

平成 13 年度経済産業省委託

**建築分野における不確かさに関する調査研究
成果報告書**

平成 14 年 3 月

財団法人 建材試験センター

<目 次>

第 1 章 調査研究の目的と実施体制	1
1.1 調査研究の目的	1
1.2 実施体制	2
1.3 調査研究の期間	3
1.4 審議経過	3
第 2 章 測定の不確かさ推定についての検討	5
2.1 不確かさの概念導入の背景	5
2.2 ISO/IEC 17025	7
2.3 ISO ガイド(GUM)及び ISO 5725	8
2.4 ILAC の方針	10
2.5 APLAC の方針	12
第 3 章 建築分野の試験における測定の不確かさについて	15
3.1 試験における測定の不確かさ評価の問題点	15
3.2 コンクリートの圧縮強度試験における測定の不確かさ	29
3.2.1 予備試験	29
3.2.2 要因と水準	31
3.2.3 標準不確かさの評価と伝播側	33
第 4 章 実験研究	37
4.1 実験の内容	37
4.2 使用材料	39
4.3 試験方法	42
4.4 試験結果	44
第 5 章 コンクリートの圧縮強度試験における不確かさの評価	79
5.1 各要因の不確かさの見積り	79
5.1.1 圧縮試験機の荷重校正の不確かさ	79
5.1.2 試験機, 試験者及び試験の繰返しによる不確かさ	81
5.1.3 ノギスによる寸法測定の不確かさ	83
5.1.4 試験前養生温度による不確かさ	83
5.1.5 供試体の乾燥状態による不確かさ	84
5.1.6 載荷速度による不確かさ	85
5.1.7 合成標準不確かさの算定	86

5.2 圧縮強度レベルによる不確かさの違い	88
5.2.1 圧縮強度レベルにおける不確かさの試験	88
5.2.2 圧縮強度レベルにおける合成標準不確かさの算定	89
5.2.3 圧縮強度と変動係数	91
第6章 懸案事項	95
第7章 おわりに	97

第 1 章 調査研究の目的と実施体制

1.1 調査研究の目的

1.2 実施体制

1.3 調査研究の期間

1.4 審議経過

第 1 章 調査研究の目的と実施体制

1.1 調査研究の目的

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 2 5 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た。また、ISO/IEC 17025 への移行は、平成 14 年度中に行うことが国際的に合意されており、それに伴って試験所としては、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。

しかし、建材分野においては、この「不確かさ」の概念が普及するに至っておらず、わが国の試験所認定機関である JNLA としては、当該分野における国際的な水準を満たす試験所認定制度を進めるために、「測定の不確かさ」の概念を普及定着させる必要が生じてきた。

JNLA の試験所認定制度における建築材料分野は、13 区分約 60 の試験項目が対象になっており、それぞれについて不確かさの推定が要求されるものと思われるが、ISO/IEC 17025 には不確かさ推定に関するいかなる方法も特定していない。

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。ISO/IEC 17025 は、ISO 5725 及び GUM を参照することを参考として記載している。

本調査研究では、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の拾い上げ、実験検討、結果の分析及び不確かさの推定を試みた。これらの検討結果から、試験機関又は試験所間ラウンドロビン試験における不確かさを推定する手法の提案を行った。

1.2 実施体制

(1) 研究組織

研 究 委 員 会
 委員長：榊田佳寛
 (宇都宮大学教授)

(2) 委員名簿

区分	氏 名	勤務先及び役職名	区 分
委員長	榊田 佳寛	宇都宮大学工学部建設学科 教授	中立者
委 員	榎原 研正	独立行政法人産業技術総合研究所 計測標準研究部門物理統計課 応用統計研究室長	〃
〃	上戸 亮	経済産業省産業技術環境局認証課 課長補佐	〃
〃	別所 敏明	独立行政法人製品評価技術機構適合性評価センター 試験所認定課長	〃
〃	祖父江良蔵	独立行政法人製品評価技術機構適合性評価センター 試験所認定課 主査	〃
〃	岩澤 洋	独立行政法人製品評価技術機構適合性評価センター 試験所認定課 主任	〃
〃	永山 勝	財団法人日本建築総合試験所 材料部材料試験室長	〃
〃	高井 淳一	財団法人日本品質保証機構南関東試験センター 千葉建材試験所 主幹	〃
〃	上園 正義	財団法人建材試験センター中央試験所 上級専門職	〃
〃	柳 啓	財団法人建材試験センター中央試験所 品質管理室長	〃
〃	鈴木 澄江	財団法人建材試験センター中央試験所品質性能部 材料グループ 専門職	〃
〃	南 知宏	財団法人建材試験センター中央試験所品質性能部 環境グループ	〃
事務局	佐藤 哲夫	財団法人建材試験センター 業務課長	
〃	天野 康	財団法人建材試験センター 業務課長代理	
〃	菊地 裕介	財団法人建材試験センター 業務課	

1.3 調査研究の期間

平成13年8月2日から平成14年3月15日

1.4 審議経過

年 月 日		場 所	委員会名	議事概要
平成 13年	9月14日	建材試験センター 会議室	第1回本委員会	・13年度調査研究実施計画の 審議
	11月26日	建材試験センター 会議室	第2回本委員会	・修正調査計画審議 ・コンクリート実験結果並び に分析結果の報告 ・追加実験計画審議
平成 14年	2月4日	建材試験センター 会議室	第3回本委員会	・実験結果報告 ・成果報告のまとめ方につい て審議
	3月6日	鉄鋼会館	第4回本委員会	・13年度活動報告・成果報告 書の審議

第5章 コンクリートの圧縮強度試験における測定の不確かさの評価

5.1 各要因の不確かさの見積り

- 5.1.1 圧縮試験機の荷重校正の不確かさ
- 5.1.2 試験機，試験者及び試験の繰返しによる不確かさ
- 5.1.3 ノギスによる寸法測定の不確かさ
- 5.1.4 試験前養生温度による不確かさ
- 5.1.5 供試体の乾燥状態による不確かさ
- 5.1.6 載荷速度による不確かさ
- 5.1.7 合成標準不確かさの算定

5.2 圧縮強度レベルによる不確かさの違い

- 5.2.1 圧縮強度レベルにおける不確かさの試験
- 5.2.2 圧縮強度レベルにおける合成標準不確かさの算定
- 5.2.3 圧縮強度と変動係数

第5章 コンクリートの圧縮強度試験における測定の不確かさの評価

5.1 各要因の不確かさの見積もり

5.1.1 圧縮試験機の荷重校正の不確かさ

圧縮試験機の校正の不確かさを、「一軸試験機校正機関のためのガイドライン」に定められている「JTM・F203:不確かさの決定方法」に基づいて算出する。

力計の JCSS 校正証明書に記載されている最大拡張不確かさを用いて標準不確かさを次式で求める。

校正証明書によると、最大相対拡張不確かさは、 $\left(\frac{U_{-tra}}{P}\right) = 0.0013$ である。

包含係数は $k=2$ であるから 相対標準不確かさは次のように求められる。

$$\left(\frac{u_{-tra}}{P}\right) = \frac{1}{2} \times \left(\frac{U_{-tra}}{P}\right) = \frac{1}{2} \times 0.0013 = 0.00065 \quad (1)$$

温度変動、感度の不安定さによる影響はないものとし、校正の相対標準不確かさを次式で表す。

$$\left(\frac{u_{c_std}}{P}\right) = \left(\frac{u_{-tra}}{P}\right) = 0.00065 \quad (2)$$

次に、圧縮試験機の各誤差成分の標準不確かさを求める。不確かさの各成分は、JIS B 7733「圧縮試験機—力の検証方法」に従って行った試験機検証結果を用いて算出する。表1に実際の検証結果の例を示す。

表1 検定結果例

試験力 (kN)	相対精度誤差 q (%)	相対繰返し誤差 b (%)	相対零点誤差 f ₀ (%)	相対分解能 a (%)
300	0.23	0.07	0.00	0.017
400	0.15	0.03	0.00	0.012

各成分に対して定義された相対分散の計算式が表2のように示されている。

表2 JTM-F203 に示されている相対分散計算式

不確かさの成分	確率分布	相対分散
相対繰返し誤差	矩形分布	$\frac{u_{-rep}^2}{P} = \frac{1}{3} \times \left(\frac{b}{2}\right)^2$
相対零点誤差	矩形分布	$\frac{u_{-zer}^2}{P} = \frac{1}{3} \times \left(\frac{f_0}{2}\right)^2$
相対分解能	矩形分布	$\frac{u_{-res}^2}{P} = \frac{1}{3} \times \left(\frac{a}{2}\right)^2$
相対往復誤差	矩形分布	$\frac{u_{-rev}^2}{P} = \frac{1}{3} \times \left(\frac{v}{2}\right)^2$
相対精度誤差		$\frac{u_{-acc}^2}{P} = q^2$

各成分について標準不確かさを求める。(u_{-zer} は0, u_{-rev} は検証せず。)

表3 相対標準不確かさの計算表

負荷 ステップ (N)	相対繰返し誤差		分解能誤差		圧縮試験器の 校正における相 対標準不確かさ $\frac{u_{c_tm}}{P}$	相対精度誤 差の相対標 準不確かさ $\frac{u_{-acc}}{P}$	圧縮試験 機の相対 標準不確 かさ $\frac{u_{-cal}}{P}$
	$\frac{b}{2}$	相対標 準不確か さ $\frac{u_{-rep}}{P}$	$\frac{a}{2}$	相対標 準不確か さ $\frac{u_{-res}}{P}$			
300	3.5×10^{-4}	2.0×10^{-4}	8.5×10^{-5}	4.9×10^{-5}	6.8×10^{-4}	2.3×10^{-3}	2.4×10^{-4}
400	1.5×10^{-4}	8.7×10^{-5}	6.0×10^{-5}	3.5×10^{-5}	6.6×10^{-4}	1.5×10^{-3}	1.6×10^{-4}

ここに,

$$\frac{u_{-tm}}{P} = \sqrt{\left(\frac{u_{c_std}}{P}\right)^2 + \left(\frac{u_{-rep}}{P}\right)^2 + \left(\frac{u_{-zer}}{P}\right)^2 + \left(\frac{u_{-res}}{P}\right)^2 + \left(\frac{u_{-rev}}{P}\right)^2} \quad (3)$$

$$\frac{u_{-cal}}{P} = \sqrt{\left(\frac{u_{-tm}}{P}\right)^2 + \left(\frac{u_{-acc}}{P}\right)^2}$$

破壊荷重は、300kNと400kNの間なので、この間の平均値を採ると、

$$\frac{u_{cal}(P)}{P} = 0.00202 \quad (4)$$

になる。ここで、今回実測したコンクリートの強度の平均値 $F_c = 41.88 \text{ N/mm}^2$ とすると、

$$\left(\frac{u_{cal}(P)}{P}\right)F_c = 0.00202 \times 41.88 = 0.0846 \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (5)$$

5.1.2 試験機、試験者、及び試験の繰り返しによる不確かさ（Aタイプ不確かさ）

3台の試験機を用い試験を実施した。表5に示すデータによる分散分析結果を表4に示す。

表4 試験機、試験者の組合せによる分散分析 (N/mm²)

要因		平方和	自由度	分散	分散の期待値
バッチ	b	55.986	3	18.662	$\sigma_e^2 + 45\sigma_b^2$
試験機	i	23.866	2	11.933	$\sigma_e^2 + 60\sigma_i^2$
試験者	h	7.35	2	3.675	$\sigma_e^2 + 60\sigma_h^2$
誤差	e	146.658	172	0.853	σ_e^2
TOTAL		233.862	179		

(注：表5の実験は、バッチを1次因子、試験機と試験者を2次因子とするいわゆる分割型といわれる実験計画に相当し、統計的に厳密には、この実験の配置に配慮した分散分析を行う必要があるが、ここでは簡単のため、表4の形の分散分析を行うにとどめる。厳密な分散分析については、付録Aを参照)

表4のバッチの要因は、供試体ばらつきと解釈し、不確かさとして評価しないことにして、 u_i 、 u_h 、 u_e を分散の期待値を表す式より求める。

$$\begin{aligned} u_i^2(F_c) &= \sigma_i^2 = (11.933 - 0.853) / 60 = 0.185 \\ u_h^2(F_c) &= \sigma_h^2 = (3.675 - 0.853) / 60 = 0.047 \\ u_e^2(F_c) &= \sigma_e^2 = 0.853 \end{aligned} \quad (5)$$

3.2.3 節の(5)式より、

$$\begin{aligned} u_A^2(F_c) &= u_i^2(F_c) + u_h^2(F_c) + u_e^2(F_c) \\ &= 0.185 + 0.047 + 0.853 \\ &= 1.085 \end{aligned} \quad (6)$$

試験機と試験者の組合せによるAタイプ不確かさは、

$$u_A(F_c) = 1.042 \text{ N/mm}^2 \text{ となる。}$$

なお、 σ は母標準偏差を表すときに用い、 u は不確かさを表すときに用いるが、 σ の推定値が u に相当する。

表5 圧縮強度試験データ

b: バッチ(4) i: 試験機(3) h: 試験者(3) n: 繰り返し(5) (N/mm²)

試験者	バッチb1			バッチb2			バッチb3			バッチb4		
	h1	h2	h3	h1	h2	h3	h1	h2	h3	h1	h2	h3
試験器i1	42.9	43.3	42.7	39.9	41.1	41.1	42.2	45.8	42.7	42.9	41.8	43.0
	44.0	41.8	41.3	39.4	42.4	39.8	41.4	43.5	42.9	42.9	40.8	41.2
	42.6	42.1	43.9	40.9	42.3	42.1	42.3	43.8	44.5	43.3	41.4	41.7
	41.9	43.0	42.4	41.7	43.0	42.0	43.5	43.9	43.5	41.4	43.1	42.1
	43.4	42.1	42.1	42.2	41.9	41.7	43.8	42.7	44.7	41.6	41.8	42.8
試験器i2	40.9	41.6	42.5	39.8	39.9	40.1	41.2	42.1	42.4	41.8	41.7	40.3
	40.6	41.0	41.7	41.6	41.8	42.2	43.1	43.1	41.0	40.8	42.0	41.9
	41.4	41.8	41.3	40.3	42.5	42.3	40.7	43.8	41.7	42.4	41.1	40.6
	40.2	42.6	41.3	41.0	41.4	41.4	41.6	42.1	42.8	40.9	42.4	41.9
	42.3	42.1	43.5	41.4	41.6	40.5	42.4	43.2	42.7	40.0	41.7	40.5
試験器i3	43.2	40.1	40.8	40.0	41.9	41.0	43.2	41.6	42.9	40.7	41.9	40.7
	43.3	41.0	39.5	42.1	42.6	41.9	42.4	43.4	41.0	40.4	41.8	42.0
	41.9	44.8	40.1	41.3	40.3	40.0	42.5	42.3	43.7	39.5	41.3	42.3
	41.2	41.9	42.0	40.4	41.3	41.0	42.5	41.4	43.8	40.2	41.6	41.3
	41.6	42.9	40.9	40.0	40.7	41.7	42.7	43.2	41.3	42.4	42.2	41.3

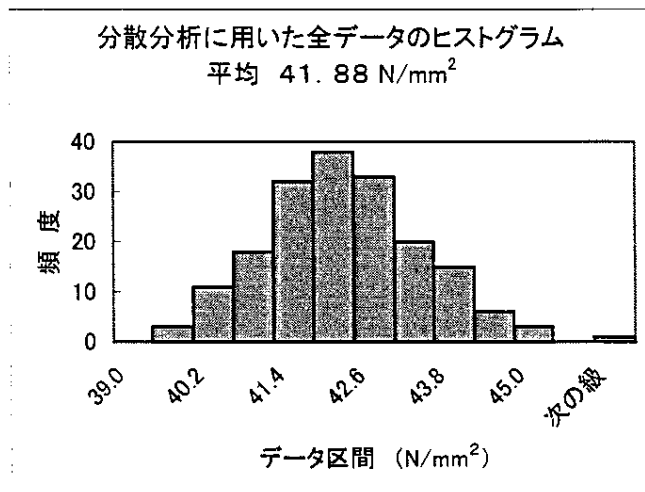


図1 圧縮強度のヒストグラム

5.1.3 ノギスによる寸法測定の不確かさ

直径の測定値の系統的な不確かさは、ノギスの偏りとみて、JISの規定値 $\pm 0.06\text{mm}$ より求める。

$$u_{\text{systematic}}(d) = 0.06 / \sqrt{3} = 0.0346 \quad (\text{mm}) \quad (7)$$

シリーズ1の試験で測定した供試体直径及び圧縮強度の平均値並びに直径の標準偏差を用いて、

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{100.26 + 100.27}{2} = 100.265 \quad (\text{mm})$$
$$\frac{u_{\text{systematic}}(d)}{d} = \frac{0.0346}{100.265} = 0.000345 \quad (8)$$
$$\frac{2 \times F_c}{d} \times u_{\text{systematic}} = 2 \times 41.88 \times 0.000345 = 0.0289 \quad (\text{N/mm}^2)$$

ノギス測定のはらつき(偶然的成分)の圧縮強度 F_c の不確かさへの寄与は、すでに上で評価した $u_e(F_c)$ 、および $u_h(F_c)$ の一部として含まれているので、独立な不確かさ成分としては評価しない。

5.1.4 試験前養生温度による不確かさ

試験日の1日前から試験までの期間の養生温度を変化させた場合の実験で得られたデータをもとに、温度と圧縮強度の関係を図2に示した。

試験結果から、温度と圧縮強度の関係が $F_c = 44.6 \cdot 0.095 T$ の回帰式で表され、この式を偏微分すると、

$$\text{この式を偏微分すると、} \left| \frac{\partial F_c}{\partial T} \right| = 0.095 \quad \text{となる。} \quad (9)$$

本実験における供試体の水中養生温度は供試体の水中養生温度は、 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ で管理されており、矩形分布していると仮定し、養生温度による標準不確かさを求めると以下のとおりとなる。

$$u_T = \left(\frac{\partial F_c}{\partial T} \right) u(T) = 0.095 \times \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.0565 \quad (\text{N/mm}^2) \quad (10)$$

$$u_T^2 = 0.003 \quad (\text{N/mm}^2)^2 \quad (11)$$

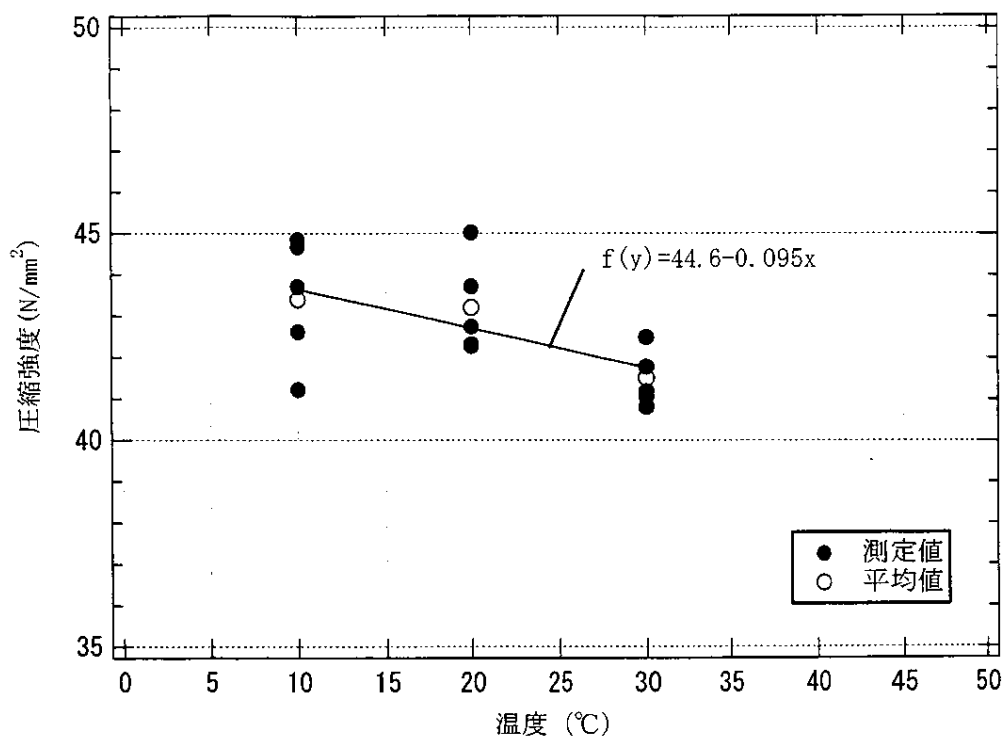


図2 試験前養生温度と圧縮強度との関係

5.1.5 供試体の乾燥状態による不確かさ

実験で得られたデータをもとに、乾燥時間と圧縮強度の関係を図3に示す。

試験結果から、供試体の乾燥時間と圧縮強度との関係が、 $F_c = 0.0169t + 41,32$ (N/mm^2)と回帰される。実験では、8時間まで測定したが1時間以降では圧縮強度がほぼ一定となったため、ここでは開始から1時間経過までのデータを用いて回帰式を求めた。従って、 $0 \leq t \leq 60$ (分)とする。この式を偏微分すると、

$$\left(\frac{\partial F_c}{\partial t} \right) = 0.0169 \text{ が得られる。}$$

さらに、通常の場合、1体の供試体を養生水槽から取り出して試験が終わるまでの時間を 5 ± 1 分と仮定して、標準不確かさを求めると、

$$u_t = \left(\frac{\partial F_c}{\partial t} \right) u(t) = 0.0169 \times \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.00976 \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (12)$$

$$u_t^2 = 0.000095 \text{ (N/mm}^2\text{)}^2$$

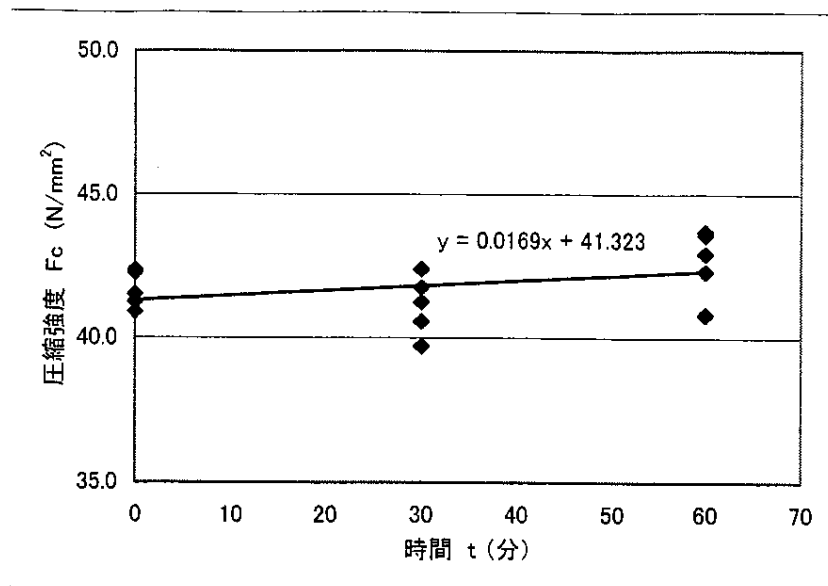


図3 供試体の乾燥時間と圧縮強度の関係

5.1.6 載荷速度による不確かさ

コンクリートの圧縮強度試験における載荷速度は、JIS A 1108 に規定されており、毎秒 $0.06 \pm 0.04 \text{ N/mm}^2$ となっている。

本報告書における載荷速度は、この JIS A 1108 の規定値の範囲で実施された。載荷速度が圧縮強度に及ぼす影響は、友澤、柘田らの既往の文献「載荷速度がコンクリートの圧縮破壊に及ぼす影響」¹ で報告されているため、載荷速度による不確かさは、文献を参考にして載荷速度と圧縮強度の関係を求め推定することにした。

同文献では、載荷速度と圧縮強度について次のような関係式を導いている。

$$F / F_{0.2} = 1 + a \log(v / 0.2) \tag{13}$$

$$a = 0.756 / F_{0.2} + 0.0544$$

ここに、 F : 載荷速度 v における圧縮強度 N/mm^2

$F_{0.2}$: 載荷速度 $0.2 \text{ N/(mm}^2\text{s)}$ における圧縮強度 N/mm^2

v : 載荷速度 $\text{N/(mm}^2\text{s)}$

(13)式を v について偏微分すると次式が得られる。

$$\left(\frac{\partial F}{\partial v} \right) = a \times F_{0.2} \times \frac{1}{2.303v} \tag{14}$$

2.303 は、自然対数の底である。

¹ 昭和63年総合技術開発プロジェクト「鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発報告書」

載荷速度 $0.2 \text{ N/(mm}^2\text{sec)}$ における圧縮強度が 40 N/mm^2 のコンクリートは、載荷速度 $0.6 \text{ N/(mm}^2\text{sec)}$ では、感度係数が 2.1 となる。
 シリーズ 2①の実験結果から載荷速度の標準不確かさを求めると次のようになる。

$$u_v = \left(\frac{\partial F_c}{\partial v} \right) u(v) = 2.1 \times 0.0328 = 0.069 \quad (\text{N/mm}^2) \quad (15)$$

$$u_v^2 = 0.00476 \quad (\text{N/mm}^2)^2$$

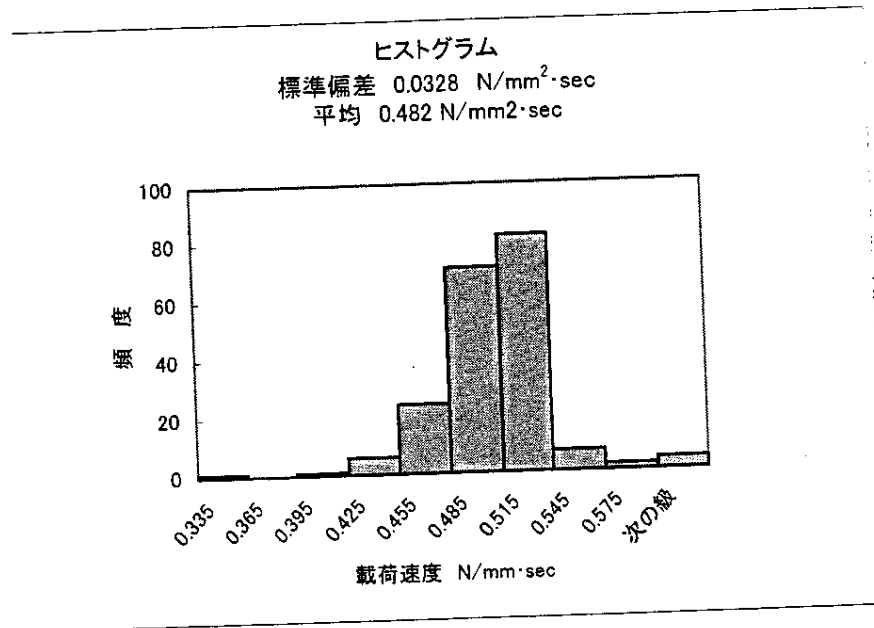


図4 載荷速度のヒストグラム

5.1.7 合成標準不確かさの算定

(1) 圧縮強度 40 N/mm^2 における合成標準不確かさ

5.1.1~5.1.9の結果から、各要因の不確かさ成分をまとめて表9に示す。コンクリートの圧縮強度における合成標準不確かさは、各要因の標準不確かさを以下に示す 3.3.3 節の式(10)に従って算出したものになる。

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

表6 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 $u_j^2 (N/mm^2)^2$	標準不確かさ $u_j (N/mm^2)$
①	試験機の校正	B	$\frac{u_{cal}(P)}{P} = 0.00202$	0.007	0.0846
②	ノギス	B	$\frac{u_{sys}(d)}{d} = 0.000345$	0.001	0.0289
u _A	試験機 u _i	A		0.185	0.430
	試験者 u _h	A		0.047	0.217
	繰返し誤差 u _e	A		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	0.0565
⑤	乾燥状態 t	A	$\left \frac{\partial F_c}{\partial t} \right = 0.0169$	0.000	0.0098
⑥	載荷速度 v	B	$\left \frac{\partial F_c}{\partial v} \right = 2.1$	0.005	0.069
合成標準不確かさ		—		1.100	1.05

(表中 u_{sys} は $u_{systematic}$ 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。)

目標圧縮強度 $40N/mm^2$ における合成標準不確かさは、表6の数値を用いて、以下の計算で求める。

$$\begin{aligned}
 u_c(F_{40}) &= \sqrt{0.007 + 0.000 + 0.185 + 0.047 + 0.853 + 0.003 + 0.000 + 0.005} \\
 &= \sqrt{1.100} = 1.05 \text{ (N/mm}^2\text{)}
 \end{aligned}$$

5.2 圧縮強度レベルによる不確かさの違い

5.2.1 圧縮強度レベルの違いによる不確かさ算定のための試験

圧縮強度レベルが異なると、測定の不確かさの大きさも異なることが一般的には予想される。

そこで、同一試験者による同一試験機を用いた圧縮強度レベルの異なる試験を行い分散分析によるAタイプ評価を行った。その結果を以下に示す。

(1) 目標圧縮強度 40N/mm²

実験1及び実験2①で実施した目標強度 40N/mm²の8バッチの分散分析の結果を表7に示す。バッチによるばらつきは、供試体のばらつきとみて評価しないことにすると、目標圧縮強度 40N/mm²の標準不確かさは、 $u_A(F_{40}) = \sigma_e = 1.052 (N/mm^2)$ となる。

表7 目標圧縮強度 40N/mm²の分散分析結果

変動要因	変動	自由度	分散	分散の期待値	σ^2	σ
バッチ b	40.147	7	5.735	$\sigma_e^2 + 10\sigma_b^2$	0.463	0.680
繰返し誤差 e	79.643	72	1.106	σ_e^2	1.106	1.052
合計	119.79	79				

(2) 目標圧縮強度 80N/mm²

目標強度 80N/mm²の分散分析の結果を表8に示す

同様に、目標強度 80N/mm²の標準不確かさは、 $u_A(F_{80}) = \sigma_e = 2.06 (N/mm^2)$ となる。

表8 目標圧縮強度 80N/mm²の分散分析結果

変動要因	変動	自由度	分散	分散の期待値	σ^2	σ
バッチ b	23.172	3	7.724	$\sigma_e^2 + 10\sigma_b^2$	0.347	0.589
繰返し誤差 e	153.01	36	4.250	σ_e^2	4.250	2.062
合計	176.18	39				

(3)

圧縮強度 100N/mm²

さらに、目標強度 100N/mm²の分散分析の結果を表9に示す

目標強度 100N/mm²の標準不確かさは、 $u_A(F_{100}) = \sigma = 2.822 (N/mm^2)$ となる。

目標

表9 目標圧縮強度 100N/mm²の分散分析結果

変動要因	変動	自由度	分散	分散の期待値	σ^2	σ
バッチ B	85.581	3	28.527	$\sigma_e^2 + 10\sigma_b^2$	2.056	1.434
誤差 e	286.65	36	7.962	σ_e^2	7.962	2.822
合計	372.23	39				

5.2.2 圧縮強度レベルの違いによる合成標準不確かさの算定

圧縮強度レベルの違いによる合成標準不確かさを求めるために、前項で求めた各圧縮強度レベルごとに A タイプ評価で求めた不確かさのほかに、表6に示す①試験機の校正、②ノギス、④養生温度及び⑤乾燥状態の感度係数を使用する。載荷速度については表10に示す数値を用いる。

表10

目標圧縮強度 N/mm ²	実測圧縮強度 N/mm ²	$u_A(F_c)$ N/mm ²	載荷速度の 感度係数	$u(v)$ N/mm ² ·sec
40	41.8	1.052	2.1	0.0188
80	99.9	2.062	3.6	0.0413
100	117.1	2.822	4.5	0.0470

注) 載荷速度の感度係数は、 $F_{0.2}$ をそれぞれの目標圧縮強度とし、 $v=0.6$ として、(13)式及び(14)式から求めた。 $u_A(F_c)$ 及び $u(v)$ は、測定データから求めた。

(1) 目標圧縮強度 40N/mm²については、

$$\left(\frac{u_{cal}(P)}{P}\right)F_c = 0.00202 \times 41.8 = 0.0844$$

$$2 \times \frac{u_{systematic}(d)}{d} \times F_c = 2 \times 0.000345 \times 41.8 = 0.0288$$

表10より $u_A(F_{40})=1.052$

$$\left(\frac{\partial F_c}{\partial v}\right)u(v) = 2.1 \times 0.0188 = 0.0395$$

$$u_c(F_{40})_8 = \sqrt{0.0844^2 + 0.0288^2 + 1.052^2 + 0.003 + 0.000 + 0.0395^2} = \sqrt{1.119} = 1.06 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

(2) 目標圧縮強度 80N/mm^2 については,

$$\left(\frac{u_{cal}(P)}{P}\right)F_c = 0.00202 \times 99.9 = 0.202$$

$$2 \times \frac{u_{systematic}(d)}{d} \times F_c = 2 \times 0.000345 \times 99.9 = 0.0689$$

表 10 より $u_A(F_{80}) = 2.062$

$$\left(\frac{\partial F_c}{\partial v}\right)u(v) = 3.6 \times 0.0413 = 0.149$$

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

(3) 目標強度 100N/mm^2 については,

$$\left(\frac{u_{cal}(P)}{P}\right)F_c = 0.00202 \times 117.1 = 0.236$$

$$2 \times \frac{u_{systematic}(d)}{d} \times F_c = 2 \times 0.000345 \times 117.1 = 0.0808$$

表 10 より $u_A(F_{100}) = 2.822$

$$\left(\frac{\partial F_c}{\partial v}\right)u(v) = 4.5 \times 0.047 = 0.2115$$

$$u_c(F_{80}) = \sqrt{0.236^2 + 0.0808^2 + 2.822^2 + 0.003 + 0.000 + 0.2115^2} = 2.84 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

これらの結果をまとめて表 11 に示す。

表 11 圧縮強度の違いによる合成標準不確かさ(N/mm²)

コンクリートの圧縮強度レベル		合成標準不確かさ
目標	実測	
40	41.8	1.06
80	99.9	2.08
100	117.1	2.84

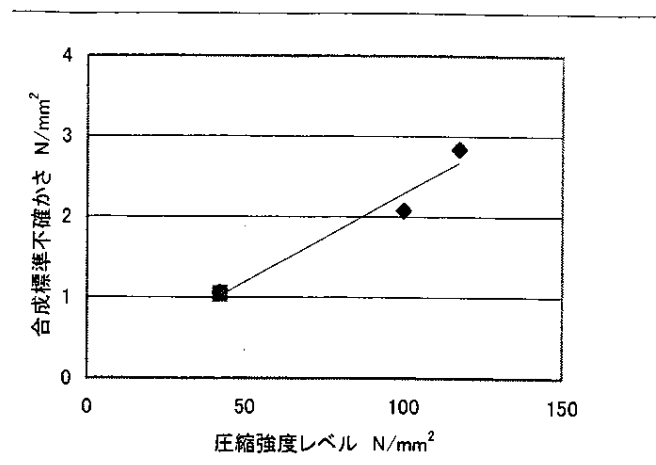


図5 圧縮強度レベルと合成標準不確かさの関係

5.2.3 圧縮強度レベルと変動係数

既往の文献*¹⁾及び本調査研究における実験1及び2①の試験結果で求められた圧縮強度と変動係数の関係を図6に示す。既往の文献においては、圧縮強度が大きくなると変動係数が大きくなる傾向を示しているが、本調査研究の実験結果では、圧縮強度レベル $40 \sim 120 N/mm^2$ における圧縮強度と変動係数の関係はほぼ同程度であり、変動係数の平均値は3%以下となった。

また、表7～9に示す実験により求めた目標強度 $40, 80, 100 N/mm^2$ の分散分析結果によると、バッチでみると目標圧縮強度 $40 N/mm^2$ と $80 N/mm^2$ ではほぼ同程度の標準偏差が得られたが、目標圧縮強度 $100 N/mm^2$ では大きい結果を示した。

高強度コンクリートの圧縮強度における破壊のメカニズムを考慮し、本実験結果及び文献データから検討すると、「コンクリートの圧縮強度試験における不確かさ」を $30 \sim 100 N/mm^2$ (実強度) の範囲で求めることが適当であると判断できる。

目標圧縮強度 $40 N/mm^2$ については合計8バッチの供試体作製を行った。実験の供試体作製バッチ間の変動係数を図7に示す。実験の結果が矩形分布となると仮定し、90%信頼区間分布範囲を求めたところ、各バッチの変動係数の平均は2.4%となり、8バッチの変動係数は、1バッチを除きほぼ $\mu \pm 1.64 \sigma$ に分布していることが確認された。

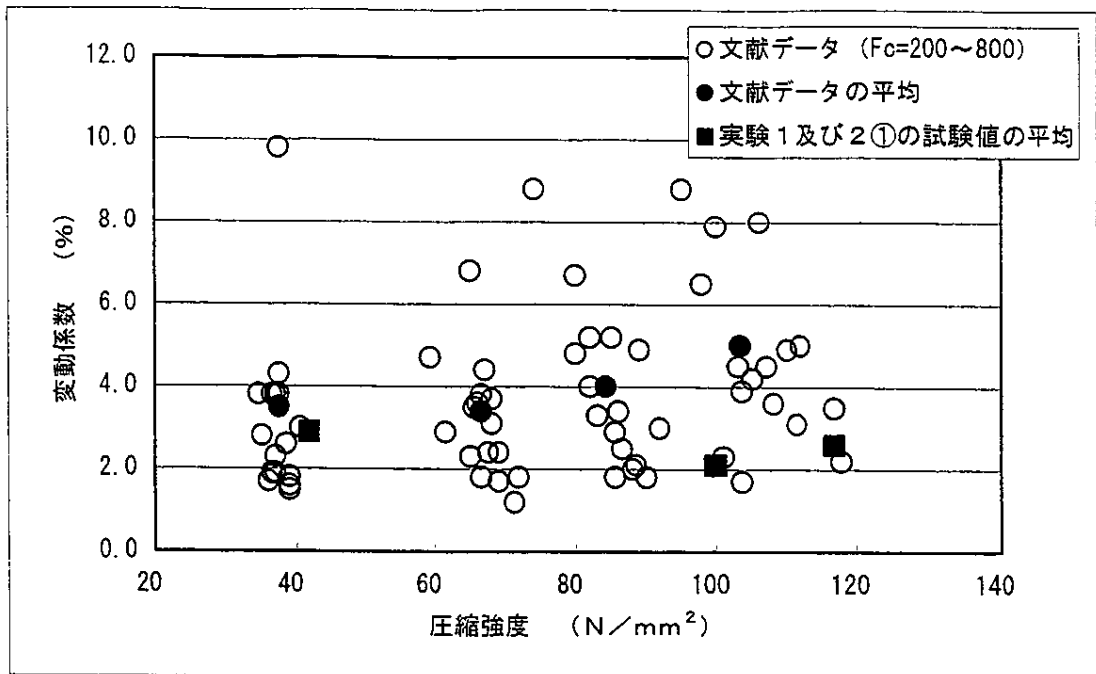


図6 圧縮強度と変動係数の関係

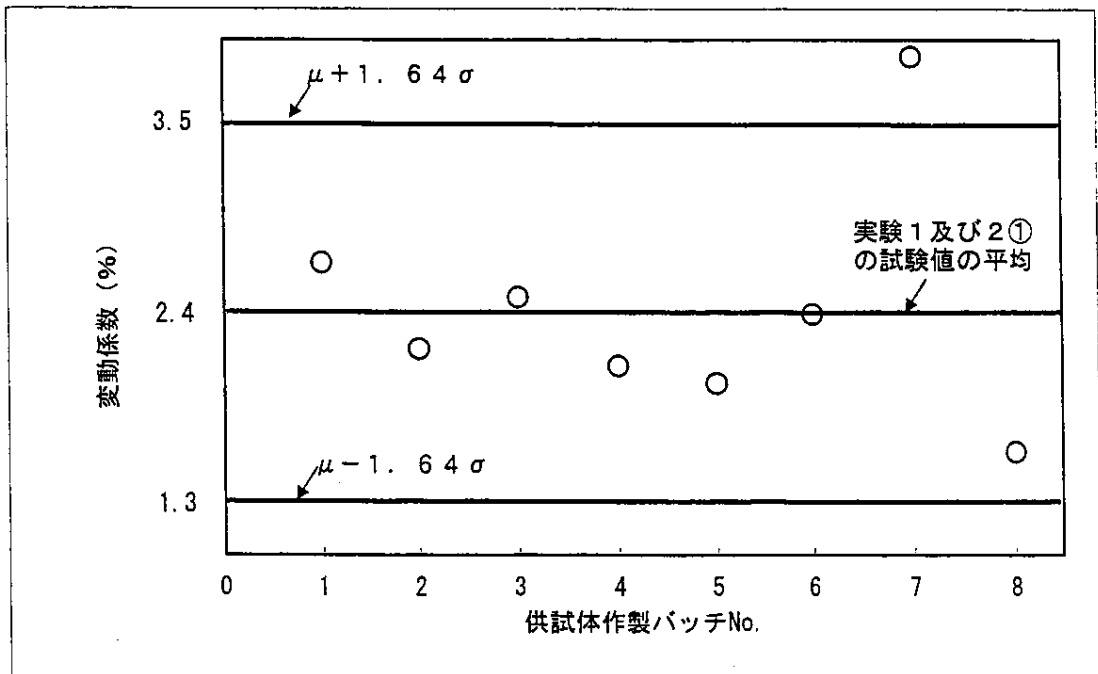


図7 供試体作製バッチ間の変動係数の分布

参考文献

*1) 友澤・野口・陳・榊田・阿部・安田／高強度コンクリートの圧縮強度試験方法の標準化に関する研究(その4 試験機の影響に関する共同実験:概要, 試験機の調査, 試験結果), 日本建築学会大会講演梗概, 1990年10月, pp.499~500

附録 A

「表5のデータを、バッチを1次因子、試験機と試験者を2次因子とする分割型実験計画によるものとして解析すると下のような分散分析表が得られる。交互作用 $i \times h$ 、及び1次誤差(e_1)は有意でないので、これらを2次誤差(e_2)にプールすると、結局、本文の表4と同じ結果が得られる。」

表 A1. バッチを1次因子、試験機と試験者を2次因子とする
分割型実験としての分散分析表

要因	平方和	自由度	分散
バッチ b	55.986	3	18.662
試験機 i	23.866	2	11.933
試験者 h	7.35	2	3.675
$i \times h$	1.921	4	0.48
e_1 (1次誤差)	26.061	24	1.085
e_2 (2次誤差)	118.676	144	0.824
TOTAL	233.862	179	