

(26) 地下開発利用に関する地盤環境上の課題

— 地盤沈下と環境システム (第3報)

ENVIRONMENTAL CONCERNS REGARDING UNDERGROUND DEVELOPMENT AND UTILIZATION

— ENVIRONMENTAL SYSTEMS FOR SUBSIDENCE ENGINEERING (3RD REPORT)

江崎哲郎*

木村 強**

亀田伸裕***

堂園俊多*

Tetsuro ESAKI*, Tsuyoshi KIMURA**, Nobuhiro KAMEDA***, Shunta DOHZONO*

ABSTRACT; This paper examines the fundamentals of underground development and its utilization, including the maintenance and management before, during, and after the planning and construction. It is expected that underground spaces will be densely concentrated within a given region. New problems will arise as follows: the suitable arrangement of underground openings, subsidence and instability due to weathering of the ground around the openings, changes in ground water flow, and so on. Once the underground space has been constructed, it is impossible to return the environment to its initial conditions. In addition repair and reconstruction due to damage are nearly impossible. Therefore, this paper discusses the durability (i.e. durable life) of underground structures from economical, functional, and physical points of view. Especially, the long term stability of underground openings is investigated in detail in connection with several previous accidents. In the future, it is necessary to recognize that "underground developments must be dealt with different from surface ones". Success of projects depends on planning and maintenance done from a long-term viewpoint, including careful study concerning the affects such systems will have on society.

KEYWORDS; subsidence, cave-in, underground utilization, ground environment, underground development

1. はじめに

現在あるいは近未来を考えると、人類の活動の空間は陸上や沿岸にとどまらず、宇宙、海洋、地下の3つが新しい空間創出のターゲットとして期待され、既に一部ではこれらの開発が始まっている。とりわけ地下開発は、人類の歴史が始まって以来、社会生活と深いかわり合いを持ち、近代でも資源採取、交通などの輸送、ライフラインなどの社会都市施設として地下空間が利用されてきた経緯もあって、最も開発の実現性が高いものと言える。最近ではこれらの利用に加えてエネルギー関連の貯蔵などでも新たな脚光を浴びてきている。地下の特徴は大まかに、隔離性、恒温性、耐震性、環境や景観を阻害しないことなどであろう。以前は、地下は閉鎖的な空間であり、建設コストが高く、防災上にも問題があるとされていたが、用途次第ではそれらの点が逆に長所になり、制約や危険性の多い地上よりも優位性がある。これらの地下開発のうち、大都市圏の地下利用、放射性廃棄物の地層処分、エネルギー備蓄などは、これらの長所を生かすものであり、かつ社会的要請が大きいので特に積極的な検討が行われている。

*九州大学工学部環境システム工学研究センター Institute of Environmental Systems, Faculty of Engineering, Kyushu University
**国立公害研究所 The National Institute for Environmental Studies
***九州共立大学工学部開発学科 Department of Land and Water Development, Faculty of Engineering, Kyushu Kyoritsu University

こういった地下開発を実現するための新しい技術開発として、ジオトモグラフィ、ボアホールレーダなどの地下探査技術、シールド工法などの掘削技術、火災対策、地震、停電等に対処する防災システムがあげられている。これらの技術は、どれ一つとっても慎重な検討・解決の必要があり、これらの技術開発なくしての実現はありえない。しかしながら、これらの個々の技術開発が完成することによって、現代、および未来の多様な要求を満足する地下利用が実現すると考えるのは早計であろう。

開発と環境との調和が極めて強く要請される今日の情勢下においては、地下掘削によって引き起こされる地盤の緩み、地盤沈下等の地盤環境上の問題も、単なる地盤の制御、被害の未然防止にとどまらず、人間社会との関連において考える必要があるものと思われる。第2報¹⁾で述べた、地盤環境の立場から見た地下開発の問題点をまとめると次のようである。

まず第1に、地下空間は一度建設されると元に戻すことが不可能である。このような地盤の不可逆性からみて、地上の構造物も含めた将来の利用計画および地下構造物の長期的寿命を考えた検討が必要である。第2に、首都圏の大深度地下などではある程度の密度の高い利用が想定されるため、地下空間の計画的な適切な配置は重要な検討課題である。第3に、地下開発に対して多くの技術的克服がなされたとしても、地盤沈下を皆無としたり、地下水系の変化を全く生じない工事は不可能である。従って被害を生じないような許容値内に収まるように、事前の予測および対策、および適切な情報の伝達が必要である。

本稿ではこれらの問題点について検討を進めた。特に、地下構造物の耐用年のあり方について基本的に考察した。

2. 地下構造物に求められる耐用年数

従来土木構造物は半永久的構造物と考えられ、その耐用年数については他の分野に比べてかなりあいまいにされてきた。しかし近年、社会資本の取り壊し、再生などのケースが次第に多くなるにつれ、土木構造物は決して永久構造物ではなく寿命があり、その寿命を維持する上でも、基本的には十分な管理と補修等によってその機能が保たれるものであるという確固とした認識が必要と思われる。構造物の建設時には前もってそれらの維持管理システムを明確にする必要があり、またその根本ともなるべき設計耐用年の設定は非常に重要と考えられる。

先に述べたように、今後様々な地下利用の実用化が迫られるなか、地下構造物の設計耐用年の設定は、次の各点を考慮しなければならない。

- 1) 地下は不可逆性の強い空間であり、一旦作られた地下構造物の取り壊し、修復、拡張は地上の構造物と比較して非常に困難を伴うこと。
- 2) 地下構造物は周囲地盤によって支持されるものであり、その周囲地盤も建設材料の一つとして取り扱わべきである。周囲地盤が自然のものである以上、材料特性が把握された他の材料と異なり、時間の経過とともに、建設時には予測しがたい強度劣化などの材料特性の変化を伴う危険性があること。
- 3) 社会の変遷にともなって、各構造物の必要性や要求される機能、諸元も変化していくのが常であるが、例にもれず地下構造物についても、それらは年々変化していくであろう。そしてその見通しが立てにくいことは、1) 2) に述べた点を考慮すると、一層注意すべきことと言える

地下構造物を含めた種々の構造物の耐用年数がいかに設定されるべきかについては、その構造物の持つべき機能と使用される条件等により各々異なるものであるが、ここではまず、構造物の寿命に対する基本的な考え方を述べる。構造物の寿命もしくは設計耐用年を検討する上で基本となる種々の制約があるが、それらは大きく経済的、機能的、そして物理的なものに分けられる。これらのどの要素がより支配的であるかは各々の状況によって異なるが、これらの総合的な検討から寿命に対する考え方を明確にし、ひいては維持管理等を含めたひとつの指標を設定することが望ましい²⁾。

2. 1. 経済的寿命

これには2つのタイプが考えられる。ひとつは、建設費やこれに関連する広い意味での管理費も含めた償還と収益のバランスで算定される償還年数的な寿命である。もうひとつは、過去に投資してきた維持管理費すなわち、維持、補修、改良に要した費用の実績を整理し、ある年間の総投資額を算出することによって、より経済的な取り替え時期を算定した場合の寿命である。地下構造物に関する寿命については、大蔵省令第15号にみる原価償却資産の耐用年数として、構造または用途の区分のうち、「鉄道業用または軌道業用のもの」の中の「トンネル」をみると、「鉄骨コンクリート造のもの」は60年、「れんが造のもの」は35年、「その他のもの」は30年となっている。また同じく構造または用途の区分のうち「鉄骨鉄筋コンクリート造または鉄筋コンクリート造のもの」の中の「トンネル」をみると75年となっている。

これらを参考にしながら、償還の面からみた地下構造物の耐用年数を考えると、トンネルのような線状地下空間の場合、鉄筋コンクリート造のものを一般的な値として考えるならおおむね60～75年程度となる。拠点的地下空間の場合には該当がないが、同程度のものであろう。

2. 2. 機能的寿命

これは、設計・計画の時点で立てた将来の予測を越えた時代の変遷、社会変化等により、その構造物の機能が十分に果たせえなくなるといった寿命である。地下構造物における機能的寿命を考える一例として、現在の首都圏を考えてみる。現在東京は極度の過密状態より、地価高騰・交通渋滞・通勤ラッシュ・都市機能の肥大化・過密化・老朽化または都市のスプロール化など多くの深刻な問題を抱えている。具体的には、土地そのものの不足から土地所有の細分化・複雑化等によって地価が高騰し、それを受けて用地費負担が増大するため用地取得は頗る困難なものとなってきた。またこういった事情と並行して、地上や浅い地下は、上下水道、送配電線、通信ケーブル、ガスなど公共サービスのための管渠網や地下鉄網、地下商店街、道路などによって埋め尽くされ、利用可能な空間がよりいっそうと狭小化している。このような状況にあって現在の大深度地下開発構想が計画・実行へ向いつつあるのだが、この場合、機能的側面からみて望まれる寿命は少なくとも数十年単位のものであろう。一般の構造物では比較的近い将来の社会がそれを必要とするのか否か推定できない場合は、それにあわせて設計寿命を比較的短く設定し、細かな改修を重ねて保持していく方針をとるのが普通である。しかし地下構造物に関しては、その不可逆性から考えても、比較的近い将来にその必要性が疑われるような場合において、そのような計画を実行することはできない。すなわち機能的側面としても、経済的に求められる寿命と同程度の将来においてなお、地下構造物が必要とされるであろう確固とした見通しが必要である。こういった点からも、機能的側面からみた寿命は少なくとも数十年単位のもので望ましく、また現に必要とされていると言えよう。

2. 3. 物理的寿命

これにも2つのタイプが考えられる。ひとつは、構造物を構成している使用材料の劣化、疲労、損傷、摩耗、これらによる構造物の耐荷力の低下などによる寿命である。またもうひとつは、使用面からとらえた場合、耐荷力はあるが、騒音や振動等が大きくなり使用上耐えられなくなるといった寿命である。まず第一に、地下構造物全体の物理的寿命に大きなウェイトを占めるのは、その構造物の周囲地盤の支持力であると言うことができる。周囲の地盤が不安定な状態に至ったとき、これを直接支持する内壁あるいはグラウトを施工することは、地下空洞の自立設計の根幹からみて理不尽なことといえよう。故に地下空洞の自立時間をもって実質的な地下構造物の寿命を考えることが適当であると思われる。また、地盤は、時間を経過するにつれ風化作用、地下水位の移動、地震等によって強度劣化を生じ、施工時の空洞安定状態とは異なった状況が、後々になって生じてくる可能性がある。故に物理的側面からみた寿命を考える上で、空洞の周囲地盤の長期的な強度劣化の検討は重要な課題であると言えよう。

地下空洞掘削後、無支保の状態で空洞を維持する時間を「自立時間 [stand-up time] 」と呼ぶが、同一スケール同一形状の空洞における自立時間は、岩盤の特性、例えば節理間隔、走向、節理の中の充填物など

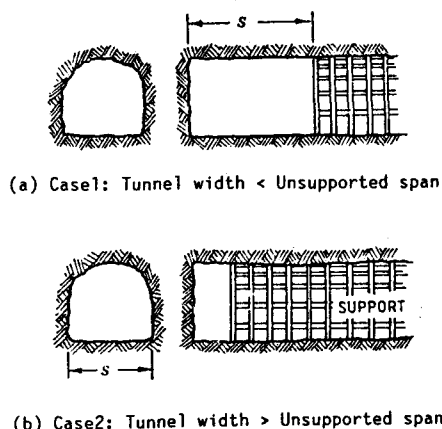


Fig.1. Definition of Unsupported span

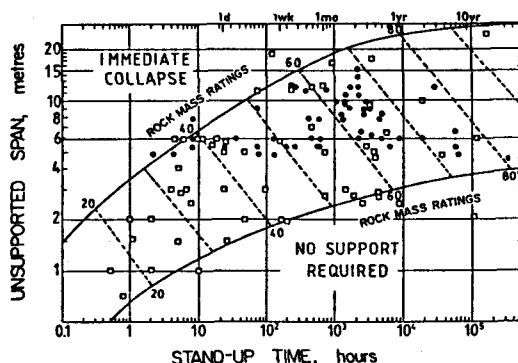


Fig.2. Geomechanics Classification of rock masses: output for mining and tunneling;
 • = case histories of roof falls in mining;
 ◻ = tunneling roof falls;
 contour lines = limits of applicability.

岩盤の不連続性に応じてその値を大きく変えるものであることが知られている。時間的経過を考慮した空洞安定問題における過去の研究として、H.Lauffer³⁾, Z.T.Bieniawski⁴⁾ らによって提案された空洞自立の考え方がある。Fig.2では、Fig.1-(a),(b)に示される「無支保スパン [unsupported span]」を縦軸にとり、横軸にstand-up timeを対数軸でとっている。例えば、良好な岩 (RMR=60) における unsupported span と stand-up time の関係は、図中に太い実線で示された領域のみ有効であり、unsupported span が 6m のとき、stand-up time は 2000hr (約3ヶ月) となる。しかしながらこの自立時間は切羽の進行にともなう空間の仮支保や覆工を行うまでの放置できる時間などを対象としたもので、ここで考えるような長期間の安定を考慮したものではない。これらの長期的安定性の検討を進めていくには、具体的な計算などを行う手掛かりが全くない状況である。このような場合には、まず過去に発生した不安定現象、災害等の動態を分析してみることが大切であると思われる。

岩盤の破壊によって引き起こされる災害は、人間のつくる構造物の破壊にともなう災害のうちで最も大きいもののひとつであろう。過去の大きな災害例を3つあげる。最も有名なのが1959年の Malpassetダムの崩壊であり、500人以上の犠牲者を出した。直接の原因は左岸アバットメントの地山岩盤の破壊である。また誘因としてダムの近くで行われていた蛍石鉱山の発破振動も当時指摘されている。次に、1963年のイタリア

Vajontダムの事故があげられる。これは大雨の後で、ダム直上流の左岸地山が貯水池内に崩壊し、基礎の破壊には至らなかったものの、ダムから大量の水があふれ大事故となった。もう1つ、南アフリカで1960年に発生したCoalbrook鉱山の陥没がある⁵⁾。これは平均深さ143mの採掘跡地下空洞が約 3 km²にわたって突然陥没し、437名が死亡した。この原因は、採掘空洞を支える残柱の強度不足にあり、空洞設計のミスと結論された。

これらの原因とされる岩盤の強度上の問題点としてまずあげられるのは、地下構造物は自然の岩盤を支持材料としており、その材料強度の評価が難しいということである。すなわち、支持岩盤内には断層などの弱点が含まれており、材料として極めて強度のばらつきが大きく、建設前に弱点の存在が完全には確認できない。また、第3の例などは、残柱の中にモンモリロナイトが存在し、空洞形成後に水と反応することによって岩盤の強度が設計時に評価された値より大きく低下した。

これらの事故は、設計当時あまり重要とされなかったり想定されなかったこと、例えば局所的な破壊現象が引金となって大事故に至ったこと、更に地下構造物が閉鎖的なものであるが故に逃げ道のない大災害となったことなど、当時の設計者の予測できない事態が生じたことを示している。

次に長期にわたる地盤の強度劣化を示す現象の代表的例として、第2報でも取り上げた空洞不安定に起因した地表の陥没がある。地表陥没を発生する地域では、地下浅部の採掘のため地層が擾乱されており、また風化作用や地層中の節理、亀裂のため長期的な力学的強度の低下が生じる。また地下深部に作られた空洞であってもそれが大規模なものになると、長期的には地表陥没を生じることが懸念され、このことは、先頃発生した大谷石採掘跡の陥没や、アメリカにおける Solution Miningによる大規模陥没現象などにおいても実証されたといえる。アメリカのテキサス州 Grand Saline で 1976年4月27日に発生した Solution Miningによる陥没被害をFig.3に示す⁶⁾。Solution Miningとは、乾燥した鉱床中に、ひとつあるいはいくつかの空洞を掘削し、鉱床中に溶媒として水を注入して、鉱物を溶液とともに移動させ、鉱物を再流動、再結晶させることにより採鉱を行う方法である。陥没崩壊は2段階にわたり、第2段階は約1カ月続いた。図は当時の平面図およびA-A'面で切った立面図である。最初の陥没で突如、直径4~6m、深さ15mの陥没孔が生じ、2段階目の崩壊では陥没孔の縁が次々と水溜りの中に落ち込み、最終的には陥没孔の面積約1200m²、体積8500m³の大陥没孔となった。地下空洞までの深度は65mであり、現在考えられているドーム状大深度地下空間に対して参考となるものである。また、この地域でのSolution Miningの開始時期である1888年から、88年後に陥没が生じている。このことは、時間経過にともなう安定性についての検討の重要性をうかがわせる。

Fig.4に、第2報で示した北部九州地域における地表陥没発生と経過年数の予測統計を修正して再掲する。今回のデータは鉱業権の変遷を示した調査資料をもとに、可能なかぎりさかのぼって採掘開始時期の推定を再検討した。全データ数は1211件である。これをもとに考えると、陥没発生までの経過時間は平均45年から70年、約60年から100年後で90%の発生となる。この値は、前述した地下構造物の耐用年数を考える上でも、また寿命が尽きた後の処理等を考える上でも、決して無視しうるものではない。

他方、空洞形成時の一次応力状態から二次応力状態への変化、地下水系の変化等を伴った地盤は、単なる埋め戻しという行為の困難さだけではなく、元通りの自然状態に戻すことが非常に困難である。このような点を考慮すると、地下構造物においては地上構造物と異なり、寿命が尽きた後の処理、あるいはその寿命が

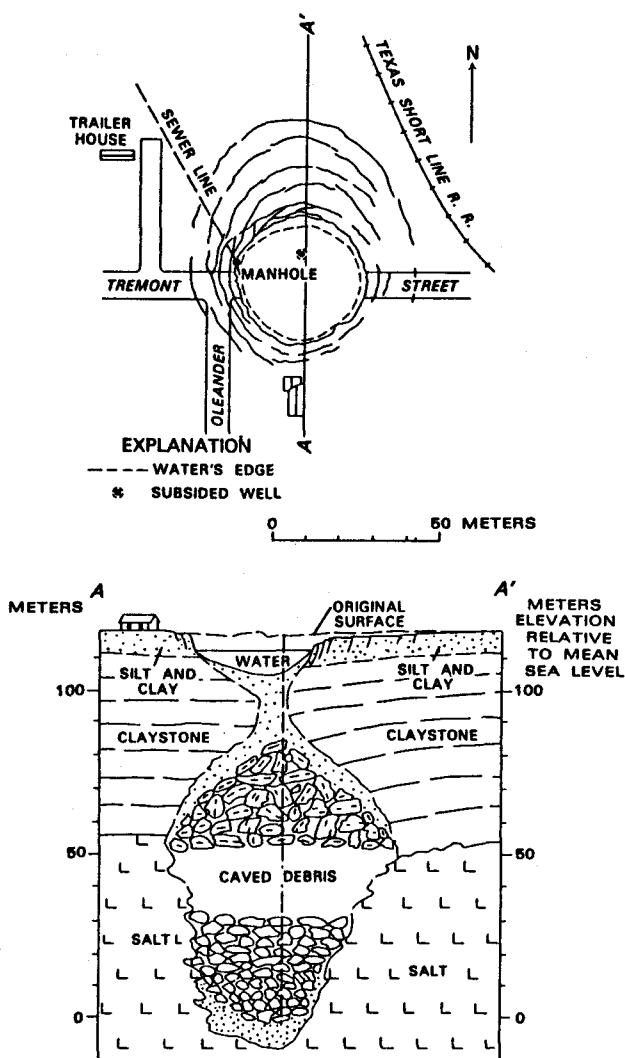


Fig.3. Map of a sinkhole that developed in Grand Saline, Tex., on April 27, 1976, due to solution mining of a salt dome.

一体どの程度であるのかについて、特段の注意が払われなければならず、また地下構造物に長期的寿命を求めるならば、当然それに応じて、地盤に生ずる強度劣化を考慮し、施工時の空洞安定性とは異なった状況が生じてくることも加味した寿命の検討が不可欠であり、今までの構造物の寿命と根本的に異なった思想で望むべきである。

3. まとめ

本稿では、地下の開発利用について、単に地下施設の建設や環境保全という立場にとどまらず、計画、建設後の維持管理、将来の問題など地盤環境という立場からみた地下の開発利用のあり方を基礎的に検討した。

今後の地下利用は、立体的かつ密度の高い空間の掘削が行われることになる。

これらの空洞間の相互の干渉問題、空洞周辺の風化の進行などの状況変化に起因する地盤沈下や空洞の不安定、地下水流の変化など、新たな問題が生じてくることが予想される。地下構造物の適切な配置は重要な検討課題となろう。

地下空間は一度建設されると元に戻すことが不可能で、不可逆性が強い。更に機能が低下した場合の修復や改築も容易ではない。そこで本稿では、地下構造物の寿命について経済的、機能的、物理的の3つの側面から検討を行った。そして特に、この中の物理的寿命に含まれる地下空洞の長期的安定性について、過去に生じたいくつかの災害をもとに、今後地下開発を進める上での重要な留意点をあげた。この結果、長期的、総合的な地下利用計画の推進や、維持管理、将来の寿命を考慮した利用計画の必要性が指摘された。更に、多くの技術的克服がなされたとしても、地盤の移動や地下水系の変化を皆無とすることはできないことを加味すれば、それらが許容される値に収まるように、事前の予測および対策、その情報の伝達が必要であると言える。

これからの地下開発においては、地表での建設活動と地下のそれとは異なるという認識の改革がまず必要である。また、現在および将来を見据えての計画、維持管理、更には、それと関わりあう社会との連携を含めた新しい技術システムの構築がプロジェクトを成功させるための新しい課題と言える。

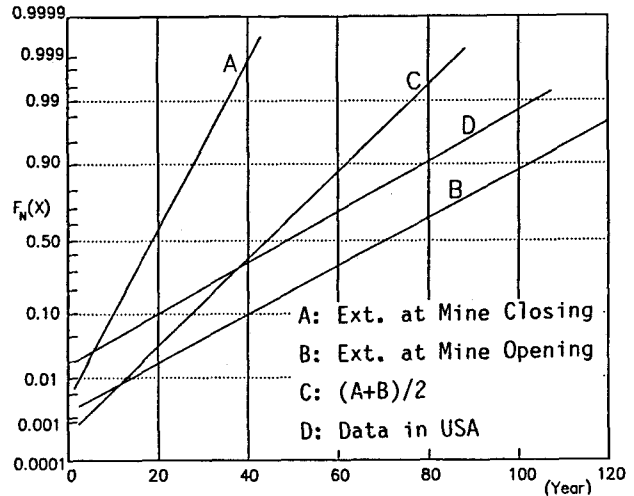


Fig.4. Time interval between extractions and cave-ins occurred in the northern Kyushu. Lines A, B and C are obtained under assumptions that coal was extracted at opening of mine, at closure of mine and the middle, respectively.

参考文献；1）江崎哲郎・木村 強・亀田伸裕：地盤沈下と環境システム（第2報），環境システム研究，Vol.17,180-185（1989）2）榎本 守：土木構造物の寿命とは何か，土木学会誌，Vol.71,No.8,7-9（1985）3）Lauffer,H. :Gebirgsklassifizierung fuer den Stollenbau,Geologie und Bauwesen,Vol.24,No.1,46-51（1958）4）Bieniawski,Z.T. :Rock mechanics design in mining and tunneling,A.A.Balkema,Rotterdam,97-135（1984）5）Bryan,S.A. ,J.G.Bryan and J.Fouche :Some problems of strata control and support in pillar workings,The Mining Engineer,Vol.123,238-257（1964）6）Dunrud,C.R. and B.B.Nevins :Miscellaneous investigations series,MAP 1-1298,U.S.Geological Survey（1981）