

H形鋼断面の弱軸周りの全塑性曲げ耐力に及ぼすせん断力の影響について

山西 央朗*

(平成30年11月1日受付)

Full plastic bending strength with shearing force effect for H-shaped steel member on miner axis

Teruaki YAMANISHI

(Received Nov. 1, 2018)

Abstract

H-shaped steel member had full plastic bending strength on collapse mechanism of structure. The principle to they conditions was normal stress reacting yield stress by means of flexure and axial force. However, normal stress reduced by shear stress in collapse motion, if shear force becomes dominant obtain from more smaller shear span ratio.

In this paper shown, H-shaped steel member on miner-axis full plastic bending strength acted on by shearing force and flexure, its computing by FEM analysis. That results showed, H-shaped steel member on miner-axis strength pays its attention to only flange and can calculate.

Key Words: H-shaped steel member, miner axis, Full-plastic bending strength, FEM-analysis

1. 序 論

建築構造物における柱、および梁部材は細長く形成され、地震時の部材崩壊は曲げ耐力により決定する。このため、崩壊荷重算定時には、垂直応力度の分布に影響を与える軸方向力を加味した部材全塑性曲げ耐力を算定すればよい。

しかしながら、シアスパン比が極端に小さくなるとせん断応力度によって降伏する領域が広がり、結果として、全塑性曲げ耐力が低下する。このことは、日本建築学会 鋼構造塑性設計指針にてまとめられおり¹⁾、せん断力の影響を加味した全塑性曲げ耐力の評価手法も示されている。一方、H形鋼の弱軸方向については長方形断面として取り扱えるとされており耐力の低下は小さいと予想されるが、シアスパン比1で全塑性曲げ耐力は1割近く低下する。

H形鋼の弱軸方向においてシアスパン比が極端に小さくなる事例は、例えば、図1に示すようにH形鋼を用いた柱

の弱軸方向をブレース架構として繋ぎ梁とブレースガセットプレート間に高低差を設ける場合が考えられる。このような事例は決して多くないものの実際に取り扱われるディテールである。

このとき、せん断力による全塑性曲げ耐力低下の可能性などは議論されておらず、これは冒頭に述べた知見等に基づいての判断であろう。しかし、耐力は確実に低下し、かつH形鋼弱軸周りでシアスパン比が極端に小さくなる場合を対象とした実験例は少なく、引き続きの検討が必要であることも指摘している¹⁾。

本研究では先ず、FEM解析により図1の応力状態を模したモデルを構築し、H形弱軸周りの全塑性曲げ耐力に及ぼすせん断力の影響について検討する。

2. 解析対象

解析対象としては、H形鋼柱が採用し、弱軸方向をブ

* 広島工業大学工学部建築工学科

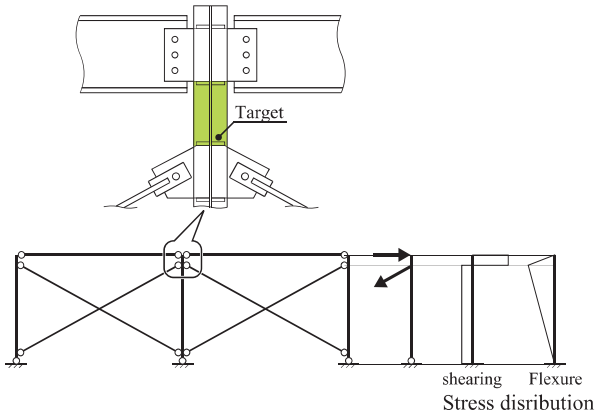


図1 対象位置例（屋内運動場の桁行方向架構）

レース架構とする事例の多い低層屋内運動場の柱を想定する。当該部材には、中幅または細幅 H 形鋼が採用される。

部材寸法については、一般的な構造物事例に則し、中幅 H-294×200×8×12、H-340×250×9×14、H-390×300×10×16、および細幅 H-350×175×7×11、H-400×200×8×13、H-450×200×9×14 を採用し、計 6 種類の断面を用いる。

3. FEM 解析概要

FEM 解析プログラムには、汎用構造解析プログラム「ADNIA ver. 9.3.4」を用いる。解析は全領域解析とした。

3.1 要素形式と境界条件

図 2 に解析モデルの要素形式、要素の様子、幾何学的・力学的境界条件を用いて検討を行う。

本解析では H 形鋼弱軸周りのシアスパン比を変数とした解析を実施するため、全長 l の H 形鋼中央部にシアスパン a の 2 倍の長さを確保し、この両端部（位置 B、C）に z 軸方向併進を拘束、H 形鋼の両端部（位置 A、D）に z 軸方向強制位 $\delta_z (=0.01 \cdot (l-2a))$ をそれぞれが逆方向同一の大きさとする幾何学的境界条件を入力する。スチフナは境界条件入力位置に設置し、当該板厚はフランジ板厚以上の平鋼板厚を採用する。なお、継続研究で実施検討している

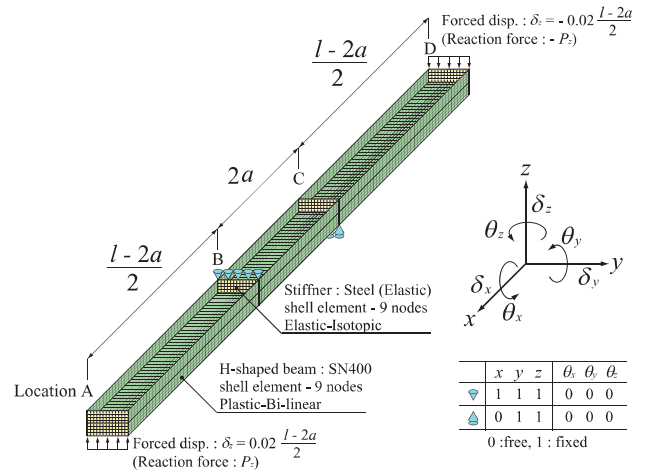


図2 FEM 解析モデル例

載荷実験を考慮して、各境界条件はスチフナ側面に設置する。

H 形鋼並びにスチフナは 9 節点 shell 要素で構成し、要素分割はフランジ幅の 2～3 割り程度の距離が 1 グリッドとなるように設定する。素材特性として、H 形鋼には Plastic-Bi-linear ($\sigma_Y=235 \text{ N/mm}^2, E=205,000 \text{ N/mm}^2, \nu=0.3, E_{2nd}=0.01 \text{ N/mm}^2$)、スチフナには Elastic-Isotropic ($E=205,000 \text{ N/mm}^2, \nu=0.3$) を設定する。

3.2 解析変数

表 1 に解析変数である断面形状とシアスパン a 一覧を示す。H 型断面としては 2 章に示した 6 断面を用い、H 形鋼フランジ幅 $=D$ として、シアスパン比 a/D が 0.5, 1.0, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5 となる a を定め、計 42 ケースの解析を行う。

また、全長 l については断面毎に設定し、部材中央のシアスパン a に対して、両端部（A～B 間、C～D 間）の長さ $(l-2a)/2$ が常に a 以上を確保できる値としている。

4. 全塑性曲げ耐力理論値¹⁾

文献 1 にまとめられていた、せん断力の影響を加味した

表 1 露出柱脚の接合部係数、最大耐力と各種回転剛性

size (mm)	a (mm)							l (mm)	
	a/D=0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5		
middle flange	H-294×200×8×12	200	400	600	800	1000	1200	1400	5000
	H-340×250×9×14	250	500	750	1000	1250	1500	1750	6000
	H-390×300×10×16	300	600	900	1200	1500	1800	2100	7000
narrow flange	H-350×175×7×11	175	350	525	700	875	1050	1225	4000
	H-400×200×8×13	200	400	600	800	1000	1200	1400	5000
	H-450×200×9×14	200	400	600	800	1000	1200	1400	5000

長方形断面の全塑性曲げ耐力 M_{ps} は以下となる。

まず、図3に示す長方形断面を有する片持ち梁の固定端に注目する。なお、当該梁は単位幅を有し、断面幅方向への応力の広がり等は無視する。更に、降伏の取り扱いにはミーゼスの降伏条件を採用する。

$$\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2 \leq \sigma_Y^2 \quad (1)$$

図4に、ミーゼスの降伏条件を満足するように全塑性状態を想定したものを示す。

まず、せん断応力のみで降伏する領域を有さない場合、すなわちシアスパン比が、

$$\sqrt{3} \cdot D / (2 \cdot a) \leq \frac{\pi}{2} \rightarrow \therefore \frac{a}{D} \geq \frac{\sqrt{3}}{\pi}$$

となり、 M_{ps} と Q は

$$M_{ps} = \frac{2}{3} \cdot \sigma_Y \cdot a^2 \cdot \left\{ 1 - \cos \left(\frac{\sqrt{3} \cdot D}{2 \cdot a} \right) \right\} \quad (2.a)$$

$$Q = \frac{\sigma_Y}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_Y \cdot a \cdot \left\{ 1 - \cos \left(\frac{\sqrt{3} \cdot D}{2 \cdot a} \right) \right\} \quad (2.b)$$

で表される。

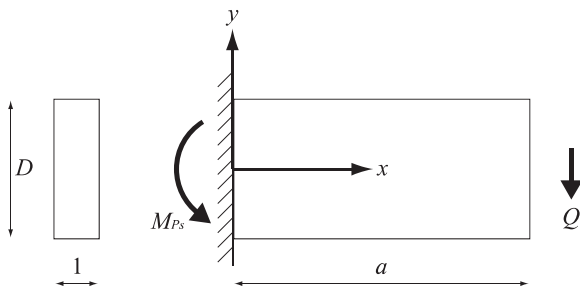
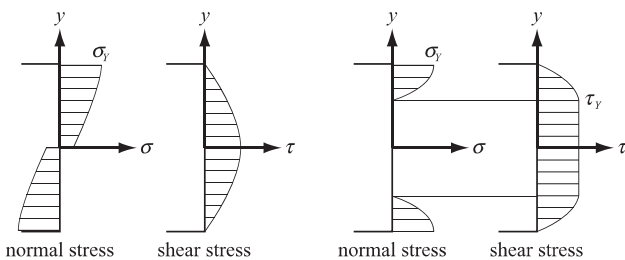


図3 理論値誘導モデル (長方形断面片持ち梁)



(a) 降伏せん断応力に達しない場合 (b) 中央部に降伏せん断応力に達した領域がある場合

図4 全塑性時応力分布 (長方形断面)

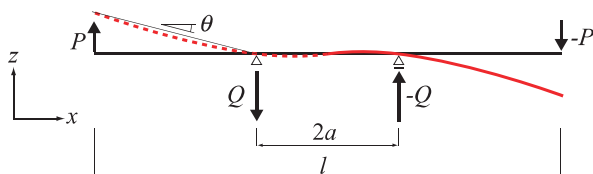


図5 変形状態、幾何学的諸量と作用力

次に、せん断応力のみで降伏する領域を有する場合、すなわちシアスパン比が、

$$\sqrt{3} \cdot D / (2 \cdot a) > \frac{\pi}{2} \rightarrow \therefore \frac{a}{D} < \frac{\sqrt{3}}{\pi}$$

となり、 M_{ps} と Q は

$$M_{ps} = \frac{\sigma_Y}{\sqrt{3}} \cdot a \cdot D \cdot \left\{ 1 - \frac{2 \cdot a}{\sqrt{3} \cdot D} \cdot \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) \right\} \quad (3.a)$$

$$Q = \frac{\sigma_Y}{\sqrt{3}} \cdot D \cdot \left\{ 1 - \frac{2 \cdot a}{\sqrt{3} \cdot D} \cdot \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) \right\} \quad (3.b)$$

で表される。

ここに、 σ_Y :降伏応力、 a :片持ち梁の長さ (シアスパン)、 D :長方形断面のせいである。

H形鋼弱軸周りに当該理論値を適用する場合、フランジのみを対象とし、また、実際の耐力を算出する時にはフランジ板厚 t_f を2枚分乗じて値を得る。

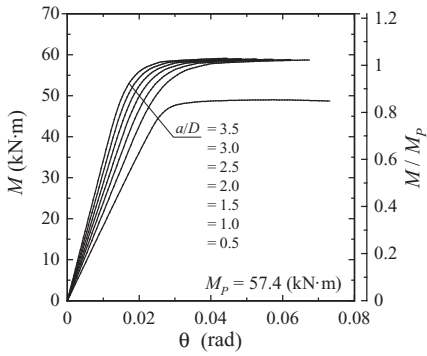
5. 解析結果と考察

図5に変形状態、幾何学的諸量と作用力の模式図を、図6～9に解析結果として、位置Bにおけるモーメント M - 部材角 θ 関係を、部材Bに作用するせん断力 Q - 部材角 θ 関係を、最大曲げ耐力 M_{max} ・全塑性曲げ耐力 M_{ps} - シアスパン比 a/D 関係を、終局時垂直応力分布として最終ステップのB～C区間の x 軸方向応力分布の代表事例を、それぞれ示す。なお、図6右縦軸、図8左縦軸には弱軸周りの全塑性曲げ耐力 (せん断力の影響を考慮しない値) M_p で除した値を、図7右縦軸には降伏せん断力 $Q_Y (= 2B \cdot t_f \cdot \tau_Y)$ で除した値を示す。

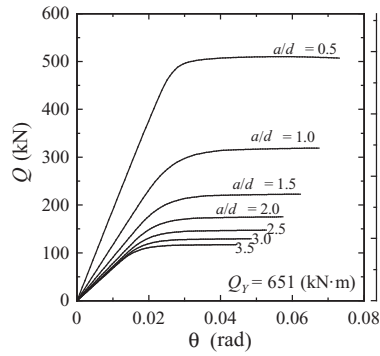
図6より、 $a/D=2 \sim 7$ はH形鋼弱軸周りの全塑性曲げ耐力 M_p に達しており、一方、 $a/D=0.5$ は M_p の8割強程度の耐力を示した。これは、表1に示した断面形状 (細幅、中幅H形断面) 全てに現われている。

このような a/D に対する全塑性曲げ耐力の変化は、図8に示すように長方形断面として算出した M_{ps} に良好に対応しており、H形鋼断面の弱軸周りの全塑性曲げ耐力に及ぼすせん断力の影響は長方形断面として検討することが可能であると判断できる。更に図9より、位置B、Cにおいて $a/D=1.0$ は断面全体にわたって降伏応力に達しているのに対し、 $a/D=0.5$ は中立軸近傍は垂直応力が極めて小さな領域が広がっており、これは図4に仮定している応力状態と整合していることが分かる。

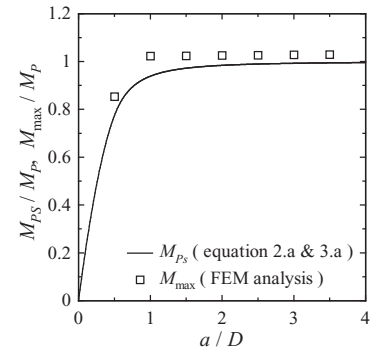
最後に、図7よりせん断力としての強度を見た場合、いずれの結果も降伏せん断力 Q_Y に達しておらず、また、結果は明記していないが式 (2.b) および (3.b) より算出した値と整合が取れていること確認している。



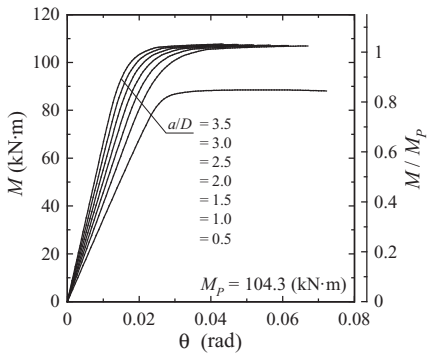
(a) H-294x200x8x12



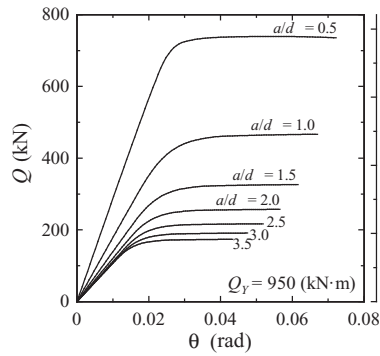
(a) H-294x200x8x12



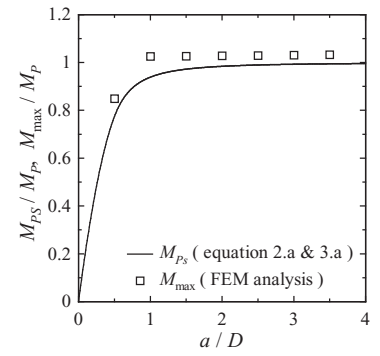
(a) H-294x200x8x12



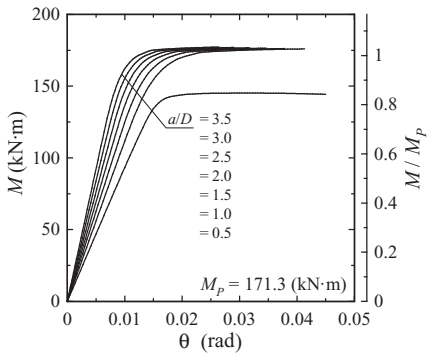
(b) H-340x250x9x14



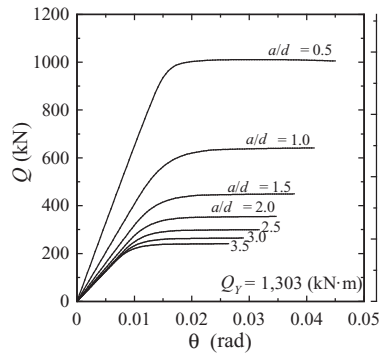
(b) H-340x250x9x14



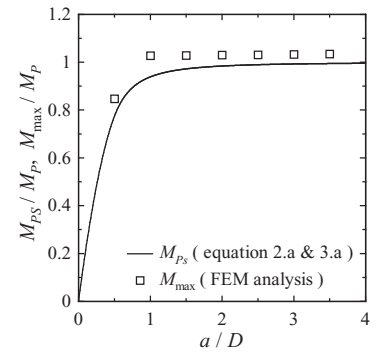
(b) H-340x250x9x14



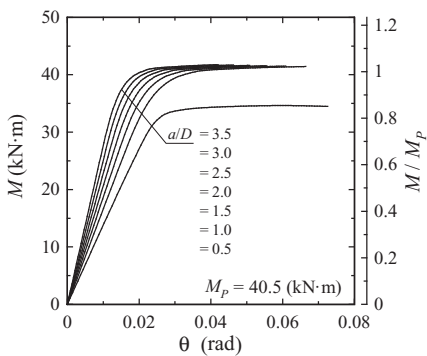
(c) H-390x300x10x16



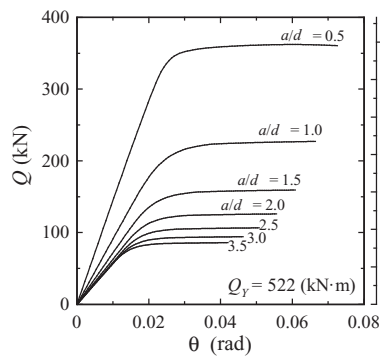
(c) H-390x300x10x16



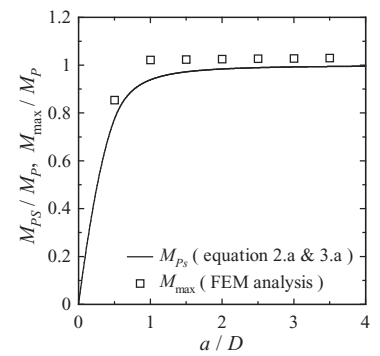
(c) H-390x300x10x16



(d) H-350x175x7x11



(d) H-350x175x7x11

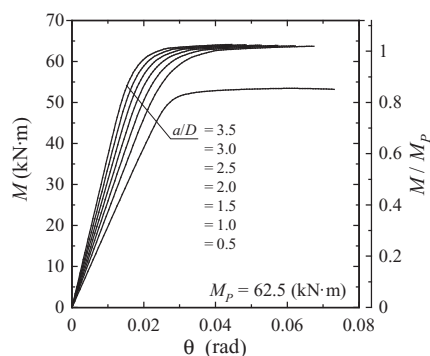


(d) H-350x175x7x11

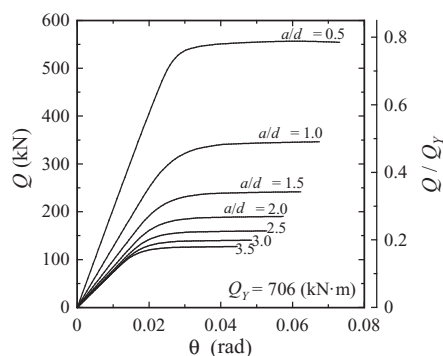
図 6 (a)~(d) モーメント M - 部材角 θ 関係

図 7 (a)~(d) セン断力 Q - 部材角 θ 関係

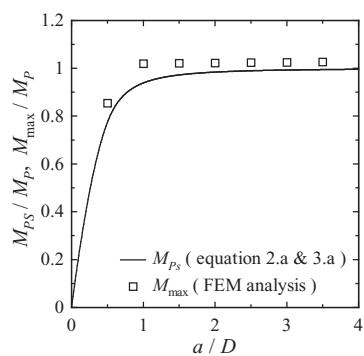
図 8 (a)~(d) M_{\max} , M_{ps} - シアスパン比 a/D 関係



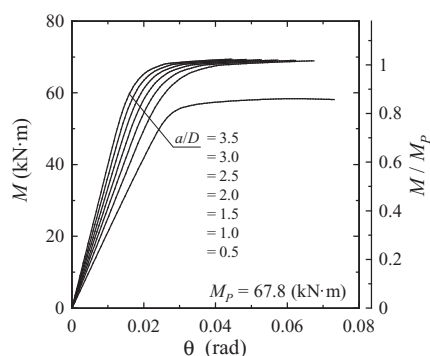
(e) H-400x200x8x13



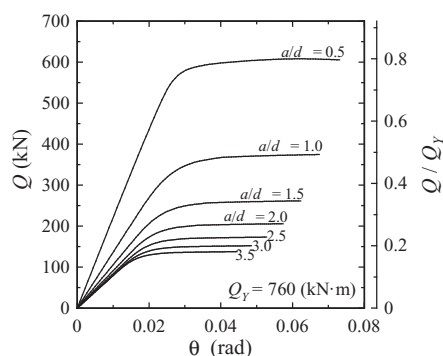
(e) H-400x200x8x13



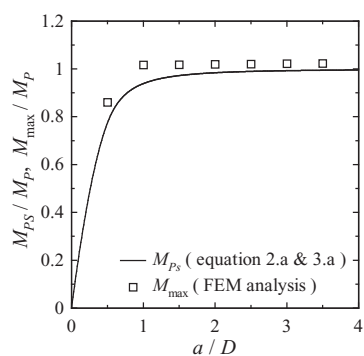
(e) H-400x200x8x13



(f) H-450x200x9x14



(f) H-450x200x9x14



(f) H-450x200x9x14

図6 (e)～(f) モーメント M - 部材角 θ 関係

図7 (e)～(f) せん断力 Q - 部材角 θ 関係

図8 (e)～(f) M_{\max} , M_{ps} - シアスパン比 a/D 関係

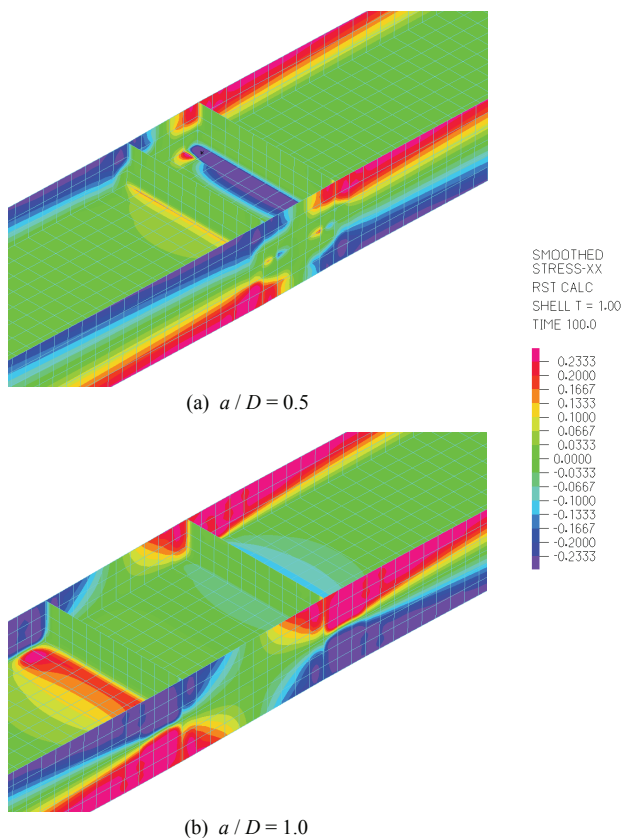


図9 x 軸方向応力度分布 (H-350×175×7×11)

6. ウェブの影響について

5章より、H形鋼弱軸周りの全塑性耐力に及ぼすせん断力の影響は、フランジのみに着目して長方形断面として取り扱えることが示された。

しかし、これは崩壊荷重に着目した理論値との整合性を検討して得た結論であり、実際にフランジのみの解析などを実施して得られた検討ではない。

更に、シアスパン比の分割が十分に細かくはなく、特に、せん断力の影響が顕著となるものについては、 $a/D=0.5$ しか取り扱えていなかった。

本章では、追加検討として、以下の2点を実施する。

1. フランジのみの解析も併せて実施し、改めて、結果を比較検討する。
2. シアスパン比を、 $a/D=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ となる解析を実施し、強度の変遷を追跡する。

代表的なモデルとしてH-350×175×7×11断面に着目し、上記内容を実施する。

6.1 フランジのみの解析モデル

解析対象の部材寸法は、細幅 H-350×175×7×11 を採用し、これのフランジのみをモデル化して載荷を行う。

図10に示す解析モデルの要素形式、要素の様子、幾何学

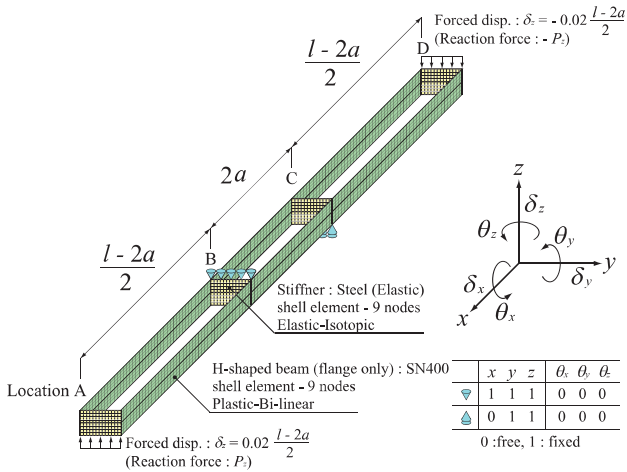


図10 FEM 解析モデル例 (フランジのみ)

的・力学的境界条件を用いて検討を行う。H 形鋼のフランジおよび幾何学的境界条件を入力するためのスチフナを設置する。

全長 l の H 形鋼中央部にシアスパン a の 2 倍の長さを確保し、この両端部 (位置 B, C) に z 軸方向併進を拘束, H 形鋼の両端部 (位置 A, D) に z 軸方向強制位 $\delta_z (=0.01 \cdot (l-2a))$ をそれぞれが逆方向同一の大きさとする幾何学的境界条件を入力する。スチフナは境界条件入力位置に設置し、当該板厚はフランジ板厚以上の平鋼板厚を採用する。なお、継続研究で実施検討している載荷実験を考慮して、各境界条件はスチフナ側面に設置する。

H 形鋼並びにスチフナは 9 節点 shell 要素で構成し、要素分割はフランジ幅の 2~3 割り程度の距離が 1 グリッドとなるように設定する。素材特性として、H 形鋼には Plastic-Bi-linear ($\sigma_y=235 \text{ N/mm}^2, E=205,000 \text{ N/mm}^2, \nu=0.3, E_{2nd}=0.01 \text{ N/mm}^2$), スチフナには Elastic-Isotropic ($E=205,000 \text{ N/mm}^2, \nu=0.3$) を設定する。

6.2 解析結果と考察

解析として図11~14に位置 B におけるモーメント M -部材角 θ 関係を、部材 B に作用するせん断力 Q -部材角 θ 関係を、最大曲げ耐力 M_{max} ・全塑性曲げ耐力 M_{ps} -シアスパン比 a/D 関係を、終局時 y 軸方向たわみとして最終ステップの B~C 区間の y 軸方向応力度分布を、それぞれ示す。なお、比較のため、ウェブを有する場合の結果 (5 章に記したデータ) も再度示す。

図11~13より、フランジのみの解析においても、ウェブを有する場合の結果と大きな違いは見られない。当該結果は 5 章の考察に記したように、弱軸周りの全塑性耐力に及ぼす影響がせん断の影響が支配的な領域に入っても同一の結果が得られることを裏付けている。一方、フランジのみの $a/D=0.2$ の最大耐力が低いこと、更に、フランジのみ

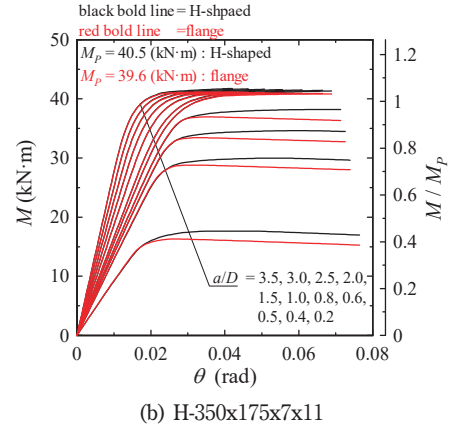


図11 モーメント M -部材角 θ 関係

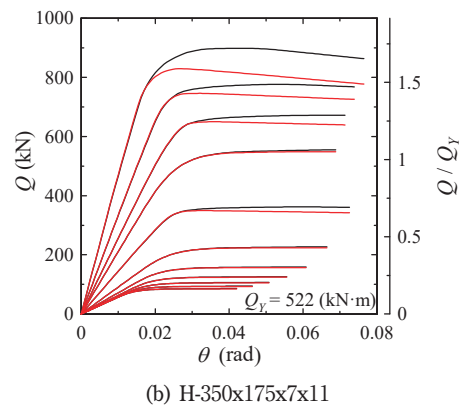


図12 せん断力 Q -部材角 θ 関係

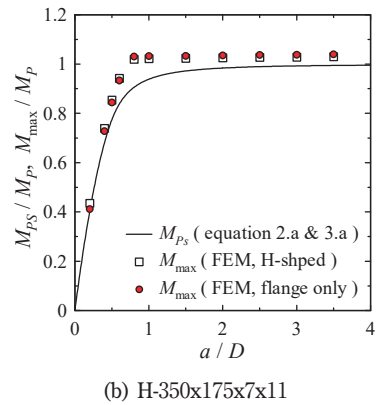


図13 M_{max}, M_{ps} -シアスパン比 a/D 関係

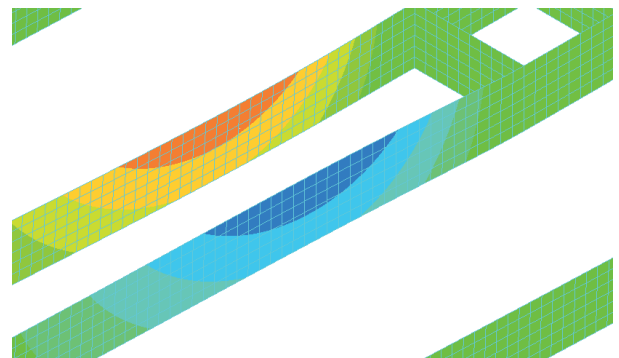


図14 y 軸方向たわみ (H-350×175×7×11)

の解析全般においては全塑性領域に入った後に負の勾配を示している。これらは図14に示したように、フランジ板要素の捩れ挙動（横座屈）に基因したものであり、ウェブの消失による力学的な耐力劣化を示唆するものではない。

これらの結果からも、せん断の影響が顕在する領域においても、全塑性耐力におけるウェブの影響はないものと見なせる。すなわち、H形鋼をフランジのみに着目した長方形断面と見なして検討が可能であることが分かる。

6. まとめ

H形鋼弱軸周りの全塑性曲げ耐力に及ぼすせん断力の影

響を検討するためFEM解析を実施し、当該耐力の変遷はフランジのみに着目して、長方形断面として取り扱えるという鋼構造塑性設計指針の手法に対応した結果を得た。

但し、ここではFEM解析結果の議論のみであるので、今後、載荷実験により上述の結果の追加検討を行うものとする。

文 献

- 1) 日本建築学会：鋼構塑性設計指針，2017.2.