

スーパーコンピュータを利用した座屈解析方法の研究

—H形鋼の局部座屈シミュレーション—

野村 敏雄 表 佑太郎

Study on Buckling Analysis Using Supercomputer

—Simulation of Local Buckling of H-section Stub Columns—

Toshio Nomura Yutaro Omote

Abstract

It is very important to appropriately determine the initial geometric imperfection and the stress-strain relation of the material for a precise buckling simulation of a complicated structure using Supercomputer. Therefore, the stress-strain relation of the compression zone of JIS SS41 steel was evaluated before the local buckling simulation was performed. A general-purpose, "ABAQUS", was used in the analysis.

In the material tests of the SS41 steel, the increase of stress in the strain-hardening regions of compression tests were larger than those of tension tests. This effect was considered in simulation analyses for compression tests of H-section stub columns and the results agreed well with those of tests without regard to width-thickness ratio. It is found that 0.1% of plate thickness is appropriate as an imperfection magnitude assumed in the analysis.

The exactitude of the member affects the ultimate strength sensitively rather than the width-thickness ratio.

概 要

スーパーコンピュータによる高度な座屈シミュレーションを複雑な構造物を対象として実施するためには、部材の初期不整や材料の応力とひずみの関係を適切に決定することが大切である。そこで、まず座屈解析で重要となる圧縮領域の応力～ひずみ関係を材料試験により評価した後、H形鋼の局部座屈シミュレーションを非線形解析ソフト「ABAQUS」で実施した。なお、対象とした鋼材はSS41である。

素材試験による圧縮挙動は引張挙動と比較して降伏後の応力増加が大きくなった。この結果を反映させてH形鋼の座屈解析を行なうと幅厚比に関係なく最大荷重以後の挙動も含めて実験値と良好な対応を示した。また、解析で仮定する初期不整の大きさは、板厚に対して0.1%程度が目安と考えられる。

幅厚比が小さいほど部材の精度が敏感に耐力に影響するので、実験を行なう際には注意が必要である。

1. はじめに

圧縮力や圧縮力と曲げモーメントを受ける鋼薄肉断面部材の局部座屈と全体座屈の連成座屈挙動は複雑であるが、その耐力や変位性状に関する理論的・実験的研究^{1),2),3)}も徐々に進められるようになってきている。

しかし、これまで取り扱われている部材は幅厚比が比較的大きいために、圧縮応力度が降伏応力度に達する前に局部座屈を生じる領域内にあるものが多く、降伏後の塑性座屈を扱うものは少ない。すなわち、塑性域の座屈後挙動を含めた解析では部材レベルの解析においても残留応力、初期不整や材料の応力～ひずみ($\sigma\sim\varepsilon$)関係などが複雑に影響し合うために最大荷重やそれ以後の挙動を的確に追跡することが難しいからである。

また、圧縮領域における $\sigma\sim\varepsilon$ 関係は引張側と同様の仮定がなされており、特に注意が払われていないのが現状である。

従って、本報告では、将来、より複雑な構造物を対象と

した高度な座屈シミュレーションを実施するための基本的条件として、部材の初期不整や材料の $\sigma\sim\varepsilon$ 関係を適切に評価して最大荷重やそれ以後の挙動を的確に追跡すること、及び座屈実験を行なう際の注意事項を解析的な面から検討することを目的として、H形鋼の局部座屈シミュレーションを非線形解析ソフト「ABAQUS」を使用して実施した。

2. 材料試験

鋼材の材料試験は引張試験のみが行なわれ、1章で述べたように圧縮側も引張側と同じモデル化がなされるのが通常である。しかし、圧縮側と引張側では $\sigma\sim\varepsilon$ 関係が異なり、座屈解析では特に圧縮領域の挙動が中心となるので、圧縮側の特性を考慮した適切な $\sigma\sim\varepsilon$ 関係のモデル化が必要と考えられる。そこで、引張試験とともに圧縮試験も実施し、本報告の解析に用いる $\sigma\sim\varepsilon$ 関係を求めることにした。

今回はSS41を対象とし、6, 9, 12, 22, 32 mmの5種類の鋼材の試験を行なった。引張試験はJIS Z 2201によ

る 1A 号試験片を用い、また、圧縮試験は板厚幅を一辺とする正方形断面で長さが 30 mm の試験片を用いた。試験片はひずみ硬化領域に入るまで座屈が発生しないプロポーションとした^{4),5)}。

2.1 試験結果

表一に試験結果を、図一1, 2に降伏応力度及び降伏ひずみで除して無次元化した各試験体の $\sigma \sim \epsilon$ 関係を示す。なお、降伏応力度としては各板厚の引張試験結果を用いた。降伏ひずみは降伏応力度を弾性係数を $2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ とし除した値である。

図一1, 2から分かるように、圧縮挙動の方がひずみ硬化が早く開始してその勾配も大きい。この傾向は試験片の板厚が厚く、立方体に近い方が座屈の影響が少ないために顕著である。そして、引張強度は1.3~1.5であるのに対して圧縮強度は2.0~2.5であり、かなり大きくなっている。

なお、ポアソン比を弾性領域では0.3、降伏後は0.5と仮定して断面積の変化を考慮した真応力度と対数ひずみの関係に実験値を変換した場合も、本試験では圧縮挙動の方が応力度は大きい値を示した。

3. 解析条件

3.1 解析方法

解析手法の詳細は「ABAQUS」理論マニュアル⁶⁾などに示されているのでここでは省略する。

以下に座屈解析の流れを示す。

- ① 弾性座屈荷重を推定する固有値解析を行ない座屈モードを求め、適切な座屈モードを選択する。
- ② ①で選択した座屈モードを部材の初期不整分布として節点に与えた解析モデルを作成する。
- ③ 作成したモデルを用いて幾何学的非線形性及び材料非線形性を考慮した大変形解析を行なう。

3.2 解析モデル

加藤ら⁷⁾の実験に対応する4種類のH形鋼が解析モデルである。解析モデルの一覧を解析パラメータ及び解析結果の一覧とともに表一2に示す。また、解析モデルの形状寸法を図一3に示す。

使用した要素タイプは八節点シェル要素である。要素分割は各解析モデルとも共通でフランジ、ウェブともに断面内では八分割、材軸方向は二十四分割である。境界条件は上下端で変位と回転を完全固定とした。ただし、荷重を加える上端では各節点が材軸方向のみ同一変位が生じることとした。

3.3 材料特性

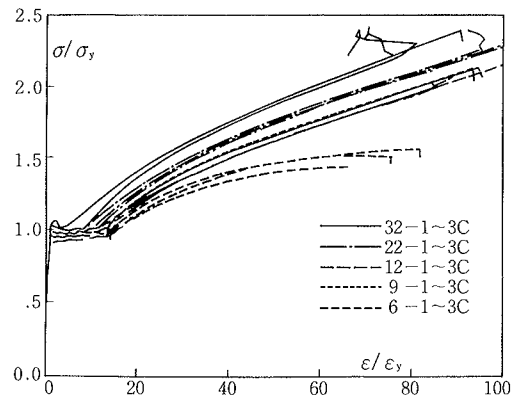
鋼材の $\sigma \sim \epsilon$ 関係は材料試験に基づいて図一4に示すモデル1, 2を設定した。モデル1は圧縮試験を基に、モデル2は引張試験を基に設定したものである。ただし、それぞれ圧縮側と引張側は同一のモデル化を行なっている。

これらは無次元化を行ない一般化してあるので、実際には解析で使用する鋼材の降伏応力度や引張強度をそれぞれ代入すれば $\sigma \sim \epsilon$ 関係が得られる。

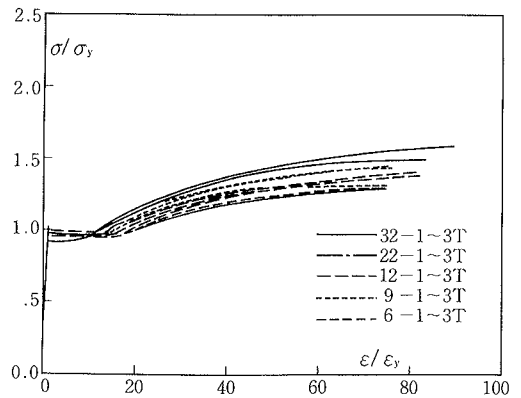
なお、「ABAQUS」ではシェル要素を用いて大変形解析

表一 1 材料試験結果

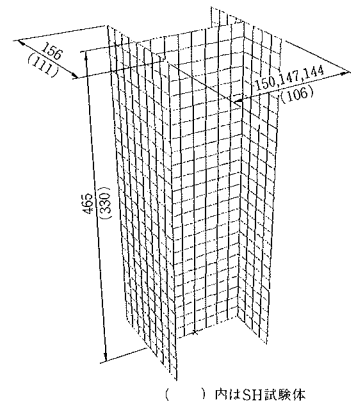
板厚 mm	降伏点 kg/cm ²	弾性係数 ×10 ⁶ kg/cm ²	引張強度 kg/cm ²	圧縮強度 kg/cm ²	伸び %
6	3,140	2.12	4,300	6,360	30
9	3,030	2.11	4,560	6,140	30
12	2,800	2.10	4,130	5,900	33
22	2,570	2.10	4,310	6,510	31
32	2,630	2.10	4,350	4,710	32



図一1 応力～ひずみ曲線 (圧縮)



図一2 応力～ひずみ曲線 (引張)



図一3 解析モデルの形状寸法

表一 2 解析モデル及び解析結果一覧

解析 ケース	初期不整 (%)			$\sigma \sim \epsilon$ モデル		降 荷 伏 重 (t)	最 大 荷 重 (t)	変 位 (mm)	備 考
	1.00	0.10	0.01	1	2				
H12C1	○			○		132.4	153.5	10.2	SC-155-6
H12C2		○		○			166.7	13.4	
H12C3		○			○		144.8	8.9	
H12C4			○	○			166.5	13.5	
H 9C1	○			○		112.8	117.5	4.5	SC-155-9
H 9C2		○		○			122.6	6.5	
H 9C3		○			○		117.2	4.3	
H 6C1	○			○		100.3	100.8	1.4	SC-155-13
H 6C2		○		○			101.2	1.8	
H 6C3		○			○		101.2	1.7	
SH 6C1	○			○		70.4	73.3	3.0	SC-110-9
SH 6C2		○		○			73.6	3.3	

を行なうとグリーンのみずみと第二種ピオラ・キルヒホッフの応力が適用される。材料試験値は公称みずみと公称応力であるので厳密には応力とみずみの関係を変換する必要がある。しかし、ここで解析するみずみ領域では両者の相違の影響は少ないと考えて材料試験値をそのまま用いた。

3.4 解析ケース

解析パラメータは1.0%、0.1%、0.01%の3種類の初期不整の大きさと $\sigma \sim \epsilon$ モデルの相違である。一般的な初期不整を表わす方法がないので、ここでは初期不整量はフランジの板厚に対する割合で示している。例えばフランジの板厚が12mmで1.0%初期不整の場合は、解析の開始時点からモデルが座屈モードに一致する変位分布を最大0.12mm有している。小松ら⁸⁾によると実際の部材の初期不整は板厚の1.0%前後であることが示されている。

表一2に示したH12C1~C4は幅厚比が6、H9C1~C4は幅厚比が9、H6C1~C4は幅厚比が13の実験結果に対応している。

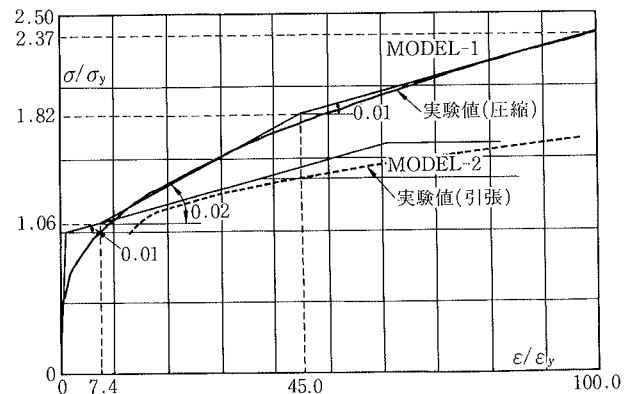
4. 解析結果と考察

4.1 固有値解析

図一5~7に座屈モードを示す。図一8は座屈荷重とモードNo(次数)の関係を示したもので、座屈荷重は1次モードの座屈荷重で割り無次元化している。ここで言う次数とは固有値の小さいほうからの順番である。

図一5~7を見るとH12はモード3、H9はモード1、H6はモード2がそれぞれ通常の実験結果に対応する座屈波形となっており、必ずしも荷重の最も小さいモード1とはなっていない。ここで、図一8を見るといずれも次数が増加すると座屈荷重も増加するが2次ないし3次モードまでの座屈荷重に大きな差はなく、特にH12においてその傾向が著しい。

これらより次の二つの事が考えられる。すなわち、実現象では初期不整、残留応力などの分布状態により座屈モー



図一 4 応力~みずみ曲線のモデル化

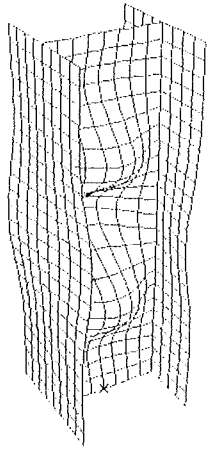
ドが変化する可能性があること、また、実際の初期不整分布や残留応力分布が実験結果のような座屈モードを発生させやすいことである。今回の解析では通常の実験結果に対応する座屈モードを初期不整として与えたが、実際には事前に座屈モードが分からないことが多い。そこで、いろいろな初期不整がある状態で固有値解析を行ない、座屈モードが変化するかどうかを調べることも必要と考えられる。

4.2 非線形解析

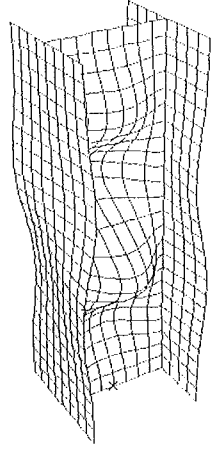
図一9、10に荷重~材軸方向変位の関係を、図一11~13にはフランジ及びウェブの局部座屈変位を示す。図一14、15には材軸方向の応力度分布を示す。

4.2.1 荷重~変位関係 図一9は圧縮側の特性を考慮した $\sigma \sim \epsilon$ モデル1を用いて行なった結果である。□印は0.1%、○印は1.0%の初期不整を与えた解析値を示している。

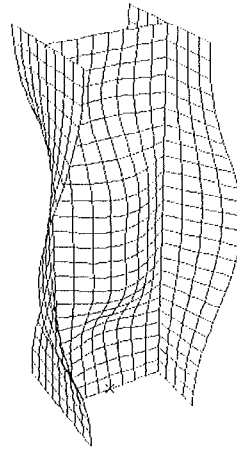
H12の0.1%初期不整(H12C2)は最大荷重以後の負勾配の領域も含めて実験値と非常に良く対応した。一方、1.0%初期不整(H12C1)は0.1%初期不整と比較して約8%最大荷重が低く、実験値と異なる挙動を示した。1.0%では初期不整が大きいため0.1%と比較して荷重と変位による2



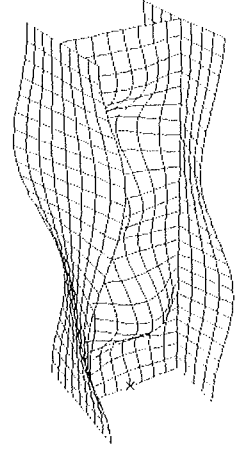
モード1: 1,012t



モード2: 1,023t

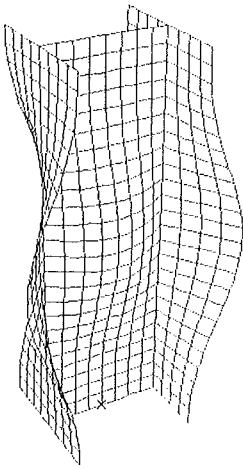


モード3: 1,069t

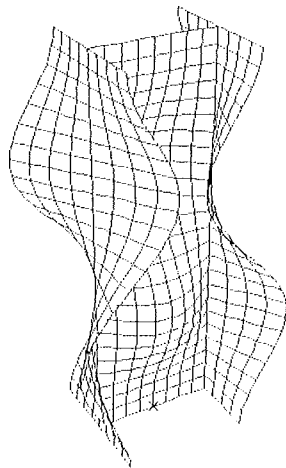


モード4: 1,129t

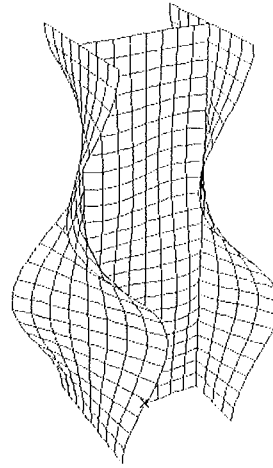
図-5 座屈モード (H12)



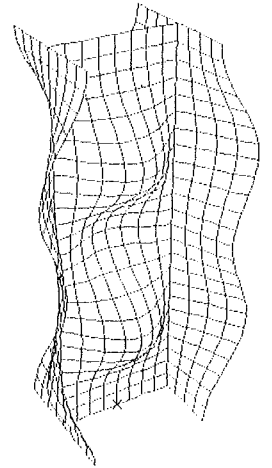
モード1: 560t



モード2: 580t

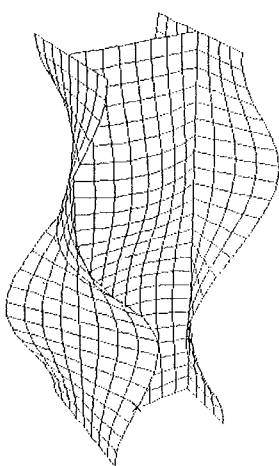


モード3: 686t

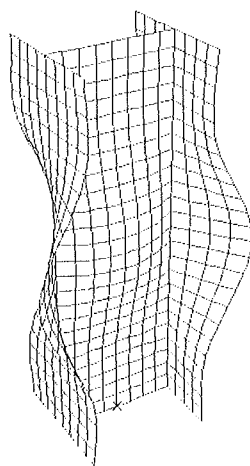


モード4: 710t

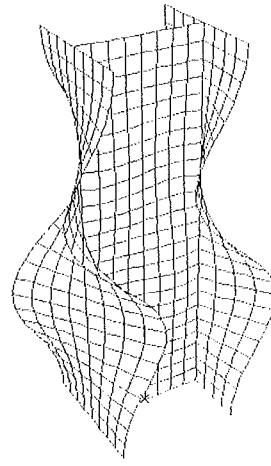
図-6 座屈モード (H9)



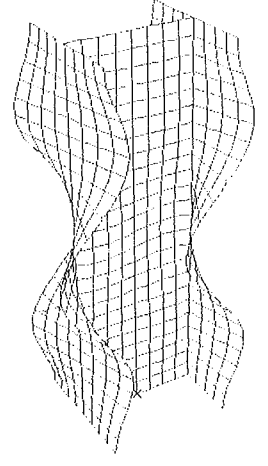
モード1: 234t



モード2: 249t



モード3: 287t



モード4: 296t

図-7 座屈モード (H6)

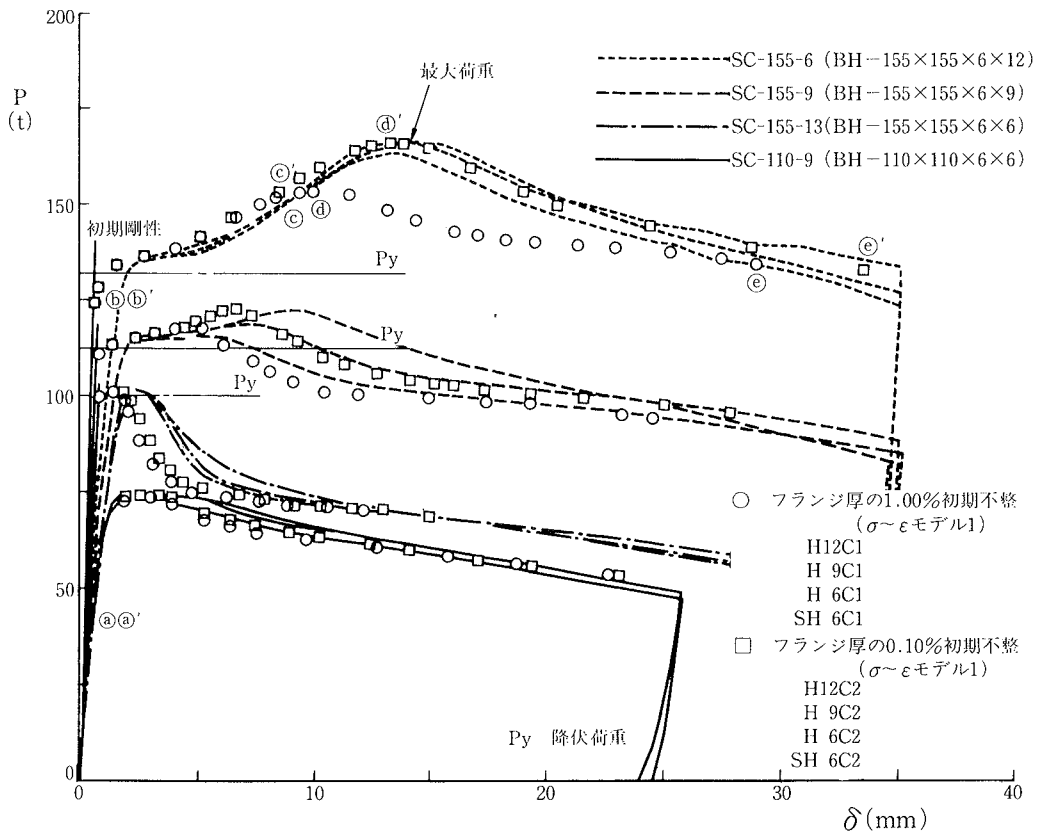


図-9 荷重～変位曲線

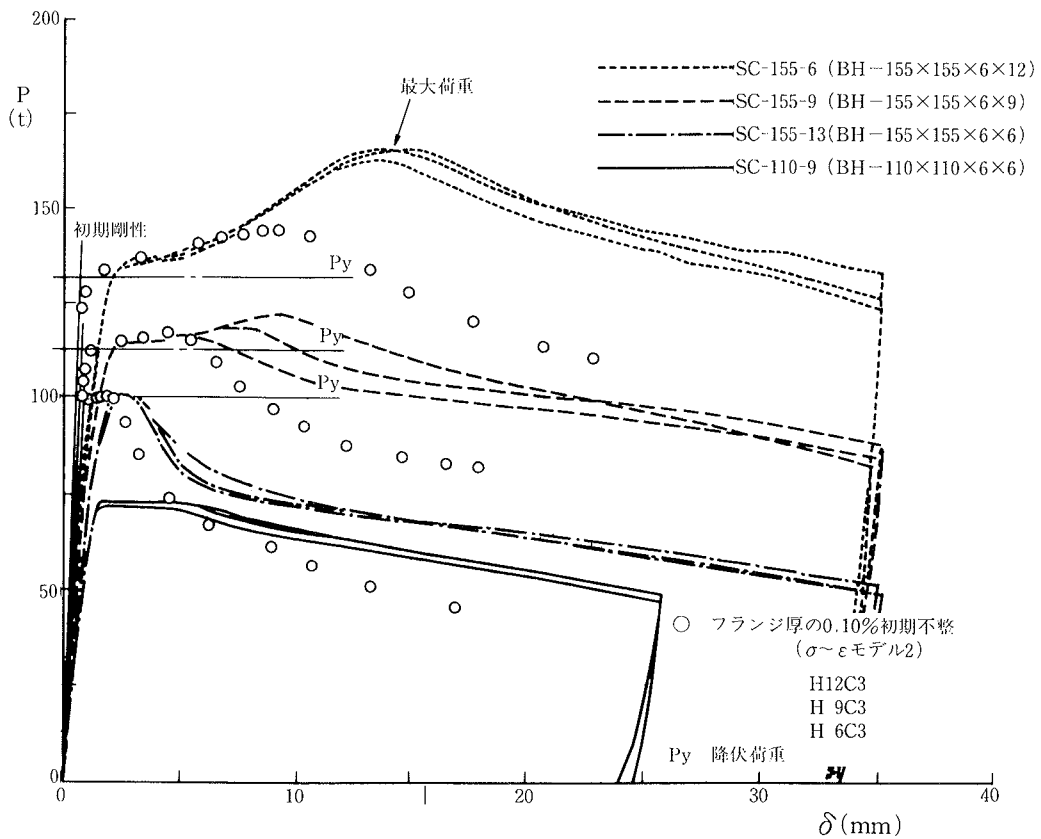


図-10 荷重～変位曲線

次曲げモーメントが早く卓越すると考えられる。

H12の場合、解析を行なった範囲において0.1%以上の初期不整を与えると実験値との対応が悪くなる。これを残留応力などの影響を無視して試験体の精度を考えると、初期不整は0.1%以下であることが示唆される。

また、図示していないが初期不整を0.01%としても変位性状は0.1%の時と大差ない。初期不整を0.1%以下に小さくすると、十分にひずみ硬化が進み、ほぼ上限まで耐力が上昇すると思われる。

H9では実験値にややばらつきがある。0.1%、1.0%初期不整の結果ともその範囲の中に納まっており、最大荷重以後の挙動も良好な対応を示している。この場合、2次曲げの影響がH12と比較して大きいため、相対的に初期不整の影響が小さくなっていると考えられる。H9はH12とH6の中間に位置しており、ひずみ硬化領域まで、曲げの影響が卓越しないで変位が進むかどうか不安定となる領域の幅厚比であると考えられる。

H6では0.1%、1.0%初期不整ともほぼ同じ性状を示しており、最大荷重以降も実験値と良く対応している。2次曲げの影響が卓越するために初期不整の相違による差がほとんど現われないと考えられる。

SH6の結果を見ると、初期不整の相違による差も小さく、実験値のばらつきが少ない。H9と比較して、わずかではあるが幅厚比が大きいためH6に近い挙動を示していると思われる。

図-10は圧縮側の特性を考慮していない $\sigma\sim\varepsilon$ モデル2を用いている。H12を見ると部材降伏した後、変位が5mm位までは実験値と同じ挙動を示すが、最大荷重が小さく、最大荷重に達した後の荷重の低下の割合も大きくなり実験値とは異なった挙動を示している。

H9では最大荷重の最も低い実験値と最大荷重に達するあたりまではほぼ等しい挙動を示しているが、その後負勾配になると荷重の低下が著しくなる。H6では最大荷重に達し、わずかに負勾配の領域に入ったところまで実験値と良い対応を示すが、その後はH9と同様に耐荷力の低下が著しくなる。

以上のように、幅厚比が大きいく程、最大荷重の近傍までは実験値と良い対応を示す傾向にある。これは、幅厚比が大きくなると、2次曲げモーメントが早期に卓越し始めるため、ひずみ硬化領域に入る前に座屈が顕著に進行することによって考えられる。すなわち、ひずみが小さく、 $\sigma\sim\varepsilon$ 関係の影響が少ない領域では良く対応する。しかし、ひずみが大きくなると、モデル2の仮定では実験値と次第に対応しなくなると考えられる。

4.2.2 局部座屈変位 図-11~13はH12C2, H9C2, H6C2の結果である。

H12では125~150tの間でフランジ、ウェブとも同時に局部座屈による変位が発生し始め、その後も荷重が増加する。フランジとウェブを比較すると、フランジの変位増加が早い。

H9では100~125tの間でフランジ、ウェブとも同時に

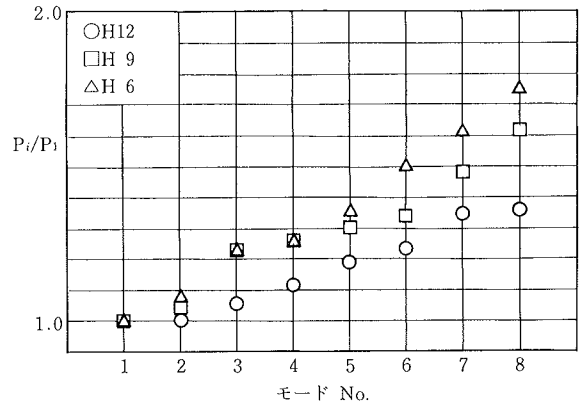


図-8 座屈荷重

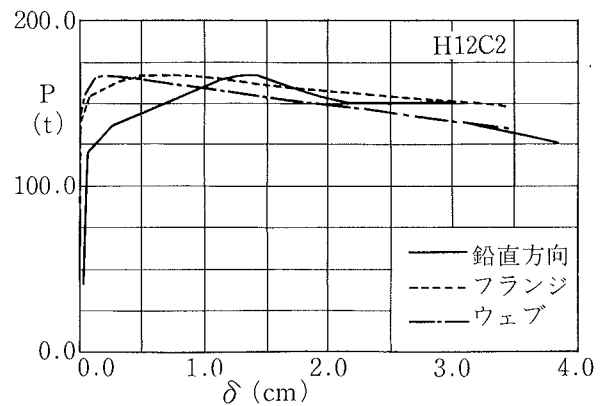


図-11 局部座屈変位

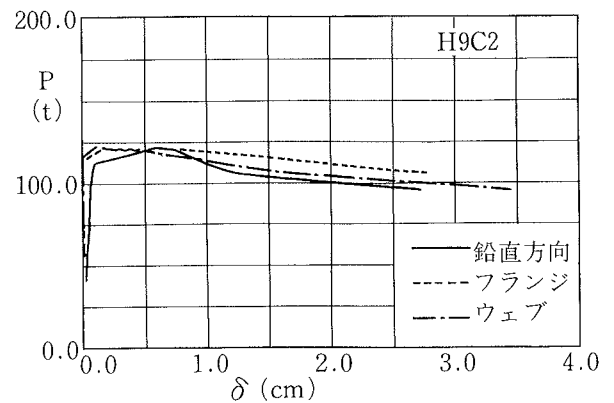


図-12 局部座屈変位

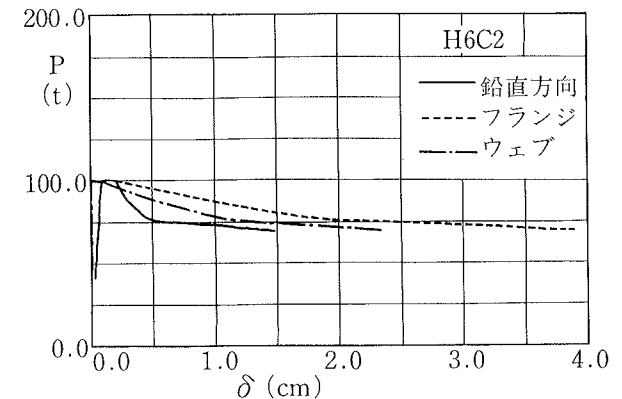


図-13 局部座屈変位

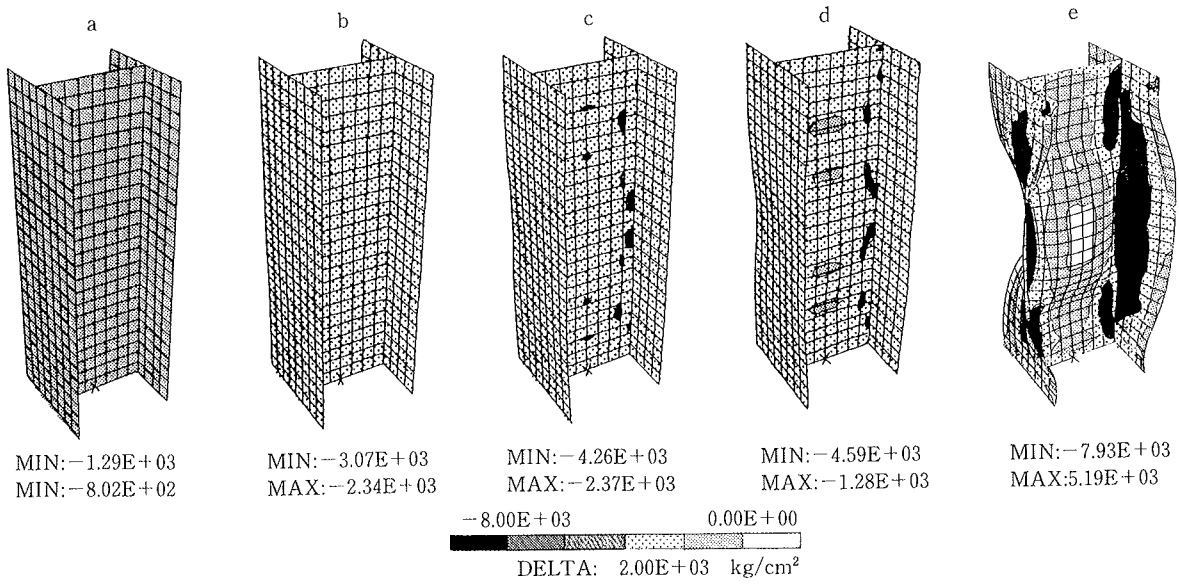


図-14 応力度分布 (H12C1, 1.0%初期不整, $\sigma\sim\epsilon$ モデル1)

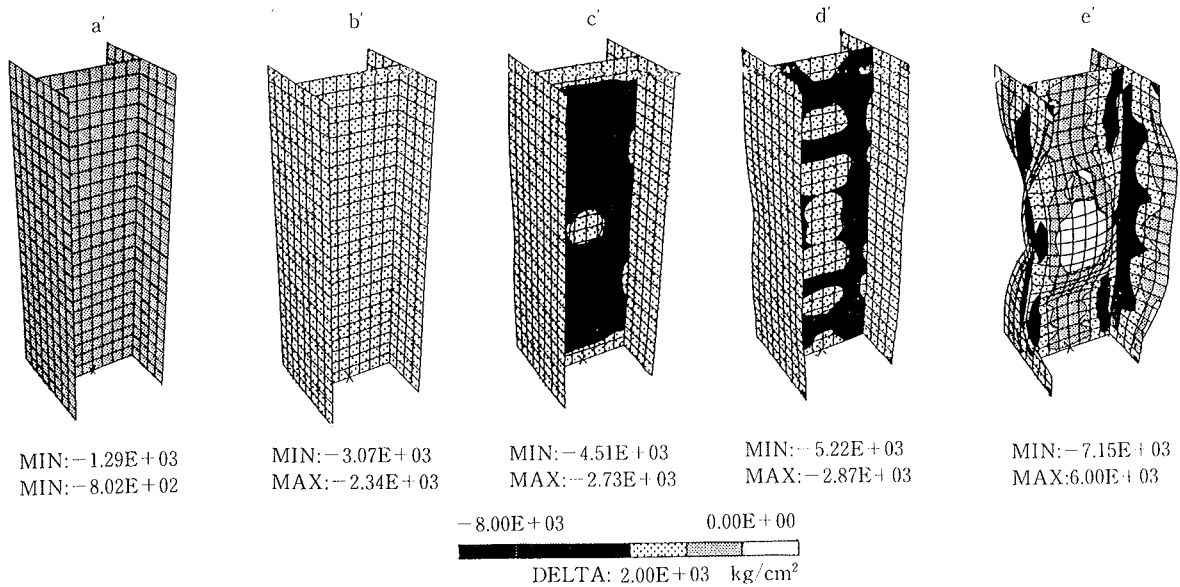


図-15 応力度分布 (H12C2, 0.1%初期不整, $\sigma\sim\epsilon$ モデル1)

変位が発生し始め、わずかに荷重が増加する。この場合もウェブと比較してフランジの変位増加が早い。

H6ではフランジ、ウェブとも同時に変位が発生した後荷重の増加はなく、直ちに低下し始めているのが特徴である。H6でもフランジの変位増加が早い。

フランジとウェブの変位増加はそれらの幅厚比の相対的關係に依存する。本解析ではいずれもフランジの方が変位増加が早く生じ、ウェブの方が拘束度が大きくなっていると考えられる。

4.2.3 応力度分布 図-14, 15は図-9の(a)~(e), (a')~(e')にそれぞれ対応するH12C1, H12C2の断面中心の材軸方向の応力度分布を示している。

$\sigma\sim\epsilon$ モデル1を用いた0.10%初期不整(H12C2)ではウ

ェブ全面が4,000~6,000 kg/cm² (©'に対応)を示す領域まで達した後で、曲げが卓越し始めるために、断面中心では除荷が生じることを示している。一方、1.00%初期不整(H12C1)では全断面が4,000~6,000 kg/cm² (©'に対応)の領域に達せずに除荷が始まっている。また、両者の変位量が一致していないので直接比較することは出来ないが、最終ステップの分布には大きな差はないと考えられる。なお、局部的に8,000 kg/cm²程度まで縁応力度が到達していた。

ここでは図示していないが $\sigma\sim\epsilon$ モデル2を用いたH12C4はH12C1と比較して4,000~6,000 kg/cm²の領域がやや多くなった。しかし、仮定している降伏後のひずみ硬化が小さく、応力度が高くないので、除荷が早く生

じていた。

H9 や H6 の場合も H12 と同様の傾向を示すが、幅厚比が大きくなるにつれて、1.0%初期不整と0.1%初期不整の差が顕著ではなくなる傾向を示した。

5. まとめ

① 圧縮試験結果について

・圧縮挙動と引張挙動を比較すると本試験結果では前者の方が降伏後の応力度の増加が大きくなっており、降伏後の挙動に相違がある。

② 固有値解析について

・荷重の最も小さいモードが必ずしも実験結果の座屈モードと一致しない。

・2次ないし3次モードまでの座屈荷重には大きな相違がないので、既往の実験結果を参考にして初期不整とする適切な座屈モードを選択する必要がある。

③ 非線形解析について

・通常用いられるバイ・リニア型の $\sigma\sim\varepsilon$ モデルでは幅厚比の小さいものでは部材降伏した後、実験結果を追跡できなくなる。

・圧縮試験結果を反映させた $\sigma\sim\varepsilon$ モデルを用いると最大荷重以後も含めて、幅厚比と関係なく実験結果と良好な対応を示す。

・幅厚比が小さい程、初期不整の大きさが実験結果に敏感に反映するので、試験体の製作に注意が必要である。

④ 今後の検討課題

・本解析では鋼材としてSS41のみを対象としたが他の鋼材に関しても圧縮試験を行ない、より一般的なモデル化が必要である。

参考文献

- 1) 山尾敏孝, 他: 薄肉 H 形短柱の耐荷力挙動に関する実験的研究, 土木学会論文集, Vol. 380/I-7, p. 331~339, (1987.4)
- 2) 山尾敏孝, 他: 薄肉 H 形鋼柱の連成座屈に関する実験的研究, 土木学会論文集, Vol. 380/I-7, p. 383~390, (1987.4)
- 3) 西村宣男, 他: 鋼 H 形断面部材の連成座屈強度特性と設計公式, 土木学会論文集, Vol. 398/I-10, p. 311~318, (1988.10)
- 4) 若林 実: 鉄骨構造学詳論, 丸善, p. 152
- 5) 倉西 茂: 鋼構造, 技法堂出版, p. 41
- 6) 加藤 勉, 他: 原子力発電所建屋の鉄骨架構の復元力特性に関する研究(その2), 日本建築学会学術講演梗概集, p.1533~1544, (1990.10)
- 7) 「ABAQUS」ユーザーズマニュアル4. 6, HKS 社
- 8) 小松定夫, 他: 補剛板の溶接残留応力および初期たわみに関する実験的研究, 土木学会論文集, Vol. 265, p. 25~35, (1977.9)