

資源掘削跡の地下空洞の安全性について

名城大学 学生会員 辻野 洋      名城大学 正会員 清水 泰弘  
名城大学 正会員 岡田 富士夫   琉球大学 正会員 渡嘉敷 直彦

1. はじめに

2005 年 8 月 16 日早朝に福井市の足羽山中腹で大規模な陥没が発生した。直径、深さともに 30m に達し、多くの墓碑が消失した。同市では 15 日午後 1 時から一時間雨量が 22 mm とあわせ同日深夜にかけて 41.51 mm、2 日も 60.5 mm とまとまった降雨があった。陥没原因は調査中であるが、陥没現場写真の断面では大部分が埋め戻された地質のようであり、陥没箇所最深部に笏谷石の採掘跡の空洞が確認された。陥没地点の地形は墓地の建設で整地されているが、墓地建設以前は谷筋であり地下水を集めやすい状態であった。

笏谷石は越前青石として知られ足羽山の笏谷付近で産出される良質の火山礫凝灰岩で、笏谷凝灰岩層に含まれるものである。この石はやわらかい、きめが細かい、加工しやすい、火に強い、色が美しい等の長所を持っており、古くから各種の建設用材として利用されてきた。笏谷石は約 1500 年前より採掘され、初期にはノミ、クサビなどを用いた手掘りであったが最近では機械掘りされており、現在は数箇所で 100m 程度の深さで小規模であるが採掘されている。表一 1 に笏谷石の層序を示す<sup>1)</sup>。

陥没地点の採掘跡の空洞は地表から約 30m、空洞の高さ約 12m と推測され空洞天盤の厚さによっては今後も陥没の危険性は解消されない。この陥没箇所の危険性を確認するため、①笏谷石の諸物性を明らかにし、②現地踏査による地質調査、地形測量さらに、③地下空洞の測量を行い空洞の天井の高さと地上の高低差から危険箇所の抽出を行い、その危険箇所の数値解析を行い安全性を確認する。

今回は、笏谷石の諸物性について報告する、計画あるいは実施している試験は比重試験、X 線回折、一軸圧縮強度試験、引張強度試験、超音波試験、曲げ強度試験、せん断強度試験、A E 計測、路頭、供試体のシュミットハンマー試験等である。

2. 物性試験

一軸圧縮試験および引張試験は石の目の方向に対し直角方向にコアリングして直径 50 mm 長さ 100 mm の供試体を作成した。石の確認は福井市の石材業梶谷末信氏に判定を依頼した。一軸圧縮強度  $q_u$  は平均 31.7Mpa、引張強度  $\sigma_t$  は平均 4.2Mpa、一軸圧縮試験から得た弾性係数 E は 8.0Gpa でポアソン比  $\nu$  は 0.1 であった。表一 2 は各種の試験結果を示したものであり、抜けている値は現在試験中である。

表一1 笏谷石の層序<sup>1)</sup>

| 地層名称    | 地層番号 | 地層厚さ (m) | 地層説明    | 地層年代 (ka) | 地層位置    |
|---------|------|----------|---------|-----------|---------|
| 足羽山凝灰岩層 | 1    | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 2    | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 3    | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 4    | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 5    | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 6    | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 7    | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 8    | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 9    | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 10   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 11   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 12   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 13   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 14   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 15   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 16   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 17   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 18   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 19   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 20   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 21   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 22   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 23   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 24   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 25   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 26   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 27   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 28   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 29   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 30   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 31   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 32   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 33   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 34   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 35   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 36   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 37   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 38   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 39   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 40   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 41   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 42   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 43   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 44   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 45   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 46   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 47   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 48   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 49   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 50   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 51   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 52   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 53   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 54   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 55   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 56   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 57   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 58   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 59   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 60   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 61   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 62   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 63   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 64   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 65   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 66   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 67   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 68   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 69   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 70   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 71   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 72   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 73   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 74   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 75   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 76   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 77   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 78   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 79   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 80   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 81   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 82   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 83   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 84   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 85   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 86   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 87   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 88   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 89   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 90   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 91   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 92   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 93   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 94   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 95   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 96   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 97   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 98   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 99   | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |
| 足羽山凝灰岩層 | 100  | 1.4      | 足羽山凝灰岩層 | 1.4       | 足羽山凝灰岩層 |

表一2 笏谷石の諸物性

| 物性     | 単位                | 大谷石  | 笏谷石  |
|--------|-------------------|------|------|
| 単位体積重量 | g/cm <sup>3</sup> | 1.79 | 1.94 |
| 一軸圧縮強度 | Mpa               | 25   | 31.7 |
| 引張強度   | MPa               | 1    | 4.2  |
| 粘着力    | MPa               | 3.4  |      |
| 内部摩擦角  | °                 | 18   |      |
| 弾性係数   | Gpa               | 2.2  | 8    |
| ポアソン比  |                   | 0.2  | 0.1  |
| 曲げ応力度  | N/mm <sup>2</sup> |      | 43.6 |

大谷石のデータは文献 2)による

同表には比較のため大谷石の物性も示した。強度的にはいずれの値も大谷石と比べ高い値を示している。図-1に一軸圧縮試験結果を示す。

粘土鉱物判定のためにX線回折を行った。その結果、笏谷石の鉱物構成は一次鉱物の石英Q、長石Fと粘土鉱物のバーミキュライトV、ハロイサイトH、カオリナイトKであると回折された。粘土鉱物の配合割合を回折強度にて定量判定するとバーミキュライト 23.3%、ハロイサイト 26.64%、カオリナイト 50.31%と推定される。この結果、供試体に用いた笏谷石は深部で堆積した古い地層であることが明らかとなった。曲げ載荷試験は 150×150×500 mmの供試体を作成し石の目に対し直角方向から二点支持(間隔 450 mm)、二点載荷(間隔 150 mm)で曲げ試験を行った。その結果、曲げ応力度  $f_b$  は 43.57N/mm<sup>2</sup>と得られた。

曲げ載荷試験では同時に上下面の中央部にひずみゲージを接着しひずみ量を計測した。さらに側面にAEセンサーを設置してAE計測を行った。AE計測結果では曲げ破壊直前に複数のイベントが発生したのみでそれ以前のイベントは皆無であった。曲げ試験の載荷状態および寸法を図-2に示す。また、曲げ試験の曲げ応力-たわみ曲線を図-3に示す。この図では初期の荷重状態で変位が大きくなっているが、載荷点および支持点の部分で岩石表面が変形したためと考えられる。

3. おわりに

ここでは笏谷石の物性試験結果を主に報告したが、陥没現場では立ち入り禁止処置が取られており詳細な地形データ、地下空洞の形状などの測量が進んでいない。これらの作業が完了しデータが得られれば数値解析を進めたいと考えている。

4. 参考文献

- 1) 吉澤康暢：足羽三山の地質と笏谷石について、福井県教育研究所紀要、第 69 号、pp.111-118 1976.3
- 2) 伊東孝、アイダン・オメル、赤木知之：岩石の変形と電位発生挙動に関する研究、岩盤力学に関するシンポジウム論文集、第 33 回、土木学会、pp.223-227、2004.1

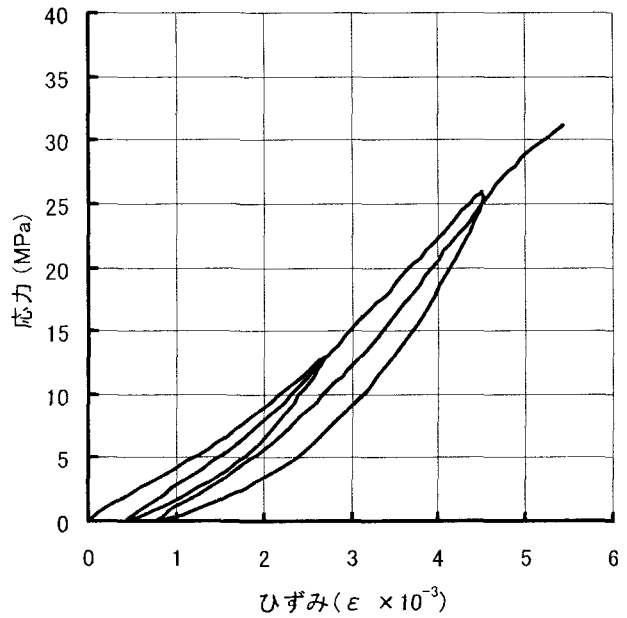


図-1 笏谷石供試体応力-ひずみ曲線

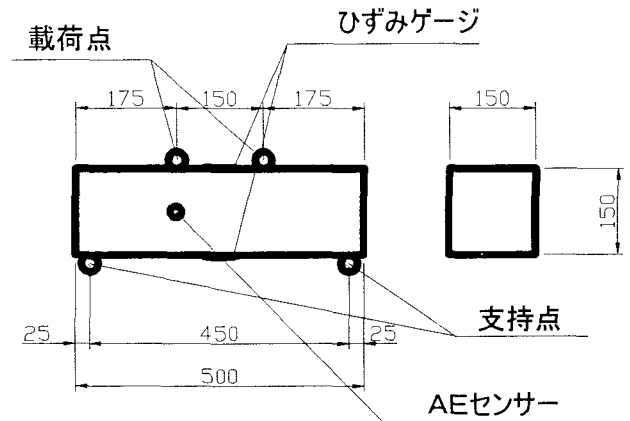


図-2 笏谷石供試体曲げ試験図

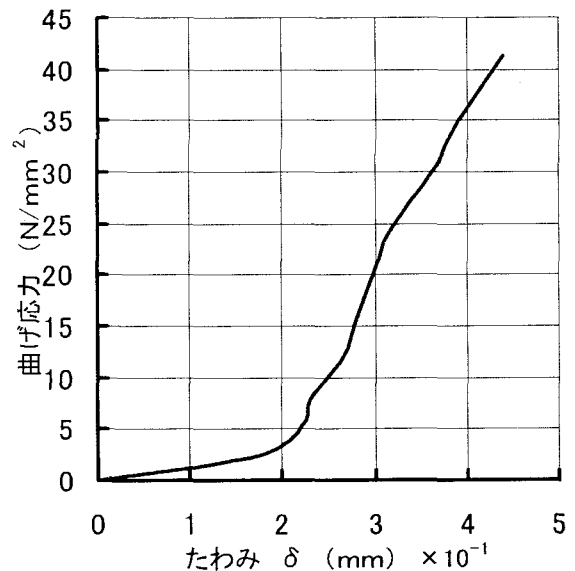


図-3 笏谷石供試体応力-たわみ曲線