

## 時間履歴が砂質土のせん断挙動に与える影響

## Effect of Time History on Shear Behavior of Sand

富尾祥一 Shoichi TOMIO (山口大学大学院理工学研究科)  
 中田幸男 Yukio NAKATA (山口大学大学院理工学研究科)  
 兵動正幸 Masayuki HYODO (山口大学大学院理工学研究科)  
 田中浩之 Hiroyuki TANAKA (山口大学大学院理工学研究科)

本研究では、中空ねじりせん断試験機を用いて、時間履歴に着目した主応力方向角 $\alpha=45^\circ$ 固定の定圧ねじりせん断試験を行った。具体的に、圧密は等方圧密を30kPaから100kPaまで行い、せん断は所定のせん断応力までに異なる時間載荷履歴を与えるもの、あるいはせん断途中で異なる時間のクリープを行うものの2シリーズを行った。試料は豊浦砂と宇部まさ土の2種類を用いた。この結果、豊浦砂はせん断時の時間履歴の影響をあまり受けないが、まさ土はクリープ時間が長い試料の方が、クリープ中の変形が大きく、またせん断強度がより明確に大きくなることが認められた。

キーワード：時間効果，ねじりせん断，クリープ

(IGC:D06)

## 1. はじめに

我が国において、これまでに数多く建設され蓄積されてきた構造物も、時間の経過に伴い老朽化してくることは、我々にとって避けられない課題である。日本では現在、高度経済成長期を中心に整備された膨大な量の社会資本を保有しているが、適切な維持管理をしないと各種構造物や設備の老朽化が進み、将来的に更新コストが急激に増大することは明白である。今後、低成長の時代が続くと予想される中で、既存の社会資本ストックの機能を維持するためには、合理的かつ効率的な保全活動が求められる。

国土交通省はこの合理的かつ効率的な保全活動のために、実施される公共事業の評価について新規事業採択時評価、再評価及び事業完了後の事後評価まで一貫した事業評価体制を構築している<sup>1)</sup>。しかしながら、砂質土の時間依存性をはじめ、現在の科学的知見をもってしても未だ解決できない数多くの課題が残っていることを認識した上で評価を行う必要がある。

この公共事業評価体制からすると、既存の構造物の維持管理は、構造物建設という公共事業の事後評価にあたる。また、ある構造物の維持管理という公共事業が新規事業として行う必要があるかどうかを判断する際には、新規事業採択時評価として大きな意味を持つことになる。どちらにおいても、特にこれから先どのように変化していくかを明確に捉える必要があることに変わりはなく、長期的安定性のための維持管理が重要となる。そのために長期的なシミュレーションを行う必要があり、用いられる構成モデルや材料定数を設定することになる。例えば、盛土などの土構造物を例に挙げると、そのシミュレーションのためには盛土材料の時間依存性による挙動を捉えた構成モデル、材料定数が求められる。

これまでの研究では、主に標準的な豊浦砂が用いられており、クリープひずみが何によって依存するか、また排水クリープだけでなく、非排水クリープではどうかなど様々な砂質土の時間依存性に関する実験結果が得られている<sup>2)3)4)</sup>。しかし、圧縮性が高い材料などその他の試料<sup>5)</sup>に対しては、十分な研究が進んでいないのが現状である。また、使用されている試験機についても、これまでの研究では一般的に砂質土の変形・強度特性を把握するために三軸試験機が中心に用いられてきたが、この試験機では現実存在する実地盤の応力状態のうち、限られた状態しか再現することができない。より実地盤に近い応力状態を再現するためには、それに見合う試験機を用いる必要がある。

本研究では、中空ねじりせん断試験機を用いて、圧縮性の高い砂質土の時間依存性を調べることを目的としている。ゆくゆくは得られた実験結果が解析に用いられる構成モデルや材料定数を設定することに役立つと考えている。比較対象として豊浦砂の実験も行っている。

## 2. 試料および実験方法

## 2.1 用いた試料

本研究で用いた試料は、シリカ系の豊浦砂と宇部まさ土の2種類である。表-1にこれらの試料の物理的性質、図-1に粒径加積曲線を示す。

表-1 試料の物理的性質

試料	$G_s$	$e_{max}$	$e_{min}$
豊浦砂	2.643	0.973	0.635
宇部まさ土	2.642	1.247	0.745

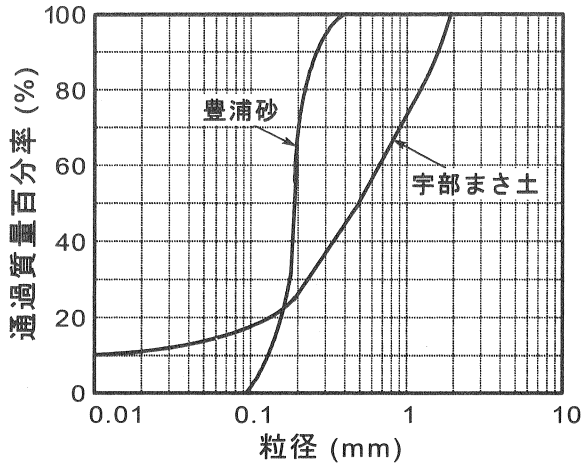


図-1 粒径加積曲線

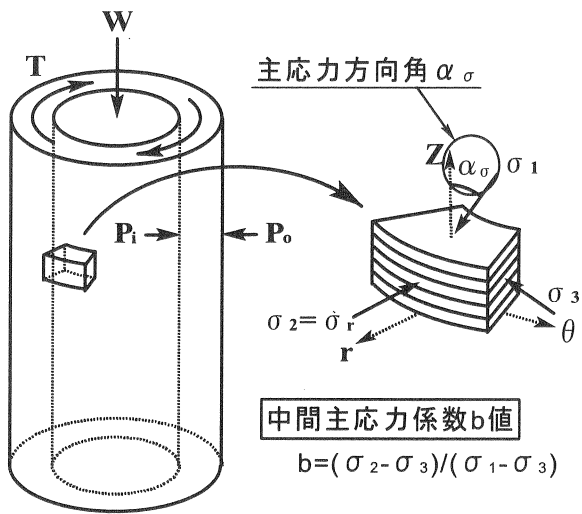


図-2 中空供試体の概念図

2.2 実験方法

2.1 で示した 2 種類の試料に対して、主応力方向固定の定圧ねじりせん断試験を実施した。使用した試験機は、図-2 に示すような供試体を用いる中空ねじりせん断試験機である。

試験機に用いる供試体は、概ね高さ 20cm、外径 10cm、内径 6cm で、相対密度 80% を目標に空中落下法で作製したものである。供試体をセル内に設置し、30kPa の拘束圧を付与した後、飽和度を高めるために 100kPa の背圧を加え、全ての供試体について間隙水圧係数 B 値が 0.95 以上となっていることを確認し、実験を実施している。

具体的な実験方法について述べる。圧密過程は等方圧密で行い、30kPa から所定の平均有効主応力である 100kPa まで 60 分かけて増加させた。60 分かけて 70kPa 増加するように単位時間に必要な平均有効主応力を計算し、パソコンからの自動制御によって載荷させた。

せん断過程は平均有効主応力  $p=100\text{kPa}$  一定、主応力方向角  $\alpha_\sigma=45^\circ$  一定、中間主応力係数  $b$  値  $[(\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)] = 0.5$  一定で軸差ひずみ 15% まで定圧ねじりせん断を実施した。このとき、(A) 所定のせん断応力までに異なる

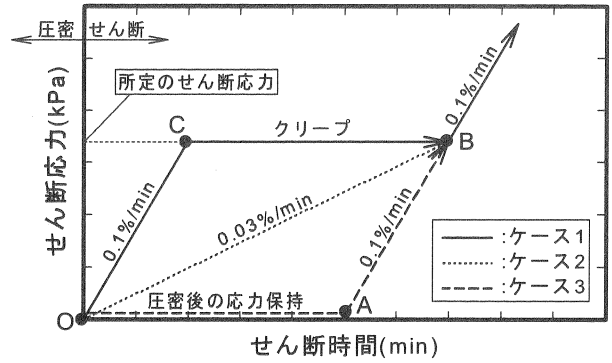


図-3 異なる時間載荷履歴の応力経路

表-2 時間載荷履歴のケース説明

ケース1	所定のせん断応力まで0.1%/minでせん断した後、クリープを行い、その後再び0.1%/minでせん断を行うもの
ケース2	0.03%/minでせん断を続け、所定のせん断応力に達した時点で0.1%/minに変え、さらにせん断を行うもの
ケース3	圧密終了時の応力状態でケース1のクリープ時間だけ保持し、その後0.1%/minでせん断を行うもの

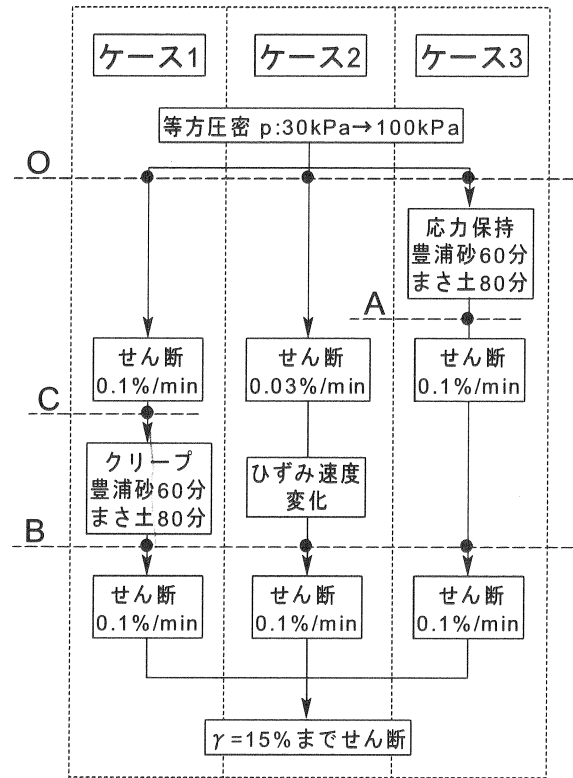


図-4 シリーズ A の実験フローチャート

時間載荷履歴を与えるもの、(B)せん断途中で異なる時間のクリープを与えるものの 2 シリーズの実験を行った。

シリーズ A については、図-3 に示すように目標とするせん断応力は同じだが、そこに到達するまでの経路が異なる場合、その後のせん断挙動にどのような影響を及ぼすかを検討するために実施するものである。表-2 に示すような 3 ケースを定義した。図-4 にこのシリーズ A の実験フローチャートを示す。

シリーズ B については、図-5 に示すようにシリーズ A の実験における経路の 1 つであるケース 1 のクリープ時間

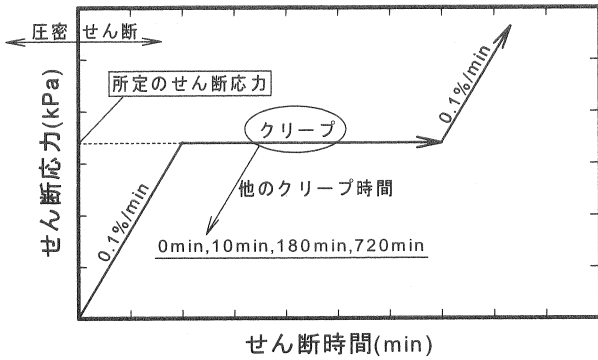


図-5 異なるクリープ時間の応力経路

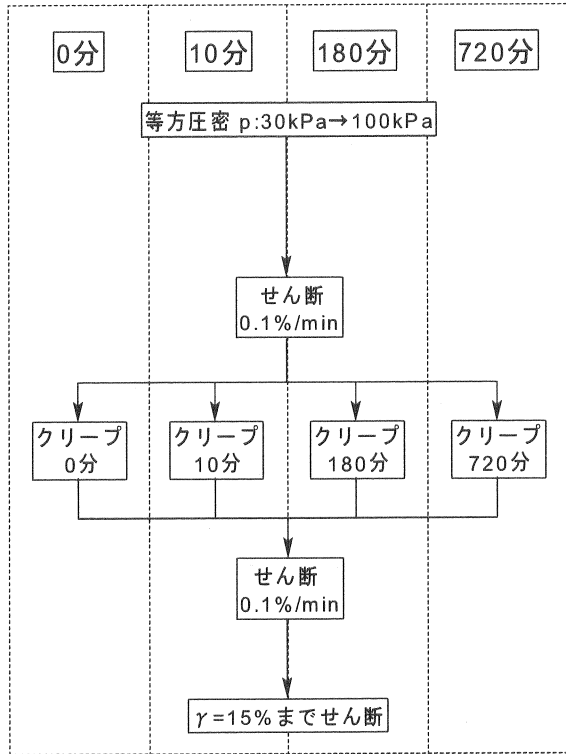


図-6 シリーズBの実験フローチャート

を変化させることで、クリープ時間によってその後のせん断挙動にどのような影響を及ぼすかを検討するために実施するものである。クリープ時間は0min, 10min, 180min, 720minと変化させた。図-6にこのシリーズBの実験フローチャートを示す。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 時間履歴を変化させた実験 (シリーズA)

まず、図-3に示している(A)所定のせん断応力までに異なる時間履歴を与えるものの実験結果を示す。

図-7に豊浦砂の時間履歴(せん断時間とせん断応力、せん断ひずみの関係)を示し、図-8に宇部まさ土の時間履歴履歴を示す。クリープを行う所定のせん断応力は豊浦砂が60kPa、宇部まさ土が50kPaとしている。これはそれぞれの試料の強度9割を目安として定めたものである。これ

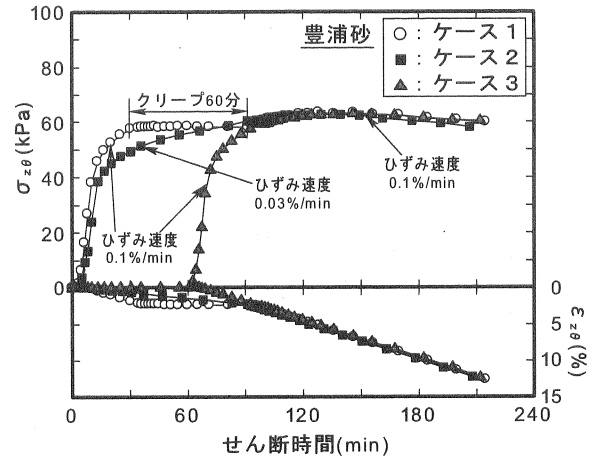


図-7 時間履歴履歴 (豊浦砂)

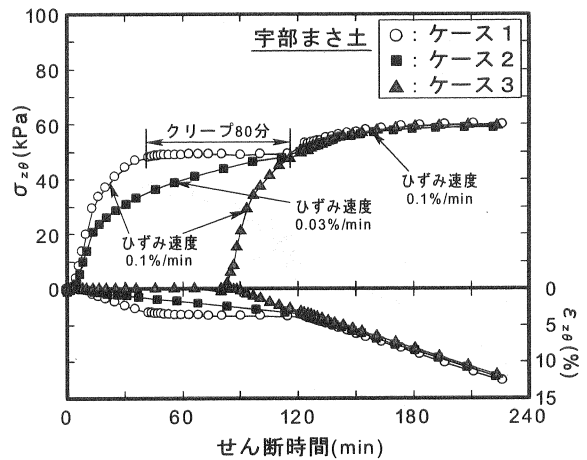


図-8 時間履歴履歴 (宇部まさ土)

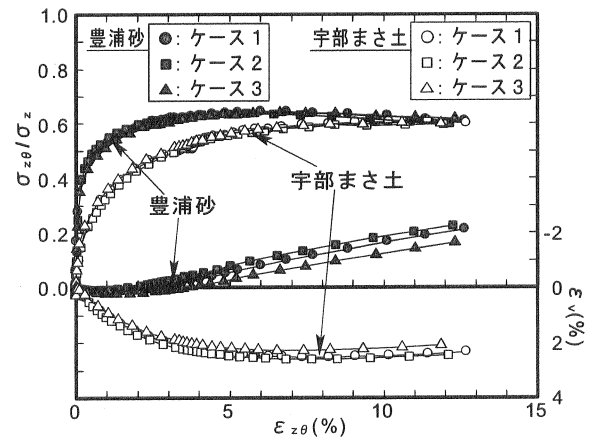


図-9  $\sigma_{z\theta}/\sigma_z, \varepsilon_v - \varepsilon_{z\theta}$  関係

は、より強度に近い状態でクリープを実施する方が、クリープの有無による比較をする際に大きな差が現れるだろうと考えたこと、強度に近すぎる状態では実験の再現性が疑われる可能性があることによる。図-7、図-8のせん断時間とせん断応力の関係を図-3 (シリーズAの応力経路) と比べてとき、豊浦砂についてはせん断開始後約90分間、宇部まさ土についてはせん断開始後約120分間において、図-3の所定のせん断時間とせん断応力の関係と同様な挙動を示していることから、両試料のいずれのケースも所定の制御が行えていることがわかる。また、豊浦砂ではせん

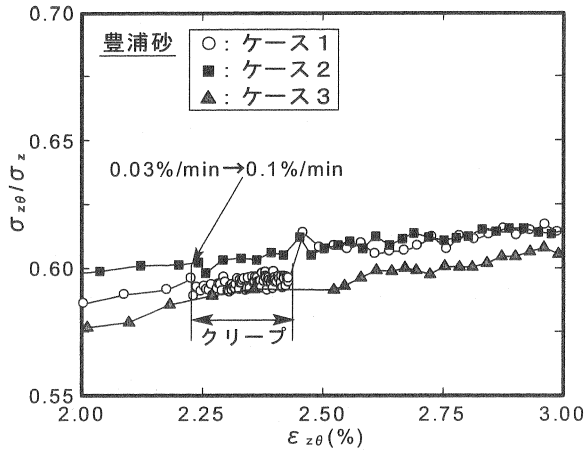


図-10  $\sigma_{z\theta}/\sigma_z - \varepsilon_{z\theta}$  拡大図 (豊浦砂)

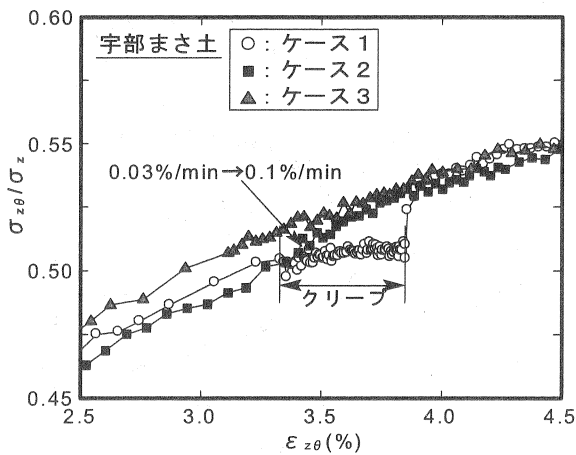


図-11  $\sigma_{z\theta}/\sigma_z - \varepsilon_{z\theta}$  拡大図 (宇部まさ土)

断開始約 90 分後、宇部まさ土ではせん断開始約 120 分後からいずれのケースも同じひずみ速度 0.1%/min でせん断を行っているが、せん断時間とせん断ひずみの関係が、3 ケースともほぼ同一の直線関係を示していることから所定の制御が行えていることがわかる。

図-9 に両試料のせん断ひずみとせん断面上の応力比、体積ひずみの関係を示す。応力比は、宇部まさ土に比べて豊浦砂の方がせん断初期から高い値を示していることがわかる。この図からは、両試料とも、ケースによる応力比の明確な違いは見られなかった。体積ひずみについては、豊浦砂はせん断初期に若干ではあるが収縮し、その後直ちに膨張傾向を示す。宇部まさ土はせん断初期から中盤、終盤にかけて全体的に収縮傾向を示す。両試料とも、クリープを行ったケース1やひずみ速度をせん断途中で変えたケース2よりも圧密終了後の応力で保持したケース3の方が、体積ひずみの発生量が小さいことがわかる。

両試料のケース1のクリープを行った部分の応力比を拡大した図を図-10、図-11 に示す。図-10 は豊浦砂の応力比を拡大したもの、図-11 は宇部まさ土の応力比を拡大したものである。両試料ともケース1とケース2、ケース3との応力比の差は、クリープ前とクリープ後のいずれについても明確な差は見られなかった。クリープ終了直後の応力比は、両試料とも急増を示している。特に宇部まさ土につ

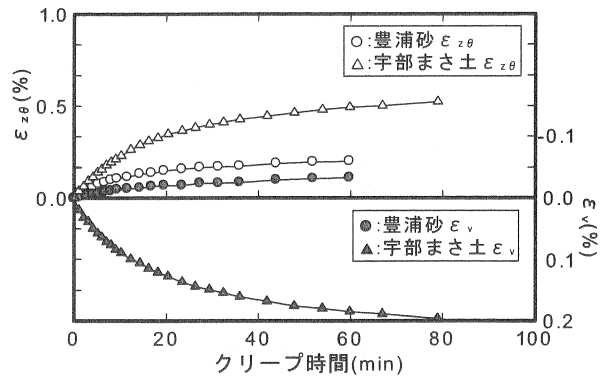


図-12 ケース1 クリープ中のせん断ひずみ、体積ひずみ

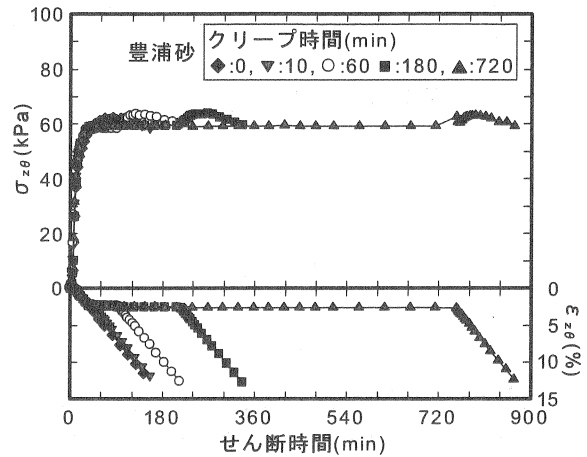


図-13 時刻歴 (豊浦砂)

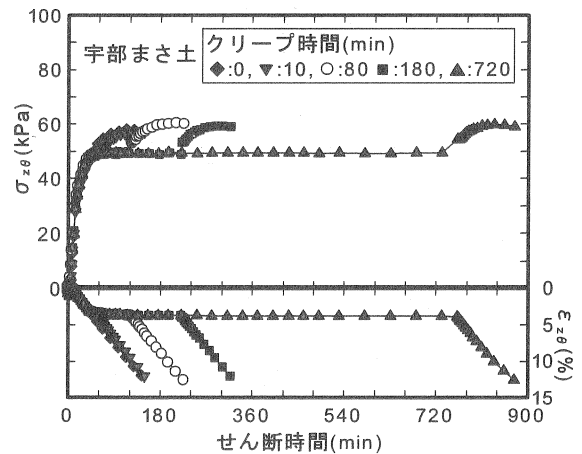


図-14 時刻歴 (宇部まさ土)

いては、急増後、その他のケースの関係とほぼ同一の関係となっていることがわかる。図-12 に両試料のクリープ中のせん断ひずみ、体積ひずみを示している。豊浦砂のせん断ひずみは 0.2%程度であるのに対し、宇部まさ土は約 0.5%発生している。また、豊浦砂の体積ひずみは約 0.05%膨張しているのに対し、宇部まさ土の体積ひずみは約 0.2%収縮している。つまり、豊浦砂よりも宇部まさ土の方がクリープ中のせん断ひずみ、体積ひずみともに大きく発生していることがわかる。先ほど述べた図-10、図-11 の応力比の結果も含め、豊浦砂に比べ、宇部まさ土の方がクリープによる影響が顕著であるといえる。

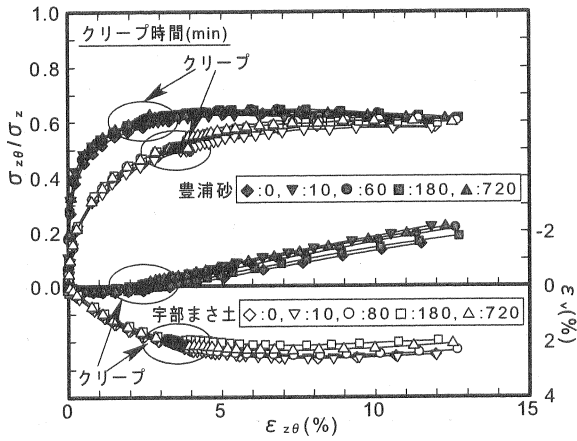


図-15  $\sigma_{z\theta}/\sigma_z, \varepsilon_v - \varepsilon_{z\theta}$  関係

### 3.2 クリープ時間を変化させた実験 (シリーズ B)

せん断途中で異なる時間のクリープを与えるものの実験結果を示す。

図-13 に豊浦砂の時刻歴 (せん断時間とせん断応力, せん断ひずみの関係) を示し, 図-14 に宇部まさ土の時刻歴を示す。両試料のいずれのクリープ時間の実験についても所定の制御が行えていることがわかる。クリープ時間を変化させた実験のひずみ速度はすべて 0.1%/min で行っており, せん断時間とせん断ひずみの関係を見ると, いずれの実験もせん断時間に対して, せん断ひずみの増分が同程度であることから, いずれのクリープ時間の実験も所定のひずみ速度でせん断を行えているといえる。なお, 図-13, 図-14 に示している豊浦砂のクリープ時間 60 分の結果と宇部まさ土のクリープ時間 80 分の結果は, 先に述べたシリーズ A のケース 1 の実験結果と同一である。

図-15 には, 両試料のせん断ひずみとせん断面上の応力比, 体積ひずみの関係を示す。応力比を見ると, 豊浦砂はクリープ終了後も大きな変化は見られないが, 宇部まさ土については, クリープ時間が長い方がクリープ終了後のせん断過程において応力比が高くなっていることがわかる。これも, 同様に豊浦砂に比べて宇部まさ土の方が, 圧縮性が高く, クリープの影響を受けやすいことによるものと考えられる。また, 体積ひずみを見ると, 宇部まさ土については, クリープ時間が長い方がせん断ひずみ  $\varepsilon_{z\theta} = 12\%$  程度となる試験終了時の体積ひずみは小さいことがわかるが, 豊浦砂については, 必ずしもそうではなく, クリープ時間による法則性が見られなかった。これは, 豊浦砂はクリープ時間による影響よりも, 供試体作製時における密度などの影響の方を顕著に受けているためだと考えられる。逆に, 宇部まさ土はクリープによる影響を顕著に受けたため, 明確なクリープによる差が見られたのだと考えられる。

図-16 に豊浦砂のクリープ中に発生したせん断ひずみと軸ひずみを示し, 図-17 に宇部まさ土のクリープ中に発生したせん断ひずみと軸ひずみを示す。両試料のせん断ひずみ, 軸ひずみともにクリープ時間が長い方が大きいひずみが発生していることがわかる。宇部まさ土の軸ひずみにつ

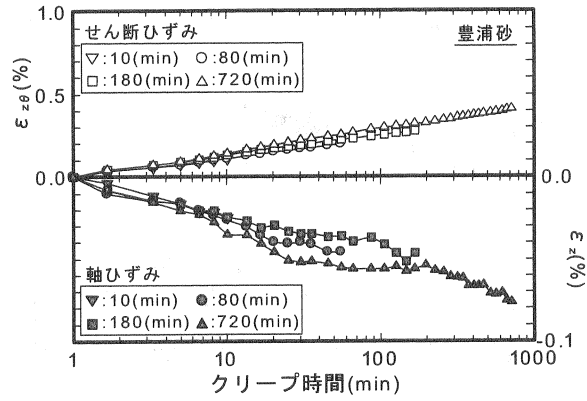


図-16 クリープ中のせん断ひずみと軸ひずみ (豊浦砂)

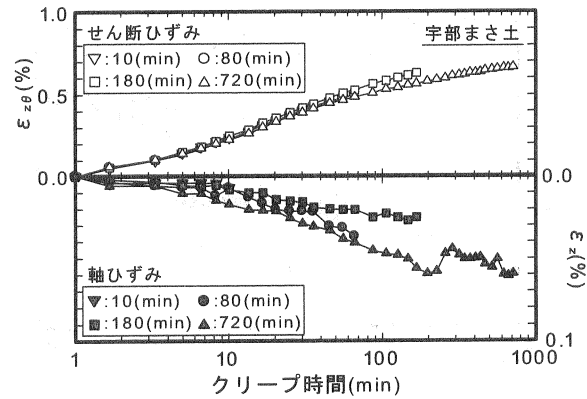


図-17 クリープ中のせん断ひずみと軸ひずみ (宇部まさ土)

いては, 正の値を示していることから供試体密度が増加したと考えられる。図-19 に示すクリープ終了直後の応力比増加は, この密度増加による強度増加によるものだと考えられる。一方, 豊浦砂の軸ひずみについては, 負の値を示していることから, クリープ中, 供試体は膨張していることになる。豊浦砂は宇部まさ土に比べて, せん断過程の早い段階で変相点を過ぎる。今回の実験でクリープを行う際にはすでに変相点を過ぎていたため, クリープ中に膨張するという結果になったと思われる。また, 豊浦砂と宇部まさ土を比較してみると, せん断ひずみについては, 豊浦砂よりも宇部まさ土の方が大きいひずみが発生しているが, 軸ひずみについては, いずれのクリープ時間においても宇部まさ土よりも豊浦砂の方が大きいひずみが発生しているという結果を得た。ただし, 宇部まさ土は収縮しているのに対し, 豊浦砂は膨張している。

次に, 両試料のクリープを行った部分の応力比を拡大した図を図-18, 図-19 に示す。図-18 は豊浦砂の応力比を拡大したもの, 図-19 は宇部まさ土の応力比を拡大したものである。なお, 図面には先に述べたシリーズ A のケース 1 の結果 (豊浦砂はクリープ時間 60 分, 宇部まさ土はクリープ時間 80 分) とシリーズ B のクリープ時間 720 分の実験結果を示している。両試料ともクリープ後の急激な応力比の増加量は, クリープ時間が長い 720 分の方が大きくなっていることがわかる。宇部まさ土については, この応力

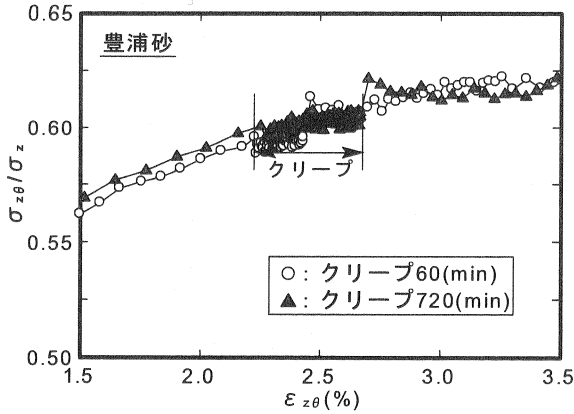


図-18  $\sigma_{z\theta}/\sigma_z - \epsilon_{z\theta}$  拡大図 (豊浦砂)

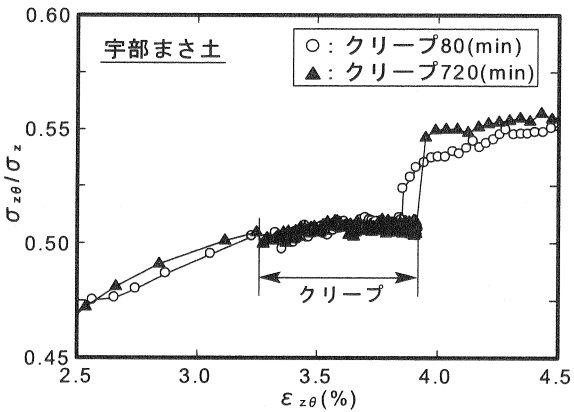


図-19  $\sigma_{z\theta}/\sigma_z - \epsilon_{z\theta}$  拡大図 (宇部まさ土)

比の急激な増加によってクリープ時間の長い結果の方が、より高い応力比を示す。一方、豊浦砂については、宇部まさ土と同様にクリープ終了直後に応力比は高くなっているものの、宇部まさ土ほど顕著ではなく、いったん増加した応力比はすぐに下がり、クリープ前とほぼ同様の挙動まで戻っていることがわかる。両試料とも、クリープ中に決められたクリープ時間だけ所定のせん断応力を受け続けたことによって、そのせん断応力に対して強くなった結果、クリープ終了直後に強度が増すことになった。クリープ時間が長い方が、それだけ長い時間せん断応力を受け続けたことになるため、強度の増加量も増える。

図-20 にせん断抵抗角  $\phi_p = [\sin^{-1}(\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 + \sigma_3)_{max}]$  とクリープ時間の関係を示す。図面中でクリープ時間1分の箇所にクリープ時間0分の実験結果が括弧書きで表示されているのは、図面の軸が対数軸であることによる。両試料とも、クリープ時間が長い方がせん断抵抗角が大きくなるのがわかる。特に、クリープ時間10分とクリープ時間60分(宇部まさ土は80分)の間に大きく差があることがわかる。また、豊浦砂と宇部まさ土を比べると、クリープ時間の違いによるせん断抵抗角の差は、豊浦砂よりも宇部まさ土の方が大きくなっていることがわかる。宇部まさ土の方が豊浦砂よりもクリープによる影響を受けやすいことがいえる。

図-21 にせん断抵抗角  $\phi_p$  と応力比  $\sigma_1/\sigma_3$  ピーク時のひずみ増分比の関係を示す。豊浦砂のひずみ増分比はばらつ

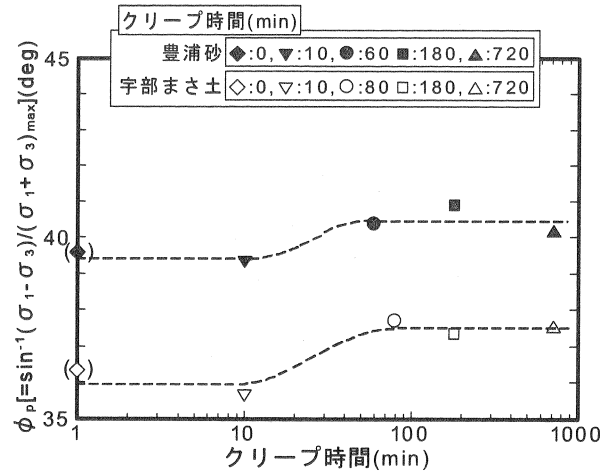


図-20  $\phi_p$  - クリープ時間関係

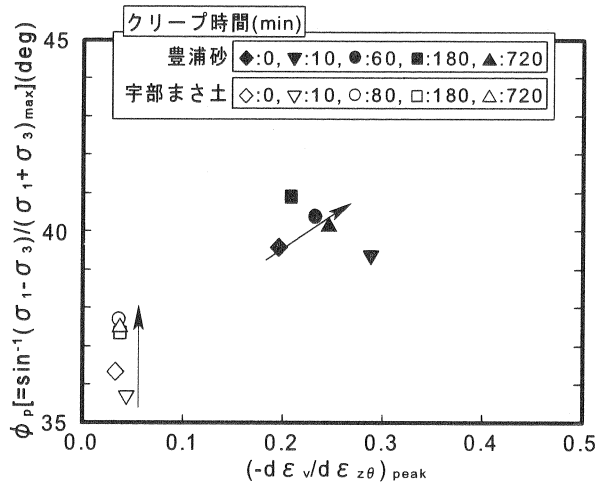


図-21  $\phi_p - (-d\epsilon_v/d\epsilon_{z\theta})_{peak}$  関係

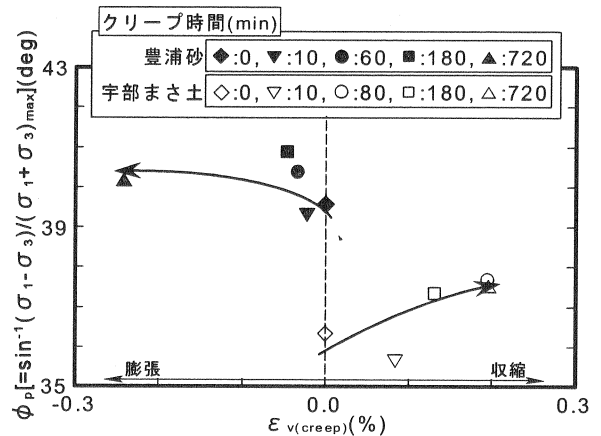


図-22  $\phi_p$  - クリープ中の体積ひずみ関係

きが見られるものの、クリープ時間の増加とともに増加する傾向がある。一方、宇部まさ土については、クリープ時間によらず、ひずみ増分比はほぼ一定の値を示した。

図-22 にせん断抵抗角  $\phi_p$  とクリープ中に発生した体積ひずみ(クリープ中の体積が最も収縮、膨張した値を示している)の関係を示す。両試料とも、クリープ時間によって多少のばらつきが見られる。豊浦砂は、クリープ時間が

長い方がクリープ中の体積が膨張し、せん断抵抗角が大きくなるのに対し、宇部まさ土は、クリープ時間が長い方がクリープ中の体積が収縮し、せん断抵抗角が大きくなる。豊浦砂に比べて、宇部まさ土の方がせん断抵抗角の増分量が多いことがわかる。

#### 4. まとめ

今回、砂質土の時間依存性について検討するために所定のせん断応力までに異なる時間履歴を与えるもの、せん断途中で異なる時間のクリープを与えるものの2シリーズの実験を行った。実験結果をまとめると以下に示すようになる。

- 1) 両試料とも、シリーズAすなわち、時間履歴の違いによる応力比の明確な差は見られなかったが、まさ土の方がクリープの影響を受けやすいなど試料ごとの違いは見られた。
- 2) クリープ時間の違いによって応力比や体積ひずみなどのせん断挙動は変化しており、圧縮性の高いまさ土は豊浦砂に比べて、より顕著にクリープ時間の影響を受けた。
- 3) 宇部まさ土について、応力比 $\sigma_1/\sigma_3$ ピーク時のひずみ増分比がクリープ時間によらず、ほぼ一定の値を示したことから、応力比ピーク時にはクリープ時間によらず体積ひずみの変化量がほぼ等しく変形が安定しているといえる。しかしながら、強度はクリープ時間が長い方が高いことがわかった。
- 4) 宇部まさ土はクリープ中に体積が収縮するほど強度が大きくなるが、豊浦砂はクリープ中に体積が膨張するほど強度が大きくなることがわかった。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省：公共事業の評価,  
<http://www.mlit.go.jp/tec/hyouka/public/index.html>.
- 2) Fumio Tatsuoka: EFFECTS OF VISCOUS PROPERTIES AND AGEING ON THE STRESS-STRAIN BEHAVIOR OF GEOMATERIALS, pp. 1-60, 2005.
- 3) 中村勇平, 橋本聡, 桑野二郎: 種々の応力状態における豊浦砂のクリープ, 第33回地盤工学研究発表会, 1998.
- 4) 桑野玲子, 西恭彦, 龍岡文夫: 三軸非排水せん断時の砂のクリープ特性について, 第36回地盤工学研究発表会, 2001.
- 5) 木村充広, 三浦清一, 中田隆文: 破砕性粒状体のクリープ特性の評価, 第40回地盤工学研究発表会, 2005.

(2006年6月30日 受付)