

[88] コンクリート強度の確率分布に及ぼす骨材粒度の影響

正会員 大岸佐吉 (名古屋工業大学)
 正会員○小野博宣 (中部大学工学部)
 高津 学 (名古屋工業大学)
 武田祥志 (名工大・大学院)

1. まえがき

セメント系硬化体は、マトリクスとしてのセメントペースト中に水隙や空隙、骨材粒子などがランダムに分散していることによる内部構造上の不均一性に起因して破壊にバラツキを伴う。試料作成上の技術的なバラツキは慎重な対処によりある程度解消し得るので、この材料固有の力学的変動を解明することが必要である。既に従来よりこうした観点からのアプローチが若干の研究者により報告されている^{1)~8)}。

本研究は、セメントモルタルおよびコンクリートの曲げ並びに圧縮強度分散の確率統計的性質におよぼす供試体寸法並びに骨材粒度分布の影響を実験的に検討したものである。

2. 実験方法

(1) 試験項目

本実験においては、モルタルおよびコンクリートについて、1) 強度分布の供試体寸法依存性 2) 強度分布の骨材粒度分布依存性 の2項目について試験した。実験に用いた骨材粒度分布曲線を図1, 図2に、また供試体寸法および骨材粒度の概要を表1~表3に示す。

(2) 材料, 調合, 養生

使用したセメントは、普通ポルトランドセメント(O社製, $\rho = 3.10$, 比表面積=3240(cm^2/g), 圧縮強さ $\sigma_{28}=40.6(\text{N}/\text{mm}^2)$), 細骨材にはけい砂($\rho=2.6$, 吸水率=2.0(%/wt), 粒径=0~0.3mm), 長良川産川砂($\rho=2.60$, 吸水率=1.4(%/wt)), また粗骨材には長良川産($\rho=2.61$, 吸水率=1.2(%/wt)) および木曾川産($\rho=2.58$, 吸水率=0.8(%/wt))を使用した。試料の重量調合比は, C/W/A=1.0/0.476/2.1の一調合である。供試体寸法は表1に示す6種類である。試験体数は, 各実験因子ごとに24個, 10×10×40(mm)の供試体のみは42個を製作した。モルタルの練り混ぜには, ホバードミキサーを, コンクリートには強制攪拌型ミキサーを用いた。打ち込み後, 3~5時間経過したときキャッピングを施し, 24時間後に脱型, 重量を測定した後, 20℃の水中養生をおこなった。曲げ試験は材齢28日で, 圧縮試験は, その2~3日後に行った。

(3) 試験方法

所定の材齢に達した供試体は, スパンをはり断面寸法の3倍にと

り, 2点集中荷重をスパンの1/4の間隔にセットしクロスヘッドスピード 0.4(mm/min)で荷重を作用させ, 曲げ強度を測定した。曲げ試験で生ずる2個の破断片に対して圧縮試験を行った。オートグラフ

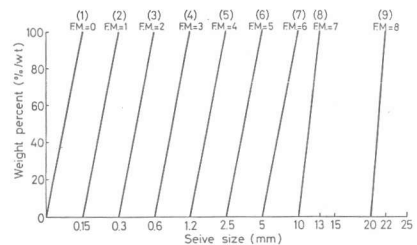


図1. 骨材粒度分布 (単一粒径)

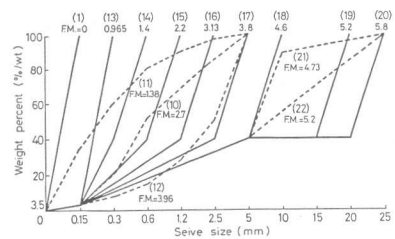


図2. 骨材粒度分布 (連続粒径)

表1. 実験概要 (単一粒径)

Aggregate grain size(mm) of specimen	(1) 0~0.15 F.M.=0	(2) 0.15~0.3 F.M.=1.0	(3) 0.3~0.6 F.M.=2.0	(4) 0.6~1.2 F.M.=3.0	(5) 1.2~2.5 F.M.=4.0	(6) 2.5~5 F.M.=5.0	(7) 5~10 F.M.=6.0	(8) 10~13 F.M.=7.0	(9) 20~22 F.M.=8.0
10×10×40 (mm)	D/d= 66.7	D/d= 33.3	D/d=16.7	D/d= 8.3	D/d= 4.0	----	----	----	----
20×20×80 (mm)	=133.3	=66.7	=33.3	=16.7	= 8.0	D/d= 4.0	----	----	----
30×30×120 (mm)	----	=100.0	=50.0	=25.0	=12.0	= 6.0	----	----	----
40×40×160 (mm)	----	=133.3	=66.7	=33.3	=16.0	= 8.0	D/d= 4.0	----	----
75×75×300 (mm)	----	----	----	=62.5	=30.0	=15.0	= 7.5	----	D/d= 3.4
100×100×400 (mm)	----	----	----	----	=40.0	----	=10.0	D/d= 7.7	----

(Va/Vcon)=0.5 W/C=0.476 C/W/A=1.0/0.476/2.1 表中の値はD/d D:供試体はり寸法, d:最大骨材粒径。

の記録より最大荷重 P max

を読み取った。圧縮試験

については、2 供試体片

の平均強度値を採用した。

3. 実験結果と考察

3・1 強度分布特性

図 3 に 0.3~0.6(mm)の

単一粒径骨材によるモル

タルの各供試体寸法別の

4 点曲げ試験、および図 4 に 0~2.5(mm)の連

続粒径骨材によるモルタルの各供試体寸法別

での圧縮試験より得られた、非破壊確率の 2

重対数 $\ln(-\ln(1-P))$ と曲げ強度 (σ_b) または

圧縮強度 (σ_c) との関係を示す。両図の値は直

線に近く、式(1)に示されるワイブル分布を示

すと判断できる。同図中で m:ワイブル係数

(直線の傾き), v:変動係数, r:相関係数。

$$\ln(-\ln(1-P)) = \ln(b) + m \ln(S) \quad (1)$$

P:実測破壊確率 S:強度 b:定数

ただし小さい方から n 番目の強度 S_n に対応

する破壊確率 $P(S_n)$ の算定には次式を用い

た。

$$P(S_n) = n/(N+1)$$

N:供試体総数

本研究のいずれの実験シリーズにおいてもモルタルおよびコンク

リートの曲げ・圧縮両強度分布は、ほぼワイブル分布を示した。本

報告のワイブル係数 m の算定には最小 2 乗法を用いた。

3・2 強度分布に及ぼす単一骨材粒径と供試体寸法の影響

図 5 に各供試体寸法別の骨材粗粒度 F.M. と曲げ強度の m_b 値との

関係を示す。いずれの F.M. の骨材でも m_b は供試体寸法の大なるほど

大である。また各寸法ともある F.M. 以下の範囲では m_b 値は一定値

を示す。この場合の一定値は供試体寸法の影響を受け供試体寸法

の大なるほど大である。F.M.=1 の付近で m_b 値の低下が見られるのは

粒度が細かいために骨材表面への吸水が激しく、充填性が悪くこの

ため均質性を欠くものと考えられる。

図 6 は、図 5 の Smooth Curve から構成した供試体寸法および F.M.

と m_b の 3 者間の関係を総合したものである。

図 5 に示されるようにコンクリートのワイブル係数 m_b は、供試体

の幾何学的均質度の因子である供試体寸法および骨材粒度に依存し、

幾何学的均質度が低いほど m_b 値は、低下する傾向を示す。そこで、

供試体の幾何学的均質度のパラメータのひとつである D/d と m_b 値の

表 2. 実験の概要 (連続粒径)

	(Va/Vcon)=0.5 W/C=0.476 C/W/A=1.0/0.476/2.1 表中の値はD/d									
	(1) 0~0.15 F.M.=0	(13) 0~0.3 F.M.=0.97	(14) 0~0.6 F.M.=1.4	(15) 0~1.2 F.M.=2.28	(16) 0~2.5 F.M.=3.13	(17) 0~5 F.M.=3.8	(18) 0~10 F.M.=4.6	(19) 0~20 F.M.=5.2	(20) 0~25 F.M.=5.8	(20) 0~25 F.M.=5.8
10×10×40 (mm)	D/d=66.7	D/d=33.3	D/d=16.7	----	D/d=4	---	---	---	---	---
20×20×80 (mm)	=133.3	=66.7	=33.3	----	=8	D/d=4	---	---	---	---
30×30×120 (mm)	----	=100	=50	D/d=25	----	---	---	---	---	---
40×40×160 (mm)	----	=133.3	=66.7	=33.3	=16	---	D/d=4	---	---	---
75×75×300 (mm)	----	----	=125	=62.5	=30	---	---	D/d=3.75	---	---
100×100×400 (mm)	----	----	----	=83.3	----	---	---	---	---	D/d=4
150×150×600 (mm)	----	----	----	----	----	---	D/d=15	----	----	---

表 3. 実験の概要 (連続粒径, D/d, d 一定)

	(Va/Vcon)=0.5 W/C=0.476 C/W/A=1.0/0.476/2.1 表中の値はD/d					
	(10) 0~5(mm) F.M.=2.70	(11) 0~5(mm) F.M.=1.38	(12) 0~5(mm) F.M.=3.96	(20) 0~25(mm) F.M.=5.8	(21) 0~25(mm) F.M.=4.73	(22) 0~25(mm) F.M.=5.2
20×20×80 (mm)	D/d=4	----	----	----	----	----
40×40×160 (mm)	D/d=8	D/d=8	D/d=8	----	----	----
100×100×400 (mm)	----	----	----	D/d=4	D/d=4	D/d=4

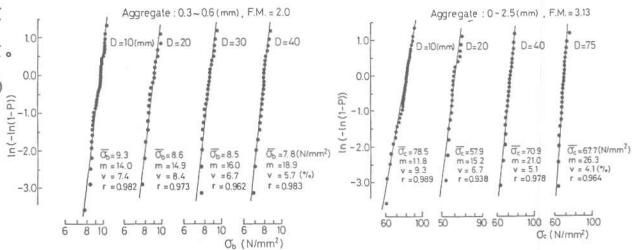


図 3. 曲げ強度分布(単一粒径) 図 4. 圧縮強度分布(連続粒径)

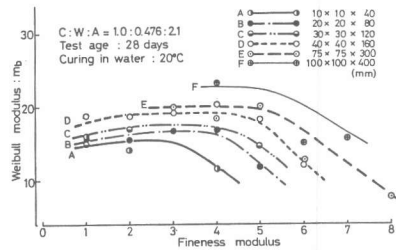


図 5. F.M. - m_b (単一粒径)

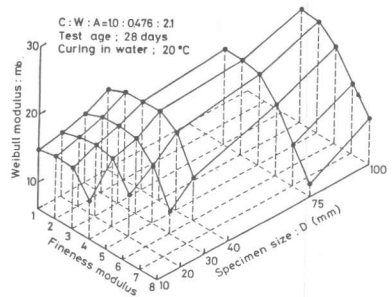


図 6. 供試体寸法-F.M. - m_b

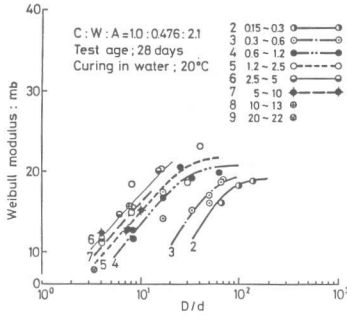


図7. $D/d-m_b$ (単一粒径)

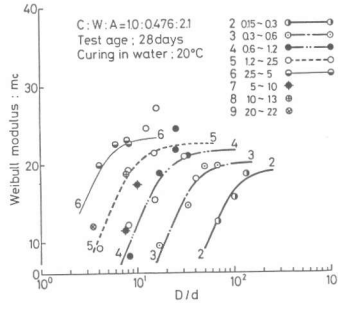


図8. $D/d-m_c$ (単一粒径)

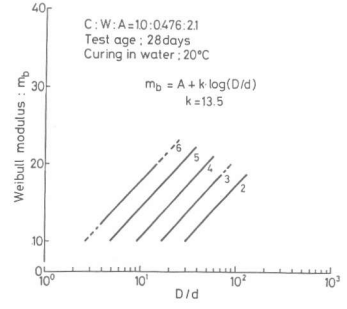


図9. $D/d-m$ モデル

関係について考察する。ここに D : 供試体はり寸法, d : 最大骨材粒径。

図7, 図8に各単一骨材粒径をもつコンクリートの曲げ・圧縮両強度に関する(D/d)とワイブル係数 m との関係を示す。各骨材粒径とも, (D/d)がある限界値以下において, m の値は(D/d)の増加とともにほぼ直線的に増大していることが認められる。またこの実験の範囲の6種類の骨材粒径をもつコンクリートの($D/d-m$)曲線は, 各粒径ごとに異なる曲線を示し, m 値は(D/d)のみならず, 骨材粒度区分にも依存することがわかる。

谷川⁹⁾は, 骨材の粒度区分にかかわらず, m は単に(D/d)のみに支配され, $D/d=40$ において一定値になると報告している。しかし単一粒径骨材に関する本実験では, m 値は粒度区分ごとに整理することが実態に即し適切であることが認められる。

図9に, 図7の($D/d-m$)曲線を模式的に示す。図9よりコンクリートの曲げ強度のワイブル係数 m は $\log(D/d)$ の関数として

$$m = A + k \cdot \log(D/d) \quad (3)$$

で表わされ, 各粒度における傾き k は等しく, 一定値を示している。このときの($\log(D/d)-m$)直線の切片 A と粗粒率F.M.の関係を図10に示す。図10より切片 A は粗粒率F.M.の関数で表わされ,

$$A = B + C \cdot (F.M.) \quad \text{但し } 1 \leq F.M. \leq 5 \quad (4)$$

となっている。式(4)を式(3)に代入すると

$$m = B + C \cdot (F.M.) + k \cdot \log(D/d) \quad (5)$$

即ち, 単一粒径における曲げ・圧縮両強度のワイブル係数 m が粗粒率F.M.と(D/d)の関数で表現できる。 m_b では $B = -10.8$, $C = 3.0$, $k = 13.5$

3・3 強度分布に及ぼす連続粒径骨材と供試体寸法の影響

図11と図12に各連続粒径骨材を含むコンクリートの曲げと圧縮強度に関する(D/d)とワイブル係数 m との関係を示す。単一粒径骨材を含むコンクリートと同様に, 各連続骨材粒径とも, (D/d)がある限界値以下において m の値は(D/d)の増加と共にほぼ直線的に増大していることが認められる。

またこの実験の範囲の6種類の骨材粒径をもつコンクリートの($D/d-m$)曲線は, 粒度ごとに異なる曲線を示し, m 値は(D/d)のみならず骨材粒度区分にも依存し, 連続骨材粒径においても式(5)に示される関数表現することの妥当性が認められる。

3・3 強度分布特性に及ぼす骨材粒度分布 (D, d =一定)の影響

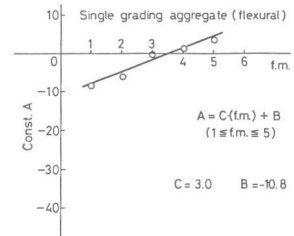


図10. F.M.-A

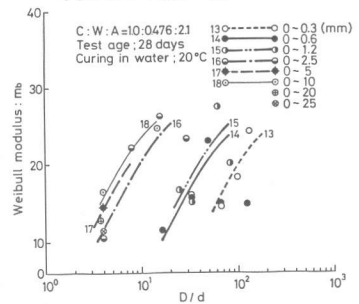


図11. $D/d-m_b$ (連続粒径)

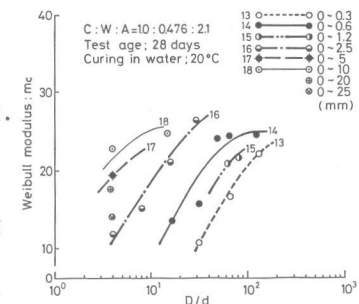


図12. $D/d-m_c$ (連続粒径)

図13にd=5mm, D=40mm(一定)で異なる粒度分布曲線をもつ骨材を含む4種のモルタルの曲げ・圧縮強度のm値とF.M.との関係を示す。図13よりd=5mm, D=40mm一定としているにもかかわらずF.M.すなわち粒度分布曲線が異なればmの値は変化し、(D/d)あるいはdのみならず骨材粒度分布も幾何学的非均質度を決定する要因であることがこの実験によって確認された。

図14にd=25mm, D=100mm(一定)で異なる粒度分布曲線を示す骨材を示す骨材を含む3種のコンクリートの曲げ・圧縮強度のm値とF.M.との関係を示す。図14よりd=

25mm, D=100mm(一定)においても, F.M.の大なるほどm値は小となり, 連続粒径骨材によるコンクリートのm値も, (D/d)あるいはdのみならず骨材粒度分布に依存していることが示された。これは骨材粒度分布の違いにより材料内部欠陥の空間的分布や欠陥の程度の分布等が異なるためであると考えられる。

図15, 図16に各々単一粒径骨材および連続粒径骨材によるコンクリート強度のワイブル係数mと変動係数vとの間の実験的關係を, 理論的關係とともに示す。実験的關係と理論的關係はよい適合を示している。

4. 結論

1) 本実験においては, コンクリートおよびモルタルの曲げ・圧縮両強度の分散は, ワイブル分布を示すとみなし得る。(図3および図4中の相関係数rによる)

2) コンクリートおよびモルタルの曲げ・圧縮両強度分布のワイブル係数mを, 単純に(D/d)のみで評価するのは, 必ずしも適当ではなく, 骨材粒度をパラメータとして表示するのが適切である。コンクリート・モルタルのワイブル係数mは, 粗粒率F.M.および(D/d)をfactorとして, 式(5)の関数形で表現できる。

3) 連続粒度骨材は, 単一粒径骨材ほどには粒度効果が鮮明に現われ難く, m値に及ぼす各因子効果にはバラツキを伴い易い。

4) コンクリートおよびモルタルの曲げ・圧縮両強度分布のワイブル係数mと変動係数vの間の実験的關係は, 理論的關係にほぼ適合している。

本研究は昭和60年度文部省科学研究費・総合研究A(60302070)によったものである。

5. 参考文献

- 1) S. Ziegeldorf, H.S. Muller and H.K. Hilsdorf, Effect of Aggregate Particle Size on Mechanical Properties of Concrete, in Advances in Fracture Research, Vol. 5, Pergamon Press, 1981, pp. 2243~2251
- 2) R.N. Swamy & C.R.S.K. Rao: Fracture Mech. in Concrete System under Unidial load, Cement and Conc. Res., Vol. 13, No. 4, 1973.
- 3) 永松静也; 日本建築学会論文報告集, 第200号, 昭47, pp. 1~8.
- 4) 永松静也; 日本建築学会論文報告集, 第223号, 昭49, pp. 1~8.
- 5) 谷川恭雄, 山田和夫; 日本建築学会論文報告集, 第267号, 昭53, pp. 1~10.
- 6) 谷川恭雄, 山田和夫; 日本建築学会論文報告集, 第280号, 昭54, pp. 1~12.
- 7) 和泉正哲, 三橋博三; 日本建築学会論文報告集, 第287号, 昭55, pp. 1~13.
- 8) 和泉正哲, 三橋博三; 日本建築学会論文報告集, 第288号, 昭55, pp. 1~12.

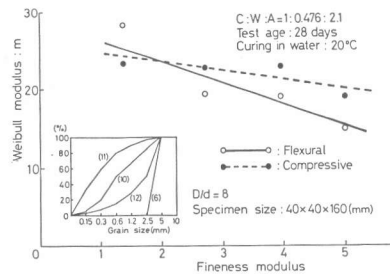


図13. F.M.-m (Mortar)

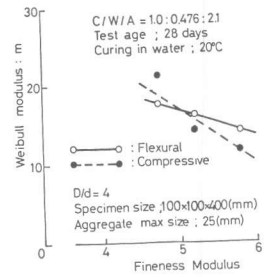


図14. F.M.-m (Concrete)

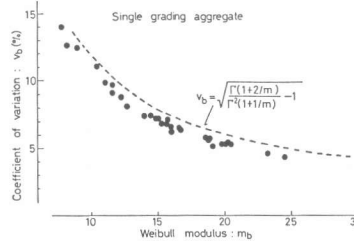


図15. m-v (曲げ強度)

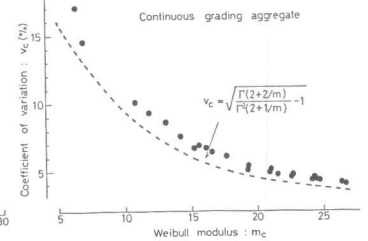


図16. m-v (圧縮強度)