

埋込み接合方式波形鋼板橋のハダ隙現象に関する解析的検討

九州工業大学大学院	学生会員	○内野 裕士
九州工業大学工学部	正会員 Ph.D.	幸左 賢二
新構造技術(株)	正会員	工修 粟根 聡
日本鉄塔工業(株)		稲森誠一郎

1. はじめに

波形鋼板ウェブ PC 橋は、ウェブに波形鋼板を用いることで主桁の軽量化が図れ、上・下部工トータルの建設コスト縮減が期待できることから、近年積極的に採用される機運が高まっている。波形鋼板ウェブ PC 橋においては、波形ウェブとコンクリート床版との接合方式が極めて重要な課題であり、常に議論となるところである。これまでに我が国で採用された接合方式は数種類あるが、これらは大きく分けてフランジ方式と、埋込み方式とに大別できる。埋込み接合方式は、経済性に優れている反面、波形鋼板を直接コンクリートに埋め込んでいるため、主桁の曲げ変形に伴って接合部のウェブ床版との間に隙間（以下、ハダ隙）が生じり、耐久性上の弱点となることが懸念されている。このハダ隙の拡大に伴い、雨水などがコンクリートフランジ内に浸入して鋼板や鉄筋の腐食が進行し、長期の耐久性に悪影響を及ぼすため、ハダ隙現象の解明ならびにその抑制は埋込み接合方式の重要な課題である。

そこで本研究では、埋込み接合方式についての載荷実験を行い、接合部の損傷状況について確認を行った。さらに、下フランジを2次元のフレーム解析で再現し、接合部に生じるハダ隙の発生メカニズムおよび損傷状況を確認した。また、実構造物レベルでのハダ隙現象について検討を行なった。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

実験供試体は阪神高速道路北神戸線の中野高架橋をモデル橋梁とし、PC 箱桁の片ウェブを1/3縮尺でモデル化した。供試体の緊張量は、実橋と供試体断面において、PC 鋼材ひずみを合わせるように決定した。また、供試体端部には荷重の偏心に対する供試体の安定性を考慮して横桁を設けた。波形鋼板の板厚については鋼板の先行座屈を避けるため、せん断座屈強度を考慮し6mmとした。表-1に接合部諸元を、図-2に供試体形状を示す。なお、波形鋼板とコンクリート床版との接合方式には、異形鉄筋を波形鋼板にフレア溶接し、コンクリートフランジ中に波形鋼板を直接埋め込む、埋込み接合方式を用いた（図-1参照）。

2.2 実験手法

載荷は図-2に示すように、供試体を単純支持として、スパン中央部における静的2点載荷（せん断スパン比=2.5）とした。加力の制御は荷重制御で行い、支間中央近傍の下側接合部にはデジタルビデオカメラを常設し、ひび割れ発生荷重および載荷に伴うひび割れの進展傾向を観察した。さらに、接合部に生じたハダ隙を同画面上に映したひび割れスケールとの比較からハダ隙量を推定した。

2.3 実験結果

図-2に示す供試体を用いて静的載荷実験を行なった結果を以下に示す。実験供試体の等曲げ区間下床版に着目すると、図-3

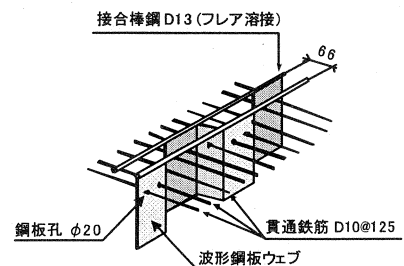


図-1 埋込み接合部の形状

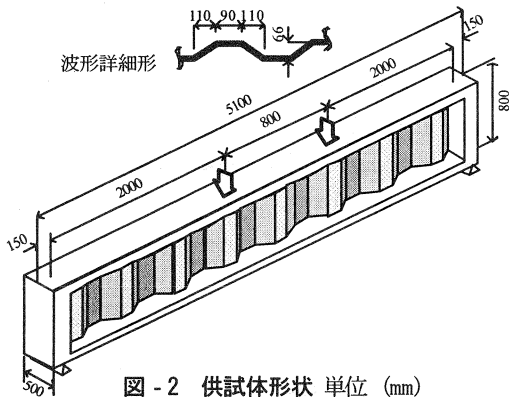


図 - 2 供試体形状 単位 (mm)

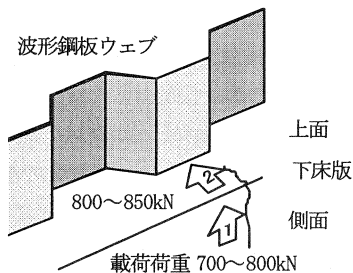
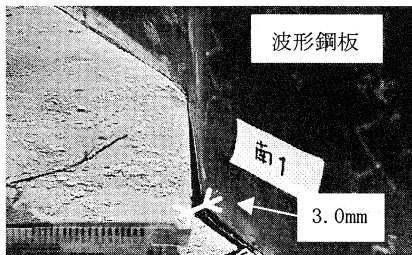


図 - 3 ひび割れの進展状況

表 - 1 接合部諸元

供試体名称		実験供試体	実構造物
接合部	形式	埋込み方式	
	埋込み長	65mm	200mm
	孔径	φ 20mm	φ 50mm
	貫通鉄筋	D10	D25
接合部材	貫通鉄筋	異形鉄筋 SD345	異形鉄筋 SD345
		D13	D19
フレア溶接			
鉄筋	材質	SD345	
ウェブ	材質/板厚	SS400/6mm	SMA490W/12mm



1000kN 載荷時

写真 - 1 接合部における損傷状況

に示すように、供試体下側に発生した曲げひび割れは荷重 700kN~800kN にかけて下床版側面を上向きに進展し、その後ひび割れは波形鋼板の埋込み位置に向けて進展した。載荷荷重が 850kN を超えると主要なひび割れは接合部に達し、写真 - 1 に示すように波形鋼板と下コンクリート床版との間のスパン中央から左右に 600mm(支点間の 1/4)の区間にハダ隙が生じた。その後、載荷荷重が増加するに従い、曲げ変形が大きくなりハダ隙量が拡大した。

3. 解析的検討

3.1 解析概要

実験結果から、曲げの影響が大きな等曲げ区間下床版の接合部に埋込み接合方式特有のハダ隙現象が生じた。この損傷は接合部の耐久性上好ましくない問題となることが考えられることから、この損傷原因について解析的に検討することとした。

3.2 解析モデル

曲げモーメントの増加に伴うハダ隙現象を解明するために、図 - 4 に示す下床版の部分モデルを取り出したフレーム解析を実施した。実験において、載荷荷重の増加とともに主要なひび割れが床版に約 300mm 間隔で、また、ハダ隙現象はひび割れ近傍の波形鋼板のコーナー部に発生した。従って、図 - 4 に示すように、波形鋼板 1 周期分に相当する主要なひび割れ区間毎にハダ隙現象が発生していることから、この 1 区間に着目して解析を行った。解析モデルは図 - 5 に示すように下床版を中央高さに集約して、梁要素とバネ要素からなる 2次元のモデルを組み、曲げ引張力に相当する力を外力として与え、下床版の挙動を再現した。

(1) 各部材のモデル化

波形鋼板は梁要素でモデル化を行い、主鉄筋、接合棒鋼および貫通鉄筋などの抵抗部材は、バネ要素を用いてモデル化を行っている。ここで、バネ要素の抵抗モデルは各材料の応力度-ひずみ関係から弾性係数 E 、断面積 A 、および部材長 l を考慮して決定した。具体的に、各部材の初期剛性 $K1$ 、耐力 P を次に示す式(1)

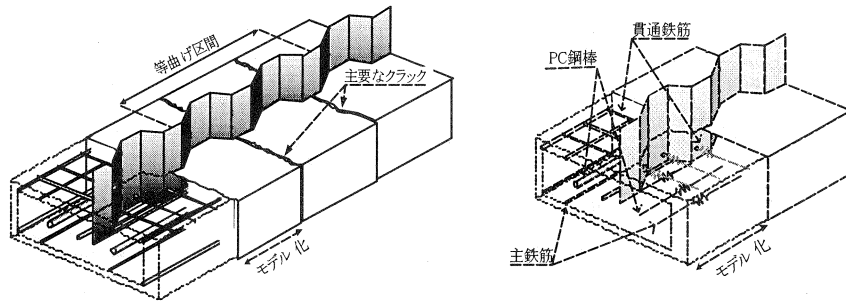


図-4 下床版のイメージ図

を用いて算出し、各バネ要素の荷重-変位関係とした。なお、各バネ要素の抵抗値は実験で用いた材料の物性値を用いて算出した。

$$K1 = E \cdot A / l$$

$$P = \sigma \cdot A \quad (1)$$

ここに、K1: 各抵抗部材の初期剛性

E: ヤング係数 (N/mm²)

A: 各抵抗部材の断面積 (mm²)

l: 各抵抗部材の長さ (mm)

P: 各部材の耐力 (N)

σ: 鋼材の降伏応力および、コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

先にも述べたが、各抵抗をバネ要素でモデル化し式(1)でその抵抗モデルを与えているが、これはその部材が配置した方向のみに抵抗し、その方向に対してはどの断面においても均一に力を分担すると考えている。ここで、主鉄筋・貫通鉄筋などの鉄筋の抵抗モデルは、図-6に示すトリニア型とした。橋軸方向に配置しているコンクリート断面の抵抗モデルは、図-7に示すように引張側を考慮しないモデルとしている。また、PC鋼棒の抵抗モデルはバイリニア型としている。

波形鋼板とコンクリート間の界面にはすべり方向と接触方向のバネを設置した。すべり方向としては界面に平行な方向に抵抗し、そのバネ耐力は既往の文献³⁾から4N/mm²としている。また、接触方向のバネは、コンクリートの圧縮側の抵抗を考慮したものとしている。これらのバネは波形鋼板とコンクリートが接する領域でモデル化を行っており、波形鋼板とコンクリートフランジ間での力の伝達を受け持つものとなっている。

(2) 解析モデルにおける外力

図-5に示した解析モデルに加える外力としては、下床版中に発生する曲げ引張力を橋軸方向に与えるこ

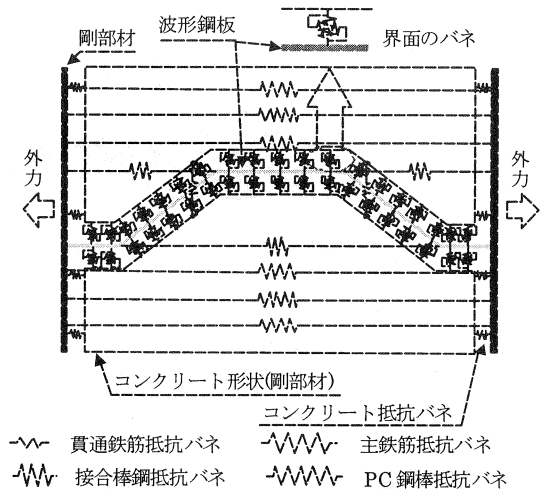


図-5 解析モデル

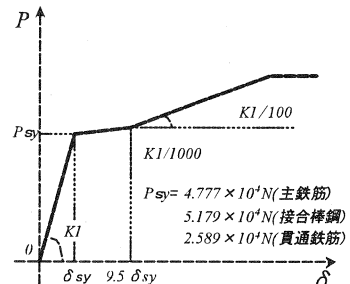


図-6 鉄筋の荷重-変位関係

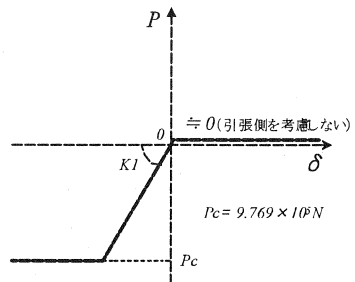


図-7 コンクリートの荷重-変位関係

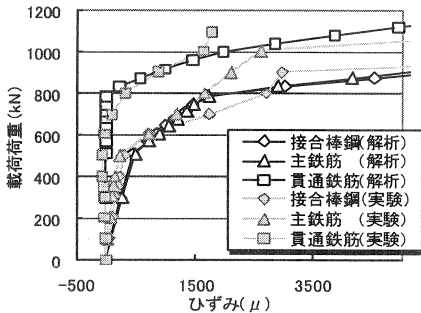


図 - 8 ひずみ進展状況の比較

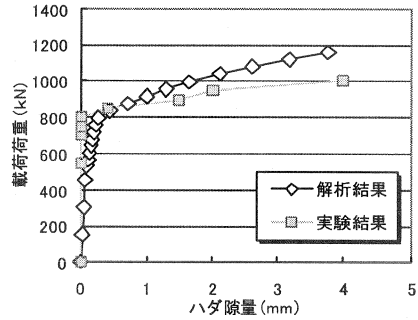


図 - 9 ハダ隙量の進展状況

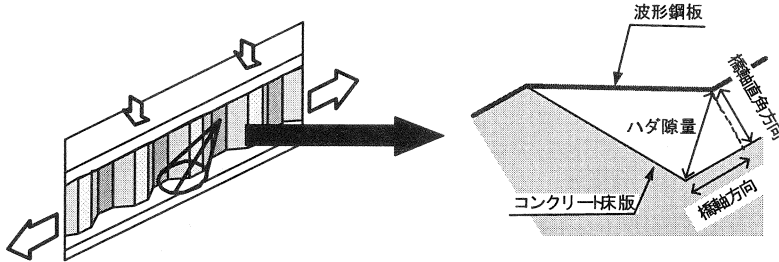


図 - 10 ハダ隙量の定義

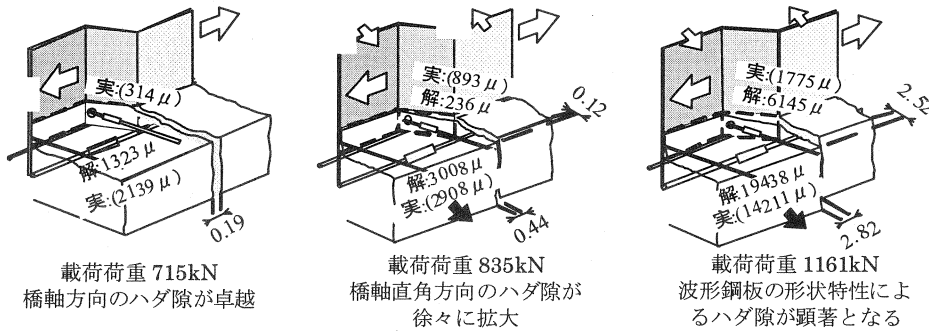


図 - 11 ハダ隙進展の模式図 (単位:mm)

とで再現した。従って、断面計算によりひび割れ発生・鉄筋降伏および終局状態(断面上縁のひずみが 3500 μ)での各荷重と中立軸の位置を算出し、平面保持の仮定より、下床版中でのひずみ分布を求めた。その後、下床版中の各部材のひずみから応力度-ひずみ関係を用いて下床版中に発生する曲げ引張力を算出した。

3.3 解析結果

図 - 8 に実験と解析結果の各ひずみ進展について比較したものを示す。橋軸方向のひずみ進展に着目すると、実験と解析結果とも載荷荷重 550kN 程度からひずみ進展が見られる。また、橋軸直角方向に配置している貫通鉄筋のひずみ進展に着目すると、解析では載荷荷重 800kN 以降に顕著なひずみ進展が見られる。載荷荷重 800kN 以降に主鉄筋などの橋軸方向の鋼材が降伏するため、下床版の剛性が低下する。このため、橋軸方向の伸び量が大きくなり波形鋼板が平板に戻ろうとする挙動を示し、図 - 11 中の 3 矢印に示すような橋軸直角方向の力が発生し、橋軸直角方向の貫通鉄筋にひずみが生じ始めると考えられる。その後、載荷荷重 1000kN 程度まで実験と解析でほぼ同様のひずみ進展を示している。図 - 9 にハダ隙量の進展状況について示す。ここで解析におけるハダ隙量は、波形鋼板が平板に戻る挙動により波形鋼板の折り曲げ部とそこに対応する床版間に生じる隙間とする(図 - 10 参照)。解析では載荷荷重 700kN で 0.19mm のハダ隙が生じている。その後、ハダ隙量は増加傾向を示し、載荷荷重 800kN 以降に顕著なハダ隙進展が生じる結果となった。実験

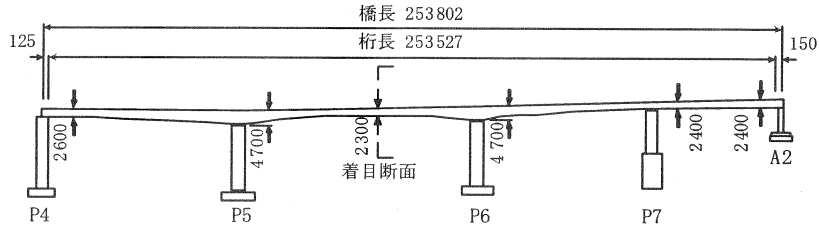


図 - 12 実橋における着目断面 (単位:mm)

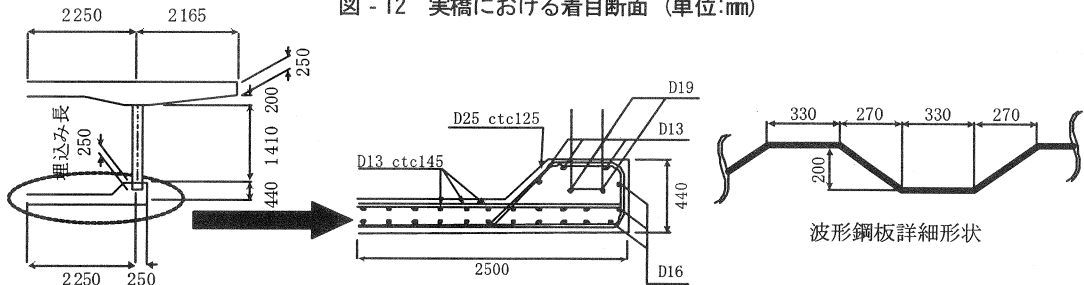


図 - 13 着目箇所における断面形状 (左: 断面形状 中: 下床版1/2断面図 右: 波形鋼板詳細図)

と解析におけるハダ隙量を比較すると、各荷重で両者に差が見られるものの、ハダ隙が急激に増加する荷重はほぼ同程度である。さらに、ひずみ進展も実験と同様の傾向を示していることから、本研究における解析モデルは概ね実験を再現できていると考えられる。また、鉄筋が許容応力度レベルに達した荷重でのハダ隙量は、約0.1mm程度と小さいものであった。

図 - 11 にハダ隙進展の模式図を示す。載荷荷重 715kN 時には約 0.19mm のハダ隙が生じている。このとき接合棒鋼のひずみは 1300 μ 程度と降伏までには余裕がある。この荷重レベルでは、橋軸方向のハダ隙が卓越しており、橋軸直角方向にはほとんどハダ隙は生じていなかったことが分かる。その後、曲げ引張り力に抵抗する主鉄筋や接合棒鋼が降伏することで、橋軸直角方向の貫通鉄筋にもひずみが生じ始めている。このとき、徐々に橋軸直角方向のハダ隙成分も拡大していることが伺える。すなわち、橋軸方向への変形が顕著になると波形鋼板が独自の变形挙動を示し、橋軸直角方向のハダ隙が発生・進展していると考えられる。

4. 実構造物を対象とした解析

前章までの検討は、実構造物を 1/3 スケールでモデル化した実験供試体を解析対象としていた。しかしながら、実構造物ではそのスケールの差から、実際に生じるハダ隙量は異なってくると考えられる。そこで、本章では実験供試体のモデル橋梁となった実橋の下床版に着目して、ハダ隙現象について検討を行なう。解析要領としては、前章 3.1 と同様の手法を用いている。対象橋梁は、実験供試体のモデルとなった中野高架橋とする。解析対象断面は図 - 12 に示すように、埋込み接合方式を用いている下側接合部に曲げ引張りが作用する P5~P6 径間の中央部とした。解析モデルは、図 - 13 に示す箱桁の片ウェブに着目し、下床版の 1/2 断面を中央高さ集約して、1 次元でモデル化を行った。また、橋軸方向には波形鋼板の平行パネル部を中心として、1 波長分の 1200mm としている。各抵抗部材の定数の設定は、下床版全体に対する着目範囲の断面積比によって定めた。緊張力は全コンクリート断面に作用しているとして、下床版の 1/2 断面に発生している緊張力を算出し、この緊張力を外力として考慮した。また、解析モデルの橋軸方向に外力を与えたときの主鉄筋に発生する応力度によって解析結果を検討した。

図 - 14 に解析結果を示す。検討する主鉄筋の応力度としては 0N/mm²、180N/mm²、345N/mm² とした。ここで、実橋が PC 構造物であることから、使用状態には全圧縮状態となっていることから、解析における主鉄筋の応力度が 0N/mm² 時が実橋の使用状態に相当するものと考えられる。このとき発生するハダ隙量は、それぞれ 0mm、

0.34mm, 0.67mm 程度と、供試体を対象とした解析結果よりも大きなハダ隙量が生じる結果となった。これは、供試体の波形鋼板の1波長が400mmであるのに対して、実橋のそれは1200mmと3倍である。従って、実橋の波形鋼板のスケールに影響を受けたものと考えられる。さらに、本研究の解析モデルは1波長間にひび割れが入っていないことを前提にモデル化を行っていることから、スケールに比例する結果となったと考えられる。終局状態での実橋のハダ隙量は、供試体での同じ状態でのハダ隙量を3倍したものよりも小さな値となっている。これは、表-2に示すように実橋では貫通鉄筋比が供試体と比べて大きいこと、橋軸直角方向の剛性が大きくなることから考えられる。そのため、橋軸直角方向の波形鋼板の自由な変形が押さえ込まれるため、結果的にハダ隙量が抑制されたと考えられる。また、地震などで一時的に過大な荷重が作用して桁が終局状態すなわち主鉄筋が降伏（主鉄筋の応力度が 345N/mm^2 ）した状態で、0.67mm 程度と大きなハダ隙量が生じるものの、この段階ではPC鋼材が降伏していないことから、この過大な荷重が除去されるとハダ隙は閉じると考えられる。

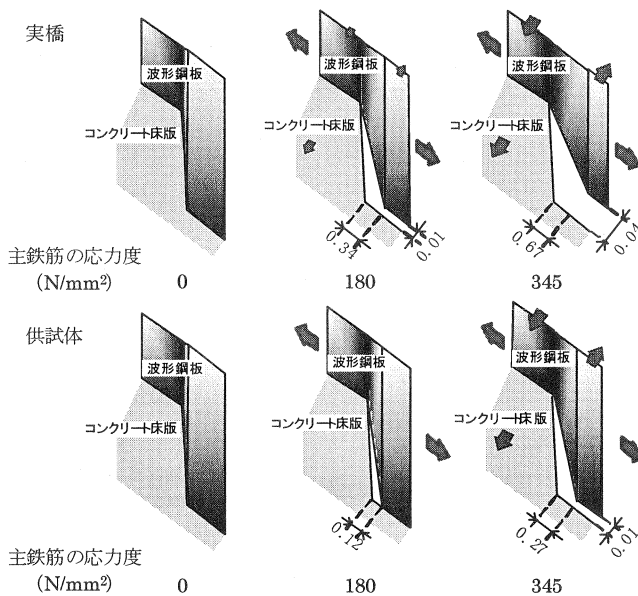


図 - 14 ハダ隙量の比較 (単位: mm)

表 - 2 貫通鉄筋量の比較

	鉄筋径	ピッチ (mm)	鉄筋量 (mm^3)	鉄筋比 (断面積)
供試体	D10	125	713.3	0.0048
実橋	D25	125	5067.0	0.0115

5. まとめ

今回の実験供試体を用いた静的荷重実験による接合部に着目した損傷状況の確認および、2次元フレーム解析による接合部に生じるハダ隙現象についての検討を行った結果を以下に示す。

- (1) 荷重実験により鋼板ウェブとコンクリート床版の接合に埋込み接合方式を用いた場合、曲げ挙動が卓越したとき、特有の損傷であるハダ隙現象が生じることが確認された。
- (2) ハダ隙現象は下床版に埋め込まれている位置の波形鋼板が平板に戻ろうとすることで顕著に生じる。
- (3) フレーム解析においてハダ隙現象を概ね再現出来ることを確認した。その結果、ハダ隙には橋軸方向と橋軸直角方向の成分があり、橋軸方向への波形鋼板の変形が大きくなることで橋軸直角方向のハダ隙が進展する。
- (4) 実橋を対象とした解析において、使用状態ではハダ隙が発生しないものと考えられる。しかし、過大な荷重が作用することでハダ隙が発生する可能性があることが分かった。

参考文献

- 1) 藤林健二, 幸左賢二, 栗根聡: 波形鋼板ウェブの埋込み接合部に関する実験的検討, 構造工学論文集, Vol. 49A pp.1615-1620, 2003.3
- 2) 上村知範, 松本貴宏, 依田照彦: 孔あきジベルを有する波形鋼板橋ウェブのせん断耐力に関する数値解析低検討, 第57回年次学術講演会, 2002.9