

原位置岩盤の長期クリープ試験に影響を及ぼす諸要因に関する検討

船戸明雄¹・工藤里絵²・田中莊一¹

¹深田地質研究所

²応用地質株式会社

Precise Measurement of Creep Deformation of Rock Mass - Experimental Study on In-situ Long-term Creep Test -

FUNATO Akio¹, KUDO Rie² and TANAKA Soichi¹

¹Fukada Geological Institute

²OYO Corporation

要旨：構造物基礎となる岩盤の長期安定性評価のために実施する原位置岩盤の長期クリープ試験について、筆者らの30年来にわたる検討結果を基に、高精度で信頼性の高い計測結果を得るための留意事項を取りまとめた。試行錯誤の結果、載荷板の微小変位を長期間安定して計測するためには、基準梁の不動性、計測システムの長期安定性、持続荷重の安定性、試験装置の長期安定性を確保する必要がある。特に、室内と原位置において行った数か月にわたる事前検討からは、基準梁上下の温度差が変化すると梁が上下にたわみ変位計測に影響すること、試験坑内の高い湿度によりひずみゲージ式変位計とロガーを結ぶスイッチボックスの絶縁抵抗が低下し見かけの変位が生じることなどが判明した。また、フェーシング材の安定性や定荷重の保持方法等についても新たな知見を得た。これらの検討結果を踏まえて実施した試験においては、定荷重の保持や微小変位の長期計測などの課題は解決できたと考える。したがって、本稿は今後実施する機会が減少するであろう原位置岩盤の長期クリープ試験の技術伝承に資するものである。

キーワード：長期クリープ試験，基準梁の不動性，微小変位の計測，一定荷重の保持

Abstract: Some key considerations have been compiled that enables highly accurate and reliable measurement in the in-situ creep test using rigid plate loading method, based on the results of the authors' research over the past 30 years. In order to stably measure minute creep displacement, it must be necessary to secure immobility of the reference beam, stability of sustained load, and long-term stability of the measurement system and test equipment. In particular, as a result of our prior studies, both in the laboratory and in-situ, the measurement of creep displacement had been found out to be affected by such factors as reference beam's arc-shaped curving that would be caused by the temperature variation between top and bottom of the beam, degradation of insulation resistance in the switch box that connects strain gauge type displacement transducer and data logger caused by high humidity in the adit. Some new knowledge had been also obtained about the stability of the bearing pads in the environments and the technique to maintain a constant pressure. Taking these experimental studies into account, the in-situ creep test had been accomplished finally with reliable results. This paper contributes to inherit the in-situ creep test techniques in future.

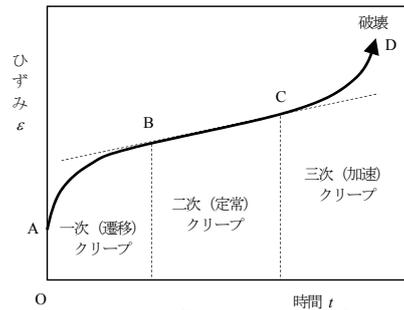
Keywords: in-situ creep test, immobility of reference beam, minute displacement measurement, constant pressure

1. はじめに

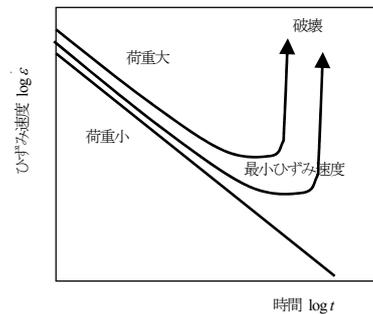
岩盤が完全な弾性体ではなく粘弾性（レオロジー）的な挙動をすることは古くから知られていた。特に我が国に広く分布する軟岩は硬岩に比べて非弾性的挙動が著しく、軟岩を基礎とする長大橋やダム、原子力発電所などの大型重要構造物の建設にあたっては、基礎岩盤のレオロジー特性の評価が重要な課題となっている。軟岩のレオロジー特性にはクリープ変形やクリープ破壊、応力緩和、応力～ひずみ関係の非線形性やヒステリシスなどがあり、近年、それらの特性を考慮した設計、解析のための調査、試験が行われることが多くなっている。

そのうちのクリープ挙動については、岩石の時間依存性を解明するために古くから様々な研究がなされてきた。図1は一定荷重下における岩石のクリープ挙動を示した概念図である。同図(a)のように荷重を加えると弾性ひずみ(OA)が生じ、ひずみ速度が時間とともに減少する一次(遷移)クリープが発生する。これに続いて一定のひずみ速度を示す二次(定常)クリープに移行し、さらにひずみが急速に増加する三次(加速)クリープを経て破壊に至る。クリープ挙動に関する研究の多くは、このようなクリープ破壊を対象としている(例えば、西, 1997; 足立ほか, 1998)。同図(b)はひずみ速度と時間の関係を両対数で表したもので、荷重レベルが低い場合には二次クリープに移行しない、或いは移行するまでに非常に長い時間がかかることを示している。

一方、原位置岩盤のクリープ挙動に関するアプローチは、岩石に比べて非常にわずかである。これは、大型構造物の基礎岩盤は、設計荷重に対して十分な支持力を有することが第一条件として求められるため、事前の調査や試験によって健全な



(a) ひずみ-時間の関係



(b) ひずみ速度-時間の関係

図1 岩石のクリープ挙動の概念図

岩盤が選定されることから、設計荷重は岩盤の支持力に比べてかなり小さくなり、弾性問題として扱われてきたことによると考えられる。しかし、石油備蓄タンクや原子力発電所など不同沈下を最小限にしたい配管系を有する重要構造物では、建設後の長期間にわたるクリープ変位の予測が重要となる。この場合は設計荷重が小さいため、図1に示した一次クリープが評価の対象となる。このような観点からの原位置岩盤のクリープ変形を評価の対象とした本格的なアプローチは本四架橋プロジェクトから始まった。本四連絡橋の基礎岩盤は、更新世の明石層や中新世の神戸層、風化花崗岩などの軟岩が主体となるため、長期にわたるクリープ挙動や地震時の挙動などに対する新たな原位置岩盤試験が実施された(本州四国連絡橋公団, 1993)。その後、原位置岩盤の長期クリープ試験(以下、長期クリープ試験と略す)は原子力発電所などにも適用されるようになっていった。

表1 原位置岩盤の長期クリープ試験の実績

地点	地質	载荷月数	実施年
A	風化花崗岩	5	1975
B	泥岩	4~12	1979
C	軽石凝灰岩	4	1983
D	火山砕屑岩	4	1987
E	火山砕屑岩	7	1995
F	片麻岩	3	2009

筆者らは、1970年代前半から長期クリープ試験に係る中で様々な試行錯誤を行いながら試験、計測方法の改良に取り組んできた(表1)。しかし、近年の岩盤プロジェクトの減少に加え、調査・設計における合理化の観点から、多大な経費と労力と時間を要する本試験が実施される機会は今後多くはないことが予想される。したがって、これまで筆者らが行ってきた試行錯誤から得られた知見を貴重な財産と考え、後世へ資するためにこれらの経緯を含めて総括的に報告する。

2. 長期クリープ試験に影響を及ぼす諸要因

長期クリープ試験に影響を及ぼす要因としては、周期的に変化する温度、湿度、大気圧、地下水位、重力、潮汐などの自然環境要因、突発的な地震、落雷などの自然現象、人工的な振動、停電、温度・湿度の変化、さらには時間経過による試験装置の劣化・変質など様々なものが挙げられる。これらの要因が単独で或いは複合的に作用して、試験装置の変形や計測器の不安定化などの影響をもたらすことになる。

図2はそれらの要因がもたらす主な課題を概念的に示したものである。これらの課題の中で、温度の変化により基準梁が伸び縮みして見かけの変位が生じる現象は直感的に理解しやすく、クリープ試験における主要課題として精力的に検討が重ねられてきた。しかし、载荷板のフェーシング材や基準梁支持台を固定するモルタルの長期安定性

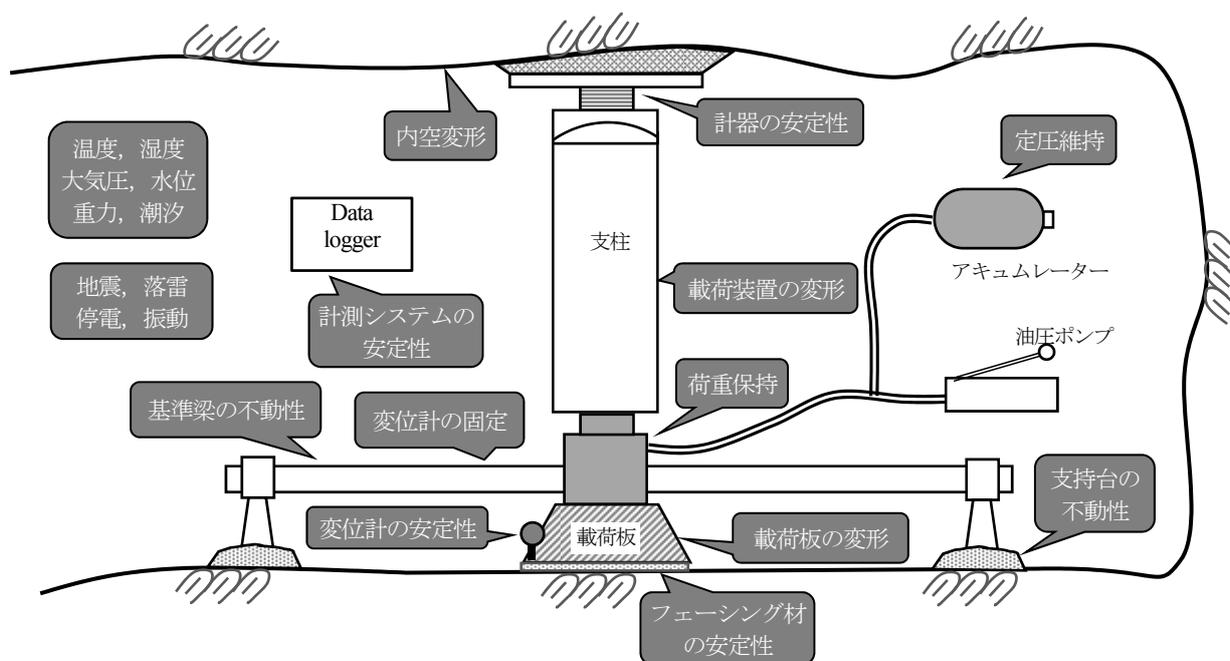


図2 原位置岩盤の長期クリープ試験における諸課題

などの課題は、これまでほとんど着目されてこなかった。また、大気圧や重力、潮汐変化の影響については、可能性としては挙げられるもののクリープ試験に及ぼす影響はあったとしても非常にわずかであろうとの判断から、検討対象として取り上げられることはなかった。

田中 (2014) は、各地の原位置クリープ試験に係った経験を踏まえ、試験に求められる要件として、試験装置の高剛性化、不動基準梁・基準点の確保、持続荷重の安定的保持、微小変位の確実な計測、定温度・高湿度環境、振動・発熱体の遮断という6つの項目を挙げている。

原位置における長期クリープ試験の課題は地盤工学会の基準である JGS 1521-2012 地盤の平板載荷試験方法でも触れられており、長期間にわたる一定荷重の保持と安定した変位計測システム、一定した試験環境 (温度, 湿度) など田中同様の項目が挙げられている (地盤工学会 (2013))。

重要構造物の基礎となる岩盤は一般に堅硬で変形量が小さいため、長期にわたって微細な変形を計測することは容易ではない。それらの影響を排除するため、長期クリープ試験においては並々でない工夫や対策が講じられている。

筆者らが最初に取り組んだ原位置岩盤の長期クリープ試験は、長大橋の基礎となる風化花崗岩を対象として行われた (大塚ほか, 1975)。試験横坑内で直径 1m の剛体載荷板を用い、定荷重保持のためにアキュムレータを、載荷板変位の計測にはダイヤルゲージと作動トランス型変位計を配し、1.4, 2.1, 2.7MPa の載荷応力でそれぞれ 58, 40, 30 日間のクリープ試験が実施された。その結果をもとにした粘弾性 FEM 解析により、橋梁アンカレッジの長期変形挙動が予測された。

熊谷ほか (1986) は 1957 年に開始した 27 年間の花崗岩の室内クリープ実験を報告している。大

学の地下実験室に長さ 215×12.3×6.8cm の花崗岩ビームを置き、鋼の直梁に取り付けたダイヤルゲージで岩石ビームの相対的なたわみを測定し、花崗岩の粘性係数を評価している。また、彼らは、地下発電所の横坑内に長さ 21cm と 16cm の小岩石試験片を置き、オプティカルフラットによる干渉縞から微小なたわみを検出する方法で、1974 年から曲げクリープ実験を開始している。干渉縞の読み取りによる変位の誤差は 0.1λ ($\lambda=0.5893\mu\text{m}$; 用いた Na-D 光の波長) 程度としている。

羽柴ほか (2008) は、飽和水浸状態の $\phi 25 \times h50\text{mm}$ 田下凝灰岩に空圧シリンダで一軸荷重を加え、ひずみゲージ式変位計を用いた室内のクリープ試験結果を報告している。空調で室温を $22 \pm 2^\circ\text{C}$ に制御し、pH 調整したイオン交換水を補充し、計測器の交換やキャリブレーションにも配慮して 10 年に及ぶクリープ試験を継続している。

原位置岩盤の長期クリープ試験が平板載荷試験として行われることを前提とすると、試験の最重要課題は載荷板の微小変位を長期間安定して計測することである。そのためには、基準梁の不動性、計測システムの長期安定性、持続荷重の安定的保持、さらには試験装置の長期安定性が保証されなければならない。

以下、これらの項目を主体としてこれまでの検討の経緯と結果を述べる。

3. 基準梁の不動性

3.1 初期の基準梁の構造

基準梁は載荷板の両側に荷重の影響のない離れた箇所不動点を設けてそれに固定される。通常長さ 4m の鋼製パイプが用いられるが、温度が変化すると両側を固定された基準梁は伸縮し上下にたわむことが予想される。これを防ぐため、B

地点では基準梁の伸縮を許して固定するスライド装置を考案した(図3)。この装置を片端に取り付けた基準梁と両端固定の基準梁の温度実験の例(C地点)を図4に示す。

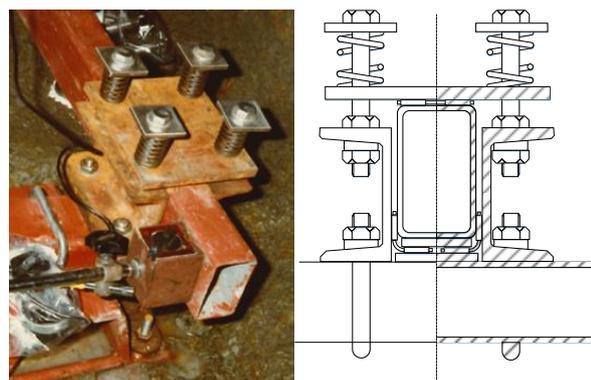


図3 基準梁スライド装置

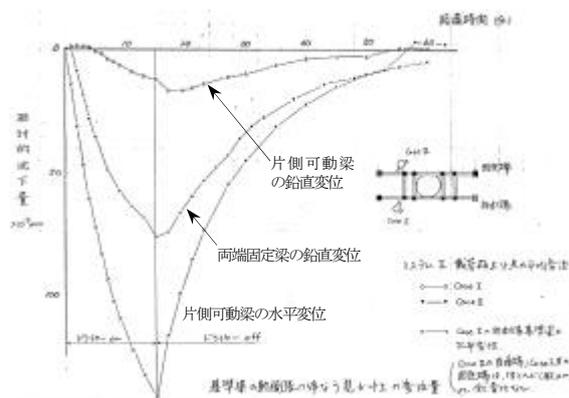


図4 基準梁の温度実験

この例では、両端固定と片側可動端の基準梁をドライヤーで加熱し、ほぼ中央に固定したマグネットベースに変位計を取り付けて載荷板の変位を計測している。両端固定の場合に比べて片側可動端の場合には載荷板の見かけ変位は1/5以下に減少している。また、変位のセンスから、基準梁が伸びると上方にたわむことが明らかになった。次いで両方の基準梁を片側可動端にして組み立て、部屋全体を投光器で0.8℃升温させたときの載荷板の見かけの変位は8.5μmとなった。これらの検

討結果を踏まえて、長期クリープ試験においては試験装置のある横坑を遮蔽して空気の出入りをなくし、白熱電灯や電気器具などの発熱体を除去するなどの温度対策を施した。その結果、試験期間中の温度変化は概ね1℃以内に抑えることができ、スライド装置の効果を考慮すれば基準梁の不動性はほぼ確保できたものと判断した。

3.2 E地点における事前検討

E地点の長期クリープ試験の計画段階では、究極の試験を目指して試験方法から試験装置に至るまで考えられる全ての懸案事項を洗い出し、入念な検討を行った。とりわけ基準梁の構造については事前の予備検討を踏まえて図5のような構造を考案した。ポイントは以下の点である。

- ・基準梁を支持する不動点を、載荷の影響のより少ない深さ1mの岩盤中に設けた。
- ・不動点と基準梁の間に熱膨張率がゼロの炭素繊維強化プラスチック(CFRP)パイプを用いた。
- ・基準梁には剛性が大きく錆びないステンレス(SUS304)製H鋼(125H)を用いた。

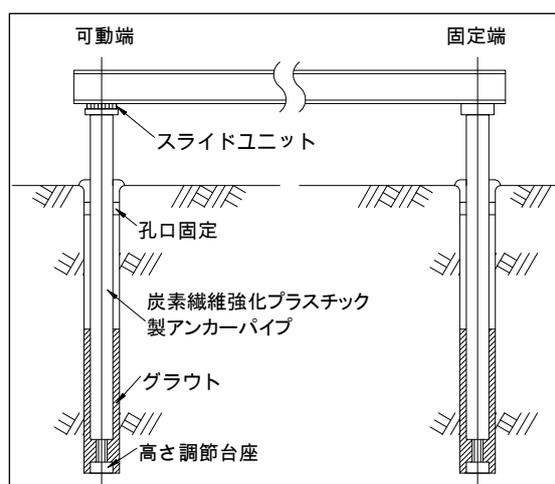


図5 基準梁の模式図

CFRPパイプは深さ1mのボーリング孔に立て込み下部50cmまでと口元をグラウトし、その上

部に SUS304 製の基準梁受け台を差し込み固定した。梁受け台に載せた H 鋼の片端は受け台にボルトナットで固定し (固定端), もう片端はボールの転がり運動を利用した直線運動機構であるスライドユニット (日本ベアリング社製) を挿入した (可動端)。検証実験の結果, 基準梁は摩擦なく伸縮しているにもかかわらず, わずかに梁がたわむような鉛直方向の変位も生じていることが明らかになった。この鉛直方向の変位の発生メカニズムの解明と対策の検討を目的として室内と現地にて検証実験を繰り返し行った。

実験に用いた計測機器類を表 2 に, 計器配置模式図を図 6 に示す。熱源としてドライヤー 2 台を用い, 基準梁や計器類に直接風が当たらないよう留意しながら 5 時間かけて坑内温度を約 1°C 上昇させ, その後自然降温させた。

度変化に対して数 10 分の遅れを持って現れている。別途, 地盤アンカーに固定した変位計による載荷板変位は発生していないため, 図にみられる沈下方向の載荷板変位は, 基準梁の鉛直変位に伴う見かけ上の変位と考えられる。

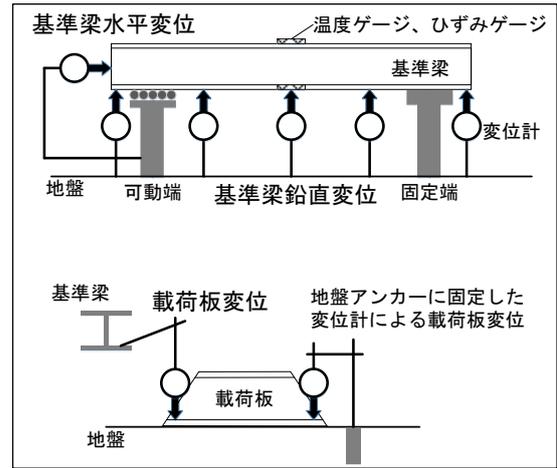


図 6 計器配置模式図

表 2 実験に用いた計測機器類

計測項目	計測機器	仕様
変位	ひずみゲージ	10mm ストローク, 1/1000mm 表示
	式変位計 リニアゲージ	10mm ストローク, 1/1000mm 表示
気温	湿度温度変換器	温度 -20 ~ 80°C, 感度約 140μs/°C
	熱電対	銅-コンスタンタン, 0.1°C 表示
温度	温度ゲージ	-20 ~ +200°C, 感度 100μs/°C
ひずみ	ひずみゲージ	単軸型, ゲージ長 10mm

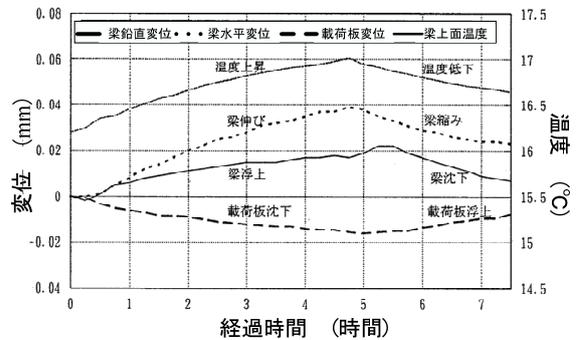


図 7 基準梁温度ならびに変位の経時変化

基準梁温度ならびに変位の経時変化を図 7 に示す。温度上昇とともに梁は伸び, 温度低下とともに梁は縮んでいる。両者の変化に時間差は認められない。両者の関係から計算した熱膨張係数は $14.3 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ となり, ステンレスの熱膨張係数 ($17.3 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) と調和的である。一方, 温度上昇に伴い上にたわむ方向の基準梁鉛直変位と沈下方向の載荷板変位も生じており, そのピークは温

梁の伸びから考えると基準梁の鉛直変位を可動端の摩擦によるたわみと解釈するのは困難である。そこで基準梁上下の温度差に着目し, 鉛直変位をプロットすると図 8 のようになった。気温が上昇し梁上下の温度差 (上 > 下) が大きくなるにつれて梁は相対的に上にたわむ方向の変位を示し, 0.06°C から 0.13°C の温度差変化に対応する梁中央部の最大変位量は $17\mu\text{m}$ であった。

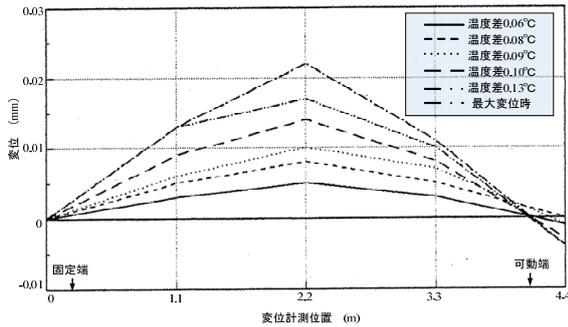


図8 基準梁上下の温度差の変化と鉛直変位

基準梁の上下面の温度差により生じるたわみ量を幾何学的に求めると次のようになる。

$$\frac{dx}{r} = \frac{t_1 \alpha dx - t_2 \alpha dx}{h}$$

(t_1 ; 上面温度, t_2 ; 下面温度, α ; 線膨張係数)

$$\frac{1}{r} = \frac{(t_1 - t_2)\alpha}{h}$$

一般に $\frac{1}{r} = \frac{d^2 y}{dx^2}$

とおける。

$$\therefore \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{(t_1 - t_2)\alpha}{h}$$

$$y = \frac{(t_1 - t_2)\alpha}{h} \cdot \frac{x^2}{2} + C_1 x + C_2$$

境界条件 $x=0, x=l$ のとき $y=0$

$$\therefore C_2 = 0, C_1 = -\frac{(t_1 - t_2)\alpha}{2h} l$$

$$y = \frac{(t_1 - t_2)\alpha x}{2h} (x - l)$$

$x=l/2$ のとき y は最大値を示す。

$$\therefore y = -\frac{(t_1 - t_2)\alpha l^2}{8h} \quad (1)$$

ここで, $t_1 - t_2 = 0.07^\circ\text{C}$, $l = 4000\text{mm}$, $h = 125\text{mm}$, $\alpha = 17.3 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ とすると $y = -0.019\text{mm}$, 即ち, 梁の上下面に 0.07°C の温度差が生じると, 梁は $19\mu\text{m}$

程上にたわむこととなり, 実測値とほぼ一致している。

別途測定した梁の上下面にロゼット型に貼ったひずみゲージによる値からは梁がねじれることなく一様に膨張することが示唆されており, これらの結果より, 基準梁は梁上下面の温度差の変化に応じて上下にたわんでいるものと判断した。

梁が上下方向にたわむと見かけ上の岩盤変位が生じるため, 梁上下面の温度差変化が発生しないよう, 坑内の温度変化を極力抑える必要があることがわかった。そこで, 試験坑は図9, 10に示すように, ラワン合板とグラスウール製断熱材, 厚手ビニールを用いて3重の隔壁を設置するとともに, 隔壁と側壁岩盤部との間は空気の交換をさけるためにコーキング材でシールし密閉性の高い構造とした。さらに, 蛍光灯の熱による温度変化を避けるために長期クリープ試験中は坑内照明を消灯することとした。また, 試験期間中は試験坑内の気温と基準梁の温度ならびに基準梁の鉛直変位を継続的に測定することとした。



図9 試験装置全景

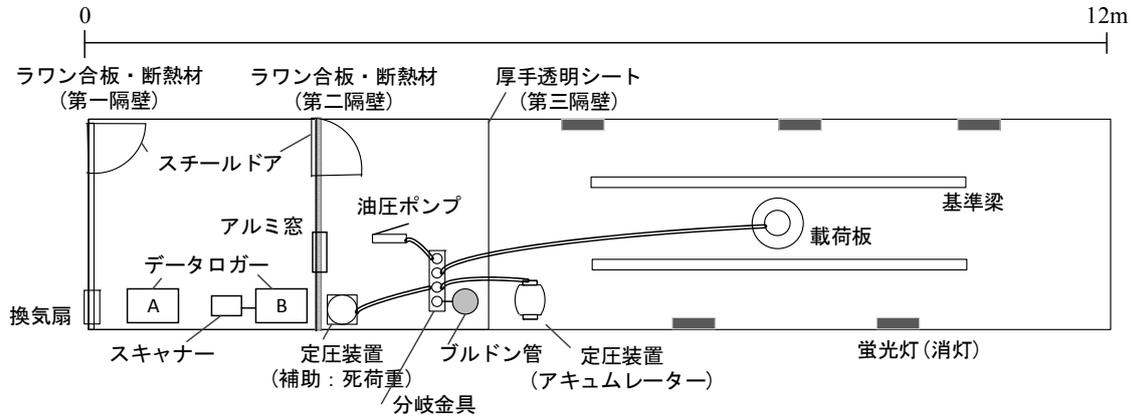


図10 試験坑内模式図

3.3 長期クリープ試験中の基準梁の挙動

E地点における7カ月間の試験期間中に坑内の気温は約0.3℃、梁の上面温度は約0.3℃低下した。0.3℃の温度低下に対応する梁の縮みは計算上20.8μmとなるが、実測値の範囲は6～11μmといずれの梁とも計算値に比べ小さな値を示した。

事前の実験では梁は抵抗なく伸縮しているが、試験期間中のゆっくりとした温度変化に対してはスライドユニットのローラーの摩擦やアンカーの横方向のたわみによる若干のヒステリシスが生じた可能性が考えられる。一方、梁上下の温度差は荷重初期に0.01℃程生じているものの、それ以後はほぼ一定であった。0.01℃の温度差変化に対応するたわみ量は計算上2.8μmとなるが、クリープ試験中の荷重板変位に比べると極めて小さな値であるため、試験への影響は無視し得るものと判断した。

事前の検討により、試験坑前のトロッコの移動や計測小屋のドアの開閉、基準梁まわりの歩行などによる振動は、変位計測には影響しないことが明らかになっていた。しかし念のため、長期クリープ試験中は、地震や人為的な振動をモニターするための加速度センサーを基準梁の上に設置し、出力をペンレコーダーで記録することとした。試

験期間中、試験地点では複数の有感地震が観測された。そのうち基準梁上の加速度センサーで計測した最大加速度が概ね1gal以上の地震の際は、変位の計測値に不連続なとびが生じていた。特に、荷重板変位は地震のたびに荷重板が沈下する方向に不連続に進行し、その値の大きさは地震の震度に対応しているのが特徴であった。なお、いずれの地震とも地震の前後で荷重荷重や圧力の計測値は変化していない。

表3に主な変位測定箇所における地震時の不連続な変位の傾向を示す。図11は試験地点地表部における震度が3以上の3つの地震について、基準梁中央部の鉛直変位と荷重板変位の不連続値を比較したものである。荷重板の鉛直変位は地震のたびに地盤が沈下する方向に不連続に進行していること、基準梁中央部は地震の度に上向きに変位しており、その値は荷重板変位とほぼ等しいこと、さらに左右の基準梁で変位の不連続値が異なることが読み取れる。これらの特徴から、地震時には地盤が沈下したのではなく、基準梁が相対的に上方向にたわむか荷重板と反対側にねじれることによって、見かけ上の荷重板変位や地盤変位が生じたものと考えられる。

表3 主な変位測定個所における地震時の不連続な変位の傾向

計測目的	基準	ターゲット	地震時の不連続な変位の傾向
載荷板の鉛直変位	基準梁	載荷板	地震のたびに載荷板が沈下する向きに変位. 複数回の地震による累積変位量は変位計固定位置近傍の基準梁鉛直変位と調和的.
地盤上の鉛直変位 (r=60)	基準梁	地盤上アンカー (r=60)	地震のたびに地盤が沈下する方向に変位. 地震による累積変位量は変位計を固定した位置近傍の基準梁鉛直変位と調和的.
基準梁の鉛直変位 (たわみ)	地盤上アンカー	基準梁	地震のたびに向上向きに変位. 変位量は梁中央部で比較的大きく, 両端部は小さい
基準梁の水平変位(伸縮)	基準梁可動端	アンカーパイプ	不連続な変位は生じているが, 方向, 値とも一貫性がない.
フェーシング材の変形	地盤上アンカー	載荷板	不連続な変位は生じていない.
プレートに対する深度 1,2,5m の鉛直変位	地中変位計 プレート	地中変位計 (1m, 2m, 5m)	不連続な変位は生じているが, 方向, 値とも一貫性なし.

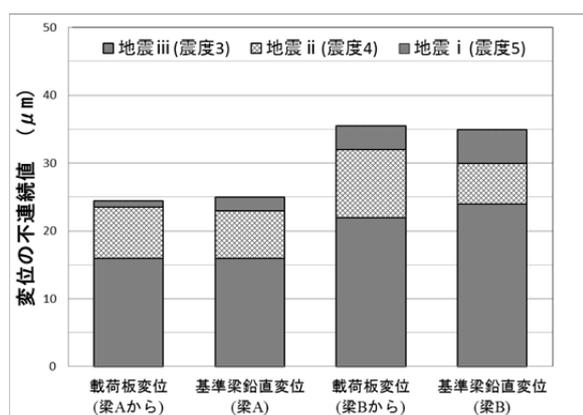


図11 地震による変位の不連続値の比較

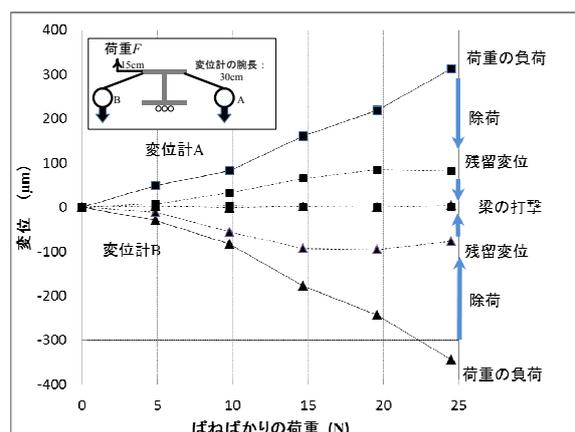


図12 基準梁に加えたねじり荷重と変位の関係

この点を検証するため, 長期クリープ試験終了後, 梁のねじり・振動実験を実施した. その結果を図12に示す. 同図は梁の可動端側にねじり荷重 F を加えた際の梁中央部の鉛直変位を示している. ねじり荷重にほぼ比例して左右で逆向きの変位が生じ, 除荷すると残留変位が残るものを梁を叩くことによってそれが解消されることが読み取れる.

これらのことを考え合わせると, 地震時の不連続な変位は, なんらかの原因で梁に蓄積されたひずみが振動により解放されることで生じた可能性が高い. しかし, このようなひずみを生じさせる

メカニズムまでは本検討では明確にできなかった.

3.4 高剛性基準梁

E 地点の検討結果より, 試験横坑を多重壁で遮蔽して発熱体を排除し, 人の出入りを最小限に抑え, さらに熱的平衡に近い状態で試験を開始すれば, 数か月間の温度変化を 0.3°C 以下に抑えて温度変化による基準梁の伸縮の影響をほぼ排除することができた. しかし, H 鋼単独の梁はねじり剛性が低いいため 2 本の梁を副梁で連結するとともに

不動点を岩盤表面にとって全体の剛性を高める方が、温度対策を主眼とした図5の構造よりも効果的であろうと考えた。

図13は以上のような試行錯誤を経て最終的にたどり着いた高剛性基準梁の模式図である。F地点ではこの基準梁を用いて安定した結果を得ている。

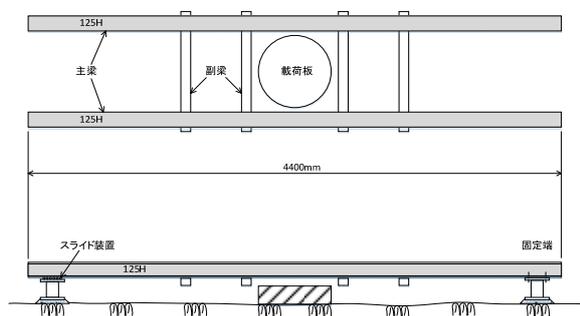


図13 高剛性基準梁の模式図

4. 計測システムの長期安定性

4.1 初期の計測システム

これまでに長期クリープ試験を行ったA地点以外はいずれも地下水位以下の試験横坑内で、年間を通して湿度は90%以上の恒湿環境下であった。そのため、高湿度環境下で長期安定した変位を計測することができるシステムの構築が不可欠であった。1970年代、変位計はダイヤルゲージの目視が一般的であった。電気式ダイヤルゲージや作動トランスなどの電気式変位計はあったが記録装置はペンレコーダーなどアナログ式しか市販されていなかった。そんな時代のさなか、B地点においてはデジタル式変位計とデータロガーによる自動計測システムをいち早く導入した。このデジタル式変位計(榊尾崎製作所リニアゲージ)は1/1000mmの分解能を有し、安定性、耐久性にも優れていることから採用したが、結局現在に至るまで最も信

頼性の高い変位計として多用している。データロガーは多数の変位計と荷重計のデータを設定した時間間隔で収録、印刷、保存する機能を有していた。データの保存媒体は水に弱い紙テープであったため、印刷されたプリンター用紙もバックアップデータとして大切に保管していた。

その後、1980年代に入るとひずみゲージ式変位計とデジタル式データロガーが市販され、取り扱いの容易さから岩盤試験の主体となっていったが、長期安定性には疑問があった。

4.2 E地点の計器と計測システムの検討

E地点では、高湿度環境下で長期間安定した計測を行うため、表4に示す原理の異なる複数の計器を用いて原位置で予備実験を行った。特に、変位計については、図14に模式的に図示したように変位が生じない位置で測定を行い(以下、ダミー変位計と記載)、変位出力値が常に0であることを確認する計画とした。約6か月の予備载荷の間、これら計器類の動作状況をモニターし、計測項目の妥当性や計器類の安定性について検討した。

表4 計測項目と機器

計測項目	機器
変位	リニアゲージ, ひずみゲージ式変位計, 差動トランス式変位計, ギャップセンサー, レーザー変位計, 目視用ダイヤルゲージ, 内空変位計
荷重	ロードセル, 圧力変換器, 目視用ブルドン管
温度	白金型温度センサー, ひずみゲージ式温度変換器, 温度ゲージ, 熱電対, 目視用温度計
その他	酸素濃度計, 湿度計, 間隙水圧計, 加速度センサー

ダミーのひずみゲージ式変位計の出力は変化しないはずであるが、スピンドルが押し込まれる方向に継続的に変位が累積していく傾向があることがわかった。要因として第一に試験坑内の高い

湿度の影響が考えられたため、別途用意したひずみゲージ式変位計ならびに変位計とロガーをつなぐスイッチボックスを、温度 20°C、湿度 85%の恒温恒湿室に設置し、絶縁抵抗と変位を 16 日間に渡り計測した。

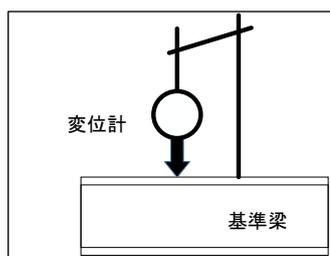


図 14 ダミー変位計

その結果、図 15 のように、スイッチボックスの絶縁抵抗が時間の経過とともに低下し、それに伴いスピンドルが押し込まれる方向に見かけの変位が生じていることがわかった。したがって、上述のダミー変位計の見かけ上の変位は、坑内の湿度によりスイッチボックスの絶縁抵抗が低下したことによるものと判断した。

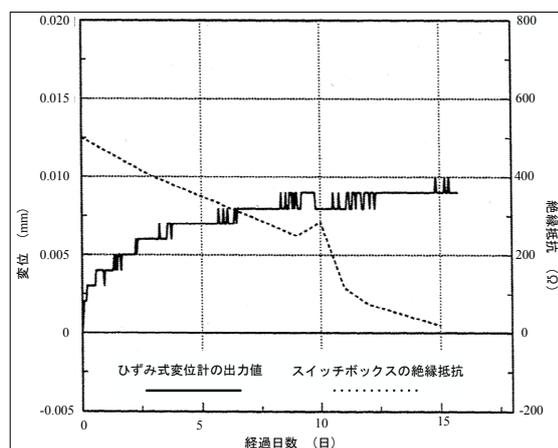


図 15 スwitchボックスの絶縁抵抗と変位計の出力

当初、スイッチボックスはプラスチックケースに入れ湿度 92%の試験坑内に設置していたが、検討結果を受け、ラワン合板製の計測小屋に移動し、その中に熱源として無停電電源を設

置することにした。その結果、絶縁抵抗は増加し、見かけ上の変位も発生しなくなったため、長期クリープ試験期間中もこの設置形態で計測を行うこととした。また、変位計は防湿のためにビニール袋で保護することとした。

なお、予備载荷期間中、リニアゲージは電気的ノイズや見かけ上の変位は認められず安定していた。

4.3 計器と計測システムの長期安定性

E 地点における長期クリープ試験終了後に試験坑内の状況を確認したところ、支柱の表面や基準梁の表面には全体的に水滴が付着しており、計器保護のためのビニール袋の外側に水滴が付着している変位計も数台認められた。また、計器の外観や取り付け状況の確認を行ったところ、リニアゲージのうち計測結果に異常が認められたものは、固定治具がゆるんでいたり、スピンドルの動きがしぶくなっていた。一方、ひずみゲージ式変位計は計測結果に異常が認められたものでも計器の外観や取り付け状況には特に異常が認められない場合が多く、計器自体のドリフトの可能性が疑われた。

7 か月間の測定結果から、試験で用いた変位計の長期安定性を評価すると表 5 のようになる。クロスチェックを行った 6 種類の変位計のうちリニアゲージが長期計測に最も適しているという結果となった。

4.4 長期安定性に優れた計測システム

これまでの試行錯誤の結果を踏まえると、現時点で最も長期安定性に優れている変位計はデジタル式のリニアゲージである。リニアゲージは、図 16 に示すように、移動スリットと固定スリットを通過する光の明暗を方形波信号に変換してカウン

表5 変位計の長期安定性評価結果

変位計の種類	安定性	※評価
リニアゲージ	✓試験期間中安定して変位を計測することができた.	○
ひずみゲージ式変位計	✓常時±1μm のふらつきがみられる. ✓スピンドルが押し込まれる方向に 1~3 μm/1 か月程度のドリフトを示すものがある.	×
ギャップセンサー	✓最小分解能の範囲で表示は安定しているが、ドリフトが生じている. ✓シールドケーブルを用いるなど絶縁性を改良する必要あり. ✓アンプからの発熱が坑内の温度に影響を与える可能性あり.	△
レーザー変位計	✓電気的ノイズをひろっている可能性あり. ✓ターゲット面の汚れや水滴の付着が影響するため、湿度の高い坑内での計測には向かない.	×
差動トランス	✓最小分解能の範囲で表示は安定している. ✓スピンドルが伸びる側にドリフトしている可能性がある.	×
ダイヤルゲージ	✓連続測定はできないものの、電気的ノイズやドリフトの影響がないため、クロスチェック用としては重要.	○

※ ○長期計測向き, △工夫次第で長期計測に仕様可能, ×長期計測に不向き

タで加算・減算して変位を測定している。1976年に栲尾崎製作所が国内で最初に販売を開始しているが、1/1000mm のデジタル表示は当時としては画期的であった。しかし、多数の変位計のデータを収録することができるデータロガーがなかったため、B 地点には自作1号機のデータロガーを導入することになった。このデータロガーは動作の安定性に難があり、紙テープを記録媒体としていたこともあって取り扱いには神経を使ったが、1年間の長期計測をなんとか無事に終了することができた。

その後、自作のデータロガーは何代も改良を重ねて小型化、安定化を図ってきたが、2008年に計測器メーカー（株東京測器研究所）からリニアゲージ用のスイッチボックスが販売開始となってその役目を終えた。このスイッチボックスを介して、市販のデータロガーで多数のリニアゲージの変位だけでなく多種多様なひずみゲージ式変換器や電圧値なども一緒に収録&保存することが可能になり、測定システム全体としての取り扱いや信頼性、安定性も向上している。

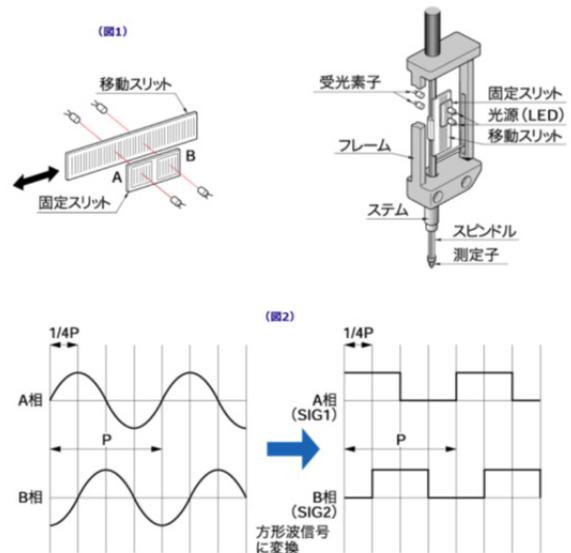


図16 リニアゲージの動作原理

<https://www.onosokki.co.jp/default.htm> (株)小野測器 HP より

5. 持続荷重の安定的保持

荷重の載荷には油圧ジャッキを用いるため、持続荷重を保持するには油圧を一定に保つ必要がある。そのための定圧維持装置として、当初よりアキュムレータを用い、圧力変換器で油圧をモニタ

一し制御を行うとともに、載荷荷重を直接計測するために荷重計（ロードセル）も並置してきた。本章ではこれまでの実績をもとに、アキュムレータの効果と荷重の変動について述べる。

5.1 定圧発生装置

定圧発生装置としては、死荷重と油圧ジャッキが用いられた例を参考にして図 17 のような装置を試作したこともあったが実用には向かなかった。載荷ジャッキに対する定圧ジャッキのシリンダ受圧面積の比を 1/100 とすれば、定圧用の死荷重は載荷実荷重の 1/100 の重量で間に合うことになる。しかし、検証実験の結果、定圧ジャッキシリンダの摩擦（摺動抵抗）が無視できないことが判明した。シリンダの摺動抵抗は周長すなわちシリンダ直径に比例すると考えられるので、受圧面積比が 1/100 になれば摺動抵抗の影響は 10 倍になってしまう。この影響を 2 倍程度に抑えるには実荷重の 1/4 の死荷重が必要になるが、一般的な長期クリープ試験の載荷実荷重が 200kN 程度であることを考慮するとこれは現実的ではない。

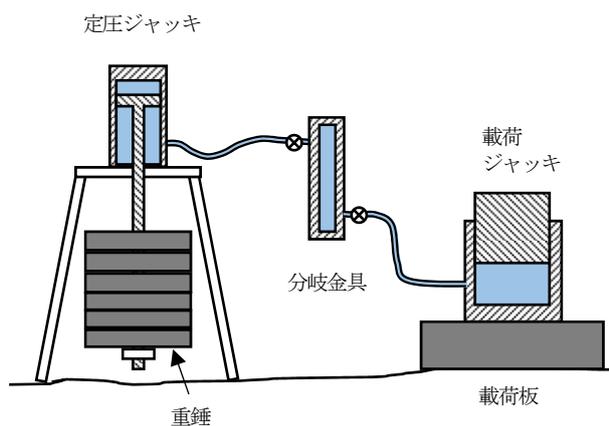


図 17 死荷重による定圧発生装置

その他の定圧発生装置としては電動油圧ポンプやエアコンプレッサも考えられるが、前者には

油圧の脈動を均すためのアキュムレータ等が、また後者にはエアと油圧の圧力交換&増幅器が必要になる。クリープ変形（岩盤及び反力装置）による圧力低下がわずかであることを考慮すれば、このような大がかりで停電対策が必要な装置は実用的ではない。

5.2 アキュムレータの効果

定圧維持に用いるアキュムレータはブラダ型と呼ばれるもので図 18 のような構造である。鋼製の耐圧容器内のゴム袋中に設定圧より低めの窒素ガスを封入し、反対側を油圧ポンプに接続して設定圧になるまで油を送り込んだ後、圧力ラインに接続して油圧ジャッキの圧力とバランスさせておく。クリープ変形により油圧ジャッキのシリンダが伸びるとアキュムレータ内の気体が膨張して油を供給する仕組みである。この時、シリンダの伸びを δ cm、シリンダの受圧面積を S cm²、アキュムレータ内の気体の初期容積と圧力をそれぞれ V_0 cm³、 P_0 MPa とすれば、クリープ変形後のアキュムレータ内の圧力 P は次式で表される。

$$P = P_0 \frac{(V_0 - \delta S)}{V_0} \quad (2)$$

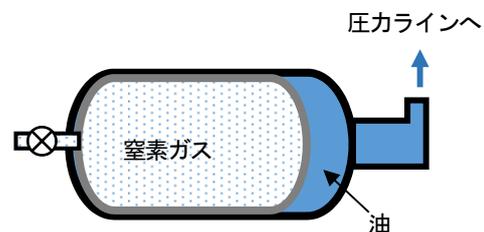


図 18 アキュムレータの構造

クリープ荷重を載荷する油圧ジャッキとしては、載荷容量（1MN）、ストローク（100mm）、組立て時の安定性（ $\phi 200 \times h250$ mm, 自重 48kg）を考慮して山本扛重機製 RM-10010 を用いることが

多い。このジャッキのシリンダ受圧面積は 201.1cm^2 、最大作動圧力は 50MPa である。(2)式において、 $S=201.1\text{cm}^2$ 、 $V_0=10,000\text{cm}^3$ とすると、 $\delta=0.1\text{cm}$ の時 $P=0.998P_0$ 、 $\delta=0.01\text{cm}$ の時 $P=0.9998P_0$ となり、油圧がそれぞれ 0.2% 、 0.02% 低下することになる。 V_0 が 2 倍になれば油圧の低下率は $1/2$ になる。

アキュムレータで補償するシリンダの伸びには、試験面のクリープ変形のほかにも支柱や反力面の長期変形も含まれる。しかし、アキュムレータによる定圧維持への切り替えは、手動操作でクリープ荷重まで荷重がある程度変位が落ち着いた後に行われるので、その後の変形は一般にわずかである。また、変形量が大きくて油圧の低下が無視できない場合には、バルブを切り替えてアキュムレータの内圧を再調整することも可能である。これらの点を考慮してアキュムレータの容量と圧力を設計することになる。

アキュムレータの内圧の温度変化の影響については次式で表される。

$$P = P_0 \frac{(T_0 + \Delta t)}{T_0} \quad (3)$$

ここに、 T_0 は初期温度 (K)、 Δt は温度変化 ($^{\circ}\text{C}$) で、 $T_0=288$ (15°C)、 $\Delta t=0.3$ とすれば $P=1.001P_0$ となり 0.1% 圧力が上昇することになる。

図 19 にはクリープ試験開始後 40 日余りにわたる間、アキュムレータによって荷重が保持されている様子を示す。ジャッキの油圧はほぼ一定で緩やかにごくわずかに低下しているが、ロードセルによる実荷重は、徐々にある程度低下すると急に元に戻る動きを繰り返し、この時同時にジャッキのストロークが伸びている。このような現象はジャッキのシリンダの摺動抵抗によるものと考えられる。即ち、荷重が低下してジャッキの油圧との差が徐々に大きくなり、それがシリンダの摺動抵抗

を超えるとシリンダが押し出されて荷重が回復している。このときの荷重の回復量は毎回ほぼ等しく、平均 1.47kN 、載荷荷重に対する割合は 0.86% であった。したがって、アキュムレータによりジャッキの油圧を一定に保持できたとしても、シリンダの摺動抵抗によって実荷重がこの程度変動することが明らかになった。この摺動抵抗については次節でさらに検討する。

なお、図 19 の 40 日後のシリンダの伸び (ジャッキストロークの変化) による圧力低下は(2)式より $\delta=0.02\text{cm}$ として 0.04% 、温度低下 ($\Delta t=-0.2^{\circ}\text{C}$) による圧力低下は(3)式より 0.07% となり、両者を合わせても実測の -0.8% とは開きがある。この差は圧力の漏れによるものと考えられる。

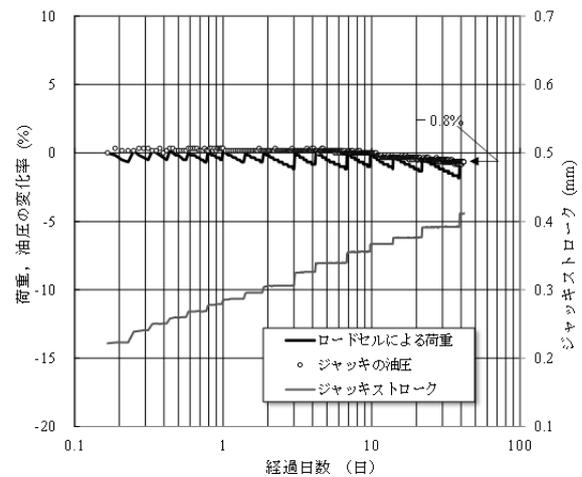
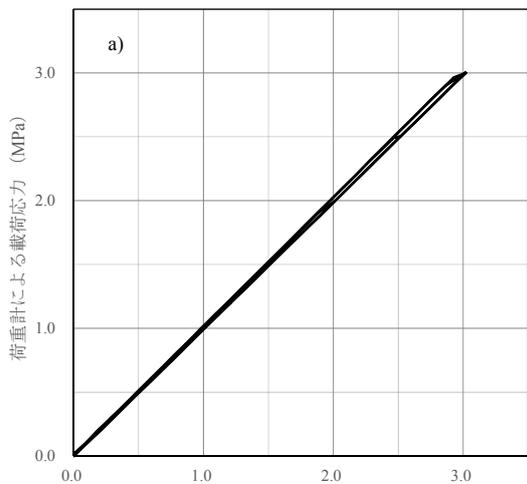


図 19 荷重、油圧、ジャッキストロークの経時変化

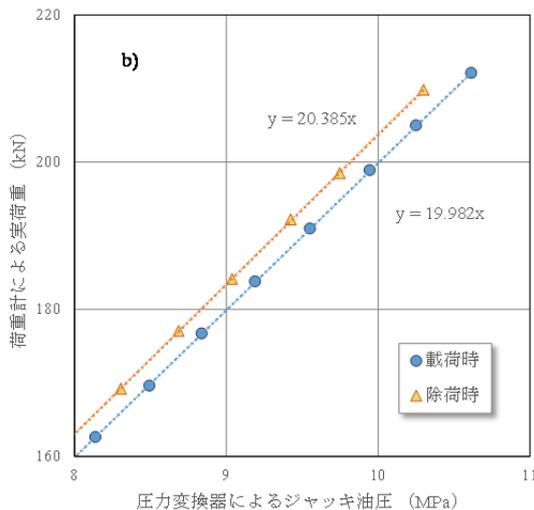
5.3 油圧ジャッキの摺動抵抗

油圧ジャッキ RM-10010 と $\phi 300\text{mm}$ の載荷板を用いた平板載荷試験の繰り返し載荷時に測定した荷重計と圧力変換器の比較を図 20 に示す。同図(a)は荷重を載荷板面積で除した平均応力として表示しているが、応力が大きくなると荷重計と圧力変換器の応力にわずかな差が認められる。同図(b)には応力 3MPa の最後の繰り返し段階の圧力変換

器によるジャッキ油圧と荷重計による実荷重の関係を示す。各記号を結ぶ点線は原点を通る回帰直線で、その回帰係数は載荷時と除荷時で2.0%の差がある。摺動抵抗は載荷時と除荷時には逆向きに作用するので、シリンダが動く時には $2.0/2=1.0\%$ の摺動抵抗が発生していることになる。この値は図19で見た0.86%とほぼ同等である。



(a) 載荷応力による比較



(b) ジャッキ油圧と実荷重の比較

図20 繰返し載荷時の荷重計と圧力変換器のの比較

このような摺動抵抗の影響は、シリンダの受圧面積が大きくなれば相対的に減少すると考えられ

るので、油圧ジャッキの選定にあたって考慮すべき事項である。また、摺動抵抗にはジャッキによる固有差もあると思われるので、事前に確認しておくことも肝要である。

なお、平板載荷試験においては、荷重計（ロードセル）の出力をモニターして手動で荷重を制御する方法が一般的になっており（図20のデータも同様の方法で実施している）、その場合にはジャッキの摺動抵抗は無関係となる。しかし、クリープ試験のように一定荷重を長期間保持しなければならない場合、手動で油圧ポンプを操作するために24時間人が常駐することは現実的ではない。また、荷重計の出力をフィードバックして自動で油圧を調整することは可能であるが、本章冒頭で触れたように実用的とはいえない。

6. 試験装置の長期安定性

6.1 フェーシング材の安定性

岩盤試験の載荷板のフェーシングには1時間程度で固化する超早強モルタルが用いられるが、塩水中では劣化することが知られている。E地点の坑内の湧水は塩分を含み影響が懸念されたため、事前に坑内の湧水について水質分析を行った。その結果、マグネシウムイオン、ナトリウムイオン、塩化物イオン等に富み、トリリニアダイアグラムでは「IV. $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{NaCl}$ 型」に属することがわかった。コンクリートの侵食判定基準DIN4030では弱侵食性～強侵食性と判定され、フェーシング材やグラウト材等と反応しそれらを劣化させる恐れのあることが明らかになった。

低載荷圧力を長期間安定に保持し、微小変位を精度よく計測するためにはフェーシング材等の劣化による膨張・収縮を極力抑える必要があった。そこで、事前にフェーシング材とグラウト材の坑

内水に対する安定性を確認し、最適な材料を選定することとした。また、合わせて変位計のターゲットのガラス板を接着する接着剤についても安定性の確認を行うこととした。

表 6 に示す 13 種の材料について供試体を作成した。それぞれの配合には水道水を用い、供試体(φ5×H10cm)を 3 体ずつ作成した。a~f については、サミット缶に打設後 1 日間水中養生し、その後サミット缶より取り出して 2 日間室内養生を行った。接着剤の g と h についてはサミット管内で 3 日間室内養生を行った。

表 6 配合試験に供した試料。

用途	No.	配合比 (質量比)				
		C ^{※1}	S ^{※2}	D ^{※3}	P ^{※4}	水
フェーシング材・グラウト材	a-1	0.95	1.00	0.05	0.02	0.33
	a-2	0.90	1.00	0.10	0.02	0.33
	a-3	0.95	1.00	0.05	0.02	0.31
	a-4	0.95	1.00	0.05	0.02	0.35
	a-5	0.99	1.00	0.01	0.02	0.33
	a-6	0.97	1.00	0.03	0.02	0.33
	b	1.00	0	0.05	0.01	0.46
	c	C : アラルダイト : 硬化剤 =1.00 : 0.5 : 0.175				
	d	ジェットセメント : S : 水 =1.00 : 1.00 : 0.45				
	e	プレミックスモルタル ^{※5} : 水 =1 : 0.125				
f	早強石膏 ^{※6} : 水=1 : 0.15					
ガラス接着用	g	水中ボンド				
	h	アラルダイト(標準)				

※1 早強ポルトランドセメント(JIS R 5210)

※2 標準砂

※3 デンカ CSA#20 ; 電気化学工業(株)

※4 ポゾリス No.8 ; BASF

※5 プレタスコン T-1 ; 電気化学工業(株)

※6 ハイストーン ; 吉野石膏(株)

これらの供試体をそれぞれ坑内水を用いた飽和状態(温度 20℃, 湿度 100%)と湿潤状態(温度 20℃, 湿度 85%)に置き、ひずみゲージ式変位

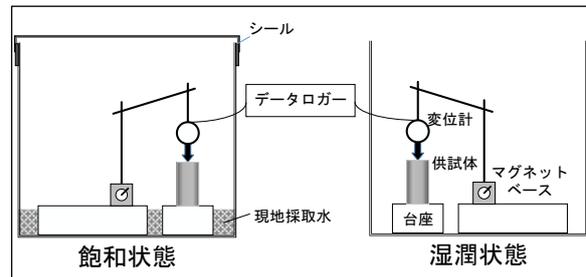


図 21 試験装置模式図

計により高さの変化を測定した。測定期間は 16~41 日とした。図 21 に試験装置模式図を示す。

飽和状態における各材料の試験結果を表 7 に示す。また、試験結果の例として a-1, a-3, a-4 の経過日数と高さの変化を図 22 に示す。表 7 に示すように、最大変位を計測日数で除した変位速度は材料によって異なることがわかった。変位速度が負の値を示す材料は、収縮によりクラックが発生する可能性があるため採用候補から除外した。また、d は比較対象の中では、変位速度が最小であったが、過去の実績から塩水環境下での長期安定性に問題があることが判明しているため検討対象から除外した。これらを除いた材料から変位速度や粘性等を考慮し、フェーシング材として a-1 を、グラウト材として b を選定した。また、長期クリープ試験の計測項目としてフェーシング材の変形とフェーシング材テストピースの高さ測定を加えることとした。なお、6 か月に渡る予備載荷期間中(載荷応力 : 0.05MPa)の地盤と載荷板間の変位測定結果からはフェーシング材はほとんど変形していないことを確認した。

長期クリープ試験終了後に載荷板を撤去してフェーシング材を確認したところ、十分堅硬で変状などは認められず、厚さはほぼ一様で平均 11mm であった。試験坑内に置いたテストピース(湿潤状態)は個体差が大きいものの、最大 10μm 程の膨張方向の変位を示した。ただし、試験後に

観察するとテストピース表面が結露しており、テストピースとテストピースを置いた基準梁の水によりみかけの膨張が生じた可能性も否めない。水浸させたテストピースは最大 110 μm ほど膨張している。膨張が著しいテストピースは水浸部の底面に厚さ約 0.5mm の白色析出物が付着しており、それによる変位が計測されたものと考えられる。実際のフェーシング材はテストピースに比べて厚さが 1/10 であるため、湿潤テストピースの最大膨張量 10 μm から考えると膨張量は最大でも 1 μm となる。これらのことからフェーシング材の膨張量はほとんど問題にならないと判断した。

表 7 飽和状態における各材料の試験結果

用途	試料 No.	最大変位 (%)	計測日数 (日)	変位速度 (%/日)	選定結果
フェーシング材・グラウト材	a-1	0.022	41	0.0005	◎
	a-2	0.157	41	0.0038	
	a-3	0.035	16	0.0022	
	a-4	0.011	16	0.0007	
	a-5	-0.097	16	-0.0061	
	a-6	0.025	16	0.0016	
	b	0.032	41	0.0008	◎
	c	-0.012	24	-0.0005	
	d	0.010	24	0.0004	
	e	0.024	24	0.0010	
	f	0.045	24	0.0019	
ガラス接着用	g	0.034	24	0.0014	
	h	0.275	24	0.0115	

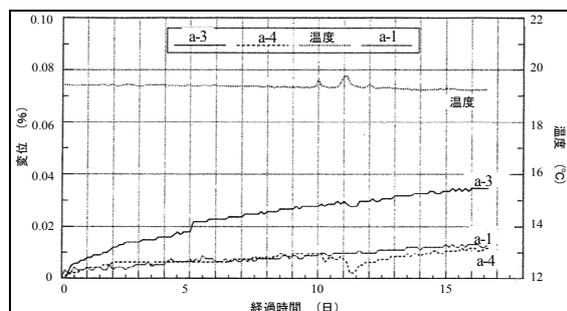


図 22 飽和状態におけるフェーシング材の高さの変化

6.2 試験装置の長期安定性

通常の岩盤試験においては、変位計をマグネットベースに取り付けて磁力で基準梁に固着し、接着剤で載荷板に貼り付けたガラス板に変位計のスピンダルを当てている。しかし、長期試験においては、基準梁との接触部の錆や磁力の劣化によってマグネットベースの固着性が確保されないこと、載荷板の錆や接着剤の変形によってガラス板が動くことなども懸念された。そこで E 地点では、前述のように基準梁をステンレス製にしたことから、マグネットベースに替えて図 23 のような変位計固定治具 (SUS304) を作成しナットで基準梁に確実に固定することとした。

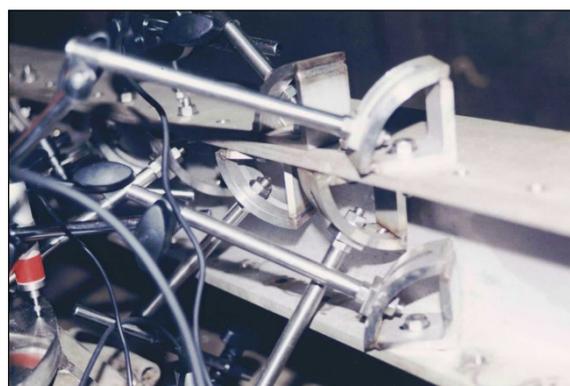


図 23 SUS304 製の変位計固定治具の取り付け状況

また、ガラス板の接着剤としての使用を考えていた g と h については膨張量が大きかったため、変位計のターゲットにはガラス板を用いず、測定点を平滑に研磨し変位計を直接当てることとした。そのため、載荷板もステンレスで作成することとした。これらのステンレス製の装置は、長期クリープ試験後に錆や変状は全く認められなかった。

支柱や支圧板は普通鋼製で錆止め塗装したものをを用いるのが一般的である。長期試験中に多少の錆が発生しても問題になることはまずないが、錆の上から塗装を重ねている場合にはそれが落下して変位計に当たることのないよう、事前の整備を

怠ってはならない。

油圧ジャッキは油を使っているため錆の発生は抑制されるが、過去には長期クリープ試験後にシリンダの露出した側面に錆の発生が認められたことがあった。クリープ荷重を保持している間はシリンダが押し戻されることはないので、露出面の錆が問題になることはないと考えられるが、前述の摺動抵抗の観点からも試験前後でのジャッキの動作確認を行うのが望ましい。

荷重装置は地震などの衝撃に対して転倒しないよう安定した状態に組み立てる必要がある。そのため支柱を鉛直に設置し、不安定な球座や荷重計は支柱最上部で支圧板との間に設置するのが有利である。

6.3 荷荷板の剛性

長期クリープ試験は、剛体荷荷板による平板荷荷試験として行われるが、荷荷板の剛性が低い場合には、荷荷重によって荷荷板がたわんで試験そのものが成立しなくなる恐れがある。荷荷板について地盤工学会基準 JGS 1521-2013 には、「たわみが無視できる、十分な剛性を持つ」と記載され補強リブを付けた荷荷板が例示されているが、剛性に関する具体的な記述はない。

筆者らは、表 1 に示した A 地点以外ではいずれも $\phi 60\text{cm}$ のリブ補強した荷荷板を用いてきた。E 地点では SUS304 製の荷荷板 (図 24) を作製し、長期クリープ試験の荷荷応力 0.5MPa を加えて剛性を確認した。その結果、荷荷板の中心から端までのたわみ量は $3\sim 4\mu\text{m}$ であり、「最大荷重を加えたときのたわみ量は 0.0125mm 以下が望ましい」とする ASTM の基準を満たすことを確認した。

荷荷板だけでなく支柱や支圧板など荷荷装置全体の剛性が高いことが望ましいのはいうまでもない。

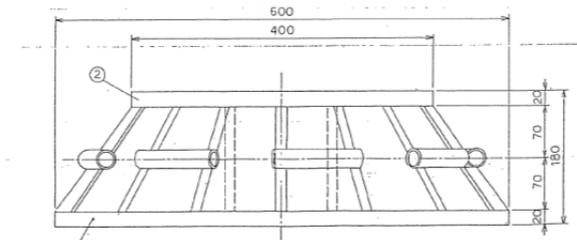


図 24 SUS304 製の剛性荷荷板

6.4 長期試験に関するその他の検討

E 地点では長期試験に関してその他に以下のような検討を行った。

試験実施中は荷重とシステムの動作状況を毎日確認する必要があった。一方で、試験坑内にはなるべく立ち入らず温度を極力一定に保つ必要や現地での常時駐在が困難という事情があった。これらを勘案し NTT のプッシュ回線を利用しモデムを介して随時データを取得し図化するための遠隔モニタリングシステムを構築することとした。構築当初は通信成功率が低く、さらに、検討期間中に当地域の NTT 電話網がデジタル化されたこともあり、モデムの設定等に試行錯誤を要したが、最終的には随時確実にデータを遠隔取得可能なシステムを構築することができた。現在では特筆すべきことではないかもしれないが、20 年前、インターネットの民間利用がやっと始まった頃に、試験坑からオンラインでデータを取得するシステムを構築したことは、当時の技術としては最先端であったろうと自負している。

重力変化の影響については、地球潮汐が間接的に計測値に影響を与える可能性を考慮し、環境モニターの一環としてラコスト重力計を用いて 4 日間の重力変化を 30 分間隔で連続測定した。その結果、重力の測定値は理論値とほぼ等しく 12 時間周期で変化していたが、計測値には影響していないことがわかった。また、試験箇所近傍に埋設した間隙水圧計による水圧変化は、近傍の港で観測さ

れた潮位変化とほぼ等しかったが、計測値への影響は認められなかった。

掘削後の粘弾性的変形については、試験坑掘削に合わせて手ばかりによる内空変位測定を行ったところ、掘削の進行に伴い内空が縮まる方向に変位するものの、測定断面より切羽が試験坑幅以上先に達すると内空変位がほとんどおさまることを確認した。その後内空変位計を設置し自動計測を行ったが有意な変位は検出されなかった。

7. あとがき

冒頭に述べたように、今後原位置岩盤の長期クリープ試験が実施される機会は少なくなり、筆者らがそれに係る可能性はほとんどないものと考えられる。したがって、本稿は、今後長期クリープ試験に携わる技術者にとっての参考資料として、筆者らが30年以上にわたる試行錯誤の中で得てきた多くの知見をとりまとめたものである。ただし、これらの知見は長期クリープ試験に限らず、原位置及び室内の各種の試験・計測においても有用であろうと信じている。

原位置岩盤の長期クリープ試験には多くの人々が係ってきた。応用地質(株)の浦和研究所、コアラボ試験・研究センター、エネルギー事業部の関係諸氏、全国から馳せ参じてくれた助勤者、さらには協力会社の関係者の方々の献身的な努力に感謝の意を表したい。

文献

足立紀尚・岡 二三生・曾良岡 宏・小池真史
(1998)：軟岩の時間依存性挙動とその統一的な説明，土木学会論文集，No.596/III-43，1-10。
羽柴公博・大久保誠介・福井勝則 (2008)：田下凝

灰岩の10年クリープ試験，Journal of MMIJ，124
12，741-747。

本州四国連絡橋公団 (1993)：本州四国連絡橋 地
質地盤調査誌，160-170。

地盤工学会 (2013)：地盤調査の方法と解説，
697-731。

熊谷直一・伊藤英文・笹嶋貞雄 (1986)：岩石の長
年クリープ実験，材料，35，392，20-25。

西 好一 (1997)：軟岩のクリープ特性，応用地質，
36，5，304-311。

大塚岩男・山本和夫・島村義晴 (1975)：長大橋基
礎岩盤としての花崗岩の長期変形特性 (その2)，
昭和 50 年度土木学会年次大会講演会講演論文
集，489-490。

田中莊一 (2014)：堆積性泥質軟岩の物理・力学的
特性評価手法に係る若干の考察，公益社団法人
深田地質研究所年報，15，117-129。