

(58) 山はねについての一考察

○ 飛島建設㈱ 正会員 福島 啓 一
飛島建設㈱ 正会員 松尾 勝 弥
飛島建設㈱ 小原 勝 巳

1. はじめに

土被りの大きい地山内にトンネルや鉱山を掘削するとき、側壁や天端の岩石が空洞内にとび出して来ることがある。山はねと呼ばれるこの現象は、一般のトンネル土圧論で考えられているゆるみ土圧では説明のつかないもので、真の土圧による岩盤破壊が原因と考えられている。今までに、円孔まわりの応力集中の弾性解、岩石の応力-ひずみ曲線（特に最大応力に達した後のひずみ軟化性状）と応力再配分の関係の研究⁹⁾、トンネル壁面の凹凸による凹み部での応力集中¹⁾（圧縮応力及びせん断力）への言及、ひずみエネルギーについての考察などがあるが、実際に起る現象を十分説明出来ていない。特に山はねがある程度起るとおさまることや、薄板状の、ふちのとがった岩片がとび出して来ることを十分に説明出来ない欠点があった。筆者等はトンネル壁面の凹凸により地山内に生じるせん断応力及び引張応力が主な原因であるとの仮説を立て、FEMによる計算及び簡単な実験を行ったのでこれを報告する。

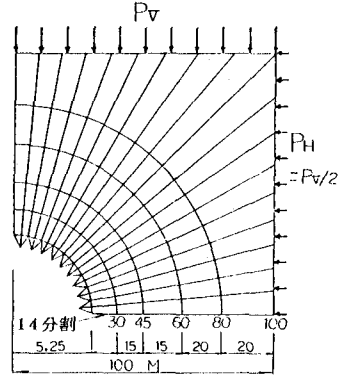


図1 FEM要素分割

2. 計算

山はね時の地山挙動は弾性的挙動と考えて十分と思われたので、弾性体の平面ひずみ問題として考え、二次元FEM（弾性）を用い、円型トンネルの内壁面に波長 $\ell = 2\pi r/48, 2\pi r/36, 2\pi r/24$ 、比波高=波高/波長 $= h/\ell \neq 1.0, 1/2, 1/4$ の三角形の凹凸がある場合について計算した（図1）。なお、水平土圧係数 $P_H/P_v = 0.5$ 、ポアソン比 $\nu = 0.15$ 及び 0.25 とした。計算結果の一部を図2～表1に示す。これより次の様なことが分った。

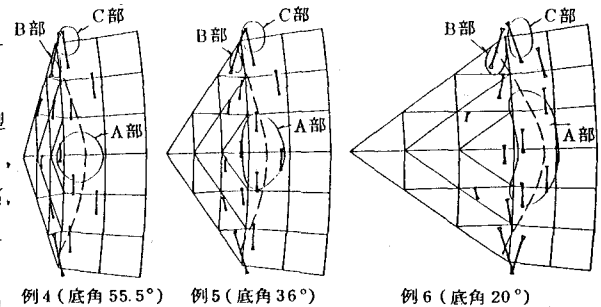


図2 計算結果と想定される破壊面（破線で示す）

(i) 凸部根元（図2 A部）に P_v の $0.2 \sim 0.3$ 倍程度の引張応力が生じる。又凸部のすそ（図2 B部）に相当大きな引張応力（ P_v の $0.1 \sim 0.4$ 倍）とせん断応力（ P_v の $1.0 \sim 1.5$ 倍位）が生じる。凹部の谷底付近には応力集中により P_v の $3 \sim 4.5$ 倍位の圧縮応力を生じる。同じトンネルの場合は側壁部が最も応力が大きいので、以後は側壁中央部について考察する。

今 $P_v = \gamma H = 2.75 \text{ t/m}^2 \times 1100 \text{ m} \div 3000 \text{ t/m}^2 = 300 \text{ kg/cm}^2$ 、岩の圧縮強度 $\sigma_c = 1200 \text{ kg/cm}^2$ 、引張強度 75 kg/cm^2 Mohr の破壊包絡線を $\tau^2 = 725(\sigma - 75)$ として、Mohr 円を描いてみると、図3（例4～6の場合）に示す様になる。

これよりA部で引張破壊が、B部でせん断破壊が起るが、C部は、圧縮応力の値そのものは大きい、まだ破壊までは安全度が残っている、などのことが分る。引張破壊やせん断破壊は急激に起り、破壊の進行が早いこ

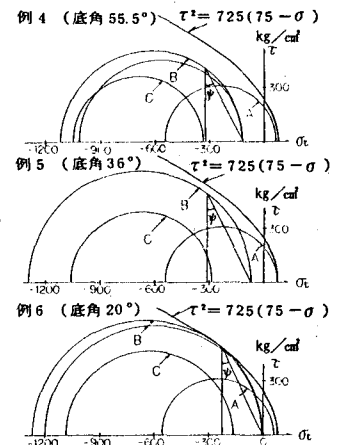


図3 Mohr円とMohrの包絡線

とは周知のことであり、山はねの急激な挙動もこれにより説明がつく。

(2) 引張り部は主応力方向と直角に、せん断部は主応力に対し $45^\circ - \phi/2$ (図3の ψ) の角度で破壊が起るとされているので、破壊面を想定すれば図2の点線の様な想定破壊面が描かれる。この様な破壊により順次、凹凸の山が低くなれば山はねは遂には終息するものと思われる。K. Terzaghi は図4の様な山はねの概念図を示している。まずA部で引張り破壊が起り、両端(B部)で地山に続いた薄い岩石は少し曲げられた様になり、やがてB部がせん断されてこの岩片が飛び出すと考えれば Terzaghi の描いた図と合致するし、現象の説明もつく。

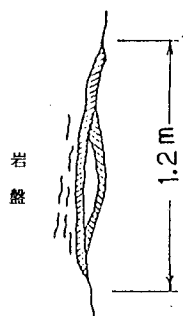


図4 山はねの概念図
(Terzaghi による)

(3) 計算結果からは単純に根元角度が大きくなれば、最大引張力が増えると言う様な結論が出なかった。各計算によって網目の粗さも違うので、No. 4～5について、Mohr 円を描いてみると図-3の様になり、Mohr の降伏基準を $\tau^2 = 725(75 - \sigma)$ と仮定して見ると、底角 55.5° と 36° ではA部の

引張破壊がまず起り、底角 20° ではA部の引張破壊とB部のせん断が同時に起りそうなこと、最も危険なのは底角が 20° の時であること。但し、岩石のぜい性度(引張強度と圧縮強度の比)を20位にとると、 36° でA部の破壊が生ずる危険性が最も高いことが分る。掘削面凹凸の形と、岩盤の破壊特性が微妙にからんで山はねが起きたり、起きなかったりするのだと思われる。

No	波 高	波 長	根元角度	A 部		B 部		C 部	備 考
	h	ℓ		最大引張 応力 σ_t	最大圧縮 応力 σ_c	最大引張 応力 σ_t	最大せん断 応力 τ	最大圧縮 応力 σ_c	
1	0.50 ^m	0.916 ^m	47.51°	2.82	-34.12	2.57	11.0	-31.33	E = 5000 kg/cm ² $\nu = 0.25$ $P_v = 100 \text{ t/m}^2$ = 10 kg/cm ² $P_H = 50 \text{ t/m}^2$ = 5 kg/cm ² $K_h = P_H/P_v = 0.5$
2	0.25	#	28.62°	2.68	-37.31	1.20	12.60	-32.66	
3	0.125	#	15.26°	1.64	-35.18	0.09	9.01	-31.18	
4	1.00 ^m	1.374 ^m	55.51°	2.27	-33.83	4.78	15.01	-35.05	トンネル径 a = 5.25 m
5	0.50	#	36.05°	2.50	-43.13	2.11	20.51	-37.18	
6	0.25	#	19.99°	1.93	-42.33	0.52	20.09	-35.95	
7	0.50 ^m	0.687 ^m	55.51°	2.99	-31.82	2.39	16.20	-29.93	$\nu = 0.15$ 他は 上記No.1に同じ
8	0.25	#	36.05°	3.15	-28.32	3.86	13.59	-28.31	
9	0.125	#	19.99°	1.82	-33.37	0.95	16.66	-29.82	
10	0.50 ^m	0.916 ^m	47.51°	2.66	-34.16	1.62	11.40	-31.37	

表-1 計算結果 (応力は kg/cm²)

凸部の中心線沿いに引張応力の分布を見ると図5の様になり、引張応力は谷底を結んだ線より僅かに引2に地山側に生ずること張1と、底角 36° の時が0最も大きいことが分圧1縮2る。

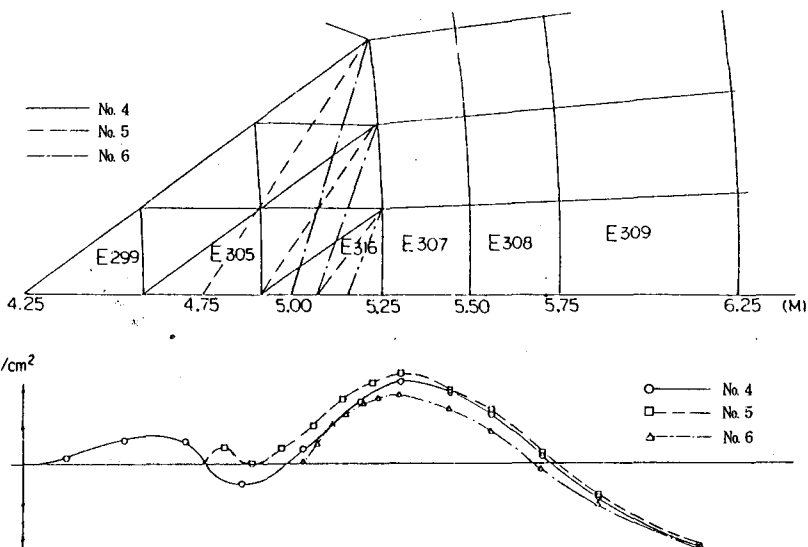


図5 凸部の中心線沿いの引張応力の分布 (No. 4～6) (但し、 $P_v = 10 \text{ kg/cm}^2$ とする)

(4) 応力分布状況を詳細にみると山の頂部付近は応力値が小さくなっており、若しこの部分がなくて、図6の(b)の様なとしてもあまり最大応力や破壊状況には関係ない。つまり山の高さよりも谷の根元角度の影響の方が大きいと考えられる。

(5) トンネル周辺の地山は応力集中により強い力を受けているが、その一部が切断されると自由に变形出来る様になるため

応力はゼロになり、その前にもっていた歪エネルギーは熱エネルギー、運動エネルギー、振動や音のエネルギーに変換されるか、又は地山側に転換されるかのいずれかである。

体積V、重量Wの物体が応力 σ 、ひずみ $\epsilon = \sigma/E$ を受けているとすると、ひずみエネルギーは $\frac{1}{2E} V \sigma^2$ になる。この物体が初速度 v_0 で飛出したとすると、運動エネルギーは $\frac{1}{2} m v_0^2 = \frac{1}{2} \frac{W}{g} v_0^2$ である。空気抵抗を無視すれば、水平に飛び出した物体は $y = -\frac{g}{2v_0^2} x^2$ の軌跡を描く。高さ3mの壁面から岩石が水平に飛び出し、10m離れた所で地面に落ちたとすると $E = 500,000 \text{ kgf/cm}^2$ 。途中での損失なしとすると岩石は当初 450 kg/cm^2 の平均一軸圧縮応力を受けていたことになる。引張応力で壊れると考えれば起り得る応力程度であろう。そ性ひずみを起して圧縮破壊する時は熱エネルギーなどに変換される割合が高く、引張破壊やせん断破壊では運動や振動のエネルギーに変換されるものと思われる。

(6) 以上の考察により山はねの防止法としては①スムーズプラスチング法などにより出来るだけ平滑な掘削面を得ること ②地山内の引張力に打勝つ程度のアンカーボルトを切羽すぐ近くの、まだ球形空洞に近い応力状態で σ_θ の小さい間に打設し、プレストレスを加えておくこと、③凹み部を切羽すぐ近くで吹付コンクリートで充填する、などが考えられる。今後研究してみたい。ただし山はねにはダイヤモンド鉱山などで起る様な、真円形と考えてもせん断破壊が起る場合も考えられ、以上の考察ですべての原因を明らかにした訳ではない。

3. 模型実験

計算で想定される様な現象が、実際に生じるのかどうかを確かめるために簡単な実験を行った。モルタル試験用型枠を利用して図7の様な模型を高強度モルタルで作製、100t万能圧縮試験機で上下に圧縮力をかけ、凹凸のある場合の破壊性状を見た。用いたモルタルの配合及び強度試験結果は表-2に示す。

W/C	C/S	セメント C	水 W	砂 S	混和剤 Σ5000
30%	1/1	1000 kg	300 kg	880 kg	100 kg
		小野田		砕砂	デンカ
$\sigma_c = 947 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma_t = 50.8 \text{ kg/cm}^2$					

表-2 モルタルの性状

(1) 図8に示すように $\sigma-\epsilon$ 曲線の勾配は凹凸のある方が、円柱に比べ約20%大きい。これは最少断面の所での応力をとっているからで、平均応力でとれば差は少ないと思われる。最終耐力は底角45°ではあまり落ちず、底角30°では80~90%に低下した。(計算も同じ傾向を示している)凹凸のある場合は降伏-そ性化と云う現象が少なく、最終ひずみが円柱の60~70%しかない。この事はひずみエネルギーが熱よりも運動エネルギーに変換されやすいことを示していると云えよう。

(2) 引張りひび割れが発生し、これが伸びて凸部がとれる、又は全体が圧壊するが、山はねの様に凸部が飛び出す現象はみられなかった。ひび割れははじめの応力にはかなりバラツキがあった。

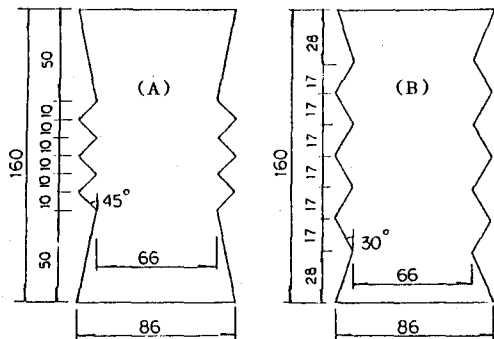


図7 実験に用いた供試体の例(mm)

(3) ひび割れは、主に、まず谷と谷を結ぶ円弧状に走ったが、円弧は地山側に背を向けるもの、逆なもの、たまには直線に走るもの、何本も走るもの、二つの山を超えて走るものなど一定した傾向を見出せなかった。スケッチ及び写真によって実験の一例を図9及び写真1に示す。これらは同一の供試体であり、図7に示したうちのBタイプのものである。ひび割れの発生は、A,B,C,Dの順序となっており、Aのひび割れは、中心部から凹部へ向ってゆっくり進行したが、他のひび割れは、ほとんど一瞬に生じた。

4. まとめ

計算及実験共、回数が少く十分な結論は出せなかったが、壁面の凹凸が山はねにかなり影響していることは推定出来た。

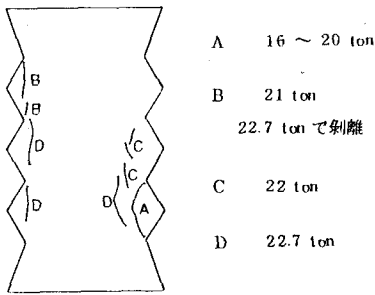


図9 スケッチ例

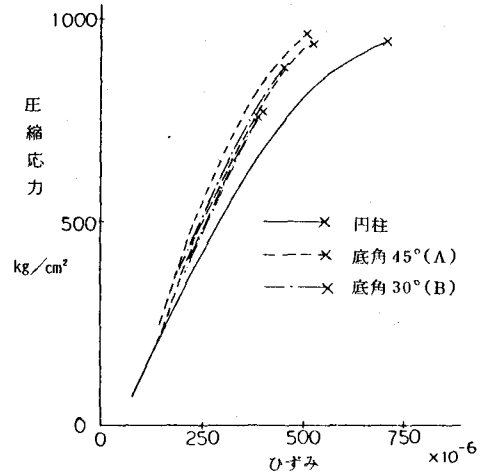


図8 各模型の応力-ひずみ曲線

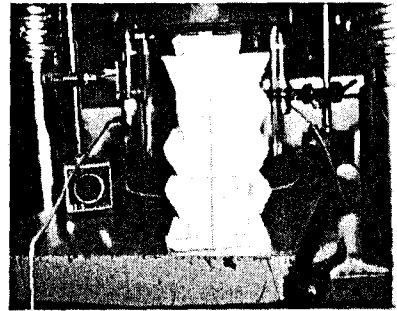


写真1 破壊状況

参考文献

- 1) H. カスナー：金原 弘訳「トンネルの力学」 森北出版 1974
- 2) E. イザクソン：高橋 他 訳 「トンネル技術者のための岩盤力学入門」 1974 鹿島出版
- 3) K. Terzaghi：Geological Introduction to "Tunnelling with Steel Supports by Procter and White" 1946 The Commercial Shearing and Stamping Co. U.S.A.
- 4) 国 鉄：上越線新清水ずい道工事誌
- 5) 下河内 稔：大清水トンネル・万太郎谷工区的全断面工法について
第10回岩盤力学シンポジウム 1976
- 6) 丹羽義次，他：岩はねに伴うアコースティック・エミッションに関する考察
第10回岩盤力学シンポジウム 1976
- 7) 丹羽義次：大清水ずい道山はねの発生機構に関する基礎的研究，日本鉄道建設公団新潟新幹線建設局 1976
- 8) 平松良雄，他：岩石のぜい性破壊特性と鉋柱の山はねの機構に関する一考察，日本鉋業会誌 '74. 6
- 9) L. Obert & W. I. Duvall：Rock Mechanics and the design of Structures in rock 1967
John Wiley & Sons
- 10) 山はね研究委員会：金属鉋山における山はねの研究：日本鉋業会誌 1972. 12

(58) A Study to Rock Burst

by Keiichi Fukushima

Katsuya Matsuo

Katsumi Obara

Tobishima Corporation

Summary

Rock burst or popping is observed in tunnel or mine in deep underground. This phenomenon is considered to be caused by true rock pressure (not loosening pressure) and some studies ---- stress concentration by round hole, stress concentration by notch, energy balance studies, ---- have been done.

But these studies cannot explain some salient feature of this phenomenon. The writers notice that the main cause is shearing and tensile stress according to the stress concentration by irregular unevenness of inner surface of tunnel.

Some calculation and model test have been carried out to make sure this hypothesis is valid. The result turned out to prove that the unevenness is the primary cause of the rock burst.