

# 空洞が内在する石灰岩を杭基礎の支持地盤とした場合の調査事例

An Investigation of Limestone Ground with Caves Used for Piling Foundation

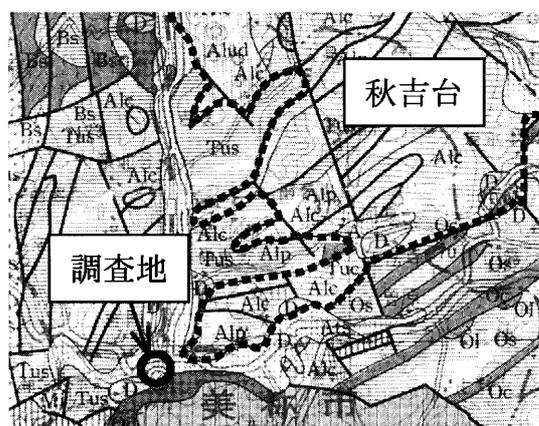
池田 智子 (いけだ ともこ)

株式会社建設コンサルタント 調査部

## 1. はじめに

山口県の「秋吉台」は、日本最大のカルスト台地で知られる代表的な石灰岩の分布地域である。国定公園の中を貫くカルストロードを通ると、広く緩やかな草原に、白い石灰岩の露頭が無数に点在する。石灰岩は、主成分である炭酸カルシウムが水に溶けやすい性質に起因し、「秋芳洞」で知られるような空洞（鍾乳洞）が岩盤内部に存在する。

図-1<sup>1)</sup>に調査地周辺の地質図を示す。当現場は秋吉台から南西に約10 kmの美祢市市街地であり、石灰岩分布域の南端にあたる。当地域では鍾乳洞のような大規模な空洞は確認されていないが、小規模な空洞が無数に存在することが想定される。このような空洞は地質学的な見地からは小規模なものであるが、土木的な見地からは大きな問題となる事が多い。当現場の橋梁では、石灰岩を支持層とする杭基礎が選定されたため、杭先端部の空洞の有無が重要な問題となった。しかしその特異な風化形態（溶食現象）より想定が困難であった。以下に石灰岩の特性を考慮しながら支持層の選定を行った結果、および実際の施工における掘削状況を併せてご紹介する。



時代	凡例	地質名	岩相
新生代	完新世	A	沖積層 礫・砂・粘土・火山灰
	更新世	D	洪積層 礫・砂・粘土・火山灰
中生代	白亜紀 後期		石英閃緑岩～斑レイ岩
	白亜紀 前期		石英閃緑岩～斑レイ岩
古生代	ペルム紀	Ts	常森層 頁岩・砂岩・礫岩
	石炭紀～シルル紀	Alp	秋吉石灰岩層群 石灰岩

図-1 調査地周辺の地質図

## 2. 調査地周辺の地質概要

### 2.1 調査地および地質

図-1に示されるように当箇所には、上位より第四紀完新世に形成された沖積層が分布する。その周囲には、第四紀更新世の洪積層、中生代白亜紀後期、広島花崗岩類の石英閃緑岩～斑レイ岩、古生代ペルム紀～石炭紀にかけて形成された秋吉石灰岩層群が分布する。ボーリング調査の結果、沖積層および石灰岩が確認された。

### 2.2 石灰岩および空洞の形成過程

空洞の分布状況を把握するにあたり、石灰岩の形成過程を振り返る事や、現在の露頭状況が大いに参考となった。以下に要点をまとめ、図-2<sup>2)</sup>の模式図を用いて解説する。

① 石灰岩の亀裂に沿って地表から地下水が浸透する。地下水と接した亀裂周辺部から徐々に溶食されて縦穴が生じる（写真-1<sup>2)</sup>）。石灰岩の露頭状況が剣山のような鋭利な角状（カレンフェルト状）を呈することから（写真-2<sup>4)</sup>）、石灰岩には主に鉛直方向の亀裂が発達しており、これに沿って溶食が進むため、そのような露頭状況になるものと想定される。

② 溶食が進み岩盤内部の空洞が互いに網目状につながっていき、地下水位が形成される。

③ 地下水位面に沿って水平方向に流出し横穴が形成される。地下水位面が下がるか台地が隆起するとそのときの地下水位面に沿って同じ現象が起き、穴が拡大する<sup>2)</sup>。

以上のことから大規模な鍾乳洞が形成されるには、岩盤内部の地下水とその変動が重要であり、そのためには秋吉台のように、周囲の沖積面から台地状に突出している必要がある。

調査箇所は、地層群の境界付近にあたるため浸食が進み河川が形成され、沖積層が堆積しており、地形的には秋吉台と逆の条件となる。また、地形的にドリーネやウ

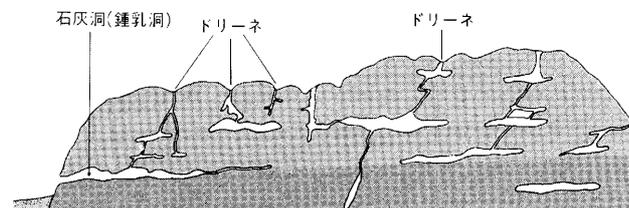


図-2 石灰岩の鍾乳洞状況模式図

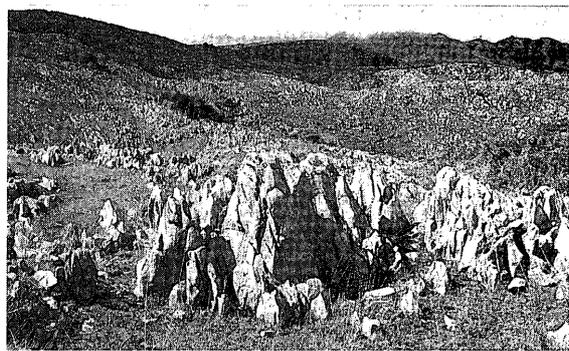


写真-1 秋吉台のカレンフェルト状の露頭。縦亀裂に沿った溶食により、角が無数に突き出したような露頭状況が形成されたものと考えられる。

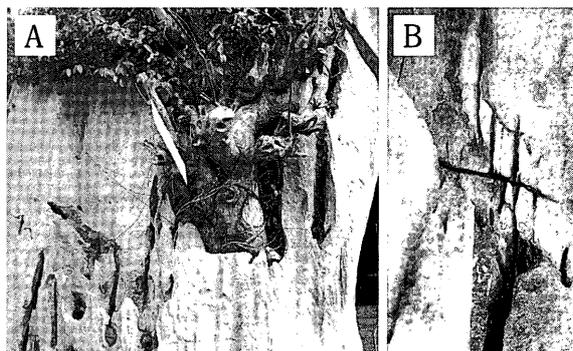


写真-2 石灰岩の露頭状況。写真Aは秋吉台に露頭していた石灰岩露頭であり、現在民族資料館玄関前にオブジェとしておいてある。空洞部の木は秋吉台にあった時からもともとはえていたものである。写真Bは石灰岩中の亀裂に沿って小規模な空隙が生じているもの。

バーレのような窪地跡も認められないため、当付近で過去に落盤が生じるような大規模な横穴は形成されていないものと考えられる。また、調査地の南側に隣接して石英斑岩の貫入があり、ボーリングコアや付近の露頭には珪化や再結晶化が認められる。よって、通常の石灰岩に比べ硬質となる事が想定される。調査地付近が秋吉台に比べ、溶食の段階が遅いのは、このようなことも理由の一つとして考えられる。

### 3. ボーリング調査結果

調査方法については、ロータリー式ハイドロリックフィードタイプの試錐機によるボーリング調査を行った。空洞調査で最も普及している手法は地中レーダー探査であるが、これは、地表から2~3m程度までしか計測できない。そこで、当初はボーリングと併せて比抵抗トモグラフィーなどの物理探査も検討したが、空洞の規模が小さく、杭基礎の調査に必要な精度が得られないか、検出不可能な場合も考えられた。また、同市の石灰岩地域で同様の探査を行った例があったが、やはり判断に難しい結果となったようである。

今回は、杭の根入れ部に空洞がないかどうか、正確な空洞の分布深度が必要であったため、ボーリングを追加することで、調査精度を高めることにした。

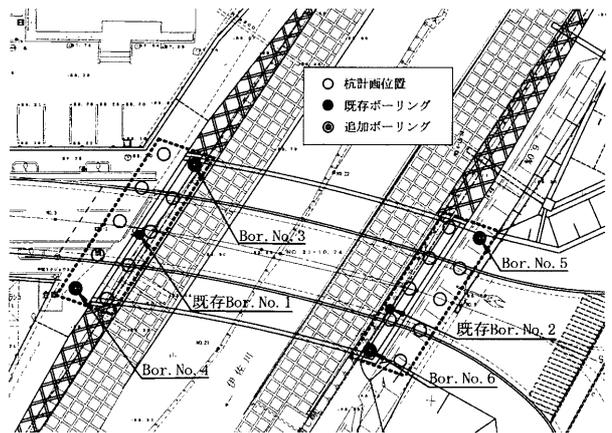


図-3 調査位置図

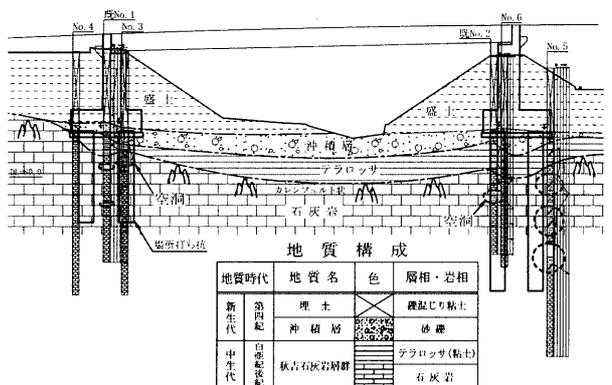


図-4 地質想定断面図

図-3に調査位置図を、図-4に地質想定断面図を示し、調査地の地盤構成について説明する。地質想定断面図は、道路センター部の河川横断面図であり、既存ボーリング2カ所および追加ボーリング4カ所の、合計6カ所分のデータをもとに作成した。調査地の地盤構成は、上位より盛土、沖積層、テラロッサ（石灰岩の風化残留粘土層）、石灰岩となる。盛土は主として礫混じり砂・粘土質砂から構成され、N値は4~18である。沖積層は砂礫から構成され、N値は18~21である。礫はφ5~50mm程度の硬質な円礫である。沖積層の下位にはテラロッサ（石灰岩の風化残留粘土）による粘土層が認められ、N値は1~5である。これは含水比が高く非常に軟質な粘土であり、所々に硬質な石灰岩角礫を含む。石灰岩は主に短棒~棒状コアにて採取される。岩質は新鮮硬質であるが所々に空洞や亀裂が認められる。空洞の鉛直方向のサイズは0.2~2.2m程度であり、空洞には、内部にテラロッサを充填する場合が多い。以上の結果から、橋梁の基礎形式については比較検討を行った結果、杭基礎が選定された。支持層としては空洞以深の石灰岩が選定された。

### 4. 空洞の状況および支持層の選定

空洞のサイズと頻度の関係を図-5に示す。空洞の規模は0.2~2.2mであり、分布頻度としては、0.1~0.5m程度の小規模なものが最も多い。分布深度と空洞のサイズに特に相関は認められない。ただし、空洞が水による

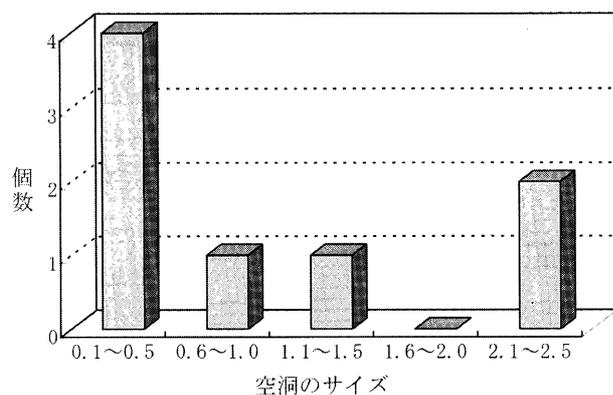


図-5 空洞のサイズと頻度の関係

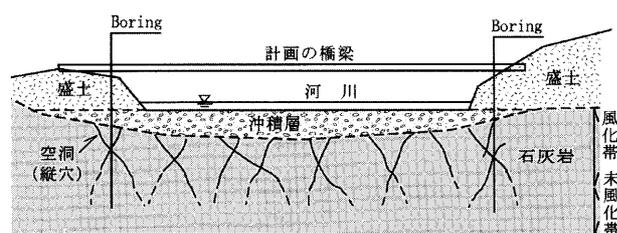


図-6 調査地の石灰岩の風化状況模式図

溶食で生じる事から考察すると、亀裂が密着する新鮮な岩盤部においては、開口部が少なくなるため、表流水が浸透しにくく空洞も生じにくいものと考えられる。よって、ある深さで深の石灰岩には空洞が存在しなくなると考えられる。つまり、石灰岩は亀裂が開き溶食が進む風化ゾーンと新鮮で溶食されていない未風化ゾーンに大きく分けられる(図-6)。このゾーン分けを把握する目的の概査であれば物理探査はかなり有効と考えられる。しかし、風化ゾーンの中においても下部につれ空洞が減少していくため、どこで区分するか判断が難しく、完全な未風化ゾーンを支持層と設定するのは経済的にも非現実的である。よって、ボーリング調査では岩着もしくは空洞が確認された場合、その底部で深5m以内に空洞がないことを打ち止め条件にしている。この5mに、明確な根拠があるわけではないが場所打ち杭となることをふまえ、道路橋示方書・同解説Ⅳ 下部構造編<sup>3)</sup>において「これまで蓄積された場所打ち杭の載荷試験結果に基づき、N値50程度以上の層厚がおおむね5m以上あり、十分固結した良質な砂礫層を支持層とする場合には、杭先端部の極限支持力度を5000 kN/m<sup>2</sup>としてよいものとした」と示されるのを参考にした。また、コアの亀裂の状況に留意し、亀裂間にテラロッサが生じていないか等を十分に留意し、以深の空洞有無の把握に努めた。

## 5. 場所打ち杭施工時の状況

場所打ち杭は全周回転オールケーシング工法で施工された。その掘削時、ボーリングにおいて2m程度の空洞が確認された深度付近に到達しても、急激に掘削速度が増加するような現象が起きず、常に岩盤を掘削しながら計画深度に達したそうである。また、掘削土砂には所々に沖積の円礫やテラロッサが含まれており、数十cm

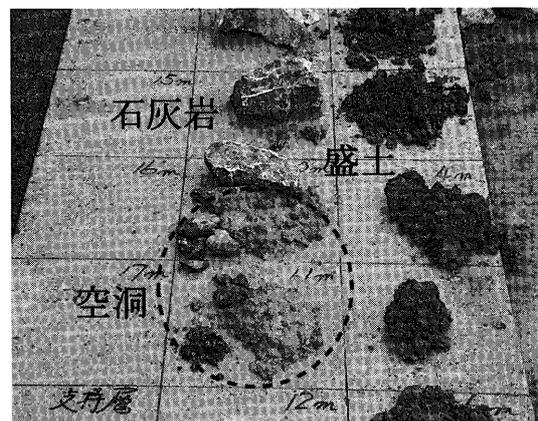


写真-3 ハンマグラブによる掘削土砂の状況。右側より下方部に向かって深度増加。最右列は盛土の掘削土砂。2列目は上部が石灰岩で、下部は空洞部の土砂。

程度の小規模な空洞が存在することは確かである。

このことは、ボーリングで確認された2m程度の空洞は、水平方向への連続性は極端に乏しく、つまりは杭径よりも形が小さい細長い縦穴であったことを示唆している。

## 6. まとめ

以上の結果をまとめると、秋吉台を取り囲む平野部における石灰岩分布地域では、鍾乳洞のように大規模な横穴が存在する可能性は低いが、構造物の基礎となるような浅部において、縦穴が無数に存在するものと考えられる。空洞の分布位置は岩盤の亀裂位置に依存するため、規則性が無くボーリング調査以外の箇所の分布を想定するのは難しい。また、物理探査も条件的に適用が難しい現場であったため、ボーリング調査による空洞位置の確認が最も有効な方法であるといえる。

ただし、ボーリング調査では現場に発達すると想定される縦穴とほぼ同方向の掘進となるため、横方向の空洞の規模を確認するのが難しい。ましてやその空洞がどのような方向で伸びているのか知るのとは不可能である。

しかし、施工時の掘進結果から考えると鉛直方向の空洞のサイズのみしか分からないボーリング調査だけでは、過大設計となる可能性もある。そのため、様々な手法を検討し、空洞の分布状況を把握する必要がある。例えば、ポアホール等の手法と組み合わせて空洞をのぞいて見るのも一つの手かもしれない。より有効かつ経済的な調査方法を検討していくことが今後の大きな課題である。

## 参考文献

- 1) 山口地学会編 編者代表 西村祐二郎・松里英男：山口県の岩石図鑑, pp. 152~153, 1991.
- 2) 山口地学会 編集 西村祐二郎・今岡照喜・宇多村譲・亀谷 敦：新編山口県地質図, 1995.
- 3) 社団法人 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅳ 下部構造編, pp. 357, 2002.

(原稿受理 2004.1.13)