技術レポート

試験における測定の不確かさ推定手順の事例
―コンクリートの圧縮強度試験を例に―

上園正義*

1. はじめに

試験所認定制度において，**JIS Q 17025**「試験所及び校正機関の能力に関する一般要求事項」に適合することが要求される。その要求事項の一つが試験における測定の不確かさを推定することである。不確かさの推定方法は，ISOガイド「計測における不確かさの表現ガイド」に示されているが，実際に適用するに当たってはいろいろと難しい問題がある。最近になって手順の考え方がまとまりつつあるのでコンクリートの圧縮強度試験の不確かさ推定について再検討を試みた。この件については，本誌2003年4月号にも紹介されているが，違う観点からの推定方法を再度紹介する。

2. 不確かさの推定

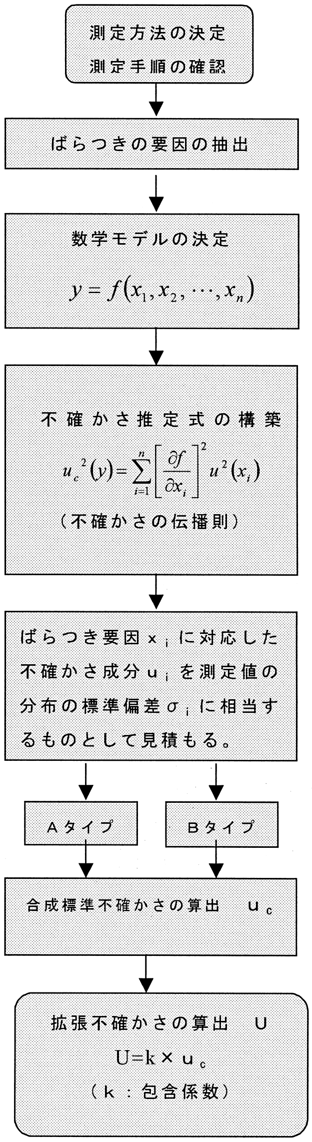
不確かさの推定をフロー図に従って行う。

手順1　測定方法を決定し測定の手順を確認する。

（**1**）測定は，**JIS A1108**「コンクリートの圧縮強度試験方法」による。

（**2**）供試体は，依頼者が成型して搬入する場合と，**JIS A 1132**「コンクリートの強度試験用供試体の作り方」によって試験所で作成する場合がある。

（**3**）供試体は，直径の2倍の高さをもつ円柱形で，直径100mm，高さ200mmとする。強度の計



フロー図

＊（財）建材試験センター中央試験所　品質管理責任者

算に関わる直径は，供試体高さの中心で，互いに直交する2方向について0.1mmまで測定する。

(4) 圧縮試験機は，**JIS B 7733**の**6.**（試験機の等級）に規程する1等級のものを用いる。

(5) 供試体は，供試体直径の1%以内の誤差で，その中心軸が加圧板の中心と一致するように圧縮試験機にセットする。

(6) 荷重は，供試体に衝撃を加えないように一様な速度で加える。荷重速度は，毎秒0.6±0.4N/mm²とする。

(7) 供試体が破壊するまでに試験機が示す最大荷重を有効数字3桁まで読む。

手順2　測定のばらつきの要因をあげる。

コンクリートの圧縮試験における不確かさの要因として，次のことがあげられる。

(1) 供試体のばらつき

供試体の作り方も不確かさの要因に含める場合もあるが，ここでは対象にしない。

(2) 試験操作

①**供試体の直径の読み取り**：直径測定のばらつきは，ノギスの校正，目量，繰り返し誤差等が関係する。供試体作成の許容値を定め，断面積を7854mm²として取り扱うこともある。

②**供試体の設置位置のずれ**：JISの規定の範囲内で設置するので不確かさの要因としては評価の対象としない。

③**載荷速度のばらつき**：載荷速度は，5±2kN/secとする。この速度はJISの規定値毎秒0.6±0.4N/mm²を十分満足しており，また繰り返し測定の中で見込まれるので不確かさ評価の対象としない。

④**破壊荷重の読み取り**：圧縮試験機の校正の不確かさ及び破壊に至るまでの最大荷重に対応する使用レンジの目量を考慮する。

(3) 試験環境

試験環境の温度及び湿度：試験機の油温や供試体の乾燥に影響を及ぼすが，その影響は小さいことを確認しているので評価の対象としない。

(4) **試験機測定者の違い**：三元配置分散分析を別途実施しているので，ここでは1試験機，1測定者による一元配置の分散分析を行う。

手順3　測定量を数式モデルで表し，標準不確かさの推定式を求める。

(1) 数式モデルを決定する。

$$f_c = \frac{P}{\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

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

ここに，f_c：圧縮強度　N/mm^2

P：破壊するまでに示す最大荷重　N

d_1, d_2，d：供試体の2方向の直径及びそれらの平均　mm

(2) 伝播則による不確かさの推定式を構築する。

$$u^2(f_c) = c_P{}^2 \cdot u^2(P) + c_d{}^2 \cdot u^2(d)$$

$$u^2(d) = c_{d1}{}^2 \cdot u^2(d_1) + c_{d2}{}^2 \cdot u^2(d_2)$$

$u(d_1) = u(d_2)$　　であり，　………(2)

$c_{d1} = c_{d2} = \frac{1}{2}$　　であるから，

$u(d) = \frac{u(d_1,d_2)}{\sqrt{2}}$　　とする。

ここで，$u(x_i)$は要因別標準不確かさを表し，x_iの関数を意味しない。また，c_iは感度係数で式(1)の偏微分係数で表される。

$$c_P = \frac{\partial f_c}{\partial P} = \frac{4}{\pi \cdot d^2} \cdot \qquad \text{.......(3)}$$

$$c_d = \frac{\partial f_c}{\partial d} = -\frac{8P}{\pi \cdot d^3}$$

$$c_{d1} = \frac{\partial d}{\partial d_1} = \frac{1}{2}, \quad c_{d2} = \frac{\partial d}{\partial d_2} = \frac{1}{2}$$

(3) それぞれの測定値の平均を**表1**に示す。

(4) 測定値を用いて（3）式によって目標強度レベルごとに感度係数を求める。**(表2)**

(5) Bタイプによる標準不確かさの評価を行う。

統計的方法以外の技術情報等によって見積もることをBタイプの評価といい，

・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

等を利用して評価する。以下の要因についてBタイプによる評価を行う。

1）試験機の荷重の読み取りの不確かさ

用いた試験機の相対拡張不確かさは，過去の校正記録から±0.50%とする。使用するレンジは，目標強度40N/mm^{2}では500kNレンジ，100N/mm^{2}では1000kNレンジを，120N/mm^{2}では2000kNレンジを用いるものとする。使用レンジの目量は，500kNレンジが1kN，1000kNレンジでは2.5kN，2000kNレンジでは5kNである。読み取りの不確かさは，目量の半値で矩形分布とする。目標強度40N/mm^{2}の場合，次のようになる。この結果を**表3**に示す。

$$u_{cal}(P) = \frac{0.5}{100} \times 500 = 2.50 \ (kN) \qquad \text{......(4)}$$

$$u_{read}(P) = \frac{1}{2\sqrt{3}} = 0.289 \ (kN)$$

表1　測定値の平均

目標強度 (N／mm^2)	圧縮強度 fc（N／mm^2)	最大荷重 P（kN)	径 d（mm)
40	41.39	326.5	100.22
100	99.91	788.9	100.27
120	117.06	923.5	100.23

表2　感度係数

目標強度 (N／mm^2)	c_p (mm^{-2})	c_d (N／mm^3)
40	1.268E−04	0.826
100	1.267E−04	1.994
120	1.268E−04	2.337

注）Eは指数を表す

表3　試験機による不確かさ

目標強度 (N／mm^2)	使用レンジ kN	目量 kN	相対拡張不確かさ (%)	校正の不確かさ (N)	読みの不確かさ (N)
40	500	1	± 0.5	2500	289
100	1000	2.5	± 0.5	5000	722
120	2000	5	± 0.5	10000	1443

2）直径の読みの不確かさ

ノギスで供試体の直径を測定する。直径の測定値の不確かさは，器差の許容値及び目量で決まる。**JIS B7507**「ノギス」に定める器差の許容値は±0.06mmであり，ノギスの目量は0.1mmである。

$$u_{cal}(d) = \frac{0.06}{\sqrt{3}} = 0.0346 \quad (mm) \qquad \text{.........(5)}$$

$$u_{read}(d) = \frac{0.1}{2\sqrt{3}} = 0.0289 \ (mm)$$

(6) Aタイプによる不確かさ評価を行う。

Aタイプの不確かさは，統計的方法によって，ばらつきの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。

その手法には，繰り返し測定から実験分散を求め，実験分散から実験標準偏差を求める場合や，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場合がある。

1）破壊直前の最大荷重のばらつきによる不確かさ

目標強度別に供試体数10本，4回の反復測定データを求めた。40N/mm²の場合について**表4**のデータで行った一元配置の分散分析結果を**表5**に示す。

荷重の不確かさは，

$$u_e(P)=\sigma_e=\sqrt{60.611}=7.785 \quad \text{..............} \ (6)$$

2）直径測定のばらつきによる不確かさ

同一の3本の供試体について，直行する2箇所を3人で3回測定して得たデータについて二元配置の分散分析を行った。**表6**は反復の寄与分をプールした結果である。直径の不確かさは，

$$u_h(d)=\sigma_h=\sqrt{\frac{0.0672-0.0129}{18}}=0.0549$$

$$\text{..............} \ (7)$$

$$u_e(d)=\sigma_e=\sqrt{0.1292}=0.1137$$

手順4　合成不確かさu_c（y）を計算する。

これらの数値を用いて**表7**のバジェットシートにまとめ合成標準不確かさを算定する。計算は次のように行う。

$$u(P)=\sqrt{u^2{}_{cal}(P)+u^2{}_e(P)}$$

$$=\sqrt{2500^2+4495^2}=5143\ (N)$$

$$u(d)=\sqrt{u^2{}_{cal}(d)+u^2{}_h(d)+u^2{}_e(d)}$$

$$=\sqrt{0.0346^2+0.0389^2+0.0805^2}=0.0959\ (mm)$$

$$u(f_c)=\sqrt{c_P{}^2\cdot u^2(P)+c_d{}^2\cdot u^2(d)}$$

$$=\sqrt{\left(1.268\times10^{-4}\right)^2\times5143^2+0.826^2\times0.0959^2}$$

$$=\sqrt{0.6523^2+0.0792^2}=0.657\ \left(N/mm^2\right)$$

$$\text{..........} \ (8)$$

手順5　拡張不確かさUを計算する。

合成標準不確かさに包含係数を乗じて拡張不確かさを求める。ここでは95%の信頼水準を与える包含係数として，k＝2を乗じて求めた。通常，有効数字2桁で表示すれば十分とされるので，拡張不確かさは±1.3N/mm²となる。

3. 圧縮強度レベルにおける不確かさの比較

圧縮強度試験の不確かさは，供試体の強度によって異なる。目標強度100N/mm²及び120N/mm²についての同様の手順で不確かさを求めることが

表4　最大荷重の測定結果（目標強度40N/mm²）

最大重量 KN		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
反復	バッチ1	323	321	325	318	333	330	326	327	336	321	326.5
	バッチ2	313	328	319	325	328	331	320	349	320	319	
	バッチ3	326	339	319	328	334	329	332	334	341	314	
	バッチ4	331	321	336	323	314	324	323	324	332	322	

（1～10：繰り返し）

表5　分散分析表
（目標強度40N/mm² の場合の最大荷重）　　kN

変動要因	変動	自由度	不偏分散	分散の期待値	σ
バッチ間　b	137.9	3	45.967	$\sigma_e{}^2+10\sigma_b{}^2$	—
誤差　e	2182.0	36	60.611	$\sigma_e{}^2$	60.611
合計	2319.9	39			

$\sigma_e=$　7.785

表6　分散分析表（直径測定）

変動要因	変動	自由度	不偏分散	分散の期待値	σ^2
人　h	0.13444	2	0.0672	$\sigma_e{}^2+18\sigma_h{}^2$	0.00302
誤差　e	0.65889	51	0.0129	σe^2	0.01292
合計	0.79333	53			

σ_h=0.0549　σ_e=0.113

表7　バジェットシート（目標強度40N/mm² の場合）

不確かさの要因		値	除数	要因別標準不確かさ u(xi)	感度係数 ci	標準不確かさ $c_i\times u(x_i)$
荷重	u(P)			5143　N	1.268E−04　mm^{-2}	0.6523　N/mm^2
校正	u_{cal}	2.5　kN	1	2500　N		
読み	u_{read}	0.5　kN	$\sqrt{3}$	289　N	u_eに含まれるので除外	
反復	u_b	—		–　N	バッチの変動は除外する	
	u_e	7.785　kN	$\sqrt{3}$	4495　N	3個の平均の場合	
径平均	u(d)			0.0959　mm	0.826　N/mm^3	0.0792　N/mm^2
校正	u_{cal}	0.06　mm	$\sqrt{3}$	0.0346　mm		
読み	u_{read}	0.05　mm	$\sqrt{3}$	0.0289　mm	u_eに含まれるので除外	
反復	u_h	0.0549　mm	$\sqrt{2}$	0.0389　mm	2箇所測定の平均	
	u_e	0.1137　mm	$\sqrt{2}$	0.0805　mm		
				合成標準不確かさ		0.657　N/mm^2
				拡張不確かさ(k＝2)		1.3　N/mm^2

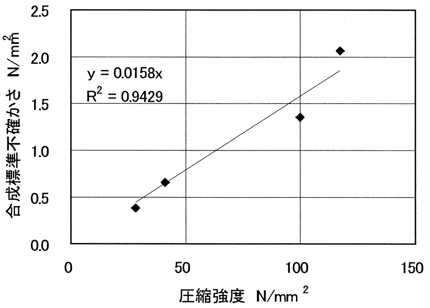


図1　圧縮強度と不確かさの関係

表8　圧縮強度レベルにおける不確かさの比較

目標強度 N/mm²	不確かさの要因		要因別標準不確かさ u(xi)		感度係数 ci		標準不確かさ $c_i \times u(x_i)$ N/mm²	合成標準不確かさ N/mm²
40	荷重	u(P)	5143	N	1.268E−04	mm^{-2}	0.6523	0.657
	径平均	u(d)	0.0959	mm	0.826	N/mm^3	0.0792	
100	荷重	u(P)	10614	N	1.268E−04	mm^{-2}	1.3461	1.36
	径平均	u(d)	0.0959	mm	1.994	N/mm^3	0.1912	
120	荷重	u(P)	16163	N	1.268E−04	mm^{-2}	2.0500	2.06
	径平均	u(d)	0.0959	mm	2.337	N/mm^3	0.2241	

できる。**表8**に結果のみを示す。**図1**は，当試験所で行った技能試験結果から得られた不確かさを含めてプロットしたものである。勾配が約0.016を示しており，これらの強度範囲での平均的な相対標準不確かさとして約1.6%が得られているといえる。

4. おわりに

不確かさの推定は，特性の安定した標準材料を用いることができれば割合容易に求められるが，建築材料試験の分野では標準材料と呼べるものが存在しない場合が多く，校正の不確かさを求める場合に比較して試験の不確かさを求めることは容易ではない。試験の不確かさの推定について，APLACの方針が示されているが，具体的にどこまで厳密に求めればいいのか，まだ定見が定かでない状況にある。ここに紹介した不確かさの推定方法は一例であり検討の余地があるだろう。

建築材料試験の分野の不確かさは，対象とする試験体が多岐にわたり，複合材料や構造体であることが多く，試験体のばらつきの影響がはるかに大きいので厳密に不確かさを求めても労多くして意味がないという見方も少なくない。

不確かさ推定の目的は，規定値に対する適合性評価や，試験所の技術力の評価に用いるとする考え方がある。不確かさの厳密さの程度は，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によるとされている。利用する目的によって不確かさの厳密さが異なるということであろう。また，試験規格の中に不確かさについて試験条件の限界値とか結果の表現形式等の記述がなされていれば，試験における不確かさの見積もりを必要としないという方針が示されている。これは，その記述から不確かさを推定できるからであり，推定できなければ，この記述だけでは不十分だと理解するべきであろう。

今のところ，不確かさは試験所認定制度の中だけで論じられているが，試験規格の原案作成団体やその関係者に不確かさの概念を理解してもらい，試験規格の制定時や改定時に不確かさの概念を取り入れていくことが望まれる。不確かさ推定の本来の手順は，不確かさの要因を全て抽出して，その要因に対して高度な統計学的知識を用いて推定することになるが，試験における不確かさは，全体の不確かさの1／5もしくは1／3以下の要因の影響は無視できるとされているので，主要な3つ程度の要因について検討すれば十分であるとも云える。