

勝瀬橋を対象とした斜張桁橋の模型実験 並びに載荷試験について

伊 藤 学*
島 田 静 雄**
熊 沢 周 明***

要 旨 わが国最初の斜張橋型式の橋梁として最近完成した勝瀬橋を対象として、その予備的模型実験並びに現場載荷試験における静的・動的応力測定の結果を報告する。構造の主要部分である斜張ケーブルおよび桁フランジにおける応力測定結果を検討するとともに、この型式の橋梁に関する筆者等の見解の一端を記したものである。

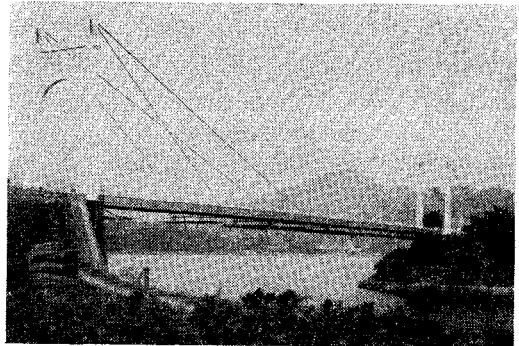
1. ま え が き

斜張橋 (Schrägeiselbrücke) の構造上の根本思想はかなり古くから見られるが、これが近代的な橋梁型式として登場し注目されたのは近年ドイツにおいてである。すなわち有名な Düsseldorf の Nord 橋をはじめスパン 300 m におよぶこの型式の橋梁がいくつか架設されており、長径間橋梁の一型式として脚光を浴びるようになった。これらについてはすでに内外の文献¹⁾ によって紹介されており、構造的な Simplicity (単純さ) による特色は認められるとしてもなおいろいろ議論はあろうが、ここではそれらの問題には触れない。なおこの型式の橋梁はドイツ語では Schrägeiselbrücke, 英語では Cable-stayed beam bridge と呼ばれている。わが国ではまだ正式の名称が定められておらず斜吊橋(または斜吊桁橋)と称している場合が多いようであるが、いわゆる吊橋とは構造理論上全く異なるこの種橋梁の呼び名としてはあまり妥当でないと考えるので筆者等は原語の意義も考慮して一応便宜的に斜張橋と呼ぶことにする。

ところでドイツ以外の諸国ではこの橋梁型式が本格的に採用された例はあまり見られないが、わが国においてはほかの橋梁型式との比較という意味で簡単な検討が行なわれた例はいくつかあるようである。特に若戸橋の設計にさいしては吊橋案との比較検討が行なわれ、その時の結論ではスパン 300 m 以上では吊橋より経済性においても得とはいえず、また動的性状にも未知の点が多いとして採用されなかった²⁾。しかし今般神奈川県において老朽化した旧木造吊橋の勝瀬橋(相模湖)の架替えに当って、諸型式を比較検討の結果わが国で最初の斜張桁

型式の橋梁が誕生するに至ったのである(写真-1)。

写真-1 竣工直前の勝瀬橋

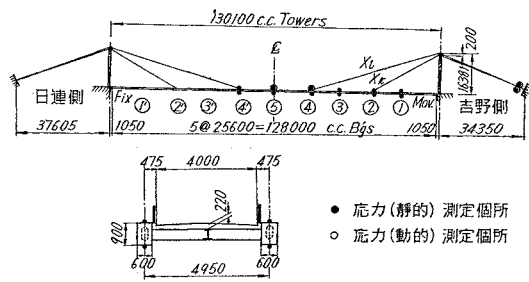


勝瀬橋の設計施工に関してはすでに紹介されている³⁾ので 2. にその概略を説明するとどめるが、何分わが国では初めての試みであり、また筆者等の属する東京大学工学部橋梁研究室においてその模型実験および完成後の現場応力測定を行なったのでここに結果を報告し検討を加えたい。

2. 勝瀬橋の構造概要

勝瀬橋は神奈川県津久井郡藤野町相模湖に位置し、神奈川県において企画され横河橋梁製作所が製作架設した鋼箱桁 2 本を主桁とする斜張橋である。その一般寸法および断面は 図-1 に示すとおりであるが、支間 128 m に対して桁高はその約 1/140 に過ぎず、鋼重は 323 kg/m² (うちケーブル約 12%) である。主塔は旧吊橋の剛なコンクリート塔をそのまま使用したため塔頂サドルはロッカー型式となっている。また主ケーブルにはスパイラルロープを用い、プリテンションを加えて弾性係数 E_K

図-1 勝瀬橋一般図および応力測定箇所



- 応力(静的)測定箇所
- 応力(動的)測定箇所

* 正員 東大工博 東京大学講師 工学部土木工学教室
 ** 正員 東大工博 東京大学助手 工学部土木工学教室
 *** 正員 東京大学受託研究生 (滝上工業KK)

$=1.5 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$, 安全率 3.0 として設計している。
 一方設計活荷重としては交通量の少ないことを考慮して、主桁に対しては集中線荷重 3.5 t/m および等分布荷重 100 kg/m^2 を、床組に対しては T-14 荷重を採用し

写真-2 ケーブル アンカー 部

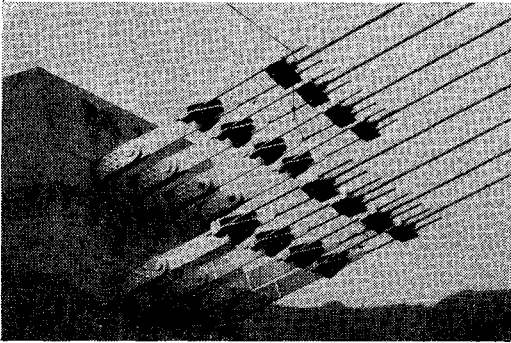


写真-3 ケーブルの主桁定着部 (下面)

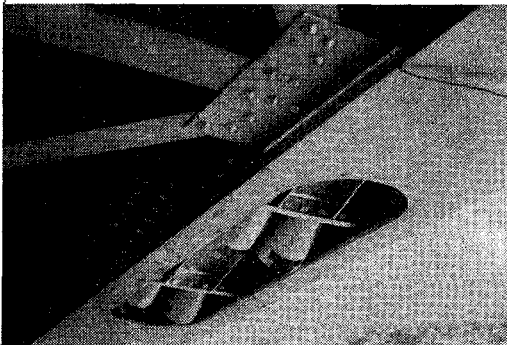
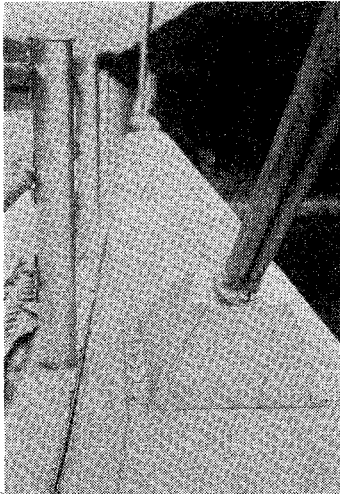


写真-4 主桁におけるケーブル取付け部



ている。このほか衝撃係数のとり方、風荷重に対する処置など特殊の問題があるので特に「勝瀬橋 設計示方書 (試案)」が作成されたが、これらについては計画に当られた神奈川県土木部の清水, 小村 (現在首都高速道路公団) 両技師の報告³⁾を参照されたい。ここでは参考までに勝瀬橋の二, 三の細部構造を写真-2~4 に示して説明にかえる。

3. 模型実験について

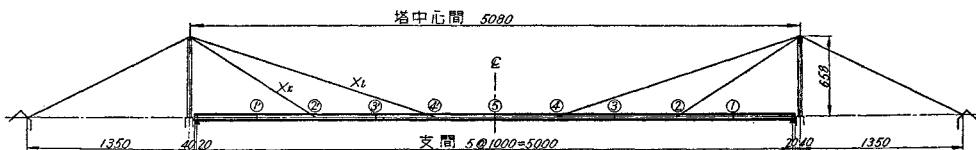
斜張橋の構造計算理論の裏付けを求め、またその一般的な性質を知るためにまず模型実験を行なった。実験に用いた模型は全く予備的な意味において1本の真鍮製角棒を主桁とし、各1本のピアノ線を斜ケーブルとして用いたごく簡単なものと、勝瀬橋の幾何学的形状および断面の剛性に相似性を持たせた模型の二種類である。前者は単なる準備段階としての実験であるのでここではその報告を省略する。

斜張橋は構造力学的にはケーブル取付け点において弾性的に支持された連続桁であるが、これを解くにはケーブル張力を不静定量にとって正統的に行列演算を行なう方法やいわゆる Kani の方法による解法⁴⁾などがある。勝瀬橋の設計計算には前者の解法を用いているので本模型実験における結果と比較せる計算値もこれにもとずいたものである。そのさい実験模型の塔はフレキシブルなものとなつてはいるが、塔頂サドルをローラー支承として計算では一応塔の変形を無視している。

実験に使用した模型は図-2 に示すような構造であり、勝瀬橋の $1/25.6$ の縮尺となっている。主桁および床組は真鍮製で死荷重に相当する等分布重錘を加えてはいるが実物に比較すれば不足であり、また床版に相当するものは設けられていない。ケーブルはピアノ線を用い、長さの調整は中間のターンバックルによって行なわれた。模型実験は目下のところ集中荷重 ($P=7.0 \text{ kg}$) 載荷による静的応力測定のみ実施されており、応力測定箇所は各ケーブルおよび主桁フランジ格点である。これらの点における応力測定には電気抵抗線ひずみ計を用い、特にケーブル張力は桁にアンカーする部分における2枚の真鍮板の箇所⁵⁾で4ゲージ法を用いて測定した。写真-5 は実験中の勝瀬橋模型である。

模型実験における静的応力測定結果のすべてを記載するようではなく、また桁フランジにおける応力測定値と計算値との比較は各点とも似かよった傾向にあるので、

図-2 勝瀬橋模型側面図



ここでは図-3 (a)~(d) にケーブル張力および主桁2点における曲げモーメントに関する結果のみを示す。これらは静的集中荷重に対する値すなわち影響線に相当するもので、実線でかいた計算値はすでにのべたとくケーブルの伸びを考慮して弾性支承上の桁構造として行列演算によって求めたものである。

図-3 (a)~(d) に見られるように模型実験の結果ではケーブル張力 X_L を除き測定値は計算値とよく一致している。ケーブル張力測定値は一般に計算値より小さくなっているが、これはケーブル定着部などにおける迂

写真-5 斜張橋実験模型

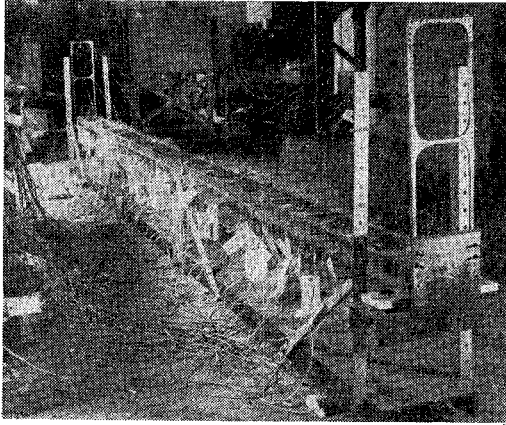
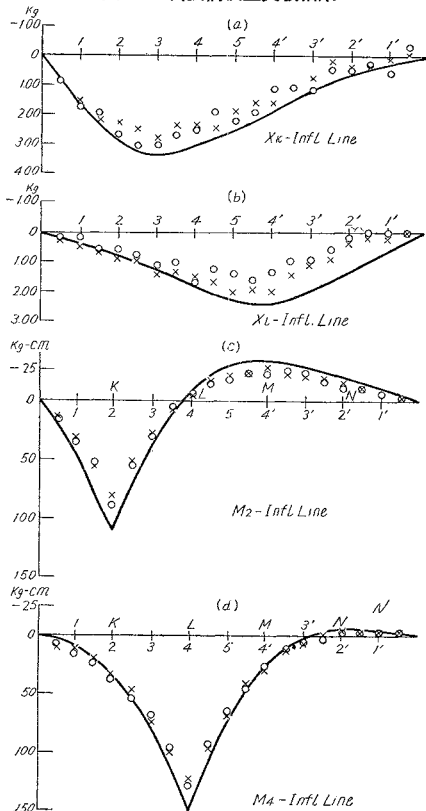


図-3 斜張橋模型実験結果



の影響（装置の不備）および塔の変形を無視したことによる誤差が原因と考えられ、その証拠としてケーブルの長さが比較的短かく調整容易で、しかも傾斜角も大きいケーブル k における誤差はほとんど無視できる程度のもとなっている。一方主桁曲げモーメントについては計算に用いた曲げ剛性の値に横桁の影響を全然考慮していないにもかかわらず測定値と計算値はよく一致している。これはケーブル張力測定値が理論値より若干低くなっているためでもあろう。

勝瀬橋模型においてはケーブル剛性が実際よりも低いが、静的模型実験の結果から計算に用いた理論の妥当性は確かめられる。斜張橋の活荷重によるたわみは同支間程度の吊橋より一般に小さいと予想される。なお偏心載荷の影響、動的性状など斜張橋一般の問題として今後の検討が必要であろう。

4. 勝瀬橋の静的載荷試験

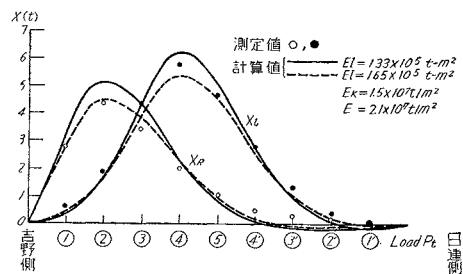
(1) 測定要領

本橋の現場載荷試験は床版コンクリートの硬化を待って昭和 35 年 6 月 6 日から 4 日間にわたって主として夜間実施された。活荷重としては総重量 7.2t のトラック 1 台を用い、ケーブル並びに主桁フランジにおける静的および動的応力測定を行なった。応力測定にはゲージ長 10 mm の電気抵抗線ひずみ計を用いたが、その設置箇所は図-1 に示すとおりである。すなわちケーブル張力の測定はアンカー ブロック前面の鋼丸棒の所で行ない、各 1 本のロープに連なる 2 本の鋼棒が均等に作用しているか否か、また同一ケーブルに属する各ロープおよび橋両側の相対するケーブルが均等に作用しているか否かなども検討することができるよう考慮した。一方主桁についてはその構造上応力測定位置は各格点付近のフランジ外面のみとし、特に点④においてはフランジ巾方向の応力分布状態を見るために 3 個のひずみ計を用いた。本橋の有効巾員は 4 m に過ぎないので偏心載荷試験は行っていない。

(2) ケーブルにおける静的活荷重張力

測定結果より各ケーブルを構成する 4 本のスパイラルロープ、各ロープをアンカー部に導く 2 本の鋼棒、および橋両側の相対するケーブルはそれぞれ均等に作用し

図-4 勝瀬橋ケーブル張力測定結果 (トラック 7.2 t)



ていることが確かめられ、この点に関しては架設の成功が認められる。スパンを10等分した各格点に荷重車後輪を位置せしめ、そのさいのひずみ測定結果より各ケーブル張力を算定すれば図-4のようになる。この図で実線は主桁の曲げ剛性に鋼箱桁のみを考慮した原計算書にもとづく理論計算値であり、また点線で示した計算値はコンクリート床版と鋼箱桁の合成作用を考慮したものである。すなわち本橋は横方向の剛性を確保するために横方向にはコンクリート床版と鋼箱断面より成る合成桁と考えているが、当然鉛直方向の曲げに対してもある程度の合成作用があろうと考え、不静定桁としての床版有効巾を仮定し、さらに鋼とコンクリートの弾性係数比を8として再計算したのが後者である。

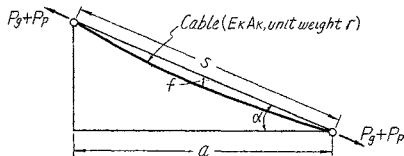
斜張橋の設計計算にさいして非常に重要な要因として、今のべた桁の曲げ剛性の値のほかにはケーブルの弾性係数の正しい評価があげられる。本橋のケーブルには一定のしかも比較的高い弾性係数値をもたせるためにプレテンションを加えたスパイラルロープ⁹⁾を用いている。さらに場合によっては斜張ケーブルの自重によるサグ(垂れ下り)に起因するケーブルの見掛けの弾性係数の減少を考慮せねばならない。これについては Dischinger, F. などの研究があり次の2つの式が出されている。記号などについては図-5を参照されたい。

$$E_{Ki} = \frac{E_K}{1 + \frac{r^2}{24} \frac{S^2}{\cos^2 \alpha} \frac{E_K}{\sigma_g^2 (\sigma_g + \sigma_P)}} \dots\dots (1)^{10)}$$

または

$$E_{Ki} = \frac{E_K}{1 + \frac{r^2}{24} \frac{S^2}{\sigma_g^2} \frac{E_K}{\sigma_{max}} \left(1 + \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}\right)} \dots\dots (2)^{11)}$$

図-5 斜張ケーブル



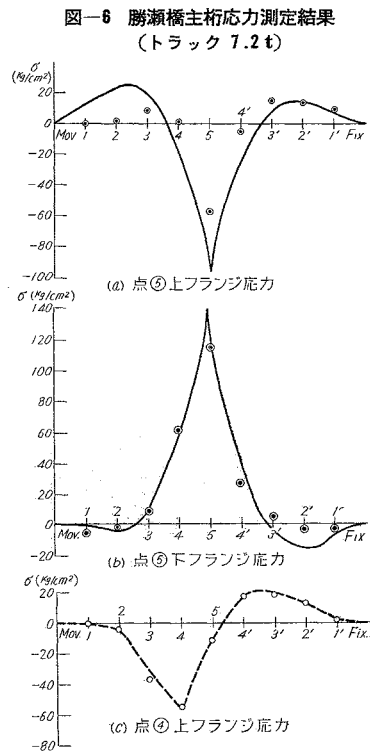
しかし本橋の場合にはサグの影響によるケーブル弾性係数の減少はほとんど問題にならない。

図-4の測定結果より判断して鋼箱桁とコンクリート床版の合成作用はある程度存在するものとみられ、それを考慮すれば測定値と計算値は比較的良好に一致していると思われる。しかし2つのケーブル①と④とは若干その傾向が異なること、およびケーブル張力の低い所で実際の値と計算値との差が大きいという事実が目玉され、その原因が理論上の誤差か、架設状況によるものか、あるいはロープのロッドの抜き取り測定のための誤差か即断はできない。

(3) 主桁フランジにおける活荷重応力

主桁には活荷重により一般に曲げモーメントと、軸力

とが同時に作用し、得られた応力測定値はその合成応力度である。両主桁が均等に働いていることは測定結果より確かめられたが、二、三の結果を図-6(a)~(c)に示す。図-6(a)および(b)における実線は前述のコンクリート床版の協同作用を考慮し、かつ実測ケーブル張力を用いて求めた計算値である。さらに比較のために表-1



には各格点における最大応力実測値および純粋に影響線より求めた二種の計算値を示した。この表における数値よりわかるように主桁有効断面のとり方によって断面中立軸の位置が異なるため、上下フランジにおける応力の比も異なる結果を与える。

表-1 各点における最大応力 (kg/cm²)

着目点	上フランジ		下フランジ	
	測定値	計算値	測定値	計算値
①	-71	(1) -144 (2) -92	—	(1) +160 (2) +162
②	-42	(1) -72 (2) -43	+36	(1) +72 (2) +73
③	-82	(1) -155 (2) -76	+118	(1) +140 (2) +138
④	-66	(1) -119 (2) -59	+100	(1) +104 (2) +102
⑤	-57	(1) -162 (2) -77	+115	(1) +118 (2) +119
⑥	-63	(1) -116 (2) -56	+80	(1) +106 (2) +105

注：計算値(1)は鋼桁のみ、(2)は床版の合成作用をも考慮した値。

主桁フランジ応力の実測結果およびその計算値との比較から次の諸項が考察される。

a) 本橋においてはコンクリート床版の主桁としての協同作用を考慮した方がより正しい結果を与えるものと思われる。

b) しかしながら場所によっては実測応力と計算値とはかなりの差があり概して後者が大である。その原因として斜張橋においてはケーブル張力のわずかな変動が主桁応力にはいちじるしい影響を与えるという事実があげられよう。

c) いま一つ考えるべきこととして、軸力の評価があ

る。本橋では左岸側支点を可動シュー、右岸側を固定シューとして計算しているが、この条件も荷重の小さい場合に実際にはどの程度正しいか疑問である。また軸力を鉄筋コンクリート床版のどれだけの部分が負たんし得るか、これらの要因が実測応力にかなり影響していると考えられる。

(4) 主桁フランジにおける死荷重応力

載荷試験に先立って横河橋梁製作所技術部研究室が行なったコンクリート床版打設時の死荷重応力測定資料があるのでその結果について簡単に触れたい。測定はゲージ長 100 mm のコンタクトゲージを用い、ケーブル定着点およびスパン中央の主桁フランジについて行なわれた。その結果によれば、

a) 床版打設後に鋼箱桁を外側凸なるように曲げるモーメントが若干作用しているように思える。すなわちフランジの中方向の応力分布は均一でない。活荷重載荷にさいしてはそのような傾向は見られなかった。

b) 実測応力値を鋼箱桁のみを有効主桁断面とみなした場合の理論計算値と比較すれば、スパン中央点においてはあまり差がないが、ケーブル取付点においては実測値の方がはるかに小さい。コンタクトゲージによる測定の信頼度は別にして、ケーブル取付点における応力分布の特異性についてもさらに検討を要するであろう。活荷重応力測定にさいしてひずみ計の位置はケーブル取付点をややはずしている。

5. 勝瀬橋の動的載荷試験

動的応力測定にさいしては荷重用トラックを最大 30 km/h、3段階の速度で往復走行させた。測定対象は図一1に示した5点における動的応力であるが、そのオシログラフによる測定記録の一例を図一7に示す。

(1) 自由振動性状

荷重通過後の自由振動記録より観察される本橋の固有振動周期としてはほぼ 0.28 秒、0.38 秒、0.55 秒の3種類が共通して現われ、特に最後のものは高速走行後にのみ生じている。そのほかにケーブルにおいては 0.7~0.8 秒および 1.1~1.3 秒の比較的長周期の振動、桁においては 0.08 秒くらいの短周期振動が時として認められる。一般に振動減衰性はあまり良好でなく、長周期の振動ではことにその傾向がいちじるしいが、減衰率その

ものは自由振動波形がいくつかの基準振動の合成したものであり振巾も小さいので定量的に評価することができない。

さて斜張橋に対する固有振動周期の近似的理論値をリッツの方法を用い勝瀬橋について計算した結果は次のようになる。

$$T_1=1.45 \text{ sec}, \quad T_2=1.07 \text{ sec}, \quad T_3=0.78 \text{ sec},$$

$$T_4=0.56 \text{ sec}, \quad T_5=0.39 \text{ sec}, \quad T_6=0.27 \text{ sec}.$$

それぞれの固有振動周期に対応する振動形はこの場合数個の正弦波形を組合わせた形を仮定したが、奇数次のものは対称型振動波形に、偶数次のものは逆対称型振動波形に対応するとみなしてきしつかえなからう。また参考までにひずみ計を設置したケーブルバックステイ部の横振動固有周期を計算すれば、ケーブル①、⑥に対してそれぞれ 0.386 sec、0.343 sec となり、またスパン 25.6 m の単純支持桁としての基本固有振動周期は 0.396 sec となる。

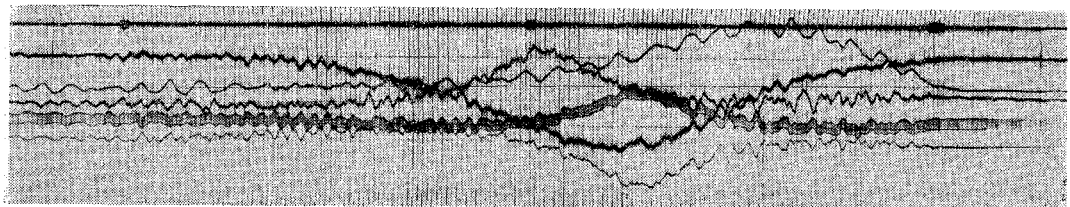
いま求めた理論値を実測固有振動周期と比較してみると、桁における微振動をのぞきいづれも実測値は計算値のどれかとほぼ一致するとみられる。もっとも計算値における T_5 の値と、ケーブル①のバックステイ部横振動周期およびスパン 25.6 m としての単純支持桁振動周期は偶然にほとんど一致しており、どの効果が現われているか確言はできない。しかし斜張橋としての理論値はコンクリート床版の合成作用をも考慮して求めたものであるが、その妥当性は認め得ると思う。ただ比較的高次の振動まで割合平等に生じていることは注目され、低次振動に相当する周期は低速走行荷重通過後に主としてケーブルに見られるのみであり、桁においてはこれらは認めにくいのではないと思われる。

(2) 走行荷重による衝撃

荷重用トラック走行中の測定記録を観察すると一般に荷重進入直後と退出直前およびケーブル張力最大の付近で顕著な振動が認められ、強制振動周期は前記自由振動のそれとほとんど変わらない。一方強制振動による衝撃率に相当する値として応力最大半振巾と静的最大応力との比をとってみれば表一2のようになる。

測定結果より判断して、この場合動的効果と荷重走行速度とはあまり関係がないように思われ、本橋の実状から見ても衝撃の原因はほとんど路面の不整に帰せられよ

図一7 動的ひずみ測定記録の一例 ($P=7.2 \text{ t}$, $v=27.3 \text{ km/h}$)



注：下の3つは主桁フランジ、他の2つはケーブル

表-2 測定結果よりの衝撃率

実験番号	測定点 走行速度	ケーブル	ケーブル	桁フランジ	桁フランジ
		①	②	(スパン中央)	(点④)
1-A	10.9 km/h	0.067	0.089	0.115	0.153
1-B	11.5	0.072	0.106	0.289	0.205
2-A	19.1	0.081	0.152	0.233	0.245
2-B	19.9	0.083	0.126	0.120	0.119
3-A	27.3	0.084	0.118	0.270	0.166
3-B	26.9	0.059	0.207	0.169	0.181

注：実験番号でAは左岸より右岸，Bは右岸より左岸へ走行

う。勝瀬橋の設計計算にはゲルバー型式橋梁に対する道路橋設計示方書の条項を準用して衝撃率を定めているが、集中荷重とはいえ測定により観察された衝撃がかなり大なることは注意を要しよう。またケーブル①における衝撃がケーブル②におけるよりも常に小であることは設計の仮定と合致しているが、主桁における衝撃値が一般にケーブルにおける値より大きいことは注目される。

6. あとがき

勝瀬橋は、わが国で初めての斜張橋として意義があるが、いわばテスト ケースでもあり予算の窮屈なこともあって必ずしも満足であったとはいえないようである。斜張橋型式は現在のところドイツ以外ではあまり例を見ないようであるが、地震など特殊事情の多いわが国でもその本格的採用に当たっては十分慎重な配慮が必要であろう。

本橋の応力測定結果について考察すれば、斜張橋としての各部の作用は予期どおりであるが、主桁の曲げ剛性には鉄筋コンクリート床版の協同作用を認めざるを得ない。斜張橋の設計計算にはケーブルの弾性係数、桁の曲げ剛性、支承条件などを正確に見積ることが必要であるが、このためには構造の簡素化とともに、桁自体を比較的曲げ剛性の評価しやすい鋼床版箱桁などにすることが望ましいと思われる。桁の曲げモーメントの交番のいちじるしいこと、架設の問題、曲げと軸力を受けるさいの合成作用の不明確さなどを考えるとコンクリート床版の採用には若干不安がある。また斜張橋においてはケーブル張力におけるわずかな誤差が主桁応力にかなり敏感に影響することも注意しなければならない。本橋の荷重走行による衝撃はときとしてかなり大きい場合が見うけられた。しかし固有振動周期を見ると大体の見当で同スパン程度の吊橋における値と大差なく、本橋の全体としての

剛性は吊橋を用いた場合とほぼ同じと考えてよからう。荷重走行にさいしての衝撃は本橋においては路面の不整に起因すると見られるが疲労の問題には特に注意を要する。幸い交通量は少ないようであるが、温度変化の影響も無視できぬであろう。

斜張橋全般の問題に関連して、この型式の橋梁としては本来外的静定構造とした方が望ましいと考える。すなわち連続桁を基本系とし得るような場合で自定式構造にするならば効果が上るのではなからうか。また吊橋では補剛トラスの損傷も致命的ではないが、斜張橋型式では部分的な欠陥も重大な結果を招くおそれがある。この点吊橋構造との比較にさいしては留意すべきである。そのほかケーブルのプレストレス工法なども考慮した架設の問題、細部構造特にケーブル定着点における桁の応力分布など多くの論ずべき点があるが将来さらに検討されることを期待したい。

終りにこの問題全般にわたって御指導を賜った東京大学 平井 敦教授および奥村敏恵助教授、本橋の測定に協力して載いた神奈川土木部 清水永策氏、日本道路公団松野操平氏、横河橋梁の明石重雄氏はじめ研究室の方々、ならびに東京大学工学部橋梁研究室の方々に深く感謝の意を表す。また現場載荷試験は東京大学工学部橋梁研究室（代表者 平井 敦教授）が神奈川県藤野町より委託を受けて行なわれたものであることを付記する。

参考文献

- 1) “Nordbrücke Düsseldorf”, Herausgegeben von der Landeshauptstadt Düsseldorf, 1958.
Schreier, G.: North Bridge at Düsseldorf; ACIER, Nos. 9 & 11, 1958.
H. Homberg: Einflußlinien von Schrägseilbrücken; Stahlbau, H. 2, 1955.
Fischer, G.: The Severin Bridge at Cologne; ACIER. No. 3, 1960. など。
- 2) 「若戸橋調査報告」; 日本道路公団および建設省土木研究所
- 3) 清水永策・小村 敏: 勝瀬橋の設計々算について; 「道路」(1960年2月号)
- 4) 岡村隆夫: Kaniの方法による斜張橋の解法; 土木技術, 第14巻第12号, p. 4, 1959.
- 5) 田中五郎・西脇威夫・島田静雄: 吊橋用スパイラル ロープの弾性的性質; 土木学会論文集第59号・別冊(3-3). 昭33. 11.
- 6) Dischinger, Fr.: Hängebrücken für Schwerste Verkehrslasten; Bauing. 1949, H. 3, S. 65~.
- 7) Schreier, G.: North Bridge at Düsseldorf; ACIER, No. 9, 1958, p. 373.

(原稿受付: 1960.8.18)

土木工学論文抄録 第3集 A4判 230頁 頒価: 500円 会員特価: 250円(〒70円)
同 第4集 A4判 273頁 頒価: 450円 会員特価: 225円(〒70円)
同 第5集 A4判 378頁 頒価: 1200円 会員特価: 800円(〒80円)

注: 土木工学論文抄録第6集も本年中には刊行できますのでお知らせ致します。