

論文 ヴィコフォルテ教会堂の劣化現況に関する非破壊検査

青木 孝義*1・込山 貴仁*2・谷川 恭雄*3・湯浅 昇*4

要旨：歴史的な組積造建築物の保存・補強・修復計画を立案するにあたり，その構造特性や劣化現況，使用材料の力学的特性等の把握が重要となる。本研究は，イタリア，ピエモンテ州のモンドヴィ市近郊に位置するヴィコフォルテ教会堂を中心とする歴史的組積造建築物の材料特性，劣化現況の把握を目的として，現地及び室内実験においてレンガにフィルム簡易吸水試験，測色，引っかき法，ウィンザーピン法の非破壊試験を適用し，吸水速度，表乾密度，吸水率，色彩値，引っかき傷幅，ウィンザーピン貫入抵抗値と圧縮強度，静弾性係数の関係を明らかにしている。

キーワード：組積造，吸水試験，引っかき法，ウィンザーピン法，色彩，力学特性

1. はじめに

イタリア，ピエモンテ州のモンドヴィ市近郊に位置するヴィコフォルテ教会堂（1596 年建設開始，1731 年ドーム建設，1733 年ランタン完成，図－1，2）は，長軸約 37.15m，短軸約 24.80m，高さ約 16.60m の世界最大規模の楕円形ドームを持ち，地上からランタン上部までの高さは約 84m に及ぶ。ドームの規模は勿論，その建設の歴史や時代背景，建築的特徴からも教会堂は 1880 年にイタリアの国宝に指定され，現在は多くの人が訪れる信仰や観光の場となっている。

しかし，その崩壊に関する構造的安定性は 1600 年代の建設中止，1700 年代始めのドラム再建に見られるように，建設当初から敷地選択の誤りによる不同沈下やドームの自重による亀裂の進行により脅かされてきた。ドームの構造的安定性については注目を集め，1962 年には Garro¹⁾による，1983 年には Rodio²⁾による調査報告がなされている。また，1983 年には地下水位の制御を目的とする水路構が設置され，1987 年にはドーム基部にポストテンションリングが挿入され，フレスコ画の修復が行われている。



図－1 ヴィコフォルテ教会堂外観



図－2 ヴィコフォルテ教会堂ドーム

*1 名古屋市立大学大学院助教授 芸術工学研究科芸術工学専攻 工博（正会員）

*2 株式会社コンステック 大阪診断技術研究所 工博（正会員）

*3 名古屋大学大学院教授 環境学研究科都市環境学専攻 工博（正会員）

*4 日本大学助教授 生産工学部建築工学科 工博（正会員）

ヴィコフォルテ教会堂の保存や補強のためには劣化現況を把握する必要があるが、歴史的価値の高い建築物ほど実際に材料のサンプルを採取して実験を行うことが厳しく禁止されているという問題を抱えている。架構維持のための補強と仕上げ材の保存に向けた補修計画を立案するための基礎データを得ることを目的に実施した第一回調査では、目視現況調査、周辺地盤踏査に加え、サーモグラフィー法による外壁石貼りと礼拝堂フレスコ画の浮き調査、レーダー法と衝撃弾性波法による部材厚測定、補強筋探索、衝撃弾性波法によるテンションリングの破断調査、および超音波法、反発硬度法によるレンガ・目地の強度推定に関する調査を行った^{3), 4)}。第二回調査では、目視調査、サーモグラフィー法によるメインドームフレスコ画の浮き調査、レーザー変位計による不同沈下の進行度チェック、ウィンザーピン法によるレンガ・目地の強度推定に関する調査⁵⁾、固有振動数を推定するための常時微動測定を実施した。

これらの調査結果に基づき、本研究は、同教会堂を中心とする歴史的組積造建築物の材料特性、劣化現況の把握のため、現地及び室内実験においてレンガにフィルム簡易吸水試験、色彩測色、引っかき法、ウィンザーピン法の非破壊試験を適用し、吸水速度、表乾密度、吸水率、色彩値、引っかき傷幅、ウィンザーピン貫入抵抗値と圧縮強度、静弾性係数の関係を明らかにすることを目的としている。

ヴィコフォルテ教会堂を中心とする歴史的組積造建築物の劣化現況調査のための手法は確立されておらず、国内においてこのような分野を扱う学問領域もなく、現地調査はコンクリート工学に携わる研究者で組織して行っている。劣化現況調査には、コンクリート工学の分野で使用されている各種非破壊検査技術を組積造建築物に応用している。本研究は、少なくともこのような研究理念と研究手法において、コンクリート工学の学問領域に含まれるものと筆者らは考えている。

2. 試験の概要

2.1 試験材料

試験に用いたレンガは、ヴィコフォルテ教会堂のドーム外側南西部、西部、北西部、ドラム基部礼拝堂屋根外側南西部、西部、北西部、ドラム内側階段室部分の各個所から採取した。

2.2 試験体作製

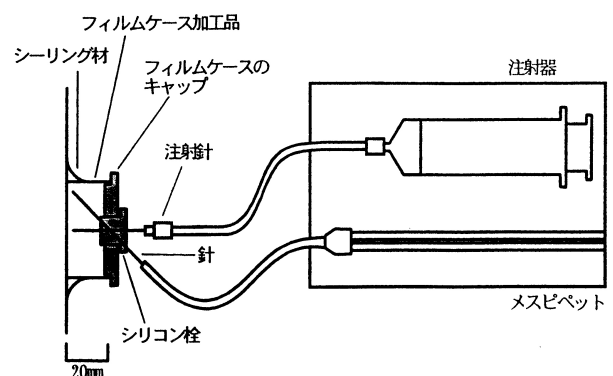
引っかき試験とウィンザーピン貫入試験を行った後のレンガを 20℃の水中に 24 時間浸け、表乾密度を測った後に、圧縮試験及び静弾性試験に用いる小径コア試験体をコアドリルにより作製した。試験体寸法は、外径約 33mm、高さ約 50mm である。

2.3 測定項目と試験方法

試験では、レンガのフィルム簡易吸水速度、表乾密度、吸水率、色彩値、引っかき傷幅、ウィンザーピン貫入抵抗値、圧縮強度、静弾性係数を測定した。

(1) フィルム簡易吸水試験（図－3）

- ① フィルムケースを上端から 2cm の所で切断したものレンガにシーリング材を用いて接着する。
- ② フィルムケースのキャップにシリコン栓をシーリング材を用いて 2，3 度重ね塗りをして接着し、注射針をまっすぐに差し込み、注射器とつなぐ。
- ③ 同様に、シリコン栓に 2 本目の注射針を斜めに差し込み、メスピペットとつなぐ。
- ④ ①のフィルムケースに②，③で作製したキャップをはめる。



図－3 フィルム簡易吸水試験装置

- ⑤ 注射器で水を少しずつ注入していき、メスピペットより水がオーバーフローした時点で注入を止める。
- ⑥ メスピペット上で 0.06ml 吸水される時間を測定する。
- ⑦ 式(1)により、簡易吸水速度 $Q1(\text{ml/sec})$ を算出する。

$$Q1 = W / T \quad (1)$$

ここで、 W ：吸水量(ml)， T ：所要時間(sec)

(2) 表乾密度の測定

切断した各レンガと小径コア試験体を 20℃ の水中に 24 時間浸し、水中質量 $m2(\text{g})$ と気中での表乾質量 $m1(\text{g})$ を測定し、体積と式(2)により表乾密度 d を求める。

$$d = m1 / (m1 - m2) / \rho \quad (2)$$

ここで、 ρ ：水中密度=1.0

(3) 吸水率の測定

表乾密度の測定で使用したレンガを 105℃ の炉の中に入れ絶乾状態にして絶乾質量 $m3(\text{g})$ を測定し、式(3)により吸水率 $Q2(\%)$ を求める。

$$Q2 = (m1 - m3) / m3 \times 100 \quad (3)$$

(4) 引っかかり試験

レンガの引っかかり傷幅の測定は、引っかかり試験器 (N 工業会) を用いて実施した⁶⁾。試験体上面から 5cm の部分より垂直に荷重 1kgf(9.8N) を用い、引っかかり速度 2cm/sec で 10cm 程度引っかかり、傷幅をクラックスケール及びフラッシュルーペを用いて測定した。なお、測定は 3 人で行い、その平均を表面の引っかかり傷幅とし、表面の劣化程度を調べる。

(5) ウィンザーピン試験

ウィンザーピン法は、長さ 30.5mm、直径 3.56mm のピンをスプリングの反発力を用いた押し付け式ピストルで打ち込み、専用のマイクロメータによりその貫入深さを測定し、貫入値から圧縮強度を推定する方法である。貫入深さが浅いほど、マイクロメータの読みは大きくなるように設定されているため、ここでは、マイクロメータの読み値を貫入抵抗値と呼ぶこととする。

(6) 測色の概要

レンガの測色は、分光測色計 (M 社製) を用いて実施した。測色条件は、 $d/8$ (拡散照明・8° 方向受光)、正反射光込み (SCI) で JIS Z 8722 の条件 C に準拠し、測色波長範囲は 400~700nm、測色波長間隔は 10nm、半値幅は約 15nm、反射率測色範囲は 0~175%、分解能 0.01%、光源 D65、分光角度 10° 視野 1 回瞬時発光とし、測定項目は分光分布と色彩値 ($L^*a^*b^*$ 値) である。

$L^*a^*b^*$ 表色系は 1976 年に国際照明委員会 CIE で規格化され、日本では $L^*a^*b^*$ 表色系及び $L^*u^*v^*$ 表色系による物体色の表示方法 JIS Z 8729 において採用され、明度 (明るさの度合い) を L^* 、色相 (色あい) と彩度 (あざやかさの度合い) $C^* : (C^*)^2 = (a^*)^2 + (b^*)^2$ を示す色度を a^* 、 b^* で表す。 a^* 、 b^* は色の方向を示しており、 a^* は赤方向、 $-a^*$ は緑方向、 b^* は黄方向、 $-b^*$ は青方向をそれぞれ示し、数値 (絶対値) が大きくなるに従って色あざやかになり、小さくなるに従ってくすんだ色になる。

(7) 圧縮強度試験と静弾性係数試験

小径コア試験体による圧縮強度試験と静弾性係数試験を JIS A 1108 (コンクリートの圧縮試験方法)、JIS A 1149 (コンクリートの静弾性係数試験方法) に準じて行った。試験体寸法は、外径約 33mm、高さ約 50mm である。抵抗線ひずみゲージ (ゲージ長さ 20mm) を試験体の軸に平行かつ軸に対称な 2 つの母線上で試験体の高さの 1/2 の位置に貼り付け、毎秒 2~3kgf/cm² (0.196~0.294N/mm²) の荷重載荷速度で実験を行った。

3. 実験結果とその考察

3.1 吸水速度

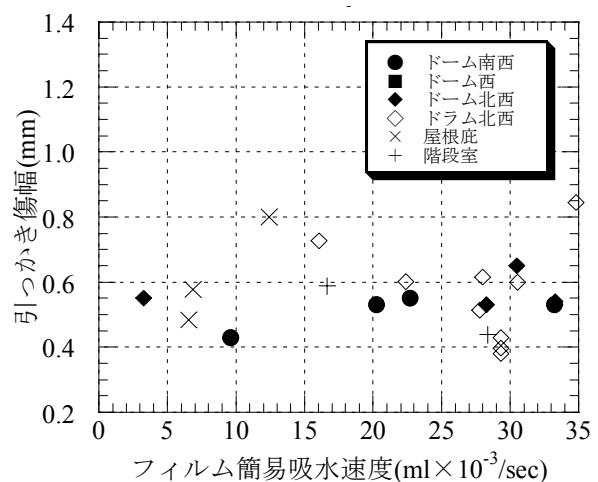
図-4、5 に表乾密度、吸水率とフィルム簡易吸水速度の関係を示す。図-4 より、表乾密度とフィルム簡易吸水速度とに相関関係は見られなかった。本来、吸水率が高いほど吸水速度は速くなると考えられるが、今回の実験で得られた結果ではばらつきが見られた (図-5)。こ

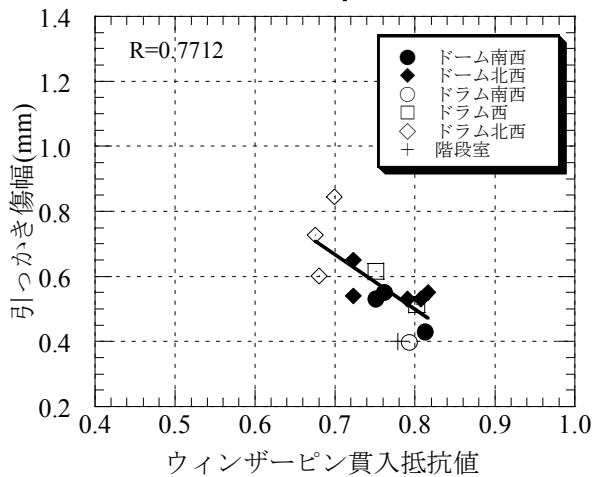
の要因として、フィルム簡易吸水試験を行った箇所が面の一部で、汚れ等の影響を受けたためと考えられる。この点については、今後サンプル数を増やして実験を行い、検討したい。

引っかかり傷幅、ウィンザーピン貫入抵抗値、圧縮強度とフィルム簡易吸水速度の関係を図-6から図-8に示す。これより、現段階では引っかかり傷幅、ウィンザーピン貫入抵抗値、圧縮強度とフィルム簡易吸水速度の相関関係は見られなかった。

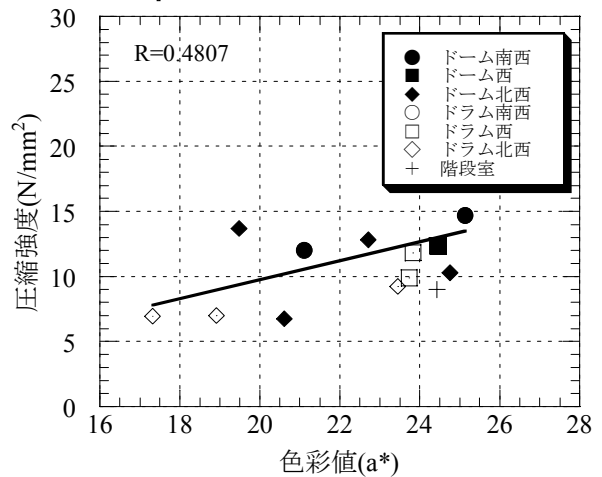
3.2 引っかかり傷幅とウィンザーピン貫入抵抗値

図-9に引っかかり傷幅とウィンザーピン貫入抵抗値の関係を示す。これより、貫入抵抗値が

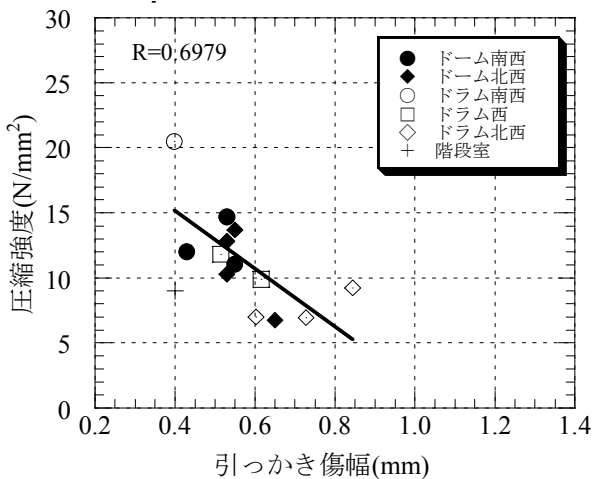




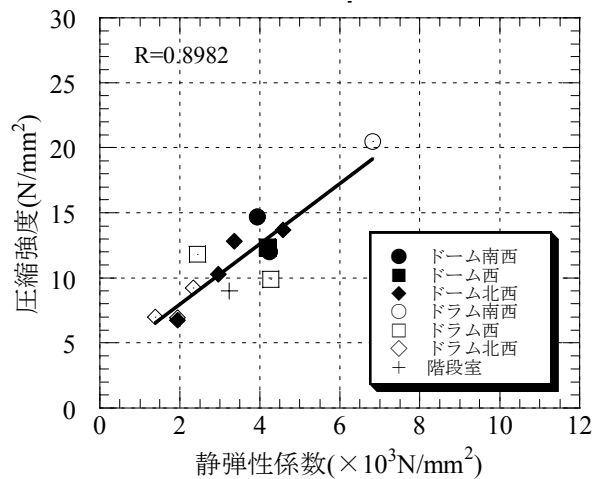
図－ 9 ひっかき傷幅とウィンザーピン貫入抵抗値の関係



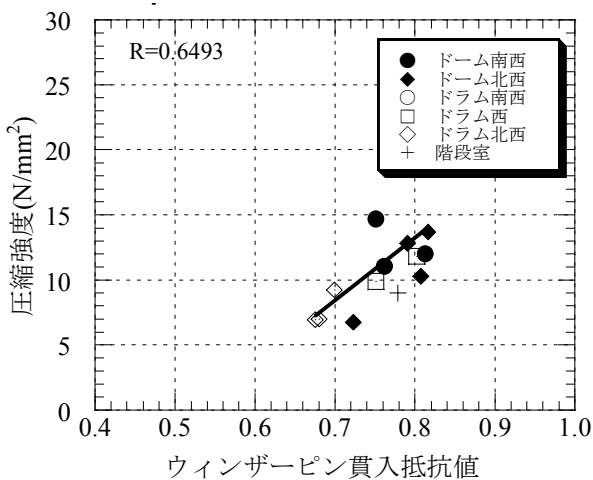
図－ 1 2 圧縮強度と色彩値 a*の関係



図－ 1 0 圧縮強度と引っかき傷幅の関係



図－ 1 3 圧縮強度と静弾性係数の関係



図－ 1 1 圧縮強度とウィンザーピン貫入抵抗値の関係

大きいほどひっかき傷幅が大きくなることがわかる。

図－ 1 0 に圧縮強度と引っかき傷幅の関係を示す。これより、引っかき傷幅が大きいほど圧縮強度が小さくなることがわかる。図－ 1 1 に圧縮強度とウィンザーピン貫入抵抗値の関係を示す。これより、貫入抵抗値が小さいほど圧縮強度が小さくなることがわかる。今回の実験に用いた試験体数は限られており、近似曲線を描くには試験数を増やす必要がある。

図－ 1 2 に圧縮強度と色彩値 a* の関係を示す。これより、圧縮強度と色彩値 a* とに強い相関関係は見られなかったが、このことは表面と

内部でレンガの色彩が異なることに起因していると考えられる。

図-13に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。これより、静弾性係数が大きくなると圧縮強度も大きくなり、その傾向は一次式で表されることがわかる。

本実験条件の範囲におけるレンガの圧縮強度の推定式を重回帰分析により求めた結果、次式が得られた。

$$F_c = -15.51 w_{scr} + 20.39 w_{win} + 4.723 \quad (1)$$

ここに、 F_c ：圧縮強度 (N/mm²)

w_{scr} ：引っかき傷幅 (mm)

w_{win} ：ウィンザーピン貫入抵抗値

なお、推定式(1)の寄与率は51.8%である。

4. まとめ

本研究で得られた知見は以下の通りである。

- (1) レンガのフィルム簡易吸水速度と表乾密度、吸水率、引っかき傷幅、ウィンザーピン貫入抵抗値、圧縮強度の間に明確な相関関係は見られなかった。この点については、今後さらに検討を進める予定である。
- (2) レンガの色彩値と圧縮強度の間に強い相関関係は見られなかった。
- (3) レンガの引っかき傷幅、ウィンザーピン貫入抵抗値と圧縮強度の間に相関関係が見られた。今後は、系統的にレンガの実験を行うことにより、引っかき傷幅、ウィンザーピン貫入抵抗値からレンガの圧縮強度を推定する近似式を提案する予定である。
- (4) レンガの圧縮強度と静弾性係数の間に相関関係が見られることから、引っかき傷幅、ウィンザーピン貫入抵抗値の値を測定することによって、静弾性係数の予測が可能となる。

謝辞

劣化現況調査において便宜をはかっていただきましたトリノ工科大学建築学部教授のキオリーノ博士、文化財保存局、ヴィコフォルテ教会の宗教局ならびに管理局の方々に深く感謝致します。

す。また、三重大学工学部建築学科教授の畑中重光博士、独立行政法人建築研究所材料グループ主任研究員の濱崎仁氏、名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻大学院生の大橋幾世氏には劣化現況調査で助力を得ました。ここに厚く御礼申し上げます。なお本研究は、平成14年度文部科学省科学研究費補助金「基盤研究(B)(2)海外学術」と日比科学技術振興財団研究助成により進められた研究成果の一部である。

参考文献

- 1) Garro, M.: Santuario - Basilica Regina Montis Regalis, Vicoforte - Mondovì, Opere di consolidamento e restauro, Relazione riassuntiva, Vicoforte di Mondovì, 1962
- 2) Rodio SpA: Santuario di Vicoforte, Prove di laboratorio su campioni di muratura, Misure geofisiche, Relazione n.19'797, 1983
- 3) 込山貴仁, 青木孝義, 大橋幾世, 谷川恭雄: ヴィコフォルテ教会堂を中心とする歴史的建築物の劣化現況調査と保存修復方法の提案(その1: 非破壊検査技術を用いた劣化・構造調査), 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), A-1, pp.3-4, 2002.8
- 4) Aoki, T., Komiyama, T. and Tanigawa, Y.: Non-Destructive Tests and Structural Analysis of the Sanctuary of Vicoforte as a Preliminary Report, Vicoforte, pp.1-13, 2002.9
- 5) 大橋幾世, 青木孝義, 込山貴仁, 谷川恭雄, 畑中重光, 濱崎仁, 湯浅昇: ヴィコフォルテ教会堂を中心とする歴史的建築物の劣化現況調査と保存修復方法の提案(その2: 目視と非破壊検査技術を用いた劣化現況調査), 日本建築学会東海支部研究報告集, No.41, pp.137-140, 2003.2
- 6) Yuasa, N., Kasai, Y., Matsui, I. and Shiozaki, S.: Testing Method for Surface Strength of Concrete Slab, Proceedings of 5th International Colloquium Industrial Floors '03, Vol.1, pp.143-148, 2003.1