

3D計測によるコンクリート打継部及び曲面板の振動解析に関する研究

Development of 3D measuring system and applications to construction joints of concrete
and to free vibration analysis of twisted cylindrical panel

松田 浩^{*1}・和田 眞禎^{*2}・小嶋 悟^{*3}・崎山 毅^{*4}・森田 千尋^{*5}・
森山 雅雄^{*6}・古賀 掲維^{*7}・仲村 政彦^{*8}・山本 晃^{*9}・鶴田 健^{*10}

Hiroshi Matsuda, Masayoshi Wada, Satoru Kojima, Takeshi Sakiyama, Chihiro Morita,
Masao Moriyama, Aoi Koga, Masahiko Nakamura, Akira Yamamoto and Ken Tsuruta

^{*1}正会員 工博 長崎大学 工学部 構造工学科 (〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

^{*2}学生会員 長崎大学大学院生 工学研究科 構造工学専攻 (〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

^{*3}学生会員 長崎大学大学院生 生産科学研究科 環境システム工学専攻 (〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

^{*4}正会員 工博 長崎大学 工学部 構造工学科 (〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

^{*5}正会員 博士(工学) 長崎大学 工学部 構造工学科 (〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

^{*6}非会員 工博 長崎大学 工学部 情報システム工学科 (〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

^{*7}非会員 工修 長崎大学 工学部 構造工学科 (〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

^{*8}正会員 日本構研情報(株) (〒812-8601 福岡市博多区博多駅前 1-7-22)

^{*9}非会員 日本構研情報(株) (〒812-8601 福岡市博多区博多駅前 1-7-22)

^{*10}正会員 小沢コンクリート工業(株) 技術研究所 (〒168-0074 東京都杉並区上高井戸 1-7-16)

In order to measure the surface roughness three-dimensionally, noncontact and portable 3D measuring system is developed. This system is composed of the two CCD cameras and laser beam, and is based on three types measure method, i.e. stereo-photogrammetry, spot-laser and slit-laser photogrammetry. As the applications of 3D measurement, the problem of construction joints of concrete and free vibration analysis for twisted thin cylindrical shell panels are investigated.

Key Words : 3D measurement system, construction joint of concrete, twisted cylindrical panel, CCD camera, laser beam

1. まえがき

画像を用いた面的な三次元計測は、航空写真測量で用いられているような大版(9"×9")の写真乾板、国土庁の定めた正確な座標をもつ地上基準点を用いた幾何校正など、高精度(誤差1%未満)計測のための理論に基づいたものしかなく、高額機器の購入が前提となり、簡易な実現が困難であった。また、従来の三次元計測装置は、高価で、定位置に設置されたもので、対象物を搬入して計測が行われている(ちなみにエムテック社製UNDは1250万円、高分解能のプロGRESSカメラを用いたスイス社製はその2倍強の価格)。

近年、CCDカメラやパソコン(PC)への画像取込インターフェースなどが開発され、PCを用いた三次元計測が可能となった。しかし、これらで用いられている計測理論は、歪の少ない航空写真用カメラを用いたものをそのまま利用しており、空間分解能の粗いCCDカメラを用いる計測には過剰なものとなっている。筆者らは、CCDカメラを使用した簡易な計測理論¹⁾を用いて、通常市販されている汎用PCとCCDカメラ、スポットレーザ投光器を使用した安価で可搬性のある非接触型の

三次元計測システムを構築し、現在0.5%以下の精度で三次元計測が可能であることを実証している²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾。

本論文は、三次元計測装置の概要を説明するとともに、三次元計測の応用技術として、

- (1) 新旧コンクリート打継目
- (2) 膜・シェル構造の構造解析

への適用例について示したものである。

(1)では、①コンクリートの表面粗度の計測、②表面粗度の定量化、③新旧コンクリート一体化試験体の製作、④付着実験、⑤表面粗度と付着特性の関係について検討、というフローで研究を進めた。

(2)では、複雑な曲面形状をもつ膜構造あるいはシェル構造の応力・変形・振動解析を行うことを目的として、①三次元座標情報からFEM解析のための自動メッシュ分割、②汎用有限要素コードへの組込み、というフローで計測・解析システムの開発研究を行った。アルミニウム合金製試験片による振動実験およびRayleigh-Ritz法による解析結果と本三次元計測装置を用いて得られた解析結果を比較することにより、本研究で提示した三次元計測ならびにFEM構造解析システムの有用性について検討した。

2. 可搬・非接触型三次元計測装置

2.1 三次元計測装置の概要

本計測システムは、スポットレーザ投光器、CCDカメラ(2台)、スリットレーザ制御装置、キャリブレーション用ボード(以後、CBと略記)、システムコントローラ(PC)から構成される。計測装置の概要を写真-1に示す。

写真-1に示すように可搬性があり非接触型の三次元計測システムで、ステレオ画像法、スポットレーザ投光法、スリットレーザ投影法の3つの計測が可能である。ステレオ画像法では、左右2台のカメラを用いて対応点を抽出する必要があるが、この作業はかなり面倒である。レーザを用いれば、簡単な画像処理(輝点検出)で対応点を抽出することができる。さらに、スリットレーザ光線を用いると、計測時間の迅速化が図れる。

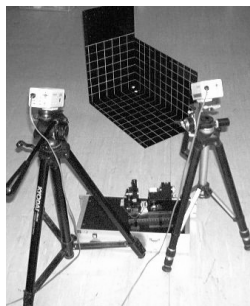


写真-1 レーザ CCD 型三次元計測器

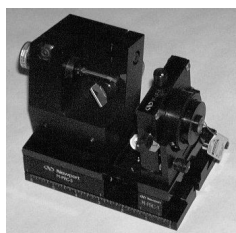


写真-2 スポットレーザ投光器

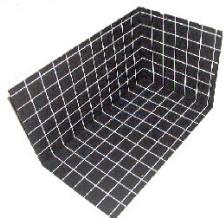


写真-3 キャリブレーション用ボード



写真-4 スリットレーザ制御装置

スポットレーザ投光器(写真-2)は、12ビット分解能のスカナーを2軸に装着したもので、その先端部でアルミ製の鏡を回転させることによって半導体レーザを対象目標点に照射することができる。CCDカメラは、通常市販されているもの(Panasonic製WV-PB510、有効画素数:771×492)を用いた。CB(写真-3)は、カメラパラメータを求めるための基準座標を決定するために用いるものである。直角に配置された3枚の板に5cm間隔で線を引き、その交点を基準点としている。スリットレーザ制御装置(写真-4)は、2.4576Hzのパルス信号を250KHzのパルス信号に変換し、内蔵DA変換器によってアナログ信号に変換し、スリットとして出力している。パソコンは、CPU Pentium II 300 MHz、メモリ 256 MB、ハードディスク 4GBの機能を持ち、また、スポットレーザ投光器の鏡の角度を制御するためのモータコントロールユニット、画像処理ボード、DA変換ボードを取り付けている。

2.2 計測のフローと理論

三次元計測の計測原理では図-1に示すような透視変換モデルが用いられる。図中の F はレンズ主点、 f はレンズの焦点距離、 I は実結像面である。レンズ主点を原点としたときの対象物の点 P の物体座標(絶対座標)を $P(X, Y, Z)$ とする。また、実際のカメラは、対象物→レンズ→実結像面となっているが、ここでは像が逆転してわかりにくいため、仮想的に結像面 I' をレンズの前に置き、対象物→仮想結像面→レンズと配置し、仮想結像面に透視された点 P' の基準座標を $P'(X_c, Y_c, Z_c)$ とする。

計測データの入出力のフローを図-2に示す。(a)は幾何校正法(以後、キャリブレーションと記述)、(b)は三次元計測法のフローである。

三次元座標を求めるには、次式が用いられる。

$$\lambda \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ただし、 λ は定数、 u 、 v はラスタ座標(カメラ内の二次元画像座標)、 X 、 Y 、 Z は三次元座標、 $C_{11} \sim C_{34}$ はカメラやレーザの特性を表すパラメータであり、カメラの絶対座標系に対する位置と方向、レンズの焦点距離が含まれる。 C_{ij} は図-2(a)に示すフローで求められる。三次元計測を行う前に、まずカメラとレーザの位置関係などを表すこれらのパラメータを求める必要がある。この作業をキャリブレーションと言う。キャリブレーションは、表面にグリッドを引いた平面板を3枚組合せたCBを使って行なう。このCB上の点を任意に9点抽出し、パラメータを算出する。

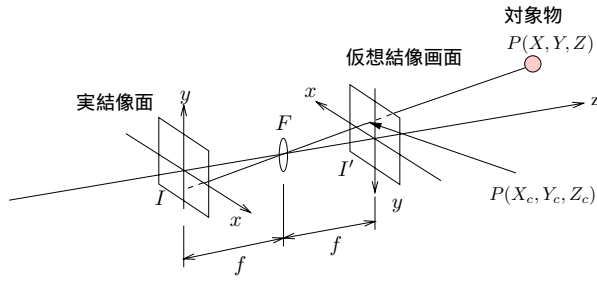
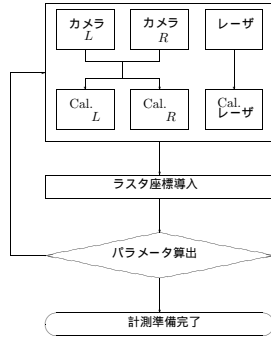
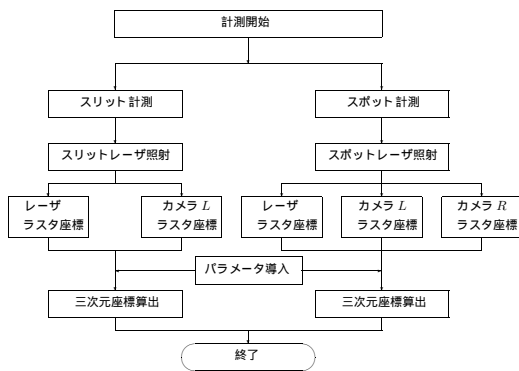


図-1 透視変換図



Cal.: キャリブレーション

(a) キャリブレーション



(b) スポット・スリット計測

図-2 三次元計測のフロー

キャリブレーションによりパラメータを算出した後、指定の場所に計測器を移動させ計測を行なう。計測法には、スポットレーザ計測法とスリットレーザ計測法があり、計測対象物又は計測の目的により選択する。図-2(b)のフロー図に示すようにレーザを照射した時の差画像と光重心法によりラスタ座標が求まる。式(1)を変形すると、式(2)が導かれる。

$$\begin{bmatrix} L_{11} - L_{31}u_L & L_{12} - L_{32}u_L & L_{13} - L_{33}u_L \\ L_{21} - L_{31}v_L & L_{22} - L_{32}v_L & L_{23} - L_{33}v_L \\ R_{11} - R_{31}u_R & R_{12} - R_{32}u_R & R_{13} - R_{33}u_R \\ R_{21} - R_{31}v_R & R_{22} - R_{32}v_R & R_{23} - R_{33}v_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{34}u_L - L_{14} \\ L_{34}v_L - L_{24} \\ R_{34}u_R - R_{14} \\ R_{34}v_R - R_{24} \end{bmatrix} \quad (2)$$

ただし、 L_{ij}, R_{ij} はパラメータ ($i, j = 1 \sim 4$)、 u_L, u_R, v_L, v_R は左右のラスタ座標を表す。

両計測法とも計測条件(計測範囲、レーザ移動ピッチ、しきい値等)とパラメータを計測前に入力すると、

計測が終了するまで自動的に三次元座標を算出することができる。

以上の式をマトリックス表記すると、以下のように書くことができる。

$$C \cdot X = A \quad (3)$$

さらに変形すると、

$$X = (C^T \cdot C)^{-1} \cdot C^T \cdot A \quad (4)$$

式(4)に、パラメータとラスタ座標の2つのデータを代入して三次元座標が算定される。

2.3 精度評価

本計測システムの精度向上を目的として、

- キャリブレーションを3回行ない、算出されたカメラパラメータを平均化する、
- 照射したスポットレーザ光がだ円にならないようにカメラ間距離を小さくする、
- CBがカメラ画面上一杯に映されるように、CBと計測器との距離を採る、

などのキャリブレーション方法を用いて計測した結果を表-1に示す。キャリブレーション方法を工夫することにより精度が向上することがわかる。

表-1 精度評価

計測方法	カメラ間距離 (cm)	計測距離 (m)	精度	
			補正前 (%)	補正後 (%)
ステレオ	84	1	0.290	0.202
		2	0.156	0.135
	123	1	0.291	0.077
		2	0.500	0.451
スポット	84	1	0.376	0.300
		2	1.154	0.861
	123	1	0.297	0.152
		2	0.549	0.435

3. 新旧コンクリート打継目の問題への応用

3.1 はじめに

現在、コンクリート構造物の補修・補強では、床版上面補強、断面修復、CFRP接着、鋼板接着、コンクリート巻立てなどの工法が用いられている。その際、既存コンクリートに新コンクリートを打継ぐ際の下地処理方法と処理程度が、構造物の一体化に大きく影響を及ぼすため、使用用途、目的に応じた処理方法と処理程度を規定、定量化する必要がある。

新旧コンクリート打継目を含めた異種材料の接合面に関しては、次のような研究が行われている。武井⁶⁾、香取⁷⁾は、プレキャストコンクリート接合部のせん断挙動を解明するために、目粗しやシアキーによる表面凹凸の程度とせん断挙動との関係について研究を行っている。栗原⁸⁾、迫田⁹⁾、鶴田¹⁰⁾は、補修・補強で必ず直面する新・旧コンクリート接合部の付着性状に関

する研究を行っている。後藤・魚本¹¹⁾は、13種の表面性状の壁面にモルタルを吹き付けた後、直接引張試験を行い、壁面の粗さと付着強度の関係を求めている。三井ら¹²⁾は、CFRPシートとコンクリート間の付着強度と各種表面粗さの関係を調べるための研究を行っている。さらに、鬼頭ら¹³⁾は鋼・コンクリート合成構造におけるコンクリートとの付着特性を強化・保証するために開発された突起付鋼材とスタッドの相互作用に関する研究を行っている。

上記の研究において、コンクリート表面形状の計測法として、目視計測⁶⁾、触針式変位計による3D計測⁸⁾、レーザ変位計をXYプロッターに取り付けた3D計測法⁷⁾¹²⁾など、いくつかの研究室レベルでの計測法が用いられている。和田ら¹⁴⁾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、計測装置自体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り、これも研究室レベルでの計測法であると思われる。

このように、従来の三次元計測装置は、定位置に設置されており、計測対象物をその場所に搬入・据え付けて計測が行われている。そのほかにも、レーザ光線を用いてトンネル内を検査する計測システムが開発されているが、これはレーザ光線の反射光を光センサーが感知するもので、非常に高価である。筆者らが開発している三次元計測システムの計測原理は、和田ら¹⁴⁾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が、計測速度、精度を向上させ、また、計測システムの計算機部分を小型化し、低価格と可搬性・移動性、および簡易操作性を追求したものである。この計測システムにより、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。

3.2 打継目を有するコンクリート試験体

図-3に示すように、既存コンクリート表面を粗面処理し、新コンクリートを打設して一体化した打継目を有するコンクリート試験体を製作し、傾斜せん断試験を行った。試験体に用いたコンクリートの配合を表-2に示す。

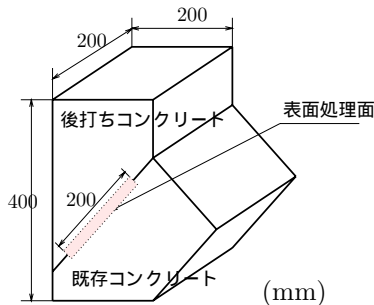


図-3 傾斜せん断試験用試験体

表-2 コンクリート試験体の配合表

粗骨材 最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材 率 (%)	単位量 (kg/m ³)					
					水	セメント	細骨材	粗骨材		混和材
								A	B	
20	8	3	55.3	47.8	183	333	839	468	468	1.249

セメント：普通ポルトランドセメント(後打ちコンクリート部：早強ポルトランドセメント)

試験体の種類を表-3に示す。表面処理法は同表に示すように、既存コンクリート打ち込み時の処理法として、A：ポラコン散布、B：遅延剤処理、C：ホウキ目処理、D：エアセル処理を用い、また、既存コンクリート硬化後の処理法として、E：グラインダー処理、F：チップング(浅)、G：チップング(深)、H：ショットブラスト(浅)、I：ショットブラスト(深)の計9種類の表面処理面(20×20cm²)をもつ試験体を製作した。表面処理部分以外の表面は、付着を切断するために離型材を塗布した。また、既存コンクリートの物性確認のため、曲げ強度、圧縮強度、引張強度用テストピースを3体ずつ作製した。テストピースによる引張強度、圧縮強度、曲げ強度を表-4に示す。

表-3 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 打ち込み時処理	ポラコン散布
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			チップング(浅)
G			チップング(深)
H			ショットブラスト(浅 ²⁾)
I			ショットブラスト(深 ³⁾)

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：建掃材径1.7mm

表-4 コンクリート強度

引張強度	曲げ強度	圧縮強度
2.94	5.30	35.4

(MPa)

3.3 表面粗度の計測と定量化手法

(1) 計測概要

新コンクリート打設前に、コンクリート表面形状を計測し、粗度の定量化を行った。なお、本計測装置による計測結果を検証するために、各種表面処理試験体の表面処理面を触針式3Dスキャナでも計測した。その際、触針式3Dスキャナでは、大きさ、重量の面から試験体自体での計測はできなかったため、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することにした。本研究では、レーザ光式3D計測装置および触針式3D計測器によって得られる計測結果を比較し、その計測結果の相関関係に注目して本計測装置の有効性の検証を行った。なお、触針式3D計測器では4万点の計測に10～12時間を要したのに対し、レーザ光式3D計測器では3分程度で計測することができる。

表面形状(表面粗度の程度)の異なる9種類のコンクリート表面を写真-5に示す。

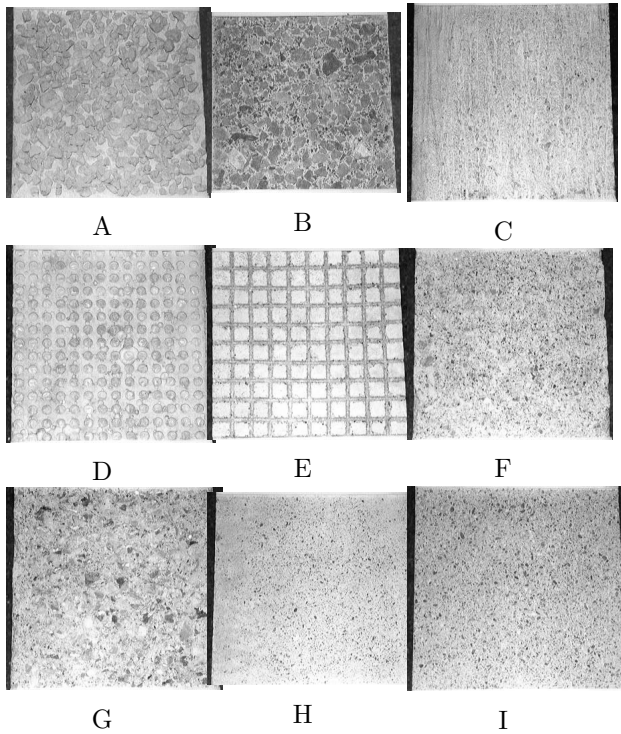


写真-5 コンクリート表面形状

(2) 表面粗度の評価方法

触針式及びレーザ光式の三次元計測装置を用いて対象物の表面形状を計測し、得られた三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次の6種類の項目に着目して処理することにより定量化を行った。

① 表面積

縦・横の測線距離の平均値 (\bar{L}_x, \bar{L}_y) の積 (処理面の実表面積 A) の投影面積に対する比率 (H) で次式で表される。

$$H = A/T \quad (5)$$

$$L_x = \sum_{i=1}^n \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta z_i^2}, \quad L_y = \sum_{i=1}^n \sqrt{\Delta y_i^2 + \Delta z_i^2}$$

Δx_i : 測定間隔, Δz_i : 深さの差 (測線は x 方向)

Δy_i : 測定間隔, Δz_i : 深さの差 (測線は y 方向)

$$A = \bar{L}_x \bar{L}_y$$

\bar{L}_x : x 方向累積距離平均, \bar{L}_y : y 方向累積距離平均,

A : 処理面の表面積, T : 投影面積

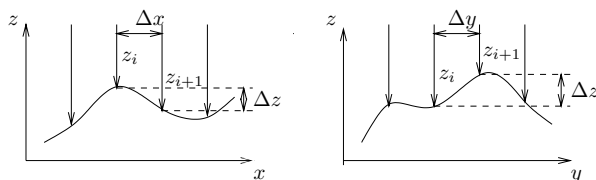


図-4 測線の累計距離

② ひび割れ面状係数¹⁵⁾(線の角度特性)

測定ライン N の隣接点間の高低差で表した傾きの平均傾斜に対する標準偏差は、式(6)で表わされ

る。ひび割れ面性状係数 S は、ひび割れ面上の全測定ラインの平均を取った平均標準偏差として式(7)で表される。

$$\sigma_N = \frac{1}{l} \left[\frac{1}{n-2} \left\{ \sum_{i=1}^{n-1} (y_{n(i+1)} - y_{ni})^2 - \frac{1}{n-1} (y_{nN} - y_{n1})^2 \right\} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$S = \left[\frac{1}{M} \sum_{n=1}^M \sigma_N^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

n : 測定数, y_i : 測定点 i の基準線からの距離, l : 基準線上の測定間隔, M : 測定ライン総数, σ_N : 測定ライン N における隣接測定間の高差で表わした傾きの平均傾斜に対する標準偏差

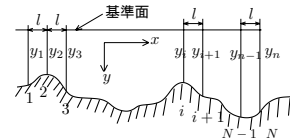


図-5 ひび割れ面性状係数

③ 斜面の角度特性 (面的角度特性)

表面処理した凹凸の水平に対する角度 (隣接点を結ぶ直線の傾き) を求め、その標準偏差を算出したものである。

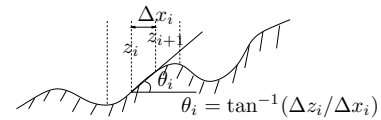


図-6 斜面の角度特性

④ 表面深さの頻度分布

ある基準面から処理表面までの高さを表面深さとし、表面深さの標準偏差を算出したものである。

⑤ 平面方程式とその距離分布

最小自乗法により三次元計測データを通る平面方程式を算定し、平面方程式と各データの距離分布の標準偏差を算出したものである。

⑥ 山数

各三次元計測データを x, y 軸正負の4方向から着目する。各方向の隣接計測データにおいて、前データより後データの方が高い場合のデータを抽出していき、4方向全てで満足するデータを山と定義し、山数を全計測データ数で除したものである。

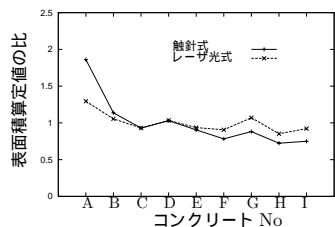
3.4 計測結果の評価

一例として表面粗度の評価法のうち表面積と表面深さについて、両計測法による計測データから算定したものを図-7に示す。同図の横軸は各試験体の種類、縦軸は各表面粗度算定値を9試験体の平均表面粗度算定値で除した比率である。レーザ光式と触針式は、計測する位置や数、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は差が生じている。しかし、表面処理状態 (A ~ I) に注目した両計測法による表面粗度算定値

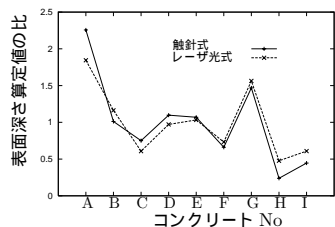
は、表面積、表面深さとも同じ傾向を示している。

図-8は、表面粗度の算定値(表面積と表面深さ)に関して、横軸に触針式3D計測器により得られた値を、縦軸にレーザ光式3D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。レーザ光式と触針式による計測結果には、表面積と表面深さのいずれの場合でも高い相関があることがわかる。

6種類の粗度の評価方法について、相関係数(寄与率)を用いて、触針式3D計測器およびレーザ光式3D計測装置によって得られた粗度算定値の相関関係を求めた。触針式3D計測器とレーザ光式3D計測装置から各々得られた値の相関関係は表-5のように求まる。

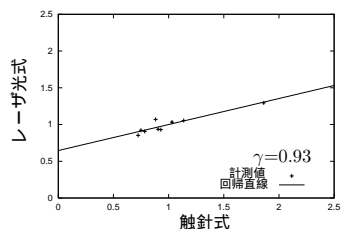


(a) 表面積

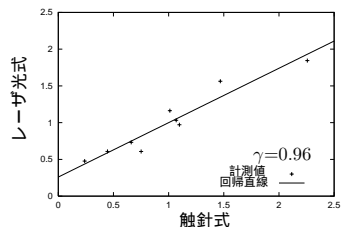


(b) 表面深さ

図-7 表面形状計測結果



(a) 表面積



(b) 表面深さ

図-8 両計測法による表面粗度の算定値の相関

表-5 両計測法の相関

評価方法	相関係数
表面積	0.93
線の角度	0.86
面的角度	0.48
表面深さ	0.96
平面方程式	0.58
山数	0.77

表-5の結果より、触針式3D計測器とレーザ光式3D計測装置による相関係数は、表面積、線の角度、表面深さ、山数の評価方法は比較的高いが、他2評価法は低いことがわかる。

3.5 付着せん断試験結果

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。試験方法の概略図および変位計・ひずみの測定位置を図-9に示す。表-6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。

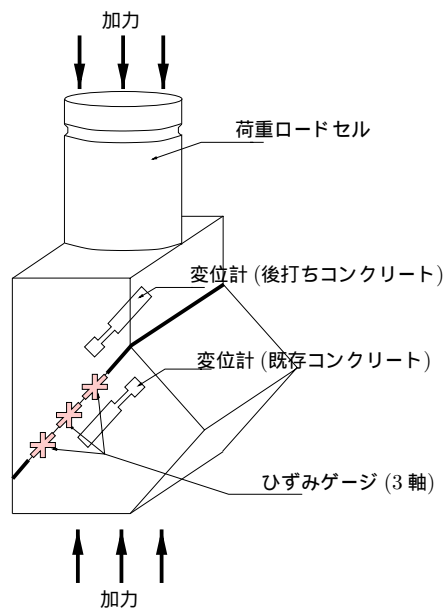


図-9 試験方法および変位計・ひずみ測定位置

表-6 せん断試験結果

試験体	表面処理状態	破壊	荷重(kN)
A	ボラコン散布	圧縮	994
B	遅延剤処理	圧縮	1084
C	ホウキ目処理	せん断	578
D	エアセル処理	せん断	766
E	グラインダー処理	せん断	783
F	チッピング(浅)	せん断	950
G	チッピング(深)	圧縮	1027
H	ショットブラスト(浅)	せん断	481
I	ショットブラスト(深)	せん断	780

3.6 コンクリート表面粗度と付着力の関係

レーザ光式と触針式による三次元計測結果から得られた表面粗度算定値と、傾斜せん断試験における破壊荷重強度との相関関係を図-10および表-7に示す。図-10の横軸は、レーザ光式計測から得られた表面粗度算定値である。データ数が9個と少なく、また、全てが同じ破壊状態(せん断破壊せずに圧縮破壊したものもある)ではないので、表面粗度算定値と破壊強度との相関を単純に求めることと問題があるものの、粗度と破壊強度の相関は比較的高いことがわかる。

表-7 両計測法の相関および粗度と破壊強度の相関

評価方法	粗度算定値と破壊強度	
	触針式	レーザ光式
表面積	0.27	0.49
線の角度	0.26	0.53
面的角度	0.39	0.25
表面深さ	0.55	0.68
平面方程式	0.53	0.09
山数	-0.58	-0.42

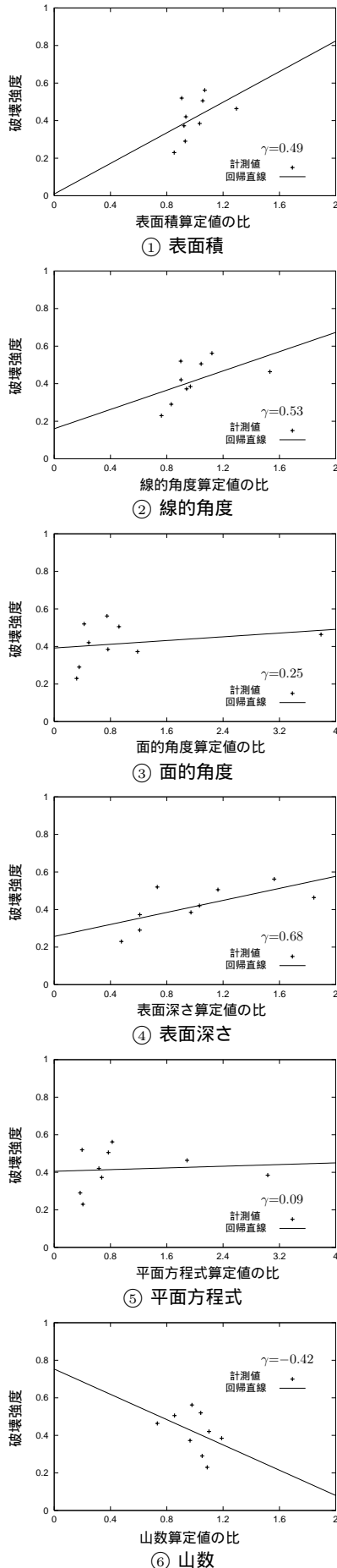


図-10 表面粗度と破壊強度の相関

4. 曲面板の自由振動解析への応用

4.1 はじめに

筆者らが開発した三次元計測装置は、可搬性があり非接触型であることが、他の計測装置と比べて優位な点の一つである。例えば、柔材料からなる膜構造の形状計測では、触針式計測器によると表面を傷つけてしまったり、膜面がへこんだりして、正確な膜形状の計測を行うことができない。また、小さなモデルでは、レーザ変位計などを用いて計測も可能であるが、比較的大規模である建設構造物の三次元計測には不適である。最近、三次元レーザ座標計を利用して、急崖斜面などのように人間の立ち入りが困難な危険な現場での計測も行われている¹⁹⁾が、1度に1点しか計測することができず、また高価である。

本節では、

- ① 筆者らが開発した可搬・非接触型である三次元計測装置の有効性・有用性の検証、
- ② 三次元計測によって得られる三次元座標情報の有効活用技術の検討、

を目的として、築地ら¹⁶⁾¹⁷⁾¹⁸⁾による曲面板の自由振動実験・解析結果と比較検討を行った。

4.2 築地らによる曲面板の振動解析・実験の概要

(1) 解析方法

築地ら¹⁶⁾¹⁷⁾¹⁸⁾は軸流回転機翼の振動解析法の一つとして、翼をねじれた薄板または曲板にモデル化し、薄肉シェル理論から導かれた正確なひずみ-変位関係を用いた Rayleigh-Ritz 法による解析法を提案するとともに、ねじれた変厚円筒曲面板やねじれた薄肉円すい曲板に対して振動数パラメータに及ぼす曲率半径や初期ねじれ角の影響について検討している。

ねじれた薄肉円筒曲面板を図-11に示す。曲板は x 軸まわりに一定のねじり率 k でねじれており、円筒の平均半径 a 、円筒の中心角 β 、厚さ t 、長さ l である。また、 e は x 軸と円筒の中心との間の距離である。

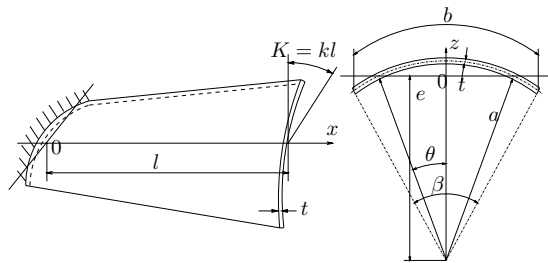


図-11 ねじれた薄肉円筒曲板

(2) 実験方法

試験片の寸法を表-8に示す。試験片は、図-12に示すようにアルミニウム合金厚板から三次元切削機を用いて製作した試験片で、 x 軸が円筒の中心と $e = 20\text{mm}$ だけずれた試験片である。

なお、試験片の厚さ t は曲板内の70点で測定した厚さの平均値である。試験片の表面はレーザホログラフィ装置による振動モード測定のため白色のラッカーで薄く塗装されている。また、材料定数は、弾性係数を $E = 72\text{GPa}$ 、ポアソン比を $\nu = 0.33$ 、比重を2.8とした。

防振台上の固定金具に試験片を固定し、試験片の裏面からスピーカーで加振する。なお、スピーカーの加振力が不足する場合には小型電動加振機(加振力1KgG)を用いる。試験片に貼付したひずみゲージあるいは圧電素子出力の極大点の加振周波数を測定し、試験片の共振周波数とする。共振時の試験片の振動モードはレーザホログラフィ(He-Neレーザ、出力30mW)の時間平均法によって測定する。

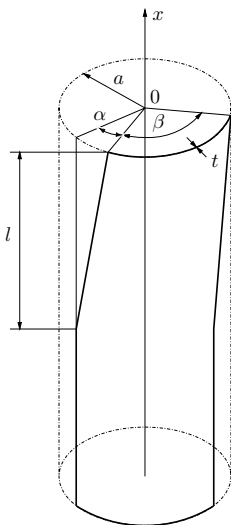


図-12 試験片

表-8 試験片寸法

試験片	a (mm)	l (mm)	t (mm)	e (mm)	β ($^{\circ}$)	K ($^{\circ}$)
寸法	30.8	98	1.97	20	88	20

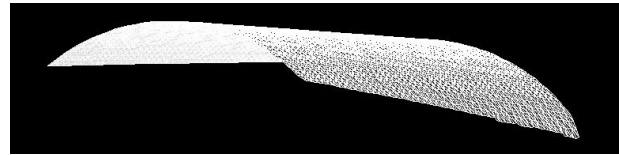
4.3 三次元計測を利用した振動解析の方法

試験片の曲面をレーザ光式3D計測装置で計測して得られる三次元座標データを用いて、応力・変形および

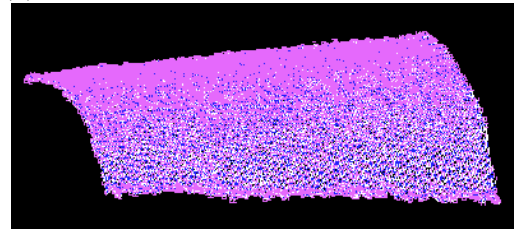
振動解析を行うために、以下のような計測・解析システムを構築した。

- ① 高速・高精度計測を追求した可搬・非接触型3D計測装置の開発、
- ② 三次元座標からFEM解析のための自動メッシュ分割できるシステムの構築、
- ③ 汎用有限要素コードへ組み込んだ解析システムの開発。

なお、比較のために触針式3D計測器を用いて計測および解析も行った。図-13は両計測装置により得られたデータを用いて有限要素解析のメッシュ分割した図である。本計測装置による計測は、触針式3D計測器による計測と比較して、周辺境界部の取り込みが十分でないことが見てわかる。しかし、三次元計測するのに、触針式3D計測器では1mmピッチで約5~6時間要したのに対して、本計測装置では0.5mmピッチで約2分かからなかった。また、触針式3D計測器は定位置に設置しなければならず、さらに、計測対象物の重量や大きさに制限があるのに対して、本計測装置は可搬式であるので、自由に任意の物体の三次元座標を取得することが可能である。



(a) 触針式3D計測器によるFEMメッシュ分割



(b) レーザ光式3D計測器によるFEMメッシュ分割

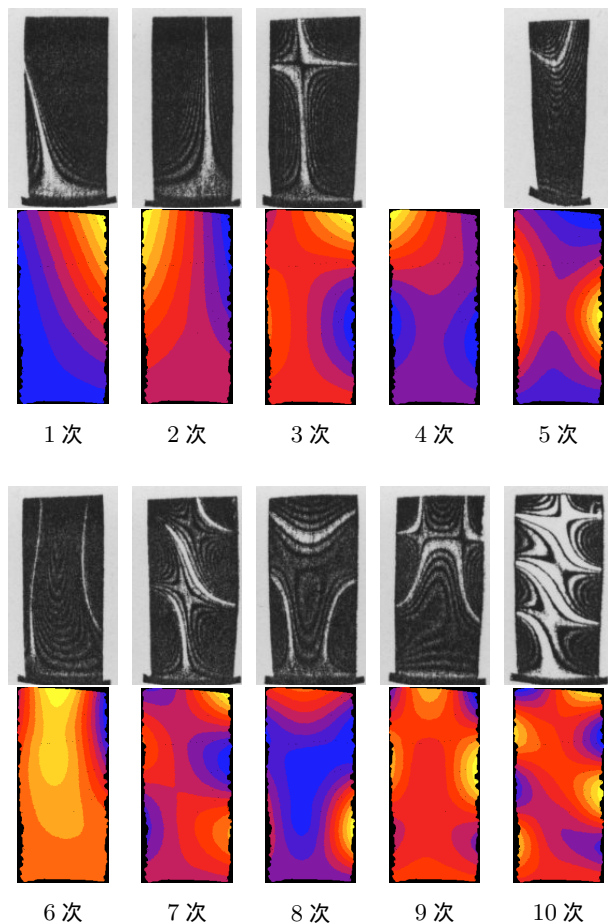
図-13 両計測法によるFEMメッシュ分割

4.4 曲面の振動解析・実験結果の比較

両三次元計測により得られたデータを用いて有限要素解析による固有振動解析結果を、築地らの結果とともに表-9に示す。表-9の築地らによる研究は、三次元切削機により指定された寸法に製作された曲面をレーザホログラフィ装置の時間平均法により得られたものである。また、解析値はRayleigh-Ritz法によるものである。Rayleigh-Ritz法による解析においては、曲面形状等は関数表示されている。一方、本研究では、曲面形状が未知なるものとして、三次元計測を行い、FEMにより固有振動解析を行った。なお、両計測ともFEM解析では、3節点三角形シェル要素を用いており、触針式3D計測では要素数8653、節点数4468、レーザ光式3D計測では要素数28660、節点数14560であった。図

-14に、1次から10次までの振動モード図について、レーザ光式3D計測による解析結果と築地らのレーザホログラフィ装置による実験結果をそれぞれ示す。モード図はレーザホログラフィの時間平均法による実験結果およびRayleigh-Ritz法による解析結果とよく一致していた¹⁷⁾。

レーザ光式3D計測および触針式3D計測による固有振動解析は、いずれも1次の共振周波数以外は良好な結果が得られていることがわかる。



上段:レーザホログラフィによる実験結果
下段:レーザ式3D計測による解析結果

図-14 曲面板の振動モード図

表-9 固有振動解析結果

モード	試験片						
	築地らの研究			本研究			
	実験値	R-R	誤差	触針	誤差	レーザ	誤差
1	585	603	3.1	627	7.2	693	18.5
2	922	968	5.0	918	-0.4	959	4.0
3	2598	2665	2.6	2647	1.9	2687	3.4
4	—	3300	—	3323	—	3414	—
5	3733	3975	6.5	3756	0.6	3995	7.0
6	4827	4766	1.3	4853	0.5	4787	0.8
7	5318	5523	3.9	5458	2.6	5366	0.9
8	6450	6615	2.6	6350	-1.6	6609	2.5
9	7258	7477	3.0	7264	0.1	7488	3.2
10	8629	9221	6.8	8981	4.1	8950	3.7
(単位)	Hz	Hz	%	Hz	%	Hz	%

R-R:Rayleigh-Ritz法

5. まとめと今後の展望

5.1 まとめ

本研究では、可搬・非接触型三次元計測装置を製作し、この三次元計測装置を用いて、新旧コンクリートの打継目の問題と膜・シェル構造の構造解析へ応用した。得られた結果は以下のようにまとめられる。

1. 本計測装置は、通常普及市販されている CCD カメラ 2 台と安価なレーザを用いて三次元計測の精度を向上させるとともに、パソコンの計算機部分を小型化し、低価格、可搬性、簡易操作性を有している。
2. 本計測装置は、触針式 3D 計測器と比較して、可搬性・移動性があり、比較的大きい構造物も計測可能である。また、非接触式なので、天井、壁、床など任意方向のコンクリート表面の凸凹形状の計測や、膜のような構造物にも適用可能である。
3. 本計測装置を用いたコンクリート打継ぎ部の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もつ結果が得られた。また、本計測装置による計測は、触針式計測に比べ格段に短時間に計測することができる。
4. 本計測装置を用いて、曲がりかつねじれた曲面板を対象として三次元計測を行い、さらに得られた三次元座標情報から有限要素メッシュを自動作成するプログラムを作成し、有限要素解析を行うためのシステムを開発した。
5. 有限要素解析の結果、ほぼ良好な結果が得られた。本研究で開発した《三次元計測ならびに解析システム》は、膜構造やシェル構造の計測・解析に適用可能であることがある程度検証された。

5.2 今後の展望

本研究で開発した三次元計測装置は、前記のように精度と応用性についての検討を行うことができたが、今後以下のような点に注目して研究を続行していく予定である。

1. 計測時のノイズ処理、FEM メッシュ分割作成など改良すべき点も残されているので、さらなる改良を行なうとともに、レーザホログラフィによる振動モード測定装置を自由に使用できる環境にもあるので、今後、異方性材料を含めて種々の材料からなる構造部材の応力・変形・振動解析へ適用していく予定である。
2. 本計測装置は、非接触式なので、膜構造のしわの発生の実験などの研究分野に適用可能であると考えられる。そのためにも奥行き方向の精度も検証する必要がある。
3. 計測システムの精度は、CCD カメラの画素数と画像処理ボードの性能に依存している。CCD カメラや画像処理ボードの性能は急速に進歩しているの

で、さらなる高精度化も近い将来必ず実現できるものと考えられる。本計測装置のさらに精度が向上すれば、様々な分野への応用が可能となるもの考えられる。また、高画素数のデジタルカメラを用いた計測法についても検討していく予定である。

4. 本論文では示さなかったが、キャリブレーションの方法を工夫することによって、平和祈念像（長崎市）などの大規模建造物の三次元計測も実証済みであるので、これについては別の機会に報告を予定している。

6. 謝辞

本研究を遂行するにあたり、ショーボンド建設（株）樋野勝巳氏、岳尾弘洋氏から、実験方法についてご教示戴き、小沢コンクリート工業（株）廣瀬匡見氏には、載荷実験を行って戴き、また奈良女子大大学院生中山沙織さん（研究当時、長崎大学工学部構造工学科）には、画像処理、画像解析などのプログラムの作成、データの整理などを手伝って戴きました。ここに記して感謝申し上げます。

また、ねじれた薄肉円すい曲板の模型は、長崎大学名誉教授築地恒夫先生の回転翼の研究で使用されていたもので、山下努技官により製作されたものを利用して戴きました。ここに記して謝意を表します。

最後に、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)展開研究(研究代表者:松田浩、課題番号11555118)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) 杉原太郎ほか: 小規模三次元計測システムの開発, 日本写真測量学会発表論文集, pp786-787, 1998.
- 3) 杉原太郎ほか: 長さ基準における校正手法を導入した三次元画像計測システムの開発, 日本写真測量学会平成11年度年次講演会発表論文集, pp299-302, 1999.
- 4) 和田眞禎ほか: コンクリート表面処理面の粗度測定のための三次元計測装置の開発, 土木学会西部支部研究発表会概要集, pp786-787, 1999.
- 5) 和田眞禎ほか: 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回年次学術講演会講演概要集, pp560-561, 1999.
- 6) 武井一夫: コンクリート打継ぎ面の界面粗さの評価方法

— 界面粗さの形状とせん断伝達 —, 日本建築学会構造計報告集, 第455号, pp.7-16, 1994.

- 7) 香取慶一, 林静雄, 榎谷貴光, 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 — プレキャスト接合部のせん断挙動に関する研究 —, 日本建築学会構造計報告集, 第507号, pp.107-116, 1998.
- 8) 栗原哲彦, 西田好彦, 鎌田敏郎, 六郷恵哲: コンクリート打継ぎ面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.21, No.3, pp.1093-1098, 1999.
- 9) 迫田恵三, 足立一郎, 光延優一, 吾妻健司: 各種打継ぎ材料がコンクリートの付着強度に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.1, pp.413-418, 1998.
- 10) 鶴田真一, 河野進, 角徹三: 付着割裂試験法によるコンクリート打継ぎ面の接着性能評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.3, pp.1165-1170, 1998.
- 11) 後藤充志, 魚本健人: 吹付けモルタルの付着強度に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.1171-1176, 1998.
- 12) 三井雅一, 福澤公夫, 沼尾達弥: CFRPシートとコンクリート間の付着強度と各種表面粗さパラメータとの関係, 土木学会第54回年次学術講演会, V部門, pp720-721, 1999.
- 13) 鬼頭宏明, 上中宏二郎, 園田恵一郎: オープンサンドイッチ形鋼・コンクリート合成はりにおける突起付き鋼材のせん断付着特性, 土木学会構造工学論文集, Vol.44A, pp.1527-1536, 1998.
- 14) 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, — コンクリート亀裂面の形状特性分析に関する基礎的研究(その1) —, 日本建築学会構造系論文集, 第490号, pp179-188, 1996.
- 15) 西村 昭, 藤井 学, 宮本文穂, 斉藤 功: ひびわれRC部材のせん断伝達作用に対するひびわれ面性状の影響, 土木学会論文集, 第360号/V-3, pp91-100, 1985.
- 16) 築地恒夫ほか: ねじれた変厚円筒曲板の自由振動, 第35回構造強度に関する講演会, 日本航空宇宙学会, pp150-153, 1996.
- 17) 築地恒夫ほか: ねじれた薄肉円筒曲板の振動実験結果, 第38回構造強度に関する講演会, 日本航空宇宙学会, pp101-104, 1996.
- 18) 築地恒夫ほか: ねじれた薄肉円すい曲板の自由振動, 日本機械学会論文集(C編), 65巻629号, pp44-52, 1999.
- 19) 宮崎英司ほか: 3次元レーザ座標計の画像マッチング化による精度向上化について, 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集, 第6部, pp.564-565, 1999.

(2000年4月21日 受付)