砂防堰堤を対象とした土圧の鉛直分布に関する現地土圧試験

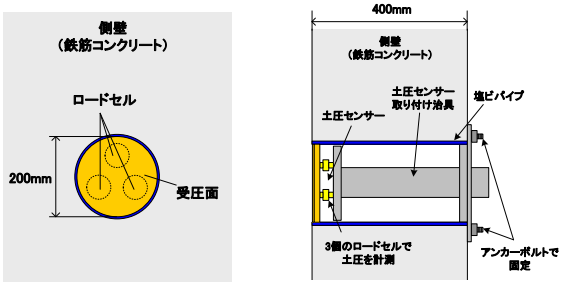
立山砂防事務所　大坂剛、金子秀樹、高橋至、柳川磨彦
日本工営株式会社　○日下拓也、村松広久、長山孝彦、小林浩二、スレンソッキアン、小原大輔、新村麻衣、伊藤隆郭
政策研究大学院大学　水山高久
京都大学防災研究所　藤田正治

1. はじめに

既設砂防堰堤では、長寿命化を目的とした高機能化のための改良が進められているが、補強対策設計を行う上で、重要なパラメータとなる堰堤に作用する外力（水圧・土圧）の設定が課題となっている。筆者ら[1),2)]はこれまでに、適切な堆砂土圧に対する知見を得るため、新たに土圧センサーを開発し、小型模型と大型模型を用いて、土圧試験を実施してきた。小型模型では、主に開発した土圧センサーの土砂への適用性を確認することを目的とし、大型模型では、実物大規模の高さに作用する土圧を確認することを目的として、土圧試験を実施した。その結果、土圧センサーの土砂への適用性が十分あることを確認し、また、大型模型を用いた土圧試験の静止土圧係数は小型模型を用いた土圧試験結果や設計基準よりも小さな値となり、深度によって静止土圧係数が変化する結果が得られた。本検討では、粒径幅の広い現地土砂を用いて、現地河床に堆積する土砂の密度を反映させ、湿潤状態および飽和状態の壁体へ作用する土圧・水圧を大型模型にて計測し、土圧、水圧および土圧係数の鉛直分布について検討を行った。

2. 試験概要

開発した土圧センサーの模式図および大型模型への設置イメージを図 1 に示す。土圧センサーは、曲げ荷重による計測誤差を軽減させる目的で小型ロードセルを図 1(a)に示す 3 箇所に設置し、試験槽の側壁に直接埋込み、アンカーボルトで固定する構造（図 1(b)）とした。



(a) 正面　　(b) 断面

図 1　土圧センサー

土圧試験は、図 2 に示す大型模型を用いて、現地土砂試料の含水状態を変えて表 1 に示す 2 ケースを実施した。

表 1　試験ケース

ケース	材料	試料状態
1	現地土砂	湿潤
2		飽和

大型模型（鉄筋コンクリート製）は、内寸が高さ 430cm×幅 280cm×奥行き 400cm で、奥行きは主働すべり面が十分入る寸法とした。土圧センサーは、試験槽底部から 50cm、150cm、250cm、350cm の 4 箇所に設置した。また、飽和試験の際の飽和状況を確認するために、模型底部には、圧力式水位計を設置し、土圧センサー間（試験層底部から 0cm、100cm、200cm、300cm）には、水位観測孔を設け、水位の観測を行った。

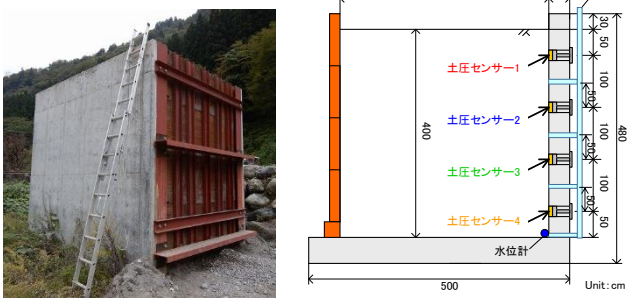


図 2　大型模型

試験に用いた土砂は、常願寺川より採取した粒径幅の広い現地土砂である。現地土砂の粒径加積曲線を図 3 に示す。

試験に用いる密度は、常願寺川河床で実施した現場密度試験（水置換法）より設定し、乾燥密度ρ_d=2.05g/cm^3 とした。図 4 に設定した乾燥密度と、乾燥状態および飽和状態で実施した現地土砂の最小密度・最大密度試験結果を示す。試験密度は、飽和状態で相対密度 Dr=96.6%、乾燥状態で Dr=103.5%となり、密に詰まった状態にある。現地土砂の土質特性を表 2 に示す。現地土砂のせん断抵抗角および壁面摩擦に関する係数（壁面摩擦角 ϕ_w、壁面摩擦による粘着力 c_w）は、大型一面せん断試験により求めた。

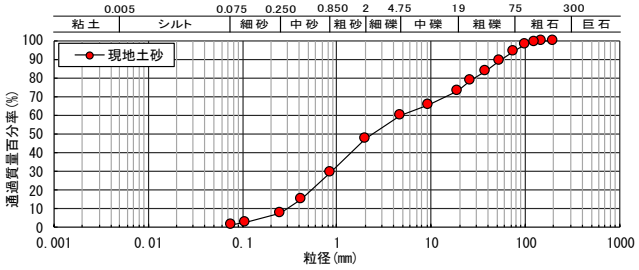


図 3　現地土砂の粒径加積曲線

表 2　現地土砂の土質特性

湿潤密度 ρ_t(g/cm^3)	2.20
乾燥密度 ρ_d(g/cm^3)	2.05
飽和密度 ρ_{sat}(g/cm^3)	2.29
水中密度 ρ(g/cm^3)	1.20
見掛け密度 Gg(g/cm^3)	2.70
最小乾燥密度 ρ_{dmin}(g/cm^3)	1.72
最大乾燥密度 ρ_{dmax}(g/cm^3)	2.04
含水比 w(%)	7.4
せん断抵抗角 ϕ(°)	41.8
壁面摩擦角 ϕ_w(°)	36.2
壁面摩擦による粘着力c_w(kgf/cm^2)	0.01

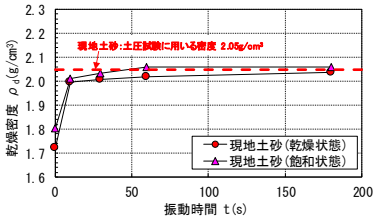


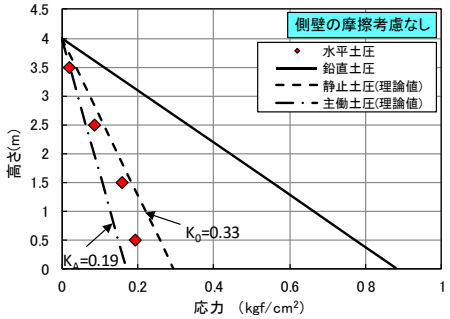
図 4　密度条件

試験手順は、1 層の仕上がり高さを約 100cm として、試験模型に重量を測定した現地土砂を、所定の乾燥密度ρ_dになるように締固め、最終高さ 400cm まで投入した。計測は、1 秒に 1 回サンプリングし、その平均値を 60 秒に 1 回出力した。なお、本試験は、試験中の土砂の水平変位を考えていないため、静止土圧の計測を想定したものである。

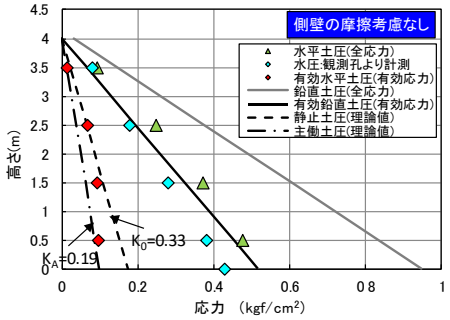
3. 試験結果

図 5 は、湿潤状態および乾燥状態の土圧センサーで計測した水平土圧と、投入した土砂材料の重量より算出した鉛直土圧の深度分布を示したものである。飽和状態の試験では、計測した水平土圧（全応力）から水位観測孔より計測した水圧を差し引いて、有効応力状態の水平土圧を算出している。また、図中には、ヤーキーの式より求めた静止土圧係数 K_0 と、クーロン土圧理論より求めた主働土圧係数 K_A を用いて算出した水平土圧（理論値）も示している。

試験値は、湿潤状態、飽和状態ともに理論値の静止土圧と主働土圧の間に位置し、理論値が直線分布を示すのに対し、試験値は深度が深くなるに従い土圧増分が減少し上に凸な非線形の形状を示す。



(a) 湿潤状態



(b) 飽和状態

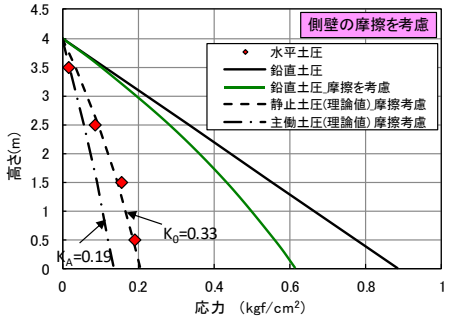
図 5　土圧・水圧の深度分布（側壁の摩擦考慮なし）

本試験結果が、理論値の静止土圧と主働土圧の間に位置し、深度が深くなるに従い土圧増分が減少する理由として、試験模型側壁の摩擦の影響が考えられる。砂防堰堤設計に用いる土圧設定に必要となる土圧係数 K を試験値から算出する場合、水平土圧を鉛直土圧で割ることで得られる。そのため、土圧係数算出の際には、鉛直土圧について側壁の摩擦を考慮する必要がある。そこで、上野 [3]によって検討された壁面摩擦を考慮した鉛直土圧の算定式（式(1)）を用いて、側壁の摩擦を考慮した鉛直土圧を算出し、土圧係数 K を求めることとした。

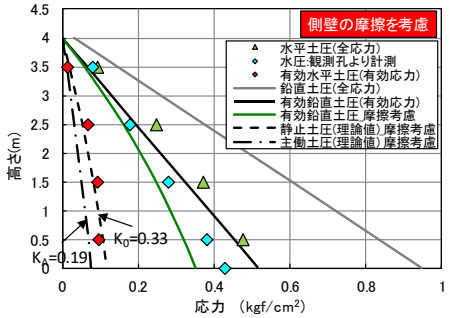
$$\sigma_z = \frac{b\gamma_d - c_w}{K_0 \tan \phi_w}\left\{1 - exp\left(\frac{-K_0 \tan \phi_w}{b} z\right)\right\} \qquad (1)$$

ここで、σ_z：鉛直土圧、b：模型幅の1/2、γ_d：乾燥単位体積重量、c_w：壁面摩擦による粘着力、ϕ_w：壁面摩擦角、K_0：静止土圧係数、z：深さ

図 6 は、湿潤状態および乾燥状態の摩擦の影響を考慮した鉛直土圧と、その鉛直土圧を用いて算出した理論値の静止土圧および主働土圧を示したものである。摩擦を考慮した鉛直土圧は、深度が深くなるに従い、土圧増分が減少し、上に凸な非線形の形状となり、理論値の静止土圧および主働土圧についても同様に、上に凸な非線形の形状となった。その結果、試験値は、概ね理論値の静止土圧と一致する結果となった。



(a) 湿潤状態



(b) 飽和状態

図 6　土圧・水圧の深度分布（側壁の摩擦考慮）

側壁の摩擦を考慮しない場合と考慮した場合の土圧係数 K の深度分布を図 7 に示す。なお、本試験は静止状態を想定しているため、試験値より求めた土圧係数は、静止土圧係数に相当する。側壁の摩擦を考慮しない場合、湿潤状態で K=0.17～0.29（平均：0.24）、飽和状態で K=0.21～0.35（平均：0.27）となり、理論値の主働土圧係数（K_A=0.19）と静止土圧係数（K_0=0.33）の間に位置する結果となった。一方、側壁の摩擦を考慮した場合、湿潤状態で K=0.18～0.36（平均：0.30）、飽和状態で K=0.24～0.42（平均：0.33）となり、静止土圧係数に概ね一致する結果となり、理論値が妥当な結果であることを示唆する結果となった。

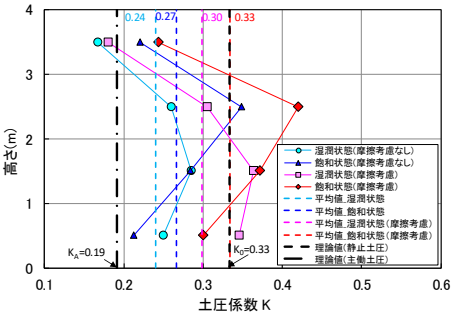


図 7　土圧係数の深度分布の比較

4. おわりに

実物スケールを対象とした大型模型での土圧試験を実施した例は無く、大型模型でも側壁の摩擦を考慮することで、静止土圧係数は概ね理論値通りになることが確認できた。土圧係数設定の際には、パラメータとなるせん断抵抗角 ϕ および壁面摩擦角 ϕ_w を適切に評価・設定することが重要である。

参考文献：1)福田ら(2016)：土圧係数に着目した室内・現地土圧試験,平成28年度砂防学会研究発表会概要集A, pp.48-49, 2)大坂ら(2017)：土圧・水圧の鉛直分布に関する現地土圧試験,平成29年度砂防学会研究発表会概要集A, pp.208-209, 3)K. Ueno(2001) : Section 4.3 Stress distribution in a container in "On the Bearing Capacity of Surface Foundation on Granular Media", pp.95-111, TITech, Doctoral thesis.