

形状と寸法の異なる開口部を設けた鋼桁ウェブの耐荷力の検討

Study of ultimate strength of steel girder web plates with openings of different shapes and sizes

祝 賢治*,

赤堀 裕**

Yoshiharu IWAI,

Yutaka AKAHORI

*博(工) 三井造船(株)鉄構建設事業本部 技術部(〒559-8651 大阪市住之江区柴谷 1-1-57)

**工修 三井造船(株)鉄構建設事業本部 技術部(〒559-8651 大阪市住之江区柴谷 1-1-57)

Presented in this paper is analytical study of the ultimate strength of steel girder web with openings. Three kinds of shape such as rectangular, ellipse, and circle, whose sizes are referred to actual bridges, are selected as opening shape parameter. Elasto-plastic finite displacement analyses are carried out on such types of models as (i) without openings, (ii) with non-strengthened openings, and (iii) with openings strengthened by doubler plates. The behavior of web plates with openings subjected to bending moment or shearing force, respectively, are investigated. The influence of the shape and size of openings and doubler plates on the ultimate strength of web plates is estimated.

Key Words: steel web plate, opening, ultimate strength, elasto-plastic and finite displacement analyses

キーワード: 鋼ウェブ, 開口部, 耐荷力, 弾塑性有限変位解析

1. まえがき

鋼桁ウェブには、架設時の部材搬入、橋梁が完成した後の維持管理、あるいは水道管・ガス管などのライフラインの設置など、様々な目的で必要上やむを得ず開口部が設けられる。ところがこの開口部の位置は、設置目的、および橋の構造・寸法により制約を受けるため、必ずしも応力に余裕のある位置とは限らない。このような開口部を有する鋼桁ウェブでは、断面欠損、および応力集中による耐荷力の低下が問題となる。

さて、開口部を有する板がせん断を受ける場合の耐荷力についての土木分野での研究としては、円形、あるいは正方形の開口を設けた正方形板の強度と補強法に関する解析と実験の両面からの研究がある¹⁾。

また、開口部を有するウェブの設計基準としては、曲げとせん断とを同時に受ける桁、あるいは梁のウェブの開口部について、ASCEによって、主にビル建築物を対象にしたガイドラインが作成されている²⁾。造船分野では、開口部による影響の重要度により3つに分類し、主に塑性崩壊、および座屈強度の両面から開口部の大きさと位置に関する設計基準を設けている³⁾。橋梁分野では、阪神高速道路公団の設計基準においては、マンホールを有する横桁の設計について、開口部の大きさと位置、適用される横桁のウェブ高さ、および補強方法が細かく規定されている⁴⁾。しかし、開口部を有する一般的な鋼桁ウェブの耐荷力算定法についての明確な規定は、未だ見

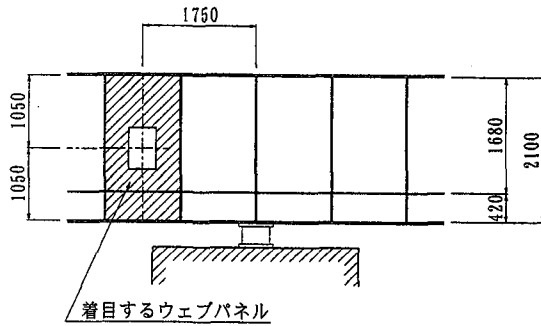
あたらないのが現状である。したがって、実橋においては、過去の実績、および設計者の経験に基づいた設計が行われてきた。

本研究では、連続箱桁の中間支点付近の鋼桁ウェブを対象として、実橋で採用されているような寸法の長方形、長円形、円形の3種類の開口形状をパラメータとし、i) 開口部のないモデル、ii) 開口部を設け補強しないモデル、iii) 開口部を設けダブリングプレートで補強したモデルを想定し、弾塑性有限変位解析を行った。そして、まず、開口部を有する鋼桁ウェブが、曲げ、あるいはせん断を単独に受けたときの耐荷力特性を調べた。つぎに、開口部あるいはダブリング補強の形状と寸法がウェブの耐荷力に及ぼす影響について考察した。さらに、曲げとせん断が同時に作用する場合の耐荷力照査について、数値解析的な検討を加えた。そして、これらの結果より、ウェブプレートの耐荷力にとって、好ましい開口部の形状、およびダブリング補強の方法を示した。

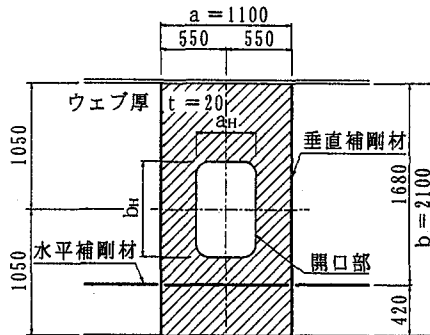
2. 検討の対象

検討の対象を図-1に示す。実橋の連続箱桁中間支点付近の同図(a)に斜線部で示す上下フランジ、および主桁ウェブの垂直補剛材で区切られた鋼桁ウェブパネルである。ウェブパネルの構造、および寸法を同図(b)に示す。下フランジ側に1段の水平補剛材が設けられている。

鋼桁ウェブパネルの長さは1100mm、幅は2100mmで、



(a) 連続箱桁中間支点付近の側面図



(b) ウェブパネルの構造および寸法

図-1 検討の対象 (寸法単位: mm)

板厚 20mm である。垂直補剛材の高さは 200mm で、板厚 19mm である。また、水平補剛材の高さは 180mm で、板厚 14mm である。ウェブパネルの使用材料はすべて SM490Y 材である。なお、鋼桁ウェブの開口位置は、ウェブパネルの中央位置とする。

3. 解析条件

3-1 解析モデル

解析モデルを図-2に例示する。図-1(b)の斜線部に示す鋼桁ウェブパネルを取り出したものである。ウェブプレートは、1 節点 5 自由度の平板要素で、また、水平補剛材、および垂直補剛材は、梁-柱要素でモデル化した。

ウェブには、曲げモーメント、およびせん断力が作用する。これらの作用力は、図-2の右側の垂直補剛材位置で面内強制変位で与える。曲げモーメントは、載荷辺に直角方向に、図-2に示す x 方向に三角形分布の強制変位を与える。また、せん断力は、載荷辺に沿って、y 方向に一様分布の強制変位を与える。

次に、表-1(a)に曲げモーメント載荷、(b)にせん断力載荷の場合について、解析モデルの境界条件を示す。なお、座標系、および変位の種類、ならびに変位の正の方向は図-2に示すとおりである。

補剛板の終局強度に影響を及ぼす初期不整として、板幅方向、および長さ方向とも 1 半波形の初期たわみを考

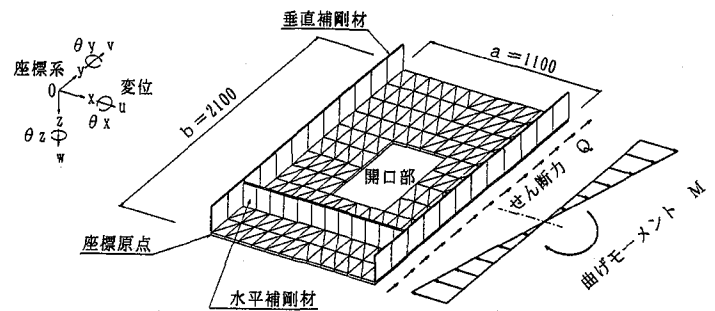


図-2 解析モデル (寸法単位: mm)

表-1 境界条件

(a) 曲げモーメント載荷

		u	v	w	θ_x	θ_y	θ_z
上辺	非載荷辺	0	0	1	0	0	1
下辺	非載荷辺	0	0	1	0	0	1
左辺	非載荷辺上端部	1	1	1	0	0	1
	非載荷辺	1	0	1	0	0	1
右辺	載荷辺	2	0	1	0	0	1

[備考] 0:自由 1:拘束 2:強制変位

(b) せん断力載荷

		u	v	w	θ_x	θ_y	θ_z
上辺	非載荷辺	0	0	1	0	0	1
下辺	非載荷辺	0	0	1	0	0	1
左辺	非載荷辺	1	1	1	0	0	1
右辺	載荷辺	1	2	1	0	0	1

[備考] 0:自由 1:拘束 2:強制変位

慮した。すなわち、全体的な初期たわみ波形 w は、次式で表される。

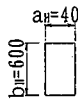
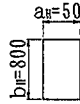
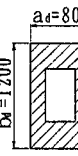
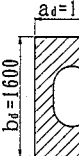
$$w = w_0 \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b} \quad \text{-----(1)}$$

ここに、 w_0 は初期たわみ波形の最大値である。この値には道路橋示方書⁵⁾による部材精度規定を準用して、 $w_0 = b/250$ とした。また、 a, b は、図-2に示すように、ウェブパネルの長さ、および幅である。なお、残留応力は考慮していない。

3-2 解析ケース

解析は、i) 開口部のないモデル、ii) 開口部を設け補強しないモデル、iii) 開口部を設けダブリングプレートで補強したモデルに対して行う。そして、開口部の形状、およびダブリング補強の形状と寸法については、公

表-2 開口部、およびダブリング補強の形状と寸法の一覧表（寸法単位：mm）

	長 方 形		長 円 形		円 形	
開口部の形状と寸法	 R 1	 R 2	 E 1		 C 1	 C 2
ダブリング補強の形状と寸法	 RD 1	 RD 2	 ED 1	 ED 2	 CD 1	 CD 2

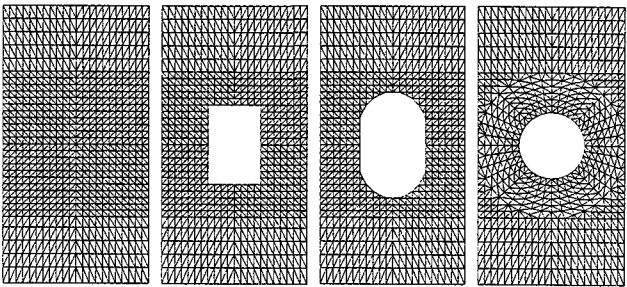
社公団の標準図^{6) - 9)}，および実際の工事で採用された形状より選択し，表-2に一覧表で示すとおりとした．なお，以下においては，それぞれの形状と寸法を示すために，表中の記号を用いる．例えば，直径 500mm の円形の開口部は，C1 で示す．

さて，パラメータとして取り上げた開口部の形状は，長方形，長円形，円形の 3 種類である．しかし，寸法の異なりを考慮すると，計 5 種類の開口部となる．また，ダブリング補強は，通常の設計においては，開口部による欠損断面積を補うだけの断面積をもつ板を母材の片側から当て，補強板の全周を溶接する方法がとられる．よって，表-2の補強板の板厚は，CD2を除いては全て 20mm である．CD2は母材の両側に補強板を当てるため，板厚は 10mm である．ただし，本研究では，増厚による補強効果を把握することを目的としたため，ダブリング補強部分は要素の板厚を母材と補強板の板厚を合計した厚さとした．よって，補強部は，荷重の偏心の影響，および母材と補強板の独立した挙動の影響は無視していることになる．

つぎに，解析モデルの一覧を表-3に示す．同表に示すように，開口部の有無，開口形状，および補強形状の組

表-4 解析シリーズの一覧表

シリーズ名	解析モデル名(記号で示す)		
	開口部なし	開口部あり，補強なし	開口部あり，補強あり
シリーズ 1	○	MR1	MRD1
シリーズ 2		MR2	MRD2
シリーズ 3		ME1	MED1
シリーズ 4		ME1	MED2
シリーズ 5		MC1	MCD1
シリーズ 6		MC2	MCD2



(a) モデル O (b) モデル MR1 (c) モデル ME1 (d) モデル MC1

図-3 シリーズ1の解析モデルの要素分割図

表-3 解析モデルの一覧表

解析モデル名	特徴	開口形状(記号)	補強形状(記号)
モデル O	開口部なし	---	---
モデル MR1	開口部を設け補強しない	R1	---
モデル MR2		R2	---
モデル ME1		E1	---
モデル MC1		C1	---
モデル MC2		C2	---
モデル MRD1	開口部を設け補強する	R1	RD1
モデル MRD2		R2	RD2
モデル MED1		E1	ED1
モデル MED2		E1	ED2
モデル MCD1		C1	CD1
モデル MCD2		C2	CD2

み合わせにより，解析モデルは計 12 種類となる．さらに，後述するような解析結果の分析のために，表-4に示すような解析シリーズに分類する．

そして，開口部の形状の異なる解析モデルの要素分割図を図-3に示す．開口部を設けるウェブパネル中央付近は 50mm × 50mm の要素寸法，上下辺近傍では 50mm × 100mm の要素寸法としている．なお，要素分割と寸法については，各モデルとも共通である．また，使用鋼材の物理定数は，すべて公称値を用いた．

3-3 解析方法

解析には，文献 10) に示す弾塑性有限変位理論に基づく有限要素解析プログラム USSP¹¹⁾を使用した．

4. 解析結果

4-1 荷重-変位曲線

図-4に、解析により得られた曲げモーメント-曲率曲線を、各シリーズごとに示す。同図の縦軸は、各モデルの載荷曲げモーメント M をパネルに開口部がない場合の降伏曲げモーメント $M_y (=2I_w/b\sigma_y)$ で無次元化し、また横軸は、曲率 Φ を開口部がない場合の降伏曲率 Φ_y

($=2\sigma_y/(Eb)$) で無次元化したものである。ここで、 I_w は中立軸に関するウェブの断面二次モーメント、 σ_y はウェブの公称降伏応力度、 E は材料の公称ヤング係数を表す。なお、図中の破線は、文献12)の式(6.1)、および式(6.2)による開口部のない場合の理論式に基づく曲線である。

次に、図-5に、解析により得られたせん断力-せん断ひずみ曲線を、各シリーズごとに示す。同図の縦軸は、

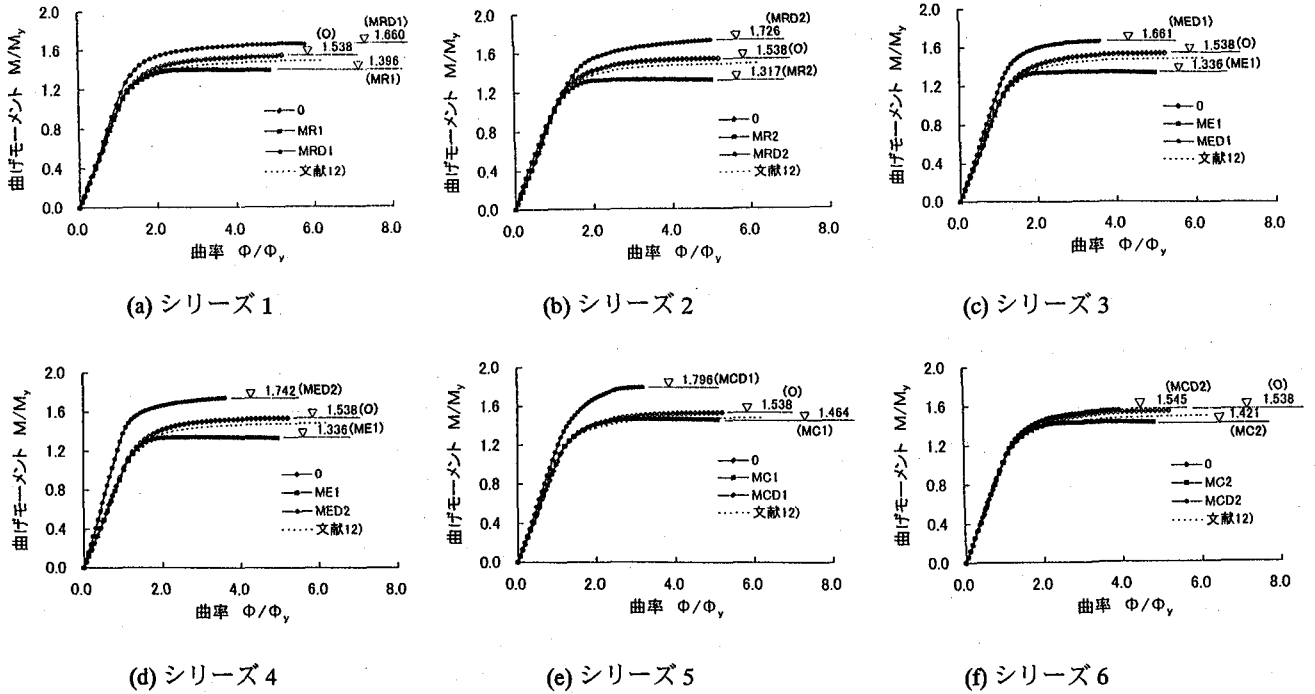


図-4 曲げモーメント-曲率曲線

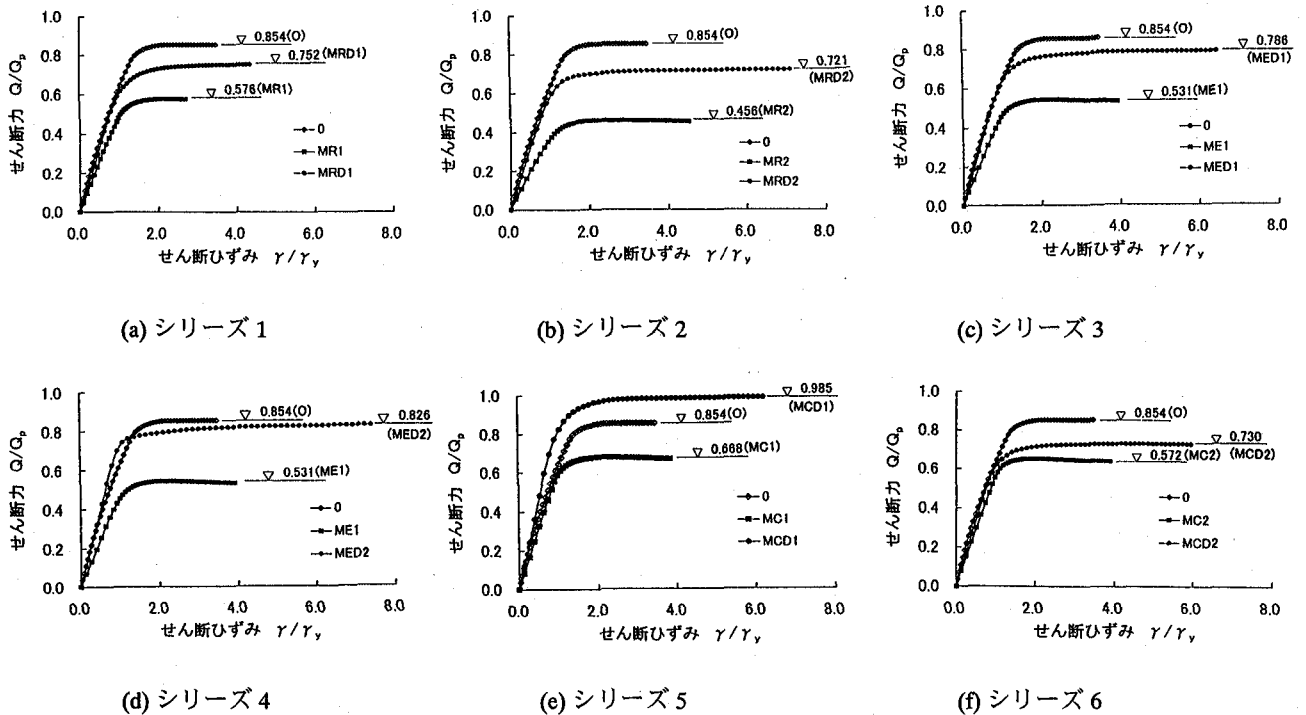


図-5 せん断力-せん断ひずみ曲線

各モデルの荷重せん断力 Q をパネルに開口部がない場合の降伏せん断力 $Q_p (=tb \tau_v; \tau_v = \sigma_v / \sqrt{3})$ で無次元化し、また横軸は開口部がない場合の降伏ひずみ $\gamma_v (=Q_p / GA_w)$ で無次元化したものである。ここで、 t はウェブ厚、 G は公称せん断弾性係数、 A_w はウェブの断面積を表す。

さらに、図 -4、および図 -5 の各曲線より、各解析モデルに対する初期剛性と終局強度を一覧表にまとめて、表-5に示す。初期剛性は、荷重が小さく、荷重と変位の関係が直線とみなせる範囲の曲線の傾きである。なお、図 -4、図 -5、および表 -5 に関する考察は、5 章で述べる。

表-5 各解析モデルの初期剛性と終局強度の一覧

解析モデル名	曲げモーメント載荷		せん断力載荷	
	初期剛性 ($M_u/M_p/(\Phi/\Phi_p)$)	終局強度 M_u/M_p	初期剛性 ($Q_u/Q_p/(\gamma/\gamma_p)$)	終局強度 Q_u/Q_p
モデル O	1.020	1.538	0.782	0.854
モデル MR1	1.000	1.396	0.540	0.576
モデル MR2	0.984	1.317	0.411	0.456
モデル ME1	0.997	1.336	0.497	0.531
モデル MC1	1.020	1.464	0.630	0.668
モデル MC2	1.016	1.421	0.572	0.640
モデル MRD1	1.107	1.660	0.679	0.752
モデル MRD2	1.147	1.726	0.651	0.721
モデル MED1	1.168	1.661	0.699	0.786
モデル MED2	1.419	1.742	0.807	0.826
モデル MCD1	1.166	1.796	0.908	0.985
モデル MCD2	1.045	1.545	0.670	0.730

4-2 塑性領域の拡がり

シリーズ 1 を例に、塑性領域の拡がりを図-6に示す。同図 (a) は、曲げモーメント載荷の場合であり、(b) はせん断載荷の場合である。また、図中の M_u および Q_u は、各モデルの終局状態における曲げモーメント、およびせん断力である。そして、例えば、 $0.77M_u$ は、作用曲げモーメントが終局状態の 77 %であることを示している。

さて、図 -6(a) の解析モデル O では、ウェブ上下縁から塑性化が始まり、水平補剛材が塑性化した後、中立軸方向に向かって、塑性域の拡がりが見られる。開口部を設けた解析モデル MR1 では、同様の傾向が見られるが、塑性域が開口部に到達した以降は、顕著な拡がりは見られない。開口部を補強した解析モデル MRD1 では、開口部に塑性域が到達した後は、パネルの未補強の部分に塑性域が拡がる。

また、図 -6(b) の解析モデル O では、ウェブパネルの中央部分から塑性化し、荷重載荷方向に沿って進行する。パネル上下辺部分については塑性化の進行は顕著でない。解析モデル MR1 では、開口部コーナから塑性化が始まる。開口部の上下部が塑性化した後、荷重載荷方向に塑性域が拡がる。解析モデル MRD1 では、ダブリングプレートとウェブパネルの境界部分から塑性化が進行する。

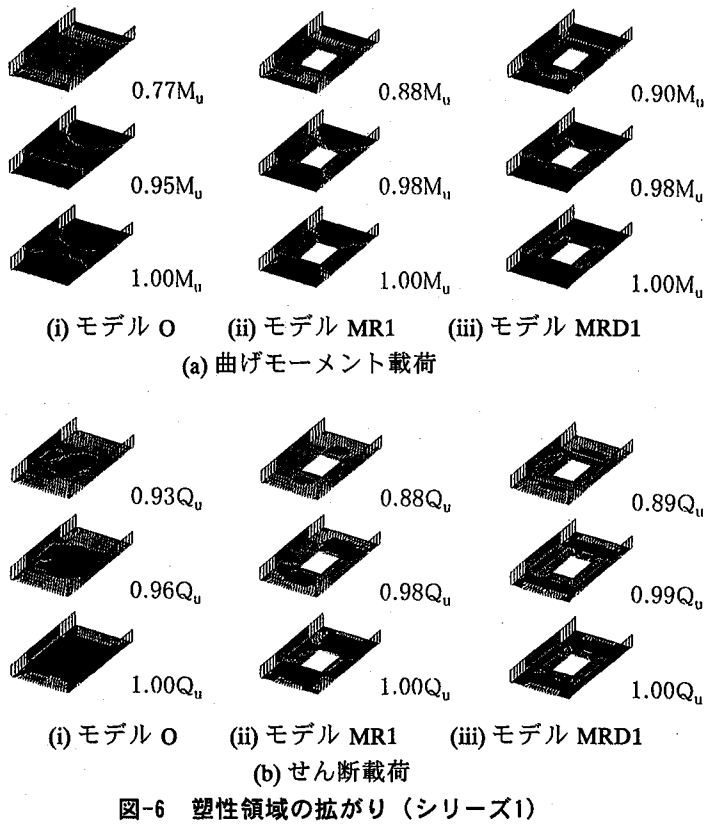


図-6 塑性領域の拡がり (シリーズ1)

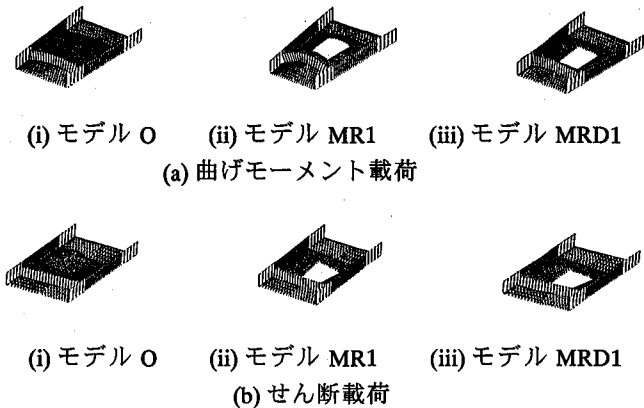


図-7 終局状態における変形 (シリーズ1)

4-3 終局状態における変形

シリーズ 1 について、終局状態における変形を図-7に示す。図 -7(a) に示す曲げモーメント載荷では、圧縮側で板の面外変形が増大し、引張側では、逆に、板の面外変形が減少していることがわかる。また、開口を設け、補強を行わない、解析モデル MR1 では、開口部の圧縮側の変形が大きくなっている。また、図 -7(b) に示すせん断載荷では、せん断変形を受けるウェブパネルの特徴が顕著に見られる。すなわちウェブは、斜め方向に引張力と圧縮力を受け、圧縮力を受ける方向に座屈波形が生じている。また、開口を設けた解析モデル MR1、および解析モデル MDR1 では、長方形の開口部が、斜め方向に交叉する引張力と圧縮力を受けることにより、ゆがみを生じていることがわかる。

5. 考察

5-1 開口部の形状および寸法の影響

開口部を有する補剛板が純圧縮を受けるときに、各種パラメータが耐荷力に及ぼす影響については、すでに、文献 13) により明らかにされている。ここでは、縦補剛材の切断、および開口率が耐荷力の低減に顕著な影響を及ぼすと述べられている。この成果に基づけば、本研究のように、開口部を有する補剛板に曲げモーメントとせん断力を作用する場合にも、圧縮応力の作用方向の開口部による断面欠損が、耐荷力の低減に大きな影響を及ぼすことが推定される。すなわち、この断面欠損を開口率により定義することにより、耐荷力を評価することができると考えられる。

なお、4 章での解析結果より、曲げモーメントが作用する場合と、せん断力が作用する場合の開口補剛板の強度特性は明らかに異なっているため、それぞれ別々に取り扱う。

(1) 曲げモーメントが作用する場合

図 -1(b) に示す記号を参考にして、曲げモーメントが作用する場合の圧縮応力の作用方向の開口部による断面欠損寸法を、まず b_H と仮定し、そして、 b_H をウェブの板幅 b で割った値を開口率 K_O ($K_O = b_H / b$) と定義する。

開口部を設け補強しない 5 つのモデルに関する開口率 K_O と初期剛性比および終局曲げモーメント比の関係を図-8に示す。ただし、初期剛性比および終局曲げモーメント比とは、表-5 に示す各モデルの初期剛性、および終局強度の値を、開口部のないモデル O の値で割ったものである。

図-8 より、モデル MR1 と MC2、およびモデル MR2 と ME1 は、開口率 K_O が同じであるにもかかわらず、初期剛性および終局曲げモーメントが異なっている。その原因は、断面欠損の評価に、最大欠損寸法のみを考慮し、形状の差異を考慮していないためである。例えば、モデル MR2 とモデル ME1 の開口部の形状の差異は、コーナ部の板の有無であり、コーナ部の板の剛性が、耐荷力に影響を及ぼしていると考えられる。

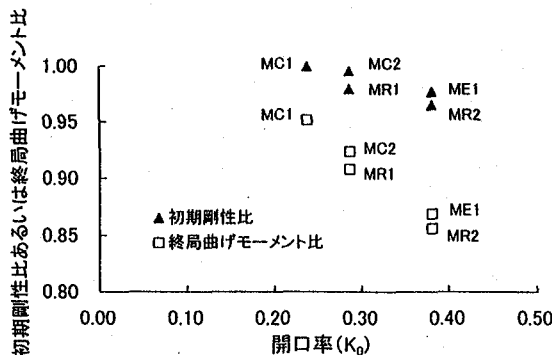


図-8 開口率 K_O と初期剛性比および終局曲げモーメント比の関係

そこで、コーナ部の板の剛性を評価するために、半径 r の円形断面の断面欠損寸法 b_{He} は、その円形断面と面積が等しく長辺が $2r$ である長方形の短辺と等しい、すなわち、 $b_{He} = \pi r / 2 = 1.57r$ と仮定する。長円形の場合も、コーナ部分を同様の考え方によって低減した断面欠損寸法 b_{He} を求める。このような形状の影響を考慮した開口部による断面欠損寸法 b_{He} と板幅 b との比を開口率 K_M ($K_M = b_{He} / b$) と定義する。開口率 K_M と初期剛性比および終局曲げモーメント比の関係を図-9に示す。

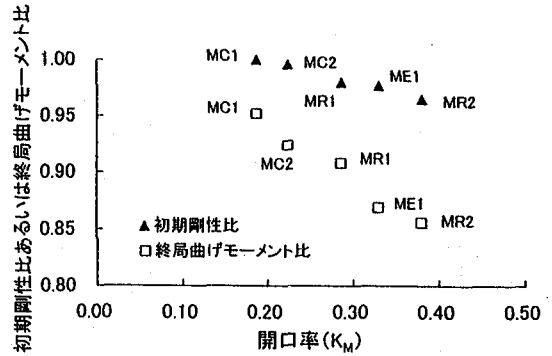


図-9 開口率 K_M と初期剛性比および終局曲げモーメント比の関係

図-9 によれば、開口率 K_M と初期剛性比および終局曲げモーメント比は、ほぼ反比例の関係で表せることがわかる。開口率 K_M を用いると、円形の開口部の断面欠損寸法は、その直径と等しい正方形の開口部の断面欠損寸法に比較して、約 20% だけ小さく評価することになる。

また、図-9 によれば、開口による終局曲げモーメントは 5% から 15% 低減しているのに対して、初期剛性の低減は 5% 以下である。開口部が、ウェブ高の 1/2 付近に設けられているため、弾性域では、曲げモーメントが開口部付近の板の変形に与える影響が小さいためと推測される。

(2) せん断が作用する場合

せん断が作用する場合について、開口部を設け補強しないモデル 5 つに関する開口率 K_O と初期剛性比および終局せん断力比の関係を、図-10に示す。曲げモーメントが作用する場合と同様に、例えば、モデル MR1 と MC2 は、開口率 K_O が同じであっても、初期剛性比、および終局せん断力比が異なる。

ところで、図-7(b) の変形より判断して、図-2 のように長方形のウェブの側辺にせん断力が作用する場合には、ウェブパネルにとっては、一方の対角方向の断面に垂直に圧縮応力が作用し、他方の対角方向の断面に垂直に引張応力が作用する場合とほぼ等価であると考えられる。そこで、各開口部のウェブパネルの対角線方向の純幅 L_H とウェブの板幅 b との比を開口率 K_O ($K_O = L_H / b$) と定義する。この開口率 K_O と初期剛性比および終局せん断力比との関係を図-11に示す。

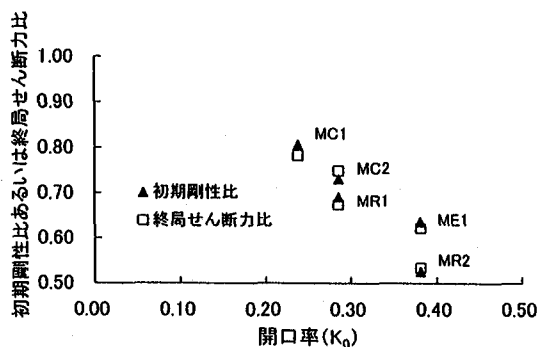


図-10 開口率 K_0 と初期剛性比および終局せん断力比の関係

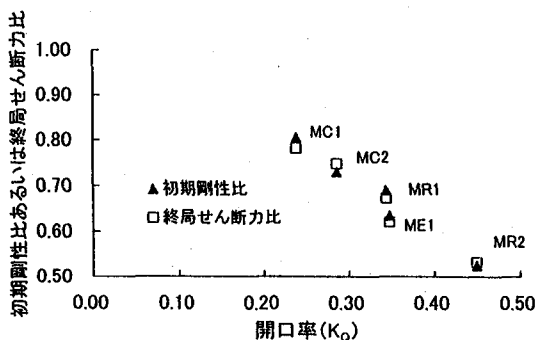


図-11 開口率 K_0 と初期剛性比および終局せん断力比の関係

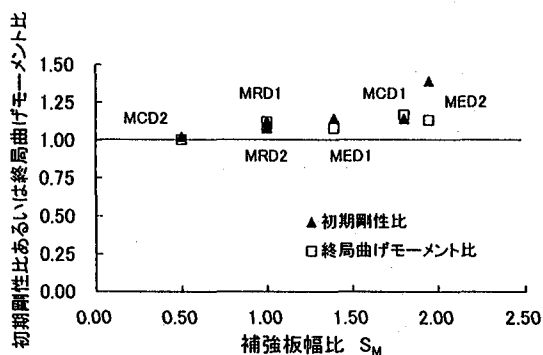


図-12 補強板幅比 S_M と、初期剛性比および終局曲げモーメント比との関係

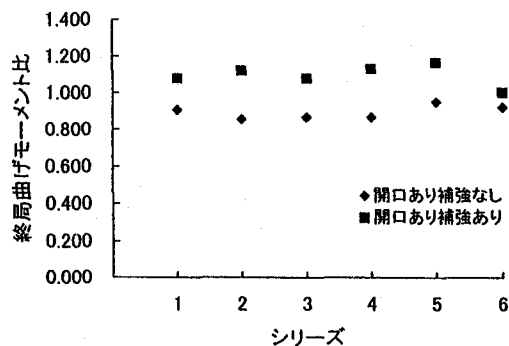


図-13 各シリーズの終局曲げモーメントに対するダブリング補強の効果

図-11によれば、開口率 K_0 と初期剛性比および終局曲げモーメント比は、ほぼ反比例の関係にある。また、開口により、初期剛性比および終局せん断力比とも20%から50%程度低減している。初期剛性の低減が、曲げモーメント載荷に比べて大きい理由はつぎのように考えられる。すなわち、図-6(b)の塑性域の拡がりによりわかるように、せん断載荷では、ウェブパネルの中央付近が、まず塑性化する。ところが、開口部は中央付近に設けられているため、せん断載荷の初期段階より開口部近傍に大きな変形が生じて初期剛性が低下する。

5-2 ダブリング補強の形状および寸法の影響

純圧縮を受ける開口補剛板にダブリング補強を施したときの影響をパラメトリック解析により調べた結果¹³⁾によれば、補強板の板厚が増すにしたがって終局強度は増加するものの、その増加率は漸減する。そして、板厚による終局強度の上昇の程度は、板幅が広いほど大きいことが明らかにされている。そこで、本研究では、表-2に示すダブリング補強の板厚が各モデルで等しいことより、補強板幅比に着目して、補強効果を調べる。

(1) 曲げモーメントが作用する場合

5-1(1)の結果より、開口部による断面欠損寸法として、 b_{He} を採用する。ダブリング板による補強板幅 b_{dM} は、

表-2に示す b_d より b_{He} を控除した幅とする。そして、曲げモーメントが作用する場合のダブリング板の開口部に対する補強板幅比を S_M ($S_M = b_{dM} / b_{He}$)と定義する。

開口部を設けダブリング補強を施した6つのモデルに対する補強板幅比 S_M と、初期剛性比および終局曲げモーメント比との関係を図-12に示す。同図によれば、初期剛性比、終局曲げモーメント比ともすべてのモデルで1.0を上回っている。また、補強板幅比と初期剛性比、および終局曲げモーメント比の相関係数を調べると、それぞれ0.816と0.879であり、正の相関が見られる。

つぎに、ダブリング補強の効果を示すために、図-4より、各シリーズの開口部を設け補強しないモデルと開口部を設け補強をするモデルの終局曲げモーメント比を、図-13に示す。同図によれば、シリーズ2が最も効果が大きく、シリーズ6が最も効果が小さい。すなわち、曲げモーメントを受ける開口補剛板では、圧縮応力を受ける側にダブリング板の板幅をできるだけ広くすると効果が大きいといえる。

(2) せん断が作用する場合

せん断が作用する場合は、開口部による断面欠損寸法は、5-1(2)の L_H を採用する。ダブリング板による補強

表-6 各モデルの安全率

解析 モデル名	終局曲げモーメント Mu (kN-m)	終局せん断力 Qu (kN)	安全率 γ
モデル O	7,985	7,308	1.25
モデル MR1	7,250	4,934	0.94
モデル MR2	6,877	3,944	0.77
モデル ME1	6,975	4,640	0.89
モデル MC1	7,622	5,808	1.08
モデル MC2	7,416	5,307	1.00
モデル MRD1	8,613	6,435	1.20
モデル MRD2	8,957	6,170	1.17
モデル MED1	8,623	6,730	1.24
モデル MED2	9,045	7,073	1.31
モデル MCD1	9,320	8,437	1.46
モデル MCD2	8,025	6,259	1.16

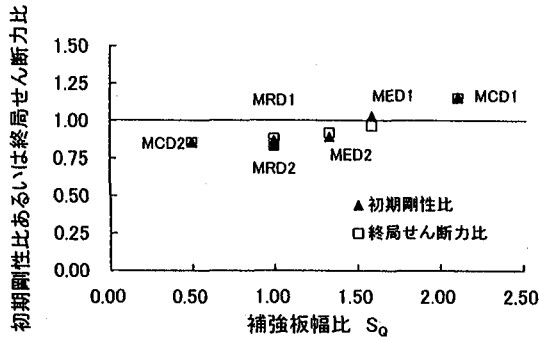
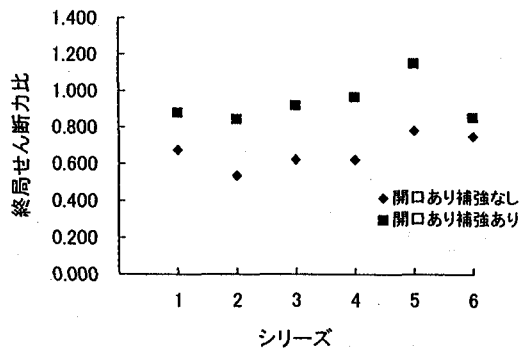
図-14 補強板幅比を S_q と、初期剛性比および終局せん断力比との関係

図-15 各シリーズの終局せん断力に対するダブリング補強の効果

板幅 L_{dq} は、ウェブパネルの対角線上のダブリング板の両外側距離より L_H を控除した幅とする。そして、せん断が作用する場合のダブリング板の開口部に対する補強板幅比を S_q ($S_q = L_{dq} / L_H$)と定義する。

開口部を設けダブリング補強を施した6つのモデルに対する補強板幅比 S_q と、初期剛性比および終局せん断力比との関係を図-14に示す。同図より終局せん断力比が1.0を上回るのは、モデルMCD1だけである。また、モデルMCD2を除いては、補強板幅を増加させると、初期剛性比、および終局せん断力比とも増加することがわかる。

つぎに、ダブリング補強の効果を示すために、図-5より、各シリーズの開口部を設け補強しないモデルと開口部を設け補強するモデルの終局せん断力比を図-15に示す。同図によれば、シリーズ5が最も効果が大きく、シリーズ6が最も効果が小さい。すなわち、せん断力を受ける開口補剛板では、ウェブパネルの対角方向のダブリング板の板幅を広くすると効果が大きい。

6. 曲げとせん断が同時に作用する場合の耐荷力照査

曲げとせん断が同時に作用する場合の耐荷力について、図-1(a)の実橋の数値を用いて検討する。ウェブパネル

に作用する断面力は、曲げモーメントは、 $M_w = 5,131$ kN-mであり、せん断力は、 $Q = 4,964$ kNである。

一方、曲げとせん断が同時に作用するときの相関曲線には、文献12)の式(9.76)より、次式を用いる。

$$\left(\frac{M_w}{M_u} \right)^4 + \left(\frac{Q}{Q_u} \right)^4 = 1 \quad \text{---(2)}$$

ここで、 M_u 、 Q_u は、4.2で述べたウェブの終局曲げモーメント、および終局せん断力である。すると、各解析モデルに対する安全率 γ は、次式により与えられる。

$$\gamma = 1 / \sqrt[4]{\left(\frac{M_w}{M_u} \right)^4 + \left(\frac{Q}{Q_u} \right)^4} \quad \text{---(3)}$$

耐荷力照査は、式(3)により求められる安全率 γ が、所要安全率 γ_{req} より大きいことを確認すればよい。式(3)により、各モデルの安全率を計算すると、表-6のとおりである。同表より、開口部を設けることにより、低下した安全率が1.0を上回るのは、円形の開口部を設けた場合である。また、ダブリング補強により、開口部のないモデル以上の安全率が確保できるのは、モデルMED2およびMCD1だけであることがわかる。

7. まとめ

本研究では、実橋の鋼桁ウェブに採用されているような形状と寸法の開口部およびダブリング補強を対象として、弾塑性有限変位解析プログラムを用いて、耐荷力の検討を行った。その結果、得られた主な成果は次のとおりである。

(1) 曲げモーメントを単独に載荷した場合、およびせん断力を単独に載荷した場合の①荷重-変位曲線、②塑性域の拡がり、および③終局状態における変形を図示し、それぞれの特徴と差異を明らかにした。

(2) 長方形、長円形、および円形の開口部を設けることによる初期剛性および終局強度の低下については、曲

げモーメント載荷,あるいはせん断載荷に対して,それぞれ形状を考慮した開口率 K_m , あるいは K_o を用いることにより, 統一的に評価できることを示した.

(3) ウェブに表-2に示す開口部を設ける場合, 最大寸法が同一であれば, 耐荷力の低下は, 円形, 長円形, 長方形の順番で小さい. すなわち, 円形の開口部は, 耐荷力の観点からは, 効率がよいといえる.

(4) ダブリング補強の効果は, 一般的な設計で採用されているようなダブリング板の板厚と材質を母材と同一とする場合は, 曲げモーメント載荷, あるいはせん断載荷に対して, 5-2で示した補強板幅比 S_m , あるいは S_o で評価できる. すなわち, 曲げモーメントを受けるときは, 圧縮応力を受ける側にダブリング板の板幅を広くとると効果が大きい. また, せん断力を受けるときは, ウェブパネルの対角方向にダブリング板の板幅を広くとると効果が大きい.

なお, 本研究で扱った開口部は, 形状および寸法が限定されている. 今後は, 開口部に関するより多くのパラメータを取り上げて, 検討をする必要がある.

謝辞

本研究で用いた USSP の使用にあたっては, プログラムの開発者である大阪市立大学の北田俊行教授, および日本構研情報(株)の狩野正人氏のご了承を頂いたことを記し, 感謝の意を表します.

参考文献

- 1) 上野谷 実: 有孔板の弾塑性せん断座屈強度に関する研究, 学位論文, 1988年12月.
- 2) American Society of Civil Engineers, the subcommittee on

Beams with Web Openings of the Task committee on Flexural Members of the Structural Division: Suggested Design Guides for Beams with Web Holes, Journal of the Structural Division, pp.2707-2728, November 1971.

- 3) 船体構造委員会関東地区部会開孔小委員会: 「ガーダウェブ等の開孔基準」に対する検討, 造船協会誌, No.444, 1966年7月.
- 4) 阪神高速道路公団: 開口部を持つ荷重分配横桁の検討, 1974年3月.
- 5) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 (I 共通編, およびII 鋼橋編), 丸善, 1996年12月.
- 6) 阪神高速道路公団: 鋼構造物標準図集, 1996年4月.
- 7) 福岡北九州高速道路公社: 鋼構造物標準図集, 1998年1月.
- 8) 首都高速道路公団: 鋼構造物標準図集, 1994年2月.
- 9) 名古屋高速道路公社: 鋼構造物標準図集, 1996年4月.
- 10) Kitada, T., Iwai, Y. and Kano, M.: Basic Theory and Numerical Example for Elasto-plastic and Finite Displacement Analysis of Stiffened Plates with Opening Subjected to Compression, Memoirs of the Faculty of Engineering, Osaka City University, Vol.38, pp. 131-146, December 1997.
- 11) USSP 研究会・日本構研情報(株): USSP Ver.3.0, ユーザーズマニュアル, 1996年10月.
- 12) 土木学会: 座屈設計ガイドライン, 鋼構造シリーズ2, 1987年10月.
- 13) 中井 博, 北田俊行, 祝 賢治: 開口部を有する補剛板の終局圧縮強度に関するパラメトリック解析, 鋼構造年次論文報告集, Vol.5, 日本鋼構造協会, pp.231-238, 1997年11月.

(2000年9月14日受付)