

論文 3次元計測装置を用いたコンクリート表面粗度の定量化と 付着特性に関する研究

松田 浩^{*1}・和田 真禎^{*2}・仲村 政彦^{*3}・鶴田 健^{*4}

要旨: レーザ光線と CCD カメラを利用した可搬・非接触型 3 次元計測装置を開発した。本装置を用いて、コンクリート表面の凸凹形状を計測し、表面粗度の定量化法について検討するとともに、付着強度試験を行い、表面粗度と付着強度との関連性について検討した。

キーワード: 3次元計測, コンクリート表面粗度, 新旧コンクリート打継目, 付着せん断強度, レーザ光線, CCD カメラ

1. はじめに

筆者らは、パソコンと CCD カメラとスポットレーザ投光器、および簡易な 3 次元計測理論¹⁾を用いて、3 次元計測装置の開発²⁾³⁾を行っている。本研究では、試作開発した 3 次元計測装置を用いてコンクリート表面凸凹を計測し、表面粗度の程度をいくつかの定量化手法を用いて定量化するとともに、新旧コンクリート打継目のせん断付着強度との関係について検討した。

コンクリート構造物の補修・補強工事では、既設コンクリートと新コンクリートの一体化を図るために表面処理が施されている。しかしながら、コンクリート表面処理面の粗度については、コンクリート標準示方書⁴⁾に打継目処理に関する規定はあるものの、表面凸凹の程度については定量的に定められておらず、旧コンクリートの表面のレタンスやゆるんだ骨材粒などの除去などが経験的に行われているのが現状である。

コンクリート表面凸凹形状の計測法として、目視計測⁵⁾、触針式変位計による 3 次元計測⁶⁾、レーザ変位計を XY プロッターに取り付けた 3 次元計測法⁷⁾など、いくつかの計測法が用いられている。和田ら⁸⁾は、レーザと CCD カメラを併用したレーザビーム光線反射法(スリットレーザ光線法)を用いて計測を行い、スリットレーザ光線法は大量の座標値を必要とするコンク

リート亀裂面の形状測定に最適であると指摘している。しかし、計測には試験体をスライディングテーブル上に設置する必要がある。

本研究で開発した 3 次元計測装置の計測原理は、和田ら⁸⁾の計測装置と同様に CCD カメラとレーザスキャナを組合せたものである。現場計測への展開と多機能化と高性能・高精度化を目標とし、画像取込インターフェイス、タッチパネル等を統合した可搬・非接触型 3 次元計測装置を製作した。さらに、マンマシンインターフェイスの改良、計測手順の自動化を図って、特殊技術を必要としない計測システムを構築した。この計測装置により、天井、壁、床などの多様な面の凸凹形状を現場計測することができる。

2. 可搬・非接触型 3 次元計測装置

2.1 本計測装置の概要

本計測装置(図-1)に用いた計測理論は、対象物(測定点)をカメラやレーザで見たときの透視変換理論に基づくものである¹⁾。指定座標系から既知点を抽出する際、図-2(a)の A 点(画像座標値)と図-2(b)のキャリブレーションボード(C.B.)上の B 点(3次元座標)を対応させて抽出する。対応する各点を 1 組として計 9 組の対応点から、カメラやレーザの位置関係を表すパラメータを算出することにより、キャリブレーション

*1 長崎大学助教授 工学部 構造工学科 工博(正会員)

*2 長崎大学大学院・構造工学専攻

*3 日本構研情報(株)福岡テクノセンタ

*4 小沢コンクリート工業・技術研究所(正会員)

(幾何校正)を行う。カメラパラメータやレーザパラメータを表わす行列を透視変換行列といい、これを用いて2次元座標を3次元座標に変換することができる¹⁾。図-3は計測原理を表すが、図-1のように同一定盤上に一体化しているので、1回のキャリブレーションで移動連続計測が可能である。本計測装置は、スポットレーザ投光法とスリットレーザ投光法による計測が可能である。スポットレーザ投光法は、スポット光が照射された点を、2台のCCDカメラにより撮影し、取得した画像座標値を得る方法である(図-3(a))。スリットレーザ投光法は、照射されたスリットレーザラインをカメラで撮影し、スリットレーザラインが対象物に投影している部分の画像座標値を取得し、透視変換行列を用いて3次元座標を算出する(図-3(b))。各カメラの画像座標値は差画像と光重心法で求めている。差画像とは、レーザ光照射前の画像とレーザ光照射後の画像の輝度(白黒画像の場合256階調表示)の差をとり、カメラ画

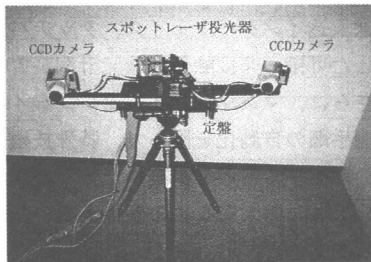
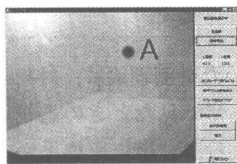
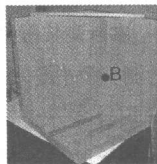


図-1 3次元計測装置

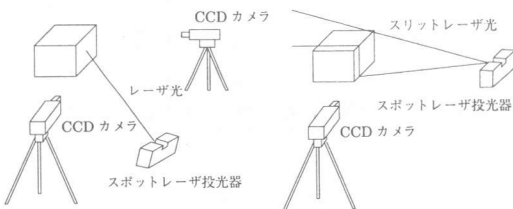


(a) デイスプレイ画面



(b) C.B.

図-2 キャリブレーション



(a) スポット計測

(b) スリット計測

図-3 3次元計測法の計測原理

像上でのレーザ光位置を特定するものである。光重心法とは、カメラ画像上でのスポット光の全ての座標(以後、ラスタ座標と表記)と、その点の輝度を抽出し、輝度を重みとして重心を求める方法である。スリットの場合は、カメラ画素1ラインでのスリット光の全てのラスタ座標、輝度を抽出し、光重心を取っている。したがって、1枚の画像から1点の3次元座標を求めるスポット計測法に比べ、スリット計測法は1回の撮影で1本のスリットレーザライン上の3次元座標を全て求めることができるので、膨大な点群の3次元座標値を短時間で計測できる。

2.2 計測環境及び計測時間

本計測装置の性能を調べるため、触針式3D計測器と比較した。触針式3D計測器(図-4)は、高精度な3次元座標を取得できるが、4万点の計測に10~12時間を必要とし、また計測対象物を定位置に搬入して計測を行うので、対象物の大きさ・重量に制限がある。それに対し、本計測装置は、計測器自体を移動して計測を行うことができるので、対象物のサイズ・重量に制限がなく、4万点の計測も80秒程度で行える(スリット計測の場合)。本計測装置の計測速度は、5000点の座標値の計測時間は、自動スポット計測で40分以内、自動スリット計測で10秒以内であった。



図-4 触針式3D計測器

3. 新旧コンクリートの打継目

3.1 コンクリート表面凹凸形状の計測

本計測装置によるコンクリート表面粗度計測への適用可能性を検討することを目的として、表面粗度の異なる9種類のコンクリート表面を有する試験体を製作し、触針式及び本計測装置により表面凹凸を計測し、その計測結果を比較検討した。なお、触針式3D計測器では、大きさ、重量の面

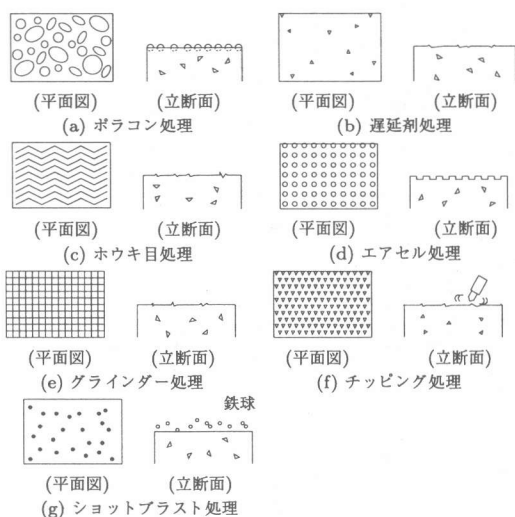


図-5 表面処理工法の種類

表-1 試験体の種類

試験体 No.	呼び強度 N/mm ²	表面処理方法	
A	24	コンクリート 打込み時処理	ポリコン散布
B			遅延剤処理
C			ホウキ目処理
D			エアセル処理
E		コンクリート 硬化後処理	グラインダー処理 ¹⁾
F			チッピング(浅)
G			チッピング(深)
H			ショットブラスト(浅 ²⁾)
I			ショットブラスト(深 ³⁾)

(備考) グラインダー処理¹⁾: 格子模様

ショットブラスト(浅²⁾): ショット速度 50m/sec - 1分)

ショットブラスト(深³⁾): ショット速度 70m/sec - 2分)

ショットブラスト: 建機材径 1.7mm

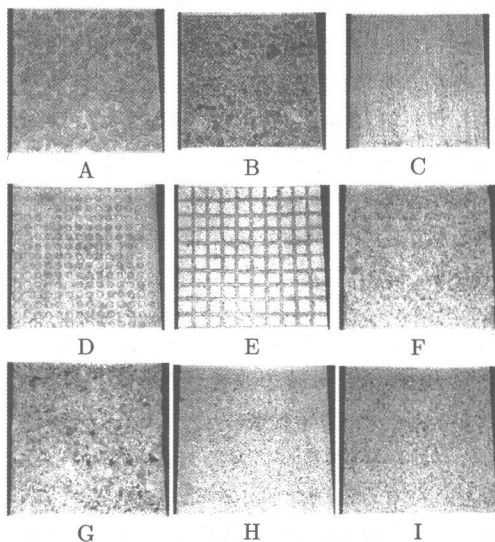


図-6 表面粗度の異なるコンクリート面

から試験体自体での計測はできなかったので、文献6)に倣い表面処理面をシリコン樹脂を用いて型取りしたものを計測した。表面処理工法の種類を図-5に、試験体の種類を表-1に、また表面粗度程度の異なる9種類のコンクリートの表面を図-6に示す。なお、図-5の各表面処理工法においては、平面図と立断面図を示している。

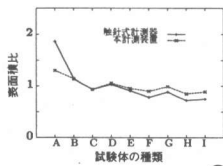
3.2 表面粗度の評価方法

触針式3D計測器及び本計測装置を用いて計測された3次元データを、表面粗度を表すのに有効であると予想される以下の11種類の定量化手法に注目して、コンクリート表面の粗度の定量化を行った。

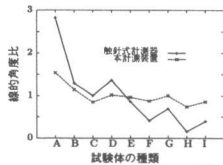
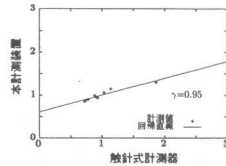
- ①表面積³⁾
- ②ひび割れ面係数(線の角度特性)³⁾
- ③斜面の角度特性(面的角度特性)³⁾
- ④表面深さの頻度分布³⁾
- ⑤平面方程式とその距離分布³⁾
- ⑥山数³⁾
- ⑦離散的フーリエ変換(パワースペクトル)⁹⁾
- ⑧算術平均粗さ(R_a)¹⁰⁾
- ⑨最大高さ(R_y)¹⁰⁾
- ⑩十点平均粗さ(R_z)¹⁰⁾
- ⑪凹凸の平均間隔(S_m)¹⁰⁾

3.3 計測結果の評価及び考察

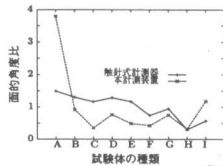
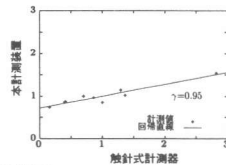
両計測法による計測データから各評価方法を用いて算定したものを図-7に示す。左図(a)の横軸は各試験体の種類、縦軸は各計測法において各試験体の粗度算定値を9試験体の平均値で除した値を示したものである。本計測装置と触針式3D計測器は、計測する位置や点数、計測領域、および基準点が異なるので、両計測結果そのものに差異が生じているものの、両計測法による表面処理状態(A~I)に注目した表面粗度算定値は同じ傾向を示していることがわかる。図-7の右図(b)は、表面粗度の算定値に関して、横軸に触針式3D計測器により得られた値を、縦軸に本計測装置により得られた値をプロットして相関関係を示したものである。本計測装置と触針式3D計測器による計測結果には、11種類のいずれの場合も高い相関があることがわかる。



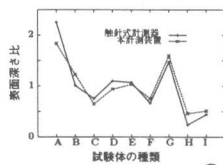
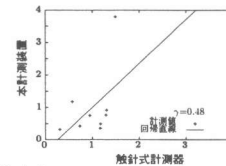
① 表面積



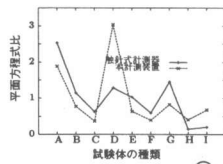
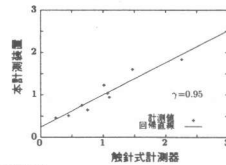
② 線角の角度



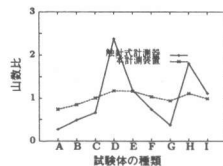
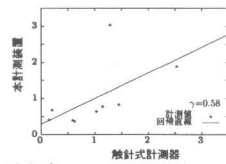
③ 面角の角度



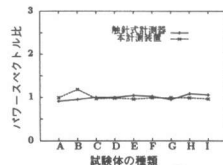
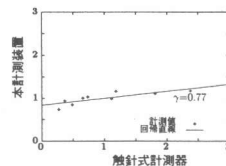
④ 表面深さ



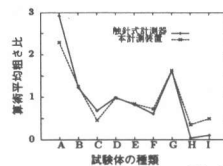
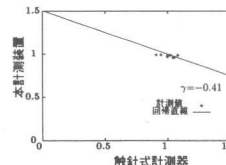
⑤ 平面方程式



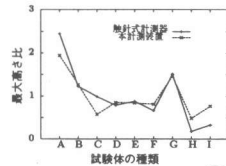
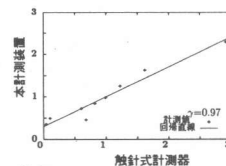
⑥ 山数



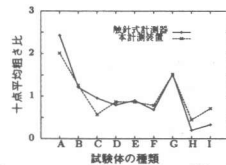
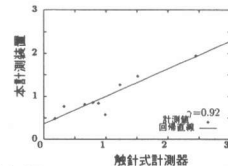
⑦ パワースペクトル



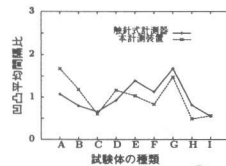
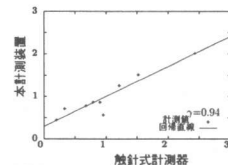
⑧ 算術平均粗さ



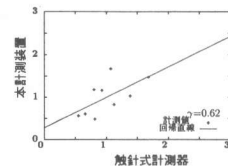
⑨ 最大高さ



⑩ 十点平均粗さ



⑪ 凹凸平均間隔



(a) 粗度の定量値 (b) 相関関係

図-7 コンクリート表面粗度計測結果

4. 傾斜せん断試験及び結果

図-6の9種類(各3試験体)の表面処理面を旧コンクリートとして、その面に新コンクリートを打設し、図-8に示すように新旧コンクリート打継目を有する試験体を製作した。また比較のために、一体化した試験体(基本)も製作した。せん断試験は、2000KN アムスラー試験機を使用し、ロードセルにて荷重を確認しながら行った。せん断方向のずれ量を変位計で、また、ひずみはひずみゲージ(3軸)を貼付して測定した。試験方法の概略図を図-8に示す。また、表-2には各試験体のせん断試験結果の破壊形式と破壊荷重値を示す。No1試験体は予めシリコン樹脂で型取りし、コンクリートの表面を十分洗浄した後、新コンクリートを打設した。しかし、No1試験体ではB遅延剤処理とGチッピング(深)以外は、No2・3より破壊荷重が小さく、またいずれもせん断すべりで破壊に至っている。一体化前にシリコン樹脂で型取りする方法はせん断すべりが生じやすくなるので、表面粗度と付着せん断強度の関係を調べる際には適当ではないと考えられる。

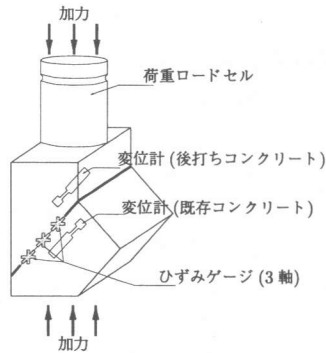


図-8 載荷試験の概要図

表-2 破壊試験結果

試験体 NO.	表面処理状態	破壊形態	破壊荷重 (KN)
basic	一体もの	圧縮破壊	1065
		圧縮破壊	1021
		圧縮破壊	1081
A	ボラコン散布	圧縮破壊	994(型取り用)
		圧縮破壊	1072
		圧縮破壊	1072
B	遅延剤処理	圧縮破壊	1084(型取り用)
		圧縮破壊	1059
		圧縮破壊	1057
C	ホウキ目処理	せん断破壊	578(型取り用)
		せん断破壊	883
		せん断破壊	857
D	エアセル処理	せん断破壊	766(型取り用)
		圧縮, せん断破壊	1080
		圧縮, せん断破壊	1001
E	グラインダー処理	せん断破壊	783(型取り用)
		圧縮破壊	1100
		圧縮破壊	1027
F	チャッピング (浅)	せん断破壊	950(型取り用)
		圧縮破壊	1042
		圧縮破壊	1081
G	チャッピング (深)	圧縮破壊	1027(型取り用)
		圧縮破壊	1015
		圧縮破壊	1119
H	ショットブラスト (浅)	せん断破壊	481(型取り用)
		圧縮, せん断破壊	935
		圧縮, せん断破壊	1027
I	ショットブラスト (深)	せん断破壊	780(型取り用)
		圧縮破壊	1099
		圧縮破壊	1057

5. 表面粗度と破壊強度の関係

表面粗度と破壊強度の相関について, No1 試験体はシリコン樹脂の型取りによる影響があるものとして除去し, No2, 3 試験体のせん断破壊したものと同様に圧縮破壊したものに分けて考察した。なお, 付着せん断強度 P_s および圧縮破壊強度 P_c は次式で算定した (σ_c : コンクリート圧縮強度)。

$$P_s = \frac{\text{破壊荷重のせん断断面方向分力}}{\sigma_c \times \text{せん断断面断面積}} \quad (1)$$

$$P_c = \frac{\text{破壊荷重}}{\sigma_c \times \text{圧縮断面断面積}} \quad (2)$$

① せん断破壊試験体と付着せん断強度

せん断破壊 (圧縮せん断を含む) に至った試験体の粗度定量値と付着強度との相関を求めた結果を図-9 に示す。山数の相関が高く, 山数が多い

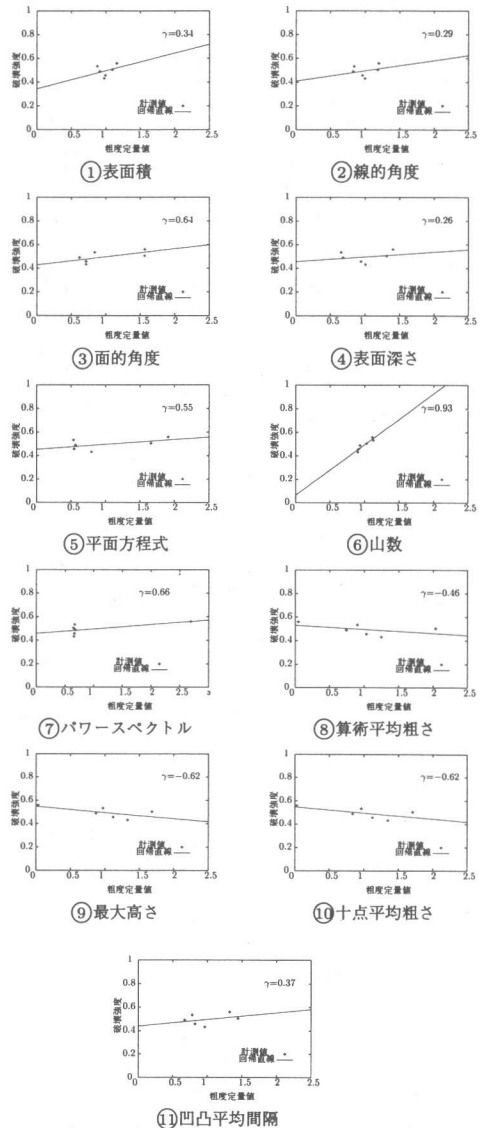


図-9 表面粗度と破壊強度の相関 (せん断破壊)

ほどせん断破壊強度は大きくなる。その他は, 相関関係を示す直線がほぼ水平であるので, 粗度の影響はあまり受けないものと考えられる。

② 圧縮破壊供試体と破壊強度

破壊形態が圧縮破壊に至った 12 個の試験体の表面粗度と破壊強度の相関を図-10 に示す。表面積と山数は相関が高く, 表面積が大きいほど破壊強度が小さく, 山数が多いほど破壊強度は高くなっている。また, 例えば①~⑤のように, せん断破壊の場合には正の相関だったものが, 圧縮破壊の場合には負の相関を示した。

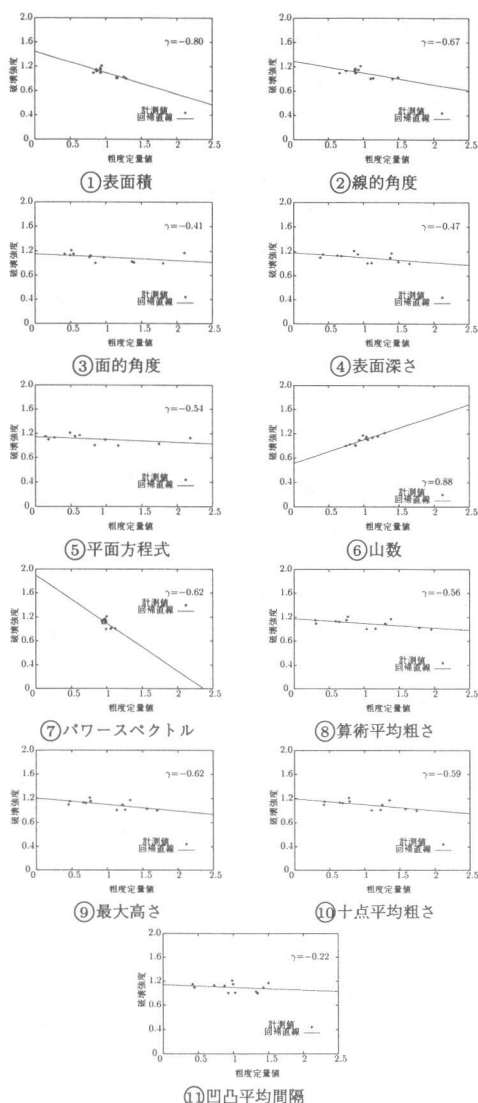


図-10 表面粗度と破壊強度の相関 (圧縮破壊)

6. まとめ

本研究で得られた結果は以下にまとめて示す。

- (1) CCD カメラ 2 台とレーザを用いた可搬型 3 次元計測装置を開発した。本計測装置は、触針式 3D 計測器と比較して、可搬性があり、比較的大きな構造物も短時間で計測可能である。また、天井、壁、床など任意方向のコンクリート表面の凹凸形状の計測にも適用可能である。
- (2) 本装置による表面粗度の評価結果は、触針式 3D 計測による結果と比較して十分な精度を有することがわかった。
- (3) 表面粗度と付着せん断強度との関係は、11

種類の粗度評価方法の中で、表面積と山数の影響が大きくその他はあまり影響しない。

7. あとがき

破壊形態と粗度の関係、圧縮・せん断破壊における正負の相関関係は興味あることであるが、破壊形態はコンクリート強度や傾斜角度の影響を大きく受けるので、本研究の結果だけではまだ不十分である。今後、このことも考慮した実験を行っていく予定である。なお、本研究は平成 10 年度能村膜構造振興財団および平成 11 年度文部省科学研究費補助金 (B) (2) の補助の一部で行ったものである。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 井口征士, 佐藤宏介: 三次元画像計測, 昭晃堂, 1990.
- 2) 和田真禎, 松田浩ほか: レーザと CCD カメラを用いた三次元計測装置の開発とその適用例, 土木学会第 54 回年次学術講演会, pp.560-561, 1999.
- 3) 和田真禎, 松田浩, 山本晃, 仲村政彦, 鶴田健: 三次元計測装置を用いたコンクリート表面粗度の定量化と付着強度特性, 平成 11 年度土木学会西部支部研究発表会, 第 1 分冊, pp.820-821, 2000.
- 4) 土木学会編: コンクリート標準示方書【施工編】平成 11 年版, pp.104-110, 1999.
- 5) 武井一夫: コンクリート打継ぎ面の界面粗さの評価方法日本建築学会構造系論文集, 第 455 号, pp.7-16, 1994.
- 6) 栗原哲彦, 西田好彦, 鎌田敏郎, 六郷恵哲: 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.1261-1266, 1998.
- 7) 香取慶一, 林静雄, 横谷貴光, 牛垣和正: コンクリート接合面の粗さを用いた接合面せん断耐力の推定と滑り変位挙動, 日本建築学会構造系論文集, 第 507 号, pp.107-116, 1998.
- 8) 和田俊良, 佐藤龍司, 石川千温, 上田正生: レーザビーム光線による亀裂面形状測定手法の開発とデータの 2 次元分析手法の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第 490 号, pp.179-188, 1996.
- 9) 高井信勝: 「信号処理」「画像処理」のための MATLAB 入門, 工学社, 2000.
- 10) 山口克彦, 沖本邦郎: 材料加工プロセス - ものづくりの基礎 -, 共立出版株式会社.