# 局所加熱を受けた波形鋼腹板桁のせん断耐荷力について

Experimental study on shearing load carrying capacity of corrugated steel web girders under local heating

## 渡辺 孝一\*, 久保 全弘\*\* Koichi Watanabe, Masahiro Kubo

\*工博,名城大学助教,理工学部建設システム工学科(〒468-8502名古屋市天白区塩釜口1-501) \*\*工博,名城大学教授,理工学部建設システム工学科(〒468-8502名古屋市天白区塩釜口1-501)

In Japan the use of corrugated steel webs is increasing in the construction of composite girder bridges. The corrugated plates have higher rigidity to shear forces but, lower rigidity to axial forces and bending. Recently, basic performances and collapse behavior of corrugated girder are clarified. However, there is no test result report concerning the corrugated web girder that receives heating. This paper presents the test results using trapezoidal corrugation configurations including a flat web that received local heating history. It is found that the local heating does not have influence on the shearing load carrying capacity because heated area is small, but affects the behavior of a corrugated web girder that received the local heating.

Key Words: locsl heating, shearing load carrying capacity, corrugated web キーワード:局所加熱, せん断耐荷力, 波形鋼板

## 1. はじめに

近年, PC 複合橋に採用されている多くの波形鋼腹板は プレートガーダーの腹板を波形に塑性加工した部材で ある.このような鋼フランジ付波形腹板(以下,「波形 桁」と呼ぶ)は、橋軸方向の軸力と曲げに対する剛性が 無視できるほど小さいため, PC 床版のプレストレス導入 効果率の向上が図られる.また,従来のコンクリート腹 板と比較して,工費の低減と,腹板に薄い鋼板を用いる ことにより自重を軽量化することが可能であり,同一諸 元の平板桁と比較して高いせん断耐荷力特性が得られ ることが既往の研究で報告されており<sup>1)~9</sup>,設計指針<sup>10</sup> も整備されつつある.

著者らの研究においても、上下フランジを有する波形 桁に対して、面内曲げ特性<sup>11)</sup>、横ねじれ挙動特性<sup>12)</sup>、お よびせん断耐荷力特性<sup>13)</sup>を模型実験と数値解析で明らか にしており、波形桁の基本的力学的特性や崩壊挙動を定 量的に評価できつつあるが、本研究は熱影響を受けた波 形桁の力学的特性を実験的に検討したものである.

鋼橋や合成桁の耐火性能に関する研究<sup>14~18</sup>は今川,柳 楽らの研究報告<sup>18</sup>などがあるが,波形桁に関するものは 事例がない.そこで,本研究では,局部せん断破壊が先



図-1 実験状況

行する諸元で設計した波形桁を用いて,死荷重載荷状態 で桁の下縁をガスバーナーで約1時間加熱した.その後, 水で急冷した後に,再びせん断載荷実験を行い破壊性状 を確認した.同様の載荷実験を加熱を与えない波形桁に 対して行い終局強度を比較した.さらに,同一諸元の平 板桁に対しても同様の実験を行い,これら計4体の供試 体によって熱影響を受けた波形桁のせん断耐荷力につ いて実験的に検討した.

表-1 実験の流れ

Test girder	Loading and heating histories		
CG-160-0-H	Loading dead load $\rightarrow$ Local heating $\rightarrow$ Quick cooling		
CG-160-4-H	$\rightarrow$ Unloading $\rightarrow$ Pushover loading		
CG-160-0	Pushovar loading		
CG-160-4	r ushover loading		



図-2 実験装置

#### 2. 実験内容

#### 2.1 実験方法

実験状況を図-1 に示し,図-2 に実験装置の概要を 示す.実験供試体をローラー支承によって単純支持した 状態で,上フランジ支間中央部に鉛直荷重を油圧ジャッ キ(最大能力1000kN)によって載荷した.荷重集中点の 局所崩壊を防止するために,載荷点と両端支点部は垂直 補剛材(板厚8mm)で補強している.

供試体の加熱は、高温によるジャッキやセンサー類の 誤作動防止等に配慮し、供試体ウェブ片側パネル(Panel 1)に対して、支点から支間長の 1/5 位置に設置したガス バーナー(火力 4200 kcal/h)によって下フランジ直下を 局所的に加熱した.

実験供試体の名称は、CG-"支間長(cm)"-"波高(cm)"と 表記しており、"-H"が付記されているものは、ガスバー ナーによって局所加熱を与えた供試体である.

表-1に実験全体の流れを示す.4体の供試体のうち, 波形桁と平板桁を各1体,死荷重相当の荷重を載荷した 状態で一定保持し,ガスバーナーで局所加熱を与えた. 死荷重は,SM400材で製作された桁の許容せん断応力  $\tau_a$ =80MPaの50%を仮定し154kNを載荷した.加熱状 態下でのウェブのひずみ変化と,桁の変形を各種セン サーで記録した.ウェブの熱分布状況は,サーモグラフ ィー(NEC 三栄製 TH5104,最小検知温度差0.1°C)によっ て可視化して,それを画像データとして記録した.局所 加熱を与えた供試体の熱量は、加熱と同時に放熱される 状況とした.そのため、約1時間の加熱を経た後、供試 体の温度変化は一定状態となったことから、水によって 加熱部を急冷し、その後荷重を徐荷した.続いて加熱し ない状態で、せん断破壊するまで載荷実験を行い、桁の 応力分布や変形性状を確認した.加熱を与えない残りの 2つの供試体については、単調なせん断載荷実験を行い、 加熱履歴を与えた供試体との比較を行った.

#### 2.2 実験供試体

実験供試体諸元は図-3 に示すような溶接 I 形断面桁 である. 各供試体ともウェブ高さを $d_w = 600$  mm, フラ ンジ幅 $b_f = 120$  mm, フランジ厚 $t_f = 12$  mm, ウェブ厚を  $t_w = 3.2$ mm とした. 部材寸法の測定値と幅厚比を表-2 に示す. 支間中央と支点部に設置された補剛材間隔から ウェブパネルのアスペクト比 $\alpha = 1.25$  となる.なお,表-2 のフランジ幅,板厚は、上下フランジの平均値で表記 している.

表-3 に波形桁の波形パラメータを示す. 波形 1 波長 q=320 mm 一定として,軸方向パネル幅 a と斜方向パネ ル幅 c を同一寸法とし,波高は $h_r=40 \text{ mm}$  とした. 波長 qと辺長 s=2(a+c)を用いた幾何学的な形状係数y (=q/s)は, 波形桁で y=0.941,平板は y=1.000 となる. ウェブの 初期変形は,図-1 に見られるように,供試体ウェブパ ネルに引いたグリッド線上の交点を移動式変位計(最小 読み 1/100 mm)を用いて測定した.測定方法を図-4 に示

Testsinder	Web plate			Flange plate		
Test girder	$d_w$ (mm)	$t_w$ (mm)	$d_w / t_w$	$b_f$ (mm)	$t_f$ (mm)	$b_f/t_f$
CG-160-0	596.4	3.27	182.4	119.8	11.68	10.3
CG-160-0-H	597.3	3.23	184.9	120.2	11.74	10.2
CG-160-4	597.4	3.20	186.7	120.2	11.78	10.2
CG-160-4-H	597.3	3.20	186.7	120.1	11.73	10.2

表-2 供試体実測寸法

表-3	波形腹板のパラメータ

Test girder	<i>h</i> <sub><i>r</i></sub> (mm)	a (mm)	b (mm)	с (mm)	$\gamma = q / s$
CG-160-0	0				1.00
CG-160-4	40	85	75	85	0.941

Note : q = 2(a + b) = 320 mm, s = 2(a + c).

ے а q=2 (a+b) =320 b<sub>f</sub>= 120 Section B-B bc C ار ب 600 П B, ⊸ B **→**X t<sub>w</sub>= 3.2 12 <u>با</u> ‡ تير С Section C-C

表-4 供試体腹板の平面度

Web plate flatness $d_w / w_0$		
Panel 1	Panel 2	
98	116	
99	126	
231	299	
252	445	
	Web plat <i>d</i> <sub>w</sub> , Panel 1 98 99 231 252	



図-3 供試体断面諸元

し、表-4にウェブの平面度(最大値)をまとめた. 今回製作した供試体は、局所加熱を与えることに配慮して製作時の加熱矯正を最小限に抑えている. そのため、平板桁と波形桁の一部のパネルで道路橋示方書に規定されている部材精度<sup>19)</sup> ( $w_0 < d_u/250$ )を満たしていない.ただし、波形桁では製作時にウェブを折り曲げ加工して成形され、小さな帯状の平面パネルが連続した状態となるため、比較的平坦度が確保されていることが認められる.

供試体は、全て SM400 材によって製作した.使用した 鋼材の引張試験結果を表-5 に示す.これらは、JIS1号 試験片による引張試験を使用板厚に対しそれぞれ3体ず つ行った結果の平均値である.なお、表中に\*で示した

図-4 ウェブの平面度測定方法

ものは、加熱実験で与えられた実測温度によって、加熱 処理を施した試験片による結果である.詳細は、4.にて 後述する.

## 2.3 センサー設置状況

局所加熱による温度変化とひずみを測定するため、上下フランジに熱電対(耐熱温度 350℃)を取り付け、ウェブには、測温機能付高温用ひずみゲージ(使用温度範囲-20~+300℃)を貼付した.加熱の影響を受けない部位には常温用ひずみゲージを使用した.図-5に貼付位置を示す.ゲージは部材の表裏に貼付した.ガスバーナーによる加熱温度は 1000℃を超えることから温度上昇が測

Plate nominal	Yield	Ultimate	Young's	Poisson's	Elongation
I fate noniniai	stress, $F_y$	stress, $F_u$	modulus, E	ratio, v	Δl
thickness, t (mm)	(MPa)	(MPa)	(GPa)		(%)
3.2 for web	276	418	204	0.280	26.0
3.2 for web*	280	419	195	0.290	30.0
12 for flange	264	428	200	0.290	30.4
12 for flange*	261	417	199	0.280	30.1

表-5 材料試験結果







定範囲に収まる位置を想定して添付位置を決定した. また、ゲージ、ケーブル類はシリコンによって被覆し、 センサーの加熱損傷防止に配慮した.供試体の鉛直変 位については、前掲した図-2 に示すように下フラン ジ支間中央部に設置した変位計(分解能 0.01mm)に よって測定した.

## 3. 実験結果

## 3.1 局所加熱による供試体の温度変化

図-6に局所加熱を与えた供試体 Panel 1 のウェブお よび下フランジの温度上昇と経過時間を示す.縦軸は 常温からの相対温度,横軸は経過時間である.温度測 定は下フランジに貼付した熱電対とウェブの測温ゲー ジ1から得られた実測値である.加熱時間は平板桁で 約59分,波形桁では約62分となった.









(d) CG-160-4-H



200°C Range

(b) CG-160-0-H

図-7 温度コンター (最高温度上昇時)

(200.0)

178.7

30.0

(-10.0)





加熱中のガスバーナー火力のバラツキで供試体に与 えた熱量は同じでないため、温度上昇の変化と経過時間 の関係は、平板桁と波形桁で若干異なる傾向となったが、 どちらの桁も下フランジとウェブに温度上昇との相関 がみられる.また、下フランジでは、平板桁、波形桁と もに最高 210℃の温度上昇が得られている.しかし、ウェ ブ下部では平板桁で110℃,波形桁では140℃の温度上昇 が確認できることから、この局所的な加熱条件では波形 桁が加熱の影響を受けやすいことが推察される.

図-7 は、波形桁と平板桁についてサーモグラフィー で撮影した最高温度時のウェブ温度コンターである.装 置の設定により、測定温度幅を最高 200℃ と 800℃の



図-11 加熱時の鉛直ひずみ

2 種類で表示している.図は判読のため,桁のグリッド 線の画像と合成して表示している.温度分布コンターは, 図−6 で示したウェブおよび下フランジの測定最高温度 とほぼ一致している.また,加熱位置の下フランジは, 約 400℃に達していることがわかる.

この図より,波形桁のほうが高温になっている範囲が ウェブ高さ方向にやや広く分布していることがわかる. しかし,サーモグラフィーではウェブの形状に関して, 波形と平板を区別するような違いが判断できないこと がわかった.

#### 3.2 局所加熱と鉛直たわみの変化

図-8 に平板桁 CG-160-0-H と波形桁 CG-160-4-H について,局所加熱時の荷重 P と支間中央の鉛直たわみの変化を示す.縦軸と横軸は降伏荷重  $P_y$ (=2  $\tau_y A_w$ )と,降伏荷重に対応する鉛直たわみ $v_y$ でそれぞれ無次元化して

いる.また、図中には、弾性理論計算結果をあわせて示している.

前掲の表-1 で示したように,死荷重(P/P<sub>y</sub>=0.25)を載荷した後,荷重保持状態でガスバーナーを点火して,下フランジ直下を約1時間加熱した.その後,加熱による温度上昇が緩やかとなり,一定に落ちついたため,加熱を中止し急冷した.その一連の過程における鉛直たわみの変化を測定した.

死荷重を保持した状態で波形桁,平板桁はおよそ $v_c/v_y=0.2$ の鉛直たわみが生じており,加熱開始から鉛直たわみが増加していることがわかる.加熱によって波形桁は最大 $v_c/v_y=0.43$ ,平板桁は $v_c/v_y=0.41$ のたわみが生じた.その後,急冷し荷重を徐荷した結果,どちらも鉛直たわみはほぼ0となり,残留変位は生じなかった.

図-9 は、死荷重保持状態の加熱断面の上下フランジ 温度差と支間中央の鉛直たわみの相対変化を示した結 果である.



温度差の最大値は平板桁と波形桁で大差ないが、温度 上昇に伴う鉛直たわみの増加量は、やや波形桁が大きい.

## 3.3 加熱によるウェブのひずみ変化

図-10,図-11には、平板桁、波形桁のPanel 1 ウェ ブについて、桁の軸方向垂直ひずみ ε<sub>sm</sub>と鉛直ひずみ ε<sub>sm</sub> を局所加熱時の主な温度上昇段階ごとに示した結果で あり、前掲の図-5 で示した 1,2,3番のゲージで得ら れた実測値である.これらはウェブの表裏に貼付した ゲージの平均値である.縦軸にはウェブ高さ d<sub>w</sub>,横軸に ひずみをとっている.0℃時点で生じているひずみは、 死荷重載荷によるものである.

図-10(a)では、平板桁の温度上昇にともなう軸ひずみ の増加が確認できる.加熱位置に近い位置において最大 で 560µ の引張ひずみが生じているが、急冷後には、加 熱により生じたひずみは0となり、残留ひずみがないこ とがわかる.図-10(b)では、波形桁のひずみ変化を示し ているが、ウェブ高さ方向に温度上昇によらず、ひずみ はほとんど発生していないことがわかる.

次に、図-11に示す桁の鉛直ひずみ変化について確認 すると、図-11(a)の平板桁で、加熱位置に近い位置で約 200µの圧縮ひずみが生じているが、冷却後には、初期ひ ずみに復帰している.図-11(b)の波形桁では、ウェブの 高さ中央位置で最大100µの圧縮ひずみが生じているが、 冷却によりほぼ0となった.これらの結果より、今回の 実験で与えた温度上昇の範囲では、波形桁のウェブが軸 方向には、温度上昇に伴うひずみを生じないことが確認 できた.これは、波形桁の軸方向剛性が極めて小さい特 性によるものと考えられる<sup>11</sup>.一方、平板桁については、 加熱温度に比例して軸方向、鉛直方向にひずみが生じる ため、加熱量が大きい場合には、部材が降伏ひずみに達 する可能性が推察される.

表-6 せん断耐荷力の比較

Test girder	P <sub>u</sub> (kN)	V <sub>u</sub> (kN)	V <sub>p</sub> (kN)	$V_u/V_p$ (kN)	$\delta P_u$
CG-160-0	375.34	187.67	313.98	0.598	1.000
CG-160-0-H	382.20	191.10	310.60	0.615	1.018
CG-160-4	620.59	310.30	307.80	1.008	1.653
CG-160-4-H	617.50	308.75	307.72	1.003	1.645

#### 3.4 せん断載荷実験

図-12 に局所加熱を与えた供試体と与えない供試体 についてせん断載荷実験による荷重-鉛直変位関係を 示す.加熱を与えた供試体 (CG-160-0-H, CG-160-4-H) については、急冷後、死荷重を徐荷し、センサー類の動 作を確認した後に、再び無負荷状態から供試体が崩壊す るまで載荷した結果であり、載荷開始時にセンサー類は、 イニシャル測定を行っている.図の縦軸は、降伏荷重  $P_y$ (=2  $\tau_y A_w$ )、横軸は降伏荷重に対応する鉛直たわみ $v_y$ でそ れぞれ無次元化している.

加熱を与えた桁とそうでない桁について、平板と波形 桁のいずれも荷重-鉛直変位関係に違いはみられず、加 熱による耐荷力の増減を確認することはできなかった.

平板桁は加熱の有無によらず  $v_c/v_y=1.1$  付近で最大荷 重  $P/P_y=0.6$  に到達した後,緩やかに耐荷力が低下して おり変形性能が大きい.一方,波形桁では加熱した桁で  $v_c/v_y=2.5$ ,加熱しない桁では  $v_c/v_y=2.8$  付近でいずれも 最大荷重  $P/P_y=1.0$  に達しているが,その直後に急激な 耐荷力低下が発生していることから,変形性能が小さい ことがわかる.

せん断載荷実験から得られた最大荷重を終局荷重  $P_u$ として、表-6にまとめた.表中には、終局せん断力  $V_u$ 、 降伏せん断力  $V_p$ 、および無次元化耐荷力  $V_u/V_p$ と加熱を 与えない平板桁を基準とした耐荷力比  $\delta P_u$ を示す. 波形 桁は平板桁の 1.65 倍の最大荷重が得られ、平板にわずか な波形加工を施すことで大きなせん断耐荷力が得られ ることが確認された.しかし、加熱の有無による終局荷 重の違いはほとんどみられなかった.

#### 3.5 崩壊状況

図-13(a)~(d)にすべての供試体について最大耐荷力直 後の崩壊状況を示す.また、ウェブの面外変形を初期た わみとして測定した結果をコンターで示したものをあ わせて示す.





(c) CG-160-4

(d) CG-160-4-H

図-13 初期たわみと崩壊状況の比較

図-13(a), (b)の平板桁では、ウェブパネルの両側に斜 張力場が形成され、ジャッキで強制的にせん断変形を進 行させると、それに伴ってウェブの面外変形が大きくな る崩壊性状となった.面外変形は初期たわみと相関があ るが、加熱による変形の違いは確認できなかった.

図-13(c), (d)の波形桁では、最大耐荷力到達付近まで、

ウェブに変状はみられなかったが、最大荷重直後に片側 ウェブパネルの中央部付近に局部座屈が生じ、急激に耐 荷力が低下した.局部座屈が発生した部位は、初期たわ みの面外変形が大きい部位とほぼ一致している.加熱を 与えた波形桁では、加熱を与えた側のウェブに局部座屈 が発生したが、加熱の影響であるかは明確でない.

Test girder	Room temperature (°C)	High temperature (°C)	Temperature changes (°C)
CG-160-0-F	21.7	131.6	109.9
CG-160-4-F	22.4	162.4	140.0
Average	22.1	147.0	125.0

表-7 加熱によるウェブの最高温度

また、下フランジの加熱を与えた部位と、その接合 部近傍のウェブについて、加熱の有無による変状の違 いを目視では確認できなかった.

## 4. 加熱による鋼材の材料性質の変化

今回の実験結果を受けて、実験供試体に与えた局所 加熱による鋼材の材料性質に関して考察を加える. 表-7 には、加熱で得られたウェブでの測定最高温度 を示す.測温ゲージから得られた値であるため、実際 には加熱位置に近い部位でさらに高温になった可能性 がある.

表-7 より,鋼材が受けた最高温度について,ウェ ブは 130℃,フランジは,サーモグラフィーの結果か ら 400℃とした.そして,材料試験片それぞれ 3 本準 備し,桁の実験と同様に1時間程度加熱してその後, 急冷した.その加熱履歴を与えた材料引張試験結果を 前掲の表-5 に示す.加熱履歴を与えても,降伏強度や ヤング係数などの材料性質に大きな変化は見られな かった.

参考として図-14に、高温下における鋼材の降伏強度 低下率<sup>18)</sup>を示す.縦軸に降伏強度の低下率、横軸は加熱 温度を示している.熱量が降伏点に与える影響は、500℃ 以上の高温になるにしたがって顕著となり、600℃では 50%以下に低下する.800℃の加熱を受けた場合には、降 伏点は87%に低下するとの報告がある.今回の加熱では 下フランジで約400℃の最高温度が確認されているが、 それ以外の部位では、400℃以上には達していないと予 想される.この図から読みとられる鋼材の降伏強度低下 率を考慮すると、加熱履歴を与えた材料引張試験結果は 妥当であり、せん断破壊実験結果でも示したように、今 回の局所加熱、急冷では、材料性質的にも供試体の耐荷 力を低下させる影響は小さかったことが推察される.

### 5. 結論

本研究は、熱影響を受けた波形桁の力学的特性を実験 的に検討したものである。局部せん断破壊が先行する諸 元で設計した波形桁に対して、死荷重載荷状態で桁の下 縁をガスバーナーによって約1時間加熱し、波形腹板の



熱応力特性を確認した.実験供試体は、平板桁を比較対象として、加熱履歴の有無により、合計4体で実施し、 せん断耐荷力の違いと、その崩壊性状を調べた.以下に、 実験で得られた結論を述べる.

- (1)一定荷重載荷の状態で、波形桁に局所加熱による温度変化を与え、温度上昇と桁の鉛直たわみの関係を確認した.波形桁は、平板桁と比較して加熱による鉛直たわみがわずかに大きくなることを確認した.また、今回の局所的な加熱条件では、波形ウェブが加熱の影響を受けやすいことを確認した.
- (2) サーモグラフィーによって、加熱された桁の温度分 布を撮影し、熱電対による測定値とおおむね一致す ることを確認した.波形桁と平板桁の比較で、明瞭 な温度分布の違いは確認できなかった.また、ウェ ブ形状の違いをサーモグラフィーの画像から判断で きないことがわかった.
- (3)局所加熱による波形ウェブのひずみ変化を測定した. 加熱温度が140℃程度では、桁の軸方向と、鉛直方向 垂直ひずみを生じないことを示し、波形桁の軸方向 剛性が小さいことを熱応力の視点から確認した.し かし、平板桁では桁の軸方向ひずみが温度上昇に 伴って大きくなるため、加熱の影響を無視できない

こともわかった.

- (4) 加熱実験で得られた温度変化を材料試験片(SM400) に与え、引張試験で材料性質を確認した.400℃で1 時間の加熱と、急冷による加熱履歴では、材料定数 が変化しないことを確認した.
- (5)局所加熱を与えた波形桁と平板桁のせん断破壊実験によって、波形桁の終局強度は平板と比較して 1.65倍の高いせん断耐荷力が確認され、加熱を与えない供試体とほぼ同様の荷重-変形性能が得られた.しかし、波形桁は最大荷重後の耐力低下が急激であることを実験で明らかにした.
- (6) せん断載荷実験での波形桁,平板桁の破壊性状は ウェブパネルの初期変形と相関があることを示した. しかし,局所加熱と崩壊性状の相関は明確とならな かった.
- (7) 今回の局所加熱ので与えた温度変化では波形桁,平板桁ともに終局耐荷力や変形性状に大きな違い発生せず、それを確認するには至らなかったが、下フランジが400℃で1時間程度加熱される状況では耐荷力の低下に影響がないことを示した.
- (8)近年、大規模な火災によって鋼桁が損傷を受ける事 故が発生している、今後はさらに高温下で波形桁の 耐荷力に関する実験的な検討が必要である。

#### 参考文献

- 依田照彦,多田雅弘,中島 陽,大内一男:波形鋼板 ウェブを持つ合成桁の力学的挙動に関する実験的研 究,鋼構造論文集,Vol.1, No.2, pp.57-66, 1994.
- Luo, R. and Edlund, B. : Shear capacity of plate girders with trapezoidally corrugated webs, Thin-Walled Structures, Vol. 26, pp.19-44, 1996.
- 3) 山崎正直: 波形鋼板ウェブの座屈耐荷力, 構造工学 論文集, 土木学会, Vol.47A, pp.19-26, 2001.
- 4) 角谷 勉, 青木圭一, 富本 信, 狩野正人: 波形鋼板 ウェブのせん断耐荷力評価, プレストレストコンク リート, Vol.43, No.1, pp.96-101, 2001.
- 5) 織田博孝: 波形鋼板ウェブのせん断座屈挙動, 技報 たきがみ, Vol.19, pp34-43, 2001.

- 6) 谷中聡久,小山明久,岩崎雅紀:重ね継手を有する 波形鋼板ウェブのせん断強度に関する検討,横河ブ リッジグループ技報, No.31, pp.26-35, 2002.
- Machimdamrong, C., Watanabe, E. and Utsunomiya, T. : Global elastic shear buckling analysis of corrugated plates with edges elastically restrained against rotation, Journal of Structural Engineering, JSCE, Vol.48A, pp.51-58, 2002.
- 廣瀬恵子,明田啓史,堂垣正博:合成箱桁における 波形腹板のせん断特性,構造工学論文集,土木学会, Vol.51A, pp.193-202, 2005.
- 9) 狩野正人,渡邊英一:波形鋼板ウェブのせん断力分 担に関する基礎的研究,鋼構造論文集,第12巻,第 14号, pp.1-9,2005年12月.
- 10)プレストレストコンクリート技術協会編: 複合橋設 計施工規準, 技報堂出版, 2005 年 11 月.
- 11)渡辺孝一, 久保全弘, 波形鋼板ウェブ桁の面内曲げ
  性能:土木学会論文集, Vol.62, No.2, pp.323-336, 2006.
- 12)久保全弘,渡辺孝一,:波形鋼板ウェブ桁の横ねじれ 座屈性能,土木学会論文集 A, Vol.63,No.1, pp.179-193, 2007.
- 13)渡辺孝一, 久保全弘: 波形鋼板ウェブ桁のせん断座 屈性能, 構造工学論文集, Vol.53A, pp.13-24, 2007.
- 14)高樋由美子・羽田野英明・石原靖弘・大山理・長坂
  悟:火災を受けた橋梁の安全評価,土木学会第59回
  年 次学術講演会,2004年9月
- 15)日本鋼構造協会:構造用鋼材の高温時ならびに加熱 被災による影響, JSSC vol.4 No.33: 1986 年
- 16)酒井・三輪・本間・原田・高:火災を受けた橋梁の 健全度評価と補修,建設図書,橋梁と基礎, Vol.37, No.4, pp.41~48, 2003 年 4 月.
- 17)鉄道総合技術研究所:火災による被災,鋼構造物補
  修・補強・改造の手引き,pp.229~297,研友社,1992
  年7月.
- 18)今川,柳楽,大山,栗田:単純合成桁橋の耐火性能 に関する基礎的研究:大阪工業大学,2005.9
- 19)日本道路協会:道路橋示報書(I共通編・II鋼橋編)・ 同解説,2002.

(2008年9月18日受付)