

(28) 地下空洞による地表陥没現象について

— 地盤沈下と環境システム (第2報) —

CAVE-IN CAUSED BY UNDERGROUND EXCAVATION

—ENVIRONMENTAL SYSTEMS FOR SUBSIDENCE ENGINEERING (2ND REPORT)

江崎哲郎 *

木村 強 *

亀田伸裕 **

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

ABSTRACT; Special attention has been recently attracted to large-scale underground excavation for the purpose of utilization of underground space in the metropolis or some storages. This excavation brings about many problems concerned with ground environments such as surface subsidences, cave-ins, ground water movements and so on. The present paper, first, describes the feature of the cave-ins which the authors have experienced in the field of coal mining for a long period. Unlike the surface subsidences, the cave-ins of cavities remaining at shallow depths (within 20 meters approximately below the surface) suddenly occur several decades after mining, and may cause unpredictable damage to habitants or surface structures. Next, considering that underground structures are markedly irreversible (unreproducible) ones compared with surface structures, the subjects which should be studied in underground development are proposed here; suitable arrangement of underground openings; planning of underground structures from a long-term viewpoint; and prediction of the ground movement and the flow mechanism of ground water and preventive measures against them.

KEYWORDS; subsidence, cave-in, underground utilization, ground environment, ground water flow

1. 緒言

第1報では、資源開発に関連した地盤沈下に関して、いくつかの事例をもとに、その実態および地盤環境という立場からみた問題点について整理した¹⁾。その結論として沈下による被害は、沈下そのものによるだけでなく採掘活動が地盤自体の特性を変化させるため、その影響が並行して発生することがあること、現状では顕在化していなくても外的な状況の変化に対応する際に阻害が生じるなど、地盤環境に対する採掘活動のインパクトが、多くの問題を引起す可能性が指摘された。

本研究では、地表近くの空洞が長期間経過した後、不安定となり、地表陥没を生じる現象をとりあげる。そして、ここで問題としている地盤環境上の立場から、主として今日までの事例をもとに再検討する。またこれらをもとにして、最近注目されている地下の開発利用に関して、地盤環境をそこなわない、適切な計画設計・施工・維持管理のあり方を考えてみることにする。

2. 地表陥没現象とその特徴

地表面下の浅い位置にある地下空洞は、その空洞がそれほど大きくない場合には、開削後崩落しないで無

*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
**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

支保の状態で自立する。この空洞が、風化作用などによる空洞天盤の支持力の低下、地下水位の変化、上載荷重の増加などにより長期間経過後に突然に崩落して、地表が崩落する現象を浅所陥没「cave-inまたはsinkhole」といい、一般の地盤沈下と区別される。一般に地盤沈下は、徐々に進行して、ある期間経過してから現象が認識さ

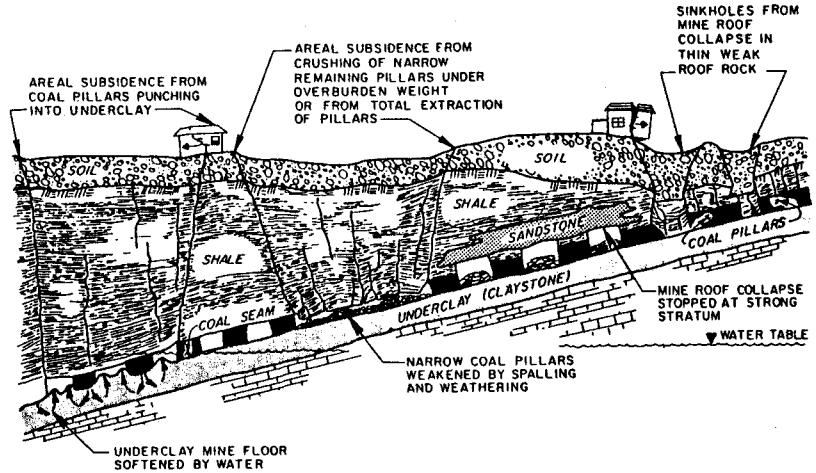


Fig.1 Modes of subsidence.²⁾

れることが多いが、浅所陥没現象は予兆もほとんどなく、ある日突然生じ、陥没も一瞬のうちに生じるので、被害を生じる区域は限られるが、死亡事故などの重大な災害となることもある。

浅所陥没はいろいろなケースで発生する。最も頻繁なのは石炭などの資源採掘に伴うものである。石炭採掘によるものは、北九州、宇部地域、亜炭によるものは、宮城、岐阜、大分県下などでみられる。海外では、アメリカ合衆国のアパラチア炭田、南アフリカのダイヤモンド鉱山などがよく知られている。石灰岩地域のドリーネの陥没も有名である。アメリカ合衆国では、石灰岩地帯にある約50の飛行場でこの陥没発生の危険性が指摘されている。露天掘石灰石鉱山では、掘下げ作業中に重機が空洞内に落下したこともある。また、大谷石採掘跡の崩落も記憶に新しい。土被り厚さの薄いトンネルの工事中の陥没事故もしばしば経験されるが、これも浅所陥没の範疇に入る。その他、温泉地帯の陥没、防空壕、立坑など古い地下空洞の陥没事故も多い。

これらの陥没現象を、模式的に示したのが Fig.1 である²⁾。これによれば、陥没現象は sinkhole と trough の2つのモードに分けられる。sinkhole は天盤が崩落して地表が陥没する現象で、地表と陥没孔の境界は明確で、陥没孔の深さが大きいとその直径は大きくなる。そして次第に侵食されて地表近くの径を増加せしめ逆漏斗状となる。ほとんどの sinkhole の地表の形状は円または楕円である。trough は sinkhole と同じく一種の陥没現象であるが、地表までは至らず盆状沈下を生じる。崩落は天盤のほか残柱の破壊やパンチングによっても生じる。残柱の強度は地下水の変動や風化に影響される。応力集中によって残柱が破壊すると、天盤のアーチ作用で応力再配分を生じて隣接の残柱の破壊へと進展する。パンチングは上盤または下盤が軟弱である場合に生

Table 1 Diameter of cave-ins occurred in the northern Kyushu.

Diameter (m)	<1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-10	>10
Number of incidents	1095	259	57	27	12	32	3

Table 2 Depth of cave-ins occurred in the northern Kyushu.

Depth (m)	<1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-10	>10
Number of incidents	916	284	72	37	15	25	4

Table 3 Overburden thickness of cave-ins in the northern Kyushu.

Overburden thickness (m)	<5	5-10	10-15	15-20	>20
Number of incidents	2	15	25	9	3

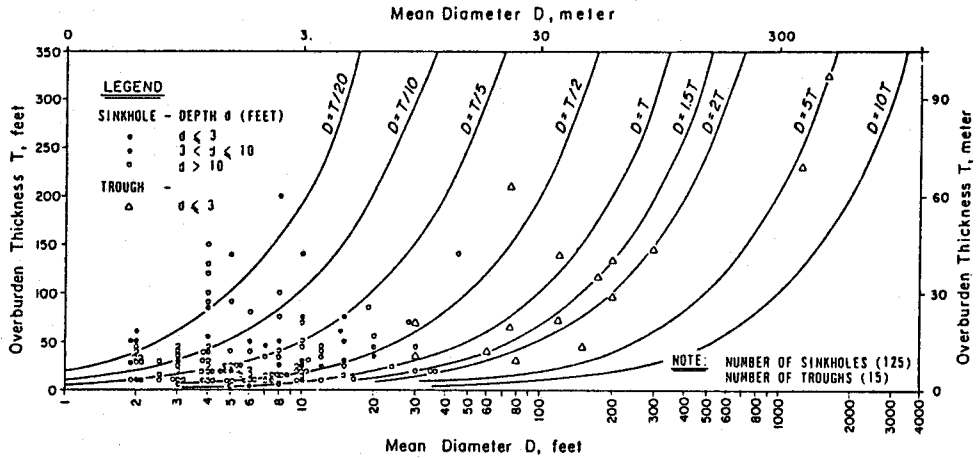


Fig.2 Relationship of diameter and depth of subsidence feature to overburden thickness in the U.S.A.²⁾

じる。troughの地表面沈下の形状はほとんど楕円であり、一般にその直径は15～150m程度である。

1974年から1985年までの12年間に北部九州地域で発生した陥没、孔徑別に示すとTable 1のようである。陥没孔の径が1m以下が全体の73%、2m以下で全体の91%、さらに3m以下では95%を占めており、陥没のほとんどが3m以下の小規模な陥没孔であることがわかる。しかし、5m以上の大規模な陥没も35件あることも無視できない。Table 2は陥没孔の深さと発生件数を示しており、これより3m以下の深さの陥没孔は全体の94%を占め、陥没孔の直径と同様、その大部分が3m以下の規模であることがわかる。5m以上のは、立坑や斜坑跡の陥没であることが多い。Table 3は、北部九州のある区域で発生した地表陥没の件数を、空洞深度別に示したものである。深度が10～15mのとき、全体の46%と最も多く、20m以浅での発生は94%に達する。この区域では残存空洞の寸法が最大で幅約4m、高さ約2mと比較的小さい。

Fig. 2は、アメリカ合衆国における陥没孔の直径Dと空洞深度Tの調査例を示している²⁾。この例では、発生件数はsinkholeがtroughの約8倍と多い。これによれば、陥没の直径は全体の80%以上が5mより小さいが、500m以上の直径のtroughも生じている。D/Tの値は70%以上が1以下で、多くが1/4～3/4である。sinkholeでは、空洞の深度は16mよりも浅い場合が多く、これより深くなると、troughが生じやすくなる。Piggott & Eynon³⁾は、空洞高さの3～5倍までの深度でsinkholeは生じ、最大でも10倍までであると指摘している。しかし、これらの関係は、断層や節理の存在によって異なってくる。

このような地表陥没に対して、その発生を助長させる外的要因として、前報告¹⁾でも述べたように、降雨、地震などが挙げられる。降雨の影響は、わが国では、梅雨および台風シーズンに陥没の発生が増加することで示することができる。合衆国でも、陥没の発生は豪雨の後に多いことが指摘されているが、Fig. 3のように3～8カ月前の降雨と関係するという報告もある²⁾。地下水の汲み上げも陥没の発生に大きな影響を与える。

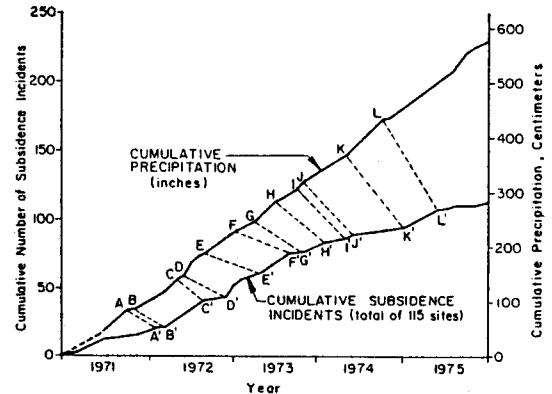


Fig.3 Relationship cumulative precipitation and sinkhole development in the U.S.A.²⁾

山口県宇部地区において、工事に伴う抜水により陥没が生じたのはこの例である（Photo. 1）。地下水の汲み上げは、降雨よりもその影響は大きい。陥没の発生に及ぼすこれら水の影響は、地盤内部の間隙水圧の上昇および地盤の単位体積重量の増加によって説明されている。

Fig. 4 は、1974年から1985年までの12年間に北部九州地域で発生した地表陥没の件数を年次別に示している。最近の5年間でも1年当たり100件程度が発生しているが、1980年の207件をピークに全体的には減少きみである。この1980年以降の減少傾向は、1960年代にほとんどの炭鉱が閉山し、その後30年が経過していることと関係していると考えられ、いずれはこれらの陥没も終息に向かうことが期待される。

以下、北部九州の産炭地域を例に、地下空洞の開削時からその空洞によって地表が陥没するまでの期間（経過年数）を統計的に検討する。このためには、まず陥没が生じた地点の採掘時期を知る必要があるが、実際には記録が不明なことがほとんどである。そこで、過去の陥没に関係した145の炭鉱について、資料をもとに、それぞれの開山時期および閉山時期の調査を行った。対象地域において、開山時期が最も早いのは1874年（明治7年）、最も遅いのは1969年（昭和44年）、また閉山時期が最も早いのは1952年（昭和27年）、最も遅いのは1976年（昭和51年）である。開山、閉山時期の調査の後、採掘時期として次の3通りを仮定した。（A）：炭鉱の開山時、（B）：炭鉱の開山時、（C）：炭鉱の開山時期と閉山時期の中間。

過去に発生した陥没について、それぞれの仮定で算出した経過年数を正規確率紙上に表すとFig. 5 のようである。横軸は陥没が発生するまでの経過年数、縦軸は累積確率である。採掘時期を（A）とした場合には、経過年数の平均 $\bar{x} = 19.1$ 年、標準偏差 $\sigma = 5.64$ 年で、経過年数は当然短い。これより採掘終了後25年で90%、約40年で99.99%の陥没が発生することがわかる。次に、採掘時期を（B）と仮定すると、 $\bar{x} = 37.6$ 年、 $\sigma = 26.5$ 年である。この場合には、陥没は70年経過後には90%の確率、100年後には99.5%で発生する。また、採掘時期



Photo.1 Cave-ins due to ground water drainage.

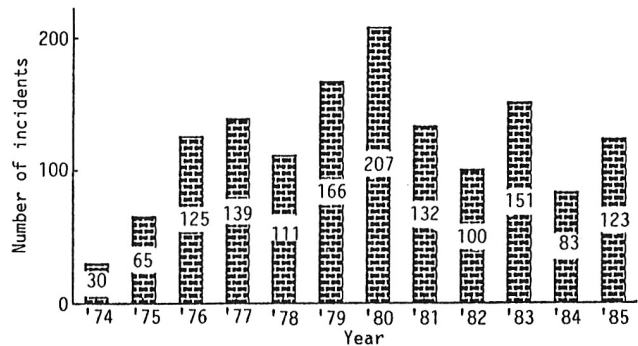


Fig.4 Number of cave-ins occurred from 1974 to 1985 in the northern Kyushu.

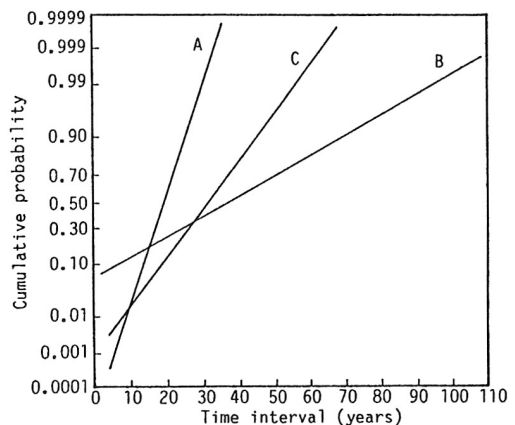


Fig.5 Time interval between extractions and cave-ins occurred in the northern Kyushu. Lines A, B and C are obtained under assumptions that coal was extracted at opening of mine, at closure of mine and the middle, respectively.

を(C)と仮定すると、 $x = 31.3$ 年、 $\sigma = 12.8$ 年となり、45年経過後で90%の発生を、70年経過後で99.99%の発生をみることになる。

Fig. 6は、アメリカ合衆国ペンシルバニア州の炭鉱についての経過年数と累積確率の関係²⁾を、正規確率紙上に表したものである。sinkhole、troughともに、経過年数と累積確率の関係は直線とはなっていない。しかし、Burnsは同じデータについて見直しを行い、sinkholeとtroughを併せて破線で示すような直線関係を得ている⁴⁾。この関係より、採掘後52年で50%が発生していることがわかる。Burnsが得たペンシルバニア州での経過年数をFig. 5の北部九州地域と比べると、平均値は異なるが、発生の傾向は(B)と(C)の中間にあたる。これは、開山当初では、浅部が優先的に採掘されたという事情によるものであろう。いずれにしろ、陥没が発生するまでには、かなり長期間にわたることがいえる。記録が明確なデータとしては英国の118年、コロラド州の73年がある。国内においても1905年の旧鉱業法制定以前と判断される事象が時々見受けられる。

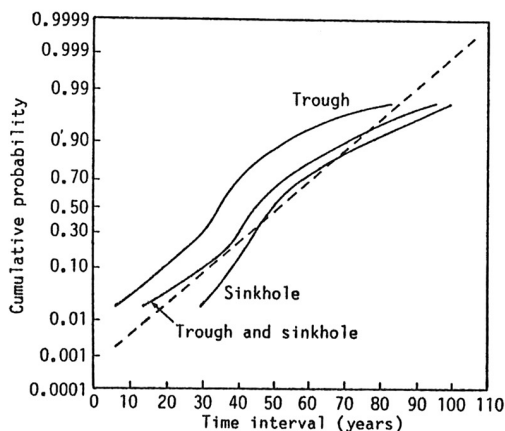


Fig.6 Time interval between extractions and sinkholes and troughs occurred in the U.S.A. Three solid lines and one broken line are drawn after Bruhn et al.²⁾ and Burns,⁴⁾ respectively.

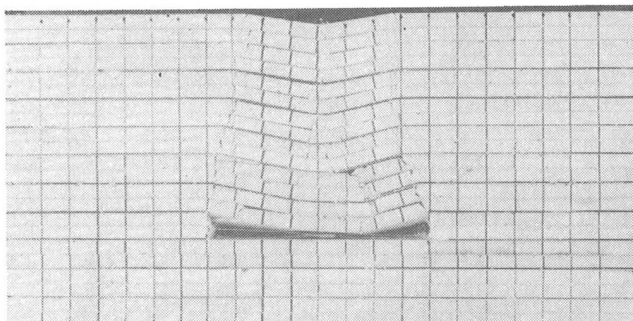


Photo.2 Typical experimental result of cave-in in the layered ground using the base friction apparatus.⁵⁾

3. 空洞の破壊・崩落過程

地表陥没は、空洞天盤の破壊・崩落過程が地表にまで進行して発生する現象なので、空洞天盤の挙動を明らかにすることが重要となる。このために、底面摩擦模型装置を開発し、地盤の力学的性質、空洞の形状および深度の違いによる空洞天盤の崩壊を検討してきた⁵⁾。均質地盤での崩落形状は、空洞中央部で崩落高さが最も大きく、空洞の端が支持台となるようなアーチ状を呈する。そのとき、空洞深度が浅い場合には、このアーチは地表に達し、自立できないで陥没が生じる。これに対し、層状地盤（石炭層を含む地盤は堆積過程を経て形成されており、層状地盤と考えてよい）では、まず空洞直接天盤の梁が破壊して、それが上層へ移行していく。Photo. 2は、底面摩擦模型装置による層状地盤の天盤崩落の例である。層状地盤の場合には、天盤各層の梁の曲げによって破壊するので、均質地盤よりも崩落高さが大きくなる。しかし、空洞深度が大きくなると、層状地盤でもアーチ形状の崩落となり、陥没は生じにくくなる。

4. 地下の開発利用と地盤環境

最近、首都圏における大深度地下利用をはじめ石油備蓄など大規模な地下開発が大きな注目を浴びている。これは地価の高騰や立地難などの影響もあるが、地下の有する数多くの特徴を見直して、地上と比較して、その優れた機能を利用しようとするものである。期待される地下の特徴には、経済性、安全性、環境や景観を阻害しない、恒温性、地震の影響が少ない、危険なものや邪魔になるものに対する隔離性などがある。以前は、地下空間は閉鎖的であり、建設コストが高く、防災上の問題があるとされてきた。これらの疑問が水

解すれば、用途次第では、逆に長所となり危険性や制約の多い地上よりも有利となることも多い。

しかしながら一方では、地下の開発経験が少なく、地盤沈下や浅所陥没などの地盤の挙動、地下水の流動など未知のことが多い。また、需要上の制約や立地上の制約から軟弱な地盤や地盤沈下の被害をうけやすい場所での立地を余儀なくされている。これらの問題点に対して大深度地下開発では ①深部の地盤の特性や賦存状況を正確に調査把握する地下探査技術の開発 ②水中掘削、シールドなどの設計・施工技术および環境対策技術の開発 ③生活空間、活動空間としての防災技術システムの開発などが進められる予定である⁶⁾。

また、地盤環境上の問題として工事中の揚水、構造物内への地下水漏水、構造物による地下水流動阻害などによって、地盤沈下や地下水利用障害など地盤環境に対する影響が検討され始めている⁷⁾。

このような個々の技術開発は不可欠であり、これらの技術開発がなされなければ実現できないであろう。ここでは先に述べた資源開発にともなう地盤環境への影響を経験し、対処してきた立場から、更に次の事項の検討の必要性を提言したい。すなわち、地下の構造物が、地表と比べて非常に不可逆性の強いものであって、特に開発が集中すれば厳しい地盤環境上の問題を引き起す可能性があるという考えである。

(A) 地下空間の適切な配置 極めて土被りが薄い場合を除いて、地下空間が開削されると1次地圧は空洞周辺の地盤に再分配される。周辺地盤への圧力の過度の集中は、資源採取の場合と同様な空洞の不安定、沈下を生じる可能性が高い。従って、立体的に近接する各空間は、地表に上載される地表構造物を含めて、相互に影響を及ぼすが、その影響が許容されるように、また、空間が錯綜して、それらの間の地盤の破壊や不安定をもたらさないように、掘削順序などを含めて計画的に適切な配置を行うべきである。

(B) 長期的視野に立った計画 地下空間は一度建設されると元に戻すことは不可能で、不可逆性の強い空間である。またその安定も非常に長い期間を考えねばならない。これは、従来の土木構造物の寿命の概念を越えるものである。また、将来放棄された場合には、周辺構造物の機能、地下水系および将来の建設活動に大きな影響を及ぼすかも知れない。

(C) 事前の予測および対策 事前に、地盤や地下水の挙動に対して十分な予測技術と情報を持ち、適切な被害の予防措置を行うことが肝要である。後からの対策は一般に多大の負担を強いられるのみならず、技術的にも難しいことが多い。また住民、関係者に対して沈下などの不安感を起させないような、技術に裏付けられた説得力を持った情報の提供が大切である。情報の不足が、理不尽な被害意識を生み出す例は、地盤沈下に対して特に多いようである。

参考文献

- 1) 江崎哲郎・木村 強・西田 正：地盤沈下と環境システム（第1報），環境システム研究，Vol.16，118-123（1988）
- 2) Bruhn,R.W., Mangnuson,M.O. and Gray,R.E.: Survey of ground surface conditions affecting structural response to subsidence, ASCE Spring Convention, Pittsburgh, ASCE Preprint 3293, 26-55（1978）
- 3) Piggott,R.J. and Eynon,P.: Ground movements arising from the presence of shallow abandoned mine workings, Proc. 1st Large Ground Movements and Structures, Gardiff, 749-780（1978）
- 4) Burns,K.: Prediction of delayed subsidence, Proc. Workshops on Surface Subsidence due to Underground Mining, Morgantown, 220-224（1981）
- 5) Nishida,T., Esaki,T. and Kameda,N.: A development of the base friction technique and its application to subsidence engineering, Proc. Int. Symp. Engineering in Complex Rock Formations, Beijing, 386-392（1986）
- 6) 土木学会編集委員会：地下空間利用に関する各種活動，土木学会誌，Vol.74，No.2，65-66（1989）
- 7) 地下開発地盤環境管理検討会：昭和63年度地下開発地盤環境管理調査報告書（1989）