

地下空間の構造的安定性に関する一考察
—トルコ共和国・カッパドキア地方の地下空間について—
CHARACTERISTICS OF MECHANICAL STABILITY OF UNDERGROUND SPACE:
THROUGH INVESTIGATION AT CAPPADOCIA, TURKEY

清木隆文・アイダン オメル..・西 淳二...・田中 正....
Takafumi SEIKI, Ömer AYDAN, Junji NISHI and Tadashi TANAKA

In Cappadocia region, Turkey, the investigation of mechanical stability scarcely has been carried out although the underground spaces which are valuable and are set as World Heritage by UNESCO have been used. In this paper, the authors carried out the investigation of underground spaces there. Based on the short term and long term laboratory tests and in-sits survey, the rock mass which consists of the Cappadocia region is classified and its material parameters are determined. Finally, visco-elasto-plastic FEM analyses were carried out for estimating the short term and long term deformable behavior of, a typical underground space, Derinkyu Underground City. These analyses indicated its underground city has been stable mechanically for 1,500 years after excavation. And these numerical results are verified by in-sits survey.

1. はじめに

地下空間の長期安定性を考えるにあたり、既存の歴史的構造物に学ぶことが自然な姿である。ここで目を海外にむけると、トルコ共和国・カッパドキア地方には古くから地下住居が存在している。その大半は、世界遺産として保存の対象となっている。これら岩盤中に作られた地下構造物は他に例がない程貴重であり、しかも現在でも日常生活で使われている。これらの中で、地下都市 Derinkuyu で代表される様な、人々の生活の場として遠い昔に使われた空間は、人の手で作り出した地下構造物の長期力学挙動特性を考察するために、非常に良い研究材料である。しかしながら、現在まで、その重要さに関わらず、カッパドキア地方の地下都市群に対して短期および長期安定性に関する十分な調査が行なわれていなかった。そこで本論文では、平成9年度から10年度にかけて行われた現地調査(AE(Acoustic Emission)試験による初期応力の推定、弾性波トモグラフィーによるゆるみ域の推定、シュミットハンマーによる非破壊剛性試験など)で得られた地質学的データおよびカッパドキア凝灰岩に対する室内試験〔一軸圧縮試験、クリープ試験、載荷ひずみ速度依存性試験など〕の結果をもとに、数値解析を行ない、短期および長期の地下空洞の力学的安定性を推定することを目的とした。以下にカッパドキア凝灰岩と総称されるこの地方特有の軟岩の力学的特性を簡単に紹介し、岩盤の現場特性を室内試験の結果と結び付けた過程について示す。最後に、室内実験および現場測定

キーワード：長期力学的安定性、トルコ共和国・カッパドキア地方、地下空間利用

*	正会員	工博	宇都宮大学助教授	工学部建設学科
**	正会員	工博	東海大学助教授	海洋学部海洋土木工学科
***	フェロー	工博	名古屋大学教授	大学院工学研究科地圏環境工学専攻
****	正会員	工修	名古屋大学助手	大学院工学研究科地圏環境工学専攻

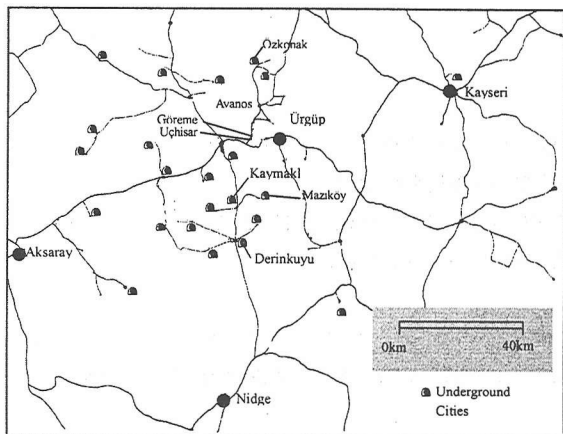


図-1 カップパドキア地方の地下都市の分布図¹⁾に加筆



図-2 カップパドキア地方の奇岩地帯

データをもとに必要なパラメータを決定し、地下都市 Derinkuyu を代表として粘弾塑性有限要素法解析を行ない、換気シャフトおよび地下7階のホールについて掘削後 1,500 年間の安定性を推定した結果について考察する。

2. トルコ・カップパドキア地方の地下空間の利用

2.1 地質の構成およびその成り立ち

カップパドキアは、トルコ共和国の中央アナトリアの約 25,000 km² の広さをもつ高原を示す(図-1, 図-2)。カップパドキア地方はカップパドキア火山地帯²⁾に属し、新第三紀から第四紀の火山岩に覆われている。これらは主にカップパドキアの周囲に位置する三つの 3,000m 級の活火山 (Mt. Erciyes, Mt. Hasandagi, Mt. Göllüdag) の火山活動によるものである。この地域で観られる主な地質は、各種基盤岩、Yeşilhisar 層、Ürgüp 層および第四紀堆積層で構成されている。基盤岩は、オフィオライト (斑レイ岩および輝石) および深成岩 (閃長岩およびモンズナイト) から成る³⁾。また、一部の基盤岩 (Mesozoic 基盤岩) に変成岩が存在していることが確認されている。Ürgüp 層は不整合層で、Yeşilhisar 層の上に堆積した層であり、カップパドキア地方の地表部を広く覆っている。この地方で観られる多くの地下構造物や特殊な地形 (例えば妖精の煙突[fairy chimneys]と称される侵食によってできた尖塔) はこの層が基になっており、河川および湖底の堆積物と火成碎屑の堆積物との互層になっている。Ürgüp 層は、ほぼ水平に広く存在し、Ürgüp 周辺部で高さ約 1,200m の高原を構成している。この層は岩石学的に水平方向および鉛直方向にさらに 12 の層に分類され³⁾、古いものから新しい順に、Çökek 層, Kavak 層, Zelve 層, Sarımaden 層, Damsa 層, Cemilköy 層, Tahar 層, Gördeles

AGE	UNITS	THICKNESS (m)	LITHOLOGY	EXPLANATIONS
QUA	KUMUTEPE	1-7		Air-fall deposits
UPPER MIOCENE	VALIBABA	5-15		Welded ignimbrite {K/Ar(W.R.): 2.7±0.1*, 2.8±0.1**, 3.0±0.1*}
	KIZILKAYA	4-60		Welded ignimbrite {K/Ar(B): 4.4±0.1*, 4.9±0.2**, 5.4±1.1*, 5.5±0.2**}
	TOPUZDAG	50-70		Lava {K/Ar(W.R.): 7±0.15***}
	SOPULAR	4-10		Ignimbrite with air-fall deposits at the bottom {K/Ar(B): 6.8±1.4*}
	GÖRDELES	7-20		Ignimbrite {K/Ar(B): 7.8±1.6*}
	TAHAR	4-80		Ignimbrite
	CEMILKÖY	10-110		Ignimbrite
	DAMSA	12-100		Lava {K/Ar(W.R.): 8.2±0.2***}
	SARIMADEN	4-15		Ignimbrite with air-fall deposits at the bottom {K/Ar(B): 8.0±1.6*, 8.5±0.2*, 8.6±1.7*}
	ZELVE	25-100		Ignimbrite with air-fall deposits at the bottom
PRE-MIOCENE	KAVAK	10-150		Ignimbrites locally interbedded with volcano-detrital and air-fall deposits {K/Ar(B): 8.6±1.7*, 11.2±2.5***}
	BASEMENT			Lacustrine and fluvial sediments
				Alternation of red mudstone and conglomerates
PRE-MIOCENE	BASEMENT			Syenite, monzonite
				Gabbro, pyroxenite

図-3 カップパドキア地方の地質柱状図 (例)¹¹⁾

層, Sofular 層, Topuzdağ 層, Kızılkaya 層, Kışladağ 層と名づけられている。この中でも Ürgüp 層の中で良く観られる Kavak 層は、2,600km²もの領域を占め、厚いところで 300 m、薄いところでも 80 m の層厚を持つ。事実カッパドキア地方の地下都市の多くはこの層の中に掘削されている(図-3)。この凝灰岩は、白色、灰色、桃色を呈し、碎屑状特性を示すとともに、軽石や火山ガラスの塊、所々に溶結凝灰岩や様々な固結度のイブニングライト、粘土、マールを含み、深くなるに従って細粒から粗粒へと変化している。Kavak 凝灰岩の一軸圧縮強度は約 6.0 MPa 程度と弱く、古代の人々は、幸運にも地下に都市(街)を当時の単純な掘削道具で建設できる材料が身近あり、非常に恵まれていたことになる。

2.2 カッパドキア地方の地下利用の歴史と気候の関係

カッパドキア地方に人類がはじめて定住したのは、新石器時代である。当初はごく自然に地表に住居を作り住んでいたようであるが、古くペルシャ時代(紀元前 401 年ころ)には地下都市としての機能の原型が十分備わっていたという記録²⁾があることから、初めて人々が地下に住みはじめたのは、2,400 年以上も前ということになる。なぜ地下に住み始めたかという疑問に対して、キリスト教徒の迫害からの逃避、火山噴火に伴う自然災害からの回避など説⁴⁾があるが定かではない。ただこの地域の気候について見ると、乾燥帯のステップ気候に属しており、夏は暑く最高で 36℃⁴⁾になり、7 月から 9 月の一日の温度差は最大 22℃⁴⁾と昼夜の差が大きい。一方で、冬は寒く最低で -18℃まで下がり、年間の最高気温と最低気温の温度差は 40℃にもなる。また降水量も少なく、典型的な大陸性気候を示している。樹木の無い不毛の地で、古代の人々が厳しい気候の中で、少しでも快適な住環境を得るために、掘りやすい凝灰岩質の地盤を掘り、地下住宅を作ったというのは納得できることである。

2.3 現代における地下空間利用法

カッパドキア地方は、古くから世界にも稀な程地下空間利用を推し進めた地域であり、何百もの地下住居、洞窟墓地、岩窟教会が点在する。その多くが大切に保存されていることより、“カッパドキア地下都市群”として世界文化遺産にも登録されている。特に Göreme の岩窟教会は有名である。この地域の景観を維持するために、商店やホテル、民家までも、この地域で産出される凝灰岩を化粧板として使う義務が課せられている。現在、この地域では地下空間を遺跡として保存しているだけではなく、実用空間として新たに空洞を掘削したり、古くからある地下空間を改修したりして使っている。カッパドキア地方で、今なお地下空間が盛んに使われているのはなぜだろうか。ホテルなどの公共的に使うものについては、もの珍しさを醸し出すことによって、観光客を呼ぶものとなることが十分考えられるが、果たしてそれだけであろうか。歴史的に地下空間を利用することを強いられた背景を除き、実用にも適うが故に現在でも積極的に地下(特に半地下)が活用されていると思われる。著者らは、カッパドキア地方の地下空間を半地下型、(完全)地下型と分類して現地調査を進め、半地下型空間として、ホテル、商業用倉庫、住居、地下型空間として、商店、地下都市(遺跡)について環境(温度・湿度)⁵⁾、地質(岩盤分類、弾性波探査 etc.)を平成 10 年の春季と夏季に行なった。カッパドキアの地下都市群は長い年月を経てこれまで存在してきた事は事実であるが、数値解析

表—1 カッパドキア凝灰岩の力学定数

パラメータ	数値
乾燥密度 (kN/m ³)	11.5-15.9
湿潤密度 (kN/m ³)	17.3-19.2
間隙率 (%)	26-38
一軸圧縮強度 (MPa)	5.38-10.5
引張強度 (MPa)	0.6-1.4
弾性係数 (GPa)	1.4-7.0
ポアソン比	0.19-0.26
内部摩擦角 (°)	13-28
P 波速度 (km/s)	1.8-2.5
S 波速度 (km/s)	0.8-1.8

表—2 Kavak 凝灰岩の材料諸量 (Der inkuyu 地下都市)

パラメータ	数値	点数
一軸圧縮強度 (MPa)	3-7	1~2
RQD (%)	90-100	20
不連続面の間隔 (m)	0.6-10	15~20
不連続面の状態	高度の連続性、わずかに粗い表面で不連続面の間隔 1~5mm、軟らかい充填物<5 mm を含む適度に風化した壁面	15
地下水の状態	乾燥あるいは湿っている	10~15

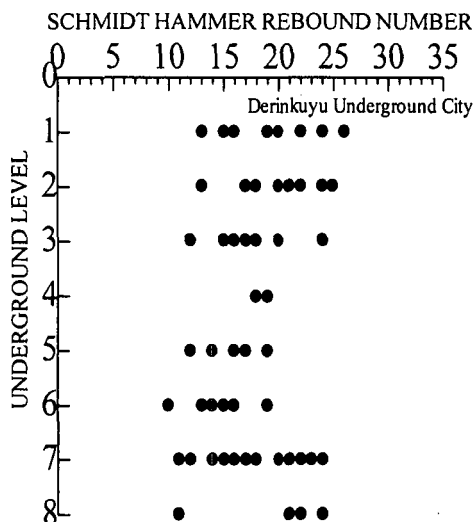


図-4 シュミットハンマーの反発係数と深さの関係 (Derinkuyu 地下都市)

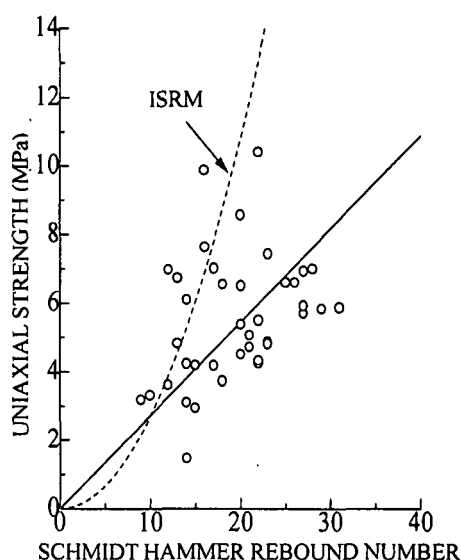


図-5 シュミットハンマーの反発係数と一軸圧縮強度の関係 (カッパドキア凝灰岩)

を道具としてその挙動を推定することは、既存の地下空間の長期安定性を推定するためにも重要である。そこで、掘削後 1,500 年以上経過している地下都市 Derinkuyu を対象に数値解析を実施することに焦点を絞り、以後の議論を進める。

3. カッパドキア凝灰岩の力学的性質

カッパドキア地方では、今まで多くの調査が、主に地質学の立場から行われてきた⁶⁾。著者らは、平成 10 年の春と夏に、カッパドキア地方の地下都市群において、岩石供試体を Derinkuyu, Ürgüp, Avanos, Özkonak において採集し、カッパドキア凝灰岩の力学定数(長期的、短期的挙動を説明する定数)を決定するための室内実験を実施した。また、以上に挙げた場所それぞれにおいて数箇所の現位置試験を行った。この章では、著者らが行った調査の概要についてまとめ、以下に記す。

3.1 短期的な力学特性について

Derinkuyu, Ürgüp, Avanos, Özkonak で採集されたカッパドキア凝灰岩の供試体について、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験、割裂試験、弾性波速度試験、透水試験を行った。一軸圧縮強度から、この凝灰岩は、“弱い”あるいは“極度に弱い”岩石に分類される。また、延性的挙動を示す一方で、スレーキング特性を持ち、凍結-融解の繰り返しによって、顕著に力学定数が低下することが報告されている^{7), 8)}。表-1 に、実験から得られたカッパドキア凝灰岩の力学定数を示す。

3.2 時間依存の力学的挙動について

著者らはカッパドキア凝灰岩の時間依存の力学挙動に関するパラメータを求めるために、クリープ試験や載荷ひずみ速度依存性試験を行った。ここで言う載荷ひずみ速度依存性試験は、一軸圧縮試験をひずみ制御で行なう際に、載荷速度の依存性を調べるものである。クリープ試験は、Derinkuyu, Ürgüp, Avanos, Özkonak から採取した供試体を用いて、温度 20℃、湿度 50%に保たれている恒温室においてを行った⁹⁾。また、載荷ひずみ速度依存性試験は、Ürgüp,

Avanos, Özkönak から得られた供試体について行った。載荷ひずみ速度依存性試験の結果から、載荷ひずみ速度を小さくすると、強度および変形係数も小さくなる傾向があることがわかった¹¹⁾。この傾向は他の岩石でも同様の結果を示すことが報告されている¹⁰⁾。クリープ試験および載荷ひずみ速度依存試験から、一軸圧縮強度のひずみ速度依存関係 $\sigma_c(\dot{\epsilon})$ (MPa) が以下のように与えられる。

$$\sigma_c(\dot{\epsilon}) = 9.8 + 0.42 \ln \dot{\epsilon} \quad (1)$$

ここに、 $\dot{\epsilon}$ は、ひずみ速度 (strain/min) である。岩石の内部摩擦角などの特性は、ひずみ速度に依存しない¹⁰⁾ので、(1) 式は、容易に降伏関数に取り入れることが可能である。そこで、Mohr-Coulomb の降伏関数は、以下のように記述できる。

$$f = \sigma_1 - (q\sigma_3 + \sigma_c(\dot{\epsilon})) = 0, \quad q = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (2)$$

なお、 ϕ は、岩石の内部摩擦角、 σ_1 および σ_3 はそれぞれ最大主応力、最小主応力である。同様に、ひずみ速度に依存するヤング率 $E^*(\dot{\epsilon})$ (GPa) は、実験結果^{9),11)}から以下のように表される。

$$E^*(\dot{\epsilon}) = 3.2 + 0.10 \ln \dot{\epsilon} \quad (3)$$

3.3 現位置特性について

著者らは、Derinkuyu, Özkönak, Mazıköy の地下都市および Ürgüp と Uçhisar 半地下住居の壁面でシュミットハンマーによる非破壊試験および弾性波トモグラフィー調査を行った¹¹⁾。現在まで、カッパドキア凝灰岩に関する現位置試験が体系的に行なわれていなかったため、現位置の力学的特性は文献にあるデータに頼っていた。この地方を広く覆う Kavak 凝灰岩についてのシュミットハンマー試験の結果、岩盤の深さ方向および水平方向に関する反発係数の顕著な違いは見られなかった。また反発係数は、10 から 30 を示し、平均値は 15 であった。同様に地下都市 Derinkuyu においても、深さによる反発係数の違いはほとんど見られなかった (図-4)。図-5 (図中 ISRM は International Society of Rock Mechanics の提案手法による推定値を示す。) は、カッパドキア凝灰岩全般における反発係数と一軸圧縮試験の関係を示す。弾性波トモグラフィー試験は、地下都市 Derinkuyu の地下 1 階、3 階、5 階、8 階において実施した (図-6)。岩盤の P 波速度 V_p は、0.9~1.3 (km/s) の間であったので、深さによる P 波速度の違いは顕著ではなかった。この結果から少なくとも深さ数十メートル単位の岩盤はかなり均質であることがわかった。これは、地質学的に堆積層はほぼ水平に積み重なっているが、この周辺では違いがあまり見られないことを意味している。そのため、節理がカッパドキア凝灰岩の主な不連続面となっているので、Bieniawski¹²⁾による RMR (Rock Mass Rating) 法を用いて、岩盤の“塊”としての品質を推し量ることを試みた。必要なパラメータを決めるために、地下都市 Derinkuyu の Kavak 凝灰岩の露頭を数多く調査した。調査から得られたパラメータの平均値および RMR を表-2 に示す。RMR 値は、良い岩盤において一様に 61 から 72 の間で得られ、Topal¹³⁾によって得られた同じ種類の凝灰岩における基礎 RMR 値 (49~77) と良く一致している。力学的特性と岩盤分類指標の間に直接関係があると仮定すると、推定された岩盤の強さや剛性などの力学特性は、母岩 (岩盤内の無傷な岩石部分) から得られた値より高くなる傾向にある¹⁴⁾。本論文では、Aydan ら¹⁴⁾による軟岩の力学特性評価手法に従って岩盤評価を行なう。この手法にしたがって一軸圧縮強度あるいは岩盤の変形係数を示す力学特性 φ_m は、RMR と個々の母岩特性 φ_i を用いて以下のようになる。

$$\varphi_m = \frac{RMR}{RMR + \beta(100 - RMR)} \varphi_i \quad (4)$$

ここで、 β は、力学特性毎に異なるパラメータである。例えば、Aydan ら¹⁴⁾は、岩盤の一軸圧縮強度を求めるために、パラメータ β の値を 6 としている。変形係数については、対象岩盤の弾性波速度が得られた場合、Aydan ら¹⁵⁾によって提案された手法を用いることが可能となる。ここで紹介した方法によって推定した地下都市 Derinkuyu における岩盤の一軸圧縮強度および変形係数は、母岩のおよそ 1/3 から 2/5 となった。

4. 岩盤の粘弾塑性構成則と有限要素定式化

この章では、本論文で用いる粘弾塑性構成則について概要を説明する。広く地盤材料は、変形および強度特性が実験時の荷重速度あるいはひずみ速度に依存していることが知られている^{10), 16)}。特に、このような岩盤材料の時間依存特性は、粘弾塑性構成則を用いてモデル化が可能である。以下、Aydan ら^{10), 17)}によって提案された構成モデルを簡単に説明する。岩盤の応力-ひずみ挙動が除荷時に弾性的であるとするとき、このモデルは粘弾性体として、

$$\sigma_0 = D_0 \varepsilon_0 \quad \text{for } t \leq 0 \quad (5a)$$

$$\sigma = D_e \varepsilon' + C_v \dot{\varepsilon}' \quad \text{for } t > 0 \quad (5b)$$

と記述できる。ここで、 σ_0 , ε_0 , σ , ε' , $\dot{\varepsilon}'$ は、載荷直後 ($t \leq 0$) および時刻 t の応力テンソル、ひずみテンソルおよびひずみ速度テンソルを表し、 D_0 , D_e , C_v は、それぞれ載荷時の瞬間弾性係数テンソル、載荷時の遅延弾性係数テンソル、粘性係数テンソルである。また、全ひずみ ε は、瞬間ひずみ成分 ε_0 と遅延ひずみ成分 ε' の和として、

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon' \quad (6)$$

と表される。一方、除荷時に塑性挙動を応力-ひずみ関係が示すと、粘弾塑性材料として、

$$\Delta \sigma = D_{ep} \Delta \varepsilon + C_{vp} \Delta \dot{\varepsilon} \quad \text{for } t > 0 \quad (7)$$

とモデル化される。ここで $\Delta \sigma$, $\Delta \varepsilon$, $\Delta \dot{\varepsilon}$ は、それぞれ応力、ひずみ、ひずみ速度の増分形テンソル、 D_{ep} , C_{vp} は、弾塑性テンソルおよび粘塑性テンソルである。塑性過程は、ひずみ速度の関数である降伏関数を用いて表現し、式展開は一般に用いられる弾塑性構成則の場合と同様に行なう。慣性力を無視した力の釣り合い式は、領域 Ω において、

$$\nabla \cdot \sigma + b = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (8)$$

$$\text{変位境界条件: } u = \hat{u} \quad \text{on } \partial\Omega_u$$

$$\text{荷重境界条件: } t = \hat{t} = \sigma^T n \quad \text{on } \partial\Omega_t$$

と書ける。ここに ∇ は微分演算子 ($= \partial / \partial x$)、 $\partial\Omega_u$, $\partial\Omega_t$ は変位境界、荷重境界である。なお、演算記号 $\ast$ はテンソル $\ast$ の階数を下げる演算を意味し、 $\ast$, $\ast$ が 1 階のテンソルであれば内積を表現する。(7) 式の弱形式は、任意のベクトル関数 δu ($\delta u = 0$ on $\partial\Omega_u$) を用いて、

$$\int_{\Omega} (\delta \varepsilon) : \sigma \, dV = \int_{\Omega} \delta u \cdot b \, dV + \int_{\partial\Omega_t} \delta u \cdot \hat{t} \, dS \quad (9)$$

と表される。なお、 $\delta \varepsilon = (\nabla \delta u + (\nabla \delta u)^T) / 2$ である。(9) 式中の演算記号 $\ast$: $\ast$ は 2 階のテンソル $\ast$ の内積を意味する。変位 u^e を形状関数 N で離散化し、有限要素の節点変位 U^e との関係を表すと、

$$u^e = N U^e \quad (10)$$

となる。(10) 式および (5b) 式の関係を用いて、(9) 式の有限要素離散化を行なうと、(11) 式のような関係

$$C_e \dot{U}^e + K_e U^e = F^e \quad (11)$$

を得る。なお、各係数マトリックス C_e , K_e および荷重ベクトル F_e は、要素領域 Ω^e において、

$$C_e = \int_{\Omega^e} B^T C_v B \, dV, \quad K_e = \int_{\Omega^e} B^T D_e B \, dV, \quad F_e = \int_{\Omega^e} N^T b \, dV + \int_{\partial\Omega_t^e} \bar{N}^T \hat{t} \, dS + \int_{\Omega^e} N^T D_e \varepsilon_0 \, dV \quad (12)$$

である。ここに、 Ω_t^e は要素領域の荷重境界、 $B = \nabla N$, $\bar{N}$ は要素境界の形状関数、 $\ast^T$ は行列 $\ast$ の転置を表す。また時間について、Eulerian の手法を用いて (11) 式を差分化すると、

$$C^\ast U_{n+1} = F_{n+1}, \quad C^\ast = \frac{1}{\Delta t} C, \quad F_{n+1} = F_n + \left(\frac{1}{\Delta t} C - K \right) U_n \quad (13)$$

となる。なお、 Δt は時間増分、 $*_n$ は n ステップ目の $*$ を意味する。

5. 地下都市の安定解析

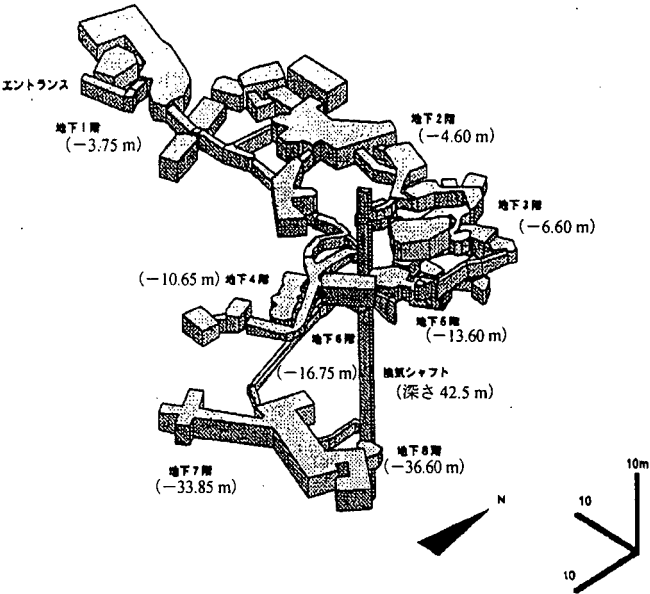
本研究では、カッパドキア地方の地下都市群の短期的および長期的な力学的安定性を検討するために、地下都市 Derinkuyu の換気シャフトおよび地下 7 階のホールを代表例として、粘弾塑性有限要素法による数値解析を行った。換気シャフトの深さは、37.5 m で地下ホールは土被り 40m であるとして計算を進めた。鉛直方向の応力成分は土被りによるものと等価であるとし、現位置による初期応力測定によって、水平応力係数 K_0 は 0.5 であるとした¹¹⁾。ひずみ速度依存性を考慮するために、Mohr-Coulomb の破壊基準と、Drucker-Prager の破壊基準を理論的な関係を生かして置き換えた。解析に必要な力学的定数は、岩石供試体の短期的、長期的な室内試験および岩盤の現位置特性によって決定した(表—3)。表中の ρ は、単位体積重量、 λ_0 、 μ_0 は、瞬間剛性の Lamé 定数、 λ 、 μ は、弾性 Lamé 定数、 λ^* 、 μ^* は、粘性 Lamé 定数、 ϕ は内部摩擦角をそれぞれ示す。

5.1 換気シャフトに関するモデル化

地下都市 Derinkuyu(図—6)には、地表面から約 150cm×70cm の矩形断面で、換気シャフトがある。このシャフトは地表面から、無支保で掘削され、かつては 70m~80m の深さを持ち、地下水脈まで届いていたとされるが、現在は地下 42.5m で埋まっている。地下都市 Derinkuyu は地下 8 階までの部屋で構成されるが、この換気シャフトは通路を通してすべての部屋に繋がっていて、かつて人々が生活していた時代には非常に重要な役割を果たしていたと考えられる。換気シャフトの断面はここでは直径 2 m の円形であると仮定し、軸対称問題として数値解析を行った。AE による初期応力測定結果および断層の条線から求められた結果をもと側圧係数 $K_0=0.5$ として、凝灰岩の単位体積重量から初期応力を計算し、掘削解析(自重掘削解析)を行った。有限要素メッシュ底面において鉛直方向の変位拘束、側面において水平方向の変位を拘束した。

表—3 数値解析に用いた定数¹¹⁾

ρ kN/m ³	λ_0 MPa	μ_0 MPa	λ MPa	μ MPa	λ^* GPa year	μ^* GPa year	ϕ (°)
18	80	80	141	94	70.5	47	22



図—6 地下都市 Derinkuyu の概略図⁵⁾〔()は地表面からの平均深さを表す。〕

5.2 換気シャフトに関する解析結果

換気シャフトを一度に掘削した過程を数値計算で再現したが、掘削直後のシャフト周辺の岩盤が全く降伏状態にならないことがわかった。また一方、掘削後 1,500 年経過、すなわち現在から 1,500 年前に掘削されたと仮定して、計算をすすめた。図—7 および図—8 は、それぞれ掘削直後および現在の換気シャフトの変形状態を示す。計算結果から、現在

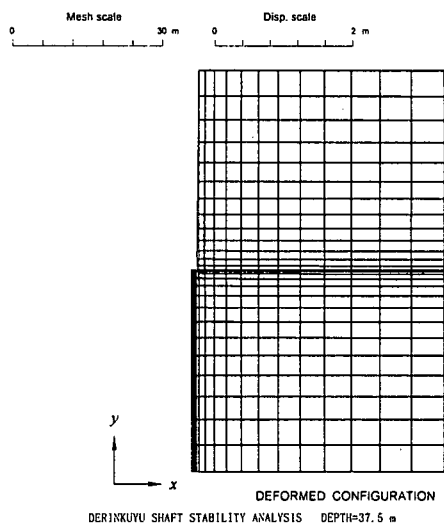


図-7 換気シャフトの変形図（掘削直後）

(1,500 年経過後)においても換気シャフト周辺の岩盤は降伏状態にないことが明らかとなった。すなわち換気シャフト周辺は粘弾性的に挙動したので、時間経過に従って、掘削に伴う変形が一定値に落ち着く傾向にある（図-9）。このためにシャフト周辺の応力は、掘削直後のものと殆ど相違ない分布傾向にある。図-10 は、換気シャフト周辺の主応力分布を示す。

5.3 地下7階のホールのモデル化

著者らは地下都市 Derinkuyu の地下7階に位置するホールを数値解析の対象とした。このホールの天井はアーチ構造、断面は馬蹄形の無支保の地下空間であり、幅はおよそ 4.5m で長さは 20m である。かつてこのホールは教会のように宗教的な役割を果たしていたとされる。この地下ホールの解析は、2 次元の平面ひずみ状態で地下ホールを長さ方向に輪切りにした断面をモデル化して行なった。実際の地下ホールには、長さ方向のほぼ中央部に 3 本の柱が中央線に沿って並んでいるが、柱そのものに数本のき裂が入っているので、モデル化に際して、柱の剛性は評価しないものとした。境界条件は有限要素メッシュ側面で水平方向の変位を固定、底面では鉛直方向の変位を固定とし、空洞掘削部で深さ 40m の相当する初期応力を発生させて、境界条件は自重掘削解析（側圧係数 $K_0=0.5$ ）を行った。

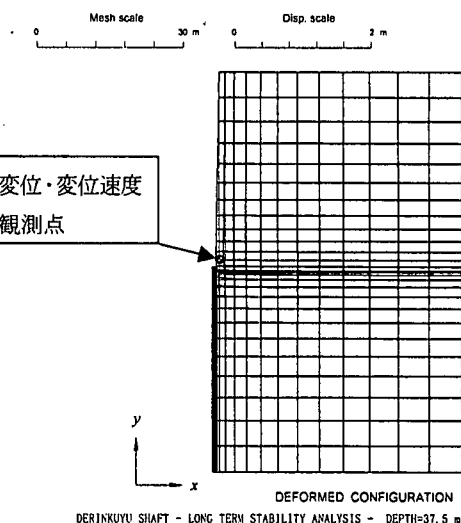


図-8 換気シャフト変形図（掘削後 1,500 年経過）

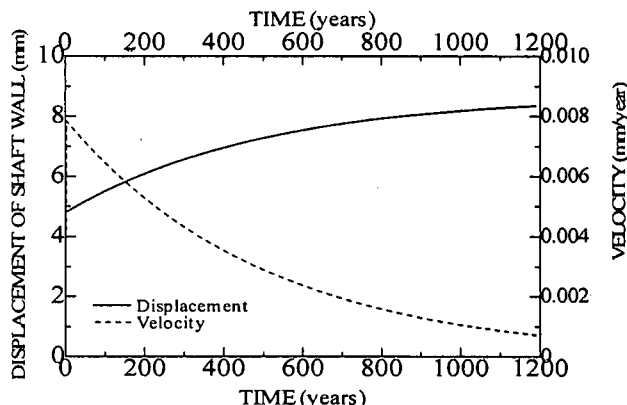


図-9 時間経過に伴う換気シャフトの側方変位および変位速度の変化（観測位置は図-8 参照）

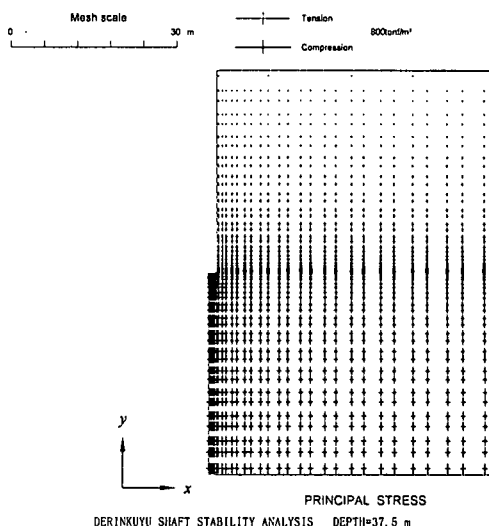


図-10 換気シャフト周辺の主応力分布図（掘削直後）

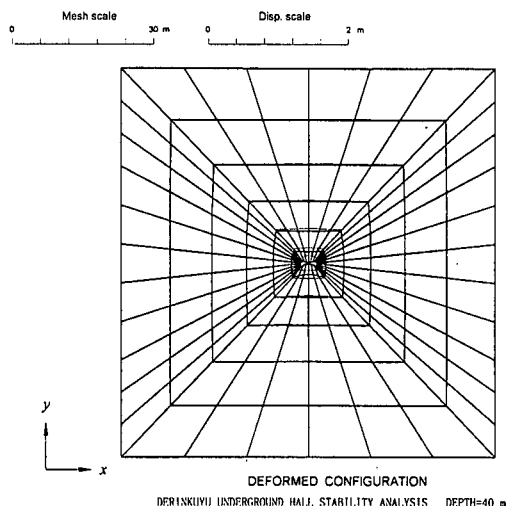


図-11 地下ホール変形図（掘削直後）

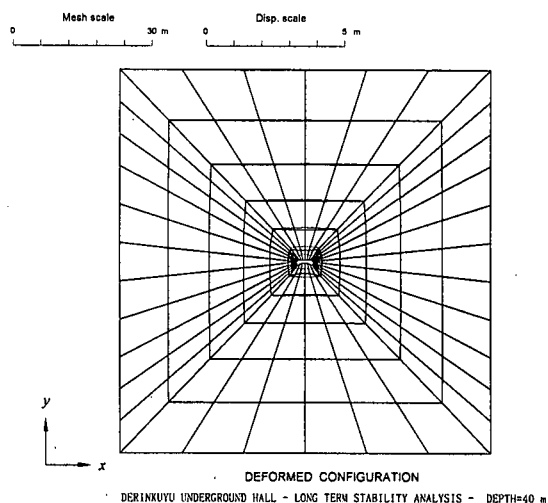


図-12 地下ホール変形図（掘削後 1,500 年経過）

5.4 地下ホールの解析結果

数値解析の結果から、掘削直後に周辺岩盤に降伏は起こらない事が明らかとなった。換気シャフトの解析結果と同様に、掘削完了時から掘削後 1,500 年経過した現在に至る数値解析を進めた。図-11 および図-12 は、計算領域の変形図を示す。数値解析の結果から、現在までに岩盤降伏が、起こっていないことも明らかとなった。また、換気シャフトの解析例と同様に、周辺岩盤は降伏していないために粘弾性的挙動をするので、地下ホール周辺の変位は、掘削後、一定の変位量に落ち着く。また地下ホール周辺の応力分布は、掘削時と現在の応力分布では時間の隔たりはあるものの同様の分布を示している。図-13 は、掘削直後における地下ホール周辺の主応力の分布を示している。平成 10 年 8 月の現地調査の際に、AE 試験も併せて行なった¹¹⁾が、このホール周辺では、全く AE が検出されなかった。これは、実際にもこの地下ホール周辺の岩盤は安定であることを示している。弾性波トモグラフィーの結果と併せると、ゆるみ域や応力が強度を超えて作用している所も数箇所あったが、これは Kavak 凝灰岩の長期にわたる風化などにより力学特性の低下したことが原因の一つであると考えられる。

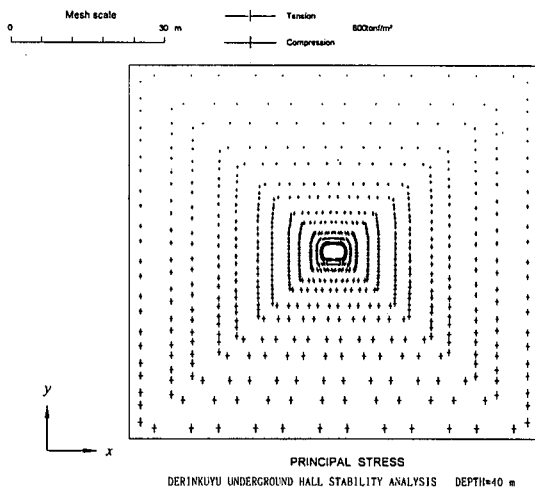


図-13 地下ホールの主応力分布図（掘削直後）

6. まとめ

本論文で、トルコ共和国・カッパドキア地方の地下都市群を対象に、著者らは粘弾塑性有限要素法解析を行ない、短期および長期の力学的安定性を推定するために、はじめに現場調査を行ない、現位置試験および現場から採取した供試体をもとに室内実験を行なうとともに、必要なパラメータを求めた。カッパドキア地方の地下都市群を主に構成する Kavak 凝灰岩は“弱い”あるいは“極度に弱い”岩石に分類される岩であり、載荷ひずみ速度を小さくすると、強度および変形係数も小さくなる傾向を示した。また弾性波トモグラフィーや AE 試験、シュミットハンマー試験の結果は深さ数十メートル単位で岩盤はかなり均質であることを示した。これは、地質学的に堆積層はほぼ水平に積み

重なっているが、この周辺では違いがあまり見られないことを意味している。本研究では、地下都市 Derinkuyu を対象として、先に得られたパラメータを用いて数値解析を実施し、一般の建設プロジェクトでは考えられない程長い期間の長期挙動を扱った。粘弾塑性有限要素法による数値解析の結果、地下都市 Derinkuyu の換気シャフトおよび土被り 40m の地下ホールは、掘削後 1,500 年経った今もお力学的に安定で、粘弾性挙動を示し、周辺の岩盤は全く降伏状態に至っていないことを示した。しかしながら、掘削当初、40m 以深にも構造物があったとされるので、時間の経過とともに降伏し、崩壊に至る可能性は否めない。この事実を確かめるためにはさらなる研究の積み重ねが必要である。少なくとも、本論文の解析結果は、カッパドキア地方の地下都市群が岩盤としては材料的にかなり弱い条件の中で、今まで崩壊を免れて存在してきた経緯を解き明かすことができた。

謝辞

本研究をすすめるにあたり、共同研究者であるトルコ・Istanbul 工科大学 Erdağın Yüzer 教授, Mustafa Erdağın 助教授, Hacettepe 大学 Reşat Ulusay 助教授, Pamukkale 大学 Halil Kumsar 助教授の現地調査における手続き、指導および惜しみない協力に感謝する。また地下都市 Derinkuyu の地質調査に多大なるご協力を頂いた応用地質(株) 田中達吉氏に感謝する。この研究は文部省科学研究費(国際学術研究)の援助により行われたことを付記する。

参考文献

- 1) Gülyaz, M.E. and Yenipinar, H.: Rock Settlements and Underground Cities of Cappadocia, Turizm Ltd.,
- 2) Toprak, V. and Göncüoğlu, C.: Tectonic control on the development of Neogene-Quaternary Central Anatolian volcanic province, Turkey. *Geological Journal*, **28**, 357-369, 1993.
- 3) Temel, A.: *Kapadokya eksploziv volkanizmasının petrolojik ve jeokimyasal özellikleri*. Ph.D. Thesis, Dept. of Geological Engng., Hacettepe University (in Turkish), 1992.
- 4) 嶋田竜紀, 米田崇: カッパドキアの地下都市と過去から現在の地下空間に関する研究, 東海大学卒業論文, 1998.3.
- 5) 清水隆文, アイダシ オメル, 西 淳二, 市川康明: 地下空間における温・湿度特性に関する一考察—トルコ共和国・カッパドキア地方の地下施設について—, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第4巻, 141-150, 1999.1.
- 6) 例えば, Erguvanli, A.K. and Yüzer, E., *Past and present use of underground openings excavated in volcanic tuffs at Cappadocia area*, Rock Storage, Oslo, 15-20, 1977.
- 7) Ulusay, R., Gökçeoğlu, C. and Binal, A.: Physical and mechanical properties of the tuff samples from Cappadocia Region. Technical Report, 32p., 1997.
- 8) Aydan, Ö., Ulusay, R., Yüzer, E. and Erdoğan, M.: *Man-made structures in Cappadocia, Turkey and their implications in rock mechanics and rock engineering*. ISRM News Journal, 1999.
- 9) Ito, T., Akagi, T., Seiki, T., Ulusay, R., Yüzer, E., Erdoğan, M. and Aydan, Ö.: Long term behaviour of tuffs of Cappadocia, *Japan-Korea Rock Engineering Symp.*, Fukuoka., 359-370, 1999.
- 10) Aydan, Ö. and Nawrocki, P.: *Rate-dependent deformability and strength characteristics of rocks*. Int. Symp. on the Geotechnics of Hard Soils-Soft Rocks, Napoli, 1, 403-411, 1998.
- 11) アイダシ・オメル: 地下都市(トルコ共和国デリンクユ)の住環境に関する研究, 平成9年—平成10年度科学研究費補助金(国際学術研究)研究成果報告書, 1999.3.
- 12) Bieniawski, Z.T.: *Engineering rock mass classifications*. New York: Wiley, 1989.
- 13) Topal, T.: *Formation and deterioration of fairly chimneys of the Kavak tuff in Ürgüp-Göreme area (Nevşehir-Turkey)*. Ph.D. Thesis, Dept. of Geological Engng., Middle East Tech. University, 1985.
- 14) Aydan, Ö. & Dalgıç, S.: *Prediction of deformation behaviour of 3-lanes Bolu Tunnels through squeezing rocks of North Anatolian Fault Zone (NAFZ)*, Reg. Symp. on Sedimentary Rock Engineering, Taipei, 228-233, 1998.
- 15) Aydan, Ö., T., Akagi, T., and Kawamoto, T.: *The squeezing potential of rocks around tunnels: theory and prediction*, Rock Mechanics and Rock Engineering, **26**(2), 137-163, 1993.
- 16) Akagi, T., Ichikawa, Y., Kuroda, T. and Kawamoto, T.: *A non-linear rheological analysis of deeply located tunnels*, Int. J. Num. Anal. Meth. in Geomechanics, **8**:107-120, 1984.
- 17) Aydan, Ö., Ito, J., Ito, T., Akagi, T., and Sato, J.: *Prediction of deformation behaviour of a tunnel in squeezing rock with time-dependent characteristics*, NUMOG V, Davos, 463-469, 1995.