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

A STUDY ON COLLAPSE MODE AND PLASTIC DEFORMATION CAPACITY OF
H-SHAPED STEEL BEAMS UNDER SHEAR BENDING

鈴木 敏郎*, 五十嵐 規矩夫**, 常木 康弘***

Toshiro SUZUKI, Kikuo IKARASHI and Yasuhiro TSUNEKI

In a recent study, it was clear that the beam with large web slenderness has enough plastic deformation capacity for seismic design. But the large deformation behavior and the collapse mechanism of these beams have not been cleared. In this study, the collapse mode and that deciding the maximum load are investigated by experiment study and numerical analysis. As a results, it is clear that the ratio of the shear strength to bending strength of the beam is very important factor for the plastic deformation behavior. And the plastic deformation capacity of the beam is estimated by using the ratio.

Keywords : beam, local buckling, plastic deformation capacity, ultimate strength, shear strength, collapse mode
梁, 局部座屈, 塑性変形能力, 最大耐力, せん断耐力, 崩壊形式

§1. 序

著者らは、これまでの一連の研究1), 2)においてウェブ幅厚比が大きな梁に対しても、フランジ幅厚比を小さくすることで耐震設計梁として使用されるための塑性変形能力を十分有していることを明らかにしてきた。また文献2)ではウェブ幅厚比が大きい梁の特徴として、フランジ幅厚比を小さくした場合に、必ずしも塑性変形能力が大きくなるものではないことを指摘している。これは、梁の崩壊形式が、構成要素の幅厚比により変化することによるものであることを示した上で、塑性変形能力が最大となる構成要素の幅厚比の値の概略を示している。さらにこの値はせん断スパン比によっても変化することを明らかにしている。しかし、その中では梁の崩壊形式を規定する主要因について明確にはふれないまま、塑性変形能力が最大となる境界の存在のみを示している。

つまり現行では、ウェブ幅厚比が大きな梁においても、塑性設計梁としての可能性と適用範囲の概略については示されてはいるものの、梁の崩壊を決定づける最大耐力決定要因については未だ十分に明らかにされていないといえる。したがって現在では建築物の多様化の中で、軽量化及びコストなどの面を考えれば、できる限りウェブ板厚を薄くしたいと言う設計者の立場からの要求は高まっているものの、ウェブ幅厚比の大きな梁の崩壊形式並びに塑性変形能力がどのような要因で決定されているかがいまだ不明であることから、このような梁の積極的な使用にはいたっていないのが現状であろう。

このような背景の中で文献3), 4)では文献5)で提案されている応力度比を参考として、曲げ応力度とせん断応力度の比に着目し、

ウェブ幅厚比の大きな梁の塑性変形能力評価を試みている。そこで提案されている応力度比を用いることで、ウェブ幅厚比の大きな梁の塑性変形能力は概ね整理できることが示されている。しかし、この応力度比を求める際の局部座屈長さ等の捕らえ方が必ずしも明確なものとはいえないなど、その評価方法はかなり煩雑なものとなっている。また、必ずしも梁の崩壊の実体を捕らえた評価法になっているとはいえない。

ウェブ幅厚比が大きな梁あるいはウェブ板厚の薄い梁は、フランジ断面積に対するウェブ断面積の割合が小さくなる傾向にある。また比較的梁せいが高くなるため、せん断スパン比も小さくなる傾向にある。これらの要因により、ウェブ幅厚比の大きな梁は、断面内に生じる応力が曲げ応力よりもせん断応力が支配的になる場合が多くなる。また、このような梁ではフランジ局部座屈が支配的な構成要素の連成座屈は発生しにくく、ウェブの耐力によって梁の塑性変形性状が決定づけられると考えられる。

そこで本研究では載荷実験を通し、以上のようなウェブ幅厚比の大きな梁の特徴を再度確認する。その上でウェブ幅厚比が大きな梁の崩壊形式並びに最大耐力を決定する要因に対して考察を加える。さらに、そこから導かれる評価因子を用いて塑性変形能力を整理し、塑性変形能力最大点との関係を明確にする。

§2. せん断曲げを受ける H 形鋼梁の大変形挙動

2.1 試験体及び実験概要

本実験では、ウェブ幅厚比が大きな梁の崩壊決定要因を考察することを目的とする。そのため構成要素の幅厚比のみを実験変数と

* 鋼構造材料研究会 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

Kouzouzairyou Kenkyukai Co., Ltd., Representative, 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.

せず、崩壊性状に影響をおよぼすであろう構成板要素の断面積比及びせん断スパン比などを実験変数とした载荷実験を行った。

本研究ではウェブ幅厚比75.0, 66.7を中心にして試験体を選定した。これらはウェブせいのとり方が異なるが、鋼構造設計規準⁹⁾における制限値をみたくないものである。また一体のみ制限値をみたくものについても実験を行った。フランジに関しては、十分塑性化後に座屈する幅厚比のものを選定している。これらの幅厚比のものは、文献2)において全塑性モーメントを確保することが保証されているものである。

また板幅と板厚を変化させることで、構成板要素の幅厚比が同じ場合には板の断面積が変化する。この断面積の変化が梁の塑性変形状態におよぼす影響を考察するための試験体も用意した。すなわちこれらの試験体は、ウェブに対するフランジの断面積比を実験変数とする試験体である。また構成板要素の幅厚比を等しくして、せん断スパン比を変化させた試験体も用意した。これらの試験体の試験体名、試験体形状を表1に示す。ただしこれらの値は公称値を用いて算出したものである。

载荷形式は図1に示すような単調载荷とし、両端単純支持の梁の中央に集中荷重を载荷するものである。梁の崩壊が片側スパンで起こるように、片側を载荷梁とするためカバープレートを用いて補強している。また試験体側の片持梁としての変位及び荷重を計測するために図中に示す式を用いて補正をおこなっている。

試験体に使用した鋼材の機械的性質を表2に示すが、試験体ごとに使用した鋼材が異なるため試験体と鋼材の対応も示している。本実験で使用した鋼材には、明確な降伏棚が存在した。また、表に示す降伏応力度は降伏点の値を示している。

図1 試験体図

表1 試験体一覧

Specimen	Section	L	D/t _w	b/t _f	L/D
A1	H-450×200×6×12	1800	75.0	8.33	4.00
A2	H-450×200×6×16	1800	75.0	6.25	4.00
A3	H-450×200×6×19	1800	75.0	5.26	4.00
A4	H-450×200×9×16	1800	50.0	6.25	4.00
A5	H-450×150×6×12	1800	75.0	6.25	4.00
A6	H-450×200×6×16	2500	75.0	6.25	5.56
A7	H-450×150×6×12	1100	75.0	6.25	2.44
B1	H-400×150×6×16	1600	66.7	4.69	4.00
B2	H-400×200×6×16	1600	66.7	6.25	4.00
B3	H-400×150×6×22	1600	66.7	3.41	4.00
B4	H-400×200×6×12	1200	66.7	8.33	3.00
B5	H-400×200×6×16	1200	66.7	6.25	3.00

2.2 構成板要素の幅厚比が梁の荷重変位関係に与える影響

まずここでは、構成板要素の幅厚比がウェブ幅厚比の大きな梁の塑性変形状態に与える影響について確認する。図2にウェブ幅厚比及びせん断スパン比を一定とし、フランジ幅厚比を変化させた場合の無次元化荷重変位関係を示す。縦軸の荷重は部材端モーメントを全塑性モーメントで、横軸の変位は部材角を全塑性モーメントに対する弾性部材角でそれぞれ無次元化して示している。ただし全塑性モーメントはフランジとウェブのそれぞれの降伏応力度を用いて算出している。また図中の▼は最大耐力点を示している。これらの表現は以降の図においても同様である。

このフランジ幅厚比を変化させた三体の試験体を比較した場合、フランジ幅厚比を小さくすれば必ず塑性変形能力が大きくなるものではないことが確認できる。A2とA3では、フランジ幅厚比がA3の方が小さいにもかかわらず、塑性変形能力は逆に小さくなる傾向にある。このような傾向は文献2)のなかでもとらえており、崩壊形式が変化することによるものであることを示している。またフランジ幅厚比が小さい試験体は、他の試験体と比較して最大耐力後の耐力劣化が若干激しいものとなっている。このようにフランジ幅厚比を小さくした場合には、その性状が幅厚比が大きい場合の性状と類似したものではなく、全く別の性状を示すようになる。事実、後に示す最終崩壊形状は異なるものであった。したがって、このように別な性状を単に幅厚比のみで説明するのは困難であり、幅厚比とは別の要因で説明、整理するのが妥当であると考えられる。

さらに、図3にはせん断スパン比及びフランジ幅厚比を一定としたままウェブ幅厚比を変化させた場合の荷重変位関係を示す。この場合も図2と同じく、必ずしもウェブ幅厚比が小さい試験体ほど塑性変形能力、耐力上昇率ともに高くなるというものではないことが確認できる。この三体の中では、ウェブ幅厚比が75.0のものと66.7のものではほとんど同様な性状を示しており、ウェブ幅厚比の違いによる大きな差異はみられない。

このようにウェブ幅厚比が大きな梁の塑性変形状態は、構成板要素の幅厚比のみでは明確に分離、整理することが難しいことが分かる。つまりこのような梁の塑性変形状態及び崩壊形式に影響を与えるものとして、幅厚比以外に何らかの要因が存在することを示唆するものである。梁の崩壊性状を見極めるために以下において、単に最終崩壊形状に着目するのみでなく、塑性変形に伴うウェブ内のひずみ度の進展状況に着目し、ウェブ幅厚比の大きな梁の崩壊過程に対して考察を加える。

表2 鋼材の機械的性質

試験体 種別	鋼種	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(%) 伸び	Y.R.(%) 降伏比
A	SN490B	6	415	559	210	16.0	25.7	74.2
		9	383	543	210	17.0	25.4	70.5
		12	368	536	206	19.0	27.4	68.6
		16	377	541	204	19.9	29.3	69.6
		19	375	543	204	18.7	29.8	69.1
B	SN490B	6	398	552	196	20.8	26.2	72.2
		12	382	528	197	17.3	27.5	72.4
		16	376	532	206	15.4	29.8	70.7
		22	357	521	197	18.6	29.2	68.4

2.3 断面形状の違いが梁の崩壊性状に与える影響

図4は、フランジ幅厚比を変化させた場合の梁の崩壊の様子を各試験体ごとに示したものである。フランジ局部座屈の進展とウェブせん断ひずみの進展を荷重変位関係とともに示している。フランジ局部座屈ひずみは、端部から100mmの位置でのひずみ1と、225mmの位置でのひずみ2の2箇所示している。フランジの局部座屈ひずみは、図4(a)中に示す位置に貼付したウェブ接合線上のひずみゲージの値とフランジ自由縁のひずみゲージの値の差である。通常は均等な両者のひずみ進展が、ねじれを伴うフランジ局部座屈により乱れが生じるため、両者の値の差がフランジ局部座屈の進展状況を便宜的に示すものとなっている。しかしこのひずみ度の値に物理的な意味はなく、大小比較のみが可能なのである。またせん断ひずみは、図中に示した三軸ゲージからウェブ上の最大せん断ひずみ度の値を算出し、その進展状況を変位の進展とともに示したものである。これらの試験体のウェブに使用した鋼材のせん断降伏ひずみ度は、約0.3%である。また図は、(a)に示すものがフランジ幅厚比が一番大きいもの、(c)に示すものがフランジ幅厚比が一番小さいものであり、(b)のものがその中間的なものである。ここではこの順番に説明を加え、幅厚比の違いと崩壊性状について考察を加える。

これらの図をみる限りにおいて、(a)に示すA1はフランジ局部座屈の進展が顕著であり、荷重変位関係が最大耐力点に到達した時の

図2 荷重変位関係に及ぼすフランジ幅厚比の影響

図3 荷重変位関係に及ぼすウェブ幅厚比の影響

フランジ局部座屈ひずみはかなり大きくなっている。これよりこの試験体の崩壊がフランジ局部座屈が支配的なものであったことがわかる。この試験体では最大耐力時においてもウェブの最大せん断ひずみ度はせん断降伏ひずみ度に達しておらず、このひずみゲージ貼付位置におけるウェブはせん断降伏していないとみることができる。

一方(c)に示すA3は、フランジ局部座屈の進展が顕著には現れておらず、最大耐力時のフランジ局部座屈ひずみはA1に比べて大きくなっていない。しかしせん断ひずみは、最大耐力点を過ぎたあたりから大きく進行し始めている。逆にいえば、せん断ひずみの値が

図4 フランジ座屈ひずみ及びウェブ内せん断ひずみ進展状況

図5 最終崩壊形状

降伏ひずみ度に達することで、梁は最大耐力になっている。このような状況から、最大耐力時点においては、ウェブは端部からある位置までの全領域において完全な塑性化状態にあると判断できる。したがってウェブは剛性がほとんど無い状態にあり、最大耐力後の劣化が他の二試験体に比較して急激なものとなっていると考えられる。

また(b)に示す A2はこれら A1と A3の性状のちょうど中間的なものとなっている。したがって A2は、フランジ局部座屈波形が成長しながらも、最終的にはウェブがせん断降伏し、このフランジ局部座屈によるフランジの剛性低下に伴う耐力低下とウェブせん断降伏に伴う耐力低下がほぼ同時に発生し、梁の性状を決定しているものと考えることができる。

これら三体の最終崩壊形状を図5に示す。(c)に示す A3の崩壊形式は明らかに他の二体と異なり、ウェブの剛性低下に伴うせん断変形が顕著に現れ、フランジにはねじれ変形が見られず、ウェブ側に落ち込んでいる。これからも、A3はせん断力によりウェブが降伏し、剛性が低下したことが確認できる。しかしそのせん断波形が確認できる範囲は、端部から梁せい程度までの長さであり、せん断局部座屈波形は梁全長に及んでいない。このせん断波形が確認できる範囲は、フランジの塑性化領域長さにおさまっていることを確認している。

これに対して(a)に示す A1では、フランジにはねじれ変形がみられ、フランジ局部座屈が顕著にあらわれた形で崩壊している。ウェブにも面外変形が確認されるものの、この変形はフランジ局部座屈に伴う連成局部座屈的なものであると思われる。また(b)に示す A2もねじれを伴うフランジ局部座屈が発生しており、A1のものときほど変わらない崩壊形式となっている。しかしウェブ局部座屈波形は、A1のものより材長方向に長くなっており、ウェブ座屈波形の形状もいくぶん A3のものに類似している。

以上より、ウェブ幅厚比の大きな梁では、フランジ幅厚比が大きい場合にはフランジ局部座屈耐力が支配的となり、梁の最大耐力が決定されている。しかしフランジ幅厚比が小さくなりフランジ局部座屈が発生しにくい断面では、ウェブのせん断降伏により梁の最大耐力が決定される。ここで梁せい、梁幅を同じにしてフランジ板厚を増すことでフランジ局部座屈耐力を向上させた場合には、ウェブ降伏荷重が等しいまとなる。これが図2でみた荷重変位関係のようにフランジ幅厚比を小さくすることで塑性変形能力が頭打ちになるばかりでなく、逆に塑性変形能力が低下する現象があらわれる要因である。

§3. せん断曲げを受ける H 形鋼梁の最大耐力決定要因

3.1 梁の荷重変位関係に影響を及ぼす要因

前章までの考察により、ウェブ幅厚比の大きな梁の最大耐力には、ウェブのせん断降伏が何らかの影響を及ぼしていることが推察された。しかしせん断曲げを受ける梁を対象する場合、ウェブのせん断降伏耐力は、梁の曲げ耐力との相対的な関係でとらえるべきであると考えられる。構成要素の幅厚比が等しい場合には、梁のせん断降伏耐力に影響を及ぼす主要因としては、せん断スパン比と構成要素の断面積の比率が考えられる。そこで、ここではせん断スパン比と構成要素の断面積比を変化させた場合の実験結果を比較し、それが梁の荷重変位関係におよぼす影響について考察する。

図6は、ウェブ幅厚比75.0、フランジ幅厚比6.25と一定として、材長を変化させた場合と、フランジ幅及び板厚を変化させてフランジ断面積に対するウェブ断面積の割合を変化させた場合の荷重変位関係である。A2と A6が断面積が等しくせん断スパン比が異なるもの、A5と A7が断面積比が等しくせん断スパン比が異なるもの、A2と A5がせん断スパン比が等しく断面積比が異なるものである。

この4体の荷重変位関係の全体的な傾向としてはさほど違わないものと判断可能であるが、本研究では、梁の性状をとらえる上での一つの指標として最大耐力時の変位量を考えることから、ここでも特に最大耐力時の変位量のみに着目する。その場合、この図に示すように構成要素の幅厚比が等しいものでも、せん断スパン比や断面積比が異なることで塑性変形能力に変化が現れる。この四体の試

図6 荷重変位関係に及ぼすせん断スパン比及び断面積比の影響

(a) $A_w/A_f=1.25$ の場合 (b) $A_w/A_f=0.69$ の場合

図7 セン断スパン比が荷重変位係に与える影響

験体と比較した場合、断面積比が大きい A5 と A7 を比較すると、せん断スパン比が小さい A7 の方が最大耐力時変位量が大きい。これに対して、断面積比が小さい A2, A6 では、せん断スパン比が小さい A2 の方が最大耐力時変位量が大きくなっている。また、同じせん断スパン比の A2 と A5 では、断面積比が大きい A5 の方が最大耐力時変位量が小さくなっている。つまり断面積比の違いによってもせん断スパン比が塑性変形能力に与える影響が異なることとなる。このようにウェブ幅厚比の大きな梁では、断面積比、せん断スパン比が相互に関連しながら塑性変形性状が決定される。さらにこの断面積比の違いとせん断スパン比の影響を次節において検討対象を増やし考察する。

3.2 梁が有するせん断耐力が荷重変位係に与える影響

断面積比及びせん断スパンを変化させた場合の荷重変位係にみられる違いを把握するために、載荷実験での試験体本数を増やす意味で有限要素法を用いた数値実験を行った。解析には汎用有限要素解析プログラム ABAQUS を用いた。使用した要素は四節点シェル要素である。材料定数は引張試験結果から得られた一様伸びまでの部分を真応力-真ひずみの関係に変換し、その塑性部分を多直線近似で入力している。また弾性部分におけるヤング率は $2,100\text{t/cm}^2$ とし、ポアソン比は 0.3 とした。この数値解析結果と実験結果の対応を一部図 7(b) に示しているが、概ね良い対応をしている。

図 7(a) には、断面形状 H-400×150×6×12 のものでせん断スパン比を変化させたものを、図 7(b) には、断面形状 H-400×200×6×16 のものでせん断スパンを変化させたものを示している。ただし、これらは全てウェブ幅厚比 66.7 、フランジ幅厚比 6.25 で等しい。図中にはフランジ断面積に対するウェブ断面積の比をそれぞれ示している。図 7(a) に示す断面積比 1.25 の場合の荷重変位係ではせん断スパン比が大きくなるに従い最大耐力時変位量は小さくなるもののその増加はわずかであり、ほとんど同様な荷重変位係となっている。これに対して、図 7(b) に示す断面積比 0.69 の場合のものは、せん断スパン比が大きくなるに従いその最大耐力時変位量は大きくなる傾向にある。またその荷重変位係の形状も大きく異なったものとなっている。このように断面積比によってせん断スパン比が変化することによる荷重変位係の違いが生じる。

図8 B5の最終崩壊形

また図 7(a) の最終変形状態は全てのせん断スパン比でほぼ同様な変形状態であった。この変形は、図 5(a) に示すようなフランジ局部座屈変形が顕著に発生しているものであった。これに対して、図 7(b) に示すものは最終変形状態にも大きな違いが現れた。特にせん断スパン比が 3 のものは、図 8 の実験終了後の最終変形状態に示すように梁全長にわたってウェブにせん断変形が発生しているものであった。

さらに数値解析対象を増やし、断面積比が異なる場合に、せん断

図9 セン断スパン比と塑性変形能力の関係

スパン比で梁の最大耐力時の塑性率を整理したものが図9である。明らかにフランジ断面積変化にともなう影響が見られる。全体的な傾向としては、あるせん断スパン比までは塑性率が大きくなるが、その値より大きなせん断スパン比では、塑性率がほぼ等しくなるか、せん断スパン比の増大にともなって若干塑性率が低下する。フランジ幅150mm、フランジ板厚12mmの断面積比の小さい断面形状のものは、ウェブ幅厚比によらず塑性率が最大となるせん断スパン比の値が小さい。これは、断面積比が小さいことでウェブのせん断降伏がせん断スパン比が小さくなくても起こりにくく、梁に作用する曲げ応力の割合が高いために、せん断スパン比が小さい範囲においてもフランジの局部座屈が支配的な崩壊をするためである。

また同じフランジ幅、フランジ板厚のものに注目した場合、塑性率が最大となるせん断スパン比よりも小さい範囲では、ウェブ幅厚比の違いが塑性率に与える影響は小さい。また塑性率が最大となるせん断スパン比よりも大きい範囲では、塑性率はウェブ幅厚比の違いによる影響がみられ、ウェブ幅厚比が大きいもので塑性率が小さくなっている。これらの要因は、塑性率が最大となるせん断スパン比を境に支配的な崩壊形が変化するためであると考えられる。つまりせん断スパン比が小さい範囲ではウェブ降伏が支配的な崩壊性状であることから、ウェブ幅厚比の影響をさほど受けにくい領域であり、せん断スパン比が大きい範囲では局部座屈が支配的な崩壊性状であることから、ウェブ幅厚比に影響を受ける領域である。

このように、断面積比がほぼ等しい場合にはある程度せん断スパン比で、その変形状と塑性率は整理できると考えられる。しかし断面積比が異なる場合も考慮して評価するには、かならずしも整理できているとは言いがたい。したがって、断面積比とせん断スパン比の影響の関係を明らかにし、それらを考慮できる因子を抽出する必要があると考える。

§4. せん断余裕度の定義とせん断曲げを受けるH形鋼梁の塑性変形性能

4.1 せん断余裕度からみた梁の塑性変形状

前章までの考察により、ウェブ幅厚比の大きな梁の塑性変形能力及び崩壊形式を整理するうえで、ウェブの降伏耐力に注目する必要があることがわかった。またせん断スパン比及びフランジに対するウェブの断面積比によっても梁の塑性変形状は大きく変化することが確認された。このせん断スパン比、断面積比はウェブの降伏耐力に大きく関与する要因である。

ところで、本論文で対象としている梁はあくまでも曲げ降伏が先行する梁であり、せん断曲げ荷重を受けた場合には全塑性モーメントを確保するものである。したがって、梁ウェブの降伏耐力は、梁の曲げ耐力との比でとらえた方が梁の塑性変形挙動を考える上で良い指標となり得るのではないかと考えた。つまり本論文では、梁の曲げ耐力とウェブのせん断降伏耐力の比を、新たに梁の性状を把握するための因子として考えることとする。この比は本論文ではせん断余裕度と称し、 wQ_p/Q_p で表現できるものである。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、 wQ_p は梁のせん断耐力である。例えば片持梁についてのせん断余裕度について考えると、以下のような式展開が可能である。

図10 せん断余裕度が等しい場合の荷重変位関係

$$\begin{aligned} \frac{wQ_p}{Q_p} &= \frac{wQ_p L}{M_p} \\ &= \frac{A_w w \sigma_y}{\sqrt{3}} \frac{k_1}{A_f \sigma_y D} L \\ &= k_2 \frac{A_w}{A_f} \frac{L}{D} \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

ここで、 M_p ：梁の全塑性モーメント、 L ：片持梁長さ、 D ：梁せい、 A_w ：ウェブ断面積、 A_f ：フランジ断面積、 σ_w ：ウェブの降伏応力度、 σ_f ：フランジの降伏応力度、 k_1 ：全塑性モーメントとフランジのみで考えた全塑性モーメントの比、 k_2 ： k_1 及び降伏応力度などを含む定数である。式(1)より、せん断余裕度は、今までの議論における断面積比とせん断スパン比の影響を全て取り入れた形で評価可能な因子となっていることが分かる。またせん断余裕度が小さな梁は、せん断崩壊しやすく、せん断余裕度が大きな梁は、曲げ崩壊しやすいものであるといえる。

図10にせん断余裕度がほぼ等しくなるように、断面積比およびせん断スパン比を変化させた試験体の荷重変位関係を示す。図中に示すせん断余裕度 wQ_p/Q_p は、実測された断面形状及び各板要素の引張試験から得られた降伏応力度を用いて算出している。この荷重変位関係を見る限りにおいては、最大耐力時変位量に大きな違いはなく、最大耐力以降の耐力劣化性状に若干の違いがあるものの全体的な性状としては、ほぼ等しいと言える。このように梁の断面形状やせん断スパン比に違いがある場合でも、せん断余裕度で梁の塑性変形状は概略予測可能であると考えられる。ただし図9でみたように構成板要素の幅厚比の影響を同時に考慮する必要がある。以上より本研究では、ウェブ幅厚比の大きな梁の塑性変形能力を、せん断余裕度と構成板要素の幅厚比で整理することができるものとする。

4.2 せん断曲げを受けるH形鋼梁の塑性変形能力

図11は塑性率を本研究で定義するせん断余裕度で整理したものである。(a)がウェブ幅厚比75.0のもの、(b)がウェブ幅厚比66.7のものである。それぞれの図にはフランジ幅厚比及びフランジ断面積を変化させて数値解析を行い、その結果を示している。あわせて実験結果を示しているが、数値解析結果よりも若干低い値ではあるものの、その傾向は一致している。

ウェブ幅厚比が小さい(b)が(a)に比べ塑性率は大きいものの、全体的な傾向としては両者ともほぼ同様である。せん断余裕度が梁の塑

(a) $D/tw=75.0$ の場合 (b) $D/tw=66.7$ の場合

図11 セン断余裕度と塑性変形能力の関係

性率におよぼす影響を(b)に示すウェブ幅厚比66.7の場合で考察する。せん断余裕度が小さい範囲では、フランジ幅厚比によらずせん断余裕度と塑性率の関係がほぼ線形関係にある。しかし、フランジ幅厚比が大きくなるほど、せん断余裕度が小さい値でこの線形関係から離れている。これはフランジ幅厚比が大きくなることにより、せん断余裕度が小さい梁においても、フランジ局部座屈が支配的な崩壊型へと移行することによるものである。

ここでフランジ幅厚比が4.68と小さなものに注目すれば、塑性率がほぼ最大となるせん断余裕度のあたりで塑性率の変化が不連続になっている。これは、崩壊型が混在した形で崩壊していくのではなく、明確に変化していることによるものであると考えられる。つまり塑性変形能力が最大となるあたりで崩壊形式が急激に変化することによる。これに対して、フランジ幅厚比が大きくなると、せん断余裕度の変化により塑性率が緩やかに変化している。これは、フランジ局部座屈を伴いながら、ウェブもせん断降伏していくものであり、これらの両崩壊型が混在した形で梁の崩壊が進んでいくことによるものである。

個別に見れば若干の違いはあるものの全体的な傾向としてみるならば、塑性率が最大となるせん断余裕度の値は1.6前後であると判断することが可能である。この1.6まではせん断余裕度の減少に伴って緩やかに塑性率は上昇するものの1.6以下では急激に低下する。また梁の崩壊形式も全長にせん断座屈波形が発生するものに近づく。したがって安定した曲げ崩壊型の崩壊形式を実現するためには、梁のせん断余裕度を1.6以上にしておくことが必要である。これらの傾向は、本研究の範囲のなかではウェブ、フランジの構成板要素幅厚比によらず同一傾向にあるととらえても差し支えないと考える。

§5. 結

本研究は、ウェブ幅厚比の大きな梁を対象として、その最大耐力決定要因を明らかにすることを目的とした。この中で、ウェブ幅厚比が大きな梁は、構成板要素の連成局部座屈で崩壊するもの以外で

は、ウェブの全断面塑性化に伴う剛性低下が梁としての耐力を決定づけていることを明らかにした。このような知見をもとに本研究では、梁の塑性変形能力を整理するための新たな指標として、梁の全塑性耐力時に梁に作用しているせん断力に対するウェブのせん断耐力をせん断余裕度と定義し、そのせん断余裕度を用いることで梁の塑性変形能力及び崩壊形式が予測可能なことを示した。また、塑性変形能力がもっとも大きくなるであろうせん断余裕度の値は、構成板要素の幅厚比で若干異なる傾向にはあるものの、本研究で対象とする範囲においては、1.6前後であるという知見を得た。この値以上のせん断余裕度を有するような梁では、その崩壊形式がフランジ局部座屈が支配的なものになり安定した曲げ変形挙動を示す。以上、ウェブ幅厚比の大きな梁の塑性変形挙動をとらえる上で、構成板要素の幅厚比とともにせん断余裕度が重要な因子であることを明らかにするとともに、それらを用いて梁の塑性変形能力が整理可能であることを示した。

参考文献

- 鈴木敏郎, 五十嵐規矩夫, 東 武史, 薩川恵一: ウェブ幅厚比の大きな高張力鋼梁の大変形挙動に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No. 504, pp.95~101, 1998.2
- 鈴木敏郎, 五十嵐規矩夫, 東 武史, 薩川恵一: 建築構造用高性能590N/mm²鋼材を用いたウェブ幅厚比の大きな梁の塑性変形能力に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No. 522, pp.113~119, 1999.8
- 大西 浩, 鈴木敏郎, 五十嵐規矩夫, 常木康弘, 石井秀明: セン断応力度の影響を考慮したH形鋼梁の塑性変形能力評価(その1 ウェブ幅厚比の大きな梁の塑性変形性状), 日本建築学会大会学術梗概集(東北), pp. 487~488, 2000.9
- 常木康弘, 鈴木敏郎, 五十嵐規矩夫, 石井秀明: セン断応力度の影響を考慮したH形鋼梁の塑性変形能力評価(その2 塑性変形能力評価), 日本建築学会大会学術梗概集(東北), pp.489~490, 2000.9
- 鈴木敏郎, 小野徹郎, 金箱温春: セン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, 日本建築学会論文報告集, No. 260, pp. 91~98, 1977.10
- 日本建築学会: 鋼構造設計規準, 1973

(2001年2月8日原稿受理, 2001年4月17日採用決定)