

論文 X 線 CT 法による超硬練りコンクリートの骨材分布と締固め特性

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

要旨：RCD 用コンクリートなどの超硬練りコンクリートは、ブルドーザで敷均しされ、振動ローラーで締固められる。その際、材料分離などが懸念され、ブルドーザによる敷均しが重要となってくる。本論文では、RCD 工法の試験施工を行い、試験施工ヤードより採取したコアを用いて、医療分野でその有用性が示されている X 線 CT 法により粗骨材の分布や締固め特性を検討した。その結果、同一リフト内の上下方向の粗骨材はほぼ均等に分布して施工されていることが明らかになった。また、空隙の平均は約 3 % であり、上部の空隙がわずかに多く、下部で小さい傾向を示すことが確認された。

キーワード：X 線 CT 法、材料分離、粗骨材分布、空隙分布

1. 緒言

RCD 用コンクリートなどの超硬練りコンクリートは、振動などでエネルギーが与えられることにより充填率が上昇し、強度も増加する。従来工法におけるダムコンクリートと比較して粘性が少なく、運搬手段としてダンプトラックを用いることから材料分離を生じないように十分配慮することが必要である¹⁾。特に粗骨材の最大寸法 150mm の配合を採用した RCD 工法では、材料分離の防止に対して骨材の製造管理や施工管理を慎重に行うことが重要である。このため、ブルドーザによる敷均し時には、運搬中やダンプトラックからの放出時に分離したコンクリートをかき混ぜ、均質な状態にするなど入念な施工が行われている²⁾。

一方、コンクリート打込みにおいて材料分離をおこさずに締固めが十分に実施されているかを確認するためにはコアの観察によるものが一般的である。外観のみならず、コア内部の物性などを非破壊で評価する技術として X 線を用いたコンピューター断層写真法 (Computed

Tomography) がある。その定義は「所要の断面を横断する放射線の吸収に関する情報を放射能分布に関する多くの情報を記憶・蓄積し、コンピューターにより再構成し断面画像を得る手法」³⁾ であり、今日その有用性が最も示されているのが医療分野で知られる X 線 CT スキャナーである。近年、医療用装置と比較して X 線管の出力が大きく、工学材料を非破壊かつ 3 次元的に評価可能な産業用の装置が開発されており、地盤工学や岩盤工学において、物性⁴⁾ あるいは破壊現象⁵⁾などを定量的に評価する研究が行われている。

本研究は、単位結合材量が 100kg/m³ という貧配合の RCD 用コンクリートを使用し、リフト厚さ 1m で RCD 工法の試験施工を実施した後に φ200mm でコアリングした円柱供試体に対して X 線 CT 法を適用し、RCD 用コンクリートの粗骨材の空間分布を非破壊的に調査し、この結果を用いて材料分離の状況を検討するとともに、深さ方向の空隙分布特性を検討したものである。

*1 (株)間組 土木本部ダム統括部 (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

表-1 骨材の物性値

項目	表乾密度		吸水率	単位体積質量	実積率	粗粒率
試験方法	JISA1109, 1110		JISA1109, 1110	JISA1104 (加振法)	JISA1104 (加振法)	JISA1102
単位	(g/cm ³)		(%)	(t/m ³)	(%)	
粗骨材	G1	150-80mm	2.68	0.15	1.47	55.1
	G2	80-40mm	2.68	0.33	1.57	58.7
	G3	40-20mm	2.68	0.56	1.57	58.9
	G4	20-5mm	2.67	0.44	1.53	57.5
	混合	150-5mm	—	—	(1.85)	(69.7)
細骨材	S	5-0mm	2.65	1.47	1.69 (1.81)	64.7 (69.4)
						2.63

表-2 示方配合表

粗骨材の最大寸法 (mm)	目標 VC 値 (秒)	水結合 材比 (%)	細骨材 率 (%)	単位量 (kg/m ³)								
				水 W	セメント C	フライ ッシュ F	細骨 材 S 0 - 5mm	粗骨材				AE 減水剤 Ad.
								G1 150 - 80mm	G2 80 - 40mm	G3 40 - 20mm	G4 20 - 5mm	
Gmax	15	95	32	95	70	30	724	389	389	389	388	(C+F) × 0.25%
150												

2. 使用材料、配合および施工仕様

RCD 用コンクリートの結合材は中庸熱セメント（密度 3.21g/cm³）とフライアッシュ（密度 2.14 g/cm³）であり、フライアッシュの置換率は 30%である。骨材は砂岩岩塊混在岩を使用しており、最大粒径が 150mm、4 分級である。骨材の物性を表-1 に示す。細骨材中の 0.15mm 以下の微粒分量は 7~9%である。

試験施工を実施した RCD 用コンクリートの配合を表-2 に示す。単位結合材量は 100kg/m³ と国内の RCD 用コンクリートとしては極めて少ない配合である。

敷均し、締固めに用いた機械は、15t 級ブルドーザおよび起振力 23t の振動ローラ（重量 10t）である。1 リフトの厚さは 1m で、敷均しは 5 層撒出し、振動ローラによる転圧回数は 16 回と 12 回の 2 ケースを実施した。

3. 撮影装置および撮影方法

X 線 CT スキャナーは、X 線管電圧 400kV、管電流 2A、スライス厚 2mm のものを用いた。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。X 線 CT のシステム構成を図-1 に示す。

ボーリングしたコア供試体は $\phi 200\text{mm} \times 1000\text{mm}$ であり、転圧回数 16 回の供試体 A および 12 回の供試体 B をそれぞれ長さ 500mm に切断し、撮影はそれぞれ 20mm ごとに行った。撮影断面は各供試体とも合計 50 断面である。

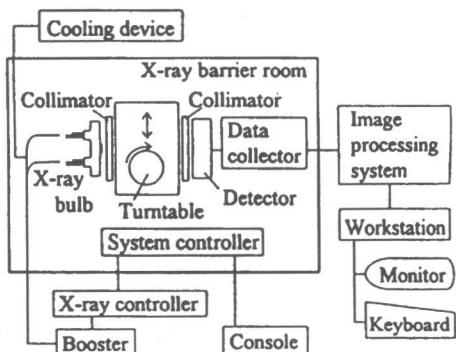


図-1 X 線 CT のシステム構成

4. RCD 用コンクリートの特性評価

4.1 CT 値

X 線 CT スキャナーにより得られた撮影画像は 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。

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

ここに μ_t は求める点の 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。

撮影画像の一例を図-2 に示す。中心に円形の白い部分が見られるが、これが試料断面であり、その周りの黒い部分は空気である。また、試料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。

4.2 粗骨材部とモルタル部の二値化

図-2 に示す画像の CT 値の頻度分布を図-3 に示す。横軸に CT 値、縦軸に頻度を示している。

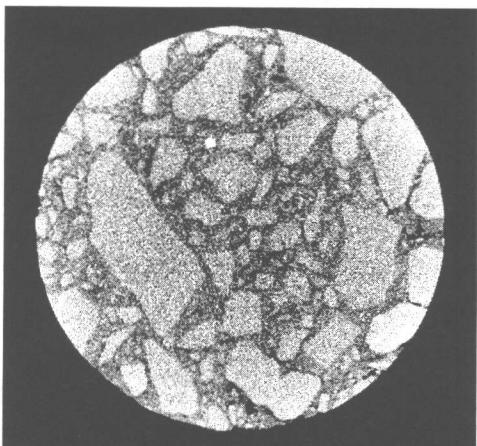


図-2 撮影画像の一例

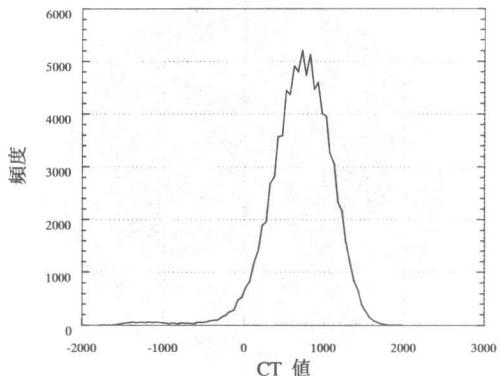


図-3 CT 値の頻度分布

図-3 は正規分布に近く、コンクリートを構成する材料毎の特徴がない。全断面においてこのような傾向であったため、元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試みた。元画像において粗骨材とモルタル境界部が画像処理ソフトにより処理できるほど鮮明でないと判断されたため、今回は手書きによる二値化を行った。

まず、図-2 に示す CT 画像を市販の画像処理ソフトにより粗骨材とそれ以外の部分の境界線がより明瞭になるように画像処理し、その画像をプリントアウトする。プリントアウトした画像をトレーシングペーパーと重ね、境界線をマジックでトレーシングペーパー上に描く。次にトレーシングペーパーに描かれた画像をスキ



図-4 手動二値化のためのスキャン画像



図-5 手動二値化画像

ヤナーでコンピューターに取り込み、図-4に示すようなスキャン画像とする。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塗りつぶすことにより、図-5に示す二値化画像が得られる。

4.3 粗骨材の分布特性

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を粗骨材が占める割合を示すものと考え、それらの比を粗骨材率 Gr と定義する。

各供試体 A, B における 1 リフト内の深さ方向と粗骨材率 Gr の関係を図-6, 7 に示す。各供試体の粗骨材率 Gr の分布をみると、試料 B において上部の粗骨材率が下部より若干小さい傾向が認められたものの、全体的にはばらつきの範囲内であり、ほぼ一定の値であるといえる。このことは、ブルドーザによる敷均しや振動ローラによる転圧により粗骨材が分離・集中することなく満遍なく分布して施工されていることを示唆していると考えられる。

示方配合より求まる理論上の容積率は 59% であり、供試体 A および B の粗骨材率 Gr の平均値はそれぞれ 56% および 55% であった。2 次元断面ではあるが、理論容積率の 93~95% 程度の値を示しており、2 次元断面での評価の妥当性を示していると考えられる。

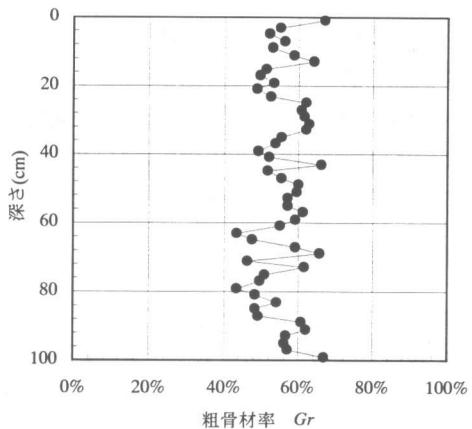


図-6 粗骨材率 Gr の分布（供試体 A）

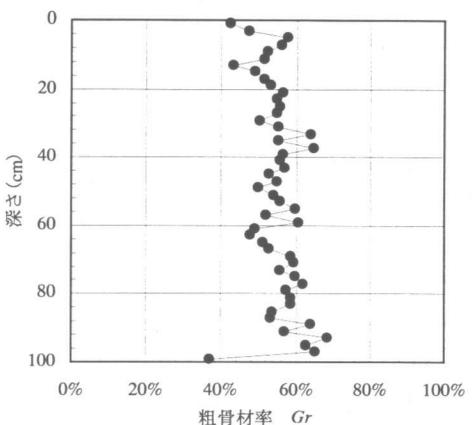


図-7 粗骨材率 Gr の分布（供試体 B）

4.4 粗骨材の CT 値

粗骨材の単位体積質量はモルタルのそれに比較して大きいので、CT 値も大きくなる。すなわち、図-3 に示す CT 値の頻度分布においては CT 値の高い部分に粗骨材の CT 値が分布していることになる。そこで、CT 値の頻度分布の総面積に対する粗骨材率 Gr 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-8 に示すように区分して検討することとした。

各供試体 A, B について各断面における粗骨材の平均 CT 値を M_{iGr} とし、 M_{iGr} の深さ方向の分布を図-9, 10 に示す。各供試体全体における CT 値の平均値を M_{Gr} とすると、 M_{Gr} は供試

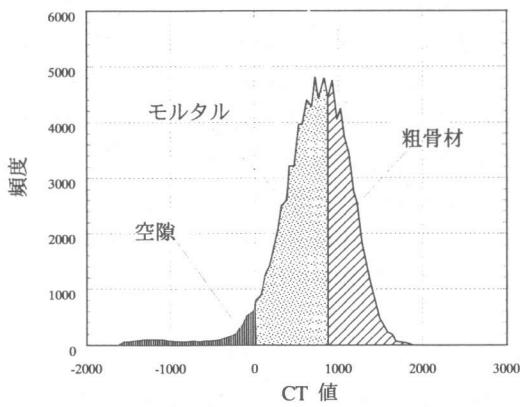


図-8 CT値の頻度分布における粗骨材、
モルタルおよび空隙の定義

体 A で 977, 供試体 B で 962 であり, また, 断面ごとの M_{iGr} は一様にばらついている。これらのばらつきの要因は骨材の分布の違いや X 線 CT スキャナーによる測定誤差などが考えられる。そこで本論文では, 用いた骨材が一種類であることを考慮し, 便宜上各断面における M_{iGr} をそれらの平均値 M_{iGr} と仮定して各断面におけるモルタルや空隙の空間分布を評価することとした。このため, 図-11 に示すような各断面の CT 値の頻度分布を $(M_{iGr} - M_{iGr})$ だけ移動させた修正頻度分布を用いて分析することとした。

4.5 空隙の分布特性

各断面の CT 値の修正頻度分布において, 粗骨材を表す領域を除いたピクセルがモルタルと空隙を表していると考えられる。CT 値の定義より, CT 値が 0 以下のピクセルは水よりも密度が小さいことを表しているので, 便宜上 0 以下のピクセルを空隙, それ以外のピクセルをモルタルとみなして空隙が頻度分布全体の面積に占める割合, すなわち空隙率 P_r を算出した。

各供試体 A, B について 1 リフト内深さ方向の空隙率 P_r の分布を図-12, 13 に示す。この結果によると, 空隙が占める面積率は転圧回数の差に関わらず 2~4%, 平均で 3%程度であることがわかる。締固めたコンクリートの見かけ

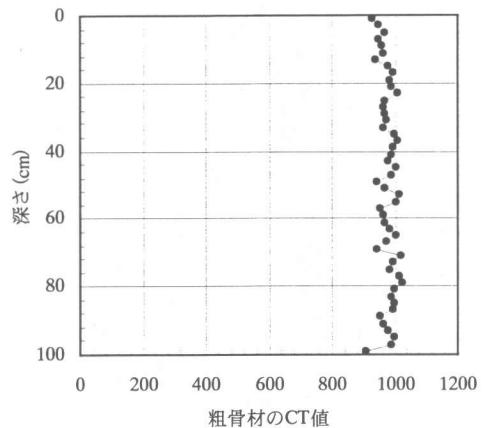


図-9 粗骨材の平均 CT 値 M_{iGr} の分布
(供試体 A)

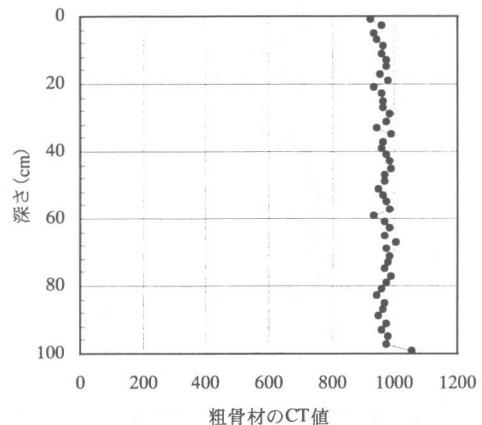


図-10 粗骨材の平均 CT 值 M_{iGr} の分布
(供試体 B)

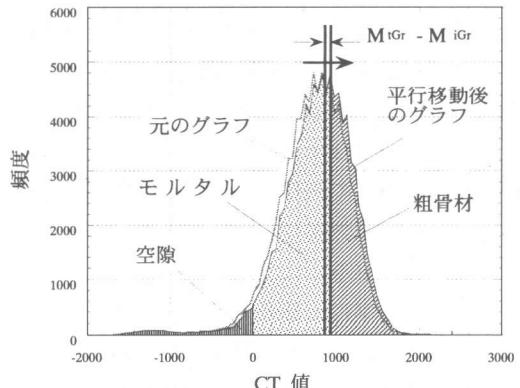


図-11 修正頻度分布

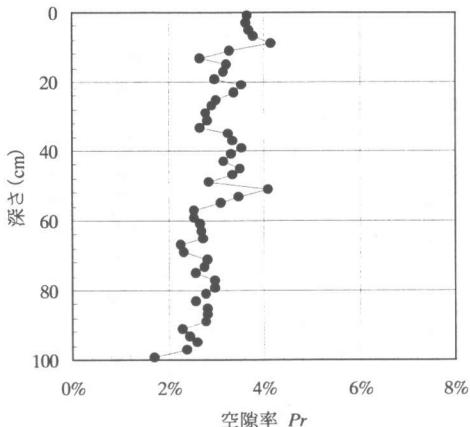


図-12 空隙率 Pr の分布（供試体 A）

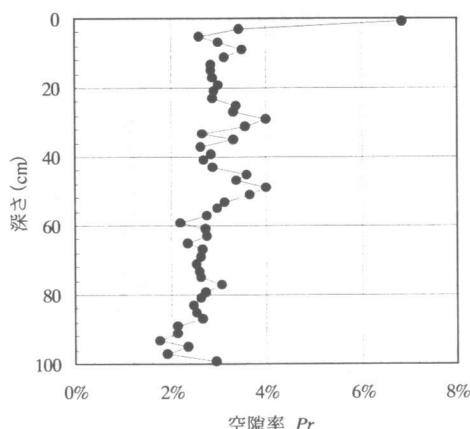


図-13 空隙率 Pr の分布（供試体 B）

の容積に占めるコンクリートの実容積の比を充填率と定義すると、CT 値より判定された空隙率 Pr を用いれば、97%程度まで充填率が増加したと考えられる。なお、コア全体にわたる質量に基づく充填率の平均値は表面乾燥飽水状態において 99.5% であった。配合に対する CT 値より求めた空隙率は便宜上 CT 値が 0 以下のものを空隙と判断しており、供試体中の空隙に存在する水分などを評価しているため小さい値であったと考えられる。

また、空隙率は上部の方ほどその割合が多くなっている。転圧時の振動締固めにより空隙が下部から上部に移動しながら RCD 用コンクリートの充填率が増加していると推察される。

5. 結言

RCD 工法の試験施工後のボーリングコアに X 線 CT 法を適用し、RCD 用コンクリートの深さ方向の粗骨材および空隙の分布性を検討した結果、以下のことが明らかになった。

1) 深さ方向の粗骨材分布は、転圧回数が少ない方の供試体では若干の偏りが認められたものの、ほぼ均等に分布されていることが明らかになつた。

2) コア内部の空隙の分布を調査した結果、転圧回数の差に関わらず、空隙の分布率は 2~4% 程度であり、上部に空隙が多く分布する傾向であることが確認された。

以上のように、X 線 CT 法を用いてコンクリートコアの非破壊検査を実施した結果、比較的鮮明な画像が得られ、粗骨材や空隙の分布状況を定量的に評価することができた。今後は、データ処理方法などの検討を行い、モルタル部分の CT 値を詳細に調査することにより、水セメント比の推定や砂とセメントペーストの分離状態の把握などの検討にも応用できる可能性があると考えられる。

【参考文献】

- 1) (財)国土開発技術研究センター編：改訂 RCD 工法技術指針(案), p38, 平成元年 8 月
- 2) (財)日本ダム協会編：改訂 RCD 工法の手引き, p174, 平成 6 年 6 月
- 3) 棚木俊文：X 線 CT 方を用いた土および地盤の破壊メカニズム解明に関する研究, 平成 9 年度熊本大学大学院修士論文
- 4) 西沢修ほか：X 線 CT による地球科学試料の内部構造分析とその応用, 地質調査所月報, 第 46 卷, 第 11 号, pp169-220, 1993
- 5) J.Otani, Y.Obara and T.Mukunoki
“Characterization of failure in soils using X-ray CT Scanner”, Proc. of Int.symp.on Deformation and progressive failure in geomecchanics, 311-314, 1997.