

不確かさクラブ 第2次事例研究会 中間報告

# 骨材のアルカリシリカ反応性試験 (モルタルバー法)の不確かさ評価

高知県生コンクリート工業組合  
技術センター 東部試験所  
竹村 賢

全国生コンクリート工業組合連合会 認定共同試験場

高知県生コンクリート工業組合 技術センター 東部試験所  
高知県香南市野市町西野 1892番地

## コンクリート材料試験

- 骨材
  - … JIS A 1145 アル骨化学法 (JIS Q 17025認定)
- 練混ぜに用いる水
- セメントの圧縮強さ

## コンクリート製品・品質試験

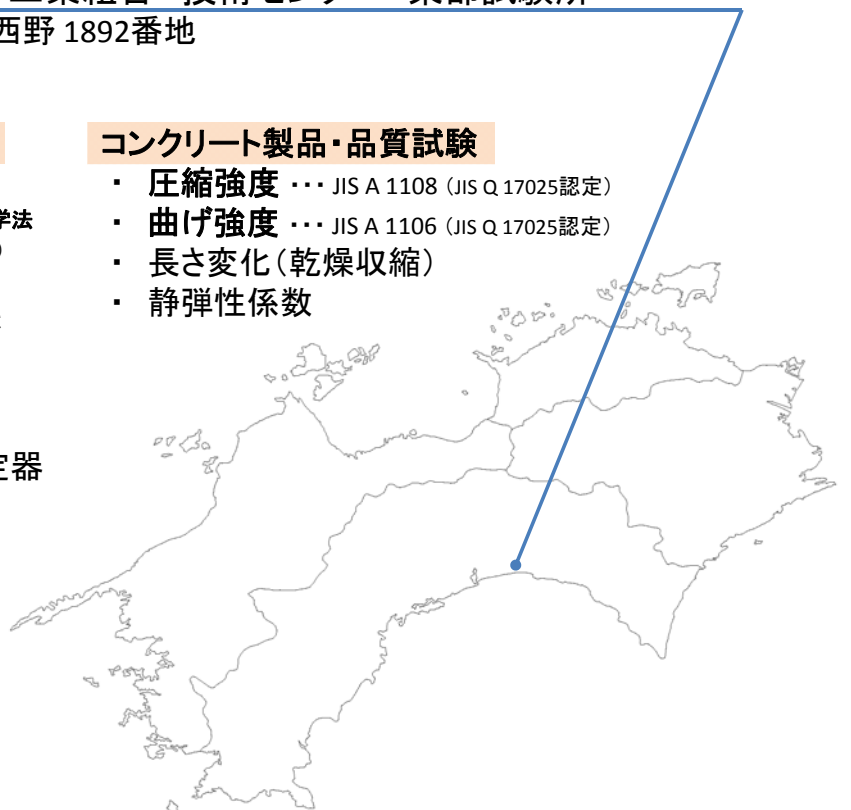
- 圧縮強度 … JIS A 1108 (JIS Q 17025認定)
- 曲げ強度 … JIS A 1106 (JIS Q 17025認定)
- 長さ変化(乾燥収縮)
- 静弾性係数

## 設備試験(検定)

- 塩化物含有量測定器
- ゴム硬度計

## 鉄筋試験

- 引張強度
- 曲げ
- 単位容積質量



## 1. 本日の発表内容

- ・ JIS A 1146 : 2007 骨材のアルカリシリカ反応性試験方法(モルタルバー法)についての説明
- ・ モルタルバー法における測定の不確かさ評価の流れ(途中まで)
  - ・ 相対不確かさの利用(ただし、今回は利用する予定はありません。)
  - ・ 数学的モデルを工夫することによるダブルカウントの防止
- ・ 今回の不確かさ評価での(私的)留意点
  - ・ 多種多様な岩種
  - ・ 測定量の定義
  - ・ 試験期間6ヶ月(想像以上にきつい制約です。)
- ・ その他

3

## 2. JIS A 1146 骨材のアルカリシリカ反応性試験方法(モルタルバー法)について

### 2.1 測定量の定義

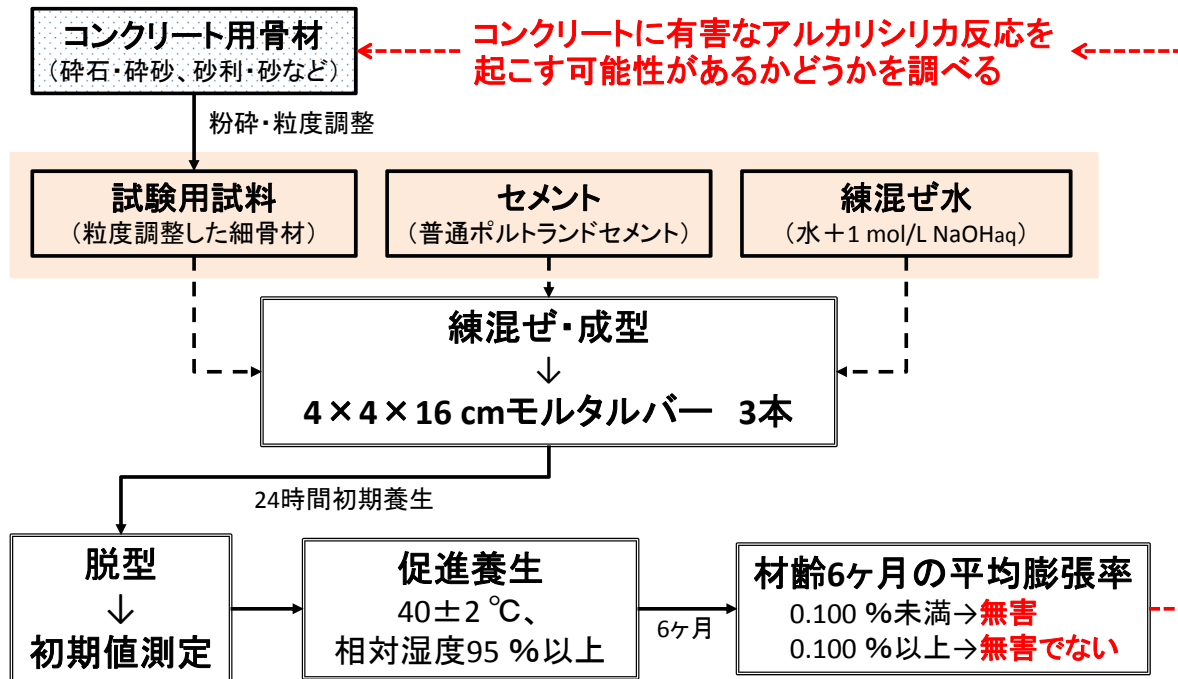
測定量は、40×40×160 mmモルタル供試体3本の長手方向の長さ変化率(膨張率)の平均値である。注：この定義では不十分なので、後ほど修正します。



4

## 2. JIS A 1146 骨材のアルカリシリカ反応性試験方法(モルタルバー法)について

### 2.2 試験の目的

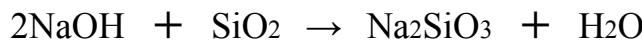


## 2. JIS A 1146 骨材のアルカリシリカ反応性試験方法(モルタルバー法)について

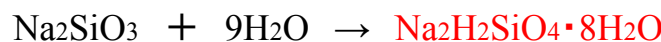
### 2.2 試験の目的 … アルカリ骨材反応(アル骨反応)について

Alkali Aggregate Reaction : 略して AAR

- ・ アルカリシリカ反応とアルカリ炭酸塩岩反応とに大別される。  
(以下の化学式は、アルカリシリカ反応。)



水酸化          反応性          水ガラス  
アルカリ          シリカ\*          ゲル



膨張した  
水ガラスゲル

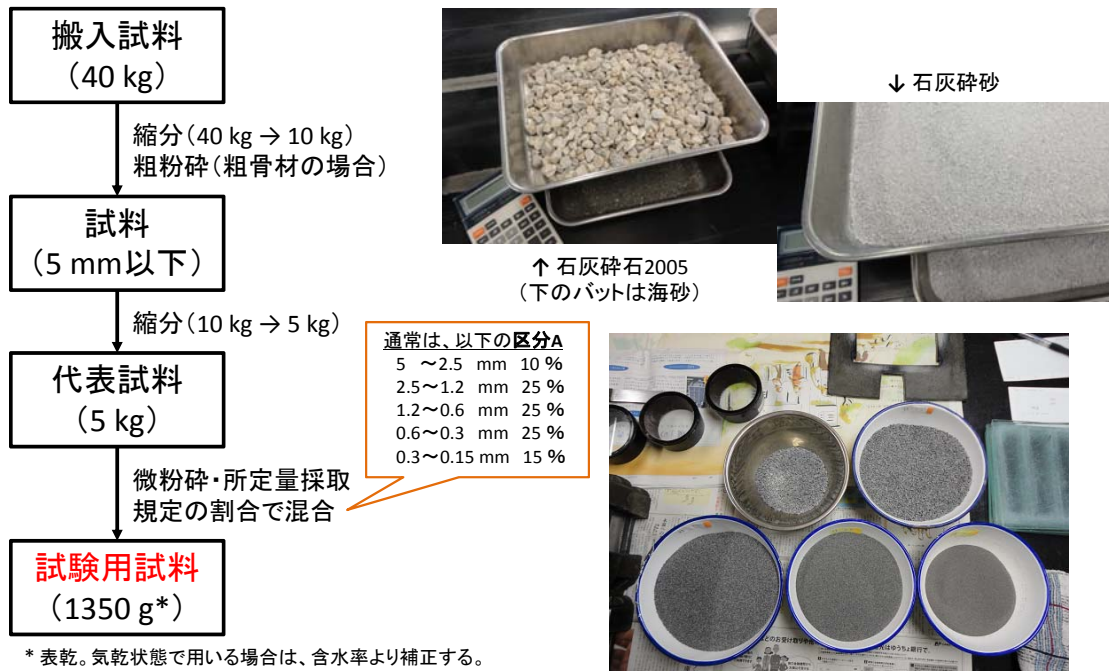
コンクリートに有害なひび割れ・  
ポップアウトを起こす

アルカリシリカ反応は、  
①反応性シリカ  
②アルカリ  
③水  
が揃うと起こることが分かる。

\* 反応性シリカとは、一般的に火山ガラス、クリストバライト、トリジマイト、玉随、瑪瑙(めのう)、微小石英(潜晶質石英、カルセドニー)、隠微晶質石英などである。

## 2. JIS A 1146 骨材のアルカリシリカ反応性試験方法(モルタルバー法)について

### 2.3 試験方法の概要(1/4) ... 試料の粒度調整



## 2. JIS A 1146 骨材のアルカリシリカ反応性試験方法(モルタルバー法)について

### 2.3 試験方法の概要(2/4) ... モルタル供試体の作成

- ・セメント(普通ポルトランドセメント) : 600 ± 1 g
- ・水(水道水or蒸留水) + 1 mol/L NaOH水溶液\* : 300 ± 1 mL  
\* その量は、セメントの全アルカリがNa<sub>2</sub>O換算で1.2 %となるように計算して定める。
- ・試験用試料(表乾) : 1350 ± 1 g  
(計量は、0.1 gまで。)

**練混ぜ** 室温 20 ± 2 °C (JIS R 5201に準拠)

- ① 30秒空練り(セメント+試験用試料)
- ② 水+NaOH水溶液 追加
- ③ 30秒間練混ぜ
- ④ 20秒間休止(掻き落とし等)
- ⑤ 120秒間練混ぜ

} 170秒 (連続)

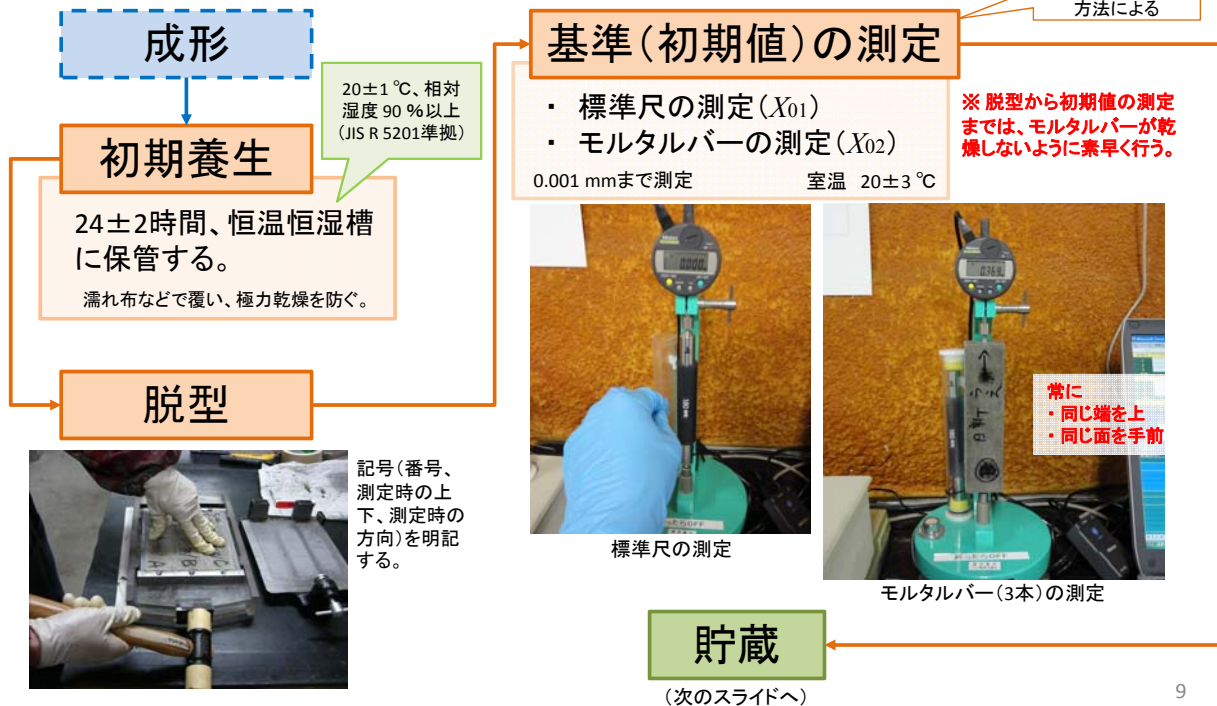
**成形**

ゲージプラグをセットして基長(L<sub>0</sub>)を測定した3連型枠に、2層に分けて詰める。1本1層につき、約15回突き棒で突き、スペーシングでゲージプラグの周囲に十分モルタルをいきわたらせ、最後に余盛部分を取り、上面を平滑にする。



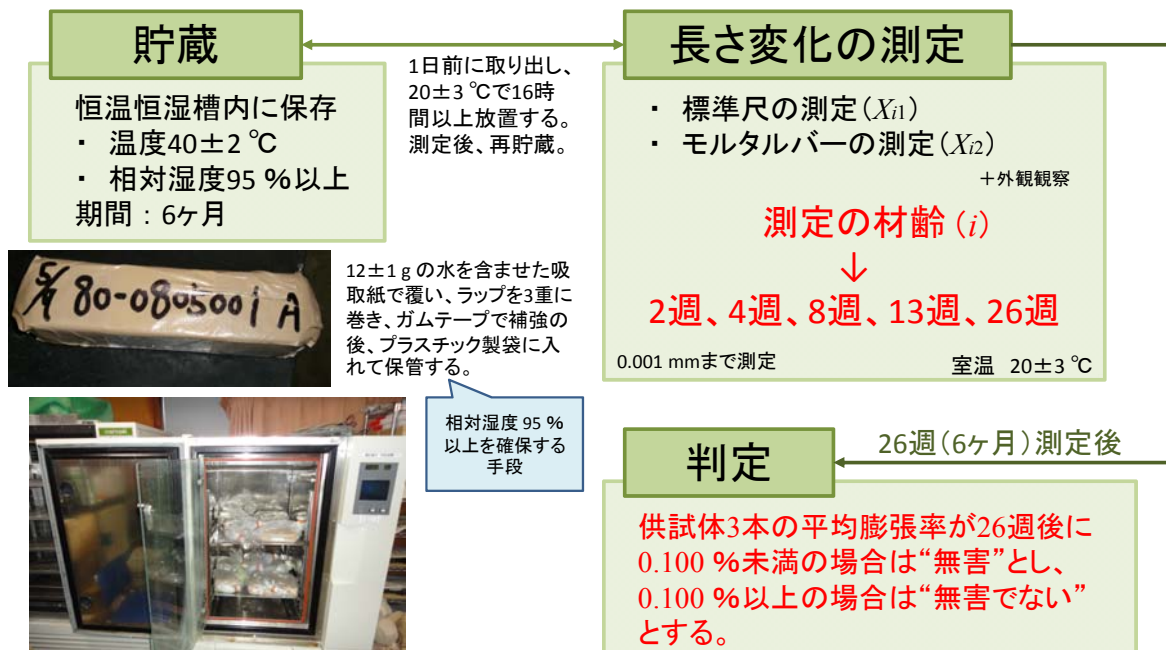
## 2. JIS A 1146 骨材のアルカリシリカ反応性試験方法(モルタルバー法)について

### 2.3 試験方法の概要(3/4) ... 初期養生及び基準の測定



## 2. JIS A 1146 骨材のアルカリシリカ反応性試験方法(モルタルバー法)について

### 2.3 試験方法の概要(4/4) ... 貯蔵、膨張率測定、及び判定



## 2. JIS A 1146 骨材のアルカリシリカ反応性試験方法(モルタルバー法)について

### 2.3 試験方法の概要(補足 … 長さ変化の測定)

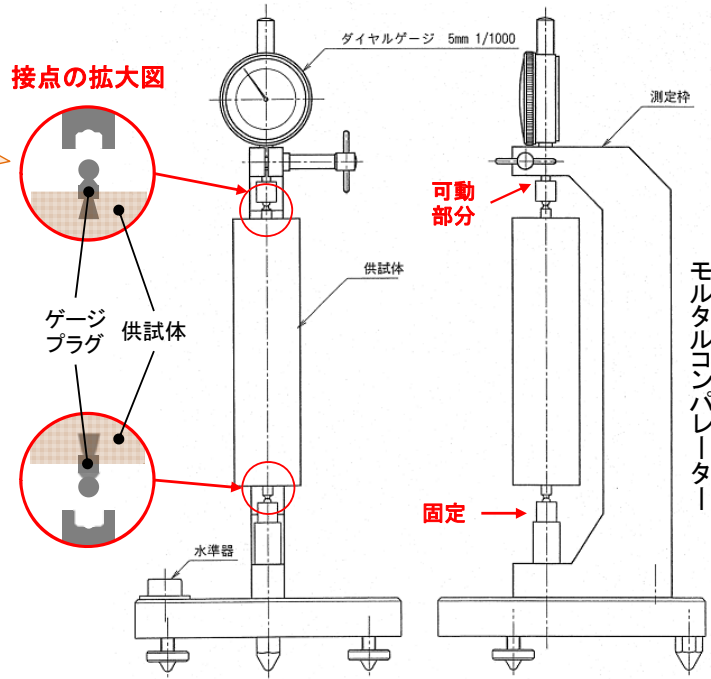
- ・ 測定の際の注意点

ゲージプラグと接触部とがよくなじむように、モルタルバーを2, 3回静かに回転させる(標準尺も同様)。

標準尺、モルタルバーともに、2回目以降のセッティング\*時のダイヤルゲージの表示値を用い、複数回(当試験所では3回)の読みの平均値を正式の測定値とする。

\* 測定のために、取付け・脱着を繰り返す。

(つまり、標準尺4回、モルタルバー1本につき4回×3本の総計16回脱着、測定を行うことになる。)



※ 株式会社マルイのマニュアルより一部転載

11

## 2. JIS A 1146 骨材のアルカリシリカ反応性試験方法(モルタルバー法)について

### 2.4 実例

		材 齢					
		脱型時	2週	4週	8週	13週	26週
標準尺 mm		6.577	6.577	6.577	6.577	6.576	6.577
供試体No.1 (基長 140.35 mm) $L_0$	測定値 mm	6.727	6.738	6.742	6.748	6.752	6.759
	標準尺との差 mm	0.150	0.161	0.165	0.171	0.176	0.182
	膨張量 mm	-	0.011	0.015	0.021	0.026	0.032
	膨張率 %	-	0.0078	0.0107	0.0150	0.0185	0.0228
供試体No.2 (基長 140.26 mm)	測定値 mm	6.660	6.670	6.675	6.680	6.685	6.693
	標準尺との差 mm	0.083	0.093	0.098	0.103	0.109	0.116
	膨張量 mm	-	0.010	0.015	0.020	0.026	0.033
	膨張率 %	-	0.0071	0.0107	0.0143	0.0185	0.0235
供試体No.3 (基長 140.32 mm)	測定値 mm	6.710	6.721	6.725	6.730	6.735	6.742
	標準尺との差 mm	0.133	0.144	0.148	0.153	0.159	0.165
	膨張量 mm	-	0.011	0.015	0.020	0.026	0.032
	膨張率 %	-	0.0078	0.0107	0.0143	0.0185	0.0228
平均値	膨張量 mm	-	0.011	0.015	0.020	0.026	0.032
	膨張率 %	-	0.0076	0.0107	0.0145	0.0185	0.0230

標準尺測定時にゼロ点調整する方法もある。

$X_{02} - X_{01}$

$X_{i2} - X_{i1}$

$$E = \frac{(X_{i2} - X_{i1}) - (X_{02} - X_{01})}{L_0} \times 100$$

※ JISでは小数点以下3けたまでだが、今回の事例では4けたまで求める予定。

$$(X_{i2} - X_{i1}) - (X_{02} - X_{01})$$

※ 計算式は3.2項で説明

### 3. モルタルバー法における測定の不確かさ評価の流れ

#### 3.1 測定原理・原則、試験方法の確認 (省略)

これまでの説明で概ね分かっていただけたのでは...

#### 3.2 数学的モデルの構築(1/4)

$$\varepsilon = \frac{(X_{01} - X_{02}) - (X_{i1} - X_{i2})}{L_0} \times 100$$

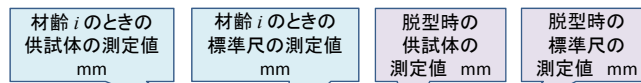
ここに、

$\varepsilon$  : 長さ変化率 → 膨張率(%)

$L_0$  : 基長(mm)

$X_{01}, X_{02}$  : 基準とした時点における標準尺及び供試体の測定値(mm)

$X_{i1}, X_{i2}$  : 材齢  $i$  における標準尺及び供試体の測定値(mm)



$$E = \frac{(X_{i2} - X_{i1}) - (X_{02} - X_{01})}{L_0} \times 100$$

使い勝手を考慮して並びを変更

注 :  $\varepsilon$  をそのまま用いると誤差項と混同してしまうので、 $E$  とした。

※ 計算式は、JIS A 1129-3 : 2010 モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法-第3部:ダイヤルゲージ方法 による。

### 3. モルタルバー法における測定の不確かさ評価の流れ

#### 3.2 数学的モデルの構築(2/4)

→ 不確かさの伝播則による合成標準不確かさの算出式を求めると、

$$u_c^2(E) = \left[ \frac{\partial E}{\partial L_0} \right]^2 u^2(L_0) + \left[ \frac{\partial E}{\partial X_{i2}} \right]^2 u^2(X_{i2}) + \left[ \frac{\partial E}{\partial X_{i1}} \right]^2 u^2(X_{i1}) + \left[ \frac{\partial E}{\partial X_{02}} \right]^2 u^2(X_{02}) + \left[ \frac{\partial E}{\partial X_{01}} \right]^2 u^2(X_{01})$$

→ 感度係数を求めると、

$$\frac{\partial E}{\partial L_0} = - \frac{(X_{i2} - X_{i1}) - (X_{02} - X_{01})}{L_0^2} \times 100$$

・ 一例

$$- \frac{0.040}{(140)^2} \times 100 = -0.00020 (\%/mm)$$

$$\frac{\partial E}{\partial X_{i2}} = \frac{\partial E}{\partial X_{01}} = \frac{1}{L_0} \times 100$$

$$\frac{1}{140} \times 100 = 0.714 (\%/mm)$$

$$\frac{\partial E}{\partial X_{i1}} = \frac{\partial E}{\partial X_{02}} = - \frac{1}{L_0} \times 100$$

$$- \frac{1}{140} \times 100 = -0.714 (\%/mm)$$

※上記の値は、

$L_0 = 140 \text{ mm}$

$(X_{i2} - X_{i1}) - (X_{02} - X_{01}) = 0.040 \text{ mm}$

とした場合。

ここまでで十分ですが、(次のスライド)

### 3. モルタルバー法における測定の不確かさ評価の流れ

#### 3.2 数学的モデルの構築(3/4)

少し無理をしていますが

→ 感度係数を変形して、“相対”の形にする

$$\frac{\partial E}{\partial L_0} = -\frac{(X_{i2} - X_{i1}) - (X_{02} - X_{01})}{L_0^2} \times 100 = -\frac{1}{L_0} \times \frac{(X_{i2} - X_{i1}) - (X_{02} - X_{01})}{L_0} \times 100 = -\frac{E}{L_0}$$

$$\frac{\partial E}{\partial X_{i2}} = \frac{\partial E}{\partial X_{01}} = \frac{1}{L_0} \times 100 = \frac{1}{L_0} \times 100 \times \frac{(X_{i2} - X_{i1}) - (X_{02} - X_{01})}{(X_{i2} - X_{i1}) - (X_{02} - X_{01})} = \frac{E}{(X_{i2} - X_{i1}) - (X_{02} - X_{01})}$$

$$\frac{\partial E}{\partial X_{i1}} = \frac{\partial E}{\partial X_{02}} = -\frac{1}{L_0} \times 100 = -\frac{E}{(X_{i2} - X_{i1}) - (X_{02} - X_{01})}$$

これらの値を合成標準不確かさの算出式に代入して変形すると、

$$\begin{aligned} \left[ \frac{u_c(E)}{E} \right]^2 &= \left[ \frac{u(L_0)}{L_0} \right]^2 + \left[ \frac{u(X_{i1})}{(X_{i2} - X_{i1}) - (X_{02} - X_{01})} \right]^2 + \left[ \frac{u(X_{i2})}{(X_{i2} - X_{i1}) - (X_{02} - X_{01})} \right]^2 \\ &\quad + \left[ \frac{u(X_{02})}{(X_{i2} - X_{i1}) - (X_{02} - X_{01})} \right]^2 + \left[ \frac{u(X_{01})}{(X_{i2} - X_{i1}) - (X_{02} - X_{01})} \right]^2 \end{aligned}$$

15

### 3. モルタルバー法における測定の不確かさ評価の流れ

#### 3.2 数学的モデルの構築(4/4) …… その他のモデル式に現れにくい偏差

$$E = \left[ \frac{(X_{i2} - X_{i1}) - (X_{02} - X_{01})}{L_0} \times 100 \right] + \varepsilon_{rep} + \varepsilon_{per} + \varepsilon_T + \varepsilon_H + \varepsilon_{make} + \varepsilon_{sam}$$

- ここに、
- $\varepsilon_{rep}$  : 測定の繰り返しに起因する膨張率の偏差 (%)
  - $\varepsilon_{per}$  : 供試体の個人差に起因する膨張率の偏差 (%)
  - $\varepsilon_T$  : 供試体の貯蔵時の温度(履歴)に起因する膨張率の偏差 (%)
  - $\varepsilon_H$  : 供試体の貯蔵時の湿度(履歴)に起因する膨張率の偏差 (%)
  - $\varepsilon_{make}$  : 供試体の成形に起因する膨張率の偏差 (%)
  - $\varepsilon_{sam}$  : 試料調整のばらつきに起因する膨張率の偏差 (%)

最初は、上記のようなモデルを考えたのだが、これらの偏差  $\varepsilon$  の要因は、 $\varepsilon_{rep}$  以外すべて  $X_{i2}$  に帰結すると考えられる。したがって、ダブルカウントを防ぐことも考慮して、

$$X_{i2} = \mu + \underbrace{\varepsilon_{per} + \varepsilon_T + \varepsilon_H + \varepsilon_{make} + \varepsilon_{sam}}_{\text{上記の偏差は、基本的に } X_{i2} \text{ に付加するほうがいいのではないか}}$$

上記の偏差は、基本的に  $X_{i2}$  に付加するほうがいいのではないか

※ただし、この式ですべての偏差( $\varepsilon$ )は“膨張量”、単位は mmとなる。

16



### 4. 今回の不確かさ評価での(私的)留意点

#### ・ 試料は、多種多様

試験の対象となる試料は岩石であり、その種類は多岐にわたる。  
試験結果、つまり膨張率は、一般的なもので0.010% ~ 0.030%程度であるが、技能試験等で搬入されるものには、0.500%を超えるものもある。

これ自体は当然ですか

問題は、以下の2点。

- ① それぞれの岩石を使って作製したモルタル供試体の持つばらつきが(相対的に)同じでないと考えられるため、種々の要因実験では同一の岩石試料を用いる必要がある。
- ② 求めた不確かさは、用いた岩石\*の測定結果にのみ有効である(この問題は、実際に顧客搬入の試料に不確かさを適用する際の検討事項になると思われる)。

\* 不確かさの要因(例えば試料調整のばらつき)が有意となる岩石と有意にならない岩石とが存在する可能性もある(川砂利等)。

#### ・ 測定量の定義の修正

2.1 測定量の定義は、いろいろな意味で不十分だが、特に以下の部分が抜けていることがまずい。

「測定量は、搬入された試料を用いて成形した40×40×160 mmモルタル供試体3本について、長手方向の膨張率を測定した平均値である。」

こうすることで、不確かさに“サンプリングのばらつき\*”を含めないことが明らかとなる。

\* サブサンプリングのばらつきは、不確かさ評価に含める。

#### ・ 試験期間は約6ヶ月

予定外の結果となった実験例を1つ。

モルタル供試体を貯蔵する際の温度40±2℃について、38℃、40℃、42℃の3水準で実験を行ったのだが、38℃に設定していた恒温槽(乾燥機で代用)の温度を測定していた測定器のセンサーが故障していたようで、実際は42℃だった(実験を開始した時点から故障していたと思われる)。

データを見る限り、13週(3ヶ月)の時点では“何かおかしい”と感じることはできても、“失敗”と断定することは無理に近いと思われる(これでは先が思いやられる)。

感度係数を求めるため

#### ・ 試験期間は約6ヶ月(続き)

→ 実際の実験データ

試験用試料の含水状態の違いを要因とし、表乾状態(含水率1.83%=標準)、表乾を下回る含水状態(含水率1.43%=マイナス)、表乾を上回る含水状態(含水率2.23%=プラス)の3水準を取った。

日間変動の要因に、貯蔵温度の要因(38℃、40℃、42℃の3水準で、それぞれ2回の繰り返しを予定。今回は、その半分の実験結果)を交絡させた(日間変動によるばらつきは、ほとんどないと思われるため)。

※ 実験中の私

- ・ 8週まで「38℃でも40℃と同じか？」
- ・ 13週「おや？38℃では、膨張率は下がることはあっても上がることはないように思えるのだが」
- ・ 26週「真っ青！」

要因名		膨張率(%)					
貯蔵温度	含水量	供試体No.	2週	4週	8週	13週	26週
40℃	標準	1	0.007	0.010	0.014	0.018	0.023
		2	0.007	0.010	0.014	0.019	0.024
		3	0.008	0.011	0.015	0.019	0.024
		平均	0.007	0.010	0.014	0.019	0.024
	マイナス	1	0.008	0.010	0.014	0.018	0.023
		2	0.008	0.011	0.014	0.019	0.023
		3	0.008	0.011	0.016	0.020	0.025
		平均	0.008	0.011	0.015	0.019	0.024
	プラス	1	0.008	0.011	0.015	0.019	0.023
2		0.007	0.011	0.014	0.019	0.024	
3		0.008	0.011	0.014	0.019	0.023	
平均		0.008	0.011	0.014	0.019	0.023	
38℃(42℃?)	プラス	1	0.007	0.009	0.014	0.019	0.025
		2	0.006	0.009	0.014	0.019	0.025
		3	0.007	0.010	0.014	0.019	0.024
		平均	0.007	0.009	0.014	0.019	0.025
	標準	1	0.006	0.009	0.014	0.019	0.025
		2	0.006	0.010	0.014	0.019	0.025
		3	0.006	0.010	0.014	0.018	0.024
		平均	0.006	0.010	0.014	0.019	0.025
	マイナス	1	0.008	0.011	0.017	0.021	0.028
2		0.007	0.011	0.017	0.021	0.028	
3		0.007	0.011	0.016	0.021	0.028	
平均		0.007	0.011	0.017	0.021	0.028	
38℃(42℃?)	マイナス	1	0.007	0.011	0.014	0.020	0.026
		2	0.007	0.011	0.014	0.020	0.027
		3	0.007	0.011	0.014	0.021	0.028
		平均	0.007	0.011	0.014	0.020	0.027
	プラス	1	0.006	0.010	0.014	0.021	0.026
		2	0.006	0.010	0.014	0.020	0.025
		3	0.006	0.010	0.014	0.021	0.026
		平均	0.006	0.010	0.014	0.021	0.026
	標準	1	0.005	0.009	0.014	0.019	0.024
2		0.004	0.009	0.013	0.019	0.025	
3		0.006	0.009	0.014	0.018	0.026	
平均		0.005	0.009	0.014	0.019	0.025	

## 4. 今回の不確かさ評価での(私的)留意点(続き)

- ・ その他

実験計画(分割法あるいは枝分かれ実験の使用)

## 5. 事例研究会での一言

今回の事例研究会で私の印象に残っている発言について、並べてみました。

- ・ 「測定量の定義は、厳密に行う」

抜け・漏れのある定義では、求める不確かさを正確にとらえることができない。測定さえうまくできないこともある。

- ・ 「ばらつきと偏りを厳密に区別しながら、不確かさ評価を行う」

ばらつきと偏りを区別することは、できているつもりでも実際は混同していることが多い。

- ・ 「相対不確かさは、不適切な用例が多いので、最近はその使用に否定的」

(真意は不明だが、たぶん)例えば、 $40 \text{ N/mm}^2 \pm 5.5 \% (k=2)$ のように拡張不確かさを相対表示してしまう、数学的な裏付けがない、間違った値(分母)で相対不確かさを求めている、等の事例がよく見受けられるため、ただ便利そうだななどと軽い気持ちで使うことを戒めたのだと思う。

- ・ 「バジェットシートに確率分布の種類を明記する必要はない」

うーん、中・上級レベルではそうなのか、とある意味身の引き締まる思いを味わったひとこと。

参考文献：小林 一輔 編集「コンクリート構造物の耐久性診断シリーズ2 アルカリ骨材反応の診断」森北出版株式会社

19

本日は、ご清聴ありがとうございました。