炭鉱の立坑ライニングの応力の測定*

正 会 員   平   松   良   雄**
正 会 員   岡   行   俊***

Measuring Stress in Shaft Linings Coal Mines

Yoshio HIRAMATSU and Yukitoshi OKA

For the purpose of contributing to the design of shaft linings, especially of coal mines, the authors have attempted to measure the stress in the shaft linings in several coal mines in Japan with the photoelastic apparatus contrived by them.

The results show that the lining in a solid ground is generally subjected to but a low stress, but sometimes to a stress about 30kg/cm^2 , that in a crushed ground the lining is subjected to a medium or high stress fluctuating, and that in a loose ground there appears such an earth pressure acting on the outer surface of the lining that may be estimated by the formula of the soil pressure.

1. 緒 言

立坑ライニングを設計するには、これにどれほどの地圧が作用するかを知らなければならない。立坑の開さくされる地盤が弾性岩盤であれば、その強さを知れば、弾性理論により立坑を開さくすることによって起る地圧現象を一応推定することはでき、またその地盤が土層、塑性地盤あるいは破碎帯などであれば、内部摩擦係数を知れば、一応地圧を見積ることはできる。しかし実際の岩盤の性質や状態は複雑であるから、理論的に適確に地圧を推定することは、現状では不可能である。そこで実際の立坑ライニングについて応力の測定を行い、ライニングに作用する地圧を知ることは極めて有意義なことと考えられる。

筆者らは数年前から、光弾性を利用する応力計を研究して来たが、昭和27年に手の平に乗る小型の装置を製作することに成功したので、当時三池鉱業所初島において井筒沈下法によって開さくされていた立坑井筒の応力測定にこれを利用して頂いた。続いて田川、大夕張、砂川および三井芦別各鉱業所の協力を得て、新しく開さくされた立坑のライニングの応力を測定して頂くことができた。これらの測定は、最初に試作した応力計を用いて行われたものであり、また測定技術が未熟であつたため、今から見れば精度は十分でなかつた。その後この光弾性応力計は改良され、精度は向上した。改良後の装

置は奔別鉱業所で最近開さくされた中央立坑ライニングの応力測定に利用して頂いた。

上に述べたように、多くの立坑において応力の測定が行なわれたが、最近まで測定精度が低く、なかば定性的なしかば定量的な結果しか得られなかつたのは残念であつた。しかし立坑ライニングの応力を測定できる機会は、今後、しばしばあるわけではないから、関係各会社および各鉱業所の許可を得て、一応ここに7年間の測定結果の概要を報告し、ライニング設計上の参考資料としたい。なお、今後精度の高い方法でこの種の測定が続けられ、一層信頼できる結果が得られることを希望する次第である。

2. 応力測定方法

まず、立坑または立坑底のコンクリートライニングを施工するとき、その表面に光学ガラス製測定片を埋設しておく。埋設した直後は、ライニング内の応力はほとんどゼロであるが、その後ライニングに地圧が作用して来ると、その内部の応力も高まり、したがって測定片の応力も高まる。そこで測定片の応力を光弾性応力計を用いて測定し、ライニングの応力を求めるのである。

補整器の付いていない光弾性応力計¹⁾を用いて測定するには、まず中空測定片に現われる等色線模様を肉眼で観察して、二つの主応力の比 $p:q$ を判定する。この判定の基礎資料として、理論計算に基づいて製作した標準

* 昭和35年2月22日受理、昭和34年11月8日、昭和34年度日本鉱業会秋季大会(熊本)学術講演会にて講演

** 工博、京都大学教授 鉱山学教室

*** 京都大学助手

* さきに、本誌71巻799号12頁の第1および第2図に、この種の等色線模様を発表したが、この図は現場測定の基礎資料として精度が不十分であることが分つたので、今回の論文第1図は、さらに詳細な計算を行なつて製作したものである。

第1図 主応力比 $p:q$ を判定するための標準等色線模様

等色線模様を示せば、第1図のようである*。図の中に記入した数字は各縞の主応力差を示したものである。この図は等色線の形を示すばかりでなく、各々の縞に記入された相対的応力から、任意のどれかの縞の色が分れば他の縞の色を推定するのに役立つものである。もし、1軸応力である場合は、等色線縞の対称軸の方向を見出して、それを主応力方向とし、さらに円孔の側壁に現われる最高次の等色線の色から、補正実験結果を利用して応力を決定する。補正実験結果の一例を示すと、第2図のようである。また、もし2軸応力である場合は、最高次等色線の色と p との関係が $p:q$ の値によつて異なるから、とりあえず1軸応力の場合の補正実験結果を利用して見掛けの p の値を求め、これに修正率 k を乗ずることにより真の p の値を決定する。 q/p と k の値との関係を理論的に求めると、第3図に示すようである。以上に述べた測定方法では最高次等色線の色と q/p とを正確に判定するのが難しく、したがって測定精度が高くない欠点がある。

補整器の付いた光弾性応力計を用いる場合、定量的に応力を求めることは容易である。その方法については、すでに報告しているので、ここに説明することを省略する^{2), 3)}。

なおコンクリートはかなりクリープを起すので、それに基づく誤差を一々実験によつて補正しなければならない

い。以下に報告する各立坑での応力測定においては、クリープに基づく誤差を補正していないことをお断りしておく。しかし、光弾性応力計による応力測定では、他のヒズミを測定して応力を決定する方法と異なり、クリープの影響は大きくないものと考えられる。

3. 三池鉱業所初島排気立坑における測定

初島は有明海上に築島されたもので、排気立坑は深さ約120mの四紀層の間だけ井筒沈下法によつて開さくさ

第2図 コンクリート構造物に埋設された中空測定片に現われる最高次等色線の色と p との関係の一例第3図 k と q/p との関係

れた。この井筒に作用する地圧を知るため、深さ 22m, 62.6m, 82.6m の 3 断面に、それぞれ東西南北の 4 個所に測定片が埋設された。埋設の時期は井筒を地上で接ぎ足すときであつて、第 4 図に示すように、昭和 27 年 11 月から同 28 年 5 月までの間であつた。

この立坑の工事中は、内部に泥水が満ちていて全然応力の測定はできなかつた。昭和 29 年 1 月に行なわれた測定結果は第 4 図のようである。この図は各測定片に現われた等色線模様様のスケッチ、主応力方向および主応力などを示している。深さ 22m の断面では、応力が低過ぎて、応力の判定が難しかつた。どの測定も、ほぼ 1 軸応力状態にあつて、主応力方向は水平または水平に近い。しかし、同一断面上の 4 測点の応力状態には、いくらか偏差が認められる。井筒に鉛直方向の地圧が現われないことから、井筒の自重は井筒と地盤との間の摩擦により大体支えられているものと考えられる。

仮りに、井筒の内壁には測定された最大主応力の平均値に等しい水平方向の応力 σ_θ が生じているものとするれば、井筒の外壁に垂直にかかる地圧 p は次式で計算できる。

昭和 29 年 1 月測定									
測定片	ライニング		等色線模様と主応力 p (kg/cm ²) とその方向						
深さ (m)	外径 (m)	内径 (m)	東	西	南	北			
22.0	28.52	9.6	7.4						
62.6	28.21	9.6	7.0						
82.6	27.11	9.6	7.0						

第 4 図 三池鉱業所初島排気立坑井筒における測定結果

第 1 表

深さ (m)	井筒内壁面上の水平方向の平均応力 kg/cm ²	(1) 式による地圧 kg/cm ²	静水圧 kg/cm ²
62.6	23.7	5.55	6.25
82.6	28.8	6.74	8.26

$$p = \frac{\sigma_\theta}{2} \left(1 - \frac{r_1^2}{r_2^2} \right) \dots \dots \dots (1)$$

ここに r_1 , r_2 はそれぞれ井筒の内半径、外半径である。深さ 22.0m の断面の測定値は除外し、深さ 62.6m と 82.6m の二つの断面について、(1) 式から求めた地圧とそれぞれの深さの静水圧とを示せば、第 1 表のようである。この結果によれば、地圧は静水圧よりいくぶん低い。また、この値は、地盤の比重を 2,000kg/m³、内部摩擦角を約 24° とし、Rankine の土圧公式で計算した値と、ほぼ一致する。なお流砂層中の地圧は静水圧の 1.3 倍程度（最大値は 1.7 倍に達する）とのことである⁵⁾。

4. 田川鉱業所伊加利立坑底における測定

伊加利立坑は深さ約 660m で、良好な岩盤中に開さされたから、地圧の点から見てあまり問題はなかつた。しかし、坑底連接部において、中央から上方にれき(礫)岩、下方に弱い頁岩層が現われたので、これに剛性コンクリートライニングを施したとき、時間の経過とともに高い地圧がかかってくるのではないかという懸念があつた。そこで坑底のライニングに約 20 個の測定片を埋設して応力を測定し、地圧のかかり方を監視することになった。第 5 図は坑底坑道の中心線を通る縦断面図で、肩側から深側を見たものである。走向は坑道の中心線に平行で傾斜は 15° である。坑底の支保は、まずレールのリング枠を入れ、これに直角に上方には鉄筋を、下方にはレールを入れて補強し、これを包んでコンクリートを打つたものである。コンクリートの厚さは、上方は約 50cm、下

第 5 図 伊加利立坑坑底構造および昭和 34 年 11 月における測定結果

方は約1mである

測定片の埋設は昭和29年8月28日から10月23日の間に行なわれた。これらの測定片について、測定したところによればライニングの応力は、初めの中は、ある程度増加するが、やがて変化しなくなることを認め、この様子ではライニングは十分安全に維持されるものと想像された。その後長く測定は行なわれなかったがライニング施工後5年以上経過した昭和34年11月に再び測定を試みた。測定片の大部分はと(鍍)銀面が腐蝕したり、充填材料であるセメントモルタルの砂粒が大きかったためか、破損したりしてうまく測定できたものは僅かであった*。

測定ができた測定片の位置、主応力方向、等色線模様および主応力は第5図に記入した通りである。等色線のスケッチは断面の半分だけについて示している。測定片4はライニングが坑底空間成形のため肉厚となり、突出している部分で、応力は零である。測定片1,5および6はいずれも主応力が傾斜していることを示し、最大主応力は約30~50kg/cm²である。測定片2および3は坑道の下方の壁面に埋められたもので、この付近は二つの主応力がほぼ等しいことを示している。

この測定は、施工から5年以上経過した後の応力変化を知ることができた点に意義がある。

5. 大夕張礦業所排気立坑における測定

この立坑は深さ760mの坑底において、同径の6mの円形坑道と接続する。その付近の岩盤は軟弱な幌加別頁岩層で、従来この地層中に開さくされた坑道の維持にはかなり困難を感じていたほどである。第2表はこの頁岩の強度試験結果である。

そこで、あらかじめ坑底接続部の位置に、坑底坑道の導坑を利用して実物の1/2の寸法で試験用の接続部を作り、これに厚さ20cmのコンクリートライニングを施し、その壁面に多数の測定片を埋設して、昭和29年5月28日から170日にわたって応力変化を測定した。

第6図は試験用接続部の形、測定片の位置、埋設後170日目の等色線模様、主応力方向および主応力などを示す。またライニング上の代表的箇所における応力の時間的変化は第7図に示すようである。この測定によれば、ライニングに作用する地圧は経過日数と共に増加し、170日位ではまだ落着いていないことが分る。しかし、分岐部分の天井の角を除いては、ライニングの応力は30kg

第6図 大夕張排気立坑の試験用坑底接続部の構造と測定片埋設位置ならびに測定結果

第2表 幌加別頁岩の強度試験結果

方 向	圧 縮 試 験		圧 裂 試 験	
	試験片数	圧縮強さ $\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$	試験片数	引張強さ $\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$
層理に垂直	2	390	3	34
層理に平行	2	486	2	20

/cm²以下で、今後増加するとしても、さほど問題になるようなことはなからうと想像された。ただ分岐部分の天井の角の応力は最初急激に増加したが、一たん、ほとんど零近くまで低下し、その後再び増加した。これは分岐部分の天井の角は甚だ浮き易く、そのためライニングを圧迫していたが、一たん滑りが起つたため、ライニングの他の部分に荷重がかかるようになったことによるものと思われる。筆者らは、さきにパロダイナミック実験によつて、ライニングのない立坑底接続部の地圧現象について研究したが、その結果によれば、やはり分岐部分の天井の角が最も破壊しやすく、また、たとえここに崩落が起つても、破壊は局部的に止まり、大きく拡大することはないことを認めた。この実験結果は上記の実測結果とつじつまが合う。

この実測結果で注目されるもう一つの点は、切上り部

第7図 大夕張排気立坑の試験用坑底接続部における測定結果

* 最近、測定片の埋設方法の改良により、このような故障はなくなった。(文献(2)参照)

分には、僅かであるが鉛直方向の応力が現われていることである。これは切上りが図に示されただけの高さしかなく、その上に矢木を並べて、天井の地圧がこれに作用できるようにしてあることによるものと想像される。

6. 奔別鉱業所中央立坑における測定

この立坑は奔別坑と弥生坑との中間の幌内頁岩層の中に関さくされたものであるが、この付近には二つの大きな断層が走っており、そのため地層は激しく乱され、ほとんど層理が見分けられない位である。第8図は立坑、炭層および断層の相対位置を示す。したがって、かなり高い地圧がライニングに作用するものと想像されるので内外2層のコンクリートブロックをもつてライニングされた。

外側のブロックはセメントと焼硬を 1:7 の比率で配合した弱いコンクリート（強さは 55kg/cm^2 程度）でできており、しかも、第9図左下方に示したような形状寸法を有し、中空である。内側のブロックは配合比 1:2:4 のコンクリートでできており、その強さは約 400kg/cm^2 で、第9図右下に示したような形状、寸法を有している。内外のブロックの間には 1:3 の配合のセメントモルタル層（1cm）を置き、水の浸透を防いでいる。裏込めにもブロック間の目地にも同じセメントモルタルが用いられている。したがって、このライニングは剛性構造であるが、地圧によつて一たん外側のブロックが破壊すると可縮構造となる。坑口付近は湧水が多かつたが、それ以下は比較的少なく、水止めがよく行なわれたので、ライニングの内壁は乾燥している。

測定片はライニング内壁の一つの母線上に、深さ 9.83 mごとに1個ずつ、埋設された。浅い部分には中空測定片が埋設されたが、間もなく破壊したので、それ以下には中実測定片が埋設された。立坑の深さは 550m であるが、現場の作業の都合上取りあえず 274m の深さまで測定片が埋設された。それ以下は立坑完成後測定片を埋設して測定が行なわれることになった。この立坑での応力測定は改良された光弾性装置をもつて行なわれ、したがって、等色線模様からではなく、補整器の読みから応力が求められた。

1年半以上にわたる測定の結果は第10図に示すよう

第8図 奔別鉱業所中央立坑と炭層と断層との関係位置図

第9図 奔別鉱業所中央立坑のライニングの構造

ある。この図からライニングに現われる応力、したがって、ライニングに作用する地圧は、一般に、最初一たん増加するが、その後、不規則に変動し、やがて減小の傾向を示している。しかし、今までに測定した立坑の中で最も高い応力が現われていることに注目される。また、応力は深さに無関係で、地盤の良否に直接関係するものである。

応力が時間とともに変動するのは、軟弱地盤中に関さくされた空洞のライニングに特有の現象ではないかと考えられる。これに似た例を挙げると、高松炭鉱二島鉱業所坑底水平坑道のようなものである。この坑道は軟弱なベントナイト質凝灰岩中に関さくされたもので、コンクリートブロックと松板とを用い、可縮性と可屈性を持たせてライニングされたが、完成後約3カ月間は断面がいくぶん変形し、その後変形は僅かになり、1年半後には落着いた由である。

奔別の立坑には 340m と 550m の水準で坑道と連絡するが、これらの坑道は分岐点から約10mの間だけ立坑と同様に二重のブロックをもつてライニングを施された。しかし施工後 1~2 カ月でライニングの一部に破壊が現われた。水平坑道の維持が立坑の維持より、いかに難しいかが分る。

第10図 奔別砒業所中央立坑ライニングの応力測定結果

7. 結 論

光弾性を利用する応力計を用い、いくつかの炭鉱の立坑において、数年にわたりライニングに現われる応力を測定して来た。この測定方法には、現在から見れば不備な点もあつて、精度の高い結果は得られなかつたが、炭鉱の立坑ライニングの応力に関し、およそ次の事柄が認められた。

1) 海底の四紀層中の立坑には水平方向に深さとともに増加する応力が現われ、大体土圧論で計算される程度の地圧が作用するように思われる。2) 破碎された地盤中の立坑ライニングに現われる応力は、時間的に一たん増加し、その後変動し、やがて減少の傾向を示しながら落着くようである。最大応力は各々の測定箇所の地盤の条件によつて異り、地盤が特に悪いところでは、かなり高い値に達する。しかし立坑を維持することは同じ条件の所に、水平坑道を維持するより這かに容易であるこというまでもない。3) 岩盤が丈夫であれば、応力はゼロまたは極めて低い。さほど丈夫でなくても、連続した弾性岩盤であれば、深さ数百メートルの立坑であれば剛性

支保で安全に維持できる。この時、いくぶん岩盤が流動学的性質を有するため、ライニングには、時間的に増加する応力が現われるが、やがて数十 kg/cm^2 までの値に落着くようである。

この研究を纏めるに当たり、多忙な立坑開さく現場において応力測定を行なうことと、測定結果を発表することを許可して頂いた三井砒山株式会社、三菱砒業株式会社および住友石炭砒業株式会社、ならびに直接測定に協力して頂いた各社の多数の技術者の方々に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 平松・丹羽・岡：光弾性を利用する盤圧の測定，日本砒業会誌71巻，799号，(昭和30年1月)，11～14頁
- 2) 平松・岡：光弾性を利用する地圧測定法の改良，日本砒業会誌75巻，847号，(昭和34年1月)9～14頁
- 3) 特に2軸応力の場合の測定法に関しては，平松・丹羽・岡：光弾性応力計による地圧の測定，水曜会誌14巻1号(昭和34年12月)7～10頁
- 4) 厚肉円筒の公式(例えば，機械工学便覧 4～102頁，昭和26年版)を变形したもの
- 5) Heise-Harbst-Fritzsche: Bergbaukunde II, 7 Auf. 1950, 243頁
- 6) 平松・岡：立坑岩盤の盤圧に関する実験的研究，日本砒業会誌68巻，774号，昭和27年12月，545～548頁