木造住宅における既調合軽量セメントモルタルの初期材齢の基礎性状に関する実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE BASIC PROPERTIES OF EARLY AGES OF PREMIX LIGHTWEIGHT CEMENT MORTAR IN WOODEN HOUSES

上村昌樹 — * 1 原田 進 — * 2
渡部嗣道 — * 3

Masaki UEMURA — * 1 Susumu HARADA — * 2
Tsumumichi WATANABE — * 3

キーワード：
既調合軽量セメントモルタル, 初期材齢, 力学的性質, 乾燥収縮, ラスモルタル

Keywords:
Premix lightweight cement mortar, Early age, Mechanical property, Dry shrinkage, Lath mortar

In this research, in order to show the basic properties of Light Weight Cement Mortar used for Blending Lath Mortar including early material age, and with the implementation of related mechanical properties evaluation test, a simple test method was proposed and attempted to evaluate the occurrence characteristics of dry shrinkage cracks of early material age. The results show that the fundamental characteristics can be demonstrated by the compressive strength, crack tensile strength and flexural strength of the test specimen centering on the early material age.

1. はじめに

今日の木造住宅のほとんどが防火構造であり、外壁については、サイディングあるいはラスモルタル壁が多く採用されている。このうち、ラスモルタル壁は、目地がないことによる重厚性や手作り感が評価され、都心部をはじめに根強い需要がある。今日のラスモルタル壁の工事には、従来の現場調合による普通セメントモルタル(以下、普通モルタルという)のほか、既調合の軽量セメントモルタル(以下、軽量モルタルという)も多く使用されるようになった。軽量モルタルは、左官職人の過労を軽減するために開発されたものであるが、外壁重量の低減も可能であり、今日の外壁用左官モルタルの主流を占めるようになった。しかし、その基礎的な物理的性質については、ほとんど明らかとなっていない。特に、初期材齢については、力学的に不安定であるため、施工後養生期間中に損傷の恐れがあり、その性状を把握することは重要である。さらに、ラスモルタル壁はひび割れを生じることが多く、漏水や耐久性に大きな支障を招く恐れがある。また、大久保ら¹⁾は、実大に近い開口部を有する試験体を作製して、乾燥収縮ひび割れの発生状況を観察している。これには実際の下地や骨組みも考慮した実大の試験体を適用していることから、ひび割れ発生の危険性を評価するには極めて有効な研究であると考えられる。今後はこれらの実験結果を鑑み、素材の性状を評価するための新たな素材試験のための試験法も開発する必要があるものと考えられる。

そこで、本研究では、初期材齢を含む基礎的な性状を明らかにするために、力学的な性質に関する評価試験を実施するとともに、初期材齢における乾燥収縮ひび割れの発生性状を評価するための簡易試験方法を提案して実験を試みたので、その結果を報告する。

2. 実験計画

2.1 使用材料と試験体の作製

実験に供した軽量モルタルは、一般木造住宅外壁用として、1986年に開発され、現在も市場に流通している F 社製の軽量モルタルである。表 1 にその試料仕様、表 2 に組成、表 3 に品質試験結果を示す。本材料は、JIS A 6918 (既調合セメントモルタルの品質基準) に合格したものである。

水との練り混ぜは、JIS R 5201「セメントの物理試験方法」によった。フレッシュモルタルの練り混ぜ後、直ちにフレッシュ性状を測定するとともに、これを所定の型枠に流し込んだ後は室内で所要の養生をした(大阪市立大学生活科学部棟の実験室内)。室内環境は、平均気温 21.2℃、平均湿度 50.9%RH であった。

2.2 力学的基礎物性試験

試験項目を表 4 に、試験方法を表 5 に示す。圧縮試験体および割裂引張試験体については室内封緘養生とした。曲げ試験については、後述の乾燥ひび割れ試験と同様に片側乾燥とし、その乾燥状態の影響を考慮できるように、乾燥面が引張応力となるように載荷した。試験材齢は、1,2,4 日の初期材齢と 7,14,28 日の材齢とした。

表 1 試料仕様

項目	詳細
製品	F 社製軽量モルタル (正味質量 25kg/袋)
混練り水量	9.6L
水セメント比	82.6%

表 2 組成

項目		詳細
普通ポルトランドセメント		46.5 Wt/%
珪砂、バーライト、フライアッシュ、高炉スラグ等		50.4 Wt/%
エチレン酢酸ビニル発泡粒、ポリエチレン発泡粒、メチルセルロース、※ビニロン繊維、パルプ等		3.1 Wt/%
※参考： ビニロン繊維	長さ	6mm
	直径	27 μ m
	アスペクト比	222
	繊維度	7 0dtex

¹⁾ 富士川建材工業(株)技術部 部長
(〒236-0002 神奈川県横浜市金沢区鳥浜町 13)

²⁾ 富士川建材工業(株) 代表取締役社長

³⁾ 大阪市立大学大学院生活科学研究科 教授

¹⁾ Department Director, Fujikawakenzaikogyo Co., Ltd.

²⁾ President and Representative Director, Fujikawakenzaikogyo Co., Ltd.

³⁾ Prof., Graduate School of Human Life Science, Osaka City Univ.

表3 JIS A 6918 による品質試験結果

項目		結果
単位容積質量	kg/L	1.26
練り上がり率	%	1.8
軟度変化	%	0.4
凝結時間	始発 分	310
	終結 分	490
曲げ強さ (参考: 圧縮強度)	N/mm ²	2.9 (7.5)
吸水量	g	13.9
透水量	mL/h	0.4
長さ変化 (収縮)	%	0.11

表4 試験項目

試験項目	物性値	材齢 (日)
圧縮試験	圧縮強度, ヤング係数, ポアソン比	1, 2, 4, 7, 14, 28
割裂引張試験	引張強度	
曲げ試験	曲げ強度, 曲げヤング係数	

表5 試験方法

試験項目	物性値	試験体形状と個数
圧縮試験	JIS A 1108 JIS A 1149	・直径 50×100mm の円柱 ・1 材齢につき 3 体
割裂引張試験	JIS A 1113	
曲げ試験	1 点中央載荷 スパン: 180mm	・幅 50×長さ 250× 厚さ 15mm ・1 材齢につき 5 体

2.3 乾燥収縮ひび割れ試験

(1) 拘束試験方法の提案

本研究では、左官モルタルのひび割れ性状を評価するための簡易試験方法を提案した。本法は、JIS A 1151「拘束されたコンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法」を参考としている。この JIS 法は、コンクリート試験体の両端を拘束してひび割れ性状を評価するものである。そこで、本研究では、板上に左官モルタルを塗り付け、乾燥期間中にその両端を拘束することによってひび割れを発生する試験方法を考案した。

ラスモルタルは、乾燥によって収縮するとともに、片側乾燥などにより乾燥表面と内部との含水率が異なる場合には反りが生じる。実際のラスモルタル壁の場合には、構造用面材や胴縁あるいは間柱などの下地に打ち付けられるステーブルによって拘束されるため、本試験方法では試験体の両端を拘束する方法を採用しており、実際の拘束による応力状況や拘束度とは異なることが予想される。実際に施工されたラスモルタル壁のひび割れの危険性の評価を行う場合には、実際の壁体による拘束度を計測して、本試験方法によるそれとの違いを把握する必要がある。本試験方法は、反りと収縮が同時に作用する場合のモルタルの基礎的な性状を、一様に収縮しようとするものと仮定し、下地の拘束も同時に一様に軸方向に拘束するものと仮定した簡易的な方法によってひび割れ性状を評価するものである。このため、ラスモルタルの実用的なひび割れの危険性を評価するためには、実際の壁材による収縮や拘束性状と比較しなければならないことに注意しなければならない。以上の考え方は、松本・大久保らの研究²⁾を参考としたものであり、同研究では、コンクリート下地としたモルタルの乾燥収縮性状の解析モデルにおいて、勾配を有するモルタルの収縮を一様なものとするともに、下地材の拘束効果を計測する場合には、下地の拘束効果を有限要素法におけ

る平面要素に位置する水平バネ要素でモデル化し、計測試験体内では一様なものと仮定している。

作製した拘束試験体を図1および写真1に示す。試験体のひび割れ誘発部（全長 550mm、直線部分 400mm）の塗り厚は 15mm である。15mm の厚さは、実験に使用した軽量モルタルによる防火構造の認定を受けたものである。本実験では、メタルラスを配置せず、モルタルのみの試験体とした。

また、ラスモルタル壁は、下地面材に防水紙、メタルラスを張り、モルタルを塗る直張り工法、あるいは通気層を設けるために胴縁を設け、裏打ち材付きメタルラスを張り、モルタルを塗る通気工法などがある。この場合の乾燥状態は、概ね外気側の面の乾燥速度が防水紙面よりも早いと考えられる。そのため、本実験では、左官後のモルタルは概ね一面乾燥に近い状態になるものと考え、モルタルの乾燥が一面のみの乾燥となるように、一面を外気側、もう片方を型枠側となるようにした。ただし、実施工される防水紙は透湿性も有するものが多いので、本実験の片側乾燥よりも実際のモルタルのひび割れ発生が危険側と判断される場合には、今後の検討課題とする。

図1 拘束試験体

写真1 拘束試験体（試験状況）

型枠は、2本の100mm角の端太角の上下に塗装合板(厚さ12mm)を張り、その上に同合板を1枚増し張りしたものである。拘束方法は、塗装合板両端に設置したボルトによる方法と、2枚の塗装合板を使用して塗り厚を変えて(15mmと27mm)ひび割れ誘発領域の外側で拘束する2方法によって実施した。本研究では、初期材齢のひび割れ性状を評価化するために、できるだけ拘束を大きくする処置を施した。ただし、長期的性状を評価するためには、拘束を緩める処置が必要となる。拘束試験体の実ひずみの計測は、3本のπ型変位計(標点間:180mm)を使用して、材齢2日から28日間計測し、ひび割れ発生の確認に用いた。また、モルタルを流し込む水平型枠は塗装合板を使用しており、流し込んだモルタルと混合しないように粘性のあるグリースを塗装合板の表面に塗り付け、モルタルと塗

装合板との拘束をなくした。試験体数は1個とした。このような若材齢でのひび割れ試験は、一般的に、ひび割れ発生時期などにばらつきが予想される。本研究では、試験方法によるひび割れ性状を評価する予備的な検討であるため、本試験方法によって物性値の特定を行う場合には、試験体数を多くした検討が必要となる。

(2) 自由収縮ひずみの測定

写真2に示すように、乾燥収縮ひび割れ試験と同時に、材齢1日から自由収縮ひずみの測定も行った。試験体は、幅100mm×長さ400mm×厚さ15mmとした。また、滑りをよくするために、研磨されたステンレス製の板の上にグリースを塗り、その上にモルタルを塗り付けて、存置して仕上げ面の片側から乾燥するように室内で養生した。長手方向の乾燥収縮変位を計測するとともに、反りの計測のために面外変位も3点計測した。長手方向の変位計測には、中央部にπ型変位計（標点間：180mm）、面外方向の変位にはCDP変位計（中央部から100mm間隔の3点）を使用した。

写真2 自由乾燥収縮ひずみの測定

3. 実験結果と考察

3.1 力学的性状

(1) フレッシュ性状

軽量モルタルのフレッシュ性状は、単位容積質量1.26kg/L、フロー値158であった。

(2) 圧縮試験

図2に、各材齢の応力ひずみ関係の例を示す。概して、材齢が増すとともに圧縮強度も大きくなり、最大応力度のひずみ度も大きくなった。ただし、材齢28日では圧縮強度は大きいものの、最大応力時のひずみ度は小さくなった。この原因は明らかではないが、他の試験体でも同様な結果となった。

図3に、圧縮強度の経時変化を示す。圧縮強度について、材齢1日で1.7N/mm²程度、材齢2日で3.0N/mm²程度発現し、その後材齢14日までは材齢とともに圧縮強度は増大し、8N/mm²程度の値となった。ただし、材齢14日と28日はほとんど同じ値を示した。

図4に、材齢28日に対する各材齢の圧縮強度の比を平均値に対して示す。材齢に28日に対して、材齢1日で0.2程度、材齢2日で0.4程度の値、材齢7日で0.8程度の値を示した。そして、材齢14日で1.0程度の値を示した。

図5に、圧縮強度とヤング係数との関係を示す。材齢28日でのヤング係数は5000N/mm²程度であり、普通コンクリートの1/4～1/5程度の値であった。材齢の増大とともに圧縮強度が大きくなるほど、ヤング係数も大きくなる結果となった。

図2 応力ひずみ関係

図3 圧縮強度の経時変化

図4 圧縮強度比の経時変化

図5 圧縮強度とヤング係数との関係

図6 圧縮強度とポアソン比との関係

図 6 に、圧縮強度とポアソン比との関係を示す。圧縮強度との相関性は見られなかった。ポアソン比の平均値は 0.226 であった。

(3) 割裂引張試験

図 7 に、割裂引張強度の経時変化を示す。材齢 1 日で 0.4N/mm^2 程度、材齢 2 日で 0.7N/mm^2 程度発現し、その後材齢 14 日、28 日と経て材齢とともに強度は増大し、 1.0N/mm^2 程度の値となった。図 8 に、圧縮強度と割裂引張強度との関係を各材齢の平均値について示す。引張強度は圧縮強度の $1/8$ 程度を示した。しかし、初期材齢では、それよりも大きな値を示している。これは初期材齢では繊維の混入による補強効果によるものと考えられる。なお、引張強度は、封緘養生試験体でありながら、材齢 7 日強度は、材齢 4 日強度よりも低下する結果を示した。このような結果を示した原因については明確にすることは出来なかった。

図 7 引張強度の経時変化

図 8 圧縮強度と引張強度との関係

(4) 曲げ試験

図 9 に、曲げ試験における荷重と載荷点のたわみとの関係の例を示す。最大荷重まではほぼ直線的に荷重は増大するものの、最大荷重後のそれは急激に減少し、脆性的な性状を示した。その急激な荷重低下後は、再度荷重が回復した後、緩やかに荷重は減少した。これは、軽量モルタルに短繊維が混入されているためであるが、最大荷重を増大させるほどの効果はない。しかし、最大荷重後の急激な荷重減少後にやや荷重が回復し、その荷重を維持していることから、ひび割れ発生後のひび割れ幅の抑制にはその効果が期待できるものと考えられる。

本曲げ試験における曲げ強度は、最大荷重 P から以下の式により算定した。ここで、 L : 曲げスパン、 Z : 断面係数を示す。

$$\sigma_b = P \cdot L / Z \quad (1)$$

図 10 に、曲げ強度の経時変化を示す。材齢 1 日では 0.2N/mm^2 程度と非常に小さな値を示したが、材齢 2 日で 1.5N/mm^2 程度発現し、その後材齢 14 日、28 日と経て材齢とともに強度は増大し、 2.5N/mm^2 程度の値であった。なお、曲げ強度は、引張強度と同様に、材齢 7 日強度は、材齢 4 日強度よりも低下する結果を示した。この場合についても、この原因について明確にすることは出来なかった。

また、本曲げ実験では、最大荷重まではほぼ弾性的な挙動を示したので、最大荷重 P までのたわみ δ から以下の式により、等価な曲げヤング係数 E を簡易的に算定した。ここで、 I : 断面 2 次モーメントを示す。

$$E = P \cdot L^3 / (48 \cdot I \cdot \delta) \quad (2)$$

図 11 に曲げ強度と曲げヤング係数との関係を示す。材齢 28 日での曲げヤング係数は、 2500N/mm^2 程度であり、圧縮ヤング係数の $1/2$ 程度の値であった。

図 12 に、圧縮強度と曲げ強度との関係を示す。曲げ強度は圧縮強度の概ね $1/3$ 程度であった。しかし、初期材齢では、それよりも大きな値を示している。これは引張試験の場合と同様に初期材齢では繊維の混入による補強効果によるものと考えられる。

図 9 荷重とたわみとの関係

図 10 曲げ強度の経時変化

図 11 曲げ強度と曲げヤング係数との関係

図 12 圧縮強度と曲げ強度との関係

3.2 乾燥収縮ひび割れ試験

(1) 自由収縮ひずみ

本実験では、自由収縮ひずみ試験では、曲率と軸方向ひずみの測定を実施している。曲率については、図 13 の変位計の計測値に対して、式 (3) のように曲率 τ を算定した。

ここで、 R : 曲率半径 (mm)、 ΔL : 左右の変形計の測定変位の平均値と中央の変位計の変位との差、 L_P : 変位計間の距離

図 13 曲率の計測

$$\tau = 1/R = 2\Delta L / (L_P^2 + \Delta L^2) \quad (3)$$

図 14 に、算定された曲率の経時変化を示す。乾燥開始から著しく曲率が増大して反りが生じた。その後、ピークを迎えて低下し、10 日程度経過すると、概ねその値は落ち着く結果となった。曲率の最大値は、 $4.31 \times 10^{-5} \text{mm}^{-1}$ であり、乾燥開始から 3.53 日であった。このように乾燥初期に反りが大きくなるのは、表面が乾燥し、断面内の表面付近に引張応力が発生し、曲げモーメントが生じたことによるものと考えられる。その後、曲率が低下したのは、内部にまで乾燥が進行し、内部の乾燥分布の偏りが減少したことによると考えられる。

図 15 に、軸方向の自由収縮ひずみの経時変化を示す。乾燥初期に大きく増大する傾向を示し、4 日程度以降はその増大率は減少するものの、計測期間中も徐々に増大する傾向を示した。また、同図には、修正した自由収縮ひずみを併記した。これは、実測値が試験体表面であり、反る場合には断面中心（中立軸位置）とは異なる値となるため、中立軸位置の値になるように曲率を用いて修正した。反りが最大値を迎える時点付近では、実測値と修正値との差は大きい、経過時間とともに曲率も小さくなることからその差も小さくなった。

(2) 拘束試験体の実ひずみ

図 16 に、3 か所に設置した π 型変位計による標点間の変位の実測値を示す。3 つの変位計のうち一つは（図中の変位計 1）、2.3 日ごろに急激に増大した。これはこの時点で、この π 型変位計の標点間でひび割れが発生したことを示している。この時点での自由収縮試験体における曲率は $4.15 \times 10^{-5} \text{mm}^{-1}$ 、修正自由収縮ひずみは 1.21×10^{-3} であった。

また、30 日経過後の π 型変位計によるひび割れ幅の計測値は 1.07mm となった。また、ひび割れゲージによる目視観測では 1.12mm 程度であった。よって、概ね変位計によってひび割れ幅も計測されたと判断される。写真 3 にひび割れの発生状況を示す。ひび割れの発生位置は、図 1 のひび割れ誘発領域の直線領域の端部であった。

図 14 曲率の経時変化

図 15 自由収縮ひずみの経時変化

図 16 π 型変位計による変位の実測値変化

写真3 ひび割れの発生

また、ひび割れ発生までの変位計1の実ひずみはほとんどゼロの値を示したので、拘束率は概ね100%であったと評価できる。

(3) ひび割れ発生時のクリープ係数の推定

ひび割れ発生を推定する場合には、自由収縮ひずみ、破壊ひずみ（弾性ひずみと塑性ひずみを含む）、そしてクリープひずみを把握する必要がある。ここでは、これらの値は乾燥を受けた試験体の曲げ試験による結果を用いることとした。材齢2日の曲げ強度から推定される破壊ひずみは、ヤング係数を曲げヤング係数とすると、 7.63×10^{-4} である。本実験の場合には、ひずみの計測結果からひび割れ発生時の拘束率はほぼ100%であったので、ひび割れ発生時の自由収縮ひずみの値（ 10.1×10^{-4} ）がそのまま実ひずみ、すなわちひび割れ時の破壊ひずみ+同クリープひずみとなる。この結果、同クリープひずみは 2.47×10^{-4} となるので、ひび割れ発生時のクリープ係数は概ね0.32と推定される。

(4) 実構造物での対応

本実験では、主に初期材齢のひび割れ性状を評価するために、拘束率が概ね100%となるような大きな拘束率を有する拘束方法の処置を行った。しかし、実際の構造物での拘束率は、本試験における拘束率とは異なるものと考えられる。そのため、本試験方法を実際の構造物の状況に適用するには、実構造物の拘束率を計測し、その拘束率に応じた試験体の拘束方法を考慮しなければならない。また、今後は初期材齢のみならずさらに長期に至る材齢の性状を評価する場合には、拘束率を緩和した拘束方法を考える必要がある。

4. まとめ

本研究で以下のことが明らかとなった。

- 1) 軽量モルタルの初期材齢を中心とした試験体による圧縮試験、割裂引張試験、曲げ試験を実施した結果、それらの基礎的力学的特性を明らかにすることができた。
- 2) 拘束試験体による乾燥収縮ひび割れ実験を行った結果、初期材齢においてひび割れが発生したことを確認したとともに、自由収縮ひずみや力学的試験結果を参考として、ひび割れ時の力学的な特性を評価することができた。
- 3) 本試験方法を実際の構造物の状況に適用するには、実構造物の拘束率を計測し、その拘束率に応じた試験体の拘束方法を考慮する必要がある。

謝辞

本研究は、2016年度の大阪市立大学生活科学部居住環境学科卒業である上田勇樹（現・大京）の多大な協力を得た。ここに謝意を述

べる。また、本研究は「外壁工法のひび割れ防止技術に関する研究会」の一環として実施されたものであり、関係者には心より感謝いたします。

参考文献

- 1) 大久保孝昭ほか：木造住宅におけるラスモルタルのひび割れ制御に関する研究（その1～3）、日本建築学会大会学術講演梗概集（材料施工）、pp.899-904、2006.09
- 2) 松本慎也・大久保孝昭：下地コンクリートに拘束される仕モルタルにおいて乾燥収縮ひび割れが発生しやすい位置の予測、日本建築学会構造系論文集 第75巻 第648号、pp.241-249、2010.02

[2018年9月30日原稿受理 2018年12月18日採用決定]