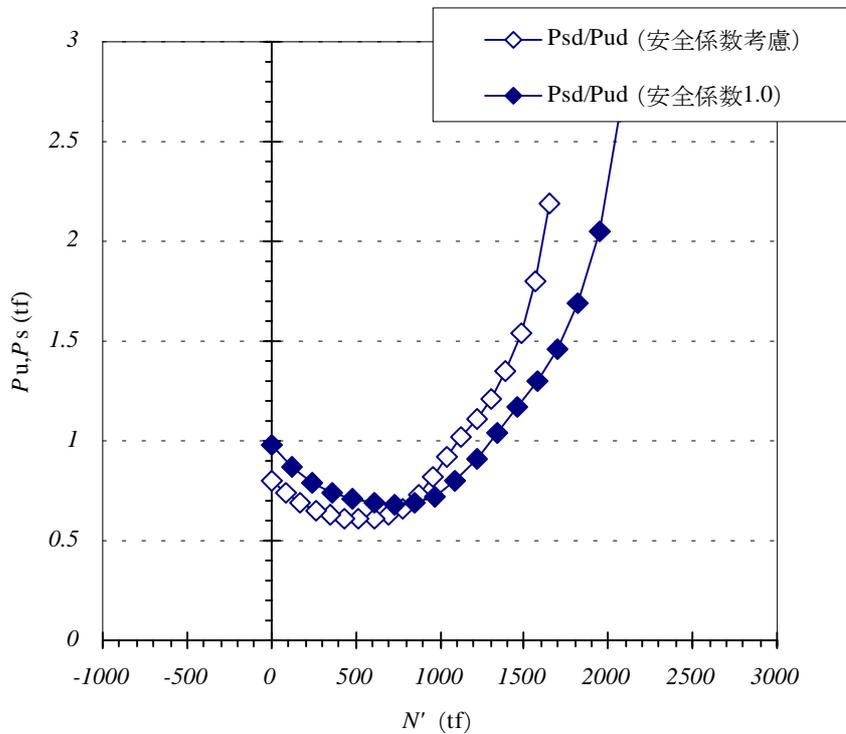
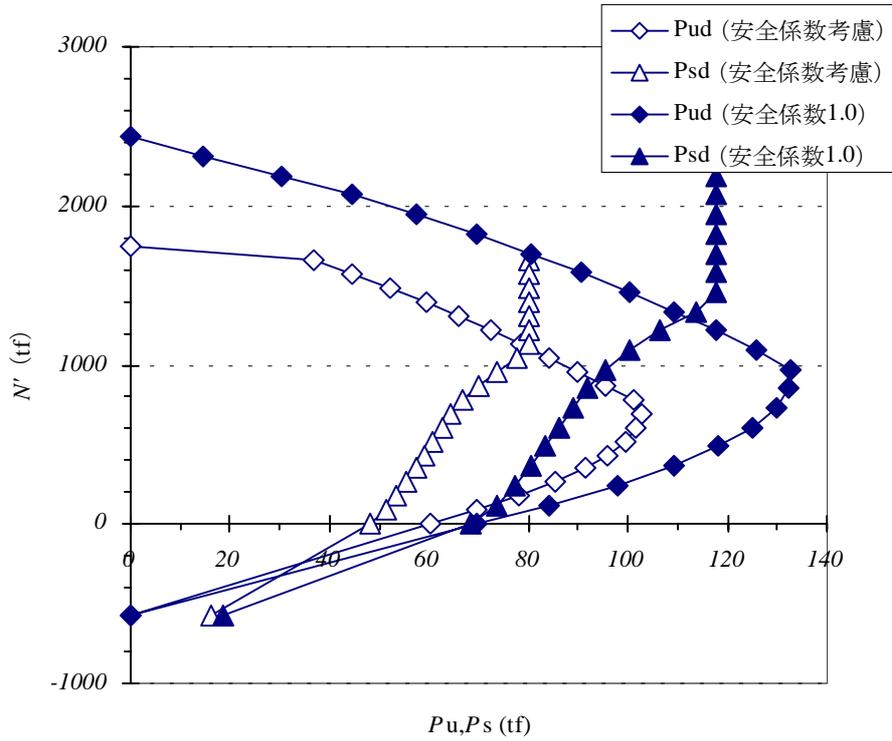


帯筋 ( $S_s$ ) 変化



【#3 計算例】

安全係数の影響(安全係数は示方書値)・・・鉄道橋の例



- 1) 日本道路協会: 道路橋示方書 V 耐震設計編 平成 8 年版, 1996
- 2) 池谷 和之, 平成 10 年度武蔵工業大学修士学位論文, 1999
- 3) 土木学会: 平成 8 年制定 コンクリート標準示方書 設計編, 1996.
- 4) JCI 近畿支部, 土木コンクリート構造物の震災対策に関する研究委員会 中間報告書, 1995. 12.
- 5) 鉄道総合研究所, 炭素繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強工法設計・施工指針, 1996. 11