

(60) 側壁軟化法による坑道断面の変形抑制

九州大学工学部 正会員 ○ 松井紀久男
九州大学生産科学研究所 正会員 後藤 研

1. 緒言

近年、我が国の炭鉱においては採掘現場の深部および奥部への移行に伴い、坑道断面の変形、とくに坑道下盤に生じる盤膨れが大きな問題となっている。坑道断面の適正な維持は生産や運搬のみならず、通気や保安の面からも必要欠くべからざるものである。

炭鉱における坑道は、土木のトンネルと異なりある程度の変形や破損を許しても必要な期間維持できればよいために施工上、維持上種々の制約を受ける。

坑道の盤膨れを抑制するために、従来から種々の対策が採用されており¹⁾、原理的には i) ボルトの打設やグラウト材の注入による坑道下盤の強化、ii) 坑道周辺岩盤中の応力の軽減および iii) i) と ii) の併用の 3 種に分類でき、それぞれ特徴を有している。

本研究では、これらのうちで坑道側壁に切込みやボアホールを設け、あるいは発破を行うことにより坑道周辺岩盤中の応力を積極的に軽減させて盤膨れを抑制する側壁軟化法を取りあげ、その効果を有限要素法(以下 FEM と称す)による弾塑性解析により検討した。さらに、発破による方法を現場に適用した場合の効果を坑道の変形量の測定により明らかにした。

2. 解析による側壁軟化法の効果

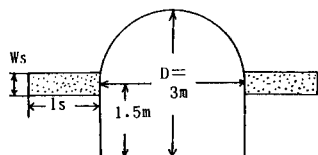
2.1 解析方法

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、第 1 図に示すように高さ、幅 D とも 3 m 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 および 150 kg/cm^2 の 3 種の初期応力を示す地山中に開さくされるものとする。坑道側壁の軟化は図に示すように坑道床面から 1.5 m のところに長さ l_s 、厚さ W_s のものを水平に両側壁に設けるとした。本解析では坑道の開さくおよび側壁軟化の作業は同時に行うものとした。すなわち、坑道の開さくおよび軟化は坑道ならびに軟化の予定面に開さくや軟化に必要な節点外力を同時に作用させた。ただし、軟化部では軟化の状態に応じた力学的特性を有するものとした。なお、節点外力は 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、軟化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軟化部の力学的特性は第 1 表に示す。軟化部の力学的特性は切込みやボーリングあるいは発破などの軟化方法によりそれぞれ異なる



第 1 図 解析モデル

第 1 表 解析に用いた材料定数

	ヤング率 (kg/cm^2)	ポアソン比 ν	一軸圧縮強度 $S_c(\text{kg/cm}^2)$	一軸引張強度 $S_t(\text{kg/cm}^2)$
岩盤	$E_r = 1.0 \times 10^4$	0.25	100	10
軟化部	$E_s = 1.0 \times 10^2$	0.25	1	0.1

が、軟化部のヤング率 E_s は岩盤のヤング率 E_r の低下したものとモデル化した。すなわち、 $E_s/E_r = 0.01$ とした。

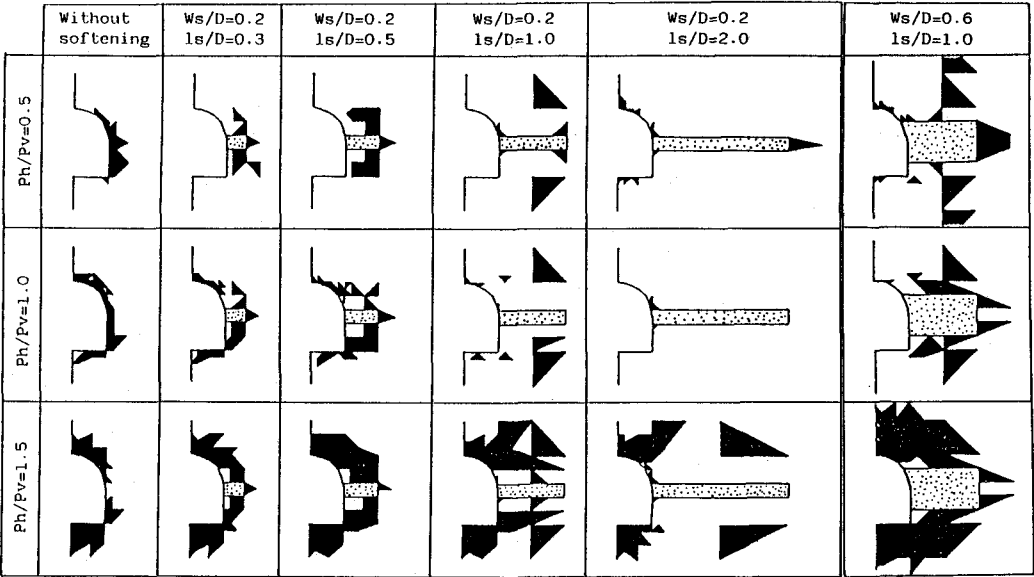
解析は上述した種々の地圧条件下において、軟化部の大きさ、すなわち軟化長や軟化厚さが坑道周辺岩盤の降伏にどのような影響を及ぼすかについて行った。なお、解析領域は第1図に示すように坑道の中心を通る鉛直軸に対して左右対称なので右半分の領域についてのみ行った。

2. 2 解析結果および考察

第2図に各軟化条件下における坑道周辺岩盤の降伏域を示す。まず、軟化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となり、実際の現象としてこの降伏した部分の岩盤の坑道内への押し出しや崩壊が生ずるであろう。水平地圧と垂直地圧が等しい ($P_h/P_v = 1.0$) 場合、降伏域は坑道を取り囲むように発達し、その結果天盤の破壊や盤膨れも生じてくるであろう。水平地圧が垂直地圧より大きい ($P_h/P_v = 1.5$) 場合、坑道天盤ならびに下盤により大きな降伏域を形成する。これにより著しい天盤の破壊や盤膨れが発生し、坑道維持は極めて困難な状況に陥るであろう。このような状況を改善するために側壁軟化を適用した場合についてみると、軟化長の増大とともに降伏域は岩盤奥部、すなわち軟化部先端付近に集中し、坑道周壁付近では減少している。これは、軟化により坑道周壁近傍の応力が改善された結果である。とくに、 $P_h/P_v = 1.0$ で $W_s/D = 0.2$ 、 $l_s/D = 2.0$ の場合、坑道周辺岩盤の降伏域は軟化部口元付近の極めて小さな範囲に限定されており、坑道上下盤での降伏は認められない。それゆえ、上下盤での降伏に伴う天盤の破壊や盤膨れは全く生じなくなる。しかし、 $P_h/P_v = 1.5$ の場合、軟化に伴い逆に大きな降伏域が坑道上下盤に形成され、側壁軟化の効果はほとんど得られていない。

さらに、軟化の厚さを増した ($W_s/D = 0.6$) 場合、軟化部先端付近の降伏域は増大する傾向にあり、 $P_h/P_v = 0.5$ あるいは 1.5 では降伏域は坑道上下盤において拡大しており、坑道維持状態を改善することはできない。 $P_h/P_v = 1.0$ においては坑道上下盤において若干の降伏域の減少が認められるが、軟化厚さの増大に見合うだけの効果は得られているとは言いがたい。

第3図に軟化長と坑道の上下盤接近量の関係を示す。この図より軟化長の増大とともに接近量はほぼ直線的に増大していることがわかる。この増大は軟化部の圧縮によるものであり、側壁軟化に伴い見掛



第2図 坑道周辺岩盤に生じた降伏領域

け上、坑道幅が増大したことによるとも考えることができる。一般に坑道の変形は、弾性的な変形成分のみならず塑性、粘性ならびに破壊などの非弾性的な変形成分から成っており、とくに後者の全変形に占める割合は大きく、その大きさは降伏域の大きさに関係している。したがって、軟化の効果は第2図に示されたように坑道周辺岩盤の降伏状態も含めて、総合的に判断する必要がある。

3. 現場適用化試験

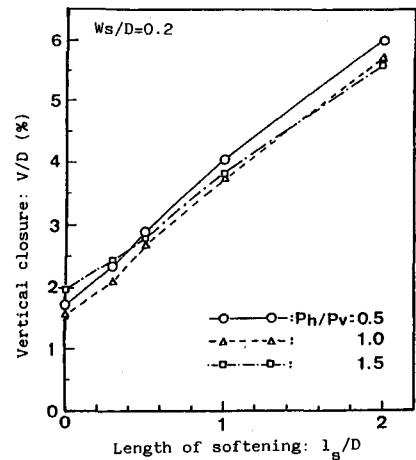
前章では解析により側壁軟化の効果を明らかにした。ここでは、発破による軟化法を現場に適用した場合の坑道維持効果について述べる。

孔底発破による側壁軟化を実施した坑道は、第4図に示すように松島炭鉱(株)池島鉱業所の暮島区域の18尺層下層(海面下深度約600m、炭層厚さ約2.8m、炭層傾斜約4°)中に掘進された沿層坑道である。この坑道は第5図に示すようI型鋼3部材のアーチ枠により支保され、その建付け高さおよび幅はそれぞれ2.80m、4.80mであり、枠間は0.65mである。

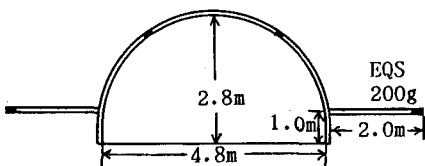
坑道の上下盤は頁岩、側壁部は石炭であり、それらの力学的特性を第2表に示す。表中の数値は室内養生下のものであるが、この頁岩は、含水率の増大とともに著しく低下する傾向を示す²⁾。

この付近の坑道の変形は大きく、上下盤接近量は90cm程度にも達し、採炭開始前に50～60cm盤打ちを行っている。このような状況を改善するために発破による側壁軟化を試験的に実施した。発破は坑道掘進時に坑道床面から約1.0mの両側壁に水平に直径48mm、長さ約2.0mで穿孔し、EQS爆薬200gを詰め、砂タンパーにより填塞して行った。この発破は坑道掘進切羽での発破と同時に行った。なお、孔間隔は1.3m、すなわち一枠おきである。

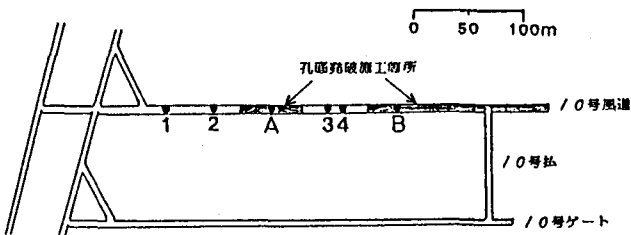
発破による軟化の状態を確認するために、γ-γ密度検層を行った。検層の結果を第6図に示す。この図によれば、発破に伴いおよそ4m奥部までの石炭の密度が低下しており、軟化が十分行なわれていることがわかる。



第3図 軟化長と上下盤接近量の関係



第5図 坑道および発破規格



第4図 測定坑道

第2表 周辺岩盤の力学的特性

岩種	ヤング率 (kg/cm ²)	一軸圧縮強度 (kg/cm ²)
頁岩 (下盤)	2.8×10 ⁴	164
頁岩 (上盤)	2.9×10 ⁴	213
石炭	1.5×10 ⁴	201

坑道の変形量は、第4図に示す1～4およびA、Bの合計6箇所の地点で坑道上下盤に設けた測点間の高さをスケールで測定して求めた。

第7図に各地点での上下盤接近量の測定結果を示す。この図より、掘進後の日数の経過とともに坑道の変形は進行していることがわかる。岩盤が弾性体である場合、円形坑道では掘進後、切羽が坑道の直径の2倍程度進行した時点で坑道の変形はほとんど終了する³⁾。このことはアーチ形坑道でもほぼ同様であろう。いま、この坑道の直径を5mの円形坑道とすると、掘進速度は約10m/日であるので、弾性岩盤とすれば掘進後1日でその変形は終了することになる。しかし、掘進後30日以上経過しても坑道の変形は依然進行しており、非弾性的な変形成分が顕著であることを示している。この傾向は発破を実施しない箇所で著しく、上下盤接近量は掘進後30日で40～60cmにも達している。一方、発破による軟化を実施した箇所では、変形の進行は軟化のない場合と比較して遅く、掘進後30日で20～30cmの上下盤接近量となっており、坑道の変形が軟化により約50%ほど抑制されたことがわかる。

採炭の際における坑道周辺岩盤の破壊状態の観察によれば、発破孔の先端付近の天盤に多数の亀裂が発生しており、解析結果の妥当性を示しているものと思われる。

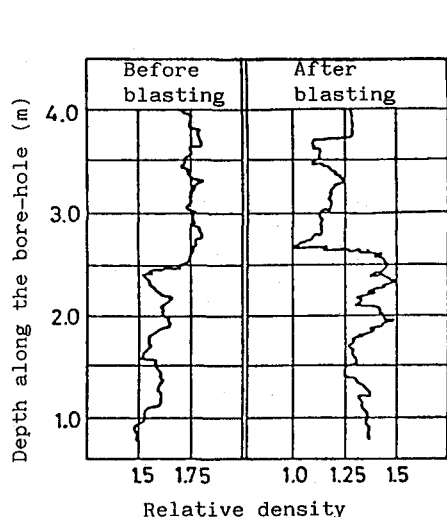
4. 結言

坑道の側壁部に切込み、ボーリングあるいは発破を行うことにより坑道維持を図る側壁軟化法をとりあげ、その効果をFEMにより明らかにした。また、発破による軟化法を現場に適用し、その効果を確認した。しかしながら、この側壁軟化法はボルト支保と比較してその適用は限定されているのは事実であり、その適用限界を明確にする必要があろう。

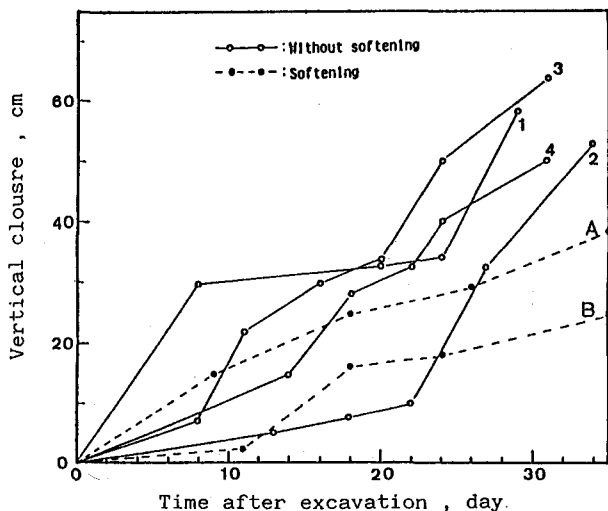
本研究にあたって、池島鉱業所の方々には多大のご協力を頂いた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 石炭技術研究所：盤圧と坑道維持対策、10月(1981)
- 2) 井原、松井、一ノ瀬、市川：日本鉱業会誌、101巻、1169号、409～414(1985)
- 3) Cruz, D.L. & Goodman, R.E.: 11th Symp. of Mechanics, Berkeley, U.S.A. (1969)



第6図 側壁部の軟化状態



第7図 上下盤接近量

(60) Control of Roadway Deformation by Sidewall Softening

by Kikuo MATSUI¹ & Ken GOTO²

ABSTRACT

One of the problems associated with the maintenance of roadways in coal mine is that of dealing with floor lift. Excessive floor lift results from the high stress concentration around roadway.

Sidewall softening technique is based on the transference of the high stress concentration further away from the roadway side. This transferral is accomplished by softening parts of sidewalls of roadway by cutting slot, drilling a series of parallel holes or blasting in the development stage.

In this paper, the effects of sidewall softening on the maintenance of roadways are studied by a finite element analysis and a field measurement.

The finite element analysis shows that sidewall softening controls the development of yield zone around roadway, improving the stability of roadway. It is also shown that in case of existing the higher primitive horizontal stress, the stability is difficult to obtain by softening.

The field measurement shows that roadway deformation is controlled well by sidewall softening with explosives.

1. Faculty of Engineering, Kyushu University

2. Research Institute of Industrial Science, Kyushu University