

人造石構造物に用いられる「たたき」の材料特性と化学的硬化の関係 Relationship between Material Properties and Chemical Hardening of “Tataki” used in Artificial Stone Structures

浅野侃哲¹，藤井幸泰²，東埜克己³，岩本優志³

- 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・243433001@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
3 元名城大学・理工学部社会基盤デザイン工学科

概 要

人造石工法は、明治期に伝統的左官技術「たたき」を基に服部長七によって考案された土木工法である。まさ土と消石灰、海水や水を練り混ぜ、叩き締めて成形する工法であり、護岸や堤防などに用いられた。しかし施工は職人による手作業に依存していたため、ポルトランドセメントの普及とともに急速に衰退し、現在では施工技術もほとんど伝承されていない。東海地方を中心に多くの人造石構造物が現存しており、歴史的価値を有する土木遺産として、適切な修復・保全が求められる。そのため、たたきの特性について科学的かつ定量的に理解する必要がある。本研究では、含水比および突固め回数を変えたたたき供試体を作製し、一軸圧縮試験によって強度発現特性を検討した。その結果、養生によって最大約 2 倍の強度増加が確認され、密実性を確保することが化学的強度発現において重要な要因であることが明らかとなった。

キーワード：まさ土、一軸圧縮試験、石灰安定処理

1. はじめに

たたきは、種土に消石灰およびにがりを混合し、水を加えて練り上げたのちに締固めた材料であり、日本における伝統的な左官技術の一つとして古くから用いられてきた。たたきには、劣化や風化が進行しても自然に土へと還元される性質があり、環境負荷の少ない素材として近年改めて注目を集めている。

このたたきの有用性に着目し、土木工法として使用したのが愛知県碧南市出身の服部長七である。長七は、明治期における日本の近代土木事業の先駆者の一人であり、広島県宇品築港、愛知県豊橋市神野新田堤防、豊田市明治用水旧頭首工などの整備において、人造石工法を用いた実績を残している。人造石工法とは、たたきと石材を組み合わせて構築する工法である。その特徴として、石材同士を密着させずに間隔を空けて配置し、その隙間をたたきで充填する点にある（図 1）。この構造により、全体としての水密性が向上し、特に堤防や護岸といった水辺構造物に適用された。

1900 年以降はポルトランドセメントの普及により、経済性や施工性に優れたコンクリート工法が一般化し、人造石工法は次第に姿を消していった。しかし、コンクリート技術が広く普及する以前においては、人造石工法は東海地方をはじめとした全国のインフラ整備に大きく貢献して

おり、その歴史的・文化的価値は高く評価されている。

2. 背景・目的

人造石構造物は、近代土木技術が本格化した明治から大正期にかけて数多く築造され、歴史的・文化的価値を有する。特に、長七の出身地である東海地方には多くの人造石構造物が現存している（図 2）。たとえば、三重県四日市市に位置する潮吹き防波堤は国の重要文化財に指定されており、愛知県豊田市の旧今井貯木場施設（通称：百々貯木場）も同文化財に答申中であり、その保存と修繕は技術的・文化的観点からも喫緊の課題である。

また、たたきは使用後に自然に還元される特性を持つことから、環境負荷の少ない建設材料としての評価も高まっている。近年では、高強度を必要としない歩道舗装材としての活用や、カンボジアのアンコール遺跡における版築土の修復技術への転用など、応用範囲が拡大しつつある¹⁾。

しかし、たたきは左官職人の裁量によって施工されてきた部分が多いため、材料の配合や施工条件に関する定量的な記録はやや残っているものの²⁾、体系的知見はほとんど残されていない。その結果、現存する人造石構造物の修繕や復元にあっても、適切な材料設計や施工管理の指針を得ることが困難であるのが現状である。本研究では、異なる含水比および締固め条件でたたきを模擬的に作製し、一

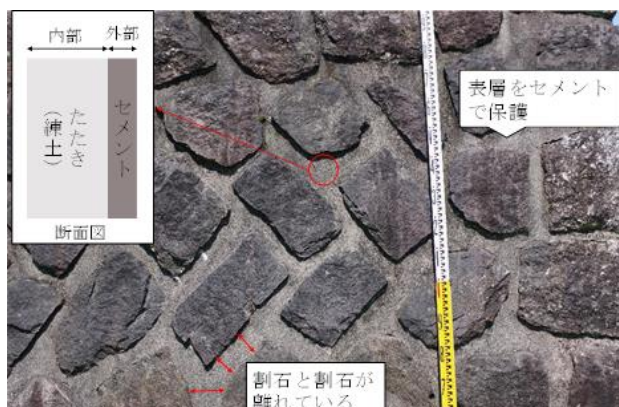


図 1 人造石の外観

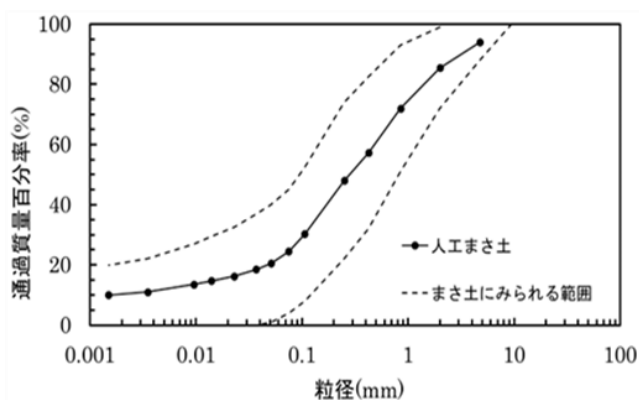


図 3 まさ土の粒径分布



図 2 東海地方の人造石構造物 (一部抜粋)



図 4 供試体 (左: 含水比15%, 右: 含水比10%)

軸圧縮試験によってその力学特性を評価する。さらに、強度発現に寄与する化学反応の影響についても検討を行い、たたきの性質の解明を試みた。

3. 供試体の作製方法

3.1 材料の配合割合

本研究では、たたきの主原料である種土として、入手が容易で粒度分布の管理が可能な人工まさ土を用いた。人工まさ土は、愛知県岡崎市に産する傾家帯変成岩を基質とした人工珪砂(三河珪砂)に、粒度 2.0~4.75 mm の切込碎石と DL クレーを配合し作製した。粒度分布は、日本各地のまさ土の平均的な分布³⁾に準拠して調整を行った(図 3)。

固化材として消石灰を用い、配合割合は明治から大正期に愛知県土木課が編纂した「人造石用種土試験成績」(以下、文献²⁾)に記載された数値を参考に、人工まさ土と消石灰の重量比を 8:1 と設定した。また、たたきの化学反応過程を単独に評価する目的から、にがりなどの反応促進剤は添加せず、水・種土・消石灰の三成分で構成した。

含水比は、供試体の自立性および反応性を考慮し、10% および 15% の 2 条件で設定した。これらは文献²⁾に記載された範囲(5~20%)を参考とし、締固め作業と供試体形成における現実的な含水条件を想定したものである。

3.2 供試体の成形手順と締固め条件

供試体は、所定の比率で混合した人工まさ土と消石灰に蒸留水を加え、均一に練り混ぜたのち、モールド内に 3 層に分けて締固めを行った。各層の突固めには、質量 0.5 kg のランマーを用い、250 mm の高さから自由落下させる方法を採用した。

突固め回数は、1 層当たり 5 回、10 回、20 回の 3 通りを設定し、供試体の密度変化および強度発現への影響を比較できるようにした。これにより、含水比 2 条件×突固め回数 3 条件=計 6 通りの作製条件が得られた。

供試体の寸法は直径 50 mm、高さ 100 mm の円柱状とし、日本産業規格 JIS A 1216:2020「土の一軸圧縮試験方法」⁴⁾に準拠したサイズで成形した。各条件につき 3 本の供試体を作製した。なお、養生を行う供試体には、養生中の崩壊を防ぐため、取り出さずにそのまま養生できるプラスチック製モールドを使用した。一方、養生を行わない供試体は、作製後すぐに一軸圧縮試験を実施する必要があるため、繰り返し使用可能で取り出しやすい金属製モールドを用いた。1 層当たり 10 回突固めて作製した養生後の供試体を図 4 に示す。

成形後の供試体は、密閉されたプラスチック容器に収容し、温度 23±3℃、湿度 99.9 % 以上の環境下で 28 日間養生を行った。養生後の供試体は乾燥させず、そのまま一軸圧縮試験を実施した。なお、養生期間前後における供試体

の質量はほぼ一定であり、水分損失は極めて小さいことが確認された。

4. たたきの化学的強度発現について

たたきにおける強度は、主に締固めによる土粒子間の密実な構造形成と、それに続く化学的反応による結合力の増加に起因する（図 5）。初期状態では、締固めによって物理的に安定した骨格が形成されるが、その後の養生期間中に様々な化学的反応が進行し、時間とともに強度が増加する。まず、消石灰が水に溶解し、 Ca^{2+} イオンと OH^- イオンが土粒子の表面に吸着することで、イオン交換反応が生じる。この過程で粒子表面の電荷状態が変化し、粒子同士の静電的な結合が強化され、団粒化構造が形成される。次に、イオン交換によってアルカリ性が高まった間隙水中で、土に含まれる粘土鉱物が化学的に反応し、不溶性の水和生成物を生成する。これが粒子間を架橋し、構造をさらに強化する。この反応はポゾラン反応と呼ばれ、たたきの長期的な強度発現に大きく寄与する。一方、たたきにおいても一つの代表的な反応である炭酸化反応（ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が空気中の CO_2 と反応して CaCO_3 を生成する反応）は、供試体が湿潤状態で密閉養生されている本研究の条件下では進行しにくいと判断されるため、本論では取り上げない。

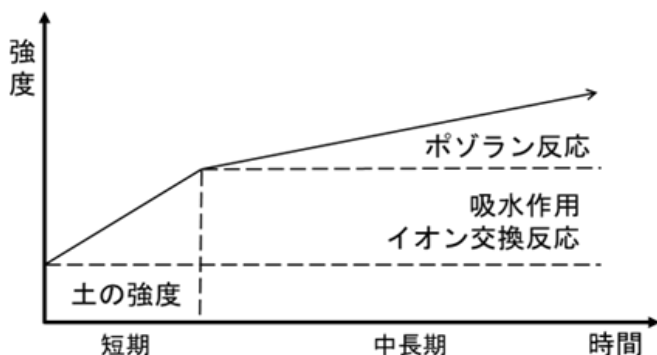


図 5 消石灰混合による土の強度発現モデル⁵⁾

5. 実験結果

5.1 養生による強度・乾燥密度の変化の平均

表 1 に養生の有無、含水比（10%、15%）、および 1 層当たりの突固め回数（5 回、10 回、20 回）ごとに分類された一軸圧縮強度および乾燥密度の測定結果の平均値を示す。含水比と突固め回数が同条件の養生なしと 28 日養生後の試料の乾燥密度を比較すると、すべての養生なし供試体の方が大きな乾燥密度を示している。これは養生なし供試体には金属製モールドを、28 日養生の供試体にはプラスチックモールドを利用したことが原因と考えられる。この違いを考慮することは重要であるが、以下では①養生なしありの強度変化、②養生後の突固め回数および含水比別の強度変化、について記載する。

表 1 供試体毎の一軸圧縮強度と乾燥密度

養生	含水比 (%)	1層当たりの突固め回数 (回)	一軸圧縮強度 (kN/m ²)	乾燥密度 (Mg/m ³)
養生なし	10	5	30.15	1.528
	10	10	42.66	1.598
	10	20	52.72	1.679
	15	5	23.85	1.748
	15	10	36.90	1.816
	15	20	43.02	1.821
28日養生	10	5	21.32	1.451
	10	10	37.21	1.553
	10	20	89.87	1.678
	15	5	39.38	1.662
	15	10	77.72	1.774
	15	20	82.77	1.781

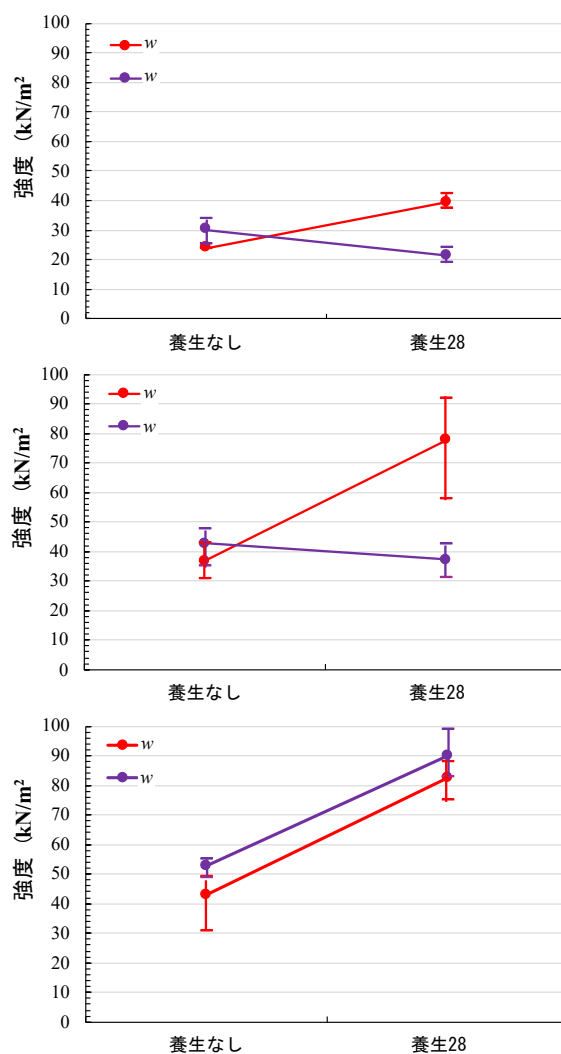


図 6 養生による強度増加

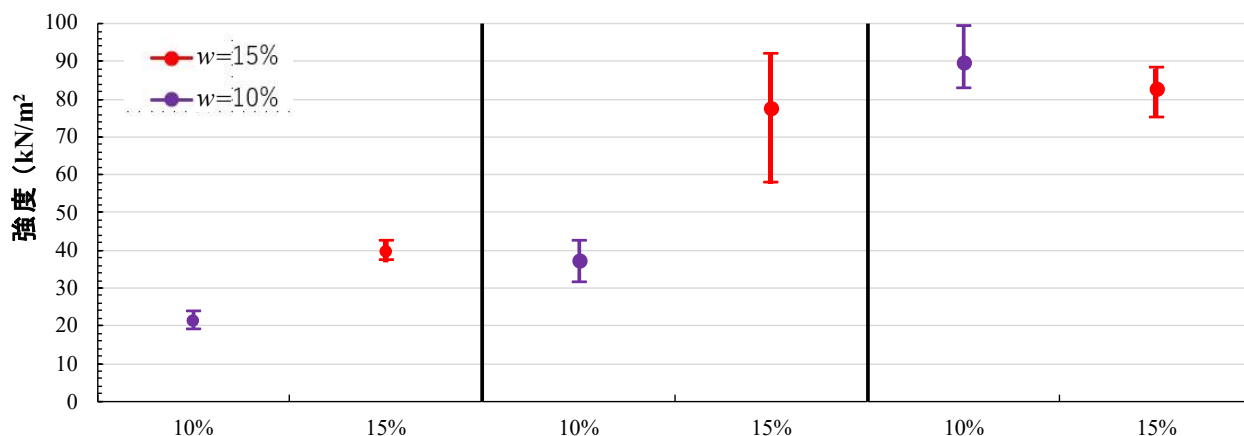


図 7 28日養生供試体における突固め回数と含水比による供試体の一軸圧縮強度の変化

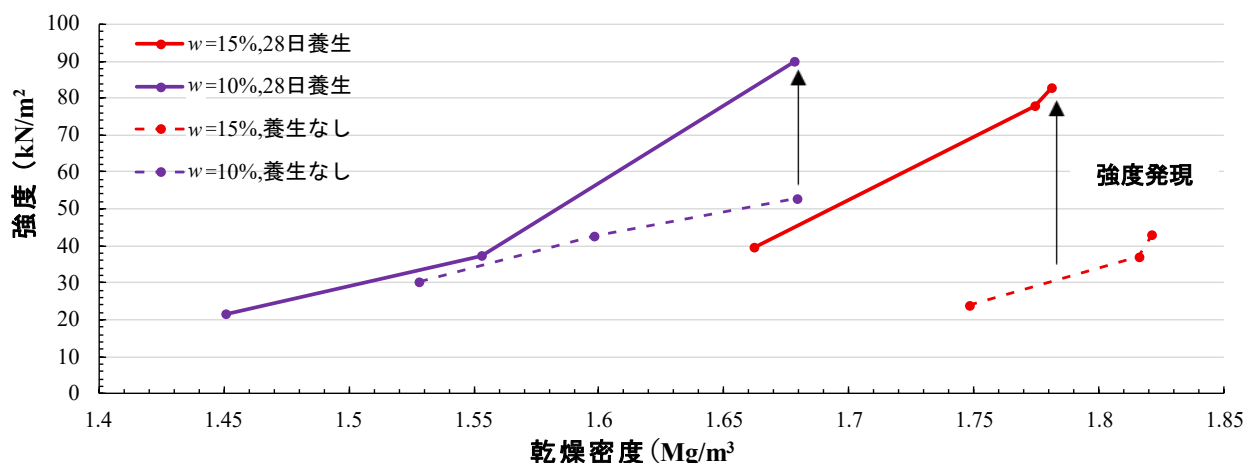


図 8 乾燥密度と一軸圧縮強度の関係

5.2 養生による強度の変化

図 6 に、1 層当たりの突固め回数 5, 10, 20 回で作製した供試体の養生の有無による一軸圧縮強度を示す。●が平均値を、エラーバーは 3 供試体の最大と最小値を示す。養生を行った供試体では、一部を除いて一軸圧縮強度の増加が確認された。突固め回数 20 回の供試体は含水比 10%、15%のどちらにおいても約 2 倍の強度増加がみられる。一方で、含水比 10%における突固め回数 5 回および 10 回の条件では、養生後の強度が養生前よりも低下している。

5.3 含水比と突固め回数の影響

図 7 は、各突固め回数における含水比 10%および 15%の養生後の一軸圧縮強度の違いを示している。突固め回数において、含水比によって強度が異なる結果となった。

突固め回数 5 回、10 回の条件では、含水比 15%の方が高い強度を示したが、突固め回数が 20 回になると、含水比 10%で $q_u = 89.87 \text{ kN/m}^2$ 、含水比 15%で $q_u = 82.77 \text{ kN/m}^2$ と、含水比 10%の方がやや高い強度を示すようになった。

また色別に示した各含水比条件 (青色と赤色) における突固め回数ごとの養生後の一軸圧縮強度の違いに着目する。いずれの含水比においても、突固め回数の増加に伴い一軸圧縮強度が上昇した。特に、含水比 10%において突固め回数が 5 回から 20 回に増加すると、強度は 3 倍以上に増加した。

5.4 乾燥密度と一軸圧縮強度の関係

図 8 に養生なしと 28 日養生後の乾燥密度と一軸圧縮強度の関係を示す。含水比 10%の供試体を青色で、15%の供試体を赤色で示している。また、養生なしを破線で結び、28 日養生後の供試体の結果を直線で結んでいる。結果の詳細と考察については以下に示す。

6. 考察

図 6 の結果から、養生による強度発現には条件ごとにばらつきが見られた。特に、含水比 10%で突固め回数が 5 回および 10 回の供試体では、養生後に強度が低下する傾向が確認された。供試体作製時に使用したモールドの違いが影響していることは先に述べた。養生ありの供試体にはプラスチック製モールドを、養生なしの供試体には金属製モールドを用いた。モールドの剛性の違いにより締固めエネルギーの伝達効率が異なり、特に突固め回数が少ない条件ではこの影響が大きく、乾燥密度に差が生じたと考えられる。実際に表 1 や図 8 からは含水比と突固め回数と同じ条件でも、養生なし 5 回の乾燥密度が 1.53 Mg/m^3 、10 回が 1.60 Mg/m^3 から、28 日後の 5 回の 1.45 Mg/m^3 と 10 回の 1.55 Mg/m^3 へ減少している。この密度の差異が、強度低下の一因となった可能性が高い。

ところで図 7 より、突固め回数と同じ場合、含水比が

高い方が養生後の強度が高い傾向を示していたが、突固め回数が 20 回では含水比に関わらずほぼ同じ 70 kN/m² 超の高強度を示した。また突固め回数が 1 層 10 回で含水比 15%の一軸圧縮強度も平均値は 70 kN/m² 以上の値を示している。

ここで図 8 の養生ありなしの乾燥密度と一軸圧縮強度の関係に注目する。含水比 10%および 15%の養生なし供試体は、それぞれ締固めエネルギーの増加と共に乾燥密度の増加が認められる。これらがほぼ直線を示す（それぞれ青色と赤色の破線）。28 日養生後の供試体のうち、含水比 10%で 1 層の突固め回数が 5 回および 10 回の供試体は、養生なし供試体とほぼ連続する直線を示す。養生なし供試体よりも低い乾燥密度を示すのは、モールドの種類の違いであることは先に述べた。しかし突固め回数が 20 回の試料は、これらより明らかに高い一軸圧縮強度を示す。すなわち図中の黒矢印の数値分、養生により 40 kN/m² 程度の強度発現が生じたと考えられる。一方の含水比 15%の 28 日養生後の供試体については、いずれの条件も養生なしの破線の値よりも高い強度を示している。たとえば乾燥密度 1.77～1.78 Mg/m³ を示す供試体は、黒矢印の数値分、養生による 50 kN/m² 程度の強度発現が生じたと考えられる。

また養生による化学的な強度発現は、一定以上の乾燥密度を有する供試体において確認できる。含水比 10%の条件では、乾燥密度が 1.56 Mg/m³ 未満の供試体では養生後の強度増加が見られず、密実性の不足が化学反応の進行を妨げた可能性が高い。含水比 15%の供試体では全体的に高い乾燥密度が得られ、モールドの違いや突固め回数の影響を受けながらも、養生による強度発現が明確に確認できる。今回強度発現が確認できた含水比 15%の最も小さい乾燥密度は 1.66 Mg/m³ 程度である。含水比 10%で強度発現が確認できた 1.68 Mg/m³ よりやや低い。すなわち物理的な締固めがより効率的に行われ、結果として 1.66 Mg/m³ 以上の乾燥密度をもった供試体は、養生による化学反応が促進されたと考えられる。

これらのことから、養生による化学的な強度発現は、密実な物理的構造が形成されていないと十分に発現しないことが示唆される。特に低含水比かつ突固め回数が少ない条件では、化学反応による強度増加は限定的であり、たたきの強度発現においては物理的な密実性が大きく影響していると考察できる。

7. まとめ

本研究では、明治から大正期にかけて用いられた人造石工法を取り上げ、特に伝統的な左官技術である「たたき」部分に着目し、たたきの配合条件や締固め条件が強度発現に及ぼす影響を実験的に検討した。

実験により、たたきの養生による強度増加が確認された。しかし、含水比と乾燥密度が低い条件下では養生による強度発現が起らないことを確認できた。また、含水比と突固め回数の相互作用が強度に大きく影響することも明ら

かになった。含水比 15%は締固めが不十分な条件下でも強度発現を示した一方、締固めが十分な場合には含水比 10%でも高い強度発現を示した。さらに、突固め回数の増加に伴い強度が大きく上昇し、物理的密実性の確保がたたきの強度発現において重要であることが確認された。

今後は、突固めによる締固め試験によるたたき自体の締固め曲線の特性、たたきのイオン交換反応やボゾラン反応などによる強度増加の定量化、実構造物との対比による実用性検討を行いたい。

参 考 文 献

- 1) 重松宏明：珪質凝灰岩の廃材を母材とした“たたき”の地盤材料としての力学的評価，土木学会論文集 C（地盤工学），Vol.76, No.1, pp.67-76, 2020.
- 2) 愛知県内務部土木課（1919）：人造石用種土試験成績，入手先 <<https://dl.ndl.go.jp/pid/1088409/1/6>>（参照 2025.7.1）
- 3) 末岡徹：地盤工学の立場からみた風化残積土に関する研究，京都大学学術情報リポジトリ，pp.101-104, 1990.
- 4) 公益財団法人地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説 [第一回改訂版] 一二分冊の 2一，pp.581-593, 2020.
- 5) 日本石灰協会：石灰による地盤改良マニュアル第 7 版，日本石灰協会，pp.10-15, 2016.