

第2章 地下空洞による地表面の陥没・沈下と既存の対策技術

2.1 地下空洞による陥没と沈下

2.1.1 わが国の地下空洞の現状

わが国には石炭・亜炭鉱山廃坑，金属鉱山廃坑，非金属鉱山廃坑，地下採石場跡および地下壕のような人工的な地下空洞や，鍾乳洞，火山洞などの自然形成の地下空洞，さらには廃棄トンネルや廃棄埋設管などの地中構造物の空間が至る所に多数放置されており，掘削による土被り厚の減少，盛土による載荷荷重の増加および地下水低下などのような地表の改変あるいは空洞・空間の劣化や老朽化，さらに地震のような外力の影響が原因で，地表面や地上施設に陥没および沈下・傾斜のような災害が頻繁に発生している．このような災害は施設の被害のみならず，ときに人命に重大な危害を与える大惨事に発展する危険性をはらんでいる．また，空洞が形成された直後に陥没や沈下を生じるばかりではなく，長年月経過した後にも発生し，さらに発生前の兆候もほとんどなく予知はきわめて難しい．

(1) 各種地下空洞

上記地下空洞のうち，石炭・亜炭鉱山，金属鉱山および非金属鉱山は，国の基幹産業を支える鉱物資源の源泉として，かつては通商産業省，現在では経済産業省の所管産業として指導および保護され，特に明治維新以来，大いに国の近代化に貢献してきた．しかし，1960年代以降，鉱業は衰退の一途をたどることになった．なかでも石炭鉱山や金属鉱山は，政府の経済政策の結果，休廃止される鉱山が多数発生することとなった．この背景には，特に石炭産業の場合，石油へのエネルギー源の依存割合の転換と海外からの安い石炭の輸入増により，石炭産業は日本経済にとっても有益な産業ではなくなったことが挙げられる．このような政策のもとに，かつてのわが国の近代化を支えた鉱業は徐々に縮小され，あとには十分な手当てのなされていない廃坑が残された．表-2.1に国内の鉱種別の鉱山数を示す．

この他に，地下採石場や特殊地下壕などもそれぞれ当時の産業や軍事を目的に採掘された空洞が現代において遺物となって残されている．

以下，国内でみられる各種地下空洞の現状について述べる．

表-2.1 鉱種別鉱山数¹⁾

2004年12月末現在

鉱 種	稼行鉱山数	休廃止鉱山数
石炭・亜炭	16	51
金 属	68	322
非金属	188	148

(鉱山保安統計年報より)

(注) 露天採掘等の鉱山を含む．

(2) 石炭・亜炭鉱山廃坑

石炭は無煙炭，瀝青炭，亜瀝青炭および亜炭（褐炭）に分類される．このうち無煙炭・瀝青炭・亜瀝青炭は埋蔵量も多く，鉱山も大規模なものが多い．一方，亜炭は最も炭化度の低い鉱物で，年代が若く比較的地表から浅いところに分布しているため，戦前・戦中・戦後から昭和 40 年代にかけて，無煙炭・瀝青炭ほど規模は大きくないが，各地で盛んに採掘された．石炭の炭種と物理的性質を表-2.2 に示す．

表-2.2 石炭の炭種と物理的性質²⁾

	亜 炭	瀝 青 炭	無 煙 炭
真 比 重	0.8～1.5	1.2～1.7	1.5～1.8
見 かけ の 比 重	0.55～0.75	0.75～0.80	——
着 火 点 (℃)	250～300	300～400	400～450
発熱量 (Cal/純炭kg)	5,500～7,500	7,500～8,800	8,200～8,500

石炭層での石炭の採掘は，炭壁に沿って切削機械を移動させながら全面的に採掘する長壁式採炭方式という方法で主に行われていた．一方，亜炭鉱山の採掘は，主に残柱式または柱房式という手作業の採掘方式で行われていた．残柱式は一定間隔に柱状に亜炭を残しながら坑道から採掘空間を広げていく方法である．これに対して，柱房式は坑道からいくつも枝状に採掘室（柱房）を作っていく方法である．残柱式と柱房式のいずれの方法で採掘するかは，主として炭層の厚さによって使い分けられていた．採掘炭層の厚さが 1.5m 程度以上あれば残柱式が，1.5m 程度以下であれば柱房式が採用されることが多かった．また，一部では長壁方式(石炭採掘とは異なる区画の長い採掘方式)，坑道方式(たぬき掘り)，露天方式でも採掘されていた³⁾．

図-2.1 に亜炭廃坑の採掘方式の概念図を示す．

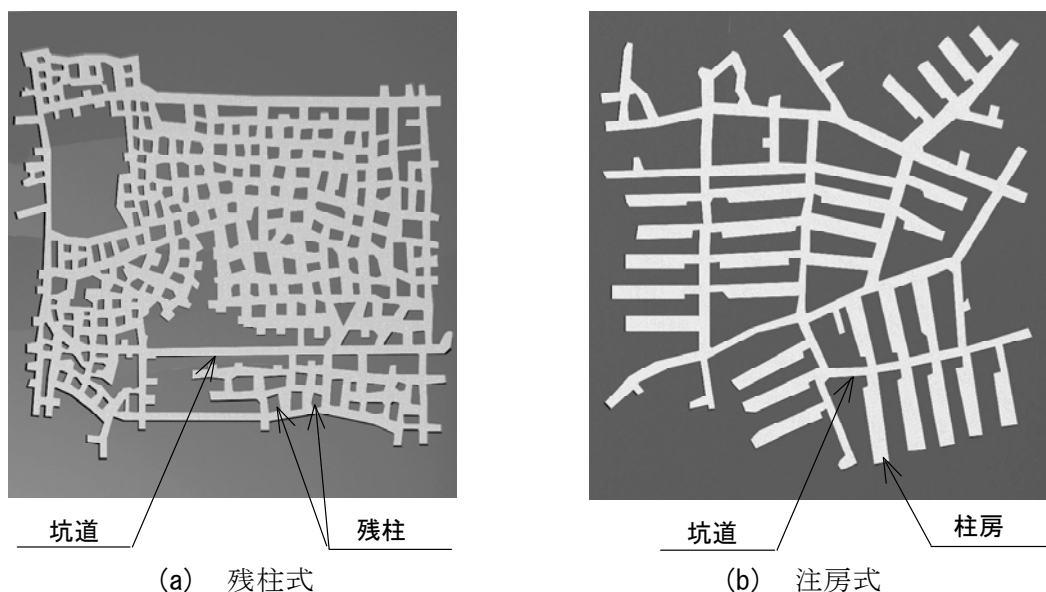
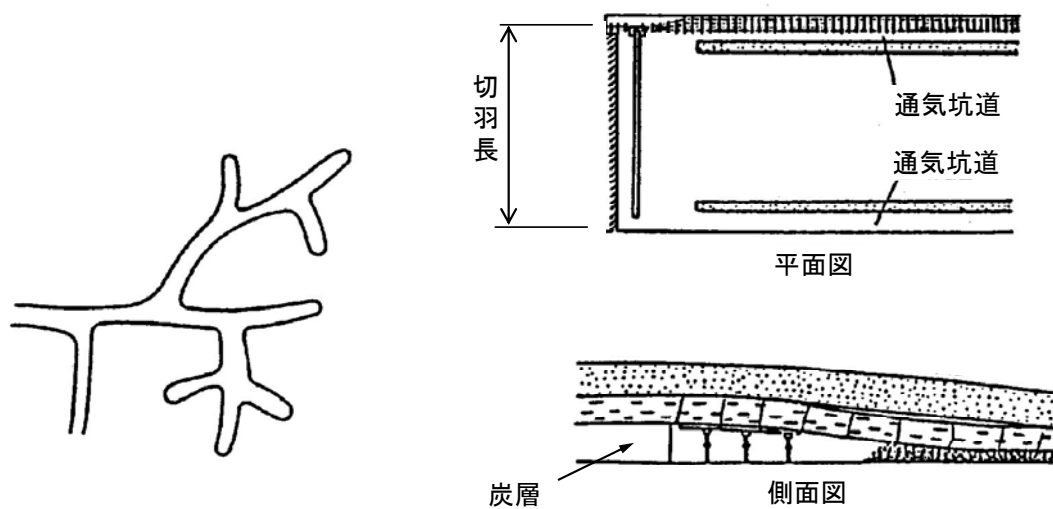


図-2.1 亜炭廃坑の採掘方式の概念図（その 1）



(c) 坑道方式（ためき掘り）

(d) 長壁式

図-2.1 亜炭廃坑の採掘方式の概念図（その2）³⁾

(3) 金属鉱山廃坑

わが国の金属鉱山では、長年月にわたる採掘の結果、鉱山が休止または廃止した後でも、坑道の坑口や鉱さいの堆積場等の蓄積鉱害源が残存し、坑内からの排水による重金属や酸性坑水等による鉱害が発生している。特に、宮崎県土呂久鉱山（スズ、ヒ素、銅、亜鉛）のヒ素などによる鉱毒水や岩手県松尾鉱山（硫黄）の強酸性水による周辺環境の汚染と健康被害で知られるような鉱害問題が顕在化し、深刻な社会問題となっている。鉱山保安法においては、このような鉱害の発生を未然に防止するため、稼行鉱山および休廃止鉱山において鉱害対策工事を行うことが義務づけられている。しかしながら、休廃止鉱山における鉱害対策は生産活動が終了した後に行われるため、余分な出費となる。また、これらの休廃止鉱山は他に転用もできず交換価値も有していない。これに対する対策方法として、坑道または坑口などにコンクリート製のプラグを施工して排水をせき止めることも行われるが、強酸性の排水に対する耐性がないことから極めて困難な場合が多く、多大な費用を投入して水処理を続けることしかないなど、有効な手段が見出せていない。



写真-2.1 土呂久鉱山の坑口と内部

(4) 地下採石場跡

全国の特定の地域には建材などに用いるために岩石を地下から採掘した採石場跡がある。代表的なのは栃木県宇都宮市の大谷石採石場で、一部では現在も稼動しているが、付近には採掘を終えた大規模な地下空洞が多数残存する。その総容量は約 1,800 万 m^3 もあるといわれている。他に福井市足羽山のしゃく谷石の地下採石場跡や静岡県伊豆長岡町地下採石場跡がある。大谷石採石場跡では 1990 年と 1991 年に大規模な陥没が発生した。また、しゃく谷石採石場跡では 2005 年に地表の共同墓地で大きな陥没事故が発生した。



写真－2.2 大谷石採石場跡内部状況 ⁴⁾



写真－2.3 しゃく谷石採石場跡内部状況 ⁵⁾

(5) 地下壕

地下壕はその目的により規模や形態も変化する。そのうち、比較的規模が大きいものが特殊地下壕とよばれる戦時中の軍事工場や司令本部が避難した地下壕である。鉱山廃坑や地下採石場跡などと同様に、長い年月を経て突然陥没することがある。図-2.2 および写真-2.4 に特殊地下壕の例を示す。

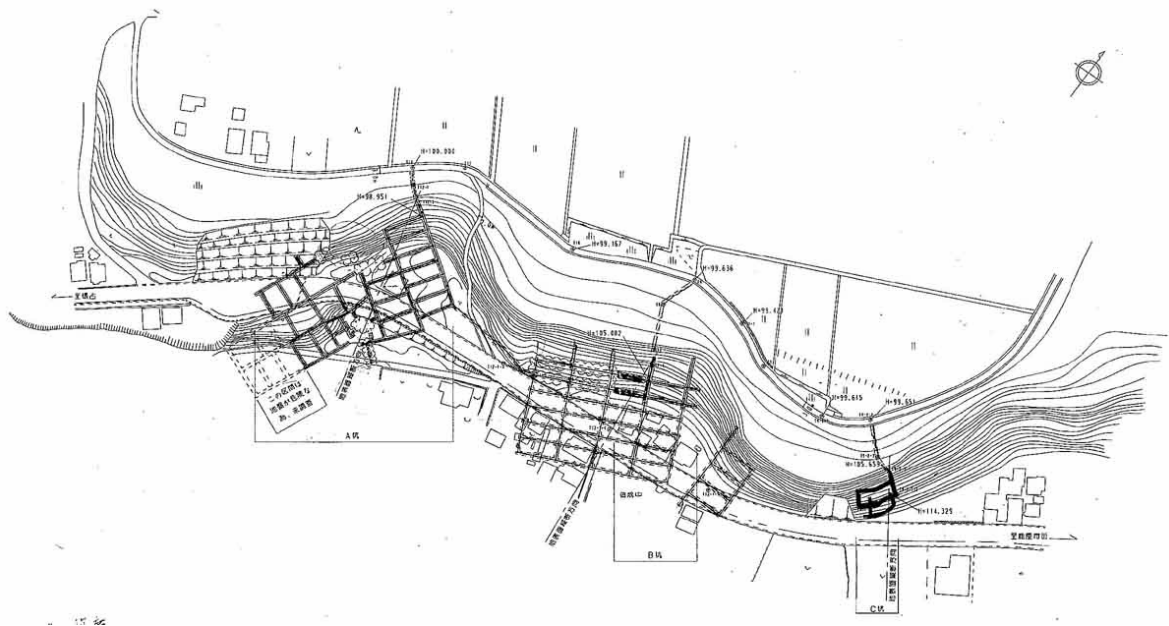


図-2.2 特殊地下壕平面図（鹿屋市）⁶⁾



写真-2.4 特殊地下壕内部状況（鹿屋市）⁶⁾

国土交通省、農林水産省および林野庁は、2005年4月に鹿児島市で発生した地下壕内の中学生死亡事故を受けて、防災上の見地から地下壕の危険解消を計画的に推進するため、全国に現存する地下壕の実態調査を行い、中間取りまとめ結果を発表した。この調査で新たに見つかった地下壕は6,296箇所、これに2001年度調査で存在を把握していた5,003

箇所のうち現在までに埋め戻し等により減少した 1,019 箇所を除いた残存地下壕を加えた総数は 10,280 箇所となった。また、新たに見つかった地下壕のうち危険またはその可能性があるかと判定されたものは 766 箇所、これに 2001 年度調査で危険とされた地下壕 777 箇所のうち埋め戻し等で危険の解消がなされた 515 箇所を除き、その後危険と判定された 182 箇所を加えると、現在危険またはその可能性があるものは 1,210 箇所となった⁷⁾。表-2.3 に都道府県別地下壕残存状況を示す。表より、特殊地下壕は全国に分布しているが、関東・東海地域（千葉、神奈川、静岡）、中国地域（広島）、九州地域（長崎、熊本、大分、鹿児島）に多く、特に鹿児島県に集中している。

なお、2000 年 6 月、鹿児島県鹿屋市で道路が陥没し、女性が車ごと転落して死亡する事故が発生している。

表-2.3 都道府県別地下壕残存状況⁷⁾

単位：箇所数

都道府県名	都道府県下の地下壕	うち危険またはその可能性がある地下壕	都道府県名	都道府県下の地下壕	うち危険またはその可能性がある地下壕
北海道	29	8	滋賀県	9	3
青森県	33	6	京都府	129	51
岩手県	26	8	大阪府	19	5
宮城県	64	6	兵庫県	72	27
秋田県	7	3	奈良県	9	0
山形県	63	7	和歌山県	37	9
福島県	16	5	鳥取県	34	8
茨城県	54	17	島根県	27	0
栃木県	46	8	岡山県	27	6
群馬県	10	3	広島県	614	34
埼玉県	24	1	山口県	330	56
千葉県	387	82	徳島県	17	4
東京都	163	7	香川県	58	11
神奈川県	517	25	愛媛県	45	16
新潟県	7	1	高知県	52	32
富山県	12	1	福岡県	113	32
石川県	18	6	佐賀県	140	30
福井県	94	28	長崎県	738	83
山梨県	50	14	熊本県	655	20
長野県	38	19	大分県	586	25
岐阜県	68	7	宮崎県	744	105
静岡県	477	109	鹿児島県	3,149	187
愛知県	171	31	沖縄県	248	43
三重県	54	21	合計	10,280	1,210

(6) 鍾乳洞

海底でサンゴなどによってできた石灰岩が地殻変動によって地上に隆起したところでは、石灰岩の主成分である炭酸カルシウムが二酸化炭素の溶解した地表水や地下水によく溶けて激しく浸食され、その内部に多くの空洞を生じるようになる。結果として、表面には溶けた石灰岩の残りが突出し、内部には空洞を生じ、あちこちでその空洞に通じるドリーネが形成される。全国にはおよそ 1,500 箇所の鍾乳洞があるといわれている。鍾乳洞は大きな地殻変動による隆起や沈降、断層運動によってできた石灰岩中の割れ目を通じて、二酸化炭素を含んだ弱酸性の雨水や地下水が流れ込み、長い年月をかけて石灰中を侵食して形成された空洞である。地下水位の低下にともなって陥没することがある⁸⁾。

(7) 火山洞

火山洞とは、表面が冷却・固結している溶岩流の中央部に形成されるトンネル状の空洞で、大きなものは直径 10m 以上にも達し、長さ数 km にも及ぶものがある。玄武岩のような流動性に富む溶岩は、この中央部を満たして流れ、溶岩流の先端部に流出するが、溶岩流が完全に固結した後にその一部がトンネル状の空洞となって残る。著名な例としては富士の風穴がある⁸⁾。

(8) 風化洞

風化洞とは、岩石が受ける温度差・浸透水による内部浸食などによって形成された洞窟である。岩石の層理・節理などに支配されて形成されるが、比較的小規模なものが多い。その存在は日本では緑色凝灰岩地帯などで確認されている⁸⁾。

(9) 地中構造物などの空間

廃棄されたトンネルや埋設管などの老朽化した施設は、建設当時の構造または施工上の欠陥、劣化による構造体の崩壊および地下水の進入にともなう地盤からの砂分の流出で空隙ができるなどして、地表に陥没などの影響が現れることがある。これらは所在や内部の大きさがはっきりしたものが多く、対策の計画も立てやすい。

2.1.2 陥没・沈下現象の発生形態

石炭鉱山では地表沈下による鉱害の現象を大まかに浅所陥没と盆状沈下に分けている。浅所陥没とは、地表から浅い位置に残存している石炭鉱山廃坑の空洞天端が崩壊し、それが上方に次々と拡大して、地表面が急激に陥落する現象である。この現象は石炭や亜炭鉱山廃坑のみならず、様々な地下空洞でもみられる。盆状沈下とは、石炭鉱山のように長壁式で採掘された空洞を崩落して閉塞することにより比較的広い範囲で盆状に発生する沈下をいう。または、残柱式採掘方式の廃坑の残柱が崩壊し、次々と隣接した残柱に崩壊が拡大することによってもこれに類した現象がみられる¹⁰⁾。これらの石炭鉱害を模式的に示すと図-2.3のようになる。

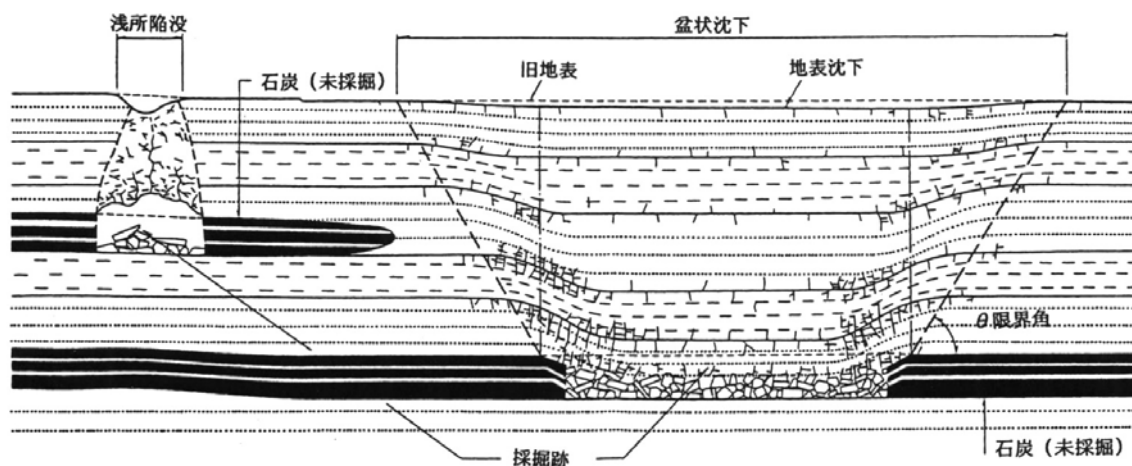
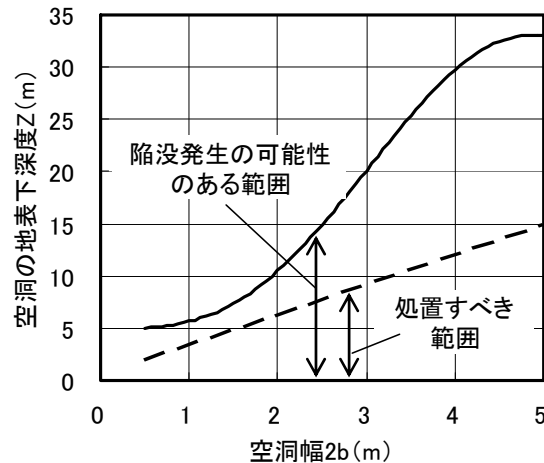


図-2.3 浅所陥没と盆状沈下^{9),10)}

空洞残存地域で陥没の危険性が大きいと考えられる箇所は次のような条件下にある場合であると考えられる¹¹⁾。

- 1) 土被り厚が薄い
- 2) 空洞上部粘土層厚が薄い
- 3) 空洞上部地山の強度が低い
- 4) 空洞幅が広い

陥没危険度については、一般には空洞の形状や地山強度などが正確に把握できないことから、特に、土被り厚で判断することが多い。図-2.4は北九州地方の石炭鉱山廃坑を対象にした陥没危険度と空洞深度および空洞幅との関係図で、発生事例をもとに、最も空洞幅が小さく、採掘深度の大きいもので浅所陥没を生じた場合として実線で示した上限値を考え、陥没対策を処置すべき範囲を破線で表している。これにより、空洞幅の3倍程度の土被り厚がない場合が対策を施す必要があるとされている^{10),11)}。



- 注 1. 実線・・・発生事例中から最も空洞幅が小さく採掘深度の大きいものと考えれば、これが浅所陥没の上限を示している。
- 注 2. 点線・・・浅所陥没の可能性のある範囲をただ一律に全面的にその対策とすることは、被覆岩石の性質や、風化の程度、造成団地の立地条件から考えて、不必要なことである。そこで載荷による影響範囲を考え、その範囲内は浅所陥没の発生する確率が高いので、対策を立てることにすればよい。その範囲は空洞幅の 3 倍の天盤厚までである。（産炭地域地盤等調査報告書）

図-2.4 陥没危険度と空洞深度・空洞幅との関係 ¹²⁾

川本 ^{13),14)} は、亜炭廃坑の安定性や地表面の陥没および沈下のメカニズムについては、これまでにいくつか提案されてきているものの、必ずしも十分に解明されているとはいえないとして、それは、亜炭層周辺の地質の複雑さ、空洞の大きさおよびその位置などの把握が十分でないことに加えて、対象とする亜炭採掘空洞の危険度の認識が低く、安全性評価のための調査試験が十分に行われてきていないこと、したがって、空洞を含む地盤状態や岩盤特性に対するデータがきわめて少ないことなどが挙げられるとしている。

川本は次のように、亜炭廃坑のような空洞地盤において浅所陥没が発生する空洞の限界深度を土質力学の分野で適用されていた計算法を組み合わせで求めている。

図-2.5 のように空洞天盤上部の緩み領域（崩壊領域）を三角形の領域と考え、この領域が地表面に達する場合に浅所陥没が発生すると仮定した。土塊の釣り合い状態を考えれば、深さ z の水平断面における鉛直応力 σ_v は次のように与えられる。

$$\sigma_v = \frac{\gamma z}{2} \left\{ 1 + \frac{\sin(\alpha + \phi) \cos \phi}{\sin^2 \alpha} - \frac{\sin(\alpha + \phi) \sin \phi}{\sin \alpha \cos \alpha} \right\} - c \left\{ \frac{\sin(\alpha + \phi) \cos \phi}{\sin \alpha \cos \alpha} + \tan(1 - \cos \phi) + \frac{\cos^2 \phi}{\sin \phi} \left(1 - \frac{\sin(\alpha + \phi)}{\sin^2 \alpha} \right) \right\} \quad (3.1)$$

式 (3.1) で $\sigma_v = 0$ となるような崩壊面の傾斜角 α を求めると、浅所陥没を生じない限界深度 D が求められる。いくつかの地盤条件に対して限界深さを求めると、図-2.6 (a),

(b), (c) のようになっているとしてゐる．ここに，たとえば，地盤の内部摩擦角が $\phi=20^\circ$ で粘着力が $c=3.0\text{tf}\cdot\text{m}^2$ の場合に， $2b=3.0\text{m}$ の空洞を掘削するとすれば，図-2.6(b)より，限界深度は $D=4.8\text{m}$ となる．

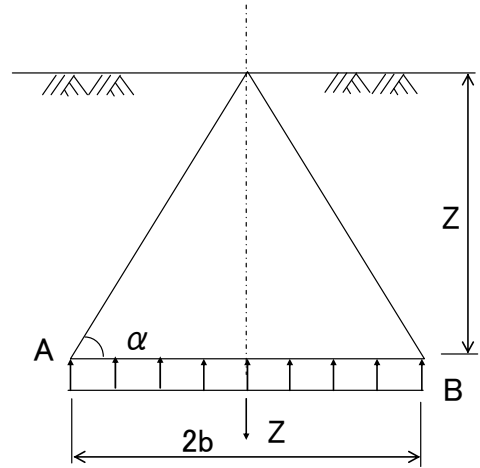
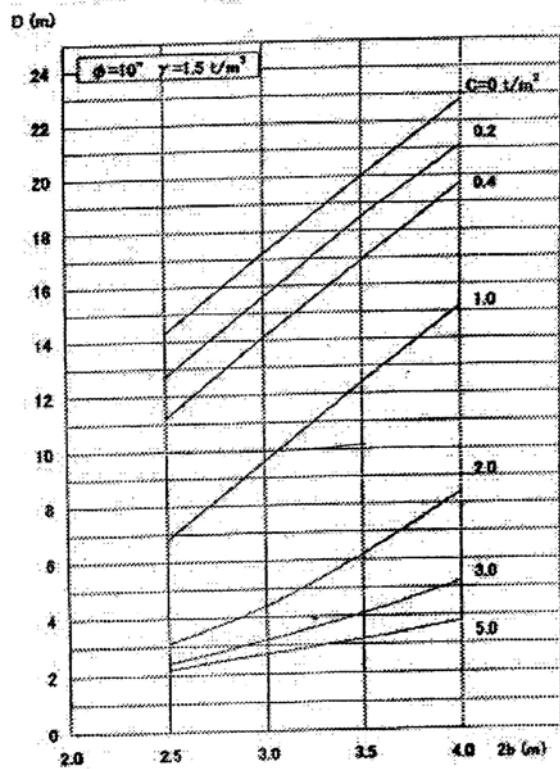
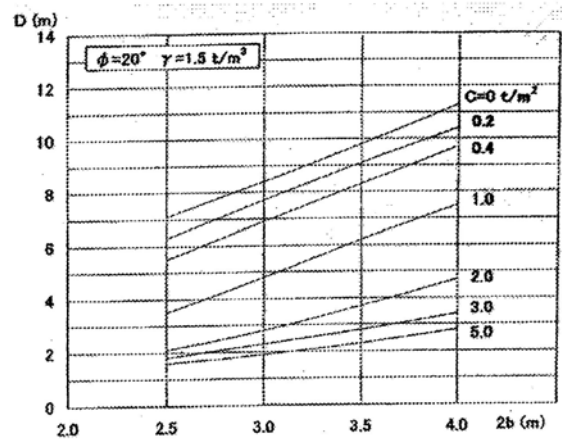


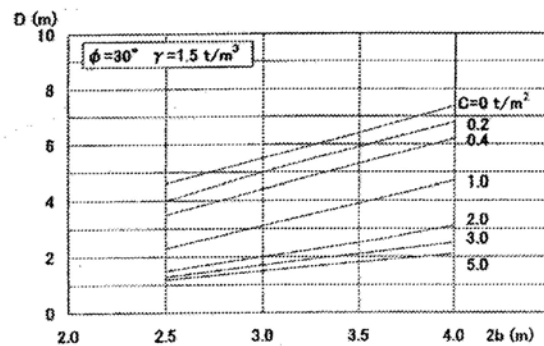
図-2.5 崩落土塊の釣り合い状態^{13),14)}



(a) $\phi=10^\circ$



(b) $\phi=20^\circ$



(c) $\phi=30^\circ$

図-2.6 浅所陥没発生限界深さ¹⁴⁾

江崎¹⁵⁾は、石炭鉱山廃坑の浅所陥没の統計から、浅所陥没が発生した箇所平均空洞深度は、約 12.1m であるとし、深度 30m になるとほとんど発生しないが、例外的に 50m まで発生した例もあるとしている（図-2.7）。また、梅雨などの降雨量の多い季節に頻発するとしている（図-2.8）。しかし、発生の際の予測は困難であるとしながらも、北部九州の産炭地域の 145 の炭鉱の情報をもとに、採掘時から空洞が陥没するまでの期間（経過年数）を統計的に検討した結果を図-2.9 として示した。図-2.9 では、(A)：炭鉱の閉山時、(B)：炭鉱の開山時、(C)：炭鉱の開山時期と閉山時期の中間に分類し、過去に発生した陥没までの経過年数を正規確率紙上に落としたものである。これによると、採掘時期を(A)とした場合、採掘終了後約 25 年で 90%、約 40 年で 99.99%の確率で陥没が発生することになる。また、(B)とした場合、70 年経過後に 90%、100 年後に 99.5%の確率で発生する。(C)とした場合では、45 年経過後に 90%、70 年経過後に 99.99%の発生をみることになるとしている。

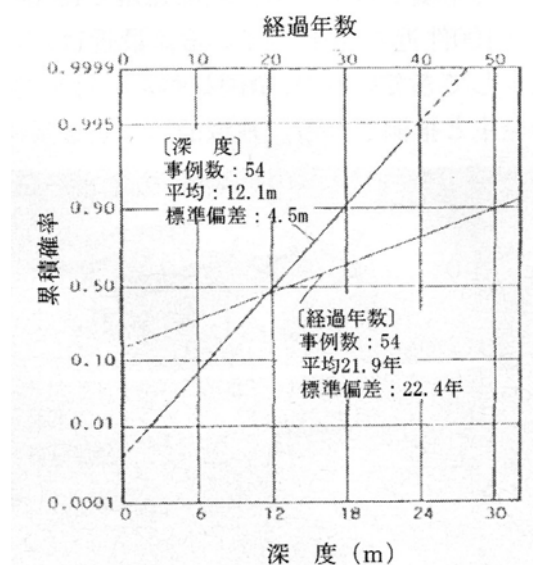


図-2.7 浅所陥没が発生した深度と経過年数¹⁵⁾

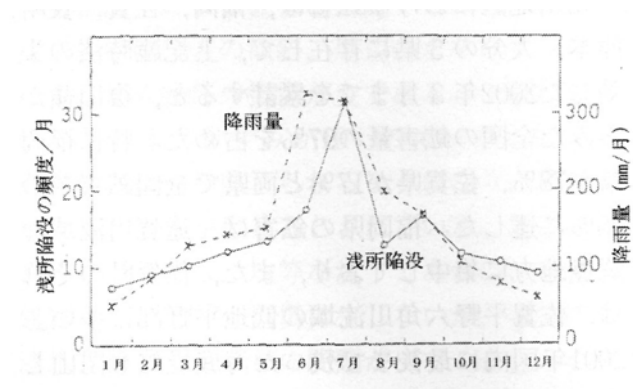


図-2.8 浅所陥没と降雨量の関係 ¹⁵⁾

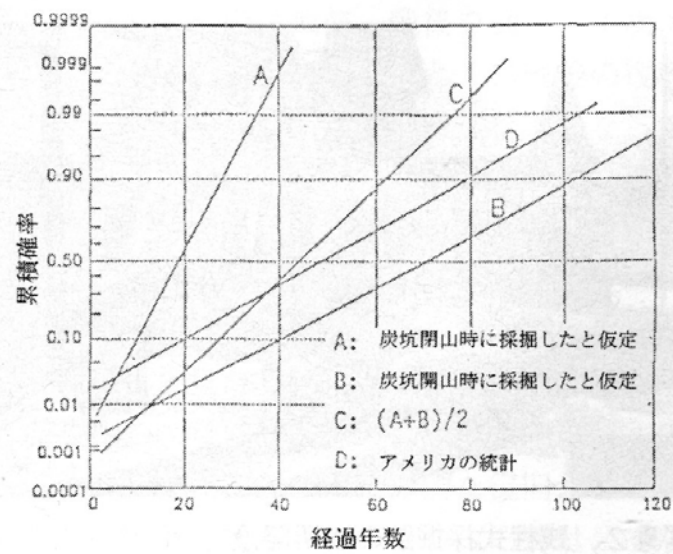


図-2.9 浅所陥没が発生するまでの期間の推定 ¹⁵⁾

以下、写真-2.5～写真 2.9 に地下空洞による被害事例を示す。

写真-2.5 は 1990 年の坂本地区の陥没（面積 $7,500\text{m}^2$ ）および 1991 年の瓦作地区の陥没（面積 $17,500\text{m}^2$ ）の様子である。この地区では、それ以前からも立て続けに大きな陥没が発生したことから、周辺に地震計が設置されて観測システムにより継続して地下の変動が監視されている。横山ら¹⁷⁾は大谷石採掘場跡の陥没のメカニズムについて検討し、事故のあった箇所空洞は残柱の断面積が小さく応力の大きな残柱から逐次クリープ破壊し、その後支持を失った天盤が曲げ破壊を起こして崩落したとし、地球潮汐応力が陥没のトリガーの 1 つになり得るとしている。

写真-2.6 は、2005 年 8 月に福井市小山谷町足羽山の共同墓地で地下の採石場跡の崩壊で発生した陥没の状況である。陥没穴は直径および深さとも最大で約 30m である。陥没箇所の地下で採石が行われた年代は記録が残っていないほど古い。その後の調査により、現場は地下水が集まりやすい地形および地層であるために、乾湿の影響で空洞の天盤を構成する凝灰岩の劣化も進んでいたと推察され、そこに数日前からの降雨による地下水の地盤内への浸透が契機となって空洞天盤が崩壊したのが原因とみられている。

写真-2.7 は鹿児島県鹿屋市の特殊地下壕による陥没で、このうちの(a)は 2000 年 6 月初旬の豪雨で道路が幅 10m、長さ 30m、深さ 7m にわたって突然陥没し、人身事故を引き起こした事故現場の様子である。

写真-2.8 は 2006 年 7 月に三重県津市のみがき砂採掘場跡の上の民家脇の道路が直径 30m、深さ 3m の大きさで陥没した現場の様子である。その後の調査で、現地は谷を 8m の高さに盛土した造成地で、降雨による地下水が集まりやすい地形・地層であったことがわかった。

写真-2.9 は 2003 年 7 月 26 日の宮城県北部地震の影響で、宮城県矢本町（現、東松島市）の亜炭廃坑が陥没や噴砂を起こしたときの状況である。地震では宮城県北部の鳴瀬町および矢本町などで震度 6 を超える揺れが生じ、建物の被害、斜面崩壊、液状化等による被害等が発生した。この矢本町の亜炭廃坑による陥没は、町全域にわたる 32 箇所が発生した。

このように、放置された空洞はこれを構成する柱、壁および天盤などの劣化の進行やクリープ破壊、さらに地下水の変動などの影響で、長期間経過後でも突然崩壊することがある。その際、空洞の一部の部位でも臨界点を超えて破壊すると全体がいちどきに崩壊すると考えられる。また、一定規模以上の地震が襲来すると、空洞残存地区の各所で広域に被害が発生する。

なお、東海地方の亜炭廃坑による被害事例は第 3 章において示す。



(a) 坂本地区の陥没（2次）（1990年3月29日） (b) 瓦作地区の陥没（1991年4月29日）

写真-2.5 大谷石採石場跡による陥没¹⁶⁾

（栃木県宇都宮市大谷町）



(a) 陥没穴全体

(b) 陥没穴周辺

写真-2.6 しゃく谷石採石場跡による陥没¹⁸⁾

（福井県福井市小山谷町足羽山，2005年8月16日）



(a) 道路の陥没



(b) 藪地の陥没

写真-2.7 特殊地下壕による陥没
(鹿児島県鹿屋市)



(a) 陥没直後¹⁹⁾



(b) 陥没穴の埋め立て後と民家への被害

写真-2.8 みがき砂採掘場跡による陥没
(三重県津市，2006年7月9日)



(a) 陥没穴



(b) 陥没穴と噴砂

写真-2.9 宮城県北部地震での亜炭廃坑による陥没²⁰⁾
(宮城県矢本町（現，東松島市），2003年7月26日)

2.1.3 海外における鉱山廃坑と地盤変状

産業革命以降、先進国において鉱業は大変活発であったが、わが国と同様に、近年は縮小され、資源を採掘した廃坑が各地に残っている。現在、大半の鉱山は閉山されているが、様々な鉱害が発生している。各国の鉱山で発生している鉱害問題は次のように概括的に分類される。

- 1) 地盤変状（陥没、沈下）
- 2) 酸性水の鉱山排水
- 3) ガス放出と地下爆発
- 4) 地下火災

ここに、地下火災とは石炭・亜炭鉱山などで、採掘作業の偶然またはミスあるいは自然発火の結果として坑内の石炭や亜炭が燃焼する現象で、火災がひどくなると坑内の崩落により地表面の沈下を引き起こすことがある。近年、石炭・亜炭鉱山がすべて閉山された日本では一般に馴染みが薄くなったが、米国では 40 年前に発生した地下火災が現在まで続いている例もある。

このような様々な鉱害問題が世界各地で発生して人的および物的に甚大な被害を与えているが、これまで各国で行われている廃鉱山の調査、観測および対策などの安全上の方策に関する情報が統括的に収集および展開されてこなかった。そこで、これを重視した ISRM (International Society for Rock Mechanics) では mine-closure sub committee を設立し、Post Mining Management のガイドラインを作成するなど、国際的に取り組む活動が行われるようになり、Post Mining 問題に対する施策の積極的な展開が期待されている。

以下、フランスの Lorraine 地域の代表的な Moyeuve 旧鉄鉱山と鉱害問題（陥没・沈下・汚染）を例として示す。この旧鉄鉱山は 1881 年に採掘を開始し、1930 年代に閉山に至ったところである。鉱山位置と鉱山周辺の地形図を図-2.10 および図-2.11 に示す。この鉱山の鉄鉱層は 3 層に分類され、全体として厚さは約 15m である。土被り厚は 5~120m の間に変化し、石灰質泥岩で構成されている。図-2.10 に示した柱状地質図は Lorraine 地域における代表的な地質図である。鉄鉱層は、図-2.12 に示すように、段丘崖に坑口を設け、そのまま鉄鉱層の分布に沿った緩い勾配で柱房式を主体として広範囲に採掘された。

立ち入ることができる範囲の坑内の様子を写真-2.10 に示す。採掘方式は柱房式を主体としながらもところにより天端を残柱で支えている箇所もある。坑道の幅は 3m 程度でその高さは 3~4m である。坑道の両側に長さが 30m 程度、幅が 5~6m 程度の柱房室を掘削することで鉄鉱が採集された。鉱山全体は残柱やずりで形成した石積壁で支えられているが、主坑道では天端の落盤防止に鉄棒も利用されている。このようななかで、柱房室の幅が 6m を超える箇所では大規模な落盤や残柱の剥離による不安定現象が多数みられ、これ

がやがて周囲に連続的に拡大すると大きな空隙や緩みとして上方に伝播し、地表に陥没や沈下となって現れるものと考えられる。

旧鉱山のそばでは河川に合流する鉱山排水の水位を制御するための施設が建設され、リアルタイムで計測が行われている。また、同地点で陥没の危険性が高い地域では住宅が移転されている。休鉱山の地上の Roncourt 村では、鉱山内の落盤や崩壊の予兆を観測する振動計測や地表面沈下にもなう住宅建物の変位計測や亀裂観察が行われている。

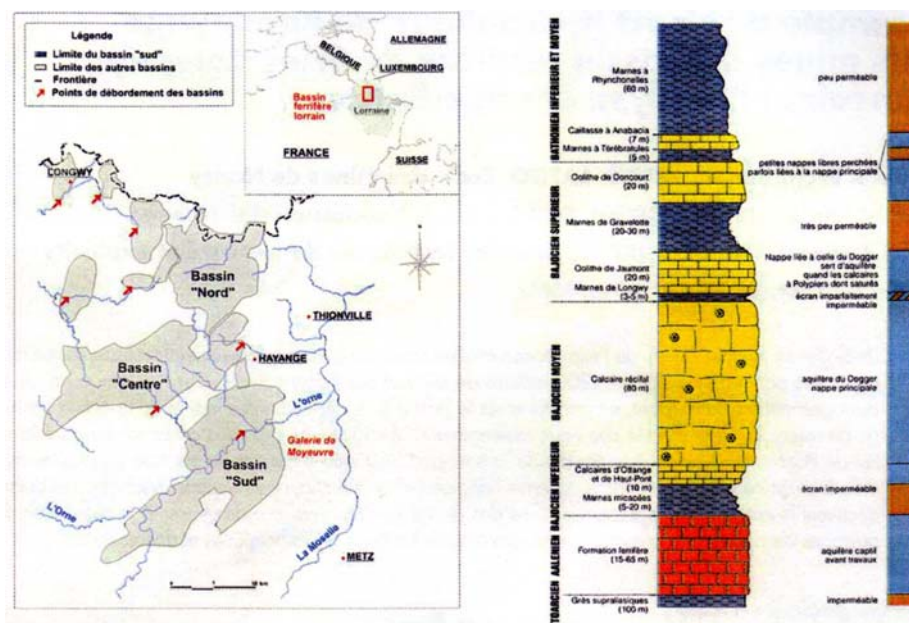


図-2.10 Lorraine 地域の鉱層の分布と柱状地質図

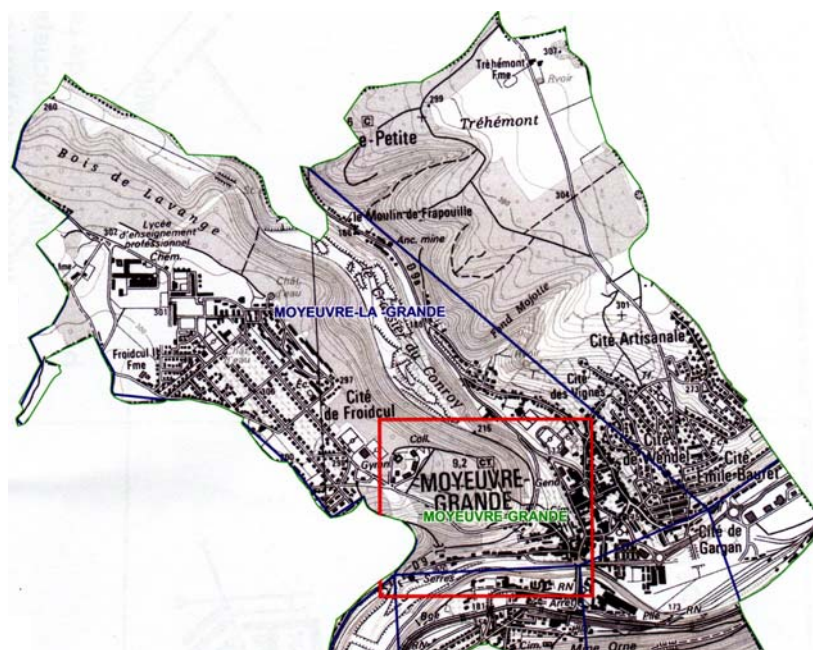


図-2.11 Moyeuvre 旧鉱山周辺の地形図

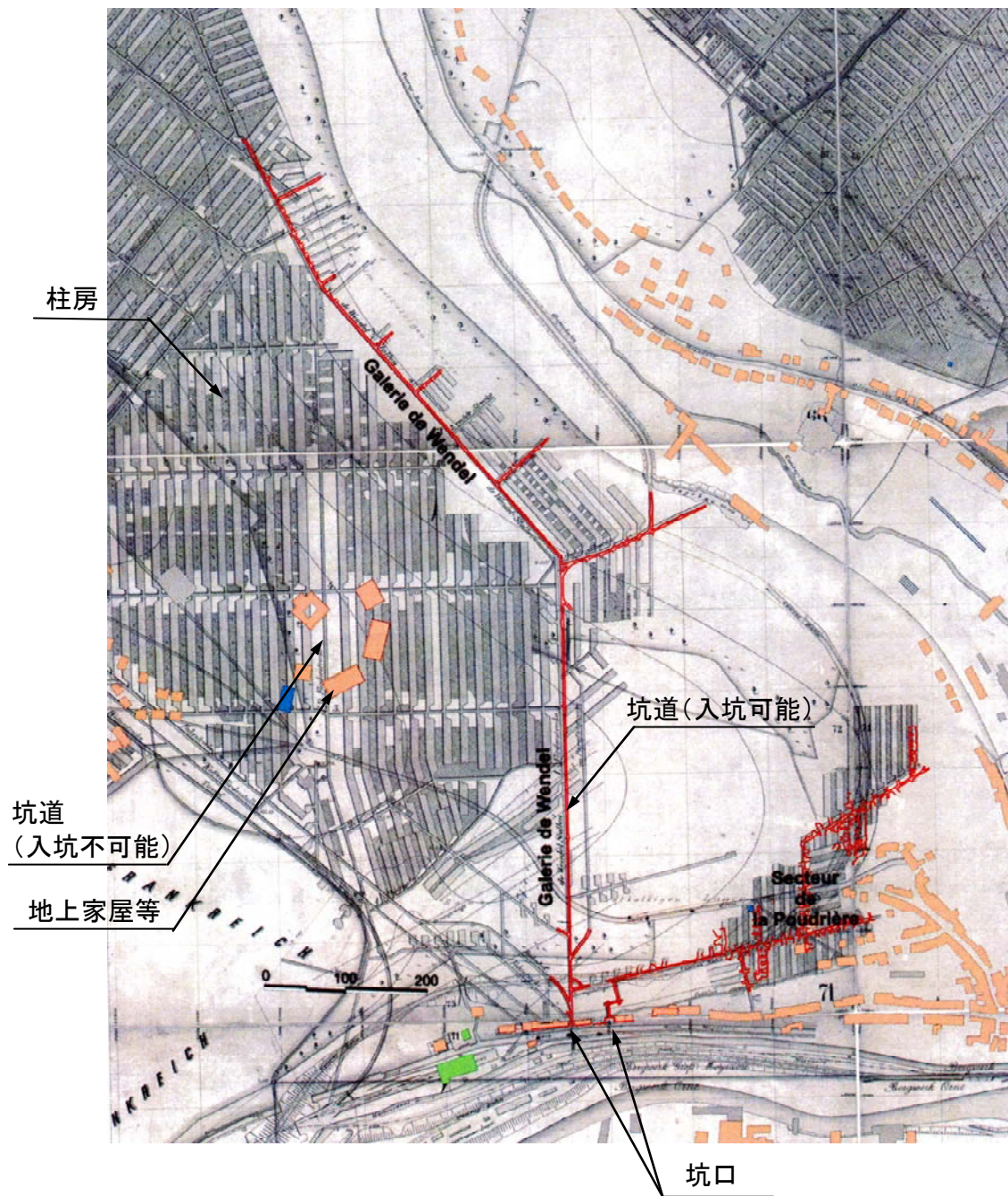


図-2.12 Moyeuve 旧鉱山の坑内配置図



(a) 坑道



(b) 残柱



(c) 天端で開口したクラック



(d) 落盤した岩塊



(e) 剥離して細った残柱



(f) 沈下による住宅の被害



(g) 沈下による住宅地の被害

写真-2.10 Moyeuve(Tranchepre 坑)旧鉱山内部と周辺地上施設の被害

2.2 既存の空洞対策技術の適用性

2.2.1 各種対策技術の適用性

空洞対策工法は事前対策と事後対策に分けられる。事前対策は地下に空洞がある地域に施設を建設する場合、空洞に起因する影響として、施設の沈下や傾斜などの被害を予防する方法である。対策方法には構造物の軽量化または基礎面の接地圧の低減を図る方法や基礎を補強するような構造物に対策を施す影響低減の方法と、空洞の掘削・埋め戻しによる方法またはスラリー状の固化物を空洞内に流し込んで固化させるスラリー埋め戻し方法のような空洞に対策を施すことで被害原因を除去する方法がある。これに対して、事後対策は、空洞が存在する地盤上に施設が建設され、その後に被害が発生した場合、陥没穴を土砂やモルタルなどで埋め戻すとともに、施設を更新するかまたは補強する方法である。

以下、各種対策工法一般の特徴、効果および課題について述べる。

(1) 構造物の軽量・低接地圧化による方法

この方法は、空洞上に構造物が建設されることによる荷重増加を極力小さくするものである。その手段として、構造物に軽い材料を用いて軽量化する方法、階層を低くして軽量化する方法および基礎面積を拡大するなどして基礎面からの荷重分散を図る方法などがある。構造物の配置や大きさなどの計画面での自由度が高い場合に有効である。空洞への荷重増加の影響が小さくなり、被害発生確率や被害が発生した場合の被害程度を低く抑えることができるが、空洞自体がそのまま残存するため、根本的な解決にはならない。また、大規模な空洞上に立地する場合などでは、効果が期待できないこともある。この方法を既存の構造物に適用するのは、施工上の制約などがあり、比較的困難である。また事前処置であっても、空洞形状や構造物との正確な位置関係を事前に把握し、基礎の一部が陥没や沈下によって支持を失った場合の機能支障の影響などを検討する必要がある。

(2) 基礎の補強

空洞対策としての基礎の補強には、空洞への荷重増を防止するために、基礎を杭基礎として、空洞下の支持層まで延長した杭とする方法や、基礎下の地盤に陥没や沈下が発生しても沈下および傾斜の影響を極力低減するためにフーチングまたは地中梁の高剛性化を図る方法である。また、道路の場合では、合成の大きい連続鉄筋コンクリート舗装とした例がある。杭基礎延長の場合は、特に地震時に空洞中の杭部分が破損することが懸念される。フーチングや地中梁の高剛性化は、一般に被害程度を比較的小さく抑えることができるが、大規模な空洞上に立地する場合には効果が期待できない。いずれも、空洞自体がそのまま

存在するため、根本的な解決にはなりえないと考えられる。構造物の軽量・低接地圧化による方法と同様に、既存の構造物に適用するのは、施工上の制約により比較的困難である。また、空洞形状や構造物との正確な位置関係を事前に把握し、機能支障の影響などを検討する必要がある。

(3) 掘削・埋め戻しによる方法

この方法は地上から掘削して空洞を掘り出し、砕石や土砂等で埋め戻す方法で、直接空洞形状と埋め戻しの施工が確認できるため、確実性が高い。空洞が浅く規模が小さい場合に有効で、陥没・沈下の原因となる空洞を排除できるため、確実な効果が期待できる。空洞が深い場合、掘削が大規模なものとなり、莫大な費用が必要になる。

(4) スラリー埋め戻しによる方法

スラリー埋め戻しによる方法は、地表面からボーリング孔などを通じてスラリー状の固化物を空洞内に注入し、空洞内を充てんして固化させる方法である。注入する固化物には、充てん材、流動化処理土、気泡混合土およびセメントベントナイトなど各種のものがある。掘削をとまなわないため、空洞が深い場合でも安全に施工ができる。適度の流動性を有するスラリー固化物を使用し、注入圧力や流量管理を適切に行うことで確実な埋め戻しを行うことができ、陥没・沈下の原因となる空洞を排除できる根本的な対策方法といえる。課題としては、使用する材料やスラリーの製造設備の選定と施工方法について、事前に十分な検討が必要なことが挙げられる。また、スラリーの注入中は、地盤内に圧力が伝播し、周辺の構造物が隆起や傾斜しないような圧力の管理を慎重に行う必要がある。

2.2.2 スラリー埋め戻し工法の適用性

前節で述べたように、スラリー埋め戻し工法は抜本的に空洞対策を行うことができ、また対象とする空洞の深さや規模についての適用範囲も広い。スラリー埋め戻し工法に使用する材料には各種のものがあるが、主にその材料の違いによってさらにいくつかの工法に分類される。

表-2.4に代表的なスラリー埋め戻し工法の特徴と適用性をまとめたものを示す。表より、一般に大中規模の空洞対策には、経済的でスラリーの流動性が高いことから確実な空洞の埋め戻しが可能な充てん工法は適用性が高いといえる。また、流動化処理工法および気泡混合土工法は、空洞内に地下水が浸入していない中小規模の空洞に、セメントベントナイト工法は小規模の空洞の埋め戻しに適用性がある。

表-2.4 代表的なスラリー埋め戻し工法の特徴と適用性

			充てん工法	流動化処理工法	気泡混合土工法	セメントベントナイト注入工法
概 要			充てん工法は砕石工場等産出の脱水ケーキに水と固化材を混合して製造したスラリー状の埋め戻し材を注入する工法であり、東海地方の亜炭廃坑の空洞を対象に開発された。 専用プラントで埋め戻し材を製造し、ボーリング孔より空洞内に注入する。	流動化処理土は発生土に水を加えた泥水に固化材を混合して流動化させた安定処理土で、狭小な空間や締固めの困難な箇所などの埋め戻し・充填に用いられる。 専用プラントで流動化処理土を製造し、ボーリング孔より空洞内に注入する。	気泡混合土は発生土に水を加えた調整土に固化材を混合して流動化させ、さらに軽量化のため気泡を混合して製造したもので、山岳地や軟弱地盤上での盛土、橋台・擁壁の裏込め等に用いられる。 専用プラントで気泡混合土を製造し、ボーリング孔より空洞内に注入する。	セメントベントナイト注入工法は、ベントナイトに水とセメントを混合して製造したスラリー状の埋め戻し材を注入する工法であり、薬液注入による地盤改良工法として用いられる。 現地に小規模のプラントを設置し、グラウトポンプによりボーリング孔より空洞内に注入する。
材料 品質	流動性		流動性が高く、空洞内の隅々にまで確実にスラリーを充てんすることができる。	流動性は比較的低い。また、発生土のバラツキにより品質性状が変化しやすい。	流動性は低い。また、消泡により品質性状が変化しやすい。	流動性は比較的高い。
	単位体積重量		13.5kN/m ³ 前後	13.5 kN/m ³ 以上	10～12kN/m ³ （エア－量による）	13.5 kN/m ³ 前後
施工性	注入孔	孔径	φ 100 前後	φ 100 前後	φ 100 前後	小口径（φ 25～50）
		孔間隔	20～40m	10～15m	15～20m	5m 程度（スラリー製造能力より）
	製造 プラント	時間最大製造 能力	100m ³ /h	60m ³ /h	60m ³ /h	6m ³ /h
	注 入	注入速度	注入速度が速い。	低流動性のため、注入速度を上げることができない。	注入圧が高くなると消泡するため、注入速度を上げることができない。	注入速度が遅い。
		空洞条件	比較的に狭い空洞にも流動性が高いため適す。	空洞水がある場合、特殊配合で可能。 狭い空洞では注入圧が高くなりやすい。	空洞水がある場合、特殊配合で可能。	特に崩落等狭い空洞に対して緻密な充填ができる。
使用材料（骨材）			砕石工場発生脱水ケーキ	発生土	発生土	――
環境安全性（水質影響）			一般に水質影響は認められない	一般に水質影響は認められない	一般に水質影響は認められない	一般に水質影響は認められない
経 済 性 （直接工事費の比率）			大中規模の工事では安価 （1.0）	小中規模の工事では安価 （1.7）	小中規模の工事では安価 （1.5）	小規模な工事では安価 （5.9）
適用性の高い現場条件			空洞充てん用に開発された工法であるため、様々な空洞条件に適応可能。大中規模の空洞埋め戻しに適す。	開削工事における狭隘部の埋め戻しに多く用いられる。空洞埋め戻しでは、水がなく崩落等のない小中規模の空洞に適す。	軟弱地盤上での盛土や擁壁等の裏込めに多く用いられる。空洞埋め戻しでは水のない小中規模空洞に適す。	薬液注入による地盤改良工法として用いられる。空洞埋め戻しでは小規模で、特に崩落後の処置など狭い空洞に適す。

(注) 経済性については、各工法により固定費および施工規模による変動費が異なる。直接工事費の比率は、対象面積 10,000m²、深度 5～25m、容量 9,800m³ の亜炭廃坑を埋め戻す場合の試算例である。

参考文献

- 1) <http://www.env.go.jp/council/09water/y099-04/mat03.pdf>
- 2) 日本鉱産誌 V-a 主として燃料となる鉱石，工業技術院地質調査所，pp.679，1960 年 10 月
- 3) 日本充てん協会編：空洞充てん要領，日本充てん協会，pp.23-24，1985 年 2 月
- 4) 相澤正行：写真集 大谷，1987 年 2 月
- 5) <http://www.city.fukui.fukui.jp/siyakusy/hokori100/28.html>
- 6) <http://www.pref.kagoshima.jp/home/d-doboku/kanoya/50003boukuugou.html>
- 7) http://www.maff.go.jp/www/press/cont2/20051226press_5.html
- 8) 日本充てん協会編：改訂版 空洞充填施工マニュアル，－空洞による災害防止と地盤安定化のための技術－，日本充てん協会，2004 年
- 9) 日本応用地質学会九州支部編：九州の大地とともに，築地書店，p.110
- 10) 川本朧万，アイダンオメル：岩盤工学特論－その歴史と実際、地質との融合－，深田研ライブラリー，特別号，pp.121-126，2006 年 5 月
- 11) 岩田淳：宅地造成開発に伴う亜炭採掘跡地の陥没危険度評価，充てん，第 34 号，pp.10-20，1996 年
- 12) 産炭地域振興事業団：産炭地域地盤等調査報告書－浅所陥没とその対策－，1972 年 3 月
- 13) 川本朧万：浅所陥没発生限界と発生防止に必要な空洞充てん物の強度に関する報告，充てん，第 10 号，pp.1-9，1985 年
- 14) 川本朧万：浅い地下空洞による地盤沈下および浅所陥没について－亜炭採掘空洞の充填工事に関連して－，日本充てん協会，2003 年
- 15) 江崎哲郎：浅所陥没とその対策，充てん，第 43 号，pp.1-8，2003 年
- 16) (財) 大谷地域整備公社：大谷石採取場跡地観測システム
- 17) 横山幸満，今泉繁良，上野勝利，水沼孝恵：大谷地区空洞陥没のメカニズム，土木学会論文集 No.568/III-39，pp.113-123，1997 年 6 月
- 18) 福井新聞朝刊，2005 年 8 月 17 日
- 19) 中日新聞夕刊，2006 年 7 月 10 日

- 20) 太田良巳，アイダン オメル，杉浦乾郎，坂本昭夫，山田紀利：亜炭廃坑の地震時における安定性と破壊形態，第 17 回中部地盤工学シンポジウム論文集，pp.67-76，2005 年 8 月