

論文 多孔体の水分拡散変形実験装置の開発

山本和範*¹・木全博聖*²・田邊忠顕*³

要旨：多孔体中における気体、液体の拡散現象を解明するために、水分拡散変形実験装置を開発した。セル内の中心部に多孔体を設置させ、その供試体を境界にして2分された上下2室のエネルギー水準を変えることにより拡散現象を生じさせるようにした。本研究においては、多孔体としてコンクリートを採用し、コンクリート中の水分移動現象を解明するための予備的実験を行った。

キーワード：水分移動、温度制御、湿度制御、変位制御

1. はじめに

コンクリートはマクロ的には緻密な材料と考えられているが、ミクロ的には空隙が多量に存在する多孔質材料である。その空隙を経て、外部から有害物質が進入し、コンクリート内部での水分移動によって拡散されて、補強材料の強度劣化が進行する。

水和によって生じたセメントゲルが水分を失うことによって、コンクリートの乾燥収縮やクリープが起こる。これも、コンクリート内部の水分移動によるものと考えられている。

また、コンクリート内部の水分移動に関連して、コンクリートの遮蔽的問題としてあげられるのが放射性廃棄物の処分問題である。放射性廃棄物は、コンクリートで固化した上でドラム缶詰めにして地中処分する。その時に、コンクリートの透水性や含水率分布が問題となる。

これら多くを踏まえると、コンクリート内部における水分移動の解析をしなければならないのだが、それほど容易ではなく、含水量を直接測定した例は過去にほとんど見受けられないのである。したがって、今までよりも詳細に水分移動メカニズムを把握しなければならない。

そこで本実験において、水分移動変形測定装置を開発した。このシステムでは、数種の条

件の下に放置したコンクリートの内部含水量分布を、相対湿度という物理量を用いることにより測定でき、さらには、内部湿度の測定と並行して、水分移動の影響によるコンクリートの変形測定も可能となるはずである。まずは、測定装置の性能を確かめるために各種の実験を行い、システムの性能を確保する方法を考察した。

2. 新しい装置の概要

図1に示すような多孔質材料水分拡散変形測定装置を開発した。

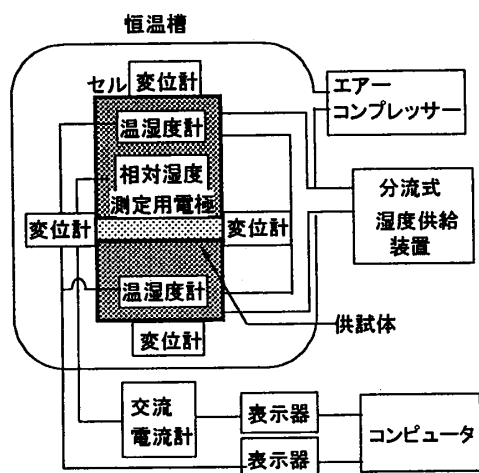
以下にこの装置で採用した多孔質材料内の水分移動測定と変形測定の方法を示す。

- ① 分流式湿度発生装置から、任意の温湿度の水蒸気を発生させる。
- ② エアーコンプレッサーによってつくられた空気の流れにより、恒温槽内に設置した、内径 200mm、高さ 250mm の円柱形のセルに水蒸気を送り込む。
- ③ セルの中心部に設置された直径 200mm の円盤型供試体の上下 2 面に水蒸気を接触させる。
- ④ 供試体内部の湿度を、相対湿度測定用ステンレス電極を用いて測定する。
- ⑤ 供試体の変位は、前後左右上下の 6 方向に

*1 名古屋大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 (学生会員)

*2 東急建設株式会社 工修 (正会員)

*3 名古屋大学教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)



図—1 水分拡散変形実験装置の概略図

取り付けられた変位センサーを用いて測定する。

- ⑥ セル内部の温湿度、供試体の内部湿度、変位のデータは、表示器に表示されるとともに、コンピュータに読み込まれる。

この装置では、多孔質体内の経時的な含水状態変化を非破壊で測定が可能となるはずである。また、水分移動だけでなく、その他の液体やガスの浸透測定もできるシステムとなっている。

多孔体内の水分移動測定の原理は、多孔質材料内にステンレス製電極を埋設し、回路に一定の電圧をかけることによって電流を流し、その抵抗を測定する。あらかじめ、その多孔質材料の内部湿度と抵抗値の関係を求めておけば、材料内部の湿度の推測が可能である。

モルタル中の水分移動測定や、コンクリートの変形測定を行う上で重要なのは、温度、湿度の条件であるが、これらを自由に变化させて発生させ、様々な条件を設定することができるようにした。特にシステムの温度管理は非常に重要である。温度変化は大きな湿度変化を生み出す。安定した湿度を送るためには温度管理は大切である。よって、供試体のおかれているセルを恒温槽内に設置し、セル内を一定の温度に保つことができるようにした。恒温槽は -99.9°C ～ 199.9°C まで設定可能である。

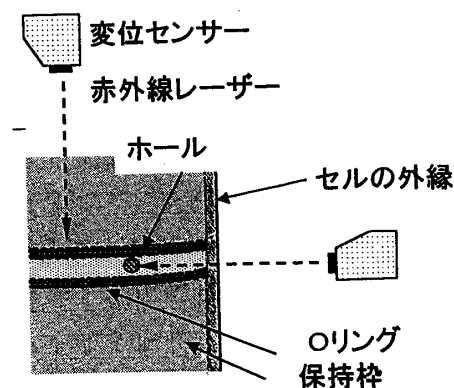
多孔質体の膨張、収縮といった変形は、セル

分流式湿度発生装置は、水蒸気のほかにも窒素ガス等も発生させることができるため、様々な気体を用いて拡散実験を行うことができるはずである。

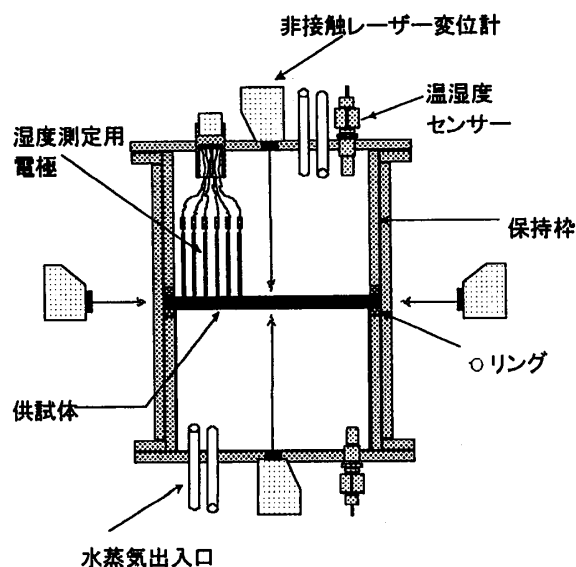
多孔質体の膨張、収縮といった変形は、セルの外部の6方向に設置した変位センサーによって測定する。供試体の拘束状態と、変位計の測定点の関係を図2に示す。

図2のように、変位センサーからの赤外線レーザーが各方向の1点を照射し、物体の位置をよみとるようになっている。

セルは本実験装置の中核といえる。セルの概略図を図3に示す。セルは内径200 mm、高さ200 mmの円筒形をしており、中心部に直径200 mmの円盤型の供試体が設置される。供試体と保持



図—2 リング付近の詳細図



図—3 セルの概略図

枠の接触部分には、セル内部の気密を保つようにゴム製のＯリングがはさみこまれている。供試体の厚さは 5 mm～50 mm まで変えることができるので、それに合わせて長さの異なる保持枠を制作すれば、いろいろな厚みの供試体を実験することができるはずである。

供試体を境界にして 2 分された上下 2 室のエネルギー水準を変えることにより、水分の拡散問題となるわけである。セル内部の温度、湿度は、セルの上部、下部に取り付けられた温湿度センサーで検知される。下部においては、水蒸気の凝結により温湿度センサーが水に浸かり故障する場合があるので、セル内部の底面よりも少し高い位置に浮かせて取り付けるようにした。

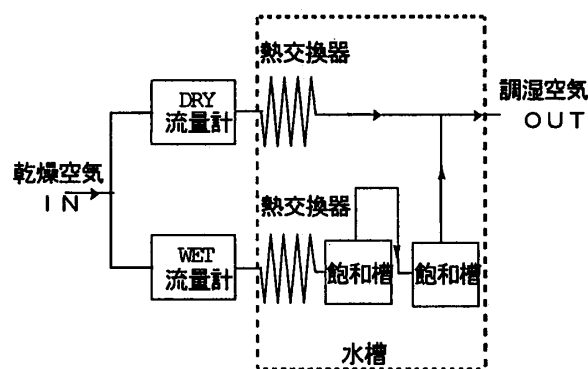
3. 湿度発生装置のメカニズム、およびセル内の湿度制御の精度

3.1 分流式湿度発生装置の原理

分流式湿度発生装置の概略図を図 4 に示す。

分流式の原理は、圧空乾燥用デシケーターによりつくられた湿度 0% の乾燥空気を二分し、一方はそのまま乾燥空気として、他方は飽和槽を通し、湿度 100% の飽和湿り空気をつくり、混合し、試験槽に供給する。この乾燥空気と飽和湿り空気との混合の割合を流量比によって調節し、希望する湿度を得る方法である。圧空乾燥用デシケーターは、いわば乾燥剤の役目をする。

また、温度変化は湿度変化に敏感に影響する。温度にもよるが、1℃変化すると 10% 以上の湿度変化が起こる場合があるので、水槽内の循環水



図—4 分流式湿度発生装置の概略図

によって湿度発生装置を正確に温度コントロールし、その温度における湿度を発生させるようにした。

3.2 セル内の湿度制御

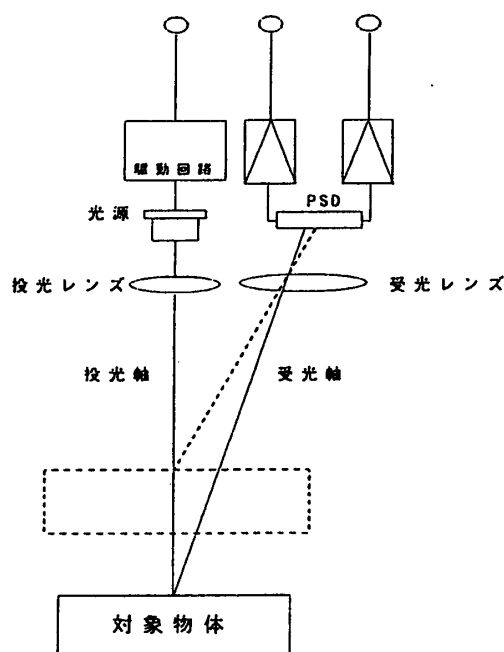
発生湿度の温度は、供試体容器の温度よりも低い温度に設定しなければならない。供試体温度より発生湿度の温度を高くすると、水蒸気の結露が確認され、設定した湿度は正確に供給されなかった。

同じ理由で、湿度発生装置とセルとをつなぐ配管に温度の低い部分があると、水蒸気の結露が生じ、コントロールされた湿度は供試体まで到達しないことがわかった。それを防ぐために配管各部にヒーターを取り付けて、温度を 1℃単位で制御できるようにした。配管の温度は常に高めに設定しておかなければならないことがわかった。

また、湿度発生器の温度をセル内の温度よりも低く設定することにより、温度の違いによる湿度の差が生じることもわかった。

したがって、今後の実験における湿度制御の注意点は、下記のようにであることが判明した。

- ① 発生湿度の温度は、供試体の温度よりも低く設定する。



図—5 変位センサーの光学系

- ② 水蒸気の結露を防ぐため、発生装置とセルを結んでいる配管の温度は高めに設定する。
- ③ 発生装置とセルの温度差による実際の湿度の違いを考えて、発生湿度をコントロールする。

4. 変位センサーの変位制御、およびその性能実験

4.1 変位センサーの測定原理

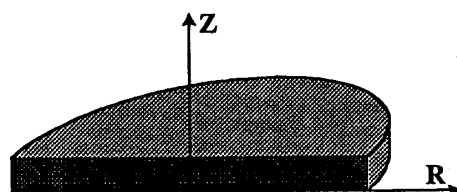
変位の測定には高精度レーザー変位センサーを使用している。これは、物体までの距離の変化を測長するセンサーであり、その原理を図 5 に示す。

光源から発せられる光がレンズにより集光されて物体に照射され、その物体からの反射光を、受光レンズにより 1 次元の位置検出素子 (PSD) 上に集光する。物体の位置によって PSD 上の結像位置が異なってくるため、PSD の 2 つの出力のバランスが変化する。その変化量を計算することにより変位が測定できるのである。光源は赤外半導体レーザーを使用。測定範囲は $\pm 10\text{mm}$ 、最小目盛は $1/1000\text{ mm}$ となっている。変位の変化量は、測定開始時の位置を基準にして算出する。

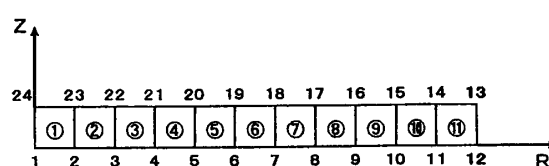
4.2 変位測定の精度

セル内部は供試体を境界にして 2 分されている。供試体は、上下に 2 つの保持枠で固定されていて、さらにゴム製のリングに接触させることにより、上下 2 室を完全に分割し、それぞれの気密を保つようになっている。そのため、リングが供試体の変形に及ぼす影響について前もって評価しておく必要がある。そこで、供試体を固定しているリングと保持枠が、供試体の体積変化をどのくらい拘束しているかについての解析を行った。

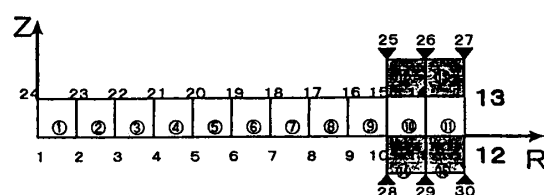
セルは回転対称の 3 次元体であるので、軸対称要素として取り扱い、有限要素法を適用することによって変形解析を行った。¹⁾ その解析手法を図 6～図 8 に示す。供試体は硬化コンク



図—6 供試体の切断面



図—7 切断面内のメッシュ (拘束なし)



図—8 切断面内のメッシュ (拘束あり)

リートとし、そのヤング率を $2.1 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ とした。

この解析結果によると、リングと保持枠の拘束がある場合とない場合とでは、約 3～4% のひずみの差が生じている事がわかった。すなわち、それらの拘束条件を踏まえると、約 3～4% の誤差の範囲内で変位測定が可能であることが判明した。

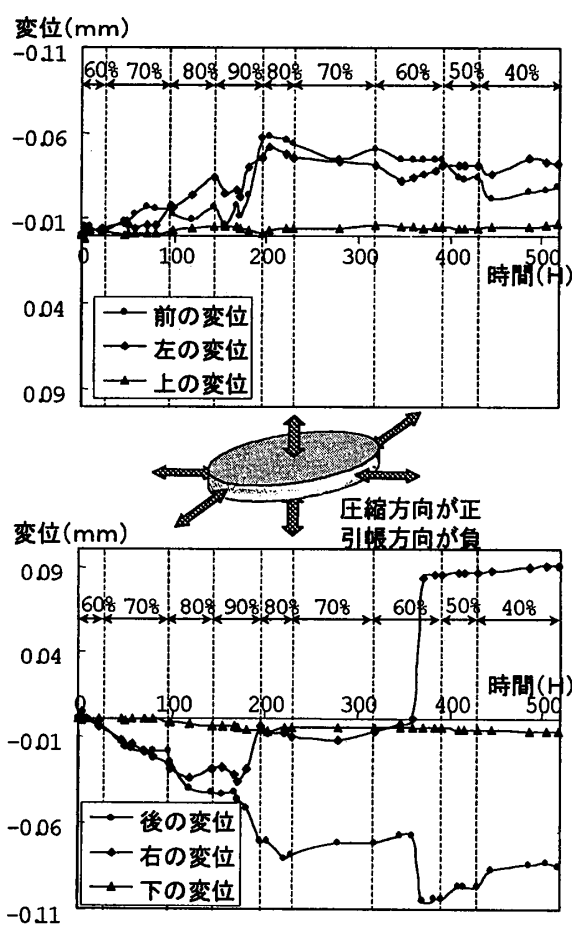
4.3 実験試験片による変位測定

本実験では、変位測定の性能を確かめるため、はじめに厚さ 10mm のコンクリート供試体での変位測定を行った。供試体形状は直径 200mm、高さ (厚さ) 10mm の円柱形で、コンクリートの配合は骨材最大寸法 5mm、水セメント比 0.65,

砂セメント比4とした。セル内部の温度は一定にして湿度のみを変化させることにより、コンクリート供試体の乾燥収縮、湿潤膨張といった傾向をとらえることができるかどうかの確認を行った。コンクリート供試体の変位測定結果を図9に示す。

グラフを見てわかるように、どの方向においても乾燥収縮、湿潤膨張の傾向はみられなかった。一般的に、コンクリート製造後、水中養生すると $10 \sim 20 \times 10^{-6}$ 程度膨張し、また、コンクリートを完全に乾燥させると $50 \sim 60 \times 10^{-6}$ 程度、収縮すると考えられる。しかし、後ろの変位では最大 0.104mm の変位、ひずみにして 520×10^{-6} が確認され、想定される数値とはほど遠い値となった。リングと保持枠が供試体の変形を3~4%拘束していることを考慮しても、実際の変形はもっと大きくなってしまう。

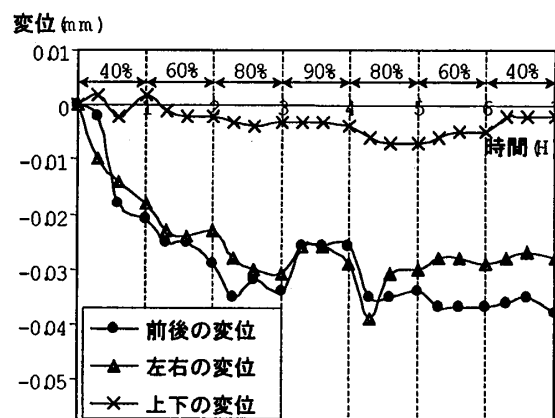
そこでさらなる変位センサーの性能確認の



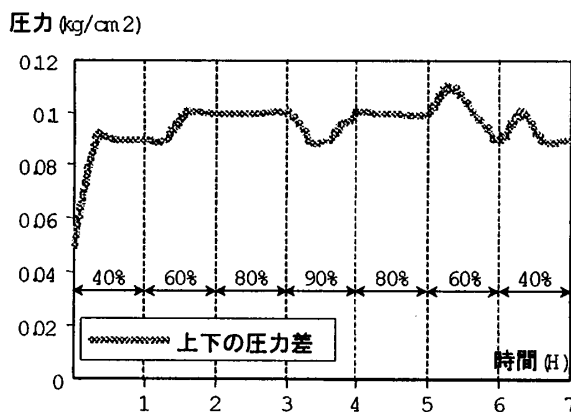
図—9 コンクリート供試体変位測定結果

ため、厚さ 10 mm 直径 200 mm のアルミニウム供試体で変位測定を試みた。図 10 に測定結果を示す。グラフは、供試体の剛体変形を考慮し、前後、左右、上下の3方向に求めることとした。アルミニウムは、湿度変化による体積変化は現実にはあり得ない現象であるにもかかわらず、かなり大きな変動が見られた。

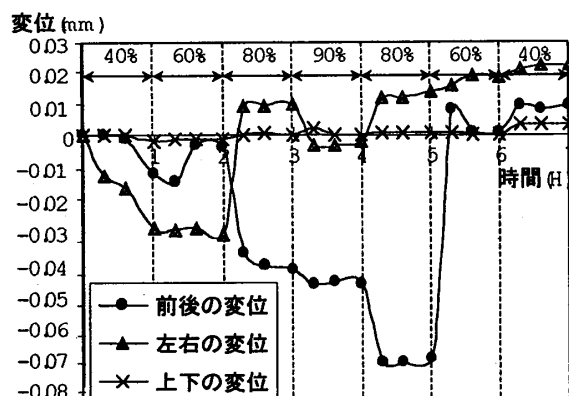
これについての原因を解明すべく、次のような実験を試みた。まずは、供試体によって分けられているセル内の上下2室の微妙な湿度差、温度差によって圧力の差が生じる。それにより大気の流れが形成されて供試体の変動してしまうのではないのかと思われた。そこで、セルの上下2室に圧力計を取り付け、2室の圧力差を測定すると同時に変形測定も行った。その結果を図 11 に示す。次に考えられたことは、コンクリート供試体の表面は非常に粗く、変位センサーのレーザーが乱反射を起こしてしまう。し



図—10 アルミニウム供試体変位測定結果



図—11 アルミニウム供試体圧力測定結果



図—12 表面研磨アルミ供試体変位測定結果

たがって、誤ったデータを読みとっているのではないのかということである。その乱反射を防ぐため、表面をよく研磨したアルミニウム供試体を使って変位測定を行ってみた。その結果を図 12 に示す。

しかし、これらの実験結果からでは、湿度変化に伴った変形に関する、はっきりとした原因は解決できなかった。

その他に行った実験としては、アルミニウム供試体にひずみゲージを取り付け、実際に変形を測定し、変位センサーで測定される数値と比較してみた。しかし、実験値ほど大きなひずみは計測されなかった。

また、高湿度になると、供試体表面には目に見えないくらいの、ほんのごく薄い水蒸気の膜が形成され、その厚さの分をセンサーが読み取っているのではないかと思い、アルミニウム供試体の 6 方向にシリコングリースを塗り、水分を付着させないようにした。そのようにして行った実験においても、同じような結果が得られた。

5. 結論

本研究においては、多孔体の水分移動とそれに関連する体積変化をより詳細に解明するため、実験装置を様々な試行錯誤の上で開発し、その性能を確かめるための予備的実験をいくつか行った。以下に、その結論を述べる。

- ① 変形測定にまだ解決できない問題が残ってしまった。現時点においては、次のような原因

が考えられる。変位センサーは供試体に非接触であり、半導体レーザーによって間接的に供試体の変形測定がなされる。セル内は様々な湿度、温度状態に設定されていて、その空気組成による屈折率の変化によってレーザーが乱れてしまっているのではないかということである。しかしその他にも、高湿度における大きな変位の原因はあるはずであり、追求していくべきである。

- ② 新しい実験装置を用いてコンクリート中の水分移動測定を行うにあたり、湿度の安定供給や、システム全体の温度管理等の基本的かつ重要な部分の有効性を確認することができた。これにより、今後、供試体の厚さや電極形状、コンクリート供試体の配合などを様々に変えて水分移動測定を行うことができそうである。

参考文献

- 1) 山田宣生、鈴木信夫：CAL-90/SSTAN で解く、有限要素構造解析、丸善株式会社