ひずみ速度が異なる状態での有効応力変化に対する粘性土の変形挙動

応用地質㈱　正会員　○大向　直樹
応用地質㈱　正会員　野坂　知正

1．はじめに

都市部の沖積低地では，地下水の揚水規制後の現在においても地盤沈下が継続している地域がある．このような広域地盤が生じている地域において，宅地造成のためにプレロードが施工される場合や，トンネル工事等により地下水位が一旦低下した場合には，プレロードの施工後あるいは地下水位回復後において残留沈下が大きな問題になるケースがある．このような場合の残留沈下量の評価すること，また，問題となる残留沈下が広域地盤沈下に起因した沈下であるのか，工事に起因した沈下であるのかを評価することが重要となる．

図-1に地盤と室内試験における圧密状態の概念を示す．**図-1(1)**は正規圧密地盤に対する概念である．有効土被り圧σ'_{v0}の下で堆積時の圧縮曲線上の点Aの状態から，時間の経過（ひずみ速度$\dot{\varepsilon}_v$の減少）に伴い，点Cの状態に至っていると考える．σ'_vが同じσ'_{v0}においても$\dot{\varepsilon}_v$が異なる点A，B，Cの状態があり，$\sigma'_{v0}\rightarrow\sigma'_{v2}$と$\sigma'_v$が$\sigma'_{v2}$の点D（あるいは点E）に応力が変化した場合の変形量はσ'_vが変化前の$\dot{\varepsilon}_v$によって異なる．**図-1(2)**は室内試験における圧密状態の概念で，圧密圧力p_0において，一般的な圧密試験では点A’，長期載荷後では点B’あるいはC’の状態となる．そこで，本研究では，沈下が継続している地盤を想定し，なるべく地盤の$\dot{\varepsilon}_v$に値近づけるために超長期間の載荷段階を設けた圧密試験を実施し，$\dot{\varepsilon}_v$が異なる状態での鉛直応力変化に伴う粘性土の変形挙動について検討した．

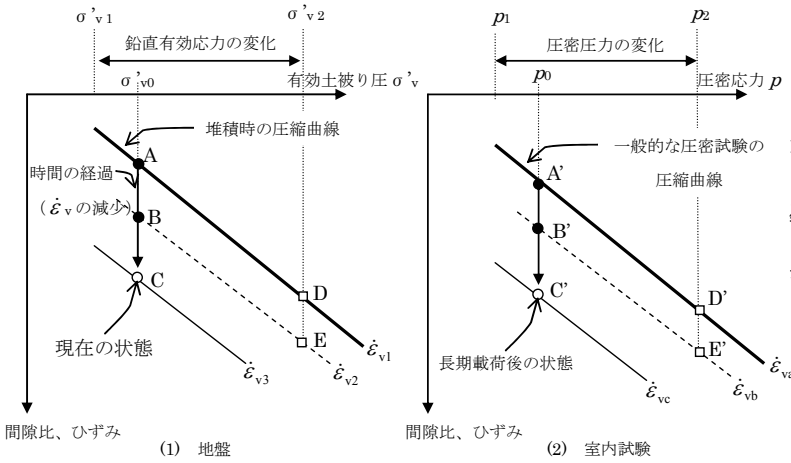
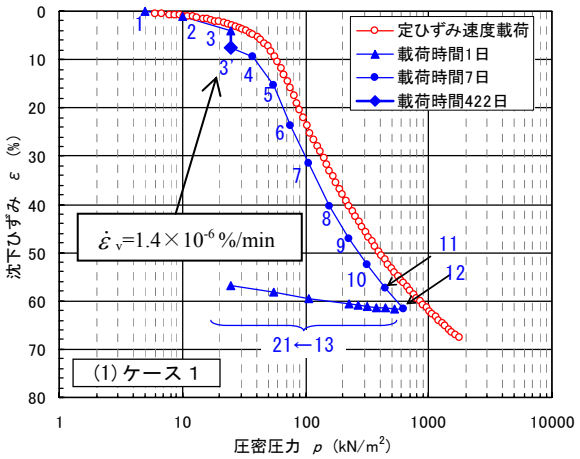
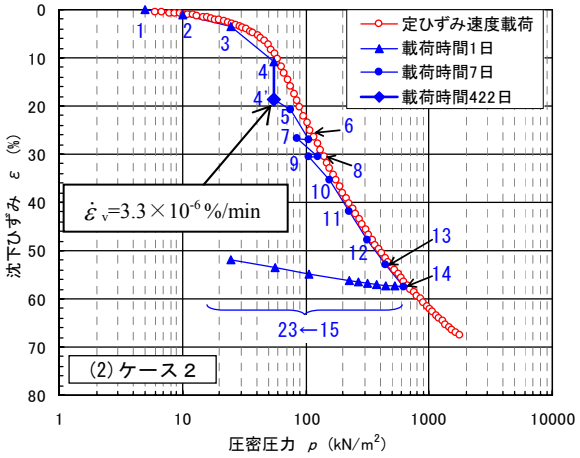


図-1　地盤と室内における圧密状態の概念

（$\dot{\varepsilon}_{v1}>\dot{\varepsilon}_{v2}>\dot{\varepsilon}_{v3}$，$\dot{\varepsilon}_{va}>\dot{\varepsilon}_{vb}>\dot{\varepsilon}_{vc}$）





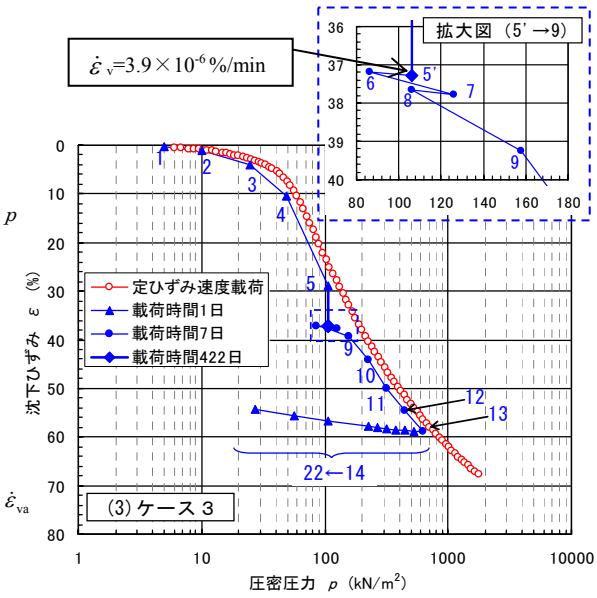


図-2　長期載荷を実施した圧密圧力
（沈下ひずみと圧密圧力の関係）

キーワード　広域地盤沈下，粘性土，ひずみ速度，圧密，変形
連絡先　〒331-8688　埼玉県さいたま市北区土呂町 2-61-5　応用地質㈱東京本社　ＴＥＬ048-652-3874

２．試験に用いた試料

試料は，横浜市の鶴見川沿いの沖積低地（σ'_{v0}=25kPa）から採取した完新統の有機質粘性土である．土粒子の密度ρ_s=1.716g/cm^3，強熱減量L_i=72.9%，初期含水比w_0=409～449 %，初期間隙比e_0=7.45～8.47である．定ひずみ速度載荷による圧密試験（0.01 %/min）による圧密降伏応力は p_c=56kPa，圧縮指数はC_c=5.5であり，圧縮性が大きい．試料を採取した地盤の$\dot{\varepsilon}_v$は，概ね3×10^{-8} %/min程度である．

表－1　各ケースの載荷時の変形量と体積圧縮係数

試験ケース	載荷段階 ($i \rightarrow i+1$)	p_i (kN/m^2)	p_{i+1} (kN/m^2)	ε_i (%)	ε_{i+1} (%)	m_v (m^2/kN)	i+1段階載荷前のひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_{pri}$(%/min)	$\dot{\varepsilon}_{pri}$を算出したi段階の載荷後の経過時間(min)
ケース1	(6→7)	76	106	23.6	31.5	2.6E-03	1.4E-04	8640→10080
ケース1	(7→8)	106	158	31.5	40.4	1.7E-03	1.4E-04	8640→10080
ケース2	(7→8)	86	126	26.8	30.4	9.1E-04	3.5E-06	8640→10080
ケース3	(6→7)	86	126	37.2	37.7	1.2E-04	3.0E-08	－

【特記事項】①i+1段階載荷前のひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_{pri}$とは，i段階終盤におけるひずみ速度を意味する．②ケース3のi段階終盤では，ひずみがほとんど発生しておらず（図-3参照），ひずみ速度算出不能であったため、試料を採取した地盤でのひずみ速度と同等な値（1×10^{-8} %/min）とした．

３．試験方法および試験条件

試験は基本的に圧密試験（JIS A 1217「土の段階載荷による圧密試験方法」）に準拠した方法で実施した．

試験は３供試体に対して実施し，異なる圧密圧力pにおいて433日間に及ぶ超長期間の載荷を行った．超長期間載荷した圧密圧力は，σ'_{v0}付近となるp=25kPa（ケース１），p_c付近となるp=55kPa（ケース２），p_cの2倍程度に相当するp=106kPa（ケース３）である．また，超長期間載荷後には，p=634kPaに達するまで段階的に7日間の載荷・除荷を実施した．さらに，その後はp=25kPaに達するまで段階的に1日間の除荷を実施した．

４．試験結果

図-2(1)～(3)に載荷･除荷を実施した圧密圧力を沈下ひずみと圧密圧力の関係として整理した．図中には別途実施した定ひずみ速度載荷による圧密試験の結果も示した．また，図中には超長期載荷の段階載荷後400日～433日における$\dot{\varepsilon}_v$を示しているが，地盤に比べ２オーダー大きく，$\dot{\varepsilon}_v$=1.4～3.9×10^{-6}%/minであった．

本論文では$p \fallingdotseq 2p_c$における結果に着目して報告する．

a) 同じ圧密圧力の変化に対する圧縮量の違い

概ね同じ圧密圧力の変化（$p_i \rightarrow p_{i+1}$）に対応するひずみとそのときの体積圧縮係数m_vについて**表-1**に整理した．**表-1**には，p_{i+1}載荷前におけるi段階終盤のひずみ速度$\dot{\varepsilon}_{pri}$も示し，**図-3**にm_vと$\dot{\varepsilon}_{pri}$の関係を整理した．概ね同じ圧密圧力の変化にもかかわらず，$\dot{\varepsilon}_{pri}$が小さいほどm_v（圧縮量）が小さいことがわかる．

表－2　各ケースの除荷開始前のひずみ速度

試験ケース	載荷段階 ($i \rightarrow i+1$)	i+1段階の除荷前の ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_{pri}$(%/min)	$\dot{\varepsilon}_{pri}$を算出したi段階の載荷後の経過時間(min)
ケース2	(6→7)	1.3E-03	8640→10080
ケース2	(8→9)	1.1E-03	8640→10080
ケース3	(5'→6)	1.7E-05	571034→624361
ケース3	(7→8)	3.3E-06	8640→10080

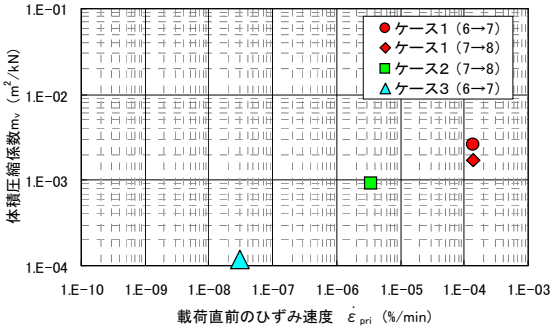


図-3　m_v と $\dot{\varepsilon}_{pri}$ の関係

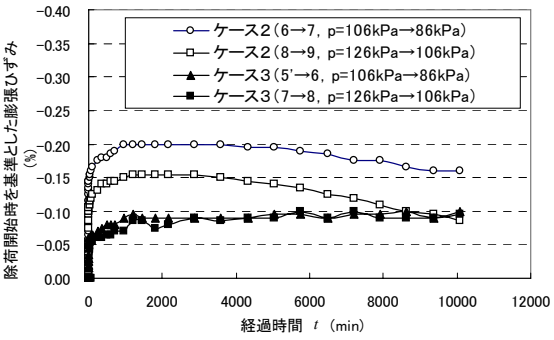


図-4　除荷時の膨張ひずみの経時変化

b) 同じ圧密圧力の変化に対する除荷時の挙動の違い

図-3に除荷時の膨張ひずみの経時変化を示す．また，除荷開始前の$\dot{\varepsilon}_{pri}$を**表-2**に整理した．除荷開始後はいずれのケースも膨張している．除荷開始後の経過時間が$t \fallingdotseq 1000$における膨張ひずみを比較すると，ケース２がケース３に比べ大きかった．この要因のひとつとして，ひずみレベルの違いが考えられる．また，$\dot{\varepsilon}_{pri} \fallingdotseq 10^{-6} \sim 10^{-7}$ %/minのケース３では，膨張したままの状態（載荷期間7日）であるのに対し，$\dot{\varepsilon}_{pri} \fallingdotseq 10^{-3}$%/minのケース２では，時間の経過に伴い収縮ひずみが生じており，$\dot{\varepsilon}_{pri}$の大きさにより除荷時の挙動が異なることがわかる．

５．まとめ

ひずみ速度が異なる状態での有効応力変化に伴う粘性土の変形挙動について検討した結果，応力が変化する前のひずみ速度の大きさに応じて，載荷時・除荷時の変形量および変形挙動は異なり，このような条件下での変形挙動を評価するためには，応力変化前の状態を含むひずみ速度の影響を考慮することが重要であることがわかった．