

て防舷材は殆んど取替えられその経費は数百万円と見積られる。現在の如き接岸方式は断じて操船技術の常道ではない。最後に元高松港湾事務所長大田日出男氏

に助言をいただいたことに感謝の意を表する次第である。

(昭. 25. 10. 3)

電気抵抗線歪計に関する研究 (第1報)

—SR-4 歪計について—

正員 成岡昌夫*

STUDIES ON THE ELECTRIC RESISTANCE WIRE STRAIN GAGE

(Ist Report)

— About the SR-4 Strain Gage —

(JSCE March 1951)

By Masao Naruoka, C.E. Member.

Synopsis This reports the essential points of SR-4 Strain Gage which is the most versatile pick up ever developed and experiments in which this strain gage was used in tension test of steel piece.

要旨 第1報として著者の入手した SR-4 歪計について簡単な説明を加え、これを用いた若干の実験を述べ、この種の歪計の要点を詳述したものである。

1. 概説

応力測定法を大別して歪計による方法、X線による方法、光弾性による方法及び塗料による方法の4つがある。歪計を用いる方法のうち電氣的歪計は高倍率を得られる利点があり、応力変化の急激なものには特に有利であつて、なお遠隔記録の便がある。

電氣的歪計としては種々のものがあるが、抵抗によるものが最も簡単であり、比較的新らしいものとして炭素片歪計がある²⁾。炭素片歪計では炭素片の面積が相当大きく、従つて得られる記録は貼付けられた面の平均の歪を表すわけである。故に炭素片の代りに歪に対して鋭敏な高抵抗線を用いると、貼付ける面積も少くすみ従つて測定点の歪を得ることに近ずき得るわけである。

最近英、米ではかゝる電気抵抗線歪計の研究が盛んに行われ、建築・土木・機械・船舶・車輛等広範囲の工業計測や試験に盛んに利用されている。従来文献等によつて僅かにその一端を伺い得るに過ぎなかつたが³⁾、著者はメーカーである米国の Baldwin Locomotive Works の御好意によつて同社の SR-4 歪計の見本を入手し、引続き島津製作所の多大の御配慮を得て実物若干個を輸入入手し得たので、こゝに若干報告したいと思う。

2. 原理

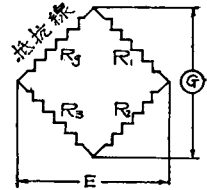
機械的歪によつて電気抵抗の変化することは既に Lord Kelvin が指摘しているところである⁴⁾。今、 R なる長さおよび抵抗を有する抵抗線が歪 ϵ を受けて $l+\Delta l$ なる長さとなり、従つて抵抗が $R+\Delta R$ になつたとする。実験の結果によると ϵ の小さい間は $\Delta R/R \div \Delta l/l$ は一定であつて、これを K とする。これを歪係数と呼ぶことにする。

ある抵抗線をとリ、これを図-1 の Wheatstone-bridge 回路で抵抗を測定した結果 R_g とする。図にお

図-1

Wheatstone bridge circuit containing resistance wire on its one arm.

いて R_1, R_2 および R_3 は P. O. Box の既知抵抗であり、 $R_g/R_1=R_3/R_2$ ならば検流計には電流が流れない。この抵抗線が歪 ϵ を受けて R_g が $\Delta R_g=R_g \cdot K \cdot \epsilon$



だけ変化するとバランスが破れ電流が流れることになる。この大きさを計算しよう。

図-1 の符号を用い、 I を抵抗線を流れる電流とすれば

$$I = E / (R_g + R_1) \dots\dots\dots(1)$$

検流計にて測定しようとする歪による回路の出力の変化 dE_0 は途中の計算を省略して

$$dE_0 = \frac{R_1 R_g}{R_g + R_1} \cdot I \cdot K \cdot \epsilon \dots\dots\dots(2)$$

従つて図-1のような回路で予めバランスさせておき、歪を受けた場合の dE_0 を測定して ϵ を求めることが

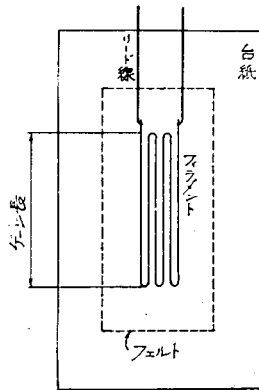
* 京都大学助教授 工学部土木工学教室

できる。

3. SR-4 歪計の構造

これについては土木学会誌第 35 巻第 9 号“SR-4 歪計について”を参照されたい。最も簡単な一例を図-2に示す。

図-2
Typical SR-4 strain gage



式(2)からわかる通り、 dE_0 は歪係数 K に比例するので、できるだけ K の大きい抵抗線をフィラメントとして用いることが望ましい。また同一の K を有する抵抗線を用いても一般に歪計の抵抗 R_g の大きい方が dE_0 が大きくなるので、できるだけ R_g の大きいものを用いる必要がある。なおこの歪計は R_g の歪による微小変化 ΔR_g を利用しているので、この ΔR_g が温度による抵抗の変化に妨げられないことが必要である。すなわち温度係数 α が 0 であることが理想である。

SR-4 歪計では静歪測定用歪計には $\alpha \approx 0$ であり $K \approx 2.0$ のアドバンス線を、動的歪計としては α が 0 でなくても K が比較的大きい $K \approx 3.4$ のエリンバー線を用いている。いずれもフィラメントの直径は $1 \sim \frac{3}{4}$ mil ($25 \sim 19 \mu$) の極めて細い線である。

次にフィラメントの抗張力も考慮しなければならない。すなわち被試験体がまだ破壊荷重に相当する歪に達しないうちは、その歪を受けてもフィラメントが切れないことが必要である。従つて普通の材料に較べて相当高い抗張力と相当大きい伸長率並びに σ - ϵ 曲線の相当大きい直線部分を持つていることが必要である。

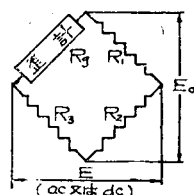
4. SR-4 歪計の使用法

図-3

Wheatstone bridge circuit, using only active gage,

これについても前記拙著を参照していただきたい。接着剤としては SR-4 セメントあるいは Duco セメント等の製品がこの歪計用として発売されている。

測定法については 図-3

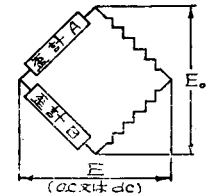


の如き Wheatstone bridge 回路が最も便利である。 R_g の位置に測定物に貼付けた歪計を用いばよい。

図-4

Wheatstone bridge circuit, using active and dummy gages.

図-4 の如く R_g の位置に前記の歪計 A を 1 個用いる外、 R_3 の代りに測定物に貼付けない歪計 B を用いると温度補償ができる。このようにするのが実際上好ましい。このような場合 A を Active gage, B を Dummy gage 一歪の歪計と呼ぶ。



5. SR-4 歪計を用いた実験

① 構造用鋼材引張試験 使用した歪計は SR-4 歪計 A-1 型である。歪計の抵抗は 120Ω であり、歪係数一歪計について言う場合は Gage factor と言う一は不明であつたので Baldwin 社の Price List に掲載の値をそのまま使つて $K=2.0$ とした。使用鋼材は平均断面積 453.038 cm^2 の第 1 号標準試験片である。このほど中央の片側に 1 個だけ歪計を接着した。用いた接着剤は京大化学研究所製の Polyvinylbutyral を醋酸エチルに溶解したものである。図-3 の直流回路を用いた。導線が相当小さく、かつ長いので $R_g=124.7 \Omega$ となつたので、 $R_3/R_2=10/100 \Omega$ とし、 $R_1=1247 \Omega$ とし測定することとした。使用電圧は 7.5 V で、試験機は Buckton 30 英噸試験機である。この場合の計算は次の如くにすればよい⁶⁾。

$$I = 7.5 / (124.7 + 1247.0) = 5.46 \times 10^{-3} \text{ amp.}$$

$$dE_0 = \{ 120.0 \times 1247.0 / (124.7 + 1247.0) \} \cdot 5.46 \times 10^{-3} \cdot 20 \cdot \epsilon = 1.19127 \cdot \epsilon$$

検流計は島津製作所製 R 型標準参照検流計 A 級一電圧感度 $153 \times 10^{-7} \text{ V}$ である。ランプ・スケール法により $1/10$ の分流器を入れて読むこととした⁶⁾。スケール上の像のふれ (実際の読みの 10 倍の値) 並びに上式より計算した歪と応力の関係を 図-5 に示す。引張荷重 10 英噸迄の実測した歪およびこの鋼材のヤング係数を $2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ とした場合の歪の計算値を表-1 に示す。これによると歪の実測値は計算値の約 $1/2$ となつている。

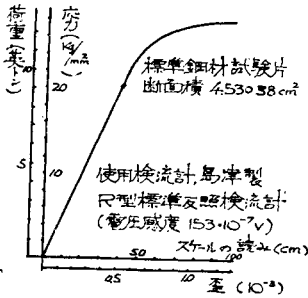
これは使用した歪計が不合格品で実測には利用価値が少いと先方から予め断つてあつた点が大いに影響していると思われる。従つて歪係数が 2.0 でなかつたのであろう。

② コンクリート圧縮・曲げ試験 使用した供試体

は 10cm 正方、高さ 40cmの直方体である。*

図-5

Stress and strain diagram. Abcissa shows the reading on the scale stood 1 m. apart from the galvanometer and the strain calculated from the reading.



*高さの中央両側に SR-4 歪計 A-1 型を貼付けた。抵抗は 120 Ω であつたが、歪係数は不明なので前同様とした。供試体の上下の受圧面が平行でないことが予め懸念されていたが、果して片面のみ圧縮される結果となり、2 個の歪計のうち 1 個しか読めないことゝなつた。Huggenberger 歪計 (明石製) も SR-4 歪計と同一の位置に取付けてあつたが、同様に 1 個しか読めなかつた。圧縮荷重 10t における歪の値は Huggenberger 歪計によれば 1.87×10^{-3} 、SR-4 歪計によれば 1.2×10^{-3} となり、後者は前者の約 65% であつた。

次にこの供試体を横にしてスパン 30cm にて支え 2 点荷重にて曲げモーメントを加えると $P=1.3t$ で破壊した。 $P=1.0t$ における弾性体としての曲げ引張応力は $\sigma=30\text{kg/cm}^2$ であり、引張側の SR-4 歪計で**

表-1 歪 の 値 (単位 10^{-3})

The values of strain calculated on the assumption that the Young's modulus of the test piece is 2100000 kg. per sq. cm. and the measured strain by SR-4 strain gage.

荷 重 (英トン)	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	
応 力 (kg/cm ²)	224	449	673	897	1121	1346	1570	1794	2019	2243	
歪 計	SR-4 歪計	0.045	0.096	0.154	0.206	0.263	0.321	0.379	0.437	0.495	0.552
	計 算 値	0.107	0.214	0.320	0.427	0.534	0.641	0.748	0.855	0.961	1.068
unit	1/1000										

表-2 歪 の 値 (単位 10^{-3})

The values of calculated and measured strain.

荷 重 (英トン)	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	
応 力 (kg/cm ²)	218	436	654	871	1089	1307	1525	1743	1961	2179	
歪 計	SR-4 歪計	0.110	0.204	0.298	0.393	0.487	0.581	0.675	0.769	0.864	0.966
	Hug. 歪計	0.020	0.049	0.101	0.156	0.215	0.277	0.343			
	計 算 値	0.104	0.208	0.311	0.415	0.519	0.622	0.726	0.830	0.934	1.037
unit	1/1000										

**測つたこの応力における引張歪は 4.8×10^{-4} であつた。これに対しては機械的歪計を取付けてなかつたので比較はできないので単に附記するに止める。

この試験に用いた歪計も不合格品と断つてあつた見本品である。

㉑) 構造用鋼材引張試験 以上の実験はいずれも見本として送られた不合格品を用いたものであつて、a) よりわかる如く結果は定性的には従来の機械的歪計によるのとよく一致するが、定量的には肝心の歪係数 K を不確定のまま使つたので一致しなかつたのである。従つて新しく入手した市販品を用いて実験を行つた。使用したのは SR-4 歪計 A-11 型で $R_g=120\Omega$ 、

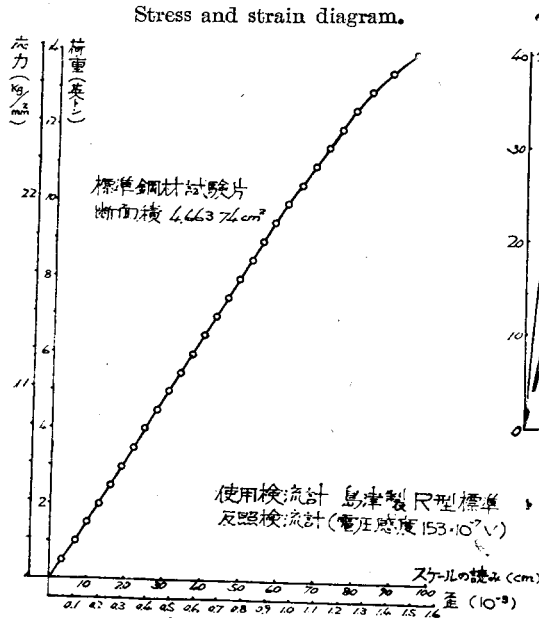
$K=2.04$ である。(この値は商品については与えられているのでそのまま使えばよい。) 試験片は断面積 4.66374cm^2 の第 1 号試験片である。この実験では導線を含む $R_g=120.4\Omega$ 、 $R_1=1204\Omega$ 、 $R_3/R_2=10/100\Omega$ 、 $E=5.8V$ とした。前同様に σ と像のふれ従つて歪との間の曲線を描くと図-6 の通りである。またこの実験には SR-4 歪計をはりつけた側に Huggenberger 歪計を併用し、これで 7 英噸迄読みを取つた。これらの値と鋼材のヤング係数を $2.1 \times 10^6\text{kg/cm}^2$ として求めた歪の計算値を比較すると表-2 の通りである。SR-4 歪計による実側値と計算値はかなりよく一致し、差は最大約 7% である。ヤング係数は実測値を使つてい

ないからこの程度は止むを得ないであろう。

以上はいずれも荷重は0にもどすことなく0.5英噸づつあけて載荷したものである。従つてまた歪の値としては全歪をとつている。

①) フィラメントに関する調査 歪計をアセトンで洗うと容易にフィラメントが出てくる。この直径を顕

図-6



微鏡とマイクロメーターの双方によつて測つたところ0.025mmであつた。これはS.W.G. # 50, 直径1mil=1/1000吋=0.0254mmに一致している。

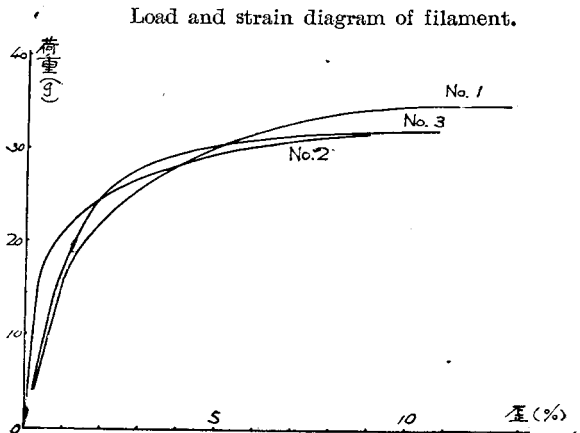
次に b) の圧縮試験で歪を実測し得なかつた方の歪計をアセトンで洗い出し、フィラメントの長さを求めたところ $l=12.73\text{cm}$ であつた。アドバンス線の比抵抗は $\rho=47.56\mu\Omega\text{cm}$ であり、この線の直径を0.0254mmとすれば、断面積 $S=50670 \times 10^{-10}\text{cm}^2$ であるから、フィラメントの抵抗は $R=\rho l/S=119.5\Omega$ となる。これは圧縮試験前に測定した $R_g=120\Omega$ と略々一致する。

次に b) の曲げ試験において切断された引張側歪計をアセトンで洗い出し、短いフィラメント3本を得たので、これを京大工学部繊維化学教室のK.S.式セメーターで繊維強伸度試験を実施した。その結果を表一3および図-7に示す。これらよりわかる如く互に相当の差違があるが、これは繊維類の引張試験では通常のことださうである。この結果によれば荷重 $P=14\text{kg}$ ($\sigma=28\text{kg/mm}^2$), $\epsilon=1.0\%$ の間において $\sigma-\epsilon$ 曲線は直線となる。切断強度は相当高い。これらの結果は我

国の抵抗線の引張試験の場合何等かの参考になるであろう。

c) の実験では鋼材の $\sigma-\epsilon$ 曲線は $\epsilon=1.0\%$ 迄は直線である。従つて $\Delta R/R-\epsilon$ 曲線も直線である。それ以上でも $\sigma-\epsilon$ 曲線が普通の機械的歪計によつて得られる関係と同一である(表及び図では省略してある)。

図-7



ことは $\Delta R/R-\epsilon$ 曲線が直線であることを意味する。なお上のフィラメントの引張試験で $\sigma-\epsilon$ 曲線が $\epsilon=1.0\%$ 迄直線であることからして、結局このアドバンス線のフィラメントは $\epsilon=1.0\%$ 迄は $\Delta R/R-\epsilon$ 曲線

表一3 フィラメントの強伸度試験

The result of test of the filament of SR-4 Strain gage.

試料	荷重 (g)	破壊強度 (kg/mm ²)	伸度 (%)	ヤング係数 (kg/mm ²)
No. 1	34.92	68.9	12.69	2606
No. 2	31.84	62.8	9.04	6950
No. 3	32.00	63.2	10.66	3396
平均	32.92	64.9	10.79	4317

が直線であることが推論される。

c) の実験で Martens の Mirror extensometer を取付けて別にヤング係数を精密に測定すれば、逆にこの歪計の歪係数がわかるわけである。c) においてはこれを省略したため歪係数の値を検討するに至らなかつたが、 $E=2.26 \times 10^6\text{kg/cm}^2$ とすれば $K=2.04$ でよく、逆に $E=2.10 \times 10^6\text{kg/cm}^2$ とすれば $K=1.90$ となる。

6. フィラメントおよび測定装置の問題

以上述べたところからこの種歪計の最も重要な点は高性能のフィラメントであることがわかる。近着の文献によつて調査すると表一4の通りである。抵抗線としては歪係数の値が少くとも $\epsilon=5\%$ (鋼材において

表—4 各種抵抗線の性質
The characteristics of the various resistance wire.

品 種	Cu	Ni	Fe	Mn	Cr	比抵抗 ($\mu\Omega\text{cm}$)	温度係数	歪 係 数
コ ン ス タ ン タ ン	50~60	40~45				47~51	0.000 02	2.0~2.1
ア ド バ ン ス	54.50	44.63	0.11	0.54		47.56	0	2.0~2.1
マ ン ガ ニ ン	84.0	4.0		12.0		43.0	0.000 01	0.5
ニ ク ロ ム		75~85			15~20	100~110	0.000 15	2.1~2.3
エ リ ン バ ー		36.1	63.9			75	0.000 2	3.6

は $100\text{kg}/\text{mm}^2$ に相当する)の範囲内ではヒステリシスの現象を伴わず一定であることが必要であろう。英国の Teddington 国立研究所の“Teddington 線”(ニクロム線)は 5% 迄, Baldwin Locomotive Works の SR-4 歪計のフィラメントは 1% 迄, ユーリカ線 (Cu 60%, Ni40%) は 4% 迄, マンガン線系の“Minalpha 線”は 7~8% 迄歪係数が一定である⁸⁾。

故に我国においても相当広範囲に歪にわたつてヒステリシスの現象がなく K が一定であり, α が極めて小さく, 更に ρ の大きい抵抗線が電気材料の課題として研究されることが極めて必要である。上に述べた線は参考になるが, この中で静的歪計用として $\varepsilon=1.0\%$ 迄は K の一定であり α の 0 であるアドバンス線が適当であろう。

次に問題となるのは測定装置である。これの感度のよい程細く測定できる。例えば 5.0) においては応力 $112\text{kg}/\text{cm}^2$ に対しスケールの読みは 30mm であるから, スケール 1mm が $3.74\text{kg}/\text{cm}^2$ に相当している。0.5mm までは読めるから約 $2.0\text{kg}/\text{cm}^2$ に相当する歪迄読める。これが反照検流計として電圧感度の最も悪いものを使つての話であるから, これの最もよい $2.0 \times 10^{-7}\text{V}$ のものを使えば更に細く測定できることになる。

しかし実際の測定の現場にはポータブルの便利なのが望ましい。また実際の測定には歪計を数多く使うのが普通である。従つて 1 個の歪計に 1 個の P.O.Box 及び 1 個の検流計は不可能な相談である。これらに対して米国では Baldwin Portable Strain Indicator や Baldwin SR-4 Switching and Balancing Unit があつて手軽に測定できるようになつている。

前者は直接歪の値が読めるように 0 から 2×10^{-3} 迄の歪の目盛盤があり (5 の実験では dE_0 の電圧をはかつて計算によつて歪を求めている), 逐次スイッチを切換えて 12×10^{-3} の歪まで読めるようになつている至極便利な装置である。後者は数多くの個所にはりつけ歪計を逐次スイッチシバランスせしめて Indicator

で読むための装置で, 20channels のものまで製造発売されている。

以上は静歪の場合であるが, 動歪の場合には Indicator の代りに Oscillograph を用いるとよい。

7. 結 び

以上簡単に SR-4 歪計の原理・構造・使用を述べ, 簡単な実験を紹介したのであるが, これは従来の電気式歪計の利点に加えて, 極く小さい歪計を測定物の表面に貼付けて平面・曲面を問わず任意の点の極めて小さい歪も測定できる特徴をもつている。

我々としては歪の測定と言うことは極めて大切な問題であり, かくる便利な歪計および測定装置が我国でも安価に製造され入手できる日の早いことを切望して止まない。

著者は目下島津製作所, 横河電機製作所の協力を得て歪計・測定装置の研究を進めている。なお輸入した歪計を各種鉄筋コンクリートおよび鋼構造の応力測定に応用すべく目下実施中であり, これらはいずれ第 2 報以下にて報告したい。

本研究は文部省科学研究費による“橋梁の 2 次応力の研究”の応力測定に関する部分の一部であり, こゝに附記して感謝の意を表したい。また京大工学部電気工学教室の大谷助教授, 繊維化学教室の辻助教授より多大の御教示にあずかつていることを特に附記して謝意を表する次第である。

1) 応力測定法については西田正孝“応力測定法”に詳細に述べられている。

2) 永島菊三郎, 小林清治: 炭素片歪計による疲試験片に生ずる応力測定 機械学会論文集 第 8 巻第 31 号(昭. 17. 3)

3) 最近著者の外に鈴木弘氏が交通技術 (25 年 8 月号), 森大吉郎氏が生産研究 (25 年 9 月号) に紹介している。Proc. of A.S.C.E. Journal of Applied Mechanics, Proc. of S.E.S.A 等にはこの歪計を使用した記事を屢々見受ける。

4) 我国でも上田博士の詳細な実験が東北大学理科報告 (1922) に報告せられている。ただしこの実験は直径 6mm の炭素鋼, 銅, 真鍮の丸棒について行われたものであり, 以下述べるようなフィラメントについて

ではない。

5) $R_g = 124.7\Omega = 120\Omega + 4.7\Omega$ で前者は歪計の抵抗, 後者は歪計と測定装置との間の導線の抵抗である。 R_g をこのようにわけて考えて(2)式を導くと, 分母の R_g は導線を含めた歪計の抵抗, 分子の R_g は歪計のみの抵抗となる。従つて計算式のようになるわけである。 $R_g = 120\Omega$, $R_1 = 120\Omega$, $R_2 = R_3 = 100\Omega$ ($R_3/R_2 = 1$) とするのが最も好ましいが, 導線の抵抗のために R_g が小数点以下を含むような値となつて, 止むを得ず本文に述べたようにしたのである。

6) 荷重 5 英噸までなら分流器を入れなくてもよい。しかしそれ以上になるとスケール・アウトするので最初より分流器を入れておいた。

7) a), c) の実験では当然歪計 2 個を表裏に貼付けるべきであるが, 歪計の個数の都合で片側のみとした。勿論これは正しくない。Huggenberger 歪計の歪が SR-4 歪計の約半分であるのは, 取付けの正しくないこと, 1 個しか用いなかつたためであると思われる。

8) Kurt Fink, Der Dehnungsmessstreifen-Ein neuer meszfühler für statische und dynamische

Beanspruchungen von festen Körpern, V. D. I. Bd. 92, Nr.4, 1950. 抵抗線歪計は英米特に米国で進んでおり, ドイツはそれに及ばないようである。また次の文献もある。

A. G. Keenan and R. L. McIntosh, A Strain-Sensitive Resistance Wire Manometer, Review of Scientific Instruments Vol. 19(1948), No.5 p. 336 (昭 25.11.16)

(編集部より)

電気抵抗を利用する Strain Gage に就いては滞米中の谷藤正三氏より報告がありましたが 前文と重複する処が多いので登載しません。唯参考文献だけ附記致します。

参考文献:

“Experimental Stress Analysis” 1943~1947
Dobie & Isaac: “Electric Resistances Strain Gages” English University Press 1948, C, Tinling & Co, Ltd, Liverpool & Presoct.

木コンクリート集成T桁橋に関する実験

正員 加藤 誠 平*
和 田 祐 三**

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE COMPOSITE WOOD-CONCRETE T-BEAM BRIDGE

(JSCE March 1951)

Seihei Kato, C.E. Member, Yuzo Wada,

Synopsis Some results of the experiments to examine the strength and mechanical properties of the composite wood-concrete T-beam bridges are reported in this article. It was proved by the experiments that, (1) the strength and the flexural rigidity of the composite wood-concrete T-beam bridges are considerably higher than those of the ordinary wooden beam-bridges, (2) the theoretical formulas are practically applicable for the design of the composite beams, and (3) therefore, adequately designed composite wood-concrete T-beams composed of good materials might be safely applied for minor roadbridges if they were carefully erected.

1. 緒言

木造桁橋(道路橋)の強度及び耐久力を増大する目的で「木コンクリート集成桁」¹⁾を応用した工法は高橋敏五郎氏の考案で, 同氏は 1940 年普通ポートランド・セメントとエゾマツを使用した木コンクリート集成桁に関する実験結果を報告し²⁾, 此の種の桁の使用

を推奨しているが, 事実は北海道に於て架設された同氏の設計による「木コンクリート橋」は架設後 10 年を経た今日でも強度及び耐久力の点に於て優秀な成績を示している由である。最近伊福部宗夫氏も同種の桁に

- 1) 単に「木コンクリート桁」と稱せられているが集成桁の一種と考へるべきものであるのでこの名稱を用いた
- 2) 高橋敏五郎:「木コンクリート橋」道路, 昭15.第2巻2號
- 3) 伊福部宗夫:「木コンクリート橋設計に関する考察」道路, 昭23.2號
- 4) 福田武雄:木構造學, 昭.24. pp.167~175

* 東京大学助教授, 農学部森林利用学教室

** 同大学院学生, 同上