

(27) 鋼板孔を用いたずれ止めの設計法に関する一考察

Study on the design method of shear connectors using concrete dowels

依田照彦*, 中洲啓太**

Teruhiko YODA, Keita NAKASU

*工博, 早稲田大学教授, 理工学部土木工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

**工修, 建設省土木研究所研究員, 橋梁研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市大字旭1)

Rational connections with pertinent stiffness, enough ductility and potential strength are expected in the field of composite girders. In general, it is difficult for composite girders to transfer shear forces smoothly between steel and concrete without any shear connectors. The purpose of the present study is to propose a design method of new type connections (concrete dowels) which have punched holes inserted into a concrete flange. Fundamental characteristics of the concrete dowels and the design method are discussed from the mechanical point of view. Experiments and FEM analyses reveal that the present concrete dowels are promising from the viewpoint of practical application.

Key words: shear connector, concrete dowel, design method

1. まえがき

合成桁の性能は、鋼ウェブとコンクリート床版の間のずれ止めの性能に大きく影響される。スタッドジベルは通常の合成桁ではもっとも良く利用されているずれ止めである。しかしながら、波形鋼板ウェブを持つ合成桁の場合には、必ずしも、スタッドジベルが最善とはいえない面がある。それは、波形鋼板ウェブの軸方向剛性がコンクリートに比べて著しく小さいため、接合部の剛性が相対的に大きくなり、応力集中や疲労の問題が懸念されるからである。したがって、合成桁のずれ止めには、合成桁の構造に適合する適切な剛性・十分なじん性・必要な強度が要求される。

本研究では、波形鋼板ウェブとコンクリートフランジとの間に図-1に示すような埋込み接合を利用した場合のずれ止めの設計法について検討する^{1), 2)}。一般に埋込み接合部の設計は軸方向の挙動に対する設計と軸直角方向

(面外曲げ)の挙動に対する設計の2つに大別される。軸方向の挙動とは図-2に示すように橋軸方向にコンクリートフランジと鋼ウェブとが相対的に変形するときの挙動である。軸直角方向(面外曲げ)の挙動とは図-3に示すように偏心外力や水平横力により横方向に変形する挙動である。図-1の孔を用いたずれ止め(以後、コンクリートジベルと略す)では、横方向鉄筋量、横方向鉄筋の配置方式、孔の大きさ、孔の間隔、コンクリートの圧縮強度などのパラメータが重要な役割を果たす。ここでは、波形鋼板を使用した埋込み接合の設計に限定せず、孔を用いたずれ止め全般への適用を視野に入れて記述する³⁾。

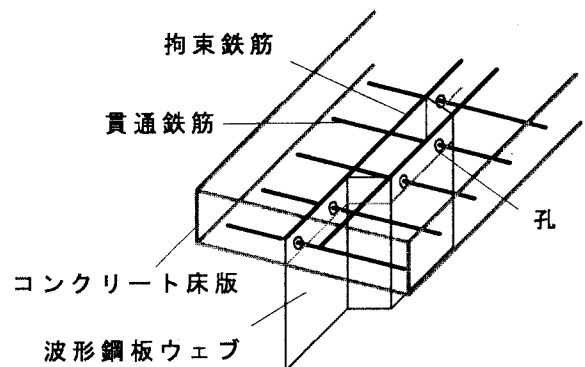


図-1 埋込み接合部

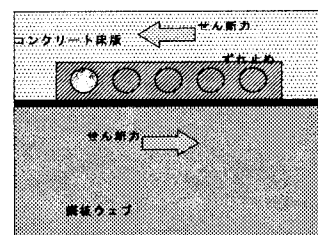


図-2 軸方向の挙動

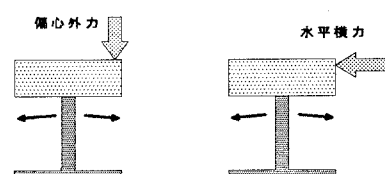


図-3 軸直角方向の挙動

2. 軸方向の挙動に対する設計

2.1 コンクリートジベルの支圧

(1) 強度評価式および設計式

コンクリート床版と鋼ウェブとが橋軸方向にずれようとするときに、孔の中のコンクリートが鋼の孔の側面から支圧力を受けて破壊することを想定する³⁾。

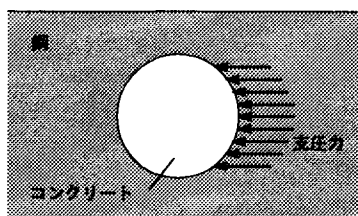


図-4 コンクリートジベルの支圧

孔の内面から受けるコンクリートの支圧に対する強度 V は、式(1)により推定できる¹⁾。

$$V = 5nDt\sigma_c \quad (1)$$

ここに、 n : 孔の個数、 D : 孔の直径、 t : 鋼板の板厚、 σ_c : コンクリートの圧縮強度である。設計においては式(1)に安全率3を用いるとよい。

(2) 設計における注意点

① 支持支圧面積比

式(1)中の5という係数は、Shelson らの実験⁴⁾で支持面積／載荷面積の値（支持支圧面積比）が30以上のときに成立するものである。孔を用いたずれ止めにおいても支持支圧面積比が、条件の違いなどを考慮して、100以上である必要がある。孔のずれ止めの場合、孔の軸方向から見た投影面積に対する床版の断面積を支持支圧断面積とする。ただし、床版の幅が非常に広い場合には、図-5のように45度の線を考え、床版端部における面積を支持面積とする。

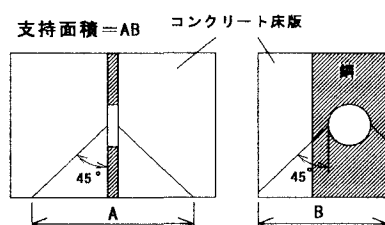


図-5 支持支圧面積比の考え方

② 横方向の拘束

支圧力の前方に横方向の引張力が発生するため、横方向鉄筋の配置などにより、鋼とコンクリートとの一体性の確保が欠かせない。

2.2 コンクリートジベルのせん断

(1) 強度評価式および設計式

コンクリート床版と鋼ウェブとが橋軸方向にずれようとするときに、孔の中のコンクリートが鋼ウェブ側面に沿ってせん断破壊することを想定する。なお、コンクリートのせん断面は条件によって何通りか考えられるので、任意のせん断面を考え、最もせん断耐力の小さいせん断面で破壊することを想定する場合もある。

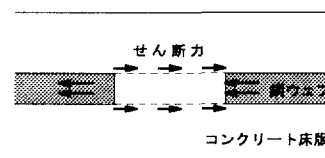


図-6 コンクリートジベルのせん断

横方向鉄筋が存在する場合、コンクリートジベルのせん断強度は式(2)により推定できる⁵⁾。

$$V = 0.9nA_c\sigma_c \quad (2)$$

ここに、 A_c : 孔1つあたりの面積、ただし、 $d \leq D/2$

（ d : 横方向鉄筋の直径）とする。設計においては式(2)に安全率3を用いるとよい。

せん断面を鉄筋が横切っていない場合には、コンクリートジベルのせん断強度として式(3)を用いる⁶⁾。

$$V = nA_c\sigma_c/3 \quad (3)$$

ただし、 $d \leq D/2$ 。設計においては式(3)に安全率3を用いるとよい。

(2) 設計における注意点

① せん断破壊面の考慮

孔あき鋼板が並列している場合、鋼板に挟まれたコンクリートが残ったまません断破壊することが考えられる。このように、鋼板の側面に沿ったコンクリートジベルのせん断以外にもせん断面が考えられる場合、起こりうるせん断面を仮定し、せん断強度が最小となる面のせん断強度を用いなければならない。その際、せん断面を鉄筋が横切っていれば式(2)を、鉄筋が横切っていない場合には式(3)を用いる。

② 孔と貫通鉄筋の直径比

貫通鉄筋の直径が孔の直径の1/2よりも大きいときには、コンクリート部分のせん断耐力よりも鉄筋部分のせん断耐力にコンクリートジベルの耐力が依存するようになる。このため、 $D/2 \leq d$ のときには式(4)を用いる。このとき、孔の中のコンクリートは鉄筋からの支圧を和らげる緩衝材のような役割を果たすが、強度には加算しない方がよい。

$$V = 2n \frac{\pi d^2}{4} \sigma_s / \sqrt{3} \quad (4)$$

ここに、 σ_s ：鋼の降伏強度である。

$D/2 \leq d$ でないときには式(2)を用いることになるが、 $2 \leq D/d \leq 3$ 程度の境界付近では、式(2)と式(4)の両方に対して安全率 3 を用いて検討しておくことが望ましい。

2.3 孔の中心線に沿った鋼のせん断

(1) 強度評価式および設計式

孔と孔の中心線に沿って鋼がせん断破壊することを想定する。

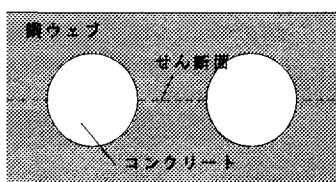


図-7 孔の中心線に沿った鋼のせん断

孔の中心線に沿った鋼のせん断破壊に対する強度はレオンハルトの研究成果³⁾を参考に式(5)によって推定できる。

$$V = \frac{A_s \sigma_s}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

ここに、 A_s ：孔の中心線に沿った鋼部分の面積である。設計においては式(5)に安全率 1.7 を用いるとよい。

(2) 設計における注意点

鋼板孔の中心間距離は、孔の直径の 2.25 倍以上離すことが推奨されているが、この条件が満たされない場合も想定し、安全側を見て、鋼板のせん断降伏をせん断に対する強度とした。

3. 軸直角方向の挙動に対する設計

3.1 力の伝達機構

軸直角方向（面外曲げ）に対する設計を行うためには、力の伝達機構を把握しておくことが重要である。このため、まず、力の伝達機構について触れる。鋼とコンクリートの接合部は偏心モーメントに対し、次の 4 つの力によって抵抗し、力の伝達を行っていることが分かる^{5), 7)}。

a) 鋼とコンクリートとの付着力

鋼とコンクリートとの付着強度は式(6)により近似的に計算できる。付着力はコンクリートの圧縮強度の 1/100

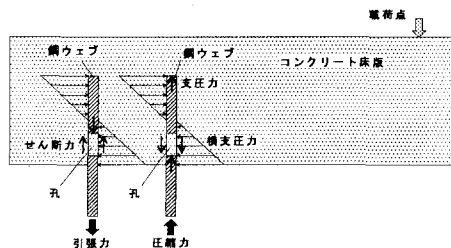


図-8 接合部に働く力

程度と非常に小さい。

$$V = 4 \times 0.01 \sigma_c m b h \quad (6)$$

ここに、 m ：波形の周期数、 b ：1 パネルの全幅、 h ：埋込み深さである。

b) ウェブ直上の上下方向支圧力

ウェブ直上の支圧強度は式(7)により推定できる。係数の 5 は式(1)と同様の考え方に基づく。

$$V = 5 m b t \quad (7)$$

(支持支圧面積比によっては 5 を低減)

c) コンクリートジベルのせん断（支圧）力

コンクリートジベルのせん断（支圧）強度に対しては軸方向の挙動と同様の考え方に基つき次式により推定できる。

$$V = 0.9 n A_c \sigma_c \quad (8)$$

(コンクリートジベルのせん断破壊に対して)

$$V = 2n \frac{\pi d^2}{4} \sigma_s / \sqrt{3} \quad (9)$$

(貫通鉄筋のせん断破壊に対して)

$$V = 5 n D t \sigma_c \quad (10)$$

(コンクリートジベルの支圧破壊に対して)

d) ウェブ側面の水平方向支圧力

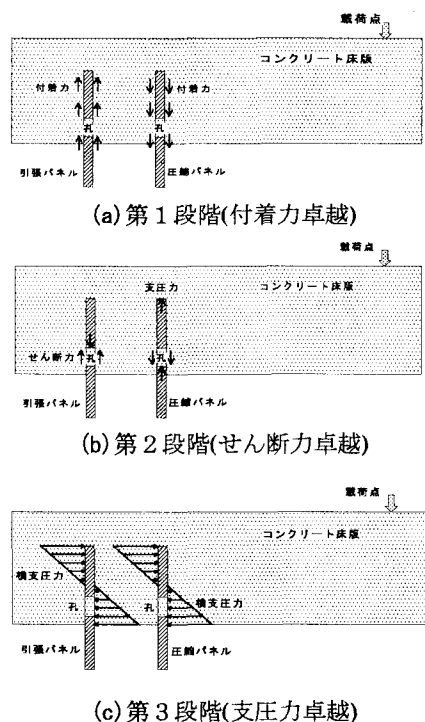
接合部のコンクリートが埋め込まれた鋼板から受ける水平方向の支圧力は式(11)により推定できる。

$$\sigma_{\max} = \frac{6 P e}{L h^2} \quad (11)$$

ここに、 $\sigma_{\max}$ ：作用支圧応力度の最大値、 P ：荷重、 e ：偏心距離、 L ：鋼板の軸方向投影長さである。

偏心モーメント $P e$ に対して、接合部ではこれら a)～d) の 4 つの力が分担し合って抵抗するため、それぞれ単独に考えた破壊荷重よりも大きな荷重に耐えることができる。しかしながら、単純に 4 つの強度を重ねあわせることはできず、図-9 のように変化すると考えられる伝達機構

を考慮しなければならない。



図－9 力の伝達機構

3.2 第1・第2段階に対する設計

第1段階に卓越する鋼とコンクリートとの付着力はコンクリートの圧縮強度のおよそ $1/100$ と小さく、それほど大きな強度は期待できない。このため、設計では付着切れは許容し、強度として加算しない方が無難である。しかしながら、孔より上側の部分では鋼とコンクリートとのせん断力があまり大きくないため、強度算定では孔より上の部分での付着力を期待することができる。鋼とコンクリートとの接着面積は孔の面積に對しかなり大きいので、埋込長が大きくなるとある程度は寄与するものと考えられる。

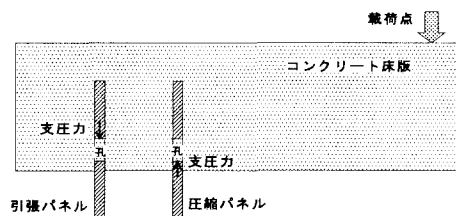
ウェブ直上の上下方向支圧力は、圧縮パネル側に主に軸圧縮力の伝達に寄与する。引張力については伝達しないため、モーメントの伝達は期待できない。そのため、付着力と同様に強度として加算しない方がよい。

コンクリートジベルのせん断（支圧）力は鋼とコンクリートとの付着切れに伴い、ウェブ側面の支圧力以上に卓越する。実際には孔より上の部分での付着力や水平方向支圧力の効果は十分期待でき、実験結果によれば、偏心モーメントの 5 割程度をジベル以外で負担している可能性が高い。しかしながら、条件の変化や不確実性を考慮してコンクリートジベルのみで偏心モーメントに抵抗できるよう設計しておくことが望ましい。このとき、コンクリートジベルのせん断強度と支圧強度は重ね合わせることができないので、強度の小さい方を使用することになる。

以上の考察から、第1・第2段階に対する設計式として式(12)～(15)が推奨される。

(1)コンクリートジベルの支圧破壊に対して

面外曲げにより、コンクリート床版と波形鋼板ウェブとが上下方向にずれようとするときに、孔の中のコンクリートが鋼の孔の側面から支圧力を受けて破壊することを想定する。軸方向挙動でのコンクリートジベルの支圧破壊とは力の向きが異なるだけで考え方は同じである。



図－10 面外曲げにおけるコンクリートジベルの支圧

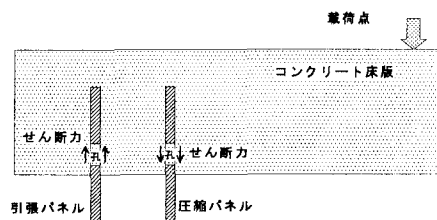
$$\frac{1}{3} 5nDt\sigma_c \times \frac{H}{2} \geq Pe \quad (12)$$

(コンクリートジベルの支圧破壊に対する設計)

ここに、 H ：波形鋼板の波の深さである。

(2)コンクリートジベルのせん断破壊に対して

面外曲げにより、コンクリート床版と波形鋼板ウェブとが上下方向にずれようとするときに、孔の中のコンクリートが鋼ウェブ側面に沿ってせん断破壊することを想定する。軸方向挙動でのコンクリートジベルのせん断とは力の向きが異なるだけで考え方は同じである。



図－11 面外曲げにおけるコンクリートジベルのせん断

したがって、せん断破壊に対する設計式は次式で表される。

$$\frac{1}{3} \times 0.9nA_c\sigma_c \times \frac{H}{2} \geq Pe \quad (13)$$

(コンクリートジベルのせん断破壊に対する設計)

$$\frac{1}{1.7} \times 2n \frac{\pi d^2}{4} \times \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \times \frac{H}{2} \geq Pe \quad (14)$$

(貫通鉄筋のせん断破壊に対する設計)

3.3 第3段階に対する設計

ウェブ側面の水平方向支圧力は、鋼とコンクリートとの付着やジベルの負担がなくなると卓越する。この水平方向

支圧力によって破壊すると、構造物の偏心モーメントに対するすべての耐荷機能が失なわれる。水平方向支圧力に対しては最終的な崩壊を防ぐため、圧縮応力に対して安全となるように設計する必要がある。引張応力による鋼とコンクリートとの肌離れに対しては、通常の使用時の荷重では、水平方向支圧力よりも上下方向の付着力およびジベルの抵抗力が卓越するため、注意は要するものの大きな問題とはならない。圧縮応力に対して安全であるように設計しておけば、引張側の肌離れの問題は生じないことが、面外曲げに関する疲労試験によっても裏付けられている⁵⁾。一方、埋込み接合部に波形鋼板ではなく、平鋼板を用いた場合には上下方向の力によるモーメント伝達が期待できず、水平方向支圧力が初期段階から卓越するので、埋込接合に1枚だけの平鋼板を用いるのは好ましくない。このことは、2次元FEM解析によっても明らかにできた⁵⁾。平鋼板を用いる場合、鋼上フランジとの併用が不可欠と思われる。

以上の考察から、第3段階に対する設計式として式(15)が利用できる。

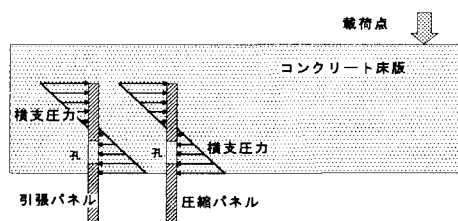


図-12 接合部コンクリートの水平方向支圧

$$\frac{6Pe}{Lh^2} \leq \sigma_{ba} \quad (15)$$

ここに、 σ_{ba} ：コンクリートの許容支圧応力度である⁸⁾。

3.4 波形鋼板の座屈に対する設計

面外曲げにより、図-13に示すように波形鋼板に上下方向の引張力と圧縮力が発生するので、圧縮側のパネルに対して座屈と降伏、引張側のパネルに対して降伏を検討しなければならない。引張側のパネルについては孔引きを考慮した作用応力度が許容引張応力度より小さいことを設計において確認すればよいので、ここでは、圧縮側パネルの座屈について検討する。

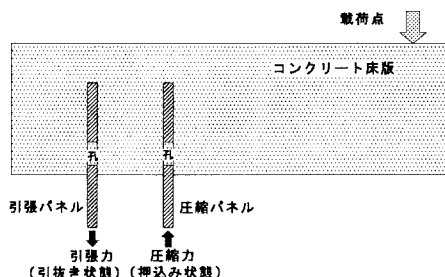


図-13 波形鋼板の応力状態

波形鋼板の応力は偏心を考慮しない圧縮応力と偏心モーメントによる曲げモーメントの和と考えることができ、圧縮パネルの局部座屈に対する検討は、設計基準の「圧縮応力を受ける両端支持板」に準拠して式(16)によって行うことができる。

$$\frac{P}{A} + \frac{Pe}{I} \frac{H}{2} \leq \sigma_a \quad (16)$$

ここに、 A ：波形鋼板の断面積、 I ：波形鋼板の断面2次モーメント、 σ_a ：許容圧縮応力度である⁹⁾。

4. パラメータの決定における考え方

4.1 埋込長の決定について

埋め込まれた波形鋼板ウェブの上端での上下方向の支圧力によりコンクリート床版の上面にひび割れが発生し破壊することを想定する。

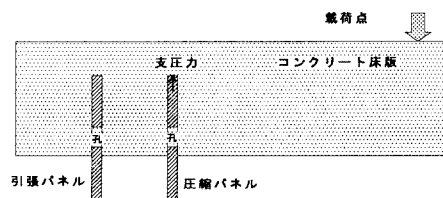


図-14 ウェブ直上の支圧

埋込長が大きいと鋼とコンクリートとの付着力が接着面積に比例して期待できること、接合部の水平方向支圧力によるモーメント伝達の分担率が上がり、コンクリートジベルの支圧力、せん断力が小さくなることから、接合部の面外曲げに対する耐力が向上する。しかしながら、ウェブ上部のコンクリートのかぶりが小さくなるので、ウェブ直上での支圧が問題となる。埋込長の最大値は軸圧縮力を圧縮パネルのみで受けると考え、そのときの支圧力がウェブ上部でのコンクリートの支圧強度を上回らないようにすることが望ましい。支持支圧面積比はウェブ上部に図-15のように45度で広がる領域を考え、その領域のウェブ上方の面での面積とウェブ上端の面積の比とする。実験でもFEM解析でもこの程度の距離があれば問題がないことが示されている¹⁰⁾。

なお、輪荷重がウェブ直上にこないように配慮する必要もある。

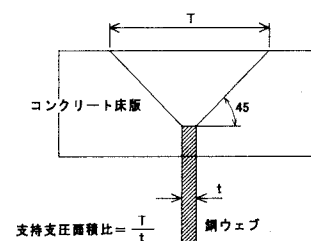


図-15 支持支圧面積比の考え方

4.2 鋼板孔の大きさについて

鋼板孔を用いたずれ止めでは、孔の大きさの決定が重要な位置を占める。コンクリートの充填性とブリージングの問題を考えると、適切な孔の直径が存在する。そこで、参考のため孔を大きくした場合と小さくした場合の特徴をまとめる。

表-1 孔の大小と特徴

孔を大きくした場合	・支圧面積が大きくなり孔の中のコンクリートへの支圧力が低下する。 ・孔の面積が大きくなり、コンクリートジベルのせん断強度が低下する。 ・孔の中心に沿った鋼部分の面積が小さくなり柔なずれ止めとなり、コンクリート部分での発生応力を低下させる。
孔を小さくした場合	・支持支圧面積比が大きくなる。 ・孔の中心線に沿った鋼部分の面積が大きくなり、鋼板の安全性が増す。

5. あとがき

鋼板孔を用いたずれ止め(コンクリートジベル)の設計においては、コンクリートジベルのせん断強度が最小になるように設計するべきであると既往の研究では指摘されている。これは、接合部のじん性の確保に着目した見解である。更なるじん性を期待する場合には、十分な3次元鉄筋配置が必要となる。このような構造細目が確保されれば、鋼板孔を用いたずれ止めには従来のスタッド以上の効果が期待できるものと思われる。

参考文献

- 1) 依田照彦：ハイブリッド(複合)橋梁への期待,土木学会誌, Vol. 84, pp.11-13, 1999.
- 2) Yoda, T., Kawaguchi, N. and Nakasu, K.:Design of concrete dowel with penetrating reinforcing bar in a composite girder, The seventh East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, pp.1021-1026, 1999.
- 3) Leonhardt, E.F., Andra, W., Andra, H-P. and Harre, W.:Neues, vorteilhaftes Verbundmittel für Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit, Beton und Stahlbetonbau, pp.325-331,1987.
- 4) Shelson, W.: Bearing Capacity of Concrete, Journal of The American Concrete Institute, Vol.29, No.5, pp.405-415, 1957.
- 5) 中洲啓太, 依田照彦：埋め込み接合の面外曲げ挙動および設計法に関する研究, 第54回土木学会年次学術講演会講演概要集, CS-184, pp.368-369, 1999.
- 6) 西海・富永・室井・古市：拘束条件を考慮した孔あき鋼板ジベルのずれ止め特性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No. 3, pp.865-870, 1998.
- 7) 依田照彦・中洲啓太：鋼とコンクリートの接合構造の新技术, 第1回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集, 土木学会, pp.73-80, 1998.
- 8) 土木学会編：コンクリート標準示方書・設計編(平成8年制定), 土木学会, pp.69-71,1996.
- 9) 日本道路協会編：道路橋示方書・同解説, I 共通編, II 鋼橋編, 日本道路協会, 1992.
- 10) 中洲啓太・依田照彦・佐藤幸一・櫻田道博・鈴木徹：孔のずれ止めを用いた波形鋼板ウェブを持つ合成桁の首振り現象に関する実験的研究, 第53回年次学術講演会講演概要集, CS-137, pp.272-273, 1998.