

鋼桁のせん断ひずみ成分の測定による輪荷重効果の推定法

WHEEL LOAD EFFECT ESTIMATION ON STEEL GIRDER BRIDGE BY SHEAR STRAIN MEASURING

城戸隆良*、近田康夫**、小堀為雄***

By Takayoshi KIDO*, Yasuo CHIKATA** and Tameo KOBORI***

This paper deals with the shear strain measuring, unfamiliar item in measuring dynamic response of a steel girder bridge. The aim of this research is establishing the measuring procedure of shear effect which is caused by wheel loads of a large vehicle.

The shear strain is measured as ε_{45° on the neutral axis of steel girder at the center of span. Analysing the record of ε_{45° by a large vehicle passage, discontinuity appears by passing over the measuring point. So, after calibrating using a test vehicle load, wheel load can be estimated by measuring the amount of discontinuity of the record.

Through the numerical simulation and the actual measuring, the presented procedure is basically a convenient and useful in wheel load measuring, although some restrictions are exist in applying the procedure.

1. まえがき

既設道路橋の応答特性を実測の立場からとらえるには、一般に曲げひずみ、たわみ、および加速度の測定によりとらえる場合が多い。たとえば、一般交通で大型車が単独走行する場合における鋼桁橋の動的たわみ応答の特徴については一部報告してきた¹⁾。本研究では、実交通状態をあまりさまたげないような桁橋の応答特性調査法の検討を進め、従来あまり着目されていない鋼桁のせん断ひずみ成分の測定法について基本的な方法をまとめるものである。なぜならば、近年、活荷重の特性、実態をとらえることが重要な課題のひとつとなっており、自動車交通流の実態（たとえば、車種混入率、交通量、車輪の通行位置分布、輪荷重の大きさ、車種の判別、車軸間隔、車両重量、車頭間隔など）を計測する方法の開発^{2), 3)}が必要となっている。そして、疲労問題の検討のための輪荷重、桁への輪荷重効果（桁へ作用する輪荷重による作用力の効果）や応力頻度などを得る計測法^{4), 5), 6)}も必要と思われるからである。

すなわち、道路橋の適切な維持管理や活荷重の検討などの基礎資料を得るための実態調査法を開発することは重要な事柄である。

本研究では輪荷重効果に着目し、鋼桁へ作用する作用力の効果を測定する方法として、せん断力の測定による方法を検討した。実際には、せん断ひずみに関するひずみ成分の測定によりせん断力成分を推定する方法である^{7)~10)}。また、せん断ひずみに関するひずみ成分の測定から得られる波形の基本的な特徴を示し、その利用法と問題点を述べる。

* 金沢大学技官 工学部土木建設工学科 (〒920 金沢市小立野2-40-20)

** 工修 金沢大学助手 工学部土木建設工学科 (同上)

*** 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 (同上)

2. 鋼桁のせん断ひずみ成分測定のための基本的な考え方

図-1のように、単純桁上を単位集中荷重がゆっくり通過する場合の測点でのせん断力の応答は、測点のせん断力の影響線になる。したがって、この基本的な関係を利用して実際に測定できる量にする。

一般に鋼桁内での曲げ応力 σ 、および、せん断応力 τ は、合成桁断面では図-2のようになる。また、桁の測点上に集中荷重が作用する場合の測点近辺での主応力図は図-3のようになり、中立軸位置において曲げ応力 σ は0、せん断応力 τ は最大となる。また、主応力は桁軸方向に対して45度の角度をなす圧縮と引張応力の対となる。

理論的には、桁断面中立軸におけるせん断応力 τ とせん断ひずみ γ の関係は、

$$\tau = SQ / (bI) \quad , \quad \gamma = \tau / G \quad (1)$$

ここに、 τ ：中立軸におけるせん断応力

S ：桁断面に作用するせん断力

Q ：桁断面中立軸に関する上側断面（または下側断面）の断面一次モーメント

b ：中立軸における断面の幅（腹板厚）

I ：桁全断面の中立軸に関する断面二次モーメント

γ ：中立軸におけるせん断ひずみ

G ：桁材料のせん断弾性係数

式(1)から、せん断力 S とせん断ひずみ γ の関係は

$$S = GbI\gamma / Q \quad (2)$$

実際に測定するひずみ成分は、桁断面中立軸位置の腹板側面において桁軸方向に対して45度の角度をなす圧縮(-)または引張(+)ひずみ ϵ_{45° を考える。

理論的には、せん断ひずみ γ が非常に小さいものとすれば、

$$\gamma = 2 \epsilon_{45^\circ} \quad (3)$$

の関係がある。

この ϵ_{45° の測定法には、図-4のような方法がある。

1ゲージ法（実際には3線式結線法で行う）は、単軸ゲージを桁軸に対して45度方向の傾きに接着する。この場合、測定器の出力ひずみ値 ϵ_{45° とせん断ひずみ γ との関係は、式(3)から、 $\gamma = 2 \epsilon_{45^\circ}$ となる。

2ゲージ法では、2軸ゲージ(0, 90°)を用いればよく、出力は2倍になり、出力ひずみ値 $2 \epsilon_{45^\circ}$ は γ に等しいという関係になる。

そして、4ゲージ法では、2軸ゲージ(0, 90°)を2枚用いればよく、腹板側面の表と裏側に接着する。

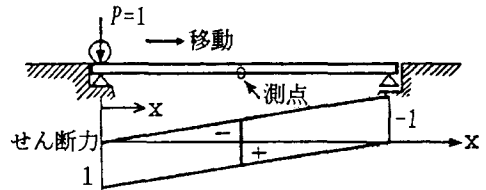


図-1 単位集中荷重の通過によるせん断力

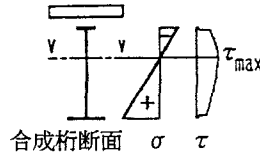


図-2 合成桁の桁断面における応力分布

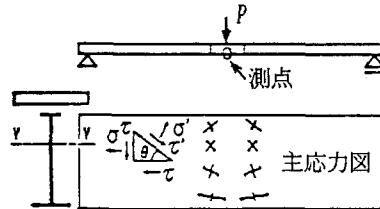
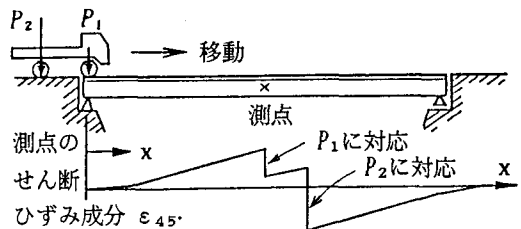


図-3 測点付近の桁の主応力図



出力1倍	出力2倍	出力4倍
1ゲージ法	2ゲージ法	4ゲージ法

図-4 せん断ひずみ成分の測定法

出力は4倍になり、出力ひずみ値 $4 \varepsilon_{45^\circ}$ を $1/2$ 倍すると γ が得られる。

その他、半導体ゲージを使用すれば見掛け上での出力を60倍ほど大きく得ることができる。ただし、半導体ゲージはまだ少し高価で、一般の単軸ゲージの10倍程度であることと、ひずみの大きさによりゲージ率が若干変化する特性がある。

なお、中立軸が明確でない場合の測定法には、主応力を求め、せん断ひずみ γ を抽出する方法として、3軸ロゼットゲージ($0, 45, 90^\circ$)を用いる方法がある^{たとえ11)}。

3. 基本的な測定法の確認

鋼桁の中立軸位置におけるせん断ひずみ成分 ε_{45° の測定法、利用法、および問題点を確認する意味で、基本的な実験を行った。簡単のために、図-5に示すような10cm高さのH型鋼の桁を用い、支間は6mとした。移動荷重は、あらかじめ重量を計量し、1輪車、2軸車、4軸車、および人の歩行などにより行った。なお、多軸車は2軸(4輪)の台車を2台使用し、その移動荷重の受け桁とするため同様の桁を並列に設置して実験を行った。以下、実験結果の考察を示す。

(1) 移動方向による応答波形の比較

1輪車が移動したときの、1ゲージ法による結果を図-6に示す。波形はノイズ処理を行っていない例である。理論どおりに移動方向の違いにより波形の位相が逆になることが確認できる。また、着目点を通じたときの波形の段差を基に、この段差量から通過した荷重成分の推定を試みた。測定波形が小さく十分な分析を得ないが、計算によれば59kgf(1kgf=9.8N)と推定され、これは載荷した63kgfの約94%の推定値となった。

(2) 測定法による比較

1ゲージ法の結果に対して2ゲージ法、および4ゲージ法による結果を図-7、図-8に示す。図-7では下フランジの曲げひずみ ε_L の記録も示す。この波形より、 ε_{45° の段差が0点を横切るときに ε_L が最大値になることが確認できる。 ε_{45° の結果は1ゲージ法の出力に対して大きい出力を得たが、それぞれ、ほぼ1.9倍(2倍)、3.8倍(4倍)の出力を得た。計算によれば約57kgfと推定され、載荷した63kgfの約90%の推定値となった。

この原因として、桁の支持状態、断面不正、横揺れ、ねじれなどの他、車輪の接地面が集中荷重ではなく少し分布していること、そして、測定、分析誤差も考えられる。なお、実験に用いたH型鋼の断面形状を測定した結果、上下フランジが平行ではなく縁間隔で約2mmのずれがあったことから、結果的に桁のねじれによ

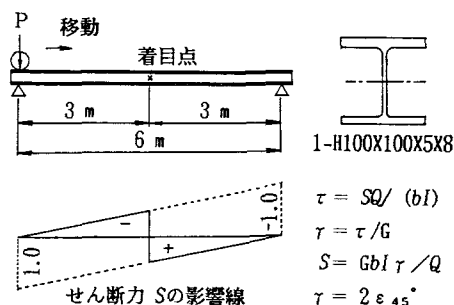


図-5 実験に用いたH桁断面の鋼桁の着目点と断面

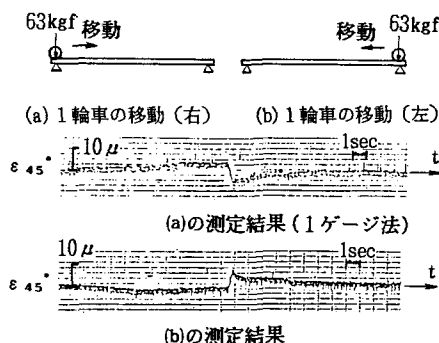


図-6 移動方向による応答波形の比較

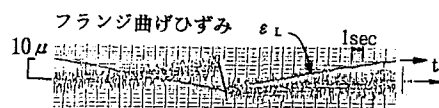


図-7 2ゲージ法による結果
(図-6(a)対応)



図-8 4ゲージ法による結果
(図-6(a)対応)

るひずみの影響が入っていたものと思われる。また、測定されるひずみ量が小さいので、測定や分析ではノイズ対策や処理を行うなどの配慮が必要である。

(3) 連行移動荷重による波形の検討

2軸車、3人の歩行、および4軸車の移動による波形の例を図-9に示す。各結果の波形では、それぞれの荷重が着目点を通ると波形に段差が見られるので、この段差量を分析して通過した荷重による桁への作用力の推定がそれぞれ可能なことがほぼ確認できた。

(4) 移動荷重による応答シミュレーションでの検討

上の基本的な実験では載荷空間がせまいために両方向の同時移動載荷実験が行えないので、計算により応答波形の検討を行った。この場合、同時に両方向から着目点上を通過した場合やきわめてこれに近い場合には正しく作用力を判別できないと思われるが、その他の場合では、ほぼ各作用力の推定が可能と考えられる。しかし、実交通状態においては種々の載荷が考えられることや測定は時間軸に沿った波形を得るために、渋滞など停止、発進を行う場合には実用的ではない。したがって、停止などがなくほぼ一定の早さで通過して行く路線での鋼桁が測定対象になり得る。

図-10は支間30.7mの鋼桁橋を設定し、支間中央点を着目点として横軸に移動距離をとってせん断力の応答を示した例である。ある程度密な通行であるが、図-10(c)の重ね合わせた波形のように軽量車による作用力を分析しないものとすれば、大型車による作用力は各段差を分析すれば可能と考えられる。しかし、どの荷重がどちら方向の荷重であるかを判別するのは難しい。

4. 実測での動的測定に関する考察

図-11に、図-10(a)または(b)に比較的近い通行状態での実測結果の例をあげる。図-11のように実際には動的な成分を含み複雑な波形を呈する。しかし、各荷重が着目点を通るとに段差が現れるので、桁への各荷重による作用力を推定するのに、このせん断ひずみ成分の測定は簡便な測定法になると考えられる。

では、実際にどのような実測上の問題点があるかについて検討する。

(1) 合成桁を例とした応答値の予備算定

せん断ひずみ成分を測定により求める方法には前記のように幾つかあるが、簡単な方法では単軸ゲージを用いるか、2軸ゲージを用いる。ここでは、単軸ゲージを用いる場合において実際の鋼桁橋でどの程度の応答値を示すかについて計算した結果を示す。文献 12)により図-12のように「等級-幅員-主桁間隔-主桁

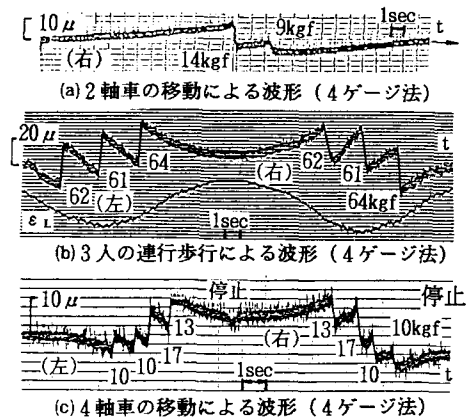


図-9 連行移動荷重による実験結果

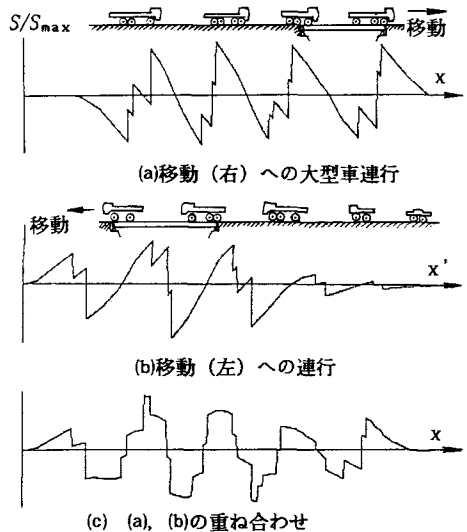


図-10 自動車移動荷重によるせん断力
応答のシミュレーション

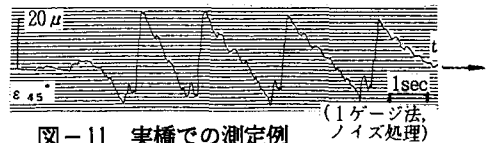


図-11 実橋での測定例

(活荷重合成桁、支間30.7m、3本主桁、
測点は中桁、支点から17.85mの位置)

本数」、および、支間 L が異なる36橋の標準合成桁について、桁の中央断面を対象にした上下フランジの曲げひずみ ε_U 、 ε_L 、たわみ δ 、および、せん断ひずみ成分 ε_{45° を荷重 $P=5$ tfの通過に対して計算により求めてみた。なお、弾性係数比 n は7（ただし、5から9の範囲では ε_{45° にはあまり変化はないが、中立軸位置、 ε_U 、 δ などは変化した）を仮定したものを示す。その結果、 ε_{45° は 30μ から 17μ 程度であり、支間が短いほど大きいひずみ値を与えることがわかる。

また、 ε_{45° は ε_L にくらべて小さいので、出力を大きくする測定法が望ましい。

(2) 鋼桁の中立軸位置の推定について

ところで、実際においては合成桁の中立軸位置の抽出法を検討する必要がある。この、中立軸位置の求め方としては、目的とする桁断面における上下フランジや腹板の曲げひずみを測定して推定する方法が考えられる。この場合、曲げひずみは断面において線形的に変化しているものと仮定し、中立軸位置を推定する。推定は数回の測定結果の統計値（平均、変動係数、レンジ）によって推定する。それは、幾つかの動的測定を行った結果、相当にばらつく（変動係数0.02）場合があるためである。また、上フランジのひずみはスタッドのせん断力による局所的な効果が影響することも考えられ、実測上での難しい面がある。したがって、測点として垂直補剛材、水平補剛材、およびスタッドなどのあまり影響のない断面に設定する必要があると考えられる。

(3) 大型車の単独走行時の波形

ここではせん断ひずみ成分の測定結果を基に荷重効果を分析する場合の基本的な特徴を示す。

図-13では、走行方向による波形の違いを示すための基本的な図を示した。また、図-14では2軸車が通過した場合の実測波形を例にあげて曲げひずみ波形との対応を示した。図-13のような理想的な静的な波形が得られることは少なく、一般交通状態を対象にすると図-14のような波形が得られる。すなわち、実際には動的な振動成分が含まれていること、輪荷重は集中荷重ではなくタイヤと路面の接地面では分布荷重であり、また舗装、床版内でも荷重が分布するので、荷重成分を抽出するのに必要な波形の段差が十分に分離できない場合がある。たとえば、多軸車においてタンデ

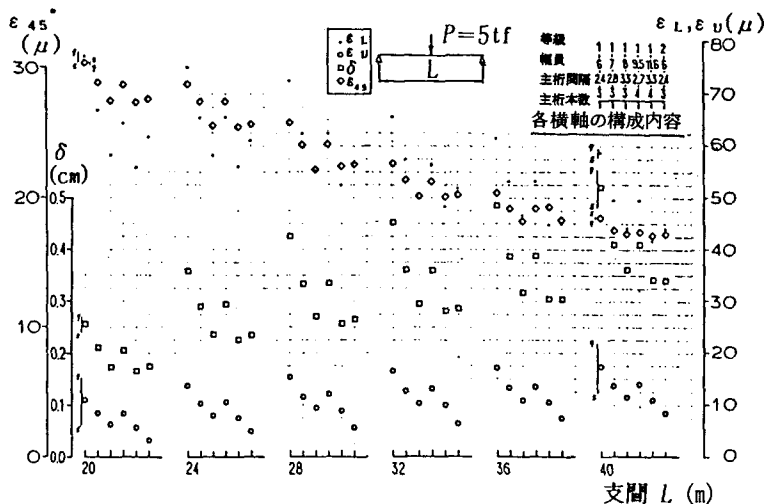
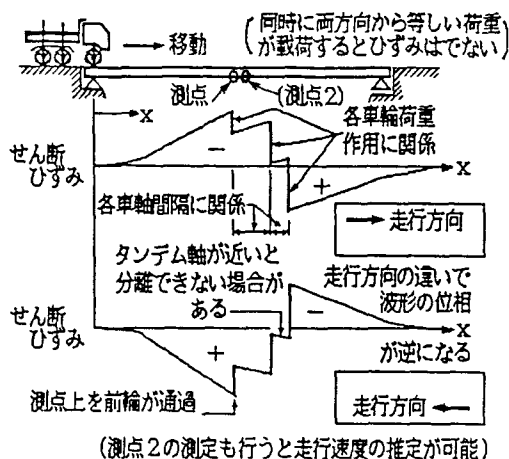


図-12 合成桁¹²⁾での応答値の予備算定（荷重 $P=5$ tf載荷時）



（測点2の測定も行くと走行速度の推定が可能）

図-13 せん断ひずみ成分波形の特徴(1)

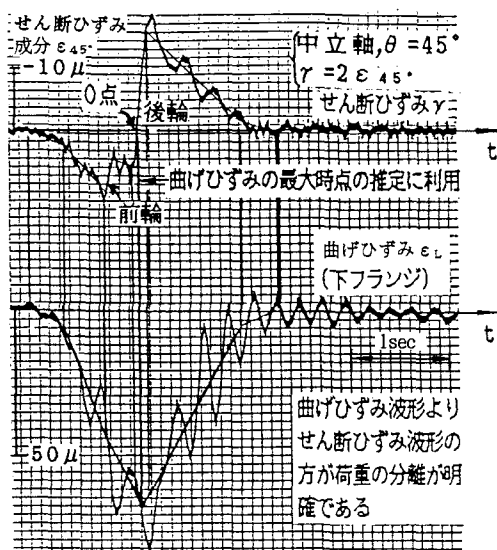


図-14 せん断ひずみ成分波形の特徴(2)

ム軸距が近いと波形の段差が明確に分離していない場合がある。

つぎに走行方向による波形の違いについて、せん断ひずみ成分 ε_{45° および下フランジの曲げひずみ ε_L の実測波形の例を図-15に示す。このような2軸の大型車が単独走行した結果の分析は比較的容易である。

(4) 大型車の連続走行時の波形

図-16は2台が連行してきた場合の波形の例である。2台目のタンデム軸距が近い後輪の2軸は分離が明確ではない。この場合、タンデム軸についての各荷重効果の分離を行うには微妙な波形の変化から簡易的に推定することになり、推定誤差を伴う可能性が考えられる。なお、この点については今後の実測的な検討が必要である。

つぎに、多くの大型車が連行した場合の例は先に示した図-11である。これらの例のように一方向に走行する場合、または一方通行路線での測定に利用できる。

(5) 対向車線である場合の問題点

これに対して、対向車線のある路線で、測点上を同時に大型車の輪荷重が通過した場合などは、分析対象外とする必要があるなど、分析上で配慮しなければならない問題点がある。しかし、過密な通行状態、車線数が多い、近くに信号機がある、あるいは、よく渋滞する場合などでは利用が困難であるが、そうでないほ

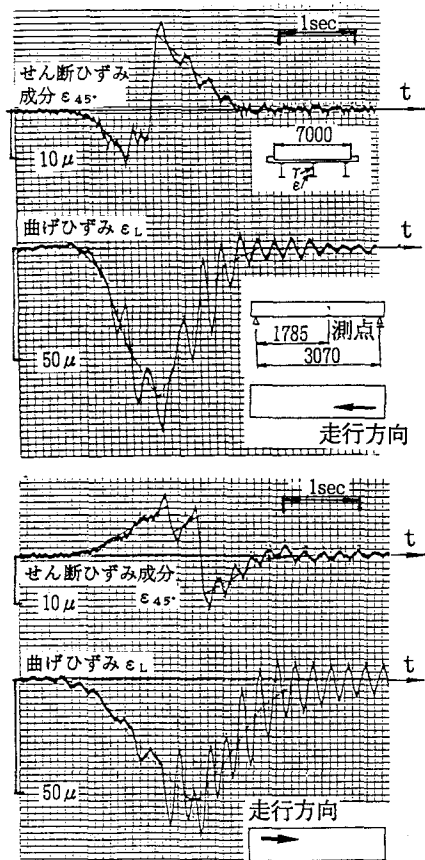


図-15 せん断ひずみ成分 ε_{45° と曲げひずみ ε_L の測定例

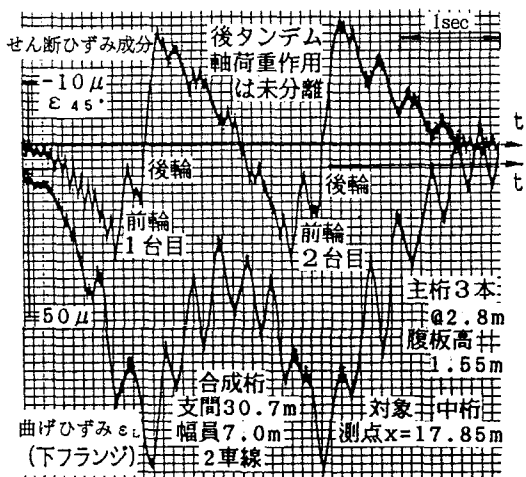


図-16 2台の大型車連行時の測定例

ば一定速度で走行している2車線の路線での利用は可能である。

(6) ひずみ量から荷重への変換方法

せん断ひずみ成分の波形から荷重効果を求める理論的な計算式は式(2)に示したが、実際には実測段階でキャリブレーションを行う方法がよいと思われる。その理由は、実際に対応するのが容易であり、断面の物性値の特定(せん断弾性係数など)や断面諸量の算出(断面1次モーメント、断面2次モーメントなど)を要しないからである。

キャリブレーションは、重量のわかっている輪荷重が定めた通行位置を通過したときに、測点で得られるせん断ひずみ成分の段差量を基準とする方法が考えられる。この場合、幅員方向の載荷位置、車線によってキャリブレーション値が異なる場合も考えられるが、測定対象とする車線を限定するなどの対応をとり、必要なキャリブレーションを行う。

もっとも基本的に分析しやすいのは、単一荷重が移動したときのキャリブレーション波形を得ることであろう。しかし、単一の輪荷重(たとえば2tf程度)を用意することが難しいことやその荷重をどのように移動するかの工夫が必要である。

また、測定される応答波形は一般交通状態を対象とするので動的な荷重効果を得ることになる。静的な荷重効果を推定する場合には、波形から静的成分を抽出する方法を検討する必要がある。

以上のようにせん断ひずみ成分の測定、利用には長所、短所があり、また、検討すべき課題が幾つか残されている。しかし動たわみ、あるいは曲げひずみ波形から荷重効果を推定する方法^{1)・4)}を検討する他に、比較的明解なせん断ひずみ成分に着目して測定法、分析法を検討していくことは意義があると考えられる。

5. あとがき

本研究では、あまり鋼桁の動的測定項目とされていないせん断ひずみ成分の測定に着目し、その測定法の基本的な方法、利用法、そして問題点について検討した結果を示した。

測定法についての基本的な実験からは測定上での問題点を確認し、計算による応答シミュレーション、および実橋での動的測定による考察により、従来あまり着目されなかったせん断ひずみ成分の測定と分析により、通過する自動車(大型車の輪荷重を対象とした)荷重による桁への作用力の推定が比較的簡単に行えることを示した。ただし、本文に示したように測定対象は限定されるので注意が必要である。また、分析上においてもタンデム軸に関する荷重分離が容易でない場合もあるので、さらに幾つかの鋼桁橋での実測的な検討を踏まえていく必要がある。

なお、測定においては通過していく自動車(詳しくは中型車、大型車、大型特殊車を対象とした車輪)の通過位置の確認や車種の確認を同時に行うための何らかの方法をとることが望ましい。また、同時に曲げひずみやたわみを測定できれば有機的な分析を進めるのに利用できることになるであろう。その他、鋼桁の橋梁診断用の測定項目として新たにこのせん断ひずみ成分を加えてもよいと考えられる。たとえば、載荷試験や動的走行試験を行う場合に桁への荷重効果を考察する方法として利用できると考えられる。

終りに、本研究にご協力いただいた上村康司氏、後藤正嗣氏をはじめ関係各位に謝意を表する。

付 録

図-12での各合成桁36橋の中立軸位置

各桁の中立軸位置(下フランジ上面から中立軸位置までの距離) y と腹板高さ h との比 y/h について比較検討した。36橋分の平均は0.85、レンジは0.78から0.96となった。変動係数を求めると0.05と相当にばらついているので、中立軸位置の推定はこの簡単な比 y/h によりがたいことがわかった。やはり各橋ごとに推定する必要がある。また、計算値と実際値とは少し違う場合も考えられるので、4.(2)で示すように実橋での中立軸位置の推定方法の開発がひとつの課題である。

実測波形のデータ処理の課題

せん断ひずみ成分波形のデータ処理として考えられる簡単な方法は、データレコーダによりデータを収録してきたものを、記録紙に再生し、波形の段差をスケールで読み取って荷重値に換算する方法である。この場合には、人による単調な作業となるが、波形の判断が容易である反面、読取り誤差を生ずる場合もある。その他、パソコンを用いて A/D変換しデータ処理を行う方法があるが、0点補正、段差位置や位相の判断、段差量、静的成分と動的成分の分離、高速処理プログラミングなど処理上での検討が必要になる。

参 考 文 献

- 1) 小堀為雄・城戸隆良・近田康夫：実交通下における桁橋の動的応答の実態調査例、金沢大学工学部紀要、第20巻、第2号、pp.103~110、1987-10
- 2) 梶川康男・西沢辰男・吉本正信：可搬式自動車交通流自動観測システムの開発、土木学会論文集、第391号/V-8、1988-3
- 3) 松井繁之・エル・ハキム・アーメド・本摩敦：道路橋における輪荷重測定について、平成元年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要、I-37、1989-5
- 4) 三木千寿・村越潤・米田利博・吉村洋司：走行車両の重量測定、橋梁と基礎、pp.41~45、1987-4
- 5) 牧野文雄・小松定夫・向井文夫・岡田好彦・久保雅邦：橋梁における交通荷重調査と荷重特性の分析、橋梁と基礎、pp.19~26、1985-12
- 6) 加藤寛・池田秀夫・福井淳起・大坪英一：高石大橋RC床版の調査、日本橋梁技報、pp.38~50、1986
- 7) 城戸隆良・上村康司・小堀為雄：既設橋梁の応答測定法に関する一考察、土木学会中部支部昭和62年度研究発表会講演概要集、I-28、1988-3
- 8) 城戸隆良・小堀為雄：鋼桁橋のせん断ひずみ測定法とその利用法に関する一考察、第43回土木学会年次学術講演会概要集、I-215、1988-10
- 9) 城戸隆良・小堀為雄：鋼桁のせん断ひずみ測定と分析について、土木学会中部支部昭和63年度研究発表会講演概要集、I-51、1989-3
- 10) 城戸隆良・小堀為雄：鋼桁橋のせん断ひずみ測定に関する一考察、第44回土木学会年次学術講演会概要集、I-232、1989-10
- 11) 共和電業：共和ゲージとその取扱法、技術資料No.5、p.39、1971-5
- 12) 建設省道路局監修：道路橋標準設計図集(2)、日本道路協会、1963

(1989年10月2日受付)