

様々な拘束圧及び応力履歴を受けた緩いまさ土の乾燥密度変化とエネルギー

Dry Density Change and Energy of Loose Decomposed Granite Soil Subjected to Various Confining Stresses and Stress Histories

石橋弘康 Hiroyasu ISHIBASHI (山口大学大学院創成科学研究科)
 吉本憲正 Norimasa YOSHIMOTO (山口大学大学院創成科学研究科)
 中田幸男 Yukio NAKATA (山口大学大学院創成科学研究科)

効率よく土の密度を増加させるための基礎的な検討として、様々な応力履歴での载荷による供試体の体積変化に着目し、省エネルギーで乾燥密度を増加させる応力履歴を調べることを目的とした。また、密度増加を図る地盤の深度も様々であるため、拘束圧の影響についても検討した。単調载荷では、等方に近い応力経路において乾燥密度変化に対するエネルギーの効率が良く、拘束圧が大きい程、同じエネルギー比による乾燥密度変化が大きくなる。繰返し载荷では、低い拘束圧を除き、異方的な応力経路において乾燥密度変化に対するエネルギーの効率が良く、同じエネルギー比による乾燥密度変化に拘束圧の明確な影響は見られない。

キーワード：密度増加，応力履歴，拘束圧，エネルギー (IGC : D05, D06, K05)

1. はじめに

世界の資源・エネルギー消費は、生活を取り巻く社会・経済情勢の変化などを背景に増大している。図-1¹⁾は、世界の一次エネルギー消費量の推移を示している。図より、世界の一次エネルギー消費量は増加の一途であり、特に、2000年代以降、日本を含むアジア大洋州地域の消費量は、急激に拡大している。

東日本大震災直後、計画停電を実施するなど、日本は未曾有のエネルギー不足に陥った。その後、エネルギー利用において様々な改善により震災直後程のエネルギー不足を感じることは少なくなりつつある。日本の一次エネルギーの国内供給構成の現状を把握するために、図-2²⁾に、一次エネルギーの国内供給構成を示す。東日本大震災が発生する以前、日本の一次エネルギー国内供給として、原子力が15%程度を占めていたのに対し、震災以降、石油、石炭、天然ガスによるエネルギー供給の占める割合が増加してきており、化石燃料に頼らざるを得ない状況となっている。

日本は、化石燃料の自給率が低いことから、大半の化石燃料を輸入に頼っている。上述したように、原子力発電の稼働が限定されているため、以前に比べ、エネルギー供給に関してより一層海外への依存度が高まっている。化石燃料は地球上で何億年もの時間をかけて作られた大切なエネルギー資源である。しかし、日本を始めとした先進国だけでなく、発展途上国でも化石燃料の利用が増加しており、このままのペースでは、化石燃料の枯渇は避けられない状況となっている。したがって、代替エネルギーの模索や化石燃料から得られるエネルギーを効率よく利用することなどが重要である。

現在、様々な産業活動においてエネルギーを効率よく利

用する試みがなされている。建設業界でも建設工事の際の省エネルギー化のために、燃費効率の良い重機などが開発され、その省エネルギー型建設機械の導入が促進されている³⁾。その中には、油圧と電動を組み合わせたハイブリッドシステムを導入したハイブリッドショベルが開発され、作業形態により異なるが、標準機と比較して20~25%の燃費向上を確認した例も報告されている⁴⁾。また、近年では、全地球測位システム(GNSS)や慣性センサユニット(IMU)のセンサ類を搭載したICTブルドーザやICT油圧ショベルも開発され、従来、自動施工不可能であった工程を自動施工可能にし、施工効率の向上につなげている事例⁵⁾、また、加速度センサをブルドーザや振動ローラに搭載し、締め固め状態を管理する事例⁶⁾なども報告されている。このように、センサ類で得られる多くの情報をリアルタイムに処理して、施工の効率化が図られつつある。

情報化施工の進展や各種センサの高精度化や汎用化が進むことにより、より効率的な施工が可能となることが考えられる。そのような中で、中島と建山^{7,8)}は、土木工事において基本的な行為の一つである土の圧縮に関して、不飽和粘性土を対象として、最も少ないエネルギーで圧縮する载荷速度を求める検討を試験及び数値モデルなどにより行っており、土の特性を考慮し省エネルギー化の研究を行っている。

このように地盤工学における省エネルギー化に関する研究は、建設機械の燃費向上という機械側からだけでなく、土の特性を考慮した検討へと進展しつつある。急速に進展してきている情報化施工や各種のセンサ開発を鑑みると、地盤側の視点に立った省エネルギー化に関する研究も並行して進めていく必要があるといえる。

そこで、本論文では、以上のような背景をふまえ、密度

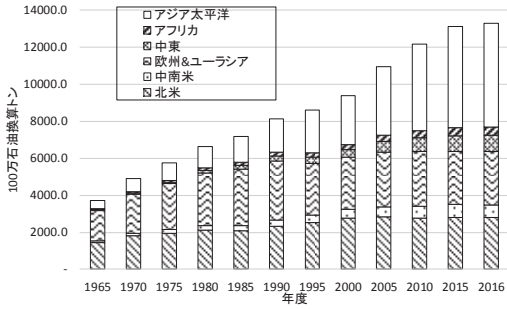


図-1 世界の一次エネルギー消費量の推移¹⁾

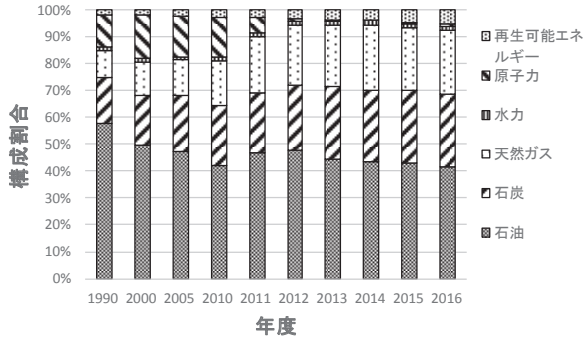


図-2 一次エネルギーの国内供給構成²⁾

を増加させて土の安定化を図ることに着目した。また、地盤改良の一つである密度増大について、省エネルギーに着目した新たな手法の開発を最終目的とし、ここでは、基礎的検討を実施した。具体的には、三軸試験装置を用い、様々な応力経路と単調や繰返しも含めた応力履歴での载荷による供試体の体積変化を調べ、少ないエネルギーで乾燥密度を増加させる応力履歴を調べることを目的とした。また、密度増加を図る地盤の深度も様々であることから、拘束圧についても種々変化させ、拘束圧の影響についても検討することとした。

2. 用いた試料及び試験方法

2.1 用いた試料

試験に用いた試料は、山口県宇部市で販売されている購入まさ土であり、購入したものを分取し使用した。研究に標準的な三軸試験装置を用いたため、それに合わせて、2mm以下に粒度調整したものを用いた。図-3に用いた宇部まさ土の粒度分布、表-1にその物理的性質を示す。

まさ土は花崗岩質岩石が風化し、その場所に残って土となったもので、風化の程度の差により粒度組成の変化が大きく、粗粒なものから細粒なものまである。しかし、基本的には風化した脆弱な長石、有色鉱物を多量に含み、土粒子が角ばっており破碎されやすい。また、階段粒度を示すこともあるが、一般には粒度が良い材料であり⁹⁾、盛土材、埋め立て材として活用されている。

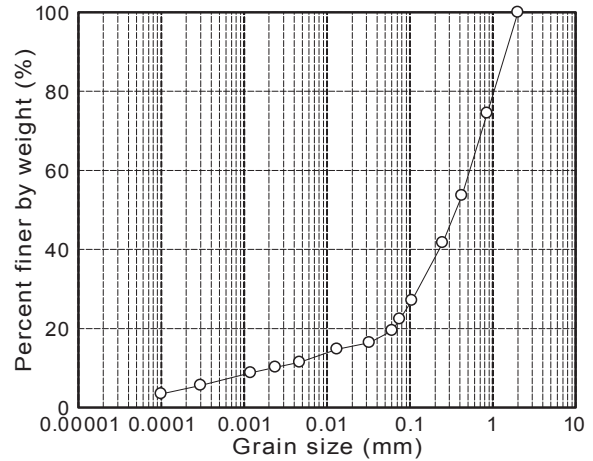


図-3 宇部まさ土の粒度分布

表-1 宇部まさ土の物理的性質

ρ_{dmax} (g/cm ³)	ρ_{dmin} (g/cm ³)	ρ_s (g/cm ³)	D_{50} (mm)	F_c (%)
1.709	1.279	2.448	0.370	22.4

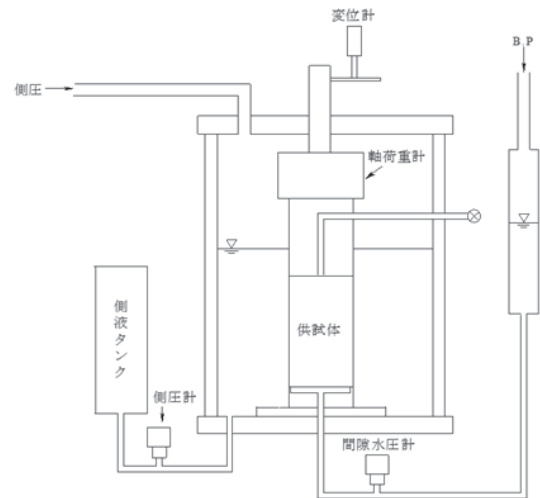


図-4 三軸試験装置の概略図

2.2 試験方法

2.2.1 用いた試験機

図-4に、本研究で用いた三軸試験装置の概略図を示す。本三軸試験装置は、任意の軸ひずみ速度で圧縮・伸張試験を行うこと、パソコンの制御で任意の側圧を作用させることが可能である。したがって、本研究で適用する任意の応力経路で供試体を圧縮変形させることが可能となっている。

2.2.2 単調载荷による排水三軸試験方法

密度を増加させ、地盤の安定化を図ることを想定しているため、供試体の初期状態は、供試体として作製可能な緩い条件とした。その供試体に対して、単調载荷による排水

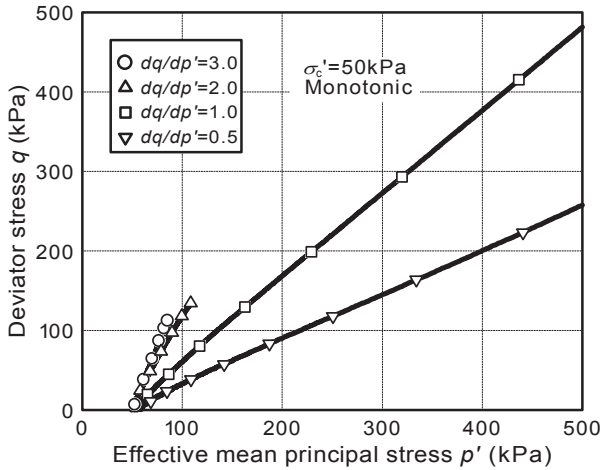
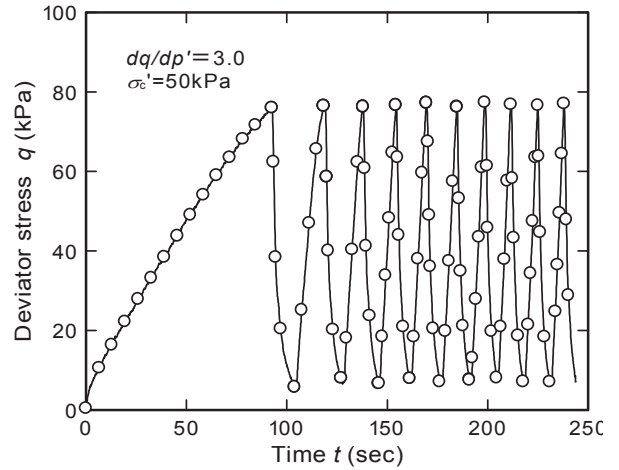


図-5 単調載荷時の応力経路



(a) 軸差応力 q の時刻歴

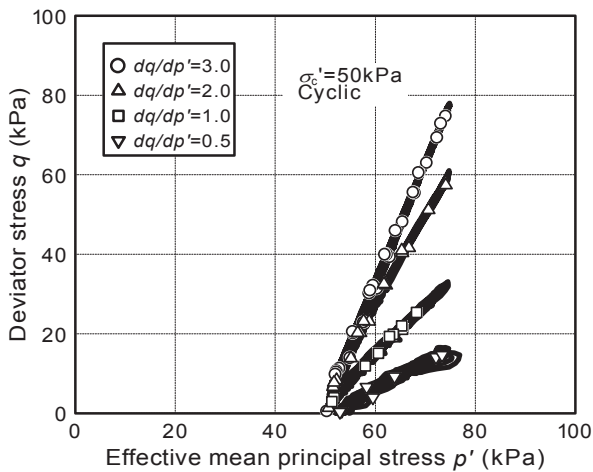
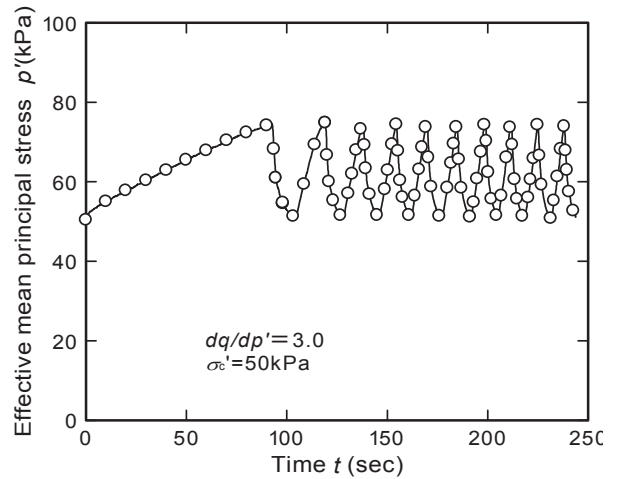


図-6 繰返し載荷時の応力経路



(b) 平均有効主応力 p' の時刻歴

図-7 繰返し載荷時の応力の時刻歴

三軸圧縮試験を行った。

供試体サイズは、直径 50mm、高さ 100mm である。供試体作製には、乾燥させた試料を用い、高さ 100mm からゴムスリーブを取り付けたモールド内に試料を落下させる空中落下法により作製した。この方法により作製された供試体の初期相対密度が 33% ($\rho_d = 1.395\text{g/cm}^3$) であったため、一連の試験の目標相対密度を 33% ($\rho_d = 1.395\text{g/cm}^3$) とした。

本研究で検討の対象とした単調載荷時の応力経路は、応力増分比 $dq/dp' = 3.0, 2.0, 1.0, 0.5$ の 4 パターンであり、拘束圧は、 $\sigma_c' = p_0' = 30, 50, 70\text{kPa}$ の 3 条件である。応力経路の表現に用いた記号の dq, dp' は、それぞれ等方圧密後の拘束圧 σ_c' からの増分で定義している。単調載荷時の応力経路は、軸ひずみ速度 0.1%/min で軸載荷を行い、それに対応して生じる dq に対して設定した応力比を保つように側圧の dp' を作用させることで管理している。つまり、軸ひずみ速度を一定に保ちながら、荷重や各種圧力をパソコンでモニタリングし、拘束圧が設定した応力経路を保つ

ようにパソコンで制御している。

図-5 に拘束圧 $\sigma_c' = 50\text{kPa}$ における単調載荷の試験時の応力経路を示す。いずれの試験結果も、試験中一定の傾きを保持し、設定した応力増分比で制御できていることがわかる。応力増分比が、 $dq/dp' = 3.0, 2.0$ の結果は、それぞれ軸差応力 q が 100kPa を超えたところで終了している。これは、先に述べたように、軸ひずみが 15% に達したためである。つまり、これら以外の応力増分比の結果は軸ひずみが 15% に達しておらず、試験装置の載荷能力に到達して試験を終了している。なお、拘束圧 30kPa、70kPa においても同様の挙動を示し、条件ごとに応力比を一定に保っていたことを確認している。

供試体作製・設置から圧密までは、地盤工学会基準 JGS 0524 「土の圧密排水三軸圧縮試験方法」¹⁰⁾ に準じており、等方圧密後の圧縮過程については、上述した方法で実施し、排水条件としている。供試体を飽和条件に保つために、背圧は 200kPa としている。また、試験終了の判断は、軸ひ

ずみ $\varepsilon_a=15\%$ に達するか、側圧の値が試験装置の能力の最大値に達したところとした。

2.2.3 繰返し载荷による排水三軸試験方法

繰返し载荷も単調载荷と同様に、供試体作製・設置から圧密までは、地盤工学会基準 JGS 0524「土の圧密排水三軸圧縮試験方法」¹⁰⁾に準じており、緩い状態の宇部まさ土を対象に同じ三軸試験装置を用いて実施した。繰返し载荷も、単調载荷と同様の応力経路で、軸ひずみ速度 0.1%/min で実施した。密度増加すなわち体積収縮させることが目的であるため、繰返し载荷は、圧縮方向のみの片振幅で行うこととした。また、後述する単調载荷の結果より、 $dp'=0.5p_0'$ の増分で繰返すこととした。繰返し回数については、試験時間の都合から、本研究では、繰返し回数 $N=10$ とした。このような繰返し载荷もパソコンによる制御で実施している。なお、供試体サイズ、供試体作製方法、試験条件等は単調载荷の場合と同様である。

図-6に拘束圧 $\sigma_c'=50\text{kPa}$ における繰返し载荷の実験時の応力経路を示す。単調载荷による試験では応力増分比が増え続けるのに対し、繰返し载荷による試験では平均有効主応力 $p_0'=50\text{kPa}$ からスタートし、 $dp'=0.5p_0'$ に達すると p_0' まで戻るように制御しているため、単調载荷とは異なる。繰返し载荷においても、試験中ほぼ一定の傾きを保持し、設定した応力増分比で制御できていることがわかる。なお、拘束圧 30kPa, 70kPa においても同様の挙動を示し、条件ごとに応力比を一定に保っていたことを確認している。

また一例として、図-7に拘束圧 $\sigma_c'=50\text{kPa}$ 、 $dq/dp'=3.0$ の繰返し载荷における軸差応力 q と平均有効主応力 p' の時刻歴をそれぞれ(a)(b)として示す。図(b)より初期の平均有効主応力 $p_0'=50\text{kPa}$ からスタートし、試験条件とした繰返し载荷の振幅 $dp'=0.5p_0'$ となる $dp'=25\text{kPa}$ で除荷し、元の値に戻ったところで再び载荷しており、試験条件通りにパソコンで制御ができていることが分かる。また、応力増分比を制御しているため、 dp' の変化に対応して dq も図(a)のように変化することが確認できる。

2.2.4 エネルギー計算式

ここで結果の整理に用いたエネルギー式を以下に示す。この式は密度増加に対するエネルギー変化を考察するために用いている。繰返し载荷における p' の計算方法は、単調载荷の場合と異なり、 p' の絶対値の増分の積算により算出している。これは除荷時にも、荷重をコントロールしエネルギーを費やしていることを想定しているためである。

$$W = \sum (p' \cdot |d\varepsilon_v| + q \cdot |d\varepsilon_s|) \quad (1)$$

ここで、式に含まれるパラメータの説明を表-2に示す。

3. 様々な応力履歴による乾燥密度変化とエネルギー

3.1 単調及び繰返し载荷の応力ひずみ関係

結果の一例として、拘束圧 $\sigma_c'=50\text{kPa}$ における単調载荷の応力ひずみ関係を図-8に、繰返し载荷の応力ひずみ関

表-2 用いたパラメータ

記号	パラメータ名	単位
W	エネルギー	kJ/m^3
σ_1'	圧縮応力	kPa
σ_3'	側圧	kPa
$\varepsilon_1, \varepsilon_a$	軸ひずみ	%
ε_3	側方ひずみ	%
σ_c', p_0'	拘束圧	kPa
$p' = (\sigma_1' + 2\sigma_3')/3$	平均有効主応力	kPa
$q = \sigma_1' - \sigma_3'$	軸差応力	kPa
$d\varepsilon_v = d\varepsilon_1 + 2d\varepsilon_3$	体積ひずみ増分	%
$d\varepsilon_s = 2/3(d\varepsilon_1 - d\varepsilon_3)$	せん断ひずみ増分	%

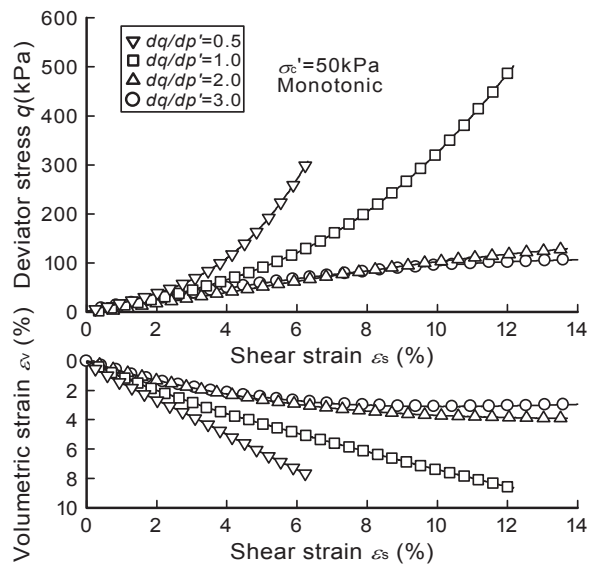


図-8 単調载荷のせん断ひずみと軸差応力、体積ひずみ関係

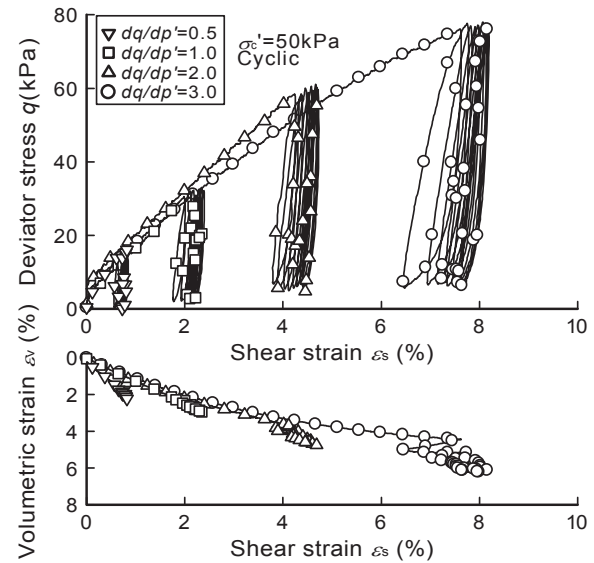


図-9 繰返し载荷のせん断ひずみと軸差応力、体積ひずみ関係

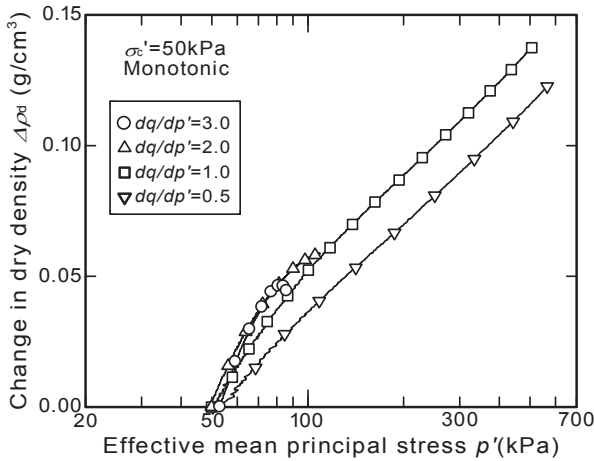


図-10 単調荷荷の $\Delta\rho_d - \log p'$ の関係

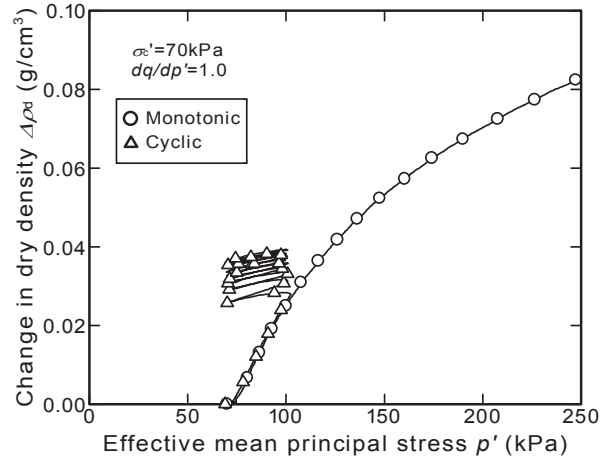


図-12 単調及び繰返し荷荷の乾燥密度変化と平均有効主応力の関係 ($dq/dp'=1.0$)

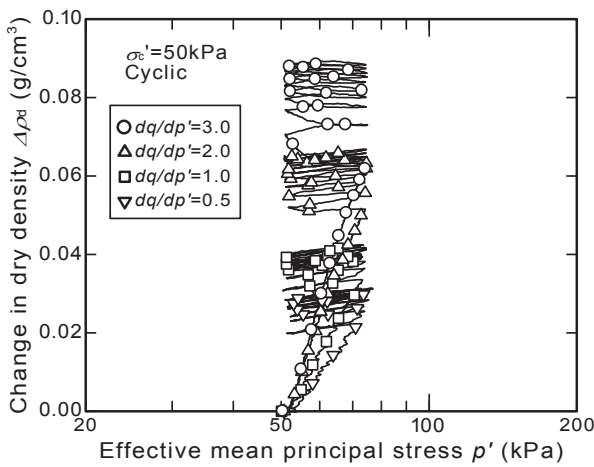


図-11 繰返し荷荷の $\Delta\rho_d - \log p'$ の関係

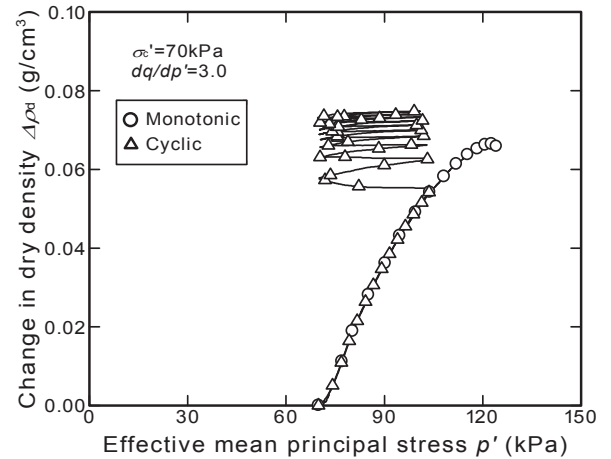


図-13 単調及び繰返し荷荷の乾燥密度変化と平均有効主応力の関係 ($dq/dp'=3.0$)

係を図-9 にそれぞれ示す。

図-8 より、 $dq/dp'=3.0, 2.0$ の応力増分比の結果は、比較的緩い砂の一般的な圧密排水三軸圧縮試験の挙動を示し、応力ひずみ関係が上に凸の非線形な曲線を描き、体積ひずみについては、下に凸の非線形な曲線で終盤はほぼ定常あるいは若干膨張へと転じている様子が見られる。それに対し、 $dq/dp'=1.0, 0.5$ の応力増分比の結果は、応力ひずみ関係では、下に凸の非線形な曲線形状を示し硬化している様子が見られる。また、体積ひずみは、ほぼ直線的に増加しており、その勾配は $dq/dp'=0.5$ において最も急なものとなっている。

図-9 の繰返し荷荷の結果は、いずれの応力増分比においても、応力ひずみ関係は、下に凸の非線形な曲線は認められず、どちらかという上に凸の非線形な曲線を呈していることがわかる。また、いずれも荷荷の1波目で大きくせん断ひずみが生じ、2波目以降のせん断ひずみの発生はわずかであることがわかる。体積ひずみの結果は、いずれも収縮している様子が見られる。いずれの結果においても、1波目と2波目以降でその増加傾向に違いが認められることも確認でき、繰返すことにより、せん断ひずみの増

分に対して体積ひずみの増分が大きいことが確認できる。

なお、拘束圧 30kPa, 70kPa においても同様の挙動が認められた。

3.2 効率的な応力経路の検討

3.2.1 平均有効主応力と乾燥密度変化

単調及び繰返し荷荷において、各応力経路の平均有効主応力が密度変化に与える影響を把握するために、図-10 に拘束圧 $\sigma'_c=50\text{kPa}$ において単調荷荷を行った際の $\Delta\rho_d - \log p'$ の関係、図-11 に拘束圧 $\sigma'_c=50\text{kPa}$ において繰返し荷荷を行った際の $\Delta\rho_d - \log p'$ の関係を示す。ここで、 $\Delta\rho_d$ は、圧密後の乾燥密度 ρ_{d0} を基準とし、それに対する乾燥密度の変化量としている。供試体の土粒子部分の質量は試験中一定である。したがって、荷荷に伴う変形による間隙の変化は、給排水による水の量として現れる。それは、ビュレットの水位変化から体積変化として測定できるため、その体積変化と土粒子部分の質量を用いて、乾燥密度を算出し圧密後の乾燥密度との差分を増分として $\Delta\rho_d$ を算出した。なお、

すべての拘束圧において結果が同様の傾向であったため、拘束圧 $\sigma'_c=50\text{kPa}$ について示す。

図-10より単調載荷では、 $dq/dp'=3.0$ 、 2.0 の場合、載荷後しばらくは乾燥密度が増加しているが、その後その増加割合は緩やかになり、 $dq/dp'=3.0$ では、終盤には乾燥密度が減少していることが読み取れ、膨張へ転じていることがわかる。一方で、 $dq/dp'=1.0$ 、 0.5 の乾燥密度増分は、 $\log p'$ に対して載荷初期から終盤まで直線的に変化していることが見て取れる。

図-11より、同じ平均有効応力 p' の振幅で $N=10$ 回の繰返し載荷では、 dq/dp' が大きい程、乾燥密度の変化が増加することがわかる。またその傾向は、1波目から生じており、1波目で最も大きな乾燥密度の変化が確認され、その後の除荷や2波目以降も変化分が少なくはなっていくが、同様の傾向を示すことがわかる。

次に単調と繰返し載荷の挙動の違いを比較するために、代表的な結果として、拘束圧 $\sigma'_c=70\text{kPa}$ における $dq/dp'=1.0$ 、 3.0 の結果を平均有効主応力と乾燥密度増分の関係として図-12と図-13にそれぞれ示す。いずれの図においても、繰返し載荷の1波目は単調載荷と同じ乾燥密度変化を生じていることが読み取れる。1波目の除荷以降は、単調と繰返し載荷で異なる挙動を示す。 $dq/dp'=1.0$ では、単調載荷において乾燥密度の変化が大きく生じているのに対し、 $dq/dp'=3.0$ では、単調載荷において、正のダイレイタンスが生じるため、繰返し載荷において乾燥密度の変化が大きくなることが確認できる。

3.2.2 エネルギーと乾燥密度変化

単調及び繰返し載荷による乾燥密度変化とその変化に要したエネルギーを把握するために、図-14に単調載荷における乾燥密度変化 $\Delta\rho_d$ とエネルギー W の関係、図-15に繰返し載荷における乾燥密度変化 $\Delta\rho_d$ とエネルギー W の関係、図-16に所定のエネルギーを要した際の乾燥密度増分 $\Delta\rho_d$ と応力経路 dq/dp' の関係を示す。ここでのエネルギー W を求めるために W は、式(1)により算出されたものである。

図-14において、載荷初期であるエネルギー $W=2\text{kJ/m}^3$ 程度までは、応力経路の影響はほとんど認められない。その後応力経路ごとに挙動が異なり、 $dq/dp'=3.0$ の応力増分比の結果は、載荷途中で収縮から膨張へ変化する、膨張した後はエネルギー W を増加させても乾燥密度が増加せず、緩んでいくことが読み取れる。このことから、正のダイレイタンスの影響で一旦膨張するとその後の載荷では、エネルギー W を費やしても密度増加には寄与しないことが明らかである。また、単調載荷では同じエネルギーを費やした場合、 dq/dp' が小さいものほど乾燥密度変化が大きくなる。これより、単調載荷では等方応力に近づくような経路、効率的に密度を増加させられると考えられる。

図-15より、繰返し載荷の1波目である載荷序盤は、単調載荷の序盤と同様に応力経路の影響はほとんど認められない。その後、繰返し載荷による除荷と再載荷により、乾燥密度変化の変化割合は減少していく。最終的には、

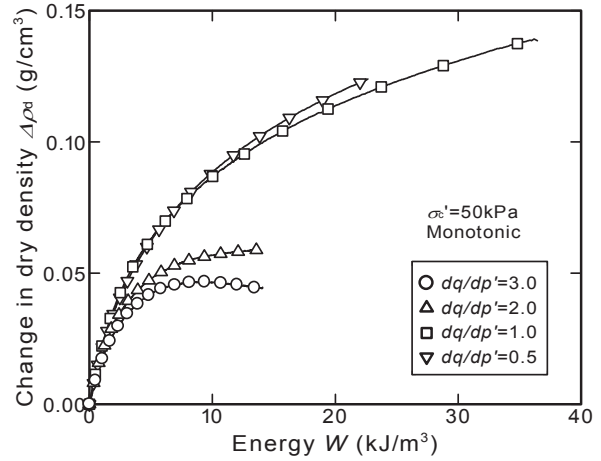


図-14 単調載荷における乾燥密度変化 $\Delta\rho_d$ とエネルギー W の関係

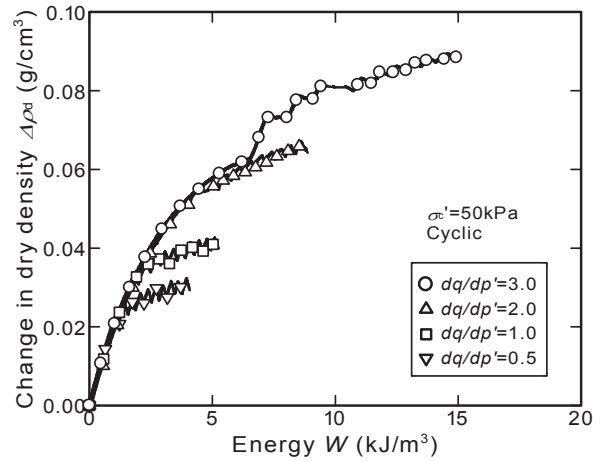
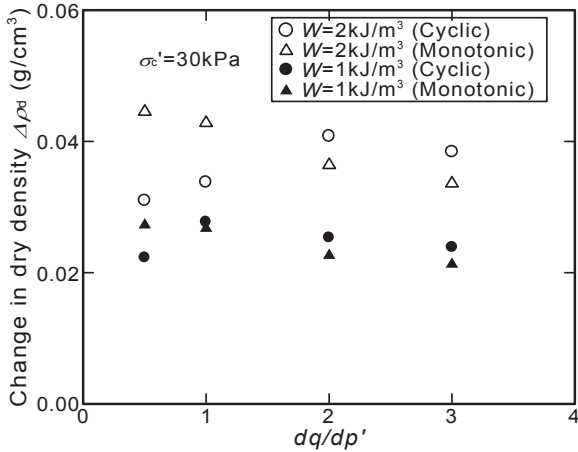


図-15 繰返し載荷における乾燥密度変化 $\Delta\rho_d$ とエネルギー W の関係

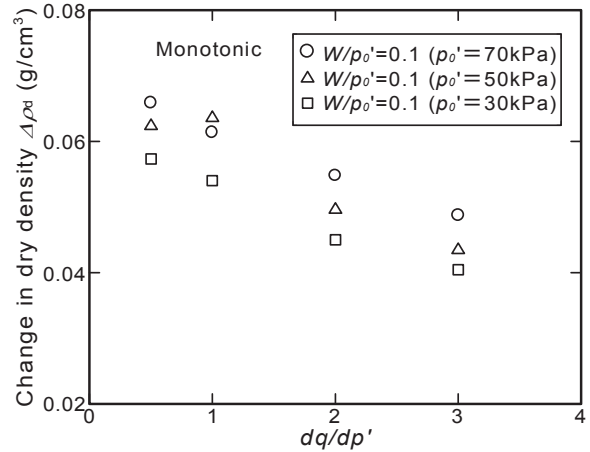
dq/dp' が大きいもの程、少ないエネルギーで密度増加していることが読み取れる。

図-16(a)～(c)に、各拘束圧において所定のエネルギー W を要した際の乾燥密度変化 $\Delta\rho_d$ と応力増分比 dq/dp' の関係を示す。図より、若干のばらつきは認められるものの、いずれの拘束圧においても、単調載荷は応力増分比が小さい程、効率的に密度増加していること、繰返し載荷で、エネルギーが 2kJ/m^3 の時点では、応力増分比が大きい程、効率的に密度増加している。このことから単調載荷では、等方応力に近い経路、繰返し載荷では、異方応力の経路においてエネルギー効率が良いと考えられる。

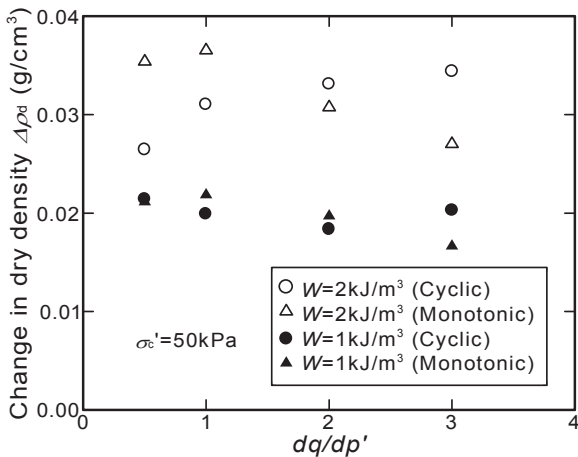
このように単調載荷と繰返し載荷において効率の良い応力増分比が異なる要因は、繰返し載荷において dq/dp' が小さいもの程1波目が $dp'=0.5p'_0$ に達するのが早いこと、繰返し載荷の1波目以降は、応力増分比が大きいもの程、負のダイレイタンスが大きく発現し、乾燥密度変化が大きくなること、繰返し載荷を行うことで単調載荷では膨張へ変化していた dq/dp' が収縮から膨張に変化しなかったことなどが考えられる。



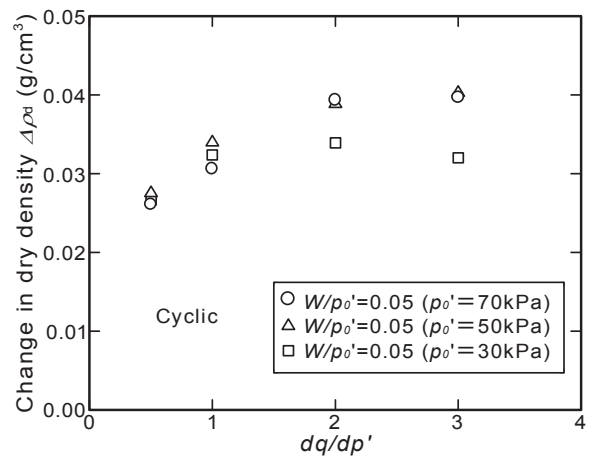
(a) 拘束圧 30kPa



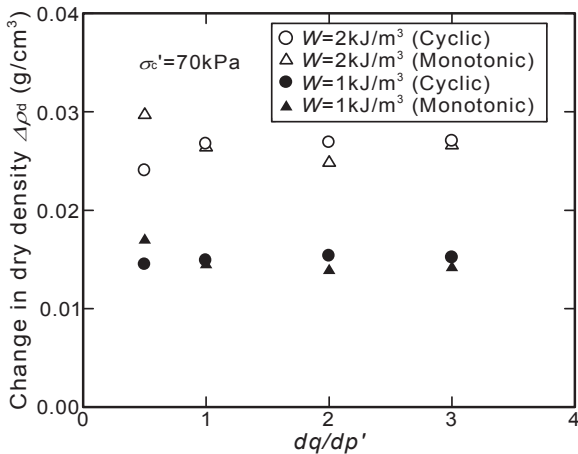
(a) 単調載荷



(b) 拘束圧 50kPa



(b) 繰返し載荷



(c) 拘束圧 70kPa

図-16 所定のエネルギー W 時の乾燥密度変化 $\Delta\rho_d$ と応力増分比 dq/dp' の関係

図-17 所定のエネルギー比 W/p_0' における乾燥密度変化 $\Delta\rho_d$ と応力増分比 dq/dp' の関係

3.3 効率的な密度変化に及ぼす拘束圧の影響

ここでは、拘束圧が乾燥密度変化に及ぼす影響を把握する。そこで拘束圧の異なる結果を相対的に比較するために、エネルギーを拘束圧で除したエネルギー比 W/p_0' を用いる。所定のエネルギー比 W/p_0' に達した際の乾燥密度変化 $\Delta\rho_d$

と各応力経路の関係を図-17 (a), (b) に示す。なお、載荷方法や応力経路により、発現しているエネルギー比の値が異なるため、比較できる最も大きいエネルギー比として、単調の場合は 0.1 を、繰返しの場合は 0.05 を用いている。

図 (a) より単調載荷では、若干結果にバラツキが認められるものの、いずれの拘束圧においても応力経路が等方応力に近い程、所定の W/p_0' に達した際の乾燥密度変化 $\Delta\rho_d$ が大きくなっていること、拘束圧が高い程、所定の W/p_0' に達した際の乾燥密度変化 $\Delta\rho_d$ が大きくなることがわかる。このことから、拘束圧が大きい程、同じエネルギー比 W/p_0' を与えた際に、乾燥密度変化 $\Delta\rho_d$ が大きくなることを確認できる。

図 (b) に示す繰返し載荷においては、拘束圧 $\sigma' = 30\text{kPa}$ の場合、応力増分比 $dq/dp' = 2.0$ でピークを示しており、他の拘束圧と異なる結果が得られた。これについては、現在の結果だけでは原因が検討できず、今後の詳細な検討が必要と考えている。一方で、おおよその傾向として、応力増分比が大きい程、乾燥密度変化が大きくなる傾向にあり、この結果は、単調のそれとは異なることが確認できる。また、

単調で見られた拘束圧の影響についても、繰返しでは、顕著な拘束圧の違いは認められず、拘束圧の影響をさほど受けない結果を示している。応力増分比の影響が表れたのは、繰返しによる除荷・再載荷時の正のダイレイタンスの影響を高い応力増分比において受けやすかったためと考えられる。拘束圧の影響については、比較検討に用いたエネルギー比 W/p_0' の値が 0.05 と小さく、差が生じていないところでの検討となったことが考えられる。これについては、繰返し回数を増加させる実験を行い、より高いエネルギー比 W/p_0' で検討していく必要があると考えられる。

4. まとめ

本研究では、三軸試験装置を用い、様々な応力経路と単調や繰返しも含めた応力履歴を与えて載荷することにより生じる供試体の体積変化を調べ、少ないエネルギーで乾燥密度を増加させる応力履歴を調査した。また、その際の拘束圧の影響についても調べた。その結果、本研究条件において、次のことが明らかとなった。

軸差応力とせん断ひずみの関係及びせん断ひずみと体積ひずみの関係から、単調載荷において、応力増分比 $dq/dp'=1.0, 0.5$ では、軸差応力とせん断ひずみ関係が下に凸の非線形な結果となる顕著な硬化挙動を發揮した。また、せん断ひずみの増加に対して、体積ひずみも比例的に増加した。繰返し載荷においては、いずれの応力増分比でも、1波目に顕著なせん断ひずみが生じるが、その後の除荷・再載荷過程では、せん断ひずみの増加はわずかであるが、体積ひずみの増加が顕著となった。

単調載荷では、すべての拘束圧において、応力増分比 $dq/dp'=3.0$ で、乾燥密度変化が頭打ちとなり、若干膨張へと転じる様子が確認された。これより、応力増分比によっては、必ずしも圧縮載荷したとしても密になるわけではなく、エネルギーが無駄となる条件が存在することがわかった。すべての拘束圧において、単調載荷では、等方に近い応力経路($dq/dp'=0.5$)、繰返し載荷では、拘束圧 $\alpha'=30\text{kPa}$ の結果を除き、より異方的な応力経路($dq/dp'=2.0, 3.0$)におい

て、乾燥密度変化に対するエネルギー効率が良いことが確認された。拘束圧 $\alpha'=30\text{kPa}$ においては異方的な応力経路 ($dq/dp'=1.0, 2.0$)において、乾燥密度変化に対するエネルギー効率が良いことが確認された。

単調載荷においては、拘束圧が大きい程、同じエネルギー比を与えた場合に乾燥密度変化が大きくなり、繰返し載荷においては、乾燥密度変化に拘束圧の明確な影響は見られなかった。

参考文献

- 1) BP Statistical Review of World Energy : Statistical Review of World Energy June 2017, 66th edition, p.8, 2017.
- 2) 経済産業省 資源エネルギー庁：エネルギー白書 2018, p.136, 2018.
- 3) 浅井俊行：省エネルギー型建設機械の導入促進, 建設機械施工, Vol.68, No.1, pp.10-14, 2016.
- 4) 落合正巳, 園田光夫：建設機械のハイブリッド化とハイブリッドショベル, 建設の施工企画, No.707, pp.35-39, 2009.
- 5) 原田純仁：ICT ブルドーザと ICT 油圧ショベルの開発, 計測と制御, Vol.55, No.6, pp.523-526, 2016.
- 6) 藤岡晃, 野末晃, 三村洋一：建設会社における ICT の活用事例, 計測と制御, Vol.55, No.6, pp.515-518, 2016.
- 7) 中島聡, 建山和由：エネルギー効率から見た圧縮載荷速度の最適化, 土木学会論文集 C, Vol.66, No.4, pp.869-876, 2010.
- 8) 中島聡, 建山和由：土質物性を考慮した最適な載荷制御による消費エネルギーの最小化に関する研究, 地盤工学ジャーナル, Vol.6, No.4, pp.475-488, 2011.
- 9) 河野伊一郎, 八木則男：土の力学, pp.17-19, 1990.
- 10) 社団法人地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説—二分冊の2—, pp.579-583, 2009.

(2018年6月22日 受付)