

技術ノート

斜角を有する非合成 I 桁橋の 局部応力解析および構造改良の検討

Analysis of Local Stresses in Skew Plate Girder Bridge and Investigation of Strengthening Method

伊藤 博章*
Hiroaki ITOH

山崎 秋信**
Akinobu YAMAZAKI

町田 文孝***
Fumitaka MACHIDA

街道 浩****
Hiroshi KAIDOU

Fatigue damages were found at sway bracing connections in the skew plate girder bridge which was constructed 25 years ago. To investigate the local stress level in such damaged portions, analytical studies by using entire bridge analysis and zoomed detailed studies by F.E.M. are carried out. Results of the analysis show that the local stresses exceeded yield stress. In order to decrease the local stress, strengthening method which is attaching horizontal gusset plate are studied.

Keywords : fatigue damage, skew plate girder bridge, local stress, strengthening method

1. はじめに

鋼道路橋では、交通量の増加や重車両の走行、溶接橋の供用年数が長くなってきたことなどにより設計段階では考えられていなかった疲労による損傷が増加してきている。疲労による損傷は、対傾構や横桁の取り付け部、垂直補剛材下端の回し溶接部、鋼床版の縦リブと横リブの交差部およびソールプレート溶接部などにおいて多く発生している。坂野らの研究¹⁾によると、現在、疲労損傷が多く発生している鋼道路橋は、主に昭和30年代後半から昭和40年代中ごろの高度成長期に建設された橋梁であり、次第にそれ以降に建設された橋梁にも疲労損傷が発見されてきていると報告している。

昭和40年代初期以前に建設された鋼 I 桁橋では、比較的斜角が小さい(60°程度)橋梁においても、対傾構が支承線と平行に配置されている場合がある。このような橋梁の対傾構取り付け部の構造詳細には、図-1に示すように、ウェブに直角に垂直補剛材を取り付けガセットプレートを折り曲げる場合と、垂直補剛材を斜めに取り付ける場合がある。一般に、斜角が小さい橋梁では、溶接や添接の施工性から前者を採用する場合が多い。

しかし、図-1(a)のような構造では、対傾構に軸力が発生した場合、ガセットプレートおよび垂直補剛材に板曲げ応力が発生し、特にガセットプレートの折り曲げ部お

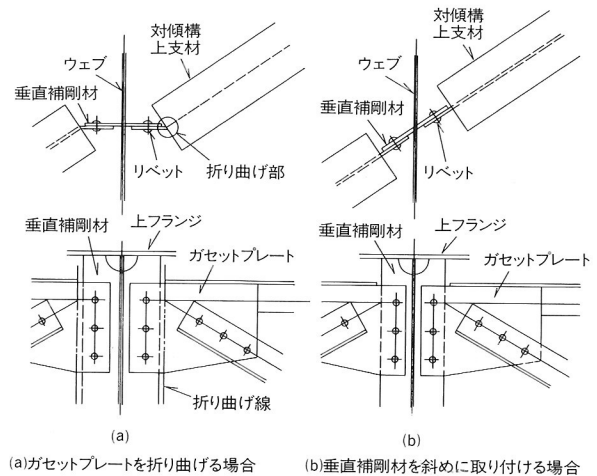


図-1 対傾構取り付け部の構造

よび垂直補剛材溶接部にその応力が集中することが予想される。実際、同種の橋梁について対傾構取り付け部の疲労損傷を調べてみると、疲労亀裂は垂直補剛材上端の溶接部やガセットプレートの折り曲げ部に発生している場合がある。昭和40年代初期以前に建設された同種の橋梁の多くは、このような構造を採用しており、上記の2次応力が疲労損傷の原因であるとする、今後類似した損傷の発生が予想される。

そこで、著者らは、昭和40年代初期に建設された斜角

*川田工業(株)技術本部技術部次長 **川田工業(株)技術本部技術部設計一課課長 ***川田工業(株)技術本部中央研究室係長
****川田工業(株)技術本部技術部設計一課

表-1 斜橋の横桁および対傾構配置に関する設計基準の変遷

道路橋示方書鋼橋編 日本道路協会	建設省 土木構造物標準設計	日本道路公団 設計要領	首都高速道路公団 鋼構造物設計基準	阪神高速道路公団 構造物設計基準	名古屋高速道路公社 鋼構造物設計基準	鋼道路橋設計便覧 日本道路協会
S39.6 記述なし	S38.11 記述なし 道路橋標準設計 図集解説	S39.10 記述なし	S40.4 記述なし	—	—	—
↓	S47.8 明確な記述なし 一部に $\theta=60^\circ$ という記述あり	S45.1 $\theta \geq 70^\circ$	S44.4 記述なし	S45.8 θ が大きい場合 鋼単純合成 I げ た橋設計基準	—	—
S48.2 記述なし	↓	↓	S48.9 $\theta \geq 75^\circ$	S49.5 θ が大きい場合	S48.8 $\theta \geq 70^\circ$ 設計要領集	—
↓	S54.5 記述なし	S55.4 $\theta \geq 70^\circ$ 分配効果を考慮 し決定している	↓	S53.4 θ が大きい場合	S51.6 $\theta \geq 70^\circ$	S54.2 $\theta > 70^\circ$
S55.2 記述なし	S56.4 記述なし	↓	S56.9 $\theta \geq 75^\circ$	S55.4 θ が大きい場合	S57.5 記述なし 設計細目	S55.8 $\theta > 70^\circ$
↓	S56.11 記述なし	↓	↓	↓	↓	↓
↓	S59.6 記述なし	↓	↓	S60.4 θ が大きい場合 $\theta > 70^\circ$ 程度	S59.4 $\theta \geq 70^\circ$	↓
↓	↓	↓	↓	↓	S62.4 $\theta \geq 70^\circ$	↓
H2.2 記述なし	↓	H2.7 $\theta \geq 70^\circ$ 分配効果を考慮 し決定している	H4.4 $\theta \geq 70^\circ$	H2.6 θ が大きい場合 $\theta > 70^\circ$ 程度	↓	↓

(注意) ・横桁および対傾構を支承線に平行に配置する場合の基準を示す。

・基準の制定、改訂年月を明示していないものについては発行年月を記入している。

が小さい非合成 I 桁橋を対象として、対傾構取り付け部の応力状態を解析し、さらに応力低減のための構造改良方法について検討を行った。本報告は、これらの検討結果について報告するものである。

2. 設計基準の変遷

斜角を有する鋼 I 桁橋では、横桁および対傾構の配置方法として図-2 に示す 2 通りの方法がある。現行の設計基準では、斜角が 70° 以上の場合に図-2(a)の配置を、斜角が 70° 未満の場合に図-2(b)の配置を用いるように規定している。この対傾構の配置方法について設計基準の変遷を整理すると表-1 のようになる。

昭和40年以前の基準では、対傾構の配置方法について斜角の大きさによる分類の規定はなく、設計技術者の判断に委ねられていたものと考えられる。当時の斜橋の施工事例²⁾について調べてみても、斜角が 60° 程度であっても図-2(a)の配置で設計・施工されている橋梁も少なくない。対傾構の配置方法が斜角の大きさにより分類されたのは、昭和45年の日本道路公団設計要領に規定されたのが最初であり、現行と同様に斜角 70° を境として配置方法を区別している。

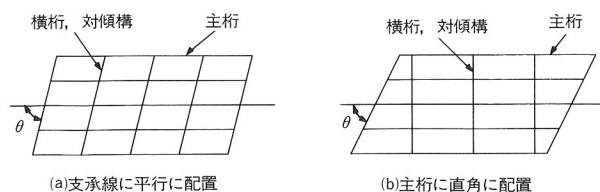


図-2 横桁および対傾構の配置方法

3. 対象橋梁と疲労損傷

本報告において検討の対象とした橋梁は、図-3 に示すような支間長30m、斜角 57° の2径間連続非合成 I 桁橋である。この橋梁の対傾構配置は、前述の図-2(a)のよう

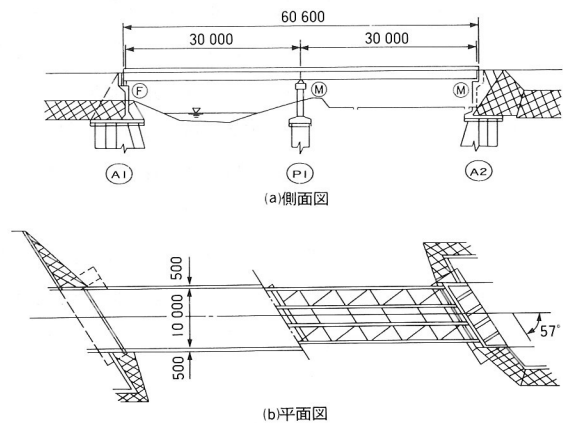


図-3 対象とする橋梁

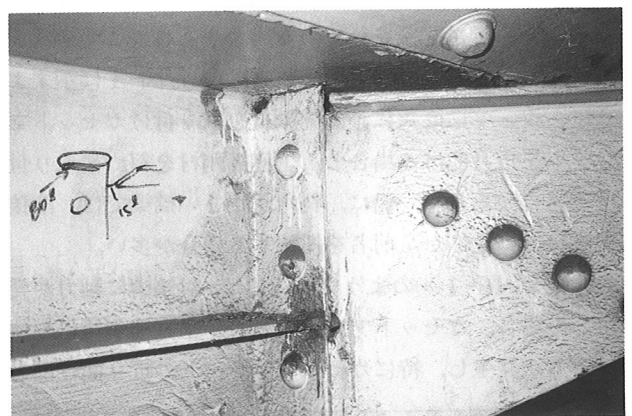


写真-1 垂直補剛材上端部の疲労亀裂

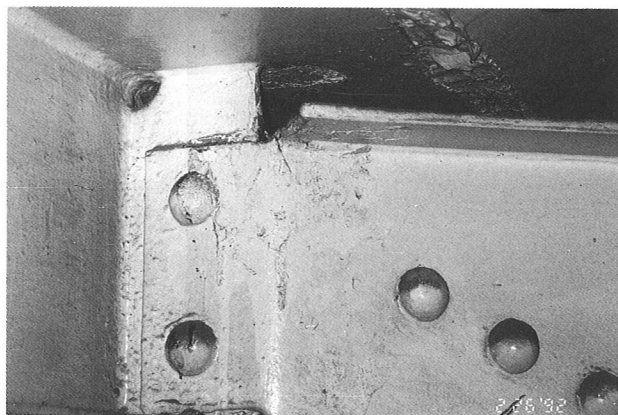


写真-2 ガセットプレート折り曲げ部の疲労亀裂

に支承線と平行に取り付ける方法を採用している。また、対傾構は折り曲げたガセットプレートを介し主桁の垂直補剛材に連結している。

本橋では、写真-1に示すように垂直補剛材と主桁上フランジとの溶接部において、垂直補剛材側の溶接止端に沿って、また写真-2に示すようにガセットプレートの折り曲げ部に沿って疲労亀裂が生じている。

4. 応力状態の解析と構造改良

ここでは、疲労損傷が発生している部分の応力レベルとその分布を解析し、局部応力が疲労損傷発生の原因となっているかどうかを調べる。また、疲労損傷を防止するための具体的な構造改良について検討を行う。

ただし、過去の実測結果（例えば、文献3、4）によれば、非合成I桁橋であっても床版コンクリート硬化後は、20tトラック1台程度の活荷重に対して合成桁に非常に近い挙動を示すことが報告されている。本報告では、橋梁に作用する実応力の把握を目的としているため、対象とする橋梁の全体解析はRC床版を含めた合成構造として行うものとする。

ここで用いた応力解析方法の手順は、以下に示すとおりである。まず、対象とする橋梁の全体解析を行い、対傾構軸力や横構軸力などを算出する。次に、疲労損傷が発生している対傾構取り付け部分を抽出し、この部分モデルに全体解析から得られた各部材の断面力を作用させ局部応力解析を行うものである。

(1) 全体解析

一般的な設計解析では、RC床版を各主桁の有効幅ごとに分割し、橋梁全体を格子構造として解析している。このため、RC床版が主桁間で連続していることが、橋梁の挙動に与える影響を評価することができない。また、対傾構は、梁部材としてモデル化しているため、その詳細な構造やRC床版に対する正確な偏心量を評価することも困難である。

そこで、このような問題を解決するため、増田ら⁵⁾が開

発した合成I桁橋の解析方法を本橋に適用した。この方法は、格子構造とは逆にRC床版を主体とし、主桁はRC床版に取り付けられた補剛材として取り扱う方法である。また、対傾構については、対傾構要素を導入しその構造を正確に表現している。

全体モデルの要素分割図および荷重載荷位置を図-4に示す。また、同図に損傷が最も著しい着目部を示す。疲労照査荷重は活荷重T-20⁶⁾とし、着目部の応力状態が最も不利になるように載荷した。

全体解析の結果の一例として、図-5に着目部付近の対傾構の軸力を示す。

(2) 局部応力解析

対傾構取り付け部を抽出した部分モデルを図-6に示す。フランジ、ウェブ、垂直補剛材、対傾構およびガセットプレートは薄板要素でモデル化し、リベットは剛体棒要素でモデル化している。境界条件は、図-6に示すと

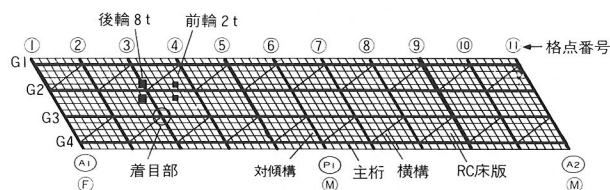


図-4 要素分割図

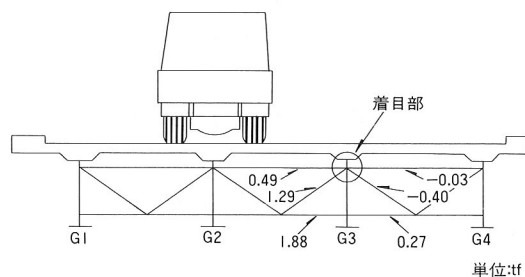


図-5 着目部付近の対傾構軸力

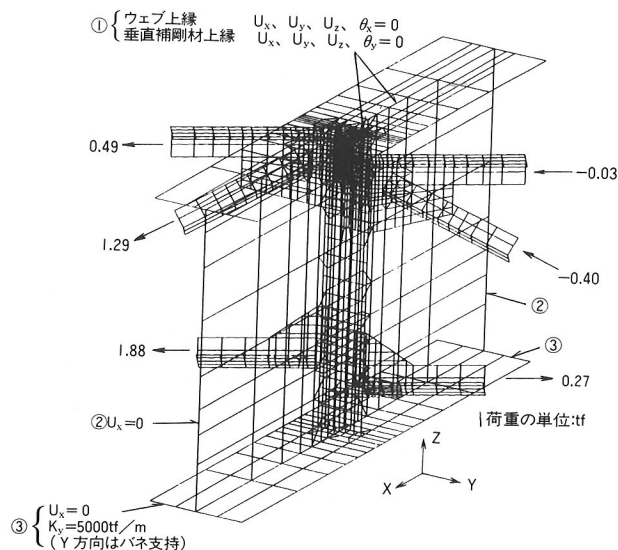
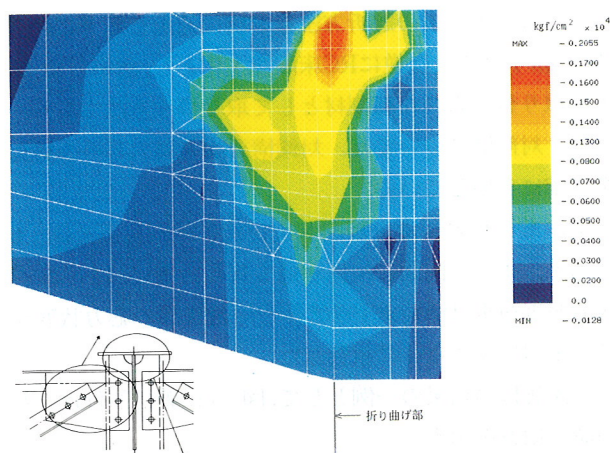
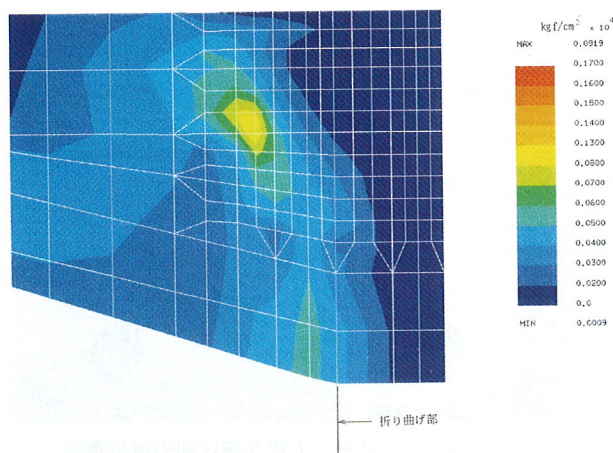


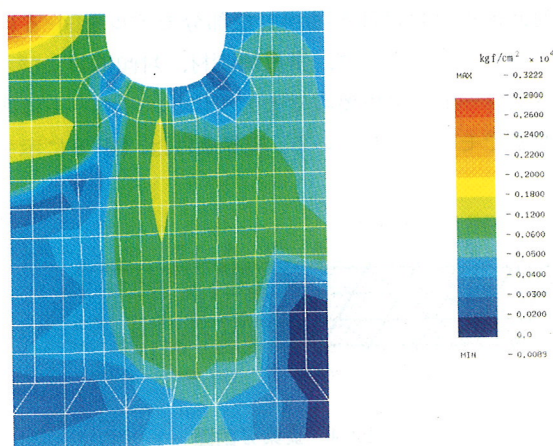
図-6 部分モデルの境界条件



(a)ガセットプレートの応力分布

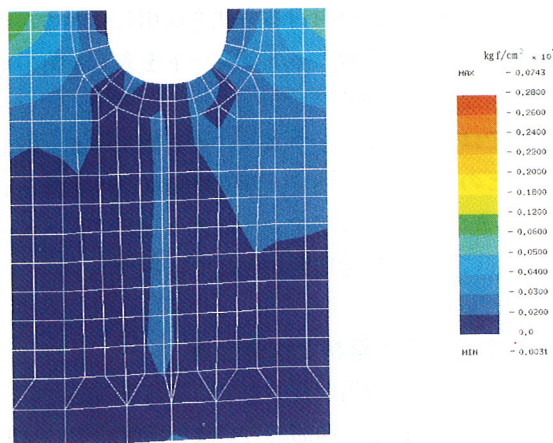


(a)構造改良後のガセットプレートの応力分布



(b)垂直補剛材上端部の応力分布

図-7 応力解析結果



(b)構造改良後の垂直補剛材上端部の応力分布

図-9 構造改良後の応力解析結果

おり、ウェブおよび垂直補剛材上縁を条件①のように拘束し、ウェブ断面を条件②のように拘束する。また、下フランジが連続していることの影響を、下フランジの両端に面外剛性と等価なバネ要素を配置することにより評価している。このため、下フランジ断面を条件③のように拘束する。

この部分モデルに全体解析から得られた対傾構軸力および横構軸力を与え、疲労損傷部の局部応力を解析した。

垂直補剛材およびガセットプレートの応力図を図-7に示す。垂直補剛材の上端部の局部応力は、図-7(a)に示すように3 000kgf/cm²を越え、使用材質SS400の降伏応力度2 400kgf/cm²を上回る。

一方、ガセットプレートの折り曲げ部の局部応力は、図-7(b)に示すように2 000kgf/cm²に達している。図-7(a)、(b)とも板曲げ応力を考慮し鋼板の表面の応力を示したものであるが、局部応力に占める板曲げ応力の割合は前者で76%、後者で93%であり、板曲げ応力が圧倒的に支配的であることが分かる。

なお、ここで用いた部分モデルは、上フランジを固定して解析しているため、RC床版の変形を考慮することができない。実際は主桁の変形に伴いRC床版も変形するこ

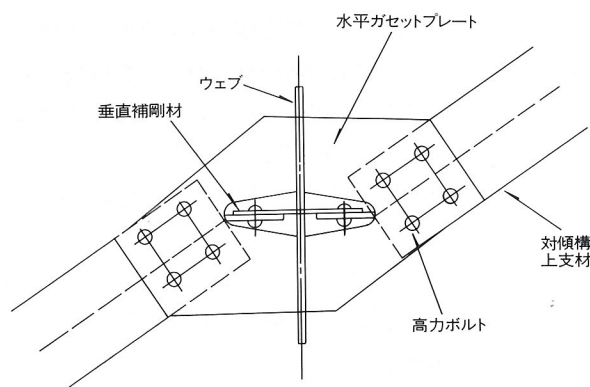


図-8 水平ガセットプレート

とから、垂直補剛材の上端部に発生する局部応力は解析結果よりも小さいものと予想される。モデル化に改善の余地が残されているものの、解析結果は疲労損傷部の応力集中現象を良くとらえていることから、対象とした橋梁は極めて厳しい応力状態におかれていたものと判断できる。

(3) 構造改良の検討

前述の解析結果から、垂直補剛材の上端部およびガセットプレートの折り曲げ部とも応力レベルが非常に高い

ことが分かった。そこで、この局部応力を低減し、今後の供用に耐え得る構造に変更するための検討を行う。

疲労損傷部では局部応力に占める板曲げ応力の割合が非常に高いことから、構造改良方法として板曲げ応力を低減する方法が有効であると考えられる。この方法としては、対傾構の配置を図-2(b)のように変更する方法、図-8のように水平ガゼットを取り付け対傾構上支材を固定する方法が考えられる。しかし、前者は対傾構、機構および垂直補剛材などを全面的に取り替える必要があり、経済性や施工性を考えると必ずしも得策でない。このことから、水平ガゼットを取り付ける方法に着目し、応力低減の効果について検討する。

なお、最近日本道路公団では、斜角の有無に関わらず対傾構の上下支材に水平ガゼットプレートを設置している例があるが、これも疲労損傷を防止する目的によるものと考えられる。

構造改良後の解析結果を図-9に示す。ガゼットプレートを取り付けた結果、全体的に応力が集中している部分がなくなっており、垂直補剛材の上端部の応力度は700kgf/cm²程度に、ガゼットプレートの折り曲げ部の応力度は200kgf/cm²程度に低減している。また、新たに取り付けた水平ガゼットプレートの応力度は100~200kgf/cm²程度である。

この解析結果について、鋼構造物の疲労設計指針・同解説⁷⁾の継手の強度等級に基づき、疲労亀裂発生の有無を検討する。垂直補剛材上端の溶接部の強度等級はF等級($\Delta\sigma_f=65\text{MPa}$; 663kgf/cm²)であり、解析結果は許容応力範囲 $\Delta\sigma_f$ をやや上回っている。しかし、この許容応力範囲は公称応力に対して規定したものであり、FEM解析などで得られるような局部応力に対してはより大きいものと考えられる。また、前述したように、実応力は解析結果に比べて小さいことが予想されるため、垂直補剛材上端部の疲労亀裂発生の可能性は小さいものと考えられる。

また、ガゼットプレートの折り曲げ部や新たに取り付けたガゼットプレートの取り付け部については、応力度が小さいことから疲労亀裂発生の可能性は非常に小さいものと推定できる。

5. おわりに

本報告で検討した斜角が小さい鋼I桁橋における対傾構取り付け部の構造改良方法は、水平ガゼットプレートを取り付け対傾構の上支材を固定するものである。この方法により疲労損傷部の局部応力は低減し疲労亀裂の発現の可能性を低く抑えることができる。またこの方法は、大がかりな部材取り替え工事を必要とせず、経済性や施工性などの面において優れているものと考えられる。

なお、本報告で対象とした橋梁は、鋼I桁橋の設計基準や設計技術が確立される以前に建設された橋梁であり、現在、本橋のような構造詳細を持つ橋梁が設計・施工されることはまずない。しかしながら、車両による輸送が主流となった現在、本橋と同時期に施工された橋梁は、物流の大動脈を形成する道路の一環となっており、同様な疲労損傷が報告されている橋梁も少なくない。このようなことから、この検討結果が、今後同様な構造を持つ橋梁の補修・補強に際し、参考になれば幸いである。

最後に、本報告をまとめるにあたり貴重なご助言、ご指導を賜りました、東京工業大学三木千壽教授ならびに武蔵工業大学増田陳紀教授に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Sakano, M., Mikami, I. and Shibata, H.: Data base of damaged and deteriorated steel bridges, Japan-Korea joint seminar on steel bridges, pp.65-77, July 1992.
- 2) 日本橋梁建設協会：橋梁年鑑，1964，1966.
- 3) 馬場・三野・小池・石沢ほか：極斜連続格子ゲタ（栗原川橋）の載荷試験，橋梁と基礎，pp.31-38，1970-4.
- 4) 齊藤・帰山・堀川・沖村：宮前橋の実橋載荷実験結果とその考察，橋梁と基礎，pp.33-39，1981-9.
- 5) Masuda, N., Miki, C., Kashiwagi, H. and Kaidoh, H.: Analysis of sway bracing members in composite-girder bridges, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol.4, No.2, 331s-340s, October 1987.
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，I共通編，丸善，pp.10-20，1990-2.
- 7) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，技報堂，pp.7-11，1993-4.