

委員会報告 「自己収縮研究委員会報告」

田澤栄一*

1. 委員構成

委員長 田澤栄一（広島大学）

幹 事 佐藤良一（宇都宮大学）

同 坂井悦郎（東京工業大学）

委 員 井上和政（（株）竹中工務店）

同 大下英吉（広島大学）

同 大谷 博（東急建設（株））

同 大野義照（大阪大学）

同 岡本修一（大成建設（株））

同 加藤弘義（（株）トクヤマ）

同 岸 利治（東京大学）

同 高田和法（鹿島建設（株））

同 竹田宣典（（株）大林組）

同 棚野博之（建設省）

同 近田孝夫（新日鐵化学（株））

同 寺村 悟（電気化学工業（株））

同 富田六郎（日本セメント（株））

同 沼尾達弥（茨城大学）

委 員 橋田 浩（清水建設（株））

同 羽原俊祐（秩父小野田（株））

同 原田 宏（秩父小野田（株））

同 宮澤伸吾（足利工業大学）

同 山田人司（（株）間組）

同 吉田孝三郎（宇部興産（株））

通信委員 小俣富士夫（ショーボンド建設（株））

同 笠井哲郎（東海大学）

同 鳥居和之（金沢大学）

同 西田徳行（西松建設（株））

同 樋口正典（三井建設（株））

旧 委 員 池尾陽作（（株）竹中工務店）

同 二羽淳一郎（名古屋大学）

同 吉田智則（（株）トクヤマ）

2. 委員会活動の概要

超高層ビル、斜張橋、超高速鉄道構造物などにみられる構造物の多様化により、コンクリートの高強度化、高性能化に関する研究が活発に行なわれるようになってきた。これにともない、セメントペーストの水セメント比が低下することにより自己収縮とそれによるひび割れの問題が顕在化してきた。日本コンクリート工学協会は、この問題の解決を図るため、自己収縮のメカニズム、自己収縮によるひび割れ発生機構に関する調査研究を行い、最終的には設計・施工指針への取り込み方について提案することを目的として、1994年に「自己収縮研究委員会」を設置した。

本委員会では、3つのワーキンググループ（WG）を設け、現在まで約2年間の調査研究を行ってきた。各WGの作業内容の概略は、以下に示す通りである。

- (1) 定義・試験法WG：自己収縮に関連した用語の定義および統一的な試験法の提案
- (2) 材料・機構・低減法WG：自己収縮に影響を及ぼす要因、自己収縮の機構および低減方法の検討
- (3) 応力・実構造物WG：自己収縮によるひび割れ試験法の提案、実構造物の自己収縮応力の検討

* 広島大学教授 工学部第四類（建設系）、工博（正会員）

3. 用語について

本委員会では、自己収縮に関連する用語の定義について検討し、現時点において以下のような用語の定義(案)を作成した。

自己収縮(Autogenous shrinkage)

セメント系材料において、セメントの水和により凝結始発以後に巨視的に生じる体積減少を自己収縮という。自己収縮には物質の浸入や逸散、温度変化、外力や外部拘束に起因する体積変化は含まれない。

また、自己収縮率は自己収縮を体積減少率として表したものであり、自己収縮ひずみは自己収縮をひずみとして表したものである。

【解説】セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの巨視的な見かけの体積が、水和収縮により減少してゆく現象を自己収縮という。この場合、基準長さの測定は、凝結の始発時点に行うものとする。自己収縮は、元来、三次元的に生じる現象であるが、自己収縮ひずみ (ε_{as}) は、自己収縮を一次元のひずみとして表したものである。

コンクリートが乾燥を受ける場合、通常のコンクリートでは水分の逸散により乾燥収縮を生じる。また、マスコンクリートは硬化過程で水和熱により温度変化が生じ、これにより体積変化を生じる。質量や温度の変化するこのような条件下でも自己収縮は生じるので、従来測定されている乾燥収縮ひずみや温度ひずみは、同じ温度履歴で生じる自己収縮ひずみを含んでいる。

自己膨張(Autogenous expansion)

セメント系材料において、セメントの水和により凝結始発以後に巨視的に生じる体積増加を自己膨張という。自己膨張には物質の浸入や逸散、温度変化、外力や外部拘束に起因する体積変化は含まれない。

また、自己膨張率は自己膨張を体積膨張率として表したものであり、自己膨張ひずみは、自己膨張をひずみとして表したものである。

自己体積変化(Autogenous volume change)

自己収縮と自己膨張を総称して自己体積変化という。

水和収縮(Chemical shrinkage)

未水和のセメントと水が反応するとき、生成する水和物の体積が前二者の体積の和より小さくなる現象を水和収縮という。

水和収縮率は、次式で表されるものとする。

$$S_{hy} = \frac{(V_c + V_w) - V_{hy}}{V_{ci} + V_{wi}} \times 100 \dots \dots \dots (1)$$

S_{hy} : 水和収縮率 (%)
 V_{ci} : 練混ぜ直前のセメントの体積
 V_c : 水和したセメントの体積
 V_{wi} : 練混ぜ直前の水の体積
 V_w : 反応(水和)した水の体積
 V_{hy} : 水和生成物の体積

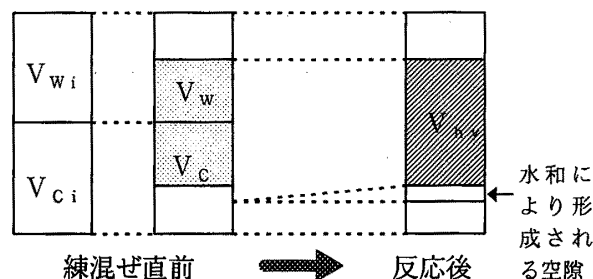


図-1 式(1)における記号の定義

【解説】セメント硬化体を固相(未水和セメント+反応生成物)、液相(未水和水)および気相(練混ぜ直後から存在する気泡と水和により形成される空隙)から成ると考えると、固相体積と液相体積の総和すなわち実質部分の体積減少が水和収縮である。これに対し、自己収縮は硬化体中の気相の体積を含む見かけの体積の減少である。水和収縮は、化学収縮または硬化収縮と呼ばれることも

ある。

一般に、凝結によりセメント硬化体の骨格が形成された後は、水和の進行によって硬化体には空隙（水隙および練混ぜ直後から存在する気泡は含まない）が新たに形成される。このため、巨視的な体積減少率すなわち自己収縮率は水和収縮率と比較すると極めて小さくなる。

乾燥の影響がない場合、セメントペーストの自己収縮と水和収縮の関係を模式的に示すと図-2のようになる。

セメントペーストの水和収縮率と自己収縮率の関係は近似的に次式により表すことができる。

$$S_{hy} \doteq S_p + S_{as} + \Delta S_{hy} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 S_{as} ：自己収縮率（％）， ΔS_{hy} ：凝結始発時点における水和収縮率（％）

S_p ：水和により形成された空隙の体積の硬化体体積に対する割合（％）（ S_p を求める
ときの空隙には水隙および打込み直後から存在する気泡は含まない。）

式(2)において $\doteq$ としたのは、水和収縮率（ S_{hy} ）は練混ぜ直後、自己収縮率（ S_{as} ）は凝結始発時を基準としているため、厳密には両辺が等しくないためである。なお、式(2)において ΔS_{hy} は小さいのでこれを無視すると式(3)が得られる。

$$S_{hy} \doteq S_p + S_{as} \dots\dots\dots (3)$$

なお、自己収縮率と自己収縮ひずみの関係は、次式により表すことができる。

$$S_{as} = 300 \varepsilon_{as} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 ε_{as} ：自己収縮ひずみ

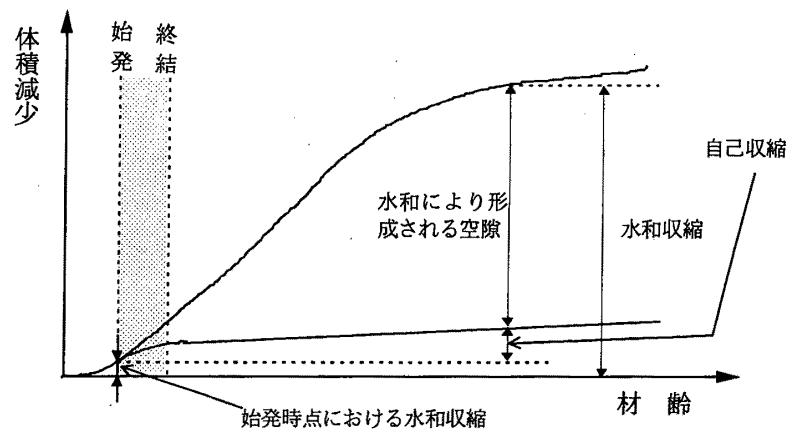


図-2 自己収縮率と水和収縮率の関係

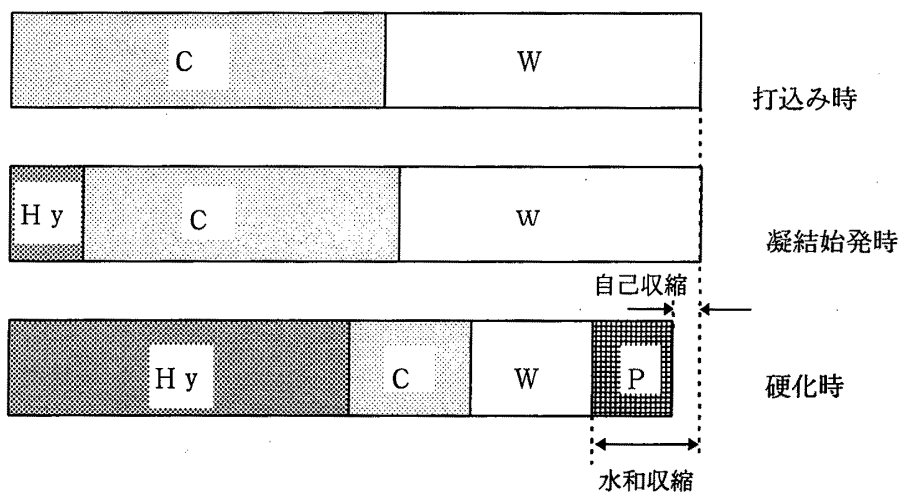


図-3 水和収縮と水平方向の自己収縮の関係

重力の影響がある場合は、水平方向の長さ変化と鉛直方向の長さ変化は以下のように異なる。水和収縮と水平方向の長さ変化の関係を図示すると、図-3のようになる。

水和収縮と鉛直方向の長さ変化の関係の一例を図示すると、ブリーディングの有無により、図-4および図-5のようになる。

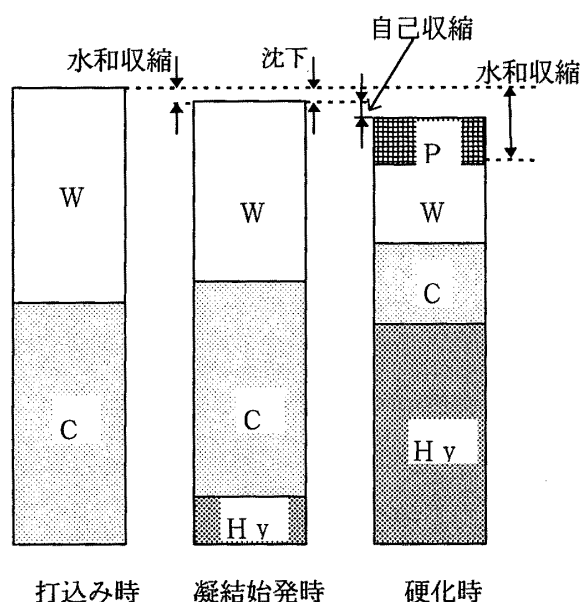


図-4 水和収縮と鉛直方向の自己収縮の関係
(ブリーディングが無い場合)

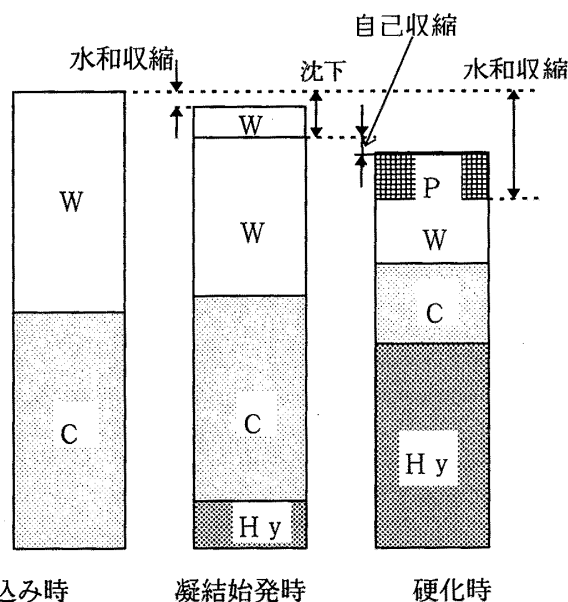


図-5 水和収縮と鉛直方向の自己収縮の関係
(ブリーディングがある場合)

W : 未水和水

W_B : ブリーディング水

C : 未水とセメント

Hy : 水和生成物

P : 水和により形成される空隙

自己乾燥(Self desiccation)

水和反応に伴い間隙水が消費されることにより、セメント硬化体を実質的に乾燥状態となる現象を自己乾燥という。

【解説】水和により形成される空隙(P)に外部より水が補給されない場合、硬化体は水分の逸散が生じない条件下で実質的に乾燥状態となる場合がある。この現象を自己乾燥という。硬化体組織が緻密な場合や部材断面が大きい場合は、水中養生を行っても表層部のみにしか養生水が浸透しないことがあり、このような場合は部材中心部が自己乾燥状態となる。

沈下(Subsidence)

セメント系材料がブリーディングや水和収縮などにより、凝結始発以前に鉛直方向に長さの変化を起こす現象を沈下という。

4. 水和収縮および自己収縮の試験方法

4. 1 セメントペーストの水和収縮試験方法

(1) 適用範囲

この試験方法は、セメントペーストの水和収縮量を測定するものである。

(2) 測定用器具

- ① 試料容器（高さ：75mm以下，容量：50cc以上のガラス製容器（サンプル瓶など））
- ② メスピペット（5cc）（最小目盛り：0.05cc），③ シリコン栓またはゴム栓
- ④ ラップ，⑤ モルタルミキサ，⑥ 注水ポンプ（洗浄ビン），⑦ 水酸化カルシウム飽和溶液
- ⑧ 防水性の接着剤

(3) 使用材料および使用器具の準備

使用するすべての材料および器具類は $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ の室内に24時間放置し、恒温とした後、試験に用いるものとする。

(4) セメントペーストの製造

1) セメントペーストの水セメント比

水セメント比は50%とする。（なお、水セメント比を50%未満として行う場合は、解説を参照のこと。）

2) セメントペーストの練混ぜ

- (a) セメントペーストの練混ぜは、 $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ の室内で行うものとする。
- (b) セメントペーストの練混ぜには、ホバート型モルタルミキサを用いる。
- (c) 練混ぜ時間は3分間とする。なお、必要に応じ練混ぜを休止しさじで練り鉢およびパドルに付着したセメントペーストをかき落とす等の操作を行う。

(5) 測定方法（図-6参照）

- 1) シリコン栓の中央部にメスピペットの先端が僅かに（約2mm）突き出るまでさし込みシリコングリース等で防水・固定する。
- 2) 試料容器の質量を0.1gまで量り、 $W_1(\text{g})$ とする。
- 3) 試料容器の広口部にセメントペーストを投入し、軽く振動させて空気泡を抜く。ペーストと容器の合計質量を0.1gまで量り、 $W_2(\text{g})$ とする。
- 4) 細口部上面まで水酸化カルシウム飽和溶液を入れる。この際、ペースト面が乱れないように注意する。
- 5) 1)で作成したシリコン栓を試料容器に垂直に差し込む。この際、メスピペットを水酸化カルシウムの飽和溶液が上昇するのを確認する。
- 6) メスピペット上部から注水ポンプ（洗浄ビン）を用いて水酸化カルシウム飽和溶液を測定可能な高さまで入れる。
- 7) メスピペット上部をラップで、試料容器とシリコン栓の接合部をボンドでそれぞれ密閉・固定する。
- 8) 容器は $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ の室内に静置し、メスピペット部の水面高さ $H_0(\text{cc})$ を0.05ccまで読みとり、測定開始とする。
- 9) 以下、所定の材令 T_0 でメスピペット部の水面高さ $H_0(\text{cc})$ を0.05ccまで読みとる。なお、水面の変化量が大きく水面が測定目盛り以下になることが予想される場合は、メスピペット上部から水酸化カルシウム飽和溶液を再添加する。この際、添加水量をメスピペットの目盛りから読み

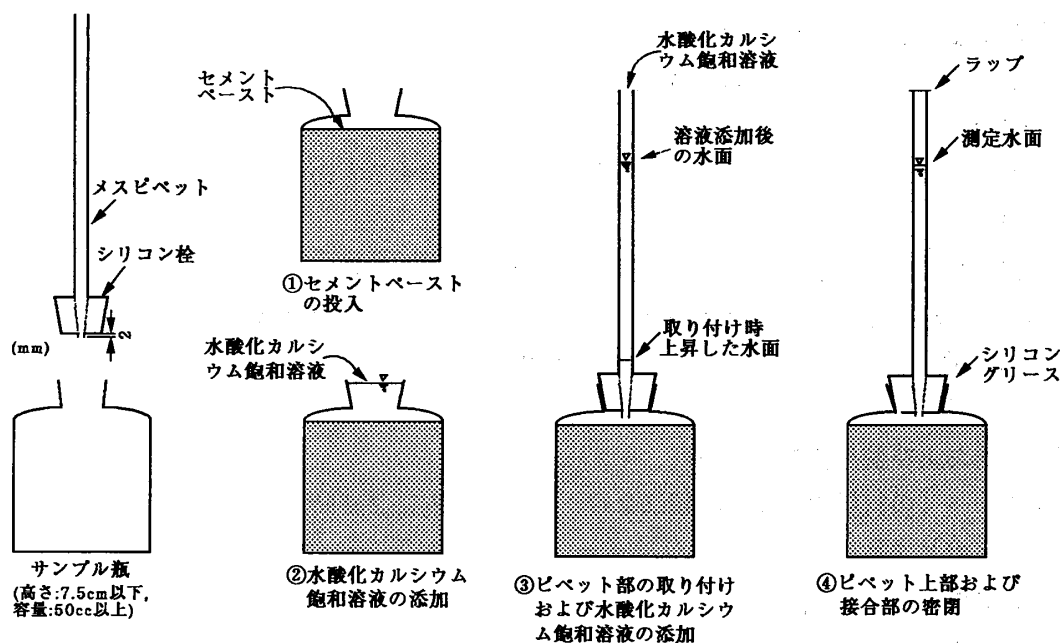


図-6 水和収縮量の測定手順

とる。

10) 測定個数は、同一条件の試験に対して2個以上とする。

(6) 計算

1) 試料体積の計算

セメントペーストの W/C ($=0.5$)、使用セメントの比重 ρ_c 、 W_1 および W_2 を用い、以下の式によって算出する。

$$\text{試料体積 } V_p = \frac{(W_2 - W_1)(W/C + 1/\rho_c)}{W/C + 1} \quad (\text{cc})$$

2) 水和収縮率の計算

n 材令における水和収縮率 S_{hyn} (%) は以下の式による。

$$S_{hyn} = \frac{H_n - H_0}{V_p} \times 100 \quad (\%)$$

水和収縮率は測定個数の平均値とする。

(7) 報告

- 1) 使用セメントの種類と品質
- 2) 配合
- 3) セメントペーストの練混ぜ方法
- 4) 測定期間中の室温
- 5) 試料の質量および容積
- 6) 各測定材令および水和収縮率
(図-7に測定結果の一例を示す。)
- 7) その他

*水セメント比が50%でない場合。

(a) 水セメント比

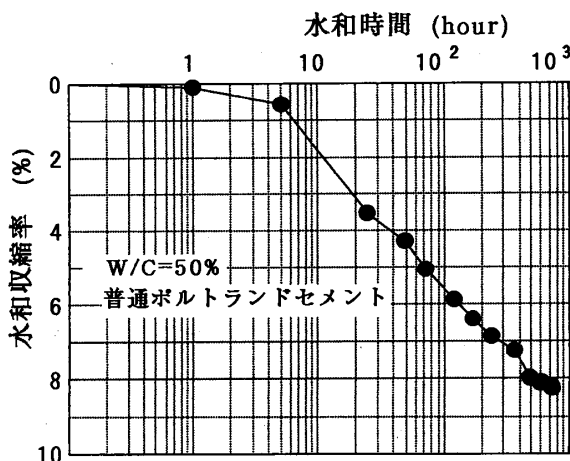


図-7 水和収縮率の測定結果の一例

- (b) 試料容器の寸法
(c) 試料の厚さ

【解説】

1) 水セメント比について

セメントペーストの水セメント比を50%より小さくして行う場合には、以下のようにする。

試料容器内のセメントペーストの厚さを、本試験法で規定した厚さ(7.5cm)より薄くする。使用する試料容器は、高さが低く、径の大きいものを選定する(試料容積が50cc以上となる容器とする。)。これは、水セメント比が小さくなるほど、ペースト上面からの水の浸透が妨げられ、ペースト厚さが大きいと、収縮量が小さめに測定されるためである。実際には、ペースト厚さを変えて水和収縮率の測定を行い、測定値に影響が現れないペースト厚さを選定する必要がある。図-8および図-9に水セメント比が40%および26%における、ペーストの厚さを変えた場合の水和収縮率の測定例を示す。この結果から、ペースト厚さの目安は、水セメント比40%では7.0cm以下がよく、水セメント比26%では2cmより更に薄くする必要がある。

2) 水和度の算定について

セメントの水和収縮率がセメントの水和度に比例すると仮定すると、セメントが100%水和した場合(完全水和時)のセメントペーストの理論収縮率を求め、この値と水和収縮率の実測値の比より、任意の水和時間におけるセメントペースト全体の水和度が以下の式により算出できる。

$$DH_n = \frac{S_{hyn}}{CS_{hy100}} \times 100 \quad (\%)$$

ここに、

DH_n (%) : n材令におけるセメントの水和度

S_{hyn} : n材令における水和収縮率の実測値

CS_{hy100} : 100%水和時の理論収縮率、以下の式による。

$$CS_{hy100} = \frac{CS_{hy100}}{W/C + 1/\rho_c} \quad (\%)$$

ここに、

W/C : 水セメント比

ρ_c : 使用セメントの比重

CS_{hy100} : 以下の式による。

$$CS_{hy100} = \{5.98C_1 + 5.35C_2 + 28.6C_3 + 16.7C_4 - (23.6C_3 + 10.1C_4)B/A\} / 100$$

ここに、 C_1 , C_2 , C_3 , C_4 はそれぞれ、使用セメントの化学成分からBogue式により求めた、 C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF の鉱物組成(%)

$$A = C_3/270.2 + C_4/486.0$$

$$B = 3C_5/408.5$$

C_5 : 使用セメントの $CaSO_4$ の含有量(%)

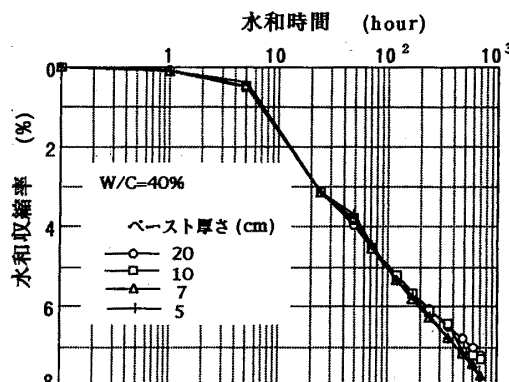


図-8 水和収縮率に及ぼすペースト厚さの影響(W/C=40%)

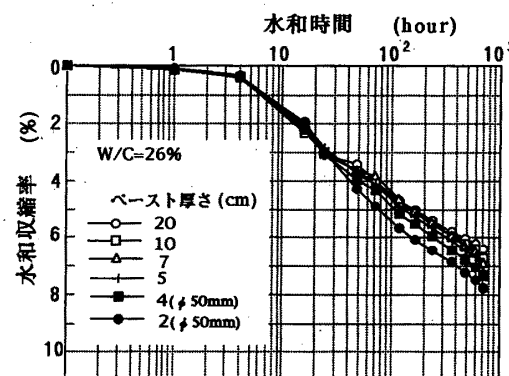


図-9 水和収縮率に及ぼすペースト厚さの影響(W/C=26%)

4. 2 セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの自己収縮および自己膨張試験方法

〔1〕 **適用範囲** この試験方法は、セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの自己収縮および自己膨張を供試体を用いて試験する方法について示す。

〔2〕 供試体

(1) **供試体の寸法** セメントペーストおよびモルタルの場合は、原則として $4 \times 4 \times 16$ cm とする。コンクリートの場合は、供試体の幅と高さが等しく、かつ、粗骨材最大寸法の 3 倍以上、長さは幅または高さの 3.5 倍以上とする。粗骨材の最大寸法が 30 mm 以下の場合は、原則として $10 \times 10 \times 40$ cm (または 50 cm) とする。

(2) **供試体の個数** 同一条件の試験に対して必要な供試体の個数は、2 個以上とする。

〔3〕 器具

(1) **型 枠** 型枠は鋼製のものとし、両端板の中央にはゲージプラグをセットするために、直径 3 ～ 5mm の穴を開けたものとする。

(2) **ゲージプラグ** ダイアルゲージのスピンドルを接触させ、長さ変化を測定するための標点とするもので、さびを生じない金属製のものとする。

図-10 および図-11 は、ゲージプラグの一例を示したものである。

(3) **ダイヤルゲージ⁽¹⁾** ダイアルゲージは、JIS B 7503 (0.001mm 目盛ダイヤルゲージ) の規定に合格するものとする。

(4) **長さ変化測定装置** 脱型後の測定に用いる長さ変化測定装置は、JIS A 1129 の規定に合格するコンパレータ方法またはコンタクトゲージ方法による測定器とする。

注(1) ダイアルゲージ以外の変位計を用いる場合は、ダイヤルゲージと同等以上の精度を有するものを用いる。

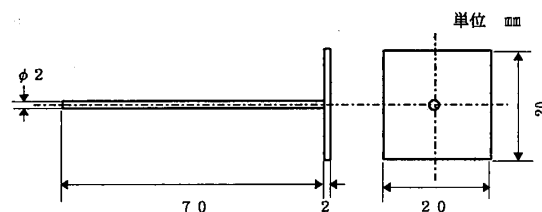


図-10 コンクリート用のゲージプラグの一例

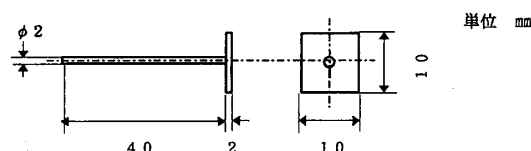


図-11 セメントペーストおよびモルタル用のゲージプラグの一例

〔4〕 試験方法

(1) 脱型以前における試験方法

① 試料の自由な変形が拘束されるのを防ぐ

ために、組み立てた型枠の底面の内側にテフロンシート (厚さ 1mm)、両端部の内側にポリスチレンボード (厚さ 3mm) を敷く。次に、型枠内側の側面、端面および底面にポリエステルフィルム (厚さ 0.1mm) を敷き、試料と型枠が接触しないようにする。

② 型枠の端板の穴にゲージプラグを供試体の長軸と一致するようセットし、ゲージプラグ間の距離 (L_0) を 1mm まで測定する。この際、ゲージプラグを試料中に埋め込む深さはセメントペーストおよびモルタルの場合は 15 ± 5 mm、コンクリートの場合は 30 ± 5 mm とする。

③ 試料を型枠に打込み、締固めを行う⁽²⁾。この際、ゲージプラグが振動により移動しないようにする。

注(2) 高流動コンクリートなどのように通常の締固めを行うと材料分離を起こす場合は、適切な打込み方法による。

- ④ 直ちに表面仕上げを行い、試料からの水分の逸散を防ぐために、仕上げ面をポリエステルフィルム（厚さ 0.1mm）で覆い、さらにその上から湿った布を覆い、 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 80%以上の室内に静置する。

- ⑤ 試料が始発時間⁽³⁾に達した時点で、ダイヤルゲージのスピンドルを、供試体の長軸に一致して動くようにゲージプラグに接触させ、第一回目の測定を行い、この時点を基準とする。この時のダイヤルゲージの目盛りを読み、 x_{01} 、 x_{02} とする。

注（3）始発時間は、同一のバッチの試料について、セメントペーストの場合は JIS R 5201、モルタルおよびコンクリートの場合は JIS A 6202 附属書 1 によって凝結試験を行い、求めるものとする。

- ⑥ 材齢 24 時間でダイヤルゲージの目盛りを読み⁽⁴⁾、 x_{i1} 、 x_{i2} とする。また、必要に応じて、始発時から脱型時までの所定の材齢において同様の測定を行う。測定後、供試体は直ちに脱型し、(2)の試験を行う。

注（4）試料の凝結が遅いために材齢 24 時間で脱型できないときは、脱型する材齢を適宜定め、脱型直前にダイヤルゲージの目盛りを読み、 x_{i1} 、 x_{i2} とする。

- ⑦ 測長の際に供試体の中心部の温度を測定し、線膨張係数をセメントペーストの場合には $20 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 、コンクリートの場合には $10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ として長さの補正を行う⁽⁵⁾。

注（5）モルタルの場合は骨材量を考慮して適宜定める。

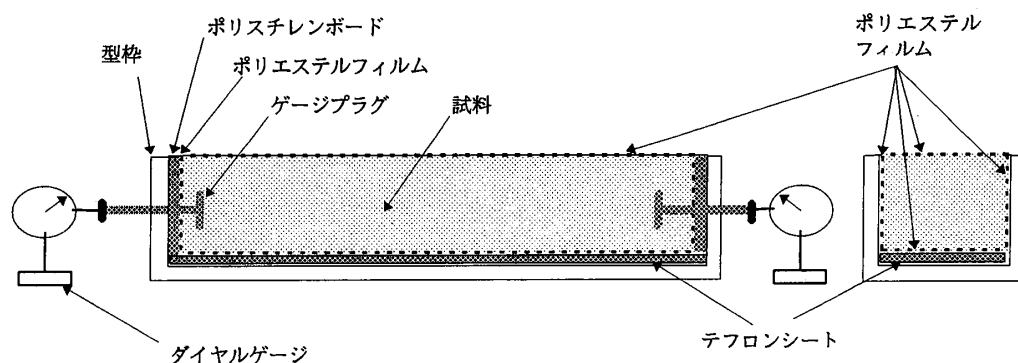


図-12 自己収縮の試験方法

(2) 脱型以降の試験方法

- ① (1)の試験が終了後、直ちに供試体を脱型し、直ちに供試体全面をアルミ箔粘着テープ（厚さ 0.05mm）でシールする。

- ② 供試体はシール後、直ちに基長の測定を行う⁽⁶⁾。

注（6）基長のとり方は、JIS A 1129「モルタルおよびコンクリートの長さ変化試験方法」による。

- ③ 供試体をビニール袋に入れ密封した後、温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の室内に横に寝かせて静置する。ただし、測定期間中、供試体の質量変化率は 0.2%以下でなければならない。

- ④ 材齢が 3 日、7 日、14 日、28 日となった時点で供試体の長さ変化および質量を測定する⁽⁷⁾。以降、必要に応じて所定の材齢において同様の測定を行う。

注（7）長さ変化の測定は、コンパレータ法またはコンタクトゲージ法（JIS A 1129「モルタルおよびコンクリートの長さ変化試験方法」）により行う。

[5] 計 算 自己収縮ひずみおよび自己膨張ひずみ (ΔL) は、[4]の測定値の平均値を用い、次の

式により算出する。

脱型以前においては、

$$\Delta L = \Delta L_a$$

脱型以後においては、

$$\Delta L = \Delta L_a + \Delta L_b$$

ここに、 ΔL : 長さ変化率⁽⁸⁾

$$\Delta L_a : \text{脱型以前の長さ変化率} \quad \Delta L_a = (x_{i1} - x_{01}) + (x_{i2} - x_{02}) / L_0$$

ΔL_b : 脱型以降の長さ変化率 JIS A 1129「モルタルおよびコンクリートの長さ変化試験方法」により算出する。

L_0 : 基長⁽⁸⁾

x_{01}, x_{02} : それぞれ基準とした時点での測定値⁽⁸⁾

x_{i1}, x_{i2} : それぞれ時点*i*における測定値⁽⁵⁾

注(8) $L_0, x_{01}, x_{02}, x_{i1}, x_{i2}$ の長さの単位は、同一とする。

[6] 報 告 報告は、次の事項のうち必要なものについて行う。

- (1) 使用材料の種類と品質
- (2) 配合
- (3) 供試体の作り方
- (4) 始発時間
- (5) 脱型した材齢
- (6) 供試体の寸法および基長
- (7) 保存期間中の温度
- (8) 各測定時点での温度
- (9) 各測定時点での長さ変化率
- (10) 各測定時点での供試体質量

5. あとがき

本委員会は、今後さらに1年間の活動を続けるとともに、「自己収縮の研究の現状(課題)」に関する講習会を1996年11月20日に東京(サンケイホール)、11月22日に大阪(建設交流館)で開催する予定である。また、高強度コンクリートの研究に関連して国外でも自己収縮の研究例が多くなっているため、これらの研究者との意見交換を目的に、1998年国際ワークショップ開催の可能性の調査とそのための準備を行う。