

地震による亜炭廃坑の破壊形態と その安定性の評価

太田 良巳¹・アイダン オメル²・杉浦 乾郎³・坂本 昭夫³・山田 紀利³

¹東海大学大学院 海洋学研究科海洋工学専攻 (〒424 - 8610 静岡県静岡市清水区折戸 3 丁目 20 - 1)

E-mail: 4aoim005@scs.u-tokai.ac.jp

²正会員 東海大学海洋学部 教授 (〒424 - 8610 静岡県静岡市清水区折戸 3 丁目 20 - 1)

³飛鳥建設株式会社 名古屋支店 (〒460-0015 愛知県名古屋市中区大井町 6-14)

近年、全国各地で亜炭廃坑の存在が大きな社会問題となっている。このような地域でも都市化が進んでいる。しかしながら、亜炭廃坑地域では日常的に地盤沈下や陥没など地盤災害が発生している。また、地震時にはその危険性は高まるものと考えられる。しかし、亜炭廃坑地域に対する地震時の挙動に関する研究報告は少なく、未だに明らかにされていない点が多い。そこで、本研究では振動によって材料自体が破壊するモデルを作成して、残柱方式によって採掘された亜炭廃坑の地震時における残柱や上部地盤の挙動に注目し、地震に伴う亜炭廃坑地域の破壊現象を実験的に検討した。また、地震時の亜炭廃坑の安定性について鉱山工学で用いられる手法で解析的な検討を行った。

Key Words: lignite, abandoned mine, earthquake, Miyagi-Hokubu earthquake, stability

1. はじめに

東海地方は日本有数の亜炭の産出地域であった。そのような時代背景から数多くの亜炭鉱が存在していた。現在それら亜炭鉱は採掘終了から 40 年余りが経過し、亜炭坑は採掘当時のまま放置され、廃坑内は残柱に劣化・損傷が顕著にあらわれている。しかしながら、そのような地域でも都市化が進んでいる。例えば、名古屋市周辺では住宅地の開発、都市高速道路、愛知万博のモノレールの建設地などは亜炭廃坑地域を通る。それらの地域では浅所陥没や地盤沈下などがしばしば発生しており、近年全国各地でこの亜炭廃坑の存在が大きな社会問題となってきている。宮城県北部地震(2003 年 7 月 26 日発生)において

震源に近く大きな被害が報告された矢本町付近は亜炭廃坑の多く存在する地域であり、亜炭廃坑に関連した被害が多く報告されている¹⁾。宮城県北部地震の被害状況より地震時にはその危険性は高まると考えられる。しかしながら、亜炭廃坑に対する地震時の挙動に関する研究報告は少なく、未だ明らかにされていない点が多い。

本研究では、地震時の廃坑内における残柱や上部地層の挙動に注目し、材料自体が壊れるモデルを用いて、地震に伴う亜炭廃坑地域の破壊現象を実験的に検討した。また、地震時の亜炭廃坑の安定性について解析的な検討を行った。

2. 宮城県北部地震による亜炭廃坑の被害

2003年7月26日に発生した宮城県北部地震では亜炭廃坑に関連した地震被害が数多く報告された。主な被害としては写真-1に示すような浅所陥没、地盤沈下、液状化、スロッシングによる噴砂、充填物の坑内への流失などが報告されている。今回の地震では廃坑内の残柱が地震動で破壊され亜炭廃坑が大規模な崩壊に至るといった報告はされていないが、筆者らが調査対象としている亜炭廃坑の様に残柱が著しく劣化・損傷している場合は地震動によって少なくとも部分的な残柱の破壊が発生すると考えられる。



1) 浅所陥没



2) 液状化



3) 浅所陥没とスロッシングによる噴砂

写真-1 宮城県北部地震に伴う亜炭廃坑の被害

3. 実験概要

本実験で使用した模型材料は、硫酸バリウム (BaSO_4)、酸化亜鉛 (ZnO)、白色ワセリンを 70 : 21 : 9 の重量比で配合した粉末状のものである²⁾。締め固め圧力の程度により模型材料の強度を簡単に変化させることができる。また、使用後に元の粉末状に戻すことが容易であり、化学反応を起こすこともないことから、再利用に適した材料である。単位体積重量と一軸圧縮強度の関係及び単位体積重量と締め固め圧力の関係を図-1に示す。

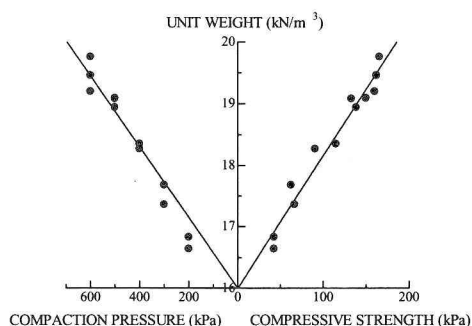


図-1 単位体積重量と圧縮強度・締め固め圧力の関係

振動実験で用いた振動台は最大 100(kg)の物体に約 600(gal)までの加速度を与えるものであり、最大変位量は 100(mm)で、振動台の面積は $1 \times 1(\text{m}^2)$ である。入力加速度は、その振幅を破壊まで単調増加させて実験を実施した。実験に使用した廃坑模型の模式図を図-2に示す。一定圧力で締め固めた模型地層を水平層構造になるように木枠の中に積み上げ模型地盤を作成した。また、木枠の内側には模型地盤の衝突による反射波を消すために、厚さ 5(mm)のゴムをダンパーとして設置した。

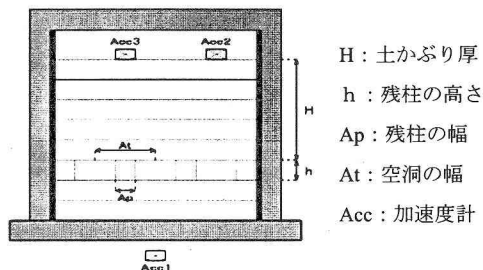


図-2 模型地盤模式図

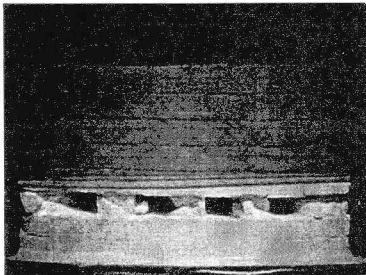
4. 実験結果

振動に伴う廃坑模型の破壊の様子を写真-2に示す。①の写真では、残柱の下部に破壊が見受けられる。また、上部地層に亀裂が発生し、進展している。②の写真では、残柱の破壊が進展し、空洞幅は大きくなっていく。それにしたがって、上部地層の亀裂が広がり、上部地層がたわんでいる。③の写真では、残柱が完全に破壊し、上部地盤が落下する瞬間である。

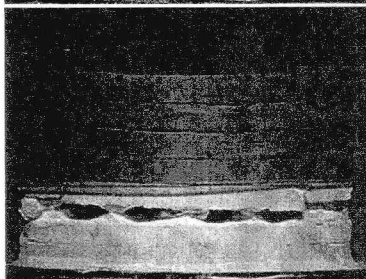
残柱に発生する亀裂によって残柱が破壊に至ると連鎖的につながり大陥没に発展することが明らかになった。

また、空洞幅を拡張して行った実験ケースでは、残柱より先に空洞の天端がたわんで落下した。それに伴って残柱が破壊し模型全体の破壊につながることを確認された。

①



②



③

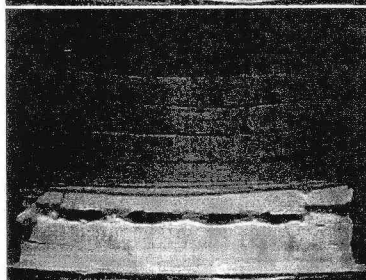


写真-2 $H/h=5, A_t/A_p=2$ における残柱の破壊の様子

図-3 に土被り比 (H/h) と降伏加速度の関係を示す。土被り比が大きくなると廃坑模型の破壊に至る加速度が小さくなる。図中の $H/h=3, A_t/A_p=3$ のケースでは残柱の破壊より先に天端の落下が発生し、天端の落下に伴い残柱の破壊が起こったために降伏加速度が小さくなっていると考えられる。また、 $H/h=6, A_t/A_p=2$ のケースでは材料を圧縮するさいに、他のケースより強い 7 kN の力を加えたため降伏加速度が大きくなったと考えられる。

図-4 に掘削率 (A_t/A_p) と降伏加速度の関係を示す。掘削率が大きくなると廃坑模型の破壊に至る加速度が小さくなる。図-3 と同様に $H/h=3, A_t/A_p=3$ のケースでは天端の破壊が先に発生するために土被り比が同じケースに比べて降伏加速度が小さくなっている。

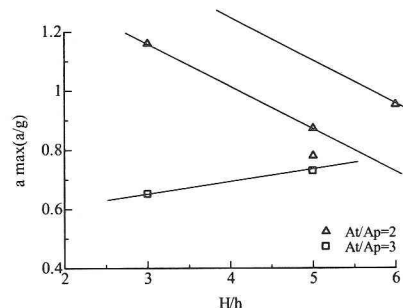


図-3 土被り比と降伏加速度の関係

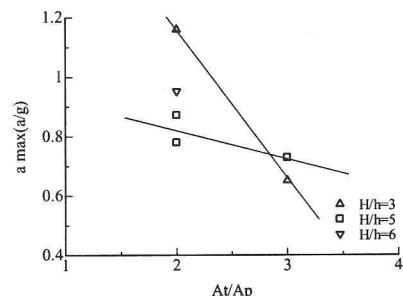


図-4 掘削率と降伏加速度の関係

5. 地震時の安定性の評価

地下の炭鉱や採石場などでは柱を残すことで、採掘する際の安定を確保している。これは、採掘する際の短期的安定性を考え作ったもので、長期的な劣化については考慮されていないものが多くであ

る。鉱山工学の分野で代表的な残柱に作用する平均鉛直応力(σ_p)は式(1)のように示すことができる³⁾(図-5を参照)。

$$\sigma_{p0} = \rho g H \frac{A_t}{A_{p0}}$$

$$\text{あるいは} \quad \sigma_{p0} = \sigma_v \frac{A_t}{A_{p0}} \quad (1)$$

ここで、 $\sigma_v = \rho g H$ ； $A_{p0} = w_1 w_2$

ρ ：上部岩盤の平均密度， g ：重力加速度， H ：土被り， A_t ：残柱がささえている面積， A_{p0} ：地震時における残柱面積。

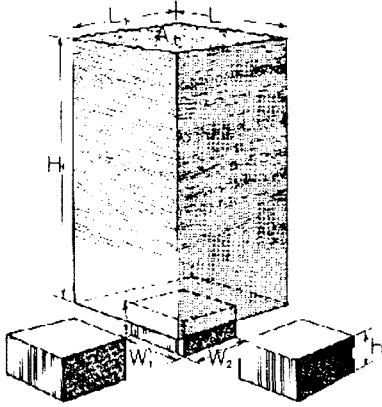


図-5 掘削率モデル

震度法に基づいて地震による影響を式(1)のモデルに追加すると残柱に作用する軸応力について次式が得られる。

$$\sigma_p = \rho g H \frac{A_t}{A_p} \left[1 + 6\alpha \frac{H}{w} \cdot \frac{y}{w} \right] = \sigma_{p0} \left[1 + 6\alpha \frac{H}{w} \cdot \frac{y}{w} \right] \quad (2)$$

ここに y は残柱の中心からの距離で、 α は水平震度係数である。 y の値は $-w(t)$ と $+w(t)$ の間に変化する。

堆積岩の場合層理面の引張り強度がほとんどないため、振動中に残柱と上部層の間に分離面が発生し、有効的な残柱幅は減少することになる。その有効的な残柱幅を w^* とした場合、残柱に採用する応力は下記のように誘導することができる

$$\sigma_p = \rho g H \frac{A_t}{A_p^*} \left[1 + 12 \left(\alpha \frac{H}{2w^*} - \frac{e}{w^*} \right) \frac{y}{w^*} \right] \quad (3)$$

ここで

$$e = w - w^* ; A_p^* = w^* \cdot w^*$$

残柱に作用する最大圧縮応力は $+w^*/2$ で発生し、その値は下記のように得られる

$$\sigma_p = \sigma_{p0} \frac{A_t}{A_p^*} \left[1 + 6 \left(\alpha \frac{H}{2w^*} - \frac{e}{w^*} \right) \right] \quad (4)$$

ここで

$$\sigma_{p0} = \rho g H \frac{A_t}{A_{p0}} \quad (5)$$

有効残柱幅に関して残柱幅で正規化された下記のパラメータを利用する

$$\xi = \frac{e}{w} \quad (6)$$

次式が得られる

$$\sigma_c = \sigma_p = \sigma_{p0} \frac{1}{(1-\xi)^2} \left[1 + \frac{6}{(1-\xi)} \left(\alpha \frac{H}{2w} - \xi \right) \right] \quad (7)$$

σ_c は残柱の一軸圧縮強度である。分離面において亀裂先端で引張り応力ゼロとすると次式が求まる

$$\alpha = \frac{w}{3H} [5\xi + 1] \quad (8)$$

同様に最大圧縮応力が残柱の圧縮強度に等しくなった時点を残柱の全体破壊と仮定すると破壊時点の最大震動係数が求まる。このモデルを利用して、残柱強度比(σ_c / σ_{p0})を3および6に対する解析結果を図-7に示す。残柱の強度比は大きくなると圧縮破壊に至る水平震度係数が大きくなる。一方、土被りが大きくなると破壊に至る震度係数が小さくなる。4章で紹介した実験結果より、掘削率が大きくなると天端も破壊することが観察された。この実験結果に基づいて、振動による天端の破壊時の限界震動係数を次式より推定できる。

$$\alpha_t = \frac{\sigma_t}{\rho g L} - \frac{L}{2H} \quad (9)$$

ここで σ_t ：天端の地層の引張り強度， L ：空洞スパン

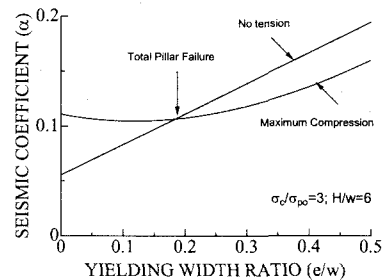


図-6 残柱強度比3による残柱が破壊に至る震度係数に与える影響

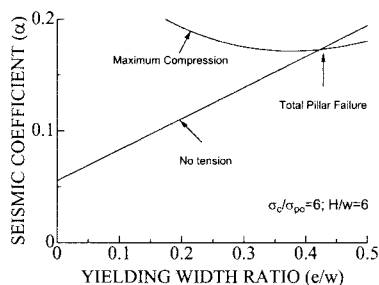


図-7 残柱強度比 6 による残柱が破壊に至る震度係数に与える影響

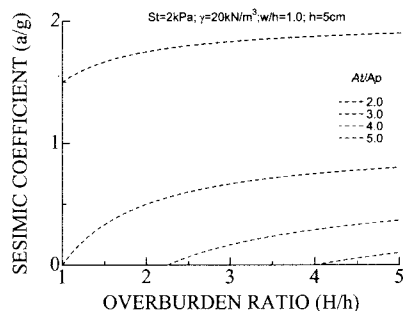


図-9 天端の破壊における震度係数と土被り比の関係

6. 実験結果と解析結果の比較と考察

残柱に作用する最大圧縮応力が残柱の圧縮強度に等しく引張りに対する式 (8) が同時に満足された時点を残柱の全体破壊と仮定すると破壊時点の最大震度係数を求めることができる。その結果を図-7 に示す。図-7 は掘削率 (A_t/A_p) が 2.0～5.0, 土被り比 (H/h) が 1.0～5.0 の場合における震度係数と土被り比の関係を示している。残柱の圧縮強度は一定であるので、土被り比が大きくなると残柱の破壊に至る震度係数は小さくなる。また、掘削率と震度係数の関係について同様な傾向で、掘削率が大きくなると残柱の破壊に至る震度係数が小さくなる。

次に式 (9) を用いて前の解析条件下で天端の破壊時の限界水平震動係数を求めた。図-8 に見られる結果から土被り比が小さい残柱の破壊時の震動係数が小さく、土被り比が大きくなるとその限界水平震動係数が増加していく。また、掘削率が大きくなると天端の破壊に至る震度係数は小さくなる傾向にある。

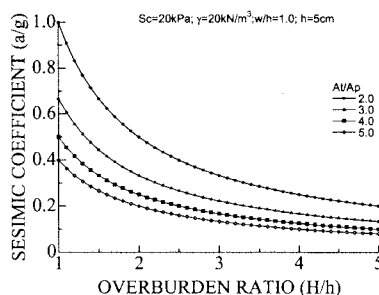


図-8 残柱の破壊における震度係数と土被り比の関係

図-9 に掘削率 3 に関して、土被り比を変化させて得られた残柱および天端の破壊時の限界震度係数を示す。土被り比と震度の程度に応じて、4 つのモードが可能である。そのモードは 1) 安定, 2) 天端の曲げ破壊, 3) 残柱の圧縮破壊, 4) 残柱と天端の破壊。廃坑が浅いと、天端の破壊する可能性が高くなるが、土被り比が大きくなると掘削率が大きい限り残柱の破壊する可能性が高くなる。

これら解析結果に見られる傾向は、図-4, 5 に示した実験結果に見られた掘削率または土被り比が大きくなると残柱が破壊に至る降伏加速度が小さくなる傾向と同様である。これら解析結果および実験結果より地震時における残柱の破壊は廃坑の掘削率および土被り比に依存し、掘削率・土被り比が大きいほど破壊に至る震度係数・降伏加速度が小さいことが確認された。

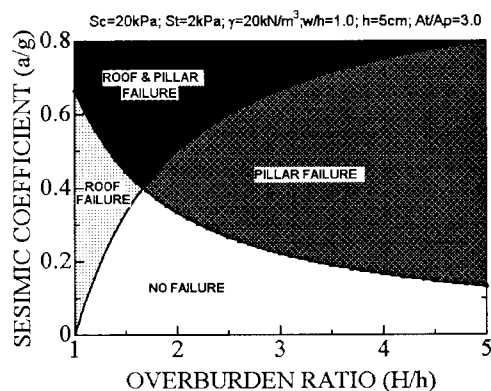


図-10 限界震度係数と天端および残柱の破壊モードの関係

7. 結論

本研究で紹介した実験結果をまとめると次のようになる。廃坑の崩壊は一つの残柱の崩壊が連鎖的に進行して廃坑全体の崩壊に発展する様子が改めて確認することができた。残中と残柱の間隔が広い場合は残柱の破壊よりも先に天端の落下することがあることが確認できた。また、天端の落下に伴って残柱の破壊が発生する。その後、連鎖的に残柱の崩壊に進行し廃坑全体の崩壊につながることも確認できた。

土被り比が大きくなる廃坑の破壊に至る加速度は小さくなる。この傾向は掘削率が大きくなった場合においても同じ傾向である。

今後の課題としては土被り比・掘削率・材料強度・さらに上部地盤の地層をもっと薄いものを積み重ねた状態で作成するケースの実験を行う必要があると考えられる。

参考文献

- 1) Aydan, Ö. & Kawamoto, T. (2004): 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, 525-530.
- 2) 川本眺万, 尾原祐三, 市川康明(1983): 底面摩擦模型装置および模型材料の力学特性 不連続面を有する岩盤構造物の力学特性に関する基礎的研究, 日本鉱業会誌, vol.99, No.1139, 1-6.
- 3) 太田良巳, アイダン・オメル, 杉浦乾郎, 坂本昭夫, 山田紀利(2005): 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, 67-76.

Failure modes of abandoned lignite mines induced by earthquakes and the evaluation of their stability

Yoshimi OHTA, Ömer AYDAN,
Kenro SUGIURA, Akio SAKAMOTO and Noritoshi YAMADA

There are many abandoned mines in Tokai Region of Japan and the authors have been investigating their performance and responses in long term as well as during earthquakes. In the first part of this article, the instability modes of abandoned lignite mines induced by Miyagi-Hokubu earthquake are briefly outlined. Then a series of shaking table tests on model room and pillar mines is performed. A theoretical stability analysis method based on seismic coefficient method is proposed for evaluating the stability of abandoned room and pillar mines during earthquake. This stability analysis method is used to investigate the effect of some fundamental characteristics of the mines such as excavation ratio, overburden ratio etc. Furthermore, some comparisons with model tests are also done. The model tests and theoretical stability analyses results indicated that many abandoned room and pillar lignite mines are prone to collapse during earthquakes. Therefore, some measures against the collapse or subsidence of these abandoned mines are urgently needed before it is too late.