

空洞充填効果の評価に対する亜炭周辺岩盤の動的モニタリング法とその適用

藍檀 オメル^{1*}・坂本 昭夫²，杉浦 乾郎²，和田 幸二郎²

¹琉球大学工学部 環境建設工学科（〒903-0213沖縄県中頭郡西原町千原1番地）

² 飛鳥建設株式会社 名古屋支店充（〒460-0017 愛知県名古屋市中区松原3丁目2-8）

*E-mail: : aydan@tec.u-ryukyu.ac.jp

岐阜県御嵩町では、南海トラフ巨大地震に対する危険度がレベル1と評価されたことを根拠として南海トラフ巨大地震亜炭鉱跡防災モデル事業防災工事（空洞充填）が施工されている。充填工事によって、地盤の変形および支持耐力が改善されることが期待される。そのため、充填前後の地盤の振動特性を把握するために、地震時および重錘（1トンの砂袋等）落下による加速度の計測を行い、地盤の固有振動特性を求め、さらに、常時微動法も利用して地盤の振動特性について計測を行なっている。本論文でこれらの調査・計測法とその結果について報告し、現場モニタリング法を用いて空洞充填工事による充填効果（地盤の安定状態への改善）を検証している。

Key Words : *abandoned lignite mines, room and pillar, back-filling, earthquake, subsidence, sinkhole*

1. はじめに

エネルギーの主役が石炭であった時代に日本では亜炭と呼ばれる石炭が大量に採掘されていた。古い文献によると日本における亜炭の発見は今から100年前にさかのぼるとされている。この亜炭は比較的、浅い所にしかも広範囲に大量に存在していたため、規模の小さな個人経営による採掘会社が各地で誕生、採掘を始めた。亜炭の採掘には主に残柱方式という工法がとられており、地中で地層を柱状に残しその周りを掘っていく掘削工法であった。

現在の日本各地には数多くの亜炭廃坑が存在している。特に東海地域において、これら亜炭廃坑は集中した形で存在している。亜炭廃坑は閉山から約40年の時間を経過したものが多く、それらの地域の内部ではさまざまな風化や劣化による損傷が進んでおり、その上部では地表面沈下や陥没などによる事故が少なからず発生し始めている。近年、この様な亜炭廃坑を有する地域で発生する問題に対して、さまざまな検討が行われている。

東日本大震災で見られたように数多くの亜炭廃坑に陥没が発生し、その数は320箇所を越している¹⁾²⁾³⁾。愛知県や岐阜県御嵩町に数多く亜炭採掘跡が存在し、採掘終了より約40年経過している。亜炭地域を構成する岩盤は堆

積岩であり、重力、地震、上載荷重の変化とクリープの影響とは別に、これらの岩盤は含水の変化によって劣化する特徴を有している。

愛知県や岐阜県御嵩町に数多く亜炭採掘跡が存在し、廃坑内では天端の落盤と残柱の逐次破壊と亀裂の進展している様子が確認されている。今後予想される巨大地震によるさらなる陥没の発生が危惧される。充填工事によって、地盤の変形および支持耐力が改善されることが期待される⁴⁾。岐阜県御嵩町では、南海トラフ巨大地震に対する危険度がレベル1と評価されたことを根拠として南海トラフ巨大地震亜炭鉱跡防災モデル事業防災工事（空洞充填）が開始された。

廃坑の充填によって、地盤の支持力および変形特性がどのように改善されたかを確認することが必要である⁵⁾。その確認法の一つとして、充填前後の地盤の振動特性を把握することが考えられる。それを確かめるために、地震時および重錘（1トンの砂袋等）落下による加速度の計測を行い、地盤の固有振動特性を求め、さらに、常時微動法も利用して地盤の振動特性について計測を行なっている。本論文でこれらの調査・計測法とその結果について報告し、現場モニタリング法を用いて空洞充填工事による充填効果（地盤の安定状態への改善）を検証し、個別有限要素法を用いて充填の効果をj確認する。

2. 計測システム

充填前後の地盤の振動特性を把握するために、地震時および重錘（1トンの砂袋等）落下による振動計測および常時微動法を利用することし、各システムの特徴について、ここで述べる。

(1) 地震観測システム

図-1および図-2に、種々の建造物の加速度応答を安価で簡易に計測する目的で新たに開発したスタンドアロン型の加速度計を示す。本加速度計は、加速度センサー、データロガー（2GB）および内蔵バッテリーで構成され、長期の観測を考慮し、外部電源による蓄電も可能となっている。今回、電源を供給するためソーラーパネルを利用している。また、データ計測開始のトリガー設定、計測インターバル設定、計測時間設定などの各種機能をPCで簡易に設定できるようになっている。

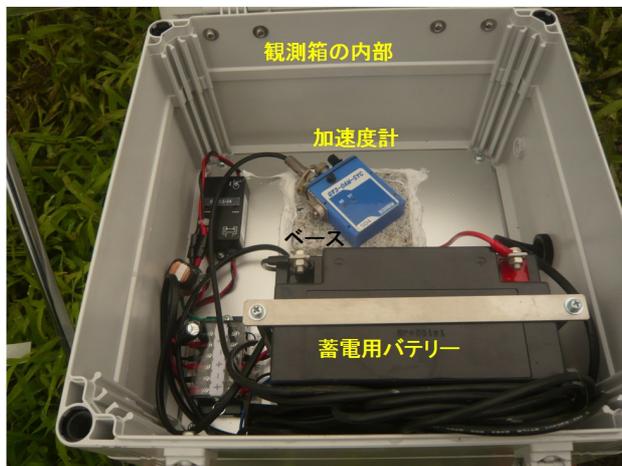


図-1 加速度計設置状況の様子



図-2 地震観測システムの様子

(2) 落下試験による振動特性計測システム

落下試験用に振動計測で用いている加速度計をシンク

ロできるサンプリング間隔が50 μ sに設定が可能なものに改良した。各加速度計をワイヤーで接続し、加速計間を6mまで離すことが可能であり、最大でライン上に30mまでの計測が可能である。落下物は円筒の形を持つ1トンの砂袋である。パルスの振動を与えることが可能である砂袋を高さ1mから落下させた（図-3）。



図-3 落下試験と振動計測システム

(3) 常時微動計測システム

常時微動計測システムの基本的な原理は、大地が常時に揺れていることに基づいている。その振動の計測より計測場所の固有の振動特性を把握することが可能である。今回、充填前後の地盤の振動特性を把握するために、常時微動計測システムも利用することとした。計測の様子を図-4に示す。

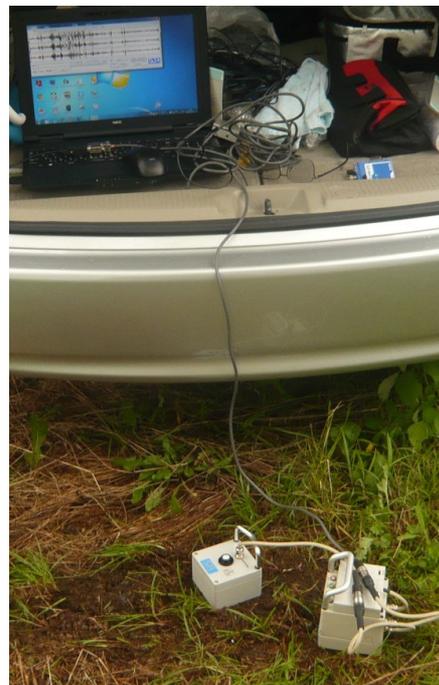


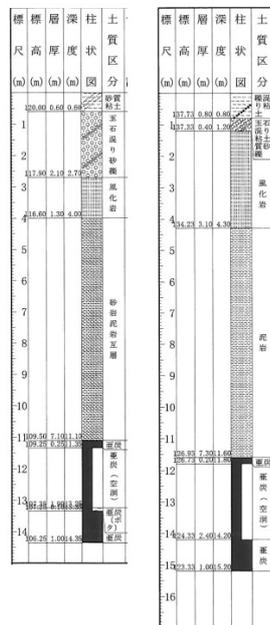
図-4 常時微動計測システムと計測の様子

3. システムの設置位置

御嵩町比衣地区第2期防災工事の充填現場で計測を行うこととした。事前の調査で空洞内に水の状況が確認され、空洞内に水が存在するによって地盤の振動特性が異なることを考慮して、計測対象地点として2箇所を選定した。計測地点の一つ目は空洞内に水なしで、二つ目の地点において空洞内に水が存在している（図-5）。図-6に観測位置における地盤の柱状図を示す。水なしの地点において空洞深さは11mで、水あり地点においては、約12mで、空洞高さは2mである。



図-5 御嵩町比衣地区における計測・観測位置



(a) 水なし (b) 水あり

図-6 観測地点における地質柱状図

4. 計測結果と考察

選定した計測地点でまだ充填工事がまだ行なわれてい

ないので、計測結果は充填前の状況に限定され、今までに得られた結果について述べる。

(1) 地震観測システムによる計測結果

現在加速度計のトリガーレベルを16galsに設定し、計測を2015年7月17日に開始した。上記のトリガーレベルは気象庁震度法で震度3に該当する。今までに御嵩町で震度3あるいはそれを超えるような地震が発生していない。しかし、工事に伴う振動と別に興味深い記録が一つ取られている。2015年7月20日午前10時ごろ観測地点から約120m離れた位置で陥没が発生した（図-7）。この陥没による加速度記録を図-8に示す。加速度の最大値は500galsを超えている。また陥没の位置を記録より読み取することもできる。



図-7 2015年7月20日に発生した陥没の様子

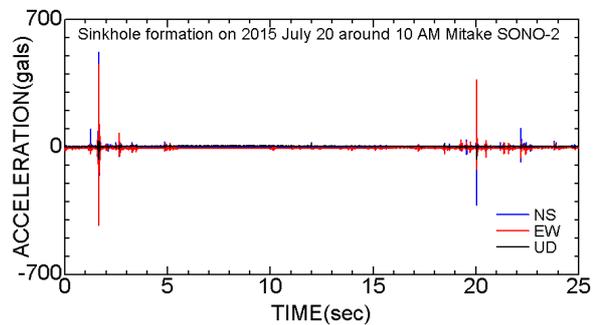


図-8 2015年7月20日に発生した陥没による加速度記録

(2) 落下試験による振動特性計測結果

各計測地点ごとに3回、計測を行なった。図-9は空洞内の水なし地点における加速度記録の一つを示し、両加速度計の間の距離は25mである。初動の読みから弾性波速度は約731m/sである。

図-10は、空洞内の水あり地点における1番前と5番目の加速度記録を示す。この場合も両加速度計の間の距離は25mである。初動の読みから弾性波速度は約1127m/sである。岩盤の空隙・亀裂などは地下水で飽和されていることから、弾性波速度が高くなったことが言える。両地点における計測結果の比較から、空洞内に空気以外の物質が存在すると、岩盤の弾性波速度が上昇することが言える。

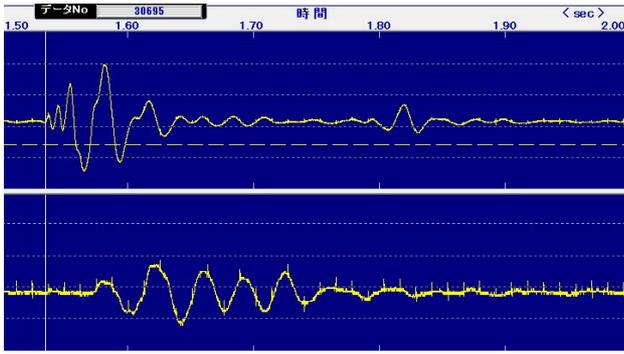


図-9 水なし地点における加速度機録

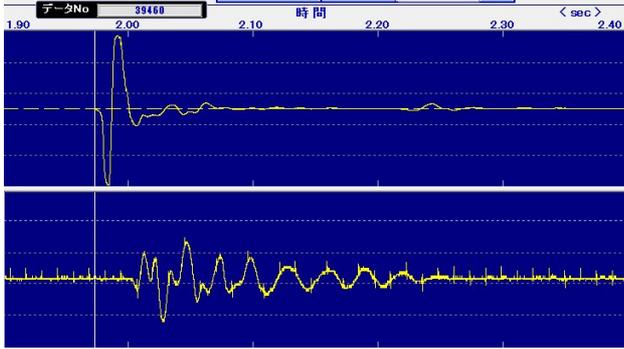


図-10 水あり地点における加速度機録

空洞内の地下水で完全に飽和されていない地点でも追加計測が行なわれた。この地点で落下物より20m離れた位置における加速計の記録を図-11に示す。また、加速度記録のFourierスペクトルを図-12に示す。同図に示すように、明確な振動特性が見受けられる。

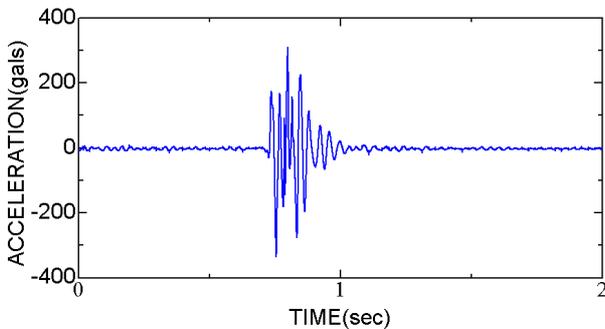


図-11 追加計測地点における加速度記録

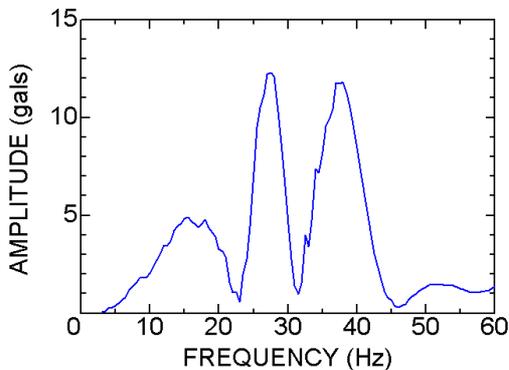


図-12 図-11に示した加速度記録のFourierスペクトル

(3) 常時微動

地震観測および落下試験を実施した両地点で常時微動計測を実施した。各地点で、3回計測を行なった。記録の解析に関して、鉛直成分のFourierスペクトルとH/Vスペクトルを用いてデータを整理されることが一般的である。図-13と図-14は、空洞内に水なし地点の鉛直成分のFourierスペクトルとH/Vスペクトルを示す。鉛直成分のFourierスペクトルについて5Hzと13Hzで固有の周波数が見受けられる。一方、H/Vスペクトルにおいては3秒と8秒に固有な値が見られる。

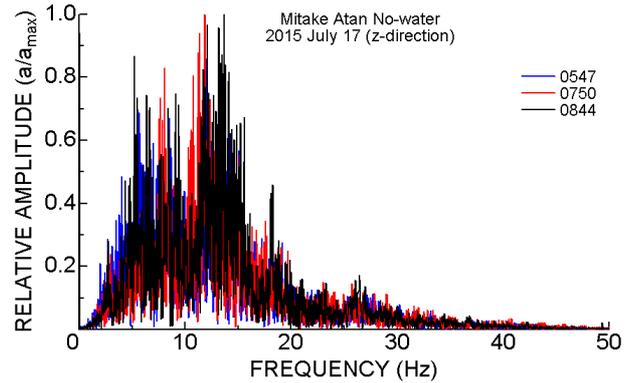


図-13 Fourierスペクトル

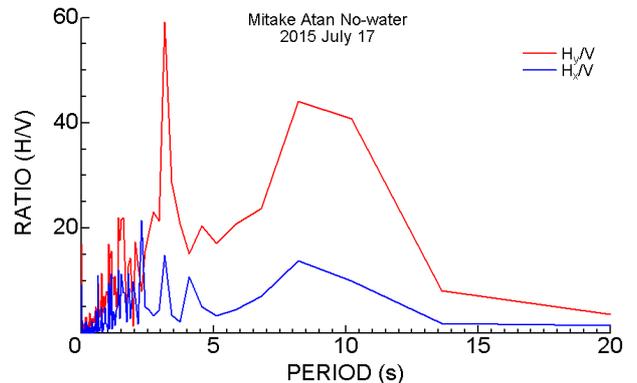


図-14 H/Vスペクトル

図-15と図-16は、空洞内に水あり地点の鉛直成分のFourierスペクトルとH/Vスペクトルを示す。水なし地点と同様に、鉛直成分のFourierスペクトルについて周波数5Hzと13Hzで固有の周波数が見受けられる。一方、H/Vスペクトルにおいては3秒と5秒に固有値が見られる。

現時点で対象計測地点で充填工事はまだ行なわれていないので、充填前後の振動特性について、議論できない。しかし、充填前後の振動特性について、解析的に検討した結果を次節で紹介する。また、現時点で得られた計測結果との比較を行なうこととする。

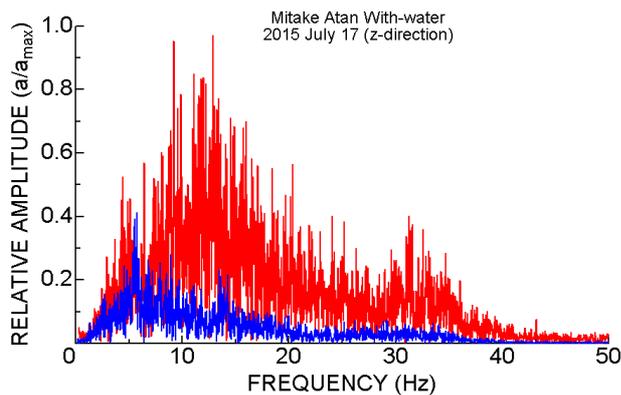


図-15 Fourierスペクトル

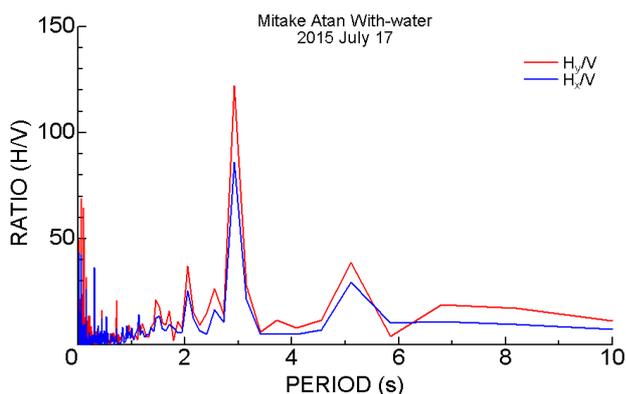


図-16 H/Vスペクトル

5. 地盤の固有振動特性

図-5に示したように、対象地域で亜炭層の深さは6mから12mの間に変化している。掘削率は約70%であることを考慮して、伝達マトリクス法を用いて、充填されていない状態に対する地盤の増幅特性を求めた。その結果を図-17に示す。亜炭層の深さが大きくなると、地盤の固有の周波数は低下する。対象地域における亜炭層の深さ6-10mに対して固有の周波数は3.05Hzと3.76Hzの間に変化している。この結果は、図-13から図-16に示した計測結果に大変類似している。

次に亜炭廃坑は充填されたことを考慮して、行なった解析結果を図-18に示す。充填物のS波速度を200m/sであると仮定した。廃坑を充填することによって、地盤の増幅率が大きくなっているが、地盤の固有の周波数は充填されていない状態に比較して増加している。地盤の剛性が高くなることによって、地盤の固有周波数が大きくなることである。周波数の増幅は約1.3Hzである。このことは地盤の弾性波速度は増大することを意味する。現時点で、計測対象地域で充填工事はまだ行なわれていないので、上記の推定を確認できない。

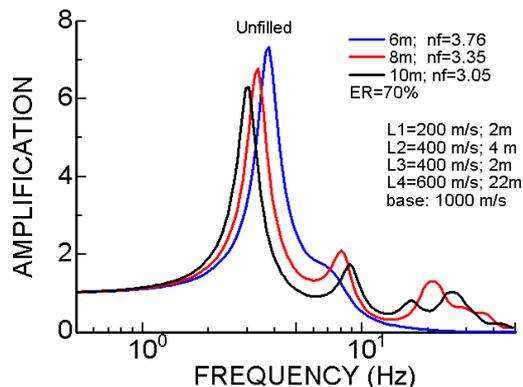


図-17 充填されていない状態に対する地盤の増幅解析

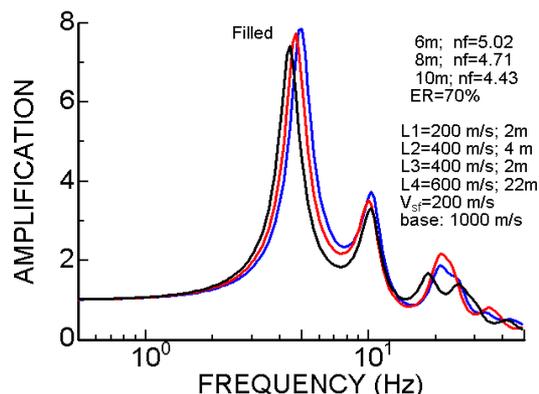


図-18 充填されている状態に対する地盤の増幅解析

6. 個別有限要素法による充填効果の解析的検討

Aydanら⁶⁾は、不連続性岩盤構造物の不安定性および大変形問題に関して個別有限要素法を提案した。この手法を用いて、亜炭廃坑における充填の効果について行なった解析結果を紹介する。深さ6m、残柱高さ4m、残柱幅は2mと仮定し、解析に用いた物性値を表-1に示す。

表-1 解析に用いた物性値

材料	$\lambda (E_n)$ (MPa)	$\mu (E_s)$ (MPa)	γ (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)	σ_t (kPa)
上部層	200	200	22	-	-	-
亜炭	200	200	14	-	-	-
下部層	300	300	22	-	-	-
充填材	100	100	14	-	-	-
破壊面	200	10	-	10	10	5

今回の解析を12ステップまで行い、その解析ステップにおける変形の状況を図-19に示す。廃坑が充填されていないと残柱にせん断破壊が見られ、徐々に地表面が沈下している。一方、廃坑が充填されている場合、第2ステップから沈下が収まっている。図-20に、地表面の沈下

を比較している。この図からわかるように充填することによって地盤の沈下を抑制することができる。

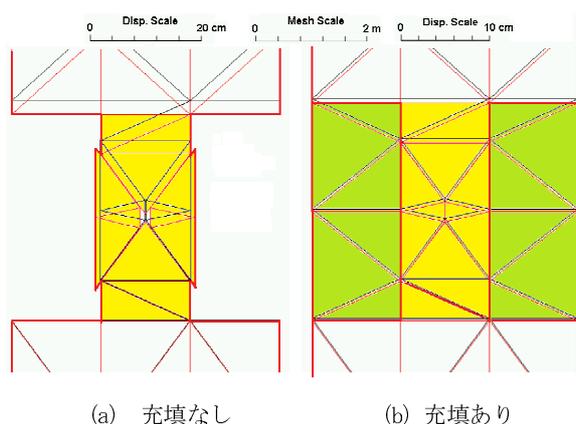


図-19 第12ステップにおける廃坑の変形状況

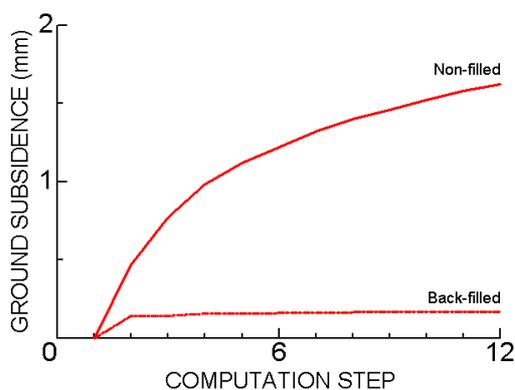


図-20 充填効果に対する地表面の沈下の比較

7. 結論

本論文で行なった調査・計測法とその結果について報告し、現場動的モニタリング法を用いて空洞充填工事による充填効果（地盤の安定状態への改善）を検証した。

- 1) 坑の充填によって、地盤の支持力および変形特性がどのように改善されることを確認する方法の一つとして、充填前後の地盤の振動特性を把握することを考え、地震時および重錘（1トンの砂袋等）

落下による加速度の計測を行い、地盤の固有振動特性を求める。さらに、常時微動法も利用して地盤の振動特性について計測を行ない、充填前の地盤の振動特性を把握することができた。

- 2) らに、伝達マトリクス法を用いて、充填前後における地盤の振動特性を求めた。充填によって、地盤の固有の周波数特性が高くなることを定量的に求めることができた。
- 3) 亜炭廃坑が充填されていない状態において、計測結果と解析結果が大変類似していることが明らかになった。
- 4) 個別有限要素法を用いて行なった解析より、充填によって地盤の沈下を抑制することができることが明らかになった。

参考文献

- 1) 藍檀オメル・杉浦乾郎・坂本昭夫(2013):亜炭廃坑がある地盤の地震動特性について。第13回国内岩盤力学シンポジウム, 519-524, 2013.
- 2) Aydan, Ö., Kawamoto, T., The damage to abandoned lignite mines caused by the 2003 Miyagi-Hokubu earthquake and some considerations on its causes. 3rd Asian Rock Mechanics Symposium, Kyoto, Vol.1, 525-530, 2004.
- 3) Aydan, Ö., Tano, H., The observations on abandoned mines and quarries by the Great East Japan Earthquake on March 11, 2011 and their implications. Journal of Japan Association on Earthquake Engineering, Vol.12, No.4, 229-248, 2012.
- 4) Aydan, Ö., Tokashiki, N., An experimental study on the supporting effect of backfilling on abandoned room and pillar mines and quarries and karstic caves. The 47th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium, San Francisco, ARMA 13-379, 10p, 2013.
- 5) Geniş, M., Aydan, Ö., A numerical study on the ground amplifications in areas above abandoned room and pillar mines and longwall old mines. The 2013 ISRM EUROCK International Symposium, Wroclaw, Poland, CRC, 733-737, 2013.
- 6) Aydan, Ö., Mamaghani, I.H.P., Kawamoto, T., Application of discrete finite element method (DFEM) to rock engineering structures, NARMS '96, pp.2039-2046, 1996.

DYNAMIC MONITORING FOR THE EVALUATION OF THE EFFECT OF BACK-FILLING OF ABANDONED LIGNITE MINES AND ITS APPLICATIONS

Ömer AYDAN, Akio SAKAMOTO, Kenrou SUGIURA and Kojiro WADA

In this study, the authors presented the outcomes of a dynamic monitoring scheme to evaluate the supporting effect of backfilling on the response and stability of abandoned lignite mines and its application to actual projects. The measurements were carried out before the abandoned mine are backfilled. The measurements will be re-carried out after the backfilling. They will be compared with each other. In addition some numerical analyses were carried out to estimate the anticipated values of vibration characteristics of the ground before and after backfilling.