

## 様々な応力条件下での緩いまさ土の高密度化とエネルギー

## Densification and Energy of Loose Decomposed Granite Soil under Various Stress Conditions

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、様々な応力条件下での荷重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条件を把握することを目的とした。一連の実験的検討から、単調荷重では、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、繰返し荷重では、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いことが分かった。また、繰返し回数が多い時、すなわちエネルギーが大きい時、小さい振幅で荷重を行うよりも大きい振幅で荷重を行うことで、同じエネルギーで比較して乾燥密度増分が大きくなることがわかった。

キーワード：高密度化、エネルギー、省エネ、応力条件 (IGC : D-05, D-06, K-05)

## 1. はじめに

近年、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-1<sup>1)</sup>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傾向であり、特に、日本を含むアジア大洋州地域の消費量が拡大している。そのため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。

このような背景を踏まえ、建設業界においては、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きている<sup>2)</sup>。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<sup>3)</sup>。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<sup>4)</sup>、また、加速度センサをブルドーザや振動ローラに搭載し、締固め状態を管理する事例<sup>5)</sup>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<sup>6),7)</sup>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荷重速度を求める検討を試験及び数値モデルなど

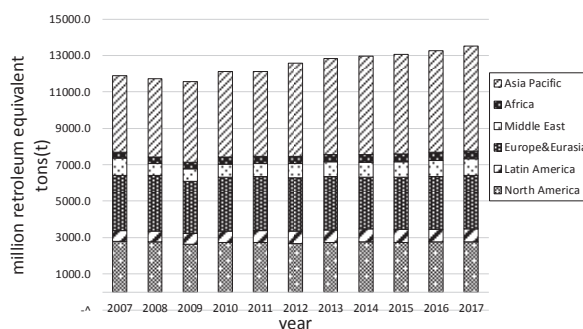


図-1 世界の一次エネルギー消費量の推移<sup>1)</sup>

により行っており、土の特性を考慮した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的な側面からだけでなく、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。

また、近年では日本国内において限られた国土を有効活用し、廃棄物処分場の容量確保のために、石炭灰などの廃棄物地盤の減容化や震災の多い日本において安全・安心な生活空間の確保のために、軟弱地盤の液状化対策などに対する高密度化の需要も高まっている。地盤の減容化や液状化対策には様々な工法があり、その中でも地盤の密度を高めることで地盤の体積の収縮や地盤の安全率を向上させる工法は多くある。先ほど述べた近年の建設業界の取り組みなどから、今後それらの工法においても省エネルギー化は求められることが考えられる。そのため減容化や液状化対策などの建設工事を様々な観点から省エネルギー化するための基礎的な研究に取り組んで

いく必要があるといえる。

高橋ら<sup>8)</sup>は、静的圧入締固め工法の試験施工を実施し、 $N$  値および  $K$  値の観察結果から、低改良率であっても  $N$  値および  $K$  値の増加が確認されたことを報告している。このような結果が得られた原因は、改良中に鉛直方向だけでなく水平方向の応力も増加することによると考えられる。つまり、様々な応力経路を与えた高密度化とその際のエネルギーとの関係を調べる基礎的な研究は、静的圧入締固め工法の改良効果のメカニズムの解明にも繋がると考えられる。

著者らは、既往の研究<sup>9)</sup>において、効率の良い応力経路の把握とそれに対する初期拘束圧の影響を把握することを目的とした研究を実施している。そして、繰返し載荷においては、初期拘束圧による明確な影響がなく、要するエネルギーが小さい際には異方応力の応力経路が効率的であることを明らかにしている<sup>9)</sup>。

そこで、本論文では、以上のような背景や研究成果を踏まえ、密度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載荷による供試体の体積変化を調べ、任意のエネルギーを与えた際に効率的に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、繰返し載荷において、同じエネルギーで繰返しの振幅の違いによる密度増加の影響についても検討することとした。

## 2. 用いた試料砂及び試験方法

### 2.1 用いた試料砂

試験に用いた試料砂は、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。本研究では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-2 に用いた粒度調整後の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<sup>10)</sup>、盛土材、埋め立て材として活用されている。

### 2.2 試験方法

#### 2.2.1 用いた試験装置

図-3 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

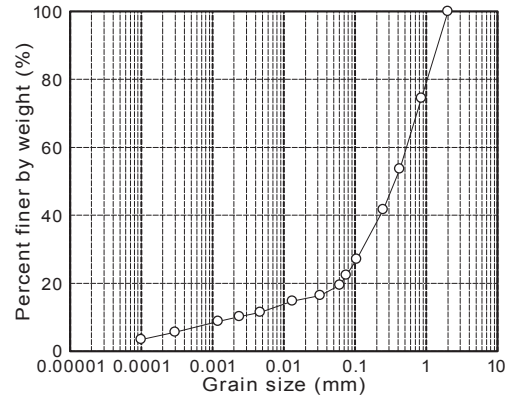


図-2 宇部まさ土の粒度分布

表-1 宇部まさ土の物理的性質

$\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{dmin}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	$D_{50}$ (mm)	$F_c$ (%)
1.709	1.279	2.632	0.370	22.4

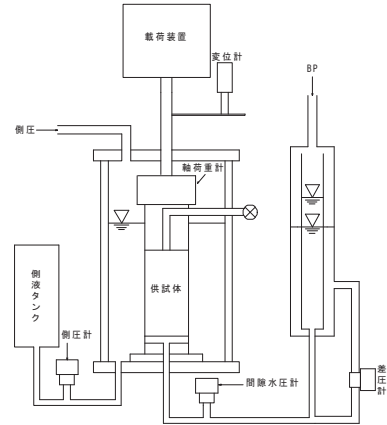


図-3 三軸試験装置の概略図

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 単調載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、単調載荷による排水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、ゴムスリーブを取り付けたモールド内に地盤工学会基準 JGS A 1224「砂の最大密度・最小密度試験方法」<sup>11)</sup>を参考に上述した試験方法の基準と同様の漏斗を用いて作製した。この方法により作製された供試体の初期相対密度が 35% ( $\rho_d = 1.405\text{g/cm}^3$ ) であったため、一連の試験の目標相対密度を 35% ( $\rho_d = 1.405\text{g/cm}^3$ ) とし、相対密度の誤差が  $\pm 2\%$  以下となるように作製した。

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、初期拘束圧は、 $\sigma'_c = p_0' = 50\text{kPa}$ 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初期拘束圧  $\sigma'_c$  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。

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」<sup>12)</sup> 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  $200\text{kPa}$  としている。また、試験終了の判断は、軸ひずみ  $\epsilon_a = 15\%$  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。

図-4 に初期拘束圧  $\sigma'_c = 50\text{kPa}$  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  $100\text{kPa}$  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、試験装置の荷重能力に到達して試験を終了している。

### 2.2.3 繰返し載荷による排水三軸試験方法

繰返し載荷も単調載荷と同様に、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」<sup>12)</sup> 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。繰返し載荷も、単調載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、繰返し載荷は、圧縮方向のみの片振幅で行うこととした。既往の研究<sup>9)</sup>において、効率の良い応力経路の把握と初期拘束圧の影響を把握することを目的とし研究を実施している。その結果、繰返し載荷においては初期拘束圧による明確な影響がなく、要するエネルギーが小さい際には異方応力の応力経路が効率的であることを明らかにしている<sup>9)</sup>。

その結果を踏まえ本研究では、繰返し載荷の繰返し振幅の影響に着目し、振幅の影響を把握するために  $dp' = 0.3p_0'$ ,  $0.5p_0'$ ,  $0.7p_0'$  の3種類の増分で繰返し載荷を行うこととした。繰返し回数については、既往の研究では繰返し回数  $N = 10$  を満たした際に試験終了としていたが等方圧密に近い経路において十分なエネルギーを加えられておらず、比較的小さいエネルギーを与えた際の効率の良い応力経路を把握することしかできなかった。そのため、本研究では繰返し回数  $N$  が  $30$  回以上かつ、要したエネルギーが  $15\text{kJ}/\text{m}^3$  を満たした場合に試験を終了することとし、比較的大きなエネルギーを要した際の効率の良い応力経路を把握することを目的とした。この

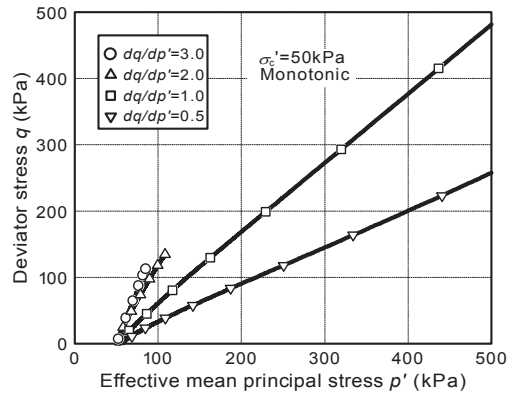


図-4 単調載荷時の応力経路

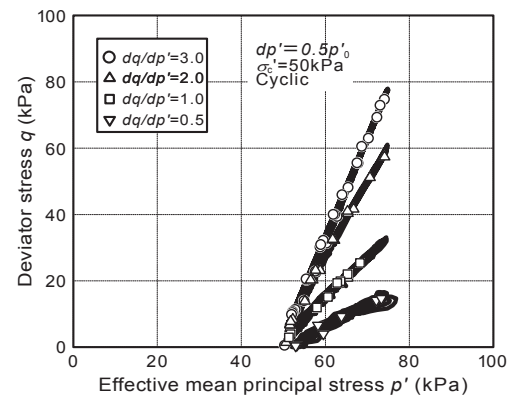


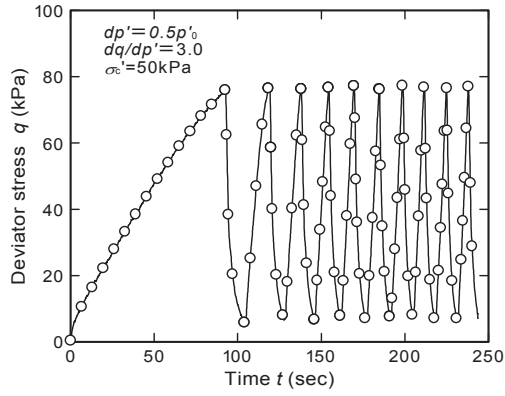
図-5 繰返し載荷時の応力経路

ような繰返し載荷の条件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、試験条件等は単調載荷の場合と同様である。

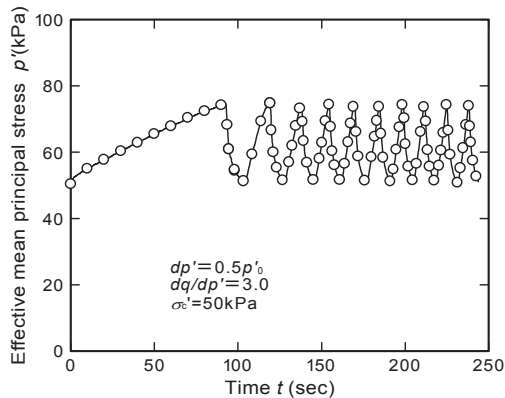
図-5 に初期拘束圧  $\sigma'_c = 50\text{kPa}$ 、繰返し振幅  $dp' = 0.5p_0'$  における繰返し載荷の実験時の応力経路を示す。単調載荷による試験では平均有効主応力  $p'$  が増え続けるのに対し、繰返し載荷による試験では平均有効主応力  $p_0' = 50\text{kPa}$  からスタートし、 $dp' = 0.5p_0'$  に達すると  $p_0'$  まで戻るように制御しているため、単調載荷とは異なる。繰返し載荷においても、試験中ほぼ一定の傾きを保持し、設定した応力増分比で制御できていることがわかる。なお、振幅  $dp' = 0.3p_0'$ ,  $0.7p_0'$  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-6(a) に  $dq/dp' = 3.0$  の繰返し載荷における軸差応力  $q$  の時刻歴、図-6(b) に  $dq/dp' = 3.0$  の繰返し載荷における平均有効主応力  $p'$  の時刻歴、図-6(c) に  $dq/dp' = 1.0$  の繰返し載荷における各振幅の1波目の平均有効主応力  $p'$  の時刻歴を示す。図-6(c) よりいずれの振幅も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載荷の振幅となる  $dp'$  に達した時点で除荷に転じていることがわかる。また、図-6(b) より  $p'$  の値が元の値に戻ったところで再び載荷しており、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。

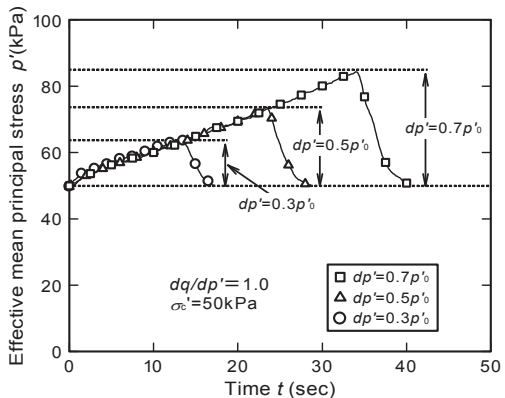




(a) 軸差応力  $q$  の時刻歴



(b) 平均有効主応力  $p'$  の時刻歴



(c) 各振幅における1波目の平均有効主応力  $p'$  の時刻歴  
図-6 繰返し載荷時の応力の時刻歴

### 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式(1)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。繰返し載荷における  $p'$  の計算方法は、単調載荷の場合と異なり、 $p'$  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、式中に含まれるパラメータの説明を表-2に示す。

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	$\text{kJ/m}^3$
$\sigma_1'$	圧縮応力	$\text{kPa}$
$\sigma_3'$	側圧	$\text{kPa}$
$\varepsilon_1, \varepsilon_a$	軸ひずみ	%
$\varepsilon_3$	側方ひずみ	%
$\sigma_c', p_0'$	初期拘束圧	$\text{kPa}$
$p' = (\sigma_1' + 2\sigma_3')/3$	平均有効主応力	$\text{kPa}$
$q = \sigma_1' - \sigma_3'$	軸差応力	$\text{kPa}$
$d\varepsilon_v = d\varepsilon_1 + 2d\varepsilon_3$	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	%

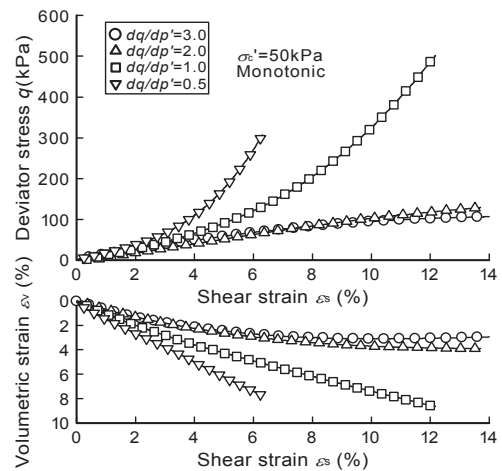


図-7 単調載荷のせん断ひずみと軸差応力、体積ひずみ関係

## 3. 様々な応力条件下での乾燥密度変化とエネルギー

### 3.1 単調及び繰返し載荷の応力ひずみ関係

試験結果の一例として、初期拘束圧  $\sigma_c' = 50\text{kPa}$  における単調載荷の応力ひずみ関係を図-7に、初期拘束圧  $\sigma_c' = 50\text{kPa}$ 、 $dp' = 0.7 p_0'$  における繰返し載荷の応力ひずみ関係を図-8にそれぞれ示す。

図-7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-8の繰返し載荷の結果は、いずれの応力増分比にお

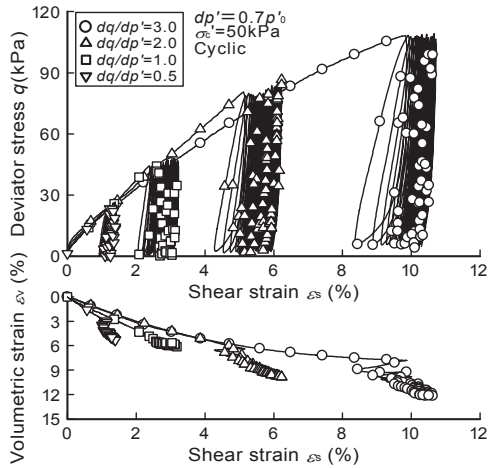


図-8 繰返し載荷のせん断ひずみと軸差応力、体積ひずみ関係

いても、応力ひずみ関係は、単調載荷と異なり下に凸の非線形な曲線は認められず、上に凸の非線形な曲線を呈していることがわかる。また、いずれも載荷の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うかがえる。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、振幅  $dp' = 0.3p_0'$ 、 $0.5p_0'$  においても同様の挙動が認められた。

### 3.2 効率的な応力条件の検討

#### 3.2.1 平均有効主応力が密度変化に及ぼす影響

単調及び繰返し載荷において、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-9に単調載荷を行った際の  $\Delta\rho_d - \log p'$  の関係、図-10に繰返し振幅  $dp' = 0.7p_0'$  において繰返し載荷を行った際の  $\Delta\rho_d - \log p'$  の関係を示す。密度変化に着目して比較するために体積ひずみではなく  $\Delta\rho_d$  を用いて比較している。 $\Delta\rho_d$  は、圧密後の乾燥密度  $\rho_{d0}$  を基準とし、それに対する乾燥密度の変化量を図-7、8に示した体積ひずみより算出している。供試体の土粒子部分の質量は試験中一定であるので、載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、繰返し載荷のすべての振幅において結果が同様の傾向であったため、ここでは繰返し振幅  $dp' = 0.7p_0'$  を一例として示す。

図-9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、載荷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

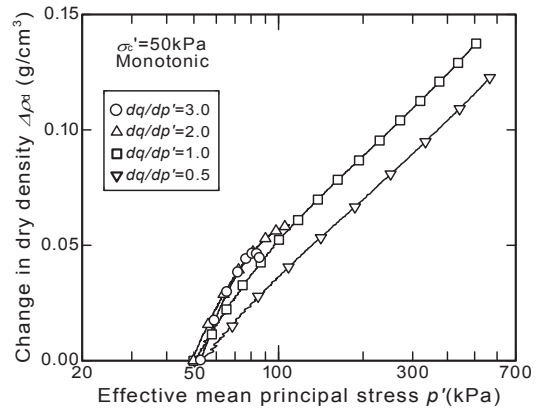


図-9 単調載荷の  $\Delta\rho_d - \log p'$  の関係

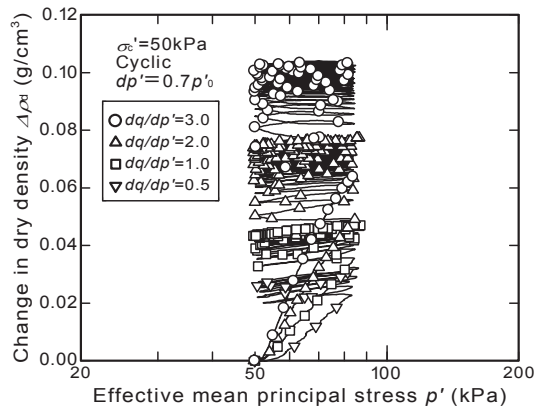


図-10 繰返し載荷の  $\Delta\rho_d - \log p'$  の関係

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-10より、同じ平均有効主応力  $p'$  の振幅での繰返し載荷では、 $dq/dp'$  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波目に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なっていくが、同様の傾向を示すことがわかる。

#### 3.2.2 高密度化に要するエネルギー

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-11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-12に繰返し振幅  $dp' = 0.7p_0'$  での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-13に単調載荷及び繰返し振幅  $dp' = 0.7p_0'$  での繰返し載荷における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  $dq/dp'$  の関係及びその関係を近似線で表した際の傾きの絶対値と評価時点のエネルギー  $W$  の関係を示す。ここで、エネルギー  $W$  は、前述したように式(1)により算出している。

図-11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し、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

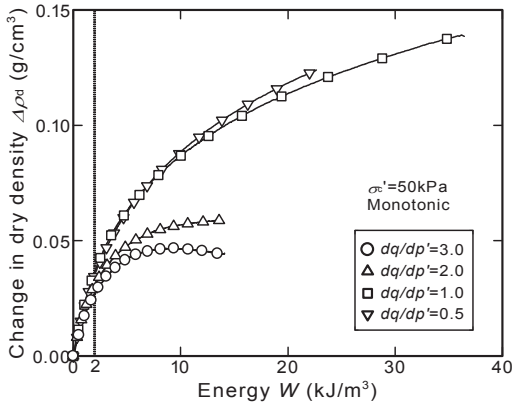
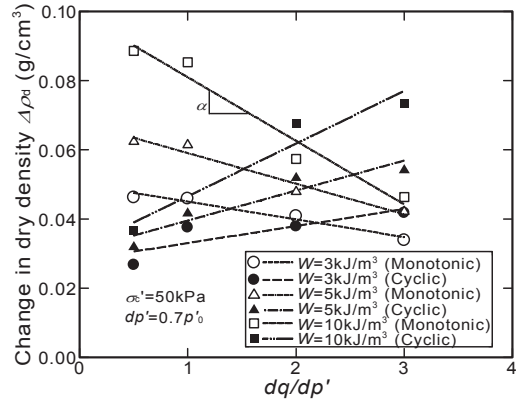


図-11 単調载荷における乾燥密度変化 $\Delta\rho_d$ とエネルギー $W$ の関係



(a) 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

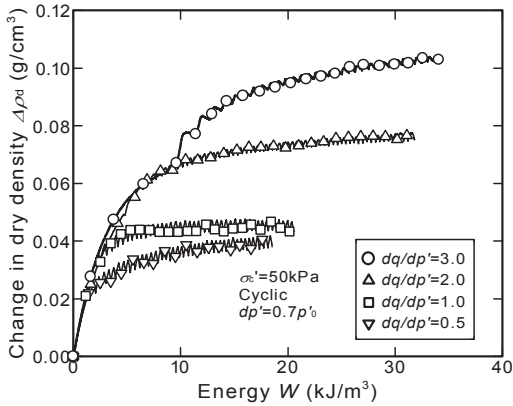
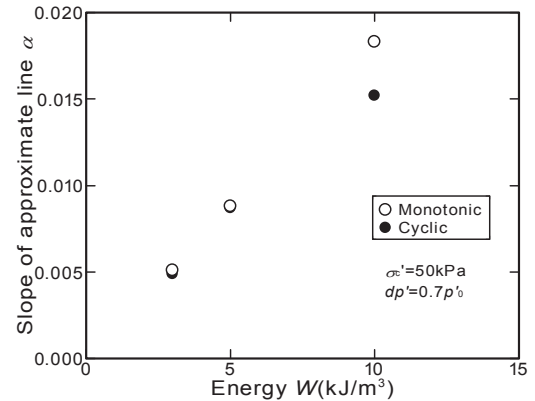


図-12 繰返し载荷における乾燥密度変化 $\Delta\rho_d$ とエネルギー $W$ の関係



(b) 所定のエネルギー $W$ における乾燥密度変化 $\Delta\rho_d$ と応力増分比 $dq/dp'$ の関係で描かれる近似線の勾配とエネルギーの関係

図-13 単調及び繰返し载荷における応力増分比の違いによる乾燥密度変化とエネルギーの影響

のダイレイタンスの影響で一旦膨張するとその後の载荷では、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、単調载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、単調载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。

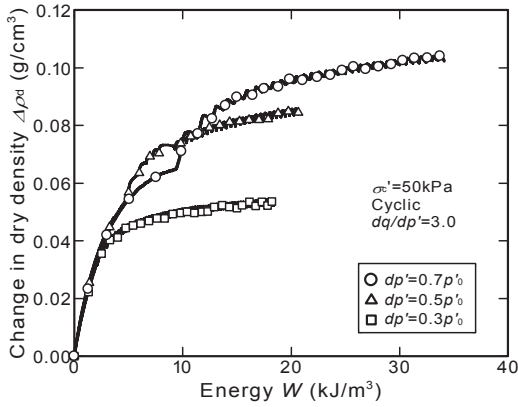
図-12より、繰返し载荷の1波目である载荷序盤は、単調载荷の序盤と同様に応力経路の影響はほとんど認められない。その後、繰返し载荷による除荷と再载荷により、乾燥密度変化の変化割合は減少していく。繰返し载荷の回数が多い際には、 $dq/dp'$ が大きいもの程、同じエネルギーを要した際の乾燥密度増分が大きくなることが読み取れ、繰返し载荷では異方応力の応力経路において効率的に密度を増加させられると考えられる。また、繰返し载荷においては、単調载荷では膨張へ転じていた応力経路においてもエネルギーを費やすことで密度増加が行われていることが読み取れる。

図-13(a)より、単調载荷は $dq/dp'$ が小さいものほど同じエネルギーを与えた際の乾燥密度増分が大きくなっており効率的に密度増加していること、繰返し载荷では、 $dq/dp'$ が大きいものほど同じエネルギーを与えた際の乾燥密度増分が大きくなっており、それぞれ異なる $dq/dp'$

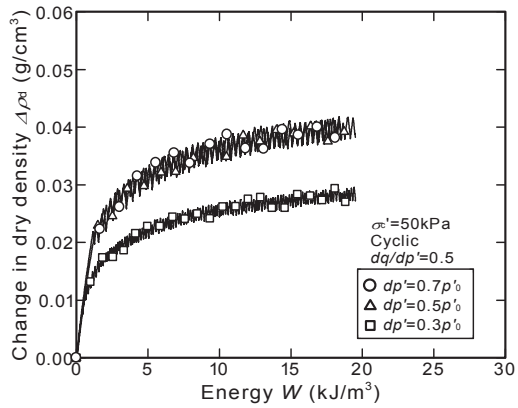
で効率的に密度増加していることが読み取れる。このことから単調载荷では、等方応力に近い経路、繰返し载荷では、異方応力の経路においてエネルギー効率が良いといえる。

図-13(b)より、要したエネルギーが大きいほど単調载荷と繰返し载荷のいずれも図-13(a)における近似線の傾きの絶対値が大きくなることが読み取れる。このことから要するエネルギーが大きくなるほど単調及び繰返し载荷のいずれも効率の良い応力経路において高密度化を行うことで、より効率的に高密度化が行えることがわかった。そして、要するエネルギーが大きくなるほど、応力経路の影響が顕著に現れる。

このように単調载荷と繰返し载荷において効率の良いと判断した応力増分比 $dq/dp'$ が異なる要因は、繰返し载荷において $dq/dp'$ が小さいもの程1波目が $dp'=0.7p'o$ に達するのが早いこと、繰返し载荷の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、繰返し载荷を行うことで単調载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)  $dq/dp'=3.0$



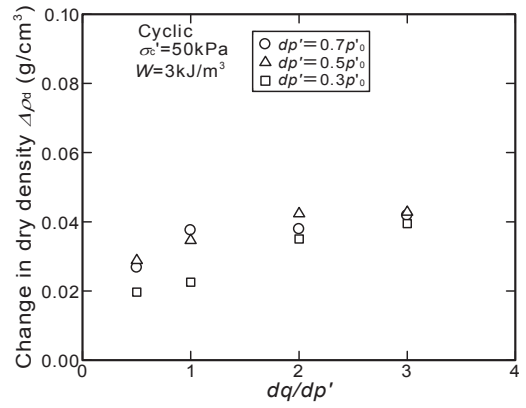
(b)  $dq/dp'=0.5$

図-14 各応力増分比  $dq/dp'$  におけるエネルギー  $W$  と乾燥密度変化  $\Delta\rho_d$  の関係

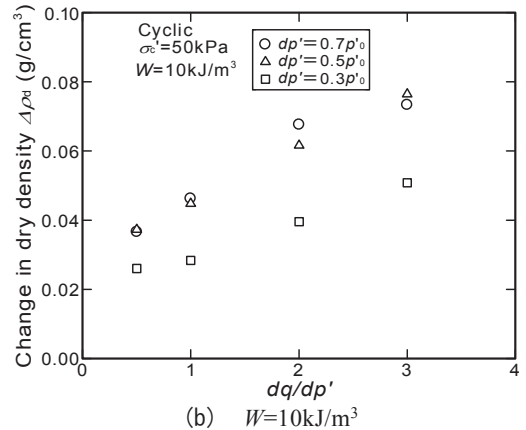
### 3.3 繰返しの振幅が効率的な密度変化に及ぼす影響

繰返し载荷における繰返し振幅の影響を把握するために、図-14(a)に  $dq/dp'=3.0$  における各振幅時の乾燥密度変化  $\Delta\rho_d$  とエネルギー  $W$  の関係、図-14(b)に  $dq/dp'=2.0$  における各振幅時の乾燥密度変化  $\Delta\rho_d$  とエネルギー  $W$  の関係、図-15(a), (b), (c)に所定のエネルギーを要した際の乾燥密度増分  $\Delta\rho_d$  と応力増分比  $dq/dp'$  の関係、図-16に図-15 の関係を近似線で表した際の傾きを示す。要したエネルギーの大きさによる検討も行うために、エネルギーが  $W=3, 10, 15\text{kJ/m}^3$  の時の乾燥密度増分  $\Delta\rho_d$  と応力増分比  $dq/dp'$  の関係の傾きを用いている。

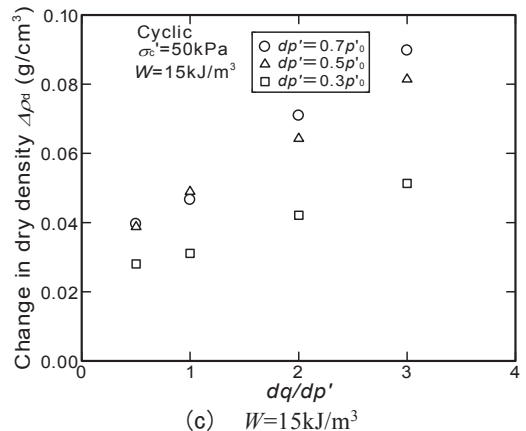
図-14 より繰返し载荷において繰返し回数が多い際には、繰返し振幅の大きい  $dp'=0.5p'_0$ ,  $0.7p'_0$  が振幅の小さい  $dp'=0.3p'_0$  に比べて同じエネルギー  $W$  を与えた際の乾燥密度増分  $\Delta\rho_d$  が大きくなることを読み取れ、大きい振幅  $dp'=0.5p'_0$ ,  $0.7p'_0$  でより効率的に高密度化することができる。また、図-14(a)より異方応力の応力経路 ( $dq/dp'=3.0$ )で载荷するには振幅  $dp'=0.5p'_0$ ,  $0.7p'_0$  においても振幅が大きいほど効率的に密度増加させることができる。一方で、図-14(b)より等方応力に近い応力経路 ( $dq/dp'=0.5$ )においては、振幅  $dp'=0.5p'_0$ ,  $0.7p'_0$  において同じエネルギーを与えた際の乾燥密度増分に大きな差がなく振幅を  $dp'=0.5p'_0$  より大きくしても効率的な密度増



(a)  $W=3\text{kJ/m}^3$



(b)  $W=10\text{kJ/m}^3$



(c)  $W=15\text{kJ/m}^3$

図-15 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

加は行えない可能性がある。

図-15(a), (b), (c)より、繰返し载荷においては、いずれの振幅においても異方応力の応力経路で同じエネルギー  $W$  を要した際の乾燥密度増分  $\Delta\rho_d$  が大きくなることが読み取れる。また(a), (b), (c)を比較すると  $W=3\text{kJ/m}^3$  の時に比べ  $W=10, 15\text{kJ/m}^3$  の時の方が振幅  $dp'=0.3p'_0$  で繰返し载荷を行った時の乾燥密度増分と振幅  $dp'=0.5p'_0$ ,  $0.7p'_0$  で繰返し载荷を行った時の乾燥密度増分の差が大きくなることを読み取れ、要したエネルギーが大きいほど振幅の影響が顕著に現れることがわかる。

図-16より、振幅  $dp'=0.3p'_0$  では、図-15 の関係から得られる傾きはほぼ一定であり、振幅  $dp'=0.5p'_0$ ,  $0.7p'_0$  においては要したエネルギーが大きいほど傾きが大きくな



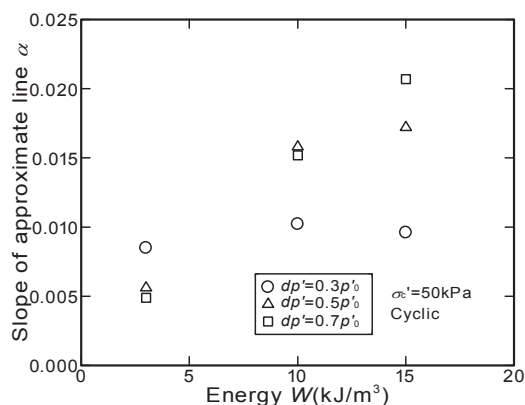


図-16 所定のエネルギー $W$ における乾燥密度変化 $\Delta\rho_d$ と応力増分比 $dq/dp'$ の関係で描かれる近似線の勾配とエネルギーの関係

ることが読み取れる。より大きな振幅で高密度化を行う際、要するエネルギーが大きくなるほど、効率の良い応力経路で顕著な高密度化が図れる。

#### 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载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条件を調査した。また、その際の繰返し载荷における繰返しの振幅の影響についても調べた。その結果、本研究条件において、以下のことが明らかとなった。

- 単調载荷では等方応力に近い応力経路、繰返し载荷はいずれの振幅においても異方応力の応力経路において同じエネルギーを要した際の乾燥密度増分が大きくなり、効率の良い高密度化が行うことが可能であることが分かった。また、要するエネルギーが大きくなるほどその結果は顕著に現れ、効率の良い応力経路で高密度化を行うことで省エネルギー化につながることを示唆された。
- 繰返し载荷において、いずれの繰返し振幅においても乾燥密度増分とエネルギーの関係の挙動は同様であり、いずれの振幅においても異方応力の応力経路において効率の良い高密度化が可能であることがわかった。
- 繰返し载荷において、繰返しの振幅が大きい $dp'=0.5p_0'$ 、 $0.7p_0'$ で载荷を行うことで繰返しの振幅が小さい $dp'=0.3p_0'$ で载荷を行う場合より効率的に高密度化を行うことが可能であることがわかった。
- 繰返し载荷において、効率的であると把握することができた異方応力の応力経路では、繰返し回数が多い際に振幅が大きいほど同じエネルギーを与えた際の乾燥密度増分が大きくなることがわかり、振幅が大きいものほど効率のよい高密度化を行うこと

が可能であるといえる。

- 繰返し载荷において、等方応力に近い応力経路では繰返しの振幅が大きい $dp'=0.5p_0'$ 、 $0.7p_0'$ で载荷を行った際の乾燥密度増分に差がなく、振幅を $dp'=0.5p_0'$ より大きくしても省エネルギー化に寄与しない可能性があることが示唆された。

本研究において、エネルギーと密度増加の関係を明らかにしたが、用いた試料砂はまさ土であり、他の砂で同様のことが言えるかは不明である。ダイレイタンシーが密度増加にどのように寄与するのかが、砂の種類によってどのように異なるのかも明らかになっていない。継続した研究を行い、これらについて解明していきたい。また、本研究のような基礎研究が、締固め工法の改良効果のメカニズムの解明に繋がる可能性も考えられるため、それらとの関連も含めた検討を実施していく予定である。

#### 参考文献

- BP Statistical Review of World Energy : Statistical Review of World Energy June 2018, 67<sup>th</sup> edition, p.8, 2018.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 中島聡，建山和由：エネルギー効率から見た圧縮载荷速度の最適化，土木学会論文集C，Vol.66, No.4, pp.869-876, 2010.
- 中島聡，建山和由：土質物性を考慮した最適な载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.
- 高橋秀紀，大橋照美，遠藤敏雄，藤井照久，金子智之，水野匠：静的圧入締固め工法の低改良率化に向けた試験施工および解析的検証，地盤工学ジャーナル，Vol.8, No.3, pp.451-461, 2013.
- 石橋弘康，吉本憲正：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，地盤と建設，Vol.36, No.1, pp.97-104, 2018.
- 河野伊一郎，八木則男：土の力学，pp.17-19, 1990
- 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1—，pp.195-198, 2009.
- 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.

(2019年6月17日 受付)