

IAEG Bulletin 紹介(16)

2016年度 Hans Cloos 受賞記念講演

歴史的な岩盤工作物の安定と保全に関する地質工学：ユネスコ世界遺産のカップパドキア地域の例

国際委員会顧問

茶石貴夫

1. まえがき

国際応用地質学会(IAEG)では、会員に贈る賞として応用地質学の発展に長年寄与したことに対する Hans Cloos Medal, 若手の研究への Richard Wolters Prize, 主に地域活動への貢献に対する Marcel Arnould Medal があり、各国からの推薦と役員等の投票によって原則2年ごとに授与されている。Hans Cloos Medal は、2016年はトルコの Resat Ulusay 教授に、2018年は中国の Runqiu Huang 教授に授与された。Ulusay 教授は2019年から Bulletin の編集責任者を務め、また国際岩の力学連合会(ISRM)の会長の任にもあり、応用地質学と岩盤力学が融合した地質工学といったことを目指している。この講演文は2017年11月にネパールのカトマンズで開催された第11回 IAEG アジア地域会議に合わせて、Ulusay 教授が受賞の記念講演をした内容が掲載されたもので、1990年代の後半から行っているトルコの有名なカップパドキアの岩盤史跡に対する取り組みを紹介している。

2. 講演文の概要

紹介する講演文は、Bulletin の第77巻457～488ページに掲載された「Geo-engineering aspects on the structural stability and protection of historical man-made rock structures: An overview of Cappadocia Region(Turkey) in the UNESCO's World Heritage List」¹⁾で、共著者は琉球大学の工学部に所属する Ömer Aydan 教授である。

2.1 はじめに

文明の初期の時代から、人類は自分達のための住居や侵略者からの防衛、厳しい気候に対応するなどのために天然の空洞あるいは岩盤を掘りぬいた地下空洞を利用していた。今から4000～5000年も前に、エジブ

トのナイル川に沿って現代のものに匹敵する巨大な地下空洞が既に掘られており、世界中の様々な地域に岩盤を使った史跡が残っている。カップパドキアはそのうちでも典型的な例である。このような史跡は何千年も経過したものが多く、いくつかは原型を保っているが、風化や地震動、人間の活動によって様々な影響を受けて損傷し、完全に破壊されていることもある。それらは人類をたどる文化遺産であるとともに、環境にさらされてきた数千年に及ぶ証でもある。したがって、それらの構造的な安定を保ち、内外から受ける影響を最小にすることは非常に重要なことである。

今世紀になり、都市は急速に発展し人口が増えていることから地下と合わせた都市計画が必要になってきており、短期から長期の地下岩盤の地質工学的挙動が重要なテーマになっている。

トルコはヨーロッパとアジアの間に位置し、アナトリア地方の中央にあるカップパドキアは歴史的遺産というだけでなく、新旧の岩盤史跡の存在や独特の景観によって世界的に有名な場所である。この地域は三つの古い火山が形成した軟らかい凝灰岩と溶岩で覆われた高原地帯をなし、特に、凝灰岩が水や風の浸食で削られて独特のキノコ状の塔(fairy chimneys)を生んでいる(図-1)。岩盤内に造られた空間は、歴史的な教会や地下都市の跡だけでなく現在も一部が使われている。その背景として、当地の環境と人間活動がその要因であり、以下の六つが挙げられている。

- i 日あるいは季節による気温の変化が厳しいこと
- ii 岩盤が熱を遮ること
- iii 岩盤が自立しやすいこと
- iv 特に軟質な凝灰岩で、削ることが容易なこと
- v 外敵から守る場所が必要だったこと
- vi 地震や火山噴火に強かったこと

この講演は、岩盤工作物の保存のための調査が世界中で増えているなかで、カッパドキアにおける経験から、このような岩盤工作物が抱えている地質工学的問題に応用地質学と岩盤力学・岩盤工学の融合することの重要性を伝えたいと思っている。



図-1 カッパドキアを代表する独特の地形

2.2 地形・地質と気候，岩盤内空間の環境

2.2.1 地形・地質

カッパドキア地方は標高 1100~1400mの高原をなし、三つの古い火山に囲まれている。水系は一般に樹枝状をなし、谷沿いにはキノコ状の塔が林立して独特の景観が見られる。これは、凝灰岩中の不連続面(冷却割れ目)に支配された差別浸食と風化作用によって形成されたもので、円錐や筒状のものがあって場所により頂部にキャップロックがある。最近の研究では、塔の大きさや形を決めるのは地層面の傾斜と冷却割れ目の間隔やその開隙程度とされ、キャップロックの存在は浸食が遅くなることによる塔の高さに影響しているのみとされている²⁾。

2.2.2 気候

カッパドキア地方は典型的な大陸性の気候で、冬は積雪もあり寒さが厳しく、春は降雨が多く、夏は暑くて乾燥している。7月~8月の平均最高気温は 28.4℃、湿度は夏場が低く冬の2月が最も高くなっている。一日の温度差は非常に大きく 12月~2月は凍結し、凍結・融解の繰り返しは年間 38~68回が記録されている。なお、植生は谷沿いに限られている。

2.2.3 岩盤内空間の環境

カッパドキア地域は夏が非常に暑く冬は厳しい寒さのため、それらが和らぐ地下空間は快適な生活環境であり、人々が地下を求めたことは自然なことである。Derinkuyu 地下都市における測定例では、一日の室内気温は 9~12℃と変化が非常に少なく湿度は 90%を越えている。

2.3 カッパドキアの岩盤利用の歴史概要

カッパドキアは古代の中国からヨーロッパへと続くシルクロード上に位置し、異宗教の出会いなど両者の歴史的、文化的な足跡を残している³⁾。

カッパドキアの岩盤工作物は二つあり、ひとつは崖や半地下にある古い地下室及び地下都市、もうひとつは最近造られたホテルや地下貯蔵庫等の現代の地下空間がある。半地下ないし地下都市の形成は、主にローマやアラブから逃れた 1400~1800 年前の初期のキリスト教徒に関係している。しかし、5000 年前には地下鉱山の開発が知られており、カッパドキアで初期に造られたものは旧石器時代に遡ると考えられる。紀元前 3000 年頃に住んでいたヒッタイトが、涼温で貯蔵する目的で軟らかい凝灰岩を容易に掘ることを発見したことが分かっているが、歴史は更に 2500 年位遡ると思われる。この地域で最も重要な地下都市は Derinkuyu 等で、Derinkuyu はヒッタイト、ローマ、ビザンチンの各時代に続けて居住し、最大深度が地下 85m もあった。

2.4 地質概要と地震活動

2.4.1 軟質凝灰岩の地質的特徴

中央アナトリア火山地帯 (Central Anatolian Volcanic Province ; CAVP) は、良く保存された火山の形態と噴出物の量の点で最も知られているもののひとつであるが、カッパドキア火山地帯 (Cappadocian Volcanic Province ; CVP) もしばしば同義で使われる⁴⁾。図-2 の地質図に示すように、同地帯は新第三紀から第四紀の CVP の火山岩で覆われ、北東-南西に約 300km 延び、その火山活動は地中海東部で起きたアフリカーアラブとユーラシアプレートの衝突によるものと考えられている⁵⁾。

図-3 にはカッパドキア地域の一般的層序図を示す。新第三紀の溶岩を挟む凝灰岩からなる Urgup 火山層が広く分布し、岩盤工作物やキノコ状の塔はこの地層にある。本層は 10 枚の凝灰岩に区分され、堆積面はほぼ水平で 1100~1200m の高原を形成している。そのうち、代表的な地下工作物は、Kavak, Zelve, Cemilkoy, Kizilkaya, Gordeles 凝灰岩中にある。

2.4.2 地震活動

図-2 の地質図に示す北西-南東、北東-南西及び北縁の 3 系統の断層があり、これらはアナトリア地塊の変形に伴って今だ活動的である。しかし、1940 年に M=5.2 の地震が発生しているものの、トルコの他の地域に比べると地震活動は活発ではない。

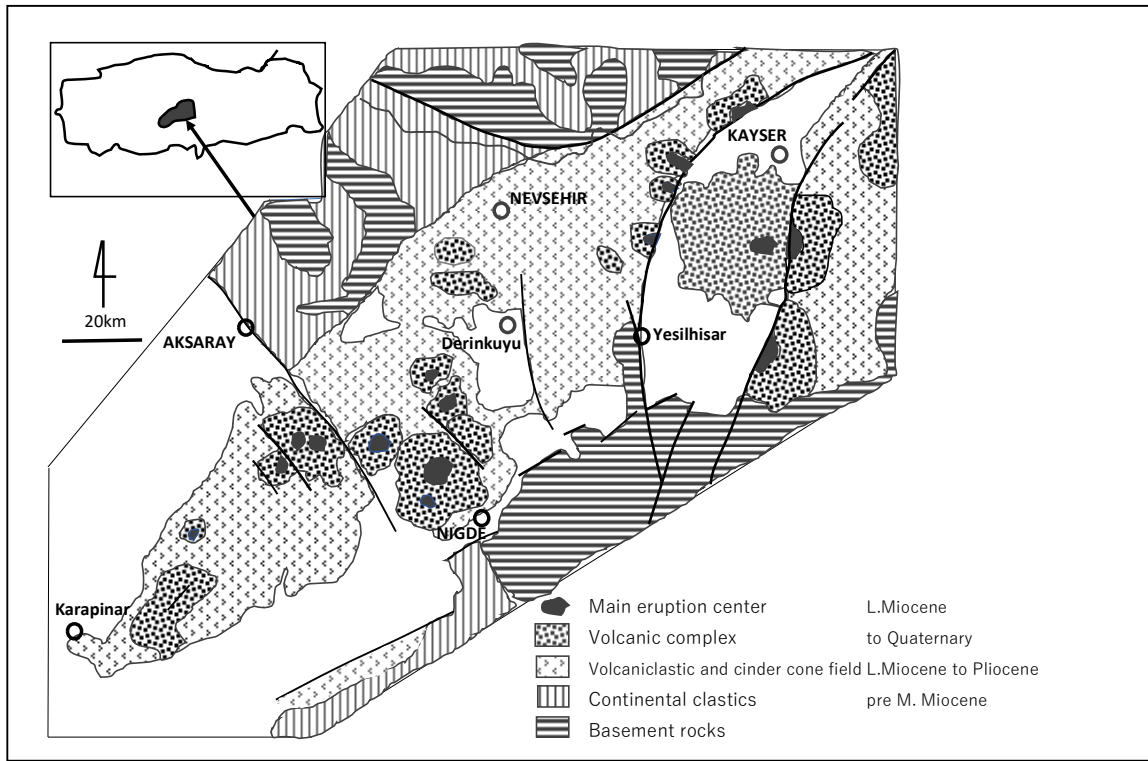


図-2 カップドキア火山地帯(CVP)の地質概略図 1)に加筆・修正

Reprinted by permission from Springer Nature. License Number 4775810715701

時代	ユニット	層厚 (m)	層序	岩相
第四紀	KUMTEPE	1-7		Air-fall deposits
鮮新世	VALIBABA	5-15		Welded tuff
	KIZILKAYA	4-60		Welded tuff
	TPPUZDAG	50-70		Lava
Urgup層 後期中新世	SOFULAR	4-10		Tuff with air-fall deposits at the bottom
	GORDELES	7-20		Tuff
	TAHAR	4-80		Tuff
	CEMILKOY	10-110		Ignimbrite
	DAMSA	12-100		Lava
	SARIMADEN	4-15		Tuff with air-fall deposits at the bottom
	ZELVE	25-100		Tuff with air-fall deposits at the bottom
	KAVAK	10-150		Tuff locally inte-bedded with volcano-detrital and air-fall deposits
前期中新世	YESILHISAR FORMATION	-80		Alternation of red mudstone, sandstone and conglomerate
中新世以前	BASEMENT ROCKS	?		Syccite, monzonite Gabbro, pyroxenite

図-3 カップドキア地域の一般的層序図

1)に加筆・修正 Reprinted by permission from Springer Nature. License Number 4775810715701

2.5 凝灰岩の原位置特性と物性

2.5.1 原位置特性

カップドキア凝灰岩の原位置特性として、ISRMによるシュミットロックハンマーと針貫入試験、及びジオトモグラフィーを壁や天井で実施している。カップドキア凝灰岩の水平に近い層理面は顕著ではなく、広い間隔の高角の冷却割れ目が主な不連続面をなしている。Zelve凝灰岩のRMR(Rock Mass Rating)値は52~63, RQD(Rock Quality Designation)は90~100%と、その値からは良好岩盤に区分されるが、強度の点では軟岩である。RMR値52からは4mの広さの岩盤内の空間が約3週間自立する、RMR値63では1年間というふうに評価されるが、これは保守的過ぎると言える。

2.5.2 短期的特性

歴史的保存地域であるためサンプリングによる室内試験は限られるが、粘土分を多く含んでいる。このような試料採取が難しい状況では、原位置で行える針貫入試験が有効な調査方法である。いずれの凝灰岩も脆弱又は非常に脆弱な岩石に分類され、層理面による異方性は認められない。

2.5.3 長期的特性

カップドキアの工作物の掘削面は1500年、一部

は 4000 年が経過し、地質工学的な長期の岩盤の挙動が分かる例である。粘土分を含む Cappadocia 凝灰岩は、含水状態の変化によって力学的性質が顕著に変化する。岩石の圧縮強度と飽和度の模式的関係を図-4 に示す。

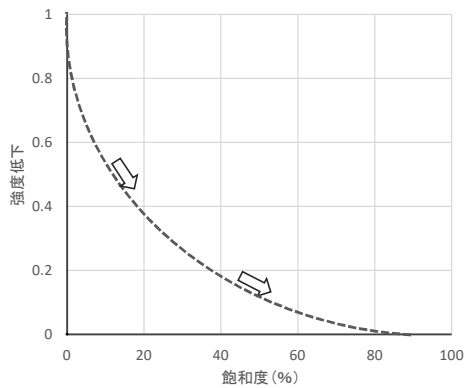


図-4 Cappadocia 凝灰岩の飽和度と圧縮強度低下の関係模式図

そこで、乾湿繰り返し、凍結融解による岩石試験を実施した。乾湿繰り返しによるスレーキング指数の低下は Zelve 凝灰岩で特に顕著であり、図-5.1 に示す、乾湿繰り返し回数と圧縮強度低下率の結果においても、Zelve 凝灰岩の低下が顕著である。図-5.2 は、同じく凍結融解の回数と圧縮強度低下率の結果であり、Kavak 凝灰岩が顕著に低下している。以上、Cappadocia 凝灰岩は飽和した状態での乾湿繰り返し、凍結融解が岩石の崩壊に相当影響することがわかる。

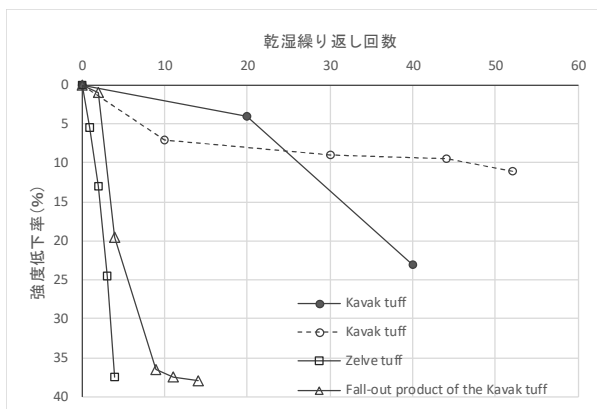


図-5.1 Cappadocia 凝灰岩の乾湿繰り返しと圧縮強度の関係 1)に加筆・修正

Reprinted by permission from Springer Nature. License Number 4775810715701

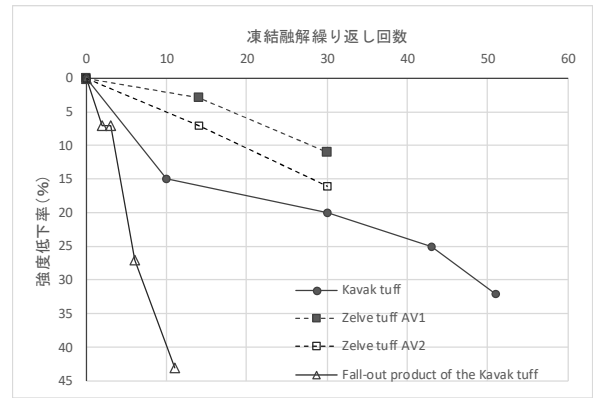


図-5.2 Cappadocia 凝灰岩の凍結融解繰り返しと圧縮強度の関係 1)に加筆・修正
Reprinted by permission from Springer Nature. License Number 4775810715701

2.6 岩盤を利用した史跡の地質工学的問題

Cappadocia における地下の岩盤の不安定化に関しては、以下のような地質工学的問題が指摘されている。

- (1) 不連続面沿いの滑落、急崖からの崩落
- (2) 岩塊の転倒や湾曲などの変形
- (3) 座屈による(板状の)割れ
- (4) 開口部での割れの進行
- (5) 地下室での岩塊の崩落
- (6) 岩盤の柱の細りやせん断

2.7 谷壁や岩盤内空間の安定性評価

2.7.1 代表的空間の簡易力学モデル

岩盤内の地下空間や岩塔の安定性を検討するために解析に用いるモデル化を検討した。

2.7.2 足元が浸食を受ける谷壁の安定

岩壁の足元が浸食された場合について、モデル計算によって岩盤に引張力が働く領域を確認した。

2.7.3 開口部の割れ目の安定性評価

モデル計算によって、開口部の岩盤に割れ目が発生することを示す引張力の分布領域を確認した。

2.8 経験に基づく保全と安全対策

Cappadocia には何万人もの人が訪れているが、特に半地下部の崩壊が危険を及ぼしており、どう崩壊を防ぎ、文化遺産を守り、安全を確保するかが大きな課題である。

Cappadocia では、ハード対策とソフト対策があり、前者は文化的価値を損なうことなく岩盤を支持、補強する対策である。例えば、入り口の開口部では天井を支える鋼製柱を設置する方法がある。岩塊の崩落を防ぐために、周囲と馴染みやすい木製の梁を

使う一般的な伝統的方法もある。ロックボルトは岩盤の崩落を防ぐために普通に行われる工法であるが、カッパドキア凝灰岩は軟質で風化しやすいため通常のものでは、その効果が疑問である。また、ボルトは錆びやすいし、硬さや性質が岩盤と大きく異なっている。この点で、周りの岩盤を傷めないで挿入するカーボンファイバー製のロックボルトの適用をもっと研究する必要がある。

大気に直接さらされるカッパドキア凝灰岩の崩壊については、ショットクリートを吹き付ける工法が浸食防止になる。特殊なセメントに凝灰岩を粉砕して混ぜたものを使った例があるが、未だ景観が変化してしまうという問題がある。この他に開口部の安定を改善するために、劣化した柱の圧縮強度を増す方法がある。これには柱を鋼製柱で囲む方法や無塩化物コンクリートを使う方法が提案されている⁶⁾。水の浸潤は風化を促進し岩盤の強度低下を招くので、可能であれば不透水性の透明なシートを被せる等が考えられる。

現在、カッパドキアでの大きな地質工学的問題は、周囲を破壊し人命に係る岩盤の崩落であり、調査によってその危険性を評価し、不安定と判断される岩塊は爆破を用いないで除去する必要がある。それに加えて落石防護柵や防護ネットの設置も行われている。また、崖にある古い住居では非常に被りが薄いところに部屋が隣り合って存在することがあり、その場合には空間を岩塊で埋めてしまう方法がある。

ソフト対策としては、崩壊の危険性が高い半地下空間の場合にはフェンスで直下への立ち入りを禁止にしている。最近起きた教会跡の空間の岩盤崩壊では、前方への岩塊の転落を抑えられなかったものの幸運にも人的被害がなかった。最近の建設工事や維持管理の場面において行われるモニタリングは、岩盤工学的な要素を含む総合的な技術である。現在、AEや電気抵抗、クラック幅、浸食量、気象条件等を含む先進的な多機能モニタリングシステムを開発しているところである⁷⁾。

3. あとがき

カッパドキアに限らず、世界には景勝地や大規模な史跡などが有名な名所や観光地になっているところが多くあり、それらには必ずと言ってよいほど地形や地質的な背景が関わっている。人との関わりという点において、その地質的価値や歴史だけでなく、人の活動とどう関係してきたかも理解することができるのは応用地質学に携わる技術者ならではのもの

と思われる。一般の観光客であっても、その地形や地質の見方、価値等を知って見るかどうかで、ただきれいというだけでなく印象に残る程度も格段に違ってくると思われる。そういった面においても応用地質学が注目される領域があるように思われるので、普通の旅行者が行く海外の観光地などを訪れた際に、会員が得た知識や印象をまとめて平易なガイドにすることも学会として有意義になるかもしれない。

引用文献

- 1) Ulusay, R., Aydan, Ö. (2018) : Geo-engineering aspects on the structural stability and protection of historical man-made rock structures: An overview of Cappadocia Region (Turkey) in the UNESCO's World Heritage List. Bull Eng Geol Environ, 77, pp.457-488.
- 2) Topal, T., Doyuran, V. (1995) : Effect of discontinuities on the development of fairy chimneys in the Cappadocian region(central Anatolia- Turkey). Turk J Earth Sci 4, pp. 49-54.
- 3) Gulyaz, ME. (2012) : Goreme National Park and the rock sites of Cappadocia. Republic of Turkey Ministry of Culture and Tourism, General Directorate of Libraries and Publications 3354b, Handbook Series, Ankara.
- 4) Toprak, V. (1998) : Vent distribution and its relation to regional tectonics, Cappadocian volcanics, Turkey. J Volcanol Geotherm Res, 85, pp.55-67.
- 5) Temel, A., Gundogdu, MN., Gourgaud, A., Le Penneç, JL. (1998) : Ignimbrites of Cappadocia (central Anatolia, Turkey): petrology and geochemistry. J Volcanol Geotherm Res, 88, pp. 447-471.
- 6) Aydan, Ö. (2017) : Rock Reinforcement and Rock Support. ISRM Book Series, CRC Press, Taylor & Francis Group, London.
- 7) Ulusay, R., Aydan, Ö., Genis, M., Tanao, H. (2013) : Stability assessment of Avanos congress centre (Cappadocia, Turkey) in soft tuffs through an integrated scheme of rock engineering methods. Rock Mech rock Eng, 46, pp. 1303-1321.