

実交通荷重による橋梁の応力および変形の測定方法

STRESS MEASUREMENT OF HIGHWAY BRIDGES UNDER ACTUAL TRAFFIC LOAD

竹之内博行^{*} 谷倉 泉^{**} 古川正巳^{***} 三木千寿^{****}

By Hiroyuki TAKENOUCHI, Izumi TANIKURA, Masami FURUKAWA and Chitoshi MIKI

Method of stress measurement of highway bridges without disturbing their ordinary traffic flow was studied. In order to analyze the relation between the measured stress and the traffic load, conditions of passing vehicles such as the lane, speed, size and weight must be measured at the same time. We have developed a new vehicle detector for bridge stress measurement utilizing photoelectric sensors. This report explains the basic idea and applications of this vehicle detector by showing examples of actual measurements.

1. ま え が き

供用開始後ある程度の年数を経ている高速道路の橋梁の中には、種々の損傷が見られるようになってきたものも多い。その中には、鋼材の溶接部などに生じている疲労亀裂のように、交通荷重による繰返し応力が原因と思われる損傷も発見されており、その対応が急がれている。この様な疲労亀裂に対して、亀裂の発生原因を解明して適切な補修対策を見出すためには、対象とする橋梁が実際の交通荷重下でどのような応力変形挙動を示しているのかを把握することが第一であり、実橋での測定が必要となる。

実橋で行われる測定は、その目的から次の2種類に分けることができる。まず第一は、橋梁の構造特性を把握するための測定で、車両の載荷位置やその大きさと、それによって生じる橋梁各部の応力や変形との関係を捉えるものである。第二は、疲労寿命の推定などの疲労解析に必要な実交通荷重による応力変動状況を把握するための測定で、着目点の応力変化を通常の供用状態で一定期間連続的に測定し、応力頻度分析などを行うものである。この測定では、通常の交通状態での応力変形性状を得ることが重要であり、測定により交通に乱れを生じさせることは絶対に避けなければならない。

第一の測定の場合は、これまで一般には交通を一時遮断して、所定位置に所定荷重を載荷する静的載荷試験が実施されてきた。しかし高速道路のように、極力通常の交通を阻害することなく測定することが要求されている場合には、通常の交通状態のままで、静的載荷試験と同等もしくはそれ以上の測定が

* (社)日本建設機械化協会 建設機械化研究所 試験部 研究員

** 工修 (社)日本建設機械化協会 建設機械化研究所 研究部

*** 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 土木工学課 助教授

可能なシステムが必要となる。その場合、通常の通過車両を載荷荷重として、車両通過時の橋梁各部の応力や変形を動的に測定するとともに、通過車両の走行車線、車両の大きさ、他の車両との間隔など、載荷荷重とした通過車両の走行状態を的確に判別することが要求される。

第二の測定を行う場合にも、着目している点の応力変化と同時にそれを生じさせている車両の走行状態が記録されていれば、応力頻度分布のみならず補修方法などを考える上で有効な各種のデータを得ることができる。このように実交通荷重による橋梁の応力および変形の測定を行うためには、通過車両の走行状態を検知する装置が不可欠となる。しかし、従来道路管理用の目的で用いられている車両検知装置は大規模であり、ここで行おうとしているような現場測定への適用は非常に難しい。

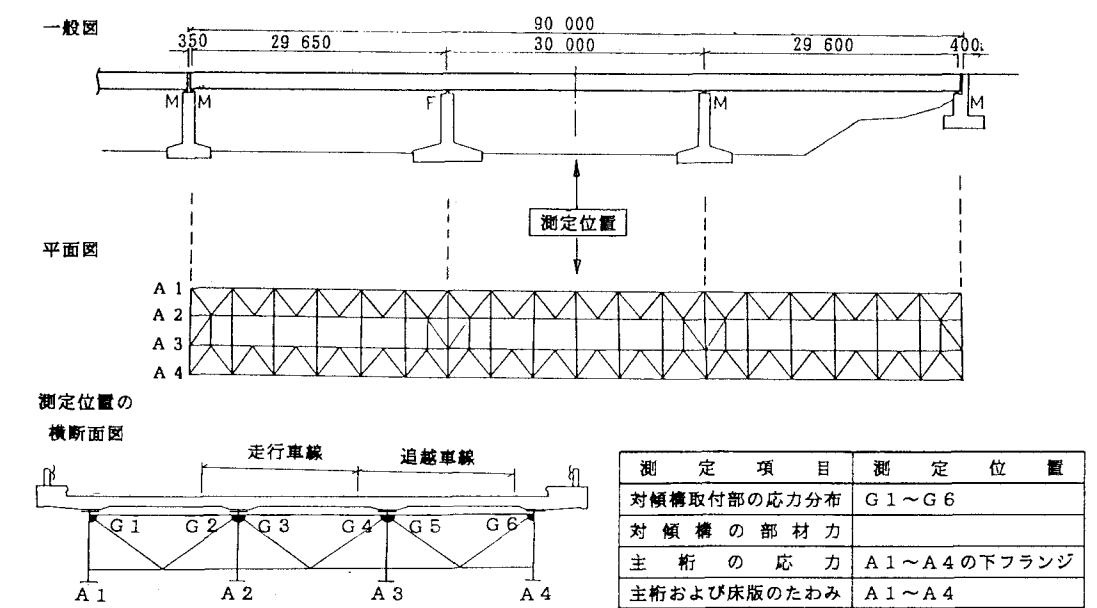
この論文は、実際に高速道路の橋梁において、実交通荷重による応力変形測定を実施した中で、新たに開発した現場測定用の簡便な走行車判別装置を紹介し、その測定および解析方法への適用方法を実施例を通して示したものである。

2. 測定計画と装置の構成

ここでは、走行車判別装置を必要とし、開発のきっかけとなった測定計画の概要を説明する。後述する測定結果の例は、この計画によるものである。

測定の対象は図－１に示すような２車線の連続鋼钣桁橋である。この橋梁の鋼材溶接部に生じた疲労亀裂の発生原因解明と適切な補修対策を見出すための基礎資料を得ることを目的として、図中に示した位置で応力および変形を測定した。この測定においては、通常交通を阻害しないで行うことが前提となっている。測定は、まえがきで述べたように、橋梁の構造特性を把握するための測定と着目点における応力の変動状況を把握するための測定の２種類を行ったが、この論文では前者を条件測定、後者を連続測定と呼ぶこととする。

条件測定の目的は、交通を遮断して行う静的載荷試験と同じである。この測定では、通常交通状態



図－１ 測定内容および測定位置

の中で、単独車両の通過による各測定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。

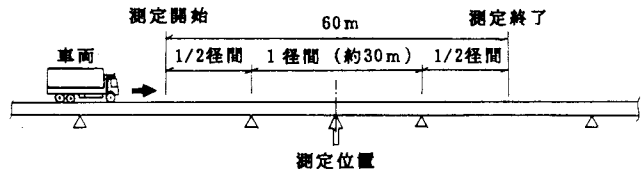


図-2 条件測定での測定区間

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、小型車および2台以上の車が、前後30m以下の間隔で連続して通過する場合（車線が異なる場合も含む）は測定しないものとした。なお、これらの条件は対象とする橋梁の型式や支間、あるいは測定目的などにより変更して設定できるものである。以上の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、その時にだけ図-2に示す測定区間を車両が通過する間の変化を測定し、記録する。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およびデータ解析の省力

化（測定チャンネル数の増大防止対策も含む）を図ったのが、この条件測定の特徴である。

連続測定は、疲労亀裂の発生に特に関連が大きいと思われる測定点について、24時間以上、連続的に測定を行うもので、測定データと同時に走行車判別装置からの信号も記録する。測定終了後に応力頻度分布や特に大きい値が測定された時の走行状態の分析などを行う。

これらの測定を行うために用いた装置の構成を図-3に示す。

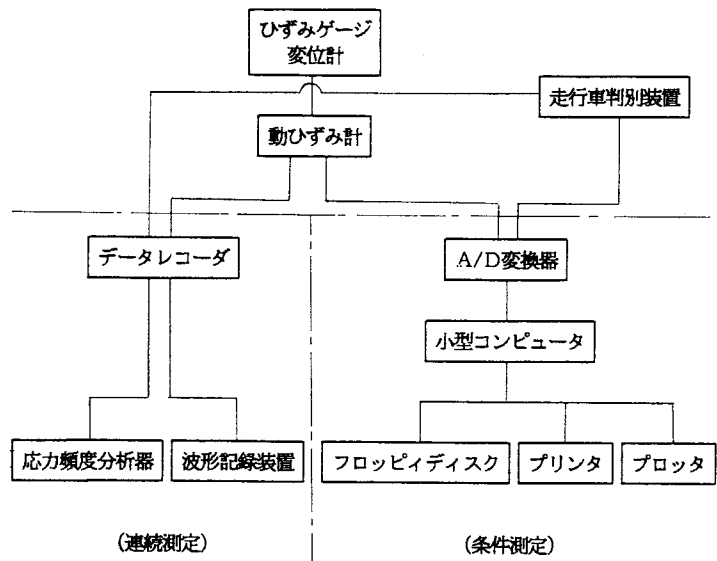


図-3 測定装置の構成

3. 走行車判別装置

3.1 現場測定用の走行車判別装置の条件

前章で説明したような測定に必要な走行車判別装置の条件を、機能および構造のそれぞれについてまとめると次のようになる。

（機能上の条件）

- ① 車両の通過時点が検出できる。
- ② 車線の区別ができる。
- ③ 車両の長さが検出できる。
- ④ 車両間隔が検出できる。

⑤ 走行速度が検出できる。

(構造上の条件)

- ① 測定対象のあらゆる橋梁に対して設置が可能である。
- ② 設置工事で特に交通規制などを必要としない。
- ③ 装置の存在が運転者に影響を及ぼすなど、通常の交通流を乱さない。
- ④ 取扱いが容易である。

車両の通過や車線を判別するために用いられている従来の装置としては、ループコイル埋設式車両検知器や超音波パルス反射式車両検知器などがあり、主に道路管理上の目的で使用されている。ループコイル埋設式車両検知器は、図-4に示すように、各車線の所定位置に舗装を

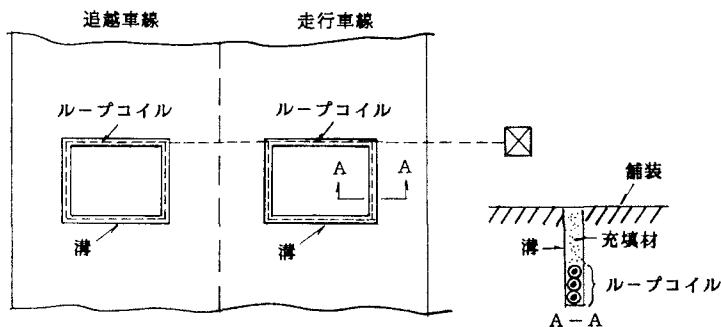


図-4 ループコイル埋設式車両検知器

所定の深まで切削して平面4角形の溝を設け、その溝内にループコイルを収容したもので、金属物通過時のインダクタンス変化により車両通過を検出するものである。また、超音波パルス反射式車両検知器は、図-5に示すように、支柱および支持梁を用いて超音波送受波ヘッドを各車線の上方に設置し、路面に向って超音波パルスを周期的に

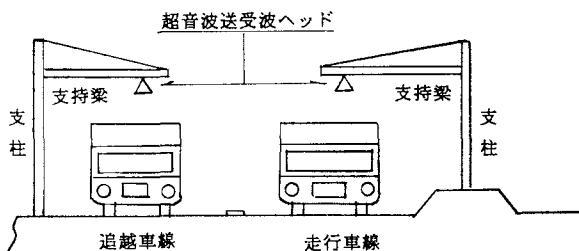


図-5 超音波パルス反射式車両検知器

輻射し、その反射波の時間差を

検知する事により、車両通過を検出するものである。これらの装置はいずれも前述の機能上の条件は満足できるものの、構造上の条件、特に設置工事が大規模となる点で問題があり、現場測定用の走行車判別装置としては不適當である。

3.2 光電スイッチを用いた走行車判別装置の構成と作動原理

ここで開発した走行車判別装置は、複数車線をまたいで3組の光電スイッチを配置し、それらの受光遮断順序などを判別することにより走行車の判別を行うものである。使用している光電スイッチは市販の透過型光電スイッチ(検出距離30m)で特に新しいものではないが、その配置により、走行車の判別を可能にしたことがこの装置の特徴である。図-6に光電スイッチの配置を示す。光電スイッチは発光器と受光器で構成され、光路A, B, Cを形成する発光器A, B, Cと受光器A, B, Cにより光電スイッチA, B, Cが構成されている。それぞれの光電スイッチからは、図-7に示す様に、受光時と受光遮断時で異なる電圧が出力される。

発光器および受光器は、車両の通過により光路が遮断される高さに、ガードレールなどを利用して簡単に設置する。光電スイッチAおよび光電スイッチBは、前出図-2に示す測定開始位置で、互いの光路が隣り合う車線の境界でX字状に交差するように配置する。光電スイッチCは、測定位置の直上で、

光路が走行方向と直角になるように設置する。

光電スイッチAおよび光電スイッチBにより測定開始位置を車両が通過するのを検出すると同時に、A、B 2つの光路を遮断する順序を判別すれば、その車両が何れの車線を通過したかを容易に判定することができる。すなわち図-8のようにA→Bの順で遮断した時は走行車線、図-9のようにB→Aの順で遮断した時は追越車線と判定される。

また光電スイッチCは、車両が測定位置直上を通過するのを検出するとともに、車両の走行速度が一定という条件のもとで、光電スイッチAあるいはBとの組合せで走行速度を、さらには、光路Cの遮断時間と走行速度から車両の長さを検出することができる。

装置の構成は前出図-3の通りである。この測定システムは、車両の通過によって変動する各測定信号を、多チャンネル高速A/D変換器によりデジタル化し、時系列数値データとしてコンピュータに取り込み、走行状態を判定して目的とする走行状態での測定結果だけを外部記憶装置に記録するものである。走行状態の判定は、デジタル信号に変換された各光電スイッチの出力をコンピュータにより逐時比較して行う。

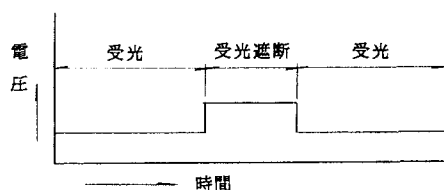
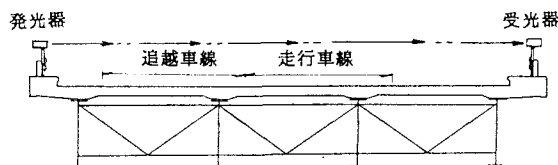


図-7 光電スイッチの出力電圧

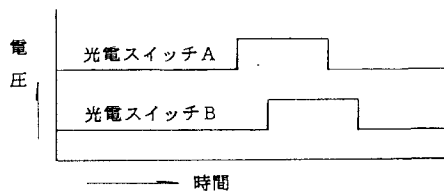
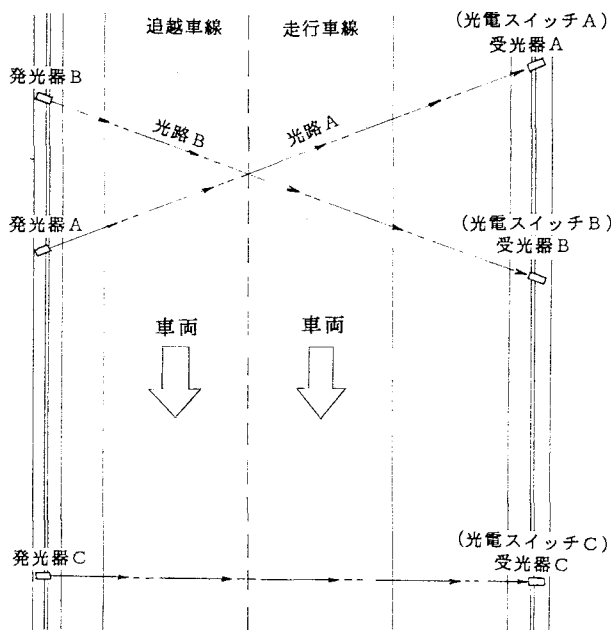


図-8 走行車線通過時の出力

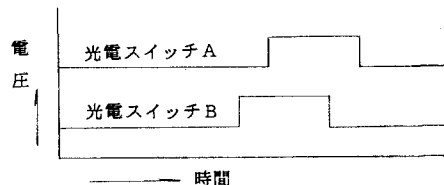


図-9 追越車線通過時の出力

図-6 光電スイッチの配置

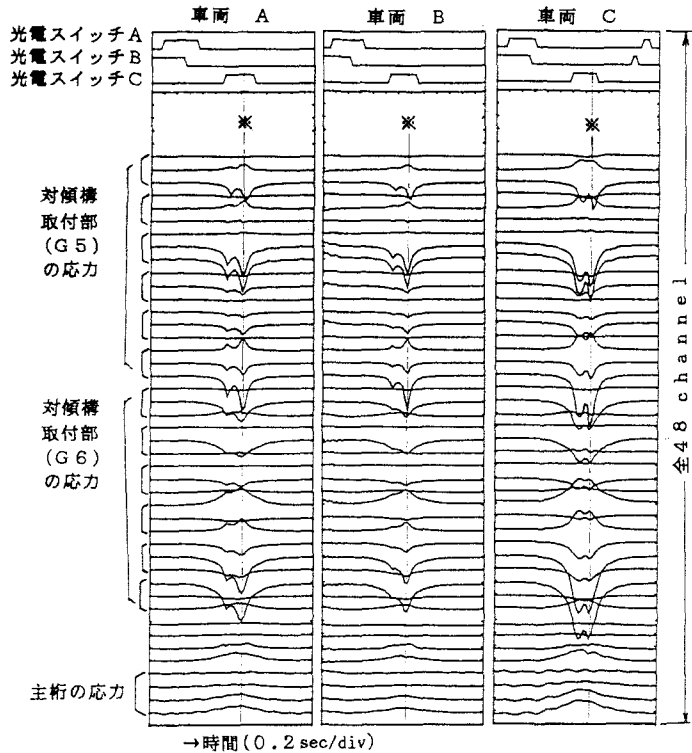
4. 走行車判別装置を使用した測定例

4.1 条件測定での測定例

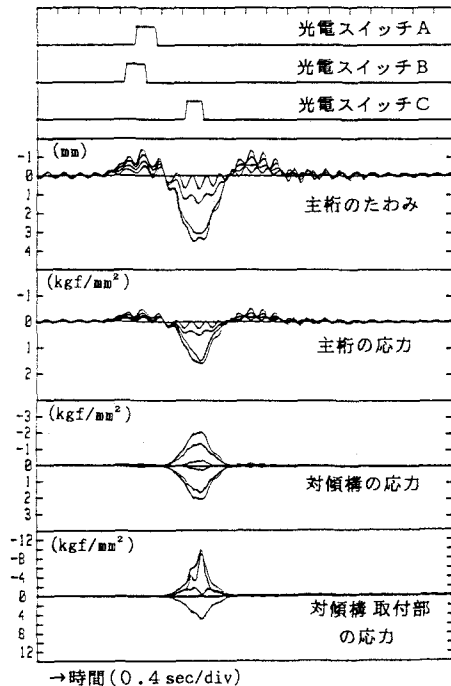
図－10は図－1に示した測定内容のうち、G5およびG6の対傾構取付け部の応力を測定した場合で、大型車が単独で追越車線を通じた時の測定例である。光電スイッチの波形から、測定開始位置の追越車線に車両が進入した瞬間から測定が開始され、その車両の前後30m程度の間には他の車両がないことが確認できる。測定応力の波形を光電スイッチCの波形と対比させると、どの応力も車両が測定位置直上を通過する時に大きな変化を示し、その中でも前後輪それぞれの通過時にピークが生じているのがわかる。図中※印で示したのは最大値が生じている時点で、後輪通過時と一致している。また、主桁の応力のように前後輪それぞれの影響は明確に現れないものもある。

これらのデータから、たとえば図中※印で示したようなある一時点でのデータを抽出して整理すれば、その時点、あるいはその載荷状態での応力分布状態などが把握できる。実際の測定では車線内での走行位置のばらつき、車の種類、積荷の状態などで測定応力波形の傾向が多少異なることも考慮して、図－10のようなデータを各条件とも50データ程度収録し、統計処理を行う。なお、この測定システムを用いれば、判定条件をコンピュータのプログラムに組込んで実行させるだけで、昼夜を問わず無人状態で所定の走行状態を検出し、例に示したような測定データを必要なだけ収録することができる。

これまで説明した測定では、車両の位置と応力変形の分布状態との対応は把握できるが、載荷荷重としている車両の重量が不明のため、荷重の大きさと応力変形の大きさ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



図－10 条件測定での測定例



図－11 荷重車によるキャリブレーション

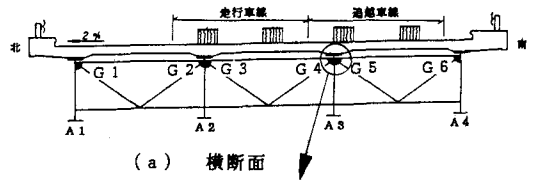
重が既知の車両を通過させて測定を行うなどのキャリブレーションが必要になる。図-11にキャリブレーション用に実施した測定例を示す。この測定では、全体の測定点のうち、各測定項目ごとにキャリブレーションに必要な代表的な測点を抽出し、荷重車として総重量20tonの車両を用いた。

同時に測定できる測点数は、主に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条件にそろえてから比較することが必要になるため、以下に述べるような手順で測定およびデータ処理を行った。

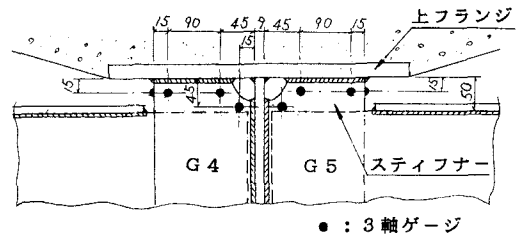
- ① 全測点を、一度に測定できる範囲内の数グループに分ける。
- ② 各測点グループ毎に所要車両台数分の測定を行う。
- ③ 各測点グループにおいて基準とする測点を選び、この測点の測定値と他の測点の測定値との関係を、同一荷重状態のもとで比較して求める(例えば単独車両通過時の最大値の比較)。これを測定台数分について統計処理し、各測定値間の関係を定量化する。
- ④ 各測点グループで選んだ基準測点全点についての応力測定を、キャリブレーション用車両(20ton車)通過時に行う。
- ⑤ ④で測定した基準測点での測定値と③で求めた基準測点と他の測点間の測定値との関係から、全測点について所定荷重の車両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

以上のようにして求めた主応力測定結果の1例を図-12に示す。同図(a)は主応力の測定を行った橋梁の横断面を、(b)はその横断面の中のG4とG5という記号で表した対傾構取付け部の詳細を、(c)は20ton車通過時に換算した主応力の分布を表している。(c)では、車両の通行位置の違いにより、スティフナー端部での主応力が交番する様子などがうかがえる。

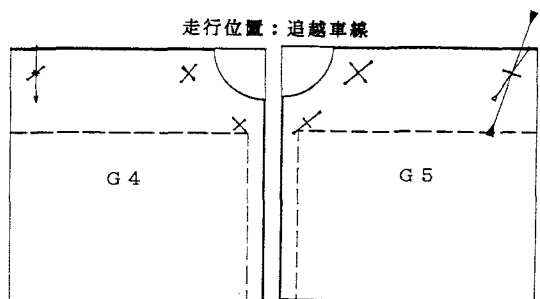
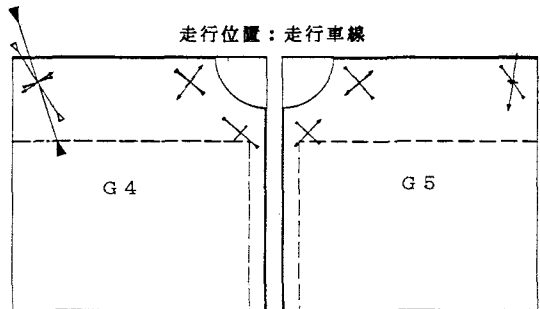
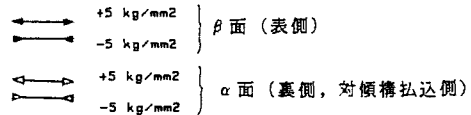
対傾構部材の軸力、主桁のたわみなどについても主応力の場合と同様に統計処理により20ton車換算値を求めている。



(a) 横断面



(b) 対傾構取付け部詳細



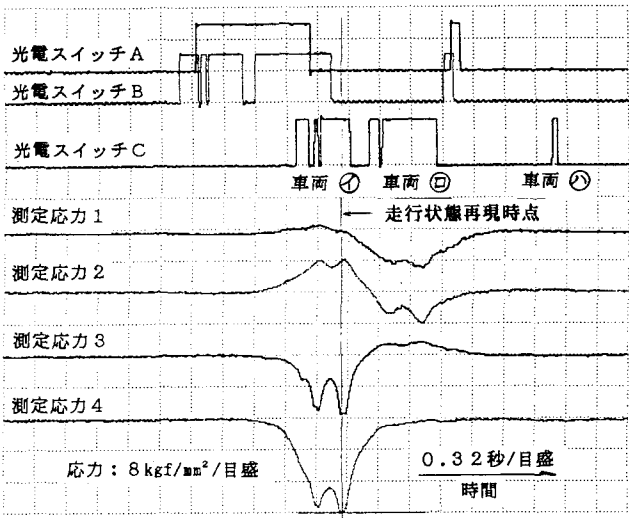
(c) 主応力の分布

図-12 主応力測定結果の一例(20ton換算)

4.2 連続測定での測定例

装置の構成は前出図－3の通りで、各光電スイッチの出力電圧は、測定データとともにデータレコーダにより磁気テープに記録される。図－13に、磁気テープに記録された信号の一部を再生して記録紙に描き、各光電スイッチの出力波形から、図中一点鎖線で示した時点での走行状態を再現したものとする。この例では、①、②、③と付記した3台の車両の走行状態と、それによる4箇所の対傾構付付け部の応力の変化が示されている。これにより、応力1は走行車線の車両で、応力3および4は追越車線の車両で大きな変化を示すこと、応力2は車線によって変化の方向が変ること、また、③の小型車では応力変化がほとんど現れないこと、などが読取れる。このように走行車判別装置を用いた連続測定を行うことにより、着目する点で特に大きな応力が生じる時の走行状態を見出すことなど、実際に橋梁各部に生じている応力と走行状態との関係を分析することができる。

本測定方法では、複数の車両が同一スピードで、全く重なって走行している場合、単独車両が走行車線と追越車線の中央を走行している場合、および渋滞時のように通行車両の流れが不規則な場合などには、判定が困難となる。しかし、高速幹線道路のように通行車両がほぼ一定の速さで流れているような路線では、実用上ほとんど問題はない。



図－13 連続測定での測定例

5. あ と が き

一時的にでも供用を中止すれば、各方面に多大な影響を及ぼす幹線的高速道路などでは、維持管理のための現状調査や測定、さらに程度によっては補修工事までもが供用状態のままで行うことが要求される。今回行った測定もこのような状況の中で行われたもので、交通を遮断して行う静的載荷試験に代わる測定として検討が始められた。その結果、光電スイッチを用いた走行車判別装置が開発され、小型コンピュータとの組合せで、橋梁を生きたままの状態で効率良く測定するシステムが出来上がった。また、道路橋の疲労現象を解明するためには、通常の供用状態で各部に生じる応力を知る必要があるが、この簡便な走行車判別装置を用いることにより、橋梁上を通過していく車両の走行状態と橋梁各部に生じる現象とが容易に対応付けられるようになった。

参 考 文 献

- 1) 交通量計測装置設置・運用要領 日本道路公団 昭和54年9月
- 2) 西川和廣：道路橋における疲労問題と補修・補強、橋梁と基礎、1983-8
- 3) 西川和廣：プレートガーダ橋の疲労損傷例、道路、1985-7

(1985年10月18日受付)