



Title	コンクリートの砂利化および熱応力試験を含めた引張試験法（後編）
Author(s)	森吉, 昭博
Citation	月刊建築仕上技術, 49(581), 94-97
Issue Date	2023-12
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/90944
Type	journal article
File Information	Moriyoshi_49_581_p94.pdf



コンクリートの砂利化および 熱応力試験を含めた引張試験法 (後編)

北海道大学名誉教授 森吉 昭博

目次

(前編)

1. まえがき
2. コンクリートの損傷
3. 大気中からコンクリートに浸透した有害な極微量の有機物
4. セメント内部の有機物
5. セメントの添加剤

6. セメントとしての接着材について

(後編)

7. コンクリート試料の引張試験
8. コンクリート試料の熱応力試験
9. セメントコンクリートの評価方法について
10. コンクリートの施工

※前編は11月号に掲載

7. コンクリート試料の引張試験

筆者の研究より、セメントコンクリートの引張り強度は $15\text{kg}/\text{cm}^2$ 、引張の破壊ひずみは 100×10^{-6} であり、熱応力破壊は両端が拘束されると温度差 5°C で破壊した。この破壊はマイクロフォーカスCTスキャナーでも試料の碎石の周りでコンクリートの試料が破壊していることが確認されたため、この試験はかなり信頼性が高いと思われる。一般に市販の油圧制御装置やメカニカルな試験では試験機は破壊ひずみが大きい金属材料の試験用として開発され、市販されている。このため、コンクリートのような大変壊れやすく、破壊ひずみが小さい物質の引張強度等をこの試験機で求めることは不可能である。このため筆者は ± 10 トンのアナログタイプの電気油圧サーボ型の装置(Instron製)で、通常の変形制御は $\pm 0.03\text{mm}$ であったのを改造した。これの変形制御は $\pm 0.001\text{mm}$ ($1\mu\text{m}$)にできるデジタル制御装置(インテスコ製)でInstronの油圧制御装置を2段階制御とし、最小変形量は $\pm 1\mu\text{m}$ 単位でスラストを上下に移動可能な装置)に改造した。引張試験用の矩形のコンクリート試料($2.5 \times 2.5 \times 10\text{cm}$)の両端は特殊な鋼製治具とエポキシ系接着剤で接着した。この鋼製治具の付いたコンクリート試料を使って、試料の両側にテイパの付いた図1に示す「治具2」を接着した。コンクリート試料の上部は油圧装置と荷重計および試料固定装置が一体となった固定されている油圧装置に繋がって、コンクリート試料の下部は試料固定装置と油圧装置の移動可能なスラストに繋がっている。

熱応力試験のように試料の温度を変化させる場合、2つ割りの厚さ 5mm の亚克力製の小型水槽(外部循環)を利用した。この水槽はコンクリート試料と下部の試料固定装置が水槽の内部に入っており、Haakeのメタノールの大きな低温水槽の外部循環装置とホースを使って、温度制御した大きなHaakeの低温水槽のメタノールを小型水槽に循環し、小型水槽の温度を $\pm 0.1^\circ\text{C}$ に制御した。

この改良したデジタル製の油圧装置(インテスコ製)の本体に固定されたコンクリート試料の上部の鋼製の固定装置(図1)とこのデジタル制御装置とコンクリート試料下部の微量な動きが可能な油圧制御装置のスラストを使い、コンクリートの引張試験および熱応力試験(引張試験)を行った。

コンクリート試料の試料固定装置と油圧制御装置を用い、コンクリートの上部および下部を固定する方法は以下のとおりである。

図1は上端に「治具2」の付いたコンクリート試料($2.5 \times 2.5 \times 10\text{cm}$)を固定された油圧制御器に取り付けるための方法、および試料固定装置の鋼製治具および固定されたコンクリート試料の油圧制御装置の本体への取り付け方を示す。ここでは上部の固定された油圧制御装置と荷重計およびコンクリートの試料固定装置のすべてが直列になって、固定された油圧制御装置にコンクリート試料が強固に固定される。コンクリート試料の下部も図1と同じような上部と同じ試料の鋼製の固定装置(試料固定装置)がある。

コンクリート試料の両端部に接着する鋼製の「治具2」は予め、石粉入りの強力な接着力となるエポキシ系接着

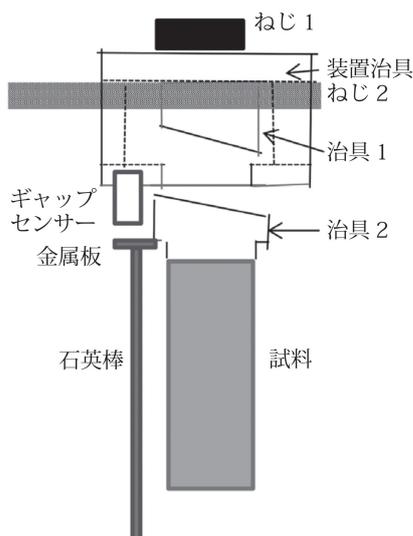


図1 コンクリート試料の固定治具(上部)

剤でコンクリート試料の両端部に接着しておく。

図1の「ねじ2」は可動の「治具1」であり、「治具1」の内部は「ねじ2」と同じピッチで内部にねじが切られているため、「治具1」は「ねじ2」を回転すると「治具1」は左右に移動する。このため、雌ネジの「治具1」の内部は「ねじ2」と同じねじ溝が切られているおり、鋼製の「ねじ2」は「治具1」を貫通している。

コンクリート試料の両端部に「治具2」を接着したコンクリート試料の固定法は以下のとおりである。

試料固定装置内の「治具1」の下部のテイパ部とコンクリート試料の上部の「治具2」のテイパ部が互いに擦り合うようにコンクリート試料を「試料固定装置」の中に嵌め込む。その後「ねじ2」を回すと、「ねじ2」の動きで「治具1」が左右に移動する。この「治具1」の動きでコンクリート試料は「試料固定装置」の中で、油圧制御装置の上部に強固に固定できる。その後、コンクリート試料の両端部のテイパの付いた治具を鋼製の「試料固定装置」の両端部にある鋼製の「ねじ2」を回して、コンクリート試料を上端と下端の両方の「治具2」を「試料固定装置」を使ってコンクリート試料を油圧制御装置に強固に固定する。

コンクリート試料の上部が固定されている油圧制御装置に固定されると、コンクリート試料の下部も上部と同じように試料固定装置を使って、油圧制御装置の可動できる油圧制御装置の下部の油圧制御装置のスラストに下部のコンクリート試料を固定する。

この下部のコンクリート試料をスラストに固定するとき、油圧制御装置の荷重が変化すると、その変化を消去するため、デジタル製の油圧制御器(スラスト)は極微量に上下に移動させ、油圧装置の荷重計の荷重値を0の

レベルにする。

試料固定時、荷重計や試料固定装置のガタを補正するため、以下の鋼製試料を使った。

ここではコンクリート試料の両端部が鋼製「治具2」で接着されたと同じ形状の鋼製試料(2.5×2.5×10cm)の鋼製試料でこのコンクリート試料と同じように両端部に鋼製「治具2」が2つとも「治具2」と鋼製試料(2.5×2.5×10cm)が一体となった鋼製の「標準試料」を使用した。

この「標準試料」を使って、荷重計(共和電業製:LCH-1000、引張圧縮両用、容量:±10ton)、治具、フレーム等を含めたすべての荷重—変形量曲線を測定し、これらの荷重—変形曲線を用いて、コンクリート試料の「引張試験」の変形量(ガタ)を補正する。通常市販されている荷重計の内部はひずみゲージを利用しているため、荷重は荷重計の中の金属がひずまないと(変形しないと)荷重計として動作しない。ここでは市販されていた荷重計の変形量が1番小さな荷重計を用いた。この装置では図1のギャップセンサーを使って、荷重計、治具の動きおよび油圧装置のすべての変形量をモニタしながらコンクリート試料はこの図1の「試料固定装置」で油圧制御装置に強固に固定する。

一般にこのような引張試験で用いる荷重計の変形量が公式に公表している製造メーカーは極めて限られている。このため、本実験装置は極めて精度の高い引張試験となっていると思われる。

この証拠として、コンクリート試料の破壊現象は試料両端の治具の付近で剥がれることなく、コンクリート試料はいつもほぼ中央部で破壊した。試料の両端部でコンクリート試料が破壊するのは試料の両端部に応力集中が生じているためである。

コンクリート試料および鋼製の「標準試料」の引張試験や熱応力試験時の温度や荷重変化時のガタは以下のように消去した。

試料間の変形量の変化は±0.001mm測定が可能な非接触型のギャップセンサーの変位計(うず電流タイプ)を試料の左右に石英棒を介して、2箇所に取り付け(図1参照)、この変化を常時データメモリーで測定し、この2箇所の平均値を試料の変形量とした。

荷重—時間曲線の測定は100Hzの2ch(荷重と変形)のウェーブメモリー装置を使用し、実験の載荷速度はデータの取り込みの速度等を考慮して、装置の引張り速度は0.043mm/secとした。

これより早い速度で引張り試験を行うと、取得したデータのポイントが少なく、精度上問題となるためこの速度とした。

コンクリート試料の両端の鋼製の「治具2」の接着方法は以下のとおりである。

コンクリート試料(2.5×2.5×10cm)の両端(2.5×2.5cm)に接着する鋼製の「治具2 : 2.5×2.5cm」は木製の型枠を作成し、その型枠の上にコンクリート試料と両側の鋼製の「治具2」にエポキシ系接着剤を両面の接着面(コンクリート試料(2.5×2.5cm), 治具2(2.5×2.5cm))に塗布した。その後、この試料の両側の鋼製の「治具2」を挟み(工作用クランプ)、コンクリート試料と鋼製の「治具2」を圧縮するようにクランプのネジを回してコンクリート試料と「治具2」が一体となるようにして、コンクリート試料と両側の「治具2」を接着した。このとき、鋼製の「治具2」とコンクリート試料の中心が合うように心がけた。エポキシ系接着剤の養生時間は常温で24時間以上とした。

コンクリートの引張り試験は常温で実験するため、コンクリート試料を覆う以下のようなアクリル製の小型水槽は使用しない。

コンクリート試料の大きさは2.5×2.5×10cmと比較的小さく、現場採取のコンクリートでは最大粒径が40mmとなるが、試料は6面ともダイヤモンドカッターで精度良く切断する。この方法では碎石の大きさが最大20mmのコンクリートでも両者の強度に大きな差はなかった。

8. コンクリート試料の熱応力試験

通常に市販されている最良の水槽の温度精度はカタログ(Haake, N3T)では-10℃で±0.1と書かれているだけである。しかし、熱応力試験では常温から-30℃近くまで一定冷却速度(-30℃/h)で冷却する必要がある。このため、外部循環が可能な大型水槽でもこのすべての温度範囲でどの温度でも±0.1℃の温度が制御されていることが実験の最前提となる。これはアスファルト混合物(2.5×2.5×25cm)の3点支持の単純曲げ試験(載荷速度:0.5mm/分)の実験中に、小型の別のHaakeの水槽が故障により、急に水温が0.5℃変化した。このときの曲げ試験ではこの温度変化が明確に現れた。これより水槽温度は厳しく制御することが重要であることを認識した。

水槽中のメタノールの温度精度を確認するため、外部循環が可能な水槽(容量24L(Haake製:2段階冷却方式のN3T水槽)の内部を3層に分けて、かついろいろな箇所温度変化したときのメタノール温度を1/100℃計(Chino製)で測定した。

この結果、この大型の低温水槽(Haake, N3T)の冷却

特性はほぼ条件を満足していること、また実験で行う-30℃/hの冷却速度で小型水槽内のメタノールの温度勾配温度の正確に比例して、冷却速度がほぼ直線であることを確認してから熱応力試験を実施した。またこの熱応力試験では鋼製治具や荷重計が温度低下に伴い収縮し、変形するため、この温度—収縮量曲線は鋼製の「標準試料」で求め、以下の熱応力試験では温度毎にこの収縮に伴うこれらの収縮量を±0.001mmの制御が可能な制御機でこの変形が絶えず0となるよう油圧制御装置の下部のスラストの動きで温度変化によるガタを補正しながら実験を行った。

試料間の変形量は特別に製作した図1に示す石英製の細い棒を溶媒中で試料の両側に設置し、この棒の長さ変化をギャップセンサーで見ながら、油圧制御装置の下部のスラストを上下に移動させた。

引張り試験同様にコンクリート試料は両端に鋼製の「治具2」が接着されたコンクリートを鋼製の試料の「試料固定装置」で油圧制御装置に強固に固定する。その後、コンクリート試料が隠れるような2つ割れのアクリル製の円筒型(半割れのアクリル水槽:直径:20cm、深さ:15cm)をコンクリート試料の外側に設置する。その後、大型の低温水槽(Haake製、N3T)の外部循環装置を利用し、この大型の低温水槽と2つ割れの小型の水槽を断熱したホースで繋ぎ、メタノールを循環させる。熱応力試験は20℃から始めるが、メタノールの温度が20℃になっていない場合、油圧装置に付属した荷重計の値が変化する。この温度変化によるコンクリート試料の荷重を消去するため、油圧制御装置の下部のスラストを上下に変化させ、この初期の熱応力を消去する。

熱応力試験中の温度変化により試料両端の治具や荷重計が変化する変形量は鋼製の「標準試料」を使って、校正曲線を作り、これを使って温度毎に変形量は補正する。

またセメントコンクリートの2.5×2.5×10cmの大きさの試料が-30℃/hの冷却速度で深部の中心部までほぼメタノール水槽と同じ温度かどうかは、コンクリートの試料中に熱電対を埋め込み、これを熱応力の試験中に確認した。この試料の大きさ(2.5×2.5×10cm)でコンクリート試料内部の温度が水槽のメタノールの温度差がないこともチェックした。試料の温度制御も空気制御であれば、空気槽中の温度むらを1℃未満とすることは空気が塊で移動するため不可能である。このため、この空気制御の恒温槽では空気の塊を砕きながら制御することが要求されるが、0.1℃の温度制御は空気では不可能である。このため、0.1℃の温度制御が可能な外循環方式の可能な大型の低温水槽(メタノール)を利用し、試料の容器の

小型水槽の温度の測定は1/100度計の温度計(CHINO製)を用いた。この外部循環方式の大型水槽は2段冷却方式であるため、最低温度は-30℃/hの冷却速度でも-50℃まで冷却可能となっている。

外部循環が可能な大型の低温水槽は熱応力試験本体の小型の水槽とホースで直結され、この外部循環のためのホースは断熱材で温度変化を避けるため覆い、半割れの亚克力製の小型水槽の温度を基準として採用した。

なお、実験水槽では低温の実験であるためメタノールを使用した。ときどき、このメタノールの比重を測定し、また正確なメタノールの冷却特性を確保するため、外部水槽および試料の冷却特性もすべて熱電対でモニタしながら、熱応力試験を行った。またメタノールのセメントコンクリートに対する損傷についても検討したが、この程度の実験時間内ではコンクリートの損傷は見当たらなかった。

また、セメントの劣化作用についても先に述べた有機物での劣化が早く、内部まで浸透するため、このような物質に対するセメントコンクリートの研究が必要と思われる。

9. セメントコンクリートの評価方法について

セメントコンクリートの評価方法は今までは表面から内部の損傷を推定し、これから損傷の程度を数字で表す方法が一般的である。これはアスファルト舗装で60年前に導入されていたPresent Serviceability Index (PSI)と基本的には同じ考え(コンセプト)である。この考えは初期値がある値まで供用中に落ちると、修繕すると元の値まで回復するという考えであり、この考えは劣化の曲線や修繕の程度や用いた修繕に使った試料の品質は全く考慮されていない想像の曲線である。

アスファルト舗装でも表面の変形や亀裂だけでは内部の損傷の程度が分からないため、今まではアスファルト試料の表面の変形量で評価していた。

しかし、アスファルト舗装は表面だけでなく、アスファルト混合物の内部の碎石の周りに生じるモルタル部のひずみが損傷の主な原因であることが判明した。これより、アスファルト舗装では表面から内部の損傷を推定しても全く異なったことであることが証明された。この結果、高温時に車両が走行すると車両表層より第2層目の基層の損傷が大きいとか、アスファルト処理層となるアスファルトの最下層での損傷が1番大きいとか、今までの常識が現場では通用しなくなった。

セメントコンクリートでも損傷をフェノールフタレンの塗布で判断し、この色を基準に損傷したかどうかを判定する研究が多いが、これはコンクリートの損傷を見ているのではなく、コンクリートが破壊した断面でのpHの変化を観察しているだけで、損傷を直接見ている訳ではない。

このため筆者はコンクリートのコアを採取して内部の亀裂や劣化を3次的に解析することを勧めている。これによれば、亀裂幅は現在試料の大きさにも依存するが、0.1mm以下の損傷(亀裂の幅、位置、形状)を3次的にすることが可能で、かつカラーで亀裂の3次元形状を求めることができるため、碎石の周りの複雑な亀裂も簡単に目で確認できる。また一般にはコンクリートの亀裂が完全に分離し、2つに分かれていると思っいる方が多いが、これによるとコンクリートにはネットメロンの表面のような亀裂が生じている。すなわち亀裂は線としては連続しているものの、面的な亀裂ではないことがCTの解析から判明した。

また、モルタル部の劣化現象はCTを使うと簡単に劣化の程度を局所的なピンポイントから面的な状態までの評価が数字で表現することが可能となった。

10. コンクリートの施工

セメントコンクリートは強力なバイブレーター(転圧機)で転圧、施工するのが常識となっているが、昔は竹の棒でつつきながらコンクリートの転圧を行っていた。しかし、セメントは水を添加するとすぐ化学反応をするため、このような強力な転圧機やコンクリートを運搬するミキサー車で常時掻き混ぜていることがコンクリートの物性に悪さをしないとは言い切れない。むしろコンクリートの早い化学反応をこの混合でいずれも絶えず壊しているため、施工直後のコンクリートに多くの亀裂を発生させている可能性が考えられた。従来はこのような判定は不可能であったが、現在ではCTが発達したため、正確にこの影響も評価できると思われる。

また、先に述べた現在のコンクリートは硬化直後に多くの細かい亀裂が発生していることがCTの解析から明らかになったが、古いコンクリートではこのような細かい亀裂が見当たらない。従って、私はこの原因を明らかにすることがコンクリートの長寿命化への研究では急務であると思っている。