

論 說 報 告

第20卷第9號 昭和9年9月

改良型撓度振動記録器及び應力記録器に就きて

會員 工學士 高 橋 逸 夫*

On the Properties of Improved Vertical Vibrograph and
Stress-recorder made by Shimazu-Seisakusho

By Itsuo Takahashi, C. E., Member.

内 容 梗 概

橋梁は竣工後直ちに或はある年數經過後にその撓度及び應力を観測することは橋梁工學上重要なことなり。著者は從來實地に使用せられたロイナー式に改良を加へ島津製作所に命じ製作せしめたるを以てその構造及び使用法を茲に説明せり。その改良の主要なる點は器械の運動部に於ける抵抗を減じ、又器械の精巧を期したるは勿論その撓度計にありては(1)秒刻を加へたること、(2)記録ペンシルの運動が常に垂直ならしめたること、(3)電氣的に遠方より取扱ひ得ること、(4)記録紙運行の速度を調節し得ること、又應力計にありては(1)電氣的に遠方より器械の運行を取扱ひ得ると同時に時間の秒刻も完全に爲し得ること、(2)變形に對する擴大倍率を増加したること、(3)記録紙運行の速度を調節し得ること等である。尙終りに實地試験に際し注意すべき事項を列擧せり。

1. 總 說

橋梁を設計するには計算のみを以て満足すべきでない。その計算の結果が實際の強度と良く符合してその計算法が正しきか否かを検査することが必要である。併し計算中には種々の近似法が用ひられてあるから實驗の結果と全然一致するものではない。多くの場合觀測の結果は計算の値より小さく出るものである。而して橋梁の強度を試験するには第1、荷重作用の下で橋の任意の點に生ずる撓度或は振動を、第2、同じく荷重作用の下で部材斷面の各點或は橋の任意の部分に生ずる應力を測定することにある。而して凡そ次の3つの場合にこれ等の試験を行ふ。

- (1) 橋梁が竣工すれば先づ試験荷重を通してその應力及び撓度を測定して橋梁に何等の缺點なきことを證明する。
- (2) 橋梁が架設後 10~20 年と云ふ歳月が經過して橋上を通過する荷重が増大する時、又は橋梁材料が風雨の爲腐蝕を受けて弱くなりたる時、橋梁が安全なるや否やを検査する。この試験は鐵道橋に對して 4~5 年毎に 1 回行ふべきものである。
- (3) 衝擊係數の決定等學術的試験を行ふ。

以上の試験を行ふに當りて橋梁上に荷重を動かして刻々變化する荷重に對して撓度及び應力を時刻と共に紙上に曲線を以て記録せしむることが必要である。

撓度及び振動を時刻と共に圖示する器械を凡そ次の如く區別する。

(a) 物體の慣性を應用して靜止點を作るもの

- (1) 大森式振動記録器
- (2) Cambridge vertical and horizontal vibrometer.
- (3) Leuner's horizontal vibrograph.

* 京都帝國大學教授

(4) Geiger-Vibrograph von Lehmann und Michels.

(5) Mailhak-Schwingungsmesser.

(b) スプリングの作用を作用して固定点を基準とするもの

(1) 田邊式撓度振動記録器

(2) Leuner's vertical vibrograph.

(3) Stopponi & Co. Deflectmeter.

この他 Scheck-Vibrometer は自記はせないが鏡への反射光線を應用して振幅を擴大してスケール上に現はし振動の大きさを簡単に見出すことが出来る。

次に應力計にて時刻と共に應力を記録するものを次の 3 種に區別する。

(a) レバレーチにより變形量を擴大するもの

(1) Leuner's Stress-recorder.

(2) Geiger-Extensograph.

(3) 寺野, 山本式應力記録器

(b) レバレーチ及び光學器械により變形を擴大するもの

(1) Cambridge Stress-recorder.

これは「セルロイド」板上に針尖端を以て疵を付けて後これを顯微鏡にて擴大或はこれを擴大寫眞に撮りて應力の曲線或は量を求むるものである。

(2) Feredey Palmer Stress-recorder.

變形に依つて鏡を動かシスリットを通して光線を寫眞のフィルム上に落して應力の曲線を作る。

(3) Dehnungsmesser mit Ritzregistrierung.

これは變形を針尖端を以て硝子板上に疵を付けて後顯微鏡或は擴大寫眞にて變形を擴大するものであつて變形を 300~800 倍に擴大し、又時刻は 1/1 000 秒迄記録し得ると云ふ。

(c) 電氣抵抗の變化を利用するもの

この種にて今日用ひらるゝものとして Spannungs-Oszillograph (Elektrische Kohlenfernmesser nach Siemen-Fuess) がある。これは鐵部材の伸縮は直ちに電氣抵抗に影響してこれを時刻と共にオシログラフに撮るものである。

尙應力計の内時刻に關係せずして單に變形量或はフック法則に従つて應力を讀み得るものとして

Huggenberger-Dehnungsmesser.

Barry-Extensometer.

Martin-Dehnungsmesser mit Spiegel Apparata.

等ある。これ等は橋梁にて一定の位置に荷重を靜止せしめて部材の應力を測るに便利である。

以上の内構造物特に橋梁の撓度、振動及び應力を測定するに取扱方法簡單又器械の價格が比較的低廉なるものはロイナー式である。余は實地に屢々これを使用したる經驗に基きその不備の點を改良せんことを企て島津製作所に命じて製作せしめ、又これを實驗室に或は實地に使用したる記録の成績良好なればその構造及びその使用方法を茲に記述せんとす。

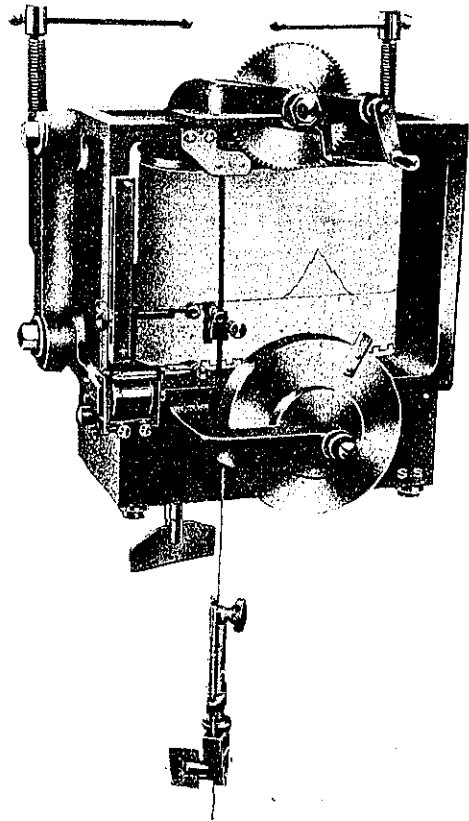
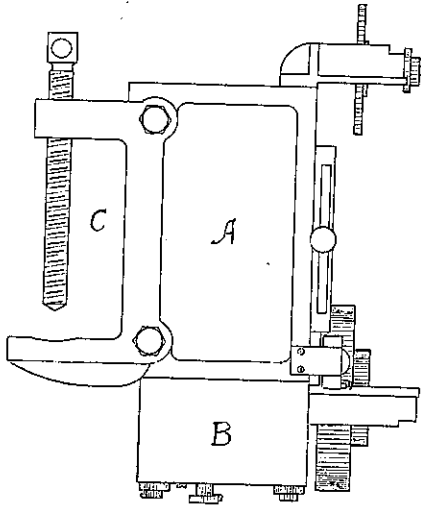
その改良の主要なる點は器械の動く部分に於ける抵抗を出来るだけ減少せしめ又器械の精巧を期したるは勿論その撓度計にありては (1) 電磁作用により時間の秒刻を加へたること、(2) 記録ペンシルの運動が常に垂直なるためベルトを 2 つのローラーにて挟みたること、(3) 電氣的に遠方より器械を發動又は停止せしめ得ること、(4) 記録運行の速度を調節せしめ撓度の大きさに應じて適當の曲線を描かしめ得ること、又應力計にありては (1) 電氣的

に遠方より器械の運行を取扱ひ得ると同時に時間の秒刻も完全に爲し得ること、(2) 變形に對する擴大倍率をローラーにては約 140 倍なるものを約 200 倍に増加せんと設計したるも事實 150 倍内外の倍率となりたり。(3) 記録紙運行の速度を調節し得ること等である。

2. 改良型撓度振動記録器

第 1 圖は改良型撓度振動記録器の寫眞を第 2 圖はその正面圖、第 3 圖はその側面圖を示す。圖中 A はフレームにして、その内に記録筒 b、記録巻取筒 c、記録紙の「ローラー」d 等を取付け、B は記録の運動を起すべき時計仕掛の箱、C は本器取付用のクランプを示す、渦狀車 e の中には帶狀撥條を収め、段車 f と鋼ベルト g

第 2 圖



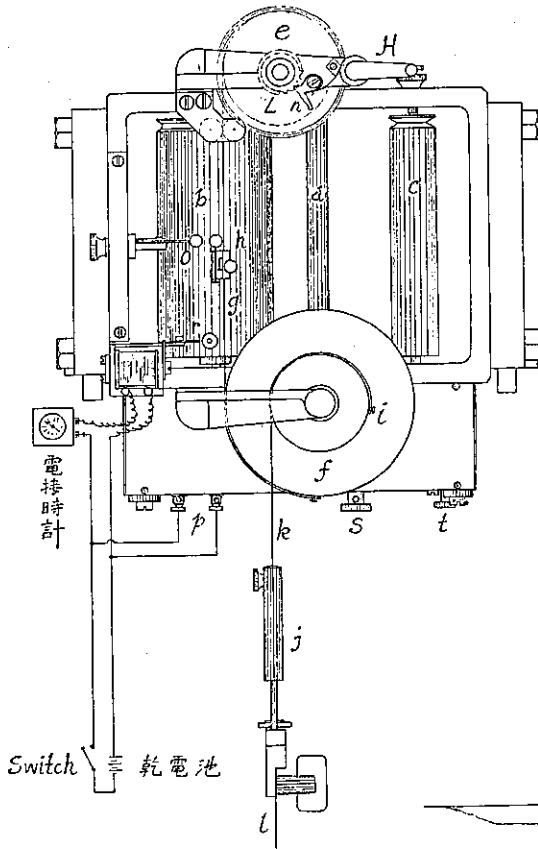
第 1 圖 自動撓度記録器

により連絡せしめ、その鋼ベルトの上に記録鉛筆 h が取付けあり。段車の各段には爪 i があり鋼ベルト k の一端を引掛け他端は接續具 j と接續す。段車は 3 段で鋼ベルトを大徑に掛くれば構造物の撓度と同寸法に中徑に掛くれば 2 倍又小徑に掛くれば 5 倍に記録することが出来る。但しこの倍率は器械製作上の誤差から多少異なるから検査の上決定する。

今橋梁上の一處に於ける撓度を測定せんには第 4 圖に示すが如くクランプ C を以て橋梁の一部分に取付け不動點として重錘 K (重量約 20 kg) を川底に沈め針金 l を接續具 j に接續し渦狀車 e 内にあるスプリングに附屬せるハンドル H を廻轉して適當に針金を緊張せしめる。尙鋼ベルト g の上端は小さき 2 つのガイド・プレーの間に挟まれて渦狀車 e が廻轉するも鋼ベルト g は常に垂直の位置を保つ。

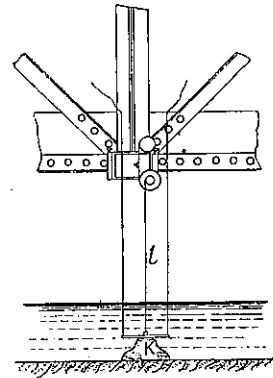
今橋梁に荷重がかかる時針金 l は弛み車 e の内にあるスプリングの弾力により e は廻轉して針金 l の弛みに相當する長さだけ鋼ベルトを巻き込みその時一緒に記録鉛筆が動きて記録紙に撓みを記録する。こゝに第 5 圖に示すが如き記録を得る。

第 3 圖



今第 6 圖に示すように渦状車 e が角 θ だけ右廻りに廻轉する時、スプリングの弾力に對應するモーメントは針金の張力 P_1 と車 e のその位置に於けるベルトの接觸點の半徑 R_1 との積 $R_1 \cdot P_1$ である (第 6 圖 (a) 参照)。更に車 e が撓度の變化に伴ひて $\Delta\theta$ だけ廻轉し (但し弾力が減ずる方向) その時のモーメントを $R_2 \cdot P_2$ とすればスプリ

第 4 圖



第 5 圖

ングがフック法則に従ふ範圍では

$$P_1 \cdot R_1 : P_2 \cdot R_2 = \theta : \theta - \Delta\theta \dots\dots\dots(1)$$

なる關係が成立する。而して器械の位置は變動があつても針金の張力が一定であるためには

$$P_1 = P_2 \text{ にして (1) 式は}$$

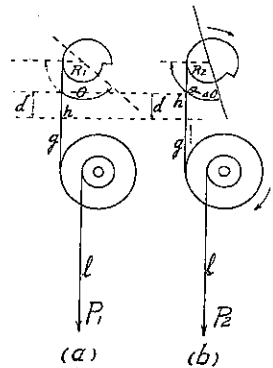
$$R_1 : R_2 = \theta : \theta - \Delta\theta \dots\dots\dots(2)$$

となる。但し $\Delta\theta$ はスプリングの弾力を減ずる方向の廻轉あるを以て負號を採る。又 $R_2 < R_1$ である。

故に車 e を廻轉角に比例して半徑が變化するが如き形狀に作れば針金の張力が常に一定であるべき條件を満足せしむることが出来る。本器の車 e はこの理論に基きて設計せられたものであるから橋梁上荷重の移動に係はらず、針金 l は常に一定の張力を以て緊張せられ針金自身は伸縮することなく従つて橋梁の撓度を何等補正なく正確に測定し得るのである。

第 2 圖に於て廻轉圓筒上にある γ は電磁記録器であつてこれを秒刻みの電接時計と乾電池 (3 volt) とに接続すれば記録紙上に半秒刻の記録を採ることが出来る。又 \circ は基準線を描く鉛筆で

第 6 圖

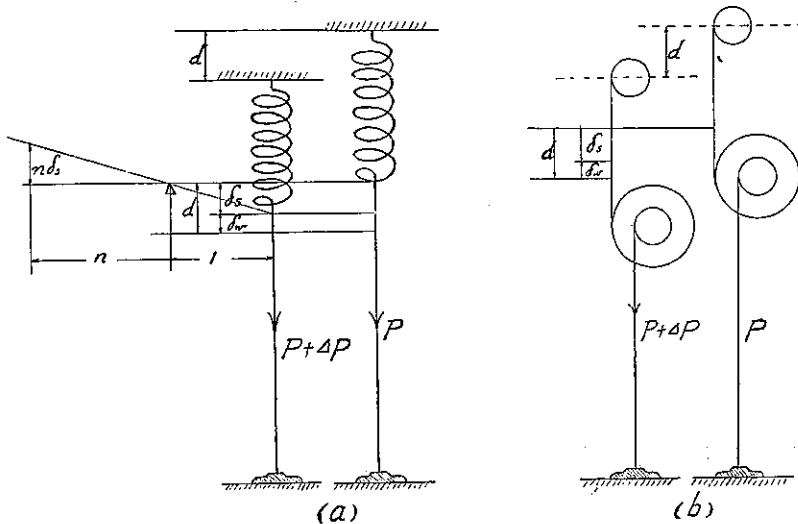


ある。尙本器は電氣的に遠方から單にスイッチにより運動せしめ得るため電磁起動装置を具備し電極 p に前記電磁秒記録器 r に接続せる乾電池をそれと並列にスイッチを経て電流を送れば記録筒を隨意に起動又は停止せしむることが出来る。而してその電氣接続は第 2 圖に示す通りである。今こゝに注意すべきことは次節に述ぶる應力計の場合も同様であるが、この起動用の電流を秒刻電磁器と直列に接続してはならない。何んとなれば電接時計が介在するため電流が一時中斷して記録圓筒の廻轉も亦一時中止することとなる。

尙本器は橋梁の徑間及びその上を通過する列車荷重の速力に應じて適當なる大きさに記録し得るため轉子 t を左右に廻轉しドラムの廻轉速度を調節し得る。即ち凡そ 1.0-0.2 cm/sec の間にドラムの廻轉速度を調節し得るから橋梁の徑間大なれば速度を早め、又これに反して小なれば速度を緩にせば適當なる長さの撓度曲線を得る。不動點を作るべき重錘は重量約 20 kg であるが、これを水中に下すには 2 本のロープで吊り下げる (第 4 圖参照) この不動點を流水中に採る時には流水及び浮游物が針金を振動を興へるから人形の針金を引きて岸に從著せしむるか、或は河中に杭を打ちて杭頭の釘にて固定點を作る。記録を巻き付けたドラムの廻轉は B 内にある時計撥條によりて行はれ s なる轉子を右へ廻せば起動し、反對の方向に廻せば停止せしめる。或は電氣的にスイッチを入れ又切ることにより發動又は停止し得ることは上述の如し。

次に觀測を終りて橋梁の部分から器械を取除くには先づ車 e 内のスプリングの彈力を弛めることが必要である。これが爲先づハンドル H を少しく緊めて齒車 L にかゝる爪 n を外してハンドル H を靜かに反對方向に廻はしてスプリングの彈力を弛める。又本器を横の方向に取付ければ水平方向の振動を測定し得る。故に本器 2 個を垂直及び横の方向に配置すれば構造物中の一點に於ける上下及び左右動を時刻と共に記録し得る。尙本器を次節に説明する應力記録器と並用する時には橋梁並に他の構造物の強度を完全に觀測し研究し得るのである。

第 7 圖



次に第 7 圖に示すか如き螺旋狀スプリングを有するもの又は車 e が單に圓板であるものに於ては針金の張力の變化に對する補正を要す、今 $P=1 \text{ kg}$ 長さ $l \text{ cm}$ なるものゝ變形は $\rho = el$ とす。e は單位變形量である。力が $P \text{ kg}$ なる時の變形は $\Delta l = \rho l$ である。

他方
$$\Delta l = \frac{\sigma}{E} l = \frac{P}{EF} l \quad \text{である。}$$

故に $\rho = \frac{l}{EF} = el$ である。但し σ は単位應力, E は弾性係数, F は斷面積を表はす。今第 7 圖に於て δ_s をスプリングの變形, 又 δ_w を針金の變形とすれば撓度は

$$d = \delta_s + \delta_w$$

である。實際記録に表はるゝ撓度は δ_s 或はその倍數 $n\delta_s$ である。 ΔP を變位の結果スプリング及び針金に生ずる張力とすれば

$$d = \delta_s + \delta_w = \Delta P(\rho_s + \rho_w)$$

となる。従つて

$$\Delta P = \frac{d}{\rho_s + \rho_w}$$

となり。記録に表はるゝ變位はスプリングの變形のみであるから

$$\delta_s = \Delta P \rho_s = d \frac{\rho_s}{\rho_s + \rho_w}$$

となる。然るに求むる撓度 d は

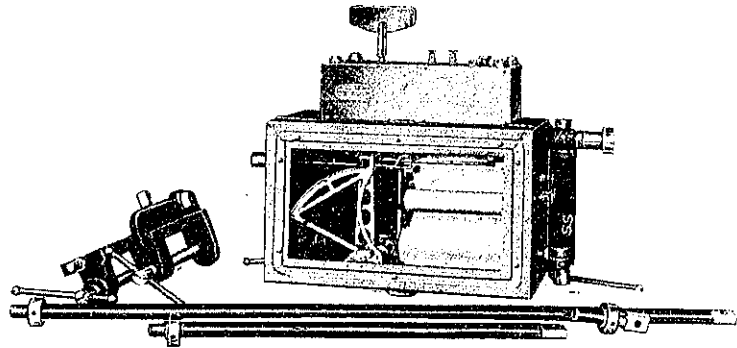
$$d = \delta_s \left(1 + \frac{\rho_w}{\rho_s} \right)$$

であるから吾人は記録せられた撓度 δ_s に對して $+\delta_s \frac{\rho_w}{\rho_s}$ なる補正を必要とする。

3. 改良型應力記録器

本器の大體の形は第 8 圖なる寫眞に示す。このものは橋梁, 建築, 起重機等の構造物に於て刻々移動するか如き荷重が作用する場合その構造物が受くる變形 (deformation) を自記せしめ, これに相當する應力 (stress) の變化を測定する装置である。

第 8 圖 ストレス・レコーダー



所謂弾性公式は

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{\sigma}{\Delta l / l}$$

である。

- 式中 σ : 材片の受くる単位應力 (unit stress)
- ϵ : 単位變形量 (strain)
- l : 材片上の試験に供する長さ即ち測長
- Δl : 測長に於て生じたる伸縮量
- E : 弾性係数

今構造物の材料を建築用鋼 (structural steel) とすればその弾性係数 $E = 2150000 \text{ kg/cm}^2$ である。倍率 $f = 150$ なる器械にてはそのペンシルの描いた曲線上の高さ 1 mm は

測長 1000 mm の場合材片が受くる應力

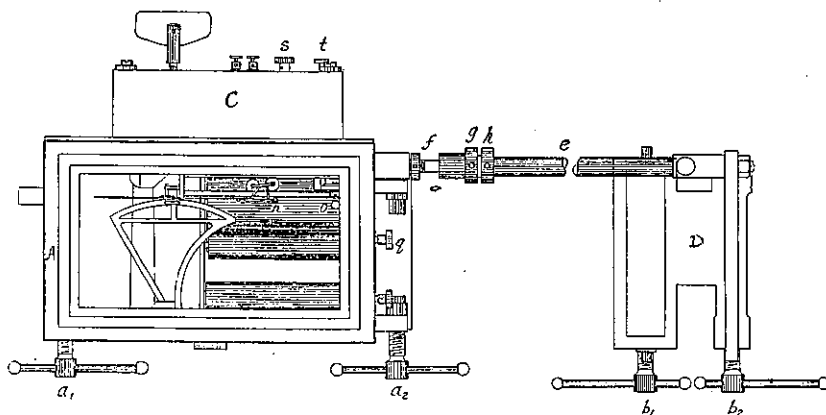
$$\sigma = \frac{\Delta l}{l} E = \frac{2150000}{1000 \times 150} = 14.33 \text{ kg/cm}^2$$

測長 700 mm の場合 $\sigma = 20.48 \text{ kg/cm}^2$

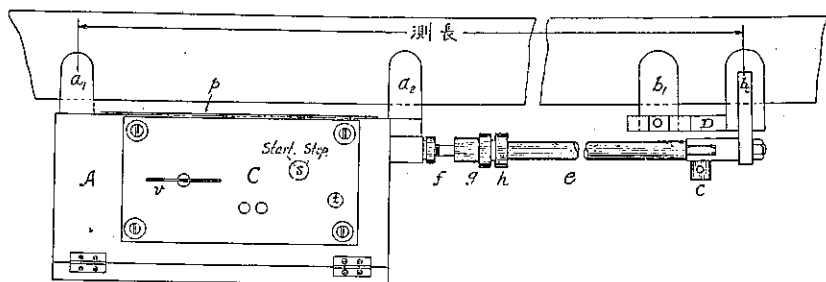
測長 400 mm の場合 $\sigma = 35.83 \text{ kg/cm}^2$

に相當する。故に本器に依つて描かれた曲線の高さを測れば、その場合部材のその點に受くる應力を何等煩鎖なる計算を用ひずして見出すことが出来る。

第 9 圖



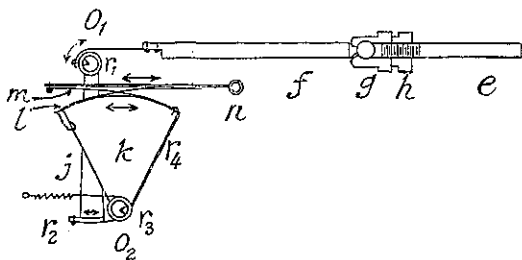
第 10 圖



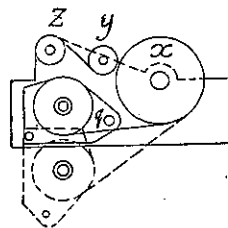
第 9 圖は本器の平面圖、第 10 圖は側面圖、第 11 圖は變形の記録が擴大せらるゝ機構、第 12 圖は記録紙の運行、第 13 圖は電氣接続圖を示したものである。

第 9 圖及び第 10 圖に示す如く本器は變形を擴大せしむる撓扇形 (leverage sector) 及び記録筒を納むる箱 A、これに附屬した時計装置 C、緊定用夾具 D、A と D とを連結せしむる測長 1000 mm, 700 mm, 400 mm に相當する長短 3 種の中空鏢 e から成る。而して鏢 e の端は D と c にてヒンズにて連結し 3 種の鏢を取換へ得

第 11 圖



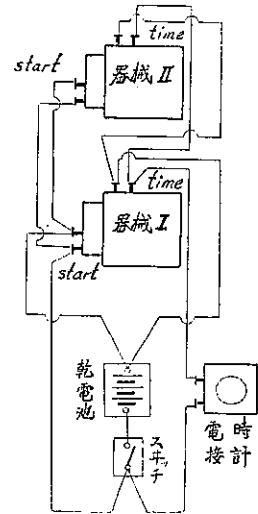
第 12 圖



る様になる。

移動荷重の下に於て構造物の部材に生ずる長さの變化を測定するには先づ部材中適當の位置を選び測長 1000 mm (或は 700 mm, 400 mm) を精密に測りて兩端の 2 點を記入する。その一點にクランプ・スクリュー a_1 を堅く締付け、クランプ a_2 は部材の軸に直角に軽く締め、又他端にクランプ・スクリュー b_2 を當て堅く締付け、 b_1 は a_2 と同様に部材の軸に直角に軽く固定する。この時錐 e の端にあるスクリューをスクリュー・ナット g に當て嵌める、而して錐 e は部材の軸と平行であることが必要である。若し多少にても伸縮の方向と錐 e の方向とが平行ならざる時には錐 f と箱 A の壁との間にコチレが生じ摩擦を増す、次にスクリュー・ナット g を廻すことに依つて記録用ペンシル n を記録筒の中央に持ち来る。部材が主として張力を或は壓力を受くるかに依つてその位置を多少加減し得るがペンシルの運動を成るべく易くするため中央の位置におくことが望ましい。ペンシルの位置をかくの如く定めたる時反向ナット h を廻してスクリュー・ナット g に接せしめその弛むことを防ぐ。クランプ a_2 及び b_1 は自身の動揺する軸に附着しておるから部材の伸縮には關係のないものである。それ故クランプ a_1 及び b_2 に比して幾分軽く締め付けることは前述の通りである。こゝに於てスクリュー v にて時計機條を巻き轉子 s を廻し記録筒の廻轉を發動せしめる。又第 13 圖に示すが如く電接時計と電氣的に接近せしむる時にはペンシル o により秒時を記録することが出来る。

第 13 圖



次に記録紙を記録筒に挿入するには第 10 圖に示す p なる底蓋を取去り第 9 圖に示すスクリュー q を廻はしてその軸棒を抜き出し、記録紙ローラーの心棒を第 12 圖に點線にて示す位置に引き出して記録紙ローラーをその棒に挿入して紙の端を記録筒 x の下より押ローラー y (これは少し動き得る) との間を経て巻取圓筒上にあるスリット (切目) に挿入固定せしめます。而して記録紙ローラーをその位置に納めて再び軸棒を嵌めてスクリュー q を締める。

數臺の應力記録器を同時に用ふるか或は自記撓度計と連結し、同時に發動又は停止せしめんには互に並列に電氣的に接続せられた乾電池よりの電力の作用に依つて行ひ得る。

この時各器械 1 臺に付 1.5 volt, 0.4 ampere 位の電流が必要であるから上の場合に 4~6 個の乾電池を直列に纏いで用ひる。尙秒刻電磁器との回路中にコンタクト・ウォッチを挿入して秒時を記入せしめ得ることは前述の通りで總ての器械を一齊に動作せしめ得る。第 13 圖には電氣接続の一例を示したものである。

本器の擴大機構は第 11 圖に示す様に今荷重が作用した結果部材の測長が伸張した場合を考へると鐵棒 e 及び f の長さは不變であるから o_1 を中心として第 1 のセクトル (扇形) j は左方へ廻轉し、同時に o_2 を中心として第 2 のセクトル k は右方へ旋回する。而して l 及び m なる 2 つの鋼ベルトで、ペンシル n に運動を傳へる。従つて圖に示す様に夫々の半徑を r_1, r_2, r_3, r_4 とすれば變形の擴大倍率は次の如くなる。

$$f = \frac{r_2}{r_1} \cdot \frac{r_4}{r_3}$$

本器の製作設計に於ては $r_1 = 8.68 + 0.1$, $r_2 = 120 + 0.1$, $r_3 = 6.5 + 0.1$, $r_4 = 94.0 + 0.1$ (mm) と爲したから $f = 195.03$ となるべきである。但し上式中 0.1 (mm) は鋼ベルトの厚さの半分を表はす。然し製作上の誤差もありて實際出來上がった器械の倍率は約 150 倍となつた。

又本器には轉子 θ を廻轉して時計仕掛のガバナを調節して記録筒回轉の速度を加減し得るから橋梁の徑間及び列車荷重の速度に應じて適當の大きさに記録曲線を描かしむることが出来る。

尙本器は 1. に述べた第 1 及び第 2 の試験に使用するものである。即ち移動荷重の個々の位置に於ける靜力學應力を撓率の關係から見出すにあり。従つて列車を橋上に於て徐行せしむる必要がある。實地列車が高速度にて橋上を通過する際には衝撃の影響が加はるから橋梁に實際に生ずる應力は本器を以て見出したる結果に衝撃係數を乗すべきである。余が今日まで實地に於て本器を使用せる結果に依れば小徑間の桁橋に對しても上述の範圍にて使用し得べきものと信ず。又本器製作に當りては構造の詳細の點又材料を注意して記録ペンシルの運動を輕くして自己振動數を増加せしむることに努力せしは勿論である。

4. 橋梁の強度試験に於ける注意

橋梁の實地試験に際し注意すべき事項を列記すれば凡そ次に示すが如し。

(a) 橋梁上は常に汽車、電車等が通過するを以て試験に従事するものは常に身體の危險に曝さるゝものであるから監視人を置き、待避所を設け又常に細心の注意をなすべし。又橋上には時として 600 volts 以上の高壓送電線が架設しあれば、これに觸れざる様注意すべし。

(b) 試験荷重に於ける車輪の重量は名簿登録のものと多少異なるのみならず、左右輪の重さは機械配置の非對稱、又は製作上の缺點よりして同一ならず、又運轉により石炭、水の消費によりて試験荷重の重さに關係を及ぼす。

(c) 記録上の撓度は一般に計算により求めたるものより小である。その原因としては (1) 格點にガセット・プレートを用ひて剛性となりたること (2) 揺止め、風壓に對する豎、水平の綾構、又は主桁と連結せられた横桁、縦桁の共同作用等である。

(d) 應力計を材片に取り付ける時測長の端にあるクランプの箇所はペイント層の影響なき様にクランプ・スクリーンの尖端を金屬層に達せしむること。

(e) 構桁に於て副應力の影響があるを以て部材長の中央に測長を採るべし、又その斷面に於てもその上下或は内外の位置にて應力を異にするを以て數箇所の點に於て應力を測定すべし、又特に副應力の影響を知らんには部材の端に器械を取付くべし。

(f) 或る一點に於ける應力を測定せんにはその測長を成るべく短くすべし。