

極厚フランジを有するプレートガーダーの変形能と断面区分

Ductility and Cross-sectional Classification of Plate Girder with Thick Flange

川見周平*, 藤井堅**

Shuhei Kawami, Katashi Fujii

*工修, 中電技術コンサルタント株式会社, 道路部 (〒734-8510 広島県広島市南区出汐 2 丁目 3-30)

** 工博, 広島大学大学院教授, 工学研究科 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1 丁目 4-1)

Recently, thick flange has been often used in plate girder bridge with a few main girders to carry large bending moment. Since this kind of girder will endure usually to full plastic moment, the enough rotation capacity will be also expected. This paper presents a cross-sectional classification for the plate girder with thick flange, conducting finite element analyses. From the results we propose the new cross-sectional classification for inelastic design, where thinner web will be applicable than that shown in AISI or AASHTO.

Key words: plate girder, thick flange, autostress design, cross-sectional classification

キーワード: プレートガーダー, 極厚フランジ, オートストレス設計法, 断面区分

1. はじめに

近年, 構造物の局所的な降伏を許す非弾性設計法の使用が世界各国で認められている. AISI では, 連続桁の中間支点上での塑性変形を許容し, モーメントの再分配を認めるオートストレス設計法(ASD 法)を提案している. このとき, 中間支点上の断面は降伏後も一定の耐荷力を保ちながら, 塑性域で十分な回転変形(以下, 回転容量)を有する必要がある. AISI の非弾性設計では, 0.063 rad. の塑性回転容量が必要とされ, これを満たす断面のフランジおよびウェブの幅厚比制限を定めている. しかし, この塑性回転容量は建築構造物のような不静定次数の高い構造物に要求されるものであり, 橋梁のような不静定次数の低い構造物には厳しい条件となる. AASHTO の LRFD¹⁾では, 有効塑性モーメントの概念を取り入れ, ある程度薄肉断面でも非弾性設計を可能とした幅厚比制限を定めている. しかし, これらの非弾性設計手法では, 極厚フランジを用いたプレートガーダーの回転容量については言及されていない.

一方, 我が国では, 平成 8 年の道路橋示方書²⁾の改訂により少数主桁橋で 50mm を超える極厚板が使用できるようになった. フランジの板厚が大きくなると相対的にウェブが薄くなるので, 極厚板をフランジに用いたプレートガーダーでは, 上下のフランジ間隔(桁高)を保持するというウェブの役割(ウェブ支持力)が小さくなり, Basler ら³⁾の唱えるフランジ垂直座屈が生じる可能性が

ある^{4, 6-8)}. 筆者らはこの視点から, ウェブの板厚に対して相対的に極厚のフランジを有するプレートガーダーの曲げ載荷実験を行い, 圧縮フランジの垂直座屈崩壊形式が現れることを確認した. ただし, この場合のフランジ垂直座屈崩壊はフランジが全降伏した後(フランジ降伏モーメント後)に発生しており, ウェブが比較的薄肉であつても大きな回転容量が期待できることを明らかにした. 加えて複合非線形有限要素法によるパラメトリック解析⁴⁾から, 極厚フランジプレートガーダーの場合には, 現行の非弾性設計法の適用範囲を緩和できそうであることがわかった.

そこで本研究では, 極厚フランジを用いたプレートガーダーを対象として, 種々の断面形状を有するプレートガーダーの曲げ耐荷力解析を行い, 曲げ耐荷力および変形能を調べるとともに, 非弾性設計法のための断面区分を提案する. またあわせて, 極厚フランジを用いたプレートガーダーの曲げ耐荷力や変形能へおよぼす残留応力の影響について明らかにする.

2. 残留応力の影響

溶接組立てされたプレートガーダーは, 溶接による残留応力が生じる. また藤井ら⁵⁾は, 極厚板では鋼板製造時の熱間圧延過程において, 鋼板の表面付近と内部では冷却速度が異なるために, 板厚方向に変化する残留応力が発生することを示した. 圧延工程で残留応力が生じた

極厚板をフランジに用いた場合、表面から降伏し、剛性が低下するが、この場合におけるプレートガーダーの曲げ耐力、変形能に残留応力が及ぼす影響についてはこれまで検討されていない。したがって、ここでは溶接により板厚方向に一定分布する残留応力と鋼板製造時に生じる板厚方向に変化する残留応力が、曲げ耐力と変形能へおよぼす影響を明らかにする。

2.1 解析概要

先に行った実験結果⁴⁾に対応して、表-1に示す寸法諸元を有する2種類のプレートガーダーの終局曲げ挙動解析を行った。解析は、ABAQUS⁹⁾を用いた複合非線形有限要素解析である。表中、解析モデル NC161-4 は、AASHTO の LRFD の断面区分(図の実線)によればノンコンパクト断面、一方、C87-4 はコンパクト断面に分類される。2つの解析モデルは、表-1に示すように、フランジ突出部の幅厚比は同じであるが、ウェブ幅厚比が異なっている。

図-2にそれぞれの解析モデルおよび境界条件を示す。使用した要素は、ウェブについては4節点アイソパラメトリックシェル要素、一方、フランジについては、溶接による残留応力を検討する場合は4節点シェル要素、鋼板製造時に生じる残留応力を検討する場合は8節点ソリッド要素を用いた。境界条件については、解析モデルの両端に剛体要素を配置し、フランジおよびウェブの端辺で面外方向変位に対して単純支持とした。なお、図-2の表で、溶接による残留応力を検討するモデルでは6自由度のそれぞれの節点変位に対して、一方、鋼板製造時に生じる残留応力を検討するモデルではウェブの6自由度およびフランジの3自由度のそれぞれの節点変位に対して、1は拘束、0は自由を意味する。

材料特性は、先に行った曲げ載荷実験⁴⁾で使用した鋼材の引張試験結果から得られた公称応力-公称ひずみ曲線を真応力-真ひずみ曲線に変換して使用した。

表-2に引張試験結果、図-3に解析で用いた公称応力-公称ひずみ曲線を示す。

ウェブの初期たわみについては、先に行った曲げ載荷試験での測定結果を用いた。⁴⁾

表-1 供試体寸法・パラメータ

供試体	NC161-4	C87-4
フランジ板厚 t_f	15.7	21.5
フランジ幅 b_f	120.0	165.0
ウェブ板厚 t_w	3.1	5.7
桁高 h_w	516.0	522.0
ウェブ幅厚比 h_w/t_w	161	87
フランジ突出部の幅厚比 $b_f/2t_f$	3.8	3.8
ウェブ・フランジ面積比 A_w/A_f	0.8	0.8

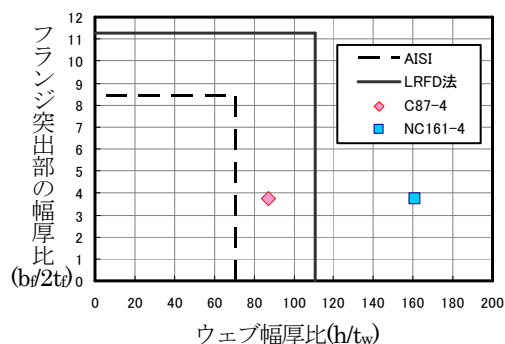
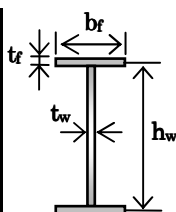
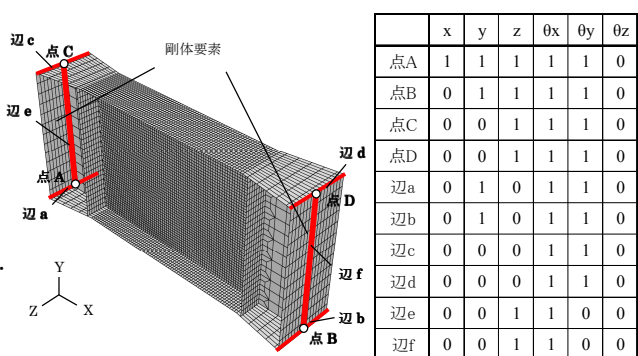
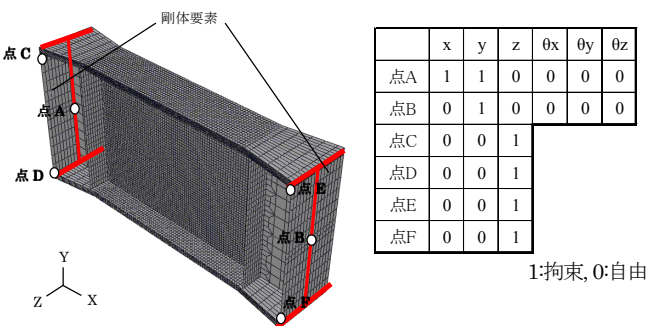


図-1 供試体の断面区分



1:拘束, 0:自由

(a)溶接による残留応力



1:拘束, 0:自由

(b)フランジ板厚方向の残留応力

図-2 解析モデル・境界条件

表-2 材料特性

	NC161-4		C87-4	
	フランジ	ウェブ	フランジ	ウェブ
降伏応力 (MPa)	246	347	265	364
引張応力 (MPa)	397	425	420	434
弾性係数 (Gpa)	190	200	198	207
ポアソン比	0.27	0.26	0.27	0.26

2.2 残留応力

解析に用いた溶接による残留応力は、従来の耐荷力解析で通常用いられている残留応力分布とした。残留応力分布を図-4に示す。極厚板をフランジに用いたプレートガーダーの場合、一般のそれと残留応力分布の大きさや分布形が異なることが予想される。しかし、極厚フランジの残留応力を計測した研究は無いようであり、ここでは、通常のプレートガーダーと同程度の残留応力があると仮定した。実際の極厚板を用いたプレートガーダーでは、図-4に示す残留応力よりも小さくなることが予想される。これについては今後なお明らかにする必要があると考えられるが、断面全体が塑性域に到達した後に崩壊する場合には、残留応力が耐荷力におよぼす影響は無くなることになる。本解析では、ウェブに発生する残留応力の影響を明らかにする目的で、フランジだけに残留応力を与えた場合とフランジとウェブ両方に残留応力を与えた場合の2ケースについて調べることにした。

一方、鋼板製造時に生じる残留応力、すなわち板厚方向に変化する残留応力は、藤井ら⁵⁾により図-5のような残留応力分布になることが示されており、解析では、この残留応力を上下フランジのみに与えた。

2.3 結果と考察

上記2種類の残留応力を考慮して複合非線形有限要素解析を実行し、得られた荷重-回転角曲線を図-6および図-7に示す。これらの図には、実験結果⁴⁾もあわせて示している。また、耐荷力（最高荷重）とそれに対応する回転変位を表-3および表-4にまとめて示す。図-6は、溶接による残留応力を考慮したものであるが、凡例中、フランジはフランジのみに残留応力を考慮したもの、フランジ+ウェブはフランジのみならずウェブの残留応力も考慮したものを示す。また、図-7では、フランジに板厚製造時の残留応力だけを考慮した場合である。また、 M_y はフランジ降伏曲げモーメント、 M_{pe} はAASHTOのLRFDに示す有効塑性モーメント、 θ_p は全塑性モーメントに対する弾性限界回転角(図-11参照)であり、それぞれ全塑性曲げモーメント M_p および θ_p で無次元化して表している。また、図-8に最高荷重時の変形図を示す。図中の色分けはMises応力の分布で、弾性域は黒色で示している。

これらの表や図から以下のことがわかる。

(1)崩壊時(最高荷重を越えて変位がかなり進展したとき)には、図-8からわかるように、C87-4は圧縮フランジの水平座屈(横ねじれ座屈)、NC161-4は圧縮フランジ垂直座屈が現れている。このように、ウェブ幅厚比が小さい場合には、ウェブは上下フランジ間隔をフランジ降伏後も保持できるので全塑性モーメントまで曲げ耐荷力を上昇させることが可能となる。一方、ウェブ幅厚比が比較的大きい場合には、フランジ降伏モーメントは担保できるもののウェブの支持力が十分でないために、全降

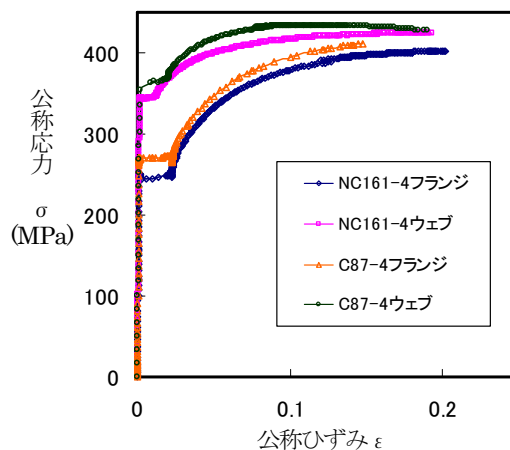


図-3 公称応力-公称ひずみ曲

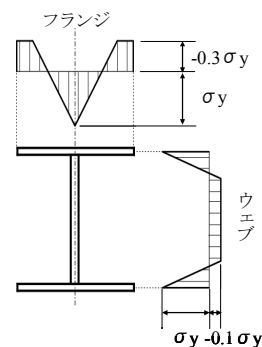


図-4 溶接による残留応力のモデル形状

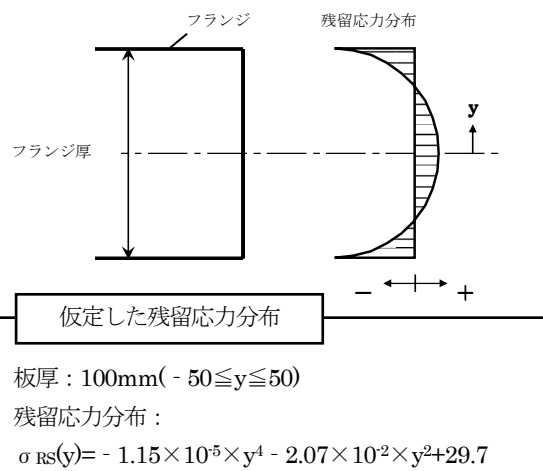
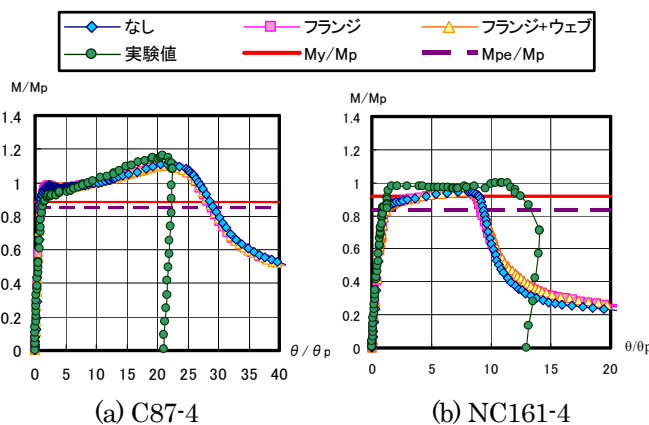


図-5 鋼板製造時に生じる残留応力分布



(a) C87-4

(b) NC161-4

図-6 荷重-回転角曲線(溶接による残留応力)

伏モーメントに達することができずフランジ垂直座屈が現れる。このとき、フランジ垂直座屈が発生する変位まではフランジ降伏モーメント程度の耐力力を保持できる。

(2) 上述のごとく、両供試体ともにフランジが降伏した後に終局荷重に達する。このような場合の溶接による残留応力の影響については、図-6に示すように、フランジ残留応力がある場合には、それが無い場合よりもフランジの一部が低い荷重で降伏し、曲線の傾き(剛性)が小さくなるものの、最高荷重はほとんど変わらないのがわかる。また、フランジのみならずウェブの残留応力も考慮した場合でも、フランジだけに残留応力を考慮した場合とほとんど同じである。これは、C87-4、NC161-4ともにフランジが降伏したあとに、すなわちフランジ降伏モーメント M_y を越えて最高荷重に到達するために、フランジの残留応力は最高荷重には影響しないことを示している。また、ウェブの残留応力の影響が小さいのは、C87-4では全降伏モーメント M_p まで耐力力が上昇するのでウェブ残留応力の影響がなくなるため、他方NC161-4では、ウェブが薄いのでウェブの分担する曲げモーメント自体が小さいことに加え、図-8に示すように、最高荷重時にはウェブの塑性化もかなり進むためであると考えられる。

(3) 鋼板製造時に発生する板厚方向に変化する残留応力の影響については、表-4および図-7に示すように、最高荷重は、残留応力のある方が無い場合よりも若干大きめとなるが、ほとんど差はない。これについても、終局時にはどちらもフランジが全降伏するために、残留応力の影響が無くなることに起因する。道路橋示方書の幅厚比制限では、通常、板が降伏するまで座屈しないように定められているので、製造時に発生する極厚板の残留応力は無視してよいといえる。

(4) 図-6と図-7を比較すると、C87-4、NC161-4のどちらも最高荷重については両図ともほとんど同じであるが、最高荷重時の回転角はかなり差があることに気づく。これは、図-6ではフランジにシェル要素を、一方、図-7ではフランジに立体要素を用いていることから、使用した要素の特性によると考えられる。図に示すように、どちらの要素を使用しても設計上要求される回転性能は満たされているので、設計に関する以下の議論では特に問題ないと考えられるが、これについては今後なお検討する必要がある。

以上、極厚フランジを用いたプレートガーダーでは、通常フランジ突出部の幅厚比 $b/2t_f$ が 10 以上になることはないと考えられる。この場合、フランジが全降伏するまで座屈が生じないので、フランジの残留応力の影響は無視できると判断される。

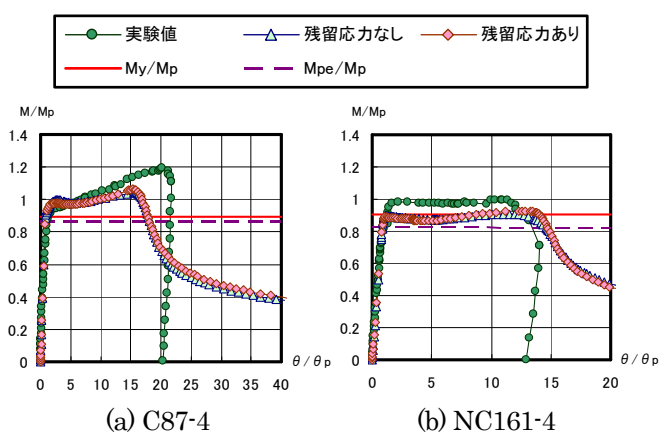


図-7 荷重-回転角曲線(鋼板製造時に生じる残留応力)

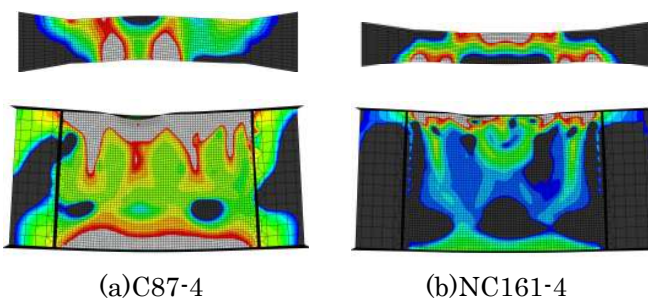


図-8 崩壊時の応力分布

表-3 曲げ耐力力と回転容量(溶接による残留応力)

		残留応力	$M_u(kN \cdot m)$	M_u/M_y	θ_{yAV}/θ_y	M_u/M_p	θ_{pAV}/θ_p
C87-4	実験値	—	744.5	1.32	24.3	1.16	21.5
	解析値	なし	710.8	1.26	31.2	1.11	25.8
		フランジ	703.6	1.24	30.9	1.10	25.3
		フランジ+ウェブ	697.0	1.25	30.8	1.10	25.2
NC161-4	実験値	—	358.8	1.08	12.1	0.99	—
	解析値	なし	328.4	1.03	8.8	0.94	—
		フランジ	327.8	1.03	8.4	0.92	—
		フランジ+ウェブ	327.8	1.03	8.7	0.92	—

[残留応力]

なし：残留応力を考慮しない場合

フランジ：残留応力をフランジにのみ考慮した場合

フランジ+ウェブ：残留応力をフランジとウェブに考慮した場合

M_u :終局モーメント, M_y :降伏モーメント, M_p :全塑性モーメント

θ_y :降伏モーメントに対する弾性限界回転角

θ_p :全塑性モーメントに対する弾性限界回転角

表-4 曲げ耐力力と回転容量
(鋼板製造時に生じる残留応力)

		残留応力	$M_u(kN \cdot m)$	M_u/M_y	θ_{yAV}/θ_y	M_u/M_p	θ_{pAV}/θ_p
C87-4	実験値		744.5	1.32	24.3	1.16	21.5
	解析値	なし	627.8	1.17	19.3	1.04	15.8
		あり	651.2	1.19	22.0	1.06	18.5
NC161-4	実験値		358.8	1.08	12.1	0.99	—
	解析値	なし	300.7	1.00	12.3	0.90	—
		あり	309.8	1.02	15.7	0.92	—

[残留応力]

なし：残留応力を考慮しない場合

あり：残留応力を考慮した場合

M_u :終局モーメント, M_y :降伏モーメント, M_p :全塑性モーメント

θ_y :降伏モーメントに対する弾性限界回転角

θ_p :全塑性モーメントに対する弾性限界回転角

3. パラメトリック解析

3.1 解析概要

すでに述べたように、変形能については使用する要素によって差異があるが、断面区分を検討するための以下の解析では、4 節点アイソパラメトリックシェル要素を用いる。鋼種は SS400 クラスとし、上記の理由から残留応力は考慮しないこととした。またうえぶの初期たわみについては、やせ馬型を仮定し、最大たわみは道路橋示方書の規定を考慮して桁高の 1/250 とした。

解析で使用する材料特性および応力-ひずみ曲線を、それぞれ表 - 5 および図 - 9 に示す。

本解析では、ウェブ幅厚比とフランジ突出部の幅厚比の 2 つのパラメータに注目した。極厚フランジを使用する場合、実断面でのフランジ突出部の幅厚比は、たとえば 100mm の板厚を用いた場合に突出部の幅厚比を 10 とするとフランジ幅は 2m となり現実的とは考えられない。したがって、フランジ突出部の幅厚比は 10 以下とした。図 - 10 に解析に用いたパラメータの値をプロットして示す。図では、AISI および AASHTO の LRFD¹⁾ で規定されている非弾性設計適用範囲もあわせて示している。

3.2 変形能の評価

変形能の評価は、フランジ降伏モーメントおよび全塑性モーメントに対する回転容量を用いて行うこととする。それぞれの回転容量の考え方を図 - 11 に示す。図に示すように、弾性は理論において全塑性モーメントが作用したときに生じる回転角を弾性限界回転角 θ_p とし、最高荷重後に再び全塑性モーメントになるときの全回転角 θ_p' から θ_p を引いたものを塑性回転容量 θ_{pAV} と定め、両者の比 $R_p(=\theta_{pAV}/\theta_p)$ を用いて変形能を評価する。同様に、降伏モーメント M_y についても、 $R_y(=\theta_{yAV}/\theta_y)$ を変形能の評価指標とする。

3.3 解析結果

表 - 6 にパラメトリック解析結果をまとめて示す。崩壊形式については、最高荷重後に現れた支配的な変形から判断した。

(1) ウェブ幅厚比と曲げ耐力・変形能の関係

曲げ耐力とウェブ幅厚比の関係を図 - 12 に、また、回転容量とウェブ幅厚比の関係を図 - 13 に示す。

表 - 6 および図 - 12 より、ウェブ幅厚比が大きくなるにつれて曲げ耐力は小さくなり、ウェブ幅厚比が 120 を越えると全塑性モーメントよりも小さくなるのがわかる。また、フランジ幅厚比が小さくなると曲げ耐力は大きくなる傾向が認められるが、それが 8 以上になるとウェブ幅厚比を小さくしても耐力上昇に対して効果はみられなくなる。

一方、回転容量に注目すると、表 - 6 および図 - 13 からわかるように、ウェブ幅厚比が 100 以下になると回転

表 - 5 材料定数(鋼材 : SS400)

	降伏応力 (Mpa)	引張応力 (Mpa)	弾性係数 (Gpa)	ポアソン比
No.1	239	421	206	0.25
No.2	243	422	207	0.27
Ave.	241	421	206	0.26

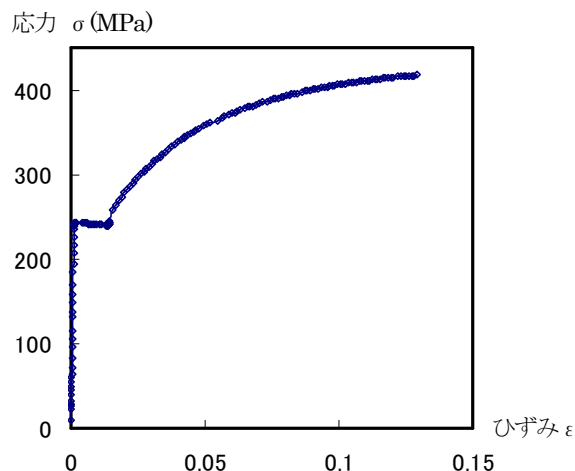
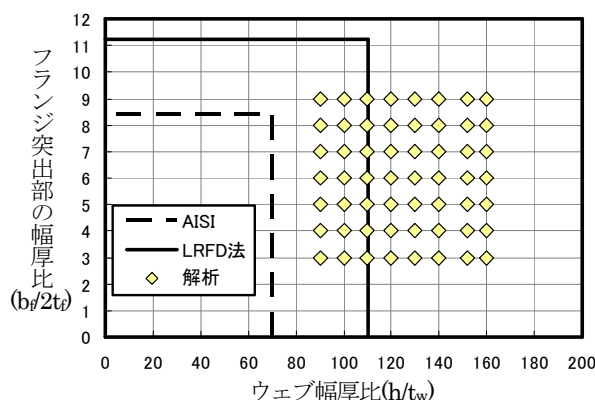


図 - 9 応力-ひずみ曲線(鋼材 : SS400)



h/t_w	$b_f/2t_f$	A_w/A_f	a/h
90~160	3~9	0.83	1.5

図 - 10 パラメトリック解析範囲

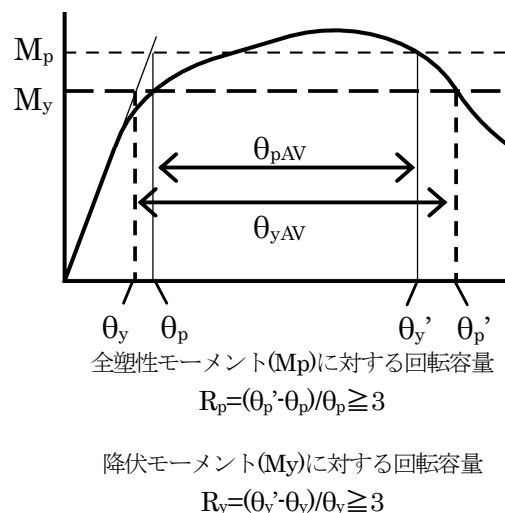


図 - 11 回転容量 (モーメント-回転角曲線) ^{1), 10)}

容量が飛躍的に上昇するのがわかる。回転容量は最高荷重後の耐力低下の挙動に影響されるので、フランジがひずみ硬化域に達するような変形までウェブが上下フランジ間隔を支持できれば、大きな回転容量が期待できることがわかる。

(2) フランジ突出部の幅厚比と曲げ耐力・変形能の関係

曲げ耐力とフランジ突出部の幅厚比の関係を図 - 14 に、回転容量とフランジ突出部の幅厚比の関係を図 - 15 に示す。

表 - 6 および図 - 14 から、フランジ突出部の幅厚比が概ね 5 のとき曲げ耐力が最も大きくなり、フランジ突出部の幅厚比がこれよりより大きくなっても小さくなくても曲げ耐力が低下することがわかる。これは、たとえばフランジ面積 A_f を一定とした場合、フランジ突出部の幅厚比が小さくなると、相対的に圧縮フランジ面内の曲げ剛性が小さくなり、フランジ水平座屈崩壊が発生しやすくなるためである。このとき、ウェブ幅厚比が大きい場合には、圧縮フランジの垂直座屈が起こる。この場合には、フランジの面内曲げ剛性の大きさよりもウェブ

の上下フランジを保持する支持力によって曲げ耐力が決まるので、たとえば $h/t_w=160$ のような場合の曲げ耐力は、フランジ突出部の幅厚比を変化させても変化しなくなる。

また、回転容量を示す図 - 15 でも、フランジ突出部の幅厚比が 3~6 の範囲では、フランジ突出部の幅厚比が小さくなるにつれて回転容量が低下しているが、これもフランジ水平座屈が起こりやすくなるためである。一方、フランジ突出部の幅厚比が大きくなると、最終的な崩壊形式がフランジ水平座屈あるいはフランジ垂直座屈からフランジねじれ座屈に移行する。そこで、それぞれの崩壊形式に対応する荷重 - 回転角曲線を、図 - 16~図 - 18 に示す。図 - 16 のフランジ水平座屈崩壊や図 - 18 のフランジ垂直座屈崩壊の場合には、最高荷重後の耐力低下が急であるのに対して、図 - 17 のフランジねじれ座屈崩壊の場合は、崩壊後の耐力低下が緩やかである。したがって、例えば図 - 16 と図 - 17 を比較するとわかるように、両者の最高荷重はほとんど差がないものの、崩壊形式に対応して回転容量にかなりの差が現れることになる。

表 - 6(a) パラメトリック解析結果

解析名	h_w/t_w	$b_f/2t_f$	M_u/M_p	θ_{pAV}/θ_p	M_u/M_v	θ_{vAV}/θ_v	崩壊形式
90-3	90	3	1.11	28.21	1.18	31.01	H
100-3	100	3	1.08	25.27	1.14	27.86	H
110-3	110	3	1.04	22.76	1.11	25.15	H
120-3	120	3	1.01	19.98	1.08	22.99	H
130-3	130	3	0.99	-	1.05	20.65	H
140-3	140	3	0.97	-	1.03	18.57	H
152-3	152	3	0.95	-	1.01	14.48	H
160-3	160	3	0.94	-	0.99	-	H
90-4	90	4	1.16	26.82	1.23	29.34	H
100-4	100	4	1.13	24.90	1.20	27.04	H
110-4	110	4	1.09	22.52	1.16	24.51	H
120-4	120	4	1.06	19.98	1.13	22.15	H
130-4	130	4	1.05	20.17	1.11	22.18	HV
140-4	140	4	1.00	-	1.06	16.47	HV
152-4	152	4	0.98	-	1.04	14.83	HV
160-4	160	4	0.97	-	1.03	13.39	HV
90-5	90	5	1.18	28.68	1.25	31.02	T
100-5	100	5	1.16	26.66	1.24	28.73	T
110-5	110	5	1.14	24.24	1.21	26.14	T
120-5	120	5	1.10	20.79	1.16	22.50	T
130-5	130	5	1.05	17.85	1.12	19.52	TV
140-5	140	5	1.02	14.78	1.08	16.48	V
152-5	152	5	0.99	-	1.05	13.49	V
160-5	160	5	0.97	-	1.03	11.60	V

表 - 6(b) パラメトリック解析結果

解析名	h_w/t_w	$b_f/2t_f$	M_u/M_p	θ_{pAV}/θ_p	M_u/M_y	θ_{yAV}/θ_y	崩壊形式
90-6	90	6	1.14	34.92	1.21	40.18	T
100-6	100	6	1.11	29.52	1.18	34.24	T
110-6	110	6	1.10	26.80	1.17	31.48	T
120-6	120	6	1.07	22.00	1.14	24.96	T
130-6	130	6	1.05	18.51	1.11	20.84	TV
140-6	140	6	1.01	13.67	1.07	16.43	TV
152-6	152	6	0.98	-	1.04	12.35	V
160-6	160	6	0.96	-	1.01	8.95	V
90-7	90	7	1.05	22.95	1.11	32.80	T
100-7	100	7	1.04	19.20	1.10	28.61	T
110-7	110	7	1.02	16.57	1.09	25.02	T
120-7	120	7	1.01	13.46	1.07	20.65	T
130-7	130	7	1.00	11.82	1.06	17.87	T
140-7	140	7	0.96	-	1.02	9.34	T
152-7	152	7	0.95	-	1.01	1.51	T
160-7	160	7	0.95	-	1.00	0.79	T
90-8	90	8	1.00	9.84	1.06	23.47	T
100-8	100	8	0.99	-	1.05	10.69	T
110-8	110	8	0.99	-	1.05	9.92	T
120-8	120	8	0.99	-	1.05	7.20	T
130-8	130	8	0.97	-	1.03	3.84	T
140-8	140	8	0.96	-	1.02	2.82	T
152-8	152	8	0.95	-	1.01	1.07	T
160-8	160	8	0.95	-	1.00	0.77	T
90-9	90	9	1.00	2.93	1.06	8.76	T
100-9	100	9	0.99	-	1.05	4.62	T
110-9	110	9	0.99	-	1.05	4.11	T
120-9	120	9	0.99	-	1.05	3.15	T
130-9	130	9	0.98	-	1.04	2.58	T
140-9	140	9	0.96	-	1.02	1.78	T
152-9	152	9	0.95	-	1.01	1.16	T
160-9	160	9	0.95	-	1.00	0.77	T

t_f : フランジ板厚, b_f : フランジ幅, t_w : ウェブ板厚, h_w : 桁高
 h_w/t_w : ウェブ幅厚比, $b_f/2t_f$: フランジ突出部の幅厚比

M_u : 終局モーメント, M_y : 降伏モーメント, M_p : 全塑性モーメント
 θ_p : M_p についての弾性回転角, θ_y : M_y についての弾性回転角,
 θ_{pAV} : M_p についての回転容量, θ_{yAV} : M_y について回転容量

V: フランジ垂直座屈, H: フランジ水平座屈, T: フランジねじれ座屈
HV: フランジ水平座屈とフランジ垂直座屈の連成座屈
TV: フランジねじれ座屈とフランジ垂直座屈の連成座屈

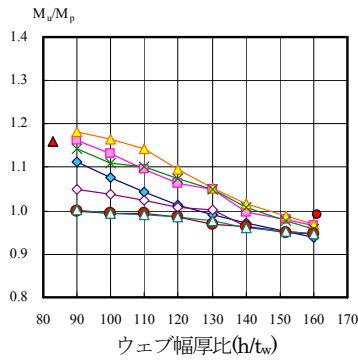


図 - 12 曲げ耐力とウェブ幅厚比の関係

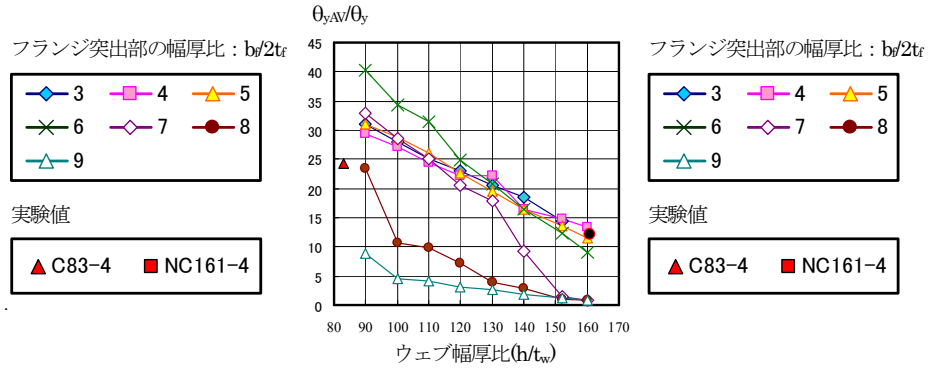


図 - 13 回転容量とウェブ幅厚比の関係

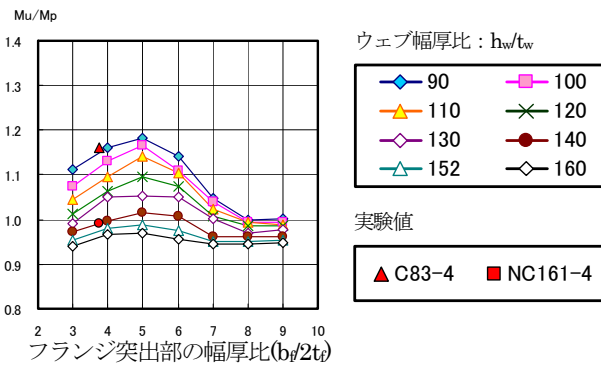


図 - 14 曲げ耐力とフランジ突出部の幅厚比の関係

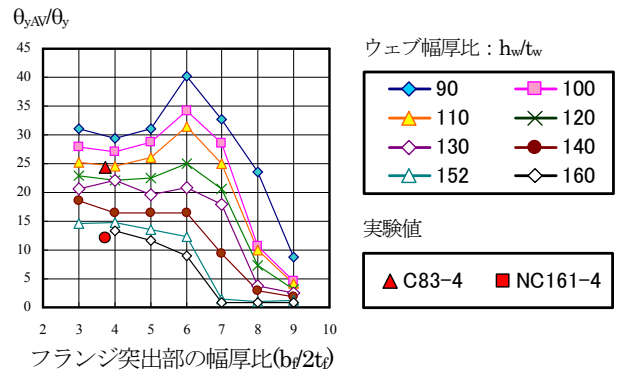


図 - 15 回転容量とフランジ突出部の幅厚比の関係

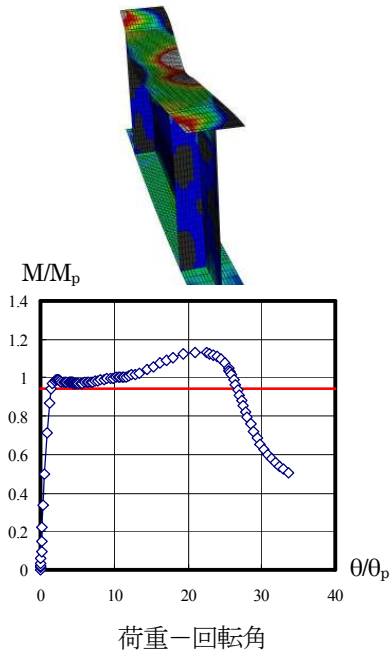


図 - 16 $h/t_w=100$, $b_f/2t_f=4$
(フランジ水平座屈)

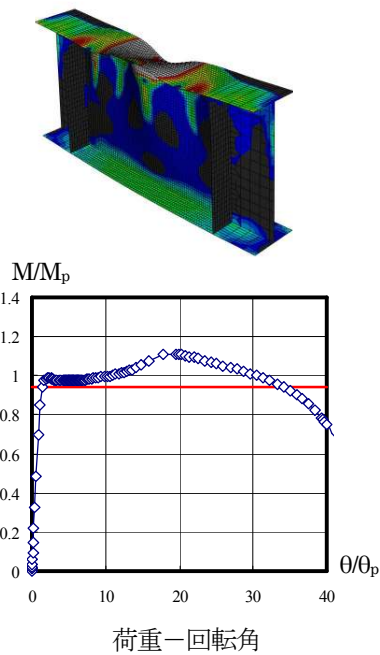


図 - 17 $h/t_w=100$, $b_f/2t_f=6$
(フランジねじれ座屈)

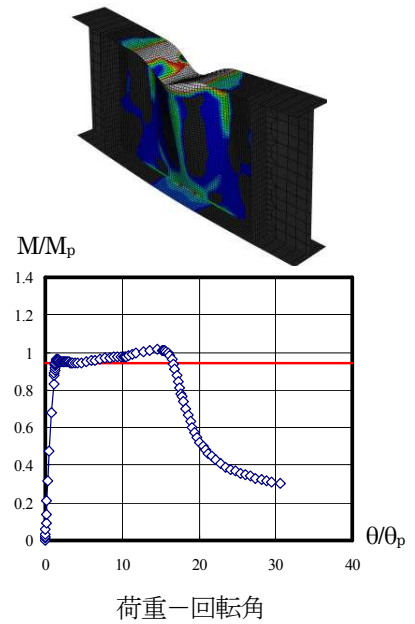


図 - 18 $h/t_w=140$, $b_f/2t_f=5$
(フランジ垂直座屈)

4. 非弾性設計法適用のための断面区分

4.1 非弾性設計法の適用条件

AASHTO の LRFD では、非弾性設計法を適用するためには有効塑性モーメントに対する塑性回転容量 θ_{peAV} が弾性限界回転角 θ_{pe} の 3 倍以上であることが要求されている。本研究でも同様の非弾性設計条件($\theta_{peAV} \geq 3\theta_{pe}$)を適用して非弾性設計の断面区分を検討する。

また、図 - 18 に示すようにフランジ垂直座屈が生じた場合、最高荷重後の耐力が急激に低下するので、この崩壊形式が現れる場合には非弾性設計を適用しないという条件を追加した場合の非弾性設計適用の断面区分もあわせて検討する。

4.2 非弾性設計適用の断面区分

図 - 19 に、全塑性モーメントおよびフランジ降伏曲げモーメントを基準として、前述の非弾性設計要件を満たす断面区分を示す。図中、CASE 1 および CASE 3 は、フランジ垂直座屈崩壊しても要件を満たす範囲を示しており、この崩壊形式を除いたものが CASE 2 および CASE 4 である。なお、図には、AISI および AASHTO 断面区分もあわせて破線で示している。

図の CASE1 をみると、フランジ突出部の幅厚比が 6 以下の小さい範囲では、フランジ水平座屈が発生するために非弾性設計の適用できるウェブ幅厚比は小さくなる。実際のプレートガーダーのフランジ水平座屈は、横桁間隔のような横支材間隔によって決まるので、この崩壊形式を防ぐような構造形式の場合には、ウェブ幅厚比の適用範囲をさらに大きくできることが予想される。

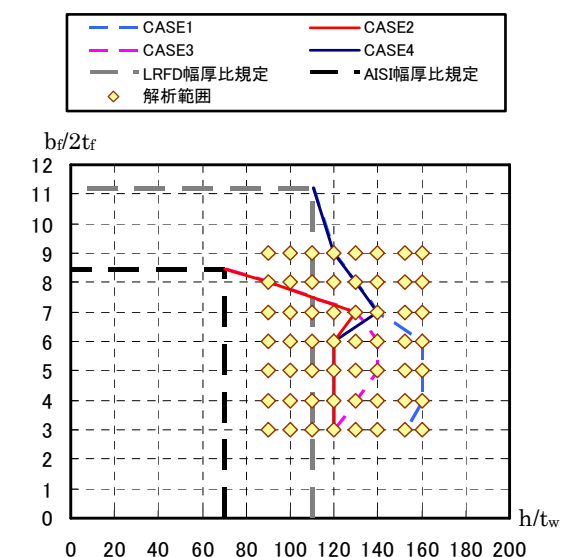
また、図 - 19 で、フランジ垂直座屈崩壊が生じる断面を除いた適用範囲でも、ウェブ幅厚比が 120 以下であれば非弾性設計法を適用してよいと判断できる。

以上のことを考慮し、非弾性設計法が適用できる断面区分として、全塑性モーメントおよび降伏モーメントを用いた非弾性設計法の限界ウェブ幅厚比はともに 120 とした。ただし、フランジ突出部の幅厚比が 7 より大きい場合には、ウェブ幅厚比は 120 より小さくする必要がある。

極厚フランジを使用する場合、実用的なフランジ突出部の幅厚比は 4~7 程度と予想されることを勘案すると、ウェブ幅厚比を 120 以下にすれば、十分な回転容量を有しており非弾性設計が適用できると判断できる。

5. 結論

弾塑性複合非線形有限要素パラメトリック解析を実施し、極厚フランジを有するプレートガーダーの曲げ耐力と変形能について調べ、非弾性設計が適用できる断面区分を検討した。本研究で得られた知見をまとめると以下ようになる。



CASE1 : M_p の非弾性設計適用条件を満たす範囲

CASE2 : CASE1+フランジ垂直座屈が生じる断面を除いた範囲

CASE3 : M_y の非弾性設計適用条件を満たす範囲

CASE4 : CASE3+フランジ垂直座屈が生じる断面を除いた範囲

図 - 19 非弾性設計適用の断面区分の緩和

- 1) 極厚フランジを有するプレートガーダーでは、通常はフランジが全断面降伏した後に最高荷重に到達し、その後耐力低下が起こる。このようにフランジが全降伏するまで座屈しない場合には、溶接による残留応力および板製造時に発生する板厚方向に分布する残留応力が、曲げ耐力および変形能におよぼす影響は小さく無視できる。
- 2) 圧縮フランジが全降伏した後は、ほぼ一定の曲げ耐力を保持しながら回転変形が進行し、最終的に耐力低下が起こる。このときプレートガーダーの崩壊は、Basler らが指摘した圧縮フランジの 3 つの座屈形式、すなわち水平、垂直、ねじれ座屈が発生する。
- 3) ウェブの板厚が上下フランジ間隔を保持できる程度に厚い場合、フランジ水平座屈あるいはねじれ座屈がおこる。フランジ突出部の幅厚比が小さくなるとフランジ水平座屈が生じやすくなる。この崩壊形式が現れると曲げ耐力が大きく低下する。一方、フランジねじれ座屈崩壊の場合には最高荷重後の耐力低下は小さい。
- 4) ウェブがフランジに比べて相対的に薄くなると、フランジ垂直座屈崩壊が起こる。この場合も最高荷重後の耐力低下は大きい。
- 5) 最終的に現れる圧縮フランジの座屈崩壊形式の違いにより、回転容量は大きく変化する。
- 6) 非弾性設計が適用できる断面区分を提案した。鋼種が SS400 クラスの場合、フランジ突出部の幅厚比が 7 以下、ウェブ幅厚比が 120 以下であれば、十分な回転容量が確保でき、非弾性設計が可能である。

謝辞

本研究に当たり，(社)日本鉄鋼連盟から学生研究助成金を賜りました．ここに記して謝意を表します．

参考文献

- 1) AASHTO LRFD Bridge Design Specification: LRFD Bridge Design Specification 2nd Ed., American Association of State Highway and Transportation Officials, D.C., 1998.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 共通編，鋼橋編，平成 14 年.
- 3) Bsler, K. Thrllimann, B: Strength of Plate girders in bending, Proc. of ASCE, Vol.87, No.ST6, pp.153-181, 1961.
- 4) 入川充夫，藤井堅，川見周平，南鉄木：極厚フランジを有するプレートガーダーの曲げ崩壊形式と変形能，構造工学論文集，土木学会，Vol.55A, pp. 134-143, 2009.
- 5) 石川晋介，中茂泰則，藤井堅，山田浩二：極厚鋼板の材料特性と残留応力，土木学会第 58 回年次学術講演会公演概要集，2003.
- 6) 入川充夫，川見周平，小川靖之，藤井堅：極厚フランジを有するプレートガーダーの曲げ崩壊形式，鋼構造年次論文報告集，日本鋼構造協会，Vol.15, pp. 145-152, 2007.
- 7) 藤井堅，大村裕：フランジ局部座屈に起因するプレートガーダーの曲げ耐荷力解析，土木学会論文集，No. 374/I-6, pp. 467-476, 1986.
- 8) 藤井堅，大村裕：曲線 I 形桁におけるフランジの局部座屈と幅厚比制限，土木学会論文集，No. 386/I-8, pp. 339-347, 1987.
- 9) ABAQUS, HIBBIT, KARLSSON & SORENSEN, INC.
- 10) 伊藤満，福本秀士，T. V. Galambos：変断面連続合成桁のオートストレス設計に関する一考察，構造工学論文集，土木学会，Vol.38A, pp. 435-442, 1992.

(2009年9月24日受付)