

腐食に伴う断面欠損過程が平面骨組鋼構造物の残存耐荷力に及ぼす影響

明石工業高等専門学校 三好 崇夫

1. はじめに

腐食損傷を有する鋼橋の補修・補強や架け替えの要否は、残存耐荷力などの客観的な指標を用いて、合理的に判断する必要がある。非破壊的に残存耐荷力を予測できる有限要素解析法は、その判断のための有力なツールの一つであることから、多くの研究に利用されている。しかし、それらの多くは、残留応力を無視し、腐食の影響を単に部材の形状変化とした解析モデルを用いた手法（以後、この手法を従来法と呼ぶ。）を採用している。腐食に伴う断面欠損が鋼構造物に生ずると、剛性や強度の低下はもとより、断面欠損過程で残留応力などの作用応力が再分配されるとともに付加的な変形が生ずることが考えられる。そこで、本研究では、残留応力や断面欠損過程の解析上の取り扱いが、残存耐荷力に及ぼす影響について検討することを目的として、腐食に伴う断面欠損過程での応力の再分配挙動や付加的な変形の発生が考慮できる解析モデルを対象とした平面骨組弾塑性有限変位解析プログラムを開発した。さらに、それを用いた解析手法（以後、本手法と呼ぶ。）によって単純支持柱および π 形ラーメン橋の残存耐荷力を求め、それらの結果と従来法による解析結果との比較を行ったので結果を報告する。

2. 解析プログラムの概要

開発した解析プログラムの定式化は、基本的には文献 1)と同様であるが、本研究では、残留応力を考慮するため、断面内では、図-1 のようなファイバー要素分割を採用し、ファイバー要素の境界上に積分点を配置して、積分点間で応力が線形変化するものと仮定して精度を向上させた。また、腐食に伴う体積欠損過程では、図-1 に示すように、ファイバー要素の総数は変化させず、ファイバー要素の厚さ t_{ig} 、幅 w_{ig} と図心座標 y_{ig} が線形変化するものと仮定した。ただし、板要素の局部座屈の影響については考慮していない。

3. 単純支持柱の残存耐荷力

図-2 のように、単純支持箱形断面柱に初期断面の降伏軸力 P_Y の 20%を圧縮力として作用させた状態で、断面内部に二軸対称な腐食欠損が進行したものとし、その後、圧縮力を漸増载荷して残存耐荷力を算定する問題について検討した。検討に際して、柱の細長比パラメータ λ_c は 0.2, 0.5, 1.0 および 1.5 と設定し、その影響は柱の長さ L を変化させて考慮した。また、初期たわみはその最大値 $L/1000$ が支間中央で生ずる正弦半波形、初期状態の残留応力分布は図-2 に示すように仮定した。検討結果として、 $\lambda_c=1.0$ の場合について、圧縮力 P を P_Y で除したパラメータと支間中央点での y 方向変位 v を L で除して百分率表示したパラメータの関係を図-3 に示す。なお、同図中には、比較として、断面欠損のない初期状態での荷重-変位曲線、および各々の終局強度 P_{max} を示した。これより、 $\lambda_c=1.0$ の初期状態での耐荷力は残留応力によって約 14%低下し、従来法による残存耐荷力は本手法に比して約 16%危険側に評価されることがわかる。次に、圧縮力の最大値（耐荷力） P_{max} を P_Y で除したパラメータと λ_c の関係を図-4 に示す。これより、 λ_c が

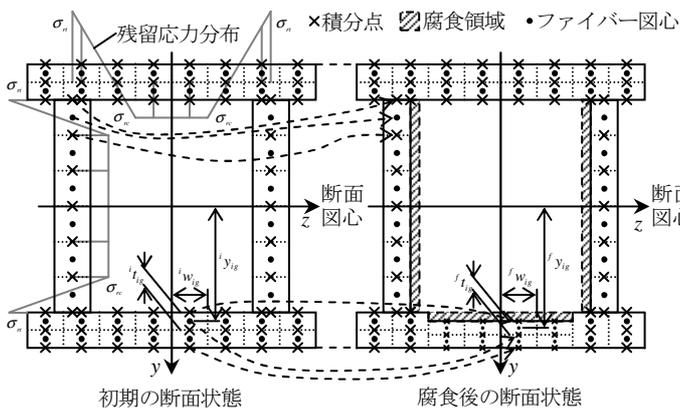


図-1 断面内のファイバー要素分割

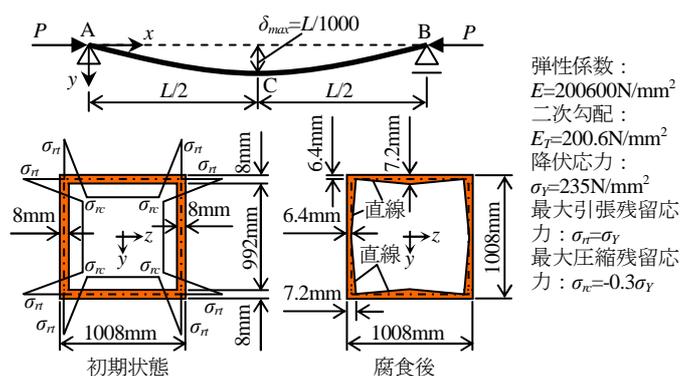


図-2 単純支持柱の解析モデル

弾性係数：
 $E=200600\text{N/mm}^2$
二次勾配：
 $E_T=200.6\text{N/mm}^2$
降伏応力：
 $\sigma_Y=235\text{N/mm}^2$
最大引張残留応力：
 $\sigma_n=\sigma_Y$
最大圧縮残留応力：
 $\sigma_c=-0.3\sigma_Y$

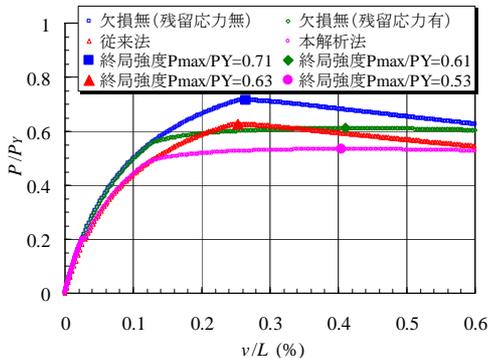


図-3 圧縮力-変位関係

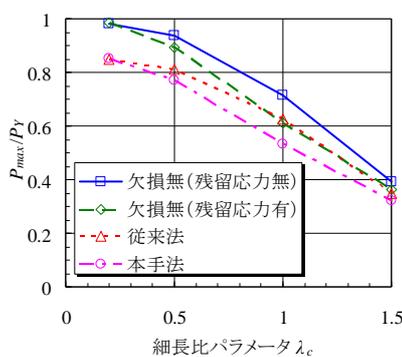


図-4 P_{max}/P_Y と λ_c の関係

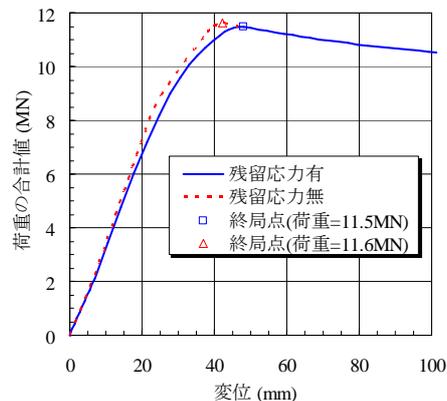


図-6 初期状態の荷重-変位関係

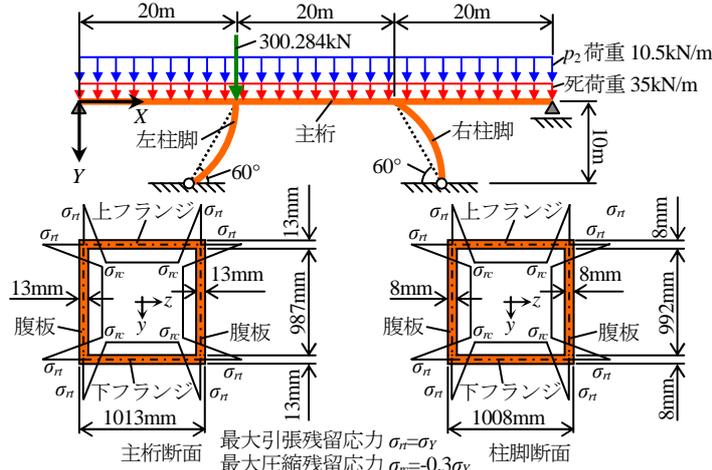


図-5 π 形ラーメン橋の平面骨組解析モデル

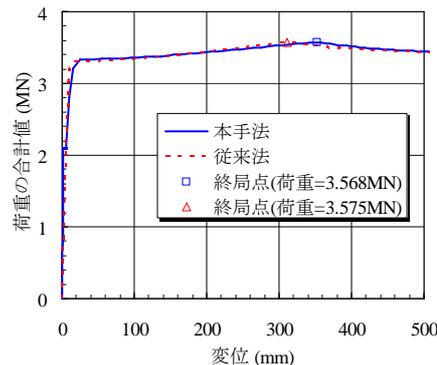


図-7 柱脚断面内に一樣な断面欠損が生じた場合の荷重-変位関係

0.5 以上では、従来法は本解析法に比べて危険側に残存耐荷力を算定し、その差は初期状態での残留応力による耐荷力の低下量に概ね対応することが分かる。

4. π 形ラーメン橋の残存耐荷力

文献 1)に報告されている諸元を有する π 形ラーメン橋は、その主桁と柱脚を図-5 のようにモデル化し、弾性係数 $E=200.6\text{GPa}$ 、降伏応力 $\sigma_y=235\text{MPa}$ 、および二次勾配 $E_T=2006\text{MPa}$ のバイリニア型構成式で応力-ひずみ関係を与えた。また、残留応力は図-5 の分布形状、初期たわみは柱脚中央でその最大値が部材長比の $1/1000$ となる正弦半波形として与えた。荷重条件は、図-5 に示すように、死荷重と道路橋示方書²⁾の B 活荷重のうち p_2 荷重を等分布荷重として主桁上に満載し、左柱脚が不利となるように、 p_1 荷重を集中荷重に換算して左柱脚上に載荷した。検討結果として、死荷重載荷後に活荷重を漸増載荷して初期状態の終局挙動を求めたケースについて、(y 軸方向) 荷重の合計値と主桁中央の y 軸方向(鉛直)変位の関係を図-6 に示す。これより、この π 形ラーメン橋は、初期状態での残留応力による強度低下の小さい構造諸元であることが分かる。次に、断面内の板要素が腐食により失った平均板厚を腐食前の板厚で除して板厚欠損率 β を定義し、死荷重作用下で $\beta=85\%$ まで柱脚断面内部を一樣に断面欠損させ、その後活荷重を漸増載荷して終局挙動を求めたケースについて、荷重と主桁中央の鉛直変位の関係を図-7 に示す。これより、従来法は本手法よりも若干危険側に残存耐荷力を算定するものの、いずれの手法による結果もほぼ一致することが分かる。

5. まとめ

単純支持柱の検討結果より、残留応力と体積欠損過程を無視する従来法は、本手法よりも危険側に残存耐荷力を評価するが、本研究で対象とした π 形ラーメン橋では、初期状態での残留応力による強度低下が殆どないため、両手法による残存耐荷力の差異が小さいと考えられる。今後は、初期状態での残留応力による強度低下が大きいと考えられるトラス橋などを対象として両手法による残存耐荷力の差異について検討する必要がある。

【参考文献】

- 1) 後藤芳顕, 川西直樹: 腐食や補修の影響を考慮した長期間の力学性能評価のための構造解析法の開発, 土木学会論文集, No.689/I-57, pp.85-100, 2000.
- 2) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, II. 鋼橋編, 丸善, 2002.

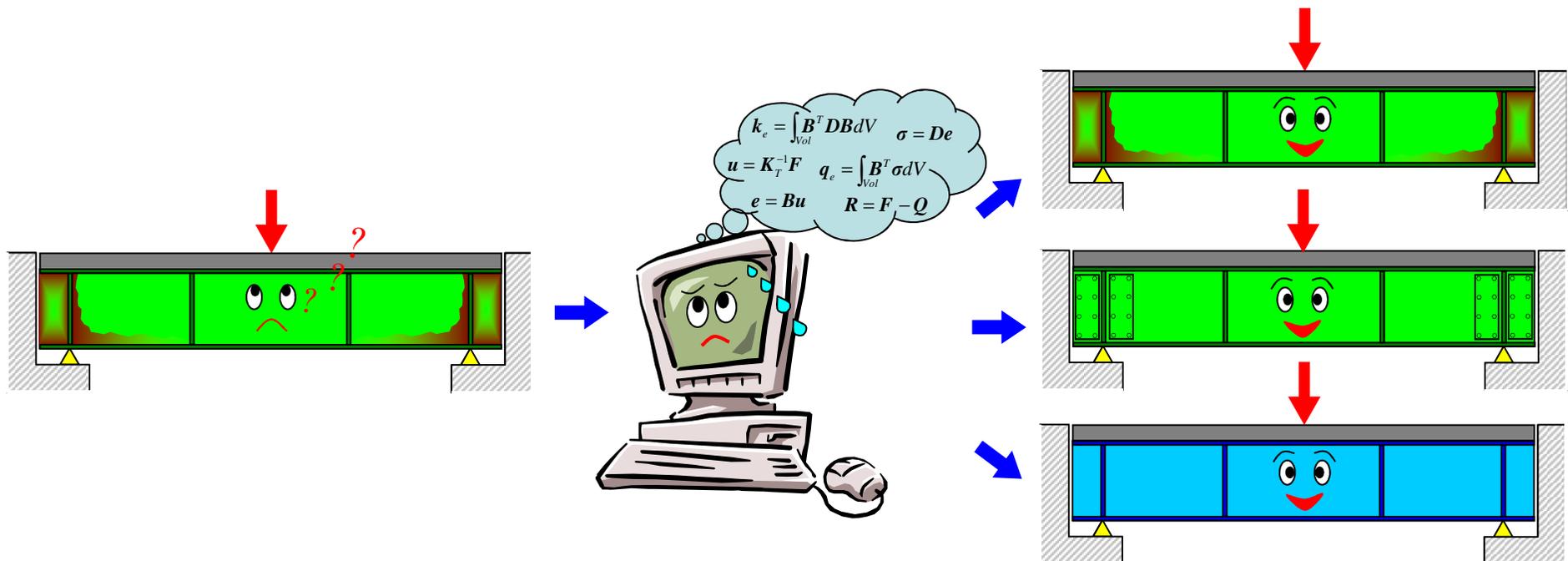
腐食に伴う体積欠損過程が平面骨組鋼構造物の 残存耐力に及ぼす影響



明石工業高等専門学校 三好 崇夫

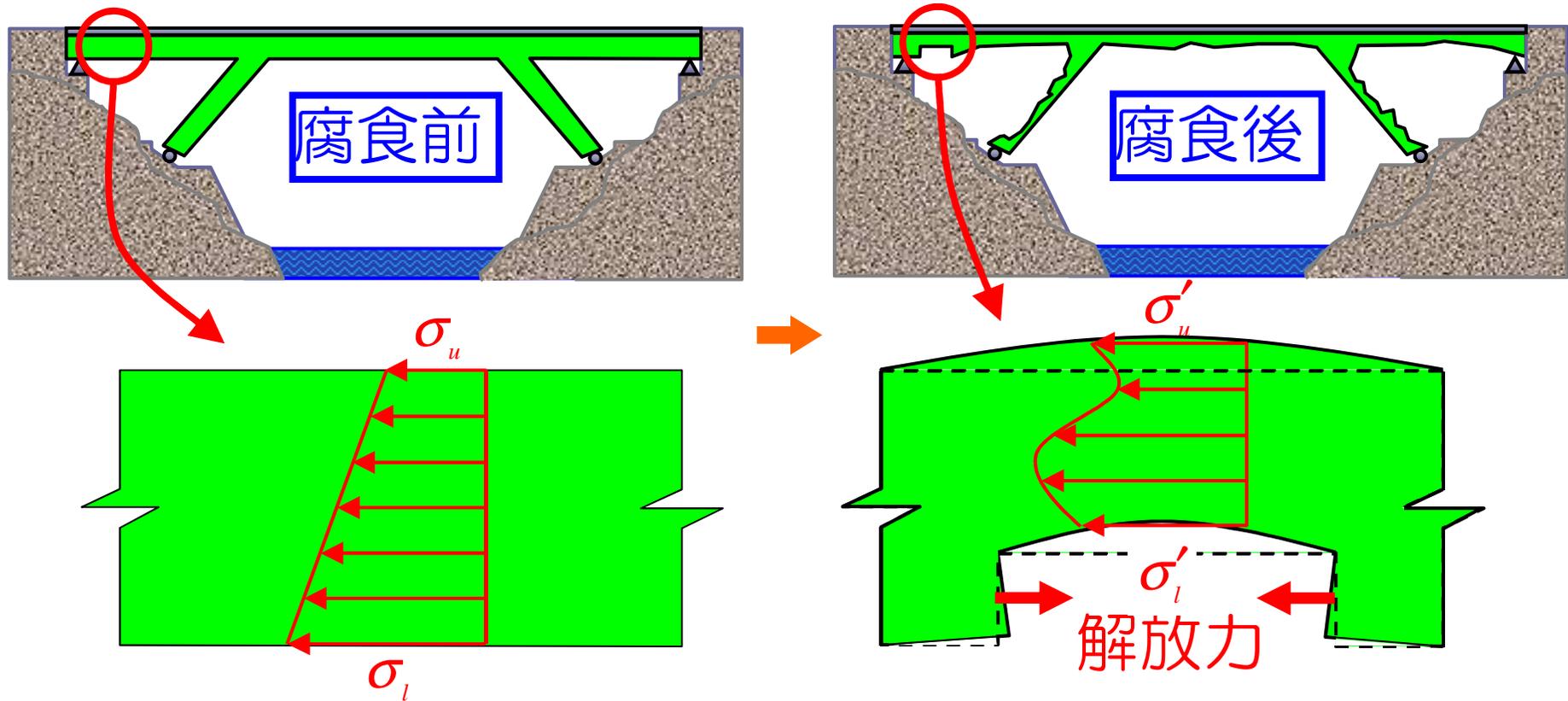
研究の背景 1

- 腐食損傷を有する鋼橋の架け替え，補修・補強の要否は，残存耐荷力等の客観的指標に基づいて，合理的に判断されるべき
- 有限要素解析法は，非破壊的手法のため，残存耐荷力予測のための有力なツールの一つ



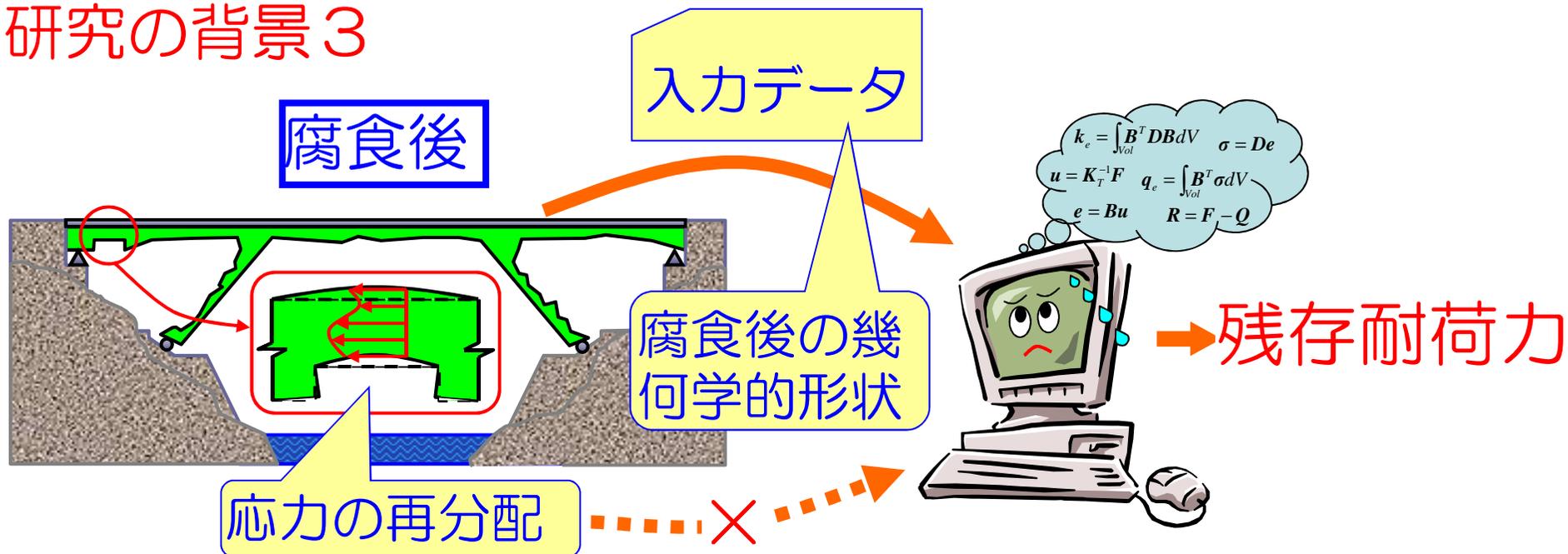
研究の背景 2

鋼部材の腐食損傷過程



- 断面欠損により，部材の剛性と強度が低下
- 断面欠損部に作用していた残留応力や死荷重応力が解放され，健全部に再分配（付加的な変形も発生）

研究の背景 3



従来の有限要素解析法（従来法）

- 単に腐食後の幾何学的形状を初期状態としてモデル化
- 断面欠損過程での応力再分配挙動や残留応力を無視

断面欠損過程での死荷重の応力再分配や、付加的な変形の発生が考慮できる平面骨組解析法を開発（後藤ら）

残留応力の影響は考慮されていない

研究の背景と目的

解析上の残留応力の取り扱いが残存耐荷力に及ぼす影響は不明確



残留応力の再分配が考慮できるように，後藤らの解析手法を拡張（本手法）



単純支持柱と π 形ラーメン橋の従来法と本手法に数値解析結果の比較より，残留応力の取り扱いが残存耐荷力に及ぼす影響を明確にする

解析法の概要 1

要素座標系表示の接線剛性方程式

$$\left([{}^tT_R]^T [{}^tK^*] [{}^tT_R] + [{}^tK_G] \right) \{\Delta u\} = \{\Delta f\} - [{}^tT_R]^T \{\Delta q_{\Delta A}^*\} + (\{f\} - [{}^tT_R]^T \{q^*\})$$

断面変化に伴う内力増分

$[{}^tT_R]$: 要素座標系から共回転座標系への変換マトリックス

$[{}^tK^*]$: 弾塑性剛性マトリックス

$[{}^tK_G]$: 幾何剛性マトリックス

$\{\Delta u\}$: 増分変位ベクトル

$\{\Delta f\}$: 増分外力ベクトル

$\{f\}$: 時刻 t の全分外力ベクトル

$\{q^*\}$: 時刻 t の全分内力ベクトル

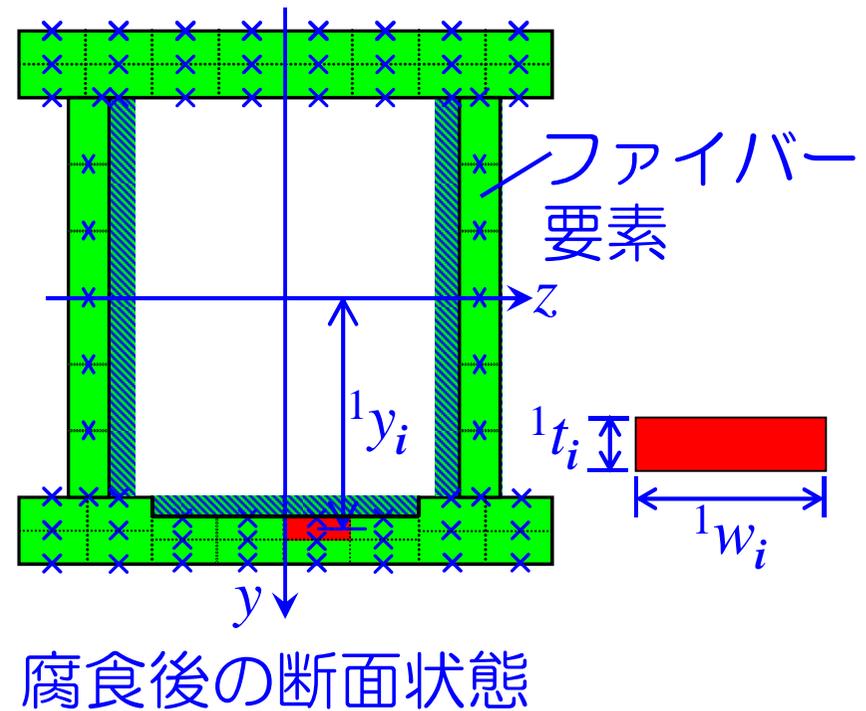
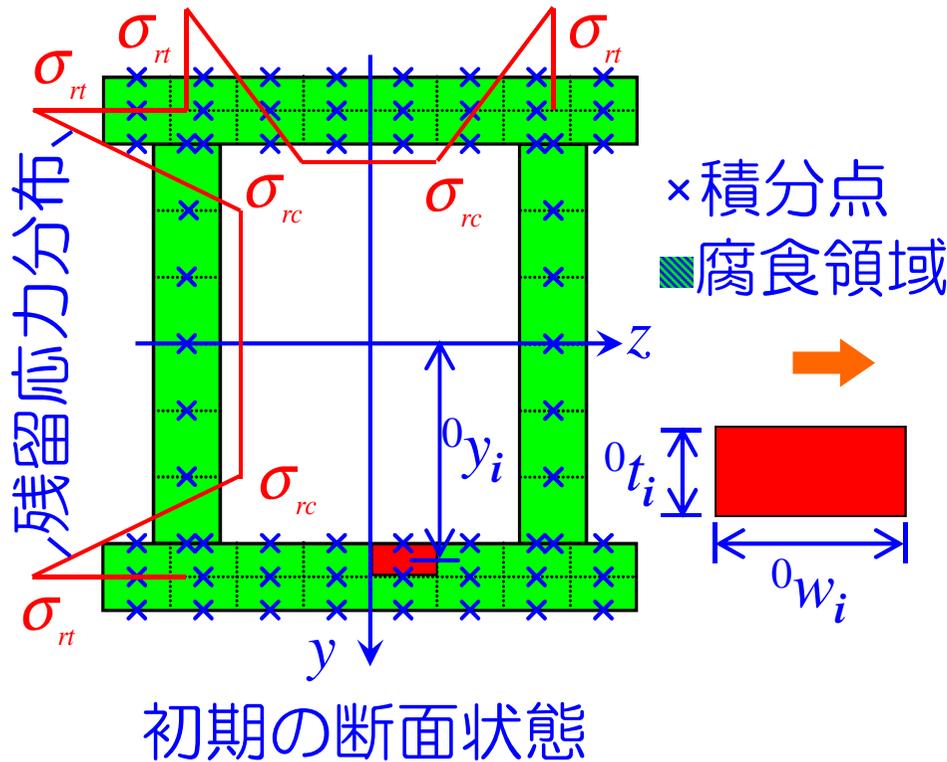
解析法の概要2

断面欠損の取り扱い

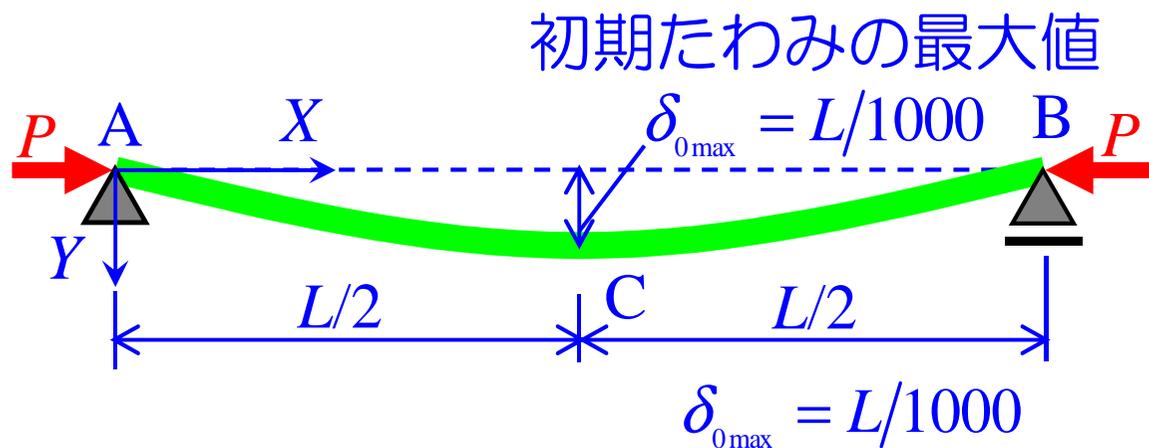
- ファイバー要素数を変化させず、ファイバー形状を線形変化させて断面欠損をモデル化

$$\begin{Bmatrix} w_i \\ t_i \\ y_i \end{Bmatrix} = (1 - \lambda_A) \begin{Bmatrix} {}^0w_i \\ {}^0t_i \\ {}^0y_i \end{Bmatrix} + \lambda_A \begin{Bmatrix} {}^1w_i \\ {}^1t_i \\ {}^1y_i \end{Bmatrix}$$

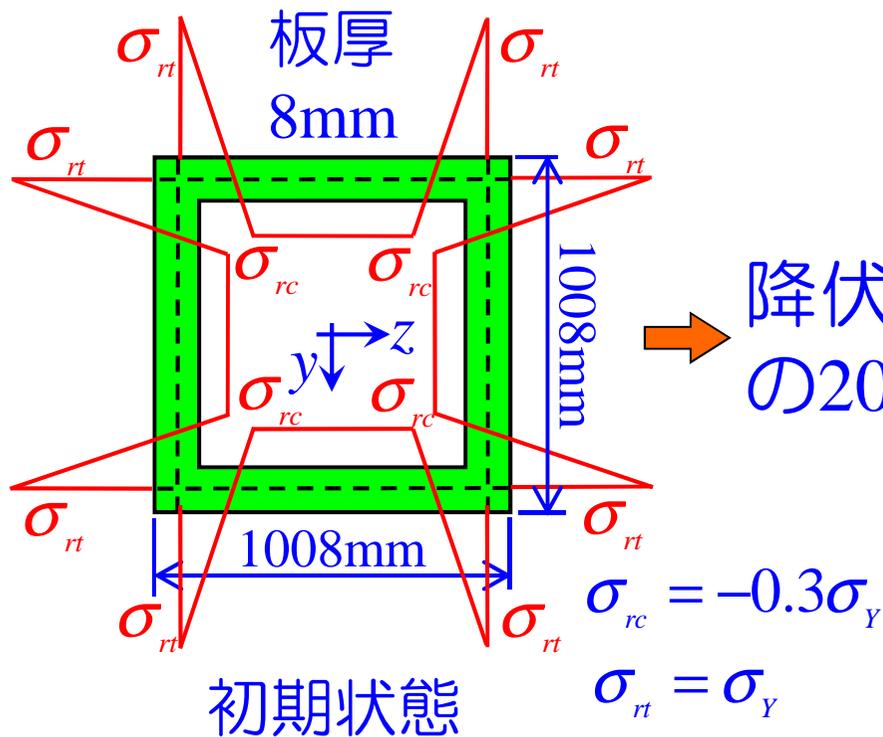
λ_A : 断面変化パラメータ



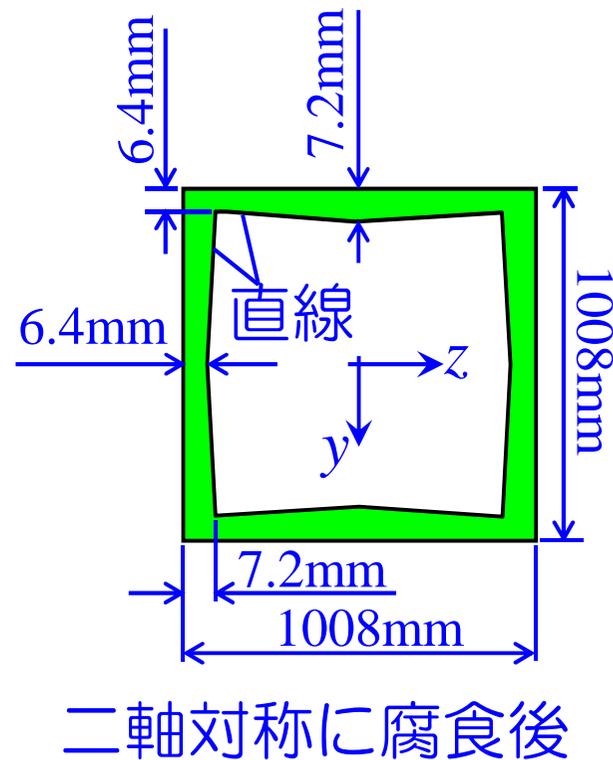
単純支持柱の残存耐荷力 1



弾性係数 : $E=200.6$ (GPa)
 二次勾配 : $E_T=E/100$
 降伏応力 : $\sigma_Y = 235$ (MPa)
 初期たわみ : 正弦半波形
 細長比パラメータ :
 $\lambda_c = 0.2, 0.5, 1.0, 1.5$

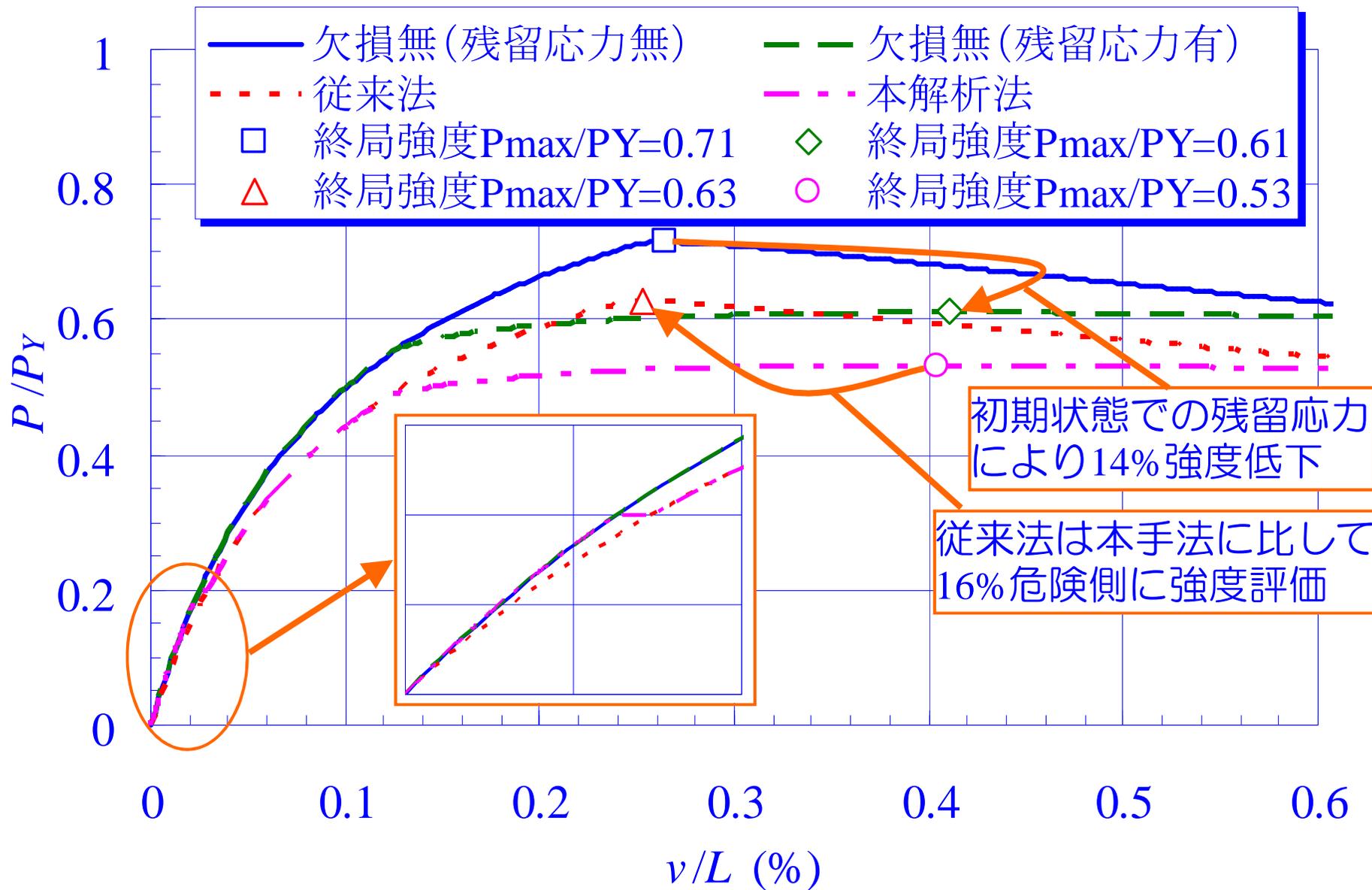
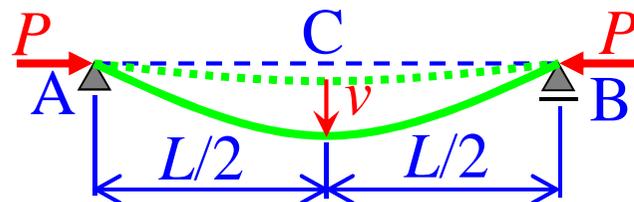


降伏軸力 P_Y
 の20% 载荷



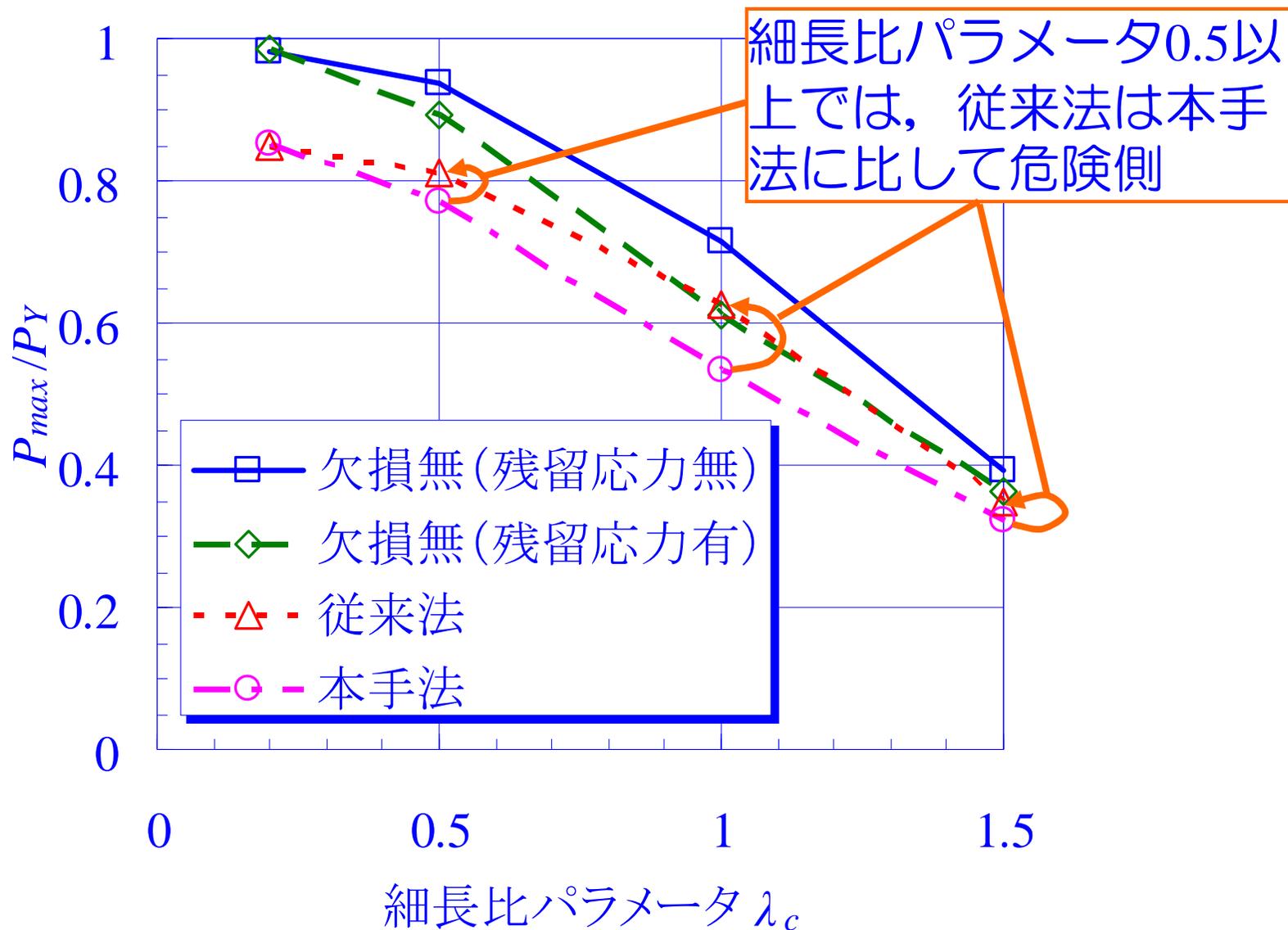
単純支持柱の残存耐荷力2

$\lambda_c = 1.0$ の荷重—変位関係

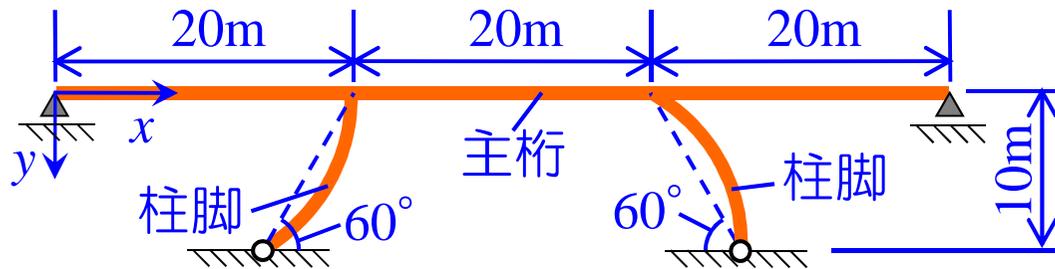


単純支持柱の残存耐荷力 3

終局荷重と細長比パラメータの関係



π形ラーメン橋の残存耐荷力 1

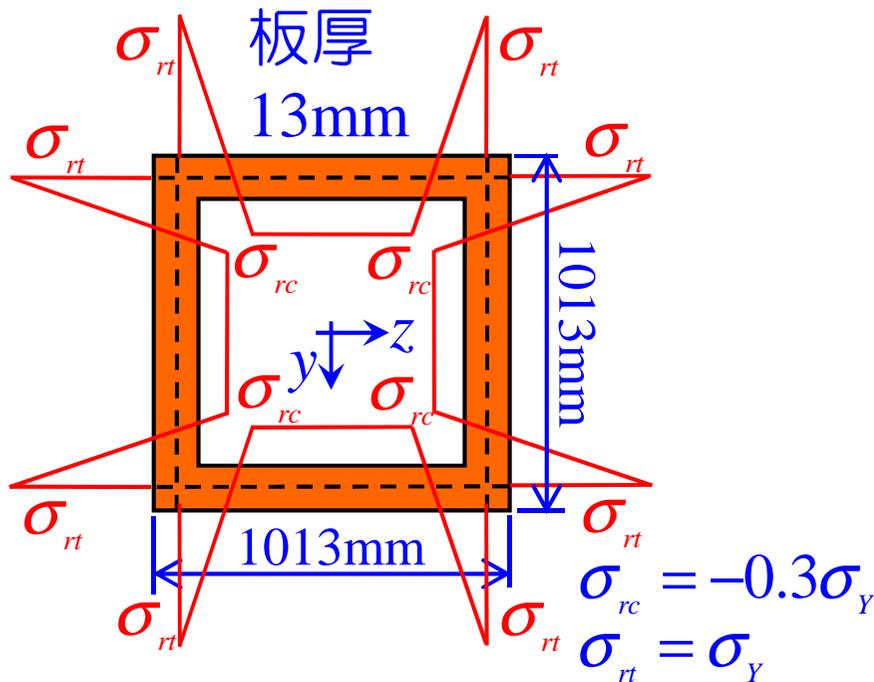


弾性係数： $E=200.6$ (GPa)

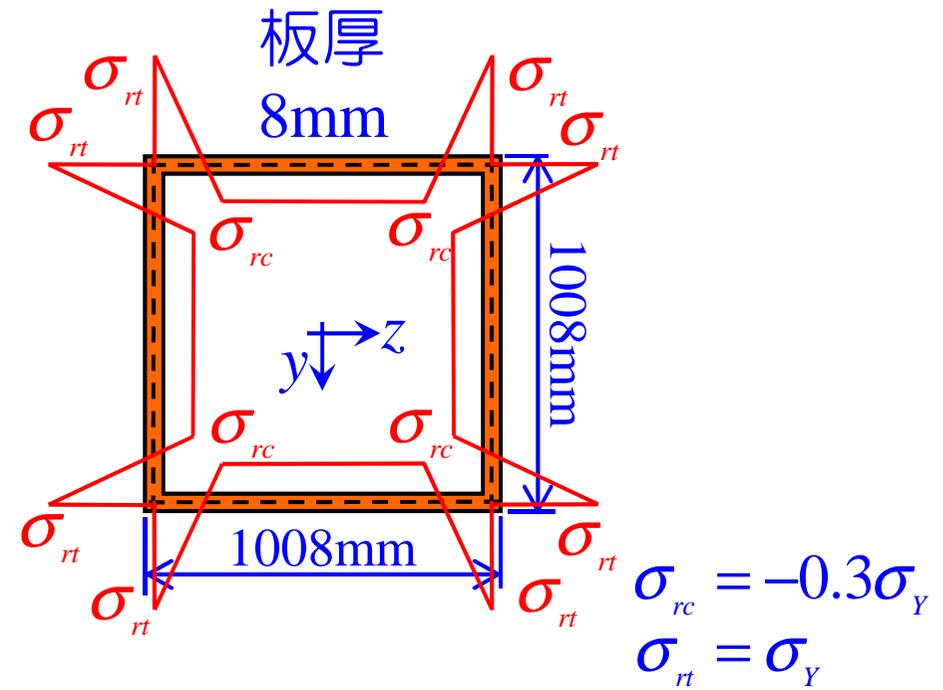
二次勾配： $E_T=E/100$

降伏応力： $\sigma_Y = 235$ (MPa)

初期たわみ：柱脚の高さ方向中央で長さの1/1000倍の正弦半波形，逆対称モード



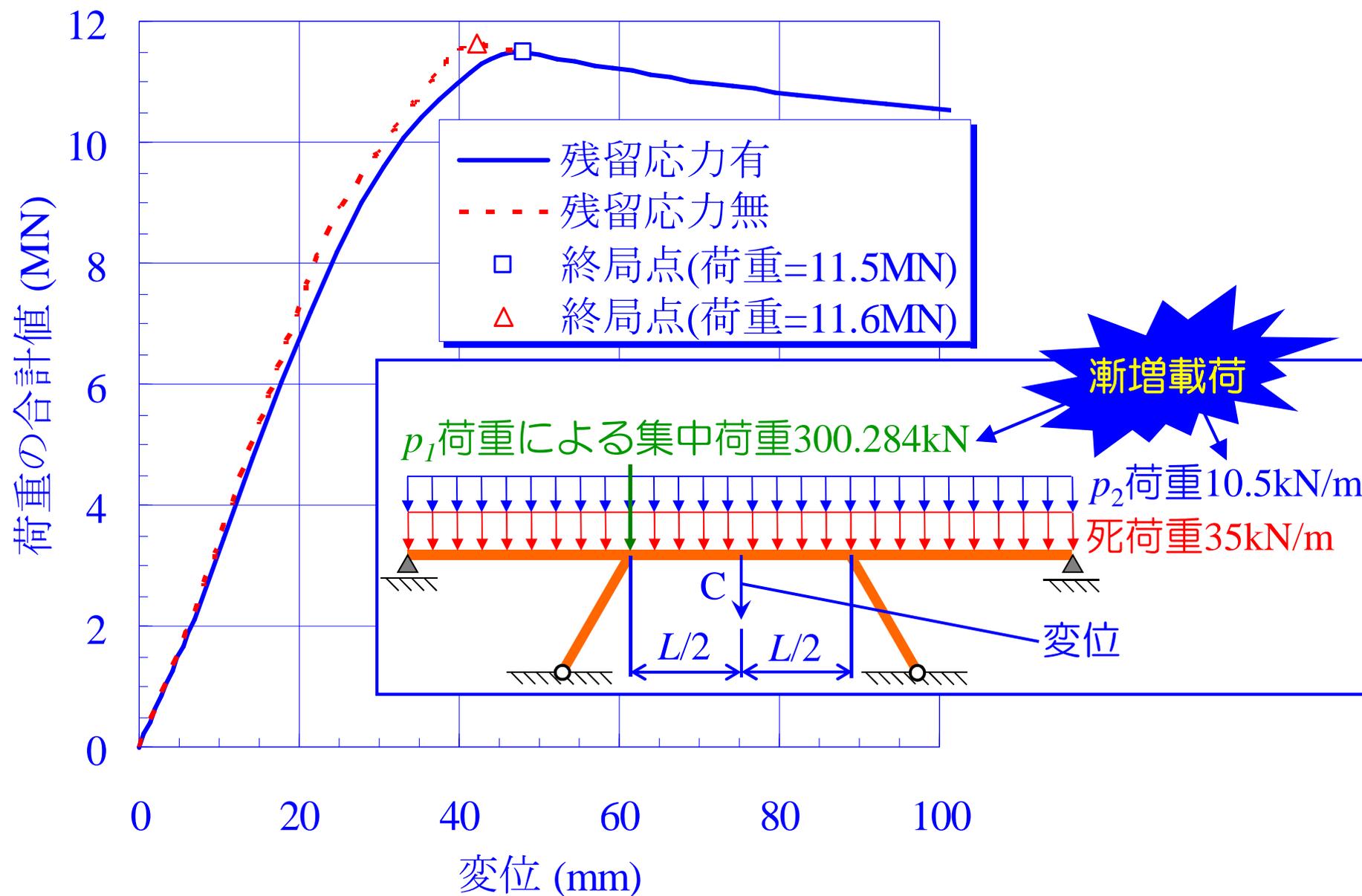
主桁断面



柱脚断面

π形ラーメン橋の残存耐荷力2

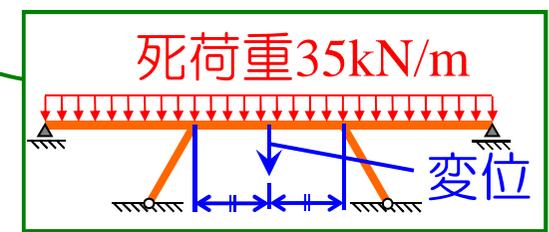
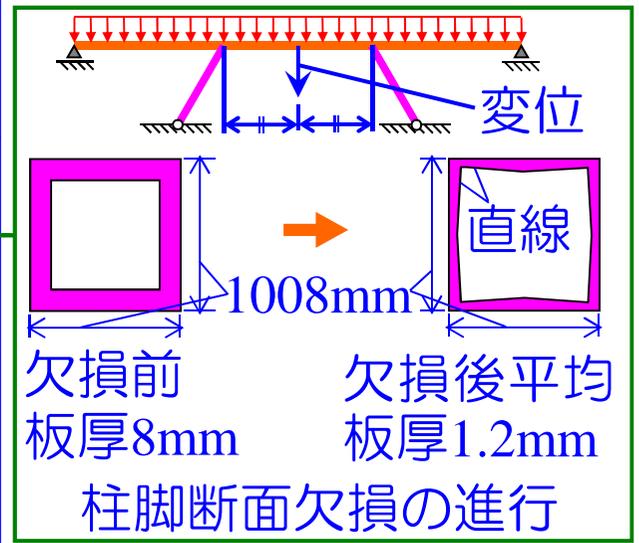
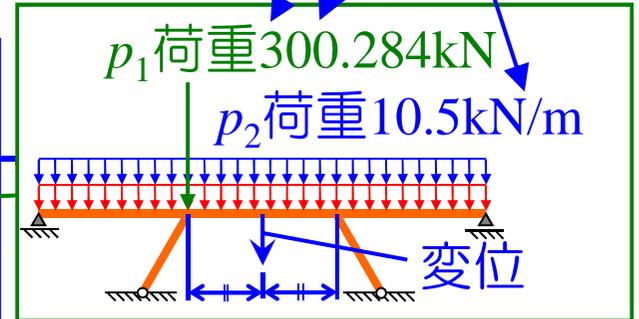
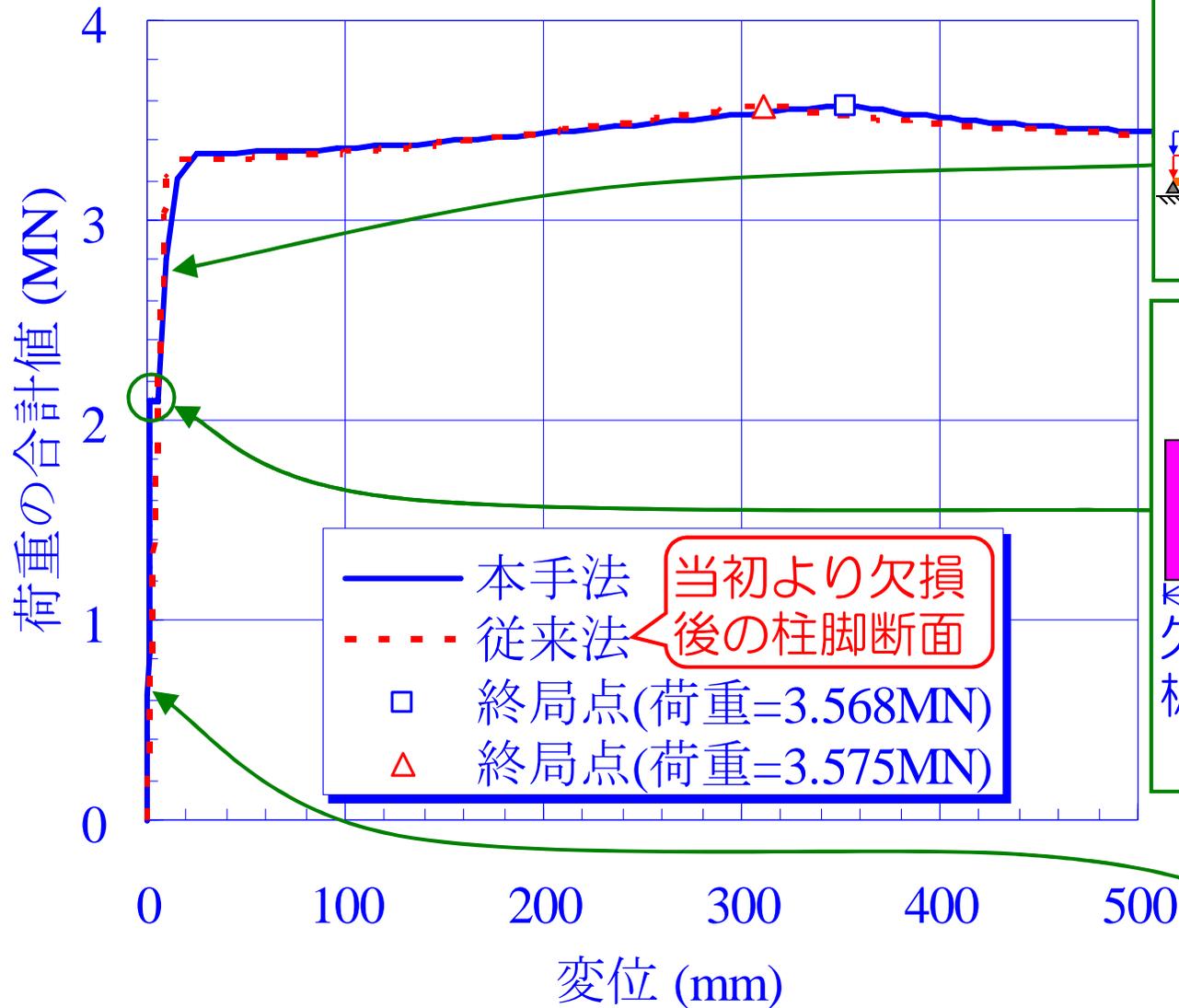
初期状態の荷重－変位関係



II形ラーメン橋の残存耐荷力3

初期状態から体積欠損後の荷重－変位関係

漸増载荷



まとめ

- 単純支持柱では，従来法は本手法に比して危険側に残存耐荷力を評価する
- π 形ラーメン橋では，従来法と本手法による残存耐荷力には有意な差はない
- これは，初期状態における残留応力による強度低下が殆どないことに起因する
- 今後は残留応力による強度低下の大きいトラス橋を対象とする検討が必要

解析法の概要 1

- 幾何学的非線形問題 → 共回転座標法による剛体変位の除去
- 材料学的非線形問題 (弾塑性問題) → ファイバー要素により塑性域の進展を考慮
Batheらの”Governing Parameter Method”による応力積分
- 部材断面の変化 → 仮想仕事の原理において、断面積の変化を考慮して定式化
- 非線形解析法 → スケーリングを施す弧長増分法 (超球面型拘束, ラジアルリターン) を採用

解析法の概要2

時刻 t (既知平衡状態) の仮想仕事の原理

$\delta^t \Pi = \int_0^l \int_{t_A} {}^t \sigma_x \delta^t e_x dA dx - \sum_{i=1}^2 ({}^t f_{xi} \delta^t u_i + {}^t f_{yi} \delta^t v_i + {}^t m_i \delta^t \theta_i) = 0 \quad (1)_1$

応力 σ_x
 ひずみ e_x
 無応力長 l
 変形後の
 部材長 l_d

Δt 時間中に断面積 A , 外力 (f_{xi}, f_{yi}, m_i) , 変位 (u_i, v_i, θ_i) が変化

時刻 $t + \Delta t$ (新たな平衡状態) の仮想仕事の原理

$\delta^{t+\Delta t} \Pi = \int_0^l \int_{t+\Delta t A} {}^{t+\Delta t} \sigma_x \delta^{t+\Delta t} e_x dA dx - \sum_{i=1}^2 ({}^{t+\Delta t} f_{xi} \delta^{t+\Delta t} u_i + {}^{t+\Delta t} f_{yi} \delta^{t+\Delta t} v_i + {}^{t+\Delta t} m_i \delta^{t+\Delta t} \theta_i) = 0 \quad (1)_2$

解析法の概要3

■ 時刻 t から $t + \Delta t$ の断面形状や変位の変化は微小と仮定

→ $t + \Delta t$ の諸量は t の諸量と微小変化量 Δ で近似可能

$$\begin{cases} {}^{t+\Delta t}f_{xi} = {}^t f_{xi} + \Delta f_{xi}, & {}^{t+\Delta t}f_{yi} = {}^t f_{yi} + \Delta f_{yi}, & {}^{t+\Delta t}m_i = {}^t m_i + \Delta m_i, & {}^{t+\Delta t}u_i = {}^t u_i + \Delta u_i \\ {}^{t+\Delta t}v_i = {}^t v_i + \Delta v_i, & {}^{t+\Delta t}\theta_i = {}^t \theta_i + \Delta \theta_i, & {}^{t+\Delta t}\sigma_x = {}^t \sigma_x + \Delta \sigma_x, & {}^{t+\Delta t}e_x = {}^t e_x + \Delta e_x \\ {}^{t+\Delta t}A = {}^t A + \Delta A, & \delta \Pi = \delta \Delta \Pi \end{cases} \quad (2)_{1\sim 10}$$

■ 平面保持則に従うひずみ－変位関係

$$e_x \cong \frac{\partial u^*}{\partial x} - y \frac{\partial^2 v^*}{\partial x^2} \quad (3)$$

u^* , v^* : 共回転座標系で記述した変位関数

■ ひずみ増分理論に従う構成式

$$\Delta \sigma_x = E_t \Delta e_x \quad (4)$$

E_t : 接線弾性係数

解析法の概要4

外力パラメータ λ_F と断面変化パラメータ λ_A を用いて...

パラメータ表示された解放力：

$$\Delta N_{\Delta A} = \Delta \lambda_A \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} ({}^0\sigma_{xi+1} + {}^0\sigma_{xi}) \{t_i ({}^1w_i - {}^0w_{0i}) + w_i ({}^1t_i - {}^0t_i)\}$$
$$\Delta M_{\Delta A} = \Delta \lambda_A \sum_{i=1}^n \left[\begin{array}{l} \frac{t_i}{12} \{t_i ({}^1w_i - {}^0w_{0i}) + 2w_i ({}^1t_i - {}^0t_i)\} ({}^0\sigma_{xi+1} - {}^0\sigma_{xi}) \\ + \frac{{}^0\sigma_{xi+1} + {}^0\sigma_{xi}}{2} \{({}^1y_i - {}^0y_i)w_i t_i + y_i t_i ({}^1w_i - {}^0w_i) + y_i w_i ({}^1t_i - {}^0t_i)\} \end{array} \right]$$

パラメータ表示された要素剛性方程式：

$$\begin{aligned} & \left([{}^tT_R]^T [{}^tK^*] [{}^tT_R] + [{}^tK_G] \right) \{\Delta u\} \\ & = \Delta \lambda_F \{f_P\} - \Delta \lambda_A [{}^tT_R]^T \{q_{AP}^*\} + \left(\{{}^t f\} - [{}^tT_R]^T \{{}^t q^*\} \right) \end{aligned}$$