

人造石工法で建造された百々貯木場の写真測量調査と強度測定について

Photogrammetric Survey and Strength Measurement of Doudo Lumberyard Constructed with Artificial Stone

竹内幸輝¹, 藤井幸泰²

1 名城大学大学院・理工学研究科社会基盤デザイン工学専攻・213433005@ccmailg.meijo-u.ac.jp

2 名城大学・理工学部社会基盤デザイン工学科

概 要

百々貯木場は河川を利用した木材輸送の中継施設である。河川中流域に建造された水中貯木場としては日本で唯一残る土木遺産であり、豊田市有形文化財にも認定されている。この貯木場は、人造石工法と称される、たたきと割石を組み合わせた土木工法で造られている。人造石は、水に対する耐久性の高さや環境面から、近年再注目されているが、貯木場は建造から100年以上経過しており、その維持管理が問題である。このような遺産の修復・保全を考慮する際、はじめに行うのが記録調査である。本研究では、UAVを用いた空中写真測量により記録活動を行い、古文書とも呼べる大正期の設計記録との比較を行った。また、遺産保全という観点からは、劣化による強度低下が大きな問題となる。そこで、たたきが露出している部分に対し、針貫入試験を用いて一軸圧縮強度の推定も行った。その結果、百々貯木場は比較的良好な状態であるが、想定され得る強度より低い場所もあり、材料の劣化が進んでいると考えられる。

キーワード：人造石、たたき、UAV、針貫入試験、土木遺産

1. はじめに

我が国における歴史的遺産や埋没文化財には、軟岩などの石材を使用しているケースが多い。これらのいわゆる石材文化財の多くが、建設されて数十年から数百年の間に、自然現象による風化・劣化が原因の損傷を受けている。文化財というと考古学の問題と捉えがちであるが、石材で構成される文化財に土木工学が果たす役割は非常に大きいと考えられている¹⁾。

鉄筋コンクリートが普及する以前の明治期から大正期にかけて、土木分野を中心とする工事に使用された工法として「人造石工法」が挙げられる²⁾。愛知県出身の服部長七が考案し、練土と割石を組み合わせた土木工法である。割石を使うため、石造構造物の一種であると言える。練土の材料にはまさ土が使われていたため、その母岩である花崗岩が広く分布する中部地方や中国地方を中心に施工が行われた。広島県広島市の宇品築港（1884年着工）、三重県四日市市の潮吹き防波堤（1894年竣工）、愛知県豊田市の明治用水旧頭首工（1909年竣工）同市の百々貯木場（1918年竣工）が代表例として挙げられる^{2)~4)}。

遺産の歴史的な調査及び修復・保全を考慮する際、はじめに行うのが対象となる構造物の記録活動（documentation）である。この記録を基に、修復に用いる材料強度などの物性を把握し、長期的な修復プランを

作成することが重要である。本論では、大正期に建造された百々（どうど）貯木場を対象として、画像計測技術である空中写真測量を用いた三次元記録活動について報告する。作成した三次元記録から、距離や面積の計測が可能であり、大正期の設計記録との比較を行い、現在の状況把握を試みた。さらに、遺産保全という観点からは、劣化による強度の低下が大きな問題となる。そこで針貫入試験を用いて、現地で練土の一軸圧縮強度の推定を行い、想定され得る強度との比較による劣化状態の評価を試みた。

2. 百々貯木場の概要

百々貯木場は、河川を利用した木材輸送の中継施設であり、愛知県豊田市を南北に流れる矢作川の中流域に現存する（図1）⁵⁾。貯木場の全容を図2に示す。1918年に建造され、長さ約130m、幅約60m、深さ約10mの貯木場である。河川中流域に建造された水中貯木場としては、日本で唯一残る遺産構造物である。この貯木場内で把握することができる施設は、貯水池、突堤、樋門、堤防、製材所跡である（図3）⁵⁾。1929年に貯木場から約2km上流に越戸（こしど）ダムが建設されたことで木材の輸送に支障をきたし、1930年に使用停止となった（図1）。貯木場は使用されずに放置され、河川から土砂などが流入し、半ば埋没状態であった。その後、1988

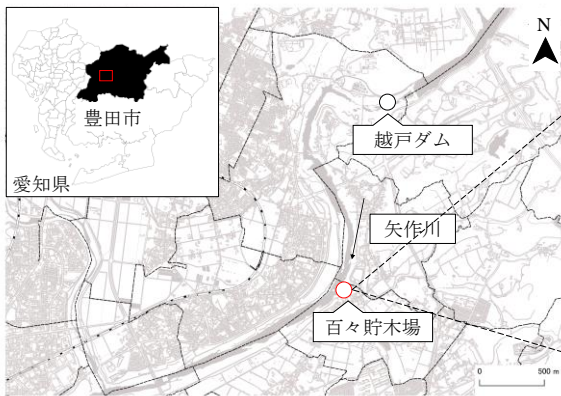


図 1 百々貯木場の位置図 (地理院タイルに加筆)



図 2 南側からの百々貯木場の全容 (2021年10月撮影)

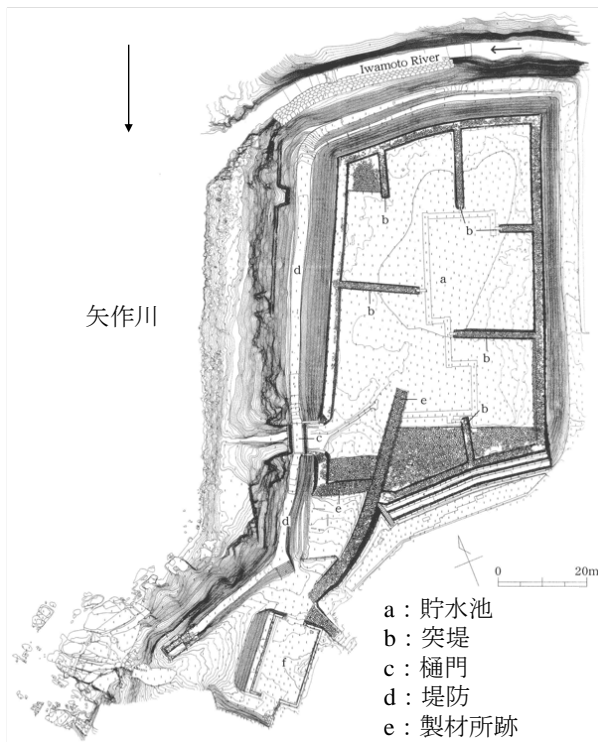


図 3 百々貯木場の平面図 (2001年豊田市作成⁵⁾に加筆)

年から 1993 年にかけて豊田市教育委員会による発掘作業が行われるとともに、傷んでいた擁壁などの補修が行われた。また、豊田市教育委員会は 1997 年に旧所有者から用地を取得し、貯木場跡を市指定の有形文化財(建造物)に指定した⁶⁾。さらに、2008 年には土木学会選奨土木遺産にも認定されている。

百々貯木場の主要施設は、人造石工法で造られている。人造石とは「たたき」の練土と割石(主に花崗岩)を組み合わせたものである。たたきとは、消石灰にまさ土を混ぜ、井戸水やにがりを加えた練土を作り、締め固めたものである。人造石の外観上の特徴(図 4)²⁾として、

- ・ 割石と割石が離れている。
- ・ 割石と割石の間の目地にはたたきが充填されている。
- ・ 目地表面には目塗り(セメントで表面を 1 cm 程度保護)と称される作業が行われている。

などが挙げられる。目塗りを行うことで、表層からの

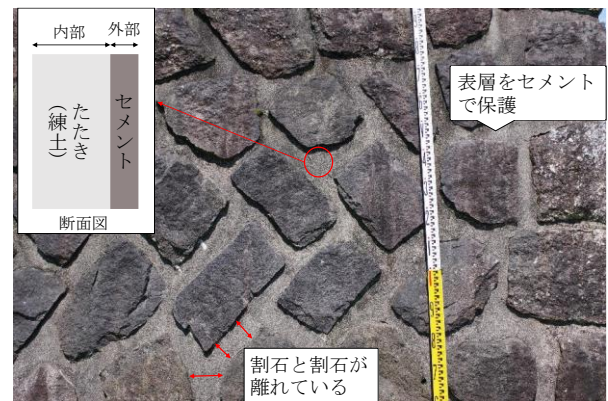


図 4 人造石の外観上の特徴 (左上: 断面図)

風化、侵食を防ぐことができる。内部にあるたたきはセメントで覆われているため直接確認は難しく、内部状況を把握することが困難である。

3. UAV を用いた百々貯木場の写真測量調査

3.1 三次元モデルの作成手順

現地での撮影は、植生の影響を比較的受けにくい 2021 年 1 月中旬に行った。今回使用した UAV (Unmanned Aerial Vehicle) は、DJI 社製の Phantom4 Pro+ V2.0 である。搭載されているカメラは、1 インチ CMOS センサーで解像度 2,000 万画素、レンズの焦点距離 C は、8.8 mm (分解能: $\delta_{CCD} = 0.0024 \text{ mm}$) である。撮影は、手動による操縦で行い、解像度が一定になるように撮影高度 H を 30 m とした。したがって地上解像度 σ_{XY} は次式より約 8.2 mm となった。

$$\sigma_{XY} = \frac{H}{C} \times \delta_{CCD} \quad (1)$$

撮影枚数は約 260 枚であり、鉛直下方向ならびに斜め下方向への撮影を行った。写真撮影時にカメラ位置を精密に測定するには特別な装置が必要である。そこで標定点と呼ばれる座標が既知のポイントを貯木場内に設置し、撮影時に対象物とともに写し込む。これらの標定点 (30×30 cm) を 12 点設置し、貯木場内にある基準点を利用してトータルステーション (TS) で地上測量した。



a: 貯水池 b: 突堤 c: 樋門
d: 堤防 e: 製材所跡

図5 東側からみた百々貯木場の鳥観図

撮影した空中写真から三次元モデルを作成するため、SfM/MVS (Structure from Motion/Multi View Stereo) 解析ソフトである Agisoft 社製の Metashape を使用した。はじめに、解析ソフトに空中写真を取り込み、重なり合った写真の特徴をマッチングしてできる三次元の点の集合体 (ポイントクラウド) を作成する。ポイントクラウドから共線条件に基づき点群の三次元座標を求め、カメラ位置を復元する。この際に標定点の位置座標も利用し、世界測地系の座標としてカメラ位置の座標を取得する。この作業は、最小二乗法を用いたバンドル調整によって実行される。これらを基に、高密度な点群を作成し、三次元形状の復元を行う。最後に点群を基にメッシュを作成し、三次元モデルの質感を表現するためテクスチャ (撮影写真) を貼り付け、三次元モデルが完成する (図5)。作成した三次元モデルを QGIS に読み込ませ、各施設の距離や面積を測定した。なお、バンドル計算時における標定点の平均二乗誤差は、約 0.015 m となった。

3.2 測量成果との比較

今回測定した施設は、貯木場内にある突堤、樋門、貯水池とした。設計記録 (古文書) と調査結果 (UAV 測量) を比較した結果を表 1~3 に示す。比較した結果、主要施設に若干の違いを確認できた。突堤の高さは、調査結果と比べ設計記録の方が 0.3~0.6m 程度高くなった。これは池床に堆積物が 0.5 m 程度あるのが影響しており、写真測量では把握困難である。同様に、突堤の幅に数十センチの違いを確認できた。しかし、各突堤の幅はほぼ一定であることから、建設中に設計変更が行われたと考えられる。突堤は建設作業の終盤に行われており、作業用の道としては十分な幅を確保していると推察できる。その他の施設については、0.1 m 以下の違いが確認される程度で、大きな変化や損傷はないと考えられる。これらの結果から、百々貯木場には大きな劣化がみられず、現在でも良好な状態を保っていると考えられる。

4. 軟岩ペネトロ計を用いた針貫入試験による一軸圧縮強度の推定

遺産の劣化・風化として強度の低下が大きな問題とな

表 1 突堤の比較 (単位: m)

	設計記録			調査結果		
	高さ	長さ	幅	高さ	長さ	幅
東側 1	2.1	18.2	1.8	1.7	18.1	1.4
東側 2	2.1	7.6	1.8	1.7	7.5	1.4
西側	2.1	18.2	1.8	1.8	18	1.4
南側	2.1	10	1.8	1.5	10	1.6
北側 1	2.1	18.2	1.8	1.7	18	1.5
北側 2	2.1	10.9	1.8	1.8	10.5	1.5

表 2 樋門の比較 (単位: m)

	設計記録	調査結果
高さ	4.3	4.3
長さ	4.6	4.5
幅	4.6	4.5

表 3 貯水池の比較

	設計記録	調査結果
周囲の長さ (m)	237	2373
面積 (m ²)	3,590	3,530

る。百々貯木場は文化財に認定されているため、掘削や削孔といった形状の変化を伴う調査は難しい。そこで本調査では、非破壊試験法の一つである針貫入試験機を採用した。

4.1 針貫入試験の概要

本試験は、地盤工学会に規定されている JGS3431-2012⁷⁾に基づき試験を行った。使用した試験機は丸東製作所製軟岩ペネトロ計 SH-70 である。試験機は、もめん針 (太さ: 0.84 mm) を測定対象に貫入させ、貫入量 10 mm のときの貫入荷重、もしくは貫入荷重 100 N に達したときの貫入量を測定する。測定した値より、針貫入勾配 N_p (N/mm) (貫入荷重 P (N)/貫入量 L (mm)) を計算する。得られた針貫入勾配により、一軸圧縮強度 q_u (N/mm²) を次式から計算できる⁷⁾。

$$\text{Log}q_u = \alpha \text{Log}N_p + \beta \quad (2)$$

ここでは、 $\alpha=0.978$, $\beta=2.621$ (相関関係 0.914) の値を利用した⁸⁾。

4.2 測定方法及び測定場所

2022年5月に針貫入試験を行った。調査場所は、貯木場内にある製材所跡の側面部とした。人造石は2章で述べたように表面をセメントで保護してある。そのため、人造石の重要な構成要素である、たたきが露出している部分に針を貫入させて試験を行った。製材所跡は、かつて木材を加工する場として使用されていた。たたきが露出している部分には木材の流出防止のため、門が設置されていたと思われる。そのため、建造時にも目塗りは施されていないと考えられる。調査場所は4か所とした(図6左)。各調査場所は、高さ約2mで幅が約20cm程度の範囲でたたきが露出している(図6右)。そこで、地表面から鉛直方向に10cm間隔で貫入試験を実施した。各ポイントで3回測定して、平均をとり、式(2)より一軸圧縮強度に換算した(図7)。

4.3 測定結果

以下、針貫入試験から換算した一軸圧縮強度を換算一軸圧縮強度と表記する。

図7より、地点1, 2における平均換算一軸圧縮強度は1.18 N/mm², 1.00 N/mm²となり、地点3, 4では0.85 N/mm², 0.75 N/mm²であった。現存する人造石構造物から採取した試験片サンプルを用いた圧縮試験より²⁾、たたきの圧縮強度は1~2 N/mm²程度と推定されている。地点3, 4は地点1, 2より強度が低く、既存研究と比較しても明らかに低いことから材料の劣化が進んでいると考えられる。地点3, 4の後方には畑があることから水が供給されやすい。さらに北向きに面していることから、表面が乾きにくいことで植生が繁茂しやすく、劣化が進みやすい環境下であることが原因と考えられる。

5. まとめ

本研究では、愛知県豊田市に現存する百々貯木場を対象に現状の記録活動及びたたきの強度測定を行った。はじめに、UAVを用いた記録活動により、貯木場全域の劣化状況を確認できた。その結果、突堤の高さと幅に数十cm程度の差がみられた。高さについては写真測量で把握できない池床の堆積物が影響しており、幅については建設中の設計変更が行われたと考えられるため、劣化による影響ではない。そのほかの施設についても0.1m以下の違いが確認されたが、大きな変化はみられなかった。よって、建造から100年以上経過した現在でも良好な状態を保っていると言える。次に、針貫入試験による一軸圧縮強度の推定を行った。測定結果より、想定され得る強度より低い部分があり、植生などによって劣化が進行していることが明らかになった。今後の展望として、記録活動では、百々貯木場で実施した別時期の測量成果を



図6 測定場所

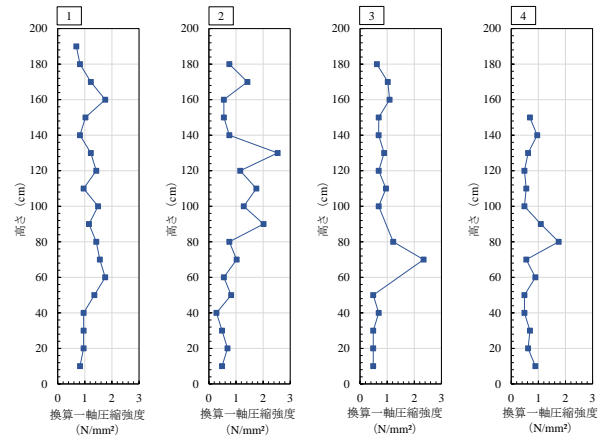


図7 針貫入試験による換算一軸圧縮強度の分布

用いて、さらに詳細な現況把握を行っていく。たたきについては、強度以外の物性にも着目し、百々貯木場の劣化状況について総合的に明らかにしていく所存である。

謝辞

本研究を実施するにあたり、現地での計測作業や測量成果の提供に関して、豊田市役所生涯活躍部文化財課の伊藤達也氏、永田悠記氏、梅村美紀子氏に大変お世話になった。設計記録(古文書)については百々貯木場の持ち主であった今井善六氏の子孫である今井紀博氏より、複写の許可を頂いた。紙面を借りて感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 関陽太郎：石造文化財の保存1. 講座をはじめに当たって、土と基礎, Vol.44, No.8, pp.37-38, 1996.
- 2) 天野武弘：服部長七没後100年にあたり歴史的土木工法(人造石工法)に再び光を, シンポジウム「日本の技術史をみる眼」第38回講演報告資料集, pp.5-28, 2020.
- 3) 樋口輝久, 馬場俊介, 天野武弘, 片岡靖志：中国地方の人造石工法—服部長七をめぐる人間関係—, 土木史研究, Vol.26, pp.107-116, 2007.
- 4) 石田正治：人造石工法(たたき)の遺産の調査とその保存, 土木史研究, 第11号, pp.309-318, 1991.
- 5) 畔柳武司：新修豊田市史22別編建築, 新修豊田市編さん委員会, pp.507-508, 2016.
- 6) 天野博之, 天野武弘, 大橋公雄, 佐々木享, 夏目勝之, 堀恭子：河川中流域の水中貯木場跡・百々貯木場矢作川における木材輸送, 近代化遺産調査報告, 2006.
- 7) 地盤工学会編：地盤調査の方法と解説—二分冊の—, pp.426-432, 2013.
- 8) 丸東製作所：軟岩ペネトロ計SH-70取扱説明書