

# トラス圧縮材の構面内極限強度特性

## ULTIMATE STRENGTH OF COMPRESSION MEMBERS IN TRUSS PLANE

西村宣男\*・小松定夫\*\*・西出俊亮\*\*\*

By Nobuo NISHIMURA, Sadao KOMATSU and Shunsuke NISHIDE

In this paper, a strut model is developed to evaluate the ultimate strength of the compression members in truss plane. The struts are restrained by the rotational springs at both ends concerning the restraining effect of the adjacent members, and are compressed by the axial load with eccentricity concerning the end moment. The accuracy of the ultimate strength analysis using the strut model is examined by the comparative calculations of the full truss models. The relations between the ultimate strength of the struts and the restraint, eccentricity and slenderness parameters are clarified by a number of parametrical calculations. And a design formula on the strength of truss compression members is proposed as a function of these mechanical parameters.

*Keywords*: truss, compression member, ultimate strength, strut model, design formula

### 1. ま え が き

欧米を中心として、鋼構造の設計法は許容応力度設計法から限界状態設計法へ移行しつつある。構造物は主として極限強度を限界状態の基準として設計されるから、各種構造物の部材および全体系の極限強度の精度よい評価法の確立は限界状態設計法が一般に受け入れられるための基本的条件であると考えられる。

両端ヒンジの鋼柱の極限強度については Schulz<sup>1)</sup>らの研究成果を基礎として複数柱基本強度曲線と断面形状および製作工程に関する区分表とが与えられている<sup>2)</sup>。

ここ数年間、欧州を中心としてトラス圧縮材の構面内座屈現象を対象として極限強度の理論的ならびに実験的研究が行われた。今日ほとんどのトラス構造はガセットプレートを介して部材を剛結した。いわゆる剛節トラスとして製作されるから、圧縮部材の極限状態における隣接部材の拘束効果の評価が研究の主目的である。Goyet-Frey-Massonnet<sup>3)</sup>は弾塑性有限変位解析によっ

て求めた極限強度より算定した上弦材および斜材の有効座屈長係数と各種の有効長係数算定法の比較を行い、その結果推奨できる方法として Goyet<sup>4)</sup>の近似分岐座屈法と拘束柱に関する Donnell<sup>5)</sup>-Johnston<sup>6)</sup>-Wood<sup>7)</sup>法を挙げている。

Johnston<sup>8)</sup>は有効長係数法とは異なるトラス圧縮材の設計法を提案している。圧縮材の極限強度は剛節トラスとしての2次モーメント発生係数と隣接部材の拘束係数に支配されるとの観点から、この2つのパラメーターを同時に考慮できる簡易モデル(ゴールポストモデル)を考案し、これを対象とした弾性2次理論によるパラメーター解析結果を図表に与えている。一般に用いられている有効座屈長の概念によらず、拘束された圧縮材の強度を直接与えようとするものである。

Marincek<sup>9)</sup>は平行弦等断面ワーレントラスを弾塑性分岐座屈理論によって解析し、圧縮弦材および圧縮斜材の有効座屈長係数としてそれぞれ0.8および0.6を用いても安全率1.7を確保できると述べている。倉西・木村<sup>10)</sup>は平行弦ワレントラスの上弦材に着目し、弾塑性有限変位解析により圧縮弦材の極限強度をパラメトリックに調査し、弦材の有効長係数として0.85を推奨している。

ところでトラス圧縮材の構面内座屈に関する有効長係数の各国の規定は表-1に示すように、弦材については

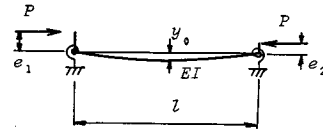
\* 正会員 工博 大阪大学助教授 工学部土木工学科  
(〒565 吹田市山田丘 2-1)

\*\* 正会員 工博 大阪産業大学教授 工学部土木工学科  
(〒574 大東市中垣内 3-1-1)

\*\*\* 正会員 工修 三菱重工業(株)神戸造船所  
(〒652 神戸市兵庫区和田崎町 1-1-1)

表一 トラス圧縮材の有効長係数に関する各国の規定

Nation-Specification		chord member	web member
USA	AISC	1.0	1.0
Germany	DIN4114	1.0	0.9
Netherlands	NEN3851	1.0	0.7-1.0
Czechoslovakia	CSN731401	1.0	0.5-1.0
Japan	JSHB	1.0	0.8-1.0
Canada	CISC	0.9	0.9
Belgium	NBN BS1-001	0.9	0.9
France	C. M.	0.9	0.8
Great Britain	BS5400	0.85	0.7



図一 ストラットモデル

$$\psi_j(\alpha) = 1 - \alpha^{1.4} \quad \alpha = P_j / P_{wj} \dots\dots\dots (2)$$

を用いると、弾塑性領域にある隣接部材の剛性を安全側に評価できることを予備的な解析で確認している。

引張り部材についても同様に

$$\psi_j(\alpha) = 1 + 0.15 \bar{\lambda}_j^2 \alpha = P_j / P_{vj} \dots\dots\dots (3)$$

と近似できる。ここに  $P_j$  は着目部材に最大の軸圧縮力を生ずる荷重状態における隣接部材の軸力、 $P_{wj}$ 、 $P_{vj}$  はそれぞれ隣接部材の圧縮強度および引張強度 ( $\sigma_y A$ ) を表わす。また  $\bar{\lambda}_j$  は両端ヒンジとした場合の細長比パラメーターである。隣接部材の圧縮強度が確定していない段階では  $P_{wj}$  としては安全側に両端ヒンジ柱の基本強度を用いている。

(2) 偏心パラメーター  $e_j/l_0$

荷重偏心量  $e_1$  および  $e_2$  は剛節トラスの弾性解析によって求められる材端モーメントに関係づけられる。材端モーメントを軸力と部材長の積で除すと等価偏心量を表わす偏心パラメーター  $e_1/l_0$  および  $e_2/l_0$  が定義される。倉西<sup>10)</sup>は対称荷重を受ける平行弦ワーレントラスの中央上弦材を対象として材端モーメントの近似式を与えている。一般の部材については着目部材の細長さ、トラスの骨組形式、隣接部材と着目部材の剛比、荷重状態など材端モーメントに影響を与える因子が多く、材端モーメントの近似式を導くことは困難である。しかし、近年のパーソナルコンピュータの発達は30~50節点程度の剛節トラスの線形解析をきわめて容易にしている。

偏心パラメーター  $e_1/l_0$  および  $e_2/l_0$  が定まるとストラットモデルに与える等価偏心量  $\bar{e}_1$  および  $\bar{e}_2$  は回転ばねに分担されるモーメントを考慮して

$$\left. \begin{aligned} \bar{e}_1 &= \left(1 + \frac{k_1}{3}\right) \frac{e_1}{l_0} - \frac{k_1}{6} \frac{e_2}{l_0} \\ \bar{e}_2 &= \left(1 + \frac{k_2}{3}\right) \frac{e_2}{l_0} - \frac{k_2}{6} \frac{e_1}{l_0} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

と与えられる。

3. ストラットモデルと全体モデルの比較

上述のような拘束パラメーターと偏心パラメーターを考慮したストラットモデルによるトラス圧縮材の極限強度解析の妥当性を図一2の平行弦ワーレントラス全体モデルの弾塑性有限変位解析の結果と比較することによって明らかにする。このモデルは道路橋示方書の荷重規定に準拠して設計されたトラス橋の主構で、表一2に示す

0.85~1.0、腹材については0.5~1.0とまちまちの値が採用されている。またこれらの規定の背景となっている理論的あるいは実験的研究においては解析モデルが特定のものに限定されているために極限強度に関するデータの蓄積は不十分であり、合理的な極限強度を基準とした設計法の確立が望まれるところである。

本研究では剛節トラスの圧縮材の挙動を部材両端のたわみ角が弾性拘束された偏心圧縮柱のモデル（以下においてストラットモデルと称する）を用いてパラメトリックに解析し、圧縮を受ける弦材および腹材の極限強度の統一的な評価式を提案する。ストラットモデルの有効性は道路橋示方書の荷重規定に準拠して設計されたトラス橋全体モデルを対象とした極限強度解析との比較によって明らかにする。

2. ストラットモデル

剛節トラス圧縮材の挙動は隣接部材の拘束と材端モーメントとの2つの効果の影響を受ける。そこでこれら2つの効果を考慮できる図一1のストラットモデルを対象とした弾塑性有限変位解析により圧縮材の極限強度特性を明らかにする。隣接部材の拘束効果は両端の回転ばね剛性  $K_1, K_2$  で、材端モーメントの効果は荷重  $P$  の偏心量  $e_1, e_2$  で考慮される。これらの効果は隣接部材の応力レベルによって非線形な形状を呈するが、極限強度を精度よく評価することに重点を置いて、以下のようにばね剛性と偏心量の算定法を導入する。

(1) 拘束パラメーター  $k_i$

拘束パラメーターは着目部材に隣接する弦材および腹材に関係し、着目部材の1端に接続する  $n$  本の部材の総和をとり、

$$k_i = \frac{k_i l_0}{EI_0} = \sum_{j=1}^n \frac{3 EI_j}{l_j} \psi_j(\alpha) \frac{EI_0}{l_0} \quad (i=1, 2) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $EI_0, l_0, EI_j, l_j$  はそれぞれ着目部材および隣接部材の弾性曲げ剛性と部材長を表わす。また  $\psi_j$  は応力レベル  $\alpha$  に関係した剛性の修正係数であり、圧縮部材では弾性柱の安定関数の近似式

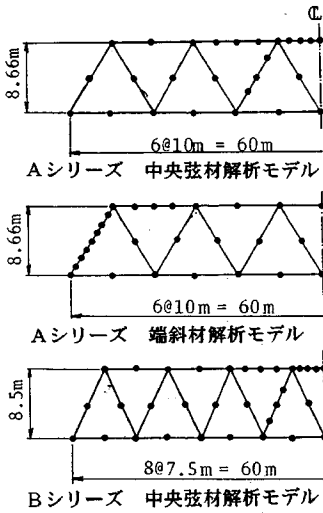


図-2 比較計算モデルの骨組構成と要素分割

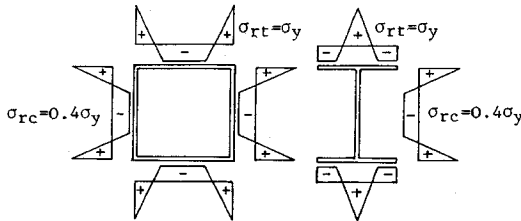


図-3 部材断面の溶接残留応力分布

表-2 解析モデルの基本諸元

橋格	一等橋	スパン長	60m
パネル長	7.5m, 10m	主構間隔	8.5m
有効幅員	7m	死荷重	5.15t/m
活荷重(線荷重)	22.18t	活荷重(分布荷重)	1.553t/m

基本諸元を有している。

全体モデルの特徴と解析上の仮定は以下のとおりである。

a) 弦材および圧縮力に対して設計される斜材は箱形断面、引張力に対して設計される斜材はH形断面とし、それぞれ図-3に示す残留応力分布を仮定している。

b) 圧縮部材は sine 半波形状で最大縦距が部材長の1000分の1の初期たわみを考慮する。隣接部材の初期たわみの方向は着目部材の強度を最も低くするように与える。

c) 圧縮部材の設計においては有効座屈係数を0.67, 0.86と仮定し、また細長比  $l/r$  が中央上弦材で60と75(Aシリーズ) および45と60(Bシリーズ)、端斜材で68と92(Aシリーズ)となるように断面を決定した。なお圧縮材の基本強度はECCS柱曲線<sup>2)</sup>の曲線bに該当する。

d) 各部材は偏心のないようにコンパクトな格点構造で剛に連結されており、部材が崩壊に至るまで格点部における構成要素の局部座屈などは生じないものとする。

e) 荷重は格点において構面内に作用するものとする。

このような仮定のもとに、中央上弦材および端斜材に着目して全体モデルの極限強度解析を行った。また、これらの着目部材について前述の拘束パラメーターおよび偏心パラメーターを求め、全体モデルと同様の初期たわみと残留応力を含むストラットモデルの極限強度解析を行った。

図-4は中央上弦材(Aシリーズ,  $l/r=75$ )の部材中央および材端の上フランジ付加直ひずみと軸力の関係を示している。軸力は全体モデルの最大軸力との比  $P/P_u$  また付加ひずみは平均圧縮応力  $\sigma_0$  を用いて  $E\varepsilon/\sigma_0$  と無次元表示した。  $E\varepsilon/\sigma_0$  が1より大きいと、軸力と曲げモーメントによる直ひずみが同符号、1より小さいと異符号であることを示す。荷重レベルが低い間は材端における縁ひずみ  $E\varepsilon_1/\sigma_0$  も1を越えており、部材

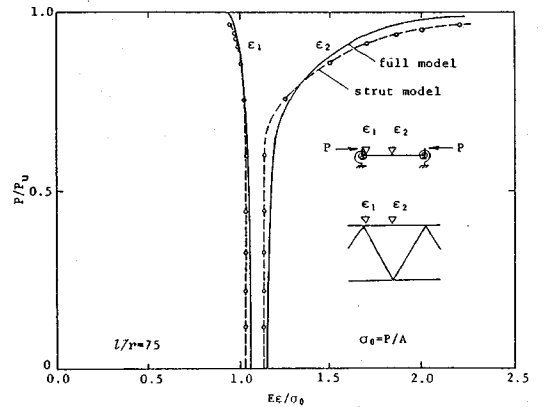


図-4 全体モデルとストラットモデルの荷重-縁ひずみ関係の比較(中央上弦材)

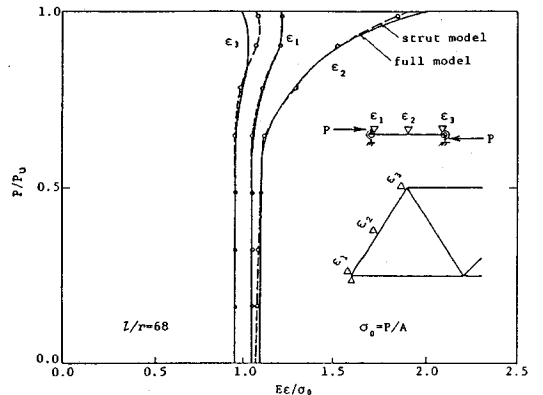


図-5 全体モデルとストラットモデルの荷重-縁ひずみ関係の比較(端斜材)

表一3 全体モデルとストラットモデルの極限強度の比較

model	type	member	l/r	κ <sub>1</sub>	κ <sub>2</sub>	e <sub>1</sub> /l	e <sub>2</sub> /l	ultimate strength f	
								strut model	full model
No.1	A	chord	75	1.15	1.15	0.65×10 <sup>-3</sup>	0.65×10 <sup>-3</sup>	1.648	1.705
No.2	A	chord	60	0.96	0.96	0.91×10 <sup>-3</sup>	0.91×10 <sup>-3</sup>	1.594	1.663
No.3	B	chord	60	0.78	0.78	0.50×10 <sup>-3</sup>	0.50×10 <sup>-3</sup>	1.678	1.710
No.4	B	chord	45	1.49	1.49	1.13×10 <sup>-3</sup>	1.13×10 <sup>-3</sup>	1.776	1.743
No.5	A	diagonal	68	1.82	1.69	0.81×10 <sup>-3</sup>	0.79×10 <sup>-3</sup>	1.896	1.901

は曲げ変形を助長する負荷モーメントを材端に受けている。軸力が極限強度のほぼ70%を越えると部材の曲げ変形が急増し、中央点の縁ひずみ  $E\epsilon_2/\sigma_0$  も急増するが、材端の縁ひずみは1より小さくなる。このことは荷重レベルが高くなると隣接部材の拘束効果が卓越し、材端モーメントは着目部材の曲げ変形を抑制する拘束モーメントとして作用することを表わしている。

このようなトラス圧縮材の挙動は Johnston<sup>9)</sup> や倉西<sup>10)</sup> によっても明らかにされている。また図一5は端斜材(Aシリーズ,  $l/r=68$ )の部材中央および両端における無次元表示した軸力と上フランジ付加直ひずみの関係を表わしている。中央上弦材と異なり端斜材では荷重の偏心量が両端で異符号であり荷重レベルの低い間は1端では拘束モーメント,他端では負荷モーメントを受けている。全体モデルとストラットモデルの極限強度を比較して表一3に掲げる。両モデルの極限強度の差は4%以内であり、また図一4および5に示したように両モデルの挙動もほぼ一致していることから、拘束パラメーターと偏心パラメーターを考慮したストラットモデルを用いたトラス圧縮材の極限強度評価法の妥当性が明らかになった。

4. 極限強度の評価式

ストラットモデルには両端の拘束パラメーター  $k_1, k_2$ , 偏心パラメーター  $e_1/l_0, e_2/l_0$  および部材の細長比パラメーター  $\lambda$  が関係している。トラス構造における

これらのパラメーターの分布範囲

$$k_1 \leq 4, 0.5 \leq k_2/k_1 \leq 1.0, e_1/l_0 \leq 0.002, -1 \leq e_1/e_2 \leq 1, \lambda \leq 1.5$$

について適宜パラメーターを組み合わせた105ケースのストラットモデルの極限強度解析結果より5つのパラメーターに関する以下の極限強度評価式を作成した。

$$\frac{P_u}{P_0} = \frac{1 - C_1 + \sqrt{k_1 k_2} C_3}{1 - C_2 + \sqrt{k_1 k_2} C_4} \dots \dots \dots (5)$$

ここに、

$$C_1 = 1950(1 - 0.95\lambda) \left( 0.6 \frac{e_1}{l_0} + 0.4 \frac{e_2}{l_0} \right),$$

$$C_2 = 2000(1 - \lambda) \left( 0.61 \frac{e_1}{l_0} + 0.39 \frac{e_2}{l_0} \right),$$

$$C_3 = (1 + 0.67) \left\{ 0.45 + 330 \left( 0.78 \frac{e_1}{l_0} + 0.22 \frac{e_2}{l_0} \right) \right\},$$

$$C_4 = (1 - 0.25\lambda) \left\{ 0.54 - 640 \left( 0.76 \frac{e_1}{l_0} + 0.24 \frac{e_2}{l_0} \right) \right\},$$

ただし、 $e_1 \geq e_2$

また、 $P_0$ は圧縮材の基本強度を表わしECCSの曲線bを用いる。

式(5)の精度は105ケースのストラットモデルの極限強度解析結果に対して-4%~3%の間にある。

図一2の比較計算モデルを対象として全体モデルの極限強度(着目部材の最大軸力  $P_u$  と基本強度  $P_0$  の比で表現), 式(5)の値, Goyet<sup>4)</sup>の近似分岐座屈法およびDonnell<sup>5)</sup>の弾性拘束柱モデルによって与えられる有

表一4 全体モデル, ストラットモデルおよび有効座屈係数法による極限強度の比較

model	type	member	λ	κ <sub>1</sub>	κ <sub>2</sub>	e <sub>1</sub> /l (×10 <sup>-3</sup> )	e <sub>2</sub> /l (×10 <sup>-3</sup> )	ultimate strength P <sub>u</sub> /P <sub>0</sub>			
								full model	Eq.(5)	Goyet	Donnell
No.1	A	chord	0.909	1.03	1.03	0.43	0.43	1.173	1.189	1.072	1.035
No.1'	A	chord	0.925	1.11	1.11	0.42	0.42	1.186	1.204	1.080	1.040
No.2	A	chord	0.765	0.78	0.78	0.61	0.61	1.134	1.110	1.038	1.019
No.2'	A	chord	0.767	0.99	0.99	0.61	0.61	1.152	1.133	1.048	1.020
No.3	B	chord	0.756	0.62	0.62	0.48	0.48	1.111	1.095	1.026	1.018
No.3'	B	chord	0.758	0.78	0.78	0.47	0.47	1.120	1.116	1.034	1.019
No.4	B	chord	0.567	0.66	0.66	0.85	0.85	1.068	1.026	1.013	1.008
No.4'	B	chord	0.573	0.69	0.69	0.83	0.83	1.072	1.032	1.014	1.009
No.5	A	diagonal	1.160	3.84	5.85	0.61	-0.37	1.554	1.605	1.356	1.372
No.5'	A	diagonal	1.148	4.00	6.42	0.60	-0.36	1.560	1.606	1.353	1.373
No.6	A	diagonal	0.847	2.36	2.53	0.78	-0.46	1.250	1.280	1.142	1.139

効座屈長係数を用いて着目部材の細長比を求め、ECCS 曲線 b から求めた極限強度  $P_u/P_0$  を比較して表-4 に掲げる。Goyet<sup>4)</sup> の近似分岐座屈法では着目部材に接続する複数の圧縮部材および引張部材をそれぞれ1本を圧縮部材および引張部材に置換した簡易モデルを用いて着目部材の弾性座屈荷重を求め、有効座屈長係数を算定する。その際隣接圧縮部材の代表長の選び方によって計算結果が変動するが、ここでは隣接圧縮弦材の長さを代表長に選んだ。また、Donnell<sup>5)</sup> の方法を適用する際には隣接圧縮部材の拘束効果は省略した。

表-4 から提案式 (5) は全体モデルの極限強度に対して-4%~3% の範囲の精度を有していることが明らかになった。これに対して Goyet や Donnell の有効座屈長係数を用いた極限強度の評価法は全般に控えめな値を与える。比較計算例の範囲で Goyet の方法では弦材に対して 8%、斜材に対して 14%、Donnell の方法では弦材に対して 11%、斜材に対して 12% 程度安全側に極限強度を評価する場合がある。

上述の全体モデルの極限強度と圧縮部材強度の評価式の比較からわかるように、静定トラスでは一部材の崩壊によって全体系の崩壊メカニズムが形成される。これに対して連続トラスでは部材の崩壊から全体系の崩壊までには若干の余裕があるが、その程度は僅少であり、また崩壊した部材を含む径間では変位が急増するから、トラスの終局限界状態は式 (5) で評価される部材の極限強

度にとってよいと考えられる。

### 5. 圧縮材の極限強度と力学パラメーターの関係

前述のようにトラス圧縮材の極限強度は隣接部材の拘束効果と材端モーメントおよび部材の細長比パラメーターの影響を受ける。これらは提案式 (5) に含まれている無次元パラメーター  $k_1, k_2, e_1/l_0, e_2/l_0$  および  $\bar{\lambda}$  に対応している。そこでこれらのパラメーターとトラス圧縮材の極限強度の関係についてストラットモデルのパラメーター解析結果を基にして考察する。

図-6 (1)~(3) では対称偏心圧縮を受けるストラット中央点のたわみと荷重の関係をまた図-6 (4) では代表的な偏心パターンについて同様の関係を表わしている。図中の×印は各ストラットの極限荷重を表わし、この点を越えると除荷域に入る。

Johnston<sup>8)</sup> はトラス圧縮材の極限強度に対する拘束パラメーター (restraint factor) と同時に偏心パラメーター (moment generation factor) の重要性を強調しているが Massonnet<sup>11)</sup>、倉西<sup>10)</sup> は極限強度に対する偏心パラメーターの影響は僅少であると述べている。図-6 より3つのパラメーターは極限強度に対してほとんど同程度に有意な影響を与えることがわかる。また、図-7 は対称偏心 ( $e_1=e_2$ ) の場合について極限強度  $P_u/P_0$  と3つのパラメーターの関係を総括して表わしている。図中

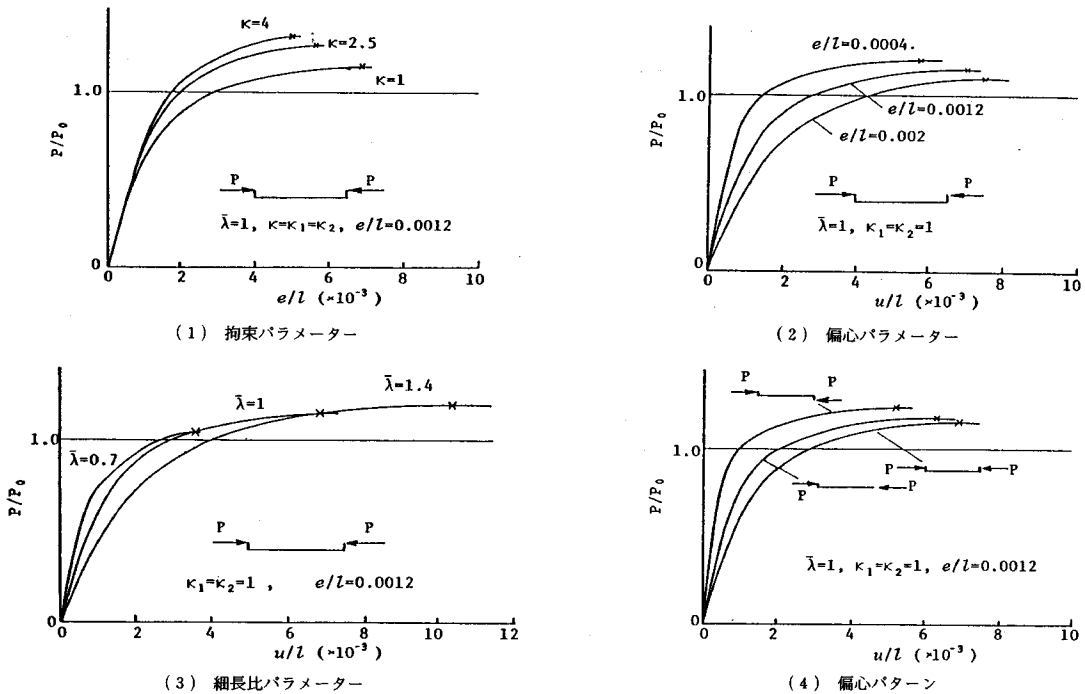
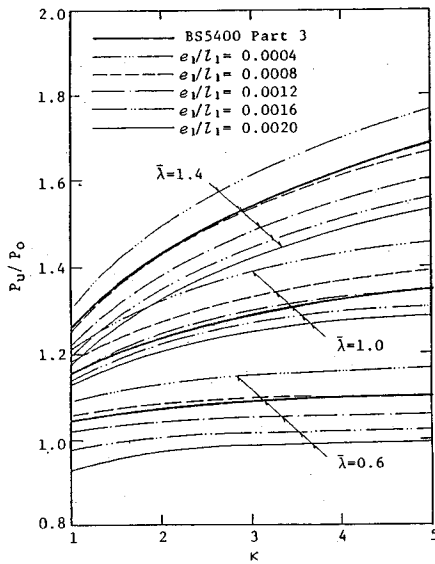


図-6 圧縮材の極限強度に対する力学パラメーターの影響



図一七 トラス圧縮材の極限強度の総括

の太い実線は BS5400 Part 3 の弾性拘束柱の有効座屈長係数

$$k = 0.5 + \frac{0.5}{1 + 0.425 k} \dots \dots \dots (6)$$

を用いて極限強度を評価したものである。なお、 $k$  の評価には本文の式 (1) を用いた。偏心パラメーターの影響により極限強度にかなりの差があることが明らかになった。弦材から斜材まで極限強度を統一的に評価するには拘束、偏心および細長比の 3 パラメーターを考慮することが重要である。

6. 結 論

以上、トラス圧縮材の構面内極限強度特性について述べた。本研究によって得られた成果を要約すると以下のとおりである。

(1) 隣接部材の拘束効果と材端モーメントの効果を考慮した剛節トラス圧縮材の構面内極限強度を効率的に解析できるストラットモデルを考案した。ストラットモデルの精度はトラス全体モデルの弾塑性有限変位解析結果との比較によって検証した。

(2) トラス圧縮材の極限強度に対して隣接部材の拘束効果に関係した拘束パラメーター、剛節トラスとしての材端モーメントに関係した偏心パラメーターおよび着目部材の細長比パラメーターが影響を与える。ストラットモデルのパラメトリック解析の結果を基にこれらのパ

ラメーターと極限強度の関係を明らかにした。

(3) パラメトリック解析結果を用いて、弦材および斜材を対象としたトラス圧縮材の極限強度評価式を提案した。慣用的に用いられている有効座屈長係数法によらず力学パラメーター  $k_i$ ,  $e_i/l$  および  $\bar{\lambda}$  の関数で与えられる補正係数を部材の基本強度に乗ずることにより直接部材の極限強度に結びつけた。

本研究で対象とした圧縮部材は溶接集成された箱形断面材に限定されているが、横構・対傾構に用いられる H 形・T 形断面についても同様の解析を行い、断面性状も含めた極限強度の評価式を作成することが今後の課題である。なお、本研究は昭和 59 年度文部省科学研究費 (課題番号 59550277) の補助を受けた。記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Beer, H. and Schulz, G. : The maximum strength of axially loaded columns with imperfections, VDI-Z, Vol. 111, No. 21, 23, 24, 1969.
- 2) ECCS : European recommendations for steel Constructions, 1978.
- 3) de Ville de Goyet, V., Frey, Fr. and Massonnet, Ch. : Ultimate load of trusses buckling in their plane, IABSE Periodica, 4, 1981.
- 4) de Ville de Goyet, V. : Contribution a l'etude de la resistance ultime dans le plane des poutres on treillis a noeuds rigides, Travail de fin d'etudes, Universite de Liege, 1979.
- 5) Massonnet, Ch. : Flambement des constructions framees de barres droites, Notes techniques, CECM, Bruxelles, 1955.
- 6) Johnston, G. : Design criteria for metal compression members, John Wiley & Sons, 1976.
- 7) Wood, R.H. : Effective Lengths of columns in multi-storey buildings, The Structural Eng., Vol. 52, No. 7, 1974.
- 8) Johnston, D.C. : Inelastic behaviour of a restrained strut, Univ. of Cambridge Tech. Rept. CUED/C-Struct/Tr., 71, 1978.
- 9) Marinček, M. : The buckling length for member of trusses, 3rd International Colloquium on Stability of Metal Structures, 1983.
- 10) Kuranishi, S. and Kimura, K. : Ultimate strength of truss girder due to failure of chord members, Proc. of JSCE, No. 344/I-1, 1984.
- 11) Massonnet, Ch. : The design of steel bridges, Conference discussion, edited by H. R. Evans, 1981.

(1986. 10. 2・受付)