

三角形網目と六角形網目からなる二層立体ラチス平板と折板の弾性座屈性状 および部材設計に関する一考察

建築構造学分野 中山 伊知郎

1. はじめに

二層立体ラチス構造物は、三角形、四角形、六角形などを組み合わせた多種多様な網目で構成されている。そのひとつに、三角形と六角形で構成されるTH-H型及びH-TH型二層立体トラス板がある。本研究では、このトラス板で構成されたTH-H型及びH-TH型二層立体ラチス平板と折板について、境界形状が六角形である六角形プランと境界形状が四角形である四角形プランを対象としている。

二層立体ラチス構造物の構造設計で要求される問題のひとつに、構造の軽量化がある。二層立体ラチス構造の軽量化を目指すとき、その部材断面が細くなる傾向から、座屈に対する検討が重要となる。

そこで、離散的取り扱いによる数値解析から、TH-H及びH-TH型二層立体ラチス平板と折板の弾性座屈性状について明らかにする。そして、その弾性座屈解析結果をもとに、部材断面の設計を行い、使用部材重量に対する弾性座屈耐力及び剛性評価を行い、部材設計に関する検討を行う。

2. TH-H型及びH-TH型二層立体ラチス平板と折板の座屈性状

2.1 平板

解析対象となるモデルについてその形状と寸法を図1に示す。モデルのユニット数は、最大ユニット数となる方向で決定し、六角形プランはユニット数7, 9の2種類とし、四角形プランはユニット数8, 10の2種類でTH-H, H-TH型の計8モデルを対象としている。

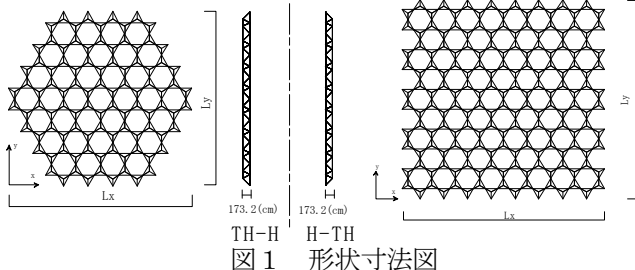


表1 部材断面諸量

部材	円形鋼管
断面寸法(mm)	φ76.3×3.2
断面積(cm ²)	7.349
断面二次モーメント(cm ⁴)	49.2
断面二次半径(cm)	2.59
ヤング係数(t f/cm ²)	2100
ポアソン比	0.3
単位質量(kg/cm)	5.77

表2 形状寸法

モデル	Lx(cm)	Ly(cm)
TH-H-h7	4500	4107
H-TH-h7	4500	4107
TH-H-h9	6100	6196
H-TH-h9	6100	6196
TH-H-s8	5100	5196
H-TH-s8	5100	5196
TH-H-s10	6300	6236
H-TH-s10	6300	6236

作用荷重は、固定荷重が作用する全載荷重を想定する。接合部は全て剛接で、支持条件は全周ピン支持としている。

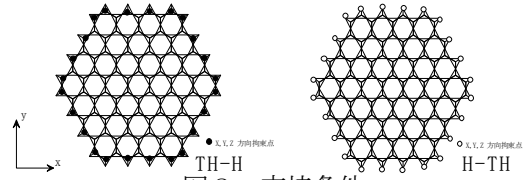


図2 支持条件

部材長さ (cm)			細長比		
TH網目	H網目	ウェブ材	TH網目	H網目	ウェブ材
300	346	245	115	133	94

2.2 座屈性状とオイラー軸力比分布の関係

ユニット数の違いによる座屈モードの違いは見られないが、六角形プランでは、TH-H型とH-TH型では座屈モードの違いが見られた。六角形プランのTH-H型の場合、境界部の下弦材が個材座屈を起こしているのに対し、H-TH型は中心部の下弦材で個材座屈をおこしている。全モデルとも、最大圧縮オイラー軸力比となる部材で個材座屈を起こしている。座屈時の最大圧縮オイラー軸力比は、TH-H型よりもH-TH型の方が六角形プランで約26%、四角形プランで約10%小さくなっている。

2.3 耐力及び剛性の比較

載荷面積あたりの弾性座屈荷重でみると、座屈耐力は、TH-H型の方がH-TH型より大きく、四角形プランより六角形プランの方が大きくなる。スパンに対して梁の場合、耐力は、スパンの2乗に反比例となる。梁理論で考えると、耐力については、六角形プランでは、ユニット9はユニット7に比べて約0.62倍となるが、TH-H型は、約0.71倍となり、梁理論を適用した値よりも約15%、H-TH型は約0.79倍となり約27%高い耐力となる。四角形プランでは、ユニット10はユニット8に比べて約0.66倍となるが、TH-H型は、約0.79倍となり、梁理論を適用した値よりも約20%、H-TH型は、約0.83倍となり約26%高い耐力となる。よって、TH-H型よりもH-TH型の方がスパン拡大に際する座屈耐力の低下は小さいといえ、四角形プランと六角形プランを比較するとH-TH型では、ほとんど同じであるが、TH-H型では、四角形プランの方が小さいといえる。初期剛性については、TH-H型の方がH-TH型よりも高くなる。梁理論の場合スパンの4乗に反比例となり、六角形プランでは、ユニット9はユニット7に比べて約0.39倍となるが、TH-H型は、約0.46倍となり、梁理論を適用した値よりも約21%、H-TH型は、約0.51倍となり約34%高い耐力となる。四角形プランでは、ユニット10はユニット8に比べて約0.43倍となるが、TH-H型は、約0.53倍となり、梁理論を適用した値よりも約23%、H-TH型は、約

0.54倍となり約25%高い耐力となる。スパン拡大に際する初期剛性の低下は、TH-H型よりもH-TH型の方が小さいといえ、六角形プランと四角形プランを比較すると、TH-H型では、四角形プランの方が小さく、H-TH型では逆に六角形プランの方が小さくなる。

表4 弾性座屈荷重

モデル	弾性座屈荷重(tf)		モデル	弾性座屈荷重(tf)	
	弾性座屈荷重	載荷面積(kgf/m ²)		弾性座屈荷重	載荷面積(kgf/m ²)
TH-H-h7	194.1		TH-H-s8	161.6	
	130			61	
H-TH-h7	55.5		H-TH-s8	55.65	
	37			21	
TH-H-h9	173.8		TH-H-s10	153.2	
	83			39	
H-TH-h9	55.2		H-TH-s10	54.9	
	26			14	

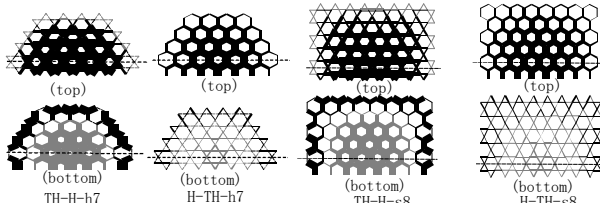


図3 オイラー軸力比図

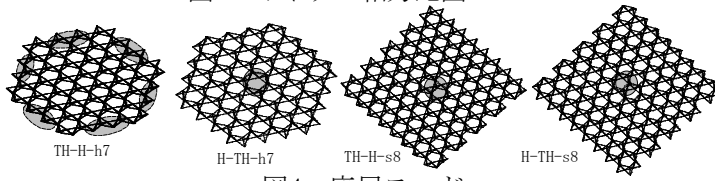


図4 座屈モード

2.4 折板

解析対象となるモデルについてその形状と寸法を示す。対象となる折板の形状は、平板をy方向中心線で単純に折った形状とする。開角を120度と150度2種類を対象とし、計16モデルの弾性座屈解析を行う。部材は、平板時と同様のものを使用する。支持条件は、2辺ピン支持としている。

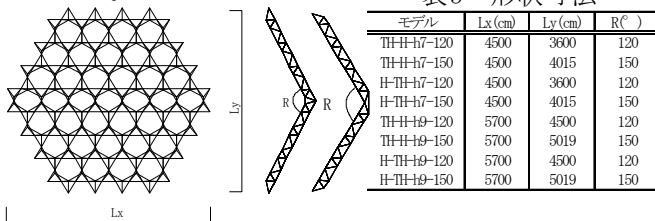
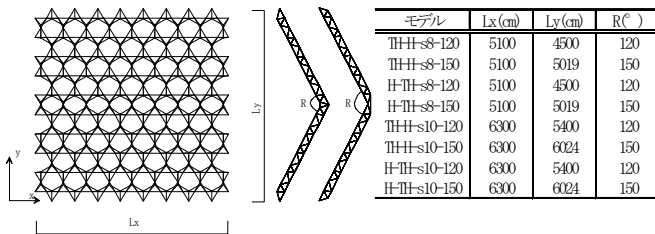


図5 形状図

表5 形状寸法

モデル	Lx(cm)	Ly(cm)	RC(°)
TH-H-h7-120	4500	3600	120
TH-H-h7-150	4500	4015	150
H-TH-h7-120	4500	3600	120
H-TH-h7-150	4500	4015	150
TH-H-h9-120	5700	4500	120
TH-H-h9-150	5700	5019	150
H-TH-h9-120	5700	4500	120
H-TH-h9-150	5700	5019	150



モデル	Lx(cm)	Ly(cm)	RC(°)
TH-H-s8-120	5100	4500	120
TH-H-s8-150	5100	5019	150
H-TH-s8-120	5100	4500	120
H-TH-s8-150	5100	5019	150
TH-H-s10-120	6300	5400	120
TH-H-s10-150	6300	6024	150
H-TH-s10-120	6300	5400	120
H-TH-s10-150	6300	6024	150

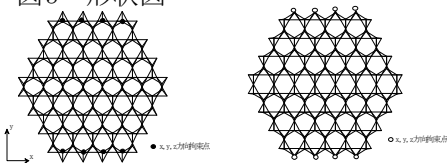


図6 支持条件

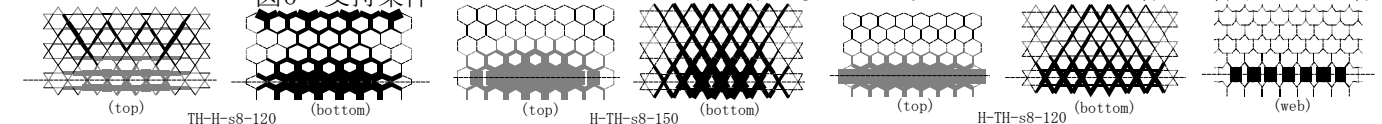


図7 オイラー軸力比図

2.5 座屈性状とオイラー軸力比の関係

六角形プランの場合TH-H型では、ユニット数、開角の違いによらず、境界部下弦材が最大圧縮オイラー軸力比を示し、その部材で個材座屈を起こす。座屈時の最大圧縮オイラー軸力比の値は、TH-H型については、ほぼ同じである。一方、H-TH型の場合、開角120度については、折れ線上のウェブ材が最大オイラー軸力比を示し、その部材で個材座屈を起こし、開角150度については、全体がねじれるねじれ座屈となった。座屈モードがねじれ座屈となる場合、個材座屈に比べて座屈時の最大圧縮オイラー軸力比は低い値となり、2よりも小さい値となっている。四角形プランの場合TH-H型の場合ユニット数、開角の違いによらず、折れ線上下弦材が最大圧縮オイラー軸力比を示し、その部材で個材座屈を起こす。一方、H-TH型の場合、開角120度については、折れ線上のウェブ材が最大オイラー軸力比を示し、その部材で個材座屈を起こし、開角150度については、折れ線上下弦材が最大圧縮オイラー軸力比を示し、その部材で個材座屈を起こす。座屈時の最大圧縮オイラー軸力比の値は、ライズスパン比(Ly/H)が大きい方が高い値となる。ここで、Hとは下面節点の最下点から下面節点の最上点の距離をいう。

2.6 耐力及び剛性の比較

載荷面積あたりの弾性座屈は、TH-H型よりもH-TH型の方が小さく四角形プランよりも六角形プランの方が大きくなる。次に開角の違いによる耐力変化を比較する。開角が150度から120度になるとライズスパン比(Ly/H)が約2倍となる。ライズスパン比が約2倍になると、六角形プランの場合、TH-H型ユニット7については、耐力が約1.8倍となり、ユニット9については、耐力が約1.6倍となる。H-TH型の場合、ユニット7については、耐力が約2.0倍となり、ユニット9については、耐力が約1.2倍となる。四角形プランの場合、TH-H型ユニット8については、耐力が約1.6倍となり、ユニット10については、耐力が約1.3倍となる。H-TH型の場合、ユニット8については、耐力が約1.5倍となり、ユニット10については、耐力が約1.3倍となる。剛性に関しては、六角形プランの場合、TH-H型ユニット7では、剛性が約3.2倍となり、ユニット9については、剛性が約2.0倍となる。H-TH型ユニット7については、剛性が約1.2倍となり、ユニット9については、剛性が約1.3倍となる。四角形プランの場合、TH-H型ユニット8については、剛性が約1.3倍となり、ユニット10については、剛性が約1.1倍となる。H-TH型の場合、ユニット8については、剛性が約0.9倍となり、ユニット10については、剛性が約0.7倍となる。よって、ライズスパン比と耐力の関係については、ユニット数が多い方が、ライズスパン比の増加に伴う耐力の増

加は小さくなり、六角形と四角形プランを比較すると、六角形プランの方が、ライズスパン比の増加に伴う耐力増加が大きく、TH-H型とH-TH型を比較すると、四角形プランでは、ほぼ同じであるといえる。ライズスパン比と剛性の関係については、ユニット数が多い方が、ライズスパン比の増加に伴う剛性の増加は小さくなり、六角形と四角形プランを比較すると、六角形プランの方が、ライズスパン比の増加に伴う剛性上昇が大きくなり、四角形プランのH-TH型はライズスパン比の増加に伴い剛性が減少している。TH-H型とH-TH型を比較すると、TH-H型の方が剛性上昇率は高いといえる。

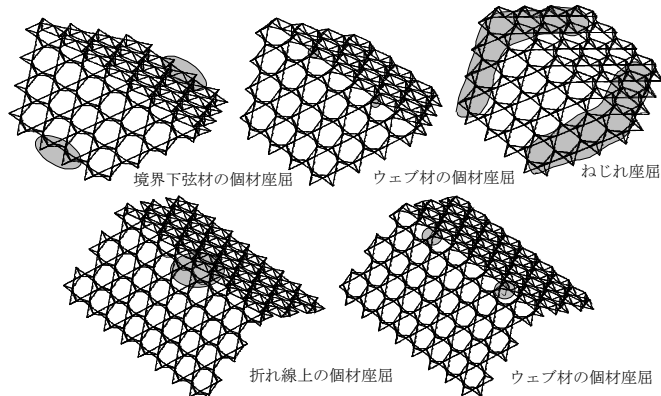


図8 座屈モード

表6 弾性座屈荷重

モデル	弾性座屈荷重(t)		モデル	弾性座屈荷重(t)	
	弾性座屈荷重(個材座屈)	弾性座屈荷重(個材座屈)		弾性座屈荷重(個材座屈)	弾性座屈荷重(個材座屈)
TH-h7-120	93.6	61.7	H-TH-h7-120	72	47
	72	47		33.2	23
TH-h7-150	57.8	33.2	H-TH-h7-150	40	23
	40	23		63.2	35
TH-h9-120	115.6	63.2	H-TH-h9-120	64	35
	64	35		58.2	29
TH-h9-150	78.3	58.2	H-TH-h9-150	39	29
	39	29			
モデル	弾性座屈荷重(t)		モデル	弾性座屈荷重(t)	
	弾性座屈荷重(個材座屈)	弾性座屈荷重(個材座屈)		弾性座屈荷重(個材座屈)	弾性座屈荷重(個材座屈)
TH-s8-120	149.1	66.5	H-TH-s8-120	65	29
	65	29		51.2	20
TH-s8-150	102.4	51.2	H-TH-s8-150	40	20
	40	20		81.7	24
TH-s10-120	146.3	81.7	H-TH-s10-120	43	24
	43	24		72.1	19
TH-s10-150	129	72.1	H-TH-s10-150	34	19
	34	19			

3 支持条件と形状を変化させた場合の効果

3.1 H-TH型平板の支持条件を変化させた場合

前章における弾性座屈解析結果からH-TH型平板は、上弦材に軸力が集中していたため、下面節点支持から上面節点支持へと支持条件を変更し、その効果を検討する。

3.2 支持条件変更による効果

支持条件変更前に比べて下弦材の軸力分布が大きくなる。座屈モードに変化は見られないが、座屈時の最大圧縮オイラー軸力比の値が若干高くなる。

初期剛性については、全モデルとも約20~85%上昇し、耐力については約110~170%上昇する。またその上昇率は六角形プランよりも四角形プランの方が大きい。

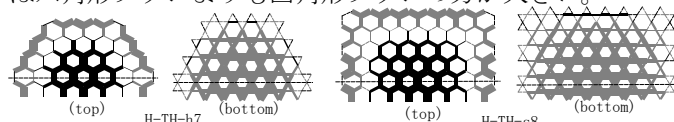


図9 支持条件変更後オイラー軸力比図

3.3 H-TH型折板の形状を変化させた場合

前章における弾性座屈解析結果から、H-TH型折板は、折れ線上に大きく応力が集中するため、以下のように形状を変化させその効果を検討する。

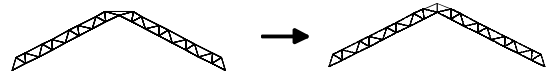


図10 形状設計

3.4 形状変化による効果

形状変更前に比べて折れ線上の軸力分布が小さくなる。座屈モードに関しては、六角形プランの場合、開角120度のモデルはウェブ材の個材座屈からねじれ座屈へと変化し、四角形プランの場合、全モデルとも折れ線上に広がる帯状座屈へと変化する。

初期剛性については、開角120度の場合約25~54%、開角150度の場合約2~19%上昇し、耐力については、開角120度の場合約46~80%、開角150度の場合約1~16%上昇する。またその上昇率は六角形プランよりも四角形プランの方が大きい。

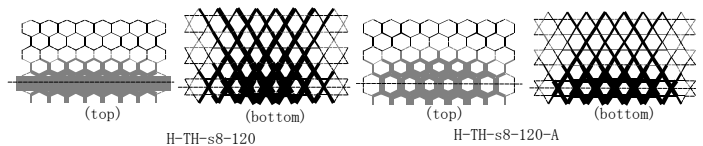


図11 オイラー軸力比図

表7 剛性と耐力の変化率

モデル名	剛性変化率(%)	耐力変化率(%)
H-TH-h7-120-A	38.5	65.7
H-TH-h7-150-A	2.2	7.1
H-TH-h9-120-A	24.1	80.5
H-TH-h9-150-A	1.5	0.9
H-TH-s8-120-A	53.9	51.4
H-TH-s8-150-A	19.4	16.3
H-TH-s10-120-A	35.6	46.4
H-TH-s10-150-A	5.7	8.05

3.5 折板に境界部材を付加した場合

前章の弾性座屈解析結果から、折板の拘束されていない境界節点の鉛直方向変位が他の節点に比べて非常に大きくなっているため、境界部材を付加することによって、剛性と耐力に対してどの程度効果が得られるかを検討する。

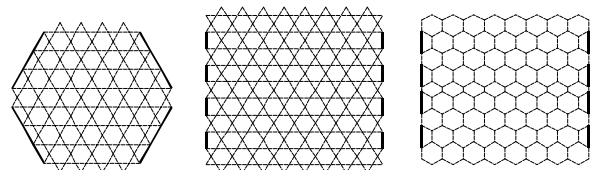


図12 境界部材配置

3.5 境界部材による効果

六角形プランの場合、軸力分布に大きな変化は見られず、境界部材を付加することによる座屈モードの変化は見られなかった。一方四角形プランの場合、TH-H型は境界部下弦材で個材座屈へと変化し、H-TH型は折れ線上の下弦材で個材座屈へと変化し、境界部材を付加することにより座屈モードの変化が見られた。初期剛性については、六角形プランのTH-H型については、約70~110%、H-TH型については、約10~20%上昇し、四角形プランのTH-H型については、約240~450%上昇し、H-TH型については、約52~240%上昇する。耐力については、六角形プランの開角120度の場合、若干減少し、150度の

場合は若干上昇した。四角形プランの場合全モデルとも約30~60%上昇した。よって、境界部材を付加することによって全モデルとも剛性は上昇する。境界部材が剛性に及ぼす効果は、TH-H型とH-TH型で大きな差が見られ、TH-H型の方がH-TH型よりも大きくなる。TH-H型の場合、六角形プランでは、開角150度の方が剛性の上昇率が高く、四角形プランでは、開角120度の方が剛性上昇率が高くなっている。耐力に及ぼす効果は、TH-H型とH-TH型では大きな差はみられないが、四角形プランでは、耐力が大きく増加するのに対して、六角形プランでは、開角120度の場合、ほとんど耐力は変わらず、開角150度の場合には耐力は増加するが、四角形プランと比べるとその増加率はかなり小さいといえる。

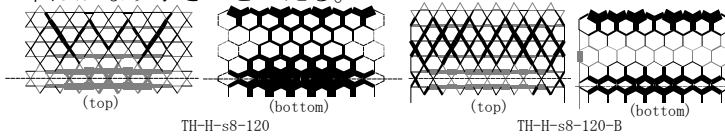


図13 オイラー軸力比の変化図

表8 剛性と耐力の変化率

モデル名	剛性変化率(%)	耐力変化率(%)
TH-H-h7-120-B	80.2	-6
TH-H-h7-150-B	108.4	2.2
H-TH-h7-120-A-B	19.7	-3.4
H-TH-h7-150-A-B	12.1	24
H-TH-h9-120-B	71.1	-0.6
TH-H-h9-150-B	75.1	0
H-TH-h9-120-A-B	9.2	-5.8
H-TH-h9-150-A-B	18.2	2.8
TH-H-s8-120-B	318	49.1
TH-H-s8-150-B	274.8	41.8
H-TH-s8-120-A-B	222.6	23.5
H-TH-s8-150-A-B	237.2	55.4
TH-H-s10-120-B	448.3	77.5
TH-H-s10-150-B	370.2	28
H-TH-s10-120-A-B	51.5	59.6
H-TH-s10-150-A-B	93.2	45.1

4 部材断面を変化させた場合の効果

4.1 部材選択方法

前章の弾性座屈解析結果から、上弦、下弦、ウェブ材で最大応力に大きな差が見られたため、100 (kgf/m²) の設計荷重を想定し、上弦下弦ウェブ材各々で許容応力度設計を行い、円形鋼管リストから部材を選択する。

表9 使用部材

モデル名	上弦部材	下弦部材	ウェブ材
TH-H-h7	101.6φ5.0	101.6φ5.0	76.3φ3.2
TH-H-h7	101.6φ5.0	101.6φ5.0	76.3φ2.8
TH-H-h7-120-B	101.6φ5.0	165.2φ4.5	89.1φ4.0
TH-H-h7-150-B	165.2φ5.0	165.2φ7.0	114.3φ4.5
H-TH-h7-120-A-B	165.2φ4.5	139.8φ4.0	114.3φ3.2
H-TH-h7-150-A-B	114.3φ5.6	190.7φ5.0	101.6φ3.2
H-TH-s8	139.8φ6.0	139.8φ6.0	114.3φ3.6
H-TH-s8	139.8φ6.0	139.8φ6.0	114.3φ3.6
TH-H-s8-120-B	114.3φ3.2	139.8φ4.0	76.3φ3.2
TH-H-s8-150-B	139.8φ4.5	139.8φ6.0	89.1φ3.2
H-TH-s8-120-A-B	165.2φ4.5	139.8φ6.0	114.3φ4.5
H-TH-s8-150-A-B	165.2φ4.5	190.7φ6.0	101.6φ5.0

4.2 耐力及び剛性の比較

部材重量で除した初期剛性で剛性を比較すると、平板に関しては、設計後剛性が約13~17%上昇するが、折板については、約6~30%減少する。耐力については、弾性座屈荷重を部材重量で除した値をひとつの耐力指標とする場合と部材が許容応力度到達時の荷重を部材重量で除した値を耐力指標とする2通りで部材効率を比較する。後者で耐力の部材効率を比較すると全モデルとも部材効率がよくなるが、前者で耐力の部材効率を比較すると、全モデルとも部材効率が悪くなっている。座屈モードが部材設計前後で変化しないモデルにおいては、座屈時の最大

圧縮オイラー軸力比の値が設計前に比べて小さくなり、そのため、弾性座屈荷重が下がっている。その下がり方は、部材使用量に大きく影響を受けており、座屈時のオイラー軸力比の変化率と弾性座屈荷重の変化率はモデルによってばらつきが見られた。以上のことから、今回対象としているモデルに関しては、ウェブ材の補剛効果が大きく、上弦、下弦、ウェブ材各々で許容応力度設計し部材断面を決定する手法では、危険であるといえ、座屈を考慮した設計手法をとるが望ましいといえる。

表10 許容応力耐力の比較 表11 弾性座屈耐力の比較

モデル名	等断面時の耐力値	部材変更後の耐力評価値	モデル名	等断面時の耐力値	部材変更後の耐力評価値
TH-H-h7	100	112	TH-H-h7	100	92
H-TH-h7	100	129	H-TH-h7	100	87
TH-H-h7-120-B	100	235	TH-H-h7-120-B	100	68
TH-H-h7-150-B	100	117	TH-H-h7-150-B	100	76
H-TH-h7-120-A-B	100	150	H-TH-h7-120-A-B	100	69
H-TH-h7-150-A-B	100	120	H-TH-h7-150-A-B	100	85
TH-H-s8	100	123	TH-H-s8	100	96
H-TH-s8	100	151	H-TH-s8	100	75
TH-H-s8-120-B	100	168	TH-H-s8-120-B	100	80
TH-H-s8-150-B	100	192	TH-H-s8-150-B	100	92
H-TH-s8-120-A-B	100	154	H-TH-s8-120-A-B	100	82
H-TH-s8-150-A-B	100	123	H-TH-s8-150-A-B	100	84

表12 剛性の比較

モデル名	等断面時の剛性評価値	部材変更後の剛性評価値
TH-H-h7	100	113
H-TH-h7	100	115
TH-H-h7-120-B	100	70
TH-H-h7-150-B	100	90.7
H-TH-h7-120-A-B	100	93.5
H-TH-h7-150-A-B	100	77
TH-H-s8	100	113
H-TH-s8	100	117
TH-H-s8-120-B	100	86
TH-H-s8-150-B	100	93
H-TH-s8-120-A-B	100	77.5
H-TH-s8-150-A-B	100	94

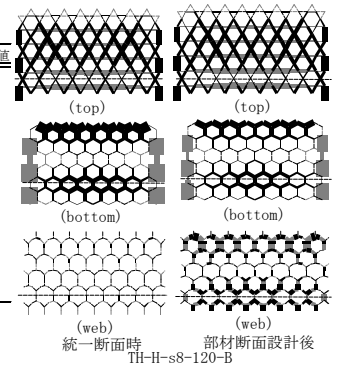


図14 オイラー軸力比の変化図

5 まとめ

1. 平板については、六角形、四角形プランとも、TH-H型の方がH-TH型よりも耐力剛性共に高くなり、H-TH型については上面節点支持が望ましい。四角形プランよりも六角形プランの方が剛性、耐力共に高い。
2. 折板については、単純に平板を折っただけでは不十分であるといえ、形状設計により、耐力、剛性の上昇が可能である。境界部材の効果は、六角形プランの場合剛性は上がるが耐力上昇にはつながりにくく、四角形プランの場合耐力、剛性とも十分な効果が得られた。境界部材付加前は六角形プランの方が耐力、剛性共に高いが、境界部材付加後剛性、耐力共に、四角形プランの方が高くなる。
3. 各面を許容応力度設計により断面を決定する設計手法は、部材の許容応力度到達荷重を耐力とした場合は、部材効率はよくなるが、弾性座屈荷重でみると部材効率が下がり、今回のモデルに関しては、座屈にたいして十分な検討をした部材設計が望ましい。

参考文献

日置興一郎、“構造力学Ⅱ”、朝倉書店 朝倉建築工学講座2、1977. 10