

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

Collapse Mode and Ductility of Plate Girder with Thick Flange under Bending

入川充夫*, 藤井堅**, 川見周平***, 南鉄木****
Mitsuo Irikawa, Katashi Fujii, Shuhei Kawami, Tetsuki Minami

*工修, 西日本旅客鉄道株式会社, 新幹線管理本部 (〒754-0002 山口県山口市小郡下郷 1357)

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

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

****四国旅客鉄道株式会社, 高松車掌区 (〒076-0011 香川県高松市浜ノ町 8 番 33 号)

Recently, there have been constructed a lot of plate girder bridges with a few main girders, which have usually thicker flanges. In this kind of bridge, flange vertical buckling of compressive flange indicated by Basler may occur, because the web cannot support thick flange enough. Therefore, bending tests and FEM analyses were conducted in this paper. And the following conclusions were obtained: 1) plate girder with thick flanges collapsed according to flange vertical buckling after yielding of compressive flange, even though the width-thickness ratio of web satisfied the limit of JSHB. 2) After flange vertical buckling, bending strength decrease significantly. 3) If the web has reasonable width-thickness ratio, plate girder with thick flange will have enough plastic rotation capacity.

Key Words : Plate girder, Flange vertical buckling, Autostress design, Ductility

キーワード: プレートガーダー, フランジ垂直座屈, オートストレス設計, 変形能

1. はじめに

近年, 架設されている少数主桁橋では 50mm を超える極厚フランジが多く用いられている. Basler¹⁾によるとプレートガーダーの曲げ崩壊は, 3 つの座屈形式によって決定すると考えられており, このうちフランジ垂直座屈はウェブ幅厚比が非常に薄い場合にのみ起こる崩壊で, 通常のプレートガーダーでは起きないと考えられていた. しかし極厚フランジを用いた場合, フランジに対するウェブの曲げ剛性が相対的に小さくなるため, ウェブがフランジを十分に支持できなくなりフランジ垂直座屈崩壊が発生することが懸念される. そこで筆者らは, 極厚フランジを有するプレートガーダーの曲げ載荷試験²⁾を行って, 曲げ崩壊形式を調べた. その結果, フランジ垂直座屈変形が現れたが, 明確な崩壊を確認するまでには至らなかった. また実験に対応させた複合非線形有限要素法解析では, フランジ降伏後一定の耐力を保持しながら変形が進み, その後急激な耐力低下を伴い, フランジ垂直座屈崩壊が現れた.

ところで, AISI では, 連続桁の中間支承部での局所的な塑性変形を認め, モーメントの再分配を認める ASD

法(オートストレス設計法)を提案している. ASD 法では, 中間支承部上で局所的な降伏を認めるので, 降伏後も一定の耐荷力を保ちながら, 大きな回転変形(以降, 回転容量と呼ぶ)が要求される. AASHTO の LRFD³⁾でもこれを採用している. AISI では過去に行われた実験^{4)~8)}に基づいて ASD 法の適用可能な断面をフランジ, ウェブの幅厚比によって制限している. しかし過去の研究では, 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十分には検討されていない. 筆者らの行った研究²⁾では, 極厚フランジを用いた場合, ウェブが比較的薄肉でも大きな変形能があることを確認できている.

以上の議論から, 本研究では, 極厚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, その終局挙動を調べ, 道路橋示方書⁹⁾のウェブ幅厚比規定内でもフランジ垂直座屈が発生することを検証する. また, 曲げ耐荷力に影響する断面形状パラメータを変化させて複合非線形有限要素解析を行い, 断面形状と曲げ耐荷力, 崩壊形式の関係を明らかにする. さらに, 実験および解析結果から, 極厚フランジを有するプレートガーダーの変形能についても検討する.

2. 曲げ載荷実験

2.1 実験概要

実験概要を図-1 に示す。実験では試験桁を 2 点単純支持、2 点載荷とし、中央パネル（試験パネル）に純曲げを作用させる。なお横倒れ座屈を防止するために、写真-1 に示すような横倒れ防止装置を設置した。

供試体概要を図-2 に示す。供試体は 2 軸対称直線 I 型桁で、断面形状を変化させて 3 体製作した。なお、鋼種は SS400 である。供試体試験パネル部の断面寸法を表-1 に示す。表中、供試体 PG163-13 は従来のプレートガーダーの断面を想定し、その他の 2 体は極厚フランジを用いた場合を想定した。供試体 NC161-4 はウェブ幅厚比を道路橋示方書⁹⁾の規定値($h_w/t_w=152$)程度、供試体 C87-4 は ASD 法のウェブ幅厚比を満たすように製作しており、それぞれ AASHTO の LRFD³⁾のコンパクト、ノンコンパクト断面の基準を満足している。

曲げ載荷試験における計測項目は、上下フランジおよびウェブのひずみ、ウェブの面外方向変位、桁のたわみ、上下のフランジ間隔の変化量（以下、「桁高の縮み」と呼ぶ）、圧縮フランジのねじれ角、そして着目パネルの両端における垂直補剛材位置での断面の回転角である。図-3 に一例として、供試体 C87-4 のひずみゲージ貼付位置

を示す。ひずみは、鋼板の両表面で測定し、その平均値を膜ひずみとした。圧縮フランジのねじれ角については、フランジの両端およびウェブ接合線上の面外たわみ(鉛直方向変位)を測定して、着目断面のフランジ半幅のねじれ角とした。着目パネル両端の桁の回転角は、供試体 NC161-4、C87-4 について測定した。図-4 に示すように、等辺山形鋼を供試体の中立軸に取り付け、左右それぞれに取り付けた 2 基のダイヤルゲージの変位から桁の回転角を求めた。図-5 に載荷前に計測した各供試体のウェブの初期たわみを示す。

桁高の縮みについては、図-6 に示すような測定装置を用いて測定した。この測定装置は、図中 A でピン結合された棒で供試体の上下のフランジを挟み込み、棒の端をバネで締結して他端に取り付けた変位計の変化量 δv を計測するようになっている。このとき、桁高の縮み v は、図に示す距離を用いて、式(1)によって求められる。

$$v = \delta v \frac{L}{L'} \quad (1)$$

供試体に用いた鋼材の材料試験結果を表-2 に示す。引張試験は、JIS5 号試験片を用い、25tf オートグラフによる載荷速度 0.1mm/min の定ひずみ試験である。

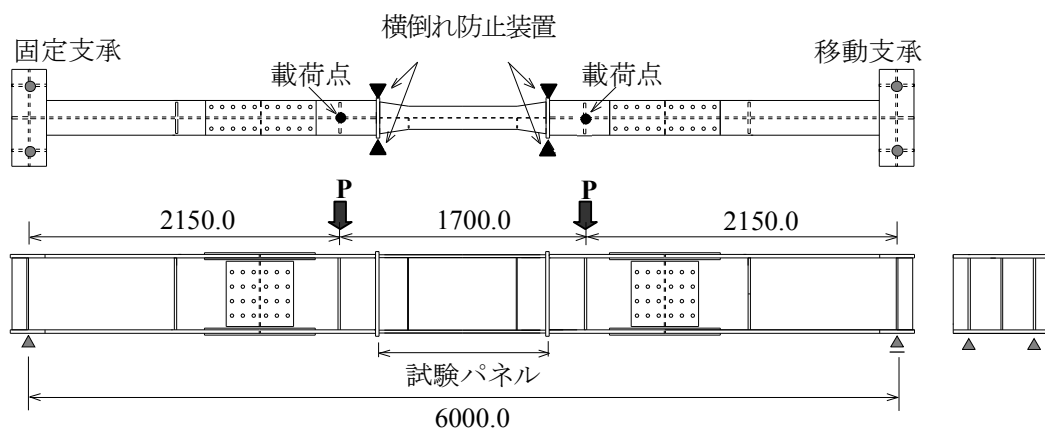


図-1 実験概要図

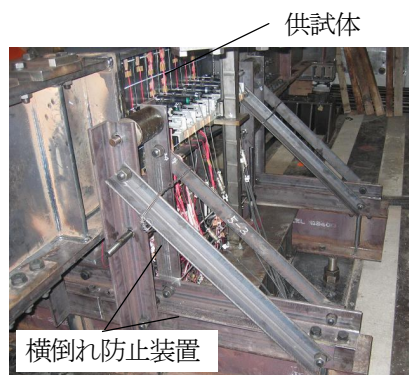


写真-1 横倒れ防止装置

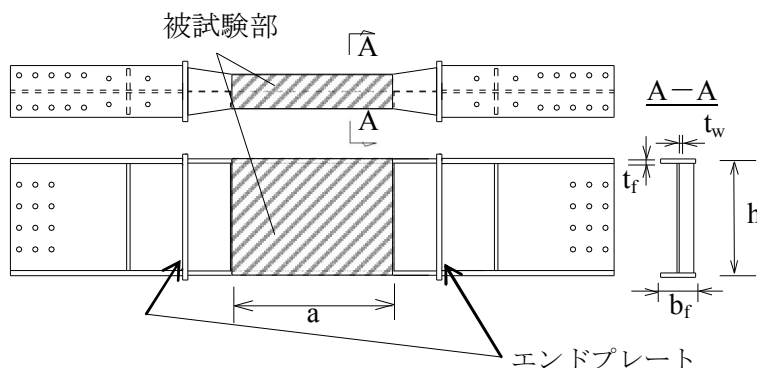


図-2 供試体詳細図

表-1 供試体断面寸法

供試体	t_f (mm)	b_f (mm)	t_w (mm)	a (mm)	h_w (mm)	$b_f/2t_f$	h_w/t_w	A_w/A_f	a/h_w
PG163-13	5.9	160	3.2	750	520	13.6	163	1.8	1.5
NC161-4	15.7	120	3.1	750	516	3.8	161	0.8	1.5
C87-4	21.5	165	5.7	750	522	3.8	87	0.8	1.5

t_f : フランジ板厚, b_f : フランジ幅, t_w : ウェブ板厚, a : ウェブ幅, h_w : 桁高

b_f/t_f : フランジ突出幅厚比, h_w/t_w : ウェブ幅厚比, A_w/A_f : ウェブ・フランジ面積比, a/h_w : ウェブ縦横比

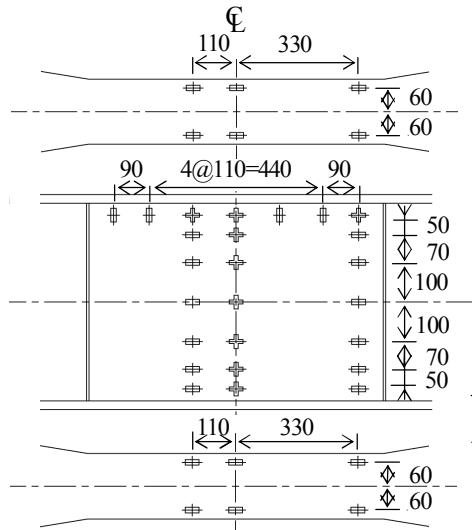


図-3 ひずみ測定位置(C87-4)

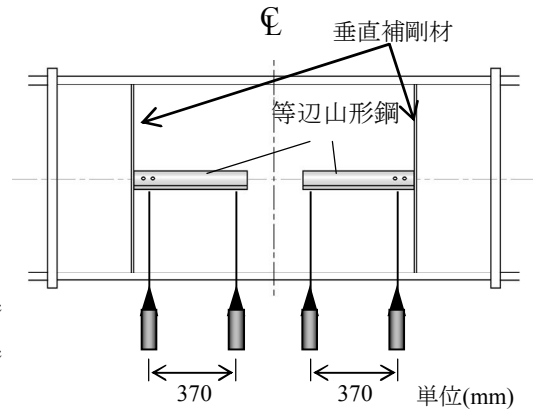


図-4 断面の回転角の測定方法

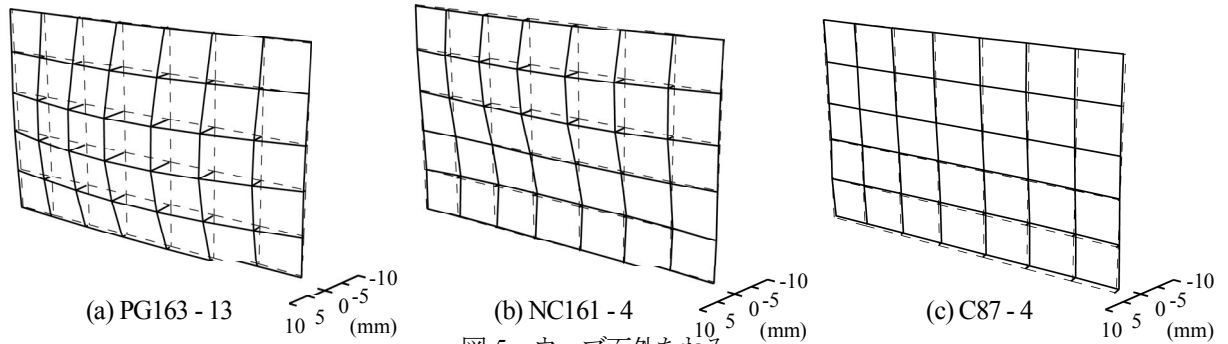


図-5 ウェブ面外たわみ

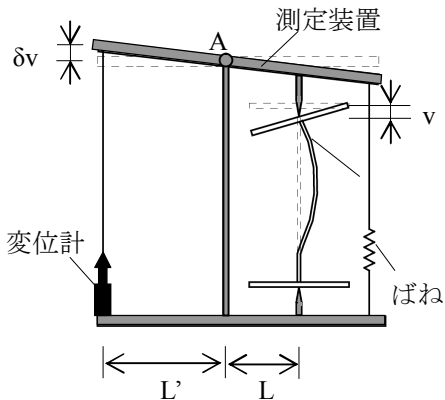


図-6 桁高の縮み測定装置

表-2 材料試験結果

	PG163-13		NC161-4		C87-4	
	フランジ	ウェブ	フランジ	ウェブ	フランジ	ウェブ
呼び板厚	6.0	3.2	16.0	3.2	22.0	6.0
板厚 (mm)	5.9	3.2	15.7	3.1	21.5	5.8
降伏応力 (MPa)	280	289	246	347	265	364
引張応力 (MPa)	347	371	397	425	420	434
弾性係数 (Gpa)	198	198	190	200	198	207
ポアソン比	0.26	0.25	0.27	0.26	0.27	0.26

汎用構造解析コード ABAQUS を用いて、曲げ载荷実験に対応する弾塑性大変形解析を行った。供試体のエンドプレート間を解析領域とし、要素には、4 節点アイソパラメトリックシェル要素(S4R6)を用いた。鋼材の材料特性は、引張試験で得られた公称応力-公称ひずみ曲線を、真応力-真ひずみ曲線に変換して与えた。なお、降伏判定は、Mises の降伏条件を用いた。

初期不整については、図-5 に示す载荷前のウェブの面外たわみを初期たわみとして与えた。溶接による残留応力については、通常のプレートガーダーの解析ではフランジの板厚方向に一定と仮定し、例えば図-7 のような分布を仮定することが多い。しかし、極厚フランジを用いる場合、フランジの板厚が大きいので、残留応力はフランジの板厚方向に変化すると考えられる。実際には、この問題についてさらに検討する必要があると思われるが、実験で用いた供試体は、実寸法を縮尺したものであり、通常のプレートガーダーと同様な溶接条件に近いと考えて、図-7 のような残留応力分布を仮定した。また、ウェブの残留応力については、耐力にあまり影響しないと考えられること、残留応力自体フランジに比べて小さいと考えられるので考慮しないこととした。

解析モデルと境界条件を、図-8 にまとめて示す。解析領域(図-2 の薄墨斜線部)の要素分割は、1 辺 10mm の等間隔メッシュとした。また、境界条件については、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は、面外方向の変位に対して単純支持とした。なお、図-8 の表で、6 自由度のそれぞれの節点変位に対して、1 は拘束、0 は自由を示している。

荷重は、曲げモーメントに対応するはり理論の応力分布を等価節点力に置き換えて、辺 a~f 上に節点荷重として与えた。

2.3 実験結果

(1) 崩壊性状

各供試体の曲げ耐力 M_u を表-3 にまとめて示す。表では、表-2 に示す降伏応力を用いてはり理論から求めたフランジ降伏モーメント M_y および全塑性モーメント M_p 、そしてこれらの値で曲げ耐力を無次元化した値の他に、無次元化した回転容量もあわせて示す。

また、载荷後の変形を写真-2 に、崩壊後の解析モデル変形図を図-9 に比較して示し、写真-3 に供試体 C87-4 の橋軸方向からの上フランジの変形を示す。

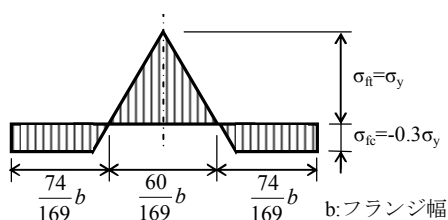


図-7 フランジ残留応力分布

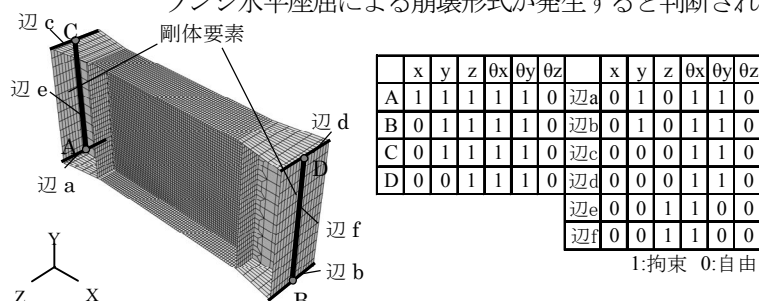


図-8 解析モデル・境界条件

図-10, 11 は、それぞれ各供試体の荷重-たわみ曲線および荷重-回転角曲線である。これらの図には、解析結果もあわせて示す。図 10, 11 の縦軸は曲げモーメントをフランジ降伏モーメント M_y で無次元化し、横軸のたわみ v および回転角 θ は、弾性ははり理論から得られるフランジ降伏曲げモーメント M_y に対するたわみ v_y および回転角 θ_y で無次元化して表している。

これらの図表から、以下のことがわかる。

従来型のプレートガーダー断面を想定した供試体 PG163-13 は、表-3 に示すように、フランジ降伏モーメントまで達しておらず、図-10(a)に示すように、最高荷重後急な耐力低下を起こしていることが実験および解析結果からわかる。また写真-2(a)、図-9(a)から、供試体 PG163-13 は、圧縮フランジのねじれ座屈によって崩壊していると判断できる。

一方、極厚フランジを有する供試体 NC161-4 は、図-10(b)に示すように、フランジ降伏曲げモーメント付近まではほぼ線形的に荷重が増加し、その後一定の荷重を保持しながら変形が進行している。崩壊後の写真-2(b)、図-9(b)の変形状態から、この供試体は、圧縮フランジが鉛直方向に変形をしており、フランジ垂直座屈によって崩壊したと判断できる。

図-10(c)に示す供試体 C87-4 (極厚フランジと板厚の大きいウェブを有する)は、NC161-4 と同様にフランジ降伏モーメントに達した後、一定の耐力を保持して変形が進むが、その後さらに荷重が増加し、全塑性曲げモーメントを越えて最高荷重に達し、その後は緩やかに耐力が低下している。写真-2(c)、図-9(c)から、フランジ垂直座屈の変形は認められるものの、写真-3 から判断して、最終的には圧縮フランジの水平座屈崩壊と考えられる。

以上のように極厚フランジを持つプレートガーダーでは、道路橋示方書⁹⁾のウェブ幅厚比制限を満たしていても圧縮フランジの垂直座屈崩壊が起こり得ることがわかった。ただし、圧縮フランジが全降伏した後にウェブの面外たわみに起因して、ウェブの圧縮側の応力が梁理論の応力よりも小さくなる現象(ここでは「ウェブの応力欠損」と呼ぶ)が起きなければ、このフランジ垂直座屈は、フランジ降伏曲げモーメント M_y に達した後に発生する。一方、ウェブ幅厚比が小さく、極厚フランジを支持することができれば、C87-4 供試体のように、フランジ垂直座屈崩壊は全塑性モーメントまで起こらず、最終的にフランジ水平座屈による崩壊形式が発生すると判断される。

表-3 曲げ耐荷力

供試体	M_y	M_p	実験値					解析値				
			M_u	M_u/M_y	M_u/M_p	θ_{AVy}/θ_y	θ_{AVp}/θ_p	M_u	M_u/M_y	M_u/M_p	θ_{AVy}/θ_y	θ_{AVp}/θ_p
PG163-13	179	199	158	0.88	0.79	—	—	160	0.89	0.80	—	—
NC161-4	335	365	359	1.07	0.98	11.7	—	347	1.04	0.95	9	—
C87-4	568	638	745	1.31	1.17	24.8	21.8	703	1.24	1.10	33.2	25.1

M_u : 終局モーメント(kN・m) , M_y : フランジ降伏モーメント(kN・m)

M_p : 全塑性モーメント(kN・m), θ_{AVy}/θ_y : フランジ降伏モーメントについての回転容量

θ_{AVp}/θ_p : 全塑性モーメントについての回転容量



写真-3 橋軸方向
載荷後供試験体(C87-4)



(a) PG163-13

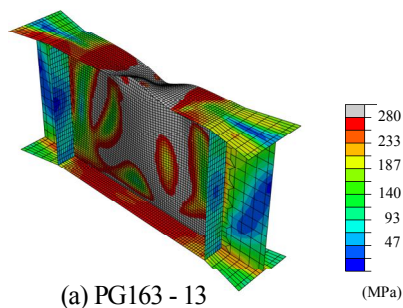


(b) NC161-4

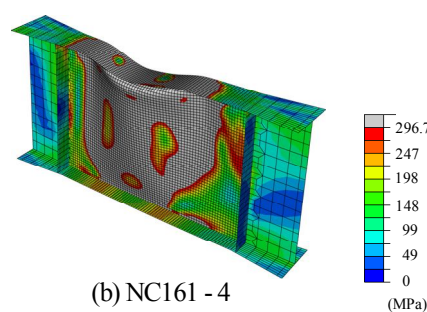


(c) C87-4

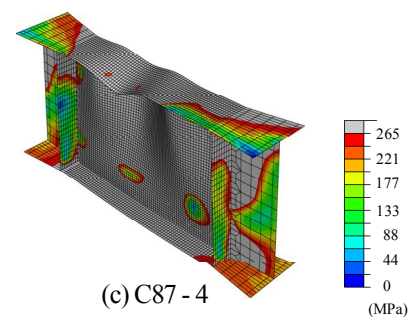
写真-2 載荷後供試験体



(a) PG163-13

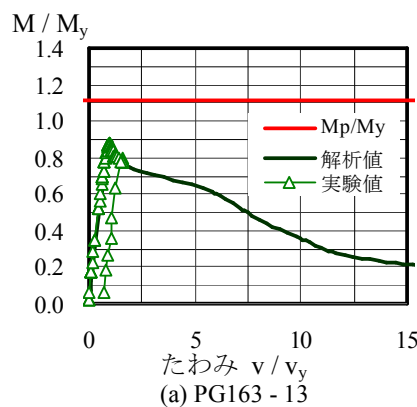


(b) NC161-4

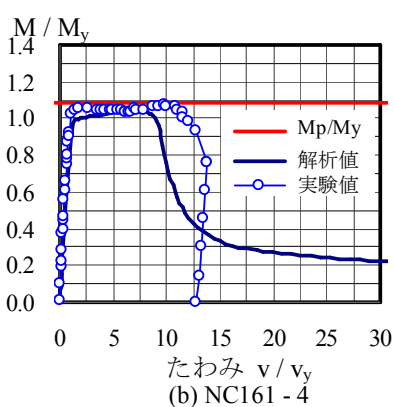


(c) C87-4

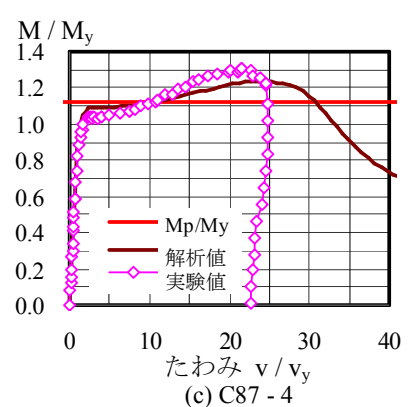
図-9 解析モデル変形図



(a) PG163-13



(b) NC161-4



(c) C87-4

図-10 荷重-たわみ曲線

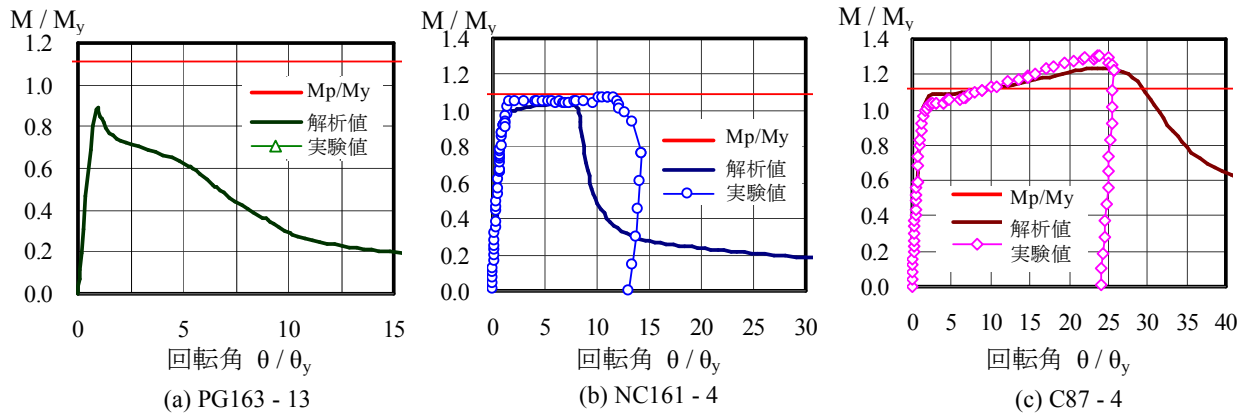


図-11 荷重一回転角曲線

(2) ひずみ性状

各供試体の膜ひずみ分布を図-12 に示す. 図中の M/M_y は曲げモーメントをフランジ降伏モーメント M_y で無次元化した値, v/v_y はたわみ v を弾性はり理論から得られる M_y に対するたわみ v_y で無次元化した値を示す. 図-12 からわかるように, 今回の全ての供試体は, 最高荷重時には圧縮フランジが降伏しているのがわかる. しかし, 供試体 PG163-13 の曲げ耐力は, 表-3 に示すように, フランジ降伏モーメントよりも小さい. これは, 最高荷重時のフランジのひずみは降伏ひずみの2倍程度であり, 図-12(a)からわかるように, ウェブ面外変位にともなってウェブ圧縮側の膜ひずみがはり理論のような直線分布にならず, ウェブの負担応力が欠損するためである. 一方, 図-12(b)の供試体 NC161-4 でも, ウェブの応力欠損が見られるが, この場合には, 極厚フランジが降伏した後もさらにひずみが増加しひずみ硬化域まで達することができるために, フランジ降伏曲げモーメントを越えて全塑性曲げモーメントまで耐力が上昇したと考えられる. こ

れに対して, 図-12 (c)に示す供試体 C87-4 のウェブのひずみは, フランジ降伏後幾分応力欠損が認められるもののはり理論から得られるひずみ分布に近いひずみ分布形状となっており, 全塑性曲げモーメントを越えて耐力上昇したと考えられる. 以上の考察をまとめる.

- 1) 供試体 PG163-13 はフランジが降伏後すぐにフランジねじれ座屈が発生し耐力を失ったと考えられる. このとき, ウェブが比較的薄いためにウェブに応力欠損が起こり, 曲げ耐力はフランジ降伏モーメントに達しなかったと考えられる.
- 2) 供試体 NC161-4 はフランジ降伏後もひずみ硬化域までフランジねじれ座屈は起こらず, 最終的にウェブが薄肉であるためにフランジ間を十分に支持することができず, フランジ垂直座屈が発生したと考えられる.
- 3) 供試体 C87-4 はウェブが厚肉で上下のフランジ間隔を十分に支持するためにフランジ垂直座屈は発生せず, フランジ全断面が降伏した後も, フランジ水平座屈が発生するまで曲げ耐力が上昇したと判断できる.

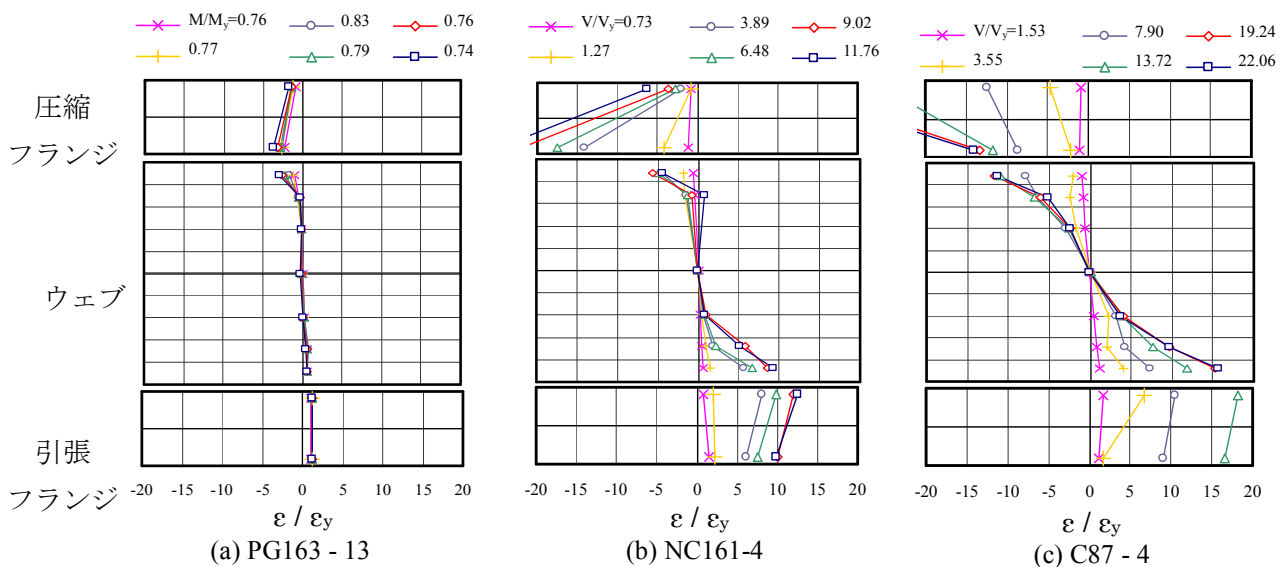


図-12 ひずみ分布

(3) 回転容量

AISI では、図-13 に示す曲げモーメント - 回転角曲線において、弾性はり理論に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、塑性回転容量 θ_{Avp} を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_{p2} から θ_p を引いたものとして、両者の比 θ_{Avp}/θ_p を変形能の指標としている。また AASHTO の LRFD³⁾では、塑性設計にはフランジ降伏モーメントに対する弾性限界回転角 θ_p の3倍以上の回転容量を要求している。本研究でも、この考えに基づいて、塑性回転容量が弾性限界回転角 θ_p の3倍以上の場合に塑性設計が可能として変形能について考察する。

図-14 に AISI, LRFD³⁾のコンパクト断面区分と、供試体断面区分を比較して示す。なお AISI の規定は全塑性モーメント以上の曲げ耐力と十分な回転容量を保証しており、LRFD³⁾では塑性回転は保証していない。図の縦軸はフランジ突出脚幅厚比、横軸はウェブ幅厚比である。図-14 から、供試体 NC161-4, C87-4 とともにフランジ突出脚幅厚比はコンパクト断面の規定を満たしているものの、ウェブ幅厚比規定は満足していないことがわかる。各供試体の塑性回転容量の結果は表-3 のようになるが、供試

体 C87-4 は、AISI のウェブ幅厚比制限を満足していないものの、曲げ耐力は全塑性モーメント以上に達し、塑性設計に必要なとされる十分な回転容量も有していることがわかる。このことから、極厚フランジを有するプレートガーダーの場合、AISI のウェブ幅厚比制限を緩和できる可能性があるかと推察される。

(4) 桁高の縮み

本研究ではフランジ垂直座屈を確認するために桁高の縮み（上下フランジ間隔の変化量）を測定した。各供試体の曲げモーメント - 桁高の縮みの関係を図-15 に示す。

供試体 PG163-13 は、最高荷重に達するまでほとんど変化はなく、終局状態になると桁高の縮み量が急増する。

供試体 NC161-4, C87-4 は、フランジ降伏モーメント付近から急激に増加することがわかる。

図-15 より、実験結果および解析結果はほとんど一致しているが、フランジ水平座屈、フランジねじれ座屈崩壊が現れても、桁高の縮みは急増していることがわかる。したがって、桁高の縮みを測定するだけでは、フランジ垂直座屈崩壊の判断は難しいといえる。

全塑性モーメントに対する回転容量 : $\theta_{Avp} = \theta_{p2} - \theta_p$
降伏モーメントに対する回転容量 : $\theta_{Avy} = \theta_{y2} - \theta_y$

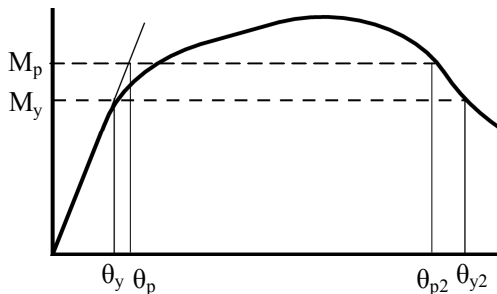


図-13 曲げモーメント-回転角曲線

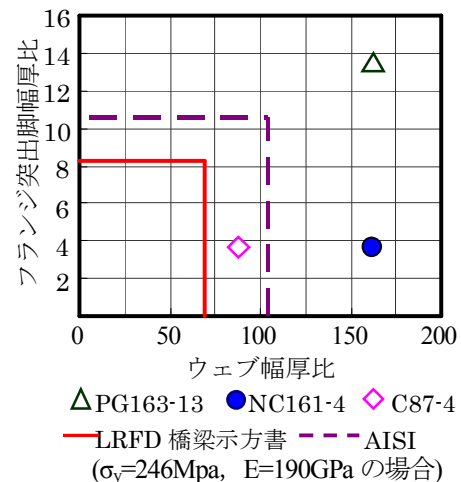
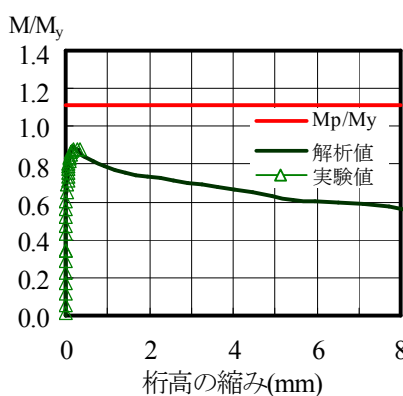
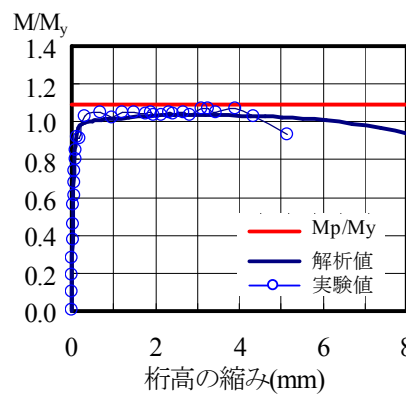


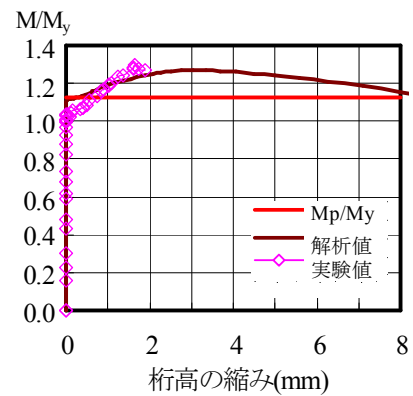
図-14 AISI, LRFD 幅厚比制限



(a) PG163-13



(b) NC161-4



(c) C87-4

図-15 荷重-桁高の縮み

3. パラメトリック解析

3.1 解析概要

写真-2 と図-9 の崩壊状態および図-10, 11 の荷重-変位曲線において、弾塑性大変位有限要素解析と実験結果を比較すると、最高荷重を越えて降伏変位の 10 倍程度までは、両者は概ね一致しており、この程度の変位までは解析により追跡できることがわかる。しかし、さらに大きな変位については差異がみられる。これは、実験での载荷にともなう変位が極めて大きくなるために、境界条件が解析条件を必ずしも満足しないこと、解析による大変形領域での誤差、ひずみ硬化域での応力-ひずみ曲線の誤差などの要因が考えられる。しかし、AISI で要求されている変形能の範囲では、十分な解析精度が得られることがわかったので、以下では、パラメトリック解析を行っ

て、変形能について検討する。

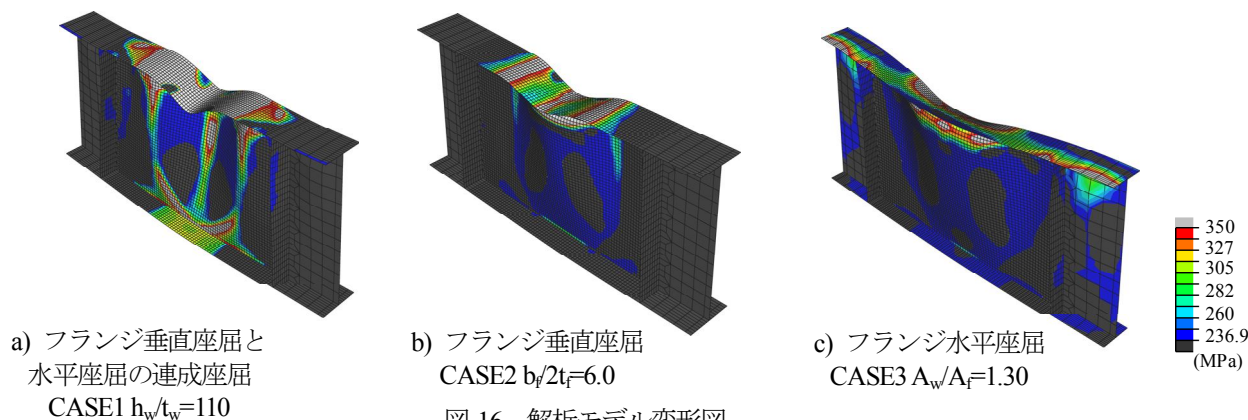
さて、パラメトリック解析は、プレートガーダーの曲げ耐荷力に影響する断面形状パラメータのうち、フランジ突出脚幅厚比、ウェブ幅厚比、ウェブ・フランジ面積比を変化させて行った。解析結果を表-4 にまとめて示す。

表中、CASE 1 は、極厚フランジを用いたモデルにおいてウェブ幅厚比を変化させた解析で、フランジ突出脚幅厚比(=3.75)、ウェブ・フランジ面積比(=0.83)を一定とし、ウェブ幅厚比を変化させた。CASE 2 は、道路橋示方書⁹⁾のウェブの幅厚比(=152)とウェブ・フランジ面積比(=0.83)を一定にしてフランジ突出脚幅厚比を変化させている。また、CASE3 は、フランジおよびウェブの幅厚比を一定にしてウェブ・フランジ面積比を変化させたケースで、極厚フランジを用いた場合を想定し、フランジ突出脚幅厚比=3.75、ウェブ幅厚比=152 とした。

表-4 解析モデル一覧

	$b_f/2t_f$	h_w/t_w	A_w/A_f	M_u (kN・m)	M_p (kN・m)	M_y (kN・m)	M_u/M_p	M_u/M_y	θ_{Avp}/θ_p	θ_{Avy}/θ_y	崩壊形式
CASE 1	3.75	50	0.83	16618	11685	11078	1.42	1.50	51.7	48.2	T
	3.75	60	0.83	12924	9753	9242	1.33	1.40	42.1	39.3	H
	3.75	70	0.83	10482	8371	7929	1.25	1.32	33.6	31.3	H
	3.75	80	0.83	8714	7332	6943	1.19	1.26	28.6	27.1	VH
	3.75	90	0.83	7467	6523	6175	1.14	1.21	26.2	24.7	VH
	3.75	100	0.83	6591	5875	5560	1.12	1.19	24.5	23.5	VH
	3.75	110	0.83	5831	5344	5057	1.09	1.15	22.3	21.3	VH
	3.75	125	0.83	4914	4706	4453	1.04	1.10	19.8	19.3	V
	3.75	152	0.83	3836	3875	3665	0.99	1.05	—	13.8	V
CASE 2	3.75	200	0.83	2803	2949	2788	0.95	1.01	—	14.2	V
	3.0	152	0.83	3727	3870	3661	0.96	1.02	—	15.9	H
	3.5	152	0.83	3804	3873	3664	0.98	1.04	—	14.2	H
	3.8	152	0.83	3829	3875	3665	0.99	1.04	—	13.4	VH
	4.0	152	0.83	3842	3876	3666	0.99	1.05	—	12.8	VH
	4.3	152	0.83	3828	3877	3666	0.99	1.04	—	12.6	VH
	4.5	152	0.83	3831	3878	3667	0.99	1.04	—	12.2	VH
	5.0	152	0.83	3844	3880	3669	0.99	1.05	—	11.8	V
	6.0	152	0.83	3751	3884	3671	0.97	1.02	—	9.2	V
CASE 3	8.0	152	0.83	3733	3888	3674	0.96	1.02	—	5.7	T
	10.0	152	0.83	3734	3891	3676	0.96	1.02	—	0.9	T
	3.75	152	0.50	6059	5994	5788	1.01	1.05	10.4	11.1	V
	3.75	152	0.70	4524	4469	4260	1.01	1.06	12.2	13.2	V
	3.75	152	0.83	3825	3871	3661	0.99	1.04	—	15.0	V
	3.75	152	0.90	3517	3621	3411	0.97	1.03	—	15.1	VH
	3.75	152	1.00	3148	3325	3113	0.95	1.01	—	13.2	H
	3.75	152	1.10	2896	3082	2870	0.94	1.01	—	2.0	H
	3.75	152	1.20	2691	2880	2667	0.93	1.01	—	1.8	H
	3.75	152	1.30	2517	2709	2496	0.93	1.01	—	1.7	H
	3.75	152	1.50	2235	2435	2222	0.92	1.01	—	1.5	H

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



3.2 解析結果

(1) 曲げ崩壊形式

解析では、圧縮フランジのねじれ角、桁のねじれ角、桁高の縮み、および解析モデルの変形図から崩壊形式を判定した。表4に解析モデルの曲げ耐力、崩壊形式、回転容量についてまとめて示す。解析モデルの崩壊形式の例として、図-16にフランジ垂直座屈と水平座屈の連成座屈、フランジ垂直座屈、フランジ水平座屈の変形図を示す。

この表によると、CASE 1では、ウェブ幅厚比=50のウェブが厚肉のモデルではフランジねじれ座屈、ウェブ幅厚比 60, 70 のモデルではフランジ水平座屈、80~110 ではフランジ垂直座屈と水平座屈の連成座屈、ウェブ幅厚比 125 以上ではフランジ垂直座屈による崩壊がみられる。

次に CASE2 では、フランジ突出脚幅厚比が 8 以上のモデルではねじれ座屈、フランジ突出脚幅厚比=5, 6 のモデルはフランジ垂直座屈、3.8~4.5 ではフランジ垂直座屈と水平座屈の連成座屈、3.5 以下の厚肉でフランジ幅が狭いフランジのモデルではフランジ水平座屈によって崩壊するのがわかる。ウェブ幅厚比 152 の場合、極厚フランジを用いたプレートガーダーはフランジ垂直座屈によって崩壊するが、さらにフランジが厚肉な範囲では水平座屈による崩壊が支配的になる。

CASE3 では、ウェブ・フランジ面積比 A_w/A_f が 0.83 以下の範囲ではフランジ垂直座屈、 $A_w/A_f=0.9$ ではフランジ垂直座屈と水平座屈の連成座屈、 $A_w/A_f \geq 1.0$ ではフランジ水平座屈によって崩壊した。ウェブ・フランジ面積比が小さくなるにつれて、フランジの板剛度がウェブの板剛度に比べて大きくなる(極厚フランジを用いたプレートガーダーの断面に移行する)ため、ウェブ・フランジ面積比が小さな範囲ではフランジ垂直座屈が生じるようになる。一方、 A_w/A_f が大きな範囲ではフランジ水平座屈が支配的になる。

(2) 曲げ耐力と変形能

曲げ耐力とウェブ幅厚比、フランジ突出脚幅厚比、ウェブ・フランジ面積比の関係をそれぞれ図-17~19に、

回転容量とウェブ幅厚比、フランジ突出脚幅厚比、ウェブ・フランジ面積比の関係をそれぞれ図-20~22に示す。これらの図には、実験結果もあわせて示している。

CASE 1の解析結果図-17をみると、ウェブ幅厚比=120では曲げ耐力は全塑性モーメント以上になっており、図-20に示す回転容量でも十分な塑性回転容量を有していることがわかる。したがって、極厚フランジを用いた CASE1($b_f/2t_f=3.75$, $A_w/A_f=0.83$)の場合では、AISIのウェブ幅厚比規定($h_w/t_w \leq 69.0$, $\sigma_y=246\text{MPa}$ の場合)を満たしていなくても、塑性設計に必要な曲げ耐力、変形能を有していると判断できる。

次に CASE 2の解析結果について、図-18および図-21をみると、全ての解析モデルの曲げ耐力は、全塑性モーメントには達していないが、フランジ突出脚幅厚比 $b_f/2t_f$ が 3~5 程度ならば、全塑性モーメント程度の曲げモーメントは期待できることが図-18からわかる。また図-21より、フランジ突出脚幅厚比が小さくなるにつれて変形能が飛躍的に増加することがわかる。これより、極厚フランジを用いる場合、フランジ突出脚幅厚比が小さくなるので、ウェブが比較的薄肉であっても、大きな塑性回転容量が期待できると判断できる。

CASE 3の解析結果図-19および図-22からは、ウェブ・フランジ面積比が大きくなるにつれて、フランジの板剛度がウェブの板剛度に比べて小さくなり、極厚フランジを用いた場合から通常のプレートガーダーの断面に移行していく。図-19より、CASE3($b_f/2t_f=3.75$, $h_w/t_w=152$)の場合、フランジが極厚になるにつれて、全塑性モーメント以上の曲げ耐力が期待できる。しかし、図-22に示すように、ウェブ・フランジ面積比 A_w/A_f が 0.8 より小さくなると塑性回転容量は低下するのがわかる。 $A_w/A_f \leq 0.8$ では、フランジ垂直座屈により崩壊するため、実験結果図-10(b)のように、最高荷重後に急激な耐力低下が生じる。そのために、ウェブ・フランジ面積比が小さくなくても、変形能が低下すると推察できる。このようにフランジ、ウェブの幅厚比が同じであっても、ウェブ・フランジ面積比の値によって、変形能が大きく変わることがわかる。

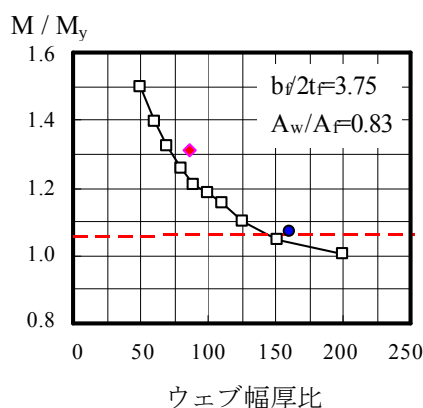


図-17 曲げ耐力に対するウェブ幅厚比の影響(CASE1)

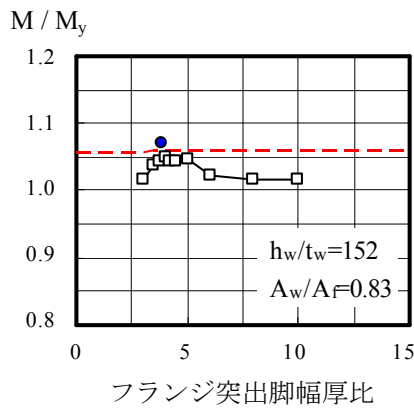


図-18 曲げ耐力に対するフランジ突出脚幅厚比の影響(CASE2)

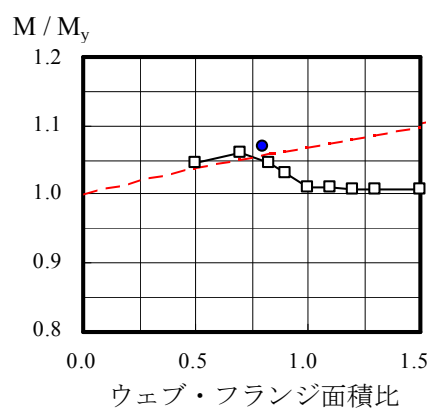


図-19 曲げ耐力に対するウェブ・フランジ面積比の影響(CASE3)

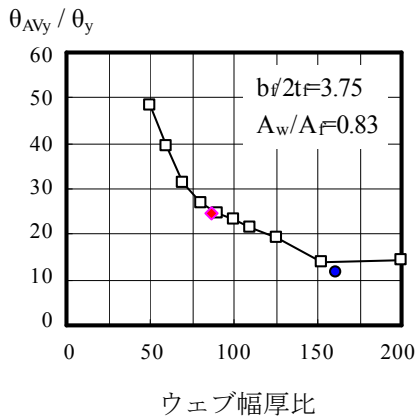


図-20 変形能に対する
ウェブ幅厚比の影響(CASE1)

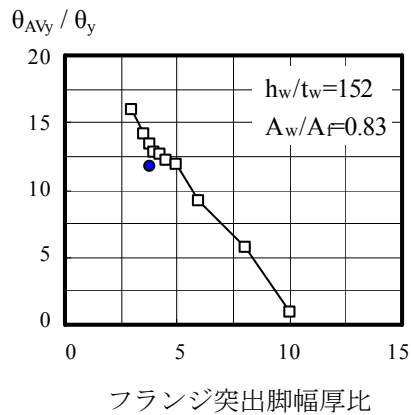


図-21 変形能に対する
フランジ突出脚幅厚比の影響(CASE2)

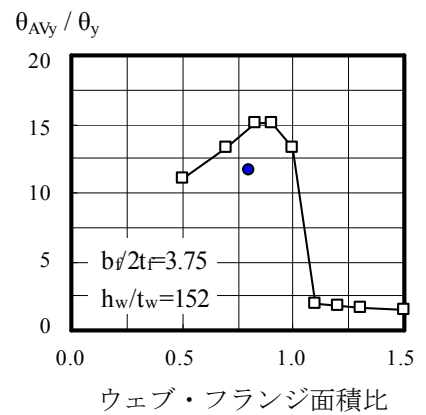


図-22 変形能に対する
ウェブ・フランジ面積比の影響(CASE3)

● : NC161-4, ◆ : C87-4

4. 結論

本研究では、曲げを受ける極厚フランジを有するプレートガーダーについて、実験および解析的に終局挙動と崩壊形式を明らかにした。さらに、極厚フランジのプレートガーダーでは、フランジ降伏後の変形能も期待できることから、ASD法の観点から桁の変形能についても調べた。実験および解析結果から得られた知見をまとめれば、以下ようになる。

- 1) 極厚フランジを有するプレートガーダーでは、道路橋示方書のウェブ幅厚比規定を満足していても、圧縮フランジの降伏後、フランジ垂直座屈崩壊が起きることを実験的に確認した。さらにウェブが上下フランジの間隔保持するに十分な板厚を持っていれば、フランジ垂直座屈は起きず、フランジ水平座屈による崩壊が支配的となることを示した。
- 2) 極厚フランジを用いたプレートガーダーの場合、ウェブが薄肉であってもフランジ降伏モーメント程度の曲げ耐荷力が期待できることを実験、解析から示した。また、変形能も期待できる。
- 3) 極厚フランジを用いた場合、AISIのASD法におけるウェブ幅厚比制限を緩和できる可能性を解析的に示した。
- 4) パラメトリック解析により、極厚フランジを用いる場合、AISI、AASHTOのLRFDのコンパクト断面のウェブ幅厚比制限を満たしていない $h_w/t_w=152$ の場合でも、フランジ突出脚幅厚比を小さくすることにより、変形能を飛躍的に向上させることがわかった。
- 5) フランジやウェブの幅厚比だけでなく、ウェブ・フランジ面積比も変形能に大きく影響することを解析的に示した。

謝辞

本研究に際して、(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) Basler, K. Thurlimann, B : Strength of Plate girders in bending, Proc. of ASCE, Vol.87, No.ST6, pp.153-181, 1961.
- 2) 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, Vol.15, pp145-152, 2007.
- 3) LRFD 橋梁示方書 AASHTO : LRFD Bridge Design Specification, 2nd Ed, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 1998.
- 4) Schilling, C.G : Autostress Design of Highway Bridges, Phase 3, Moment-Rotation Tests of Steel Bridge Girders, AISI Project 188, 1985.
- 5) P. F. Adams, M. G. Lay, and T. V. Galambos. : Experiments on High-Strength Steel Members, Fritz Laboratory Report No.297. 8, 1964.
- 6) A. F. Lukey and P. F. Adams. : Rotation Capacity of Beams Under Moment Gradient, ASCE Structural Journal, 1969.
- 7) N. M. Holtz, and G. L. Kulak. : Web Slenderness Limits for Compact Beams, Structural Engineering Report No.43, University of Alberta, 1973.
- 8) N. M. Holtz, and G. L. Kulak. : Web Slenderness Limits for Non-Compact Beams, Structural Engineering Report No.51, University of Alberta, 1975.
- 9) 日本道路協会 : 道路橋示方書・同解説 I 共通編, II 鋼橋編, 2002.

(2008年9月18日受付)