

せん断ひずみ成分の測定に着目した 鋼桁橋の荷重効果の抽出法

LOAD EFFECT ESTIMATION ON STEEL GIRDER BRIDGE
BY SHEAR STRAIN MEASURING

城戸隆良*・近田康夫**・小堀為雄***・若林 修****

By Takayoshi KIDO, Yasuo CHIKATA, Tameo KOBORI and Osamu WAKABAYASHI

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 with a test vehicle load, wheel load can be estimated by measuring the amount of discontinuity of the record. Through test measuring of ε_{45° on an existing bridge, the presented procedure is convenient and useful although some restrictions exist in applying to the actual wheel load measuring.

1. まえがき

既設道路橋の応答特性をとらえるのに、静的載荷試験、動的走行試験、さらに実交通荷重を対象とした動的応答の測定などが行われることがある。測定される曲げひずみやたわみなどの測定波形は有用な情報を含んでいると考えられるが、測定断面での荷重成分の情報が測定されないために詳しい分析がなされないことが多い。載荷した荷重の諸量（軸重、軸距など）が試験車のように事前に計測されている場合でも、桁内の荷重成分の応答状態（以下、荷重効果という）を把握する何らかの方法の確立が重要であると考え、著者らは従来あまり着目されていないせん断ひずみ成分に着目し、実測も交えて基礎的な考察を行ってきた¹⁾。

このような測定による調査法の研究は、近年盛んに検討されるようになった活荷重の実態調査²⁾、自動車交通流の実態³⁾、疲労問題の検討^{4),5)}などのための輪荷重の実態調査法^{6),7)}や橋梁部材の応力頻度の計測法⁸⁾、耐荷性の評価法⁹⁾、動的応答特性調査¹⁰⁾、および、適切な橋梁の維持管理手法¹¹⁾、維持管理の重要性・必要性からくる定期的な調査・検査や診断手法の確立のための実測¹²⁾、適切な補強法などの調査研究の必要性¹³⁾からも重要な事柄である。

そこで本論は、さらに鋼桁上を通過する大型車の輪荷重により生ずる桁内の荷重効果を抽出する方法の検討を進め、せん断ひずみ成分の検出法を示し、せん断ひずみ成分測定の実用と実用化の方法を検討する。

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

** 工博 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科

*** 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科

**** 金沢大学大学院 土木建設工学専攻

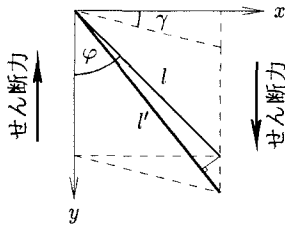


図-1 y 方向にせん断力作用時のせん断ひずみ γ

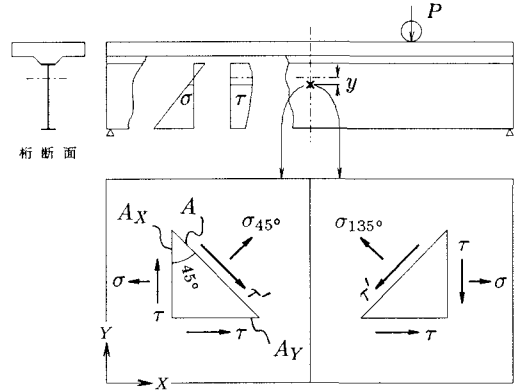


図-2 せん断ひずみ成分の測定位置の応力状態

2. せん断ひずみ成分の検出法

基本的に鋼桁の中立軸位置を対象とした場合、および曲げモーメントなどが作用している複合作用下での中立軸位置の近辺でのせん断ひずみ成分の検出方法について検討を述べる。

(1) せん断力のみが作用する場合

鋼桁の中立軸位置を対象として、せん断力のみが作用すると仮定して検出する方法を示す。

図-1のように $x-y$ 平面を考え、 y 方向にせん断力が作用した場合に長さ l から l' へ変化したとして、その変化からせん断ひずみ γ の関数として求める¹⁴⁾。せん断変形が微小であれば、 $\tan \gamma = \gamma$ とおくことができる。 $\varepsilon_\varphi = \frac{(l'-l)}{l}$ とすれば、 ε_φ は

$$\varepsilon_\varphi = \gamma \sin \varphi \cos \varphi \quad \dots \dots \dots (1)$$

の関係が得られる。 ε_φ を最大にするような角 φ_{max} は、式 (1) を φ で微分し、その結果を 0 に等しいとおくことで得られ、その結果、

$$\gamma \cos^2 \varphi_{max} = \gamma \sin^2 \varphi_{max} \quad \dots \dots \dots (2)$$

の関係が得られる。式 (2) より、 φ_{max} は 45° をなす角度の方向を得る。したがって、 45° 方向のひずみ成分を測定すれば、せん断ひずみ γ を求められる。以下、せん断ひずみ成分とはこの測定できる直ひずみ成分 ε_{45° にかかわる成分をいうものとする。式 (1) に $\varphi = 45^\circ$ を代入すると、

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

の関係が得られる。測定方法には 1 ゲージ法、2 ゲージ法、4 ゲージ法などがある^{1),14),15)}。

本例は鋼桁断面の中立軸位置を測定の対象としているが、この中立軸位置の特定は実測などにより行うことが必要となる。中立軸位置を特定することは、合成桁などでは対象とする合成桁断面が健全であるかどうかの推定に利用できる。中立軸では最も簡単な 1 ゲージ法での測定が可能となる。

(2) 曲げとせん断応力とが作用する場合

測定の対象はせん断ひずみ成分の検出である。しかし、中立軸位置の特定作業を省略する場合などでは、鋼桁の腹板の中立軸位置近辺の任意の位置においてせん断ひずみ成分のみを抽出する方法が必要になる。

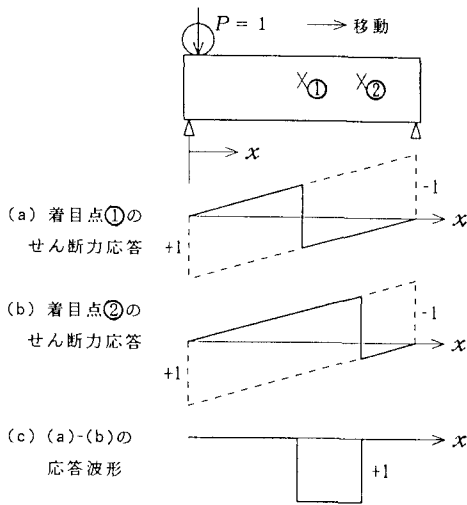


図-3 鋼桁での基本的な検出法

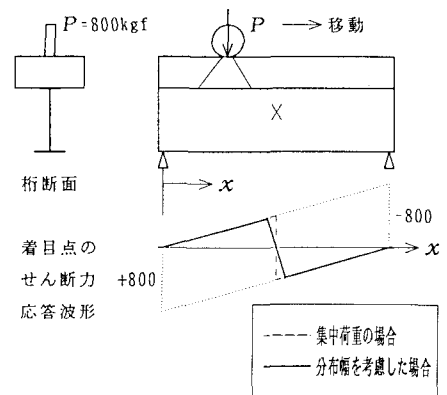


図-4 荷重効果の抽出について

ここでは、曲げ応力 σ とせん断応力 τ が作用している場合を仮定する。いま、仮に図-2のように測定位置を支間中央の桁断面の中立軸位置より y だけ離れた位置とする。測定の目的が主応力面を求めるのではないのでせん断ひずみ成分を検出する 45° 方向成分と 135° 方向成分について応力成分を求めてみる^{16),17)}。

図-2において測定位置の着目する部分が微小な三角柱であるとして取り出した場合に、曲げによる応力成分 σ とせん断応力 τ が一樣に作用し、三角柱は釣り合っているものとする。

三角柱の斜面の応力成分 σ_{45° に着目してみる。斜面の断面の面積を A 、同様に側面の面積を A_X 、下面の面積を A_Y とする。

面積は、 $A_X = A_Y = A/\sqrt{2}$ であり、 X 方向と Y 方向での力の釣り合い条件により、それぞれ

$$\sigma_{45^\circ} A \cos 45^\circ + \tau' A \sin 45^\circ - \sigma A_X + \tau A_Y = 0 \quad (4)$$

$$\sigma_{45^\circ} A \sin 45^\circ - \tau' A \cos 45^\circ + \tau A_X = 0 \quad (5)$$

式(4)、(5)より、 σ_{45° が求められる。また同様な条件式を立てて σ_{135° を求めると、それぞれ

$$\sigma_{45^\circ} = \sigma/2 - \tau \quad (6)$$

$$\sigma_{135^\circ} = \sigma/2 + \tau \quad (7)$$

となる。これより、曲げ応力成分 σ が関与することになる。

1 ゲージ法により、 45° と 135° 方向のひずみを別々に測定する方法では、式(6)と式(7)との差をとるとせん断応力成分 2τ に関する成分が検出される。または、和をとると曲げ応力成分 σ に関する成分が検出されることになる。 τ に関して測定される量、すなわち、ひずみは ε_{45° の成分であり、関係式の上では式(3)および後述する式(8)から $\tau = 2\varepsilon_{45^\circ} G$ の関係である。そして、 σ に関して測定される量、すなわち、ひずみは $\sigma = \varepsilon E$ の関係にある ε の成分である。

また、実用上においては曲げ応力成分が小さい領域においては2ゲージ法を採用することにより、曲げひずみ成分を消去可能であり、せん断ひずみ成分を検出できる。出力は1ゲージ法の2倍である。

(3) 鋼桁での基本的な検出法と利用法

以下の対応については説明を簡単にするために、測定できる曲げひずみは曲げモーメント、せん断ひずみ成分はせん断力に対応する相似の応答波形になるとして読みかえを行っていくものとする。

図-3のように鋼桁上をゆっくりと距離 x の方向に移動する一つの集中荷重 P によって、各着目点のせん断力の波形はせん断力の影響線に相似の形状を成す。着目点上を P が通過するときに波形に段差が生ずる。段差量は通過した集中荷重 P に比例するので、桁へ作用する荷重効果を検出するうえで有用な測定項目である。

その他の特長から利用法としては、走行方向が逆（右から左）であれば、波形の位相が逆になることから、走行方向の判別ができる。

着目点①と②があれば、どちらかの波形の位相を逆にして両者を重ね合せれば（この例では両者の差をとれば）図-3(c) のようなパルス波の成分が得られ、荷重効果の成分の抽出になる。また、通過時点の検出や通過速度の推定に利用できる。

曲げモーメントは、せん断力成分波形の段差が 0 点を横切るときに最大の成分となる。よって、種々の大きさの荷重が連続的に移動するときに曲げモーメントが大きくなる時点の判断に利用できる。

しかし、欠点もある。たとえば、着目点上を左右から同時に同じ大きさの荷重が通過するとせん断成分の波形にはその時点で段差が生じない。同様に、同時に着目点上を複数の荷重が通過する場合、走行方向によって生ずる段差は和または差ということになる。このような同時通過の状態は分析上注意が必要である¹⁾。

3. 荷重効果の分析法

図-2および図-3について応力状態を検討する。基本モデルとしては簡単な移動集中荷重としている。この場合、鋼桁断面の着目点におけるせん断応力 τ とせん断ひずみ γ については、

$$\tau = \frac{SQ}{bI}, \quad \gamma = \frac{\tau}{G} \dots\dots\dots (8)$$

式 (8) についての記号説明は付録に示す。測定可能なのはせん断ひずみ成分であり、式 (3) と式 (8) より、

$$S = 2\varepsilon_{45^\circ} \frac{GbI}{Q} \dots\dots\dots (9)$$

のような関係になる。ここで ε_{45° はせん断ひずみ成分である。本研究ではこの項の ε_{45° に対して、測定によって得られるひずみ波形の段差量をあてはめてみることを考える。そうすることによって断面諸量が判明していれば、式 (9) に代入して得られる S は荷重効果として容易に求められることになる。

ところが、実際にはその断面諸量の正確な判明は容易でない。そのため荷重値、寸法を計測した基準荷重（試験車）を設定し、所定の通過位置をゆっくり通過させたときの波形を測定し、その波形を基にしたキャリブレーション値により、種々の輪荷重が通過していく場合の荷重効果を推定するという方法をとる。

いま一つの課題として、実際には車輪と路面とは任意の接地面積を伴い、舗装や床版厚を介してさらに分布されるものと考えられる。したがって、輪荷重は集中荷重としてではなく、ある分布荷重が移動すると考えられる。

この輪荷重が集中荷重作用でないことに対して、簡単な考察を行ってみる。図-4のように対象とする桁の直上を 1 輪荷重 $P = 800 \text{ kgf}$ が通過するものとする。輪荷重の接地長は大型車の場合、進行方向には 20cm と仮定する。

舗装と床版厚によってその荷重が一樣に 45° に広がって分布化するものと仮定する。舗装厚 8cm、床版厚 22cm とすると、分布幅は 80cm になる。支間 30m で支間中央断面を着目点とすると、移動する輪荷重によりせん断力波形が得られる。図-4 のように集中荷重の場合と分布を考慮した場合の 2 つの場合で応答波形が違ふ部分は、桁への入出時と着目点を通過するときに生ずる。着目点を通過するときに生ずる段差は集中荷重（破線）の場合は急激な段差 (800kgf : 100%) となるが、分布幅 80cm を考えた場合（実線）は段差は傾いて最大値が小さくなる (778kgf : 97%)。以下、このことについて若干の考察を加える。

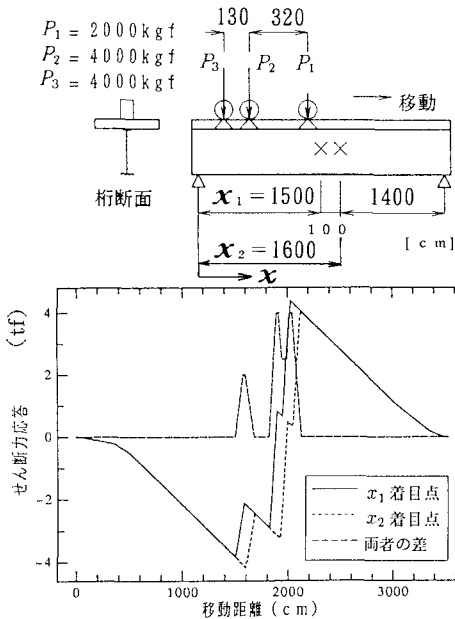


図-5 ダンプトラック移動を仮定した疑似波形例

	最大	最小	正規分布		変動係数	対数正規分布	
			μ	σ		λ	ζ
中型車	7.122	1.110	2.691	0.916	0.340	0.935	0.330
大型車	17.02	2.590	6.529	2.135	0.327	1.825	0.318
全車種	17.02	1.110	4.213	2.416	0.573	1.296	0.532

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right\}$$

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \lambda}{\zeta}\right)^2\right\}$$

ここに、 μ : 平均値
 σ : 標準偏差
 x : P_G のデータ
 λ : $\ln x$ の平均値
 ζ : $\ln x$ の標準偏差
 x : P_G のデータ, $0 \leq x$

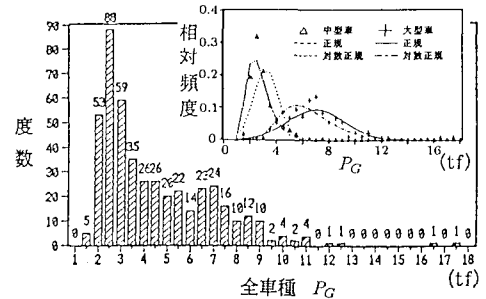


図-6 一般交通を対象にした分析例

(車両 1 台分の総荷重効果 P_G の度数分布の例)

単純桁でせん断力の応答波形は、輪荷重がゆっくりと一定速度で通過すると図-4の比較でわかったように直線的な勾配になる部分が多いことがわかる。よって、もし輪荷重がこのような分布荷重となっても、通過した波形から逆に外挿により段差時の鉛直破線のような集中荷重成分を抽出することも可能なことがわかる。そしてまた荷重効果について、この段差が生ずるときの傾き具合を分析することによって輪荷重が桁にどの程度の幅で分布されて着目点の応答になっているかの分析が可能になると考えられる。

以上、ゆっくり一定速度で通過するような一つの集中荷重または輪荷重の分布についての基本的な検出法について述べた。

ところで、実際には走行試験としては試験車としてダンプトラックのような計量を行った大型車を通過させることが多い。ダンプトラックの通過を例に、どのようなせん断力応答波形になるかを示す。ただし、簡単な設定で行う。図-5のように桁直上を $P_1 = 2000 \text{ kgf}$, $P_2 = P_3 = 4000 \text{ kgf}$ の輪荷重が移動する。 P_1 と P_2 の間隔 320cm, P_2 と P_3 の間隔 130cm とする。支間 3000cm, 着目点は支間中央 $x_1 = 1500 \text{ cm}$ と $x_2 = 1600 \text{ cm}$ とする。せん断力応答疑似波形は実線が x_1 , 短い破線が x_2 での段差状態である。なお、各輪荷重は舗装、床版厚により 80cm 幅の分布荷重になっていると仮定している。また、 x_1 での波形に逆位相化した x_2 での波形を重ね合せる、すなわち、両者の差をとると、長い破線のようにパルス波に近い荷重成分 (ピーク $P_1 = 2 \text{ tf}$, $P_2 = P_3 = 4 \text{ tf}$) を抽出可能と考えられる。この場合、両着目点間を 100cm に設定しているのは、 P_2 と P_3 の間隔、すなわち軸距が 130cm 程度であることや輪荷重の分布幅から分析可能と思われる間隔を仮定したものである。

この例は、1 台の試験車をゆっくり通過させる場合の載荷試験などに利用できると考えられる。

4. 測定利用とその応用

鋼桁のせん断ひずみ成分の動的測定による利用法について、具体的に著者らが検討を行った応用例を示す。

(1) 一般交通の荷重効果モニター

ほぼ一定速度で走行する路線における支間 30.7m, 幅員 7m, 3 主桁, 2 車線の合成桁橋で中桁（支間中央付近の断面中立軸位置）を測定対象にして, 大型車など目的とする車両が桁上を通過するときのせん断ひずみ成分の応答を測定し, 荷重効果を分析した例¹⁸⁾（図-6）を示す。キャリブレーションは車種と通過位置情報を基に空積のダンプトラック通過の波形段差を基準に分析して荷重値への換算を仮定している。

キャリブレーション用の車両あるいは実交通での車両が必ずしも低速で走行するとは限らない。その場合, 静的成分に動的成分が付加されたものとして, 静的成分と動的成分を分離して抽出する方法を考える。単純桁での波形において静的成分はほぼ直線的な折れ線状に変化する特徴があることを利用し, その成分を抽出することになる。

分析は中型車, あるいは大型車の応答による各輪荷重によるせん断ひずみ成分に生ずる段差を測定し, 前輪, 後輪などそれぞれについての輪荷重による桁への荷重効果を得た。1 台ごとのデータとしてそれぞれ処理し, 集計して荷重効果の度数分布を得て, 確率分布性状を推定することが容易かどうかを検討した。図-6 は車両 1 台ごとの輪荷重効果の集計値としての度数分布の 1 例を示した。この例は動的成分も含んでいる場合の処理結果である。分類としては中型車と大型車についての分布に分け, 分析結果から正規分布あるいは対数正規分布との対応表示を示した。データ数が十分ではないものの, データ数を増せば荷重効果についての統計分布性状を推定することや最大荷重効果などの実態把握のために寄与できるものと考えられる。

なお, 一般交通は種々な路線（車線数, 走行速度, 交通量など）, 通行形態（渋滞, 停止, 発進, 高速走行, 衝撃）があるために, 本例のように測定に良好な場所の橋梁が測定対象になると思われる。

このように, せん断ひずみ成分とともにさらに曲げひずみの測定モニターを同時に行うことによって桁へ作用する輪荷重効果と曲げ応力頻度を対応づけて分析できることになる。

橋梁の適切な維持管理のための通行自動車荷重の実態把握調査と同様に, 桁へ作用する荷重効果の実態, あるいは桁のストレス状態の実態把握手法として簡便で有機的な応用が図れるものと考えられる。

課題としては一般交通による応答は動的成分を含むために静的成分と動的成分の分析の扱いについてより詳しい検討が必要と考えられる。

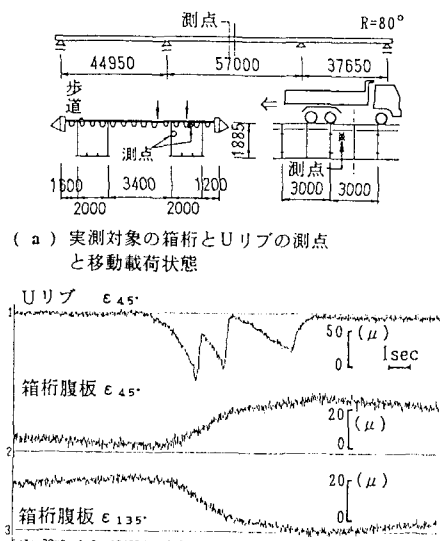
(2) 鋼箱桁および鋼床版での測定

鋼床版を有する 3 径間連続鋼箱桁橋に対して, 荷重値と寸法が計測されている試験車（ダンプトラック）が所定位置をバックでゆっくりと通過したときの波形を測定した例¹⁹⁾（図-7）を示す。

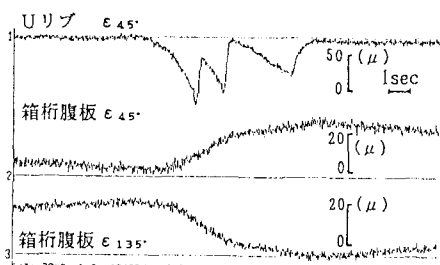
箱桁は, 支間中央近くの測点断面の中立軸（断面計算により推定した中立軸）近辺に×印にゲージを接着しその応答波形と解析値との整合を検討した。すなわち, 影響線の推定分析に利用できるものと考えた。結果は疑似波形（図-7 (d)）と対応がとれた。

同様に鋼床版のＵリブに 45°方向にゲージを接着し, 利用可能性を検討した。得られた結果に対して解析により疑似波形を作成し, 測定結果との対応を検討した。簡単な検討として任意ばねを持つ弾性支持連続桁として解析した疑似波形（図-7 (c)）とほぼ近似した。鋼床版の場合, 輪荷重の接地面の分布が直接的に作用すると考えられるが段差は傾きを持ち, やはり分布作用していることがうかがえるが, 集中荷重の解析の場合と同じように段差は比較的明確に現れている。また, 箱桁の応答ひずみ量に比べ大きいひずみ値が得られている。この測定例では 45°成分のみのひずみ測定を行ったことから曲げひずみ成分の消去が困難であったが, 曲げひずみ成分が含まれていても, 輪荷重が通過するとその荷重値に対してせん断ひずみ成分は波形に段差がはっきり生ずるので, 荷重値の検出は単純桁のような線形的な波形でなくても比較的容易に可能であることがわかる。しかし, せん断ひずみ成分のみの検出を行うにはやはり×印にゲージを接着し測定, 分析を行うことが重要であることがわかった。

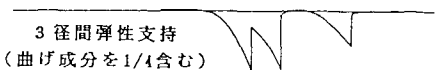
(3) 床組での利用



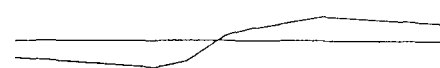
(a) 実測対象の箱桁とUリブの測点と移動載荷状態



(b) 1号車がゆっくりバックしたときの波形

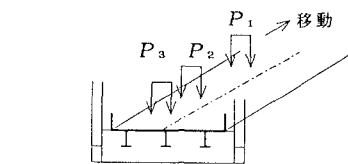


(c) Uリブを桁と仮定して求めた疑似波形の例

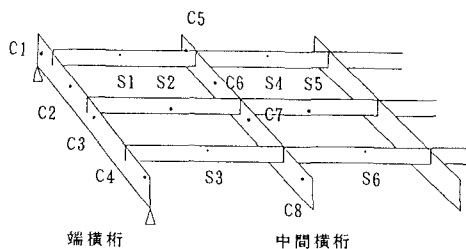


(d) 箱桁（主桁の腹板）の測点における解析的なせん断ひずみ成分の疑似波形

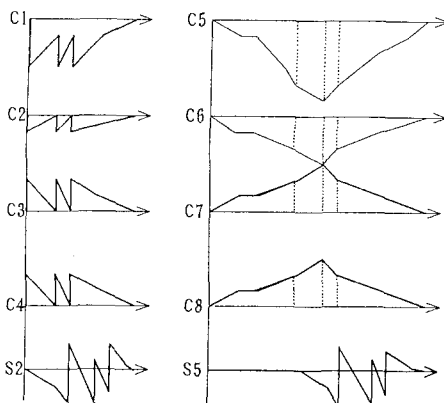
図-7 箱桁と鋼床版での測定例



(a) 車両の移動によるトラス橋などの床組



(b) 縦桁、横桁（床桁）での測定点の想定



(c) 波形の模擬形状(せん断力波形)

図-8 床組での利用

その他、トラス橋など床組を持つ橋梁にあっては、縦桁や横桁においての利用が考えられる。静的な測定ではなく、動的測定であるので、相互の関連について分析するのに利用が図れるものと考えられる。分析目的に合わせて適当な測定点数を選ぶことになる。

それぞれの縦桁の分担と横桁の分担とを検討するには、ある試験車1台がゆっくり通過する場合に対して同時に測定を行い分析を行う。たとえば、図-8のように、3軸車の通過であれば疑似波形は複雑となる。

縦桁（例：S2,S5）では各縦桁の荷重効果分担や車輪の通過時点の確認、軸距の推定などの分析が可能と考えられる。

横桁（例：C5,C6,C7,C8）では時系列的なせん断力波形（時系列的なせん断力図の推定）や縦桁からの間接荷重の伝達状態および通過した軸荷重効果の推定などが可能と考えられる。

端横桁（例：C1,C2,C3,C4）では段差が生ずるので各軸の荷重効果の分析が可能であり、この例では測定点C1,C2,C3,C4のそれぞれ相隣り合うせん断力の差をとれば3つ得られるが、その絶対値の和は、端横桁直上を通過した対象とする軸荷重の効果に比例する結果が得られるものと考えられる。

中間横桁では、波形のピーク近辺の3つの折れ点について同様の分析をすれば3軸のトータルな作用とし

ての荷重効果が得られる。

5. あとがき

鋼桁に関するせん断ひずみ成分の測定に着目し、桁へ作用する荷重効果の抽出法について幾つかの検討を述べ、その応用と利用法について述べて実用化の一検討を行ってきた。

測定法は比較的簡便で実交通を乱すことなくしかも効率的な測定が行えるものと考えられる。ここに、せん断ひずみ成分の検出法と分析法および利用法について主な知見をあげる。

(1) 提案したせん断ひずみ成分の測定を従来の動的測定の測定項目に加えることにより、荷重成分などの有用な情報を得られることが指摘できた。測定での検出法は2ゲージ法がよいと考えられる。

(2) 車両通過時の桁の着目点における桁への荷重効果をせん断ひずみ成分の波形の段差量から比較的簡単に推定可能である。また、輪荷重による走行方向の桁内分布は波形段差の傾き具合で検討が可能である。

(3) 桁のせん断ひずみ成分波形から、荷重効果としての荷重値へ換算を行うには、あらかじめ所定位置通過に対しての基準荷重がゆっくりと通過する走行試験などを行ってキャリブレーションを行うことが必要である。

(4) 単純桁では曲げひずみとせん断ひずみ成分との関係は分析を行うのに容易な関係にあり、せん断ひずみ成分の測定を加えることが曲げひずみ波形の詳細な分析を行うのに有用な情報を与える。

これらは、実測的な利用と研究が今後進められることによって、より具体的な課題の提起や進展を得るものと考えられる。

最後に、本研究において実測と分析にご協力いただいた諸氏に対して、また、実橋での測定の機会を与えていただきました諸氏に対してここに深く謝意を表します。

付録・記号説明 (式(8))

S : 桁断面に作用するせん断力(kgf)

b : 着目点における断面の幅(cm) (例: 腹板厚)

γ : せん断ひずみ(rad)

E : ヤング係数(kgf/cm²) (例: 2.1×10^6)

(SI単位への換算: $10^5 \text{ kgf/cm}^2 = 9.80665 \text{ GPa}$, $10^3 \text{ kgf} = 1 \text{ tf} = 9.80665 \text{ kN}$)

τ : 着目点のせん断応力(kgf/cm²)

Q : 中立軸に関する着目点より外側の断面積を対象とした断面一次モーメント(cm³)

I : 全断面の中立軸に関する断面二次モーメント(cm⁴)

G : せん断弾性係数(kgf/cm²), $G = E / \{ 2(1 + \nu) \}$

ν : ポアソン比 (例: 0.3)

参考文献

- 1) 城戸隆良・近田康夫・小堀為雄: 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, 構造工学論文集, Vol. 36A, pp. 1057-1064, 1990-3.
- 2) 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.
- 3) 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, No. 391/VI-8, pp. 107-114, 1988-3.
- 4) 三木千壽・船石和雄・杉本一朗: 道路橋の振動現象のための荷重に関する一考察, 土木学会論文集, No. 432/I-16, pp. 63-68, 1991-7.
- 5) 坂野昌弘・三上利蔵・宮川欣也: 大型車3車平均重量と同時載荷係数を用いた道路橋設計荷重の設定, 構造工学論文集, Vol. 38A, pp. 1063-1070, 1992-3.
- 6) 三木千壽・村越豊・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.
- 7) 松井繁之・エル・ハキム・アームド・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集, I-37, 1989-5.
- 8) 吉川紀・山本力・寺田博昌・松本好生: 実測データを基とした道路橋疲労強度検討のための作用応力頻度の推定, 土木学会第39回年次学術講演会講演概要集第1部, I-183, 1984-10.
- 9) 小堀為雄・城戸隆良・近田康夫: 観測による既存橋の耐荷性評価に関する研究, 金沢大学工学部紀要, 第17巻, 第2号, pp. 147-155, 1984-10.
- 10) 小堀為雄・城戸隆良・近田康夫: 実交通下における鋼橋の動的応答の実態調査, 金沢大学工学部紀要, 第20巻, 第2号, pp. 103-110, 1987-10.
- 11) 小関井孝吉・木保昇・小堀為雄: 維持・管理計画のための橋梁評価システムに関する基礎的研究, 土木学会論文集, No. 428/I-15, pp. 137-146, 1991-4.
- 12) 小堀為雄・城戸隆良・出村裕典・本田秀行・石見聖吉: ワーレントラス橋(御影大橋)の耐用性調査の一例, 橋梁と基礎, pp. 46-51, 1983-4.
- 13) 土木学会関西支部: 昭和60年度講習会テキスト, 既存橋梁の耐荷力と耐久性, 1985-7.
- 14) T. ボトマ著/関谷社・角城之助・杉山吉彦・須見尚文共訳: ひずみゲージ, 理論と応用, 共立出版, pp. 105-126, 1978-3.
- 15) 高橋實・河井正安: ひずみゲージによる・ひずみ測定入門 ―これから使う人のために―, 大成社, 1990-9.
- 16) 高岡宣善: 弾定構造力学, 増補版, 共立出版, 1987.
- 17) 養迎理: ひずみゲージとその応用, 改訂版, 日刊工業新聞社, 1981.
- 18) 城戸隆良・小堀為雄: 鋼桁への輪荷重効果の実測について, 土木学会第45回年次学術講演会概要集, I-333, 1990.
- 19) 城戸隆良・近田康夫・小堀為雄: 鋼桁と鋼床版のせん断ひずみ成分測定に関する一考察, 土木学会第46回年次学術講演会概要集, I-322, 1991.

(1992年9月21日 受付)