

論文 X線CT法によるコンクリート供試体の非破壊検査

天明 敏行^{*1}・堤 知明^{*2}・村上 祐治^{*3}・尾原 祐三^{*4}

要旨: X線CT法は物体の内部を三次元で確認できる非破壊検査方法であるが、密度の分布に関する情報を得ることができる手法でもある。コンクリートに対するX線CT法の適用性の把握を目的として、配合の異なるコンクリート供試体のX線CT撮影を行い、X線吸収率を表わすCT値を定量的に解析した。その結果、粗骨材の空間分布やモルタル部のCT値の鉛直分布から材料分離の状況を確認することができた。さらに、モルタル部の平均CT値と密度は相関が高く、モルタル部の平均CT値を求めることによって水セメント比の相違を識別できることを明らかにした。

キーワード: X線CT法, CT値, 密度, 材料分離, 水セメント比

1. 緒言

X線投過撮影法は、内部の様子をほぼ実体に近い状態で確認できる非破壊試験方法であり、医療や工業の分野で幅広く用いられている。コンクリートを対象とした場合には、鉄筋や配管等の埋設物および空洞やひび割れ等の変状を検出することができる。さらに、マイクロクラック発生状態から劣化の程度を定量的に検査する方法などが研究されている¹⁾。

被写体を透過したX線をそのまま透過像として結像するX線透過撮影法に対して、X線CT法はX線を検出器により信号に変換し、コンピュータにより画像再構成を行うことによって、任意断面の画像表示が可能となる。コンクリートに適用した場合には、柱などについて、配筋、空洞、ひび割れなどの位置や形状の立体表示などが期待できる。

X線CT法ではX線吸収率の相違を識別して物体の立体形状を表示することが可能であるが、一般に、X線吸収率は物体の密度に比例することから、密度分布に関する情報からコンクリート自体の材料の性状やその構成を

把握できる可能性が考えられる。

コンクリートの診断にあたっては、コンクリートの材料の性状やその構成がどのようなものであるかを把握することは構造物の管理上重要である。本研究では、水セメント比や細骨材率の異なるコンクリート供試体を作製し、X線CT法を適用して撮影断面のX線吸収率を表わすCT値を定量的に解析する方法を検討した。つぎに、その方法を用いて粗骨材、モルタルおよび空隙の鉛直分布や配合の違いによるモルタルの性状の相違を検討した。

2. 使用材料および配合

2.1 使用材料

コンクリートの使用材料を表-1に示す。

表-1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント：密度 3.16g/cm ³
水	つくば市水道水
粗骨材	砂岩岩塊混在岩：表乾密度 2.68 g/cm ³
細骨材	砂岩岩塊混在岩：表乾密度 2.65 g/cm ³
混和剤	AE 減水剤, 空気量調整剤

*1 (株)間組 土木事業総本部ダム統括部 (正会員)

*2 東京電力(株) 電力技術研究所土木グループ 工博 (正会員)

*3 (株)間組 技術研究所技術研究部土木研究室 工博 (正会員)

*4 熊本大学教授 工学部環境システム工学科 工博

2.2 配合と試験ケース

コンクリートの配合は、粗骨材の最大寸法 40mm, 目標空気量 4.5%, スランプ 8cm, 細骨材率 40%として、水セメント比 45, 55, 65, 75%の4ケースとした。さらに、水セメント比 55%の配合において細骨材率を 38, 42, 44%と変化させて3ケース実施し、計7ケースについて実施した。各ケースの示方配合を表-2に示す。

3. X線CT法

3.1 撮影装置および撮影方法

X線CTスキャナは、X線管電圧 400kV, 管電流 2A, スライス厚 2mm, 投影領域 15cm×15cmの条件で撮影を実施した。X線管と176個の検出器は同一水平面上に固定されており、上下方向に移動する。一方、供試体はターンテーブルの上に設置され、必要な併進と回転を行う。コンクリート供試体はφ

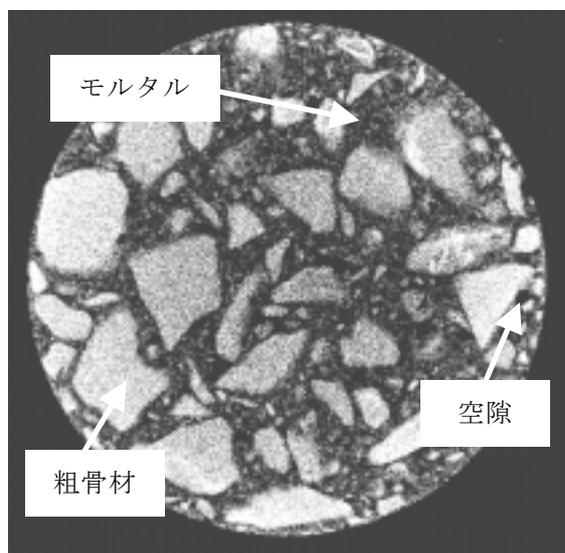


写真-1 撮影画像の一例

125mm×250mmであり、撮影は20mmごとに12断面を行った。

3.2 CT値

X線CTスキャナにより得られた撮影画像の一例を写真-1に示す。画像は15cm×15cmの投影領域に対して512×512のピクセルで構成され、各ピクセルには次式で定義されるCT値が与えられる。

$$CT値 = \frac{\mu_t - \mu_w}{\mu_w} K \quad (1)$$

ここに、 μ_t は求めるピクセルのX線吸収係数、 μ_w は水のX線吸収係数、 K は定数である。 $K=1000$ とすると、空気のX線吸収係数は0であるから、CT値は-1000となる。また、水のCT値は0となる。X線吸収係数は、一般に物体の密度に比例するため、CT値も密度に比例した値と考えることができる。

写真-1において、中心に円形の白い部分が

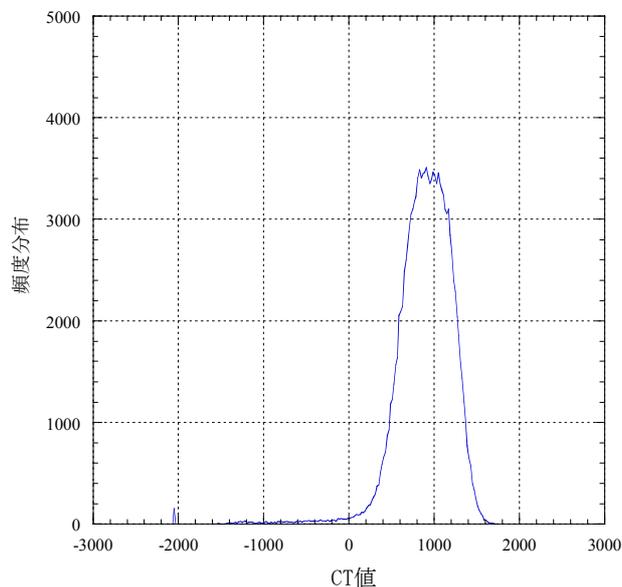


図-1 CT値の頻度分布

表-2 示方配合

粗骨材の最大寸法 Gmax (mm)	スランプ SL (cm)	水セメント比 W/C (%)	空気量 air (%)	細骨材率 s/a (%)	AE 減水剤 A1 (%)	空気量 調整剤 A2 (A)	単位量(kg/m ³)						
							水 W	セメント (普通) C	細骨材 S	粗骨材		AE 減水剤 A1	空気量 調整剤 A2
										40~20mm G3	20~5mm G4		
40	8	45	4.5	40	0.25	5	178	396	691	524	524	0.989	0.049
40	8	55	4.5	38	0.25	5	170	309	692	571	571	0.773	0.039
40	8	55	4.5	40	0.25	5	172	313	725	550	550	0.782	0.039
40	8	55	4.5	42	0.25	5	176	320	754	527	527	0.800	0.040
40	8	55	4.5	44	0.25	5	180	327	783	504	504	0.818	0.041
40	8	65	4.5	40	0.25	6	172	265	741	562	562	0.662	0.040
40	8	75	4.5	40	0.25	7	177	236	746	565	565	0.590	0.041

見られるが、これが供試体断面であり、その周りの黒い部分は空気である。また、内部の白い部分が骨材であり、灰色部分がモルタル、さらに黒い部分が空隙である。CT値が高いほど白く表示され、密度が大きいことを示している。

写真-1 に示す画像のCT値の頻度分布を図-1 に示す。横軸にCT値、縦軸に頻度を示している。頻度分布の総面積は供試体の断面積と対応している。

4. 粗骨材と空隙の空間分布およびモルタル部CT値の鉛直分布

4.1 粗骨材部とモルタル部の二値化

粗骨材の密度はモルタルよりも大きく、図-1 において、CT値の高い方に粗骨材が分布していると考えられる。そこで、CT値の頻度分布の総面積に対して粗骨材の面積分をCT値の高い方から取り除いた残りがモルタルと空隙の占める頻度分布と考え、CT値の頻度分布を図-2 に示すように区分して検討することとした。ここで、供試体の断面積に対する粗骨材の割合を粗骨材率と定義する。なお、CT値の定義よりCT値が0以下のものを便宜上空隙とみなし、供試体の断面積に対する比を空隙率と定義した。

粗骨材率を求めるために、原画像において粗骨材とそれ以外のモルタルおよび空隙の二値化を実施した。二値化の方法はプリントアウトした画像を手書でトレースした後にスキャナでコンピュータに取り込み、さらにこの画像を処理して境界線に囲まれた粗骨材部分を黒く塗りつぶすことにより、二値化画像とした。得られた二値化画像において、供試体全断面積に対する黒い部分の比が粗骨材率である。また、モルタルの総面積に対する割合は全体から粗骨材率と空隙率を引いたもので、これをモルタル率と定義した。

さらに、図-2 のように区分された粗骨材、モルタルのCT値の平均値を当該断面におけるそれぞれのCT値とした。

4.2 粗骨材の空間分布

求めた粗骨材率の鉛直分布を図-3 に示す。粗骨材率は全ての配合において供試体の上部で小さく、下部で大きいという傾向であった。粗骨材については分離の傾向がうかがえる。供試体の作製には内部振動機を用いたため、この影響も考えられる。

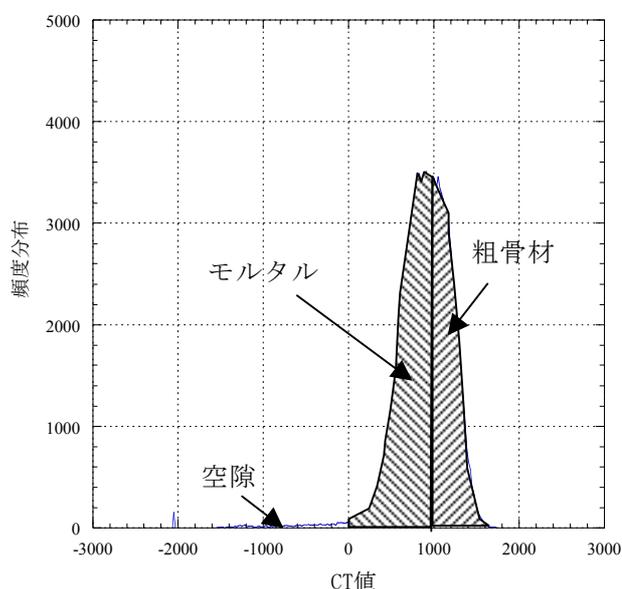


図-2 CT値の頻度分布の区分

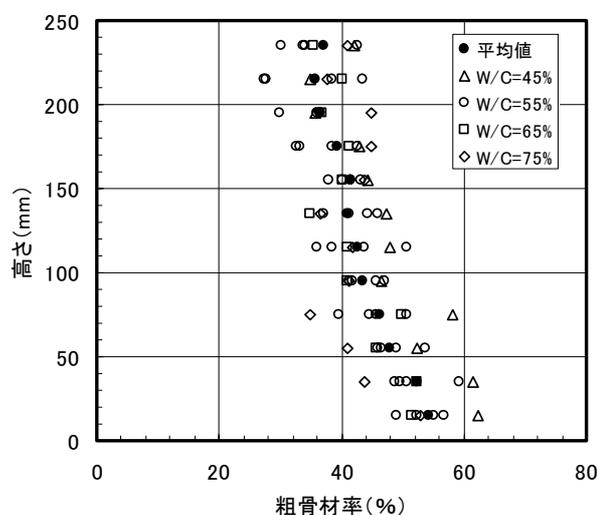


図-3 粗骨材率の鉛直分布

示方配合より求まる骨材率は、W/C=55%、s/a=40%の配合で41%であり、絶対量の評価としてはほぼ妥当に評価できたと考えられる。

次に、粗骨材のCT値の鉛直分布を図-4に示す。粗骨材のCT値の空間分布に顕著な傾向はなく、一様に分布していた。粗骨材の表乾密度は 2.68 g/cm^3 であり、CT値では1090~1150程度の範囲であることがわかる。

密度 1 g/cm^3 の差をCT値では1000と定義していることから、CT値の60幅は 0.06 g/cm^3 程度の幅である。

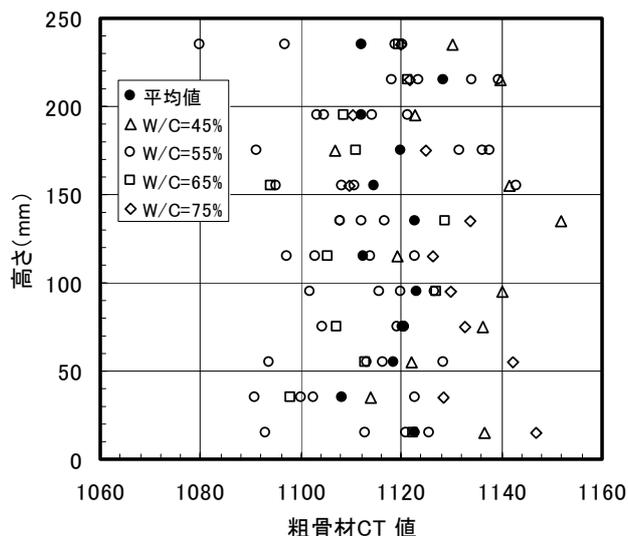


図-4 粗骨材のCT値の鉛直分布

4.3 空隙の空間分布

空隙率の空間分布を図-5に示す。空隙の分布については鉛直方向に一様であり、配合による相違も認められなかった。空隙の分布の偏りは水の移動などを評価すると考えられるが、ブリージングの影響は直接的に評価できなかったと思われる。

空隙率は、示方配合上の空気量と相関があると考えられるが、コンクリートのフレッシュ状態での空気量は4.5%程度であり、本手法では空隙を小さく評価していることがわかる。これは、CT値が0以下のものを空隙とみなしていることが原因であると考えられる。空気量の絶対量の評価としては、別途キャリブレーションなどが必要となると思われる。

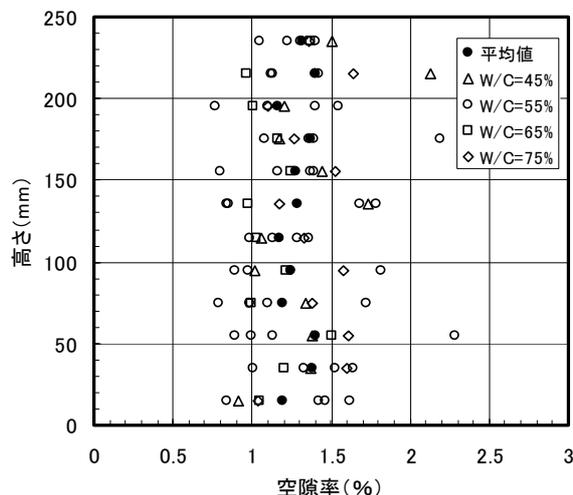


図-5 空隙の空間分布

4.4 モルタル部のCT値の鉛直分布

モルタル部CT値の鉛直分布を図-6に示す。モルタルCT値の鉛直方向の偏りはなく、材料分離は発生していないと思われる。

また、配合別にみると、水セメント比の大きい配合のCT値が小さく、水セメント比の小さい配合のCT値が大きいことがわかる。水セメント比の小さい配合のモルタルは、単位容積質量が大きく、CT値と密度が関係あることがわかる。

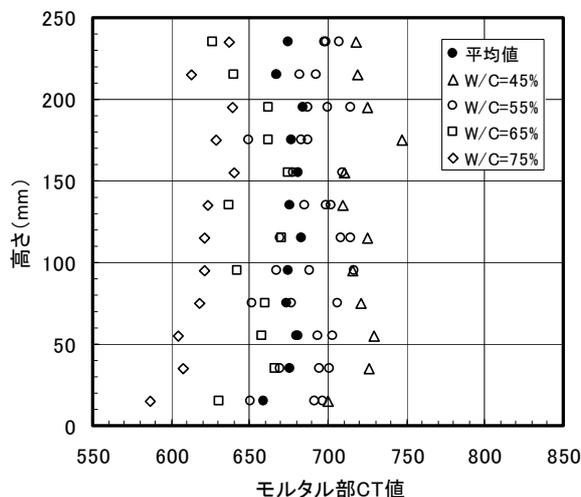


図-6 モルタル部CT値の鉛直分布

5. 平均CT値と密度

5.1 各材料の平均CT値と密度

一般に、X線吸収率は物体の密度と比例関係にある。そこで、粗骨材、モルタル、コンクリートの密度とCT値を検討した。

粗骨材の密度は骨材試験より得られた表乾密度 2.68g/cm^3 とした。モルタルの密度は、コンクリート供試体作製時に 5mm ふるいでウェットスクリーニングした材料でモルタル供試体を作製し、この供試体の撮影時の単位容積質量とした。コンクリートの密度は材齢28日における圧縮強度試験時の単位容積質量とした。

また、粗骨材、モルタル、コンクリートの各材料のCT値は、各撮影断面における各材料のCT値から全断面の平均値を求め、これを各材料の平均CT値として評価することとした。さらに、CT値の定義より、水の密度とCT値は 1g/cm^3 と 0 を、空気の密度をCT値は 0g/cm^3 と -1000 をプロットしている。

粗骨材、モルタルおよびこれらを複合して使用しているコンクリートのCT値と密度の関係を図-7に示す。水と空気から定義したCT値の直線上にはプロットされていないため、CT値より密度の絶対評価を行うには、キャリブレーションが必要であると思われる。た

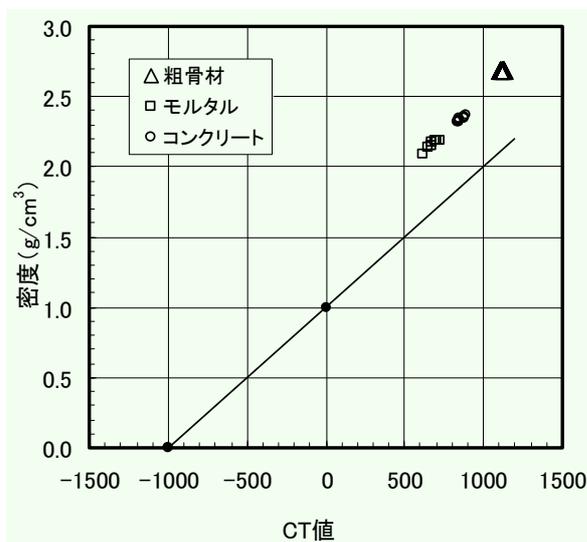


図-7 平均CT値と密度

だし、粗骨材、モルタル、コンクリートに関しては、それぞれの平均CT値は密度と相関が高いことがわかる。

モルタルやコンクリートのCT値と密度に幅が生じているのは配合の相違によるためであり、これらを詳細に検討するために、コンクリートとモルタル部のそれぞれに分けて考察する。

5.2 コンクリートの平均CT値と密度

コンクリートの平均CT値と密度の関係を図-8に示す。

コンクリートの平均CT値と密度は高い相関があることがわかる。細骨材率が40%と一定で水セメント比が45%から75%へと変化するとコンクリートの密度は約 $2.35\sim 2.32\text{g/cm}^3$ へ2%程度変化しており、2%程度の密度の差を識別できることがわかった。

コンクリートの密度の変化には水セメント比によるものと細骨材率によるものがあるが、細骨材率が40%と一定で水セメント比が45%～75%と変化した場合と水セメント比が55%と一定で細骨材率が38～44%と6%変化した時の密度の変化量は同程度である。よって、コンクリートの密度から水セメント比の相違を識別することは困難であると思われる。

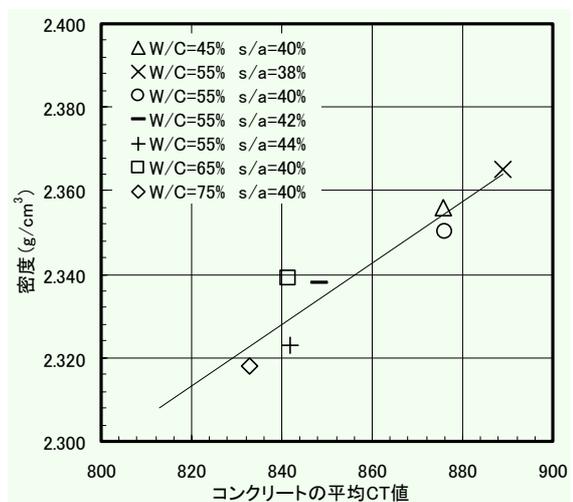


図-8 コンクリートの平均CT値と密度

5.3 モルタル部の平均CT値と密度

モルタル部の平均CT値と密度の関係を図-9に示す。モルタル部の平均CT値と密度はコンクリートの場合と同様に高い相関があることがわかる。細骨材率が40%と一定で水セメント比が45%~75%程度変化することによって、モルタルの密度は約2.18~2.09 g/cm³へと0.09 g/cm³, 4%程度変化しており、CT値では約100の幅で変化していることがわかる。配合の相違によるモルタルの密度の変化量はコンクリートと比較すると約2倍であり、コンクリートよりも配合の相違に敏感であることがわかる。

また、同一水セメント比において細骨材率が変化した場合のCT値の変化を調べると、水セメント比55%の配合において、細骨材率が38%~44%と変化した場合のモルタルの密度の変化量はコンクリートの場合よりも小さく、約1%である。コンクリートの細骨材率が大きくなると同様のワーカビリティを得るために単位水量が増加するので、同一水セメント比ではセメントペーストの量が増加し、骨材量が減少する。このため、コンクリートの密度は減少する。一方、モルタル部では同一水セメント比で細骨材率が増加した場合に、セメントペーストは増加するが、同時に細骨材量も増加している。このため、同一水セメント比で細骨材率が変化した場合、モルタル部の密度の変化量はコンクリートよりも小さくなると考えられる。

したがって、細骨材率が6%程度変化した場合でもモルタル部のCT値に与える影響としては細骨材率の相違によるものは少なく、モルタル部のCT値の相違は主として水セメント比の相違によるものと考えられる。すなわち、モルタル部のCT値からコンクリートの水セメント比の相違を識別することが可能であると思われる。さらに、図-9のようなコンクリートのモルタル部の平均CT値と密度の関係が既知であれば、X線CT法の適

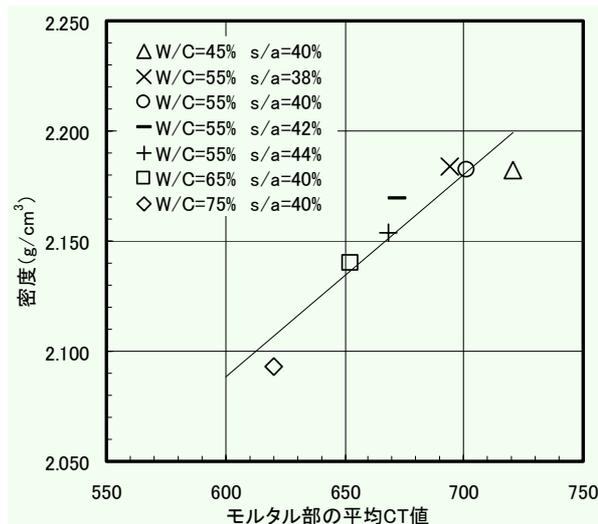


図-9 モルタル部平均CT値と密度

用によってコンクリートの水セメント比の推定を行える可能性が考えられる。

6. 結言

配合の異なるコンクリート供試体にX線CT法を適用し、粗骨材や空隙の空間分布やモルタル部CT値の鉛直分布を検討し、今回作製したコンクリート供試体では粗骨材のみに分離傾向が認められた。

また、コンクリートの平均CT値、モルタル部の平均CT値と密度の関係より、コンクリートでは2%程度、モルタルでは4%程度の密度の範囲内で平均CT値との間に高い相関が認められた。そして、モルタル部の平均CT値と密度の関係を用いることにより、細骨材率の相違が6%程度であれば、コンクリートの水セメント比の相違を識別することが可能であると思われる。

【参考文献】

- 1) 大塚宏司, 武田三弘: コンクリート構造物の新しい非破壊検査技術-X線造影法-, コンクリート工学, Vol.40, No.11, pp13-18, 2002.11