

論文 コンクリート打継部における表面処理粗さの定量化と 付着性状の評価

栗原哲彦*1・西田好彦*2・鎌田敏郎*3・六郷恵哲*4

要旨：打継部の付着性状に影響を及ぼす表面処理粗さを、スペクトルあるいはフラクタル次元により定量化し、打継部の付着性状との関係について検討した。その結果、表面粗さをパワースペクトルにより評価した場合、その凹凸面がどの長さの波長により構成されているかを相対的に判断できることを明らかにした。フラクタル次元を用いた場合、表面粗さを定量的に評価できるとともに、フラクタル次元の増加に伴い曲げ強度および破壊エネルギーも増加する傾向にあることを明らかにした。

キーワード：表面粗さ、フラクタル次元、破壊エネルギー、スペクトル、曲げ強度

1. はじめに

コンクリート構造物に必然的に設けられる打継部の性能は、その部材全体の挙動に大きな影響を与える。打継部には、事前に表面処理が施され、適度な凹凸が設けられる。この凹凸は、打継ぎ後の性能に大きな影響を与えることは一般に知られているが、面の凹凸（粗さ）は、感覚的にとらえられる場合が多く、定量的には十分に評価されていない。また、その粗さと打継ぎ後の性能（例えば、曲げ強度）との関係も十分に把握されていないのが現状である。凹凸の粗さ評価に関しては、パワースペクトルを用いた研究が行われている¹⁾。

一方、破壊力学パラメータの1つである引張軟化曲線は、破壊領域で増大するひび割れ幅と引張伝達応力との関係（純引張試験時の最大荷重後のひび割れ幅と引張応力との関係に相当）であり、コンクリートのひび割れ抵抗性を示している。すでに著者ら²⁾は、異なった表面処理を施した打継部の付着性状の違いが引張軟化曲線に現れることから、付着性状の評価に引張軟化曲線を用いることの有用性を示している。

本研究では、打継部の付着性状に影響を及ぼ

す表面処理粗さを、スペクトルあるいはフラクタル次元により定量化し、打継部の付着性状との関係について検討した。

2. 実験概要

2.1 供試体の概要

普通コンクリートを用い、供試体中央部に鉛直打継部を設けたはり供試体（幅 10×高さ 20×長さ 120cm）を作製した。新旧コンクリートの配合を表-1 に、新旧コンクリートの試験時材齢における強度試験結果を表-2 に示す。はり供試体中央の打継部には、供試体の破断が打継部で生じるようにするために、コンクリートカッターによりはり高さの 1/3 の切欠きを設けた。載荷方法は図-1 に示すような 4 点曲げ載荷（せん断スパン：40cm，モーメントスパン：20cm）とした。荷重ならびに供試体下面の切欠き口の開口変位（CMOD）を、それぞれロードセル（容量 100kN）とクリップゲージ（感度 1/400mm）により測定した。また、供試体の打継面には、表-3 に示すように、あらかじめショットブラスト法、ウォータージェット法、遅延剤シートを用いた洗出し法により表面処理を

*1 岐阜大学助手 工学部土木工学科 工修 (正会員)
 *2 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)
 *3 岐阜大学助教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)
 *4 岐阜大学教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)

表-1 コンクリートの配合

新旧	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A.d.
旧	3.1	50.4	171	339	782	1023	1.018
新	4.0	50.6	170	336	773	1010	1.005

A d. : A E減水剤

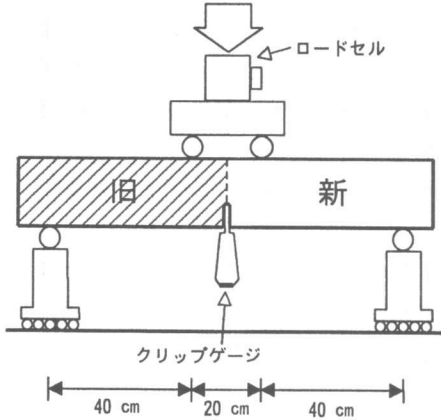


図-1 荷重方法

施した。また、高低差（対象とする領域内で最も凸の点と最も凹の点の差）に違いが生じるように、それぞれの表面処理法において処理程度を2レベル設定した。なお、供試体本数は、各シリーズそれぞれ5本とした。

2.2 表面形状の計測

打継面の表面形状をシリコンゴムで型どりした後、石こうで復元し、触針式3次元形状計測機を用いて図-2 に示す範囲（7×7cm）を0.4mmの間隔で計測した。図-3 に3次元形状計測結果の一例を示す。表面処理法により生成される表面の粗さが異なることが分かる。

2.3 引張軟化曲線の推定

4点曲げ試験結果から、橋高らの提案した多直線近似解析法³⁾に基づき供試体中央に仮想ひび割れモデルを組み込んだ有限要素法⁴⁾により引張軟化曲線を推定した。この推定法は、ひび割れ発生後、ひび割れが微小長さ進展することに逐次引張軟化曲線を仮定し、解析値と実験値とが一致するように引張軟化曲線を推定するものである。解析に用いた弾性係数は、圧縮試

表-2 強度試験結果

新旧	強度(MPa)			弾性係数 (GPa)	材齢 (日)
	圧縮	引張	曲げ		
旧	59.2	4.53	6.27	34.6	123
新	47.3	3.85	5.75	29.3	31

圧縮: φ10×20cm 引張: φ15×15cm
曲げ: 10×10×40cm

表-3 表面処理方法と高低差

シリーズ	表面処理方法	高低差 (mm)	供試体本数
A1	ショットブラスト 投射密度: 150kg/m ²	6.7	5
A2	ショットブラスト 投射密度: 300kg/m ²	11.6	5
B1	ウォータージェット (ハイジェットガン) 噴射圧力: 2000kgf/cm ² 噴射距離: 約10cm	6.7	5
B2	ウォータージェット (ロージェットガン) 噴射圧力: 2000kgf/cm ² 噴射距離: 約5cm	8.9	5
C1	遅延剤シート 目標洗出し深さ: 4mm	8.1	5
C2	遅延剤シート 目標洗出し深さ: 6mm	10.7	5

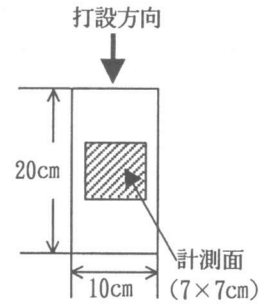


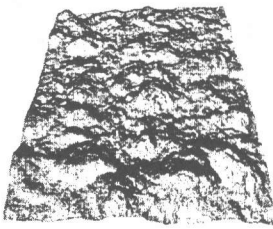
図-2 3次元座標の計測範囲

験時に得られた実測値とした。

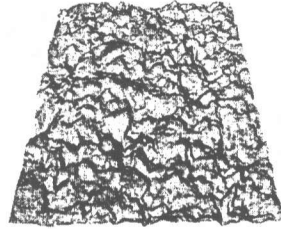
3. 表面粗さの定量化

3.1 表面積

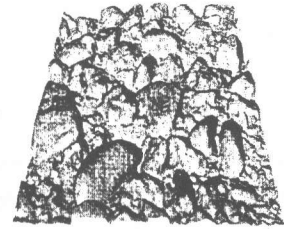
2.2 で計測した計測点を三角形で結び、その三角形の面積の総和を打継面の表面積として算出した。算出された各シリーズの表面積の平均値を表-4 に示す。表面処理法により生成される表面の面積に違いが現れ、遅延剤シートを用



(a)ショットブラスト法



(b)ウォータージェット法



(c)遅延剤シートによる洗出し法

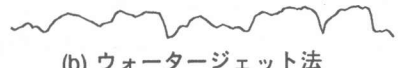
図-3 3次元形状計測結果の例

表-4 表面積とフラクタル次元

シリーズ	表面積 (cm ²)	フラクタル次元	
		2次元	3次元
A1	53.5	1.036	2.070
A2	56.3	1.038	2.079
B1	61.3	1.061	2.108
B2	68.1	1.076	2.135
C1	70.6	1.073	2.130
C2	78.0	1.088	2.166



(a) ショットブラスト法



(b) ウォータージェット法



(c) 遅延剤シートによる洗出し法

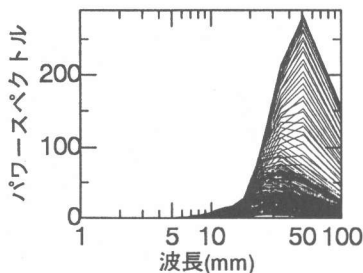
図-4 時系列データの例

いたものが最も表面積が大きくなり、投射密度 150kg/m²のショットブラスト法によるものが最も面積が小さくなった。また、ショットブラスト法では、投射密度を 150kg/m²から 300 kg/m²と2倍にしても表面積は5%程度しか増加しないが、その他の方法では、処理レベルを高めた場合、10%程度の増加が認められた。

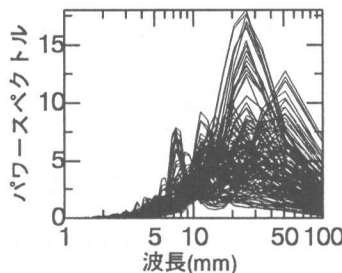
3.2 パワースペクトル

図-4 に示すようなはり高さ方向の断面（はり高さ方向における処理深さの形状）を時系列データとみなすことにより、パワースペクトルの分布を求めた。計測ライン（はり幅方向に176ライン）ごとのパワースペクトルの分布を重ね

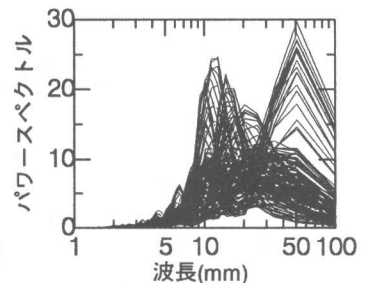
合わせた結果の一例を、図-5 に示す。ショットブラスト法では、波長の長い領域において明確なピークが現れ、また、波長5mm以下においてパワースペクトルが現れていない。一方、その他の表面処理方法では、ショットブラスト法と同様に波長の長い領域でピークが現れるとともに、波長の短い領域においてもいくつかのピークが確認できた。さらに、波長5mm以下においてもパワースペクトルが得られている。これより、ショットブラスト法以外の方法では、ショットブラスト法により生成されるものと同規模の凹凸の上に、さらに、より小規模の凹凸を重ね合わせた面が形成されていると推察でき



(a)ショットブラスト法



(b)ウォータージェット法



(c)遅延剤シートによる洗出し法

図-5 パワースペクトル分布図の例

る。

3.3 フラクタル次元

フラクタルとは、任意の部分を拡大してももとの図形と同形となる自己相似図形の総称である。フラクタル理論では、図形の複雑さを定量的に表す指標として、非整数であるフラクタル次元が用いられる。一般的には、フラクタル次元の値が大きいほど形状が複雑であることを示す。このフラクタル次元を求めるには幾つかの方法があるが、ここでは、Box Counting 法⁵⁾を用い、はり高さ方向の断面（2次元図形）を正方形により被覆する処理と、面を立方体で被覆する処理により2つのフラクタル次元を算出した。Box Counting 法により算出した各シリーズのフラクタル次元の平均値を表-4に示す。フラクタル次元は、どれだけ面的な広がり、あるいは空間的広がりをしているかに大きく影響され、面あるいは空間を埋め尽くす場合、フラクタル次元はそれぞれ2ならびに3となる。しかし、ここで対象とした面の凹凸は図-3、4に示すように面的あるいは空間的広がりが小さいために表-4に示すような1あるいは2に近い小さな値になったと考えられる。2次元および3次元のフラクタル次元は、ともにC2シリーズが最大となり、A1シリーズが最小となった。また、図-6に示す平均の表面積とフラクタル次元との関係から、表面積とほぼ1対1の関係にあることが分かる。また、処理レベルを高めた場合のフラクタル次元の増加割合もショットブラスト法では他の方法に比べ非常に小さい結

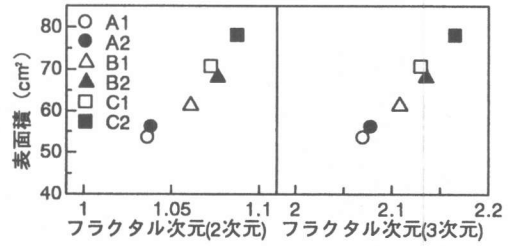


図-6 表面積とフラクタル次元の関係

果となった。

4. 表面粗さと曲げ強度

図-7に実験により得られた荷重-CMOD 曲線（細線）の一例を示す。なお、図中には、荷重-CMOD 曲線の平均曲線（太線）も示す。計測結果は、ばらつきの大きな結果となった。各シリーズの曲げ強度の平均値をばらつきとともに図-8に示す。なお、図に示す曲げ強度は、ロードセル、載荷ビーム等の重量と供試体の自重を考慮して修正したものである。以降、曲げ強度は平均値に対して考察を進める。C2シリーズの曲げ強度が他よりもやや大きな値を示し、A1シリーズが最も小さくなった。

3.1で算出した平均の表面積と曲げ強度との関係を図-9に示す。全体的に右上がりの傾向を示し、表面積が大きいほど曲げ強度も大きくなることが分かる。また、2次元および3次元の平均のフラクタル次元と曲げ強度との関係を図-10に示す。表面積とフラクタル次元がほぼ1対1に対応していることからフラクタル次元と曲げ強度との関係についても、おおよそフラクタル次元が大きくなる程、曲げ強度が大きくなる傾向が認められた。しかし、ウォータージ

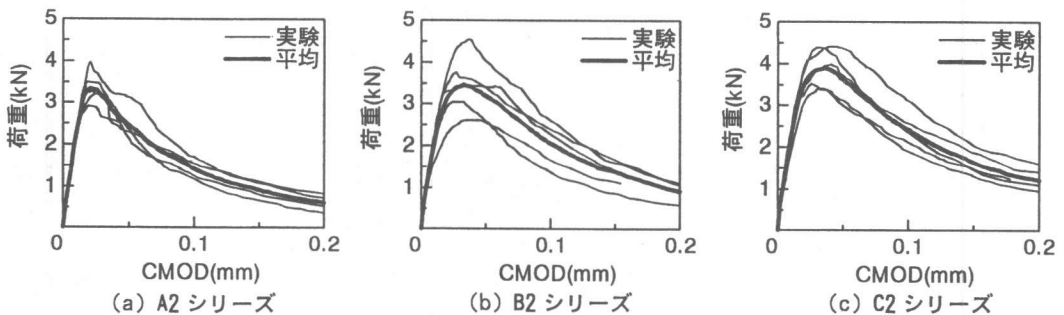


図-7 荷重-CMOD 曲線の例

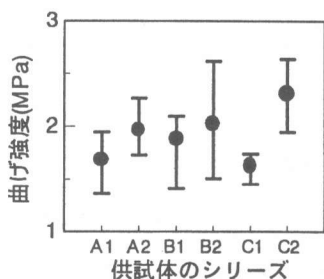


図-8 曲げ強度

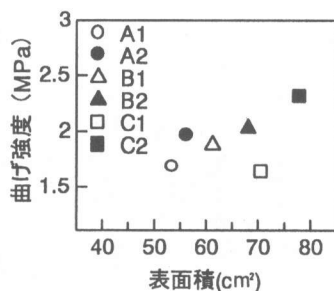


図-9 曲げ強度と表面積の関係

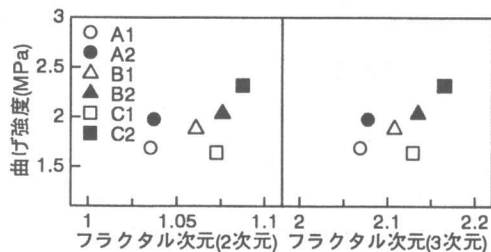


図-10 曲げ強度とフラクタル次元の関係

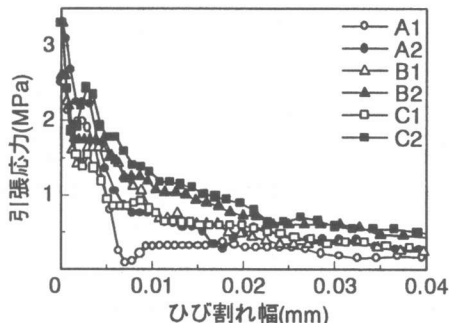


図-11 引張軟化曲線

エツト法を用いた場合、他の処理法に比較して処理レベルを高めても曲げ強度の平均値はそれ程大きく改善されなかった。

5. 表面粗さと破壊力学パラメータ

各シリーズの荷重-CMOD 曲線の平均曲線から推定された引張軟化曲線を比較したものを図-11 に示す。C2 シリーズの引張軟化曲線は他に比べ常に引張応力が高いレベルにあるのに対し、A1 シリーズの引張軟化曲線はひび割れ幅 0.01mm においてすでに引張応力が 0.3MPa 程度となった。図-11 に示すように各シリーズごとに異なった引張軟化曲線が得られており、表面処理法の違いによる打継部の付着性状が引張軟化曲線により表現されているものと考えられる。つまり、C2 シリーズが最もひび割れ抵抗に優れ、A1 シリーズが最も劣っていると判断できる。

引張軟化曲線のひび割れ幅の小さい領域は部材の最大荷重に、ひび割れ幅の大きい領域は最大荷重以降の挙動に大きな影響を与えることが知られている^{6),7)}。ここでは、曲げ強度との対応を比較するため、ひび割れ幅が小さい領域

表-5 曲げ強度と破壊エネルギー

シリーズ*	曲げ強度 (MPa)	破壊エネルギー* (N/mm)
A1	1.68	0.0135
A2	1.96	0.0202
B1	1.88	0.0207
B2	2.03	0.0247
C1	1.63	0.0184
C2	2.31	0.0286

*：ひび割れ幅 0.02mm までの引張軟化曲線下の面積

(0~0.02mm)までの引張軟化曲線下の面積(以下、単に破壊エネルギーとする)を求め、曲げ強度の平均値とともに表-5 に示す。C2 シリーズの曲げ強度および破壊エネルギーを基準とした各シリーズの比率を図-12 に示す。破壊エネルギー比の方が曲げ強度比に比べ、各シリーズの差が大きくなり、曲げ強度より明確な差が現れた。このように、破壊エネルギーの方が付着性状の優劣を判断する指標としてより敏感であるとの結果は、著者らの過去の研究²⁾においても同様に得られている。図-13 にフラクタル次元の平均値と破壊エネルギーとの関係を示す。おおよそフラクタル次元が大きくなる程、破壊

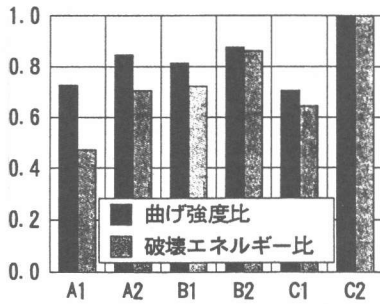


図-12 曲げ強度比と破壊エネルギー比

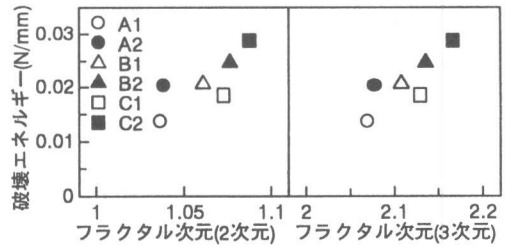


図-13 破壊エネルギーとフラクタル次元の関係

エネルギーも大きくなる傾向にあった。

6. まとめ

打継部の付着性状に及ぼす表面処理粗さの定量化を行い、表面処理粗さと、曲げ強度、引張軟化曲線および破壊エネルギーとの関係について検討した。得られた結果を以下にまとめる。

(1) 表面処理された凹凸面の粗さをパワースペクトルにより評価する場合、その凹凸面がどの長さの波長により構成されているかを相対的に判断できることを明らかにした。

(2) 凹凸面の粗さをフラクタル次元により定量的に評価できることを明らかにした。また、ショットブラスト法における投射レベルの変化に伴うフラクタル次元の増加割合は、他の処理法に比較して非常に小さかった。

(3) フラクタル次元の増加に伴い曲げ強度および破壊エネルギーも増加する傾向にあることが認められた。また、同種の表面処理法を行った場合、処理レベルが高い程、フラクタル次元は大きくなるとともに、曲げ強度および破壊エネルギーも大きくなった。

(4) 曲げ強度と破壊エネルギーを比較した場合、破壊エネルギーの方が、曲げ強度に比べ各シリーズの差が大きくなり、付着性状の優劣を判断する指標としてより敏感であることを確認した。

以上、各種表面処理方法により生成される凹凸面の粗さに対して定量化を試み、曲げ強度や破壊エネルギーとの関係について検討したが、本実験では曲げ強度に大きなばらつきが認められた。そのため、今後、凹凸面の粗さと付着性

状との関係をより明確にするにはばらつきを考慮した検討を進める必要があり、それについては今後の課題である。

参考文献

- 1) 外崎得雄, 山根皓三郎: 湿潤滑走路面の粗さ評価法に関する研究, 航空宇宙技術研究所報告 1216号, pp.1-10, 1989
- 2) 栗原哲彦, 安藤貴宏, 内田裕市, 六郷恵哲: 引張軟化曲線によるコンクリート打継ぎ部の付着性状の評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.2, pp.461-466, 1996
- 3) 橘高義典, 上村克郎, 中村成春: コンクリートの引張軟化曲線の多直線近似解析, 日本建築学会構造系論文集, 第453号, pp.15-25, 1993
- 4) 栗原哲彦, 安藤貴宏, 国枝 稔, 内田裕市, 六郷恵哲: 多直線近似法による引張軟化曲線の推定と短繊維補強コンクリートの曲げ破壊性状, 土木学会論文集, No.532/V-30, pp.119-129, 1996
- 5) 高安秀樹: フラクタル, 朝倉書店, 1986
- 6) Alvarado, A.M. and Torrent, R.J.: The effect of the shape of the strain-softening diagram on the bearing capacity of concrete beams, Mater. Struct., Vol.20, pp.448-454, 1987
- 7) Roelfstra, P.E. and Wittmann, F.H.: Numerical method to link strain softening with failure of concrete, Fracture Toughness and Fracture Energy of Concrete, Edited by F.H. Wittmann, Elsevier, pp.163-175, 1986