H 形鋼梁ウェブ板要素の弾塑性せん断座屈挙動に関する研究

A STUDY ON ELASTO-PLASTIC SHEAR BUCKLING BEHAVIOR OF WEB PLATE

鈴木 敏郎*, 五十嵐 規矩夫**, 常木 康弘***
Toshiro SUZUKI, Kikuo IKARASHI and Yasuhiro TSUNEKI

In this study, shear buckling behavior of web plate is investigated. First, it is shown that web elasto-plastic buckling strength in shear stress is not influenced by flange flange stiffness. This boundary condition by flange plate is close to clamped condition. Secondary, the influence of bending stress to web plate shear buckling is investigated. As a result, it is shown that the web shear buckling strength is decreased by bending stress. In addition, the web shear buckling strength is estimated by the index showing the plastic region in web plate.

Keywords : web plate, shear buckling, ultimate strength, collapse mode, frame stiffness, bending stress
ウェブ板要素, せん断座屈, 最大耐力, 崩壊形式, 枠剛性, 曲げ応力

§1. 序

せん断スパン比が小さな梁の断面内に生じる応力は、曲げ応力よりもせん断応力が支配的となり、ウェブが有する最大耐力によって梁の塑性変形性状が決定づけられる場合が多くなる。著者らは、このような梁に対して塑性変形能力評価を試みている¹⁾。また過去においても比較的ウェブ幅厚比が大きな梁やせん断応力度の影響が大きな梁に対する研究は見られる^{2)~5)}。これらの研究により梁としての変形性能や最大耐力は実験的、解析的に検討が加えられており、その予測式などが導かれている。このように現在まで行われてきているこれらに類する研究の多くは、梁としての挙動をとらえようとしたものが多い。しかし梁のせん断座屈崩壊挙動を決定づけるであろうウェブ座屈挙動を詳細に検討したものは少なく、その座屈挙動には今だ不明な点が多い。

ところで現行の鋼構造設計規準⁶⁾に規定されているウェブ幅厚比制限値は、スチフナを有するプレートガーダーの場合も含めて、座屈理論より求まる座屈耐力を基本として設定されている。しかし局部座屈耐力や変形性能の研究結果が十分に反映されたフランジの規定に比べると、ウェブに対する各種規定は、その研究成果が少ないまま定められているのが現状であろう。特に、載荷実験により現実のウェブせん断座屈挙動を検討した結果が十分に反映されているとは考えがたい。現代のように梁の大型化、その使用法の多様化の中で、梁に要求される性能はより厳しくなる方向にある。そのような中で比較的せん断スパン比が小さくなる場合が少なくない。このような梁の性状を見極める上では、ウェブの座屈性状を詳細に検討することが重要であり、急務な課題である。

そこで本研究では、ウェブ板要素の弾塑性座屈性状を、最大耐力に注目して検討する。まずウェブに対しては枠組として作用するフランジ剛性がウェブ局部座屈性状に及ぼす影響を静載荷実験により検討する。その際、比較的小さいせん断スパン比の梁を用い、ウェブにはせん断応力のみが作用しているとみなし得る条件とした。しかし梁ウェブに存在する応力がせん断応力のみと見なせる梁の条件は、極短いのみに限られる。現行で多く使用される梁では、比較的せん断スパン比が大きく、ウェブも曲げを負担しながら梁の崩壊へといたる。本研究では、このような場合のウェブの弾塑性座屈性状も、最大作用せん断耐力及び崩壊性状に着目し考察する。ただし本研究の範囲としては、梁の最大耐力がウェブ座屈により決まるものであり、斜張力場を形成した後の終局耐力は扱わない。ここでは、ウェブ塑性化後の座屈現象そのものを主な対象とし、ウェブの座屈挙動を見極めた上で、梁の塑性変形能力評価に応用することも念頭においている。

§2. H 形鋼梁ウェブ板のせん断座屈実験

2.1 実験概要及び試験体

本研究においては、ウェブ板の座屈性状を検討するため、フランジはウェブに対して周辺枠効果を与える部位として扱う。したがって載荷実験では、この枠剛性がウェブの座屈性状に与える影響を検討する。本実験では、せん断スパン比が極く小さい梁のウェブを想定し、その座屈性状を検討することを目的として図1のような載荷形式により静載荷実験を行った。4点曲げにより、陰を付けて示した中央の試験体部に逆対称せん断曲げが作用するものとした。

* ㈱構造材料研究会 代表・工博

** 東京工業大学大学院理工学研究科建築学専攻
助教授・博士(工学)

*** ㈱日建設計・東京

Representative, Kouzouzairyoku Kenkyukai Co., Ltd., Dr. Eng.
Assoc. Prof., Dept. of Architecture and Building Engineering, Graduate School of
Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
Nikken Sekkei, Ltd.

この試験体部に対し3種類の異なる枠剛性となるようにフランジ剛性を変化させた。また、ウェブ幅厚比は $d/tw=55, 65$ の2種類とした。ここでウェブせい d はH形断面の内法寸法である。図2にウェブ幅厚比55のものを例にとり試験体部寸法を示している。A1, A2, A3はウェブ内法寸法を330mm, 材長1000mmで統一してあり、フランジ剛性を変化させている。A1からA3に向かい順にウェブ板に対する枠剛性を低下させている。特にA3では中央部を細く加工し、一部分に限って剛性を極端に落としている。これら枠剛性の低下は、フランジの局部的な塑性化等により剛性が低下した場合を想定し、モデル化したものである。またフランジを弾性状態に保つために、試験体部の両端フランジをカバープレートで補強している。これによりウェブが曲げ応力により降伏しない、曲げ応力の影響を大きく受けないよう配慮している。付録に本実験で用いた試験体の主要断面位置におけるせん断応力度と曲げ応力度の分担比率を示している。

またフランジ形状は変えずにウェブ内法寸法を390mm, 材長を1200mmとした, B1, B2, B3についても実験を行った。これらのウェブ幅厚比は65である。Aシリーズ, Bシリーズのウェブ幅厚比の選定にあたっては、鋼構造設計規準⁷⁾のウェブ幅厚比制限値近傍のものを選定した。なお両シリーズで辺長比 L/d がほぼ等しく3程度になるように設定している。これらの試験体部長さは、曲げ応力の影響がないように、また載荷点に設置したスチフナの拘束がウェブの座屈波形の発生状況に影響を及ぼさないようにするためである。このスチフナには厚さ16mmの板を用い、フランジ及びウェブとはすみ肉溶接により接合している。表1にこれら試験体の形状緒元の一覧を示す。さらには、繰返し荷重下におけるウェブせん断座屈挙動を検討するため、B1と同一な試験体を用意した。したがって試験体は合計7体である。使用した鋼材はSN490Bであり表2にその機械的性質を示す。これら材料の応力度ひずみ度曲線を付録に示している。

2.2 せん断力を受けるウェブ板の大変形挙動

図3にウェブ幅厚比を一定値55としてフランジ枠剛性を変化させたAシリーズの荷重変位関係を示す。縦軸はウェブのせん断降伏耐力 wQ_p で、横軸は wQ_p に対する弾性部材角 γp でそれぞれ無次元化している。ここで注目すべきは、最大耐力が枠剛性によらず等しいこと、並びに比較的ウェブ幅厚比が大きいにも関わらず降伏耐力 wQ_p をほぼ確保できている点である。最大耐力及び線形関係から離れる耐力に関しては三体ともほぼ等しいものであったが、最大耐力時変位量に関しては、フランジ枠剛性が高いもので大きい結果となった。また最大耐力後の劣化勾配は材中央部のフランジを細くしたA3が一番大きく、フランジ剛性の高いA1が一番緩やかなものとなった。以下ではこれら三体の荷重変位関係を分析するためにウェブのひずみ進展、ひずみ分布及び最終変形状態を示しながら考察を加える。

図4は $Q/wQ_p=0.8$ におけるA1及びA3のウェブの主応力分布を示したものである。この値は、各矢印中央部に貼付した三軸ひずみゲージより求めたものである。このひずみゲージはウェブの裏表に貼付しており、局部座屈の発生による面外変形の影響は排除されている。これらの図を見る限りでは、両者に大きな違いは見られない。また材中央部のフランジを細くしたA3においても、材中央部の主応力分布がその他の部分と大きく変わることはなく、ウェブ全面に

表1 試験体一覧

Specimen	d(mm) ウェブ内法寸法	tw(mm) ウェブ板厚	材中央部		材端部		L(mm) 材長	d/tw ウェブ幅厚比
			B(mm) 梁幅	tf(mm) フランジ板厚	B(mm) 梁幅	tf(mm) フランジ板厚		
A1	330	6	150	16	150	16	1000	55
A2				9		18		
A3			50					
B1	390		150	16		16	1200	65
B2				9		18		
B3			50					

表2 鋼材の機械的性質

Test-piece	t(mm) 板厚	σ_y (N/mm ²) 降伏応力度	σ_u (N/mm ²) 引張強度	E(kN/mm ²) ヤング率	ϵ_u (%) 一様伸び	Elong(%) 破断伸び	Y.R.(%) 降伏比
SN490B	6	398	552	196	20.8	26.2	72.2
	9	350	516	205	16.1	27.8	67.8
	16	376	532	206	15.4	29.8	70.7

図1 載荷形式

図2 試験体図

わたりほぼ等しい応力分布となっている。つまりフランジが弾性状態を保つならば、ウェブ幅厚比55程度、辺長比3程度のウェブ板がせん断力を受ける場合には、ウェブがほぼせん断降伏するまでウェブ内の応力状態は、フランジ枠剛性の影響を受けないと言える。この要因により、線形関係を離れる荷重がフランジ剛性によらずほぼ等しくなったものと考えられる。またその荷重は、ウェブせん断降伏荷重にほぼ等しくなっている。

先の荷重変位関係において、三体はいずれもほぼウェブ降伏耐力を維持したまま変位が進行している。その後フランジ枠剛性の違いにより最大耐力時変位量に違いが生じている。この最大耐力時付近におけるウェブ板の挙動を図5に示した。この図はウェブの面外変形発生状況を荷重変位関係とともに示したものである。ここでは一例としてA1, A3のものについて示している。面外変形発生状況は、図中に示したウェブ中心上部の位置において裏表に貼付したひずみゲージの値の差で便宜的に示している。荷重変位関係において弾性範囲及びウェブ降伏後も面外変形の発生はまったく見られない。しかし面外変形が一旦発生するとその成長は急激である。その成長とともに荷重変位関係において急激な耐力低下があらわれている。事実、実験中の目視による観察においても、ウェブ座屈の発生と同時に最大耐力をむかえたのが観察できた。また、それまでのウェブは全面にわたり平板状態が保たれていた。これらの面外変形すなわちウェブ座屈の発生状況はフランジ枠剛性、ウェブ幅厚比によらず同様であった。したがって本実験における耐力低下要因は、座屈後の斜張力場形成後の終局状態ではなく、明確な分岐座屈によるものであると判断できる。以上から、ウェブ幅厚比55程度ではフランジ枠剛性によらずウェブ降伏耐力はほぼ確保できるものの、最大耐力時変位量はフランジ枠剛性に支配される。ただし最大耐力決定要因としては明確なウェブのせん断座屈であり、斜張力場形成後の引張降伏ではない。したがって荷重変位関係は、線形関係を離れた後もウェブ座屈まで耐力はほぼ一定値を保っている。

写真1にA1, A2, A3の最終変形状態を示す。これら3体の座屈波形に大きな違いは見られない。ただし詳細に検討すれば、A1ではフランジに目立った変形が現れていないものの、フランジ板厚が薄いA2ではウェブ座屈の影響によりフランジにねじれが発生している。またA3では、ウェブ座屈の範囲が幾分材中央に集中しており、フランジを細くした部分でフランジが内側に引張られている。これはウェブ座屈発生以降耐力低下していく過程で起こった現象である。つまりこれらの写真に現れている変形状態は最大耐力以降形成されたものであり、最大耐力にはなんら影響を及ぼしていない。しかしこれらの最終変形状態より判断するに、荷重変位関係に見られた最大耐力後の耐力劣化性状の違いはフランジ枠剛性による

図3 Aシリーズ荷重変位関係 ($d/tw=55$)

図4 主ひずみ分布 ($Q/wQ_p \approx 0.8$)

図5 ウェブ座屈発生状況

(a) A1

(b) A2

(c) A3

写真1 最終崩壊形状

ものである。以上より、ウェブ幅厚比55、辺長比3程度のせん断力を受けるウェブ板の座屈耐力はフランジ枠剛性の違いによらず、ほぼウェブせん断降伏耐力を確保できることが確認できた。しかし最大耐力時変位量及び耐力劣化性状に関してはフランジ枠剛性により違いが生じることが明らかとなった。

2.3 ウェブ幅厚比の違いによる荷重変位関係の相違及び繰返し荷重下における挙動

図6には、フランジ枠剛性が大変形挙動に及ぼす影響を、ウェブ幅厚比の違いで示している。今回実験を行った範囲においては、最大耐力は枠剛性によらず全ての試験体でほぼウェブ降伏耐力を確保する結果となった。ただし最大耐力時変位量及び最大耐力後の劣化性状はウェブ幅厚比及びフランジ枠剛性に影響を受ける結果となっている。同一フランジ枠剛性で比較した場合、最大耐力後の耐力劣化はウェブ幅厚比が大きなBシリーズのものほど急である。また最大耐力時変位量はウェブ幅厚比が大きなBシリーズのものほど小さくなっている。さらに最大耐力時変位量に関しては、ウェブ幅厚比が大きくなるほどフランジ枠剛性の影響を受けにくくなっている。つまりA1とA3、B1とB3を比べた場合、ウェブ幅厚比が大きなB1、B3で、最大耐力時変位量に開きがなくなっている。

また実際の梁に应用する場合には繰返し荷重を加えた場合の挙動を把握しておく必要があるため、漸増変位繰返し载荷を行った。その荷重変位関係を図7に示す。この図と先の図6を比較すると、繰返し荷重変位関係のスケルトン部はB1の単調载荷における荷重変位関係にほぼ一致している。また繰返し荷重下における復元力特性は、概ね安定した紡錘型となっている。しかし繰返し途中における変位0のあたりで荷重の低下が見られる。これは、ウェブに生じたせん断座屈波形が、荷重の反転に伴い、波形の発生方向が逆転することによるものである。この多少の荷重の低下を除けば、復元力特性は大変安定したものであり、特に大変形域においては荷重低下もほとんど見られず、大変安定したものとなっている。

§3. せん断力を受けるウェブ板の座屈挙動及び座屈耐力

次に、ウェブ幅厚比の違いによる座屈耐力及び大変形挙動を考察する。ここでは数値解析により検討対象を増やしている。数値解析モデルは、図1の陰を付けた部分だけを取り出したものとした。端部にせん断力を加えて逆対称せん断曲げ状態で数値解析を行った。有限要素にはシェル要素を用い、せん断力を加える断面上には剛体要素を配し、特に荷重点スチフナはモデル化していない。解析モデルを図8に示す。数値解析に使用した材料の応力度ひずみ度曲線は

図8 解析モデル

図6 ウェブ幅厚比が荷重変位関係に与える影響

図7 繰返し荷重下における荷重変位関係

引張試験結果から多直線近似で作成している。なお初期不整は固有値解析結果から得られる1次モードで与え、その大きさは、最大値がウェブ板厚の1%となるようにしている。数値解析結果の妥当性は、実験から得られた荷重変位関係との比較を通して行っている。その結果を以下の図9及び図12中で行っているが、概ね良い対応を示しており、数値解析の妥当性は示されている。

3.1 幅厚比の違いに伴う大変形挙動の差異

図9には、ウェブ幅厚比の変化による大変形挙動の違いを示している。数値解析に用いた断面は、梁せい422mm(ウェブ内法寸法390mm)、フランジ幅150mm、フランジ板厚16mmと一定とし、ウェブ板厚を変化させることでウェブ幅厚比を変えている。これはウェブ幅厚比は適宜異なるものの、载荷実験を行ったBシリーズの形状である。ウェブの辺長比は3である。この数値解析結果を実線で先の実験結果A1、B1をプロットであわせて示している。解析結果と数値解析結果は良く対応している。特に、A1は数値解析モデルの梁せいが異なるものの、幅厚比、辺長比を等しくすることで、良い一致を示している。

ここでは、現実的な梁に用いられるウェブ幅厚比の範囲で検討しているが、幅厚比の増大に伴い徐々に最大耐力が低くなっていくことが確認できる。幅厚比65程度までは、ほぼウェブ降伏耐力を確保

図9 ウェブ幅厚比が荷重変位関係に与える影響

できているが、幅厚比75になると、最大耐力はウェブ降伏耐力の9割程度まで低下している。また幅厚比75以上では、ほとんど塑性変形が見られないまま荷重低下が始まっていることから、これらは弾性座屈しているものと考えられる。

次に、フランジ枠剛性の影響を見るために数値解析を行った。実験では、中央部のみを極端に細めたものも対象としたが、ここでは、現実的な梁のプロポーションの中で、いくつかのパラメータについて検討した。また、ウェブ幅厚比に関しては、先の図9の結果を考え、ウェブ幅厚比55, 75について検討した。その結果を図10(a), (b)に示す。ただし先程とは異なりフランジ塑性化の影響を排除するために、フランジは常に弾性状態を保つようにして数値解析を行っている。

図10(a)に示す幅厚比55の場合は、数値解析を行った全てのものでもその最大耐力はほぼウェブせん断降伏耐力に到達している。また最大耐力時変位量は、フランジ枠剛性によって影響を受けており、この傾向は前章での実験結果と同様である。しかしその差はさほど大きなものとはなっていない。また(b)には、ウェブ幅厚比75の場合を

(a) d/tw=55

(b) d/tw=75

図10 枠剛性が荷重変位関係に与える影響

図11 座屈曲線比較

示している。この場合もフランジ枠剛性の影響は無く、最大耐力はいずれの場合もほぼ同じ程度であり、ウェブせん断降伏耐力を確保できないまま弾性座屈が発生し、崩壊している。またその後の耐力劣化性状もフランジ枠剛性に関わらずほぼ同程度である。

以上のように、フランジが弾性状態を保ち、ウェブに存在する曲げ応力がせん断応力に比べて無視できる程度の辺長比では、ウェブ座屈耐力に与えるフランジ剛性の影響は大きくないと判断できる。しかし、ウェブ幅厚比が小さくなり、座屈耐力がウェブせん断降伏耐力を確保できるような場合には、フランジ枠剛性により最大耐力時変位量に違いが生じてくる。

このようにウェブのせん断力下における弾塑性座屈耐力は、現実的なプロポーションの範囲では、フランジ枠剛性の影響を受けないことが明らかになった。以下では、このウェブせん断座屈耐力を、現行設計規準との比較を行い、フランジ枠剛性の効果を検討する。

3.2 せん断力を受けるウェブ板の座屈耐力評価

図11は、せん断力下における辺長比3のウェブの最大耐力及び座屈耐力を、横軸にウェブ幅厚比をとり示したものである。太実線で示したものが、実験を行ったフランジ幅150mm, フランジ板厚16mm

及び9mmの試験体形状による数値解析から得られた最大耐力である。また破線で示したものは、周辺ピン及び固定支持された純せん断力を受ける板の弾性座屈耐力である。これらの曲線は、例えば文献6)などに示されているウェブの純せん断力下における弾性座屈耐力近似式によっている。これらの式は図中に示している。また細実線で示す非弾性域における座屈耐力評価曲線としては、先の曲線の $0.6_w Q_p$ における接線で示している。これは、文献7)でウェブ幅厚比規準を規定する際に取られている方法によっている。

通常、梁のウェブ幅厚比制限等は、周辺ピン支持の座屈曲線をもとに考えられている。しかし数値解析結果は、それらを上回るものである。またウェブ幅厚比が大きくなると、ウェブ座屈耐力は通常用いられるであろうプロポーシヨンの範囲でフランジ枠剛性によらず徐々に周辺固定の場合の座屈耐力に近付く傾向がある。

さらに本数値解析における非弾性域の座屈荷重にはフランジ枠剛性の影響は全く見られない。また幅厚比70程度までは、ほぼウェブせん断降伏耐力を確保することが可能である。それ以上の幅厚比では最大耐力は幅厚比の増大とともにほぼ線形的に減少する。ただし幅厚比90でも、その最大耐力はウェブ降伏耐力の8割程度は確保できている。以上から総合的に判断するに、梁のウェブ座屈を取り扱う場合のフランジがウェブに与える固定度はピンよりもむしろ固定として扱える程度に高いと考えられる。

§4. ウェブせん断座屈性状に曲げ応力が与える影響

前章では、ウェブせん断座屈性状に及ぼす曲げ応力の影響が小さい場合を対象に、枠剛性と座屈耐力の関係を考察した。しかし辺長比がウェブ座屈性状に及ぼす影響については触れてきていない。通常の建築物における梁では、梁に存在する応力はせん断応力よりも曲げ応力を考慮しなければならない場合が多い。この存在応力の割合は、辺長比あるいはせん断スパン比により変化する。そこで以下では、比較的せん断応力度の影響が大きな場合を対象としながらも、曲げ応力により如何様な変化がみられるかを検討する。

せん断スパン比がある程度大きな梁においては曲げ応力によりウェブ板要素の一部が早期に塑性化する。また同時に枠として機能するフランジも荷重端から塑性化領域が材長方向に進行し、枠剛性が低下する。このような梁の実験を著者らは文献1)において行っている。ここでは、その結果を一部用いて、ウェブ座屈に及ぼす曲げ応力の影響を最大耐力及び座屈形式に着目して考察を進める。この実験等の詳細は文献1)を参照されたい。さらに考察対象を増やすため

に数値解析を行った。この数値解析手法は前章のものと同様である。

4.1 曲げ応力の影響によるウェブせん断座屈耐力の低下性状

図12に断面を一定としてせん断スパン比を変えて行った実験及び数値解析から得られた荷重変位関係を示す。実験結果は文献1)で行った単純梁載荷の結果であることから、試験体長さを倍にして表記してある。実験と数値解析では載荷形式が異なるものの、概ね良い一致を示している。

この図より、試験体長さが長くなると最大耐力は徐々に低下する傾向にあることがわかる。また辺長比 L/d が6以下のものは、最大耐力後の耐力低下の割合が変形と共に小さくなっているのに対し、 L/d が7以上のものは、耐力低下の割合が変形と共に大きくなっていく。これらの違いはウェブ座屈形式の違いによるものであると考えられる。そこで実験における最終変形状態を写真2に示す。(b)に示す $L/d=8$ 相当の試験体にはフランジ局部座屈が見られるが、これは最大耐力後耐力劣化の過程で発生したものであり、耐力劣化要因は実験時の観察よりウェブせん断降伏であった。したがってウェブに生じている局部座屈波形は局部座屈長さがほぼ梁せい程度のせん断座屈波形である。これら両者を比較すると座屈波形の長さが明らかに異なっている。試験体長さが短い(a)のものは全長にわたって、ウェブ座屈波形が現れているのに対し、試験体長さが長い(b)のものは、梁せい程度の領域にウェブ座屈波形が限定されている。

この要因は次のように考えることができる。辺長比が小さいものは、フランジが弾性のままウェブ板が全域にわたり同時にせん断降

図12 材長が荷重変位関係に及ぼす影響

(a) $L/d=6$ 相当試験体

(b) $L/d=8$ 相当試験体

写真2 材長変化による局部座屈発生状況の違い

伏する。そのためウェブ全面に及ぶ座屈波形が形成される。これに対し辺長比が大きくなると、ウェブがせん断降伏する以前に曲げ応力により、ウェブは材端部及びフランジ側端部より降伏領域が広がる。そのため、曲げにより降伏したウェブ領域ではせん断力を負担できる領域が減少する。ここでさらに荷重が上昇すると、ウェブは材端部からある領域まで完全に塑性化した状態となり、その領域のみに塑性座屈が発生することとなる。

このような要因により、ウェブのせん断力による座屈耐力は、辺長比の増大とともに減少し、図12の荷重変位関係における最大耐力の低下につながっている。またその後の耐力劣化性状の違いも、ウェブ座屈性状による違いから考察可能である。ウェブ座屈が全面に及ぶ場合には変形が材全体に分散し、緩やかに荷重低下しながら変形が進むこととなる。しかし、材端のみに座屈波形が生じる場合には、変形が集中し急激な耐力低下につながる。

4.2 ウェブ座屈耐力低下及び座屈形式に及ぼす曲げ応力の影響

ところで、文献1)では比較的せん断応力度の影響が大きな梁の塑性変形能力をせん断余裕度という概念で整理可能であることが示されている。この指標は、梁端部に作用する曲げ応力度とせん断応力度の比を表すものである。そのためせん断座屈に及ぼす曲げ応力度の影響もこの指標で整理可能であると考え、本研究で対象とする梁の最大耐力を整理する場合にも適応を試みた。

さらに検討対象を増やすために数値解析を行った。数値解析概要はこれまでと同様である。ただしフランジ板のねじれ座屈を防止するために、フランジ材軸回りの回転は拘束して解析を行っている。図13にその結果を示す。縦軸が最大せん断耐力をウェブのせん断降伏耐力 wQ_p で基準化したものであり、横軸にはせん断余裕度をとっている。ここで Q_p は梁端部が全塑性モーメントに達した時に梁に作用しているせん断力を表している。ここではフランジ板厚、フランジ幅を変化させて解析を行った。また図12の実験結果も示している。さらに、▼は先の写真2で示したウェブ座屈形式が変化している点を示している。

この図の範囲では、せん断余裕度が1.1程度までは、ほぼウェブ降伏耐力を確保できている。それ以上のせん断余裕度では、材長全体にわたる波形が形成されるものの最大耐力は低下する。さらに曲げ

図13 ウェブ変形発生状況変化点及び最大耐力

の影響が大きくなりせん断余裕度が大きくなると、座屈形式は端部のみに座屈波形が形成されるせん断座屈となる。その変化する時のせん断余裕度はフランジ剛性による若干の違いはあるものの、概ね1.3前後であると考えて良い。またその時の最大耐力はウェブ降伏耐力の9割程度である。しかし、曲げ応力の影響が大きい範囲ではフランジの局部座屈による崩壊あるいはウェブの曲げ座屈崩壊となることが予測されることは言うまでもない。文献1)の結果によれば、フランジ局部座屈が支配的な安定した曲げ塑性ヒンジの形成は、せん断余裕度が約1.6以上であった。このことから、せん断余裕度1.3から1.6程度は、せん断座屈的な崩壊と曲げ的な崩壊が混在している領域であり、1.3以下はせん断崩壊型、1.6以上は曲げ崩壊型として分類できる。

§5. 結

本研究では、H形鋼梁のウェブ要素の弾塑性座屈性状を載荷実験及び数値解析により検討し、以下のような知見を得た。

ウェブに作用する応力がほぼせん断応力のみの場合においては、フランジ枠剛性がウェブの座屈耐力に与える影響は小さいことが明らかになった。これは枠剛性の違いによるウェブ内の応力分布に差

(a) Aシリーズ

(b) Bシリーズ

(c) 断面位置

付図1 試験体の全塑性相関図

異が見られないことによるものである。またウェブ幅厚比が70程度までは、ほぼウェブ降伏耐力をウェブが座屈崩壊することなく確保することができる。

辺長比が長くなりウェブに作用する曲げ応力を無視できない範囲では、曲げ応力の影響によりウェブのせん断座屈耐力は低下する。その際、曲げ応力の影響が大きくなると、ウェブ座屈形式が材全体に及ぶものから、材端部のみに限定されるものに移行することを示した。その際のせん断余裕度は1.3程度であった。

付録

1. 試験体のせん断と曲げの全塑性相関関係

付図1に本研究で使用した試験体のせん断応力度と曲げ応力度の全塑性相関関係及びせん断応力度と曲げ応力度の比率を示している。(a)がAシリーズのもの、(b)がBシリーズのものである。図中のI, II, III, IVは(c)に示す各試験体の断面位置をそれぞれ示している。実際の試験体ではフランジとウェブに使用している鋼材の降伏応力度は異なっているが、この図を作成する場合には、降伏応力度は等しいものとして取り扱った。ウェブ内の曲げとせん断の相互効果は考慮しておらず、曲げ応力とせん断応力は分離して考えている。

2. 使用鋼材の応力度ひずみ度関係

付図2に本研究で使用した鋼材の応力度ひずみ度関係を示す。これらの関係は、JIS 1号試験片を用いた引張試験より得ている。またひずみ度の値は、評点間を変位計で計測した値を元に算出した評点間の平均ひずみ度である。

参考文献

- 1) 鈴木敏郎, 五十嵐規矩夫, 常木康弘: せん断曲げを受けるH形鋼梁の崩壊形式と塑性変形能力に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, pp.

付図2 使用材料の応力度ひずみ度関係

- 185~191, No. 547, 2001.9
- 2) 高田弘志, 藤原勝義: 溶接H形はりの耐力に関する研究(その3), 日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.177~268, 昭和48年6月
- 3) 鈴木敏郎, 小野徹郎, 金箱温春: せん断曲げを受ける鉄骨H型断面梁の局部座屈挙動と塑性変形能力, pp.91~98, 第260号, 昭和52年10月
- 4) 井上哲郎, 秋山 宏: せん断降伏型H形断面部材の荷重-変形関係, 日本建築学会構造系論文報告集, pp.52~60, 第348号, 昭和60年2月
- 5) 奥田香二, 今川克彦, 黒羽啓明, 小川厚治: 幅厚比の大きいH形断面曲げ材の荷重-変形挙動に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文報告集, pp.89~99, 第402号, 1989.8
- 6) T.V. Galambos: Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures, 1998
- 7) 日本建築学会: 鋼構造設計規準, 1973.5

(2001年11月8日原稿受理, 2002年3月4日採用決定)