

(19) 地盤沈下と環境システム(第1報)

ENVIRONMENTAL SYSTEMS FOR SUBSIDENCE ENGINEERING (1ST REPORT)

江崎哲郎*

木村 強*

西田 正*

Tetsuro ESAKI*, Tsuyoshi KIMURA*, Tadashi NISHIDA*

ABSTRACT; Extraction of mineral and energy resources from underground causes visible damages, which result from not only surface subsidence already being treated well but also the change of ground water flow, the cave-in of cavities remaining at shallow depths and many other things. In addition the land disturbed by extracting reduces its own economical values and injures some ground environments; the land tends to be flooded, construction of buildings on the land requires special considerations and residents on the land always feel restless under the dangerous situations. The problem of restoring the disturbed lands is difficult because of including various social factors and thus this should be considered as an environmental system. This paper describes the actual state of damages caused by extracting resources and the influence factors giving rise to the environmental impacts, and also presents some points should be discussed in the future.

KEYWORDS; subsidence, damage criteria, damage classification, land disturbance, resource extraction.

1. はじめに

資源の採掘活動は、石炭、金属鉱物などの固体の採掘から、天然ガス、石油などの気体や液体の採取に至るまで、近代産業社会の発達に伴う地下資源エネルギーの需要の増加とともに、地球上の各地で展開され、今なお拡大を続けている。ほとんどの資源は地下から掘り出され、これが現代および未来の人類社会の活動に欠くべからざる源泉となっている以上、今後とも継続し増加する以外に道はない。例えば、年間30億tに達する石炭の採掘は、その採掘に付随したずりの量や地盤の沈下率を考慮すれば、毎年約20億^m³の地表の凹みを生じていることになる。他の資源の採掘においても類似した地盤の沈下を生じているので、採掘活動による沈下は実に膨大で、年々地球上の地盤環境に影響を及ぼしている。近い将来における資源の枯渇が人類の大きな課題であるが、枯渇に至るまで掘り起こされる可能性のある地盤の環境保全も同程度に重要な課題であろう。人類にとって資源の確保の重要性は言うまでもなく、資源なしでは1日たりとも生活はできない。この資源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、地盤沈下の問題も、単なる沈下の制御、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資源確保と調和のとれた地盤環境として考えねばならない。

筆者らは、これまで30年以上にわたって、主として資源の採掘による地盤沈下をテーマとして、その沈下現象の把握、予測、制御等の技術的検討を行ってきた。また、その一方で、実際の被害に対してその処理、復旧、対策工事にもかかわってきたが、これらの相互の関連は複雑で評価や対処の方法が極めて難しく、現に種々の社会問題を生じている。本研究では、この地盤沈下を環境システムの立場から再検討することとし、その体系化をめざすことを目的とする。本報ではまず、地盤沈下の現状および問題点の整理、集約を試みることにする。

* 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

2. 採掘による地盤沈下現象とその被害および被害防止対策の概説¹⁻⁵⁾

採掘による地盤沈下現象は、古くから研究が行われてきた。その理論はほぼ完成しており、沈下の予測計算はかなりの精度で可能である。Fig. 1 に沈下の垂直断面図を示す。ある深さに賦存する層が採掘されると、図のような沈下トラフを生じて、採掘端より限界角 γ の範囲で囲まれた領域が、沈下を生じる。その地表の物件に及ぼす影響については5つの要素を考えるのが一般的である。それらは沈下、傾斜、湾曲、水平移動、伸縮ひずみであり、各々地表に特異な影響を及ぼす。この沈下現象は瞬時に生じるのではなく、ゆっくりとした採掘領域の進展に伴い、例えば長壁式採掘では平面図上で幅約100m で切羽は1日に数mずつ進行するなど、徐々に沈下領域が拡大していく。さらに、この沈下現象は時間依存性を持っており、採掘終了後も数ヶ月～数年間沈下が進行する。従って、採掘より長期間経過後に被害が出てくるというのが通例である。採掘された層の厚さに対する最大沈下量 S_{max} の割合、すなわち沈下率は75～90% 程度であり、採掘領域がある程度広いと、地下採掘跡の空間は上下盤接近して、地表はかなり沈下することになる。各々の要素による被害現象を以下に示す。

(A)沈下によるもの： 均等沈下であれば構造物に直接の被害は生じない。しかし大きな範囲を考えると、ライフライン等は大きな弧を描いて伸び、接合部に被害が生じる。また、地表物件が元来低地にある場合には、浸水、排水不良を生じ、田面等は湿田化する。

(B)傾斜によるもの： 構造物は、それ自体の傾斜のため構造的な応力変化を生じ、木造構造物では建具の開閉が困難になり、傾斜の程度によっては破壊を生じる。また、水路、田面等にも被害を生じる。

(C)湾曲によるもの： 構造物基礎が地盤と同じ動きをして湾曲する場合と、地盤と分離して梁をわたしたようになる場合があるが、いずれも曲げ応力、せん断応力を生じ、骨組が変形して破壊の一因となる。

(D)水平移動によるもの： 構造物の各点の移動量、移動方向が異なる場合には、構造物に被害を与える。特に構造物が直線的に保持される必要のあるものは、大きな被害を受ける。

(E)伸縮ひずみによるもの： せん断応力、引張応力、圧縮応力を生ぜしめ、構造物の亀裂、裂開の原因となる。最大伸びひずみ付近では直接に地表面に亀裂を発生させ、貯水池等の漏水を生じる。また、海底採掘では、海底の地盤の伸びひずみが、坑内出水の原因となることもある。

一方、これらの被害現象の発生を未然に防止したり、万一発生しても軽微に抑えるために多くの地盤制御に関する検討がなされてきた。

地表の構造物には、構造的な問題からだけでなく、その機能上また人間的な尺度からくる居住性などからも、許容されるひずみや傾斜の大きさが存在する。木造家屋などでは、この後者の面からの許容値の方がむしろ小さい場合が多いようである。戸、障子では、傾斜が2～2.5mm/mで枠との間にすき間が生じ、建付不良となる。床面傾斜も5mm/mで感知される。しっくい壁や土壁などは、1mm/mでも柱との間にすき間が生じるであろう。コンクリートは、引張に対して極めて弱く、0.2～0.5mm/mの引張で、微小亀裂が発生するとされている。精密機械類の許容変形量は、その種類によって異なるであろうが、上記の建築物の許容値のオーダーよりは、さらに精度が高いものと思われる。

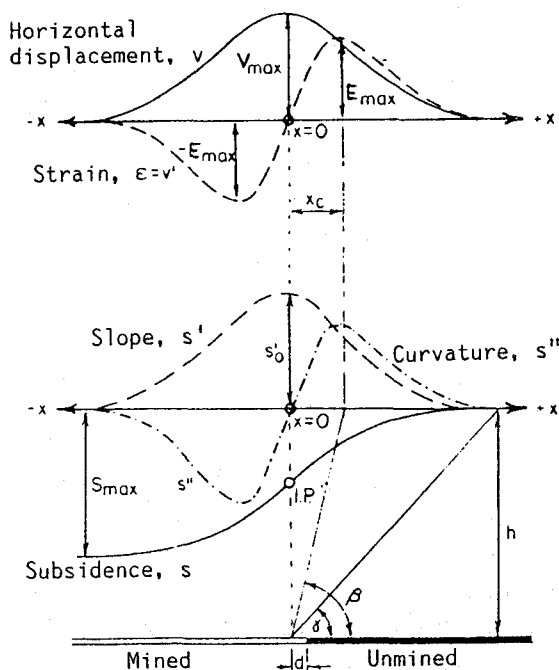


Fig.1 Extraction area and surface movements.

しかし、機械自体は設置時に修正や調整を行なうので、地盤変動は建築上のオーグ程度でも許容できる場合も多いであろう。

許容変形量は各国まちまちである。Table 1 に代表的な例⁶⁾を示す。微小あるいは感じられない程度の損傷に対する地盤の変形は許されるが、構造物、地盤の種類や“有感”といわれる損傷の程度の定義などにより、許容変形量は異なる。Table 2 は、ドネツ地区の例⁷⁾で、構造物の重要度や敏感さによって保護の種類を定めている。安全係数は、これに炭層の厚さを乗ずることによって許容値を越えない安全な採掘深度が求められる。分類Ⅰはクレーン基礎、発電所など、Ⅱは5階建以上、Ⅵは平屋の建物に適用される。

地下採掘を行なう以上、沈下を全く0にすることはできない。しかし、事前に対策を行なえば、被害を防止または最小限に止めることができる。従来より行なわれてきた対策法には、採掘技術上の対策と構造物に対して行なう対策の2通りがある。

1) 採掘に関する対策

残柱式採掘、採掘跡の充てん、調和採掘法、保護柱、急速な採掘、好ましくない採掘形状の回避

2) 構造物に関する対策

抵抗原理に基づく剛性の高い構造、回避原理に基づく可撓性の構造、応力の低減（小さな平面寸法、構造物の分割、地盤と構造物の付着の低減、トレンチ溝）

3. 地盤沈下による被害の問題点

前章では、見掛け上最も顕著な、沈下トラフの大きさや形状に起因する被害について述べた。一般的には、沈下量が多いほど被害が多くなる。しかし一方では、かなりの沈下を生じても被害を生じない場合があり、その逆の場合もしばしば経験される。すなわち、第1の問題点は、被害の許容限度と実際の被害は必ずしも同じ尺度ではないことである。

第2の問題は、沈下トラフに起因する被害以外にも、それに関連した多くの被害現象が生じていることである。これらには、沈下現象に付随した被害、採掘後あるいは閉山後発生して、その後継続する被害、および、当初より予測ができないような特殊な被害がある。以下、これらについて概説する。

3.1 脱水圧密沈下

採掘の際には、坑内の湧水の排除を行なう。この場合、周辺の地下水位を低下させることになり、上部に圧密を生じる第四紀層があれば、圧密沈下が同時に進行する。これは採掘による沈下と重畳するので区別がつきにくい。軟弱地盤地帯ではむしろ採掘によるより大きな被害となる。

Table 1 Maximum allowable structural deformations in major coal-producing countries.

Country	Compressive Strain (mm/m)	Tensile Strain (mm/m)	Slope (mm/m)	Radius of Curvature (km)	Remark
China		2	3	5	Pipeline
France	1-2	0.5			
Germany	0.6	0.6	1-2		
	0.5	0.5			Reinforced concrete foundation Frame Waste impoundment
Japan	1	1			
	5	5			
Poland	1.5	1.5	2.5	20	
Donets Coalfield (USSR)	2	2	4	20	
Karaganda Coalfield (USSR)	4	4	6	3	
United Kingdom	1	(30-ft-long building)			

Table 2 Categories of protection, Donets district, USSR. α is the angle of dip of the seam. The coefficient of safety is the ratio of safe depth to seam thickness.

Category	Allowable Tilt, $\times 10^{-3}$	Allowable Radius of Curvature (m)	Allowable Strain, $\times 10^{-3}$	Coefficient of Safety	
				$\alpha \leq 45^\circ$	$\alpha > 45^\circ$
I	4.0	20,000	2.0	400	500
II	4.5	18,000	2.5	350	400
III	5.0	12,000	3.5	250	300
IV	8.0	5,500	6.0	150	200
V	10.0	3,000	7.5	100	150
VI	25.0	1,000	14.0	50	75

3. 2 浅所陥没現象

浅い位置での採掘を行なう場合、残柱式採掘を採用することが一般である。また、古い時代の狸掘り採炭跡や浅部の坑道は、採掘終了後も空洞が残存したままになる。これが風化作用などによる空洞の支持力の劣化、地下水位の移動、上載荷重の増加、地震力などにより、長期間経過した後に突然崩落する現象を浅所陥没[cave in]という。これは、日本および米国のように過去に比較的浅い採掘を行ったところでひんぱんに見られる。この被害例をPhoto.1および2に示す^{8,9)}。

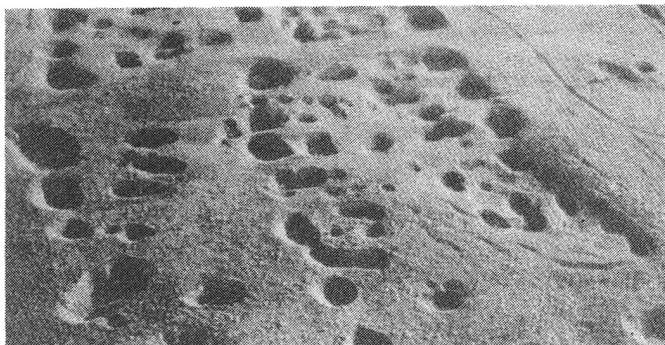


Photo.1 Aerial view of sinkholes, troughs and cracks above an abandoned underground coal mine in Wyoming.

この種の沈下は浅所陥没[sinkhole]と浅所陥没類似現象[trough]の2つのモードに分けられる。sinkholeは空洞が崩落し地表が陥没する現象で、逆漏斗状の円または楕円の陥没孔を生じる。troughは地表に陥没孔を生じない浅く広い盆状沈下である。しかし、広範囲に被害が及ぶ。この現象はある日、突然に生じ、陥没も一瞬のうちにおきるので、予測が難しく、死亡事故となったこともある。西ベンシルバニア地方では採掘後10~100年後に生じ、半分以上は50年以上経過してから発生している(Fig.2)¹⁰⁾。英国では118年後に生じた例もある。筑豊地方では全ての鉱山が採掘を中止して20年近く経過するが、今なお年間50~60件の発生をみている。この現象は発生の予測が極めて難しい。



Photo.2 Home severely damaged by sinkhole in Pennsylvania.

3. 3 古洞水の湧出

夾炭層は本来難透水帯であるが、採掘跡およびその周辺の擾乱帯は、透水性が大となり、閉山による復水後は巨大な地下水の貯留層となっている。水頭勾配は地形に沿っており、大局的には勾配の方向に非常にゆっくりした速度で移動して平衡を保っている。しかしながら、比較的低地においては、地表標高以上の水位を持った被圧水となり、露頭付近、坑口、断層などを經由して地表に湧水する。

この古洞水は、古洞に供給される原水のも多様性と、周辺岩盤の風化度、硫化鉄の含有度などにより水質組成は多様であるが、一般に Fe^{2+} を多く含むとともに強酸性であり、溶解性塩類を多く含む等の特性を

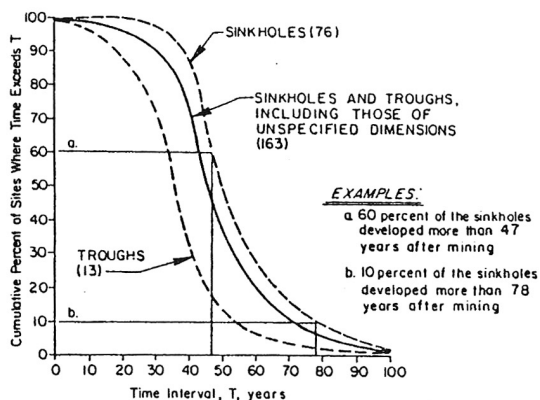


Fig.2 Minimum time interval between mining and subsidence.

有し、単に湿潤化等の被害を与えるのみならず、作物等への影響を及ぼす。

3. 4 堆積場

採掘活動は、鉱石の採取とともに坑道掘進や選鉱後の廃石など多くの土砂、岩石を地表に残すことになる。石炭の場合ボタ山とよばれ、古くはピラミッド状に高く積上げられていた。また、廃石はたい積場に捨てられる。これらのたい積物の斜面の崩壊や土砂の流出などが各地で発生し、災害を引き起こすことがしばしばみられる。



Photo.3 Subsidence due to deep multiple seam extractions in north China.

4. 顕在化していない、地盤環境としての問題点

直接に生じる被害以外でも、すなわち顕在化しないまでも、採掘活動の影響が何らかの形で残存しており、外的刺激に対して敏感となったり、多大の影響を蒙るなど、地盤環境として考えるときに問題となる影響がある。これらには、災害に対して敏感となること、新設構造物の基礎地盤としての問題、被害を生じるかも知れないという心理的負担の増加などの問題がある。

4. 1 災害に対する抵抗性

その地域が低地、平坦地である場合、沈下現象のために用水路、排水路の能力に支障をきたし、高潮、洪水などの異常時に、被害が通常よりも大きくなる。例えば西ドイツルール地方では、最大沈下量は20mにも及んでいるので下流側の河川に自然流下することができず、ポンプによる常時排水を行ない内水排除を行なっている¹¹⁾。その費用が年間約120億円と膨大であることのみならず、少し降雨量が多いと低地は常時浸水するという状況にある。この現象は、平野の狭い日本では、極く狭い範囲に限られるが、中国等では、顕在化しつつある。Photo.3は、その一例で沈下部分が大きくなって放置されている。

浅所陥没の発生する可能性のある地域では、豪雨、長雨、地表に加わる荷重、地下水の汲上げ、地震などの外的刺激によって陥没の発生が増加する¹²⁾。Fig.3は、筑豊地方における月別の降雨量と発生件数の関連性を示す。Fig.4は東北地方における陥没の発生件数を示す。毎年20件程度の発生件数であったが、1978年6月12日に発生した宮城県沖地震(マグニチュード7.4、現場付近での最大垂直加速度約100gal)の直後に多発し、219件もの発生をみた。

4. 2 新設構造物に及ぼす影響

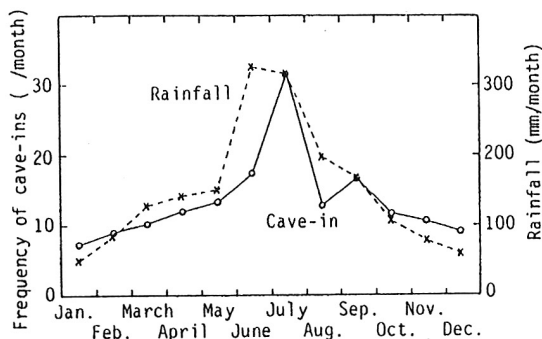


Fig.3 Average monthly frequency distributions of cave-ins and rainfall in the Chikuhō district between 1974 and 1987.

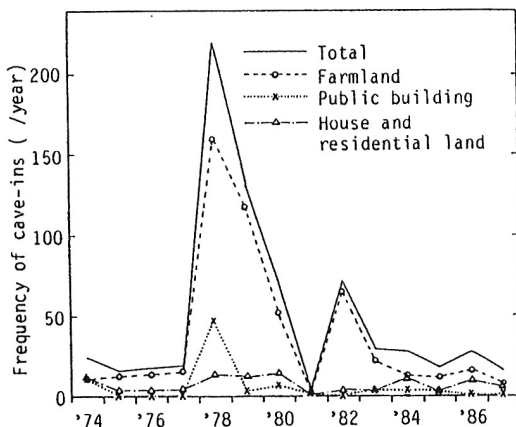


Fig.4 Frequency distribution of cave-ins in the Tohoku district between 1974 and 1987.

採掘活動が行なわれた地域では、鉄道、道路、水路、ダムなどの公共施設や大きな構造物を建設する際に慎重な検討が必要である。元来このような地盤は構造物の良好な支持層となりうる堅固な岩盤である。しかしながら、採掘跡の空洞の残存により新たな沈下や陥没が発生する可能性がある。従って採掘跡の充填、採掘跡の下盤に支持させる杭基礎、特殊なはり構造、スラブ構造が用いられる。ダムにおいては漏水の原因となることがあり、水路では、シールド工事において採掘跡の存在を事前に知らなかったために切羽の異常出水を起こして水没した例がある。このような場合、一般に調査および対策工事には多大の負担が必要で、上部工よりも基礎工の費用が高いという例も多い。

4. 3 物理的影響以外の影響

顕在化していない影響の1つとして、地表物件の価値の低下や経済成長の低下などの経済的影響や、社会不安などコミュニティ感情への阻害などの精神的影響が考えられる。1979年に制定された米国のPublic Law95-87は、このような問題も被害現象として具体的にとりあげている。

5. まとめ

資源開発に関連した地盤沈下の実態と地盤環境という立場からみた問題点について、多くの事例をもとに整理してみた。その結論として、沈下とその被害は物理的な量のみで関連づけられるものではないこと、沈下の被害は沈下そのものによるだけでなく、採掘活動は地盤そのものの特性を変化させるため、それによる影響が並行して発生することがあること、現状では顕在化した被害はなくても、外的な状況の変化に対応する際に阻害を生じるなど、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き起す可能性があること、が指摘される。現在の採掘活動は必ずしも、これらの地盤環境の全般を考慮して行なわれていない。採掘計画の中でこれらのインパクトを考慮して前もって対策を行なうべきであろう。この他に法制、賠償や復旧の問題点があるが、今後漸次とりあげていくことにする。沈下現象、被害の発生、その賠償、復旧という流れは、当事者間で個別に検討されてきたのが実情であり、これらの環境システムの確立は極めて緊急を要する課題であり、これによって資源開発と環境との調和をめざしたい。幸い従来から多くの事例、経験があり、これらを整理検討しながら研究を進めていく考えである。

参考文献

- 1) 西田 正: 九州大学生産科学研究所報告, 32 (1962)
- 2) Brauner G.: US Bureau of Mines, IC 8571 (1973)
- 3) NCB(現在BC): Subsidence Engineers Handbook, 2nd ed., London (1975)
- 4) 福岡通産局: 石炭鉱害概論 (1975)
- 5) Kratzsch H.: Bergschadenkunde, Springer Verlag, Berlin (1974)
- 6) Peng S.S.: Coal Mine Ground Control, 2nd ed., John Wiley & Sons, N.Y (1986)
- 7) VNIMI: Ugletekhizdat, Moscow (1958)
- 8) National Research Council: Ground Failure, 2-2 (1985)
- 9) 江崎哲郎: 日本鉱業会誌, 102, 1181, 431-434 (1986)
- 10) Gray R.E. & R.W. Bruhn: State of the Art of Ground Control in Longwall Mining and Mining Subsidence, SME, AIME, 253-271 (1982)
- 11) 資源エネルギー庁: 欧州石炭鉱害調査報告書(西ドイツ編) (1979)
- 12) 西田 正 他: Int. Sym. on Modern Mining Technology, Taian (1988)(in Print)