

早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文概要

論文題目

残存地下空洞による地盤の変状とその対策に関する研究
A Study on Ground Failures and Subsidence due to Existing Underground
Cavities and Countermeasures

申請者

坂本 昭夫

Akio Sakamoto

2006 年 12 月

全国には、地下資源を採掘した後に放置された鉱山廃坑の地下空洞や廃棄された地下施設の空間が至る所に残されている。前者の例では、石炭・亜炭・金属・非金属鉱山の廃坑、大谷石に代表される地下採石場跡、戦時中の地下壕などがある。また、後者では、廃棄トンネルや廃棄埋設管などがあげられる。さらに、鍾乳洞、火山洞などの自然形成の地下空洞も各地に散見される。

これらの空洞や空間を支える壁、柱あるいは天盤などの部位は、侵入した地下水の乾湿などによる劣化や長期間作用する荷重によるクリープの影響によって破壊され、その影響が地表に伝播して地表面や地上の構造物が突然陥没や沈下を引き起こすことがある。また、近い将来東海地震のような巨大地震が列島各地に襲来すると予想されているが、特に廃坑などが大きな地震動を受けると、不安定な坑内の残柱や坑道の天盤が広範囲にわたって大崩壊を起こすことが想定される。このように地下に潜む放置された空洞や空間は、常に住民の命や財産を脅かしており、各地で深刻な社会問題となっている。

対策として有効なのは、被害の原因除去となるように地下空洞を埋め戻すことである。地下空洞を埋め戻す方法として、固化材、土質材料（母材）および水を練り混ぜたスラリー状の充てん物（充てん材）を、地上よりボーリング孔（充てん孔）を通じて空洞内に注入して固化させる空洞充てん工法がある。空洞充てん工法はもともと亜炭廃坑対策として開発された工法で、東海地方で主に施工されている。空洞充てん工法の開発当時は、固化材にはセメントの他に火力発電所で発生する排煙脱硫石膏や消石灰が、また母材には脱水ケーキや機械工場の鍛造工程で発生する集塵ダストなど、市販材料以外に各種のリサイクル材料の有効利用なども視野に入れて室内実験や試験施工を行いながら検討された。今日では、固化材としてセメント系固化材を、母材として碎石工場産の脱水ケーキを用いた配合が標準となっている。また、試験施工や実施工を通じて、品質管理や施工管理の標準が確立されている。同工法が対象とする空洞は、深さが数 m～100m 程度で、空洞の大きさが数百 m^3 ～数万 m^3 と適用範囲が広く、中規模から大規模な空洞の埋め戻しに対して効率がよい。

本論文は、東海地方の亜炭廃坑の実態と廃坑に起因する陥没・沈下などの地盤変状の危険度評価を 1 つの事例として取り上げ、このような空洞災害防止に必要な対策技術に関する研究についてまとめたものである。

対策技術に関する研究は主に 2 つの研究より成る。1 つは広い空洞の一区画を充てんする限定充てん工法の開発に関する研究である。元来、スラリー状態の充てん材は高い流動性を有することから、1 つの充てん孔から注入した充てん材を空洞内の遠方にまで送ることが可能であり、それゆえ、充てん孔の本数が少なく、また空洞が複雑な形状を成す場合でも均質に充てんできることが特徴であった。ところが、新設される道路や鉄道の直下にある一部の空洞を充てんする場合、その高い流動性が災いし、対象範囲外へも大量に流出する課題があった。この課題

に対し、流動性を制御できる限定充てん工法を開発し、実工事に適用してその有効性を検証した。この研究の成果は、従来用いられてきた充てん材の特徴である良好な充てん性を活かしながら、地下空洞の限定範囲を確実に、また効率よく充てんする工法を確立したことである。

2 つめの研究は、充てん材の母材として、これまで用いられてきた材料、すなわち、東海地方の砕石工場で山砂利選別時に発生する脱水ケーキ等に代わるあらたなリサイクル材料の適用性に関する研究である。充てん工法は東海地方の亜炭廃坑を対象として先人のたゆまない工夫で技術の改良と検証を重ね、多数の実績を有し、空洞の埋め戻しを効率よく施工できる対策工法として一定の完成をみた総合技術であるが、まだ東海地方以外の全国各地に残存する地下空洞や空間に適用した事例は少ない。しかし、その材料的な特性や品質管理方法をもってこれらの空洞・空間に対する対策として適用する場合にも非常に有効であると考えられる。そのためには、東海地方で産する砕石工場産の脱水ケーキ等に代わるあらたなリサイクル材料を充てん材の材料として用いることが必要になる。この研究の成果は地域に限定されない各種のリサイクル材料について、充てん材に用いたときの適用性を明らかにしたことである。また、これによりリサイクル材料の新しい有効利用分野の確立に 1 つの方向性を示したことである。

本論文は 6 章から構成されており、その概要は以下の通りである。

第 1 章は序論であり、空洞対策技術に関する従来の研究・開発の現状を述べた上で、本研究の目的について述べた。

第 2 章では、地下空洞による地表面の陥没・沈下の事例と既存の対策技術として、国内の石炭・亜炭・金属・非金属鉱山廃坑、地下採石場跡、地下壕などの各種地下空洞の形態、成因、管理状態および石炭・亜炭鉱山廃坑の陥没・沈下などの被害形態および海外の鉱山廃坑と被害状況について事例を挙げて述べている。また、空洞対策技術を系統分類し、適用性一般およびそのなかで特にスラリー埋め戻しに分類される代表的な空洞充てん工法、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を取り上げ、材料、施工方法、経済性および適用性について整理した。

第 3 章は、東海地方における亜炭廃坑の危険度と対策として、最初に、東海地方の亜炭廃坑の実態、実験や観察等により得られた亜炭廃坑の破壊形態および岐阜県御嵩町における亜炭廃坑の危険度評価を一つの事例として取り上げた。次に、このような空洞災害に必要な対策としてこの地方で行われてきた空洞充てん工法の概要を述べ、さらに、亜炭廃坑の鉱害と脱水ケーキなどの産業副産物の処分など、工法開発に至った東海地方の社会問題を背景として旧通産省名古屋通産局の委員会において検討・開発された当初の工法技術と、今日確立された工法の材料、計画、設計、施工方法（品質管理、環境管理を含む）およびその課題について詳述した。

第 4 章は限定充てん工法の開発として、限定充てん工法の原理を、充てん材の

材料と施工方法から概説する．そして，そのなかの緩勾配タイプの限定充てん工法について，東海環状自動車道および可児御嵩バイパスの対策を対象にした試験施工による工法の確立と実施工を通じた検証結果について述べた．次に，急勾配タイプの限定充てん工法について，大谷石採石場跡の市道陥没対策を対象にした試験施工による工法の確立と実施工を通じた検証結果について述べた．

第5章はあらたなりサイクル材料を活用した充てん材の適用性として，最初に，リサイクル材料を充てん材の材料として用いることの意義を述べ，国内における副産物の発生・処理状況について整理した．次に，東海地方以外で発生する脱水ケーキ，建設残土，ペーパースラッジ焼却灰，石炭フライアッシュ，熔融スラグ，下水汚泥焼却灰についての適用性一般について記述した．さらに，そのなかで性状の安定性や供給量および取り扱いの容易さから，石炭フライアッシュ，熔融スラグ，下水汚泥焼却灰の3つの材料種類を取り上げて，その物理特性（フロー値，ブリーディング率，一軸圧縮強度）および環境影響性（有害物質溶出量）に関する室内試験結果について分析し，品質目標値をクリアする配合可能範囲から，ここで取り上げた材料についての標準配合を設定した．

第6章は結論を述べた章であり，残存空洞の危険度評価および空洞対策技術としての空洞充てん工法に関する研究・開発成果を総括した．また，残された課題を解決するための方向性を示した．

研 究 業 績

種 類 別	題名, 発表・発行掲載誌名, 発表・発行年月, 連名者 (申請者含む)
○論文	リサイクル材料の空洞充填材への適用性, 材料, 第 54 巻 第 11 号, pp.1123-1128, 2005 年 11 月, <u>坂本昭夫</u> , 山田紀利, 岩城圭介, 川本朧万
○論文	An Integrated Cavity Filling Technique for Abandoned Underground Room and Pillar Lignite Mines and Underground Quarries, Post-Mining Symposium, CD-ROM, November 2005, <u>Akio SAKAMOTO</u> , Noritoshi YAMADA, Kenrou SUGIURA and Masanori HAMADA
○論文	Some Example of the Cavity Filling along Transportation Routes above Abandoned Room and Pillar Lignite Mines in Tokai Region, Post-Mining Symposium, CD-ROM, November 2005, <u>Akio SAKAMOTO</u> , Noritoshi YAMADA, Kenrou SUGIURA and Toshikazu KAWAMOTO
○論文	地下空洞限定充てん工法の開発と施工, 土木学会論文集 F, Vol.62, No.3, pp.546-557, 2006 年 8 月, <u>坂本昭夫</u> , 杉浦乾郎, 山田紀利, 岩城圭介
○論文	Failure Modes and Responses of Abandoned Lignite Mines Induced by Earthquakes and the Evaluation of their Stability, 4th Asian Rock Mechanics Symposium, CD-ROM, November 2006, <u>Akio SAKAMOTO</u> , Noritoshi YAMADA, Kenrou SUGIURA, Ömer Aydan, Hisataka TANO and Masanori HAMADA
○講演	下水汚泥焼却灰を活用した空洞充填材の研究, 第 40 回地盤工学研究発表会講演集, pp.597-598, 2005 年 7 月, <u>坂本昭夫</u> , 橋本雅宏, 金住健一, 杉浦乾郎, 石合伸幸, 山田紀利, 岩城圭介
○講演	下水汚泥焼却灰を用いた空洞充填材の強度特性, 土木学会第 60 回年次学術講演会講演会概要集, pp.135-136, 2005 年 9 月, <u>坂本昭夫</u> , 橋本雅宏, 金住健一, 杉浦乾郎, 石合伸幸, 山田紀利, 岩城圭介
○講演	急結剤を用いた限定充填工法用充填材の開発, 土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集, pp.867-868, 2006 年 9 月, <u>坂本昭夫</u> , 岩城圭介, 杉浦乾郎, 石合伸幸, 和田幸二郎, 岩城圭介
○講演	限定充填工法の急勾配隔壁を形成する充填材の開発と適用, とびしま技報 (土木), No.55, <u>坂本昭夫</u> , 杉浦乾郎, 石合伸幸, 和田幸二郎, 脇田昌彦, 岩城圭介 (掲載決定)

研 究 業 績

種 類 別	題名, 発表・発行掲載誌名, 発表・発行年月, 連名者（申請者含む）
論文	A Real-time Monitoring System for the Assessment of Stability and Performance of in Abandoned Room & Pillar Lignite Mines, Post-Mining Symposium, CD-ROM, November 2005, Ömer Aydan, Hisataka TANO, <u>Akio SAKAMOTO</u> , Noritoshi YAMADA and Kenrou SUGIURA
論文	The Characteristics of Soft Rocks and their Effect on the Long Term Stability of Abandoned Room and Pillar Lignite Mines, Post-Mining Symposium, CD-ROM, November 2005, Ömer Aydan, <u>Akio SAKAMOTO</u> , Noritoshi YAMADA and Kenrou SUGIURA and Toshikazu KAWAMOTO
総説	地下空洞陥没対策に有効な充填工法の開発, 電力土木, No.308, pp.105-109, 2003 年 11 月, 杉浦乾郎, 石合伸幸, 山田紀利, <u>坂本昭夫</u>
講演	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（地盤の補強）, pp.67-76, 2005 年 8 月, 太田良巳, アイダン・オメル, 杉浦乾郎, <u>坂本昭夫</u> , 山田紀利
講演	地震による亜炭廃坑の破壊形態とその安定性の評価, 第 35 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.57-62, 2006 年 1 月, 太田良巳, アイダン オメル, 杉浦乾郎, <u>坂本昭夫</u> , 山田紀利
講演	充填工法に用いる各種リサイクル材料の研究, 第 38 回地盤工学研究発表会講演集, pp.649-650, 2003 年 7 月, 栗山隆之, 杉浦乾郎, <u>坂本昭夫</u> , 山田紀利, 石合伸幸, 松本博幸, 岩城圭介
講演	多様な副産物を利用した充填用 CLSM の開発, 第 39 回地盤工学研究発表会講演集, pp.625-626, 2004 年 7 月, 杉浦乾郎, 石合伸幸, <u>坂本昭夫</u> , 山田紀利, 岩城圭介
講演	地下空洞対策のための調査と充填技術の現状, 第 14 回調査・設計・施工技術報告会発表論文集, pp.15-22, 2005 年 6 月, 山田紀利, 杉浦乾郎, <u>坂本昭夫</u> , 舟橋嘉浩
講演	空洞充填材としての火山灰土の有効利用, 第 41 回地盤工学研究発表会講演集, 2006 年 7 月, 和田幸二郎, 杉浦乾郎, 石合伸幸, <u>坂本昭夫</u> , 山田紀利, 岩城圭介, 阿部暢夫

研 究 業 績

種 類 別	題名, 発表・発行掲載誌名, 発表・発行年月, 連名者 (申請者含む)
その他 (論文)	載荷試験データによる杭の水平抵抗特性に関する調査, 土木研究所資料, 第 2721 号, 1989 年 1 月, 岡原美知夫, 高木章次, 中谷昌一, 田口敬二, <u>坂本昭夫</u>
その他 (総説)	構造物基礎岩盤の調査と評価ー岩盤上の直接基礎の鉛直支持力推定法ー, 地質と調査, 1988 年第 2 号, pp.10-17, 1988 年 2 月, 岡原美知夫, <u>坂本昭夫</u>
その他 (総説)	S.Q.C 構造物シリーズ第 4 回 高強度を生かした構造物, 土木施工, Vol.40 No.9, pp.92-96, 1999 年 9 月, 菊地眞, <u>坂本昭夫</u> , 坂元健一郎, 篠田佳男
その他 (講演)	港口附近における波の回折と物質の拡散, 海岸工学講演会論文集, Vol.25, pp.543-546, 1978 年, 松梨順三郎, 春名誠治, <u>坂本昭夫</u>
その他 (講演)	水平載荷試験データによる杭の基準変位量に関する一考察 (その 1), 第 24 回土質工学研究発表会, pp.1345-1346, 1989 年 6 月, 岡原美知夫, 高木章次, 中谷昌一, 田口敬二, <u>坂本昭夫</u>
その他 (講演)	水平載荷試験データによる杭の基準変位量に関する一考察 (その 2), 第 24 回土質工学研究発表会, pp.1347-1348, 1989 年 6 月, 岡原美知夫, 高木章次, 中谷昌一, 田口敬二, <u>坂本昭夫</u>
その他 (講演)	SQC を用いた杭の試設計, 「超高性能コンクリート構造物」に関するシンポジウム論文集, pp.151-160, 1998 年 8 月, <u>坂本昭夫</u> , 中井督介, 佐藤元治, 富沢勉, 棚村史郎, 河野秀明, 浅沼潔
その他 (著書)	地盤工学・実務シリーズ 8 山留めの挙動予測と実際, (社)地盤工学会, pp.251-258, 1999 年 2 月, 杉本隆男, <u>坂本昭夫</u> , 他 31 名