

PCに関する試験および測定

入門講座

No.8

PCのクリープ測定・乾燥収縮測定

講師：綾野 克紀*

① はじめに

弾性ひずみや残留ひずみは、荷重が載荷されると同時に生じます。これに対し、クリープひずみや乾燥収縮ひずみは、コンクリート構造物の供用期間中をとおり、長い年月にわたって増加します。時間とともに増加するひずみですから、クリープひずみや乾燥収縮ひずみのことを時間依存性ひずみと呼ぶこともあります。

プレストレストコンクリート（以下PCと略記）構造物では、クリープひずみや乾燥収縮ひずみは、プレストレスト力の減退や過度の変形の原因になります。その影響の大きさを設計において把握するために、クリープひずみおよび乾燥収縮ひずみの経時変化が求められなければなりません。長期にわたって生じるクリープひずみや乾燥収縮ひずみを実験によって正確に求めるには、かなりの時間と労力が必要です。このような理由から、設計段階においては実験を行わずに、わが国の土木学会コンクリート標準示方書やCEB-FIPのモデルコード等に提案されている予測式を用いてその値が計算されることもあります。

しかし残念ながら、現在提案されている予測式の精度は、社会的にも重要で高い寸法精度を要するPC構造物の設計において、実験値との検証を行わずに用いられるほど高いものではありません。クリープおよび乾燥収縮ひずみ予測式は、これからのデータの蓄積と新たな研究成果によって、より精度がよく、適用範囲の広いものへと改良されていかなければなりません。予測式は、土木学会308委員会など研究の途中にあります。PC構造物の設計において、信頼性の高いクリープおよび乾燥収縮ひずみデータを用いるには、実験を併用せざるを得ないのが現状です。

② クリープ試験

2.1 概 説

通常の荷重（圧縮強度の3分の1以下程度）を載荷し

た場合に1年後に生じるクリープひずみの大きさは、載荷直後に生じる弾性ひずみの1~4倍程度になります。この大きさは、コンクリートの配合、環境の温度・湿度、供試体の形状・寸法および載荷開始時材令等によって影響を受けます。コンクリート中の水分が多くなるほど、外気の空気が乾燥するほど、部材断面寸法が小さいほど、クリープひずみは大きくなる傾向にあります。逆に、コンクリート強度が高くなるほど、載荷開始時材令が遅くなるほど、クリープひずみは小さくなります。

通常の荷重下では、クリープひずみの大きさは、コンクリートに作用する応力に比例するものとして扱われています。従って、コンクリートのクリープ試験は、一定持続応力下で行われ、その結果は、クリープひずみを応力で除して求めた単位応力当たりのクリープひずみ $\mu \epsilon_{ct}$ またはクリープひずみを弾性ひずみで除して求めたクリープ係数 ϕ_t によって表されます。単位応力当たりのクリープひずみ $\mu \epsilon_{ct}$ およびクリープ係数 ϕ_t は、それぞれ、(1)式および(2)式によって計算されます。

$$\mu \epsilon_{ct} = \epsilon_{ct} / \sigma \dots\dots\dots (1)$$

$$\phi_t = \epsilon_{ct} / \epsilon_e \dots\dots\dots (2)$$

$$\epsilon_{ct} = \epsilon_{at} - \epsilon_e - \epsilon_{st} \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 ϵ_{ct} 、 σ 、 ϵ_{at} 、 ϵ_e および ϵ_{st} は、それぞれ、クリープひずみ、載荷応力、全ひずみ、弾性ひずみおよび無載荷供試体を用いて同時に測定された乾燥収縮ひずみです。

2.2 試験方法

現在規格化されているクリープの試験方法は、圧縮応力下で行われるクリープ試験法です。ここでは、JIS原案（コンクリートの圧縮クリープ試験方法（案））とASTM C-512（コンクリートの圧縮クリープ試験方法）について説明します。

実験に用いる供試体の形状寸法は、ASTM法とJIS法で異なります。ASTM法では、 $\phi 15 \times 30$ cmの円柱供試体が

* Toshiki AYANO：岡山大学 環境理工学部 環境デザイン工学科 講師

用いられます。一方、JIS法では、直径10cm以上、高さが直径の2～4倍の円柱供試体用いられます。

一定持続荷重を載荷する方法には、様々なものが考えられます。図-1には、その中から、スプリング式、油圧式およびPC鋼棒式のものを示しました。スプリング式やPC鋼棒式では、クリープひずみの進行によって持続荷重が減少します。そのために、所定の持続荷重が常に載荷されるよう、荷重のチェックや再載荷をする必要があります。ASTMでは、載荷装置に図-2に示されるスプリング式を採用していますが、JISでは特定の載荷装置を用いるように、とは定めていません。その代わりに、次に示す性能を有する載荷装置を用いることが記されています。

- ① 上下の加圧面の中心は載荷柱の中心線上に一致し、一方の加圧面は球面座をもち、圧縮荷重以外の力が加わらないような構造とする。
- ② 載荷完了直後の状態において、所定の載荷応力の±2%の精度で載荷できること。
- ③ 載荷持続期間中、所定応力の±2%の精度で載荷応力を監視・調整できること。

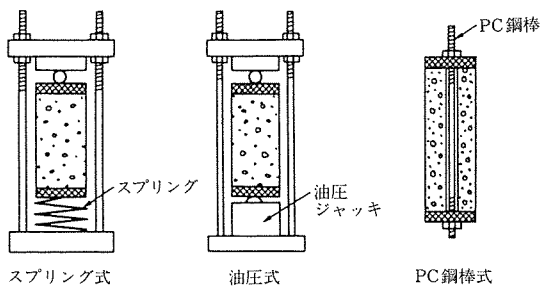


図-1 クリープ試験法

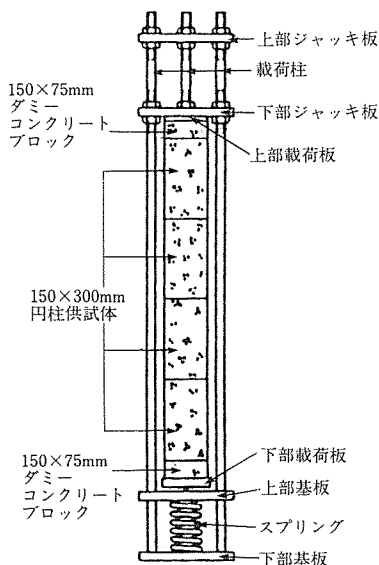


図-2 ASTM法載荷装置

載荷応力の大きさは、JISでは、静的圧縮強度の25～35%、ASTMでは、静的圧縮強度40%以下とされています。これは、通常の荷重が、圧縮強度の3分の1以下程度であることと、載荷応力が静的圧縮強度の40%以下であれば、応力とクリープひずみとの関係が比例関係で近似できることを考慮しているためです。

試験を行うJISの標準の環境条件は、温度20±2℃、湿度65±5%です。これは、日本の1年間の平均温度および平均湿度にほぼ一致します。一方、ASTMでは、温度23+1℃、湿度50+4%を標準の環境条件として定めています。もちろん、あらかじめPC建造物の建設される環境の条件が明らかである場合は、その条件下で得られる試験結果が極めて有用であることは当然のことです。

ASTMおよびJISにおける標準の載荷開始時材令は、いずれの方法においても28日です。しかし、実際に設計でクリープの影響を検討する際には、標準の載荷開始時材令で初載荷を行ったデータだけでは不十分な場合もあります。PC建造物のプレストレス力の減退を計算するときのように、コンクリートに作用する応力は常に一定ではありません。このような場合、実際の設計では、一定持続応力下で得られたクリープデータを用いて、コンクリートに作用する応力が変化する下でのクリープひずみを計算しなければいけません。ここで、クリープひずみと応力の線形仮定が大切な役割を果たします。数学的な証明は省きますが、コンクリートのクリープひずみが応力に対して線形であるということは、一定持続応力下では、コンクリートのクリープひずみが単位応力当たりのクリープひずみまたはクリープ係数で表され、応力が変化する下でのクリープひずみは、単位応力当たりのクリープひずみまたはクリープ係数を用いてクリープの重ね合わせ則によってその経時変化が計算できることを意味します。たとえば、クリープひずみによってプレストレス力が減退し、コンクリートに作用する応力が図-3の実線のように減少したとします。クリープの重ね合わせ則によってクリープひずみを計算するためには、まず、図-3の実線のように連続的に減少する応力が破線で表される階段状の応力変化に置き換えられるものとします。そして、図-3に示される記号を用いて、クリープの重ね合わせ則に基づく変動応力下のクリープひずみ ϵ_v が次式で計算されます。

$$\epsilon_v = \mu \epsilon_{ct}(t, t_0) \cdot \sigma_0 - \mu \epsilon_{ct}(t, t_1) \cdot \Delta \sigma_1 - \mu \epsilon_{ct}(t, t_2) \cdot \Delta \sigma_2 - \mu \epsilon_{ct}(t, t_3) \cdot \Delta \sigma_3 \dots (4)$$

ここに、 $\mu \epsilon_{ct}(t, t_1)$ は、材令 t_1 に初載荷を行ったコンクリートの材令 t における単位応力当たりのクリープひずみです。このように、クリープの重ね合わせ則を用

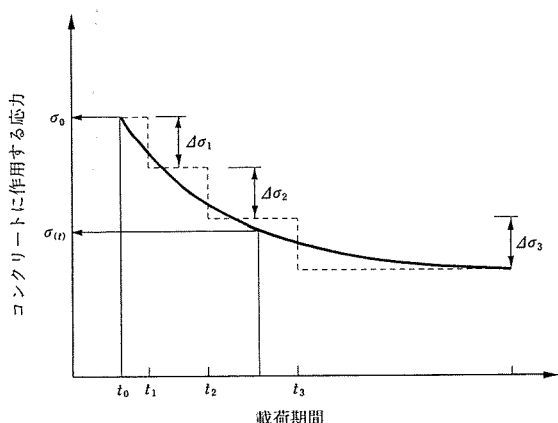


図-3 応力変化の例

いて、プレストレス力の減退などを計算するためには、どんなに少なくとも初載荷時材令が3種類以上異なる単位応力当たりのクリープひずみまたはクリープ係数が必要です。

しかし、実際の問題として、初載荷時材令が3種類以上異なる単位応力当たりのクリープひずみまたはクリープ係数を求めることは大変です。そこで、クリープの重ね合わせ則を簡便化した方法として、EM (Effective Modulus) 法 (以下、EM法と略す) が提案されています。EM法に基づけば、図-3に示される記号を用いて変動応力下のクリープひずみ ϵ_v は次式で計算されます。

$$\epsilon_v = \mu \epsilon_{ct}(t, t_0) \cdot \sigma(t) \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 $\sigma(t)$ は、材令 t においてコンクリートに作用する応力の大きさです。(5)式を見れば明らかなように、EM法の計算式は、非常に簡単な式です。計算に必要とする単位応力当たりのクリープひずみも、初載荷時材令のものだけで十分です。しかし、この方法では、応力の履歴が全く考慮されていません。従って、EM法を用いた計算値は、実際にコンクリートに作用する応力が変化する下で得られる観測値や重ね合わせ則に基づく計算値には一致しません。とくに、プレストレス力が減退する場合のように、コンクリートに作用する応力が減少する場合のクリープひずみの計算値は、実際の値よりも必ず小さめの値となります。

そこで、EM法の計算の簡便性とクリープの重ね合わせ則の計算精度とを同時に満たす手法を目指して、T.B (Troost-Bazand) 法 (以下、T.B法と略す) が開発されました。T.B法に基づけば、図-3に示される記号を用いて変動応力下のクリープひずみ ϵ_v は次式で計算されます。

$$\epsilon_v = \chi \cdot \mu \epsilon_{ct}(t, t_0) \cdot \sigma(t) \dots \dots \dots (6)$$

ここに、 χ は、エージング係数と呼ばれるものです。 χ は、本来、EM法に基づき求めた計算値が、クリープの重ね合わせ則に基づく計算値に一致するように定められる係数でした。しかし、種々の研究から、コンクリートに作用する応力が減少する下では、 $\chi=0.8$ のとき、重ね合わせ則に基づく計算値にほぼ一致するということが分かっています。

しかし、このように、EM法やT.B法を用いる場合においても、計算に必要な一定持続応力下のクリープひずみのデータは、初載荷時材令が標準の載荷開始時材令28日のものではなく、実際に初載荷が行われる材令のものです。PC構造物に初載荷を行う材令があらかじめ分かっている場合は、JISおよびASTMで決められた標準の載荷開始時材令にとられず、実際の初載荷時材令において実験を開始すべきです。

2.3 データの整理

クリープ試験結果を図示する場合には、一般に、片対数方眼紙がよく用いられます。縦軸に単位応力当たりのクリープひずみまたはクリープ係数をとり、横軸に載荷後の経過材令 (日数) をとります。そして、クリープの経時変化は、(7)式および(8)式に示される対数式を用いて回帰します。

$$\mu \epsilon_{ct} = A \log t + B \dots \dots \dots (7)$$

または、

$$\phi_t = A \log t + B \dots \dots \dots (8)$$

ここに、 t : 載荷後の経過材令 (日), A, B, A' および B' : 実験結果から得られる定数です。

3 乾燥収縮試験

3.1 概 説

乾燥収縮は、コンクリート中の小さな空隙内にある水分が蒸発して縮む現象をいいます。一般に、乾燥開始後1年間に生じる乾燥収縮ひずみの大きさは、屋外で100~300 μ 、雨のかからない室内では、500 μ 程度といわれています。この大きさも、クリープと同様に、コンクリートの配合、環境の温度・湿度、供試体の形状寸法等によって影響を受けます。空気が乾燥していたり、コンクリート中に水分が多かったり、骨材量が少ないと、乾燥収縮ひずみは大きくなります。場合によっては、800~1000 μ の大きさに達することもあります。

コンクリートの乾燥収縮ひずみは、クリープひずみや熱ひずみと独立に生じるものとして扱われます。従って、コンクリートの総ひずみ ϵ_{at} は、(9)式に示されるように、クリープひずみ ϵ_{ct} 、乾燥収縮ひずみ ϵ_{st} 、熱ひずみ

◇講座◇

ϵ_n および弾性ひずみ ϵ_e の和によって表されます。

$$\epsilon_{at} = \epsilon_{ct} + \epsilon_{st} + \epsilon_n + \epsilon_e \dots\dots\dots(9)$$

コンクリートの乾燥収縮ひずみの主な原因は、コンクリート中の水分が外気中に逸散する乾燥に伴って生じる体積の縮小です。従って、部材断面が厚く、コンクリート断面の中心から乾燥面までの距離が長いほど、コンクリート中の水分が乾燥するのに要する時間が長くなりますから、乾燥収縮ひずみが最終値に達する時間も長くなります。また、乾燥面に近いほど、乾燥が早く進みますから、乾燥面に近いほど、断面の中心部よりも乾燥収縮ひずみは早く最終値に近づきます。このとき、断面は、平面を保持しようとし、乾燥面には引っ張り応力が生じ、断面内部には圧縮応力が生じるのです。一般の鉄筋コンクリート構造物では、乾燥収縮ひずみによる応力分布によって構造物の表面にひび割れが生じ、その影響が大きな問題となります。ところが、PC構造物では、図-4に示されるように、プレストレス力によって、乾燥収縮ひずみによる引っ張り応力が解消され、構造物の表面に乾燥収縮ひずみによるひび割れが生じにくくなると一般にいられています。

試験によって得られる乾燥収縮ひずみのデータには、コンクリート中の水分の逸散によって生じる乾燥が原因となるものだけが含まれているわけではありません。コンクリートは、炭酸化や水和のような化学的な作用によっても収縮します。しかし、炭酸化は、コンクリート表面で外気に接する面から2~5mmの浅い深さで生じる現象です。収縮全体に炭酸化による収縮が及ぼす影響は、大きくありません。また、硬化収縮あるいは自己収縮と呼ばれる水和が原因となる収縮も、PC構造物に一般に使われる30MPa~50Mpaの強度のコンクリートでは問題となることはありません。自然界において、乾燥収縮と

化学的な収縮は全く異なるものです。しかし、構造工学的な見地からは、これらが区別されることはありません。一定温度下において、無載荷、無拘束状態にあるコンクリート供試体より測定された時間に依存するひずみが乾燥収縮ひずみと呼ばれています。

しかし、最近では、橋梁のスパンの長大化、断面の縮小化のため、圧縮強度が60MPaを超えるような高強度コンクリートも使用されています。このような高強度コンクリートにおいては、水和による収縮が無視できないほど大きくなる場合があります。高強度コンクリートでは、強度を高めるために、練り混ぜられる水の量に比べて大量のセメントが使用されます。従って、未水和の状態のまま打ち込まれるセメント粒子も、普通コンクリートに比べて多くなります。大量の未水和のセメント粒子は、硬化後も水和しようとし、この未水和のセメント粒子の水和に伴う収縮が自己収縮と呼ばれるものです。また、自己収縮が生じる際には、水和によってコンクリート中の遊離水が消失し、乾燥に似た現象が起こります。これによって、コンクリート表面から乾燥によって消失する水分量が減少します。高強度コンクリートでは、乾燥が原因となり生じる収縮に比べて水和によって生じる収縮の割合が高くなります。

高強度コンクリートの乾燥収縮ひずみにおいて、自己収縮を乾燥収縮ひずみと分けて考えるか、普通コンクリートのように区別せずに考えるかは、議論の分かれるところですが。現在でも、JCIをはじめ、各学・協会において活発な議論が繰り広げられています。自己収縮ひずみを乾燥収縮ひずみと分けて考える理由には、主に次の2つのことが挙げられます。

- ① 乾燥収縮ひずみに比べて、自己収縮ひずみは極めて早く終局値に達する。すなわち、それぞれの経時変化は、異なる関数によって表されなければならない。

- ② 図-5に示されるように、乾燥収縮ひずみによって生じるひずみ分布は、乾燥面に近いほど収縮が大きくなる放物線状である。しかし、自己収縮によって生じるひずみは、断面内の位置に関係なく生じるため、その分布は、フラット状になる。従って、コンクリート表面のひび割れが問題となるときのように収縮の断面内の分布が重要となるときは、その違いを明白にしなければいけない。

一方、自己収縮ひずみを乾燥収縮ひずみと区別する必要がないとする理由には、以下のことが挙げられます。収縮ひずみの及ぼす影響を実際の設計で考慮する際

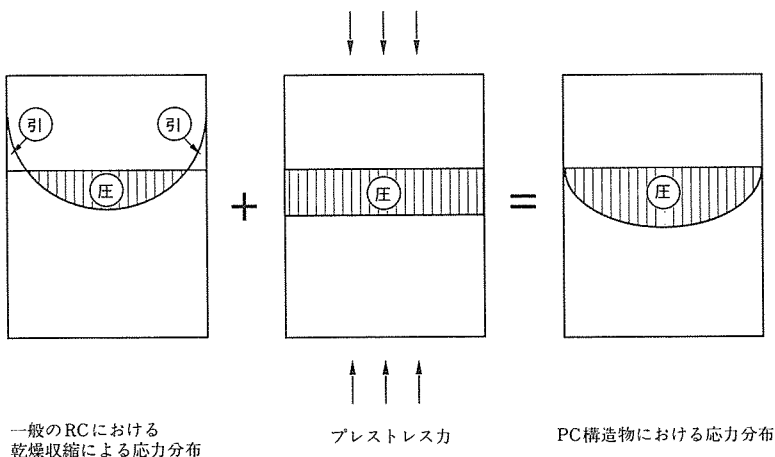
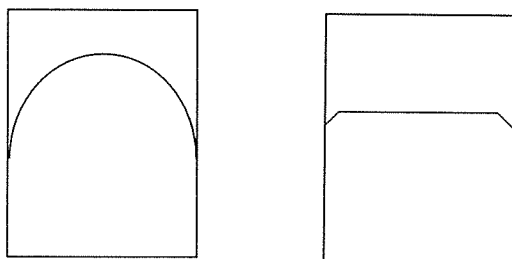


図-4 RCとPCにおける乾燥収縮ひずみによる応力分布

には、各々のメカニズムによってどれだけの収縮が生じるかではなく、トータルとしてどれだけの量が生じるかということが重要である。クリープにおいても、その生成機構を考えれば、水分の移動に関係なく生じる基本クリープと水分の移動に伴って生じる乾燥クリープに分けて考えなければならない。しかし、実際の設計に用いられるクリープひずみは、「基本クリープと乾燥クリープが同時に生じる下で測定されたものが用いられており、実用上、そのことが問題となることは少ない」と、いうものです。

自己収縮ひずみの取り扱いについては、今後の新たな研究成果や実際の設計に携わっている技術者の意見等を参考に、学・協会における活発な議論をとおして、より信頼性が高く、取り扱いやすい指針が決められることでしょう。

“乾燥収縮測定”という表題は、現時点では不適當なものかもしれません。従って、次節の試験方法では、乾燥収縮ひずみまたは自己収縮ひずみにとらわれず、一定温度下で、無載荷・無拘束の供試体の長さ変化の測定方法について述べたいと思います。



乾燥収縮ひずみ分布
自己収縮ひずみ分布
図-5 乾燥収縮ひずみ分布と自己収縮ひずみ分布

3.2 試験方法

コンクリートおよびモルタルの長さ変化を測定することを目的とする試験に関連する規格には、JIS A 1129（モルタルおよびコンクリートの長さ変化試験方法）と ASTM C-341（セメントモルタルやコンクリートから切り出した供試体の長さ変化測定方法）があります。ここでは、とくにJISの方法について説明します。

供試体の長さ変化を測定する方法としては、コンパレータ法、コンタクトゲージ法および、ダイヤルゲージ法があります。コンパレータ法およびコンタクトゲージ法では、供試体の側表面の標線または標点間の距離が測定されます。一方、ダイヤルゲージ法では、供試体の断面中心線の長さ変化が測定されます。

コンパレータ法とは、図-6に示すように、2個の顕微鏡を有する装置で、供試体表面に刻まれた2本の標線間の距離を計測し、長さ変化を求める方法です。このよう

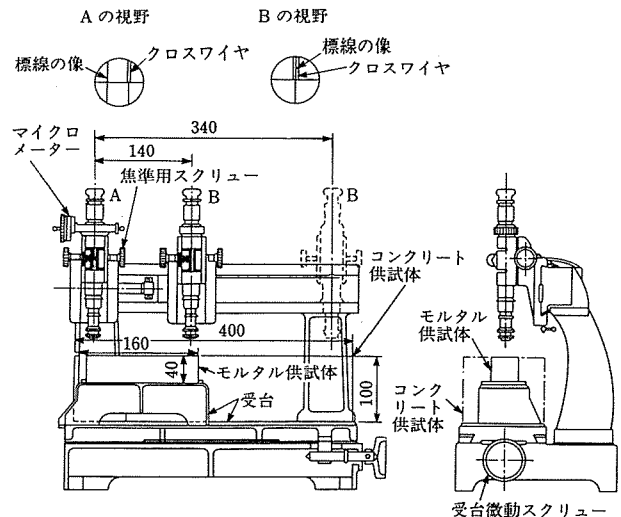


図-6 コンパレータ法の測定器の一例

な測定を可能にするためには、2個の顕微鏡のうち、1つは最小目盛が0.001~0.005mmの接眼マイクロメータを備えた顕微鏡で、他は倍率30~100で乳色ガラスの刻線の鮮明な像を得ることができる顕微鏡でなければなりません。極めて大がかりな測定装置です。

コンタクトゲージ法では、金属製のゲージプラグを供試体に埋め込むか、または貼り付けて長さ変化を測定するための標点とします。この標点間の距離を、図-7に示されるフリッツステーガー押当て式ひずみ計や図-8に示されるホイットモア式ひずみ計を用いて測定します。

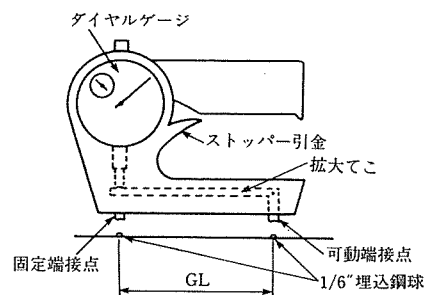


図-7 フリッツステーガー押当て式ひずみ計

ダイヤルゲージ法では、供試体の両端に埋め込まれたゲージプラグを標点とします。測定には、写真-1に示されるような装置を用います。台に固定された測定端子の上に、供試体に埋め込まれたプラグの片方を置きます。ダイヤルゲージからのびるもう一方の測定端子で供試体を挟み、供試体を測定器にセットします。このときのダイヤルゲージの目盛を読み取ることによって、長さ変化が測定されます。

JISで定められている供試体寸法の標準は、モルタルで4×4×16cm、コンクリートで10×10×40cmの角柱供試体です。

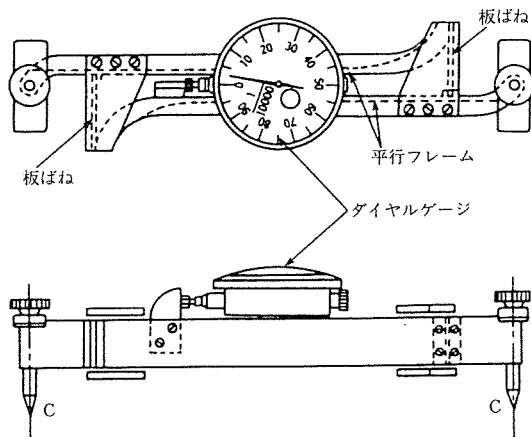


図-8 ホイトモアひずみ計

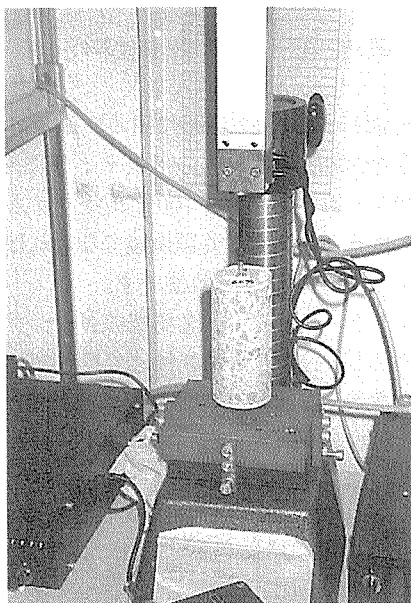


写真-1 ダイヤルゲージ法

あらかじめ設定した基準となる標線または標点間の距離のことを基長といいます。基長は、以下の2つの条件を満足しなければいけません。

- ① コンクリート供試体の場合、基長は粗骨材の最大寸法の4倍以上。
- ② コンパレータまたはダイヤルゲージの最小目盛が0.001 mmの場合には10cm以上、0.01mmの場合には20cm以上。

コンクリート供試体に設置された基長間の長さ変化を調べる前に、測定器（フリッツステーガー押当て式ひずみ計やホイトモア式ひずみ計）に用いられているのと同じ材質より作られた標準尺の基長間の長さ変化を調べなければいけません。標準尺の基長間の長さ変化とコ

ンクリート供試体の基長間の長さ変化によりコンクリートの長さ変化（ひずみ） ϵ は、次式で求められます。

$$\epsilon = \frac{(\chi_{01} - \chi_{02}) - (\chi_{i1} - \chi_{i2})}{L_0} \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 χ_{01} 、 χ_{02} ：それぞれ標準尺および供試体の基準とした時点での測定値、 χ_{i1} 、 χ_{i2} ：それぞれ標準尺および供試体の時点*i*における測定値、 L_0 ：基長です。標準尺の基長間の長さ変化は、測定器に含まれる誤差、あるいは、外気の微妙な温度変化などによって生じる測定器の狂いを調整するために計測されます。

4 おわりに

クリープひずみおよび乾燥収縮ひずみの測定は、長い時間と多くの労力を要します。従って、実際に試験を行うことは、非常に難しいことかもしれません。しかし、これらの時間に依存するひずみがPC構造物に及ぼす大きな影響を考えれば、信頼性の高いクリープひずみおよび乾燥収縮ひずみデータが必要であることはいうまでもありません。

現在、土木学会の308委員会などを中心に、コンクリートのクリープひずみおよび乾燥収縮ひずみのデータベース化が行われています。このプロジェクトが成功すれば、実験を行わなくても信頼性の高いデータが得られます。本講座では、とくに、JISとASTMに基づくクリープおよび乾燥収縮測定法について説明しました。データベース構築のプロジェクトの成功は、これらの試験方法等によって得られた信頼性の高いデータがどれだけ集まるかにかかっています。

測定条件の明らかな試験方法によって信頼性の高いデータが設計において用いられるとともに、それらのデータが将来の設計合理化のために、我々技術者の財産として蓄積されていくことを切望し、本講座を終了いたします。

参 考 文 献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書[平成6年版]基準編
- 2) 日本規格協会：JISハンドブック 土木、1995年版
- 3) 技報堂出版：コンクリート便覧[第二版]
- 4) 日本材料学会：新建設材料実験
- 5) Neville, Dilger, Brooks: CREEP OF PLAIN AND STRUCTURAL CONCRETE
- 6) F. Wittmann, P. Schwesinger: High Performance Concrete: Material Properties and Design

【1996年10月31日受付】