

版築材料の強度に及ぼす高サクシジョンの影響

不飽和土 突固め 一軸圧縮強さ

東京大学 大学院工学系研究科 学生会員 ○荒木 裕行
 東京大学 生産技術研究所 国際会員 古関 潤一
 足利工業大学 国際会員 西村 友良
 複合技術研究所 国際会員 佐藤 剛司

1. はじめに

版築技法は礫、砂、粘土等の土質材料を層状に突固めることで基壇や壁材を構築する古典的な建築技法の一つであり、紀元前から世界各地で用いられてきた。我が国においては、版築技法は基壇や土塁、寺社等を取り囲む築地塀を作製する際に使用され、歴史的価値の高い版築構造物も数多く現存している。

版築技法による築地塀(写真-1)は、大気中で水分移動が平衡状態となった乾燥側の不飽和土で構成された土構造物といえる。このような状態の不飽和土の土中水には、大気中の水蒸気と等しい化学ポテンシャルが作用する。化学ポテンシャルの絶対値がトータルサクシジョンであり、式(1)で求められる^{1),2)}。

$$\psi_T = -\rho_w \frac{RT}{M} \ln\left(\frac{p}{p_0} \cdot \frac{1}{100}\right) \quad (1)$$

ここで、 ψ_T はトータルサクシジョン[kPa]、 R は気体定数(8.314 [J/(K・mol)])、 ρ_w は水の密度[t/m³]、 T は絶対温度[K]、 M は水の分子量(18.016 [kg/mol])、 p/p_0 は相対湿度[%rh]である。この原理に基づき、密閉空間内の相対湿度を制御して不飽和土に作用する ψ_T を制御・測定するのが蒸気圧法^{1),2)}であり、粘性土等に関する力学試験に応用した研究が進められている³⁾。本稿では、版築技法を模擬して作製された突固め供試体に対して、蒸気圧法を用いて ψ_T を作用させ、一軸圧縮強度との相関関係について検討を行う。

2. 試験方法

2.1. 対象とした版築材料と供試体の作製

対象とした土材料は、我が国の伝統的な版築塀の改修工事で使用された版築材料である。配合や粒度等に関しては既往報告^{4),5)}を参照されたい。なお、本材料には石灰等の改良剤は添加されていない。改修工事では、濃度が3~4%のにがり水(MgCl₂水溶液)を版築材料に対して容積比で5~9%混ぜて含水比を調整し、突固め後の乾燥密度は2.0 g/cm³程度であった。

濃度3.0%のMgCl₂水溶液で含水比調整を行って締固め試験を実施したところ、締固めエネルギー $E_c=2700$ kJ/m³での最適含水比と最大乾燥密度は10.3%、1.996 g/cm³であり⁵⁾、実際の改修工事に近い密度を得ることができた。そこで本研究では、濃度3.0%のMgCl₂水溶液を用いてこの最適含水比に調整した版築材料を用い、 $E_c=2700$ kJ/m³で突固め、円筒供試体を作製した。供試体寸法は高さ100 mm、直径50 mmであり、突固め層厚は10 mmである。

2.2. サクシジョンの制御と一軸圧縮試験方法

モールド内で作製した供試体は、脱型した状態で相対湿度が管理されたデシケータ内で養生した。デシケータは室温16°Cの恒温室内に設置されており、デシケータ内の相対湿度を表-1に示す7種類の塩飽和水溶液を用いて制御した。表-1には各塩飽和水溶液で与えられる相対湿度と、16°Cとして式(1)で算定した ψ_T を示している。7種類の相対湿度条件を条件A~条件Gと称する。

本研究では、相対湿度11~98%rhの各デシケータ内で一定湿度



写真-1 法隆寺西院大垣東面

表-1 本研究で用いた塩飽和水溶液と相対湿度およびサクシジョンの一覧²⁾

条件	塩	相対湿度 [%rh]	ψ_T [MPa]
A	硫酸カリウム	98	2.69
B	硝酸カリウム	95	6.84
C	リン酸二水素 アンモニウム	93.1	9.53
D	塩化ナトリウム	75	38.3
E	硝酸マグネシウム	54	82.1
F	塩化マグネシウム	33	148
G	塩化リチウム	11	294

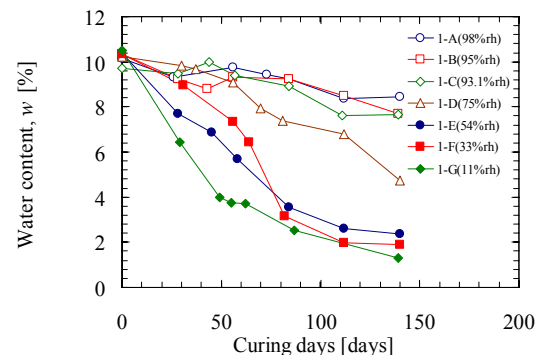


図-1 養生日数5ヶ月で一軸圧縮試験を行った供試体(Series 1)の含水比の経時変化

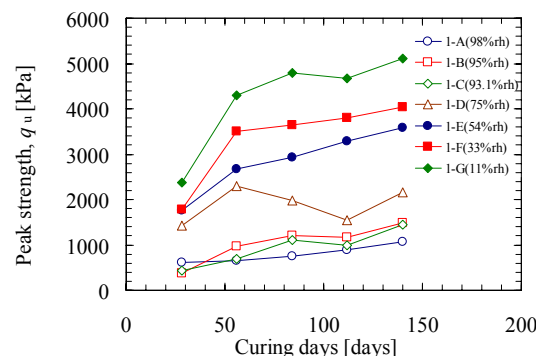


図-2 排水履歴のみを与えた供試体Series 1の各養生日数における一軸圧縮試験結果

Effect of high suction on the strength of rammed earth materials

Hiroyuki ARAKI (University of Tokyo), Junichi KOSEKI (University of Tokyo), Tomoyoshi NISHIMURA (Ashikaga Institute of Technology) and Takeshi SATO (Integrated Geotechnology Institute)

で養生し、排水履歴のみを与えた Series 1 と、33~98 %rh のデシケータと 11 %rh のデシケータの間を 1.5 ヶ月毎に移動させることで排水・吸水履歴を与えた Series 2 を作製した。Series 1 は 1 ヶ月毎に、Series 2 は乾燥-湿潤過程を 2 サイクル与えた後である 7.5 ヶ月目において一軸圧縮試験を実施した。载荷速度は 1.0 %/min とし、载荷中のサクシオン変化を抑制するために、表-1 に示した塩飽和水溶液で相対湿度を制御した空気を供給しながら試験を行った。試験後の供試体を用いて含水比を測定するとともに、土中水の電気伝導率 EC[mS/m] を測定した。EC を用い、浸透サクシオン ψ_{sol} を $\psi_{sol}[\text{kPa}] = 0.36 \times \text{EC}$ として簡易的に評価し、 ψ_T から ψ_{sol} を差し引いた値をマトリックサクシオン ψ_M とした³⁾。

3. 試験結果と考察

Series 1 において、養生日数 5 ヶ月で一軸圧縮試験を行った供試体の含水比の経時変化を図-1 に、また、1 ヶ月毎に実施した一軸圧縮試験の結果を図-2 に示す。なお、養生日数 1~4 カ月で一軸圧縮試験を実施した供試体の含水比の経時変化についてはここでは示していないが、図-1 に示した供試体の各養生日数における含水比と同程度であった。各相対湿度条件における供試体の含水比は養生日数の増加に伴って減少を続け、養生日数 5 ヶ月では概ね安定傾向を示した (図-1)。また、養生日数の増加および含水比の低下に伴って一軸圧縮強度は増加し、養生日数 3 ヶ月以降は値が安定傾向を示した (図-2)。そこで、水分移動が概ね平衡状態となっていると考えられる養生日数 5 ヶ月での一軸圧縮強度を比較すると、条件 A では 1070 kPa、条件 G では 5110 kPa であり、周囲の相対湿度環境によって強度は約 5 倍変化する。

Series 2 の供試体の含水比経時変化を図-3 に示す。各供試体は、一軸圧縮試験時よりも含水比が低い状態を 1 回ないし 2 回経ており、一軸圧縮試験時には吸水過程にあったことが確認できる。

Series 1 で 5 ヶ月養生を行った供試体と Series 2 の供試体を対象とし、 ψ_M と含水比の関係を図-4 に、 ψ_M と一軸圧縮強度の関係を図-5 に、含水比と一軸圧縮強度の関係を図-6 に示す。図-4 には蒸気圧法で評価した水分特性曲線を併せて示したが、Series 1 は排水曲線、Series 2 は吸水曲線と調和的である。同じ ψ_M で比較すると Series 1 より Series 2 の方が含水比は低く、水分特性曲線のヒステリシスの影響が表れているといえる。一方で、同じ ψ_M で比較すると、Series 1 および 2 の一軸圧縮強度はほぼ同じである (図-5)。また、同じ含水比で比較すると、排水・吸水履歴条件の違いに応じて一軸圧縮強度は異なる (図-6)。したがって、版築材料の一軸圧縮強度には周囲の相対湿度に起因するサクシオンが支配的に影響していると考えられる。

4. まとめ

伝統的な版築塀を模擬して作製した供試体に蒸気圧法で高サクシオンを与え、一軸圧縮試験を行った。その結果、一軸圧縮強度は 98%rh ($\psi_M : 2.65 \text{ MPa}$) では 1070 kPa、11%rh ($\psi_M : 294 \text{ MPa}$) では 5110 kPa であり、周囲の相対湿度によって約 5 倍変化的ことが明らかとなった。また、一軸圧縮強度には周囲の相対湿度に起因するサクシオンが支配的に影響することが示された。したがって、石灰等を用いていない既存の伝統的版築構造物は、季節・気候による湿度変化を受けて強度が変化している可能性がある。

参考文献

- 1) Fredlund D.G. and Rahardjo H. (1993): *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, pp.64-106.
- 2) 地盤工学会 (2009): *地盤材料試験の方法と解説*, pp.162-176.
- 3) 例えば、西村友良, 豊田浩史 (2006): *高サクシオンを受けた非塑性不飽和シルトの見かけの粘着力*, 土木学会論文集 C, Vol.62 No.2, pp.519-528.
- 4) 荒木裕行, 古関潤一, 佐藤剛司(2010): *伝統的版築材料の一軸圧縮試験*, 生産研究, Vol.62 No.6, pp.39-43.
- 5) 荒木裕行, 古関潤一, 佐藤剛司 (2011): *にがりの添加が版築材料の強度特性に与える影響*, 土木学会第 66 回年次学術講演会, III-074.

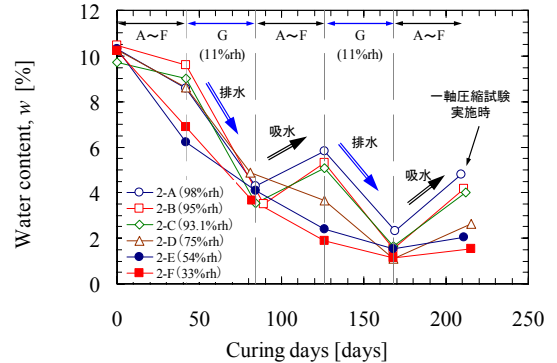


図-3 排水・吸水履歴を与えた供試体 Series 2 の含水比の経時変化

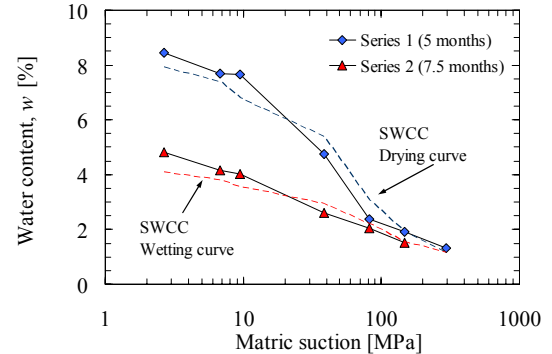


図-4 Series 1 (養生日数 5 ヶ月) と Series 2 のサクシオンと含水比の関係 (SWCC は水分特性曲線を示す)

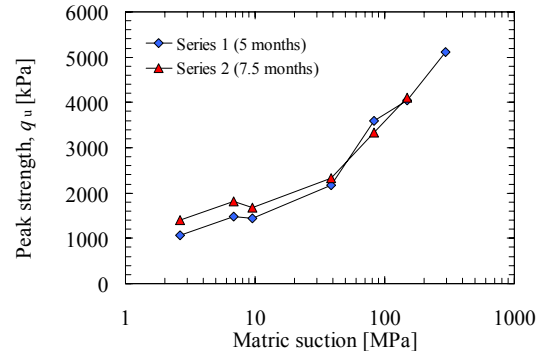


図-5 Series 1 (養生日数 5 ヶ月) と Series 2 のサクシオンと一軸圧縮強度

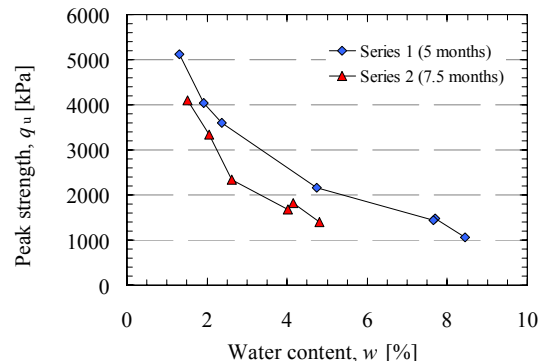


図-6 Series 1 (養生日数 5 ヶ月) と Series 2 の含水比と一軸圧縮強度