

# 橋 梁 測 定 法

正會員 新 郷 高 一\*

譯者の序 本文は 1928 年及び 1931 年に die Bautechnik に發表せられたもので、今日既に舊びた感じが無いではないが、今次歐洲大戰前、ドイツ國內に於て鐵道並に自動車道路の殆ど全鐵橋の測定に施行せられた橋梁測定法は、盡く本法に依る處で、本法は今尙斯界最良法であることは識者の等しく認むる所である。此の故を以て譯者元來自らの爲に稗力をも顧ず元文の翻譯を試みたのである。然し乍ら拙文若し他の同志をも益する所があれば望み之に過ぐるものはない。譯文の意はよく悉きざる點が多々あるべく、諸賢の御叱正を賜りたまき次第である。

## 橋梁の動力學的應力の新式測定法\*\*

國有鐵道技師 工學博士 ルドルフ・ベルンハルト

### I. 概 説

土木建築工事に於ては、靜力學が或程度完成の域に達した時と雖も、動力學は尙その初階に在るを常とする。動力學に於ては時間の關係が數學的に表はされて同時に計算に考慮せられる點に於て靜力學と著しく相違するのである。土木建築技師が此の難解なる然し益々重要となりつつある構造物の動力學の領域に於て進歩を求むるならば、新しい然し從來習熟してゐなかつた理論的な又同時に實際的な方法を以てしなければならない。

かくして例へば橋梁の應力を現場に於て實測するにより、計算に依つて得た結果を検證せんとする、漸次據頭しつつある要求は、今日尙決して決定的なものとは考へられないが、近年數多の研究を誘導醸成するに至つた。然し車輛が構造物上を進行する場合に、動力學的應力に顧慮して狀況の研究を行へば、從來決して異論なき解答が得られなかつた程に、現象に錯綜してゐる。

此の研究の大なる經濟的意義は明かに實驗的證明により事實上生じたる衝擊係數をより正確に決定し、之によりて許容應力が恐らく多少にても引き上げ得らるべしと云ふ點に在る。然る時は、此の結果として可及的により經濟的建設をなし得るであらう。

次には第一に實際の測定結果とその理論との一致、即ち、橋梁の應力測定は之に適當せる裝置にて測定さるべきである。一部近時文獻の出版に刺戟せられて現れた<sup>1)2)</sup>、數多の之に關する問題の解法は、既に研究されてゐるので之に就いて簡潔に照會し得る。

靜力學的並に動力學的應力計に對する希望事項は明瞭に極めて詳細に規定しておかなければならぬ。何故ならば、惹起せらるる伸縮は極めて小なるのみならず、又、一面比較的大なる計測範圍に涉るからである。此の外計器は本來記録すべき急激なる伸縮の變化を同時に其れ自體に受けるのである。

\* 京城帝國大學教授

\*\* R. Bernhard, Beitrag zur Brückenmesstechnik. Neuere Messungen dynamischer Brückenbeanspruchungen. I Stahlbau 1928, Heft 13.

1) Grundzüge für ein Verfahren zur dynamischen Untersuchung von Brücken. Von Prof. N. Stretzki, Moskau. "Die Bautechnik" 1927, Heft 41.

2) Stossbeanspruchungen und Schwingungen der Hauptträger statisch bestimmter Eisenbahnbrücken. Von Prof. Dr. W. Hort. "Die Bautechnik" 1928, Heft 3 u. 4.

更に使用中の橋梁に於ては同様の理により、研究室に於ける様な敏感な計器を使用することの不可能なことは容易に分る。又精度と感度とに對する要求は、之等が最も不都合にも同時に考慮される時、恐らく従來の計器の何れに於ても、他の計測に於ては要求せられてゐないであらうけれども、定められてゐなければならぬ。變位計自體は堅固に作らるべきで、之は適宜に自記裝置より分離せしめておくべきである。敏感なる自記裝置の部分は、此の様にすることにより、最早橋梁上に固定する必要はなくなる。之は純粹に動力學的理より適當なりと考へられる。何となれば、若し然らざれば記録裝置の重量は記録を絶へず歪曲するからである。斯くて此の兩部分は電氣的に連結せられれば極めて簡單である。此處で土木技師は彼自身に極めて縁遠い微量測定術の領域を理解しなければならぬ。併して、舊來の方法に依りて正鵠を得た結果を望むことは出來ないが、然し、其の方法は振動問題の研究が遙に高度に解決せられてゐる電氣工学の専門領域から求めなければならぬ。

ドイツ國有鐵道會社は普く知られてゐる様に、1923年に鐵橋の動力學的 안전度檢定の必要の爲に應力並に振動計の設計を懸賞募集したのである。

懸賞金の好餌を以つてしても、従來の應力計も亦懸賞に對して提出された橋梁の應力計も未だ、決して、夫れ自身に指定せられた要求を完全に満足せしめ得ない結果<sup>3)</sup>に在るが、適當の裝置の製作には二つの根本的に相違せる方法が採用せられた。

其の第一には、舊來の機械的裝置の改良に在る。

其の第二には、上記の理由に依り電氣的計測法を利用せるもので、其の間正にベルリンの國有鐵道中央局で更に改良製作されたものに外ならない。此處には之に就いて述べることにする。前者が極めて急激なる應力變化を著大なる倍率にて擴大する事を行はない場合には、兩者は全く差異がない事を前置きして置き度い。

## II. 計器檢定問題<sup>4)</sup>

計器檢定の問題は、すべての動力學的應力計のみならず、純粹の靜力學的裝置に對しても、詳細に研究せらるべき重要な事項である。

靜力學的檢定と動力學檢定との間には劇然たる區別がなければならぬ。動力學的裝置は自ら次の二つの試験に合格する様設計されなければならぬ。

1. 先づ靜力學的、亦勿論動力學的の應力計のその時々倍率の精密なる靜力學的檢定を計器の全計測範圍内にて行はねばならぬ。

例へば、ドイツ國有鐵道會社の懸賞募集の極めて細密なる要求が準守せらるるものとすれば、30 cmの通常の規定に依る測長に就き  $5 \text{ kg/cm}^2$  の應力變化の證明が要求される、即ち、 $0.5 \mu$  の變位 ( $\Delta l$ ) が測定し得られねばならぬ。即ち  $\Delta l = 20.5/2 \cdot 100 \cdot 000 \approx 1/20 \cdot 000 \text{ cm} = 0.5 \mu$  となる。通常の記録圖の線の太さは尙ほ  $1/2 \text{ mm}$  程に充分精密に讀み得らるるものと假定する時は、少くとも 1000 倍の擴大が必要な事になる ( $n = 0.5 \text{ mm}/0.5 \mu = 1000$ )。

倍率を 1000 倍にすべき、此の様に小なる變位の檢出は機械的裝置を以てしては純靜力學的測定に對してさへも之等二條件を満足せしむる事は困難である。

比較の爲に此處に微量測定學に於ては  $1 \mu$  の精度で、之等測定範圍内にて殆ど絶對的に必要な一定測壓を得る爲に、所謂微測槓杆 (Fühlhebel) を裝置したる螺旋測微計を以て測定する事を述べなければならぬ。然し 20 cm の長さに涉り、單に  $10 \text{ kg/cm}^2$  の正常壓力に於て St 37 に對する壓縮は既に凡そ  $1 \mu$  に達する。此の故

3) Vergl. Untersuchung von Spannungs und Schwingungsmessungen für Brücken. Bericht über die Ergebnisse des Wettbewerbs der Deutschen Reichsbahn Gesellschaft zur Erlangung eines Spannungs und Schwingungsmessers für dynamische Beanspruchung eiserner Brücken. Berlin 1928. Verlag der Verkehrswissenschaftlichen Lehrmittelgesellschaft m. b. H. bei der Deutschen Reichsbahn.

4) 檢定 Eichung, auf Englisch "Calibration."

4)  $1 \mu = 1/1000 \text{ mm}$ .

に  $1\mu$  以下の量が規定される場合は、光學的方法を選ばねばならぬ<sup>5)</sup>。

今述べた、壓力の特に重要な事に就いては、特に注意し度い。何となれば橋梁測定装置を如何に注意して取り付けても、夫れ自體に一定の未知量が藏されて居り、之が數多の過誤測定の原因となるからである。故に先づ、橋梁上に種々の荷重走行を行はしむる時は、計器の各尖支點は其の支承點にて、夫れ以上の荷重走行に依りて最早何等の位置の變化をも生じない點に壓し着けられる事は勿論容易に想像される。

正規の荷重機關車に依りて生ずる靜力學的的最大應力は、例へば 35 m 徑間の中位の大きさの鐵道橋で僅に  $\max. \sigma_p = \text{約} \pm 300 \text{ kg/cm}^2$  ( $\sigma_g = \pm 500 \text{ kg/cm}^2$ ) である。最も著名なる靜力學的變位計 (例へば Huggenberger, Okuizen 並に Fuess) の測長は延長杆なき場合は凡そ 2 cm であるから、一輛の荷重機關車に依る荷重に對し單に

$$\Delta l = \frac{300 \cdot 2}{2 \cdot 100000} = 0.0002 \cdot 85 \text{ cm} = 2.85 \mu.$$

の變長を生ずるのみ。故に例へば場所が無かつた爲に、延長杆を用ひてより長き測長となす事は別として、既に此處に、即ち純靜力學的測定の場合に、從つて正に先づ檢定の際に最大の困難が起る事は最早不思議ではない。

故に若し將來、前に算定せる精限の  $0.5\mu$  以下の此の様な計測を行ふには、他の方法が講ぜられねばならぬ。

倍率の靜力學的檢定即ち精密なる決定は應張棒狀試片に變位計 (Dehnungsmesser) を取り着け、一方應張力試驗機の檢定せられたる目盛と、他方變位計の記録圖上にて、その變長を讀み取ることに依り、例へば各々の應張棒狀試験片の各點に於て決して同一ならざる彈性係數 ( $\pm 2.5\%$  の變化) に依る僅小なる誤差の原因を分明にする。個々の装置内の槓杆の擴大比の合成に依る倍率の純粹なる機械的決定は接手 (gelenke) 内の避け難き遊びを看過してゐる。亦、20 cm の測長にて  $1^\circ$  の溫度變化は既に凡そ  $2.4\mu$  の變長を生ずるから、此の様な檢定は定溫にて行はれなければならぬ。

夫れ故に先づ第一に  $0.5\mu$  の範圍の此の様に小さな原因的運動を計器に強要し、他方或る方法に依り、例へば光學に依り干涉測距計 (Interferenzkomparatoren) を考慮しない場合、顯微鏡測距計 (Messmikroskope) を以つて檢測することが出来るならば、橋梁測定學に於て要求される精度に對する計器の檢定曲線は完全に決定される。

同一檢定法が先づ靜力學的的基本應力の絶對的の倍率を檢證し得る爲に、すべての動力學的應力計に對しても亦當に應用されねばならぬ。

2. 動力學的檢定は第一に装置の自己振動數を決定するに在る。之は 500 Herz<sup>6)</sup> 以上の振動數の場合は下に述べる様に振動臺に依つても殆ど檢定し得られない。振動臺自體も此の様な高振動數に對しては製作が困難である。然し衝擊法に依れば檢定し得られる。衝擊法とは唯一回の衝擊に依り、計器に刺戟を與ふる事を意味する。之は機械的装置に於ては記録桿尖點を其の平衡位置より最も簡單に變位せしめ、再び放置するに依りて行はれる。記録杆無き方式に於ては、例へばハンマーを以つて輕打するに依りて自由振動を生ぜしめる事が出来る。兩方の場合に於て、記録は装置の求められたる自己振動數と共に行はれる。

然し第二には發生する橋梁の振動の範圍内では、装置は絶對に正確なる、即ち歪まざる振幅を記録すると云ふ適正なる證明がなされなければならぬ。此の橋梁の振動に對しては實際上の評價の際には最高凡そ 300 Herz が問題になるのである。

然し之は正確には亦振動臺に依りて檢定せられる。振動臺は固定部と可動部とより成り、檢定さるべき應力計は可動部に固定し得られる。可動部は、一面、充分に高振動數を、例へば、少くも 300 Herz 迄の正弦波振動を、可及的に歪を生ずることなく發生し得る様な機構でなければならぬ。然し、他面、亦同時に完全に觀測せられ、檢定すべき變位計の記録圖と比較され得る様記録され得る機構でなければならぬ。今日迄の機械的の將又電氣的の

5) Die Genauigkeit technischer Längenmessungen. Von Vorländer, Dresden, in der Messtechnik 1928, Heft 5.

6) 1 Herz = 1 Schwingung je Sekunde = 1 振動/秒.

應力計に依る研究は、橋梁上に荷重が走行する際に發生する振動狀況(強制振動)は、夫れが計器の自己振動と一致する時は、假へ着せられた振幅が橋梁の應力に何等の顯著なる影響を生ぜざる程小なる場合ですら、記録には著しき歪曲を惹起する。亦装置が比較的高度の自己振動數を有する場合には之は避け難いから、共鳴波動は記録を數倍に重疊せしめる結果、記録圖より評價する事は實際上不可能である。

上記の目的に使用さるべき靜力學的並に動力學的檢定器械を以つて現在研究中で、その終結を待つて、之に就き報告することが出来る。

III. 電氣的測定法

主として機械的の計器を以つての研究並にその結果に關しては、既に近年充分に文獻が出版せられてゐるから(7,8,9), 此處では觸れないこととする。振動作用は橋梁製作架設者に先づ第一に應力變化の形式で興味を持たれてゐるので、振動計は同様に詳細には述べない。

總ての機械的装置に於て、主要な困難なる點は、先づ第一に、其の測定範圍に於て、倍率に適した記録を得る爲に必要にして高度の自己振動數を得る事で、第二に自己振動數は倍率の増加と共に著しく増大するのであるから、同時の完全なる評價に必要な顯著なる倍率を得る事である。

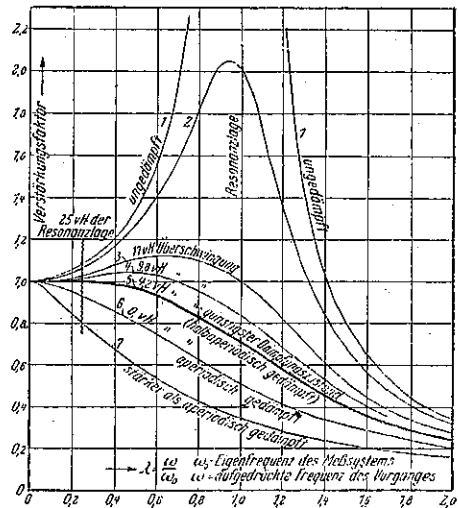
圖-1 の共鳴曲線から、如何なる狀況に於ても記録に歪を生ぜざる範圍に止むる爲に、測定すべき最高振動數の4倍を計測装置の自己振動數ならしむる事が重要な事として無條件に推賞せらる。今 X 軸上に計測装置に傳達された振動數を取り、Y 軸上に振幅即ち計測装置に依り記録せられたる波高を取りて作らるる曲線を共鳴曲線と名づける。

極く一般に適法な曲線を得るために、圖-1 では X 軸上に  $\lambda$  の値 ( $\lambda = (\text{現象より傳達せられた振動數}) + (\text{計測装置の自己振動數})$ ) を、Y 軸上に倍率 (倍率 = (記録されたる振幅) + (強制振幅)) を示してある。

傳達された振動數と計測装置の自己振動數が一致した點では、若し減衰作用即ち例へば摩擦又は空氣抵抗等の內的抵抗が振幅を弱めなければ、其の振幅は遂に無限大となるであらう。

可撓ならざる振子は、其の自己振動の周期と同じ律動を以つて突き動かさるれば、其の振幅は常に増大する。然るに自己振動の周期より急激なる、同様により緩慢なる、又は律動的でない擊動に依つては全く又は殆ど大なる振動を生じない。此の例は最も良く此の間の事情を明かにしてゐる。此處には亦振子の支點に於ける摩擦に依りて、振幅が著しく減少せしめられる事實を理解し得る。圖-1 に示された種々の共鳴曲線より解る事は半非周期的減衰作用(曲線 5)の場合に限り共鳴位置の 25% 迄は正確な倍率の振幅を有する事を、夫れに依り算出出来るであらうと云ふ事である。(非周期的減衰作用とは決して過超振動即ちその平衡位置に對して過剰の指示を生じない減衰狀態を明白に意味する)。電氣的に傳達せらるる計器を以つてすれば、此の困難は容易に除去し得られる。然も、

圖-1. 種々の制振状態に対する共鳴曲線



7) Dynamische Untersuchungen an Brücken. Von Dr.-Ing. Geiger, Augsburg, im "Bauingenieur" 1924, Heft 19.

8) Stosswirkungen bei eisernen Brücken. Von A. Bühler, Sektionschef für Brückenbau der Schweizerischen Bundesbahnen. Zürich 1926; in "Schweizerische Ingenieurbauten" in Theorie und Praxis.

9) Über das Wesen dynamischer Wertziffern. Von Dr.-Ing. Saller, Direktor bei der Reichsbahn, im "Bauingenieur" 1926, Heft 20.

充分に急激なる自己振動が得られるのみならず、次に述べる様に、検定の問題も同時に完全に解決し得られる。

次に述べる研究は橋梁技術者の實際の仕事に對して使用上特別なる困難を伴はずして應用し得られる様、専ら電氣的測定法を完成するのが目的である。

既述の様に先づ自記装置自體と變位計とを區別しておかねばならぬ。

1. 就中必要なる高度の自己振動數を示す優秀なる自記装置は、電氣工學に於て既に久しく振動現象の研究が行はれてゐたオシログラフに依り與へられる。然し土木建築技術者には餘り知られてゐないので此處に簡潔に記述する。

オシログラフは元來閉回路狀に引き張られた電線を強力なる電磁石間に懸垂した計器より成る(圖-2a, b)。電流の流通する導體に磁場の及ぼす電動作用に依り、電流の流通する際に閉回路の旋回を生ずる。此の閉回路線上に一個の小なる僅に 0.5×0.5 mm の大さの鏡が固定してあり、之は一つのランプより來る光路の中間に吊り下げられてあるので、その旋回は光挺子の回轉となり、夫れに依る光點の移動を運行せる一本のフィルム上に投影する役目をなす。其れは 6 線迄投影し得られる様な機構になつてゐる。即ち一本のフィルム上に 6 本の記録曲線が撮影される。

圖-2 a. オシログラフの閉回路の略圖

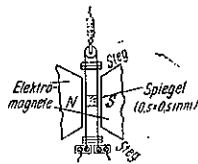
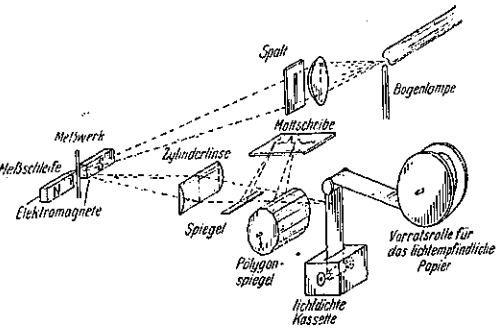


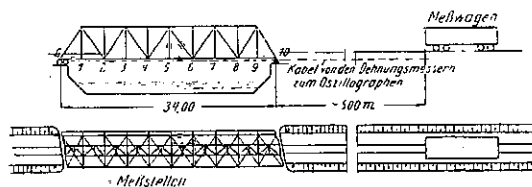
圖-2 b. 一閉回路を有するオシログラフに於ける光線の経路圖



一般に凡そ  $5 \times 10^{-5}$  Ampère の電流が 1 m の光挺子に對して 1 mm の變化を示す様になつてゐる。

前の目的に使用されたオシログラフの回路は 2000 Herz の自己振動數を持つてゐる。此のオシログラフの回路中に振動減衰に必要な油を適當に入れる事に依り圖-1 の半非周期的に減衰された曲線 5 を得る様にしなければならぬ。機械的裝置に於ては何れの場合でも、最早所期の減衰状態を強制する事は出來ない。例へば接手に於ける様な、裝置の内部抵抗は運搬の度に、反覆される計器の取付け毎に、時々多少變更されて、他の減衰曲線を與ふるに至る。併して歪の倍率の臨時の檢定は極めて困難である。電線閉回路の回轉運動を、否絶へず認らるる或程度靜止せる、移動する波の變化を試験中完全に、亦撮影の際、幾分回轉する二翼ある圓筒又は多面鏡(圖-2b を參照)上にストロボスコープの原理に依りて觀測し得られる。倍率は記録圖の線を擴大しないし、又殆ど制限されてゐない。今日迄最高の場合には 2000 倍に擴大された。感光紙の進行は機械的記録の場合には不可能の様に思はれた 4m/sec (米/秒) まで引き上げられた。オシログラフは橋梁から任意の距離の特定の測定車内に安置して作用せしめられる(圖-3)。

圖-3. 單線鐵道橋梁の測定配置



測定された時間の経過を定める爲に時間記號として 50 Herz の自己振動を有する音叉を同時に撮影する。前述の橋梁測定の爲に電氣的に作用する遮斷器も取り付けられてある。其のスウッチの挿入は一個又は數多の枕木上に取り付けられたる軌條接觸器に依り鐵橋上及び其の前後に於て行はれる、即ち荷重機關車の車軸が此の接觸器の上を通過する際に之を下壓するに依りてスウッチが入り、其の位置並に其の速度が同時に各記録圖上に精確に記録される様になつてゐる。

夫れ故にオシログラフは寫眞現像の缺點を別にすれば、高振動數の範圍に於ける動力學的測定の場合に避け難

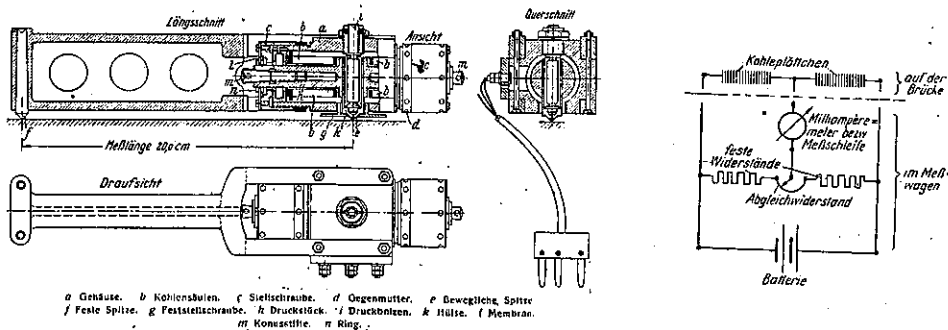
い機構の質量の影響は、質量無き光線の使用に依り完全に除去せらるるが故に振動並に應力變化狀況の記録には優秀なる計測装置と考へ得られる。

2. 實際の變位の測定とオシログラフに依り記録せしめる爲に變位を直流電氣に置換する事とは共に更に困難な事である。數多の既存の又は考案された電氣的應力計は或ものは單に變位の變化のみを與へ、亦屢々其の上に交流電氣曲線として與ふるもので、之等は橋梁の振動測定には不適當である。同様に増幅真空管を用ひたる配線は檢定最も困難なるため有望で無い。得られた交流記録圖よりは屢々其の包絡線が用ひ得られるのみで、極めて迅速な應力變化を評價する事は特に困難である。

夫れ故に次には變位測定に上記の様な缺點の無い炭素變位計 (Kohledehnungsmesser)<sup>10)</sup> が考案された (圖-4 a)。之は一つの容器内に二つの炭素棒を封じ込んだもので、各の炭素棒は炭素の小板を積み重ねて作られてゐる。之等2本の炭素棒間に一つの彈性的に應力をかけられた棒が入れてあり、其の自由端を伸縮する橋梁の部材上に乗せておけば、彈性棒が容器に對して運動する時、一つの炭素棒に張力を、他の一つの炭素棒に壓力を生ずる事となる。此の際炭素小板間の電氣的接觸抵抗は變化する。故に此の2本の炭素棒を有名な Wheatstone Bridge の配線に結合して (圖-4 b)、炭素棒が正常位置に在る時、此のブリッジに何等の電流も流れない様に調節しておけば、變位の變化毎に之に從つて壓力即ち抵抗の變化が Wheatstone Bridge の中に + 又は - の電流を發生す

圖-4 a. 橋梁測定用の炭素變位計

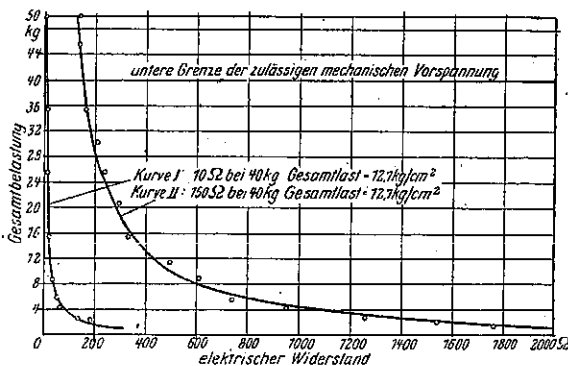
圖-4 b. 炭素變位計の電氣的接觸圖



る。此の小型の漸く 800 g の重さの装置は外觀何等の可動部又は鋭感部をも持つてゐない様に見える。

圖-5 に示された双曲線形の曲線は1本の炭素棒を使用した場合、機械的荷重と電氣的接觸抵抗との間には決して直線的關係が成立しないことを示してゐる。I 及び II の兩曲線は抵抗材料の長期間の試験の後注意して選定された組合せに依り決定したもので、各々合計 57 枚の炭素小板片より成る。但し、此の實驗は未だ完了してはゐない。他方上述の配線結合及び二つの炭素棒柱の適當なる機械的初應力の選擇に依りて凡そ  $\pm 1000 \text{ kg/cm}^2$  の必要なる測定範圍では實際上各應力の變化が Milliampèremeter 及び測定回路の指示

圖-5. 炭素棒の機械的壓力と電氣抵抗との關係



高と直線的關係を保持し得る事を圖-6 に示された應張並に應壓力試驗が證明してゐる。

此の 1923 年に始めにアメリカ人に依り應用された原理 (Electrical Telemeter von O.S. Peters, U. S. Bureau

10) Die erste Anregung zu diesen Versuchen mit Kohledehnungsmessern erhielt Verfasser bei seinem Besuche des U.S. Bureau of Standards in Washington im Frühjahr 1926.

of Standards, Washington, D. C.<sup>(11)</sup> は 1925 年に Dr. Siemann に依りドイツのブレーメンに於て多少變形して海上で船舶の試験の際に緩慢なる應力變化の記録に利用された<sup>(12)</sup>。

橋梁測定のために特に改造された装置 (圖-4a 及びドイツ國專賣特許を参照) はアメリカの装置と同様に、二つの炭素棒の機械的初應力は兩方より相互に無關係に調整し得られる様に作られてゐるので測定すべき橋梁の部材に取り付けた後にも再調整し得られる様になつてゐる。

各連杆結合及び其の他の動力學的結合は、所謂動搖を生ずる機因を避ける事に努めた。

装置を取り付けるには極めて強力な螺旋緊子 (圖-7) を作つた。其の壓力は常に尖支點上に等分に分布され亦垂直に作用する様になつてゐる。

何故なれば機械が傾斜して取り付けらるれば極く一般的に云つて常に誤差の一原因となるからである。例へば、20 cm の測長に就き僅に 1/6° の傾斜の取り付けが凡そ 0.8 μ の長さの變化を與ふるからである。此の取付け金具一個に依り實際の取付け時間が凡そ 30 秒に短縮される。

圖-7. 炭素變位計の取付装置

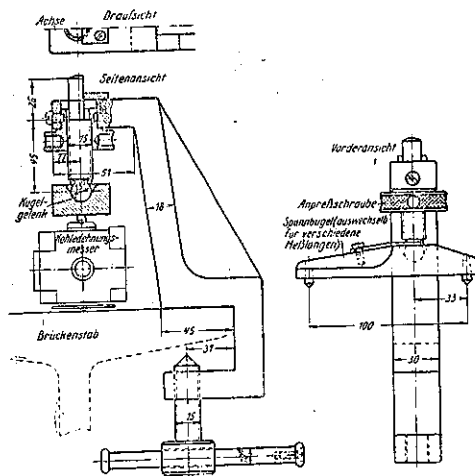


圖-6. 炭素變位計の引張反應壓力試験 (荷重に對應するミリアンペアメーターの指示の直線的變化を示す)

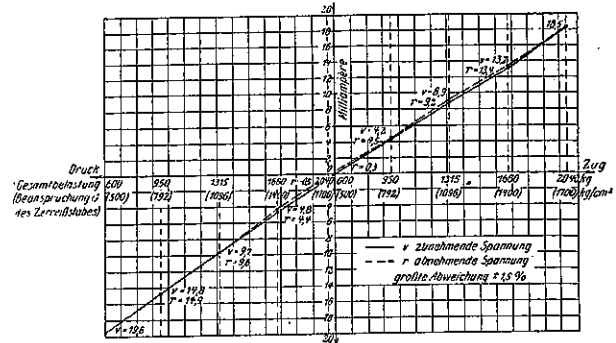
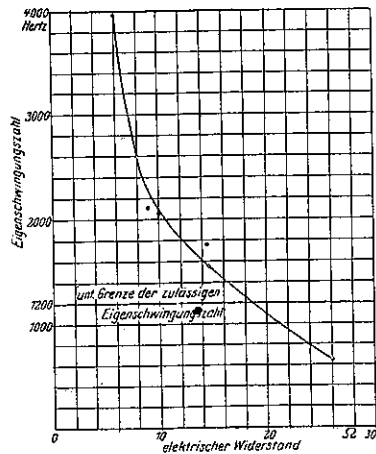


圖-8. 橋梁用炭素變位計の自己振動數と二本の炭素棒の電気抵抗 (即ち機械的應力) との關係



此の變位計は炭素棒の外に自記杆等の様な可動並にバネ仕掛の部分が無いので、例へば取り付けられた状態の自己振動現象は、從來とは異つた意味で理解せねばならぬ。計器を取り付け又は取り付けずして打撃を與へて自己振動曲線を撮影した所、豫め決定した炭素棒の機械的初應力に依つて 2 000 Herz から 4 000 Herz 迄變化してゐた (圖-8)。炭素變位計を取り付けた状態で打撃を與へた場合の至即ち振動狀況は就中圖-9 に示された如くに想像して見る事が出来る。

• 11) S. O. Peters, "New Development in Electric Telemeters." Proceedings, Am. Soc. Testing Mts., Vol. 23, Part II, p. 593 (1923).

12) Formänderungsmessungen an Schiffskörpern. Von Dr.-Ing. Siemann, Bremen. Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1926, Heft 16 u. 19.

圖-9. 炭素變位計の自己振動數決定のため力をかけた状態にて打撃を興へた場合の振動状態圖

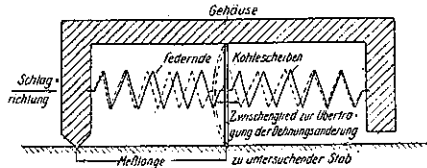
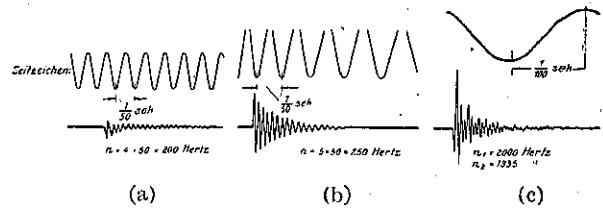


圖-10. 炭素變位計の自己振動記録圖  
a) 初期變位計 b) アメリカの變位計 c) 改良せる變位計



Siemann に依つて使用された装置の自己振動は凡そ 200 Herz, アメリカの装置の夫れは取り付けられた状態て 500 Herz, 取り付けられざる状態て 250 Herz を示した。之等は接手並に槓杆傳達の存在に依り直ちに自明なる缺點である (圖-10 a, b, c)。兎に角ドイツ國有鐵道會社に依り橋梁測定の目的に適する様改良せられた變位計

圖-11. 炭素變位計の自己振動曲線の級數解析法

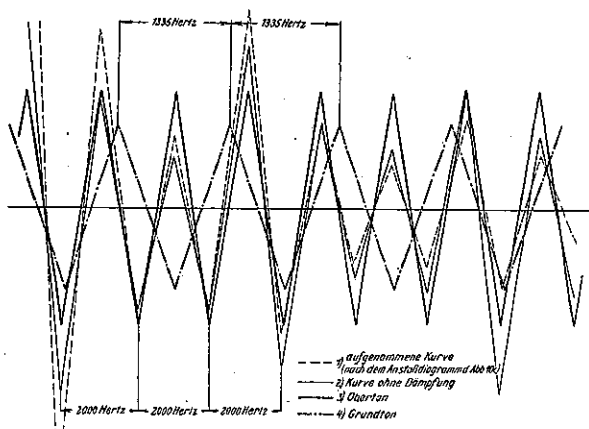
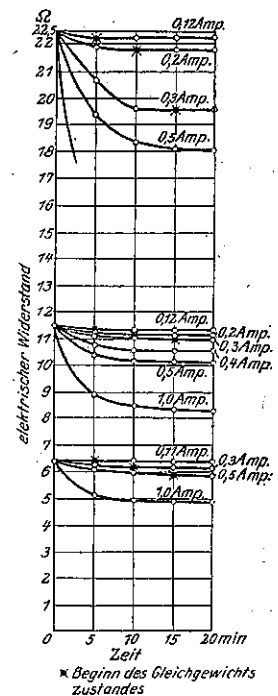


圖-12. 種々の初期抵抗を有する炭素棒に於ける電流載荷時間による電氣抵抗の變化



では測定すべき橋梁の振動數の精々 4 倍の振動數 (4 × 約 300 Herz) が完全に自己振動數となし得られた。圖-11 には装置を取り付けておいて打撃を興へて實驗的に見出された圖-10 c の改良型變位計の自己振動曲線から最低の振動數を求むる爲に、實驗的方法で求めた級數解析法が示されてある。先づ第一に強烈なる減衰作用に依り急激に低調となつてゐる實驗に依り撮影された曲線から、其の一部を取り出し、併も明瞭にする爲に、減衰せしむる事なしに直線で描いた。夫れは次の考察には最大縦距が問題となるからである。然る後二曲線はその縦距の代數和を求むる時初めの撮影された曲線を得る様に試案に依り決定された。

次には變位計の許容電流を定める爲に圖-12 に示した曲線を実験により求めた。同曲線は種々の初抵抗を有する炭素棒の電氣抵抗の時間的變化を示してゐる。亦同時に微電流 (0.1 Ampère 以下) の場合、僅小なる時定數 (Einschaltzeit) (約 5 分間) の後、問題となる總ての抵抗に對し既に平衡状態となり従つて完全に一定の指示を表すに至る。實際上には變位計に少くも 5 分間電流が流れてから初めて測定を初むべき事を意味する。此の操作は實驗の際に勿論以上の時間の損失を伴はない様に行はるべきである。

IV. 橋梁測定學の特殊問題と其の解決

オシログラフ及び應力測定に用ひらるる前述炭素變位計装置を以つて、例へば鐵道橋を測定する方法を此處に簡単に説述する事に依り之に依つて解決さるべき問題に暗示を興へ得るであらう。



橋梁測定車(圖-3 参照)は橋梁より任意の距離に置かれ、其の中にはオシログラフ並にホキートストーン・ブリッチ配線の各回路の抵抗調節器が設備されてゐる。此處で荷重車輛の走行も命令せられ亦オシログラフも作用せしめられる。電線を敷設接続する間に、橋梁の測定すべき部材に變位計を取り付け(圖-13)、其の炭素棒の抵抗を橋梁上では機械的に大體調整し、抵抗調節器に依り電氣的に微細に調整する。又軌條接觸器をも取り付ける。然る後に前述の理論に依り荷重の振動走行が行はれ、其の結果として振動記録圖が撮影される。

振動記録圖の檢定は、荷重機關車を繰り返して走行せしめ、其の場合の最も結果悪しき橋上の位置にて 10 cm 測長の Huggenberger 式應力計に依りて行はれる。斯くて此の變位計の讀みの平均値より靜力學的應力が算出される。次に振動記録圖の撮影の前後に於ける靜力學的荷重に依りて生じたオシログラフの指示高は動力學的記錄の評價の基礎となる。

アメリカ人に依りて用ひられたる方法は、抵抗調節器上の精密 Milliampèremeter を直接に讀む事に依りて炭素變位計の振動記録圖の靜力學的檢定を行ふのであつて、機械的裝置を以つて比較測定することは行はれてゐないのであるから、未だ檢定がなしとげ得られたとは云へない。

圖-13. 橋梁材に取付けたる變位計

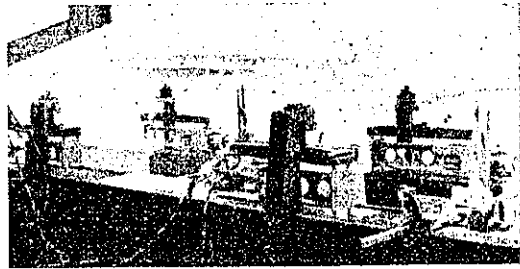


圖-14 a. 一鐵路車の通過に起因する支間 34 m の桁桁に於ける部材應力 (IV, V 格間)

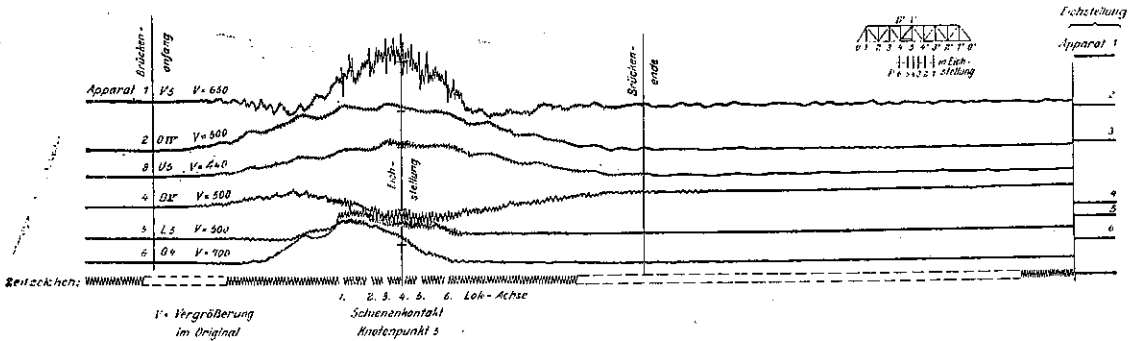


圖-14 b. 圖-14 a に対する表

Brückenfeld IV - V.

| Apparat<br>Nr. | Meßlänge<br>em | Befestigung           |        | Stromverbrauch |      | Vorspannung |      | Schleife                   | Eichstellung            |                             |                         |                               | Fahrt 50 km/h      |               |                       | Schwingungen |                    |                | Zeitzeichen    | Be-<br>merkungen |                         |      |      |  |
|----------------|----------------|-----------------------|--------|----------------|------|-------------|------|----------------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------------|--------------------|---------------|-----------------------|--------------|--------------------|----------------|----------------|------------------|-------------------------|------|------|--|
|                |                | Stab                  | Skizze | Volt           | Amp. | a)          | b)   |                            | Typ                     | Achse 4<br>in Knotenpunkt 5 |                         | Aus-<br>schlag<br>mit<br>Stoß | "                  | Stoß-<br>zahl | auf<br>Null<br>zurück |              | Fahrt-<br>diagramm |                |                |                  | Stabstoß<br>in Richtung |      |      |  |
|                |                |                       |        |                |      | I           | II   | Empfindlichkeit<br>mm/p.A. | Anschieß<br>im Diagramm | M. A. am<br>Schaltapp       | 0 Nügel<br>Huggenberger | mm                            | kg/cm <sup>2</sup> | mm            | kg/cm <sup>2</sup>    | mm           | H <sub>1</sub>     | H <sub>2</sub> | H <sub>3</sub> | J-Achse          | K-Achse                 | Sek. |      |  |
| 1              | 20             | V <sub>3</sub>        |        | 12             | 0.4  | a 7.8<br>b  | 7.6  | 14,3                       | IV                      | 15,6                        | 17,2                    | 1,5                           | 214                | 30,9          | 385                   | 1,80         | nein*)             | 9              | -              | 200              | -                       | -    | 1/50 | *) Aufnahme<br>ohne ver-<br>bliches Ein-<br>rücken |
| 2              | 20             | O <sub>IV</sub>       |        | 12             | 0.4  | a 11,0<br>b | 11,5 | 14,6                       | IV                      | 15,6                        | 18,6                    | 3                             | 395                | 22,3          | 474                   | 1,20         | ja                 | -              | 98             | 250              | 165                     | 65   | 1/50 |  |
| 3              | 20             | U <sub>3</sub>        |        | 12             | 0.4  | a 9,6<br>b  | 9,5  | 14,3                       | V                       | 7,4                         | 12,9                    | 2                             | 309                | 17,5          | 420                   | 1,36         | -                  | -              | 200            | -                | -                       | 1/50 |      |  |
| 4              | 20             | D <sub>V</sub>        |        | 12             | 0.4  | a 10,0<br>b | 9,6  | 14,3                       | V                       | 6,6                         | 6,4                     | 1                             | 120                | 8,3           | 156                   | 1,30         | nein*)             | -              | 35             | 200              | -                       | -    | 1/50 |  |
| 5              | 10             | Längs-<br>träger<br>5 |        | 12             | 0.4  | a 8,2<br>b  | 7,8  | 15,1                       | V                       | 11,6                        | 6,5                     | 1                             | 346                | 13,0          | 692                   | 2,0          | -                  | -              | 350            | -                | -                       | 1/50 |      |  |
| 6              | 10             | Quer-<br>träger<br>4  |        | 12             | 0.5  | a 160<br>b  | 155  | 14,7                       | V                       | 21,0                        | -                       | 1,5                           | -                  | -             | -                     | -            | ja                 | -              | 100            | -                | -                       | 1/50 |      |  |

全ての記録の縦距の大きさに調節器上の電気の調整計器を記録撮影中監視する事が出来れば、今撮影した振動記録圖が信頼し得られるや否やを殆ど即座にかなりの的確に判定し得る。更に例へば測定車内の暗室の前に光室を設備しておけば短時間の現像後直ちにフィルムを見る事が出来る。

一部分猛烈な暴風雨の際に取行はれた試験の結果から、例へば濕潤に依り何等の記録の變化をも生じない事が明白となつた。又、天候の影響を蒙らない様に防護せられた測定車内で6個所の同時測定の歪曲せられない観測と記録とに依り此の方法は評價を誤らない利益がある事も明白となつた。

應力、振動數並に衝撃係數は直接に個々の記録圖から明白となる(圖-14より圖-19迄)。圖-14b~圖-19bに掲げられた一部過大な衝撃係數は必ずしも最大應力の超過を制限しない。何となれば變位計は屢々靜力學的に最も都合悪しき断面に取り付けられなかつたし、従つて部材内の最も可能なる靜力學的應力の算定が衝撃係數の評價にその基礎を置かれてゐなかつたからである。今日迄行はれた小數の試験からは、今尚ほ妥當なる結論は見出し得られない。然し二、三の注意すべき結果は、他の橋梁の測定に依る確證を保留して、簡単に説明し度い。

先づ第一に何れの場合でも零線が振動走行に依り強制せられるとも絶対に不變な事は全装置の正確なる動作を裏書きする良き證據である。機械的測定装置を用ひ併せて純靜力學的測定を行ふ場合に、組織的に荷重走行をなさしむる事は無條件に必要にして測定成功に常に大いに役立つた。

圖-15の記録圖(Apparat 3及び4は上弦の下突椽(Untere Flansche, lower flange)に取り付けられた)に於ける振動に注意すべし。然し之に對する完全な説明は今尚ほ與へられない。此の試験橋梁に於ては一つの充分なる對傾構(Querverband, sway bracing)、綴板(Bindebleche, tie-plate)及び一つの上横構(oberer Windverband, upper lateral bracing)が缺けてゐるから、恐らく其の爲に兩方の下突椽(untere Flanschen, lower

圖-15 a. 一機關車の通過に起因する支間 34 m の構桁に於ける上弦材應力

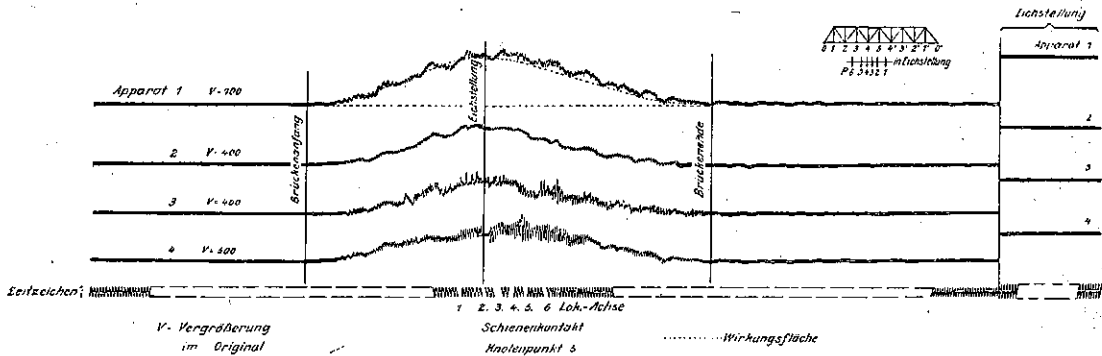


圖-15 b. 圖-15 a に對する表

Obergurt.

| Apparat Nr. | Messlänge cm | Befestigung    |        | Stromverbrauch |      | Vorspannung       |                     | Knotenpunkt | Schleife | Eichstellung        |                    |                            | Fahrt 50 km/h       |           |                | auf Null zurück | Schwingungen Hertz |                |                        | Zeitzeichen | Be-merkungen |                               |      |  |
|-------------|--------------|----------------|--------|----------------|------|-------------------|---------------------|-------------|----------|---------------------|--------------------|----------------------------|---------------------|-----------|----------------|-----------------|--------------------|----------------|------------------------|-------------|--------------|-------------------------------|------|--|
|             |              | Stab           | Skizze | Volt           | Amp. | a) v. d. Versuch  | b) n. a. Elmrütteln |             |          | Ausgang im Diagramm | N. A. am Schraubit | σ Mittel nach Fugenbreiter | Aus-schlag mit Stoß | Stoß-zahl | α <sub>1</sub> |                 | α <sub>2</sub>     | α <sub>3</sub> | Stabanstoß in Richtung |             |              | Zeitzeichen                   |      |  |
| 1           | 20           | O <sub>v</sub> |        | 12             | 0,4  | a 7,8<br>b 7,7    | 7,5<br>7,5          | 14,3        | IV       | 15,6                | 20,1               | 1,5                        | 320                 | 25,4      | 405            | 1,27            | ja                 | -              | -                      | 94          | 1/50         | Vor der Aufnahme 4 Elmrütteln |      |  |
| 2           | 20           | .              | .      | 12             | 0,4  | a 10,75<br>b 10,7 | 10,6<br>10,4        | 4,6         | IV       | 15,6                | 14,9               | 3,0                        | 395                 | 18,2      | 483            | 1,22            | .                  | -              | -                      | 94          | 165<br>320   | 65<br>150<br>350              | 1/50 |  |
| 3           | 20           | .              | .      | 12             | 0,4  | a 9,2<br>b 9,4    | 9,7<br>9,3          | 14,3        | V        | 7,4                 | 13,6               | 2,0                        | 346                 | 24,0      | 610            | 1,76            | .                  | -              | -                      | 110         |              |                               | 1/50 |  |
| 4           | 20           | .              | .      | 12             | 0,4  | a 10,0<br>b 9,7   | 9,6<br>9,5          | 14,3        | V        | 6,6                 | 10,7               | 1,5                        | 220                 | 20,8      | 428            | 1,94            | .                  | -              | -                      | 110         |              |                               | 1/50 |  |

l = innen  
a = außen

圖-16 a. 一級關車の通過に起因する支間 34 m の橋桁に於ける下弦材應力

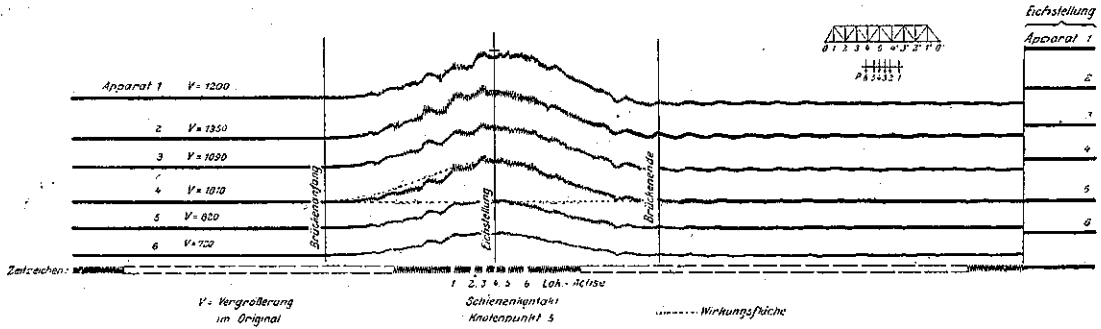


圖-16 b. 圖-16 a に對する表

**Untergurt.**

| Apparat Nr. | Meßlänge cm | Befestigung    |        | Stromverbrauch |      | Vorspannung      |                  | Kabelwiderstand für und Rückleitung in Ω | Schleife | Eichstellung Achse 4 in Knotenpunkt 5 |                          |                      |   | Fahrt 44 km/h         |          |                 | Schwingungen Hertz |                      | Zeitzeichen Sek. | Bemerkungen |      |                                       |
|-------------|-------------|----------------|--------|----------------|------|------------------|------------------|--|----------|---------------------------------------|--------------------------|----------------------|---|-----------------------|----------|-----------------|--------------------|----------------------|------------------|-------------|------|---------------------------------------|
|             |             | Stab           | Skizze | Volt           | Amp. | a) v. d. Versuch | b) n. d. Versuch |  |          | Type                                  | Ausschlag im Diagramm mm | M.A. am Schafkopf mm | Mittelwert nach Huggenberger kg/cm <sup>2</sup> | Ausschlag mit Stoß mm | Stoßzahl | auf Null zurück | Fahrt-diagramm     | Stabstoß in Richtung |                  |             |      |                                       |
| 1           | 20          | U <sub>5</sub> |        | 12             | 0,38 | a 11,3<br>b      | 11,05            | 14,3<br>14,4<br>14,3                     | IV 15,6  | 21,8                                  | 3,0                      | 190                  | 23,6  | 208                   | 1,08     | nein*)          | —                  | 180                  | —                | —           | 1/50 | *) Aufnahme ohne vorheriges Einmitten |
| 2           | 20          | .              | .      | 12             | 0,38 | a 11,7<br>b      | 11,7             | 14,7<br>14,7<br>14,7                     | IV 15,6  | 21,4                                  | 2,5                      | 167                  | 26,0  | 203                   | 1,22     | ja              | —                  | 300                  | —                | —           | 1/50 |                                       |
| 3           | 20          | .              | .      | 12             | 0,36 | a 11,05<br>b     | 11,2             | 14,3<br>14,3<br>14,2                     | V 7,4    | 17,3                                  | 3,0                      | 167                  | 20,8  | 201                   | 1,20     | nein*)          | —                  | 75<br>200            | —                | —           | 1/50 |                                       |
| 4           | 20          | .              | .      | 12             | 0,38 | a 10,15<br>b     | 10,0             | 14,4<br>14,4<br>14,2                     | V 6,6    | 18,2                                  | 3,5                      | 190                  | 21,4  | 224                   | 1,18     | ja              | —                  | 75<br>100            | —                | —           | 1/50 |                                       |
| 5           | 10          | .              | .      | 12             | 0,38 | a 9,6<br>b       | 9,5              | 15,2<br>15,1<br>15,1                     | V 11,6   | 12,1                                  | 1,5                      | 309                  | 15,1  | 386                   | 1,25     | .               | —                  | 87<br>200            | —                | —           | 1/50 |                                       |
| 6           | 10          | .              | .      | 12             | 0,48 | a 167,5<br>b     | 167,5            | 14,8<br>14,8<br>14,6                     | V 21,0   | 10,1                                  | 1,0                      | 292                  | 12,1  | 350                   | 1,20     | .               | —                  | 87<br>200            | —                | —           | 1/50 |                                       |

*i = Innen  
o = außen*

圖-17 a. 一級關車の通過に起因する支間 34 m の橋桁に於ける横桁應力



圖-17 b. 圖-17 a に對する表

**Querträger.**

| Apparat Nr. | Meßlänge cm | Befestigung    |        | Stromverbrauch |      | Vorspannung      |                  | Kabelwiderstand für und Rückleitung in Ω | Schleife | Eichstellung Achse 4 in Knotenpunkt 4 |                          |                      |   | Fahrt 30 km/h         |          |                 | Schwingungen Hertz |                      | Zeitzeichen Sek. | Bemerkungen |   |      |  |
|-------------|-------------|----------------|--------|----------------|------|------------------|------------------|--|----------|---------------------------------------|--------------------------|----------------------|---|-----------------------|----------|-----------------|--------------------|----------------------|------------------|-------------|---|------|--|
|             |             | Stab           | Skizze | Volt           | Amp. | a) v. d. Versuch | b) n. d. Versuch |  |          | Type                                  | Ausschlag im Diagramm mm | M.A. am Schafkopf mm | Mittelwert nach Huggenberger kg/cm <sup>2</sup> | Ausschlag mit Stoß mm | Stoßzahl | auf Null zurück | Fahrt-diagramm     | Stabstoß in Richtung |                  |             |   |      |  |
| 2           | 20          | Q <sub>4</sub> |        | 12             | 0,4  | a 10,3<br>b      | 10,0             | 14,6                                     | IV 15,6  | 24,9                                  | —                        | —                    | 85  | 36,1                  | —123     | 1,45            | ja                 | —                    | 120<br>200       | —           | — | 1/50 |  |

圖-18 a. 一級關車の通過に起因する支間 34 m の構桁の縦桁應力

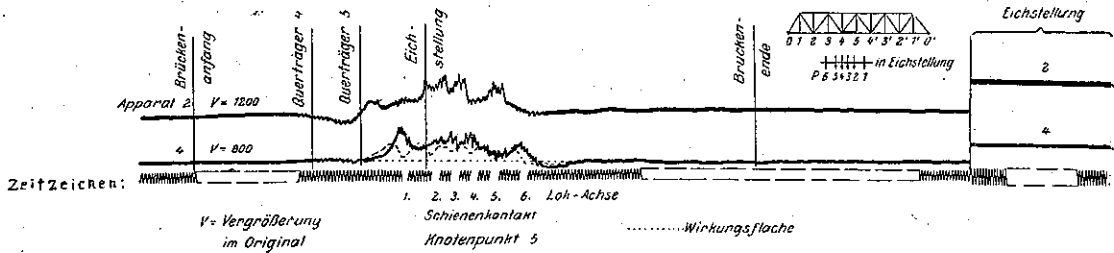


圖-18 b. 圖-18 a に対する表

**Längsträger.**

| Apparat<br>Medlänge | Befestigung<br>Stab<br>Skizze | Stromverbrauch |      | Vorspannung                          |     | Kabelstand<br>Hin- und Richtung<br>qd | Schleife<br>Type | Eichstellung     |                               |                                       | Fahrt 45 km/h      |      |                    | auf Null zurück | Schwingungen Hertz |                    |                           | Zeitzeichen | Be-<br>merkungen |      |      |  |
|---------------------|-------------------------------|----------------|------|--------------------------------------|-----|---------------------------------------|------------------|------------------|-------------------------------|---------------------------------------|--------------------|------|--------------------|-----------------|--------------------|--------------------|---------------------------|-------------|------------------|------|------|--|
|                     |                               | Volt           | Amp. | a) v. d. Versuch<br>b) n. d. Versuch | II  |                                       |                  | in Knotenpunkt 4 | Aus-<br>schlag<br>im Diagramm | M. A. am<br>Schleifen-<br>mittelpunkt | kg/cm <sup>2</sup> | mm   | kg/cm <sup>2</sup> |                 | Stoß-<br>zahl      | Fahrt-<br>diagramm | Stabanstoß<br>in Richtung |             |                  | Sek. |      |  |
| 1                   | 20<br>L <sub>6</sub>          | 12             | 0,4  | a 7,5<br>b 7,6                       | 7,6 | 14,3                                  | IV               | 15,6             | 5,7                           | —                                     | 91                 | 10,7 | + 171              | 1,88            | ja                 | 3,3                | —                         | 110         | —                | —    | 1/50 |  |
| 4                   | 20                            | 12             | 0,4  | a 9,9<br>b 9,3                       | 9,3 | 4,3                                   | V                | 6,6              | 6,5                           | —                                     | 87                 | 14,3 | 192                | 2,20            | —                  | —                  | —                         | 120         | —                | —    | 1/50 |  |

圖-19 a. 一級關車の通過に起因する支間 34 m の構桁に於ける垂直材應力

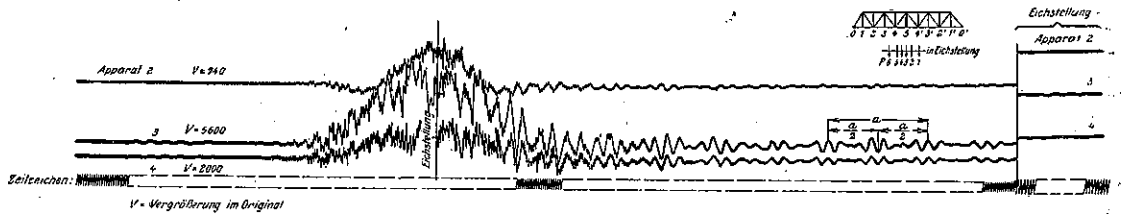


圖-19 b. 圖-19 a に対する表

**Pfosten.**

| Apparat<br>Medlänge | Befestigung<br>Stab<br>Skizze | Stromverbrauch |      | Vorspannung                          |      | Kabelstand<br>Hin- und Richtung<br>qd | Schleife<br>Type | Eichstellung     |                               |                                       | Fahrt 50 km/h      |      |                    | auf Null zurück | Schwingungen Hertz |                    |                           | Zeitzeichen | Be-<br>merkungen                |      |     |      |                                |
|---------------------|-------------------------------|----------------|------|--------------------------------------|------|---------------------------------------|------------------|------------------|-------------------------------|---------------------------------------|--------------------|------|--------------------|-----------------|--------------------|--------------------|---------------------------|-------------|---------------------------------|------|-----|------|--------------------------------|
|                     |                               | Volt           | Amp. | a) v. d. Versuch<br>b) n. d. Versuch | II   |                                       |                  | in Knotenpunkt 4 | Aus-<br>schlag<br>im Diagramm | M. A. am<br>Schleifen-<br>mittelpunkt | kg/cm <sup>2</sup> | mm   | kg/cm <sup>2</sup> |                 | Stoß-<br>zahl      | Fahrt-<br>diagramm | Stabanstoß<br>in Richtung |             |                                 | Sek. |     |      |                                |
| 1                   | —                             | —              | —    | a<br>b                               | —    | —                                     | —                | —                | —                             | —                                     | —                  | —    | —                  | —               | —                  | —                  | —                         | —           | —                               | —    | —   |      |                                |
| 2                   | 20<br>V <sub>5</sub>          | 12             | 0,6  | a<br>b 8,75                          | 7,5  | 14,6                                  | IV               | —                | 15,7                          | —                                     | 214                | 21,6 | 294                | 1,38            | ja                 | 8                  | 100                       | 150         | a*) 200<br>— 400<br>b*) 240     | 230  | 225 | 1/50 | a*) belastet<br>b*) unbelastet |
| 3                   | 20                            | 12             | 0,6  | a<br>b 14,9                          | 11,0 | 14,3                                  | V                | —                | 22,5                          | —                                     | 42                 | 40,4 | 73                 | 1,80            | —                  | 8                  | 45                        | 150         | a*) 200<br>b*) 50<br>160<br>200 | 300  | —   | 1/50 | —                              |
| 4                   | 20<br>i = innen<br>a = außen  | 12             | 0,6  | a<br>b 9,4                           | 14,8 | 14,3                                  | V                | —                | 12,2                          | —                                     | 64                 | 29,3 | 155                | 2,4             | —                  | 8                  | 70                        | 200         | a*) 300<br>b*) 150<br>160       | 175  | 170 | 1/50 | —                              |

Flanges) が此の様に大なる動力學的應力を受けてゐるのであらう。

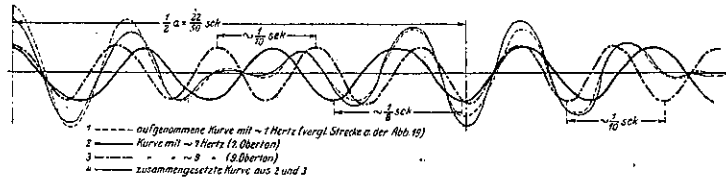
更に、荷重機關車が橋梁上を通過した後には漸次振動は止むけれど、一部の振動は 10 秒も或はもつと長く後迄も續くのが注意に値する (圖-18)。

上弦材 (Obergurt, upper chord) (圖-15) 及び垂直材 (Pfosten, posts) では著しく緩なる振動が明瞭に觀察し得られる。之は恐らく對傾構 (Querverband, sway bracing) (横構 (Windverband, lateral bracing)) の缺除に依る垂直材 (Pfoete, post) の上部自由端の振動及びブラーメン作用の影響であらう。一部材の一断面内で相互に相對して取り付けられた二計測装置 Apparat 2 及び 3 (圖-19) の記録圖を觀察して 7 乃至 8 Herz の彎曲振動が存在してゐる事が明瞭となつた。此の兩計測装置は同時に、その一は應張力の増加を、他の一は應張力の減小を、即ち相反對する振動量即ち彎曲應力を示した。

荷重後の振動狀況を熟知する爲にシャロットンプルグの國立物理工學校の調和級數分析儀 (Harmonischer Analysator) で垂直材の振動曲線 (圖-19 の Apparat 3) の上音 (Obertöne) を機械的に決定し、その結果を圖-20 に示した。第一、第三、第八の上音 (Partialton) は上に示されたる分解の様に、振幅小なるを以て其の影響も少なき故示してない。

個々の機械的装置の場合には未だ一度も精確に得られた事の無い數多の記録圖の同時性の特別に重大なる事に就き再び注意して置き度い。此の様に數多の計測器に依り 1 本の部材又は構造物の桁等の立體的歪線即ち振動形 (基音又は第一、第二等の上音) を決定する事が出来る。

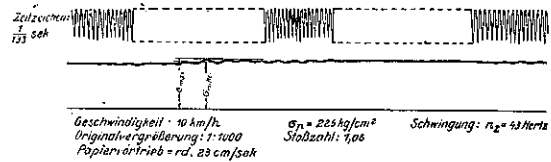
圖-20. 一垂直材の振動曲線の調和級數分析



1 本の下弦材 (Untergurtstab) 内の振動狀況の特徴、從つて又衝擊係數は次の様にして豫め評價される。

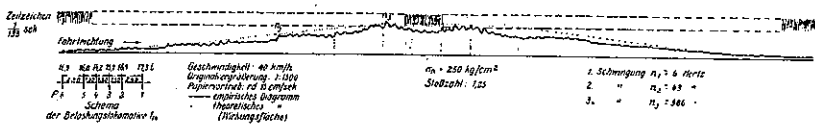
1. 荷重が 10 km/std (秆/時) の速度にて走行する場合 (圖-21)、從來此の様に緩速度の場合には殆ど觀測せられなかつた 30 乃至 50 Herz の一つの明瞭なる振動が発生した。然し之は顯著なる倍率 (1:1000) で感光紙を迅速に前進 (23 cm/sek) せしむる場合初めて認められたのである。之より 10 km/std (秆/時) に對して衝擊係數 1.06 ( $\sigma_{max} = 1.06 \sigma_{mittel}$ ) が算出せられる。

圖-21. 一機關車が  $V=10 \text{ km/h}$  にて通過する場合支間 34 m 橋桁の下弦材應力



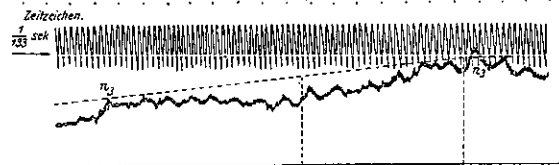
2 40 km/std (秆/時) の速度の場合には (圖-22 a, b), 相互に全く相違する三つの振動が認められた即ち,  $n_1=4$  から 6

圖-22 a. 一機關車が  $V=40 \text{ km/h}$  にて通過する場合支間 34 m 橋桁の下弦材應力



Herz 迄,  $n_2=42$  から 44 Herz 迄及び  $n_3=300$  から 600 Herz 迄であつた。此の三振動を Hort<sup>2)</sup> に依り算出された値と比較する時は恐らく緩速振動を動輪影響及びチモシェンコ影響 (Triebbad-und-Timoshenkoeffekt) として、中速振動を衝擊影響として表はす事が出来るであらう。一方第三の迅速振動は恐らく部材の自己振動の上音と考ふべきであらう。

圖-22 b. 圖-22 a 中の振動記號  $N_3$  部分の記録實大圖



最大の動力學的影響を持つ第一の緩速振動に對して次の事柄が述べられる。

荷重機關車の動輪の周邊長は 4.10 m となる、即ち輪壓 (Radtpücke)<sup>1)</sup> のロシヤ式動力學的機關車圖 (Lokomotivdiagramme) に依れば 4.10 m の距離毎に衝擊を發生する。夫れ故に機關車の車輪の不平衡質量の衝擊は、40

km/std (料/時) の場合には 1/5.5 秒の間隔で起る。之は後に算出せられる様に橋梁の自己振動に殆ど一致してゐる。故に前記橋梁に對し 40 km/std (料/時) の走行速度の附近に於て動輪影響と橋梁の自己振動とが共鳴すべきであり、之は此の限界速度 (die kritische Geschwindigkeit) に對し遙に大なる衝撃係数が屢々見出されるので或程度確證せられる。既知の動力學的動輪圖 (dynamische Triebraddiagramma) の機關車又は大約平衡せる動輪力 (例へば四汽筒連結急行列車用機關車) の機關車を、機關車の不平衡質量に依る衝撃に一致しない自己振動を有する橋梁上を走行せしむる場合には、之等影響を瞭然と分離せしむる試験を改めて行はなければならぬ。

3. 荷重せる状態又は無荷重状態に於て、上弦 (圖-23 a, b, c, d) 及び垂直材 (圖-24 a, b) の自己振動數並に其の上音 (Obertöne) は又實驗的に次の様にして求められた。部材に變位計を取り付けた後に、試験槌 (Vorschlaghammer) を以つて直接にその部材に X 軸及び Y 軸の方向に打撃を加へて振動せしめた。此の打撃に依りて機械的計器が漸く堪へ得る應力を部材に生ずる。

X 軸並に Y 軸の方向に於て、50 乃至 600 Herz の範圍の各部材の自己振動と、通常の荷重走行の際に生ずる振動とが一致する時は、後説の如く、縦振動のみならず横振動も著しく橋梁の應力に影響を及ぼすと結論を下し得る。

4. 衝撃係數に換算された各振動の振幅高は  $n_1$  に對し凡そ 0.08 (Hort<sup>2</sup>) に依れば 65 km/std の時、共鳴の場合の動輪影響及びチモシェンコ影響を一緒にして 0.2 と算定される),  $n_2$  に對して約 0.15 (Hort に依る衝撃影響として 0.15 と算定される) 及び  $n_3$  に對し凡そ 0.02 (豫め構造物の部材の自己振動の上音として得られた) を得た。之等の高上音が衝撃係數に關聯して實際上意味無き事は豫想さるべきであつた。此の實驗の目的も亦此の様に迅速な振動を撮影して研究する事にはない。

然し 600 Herz の振動は即音樂的に聴き得られる音 (室内音樂の音調  $a=435$  Herz) は橋梁測定の場合には今日迄未だ嘗て記録された事はないが、唯だ倍率を適當に撰んだ時のみ認知し得られた事を注意して置き度い。列車が橋梁上を走行する場合に起る一般の騒音中には、此の高音は潜在してゐるけれど、それは決して存在しない事を證明しない。概して此の様な音が人に聴きとられ得るには振幅が一定の大きさ (音の強度) である事と同時に時間的に充分な時期丈け相連続する事が豫備條件である。

5. 長期間使用した後に、橋梁の自己振動の變化から其の状況を逆に斷定し得る様に、橋梁の自己振動を精確に決定する爲に、振動發生車を以つて試験を行つた。振動發生車とは所謂不平均質量に依り、即ち偏心の節動輪 (Schwungräder) に依り任意に連続せる、任意の強度の、種々の方向に向へる衝撃を與へ得るもので、橋梁に正弦

圖-23. 橋梁部材の打撃による振動記録圖 V<sub>6</sub> 垂直材

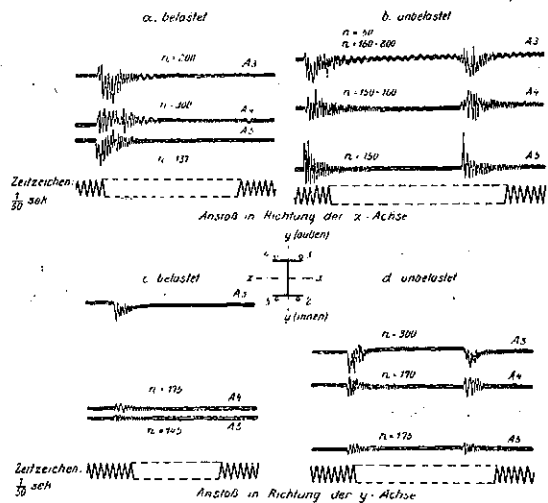
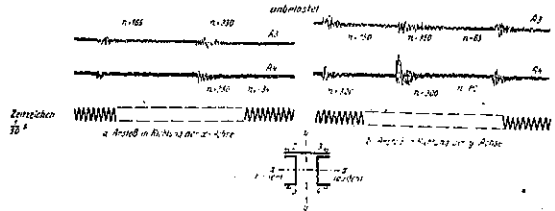


圖-24. 橋梁部材の打撃による振動記録圖 O<sub>1</sub> 上弦材



13) Nach "Hütte" 1925 (25. Aufl.), Bd. I, S. 402, Fall 8 entwickelt und die Durchbiegung  $\delta$  statt der Spannung  $\sigma$  eingeführt. Es wird hierdurch die Schwierigkeit, welcher Stabquerschnitt und ob mit oder ohne Nietabzug zugrunde zu legen ist, vermieden.

波振動を傳達すべきものである。前述の試験を施行した橋梁では無荷重状態で鉛直方向の衝撃に對し 6.4 Herz の自己振動が存在してゐた。簡単な桁と假定した場合先づ無荷重状態に於て  $n = \frac{1}{2} \pi \sqrt{5 g / 384 \delta^{13}} \sim 6.6$  Herz と理論的に算定される。此處に  $\delta$  は橋梁の撓みである。次に試験用機關車を走行せしめ、荷重をかけた状態では 4.4 Herz となる。夫れ故に全ての記録圖に於て橋梁の自己振動は、荷重機關車が橋梁上を走行する時、初めは降下するも其の後再び上昇するのが認められる。(此の例に於ては凡そ 6.6 Herz より 4.4 Herz に下り、再び 6.6 Herz に上昇する)。更に同様の振動發生車を以つて繰返された後に第 6 項に記述する試験では列車の停止後に同様に凡そ 6 Herz の正弦波振動曲線が示された。Bühlner<sup>2)</sup> が與へた經驗公式は同じ荷重状態に對して 4.48 Herz を與へた。兎に角理論と實際との間に著しく良好なる一致が存在する。現在施行中の振動發生車に依る實驗に就いては目下の處未だ報告する迄に至つてゐない。

6. 更に、先づ第一に、之等装置に依れば適當なる準備がなされた場合には申し分のない試験が行ひ得られる事を示す爲に、縦波の傳播速度を命ぜられた方法に依らずロシア式刺戟法に依り決定する一つの實驗を行つた。一つの變位計を第一の下弦部材に取り付け、一方他の一つの變位計を同じ主桁の最後の下弦部材に取り付けた。出來るだけ大なる衝撃を發生せしむる爲に、荷重機關車を可及的に高速度にて走行せしめ、第一の下弦部材の最大應力を生ずる位置で撒砂して突然に急激に制動した。

かくして記録圖上で、波を比較觀察して橋梁の一端より他端に至る間に示される位相の遅れを決定した。裝置間の距離は凡そ 30 m であつた。對ふ岸の變位計の示す應力の僅小なる事は、測長を長くし、又オシログラフの測定回路をより敏感ならしむる事に依つて救済された。測定時日が短少な爲に實驗を多數回反復する事が出来なかつた。然し振動傳播速度の大きさは、大約讀み止め得た、即ち凡そ 4400 m/sek (米/秒) の速度であつた。縦波を根據とすれば理論的には 5140 m/sek の速度となる、即ち

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{2100000}{\frac{7.5}{981 \cdot 1000}}} = 514000 \text{ cm/sek.}$$

此處に  $\rho$  は St. 37 の密度である。上記の結果は觀測値に比し 17% の相違があるに過ぎぬ。此の時間の差違は波動の傳達にあづかる部分即ち緊釵 (Knotenblech, gusset plate)、緩釵結 (lose Nietverbindungen, loose riveted connection) 等に依る遲滯作用に依るものと解される。

7. 終りに、然し純靜力學的作用に依り、然も從來一般に餘りにも等閑視されてゐた、作用面 (Wirkungsfläche) (圖-25, 26) の特に縦桁 (Längsträger, stringer) 並に横桁 (Querträger, floor beam, cross beam) に起る鋭尖部に依りても亦振動の現象は惹起される。

他に適當なる名稱は無いのであるが、作用面 (Wirkungsfläche) 即ち理論的記録圖、換言すれば和影響線 (Summeneinflugslinie) とは此處では相對應する輪壓を相乗じた影響線の和を意味する。此の輪壓は一定の動荷重群 (例へば一つの荷重機關車) のもので通常の影響線の場合の様に荷重 1 に依るものではない。他の振動と容易に取り違へられる頻繁に重疊する鋭尖部は荷重機關車の速度のみに關係がある。例へば試験を施行した橋梁の縦桁並に横桁に對し、40 km/std の速度の場合凡そ 4 Herz の明瞭なる振動が存在する。夫れ故斜材、垂直材、就中横桁及び縦桁の衝撃係数を決定するには正確な評價を期する爲に、此の作用面を記入する事 (圖-15, 16 及び 18 の記録圖参照) は無條件に必要である。理論的記録圖の最大値は最も都合悪しき荷重状態に對する靜力學的應力に等置さるべきであるから、各作用面の縦距は時として最も簡單に靜力學的檢定量 (statische EichgröÙe) に依り決定される。

縦桁が横桁へ取り付けられる點の近所に於ける縦桁断面の作用面の特殊形 (圖-II) に就いて此處に更に注意し度い。横桁への取り付けに注意すれば、此の縦桁の記録圖の負の部分からその作用面を描く事が出来る。今單に取付けが半分丈け有效なりと假定すれば (連續せる應張接目板 (Zuglasche) がなく、又應壓材が無いから非剛

結取付け (Weiche Einspannung) である)。即ち單に支持モーメントが半分丈け作用するものとすれば負の部分は餘りに大となり過る。之に對して取付けが 1/3 丈け有效なりと假定すれば、作用面と描かれた 圖表とはより良く一致する。同様の結果が純靜力學的測定に對する スキス聯邦鐵道の研究に依り示された。

此の様にして逆に、取付け、從つて連續作用に關聯ある著しく問題となつた縦桁關係の實際の作用狀況を、例へば一回の荷重走行に依り、然し時間を要する靜力學的變長測定に依らず、極めて迅速に實驗的に、より精確に求め得るに至つた。

走行方向に關して理論的記録圖の曲線より凡そ 1/10 秒の位相の變位即ち經驗的の位相の遅れに對し特に注意を喚起し度い (例へば圖-18, Apparat 4 を参照の事)。各個の振動現象には無關係に此の作用面の鋭尖部で表はされる、振動數が凡そ 2 乃至 10 Herz の著大なる應力變化及び伸縮の變化は、自ら立體的に作用してゐる全橋梁系の中に、云はばその原因は先づ軌道より生じた一つの脈動を正に生じてみると、全く一般的に云ふことが出来る。

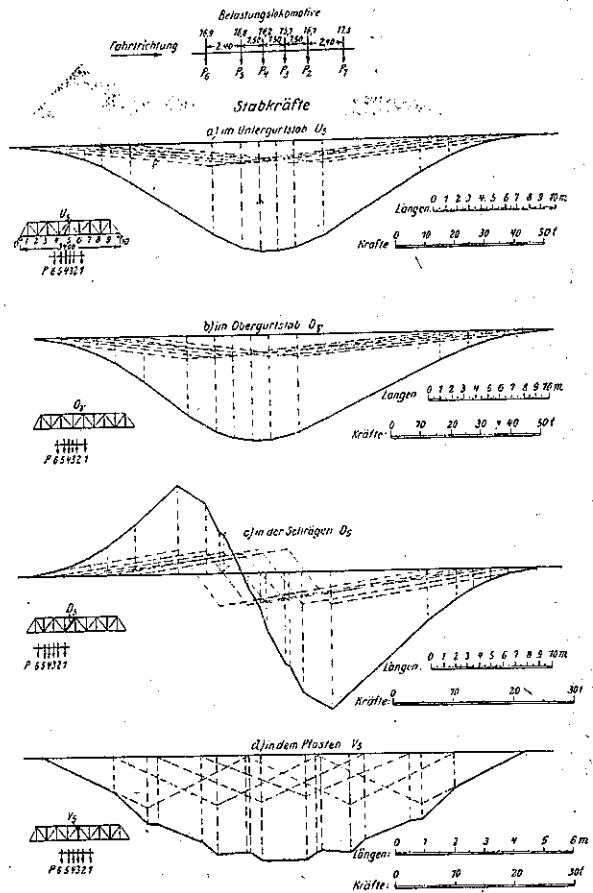
夫れ故に前述の考察の中で、夫れ自體の研究が殘念乍ら今尙は著しく困難なる、個々の現象の根本的錯綜を意味してゐる靜力學的並に動力學的副應力を處理しなければならない。先づ、例へば一軸車輛<sup>14)</sup>を以つて動力學的研究を行ふ事に依り此の數多重疊せる事情の一部は分離され、之に依り恐らく明白にされるであらう。一軸車輛とは一つの單一軸荷重を種々の速度を以つて橋梁上を走行せしむるに依り動力學的に荷重し得べきもので、例へば之を用ひて單一荷重の重量を以つて除した影響線を實驗的に直接に記録せしめ得るであらう。夫れ故に一軸車輛を橋梁の動力學的測定の目的に對して改造せむとする スキス聯邦鐵道の研究は絶大なる興味を以つて行はる可きである。

終りに、電氣的測定法の一つ、例へば炭素變位計を更に改良するに依り、Siemann が嘗て船舶の研究に施行した様に、之を振動計測器並に加速度計測器として應用する意圖がある事を述べて置き度い。

自己振動より迅速なる振動を記録する從來研究せられたる地震計の原理に對し、此處に述べられたる計測裝置では其の自己振動數が高い事に依て、之以下の振動數の測定を行ふ事が出来る、夫れ故に、一定縮尺の振動過程の代りに、一定縮尺の加速度及び正確なる橋力を得る事が出来る。

例へば一軸車輛の軸に X, Y 及び Z 軸の方向に加速度計を取り付ける事に依り、最初に與へた振動と共に、同時に其の作用、即ち夫れに依り生じた應力を撮影する事を試る可きである。例へば U. I. C. (Union internationale des chemins de fer) の希望要項、即ち軌條衝擊の影響、機關車の調整裝置の開放並に閉鎖の影響等は恐らく此の様にして迅速に併かも確實に記録されるであらう。

圖-25. 構桁部材の和影響線圖



14) Der Brückenbelastungswagen der S. S. B. Schweizerische Bauzeitung 1922, 1. Teil, Heft 16.

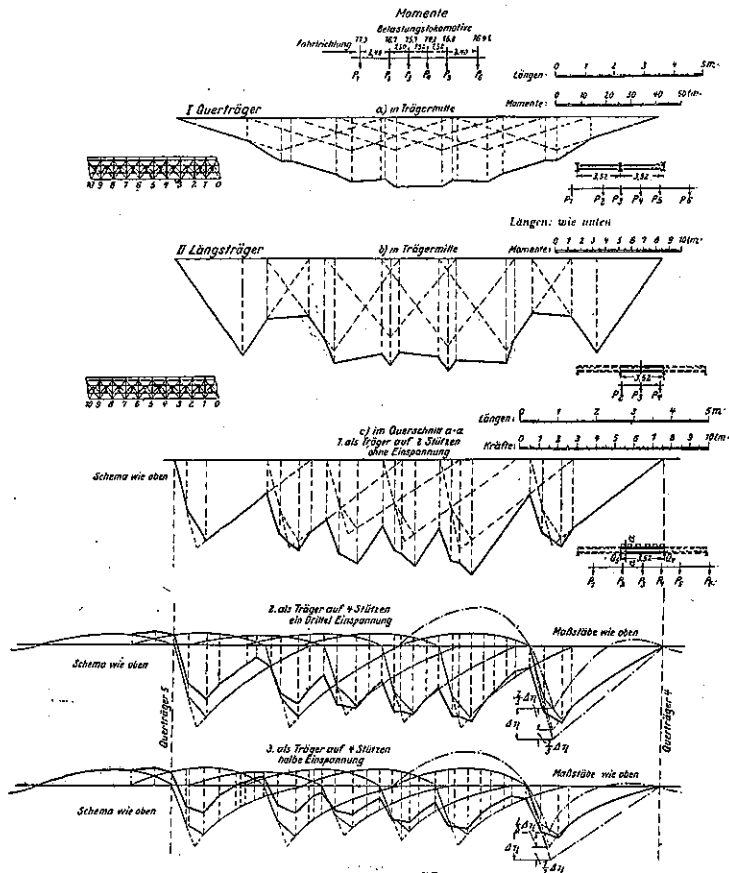


V. 約 説

鐵橋の靜力學的並に動力學的應力を研究する爲に使用される 優良なる自記應力計に具備せらるべき諸條件を簡約すれば現在の處大約次の如くである。

- 1. 計測装置の自己振動數： 300 Herz 迄の振動數を一定倍率にて正確に指示し得る爲に、1200 Herz 又はそれ以上たる事。
- 2. 感度： 約 5 kg/cm<sup>2</sup> の應力變化を指示し得る事。
- 3. 精度： 1000 倍以上の倍率の場合 ±2.5 % 以内たる事。
- 4. 時間的一致： 數多の測點に於ける計測結果が 1 枚の圖表に記録せらるる事。
- 5. 記録圖の前進： 短時間の現象を撮影する爲に感光紙の前進速度は 4 m/sek (米/秒) 迄調節可能とする事。
- 6. 計測器の檢定が簡易なる可き事。
- 7. 使用簡易なる可き事。

圖-26. 桁桁部材の和影響線圖



之等諸原則は本質的にドイツ國有鐵道會社の懸賞募集の今日迄の希望事項に一致する。之等の概ね全てが、唯一つの装置に依つて満足され得るや否やは今尙は未解決の儘殘されてゐる。然し電氣的方法に依れば、之等の大部分は兎に角その目的を達し得る。其の他を主として機械的の裝置として製作する必要は、正に前記の懸賞募集の結果初めて明となつたので、その以前には決して斷定的に豫見し得られなかつた。

電氣的方法の缺點は疑もなくオシログラフの使用が容易でない事に在る。然し此の場合、すべて、最も簡單なる機械的純靜力學的變位計ですら無條件に熟練せる補助力を必要とする事は勿論注意す可きである。

之に反して電氣的測定法の長所は先づ第一に實際上制限されない裝置の自己振動數の高い事及び倍率の大なる事、取付け時間の僅小なる事、數多の變位計を一つの中樞點より同時に操作し得る事即ち勞力の經濟なる事、1 枚の紙片上に描かれたる數多の現象が絕對的に時間が一致する許りでなく殆ど自由に迅速に走行せしめ得る 1 枚の紙片上に現象を撮影する事に依り記録圖數を減小し得る事、之に依り時間の節約される事、最後に總經費の僅小なる事である。

扱て經費を比較して見るに 6 臺の炭素變位計及び 1 臺の最良なる自記裝置として使用せらるる比較的高價な 6 線オシログラフを合算せるものは、6 臺の機械的自記應力計に比しても遙に安價である。12 臺又はそれ以上の裝置と比較するものとすれば此の關係は著しくより良好となる。

斯くして多數の計測點の測定は、同時に數多の裝置を取り付け荷重機關車を單に 1 回丈け走行せしむる事に依

り完了し得られる。之は電氣的遠隔操作に依りて極めて容易ならしめられたのである。

上述簡單測定法は兎に角、電氣置換に依る方法が科學的實驗室測定法に適せるのみならず、橋梁測定術に應用して成功を収め得る事を示してゐる。監視測定即ち機械的計器を以つて簡單なる作業に依る測定は、其の使用可能の限度が任意の場合反對に認められる事があつても、夫れに依つて決して排除せらるべきではない。

此處に、橋梁架設の實際に對しても電氣的測定法<sup>1)</sup>が特別の價值ある事並に實用可能なる事を専門界に示し、數多の其處に存在する未解決の、夫れに依りて恐らく解決し得らる可き問題を更めて明示する事に成功したものとすれば此の報告の目的は達せられたものと考へる。

## ドイツ國有鐵道會社新式橋梁測定車\*

國有鐵道技師 工學博士 ルドルフ・ペルンハルト

此處にはドイツ國有鐵道會社の 2 つの新式橋梁測定車に就き説述した。又今日迄に新に考案された二、三の測定法を略説すると同時に構造並に設備をも述べた。終りに全く一般に構造物に起る問題にも留意して現在の問題を簡潔に敘述した。

### 1. 測定車の目的

ドイツ國有鐵道會社の財産中、凡そ 87 000 の鐵道橋並に道路橋及び新に架設せらるべき上部構造物は其の主要部を成すが故に、何よりも先づ其の良好なる維持は其の安全度の問題より、其の最も經濟的なる施工は純經濟的見地より、今日益々重要となつた。——橋梁内に惹起せられる應力の計算結果を、更に實測に依り檢證せむとする要求は、數多の絶へず増大しつつある荷重並に高速度運轉の爲めに補強せらるべき上部構造物の場合に特に然りであるが、其の要求から最優秀の計器を決定せんが爲、既に 1925 年に其の懸賞募集<sup>2)</sup>を行ふに至つた。——其の競争の結果から、提出された機械的計測装置を以つてしては動力學的試驗即ち動荷重の場合の測定は殆ど所要の精度を以つて行はれ得ない事が明かとなつた。故に其の試験が先づ一つの中樞點のみより操作される他の測定法が考案された。

之れに必要な計測装置は 2 輛の特別な橋梁測定車内に安置された。其の設備に就いては後説する事とする。

測定法の如何に係らず各種の計測装置を安置する爲に移動し得る設備を作る必要が起つた。計測器の運搬には鐵道橋の試験に對しては鐵道車輛、道路橋の試験に對しては例へば自動車<sup>3)</sup>が考慮される。

此の測定車の装置は橋梁の試験のみならず、亦土木建築の領域に於ける他の問題を解決するにも應用されてゐることを特記し度い。

數多の新に考案された、又は今日尙研究中の測定法に就いては此處に個々詳細に涉つて説述し難い、然しあまり著名ならざる新式計測装置に就いては説明する事が出来る。

測定法の考案は今尙は完成せられてはゐないので、其の改良は引き続き研究せらるべき事を豫め述べて置き度い。

15) Den Firmen Siemens & Halske, Gebrüder Siemens, Losenhausen und Fuess sei für ihre wertvolle Mitarbeit bei Durchführung der Versuche an dieser Stelle bestens gedankt.

\* R. Bernhard, Die neuen Brückenmesswagen der Deutschen Reichsbahn-Gesellschaft. Bautechn. 1931, Heft 1.

1) Hort und Hülsenkamp, Untersuchungen von Spannungs- und Schwingungsmessungen für Brücken. Bericht über die Ergebnisse des Wettbewerbs der Deutschen Reichsbahn-gesellschaft zur Erlangung eines Spannungs- und Schwingungsmessers für dynamische Beanspruchung eiserner Brücken. Berlin 1928. Verlag der Verkehrswissenschaftlichen Lehrmittelgesellschaft m.b.H. bei der Deutschen Reichsbahn.

2. 橋梁測定車 I

橋梁測定車 I (圖-1) は先づ第一に静力學的並に動力學的試驗施行に使用される。

之は一輛の古い四軸食堂車を改造して、小工作室、オシログラフ室、光室付きの暗室及び計測器並にケーブル筒の收容室を設備したものである。

圖-1. ドイツ國有鐵道會社の橋梁測定車 I

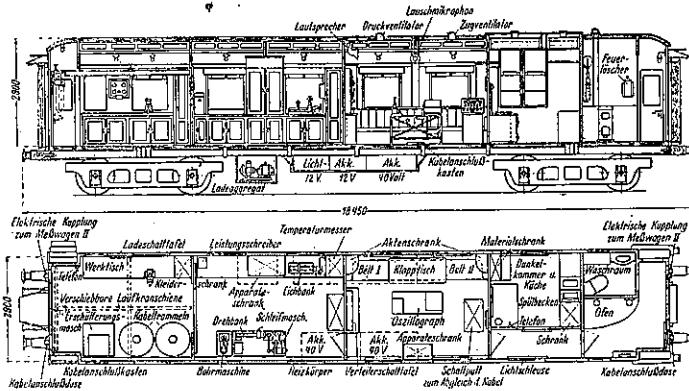


圖-2. 電氣的計測器 (炭素變位計). 構造物或は車輛の應力 (電み) の變化記録装置に電流の波に依つて送る装置にして、取付装置を有す

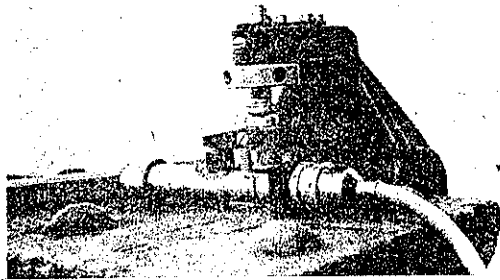
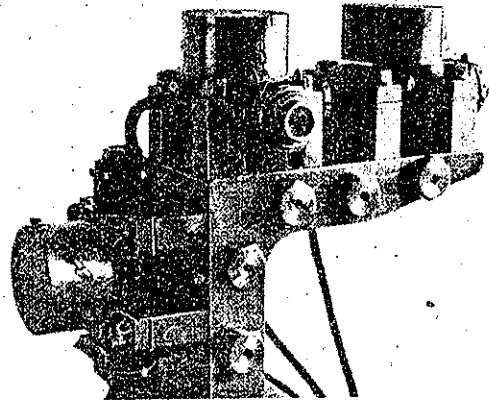


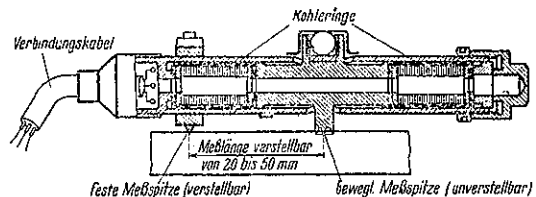
圖-3. 電氣的計測器 (炭素變位計). 三方向加速測定器 構造物或は車輛の三方向の加速度 (振動) を記録 装置に電流の波に依つて送る装置の一組を示す



電氣的計測器<sup>2)</sup> (發電器 (Sender)) として先づ第一に炭素變位計 (Kohledehnungsmesser (Fuess, Steglitz)) が考案された。之は同時に應力變化 (圖-2); 振動の變化, 加速度の變化 (圖-3) 及び彎曲の變化の測定に使用される。併して低振動數計測器 (Unterfrequenzapparat) 即ち自己振動數以下の測定を行ふ計器として作られたものである。

炭素變位計は3つの堅牢なる測尖點を有する1つの容器と、その中に納められてる炭素小圓盤 (Siemens-Planina, Berlin) を重ね合せて作った2本の炭素柱及び其の中央に位置してゐる可動測尖點とより成る (圖-4 a)。應力の變化, 振動の變化, 加速度の變化又は彎曲の變化は此の可動測尖點に依り炭素柱上に傳達せられ電壓の變化に置換される。之は炭素はその壓力の變

圖-4 a. 電氣的計測器 (炭素變位計. 重量 400 g) 電流の波を送る装置の縱斷面圖



2) R. Bernhard, Beitrag zur Brückenmesstechnik. Neuere Messungen dynamischer Brückenbeanspruchungen, Stahlbau 1928, Heft 13.

化に依り、電気抵抗を變化し、之に従つて變化する大電流を流通せしめる性質を有するからである。

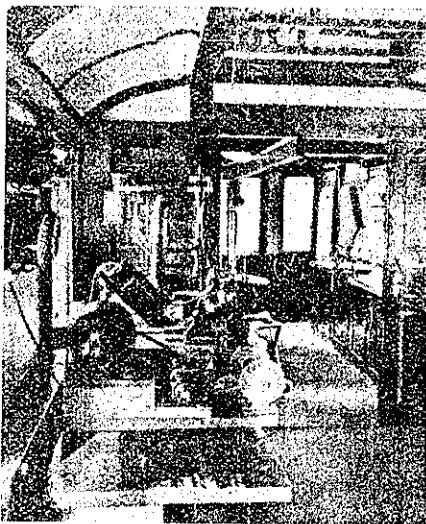
發電器内の此の電流の變化はケーブルに依り可なり距つて、橋梁の振動の衝撃を受ける事の少い地點に置かれた受電器（オシログラフ）に導かれる。

例へば橋梁上に持來されてる電気計器との連絡は 1 本の多心ケーブル（500 m 迄は 18 心ケーブル）が掌つてゐる。之は各測定車の端にある 2 つの器具に差し込む事に依り迅速に連絡せられる。此の如く配備する時は特に單線軌道の場合、必要に応じて測定區間を空ける事が出来る（圖-5）。

工作室には 1 臺の電動機付小型旋盤ドリル並にグラインダーが据ゑ付けてある（圖-6）。又オシログラフ室（圖-7, 8）には 1 臺の 6 線オシログラフ（Siemens & Ha'ske, Berlin）の外に兩測定車の下に取り付けられた二次蓄電池の配電盤がある。オシログラフ室は寫眞撮影中は邪魔になる餘光を遮斷する爲に完全に暗黒にしてある。

オシログラフ（圖-9）は元來反照電流計（Spiegelgalvanometer）式で、2 個の強力なる電磁石の間に電線回路を引き張つた装置である。此の電線回路の中央には僅か 0.5×0.5 mm の大さの小鏡が取り付けられてあり、光源ランプより來れる光路に挿入してあるので、鏡の回轉運動は反射光線の移動として 1 本のフィルム上に投射される譯である。試験すべき構造物に取り付けられた電気計器に依り電流の變化に置換された應力、振動、加速度又は彎曲の變化は、電磁場に於ける電線回路の回轉量として現はれ、フィルム上に撮影される。6 個の送電器（Sender）と 6 本の記録圖線とは同時に連絡されて居る。即ち構造物の 6 個所の試験が同時に行はれる。

圖-6. 橋梁測定車 I の内部、工作室



1 個の 120-V 蓄電池（74 Ah）及び 2 個の 24-V 蓄電池（各 223 Ah の光源用蓄電池）の 3 個の二次蓄電池の充電には、測定車の下面に取り付けられた 1 個の發動機付 6 馬力ベンジン發動機（DKW Erfenschlag, Chemnitz）が作用する。之は工作室の充電用配電盤により動作せしめられる。

圖-4 b. 炭素變位計の電氣的接續圖

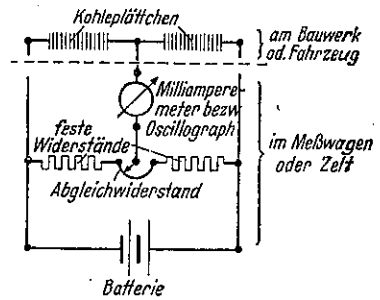


圖-5. 單線又は複線上に於ての一橋梁の動力學的壓力測定に際しての六極の炭素變位計とオシログラフ装置とを接續する場合の球圖

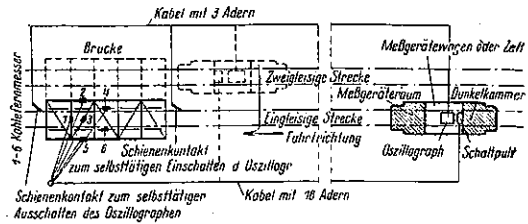
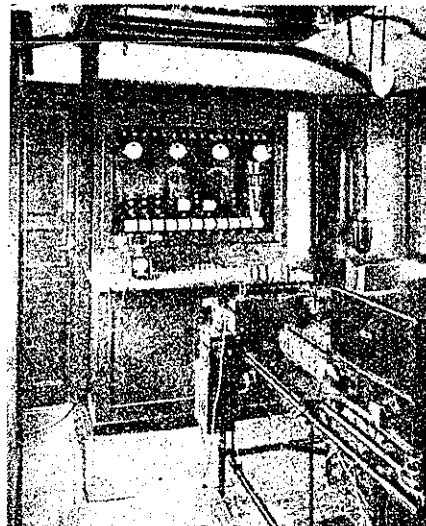


圖-7. 橋梁測定車 I の内部、配電盤に面してのオシログラフ設置室



工作室にはその外に 1/2 t 走車の着いた車外に突出し得るクレーンの軌條 (圖-10) が設備してある。之は振動發生機<sup>3)</sup> (Erschütterungsmaschine) (Bauart Spaeth-Losenhausen, Etisseldorf) を車内に搬入搬出するの用をなす。

振動發生機 (圖-11) は構造物の多様な合成荷重現象の單純化に利用される、即ち先づ以つて構造物に對して單純な動力學的現象を模作する役目をなす。此の機械は本來 2 個の相互に相反對の方向に電氣に依り回轉せしめられる偏心に取り付けられた振動質量より成るが故に、構造物に希望の振動を與ふる事が出来るのである。故に之を以つて任意の大きさの、任意の方向の力及びモーメントを任意の回数だけ發生せしめ得る。2 個の振動質量は互に相反する方向に回轉する結果好ましからざる衝撃は相殺される。此處で若し此の機械が種々の速度を以つて強制衝撃を構造物に與ふるものとすれば、構造物は其の振動の共鳴位置にてより大なる振幅を以つて振動するに至る。此の共鳴振動に要するエネルギーは此の機械が供給しなければなら

圖-8. 橋梁測定車、電氣接續器側よりのオッシログラフ装置室

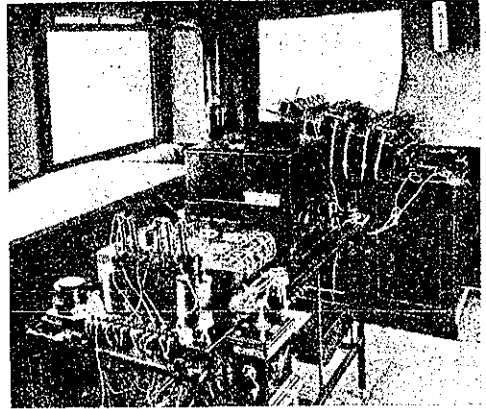


圖 9 a. 一閉回路を有するオッシログラフに於ける光線の経路圖。電流或は應力の變化を視測し又記録する裝置

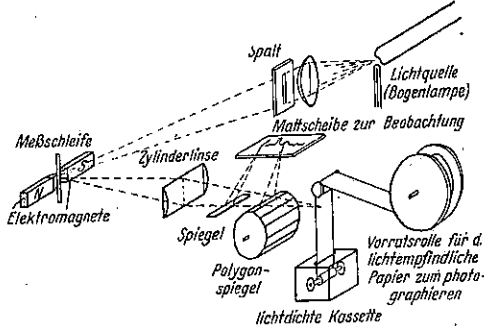
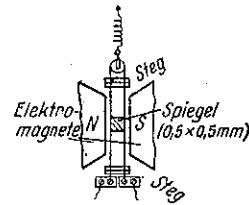


圖-9 b. オッシログラフの閉回路の略圖

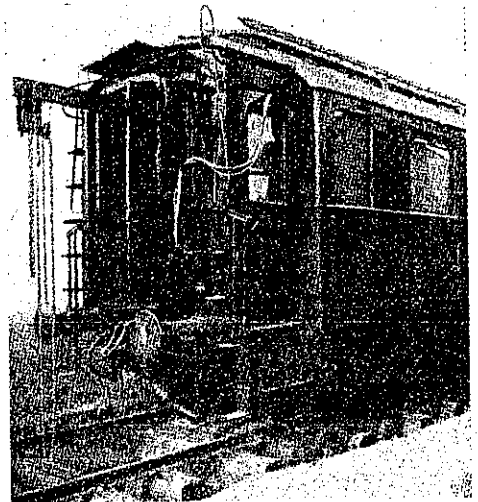


ぬ。1 臺の特別構造の摩擦なき記録装置 (電氣火花に依る記録装置) を備へた電氣計器 (Berliner Physikalische Werkstätten) が振動質量を廻轉せしむる電動機的作用に關聯して自動的に衝撃振動数を記録する。之に依り、構造物のすべての實際の動力學的性質、特に長時間の其の變化を決定し得られる圖表が得られる。

總ての測定用並に電話用電線は 2 輛の測定車を通じて容易に通し得るケーブル溝の中に通してあるから、必要な分岐は特殊の分叉器に依り都合よく行ひ得る。總ての電線は相互反對の影響を防止する爲に一對づつ撚込である。

數多の戸棚の中には必要なる靜力學的並に動力學計測器、溫度計及び風速計の様な電氣計器が納められてゐる。電氣溫度計 (Thermoelemente, Pyrowerke Hannover; Widerstandselemente, Hartmann & Braun, Frankfurt a. Main) に依りて太

圖-10. 橋梁測定車 I. クレーン端部及測定用電氣接續



3) K. Benhard und W. Späth, Rein dynamische Verfahren zur Untersuchung der Beanspruchung von Bauwerken. Stahibau 1929, Heft 6.

陽照射の少なからざる影響を決定し得るのみならず、疲勞試験の場合には、一次破壊が起る前に豫め弱點を見出し得る爲に早期温度上昇を自記せしむる事が出来る。

炭素變位計並にオシログラフの場合と同様に温度計の場合でも送電器と受電器とは分離されてゐる。6個の熱電對又は電気抵抗抗寒暖計 (Widerstandselemente) (送電器) は同時に測定すべき構造物に取り付け得られ、ケーブルに依り測定車内の6色自記計 (受電器) (Pyrowerke Hannover) と連絡されてみて、温度變化は時間 (試験時間) の函數として自記される。

圖-11 a. 電氣的計測器、構造物或は車輛の動力學的定數決定に使用する振動發生機にして回轉數の調整器を有す

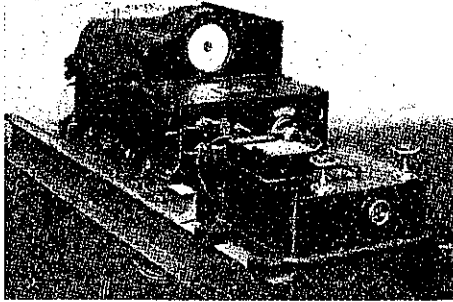
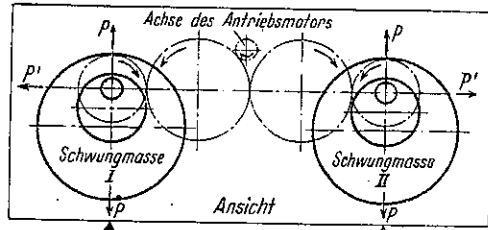


圖-11 b. 振動發生機の振動發生用質量の配置圖



此處に尙ほ應力、變位角回轉の測定に使用される二、三の裝置、例へばオクイゼン式變位計 (Huggenberger Zürich)、水準儀 (圖-12) (Zeiss, Jena) 及び傾斜測定儀 (圖-13) (Stoppani, Bern) に就き説述し度い。

圖-12. 光學的計測器、靜力的撓み測定のため水準儀、對物レンズの前に完全な平行平面を有するガラス板が位置し、水平線の 1/100 mm の移動が可能である

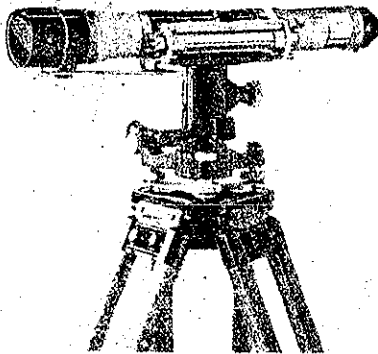
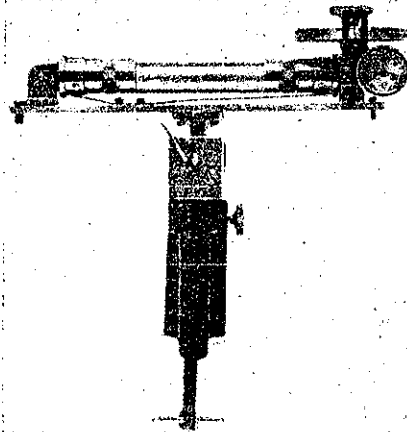


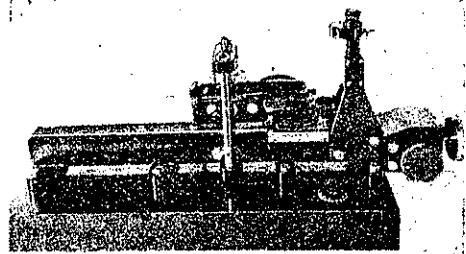
圖-13. 光學的計測器、靜荷重に依る角變化 (撓度曲線) を測定する傾斜測定儀 (一目盛=1.15')



最後に檢定臺 (圖-14) は計測裝置の靜力學的檢査に使用される。

此の檢定臺 (Fuess, Steglitz) は固定部と可動部とより成る。檢査すべき測定裝置は其の可動尖點を檢定臺の可動部に、固定尖點を檢定臺の固定部に取り付ける事に依り檢定臺に固定される。檢定臺の可動部を一定距離  $0.5\mu$  ( $1\mu = 1/1000$  mm) だけ極めて精確に變位せしむる事に依り——此の小移動は精密なるコンパレーターにて決定される——此の一定の變位を計器に強制する事が出来る。然る時は檢定すべき計器の讀みは檢定臺の可動部の移動距離 (コンパレーター) に精確に一致しなければならぬ。

圖-14. 計測裝置の靜力學的檢査に使用する檢定臺、炭素變位計を檢査中。(1目盛=1/2000mm)



靜力學的並に動力學的計測器は現在の處 300 Herz (1 Herz=

1 振動毎秒)に至る迄、倍率は 20000 倍迄、振幅高(中心よりの偏差)は最小  $0.5\mu$  に至る迄歪を伴はずして撮影出来る。20 cm の測長、 $2100000 \text{ kg/cm}^2$  のヤングスモデュラスの場合に  $0.5\mu$  の変位は約  $5 \text{ kg/cm}^2$  の應力變化に相當する。夫れ故に石造又は鐵筋コンクリート道路橋に單一車輛を迅速に走行せしめて荷重する場合の測定は何等の困難をも伴はずして容易に行ふ事が出来た。

オシログラフ室並に暗室内の特殊通風装置は空氣の排出と流入の役目を掌つてゐる。フィルムの現象、定着、水洗等の目的にて 1 つの獨立した温水装置及び 1 個の  $2 \text{ m}^3$  の容量水タンクが設備されてゐる。擴聲器付きの電話——オシログラフ室内には擴聲器及び送話器 (mix & genest, Berlin)——が各室間並に構造物の測定現場と對話出来る様に充分に設備されてゐる。

3. 橋梁測定車 II

橋梁測定車 II (圖-15) は先づ以つて溶接並にリベット綴合せ及び鐵筋コンクリート構造物のレントゲン撮影の目的に使用される。

之は 4 軸の舊宮廷用客車を改造して、レントゲン装置室、2 つの居室並に寢室、及び製圖室を設備したものである。

如何なる構造物に於ても試験は桁の破壊に至る迄行ふ譯にはいかないから、特に溶接構造の場合に溶接接目の試験を破壊に至らしめず可能ならめむる方法を考案しなければならぬ。レントゲン工學の進歩に依つて厚さ 10 cm 迄の鋼板を透過してレントゲン寫眞を撮影する事が出来る様になつた。螢光板を用ひ、非常なる努力に依り絶へず注意する事に依つても從來尙ほ鋼板の厚さは約 3 cm に限られてゐた。

重要な鐵筋コンクリート構造に於て凡そ同様の問題即ち鐵筋の存在を後から検査する必要が起り得る。其の際此の方法は亦或る場合、就中疑はしき場合に、例へば圖面が無い場合などに應用し得られる事が想像し得られるであらう。

レントゲン寫眞撮影は醫術に於ける場合と同様に遮影法 (Schattenbildverfahren)<sup>4)</sup> (圖-16) に依る。例へば、空洞、鑛滓抱合、氣泡及び溶接の場合の不十分なる加熱深度等に依る瑕疵は種々の方向よりレントゲン照射を行ひ(圖-17)、寫眞乾板又は螢光板にて遮影する時は明暗の點として認めらるるが故に、之に依りて其の位置、特に深度が決定し得られる。従つて瑕疵のある場所は直ちに發見せられ、取り除かれ、瑕疵の多い溶接は更に溶接をやりなをされる。

レントゲン装置 (圖-18) (R. Seifert, Hamburg) は車輛の下面に取り付けられた交流發電機結合の 1 臺の 12 馬力のベンジン發動機 (DKW Erfenschlag, Chemnitz), 1 個の變壓器の設備ある遮斷せられた高壓電氣室、コンデンサー、發電機の發生する交流を直流に變流する真空管 (220 V を 250000 V 迄の直流に變流する) 及びレントゲン管 (Metalix Müller-Hamburg) から成つてゐる。

配線圖 (圖-19 a) に示されてゐる所に依れば、發電機に依り供給される交流 (220 V, 50 c/s) は 1 個の變壓器に依り 125000 V に變壓される。2 個の整流用真空管を 2 個のコンデンサーに結合した配線 (Greinacher Schaltung)<sup>5)</sup> は整流即ち交流を直流に變流せしむる外に、同時に亦 2 つの交流の片波を合成する (圖-19b) 様に

圖-15. ドイツ國有鐵道會社の橋梁測定車 II

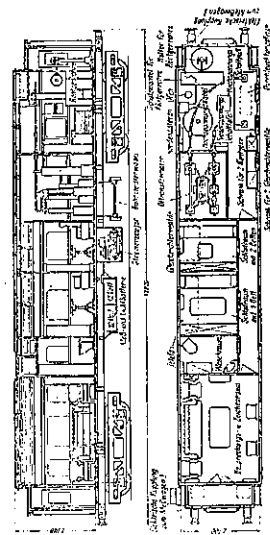


圖-16. 螢光板にて遮影する事により材料をレントゲンにて安全に間接に見る

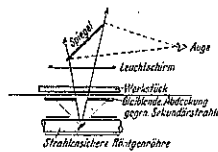
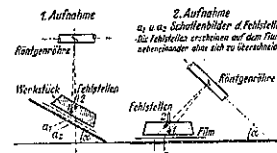


圖-17. 遮影法に依る材料のレントゲン寫眞撮影法。傾斜角に依る内部缺陷の確認



4) Die Röntgentechnik in der Materialprüfung. Berichte von Behnken, Herr und Kantner. Leipzig 1930, Akademische Verlagsgesellschaft.

考案されてゐる。相互反對に配線された整流用真空管は第一の半波が第一のコンデンサーを充電する間に、第二の半波はシリーズに配列された第二のコンデンサーを最高電壓に至る迄充電するが故に、2つのコンデンサーの外端間には2倍の電壓を生ずる事となる。従つてレントゲン管に於ける電壓も同様に2倍となり、 $2 \times 125\,000 = 250\,000$  Vに迄達する。此處で2半波間のコンデンサーの放電に依る僅小なる電壓變化は之を攪亂する程度には達しない。

レントゲン管は測定車の外で、直接に試験さるべき個所の前で(圖-20)、特別製の、長さ25mの、高度に絶縁された高壓ケーブルに依つて連絡される。1臺の電動水ポンプがレントゲン管の冷却の用をなしてゐる。豫備室内の作業机は小形材料のレントゲン寫眞試験に使用される。低電壓用の配電盤及び高電壓用の可動配電臺は調整に必要なものである。レントゲン装置全體は移動し得られ、例へば一工場内で長い間作業する場合には取り外し得られる様になつてゐる。車輛の下面に取り付けられてゐる光源用蓄電池は同時に測定車Iの装置に對する測定用蓄電池として使用され、亦其れより充電し得られる。此の蓄電池は特殊配線に依り電氣的に測定車Iと結合されてゐる。

I輛の小さな、車輛の下部につり下げられた線路作業監督用手推車、高電壓事故に必要な衛生救急函、各2個づつのレントゲン管及び整流用真空管を柔かき弾機にてつり下げて衝撃の影響を受けない様にした戸棚を加へて測定車IIの設備は完備する。

暖房並に照明は測定車に同じ。

#### 4. 兩測定車の利用

現在存在する問題の中から、唯2,3を此處に列擧する事が出来る。例へば個々の國有鐵道局(Reichsbahndirektionen)に使用せしめてある簡単な計測器を以つてしては施行し得ない様な問題が問題となる。

最も重要な仕事は先づ以つて鋼、石、コンクリート及び鐵筋コンクリート製の鐵道橋及び道路橋に於ける動力學的現象の組織的研究である。今日迄各國の種々の規定に示されてゐる衝擊係數曲線<sup>5)</sup>を檢證する事が國際測定研究に依り既に企圖されつつある。

古い現存の橋梁は補強の前後に於て、其の構造狀態を精確に決定し研究されなければならない。新しい熔接橋梁<sup>7)</sup>に於ても、亦熔接に依り補強された橋梁に於ても、

圖-18. 橋梁測定車 II. レントゲン装置  
 手前: X線保護装置を有するレントゲン管、  
 高電壓電盤  
 前方: 冷却用ポンプ、低電壓配電盤、變壓器箱

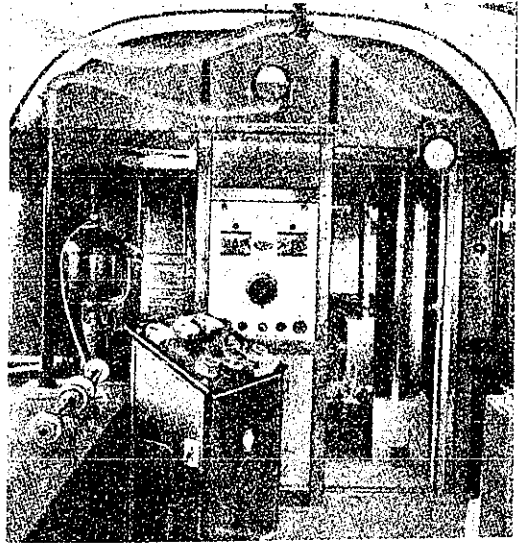


圖-19 a. レントゲン装置の X線發生回路の配線略圖  
 圖-19 b. レントゲン装置に於ける X線發生回路の電壓と時間との關係

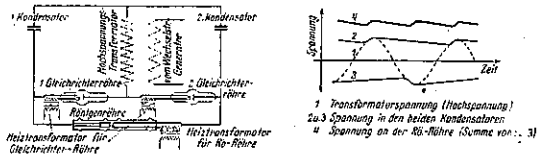
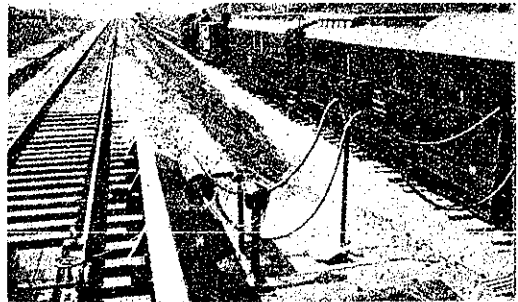


圖-20. 熔接鐵道橋梁のレントゲン寫眞による調査



5) Hort, Stossbeanspruchungen und Schwingungen der Hauptträger statisch bestimmter Eisenbahnbrücken. Bautechn. 1928, Heft 3 u, 4.  
 6) Report of the Bridge Stress Committee. London 1928.  
 7) Schaper, Die erste geschweisste Eisenbahnbrücke für Vollbahnbetrieb. Bautechn. 1930, Heft 22.  
 8) R. Bernhard, Neuere geschweisste Brücken. Z. d. VdI 1930, Heft 55.



レントゲン寫眞撮影に依つて完全な施工がなし得られる様に、各點試験に依り検査されねばならぬ。

リベット綴合並に熔接の試験用橋梁構造物<sup>9)</sup>及び種々の鋼材により作られた個々の部材は破壊に至る迄長期試験を行ふ事に依り静力學的並に動力學的に最も適當な構造を研究せねばならぬ。その際上述の仕事並に熱の測定に依り、構造物全體のエネルギー量を研究すべきである。

橋梁特に新しき特殊の構法の橋梁に於ては荷重試験を施行しなければならない。

終りに尙ほ、増加しつつある制動力に對する規定、許容横振動並に扭轉振動<sup>10)</sup>の測定學的検査及び對傾構 (Querverband) の最も適當なる施行に就き述べ度い。

例へば特に橋梁に對する影響を知る爲<sup>11)</sup>に車輛 (機關車、鐵道車輛及び自動車) の動力學的定數の決定、走行せる車輛の車臺に於ける應力 (制動杓に依る制動) の測定及び軌道に於ける應力 (軌條) の測定の様な、近接領域の數多の研究が同様に着手された。同様に機械 (タービン) の基礎<sup>12)</sup>の研究が行はれてゐる。他の管轄に對する特殊の測定學的問題の研究も亦行はれて來てゐる。

## 5. 約 説

最も經濟的な構造法を強制されたため、實測に依り構造物内部の總ての事象の知識を深める事に依り、理論的計算が完成されるに至つた。測定法の不斷の改善は眞に之に貢獻し得る。其の進歩は土木技術者の仕事の中で、電氣工學の助力を缺く事の出来ない重要な問題である。

ドイツ國有鐵道會社が測定車の製作と設備に惜しまなかつた永年の努力と莫大なる費用は、多分國有鐵道以外に於ても、新なる科學的認識と、より經濟的構造物の架設に依つて相償ひ得られるであらう。

9) R. Bernhard, Dauerversuche an genieteten und geschweissten Brücken. Z. d. VdI 1929, Heft 47.

10) R. Bernhard, Über die Verwindungssteifigkeit von zweigleisigen Eisenbahnfachwerkbrücken. Stahlbau 1930, Heft 8.

11) R. Bernhard, Brücken und Fahrzeug. Bauing. 1930, Heft 28.

12) K. Bernhard, Aus der Praxis der Maschinenengründung. Z. d. VdI 1930, Bd. 74, Heft 37.