

土圧・水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、浅井誠二(現 北陸地方整備局)、石井崇(現 北海道開発局)、辻森伸幸(現 金沢河川国道)
日本工営株式会社 ○日下拓也、長山孝彦、小林浩二、斉藤淳、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等改良が進められているが、現行基準に準拠した補強設計を行うと一部では大規模な補強が必要となる場合もあり、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ことを示唆する結果が得られた。本検討では、過年度に用いた一様礫に加え、粒径幅の広い現地土砂を用いて、湿潤状態および飽和状態の壁体へ作用する土圧・水圧を小型模型と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ので、その結果を報告する。

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。

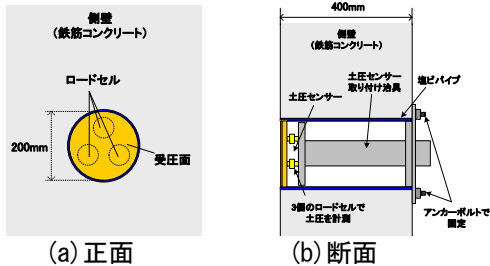


図1 土圧センサー

土圧試験は、図2に示す小型模型（室内土圧試験）と大型模型（現地土圧試験）を用いて、使用材料および試料の含水状態を変えて表1に示す8ケースを実施した。

表1 試験ケース

ケース	試験種別	材料	試料状態
1	室内土圧試験 (小型模型)	一様礫	湿潤
2			飽和
3		現地土砂	湿潤
4			飽和
5	現地土圧試験 (大型模型)	一様礫	湿潤
6			飽和
7		現地土砂	湿潤
8			飽和

小型模型（鋼材製）は、内寸が高さ70cm×幅50cm×奥行き40cmである。土圧センサーは、試験槽底部から12.8cmの位置（受圧面の中心）に設置した。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。

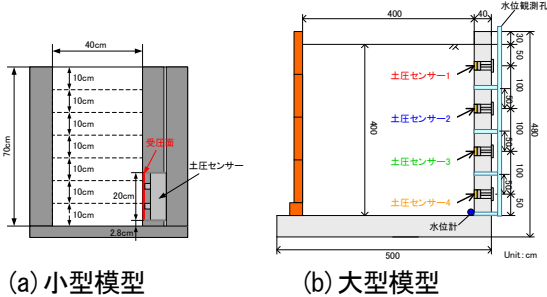


図2 試験模型模式図

試験に用いた土砂は、粒径が一様な礫（19~37.5mm程度）と常願寺川より採取した粒径幅の広い現地土砂の2種類を用いた。各材料の粒径加積曲線を図3に示す。

試験に用いる密度は、堰堤内に堆積した状態の土砂を想定して、水締めされた状態での乾燥密度 ρ_d とし、図5に示す通り、室内および現地にて密度試験を実施し、一様礫の乾燥密度 ρ_d を1.49g/cm³、現地土砂の乾燥密度 ρ_d を1.83g/cm³と設定した（表2、図4参照）。室内土圧試験は、試験槽に一様礫を所定量投入し、所定の乾燥密度 ρ_d になるよう締め固めた。各層の仕上り高さは10cmとし、計60cmの一様礫を投入した。土圧の計測は、10cm毎に行った。現地土圧試験は、1層の仕上がり高さを約100cmとして、試験槽に重量を測定した一様礫を、所定の乾燥密度 ρ_d になるように、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。

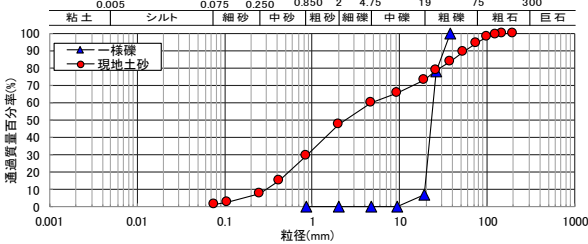


図3 使用土砂の材料特性

表2 各材料の土質特性

試料名	一様礫	現地土砂
湿潤密度 ρ_w (g/cm ³)	1.52	1.96
乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.49	1.83
飽和密度 ρ_{sat} (g/cm ³)	1.93	2.15
水中密度 ρ (g/cm ³)	0.93	1.15
見掛け密度 G_g (g/cm ³)	2.67	2.70
最小乾燥密度 ρ_{dmin} (g/cm ³)	1.37	1.72
最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.69	2.04
含水比 w (%)	2.2	7.4
安息角 ϕ (°)	37.4	37.2
壁面摩擦角 δ (°): 鋼材	20.6	21.4
壁面摩擦角 δ (°): コンクリート	30.0	26.5

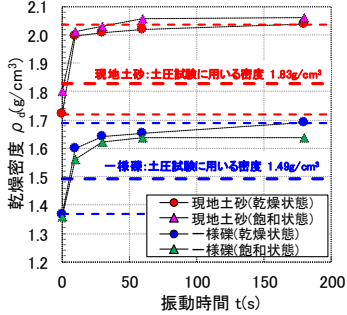


図4 乾燥密度条件

3. 試験結果

図5は、室内土圧試験（試験ケース1~4）の10cm毎に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。図6に各ケースの土圧係数 K_0 の深度分布を示す。

一様礫の土圧係数 K_0 は、湿潤状態で $K_0=0.36\sim0.66$ （平均：0.5）、飽和状態で $K_0=0.15\sim0.30$ （平均：0.21）となり、湿潤状態の方が飽和状態より土圧係数が大きくなる傾向が見られた。現地土砂の土圧係数 K_0 は、湿潤状態で $K_0=0.55\sim0.61$ （平均：0.58）、飽和状態で $K_0=0.35\sim0.45$ （平均：0.41）となり、一様礫と同様に湿潤状態の方が飽和状態より土圧係数が大きくなる傾向が見られた。一様礫と現地土砂の土圧係数を比較すると、飽和状態、湿潤状態ともに現地土砂の方が大きくなる結果となった。また、設計基準²⁾では、堆砂面がほぼ平坦な場合、 $K=0.3$ とされており、一様礫（飽和）を除き、設計基準より大きな結果となった。

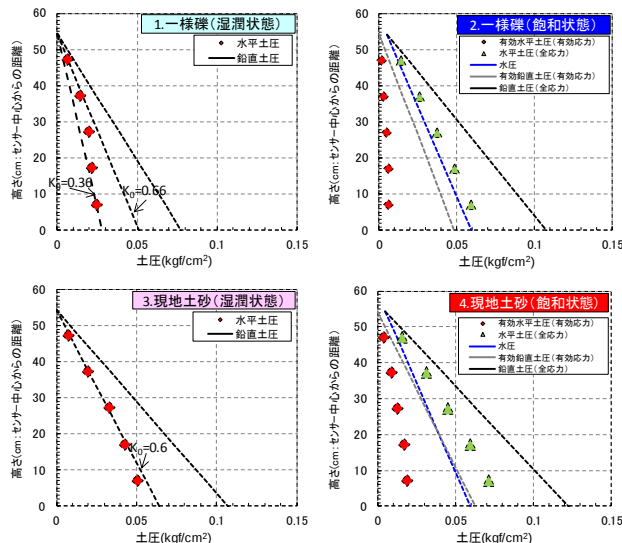


図5 土圧・水圧の深度分布（室内土圧試験）

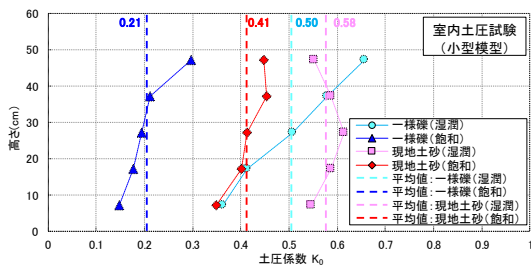


図6 土圧係数の深度分布（室内土圧試験）

図7は、現地土圧試験（試験ケース5～8）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。図8に各ケースの土圧係数 K_0 の深度分布を示す。

一様礫の土圧係数 K_0 は、湿潤状態で $K_0=0.23\sim0.29$ （平均：0.27）、飽和状態で $K_0=0.15\sim0.31$ （平均：0.23）となり、湿潤状態の方が飽和状態より土圧係数が大きくなる傾向が見られた。現地土砂の土圧係数 K_0 は、湿潤状態で $K_0=0.36\sim0.58$ （平均：0.43）、飽和状態で $K_0=0.29\sim0.47$ （平均：0.39）となり、一様礫と同様に湿潤状態の方が飽和状態より土圧係数が大きくなる傾向が見られた。一様礫と現地土砂の土圧係数を比較すると、室内土質試験と同様に、飽和状態、湿潤状態ともに現地土砂の方が大きくなる結果となった。

設計基準²⁾ ($K=0.3$) と比較すると、一様礫は、設計基準よりやや小さく、現地土砂は、設計基準より大きくなる結果となった。また、古典土圧式³⁾（ヤーキーの式： $K_0=1-\sin \phi'$ ）より求めた静止土圧係数 $K_0=0.4$ ($\phi'=37^\circ$ として) と比較すると一様礫は小さく、飽和状態の現地土砂の試験結果は概ね整合する結果となった。

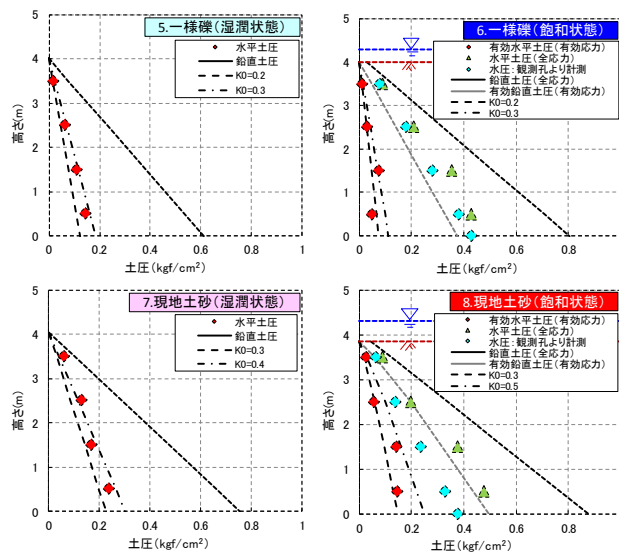


図7 土圧・水圧の深度分布（現地土圧試験）

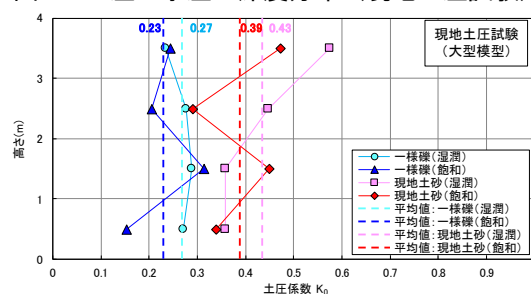


図8 土圧係数の深度分布（現地土圧試験）

現地土圧試験と室内土圧試験の土圧係数 K_0 の値を比較すると、一様礫（飽和）を除いて、室内土圧試験の方が顕著に大きな値を示した。これは、試験モデルのスケール効果によるものと考えられ、大型モデルを用いた土圧試験の有効性を示す結果となった。また、現地土圧試験、室内土圧試験ともに土圧係数 K_0 は、ばらつきはあるものの深度が深くなるにつれて小さくなる傾向が見られた。この原因のひとつとして、土被り圧に依存した内部摩擦角の変化が考えられる。

4. おわりに

本検討により、土砂材料および含水状態によって、土圧係数が変化することを示唆する結果が得られ、現地土圧試験の土圧係数は、設計基準より大きくなる結果となった。この原因については、今後、実験的および理論的に検証する必要がある。また、砂防堰堤に作用する堆砂圧に関する考え方を整理するためには、さらに堆砂環境の違いや密度の違い等についても検討を進める必要がある。

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) 建設省(1997)：河川砂防技術基準(案)同解説.
- 3) 落合英俊(1977)：砂の静止土圧係数の算定式とN値を用いた静止土圧の計算法, 土質工学会論文報告集, Vol.17, No.3, pp93-101.