

平成22年度

修士論文

周辺拘束材を有する極薄肉鋼板の
座屈後耐力に関する解析的研究

指導教員 川口 淳 准教授

三重大学大学院工学研究科

建築学専攻

早坂 泰範

目次

第 1 章 序

1.1 研究の背景	1
1.2 極薄肉鋼板を用いた耐震壁の既往の研究	2
1.3 研究の目的	5

第 2 章 数値解析

2.1 薄鋼板の座屈耐力および座屈後耐力を対象とした数値解析の既往の研究	6
2.2 数値解析の目的	8
2.3 数値解析概要	
2.3.1 解析手順	9
2.3.2 解析モデル	10
2.3.3 解析変数	12
2.3.4 材料特性	13
2.4 数値解析結果	
2.4.1 数値解析結果の座屈耐力および座屈後耐力の定義	14
2.4.2 解析モデル A	
2.4.2.1 拘束材部の曲げ剛性の影響	15
2.4.2.2 拘束材部の剛性の影響	27
2.4.3 解析モデル B	
2.4.3.1 拘束材部の曲げ剛性の影響	36
2.4.3.2 拘束材部の剛性の影響	51
2.5 まとめ	60

第 3 章 座屈耐力および座屈後耐力理論式

3.1 座屈耐力理論式	61
3.2 座屈後耐力理論式	63

第 4 章 数値解析結果と理論値との比較

4.1 解析モデル A	
4.1.1 座屈耐力	66
4.1.2 座屈後耐力	69

4.2	解析モデル B	
4.2.1	座屈耐力	71
4.2.2	座屈後耐力	73
4.3	まとめ	77
第 5 章 結		
5.1	結論	78
5.2	今後の課題	80
参考文献		81
謝辞		82

第 1 章 序

1.1 研究の背景

板厚 1mm 前後の溶融亜鉛メッキ処理した軽量形鋼を使用するスチールハウスは、木造枠組壁構法から派生した構法の一つで、従来の枠組壁構法の枠材を薄板軽量形鋼に置き換えたものである。スチールハウスの構造壁は、通常、薄板軽量形鋼の枠材に構造用合板をドリリングタッピングねじで取り付けられた形式となっており、その力学的特性は、様々な研究により明らかにされている。これらの研究成果により、スチールハウスは鋼部材を構造壁に用いているため優れた耐力および変形性能を有することが知られ、近年その施工例が増えている。

これまでに本研究室では、小規模建築物を対象としたスチールハウスの更なる軽量化、低コスト化、かつ部材として鋼材のみを用いることによる構造設計の緻密化を図るために、主な耐力壁部材である構造用合板を、板厚 1mm の溶融亜鉛メッキ処理した極薄肉鋼板に置き換えたスチールハウス耐力壁を提案し、その基礎的力学性状を把握することを目的とした実験的研究を行ってきた。

極薄肉鋼板を耐力壁部材に用いることにより、耐力壁の軽量化、構造体の全部材がリサイクル可能と成るメリットがある。しかし、極薄肉鋼板は板厚が薄く、面内剛性が低いため座屈が問題となる。しかし、本研究室における極薄肉鋼板耐力壁の圧縮載荷実験、水平載荷実験によって、座屈後も耐力が上昇し、最大耐力つまり座屈後耐力に至ることが証明されている。そこで、現在はその極薄肉鋼板耐力壁を用いた工法の構造設計は、従来の木造枠組壁工法で用いられる壁倍率のフローで設計されている。そのため、用いられる耐力壁の形状は限定されている。

そこで、鋼板耐力壁の実大実験を行わなくても、鋼構造としての耐力、剛性、変形能力等を考慮した設計フローを組み立てる必要があり、極薄肉鋼板の幅厚比、アスペクト比や拘束材の形状等の変数に応じた定量的な評価手法が確立することが必要である。

1.2 極薄肉鋼板を用いた耐震壁の既往の研究

本研究室における極薄肉鋼板を用いた耐力壁の実験的研究を以下に示す。

極薄肉鋼板を用いたスチールハウス用耐力壁の弾塑性性状に関する実験的研究(その 1: 圧縮力載荷実験)²⁾

研究の背景と目的

スチールハウス工法で用いられる耐力壁は、構造用合板をドリリングタッピングねじで取り付けて製作される。高性能化、軽量化かつ低コスト化を目指して、構造用合板に換えて板厚 0.8~1.6mm の鋼板を用いた耐力壁を提案している。その基礎的力学性状を明らかにすることを目的とする。

圧縮力載荷実験

試験体

サイド 2 本、センター 1 本の計 3 本の極薄肉リップ付き溝形鋼のスタッドを鋼板にねじ留めし、上下端を極薄肉溝形鋼のランナー材によって覆ったもの。

実験変数はサイドスタッドの板厚で、1.6mm を C シリーズ、1.0mm を D シリーズと呼ぶ

実験結果

C シリーズ

載荷後、鋼板が面外に波打ち、ゆがみ座屈がセンタースタッドに発生した。その後、ゆがみ座屈によってセンタースタッドの局部座屈が発生。この座屈後も剛性を保ったまま荷重が増加し、サイドスタッドに局部座屈が発生し、最大耐力に至った。

D シリーズ

載荷後、鋼板が面外に波打ち、その後、センタースタッドにゆがみ座屈に起因する局部座屈が発生。直後に、サイドスタッドの局部座屈が発生し、最大耐力に至った。

最大耐力評価

断面のゆがみを伴う座屈が見られたセンタースタッドの評価式は、片面面材拘束がある場合のゆがみ耐力式を使用。断面のゆがみ・ねじれが発生しなかったサイドスタッドは、組立ボックスとして扱い、曲げ座屈評価式を使用。

せん断力載荷実験

試験体

形状、寸法、実験変数は圧縮実験と同様。連続の耐力壁は、サイドスタッドを共有して鋼板のフランジをねじで留めたもの。

実験結果

C シリーズ

最大荷重の 20~30% の段階で鋼板が波打ち、複数に分かれて波形が発生する。その後、鋼板の変形に

伴い鋼板とセンタースタッドを止めているねじが抜ける。これにより、複数の波形が鋼板の対角線上の1本に一体化する。その後、下部ランナー材に局部座屈が発生し、最大耐力に至った。

D シリーズ

ねじの抜け出し発生前に、サイドスタッドに局部座屈が発生し最大耐力に至り、その後、急激な耐力低下が発生した。単体耐力壁と連続耐力壁は同様の破壊性状を示した。

最大耐力評価

最大荷重は、C シリーズの方が D シリーズより高く、連続耐力壁は単体耐力壁の2倍となった。初期剛性は、シリーズによる差はほとんどなく、連続耐力壁の方が高い初期剛性を示した。構造特性係数は、バラツキがみられたが、C シリーズの連続耐力壁が最も低かった。

構造用合板を面材に用いた耐力壁の場合：面として抵抗し、面材と枠材の接合強度、または縦枠材の圧縮耐力により最大耐力が決まる。

鋼板を面材に用いた耐力壁の場合：面材に斜張力が発生して、トラスとして抵抗し、枠材の耐力により最大耐力が決まる。→鉄骨構造の筋交い付きラーメンに近い抵抗機構

総括

板厚 1.6mm の耐力壁を使用し、下部ランナー材周辺の補強、横補強材の取り付け、ねじピッチの縮小、スタッドの形状改良によって耐力の向上が期待できる。

極薄肉鋼板を用いたスチールハウス用耐力壁の弾塑性性状に関する実験的研究

(その 2: せん断力載荷実験)³⁾

研究目的

上記の実験に引き続き、極薄肉鋼板を用いたスチールハウス耐力壁の基礎的力学性状を把握することを目的とし、せん断力載荷実験を行い、その弾塑性性状について検討。

試験体

鋼板のサイドに角形鋼管 2 本、センターに極薄肉リップ付き溝形鋼 1 本をドリリングタッピングねじで取り付け、上下端を極薄肉溝形鋼のランナー材によって覆ったもの。

実験変数は壁幅、補剛板の有無。補剛板とはサイドスタッド上部付近のランナー材の面外変形を拘束するもの

実験結果

破壊性状

CH シリーズ

鋼板に複数の面外方向への波形が発生し、その後、センタースタッドのフランジが引張られて面外に変形した。これにより、センタースタッドによる鋼板の拘束がなくなり、鋼板の対角線上の波形が深くなった。

このとき、CH2-N-M では鋼板の波形の凹凸が反転し、ねじがはずれ、鋼板とランナー材が面外に変形しサイドスタッドと鋼板の間に隙があき、トラス抵抗がなくなり、最大耐力に至った。

CH2-M では補剛板がこの変形を防ぎ、耐力低下せずに水平変位が進み、その後、鋼板の波形が大きくなり、センタースタッドと鋼板がはずれて最大耐力に至った。

A シリーズ

CH シリーズとほぼ同様。最大荷重の 90%付近でサイドスタッドの下部が局部座屈し、荷重が低下。その後荷重は再び上昇し、終局変形角へと至った。補剛板の影響は見られない。

結論

A シリーズは補剛板の有無に関わらず同じ破壊形状を示し、剛性、最大荷重、Ds 値ともにほぼ同値

CH シリーズは補剛板有りの方が剛性、最大荷重は高い値を示し、Ds 値は低い値を示した。

1.3 研究の目的

本研究では、鋼板耐力壁の実大実験を行わなくても、極薄肉鋼板耐力の幅厚比、アスペクト比や拘束材の形状等の変数に応じた定量的な評価手法が確立することを目的とし、これまでの研究で得られた知見を基に極薄肉鋼板による鋼板部と薄板軽量形鋼による周辺拘束材部を模した解析モデルに対して有限要素法による数値解析を行うことで、鋼板部の座屈耐力および座屈後耐力に及ぼす曲げ剛性を考慮した拘束材部の剛性、および載荷方法の影響について検討し、数値解析結果から求めた座屈耐力、座屈後耐力に対し、既往の座屈耐力評価式および座屈後耐力評価式を用いて評価し、その評価式の適応の可能性について論ずる。

第 2 章 数值解析

2.1 薄鋼板の座屈耐力および座屈後耐力を対象とした数値解析の既往の研究

H形鋼梁ウェブの弾性座屈耐力評価に関する研究

五十嵐らは文献4)で、一般的なH形鋼梁ウェブを不均等曲げせん断力を受ける周辺単純支持平板と捉え、その弾性座屈耐力評価式を提案することを目的とし、エネルギー法を用いて得られた座屈耐力から、座屈耐力評価近似式を導いている。この中で、曲げ応力の影響を考慮しなければならない辺長比の範囲において、逆対称曲げせん断力を受ける周辺単純支持平板の座屈耐力評価近似式を導いており、不均等曲げせん断力を受ける場合では、逆対称曲げせん断力を受ける場合の座屈耐力評価近似式に安全率を見込むことで適用可能であるとしている。

文献5)では、せん断力の影響の大きい一般的なH形鋼梁は、フランジが捩じれずにウェブの座屈のみで崩壊するものも存在するとし、この場合、H形鋼梁ウェブを不均等曲げせん断力を受ける周辺固定支持平板と捉え、その弾性座屈耐力評価式を提案することを目的とし、エネルギー法を用いて得られた座屈耐力から、座屈耐力評価近似式を導いている。この中で、文献4)と同様に、曲げ応力の影響を考慮しなければならない辺長比の範囲において、逆対称曲げせん断力を受ける周辺固定支持平板の座屈耐力評価近似式を導いている。

文献6)では、一般的なH形鋼梁ウェブの弾性座屈性状に対して境界条件が与える影響および座屈耐力を算出する上で最も適当な境界条件について考察している。エネルギー法を用いた座屈解析から得られた座屈耐力曲線と有限要素法による解析結果を比較している。この中で、現実の境界条件下であってもフランジ-ウェブ接合線上は、回転についても変形についても十分固定と見なせるため、H形鋼梁ウェブの境界条件は、座屈耐力を算出する上で四辺固定支持と見なせ、現実の梁ウェブの弾性座屈耐力はせん断応力分布を等分布として求めた四辺固定支持平板の座屈耐力として評価できるとしている。

薄板の座屈後耐力に関する研究

木村らは文献7)で、薄板の座屈後耐力について圧縮、面内曲げ、面内せん断力それぞれが単独に作用する場合を対象とし、有効幅の概念を拡張して統一的な座屈後耐力評価を行っている。また、その妥当性を有限要素解析による数値実験結果との比較により検討している。解析変数は、圧縮、面内曲げの場合は、換算幅厚比 $\lambda^*=0\sim3$ 、アスペクト比 $\beta=0.5\sim6$ 、面内せん断の場合は換算幅厚比 $\lambda^*=0\sim3$ 、アスペクト比 $\beta=1\sim3$ としている。この中で、塑性限界幅厚比 λ_p^* を、板厚で無次元化した有効幅と解釈して求めた座屈後耐力評価式を提示している。薄板の境界条件が単純支持あるいは固定支持で、 $\beta=0.5\sim6$ の場合、圧縮を受ける薄板の座屈後耐力評価式でよい評価を得られる。また、座屈耐力は座屈耐力評価式でよい評価を得られ、面内曲げを受ける薄板については、外力を全塑性モーメントによって無次元化すれば、境界条件が単純支持あるいは固定支持で $\beta=0.5\sim6$ の場合、座屈後耐力式を利用でき、

面内せん断を受ける薄板については、境界条件が単純支持で、 $\beta=1\sim3$ の場合、座屈後耐力式を利用できるとしている。

文献 8) では、文献 7) の数値解析方法に準じて、薄板の境界条件が単純支持の場合の複合荷重を受ける座屈後耐力相関関係を求めている。これは、単独の外力を受ける薄板の座屈後耐力から、複合荷重を受ける薄板の座屈後耐力を評価するものである。解析変数は、幅厚比を 105, 148, アスペクト比 $\beta=1, 3$ としている。この中で、単独の荷重を受ける場合の座屈後耐力 N_u, M_u, Q_u から N-M, N-Q, M-Q 座屈後耐力相関関係を求め、任意の複合荷重 N-M-Q に対する座屈後耐力相関曲面を誘導している。

せん断力を受ける部分支持された薄鋼板の座屈耐力及び座屈後耐力に関する研究

金箱らは文献 9) で、幅厚比が大きく、周囲の枠材と部分支持されたせん断力を受ける鋼板を対象に、実用的な範囲での座屈耐力および座屈後耐力を把握することを目的とする基本的な検討を行っている。解析変数は、板周辺の支持長さ比 $\alpha=0.1\sim0.5$, 幅厚比 150~350, アスペクト比 $\beta=1$ としている。この中で、ブレースモデル及び応力分布に基づいた座屈耐力および座屈後耐力の評価式を提案し、この評価式と数値解析結果を比較検討しており、部分支持された板の全周支持された板に対する弾性座屈耐力の比率は、支持長さの辺長に対する割合 α をパラメータとして提示した式で評価でき、枠材の曲げ剛性が十分に大きい場合の座屈固有値解析を行った結果、座屈モード、座屈耐力は枠材の曲げ剛性、すなわち板の面内拘束の有無に影響されないとしている。また、枠材の曲げ剛性が十分に大きい場合の鋼板の座屈後耐力は、 α が 0.3 以下でかつ幅厚比が 150~350 の場合には、提示したブレースモデルに基づく座屈後耐力式で安全側に評価できるとしている。

文献 10) では、文献 9) をうけてせん断力を受ける部分支持された幅厚比の大きい鋼板の座屈耐力及び座屈後耐力を、アスペクト比 2~3 の範囲についてもブレースモデル及び応力度分布に基づいた評価式を提案し、数値解析結果と比較検討している。解析変数は、板周辺の支持長さ比 $\alpha=0.1\sim0.5$, 幅厚比 150~350, アスペクト比 $\beta=2\sim3$ としている。この中で、部分支持された鋼板の座屈耐力は、板周辺の支持長さ比 $\alpha\leq 0.3$, アスペクト比 $\beta\leq 3$ の場合であれば、ブレースモデル及び応力度分布に基づいた評価式で概ね評価できると述べており、枠材の付いた鋼板で、枠材の曲げ剛性がゼロおよび無限大の場合では、板周辺の支持長さ比 $\alpha\leq 0.3$ かつ幅厚比 ≥ 200 の場合に限定すれば、座屈後耐力は α, β を用いた評価式で概ね推定できるとしている。また、枠材の曲げ剛性によって座屈後耐力は影響を受け、今回の検討範囲では、曲げ降伏時の曲げ剛性に対して 10 倍以上の剛性を有している場合には、曲げ剛性無限大の枠材を有する座屈後耐力の 90%程度以上が確保できるとしている。

2.2 数値解析の目的

2.1 の数値解析による既往の研究では、一般的なH形鋼梁ウェブや純せん断力を受ける極薄肉鋼板耐力壁の薄鋼板の座屈耐力および座屈後耐力について論じている。しかし、本研究で対象とするのは、極薄肉鋼板耐力壁であり、その耐力壁の極薄肉鋼板の面材、薄板軽量形鋼の拘束材の関係について論じられている研究は十分になされていないと言える。

そこで本研究では、極薄肉鋼板耐力の幅厚比、アスペクト比や拘束材の形状等の変数に応じた定量的な評価手法が確立することを目的とし、これまでの研究で得られた知見を基に、極薄肉鋼板を用いた耐力壁を、極薄肉鋼板による鋼板部と薄板軽量形鋼による周辺拘束材部を矩形とした基本的な解析モデルに対し、有限要素法による数値解析を行い、数値解析手法の適応範囲拡張の検討、鋼板部の座屈耐力および座屈後耐力に及ぼす曲げ剛性を考慮した拘束材部の剛性、および載荷方法の影響について検討し、既往の座屈耐力、座屈後耐力評価式の妥当性を検証する。

2.3 数値解析概要

2.3.1 解析手順

数値解析は有限要素法の汎用プログラム NX Nastran (ver. 9.2)による FEM を用いて行い、材料および幾何学的非線形を考慮する。解析手順はまず弾性座屈固有値解析を行い、1 次の座屈モードを求め、これを解析モデルの極薄肉鋼板部の面外方向の初期不整として与えて、幾何学的非線形を考慮した弾塑性増分解析を行う。初期不整の量は、極薄肉鋼板の板厚の 1% を面外方向の変形の最大たわみとして与える。また弾塑性増分解析には弧長増分法を用いる。

2.3.2 解析モデル

図 1, 図 2 に示すように, 2 種類の解析モデルに対して数値解析を行う. 解析モデル A, 解析モデル B はともに, 極薄肉鋼板とその周辺を拘束する拘束材をモデル化したもので, それぞれ正方形板要素で構成する. 鋼板部は幅 b , 高さ h , アスペクト比(b/h)を 1 とし, 1 辺を 20 分割したサイズを正方形板要素の 1 辺とする. また, 鋼板部の板厚 t は 1 mm とし, 幅厚比(b/t)は 150 である.

解析モデル A の拘束材部は, 鋼板部の各周辺に幅 $b_r(h_r)$, 高さ $h(b)$ の面材を配置し, 1 辺の長さが e_s , 板厚 t_r の正方形板要素で構成する. 境界条件は鋼板部の周辺 4 辺を面外方向(z 方向)の変位を拘束, 面内方向(xy 方向)は自由とする. ただし, モデル全体が移動しないように下部の 2 頂点をピン及びローラー支持する.

解析モデル B の拘束材部は, 鋼板部の左右 2 辺の y 軸方向に幅 b_r , 高さ h の面材を配置し, 1 辺の長さが e_s , 板厚 t_r の正方形板要素で構成する. 境界条件は, 鋼板部の下辺を面内方向 (x, y 軸方向), 面外方向(z 軸方向)の変位と, 面内方向 (y, z 軸まわり) の回転を拘束し, 面外方向(y 軸まわり)の回転を自由とする. また鋼板部の上辺は剛体とし, 面外方向(z 軸方向)の変形と, 面内方向 (y, z 軸まわり) の回転を拘束し, 面内方向 (x, y 軸方向) の変位と面外方向(y 軸まわり)の回転を自由とする. ただし, モデル全体が移動しないように下部の 2 頂点をピン支持する.

ここで面内方向変形, 面外方向変形を定義する. 面内方向変形は, $\delta 1, \delta 2$ (図 1, 図 2 参照)の平均を 1 辺の長さ h で除して求めたものを面内変形角 γ とする. 面外方向変形は弾性座屈固有値解析で求めた最大面外方向変形ノードの面外変形量 δ で定義する.

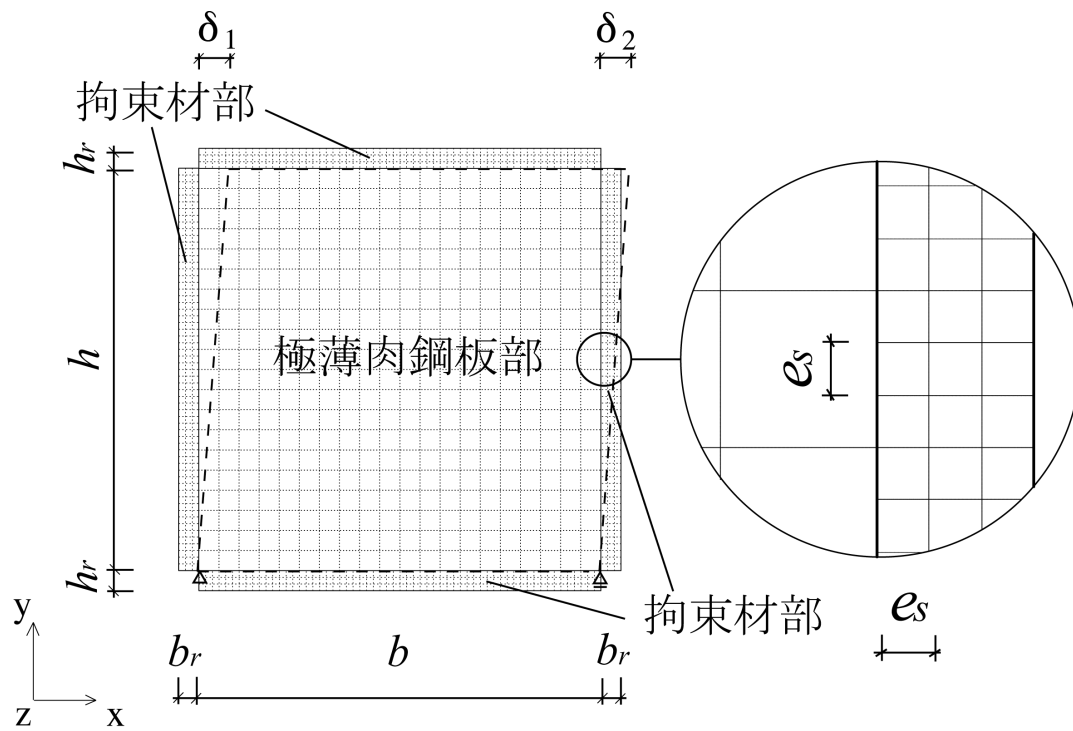


図 1 解析モデル A

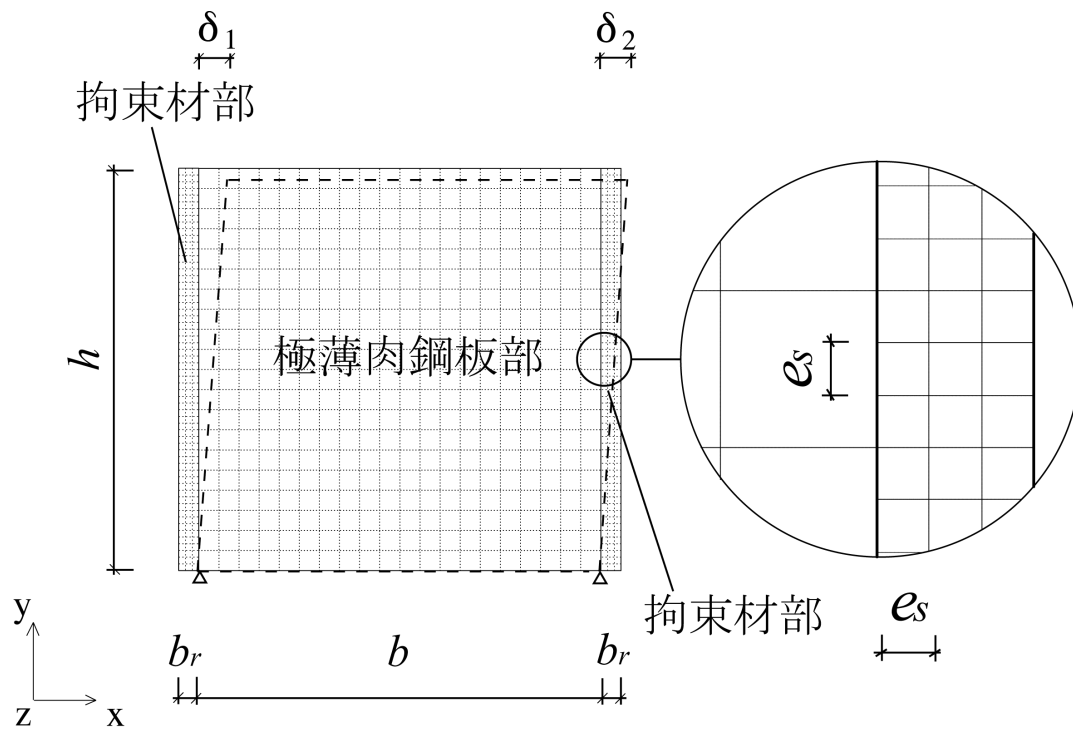


図 2 解析モデル B

2.3.3 解析変数

解析変数は解析モデル A の場合、荷重方法、拘束材部に曲げ剛性を考慮するため拘束材部の要素サイズ e_s 、拘束材部の剛性を変化させるため板厚 t_r とし、解析モデル B の場合、拘束材部に曲げ剛性を考慮するため拘束材部の要素サイズ e_s 、拘束材部の剛性を変化させるため板厚 t_r とする。

荷重方法は、図 3.1 の荷重方法(a)の場合、鋼板部に純せん断力(Q)が加わるように荷重し、初期の材軸および直交軸に平行に分割要素の外側節点へ与える。図 3.2 の荷重方法(b)の場合、上部右上の 1 頂点に面内方向(X 方向)に水平力(P)を荷重する。

拘束材の板厚 t_r は解析モデル A、解析モデル B とともに 1, 10, 25, 50, 100 (mm) とする。
また、拘束材の要素サイズ e_s は解析モデル A の荷重方法(a)の場合、 b_r , $b_r/3$, $b_r/5$ とし、荷重方法(b)の場合、 b_r , $b_r/3$, $b_r/5$, $b_r/10$ とする。解析モデル B の場合は b_r , $b_r/3$, $b_r/5$, $b_r/10$ とする。

以下に解析モデルの解析変数に応じた試験体名を定義する。

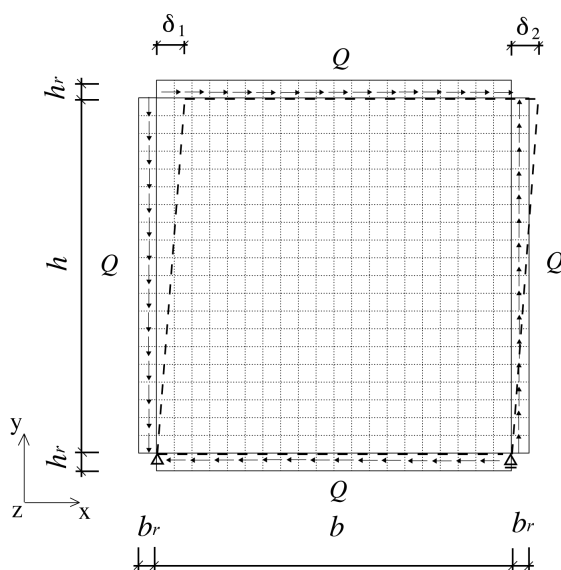


図 3.1 荷重方法 (a)

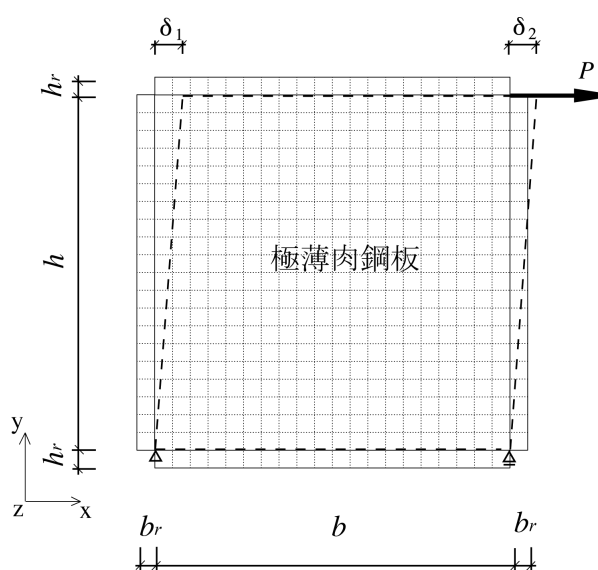
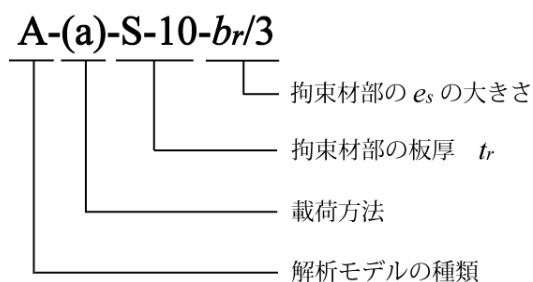


図 3.2 荷重方法 (b)



2.3.4 材料特性

材料特性は図 4 に示すように、鋼板部、拘束材部ともに bi-linear 型の応力度-ひずみ度関係を用い、400N 級の鋼材を想定した降伏応力度： $\sigma_y = 235(\text{N/mm}^2)$ ，ヤング係数： $E = 2.05 \times 10^5(\text{N/mm}^2)$ ，ポアソン比： $\nu = 0.3$ とする．ただし，ひずみ硬化は考慮しない．

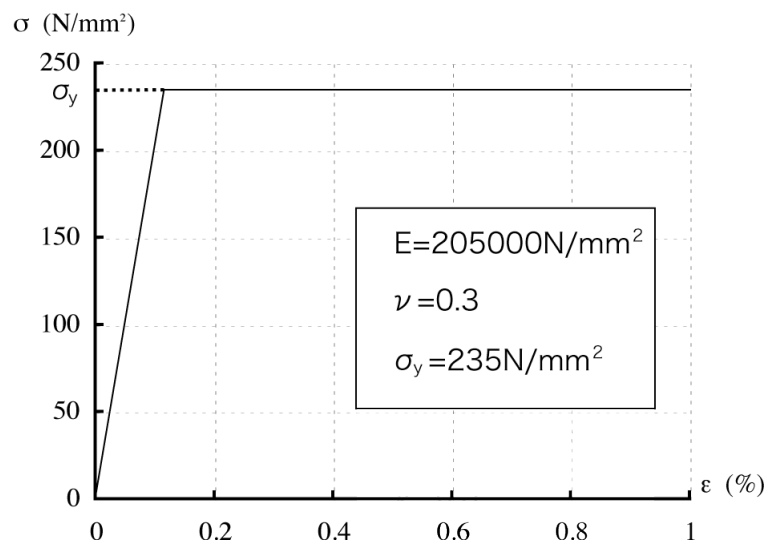


図 4 材料特性

2.4 数値解析結果

2.4.1 数値解析結果の座屈耐力および座屈後耐力の定義

図 5 に数値解析結果の座屈耐力および座屈後耐力の定義を示す。縦軸は荷重 Q 及び P ，横軸は面外方向変形 δ とする。座屈耐力は各点での接線勾配を求め、これが初期勾配の $1/1000$ となる点の耐力を座屈耐力とし、座屈後耐力は座屈耐力発揮後、最大耐力を発揮した点とする。

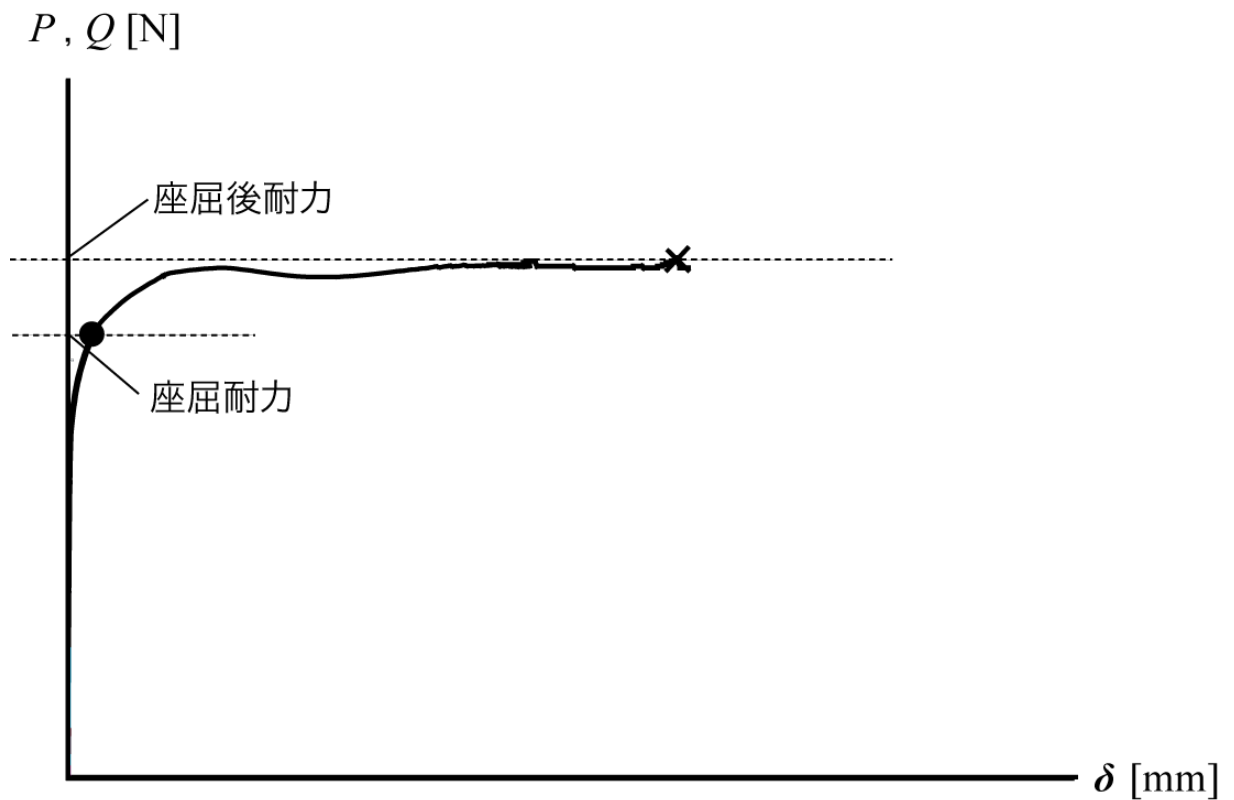


図 5 座屈耐力および座屈後耐力定義方法

2.4.2 解析モデル A

2.4.2.1 拘束材部の曲げ剛性の影響

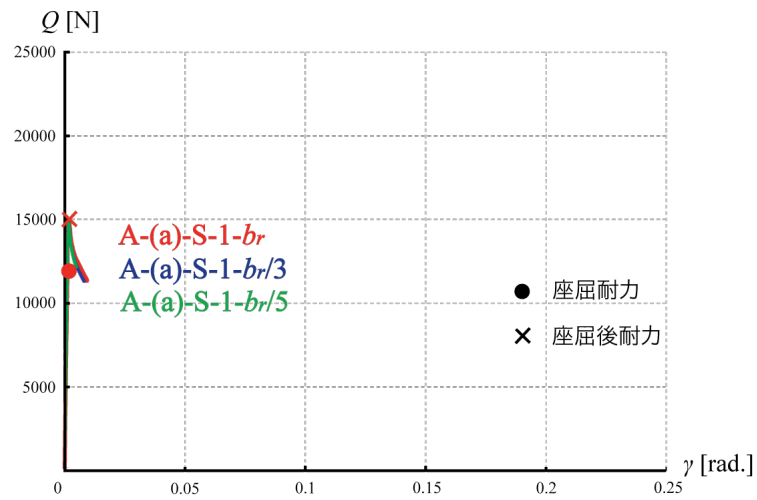
解析モデル A の載荷方法(a)の t_r ごとの弾塑性増分解析の結果の荷重-面内変形角関係を図 6.1, t_r ごとの弾塑性増分解析の結果の荷重-面外変形角関係を図 6.2, 載荷方法(b)の t_r ごとの弾塑性増分解析の結果の荷重-面内変形角関係を図 7.1, t_r ごとの弾塑性増分解析の結果の荷重-面外変形角関係を図 7.2 に示す. グラフの縦軸は荷重 Q 及び P , 横軸はせん断変形角 γ , 最大面外変形 δ とする. そして, 2.4.1 に示した座屈耐力および座屈後耐力の定義による, それぞれの座屈耐力, 座屈後耐力を示す.

載荷方法(a)の場合, 荷重-面内変形角関係, 荷重-面外変形角関係ともに, それぞれの t_r で, e_s に関わらず初期剛性がよく一致しており, 同じ挙動を示しており, e_s の影響は見られない.

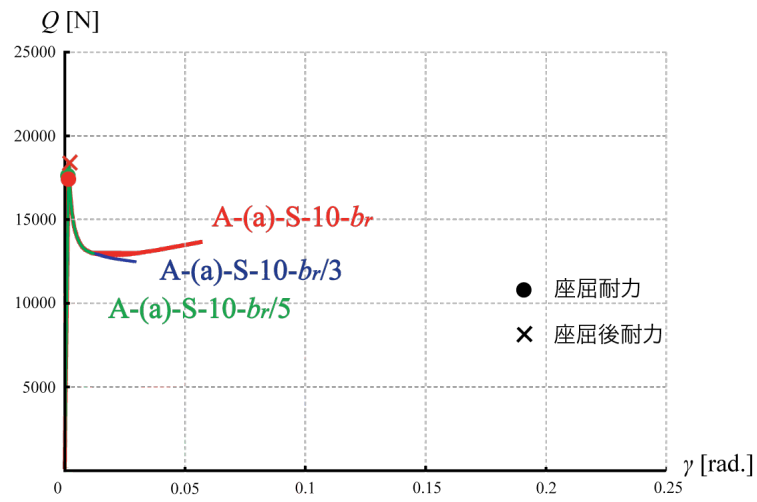
載荷方法(b)の場合, A-(b)-S-1- $b_r/3$, A-(b)-S-1- $b_r/5$, A-(b)-S-1- $b_r/10$ の場合については座屈耐力および座屈後耐力は定義できなかった. 挙動については, $t_r = 1$ では e_s によって解析結果全体の挙動が同じである. しかし, $t_r = 10$ では, 図 7.1 (b) の荷重-面内変形角関係を見ると, 初期剛性が一致しているが, その後, 座屈耐力, 座屈後耐力に至るまでの挙動に違いがあり, e_s が小さいほど剛性が低下する傾向がある. また, 座屈後耐力発揮後, 応力の再分配が起こり荷重が低下し, その後再び荷重が上昇する挙動も e_s によって異なり, e_s が小さいほど剛性が低下する傾向がある. $t_r = 25$ では, $t_r = 10$ と同様に, 座屈後耐力発揮後, 応力の再分配が起こり荷重が低下し, その後再び荷重が上昇する挙動が e_s によって異なり, e_s が小さいほど剛性が低下する傾向がある. よって A-(b)-S-25- b_r だけ, 座屈後耐力が A-(b)-S-25- $b_r/3$, A-(b)-S-25- $b_r/5$ に比べ大きくなる.

このような挙動の違いは, 載荷方法にあると考えられる. 載荷方法(a)の場合, 鋼板部に純せん断力を与えるため, 拘束材部に曲げの影響が入らない. しかし, 載荷方法(b)の場合, 曲げとせん断を与えるため, 鋼板部がせん断を受け持ち, 拘束材部に曲げが入る. その拘束材部に入る曲げは, e_s の大きさに影響が出るためである. e_s の大きさの影響は, $e_s = b_r$ の場合, 拘束材部の短辺方向 b_r , h_r に要素が 1 つしか存在しないので, 応力勾配がないため, 拘束材には曲げの影響が少なく, 面内方向変形が進行するにつれ鋼板部に応力が集中し, 鋼板部のみ降伏していく. しかし $e_s = b_r/3$, $b_r/5$, $b_r/10$ の場合, 拘束材部の短辺方向 b_r , h_r にも要素が複数存在するので, 応力勾配があり, 面内方向変形が進行するにつれ, 鋼板部だけでなく拘束材部にも曲げの影響が入り, 応力が分散し鋼板部, 拘束材部ともに降伏していくためであると考えられる. その影響は e_s が小さいほど, また拘束材部の剛性が小さいほど表れる. また $t_r = 50, 100$ では, 荷重-面内変形角関係, 荷重-面外変形角関係ともに解析結果の挙動の違いが見られない. これは面内方向変形が進行するにつれ応力の分布は e_s によって異なるが, 拘束材部の剛性が大きいため, 全体の挙動には e_s の影響が表れないと考えられる.

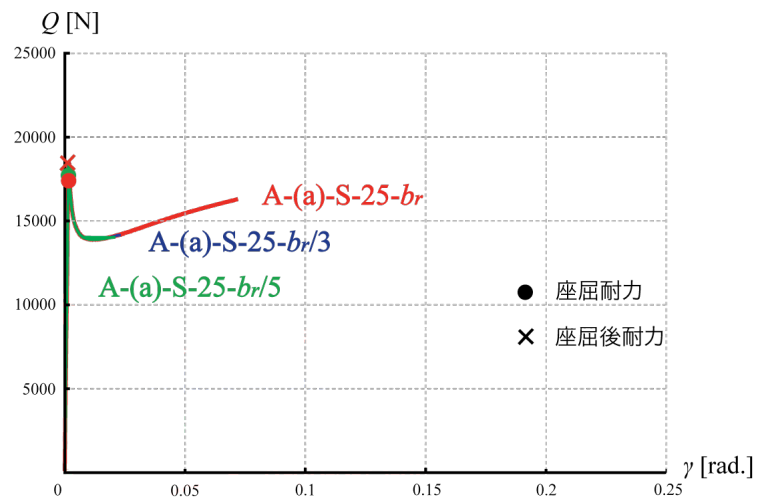
また, e_s の大きさを小さくすると, 正方形板要素数が多くなるため, 数値解析の負荷が大きくなるため, e_s の大きくなるにつれて, 得られる数値解析解が少なくなる傾向がわかる.



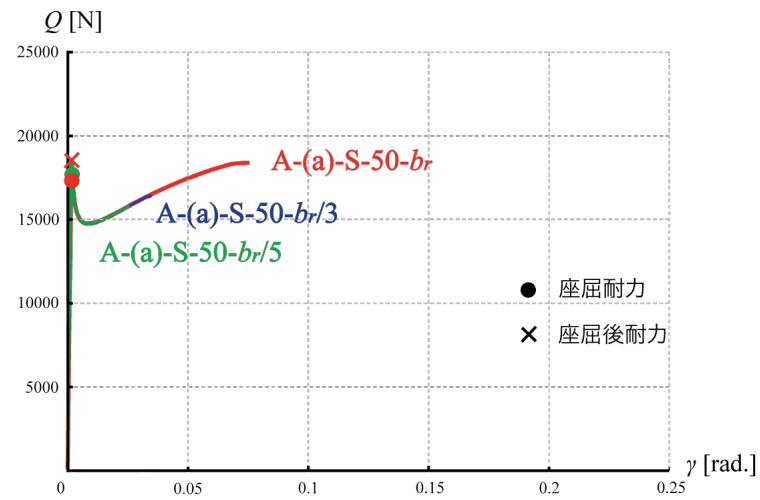
(a) $t_r=1$



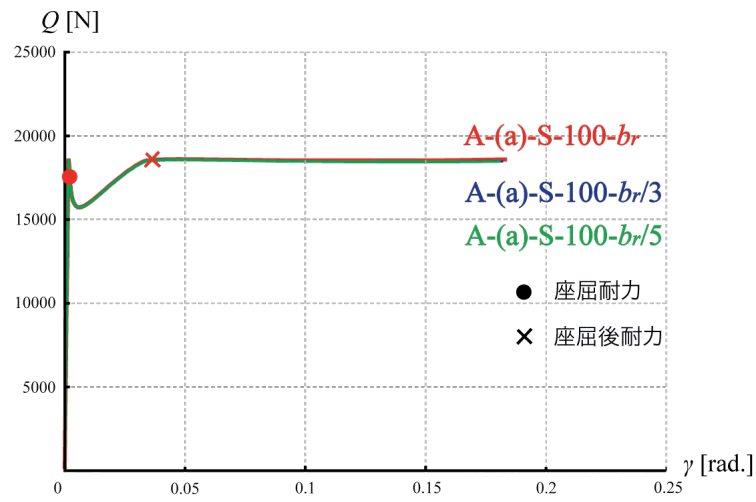
(b) $t_r=10$



(c) $t_r=25$

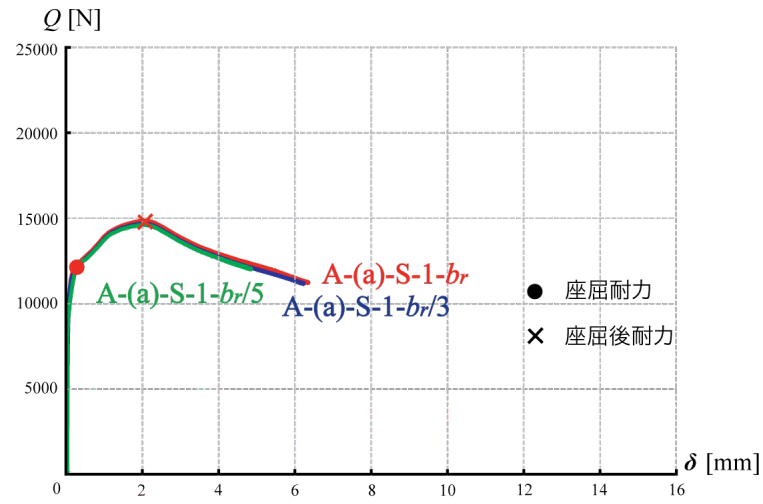


(d) $t_r=50$

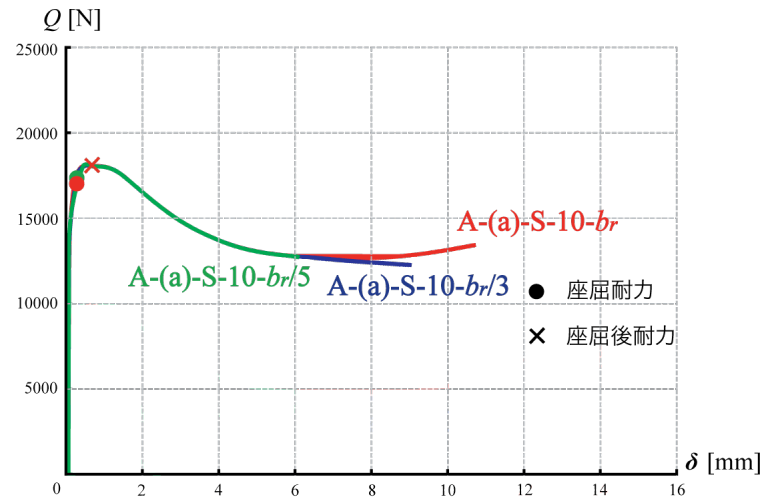


(e) $t_r=100$

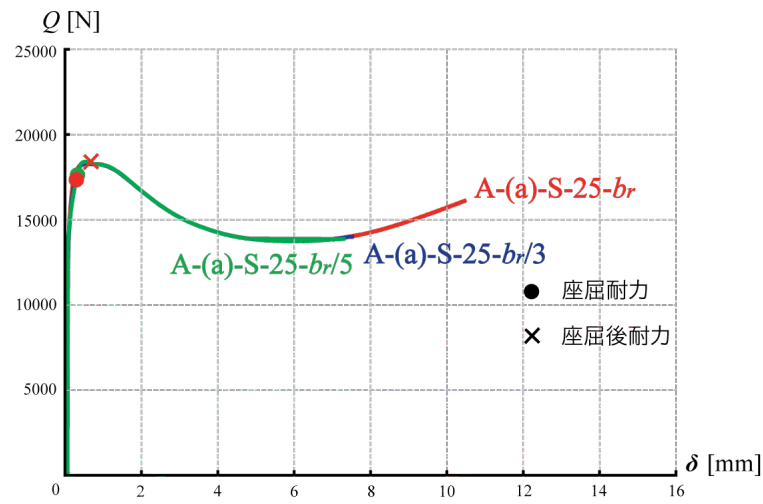
図 6.1 载荷方法(a) 荷重-面内変形角関係 (t_r : 一定)



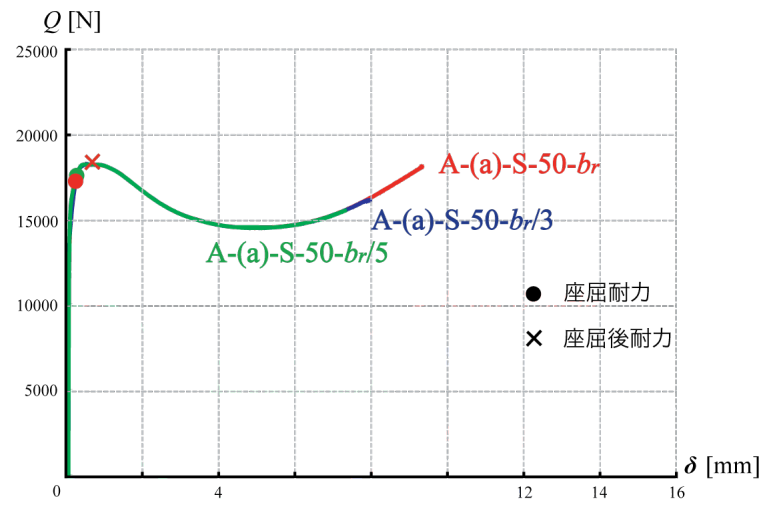
(a) $t_r=1$



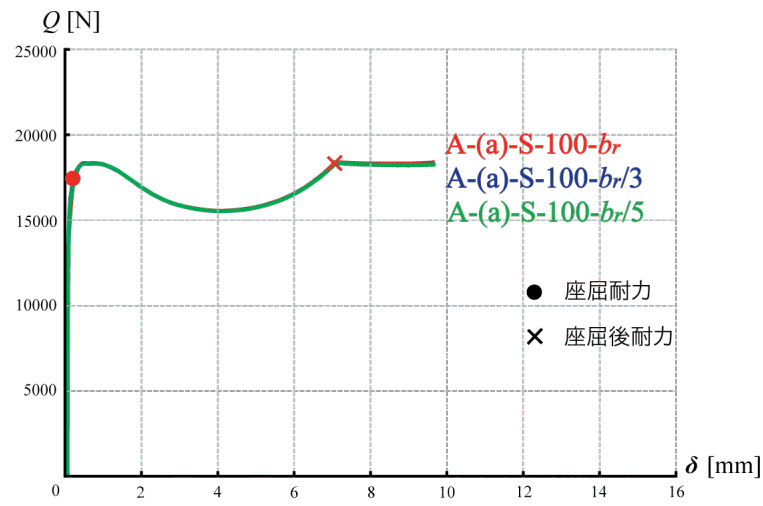
(b) $t_r=10$



(c) $t_r=25$

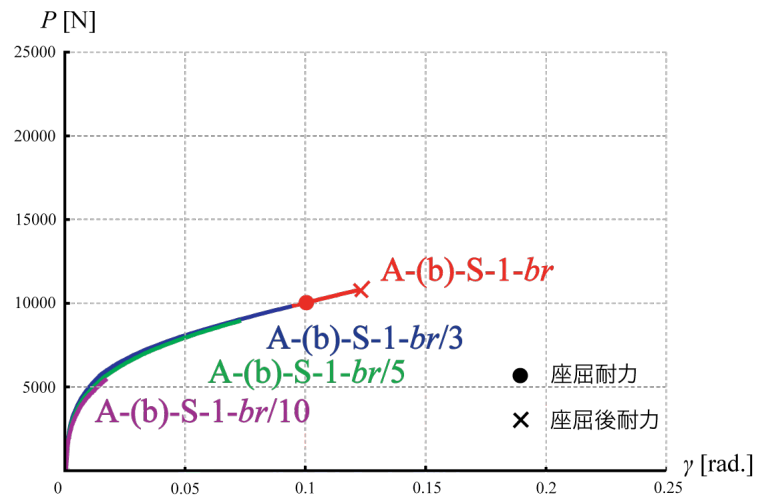


(d) $t_r = 50$

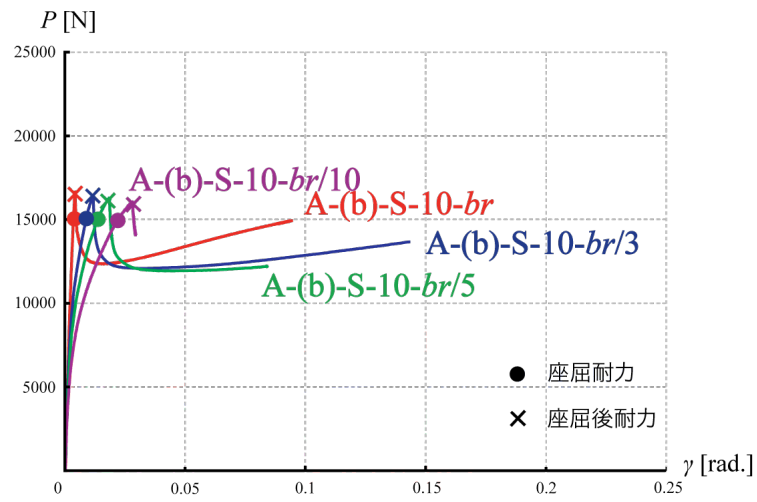


(e) $t_r = 100$

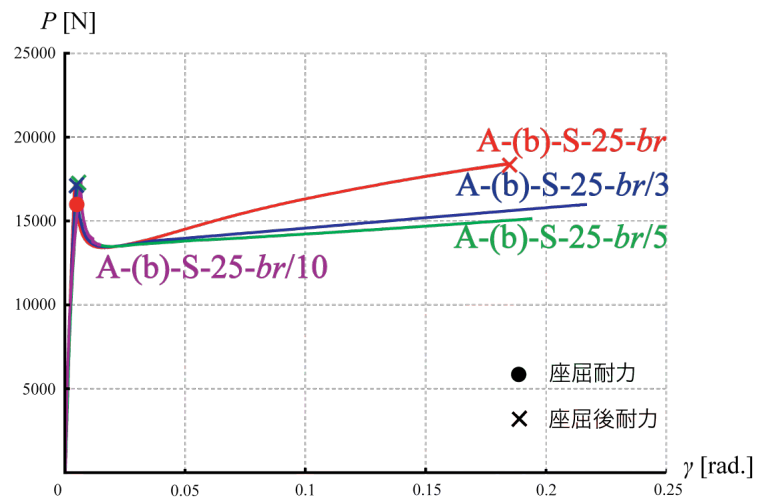
図 6.2 載荷方法(a) 荷重-面外変形関係 (t_r : 一定)



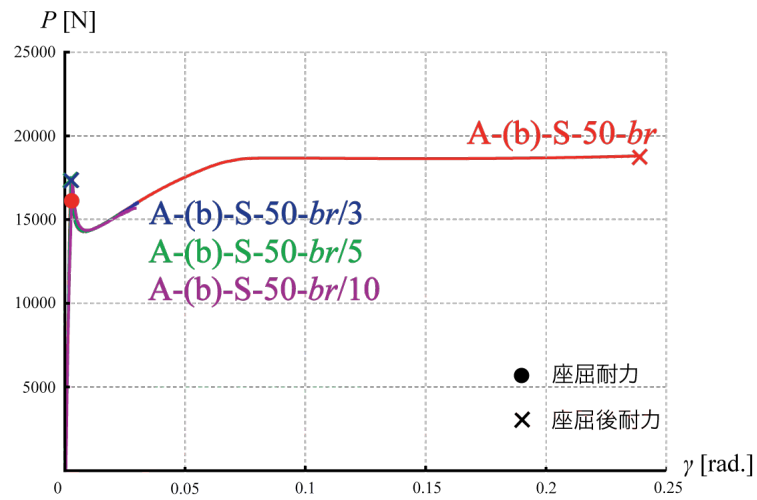
(a) $t_r=1$



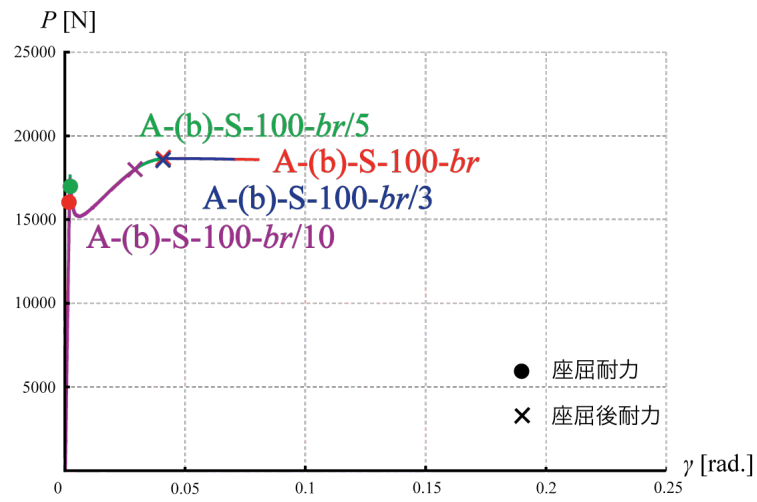
(b) $t_r=10$



(c) $t_r=25$

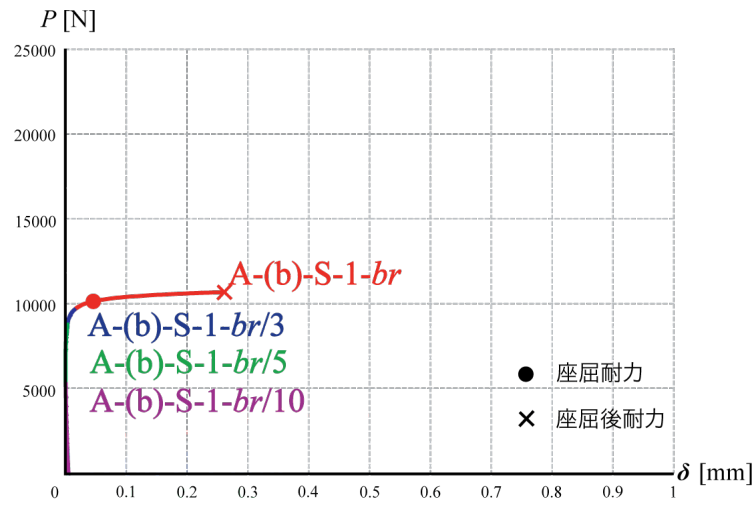


(d) $t_r=50$

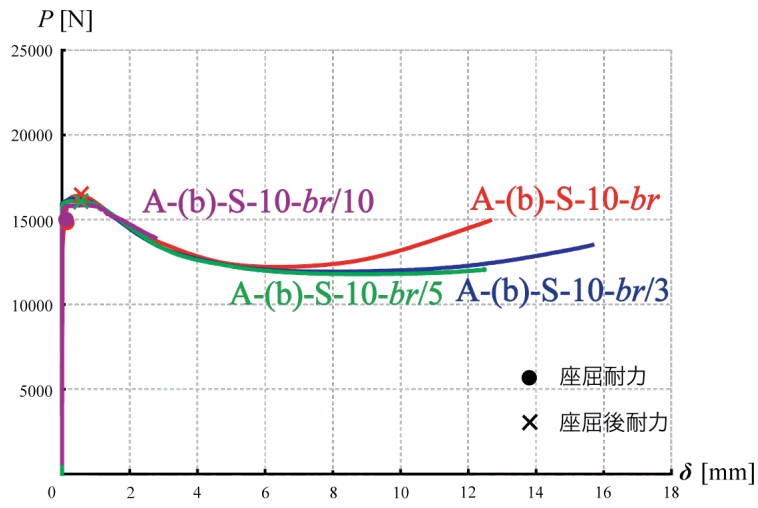


(e) $t_r=100$

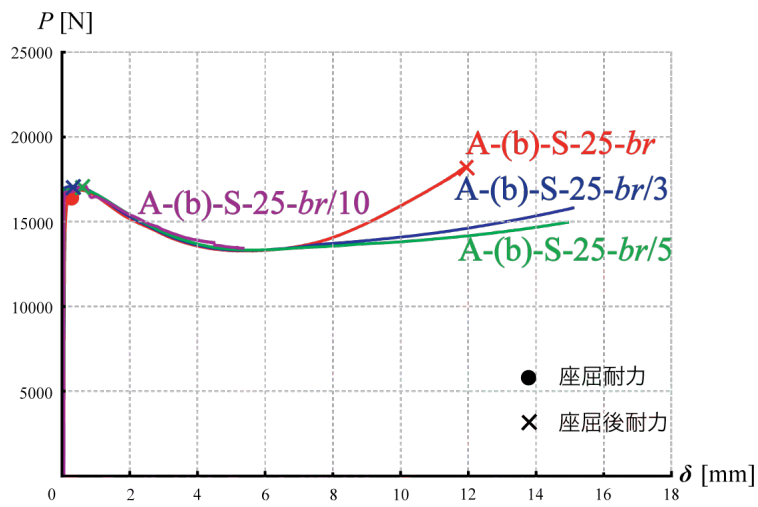
図 7.1 载荷方法(b) 荷重-面内変形角関係 (t_r : 一定)



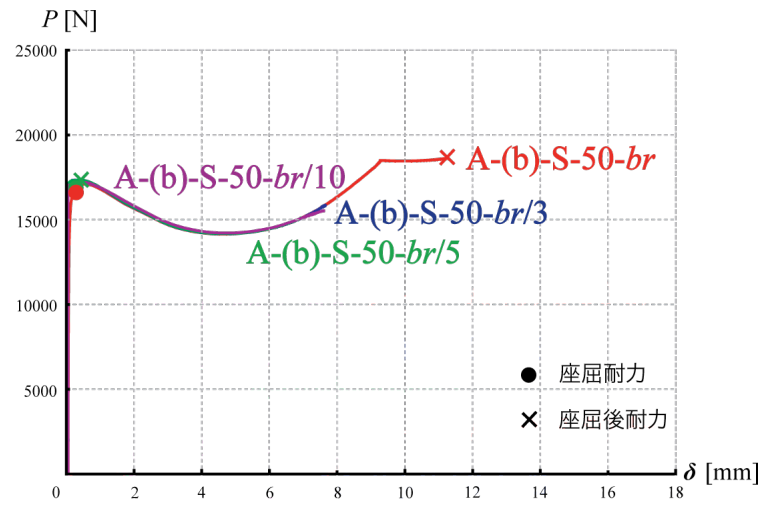
(a) $t_r=1$



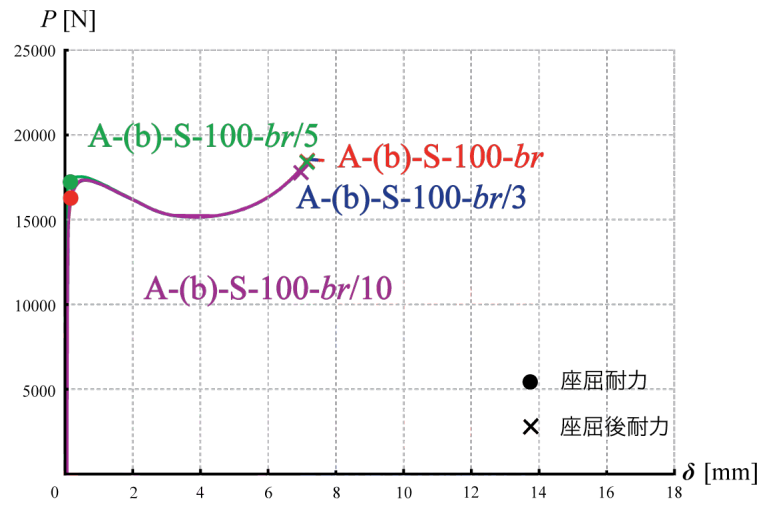
(b) $t_r=10$



(c) $t_r=25$



(d) $t_r=50$

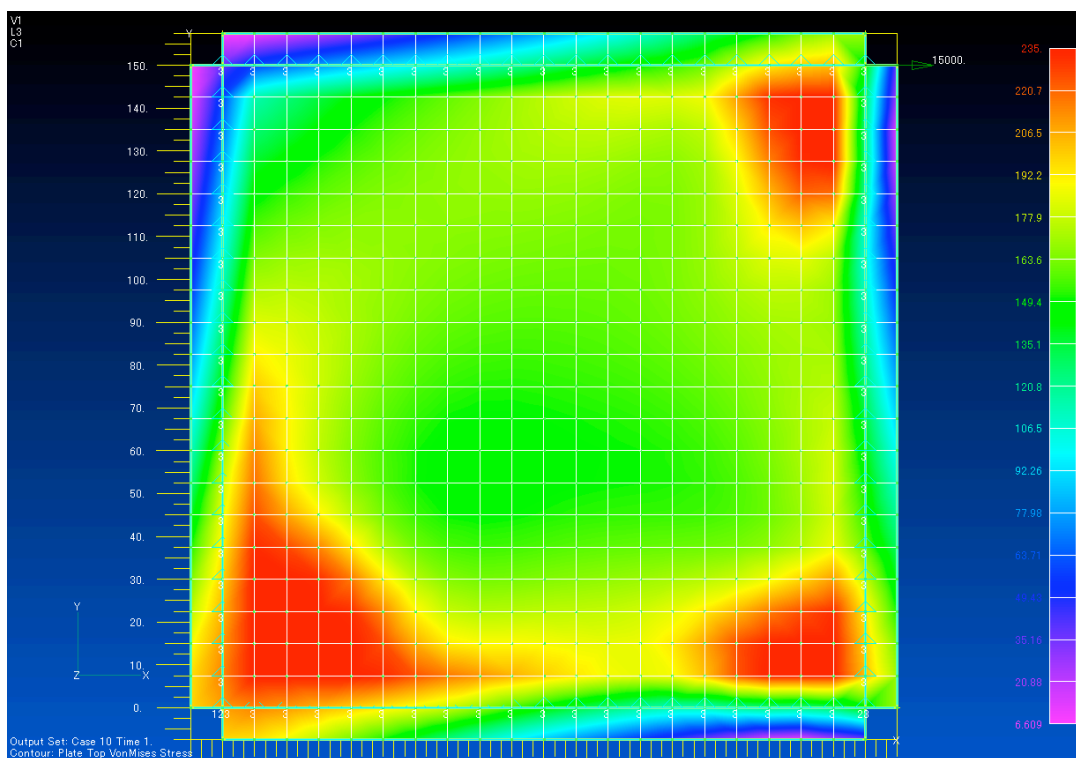


(e) $t_r=100$

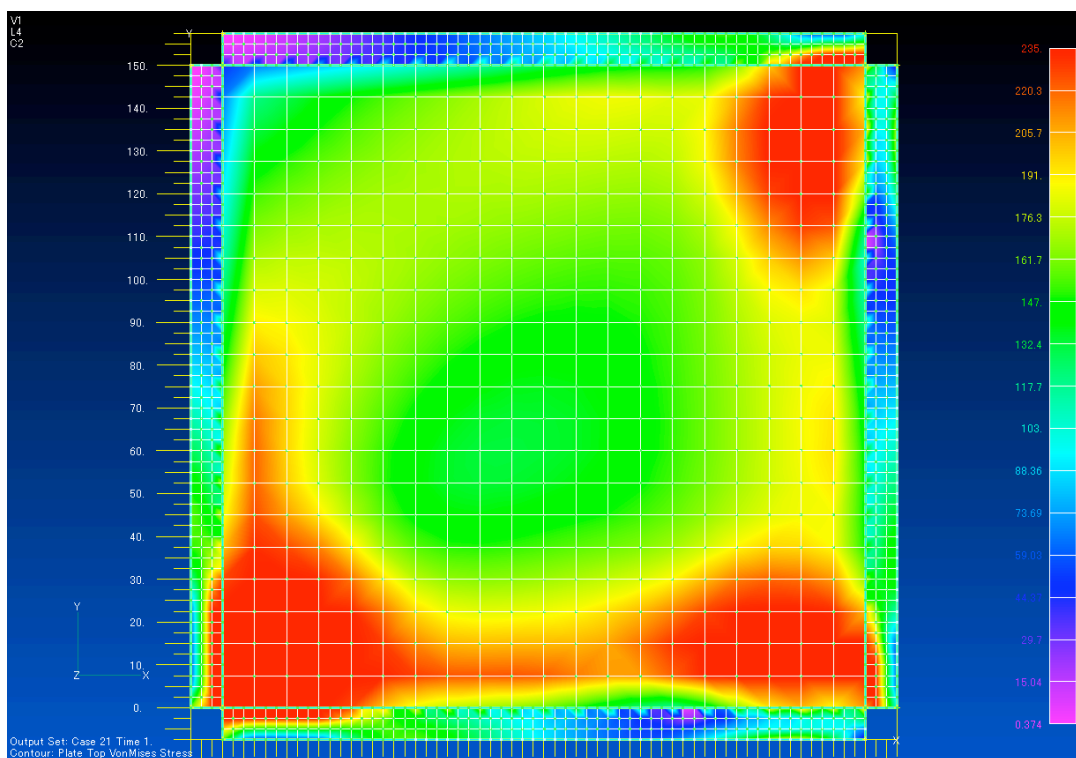
図 7.2 載荷方法 (b) 荷重-面外変形関係 (t_r : 一定)

ここで前述した载荷方法(b)の場合の、 t_r の違いによる力学挙動の違いについて、主応力コンター図を用いて考察する。図 8 に、A-(b)-S-10- e_s 、A-(b)-S-10- $e_s/3$ 、A-(b)-S-10- $e_s/5$ 、A-(b)-S-10- $e_s/10$ それぞれの 15000N 時の主応力コンター図を示す。主応力レベルは、それぞれの図右にあるようなパラメータの配色になっており、赤に近づくほど降伏応力度 235N/mm^2 に近づき、紫に近づくほど、 0N/mm^2 に近づく。

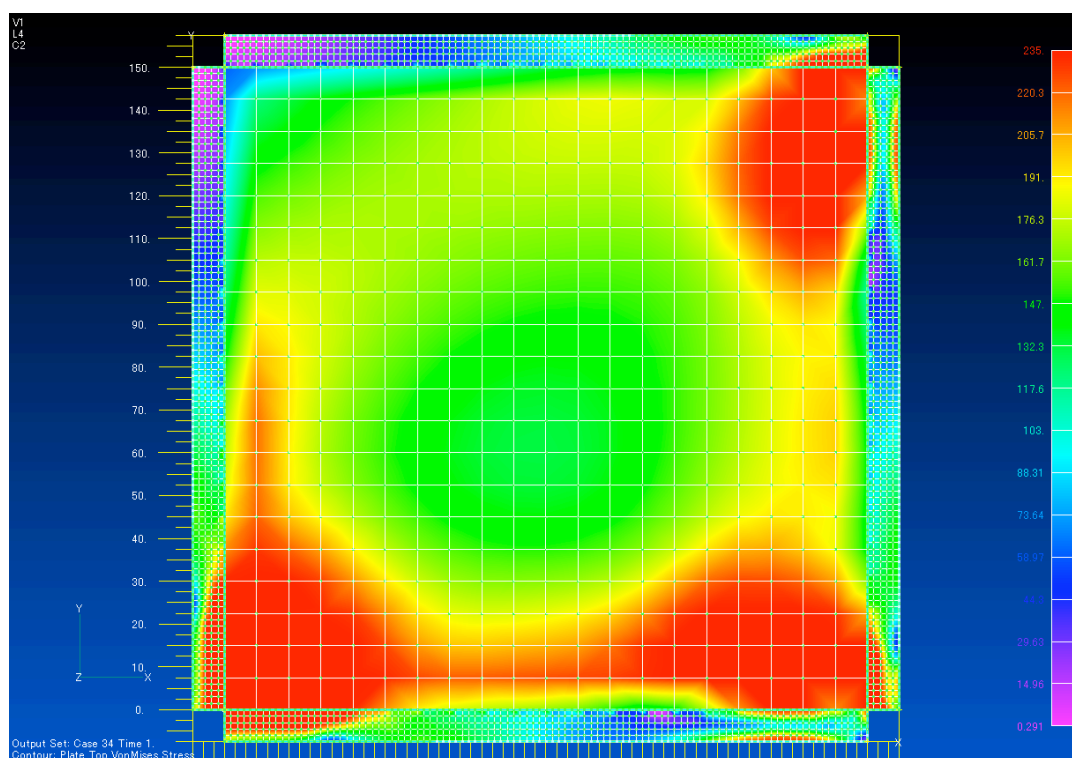
A-(b)-S-10- e_s の場合、鋼板部のピン、ローラー支持付近、つまり左下、右下部分が降伏しているが、その周辺の拘束材部は降伏していない。しかし、A-(b)-S-10- $e_s/3$ 、A-(b)-S-10- $e_s/5$ 、A-(b)-S-10- $e_s/10$ の場合、A-(b)-S-10- e_s と鋼板部の主応力分布は変わらないが、 e_s が小さくなるほど、ピン、ローラー支持付近の拘束材部の降伏している範囲が広がっていることがわかる。したがって、図 7.1 (b) にあらわれた挙動になる。また、 $t_r=25$ でも同様のことが言える。



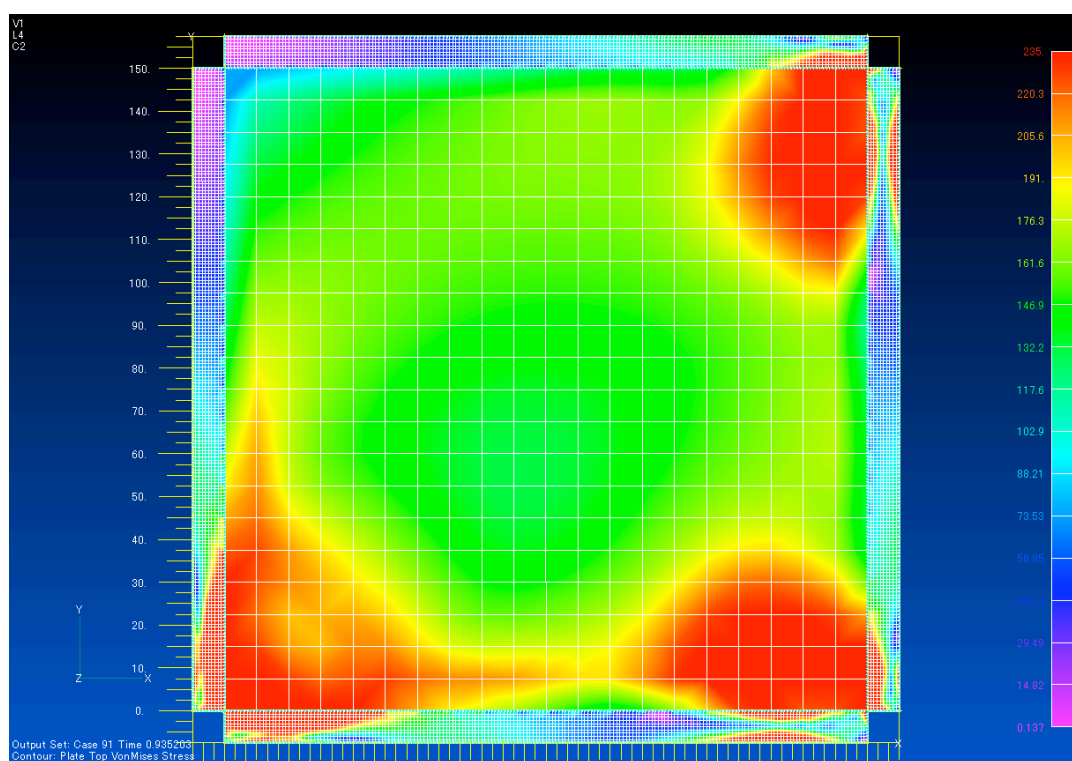
(a) $A-(b)-S-10-e_s$



(b) $A-(b)-S-10-e_s/3$



(c) $A-(b)-S-10-e_s/5$



(d) $A-(b)-S-10-e_s/10$

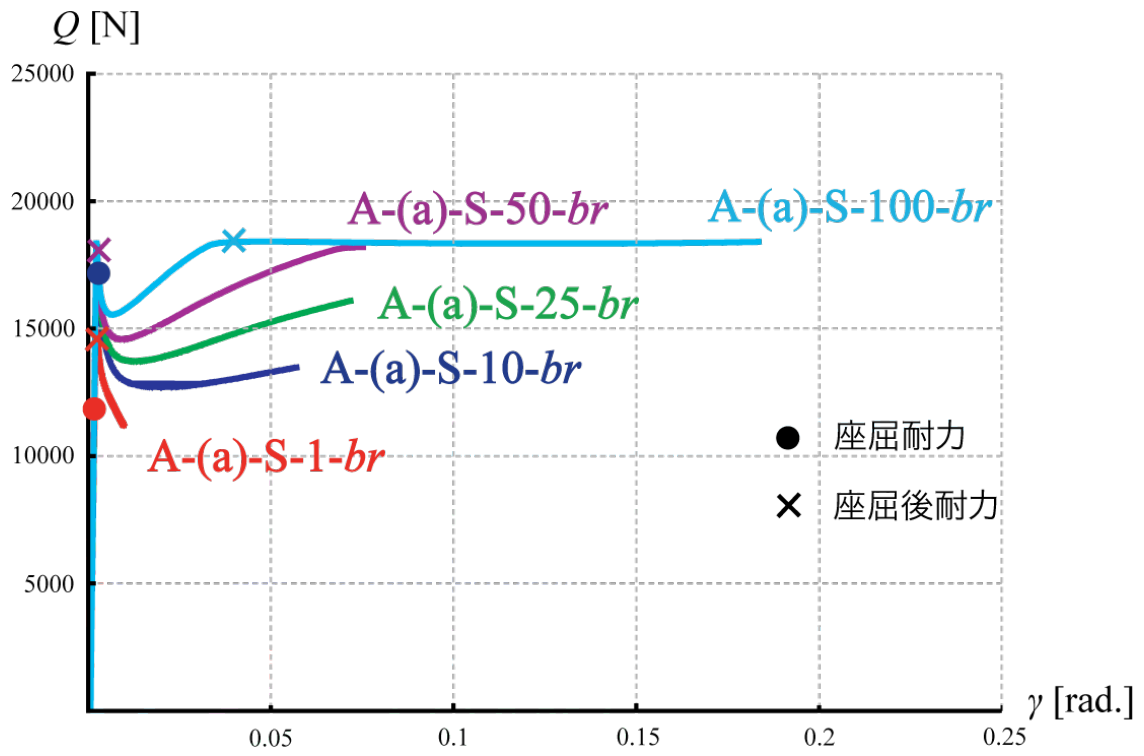
図 8 $P=15000N$ 時の主応力コンター図

2.4.2.2 拘束材部の剛性の影響

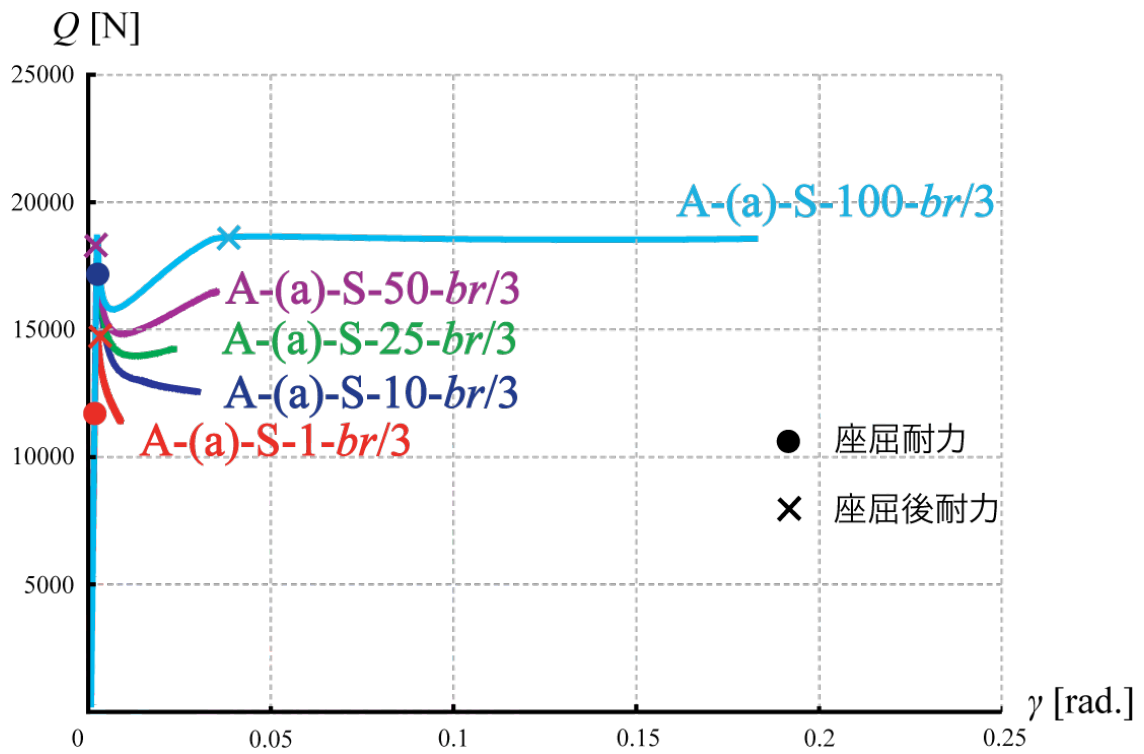
解析モデル A の載荷方法(a)の e_s ごとの弾塑性増分解析の結果の荷重-面内変形角関係を図 9.1, e_s ごとの弾塑性増分解析の結果の荷重-面外変形角関係を図 9.2, 載荷方法(b)の e_s ごとの弾塑性増分解析の結果の荷重-面内変形角関係を図 10.1, e_s ごとの弾塑性増分解析の結果の荷重-面外変形角関係を図 10.2 に示す. 2.4.2.1 と同様に, グラフの縦軸は荷重 Q および P , 横軸はせん断変形角 γ , 最大面外変形 δ とする. そして, 2.4.1 に示した座屈耐力および座屈後耐力の定義による, それぞれの座屈耐力, 座屈後耐力を示す.

載荷方法(a)の場合, それぞれの e_s で, t_r に関わらず初期剛性がよく一致しており, $t_r=10$ 以上になると, 座屈耐力に対する拘束材の剛性の影響は極めて小さくなる. また座屈後耐力についても, $t_r=10 \sim 50$ の範囲では, 拘束材の剛性の影響は極めて小さくなる. 挙動については, $t_r=10$ 以上では, 荷重が初期剛性から線形で一度目のピークを迎えた後, 応力の再分配がおり, 荷重が低下する. その低下した後, 荷重が再び上昇していくが, この上昇する剛性が t_r によって異なり, t_r が大きいほど, 剛性が大きくなる.

載荷方法(b)の場合, 図 10.1(a), (b), (c), (d)より, t_r によって初期剛性が異なり, その挙動は t_r が大きいほど, 初期剛性が大きくなる. これは, 載荷方法(b)の場合, 拘束材部に曲げの影響が入るため, このような挙動の違いがあらわれる. しかし, 座屈耐力に関しては, 載荷方法(a)の場合と同様に, $t_r=10$ 以上になると, 座屈耐力に対する拘束材の剛性の影響は極めて小さくなる. また座屈後耐力に関しても, $t_r=10 \sim 50$ の範囲では, 拘束材の剛性の影響は極めて小さくなる. また, 挙動についても載荷方法(a)の場合と同様に, $t_r=10$ 以上では, 荷重が一度目のピークを迎えた後, 応力の再分配がおり, 荷重が低下する. その低下した後, 荷重が再び上昇していくが, この剛性が t_r によって異なる. その挙動は t_r が大きいほど, 勾配が大きくなる.



(a) $e_s = b_r$



(b) $e_s = b_r/3$

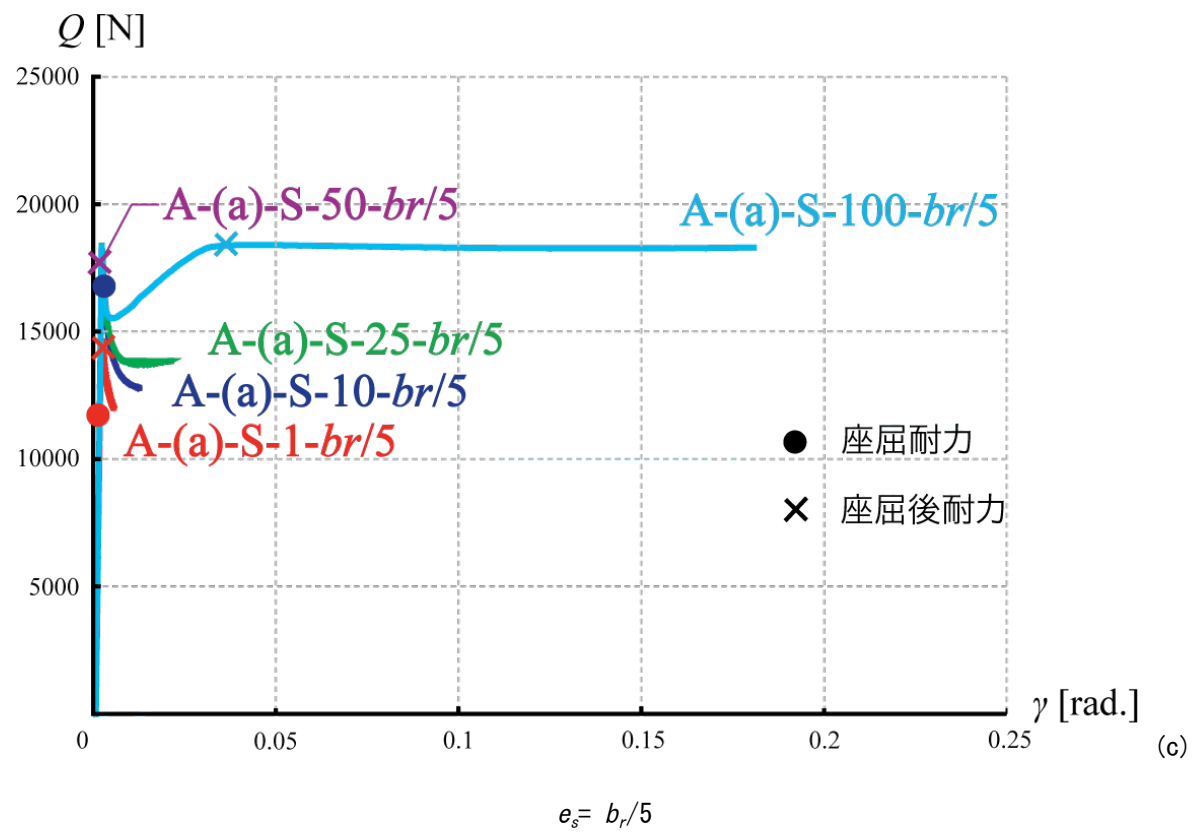
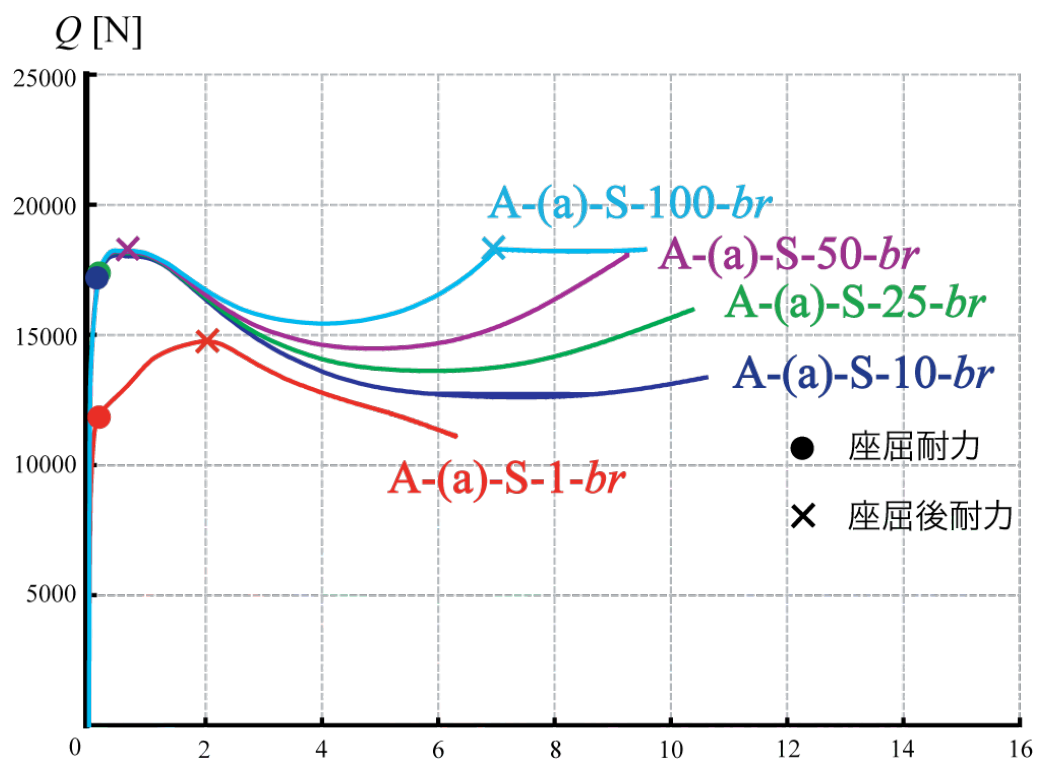
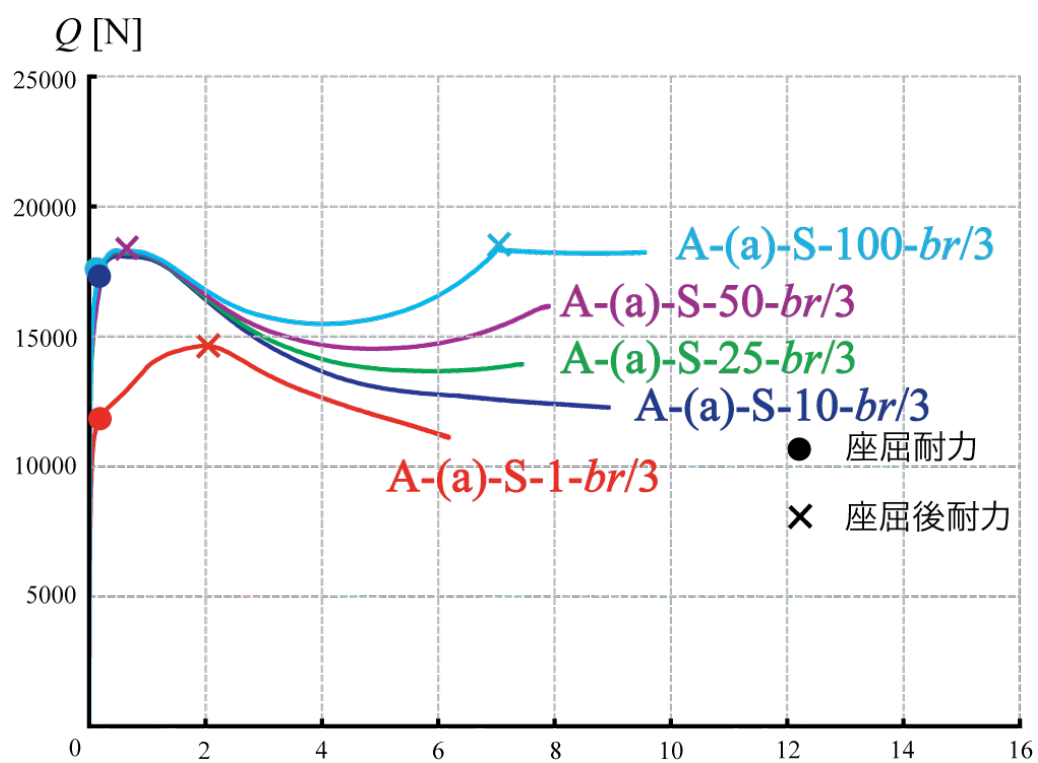


図 9.1 載荷方法(a) 荷重-面内変形角関係 (e_s : 一定)



(a) $e_s = b_r$



(b) $e_s = b_r/3$

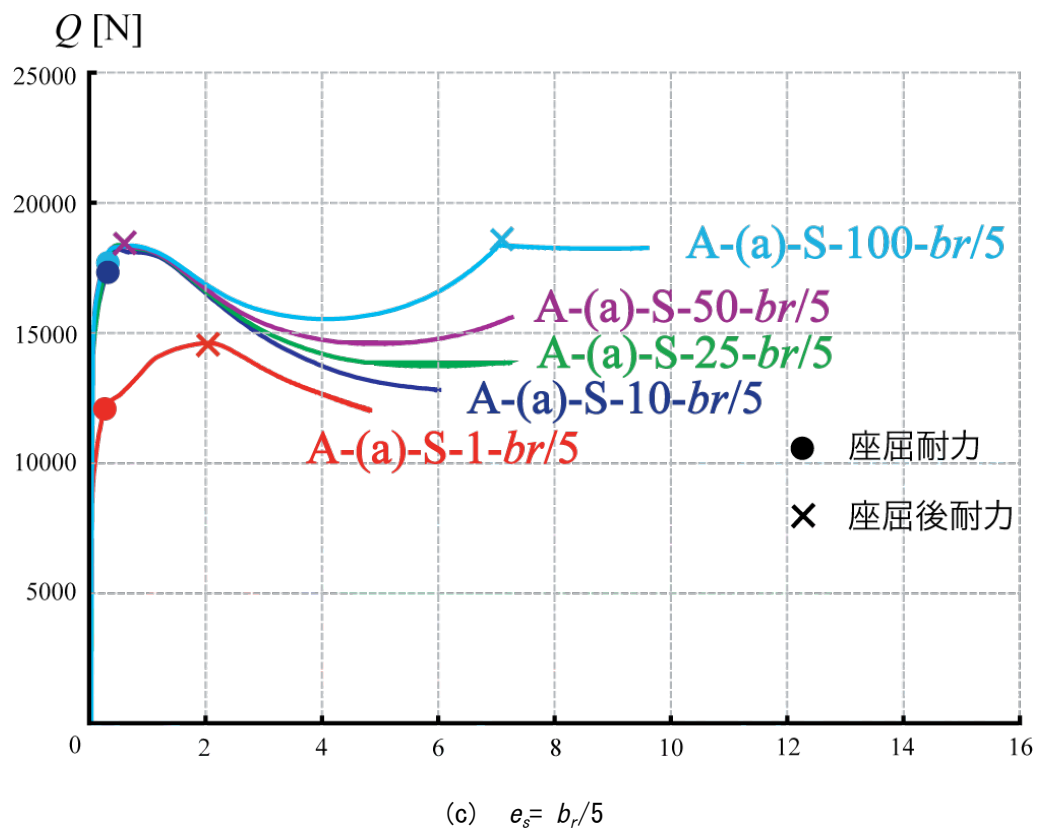
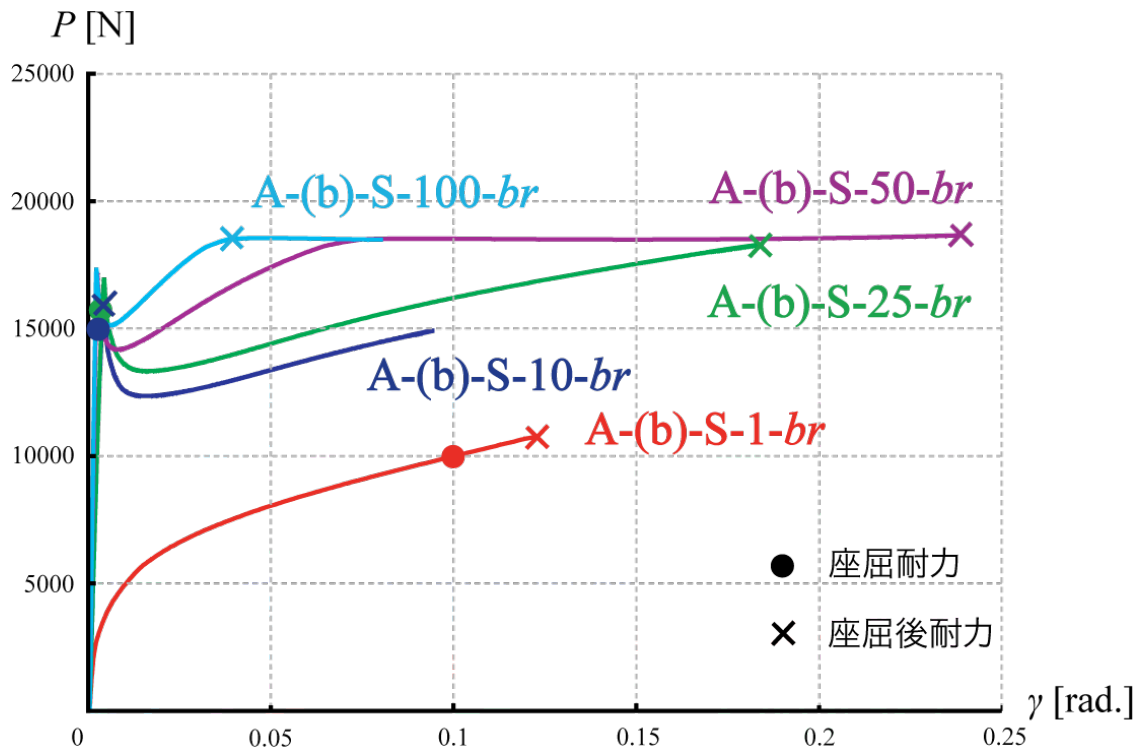
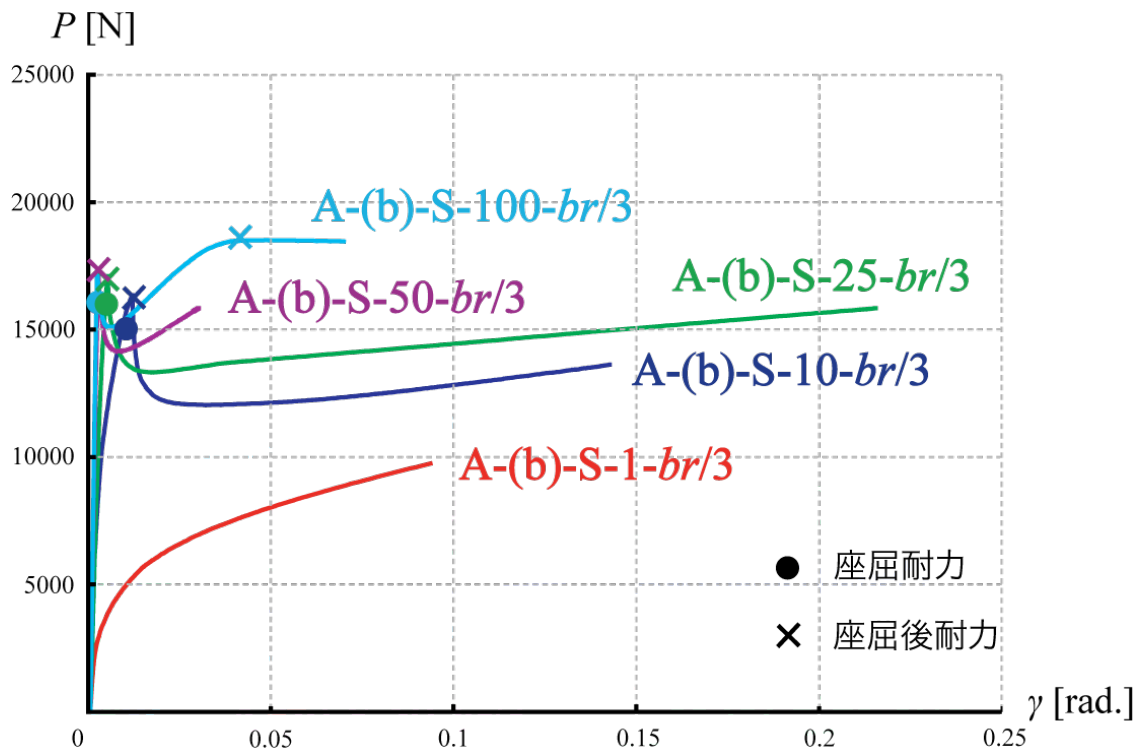


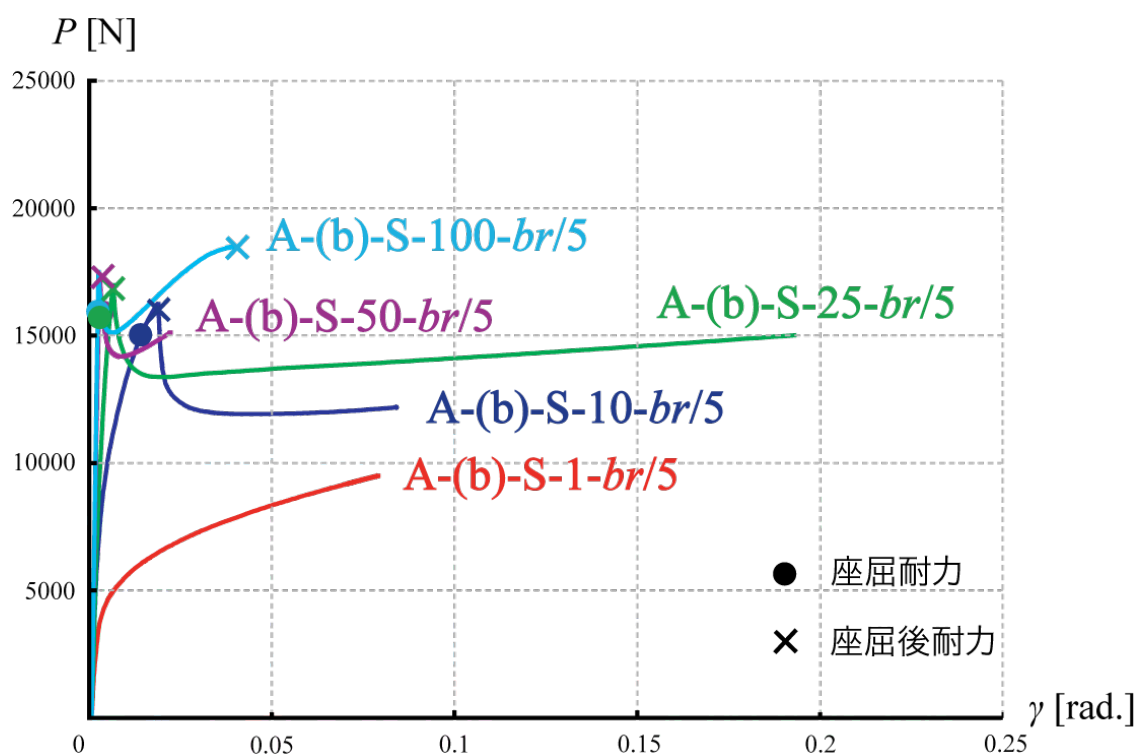
图 9.2 载荷方法(a) 荷重-面外变形关系 (e_s : 一定)



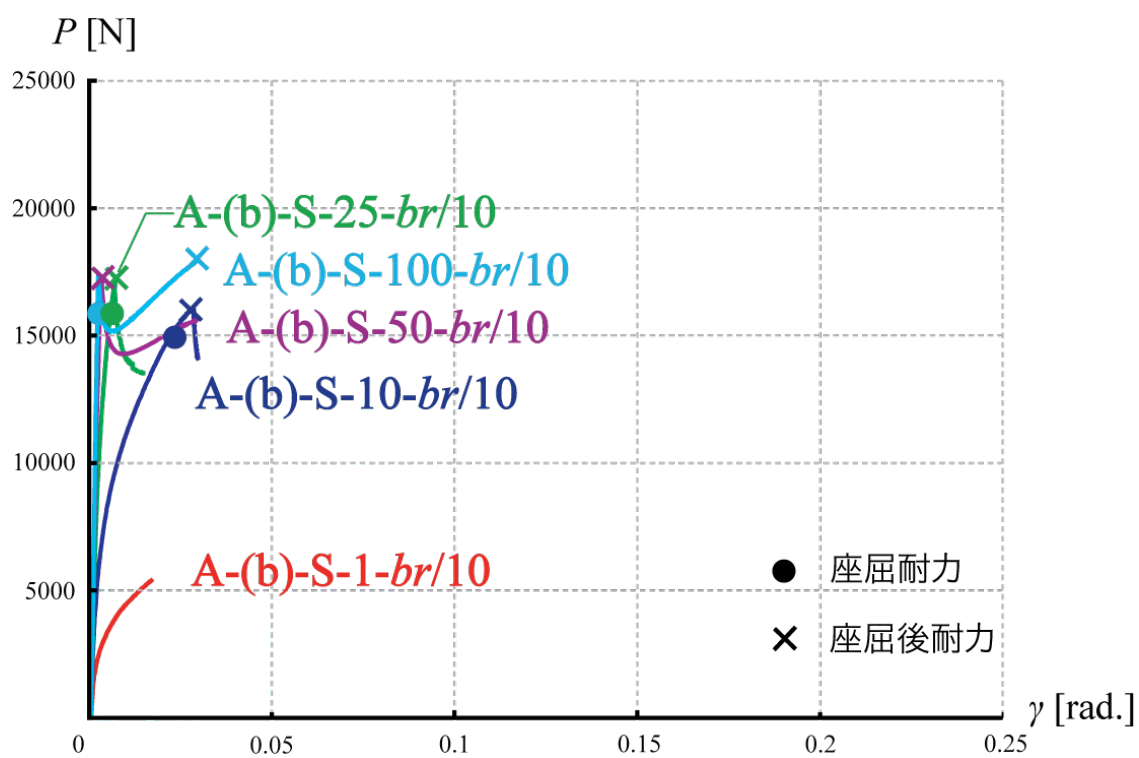
(a) $e_s = b_r$



(b) $e_s = b_r/3$

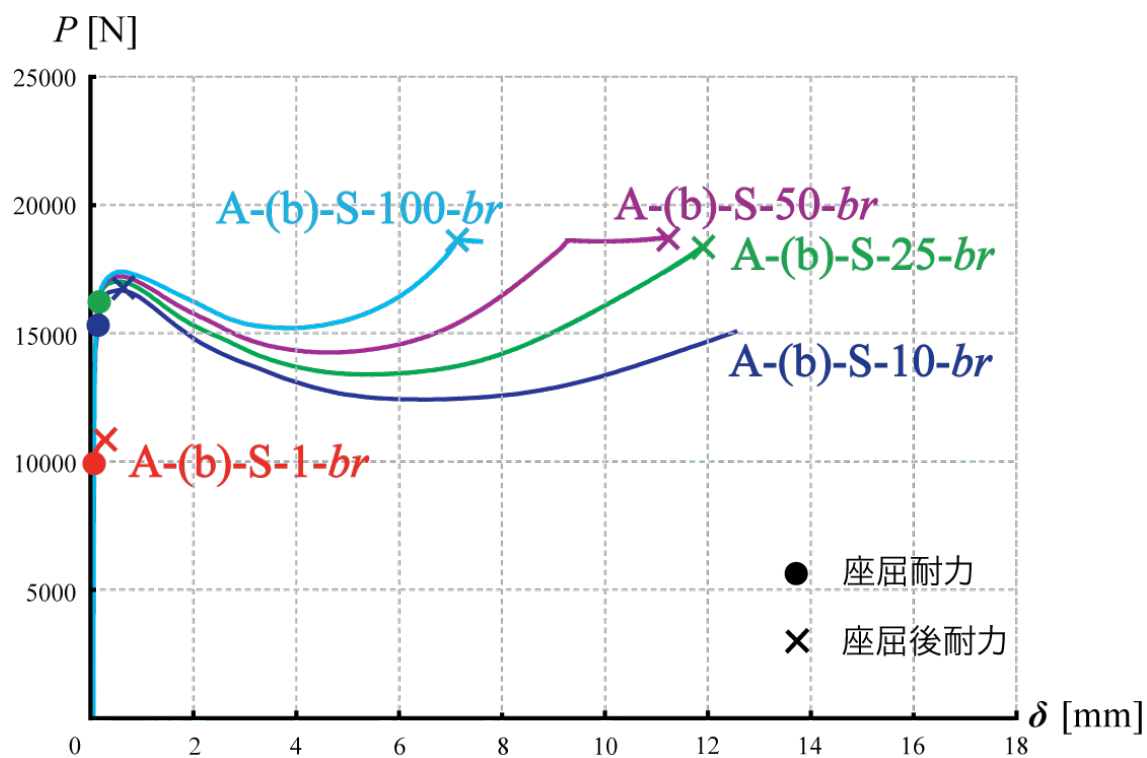


(c) $e_s = b_r/5$

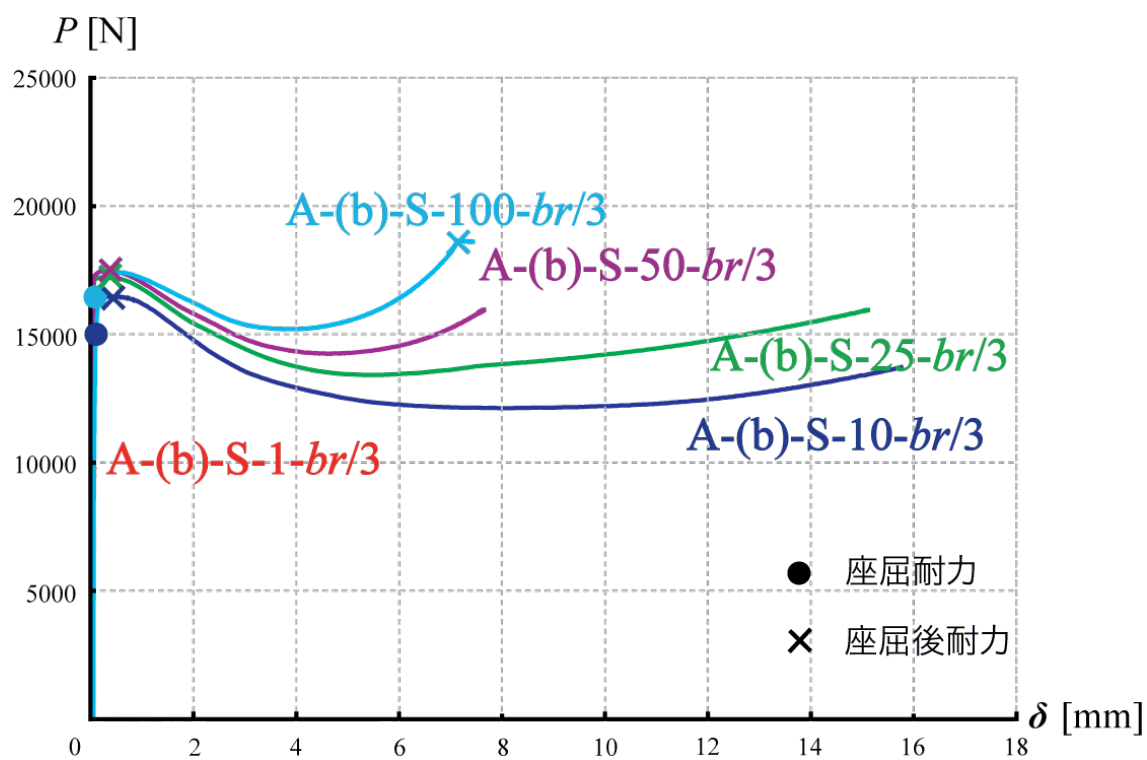


(d) $e_s = b_r/10$

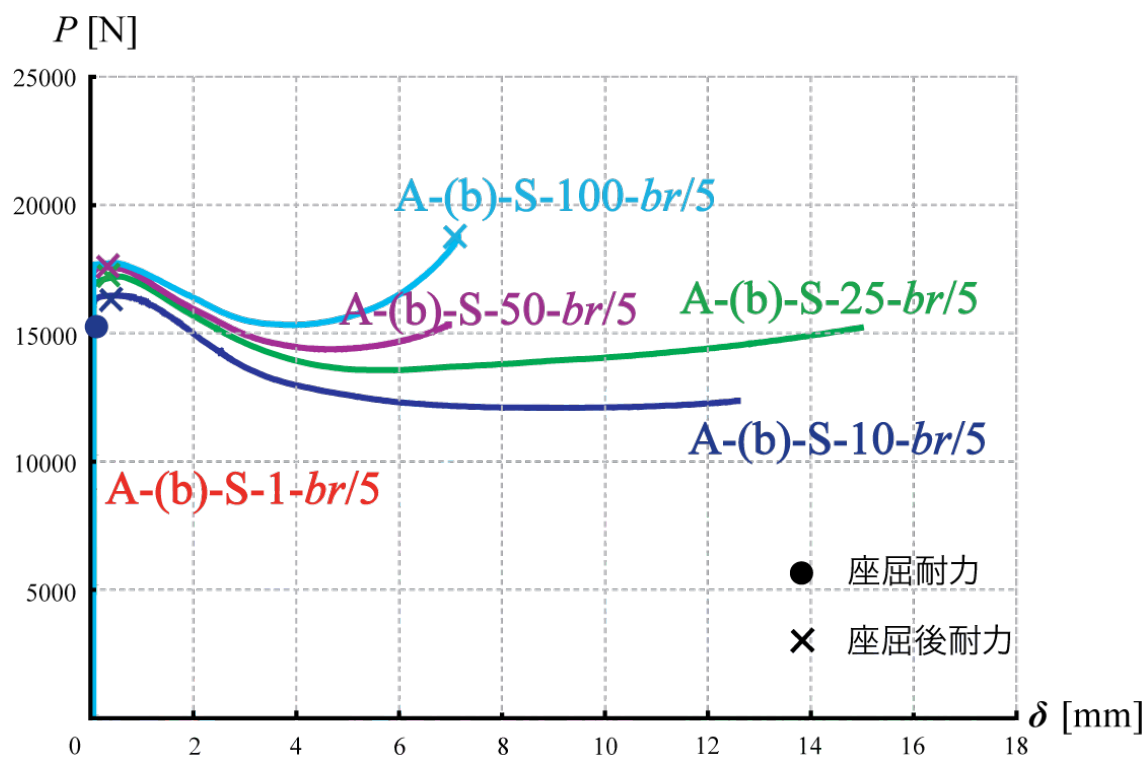
図 10.1 载荷方法(b) 荷重-面内変形角関係 (e_s : 一定)



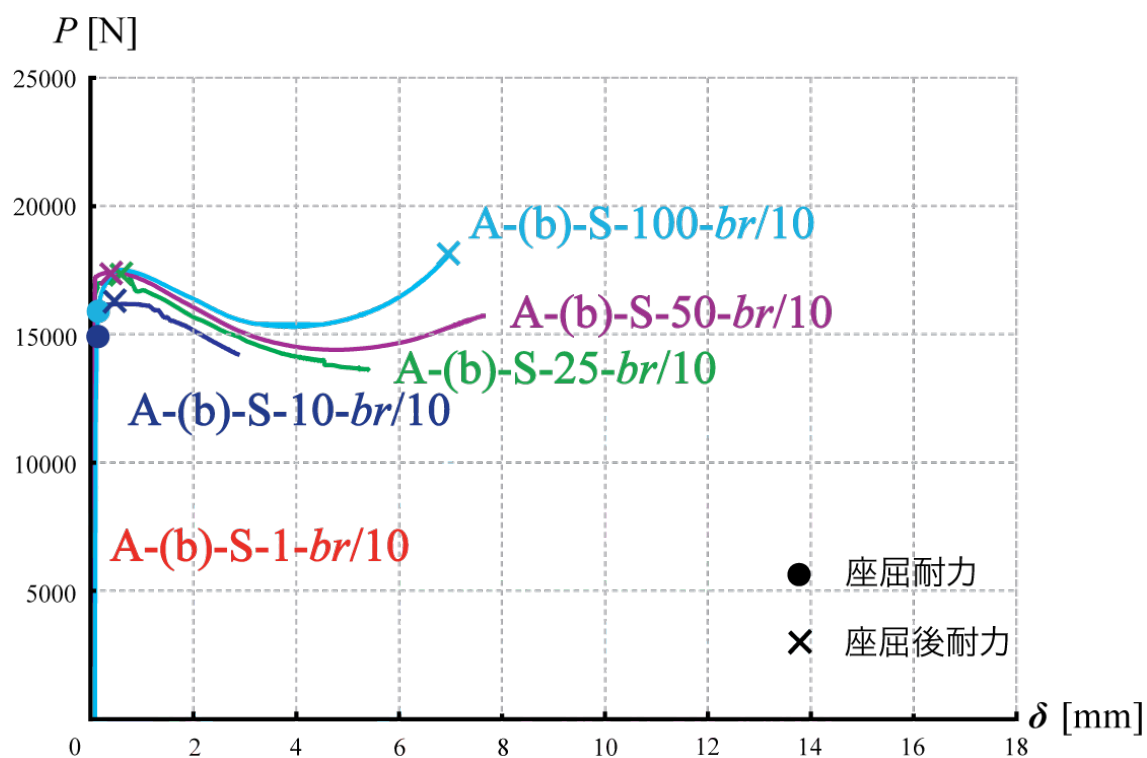
(a) $e_s = b_r$



(b) $e_s = b_r/3$



(c) $e_s = b_r/5$



(d) $e_s = b_r/10$

図 10.2 載荷方法(b) 荷重-面外変形関係 (e_s : 一定)

2.4.3 解析モデル B

2.4.3.1 拘束材部の曲げ剛性の影響

解析モデル B の載荷方法(a)の t_r ごとの弾塑性増分解析の結果の荷重-面内変形角関係を図 11.1, t_r ごとの弾塑性増分解析の結果の荷重-面外変形角関係を図 11.2, 載荷方法(b)の t_r ごとの弾塑性増分解析の結果の荷重-面内変形角関係を図 12.1, t_r ごとの弾塑性増分解析の結果の荷重-面外変形角関係を図 12.2 に示す. グラフの縦軸は荷重 Q 及び P , 横軸はせん断変形角 γ , 最大面外変形 δ とする. そして, 2.4.1 に示した座屈耐力および座屈後耐力の定義による, それぞれの座屈耐力, 座屈後耐力を示す.

載荷方法(a)の場合, 図 11.1, 図 11.2 より, それぞれの t_r で, e_s に関わらず初期剛性がよく一致しており, 座屈耐力および座屈後耐力に対する e_s の影響は見られない. しかし, $t_r=10, 25$ の場合では, 座屈後耐力発揮後の挙動に違いが見られる. 座屈後耐力発揮後, $e_s=b_r$ の場合, 拘束材部の短辺方向 b_r , h_r に要素が 1 つしか存在しないので, 拘束材部の短辺方向に応力勾配がないため, 面内方向変形が進行するにつれ鋼板部に応力が集中し, 鋼板部のみ降伏していく. しかし $e_s=b_r/3, b_r/5, b_r/10$ の場合, 拘束材部の短辺方向 b_r, h_r にも要素が複数存在するので, 応力勾配があり, 面内方向変形が進行するにつれ, 鋼板部だけでなく拘束材部も降伏していく部分がある. このことにより, 座屈後耐力発揮後の挙動に違いがあると考えられる. また, $t_r=50, 100$ では解析結果の挙動の違いが見られない. これは, 拘束材部の剛性が大きいので, 拘束材部に降伏する部分がないため, 全体の挙動には e_s の影響が表れないと考えられる.

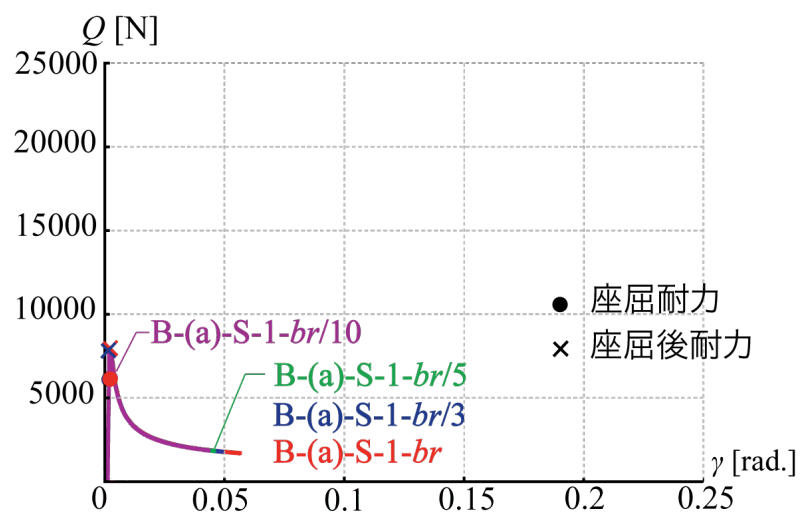
また, e_s の大きさを小さくすると, 正方形板要素数が多くなるため, 数値解析の負荷が大きくなるため, e_s の大きくなるにつれて, 得られる数値解析解が少なくなる傾向がわかる.

載荷方法(b)の場合, 図 12.1 (a), 図 12.2 (a) より $t_r=1$ では e_s に関わらず解析結果全体の挙動が同じであり, 座屈耐力および座屈後耐力に対する e_s の影響は見られない.

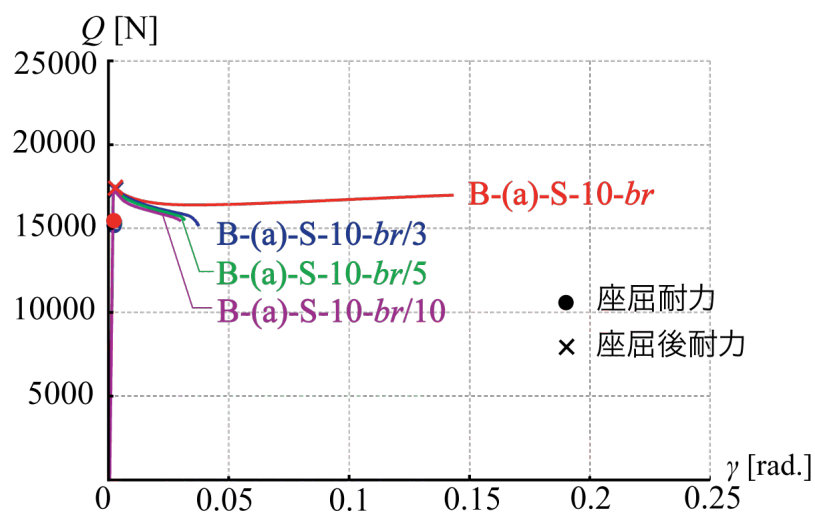
$t_r=10$ では, 初期剛性が一致しており, 座屈耐力に至るまでの挙動は同じである. しかし, 座屈耐力発揮後, 荷重がピークを迎え, 応力の再分配が起こり荷重が低下し, その後の挙動が, $e_s=b_r$ では再び荷重が上昇するのに対し, $e_s=b_r/3, b_r/5, b_r/10$ では漸減するという違いがある. $t_r=25$ では座屈耐力発揮後, 荷重がピークを迎え, 応力の再分配が起こり荷重が低下し, その後の挙動が, e_s に関わらず再び荷重が上昇するが, $e_s=b_r$ のみが剛性が大きくなり, $e_s=b_r/3, b_r/5, b_r/10$ では剛性に違いはみられない. この挙動の違いは, 載荷方法(b)の場合, 解析モデルに対し曲げとせん断を与えるため, 鋼板部がせん断を受け持ち, 拘束材部に曲げが入り, その拘束材部に入る曲げは, e_s の大きさに影響が出るためである. $e_s=b_r$ の場合, 拘束材部の短辺方向 b_r , に要素が 1 つしか存在しないので, 応力勾配がないため, 拘束材には曲げの影響が少なく, 面内方向変形が進行するにつれ鋼板部に応力が集中し, 鋼板部のみ降伏していく. しかし $e_s=b_r/3, b_r/5, b_r/10$ の場合, 拘束材部の短辺方向 b_r にも要素が複数存在するので, 応力勾配があり, 面内方向変形が進行するにつれ, 鋼板部だけでなく拘束材部にも曲げ

の影響が入り，鋼板部，拘束材部ともに降伏していくためであると考えられる．これらの考えられる理由から，座屈後耐力については e_s の影響が見られる．また， $t_r=50, 100$ では解析結果の挙動の違いが見られなく，座屈耐力，座屈後耐力に対する e_s の影響が見られない．これは，拘束材部の剛性が大きいいため，拘束材部に降伏する部分がないためだと考えられる．

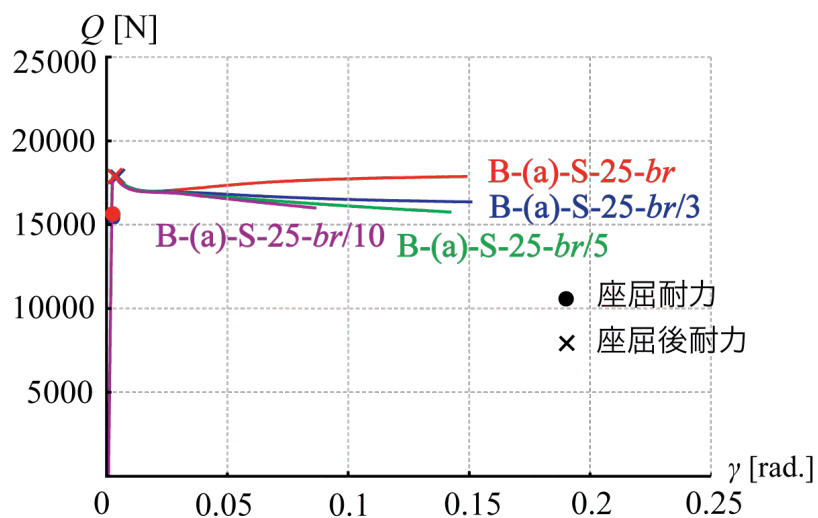
また，載荷方法(a)の場合と同様に， e_s の大きさを小さくすると，正方形板要素数が多くなるため，数値解析の負荷が大きくなるため， e_s の大きくなるにつれて，得られる数値解析解が少なくなる傾向がわかる．



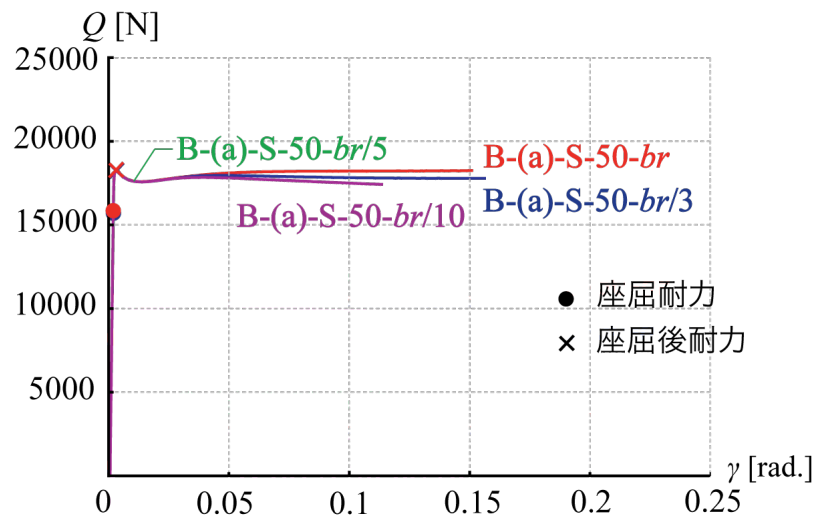
(a) $t_r=1$



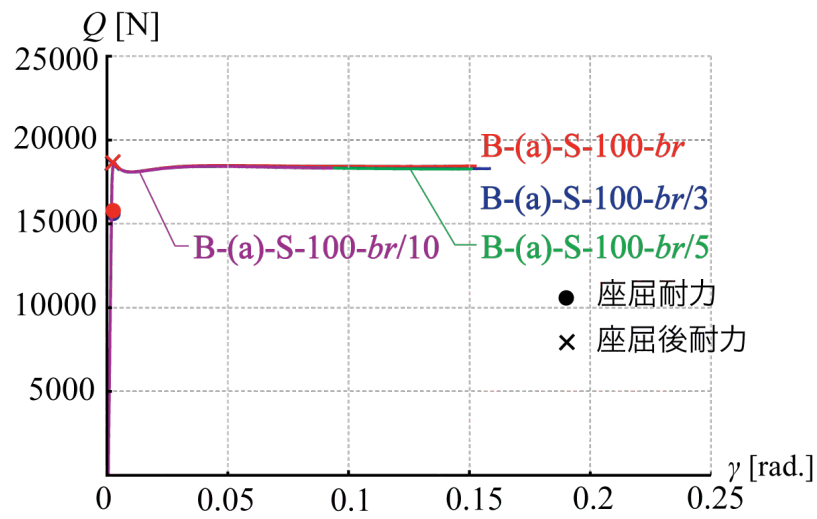
(b) $t_r=10$



(c) $t_r=25$

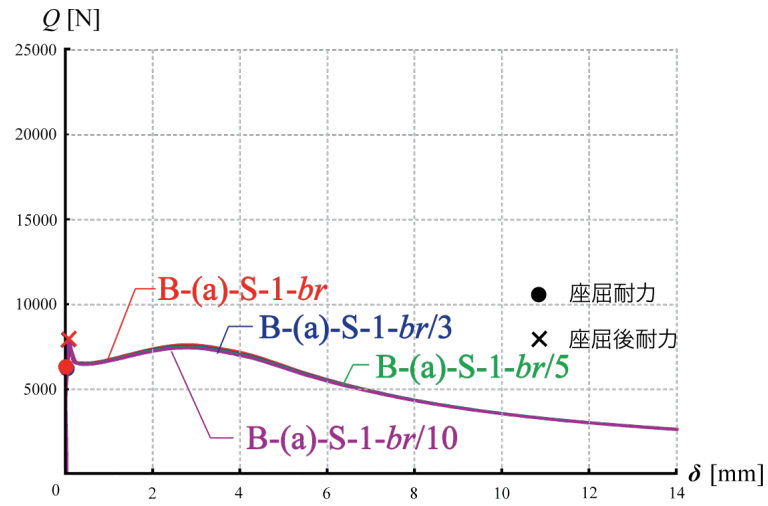


(d) $t_r=50$

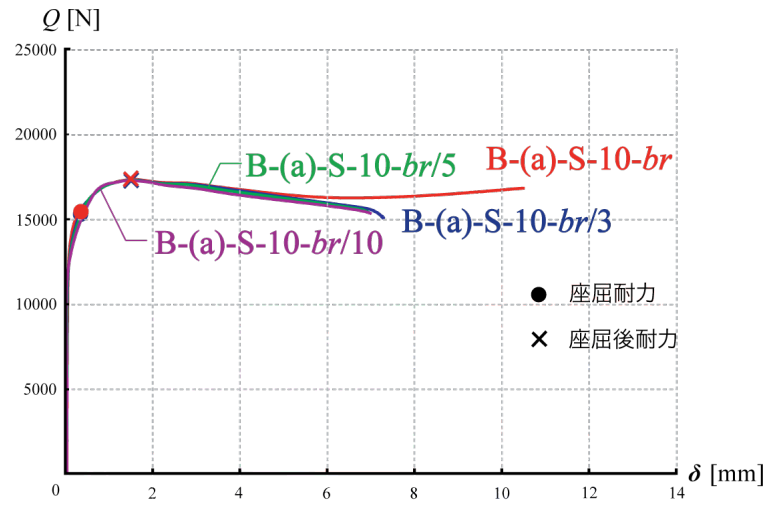


(e) $t_r=100$

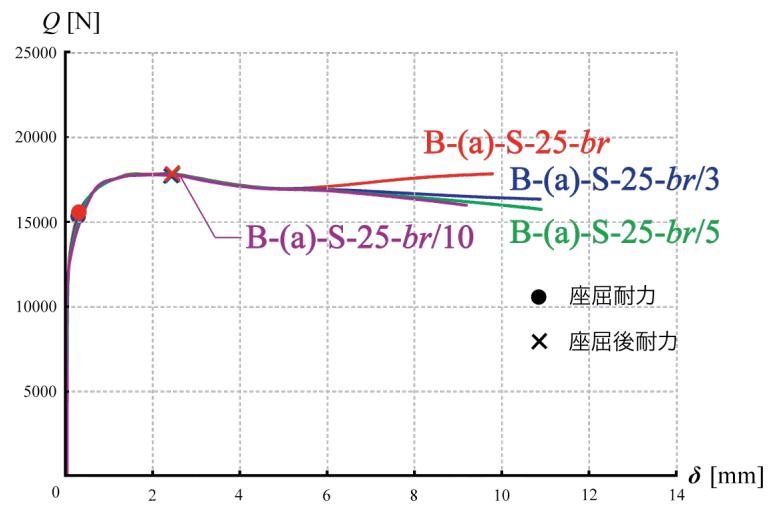
図 11.1 載荷方法(a) 荷重-面内変形角関係 (t_r : 一定)



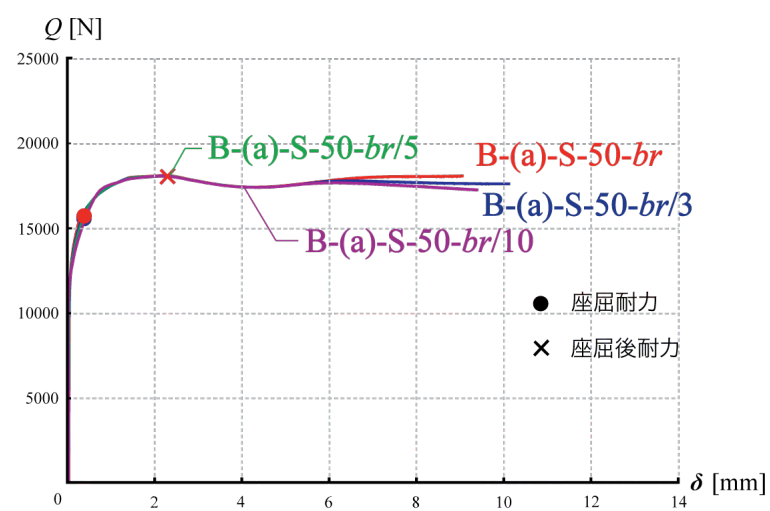
(a) $t_r=1$



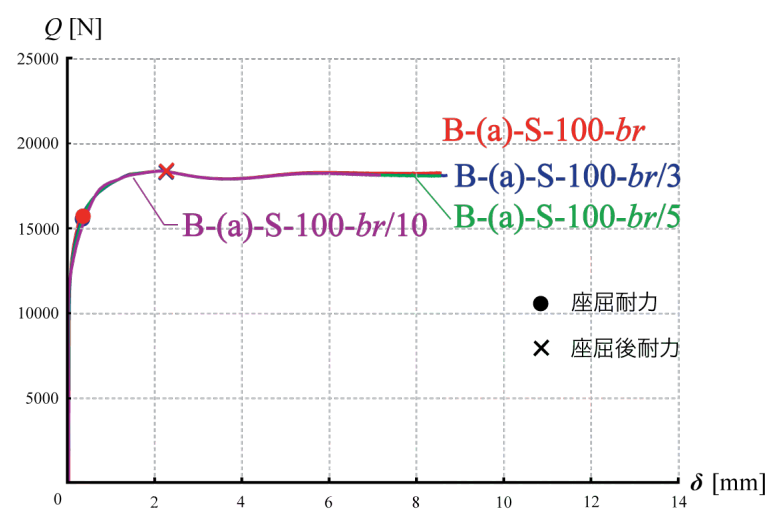
(b) $t_r=10$



(c) $t_r=25$

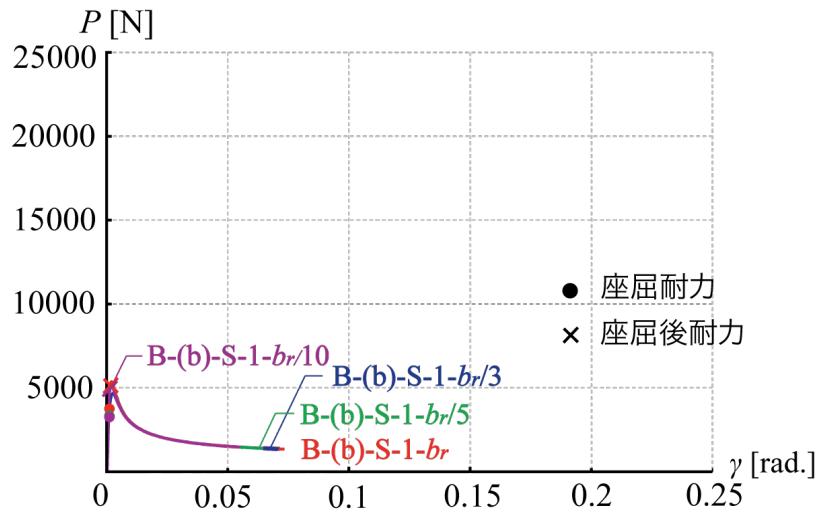


(d) $t_r=50$

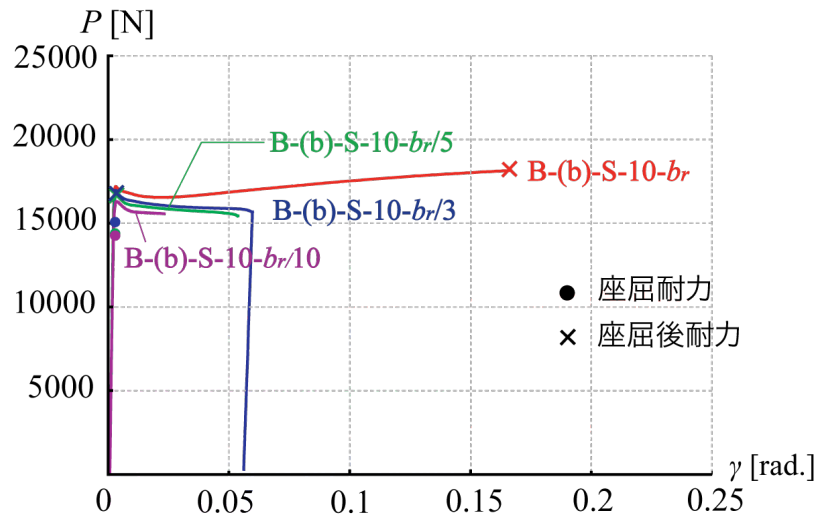


(e) $t_r=100$

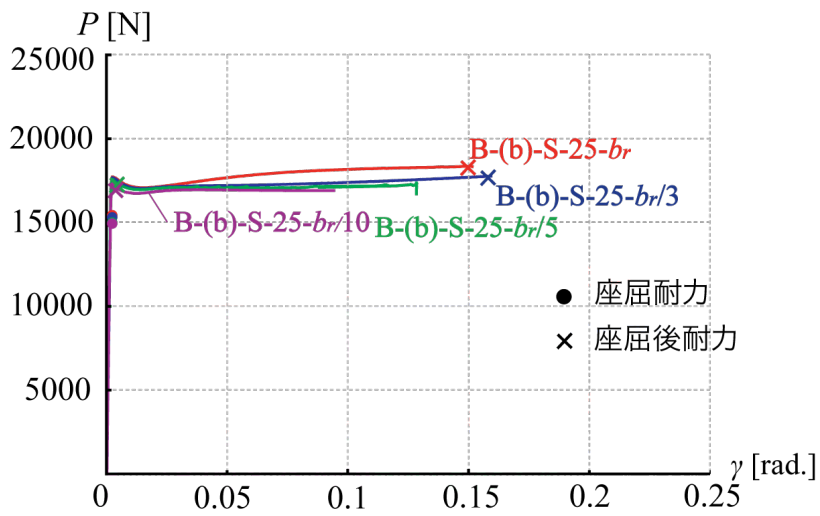
図 11.2 載荷方法(a) 荷重-面外変形関係 (t_r : 一定)



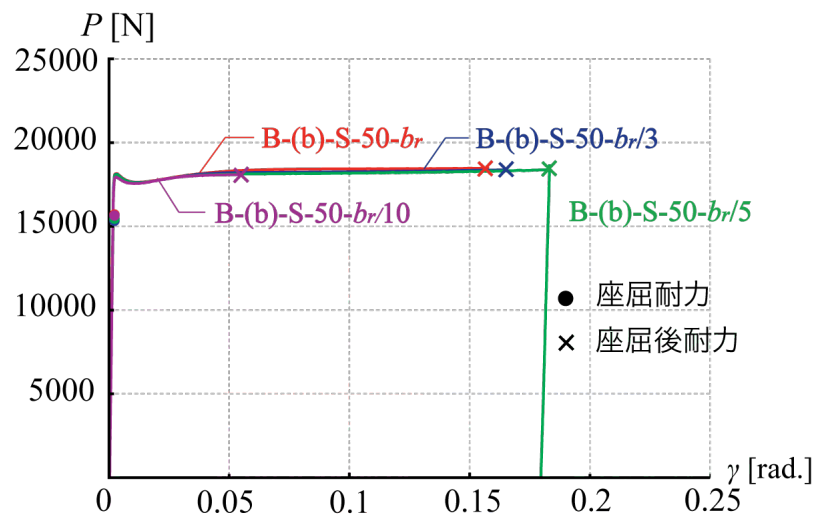
(a) $t_r = 1$



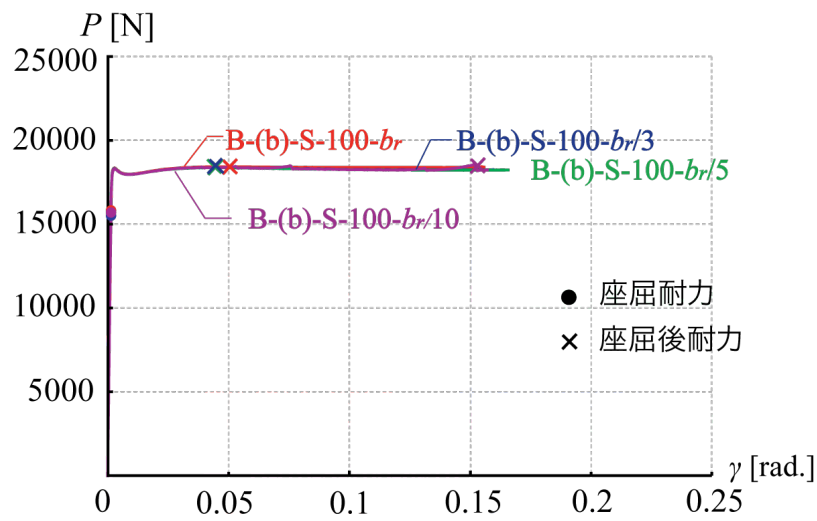
(b) $t_r = 10$



(c) $t_r = 25$

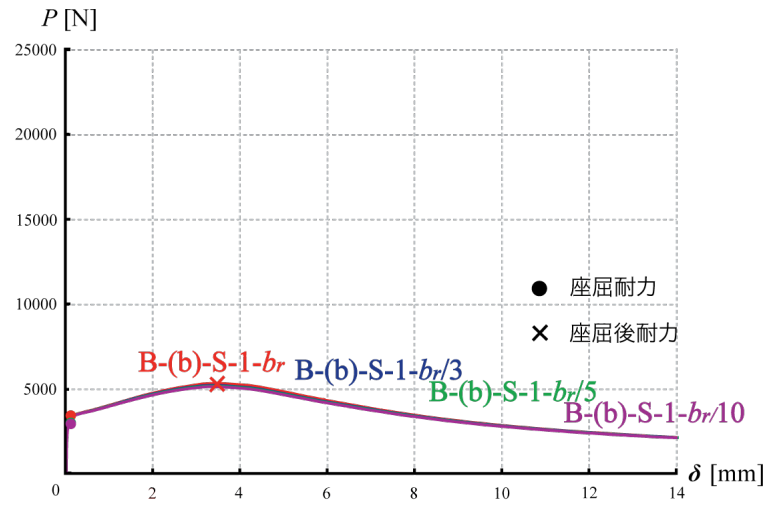


(d) $t_r=50$

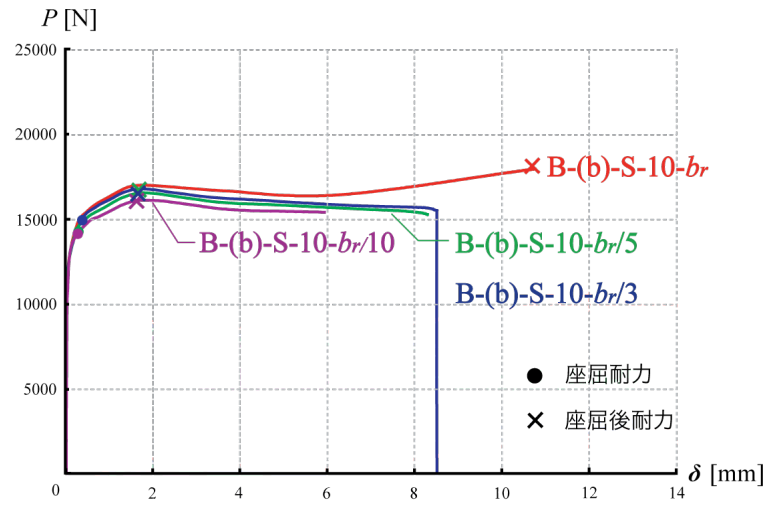


(e) $t_r=100$

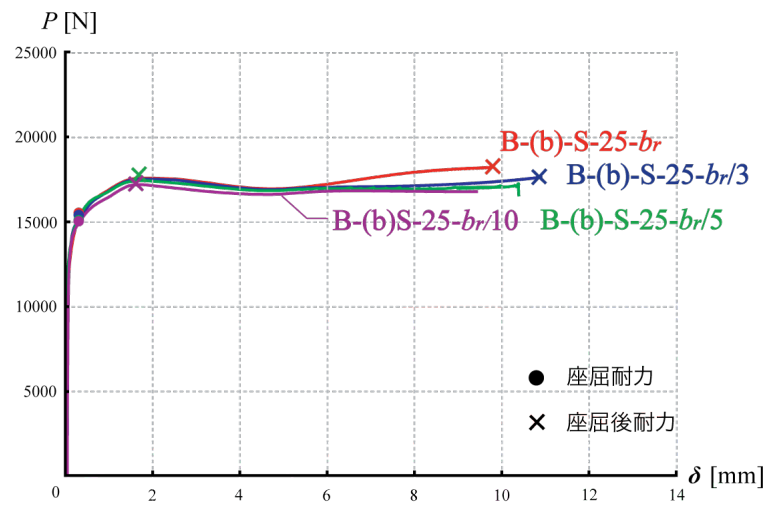
図 12.1 載荷方法 (b) 荷重-面内変形角関係 (t_r : 一定)



(a) $t_r=1$



(b) $t_r=10$



(c) $t_r=25$

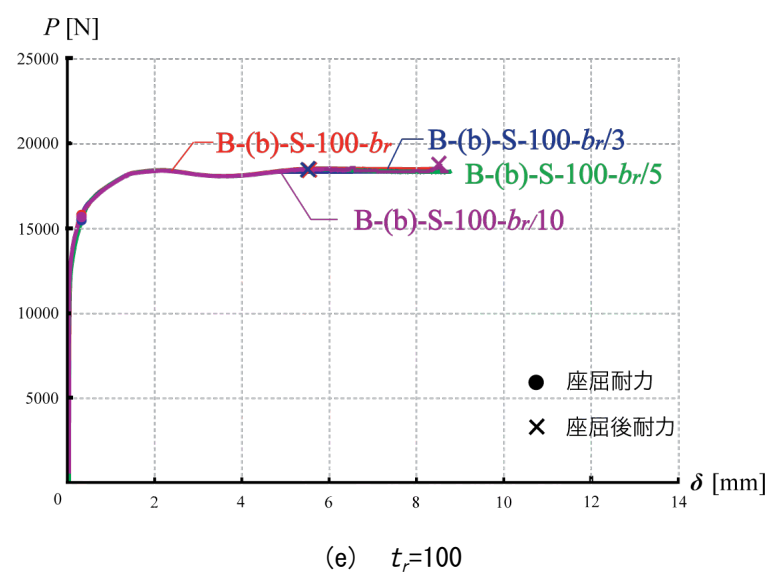
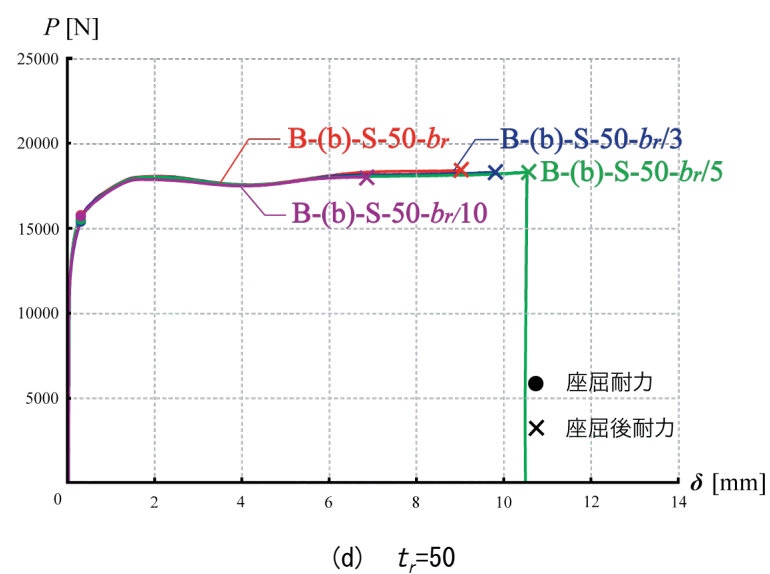
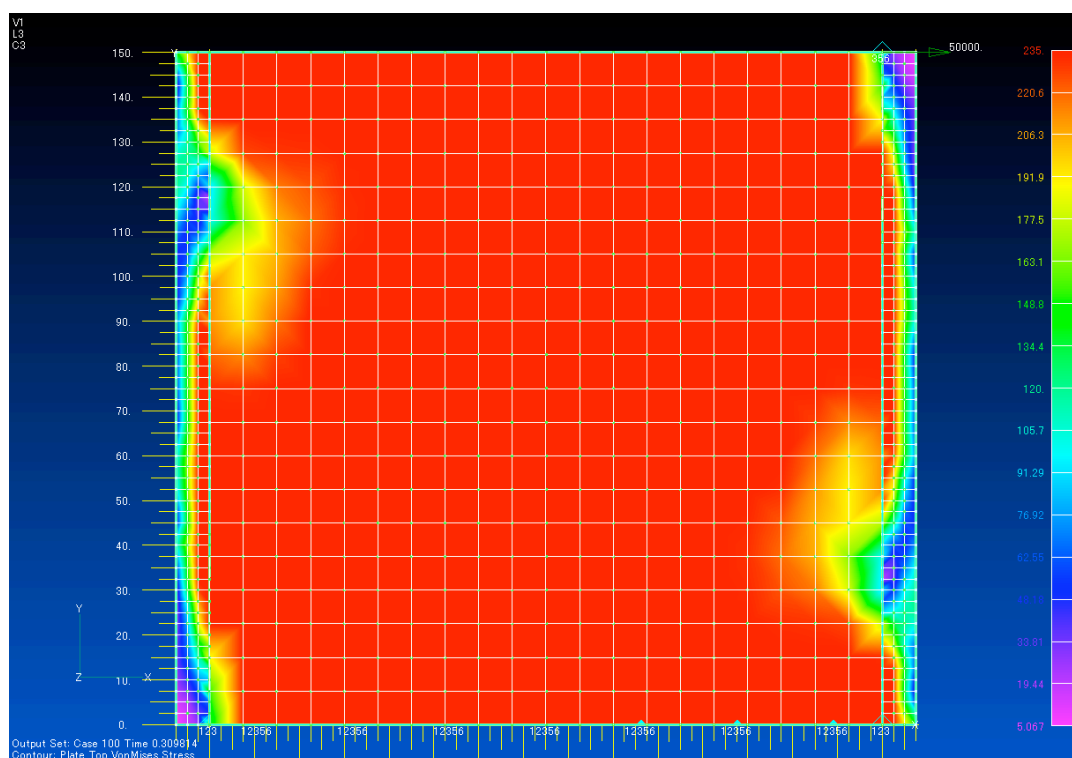


図 12.2 載荷方法(b) 荷重-面外変形関係 (t_r : 一定)

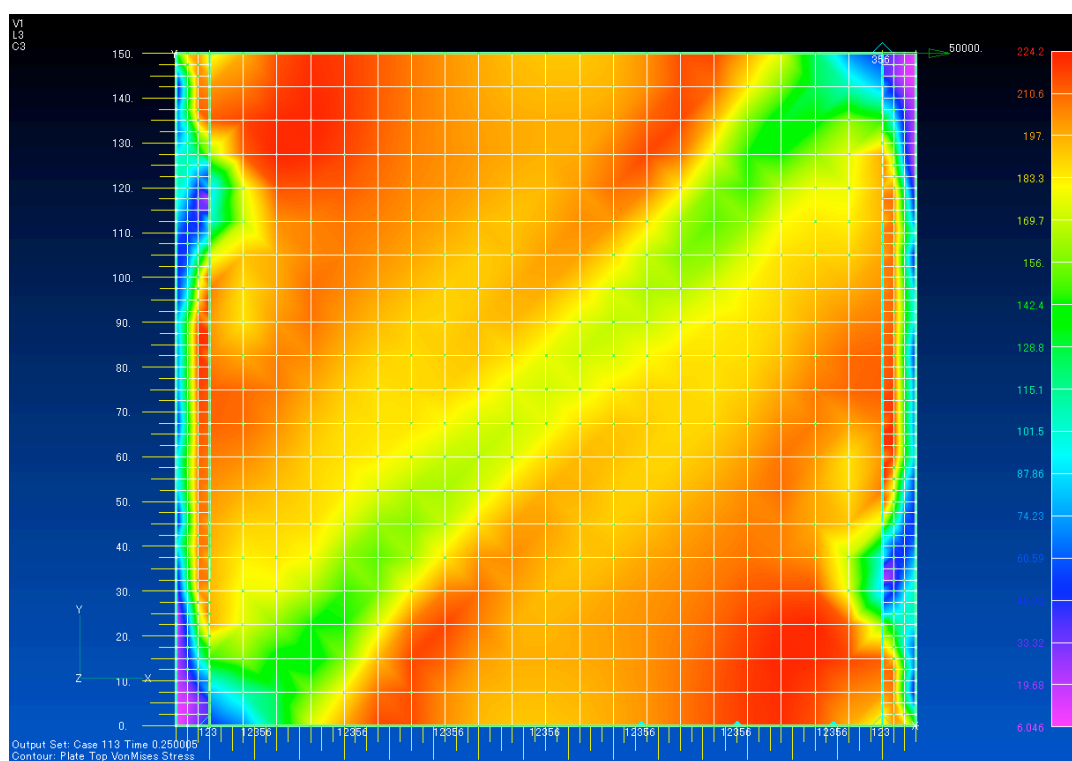
ここで、図 12.1(b)，(d)，図 12.2(b)，(d)より B-S-10- $t_f/3$ が面内変形角 $\gamma=0.0589$ ，B-S-50- $t_f/5$ が面内変形角 $\gamma=0.182$ を境に急激に荷重が低下する挙動について考察する．ここでも、主応力コンター図を用いる．図 13 に B-S-10- $t_f/3$ ，図 14 に B-S-50- $t_f/5$ の荷重が急激に低下していく時の、主応力コンター図を示す．それぞれの 15000N 時の主応力コンター図を示す．主応力レベルは、それぞれの図右にあるようなパラメータの配色になっており、赤に近づくほど降伏応力度 235N/mm^2 に近づき、紫に近づくほど、 0N/mm^2 に近づく．

図 13(a) より、B-S-10- $t_f/3$ の場合、荷重が低下する直前は鋼板部がほぼ全面降伏している．その後、面内変形角が減少しながら、図 13(b) のように鋼板部全体の主応力の値が小さくなっており、特に鋼板部左下から右上にかけての斜張力場の部分が特に低下していることがわかる．その後、図 13(c) の状態になり、斜張力場を中心として、さらに主応力の値が小さくなっていく．

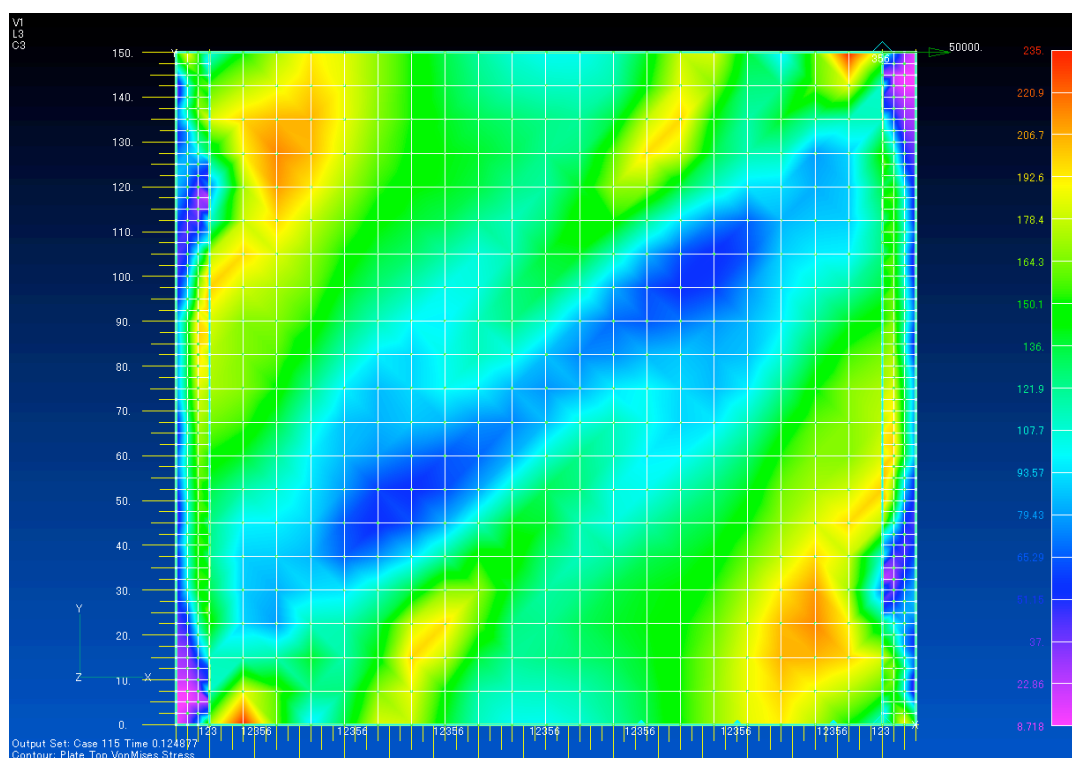
図 14 より、B-S-50- $t_f/5$ の場合も B-S-10- $t_f/3$ と同様な現象がおこっている．これは図 12.1(b)，(d)，図 12.2(b)，(d)より荷重が低下しながら、面内変形角が減少していることがわかる．つまり主応力の値が減少し、それによって荷重が低下し、また面内変形角が減少していることから、弾性除荷がおこっていると考えられる．



(a) $P=15490\text{N}$ 時

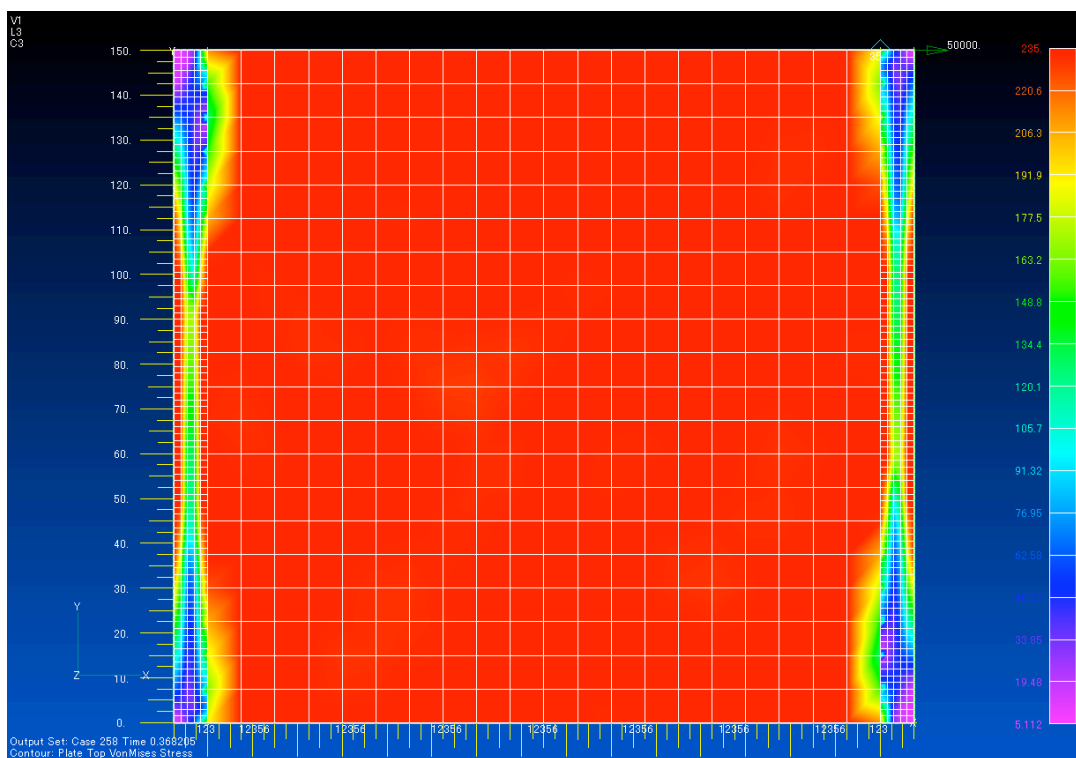


(b) $P=12500\text{N}$ 時

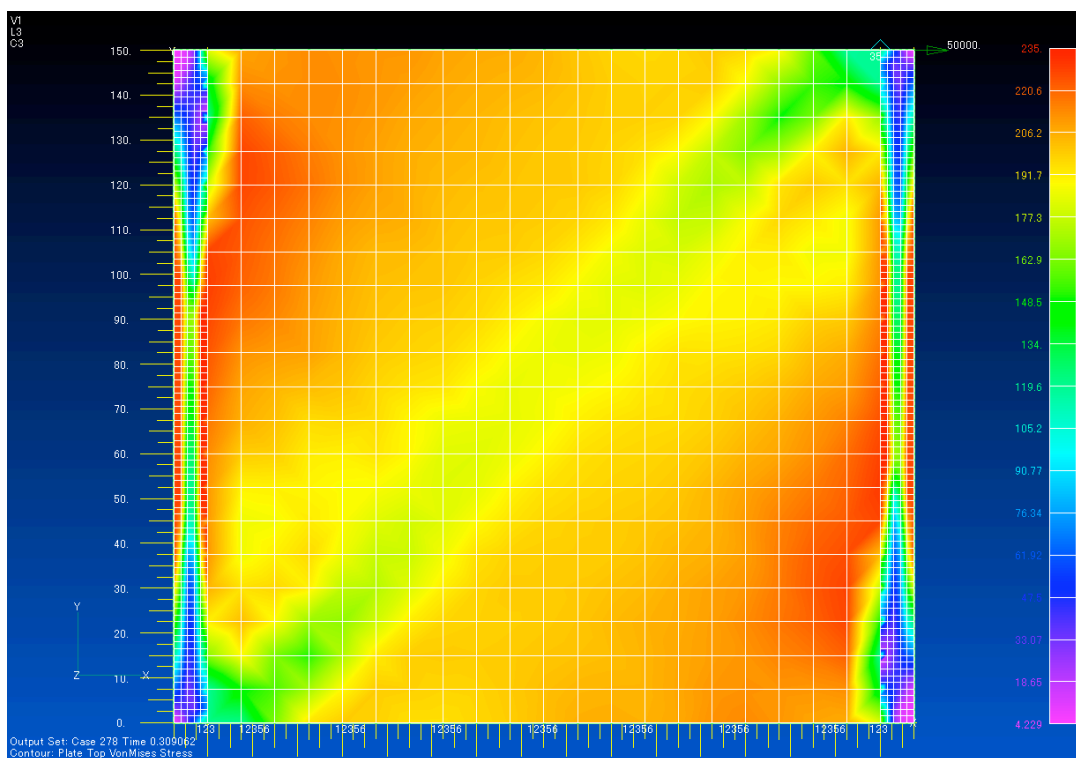


(c) $P=6240\text{N}$ 時

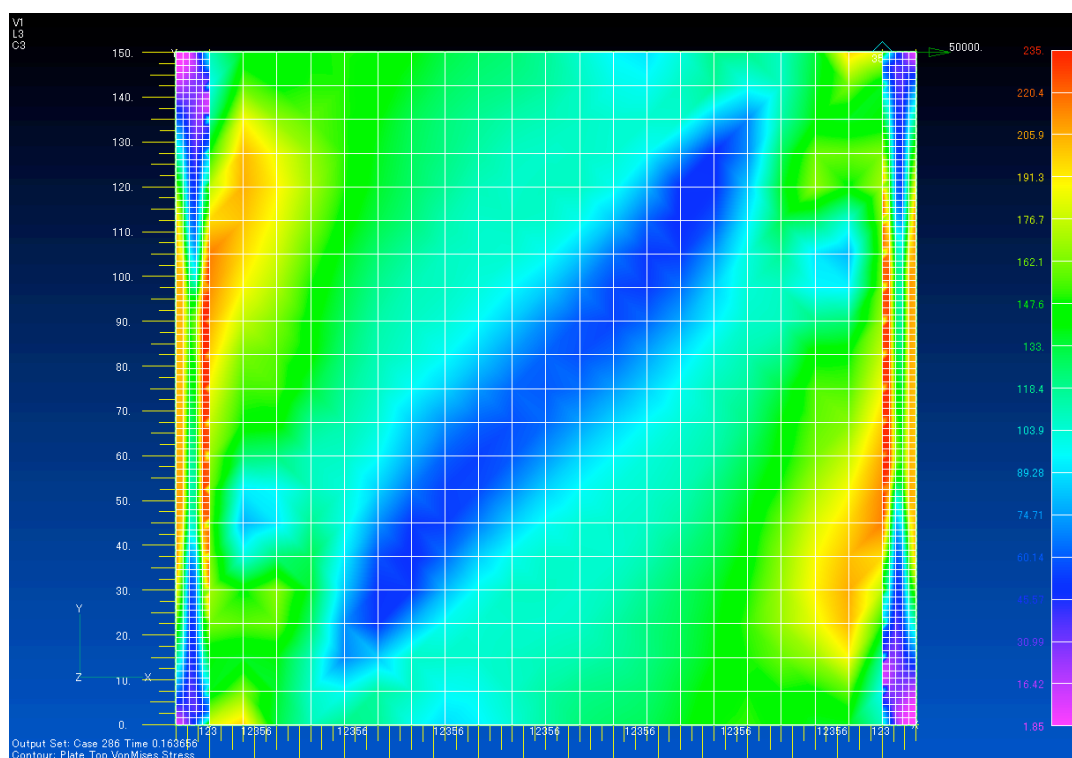
図 13 B-S-10- $t_r/3$ 主応力コンター図



(a) $P=18410\text{N}$ 時



(b) $P=15450\text{N}$ 時



(c) $P=8180\text{N}$ 時

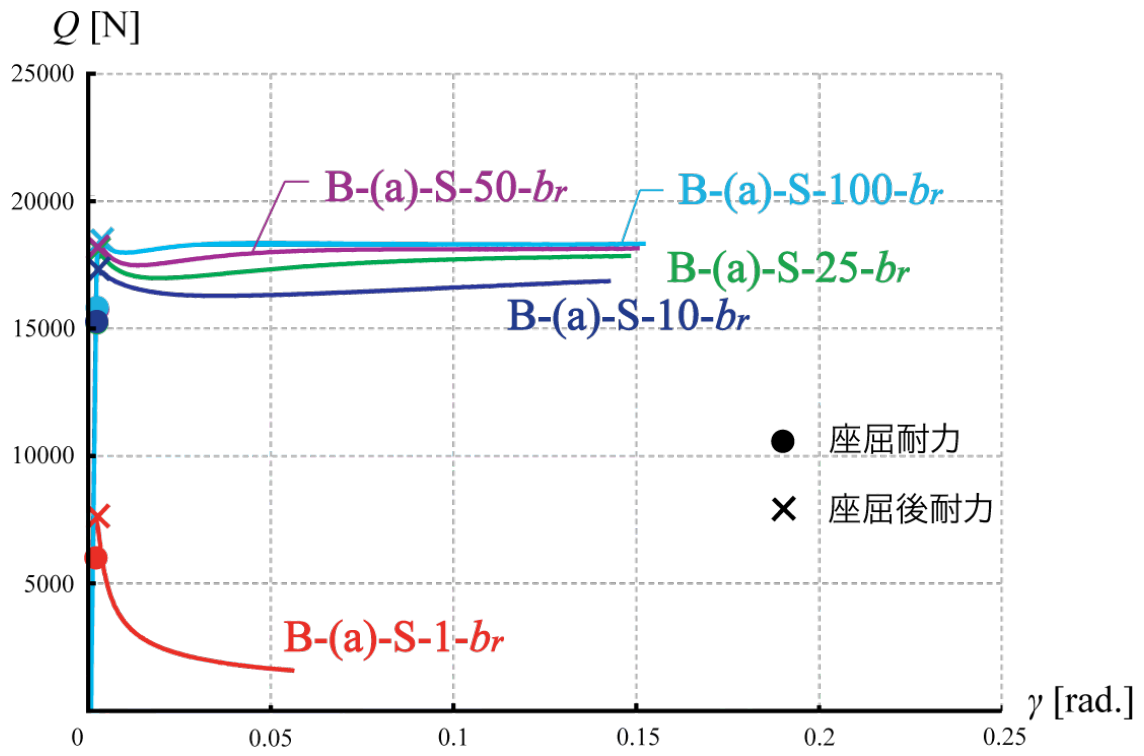
図 14 B-S-50- $t_r/5$ 主応力コンター図

2.4.3.2 拘束材部の剛性の影響

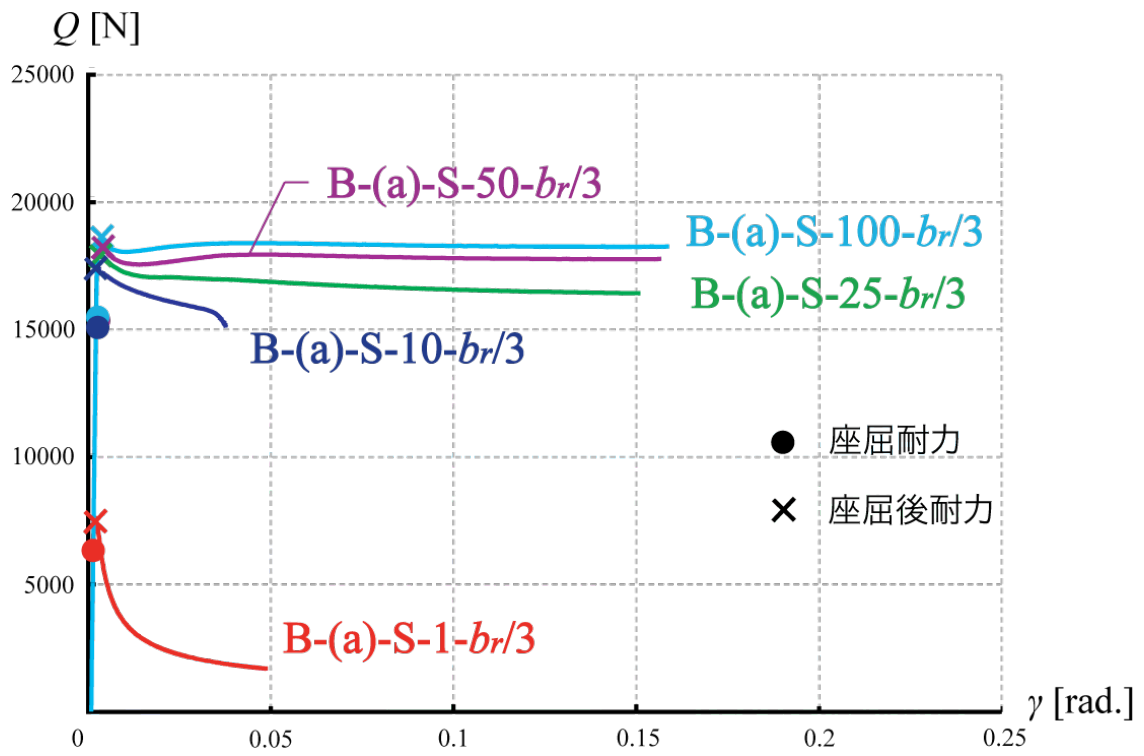
解析モデル B の載荷方法(a)の e_s ごとの弾塑性増分解析の結果の荷重-面内変形角関係を図 15.1, e_s ごとの弾塑性増分解析の結果の荷重-面外変形角関係を図 15.2, 載荷方法(b)の e_s ごとの弾塑性増分解析の結果の荷重-面内変形角関係を図 16.1, e_s ごとの弾塑性増分解析の結果の荷重-面外変形角関係を図 16.2 に示す. 2.4.3.1 と同様に, グラフの縦軸は荷重 Q および P , 横軸はせん断変形角 γ , 最大面外変形 δ とする. そして, 2.4.1 に示した座屈耐力および座屈後耐力の定義による, それぞれの座屈耐力, 座屈後耐力を示す.

載荷方法(a)の場合, 図 15.1, 図 15.2 より, それぞれの e_s で, t_r に関わらず初期剛性がよく一致しており, $t_r=10$ 以上になると, 座屈耐力および座屈後耐力に対する拘束材の剛性の影響は極めて小さくなる. 挙動については, $t_r=10$ 以上では, 荷重が初期剛性から線形で座屈後耐力発揮後, 応力の再分配がおこり, 荷重が低下する. その低下した後, 剛性が t_r によって異なり, t_r が大きいほど, 剛性が大きくなる.

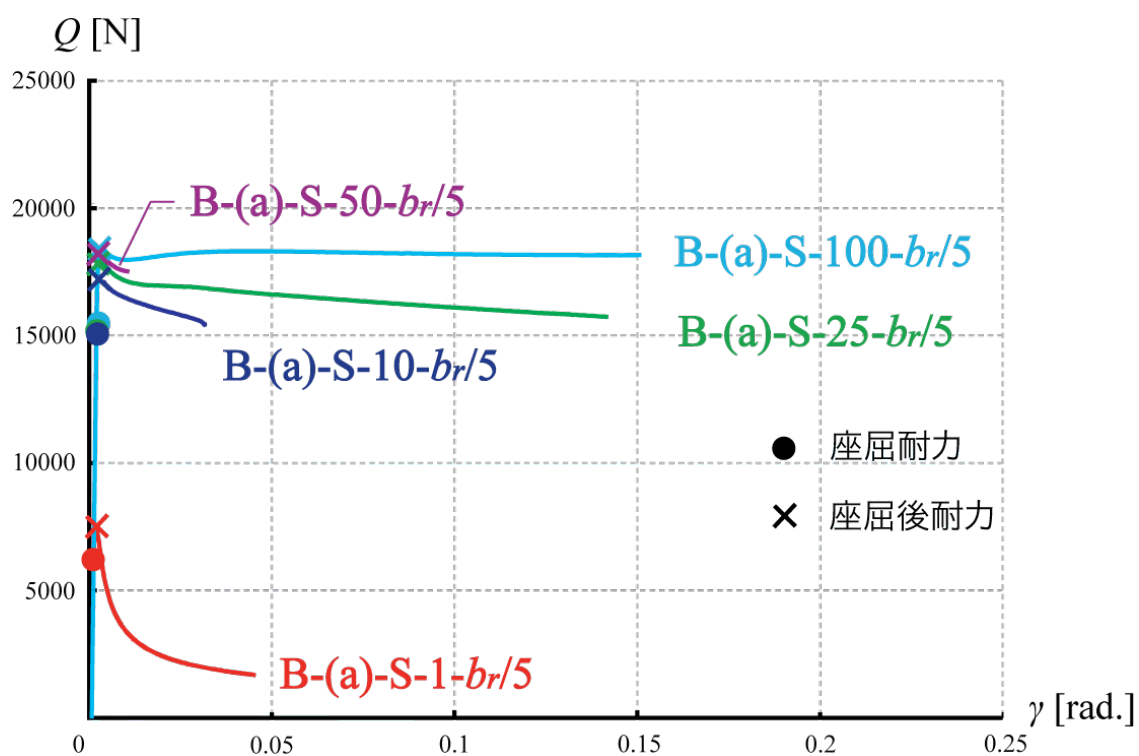
載荷方法(b)の場合, 図 16.1, 図 16.2 より, それぞれの e_s で, t_r に関わらず初期剛性がよく一致しており, $t_r=10$ 以上になると, 載荷方法(a)と同様に, 座屈耐力に対する拘束材の剛性の影響は極めて小さくなる. 座屈後耐力については, $e_s=b_r$ では, $t_r=10$ 以上で荷重が初期剛性から線形で一度目のピークを迎えた後, 応力の再分配がおこり, 荷重が低下する. その低下した後, 荷重が再び上昇していくため, 座屈後耐力に対する拘束材の剛性の影響は極めて小さくなる. しかし, $e_s=b_r/3, b_r/5, b_r/10$ では $t_r=10$ の場合, 荷重が初期剛性から線形で一度目のピークを迎えた後, 応力の再分配がおこり, 荷重が低下し, そのまま漸減する. $t_r=25$ 以上で荷重が初期剛性から線形で一度目のピークを迎えた後, 応力の再分配がおこり, 荷重が低下する. その低下した後, 荷重が再び上昇していくため, 座屈後耐力に対する拘束材の剛性の影響は極めて小さくなる.



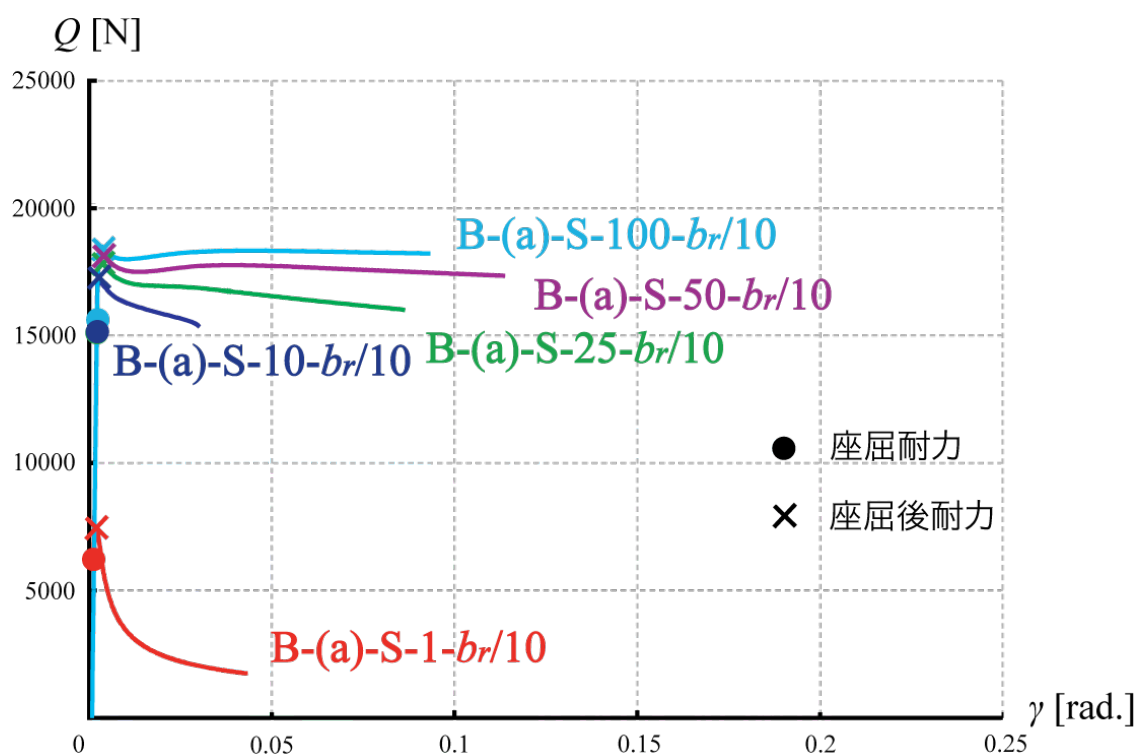
(a) $e_s = b_r$



(b) $e_s = b_r/3$

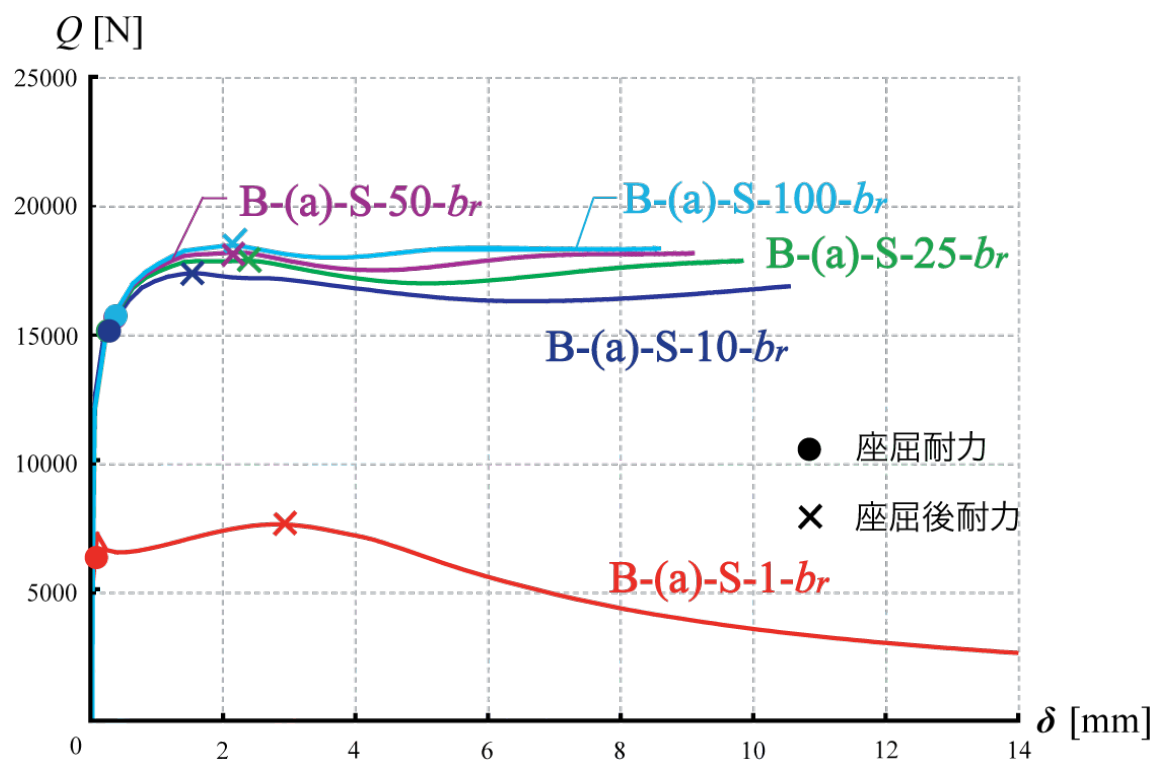


(c) $e_s = b_r/5$

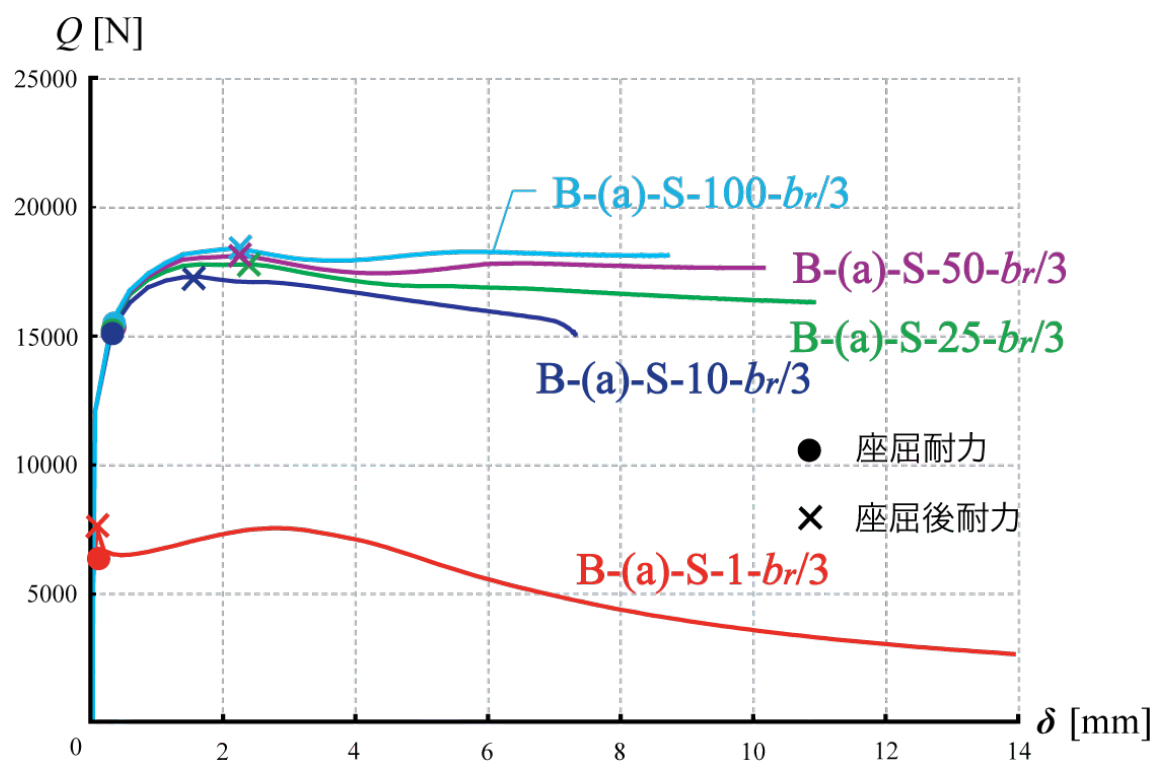


(d) $e_s = b_r/10$

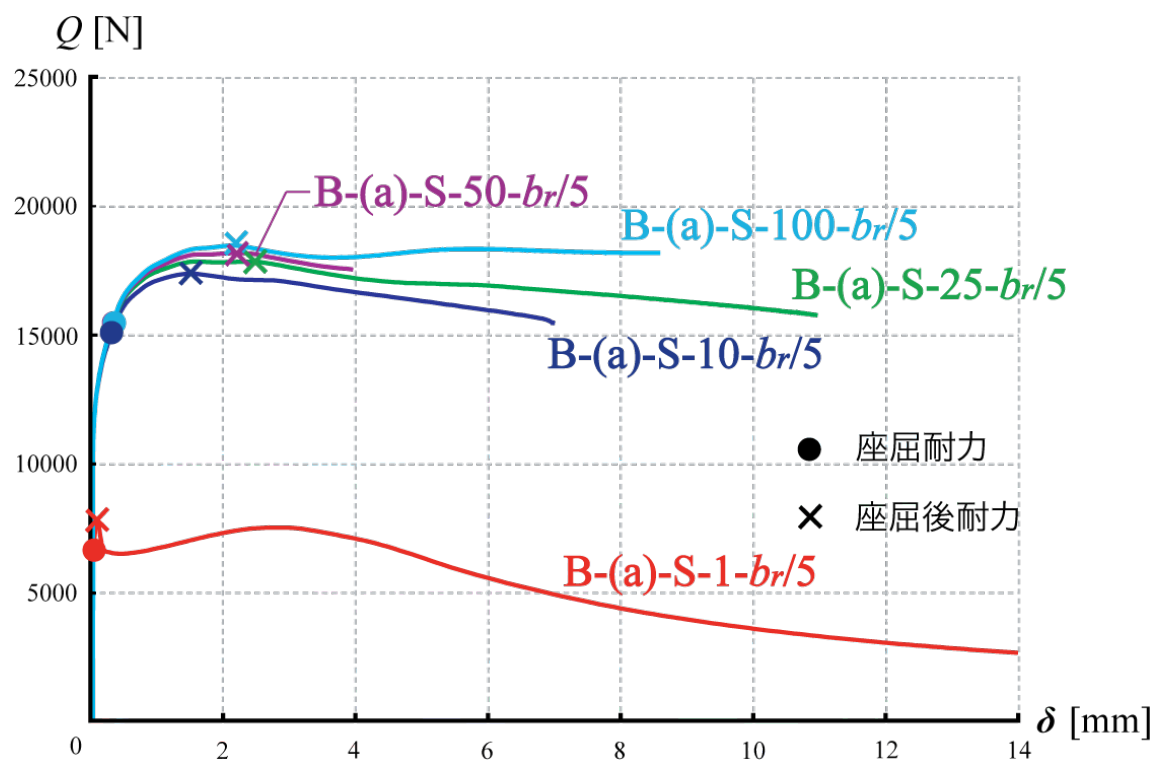
図 15.1 载荷方法(a) 荷重-面内変形角関係 (e_s : 一定)



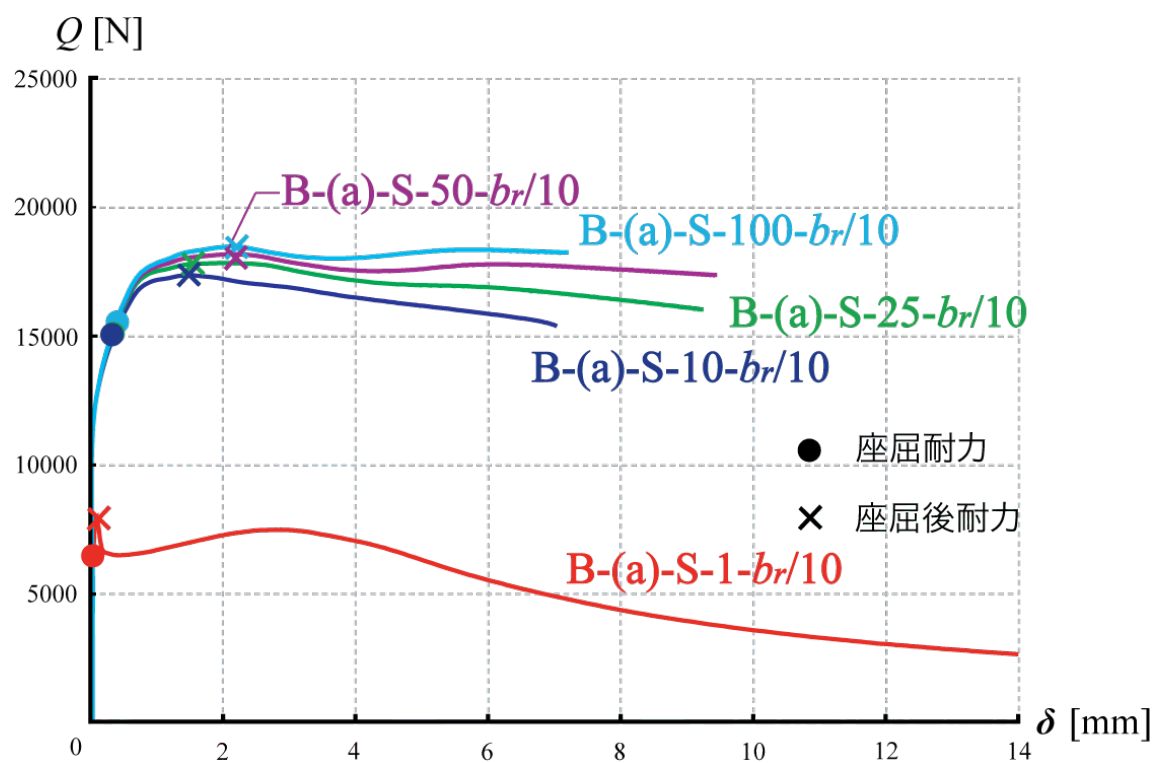
(a) $e_s = b_r$



(b) $e_s = b_r/3$

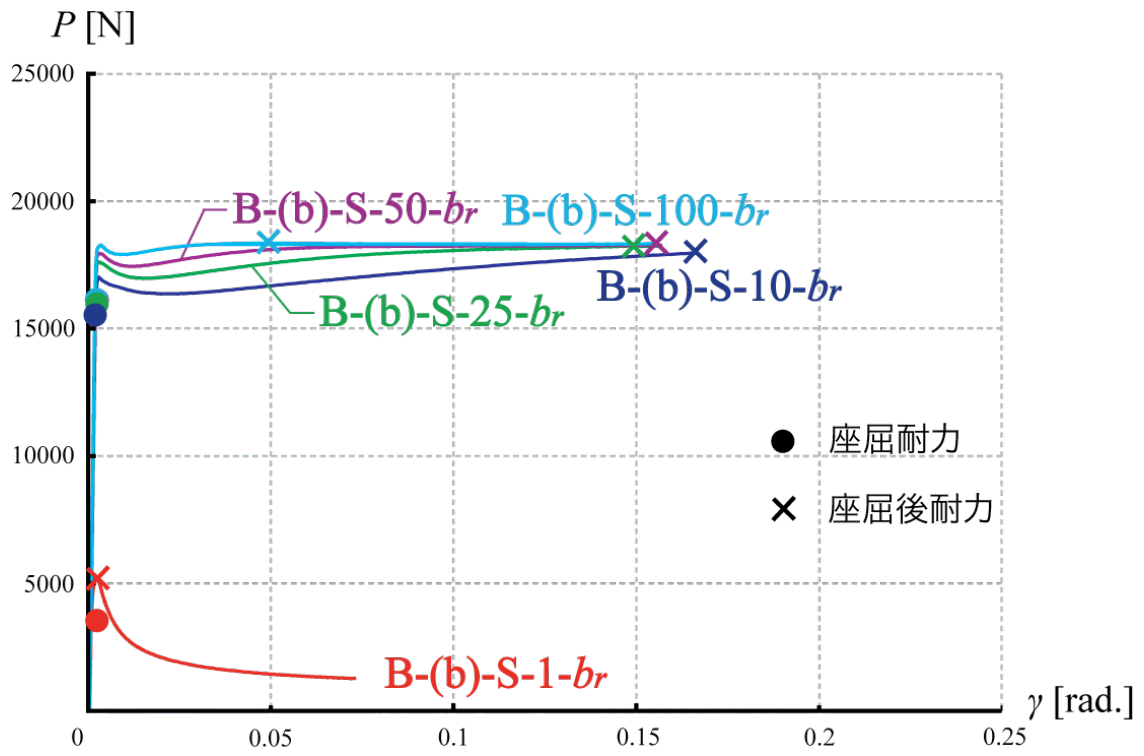


(c) $e_s = b_r/5$

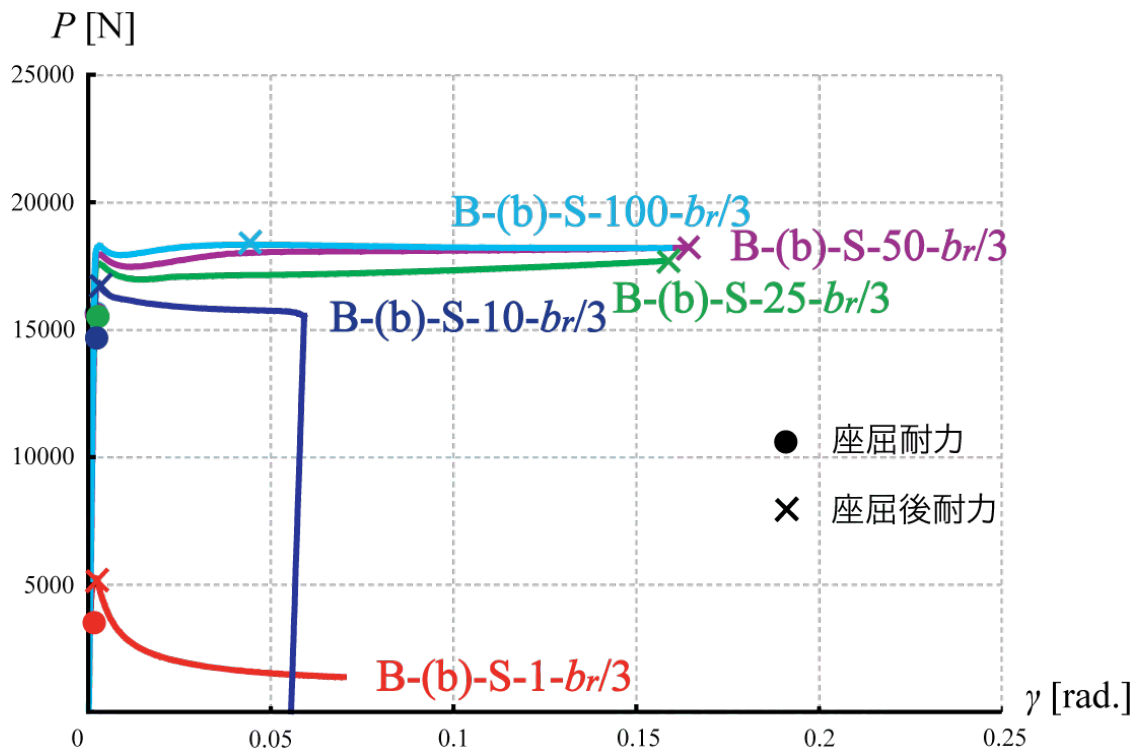


(d) $e_s = b_r/10$

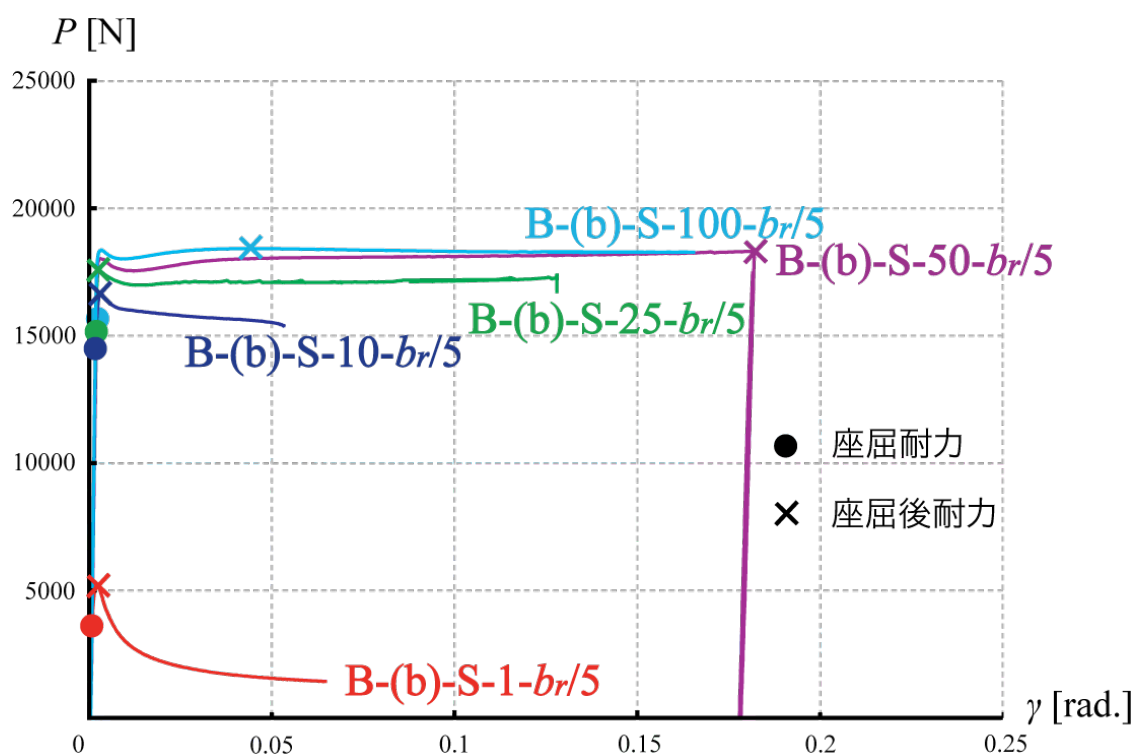
図 15.2 載荷方法(a) 荷重-面外変形関係 (e_s : 一定)



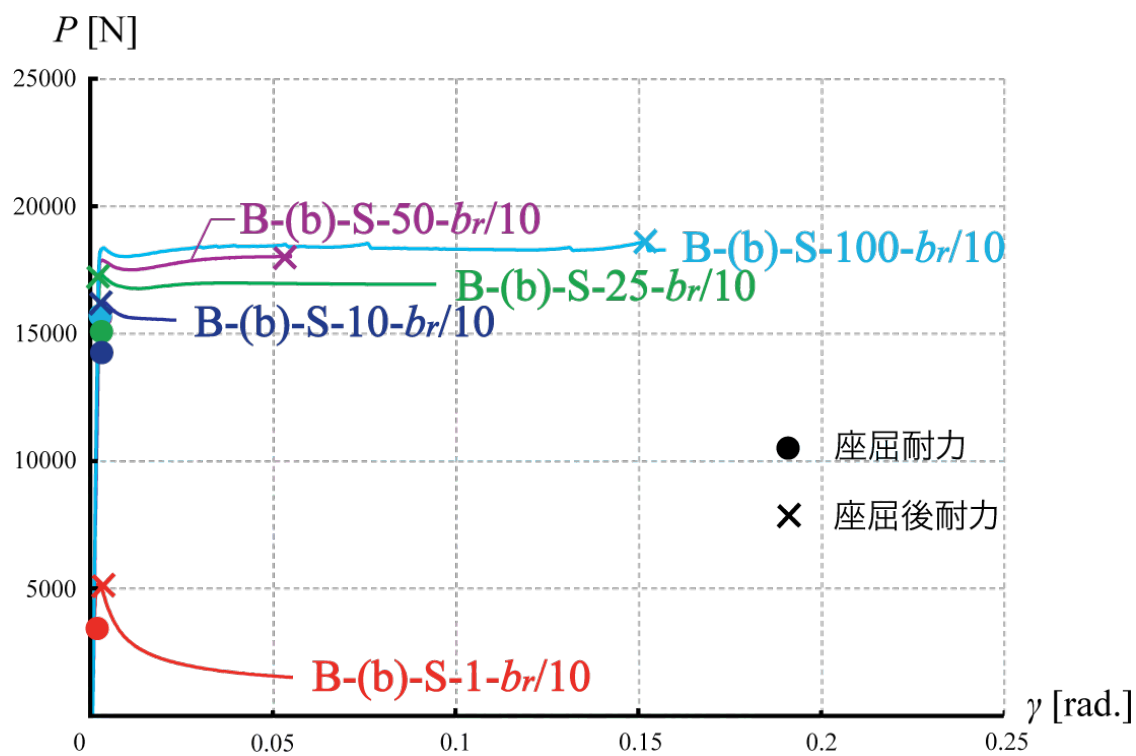
(a) $e_s = b_r$



(b) $e_s = b_r/3$

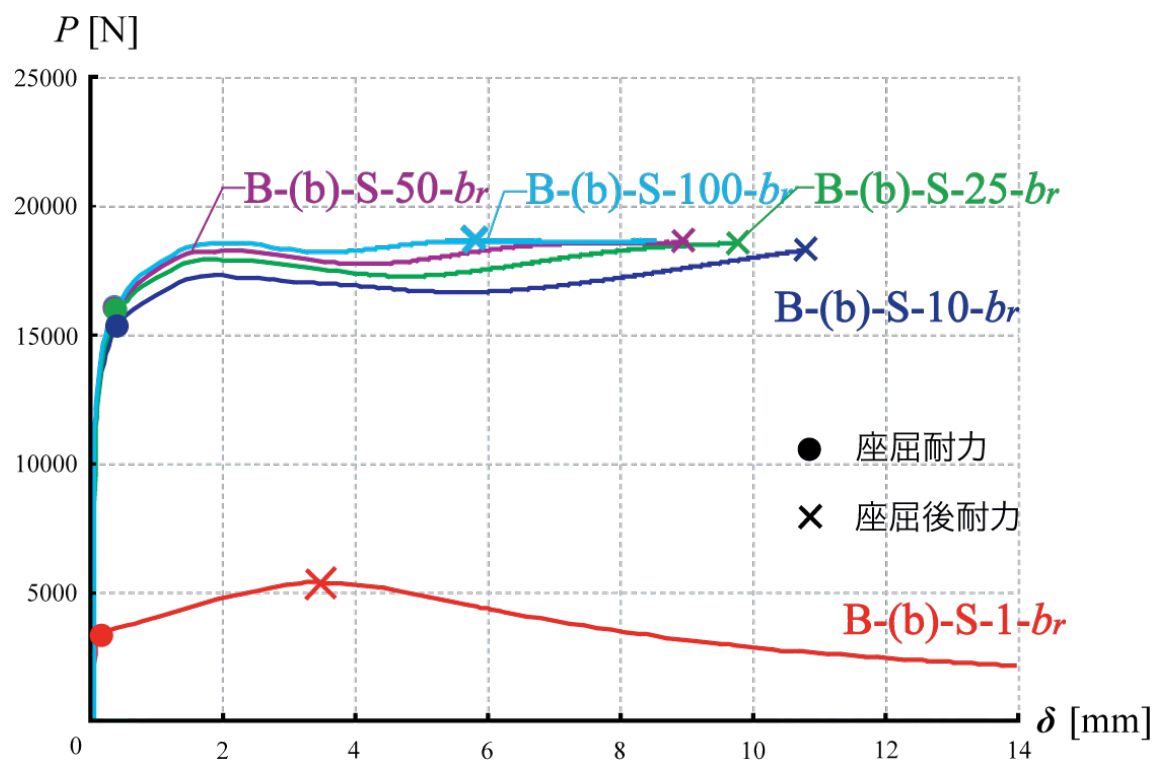


(c) $e_s = b_r/5$

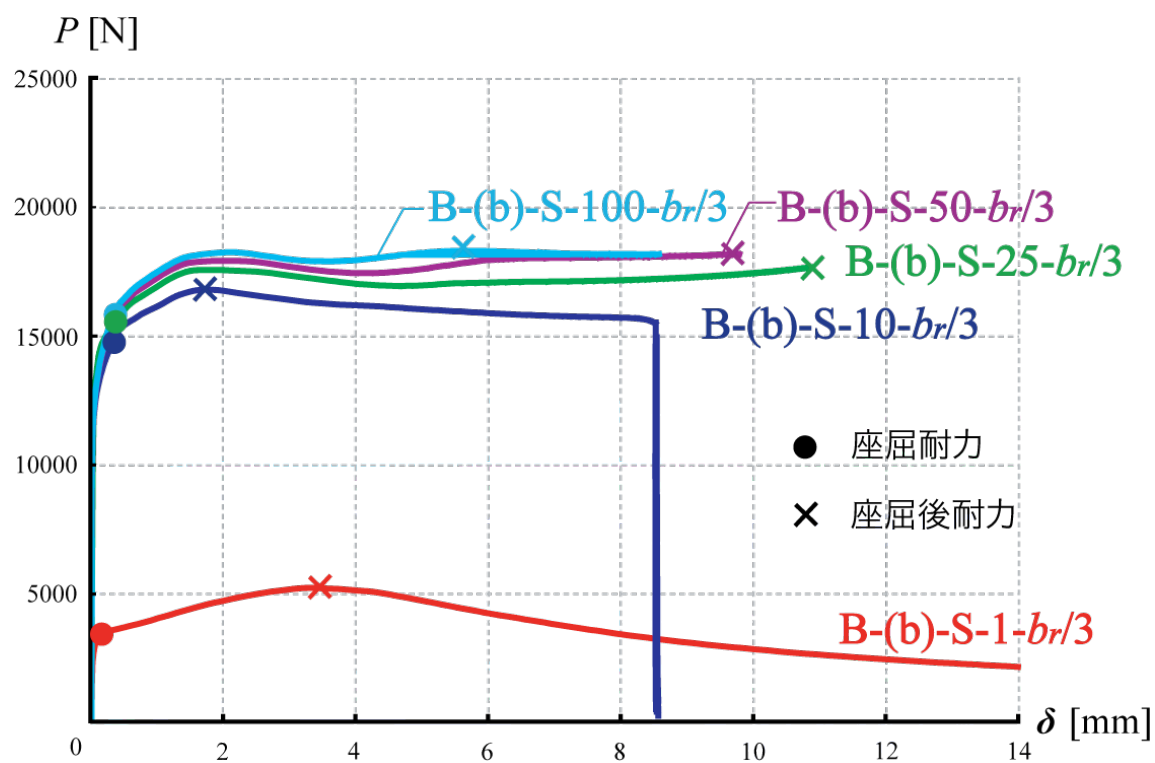


(d) $e_s = b_r/10$

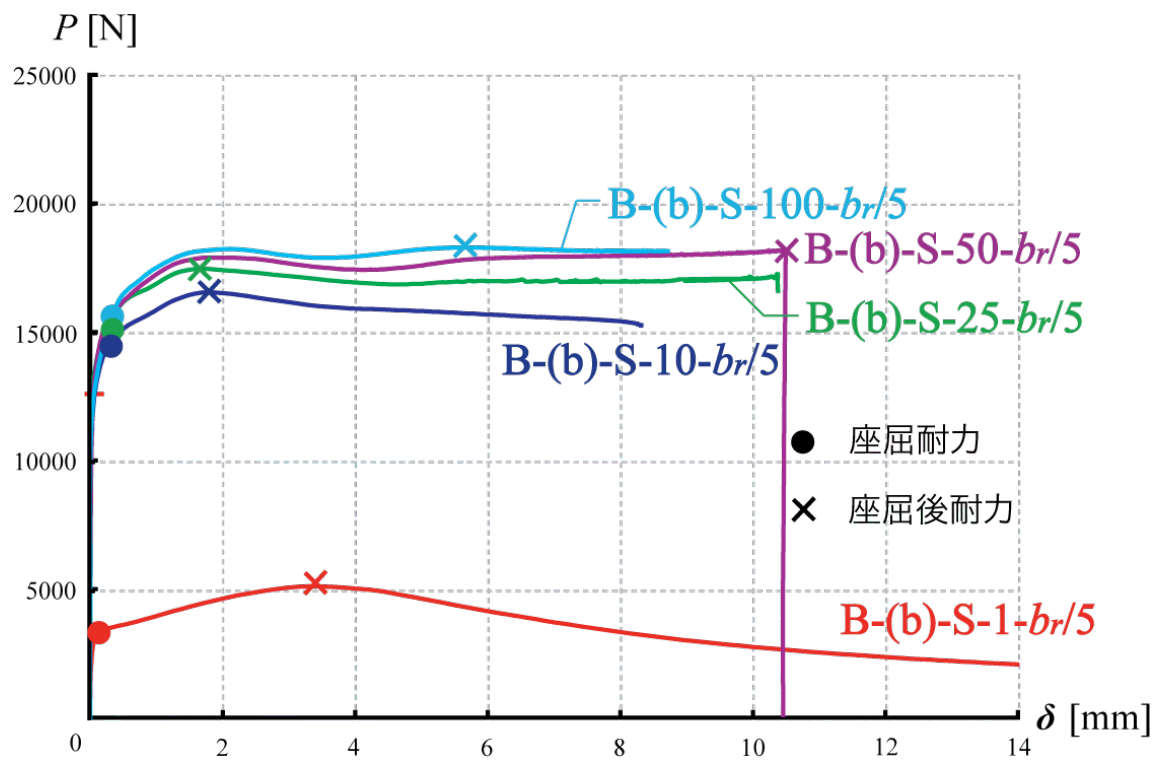
図 16.1 載荷方法 (b) 荷重-面内変形角関係 (e_s : 一定)



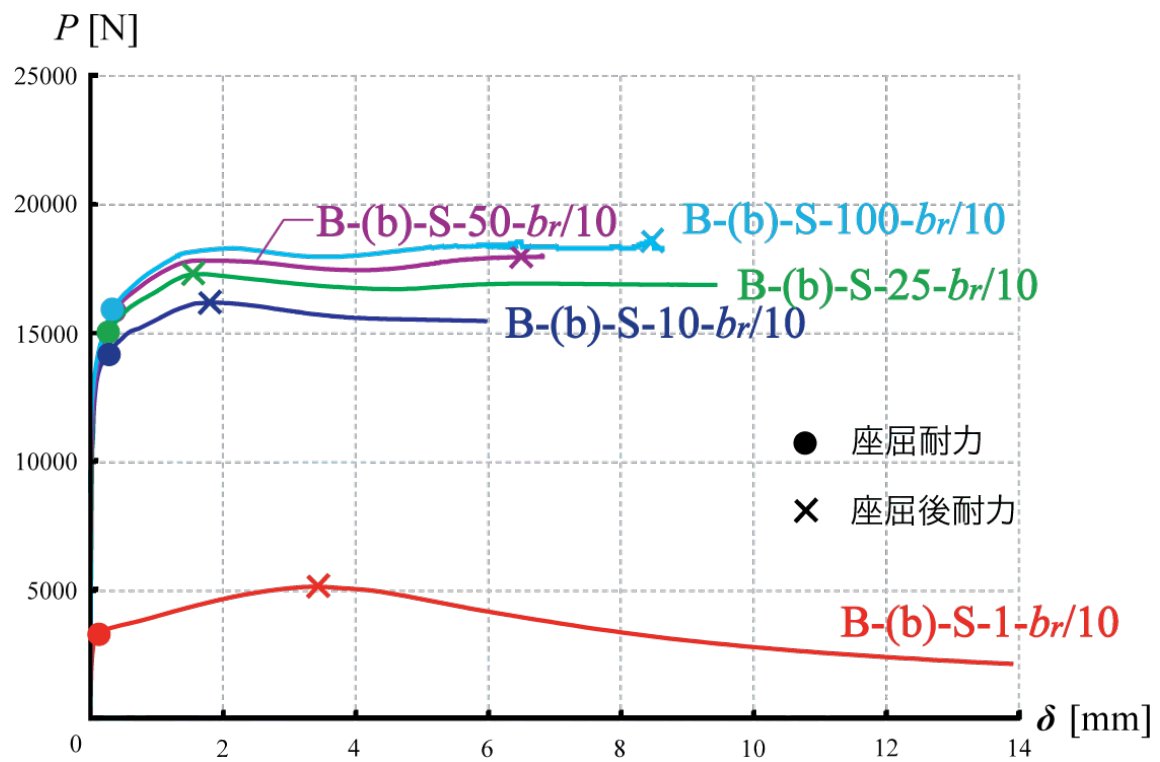
(a) $e_s = b_r$



(b) $e_s = b_r/3$



(c) $e_s = b_r/5$



(d) $e_s = b_r/10$

図 16.2 載荷方法 (b) 荷重-面外変形関係 (e_s : 一定)

2.5 まとめ

解析モデル A, 解析モデル B に対する数値解析結果の考察より, 得られた知見を以下に示す.

解析モデル A

- (1) 載荷方法(a)の場合, 荷重-面内変形角関係, 荷重-面外変形関係ともに, それぞれの t_r で, e_s に関わらず初期剛性がよく一致しており, 同じ挙動を示しており, e_s の影響は見られない.
また, それぞれの e_s で, t_r に関わらず初期剛性がよく一致しており, $t_r=10$ 以上になると, 座屈耐力に対する拘束材の剛性の影響は極めて小さくなる. また座屈後耐力についても, $t_r=10\sim50$ の範囲では, 拘束材の剛性の影響は極めて小さくなる.
- (2) 載荷方法(b)の場合, 拘束材部に入る曲げの影響により, $t_r=10, 25$ では, e_s の違いにより荷重-面内変形角関係, 荷重-面外変形関係の挙動に違いがある. しかし, 拘束材部の t_r が大きくなると, 剛性が大きくなるため, e_s に関わらず挙動に違いがない.
また, それぞれの e_s で t_r によって初期剛性が異なり, その挙動は t_r が大きいほど, 初期剛性が大きくなる. これは, 拘束材部に曲げの影響が入るため, このような挙動の違いがあらわれる.
しかし, 座屈耐力に関しては, 載荷方法(a)の場合と同様に, $t_r=10$ 以上になると, 座屈耐力に対する拘束材の剛性の影響は極めて小さくなる. また座屈後耐力に関しても, $t_r=10\sim50$ の範囲では, 拘束材の剛性の影響は極めて小さくなる.

解析モデル B

- (3) 載荷方法(a)の場合, それぞれの t_r で, e_s に関わらず初期剛性がよく一致しており, 座屈耐力および座屈後耐力に対する e_s の影響は見られない.
また, それぞれの e_s で, t_r に関わらず初期剛性がよく一致しており, $t_r=10$ 以上になると, 座屈耐力および座屈後耐力に対する拘束材の剛性の影響は極めて小さくなる. 挙動については, $t_r=10$ 以上では, 荷重が初期剛性から線形で座屈後耐力発揮後, 応力の再分配がおこり, 荷重が低下する. その低下した後, 剛性が t_r によって異なり, t_r が大きいほど, 剛性が大きくなる.
- (4) 載荷方法(b)の場合, 拘束材部に入る曲げの影響により, $t_r=10, 25$ では, e_s の違いにより荷重-面内変形角関係, 荷重-面外変形関係の挙動に違いがある. しかし, 拘束材部の t_r が大きくなると, 剛性が大きくなるため, e_s に関わらず挙動に違いがない.
また, それぞれの e_s で, t_r に関わらず初期剛性がよく一致しており, $t_r=10$ 以上になると, 座屈耐力に対する拘束材の剛性の影響は極めて小さくなる. また座屈後耐力についても, $t_r=10$ 以上になると, 拘束材の剛性の影響は極めて小さくなる.

第 3 章 座屈耐力および座屈後耐力理論式

3.1 座屈耐力理論式

本研究で対象とする耐力壁面材のように、幅厚比が大きく、素材の比例限以下の応力度における座屈現象を問題とする平板を薄板という。文献 1)より、基本とする薄鋼板の弾性座屈耐力 σ_{cr} は次式で表すことができる。

$$\tau_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} / \left(\frac{b}{t} \right)^2 \quad (1)$$

ここに k : 座屈係数

E : ヤング率

ν : ポアソン比

b : 板幅

t : 板厚

座屈係数 k は平板に作用する荷重条件、境界条件、アスペクト比 β に対応する。純せん断力を受ける周辺固定支持平板の近似式は次式で表すことができる。

$$k_f = 5.6/\beta^2 + 8.98 \quad \beta \geq 1 \quad (2)$$

純せん断力を受ける周辺単純支持平板の近似式は次式で表すことができる。

$$k_s = 4/\beta^2 + 5.34 \quad \beta \geq 1 \quad (3)$$

五十嵐らは文献 5) で、実在する H 形鋼を検討対象として逆対称曲げせん断力を受ける周辺固定支持を受ける周辺固定支持の弾性座屈耐力評価の近似式を以下のように示している。

$$\beta \leq \Lambda \quad k = k_f \quad (4)$$

$$\beta \geq \Lambda \quad k = \left\{ R \left(\frac{1}{\beta} \right)^3 - \left(\Lambda^2 + \frac{2R}{\Lambda} \right) \left(\frac{1}{\beta} \right)^2 + \left(2\Lambda + \frac{R}{\Lambda^2} \right) \left(\frac{1}{\beta} \right) \right\} k_f \quad (5)$$

$$\text{ここに} \quad \Lambda = 2.1\eta + 1.7$$

$$\eta = \frac{A_f}{A_w} + \frac{1}{6}$$

$$R = 107\eta^2 + 20.9\eta + 7.22$$

A_f : フランジ断面積

A_w : ウェブ断面積

ただし、この式は η が 0.5 から 2.25 の範囲において有効である。

また、五十嵐は文献 4) で、実在する H 形鋼を検討対象として逆対称曲げせん断力を受ける周辺単純支持を受ける周辺固定支持の弾性座屈耐力評価の近似式を以下のように示している。

$$\beta \leq \Lambda \quad k = k_f \quad (6)$$

$$\beta \geq \Lambda \quad k = \left\{ R \left(\frac{1}{\beta} \right)^3 - \left(\Lambda^2 + \frac{2R}{\Lambda} \right) \left(\frac{1}{\beta} \right)^2 + \left(2\Lambda + \frac{R}{\Lambda^2} \right) \left(\frac{1}{\beta} \right) \right\} k_s \quad (7)$$

$$\text{ここに} \quad \Lambda = 3.0\eta + 2.0$$

$$\eta = \frac{A_f}{A_w} + \frac{1}{6}$$

$$R = 107\eta^3 - 233\eta^2 + 342\eta - 149$$

A_f : フランジ断面積

A_w : ウェブ断面積

ただし、この式は η が 0.5 から 2.25 の範囲において有効である。

3.2 座屈後耐力理論式

薄板がせん断力を受ける場合には、板のせん断座屈耐力發揮後に斜張力場が形成されて耐力が増大することは多くの研究で明らかにされており、このときの耐力を座屈後耐力という。その座屈後耐力 τ_u^* は次式で表すことができる。

$$\begin{aligned}\sigma_u^* &= \lambda_p^* / \lambda^* \\ \lambda^* &\geq \lambda_p^* / \alpha\end{aligned}\tag{8}$$

ここに、 α ：比例限

τ_y ：降伏せん断応力度

$$\begin{aligned}\lambda^* &= \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\tau_y}{kE}} \\ \lambda_p^* &= \frac{3\alpha - 1}{2\alpha} \lambda_e^* \\ \lambda_e^* &= \sqrt{0.9/\alpha}\end{aligned}$$

また、プレートガーダーのウェブ等、周辺にフランジやスチフナ等の枠的要素を有するせん断応力を有するせん断応力を受ける比較的薄い板要素のせん断座屈後の最大耐力を評価するために導入された応力評価の方法が張力場理論であり、以下に示す。

完全張力場

板要素の板厚が十分薄く、上下フランジならびに中間スチフナの剛性・耐力が大きい場合には、最大耐力の評価においてせん断座屈の大きさは無視され、張力場の耐力だけが重要となる。フランジに対する斜張力の方向は 45° と仮定できる。

このときの最大せん断耐力は次のように得られる。

$$Q_{\max} = \frac{bt\sigma_y}{2} \quad (9)$$

ここに、 σ_y ：降伏応力度

不完全張力場

フランジの曲げ剛性や耐力が、ウェブの座屈後の剛性や耐力に対して相対的に十分でなく、斜張力によって生じるフランジの曲げ変形が張力場の形成ならびに最終耐力に影響する場合、この状態を不完全張力場と呼ぶ。フランジに対する斜張力の方向はフランジの剛性によって変わる。

このときの最大せん断耐力は次のように得られる。

$$Q_{\max} = Q_{cr} + Q_T \quad (10)$$

ここに Q_{cr} ：ウェブのせん断座屈耐力

σ_T ：斜張力

$$Q_T = \sigma_T ht \sin(\theta) \cos(\theta) = \frac{\sigma_T bt}{2\sqrt{1 + (1/\beta)^2}} \quad (11)$$

ウェブのせん断座屈後の応力状態をせん断座屈応力度 τ_{cr} と斜張力 σ_T とが働いている状態と仮定すると，von Mises の降伏条件から， σ_T は次のように求められる．

$$\frac{\sigma_T}{\sigma_y} = \sqrt{1 - \left(\frac{\tau_{cr}}{\tau_y} \right) \left(1 - \frac{3 \sin^2(\theta_d)}{4} \right)} - \frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{\tau_{cr}}{\tau_y} \right) \sin(\theta_d) \quad (12)$$

あるいは，さらに簡単に次の近似式が提案されている．

$$\frac{\sigma_T}{\sigma_y} = 1 - \sqrt{\frac{\tau_{cr}}{\tau_y}} \quad (13)$$

第 4 章 数値解析結果と理論値との比較

4.1 解析モデル A

4.1.1 座屈耐力

図 15.1 に弾塑性増分解析結果から求めた載荷方法(a)の e_s ごとの座屈耐力，また(1)式，(2)式，(3)式から求めた周辺固定支持座屈耐力理論値と周辺単純支持座屈耐力理論値を示す．グラフの縦軸は荷重 Q ，横軸は拘束材部の板厚 t_r とする．

それぞれの e_s で座屈耐力は一致しており，座屈耐力に対する e_s の影響はないと言える．また， $t_r=10$ 以上になると，拘束材部の剛性の影響は極めて小さくなる．

そして，理論値との比較は， $t_r=1$ では周辺単純支持座屈耐力理論値， $t_r=10$ 以上では周辺固定支持座屈耐力理論値で良く評価できる．これは載荷方法(a)の場合，鋼板部の周辺 4 辺を面外方向に単純支持しており，拘束材部に曲げの影響が入らないため，このような傾向になると考えられる．また拘束材部の板厚 $t_r=1$ では，鋼板部と同じ板厚の鋼板が 4 周辺に配置しているだけなので，剛性が十分でなく，周辺単純支持の座屈耐力理論値とよく一致し， $t_r=10$ 以上では鋼板部より十分剛性の大きい拘束材が鋼板部の 4 周辺に配置するので，周辺固定支持の座屈耐力理論値とよく一致すると考えられる．

また， $t_r=10$ 以上で若干周辺固定支持の座屈耐力理論値を下回っているのは，弾塑性増分解析をする際に，弾性座屈固有値解析から求めた座屈モードを，解析モデル全体，つまり拘束材部にも初期不整として与えているため，その初期不整が影響していると考えられる．

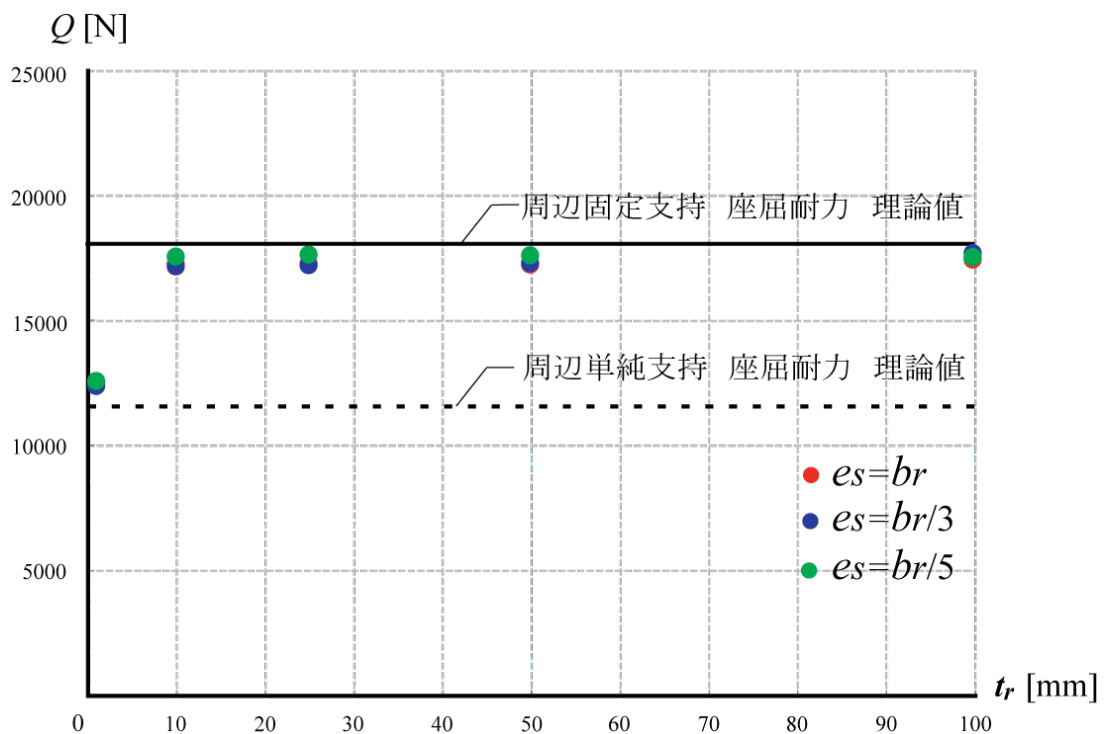


図 15.1 載荷方法(a) 座屈耐力

載荷方法(b)の場合、載荷方法(a)と違い、曲げとせん断の影響を受けるので、座屈耐力理論値は(4)式、(5)式、(6)式、(7)式から求める。これらの式は実在する H 形鋼を検討対象としているが、本研究では H 形鋼のウェブを鋼板部、フランジを拘束材部とみなし適用する。表 1 に(4)式、(5)式、(6)式、(7)式に対応させるために、本研究における解析モデルの η および λ を示す。

表 1. 本解析モデル η および λ

鋼板部断面積 A_p	拘束材部 t_r	拘束材部断面積 A_r	η	λ
150	1	7.5	0.217	2.65
	10	75	0.667	3.1
	25	187.5	1.417	4.675
	50	375	2.667	7.3
	100	750	5.167	12.55

表 1 より、本解析モデルでは η は 0.217~5.167 となり、(4)式、(5)式、(6)式、(7)式は η は 0.5~2.25 で有効であるとされているため、 $t_r=10, 25$ の場合で有効となる。しかし、 $t_r=50, 100$ は $t_r=10, 25$ よりも剛性が高いため、 η が有効範囲外であっても十分に周辺固定支持に近いと考えられ、(4)、(5)式を適用できると考えられる。また、前述の載荷方法(a)の場合、 $t_r=1$ の場合は、周辺単純支持に近いと考えられるため、(6)、(7)式を適用する。

本解析モデルの λ は表 1 より、 λ は 2.65~12.55 となり、本解析モデルのアスペクト比 β は 1 のため、 $\beta < \lambda$ となるため、(4)、(6)式となる。つまり、座屈係数は純せん断を受けるときの座屈係数となる。

よって、図 15.2 に弾塑性増分解析結果から求めた載荷方法(b)の e_s ごとの座屈耐力、また(1)式、(2)式、(3)式から求めた周辺固定支持座屈耐力理論値と周辺単純支持座屈耐力理論値を示す。グラフの縦軸は荷重 P 、横軸は拘束材部の板厚 t_r とする。

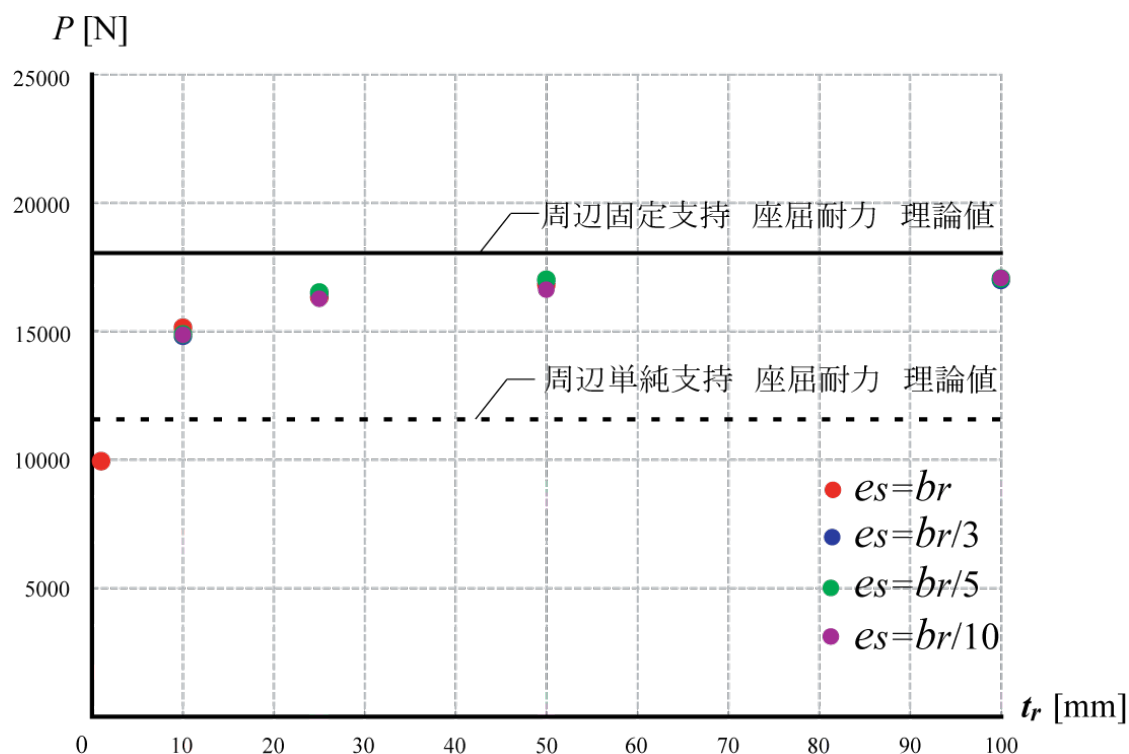


図 15.2 载荷方法(b) 座屈耐力

それぞれの e_s で座屈耐力は一致しており、座屈耐力に対する e_s の影響はないと言える。また、 $t_r=25$ 以上になると、拘束材部の剛性の影響は極めて小さくなる。

また、理論値との比較は、 $t_r=1$ では周辺単純支持座屈耐力理論値を下まわり、 $t_r=10$ 以上では t_r の値が大きくなるほど、周辺固定支持座屈耐力理論値に近づいていくが、载荷方法(a)の場合ほどうまく理論値で評価できない事がわかる。これは载荷方法(b)の場合、拘束材部に曲げの影響が入り、また、解析モデル A の境界条件は、鋼板部の 4 周辺を単純支持で面内方向は変位を拘束していないため、 t_r の値が小さいほど、拘束材部の曲げ変形が大きくなるので、このような傾向になると考えられる。

4.1.2 座屈後耐力

図 16.1 に弾塑性増分解析結果から求めた載荷方法(a)の e_s ごとの座屈後耐力, また(2)式, (3)式, (8)式から求めた周辺固定支持座屈後耐力理論値と周辺単純支持座屈後耐力理論値を示す. グラフの縦軸は荷重 Q , 横軸は拘束材部の板厚 t_r とする.

座屈耐力と同様に, それぞれの e_s で座屈後耐力は一致しており, 座屈後耐力に対する e_s の影響はないと言える. また, $t_r=10$ 以上になると, 拘束材部の剛性の影響は極めて小さくなる.

そして, 理論値との比較は, $t_r=1$ では周辺単純支持座屈後耐力理論値, $t_r=10$ 以上では周辺固定支持座屈後耐力理論値で良く評価できる. これは載荷方法(a)の場合, 鋼板部の周辺 4 辺を面外方向に単純支持しており, 拘束材部に曲げの影響が入らないため, このような傾向になると考えられる. また拘束材部の板厚 $t_r=1$ では, 鋼板部と同じ板厚の鋼板が 4 周辺に配置しているだけなので, 剛性が十分でなく, 周辺単純支持の座屈後耐力理論値とよく一致し, $t_r=10$ 以上では鋼板部より十分剛性の大きい拘束材が鋼板部の 4 周辺に配置するので, 周辺固定支持の座屈後耐力理論値とよく一致すると考えられる.

また, $t_r=10$ 以上で若干周辺固定支持の座屈耐力理論値を下回っているのは, 弾塑性増分解析をする際に, 弾性座屈固有値解析から求めた座屈モードを, 解析モデル全体, つまり拘束材部にも初期不整として与えているため, その初期不整が影響していると考えられる.

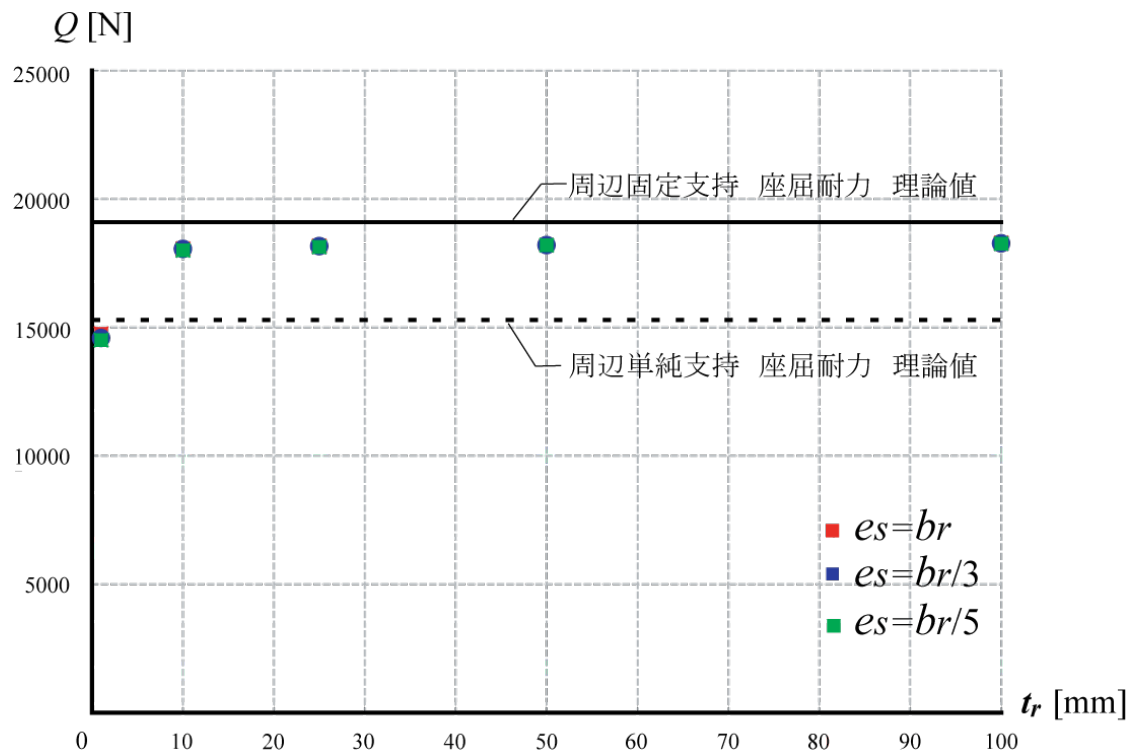


図 16.1 載荷方法(a) 座屈後耐力

図 16.2 に弾塑性増分解析結果から求めた載荷方法(a)の e_s ごとの座屈後耐力, また(2)式, (3)式, (8)式から求めた周辺固定支持座屈後耐力理論値と周辺単純支持座屈後耐力理論値を示す. グラフの縦軸は荷重 P , 横軸は拘束材部の板厚 t_r とする.

$t_r=10, 100$ の場合はそれぞれの e_s で座屈耐力は一致しているが, $t_r=25, 50$ の場合は $e_s = b_r$ のみが大きな値となる. $t_r=25$ の場合は, $t_r=100$ の場合と違い, 曲げの影響が e_s ごとに異なり, e_s が大きいほど曲げの影響を受けないので, 応力の再分配後の挙動が違い, 座屈後耐力が上昇するためである. $t_r=50$ の場合は, $e_s = b_r$ のみが大変形域まで解析解が得られているためである.

また, 理論値との比較は, 座屈耐力と同様に, $t_r = 1$ では周辺単純支持座屈耐力理論値を下まわり, $t_r=10$ 以上では t_r の値が大きくなるほど, 周辺固定支持座屈耐力理論値に近づいていくが, 載荷方法(a)の場合どうまく理論値で評価できない事がわかる. これも, 解析モデル A の境界条件は, 鋼板部の 4 周辺を単純支持で面内方向は変位を拘束していないため, t_r の値が小さいほど, 拘束材部の曲げ変形が大きくなるので, このような傾向になると考えられる.

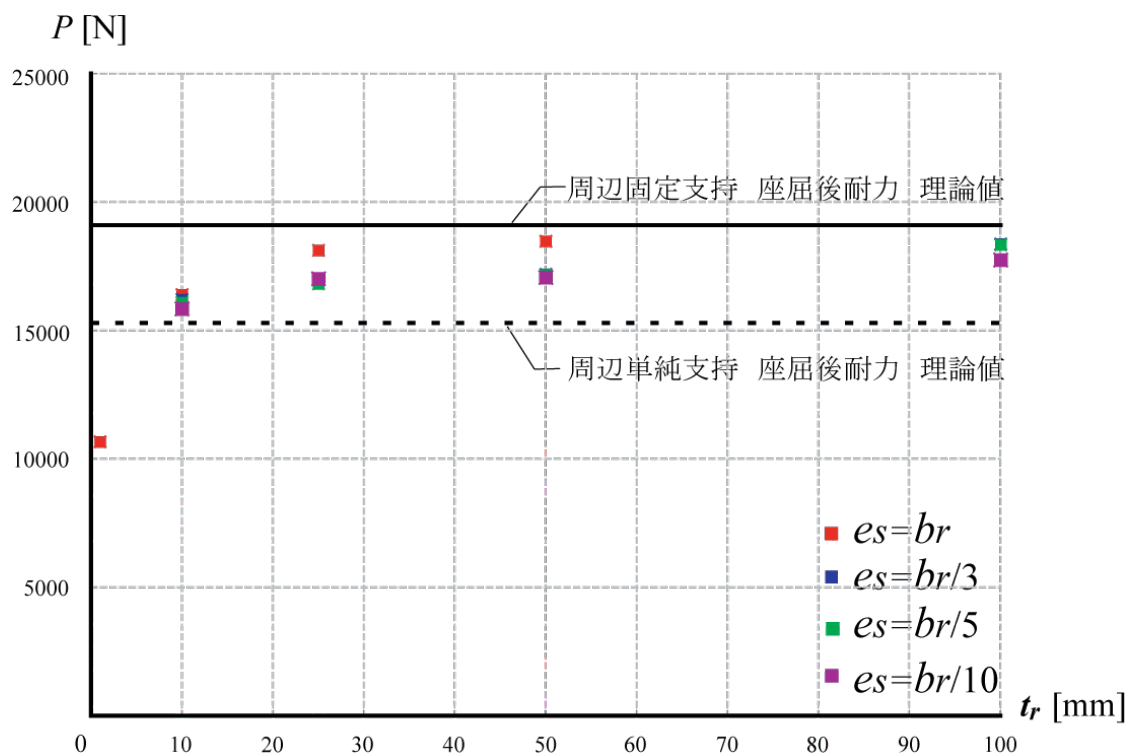


図 16.2 載荷方法 (b) 座屈後耐力

4.2 解析モデル B

4.2.1 座屈耐力

図 17.1 に弾塑性増分解析結果から求めた載荷方法(a)の e_s ごとの座屈耐力，また(1)式，(2)式，(3)式から求めた周辺固定支持座屈耐力理論値と周辺単純支持座屈耐力理論値を示す．グラフの縦軸は荷重 P ，横軸は拘束材部の板厚 t_r とする．

それぞれの e_s で座屈耐力はほぼ一致しており，座屈耐力に対する e_s の影響はないと言える．また， $t_r=10$ 以上になると，拘束材部の剛性の影響は極めて小さくなる．そして，理論値との比較は， $t_r=1$ では周辺単純支持座屈耐力理論値を大きく下回り， $t_r=10$ 以上では周辺単純支持座屈耐力理論値と周辺固定支持座屈耐力理論値の間の値となっており，理論値でうまく評価できない．これは解析モデル B の場合，鋼板部と左右の拘束材部との接合部分に境界条件を与えていないので，拘束材の剛性のみが影響する．よって，拘束材の剛性が鋼板部に比べ十分であっても，接合部分に面内方向，面外方向ともに変形が生じるため，周辺単純支持とも周辺固定支持とも定義できない境界条件であるためである．

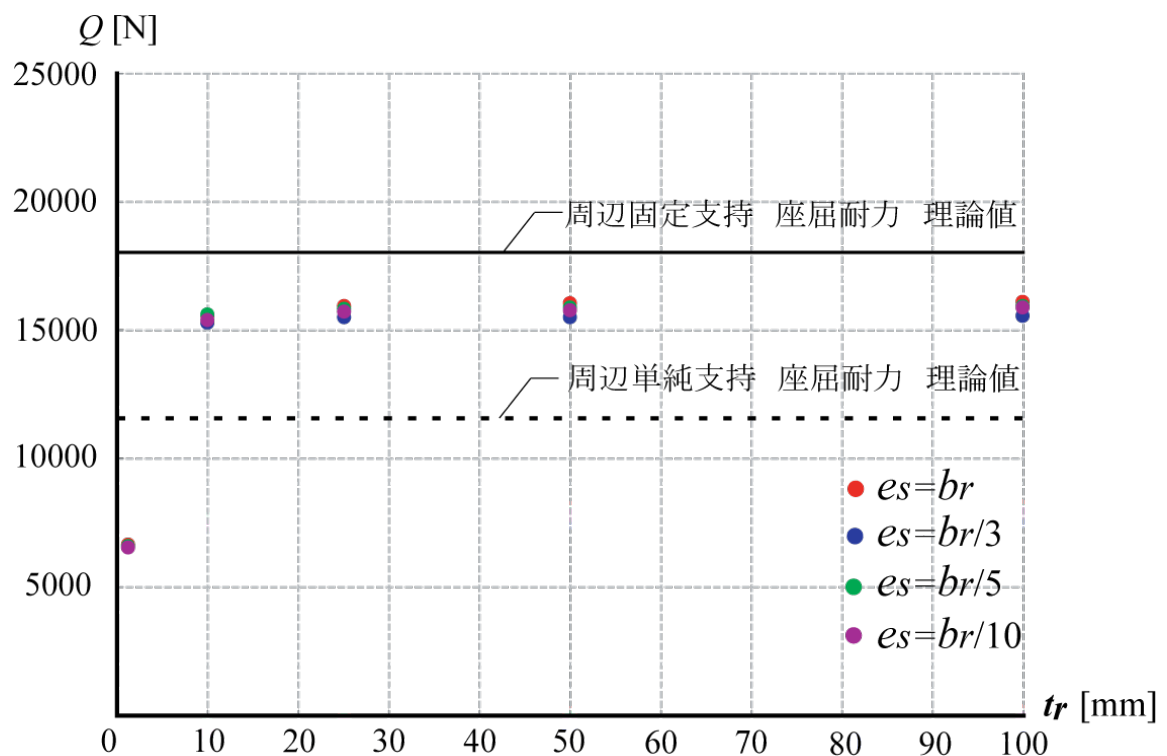


図 17.1 載荷方法(a) 座屈耐力

図 17.2 に弾塑性増分解析結果から求めた載荷方法(b)の e_s ごとの座屈耐力，また(1)式，(2)式，(3)式から求めた周辺固定支持座屈耐力理論値と周辺単純支持座屈耐力理論値を示す．グラフの縦軸は荷重 P ，横軸は拘束材部の板厚 t_r とする．

それぞれの e_s で座屈耐力はほぼ一致しており，座屈耐力に対する e_s の影響はないと言える．また， $t_r=10$ 以上になると，拘束材部の剛性の影響は極めて小さくなる．そして，理論値との比較は，載荷方法(a)の場合と同様に， $t_r=1$ では周辺単純支持座屈耐力理論値を大きく下回り， $t_r=10$ 以上では周辺単純支持座屈耐力理論値と周辺固定支持座屈耐力理論値の間の値となっており，理論値でうまく評価できない．これも，前述した通り，鋼板部と左右の拘束材部との接合部分に境界条件を与えていないので，拘束材の剛性のみが影響する．よって，拘束材の剛性が鋼板部に比べ十分であっても，接合部分に面内方向，面外方向ともに変形が生じるため，周辺単純支持とも周辺固定支持とも定義できない境界条件であるためである．また， $t_r=10, 25$ では載荷方法(a)の座屈耐力よりも，それぞれの e_s で小さい値となるが，曲げの影響が入るからであると考えられる．しかし， $t_r=50, 100$ では拘束材部の剛性が大きいため，曲げの影響が入らず，載荷方法に関わらず，ほぼ同じ値となる．

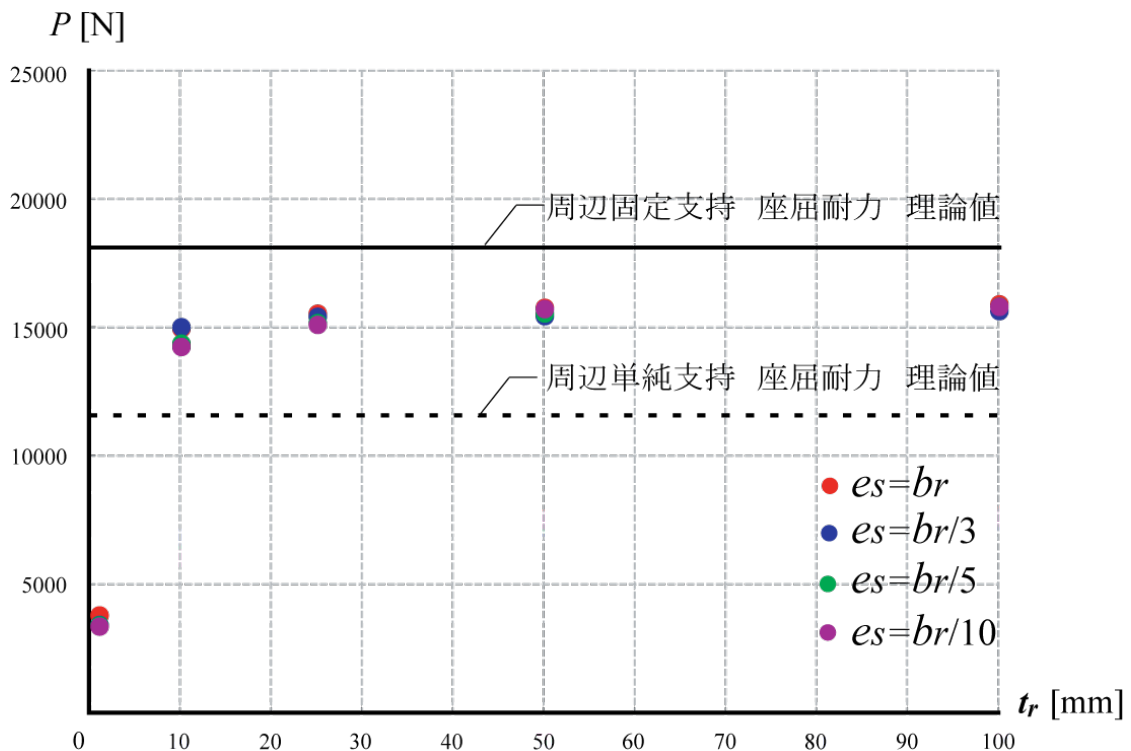


図 17.2 載荷方法(b) 座屈耐力

4.2.2 座屈後耐力

座屈後耐力は、(9)式、(10)式、(11)式、(13)式の完全張力場、不完全張力場の理論値を用いて評価する。この不完全張力場を用いる場合、座屈耐力 Q_{cr} を理論的に求める必要があるが、4.2.1 で示したように、既往の座屈耐力評価式でうまく評価できないため、座屈耐力 Q_{cr} に弾性座屈固有値解析で求めた値を用いることとする。ここで、弾塑性増分解析結果の座屈後耐力を Q_{cal} 、不完全張力場理論値を Q_{sl} 、完全張力場理論値を Q_{s2} とする。

図 18.1 に弾塑性増分解析結果から求めた載荷方法(a)の e_s ごとの座屈後耐力を不完全張力場理論値と比較したグラフ、図 18.2 に弾塑性増分解析結果から求めた載荷方法(a)の e_s ごとの座屈後耐力を完全張力場理論値と比較したグラフを示す。グラフの縦軸はそれぞれ Q_{cal} を Q_{sl} で除した値と Q_{cal} を Q_{s2} で除した値、横軸は拘束材部の板厚 t_r とする。

載荷方法(a)の場合、 $t_r=10$ では、それぞれの e_s で座屈後耐力に対する拘束材部の剛性の影響は極めて小さくなる。また、 $t_r=10$ では不完全張力場理論値、 $t_r=25$ 以上では完全張力場理論値で良く評価できる。これは、 $t_r=25$ 以上であれば、完全張力場が形成され、座屈後耐力に対する拘束材部の剛性の影響は極めて小さくなるということを示している。

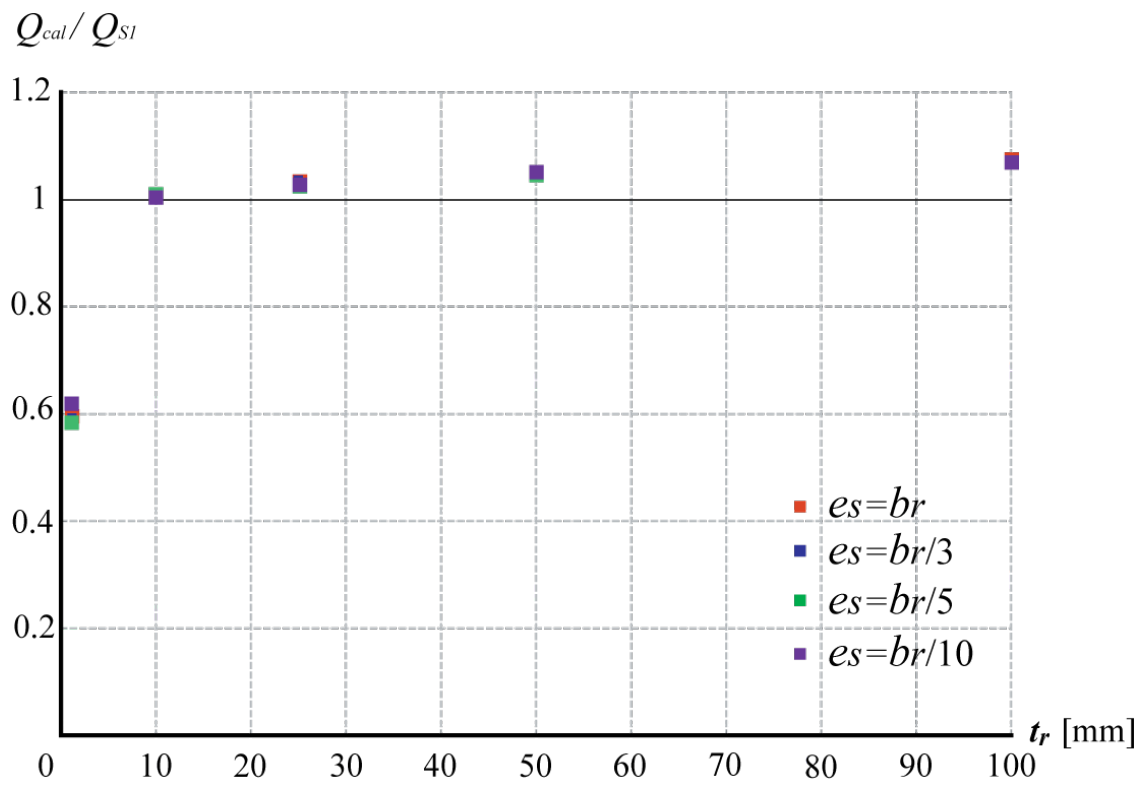


図 18.1 載荷方法(a) 座屈後耐力と不完全張力場理論値との比較

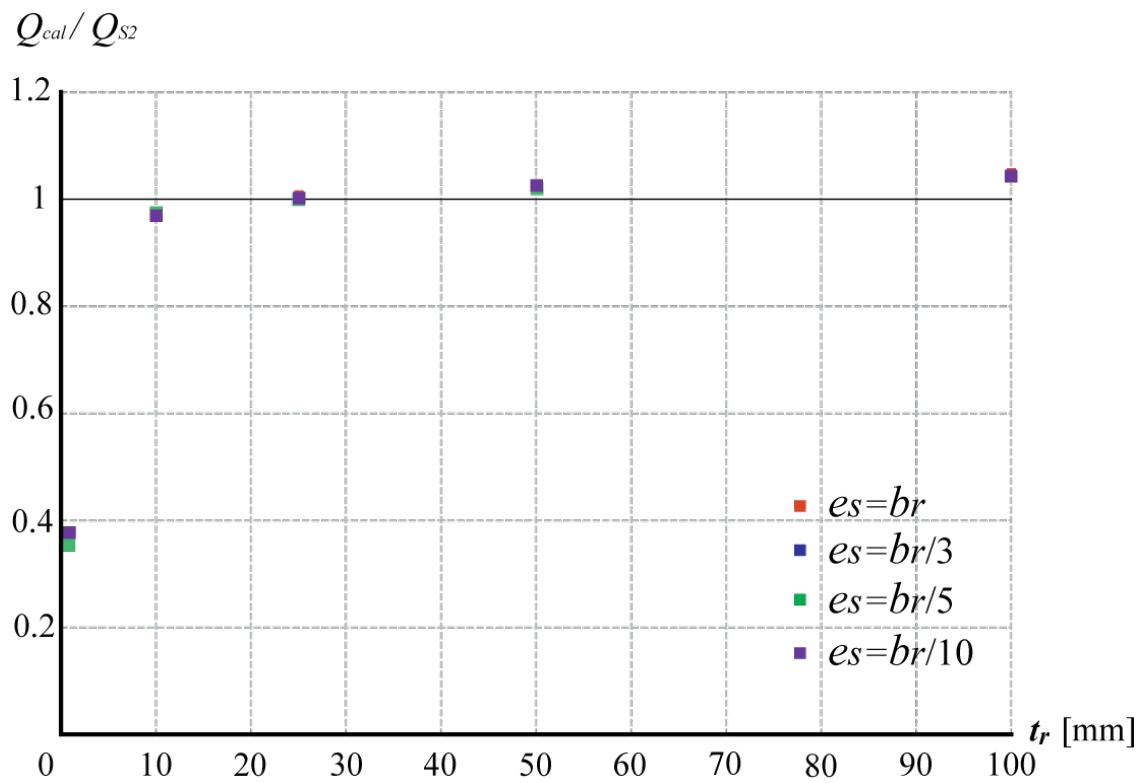


図 18.2 載荷方法(a) 座屈後耐力と完全張力場理論値との比較

同様に図 19.1 に弾塑性増分解析結果から求めた載荷方法(b)の e_s ごとの座屈後耐力を不完全張力場理論値と比較したグラフ，図 19.2 に弾塑性増分解析結果から求めた載荷方法(b)の e_s ごとの座屈後耐力を不完全張力場理論値と比較したグラフを示す．グラフの縦軸はそれぞれ Q_{cal} を Q_{sl} で除した値と Q_{cal} を Q_{s2} で除した値，横軸は拘束材部の板厚 t_r とする．

載荷方法(b)の場合， $t_r=10$ では，それぞれの e_s で座屈後耐力に対する拘束材部の剛性の影響は極めて小さくなる． $e_s=b_r$ 場合，曲げの影響が拘束材部に入らないため， $t_r=25$ 以上では完全張力場理論値を上回る．しかし， $e_s=b_r/3$ ， $b_r/5$ ， $b_r/10$ では拘束材部に曲げの影響が入るため， $e_s=b_r$ の場合の座屈後耐力よりも低い値となる．よって $t_r=10$ では不完全張力場理論値， $t_r=25$ 以上では完全張力場理論値で良く評価できる．

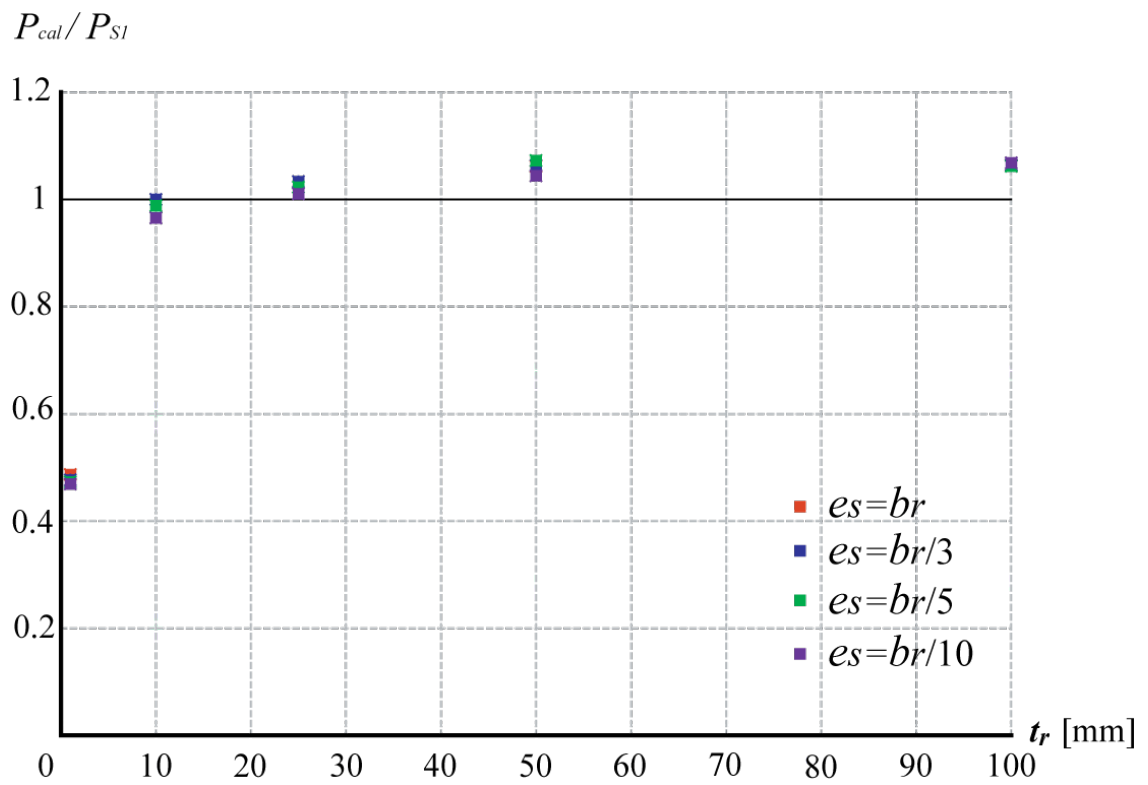


図 19.1 載荷方法 (b) 座屈後耐力と不完全張力場理論値との比較

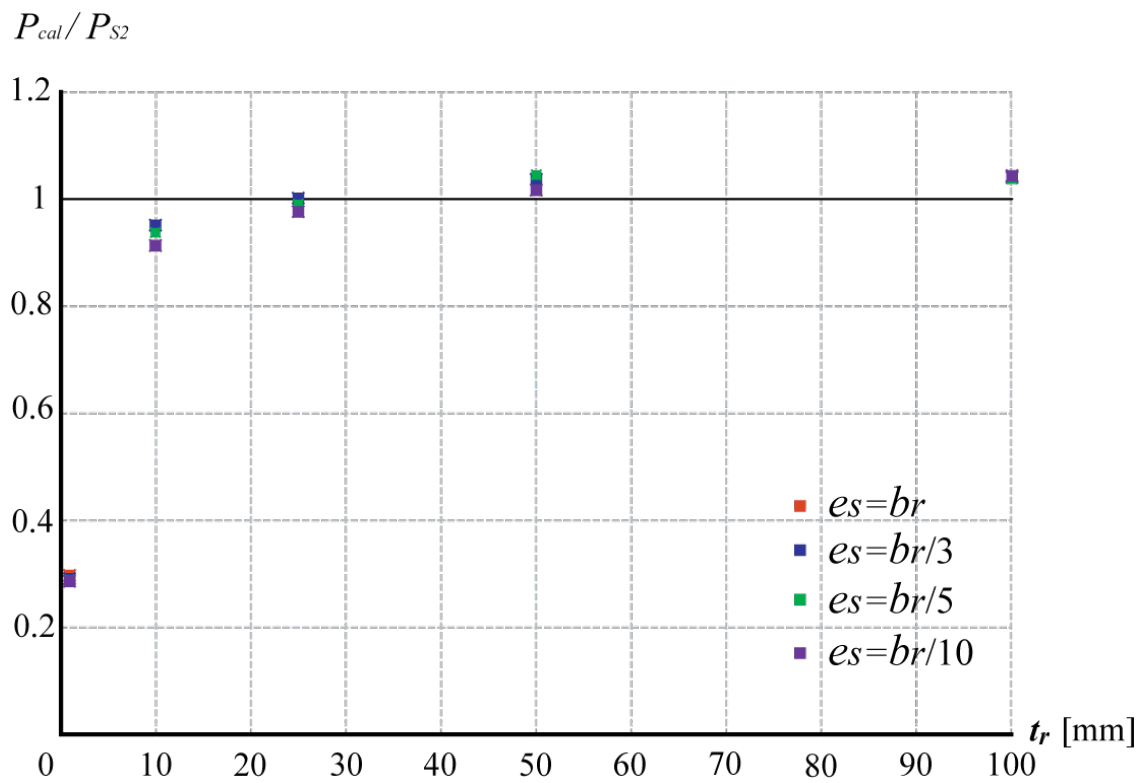


図 19.2 載荷方法 (b) 座屈後耐力と完全張力場理論値との比較

4.3 まとめ

数値解析結果から定義した座屈耐力および座屈後耐力と理論値との比較，考察より，得られた知見を以下に示す．

解析モデル A

- (1) 載荷方法(a)の場合，座屈耐力，座屈後耐力ともに $t_r=1$ では周辺単純支持座屈耐力理論値， $t_r=10$ 以上では周辺固定支持座屈耐力理論値で良く評価できる．
- (2) 載荷方法(b)の場合，座屈耐力，座屈後耐力ともに $t_r=1$ では周辺単純支持条件の理論値を下まわり， $t_r=10$ 以上では t_r の値が大きくなるほど，周辺固定支持条件の理論値に近づいていく．これは載荷方法(b)の場合，拘束材部に曲げの影響が入り，また，解析モデル A の境界条件は，鋼板部の 4 周辺を単純支持で面内方向は変位を拘束していないため， t_r の値が小さいほど，拘束材部の曲げ変形が大きくなるので，このような傾向になると考えられる．

解析モデル B

- (3) 座屈耐力は載荷方法に関わらず， $t_r=1$ では周辺単純支持座屈耐力理論値を大きく下回り， $t_r=10$ 以上では周辺単純支持座屈耐力理論値と周辺固定支持座屈耐力理論値の間の値となっており，理論値でうまく評価できない．これは解析モデル B の場合，鋼板部と左右の拘束材部との接合部分に境界条件を与えていないので，拘束材の剛性のみが影響する．よって，拘束材の剛性が鋼板部に比べ十分であっても，接合部分に面内方向，面外方向ともに変形が生じるため，周辺単純支持とも周辺固定支持とも定義できない境界条件だからであると考えられる
- (4) 座屈後耐力は載荷方法に関わらず， $t_r=1$ では張力場理論でうまく評価ができないが， $t_r=10$ では不完全張力場理論値， $t_r=25$ 以上では完全張力場理論値で良く評価できる．

第 5 章 結

5.1 結論

極薄肉鋼板を用いた耐力壁を、極薄肉鋼板による鋼板部と薄板軽量形鋼による周辺拘束材部を矩形とした基本的な解析モデルに対する数値解析および数値解析結果の考察より、得られた知見を以下に示す。

解析モデル A

- (1) 載荷方法(a)の場合、荷重-面内変形角関係、荷重-面外変形関係ともに、それぞれの t_r で、 e_s に関わらず初期剛性がよく一致しており、同じ挙動を示しており、 e_s の影響は見られない。
また、載荷方法(a)の場合、それぞれの e_s で、 t_r に関わらず初期剛性がよく一致しており、 $t_r=10$ 以上になると、座屈耐力に対する拘束材の剛性の影響は極めて小さくなる。また座屈後耐力についても、 $t_r=10\sim50$ の範囲では、拘束材の剛性の影響は極めて小さくなる。また、座屈耐力、座屈後耐力ともに $t_r=1$ では周辺単純支持座屈耐力理論値、 $t_r=10$ 以上では周辺固定支持座屈耐力理論値で良く評価できる。
- (2) 載荷方法(b)の場合、拘束材部に入る曲げの影響により、 $t_r=10, 25$ では、 e_s の違いにより荷重-面内変形角関係、荷重-面外変形関係の挙動に違いがある。しかし、拘束材部の t_r が大きくなると、剛性が大きくなるため、 e_s に関わらず挙動に違いがない。
また、それぞれの e_s で t_r によって初期剛性が異なり、その挙動は t_r が大きいほど、初期剛性が大きくなる。これは、拘束材部に曲げの影響が入るため、このような挙動の違いがあらわれる。
しかし、座屈耐力に関しては、載荷方法(a)の場合と同様に、 $t_r=10$ 以上になると、座屈耐力に対する拘束材の剛性の影響は極めて小さくなる。また座屈後耐力に関しても、 $t_r=10\sim50$ の範囲では、拘束材の剛性の影響は極めて小さくなる。

解析モデル B

- (3) 載荷方法(a)の場合、それぞれの t_r で、 e_s に関わらず初期剛性がよく一致しており、座屈耐力および座屈後耐力に対する e_s の影響は見られない。また、それぞれの e_s で、 t_r に関わらず初期剛性がよく一致しており、 $t_r=10$ 以上になると、座屈耐力および座屈後耐力に対する拘束材の剛性の影響は極めて小さくなる。挙動については、 $t_r=10$ 以上では、荷重が初期剛性から線形で座屈後耐力発揮後、応力の再分配がおこり、荷重が低下する。その低下した後、剛性が t_r によって異なり、 t_r が大きいほど、剛性が大きくなる。また、座屈耐力は、 $t_r=1$ では周辺単純支持座屈耐力理論値を大きく下回り、 $t_r=10$ 以上では周辺単純支持座屈耐力理論値と周辺固定支持座屈耐力理論値の間の値となっており、理論値でうまく評価できない。これは解析モデル B の場合、鋼板部と左右の拘束材部との接合部分に境界条件を与えていないので、拘束材の剛性のみが影響する。よって、拘束材の剛性が鋼板部に比べ十分であっても、接合部分に面内方向、面外方向ともに変形が生じるため、周辺単純支持とも周辺固定支持とも定義できない境界条件だからであると考えられる。そして、座屈後耐力は、 $t_r=1$ では張力場理論でうまく評価ができないが、 $t_r=10$ では不完全張力場理論値、 $t_r=25$ 以上では完全張力場理論値で良く評価できる。
- (4) 載荷方法(b)の場合、拘束材部に入る曲げの影響により、 $t_r=10, 25$ では、 e_s の違いにより荷重－面内変形角関係、荷重－面外変形角関係の挙動に違いがある。しかし、拘束材部の t_r が大きくなると、剛性が大きくなるため、 e_s に関わらず挙動に違いがない。荷重－面内変形角関係、荷重－面外変形角関係ともに、それぞれの e_s で、 t_r に関わらず初期剛性がよく一致しており、 $t_r=10$ 以上になると、座屈耐力に対する拘束材の剛性の影響は極めて小さくなる。また座屈後耐力についても、 $t_r=10$ 以上になると、拘束材の剛性の影響は極めて小さくなる。また、座屈耐力は、 $t_r=1$ では周辺単純支持座屈耐力理論値を大きく下回り、 $t_r=10$ 以上では周辺単純支持座屈耐力理論値と周辺固定支持座屈耐力理論値の間の値となっており、理論値でうまく評価できない。これは解析モデル B の場合、鋼板部と左右の拘束材部との接合部分に境界条件を与えていないので、拘束材の剛性のみが影響する。よって、拘束材の剛性が鋼板部に比べ十分であっても、接合部分に面内方向、面外方向ともに変形が生じるため、周辺単純支持とも周辺固定支持とも定義できない境界条件だからであると考えられる。そして、座屈後耐力は、 $t_r=1$ では張力場理論でうまく評価ができないが、 $t_r=10$ では不完全張力場理論値、 $t_r=25$ 以上では完全張力場理論値で良く評価できる。

5.2 今後の課題

今後の課題として，以下のことが挙げられる．

- (1) アスペクト比，幅厚比等を解析パラメータとした数値解析が必要である．
- (2) 拘束材の剛性を考慮した座屈耐力および座屈後耐力評価式の提案．
- (3) 実大実験を行った極薄肉鋼板耐力壁の詳細な解析モデル化と，その解席モデルに対する数値解析．

参考文献

参考文献

- 1) 社団法人 日本建築学会：「鋼構造座屈設計指針 第3版」，2009.11
- 2) 堺万佑子，平林典久，川口淳，森野捷輔，下河原忠道，堀祐三：「極薄肉鋼板を用いたスチールハウス用耐力壁の弾塑性性状に関する実験的研究（その1：圧縮力載荷実験）」 日本建築学会東海支部研究報告集，第42号，pp.253-256，2004.2
- 3) 堺万佑子，平林典久，川口淳，森野捷輔，下河原忠道，堀祐三：「極薄肉鋼板を用いたスチールハウス用耐力壁の弾塑性性状に関する実験的研究（その2：せん断力載荷実験）」 日本建築学会東海支部研究報告集，第42号，pp.257-260，2004.2
- 4) 五十嵐規矩夫：「不均等曲げせん断力を受けるH形鋼梁ウェブの座屈耐力評価－周辺単純支持平板としての弾性座屈耐力評価－」 日本建築学会構造系論文集，第565号，pp.135-141，2003.3
- 5) 五十嵐規矩夫，鈴木琢也：「不均等曲げせん断力を受ける周辺固定支持の弾性座屈耐力の導出」 日本建築学会構造系論文集，第571号，pp.137-144，2003.9
- 6) 五十嵐規矩夫，鈴木琢也：「逆対称曲げせん断力を受けるウェブ平板の弾性座屈耐力に及ぼす境界条件の影響」 日本建築学会構造系論文集，第571号，pp.145-152，2003.9
- 7) 木村衛，井上哲郎，谷口元，橋村徹，小松健：「薄板の座屈後耐力」 日本建築学会構造系論文集，第545号，pp.135-140，2001.7
- 8) 木村衛，小河利行，橋村徹：「複合荷重を受ける薄板の座屈後耐力」 日本建築学会構造系論文集，第566号，pp.153-159，2003.4
- 9) 金箱温春，小河利行，竹内徹，松原洋介：「せん断力を受ける部分支持された薄鋼板の座屈耐力及び座屈後耐力の評価」 日本建築学会構造系論文集，第610号，pp.185-190，2006.12
- 10) 金箱温春，小河利行，竹内徹，松原洋介：「アスペクト比の異なる部分支持された薄鋼板のせん断座屈耐力及び座屈後耐力評価」 日本建築学会構造系論文，第617号，pp.161-167，2007.7

謝辭

謝辞

本研究に携わる機会を与えて下さり、また本研究を進めるにあたり、適切なるご指導を頂いた川口淳准教授に深く御礼申し上げます。

また、数値解析をする上で分からないことは多く、それらを親切にご助言いただき、また本研究を進めるにあたり、適切なるご指導を頂いた平林典久特任助教に深く感謝の意を表します。

そして数値解析を行うにあたり、助力していただいた川口研究室の皆様に感謝いたします。