

論文 実構造物フライアッシュコンクリートの空隙構造のイメージング

池上 裕樹*1・杉山 隆文*2

要旨: JIS III 種灰を使用した実構造物コンクリートからコアを抜き取り、微焦点 X 線 CT を用いて、等価空気量測定および気泡分布のイメージングを行った。画像解析とフレッシュ時の空気量が同傾向を示した。また、水銀圧入法と放射光 X 線 CT との空隙構造の比較を行った。水銀圧入法による空隙率は画像解析による結果よりも大きな値を示したが、全ての AE (気泡) まではカウントしていないことが推察された。

キーワード: 実構造物, フライアッシュコンクリート, X 線 CT, 気泡分布, 水銀圧入法, 空隙構造

1. はじめに

コンクリート構造物を適切に維持管理するには、竣工時の検査や調査時点におけるコンクリートの品質および劣化状態などをできる限り定量的に把握する必要がある。これまでに種々の検査法が開発されており、一部は実用化もされている。将来的に、検査や診断をより一層客観的に行うためには、コンクリートの状態を可視化することで、視覚的に評価する手法の充実が求められる。この可視化手法に関連して、著者らや人見らは X 線 CT を利用したセメント系硬化体の微細空隙構造を研究してきた^{1),4),5),6),7)}。また、天明らは X 線 CT 法のコンクリート診断への適用を研究しており²⁾、現場での利用には実構造物のサイズ、安全管理や法規制などの点でまだハードルが高いことを指摘し、コア供試体を使用した適用法を提案している。

本研究では、実構造物フライアッシュコンクリートから採取したコア供試体に対し、微焦点 X 線 CT 装置を用いて、その空隙構造をイメージングする手法を研究した。この装置は、解像度が比較的高いことからエントレインドエアを含む気泡の観察が可能である特長を有している。空隙構造の調査では、比較も兼ねて水銀圧入試験も実施した。さらに、解像度が最も優れている放射光 X 線 CT による測定も実施した。

2. 実験概要

2.1 実構造物からのコア採取

使用材料の物性値および使用したフライアッシュの品質を表-1、表-2 に示す。このフライアッシュを用いて、実機プラントによる施工性の確認などのために、繰返し試練りを実施し、実際の護岸用鉄筋コンクリート構造物の配合を決定した³⁾。その配合を表-3 に示す。普通コンクリート (B0-0P)、フライアッシュをセメント (F1-60P) または細骨材 (F2-80P) に一部代替した合計 3 種類のコンクリートを用いて、同じ護岸帯に間隔をあ

けて、それぞれのコンクリートを打ち込んでいる。

本研究においては材齢 6 年 9 ヶ月の時点で採取したコアを使用した。

2.2 X 線 CT 画像の画像情報および画像処理

微焦点 X 線 CT を用いて気泡分布を調べるために、それぞれの配合に対して直径が 7mm, 12mm, 20mm の 3 種類のコアサンプルを用意し撮影を行った。撮影された連続断面画像から 3 次元画像の立体サンプル (VOI) を抽出した。VOI は立体を格子状に分解された最小要素 (voxel) で構成され、色調を整え、鮮明にするために、撮影時の 16 bit 画像から 256 階調の 8 bit 画像に変換している。以後、この階調を GSV と称す。それぞれのコア直径に対する画像情報および VOI の大きさを表-4 に示す。B0-7 は直径 7mm の B0-0P のコアを、B0-12 は直径 12mm, B0-20 は直径 20mm のコアをそれぞれ表しており、F1-60P, F2-80P のコアにおいても同様に表記している。層厚とは断面画像 1 枚の厚さのことを示している。

放射光 X 線 CT による空隙構造のイメージングにおいては、フライアッシュが混入されている F1-60P, F2-80P

表-1 使用材料の物性値³⁾

材料	種類	密度(g/cm ³)	粗粒率
セメント	普通 (N)	3.16	—
細骨材	海砂	2.62	2.17
	砕砂	2.67	3.10
粗骨材	碎石	2.70	60.2% *
AE 減水剤	リグニンスルホン酸 (標準形)		

* 実積率

表-2 フライアッシュの物性値³⁾

種類	密度(g/cm ³)	強熱減量(%)	MB 量(%)
ワンボ炭	2.20	6.3	1.12

*1 北海道旅客鉄道株式会社 修士 (工学) (正会員)

*2 北海道大学大学院 工学研究院 環境フィールド工学部門 教授 Ph.D. (正会員)

表-3 実構造物のコンクリート配合および諸性状³⁾

配合	W/C (%)	W/(C+F) (%)	単位量 (kg/m ³)					(C+F) × (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	空気量 (%)
			W	C	F	S	G			
B0-0P	56	-	169	302	0	860	979	0.4	32.8	3.3
F1-60P	70	56.3	172	245	60	852	955	0.4	46.3	1.5
F2-80P	59.3	46.7	175	295	80	688	1052	0.6	51.8	2.2

表-4 画像情報およびVOI サイズ

	B0-7	F1-7	F2-7	B0-12	F1-12	F2-12	B0-20	F1-20	F2-20
1pixel サイズ (μm)	7	7	7	12	12	12	22	22	22
層厚 (μm)	20	20	20	20	20	20	40	40	40
縦の voxel 数	600	600	600	600	600	600	600	600	600
横の voxel 数	600	600	600	600	600	600	600	600	600
層数	252-253	241	251-252	365	395	389	372-393	372-389	389

に対し、約 1mm³ の試料に対して撮影を行った。撮影画像は 0.5μm の画素で構成されている。本研究では、VOI のサイズを 400³voxels すなわち 200³μm³ とした。

2.3 空気のしきい値の決定方法

抽出した VOI からヒストグラムを作成し、しきい値を決定した。微焦点 X 線 CT から作成した一例を図-1 に示す。著者らの既往の研究^{4),5)}において、微焦点 X 線 CT を用いた場合の空気のしきい値は下限を GSV=0 とし、上限をモルタルを表すヒストグラムのピークの GSV の半値とするものである。

図-1 はヒストグラムの一例であるが、この例のように比較的大きな、二つのピークを確認できるが、この二つのピークはモルタル部と粗骨材部のものであると思われる。この二つのピークの同定は 2.4 で後述する。

また、放射光 X 線 CT を用いた場合は解像度が 0.5μm と小さく、気泡ばかりではなく微細空隙構造も含むため手法が異なる。その手法は下限を GSV=0 とし、上限をしきい値の変化による空隙率の推移の変化から決定するというものである⁴⁾。

2.4 モルタル部と粗骨材部の同定

モルタル部と粗骨材部を用意し、同時に撮影を行いピークの GSV の比較を行った⁶⁾。その結果、ピークの GSV が高い方が粗骨材部であることが確認できた。また、粗骨材のしきい値の決定方法にはモード法を採用した。モード法とはヒストグラム中の双峰性のある二つの山の間の谷をしきい値とするもので、これによりコンクリートの断面画像からモルタル部と粗骨材部の分離が可能となる。

2.5 等価気泡径の算出方法

VOI は最小要素である voxel で構成されており、voxel は立方体または直方体の形をとっている。そのため、しきい値適用後の空気と判断された voxel の集合を気泡と見なし、その気泡径（等価気泡径）を算出した。計算式を式(1)に示す。D は等価気泡径 (μm)、V は気泡の体積 (μm³)、V_v は 1 voxel の体積 (μm³)、N は気泡を構成している voxel 数をそれぞれ表している。

$$V = V_v \times N$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}} \quad (1)$$

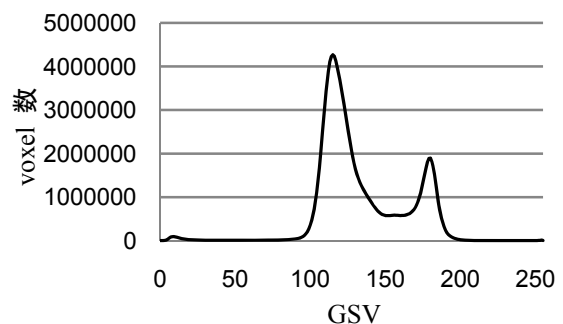


図-1 VOI からのヒストグラム (F1-20-1)

3. 結果および考察

3.1 空隙構造のイメージング

微焦点 X 線 CT で撮影された断面図の例を図-2、図-3 に示す。空気など X 線を吸収しないものは黒の色調で表され、反対に密度が大きい物質など X 線が吸収されやすいものは白の色調で表される。図-4 にしきい値を

適用した後の 3D 気泡の一例を示す。

3.2 等価空気量の評価

微焦点 X 線 CT を用いた画像解析からの空気量（等価空気量）の結果と実験から得られた空気量の比較を行うにあたり、しきい値から得られた粗骨材の割合（粗骨材含有割合）に VOI ごとの差がみられた（図-5）。そこで、粗骨材の影響を除外するために、全体の体積から粗骨材の体積を除き、モルタルとして換算し、モルタル中の等価空気量を算出した（図-6）。そのため、フレッシュ時から得られた空気量も、配合表から粗骨材含有割合を計算し、その体積を除外しモルタルとして空気量を換算した（表-5）。また、画像解析において計算された等価気泡径の内、直径が 1mm 以上のものは、打設時のエントラップトエアとして等価空気量から除外した。エントラップトエアと思われる画像を図-7 に示す。この際、図-7 のようにエントラップトエアの周りに AE が存在した場合、しきい値の適用時に連続した 1 つの気泡と判定される場合がある。その場合は、その AE もエントラップトエアとして除外されている。図-6 から等価空気量はフレッシュ時の値と同傾向を示していることがわかる。

また、すべての試料においてコア直径が 20mm の画像から抽出した VOI が最も等価空気量が少ない結果を表している。これは撮影サンプルの大きさが大きくなると解像度が下がるため、それよりも小さい気泡を検知できていないことが原因として挙げられる⁹⁾。

3.3 等価気泡径の分布

各コア直径から抽出した VOI の等価気泡径分布の一例を図-8、図-9、図-10 に示す。各 VOI の大きさは、（縦横の voxel 数，層数）とすると、以下の通りである。B0-20-1= (600, 393), F1-20-1= (600, 389), F2-20-1= (600, 389), B0-12-1= (600, 365), F1-12-1= (600, 389), F2-12-1= (600, 389), B0-7-1= (600, 389), F1-7-1= (600, 389), F2-7-3= (600, 389)。そのため各 VOI の体積が異なっている。しかしながら、コア直径が 20mm から抽出した VOI はすべて 60-80 μ m、直径が 12mm からの VOI は 20-40 μ m、直径が 7mm からの VOI は 10-20 μ m とコア直径ごとに同範囲で頻度が最大となっていることがわかる。ここで、各試料の最大頻度が同じコア直径でも異なっているのは、それぞれの VOI ごとの粗骨材含有割合が異なっているためである。また頻度が最大となる範囲が異なるのは撮影するコア直径によって、1 pixel の大きさが異なり、voxel の大きさに影響を与えるためである。コア直径が 20mm の VOI からは等価気泡径が 30 μ m 以下のものは検知できないが、等価気泡径が 30 μ m 以下の気

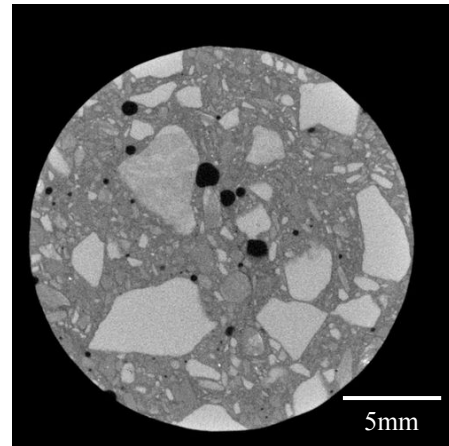


図-2 F1-60P（微焦点 X 線 CT）

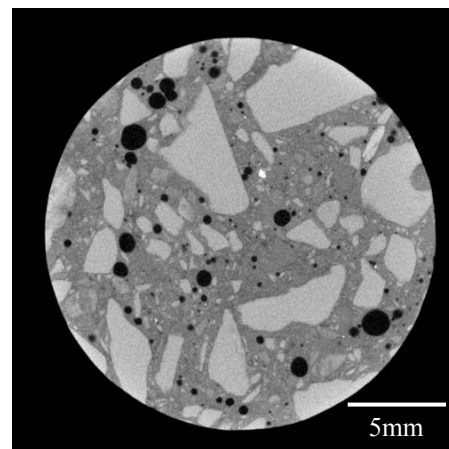


図-3 F2-80P（微焦点 X 線 CT）

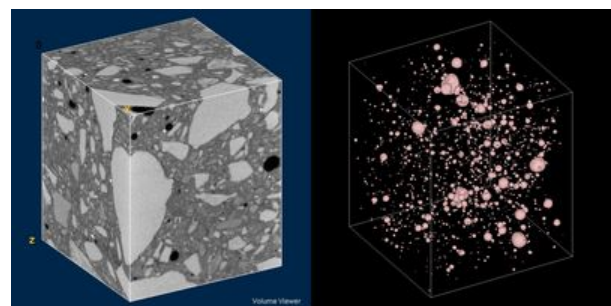


図-4 VOI と 3D 気泡のイメージング (F1-20-1)

表-5 フレッシュ時の空気量

	空気量 (%)	
	コンクリート中	モルタル中
B0-0P	3.3	5.2
F1-60P	1.5	2.3
F2-80P	2.2	3.6

泡が存在していないというわけではない。しかしながら、空気と判断された voxel がすべて気泡であるとは限らず、気泡ではない粗大な空隙構造を捉えていることも推察

される。そのため、着目する範囲に注意した撮影条件を設定する必要がある。また、等価空気量においては、気泡の数に大きな違いがあるが等価空気量にそれほど大きな影響がないことから、微細な気泡径を持つ気泡の数が、等価空気量の変化に与える影響が小さいことも、この頻度からうかがえる(表-6)。また、ここでは微細な気泡径を100 μm 以下の等価気泡径とした。

3.4 空隙率の評価

放射光 X 線 CT における画像解析からの空隙率と水銀圧入法からの空隙率の比較を行った。水銀圧入法の細孔径分布を図-11に、またその比較の結果を表-7に示す。

既往の研究において、水銀圧入法で求めたセメントペースト (CP) の空隙率が画像解析で求めた空隙率より大きい値を示すという報告がある⁷⁾。この理由として、X 線 CT の解像度が 0.5 μm であることから、それより小さい細孔径を検知できないことが考えられる。

本研究では、表-7 から画像解析の結果が、水銀圧入法の結果よりも大きな値を示していることがまず読み取れる。また、図-12に示すように放射光 X 線 CT で撮影された画像に、形状および性質からフライアッシュ粒子と推察される中空の気泡が観察された。この中空のフライアッシュ粒子が存在する場合には、しきい値適用時に空気と判定され、画像解析における空隙率の上昇につながったことが推察される。またその他の理由として、本研究では水銀圧入法による細孔径の測定において、試料のモルタル部から一辺が約 5mm の立方体となるように抽出したサンプルを用いたことと関係がある。放射光 X 線 CT 画像から抽出した VOI は一辺が 200 μm となっており、粒度の大きな細骨材を含んでおらず、この違いが空隙率に影響を与えていると考えた。そこで、表-7にあるように CP 中に対してどのくらい空隙率があるか換算した。水銀圧入法で用いたコアは一辺が 5mm のモルタル部であることから、コンクリート標準示方書を参考にふるいの呼び寸法が 5mm までの粒度はすべて含むことができると仮定した。その質量百分率から細骨材の体積の割合を除外し、CP 中の空隙率を算出した。また、その時のふるいを通る質量百分率は 100% である。放射光 X 線 CT の VOI は一辺が 200 μm であることからふるいの呼び寸法が 150 μm までの粒度はすべて含むことができると仮定して、先程と同様に CP 中の空隙率を算出した。この時のふるいを通る質量百分率は 10% とした。その結果が表-7 の CP 中の空隙率である。

この結果から既往の研究結果と同様に、水銀圧入法の空隙率が放射光 X 線 CT より得られた画像解析の空隙率よりも大きな値を示すことがわかった。

微焦点 X 線 CT から確認できたが、本研究で用いた

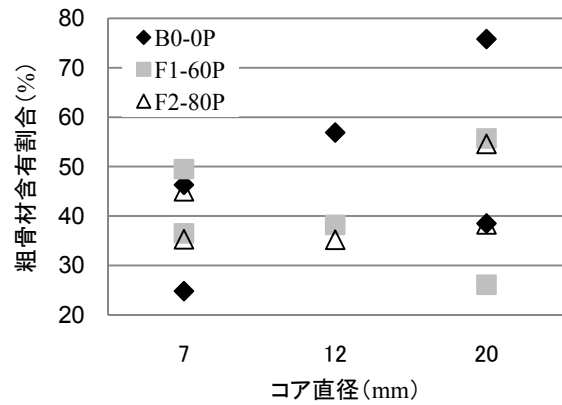


図-5 各コア直径から抽出した VOI ごとの粗骨材含有割合

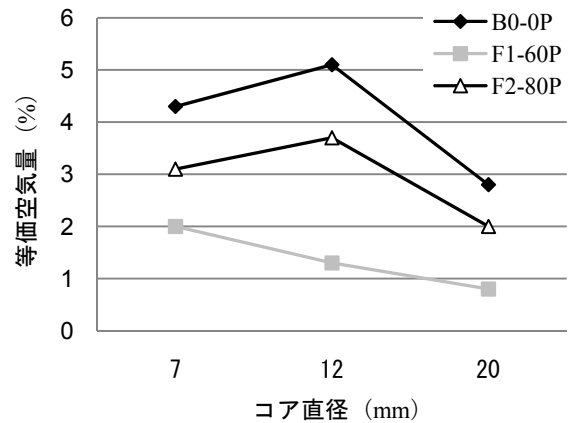


図-6 各コア直径から抽出した VOI の等価空気量

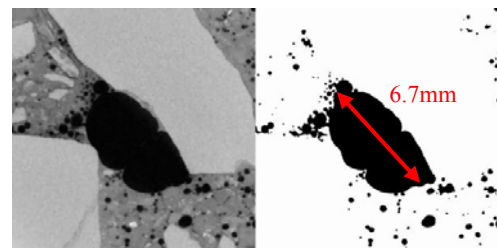


図-7 エントラップトエア (B0-20-2)

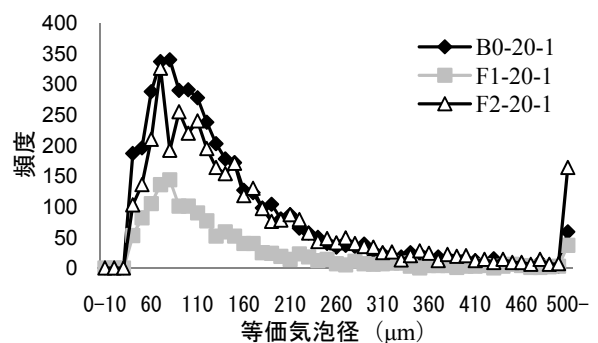


図-8 直径 20mm コアから抽出した VOI の気泡径分布

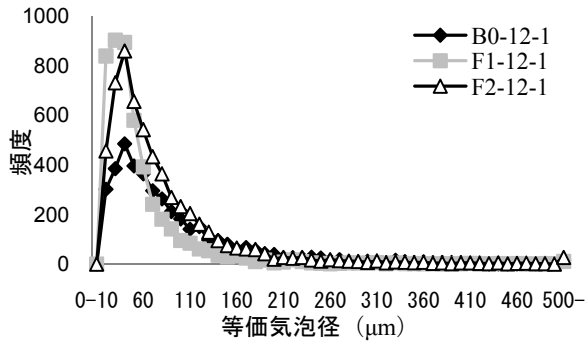


図-9 直径12mm コアから抽出した VOI の気泡径分布

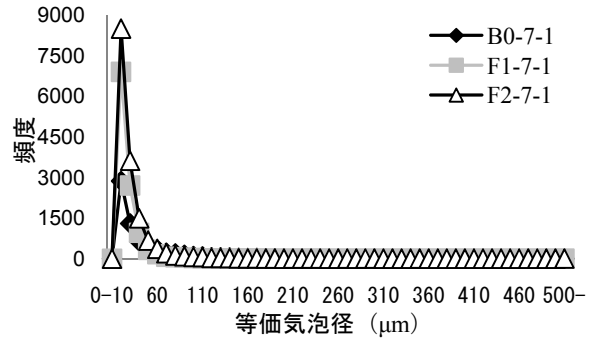


図-10 直径7mm コアから抽出した VOI の気泡径分布

表-6 100μm 以下の気泡径の数が等価空気量に与える影響

	100μm 以下の等価 気泡径の数	全体の気泡数に 占める割合 (%)	100μm 以下の等価 空気量 (%)	等価空気量 (%)
B0-7-1	6156	92.1	0.5	3.5
F1-7-1	11237	99.1	0.2	1.1
F2-7-1	15057	98.0	0.5	3.5

表-7 画像解析と水銀圧入法による空隙率

	モルタル中の空隙率 (%)		CP 中の空隙率 (%)		CP 中の細孔直径が 0.5μm 以上 の水銀圧入法の空隙率 (%)
	水銀圧入法	画像解析	水銀圧入法	画像解析	
F1-60P	16.5	21.8	33.1	24.0	8.7
F2-80P	17.9	19.0	31.2	20.4	8.2

表-8 等価空気量に対する等価気泡径の割合 (%)

	B0-7	B0-12	B0-20	F1-7	F1-12	F1-20	F2-7	F2-12	F2-20
0-300μm	55.7	37.0	33.5	31.7	33.6	16.9	43.0	31.5	16.9
300-600μm	33.1	36.6	39.8	20.7	44.2	38.9	38.9	37.6	34.6
600-1000μm	11.2	26.4	26.7	47.6	22.2	44.2	18.1	30.9	48.5

コアサンプルには AE 減水剤が用いられていることから、内部に独立した AE が存在している。その AE を水銀圧入法で捉えられているのかを考察した。放射光 X 線 CT の 1voxel は一辺が 0.5μm であることから 0.5μm 未満の細孔径は検知できず、水銀圧入法において細孔径が 0.5μm までの空隙率を計算したのが、表-7 の CP 中の細孔直径が 0.5μm 以上の水銀圧入法の空隙率である。この結果から、CP 中の細孔直径が 0.5μm 以上の水銀圧入法の空隙率が、画像解析による空隙率と比べ小さい値となったのは、内部の独立した AE に水銀が充填されていない AE も存在することが考えられる。また、内部の独立した AE に水銀が充填された場合でも、インクボトル効果によって 0.5μm 未満の細孔径として計測されたことも考えられる。このことから、水銀圧入法では所定の範囲の全ての AE まで測定するのは困難であると考えられる。

3.5 実構造物コンクリートのイメージングにおけるコア直径の影響

微焦点 X 線 CT でのコンクリートのイメージングにあたって、コア直径の考察を行った。表-8 に画像解析から得られた等価空気量に対しての、等価気泡径の範囲とその割合を示した。

表-8 からコア直径が 7mm から抽出した VOI において等価空気量は、気泡径の小さい範囲 (0-300μm) で多く影響を受けている傾向を示している。この理由にまず、解像度が上がることで、より細かい等価気泡を検知することが考えられる。また、抽出範囲がせまいことから頻度が少ない比較的大きい気泡径 (600-1000μm) の VOI 中での有無が等価空気量に影響を与えたことも推察される。

コア直径が 12mm と 20mm から抽出した VOI において、F1-60P と F2-80P では、先程と同様に、頻度が少ない大

きい気泡径 (600-1000 μm) の範囲で割合に差がみられた。このように、コア直径が 7mm および 12mm において頻度が少ない比較的大きい気泡径が、等価空気量の割合に及ぼす影響が大きいと考えられる。

4. 結論

本研究では、実構造物コンクリートから採取したコアサンプルに対して、微焦点 X 線 CT を用いることで、コアサンプル内の空気量および気泡分布の観察を行った。また、水銀圧入法と放射光 X 線 CT を用いて、空隙率の評価を行い、空隙構造のイメージングを行った。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 微焦点 X 線 CT を用いた画像解析において、しきい値を用いて粗骨材を同定し、分離することで、画像解析によるコンクリート内部の空気量がフレッシュ時に得られた値と同傾向になることを示した。
- (2) フライアッシュをセメント代替で使用したコンクリートの空気量は、フレッシュ時の測定結果と同様に、イメージングによる画像解析からも最小の空気量であった。また、放射光 X 線 CT による画像解析において、中空のフライアッシュ粒子の存在が確認され、その内部気泡が等価空気量にカウントされた可能性が推察された。
- (3) 水銀圧入法から計算した空隙率は放射光 X 線 CT から求めた空隙率よりも大きな値を示した。また、前者において所定の範囲の全ての AE (気泡) までカウントしていないことが推察された。

謝辞 本研究は、科学研究費補助金 (挑戦的萌芽研究, 課題番号: 21656109) を受けて実施した研究の一部です。実構造物コンクリートのコア採取に際しては、大城武先生 (琉球大学名誉教授), 山田義智先生 (琉球大学教授) のご協力を賜りました。また、微焦点 X 線 CT 装置の利用にあたり、金子勝比古先生 (北海道大学教授) による指導ならびに助言を賜りました。また、放射光 X 線 CT 撮影に関して、人見尚氏((株)大林組技術研究所)にご協力を賜りました。ここに付記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 人見尚: 高分解能 X 線 CT を用いたコンクリートの微細構造観察に関する研究, コンクリート工学, Vol.47, No.4, pp.42-47, 2009
- 2) 天明敏行: X 線 CT 法のコンクリート診断への適用に関する基礎研究, 学位論文, 熊本大学, 2009
- 3) 大城良信, 仲本文範, 山田義智, 大城武: 海洋環境下における石炭灰を使用した RC 構造物の施工報告, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1,

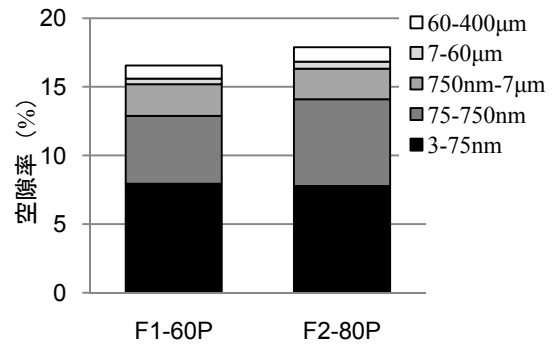


図-11 水銀圧入試験の細孔径分布

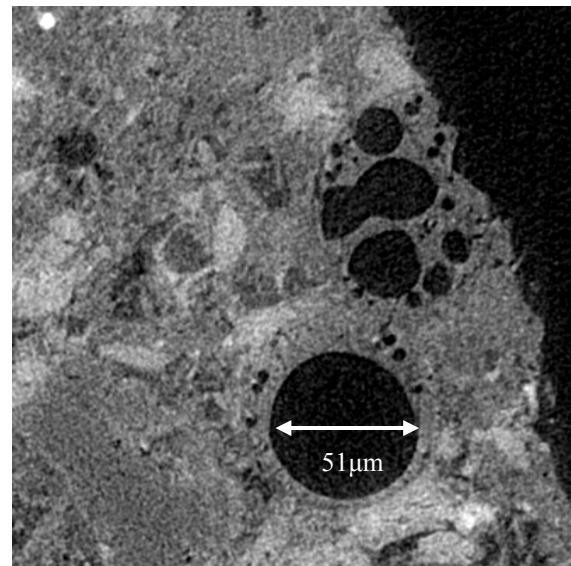


図-12 フライアッシュ粒子 (放射光 X 線 CT)

- pp.789-794, 2002
- 4) Promentilla M.A.B., Sugiyama T., Hitomi T., Takeda N.: Characterizing the 3D Pore Structure of Hardened Cement Paste with Synchrotron Microtomography, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.6, No.2, pp.273-286, 2008
- 5) Promentilla M.A.B., Sugiyama T.: X-ray Microtomography of Mortars Exposed to Freezing - Thawing Action, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.8, No.2, pp.97-111, 2010
- 6) Ikegami H., Promentilla M.A.B., Sugiyama T.: Measurement of air voids in fly ash concrete using microfocus X-ray CT, Proceedings of the 2nd International Conference on Durability of Concretes Structures, pp.97-106, 2010
- 7) 増田亜由子, Promentilla M.A.B., 杉山隆文: 放射光 X 線 CT によるセメントペーストの材齢経過に伴う微細構造変化の観察, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.539-544, 2010