

# インドネシアの露天掘り石炭鉱山におけるスレーキング問題

大屋 二郎<sup>1</sup>・笹岡 孝司<sup>2</sup>・島田 英樹<sup>2\*</sup>・一ノ瀬 政友<sup>2</sup>・松井 紀久男<sup>2</sup>

<sup>1</sup>九州大学大学院工学府（〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744）

<sup>2</sup>九州大学大学院工学研究院（〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744）

\*shimada@mine.kyushu-u.ac.jp

インドネシアの露天掘り鉱山の剥土岩となる岩石類としてはシルト岩、頁岩、泥岩、砂岩などであるが、その力学的特性は一般に軟弱であり、また水分の影響を受けて著しいスレーキング現象を呈するものが多い。インドネシアは乾季・雨季を持つ熱帯雨林気候であり、乾燥・湿潤によるスレーキング現象は採掘のみならず運搬、岩盤斜面崩壊、浸食及び酸性水化問題に大きな影響を及ぼしており、これらの問題を解決することが環境低負荷・持続可能な石炭鉱山の開発に要求されている。

本報告は、これまでに筆者らが関わってきたインドネシアの石炭鉱山の夾炭層岩石のスレーキング特性や強度劣化等についての概要を纏めたものである。

**Key Words :** *coal measure rock, opencut coal mine, slaking behavior, acid mine drainage, erosion, rehabilitation*

## 1. はじめに

インドネシアにおいては、年間石炭生産量のほぼ全量に近い約1億5千万トンが露天掘りから生産されている。近年、石炭需要の増加に伴って炭鉱の開発は増加し、それに伴う環境問題に対する関心も非常に高くなっており、これへの対策無くしては安定した操業は不可能になってきている。この国の夾炭層岩石は地質的生成年代が若いこともあり、その力学的特性は一般に軟弱で、かつ著しいスレーキング現象を呈するものが多い。このことから、熱帯雨林気候で雨量も多いこともあり、酸性鉱山排水（Acid Mine Drainage；以下AMD）問題やスレーキング問題が重要視されている。

本報告での対象露天掘り炭鉱は、KPC（Kaltim Prima Coal）、Tanjung Enim、Ombilinである。KPC炭鉱では、AMD問題に種々の対策をしつつ操業している。この対策のひとつがNet Acid Generation（以下NAG）試験<sup>1</sup>による採掘廃石（剥土岩、ズリ）のNAGタイプ分類である。すなわち、NAG試験によって廃石をPotentially Acid Forming（以下PAF）とNon-acid Forming（以下NAF）に分け、採掘跡に埋め戻す際にPAF層の上にNAF層を埋め戻し、さらにその上に表土を埋め戻すことによって、PAF層へ水と酸素が接触することを制限して酸性水の発生を

防ぐ方法を採用している。しかし、NAFとされた廃石のスレーキング性が大きければ、PAF層のカバー材としてのNAF層の役割が失われ、PAF層からの酸性水の発生や、堆積廃石の流出等の危険性が生じる。

以上のような背景から、各炭鉱の夾炭層岩石のスレーキング試験や含水率を考慮した強度試験を実施し、筆者らが既に得ている我が国の夾炭層岩石の結果<sup>2</sup>と比較しつつ、これら特性の把握を行った。

## 2. スレーキング試験

スレーキング性の評価には Slaking Index 試験、Slake-durability Index 試験、SSI (Slake-Susceptibility Index) 数値分類の3種を、単独または併用して用いた。

### (1) Slaking Index試験<sup>3</sup>

Slaking Index 試験では、乾湿操作を5回繰り返し、この試験から得られるSlaking Index 値SI(n)は、試験前の乾燥重量からn回目の重量損失割合を表したものである。

## (2) Slake-durability Index 試験

ISRM の指針によるSlake-durability Index試験である。ただし、ISRMの指針では乾湿操作 2 回の結果: Id (2) でもって表されるが、現在までの経験に従い<sup>2)</sup> 乾湿操作を 5 回行って Id (5) を求めた。

## (3) Slake-Susceptibility Index (SSI) 数値分類<sup>3)</sup>

SSI 数値分類は、Slaking Index 試験での 1 回目の 24 時間含水後における夾炭層岩石試料の状態を観察し分類する OI (Observation Index) 値 (0~4) と、SI (1) によって分類する SI 値 (1~6) の合計 (1~10) で表す。

## 3. 強度試験

一軸圧縮試験、線載荷圧裂引張試験を用いた。これらの試験より一軸圧縮強さ (UCS)、圧裂引張強さ (BTS)、および 50%接線ヤング率  $E_{50}$  を求めた。また、試料がスレーキング現象を呈するため、規定の岩石供試体作製が困難なものは丸棒圧入試験<sup>4)</sup> を用い、この試験で得られる圧入強度  $S_p$  および圧入ヤング率  $E_p$  から、UCS および  $E_{50}$  をそれぞれ算出した。この丸棒圧入試験は、直径 2mm の丸棒を一面のみを平滑に仕上げた供試体に垂直に圧入し、その際の丸棒の圧入量と荷重を測定し  $S_p$ 、 $E_p$  を求める方法である。なお、これら試験の一部は KPC 炭鉱において実施した。

## 4. 試験結果の考察・検討

### (1) スレーキング特性

ここでは代表例として、Tanjung Enim 炭鉱で採取された夾炭層岩石の結果を述べる。試験は NAG 試験、Slaking Index 試験および SSI 数値分類を実施し、NAG タイプ別にスレーキング特性の調査を行なった。

また、一般にスレーキング現象の有無や程度を予測・判定する有効な指標のひとつとして挙げられるスメクタイトの含有を X 線分析により確認して、その含有量  $W_{mo}$  (%) を、メチレンブルーによる簡易定量法を用いて定量し、SI (n) との相関性を調査した。これらの結果を表 1 に示す。

Sadisun<sup>3)</sup> は、SI (n) が 10% を超えるとスレーキング現象を呈するとしている。これに従えば、T8 を除く全ての試料でスレーキング性が非常に大きいことが判る。ここで、NAF とされる T1, 6, 11 では、SI (5) および SSI は共に高い値を示し、特に初期の段階から激しいスレーキングを起こしやすいことが分かる。この結果は、埋め戻す際の PAF 層のカバー材としての NAF 層の役割が失わ

れる可能性が大きいことを示唆している。同様に、PAF とされる岩石も非常にスレーキング性が大きい。もし、NAF 層がスレーキングの進行によって細粒化、あるいは亀裂拡大や流出が起こるとカバー材としての役割を失い、PAF 層に水と酸素が浸透して酸性水発生の恐れが生じる。さらにはこれによって PAF 層もスレーキングを起こせば細粒化し、水と酸素との反応比表面積が増加することによって、酸性水発生の進行が加速することになる。したがって、現在インドネシアでの AMD 問題の対策は、主に NAG 試験のような化学的な面からなされているが、今後はスレーキング特性の面からの配慮を加える必要がある。

表-1 NAG タイプ試験、各種スレーキング試験、およびスメクタイト含有量測定結果 (Tanjung Enim 炭鉱)

試料 No.	NAG タイプ	SI(5) (%)	SI	OI	SSI	Wmo(%)
T1	NAF	99.6	5	4	9	21.0
T2	PAF	100	4	4	8	15.6
T3	PAF	60	3	3	6	13.1
T5	PAF	68	2	3	5	15.7
T6	NAF	99.1	5	4	9	13.1
T7	PAF	99.7	4	3	7	12.0
T8	PAF	8.3	2	0	2	4.0
T9	PAF	87.7	2	1	3	3.4
T11	NAF	100	6	4	10	10.8

同表において、T2, 5 および T3, 6 を比較すると、 $W_{mo}$  が同程度であっても、スレーキングの程度が異なることが分かる。必ずしもスメクタイト含有量とスレーキングの程度に相関性が良いわけではないが<sup>2)</sup>、このひとつの原因は、スレーキング現象を評価する場合の経過時間の問題であろう。すなわち、スレーキングの進行速度や破壊後の粒径等の相違を試験においていかに表示するかにて起因していると考えられる。

KPC, Ombilin 炭鉱の夾炭層岩石のスレーキング試験結果も、程度に多少の差はあるが同様にスレーキング性は大きい。我が国の旧高島炭鉱、池島炭鉱などの夾炭層岩石と比較しても大きいと言える<sup>2)</sup>。

### (2) 強度特性

KPC 炭鉱の Pit J で採取された夾炭層岩石の一軸圧縮試験を行い、同時にその供試体の含水率を計測した。これら試料の含水率と一軸圧縮強さを図-1 に示す。この図に見られるように、総括的に見れば各岩種において一軸圧縮強さが弱く、かつ含水率の増加に伴い一軸圧縮強さが減少し、強度劣化が明瞭に現れている。特にシルト

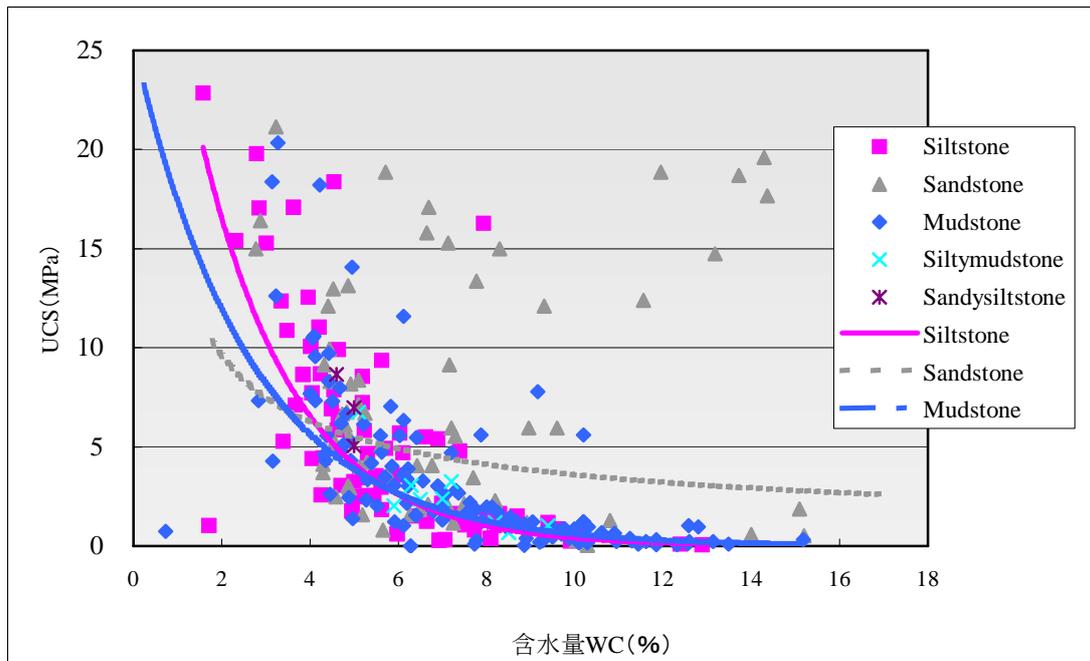


図-1 含水率と一軸圧縮強さの関係 (KPC 炭鉱、Pit J)

岩と泥岩においては、含水率が7~8%以上となると一軸圧縮強さは極端に減少し、ほとんどが3MPa以下となる。これらに比べて砂岩においては、含水率の影響があまり見られないようであるが、受ける乾湿の繰返し回数によっては、ある回数以降急速に強度が落ちることもあり<sup>5)</sup>、留意が必要であろう。

Ombilin, および旧池島と三池炭鉱の夾炭層岩石の一軸圧縮強さ、圧裂引張強さおよび50%接線ヤング率と含水率の関係を図-2~4に示す。なお、Ombilin 炭鉱で採取された岩石試料の力学特性については丸棒圧入試験を用いている。各図に見られるように、いずれの強度特性も含水率の増加に伴って低下している。KPC や Ombilin 炭鉱の試料と比較してみると、旧池島と三池の試料は強度が大きいことが判る。それにも拘わらず坑内掘りであり、かつ坑内湧水が多かった両炭鉱では、坑道維持や切羽の維持に多大の苦勞を費やしたという経験から、KPC,

Tanjung Enim や Ombilin 炭鉱が将来坑内掘りに移行せざるを得なくなった時の大きな採掘技術上の問題点となることが示唆される。

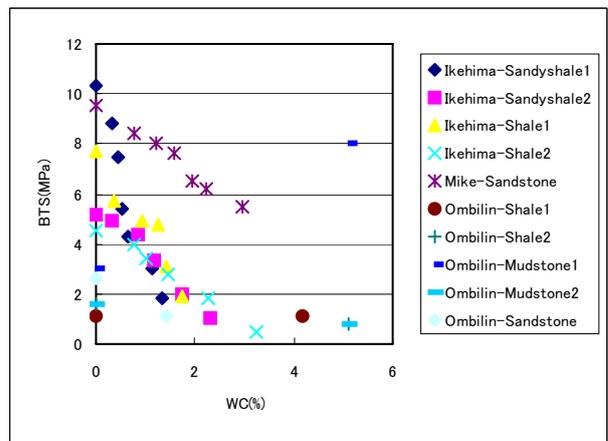


図-3 含水率と圧裂引張強さの関係

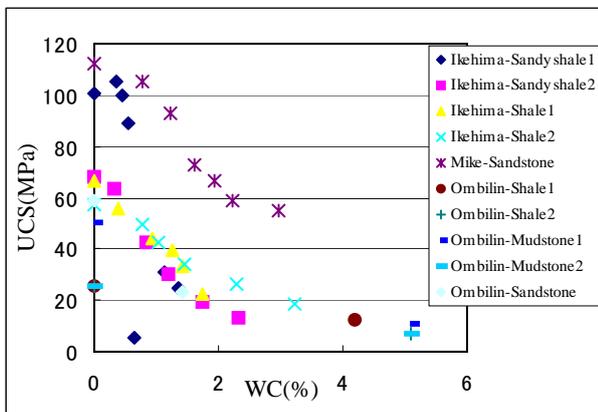


図-2 含水率と一軸圧縮強さの関係

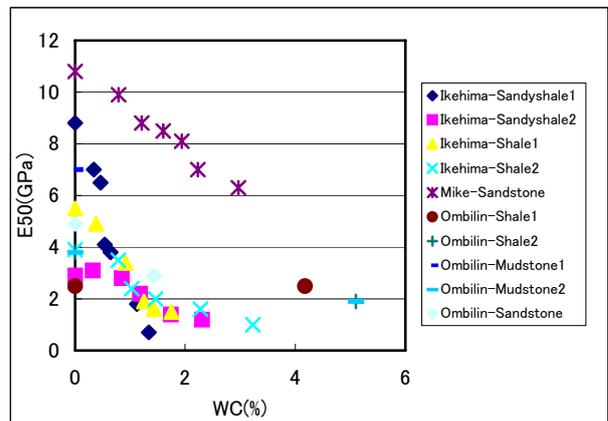


図-4 含水量と50%接線ヤング率の関係

## 5. まとめ

本報告では、インドネシアの夾炭層岩石のスレーキング特性と強度劣化について、得られた実測データをもとに総説的に検討した。本報告で対象とした夾炭層岩石は、岩種に拘わらずいずれも顕著なスレーキング現象を示し、また、水分の影響による強度の劣化も著しいことが分かった。これは、間隙水圧の影響、間隙水による岩石の粘着力と内部摩擦角の減少によると考えられ、また含有粘土鉱物の膨潤作用等によると考えられる。

現在、KPC炭鉱で行なわれている廃石のNAGタイプ別埋め戻しによるAMD対策は、NAF層のスレーキングによってPAF層のカバー材としての役割を失う可能性が示唆され、スレーキング性をも考慮した対策方法が必要である。また、インドネシアでも露天掘り終掘後の残壁（ハイウォール）に残された多量の未採掘石炭の効率的な回収法として、掘削機を用いてほぼ水平方向に炭層を掘削し石炭を回収するシステムであるハイウォールマイニング<sup>6)</sup>（図-5）の適用が試みられているが、この場合も夾炭層岩石の強度の弱さやスレーキング性を十分考慮に入れての採掘設計が必要である。

### 参考文献

1) KPC: *Rehabilitation Specifications Version 2*, Department Enviro, PT Kaltim Prima Coal, 2000.



図-5 ハイウォールマイニング

- 2) 例えば、一ノ瀬政友, 内野健一, 松井紀久男: 夾炭層岩石のスレーキング特性, 資源と素材, Vol.105, No.4, 1989.
- 3) Sadisun, I.A.: *Comprehensive study of argillaceous rocks by means of static slaking tests and its roles in engineering design*, Doctor of Engineering Dissertation, Kyushu University, Japan, p.142, 2004.
- 4) 島田英樹, 松井紀久男, 一ノ瀬政友: 丸棒圧入試験による岩石の力学的性質の評価, 資源と素材, Vol.107, No.9, 1991.
- 5) 一ノ瀬政友, 松井紀久男, 後藤 研: 岩石の水分履歴による強度特性の変化, 資源と素材, Vol.108, No.1, 1992.
- 6) 松井紀久男, 島田英樹: ハイウォールマイニングシステムの適用とその問題点, 資源と素材, Vol.119, No.4-5, 2003.

## SLAKING BEHAVIOR AT OPENCUT COAL MINES IN INDONESIA

Jiro OYA, Takashi SASAOKA, Hideki SHIMADA,  
Masatomo ICHINOSE and Kikuo MATSUI

In Indonesia, 140 million tons of coal are extracted from opencut mines annually. Some coal measure rocks are soft in dynamic characteristic and show severely slaking behavior affected by water. An annual rainfall often amounts over 3000 mm. This condition accelerates slaking behavior severe. It effects some problems such as mining, hauling, slope failure, erosion and acid mine drainage. This condition needs to be minimized negative environmental impact of mining activity.

This paper describes slaking behavior and deterioration characteristics of strength of coal measure rocks including test method.