

# コンクリートの圧縮強度試験の測定における不確かさの求め方

宇都宮大学建設学科 教授 梶田佳寛



## 1. はじめに

今般、試験所及び校正機関に係わる一般要求事項がISOガイド25からISO/IEC 17025 (General requirements for the competence of testing and calibration laboratories)に移行したことによって、試験所は国際的な水準を満たすために、試験結果の信頼性を示す指標として「測定の不確かさ」を推定し、それを表明することが要求事項として明確に規定され、それに伴い試験所は、平成14年度中に測定の不確かさの推定を実施しなければならないことになった。

測定結果の信頼性を表す「測定の不確かさ」の概念は、ISOの下に国際度量衡局など7機関の共同により編集された国際文書「計測における不確かさの表現ガイド」(Guide of the expression of uncertainty in measurement: GUM)に述べられているが、本稿で紹介する「コンクリートの圧縮強度試験の測定における不確かさ」は、不確かさ推定を広く普及させるために、推定方法の事例を提供することを目的に、建築材料分野の中で関係する認定試験所の数が多く、適用性の高い「コンクリートの圧縮強度試験」を取り上げて、GUMの手法を参考にして要因と水準を拾い上げ実験を行った結果を分析し、測定における不確かさの推定を試みたものである。対象としたコンクリートの強度水準は、 $40\text{N/mm}^2 \sim 100\text{N/mm}^2$ 程度のコンクリートである。なお、本稿は、(財)建材試験センターが平成13年度に経済産業省から委託され、

研究委員会を発足し審議した調査研究を基に解説するものである。

## 2. ISO/IEC 17025とISOガイド (GUM)

### 2.1 ISO/IEC 17025

「測定の不確かさの推定」は、ISO/IEC 17025「試験所及び校正機関の能力に関する一般要求事項」の条項5.4.6において表1のとおり規定されている。

ISO/IEC17025では、不確かさの推定について具体的な方法を特定していないため、この規定に対する解釈については、APLAC及びILACにおいて審議されている。

### 2.2 ISOガイド (GUM)

ISOガイド (GUM) では、不確かさの成分を、統計的に求めることができるもの (Aタイプ) と、それ以外の経験的に推定あるいは従来のデータに基づいて推定するもの (Bタイプ) とする概念を導入している。試験における測定の不確かさ評価の手順の概略を表2に示す。

## 3. コンクリートの圧縮強度試験における測定の不確かさ

### 3.1 不確かさの成分の考え方

試験は、一般に、試験対象の (1) 採取, (2) 処理, (3) 測定, の3ステップで作業が進められる。各ステップでの不確かさが最終的な試験の不確かさにすべて寄与するため、単なる機械あるい

表1 測定の不確かさの推定

5.4.6 測定の不確かさの推定

5.4.6.1 校正機関又は自身の校正を実施する試験所は、すべての校正及びすべてのタイプの校正について測定の不確かさを推定する手順をもち、適用する。

5.4.6.2 試験所は、測定の不確かさを推定する手順をもち、適用する。ある場合には、試験方法の性質から厳密で計量学的及び統計学的に有効な測定の不確かさの計算ができないことがある。このような場合には、試験所は少なくとも不確かさのすべての要因の特定を試み、合理的な推定を行い、報告の形態が不確かさについて誤った印象を与えないことを確実にする。合理的な推定は、方法の実績に関する知識及び測定の有効範囲（scope）に基づくものであり、例えば以前の経験又は妥当性確認のデータを活用したものである。

参考1 測定の不確かさの推定において必要とされる厳密さの程度は、次のような要因に依存する。

- － 試験方法の要求事項
- － 依頼者の要求事項
- － 仕様への適合性を決定する根拠としての狭い限界値の存在

参考2 広く認められた試験方法が測定の不確かさの主要な要因の値に限界を定め、計算結果の表現形式を規定している場合には、試験所はその試験方法及び報告方法の指示に従うことによってこの項目を満足すると考えられる（5.10参照）<sup>1)</sup>。

5.4.6.3 測定の不確かさを推定する場合には、適切な分析方法を用いて当該状況下で重要なすべての不確かさの成分を考慮する。

参考1 不確かさに寄与する源には、用いた参照標準及び標準物質、用いた方法及び設備、環境条件、試験・校正される品目の性質及び状態並びに試験・校正実施者が含まれるが、これらに限定されない。

参考2 予想されている試験・校正品目の長期の挙動は、通常、測定の不確かさを推定する際に考慮に入れない。

参考3 この問題についてさらに情報を得るには、JIS Z 8402及び「測定の不確かさの表現の指針（GUM）」を参照する（参考文献参照）。

1) (5.10) 結果の報告

表2 試験における測定の不確かさ評価の手順

手順1 測定の手順を明確にする。

測定の原理、測定の方法、測定装置、測定手順、解析手順

手順2 測定のばらつきを要因をあげ、可能ならば数学モデルで表す。

- ・ 測定量の定義の実現の不完全さ
- ・ 測定試料が測定量を代表していないこと
- ・ 測定値に対する環境条件の効果
- ・ 測定環境条件の設定及び測定の不完全さ
- ・ 測定に使用する機器の不確かさ
- ・ 使用した測定標準や標準物質の標準値に不確かさ
- ・ データ処理や補正に用いられる定数などの不確かさ
- ・ 測定量の反復測定の変動

手順3 標準不確かさ成分の大きさを見積もる。

ばらつき要因に対応した標準不確かさ成分を、測定値の分布の標準偏差に相当するものとして見積もる。

不確かさ成分は、見積もる方法によって、Aタイプ、Bタイプに分類される。

Aタイプ 統計的方法によって見積もる。

- ・ 繰り返し測定から実験分散を求める。
  - ・ 実験分散から実験標準偏差を求め、Aタイプの標準不確かさとする。
- 又は、実験計画法に基づく分散分析から要因別不確かさを求める。

Bタイプ 従来の技術情報等の統計的方法以外の方法で見積もる。

- ・ 今までの実験データ
- ・ 計測器の性能・仕様
- ・ 校正証明書や成績書記載のデータ
- ・ 引用したデータや定数の不確かさ

手順4 合成不確かさ  $u_c(y)$  を計算する。  
 $u_c(y) = \sqrt{\sum u_i^2(y)}$  不確かさの伝播則

手順5 拡張不確かさ  $U$  を計算する。  
 $U = k u_c$   $k$ : 包含係数

は器具の測定の不確かさ評価と比べると、試験における不確かさ評価は一般に複雑である。圧縮強度試験の測定における不確かさの成分を抽出するにあたり、コンクリートの圧縮強度試験における根本的な事項の不確かさの成分としての考え方について以下に記述する。

### 1) 破壊試験の不確かさはどのようにして求めるか

コンクリートの圧縮強度試験は、破壊試験であるため、全く同一の試験片について繰り返してデータをとることができない。そのため、試験に起因するばらつきと試料に起因するばらつき（試験片のばらつき）を分離して評価することが難しい。

試験のばらつきと試料のばらつきを分離して評価するには、技術的に考え得る範囲で試料のばらつきが最も小さくできると考えられる不確かさ評価用試料を準備することが必要である。この試料は、セメント・コンクリートの試験材料でなくとも良く、試料のばらつきがほとんど無い試験体を用いて行った試験結果から、試験のばらつきを評価することができる。破壊試験の場合、試験のばらつきには、試料によるばらつきも含まれるが、試料のばらつきを最小とできる場合には、便宜上、試験方法に起因するばらつきとみなすことができる。

### 2) 試料のばらつきは測定の不確かさに含めるか

試験の不確かさは、図1に示すように、試料採取、処理、測定のすべての段階で発生し得る。依頼に応じて試験を実施する側からすると、これらを不確かさの成分として含めるべきかどうか、必ずしも自明ではない。しかし「測定結果に対する我々の知識の曖昧さ」を表すという不確かさの本来の意味\*) からすると、その起源や責任がどこにあると、最終的な試験結果の不確かさには、すべての不確かさ成分を含めるべきである。ただし、試験方法に起因する成分と試料ばらつきに起

因する成分の区別はしばしば貴重な情報を与えるから、これらの区別が必要と考えられるときには、以下のような形で不確かさを報告するのが適当であろう。

#### [合成標準不確かさで報告する場合の例]

合成標準不確かさ： $u_c$

この内、試験方法に起因する不確かさ： $u_t$

試験片のばらつきに起因する不確かさ： $u_s$

(ただし、 $u_c^2 = u_t^2 + u_s^2$ )

#### [包含係数を2として拡張不確かさで報告する場合]

拡張不確かさ： $U$  (包含係数 $k=2$ )

この内、試験方法に起因する不確かさ： $U_t$

試験片のばらつきに起因する不確かさ： $U_s$

(ただし、 $U^2 = U_t^2 + U_s^2$ )

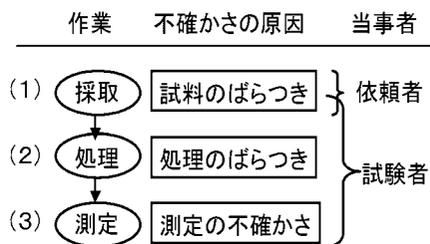


図1 試験における不確かさの3成分

### 3) 試験者の違いによるばらつき

測定の不確かさにおいて、特定の試験担当者が試験を実施しているからといって試験者によるばらつきを含めずに評価することは適当ではない。ある試験者により得られた値と複数の試験者により得られることが想定できる値をすべて含む集合のばらつきの程度が、試験者の測定における不確かさとなる。試験者による違いが補正可能である場合は、むしろこの限りではないが、一般的には、試験者の違いは、測定における不確かさの一成成分となる。

\*) GUMによる不確かさの公式の定義は、「測定の結果に付随した、合理的に測定量に結びつけられ得る値のばらつきを特徴づけるパラメータ」である。「合理的に測定量に結びつけられ得る値」とは、測定量の真値の候補の一つと見なし得るような値(の集合)を意味している。

### 3.2 圧縮強度試験における測定の不確かさ推定の数学モデル

#### 1) 圧縮強度の計算式

$$F_c = \frac{P}{A}$$

$$A = \pi \left( \frac{d}{2} \right)^2 \quad (1)$$

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

ここに、 $F_c$ : 圧縮強度 N/mm<sup>2</sup>

$P$ : 破壊するまでに示す最大荷重 N

$A$ : 供試体の断面積 mm<sup>2</sup>

$d, d_1, d_2$ : 供試体の2方向の直径及びそれらの平均 mm

#### 2) 圧縮強度試験の不確かさの要因と伝播則

ここでは $F_c$ の合成標準不確かさ $u_c(F_c)$ を、系統的成分 $u_{\text{systematic}}(F_c)$ と偶然的成分 $u_{\text{random}}(F_c)$ にわけて検討する。すなわち、

$$u_c^2(F_c) = u_{\text{systematic}}^2(F_c) + u_{\text{random}}^2(F_c) \quad (2)$$

ここで、 $u_{\text{systematic}}(F_c)$ は、式(1)から導かれる不確かさの伝播則にもとづき、また $u_{\text{random}}(F_c)$ は $F_c$ の不確かさとして直接評価する。

#### [1] $u_{\text{systematic}}(F_c)$ に寄与する不確かさ要因

- 1) 圧縮試験機の荷重校正の不確かさ、 $u_{\text{cal}}(P)$
- 2) ノギスによる供試体直径 $d$ の測定値の系統的な不確かさ、 $u_{\text{systematic}}(d)$
- 3) 個々の圧縮試験機に固有の系統的効果

これは、試験器毎のいわば「くせ」に相当するものであるが、圧縮強度試験の標準試験片が存在しないので、これを定量的に評価することができない。そこで、複数の試験機を準備し、

試験器間ばらつき $u_{\text{instrument}}(F_c)$ として、実験的に評価することにする。

#### [2] $u_{\text{random}}(F_c)$ に寄与する不確かさ要因

偶然的要因 $i$ による不確かさ $u_i(F_c)$ を実験的に評価する場合、この要因による荷重 $P$ の不確かさ $u_i(P)$ と試験片面積 $A$ の不確かさ $u_i(A)$ を別個に評価し、式(1)を利用して合成するより、 $F_c$ の不確かさ $u_i(F_c)$ として直接評価の方が容易である。これは、試験が破壊試験であって、1個の試験値 $F_c$ に必ず1個ずつの入力量 $P, A$ が付随するため、式(1)による場合には $P$ と $A$ の間の相関を考慮する必要が生じるからである。従って、 $u_{\text{random}}(F_c)$ に寄与する要因は、以下のように、直接 $F_c$ の不確かさとして評価する。

- ・試験機によるばらつき $u_i(F_c)$
- ・試験者によるばらつき $u_h(F_c)$
- ・供試体作成のバッチによるばらつき $u_b(F_c)$
- ・および試験の繰り返しに伴うばらつき $u_e(F_c)$

これらは、実験計画法にもとづくデータを分散分析することによりAタイプ評価する。

$$u_A^2(F_c) = u_b^2(F_c) + u_h^2(F_c) + u_i^2(F_c) + u_e^2(F_c) \quad (3)$$

また、供試体の養生温度や乾燥状態ならびに試験時の載荷速度におけるばらつきは、次の式を用いて算出することとした。

- ・試験前養生温度の違い $u(T)$ による効果、 $u_T(F_c)$

ここで

$$u_T(F_c) = \left| \frac{\partial F_c}{\partial T} \right| u(T) \quad (4)$$

であり、 $\partial F_c / \partial T$ は実験、もしくは過去の文献によって求める。

- ・供試体の乾燥状態の違い $u(t)$ による効果、 $u_t(F_c)$

ここで

$$u_t(F_c) = \left| \frac{\partial F_c}{\partial t} \right| u(t) \quad (5)$$

であり、 $\partial F_c / \partial t$ は実験、もしくは過去の文献によって求める。

・ 載荷速度のばらつき $u(v)$ による効果、 $u_v(F_c)$

ここで

$$u_v(F_c) = \left| \frac{\partial F_c}{\partial v} \right| u(v) \quad (6)$$

であり、 $\partial F_c / \partial v$ は実験、もしくは過去の文献によって求める。

以上から、

$$u_{\text{random}}^2(F_c) = u_A^2(F_c) + \left( \frac{\partial F_c}{\partial T} \right)^2 u^2(T) + \left( \frac{\partial F_c}{\partial t} \right)^2 u^2(t) + \left( \frac{\partial F_c}{\partial v} \right)^2 u^2(v) \quad (7)$$

### [3] 合成標準不確かさ

[1], [2] より合成標準不確かさを次のように求めることとした。

$$u_c^2(F_c) = \frac{F_c^2}{P^2} u_{\text{cal}}^2(P) + \frac{4F_c^2}{d^2} u_{\text{systematic}}^2(d) + u_A^2(F_c) + \left( \frac{\partial F_c}{\partial T} \right)^2 u^2(T) + \left( \frac{\partial F_c}{\partial t} \right)^2 u^2(t) + \left( \frac{\partial F_c}{\partial v} \right)^2 u^2(v) \quad (8)$$

### 3.3 圧縮強度試験における測定の合成標準不確かさ

各要因をAタイプ（統計的方法）不確かさとBタイプ（統計的以外の方法）不確かさに区分し、各要因の不確かさ成分をまとめて表3に示す。コンクリートの圧縮強度試験の測定における合成標準不確かさは、各要因の標準不確かさを合成したものとなる。

表3 圧縮強度（40N/mm<sup>2</sup>）試験における測定の合成標準不確かさバジェットシート

No.	要因	タイプ	感度係数	不確かさの分散 $u_j^2$ (N/mm <sup>2</sup> ) <sup>2</sup>	標準不確かさ $u_j$ (N/mm <sup>2</sup> )
①	試験機	B	$u_{\text{cal}}(P) / P = 0.00202$	0.007	0.0844* <sup>1</sup>
②	ノギス	B	$u_{\text{sys}}(d) / d = 0.000345$	0.001	0.0288* <sup>2</sup>
③	強度レベル $u_A$	A	—	1.106	1.052* <sup>3</sup>
	試験機 $u_i$		—	0.185	0.0565
	試験者 $u_h$		—	0.047	0.217
	繰返し誤差 $u_e$		—	0.853	0.924
④	試験前の養生温度 T	B	$\left  \frac{\partial F_c}{\partial T} \right  = 0.095$	0.003* <sup>4</sup>	0.0565
⑤	乾燥状態 t	A	$\left  \frac{\partial F_c}{\partial t} \right  = 0.0169$	0.000* <sup>5</sup>	0.0098
⑥	載荷速度 V	B	$\left  \frac{\partial F_c}{\partial v} \right  = 2.1$	0.0628	0.0395* <sup>6</sup>
合成標準不確かさ		—		1.100	1.05

(表中の $u_{\text{sys}}$ は $u_{\text{systematic}}$ である。不確かさの分散については、小数点以下3桁で表記した。)

表3のバジェットシートから、各圧縮強度における合成標準不確かさ（\*1～\*6の合成）を求めると以下のとおりとなった。

$$u_c(40) = \sqrt{0.0844^2 + 0.0288^2 + 1.052^2 + 0.003 + 0.000 + 0.0395^2} = \sqrt{1.119} = 1.052 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$$u_c(80) = \sqrt{0.202^2 + 0.0689^2 + 2.062^2 + 0.003 + 0.000 + 0.149^2} = 2.08 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$$u_c(100) = \sqrt{0.236^2 + 0.0808^2 + 2.822^2 + 0.003 + 0.000 + 0.2115^2} = 2.84 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

注) :  $u_c( )$  内の数値は、目標とした圧縮強度を示す。

#### 4. おわりに

本稿で求めた「圧縮強度試験の測定における不確かさ」は、1年という短い期間で行われたものであり、検討が充分でない箇所がある事は否めない。以下に、今後検討を要する事項を記述し、各試験所における圧縮強度試験の測定における不確かさの早期確立を願うものである。

##### 1) 標準供試体

本稿で、求めた「コンクリートの圧縮強度試験における測定の不確かさ」は、供試体のバラツキを含んだ不確かさを求めている。しかし、本来「測定における不確かさ」を検証するためには、均一な代替物質（但し、破壊モードがコンクリートに近似しているもの）で行うことが望ましく、今後このような特性を持つ標準供試体での検証が望まれる。

##### 2) 破壊試験における測定の不確かさ

コンクリートの圧縮強度試験は、破壊試験である

ため破壊のメカニズムにより超高強の領域における破壊特性には試験装置の偶発的な要因が不確かさの中に含まれる可能性がある。これらの要素は分離してそれぞれの不確かさを求めることができないため、コンクリートの圧縮強度試験における不確かさが正しく求められるかを検証する必要がある。

- ・破壊力学としての要因（破壊試験のため繰返し試験不可）
- ・試験機の軸方向剛性の影響
- ・加圧盤の表面状態の影響（摩擦）
- ・球面座の影響（球面座の加圧伝達位置、中心位置・回転性能、潤滑剤の影響等）

##### 3) 実験データにおける信頼性

本調査研究で実施したコンクリートの圧縮強度試験の測定における不確かさは各強度の水準について1回ずつ実施した結果であり、長期間にわたり統計的に求められた圧縮強度試験におけるものではない。よって、試験機関における「コンクリートの圧縮強度試験における測定の不確かさ」を求めるにあたり、複数の試験機関で相互に供試体を作製し、作製された供試体を用いて共通試験（ラウンドロビン試験）を行いそのデータを蓄積することにより、統計的に処理された「コンクリートの圧縮強度試験の測定における不確かさ」を求めることが必要である。今後、データの蓄積をするためには、「不確かさ算出手順書」等の作成および標準試験方法の確立が必至である。