

GISを用いた地下空洞の陥没とその地表に及ぼす影響の評価

Cave-In Phenomenon of Underground Cavity and Its Influence Evaluation by Using GIS

三谷 泰浩*, 江崎 哲郎**, 安藤 潤***, 藤原 盛光***

Yasuhiro MITANI, Tetsuro ESAKI, Jun ANDO, Morimitsu FUJIWARA

In this study, the prediction method of cave-in occurrence and its influence on surface is proposed by using Geographic Information System (GIS). Firstly, after study area is divided into the mesh, the risk of cave-in occurrence is evaluated from safety factor for the stability of pillar taking account of extraction ratio. Secondly, the influence damage on surface is assessed by the amount of reclamation cost depending on each land use and kinds of surface structure. Finally, by integrating all these evaluations, the total influence of cave-in is assessed. As a result, the prediction of cave-in occurrence is correct with the actual history of cave-in phenomenon. It is found that the proposed prediction method is an effective way to examine the cave-in occurrence risk distribution.

Key words : GIS, Cave-in Phenomenon, Stability of Cavity, Hazard Map, Risk Assessment

1. はじめに

地下の掘削や圧密などによってある範囲の地盤が徐々に移動し、その結果、地表が沈下する一般的な地表沈下現象とは異なり、地表陥没現象は、予兆が殆ど見られずに突発的に不連続な落差や陥没孔を生じる現象である。被りの浅いトンネル、採掘跡などの浅い地下空洞では、空洞を支持する残柱や天盤が崩壊し、これが地表に達して陥没を生じることがしばしばある。これは掘削直後に発生することもあるが、空洞形成後長期間経過した後に突然発生する。このようなことから、その発生予測が難しく、事前の対応がとりにくいことなどから地表陥没は厄介な問題とされる。

今日、地下空間の開発が次々と進められており、その建設技術も着実に向上している。しかし、開発の現状を見ると、例えば、トンネルなどは他の構造物に比べて卓越した供用実績があり、耐用期間が長く、保存性が良いという認識がある。その一方で利便性、経済性から地下の比較的浅い位置に広大な空間が開発されており、洞が洞を重ねる例も増加している。そのような開発による地表陥没現象はしばしば発生し、社会問題となることも多い。全国的な発生数は明らかでないが、例えば、石炭採掘に起因する陥没の発生数は1980年代で年間100件以上、最近はやや減少しているが今なお20~30件の発生が継続している¹⁾。また、地表陥没は事件・事故と表現されることが多く、安全に関する社会的関心事となっている。カルスト台地、トン

キーワード：地理情報システム(GIS)、浅所陥没現象、空洞安定、危険度マップ、危機管理

* 正会員 博(工)九州大学大学院工学研究院 環境システム科学研究センター 助教授

** 正会員 工博 九州大学大学院工学研究院 環境システム科学研究センター 教授

***正会員 川崎地質株式会社

ネル工事，防空壕，資源開発跡地などの陥没現象は，これまでとは異なった長期的視点からの維持管理問題を提起し，技術的のみならず社会的不安を払拭する予防・防止対策が求められる。今後，社会資本の老朽化，改築などが進み，記録・記憶が失われていく中で，その全貌が見えない地下空間に関する対処の機会の増加が考えられる。健全な地下空間の利用を継続するには，このような特有の問題への取り組みの手法，可能性について明確にしておくことは極めて重要と考える。

地表陥没問題を解決するために，以下のように段階的に現象を捉えていくことが必要と考えられる。第一に，地表陥没とは何か，どのようなメカニズムか，いわゆる「現象の把握」である。過去に発生した陥没の履歴や原因を究明し，陥没の発生機構を解明することである。これまで地表陥没現象を解明する目的で，その発生機構について多くの研究が行われている²⁾。次の段階は，陥没問題が発生する可能性のある場所のうち，どこで，いつどんな時に発生するのか，「予知・予測」することである。陥没発生の位置と時間を正確に予測することが可能であれば，確実な防止対策が行える。しかし，地表陥没は突発的に発生し，地下空洞の状況などは不明瞭であることが多いため，その予知・予測は非常に困難であり，具体的な予測手法の確立までには至っていないのが現状である。第三の段階は，陥没の発生に対する「未然防止対策」である。地表では様々な社会経済活動が営まれており，地下空間を利用する立場から何らかの防止策，対策の必要がある。これには，陥没発生の可能性のある地域を回避したり，地下空洞を埋め戻すなどの直接的な対策などがまず考えられる。しかし，地表陥没の発生する位置や規模の特定が難しい場合には，対象地域全域にわたってその対策を考えなければならず，このような防止策は現実的でなく，経済的にも不利である。最後に実際に陥没が発生し，被害が生じてしまった場合には，被害箇所の「復旧」が必要となる。これまで様々な復旧工，被害に対する補償が実施されており，具体的な対処方法についてはその事例も多く存在する。

以上のように，「現象の把握」については，様々な基礎的な研究がなされているが，地下空間の位置が明確でなく，かつ複雑な形状で存在する実際の現場においては，地表のどこでいつ陥没が発生し，いかなる影響が生じるかという危険度を明確にかつ適切に判断する「予知・予測」技術は未開発段階にある。したがって，今日まで陥没問題のほとんどが明確な「未然防止対策」ができずに被害の発生した箇所の「復旧」にとどまっている。しかし，今後は，地下空間の有効な利用や安全，地圏環境の保全といった観点から「予知・予測」，「未然防止対策」に主眼を置き，地表陥没の発生する位置や規模を予測し，陥没防止のための対策を適切に行うことが望まれる。

本研究では，以上の目的から，ある地区での地表陥没現象の問題解決のための具体的な検討例について報告する。ここでは，陥没発生に影響を及ぼす様々な要素を，GIS（Geographic Information System：地理情報システム）を用いて分析・解析・統合し，陥没発生の予測，さらには地表への影響を定量的に評価するための実用的な評価手法の提案を行うこととする。

2. 対象地区

対象とする地域は古くから建材としての採石の地下採掘が行われている。地質的には火山岩及び緑色溶結凝灰岩で構成され，岩層及び層序関係から数層に分類されている。層序ごとに物性が若干異なるが，概ね単位体積重量 20kN/m^3 ，一軸圧縮強度 900kN/m^2 程度である。採掘が行われている約 $3\text{km} \times 6\text{km}$ の範囲内には，現在も稼働している採石場もあるが，休廃止のものも含め百数十カ所の地下採石場が地表下 $10\text{m} \sim 40\text{m}$ という浅い位置に集中しており，そのほとんどは残柱式採掘である。これによる掘削跡空洞は空間的に複雑に分布している。この地区の採石層は 10 度前後南西に傾斜し，また細長く分布していることから，空洞の深さも南西部が深く，北部は浅い傾向にある。採掘が非常に大規模に行われたところも多く，採掘を終了した空洞が放置されており，それら放置された空洞直上に地表陥没が発生している。この地域では，地表陥没が昭和

20 年代より発生しており、戦後記録されているものでも、33 地点で 37 件発生している。陥没の規模は様々であり、最近でも約 3～4 年おきに陥没が確認されている。

本研究では、この地域内のうち過去に陥没履歴を有する代表的地区を 2 箇所（以下、A 地区、B 地区）抽出し、それぞれの採掘区域（約 600×700m）を対象区域として検討を行う。両地区とも、古くから採掘が行われてきた地域であり、現在ではそのほとんどが廃坑である。採掘は両地区とも同じ層を中心に行われており、B 地区は A 地区よりも南に位置する。

この 2 つの対象地区における空洞の位置情報を GIS に入力し、空洞に関する幾何学的情報、分布形態などについて定量的な分析を行った（表－1）。具体的には 2 地区の空洞について、空洞の平面形状をベクトルデータで作成し、採掘空洞の面積、残柱の断面積、残柱の本数、残柱の平均断面積、残柱の平均幅等を求め、採掘状況について定量的に評価した。得られた結果から、採掘空洞の特徴を示すと以下ようになる。

- (a) 採掘空洞の面積は平面的に A 地区で約 8 ha、B 地区で約 10ha、と広範に採掘されており、空洞の割合、すなわち空洞率は、A 地区では 65%、B 地区では 80%と非常に大きい。
- (b) 平均残柱幅は概ね 8 m～12m の幅であり、残柱は比較的一定の間隔で配置されている。
- (c) 残柱の形は原則的に正方形あるいは矩形で、中には変則的な形のものも存在する。残柱の高さは様々であるが、残柱の幅に対する高さの比の平均値は 0.95 であり、残柱は立方体のような形状が多い。しかし、中にはその値が 3～4 と比較的大きいものも存在する。

表－1 各対象区域の空間分析結果

地区	掘削面積(m ²)	全残柱面積(m ²)	空洞率(%)	残柱数	平均残柱面積(m ²)	平均残柱幅(m)
A 地区	81694	16112	80	167	96	9.8
B 地区	104479	36853	65	254	145	12.1
全体	186173	52965	72	421	125	11.2

3. GIS の適用性

GIS は位置や空間的關係を示す地理データ、それに付随する数値や文字で表された属性データを総合的に解析及び管理するツールであり、データの取得、記憶、更新、分析、統合、解析、表示など様々な機能を有する。地表陥没の発生、それによる影響の予測等を定量的に評価するためには、様々な情報を統合して検討する必要がある。今回、対象区域に対して、地質、土地利用、採掘状況等といった詳細な各種情報を入手して、GIS を用いてこれらを統合することで地表と空洞の空間的相関性を定量的に把握する。さらに、地盤力学的な考え方を基本とした数値解析結果や統計処理の結果を属性情報として GIS に導入して解析することで、問題解決の支援を行う。また、GIS の主題図であるレイヤはそれぞれが 1 枚の電子地図として管理されるので、別の用途に使用する際も手早く取り扱え、修正も容易であり、今後の維持管理においても有効となると考えられる。以上の観点から、本研究に GIS を適用することは有効であると考えた。

4. 地表陥没発生安全率の評価

4. 1 地表陥没発生安全率の算出

まず地表陥没発生の可能性について検討を行う。前節で述べたように両地区とも残存している地下空洞は残柱式採掘によるものである。この地下空間では、残柱破壊、天盤の破壊、そして立坑崩落の 3 種類の異なる

る形態の空洞破壊が生じる可能性がある。立坑崩落は、地表につながる開口部が、廃坑後、埋戻しが不十分であったり、管理不良などから開口部周辺の破壊を伴うものである。立坑位置と陥没発生箇所の重なる位置は明らかに立坑崩壊と考えられる。また、残柱部の破壊については、残柱の間の空洞の天盤崩落と残柱破壊の2種類が考えられるが、陥没発生箇所では、ほとんどの場合、残柱破壊を伴っていること、天盤崩落による陥没の発生は空洞の幅にもよるが30m以深ではその発生が極めて少なくなり、50m以深ではほとんど発生しないことから、対象地区での陥没のほとんどで基本的に残柱および採掘端部境界部分、いわゆる残壁部の破壊が発生していると判断できる。

残柱等の支持部の破壊は基本的に圧縮破壊によるもので、その負荷は土被り荷重によるもので、この荷重が支持部分の強度を超える時に破壊が生じる。このような考え方から、支持部に作用する土被り応力に対する支持部の一軸圧縮強度との比を残柱等の支持部破壊の安全率とし、これを空洞の崩壊を評価する指標として定義する。この地区の空洞は、基本的には矩形断面の残柱が分布する構造をとるが、残柱の大きさや形は不規則である。支持部に作用する鉛直応力は、支持部が分担する土被り荷重に依存する。つまり、支持部はもちろんのこと空洞部分上方の土被り荷重を隣接する支持部で分担することとなる。そのため、空洞の採掘の割合を定量的に表現するために、次式に示す採掘率 X_i を定義する。

$$X_i = \left(\frac{A_i}{A_i + B_i} \right) \times 100 \quad (1)$$

ここで、 A_i ：採掘部の面積(m^2)、 B_i ：支持部の面積(m^2)

残柱部の強度と採掘率に応じて分担する土被り荷重による応力との比を次式で表し、これを陥没発生安全率として評価する。この際、残柱部の強度については(3)式のように残柱の高さと幅を考慮する³⁾。

$$F = \frac{\sigma_c'}{\gamma \cdot z \cdot \left(\frac{100}{100 - X_i} \right)} \quad (2)$$

ここで、 γ ：地区の単位重量(kN/m^3)、 z ：土被り厚さ(m)、 σ_c' ：残柱の高さ h と幅 d を考慮した圧縮強度(kN/m^2)で以下の式で表される。

$$\sigma_c' = 1.425 \cdot \sigma_c / \sqrt{((h+1)/d)} \quad (3)$$

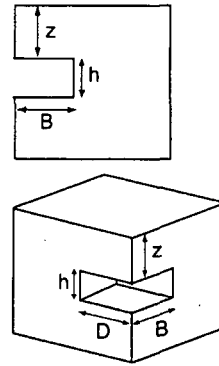
ここで、 σ_c ：一軸圧縮強度(kN/m^2)である。

4. 2 側壁部分の応力集中度と荷重分担範囲に関する検討

空洞形成以前は深さに比例した土被りによる応力が作用しているが、空洞形成によって応力分布が変化し、土被り荷重は支持部である残柱のみならず、採掘の外縁境界部は壁面（以下、側壁と称する）によっても支持されることになる。特に問題となるのは側壁部のどの範囲までが空洞上部の荷重を分担するかであり、前述した陥没発生安全率を用いて評価するためには側壁部の支持境界を特定する必要がある。そこで、図-1に示すように空洞高さ $h=10\text{m}$ 一定とし、空洞の土被り厚 z 、空洞幅 $2B$ 、奥行 D をパラメータとした2次元および3次元の数値解析（解析コード：FLACを使用）を行い、空洞の位置、形状や規模の違いによる土被り圧の影響範囲の変化について検討を行う。なお、モデル上部は地表面とし、モデルの側方境界は空洞幅、奥行の約5倍、下部境界は空洞高さの約3倍とした。

解析結果から空洞直上部分の鉛直応力の分布形状は、基本的に空洞側壁部分（採掘端部境界の空洞隅角部）において鉛直応力が集中し、この部分を頂点として空洞側壁から離れるに従って徐々に初期地山応力の値に漸近していく。この初期地山応力に一致する地点までが掘削による鉛直応力の再配分の影響範囲、いわゆる荷重分担範囲と考える。パラメータ解析の結果を整理すると以下の通りである。

$\begin{matrix} z(m) \\ 2B(m) \end{matrix}$	5	7	8	10	15	18	20	25	30
10				○			○		
20	A	○	○	B	A	○	○	○	○
30				○			○		
40				○			○		
50				○			○		
60				○			○		



注) 表中の丸印部分は2次元モデル, 表中Aは2次元モデルによる同様の検討と3次元モデルによる側壁形状も考慮した検討, 表中Bは2次元モデル及び3次元モデルにより奥行を5,7,10,12,15mに変化させた検討と側壁形状を考慮した検討を行う。なお, 空白部分ケースについては解析を行わない。

図-1 解析ケースおよび数値解析モデル

(a) 土被り厚 z , 空洞高さ h 一定で空洞幅 $2B$ をパラメータとした2次元解析結果

空洞幅 B を5m~30mの範囲内で変化させた結果, 壁面直上の応力集中度(鉛直応力/初期地山応力)は, $B=10m$ を超えるとほぼ一定となり, その集中度は約2倍である。また応力影響範囲は, 空洞壁面から約35mとなる。

(b) 空洞高さ h , 空洞幅 $2B$ 一定で土被り厚 z をパラメータとした2次元解析結果

空洞幅 $2B=20, 30, 40m$ の場合について, それぞれ土被り厚 z を10m~50mと変化させた結果, 土被りが大きくなるに従いその応力集中度は減少するが, $z=40m$ でほぼ一定(集中度約1.4)となる。応力分布曲線の形は空洞幅によらずほぼ等しく, 応力影響範囲は $z=30m$ を超えるとほぼ35m~40mとなり, $z=40m$ で影響範囲は約45mとなる。

(c) 土被り厚 z , 空洞高さ h , 空洞幅 $2B$ 一定で奥行 D をパラメータとした3次元解析結果

奥行 D を5m~15mの範囲内で変化させた結果, $D=10m$ を超えると応力集中度はほぼ一定(集中度約3.0)となる。また, 応力影響範囲は奥行の影響をほとんど受けず約10mとなった。

(d) 側壁の形状を変えた3次元解析結果

空洞の3次元的な形状効果を考慮するために, 側壁の空洞形状を凸形と凹形および平坦な側壁に分け, 空洞形状の違いによる応力分布の相違を検討する。採掘率で評価すると平坦な側壁は50%の採掘であり, 凸形は75%, 凹形は25%の採掘と分類できる。応力集中度は, 採掘率にほぼ比例し凸形, 平坦な側壁, 凹形の順に小さくなり, 応力影響範囲も同様の傾向を示し, 空洞幅, 土被り厚さによらず比率にしておよそ3:2:1となる。

以上の結果から側壁の荷重分担範囲は, 空洞幅 $2B$, 奥行 D , 土被り厚さ z が, ある範囲を超えるとほぼ一定となり, 空洞の形状にも影響される。このパラメータ解析の結果をもとに土被り荷重の分担範囲の算定を行う。解析結果から各パラメータは $2B=20m$, $z=40m$, $D=10m$ を超えると, 支持部の荷重分担範囲は, ほぼ一定の値(側壁から45m)となる。これを基本影響範囲 R として, 求める影響範囲 R' を次式で求める。

$$R' = (N_{2B} \times N_z \times N_D \times N_S) R \quad (4)$$

ここで, R' : 荷重分担範囲(m), N_{2B} : 空洞幅係数, N_z : 土被り係数, N_D : 奥行係数, N_S : 側壁係数とし, 解析結果からこれらの係数値を表-2に示すよう設定する。

以上の結果から側壁部の荷重分担範囲を設定し評価すべき解析領域を図-2のように設定した。なお, 図

中の Cave_in は過去に発生した陥没履歴を表す。

さらに、荷重分担範囲圏内では鉛直方向の応力分布は、前述したように採掘の境界をなす側壁部を最大値とした2次曲線的な応力分布曲線を描く。そのため、載荷する鉛直荷重は側壁部分の2次曲線型の鉛直荷重分布を等価な等分布荷重として作用させることとした。

4. 3 GIS のメッシュサイズの検討

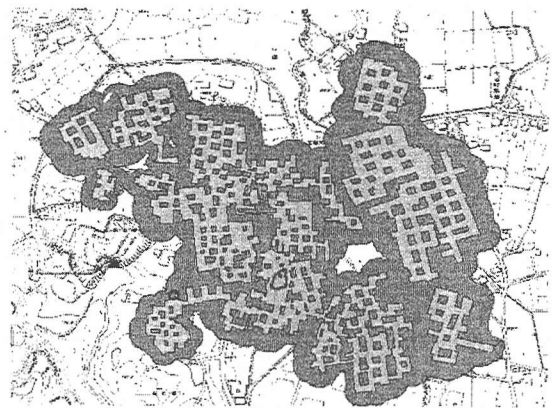
GIS を用いて不規則で複雑な形状をした空洞を適切に把握し、陥没発生の可能性を適切に表現するために解析領域をメッシュに分割して、採掘率を求める。その際、(1)式で表される採掘率はメッシュの大きさによって変化する。そのため空洞分布の特徴をとらえ、適切なメッシュサイズを求める。

メッシュサイズによる影響を求めるために、5, 10, 12, 18, 20, 25mのメッシュサイズで分割し、採掘率を比較した。まず、平均採掘率について、ベクトルデータによる値と各メッシュサイズで求めた値を比較するとメッシュサイズが大きくなると平均採掘率は減少する傾向になる。これは、メッシュサイズを大きくすると、解析領域以外の部分を多く包含すること、地下空洞を適切に表現できないためと考えられる。さらに、図-3に各メッシュサイズ毎の採掘率の頻度分布を示す。メッシュサイズが15m以下となると採掘率が0%および100%を示すものが多くなり、領域における空洞の分布を的確に表現できなくなる。次に、メッシュ位置の任意性を確認するために各メッシュの位置をメッシュサイズの1/2だけx,y方向に移動させたときの採掘率の頻度分布状況の変化を求めた。その結果、メッシュサイズ25m以上では移動による分布の変化が顕著に現れたことから、メッシュサイズの位置の恣意性のない最大のメッシュサイズは20mとなった。

以上の結果に加えて、表-1による残柱の平均幅や当地域の残柱式採掘の基準値なども考慮して、解析のためのメッシュサイズは20mが最も客観性があり、適当であると考えられる。さらに、採掘跡調査の精度とメッシュ位置の任意性を高めるために、決定した20mメッシュで求めた値を、10mに細分化したメッシュに

表-2 荷重分担影響係数

	$2B < 20m$	$20m \leq 2B$			
N_{2B}	0.80	1.00			
	$z < 10m$	$10m \leq z < 20m$	$20m \leq z < 30m$	$30m \leq z < 40m$	$40m \leq z$
N_z	0.24	0.50	0.73	0.89	1.00
	$D < 10m$	$10m \leq D$			
N_D	0.80	1.00			
	凸形	平坦形	凹形		
N_S	0.50	1.00	1.50		



(a) A 地区



(b) B 地区

図-2 荷重分担範囲

格納する。同様に分割の基準を x 方向, y 方向, xy 方向にそれぞれ $1/2$ 移動したメッシュに対しても採掘率を求めて格納する。これらを平均してその $10m$ メッシュ毎に採掘率を決定した。

4. 4 陥没発生安全率の算出

対象領域を規則的なメッシュに分割し, 各メッシュ毎の採掘率と土盛り厚, 残柱強度を算出し, 陥没発生安全率を導く。図-4にGISを用いた解析プロセスを示す。このプロセスに沿って必要なレイヤを作成する。分割したメッシュ毎に地盤標高と空洞天盤標高のレイヤから土盛り厚のレイヤを, メッシュ図と空洞支持部分分布のレイヤから採掘率のレイヤを, 空洞支持部分分布と地層のレイヤから残柱強度のレイヤを導出する。さら

にこれらをオーバーレイ解析し, 陥没発生安全率のレイヤを求める。最終的に求めた陥没発生安全率のレイヤを図-5に示す。その結果, 以下のことが明らかとなった。

- 土盛りのレイヤから, 空洞深度の分布が定量的に示された。A地区の空洞はB地区より比較的浅いことがわかる。

- 採掘率のレイヤから, 採掘率の

平均値はA地区で48.9%, B地区で44.8%と, 50%程度の値となるが, 採掘率が75%以上の部分が集中した箇所や, 全体的に低い採掘率の箇所など, 採掘の分布にばらつきがある。

- 両地区ともに90%を超える採掘率の箇所が, 過去に発生した陥没箇所付近に点在している。
- 陥没発生安全率が1.0を下回る箇所は, 解析領域全体に対してA地区で0.6%(約0.1ha), B地区で1.9%である。また, 安全率が1.5以下の地域は, A地区で2.2%, B地区で9.7%, 安全率が2以下の地区が, それぞれ12.5%, 24.3%であることから, 陥没発生の危険性は局所的に存在する。
- 陥没発生安全率の平均はA地区で5.49, B地区で2.99である。

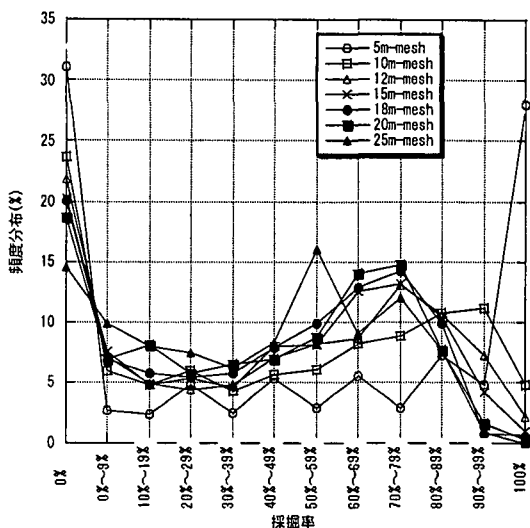


図-3 メッシュサイズによる採掘率分布

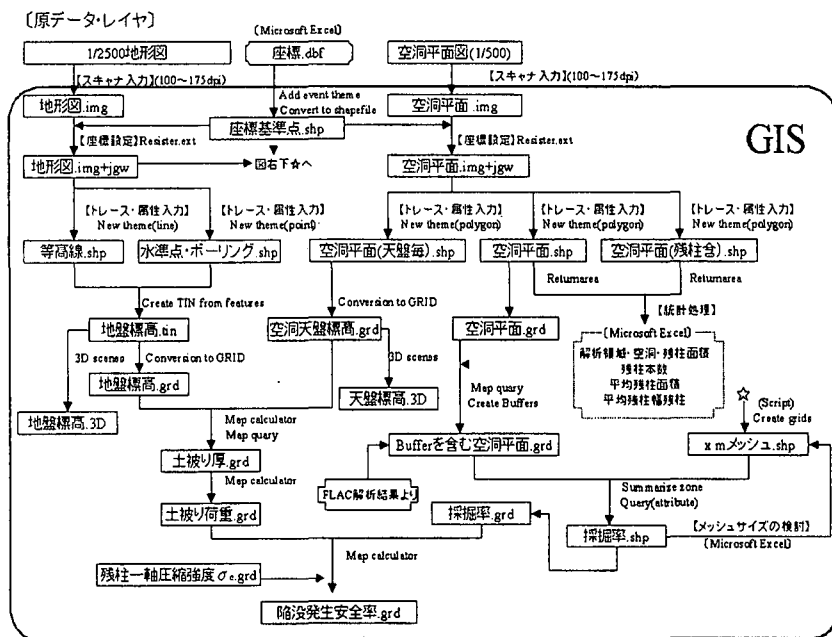
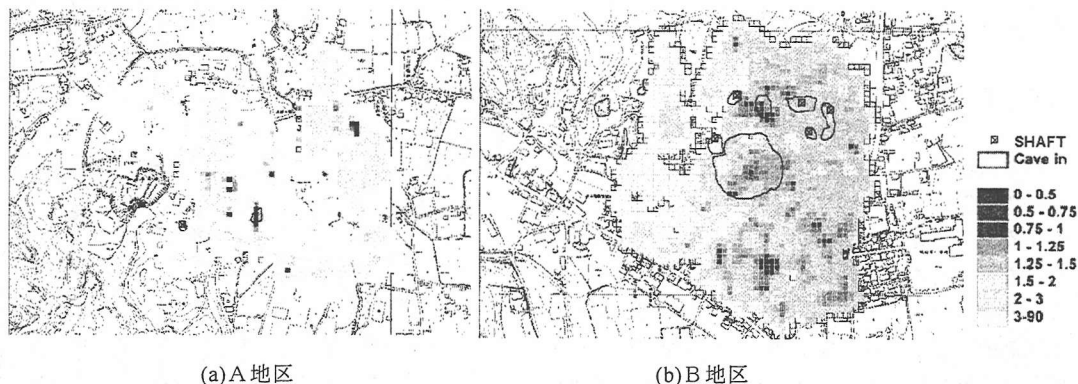


図-4 GISによる陥没発生安全率の算出手順

- 立坑崩落による陥没発生箇所を除くと、過去の陥没発生箇所では両地区とも陥没発生安全率が小さい。ただし、陥没発生安全率が小さくても陥没には至っていない箇所も存在する。このような箇所は今後陥没発生の可能性が高いと予測される。



図－5 陥没発生安全率

5. 陥没発生による地表への影響評価

5. 1 陥没による地表への影響の評価

地表陥没現象は、その発生が局所的であるため、陥没が発生する位置の地表物件への影響がどうか、すなわち被影響度を把握しておくことが肝要である。地表陥没はその地表の土地利用への効用を阻害し、様々な被害を生じる。田畑では水田の枯渇や作付け土壌の流出などによる生産額減少、建物用地においては構造物の損壊や事業所の営業停止損失などの被害が考えられる。これらの被害を被害金額として定量化し、土地利用別の被害指標値として評価することを試みる。

被害指標値として地表陥没問題に対する明確な被害算定法は確立されていない。そこで、その被害額を算定するために、鉱害被害復旧にかかわる費用の過去の統計データ⁴⁾を参考に被害額を算定する。被害復旧は、発生した被害が起こる直前の状態に戻すという原型復旧の考え方に基づく。地表陥没の被害復旧は、陥没孔を埋め戻す、ふさぐ、空洞を充填するといったことにより行われる。また、建物家屋は、被害の度合いに応じた修繕、復旧が行われる。これらの原型復旧にかかる価格を土地建物被害額として表－3に示す。

陥没による土地建物被害額は、この被害復旧額に陥没面積を乗じて次式から求められる。

$$DI = \sum_A (DIV)_i \quad (5)$$

ここで、 DI ：土地建物被害額(円)、 A ：陥没面積(m^2)、 DIV ：被害指標値(円/ m^2)である。

表－3 被害復旧額

	復旧額 (千円)	数量	単位面積当たり復旧額 (千円/ m^2)
農地等	11,762,367	119.57 ha	9.84
家屋等	19,249,180	1077 戸	17,872.96
道路・河川等	2,033,491	9904 m	205.32
公共施設	416,578	4753 m^2	87.65

GIS を用いた土地建物被害額の算出プロセスを図-6 に示す。まず、地表の土地利用を求める。土地利用データとして土地利用現況 DM(1999)、国土地理院発行の 1/2500 地形図からデータを取得し、土地利用のレイヤを作成する。対象地区において土地利用を田畑(果樹園も含む)、宅地・用地、荒地、山林、史跡・公園、河川、道路に分類する。さらに、土地利用の状況をより詳細に把握するために、建物家屋のレイヤを作成し、建物区分を一般建物・家屋(住宅)、商業施設、公共施設、農業施設、工業(工場・石材関係)施設に分類する。対象地区に対して式(5)を適用し、陥没規模を 10m 四方と想定して、10m メッシュ毎の陥没による土地建物被害額のレイヤを図-7 に示す。

その結果、道路や、建物家屋が密集している箇所の土地建物被害額は高く、逆に農地、山林、荒地は低くなることが定量的に示された。

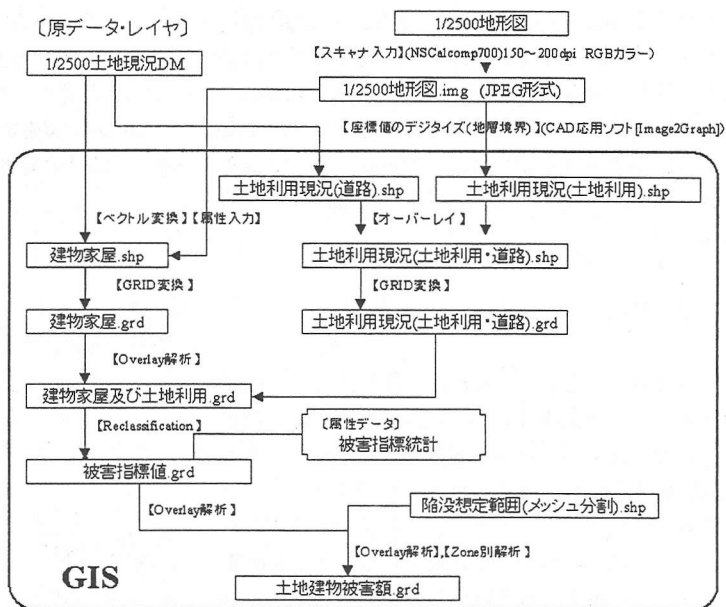


図-6 GISによる土地建物被害額の算出手順

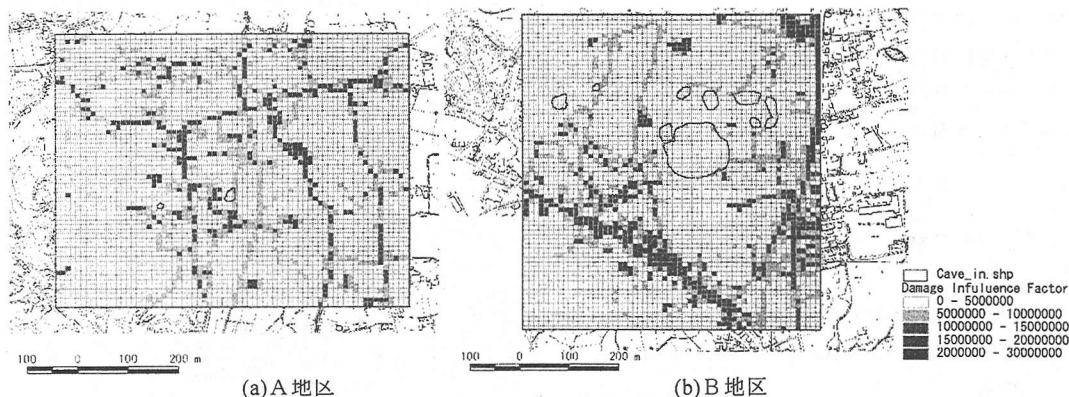


図-7 陥没による土地建物被害額

5. 2 総合的な陥没被害影響度の評価

これまでに得られた地表陥没発生安全率 F 、土地建物被害額 DI をそれぞれの平均値で正規化し、2つのレイヤを統合し、陥没被害影響度として陥没発生による地表への影響を総合的に評価する。GISによりオーバーレイした結果を図-8 に示す。

その結果、A地区では実際の陥没箇所や陥没発生安全率の高い箇所で陥没被害影響度は高いこと、B地区

では住宅、道路が密集している地域でその値は高くなることがわかった。このように個別の評価からは得られなかった情報として、陥没発生が地表にどの位影響を及ぼすかを定量化することができた。さらに実際に陥没が発生しても被害が小さい、あるいは逆に陥没発生危険度が低くても発生した時の被害が甚大となり、防災対策が望まれる位置の特定が可能となり、陥没の未然防止の対策を講じる際に有効な指標となる。このような評価手法は陥没発生に対する安全性や影響度を予測し、陥没の対策の優先度、工法などの選定の意思決定を実用的に支援できると考えられる。

6. 結論

陥没発生の安全率とそれに起因した地表に及ぼす影響（土地建物被害額）を評価する定量的手法として、GISの空間情報管理解析と地盤工学的手法を組み合わせた評価プロセスを構築し、これを具体的な現場に適用した。その結果、陥没発生安全率の空間分布を初めて定量的に示し、過去の陥没履歴との整合が得られた。また、陥没発生安全率と土地建物被害額を統合した陥没被害影響度の分布を定量的に求めて地表陥没問題の発生予測、防止対策のための実用的な評価手法を提案することができた。また、本研究は、最近注目されているGIS技術を用いた地表陥没による影響評価の1つの技術的手法としての可能性および有効性を提示したものである。今後は信頼性の高い地下空間利用の発展のためにもこのような具体的な問題解決のためのIT技術を使った合理的手法の開発が不可欠であると考ええる。

7. 参考文献

- 1) 江崎哲郎：浅所陥没等についてのまとめ，資源エネルギー庁石炭鉱害審議会鉱害部会資料，1999。
- 2) 例えば，西田正他：浅所陥没発生機構に関する研究，日本鉱業会誌，第88巻，1018号，pp.11-16，1972。
- 3) Vutukuri, V. S. : Handbook on Mechanical Properties of Rocks, Vol.1, Trans Tech Publications, 1974。
- 4) 石炭鉱害事業団編：鉱害復旧統計要覧，1995。

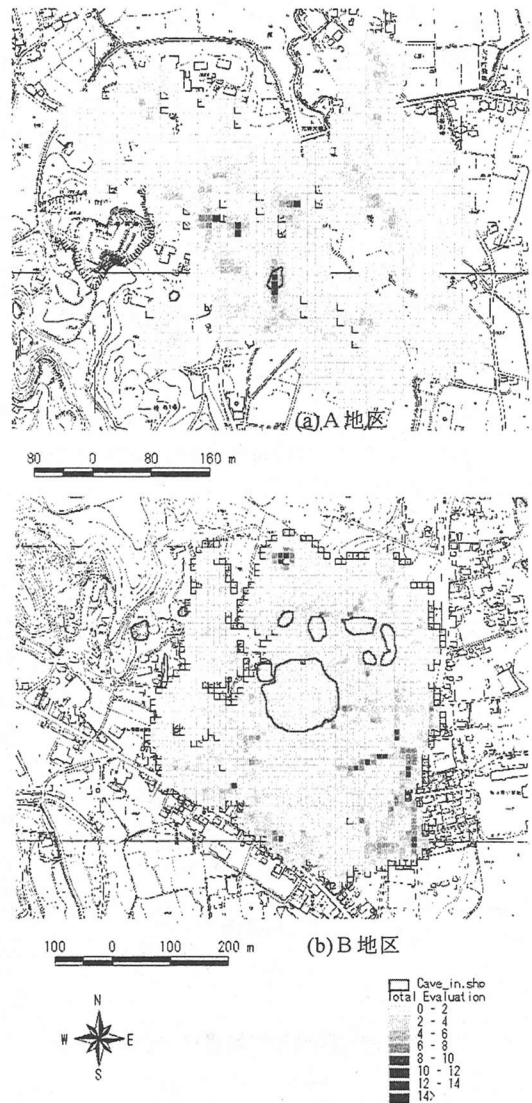


図-8 陥没被害影響度