

論文
 [1065] コンクリートの強度分布の確率性状に及ぼす骨材種別の影響

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)

1. まえがき

コンクリート強度のバラツキは従来正規分布で取扱われることが多い。この考えの基本は、破壊強度の分散は単なる偶然の結果生ずるとの考えに基づいている。しかしセメント系複合材は内部に存在する水隙、空隙、骨材粒子、水和の偏在など組織の不均質に起因するバラツキを本源的にもつ。従ってこの破壊は本質的に確率統計的現象であると考えられ、単なる技術的誤差だけに帰することはできず、バラツキの特性は各材料固有のものであると考えることができる。既にこのような観点からコンクリートの強度の分散を検討した報告がある[1~18]。筆者もモルタル、コンクリートの強度分散現象をワイブル定数により実験的に考察し報告した[19~23]。

本研究の目的はコンクリート強度の分散特性に及ぼす骨材種別の影響を明らかにする。すなわち4種類の骨材を用いたコンクリートの曲げと圧縮強度の分散をワイブル分布により検討し、ワイブル定数に及ぼす1)骨材種別、2)試料寸法、3)粗骨材容積率、4)粗骨材最大粒径の各因子の寄与を明らかにした。確率特性に及ぼす骨材種別の影響の研究はまだない。

2. 確率統計解析

ワイブルは、各部の応力を σ としたとき、破壊確率分布関数 $P(S)$ を次式で与えた。

$$P(s) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{\sigma - \sigma_U}{\sigma_0} \right)^m \cdot V \right\} \quad \sigma < \sigma_U \quad (1)$$

ここに s : 確率変数、 σ : 応力の分布、 σ_U : 破壊応力の下限值、 m : ワイブル定数、 V : 試料の体積、 σ_0 : σ_U 、 m 、 V で定まる定数。

いま試料内の各点の応力 σ を最大応力 σ_R に対する比(σ/σ_R)で表わすと(文献8を参照)、

$$P(\sigma_R) = 1 - \exp \left[- \left\{ \left(\frac{\sigma_R}{\bar{\sigma}} \right) \cdot \Gamma \left(\frac{m+1}{m} \right) \right\}^m \right] \quad (2)$$

式中の Γ はガンマー関数。式(2)の両辺を2度対数をとると、

$$\ln \ln \left(\frac{1}{1-P} \right) = m \cdot \ln \sigma_R + m \cdot \ln \left\{ \Gamma \left(\frac{m+1}{m} \right) / \bar{\sigma} \right\} \quad (3)$$

たて軸に $\ln \ln (1/(1-P))$ 、よこ軸に $\ln(\sigma_R)$ をとり両者が直線関係を示せば、強度分散はワイブル分布に従うことを示す(例として図5、図6などを参照)。

いま確率強度 σ での実測破壊率を P とすると、

$$P = n/(N+1) \quad \text{または、} \quad P = (n-1/2)/N \quad (4)$$

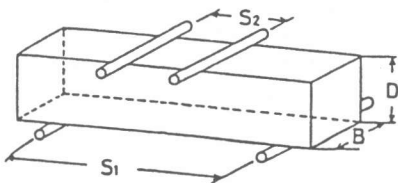


図1 はりの曲げ試験方法

表1 実験対象骨材4種類の性質概要

Types of agg.		Relative gravity	Water absorb.	Size of agg.(mm)	F.M.
River agg.	fine	2.53	0.86%	0-5	2.72
	coarse	2.65	0.84%	5-25	6.02
Crashed agg.	fine	2.71	0.44%	0-5	2.64
	coarse	2.67	0.92%	5-25	6.90
Artificial *1 lightweight agg.	fine	1.85	14.3%	0-5	2.69
	coarse	1.65	27.0%	5-20	6.32
Blast furnace slag agg.	fine	2.61	0.51%	0-2.5	2.14
	coarse	2.66	2.72%	5-25	6.76

*1; Mesalight

ここに N : 試料の総数 n : σ 以下の応力で破壊する供試体の数
 2母数のワイブル分布は次式で示される。本研究では式(4)の前者の確率 P を用いる。

$$P = 1 - \exp(-b \cdot \sigma^m) \quad b > 0, m > 0 \quad \text{つまり} \quad \ln(1 - P) = -b\sigma^m \quad (5)$$

$$\text{よって} \quad \ln(-\ln(1 - P)) = \ln b + m \cdot \ln \sigma \quad (6)$$

実測強度値から最小2乗法で m を解析的に求めるには次式によるのが適切である [22、23]。

$$m = \frac{\sum (Y_n \cdot \ln \sigma_n) - (1/N) \sum \ln \sigma_n \cdot \sum Y_n}{\sum (\ln \sigma_n)^2 - (1/N) \{ \sum (\ln \sigma_n) \}^2} \quad (7)$$

ここに $Y_n = 1/n \ln [1 / \{1 - n / (N + 1)\}]$

本研究では、コンクリートのワイブル定数 m を式(7)により解析的に算出した。

3. 実験方法

本実験に用いた骨材(細・粗とも)は、①河川産骨材 ②砕石骨材 ③人工軽量骨材(メサライト) ④高炉スラグ骨材の4種類を対象した。その物理的性質の概要を表1に示す。強度分散の特性指標であるワイブル定数 m と変動係数 v に及ぼす影響を調べるために検討した試験要因は、1)骨材種別の影響 2)試料断面寸法の影響 3)粗骨材容積率の影響、および 4)骨材最大粒径の影響の4項目である。

普通ポルトランドセメントを使用。各試験ごとの重量調合比、実測スランプ、空気量、単位容積重量を表2に示す。各試験項目ごとの供試体寸法は表3の如くである。コンクリート試料は打込みの翌日脱型し、試験材台まで水中養生し、図1に示す4点曲げ载荷により曲げ強度を求め、この折片から圧縮強度を求めた。一条件あたりの試料数は24個とした [22]。

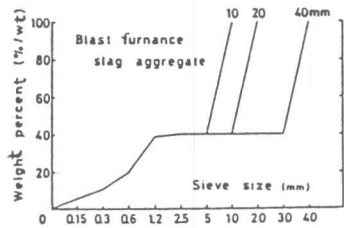


図2 スラッグの粒径依存の粒度分布

表2 実験計画概要(試験要因、重量調合、実測値)

Test factors	Type of aggregate	V_g/V_{con}	Weight propor. C/W/S/C	Slump (cm)	Air vol I	Unit v. (kg/l)	
1) Eff. of agg. types	River agg.	0.4	1/0.53/1.80/2.70	19.1	0.59	2.4	
	Crashed agg.	0.4	1/0.59/1.64/2.4	16.0	0.38	2.3	
	2) Eff. of beam sizes	Arti. lightw. agg.	0.4	1/0.52/1.21/1.58	18.1	1.54	1.7
		Bl. fur. slag agg.	0.4	1/0.61/1.70/2.47	19.6	3.70	2.3
3) Effect of volume fraction of gravel	Artificial lightweight agg.	0	1/0.52/1.20/0.0	(24.3)	1.64	1.8	
		0.2	1/0.52/1.20/0.63	24.2	2.20	1.8	
		0.58	1/0.52/1.20/3.53	15.0	5.60	1.6	
	Blast furnace slag aggregate.	0	1/0.61/1.87/0.0	(21.3)	2.95	2.1	
		0.2	1/0.61/1.87/1.1	21.4	3.70	2.2	
		0.58	1/0.61/1.70/1.5	0.2	4.01	2.4	
5) Eff. of ratio W/C	Art. light-w. agg.	W/C=6	1/0.61/1.28/1.68	19.9	3.80	1.7	
		W/C=7	1/0.71/1.20/1.61	23.2	2.80	1.6	

表3 試験結果一覧表(実験条件、試料寸法、強度 σ 、ワイブル定数 m 、変動係数 v)

Test factors	Types of aggregate	Sand (mm)	Gravel (mm)	W/C	V_g/V_{con}	Size of specimen, cm	$\bar{\sigma}_b$ N/mm ²	m_b	v_b %	r_b	$\bar{\sigma}_c$ N/mm ²	m_c	v_c %					
1) Effect of type in aggregate	River agg.	0-5	5-25	0.53	0.4	7.5x7.5x 28	5.48	10.0	9.7	0.935	57.7	23.7	4.4					
						10x 10x 40	4.78	11.0	9.4	0.982	49.2	21.5	4.8					
						15x 15x 60	4.08	13.1	7.9	0.930	44.9	22.7	4.6					
	Crashed agg.	0-5	5-25	0.59	0.4	7.5x7.5x 28	4.97	11.1	9.4	0.945	42.8	17.9	5.7					
						10x 10x 40	4.59	11.8	8.9	0.960	39.8	17.7	6.0					
						15x 15x 60	4.13	13.6	7.4	0.968	36.3	16.9	5.7					
2) Effect of beam size	ALA	0-5	5-20	0.52	0.4	7.5x7.5x 28	3.57	22.9	4.5	0.980	42.5	19.2	5.2					
						10x 10x 40	3.12	26.0	3.9	0.976	42.9	19.5	5.4					
						15x 15x 60	2.60	34.2	3.1	0.984	35.9	19.7	5.2					
	Slag agg.	0-2.5	5-25	0.60	0.4	7.5x7.5x 28	4.52	16.2	6.4	0.961	54.9	12.6	7.7					
						10x 10x 40	3.89	16.6	6.3	0.967	44.0	13.8	7.6					
						15x 15x 60	3.72	20.2	5.2	0.984	35.1	14.0	7.4					
3) Effect of volume fraction of gravel	ALA	0-5	5-20	0.52	0.2	10x 10x 40	3.41	25.4	4.1	0.980	51.0	15.8	6.5					
						Slag agg.	0-2.5	5-25	0.60	0.2	10x 10x 40	3.14	25.8	4.1	0.993	49.4	15.5	6.6
											Slag agg.	0-2.5	5-25	0.60	0.4	10x 10x 40	3.12	26.0
	Slag agg.	0-2.5	5-25	0.60	0.4											10x 10x 40	2.93	18.5
						Slag agg.	0-2.5	5-25	0.60	0.58						10x 10x 40	3.60	22.9
											Slag agg.	0-2.5	5-25	0.60	0.4	10x 10x 40	3.92	20.4
Slag agg.	0-2.5	5-25	0.60	0.58	10x 10x 40											3.89	16.6	6.3
					Slag agg.	0-2.5	5-25	0.60	0.58	10x 10x 40						4.40	17.0	6.2
										Slag agg.	0-5	5-20	0.60	0.4	10x 10x 40	4.40	26.3	3.0
Slag agg.	0-5	5-20	0.60	0.4											10x 10x 40	4.18	20.7	5.1
					Slag agg.	0-5	5-40	0.60	0.4						10x 10x 40	4.10	10.4	9.9

4. 実験結果と考察

表3に全実験結果の一覧を示す。同表において、曲げ平均強度値 $\bar{\sigma}_b$ 、曲げ強度の分散に関するワイブル定数 m_b (式7を使用、ただし $N=24$)、曲げの変動係数 v_b 、および σ_b の分布実態を式(7)にあてはめた場合の相関関数を r_b を各試験項目に対して示している。圧縮強度に関するこれらの各値は、それぞれ $\bar{\sigma}_c$ 、 m_c 、 v_c と記号している。

4.1 強度分散に及ぼす骨材種別の影響

図3は、4種類の骨材に関する曲げ強度のワイブル定数 m_b 、圧縮強度のワイブル定数 m_c および曲げ強度の変動係数 v_b を、例として試料寸法 $15 \times 15 \times 60$ cmについて一括対比したものである。これによれば強度分散の確率特性は、骨材種別によって大きく異なることが知られる。 m 値が大きく、 v が小さいことは強度の分散幅が狭く、均質性に富むことを意味する。従って曲げ強度の確率性状からみて均質性に富む順序は、人軽骨>高炉スラグ>河川産≈砕石である。 v_b もこの順序で大きくなっており m 値の大小とよい整合性がある。

図4は、同一調査のSENはりの破断面の模式図である。黒丸は骨材自体のわれを、白丸は骨材がマトリックスと剝離したもの(つまり付着破壊)を示す。これによればコンクリートの破壊は、①人軽骨では骨材の破断で、②川砂利と砕石は骨材が硬質のため付着破断で、③スラグはこの両者の中間形式で複合型破断もしくはマトリックス破断をするものと、3形式に類別できる。①の骨材破断は統計上均質に、②の付着破断は不均質につながると考えられる。元来骨材の付着強さは、水隙や、組織のち密性などに敏感に依存し、不安定なものである。このような破断要因の違いが、強度上の不均質性の相違をもたらしたと考えられる。過去の文献上にはこの種の検討報告が未だみられない。なお本研究で一条件あたり試料24個としたのは、筆者が以前に行った検討結果[22、23]に基づく合理的な数によるものである。

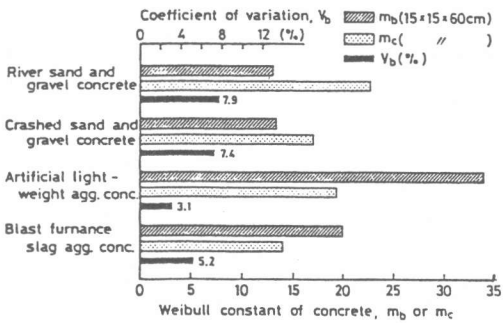


図3 4種類の骨材コンクリートの m および v

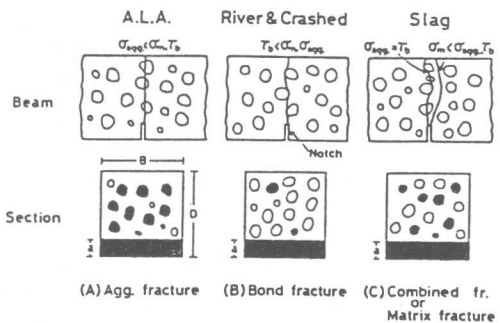


図4 骨材別の破断の形式類別

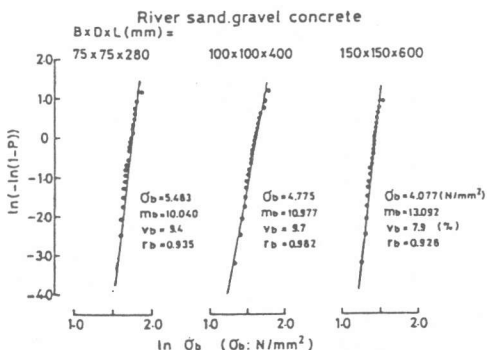


図5 河川産骨材コンクリートの強度分散

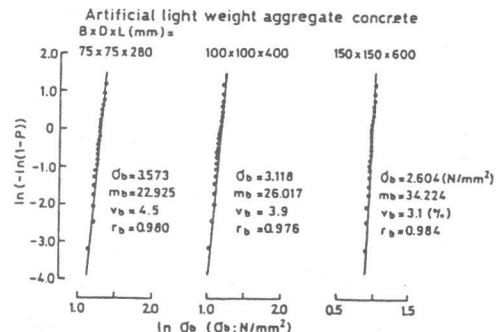


図6 人軽骨コンクリートの強度分散

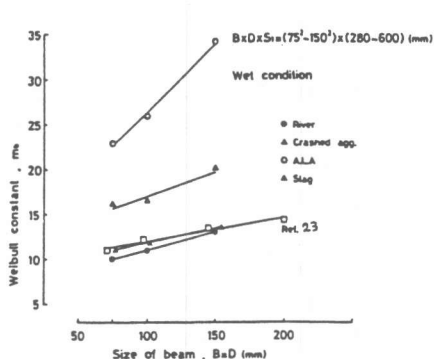


図7 ワイブル定数 m_b の試料寸法依存

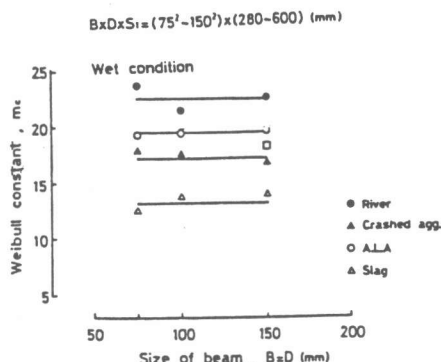


図8 ワイブル定数 m_c の試料寸法依存

4.2 強度分散に及ぼす試料寸法の影響

図5は河川骨材コンクリートの、また図6は人工軽量骨材コンクリートの曲げ強度の確率的分散を、試料寸法 $7.5 \times 7.5 \times 28$ 、 $10 \times 10 \times 40$ および $15 \times 15 \times 60$ cmの3種類について例示したものである。この両図によれば、すべてよい直線性を示しワイブル分布に従うと見做しうる。

図7は4種類のコンクリートの m_b の寸法依存を、同じく図8は m_c の寸法依存を示す。この結果によれば、 m_b は試料寸法に依存し、大寸法の場合ほど強度分布は小さくなり均質性が増す。しかし、 m_c は寸法に依存しない。これは曲げでは骨材下面など付着界面の状態が圧縮の場合より鋭敏に影響するためと考えられる。この種の研究例には [14、16、18] などがあり同一の傾向を報告している。

強度 σ の試料寸法 (容積 V) 依存は m を介し次式で示される。 σ_0 と V_0 は基準値を表わす。

$$\sigma = (V_0 / V)^{1/m} \cdot \sigma_0 \quad (8)$$

いま、試料寸法 $7.5 \times 7.5 \times 28$ cmを基準容積 V_0 にとり、図7より人軽骨、スラグ、砕石、河川コンクリートの各 $m = 22.9$ 、 16.2 、 11.1 、 10 とした場合の理論計算強度比 (σ / σ_0) と実験強度比の比較を図9に示す。理論と実験は完全には一致しないが、傾向的には類似性を示した。

4.3 強度分散に及ぼす粗骨材容積率 (V_g / V_{con}) の影響

図10は、スラグ骨材コンクリートの粗骨材容積比が0、0.2、0.4(4.1項の実験に含)、0.58の場合の曲げ強度の確率分布を示す。ここで $V_g / V_{con} = 0$ はモルタルのこと。

図11は、人軽骨とスラグ骨材の両コンクリートの m_b の粗骨材容積依存性を示す。これによれば m_b は V_g / V_{con} を増すほど低下し、不均質となることを示しており妥当な結果である。この種の実験は確率理論の基本に照して異論の余地はあるが、破断面に依存する骨材の配列、大きさ、数などを含めた意味での広義の一確率指数と見做される。

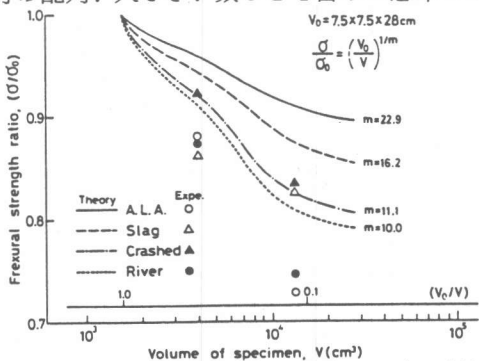


図9 コンクリート強度の理論と実際の対比

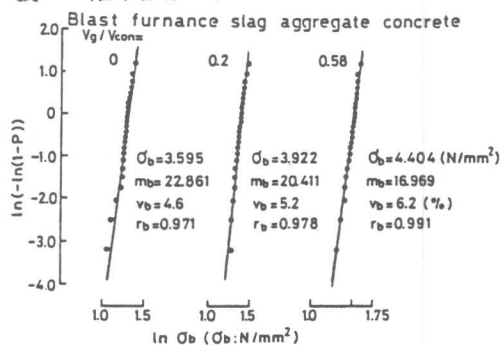


図10 粗骨材容積比別の強度の確率分散

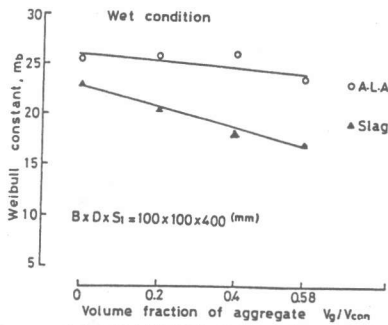


図11 m_b の粗骨材容積率 (V_g/V_{con}) 依存

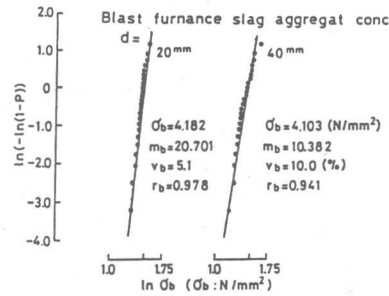


図12 骨材最大粒径別の強度の確率分布

4.4 強度分散に及ぼす骨材最大粒径の影響

図12は、スラグ粗骨材の最大径が20、40 mmのコンクリートの曲げ強度の確率分布を示し、粗粒でも比較的良好にワイブル分布に従うことが認められる。この実験に用いた骨材の粒度分布を図2に示した。実験は最大径10、20、40 mmの3つについて行い、試験対象粒径のものが全骨材中60%を占めるように粒度調整した。

図13は、本実験で得られた m_b の粒径 d に対する依存性を示す。 d を増大するほどコンクリートの幾何学的不均質性が増すことから、 m_b が急激に減少していることは合理性がある。粗骨材径の問題は、その絶対的寸法よりも、供試体の断面寸法 D との比 (D/d) によって考察する方がより適切とも考えられる。この相対量 (D/d) でコンクリートの不均質係数 β を表示したものに谷川ら [18] の式(9)、および筆者ら [23] の式(10)がある。

$$\beta = k (D/d)^{\alpha} \quad \text{但し } D/d \leq 40 \quad (9)$$

ここに、定数 k は曲げで20、圧縮で23、 $\alpha = 0.15$ と実験的に見出している。

$$m = C \cdot f_m + k \cdot \log(D/d) + B \quad \text{但し } 3 \leq D/d \leq 100 \quad (10)$$

ここに f_m : 骨材の粗粒率、定数は曲げで $C = 7$ 、 $B = -27.4$ 、圧縮で $C = 7.5$ 、 $B = -24.4$ を見出した。本実験での骨材径10、20、40 mmでは、 $D/d = 10$ 、5、2.5である。従って40 mm径の場合のみ(10)の適合性がわるい。骨材径はコンクリートの強度分布に大きく影響する。

4.5 m と変動係数 v との関係

図14の実線は、式(11)で与える圧縮の場合のワイブル定数 m_c と変動係数 v_c の理論的関係を、また点線は、式(12)で表わされる曲げの場合の ($m_b - v_b$) 関係を示す。同図中の白丸は圧縮、黒丸は曲げの実測値を、本研究の主なる結果からプロットした。これによれば理論と実験値は比較的良好に合一しており、各式が実態によく適合するものと判断される。文献 [13] は試料数が僅か10個であるが、同様の所見を報告している。

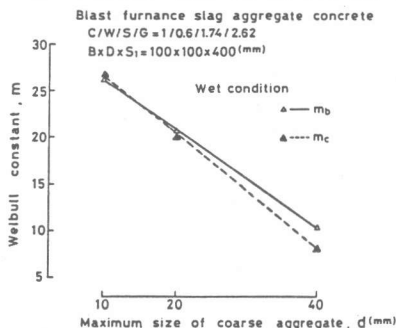


図13 スラグコンクリートの m の d 依存

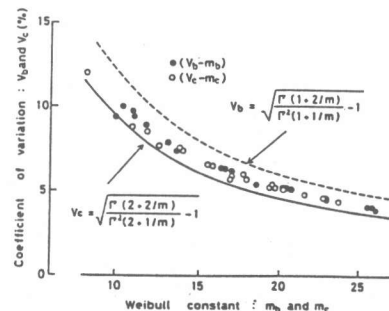


図14 変動係数 v とワイブル定数 m の関係

$$\text{圧縮} : [\{ \Gamma (2 + 2 / m) \} / \{ \Gamma^2 (2 + 1 / m) \}] - 1 \quad (11)$$

$$\text{曲げ} : [\{ \Gamma (1 + 2 / m) \} / \{ \Gamma^2 (1 + 1 / m) \}] - 1 \quad (12)$$

5. 結 論

川砂利、砕石、人工軽量および高炉スラグの4種類の異なる骨材を用いたコンクリートの強度分散をワイブル定数により実験的に検討した結果は、次のように要約される。

- 1) コンクリートの曲げ・圧縮両強度の分散はどの骨材でもワイブル分布に従うと見做しうる。
- 2) 曲げのワイブル定数 m_b は骨材種別により大きく異なる。 m_b が大きくて確率論的に均質性に富む順序は、人工軽量>スラグ>川砂利≈砕石である。この原因はコンクリートの破壊が、骨材破断か、付着破断か、もしくは母材破断の3形式のいずれであるかと深い関係がある。
- 3) ワイブル定数 m_b は試料寸法に依存し大寸法ほど m は増大する。この増大変化は骨材種別により異なり、結論2)と同一順序で寸法依存をうける。人工軽量は最も寸法依存を受け易い。
- 4) 粗骨材容積比(V_g/V_{con})は m_b に影響する。 V_g が増すほど m_b は直線的に低下する。
- 5) 高炉スラグ骨材コンクリートについて、 m_b は骨材粒径に依存することを確かめた。大粒径の場合ほど m_b 、 m_c は共に大きく低下し、この骨材の幾何学的不均質は確率的不均質に一致する。

謝辞 本研究は文部省科学研究費・62年度試験研究(61850105)によったものである。実験には山田寛己技官、学生山内 高、西村俊也、小島基弘の諸君の助力を得た。ここに謝意を表わす。

文献 (Refereneces)

- 1) Tucker, J. J. ; Proc. of ASTM, 41, 1072-1088(1941).
- 2) Epstein, D. ; J. Appl. Phys., 19, 140(1948).
- 3) Hori, M. ; J. of phys. Soci., Japan, 14, 10, 1444-1452(1959).
- 4) Hori, M. ; RILEM Bull. 11, 73-81(1961).
- 5) 和泉正哲, 三橋博三; 日本建築学会論文報告集, 287, 1-13(1980).
- 6) 和泉正哲, 三橋博三; 日本建築学会論文報告集, 288, 1-12(1980).
- 7) Daniels, H. E. ; Proc. of the Royal Society, 183, 995, 405-435(1945).
- 8) Weibull, W. The Phenomenon of rupture in solids, Stockholm, Handlingar, No. 153, 55(1939); and J. of Appl. Mach., 18, 293(1951).
- 9) Hobbs, D. W. ; Maga. of Conc. Res., 24, 80, 127-138(1972).
- 10) Kameswara Rao, C. V. S. and R. N. Swamy ; Cem. and Conc. Res., 4, 4, 669-681(1974).
- 11) 永松静也; 日本建築学会論文報告集, 200, 1-8(1972).
- 12) Hasofer, A. M. ; Inter. J. of Fract. Mech., 4, 4, 439-452(1968).
- 13) 永松静也; 日本建築学会論文報告集, 240, 9-19(1976).
- 14) 谷川恭雄, 山田和夫; 日本建築学会論文報告集, 267, 1-9(1978).
- 15) 小阪義夫, 谷川恭雄, 山田和夫; 日本建築学会論文報告集, 347, 18-28(1985).
- 16) 谷川恭雄, 山田和夫; セメント技術年報, 32, 221-224, 昭和53年(1978).
- 17) 山田和夫, 畑中重光; セメント技術年報, 33, 351-355, 昭和54年(1979).
- 18) 谷川恭雄, 山田和夫; 日本建築学会論文報告集, 286, 1-11(1978).
- 19) 大岸佐吉, 小野博宣, 高津 学, 武田祥志; 第7回コンクリート工学年次講演会論文集 Vol. 7, 269-352(1985).
- 20) 大岸佐吉, 小野博宣, 高津 学, 武田祥志; 第8回コンクリート工学年次講演会論文集 Vol. 8, 349-352(1986).
- 21) 大岸佐吉, 小野博宣, 棚橋 勇, 山田兼義; 第8回コンクリート工学年次講演会論文集 Vol. 8, 345-348(1986).
- 22) 大岸佐吉, 小野博宣, 棚橋 勇; 第9回コンクリート工学年次論文報告集, 9-1, 127-132(1987).
- 23) 大岸佐吉, 小野博宣; コンクリート工学, 25, 12, 101-117(1987).