

高炉水砕スラグを用いた低置換率 SCP 工法に関する基礎的研究

山口大学大学院 学生会員 ○近藤政彦 山口貴

山口大学 正会員 松田博 白元珍

復建調査設計㈱ 正会員 来山尚義

1. まえがき 軟弱地盤上に構造物を建設する場合、サンドコンパクションパイル(SCP)工法が広く用いられている。同工法においては、強度・透水性に優れた砂を多量に必要とするが、その確保が困難な現状にある。そこで、SCP工法における自然砂の代替材料として、銑鉄の製造過程で発生する副産物である高炉水砕スラグの利用が考えられる。高炉水砕スラグは自然砂と同等の強度および透水性を有し、水と反応し硬化する潜在水硬性があり、SCP工法への有効利用が期待される。既に、砂杭置換率25%でのアルカリ高温水中で養生した、硬化の程度の異なる砂杭についての沈下特性および応力分担特性について調べているが、本研究では、未硬化高炉水砕スラグを砂杭として用い、低置換率 SCP 工法を模擬した K_0 圧密試験を行い、①各圧密段階における K_0 値の変化、②砂杭置換率の違いによる、砂杭-粘土複合地盤の沈下特性および過剰間隙水圧の消散過程、③FEMによる解析結果と実験値の相違について調べた。

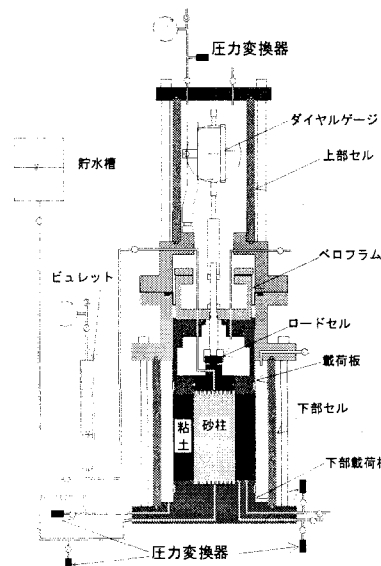


図-1 試験装置の概要図

2. 試験装置の概要および試験方法 試験装置の概要を示したものが図-1である。供試体は、粘土($\phi=100\text{mm}$ 、 $h=100\text{mm}$)の中心部に砂杭($\phi=50\text{mm}$ 、 30mm 、 10mm 、 $h=100\text{mm}$)を有している。砂杭径 $\phi=50\text{mm}$ の場合、地盤の改良率は25%に相当する。試料の物理特性を示したものが表-1 お

表-1 粘土の物理特性

$\rho_s(\text{g/cm}^3)$	2.757
$w_L(\%)$	93.1
I_p	53.1
C_c	0.631

表-2 砂杭（高炉水砕スラグ）の物理特性

$\rho_s(\text{g/cm}^3)$	2.702
$e_{\max}$	1.413
$e_{\min}$	0.904

および表-2である。試験中、背圧は100kPaとし、圧密圧力30kPa、50kPa、100kPaおよび200kPaの4段階で K_0 圧密試験を行った。供試体の間隙水圧は砂杭中央部、粘土部の砂杭に近い位置（粘土の外周から15mm）および外周面に近い位置（粘土の外周から5mm）の3ヶ所で測定した。

3. 試験結果

(1) 置換率25%における試験結果 図-2は各圧密圧力30kPa、50kPa、100kPaにおける軸ひずみと体積ひずみの関係を示したものである。 $\sigma_p=30\text{kPa}$ (σ_p : 圧密応力)では、若干体積ひずみが大きいものの、その差は小さく側方向ひずみは0.05%以内であり、 $\sigma_p=50\text{kPa}$ 、 $\sigma_p=100\text{kPa}$ においても、軸ひずみと体積ひずみが一致しており、実験中 K_0 状態が保たれていることが分かる。図-3は各圧密圧力30kPa、50kPa、100kPaにおける軸ひずみの経時変化を示したものである。図-4は各圧密圧力30kPa、50kPa、100kPaにおける粘土部と砂杭の応力比を示したものである。 $\sigma_p=30\text{kPa}$ では砂杭の応力分担比が1以下となっている。これは、供試体作成時において、若干砂杭上端が緩くなっている。そのため、圧密初期において粘土部分に対する有効応力が砂杭に比べて相対的に高く、砂杭の有効応力が低くなっているためである。 $\sigma_p=50\text{kPa}$ 、 $\sigma_p=100\text{kPa}$ で

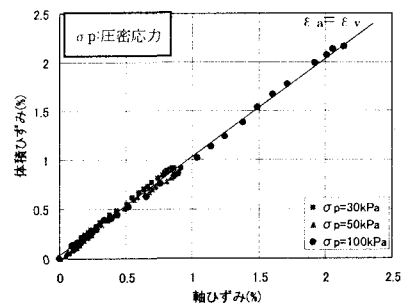


図-2 軸ひずみと体積ひずみの関係

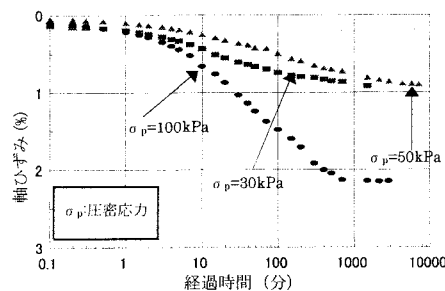


図-3 軸ひずみの経時変化

は時間の経過とともに徐々に応力分担比が増加しており、砂杭への応力集中が生じている。圧密圧力 50kPa においては応力分担比は 1.7 まで増加し、100kPa においては 2.5 まで増加している。図-5 は側方向有効応力の変化を示したものである。圧密初期から 20 分程度では、過剰間隙水圧の発生により、粘土部分においては有効応力が少なく、逆に過剰間隙水圧が消散している砂杭部分に有効応力が集中している。時間の経過とともに、過剰間隙水圧の消散により粘土部分は有効応力が増加し、砂杭部分は減少した後、収束している。図-6 は粘土部における軸方向有効応力と側方向有効応力の関係を示したものである。過剰間隙水圧の減少により軸方向、側方向有効応力ともに増加した。側方向有効応力は一定値になり、さらに、砂杭への応力集中により、軸方向の有効応力が減少していることが分かる。 K_0 値はいずれも 0.4 から 0.6 の間に収束している。図-7 は砂杭部における軸方向有効応力と側方向有効応力の関係を示したものである。圧密圧力 30kPa においては初期状態において、応力分担比は 1 以下であり、そのとき、 K_0 値は 1 以上になっている。また、粘土部の過剰間隙水圧減少に伴い、側方向有効応力は減少し粘土部と同程度の値に収束し、また、砂杭への応力集中に伴い、軸方向有効応力が増加することで K_0 値が減少している。

(2) 異なる置換率間の試験結果および比較 図-8 は粘土内部（供試体中心から 44mm）の過剰間隙水圧の経時変化を示したものである。砂杭置換率が大きいほど、過剰間隙水圧の消散は、早くなっており、また置換率 1% においては、間隙水圧は 100kPa 以上となる傾向が見られる。

(3) FEM による沈下計算 砂杭置換率 25% について有限要素法による地盤変形解析用プログラム（SAGE CRISP；修正 Cam-Clay モデル）を用いた解析を行い、実験結果との比較を行った。有限要素メッシュを図-9 に示す。図-10 は軸ひずみの経時変化を示したものであり、解析値は実験値より早く収束する傾向を示している。

4. 結論 高炉水砕スラグを低置換率 SCP 工法における自然砂の代替材料として適用するため K_0 圧密実験を行った結果、以下のことが明らかになった。

1) 圧密初期から過剰間隙水圧消散までは軸方向・側方向の有効応力はともに上昇する。その後、砂杭への応力集中により粘土部の K_0 値は増加し、砂杭部の K_0 値は減少する。

2) 各圧密段階においての側方向有効応力は粘土部・砂杭部ともに一定値に収束する。

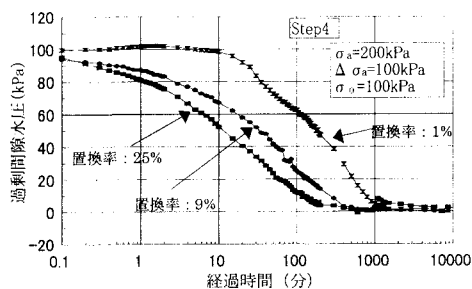


図-8 過剰間隙水圧の経時変化（粘土内部）

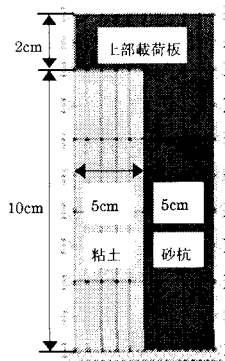


図-9 有限要素メッシュ

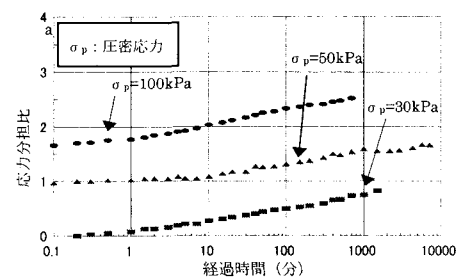


図-4 応力分担比の経時変化

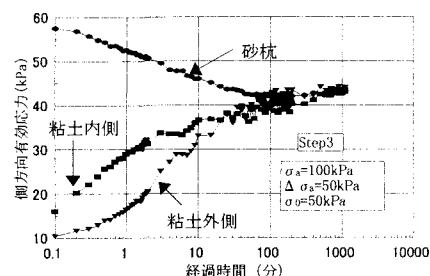


図-5 側方向有効応力の経時変化

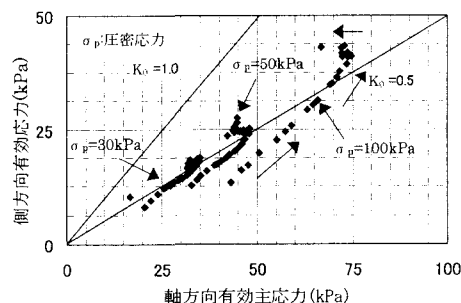


図-6 軸方向有効応力と側方向有効応力の関係（粘土部）

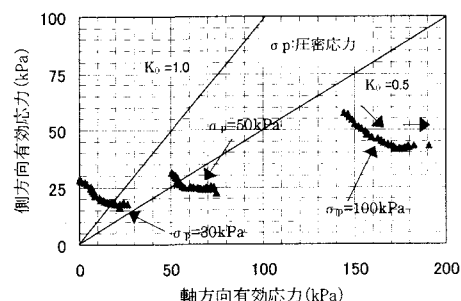


図-7 軸方向有効応力と側方向有効応力の関係（砂杭）

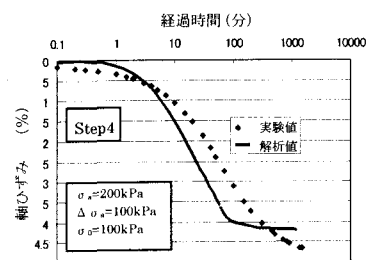


図-10 軸ひずみの経時変化