

長期測定における無応力計の必要性

—トンネル地圧の測定に抵抗線ひずみ計を用いた場合—

資 料

高橋彦治*・飯塚全**

1. ま え が き

トンネルにおける測定は、地圧現象が長期にわたることが多いので、悪環境下における長期間測定であることが多い。被測定体、測定計器の測定機構などが、長期間、同一条件に保たれることは、まずあり得ない。従来、ワイヤストレーンゲージ型の計器は動的測定には適しているが、長期測定には適していないと考えられていた。しかし、その後、技術の進歩にもなってゲージの性能が改良され、耐久性も増してきたので、最近ではたとえば、ゲージを測定機構に内封せしめる方法を用いることによって、トンネル地圧の各種測定が可能になった。しかし、この種の電気的増幅器を有する測定計器にあっては、機構上避けられないいくつかの欠陥がある。もっとも重要なことは、測定期間中零点が移動することであり、そのチャンスは、ゲージと指示計器を含む測定機構全般にある。測定の目的は、外力によって被測定体に生ずる応力またはひずみを求めることにあるから、外力以外の要素（機構的なもの）に基づく影響を排除しなければならない。測定系全般を通して生ずる総合移動ひずみ（零点の移動）は、測定用ゲージが刻々に変化する荷重の拘束下にあるために、後日、これを分離することができない。ここに無応力計を必要とする理由がある。「無応力計」という名称は本文の趣旨を明らかにするために、仮に用いてあるに過ぎない。被測定要素との関連において考えた場合、たとえば「補償用ひずみ計」と呼んだ方が適当であるかも知れない。この種問題の議論に関して「適切な用語」が設定されることが望ましいが、これは他日、有識者の間で提案していただきたいと考えている。

われわれの手許に、測定の実績を通して得られた無応力計に関する若干の資料があるので、その大要を紹介して参考に供したい。ここでいうところのゲージには、土圧計、盤圧計、ひずみ計、応力計などが含まれる。つまり、ワイヤストレーンゲージを貼布した受感体を総称している。

2. 生の測定値に含まれる要素

構造物の応力を求めることを目的とするマイクロ級のひずみ測定にあっては、抵抗値の変化を指示計器の中で電気的に高増幅する機構のものが多く、増幅度が大きいものほど、外力によって生ずるひずみ以外の、測定器の機構上の欠陥による影響が介入しやすい。おおよそ、生の測定値にはつぎの要素が含まれている。

- (1) 外力によるひずみ
- (2) 自己成長、化学的变化などともなる被測定体の容積変化による影響
- (3) 測定用ゲージおよび指示計器の劣化による影響
- (4) 温度、湿度など測定時の環境条件の変化ともなる被測定体、測定用ゲージ、指示計器などの相互の条件変化による影響
- (5) 測定者の操作上の間違い、読みとり誤差
- (6) 測定の都度、結線を行なうものにあつては、各測定系間の接触条件の変化による影響
- (7) その他

外力によるひずみまたは応力を求めるためには、生の測定値から(2)～(7)項の要素を排除しなければならない。(2)～(7)項の要素の総和を示すものとして無応力計を用いる。

(2)項に起因する被測定体の容積変化は、主としてコンクリートを対象とした場合に適用される。これを排除するためには、外筒および内筒から成る測定用ゲージを無応力計として用いる。内筒は銅板製の容器であり、この中に被測定体と同質のコンクリートを充填し、ゲージを埋設しておく。外筒内筒間には空間を残しておく。この二重管を被測定体のマスコンクリートに埋込む。したがって、ゲージは外力から隔離された状態に置かれ、温度や湿度はマスコンクリートと同一条件を示すことができる。すなわち、外力以外のコンクリートの容積変化による影響はすべてこの無応力計に現われる。

(3)項に対しては、指示計器にチェック装置を備えているものもあるが、定量的変化は表現されない。

(4)項の温度および湿度の変化はいかんともしがたい。

*正会員 理博 国鉄鉄道技術研究所 地質研究室
** 国鉄鉄道技術研究所 同

(5) 項以下は、主として測定者の技術に依存するが、測定条件を一定にすることは困難である。

5. 無応力計の意味

外力以外の要素に基づくものを集約的に抽出する手段として、無応力計の使用が提案される。ここでいう無応力計とは、同じ時期に製作されたゲージを、測定用ゲージと同じ環境条件下に無応力状態で置かれたものを総称する。測定に際しては、その都度、まず無応力計の読み(以下 S_0 と呼ぶ)を指示計によって測定する。ここで注意しなければならないことは、測定中は指示計のいかなる調整箇所にも手を触れないことである。つぎに、測定用ゲージを順次測定する。測定地点が分散している場合は、1ブロックごとに同様の方法で測定を行なう。測定周期の短い場合は S_0 の値は大きく変動しないのが普通であるから、前回の S_0 の値を参考にして、指示計器を調整し、また測定時における異状の有無を点検することができる。無応力計と測定用ゲージとが、コードの接続、結線などを含めて全面的に同一条件下に置かれた場合、どの測定値にも S_0 に相当する零点偏倚が同時に含まれていると考えることによって、生の測定値における零点の移動量と実用精度とを把握することができる。実用精度とはつぎのようなものである。実際の S_0 の経時変化はスムーズな曲線というよりは、ばらつきのある曲線を示すのが普通である。毎日の S_0 点をスムーズな平均的曲線で結んだとき、この曲線からはずれた S_0 のばらつきの度合をもって、ゲージの実用精度と考える必要がある。

4. 実例の紹介

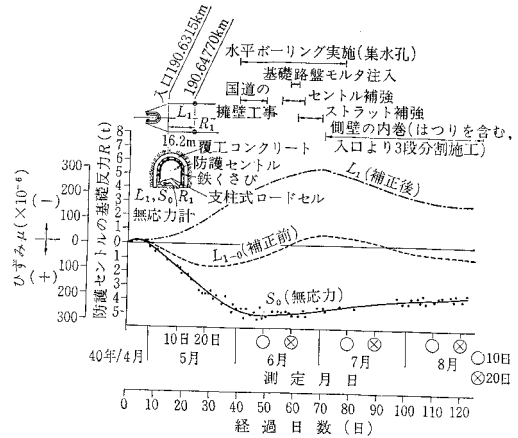
つぎにわれわれがトンネル支保工の基礎反力および、トンネル覆工応力の測定に際して用いた無応力計の実測例を図-1~3によって見ることにしよう。図-1~3において、 S_0 の記号を付してある曲線が無応力計の経日曲線であり、他は測定用ゲージの経日曲線を示す。応力またはひずみの経日曲線は、生の値(補正前)と零点の移動量(S_0)を差引いたもの(補正後)を同時に現わしている。

(1) S_0 曲線の変動が大きい場合

図-1は奥羽本線岩崖トンネル(延長 103.6 m)における防護セントルの基礎反力の測定例である¹⁾。測定位置はトンネル坑口より 45 m の地点である。

S_0 曲線は、最初の 42 日間は原点に対して約 7 μ /日(300 μ /42 日)の勾配で(+)側(伸び)に移行し、42

図-1 S_0 曲線の変動の大きい場合の実測例
(岩崖トンネル防護セントル基礎反力)



《測定諸元》

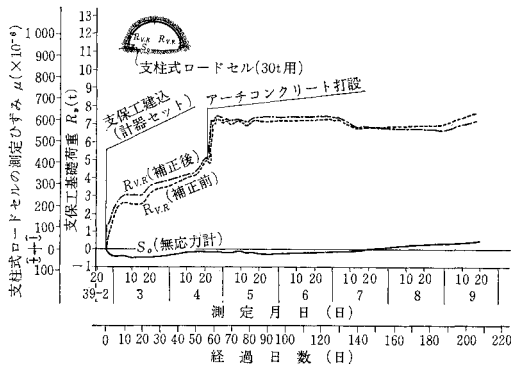
測定場所：奥羽本線岩崖トンネル
測定位置：入口より 16.2 m (貫通)
ゲージ：支柱式ロードセル
指示計：(1) ME-22 B
測定法：指示計は測定の都度搬入，端子は防湿保護のうえ測定の都度結線，コード延長 5 m
気温範囲：5°~20°

日を変曲点として 1 μ /日 (70 μ /70 日)の勾配で(-)側に転移している。これに対して測定用ゲージの生の測定値を用いた荷重曲線は L_{1-0} (補正前)で示される。 L_{1-0} からそれぞれ S_0 の値を差引いた点を結んで得られる L_1 曲線は真の荷重曲線である。 S_0 はひずみにして $\pm 25 \mu$ (測定用ゲージでは約 $\pm 0.4 t$ の荷重に相当する)の範囲のばらつきを示している。この場合における実用精度は $\pm 25 \mu$ となる。補正前の L_{1-0} 曲線では(-)荷重が現われているが、実際面ではこのような現象は考えられないことである。これに対して S_0 の補正を行なった L_1 曲線ではこのような矛盾がない。

(2) S_0 曲線の変動が小さい場合

図-2は北陸本線親不知トンネルにおける上部半断面の鋼アーチ支保工の基礎反力の測定例である²⁾。測定は貫通前、市振方坑口の 2030 m の地点で行なわれた。 S_0 曲線は測定期間(約 200 日間)において、原点に対するひずみの最大移動量は +40 μ /13 日、測定値のばらつきは $\pm 10 \mu$ 以下となっている。測定用ゲージの経日-荷重曲線は補正前は R_0 、補正後は R で示されている。ここでは S_0 曲線の移動量が少ないので、荷重曲線に与える影響はあまり大きくない。しかし R 曲線の勾配変更点、たとえば 57 日で荷重の急増が見られ、これに対する信頼性は S_0 曲線によってはじめて裏付けられる。この例では実用精度は $\pm 10 \mu$ 、荷重にして約 $\pm 0.1 t$ の程度である。

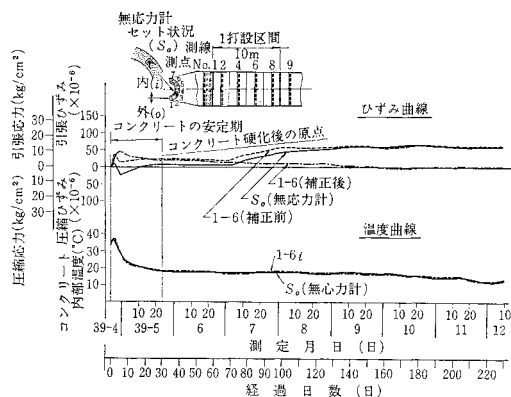
図-2 S_0 曲線の変動の小さい場合の実測例
(親不知トンネル本坑支保工基礎反力)



《測定諸元》

測定場所：北陸本線親不知トンネル本坑
測定位置：延長 4 536 m のち、市振方坑口より 2 030 m (未貫通)
ゲージ：支柱式ロードセル
指示計：(3) SM 60 AT
測定法：コード 15 m, 指示計は測定の都度撤入, 測定ごとに端子接続替え
気温範囲：14°~17°

図-3 コンクリートの S_0 曲線の実測例
(親不知トンネル本坑覆コンクリート応力)



《測定諸元》

測定場所：北陸本線親不知トンネル本坑
測定位置：延長 4 536 m のうち市振方坑口より 2 030 m (貫通前)
ゲージ：L-10 B
指示計：(4) M-4 S
測定法：恒温装置付切換ボックス使用, 指示計は測定の都度撤入, コード延長 20 m
気温範囲：12°~18°

(3) コンクリートの S_0 曲線

図-3 は北陸本線親不知トンネルのアーチコンクリート応力の実測値の一例である²⁾。貫通前の市振方坑口 2 040 m 付近において測定されたものである。図-3 では無応力計 (S_0) および測定用ゲージの経日一ひずみ曲線とともに経日一温度曲線が示されている。 S_0 の温度曲線についてみると、硬化温度はコンクリート打設後

37°C (最高温度) を示し、後次第に減衰し、約 30 日において 19°C に安定している。これよりコンクリートの安定期を 30 日と定めることができる。測定用ゲージの温度曲線は、 S_0 のそれと終始ほとんど一致している。すなわち無応力計と測定用ゲージとの環境条件は等しい判断することができる。ひずみ曲線についてみると、実線で示した S_0 の経日曲線は、コンクリート硬化後の 30 日に原点をとった場合、原点ひずみが +5 μ を示し、その後水平に延びている。ついで 65 日に変曲点を有し、140 日まで [+65 μ - (+5 μ)] / (140 日 - 65 日) = +60 μ / 75 日 = +0.8 μ / 日 の勾配で (+) 側に移行している。その後は 220 日までほぼ水平に延びている。この間の S_0 曲線の最大移動量は、コンクリート打設時を原点にとった場合 +65 μ , 硬化後に原点をとった場合 +60 μ である。

これに対して測定用ゲージの補正前の値は、硬化後の 30 日に原点をとった場合、原点ひずみが +40 μ を示したが、その後 100 日目までは S_0 曲線とほぼ並行に延び、140 日頃ほぼ S_0 曲線に一致し、220 日頃まで続いている。この測定値から S_0 を差引く補正を行なった経日曲線は、鎖線で示される。補正前と補正後の曲線を硬化後に原点をとって比較すると、前者には引張りひずみ、後者には圧縮ひずみが現われて、全く相反する傾向を示している。温度曲線が類似することをあわせて考えると、 S_0 曲線によって補正された経日一ひずみ曲線は、外力によるひずみを忠実に示しているものと理解される。この種の機構のものでは、温度補償は計算によって求めることができるので、計算上は外力によるひずみが分離されることになるが、この操作はコンクリートおよびゲージ本体の線膨張係数を仮定した上で成立つものである。しかし、実際には特にコンクリートの線膨張係数は実体不明な要素であるから、真実とは大分違った結果を導びく可能性がある。温度補償についてだけ考えても、無応力計を用いて S_0 曲線による補正を行なう必要がある。 S_0 にはこの種の要素による影響がすべて含まれているからである。

測定用ゲージは絶えず荷重の拘束下にあるのに対して、無応力計は非拘束下にあるので、コンクリートの外力によるクリープひずみは S_0 によっても除かれぬ。

5. 環境条件と無応力計

(1) 環境条件としての要素の分類

つぎに、環境条件が無応力計に与える影響を考えてみよう。支柱式ロードセルの測定機構は、クロスゲージを四片組み合わせることによりブリッジ回路を構成したも

の(4ゲージ法)である(図-4)。ブリッジ回路の各辺は、対向するゲージを直列に結線している。これを4ゲージ法によって測定する場合には、(1)偏心偏圧に対し

図-4 支柱式ロードセル

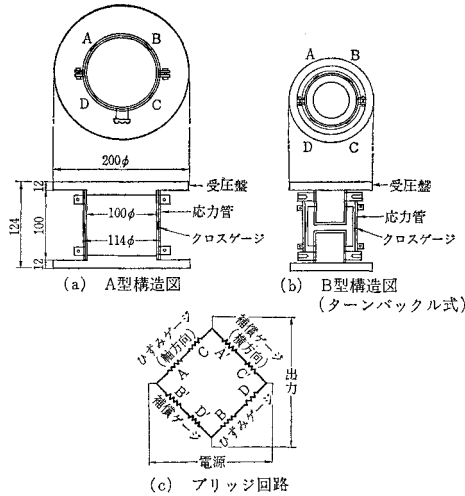
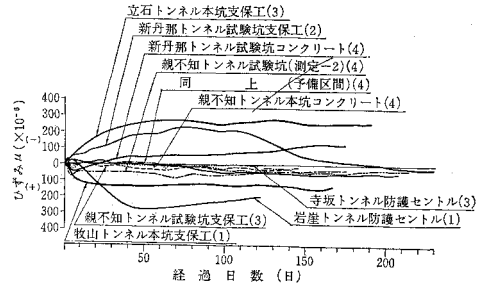


図-5 S_0 曲線の実測値



注：コンクリートのひずみはコンクリートの応力によるひずみを支保工のひずみは測定用ゲージのひずみを示した。() 内数値は、機種を示す。

ても平均化された測定軸方向の成分が測定される。(2) 温度変化による影響は、隣接辺が相互にひずみゲージと補正ゲージの機能を果たし、自動的に補償される。このように、理論的には無荷重状態では一定であるべき零の値が、実際にはおのおの異なる経過を示して共通点を見出したい(図-5、表-1)。その理由としてつぎの事項が考えられる。

表-1 S_0 曲線の比較一覧

測定場所名	機種		比較要素					S_0 曲線の経過		測定項目	測定期間	測定条件 (m)	備考
	指示計	ゲージ	断面積 (m ²)	坑口よりの距離 (m)	貫通	気温	湿度	温度範囲	S_0 曲線からのばらつき範囲 (μ/日)				
新丹那トンネル試験坑	(2)	(1)	1.5 × 2.0	2700	前	13° ~ 16°	—	±25	-210/70, -210/110, -30/150	支保工基礎反力	37.4~37.9 (150日)	コード3, A, B, D	建設トンネル
同上 (測定-3)	(4)	(3)	1.5 × 2.0	2700	前	13° ~ 16°	—	±20	+50/5, -50/40, -80/130, -120/160	覆工コンクリート応力	37.12~38.6 (180日)	コード3, A, B, F	建設トンネル
親不知トンネル試験坑 (予備区間)	(4)	(3)	2.0 × 2.5	470	前	13° ~ 17°	—	±10	-20/5, ±0/15, +50/150	同上	38.4~39.9 (500日)	コード5, A, B, F	建設トンネル
同上 (測定-2)	(4)	(3)	2.0 × 2.5	470	前	13° ~ 17°	—	±15	+80/5, +50/10, +85/68, +25/200	同上	38.10~39.8 (300日)	コード5, A, B, F	建設トンネル
同上 (測定-2)	(3)	(1)	2.0 × 2.5	470	前	13° ~ 17°	—	±10	+40/60, +20/110, +45/130	支保工基礎反力	38.8~38.12 (140日)	コード5, A, B, D	建設トンネル
親不知トンネル本坑	(3)	(2)	複線	935	前	8° ~ 19°	—	±10	±10	胸付支保工基礎反力	38.10~39.5 (210日)	コード3, A, B, D	建設トンネル
同上	(3)	(1)	同上	2030	前	12° ~ 18°	—	±10	+30/3, +40/13, +15/50, +25/90, -25/200	上半, 支保工基礎反力	39.2~39.9 (210日)	コード20, C, D	建設トンネル
同上	(4)	(3)	同上	2030	前	12° ~ 18°	—	±10	-25/8, ±0/15, ±0/70, +65/120, +60/270	上半, アーチコンクリート応力	39.4~40.1 (270日)	同上	建設トンネル
牧山トンネル	(1)	(1)	複線	500	前	12° ~ 18°	—	±25	+110/7, +150/150	上半, 支保工基礎反力	39.6~39.12 (170日)	コード20, A, B, D	建設トンネル
宇津トンネル	(3)	(1)	単線	882	後	3° ~ 20°	—	±10	-10/30, ±0/130, +20/270	防護センター基礎反力	39.6~40.12 (530日継続測定中)	コード15, C, D	変状トンネル
立石トンネル (斜坑)	(3)	(1)	複線	130	前	16° ~ 23°	大	±25	-200/20, 270/50, 290/180	上半支保工基礎反力	40.2~40.12	コード15, A, B, D	建設トンネル
同上	(3)	(1)	同上	200	前	16° ~ 23°	大	±20	-100/31, -110/110	同上	40.4~40.12	同上	建設トンネル
同上	(4)	(3)	同上	130	前	16° ~ 23°	大	±10	-40/20, -45/40, -20/180	上半アーチコンクリート応力	40.2~40.12	コード15, A, B, E	建設トンネル
寺坂トンネル	(3)	(1)	単線	17	後	3° ~ 17°	—	±10	-10	防護センター基礎反力	39.12~40.4	コード15, A, B, D	変状トンネル
岩崖トンネル	(1)	(1)	単線	16	後	8° ~ 20°	—	±25	+300/42, +220/95, +210/40	同上	40.4~40.8	同上	建設トンネル

注) 指示計器：(1)=S社 ME-22B, (2)=Si社 PL-7L, (3)=K社 SM社 60AT, (4)=D社 M=4S
ゲージ：(1)=支柱式ロードセル, (2) 支保工貼付 (室内), (3)=D社 L10B

—: S_{0max}

測定条件：A: 端子保護 D: 無応力計は坑内に放置
B: 測定の都度結線 E: 無応力計は被測定体内に封
C: 恒温装置付, 切替ボックス使用 F: 無応力計は被測定体付近に放置

(1) 測定位置の環境条件

坑道の断面積、坑口からの距離、貫通の有無、気温および温度の範囲、空気の汚染など

(2) 測定用ゲージの特性

ゲージの種類、製作年月、防湿処理、コードの特性など

(3) 指示計器の特性

内臓部品、たとえばトランジスター、ダイオード、コンデンサー、抵抗などのいっさいの特性と絶縁処理法の差による計器の絶縁度。製作番号、製作年月によってもこれらの特性が異なる

(4) コード処理法、指示計器の置場所の相違

コード端子の保護、測定時の拭きとり、指示計器の置き場所など

(5) 計測者の習癖、習熟、注意の度合

(6) その他

このように実際面では計算にのらない多くの要素があり、それが影響して、種々の S_0 曲線の異なった傾向が現われるものと考えられる。 S_0 曲線の変動は、経験によれば測定用ゲージと指示計器、およびその間のすべての増幅機構の系の間で生ずる。

(2) 実例の紹介

a) 岩崖トンネル¹⁾と寺坂トンネル²⁾とでは、トンネルの長さ、測定位置などの条件が類似している。それにもかかわらず S_0 曲線間には指示計器による差が単的に現われている。寺坂トンネルの A 点または B 点における異常は、測定者の差による変動である。

b) 寺坂トンネル(貫通状態)と立石トンネル⁴⁾(建設中)との比較では、同じ製作所の指示計器が用いてあるので、環境の影響が異なって現われたことを示す。

c) コンクリートの場合、温度の範囲が極端に異なる場合を除けば、環境条件の差は主としてコンクリート

の質(セメント、水量、配合、打込方法、厚さなど)に依存して現われるようである。新丹那トンネル試験坑⁵⁾の親不知トンネルの試験坑⁶⁾および本坑²⁾の測定例がこれを示している。親不知トンネルの同じ試験坑の S_0 曲線が、その傾向を異にするのは環境の相違によるものとは考えられない。一方、親不知トンネルの本坑における S_0 曲線と試験坑の予備区間における S_0 曲線との間では、その傾向が類似している。

d) 点のばらつきの大きいものほど S_0 曲線の零点の移動量が大きい。

6. あとがき

無応力計に現われる総合移動ひずみ(零点の移動)は、種々雑多な要因によって異なった傾向を示し、同じ機種、同じ環境という条件下でも必ずしも一律でない(図-5、表-1)。

コンタクトゲージまたは直視ひずみ計のような機械的なものについても、全く同様に無応力計の必要性があると考えている。

参考文献

- 1) 高橋・飯塚他:奥羽本線岩崖トンネルの変状と荷重, 鉄研報告, No. 501, 1965-10
- 2) 高橋他:未発表(親不知トンネル)
- 3) 高橋・飯塚他:新潟地震防災総合研究における橋梁およびずい道に関する調査研究(ずい道編), 鉄道技術, 1965-3
- 4) 高橋他:未発表(立石トンネル)
- 5) 高橋・飯塚他:新丹那トンネルにおける温泉余土との膨張と岩石荷重, 鉄研報告, No. 371, 1963-10
- 6) 高橋・飯塚・高木:親不知トンネル市振に 414 m 付近の試験坑における地圧測定, 鉄研報告, No. 475, 1965-5
(1966.1.10・受付)

建設/創造/技術(写真集) 彰国社発行

定価: 3 800 円(〒 200 円)

内 容: 最近 10 年間の土木技術の進展はめざましいものがある。戦後、土木工事の機械化にともない工事の進捗は早く、ここ数年の間に黒四ダム、若戸橋、東海道新幹線などの大工事が相ついで完成した。これらの工事の全ぼうを写真および解説でとらえ、立体的にとりまとめたのが本書であり、従来の写真集のイメージを打破した内容は高く評価されている。

論 文: 日本における建設の問題点/高橋 裕・開発と新しい生活の創造/川喜田二郎・土木技術昨日と今日/久野悟郎

写 真: ダム/発電施設/土地造成・団地/農業/災害/河川・海岸/砂防/都市計画・オリンピック施設/上下水道/国鉄・鉄道橋・トンネル/私鉄/地下鉄/特殊鉄道/道路・道路橋/港湾/空港/研究・試験・実験/基礎工・土工・建設機械/材料/測量・その他

展 望: 産業基盤のため建設■災害に対応する建設/高橋 裕・国造りにおける産業偏重より生活創造への移行・わが国における交通関係施設の現況および課題/鈴木忠義・最近 10 年間の主要工事リスト

体 裁: A 4 判 233 ページ 箱入上製デラックス造本