多孔質骨材を用いたコンクリートの空隙特性と力学的特性

CORRELATION OF POROSITY AND MECHANICAL PROPERTY
OF CONCRETE CONTAINING POROUS AGGREGATE三浦隆広*¹, 菊池雅史*², 小山明男*³, 秋庭淳二*⁴
Takahiro MIURA, Masafumi KIKUCHI, Akio KOYAMA
and Junji AKIBA

In recent years, various kinds of aggregates are being developed for the purpose of resources recovery of solid waste. Generally, these types of aggregates contain microscopic porosity in these matrixes.

These aggregates show many different properties comparing with conventional artificial lightweight aggregate, such as chemical composition, manufacturing process, internal structure and external surface structure and external surface textures. Variation of properties, density, absorption, strength, etc of porous aggregate are caused by reasons above-mentioned.

According to our series studies, it was observed that properties of porous aggregate, density, absorption, strength, etc can be evaluated by porosity as common index, and porosity has a high correlation with three properties.

Based on the past above investigation, this study was carried out in these experimental series.

Series I : Characteristic of porous aggregate

Series II : Correlation of porosity and mechanical properties of mortar and concrete containing porous aggregate.

Series III : Correlation of porosity and mechanical properties of mortar and concrete containing normal aggregate and porous aggregate.

Volume and radius of porosity, density, absorption, strength of aggregate in series I, volume of porosity, density, compressive strength, Young's Modulus of mortar in series II, volume of porosity, density, compressive strength, Young's Modulus of concrete in series III were measured respectively.

Porosity of aggregate, mortar and concrete, density, compressive strength, and young's modulus are measured.

Keywords : porous aggregates, porosity, mortar, concrete, mechanical property

多孔質骨材, 空隙特性, モルタル, コンクリート, 力学的特性

1. はじめに

コンクリートに要求される代表的品質のひとつに圧縮強度がある。

圧縮強度については、その所要品質を確保する手法として、水セメント比による調合設計法が広く採用されている。また、資源の有効利用を目的に各種産業廃棄物、工業副産物を主原料とした骨材が開発、実用化され始めた現状にある。このような状況下において、これら骨材を用いたコンクリートにあっては、水セメント比のみで所要品質を確保することの困難さが指摘されている。その主な理由として、これら骨材は空隙を多量に含んでおり、ペーストあるいはモルタルの強度に比べて骨材の強度・剛性が小さいことがあげられる。

多孔材料の空隙特性と力学的特性には高い相関性があることは広く知られており、セメント系材料についても、鎌田¹⁾、湯浅ら²⁾をはじめとした研究者らによる多くの報告がみられる。

しかし、セメント硬化体中の空隙と骨材中の空隙の双方に着目して圧縮強度との関係を解明した研究はほとんどみられない。

筆者らは、これまで、軽量骨材や超軽量骨材、あるいは再生骨材等のように骨材中に普通骨材に比べて多量の空隙を有する骨材（以下、多孔質骨材という）を用いた各種コンクリートの性質について広範囲な実験的研究^{3) 4)}を継続してきている。これらの研究から、

多孔質骨材を用いたコンクリート（以下、多孔質骨材コンクリートという）の力学的特性は、コンクリートの調合条件、材齢、養生方法等の因子により、大きく影響されること、その影響の程度が普通コンクリートに比べて大きいこと、また、これら影響因子は最終的にコンクリート中の空隙特性で置き換えられることの判断を得ている。

そこで本研究は、多孔質骨材を用いたコンクリートの材料設計の基礎的資料を得るための前段として、コンクリートの力学的特性をコンクリート容積に占める全空隙容積により評価することの妥当性の確認を主な目的として着手したものである。

2. 本研究の進め方

2.1 本研究における多孔質骨材コンクリートのモデル

図1は、任意の容積を持つ多孔質骨材コンクリートの断面を示したものである。この図において、コンクリートの容積(V)は、(1)式によって表される。

$$V = V_p + V_s + V_o \quad (1)$$

ここに、 V_p : 硬化したセメントペーストの容積(m^3)

V_s : 多孔質細骨材の容積(m^3)

V_o : 多孔質粗骨材の容積(m^3)

*¹ 前田建設工業 工博

*² 明治大学理工学部建築学科 教授・工博

*³ 明治大学理工学部建築学科 講師・工博

*⁴ 前田建設工業 工修

Maeda Corporation, Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Science and Technology, Meiji Univ., Dr. Eng.

Lecturer, Dept. of Architecture, Science and Technology, Meiji Univ., Dr. Eng.

Maeda Corporation, M. Eng.

pV , sV および $G V$ が、それぞれ空隙を含まない固体部の容積(pV_s , sV_s および $G V_s$)と空隙部の容積(pV_p , sV_p および $G V_p$)よりなるとすれば、各材料の容積は(2)式から(4)式で表される。

$$pV = pV_s + pV_p \quad (2)式$$

$$sV = sV_s + sV_p \quad (3)式$$

$$G V = G V_s + G V_p \quad (4)式$$

以上の(1)式～(4)式より、 cV は(5)式で表される。

$$cV = (pV_s + sV_s + G V_s) + (pV_p + sV_p + G V_p) \quad (5)式$$

本研究は、(5)式のコンクリート中の全空隙容積($pV_p + sV_p + G V_p$)と力学的特性の相関性を実験により求めるものである。

図1 多孔質骨材コンクリートのモデル

2.2 実験の進め方

コンクリート中の全空隙容積と力学的特性の間に高い相関性があることを検証するために、以下のような段階的な研究計画を進めた。
シリーズⅠ：多孔質骨材の空隙特性に関する研究

シリーズⅡ：多孔質骨材を用いたモルタルおよびコンクリートの空隙特性と力学的特性に関する研究

シリーズⅢ：普通骨材と多孔質骨材を用いたモルタルおよびコンクリートの空隙特性と力学的特性に関する研究

2.3 実験結果を整理するうえでの仮説

本研究では、多孔質骨材モルタルおよびコンクリート中の全空隙容積と力学的特性の相関性を求めるにあたり、以下に示す3つの仮説をたてた。

【仮説1】ペーストの硬化および乾燥による収縮応力は、いずれの材齢においても、細骨材および粗骨材に均等に分配されるものとする。

【仮説2】各種応力に伴うペースト、細骨材および粗骨材の容積減少の比率は同じとする。

【仮説3】【仮説1】、【仮説2】のもとで、コンクリートの空隙特性に対する空隙の変動因子は、ペーストの空隙のみとする。

以上の【仮説1】【仮説2】は、硬化および乾燥収縮応力、ペーストと骨材界面(普通骨材を除く)の付着状況、収縮ひび割れおよびそれに伴う応力弛緩、等については考慮していないことを示すものである。

【仮説3】は、練混ぜ時の骨材の破壊、セメントペーストが骨材の空隙部へ侵入することによる骨材の空隙特性の変化は考慮しないことを示すものである。

3.実験概要

3.1 シリーズⅠ：多孔質骨材の空隙特性に関する研究

表1 骨材の主要物性の概要

区分	骨材の種類、記号			骨材の主要物性				
	種別	骨材種類	記号	絶乾密度 (g/cm ³)	24時間 吸水率 (wt %)	10% 破砕力 (kN)	400kN 破砕値 (%)	全空隙率 S _p , G _p (Vol %)
多孔質骨材	人工軽量骨材	膨張頁岩系	L	1.29	9.65	97.7	39.2	50.4
		石灰系	F	1.34	16.6	95.0	39.9	41.5
		抗火石系	B	1.32	0.49	175	27.2	38.4
	人工超軽量骨材	膨張頁岩系	S	0.91	8.41	69.3	49.0	59.7
		抗火石系	A	0.83	1.40	130	40.5	69.8
		珪ガラス系	G	0.56	9.59	43.7	91.8	73.8
	再生骨材	W/C=45%	RN45	2.32	4.28	155	24.7	5.6
		W/C=55%	RN55	2.31	4.51	145	26.7	6.6
		W/C=65%	RN65	2.29	5.11	151	26.5	6.1
	細骨材	膨張頁岩系	l	1.68	11.36	—	—	28.8
		抗火石系	b	1.41	0.66	—	—	42.3
		珪ガラス系	g1	0.70	8.70	—	—	75.6
			g2	0.67	6.59	—	—	75.9
			g3	0.59	9.56	—	—	75.2
普通骨材	粗骨材	硬質砂岩碎石	N	2.61	1.00	302	12.4	0
	細骨材	陸砂	n	2.58	1.18	—	—	0
試験方法				細骨材:JIS A 1134 粗骨材:JIS A 1135		BS812法	水銀 圧入法	

(1) シリーズⅠで使用した骨材の種類

原料構成、製造方法、密度、吸水率、強度、表層シールの有無等の異なる15種類の多孔質骨材を対象とした。表1に骨材の主要物性のうち、空隙特性と高い相関が予測される密度、吸水率、強度と骨材の容積に対する全空隙容積の割合を表す全空隙率(Vol %) (以下、細骨材についてはS_p、粗骨材についてはG_pの記号で示す)を示す。

(2) 空隙測定用試料の調整

空隙測定用試料の調整：普通骨材、人工軽量骨材および人工超軽量骨材にあつては、原則として粗骨材を5mm角程度、細骨材を有姿としたままに調整した。再生骨材にあつては、粗骨材に付着したモルタル部分を5mm角程度に採取したものを試料とした。

採取した普通骨材、人工軽量骨材および人工超軽量骨材の試料にあつては、110±5℃で絶乾になるまで乾燥させ、また、再生骨材から採取したモルタル試料にあつては、採取後直ちにアセトンに浸漬し、0.5、4時間後にアセトンの交換を行い、計24時間浸漬後、直ちに真空ポンプ(7.5×10⁻³mmHg)により24時間乾燥処理を行い、空隙の測定まで試験管内で密封保管した。

(3) 空隙の測定方法

空隙の測定は、水銀圧入法(装置：FISION Instrument 社製ポロシメーターPascal 140型およびPascal 240型 最大圧力:200Mpa、空隙半径の測定範囲:3.7nm～58,000nm (58μm))によった。

本研究では、空隙径3.7nm～58μm範囲の空隙を対象としている。

3.2 シリーズⅡ、Ⅲ：モルタルの空隙特性と力学的特性に関する研究

(1) 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメントを用いた。骨材は表1に示すうち、多孔質骨材としてl, g1, g2, g3, b, 普通骨材として, n また、普通骨材を含む再生骨材RS45の合計7種類を使用した。

化学混和剤はW/C=35%以下のモルタルにあつては、高縮合トリア

ジン系の高性能減水剤を使用した。

(2) 試料モルタルの種類、調査概略および養生

試料モルタルは、細骨材種類の組み合わせを 8 水準、W/C は 25%、30%、35%、45%、55% の 5 水準とした合計 35 種類である。モルタルの種類および調査概略を表 2 に示す。脱型は打設終了時から 24 時間後に行い、2 次養生として水中養生(20±2℃)および気中養生(20±2℃, RH60±5%)の 2 水準とし、試験材齢は 28 日とした。

(3) 検出特性値および試験方法

(a) 硬化したモルタルの力学的特性

モルタルの密度は供試体重量を容積で除して求めた。圧縮強度は JIS A 1108 に準拠して行った。ヤング係数はコンプレッソメーター法により圧縮応力度の 1/3 の点の割線剛性から求めた。

(b) モルタルの空隙用測定試料の調整および測定方法

モルタルの空隙測定用試料は、圧縮強度およびヤング係数測定用の供試体と同一とした。圧縮強度およびヤング係数を測定した 3 体の供試体を直ちにコンクリートカッターにより、図 2 に示すように供試体の上下面 5cm を取り除いた中央部をφ10×2cm のディスク状に切断し、外側から 2cm と内側の範囲に分けて、それぞれ採取し、内部のものを測定に供した。測定までの調整方法は再生骨材から採取したモルタル試料と同様な手順である。

以上の手順で調整されたモルタル中の全空隙容積は、3.1(3)に示す方法で測定した。

3.3 シリーズⅡ、Ⅲ：コンクリートの空隙特性と力学的特性に関する研究

(1) 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメントを用いた。骨材は表 1 に示すうち、粗骨材には多孔質骨材として、L、S および G、普通骨材には N の 4 種類、細骨材には多孔質骨材として、 ℓ および粒度の異なる 3 種類の g1、g2、g3、普通骨材として n の 5 種類を用いた。

化学混和剤には高縮合トリアジン系高性能減水剤、リグニンスルホン酸系 AE 減水剤ならびに空気量調整剤（樹脂酸系）を使用した。廃ガラス系細骨材を用いたコンクリートにあっては、水溶性セルロースエーテル系の分離低減剤を使用した。目標スランプ 19±1.5cm となるように各種混和剤を調整して用いた。

(2) 試料コンクリートの種類および調査概略

骨材種類および組み合わせは、細骨材には ℓ 、g および n をそれぞれ単味で使用し、粗骨材には L、S、G、および N の 4 種類を単味、または、容積混合して使用した。W/C は 25%、30%、35%、45%、55% および 65% の 6 水準とした。以上のように計画した合計 45 種類の試料コンクリートを作製した。表 3 に試料コンクリートの種類およびコンクリートの全空隙率(Vol %)(C_p)の範囲を示す。

(3) 養生および試験材齢

脱型は、打設終了時から 24 時間後に行い、2 次養生は水中養生(20±2℃)および気中養生(20±2℃, RH60±5%)の 2 水準とした。試験材齢は 7 日、28 日および 91 日とした。なお、一部のコンクリートは、材齢 1 年においても諸試験を行った。

(4) 検出特性値および試験方法

(a) 硬化したコンクリートの力学的特性

コンクリートの密度、圧縮強度およびヤング係数の測定は、シリーズⅡと同様の方法で行った。

表 2 試料モルタルの種類および調査概略

種類	試料 モルタル の 記号	骨材の種類および組み合わせ		W/C(%)					モルタルの 全空隙率(M_p) の範囲 (Vol %) ^{※2}
		種類および 組み合わせ	混合率(%) (容積比)	25	30	35	45	55	
多孔質 骨材 モルタル (シリーズⅡ)	M ℓ	—	ℓ 単味	○	○	○	○	○	11~30
	M ℓ g	膨張頁岩系- 廃ガラス系 ^{※1}	ℓ :g=50:50	○	○	○	○	○	18~37
	M ℓ b ^{※3}	抗火石系- 膨張頁岩系	ℓ :b=70:30	○	○	○	○	○	15~27
	Mg	廃ガラス系(g)	—	g 単味	○	○	○	○	23~47
普通 骨材を 含む モルタル (シリーズⅢ)	Mn	—	—	○	○	○	○	○	9~16
	Mn ℓ	陸砂(n) 膨張頁岩系 ℓ	n: ℓ =50:50	○	○	○	○	○	11~20
	Mng	膨張頁岩系- 廃ガラス系-g	n:g=50:50	○	○	○	○	○	13~29
	MRS	再生骨材(RS)	—	RS 単味	○	○	○	○	9~28

※1 表中のgは、g1:g2:g3=5:4:3の容積比で混合しようとしたものの総称。

※2 W/C=25%~55%のモルタルにおける範囲を示したものである。

※3 M ℓ bについては、水中養生のみである。

図 2 セメントペースト、モルタル、コンクリートの空隙測定用試料の採取範囲

表 3 試料コンクリートの種類および調査概略

種類	コンクリートの 記号	試料コンクリートの種類			コンクリートの全空隙率 (Vol %)(C_p)の 範囲 ^{※2}
		粗骨材 種類および記号	混合率 (Vol %)	細骨材 種類および記号	
多孔質骨材 コンクリート (シリーズⅡ)	LI	L:膨張頁岩系	L 単味	—	28~38
	SI	S:膨張頁岩系	S 単味	—	29~42
	SGI	G:廃ガラス系	S:G=50:50	L:膨張頁岩系 単味	31~35
	Lg	L:膨張頁岩系	L 単味	—	41~42
	Sg	S:膨張頁岩系	S 単味	—	47~49
	SGg	G:廃ガラス系	S:G=50:50	g:廃ガラス系 単味 ^{※1}	44~66
普通骨材を 含むコンクリート (シリーズⅢ)	Ln	L:膨張頁岩系	L 単味	—	16~31
	Sn	—	S 単味	—	22~38
	SGn	S:膨張頁岩系 G:廃ガラス系	S:G=50:50	n:陸砂 単味	23~38
	Nn	—	—	—	0.7~39
	NI	N:硬質砂岩砕石	N 単味	L:膨張頁岩系 単味	7~18

※1 表中のgは、g1:g2:g3=5:4:3の容積比で混合使用したものの総称

※2 W/C=25%~55%のモルタルにおける範囲を示したものである。

(b) コンクリートの空隙用測定試料の調整および測定方法

硬化したコンクリートの空隙測定用試料は、図 2 に示す範囲から、コンクリート中のモルタル部分のみを採取し、空隙の測定を行った。なお、空隙測定用試料の採取から測定までの調整方法についてもモルタルの場合と同様である。

コンクリートの全空隙率(Vol %)(C_p)の表示は、コンクリートの調査からモルタルと粗骨材の容積比を求め、(6)式に示すようにコンクリート容積に対する全空隙容積とシリーズⅠで測定した骨材容積に

対する空隙容積の和をコンクリートの全空隙率とした。

なお、(6)式は、コンクリートの練り上がり密度は計画調査から求まるコンクリートの密度に対して、JASS 5 16 節 軽量コンクリートにおいて許容範囲とされる $\pm 3.5\%$ の範囲内にあることを検証したうえで採用されるものである。

ここに、 C_p ：コンクリートの全空隙率(Vol %)

$$C_p = \frac{(X \times M V_p) + (Y \times G V_p)}{V} \times 100(\text{Vol } \%) \quad (6) \text{式}$$

V ：コンクリートの全容積(m^3)

$M V_p$ ：単位モルタル容積中の空隙容積(l/m^3)

$G V_p$ ：単位多孔質粗骨材容積中の空隙容積(l/m^3)

X ：単位コンクリート中のモルタルの容積比

Y ：単位コンクリート中の多孔質粗骨材の容積比

ただし、 $M V_p = V_p + S V_p$

V_p ：単位セメントペースト容積中の空隙容積(l/m^3)

$S V_p$ ：単位多孔質細骨材容積中の空隙容積(l/m^3)

$X + Y = 1$

$$X = \frac{V_p + V_s}{V_c}, Y = \frac{V_g}{V_c}$$

4. シリーズⅠ：多孔質骨材の空隙特性に関する実験結果および検討

4.1 多孔質骨材の空隙特性

(1) 多孔質骨材の全空隙率

表 1 に各種多孔質骨材の全空隙率を示す。全体として、全空隙率は骨材種類により多様に異なり、幅広い結果を示した。全空隙率が最も小さい値を示したものは再生骨材であり、全体として 3Vol %～7Vol %の範囲にある。現在、構造用人工軽量骨材として使用されている骨材 L および F の全空隙率はおよそ 30Vol %～50 Vol %の範囲にある。また、骨材 B の全空隙率は骨材 L および F の値に近く、38.4Vol %である。人工超軽量骨材 S、G および A の全空隙率は、骨材 L および F に比べ大きく 50Vol %～76Vol %の範囲にある。なお、普通骨材 n および N については、測定も行ったが空隙量は測定されなかったことから、0Vol %として整理した。

(2) 多孔質骨材の空隙径分布

図 3 に多孔質骨材の空隙径分布の一例を示す。全空隙率がほぼ同じであっても、骨材種類により、ピークとなる径およびその数等の空隙径分布は多様に異なることが確認できる。

4.2 多孔質骨材の空隙特性と従来の品質評価項目の関係

図 3 多孔質骨材の空隙径分布の一例

本研究では、多孔質骨材の物性のうち、空隙特性と関連が深いと予測される密度、吸水率および強度との相関を求めた。

表 4 に多孔質骨材の全空隙率と密度、24 時間吸水率および強度の関係から得られた回帰式を示す。これによると、密度および強度特性値である 400kN 破砕値および 10%破砕力は骨材の全空隙率と高い相関性を示すことが認められた。24 時間吸水率については、全空隙率との相関性は小さいが圧力吸水率では相関性は高いと予想される。

表 4 多孔質骨材の空隙特性と従来の品質評価項目の関係

骨材の物性	回帰式	相関係数： γ
絶乾密度(g/cm^3): ρ_d	$\rho_d = -0.025 \times (S_p, G_p) + 2.40$	-0.970
24 時間吸水率(wt%): Q	$Q = 1.65 \ln(S_p, G_p) + 1.90$	0.700
10%破砕力(kN): S_{10}	$S_{10} = 249e^{-0.026G_p}$	-0.966
400kN 破砕値(%): S_{400}	$S_{400} = 17.2e^{-0.025G_p}$	-0.939

5. シリーズⅡ：多孔質骨材モルタル、コンクリートの

空隙特性と力学的特性に関する実験結果および検討

5.1 多孔質骨材モルタル、コンクリートの全空隙率と密度の関係

図 4 は、材齢 28 日における $W/C=25\% \sim 55\%$ 、水中および気中養生とした 35 種類の多孔質骨材モルタルと $W/C=25\% \sim 65\%$ 、水中養生および気中養生、材齢 7 日、28 日および長期材齢(材齢 91 日および 1 年)とした合計 160 種類の多孔質骨材コンクリートの全空隙率と密度の関係を示したものである。

これによると、両者の関係は、全空隙率が大きくなるに伴い、密度は直線的に小さくなり、モルタル、コンクリートの順に、相関係数 -0.944、-0.868 の比較的高い相関性の直線式により回帰される。

しかし、両者の関係には若干のばらつきが認められ、本研究で対象とした空隙径より大きい気泡、また骨材種類、材齢、養生方法により異なるマトリクス中の含水率の影響を考慮することで高まることが予測される。

図 4 多孔質骨材モルタル、コンクリートの全空隙率と密度の関係

5.2 多孔質骨材モルタル、コンクリートの全空隙率と圧縮強度の関係

(1) 多孔質骨材モルタルの全空隙率と圧縮強度の関係

図 5 に材齢 28 日における 35 種類の多孔質骨材モルタルの全空隙率と圧縮強度の関係を示す。これによると、骨材種類、水セメント比、養生方法によらず、両者の関係は、相関係数 -0.945 の指数関数式により回帰されることが確認できる。

(2) 多孔質骨材を用いたコンクリートの全空隙率と圧縮強度の関係

図 6 は、 $W/C=25\% \sim 65\%$ 、材齢 7 日、28 日および長期材齢(91 日、

1年)における合計160種類の多孔質骨材コンクリートの全空隙率と圧縮強度の関係を示したものである。これによると、両者の関係から得られた回帰式の相関係数は、 -0.764 と小さく、全空隙率が小さくなるに伴う圧縮強度の増進割合は、多孔質骨材モルタルに比べて小さい。これは、細骨材に比べ表面積の大きい粗骨材とセメントペースト界面の付着性状が圧縮破壊に及ぼす影響が大きいためと考えられる。

そこで、以下に、骨材界面の付着性状に影響を及ぼす水セメント比、材齢に着目して、コンクリートの圧縮強度の評価指標としての全空隙容積の適用性について検討を行った。

図5 多孔質骨材モルタルの全空隙率と圧縮強度の関係

図6 多孔質骨材コンクリートの全空隙率と圧縮強度の関係

図8(a) 材齢7日

図7(a) 水セメント比25%, 30%, 35%

図8(b) 材齢28日

図7(b) 水セメント比45%, 55%, 65%

図8(c) 材齢91日、1年

図8(a), (b), (c) 多孔質骨材コンクリートの全空隙率と圧縮強度の関係(材齢別)

(2-1) 水セメント比の影響

図7(a)および図7(b)は、水セメント比別に多孔質骨材コンクリートの全空隙率と圧縮強度との関係を示したものである。これによると、 $W/C=25\% \sim 35\%$ とした場合では、両者の関係は多孔質骨材モルタルと同様であり、相関係数 -0.880 の指数関数式により回帰される。また、 $W/C=45\%$ 以上の場合では、両者の相関性は小さく、その傾向は、水セメント比の増加に伴い顕著となる。

(2-2) 材齢の影響

図8(a)～図8(c)は多孔質骨材コンクリートの全空隙率と圧縮強度の関係を材齢別に示したものである。これによると、両者の相関性は、材齢の経過に伴い高まり、また、その関係も多孔質骨材モルタルの場合と類似することが確認できる。

以上の検討から、多孔質骨材モルタルおよびコンクリートの全空隙率と圧縮強度の相関性は、水セメント比が小さく、また長期材齢になるに伴い高まり、材齢91日以降では、モルタル、コンクリートの両者の関係は類似することが確認された。このことは、低水セメント比、長期材齢のものほど、ペーストと骨材界面の付着性状が圧縮強度へ及ぼす影響が小さいことを示唆するものと考えられる。

5.3 多孔質骨材モルタルおよびコンクリートの全空隙率と

ヤング係数の関係

図9は、材齢28日における35種類の多孔質骨材モルタルと材齢7日、28日および長期材齢(材齢91日および1年)における160種類の

多孔質骨材コンクリートの全空隙率とヤング係数の関係を養生方法別に示したものである。

これによると、両者の関係は養生方法により若干異なるが、全体として、高い相関性の指数関数式で回帰されることが確認される。

水中養生とした多孔質骨材モルタル、コンクリートでは気中養生とした場合に比べ、同一の全空隙率に対するヤング係数が若干大きいことが確認され、このことは、密度と同様に養生方法、材齢等によるマトリックスの含水率による影響であると考えられる。

図9 多孔質骨材モルタル,コンクリートの全空隙率とヤング係数の関係

6. シリーズⅢ: 普通骨材と多孔質骨材を用いたモルタル、コンクリートの空隙特性と力学的特性の関係に関する実験結果および検討

6.1 普通骨材と多孔質骨材を用いたモルタル、コンクリートの全空隙率と密度の関係

図10に、普通骨材と多孔質骨材を用いたモルタル、コンクリートの全空隙率と密度の関係を、シリーズⅡにおける多孔質骨材モルタル、コンクリートを併せ示す。これによると、両者の関係は、全体で、相関係数 -0.962 の直線式で回帰されることが確認される。

また、同一全空隙率に対する密度は、水中養生とした場合において若干大きく、このことは、全空隙率の大きい場合に顕著になる傾向であることが確認できる。

図10 モルタル, コンクリートの全空隙率と密度の関係

6.2 普通骨材と多孔質骨材を用いたモルタル、コンクリートの全空隙率と圧縮強度の関係

図11および図12に普通骨材のみ、あるいは普通骨材と多孔質骨材を用いたモルタル、コンクリートの全空隙率と圧縮強度の関係を示す。なお、図中には、多孔質骨材モルタルより得られた回帰式も示す。これらによると、モルタルの全空隙率と圧縮強度の関係は、

図11 普通骨材と多孔質骨材を用いたモルタルの全空隙率と圧縮強度の関係

図12 普通骨材と多孔質骨材を用いたコンクリートの全空隙率と圧縮強度の関係

相関係数 -0.73 コンクリートでは、相関係数 -0.651 と小さい。

既往の研究において、鎌田¹⁾らは、普通骨材を用いたコンクリートの圧縮強度を空隙特性により推定する際、ペースト中の全空隙容積に着目した空隙特性として有効細孔量を(7)式により求め、これを圧縮強度の推定のためのひとつの指標として採用している。

$$\text{有効細孔量} \left(\frac{\text{cc}}{\text{g}} \right) = \frac{V_p}{W} \quad (7) \text{式}$$

ここに、 pW : 単位セメントペーストの重量(g)

しかし、(7)式は、ペースト部の空隙のみを扱ったものであり、多孔質骨材中の空隙容積については対象としていない。

そこで、本研究では、(7)式を参考として、普通骨材と多孔質骨材を用いたコンクリートの圧縮強度を推定するための空隙特性として有効全空隙率(C_{ep})を(8)式により求め、これと圧縮強度との相関性を求めた。なお、普通骨材と多孔質骨材を用いたモルタルの場合についても同様な方法により求めた有効全空隙率(M_{ep})を用いて圧縮強度との相関を求めた。

$$C_{ep} = \frac{(X \times pV_p) + (Y_2 \times V_p) + (Z_2 \times gV_p)}{pV + V + gV} \times 100(\text{Vol} \%) \quad (8) \text{式}$$

ここに、 C_{ep} : 普通骨材と多孔質骨材を混合使用したコンクリートの有効全空隙率(Vol %)

V : 普通骨材と多孔質骨材を用いたコンクリートの全容積(m^3)

pV : セメントペーストの絶対容積(m^3)

gV : 多孔質細骨材の絶対容積(m^3)

V : 多孔質粗骨材の絶対容積(m^3)

pV_p : 単位セメントペースト容積中の空隙容積(m^3)

V_p : 単位多孔質細骨材容積中の空隙容積(cm^3)

αV_p : 単位多孔質粗骨材容積中の空隙容積(cm^3)

X: 単位コンクリート中のセメントペーストの容積比

Y_1 : 単位コンクリート中の普通細骨材の容積比

Y_2 : 単位コンクリート中の多孔質細骨材の容積比

Z_1 : 単位コンクリート中の普通粗骨材の容積比

Z_2 : 単位コンクリート中の多孔質粗骨材の容積比

ただし, $X+Y_1+Y_2+Z_1+Z_2=1$

図13 普通骨材と多孔質骨材を混合使用したモルタルの有効全空隙率と圧縮強度の関係

図14 普通骨材と多孔質骨材を用いたコンクリート全空隙率と圧縮強度の関係

図15 (a) W/C=25%~35%

図15 (b) W/C=45%~65%

図15 (a)~(b) 普通骨材と多孔質骨材を用いたコンクリートの有効全空隙率と圧縮強度の関係(水セメント比別)

図16 (a) 材齢7日

図16 (b) 材齢28日

図16 (c) 材齢91日, 1年

図16 (a)~(c) 普通骨材と多孔質骨材を用いたコンクリートの有効全空隙率と圧縮強度の関係(材齢別)

図13, 図14は普通骨材と多孔質骨材を用いたモルタルおよびコンクリートの有効全空隙率と圧縮強度の関係を示したものである。

図13より, モルタルの両者の関係は, 相関係数 -0.938 の指数関数式で回帰され, また, 多孔質骨材モルタルの場合と同様な関係であることが確認される。

一方, 図14より, コンクリートにあっては, 有効全空隙率と圧縮強度の相関性は, 相関係数は -0.759 と図12に示した全空隙率の場合と比較して, 若干高まることが確認できる。しかし, 粗骨材に普通骨材を用いたNLおよびNnコンクリートにあっては, 有効全空隙率が小さくなることに伴う圧縮強度の増加割合が多孔質骨材モルタルの場合に比べ小さいといえる。

この理由には, シリーズIIの多孔質骨材コンクリートの場合と同様に, 細骨材に比べ表面積の大きい粗骨材界面の付着性状が圧縮破壊に及ぼす影響が大きく, 特にセメントペーストに比べ強度, 剛性の大きい普通骨材において顕著であると考えられる。

以上のことから, 粗骨材に普通骨材を用いたNnおよびNLコンクリートの圧縮強度は, コンクリート中の空隙容積に比べ普通粗骨材界面の付着性状の影響が大きいことから, 空隙特性のみによる圧縮強度の評価は適切でないと判断し, これらコンクリートについては以下の検討の対象から外し, 骨材界面の付着性状に影響を及ぼす水セメント比, 材齢の影響に着目して検討を行った。

(1) 水セメント比の影響

図15(a)および図15(b)は $W/C=25\% \sim 35\%$ の範囲と $W/C=45\% \sim 55\%$ の範囲にコンクリートを区分し、有効全空隙率と圧縮強度の関係を示したものである。図15(a)によると、 $W/C=25\% \sim 35\%$ の場合では、細骨材に普通骨材、粗骨材に多孔質骨材を用いたコンクリートの両者の関係は、相関係数 -0.841 の指数関数式により回帰され、また、多孔質骨材モルタルの場合と同様な関係であることが確認できる。

一方、図15(b)によると、 $W/C=45\% \sim 55\%$ の場合では、両者の相関性は小さく、また、多孔質骨材モルタルの場合と比較して、有効全空隙率に対する圧縮強度は若干小さくなることが確認される。

(2) 材齢の影響

図16(a)～図16(c)は普通骨材のみを用いた、または、普通骨材と多孔質骨材を用いたコンクリートの有効全空隙率と圧縮強度の関係について、材齢別に示したものである。これらによると、粗骨材に多孔質骨材、細骨材に普通骨材を用いたコンクリートの両者の相関性は、材齢の経過に伴い相関性は高くなり、材齢91日以降においては、相関係数 -0.901 の指数関数式により回帰されることが確認できる。

以上の検討から、細骨材に普通骨材、粗骨材に多孔質骨材を用いたコンクリートの材齢91日以降における圧縮強度の評価指標としてコンクリートの全容積の除いた容積に占める全空隙容積の割合とした有効全空隙率の妥当性が確認された。

6.3 普通骨材と多孔質骨材を用いたモルタルの全空隙率と

ヤング係数の関係

図17に普通骨材のみ、または普通骨材と多孔質骨材を用いたモルタルの全空隙率とヤング係数の関係を示す。これによると、両者の関係は、相関係数 -0.939 の指数関数式で回帰され、多孔質骨材モルタルの場合と同様な関係にあることが確認できる。

6.4 普通骨材および多孔質骨材を用いたコンクリートの全空隙率と

ヤング係数の関係

図18に普通骨材のみを用いた、または普通骨材および多孔質骨材を用いたコンクリートの全空隙率とヤング係数の関係を示す。これによると、全体として、両者の関係は多孔質骨材モルタルの場合と類似するが、相関係数は -0.789 と小さい。詳細にみると、 N_L および N_N の一部において、ばらつきが大きいことが確認できる。

これは、乾燥などにより骨材界面に微細なクラックが生じたことによる剛性低下が理由として考えられる。このことを考慮して、気中養生、 $W/C=45\%$ 以上とした N_L および N_N を除いた場合の両者の関係にあっては、相関係数 -0.902 の高い相関を示すことが確認された。

7. 結論

多孔質骨材を用いたコンクリートにおける硬化体中の空隙特性と力学的特性の関係を明らかにすることを目的に、多孔質骨材の空隙特性ならびにモルタルおよびコンクリートの空隙率、圧縮強度、ヤング係数を測定した。その結果から大要以下のことがいえる。

(1) 多孔質骨材の組成分、原料構成、製造方法、内部および表層の構造等の相違は、全空隙率、空隙径分布等の空隙特性に大きな影響を及ぼすことが確認できた。

(2) 多孔質骨材を用いたモルタルおよびコンクリートのうち、全空隙率の大きいもの、水セメント比が 55% 以下のもの、材齢が91日を越えるものについては、養生方法の如何を問わず、全空隙率と密度、

図17 普通骨材と多孔質骨材を用いたモルタルの全空隙率とヤング係数の関係

図18 普通骨材と多孔質骨材を用いたコンクリートの全空隙率とヤング係数の関係

圧縮強度、ヤング係数との間に高い相関性が認められた。

(3) 普通骨材を含む全空隙率の小さなモルタルおよびコンクリートのうち、細骨材に普通骨材、粗骨材に多孔質骨材を用いたコンクリートにあっては、水セメント比 55% 以下、材齢28日以上のもについて、養生方法を問わず、密度、ヤング係数は全空隙率と、圧縮強度は、コンクリート全容積から普通骨材容積を除いた容積に占める空隙の割合とした有効全空隙率との間に高い相関性が認められた。

(4) 現在、これらの結果をもとに、骨材の一般的な物性と空隙特性の関係をより精度良く解明し、それを代替特性値とすることにより材料設計への移行を図る研究を行っている。

【謝辞】

本研究の実施にあたりまして、日本メサライト工業(株)、クリスタルクレイ(株)、(株)新島物産、(株)九電産業、(株)エヌエムビー、(株)第一セメント、また、1999年度明治大学卒業生 大浦哲宜君、表幹人君、金丸和樹君、熊野栄一君、斉藤圭君、平野秀明君に多大な御協力を賜りました。ここに深く謝意を表します。

【参考文献】

- [1] 吉野利幸, 鎌田英治, 田畑雅幸, 柳敏幸: 空隙依存性に基づくコンクリートの強度推定法に関する研究-第1報 圧縮強度と空隙構造の関係-, 日本建築学会論文報告集, 第312号, pp.9~16, 昭和52年2月
- [2] 湯浅昇, 笠井芳夫他: 乾燥条件が微少セメントペーストの水和、細孔構造及び強度に及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文集 第505号, pp.15~21, 1998.3
- [3] 小山明男, 菊池雅史, 三浦隆広, 榎本浩士: 高強度軽量コンクリートの細孔構造に関する研究, 日本建築学会構造系論文集 第516号, pp.7~13, 1999.2
- [4] 道正泰弘, 菊池雅史, 増田明, 小山明男, 三浦隆広: 再生細骨材を用いたコンクリートの構造用コンクリートへの適用-原モルタルの性質が再生細骨材および再生コンクリートの品質に及ぼす影響-, 日本建築学会構造系論文集, 第502号, pp.15~22, 1997.12

(2000年11月10日原稿受理, 2001年4月20日採用決定)