# 第一海堡の建設材料の強度特性

正垣技術士事務所 正垣孝晴, 防衛大学校 黒田一郎 陸上自衛隊 林千賀, 国土交通省関東地方整備局 野口孝俊

#### 1. はじめに

我が国には、江戸期から建設された近代土木遺産が数多く残されている。これらの土木史跡の中には文化・制度を含む我が国の存亡や近代化に大きな役割を果たした施設がある<sup>1)</sup>が、地盤工学の視点で、実測や関連資料の収集を伴う技術史的評価の検討は十分ではない。著者らは明治期以降の土木史跡の建設材料の強度を測定して、それらの評価・修復方法の分析のため、建設年代や施設の用途、材質等を検討している<sup>2)</sup>。本稿は、このような研究の一環として、1890(明治23)年に竣工した第一海堡の建設材料として、煉瓦、コンクリート、石の強度を測定する。本調査は、東京湾口航路事務所が第一海堡所有者の上陸許可を受けて行った。

# 2. 対象施設と調査の方法

石材は真鶴産の新小松石(安山岩)である。この石は、江戸城の石垣にも使われているが、第一海堡の石は石積護岸周辺の転石を採取した。コンクリートと煉瓦も同様に第一海堡の被覆コンクリート周辺部の塊状のものを採取して、岩石用のドリルで刳り貫いて供試体とした。一軸圧縮試験は、ひずみゲージを供試体の軸方向に2、円周方向に2の計4個貼り付け、0.6N/mm²/secの応力制御でせん断した。

## 3. 一軸圧縮強度特性

**図-1** は応力  $\sigma$  と軸ひずみ  $\varepsilon$  の関係である。煉瓦 (7) , コン クリート(6), 石(8)の計21供試体を, それぞれ記号を変 えてプロットしてるが、図が煩雑になるのを避けるために、石 は  $\epsilon$  が 3,000  $\mu$  以下のデータを省いている。  $\sigma$   $\delta$   $\delta$   $\delta$   $\delta$   $\delta$ 人工材料の煉瓦が小さいが、応力の最大値 σmax の一軸圧縮強 さ $q_u$ は、材料によって大きく異なる。図-2は、 $q_u$ と気乾状態で 得た供試体の乾燥密度  $\rho_d$ の関係である。第一海堡のコンクリ ート(x)を除き、煉瓦、コンクリート、石の  $q_u$ は  $\rho_d$  とともに 大きくなっている。これらのプロットを近似する曲線 (qu=  $0.49e^{2.17\rho d}$ ) は、相関係数rが0.983と高く、両者の間の関係は 極めて高いことから、 $\rho_{\rm d}$ から  $q_{\rm u}$ の概算値を推定する式として 利用できる。煉瓦(+)の $\rho_d$ は1.64~1.84g/cm³であり,  $q_u$ も 27N/mm<sup>2</sup>程度と小さい。第一海堡のコンクリート(x)の $q_u$ (=25~41kN/mm²)は,この関係式の半分程度の値である。同じ コンクリートである第三海堡 ( $\bullet$ ) の  $q_u=124\sim177$ kN/mm<sup>2</sup>は, 照明灯等の本体構造物から穿孔した供試体の結果2)であるが、 同じ第三海堡でも倉庫( $q_u=22~38kN/mm^2$ )や防波堤( $q_u=37~$ 41 kN/mm<sup>2</sup>) の  $q_u^{3}$ は、第一海堡の値と同等である。第一海堡 のコンクリート (×) は、ρdも 2.08~2.44g/cm³と第三海堡 (•) の 2.66~2.67g/cm³より小さく, 目視観察によると, 空隙がある 部分もあり捨てコン的なコンクリートの打設も見受けられた。 施設や構造物によってコンクリートの配合や打設法が異なって いた可能性がある。

図-3 は,応力の最大値  $\sigma_{max}$  の 30%の応力点から得た割線変形係数  $E_{30}$  を  $\rho_{d}$  に対してプロットしている。土質材料では、 $\sigma_{max}$  の 50%で割線係数  $E_{50}$  を定義するが、 $E_{30}$  はコンクリート材料で多用される値を踏まえて設定している。 $E_{30}$  は  $q_{u}$  と同様に  $\rho_{d}$ 

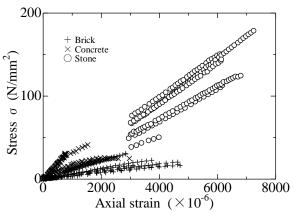
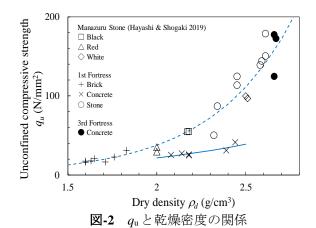
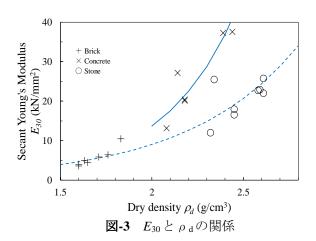


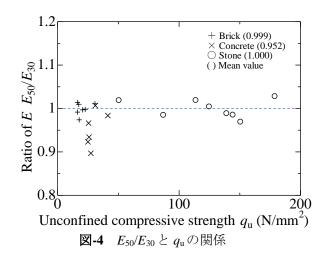
図-1 応力と軸ひずみの関係





キーワード 第一海堡,建設材料,一軸圧縮強度

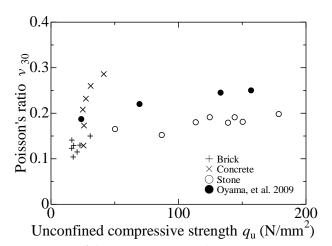
連絡先 〒239-0808 横須賀市大津町 技術士事務所 E-mail: shogaki.takaharu1111@outlook.com

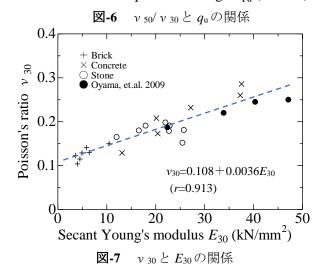


との間にも強い正の関係(コンクリートを除き r=0.960)があり,第一海堡の石(o)は,同じ $\rho_d$ 下でコンクリートの半分程度の値である。**図-4**は  $E_{50}/E_{30}$ と  $q_u$ の関係である。材料毎の  $E_{50}/E_{30}$ の平均値を記号凡例の後に,()で示している。コンクリートの  $E_{50}$ は  $E_{30}$ より 5%程度小さい。これは,粗骨材とセメントペーストの境界面に発生する微小ひび割れがひずみレベルの小さい段階から発生して, $\sigma_{max}$ の 30%を超える応力レベルになると,ひずみが急激に成長して Eが小さくなることを反映している。煉瓦と石材の  $E_{50}$ と  $E_{30}$ は同等であり, $\sigma_{max}$ の 50%程度の領域では  $\sigma$ と  $\varepsilon$  が同じ直線上にあることを反映している。しかし,これらの E は,本稿の供試材料の  $g_u$  の範囲では一定であると判断される。

図-5 は  $\sigma_{max}$  の 30%に対する割線ポアソン比  $v_{30}$  を  $q_u$  に対してプロットしている。この図には、小山ら  $^4$ が同じ載荷速度で行った結果もプロットしている。 $v_{30}$  は、 $q_u$  とともに大きくなり、 $q_u$  に対して正の関係にあるが、石( $\circ$ )の  $v_{30}$  は、同じ  $q_u$  下で小山ら  $^4$  によるコンクリートの 60% 程度の値である。

 $vs_0/v_{30}$  を  $q_u$ に対して**図-6**にプロットしている。煉瓦、コンクリート、石の  $vs_0/v_{30}$  の平均値は、凡例に示すようにそれぞれ 1.127,1.142,1.201 であるが、同じ供試材料の中では、 $q_u$  の値に依存することなく一定と判断される。 $v_{30}$  と  $E_{30}$  の関係を**図-7**に示す。図には小山ら  $^4$ によるコンクリートの結果も示しているが第一海堡のプロットと同じ傾向である。 $v_{30}$  は  $E_{30}$  と直線的な比例関係にあり、すべてのプロットを近似する回





帰式のrは 0.913 と高い。材質の異なるコンクリート,煉瓦,石の $v_{30}$ と  $q_u$ の関係が 1 つの回帰式で示せる事実は興味深い。Eが大きくなり材料としての剛性が大きくなると,より等方的に変形することもこの挙動の理由であり,図-3 に示す材料としての密実さを示す  $\rho_d$ に対する変化も同じ説明ができる。また, $v_{30}$ の値は,コンクリートの混合材料(セメント,細骨材,粗骨材)としてのせん断時のダイレタンシー挙動も影響している。

## 4. おわりに

コンクリートの場合,施設や施工法によって  $q_u$ や E が異なり,  $\sigma_{max}$ の 50%程度の応力レベルでは,30%程度のそれより 5%程度 E が小さくなる。 $\sigma_{max}$ の 30%程度の応力レベルで求めた  $v_{30}$  と  $E_{30}$  の間には,強い正の関係があり,この関係に煉瓦,石,コンクリートの材質の影響は受けない。

**参考文献** 1) 正垣孝晴:近代日本の土木遺産の地盤工学的分析と保存,地盤工学会誌, Vol.62, No.4, pp.1-5, 2014.

2) Hayashi, C. and Shogaki, T.: Strength properties of stones used in Tokyo Bay Fortresses, The Intnat. Conf. of ICOFORT, pp.1-13, 2018. 3) 国土交通省関東地方整備局東京湾口航路事務所,東京湾第三海堡建設史, 2005. 4) 小山善行・鈴木澄江・早川光敬・陣内浩:圧縮強度試験における荷重速度と強度レベルがコンクリートの強度・変形特性に及ぼす影響,コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.409-414, 2009.