I－27

Ｐ－Δ法及び有効座屈長法による 鋼ラーメン構造物の強度と最適設計

大成建設名古屋支店　○韓　笑菲
名古屋大学工学部　学生員　天雲宏樹
名古屋大学工学部　正　員　宇佐美勉

1．緒言：　土木構造物では，鋼ラーメン構造物は，吊橋，斜張橋の主塔，都市内高速道路の橋脚などに使われている．このような鋼ラーメン構造物には，箱形断面が多用され，通常は，部材の長さ方向に変断面（幅及び厚さが変化する場合，または幅は一定で厚さのみ変化する場合）になっている．この論文は，変断面ラーメン（１層および２層の１スパンラーメン）について，有効座屈長法およびＰ－Δ法の両方法を用いて最適設計（最小重量設計）を実施して，設計断面の比較を行い，さらに，有効座屈長によって設計された断面を用いてＰ－Δ法によって強度計算を行って極限強度の比較も行っている．断面は，無補剛正方形箱形断面を用い，部材軸方向に幅及び厚さの両方が変化する場合，および，幅は一定で厚さのみ変化する場合の２つのケースを考えている．

2．最適設計の定式化：　図1,2に示すような各要素iで，幅b_i,厚さt_i,断面積A_i,長さℓ_i($i=1,...,n$)の薄肉正方形箱型断面ラーメン構造物を考える．また，その要素が属する部材（柱，または，はり）の長さをLとする．このような骨組構造物全体の重量を最小にする最適化は文献1)，2)に従って次のように定式化される．ただし，以下の記述では，各要素を表す下添え字iは省略し，$b_i \rightarrow b$，$t_i \rightarrow t$などと表す．ここで，各部材（柱，はり）についての平均値を表す場合は，記号の上に－をつけて区別する（たとえば，$\bar{r}$など）．

目的関数：$F=\sum_{1}^{n} A_i \ell_i$ → 最小化(n:要素数)，設計変数：$\{X\}=\{b_1,b_2,...,b_n,t_1,t_2,...,t_n\}$　(1)(2)

以下の制約条件は各要素に適用する．ただし，G(2)については，各要素を含む部材に適用する．

$$G(1)=\frac{R}{1.2}-1.0 \leqq 0 \qquad G(2)=\frac{KL/\bar{r}}{120}-1.0 \leqq 0 \qquad (3)(4)$$

$$G(3)=\frac{0.8}{t}-1.0 \leqq 0 \qquad G(4),G(5) \leqq 0 \qquad (5)\sim(7)$$

有効座屈長法では，

$$G(4)=\frac{N}{QN_Y}+\frac{M_0}{Q_B M_Y}-1.0 \leqq 0 \qquad G(5)=\frac{N}{N_u}+\frac{M_0 C_m}{Q_B M_Y(1-N/P_E)}-1.0 \leqq 0 \qquad (8)(9)$$

Ｐ－Δ法ではG(5)は用いない．しかし，G(4)の制約条件に用いる曲げモーメントは，Ｐ－Δ効果によって生じる付加モーメントを考慮したものを用いる．ここで，Rは幅厚比パラメーター，$\bar{\lambda}$は細長比パラメーター，$\bar{\lambda}'$は修正細長比パラメーター，N_yは降伏軸力，M_yは降伏曲げモーメント，P_Eはオイラー座屈強度，C_mは材端モーメント補正係数である．また，Qは圧縮強度の低減係数，Q_Bは曲げ強度の低減係数，N_uは中心軸圧縮強度，で以下の式で表される．

$$\bar{\lambda}'=\sqrt{Q}\bar{\lambda},\ C_m=0.85,\ Q=0.7/R \leqq 1.0,\ Q_B=(5Q+3)/8 \leqq 1.0$$

$$N_u=Q\,N_Y \qquad (\bar{\lambda}' \leqq 0.2)$$

$$=(1.109-0.545\bar{\lambda}')QN_Y \qquad (0.2<\bar{\lambda}' \leqq 1.0)$$

$$=QN_Y/(0.773+\bar{\lambda}'^2) \qquad (1.0<\bar{\lambda}') \qquad (10)\sim(14)$$

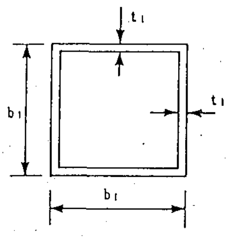

図１　最適設計を行う箱形断面

G(1)は幅厚比制限で，G(2)，G(3)は現行道路橋示方書の制限である．

ただし，G(2)のLは部材長，$\bar{r}$は各部材について各要素の平均値をとる．

有効座屈長係数Kの値は，各部材について，平均断面より求める．式(1)～(14)に用いられた記号は：σ_Y＝

降伏応力，E＝弾性係数，ν＝ポアソン比，A＝4bt＝断面積，L＝部材長，$\bar{r}=b/\sqrt{6}$＝各部材の平均断面二次半径（bは各部材について各要素の幅の平均値），$W=4b^2t/3$＝各要素の断面係数，$\bar{I}$＝各部材の平均断面二次モーメント，である．N＝各要素に働く軸圧縮力，M_e＝各要素の両端の曲げモーメントのうち絶対値の大きい方の値，である．また，初期部材回転角については，本論文では，文献1)で有効座屈長法とP－Δ法より求められる強度がほぼ等しくなる条件より求められた次式を採用する．

$$\phi^{(i)} \;=\; 0.25\cdot\sqrt{\sigma_Y/E}\cdot(\bar{\lambda}-0.2) \qquad (15)$$

ここで，$\phi^{(i)}$はi層の柱の初期部材回転角，
$\bar{\lambda}$はi層柱の部材の平均細長比パラメーターである．

3．最適化計算結果： 表2に示すような，1層及び2層ラーメン構造物の各設計変数ケースについて，表1の各荷重ケースの荷重を載荷した時の最適化計算を行った．図3に各設計変数ケースについて，P－Δ法による目的関数の値を示す．

表 1　荷重ケース

荷重	一層 ラーメン		二層ラーメン		
ケース	P (ton)	H(ton)	P (ton)	H(ton)	γ
(1)	0.0	95.0	0.0	60.0	0.0
(2)	200.0	90.0	250.0	50.0	0.0
(3)	400.0	80.0	400.0	40.0	0.0
(4)	800.0	70.0	600.0	30.0	0.0
(5)	800.0	60.0	800.0	20.0	0.0
(6)	1100.0	40.0	900.0	10.0	0.0
(7)	1200.0	20.0	1050.0	0.0	0.0
(8)	1400.0	0.0	400.0	40.0	0.5
(9)	----	----	400.0	40.0	1.0

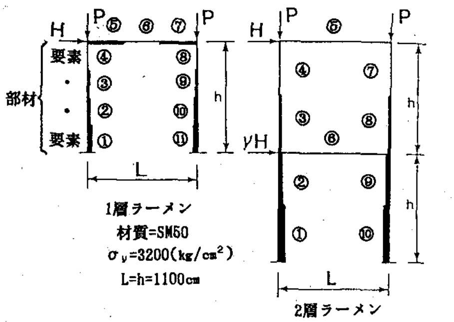

図2　最適設計を行うラーメン構造物

表2　設計変数ケース

設計変数ケース(a)（1層）

要素番号	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪
幅： b	b_1	b_1	b_1	b_1	b_2	b_2	b_2	b_1	b_1	b_1	b_1
厚さ：t	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_5	t_4	t_3	t_2	t_1

設計変数ケース(b)（1層）

要素番号	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪
幅： b	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_5	b_4	b_3	b_2	b_1
厚さ：t	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_5	t_4	t_3	t_2	t_1

設計変数ケース(c)（2層）

要素番号	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
幅： b	b_1	b_1	b_1	b_1	b_2	b_3	b_1	b_1	b_1	b_1
厚： t	t_1	t_1	t_2	t_2	t_3	t_4	t_2	t_2	t_1	t_1

設計変数ケース(d)（2層）

要素番号	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
幅： b	b_1	b_1	b_1	b_1	b_2	b_3	b_1	b_1	b_1	b_1
厚さ：t	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_4	t_3	t_2	t_1

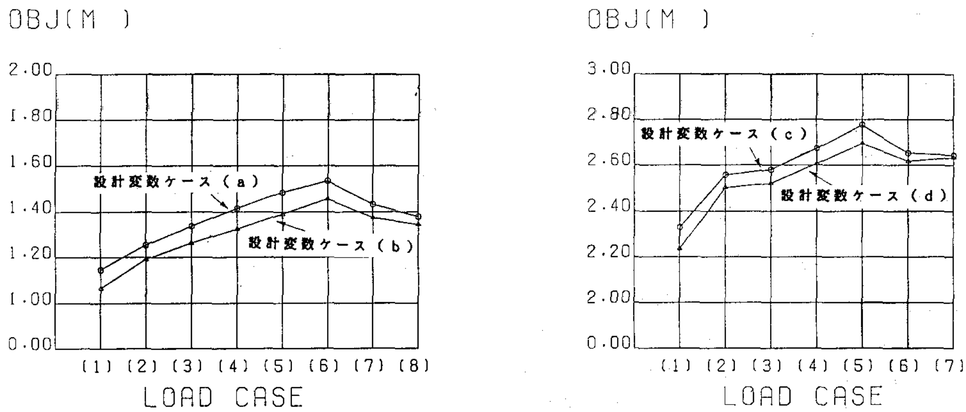

図3　P－Δ法による最適設計の目的関数

4．結言： P－Δ法及び有効座屈長法による局部座屈を考慮したラーメン構造物の極限強度評価式に基づいて最適設計を行った．最適設計の考察及び強度計算による極限強度の比較については，講演当日に述べる．

《参考文献》　1) 1) 宇佐美勉・垣内辰雄・水野克彦：鋼ラーメン構造物の合理的設計式の提案，土木学会論文集，第402号，1989年4月．　2) 宇佐美勉：鋼平面ラーメン構造物の極限強度評価式の実験データによる検証，構造工学論文集，Vol.36　A,1990年3月．