

クメール宗教建築の基壇の版築技術に関する研究
 —版築土のせん断剛性に及ぼす拘束圧の影響—

Study on compacted soil technology for basement and platform of Khmer religious tower structure
 —Effect of confining pressure on shear stiffness of compacted soil—

○柳澤慶伍¹, 曾根凌², 酒匂教明³

*Keigo Yanagisawa¹, Konryo So², Noriaki Sako³

Abstract: In recent years, Khmer religious tower structures were found with large inclination due to subsidence. Previous studies have pointed out that the subsidence of tower structure was caused by upper-rising of ground water level under compacted soils. We assumed three contributing factors as follows (1) collapse of the soil skeleton by water immersion, (2) deformation of the geomaterials due to slaking, (3) the reduction in shear stiffness depending on the effective confining stress. In this paper, it was performed tri-axial tests to confirm the shear stiffness dependency of the compacted soil.

1. はじめに

9世紀から13世紀ごろ、東南アジア地域に建造された寺院建築であるクメール宗教建築では、近年、基壇の沈下による被害が深刻となっている。クメール宗教建築は一般に、人力で土を突き固めて造成した「版築」と呼ばれる盛土地盤を石材で被覆した基壇を有し、その上に、石やレンガを空積みした上部構造を持つ。上方の荷重は石材と版築に分散され上部構造が支えられるため、内部の版築盛土の変形・破壊は即座に建築物全体の変状として現れる。沈下はいくつかの要因により複合的に引き起こされると考えられているが¹⁾、地盤工学的な観点からは、基壇材料のスレーキング、雨水の排水に伴う版築の細粒分の流出、降水による地下水位上昇に起因するせん断剛性の低下などが沈下の要因として考えられる。本論文では、この内せん断剛性の低下に着目し、これにより沈下が生じる可能性を探る。そこで、地下水位上昇によって地盤内の有効拘束圧が低下したと仮定し、版築材料のせん断剛性の拘束圧依存性について、ベンダーエレメント試験（以下BE試験と記載）を用いた三軸試験により調べた。

2. 実験方法

2.1 使用材料

本報告では、日本国政府アンコール遺跡救済チーム(JSA)による『プラサート・スープラ塔修復工事報告書』²⁾から、N1塔の版築土の特性を読み取り、試料の調製を行った。粘土はベトナム産ラテライト粘土、砂は、三河産珪砂を使用し、細粒分含有率 F_c が 10%、20%となるよう試料を調整した。各供試体の物性値について Table.1 に示し、粒形加積曲線を Figure.1 にまとめた。最適含水比 w_{opt} （以下 O.W.C. と記載）、土粒子密度 ρ_s は、 F_c ごとに異なる値を示した。

Table.1 Physical properties of specimen

Specimen No.	F_c (%)	w_{opt} (%)	ρ_s (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	test condition
A	10	11.5	2.666	1.64	saturated
B				1.68	Optimum water content
C	20	11.3	2.733	1.93	saturated
D				1.92	Optimum water content

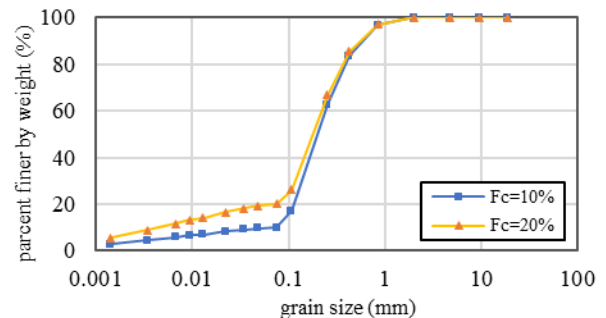


Figure.1 Grain size accumulation curve

2.2 供試体の作製

供試体の作製にあたり、JCAS L-01「セメント系固化材による改良体の強さ試験方法」に準拠し、質量 1.5kg のランマー、φ50×100mm の鋼製モールドを使用した。O.W.C.まで加水調整した試料を4層に分けモールドへ投入し、20cmの高さからランマーを自由落下させ、各層を12回突き固めた。各層の上面にソイルナイフで刻みを付し、上の層に馴染みやすくした。なお、4層目の突き固め面は刻み付けをせず、平らに均した後脱型した。

2.3 試験方法

Figure.2 に示した、BE試験システムを組み込んだ三軸試験機を用いてせん断波速度 V_s を測定し、せん断剛性 G を算出した。飽和の影響について比較検討するため、①最適含水比で突き固めた直後の供試体、②脱気水を通し飽和させた供試体の2つの条件で試験を行った。試験機に供試体を設置した後、 $\sigma'_0=10,30,50,70$ kPaまで段階的に等方圧密を行い、その後も等方応力で10kPa

1：日大理工・院(前)・建築 2：日大理工・学部・建築 3：日大理工・教員・建築

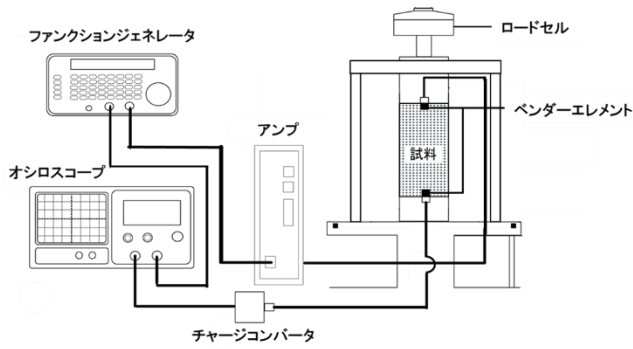


Figure.2 Vender element testing system

まで順々に除荷をした。BE 試験は各段階の圧密終了後に実施した。本試験ではより簡便に伝播時間を測定するため、既往の文献³⁾で提案されている、受信波と送信波の周期が等しくなる周波数(共進周波数 f)を用いた測定法により伝播時間を決定した。3kHz から 20kHz の間の共振する周波数で \sin 波を送信し、伝播距離は一对の BE における先端間の距離(tip-to-tip)、伝播時間は送信波と受信波の立ち上がり点の時間差 Δt_s とピーク点の時間差 Δt_p の時間差の平均として V_s を算定した。試験結果は複数の異なる共進周波数で測定した V_s の内、式(1)、式(2)を満たすものの平均値としている。

$$\left| \frac{(\Delta t_p - \Delta t_s)}{\Delta t} \right| \leq 0.03 \text{ (ms)} \quad (1)$$

$$f \cdot \Delta t \geq 2 \quad (2)$$

3. 試験結果

Figure.3 は細粒分含有率ごとの有効拘束圧 σ'_0 とせん断弾性係数 G の関係を表している。

Figure.3(a),(b)の結果を比較すると、 $F_c=10\%$ に比べて $F_c=20\%$ の方がせん断弾性係数は大きな値を示した。これは、粒径幅の広い試料の場合、粒径の大きい土粒子の間隙に小さい土粒子が入り込むことができ、Table.1 に示すように乾燥密度が大きくなるためである。

Figure.3 (a)では飽和した場合に比べ、O.W.C.の方が2倍程度せん断剛性は大きい。一方、Figure.3 (b)では両方の値は同程度である。 $F_c=10\%$ では、供試体作成時のばらつきにより specimen A と specimen B に乾燥密度 ρ_d の差が生じたことが、要因の一つとして挙げられる。また、細粒分が多い版築土が飽和すると地盤材料の力学的特性が変わる可能性が考えられ、これについては今後検討が必要である。

せん断剛性の有効拘束圧依存を確認すると、傾きが1.9~2.5乗となっている。一般的に自然に堆積した土の傾きは0.5乗とされており^{例え(ば)4)}、版築土は小さい値になっていることが分かった。本試験結果では、自然に堆積した土に比べ版築土の方が有効拘束圧に対するせん断剛性の依存性が小さいことから、地盤変状の要因は

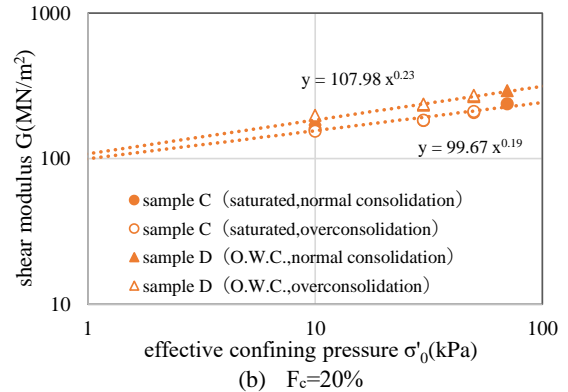
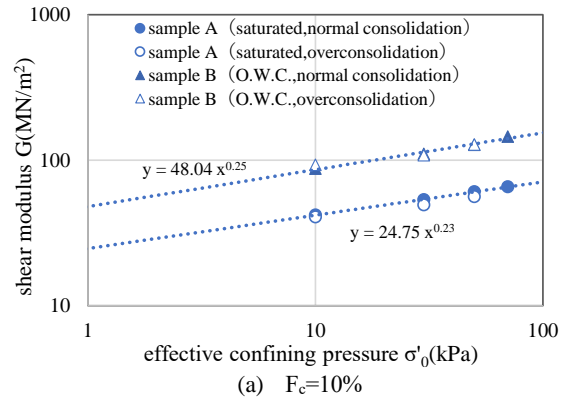


Figure.3 Relationship between shear modulus and effective confining pressure

有効拘束圧の可能性は低いと思われる。ただし、飽和させたときに、供試体のせん断剛性の低下する可能性があるため、今後は模型地盤を利用した実験により確認する予定である。

4. まとめ

クメール宗教建築の版築のせん断剛性に及ぼす拘束圧の影響について検討するために、版築模擬供試体を用いて異なる拘束圧条件下でベンダーエレメント試験を実施した。本報告をまとめると以下の通りである。

- ① 細粒分含有率によりせん断剛性係数に差がみられ、 $F_c=20\%$ は $F_c=10\%$ に比べ大きな値を示した。
- ② 最適含水比の条件では飽和条件の供試体に比べ大きなせん断剛性を示した。
- ③ 版築土は堆積した土に比べ有効拘束圧に対するせん断剛性の増加率が小さく、拘束圧依存性が小さいと考えられる。

参考文献

- 1) 内田悦生：アンコール遺跡の石材と非破壊調査，物理探査 第60巻第3号，pp.223-234，2007。
- 2) 日本国政府アンコール遺跡救済チーム：プラサート・スープラ塔修復工事報告書，財団法人日本国際協力センター，2005。
- 3) 小林亮太 他：ベンダーエレメントによる砂のせん断剛性の評価—その1 リサーチ図形を用いた試験法の検討—，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.503-504，2018。
- 4) Kokusho.T. : Cyclic Triaxial Test of Dynamic Soil Properties for Wide Strain Range, Soils and Foundations, 20(2), pp.45-60, 1980.