

コンクリート部材中の骨材分布性状の定量的評価

西澤 卓史***, 小野 博宣*, 渡辺 健治*, 岸 健太郎**

Quantitative evaluation for Distribution Aspect of Aggregate in Concrete Members

Takushi NISHIZAWA***, Hironobu ONO*, Kenji WATANABE*
and Kentarou KISHI**

(Received June 16, 2004)

This experiment tries to clarify the distributional situation of the aggregate in the inside of concrete by using the fractal theory. We have used pillar-shaped and beam-shaped test pieces.

It is found that the aggregate distribution properties in a column-shaped concrete section can be quantitatively evaluated by the application of the fractal theory. Also, it is found that the material separation constant and the fractal dimension are in high correlation in the high fluidity concrete where the material separation is effected.

Keywords: aggregate distribution, fractal dimension, material separation, high fluidity concrete

1. はじめに

一般にコンクリート構造物を構成する各種部材（柱・梁・壁・床）におけるコンクリート品質の不均一性が構造耐力上、耐久性劣化の観点から問題視されている。これらの要因は、コンクリートの品質や打設方法に主たる原因があるものの、一義的な要因としては定め難く複合的因子が作用していると推測される。コンクリート部材内部の骨材分布性状は、1) 骨材寸法と形状、2) コンクリートの調合、3) 材料分離抵抗性により影響を受けると考えられている。コンクリート構造物における骨材分布の不均一性は建築部材形状や配筋、打設方法によって、そのパターンに差異はあるものの少なからず発生する。既往の研究では、コンクリート容積中の骨材量 (VG / VC) やコンクリート断面積中の骨材面積率 (AG / AC) によってコンクリート供試体中の骨材分布を表示していた。しかし、高流動コンクリートにおいて材料分離が生じた場合は、コンクリート断面中の骨材分布が均一性を欠くため、上記の 2 方法は適用できない。このように高流動コンクリート

の骨材分布性状は十分に解明されたとは言えない。

本研究は、コンクリート部材中の骨材分布性状評価にフラクタル理論を用いて、より精度良く骨材分布を把握しようとするものである。コンクリート供試体は簡易な形状（柱状と梁状）として実験室レベルの分析・評価を試みたものである。

2. 研究の展開

2.1 フラクタル理論の仮想コンクリート断面の適用性

コンクリート供試体を用いた実用的骨材分布試験を行う前に、骨材を白色、ペースト部分を黒色と仮定した簡単なモデル図（図-1）を用いてフラクタルの性状を調べた。供試体断面における総骨材面積やその分布の違いを、フラクタル次元を用いるとどう評価できるのかをモデル図を用いて調べた。

2.2 柱状供試体へのフラクタル理論適用性

柱状供試体を用いて、コンクリート中の異なる高さ部位における水平切断面の骨材分布が、フラクタルであるかどうかの確認をした。その後、フラクタル次元を用いてコンクリート中の骨材分布を調べた。

2.3 梁状供試体の骨材分布性状

コンクリート中の骨材分布の不均一性を生じさせる要因の一つはコンクリートの材料分離であると考え、

* 建築学科 (Department of Architecture)

** 株式会社 Sobi (Constructional Company Sobi)

***建設工学専攻大学院生 (Graduate Student, Constructional Engineering)

実験は、特に材料分離が問題視される単位セメント量の多い高流動コンクリートを対象とし、梁型供試体を用いて行った。

3. 研究の結果

3.1 モデル図によるフラクタル次元の傾向

図-1 にモデル (I), (II) を示す。モデル (II) の骨材面積は、モデル (I) と同一で、その分布が一方に偏った場合を想定した図である。2 つの骨材分布状況は、定量化した骨材面積では同値と評価される。しかし、モデル (I), (II) のフラクタル次元は、それぞれフラクタル次元に違いがみられる。このため、フラクタル理論を適用することによって、骨材分布状況を定量的に評価できるものと思われる。

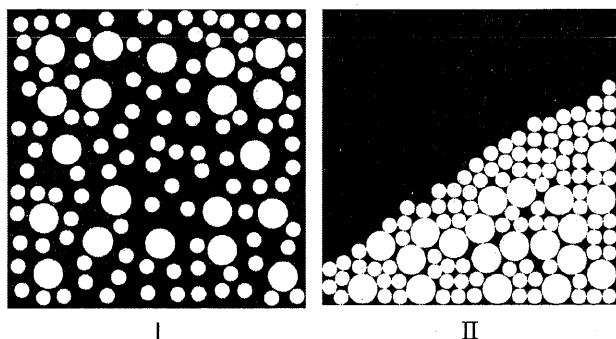


図-1 骨材分布モデル図

3.2 柱状供試体へのフラクタル理論適用

3.2.1 使用材料および基本調合

セメントは普通ポルトランドセメント、骨材は、普通骨材（川砂、川砂利）を使用した。調合は、W/C=40,50,60%の3水準を設定した。スランプ18cm、空気量4.5%を目標として、AE減水剤とAE剤で調整した。使用材料を表-1に、基本調合を表-2に示す。

3.2.2 供試体寸法と打設方法

供試体は、寸法150mm×150mm×800mmの柱状供試体を使用した。また、打ち込み方向は縦方向とした。

3.2.3 フラクタル次元の算出手順

- ① 供試体を30mm間隔に26等分に分割・切断
- ② 各切断面をデジタルカメラにて撮影
- ③ 各切断面画像をパソコンにて白黒2値化
- ④ フラクタル次元の算出

3.2.4 結果と考察

図-2 に普通骨材におけるフラクタル次元と供試体高さ位置の関係を示す。各 W/C 毎に供試体下部へ向かうにしたがってフラクタル次元が高くなり、フラクタル次元を用いても骨材の分布を定量的に評価できることを確認した。骨材面積率と供試体高さ部位別においては、相関係数が約0.6とやや高い値を示した。しかし、

表-1 使用材料

使用材料		密度(g/cm ³)	概要
セメント		3.15	普通ポルトランドセメント
粗骨材	川砂利	2.61	木曽川産
細骨材	川砂	2.55	木曽川産
混和剤	Ad1	1.08	AE減水剤
	Ad2	1.00	AE剤

表-2 基本調合

W/C (%)	s/a (%)	質量(kg/m ³)					
		W	C	S	G	Ad1	Ad2
40	46	168	438	805	968	6.6	0.9
50	46	169	350	838	1007	5.3	0.7
60	46	170	292	859	1033	4.4	0.6

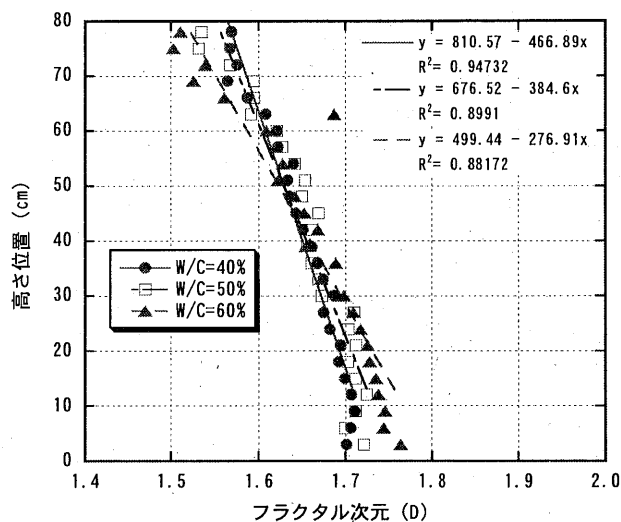


図-2 フラクタル次元と供試体高さ位置

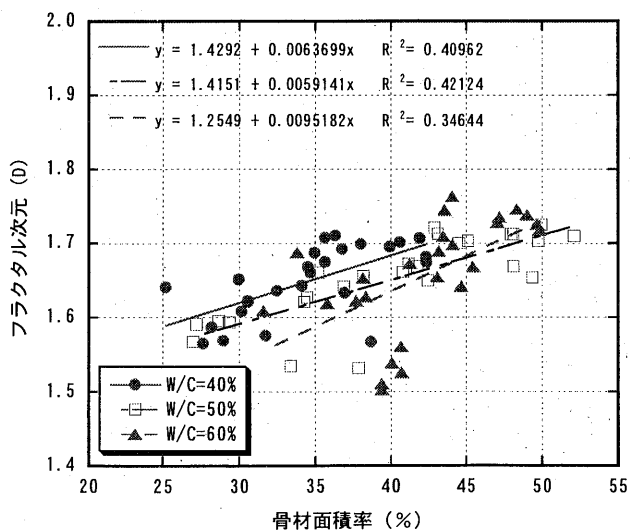


図-3 骨材面積率^{x1}とフラクタル次元

図-3 に示すように同一切断面画像における骨材面積率*1 とフラクタル次元ではあまり相関性はみられなかった。よって、コンクリート供試体切断面のフラクタル次元は、骨材の面積率とともに分布性状の因子も影響しているものと推測される。*1 供試体切断面中に占める骨材面積

3.3 梁状供試体の骨材分布性状

3.3.1 使用材料および調合

コンクリートの使用材料を表-3 に示す。セメントは、切断面における骨材分布を目視的に判定・評価しやすくするためにホワイトセメントを使用した。細骨材は川砂、粗骨材は碎石と川砂利を用いた。

コンクリートの基本調合を表-4 に示す。基本調合は、W/C=25,35%の2水準を設定した。スランプフロー値 $65 \pm 5\text{cm}$ 、空気量 $3.0 \pm 5\%$ を目標とし、高性能 AE 減水剤と AE 剤を用いて調整した。また、比較対象コンクリートとして練り上り後に基本調合のコンクリートと同等のフレッシュ性状であることを確認した後、各基本調合に単位水量の10%を加水して人為的に材料分離させたコンクリートを製作した。

表-3 使用材料

使用材料	密度 (g/cm ³)	概要
セメント	3.05	白色ポルトランドセメント
粗骨材	碎石	2.63 多治見産碎石(10mm以下)
	川砂利	2.60 揖斐川産(10mm以下)
細骨材	川砂	2.56 長良川産
混和剤	Ad1	1.05 高性能 AE 減水剤
	Ad2	1.00 AE 剤

表-4 コンクリートの調合

Series	W/C (%)	s/a (%)	質量 (kg/m ³)					
			W	C	S	G	Ad1	Ad2
S-25-A	25	48.7	171	684	726	717	20.5	2.7
S-25-B	(25)	48.7	171	684	726	717	20.5	2.7
S-35-A	35	48.7	171	489	796	862	9.8	2.0
S-35-B	(35)	48.7	171	489	796	862	9.8	2.0
K-25-A	25	48.7	171	684	717	767	20.5	2.7
K-25-B	(25)	48.7	171	684	717	767	20.5	2.7
K-35-A	35	48.7	171	489	796	852	9.8	2.0
K-35-B	(35)	48.7	171	489	796	852	9.8	2.0

※S: 粗骨材に碎石使用 K: 粗骨材に川砂利使用

※A: 材料分離なし B: 材料分離あり

3.3.2 供試体寸法と打設方法

型枠は $100\text{mm} \times 150\text{mm} \times 1200\text{mm}$ の梁状のものをを使用した。打設方法は、定位置（型枠の片側端部より約10cm間）からコンクリートを流し込み、コンクリートが型枠に充填されるまでバイブレーターで振動を与えた。

3.3.3 試験項目と方法

1) フレッシュコンクリートの性状

○ スランプフロー試験: JIS A 1150 に準拠

○ 空気量試験: JIS A 1128 に準拠

○ L フロー試験 (図-4 に示す): 高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針 (案)・同解説 (日本建築学会) を参考にした。本実験では、L フロー試験により得られたシャッター部分から流動させたモルタル部と粗骨材の最大到達距離を求め、それぞれ L_m ・ L_a とし、その比率 L_m/L_a の比を骨材分離定数 ϕL と定義した。

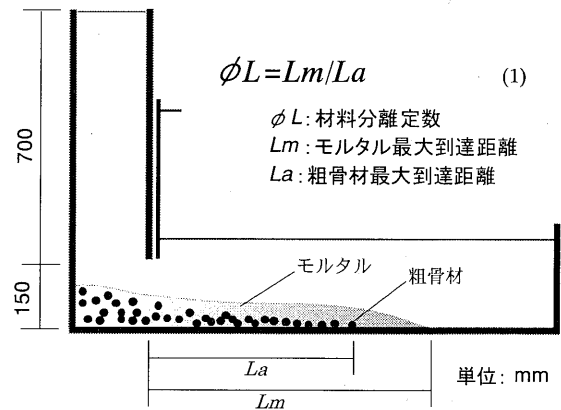


図-4 Lフロー試験装置

○ 充填装置 (ボックス型) を用いた間隙通過試験 (図-5 に示す): 高流動コンクリート施工指針 (土木学会規準)

(案) を参考にした。ボックス型の充填装置を用いて、充填高さ15cm地点の通過時間と最終充填高さ H_b (cm) を測定し、充填高さ15cmにおける充填速度 V_b を求めた。また、材料分離を生じさせていないコンクリートの H_b と V_b を1とし、材料分離が生じコンクリートの充填高さ比 H_b と充填速度比 V_b を求めた。本実験では、 H_b と V_b の比を間隙通過試験における材料分離定数 ϕB と定義した。

$$\phi B = V_b / H_b \quad (2)$$

・ ϕB : 骨材分離定数 ・ V_b : 充填速度比 ・ H_b : 充填高さ比

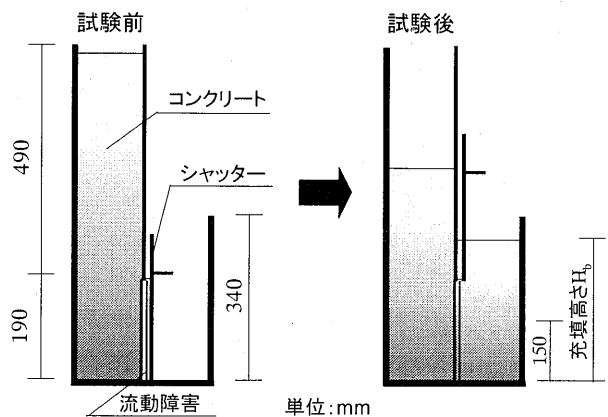


図-5 充填装置

2) 硬化コンクリートの性状

○ 割裂強度試験：所定の養生後コンクリート供試体の打設位置 50mm 地点から 100mm ピッチの位置にて順次割裂強度試験を行い、引張強度を求めた。

○ 圧縮強度試験：JIS A 1114 に準拠し、割裂強度試験後のコンクリートコア（約 100mm×100mm×150mm）を用いて梁切片のコンクリート打設方向（上下）からの圧縮強度（100×100mm²）を測定した。

3.3.4 結果と考察

1) フレッシュコンクリートの性状

○ スランプフロー試験、空気量試験

材料分離を起こさないコンクリート（シリーズ A）は、スランプフロー値 65u±5cm、空気量 3.0±5% の目標を満足する値を示した。

A シリーズコンクリートは、スランプフロー値において、川砂利コンクリートのほうが碎石コンクリートよりも若干大きい値を示した。この理由の一つとして骨材形状による影響があると思われる。シリーズコンクリート（B）では、いずれも 70cm を超える値となった。

空気量試験においては、材料分離を生じさせることによって空気量が減少する結果となった。この理由の一つとして、測定容器内での骨材の沈下が挙げられる。材料分離を生じさせたコンクリートを測定容器内に詰めると、僅かな時間で容器下部に骨材が沈下してしまう。容器上部には、空気を内包できる粘性を有しない余剰水が溜まる。これらのことが空気量減少の原因となったと考えられる。

○ L フロー試験

平均流動速度 V_{20} とスランプフロー値 S_f の関係を図-6 に示す。骨材分離がみられないコンクリートでは、スランプフロー値によらず平均流動速度 V_{20} はほぼ一定の値を示した。しかし、骨材分離を生じたコンクリートではスランプフロー値が増加すると平均流動速度が 2~4 倍となった。また、使用骨材により平均流動速度の増加幅に違いがみられ、碎石に比べ川砂利コンクリートの方が平均流動速度の増加が大きい結果となった。これは、骨材形状の違いによる骨材の転がり係数が起因しているものと考えられる。

(1) 式より求めた骨材分離定数 ϕ_L と平均流動速度 V_{20} の関係を図-7 に示す。材料分離を生じない（シリーズ A）コンクリートは材料分離定数がほぼ 1.00 となり骨材とモルタル部分が一体性を保ち流動したことがわかる。材料分離を生じた（シリーズ B）コンクリートでは、平均流動速度が増加すると材料分離定数も増加する傾向がみられ、骨材分離定数においても川砂利を使用したコンクリートの方が約 10% 大きい値を示した。分離したモルタル部分（余剰水が多い）の流動速度はコンクリートの平均流動速度に比例的に増加するものと考えられるが、骨材の流動速度は沈下による影響などでそれほど増加しないと考えられる。このため、流動速度が速くなるコンクリートに川砂利を使用した場合には、骨材分離

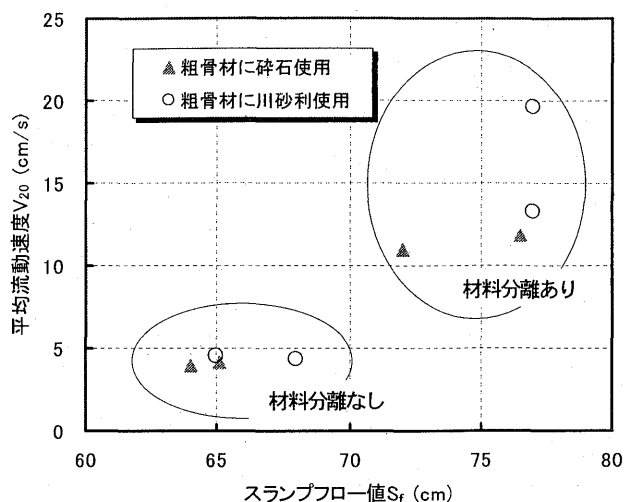


図-6 平均流動速度 V_{20} とスランプフロー値 S_f の関係

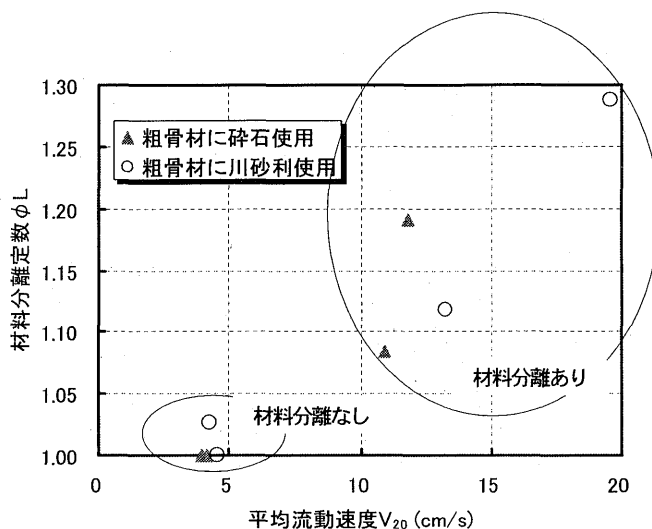


図-7 骨材分離定数 ϕ_L と平均流動速度 V_{20} の関係

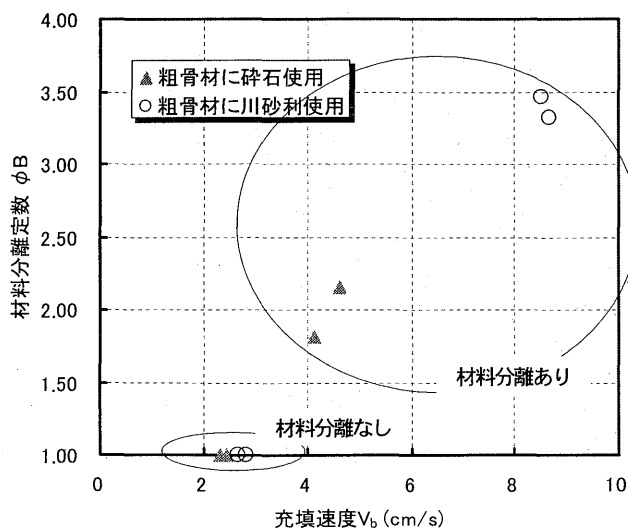


図-8 骨材分離定数 ϕ_B と充填速度 V_b の関係

定数が大きくなったと思われる。また、このことは粗骨材に碎石を用いるよりも川砂利を使用したコンクリートの方が、材料分離が生じやすくなることを示していると考えられる。

○ 充填装置（ボックス型）を用いた間隙通過試験

(2) 式より求めた骨材分離定数 ϕB と充填速度 V_b の関係を図-8に示す。図より、充填速度が増加すると骨材分離定数も増加する傾向がみられる。また、間隙通過試験での骨材分離定数 ϕB でも L フロー試験結果と同様に、粗骨材に川砂利を使用したコンクリートの方が碎石を使用したコンクリートよりも高い値を示した。これらより、間隙通過試験においても、充填速度と充填高さの関係から材料分離を定量的に示すことが可能であることを確認した。

○ 材料分離定数とフラクタル次元の関係

L フロー試験と間隙通過試験より得られた各材料分離定数 ϕL 、 ϕB とコンクリート中の骨材分性状（フラクタル次元）との関係について検討を行った。

骨材分離定数はコンクリートの品質を示すものであり、比較するフラクタル次元においてもコンクリート供試体全体におけるフラクタル次元を考える必要があると考える。そこで、各切断面画像を連続スライス画像として扱い、各供試体の 3D フラクタル次元を算出した。 ϕL とフラクタル次元(3D) の関係を図-9 に、 ϕB とフラクタル次元(3D) の関係を図-10 に示す。両図より、材料分離を生じさせたコンクリートでは骨材分離定数が増加するとフラクタル次元が減少する結果となった。どちらの試験結果においても骨材分離定数とフラクタル次元は高い相関性を示したが、特に L フロー試験における骨材分離定数 ϕL とフラクタル次元の関係は、相関係数が約 0.96 と非常に高い相関性を示した。このことは材料分離がコンクリート中の骨材分布の不均一性を生じさせる大きな要因の一つであることを示していると考えられる。

また、同一調合（骨材量が等しい）コンクリートであっても材料分離が生じた場合はフラクタル次元が低く算出されていることを考慮すると、骨材分離定数を定めコンクリート中の骨材分布性状にフラクタル理論を適用することにより、材料分離が生じたコンクリートでも骨材分布の均一性という視点からコンクリートを評価できる可能性があると考えられる。

2) 硬化コンクリートの性状

○ 圧縮強度試験

図-11 に W/C=35% における各供試体（打設点に近いものから No.1~11）と圧縮強度の関係を示す。材料分離を生じていない供試体では、ほぼ一定の値（70N/mm²）を示した。一方、材料分離を生じさせた供試体においては、打設点から遠ざかるにしたがい若干の強度低下がみられた。しかし、フラクタル次元の低下（骨材の不均一性）度合いを考慮すると、供試体内部の骨材分布性状は圧縮強度にさほど影響を及ぼしていないと考えられる。

○ 割裂強度試験

図-12 に W/C=35% における各供試体（打設点に近いものか

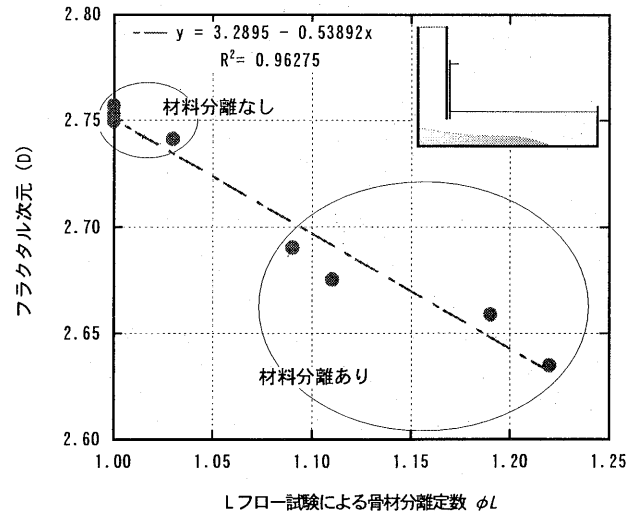


図-9 骨材分離定数 ϕL とフラクタル次元（3D）の関係

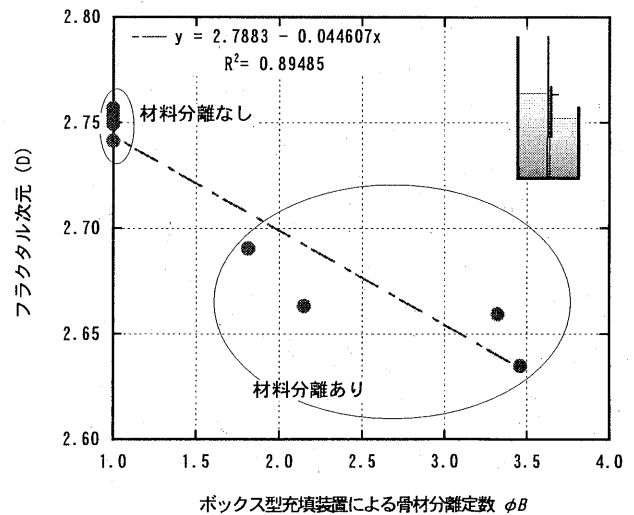


図-10 骨材分離定数 ϕB とフラクタル次元（3D）の関係

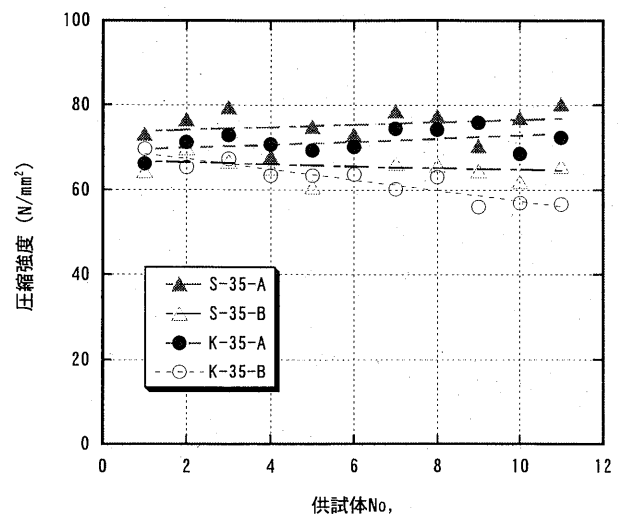


図-11 各供試体と圧縮強度の関係

ら No.1~12) と引張強度の関係を示す。引張強度は、全体的に打設点から遠ざかるに従い低下する傾向がみられた。特に、材料分離を生じさせたコンクリートにその傾向が顕著に表れた。また、材料分離を生じさせたコンクリートは測値のバラツキが多くなった。これは W/C=25% シリーズでも同様の傾向となり、フラクタル次元との相関性がみられた。

3) コンクリート梁の「フラクタル次元 (3D)」に及ぼす、材料分離定数と引張強度の標準偏差

硬化後コンクリートの梁型供試体における部位別骨材分布の性状は、フレッシュ時の材料分離定数や硬化後の引張強度(部位別)とも深く関係するものと考えられる。

ここでは、各シリーズ別調査について材料分離定数 ϕL と引張強度の標準偏差 St を独立変数として、重回帰分析により回帰式を算出した。

$$Y = 3.382323 - 0.58132\phi L - 0.04548St \quad (3)$$

$$R^2 = 0.98$$

ここに、Y: フラクタル次元 (3D) ϕL : 材料分離定数

St : 引張強度の標準偏差

(3) 式より材料分離定数 ϕL が小さく(材料分離が生じていない)、引張強度の標準偏差 St が少ない程コンクリート中の骨材分布(フラクタル次元)が大きくなり均一に分布することが分かる。また、(3) 式の R^2 (重決定) は 0.98 以上と非常に高い値を示し、有意 F も 3.19×10^{-5} と低い値を示していることから(3) 式は有効だと考えられる。しかし、本実験での限られた条件下での回帰式であり、今後さらにフレッシュ時の粘性や梁型枠に鉄筋を配したときの影響などを検討する余地があると考えられる。

4. まとめ

- 1) フラクタル理論を適用することにより柱状コンクリート断面中の骨材分布を定量的に評価できるものと考えられる。
- 2) 材料分離を生じさせた高流動コンクリートにおいては、材料分離定数とフラクタル次元 (3D) は高い相関関係にある。
- 3) 硬化コンクリートの性状で、圧縮強度では供試体内部の骨材分布との相関性は低いものの、引張強度においてはフラクタル次元 (3D) と引張強度(標準偏差)との間に高い相関性がみられた。
- 4) 梁状コンクリート部材の骨材分布性状は、フラクタル次元 (3D) に及ぼすフレッシュコンクリートの骨材分離定数 ϕL と硬化後の引張強度の標準偏差 St とが密接に関係していることを示した。

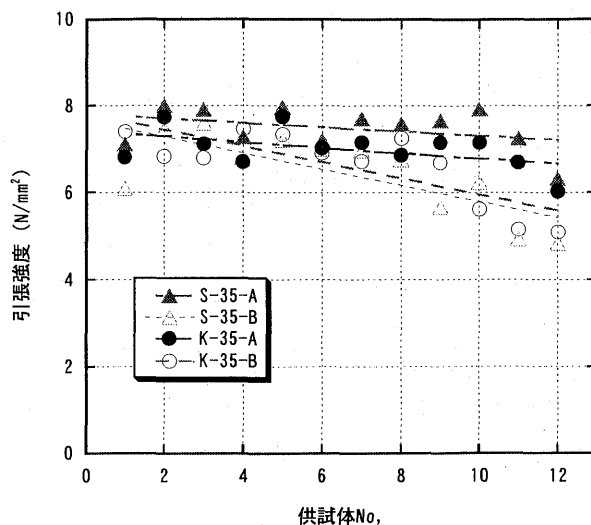


図-12 各供試体と引張強度の関係

【謝 辞】

本研究は、中部大学総合工学研究所研究費によった。また、中部大学 4 年生小木曾賢君、木場伸一君、花本亘君の助力を得た。記して謝意を表する。

【参 考 文 献】

- 1) 日本建築学会：高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針(案)・同解説
- 2) 土木学会：高流動コンクリート施工指針
- 3) 国枝、林、栗原、他：コンクリートの破断面積とフラクタル次元、土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集、第 V 部門、pp.154-155, 1998.
- 4) 今村文彦、西山英彰：拡張フラクタル次元を用いた海岸線形状の解析、海岸工学論文集、第 37 巻、pp.299-303, 1994.
- 5) 池崎、姫野、村井：舗装のひびわれへ評価のフラクタル解析の応用、木学会年第 47 回土次学術講演会概要集、第 V 部門、pp.110-111, 1992.
- 6) 西山、池永、石神：コンクリートのひびわれの数量化手法に関する研究(フラクタル理論の適用性の検討)、日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)、pp.249-250, 1990.
- 5) 白田、東野、井上、他：「カオスとフラクタル」、オーム社出版
- 6) 高安秀樹：フラクタル、朝倉書店