

# 論文 セメントペーストの自己収縮測定装置の試作

高橋俊之\*1・中田英喜\*2・後藤誠史\*3

**要旨**：セメントペーストの自己収縮を非接触式の渦電流式変位センサを用いて初期材齢から精度良く測定できる装置を考案した。凝結始発から材齢2日までは型枠にペーストを入れた状態で自動的に測定を行ない、それ以降は脱型して測定を適時行えるようにした。型枠からの拘束の影響を少なくするためには試料と型枠との間にポリエチレン製フィルムとポリテトラフルオロエチレン製フィルムを敷くことが必要であり、測定時の計測データの乱れを抑えるためには高性能のアンプユニットを用いることが必要であること等が分かった。

**キーワード**：セメントペースト、自己収縮、非接触式変位センサ、測定装置

## 1. はじめに

セメント系材料の巨視的な体積が、外力、水分の侵入や逸散、温度変化、炭酸化などの無い条件下で、セメントの水和の進行に伴って減少する現象は自己収縮 (Autogeneous shrinkage) として知られている [1]。この自己収縮は水セメント比が低くなると増大することが最近の研究によって明らかにされ [2]、マスコンクリートの温度応力解析などでも自己収縮ひずみを考慮する必要性が指摘されている [3]。自己収縮の機構を解明するためには、セメントペーストの自己収縮を精度良く測定できることが不可欠であり、本研究ではセメントペーストの自己収縮測定装置の試作を行った。

## 2. 既往の研究

自己収縮をセメントの凝結始発直後から測定する方法としては、セメントペーストをゴム袋に封入しゴム袋の体積変化を測定する方法 [4]、型枠に充填したセメントペースト中にゲージプラグを埋め込み、ゲージプラグの動きをダイヤルゲージを用いて測定する方法 [5] 等が報告されている。ゴム袋に封入する方法は、ゴム膜内側のブリーディング水が見掛け上自己収縮を大きくするなどの問題があり、適当な方法と言えない。ゲージプラグを埋め込んで測定する方法はブリーディングが生じる方向と垂直な方向で長さ変化を測定するので、ブリーディングの影響を受けにくく、封入法よりも優れていると考えられる。しかし、既往の方法では、ダイヤルゲージをゲージプラグに接触させてセメントペーストの長さ変化を測定しているため、ダイヤルゲージのスピンドルによる反力がセメントペーストに伝達し、測定値に誤差を与える恐れがある。また、試料と型枠との間の付着が測定結果に与える影響や繰り返し精度についての記載がないように思われる。さらに、初期材齢では長さ変化の時間的な変化が大きいため、測定間隔をできるだけ短くする必要があり、自動計測できることが望ましい。

\*1 宇部興産 (株) 建設資材事業本部 技術開発部 セメント基礎研究グループ主任部員、理修 (正会員)

\*2 宇部興産 (株) 建設資材事業本部 技術開発部 セメント基礎研究グループ、工修

\*3 山口大学助教授 工学部機能材料工学科、工博 (正会員)

そこで、本研究では、セメントペースト中に埋め込んだゲージプラグの動きを非接触式の変位センサを用いて自動計測できる装置を試作し、試料と型枠との付着、変位センサの性能、ペースト内部の温度変化等の影響について検討を行った。

### 3. 実験概要

#### 3.1 試料およびセメントペーストの調製

本実験では、普通ポルトランドセメントを使用した。表-1に使用したセメントの粉末度および化学組成を示す。セメントペーストの調製は、JIS R 5201 「セメントの物理試験方法」の凝結試験方法に準じ、手練りにて3分間行った。水セメント比は0.30とした。

表-1 供試セメントの化学組成および粉末度

種別	化学組成 (%)										化合物組成 (%) <sup>1)</sup>				粉末度 <sup>2)</sup> ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )
	ig loss	insol.	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	
普通ポルトランドセメント	0.8	0	21.5	5.1	2.8	65.2	1.0	2.1	0.23	0.52	57	18	9	9	3190

1) Bogue式により計算

2) ブレーン比表面積

#### 3.2 セメントの凝結試験

セメントの凝結は、JIS R 5201 「セメントの物理試験方法」の凝結試験方法に準じて測定した。水セメント比は0.30とした。

#### 3.3 自己収縮の測定

試作した測定装置の概略を図-1に示す。凝結始発から材齢2日までは図-1 (a) の装置を用いた。型枠内に充填したセメントペースト中の両端にゲージプラグ（反射板：アルミニウム製）を埋め込み、その動きを非接触式の渦電流式変位センサ（キーエンス社製 センサヘッド：EX-008、アンプユニット：EX-502）を用いて計測した。計測したデータはデータロガー（東京測器研究所製、TDS-302）によって自動的にサンプリングした。セメントペーストの自己収縮

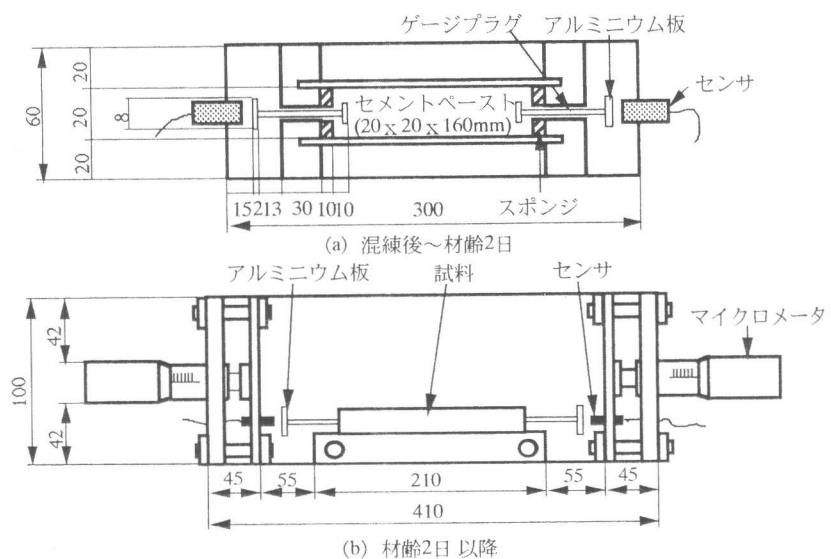


図-1 自己収縮測定装置（単位：mm）

ひずみは、セメントペーストの両端に埋め込んだゲージプラグの移動量から計算によって求めた。実験で用いた渦電流式変位センサの測定範囲は0~2mmであり、分解能および直線性は、それぞれ試料のひずみに換算すると $8.6\mu$ および $\pm 14\mu$ であった。セメントペーストの自由な膨張を妨げないように試料と型枠との間には撥水処理を施したスポンジを挿入した。また、セメントペーストから水分が蒸発するのを防ぐため、セメントペーストの上面をポリエチレン製フィルムで覆い、型枠の上部には湿布を施した。

材齢2日に達した時点で、図-1 (a) の型枠から硬化したセメントペーストを脱型し、水分の蒸発を防ぐため、直ちにセメントペースト全体をポリエチレン製フィルムとアルミニウム製のフィルムで密封した。密封後、図-1 (b) の装置を用い、セメントペーストの両端に埋め込んだピストンと装置に取り付けられた非接触式の渦電流式変位センサとの距離から試料の基長を求めた。装置の検定は、長さ既知のステンレス製の角柱（恒温室内で保管）を用いて測定ごとに行った。所定材齢に達した試料は基長の測定時と同じ方向になるようにガイド板に固定し、基長との差を計測して長さ変化を求めた。これらの測定は全て $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ に調節された恒温室内で行った。

#### 4. 結果および考察

##### 4.1 試料と型枠との付着

混練したセメントペーストを型枠内に流し込み、硬化途中のセメントペーストの長さ変化を測定する場合、型枠内側の面とセメントペーストとの付着によりセメントペーストの自由な膨張・収縮が妨げられることが懸念される。そこで、試料と型枠との間にプラスチック製フィルムを敷きつめ、型枠と試料との間の付着を低減する方法を検討した。その結果を図-2に示す。型枠内に

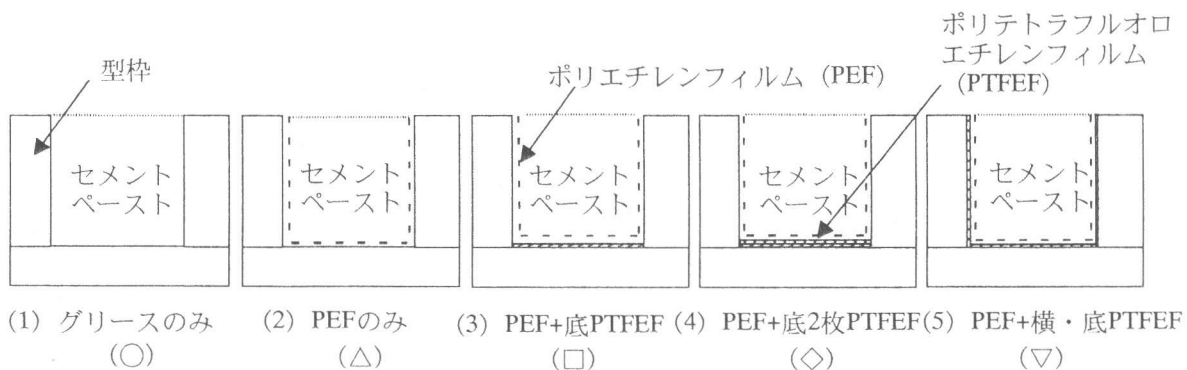
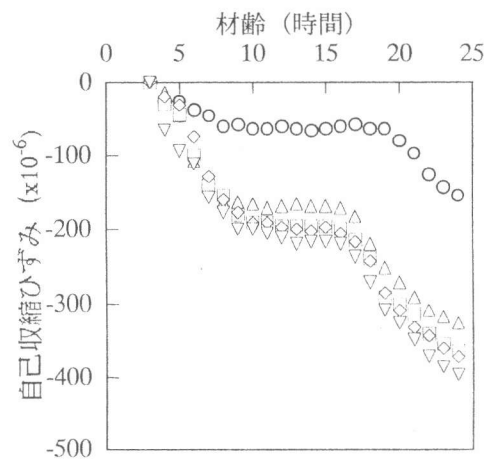


図-2. セメントペーストの自己収縮に及ぼす型枠からの拘束の影響

にポリエチレン製フィルムとポリテトラフルオロエチレン製フィルム（以下、テフロン製フィルムと称す）を敷くことによって型枠からの拘束はかなり低減され、測定される収縮ひずみは大きくなった。底面にテフロン製フィルムを1枚敷いた場合（図-2（3））と2枚敷いた場合（図-2（4））では測定される収縮ひずみはほぼ同じで型枠からの拘束の程度はほぼ同じであるが、側面にテフロン製フィルムを敷いた場合（図-2（5））には収縮ひずみはこれらより若干大きくなり型枠からの拘束は低減されることが分かった。しかし、図-2の（3）、（4）、（5）の場合の繰り返し精度を比較すると、前二者が $\pm 30\mu$ （ $3\sigma$ ）であるのに対して、後者は $\pm 300\mu$ （ $3\sigma$ ）と大きく、再現性が悪いことが分かった。したがって、型枠の側面にテフロン製フィルムを敷く方法（図-2（5））はデータの再現性の面で好ましくないと考え、底面にテフロン製フィルムを2枚敷く方法（図-2（4））よりも簡便な底面にテフロン製フィルムを1枚敷く方法（図-2（3））を採用することとした。

## 4.2 変位センサの性能

変位センサのアンプユニットとしてEX-502より低価格のEX-202を用いて検討を行った。その結果、EX-202では計測データの乱れが激しく、その変動幅は試料のひずみに換算すると約 $\pm 280\mu$ であった。EX-502の $\pm 10\mu$ に比べると、かなり大きくなった。これは、EX-202の分解能および直線性が試料のひずみに換算するとそれぞれ $12\mu$ および $\pm 1500\mu$ とEX-502の $8.6\mu$ および $\pm 14\mu$ に比べて悪いことによるものと考えられる。そこで、アンプユニットにはEX-502を用いることとした。

## 4.3 セメントペースト内部の温度変化

セメントは水和すると発熱し、セメントペーストが断熱状態におかれると内部の温度が上昇することが知られている。セメントペースト温度の上昇は熱膨張を引き起こすので、温度一定を前提とする自己収縮の測定では熱膨張の補正が必要となる [5]。そこで、本装置を使用した場合のセメントペースト中心部の温度変化を熱電対を用いて測定した。その結果を図-3に示す。試料内部の温度は室温と同様な変化を示し、温度上昇は特に認められなかった。これは、セメントの水和によって発熱は生じるが、型枠から外部への放熱が効率よく行なわれたためであると考えられる。したがって、普通セメントで $W/C=0.30$ という条件では本装置を用いた場合、特に温度補正をする必要がなく、普通セメントよりも発熱量の大きなセメントを用いた場合や本実験より富配合（ $W/C < 30\%$ ）とした場合に限り、

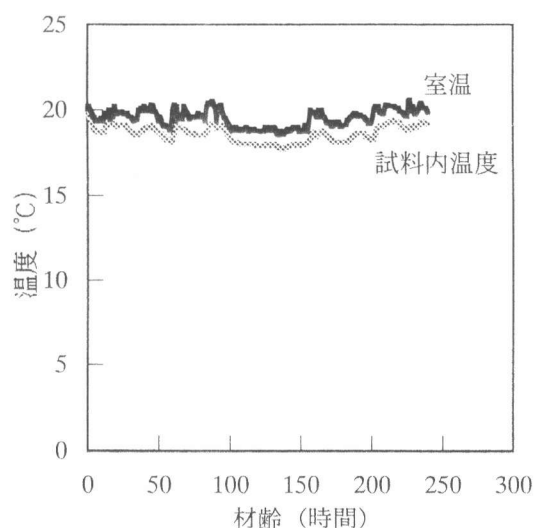


図-3. 自己収縮測定時における試料中心部の温度変化  
（図1（a）の装置を用いて測定）

予めペースト内部の温度変化を測定する必要があると考えられる。

#### 4.4 型枠からの脱型の影響

本測定では、材齢2日で型枠から試料を脱型し、その後は脱型した試料について長さ変化を測定する方式を採用している。これは、試料を脱型することによって型枠の使用サイクルを高めるためである。しかし、この場合、型枠から試料を脱型して測定する場合と型枠内で継続して測定する場合とで互いのデータが一致する必要がある。そこで、型枠内で継続して測定する場合と材齢2日以降脱型して測定する場合とで比較検討を行った。図-4に比較結果を示す。型枠からの脱型の有無にかかわらず測定される値はほぼ同じとなった。したがって、材齢2日で型枠を脱型し、その後脱型した試料の長さ変化を測定しても特に問題のないことが分かった。

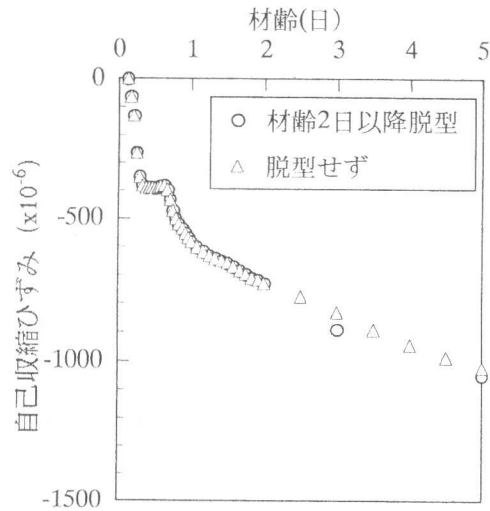


図-4 セメントペーストの自己収縮に及ぼす型枠からの脱型の影響

#### 4.5 普通セメントのペーストの自己収縮

本装置を用いて普通セメントのペーストの自己収縮を凝結始発から材齢28日まで測定した結果を図-5に示す。自己収縮の経時的な変化を表す曲線には2つの屈曲点が存在することが分かる。一

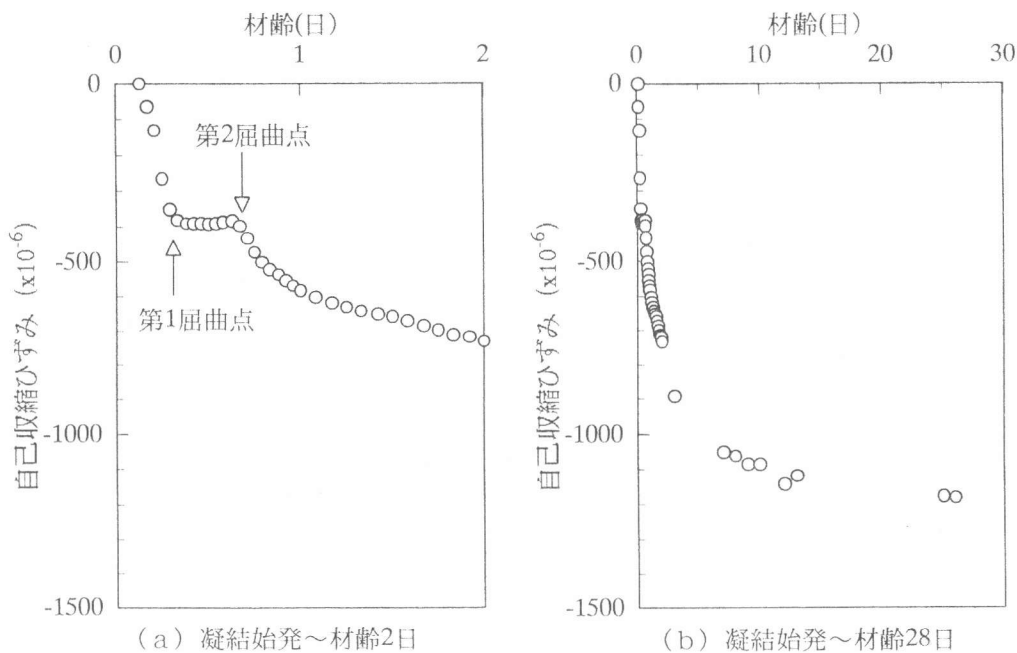


図-5 普通セメントのペーストの自己収縮  
(始発：2時間20分、終結：4時間5分)

つは、始発直後からの収縮が一旦終了する点（第1屈曲点と称す）であり、注水後7時間に現われた。もう一つは、再び収縮が開始する点（第2屈曲点と称す）であり、注水後16時間に現れた。このような2つの屈曲点はセメントペースト中にゲージプラグを埋め込み、その動きをダイヤルゲージを用いて測定するという本測定と原理的に同じ方法を用いた場合に認められる [5]。屈曲点が現われる理由については文献 [6] にその詳細を述べているが、始発直後からの収縮が一旦終了するのは水和によってセメントペースト内部に強固な骨格が形成されることに起因していると考えられる。また、注水後16時間に再び収縮が開始するのは、せつこうがこの時期に消費され、ペースト内部の構造形成に重要な役割を果たしているエトリンナイトが形態変化を起こすためと推察される。なお、材齢28日における収縮ひずみは $1180 \times 10^{-6}$ であり、既往の報告値（約 $1200 \times 10^{-6}$ ） [7] と良く一致した。

## 5. まとめ

セメントペーストの自己収縮を非接触式の渦電流式変位センサを用いて初期材齢から精度良く測定できる装置を考案した。凝結始発から材齢2日までは型枠にペーストを入れた状態で自動的に測定を行ない、それ以降は脱型して測定を適時行えるようにした。型枠からの拘束の影響を少なくするためには試料と型枠との間にポリエチレン製フィルムとポリテトラフルオロエチレン製フィルムを敷くことが必要であり、測定時の計測データの乱れを抑えるためには高性能のアンプユニットを用いることが必要であること等が分かった。

## 参考文献

- [1] Davis,H.E. : Autogeneous Volume Changes of Concrete, ASTM, 40, pp.1103-1110, 1940
- [2] 田澤栄一、宮沢伸吾、重川幸司、三宅啓文 : 水和反応による硬化セメントペーストのマクロな体積減少、セメント・コンクリート論文集、No.45、pp.122-127、1991
- [3] 長曾我部徹、鈴木康範、小田部裕一、流龍成 : 低発熱形セメントの収縮特性が温度応力に及ぼす影響、セメント・コンクリート論文集、No.49、pp.474-479、1995
- [4] 野口康成、原田宏、大門正機 : ポルトランドセメントペーストの水和収縮に関する研究、セメント・コンクリート論文集、No.48、pp.52-57、1994
- [5] 田澤栄一、宮沢伸吾 : セメント系材料の自己収縮に及ぼす結合材および配合の影響、土木学会論文集、No.502/V-25、pp.43-52、1994
- [6] 高橋俊之、中田英喜、吉田孝三郎、後藤誠史 : セメントペーストの自己収縮に及ぼす水和反応の影響、コンクリート工学論文集、Vol.7、No.2、1996（投稿中）
- [7] 田澤栄一、宮沢伸吾、佐藤剛 : セメントペーストの自己収縮、セメント・コンクリート論文集、No.46、pp.684-689、1992