軽量骨材を用いたコンクリートの細孔構造に及ぼす諸要因とその影響

EFFECTS OF FACTORS ON POROSITY OF
LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE小山 明男^{*1}, 菊池 雅史^{*2}, 三浦 隆広^{*3}

Akio KOYAMA, Masafumi KIKUCHI and Takahiro MIURA

Porosity of concrete was varied by the influence of water cement ratio, curing method, age and so on. The influence, which porosity has on properties of concrete, of lightweight aggregate concrete tends to be stronger than that of normal weight concrete.

From this point of view, porosity of lightweight concrete which varied factors such as water cement ratio, curing method, age, types of aggregate and sampling place, was measured. These results are summarized as follows, a) Changes in contained moisture of concrete are much influenced by water cement ratio and moisture content of aggregate, in the case that be used light weight aggregate, it depends on characteristics of aggregate, surface texture and void connection. b) Under drying condition, effects of types of aggregate on pore structure are varied by water cement ratio, and the densification of pore structure of light weight aggregate concrete tends to be possible at inner place. c) Water contained in lightweight aggregate gives influence to porosity of mortar matrix under drying condition. It depends on rate of exhalation in aggregates. The densification of pore structure of fly-ash aggregate concrete is possible within 2.0cm from the drying surface.

Keywords : Porosity, Artificial light weight aggregate, Light weight aggregate concrete, Curing method, Water cement ratio

細孔構造、人工軽量骨材、軽量コンクリート、養生方法、水セメント比

1. はじめに

硬化したコンクリートの品質に最も大きな影響を及ぼす要因は水セメント比であり、十分な水湿分の供給下では水和反応の進行にともない種々の性能が発現されていくことになる。しかし、水湿分の供給が不十分であったり、発散の程度および速度が大きい場合には必ずしも所要の性能が確保されない場合がある。この理由としては水和反応の停滞によるところが大きい。

コンクリートの細孔構造は硬化後の品質を決定づける重要な因子であり、水セメント比、セメント種類、混和材の混入、材齢などが細孔構造に及ぼす影響について、あるいは圧縮強度、耐凍結融解性などの硬化後の諸物性と細孔構造の関係については内川ら⁹⁾、あるいは鎌田ら²³⁾をはじめとした多くの研究者^{6)~10)}によって検討報告がなされている。また、水湿分の供給が不十分な乾燥下でのコンクリートの細孔構造について地濃ら¹¹⁾あるいは湯浅ら¹²⁾は詳細に検討されており、マトリックス中の含水状態と関係が深く、より乾燥をうける表層部において水和反応の停滞により組織の緻密化が鈍ることを指摘している。

筆者らはかねてより各種人工軽量骨材を用いたコンクリートの諸物性に関する検討^{17)~21)}を進めてきているが、これまでの結果では水分の発散量や速度が及ぼす影響の程度が普通コンクリートと異なることを確認している。普通骨材に比べて吸水率の大きい軽量骨材を

用いたコンクリートでは乾燥下での水分発散量や速度が普通コンクリートと大きく異なり、また内部構造、表面性状などの異なる2種類の軽量骨材の間にも僅かではあるが乾燥による影響が認められている。骨材種類によりマトリックス中の含水状態は異なることから、モルタルマトリックスと骨材中の相対的な環境(湿度)の違いによって、骨材種類の違いがモルタルマトリックスの細孔構造に影響を及ぼすことが考えられる。しかし、これら骨材特性と細孔構造の関係を検討した例は少ない。

そこで本研究では、水セメント比、材齢、採取位置、粗骨材種類、養生方法の因子を変化させたセメントペーストおよびコンクリートを作製し、これらの各因子が細孔構造に及ぼす影響を粗骨材の種類を中心に検討したものである。

2. 実験の概要

2-1. 使用材料

セメントは、普通ポルトランドセメント(K_{28} :428kgf/cm²)を用いた。骨材は、粗骨材として硬質砂岩碎石(記号:G)ならびに膨張頁岩系(記号:L)および石炭灰系(記号:F)の軽量骨材2種類合計3種類を用いた。細骨材は、いずれのコンクリートにおいても川砂を用いた。これら使用骨材の主要物性を表-1に示す。混和剤は、高性能減水剤(高縮合トリアジン系)、AE減水剤(リグニンスルホン酸

^{*1} 東京都立大学工学研究科建築学専攻 助手・工修

^{*2} 明治大学理工学部建築学科 助教授・工修

^{*3} 明治大学大学院理工学研究科建築学専攻
大学院博士後期課程・工修

Research Assoc., Graduate School of Engineering, Tokyo Metropolitan Univ., M. Eng.
Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Science and Technology, Meiji Univ., Dr. Eng.
Graduate School of Science and Technology, Meiji Univ., M. Eng.

系)および空気連行補助剤(樹脂酸系)を用いた。練り混ぜ水は、一般の上水道を用いた。

2-2. 試料の種類および試験体形状・寸法

セメントペーストは、水セメント比 35%、45%、55%の 3 水準とし養生方法を 3 水準とした組み合わせにより計 9 種類用意した。なお、いずれのセメントペーストにおいても混和剤は使用していない。また、コンクリートは、粗骨材を 3 種類、水セメント比 3 水準、および養生方法 5 水準の組み合わせにより計 45 種類用意した。試料の種類および調査概略を表-2 に示す。計画調査において単位水量および細骨材率をそれぞれ 170kg/m³、45%で一定とし、目標スランプおよび空気量はそれぞれ 18cm、5%とした。ポロシチー測定試料用の試験体はφ10×20cm の円柱供試体を用いた。なお、セメントペーストでは脱型後速やかにφ10×20cm の供試体から切り出したφ10×3cm のセメントペースト硬化体の上下面にエポキシ樹脂をシールし水分の発散を防いだものを 2 次養生に供した。

2-3. 養生方法

セメントペーストおよびコンクリート打設後 24 時間経過時に速やかに脱型を行い、2 次養生を行った。2 次養生は、全材齢水中(記号: A) 養生、1 週水中以後気中(記号: B) 養生、全材齢気中(記号: C) 養生、全材齢封緘(記号: D) 養生、4 週水中以後気中(記号: E) 養生の 5 水準とした。なお、気中養生は温度 20℃、湿度 RH60%の室内において行った。なお、セメントペーストについては全材齢水中養生、1 週水中以後気中養生、全材齢気中養生の 3 水準のみとした。

2-4. 試料の採取、調整および試験方法

a) 試料の採取方法

セメントペースト硬化体試料は、所定材齢に達した後図-1 示す試料採取位置に分け、5mm 角程度の試料を採取した。

コンクリート試料は、所定材齢に達した時点でコンクリートカッターにより上下面 5cm を取り除いた部分をφ10×2cm のディスク状に切断した後図-1 示す試料採取位置に分け、ペーストリッチな部分から 5mm 角程度のモルタル片を採取した。

b) 試料の調整方法

採取直後試験管に入れた試料をアセトンに浸し、0.5、4 時間後にそれぞれアセトンの交換を行い、計 24 時間アセトン処理し水和進行を停止させた。次に、真空ポンプ(7.5×10⁻³mmHg)により 24 時間脱水乾燥を行い、ポロシチー測定まで試験管において密封保管した。

図-1 試料採取位置

c)ポロシチーの測定: ポロシチーの測定は、水銀圧入法によった。装置を図-2 に示す (FISION Instrument 社製ポロシメーターPascal 140 および Pascal 240 型 最大圧力は 200MPa)。測定範囲は、細孔径 3.7~7,500nm とし、一回の測定に用いた試料の量は約 5g である。

2-5. モルタルの不溶残分

モルタルの不溶残分は、(社)セメント協会報告 F-18 に準拠して測定した。なお、測定した試料は、水セメント比 (35%、55%) 2 水準、粗骨材種類 (G、L、F) 3 種類、養生方法 (A、C) 2 水準および材齢 (1 週、4 週) 2 水準を組み合わせたもの計 24 種類とした。

表-1 使用骨材の主要物性

	粗粒率	洗い損失 (%)	単位容積質量 (kg/l)	実積率 (%)	絶乾比重	表乾比重	吸水率 (%)	使用時含水率 (%)
川砂	2.81	1.66	1.74	67.6	2.58	2.61	1.2	-
硬質砂岩碎石	6.72	-	1.54	59.2	2.61	2.64	0.9	-
膨張頁岩系人工軽量骨材	6.56	0.31	0.81	62.6	1.29	1.46	13.1	26.7
石炭灰系人工軽量骨材	6.53	0.42	0.82	60.6	1.34	1.56	16.6	23.8
試験方法	JIS A 1102	JIS A 1103	JIS A 1104	JIS A 1104	JIS A 1109	JIS A 1110	JIS A 1111	JIS A 1135

表-2 試料コンクリートの種類および調査概略

粗骨材 種 類	記号	W/C (%)	細骨材 率 (%)	単 位 水 量 (kg/m ³)	絶対容積 (l/m ³)			混和剤 添加量 (kg/m ³)	フレッシュコンクリート性状		
					セ メ ン ト	細 骨 材	粗 骨 材		スラン プ (cm)	空 気 量 (%)	単 位 容 積 質 量 (kg/l)
硬 質 砂 岩 砕 石	GN	35	45	173	156	279	341	7.41 ^{*1}	18.6	5.1	2.35
		45		169	119	288	352	1.88 ^{*2}	19.0	7.2	2.29
		55		173	99	304	372	1.26 ^{*2}	18.5	5.2	2.32
膨 張 頁 岩系人工 軽量骨材	LN	35		172	156	278	339	6.4 ^{*1}	18.4	5.5	2.00
		45		171	120	290	355	1.14 ^{*2}	19.0	6.4	1.94
		55		173	100	304	372	0.94 ^{*2}	19.4	5.1	1.97
石炭灰系 人工軽量 骨 材	FN	35	170	154	274	335	6.31 ^{*1}	19.8	6.8	1.98	
		45	172	121	293	358	1.53 ^{*2}	20.0	5.7	1.97	
		55	173	100	305	372	1.26 ^{*2}	18.1	5.0	1.99	

*1 高縮合トリアジン系高性能減水剤 *2 リグニルスルホン酸系 AE 減水剤
注) 調査はすべて空気量をもとに補正した値

図-2 ポロシメータの外観

3. 実験結果および検討

3-1. 養生方法がセメントペースト硬化体の細孔構造に及ぼす影響

養生方法が細孔構造に及ぼす影響について、セメントペースト硬化体の細孔径分布を一例として水セメント比 55%の試料について図-3に示す。水中養生した試験体の細孔分布は、脱型時において500nm付近で最も多い細孔量を示し、以後材齢の経過により全体的に細孔分布が小さい径へとシフトしている。この水和反応の進行に伴う現象は、養生方法の差異により若干異なっている。気中養生したものでは、細孔径250~500nm付近で細孔量が多く、脱型時の細孔量よりも減少しているが、水中養生した試料に比べると全体的に大きい径の細孔量が多い。また、水中養生した場合、採取位置の違いはほとんど細孔分布に影響を及ぼしていないが、気中養生した場合には、より乾燥をうける表層部のほうが大きい径の細孔量が多い。これは、地濃ら¹¹⁾あるいは湯浅ら¹²⁾の研究による知見と一致しており、より乾燥をうける表層部において水和の進行が緩慢となることによるものである。なお、以上のような材齢の経過にともなう細孔分布の変化は水セメント比 35%および 45%の場合でも同様の傾向であった。本実験の範囲では、水中養生と気中養生の違い、あるいは試料採取位置の違いによる総細孔量の差は小さく、水和の進行にともなう細孔分布の小径側へのシフトは総細孔量から判断しにくい。そこで採取位置の違いが細孔径平均値(全細孔を円柱形と仮定し総細孔量と比表面積により算出した平均径)に及ぼす影響を図-4に示す。これによれば、水中養生を行ったものは範囲による差がほとんどないが、気中養生を行ったものは例外もあるがおおよそ表層の試料のほうが細孔径平均値は大きくなっており、表層部で水和の進行が内部よりも緩慢になっていることが理解できる。また1週水中以後気中養生としたものについては、ほぼ水中養生のものと同様の傾向である。

3-2. コンクリートの水分発散量に及ぼす骨材の影響

各種骨材を用いたコンクリートの経時による水分発散量について

図-6 軽量骨材の外観

水セメント比 35%および 55%の気中養生したものを図-5 に示す。乾燥をうける養生では、脱型時およびそれ以降のコンクリート組織は水セメント比が小さいほうが緻密であるため同材齢における水分発散量が小さい。また、乾燥をうけるコンクリートの水分発散はコンクリート内部の湿度と外部の湿度との相関により発散量が左右されることが考えられるが、粗骨材に含水率の大きい軽量骨材を用いた場合には、普通骨材を用いたものに比べ非常に大きな水分発散量を示している。2種類の軽量骨材を比較すると、水セメント比によらず骨材中の水分量を含めたコンクリート中の総水量が若干小さい石炭灰系軽量骨材の方が水分発散量は大きい。2種類の軽量骨材の外観写真を図-6 に示す。石炭灰系軽量骨材は膨張頁岩系軽量骨材と異なり骨材の外殻にシェルを有しておらず、また内部の気泡は連続している。このことから石炭灰系軽量骨材では骨材内部の水分が膨張頁岩系軽量骨材に比べて発散しやすく、そのため石炭灰軽量骨材を用いたコンクリートの水分発散量が大きいといえる。

3-3. コンクリートの細孔構造に及ぼす骨材種類の影響

本実験で行った不溶残分の測定結果を表-3 に示す。若干使用した粗骨材種類の違いによるバラツキはみられるが、不溶残分の測定値から得たモルタル中のペースト重量割合は、いずれの骨材を用いた場合でも水セメント比 35%で 46~55%、水セメント比 55%で 34~40%の間にあり、測定値の平均値と調査から求めた計算値との誤差は大きいものでも 8%程度である。また、材齢、養生方法および試料採取位置等の影響も特に認められなかった。そこで本報告では、コンクリートの調査からモルタル中のペーストと細骨材との比を求めて補正した値を有効細孔量とし、以後の検討を進めることとした。

3-3-1. 細孔分布に及ぼす材齢および骨材種類の影響

各種骨材を用いたコンクリートの細孔分布について水セメント比

55%を一例として図-7 に示す。図は養生方法を全材齢水中養生としたもので、かつ供試体内部（Y 範囲）のものである。これによると、セメントペースト硬化体の場合と同様に、各種コンクリートとも材齢の経過により水和反応が進展し、細孔量のピークが小径側に移動している。石炭灰系軽量骨材を用いたコンクリートは、他に比べて 25~50nm の細孔量が小さく、有効総細孔量も小さい。水分発散のない養生方法であっても骨材の含水率などが変わればコンクリート中の内部湿度も異なり水和速度が若干異なることも考えられるが、骨材種類によって異なる細孔量の差は、筆者らでは現在のところ細骨材の混入などによる実験誤差と考えている。なお、水セメント比 35%および 45%においても、脱型時の細孔径のピークに違いはあるが、材齢の経過による細孔分布の変化は同様の傾向を示した。

3-2-2. 細孔径分布に及ぼす養生方法の影響

乾燥をうけるコンクリートの細孔径分布を検討するため、全材齢水中養生および全材齢気中養生とした各種骨材を用いたコンクリートの細孔分布について水セメント比 35%、材齢 4 週時を一例として図-8 に示す。脱型後直ちに乾燥をうける気中養生としたコンクリートでは、供試体内部の細孔分布は、水中養生を行ったコンクリートのそれとほとんど変わらない分布を示した。しかし、気中養生を行ったコンクリートの表層部では、用いた骨材の種類によって細孔分

表-3 モルタル中のペースト重量割合

コンクリート 種 類	ペースト重量割合の範囲および平均値 (%)			
	W/C=35%		W/C=55%	
	不溶残分測定値	計算値	不溶残分測定値	計算値
GN	46.73~51.67(48.88)	47.77	38.48~40.41(39.44)	37.98
LN	47.81~55.43(51.62)	47.82	36.46~38.59(37.52)	38.13
FN	46.46~53.22(48.98)	47.87	34.09~35.32(34.68)	38.05

注1:表中の値は水セメント比以外の因子を全てプールしたもので各3~6の試料数

注2:表中の計算値は調査から求めたもの

図-7 各種骨材を用いたコンクリートの細孔分布

図-8 乾燥をうけるコンクリートの細孔分布

布が異なった傾向を示した。砕石コンクリートでは、他に比べて大きい径の細孔量が多く、小さい径の細孔量が少ない細孔分布であった。これは、より乾燥をうける表層部において水和の進行が緩慢となることによるもので 3-1 で述べたセメントペースト硬化体の結果と一致している。これに対して膨張頁岩系および石炭灰系軽量コンクリートでは、細孔径 25~50nm 付近の細孔量が若干大きい、細孔分布は比較的内部のものに近い傾向を示した。

3-3-3. 細孔構造に及ぼす水セメント比および骨材種類の影響

全材齢水中養生および全材齢気中養生のコンクリートにおける内部の細孔径平均値の比較を図-9 に示す。軽量骨材を用いた 2 種類のコンクリートでは水中養生および気中養生の細孔径平均値は同等の値であり、養生方法の違いによる影響は認められない。しかし、砕石を用いたコンクリートでは細孔径平均値が大きい範囲で、気中養生のほうが水中養生の値よりも大きい。3-1 でも述べたように水セメント比が大きいコンクリートでは、水セメント比の小さいものよりモルタルマトリックス組織は粗いためコンクリート中の水分は発散し易く、より内部まで乾燥が進んだことによるためと考えられる。つまり、本実験の範囲では砕石コンクリートではモルタルマトリックス組織が緻密であれば試験体内部では水和反応の進行が期待できるが、軽量骨材は含水率が砕石に比べて非常に大きいため、水セメント比が大きい場合でも内部ではモルタルマトリックス中の湿度が大きく、水和反応の進行が期待できる。ただし、軽量骨材を用いた場合でも水分発散は水セメント比の違いによるモルタルマトリックス組織の緻密さにも左右されるため、軽量骨材による水和反応の進行についてはより組織が緻密である高強度域において効果が大きいと考えられる。

3-3-4. 表層部の細孔構造に及ぼす骨材種類の影響

各種コンクリートの細孔径平均値を図-10 に示す。これによると、砕石を用いたコンクリートではセメントペースト硬化体の場合と同様に、水分発散のない水中養生および封緘養生のコンクリートでは、内部と表層部の細孔径平均値はほぼ同等の値を示している。これに対して脱型後ただちに乾燥をうける気中養生のコンクリートでは、表層部の細孔径平均値は内部の値に比べて大きい値となっており、乾燥による影響をうけ水和反応の進行が緩慢になっている。1 週水中以後気中養生のコンクリートでは気中養生のものと同様なものもみられるが、比較的水中養生したものに近い傾向を示した。一方、含水率が砕石に比べて大きい軽量骨材を粗骨材として用いた膨張頁岩

図-9 コンクリートの細孔径平均値に及ぼす養生方法の影響

系および石炭灰系軽量コンクリートの細孔径平均値についてみると、気中養生とした場合では、膨張頁岩系軽量コンクリートでは砕石コンクリートに近い傾向を示した。しかし、石炭灰系軽量コンクリートは表層部の細孔径平均値はやや大きい、他の骨材を用いたコンクリートと比べると内部との差は小さく、表層部においても細孔構造の緻密化が進展しているといえる。同程度の含水率で使用した 2 種の骨材によるこの差は、3-2. において述べたように表層に溶解シエルをもつ膨張頁岩系軽量骨材のほうが骨材内部の水分が石炭灰系軽量骨材に比べて発散しにくいことに起因する。このような骨材種類の違いによる細孔構造および水分発散量の違いは耐火性などの性質に多大な影響を及ぼすと考えられる。

4. 結論

コンクリートの細孔構造に影響を及ぼす諸要因に関する既往の知見を確認した上で、軽量骨材を用いたコンクリートに関する検討結果をまとめると大要以下のことがいえる。

- (1) コンクリートの水分発散は、水セメント比、骨材の含水率による影響が大きい。また、溶解シエルの有無あるいは気泡の連続性といった骨材特性の違いによっても影響をうける。
- (2) 乾燥をうけにくい供試体内部では、水セメント比が小さいと骨材種類によらず組織の緻密化が期待できる。一方、水セメント比が大きいと内部まで乾燥が進むため粗骨材の含水率の影響をうけ、砕石コンクリートでは組織の緻密化が緩慢となるが、軽量骨材を用いた

図-10 コンクリートの細孔径平均値に及ぼす養生方法の影響と採取位置の関係

コンクリートでは組織の緻密化が期待できる。

(3) 軽量骨材中の水分がモルタルマトリックスの細孔構造に及ぼす影響は、骨材中からの水分発散のし易さによる影響が大きい。熔融シェルのある骨材を用いた場合、乾燥をうけやすい表層部で組織の緻密化が緩慢となる。熔融シェルのない石炭灰系軽量骨材を用いた場合、乾燥をうけやすい表層部においても組織の緻密化が期待できる。

【謝辞】

本研究を行うにあたり日本コンサルタント株式会社 山口氏、中村氏、石川氏、日本メサライト工業株式会社、九電産業株式会社、ボゾリス物産株式会社、株式会社エヌエムビーならびに 1995 年度明治大学卒論生 蔦野信治君および若本昌己君に多大なる協力を賜りました。ここに厚く謝意を表します。

【参考文献】

- [1] 内川 浩:組成と構造の観点から見た硬化セメントペースト,モルタルおよびコンクリートの類似点と相違点 セメント・コンクリート, No.507, pp.33~45, 1989.5
- [2] 鎌田 英治, 吉野 利幸:空隙率および水湿度によるコンクリートの強度の表示 セメント技術年報 32 pp.216~220, 1978
- [3] 吉野 利幸, 鎌田 英治, 田畑 雅幸, 柳 敏幸:コンクリート強度の空隙率依存性を応用したコンクリート強度推定法の提案 セメント技術年報 33 pp.249~252, 1979
- [4] 鎌田 英治, 大内 一之, 吉野 利幸:硬化セメントペーストの凍害と細孔構造の役割について セメント技術年報 33 pp.292~295, 1976
- [5] 鎌田 英治, 吉野 利幸, 寺井 靖人:コンクリートの強度と細孔構造に関する研究 セメント技術年報 34 pp.256~259, 1977
- [6] 李 長江, 依田 彰彦, 横室 隆,:セメントペーストの細孔構造および圧縮強度に及ぼす高炉スラグ微粉末の影響 日本建築学会構造系論文報告集 No.506, pp.1~6, 1998
- [7] 田中 享二, 内田 昌宏, 大森 修, 橋田 浩, 湯浅 昇:塗り床のふくれ発生機構の一考察 日本建築学会構造系論文報告集 No.488, pp.25~30, 1996
- [8] 田中 享二, 内田 昌宏, 大森 修, Keesun BAE:塗り床のふくれ発生に及ぼす下地コンクリートの影響 日本建築学会構造系論文報告集 No.493, pp.1~7, 1997
- [9] 橋田 浩, 田中 享二, 小池 迪夫:打設直後から乾燥途中におけるコンクリートの含水状態(仕上げ材下地としてのコンクリート含水率の検討その 1) 日本建築学会構造系論文報告集 No.412, pp.1~8, 1990
- [10] 田沢 栄一, 米倉 亜州夫, 寺本 尚夫, 森下 全人:細孔構造の相違がコンクリートの乾燥収縮およびクリープに及ぼす影響 セメント技術年報 40 pp.131~133, 1984
- [11] 地濃 茂雄, 平野 隆, 仕入 豊和:養生条件とコンクリートの表層部の細孔構造 セメント技術年報 38 pp.266~269, 1984
- [12] 湯浅 昇, 笠井 芳夫, 松井 勇:表層コンクリートの品質の評価(乾燥を受ける表層コンクリートの細孔構造の経時変化) 日本建築学会大会学術講演梗概集 A, pp.199~200, 1994
- [13] 湯浅 昇, 松井 勇, 逸見 義男, 佐藤 弘和:仕上げ材のはがれに及ぼす下地コンクリートの含水率, 細孔構造の影響 コンクリート工学年次論文報告集第 18 巻 第 1 号, pp.573~278, 1996
- [14] 湯浅 昇, 笠井 芳夫, 松井 勇, 逸見 義男, 佐藤 弘和:仕上げ材を施すコンクリート床スラブの含水率, 細孔構造 日本建築学会構造系論文報告集 No.504 pp.7~13, 1998.2
- [15] 村上 祐治, 山下 英俊, 鈴木 篤,:コンクリートの塩分透水に

おける乾燥および微細構造の影響 コンクリート工学年次論文報告集 Vol.14, No.1, pp.675~680, 1992

- [16] 湯浅 昇, 笠井 芳夫, 松井 勇:表層コンクリート品質の検討 日本建築学会大会学術講演梗概集 A, pp.449~450, 1993
- [17] 菊池 雅史, 向井 毅:石炭灰軽量骨材の構造用コンクリート骨材としての適用性に関する研究(第 1 報) 日本建築学会構造系論文報告集, 第 402 号, pp.27~36, 1989.9
- [18] 菊池 雅史, 榎本 浩士, 小山 明男, 多田 克彦:石炭灰軽量骨材を用いたコンクリートの高強度化・高耐久化に関する検討(その 1.骨材特性が圧縮強度に及ぼす影響) 1992 年度日本建築学会関東支部研究報告集 pp.173~176
- [19] 菊池 雅史, 榎本 浩士, 谷部 徹, 三原 崇明:石炭灰軽量骨材を用いたコンクリートの高強度化・高耐久化に関する検討(その 4.ポロシティー, 耐火性状について) 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)A, pp.399~400, 1993.9
- [20] 向井 毅, 菊池 雅史, 山盛 智広:石炭灰軽量骨材を用いたコンクリートの基礎的性質に関する研究(その 4.水分発散が諸強度に及ぼす影響について) 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)A, pp.431~432, 1988.10
- [21] 菊池 雅史, 成岡 優:石炭灰軽量骨材を用いたコンクリートの基礎的性質に関する研究(その 6.乾燥に伴う内部歪みについて) 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)A, pp.839~840, 1990.10

(1998 年 3 月 10 日原稿受理, 1998 年 7 月 17 日採用決定)