

セメント硬化体の乾燥収縮及び クリープ試験用薄肉円筒供試体

沼尾達弥*, 三橋博三**, 福澤公夫*, 川上 浩***

(平成2年8月31日受理)

A Thin-Wall Cement Paste and Mortar Cylinder for Shrinkage and Creep Tests.

Tatsuya NUMAO*, Hirozo MIHASHI** Kimio FUKUZAWA* and Hiroshi KAWAKAMI***

ABSTRACT—Solid specimens have been usually used for shrinkage tests. In such cases, a hygral gradient is built up in a specimen immediately after the drying process begins and it exists for a long time. Consequently, the change in measured length under this condition involves the influence of internal stress distribution. The above mentioned effects, however, must be eliminated in order to estimate the real material properties of drying shrinkage directly by means of experimental studies. For this purpose the specimen must be as thin as possible so that an equilibrium condition may be achieved in a short time and hygral gradient may not exist through the drying process.

In this paper, a production technique of cylindrical specimens with the thickness of 1.0mm is described and such the mechanical properties of produced specimens as sorption isotherm and porosity are discussed. Furthermore, one example of experimental result of shrinkage tests by using the specimen are shown.

1. はじめに

コンクリートの様な細孔を有する材料に於いては、材料中の水分の挙動が、弾性係数、クリープ挙動や乾燥収縮等その力学的挙動に大きな影響を及ぼす事が知られている¹⁾。特に乾燥収縮は、コンクリート中に含まれる水分が時間の経過と共に空中に散逸する事により直接引き起こされる現象である。それ故、水分の移動と乾燥収縮変形の関係を定量化することは、コンクリートの力学的特性を考える上で重要な課題である。コンクリートのクリープや乾燥収縮に関する基本理

論やモデルは既に多くの研究者によって報告されている²⁾。しかし、それらを用いた解析的研究は、その物理的パラメータの定量化がなされていない為に、誤差が大きく十分に現象を表すには至っていない。

物理的パラメータの定量化を困難にしている原因としては、その機構が著しく複雑である事と共に、従来行われているコンクリート円柱供試体による乾燥収縮実験では、コンクリート内部の湿度分布が一定になるまでに長期間を要する事が考えられる。更に、乾燥過程に於ける湿度勾配によって供試体内に内部応力が生じ、著しい場合は供試体表面にひび割れが発生して、

*茨城大学工学部建設工学科 (日立市中成沢町)

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ibaraki University, Hitachi 316, Japan.

**東北大学工学部建築学科 (仙台市青葉区)

Department of Architecture, Faculty of Engineering, Tohoku University, Sendai 980, Japan.

***三井建設㈱ (千代田区岩本町)

Mitsui Construction Co., Chiyodaku, Tokyo 101, Japan.

それらが乾燥収縮変形に影響を及ぼしている事があげられる。

それ故、パラメータを直接実験で求めるには、短期間で平衡状態に達し、しかも内部に湿度勾配の生じない程十分に薄い供試体を用いることが必要である。

筆者らは、セメントペースト及びモルタルを用いた厚さ1mm程度の薄肉円筒供試体を作製し、乾燥収縮変形に及ぼす水分移動の影響を研究する為に実験的検討を行っている。³⁾⁴⁾⁵⁾

本報告は、従来用いられている乾燥収縮試験用供試体にかわる物として、セメントペースト及びモルタル薄肉円筒供試体の作製方法の詳細について述べる。また、その物性について実験を行ったのでその一部を報告する。

2. 薄肉円筒供試体作製方法

2.1 供試体の配合及び形状

乾燥過程に於て、供試体内部に生じる湿度勾配の影響が無視できるほど小さい事、及び短期間のうちに供試体内部が外部環境と湿度平衡状態となる為には、厚さが1mm以下程度の供試体とする必要がある。コンクリートでそのように薄い供試体を作製することは困難である為、本研究ではセメントペースト及びモルタルを用いることとした。

使用した材料は、セメントとして、セメントペースト・モルタルとも日立セメント社製普通ポルトランドセメントを使用した。また、モルタルに使用した細骨材は豊浦標準砂である。

Table 1 Mix Proportion of Cement Paste

W/C	W (g)	C (g)
0.30	30.0	100.0
0.35	35.0	100.0
0.40	40.0	100.0

セメントペーストの水セメント比は、30%、35%、40%の3種類とした。その配合を表1に示す。また、モルタルの配合としては、水セメント比40%で一定として、砂セメント比(体積比)を1.2、0.8、0.4の3種

類を用いることとした。このモルタルの配合を表2に示す。

Table 2 Mix proportion of Cement Mortar

s/c	W/C	W (g)	C (g)	S (g)
1.2	0.40	40.0	100.0	99.12
0.8	0.40	40.0	100.0	66.08
0.4	0.40	40.0	100.0	33.04

Specific Gravity:

Normal Portland Cement 3.15
Toyoura Standard Sand 2.60

次にこの様な1mm程度の薄肉供試体の形状としては、平板型の供試体も考えられるが、座屈に対する抵抗性や自立性などクリープ試験のし易さ、及び軸対象回転体であり乾燥収縮の方向性が限られること等により円筒形の供試体とした。

また、円筒供試体の作製方法としては、遠心力による成形や円柱供試体からくり抜く方法等が考えられる。しかし、前者による方法は、成型時に水セメント比が変化する事や骨材の分離等による影響が生じる事、後者は、供試体厚さが薄い為、成型時に供試体への損傷が避けられない事等の問題点がある。そこで、これらの問題を考慮して、ここではペースト及びモルタルの打設時に押し出し成型する事により供試体を作製する方法を用いている。

尚、本実験で目標としたセメントペースト供試体寸法は、外径15mm、肉厚1mm、長さ100mmである。また、セメントモルタルについては、外径20mm、肉厚1mm、長さ100mmとした。

以下、セメントペースト・モルタルを用いた薄肉円筒供試体作製方法について述べる。

2.2 セメントペースト薄肉円筒供試体の作製

セメントペースト薄肉円筒供試体の作製にあたっては、Bazant[®]により報告されている型枠及び供試体作製方法を参考にした。

供試体作製に用いた型枠を図1及び写真1に示す。

この型枠は、外枠と芯によって構成されており、外枠と芯の間にペーストを挟み込み、余分なペーストを

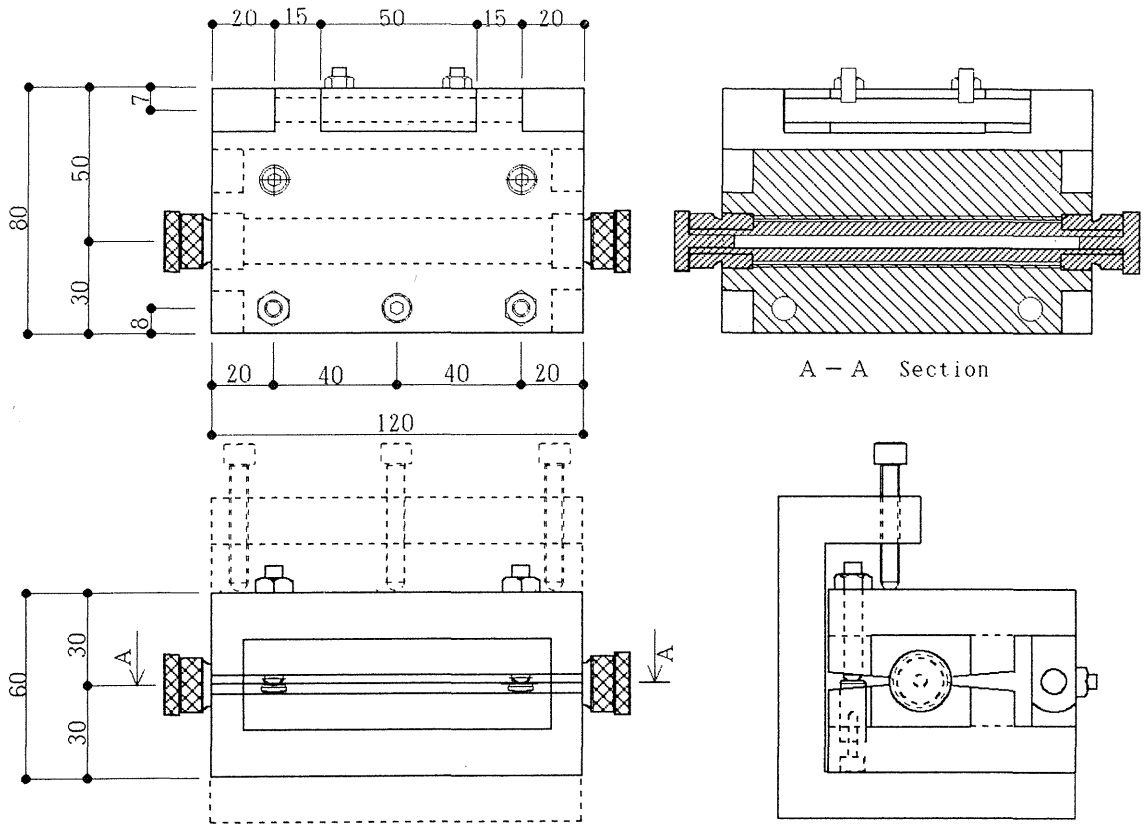


Fig. 1 Mold of Cement paste Specimen

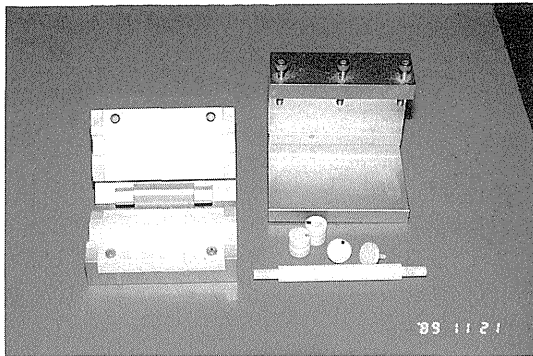


Photo. 1 Mold of Paste Specimen

押し出す事により供試体を成形する。またペーストとの付着が小さいこと、及び熱膨張係数がペーストよりも15倍程度大きい事により、芯及びペーストとの接触部にテフロンを用いている事に特徴がある。外枠のテフロンは剛性を保つ為アルミ枠で補強されており、

ペースト打設時のテフロンの変形を防いでいる。

次にセメントペースト打込み手順について述べる。

まず、ペーストを練り混ぜた後、予め恒温槽(35℃)で暖めて置いた型枠の外枠を開き、その外枠の半円の窪みに気泡ができない様に、ペーストを一様に塗り付ける(写真2)。更に、塗り付けたペーストの上から、余分なペーストを押し出しながら一方の型枠にテフロン芯をセットする(写真3)。そして、もう一方の外枠に同様にペーストを塗り、テフロン芯をセットした方を、芯が動かない様に両端を押えながら、これにかぶせる様に押し付けて、余分なペーストを側面より押し出し、成形する。その後押え枠により型枠が開かない様に固定する(写真4)。

脱型までの養生は、型枠全体を湿布にくるみ、35℃の恒温槽で24時間行った。また、水セメント比の大きい物ほど、ブリージングの影響によりひび割れが発生し易いために、打込みから約3時間ほど15分毎に型枠の向きを変えて養生した。

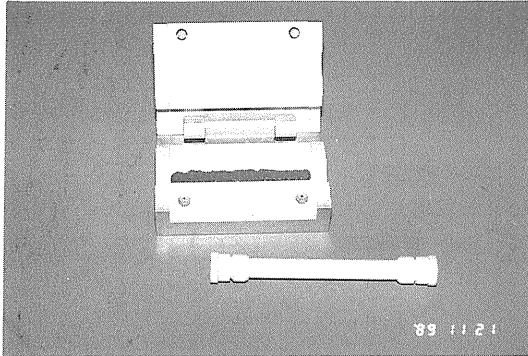


Photo. 2 Placing of Cement Paste: Step 1
Cement paste is spread on the lower part of the open mold, trying to avoid entrapping air bubbles.

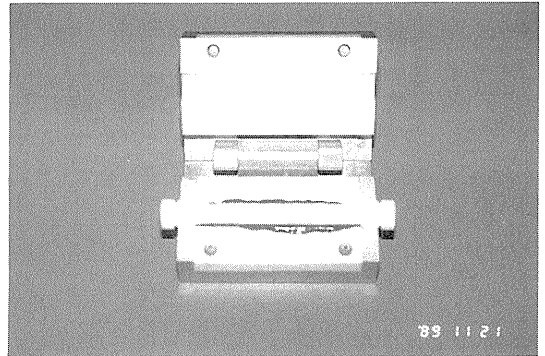


Photo. 3 Placing of Cement Paste: Step 2
The teflon mandrel is pressed lightly into the paste and the excess paste is squeezed out.

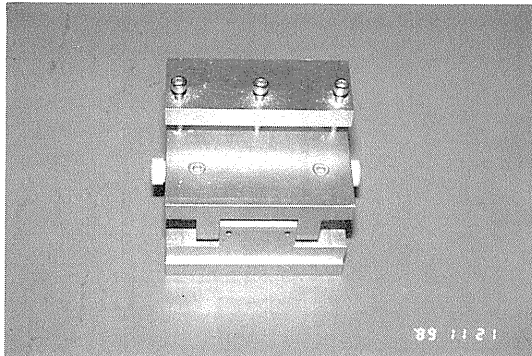


Photo. 4 Placing of Cement Paste: Step 3
The mold is closed and gradually tightened by the screw.

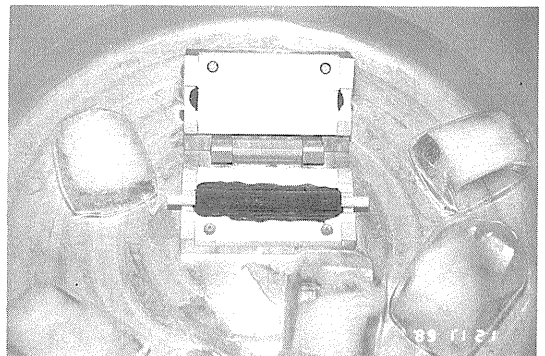


Photo. 5 Removing Cement Paste Specimen from the Mold: Step 1
The closed mold with specimen is cooled with ice water and then the mold is pried open.

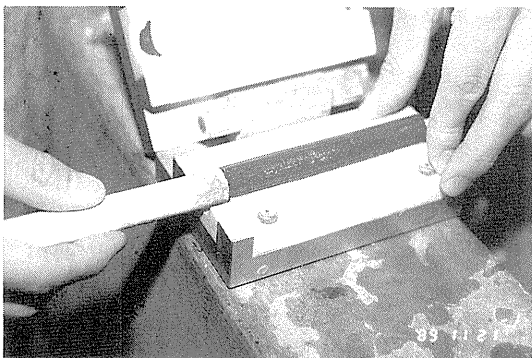


Photo. 6 Removing Cement Paste Specimen from the Mold: Step 2
The specimen with the mandrel is gently pushed out of the mold.

脱型は、恒温槽から取り出した型枠を冷水で冷やしながら(写真5)外型枠を開いた後、同形の供試体を用いて、側面から押し出すように型枠から供試体を取り出す(写真6)。

次に、芯の側面に付いている余分なペーストを取り除いて、静かに芯を引き出す(写真7)ことにより行った。

これらの方法を用いる理由は、第一に、35℃による養生により脱型までに供試体の強度を高めておく為であり、第二に、テフロンとペーストの線膨張係数の違いを利用して、脱型時にテフロンとペーストとの付着を断ち切る事、及びテフロンの収縮により、芯が供



Photo. 7 Removing Cement Paste Specimen from the Mold: Step 3

The mandrel is removed by pulling on one end of the mandrel.

試体から抜け易くする為である。

以上のペースト円筒供試体作製の上で重要な事は、まず、テフロン型枠面の仕上げの程度である。面の仕上げが荒い場合は、ペーストとの付着により型枠から取り出せなくなるか、供試体の一部が型枠に付着して脱型時に割れてしまう。更に、芯の加工精度も重要であり、歪や曲がりがある場合は、供試体の肉厚に偏りが生じるか、芯の引き抜き時に供試体がひび割れる原因となる。また、テフロンは剛性が小さいために、供試体打込み時に芯や型枠の変形が生じ、供試体厚に歪みが生じる場合があり、むやみに力をかけられない。特に、芯の変形は、脱型時に供試体にひび割れを発生させるので、特に注意が必要である。

次に、脱型時の供試体の取扱いは、通常の供試体を扱う場合に比べ著しい慎重さが必要である。供試体作製の失敗の殆どが脱型時に生じるため、型枠を十分に冷却することや無理な力を加えないこと、または、脱型に関わる少しの障害も丁寧に取り除くことが必要である。更に、セメント硬化体は、引張強度が小さいので、作製過程で供試体に引張力の生じる原因または方法は極力避ける必要がある。特に、外枠から外す時及びテフロン芯を引き抜く時には、十分に冷目で冷やし、型枠とペーストとの付着が切れている事を確認すると共に、供試体に引張応力が生じない様に、ペースト部を押し出すように脱型する必要がある。

2.3 モルタル薄肉円筒供試体の作製

モルタル円筒供試体の作製にあたっては、実験値を比較することを考慮すれば、ペースト供試体と同様の

型枠で作製する事が望ましい。しかし、ペースト円筒供試体用型枠表面はテフロンで出来ており、モルタル円筒供試体作製の際にモルタルに含まれる細骨材により型枠面を傷つける事が考えられる。その結果、表面の傷により付着力を増し、供試体の脱型の際の取り外しの作業を困難にする。

そこで、モルタル供試体の作製にはペースト用の型枠は使用せず、新たにモルタル供試体用に型枠を作製することとした。

ここでは、安価で、しかも比較的簡単に作製できるために、モルタル円筒供試体の作製に市販の塩化ビニルパイプを使用した。内径20mm及び外径18mmの大小2種類の塩化ビニルパイプを用いて、小さな方のパイプを芯として用い、径の大きなものを外枠として使用して、ペースト供試体と同様に押し出し成形する事により薄肉円筒供試体を作製しようとするものである。

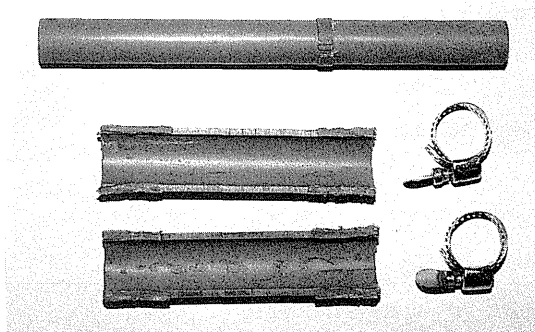


Photo. 8 Mold of Cement Mortar Specimen

型枠は、写真8に示すように、径の大きい外枠の塩化ビニルパイプを縦に切断し、切断面にスペーサーを取り付けて、形を整えると共に余分なモルタルの逃げ道を作り外型枠とした。また、芯とする塩化ビニルパイプには、10cmの間隔を取り、厚さ1mmになるようにスペーサーを巻き付けた。

モルタル供試体の打込みは、ペーストの場合と同様に、まず、外型枠の両側にモルタルを気泡ができないように一様に塗り付ける。そして、片側に芯をセットし(写真9)、反対側の型枠を閉じることにより余分なモルタルを側面より押し出し(写真10)、供試体を成形する。型枠が開かないように押さえ金物等で固定した後(写真11)、型枠の回りについているモルタルを取り除き、型枠ごと湿布にくるみ、ペースト供試体と同様に養生した。

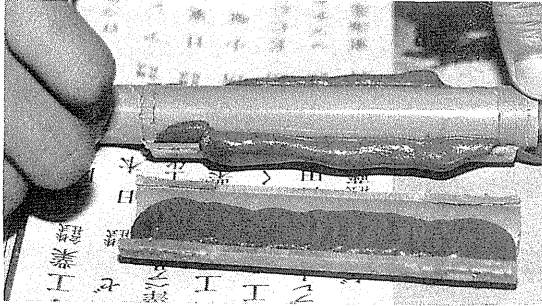


Photo. 9 Placing of Cement Mortar: Step 1
The vinyl chloride mandrel is pressed into the mortar and the excess mortar is squeezed out.

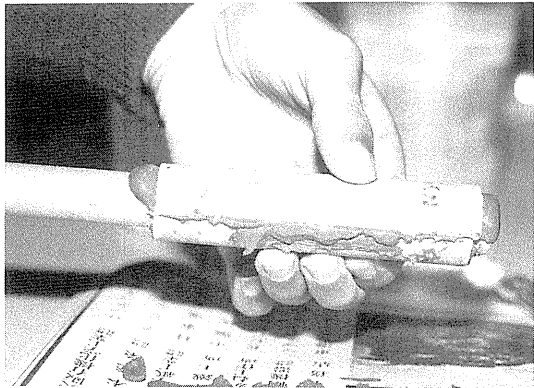


Photo. 10 Placing of Cement Mortar: Step 2
The other half of the mold is closed.

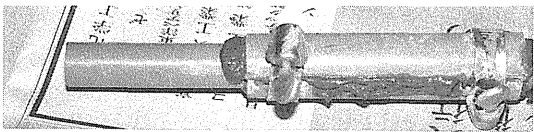


Photo. 11 Placing of Cement Mortar: Step 3
The mold is gradually tightened by hose bands.

脱型は、先ず、恒温槽から取り出した型枠から押さえ金物を外してから、外型枠の隙間に薄い金具などを入れ、型枠を静かに開ける(写真12)。そして芯の付いた状態で供試体を外型枠から取り出す(写真13)。その後、供試体を壊さないように、芯に巻き付けたスペイサーを取り外して、ゆっくり供試体から芯を抜き

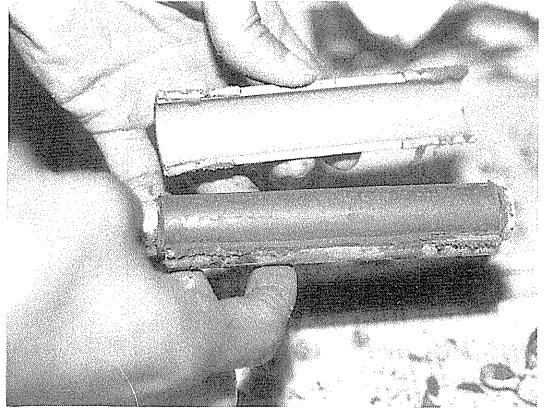


Photo. 12 Removing Cement Mortar Specimen from the mold: Step 1
In this case, the top half of the mold is opened without cooling with ice water.

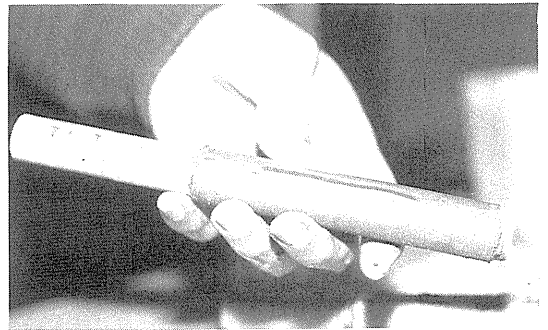


Photo. 13 Removing Cement Mortar Specimen from the mold: Step 2
Specimen is gently rolled out of the other half of the mold.

取った(写真14)。尚、これらの作業過程に於いては、ペースト供試体で行った様な、冷水につける必要はなく、しかも、ひび割れて失敗する供試体は少なかった。

以上により作製した供試体をペースト供試体と共に写真15に示す。

モルタル供試体の作製に於いても、厚さ1mmを目標に供試体の作製を行ったが、厚さが1.5mm前後となりバラツキもでてきてしまった。この原因は、主に型枠の作製精度によるものであり、今後型枠の改良等が必要である。



Photo. 14 Removing Cement Mortar Specimen from the mold: Step 3
The mandrel is removed by the same method as in Photo. 7

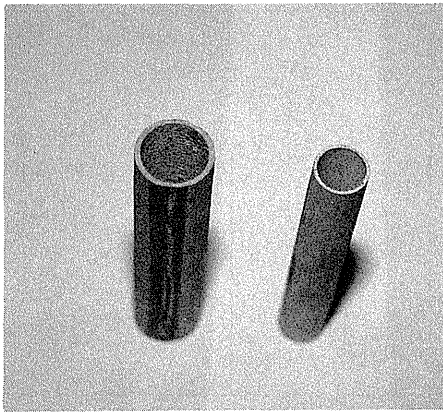


Photo. 15 Specimens of Cement Paste and Mortar

モルタル供試体に於いては、冷水に漬けることなく、ペーストに比べて比較的簡単に薄肉円筒供試体を作製できた。これは、モルタルの場合、ペーストに比べ付着力が小さいために、型枠から剝離し易いこと、及び局所的な応力集中があっても骨材によって分散される事により、脱型時のひび割れが比較的少なくなる為と思われる。

尚、モルタル用の型枠で、同様にペースト供試体の作製を試みたが、ペーストの場合には、脱型時に型枠から剝離せずに割れてしまい、この方法での作製はできなかった。

2.4 乾燥収縮予備試験

上記の様にして作製させた供試体を用いて、円柱供試体との比較を行った実験の一例⁹⁾を図2に示す。円

柱供試体に於いては、ひび割れによる影響が現れており、本報告によって示された、薄肉円筒供試体の有用性が示されている。

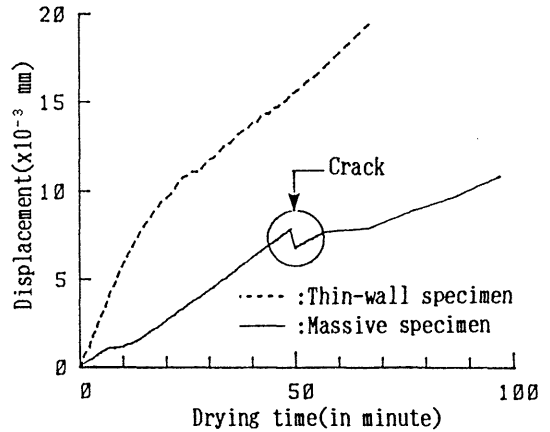


Fig. 2 Shrinkage of Thin-wall Specimen and Massive Specimen at Early satge

3. 物性試験

3.1 物性試験概要

水分移動及び乾燥収縮変形挙動の為の基礎的データを得る目的で、上記方法によって作製した薄肉円筒供試体の基礎的な物性値を求める為に、物性試験を行った。ここでは、測定した物性値の内、水銀圧入式ポロシメータによる細孔径分布及び水分特性曲線について報告する。

3.2.1 細孔径分布

細孔径分布試験は、セメント硬化体の乾燥収縮、水分逸散及び水分特性曲線を解析する上で、基礎的なデータとなる細孔分布を求めるために行うものである。

セメント硬化体中の水分逸散は、水分が細孔から細孔へと移動することによって起こると考えられる。そのためセメント硬化体中の細孔構造を把握することは乾燥収縮及び水分逸散のメカニズムを解明する上で重要なものの一つである。

本研究では幅広い測定領域を持つ水銀圧入法(Hg-ポロシメータ法)により、7500nm~3.75nmの範囲で細孔分布の測定を行った。

3.2.2 水分特性曲線(Sorption Isotherm)

この試験は、コンクリートの含有水量と湿度平衡状

態での関係(水分特性曲線)を求めめるために行うものである。この結果は、セメント硬化体の水分移動の解析に利用できるだけでなく、乾燥収縮やクリープ等の解析に於いても基本的データとして有用なものとなる。

水分特性曲線を求める上で、湿度及び温度が一定の環境を作る必要がある。本実験では恒温室(20℃)及び恒温槽(50℃)内において、飽和塩を密封容器に配置することにより行った。

飽和塩は密閉された容器にある場合、ある温度で雰囲気湿度を一定にする性質を持つ。また、塩の種類を変える事により、湿度を変化させる事ができる。このことを利用し、飽和塩を配置した容器の中に硬化セメントペースト・モルタルの試験片を曝すことにより水分特性曲線を求めようとするものである。

本試験では、設定し易い20℃と50℃の温度で、各々3種類の塩を選び試験を行った。温度、湿度の水準及び使用した塩を表3に示す。

	20℃	50℃
80%RH	(NH ₄) ₂ SO ₄ (20℃, 81%)	KCl (50℃, 81%)
45%RH	K ₂ CO ₃ ·2H ₂ O (20℃, 44%)	Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O (50℃, 46%)
10%RH	KOH (20℃, 9%)	LiCl·H ₂ O (50℃, 11%)

Table 3 Levels of Temperature and Relative Humidity, and Kind of Saturated Chlorides

使用する試験片としては、ペースト及びモルタルの薄肉円筒供試体を6週間水中養生したものを使用した。円筒供試体そのものを使用するには、塩を入れる容器も大きなものを必要とする上、供試体中の含有水量が一定するにも時間を要する。そこで、十分に養生した円筒供試体を約1gの薄片にし、容器中に糸で釣るし、ゴム栓で密封することにした。

平衡含有水量の測定は、供試体片の質量が一定となるまで容器内に放置した後、2日間炉乾燥(105℃)して含有水量を測定することにより求めた。

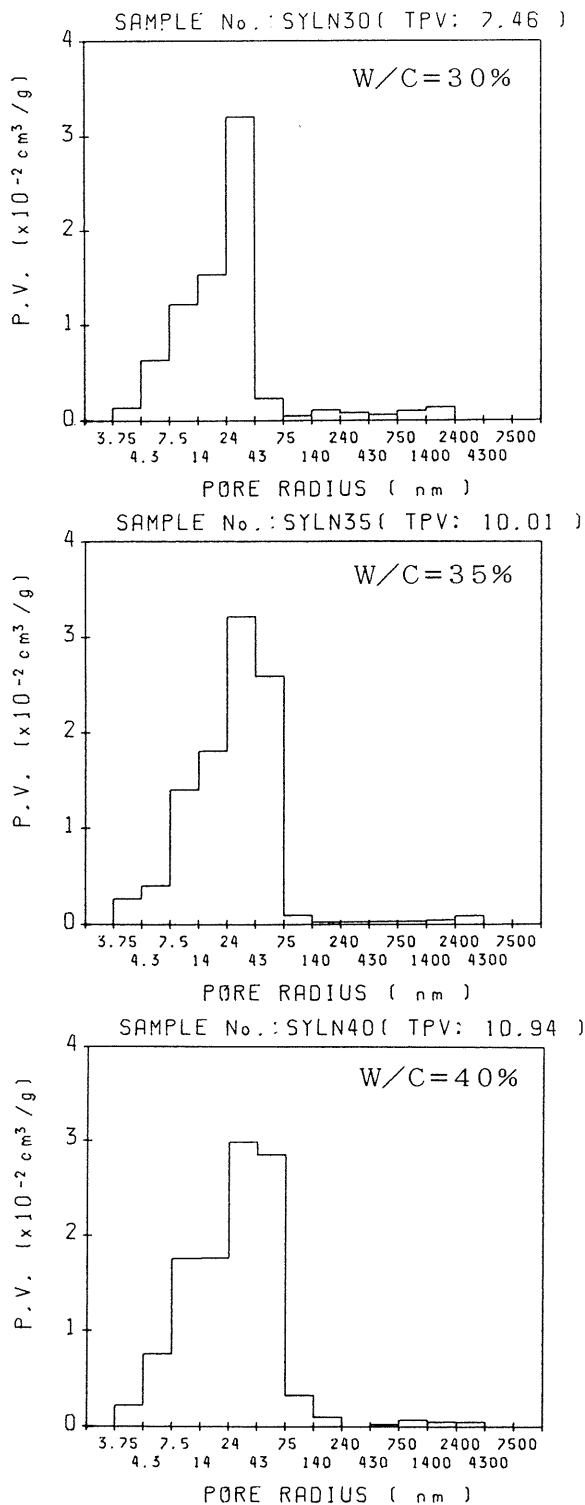


Fig. 3 Pore Distribution of Cement Paste

4. 物性試験結果及び考察

4.1 細孔径分布

図3と4には、水銀圧入式ポロソメータにより測定した細孔分布の結果を示す。図3は、ペースト円筒供試体の水セメント比30, 35, 40%各々について、示し、図4は、モルタル円筒供試体の砂セメント比0.4, 0.8, 1.2のものである。

これらの図より次のことが示された。

まず、セメントペーストに於いては、水セメントが大きくなる程、総細孔容積が増える傾向を示し、径の大きな細孔容積、特に75nm付近での増加が著しい。

また、モルタル供試体に於いては、砂セメント比が大きくなる程、即ち、セメントペースト容積が小さくなる程、総細孔容積は小さくなる。しかし、その反面、砂セメント比の大きなものは、大きな径の細孔容積の増加が認められる。更に、ペーストと比べ、モルタル供試体では、7.5nm~75nmの範囲の細孔容積の減少が著しいことが示された。

これらの結果は、骨材を含む供試体では、マトリックス(ペースト)内部の細孔と、マトリックスと骨材の境界部での細孔とでは、細孔の特性が異なっていることを示していると思われる。細孔の特性が変化すれば、水分の移動や乾燥収縮、またはクリープ挙動に変化を及ぼすことが考えられ、骨材が混入した場合には、単にペーストの容積のみによりモルタルの挙動を説明することは、十分でないことを示している。

4.3 水分特性曲線

水分特性曲線は吸着及び凝縮現象に依存している。一般に、セメント硬化体の吸着等温線は、B.E.T型等温線の型に近く、実験結果の解析に当たってはこの等温線をモデルに進めて行くことにした。B.E.T型は多くの吸着剤についての蒸気吸着に見られ、純実験式としてのホルゼー式

$$\ln x = -\frac{A}{V_s} \quad (1)$$

ここで、V:含水率, A,s:定数, χ :相対湿度によってかなりよく表わすことができる⁷⁾とされている。ここでは(1)式を基に(2)式と変形して近似曲線とし、最小二乗法によりA, sの値を求めた。尚、ここで用いたxは試験より求めた各含水率、yは χ の自然対数である。

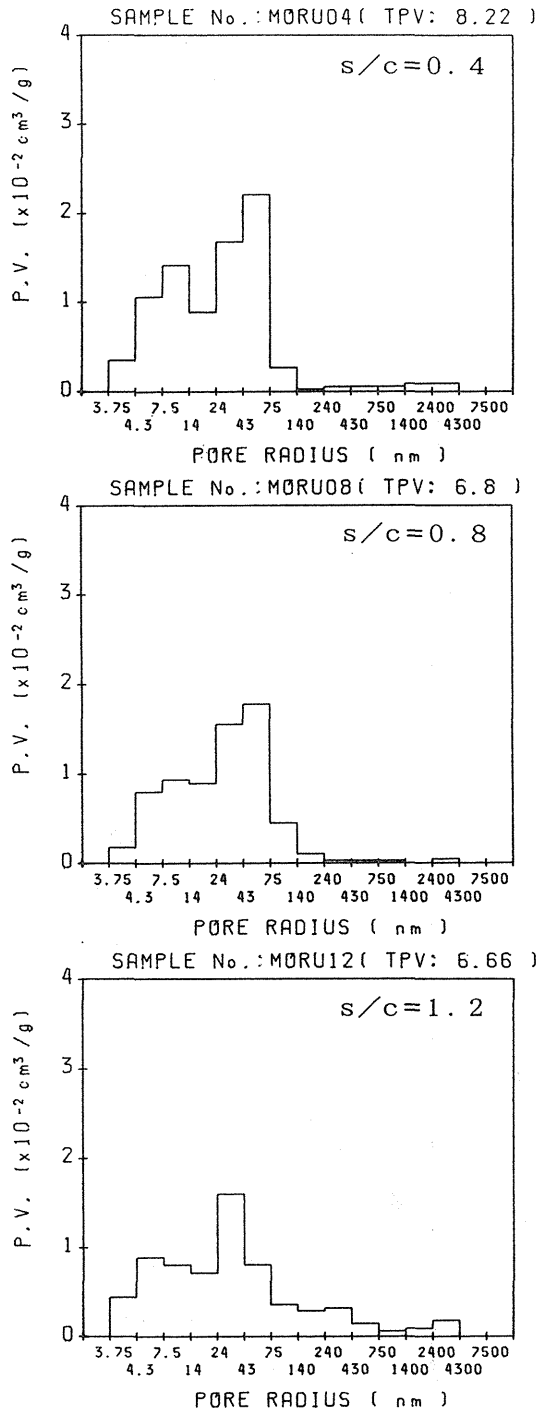


Fig. 4 Pore Distribution of Cement Mortar

Table 4 Values of Parameter A and s of Eq. (2) obtained by means of Regression Analysis.

	Cement Paste				Cement Mortar			
	W/C	A	s	R ²	s/c	A	s	R ²
20 °C	30%	0.00220	2.486	0.988	0.4	0.00287	2.341	0.961
	35%	0.00815	2.038	0.977	0.8	0.00170	2.376	0.995
	40%	0.01140	1.926	0.987	1.2	0.00154	2.237	0.977
50 °C	30%	0.00188	2.156	0.993	0.4	0.00180	2.144	0.997
	35%	0.00272	2.094	0.974	0.8	0.00673	2.335	0.998
	40%	0.00509	1.954	0.996	1.2	0.00642	2.248	0.999

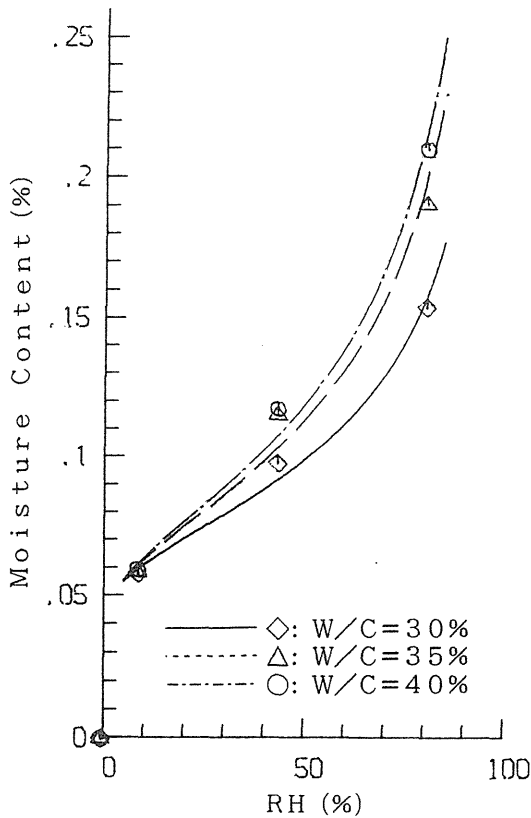


Fig. 5 Sorption Isotherm of Cement Paste at 20°C

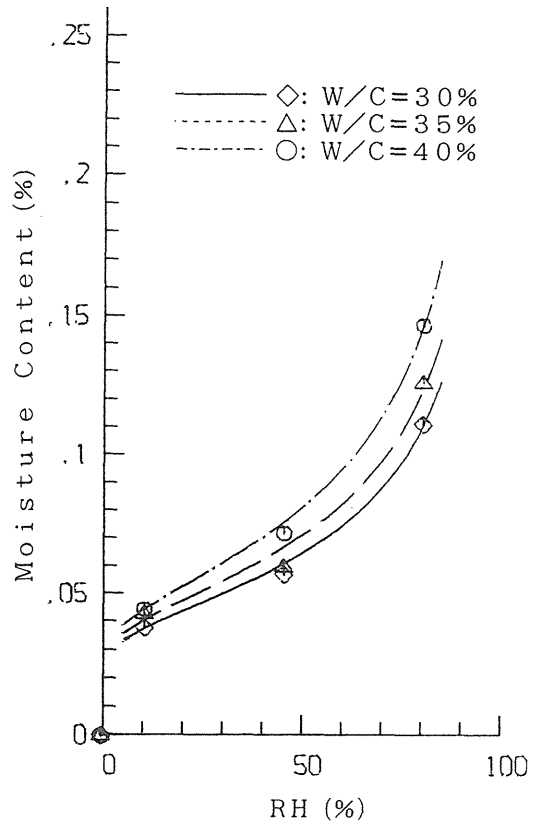


Fig. 6 Sorption Isotherm of Cement Paste at 50°C

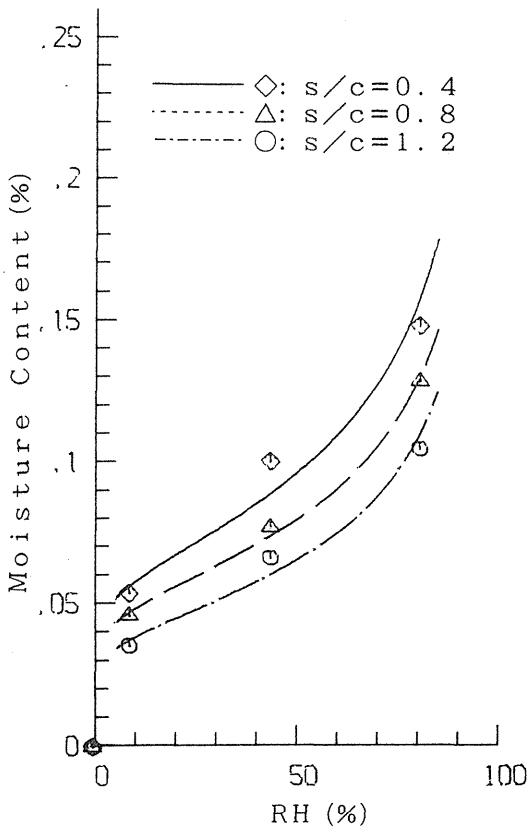


Fig. 7 Sorption Isotherm of Cement Mortar at 20°C

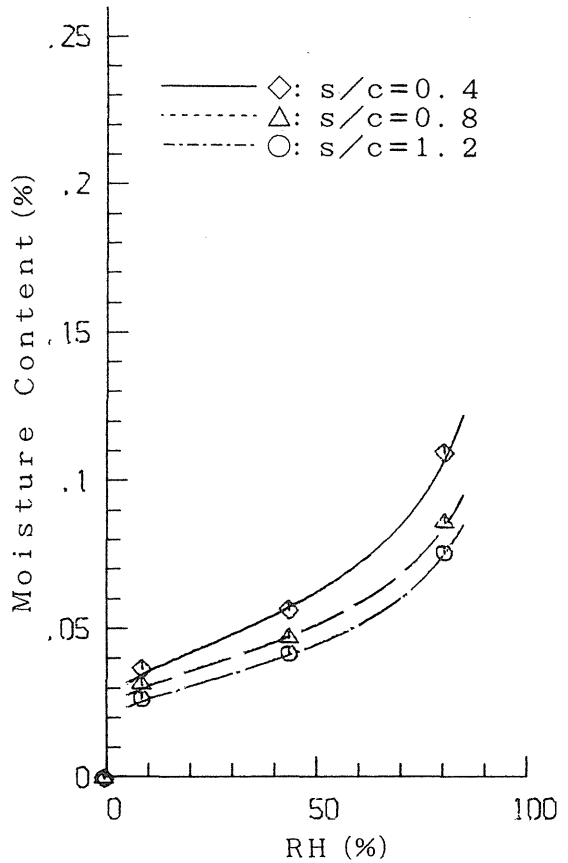


Fig. 8 Sorption Isotherm of Cement Mortar at 50°C

$$Y = A x^{-s} \quad (2)$$

ここで, A, s : 定数, x : 含水率, $Y: |\ln \chi|$
 表4には, 回帰分析により求めた A, s の値および寄与率 (R^2) の値を示す。また, 図5~8には, この様にして求めた近似曲線と実験値との比較を示す。これらの図は, 本実験の範囲でほぼ良い近似を示している。特に, ペースト, モルタルともに温度50°Cの方で比較的よく合っている。今後は, 温度, 水セメント比, 砂セメント比を変え, より多くのサンプルによって実験を進め, 解析のパラメータに取り入れる必要がある。

5. まとめ

セメント硬化体の乾燥収縮及び乾燥クリープを測定する場合, 従来から用いられている供試体は, 実験の

しやすさから円柱型の供試体が用いられてきた。しかし, この場合, 実験に長期間を要し, かつこれらの供試体から得られた実験結果は, 供試体内部の湿度勾配による影響を含み, 見かけ上の収縮またはクリープ挙動を求めている事になり, 必ずしも真の挙動を示しているとは言えない。

本報告により示した方法による薄肉円筒供試体を用いる事により, ペーストやモルタルでの制約はあるものの, 供試体内部の湿度勾配を少なくし, かつ比較的短時間に実験が行える事となる。また, その自立性や座屈に対する抵抗性によって薄肉平板では不可能であったクリープ試験も可能となり, 水分逸散を伴う現象の実験的な解明に有用な手段であると言える。

また, 本報告に於いては, 物性値として細孔径分布及び水分特性曲線を求めた。これらのデータは, 水分移動や乾燥収縮挙動を解析する上で, 基礎的なデータとなる物である。

今後、本報告によって示された供試体を用いて、実験を進めると共に、これらのデータの解析を行う予定である。

参 考 文 献

- 1) 例えば, F.H.Wittmann (三橋博三訳), “コンクリートの内部構造と力学特性”, コンクリート工学, Vol.21, No.3, pp.19-30, 1983.
- 2) 例えば, Z.P.Bazant, F.H.Wittmann, “Creep and Shrinkage in Concrete Structures.”, pp.129-161, 1982.
- 3) 三橋, 沼尾, 硬化セメントペーストの薄肉円筒供試体を用いた乾燥収縮に関する基礎的研究, セメント・コンクリート論文集, No.43, pp.232-237, 1989.
- 4) 沼尾, 三橋, 硬化ペースト及びモルタルの水分逸散と乾燥収縮, 日本建築日本建築学会大会梗概集, PP.585-586, 1989.
- 5) 三橋, 沼尾, 薄肉円筒供試体を用いたセメント硬化体の乾燥収縮と水分逸散に関する研究, セメント技術大会講演集, 第44回, pp.602-607, 1990.
- 6) Z.P.Bazant, et al., “A thin-wall cement paste cylinder for creep tests at variable humidity or temperature.”, Materials and Structures, RILEM, vol. 6, pp.277-281, 1973.
- 7) 慶伊富長, 「吸着」, 共立出版, 1986.