

# 亜炭廃坑の地震時における安定性と破壊形態

東海大学 大学院 海洋学研究科 海洋工学専攻

太田 良巳

東海大学 海洋学部 海洋土木工学科 正会員

アイダン オメル

飛島建設株式会社 名古屋支店

杉浦 乾郎

飛島建設株式会社 名古屋支店

坂本 昭夫

飛島建設株式会社 名古屋支店

山田 紀利

## 1. はじめに

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きた。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る。矢本町付近における亜炭廃坑地域では大きな被害があったことが報告されている(Aydan & Kawamoto, 2004)。東海地方にも数多くの亜炭廃坑が存在し、かつては日本有数の亜炭産出地域であった。それらは採掘終了から40年余りが経過している。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。それらの地域では写真-1のような浅所陥没や地盤沈下などがしばしば発生しており、地震時にはその危険性は高まると考えられている。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。

筆者らはこれまでの研究で、弾性挙動するブロックを用いた実験により亜炭廃坑地域での地表面加速度の増幅率に関する研究(アイダンら,2003)を行った。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。

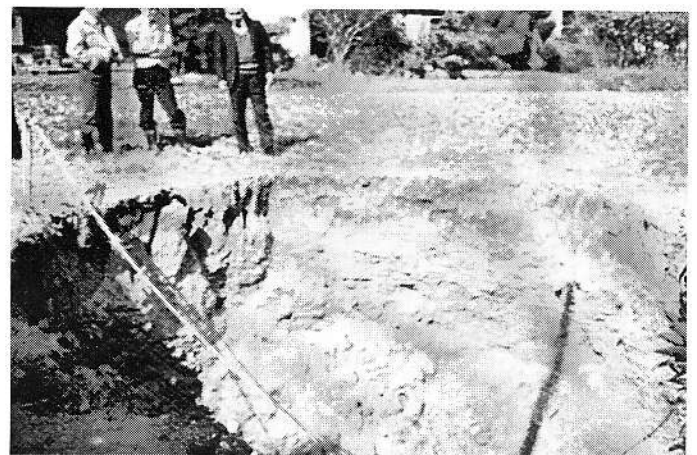


写真 - 1 廃坑の存在する地域における陥没や沈下

---

Stability and failure modes of room and pillar abandoned lignite mines during earthquakes

Y. Ohta, Ö. Aydan, Tokai University, Shizuoka

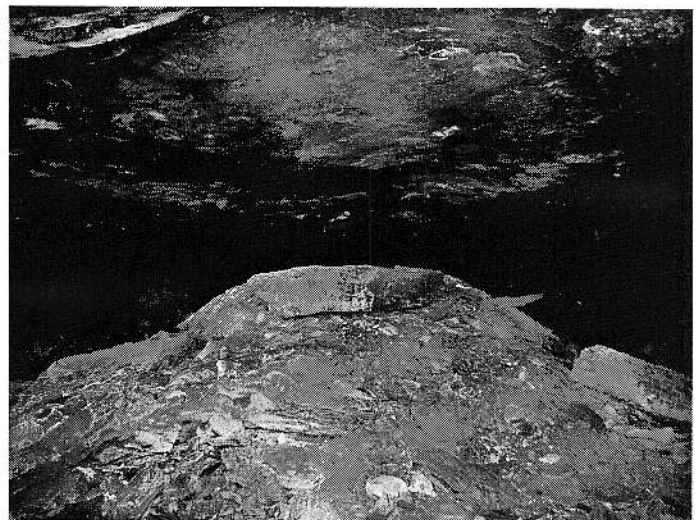
K. Sugiura, A. Sakamoto and N. Yamada, Tobishima Construction Co., Nagoya

## 2. 亜炭廃坑の現状

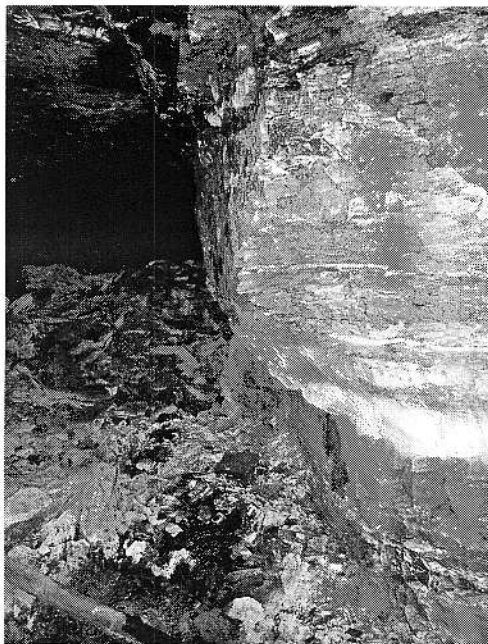
亜炭坑では主に柱を残すことで、坑内の安定を確保する残柱方式という採掘法がとられた。採掘後の空洞内では、地下水や空気の流れなどによる材料の劣化といった時間の経過による残柱の破壊または上部地盤の崩壊など地盤沈下や浅所陥没といった災害の発生が問題となっている。このような問題だけでなく地震などの動的な現象によって同様な破壊が発生し地盤沈下や浅所陥没といった問題が発生している。調査対象としている亜炭廃坑では採掘終了から約40年経過している。亜炭地域を構成する岩盤は堆積岩で、主に亜炭、砂岩、頁岩、泥岩、シルト岩で構成されている。廃坑内では天端の落盤や残柱の破壊・座屈・亀裂の進展の様子(写真-2)、数箇所の漏水、乾湿の繰り返しに伴う岩盤の剥離現象が確認された。また、廃坑内では正断層も確認された。その断層近辺では残柱の破壊および天端の落盤が著しく発生している。調査対象としている亜炭廃坑を構成する岩盤の中で特に砂岩層は乾湿の繰り返しに伴い著しく劣化することが確認されている(太田ら、2005)。



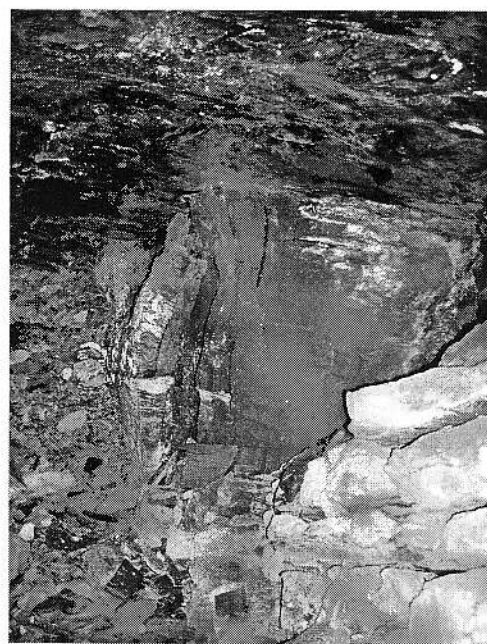
1) 残柱の亀裂の進展



2) 天端の落盤



3) 乾湿の繰り返しによる剥離



4) 残柱の座屈

写真-2 亜炭廃坑内で確認された不安定現象

### 3. 宮城県北部地震による亜炭廃坑の被害

亜炭廃坑地域を直撃した大地震として2003年7月26日に発生した宮城県北部地震は記憶に新しい。震源に近い矢本町では亜炭廃坑に関連した地震被害が多く報告された。主な被害としては写真-3のような浅所陥没、地盤沈下、陥没およびスロッシングによる噴砂、液状化、充填物の坑内への流失などが報告されている。

宮城県北部地震では亜炭廃坑の上部地盤が坑内に落下するような被害が主であった。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-3 宮城県北部地震に伴う亜炭廃坑の被害

### 4. 実験概要

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。本研究では残柱方式によって採掘された亜炭廃坑に注目し、振動台を用いた模型実験により、亜炭廃坑地域の地震時を想定した亜炭廃坑の安定性を検討した。振動によって材料自体が破壊する模擬岩盤モデルを作成し亜炭廃坑地域の地震時における破壊現象について実験結果を報告する。

#### 4. 1 材料特性

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(川本ら,1983)。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。

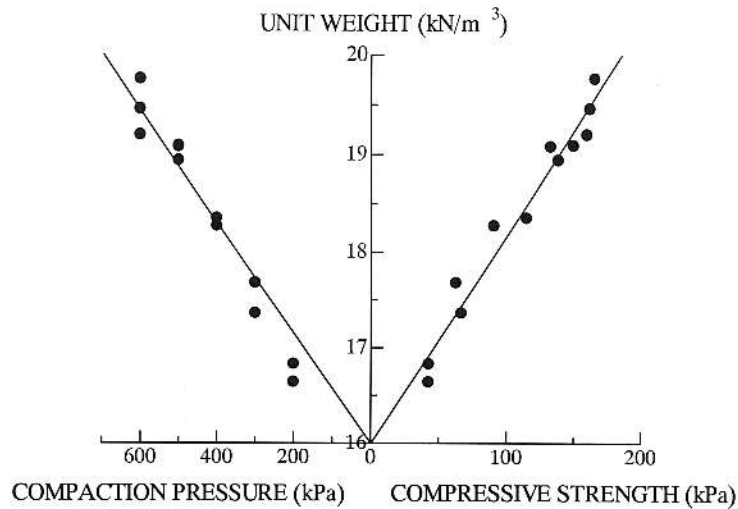


図 - 1 単位体積重量と圧縮強度・締め固め圧力の関係

#### 4. 2 実験装置

振動実験に用いた振動台は東海大学海洋学部海洋土木工学科所有のもので、最大 100[kg]の物体に約 600[gal]までの加速度を与えることが可能である。最大変位量は 100[mm]で、振動台の面積は  $1 \times 1[\text{m}^2]$ となっている。実験の条件としては模型が破壊するまで加速度を増加させた。

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。

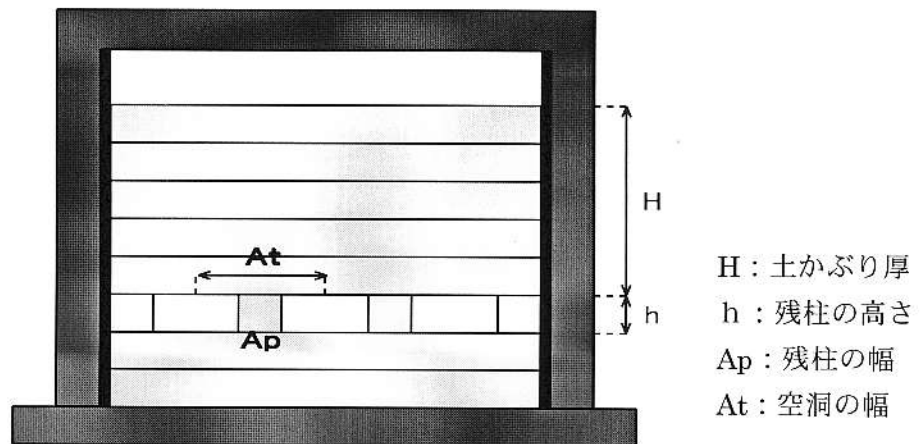


図 - 2 模型地盤模式図

#### 5. 実験結果

振動に伴う廃坑模型の破壊の様子を例を図 - 3、図 - 4 に示す。残柱が上部地盤に引きずられるように振動するため、残柱下部に破壊が発生し、その後上部地盤に亀裂が入る。残柱下部の破壊が進行すると上部地盤の亀裂が拡大する。その後、模型中央部の残柱はほとんど崩壊し、上部地盤にたわみが生じる。やがて、中央付近の残柱が完全に崩壊し上部地盤が中央に落ち込むような破壊が発生する。以上のことから、土被りが厚い場合や炭鉱全体の幅が狭い場合にはアーチング効果によって地表面まで陥没せずに沈下のみが発生することも予測できる。

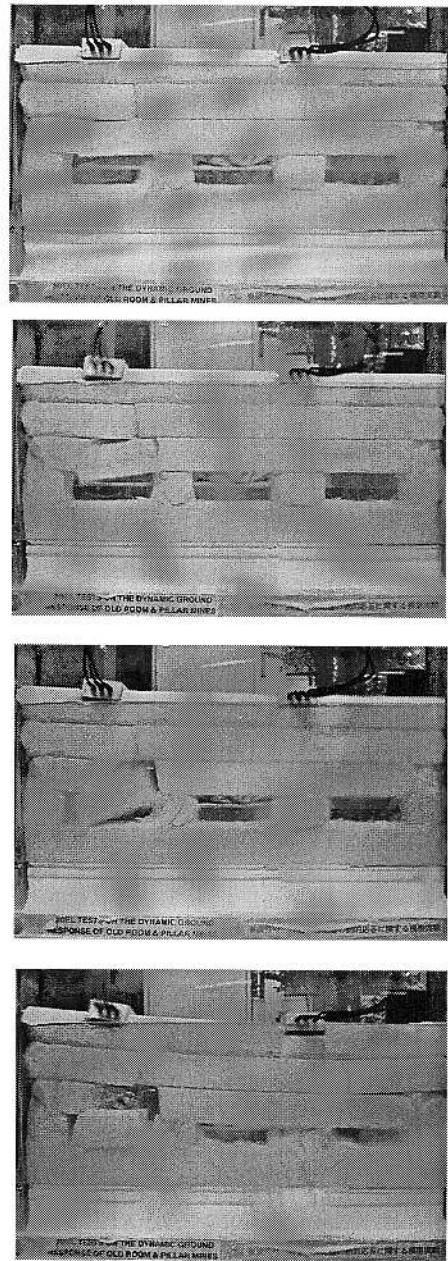
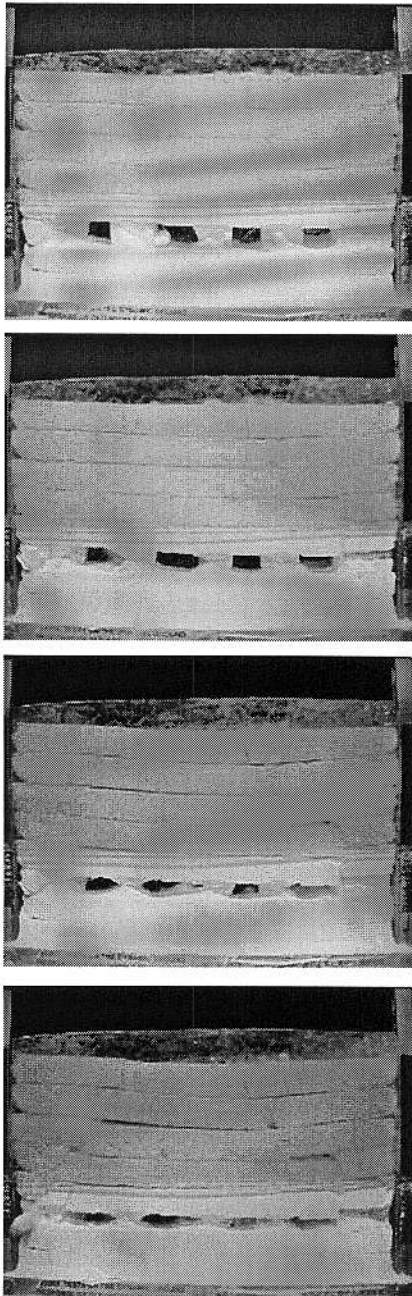


図 - 3  $H/h=5$ ,  $A_t/A_p=2$  の場合の残柱の破壊の様子 図 - 4  $H/h=3$ ,  $A_t/A_p=3$  の場合の残柱の破壊の様子

また、図 - 4 のように残柱の間隔が広くなると振動開始後すぐ天端に亀裂が入る。振動によってこの亀裂が広がり天端の落下につながる。天端の落下によって残柱にせん断亀裂が発生し、その後、残柱は崩壊する。1本の残柱の崩壊により周囲の残柱に連鎖的に進行し、廃坑全体の崩壊に至る様子を明確になった。

図 - 5 に土被り比と降伏加速度の関係を示す。図 - 5 より土被り比が大きくなると亜炭廃坑モデルの破壊に至る加速度が小さくなる傾向にあることが確認された。図中の  $H/h=3$ ,  $A_t/A_p=3$  のケースでは図 - 4 に示したように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  $7\text{ kN}$  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 - 6 に掘削率と降伏加速度の関係を示す。図 - 6 より掘削率が大きくなると亜炭廃坑モデルの破壊に至る加速度が小さくなる傾向にあることが確認された。図 - 5 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大幅に降伏加速度が小さくなっている。

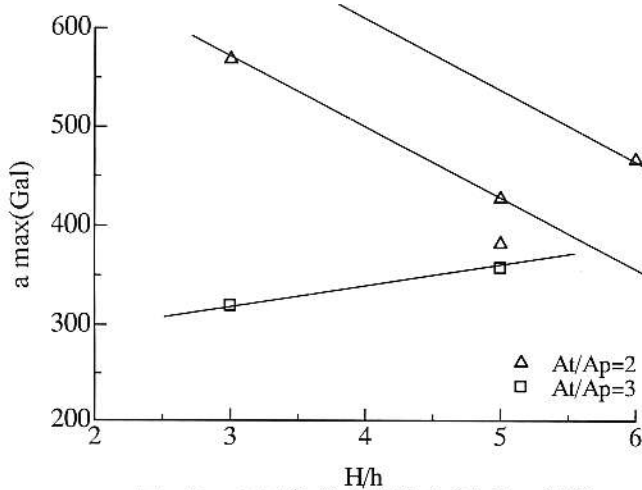


図 - 5 土被り比と降伏加速度の関係

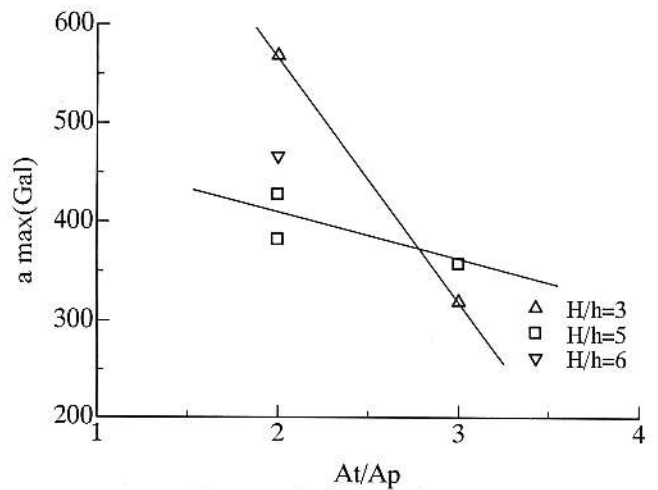


図 - 6 掘削率と降伏加速度の関係

## 6. 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掘削されたもので、長期的な劣化については考慮されていないものが大半である。

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( $\sigma_p$ )は式-6.1のように示すことができる(図-7を参照)。

$$\sigma_{p0} = \rho g H \frac{A_t}{A_{p0}} \quad \text{あるいは} \quad \sigma_{p0} = \sigma_v \frac{A_t}{A_{p0}} \quad (\text{式-6.1})$$

ここで、 $\sigma_v = \rho g H$  ;  $A_p = w_1 w_2$

$\rho$  : 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、 $A_p$  : 地震時における残柱面積。

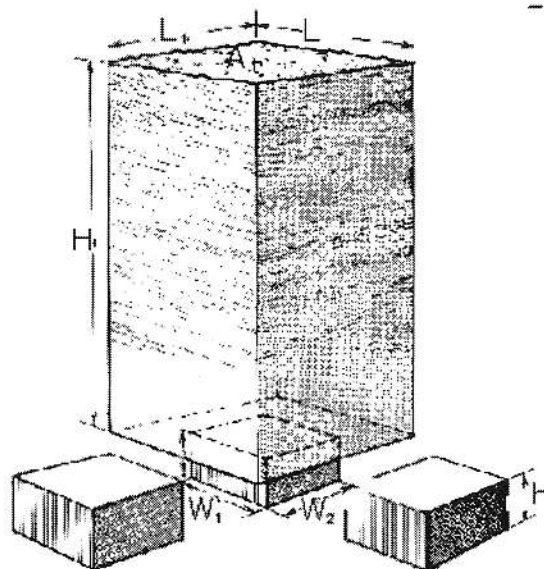


図-7 掘削率モデル

震度法に基づいて地震による影響を式-6.1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。

$$\sigma_p = \rho g H \frac{A_t}{A_p} \left[ 1 + 6\alpha \frac{H}{w} \cdot \frac{y}{w} \right] = \sigma_{p0} \left[ 1 + 6\alpha \frac{H}{w} \cdot \frac{y}{w} \right] \quad (\text{式-6.2})$$

ここに  $y$  は残柱の中心からの距離で、 $\alpha$  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

$$\sigma_p = \rho g H \frac{A_t}{A_p^*} \left[ 1 + 12 \left( \alpha \frac{H}{2w^*} - \frac{e}{w^*} \right) \frac{y}{w^*} \right] \quad (\text{式-6.3})$$

ここに

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

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

$$\sigma_p = \sigma_{p0} \frac{A_p}{A_p^*} \left[ 1 + 6 \left( \alpha \frac{H}{2w^*} - \frac{e}{w^*} \right) \right] \quad (\text{式-6.4})$$

ここに

$$\sigma_{p0} = \rho g H \frac{A_t}{A_{p0}} \quad (\text{式-6.5})$$

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と

$$\xi = \frac{e}{w} \quad (\text{式-6.6})$$

次式が得られる

$$\sigma_c = \sigma_p = \sigma_{p0} \frac{1}{(1-\xi)^2} \left[ 1 + \frac{6}{(1-\xi)} \left( \alpha \frac{H}{2w} - \xi \right) \right] \quad (\text{式-6.7})$$

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

$$\alpha = \frac{w}{3H} [5\xi + 1] \quad (\text{式-6.8})$$

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、残柱強度比が3および6に対する解析結果を図-8に示す。残柱の強度比が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。

5節で紹介した実験結果より、掘削率が大きくなると天端の破壊も発生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。

$$\alpha_t = \frac{\sigma_t}{\rho g L} - \frac{L}{2H} \quad (\text{式-6.8})$$

ここに  $\sigma_t$  : 天端の地層の引張り強度;  $L$  : スパン

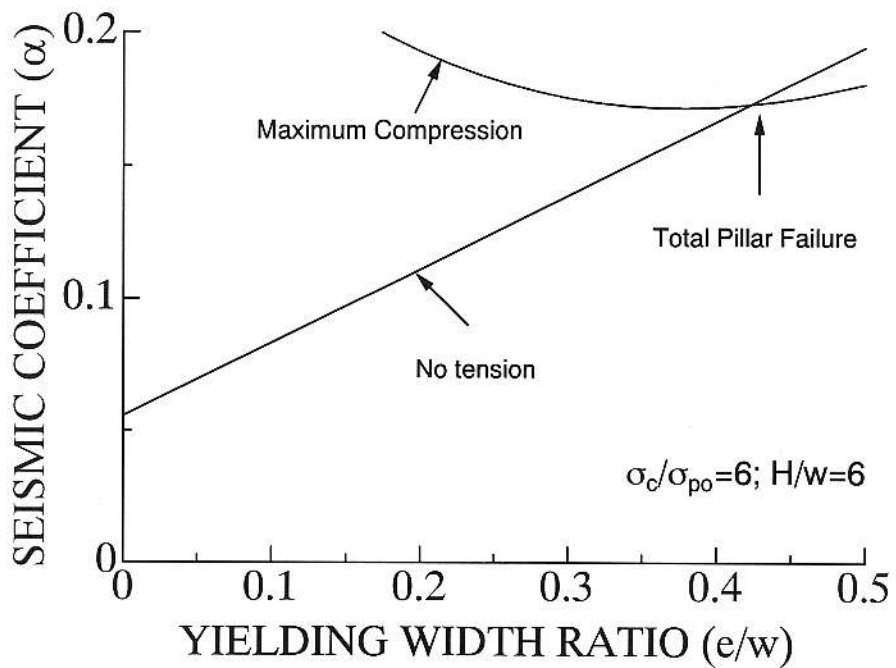
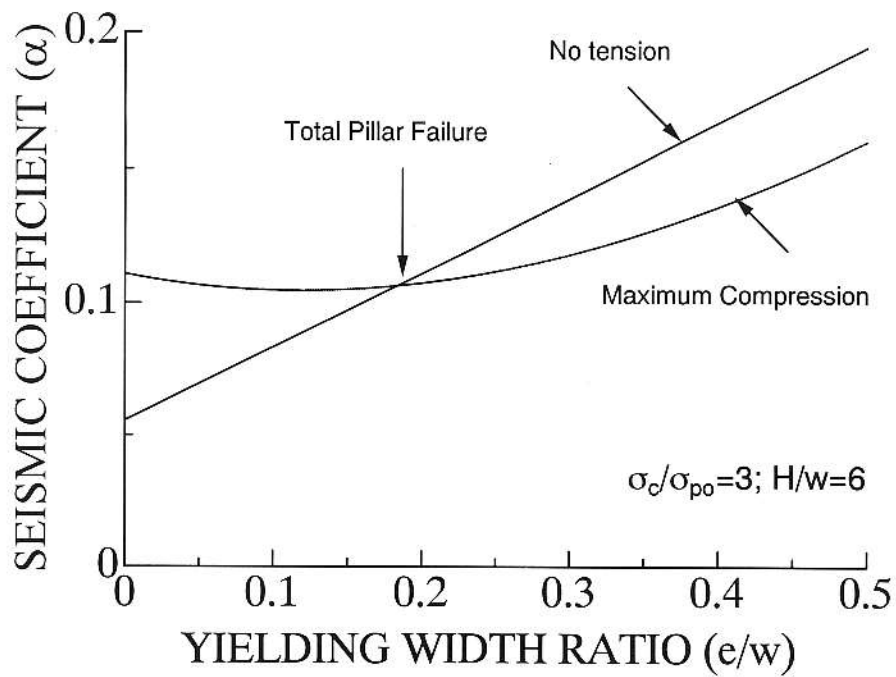


図-8 残柱強度比による残柱が破壊に至る震度係数に与える影響

### 7. 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 6.8 は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-9 に示す。図-9 は掘削率 ( $A_1/A_p$ ) 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



なる傾向が見て取れる。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傾向がある。

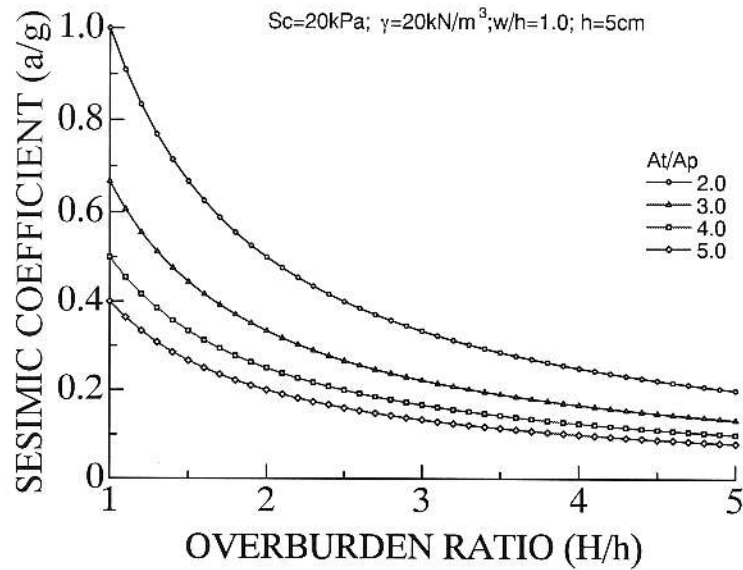


図-9 震度係数と土被り比の関係

次に式 - 6.8 を用いて前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 - 10)。図 - 10 に見られる計算結果から土被り比が小さいと天端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が見て取れる。

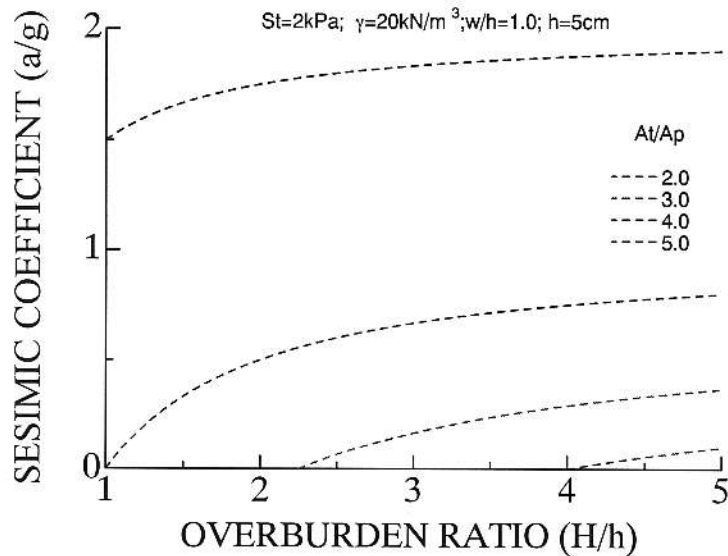


図-10 震度係数と土被り比の関係

図 - 11 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 つのモードに分類することができる。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) 残柱と天端の破壊である。廃坑が浅いと、天端の破壊する可能性が高くなるが、土被り比は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-5, 6 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な傾向である。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あらためて確認された。

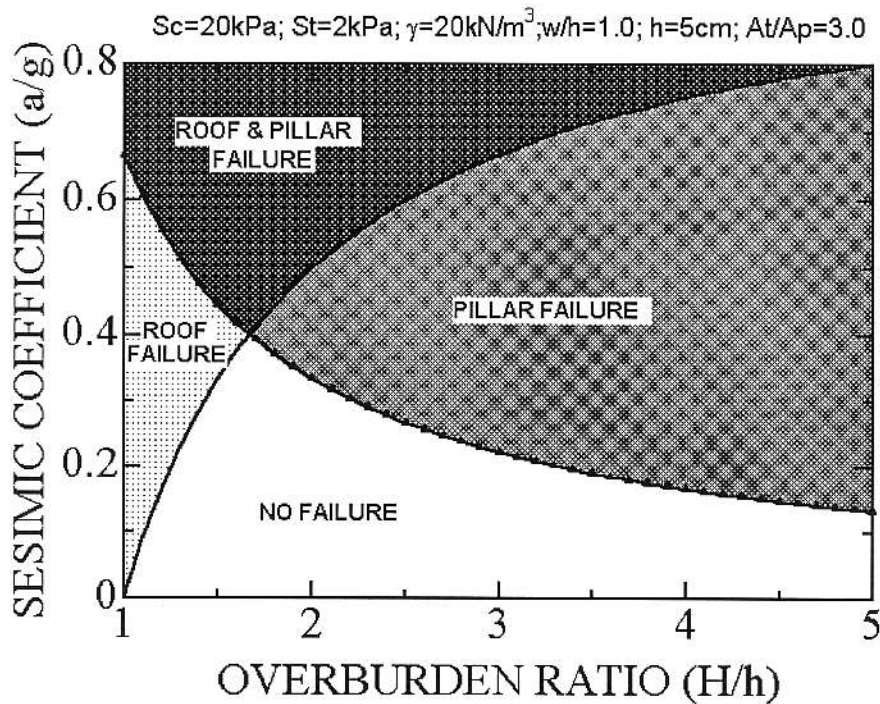


図-11 限界震度係数と天端および残柱の破壊モードの関係

## 8. 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と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

- 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.
- 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.
- 太田良巳, 中谷英史, 大洞光央, アイダン・オメル(2005): 変形・破壊過程における亜炭廃坑周辺岩盤の多重パラメータ応答 第34回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 483-488.
- 太田良巳, アイダン・オメル, 杉浦乾郎(2005): 地震時の亜炭廃坑の振動および破壊に関する実験的研究 平成16年土木学会中部支部研究発表会講演梗概集, 297-298.