

(81) スウェーデン “ASPO” SKB 地下実験施設坑道における坑道周縁の発破損傷について

—— 振動計測による予測 ——

山口大学工学部 村瀬ニ、フシ¹

山口大学工学部 中川浩二

BLASTING DAMAGE IN THE RAMP OF THE SKB UNDERGROUND LABORATORIES AT ÄSPÖ IN SWEDEN
- verification of predictions based on vibration measurements.

Finn Ouchterlony¹, prof., Yamaguchi University

Koji Nakagawa, prof., Yamaguchi University

Summary

This contribution reports an investigation of the blasting damage in the contour of an access ramp to a Swedish underground laboratory for nuclear waste related studies. Near zone vibration measurements were made for 7 rounds and the results converted to a site specific scaling law. A simple engineering correction for the influence of the charge length was developed and the resulting equations used to predict the damage zone depths of three different drilling and charging patterns.

These predictions were then compared with actual blast damage measurements. The agreement is remarkably good. This in our opinion gives good support to the engineering method in which a critical vibration velocity is used to predict the zones of blast damage around bore holes.

1. 研究の目的と実験場所

1991年から1994年にわたってスウェーデン核燃料及び核廃棄物処理会社 (SKB) は、放射性廃棄物の貯蔵施設のためにASPOの硬岩中に地下実験施設を建設中である。この研究施設はスウェーデンの原子力発電所からの高レベル放射性廃棄物を安全に貯蔵するために必要な技術的な概念を発展させるという基本的な役割を有している。

ASPOはスウェーデン東海岸部Oskarshamnから約10kmの Simpevarp原子力発電所にある。ASPOの地質は主として花崗岩である^{1), 2)}。

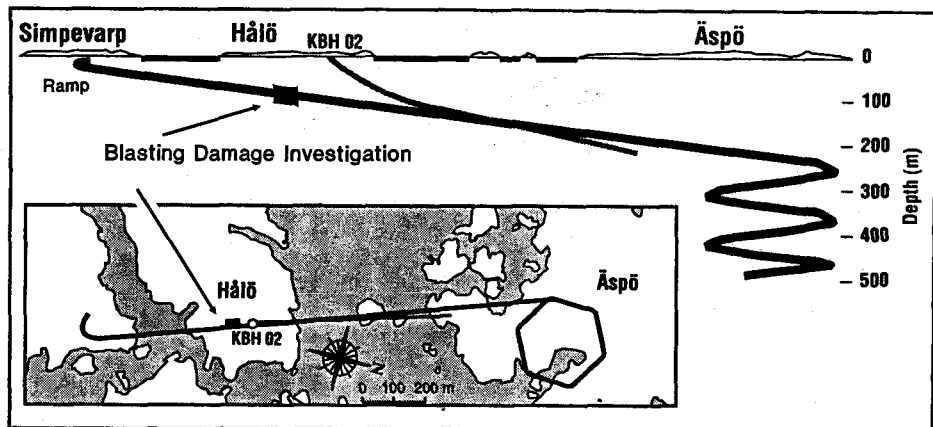


図-1 ASPO underground laboratories

1: Director, Swedish Detonic Research Foundation, Stockholm, Sweden.

実験施設へのアクセスとしては勾配 1:7、全長 1600 m のランプが掘削されている。その終点より六角形状に斜坑が500 m 続くことになる。斜坑はそれ自身実験施設の一部となっている。斜坑断面積は25.5 (ランプ) ~43.0 m²であり、全長約4000 m となっている。その状況を図-1に示す。

1990年、発破によるトンネル周縁の損傷域の調査に関する研究が開始されている。これに関する実験は1991年の春アクセスランプの途中で行われた。この研究の目的は発破による損傷領域の拡がりの調査とその削孔、装薬パターンとの関連を求めることである。発破損傷領域の拡がりについて本研究で提案する予測式と比較するために、いくつかの実験的方法による計測がその評価のために行なわれた³⁾。

2. 発破の概要

発破に関する詳細は、文献³⁾に述べられているのでここでは概説するに止める。検討の対象としたのは次の3種の削孔、装薬パターンであり、全ての孔の孔長と孔径は 5.0 m及びφ48 mm である。

- パターン1： 標準パターンであり周縁孔は通常スムーズブラスティングとする(計78孔)。
- パターン2： 孔当り薬量を減じて損傷深さの目標値を床面で 0.6m、天井と壁面で 0.3mとする(計87孔)。
- パターン3： 比較のためのパターンで孔数を減じ孔当り薬量を増したもの(計65孔)。

図-2にパターン1を代表例として示す。起爆のシステムは Nitro Nobel による Nonel GT/T トンネルシリーズによっている。

事前の推定⁴⁾では、パターン2は損傷深さの目標値を満足するものであり、パターン1による損傷領域はおおよそ床面で 1.7 m、壁と天井で 0.7 m、そしてパターン3ではそれぞれ 2.1 mと 1.0 ~ 1.2m であった。さらにパターン2、3では第2周縁孔の発破がこれらの値に影響を及ぼす可能性が考えられた。

実験の概略を図-3に示す。発破は計9回行われ、振動の計測はパターン1とパターン2についてのみ7回行われたが、これは経済的理由による。

3. 振動の計測

振動計測の目的は発破における起爆秒時のチェック、どの孔の発破が壁面へ最大の入力を与えるかの確定、最大振動振幅の計測である。振動計測のために傾斜ランプの天井に対して 1.8 mの高さで、長さ 28 m、φ89 mmのボアホールを削孔した(図-3)。孔に沿って4つの計測点(MP1~4)を設定している。MP2, 3, 4 では加速度計をMP1とMP2では速度計を用いている。これらはすべてケースに納められ孔壁に固定された。

MP2 では、加速度計と速度計の検定を行っている。観測された波形の比較検討の結果、最終的にMP3 とMP4 のみが信頼できる結果を与えると判定された。用いた加速度計はBruel&Kjaer4371 加速度計(周波数域0~20kHz)である。計測信号はFMテープレコーダに記録された。7回の発破に対し、10個のピックアップ合計7×10 = 70の信号列のうち4回の発破に対する16の信号列のみが信頼できるものと判断された。

周波数解析の結果装薬孔の近くでは5kHz近くにエネルギーの主成分があると考えられる。このことより加

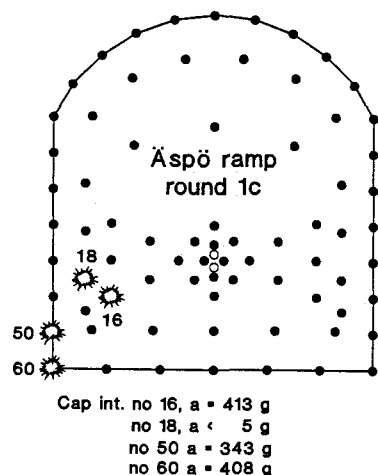


図-2 ASPÖ ramp round 1c

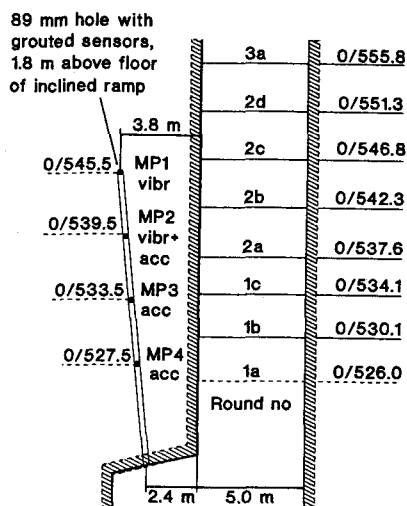


図-3 ASPÖ ramp, sensors and rounds

速度計のみが信頼できる定量的データを与えるものと考えられる。記録された最大の加速度は413gであり、この速度変換値は 392mm/secであった。

これらの計測とその検討により次のことが明かとなった。

- 1) 心抜き孔と踏前すみ孔の発破が最大、あるいはそれに次ぐ振動加速度値を生じている。
- 2) 第2周縁孔の発破はほぼ最大値に近い加速度値を与える。
- 3) 側壁あるいは天端孔による加速度値は小さく、非常に低くほとんど記録されていない。

これによると第2周縁孔からの振動は大きいはずしもそれが決定的となるものではなく、減衰状況から判断して周縁孔からの振動が平均的に大きく、損傷領域を決定していると思われる。

4. スケーリング則と実用的装薬孔長修正

16の発破信号列のそれぞれについて加速度計に近い左側壁付近の孔からの15～20の信号はそれぞれの信号ごとに積分し、 V_{max} を求めた。照査した約 250の信号のうち比較的大きなピーク値を有する43の信号が損傷に影響があると判断され、これを以後の解析に用いた⁵⁾。これらの振動データを用いてスケーリング則中の定数A、 α 、 β ($=2\alpha$) を回帰式により求めた⁵⁾。

$$V_{max} = A Q^{\alpha} / R^{\beta} = A (R / \sqrt{Q})^{-\beta} \quad (1)$$

ここで $A = 411 \text{ mm/s}$ 、 $\beta = 0.74$ が得られている。ばらつきを考慮し、安全側の推定式としてはAの値に標準偏差1 σ を考へ $A_t = 698 \text{ mm/sec}$ をとることとした (図-4)。

装薬長Hの影響を考慮して V_{max} を得るためには積分を行うことが必要である⁵⁾。 $\beta = 2\alpha$ に対して修正関数は閉じた形となる⁶⁾。ここでfの値が岩盤の損傷領域の広がりを決定すると仮定する。簡単な表現として、修正式は次の形で表わされる。

$$V_{max} = A (R / \sqrt{Q f})^{-\beta} \quad : \quad f = \tan^{-1} (H/2R) / (H/2R) \quad (2)$$

損傷領域の広がり $R = R_c$ を求めるために限界速度値 $V_{max} = V_c$ を用い、それ以上では損傷が生じるとする。

$$((V_c/A_t)^{(1/\beta)} \cdot H / \sqrt{Q}) \cdot R_c/H = \sqrt{f (R_c/H)} \quad (3)$$

$V_c = 700 \sim 1000 \text{ mm/sec}$ はスウェーデンの基盤岩に対して代表的なものである⁵⁾。ASPO ランプにおける花崗岩は同等あるいはそれ以上であり、 $V_c = 800 \text{ mm/sec}$ 程度と考えられよう。これらの値と $H = 4.5 \text{ m}$ を代入して式 (3)の係数 $(5.41/\sqrt{Q})$ を得る。

この解は勾配が装薬量にのみ依存する直線と曲線 $\sqrt{f}$ との交点として求められる (図-5)。

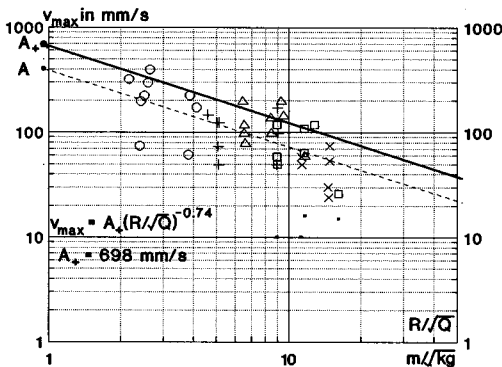


図-4 ASPO ramp, site scaling law

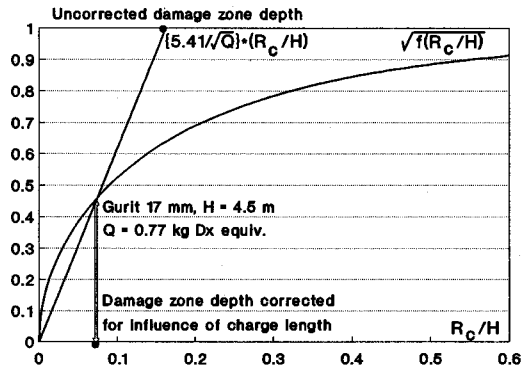


図-5 Graphic solution for damage zone depth

5. 損傷領域の評価

損傷領域深さの推定のために $V_c = 700 \sim 900 \text{ mm/sec}$ を用い³⁾、 $\pm 30\%$ の範囲での損傷領域の予測を与えたものが表 - 1 である。これらを含めた検討により、次の結果が得られている。

Table 1: Predicted average damage zone depths.

Rounds	Pattern 1	Pattern 2	Pattern 3
Floorholes:	1.29 m	0.63 m	1.49 m
Contourholes	0.34 m	0.34 m	0.55 m
2nd contour	1.05	0.63	1.29
- burden	-0.5	-0.3	-0.7
- look-out	-0.2	-0.2	-0.2
Total	0.35 m	0.13 m	0.39 m
Stoping	1.39	1.05	1.76
- burden	-1.5	-0.95	-1.6
- look-out	-0.2	-0.2	-0.2
Total	<0	<0	<0

- 1) 周縁孔において隣接孔による損傷領域の重なりは非常に小さいが踏前孔による損傷領域は少なくとも隣接の孔を含む。
- 2) 第2周縁孔による損傷領域形成の危険性は非常に小さく、周縁孔によるものよりも小さい。
- 3) 壁あるいは、床で0.3m、床面で0.6mという損傷領域についての目標値を達成するのは非常に困難である。パターン2においてのみ結果は目標値に近づくが、この場合には特に踏前孔において好ましくない破壊を生じている。

6. 損傷領域調査結果との比較

SKB 発破損傷調査においてはいくつかの方法を用いて実際の発破損傷領域の調査を行っている。

6-1 表面調査

表面調査の対象とした地質条件はほぼ均一であり自然のクラックの状況はほとんど変化しない。

- 1) 発破によるクラックは、ボアホールから主として放射状に外部方向へ発達する。それらの大部分は0.6~0.8m あるいはそれ以下であり、非常にまれに1m以上になる。
- 2) ほぼ完全なのみ跡のみ跡率はパターン1とパターン2の周縁孔では33%と35%であり、パターン3ではわずか19%であった。
- 3) 半数以上の周縁孔のみ跡は発破後には認められなかった。これらの多くは差し角が大きいか、あるいは低い位置の側壁孔におけるものであった。
- 4) 発破により生じたクラックのほとんどは残存しない周縁孔周辺に位置している。

精度の悪い削孔が周縁孔において発破により生じるクラックの主たる原因となる。また局部的に地質が変化するためパターン1、2、3において期待される損傷域深さの差が明確でなくなっている。しかし、表面観察が必ずしも発破による損傷の侵入深さを表すものとはいえないが、削孔精度の向上と適切な注意深い発破により、前のみ跡率に示された以上の差が期待されている。

6-2 ボアホールを用いた調査

ここでは、発破の前後においてボアホールを調査するという方法を採用している。電気抵抗調査によると単一の破壊や空隙の効果も検知可能であり、また削岩機による孔でもコアの採取用孔でも同様の結果を得ている。結果を列挙すると次のようである。

- 1) 坑道壁周縁における破壊は主として独立したクラックの発達からなり、床部分における損傷は床に向かつての連続的な材料性質の劣化による。
- 2) 発破による損傷は新しく発生した破壊と、発破前からのクラックの発達によっている。
- 3) 踏前すみ孔周囲の損傷領域は踏前孔によるものよりも大きい。新しく発破により発生したクラックは2m以上のものもある。

- 4) 踏前孔による損傷領域の深さは平均値としてパターン1、2、3に対してそれぞれ1.2、1.4、1.7mであり、その差は顕著である。パターン2の踏前孔は起砕不良のため再発破したためと考えられる。
- 5) 周縁孔における損傷領域の深さはそれぞれ0.6、0.3、0.5mである。

7. 結論

これまでの結果をまとめて次の結論を得る。

- 1) 振動と損傷領域調査との比較により、大振動領域と大きな損傷領域との良い対応関係が示された。
- 2) 損傷領域の調査によると周縁孔周辺での損傷領域はほとんど重ならず踏前孔では重なるという振動推定に基づく予測と合っている。

- 3) 推定された損傷深さは地質学的な方法で計測された深さと非常によく一致している。その結果は再度発破を行ったパターン2の踏前を含めて表-2に示している。

Table 2: Predicted and measured damage zone depths.

Rounds	Pattern 1	Pattern 2	Pattern 3
Floor:			
prediction	1.0 -1.6 m	0.5 -1.3 m	1.1 -1.9 m
measurement	1.0 -1.4 m	0.6 -2.2 m	1.3 -2.1 m
Contour:			
prediction	0.25-0.65 m	0.25-0.45 m	0.45-0.75 m
measurement	0.4 -0.8 m	0 -0.7 m	0.1 -0.9 m

- 4) 本研究の損傷域推定方法は実用的であり限界振動速度で損傷領域と未損傷領域とを領域分けできる⁵⁾。本報告では爆薬近くでの問題に対し装薬長の影響を取り入れた補正を行うことによってより取り扱い易いものとしている。この考え方は今後の発破設計を行なう上で有用であると考えられる。

謝辞

筆者の一人 (Ouchterlony) はSKB disturbed zone project に参加された諸氏に感謝する。また、Nitro Consult の Conny Sjöberg 氏の協力と、この発表に対するSKBの了解に感謝する。さらに、山口大学における正規の教授としての活動の機会を与えていただいた、山口大学工学部社会建設工学科に謝意を表する。

References

1. Bäckblom G (1991): "The Äspö Hard Rock Laboratory - a Step Toward the Swedish Final Repository for High-Level Radioactive Waste." Tunneling and Underground Space vol 6, pp 463-467.
2. Wikberg P, Gustafsson G, Rhen I and Stanfors R (1991): "Äspö Hard Rock Laboratory. Evaluation and Conceptual Modelling Based on the Pre-Investigations 1986-1990." SKB Technical Report 91-22, Stockholm, Sweden.
3. Ouchterlony F, Sjöberg C, Johansson S-E and Nyberg U (1991): "Äspö Hard Rock Laboratory - Blasting Damage Investigation in Access Ramp Section 0/526-0/565 m. No 3: Damage Zone Assessment by Vibration Measurements." SKB progress report 25-91-14, Stockholm, Sweden.
- see also SKB progress reports 25-91-12, 13, 15, 16.
4. Sjöberg C, Larsson B, Lindström M and Palmqvist K (1977): "Blasting Method for Controlled Fracture Extension and Improved Safety Underground." ASF project no 77/224, Nitro Consult AB, Stockholm. In Swedish.
5. Holmberg R and Persson P-A (1979): "Design of Tunnel Perimeter Blasthole Patterns to Prevent Rock Damage." In Proc. Tunnelling '79, Inst. Min. and Met., London.
6. Persson P-A (1990): "Fragmentation Mechanics." In Proc 3rd Int Symp on Rock Fragmentation by Blasting, pp 101-108, AusIMM, Parkville VIC.