

モルタルの引張強度の確率分布に関する実験的研究

北海道工業大学大学院 学生会員 ○石川 悠太

北海道工業大学 正会員 今野 克幸

1. はじめに

骨材粒・空隙の分布等に起因するモルタル及びコンクリートの材料固有の強度のばらつきについて、例えば文献1)～3)のように多くの研究がなされているが、モルタルの引張強度の確率分布についての研究成果は見当たらない。また、昨今、剛体バネモデル（以降、RBSM と呼ぶ）を用いた数値解析により、メソスケールでのコンクリートの破壊挙動のシミュレーション等が活発に行われているが、要素間のバネの強度、つまりモルタルの引張強度あるいは粗骨材界面の付着強度のばらつきは便宜的に正規分布が仮定されているのが現状と思われる⁴⁾。本研究では、RBSM を用いた数値解析の精度向上を目的にモルタルの引張試験を行い、その結果から引張強度の確率分布について検討を行った。

2. 実験概要

実験に用いたモルタル供試体の形状および寸法は、最小断面積 $2.54\text{cm} \times 2.54\text{cm}$ のひょうたん型であり、1つの試験シリーズについて供試体を 50～57 個用意した。供試体を作製する際に用いた使用材料として、細骨材は表乾密度 2.68g/cm^3 、吸水率 1.55%の沙流川産川砂、セメントは密度 3.16g/cm^3 の普通ポルトランドセメント、混和剤に AE 剤を用いた。また、実験変数を水セメント比とし、表-1 に示すように 40%から 65%の間で変化させた。供試体は、打設後、室内で 24 時間湿布養生された後脱型され、材齢 28 日まで 20°C で水中養生された。引張試験は、供試体に曲げモーメントが作用しないように掴み具はピン支持とし、載荷速度 9.8N/sec のもと行われた。

3. 統計モデルと検定方法

引張強度のヒストグラムの一例として試験シリーズ WC60-1 の結果を図-1 に示す。図より、引張強度の確率分布は正規分布よりワイブル分布に近いと思われるが、本研究ではモルタルの引張強度の確率分布が正規分布よりワイブル分布に対して適合度が高いことを確認するために検定を行った。なお、検討に用いたワイブル分布の確率密度関数は式(1)に示すとおりである⁵⁾。

$$f(x) = \beta m x^{(m-1)} \exp(-\beta x^m) \quad (1)$$

ここで $\beta (>0)$ は尺度のパラメータ、 $m (>0)$ は形状パラメータ（ワイブル係数）であり、 $x \geq 0$ とする。

検定法として、コルモゴロフスミルノフ検定（以降 K-S 検定と呼ぶ）を用いた。以下に、検定の手順の概略を示す。まず、正規分布を仮定する場合は引張強度の平均値と標準偏差により理論分布関数が与えられ、ワイブル分布を仮定する場合は図-2 に示すようなワイブル確率紙上の回帰直線の傾きと切片からそれぞれ求められるワイブル係数 m と $\log \beta$ により理論分布関数が与えられる。なお、全てのシリーズの引張強度の平均値と標準偏差をまとめたものを表-2 として示し、ワイブル係数 m と $\log \beta$ をまとめたものを表-3 として示す。次に正規分布を仮定した場合とワイブル分布を仮定した場合のそれぞれに対して、図-3 のように理論分布関数 $F(x)$ と標本累積度数 $S_n(x)$ を比較し、それらの差の絶対値 D_n の内、最大値 $D_{\max}$ を求める。そして、仮定する確率分布が 2 つある場合、 $D_{\max}$ の値が小さい方の確率分布に対して適合度が高いことになる。

4. 考察

表-4 は検定結果より得られた $D_{\max}$ の値について正規分布とワイブル分布の比較を示したものである。表より全てのシリーズにおいてワイブル分布と仮定した場合の方が $D_{\max}$ の値が小さく、本実験の範囲ではモルタルの引張強度

キーワード モルタル、引張強度、ワイブル分布

連絡先 〒006-8585 北海道札幌市手稲区前田 7 条 15 丁目 4-1 北海道工業大学 TEL 011-681-2161

表-1 モルタルの示方配合							
試験シリーズ	水セメント比 (%)	空気量	砂セメント比	単位量(kg/m ³)			
		測定値(%)		水	セメント	細骨材	混和剤
WC40-1	40	7.6	1.61	283	706	1136	0.671
WC40-2		7.7	1.61	283	706	1136	0.671
WC45-1	45	7.5	1.94	281	624	1211	0.593
WC45-2		7.8	1.94	281	624	1211	0.593
WC50-1	50	7.9	2.24	282	563	1262	0.535
WC50-2		7.8	2.24	282	563	1262	0.535
WC55-1	55	7.8	2.55	281	512	1307	0.486
WC60-1	60	7.7	2.83	283	472	1336	0.448
WC65-1	65	7.6	3.16	282	434	1372	0.412

表-2 引張強度の平均値と標準偏差		
試験シリーズ	平均値 (N/mm ²)	標準偏差 σ (N/mm ²)
WC40-1	4.00	0.508
WC40-2	4.02	0.428
WC45-1	3.91	0.352
WC45-2	3.67	0.390
WC50-1	3.17	0.461
WC50-2	3.09	0.427
WC55-1	2.96	0.334
WC60-1	2.64	0.418
WC65-1	2.33	0.340

表-3 ワイブル係数 m と $\log \beta$		
試験シリーズ	m	$\log \beta$
WC40-1	9.47	-13.5
WC40-2	11.6	-16.5
WC45-1	13.5	-18.8
WC45-2	11.1	-14.9
WC50-1	7.79	-9.40
WC50-2	8.54	-10.1
WC55-1	10.5	-11.8
WC60-1	7.26	-7.46
WC65-1	8.09	-7.25

表-4 K-S検定結果		
試験シリーズ	正規分布 D_{max}	ワイブル分布 D_{max}
WC40-1	0.0754	0.0616
WC40-2	0.0962	0.0776
WC45-1	0.0815	0.0675
WC45-2	0.0764	0.0681
WC50-1	0.1160	0.1050
WC50-2	0.0745	0.0686
WC55-1	0.0920	0.0882
WC60-1	0.0857	0.0716
WC65-1	0.1100	0.1050

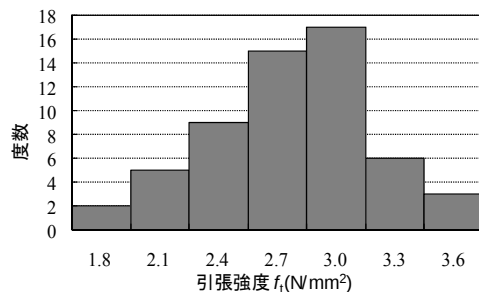


図-1 WC60-1 の引張強度のヒストグラム

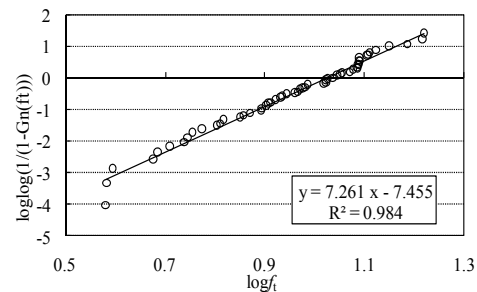


図-2 ワイブル確率紙(WC60-1)

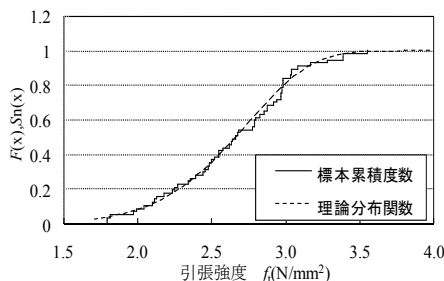
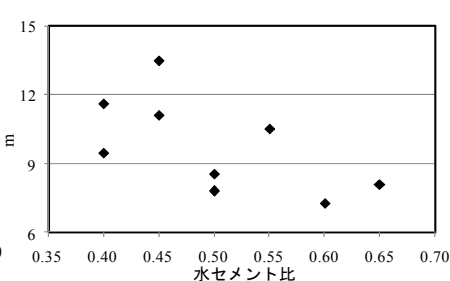
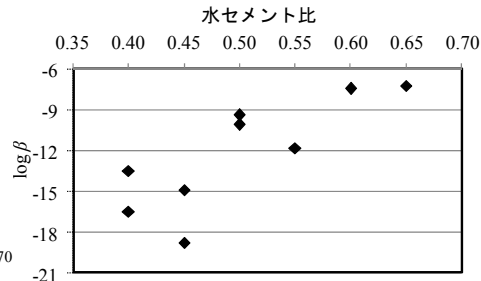


図-3 K-S 検定

図-4 水セメント比と m の関係図-5 水セメント比と $\log \beta$ の関係

の確率分布はワイブル分布に適合すると言える。よって、水セメント比と形状のパラメータ m の関係を図-4 に、水セメント比と尺度のパラメータ $\log \beta$ の関係を図-5 に示す。図-4, 5 より水セメント比が 45%以上の範囲では、水セメント比が大きくなると m の値は小さくなり、 $\log \beta$ の値は大きくなることが示された。 m は形状のパラメータであり、この値が大きくなると、確率密度関数の形状は尖塔的、すなわちばらつきが小さくなる傾向が示される。また、 $\log \beta$ は尺度のパラメータであり、この値が大きくなると、確率密度関数の形状は最頻値が左側に寄る、すなわち強度が小さくなる傾向が示される。したがって、本実験の範囲では水セメント比が大きくなるにしたがい強度が小さくばらつきが大きくなる傾向が示された。

5. まとめ

- 1) モルタルの引張強度の確率分布は、ワイブル分布にしたがうことが示された。
- 2) 水セメント比が 45%以上では、水セメント比が大きくなるにしたがい形状のパラメータ m の値は小さくなり、尺度のパラメータ $\log \beta$ の値は大きくなる、つまり、強度が小さくばらつきが大きくなる傾向が示された。

参考文献

- 1) 永松静也：モルタル・コンクリート強度の統計的性質，日本建築学会論文報告集，第 240 号，pp.9-19，1976
- 2) 谷川恭雄，山田和夫：セメントペースト、モルタルおよびコンクリート強度の確率分布について，セメント技術年報，Vol.32，pp.221-224，1978
- 3) 大岸佐吉ら：セメントモルタルの曲げ強度の確率論的考察，コンクリート工学年次講演論文集，Vol.7，pp.269-272，1985
- 4) K. NAGAI, Y. SATO, T. UEDA：Mesoscopic Simulation of Failure of Mortar and Concrete by 2D RBSM，Journal of Advanced Concrete Technology, 2(3) 359-374, 2004
- 5) 横堀武夫：材料強度学，岩波全書，1997