

実交通荷重による鋼鈑桁橋の応力変形挙動

STRESS MEASUREMENT OF STEEL GIRDER BRIDGES UNDER ACTUAL TRAFFIC LOAD

竹之内博行^{*} 谷倉 泉^{**} 高倉 敏^{***} 三木千寿^{****}

By Hiroyuki TAKENOUCHI, Izumi TANIKURA, Satoshi TAKAKURA and Chitoshi MIKI

Stress and deflection of steel girder bridges were measured under actual traffic load. From the measured data, stress condition of stiffener plate of cross-frame-to-girder connection was clarified, which have frequently caused fatigue cracks. Effect of load distribution by cross-frame and concrete slab were also investigated.

1. ま え が き

近年、高速道路網の発達した米国における道路構造物の荒廃ぶりが報告されて以来、国内においても疲労損傷等の各種変状に対する関心が強まり、各方面で研究が進められている。

日本の高速道路の歴史は約20年を経過したばかりであるが、この間の著しい経済成長の影響による交通量の増大および重車両の通過により、高速道路の橋梁は建設当初の予想をはるかに上回る過酷な応力状況下に置かれている。中でも鋼鈑桁橋に見られる共通した損傷として、対傾構が取付けられている垂直補剛材(以下スティフナと称す)と主桁上フランジのすみ肉溶接部には、疲労が原因と思われる亀裂が多数発見されており、その対策は今後の高速道路の維持管理上重要な課題となっている。この様な疲労亀裂に対し、その発生原因を解明し適切な補修対策を見出すためには、亀裂発生箇所が実際の交通荷重下でどのような応力挙動を示しているかを把握し、その原因となる要因を知ることが重要である。損傷を生じているスティフナには、一般に図-1のようにガセットを介して斜材と上支材が取付けられており、損傷部付近は複雑な構造となっている。この部分には対傾構の荷重分配作用による力や、床版のたわみに伴う2次的な変形などが作用しているものと推察され、その応力状態を解析するのは極めて難しいため、供用中の実橋において実交通荷重下の応力変形挙動を測定することとした。

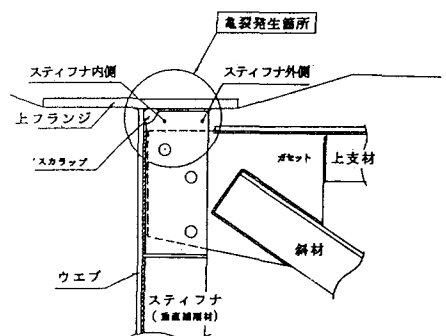


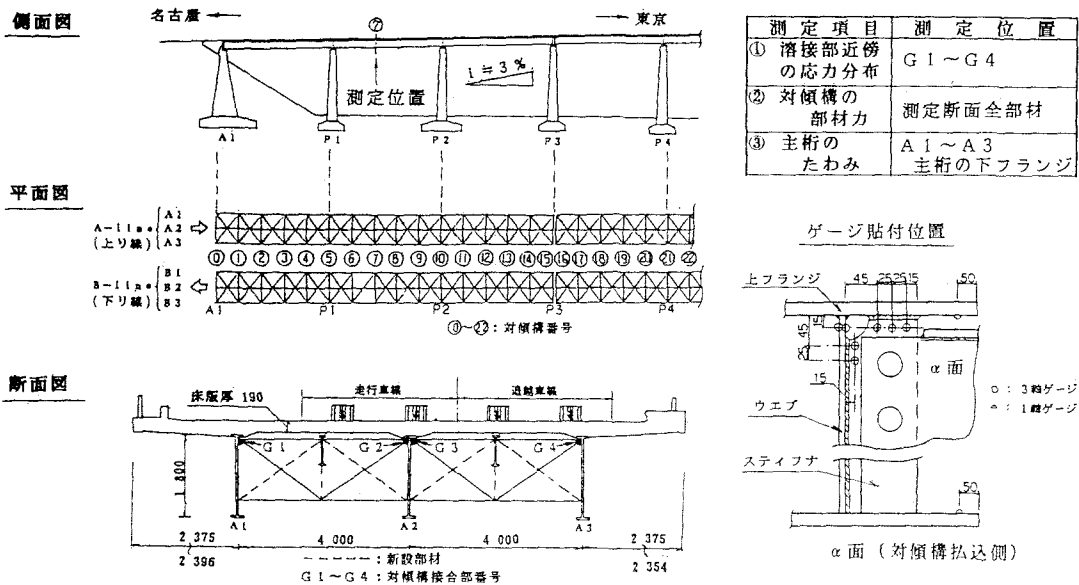
図-1 対傾構接合部の構造

* (社)日本建設機械化協会 建設機械化研究所 研究第二部 主任研究員

** 工修 (社)日本建設機械化協会 建設機械化研究所 研究第一部 研究員

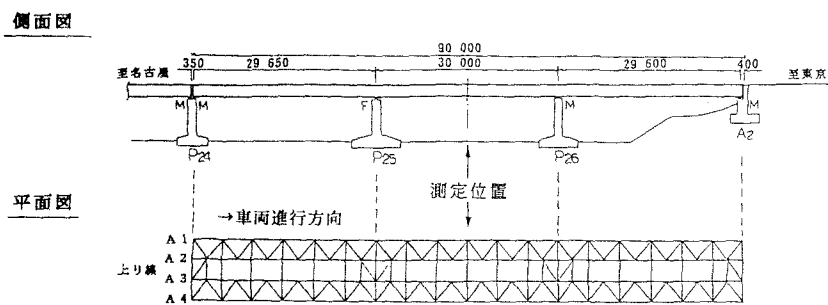
*** 日本道路公団 東京第一管理局 技術部 補修第二課

**** 工博 東京工業大学 工学部 土木工学科 助教授



図－2 T高架橋の測定項目および測定位置

(単位：mm)



図－3 M高架橋の測定項目および測定位置

(単位：mm)

測定の対象とした橋梁は、高速道路の鋼鈑桁橋の中から3主桁橋と4主桁橋を選び、①縦桁補強した3主桁橋、②縦桁補強していない4主桁橋、③縦桁補強した4主桁橋の3ケースで測定した。また、供用中の高速道路では通常の交通を阻害せずに測定することが要求されるため、小型コンピュータと光電スイッチを利用した走行車判別装置を開発し、交通流を乱さずに車両走行状態と対応した橋梁各部の応力変形量を測定することに成功した。

本論文は、この測定で明らかとなった実橋の応力変形挙動を紹介するとともに、疲労亀裂を生じている対傾構接合部の応力状態に影響を及ぼす主桁構造や縦桁増設等の構造特性について検討を加えたものである。

2. 測定を行った橋梁の概要

測定の対象とした橋梁は、3主桁橋のT高架橋および4主桁橋のM高架橋である。これらの橋梁は昭和43年度に供用が開始された。その後床版補強のため、T高架橋で昭和47年度、M高架橋では昭和59年度～昭和60年度にかけて縦桁の増設が行われた。

T高架橋の応力変形測定は、縦桁増設後約13年を経過した状態で実施したものである。これに対し、M高架橋での応力変形測定は、縦桁増設工事の時期にあわせ、縦桁増設前および縦桁増設後の双方の状態について行ったものである。両橋の一般図および測定項目、測定位置を図-2、図-3に示す。縦桁増設工事では、縦桁の死荷重および縦桁を伝わる活荷重を支えるための対傾構部材の増設も行われ、T高架橋では斜材、M高架橋では斜材および下支材が縦桁と共に増設されている。

3. 測定方法

この測定は、対傾構各部の応力や変形を実交通荷重下で捉えようとするものである。そのため、ここでは通常の交通状態の中で、単独車両の通過による各測定

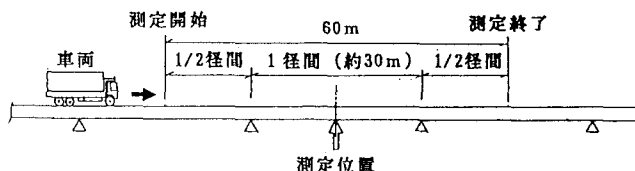


図-4 測定区間

点での応答を車両通過による影響線として求め、その後着目する時点、例えば車両が測定位置直上を通過した時点（一般にこの時に最大値となる）などにあわせて各測定値を取出して整理することとした。測定の対象とした走行状態は、大型車が単独で走行車線あるいは追越車線を通過する時とし、図-4に示すような走行状態の車両を通常の交通状態の中から自動的に検出し、測定区間を車両が通過する間の変化を測定、記録した。走行状態の判別を自動的に行う手段として開発したのが走行車判別装置であり、小型コンピュータを用いてこれらの測定、判定、データ処理の省力化を図ったのがこの測定の特徴である。

測定に用いた装置の構成を図-5に示す。この測定システムでは車両通過位置と応力変形量の分布状態との対応は把握できるが、載荷荷重となる車両重量が不明のため、活荷重の大きさと応力変形量との対応が得られない。従って、これらに関連づけるためには、総重量あるいは輪荷重が既知の車両を通過させて測定を行うなどのキャリブレーションが必要である。本測定では、全測点のうち、各測定項目ごとにキャリブレーションに必要な代表的測点を抽出し、キャリブレーション用として総重量20tonの

車両を走行させての測定を実施した。

同時に測定できる測点数は、動ひずみ計やA/D変換器のチャンネル数によって制限され、全体の測点数がそれより多い場合は、何回かに分けて測定することになる。この場合には全データを同一の荷重条件に揃えてから比較することが必要になるため、測定およびデータ処理は以下に述べるような手順で行った。

- ① 全測点を、一度に測定できる範囲にまとめた数グループに分ける。
- ② 各測点グループ毎に所定車両台数分の測定を行う。
- ③ 各測点グループにおいて基準とする測点を選び、この測点の測定値と他の測点の測定値との関係を、同一荷重状態のもとで求める(例えば単独車両通過時の最大値の比較)。これを測定台数分について統計処理し、各測定値間の関係を定量化する。
- ④ 各測点グループで選んだ基準測点でキャリブレーション用車両(20ton車)を通過させて測定する。
- ⑤ ④で測定した基準測点での測定値と③で求めた基準測点と他の測点間の測定値との関係から、全測点について所定荷重の車両通過時の測定値を算出する(20ton車換算値)。

これら一連の測定およびデータ処理の手順を図-6にまとめて示す。

本論文での応力・変形量の測定値は、特にことわりのない限り、20ton車通過時の最大値に換算した値を用いている。

4. 測定結果

4.1 主桁間の荷重分配

活荷重は床版を介して主桁に伝わり、さらに対傾構を通して他の主桁に伝えられる。この床版と対傾構の剛性により荷重を分散させることになるが、その荷重分配の結果は主桁のたわみや応力で概略知ることができる。また、床版補強の目的で設置された縦桁および他の部材の増設によっても荷重の分配状況は異なってくるため、縦桁増設の前後において、主桁の応力や床版あるい

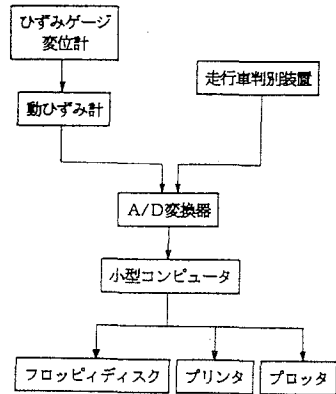


図-5 測定装置の構成

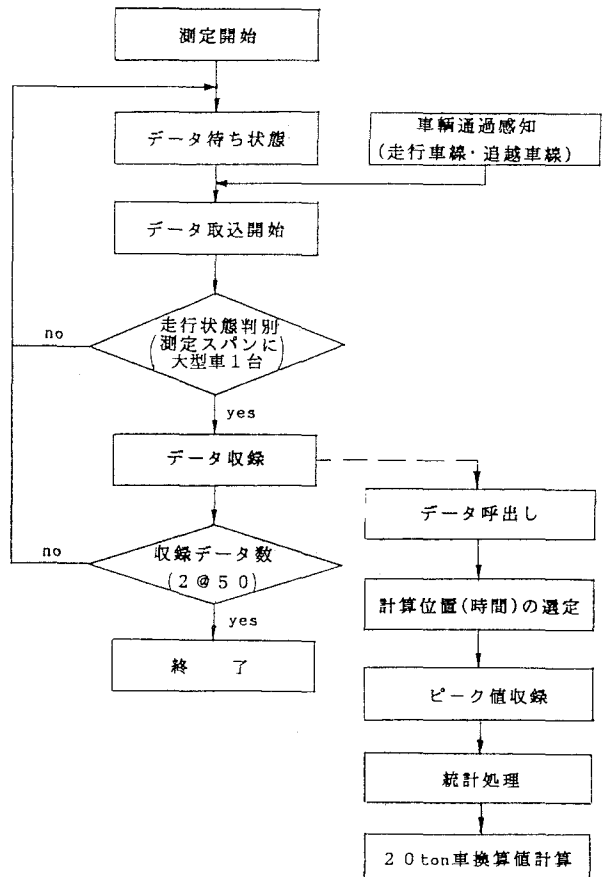
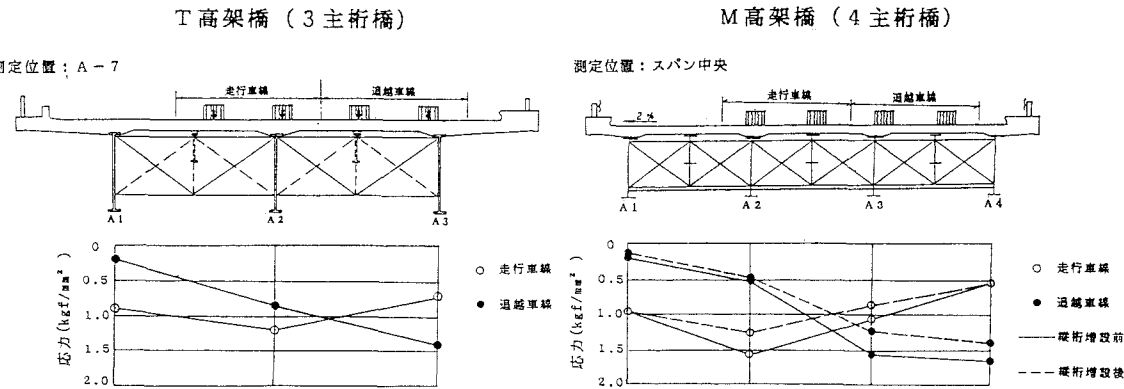


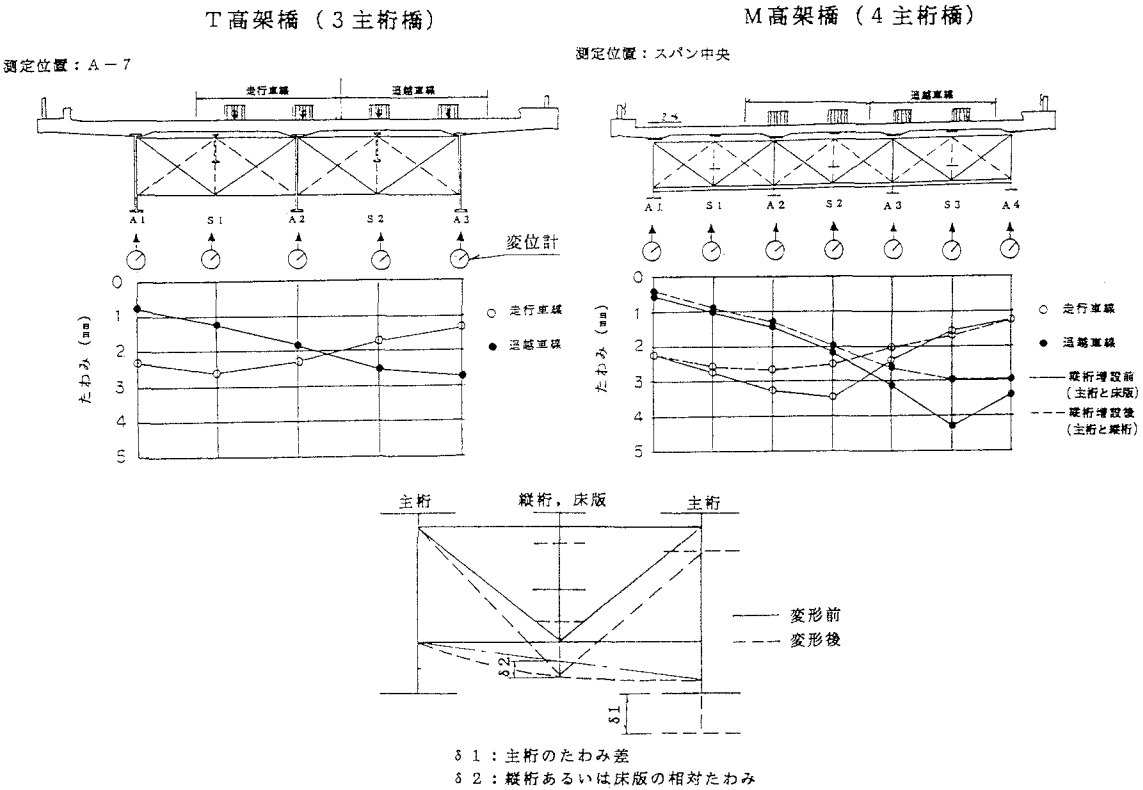
図-6 測定およびデータ処理の手順

は縦桁と主桁のたわみを測定し、その変化を見た。なお、主桁の応力は下フランジで橋軸方向に測定し、桁のたわみは下フランジ下面の変位を測定した。

3主桁橋と4主桁橋の主桁の応力測定結果を図－7に、主桁および床版、縦桁のたわみ測定結果を図－8に示す。図－8に、主桁に対する床版あるいは縦桁の相対たわみの定義を併せて示しておく。



図－7 主桁の応力（20ton車通過時）



図－8 主桁、縦桁、床版のたわみ（20ton車通過時）

測定結果をまとめると以下のとおりである。

- ① 主桁下フランジの応力は、輪荷重下に近い主桁で大きく、4主桁橋では最大で 1.6 kgf/mm^2 程度であるが、縦桁増設後は全体的に2割ほど低減する。その結果、4主桁橋の縦桁増設後の応力は縦桁増設している3主桁橋とほぼ等しい値となる。
- ② 主桁のたわみ分布曲線も主桁の応力分布曲線と同様の傾向を示す。4主桁橋の主桁のたわみは最大 3.5 mm 程度であるが、これも縦桁の増設後は2割ほど低減し、縦桁増設している3主桁橋とほぼ等しい。
- ③ 縦桁増設前の4主桁橋の床版の相対たわみは、最大で約 1 mm であるが、縦桁増設により、その $1/4$ 程度にまで抑えられる。

4.2 対傾構の部材力

対傾構各部材に貼付した数枚のゲージから車両通過時のひずみを測定し、部材力を算出した。その結果を、引張力の働いている部材を実線、圧縮力の部材を破線で表し、走行位置別に図-9に示す。主な特徴は以下のとおりである。

- ① 斜材に大きな部材力が見られ、中には車両の通過車線の違いにより応力の交番する部材もある。
- ② 上支材の部材力は一般に小さい。これは床版の剛性が影響しているものと思われる。
- ③ 輪荷重直下に位置する下支材に比較的大きな軸力が生じる傾向にある。
- ④ 4主桁橋では縦桁増設により、一部の部材を除いてほとんどの部材の軸力が減少する。縦桁増設前に大きな部材力を生じていた斜材の軸力は、縦桁増設後には3~5割減少する。中には軸力の増加する斜材(縦桁増設前の部材⑦(走行車線)と⑨(追越車線))もあり、全体として縦桁等の増設による荷重の再配分の傾向が見られる。

4.3 スティフナ上端部の応力分布

疲労亀裂を生じているスティフナ上端の溶接部近傍における、活荷重作用時の応力分布を知るため、主桁上フランジあるいはウェブから約 15 mm 離れた数点を選びスティフナ両面の主応力を測定した。4主桁橋および3主桁橋における主応力測定結果を図-10、図-11に示す。図中のG1~G4、G1~G6の記号は斜材と上支材が取付けられているスティフナ上端部の位置を示す。また、図中の実線の矢印は α 面(表側)、破線の矢印は β 面(裏側、対傾構払入側)の主応力の大きさを示す。なお、参考までにスティフナのサイズは、3主桁橋が板幅 $110\times$ 厚さ $8(\text{mm})$ 、4主桁橋は $150\times 9(\text{mm})$ である。

これらの測定結果から、スティフナ上端部の応力分布に関し、次のような点が明らかとなった。

- ① 主応力の方向は、外端部(スカーラップと反対側の端部)を除き、対傾構の斜材方向に引張、これと直角方向には圧縮の2軸応力状態である。
- ② 一般に、外端部の応力が大きい。この部分の最大主応力の方向はスカーラップ側の主応力に比べて鉛直方向に近い傾向にある。また、板の両面の主応力の符合が異なっているため、この外端部では面外曲げを生じているものと思われる。主応力の値は、ガセットが接合されている面の裏側の面(β 面)で大きな応力値となっている。
- ③ 車両の走行する車線が異なると、主応力の符号が交番する接合部が存在する。これは、その部分へ接合される対傾構斜材の軸力が交番する現象と一致する。3主桁橋ではG2、G3で交番し、その全振幅は最大 8 kgf/mm^2 程度である。4主桁橋ではG4、G5で交番し、全振幅は縦桁増設前は最大 18 kgf/mm^2 にも達するが、縦桁増設後は半分以下の 8 kgf/mm^2 程度にまで減少する。この結果は縦桁増設による床版のたわみ低減と密接な関係にあるものと思われる。

T 高架橋 (3 主桁橋)

M 高架橋 (4 主桁橋)

--- : 圧縮部材
— : 引張り部材

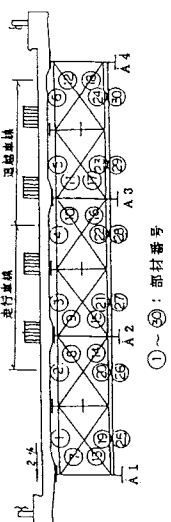
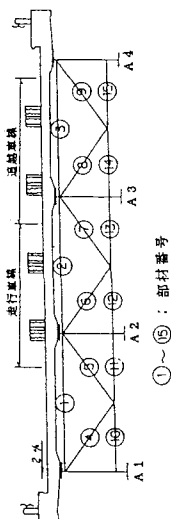
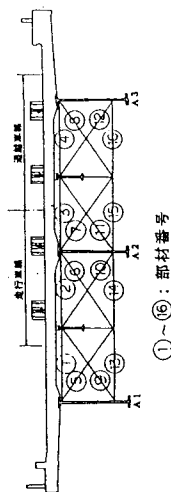
縦桁増設前

縦桁増設後

測定位置 : A-7 (単位 : ton)

測定位置 : スパン中央

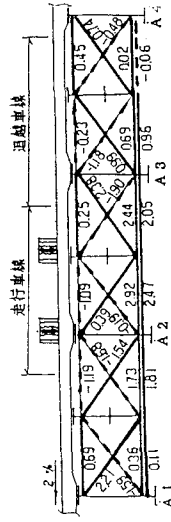
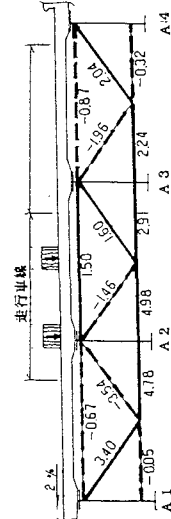
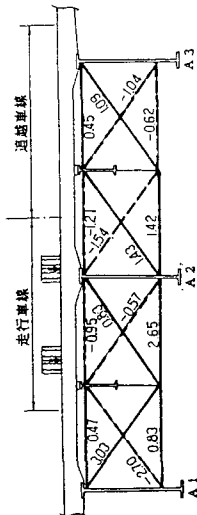
測定位置 : スパン中央



走行位置 : 走行車線

走行位置 : 走行車線

走行位置 : 走行車線



走行位置 : 追越車線

走行位置 : 追越車線

走行位置 : 追越車線

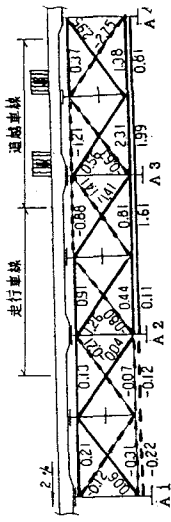
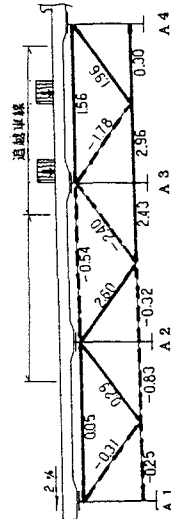
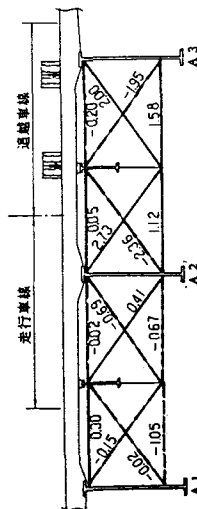
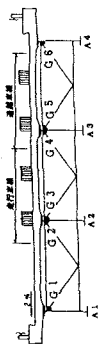


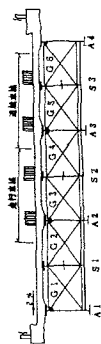
図-9 対傾橋の部材力 (20 ton車換算)

測定位置：スパン中央

縦桁増設前



縦桁増設後



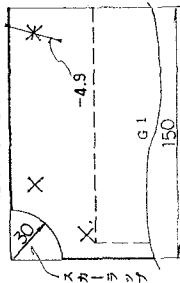
→ $+3 \text{ kg/mm}^2$ } 上面 (表側)

→ $+3 \text{ kg/mm}^2$ } 下面 (裏側, 対称部分省略)

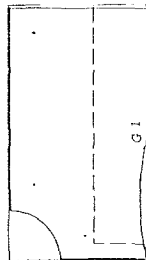
(単位: kgf/cm^2)

縦桁増設後

走行位置：走行車線

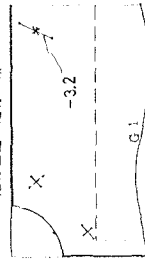


走行位置：追越車線



縦桁増設後

走行位置：走行車線



走行位置：追越車線

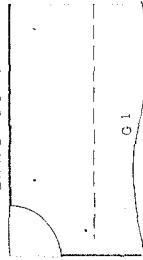


図 10 M高架橋 (4主桁橋) 主応力測定結果 (20 ton車換算)

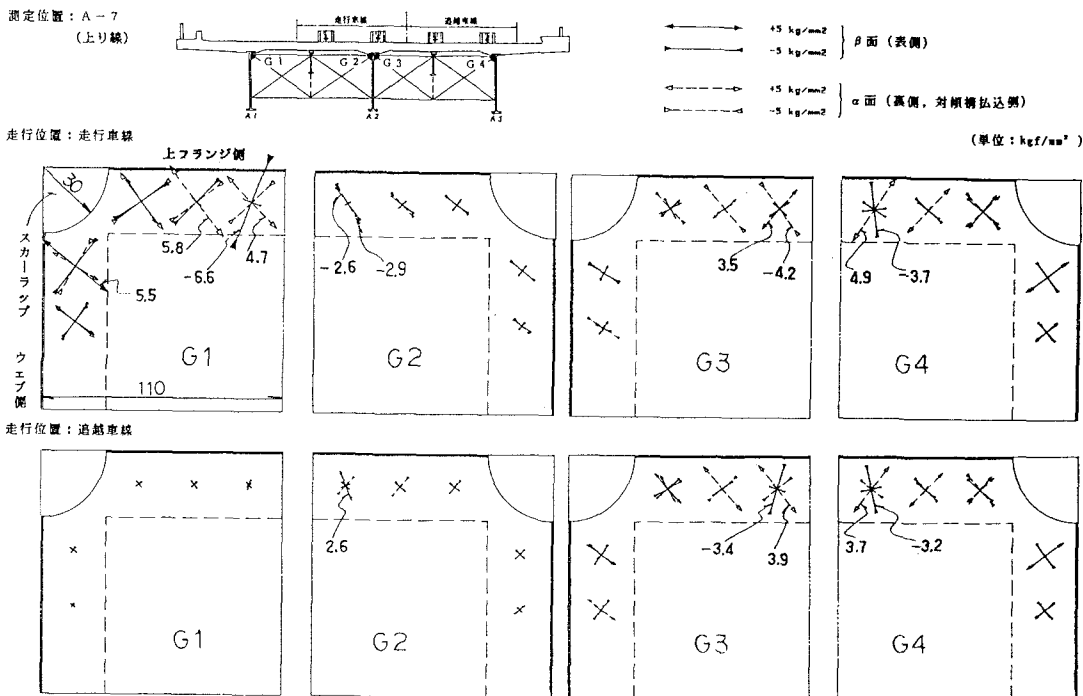


図-11 T高架橋(3主桁橋)主応力測定結果(20ton車換算)

前記③に関連し、斜材軸力と主応力との関係を知るために斜材の軸力を横軸に、スカーラップ横の斜材方向の主応力を縦軸にとり、3主桁橋と4主桁橋で両者の関係を調べたのが図-12である。

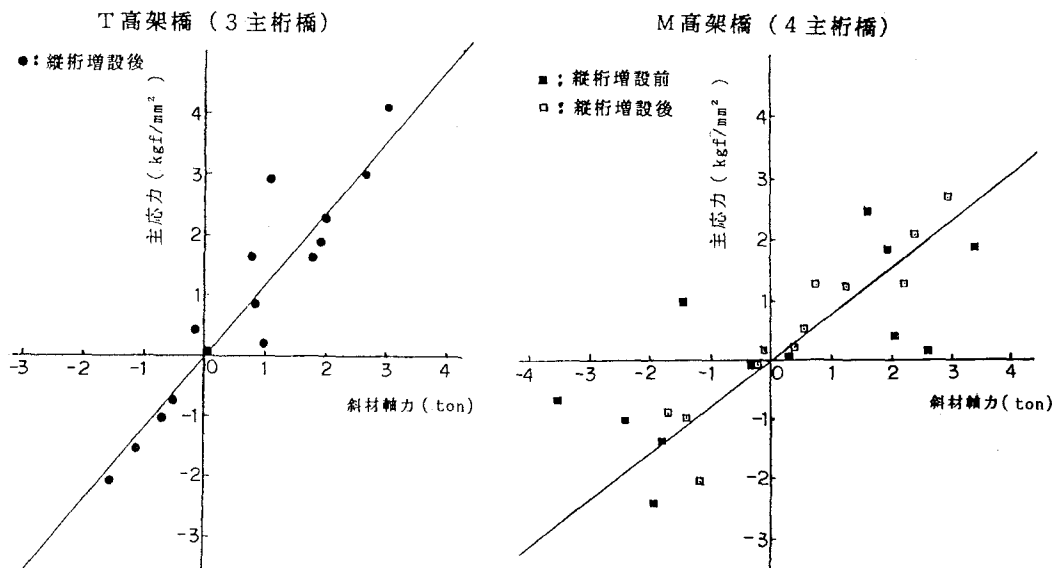


図-12 軸力と主応力の関係(20ton車換算)

3主桁橋(縦桁増設済)と縦桁増設後の4主桁橋では、これらの間に良い相関が認められるが、4主桁橋の縦桁増設前はややばらつきが多い。従って前者の場合は、スティフナ上端部の応力状態に対して斜材の軸力が支配的と思われるが、後者の縦桁増設前の場合には、さらにその他の要因、例えばたわみを抑える縦桁がないため、床版のたわみに伴って主桁上フランジに角折れが生じ、その影響で上フランジに接するスティフナ上端部が複雑な応力状態となることなどが考えられる。また、斜材軸力とスティフナ上端部の主応力の関係を示す直線の傾きは、3主桁橋と4主桁橋で差が認められる。これはスティフナの断面寸法が3主桁橋で $8 \times 110\text{mm}$ 、4主桁橋で $9 \times 150\text{mm}$ と異なり、4主桁橋の断面積が大きい分、測定される鋼材表面のひずみが小さくなることも一因と思われる。

5. 考 察

5.1 3主桁と4主桁での相違

これまで述べてきたように鋼鈑桁橋の応力変形挙動は、3主桁橋と4主桁橋で多少異なり、その主な点を以下に挙げる。

(1) 主桁間の荷重分配

活荷重は主桁、対傾構、縦桁、床版等の剛性により各主桁に分配される。その結果は前述したように、主桁の応力やたわみで窮うことができる。縦桁補強され、支間長のほぼ等しい3主桁橋と4主桁橋の主桁の応力とたわみを図-7、図-8で比較すると、全体的な荷重分配作用には大差がないようである。

(2) スティフナ上端部の応力分布

4.3項で述べたように、縦桁補強した3主桁橋と4主桁橋を比較した場合、スティフナ上端部の応力分布はほぼ等しいが、応力の大きさは3主桁橋の方が若干大きい。これは、両橋の亀裂損傷の程度を比較すると、3主桁橋の方がかなり進んでいる事実とも合致する。この応力の大きさを対傾構の斜材軸力との関係で捉えた時、3主桁橋の方が同じ斜材軸力でも大きな応力を生じるようである。しかし、これは主桁本数の差ではなく、スティフナの寸法の差によるものと推察される。

5.2 縦桁増設の影響

供用開始後数年を経て、RC床版には多くの亀裂が見られるようになった。この床版を補強する目的で、高速道路のほとんどの鋼鈑桁橋では縦桁が増設されている。幸いにも我々は4主桁橋の縦桁増設工事の前後において応力変形挙動を実測する機会を得た。その結果、同一荷重下の応力変形特性として、縦桁増設の効果とも言うべき次のような事実を知ることができた。

- ① 主桁間中央の床版の相対たわみは、縦桁増設により約 $1/4$ に低減する。
- ② 主桁の応力およびたわみは、全体的に約2割減少する。
- ③ スティフナ外端部の大きな圧縮応力は、約半分にまで減少する。

以上のことから、縦桁補強は床版のたわみを抑制するのみならず、亀裂損傷部付近に生じる局部応力を減少させる効果があると言えよう。

6. あ と が き

実橋での応力変形測定により、スティフナ上端部の疲労損傷部付近に生じている応力分布の傾向と、これらの応力分布に影響を及ぼす対傾構による荷重分配作用、さらに縦桁増設による各種挙動の変化を明らかにすることができた。今後は、この測定結果をもとに計算による解析手法を確立し、他の橋梁や橋梁構造が変化した場合の解析に役立てる必要がある。また、疲労損傷に対しては、損傷の発生位置や程度との関連および発生応力の頻度に関するデータを加味し検討を進める必要があろう。現在、これらについての検討も実施中である。

参考文献

- 1) 三木：米国における道路橋の破壊と保守，道路，1983-11
- 2) 西川：プレートガーダー橋の疲労損傷例，道路，1985-7
- 3) 竹之内，谷倉，古川，三木：実交通荷重による橋梁の応力および変形の測定方法，構造工学論文集，vol.32A，1986-3

(1986年10月17日受付)