砂型積層3Dプリンターで作製した 人工砂岩の力学特性

佐藤 稔1*・西本 壮志1・竹村 貴人2

¹(一財)電力中央研究所・地球工学研究所(〒270-1194千葉県我孫子市我孫子1646) ²日本大学・文理学部地球科学科(〒156-8550東京都世田谷区桜上水3-25-40) *E-mail: sato3763@criepi.denken.or.jp

3Dプリンターで作製された地盤材料試料を用いた実験により,自然界の岩石との力学水・理特性の比較 検討が進められている.砂型積層3Dプリンターで作製された人工砂岩を大気圧条件下において基礎物性測 定がなされており,透水係数などの平均的な特性については再現性が認められるが,組成に敏感な力学特 性については若干のばらつきがあるという報告がされている.しかし,拘束圧下における人工砂岩の力学 特性のデータは限られており,基礎物性との比較は十分でない.このため本研究では,人工砂岩に対して 三軸圧縮試験を行い異なる拘束圧条件における力学特性を取得し,類似の自然界の岩石の力学特性との比 較を行うことで,その特性や再現性について把握する.

Key Words : 3D-printing, sandstone, triaxial compression test, compressive strength, repeatability

1. はじめに

地下構造物の建造や安定した地下環境利用などに際し、 将来起こりうる現象を把握するために数値計算が広く利 用されている.一方でその数値計算のためには多大な実 験データを必要とし、さらに自然界の地盤・岩盤を構成 する岩石は多様で不均質であるため、様々な仮定を必要 とする.そこで近年発達している3Dプリンターにより 岩石を模して作製した試料に対して実験し、自然界の岩 石との力学・水理特性の比較検討が進められている^{例えば} ¹⁾.より均質な試料を使用した実験結果が得られれば、 実験評価手法の高度化や、数値解析と実験データのギャ ップを埋められることが見込まれる.

3Dプリンターで作製した試料を使用する利点として、 均質な試料を大量に作製でき、さらに試料内部に亀裂等 の構造を自由に入れられることなどが挙げられる.3D プリンター試料に使用する素材としては、樹脂系材料と 砂粒子の大きく2つに分類できる.樹脂系材料を素材と する場合、試料内に自由に亀裂配置をしやすく、亀裂ネ ットワーク中の流体移動モデルの検証^{233,4550}や,亀裂連 結の可視化³などに利用されている.砂粒子を素材とす る3Dプリンター試料は均質な岩石模擬試料として一軸 圧縮試験^{59,9,10}や圧裂試験^{10,11)}、一面せん断試験^{10,12)}といっ た各種試験により力学特性について研究されている. Gomez et al,¹⁰では砂素材の3Dプリンター試料に対して三 軸圧縮試験を行い,圧縮性や透水性は自然界の岩石より も高いものの,拘束圧依存性といった基本的な力学的挙 動は自然界の岩石と近いことを示した.一方で同じ3D プリンター試料に対して他の力学試験との比較などはさ れておらず,基礎物性の情報は十分ではない.また,鈴 木ほか¹⁰では透水係数などの平均的な特性については再 現性が認められるが,組成に敏感な力学特性については 若干のばらつきがあるという報告もされている.

そこで本研究では大気圧条件下において基礎物性が取 得されている砂型積層3Dプリンター試料に対して三軸 圧縮試験を行い,より詳細な力学特性を把握することを 目的とする.個体差を気にせず数値モデルに近い要素試 験を行うことで,数値モデルや理論の岩石への適用性評 価,実験自体の精度評価に繋がると考えられる.また, 自然界の岩石との力学特性の比較や,試験や試料の不確 かさ評価について今後の課題とともに記述する.なお, 砂型積層3Dプリンターで作製された供試体の形成プロ セスは圧密を除けば砂岩と同じであるため,本研究では 作製した供試体を人工砂岩と呼ぶ.

2. 砂型積層3Dプリンターで作製した人工砂岩試料

本研究で使用した試料は、砂型積層 3D プリンター (Sand Casting Meister SCM-10, CMET 社)により作製された

高さ 100mm, 直径 50mm の円柱形試料である(写真-1). 人工砂としてアルミナ-シリカ系のセラミックであるム ライト(粒径 100 µ m)を,人工砂を結合させるバインダー としてフラン系樹脂を使用した. この人工砂岩試料はこ れまでにも地盤材料モデルとして力学・透水挙動につい て研究されている 10,12,13,14). 竹村ほか 13では水銀圧入式 ポロシメーターによる空隙系分布の取得および透水実験 から、人工砂岩の透水係数に拘束圧依存性があることを 示した. 鈴木ほか ¹⁰では人工砂岩に対して垂直応力一定 の一面せん断試験と多段階せん断試験の結果を比較し、 せん断変位とせん断応力の関係は若干の違いが見られる ものの、垂直応力とせん断応力の関係についてはほぼ同 一の結果が得られたことを報告した. 奥澤ほか¹⁴では人 工砂岩の空隙中の物質移行特性について調査し、透水係 数および透気係数は試料間での大きな違いは見られなか ったものの、通気試験から得られた透過係数のほうが透 水試験から得られた透過係数よりも 1.2~1.5 倍大きい値 であった. この透過係数の違いは、人工砂表面での水と 空気の摩擦抵抗の違いに起因する可能性を示唆した. 鈴 木ほか¹⁰ではP波速度測定,エコーチップ測定,一軸圧 縮試験、一面せん断試験を行い、試験法による不確かさ の大きさや試料ごとの個体差と考えられる値のばらつき について報告した.

円柱形人工砂岩の力学特性として一軸圧縮強さは 10 供試体平均 6.3MPa,標準偏差 0.32,一面せん断試験の 結果から粘着力 c=1.54MPa,内部摩擦角 φ=27°が得ら れているが,一面せん断試験結果のプロットの R²値は 0.64 とばらつきが大きい¹⁰.岩石空隙中の物質移行特性 として,空隙率は約 49%,透水係数は(2.61±0.16)×10 ⁴m/s である¹⁴.





3. 三軸圧縮試験

円柱形の人工砂岩試料に対して三軸圧縮試験を行った. 試料は自然乾燥状態でひずみゲージ(1ゲージ3線式)を軸 方向と周方向に2枚ずつ,ゲル状の接着剤で試料表面に 下地を作り,下地の上から瞬間接着剤でひずみゲージを 接着した.さらにメンブレンでジャケットし,油圧によ り拘束圧制御した.三軸圧縮試験装置は岡田¹⁵で使用さ れた装置であり,セル外部に設定されている変位計で岩 石のひずみ量を計算するとベディングエラーを含むこと がわかっているため,試料のひずみ量に関する計算には ひずみゲージの値を使用した.試験は自然乾燥状態で行 い,拘束圧(σc)は0.5MPa, 1.0MPa, 1.5MPaの3条件,軸 方向の圧縮はひずみ速度0.01%/minとした.

4. 三軸圧縮試験結果

図-1 に拘束圧(σ_c)0.5MPa, 1.0MPa, 1.5MPa の条件で 行った三軸圧縮試験の応力---ひずみ線図を示す. 横軸は 圧縮を正としたひずみ(ε)であり、軸ひずみ(εz)および 周ひずみ(εc)は2本のひずみゲージから得られたひずみ の平均値,体積ひずみ(ϵ v)は ϵ v= ϵ z+2 ϵ cである.縦軸 は圧力容器内に設置された内部ロードセルで取得した軸 荷重から計算された差応力(σz-σc)である. また, 試料 の変形が進み、ひずみゲージが破断してひずみを取得で きていない部分については図に示していないが、試験は 図-2 の通り応力が減少し安定するまで変形させた. 図-1 からはいずれの条件においても応力降下をともなう試 料の破壊が見られた. 拘束圧 0.5MPa, 1.0MPa, 1.5MPa におけるピーク応力は、それぞれ 4.01MPa、 5.01MPa、 5.52MPa であり、拘束圧の増加にともないピーク応力が 増加するという一般的な傾向が得られた.また、図−2 から拘束E 0.5MPa, 1.0MPa, 1.5MPa における残留応力 はそれぞれ 1.65MPa, 2.65MPa, 3.66MPa であり, 拘束圧 が 0.5MPa 上昇するごとに残留応力が約 1MPa 上昇する 線形的な関係であった.

図-3 にピーク応力と残留応力から求めたモールクー ロンの破壊規準を示す.粘着力(c)および内部摩擦角(φ) は、三軸圧縮試験結果のσzおよびσcからモール円を描 き、各モール円と破壊規準線との距離の最小二乗法によ り計算した.ピーク応力から求められた粘着力は 1.00MPa,内部摩擦角は26.1°であった.残留応力から 求められた粘着力は0.15MPa,内部摩擦角は31.0°であ った.



図-1 拘束圧条件の異なる三軸圧縮試験の応力-ひずみ 線図



5. 考察と課題

(1) 強度特性

三軸圧縮試験の結果,粘着力1.00 MPa,内部摩擦角 26.1°であり、強度特性ついてはGomez et al.,¹⁾と同様に拘 東圧依存性が見られた.鈴木ほか10では本研究で使用し た試料と同じシリーズで作製した試料に対して一軸圧縮 試験と一面せん断試験を行い、一軸圧縮強さ6.3MPa、標 準偏差0.32,粘着力1.5MPa,内部摩擦角27°という結果 が得られた.結果を比較すると、内部摩擦角に関しては 本研究と既往研究の結果は近い値であった。一方で本研 究で得られたモールクーロンの破壊規準から計算される 一軸圧縮強さは3.2MPa程度であり、鈴木ほか10の値より も小さい結果であった. この原因として時間経過による 3Dプリンターで作製した人工砂岩の劣化や、ひずみ速 度の違い、試験時の湿度等の環境による影響などが考え られるが、それぞれの条件に対する応答は把握できてい ないため、今後試験数を増やすことにより検証する必要 がある.

残留応力による内部摩擦角は31.0°と、密度や粒子形 状にもよるが一般的な砂の内部摩擦角と調和的な値であった.

(2) 変形特性

写真-2には三軸圧縮試験後の写真を示している. No.38はひずみゲージを切るようにせん断破壊した様子 がわかるが,No.39およびNo.40では試料表面付近でひず みゲージを避けるように破壊した.これは砂型3Dプリ ンターで作製した試料の空隙率が約50%と高く,ひずみ ゲージを接着する際の下地の接着剤が浸透してしまった ためと考えられ,No.38およびNo.41試料に関しては軸ひ ずみを過小評価している可能性が高い.また,試料の破 壊は試料の下部に集中しており,周方向のひずみゲージ はいずれもせん断面をまたがっていない.この場合,せ ん断破壊時の滑りによる膨張を周方向のひずみゲージで



写真-2 三軸圧縮試験後の試料写真



図-3 三軸圧縮試験のピーク応力と残留応力から得られたモールクーロンの破壊規準. 実線はピーク応力から, 破線は残留応力から求められた結果.

測定することはできないため、周ひずみおよび体積ひず みは実際よりも圧縮方向に評価していると考えられる. したがって今回使用した空隙率の高い人工砂岩試料の場 合、ひずみゲージの測定数を増やすことや、非接触型変 位計、LDTを利用するなどの改良方法が挙げられる.

(3) 試料の再現性

試験時に試料の不確かさをできるだけ小さくするため. これまでにもセメント改良土を使用した例ゆもあるが、 試験装置の校正の誤差と試料の不確かさを判別すること は困難である.また、複数人がモルタルの作製から一軸 圧縮試験まで行った研究例切では、一軸圧縮強さの標準 偏差を平均値で除した変動係数が、人により25%から 11.0%まで差がでたことを報告した.一方で鈴木ほか10 から3Dプリンターで作製した砂岩の一軸圧縮強さの変 動係数を求めると5.08%となった、本研究では異なる拘 束圧条件で試験を行っているため試料の不確かさを直接 比較することはできないが、内部摩擦角を試験結果から 26.10°と固定すると、それぞれの試験条件におけるモ ール円と接線から粘着力と一軸圧縮強さを計算できる. この手法で一軸圧縮強さを求めると、No.38は3.21MPa, No.39は3.44MPa, No41は3.17MPaとなり, 平均値3.28MPa, 標準偏差0.145,変動係数4.41%となった.

表-1に文献に記載されている天然の砂岩と、参考とし てモルタルおよびコンクリートの一軸圧縮強さ、標準偏 差、変動係数の代表例を示す. Huang & Shen²¹⁾のOperator E, Iは一連の一軸圧縮試験で変動係数の最も大きかった

人と最も小さかった人の例である. モルタルやコンクリ ートの条件や、その他の結果については参考文献を参照 されたい. 表-1から, 自然界の砂岩は比較的変動係数が 大きいものの、世界標準的に各種試験がなされている Berea砂岩の変動係数は4.2%であった。また、モルタル に関しては上述の通り試料作製者の違いに起因する変動 係数の違いが大きいことがわかる. コンクリートについ ては通常の粗骨材(N)を用いるか,再生骨材を混ぜ合わ せたもの(R1-R3)を用いるかでも変動係数は異なる.変 動係数で比較した場合、3Dプリンターで作製した試料 はBerea砂岩以外の天然の岩石よりも値は小さく、コン クリートと同等か若干大きい値と言える. これらの結果 は全て試験の繰り返しや、試験装置の校正の不確かさが 含まれているため、必ずしも試料自体の不確かさを表す 数値ではないが、一連の試料を用いた場合の実験の不確 かさの一つの指標となる.また,Berea砂岩と呼ばれる 岩石も採取時期や場所により、均質に近いものからはっ きりと葉理が見られるものまであり²⁰、過去の文献との 直接的な比較は困難である.したがって、3Dプリンタ ーで試料を作製した場合、作製する人による不確かさは ほぼないものと考えられることは大きな利点と言える.

今回は破壊に至る応力値のみで比較を行ったが,破壊 前後の応力-ひずみ挙動を比較することも重要であると 考えられる.今後も3Dプリンターで作製した人工試料 に対する試験を追加し,各種試験との比較を行うことで, 試料ごとの不確かさや試験の再現性をより的確に評価で きると考えられる.

文献	試料	ー軸圧縮強さ平均 (MPa)	ー軸圧縮強さ 標準偏差 (MPa)	変動係数 (%)
Bieniawski (1974) ¹⁷⁾	Sandstone	64.5	4.9	7.5
Akram & Bakar (2007) ¹⁸⁾	Dandot Sandstone	57.2	10.6	18.4
	Jutana Sandstone	25.8	2.7	10.3
	Baghanwala Sandstone	51.3	14.4	28.0
	Khewra Sandstone	43.4	12.2	28.0
Ruffolo & Shakoor (2009) ¹⁹⁾	Berea sandstone	71.1	3.0	4.2
Henry et al., (2012) ²⁰⁾	Concrete(N)	41.9	1.2	2.9
	Concrete(R1-R3)	28.7	1.7	6.0
Huang & Shen (2011) ²¹⁾	Mortar(Operator E)	6.7	0.7	11.0
	Mortar(Operator I)	7.4	0.2	2.5
	Mortar(No.1, 28d, Operator I)	35.8	0.6	1.7
	Mortar(No.15, 28d, Operator I)	66.2	1.4	2.1

表-1 砂岩とセメント混合材料の一軸圧縮試験結果

参考文献

- Gomez, J. S., Chalatumyk, R. J. and Zambrano-Narvaez, G. : Experimental investigation of the mechanical behavior and permeability of 3D printed sandstone analogues under triaxial conditions. *Transp. Porous Med.*, 129, pp. 541-557, 2019.
- 鈴木健一郎,田中達也,Patrick Bruines,竹村貴人: 3D プリンタ亀裂性岩盤モデルの浸透流解析,第 51 回地盤工学研究発表会発表講演集,pp.529-530,2016.
- 奥澤康一,鈴木健一郎,竹村貴人:3Dプリンタ亀裂性 岩盤モデルの作製と透水試験,第 51 回地盤工学研究 発表会発表講演集, pp. 527-528, 2016.
- 4) 竹村貴人,濱本昌一郎,神戸音々,佐藤稔,鈴木健一郎,奥澤康一:3Dプリンタによる模擬試料からみた透水・透気挙動へのクラックの配置の影響,第51回地盤工学研究発表会発表講演集,pp.525-526,2016.
- 5) 佐藤稔,竹村貴人,鈴木健一郎,奥澤康一:3D プリン ター亀裂性岩盤モデルを持ちいた透水実験と LBM 解 析,平成 29 年度日本応用地質学会研究発表会講演論 文集, Vol. 14, pp. 187-188, 2017.
- Suzuki, A., Minto, J. M., Watanabe, N., Li, K. and Home, R. N. : Contributions of 3D printed fracture networks to development of flow and transport models. *Transp. Porous Med.* 129, pp. 485-500, 2019.
- Zhou, T., Zhu, J. B., Ju, Y. and Xie, H. P. : Volumetric fracturing behavior of 3D printed artificial rocks containing single and double 3D internal flaws under static uniaxial compression. *Eng. Fract. Mech.* 205, pp. 190-204, 2019.
- Osinga,S., Zambrano-Narvaez, G. and Chalatumyk, R. J. : Study of geomechanical properties of 3D printed sandstone analogue, *ARMA*-15-547, 2015.

- 9) Kong, L., Ostadhassan, M., Li, C. and Tamimi, N. : Rock Physics and Can 3-D Printed Gypsum Samples Replicate Natural Rocks? An Experimental Study. *Rock Mech. Rock Eng.*, 51, 10, pp. 3061-3074, 2018.
- 10) 鈴木健一郎, 奥澤康一, 濱本昌一郎, 藤井幸泰, 磯部有 作:砂型積層3Dプリンターで作製した地盤材料モデルの 力学特性の再現性, 第54回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 37-38, 2019.
- Volger, D., Walsh, S. D. C., Dombrovski, E. and Parras, M A. : A comparison of tensile failure in 3D-printed and natural sandstone, *Eng. Geol.* 226, pp. 221-235, 2017.
- 12) 鈴木健一郎,藤井幸泰,磯部有作,佐ノ木哲:砂型積層 3D プリンターで作製した地盤材料モデルのせん断特性,第53 回地盤工学研究発表会発表講演集,pp.71-72,2018.
- 13)竹村貴人,西本壮志,岡根利光,佐藤 稔:砂型積層 3D プリンターを用いた地盤材料モデルの作製,第 53 回 地盤工学研究発表会発表講演集,pp. 69-68, 2018.
- 14) 奥澤康一, 濱本昌一郎, 下茂道人, 佐ノ木 哲:砂型積層 3D プリンターで作製した地盤材料モデルの透気・透水特性, 第53回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.69-70, 2018.
- 15) 岡田哲実:高温環境下における堆積軟岩の力学特性(その 1) --三軸圧縮試験による温度依存性の把握--,電力中央研究 所報告 N04026.
- 16) 澤孝平,中山義久,稲角健:三軸圧縮試験から求める c, φの不確かさ評価方法,第43回地盤工学研究発表会発表講 演集,pp. 81-82, 2008.
- 17) Bieniawski, Z. T. : Estimating the strength of rock materials, *J. South. Afr. Inst. Min. Metall*, pp. 312-320, 1974.
- 18) Akram, M. & Bakar, M. Z. A. : Correlation between uniaxial compressive strength and point load index for salt-range rocks, *Pak. J. Engg. & All. Sci.* 1, 1-8, 2007.

- Ruffolo, R. M. and Shakoor, A. : Variability of unconfined compressive strength in relation to number of test samples. *Eng. Geol.*, 108, pp. 16-23, 2009.
- 20) Henry, M., Iyoda, T. and Kato, Y.: Statistical analysis of strength variation in concrete utilizing low-grade recycled aggregates. 土木学会 第 67 回年次学術講演会, V-525, 2012.
- Huang, H. & Shen, X-d. : Analysis of variance for testing method of cement in determination of strength, *Prog. Nat. Sci.: Mater. Int.*, 21. pp. 341-346, 2011.
- 22) 藤井幸泰,高橋学:ベレア砂岩の地質・堆積環境・物性について,応用地質,56, pp.105-109,2015.

MECHANICAL PROPERTIES OF 3D-PRINTED ARTIFICIAL SANDSTONE

Minoru SATO, Soshi NISHIMOTO, Takato TAKEMURA

In previous research studies, based on the experimental analysis of three-dimensional (3D) printed ground material analogue, mechanical and hydraulic properties of natural and artificial ground materials are compared. Fundamental properties of 3D printed artificial sandstone have been estimated in the atmospheric environment. Since few studies have been conducted on mechanical properties of artificial sandstone at confining pressure, mere comparison between fundamental and triaxial compression properties is not adequate. In this study, mechanical properties of artificial sandstone were examined at certain confining pressure conditions through a triaxial compression test. Furthermore, mechanical properties and repeatability of artificial sandstone were also analyzed.