

亜炭廃坑における不安定性現象および劣化とクリープを考慮した 長期安定性評価

東海大学 海洋学部 アイダン オメル

東海大学 海洋学研究科 大洞光央

日本大学 工学部 田野 久貴

豊田工業高等専門学校 伊東 孝

1 はじめに

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被害が少なからず発生し始めている。近年、このよう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。しかし、亜炭層およびその周辺岩盤に関するデータが少なくその解明はあまり進んでいないのが現状である。亜炭廃坑の周辺岩盤には、非常に軟弱な堆積軟岩が存在し、廃坑の劣化に大きな影響をあたえていると考えられる。亜炭廃坑周辺岩盤より採取した堆積軟岩は、乾燥と飽和の繰り返しに非常に脆い性質を持っている。

本研究では廃坑内における不安定性現象を整理分類した。また、劣化現象に着目し周辺岩盤の劣化とそのメカニズムに関する試験を行い、亜炭廃坑周辺岩盤の劣化モデルを作成した。短期および長期安定性に関する解析として、岩盤のクリープおよび劣化を考慮した簡易安定解析法を提案し、既存の亜炭廃坑の安定性評価を行った。

2 亜炭廃坑における不安定性現象

実際に廃坑内において観察された不安定現象についてこの節で考察していく。対象亜炭廃坑を例にこれまでに確認された不安定現象は、下記の通りである。

a) 天端の両端固定ばりとしての曲げ破壊

図-1 に示したように、廃坑内の天端において堆積岩の層面に添った形で分離が発生し、たわんだ天端が良く見受けられる。このような場合、時間を置いて分離面が広がって、中央付近の下部と層の両端付近で亀裂が発生する。その後、層の自重に耐えられなくなった時点で、比較的大きな層が天端から落下して破壊が生じる。

b) 天端の片持ちとしてのたわみ性トップリング

上記のような天端の曲げ崩壊と別に、天端の層が断層によって破断されている場合、天端の岩層が片持ち梁様式で不安定性が発生する。この破壊様式に対する模式図を図-1 に示す。

Instability problems in abandoned lignite mines and their long term-stability assessment with the consideration of degradation and creep characteristics of surrounding rock masses

Ö. Aydan, M. Daido Tokai University, Department Marine Civil Engineering, Shizuoka

H. Tano, Nihon University, Department of Civil Engineering, Koriyama

T. Ito, Toyota National College of Technology, Toyota

c) 天端における岩盤ブロック落下

既存の断層などの不連続面と2次的な亀裂の発生が多い。その場合、図-2に示したように天端に不安定な岩盤ブロックの形成が見られる。掘削によって天端のそのブロックは自重で落下することの可能性がある。図-2は、廃坑内に見られるブロックの落下例を示す。

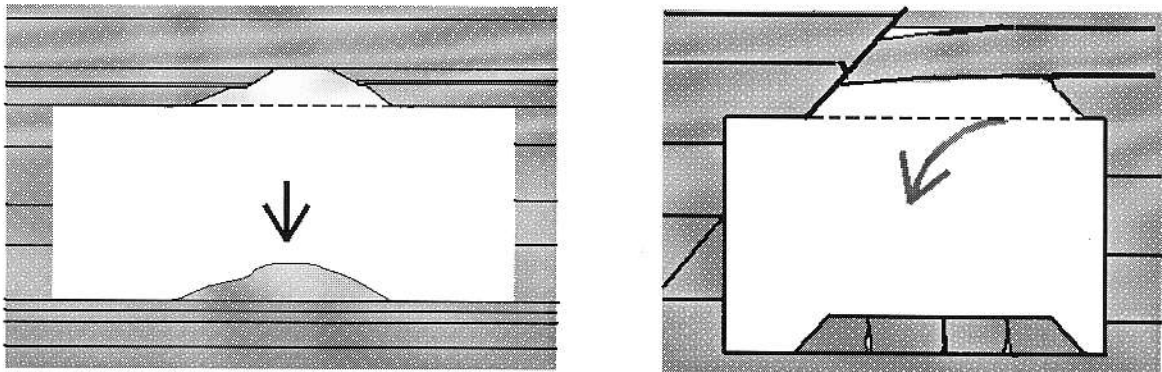


図-1 岩盤の両端固定はりとしての曲げ破壊およびたわみ性トップリング

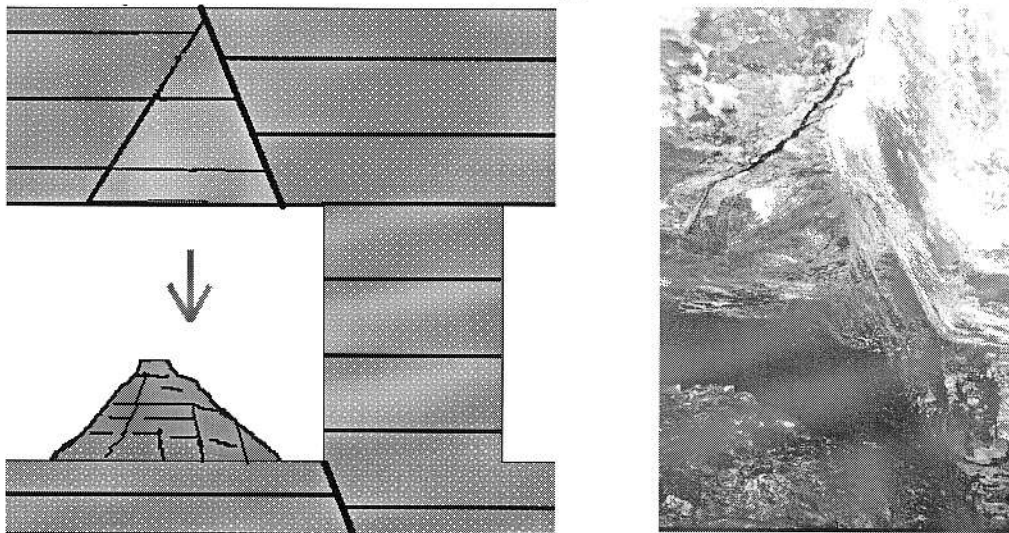


図-2 岩層の変動による天端の岩盤のブロック落下

d) 残柱の応力集中による剥離

残柱方式の掘削の場合、残柱の表面付近で応力集中が発生する。応力は岩盤の強度を超えると岩盤が降伏し、時間とともに、その降伏が広がって行く。岩盤の降伏は脆性挙動の場合、大半の亀裂は縦亀裂で図-3に示すように現れる。一方、岩盤の挙動は延性的な場合、残柱と天端の交差付近からせん断面が発生し、残柱は砂時計のように細くなっていく(図-3)。

e) 残柱の乾燥収縮による剥離

図-4に乾燥収縮による剥離の様子を示す。これは、坑内の温度と湿度変化によって乾燥と収縮の繰り返しの伴ない、残柱の体積変化が発生する。その体積変化が最も顕著に見られる位置が残柱の表面に近い部分である。乾燥過程によって壁面に平行で残柱に縦亀裂が発生し、残柱と天端の角付近で分離が発生する。次第にこの分離と亀裂が進行し、分離した部分が自重で落下や転倒して崩壊する。また、岩盤内に性質が異なる層が存在する場合、各層の乾燥収縮特性の違いで、残柱の断面は位置によって変化する。これはさらに残柱の応力状態を変化させて、残柱の破壊の確率を増加させる。

f) 既存の不連続面による剥離と破壊

残柱には、岩盤形成に伴う不連続面が発生することが多い。周辺岩盤は堆積岩であるため、不連続面は主に層理面、断層および層にほぼ直交した節理である。残柱と不連続面の幾何学分布によって様々な剥離、転倒およびブロックすべりが発生している(図-5)。特に断層近傍に規模の大きな破壊や剥離が見られた。ま

た、最初に縦亀裂が発生した残柱において、薄い岩盤は天端の沈下によってさらに圧縮され、座屈した様子も確認された。最終的にこれらの剥離現象は残柱における有効断面を減少させ、重力や地震荷重に伴い残柱に作用する応力下で残柱の崩壊につながると考えられ、結果として残柱の破壊は地表面の陥没として現れる。

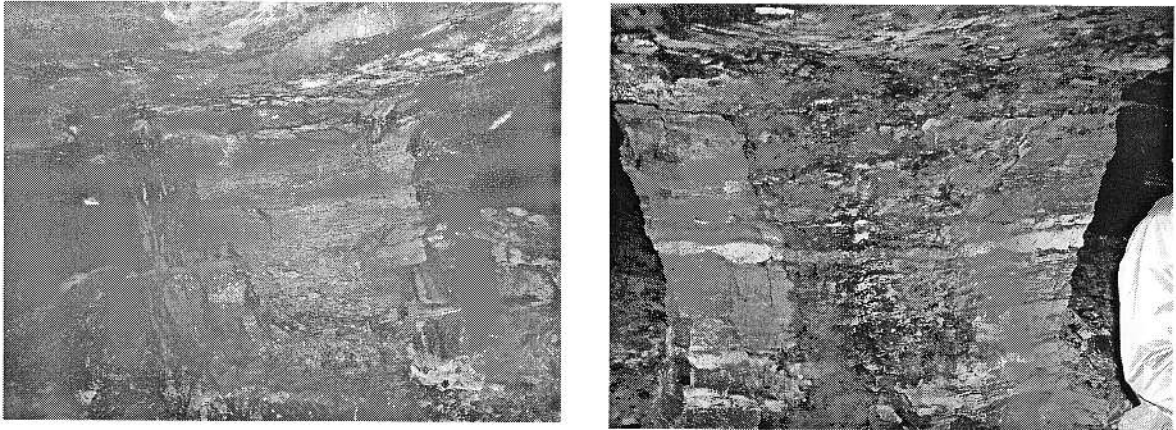


図-3 応力集中による剥離現象



図-4 乾燥収縮による剥離現象

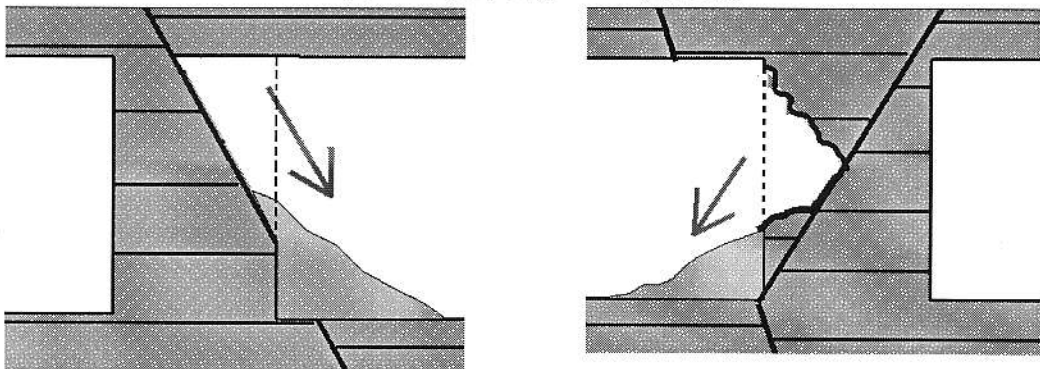


図-5 残柱における既存の不連続面による剥離と破壊

3 亜炭廃坑周辺岩盤の劣化とその特徴

亜炭周辺岩盤の劣化は主に水分量の変化に伴って発生していると考えられる。その過程としては、まず、降雨期に岩盤は地下水の浸透および大気中の水分を吸収し、体積的に膨潤する傾向を示す。一方、大気中の水分が減少すると岩盤が乾燥し、それに伴って岩盤は体積的に収縮する。そして、その収縮ひずみによって岩盤に

引っ張り亀裂が発生する事になる。現場および室内における乾燥収縮により亜炭を含む周辺岩盤の亀裂の様子を図-6に示す。

亜炭廃鉱周辺地域を構成してい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別に、図-4で確認されたように含水量の変化により劣化する特性を有している。そのため、岩盤の乾燥、飽和の繰り返しによる性質の変化などを求め、安定性評価にそれを反映することが望ましいと考えられる。

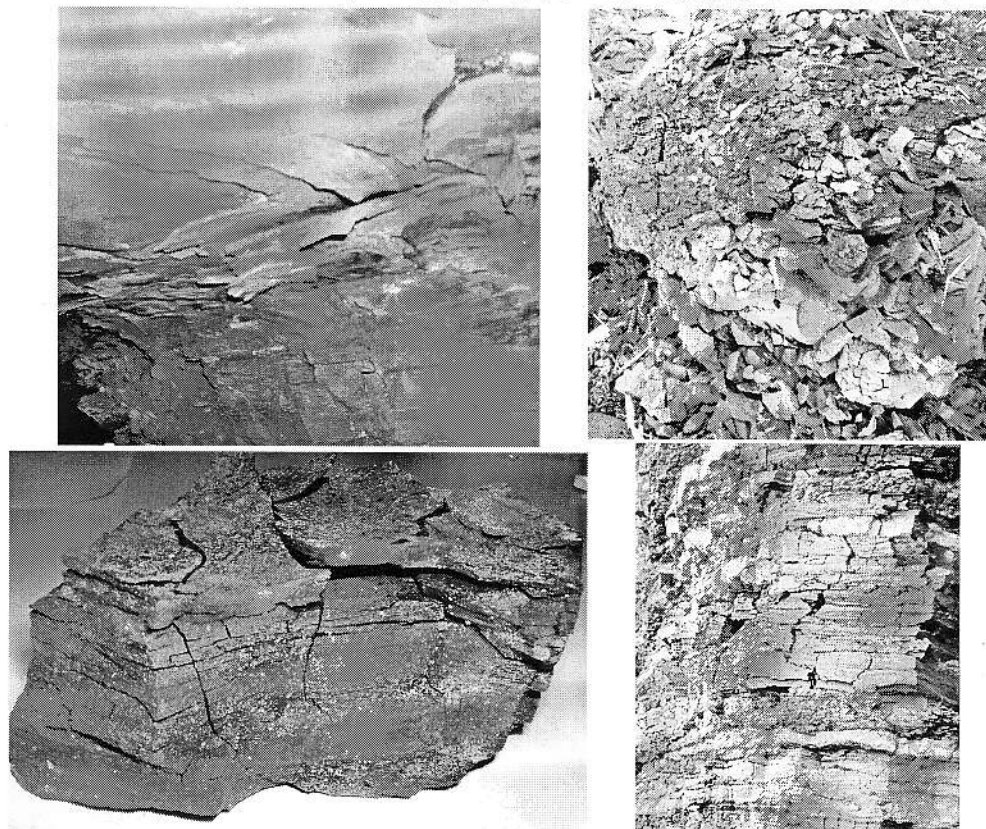


図-6 現場および室内における乾燥収縮により周辺岩盤の劣化

4 亜炭廃坑の長期安定性の評価

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。対象亜炭廃坑において、亜炭廃鉱の掘削方式は基本的に残柱式であるが、その大きさ、パターンは様々であり、一般的な大きさ 2 x 2m と 3x3m の間に変化している。また残柱高さは平均的に約 1.8m であり、空洞の幅は 2m から 6m の間に変化している。これは、採掘する際の短期的安定性を考えた場合で、長期的な劣化については考慮されていない。本節では、岩盤分類、劣化速度やクリープを考慮した掘削率や土被りの変化による坑内の長期安定性について記す。

4.1 岩盤分類による岩盤の評価

調査対象亜炭廃坑において、RMR および Q-システムの岩盤分類にしたがって岩盤を分類した。断層が見られる個所において岩盤を破碎帯と呼ぶこととし、それ以外の部分の性質はほとんど同様であるので、一般的な岩盤として区分する。

一般的な岩盤は RMR 分類で岩級 III あるいは「普通」(RMR:37 - 53)、破碎帯部分は岩級 IV あるいは「やや弱い」(RMR:26 - 29) と分類される。空洞幅が大きく (5m 以上) なるところで、天端の崩落が推測される。第 2 節で紹介した事例でこの推測が裏付けられている。同様に破碎帯部分でも天端の破壊が推測され、廃鉱内でこの推測も裏付けられている。図-7 は RMR 岩盤分類による空洞幅と自立時間の関係を示す。同図に岩盤評価結果と空洞幅も明記してある。廃鉱は約 40 年前に閉山され、当時から今までに、天端の崩落や残柱の部分的な破壊が認められる。また、空洞の天端に対して利用された木製支補は腐っており、支補部材になるものが

見当たらない。廃鉱に部分的な崩落や岩盤劣化が認められるが、基本的にまだ全体的に自立していると言えよう。この観点から、Bieniawski の RMR 法の空洞幅・自立時間の関係は保守的であると判断される。Q-システムにおいても岩盤の岩級は RMR と同様であり、廃鉱の岩盤の Q-値と空洞幅の関係は Q-システムで支補が必要・不要の境界線上に存在している(図-7)。部分的崩壊・劣化および 40 年以上全体として自立していることを考慮すると観測と推測はほぼ一致していると言える。

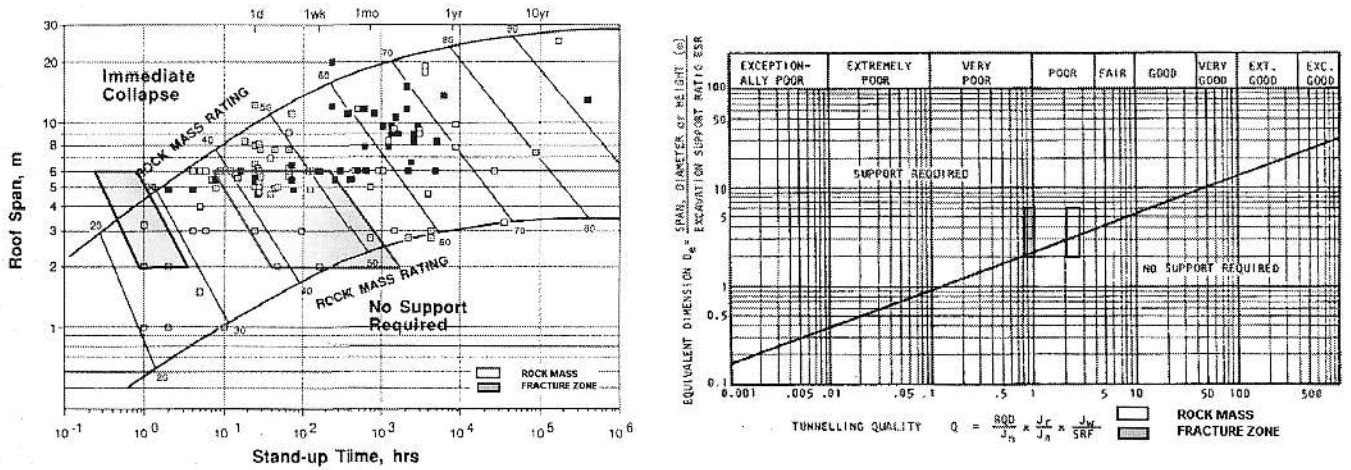


図-7 RMR および Q システム岩盤分類による空洞幅と自立時間の関係

4.2 残柱の長期的安定性の評価

亜炭廃坑の長期的安定性は基本的に残柱の安定性に直接に依存している。ここで残柱に着目して劣化およびクリープの影響を考慮して、その安定性を検証する。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) は次式で与えられる (図-8)。

$$\sigma_p = \rho g H \frac{A_t}{A_p} \text{ あるいは } \sigma_p = \sigma_v \frac{A_t}{A_p} ; \sigma_v = \rho g H \dots \dots \dots (1)$$

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。

これらの数値に対しての略図を図-8 に示す。亜炭廃鉱における残柱の断面積は約 2mx2m である。掘削率 (A_t/A_p) は場所によって異なり、その値は 2 と 12 の間に変化している。

a) 劣化を考慮して残柱の安定性の評価

劣化に伴って、残柱の有効的な断面積が減少しているとし、掘削時の残柱に作用する平均鉛直応力を用いて下記の式が得られる。

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_{p0}} = \frac{1}{1 - \frac{\Delta L \times (L_{10} + L_{20})}{A_{p0}} + \frac{\Delta L^2}{A_{p0}}} \dots \dots \dots (2)$$

年数の関数として劣化深さを下記の線形式で与えられるとする。

$$\Delta L = a \cdot t \dots \dots \dots (3)$$

掘削率を 4、土被りを 12.5m、単位体積重量を 20kN/m³、残柱幅を 2m とし、係数 a の値を 12.5mm/year から 20.0mm/year の間に変化させて、残柱に作用する応力の変化を求め、その結果を図-9 に示す。図-9 からわかるように劣化速度が速くなれば、残柱の破壊時間は早まる。

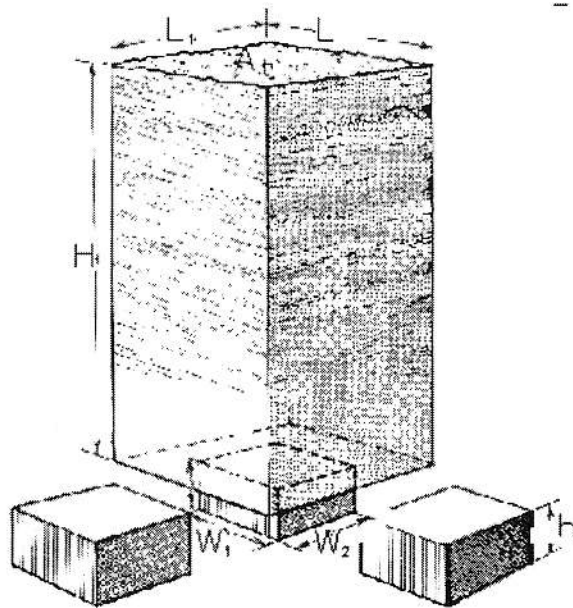


図 - 8 代表的な残柱に対する幾何学パラメータの定義

次に土被り、残柱幅および単位体積重量を先の解析と同様な値を用いて劣化係数 15.0mm/year に対して掘削率の値を 2 から 12 の間に変化させて、残柱の応力の変化を求め、その解析結果を図-10 に示す。解析結果から、掘削率が大きいほど、残柱の破壊が早くなることがわかる。特に不規則的に採掘が行われた廃鉱において残柱の破壊時間が掘削率によって異なることを意味している。

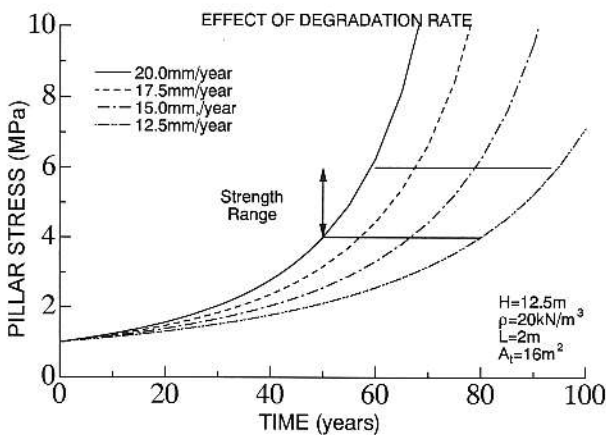


図-9 劣化速度の変化に伴う残柱の応力変化

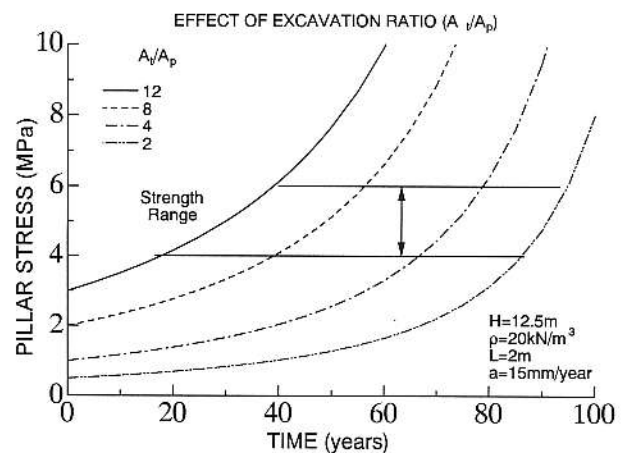


図-10 掘削率の変化に伴う残柱の応力変化

[b] クリープおよび劣化を考慮した残柱の安定性評価

亜炭廃坑内の崩壊は、一般的にクリープの影響による岩盤の破壊が推測されるため、これまで岩盤の時間依存性挙動に関しては多くの実験が行われている。図 - 11 (a) は過去に行われた室内実験の結果で、岩石の時間依存性強度の変化を示している。この実験結果から岩石の強度が異なると、各種の岩石の時間依存性強度を表す関数が異なることが推測される。図 - 11 (b) は図 - 11 (a) に示した実験結果を再整理したものである。図 - 11 (b) の場合、縦軸は岩石の強度を、短期強度を用いて正規化されたものである。大変興味深いものは、岩石の種類が異なっても、強度の時間的変化を次のような関数で表現が可能であることである。

$$\frac{\sigma_{cl}}{\sigma_{cs}} = 1 - b \ln\left(\frac{t}{t_s}\right) \dots \dots \dots (4)$$

図-11(b)に示した実験結果より、上式における係数 b の値は最小二乗法より決定される。ISRM の指針で岩石の圧縮強度が 10—20 分で求められることを考えると上式より岩石の強度の時間的な低下が推定される。また、岩石・岩盤の変形特性も同様な特性を持つ。

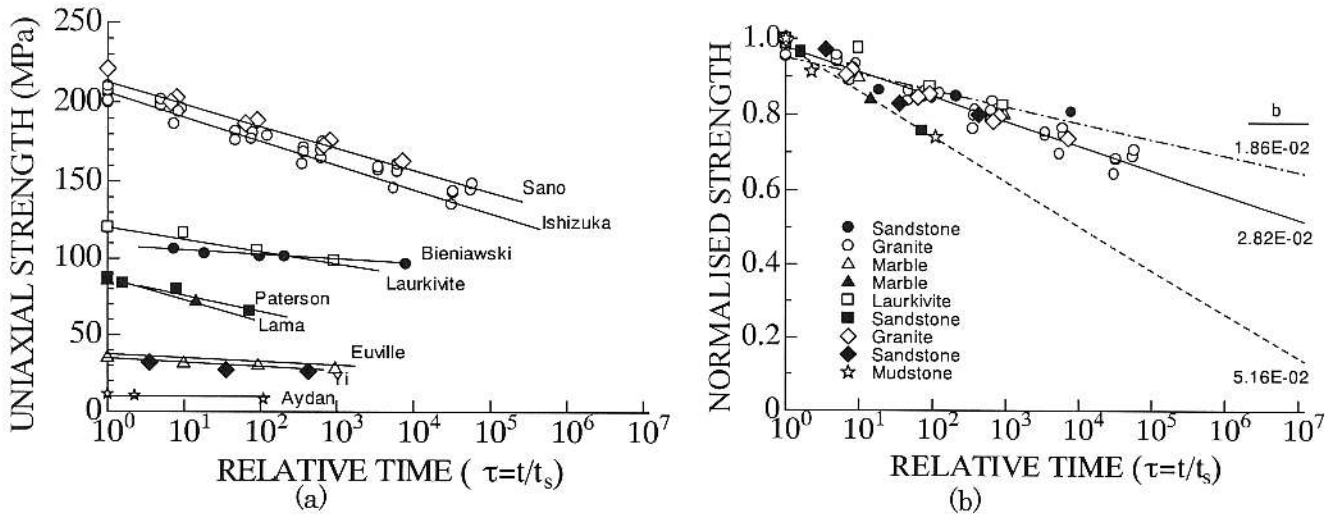


図-11 各種岩石の圧縮強度の時間依存性

岩盤の劣化を考慮せず、掘削率を 4 と 12 の間で変化させて、残柱のクリープ破壊時間を推定した結果を図-12 に示す。当然な結果として、掘削率が大きくなると残柱の破壊は短くなる。また、岩盤の強度が小さくなると、破壊時間が短くなる。このことから、不規則的に掘削された亜炭廃鉱の場合、掘削率が大きい場所において早い段階で陥没の恐れがあることが明確である。

次に岩盤の劣化とクリープを考慮し、その劣化関数の係数を 10mm/year、掘削率を 4 と 12 の間で変化させて、残柱の破壊時間を推定した結果を図-13 に示す。図-12 と比較すると、岩盤が劣化する場合、残柱の破壊時間は短くなるのがわかる。

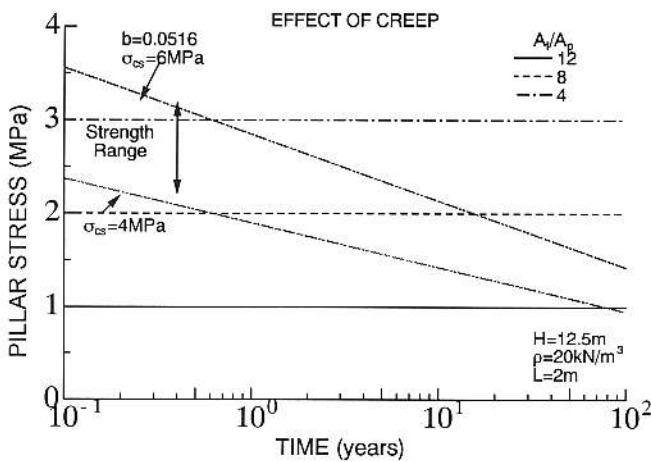


図-12 クリープによる残柱の破壊時間

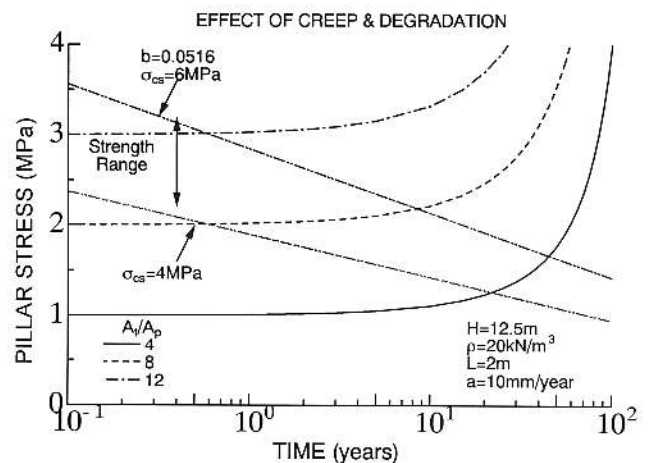


図-13 クリープおよび劣化による残柱の破壊時間

(2) 天端における破壊時間の推定

対象亜炭廃坑における亜炭廃坑の上部岩盤は比較的厚い砂岩および泥岩より構成されている。天端に厚みが 200-300mm の泥岩層が存在し、その上部層の厚みは約 500-1000mm である。亜炭廃鉱の陥没は基本的に局部的に残柱が破壊し、そのスパンは十分な広さになった時点で発生することによって現れる。したがって、天端の破壊を考える際に掘削時の幾何学形状のものと残柱の破壊によってスパンが広がった状況に対するものと 2 つに分けられる。

一般的に水平な多層岩盤の場合、天端の安定性を簡易に検討する際に下記のようなモデルが考えられる(図-14, Aydan, 1989)。

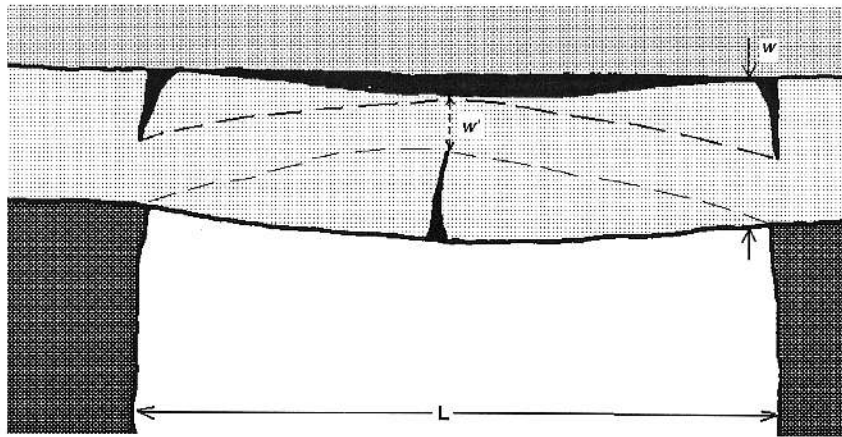


図-14：天端の安定性評価に対する力学モデル

(a)両端固定はり理論

(b)片持ちばり理論 (岩層は断層で破断されている場合)

(c)アーチング理論

(a)両端固定はり理論

天端における厚みが w 、スパンが L である岩層内に発生する曲げ応力は岩層の上部で両端に発生し、その大きさは次式で与えられる。

$$\sigma_t = \frac{1}{2} \rho g L \left(\frac{L}{w} \right) \quad (5)$$

また、両端作用する最大せん断応力と平均せん断応力は下記のように誘導される。

最大せん断応力 平均せん断応力

$$\tau_{\max} = \frac{3}{4} \rho g L \quad \tau_{\text{avg}} = \frac{1}{2} \rho g L \quad (6)$$

(b)片持ちばり理論

岩層は断層で破断されている場合、片持ちばりとして岩層をモデル化される。天端における厚みが w 、スパンが L である岩層内に発生する曲げ応力は岩層の上部で固定端に発生し、その大きさは次式で与えられる。

$$\sigma_t = \rho g L \left(\frac{L}{w} \right) \quad (7)$$

また、両端作用する最大せん断応力と平均せん断応力は下記のように誘導される。

最大せん断応力 平均せん断応力

$$\tau_{\max} = \frac{3}{2} \rho g L \quad \tau_{\text{avg}} = \rho g L \quad (8)$$

天端の岩層の破壊に関してもクリープおよび劣化の影響は残柱と同様にモデル化できる。

(c)アーチング理論

一般的に曲げに伴って天端に引っ張り亀裂が発生しても天端が直ぐ落下することにならない。その場合、亀裂が存在しているアーチとして天端の岩層をモデル化し、安定性を検討する必要がある。天端の破壊はアーチ内に発生する圧縮応力の値が圧縮強度を超える際に発生する。その場合、次式を誘導することができる (Aydan, 1989)。

$$\sigma_c = \frac{3}{8} \rho g L \left(\frac{L}{w} \right) \quad (9)$$

天端の岩層のアーチング破壊に関してもクリープおよび劣化に伴う影響は残柱と同様にモデル化できる。

対象亜炭廃坑の亜炭層の上部は泥岩で構成されている。天端の岩層は泥岩であるとして岩盤の劣化とクリープ破壊特性を考慮して、スパンを 4000mm、層の厚さを 200mm から 600mm まで変化させてアーチング効果に対して行った解析結果を図-15(a)に示す。当然な結果として、層の厚さが小さくなると天端の破壊に至る時間は短くなる。また、岩盤の強度が小さくなると、破壊時間が短くなる。

次に砂岩層に関して、層厚さを 1000mm、劣化関数の係数を 10mm/year として、アーチのスパンを 4000mm から 12000mm まで変化させて行った同様な解析結果を図-15(b)に示す。この解析は残柱の一部が破壊したと想定して行ったものに相当する。図からわかるように、スパンが大きくなると破壊時間が短くなる。また、強度が低下すると破壊時間が短縮される。

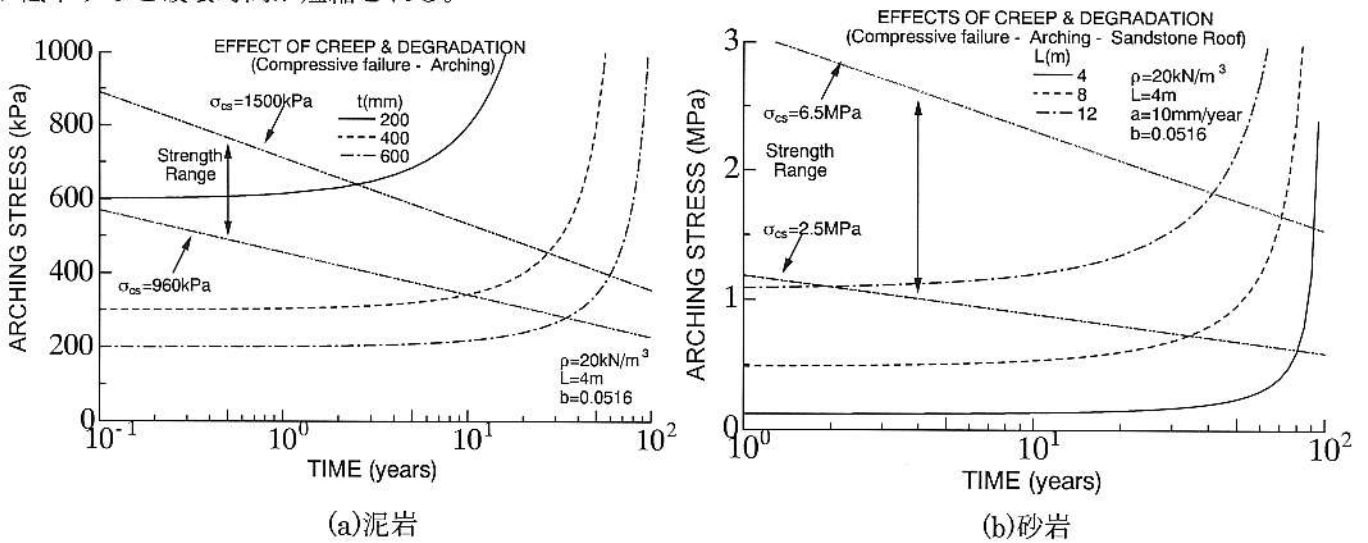


図-15 クリープおよび劣化による天端の破壊時間の予測

9 結論

亜炭廃坑の周辺岩盤には、非常に軟弱な堆積軟岩が存在し、廃坑の劣化に大きな影響をあたえている。本研究では廃坑内における劣化について理解し、その周辺岩盤から採取した堆積軟岩に対して幾つかの試験を行い亜炭廃坑およびその周辺岩盤の安定性評価を行うこととした。最初に廃坑内に見られた不安定現象をまとめ分類した。天端の不安定現象としては、天端の両端固定ばりとしての曲げ破壊、天端の片持ちとしてのたわみ性トッピング、岩盤ブロック落下の三種類に分けられる。残柱については、現段階で全体崩壊は確認されず剥離現象に留まっている。しかし、これらは年を重ねるごとに細くなっていることが確認された。残柱における剥離過程としては、応力集中による剥離、乾燥収縮による剥離、既存の不連続面による剥離が確認されている。天端や残柱の不安定現象は、坑口付近に多くみられ、その環境の変化により影響を受けていることが明確になった。このような崩壊現象は地震などの大きな振動が発生する場合に、引き起こされる可能性もあり、地表面への大きな影響も心配される。湿度の変化は堆積軟岩中で水分量の減少につながり、岩盤の壁面部分は乾燥していく。それに伴い収縮ひずみが生じ、結果として岩盤の剥離と劣化が発生し、進展する。

亜炭廃坑周辺岩盤の劣化が水分量の変化に大きく影響されていることを考慮して、周辺岩盤の劣化とそのメカニズムに関する試験を行い、堆積軟岩は、乾燥と飽和の繰り返しに非常に脆い性質を持っている。短期および長期安定性に関する解析として、岩盤のクリープおよび劣化を考慮した簡易安定解析法を提案し、亜炭廃坑の安定性評価を行った。解析結果より、廃坑内のクリープ破壊には劣化速度や掘削率が大きくなるほど崩壊が早まることを示した。亜炭廃坑周辺地域に起こる沈下や陥没の重要な要素は坑内環境の変動による劣化、地震

による加速度の影響および掘削率である。これらを考慮すると、亜炭廃坑における沈下や陥没は、短期で考えるとその危険性は低いですが、長期的な危険性を考える場合、それらは、必ず起こるものであり、その対策にかかる時間も含めると、その緊急性が窺われる。

謝辞

本研究の実施にあたり数多くの方々のご協力とご助言をいただきました。特に名古屋大学工学部川本朧万名誉教授に研究の進め方に対するご指導を賜り、飛鳥建設名古屋支店の杉浦乾郎氏、山田紀利氏、坂本昭夫氏には現場調査・計測に対してご協力頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- Aydan, Ö.(1989): The stabilisation of rock engineering structures by rockbolts. Doctorate Thesis, Nagoya University, 240p.
- Aydan Ö. & Nawrocki, P. (1998): Rate-dependent deformability and strength characteristics of rocks. *The Geotechnics of Hard Soils-Soft Rocks, Evangelista & Picarelli. ISBN 90 5809 018 3*
- 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.
- Aydan, Ö., and Kawamoto, T., (2000): The assessment of mechanical properties of rock masses through RMR rock classification system. GeoEng2000, UW0926, Melbourne.
- Barton, N., Lien, R., Lunde, I. 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel supports. *Rock Mechanics*, 6(4), 189-239.
- Bieniawski, Z.T. 1984. *Engineering Rock Mass Classifications*. John Wiley & Sons, New York, 251 pp.