

(89) 夾炭層岩石の坑道両袖巻充填材としての利用

九州大学工学部 正会員 ○ 松 井 紀久男

〃 一ノ瀬 政 友

Utilization of Coal Measure Rocks as Roadsides Packing Materials

Kikuo MATSUI, Kyushu University

Masatomo ICHINOSE, Kyushu University

Abstract

In our coal mines, coal measure rocks which are inevitably produced during roadway driveage and repair work such as re-ripping and dinting are transported from the underground to the surface and disposed of.

Apart from the transportation problems, disposal of waste rocks has a possibility of becoming one of enviromental problems. A solution to the problem is to utilize them underground. Waste rocks may be utilized as the roadsides packing materials.

In the paper, the stability of roadway with roadsides pack and the mechanical properties of roadsides pack when utilizing coal measure rocks as roadsides packing materials are investigated by using non-linear FEM analyses and laboratory strength tests.

1. 緒言

我が国の石炭鉱山において、坑道掘進や盤打ち、拡大などの仕繰りの際必然的に生ずるズリである夾炭層岩石は一般に坑外に搬出され、捨てられている。このようなズリの処分は採炭切羽の深部化、奥部化に伴う搬出量や搬出距離の増大という問題のみならず、環境保全などの社会問題を新たに生じさせる可能性を有している。これらの問題に対処するには、ズリの坑内での処理と利用が基本的に必要となろう。現時点で最適と考えられるズリの坑内での有効利用としては、ゲート坑道の払跡側への袖巻充填材¹⁾や坑道支保柱の裏込め材²⁾への利用が挙げられる。

以上のような観点から、本報告では沿層坑道の掘進において坑道の両側壁部の石炭や通常採炭の対象とならない薄層の石炭もある深さまで採掘し、そこにズリである夾炭層岩石を充填した場合、この袖巻充填の力学的特性や大きさが坑道の安定性にどのような影響を及ぼすか、またどの程度の力学的特性が実際得られるかについて、FEM解析及び室内強度試験により種々検討した結果について述べる。

2. FEM解析による両袖巻充填の坑道維持効果の検討

2. 1 解析方法

坑道周辺の岩盤を弾塑性体と仮定し、FEMを用いて平面ひずみ状態で解析を行った。解析に用いた坑道は、図1に示すように厚さ1.8mの炭層を含む岩盤中に掘進される高さ、幅(D)とも3mの素掘りのアーチ形坑道である。この坑道は垂直地圧 $P_v=100\text{kg/cm}^2$ 一定で、水平地圧 $P_h=50, 100, \text{および} 150\text{kg/cm}^2$ の3種の初期応力を示す地山中に開削されるものとする。図に示すように、坑道側壁部の炭層箇所では深さ(L_p)3m、厚さ1.8mの大きさと掘削後、充填は行われるが、本解析では坑道、充填部の開削および充填の作業は同時に行うもの

とした。すなわち、坑道および充填部の開削は予定開削面に開削に必要な等価節点力を作用させた。ただし、充填部では用いる充填材の特性に応じた力学的性質を有するものとした。なお、等価節点力は10等分し、増分的に作用させた。

坑道周辺岩盤は次式に示す破壊包絡線に従って降伏するものとした。ただし、引張応力を正とする。

$$\tau^2 = (\sqrt{S_c/S_t + 1} - 1)^2 S_t (S_t - \sigma)$$
ここに、 τ および σ はせん断応力および直応力、 S_c および S_t は岩盤の一軸圧縮強度および一軸引張強度である。なお、降伏した要素の余剰応力は反復計算により再配分を行った。さらに、充填部は岩盤と同様に上式に従って降伏するものとした。今回の解析に用いた岩盤および充填部の力学的特性は表1に示す。

解析は上述した種々の地圧条件下において、充填部の力学的特性値や充填部の大きさが坑道周辺岩盤の降伏状態にどのような影響を及ぼすかについて行った。

2. 2 解析結果および考察

図2に各地圧および充填条件下における坑道周辺岩盤の降伏領域を示す。まず、充填を行わない場合についてみると、水平地圧が垂直地圧より小さい ($P_h/P_v=0.5$) 場合、降伏は坑道側壁部において顕著であり、実

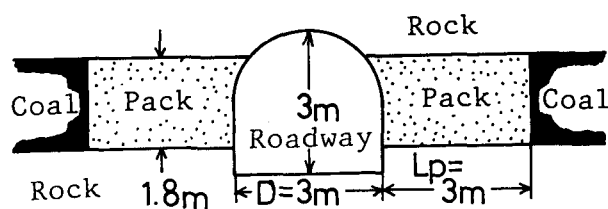


図1 解析モデル

表1 解析に用いた材料定数

Material	Young's modulus x10 ⁴ (kg/cm ²)	Poisson's ratio ν	Uniaxial compressive strength S_c (kg/cm ²)	Uniaxial tensile strength S_t (kg/cm ²)
Coal	$E_c = 1.0$	0.25	100	10
Rock	$E_r = 1.0$	0.25	100	10
Pack	1 $E_p = 0.01$	0.25	1	0.1
	2 0.1	0.25	50	5
	3 1.0	0.25	100	10
	4 10.0	0.25	500	50

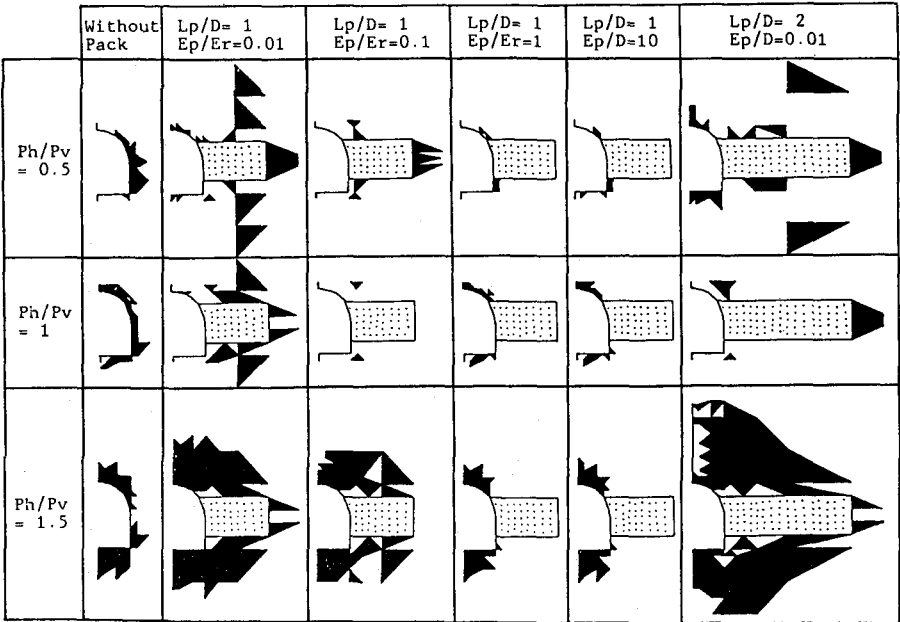


図2 解析による坑道周辺岩盤の降伏領域の発達状態

際の現象としてこの部分の降伏した岩石が坑道内に押し出してきたり、崩壊してくる可能性がある。水平地圧が垂直地圧と等しい($P_h/P_v=1$)場合、降伏領域は坑道を取り囲むように発達し、その結果坑道天盤の崩落や下盤での盤膨れが生じてくる。水平地圧が垂直地圧より大きい($P_h/P_v=1.5$)場合、坑道天盤および下盤により大きな降伏領域を形成し、これにより著しい天盤の破壊や崩落や盤膨れが生じ、坑道維持は極めて困難な状況に陥る。このような状況を改善し、かつ不必要な夾炭層岩石を処分するために両袖巻充填を適用した場合について検討してみる。充填を設けることにより、坑道上下盤の応力状態は変化し、それに伴い降伏領域も大きく変化している。 $P_h/P_v=0.5$ の場合、充填のヤング率比 $E_p/E_r=0.1\sim 1$ において坑道上下盤の降伏領域の減少が認められる。とくに、 $P_h/P_v=1$ の場合、 $E_p/E_r=0.01\sim 1$ では降伏領域の減少は顕著であり、坑道の安定性は両袖巻充填により大きく改善され、ズリの処分と坑道維持の2つの機能を十分に果たすことがわかる。しかし、水平地圧が大きい($P_h/P_v=1.5$)場合、充填により坑道上下盤の降伏領域の発達状態はほとんど改善されず、逆に大きくなる傾向にあり、坑道の安定性は大きく低下する。したがって、このような充填はズリの処分の機能しか果たすことができない。さらに、充填深さを増すことにより坑道安定性やズリの処分能力を高めることができる場合がある。しかし、 $P_h/P_v=0.5$ や 1.5 ではより深い充填になると、坑道上下盤での降伏領域は増大し、坑道の安定性は逆に低下する。それゆえ、このような地圧下で深い充填を行う場合、充填の強度を高める必要がある。

3. 実験による充填部の力学的特性の検討

3. 1 実験方法

我が国の炭鉱では現在、長壁式採炭におけるゲート坑道を切羽面後方で維持するためおよび払脉を密閉するために坑道の払脉側に袖巻充填を行っており、その充填材としてフライアッシュや選炭スラッジを用いている。充填の強度を確保するために、これらにセメントを混入する場合もある。

本実験では、ある炭鉱で採用している、フライアッシュ：セメント：水＝27：3：20（重量比）のスラリーに夾炭層岩石である頁岩を混入して、その力学的特性を室内強度試験により評価した。混入した頁岩は図3に示すように軟弱であり、含水率の増加とともに著しく力学的特性（一軸圧縮強度 S_c 、圧裂引張強度 S_t 、50%強度における割線ヤング率 E_{50} ）は低下する。また、水中養生においてスレーキング現象を呈するものもあった。

混入岩石の大きさは、充填自体の力学的特性のみならず坑内での破碎、運搬および設置設備やそれらの方法などにも大きく関連するが、実験では次のように3種の大きさについて考慮した。すなわち、ハンマーで砕いた頁岩を大（40～20mm）、中（20～5mm）、小（5～1mm）の3種の大きさの岩塊に分け、それぞれを所定の配合比からなるフライアッシュとセメントからなるスラリーに混入した。混入岩石は室内養生したもので、その一軸圧縮強度 $S_c=172\text{kg/cm}^2$ 、圧裂引張強度 $S_t=33\text{kg/cm}^2$ 、割線ヤング率 $E_{50}=0.7\times 10^4\text{kg/cm}^2$ である。

岩石を混入したスラリーは、縦100mm、横100mm、高さ200mmの角柱型枠に流し込み、2日後型枠から取り出し、室温25℃、相対湿度98%の一定条件下で養生した。養生日数は3、7、14および28日であるが、流し込みから型枠取り外しまでの2日間は養生日数に

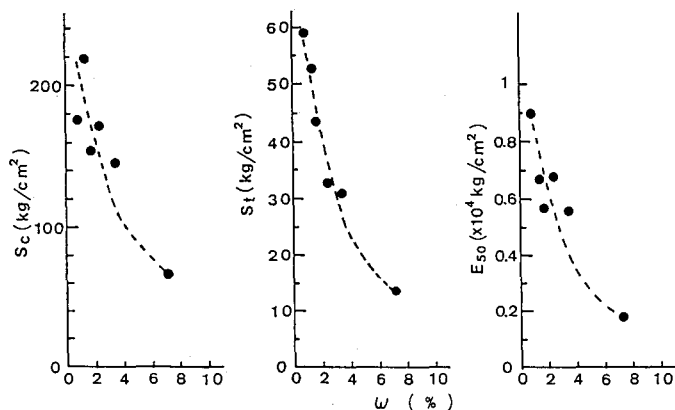


図3 含水率の変化に伴う頁岩の力学的特性の変化

含んでいる。なお、岩石は試料中にほぼ均質に混入し、各試料中に占めるフライアッシュとセメントのスラリーの体積割合は大塊、中塊および小塊ではそれぞれ約55、50および32%であった。また、岩石を混入しないフライアッシュとセメントのみからなる試料も同様に作製、養生した。強度試験は所定の養生日数を経た試料について、一軸圧縮試験を行い、ロードセルと変位計からの出力をX-Yレコーダで記録し、最大一軸圧縮強度 S_c 、割線ヤング率 E_{sg} をそれぞれ求めた。なお、実験は同一条件下で2個ずつの試料について行った。

3. 2 実験結果および考察

図4 (a)~(d)に一軸圧縮試験により得られた応力-ひずみ曲線の例を示す。これらの図に示されているように、頁岩を混入しないフライアッシュとセメントのみからなる試料の場合、最大強度に達した後、応力がひずみの増大とともに低下する、いわゆるひずみ軟化挙動を示すことがわかる。とくに、この傾向は養生日数が大きくなるほど著しい。一方、頁岩を混入した場合、最大強度に達した後もほぼその強度を保ちながら変形が進行する延性的挙動を示す。この傾向は大塊の頁岩を混入した試料ほど顕著である。しかし、中塊や小塊を混入した試料では、養生日数の増大に伴いひずみ軟化挙動へと変化していることがわかる。この軟化挙動は頁岩を混入しない試料と比べて急激なものではない。とくに、28日養生の小塊頁岩を混入した試料は、最大強度以後も高い強度を保持し、この値は頁岩を混入しない試料よりも大きく、充填として必要な特性を有しているといえる。

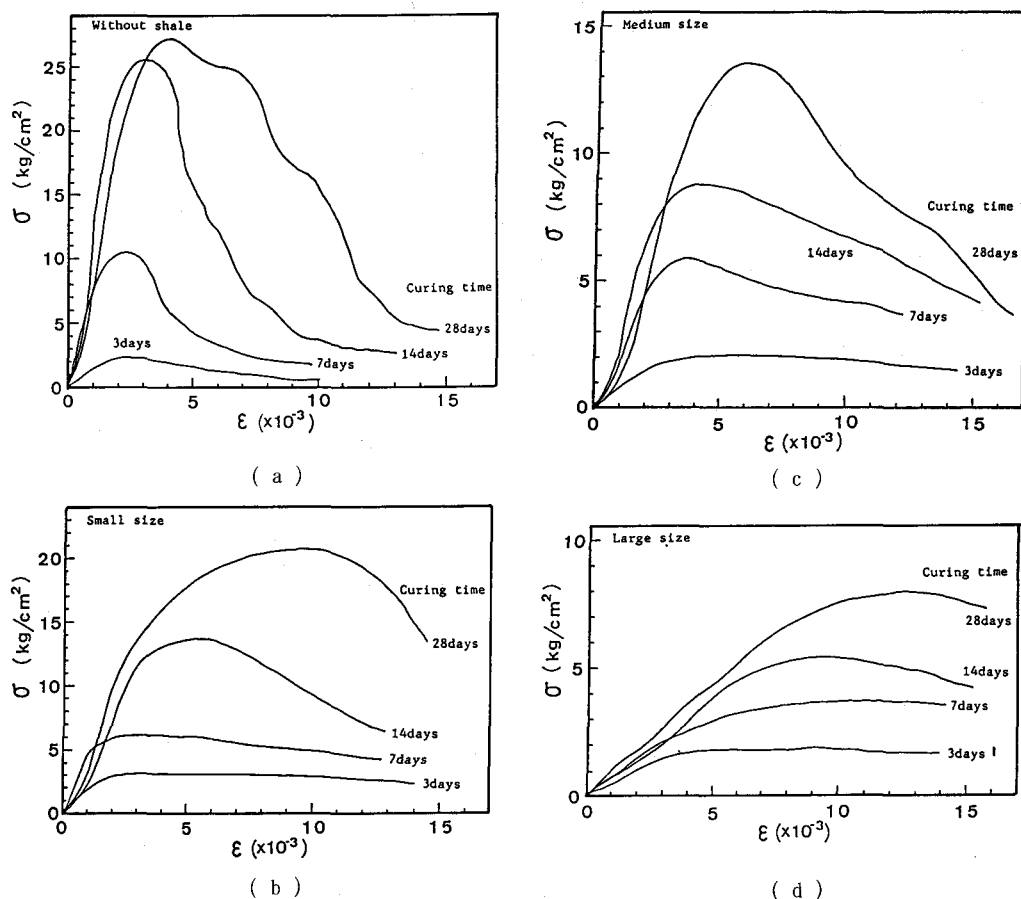


図4 応力-ひずみ曲線

図5および図6に一軸圧縮強度 S_c 、割線ヤング率 E_{so} と養生日数の関係をそれぞれ示す。これらの図に示されるように、養生日数の増大とともに各特性は増大する傾向にあることがわかる。また、頁岩を混入することにより、各特性はフライアッシュとセメントのみからなる場合よりも低下している。とくに、この低下は大塊頁岩を混入した場合が著しい。この原因としては、混入頁岩が元々軟弱で、かつ水によりさらに強度劣化しやすいことと、混入岩石とフライアッシュ、セメントとの結合面が弱面となりうることなどが考えられる。したがって、軟弱で水に影響されやすい夾炭層岩石を大塊で充填に混入した場合、充填の力学的特性の向上は大きくは期待できない。しかし、前節の解析によれば地圧条件にもよるが、充填のヤング率比は $E_o/E_r=0.01\sim 1$ であれば、坑道の安定性を高めることから、今回得られた結果でも十分、袖巻充填による坑道維持の改善が可能と考えられる。強度の弱い岩石を充填に用いる場合、セメント混入率を増大することによって、早期強度をも含めて各特性の増大は可能である³⁾。たとえば、セメント：水＝2：1（重量比）からなるセメントミルク中に今回に実験に用いたのと同じ頁岩（20～30mmの岩塊）を混入した場合、3日養生で $S_c=31\text{kg/cm}^2$ 、 $E_{so}=0.5\times 10^4\text{kg/cm}^2$ 、28日養生で $S_c=57\text{kg/cm}^2$ 、 $E_{so}=1.0\times 10^4\text{kg/cm}^2$ の値を示す。また、木積やポリクロスなどを充填囲いや充填袋として用いることにより、充填の各力学的特性も増大することから^{4)、5)}、軟弱岩石を混入した場合の強度低下の欠点はある程度補うことができると考えられる。

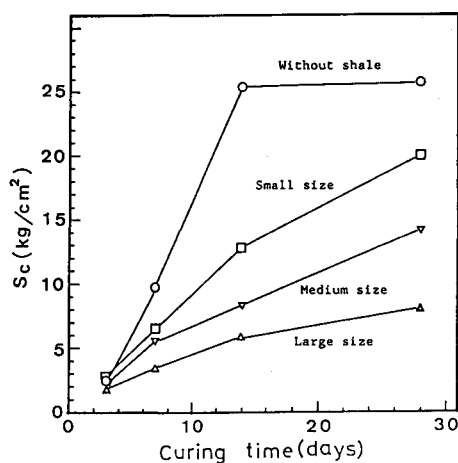


図5 一軸圧縮強度と養生日数の関係

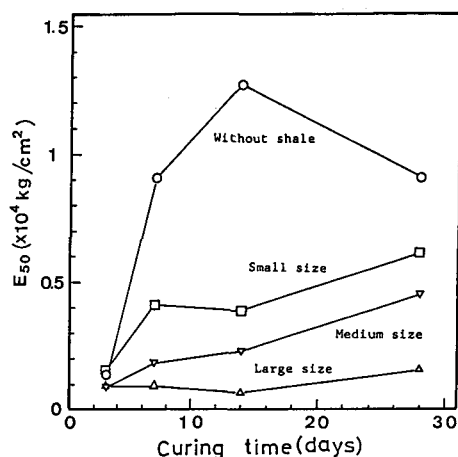


図6 割線ヤング率と養生日数の関係

4. 結言

我が国の石炭鉱山において、必然的にズリとして生ずる夾炭層岩石を坑道の両袖巻充填に用いた場合の坑道の安定性に及ぼす影響や充填の力学的特性について、数値解析および室内強度試験により種々検討した。この結果、ズリが袖巻充填材として利用できる可能性のあることが明かとなった。今後、ズリの破碎、運搬、設置システムが坑道掘進システムとうまく適合するかについて検討する必要があると考える。

参考文献

- 1) 松井、市川、井原：日本鉱業会春季大会講演要旨集、pp. 51-52, (1986)
- 2) 一ノ瀬、松井：土と基礎、37-4(375), pp. 43-47, (1989)
- 3) 井原、松井：九州大学工学集報、第57巻、第6号、pp. 875-882, (1984)
- 4) 後藤、河野、糸井、大牟田：九州大学生産科学研究所報告、第67号、PP. 1-5, (1978)
- 5) 後藤、河野、糸井：昭和54年度日本鉱業会九州支部春季例会講演要旨、pp. 24-26, (1979)