県道直下の亜炭廃坑空洞調査と空洞充塡

岐阜大学　国際会員　沢田和秀，八嶋厚，学生会員○武田 和祥
岐阜県　纐纈 友宏、（一社）　充填技術協会　正会員　小松幹雄
地盤防災ネットワーク　国際会員　村田芳信

１．はじめに

岐阜県御嵩町は、亜炭廃坑の空洞が広い範囲で残されており、これまでに突然の陥没がたびたび発生してきたことから、町民等の安全な生活のため、特に緊急輸送道路の震災時の安全確保を目的として、岐阜県が管理する道路直下の亜炭廃坑空洞調査と空洞充塡工事を実施した。工事は、片側交通規制の道路上からボーリングにより空洞の有無を確認し、道路下の空洞に確実に充填ができるよう試行しつつ実行した。また、工事に際しては、ボーリング孔を利用した調査など、空洞の深さ、位置、大きさ等を把握するためのいくつかの調査を実施した。ここでは、道路下という限定された領域に対する空洞充塡工事の実際と、各種調査方法の空洞調査への適用について検討し報告する。

２．空洞調査

調査に先立ち、周辺住民への事業説明会を開催し、調査ならびに聞き取り調査への協力を要請した。

2-1. 既存資料収集ならびに現地踏査

工事前に確認された工事区間周辺の「浅所陥没および不等沈下による御嵩町家屋復旧箇所位置図（1959~2001）」、ならびに周辺住民への聞取りによる過去の陥没実績や採掘時の状況等の情報を図-1に示す。なお、既存資料による亜炭掘削箇所は図-1 範囲内には存在しない。

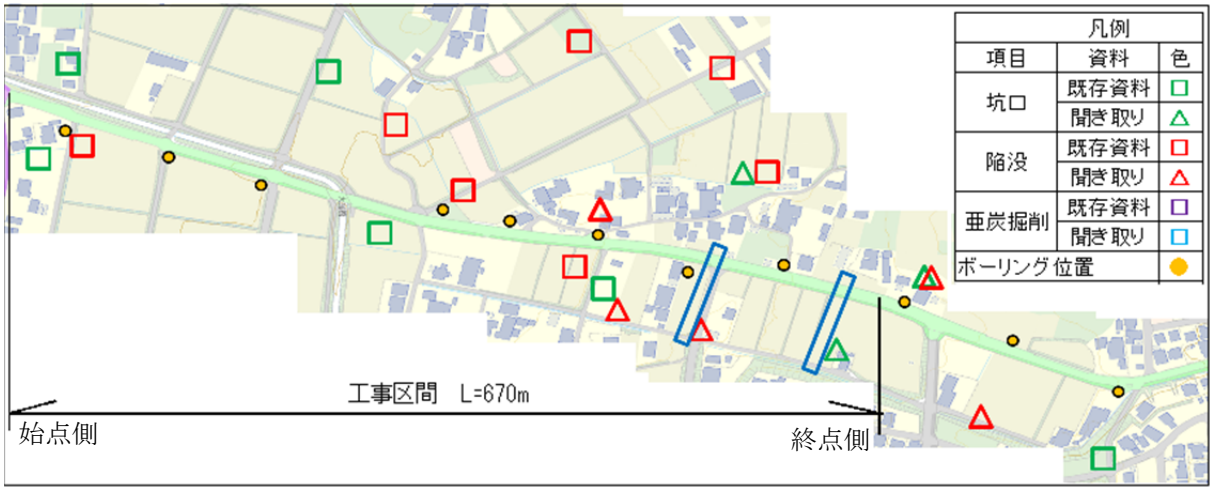


図-1　既存資料収集ならびに聞取り調査結果位置図

2-2. ボーリング調査

空洞の位置ならびに地質を確認するため、工事区間を含む約 1,200 m の区間で 13 か所の調査ボーリングを実施した。調査ボーリングは、深さ 30m まで 1m ごとに標準貫入試験を実施したが、30m 付近で亜炭層ならびに空洞が確認された場合には、深さ 35m まで掘進した。また、亜炭層が確認されたものの空洞が確認できない場合は、地表ボーリング位置から 2m 離れた地点で掘進のみによる空洞確認を亜炭層の下端付近まで実施した。これは、ボーリングが亜炭抗の残柱を掘進した場合を想定したもので、2 か所まで繰返し確認した。

Investigation of disused mine for lignite just beneath the prefectural road and its filling construction, Sawada,K., Yashima,A., Takeda,K.(Gifu University), Koketsu,T.(Gifu Prefecture), Komatsu,M. (Filling construction association), Murata,Y.(NPO Act against geo-hazard)

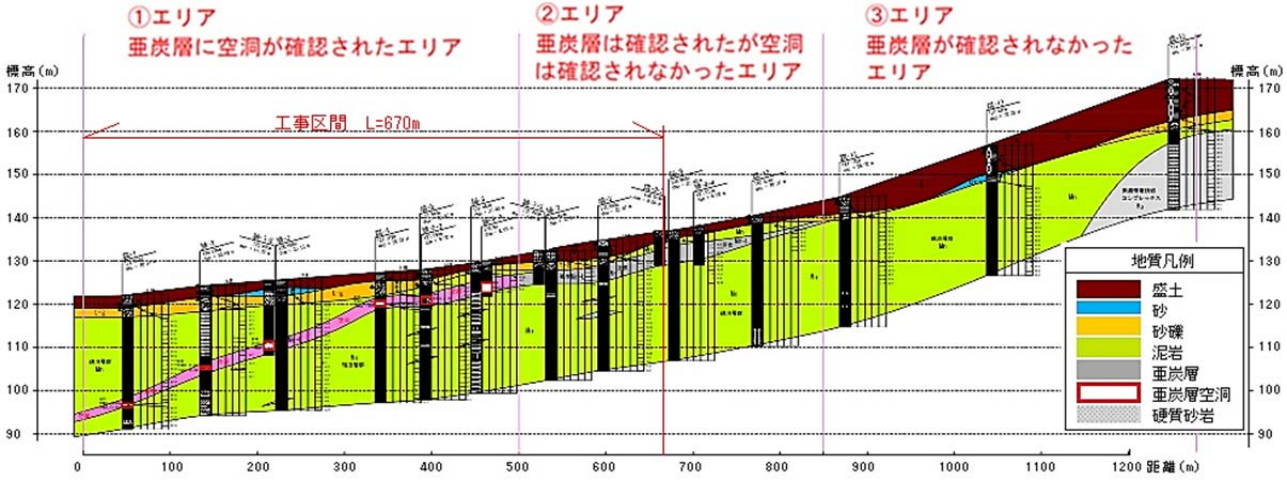


図-2　地質縦断面図（ボーリング調査結果）

ボーリング調査結果を図-2 に地質縦断面図として示す。図に示すように、表層はシルト分に富む盛土（もしくは砕屑物）に覆われており、始点から距離 900 m 付近までは層厚 1～3 m、距離 900m から終点側には最大 10 m ほどの厚さで分布する。また、始点から距離 900 m 間には、盛土下に 3 m ほどの厚さで砂礫層が分布することから、地表から深さ 6 m 付近に第三紀の泥岩層が現れる。ただし、距離 450m 付近では泥岩層が深さ 3m 付近に現れる。泥岩層中の亜炭層は、始点から距離約 300m間では、深さ 30 m～10 mの位置に層厚 2～3 m で始点に向かって深く分布する。また、距離約 300 m～800 m 間では、地表から 10 m 以浅に地表面とほぼ同じ勾配で、3 m ほどの層厚で連続することが確認された。さらに、距離約 800 m 地点から終点側では、ボーリング調査において亜炭層は確認されなかった。亜炭層内に空洞が確認されたのは、始点から約 500 m 間である。この結果より、始点から距離 500 m 間を①エリア：亜炭層に空洞を確認（ピンク）、距離 500 m～850 m 間を②エリア：空洞のない亜炭層を確認（灰色）、そして 850 m より終点側を③エリア：亜炭層は確認できず、とした。工事区間は、始点から距離 670 m までとした。

2-3. 物理探査ならびに抗内計測

地盤の状況を把握するために、弾性波探査（S 波反射法地震探査）を実施した。また、補足調査として、２次元表面波探査及び牽引式電気探査を実施した。さらに、ボーリング調査により空洞が確認された地点において、空洞の形態（坑道の大きさや広がりなど）や状態（地下水や崩落の有無など）等を把握するため、空洞が水没していない箇所はカメラ調査及びレーザーレーダー探査を、水没している箇所は音響測深探査を実施した。

(1) S 波反射法地震探査

始点から距離 1250m までの道路沿いに、S 波反射法地震探査を実施した。震源は、打撃式 S 波震源を使用し、1 起振に対し 1 データとして、測線上に 2mピッチで設置した S 波受振器 96ch 分をデータロガーで収録した。起振は、1 か所当たり垂直重合回数分（16 回発信）を実施して、4m ごとに移動を繰返した。解析は、反射法データ処理ソフトウェアを用いて、観測波形と測線の位置情報（X,Y 座標と標高）を入力し、抽出された重合時間断面を有限差分時間マイグレーション処理して深度断面に変換した。

図-3 に解析結果図を示す。図中には、ボーリング調査において確認された亜炭層の位置を□で示す。今回の S 波反射法地震探査では、100m程度までの岩盤層の確認（強い反射面である黒色の帯が確認できる）には有効であったが、亜炭層の特定や空洞の確認は難しいことが分かる。ただし、表層の微弱な反射面と空洞位置との整合性が見られることから、震源や起振方法（たとえば水平板たたき法など）を工夫することで、浅層の微弱な速度境界を抽出できる可能性はあると考えられる。

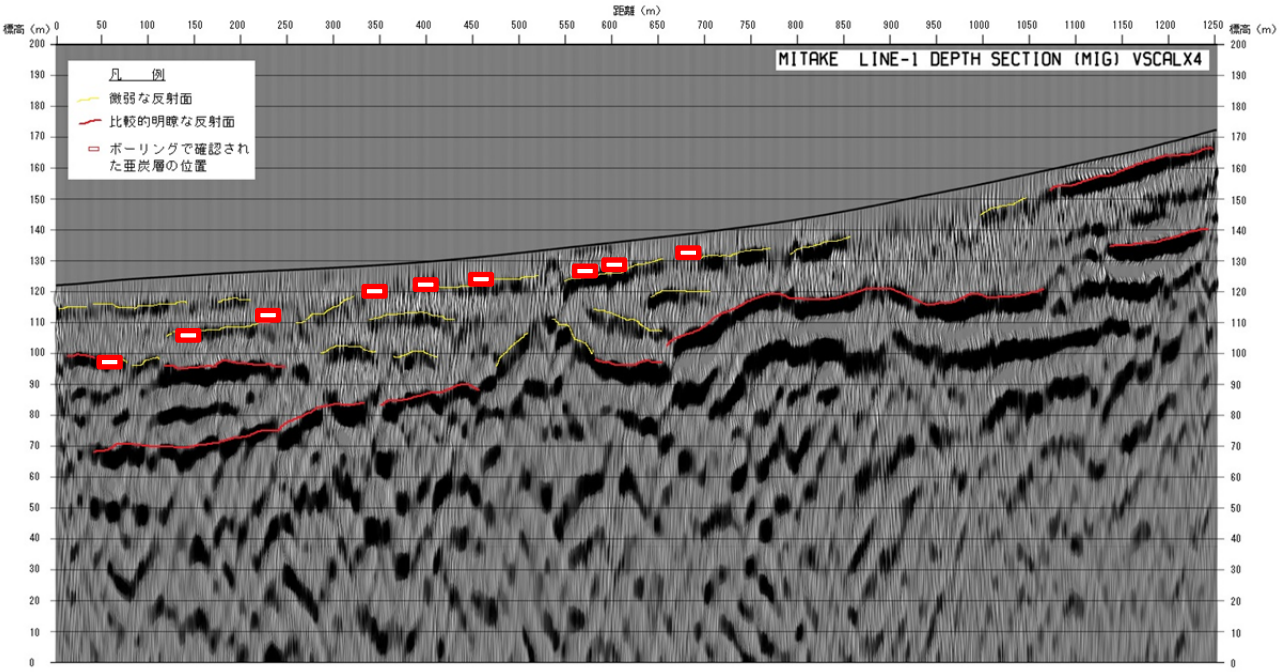


図-3　S 波反射法地震探査による解析結果図（S 波反射面分布図，図中□は亜炭層確認位置）

(2)　２次元表面波探査と牽引式電気探査

２次元表面波探査ならびに牽引式電気探査は、地盤を伝播する波動や電位を計測することから、亜炭廃坑のような小さな空洞を特定することは不可能である。一方で、空洞の上盤の沈下に伴うゆるみや、盛土への地下水侵入による脆弱化による影響などは、伝播速度や比抵抗値の変化となって現れる。

２次元表面波探査は、道路の路肩に沿って、受振器（4.5 Hz 地震計 24 ch×1.0～0.5 m ピッチ）を牽引しながら、2 m ごとにカケヤにより路面を打撃して、その振動を記録装置に収録する。打撃により励起された振動の大半は表面波であり、この表面波の周波数ごとの位相速度を求めることで、深さ方向の位相速度の分布を求めることができる（周波数ごとに位相速度が異なる「分散」という表面波の特徴）。

全自動装置[1)]による計測結果（0.5 m アレイ，4.5 Hz 地震計 24 ch×0.5 m ピッチ，測線長 11.5 m）、ならびにランドストリーマによる計測結果（1.0 m アレイ，4.5 Hz 地震計 24 ch×1.0 m ピッチ，測線長 23 m）を図-4 に並べて示す。図中段・下段より、測線長の長いランドストリーマによる計測の方が、全自動に比べてより深い地盤の S 波速度を反映することから、基盤の伝播速度（S 波速度）がやや大きな値を示す。一方、深さ 5m 付近までの浅い部分の伝播速度は、ほぼ同様な傾向を示し、地震計の測定間隔の小さな全自動の方が、より細かなアンジュレーションを捉えていることが分かる。特に、距離 380 m～420 m 間、580 m～640 m 間に、深さ 5 m 以深に低速度ゾーンが確認され、同時に浅い部分にも目玉状の低速度ゾーンがみられることから、亜炭廃坑の影響が疑われる。これは、岩盤層（亜炭廃坑の上盤）が沈下を生じ、さらにその上位の堆積層が緩んでいると考えられるものである。ただし、亜炭層を露天掘りした場合の埋土である可能性も否定できないので、亜炭廃坑や空洞の存在を特定できるものではない。

牽引式電気探査は、絶縁体である舗装面にダイポールケーブルをキャパシタ電極として交流電圧を印加することで、地中に連続的に電流を発生させ、これを距離の離れた複数のレシーバーで同様にキャパシタ電極間に生じる電圧を測定することで地中の比抵抗分布を捉えるものである。図-5 に牽引式電気検層結果である比抵抗断面図を示す。図より、距離 360 m～650 m 間の深さ 3 m 以下の比抵抗は小さく、亜炭層の分布と一致することが分かる。また、先の S 速度断面で見られた 2 つの特徴区間では、580 m～640 m 間では比抵抗の高まりがみられ、土の間隙率が大きいこと、もしくは粗粒材料であることが予想されるが、他方では見られない。ここでも、空洞の影響を特定することは難しい。

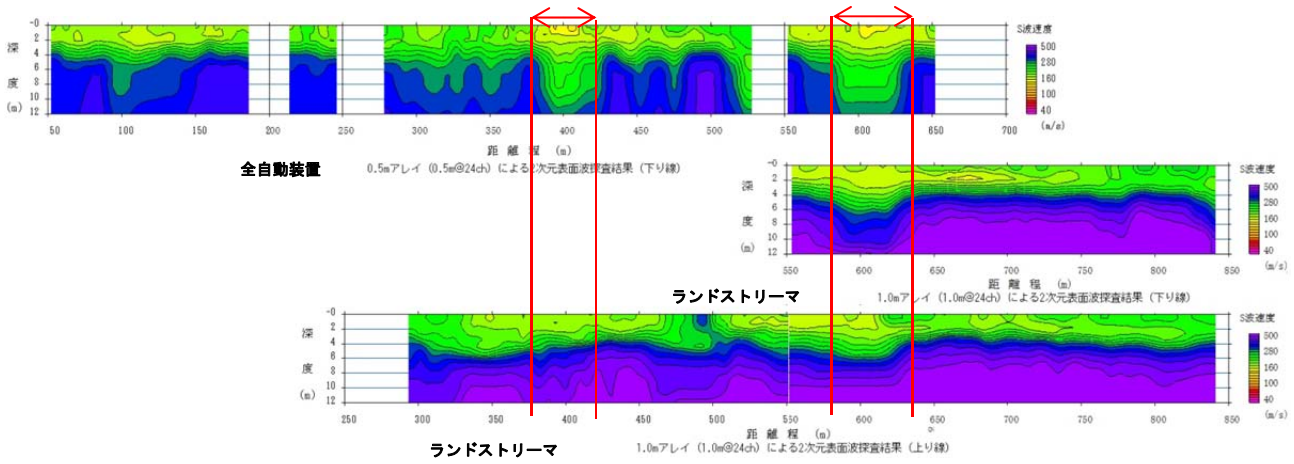


図-4　アレイ間隔の異なる S 波速度断面図の比較（0.5m@24.0m上図と 1.0m@24ch 中段＆下図）

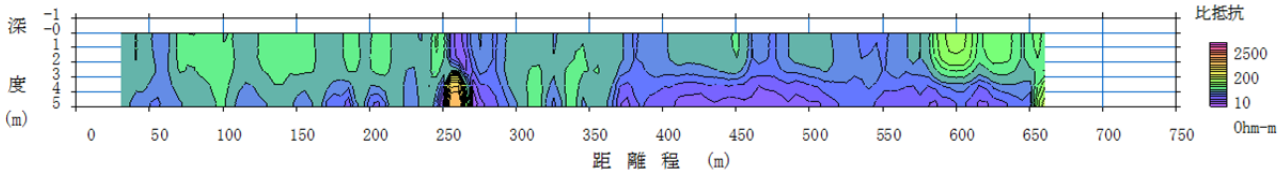
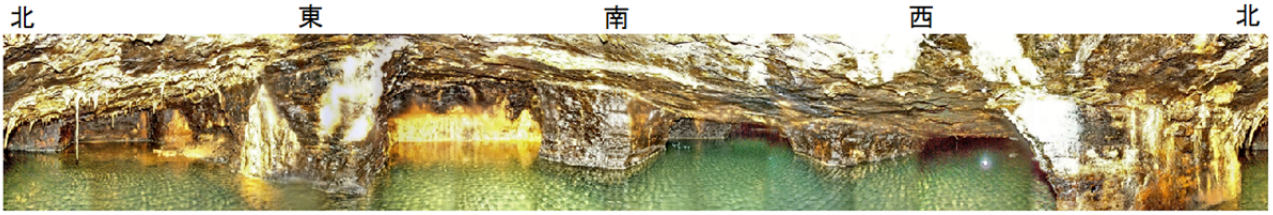


図-5　牽引式電気探査による比抵抗断面図

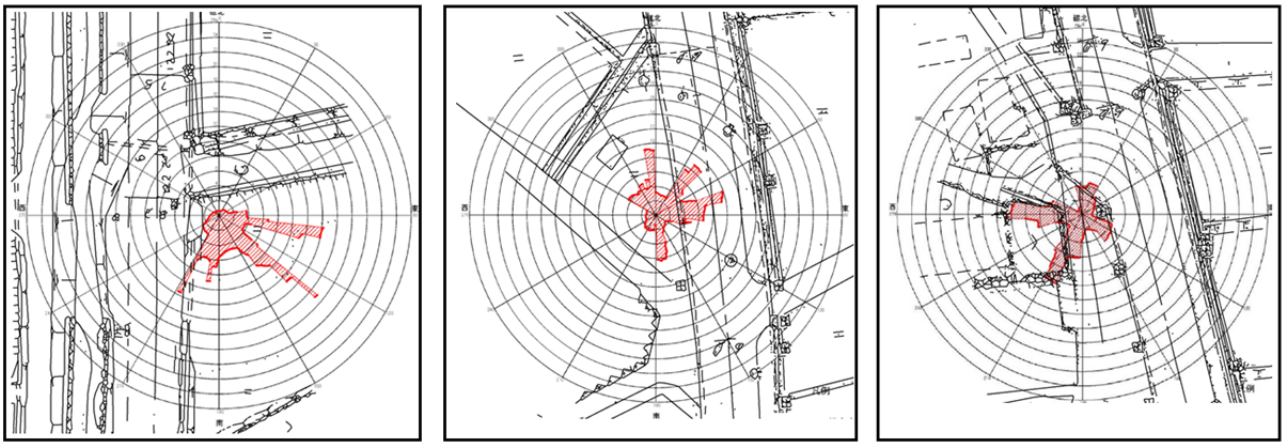
(3) カメラ調査及びレーザーレーダー探査と音響測深探査

ボーリング調査により、No.1，No.3，No.4，No.6 地点で、亜炭層内に空洞が確認された。このボーリング孔を利用して、空洞の内部を計測することのできるレーザーレーダー計測・空洞内写真撮影システムと水中部の計測が可能な音響測深機により、空洞の形態ならびに状態を調査した。

図-6 に、空洞内部のパノラマ写真（No.6 地点）と音響測深探査による空洞の平面的な分布範囲を示す。図より、亜炭鉱は残柱形式で掘られている様子が分かる。残柱は無作為で細く、裸抗で剥落跡も確認できる。天井の凹凸も一様でないことから、限定的な満量充填の難しさが予想される。



No. 6　パノラマ写真



No. 1　　No. 4　　No. 6

（図はボーリング孔を中心とした 1m ごとの同心円表示）

図-6　空洞内部のカメラ調査結果（上図）と音響測深探査結果（下図，空洞は円中心から反射点までをハッチング）

３．空洞充填工事

工事に先立ち、周辺住民への工事説明会を開催し、充填材が道路外にはみ出る土地の地権者より承諾書を取得してから充填工事に着手した。また、充填する空洞から荷重影響角度 45 度にかかる家屋に対して事前に家屋調査を実施した。さらに、充填する空洞から 100m 以内の既設井戸に対し、水道法に基づく水質検査を事前に 2 回、事後に 1 回実施した。

3-1. 充填孔ボーリング工

削孔機械は、油圧式ロータリーパーカッションを使用した。ただし、事前調査で空洞までの土被りが 10 m 以下で空洞上部の岩層が薄い距離 270 m～終点側は、削孔中の亜炭廃坑の崩壊が懸念されるためロータリー式（回転）での削孔とした。削孔径は、充填材を流し込む必要から、φ100 mm 程度を確保するものとし、ロータリーパーカッションでは、充填時に孔が自立しない土砂部分を内径φ100 mm の塩ビ管にて保護する必要からφ165 mm、岩部はφ115 mm とした。一方、ロータリー式では、充填時に孔が自立しない土砂部分は削孔時のケーシングパイプにて保護するためφ116 mm、岩部はφ96 mm とした。

道路は片側 1 車線を占用して行う必要から、片側車線の充填孔の孔口から道路中心直下の空洞天端位置にめがけて斜め削孔した。観測孔についても、用地の確保が難しい箇所では、充填孔の孔口からそれぞれの空洞天端位置（道路中心直下から 4m 離れた地点）にめがけて斜め削孔した。

充填孔の設置間隔は充填天端幅である 8m を基本として削孔し、空洞が確認できなかった場合には 8m を越えない地点で再度削孔するものとし、図-7 に示す手順で残柱に対処した。

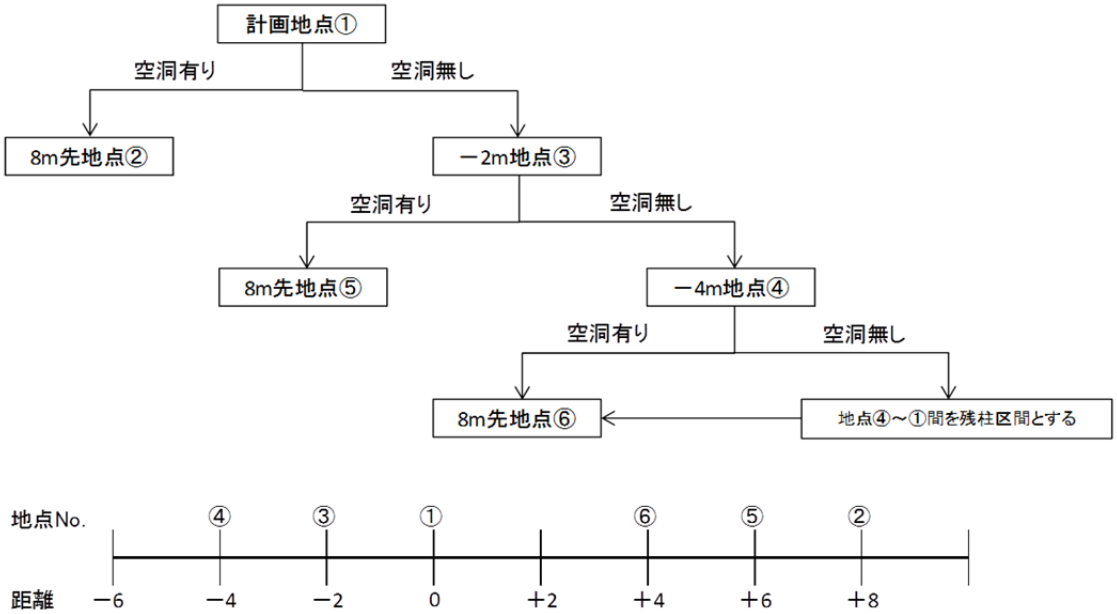


図-7　残柱対策のための充填孔の削孔位置フロー（上図）と模式図（下図）

3-2. 充填観測孔と充填工

充填材料は、岐阜県産（坂祝町）の砂キラを使用した。配合は、施工実績のある当初設計配合値を基本として配合試験を実施し、設計テーブルフロー値、材齢 28 日一軸圧縮強度 q_{u28} が 100 kN/m^2 以上を満足することの他、外観、沈殿、材料分離、ワーカビリティを注視して決定した（表-1）。また、充填材の品質確保のため、表-2 に示す品質管理試験を実施し、適切に管理した。道路直下の限定充填に当たり、充填時の充填材の広がり方や、縦横断勾配（前の充填材の上に充填）による偏り方の有無を確認するため、始点から距離 100 m までの区間では充填孔の両端（4m 離れ）に充填観測孔を設けるとともに、次の充填孔（8m 離れ）とその両端の計 5 か所を充填到達観測孔として観測施工した。充填状況は、充填到達観測孔に設置した感知センサー及び検尺棒により、充填高さをリアルタイム管理して実施した（図-8、図-9）。

表-1　充填材の配合表（１㎥あたり）

材料名		配合
A液	粘土キラ(kg)	220
	砂キラ(kg)	220
	特殊水ガラス(kg)	48.8
	水(kg)	676
B液	特殊土用固化材(kg)	90
	超遅延型減水剤(kg)	0.27
	水(kg)	90

表-2　充填材の品質管理試験

項目	頻度	規格値	方法
フロー値	2回／日	140～180mm	テーブルフロー試験
ブリーディング率	2回／日	3%以下	袋法
ゲルタイム	2回／日	ー	カップ倒立法
一軸圧縮強度	2回／日	100kN／㎡(qu28)	一軸圧縮試験
単位体積重量	2回／日	1.30～1.50	密度試験
六価クロム溶出量	1回／月	0.05mg／L 以下	環境省基準

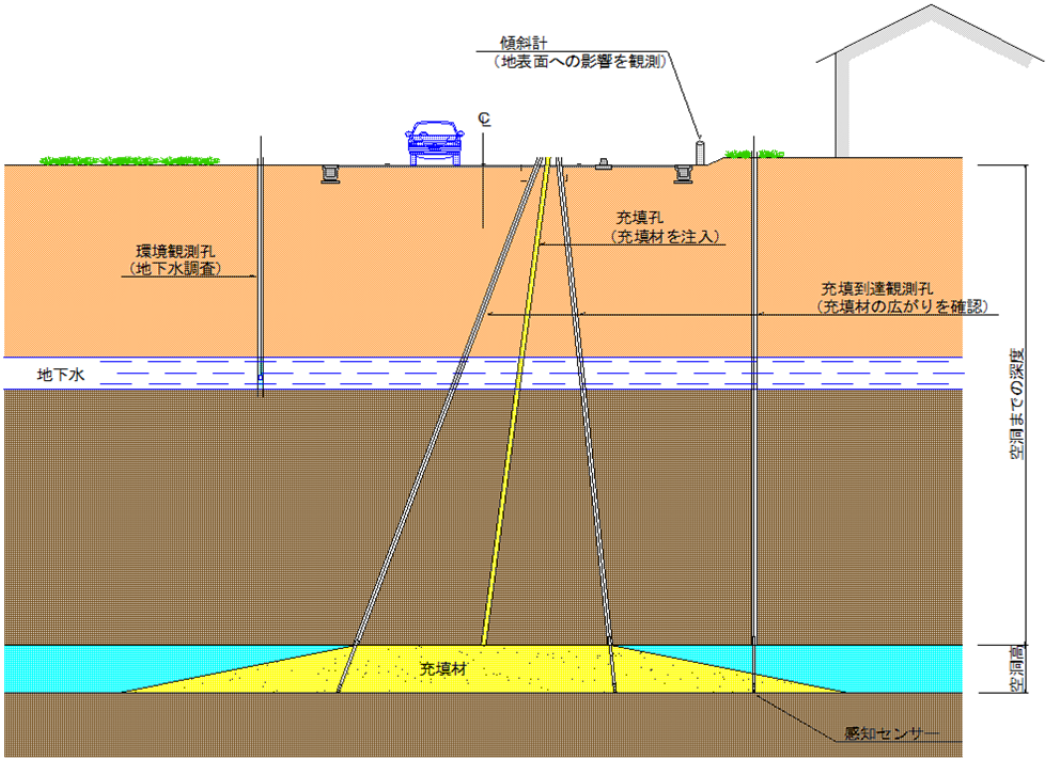


図-8　充填工事の横断概要図

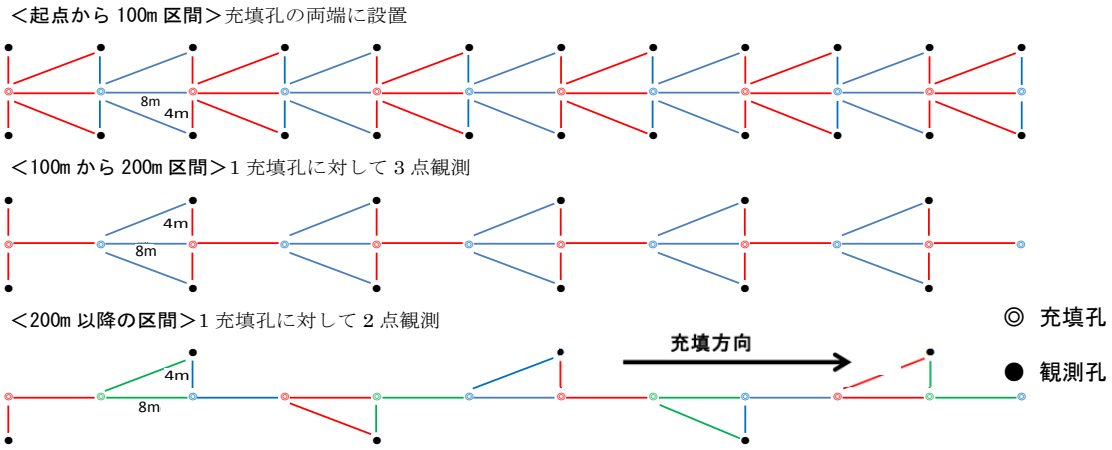


図-9　充填孔と充填到達観測孔の配置基本図

その結果、充填材は、偏りなく道路直下に充填されることが確認できたので、距離 100 m~200 m 区間では 1 充填孔に対して両端と次の充填孔（もしくは次の充填孔とその両端）の 3 点観測とし、さらに、距離 200 m 以降の区間では、次の充填孔とその片端（もしくは充填孔の片端と次の充填孔）の 2 点観測として、充填観

測孔の本数を徐々に削減した。ただし、計画充填量に対する実際の充填量に過度な相違が出ないように、次の充填孔が閉塞しない範囲で充填を継続することとした。充填量は、充填ポンプに検収済の流量計を設置し、自動記録装置によるチャートにより管理した。

表-3　原位置簡易水質試験の観測頻度

時期	頻度	試験項目
充填前	2 回以上	pH、SS、水位
充填中	1 回／日	
充填後	充填後 2 週間まで 1 回／日	

このほか、充填による周辺構造物への影響をいち早く察知するため、据置型 2 軸傾斜計 5 台を充填孔周辺に設置し、リアルタイム監視を実施した。また、充填による周辺水質への影響を確認するため、既存の井戸及び環境用観測孔において、表-3 に示す原位置簡易水質試験を実施した。さらに、事前調査を実施した家屋及び既設井戸に対して、充填による影響の有無を確認するための事後調査を実施した。

施工された充填材が、設計の強度を有しているかを確認するため、ボーリングにより原位置の充填材をサンプリングし、一軸圧縮試験を実施した。確認ボーリングは、100 m に 1 箇所程度（計 12 箇所）を基本とし、残柱または残滓が多い箇所、充填量が周辺に比べて少なかった箇所等を選定し、デニソンサンプラーを用いて乱れの少ない試料を採取し、試験に供した。

3-3. 施工結果

充填孔ボーリングならびに充填到達観測孔ボーリングにより確認された亜炭層ならびに空洞を図-10 に示す。始点から距離 420 m 間は、点々と残柱と思われる箇所が確認されたが、概ね調査どおりの空洞が出現した。また、距離 420 m から 500 m 間は、道路区域ではほとんど空洞が確認されなかった。さらに、距離 500 m から 670 m 間も、ほとんど空洞は確認されなかったが、２次元表面波探査により空洞の可能性が指摘された 2 箇所のうちの距離 580 m～640 m 間において空洞が確認されたほか、0.5m アレイによる２次元表面波探査の端部に確認された距離 530m 付近低速度ゾーンでも空洞が確認された。なお、発見された空洞以深の亜炭層の分布については、今回の調査では明かでない。

充填材の品質管理試験では、全充填区間の全試験で規格を満足する結果となった。また、全ての充填到達観測孔への充填材の到達を確認した結果、充填量は 7,952 m^3 となった。これは、計画充填量 8,830 m^3［空洞率 80%］に対して約 90%の充填量となっているが、空洞率を 70%とすると充填量は約 100%となる。ここで、ボーリングによる空洞調査において、空洞に当たった比率を空洞率とした。このことから、当区間で採掘された亜炭廃坑における空洞率は 70%であると推定される。

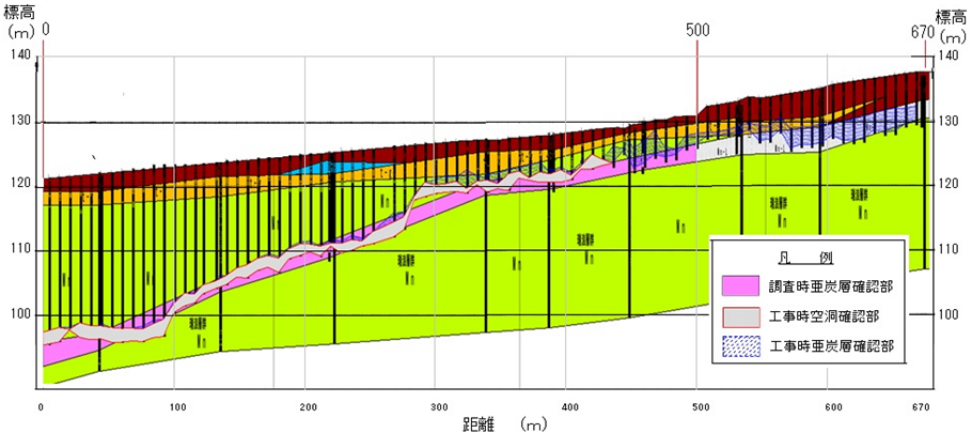


図-10　充填工事における亜炭層ならびに空洞確認結果

4．まとめ

道路直下の空洞充填工事により得られた知見を以下に整理する。

- 周辺住民への事業説明ならびに工事説明を通じ、亜炭廃坑に関する重要な聞取り情報が得られたと同

時に、住民の亜炭廃坑に対する危機意識の醸成を図ることが重要である。

- 亜炭空洞調査に、物理探査の有効性は乏しい。ただし、後述するように、道路の舗装の健全性評価ならびに亜炭空洞の存在によって路盤下に発生したゆるみの早期確認に効果的である。
- ボーリング調査は、深さ 1m ごとの標準貫入試験の実施により有用な情報が得られる。ボーリング調査の間隔は 100m程度で、亜炭層ならびに空洞の連続性を捉えることができた。地表から十数mの範囲であれば、２次元表面波探査の併用で、より効率的で効果的な調査が可能と考えられる。
- カメラ調査及びレーザーレーダー探査と音響測深探査は、空洞の形態ならびに状態の把握にも有用で、充填工事の施工を検討する上でも役立つ。
- 建物調査は、空洞天端における充填材端部から 45 度範囲の家屋に対して実施した。
- 既設井戸への影響確認に対する水質調査は、充填箇所の道路センターから 100 mの範囲とし、今回は問題もなく十分な措置と判断するが、井戸水の利水状況や水道の普及状況によって、適宜必要な範囲ならびに措置を講ずる必要がある。
- 今回、限定充塡工法による端部充填材 [2)]のみでの施工であり、充填管理には充填到達観測孔による確認について試行錯誤で実施した。結果的に、充填孔間隔を 8 m を基本としたのは、過去の経験からも適正と判断され､充填到達観測孔の 2 点観測が施工管理面やコスト面でも妥当であったと判断される。
- 充填工について、充填到達観測孔への到達状況や充填量により次の充填孔へ移行するかを決定したが、残柱（未採掘箇所）に囲まれた充填孔では、充填材が満杯になると充填圧力が急上昇し、全充填孔が予定高さに達する前、又は計画充填量に達する前に、それ以上充填が出来なくなるケースがあった。充填圧力、傾斜計値、充填到達状況を総合的に判断して、その孔に対する充填完了を決定する必要があるが、今後はこの知見をマニュアル化して安全施工の継続を図る必要がある。
- 確認工は、サンプリングと一軸圧縮試験による管理を行ったが、試験はサンプリングコアの良いところを試験することになる。今後は、原位置試験などの適用も含めて、簡便で確実な性能評価手法を検討する必要がある。

５．おわりに

図-11 に、充填工事後に 1.0m アレイでの 2 次元表面波探査による S 波速度断面図を示す。充填量の多かった距離 380 m～420 m 間の 5m 以深の低速度ゾーンはなく、改良効果が確認できる。一方、充填量の少ない距離 580 m～640 m 間では、従前とほとんど変化は見られない。さらに、表層部の目玉状の低速度ゾーンについても従前と変わりなく緩んだままである。今後、これらのゆるみが舗装の沈下やひび割れとなって現れる危険が高いので、留意する必要がある。

道路直下の空洞充填工事は、南海トラフ巨大地震の襲来に備えた予防対策である。地域住民の安全な生活の確保と緊急輸送道路の安全確保を目的とした、健全な道路の補修対策を講じる上で、本工事報告が役立つことを祈る。

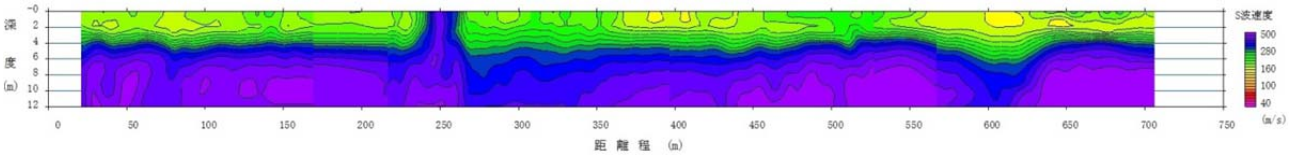


図-11　充填工事完了後の 1.0m アレイでの 2 次元表面波探査結果による S 波速度断面図

参考文献

1)　２次元表面波探査の全自動化技術の開発、村田芳信、八嶋厚、沢田和秀、土木学会第 66 回年次学術講演会(平成 23 年度)概要集、pp.735-736、2011.

2)　限定充塡工法、一般社団法人 充填技術協会ホームページ