

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

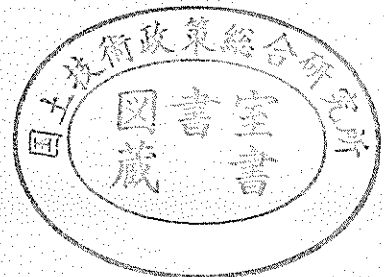
REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 8

NO. 2

JUNE 1969

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告は第7巻第1号より年4回定期的に刊行する。ただし第1巻から第6巻および欧文編第1号から第15号までは下記のとおり不定期に刊行された。
報告の入手を希望する方は論文番号を明記して港湾技術研究所長に申し込んで下さい。

和文篇 (Japanese Edition)

- Vol. 1. No. 1 (1963)
- Vol. 2. Nos. 1~3 (1963~1964)
- Vol. 3. Nos. 1~7 (1964)
- Vol. 4. Nos. 1~11 (1965)
- Vol. 5. Nos. 1~15 (1966)
- Vol. 6. Nos. 1~8 (1967)

欧文篇 (English Edition)

- Report Nos. 1~15 (1963~1967)

The Report of the Port and Harbour Research Institute is published quarterly, either in Japanese or in occidental languages. The title and synopsis are given both in Japanese and in occidental languages.

The report prior to the seventh volume were published in two series in Japanese and English as listed above.

The copies of the Report are distributed to the agencies interested on the basis of mutual exchange of technical publication.

Inquiries relating to the Report should be addressed to the director of the Institute specifying the numbers of papers in concern.

港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第8巻 第2号 (Vol. 8, No. 2), 1969年6月 (June 1969)

目 次 (CONTENTS)

1. 沖積粘土のボーリングおよびサンプリングに関する研究 (第4報)
..... 松本一明・堀江宏保・奥村樹郎..... 3
(Studies on Boring and Sampling of Saturated Alluvial Clays (4th Report)
.....Kazuaki MATSUMOTO, Hiroyasu HORIE and Tatsuro OKUMURA)
2. 載荷時間の圧密諸係数におよぼす影響について..... 小川富美子..... 21
(Effect of Loading Duration on the Consolidation Indices..... Fumiko OGAWA)
3. スパッドを有する作業船の船体に作用する波力について (第1報)
..... 小岩 啓生・大平 勝・平山 勇・白鳥保夫..... 51
(Wave Force on a Hull of a Working Craft with Spuds (1st Report)
.....Taisei KOIWA, Katsu OHIRA, Isamu HIRAYAMA and Yasuo SHIRATORI)
4. 水噴流による水中の岩盤の理論的破碎過程について
..... 藤井喜一郎・守口照明..... 71
(On the Theoretical Analysis of the Destruction of Rocks in Water by Water Jet
.....Kiichirou FUJII and Teruaki MORIGUCHI)

4. 水噴流による水中の岩盤の理論的破碎過程について

—モルタル試料による実験結果—

藤井喜一郎*・守口照明*

要 旨

近年港湾工事において硬土盤、あるいは岩盤浚渫作業の能率向上は、一つの重要な課題となっている。現在、種々の作業方法が考えられ、開発されているが、本報告ではその一つとして、水力により岩盤を破碎する方法について研究し、実験室内で行なってきた実験結果を理論的に考察したものである。水噴流により水中の岩盤を破碎する過程はかなり複雑で、水噴流と岩盤の両面にわたりすべてを理論的に解析することは、ほとんど不可能である。ここでは単に噴流の圧力とそれに対応して破碎される岩盤強度との関係について考察を試みただけである。岩盤の破碎を理論的に解析するには、次のような仮定をたてた。

すなわち、噴流はすでに確立されている Tollmien の理論による構造をなしていること、破碎する際、岩盤に作用する荷重は、噴流が岩盤に衝突して生ずる打撃力として作用すること、岩盤内部に発生する応力は Boussinesq の定理が応用されること、また岩盤内部に発生する応力により Mohr の破碎説に従って破碎が生ずること、などの理論が適応されるものとして考察を行なった。以上の解析方法により、噴流の圧力と破碎される岩盤の圧縮強度との関係を明らかにし、模型岩盤として実験室内で製作したモルタルを使用して行った破碎実験結果により両者の関係を確認した。

噴流によるモルタル試料破碎実験の結果、ノズル中心軸上の噴流の圧力を P 、破碎されるモルタルの圧縮強度を σ_0 とするとき、ノズルとモルタルの面までの距離がノズル径の4倍以上の領域では、

$$\sigma_0 \approx 2P \text{ (但し、モルタルのポアソン比が } 0.15 \sim 0.30 \text{ のとき)}$$

の関係があることがわかり、これは理論的に求めた計算値とほぼ一致した。

* 機材部 作業船研究室

4. On the Theoretical Analysis of the Destruction of Rocks in Water by Water Jets.

—Results of the Experiments on the Destruction of Moter Test Pieces—

Kiichiro FUJII*
Teruaki MORIGUCHI*

Synopsis

Recently the improvement of efficiency for the dredging at hard strata or hard rocks are becoming one of the main problems in the construction of ports and harbours.

Various methods were invented and developed today for the destruction of rocks or hard strata at the bottom of the sea.

In this report the authors presented the research on the water-jet excavation and made theoretical analysis on the destruction of rocks in water by submerged water jets (The pressure of water jet is 40 kg/cm² ~50 kg/cm²).

But the process of destructions of rocks in water by water jet is quite complicated and it was impossible for us to make theoretical analysis on all process of them.

So we just tried to analyze on the relation between the pressure of the water jets and the compressive strength of rocks which are to be destroyed by water jets. For the theoretical analysis, we made following assumptions.

1. Water jets have structure based upon the theory of Tollmien. And the loads which act on the rocks can be determined by the shock produced by the impacts of water jet with the rocks.
2. The stress produced in the inner part of the rocks can be determined by the Boussinesq's theory.
3. Rocks are to be destroyed by stress in the inner part of them according to Morhr's theory.

By the theoretical analysis through above assumptions, we found following relation for the rocks with the poisson's ratio 0.15~0.30, and when their distance from the tip of nozzle is about quadruple of the nozzle diameter,

$$\sigma_c \doteq 2p$$

where σ_c : Compressive strength of rocks which are destroyed by water-jets.

p : Pressure of water jets on the axis of round jets.

And this relation was also confirmed by destruction experiments on the mortar-test pieces.

* Research Staff of Dredger and Construction Equipment Laboratory.

目 次

要 旨	71
まえがき	75
1. 噴流が岩盤に作用した場合、その内部に生ずる応力についての考察	75
1-1 噴流の B, C, D 領域に岩盤を設置した場合	75
1-2 噴流の A 領域に岩盤を設置した場合	81
2. 岩石破碎に関する理論およびその応用について	82
2-1 Mohr の破碎理論及びその応用について	82
2-2 噴流の岩盤内部に作用する応力と破碎される岩盤の圧縮強度 σ_c との関係について	86
3. 実 験	88
3-1 実験方法および実験	88
3-2 実験結果および考察	90
4. あとがき	91
参考文献	91
記 号 表	91
附 表—1	93
附 表—2	105

まえがき

噴流による岩盤の破碎は、破碎する手段が連続水流であり、破碎される物体が固体であるため噴流そのものと岩盤自体の構造を両面にわたり考察しなければならない。

水中における噴流の構造及びモルタルの破碎結果についてはすでに文献(7)に、その実験結果等を報告したが噴流が水中の岩盤を破碎する過程については若干の理論的考察を試みるにとどまった。

噴流による岩盤の破碎理論に関しては、空気中における現象については若干海外の文献などに見られるが、水中での現象を取り扱ったものはほとんどない。両者における掘削現象は、多少異っていると考えられるが、それは水エネルギーの構造自体および破碎対象である岩盤への噴流の作用現象が異ってくることに基因するのである。そして岩盤の破碎現象を破碎手段である噴流と岩盤との両者のエネルギー的な面、衝突現象、及び岩盤に生ずる応力から、完全な理論的考察を行なうことは破碎現象が非常に複雑なために、ほとんど不可能で、それらの現象の初期状態、及び概略を示すことにとどめた。

筆者らの試みた考察は次のようなものである。

- (1) 噴流が岩盤に作用した場合に、岩盤内部の各点に発生する各応力どのようなものであるか？
- (2) (1)によって発生した応力に対応していかなる応力の条件により岩盤が破碎するものであるか？
- (3) ノズルに供給する水圧に対して、どの程度の圧縮強度をもつ岩石の破碎が可能であるか？

しかしこの考察自体も理論を簡略化するために次のような仮定を設けなければならなかった。

- (1) 破碎岩石は、等質等方性の完全弾性体であること。
- (2) ノズルの中心軸は岩盤表面に垂直で円形のノズルを使用した場合、力の作用面はノズルからの各距離に対応した径を持つ円であること。そして力の作用する作用面に配分される荷重は、特別な領域を除いて、Tollmien の噴流の理論に基づく速度分布に対応した噴流が岩石に衝突した際に生ずる打撃力として求められること。
- (3) (2)によって生ずる打撃力が岩盤内部に生じさせる応力は Boussinesq の定理を応用することにより求まること。
- (4) (3)によって生じた応力が岩盤内部に作用することによりモールの材料破碎説に従って破碎現象が起る

こと。

以上の仮定に基いて、次に述べるような考え方で理論を進めた。

1. 噴流が岩盤に作用した場合、その内部に生ずる応力についての考察

1-1 噴流の B, C, D 領域に岩盤を設置した場合

水中での噴流による岩盤破碎を考察するために、まず噴流の構造を知らねばならぬが、これについては既に文献(7)で、その構造を調査した結果を発表した。そこでここではその概略のみを示し、噴流の理論的岩盤破碎への適用について考えてみる。

図-1 に示すように、ノズルから噴出した噴流はその中心軸上の速度が徐々に減少する割合に応じてノズル口より噴出方向に A, B, C, D の4つの区域に分離される。殊に図 B, C, D の領域については、ノズル中心軸上の流速を u_m と中心軸より y だけ垂直に離れた位置における x 軸方向の速度と u の間には、次のような相似法則がある。すなわち

$$\frac{u}{u_m} = f(\varphi) \dots\dots\dots (1-1)$$

$$\text{ここに } \begin{cases} f(\varphi) : \text{Tollmien の 函 数} \\ \varphi = y/cx \left(\begin{array}{l} y : \text{ノズルの中心軸から半径方} \\ \text{向への距離} \\ x : \text{ノズルからの距離} \end{array} \right) \\ c = \text{実験常数} \end{cases}$$

の関係があることを Tollmien らによって明らかにされた。従って、ノズルからある距離でのノズル中心軸の流速が定まれば、その位置での任意の y の位置における噴出方向(図-1の x 軸方向)の速度が式(1-1)より求まる。なお筆者らの実験によれば、B, C, D の領域においては、Tollmien の理論に従う流速分布の考え方は、十分正しいことが確認された。

次に噴流が岩盤表面に作用する面は円形であり、また流速の分布は、上記のように Tollmien の流速分布とする。そして岩盤に衝突した後の噴流は、放射状に向きを変え岩盤表面に沿って流れるものと仮定しよう。

いま、ノズル口より噴出方向に距離 x_0 だけ離れた位置で噴流の中心軸より y だけ離れた点を含む微小面積 A_0 において速度 u で衝突している噴流(図-1参照)は、岩盤表面にはその力を考えるなら、

$$F = A_0 \frac{\gamma u^2}{g} \dots\dots\dots (1-2)$$

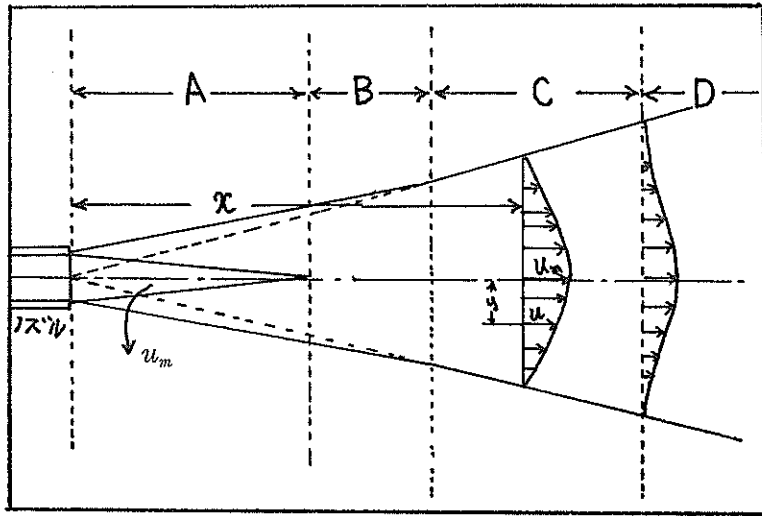


図-1 噴流の基本構造図

ここに $\left\{ \begin{array}{l} \gamma: \text{水の比重量} \\ g: \text{重力の加速度} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} F: \text{微小面積が受ける荷重} \\ A_0: \text{微小面積} \\ u: \text{衝突前の流速} \end{array} \right.$

なる力をその面に与えられていると考えられる。(実際の噴流の衝突による荷重は、微小面積およびその周囲のすべての点における荷重を加えて求めなければならないが、噴流による重荷の最も強く作用する部分が微小面積の附近にあると近似的に見なすなら上記の式が考えられる。) いまこの作用円の中心に衝突する噴流の速度 u_m (中心軸上の速度) と、 u とには、式 (1-1) から

$$u = u_m f(\varphi)$$

の関係があり、従ってこの面に作用する力は (1-2) より

$$F = \frac{A_0 \gamma \cdot u_m^2 \cdot f(\varphi)^2}{g} \dots\dots\dots (1-3)$$

と表わされる。

すなわち噴流の中心軸上の速度を知れば、ノズル口よりある距離の位置にある岩盤の表面に作用する(微小面積)の荷重の大きさを上記の式により近似的に導くことが可能である。

次にこれらの作用円上の微小面積における各荷重は、作用円下の岩盤内部にどのような応力を生じさせるのか検討してみよう。

いま、図-2において、噴流の作用する円の半径を a とし、直径 I_1, I_2 上の中心 O より R だけ離れた点 G を通る直線を MG と、これに限りなく近いもう一つの直線 $M'G$ をひき、点 Q を含む図の陰影を施した面素 ds 上加わる荷重が点 G の下の岩盤に作用する応力を考慮

しよう。

いま面素の面積 dA は $dA = s \, d\theta \, ds$ とあらわされるから面素に衝突する水流の速度を u とし、この面素に作用する荷重 dF は式 (1-3) より

$$dF = \frac{\gamma u_m^2 f(\varphi)^2}{g} s \, d\theta \, ds \dots\dots\dots (1-4)$$

と表わされる。

さて、この荷重が作用される岩盤の内部における応力を図-2の半径 OI_2 に沿って考察してみよう。そのために筆者等は次のような Boussinesq 定理を応用してみた。Boussinesq によれば、弾性半無限体の表面に、すなわち図-3において、平面 $z=0$ の z 軸上に集中力 P が働いているものとしたとき、集中荷重により岩盤内部の各距離における各応力は次のように表わされる。

すなわち、図-3の点 N に生ずる応力は、圧縮応力を正とすると沿直方向の垂直応力は

$$\sigma_{rz} = \frac{3P}{2\pi} \cdot \frac{z^3}{(\sqrt{s^2+z^2})^5} \dots\dots\dots (1-5)$$

半径方向の垂直応力は (μ : ポアソン比)

$$\sigma_r = \frac{P}{2\pi} \left\{ \frac{(1-2\mu)}{\sqrt{s^2+z^2} (\sqrt{s^2+z^2}+z)} - \frac{3zs^2}{(\sqrt{s^2+z^2})^3} \right\} \dots\dots\dots (1-6)$$

接線方向の垂直応力は

$$\sigma_{\theta\theta} = -\frac{P}{2\pi} (1-2\mu) \left[\frac{z}{(\sqrt{s^2+z^2})^3} - \frac{1}{\sqrt{s^2+z^2} (\sqrt{s^2+z^2}+z)} \right] \dots\dots\dots (1-7)$$

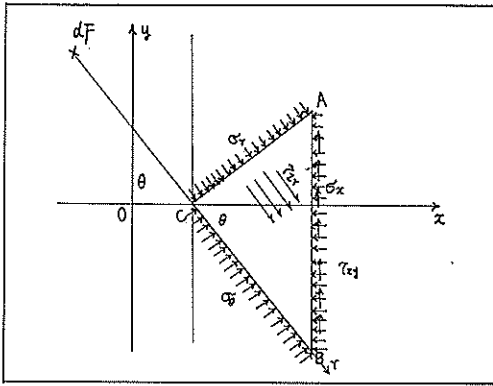


図-5 G点における微小な三角柱に作用する応力

点における半径方向を求めてみよう。

面積 dA に加わる荷重 dF により三角柱の AC 平面, BC 平面に作用する応力は先に示したように σ_r, σ_θ の応力が作用する。(面 AC には, その他紙面に垂直に τ_{rz} が働くが, 面 BC にはせん断応力は働かない。) そして面 AB 上に紙面に平行に τ_{xy} なるせん断応力が働いたとしよう。

これらの応力の x 軸方向, y 軸方向における平衡条件を考えると

$$\begin{cases} \sigma_r \times \overline{AC} \times dz \times \cos \theta + \sigma_\theta \times \overline{BC} \times \sin \theta \times dz \\ - \sigma_x \times \overline{AB} \times dz = 0 \\ \tau_{xy} \times \overline{AB} \times dz + \sigma_\theta \times \overline{BC} \times dz \times \cos \theta \\ - \sigma_r \times \overline{AC} \times dz \times \sin \theta = 0 \end{cases}$$

上式より

$$\begin{cases} \sigma_x = \sigma_r \cos^2 \theta + \sigma_\theta \sin^2 \theta \\ \tau_{xy} = (\sigma_\theta - \sigma_r) \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \end{cases} \dots \dots \dots (1-9)$$

として求められ σ_x が σ_r, σ_θ の関数で表わされる。同様な考え方に従い, 点 G における y 軸方向垂直応力も

$$\sigma_y = -\sigma_r \sin^2 \theta + \sigma_\theta \cos^2 \theta \dots \dots \dots (1-10)$$

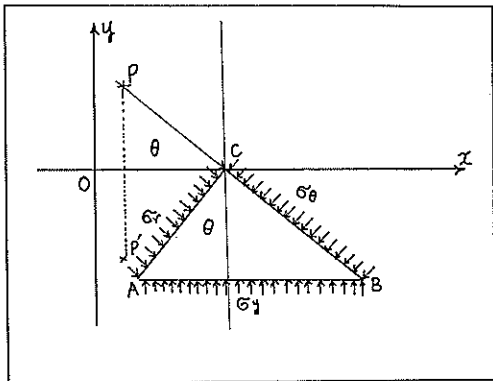


図-6 G点における微小な三角柱に作用する応力

として求まる。(図-6 参照)

ところが 図-6 において, いま x 軸に関して点 P と対象で同荷重の点 P' を考えるなら, (いま考えている作用円の面上には対象点は必ず存在する), 全く同じ大きさで方向が反対の応力 $\sigma_y' = -\sigma_y$ が作用すると考えられるから, G 点における y 軸方向の応力 σ_y は零となる。全く同様な考えに従い先に求めた τ_{xy} も零となる。

次に 図-5 において $\tau_{yz}, \tau_{zy}, \tau_{zx}, \tau_{xz}$ 等のせん断応力について考えてみる。

同図に示す面 ABC において, この面に沿って r 軸方向にせん断応力 τ_{rz} が作用しており, 面 ABC の面積を A_0 とすると全体で $A_0 \tau_{rz}$ の力が r 軸方向に作用している。従ってこの力の x 軸方向の力は $A_0 \tau_{rz} \cos \theta$ である。よって面 ABC の x 軸方向のせん断応力 τ_{zx} は $A_0 \tau_{rz} \cos \theta / A_0$ の応力が作用していることになる。このせん断応力 τ_{zx} は面 AB の z 軸方向 (紙面に垂直な方向) に作用するせん断応力に等しくならねばならない。すなわち

$$\tau_{zx} = \tau_{xz} = \tau_{rz} \cos \theta \dots \dots \dots (1-11)$$

となる。また 図-6 で, 面 ABC において y 軸方向に作用するせん断応力 τ_{zy} については, 先の σ_x, τ_{xy} のときと同様に, x 軸と対象な点における同荷重を考えてみれば零となることがわかる。

したがって, $\tau_{xy} = \tau_{yx} = 0, \tau_{yz} = \tau_{zy} = 0$ となる。

次に面 ABC について z 軸方向の応力を考えてみるとそれは Boussinesq の定理で求められたように,

$$\sigma_z = \sigma_{rz} \dots \dots \dots (1-12)$$

として求めてよい。

以上のことから, 図-2 の半径 OI_2 上の点 G の下の, 作用円内に任意の点における荷重によって生ずると考えられる応力は, $\sigma_x, \sigma_z, \tau_{xz}$ だけとなる。先にも述べたように, 面素 dA に加わる荷重は式 (1-4) のように表わされるから, G 点に作用する応力は, この荷重により (1-5)~(1-8) において $P=dF$ とおき, また (1-9)~(1-12) 式を利用することにより

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_r \cos^2 \theta + \sigma_\theta \sin^2 \theta \\ &= -\frac{dF}{2\pi} \left[\frac{(1-2\mu)}{\sqrt{s^2+z^2}(\sqrt{s^2+z^2}+z)} - \frac{3zs^2}{(\sqrt{s^2+z^2})^3} \right] \cos^2 \theta \\ &\quad - \frac{dF}{2\pi} (1-2\mu) \left[\frac{z}{(\sqrt{s^2+z^2})^3} - \frac{1}{(\sqrt{s^2+z^2})(\sqrt{s^2+z^2}+z)} \right] \sin^2 \theta \\ &= -\frac{dF}{4\pi} \left[\frac{z(1-2\mu)}{(\sqrt{s^2+z^2})^3} - \frac{3zs^2}{(\sqrt{s^2+z^2})^3} \right] \end{aligned}$$

$$+\cos 2\theta\left[\frac{2(1-2\mu)}{\sqrt{s^2+z^2}(\sqrt{s^2+z^2}+z)}-\frac{3zs^2}{(\sqrt{s^2+z^2})^3}-\frac{(1-2\mu)z}{(\sqrt{s^2+z^2})^3}\right] \dots\dots\dots(1-13)$$

$$\varphi=3.4\frac{y}{a}$$

と表わされ、また図-2より、作用円の中心といま考えている荷重点までの距離は

$$y=\sqrt{R^2+s^2}-2Rs\cos\theta$$

全く同様にして

$$\sigma_z=\frac{3dF}{2\pi}\times\frac{z^3}{(\sqrt{s^2+z^2})^3}\dots\dots\dots(1-14)$$

$$\tau_{xz}=\frac{3dF}{2\pi}\times\frac{z^2s}{(\sqrt{s^2+z^2})^3}\cos\theta\dots\dots(1-15)$$

いま面素 ds 上加わる荷重 dF により、このような応力がG点に生じたのであるから、作用円全体の荷重によっては次のような応力が生じるであろう。すなわち図-2において θ を0から 2π まで、 s を0から s_0 まで変化させることによりそれぞれのG点下における応力が求まる。 x 軸方向の垂直方向の応力 σ_x は

$$\sigma_x=-2\int_0^{s=s_0}\int_0^{2\pi}\left[\frac{\gamma um^2/g}{4\pi}\right]\left[\frac{z(1-2\mu)}{(\sqrt{s^2+z^2})^3}-\frac{3zs^2}{(\sqrt{s^2+z^2})^3}+\cos 2\theta\left(\frac{2(1-2\mu)}{\sqrt{s^2+z^2}(\sqrt{s^2+z^2}+z)}-\frac{3zs^2}{(\sqrt{s^2+z^2})^3}-\frac{(1-2\mu)z}{(\sqrt{s^2+z^2})^3}\right)\right]f(\varphi)^2s\,dsd\theta \dots\dots\dots(1-16)$$

$$\sigma_z=2\int_0^{s=s_0}\int_0^{2\pi}\left[\frac{\gamma um^2/g}{2\pi}\right]\cdot\frac{z^3s}{(\sqrt{s^2+z^2})^3}f(\varphi)^2s\,dsd\theta \dots\dots\dots(1-17)$$

$$\tau_{xz}=2\int_0^{s=s_0}\int_0^{2\pi}\left[\frac{\gamma um^2/g}{2\pi}\right]\cdot\frac{z^2s}{(\sqrt{s^2+z^2})^3}f(\varphi)^2s\,dsd\theta \dots\dots\dots(1-18)$$

として表わされる。

ここに s_0 および Tollmien の関数 $f(\varphi)$ は

$$s_0=R\cos\theta+\sqrt{a^2-R^2\sin^2\theta}\dots\dots(1-19)$$

$$f(\varphi)=\left(\frac{2}{\varphi}-0.4\varphi^{0.5}-0.04\varphi^2+0.00082\varphi^{3.5}+0.00015\varphi^5+\dots\dots\right)\exp\left(\ln\frac{\varphi^2}{2}-0.27\varphi^{1.5}-0.013\varphi^3+0.00018\varphi^{4.5}+0.000025\varphi^6+\dots\dots\right)\times\frac{1}{\varphi}$$

と表わされ、変数 φ は

$$\varphi=\frac{y}{cx}\left(\begin{array}{l} y : \text{作用円の中心からの距離} \\ x : \text{ノズルから作用面までの距離} \end{array}\right)$$

であるから、いまこの分母、分子を a (作用円半径) で除すと

$$\varphi=\frac{y/a}{cx/a}=\frac{y/a}{1/(a/cx)}$$

となる。一方、Tollmien の理論によれば a/cx の値は 3.4 となるから、

であるから

$$\varphi=3.4\sqrt{\left(\frac{R}{a}\right)^2+\left(\frac{s}{a}\right)^2}-2\left(\frac{R}{a}\right)\left(\frac{s}{a}\right)\cos\theta\dots\dots(1-20)$$

よって s_0 および φ は、 R , s , θ の関数として表わされる。次に、いま考えている応力は先にも述べたように半径 Ol_2 に沿った各点下のものであるから、 R (中心から応力を求める点までの距離)、 z (応力を求める点の岩盤下の表面からの深さ) は作用円半径 a の倍数として定めまた s も a の倍数として変化させてゆくなら、(1-16)、(1-17)、(1-18) の積分値は $a, \gamma um^2/g$ の値がわかれば、数値計算により求めることが可能である。なお作用円半径 a については、まえがきにも述べたように、岩盤の表面に衝突する直前まで噴流が Tollmien の速度分布に従っているものとすれば (B, C, D の領域については) $a=0.22x$ (x : ノズルと岩盤面までの距離) と表わされるし、また u_m (ノズル中心軸上の流速) は各ノズルからの各距離における中心軸上の速度を実験により求めることが出来る。

次に実際の数値積分の方法を示す。

図-7 のように半径 a の作用円を想定し、中心Oより距離 R にある点G下における岩盤の応力を求めることにする。点Gを中心に半径 $(a+R)$ の半円を描き、それを扇形に m 等分する。次にそれを更に半径方向に n 等分すると、半円は $m \times n$ 個の微小部分に分割される。その微小部分の中心点の位置が半径 a の作用円内にある微小部分だけに注目し、その中心点を含む微小面積 A_{mn} に作用する荷重は、作用円に衝突する時の噴流の速度を u とすると $\frac{A_{mn}\gamma u^2}{g}$ とあらわされる。いま $\Delta\theta_a=\pi/m$, $\Delta s_a=(a+R)/n$ とおくと、微小面の中心点からGまでの距離を s' とし、その中心点がC点に関して x 軸とのなす角 θ' とすれば

$$\left. \begin{array}{l} s'=As_a/2+(K-1)\Delta s_a \quad (K=1\sim n) \\ \theta'=\Delta\theta_a/2+(L-1)\Delta\theta_a \quad (L=1\sim m) \end{array} \right\} \dots\dots(1-21)$$

で表わされる。従って任意の微小部分の面積は、 $A_{mn}=As_as'\Delta\theta$ であらわされるから $As_as'\cdot\frac{\gamma u^2}{g}$ の微小の荷重が作用する。この荷重によって点Gに生ずる応力を求めてみよう。式 (1-13) において、

$$\theta \rightarrow \theta', \quad s \rightarrow s',$$

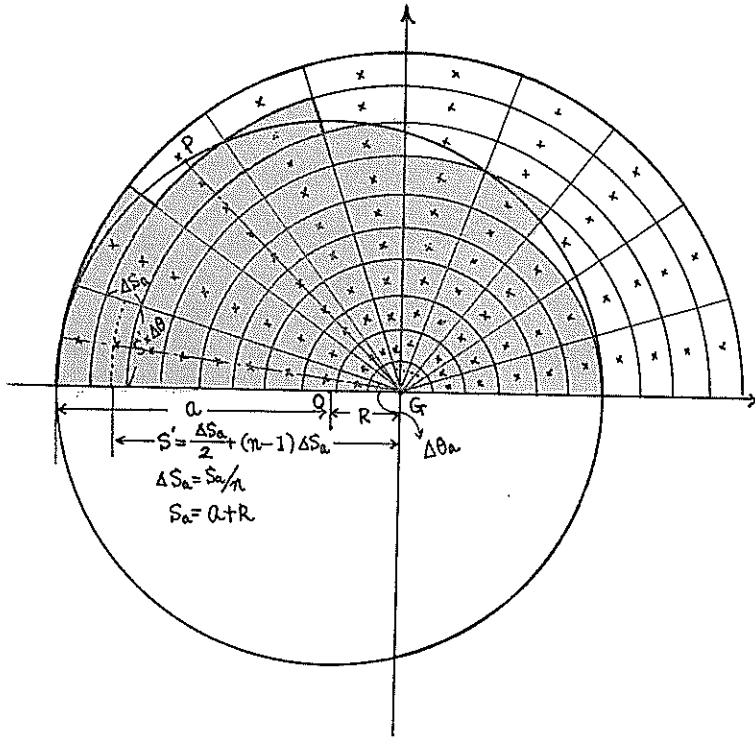


図-7 各微小部分の荷重がG点に作用する図

$$\varphi \rightarrow \varphi' = 3.4 \sqrt{\left(\frac{R}{a}\right)^2 + \left(\frac{s'}{a}\right)^2} - 2 \left(\frac{R}{a}\right) \left(\frac{s'}{a}\right) \cos \theta'$$

と変換し、また dF についても

$$dF = \frac{\gamma u^2}{g} \Delta s_a \cdot \Delta \theta s' = \frac{\gamma u m^2 f(\varphi')^2}{g} \Delta s_a \cdot \Delta \theta \cdot s'$$

とおくことにより、次のように $d\sigma_x$ が表わされる。

$$d\sigma_x = -\frac{\gamma u m^2 / g}{4\pi} \left[\frac{z(1-2\mu)}{(\sqrt{s'^2+z^2})^3} - \frac{3zs'^2}{(\sqrt{s'^2+z^2})^5} + \cos 2\theta' \left(\frac{2(1-2\mu)}{\sqrt{s'^2+z^2}(\sqrt{s'^2+z^2}+z)} - \frac{3zs'^2}{(\sqrt{s'^2+z^2})^5} - \frac{(1-2\mu)z}{(\sqrt{s'^2+z^2})^3} \right) \right] \times f(\varphi')^2 s' \Delta s_a \Delta \theta \dots (1-22)$$

従って、作用円内にその中心点をもつ微小部分の荷重をすべて加えることよりこの作用円全体にかかる荷重がもたらすG点下の応力を求めることができる。そのために微小部の中心が作用円の内部にあるための条件は次のように求められる。微小部分の中心点とG点と結ぶ直線が作用円と交わる点Mとすると、GMの(ただし $\overline{GM} = s_0$ 、図-2)距離は、 L を変化させることにより式(1-19)、及び図-2と、図-7を対応させ、式(1-21)において、

$$\theta' = \left(L - \frac{1}{2}\right) \Delta \theta_a = \left(L - \frac{1}{2}\right) \frac{\pi}{m} \text{ とするなら}$$

$$\overline{GM} = R \cos \left(L - \frac{1}{2}\right) \frac{\pi}{m} + \sqrt{a^2 - R^2 \sin^2 \left(L - \frac{1}{2}\right) \left(\frac{\pi}{m}\right)} \quad (L=1 \sim m)$$

と表わされるから微小面の中心点が作用円内にあるためには

$$s' \leq \overline{GM}$$

でなくてはならず、これを満足する s' の式の中の最大の整数として $K=n'$ を定めることが出来る。従って $L=1 \sim m$ 、 $K=1 \sim n'$ のこの範囲の s' について、次の計算を行なうことにより、 σ_x を概算することが出来る。作用円全体にかかる微小部分の荷重がG点下に作用するものとして(1-22)式の総和を求めると

$$\sigma_x \doteq 2 \sum_{L=1}^m \sum_{K=1}^{n'} - \left(\frac{\gamma u m^2 / g}{4\pi} \left[\frac{z(1-2\mu)}{(\sqrt{s'^2+z^2})^3} - \frac{3zs'^2}{(\sqrt{s'^2+z^2})^5} + \cos 2\theta' \left(\frac{2(1-2\mu)}{\sqrt{s'^2+z^2}(\sqrt{s'^2+z^2}+z)} - \frac{3zs'^2}{(\sqrt{s'^2+z^2})^5} - \frac{(1-2\mu)z}{(\sqrt{s'^2+z^2})^3} \right) \right] \right) \times f(\varphi')^2 s' \Delta s_a \Delta \theta \dots (1-23)$$

同様にして

$$\sigma_z \doteq 2 \sum_{L=1}^m \sum_{K=1}^{n'} 3 \left(\frac{\gamma u m^2 / g}{2\pi} \right) \cdot \frac{zs'^2}{(\sqrt{s'^2+z^2})^5} f(\varphi')^2 \cdot s' \Delta s_a \Delta \theta \dots (1-24)$$

$$\tau_{zz} \doteq 2 \sum_{L=1}^m \sum_{K=1}^{n'} 3 \left(\frac{\gamma u_m^2 / g}{2\pi} \right) \frac{z^2 s}{(\sqrt{s^2 + z^2})^5} f(\varphi')^2 \cdot s' \Delta s \Delta \theta$$

.....(1-25)

として数値積分の形で表わされて求まる。式 (1-21) における m, n は上式の $\sigma_x, \sigma_z, \tau_{xz}$ 等の値が一定の値に近づいて行くようにして適当な値に定める。これらの計算、および計算における判断はすべて電子計算機を使用して行った。なお u_m の値については以上の考え方を次の第2章における破砕の理論ならびに実験結果とを比較する都合上、実験に使用した2種類のノズル(径11mm, 13mm)による測定値を用いた。なお各距離における中心流速は表-1のとおりである。

表-1 各ノズルのノズルからの各距離における中心流速

①	②	13 mmφ ノズル	11 mmφ ノズル
5		92.7 m/sec	102.3 m/sec
10		73.0 "	90.6 "
15		55.7 "	70.9 "
20		47.2 "	53.4 "
25		37.8 "	40.9 "
30		32.1 "	31.7 "

① ノズルからの距離(cm) ② ノズル種類

このようにして求めた岩盤内部に作用する応力値を附表-1に示す。表ではノズルから岩盤まで距離が表-1に対応する $x=5, 10, 20, 25, 30$ cmの各位置での岩盤の表面、ならびに内部に作用する各応力を作用円の中心から半径 a の $1/10$ ずつ離れた点下と、その点から半径 a の $1/10$ ずつ深くなった各点の各応力 $\sigma_x, \sigma_z, \tau_{xz}$ の値を求めて算出したものである。なおポアソン比としては0.25の値を用いた。

以上述べてきたことは、荷重を受ける岩盤の面が先に述べた噴流のB, C, Dの領域にある時の、各応力の計算を考えた場合である。

1-2 噴流のA領域に岩盤を設置した場合

次に岩盤にノズルが更に近づいた場合における領域、すなわちA領域で噴流が岩盤の面に衝突した場合にどのような応力が岩盤内部に生ずるかについて、検討してみよう。このA領域とは、噴流の中心の速度がノズルから出口速度を噴出方向に維持する区間をさすが、この区間においては、他の領域と異なり、噴出後の噴流のコア部分は噴出前のノズル内部の高圧水と同様な状態を維持しており、岩盤の面に打撃的に作用するのではなく、むしろ静的な荷重として作用すると考えられる(図-8参照)。

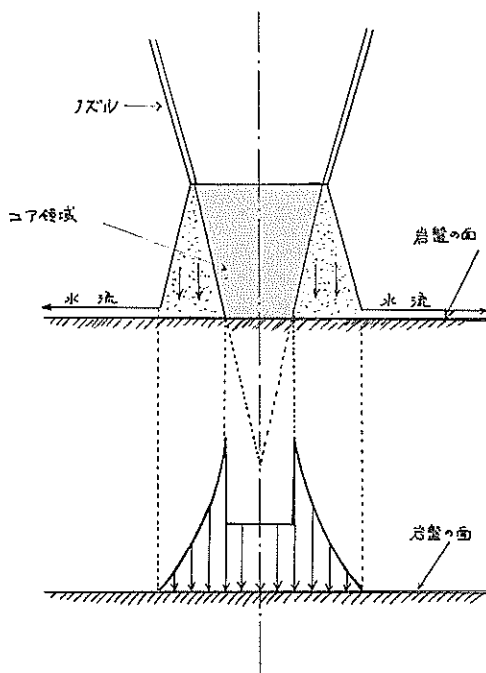


図-8 コア領域における噴流の衝突現象及び岩盤に作用する荷重分布

すなわち、他の領域ではノズルからは噴出した水と、周囲の水との混合水流による dynamic な作用をなすのに対し、この領域のコア部分の水噴流は単に定常的に岩盤に圧接しているような状態となっている。従って岩盤がコア部分と接触する面が受ける圧力は static で、その圧力はノズルに供給する水の圧力と同一である。一方共に流されるコア部分の周囲の水流は dynamic に作用し、岩盤破砕作用をより強く行うものと考えられる。従って、コア部分ではノズル出口速度水頭による荷重が、そしてまたその周囲では dynamic な作用としての荷重が加わるとして岩盤にかかる応力を先にB, C, Dの各領域と同様な方法で計算することができる。

なおA領域の例としてノズルと岩盤の作用面との距離 $x_0=1$ cm の場合の速度分布を表-2に示す。なお表の中心軸速度と同一の流速をもつところがコア部分の領域と考えられる。この区域では、動圧 $\gamma u_0^2 / 2g$ がそのまま荷重としてかかるとし、この値を先に求められた式(1-16), (1-17), (1-18)の $\frac{u_m^2 f(\varphi)^2 / g}{\pi}$ の値の替りに代入して求めることが可能である。 $x_0=1$ cm の場合の応力分布の計算値は附表-1-1に示す。

附表-1-1は、図-9の作用円内にコア領域が存在する

表-2 コア領域における各点での噴流の速度

① \ ②	13 mmφ ノズル	11 mmφ ノズル
0.0	92.7 m/sec	102.3 m/sec
1.0	92.7 "	102.3 "
2.0	92.7 "	102.3 "
3.0	92.7 "	102.3 "
4.0	88.3 "	99.0 "
5.0	41.8 "	83.9 "
6.0	12.6 "	15.8 "
7.0	5.0 "	8.0 "
8.0	0.0 "	0.0 "

① 中心軸からの距離 ② ノズルの種類

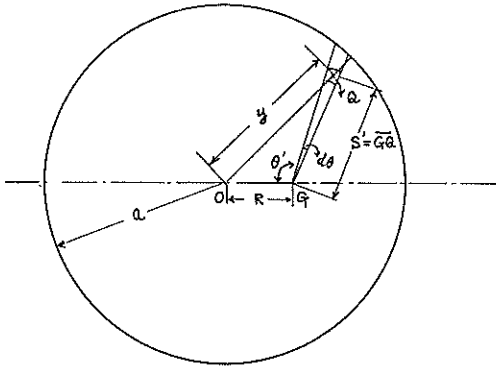


図-9 コア領域における作用円上の荷重が点Gに作用する関係図

ものとして次の計算法により求めた。図-9 において長さ y (すなわち \overline{OQ}) は

$$\overline{OQ} = \sqrt{\overline{OG}^2 + \overline{GQ}^2 - 2\overline{OG} \cdot \overline{GQ} \cos \theta'}$$

であり、また \overline{OG} は R であり、これは a (作用円半径) の倍数として求まる。そして \overline{GQ} , θ' は (1-21) 式と同様に

$$\theta' = \frac{d\theta_a}{2} + (L-1)d\theta_a \quad (L=1 \sim m)$$

$$(d\theta_a = \pi/m)$$

$$\overline{GQ} = s' = \frac{ds_a}{2} + (K-1)ds_a \quad (K=1 \sim u)$$

$$(ds_a = a + R/n)$$

としてやはり a と θ との値で求まるから、 \overline{OQ} の値も具体的に計算出来る。いま点 Q を含む微小面積にかかる荷重 F は作用円の中心点 O よりの距離 \overline{OQ} によってその大きさが変化する。表-2 でわかるように \overline{GQ} が $0 \sim 3$ mm で u の値が 92.7 m/sec であるから、この部分がコア

となる。そしてこの部分に属する微小面積 ds $s' d\theta$ には単に動圧 $\frac{\gamma u^2}{2g}$ の圧力が静的に作用すると考える。次に (1-22) 式において $\frac{\gamma u_m^2 f(\varphi')}{g}$ の値の代りに、この値をこの式に代入するならば点 G における垂直応力 $d\sigma_x$ が求まる。また表-3 において \overline{GQ} が $4 \sim 8$ mm の範囲にあったなら、微小部分はコアの内部に含まれないから岩盤には打撃作用としての水流が作用すると考えると、(1-22) 式において $\frac{\gamma u^2}{g}$ を $\frac{\gamma u_m^2 f(\varphi')^2}{g}$ の代りに代入すると、この部分の微小部分が G 点に与える $d\sigma_x$ の値を求めることが出来る。そしてこの A 領域の計算においては作用円半径 a は先の Tollmien の理論に従わず表-2 より $a=8$ mm とする。このようにコア部分における荷重、ならびにその周囲における荷重が各々求まったから、これらの総和を (1-23), (1-24), (1-25) 式と同様な計算を行うことにより、 A 領域に設置された岩盤の面の一点 G に作用する各応力 $\sigma_x, \sigma_z, \tau_{xz}$ が求めることが出来る。

なお、ポアソン比が変化した場合における作用円の表面の各応力は、附表-2 にあげてある。ただしノズルからの距離が 5 cm 以下のものはコア領域での応力であるから、各応力値があまり大なる値をとらないので省略した。また、岩盤表面における σ_x の算出するために Boussinesq の式をそのまま使用すると、すべてその値が 0 となるため、噴流の実際の速度を測定して、その流速で岩盤に衝突した際の打撃力として求めた。さて、これらの各応力値を検討してみると、各ポアソン比によりかなり異なることがわかる。実際に考えられる岩盤のポアソン比としては、 $0.20 \sim 0.33$ 附近であるから $\mu=0.5$ とか $\mu=0.1$ の値は実用的意味がない。また特に興味あることは、 σ_x (半径方向垂直応力) については、表面の中心付近には、引張応力が働いていることである。

各応力値全体としては、やはり岩盤表面から、深度が深くなるにつれて次第にその値が低くなっていく傾向がみられる。

2. 岩石破砕に関する理論およびその応用について

2.1 Mohr の破砕理論およびその応用について

以上により岩盤内部に生ずる各応力の分布の傾向及びその概略の値がつかめたが、では岩石はこれらの応力とどのような相関々係により、破壊が生ずるのであるうか。岩石の破砕に関する理論は、それを弾性破損の一形態と

水噴流による水中の岩盤の理論的破壊過程について

みなすなら一般に利用されている破壊強さが考えられるが、その破壊限度を表わす条件については応力とか、ひすみにおける関係で理論的な立場から種々説明されている。それらの説の一つとして、Mohr の説を取り破碎のされ方を考察してみる。Mohr は材料破壊仮説を提唱し、この説はぜい性材料に関しては、しばしばよく適合すると考えられてきた。

その考え方とは、材料の内部の平こう状態の超過（破壊）は、すべりによって生じ、破壊面に働く垂直応力、およびせん断応力が材料によって定まるある極限值に達した時に生ずるものとした。いま、この説をモールの最大主応力円によって考えてみよう。

この円は、弾性体内の一点についてある方向の応力、特に、その主応力 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ が分明すれば、その点におけるあらゆる方向の応力状態を完全に、かつ簡単に示すものである。一定の垂直応力に対するせん断応力は、**図-10** に示す様に中間主応力 σ_2 を含まない半径 $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ 、中心 $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ の応力円によって定まる。

一方材料は、種々の異った応力状態の下で破壊するのであるから各極限状態に対して応力円をそれぞれ画くことが出来る。それらの円の包絡線を**図-11** のように画けばこの線が材料の破壊状態を与えることになる。

すなわち、すべり面は包絡線との接点にあたる応力円上の点で定まる。

しかし、この様な極限曲線を個々の材料に対して求める事は困難であるため、簡単に単純引張り、及び単純圧縮の試験の結果から破壊限度を示す応力円を描いてそれから求める方法がある。（**図-12** 参照）

求める包絡線が、これに接する直線 $AB, A'B'$ であったとすれば、破壊限度を表わす線は、この二直線であらわされる。それらの式としていま

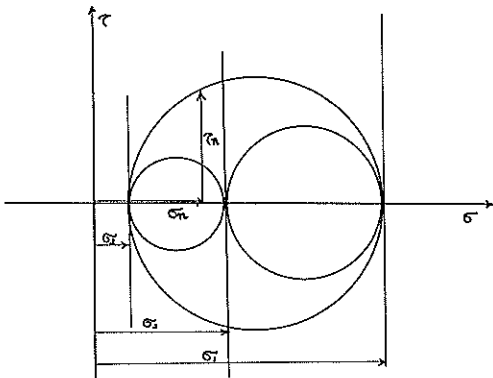


図-10 三軸応力系におけるモールの応力円

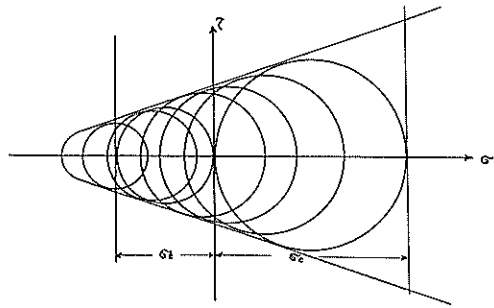


図-11 モールの応力円によって決定される包絡線

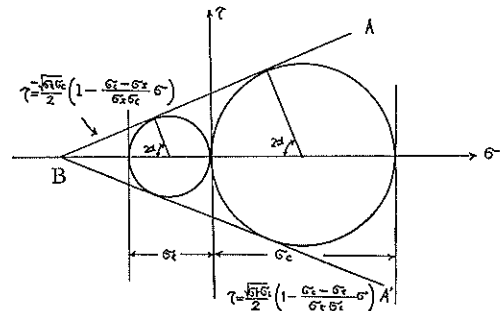


図-12 単純圧縮及び単純引張り試験により決定される破壊限界線

$$\pm \tau_{\text{破壊}} = \frac{\sqrt{\sigma_1 \sigma_c}}{2} \left(1 - \frac{\sigma_c - \sigma_t}{\sigma_1 \sigma_c} \sigma_n \right) \dots (2-1)$$

（ここに σ_t, σ_c は、その絶対値をとる）

を採用しよう。

するとモールの考え方によれば、この様な種々の最大主応力円に対して、これら直線に接する点で破壊を生ずるのであるから **図-11** からわかるように、すべての円は中心と一定の角度をなす各点で接していると考える。

従ってすべり面は σ_1 と σ_3 がつくる応力面に直交し、かつ σ_1 の作用面に（一定の角度を 2α とするなら）

$$\alpha = \frac{1}{2} \cos^{-1} \frac{\sigma_c - \sigma_t}{\sigma_c + \sigma_t} \dots (2-2)$$

だけ傾いている。すなわち **図-13** に示す面である。（従って σ_c, σ_t の値が分れば、すべりを起す面の角度を知れる）**図-14** から、この α が求められたなら、もし σ_1, σ_3 が求められていると、

$$\begin{cases} \sigma_n = \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\alpha \\ \tau_n = \frac{1}{2} |\sigma_1 - \sigma_3| \sin 2\alpha \end{cases} \dots (2-3)$$

となり、任意の点における σ_1, σ_3 の各値に対して σ_n, τ_n が求まる。（すなわち、すべりを起す面に働く、せん断応力 τ_n 、垂直応力 σ_n を知ることができる）今、逆に

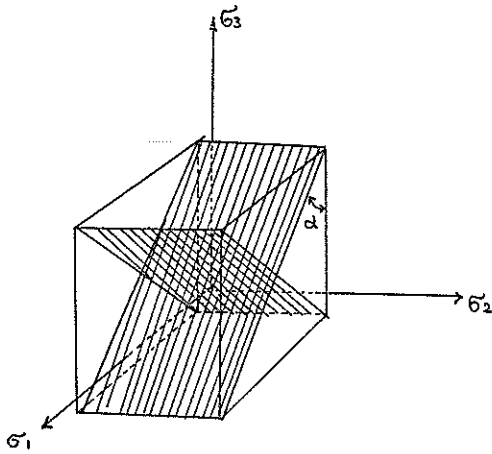


図-13 破損を起すと考えられる面

岩盤内部のある点での主応力 σ_1, σ_3 がわかった時に図-14 に示すような Mohr の円が出て、その岩盤の σ_c/σ_0 の値が既知ならば、 α が決定され中心より 2α の角度をなす半径に、円周上の点 P, P' で直交する直線を描けばこれが破砕限界線である。そしてこの限界線と τ 軸の両方に接する円を描けば、これがそれぞれ単純圧縮、及び単純引張に関するモールの応力円となり、岩盤のこの点において、これらの応力 σ_1, σ_3 で破砕すると考えられる岩盤の圧縮強度、引張強度である。

次にまた、図-15 に示すように、ある岩石の単純引張り強さ σ_t 、単純圧縮強さ σ_0 の大きさが知れた時、それ

ぞれの Mohr の円を描き、この両円に接する破砕限界線を描く。いま、この岩石のある 1 点に主応力 σ_1, σ_3 が作用した場合に、これらの値の大小により、それぞれ図に示す径の異った Mohr の応力円、 K_1, K_2, K_3 等が描ける。図において円 K_1 は、破砕限界線と交わらない円、 K_2 は限界線に接する円、 K_3 は限界線と交わるものとするれば、円 K_2 を決定する主応力 σ_1, σ_3 で、この岩石は破砕を始め、更に K_3 では、完全に破砕を生じさせることがわかる。

すなわち、いま円 K_2 が破砕限界線と接する点を P とするならば、この点でのせん断応力 τ_n は

$$\tau_n = \frac{1}{2} |\sigma_1 - \sigma_3| \sin 2\alpha \quad \dots\dots(2-4)$$

であり、また円 K_3 において $\sigma = \sigma_n$ の時のせん断応力は図より τ_s である。そして円 K_2 と K_3 では、 $\sigma = \sigma_n$ で (2-1) 式と比較して

$$|\tau_s|, |\tau_n| \geq |\tau_{破砕}| \quad \dots\dots(2-5)$$

破砕であるから破砕を生ずるのであろう。

すなわち図の斜線をほどこした領域に入る円 K_3 が決定するせん断応力の値をとるなら破砕するのである。ところが円 K_1 については、斜線の領域に入らないから破砕しない。

以上の事から、次のようなことも言える。

直線 CP が円 K_1, K_3 と交わるそれぞれの点を P_1, P_3 とすれば、 P_1, P_3 において、円 K_1, K_3 で接し、かつ破砕限界線と平行な直線 A_1, A_3 をひけば、これらは

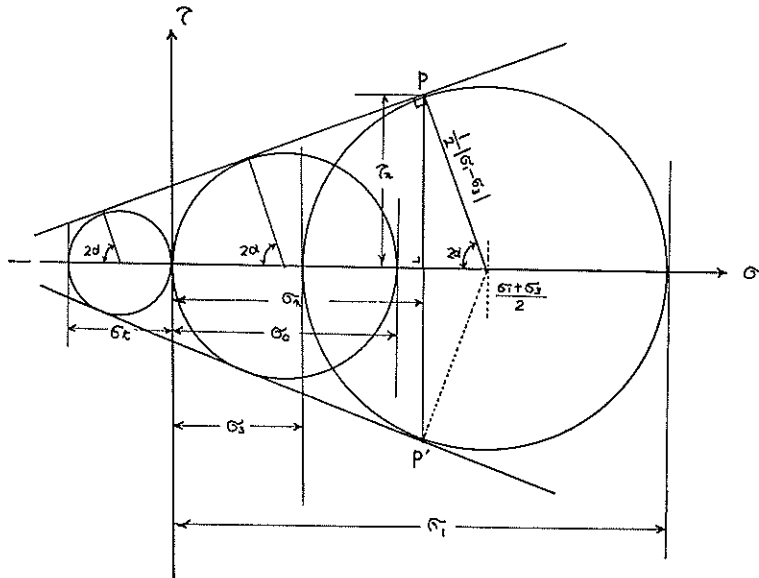


図-14 σ_n, τ_n を σ_1, σ_3 より求める関係図

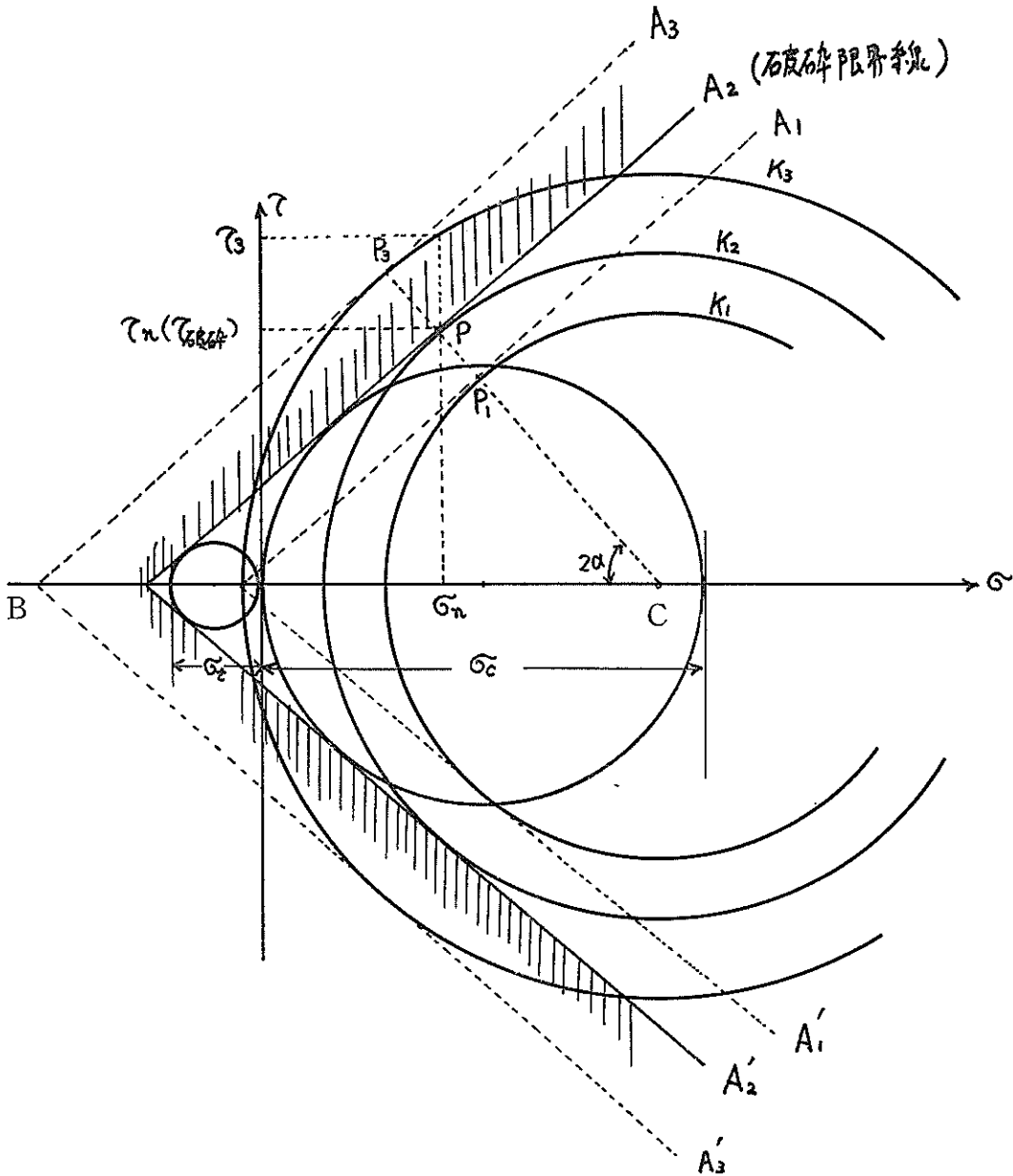


図-15 モールの応力円により決定される破砕限界線と圧縮強度 σ_c の大きさとの関係

別の値の σ_c , σ_t に対応する破砕限界線を意味する。

そしてある点で、円 K_1 , K_2 を決定する別の大きさの σ_1 , σ_3 で破砕すると考えられる岩石があったなら、それに応ずる破砕限界線、例えば図-15 の A_3 , A_1 が (もしその岩石の σ_c/σ_t の値が一定、すなわち $2\alpha = \text{一定}$ なら) 求められ、それらの A_3 , A_1 を決定する別の大きさ

の σ_c , σ_t が求まることになる。(作図により σ_c , σ_t の径の円が求まる) すなわち、岩盤破砕の際の破砕点での主応力と岩盤の単純圧縮強度 σ_c との相対関係を求めることが可能である。

このようにして Mohr の岩盤破砕の条件は明らかになったが、破砕条件を単に主応力 σ_1 , σ_3 と圧縮強度 σ_c と

の相対的な関係で表わすことが出来れば、非常に便利だし、実際に実験結果と比較するには便利である。(実際はせん断強度を求めるのが理想であるが、岩盤の理論せん断強度を求めることは困難である)

2.2 噴流の岩盤内部に作用する応力と破碎される岩盤の圧縮強度 σ_c との関係について。

さて、このような考え方に従い、第1章に求めた岩盤の各点に働くと考えられる各応力 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ より、その点における主応力 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ を求め、 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ として、 σ_1 (最大)、 σ_3 (最小) を定める。一方モルタルとか、コンクリートなどでは、一般に $\sigma_t/\sigma_c \approx 0.1$ であるから、式 (2-2) より、まず α の角度が決定出来るし、ある点での σ_1, σ_3 がわかれば、式 (2-3) の σ_n, τ_n を求め、(2-5) 式を比較することにより、その点に対応する σ_c を求めることが可能である。

次に具体的に $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ の値を求めてみよう。

一般に、任意の点における応力 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ が求められたなら、主応力は次の3次方程式の根であることが知られている。すなわち

$$\sigma^3 - (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)\sigma^2 + (\sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{zx}^2)\sigma - (\sigma_x\sigma_y\sigma_z + 2\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{zx} - \sigma_x\tau_{yz}^2 - \sigma_y\tau_{zx}^2 - \sigma_z\tau_{xy}^2) = 0$$

ところが先に第1章で検討しているように

$$\sigma_y = 0 \quad \tau_{xy} = 0 \quad \tau_{yz} = 0$$

から上の方程式は

$$\sigma^3 - (\sigma_x + \sigma_z)\sigma^2 + (\sigma_x\sigma_z - \tau_{xz}^2)\sigma = 0$$

$\therefore \sigma = 0$ また

$$\sigma = \frac{1}{2}[(\sigma_x + \sigma_z) \pm \sqrt{(\sigma_x - \sigma_z)^2 + 4\tau_{xz}^2}] \quad \dots (2-6)$$

これらの根の中から、最大の根と最小の根をそれぞれ σ_1, σ_3 として求め、これから (2-3) 式により σ_n, τ_n が求まる。従って、この主応力 σ_1, σ_3 が求まり、すべりを起すと考えられる面の垂直応力 σ_n 、せん断応力 τ_n が求まったから、破碎を生ずる条件式、すなわち (2-1) 式の $|\tau_n| \geq |\tau_{\text{破碎}}|$ より、

$$\tau_n = \tau_{\text{破碎}} = \frac{\sqrt{\sigma_t \sigma_c}}{2} \left(1 - \frac{\sigma_c - \sigma_t}{\sigma_t \sigma_c} \sigma_n \right)$$

とおき $\sigma_t/\sigma_c = 0.1$ とすると、この式より

$$\sigma_c = 6.33\tau_n + 9\sigma_n \quad \dots (2-7)$$

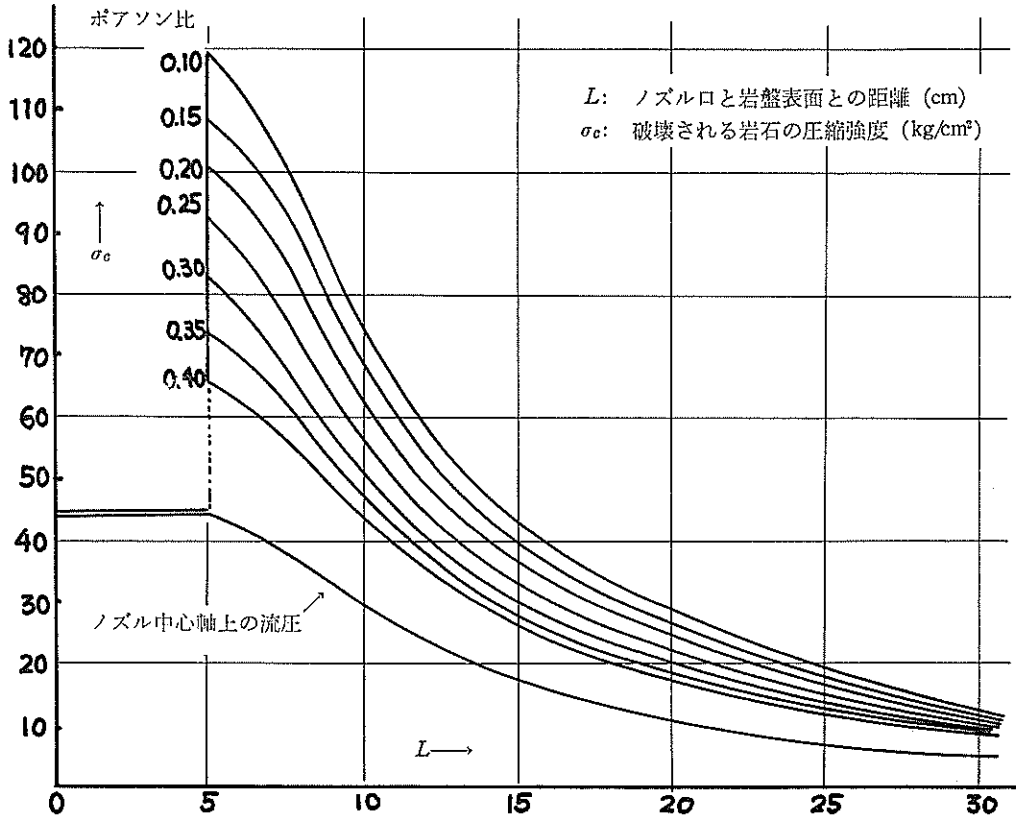


図-16 理論的に破壊される岩石の圧縮強度とノズルからの各距離との関係 (13 mmφ ノズル使用の場合)

水噴流による水中の岩盤の理論的破壊過程について

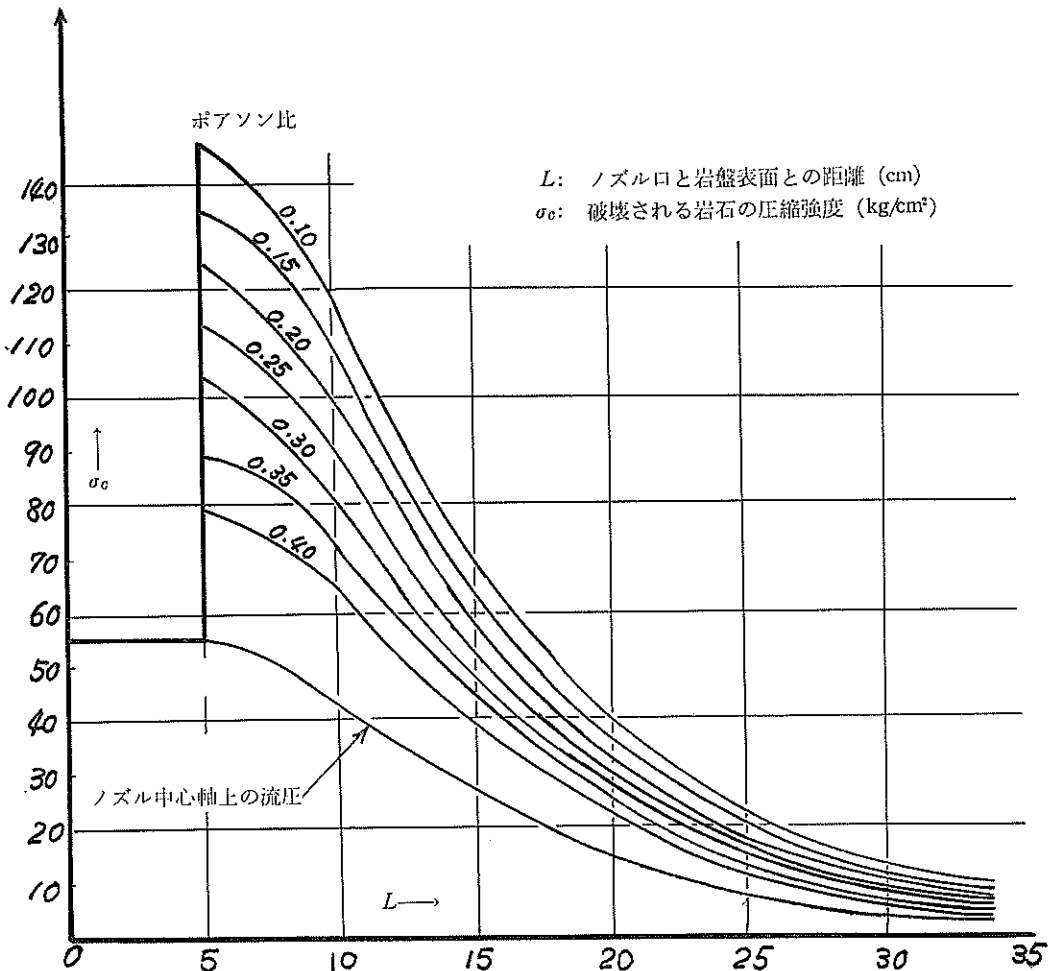


図-17 理論的に破壊される岩石の圧縮強度とノズルからの各距離との関係 (11 mmφ ノズル使用の場合)

が得られ、いま求めた σ_n , τ_n の値を代入すれば、この点における主応力 σ_1 , σ_3 でちょうど破壊される岩石の圧縮強度 σ_c が求まる。これは (図-13) の場合の作図して求める過程と同じである。

この様にして σ_n , τ_n は主応力 σ_1 , σ_3 の値から得られ σ_1 , σ_3 の値は、先に求めた σ_x (半径方向応力), σ_z (鉛直方向応力), τ_{xz} (せん断応力) から求まるから、もし岩石の内部のある1点に σ_x , σ_z , τ_{xz} の応力が働いた時、その点をそれらの応力でもって破壊されると考えられるその岩石の圧縮強度の最も大きな値 σ_c を知ることが出来る。

従って第1章に述べたような岩石の内部の各点に作用する応力が決定された時、その点で破壊が生ずる最大の圧縮強度を各点について求めることになる。そしてポア

ソン比が、0.25, $\sigma_1/\sigma_c=0.1$ と仮定した岩石について、(2-6), (2-7) 式に従って求めたものが附表-1 に示す σ_c の項のものである。

すなわち、11 mmφ, 13 mmφ の2つのノズルを使用して、高圧水を噴射させた場合に、岩石の内部の各点について、ノズルと試料との距離を変化させた場合について求めたものである。また岩石のポアソン比が変化した場合に、ノズルから各距離に岩石を設置した場合にその表面にの各点に生ずる σ_c の値は附表-2 に載せてある。これら一連の表からもわかるように、ノズルから各距離だけ離れた岩石の内部で得られる最も大きな σ_c で破壊されると考えられる点は、やはり岩盤の表面の附近であり、作用円の中心に近いところに存在すると思われる。殊に表面附近では、半径方向の応力 σ_x は引張応力として作

用し、これが破砕限界としての大きな圧縮強度 σ_0 の値を与えると考えられる。

また各ポアソン比が変ると各応力が異ってくるようにここで求めている σ_0 がかなり異ってくる。

いま、各ポアソン比について、また、ノズルからの各距離について、岩盤の表面の点で最も大きな σ_0 を得るところを、計算して横座標にノズルと岩盤との距離 L 、縦座標に σ_0 をとり図示すると図-16, 17 のようになった。すなわち、これらの図ではノズルの入口圧力が 44 kg/cm², 54 kg/cm² のとき、ノズル口と破砕すべき岩盤の面の各距離において、どの程度の圧縮強度の岩盤の破砕が理論的に可能であるか図示したものである。これらの図によれば、ポアソン比が 0.25 のものについては、ノズル中心軸上の流圧の約 2 倍前後の値をもった圧縮強度の岩盤の破砕が可能ということになる。しかし、これはあくまで岩盤の表面附近の破砕について言えることで、この破砕し得る状態が岩盤内部まで深く浸透するとは言えない。ポアソン比として考えられる値は約 0.15~0.30 程までであろうが、 σ_0 はこれらの各値によりかなり変化すると考えられる。

次に岩盤内部の各点における σ_0 の値については、表面より順次深くなるにつれ、また作用円中心軸から離れるにつれ徐々に少なくなっていく。

いま σ_0 の計算値よりも低い圧縮強度をもつ岩石であれば表面附近はもちろん、岩石の内部でも破砕が進行していることがこれらの附表-1 より推定される。従って各表に示す深さが零の場合の σ_0 の値と同程度の圧縮強度をもつ岩石を噴流で破砕する場合は、表面から極くうすくはげるように掘削されるだろうが、それよりかなり低い強度をもつ岩石の場合は、瞬時に岩石内部まで掘削が進行すると考えられる。

次に A 領域での σ_0 の値についての検討だが、これは先に示した応力計算に従って求めたものが、附表 1-1 のノズルからの距離 $x=1$ cm の場合におけるものである。

この表からもわかるように、作用円中心附近の岩盤の表面及びその内部における、各々の応力 σ_x , σ_z , τ_{xz} はこのコア部分での噴流が静的に作用するものとすれば小さな値となり、その結果、それらの点における最大の圧縮強度 σ_0 も、 $x=5$ cm の場合におけるよりもかなり低い値をとる。

そのため、もしこの表に示される表面附近の σ_0 の値より、やや大きな圧縮強度をもつ岩石を破砕するとするならば作用円の中心附近は、ほとんど破砕されずに残り、むしろその周囲が破砕して行くのではないかと考えられ

る。しかし、表面附近の σ_0 の値より、低い圧縮強度をもつ岩石なら、瞬時に作用円中心附近も破砕するであろう。以上の考察で、岩石破砕の傾向が、ほぼ推測出来たが、これらの妥当性を示すための実験を行ったので次章に示す。

3. 実 験

以上理論的な考えのみに従って考察してきたが、次にこれらの理論と比較するための実験について述べよう。しかし先に仮定した条件に適合すると考えられる現象を構成することは、ほとんど不可能であるから、出来るだけ近い状態にするため 2 章で求められた、図-16, 17 等の理論曲線との比較、及び A 領域での掘削実験について理論の確認を行った。

3.1 実験方法、および実験

実験装置は文献-7 に紹介した装置と全く同一のものを使用した。破砕すべき岩石模型試料としては、実験室内で製作したモルタルを使用した。これは先に示した理論を確認するのに最も都合のよい岩石のサンプルとして考えられたからである。なぜなら自由に圧縮強度の異った、しかも均一な強度をもつものが手軽に製作出来るし、強度測定も容易であり、他の岩石のようにその構造上の変化を出来るだけ少なくすることが可能であるからである。

そのため、破砕試料としてのモルタルは、なるべく粒子の直径の小さい（径 1 mm 以内）砂を使用し、セメントとの混合比を種々変化させ、安定した強度をもつものを製作するため、約 3 週間の養生期間をおいて製作した。なお、図-16, 17 等のように厳密にポアソン比との関連づけを行って調査するならば、ポアソン比が一定である試料を作製しなければならないが、実際はポアソン比均一の試料を作製することは、ほとんど不可能である。そして、圧縮強度の低いモルタルでは、その測定は不可能であった。なお製作した各々の試料のポアソン比は、あまり大きな変化をせず、ほぼ 0.15~0.25 の範囲にあった。

製作したモルタルの圧縮強度の測定結果を表-3 に示す。次に引張強度についてだが、先に求めた理論曲線では、ほぼ圧縮強度の 1/10 を仮定したが、実際には大部分が 0.089~0.11 σ_0 の値の範囲にあった。従って、ほぼ理論曲線との比較には適していると考えられる。

なお、使用したノズルは先にも示したように噴流の速度分布を測定した際に使用されたノズル、径 13~11 mm のもの 2 つを使用した。

水噴流による水中の岩盤の理論的破碎過程について

表-3 実験試料用モルタルの各強度表

A \ C \ B	圧縮強度 (kg/cm ²)			平均 (kg/cm ²)	引張縮度 (kg/cm ²)
	1	2	3		
1	8.0	7.9	8.2	8.0	1.2
2	13.7	13.6	13.8	13.7	1.8
3	21.5	20.3	19.5	20.5	2.8
4	23.6	24.2	22.4	23.5	2.6
5	23.8	25.0	23.3	24.1	2.6
6	30.8	29.4	28.0	29.4	2.8
7	33.8	33.8	34.5	34.1	3.9
8	48.6	47.5	40.3	45.5	4.3
9	49.0	48.6	42.2	46.6	4.3
10	52.0	53.8	51.2	52.3	5.5
11	66.3	67.2	65.3	66.6	6.0
12	68.7	67.7	69.2	68.5	6.2
13	75.8	76.2	74.7	75.5	6.8
14	74.8	75.0	75.3	75.0	7.0
15	88.5	92.0	88.7	89.7	8.1
16	90.0	93.3	89.2	90.8	8.5
17	108.3	107.5	109.6	108.6	10.3

A: 試料番号
C: 試験種類

B: 試験回数

次に破碎実験の方法であるが、いままで理論的に考察してきた方法は、ノズルから噴出した噴流が岩盤の表面に衝突した瞬間に、その作用円の岩盤内部の点に生ずる応力より破碎されるか否かを知る目的であるし、いったん破碎が開始された後の破碎状況を調査するのではないので、噴射時間を出来るだけ短くしなければならない。

本実験では噴射時間は 2~3 秒間として、破碎実験を行った。もちろん実験は十分広い水そう内 (径 5m・深さ 4m) で行った。

理論を確かめる方法として、ノズル口から噴射方向に直角に十分離れた距離に破碎用のモルタル試料を設置し、噴射を開始する。

噴射した結果、破碎されていないようなら、試料を少しノズルの直角方向に近づけて同様な噴射実験を行う。この様にして順次同様な実験を行い、はっきりと掘削されたと認められるところで噴射をやめて、ノズルと試料との距離、試料の破碎状況を観察する。こうして先に求めた理論曲線との比較を行うために、横軸にノズルからの距離、縦軸にモルタルの圧縮強度 σ_c をとったグラフ上に測定結果をプロットした。それらの結果が、図-18, 19 に示すものである。なお帯状の曲線の範囲はポアソン比が、0.15~0.30 の理論曲線の値である。

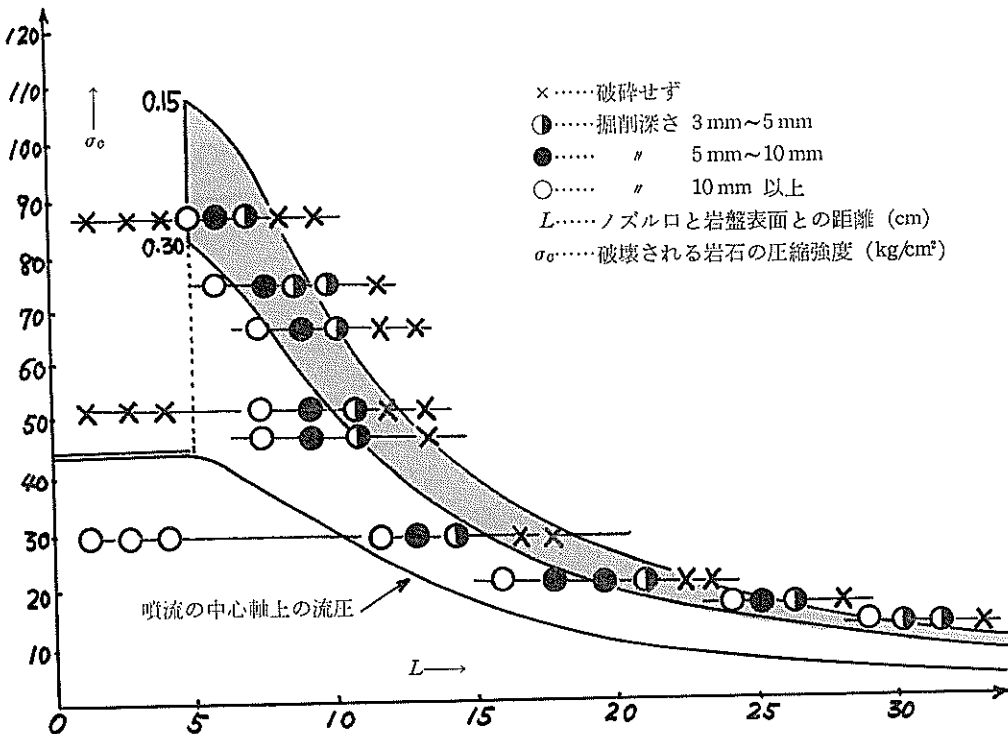


図-18 ポアソン比 0.15~0.30 の理論曲線と実験値との比較 (13mmφ ノズル使用の場合)

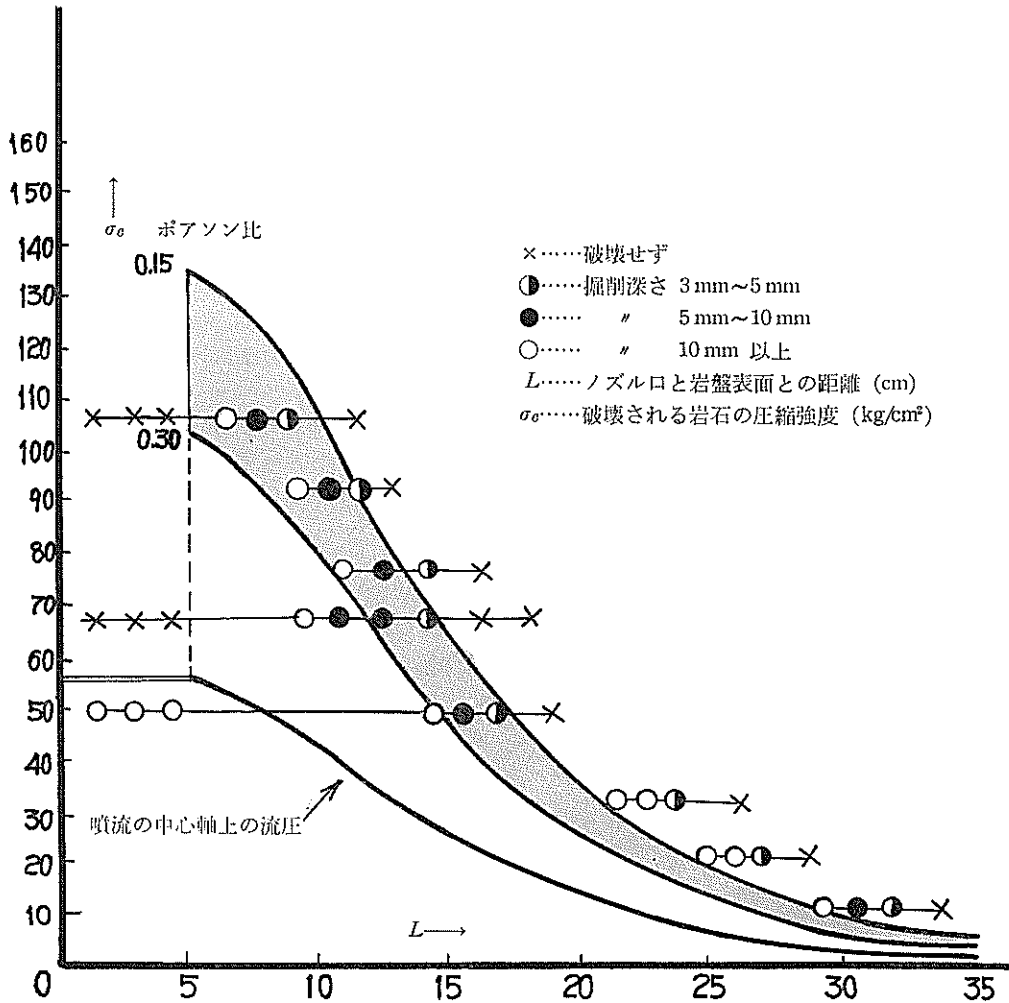


図-19 ポアソン比 0.15~0.30 の理論曲線と実験値との比較 (11 mmφ ノズル使用の場合)

3.2 実験結果および考察

図-18, 19 に示すように、実験値は、ほぼ理論曲線に沿って分布しているものの、若干のバラッキがある。

その大きな理由は、どの段階で掘削が生じたかを判断するのが困難なためである。すなわち破碎の度合をどの程度をもって、破碎したと判断するかが問題となる。

本実験では破碎深さが 3 mm 以上のものについてプロットした。

全般として言えることは、文献-7) にも述べたようにノズルからの各距離で破碎される試料の圧縮強度は噴流の持つノズル中心軸上の圧力の少なくとも 2 倍近くの値をもつと考えられるものまで破碎されている。殊に、ノズル近辺では、出口圧力が 44 kg/cm²、55 kg/cm² で、圧

縮強度が約 90 kg/cm²、110 kg/cm² 前後のものまで容易に破碎されていることは明らかである。またこの事実は他の研究者達によってもある程度確認されており、その一例として文献-8) において、ソビエトの研究者の実験によれば、噴流の動圧 p と破碎される岩石の圧縮強度 σ_0 との関係は、殊に石炭について

$$\sigma_0 \approx 2p$$

という説を提唱しているが、これなどは上記の実験結果とかなり一致してくる。

次に A 領域での破碎現象について観察してみるなら、既に 2 章で述べたように、また文献-7) にも述べたように、作用円の中心付近はノズル出口圧力が 44 kg/cm² の場合、圧縮強度が 50 kg/cm² の岩石について破碎実験を

水噴流による水中の岩盤の理論的破砕過程について

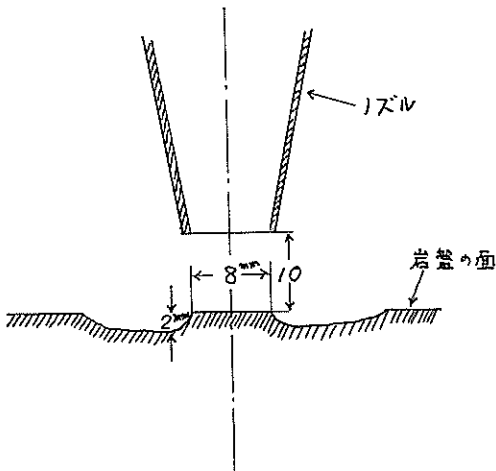


図-20 コア領域における岩盤の破砕状況

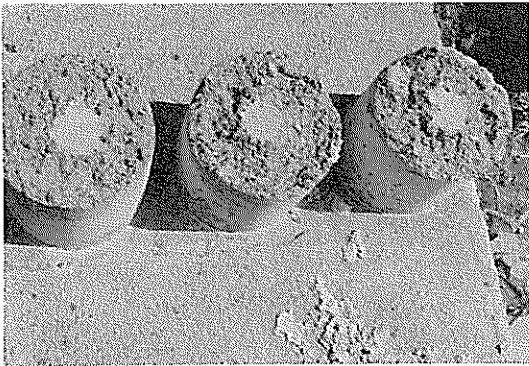


写真-1 コア領域における岩盤の破砕状況

行ったが、ほとんど破砕されずに、図-20 および写真に示すような形になり、先に考えた理論を裏づけることが出来た。殊に圧縮強度 $\sigma_c = 35 \text{ kg/cm}^2$ の試料について行った実験では瞬時に作用円下深く破砕されることもはっきり確認出来た。またノズル出口圧力が $11 \text{ mm}\phi$ ノズルを使用した場合の 55 kg/cm^2 の時における同様な実験でも A 領域における掘削実験では、全く同一の結果が観察された。

4. あとがき

今回の実験の結果、水中における水噴流の掘削能力として、ノズル中心軸上の流圧の約 2 倍の値前後の圧縮強度をもつモルタル試料の破砕が可能であることがわかったが、これは噴流の最大の圧力が 44 kg/cm^2 ($13 \text{ mm}\phi$ ノズル), 54 kg/cm^2 ($11 \text{ mm}\phi$ ノズル) の場合について言えたことで、これ以上高い圧力を用い、またより大き

な圧縮強度をもつ試料について同様なことが言えるかどうか現在のところはっきりしない。また破砕試料としてモルタルのみを使用したのが、これだけでは実験データとしては、全く不足で他の天然岩石の多数について今後実験を行い、以上の理論を確かめたい。しかし、多くの天然岩石では、その組成が多種多様であるため、今まで考えて来た考えは適用することは困難であろう。

なお、今回は単に岩石の破砕強度としての圧縮強度 σ_c と、ノズル中心軸の圧力 p との関係についてのみ検討したが、これはもっぱら実用的な便宜を考慮した上で行ったことであり、今回の実験結果から、両者のおよその傾向がつかめたと思われる。

また使用したノズルも、わずか 2 種類であり、実験による確認が不足であるような感じを与えるが、今回はこれだけに限った。殊にノズルの制作上の精度などについては、検討していないので、今後この点についても調査して行きたい。

参 考 文 献

- 1) "The theory of turbulent jets" abramovich
- 2) "水力採炭, 水力輸送" ムーチニク, イグナトフ編
- 3) "土木技術者のための岩盤力学" 土木学会
- 4) "材料試験便覧" 日本材料試験協会
- 5) "地下, 分布荷重によって生じる地盤内の鉛直応力と変位の計算" 西田義親(土と基礎) 1965年 11月号
- 6) "弾性・塑性論" H. И. БЕЗУХОВ
- 7) "高圧噴流の構造に関する実験結果およびモルタル試料掘削実験結果について" 藤井, 守口, 近藤 "港湾技研資料 No. 60"
- 8) "高速の水噴流による岩石の破壊" 山門憲雄, 横田章 "土木学会論文集 133号"

記 号 表

- u : 噴流の任意の点における x 軸方向の速度
- u_m : 噴流の中心軸上における速度
- x : ノズルからの距離
- y : ノズル中心軸からの距離
- γ : 水の比重量
- g : 重力の加速度
- F : 微小面積が受ける荷重
- A_0 : 微小面積
- C : 噴流の実験によって求まる常数
- φ : y/cx
- $f(\varphi)$: Tollmien によって求められた噴流の速度分布を定める函数

- ΔA : 微小面積
 s : 応力を求める点から, 荷重までの距離
 S_0 : 応力を求める点から, 作用円までの距離
 σ_{rz} : 沿直方向の垂直応力 (Boussinesq の式より)
 σ_r : 半径方向の垂直応力
 σ_θ : 接線方向の垂直応力
 τ_{rz} : せん断応力
 σ_x : 図-2 の G 点に作用する垂直応力
 τ_{xy} : 図-5 の AB 平面に作用するせん断応力
 τ_{zx} : 図-5 の ABC 平面に作用するせん断応力
 A_0 : 図-5, 6 の平面 ABC の面積
 θ : 図-2 において, 応力を求める点 G と荷重の作用する点 Q を結ぶ直線 x が軸となす角度
 σ_z : 図-2 において, G 点に作用する z 軸方向の垂直応力
 A_{mn}' : 数値積分する際, 作用円を分割したとき生ずる微小部分の面積
 m : 数値積分する際, 作用円の半円部分を扇形に分割した分割数
- n : 数値積分する際, 作用円の半円部分を半径方向に分割した分割数
 $\Delta\theta_a$: π/m
 Δs_a : $(a+R)/n$
 K : 1 から n までの整数値
 L : 1 から m までの整数値
 s' : $\Delta s_a/2 + (K-1)\Delta s_a (K=1 \sim n)$
 θ' : $\Delta\theta_a/2 + (L-1)\Delta\theta_a (L=1 \sim m)$
 φ' : $3.4\sqrt{\left(\frac{R}{a}\right)^2 + \left(\frac{s'}{a}\right)^2} - 2\left(\frac{R}{a}\right)\left(\frac{s'}{a}\right)\cos\theta'$
 σ_1 : 岩盤の内部のある点における最大主応力
 σ_2 : 岩盤の内部のある点における中間主応力
 σ_3 : 岩盤の内部のある点における最小主応力
 σ_c : 岩盤のもつ圧縮強度
 σ_t : 岩盤のもつ引張強度
 σ : 主応力
 R : 図-2 において作用円の中心から, 点 G までの距離

(1969.4.5 受付)

附表-1-2 13mmφ ノズル使用の場合噴流が岩盤の各点におよぼす応力, および限界の圧縮強度 σ_c
ノズルからの距離=5.0m ポアソン比=0.25 作用円半径=1.10cm

	ノズルからの距離 (cm)										
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0	
A	σ_x	0.00	-1.74	-4.66	-5.99	-5.69	-4.77	-3.80	-3.01	-2.39	-1.93
	σ_z	87.69	73.53	45.23	22.50	10.02	4.30	1.86	0.83	0.39	0.19
	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	σ_c	88.05	91.26	92.09	82.50	67.04	52.01	39.95	30.93	24.32	19.49
B	σ_x	19.65	19.26	17.09	12.99	8.50	4.93	2.58	1.19	0.41	0.00
	σ_z	88.11	77.97	52.39	28.68	13.85	6.29	2.82	1.28	0.59	0.11
	τ_{xz}	0.00	9.10	12.26	10.09	6.50	3.70	2.00	1.08	0.60	0.34
	σ_c	88.48	79.68	56.47	33.76	18.28	9.41	4.72	2.32	1.12	0.56
C	σ_x	7.24	7.89	9.05	9.19	8.00	6.17	4.39	2.96	1.93	1.24
	σ_z	56.32	51.21	37.92	23.82	13.36	7.02	3.58	1.82	0.93	0.49
	τ_{xz}	0.00	7.52	11.22	10.79	8.28	5.61	3.56	2.20	1.37	0.86
	σ_c	56.55	52.70	41.94	29.66	19.47	12.27	7.60	4.69	3.16	2.27
D	σ_x	2.63	3.28	4.71	5.83	6.06	5.50	4.55	3.54	2.65	1.95
	σ_z	46.13	37.24	29.58	20.64	13.08	7.78	4.46	2.52	1.42	0.82
	τ_{xz}	0.00	5.43	8.73	9.35	8.12	6.23	4.44	3.05	2.07	1.40
	σ_c	40.30	38.24	32.47	25.27	18.50	13.03	8.99	6.82	5.46	4.20
E	σ_x	0.78	1.25	2.37	3.52	4.20	4.30	3.96	3.40	2.79	2.22
	σ_z	29.73	28.05	23.45	17.69	12.31	8.08	5.11	3.16	1.94	1.20
	τ_{xz}	0.00	3.81	6.44	7.43	7.06	5.94	4.64	3.47	2.53	1.83
	σ_c	29.85	28.70	25.37	20.96	16.46	12.97	10.67	8.62	6.90	5.39
F	σ_x	0.02	0.33	1.14	2.07	2.80	3.17	3.19	2.96	2.61	2.21
	σ_z	22.68	21.66	18.79	15.00	11.19	7.93	5.42	3.62	2.38	1.57
	τ_{xz}	0.00	2.70	4.73	5.75	5.83	5.27	4.42	3.53	2.73	2.08
	σ_c	22.77	22.12	20.51	18.39	16.10	13.73	11.45	9.40	7.65	6.11

B=表面からの深さ (cm) A=B/作用円半径 C=応力の種類 D=作用円の中心からの距離 (cm) E=D/作用円半径
 $\sigma_x=x$ 軸方向垂直応力 [kg/cm²] $\sigma_z=z$ 鉛直方向垂直応力 [kg/cm²] τ_{xz} =せん断応力 [kg/cm²]
 σ_c =破壊される岩石の限界の圧縮強度 [kg/cm²]

附表-1-3 13mmφノズル使用の場合噴流が岩盤の各点におよぼす応力, および限界の圧縮強度 σ_0
ノズルからの距離=10.0cm ポアソン比=0.25 作用円半径=2.2cm

A	E											
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	
0.0	σ_z	0.00	-1.08	-2.89	-3.71	-3.53	-2.96	-2.36	-1.87	-1.48	-1.20	-0.98
	σ_r	54.40	45.62	28.06	13.96	6.22	2.67	1.15	0.52	0.24	0.12	0.06
	τ_{rz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	σ_0	54.63	56.62	57.13	51.18	41.59	32.27	24.78	19.19	15.09	12.09	9.85
0.1	σ_z	12.19	11.95	10.61	8.06	5.27	3.06	1.60	0.74	0.26	0.00	-0.13
	σ_r	54.66	48.37	32.50	17.80	8.59	3.90	1.75	0.79	0.37	0.18	0.07
	τ_{rz}	0.00	5.65	7.60	6.26	4.03	2.30	1.24	0.67	0.37	0.21	0.14
	σ_0	54.89	49.43	35.03	20.94	11.34	5.84	2.93	1.44	1.31	1.71	2.16
0.2	σ_z	4.49	4.87	5.62	5.70	4.97	3.83	2.72	1.84	1.20	0.77	0.48
	σ_r	34.94	31.77	23.52	14.78	8.29	4.35	2.22	1.13	0.58	0.31	0.15
	τ_{rz}	0.00	4.67	6.96	6.69	5.14	3.48	2.21	1.37	0.85	0.53	0.35
	σ_0	35.08	32.69	26.02	18.40	12.08	7.61	4.71	2.91	1.96	1.58	1.41
0.3	σ_z	1.63	2.03	2.92	3.62	3.76	3.41	2.82	2.19	1.65	1.21	0.88
	σ_r	24.90	23.10	18.35	12.80	8.11	4.82	2.77	1.56	0.88	0.51	0.29
	τ_{rz}	0.00	3.37	5.42	5.80	5.04	3.87	2.76	1.89	1.29	0.87	0.59
	σ_0	25.00	23.73	20.15	15.68	11.47	8.08	5.57	4.23	3.39	2.61	2.08
0.4	σ_z	0.48	0.77	1.47	2.18	2.60	2.67	2.46	2.11	1.74	1.38	1.08
	σ_r	18.44	17.40	14.55	10.97	7.63	5.01	3.17	1.96	1.21	0.74	0.46
	τ_{rz}	0.00	2.36	4.00	4.61	4.38	3.69	2.88	2.15	1.57	1.13	0.81
	σ_0	18.52	17.80	15.74	13.00	10.21	8.05	6.62	5.35	4.28	3.34	2.65
0.5	σ_z	0.01	0.21	0.71	1.29	1.74	1.96	1.98	1.84	1.62	1.37	1.14
	σ_r	14.07	13.44	11.66	9.30	6.94	4.92	3.36	2.24	1.48	0.97	0.64
	τ_{rz}	0.00	1.67	2.93	3.57	3.62	2.27	2.74	2.19	1.70	1.29	0.97
	σ_0	14.13	13.73	12.73	11.41	9.99	8.52	7.10	5.83	4.75	3.79	3.04

B = 表面からの深さ (cm) A = B/作用円半径 C = 応力の種類 D = 作用円の中心からの距離 (cm) E = D/作用円半径
 $\sigma_x = x$ 軸方向垂直応力 (kg/cm²) $\sigma_z = z$ 軸方向垂直応力 (kg/cm²) $\tau_{rz} = \tau_{rz}$ せん断応力 (kg/cm²)
 $\sigma_0 = \sigma_0$ 破壊される岩石の限界の圧縮強度 (kg/cm²)

附表-1-4 13mmφ ノズル使用の場合噴流が岩盤の各点におよぼす応力, および限界の圧縮強度 σ_c
ノズルからの距離=15.0cm ポアソン比=0.25 作用円半径=3.3cm

	E										0.9	1.0			
	A	B	C	D	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5			0.6	0.7	0.8
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.63	-1.68	-2.16	-2.05	-1.72	-1.37	-1.08	-0.86	-0.70	-0.57
	σ_x	σ_z	τ_{xz}	σ_c	0.00	31.60	26.50	8.11	3.61	1.55	0.67	0.30	0.14	0.07	0.03
					0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
					31.73	30.89	33.19	29.73	24.16	18.74	14.40	11.15	8.76	7.02	5.72
0.1	0.33	7.08	6.94	4.68	3.06	31.75	28.10	18.88	4.99	2.27	1.01	0.46	0.21	0.10	0.04
		σ_x	σ_z	τ_{xz}	σ_c	0.00	3.28	4.42	2.34	1.33	0.72	0.39	0.21	0.12	0.08
						31.89	28.71	20.35	6.59	3.39	1.70	0.84	0.76	0.99	1.26
0.2	0.66	2.61	2.84	3.26	2.88	20.29	18.45	13.66	4.82	2.53	1.29	0.66	0.34	0.18	0.09
		σ_x	σ_z	τ_{xz}	σ_c	0.00	2.71	4.04	2.99	2.02	1.28	0.79	0.49	0.31	0.20
						20.38	18.99	15.11	7.02	4.42	2.74	1.69	1.14	0.92	0.82
0.3	0.99	0.95	1.18	1.70	2.18	14.46	13.42	10.66	4.71	2.80	1.61	0.91	0.51	0.29	0.17
		σ_x	σ_z	τ_{xz}	σ_c	0.00	1.96	3.15	2.93	2.25	1.60	1.10	0.75	0.50	0.35
						14.52	13.78	11.70	6.67	4.69	3.24	2.46	1.97	1.51	1.21
0.4	1.32	0.28	0.45	0.85	1.51	10.71	10.11	8.45	4.43	2.91	1.84	1.14	0.70	0.43	0.27
		σ_x	σ_z	τ_{xz}	σ_c	0.00	1.37	2.32	2.54	2.14	1.67	1.25	0.91	0.66	0.47
						10.76	10.34	9.14	5.93	4.67	3.84	3.11	2.49	1.94	1.54
0.5	1.65	0.01	0.12	0.41	1.01	8.17	7.81	6.77	4.03	2.86	1.95	1.30	0.86	0.57	0.37
		σ_x	σ_z	τ_{xz}	σ_c	0.00	0.97	1.70	2.10	1.90	1.59	1.27	0.98	0.75	0.56
						8.21	7.97	7.39	5.80	4.95	4.12	3.39	2.76	2.20	1.76

B=表面からの深さ (cm) A=B/作用円半径 C=応力の種類 D=作用円の中心からの距離 (cm) E=D/作用円半径
 σ_x =x軸方向垂直応力 (kg/cm²) σ_z =鉛直方向垂直応力 (kg/cm²) τ_{xz} =せん断応力 (kg/cm²)
 σ_c =破碎される岩石の限界の圧縮強度 (kg/cm²)

附 添

附表-1-5 13 mmφ / ズル使用の場合噴流が岩盤の各点におよぼす応力, および限界の圧縮強度 σ_c
 / ズルからの距離=20.0cm ポアソン比=0.25 作用円半径=4.4cm

A	E										
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0	σ_x	0.00	0.44	0.88	1.32	1.76	2.20	2.64	3.08	3.52	4.40
	σ_z	0.00	-0.45	-1.21	-1.56	-1.48	-1.24	-0.99	-0.78	-0.62	-0.41
	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	σ_c	22.80	19.12	11.76	5.85	2.61	1.12	0.48	0.22	0.10	0.02
0.1	σ_x	0.00	0.44	0.88	1.32	1.76	2.20	2.64	3.08	3.52	4.40
	σ_z	0.00	5.01	4.44	3.38	2.21	1.28	0.67	0.31	0.11	0.00
	τ_{xz}	0.00	20.27	13.62	7.46	3.60	1.64	0.73	0.33	0.15	0.07
	σ_c	22.90	23.73	23.94	21.45	17.43	13.52	10.39	8.04	6.32	5.07
0.2	σ_x	0.00	0.44	0.88	1.32	1.76	2.20	2.64	3.08	3.52	4.40
	σ_z	0.00	2.05	2.35	2.39	2.08	1.60	1.14	0.77	0.50	0.20
	τ_{xz}	0.00	13.31	9.86	6.19	3.47	1.82	0.93	0.47	0.24	0.06
	σ_c	14.70	13.70	10.91	7.71	5.06	3.19	1.97	1.22	0.82	0.59
0.3	σ_x	0.00	0.44	0.88	1.32	1.76	2.20	2.64	3.08	3.52	4.40
	σ_z	0.00	0.85	1.22	1.52	1.58	1.43	1.18	0.92	0.69	0.37
	τ_{xz}	0.00	9.68	7.69	5.37	3.40	2.02	1.16	0.66	0.37	0.12
	σ_c	10.43	10.48	8.44	6.57	4.81	3.39	2.34	1.77	1.42	1.09
0.4	σ_x	0.00	0.44	0.88	1.32	1.76	2.20	2.64	3.08	3.52	4.40
	σ_z	0.00	0.32	0.62	0.91	1.09	1.12	1.03	0.88	0.73	0.45
	τ_{xz}	0.00	7.29	6.10	4.60	3.20	2.10	1.33	0.82	0.51	0.19
	σ_c	7.73	7.76	6.60	5.45	4.28	3.37	2.77	2.24	1.79	1.40
0.5	σ_x	0.00	0.44	0.88	1.32	1.76	2.20	2.64	3.08	3.52	4.40
	σ_z	0.00	0.09	0.30	0.54	0.73	0.82	0.83	0.77	0.68	0.48
	τ_{xz}	0.00	5.63	4.89	3.90	2.91	2.06	1.41	0.94	0.62	0.27
	σ_c	5.90	5.92	5.33	4.78	4.19	3.57	2.98	2.44	1.99	1.27

B=表面からの深さ (cm) A=B/作用円半径 C=応力の種類 D=作用円の中心からの距離 (cm) E=D/作用円半径
 $\sigma_x = x$ 軸方向垂直応力 (kg/cm²) $\sigma_z = z$ 鉛直方向垂直応力 (kg/cm²) $\tau_{xz} = \tau_{zx}$ せん断応力 (kg/cm²)
 $\sigma_c = \sigma_c$ 破砕される岩石の限界の圧縮強度 (kg/cm²)

附 録

附表-1-6 13mmφノズル使用の場合噴流が岩盤の各点におよぼす応力，および限界の圧縮強度 σ_c
ノズルからの距離=25.0cm ポアソン比=0.25 作用円半径=5.5cm

	E														
	A	B	C	D	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.31	-0.82	-1.05	-1.00	-0.84	-0.67	-0.53	-0.42	-0.34	-0.28
	σ_x	σ_z	τ_{xz}	σ_c	σ_x	15.40	7.94	3.95	1.76	0.76	0.33	0.15	0.07	0.03	0.02
0.1	0.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	σ_x	σ_z	τ_{xz}	σ_c	σ_x	15.46	16.17	14.49	11.77	9.13	7.02	5.43	4.27	3.42	2.79
0.2	1.10	0.00	0.00	0.00	0.00	3.38	3.00	2.28	1.49	0.87	0.45	0.21	0.07	0.00	-0.04
	σ_x	σ_z	τ_{xz}	σ_c	σ_x	15.47	9.20	5.04	2.43	1.10	0.49	0.22	0.10	0.05	0.02
0.3	1.65	0.00	0.00	0.00	0.00	1.60	2.15	1.77	1.14	0.65	0.35	0.19	0.10	0.06	0.04
	σ_x	σ_z	τ_{xz}	σ_c	σ_x	15.54	9.92	5.93	3.21	1.65	0.83	0.41	0.37	0.48	0.61
0.4	2.20	0.00	0.00	0.00	0.00	1.38	1.59	1.61	1.41	1.08	0.77	0.52	0.34	0.22	0.14
	σ_x	σ_z	τ_{xz}	σ_c	σ_x	9.89	6.66	4.18	2.35	1.23	0.63	0.32	0.16	0.09	0.04
0.5	2.75	0.00	0.00	0.00	0.00	1.32	1.97	1.89	1.45	0.98	0.62	0.39	0.24	0.15	0.10
	σ_x	σ_z	τ_{xz}	σ_c	σ_x	9.93	7.37	5.21	3.42	2.15	1.33	0.82	0.55	0.45	0.40
						0.46	0.83	1.02	1.06	0.97	0.80	0.62	0.47	0.34	0.25
						7.05	5.19	3.62	2.30	1.37	0.78	0.44	0.25	0.14	0.08
						0.00	1.53	1.64	1.43	1.09	0.78	0.54	0.36	0.25	0.17
						7.08	5.70	4.44	3.25	2.29	1.58	1.20	0.96	0.74	0.59
						0.14	0.42	0.62	0.74	0.75	0.70	0.60	0.49	0.39	0.31
						5.22	4.12	3.11	2.16	1.42	0.90	0.56	0.34	0.21	0.13
						0.00	1.13	1.30	1.24	1.04	0.82	0.61	0.44	0.32	0.23
						5.24	4.46	3.68	2.89	2.28	1.87	1.51	1.21	0.95	0.75
						0.00	0.20	0.36	0.49	0.56	0.56	0.52	0.46	0.39	0.32
						3.98	3.30	2.63	1.97	1.39	0.95	0.64	0.42	0.28	0.18
						0.00	0.83	1.01	1.02	0.93	0.78	0.62	0.48	0.36	0.27
						4.00	3.60	3.23	2.83	2.41	2.01	1.65	1.34	1.07	0.86

B=表面からの深さ (cm) A=B/作用円半径 C=応力の種類 D=作用円の中心からの距離 (cm) E=D/作用円半径
 $\sigma_x = x$ 軸方向垂直応力 (kg/cm²) $\sigma_z = z$ 鉛直方向垂直応力 (kg/cm²) τ_{xz} =せん断応力 (kg/cm²)
 σ_c =破壊される岩石の限界の圧縮強度 (kg/cm²)

器

器

附表-1-7 11mmφノズル使用の場合噴流が岩盤の各点におよぼす応力、および限界の圧縮強度 σ_c
ノズルからの距離=1.0cm ポアソン比=0.25 作用円半径=0.8cm

	距離 (cm)											
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	
E A B C D	σ_x	0.00	4.96	-1.77	-2.20	-2.75	5.02	-11.18	-7.67	-8.63	-6.17	-5.84
	σ_z	53.39	53.39	53.39	53.39	53.39	71.83	2.55	0.37	0.00	0.00	0.00
	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	σ_c	53.62	53.62	71.35	75.60	81.16	72.13	114.48	77.11	86.40	61.76	58.40
0.1	σ_x	29.33	28.89	28.55	28.56	24.95	18.67	16.00	9.95	4.87	1.34	-0.36
	σ_z	59.87	61.35	62.91	65.18	72.51	77.72	34.16	4.21	1.34	0.35	0.10
	τ_{xz}	0.00	0.21	0.26	-0.53	-1.17	9.51	21.92	3.60	3.60	1.49	0.62
	σ_c	60.13	61.60	63.17	65.46	72.85	79.54	49.01	24.66	16.13	9.74	8.47
0.2	σ_x	21.06	20.19	19.85	18.31	14.61	11.34	12.91	12.78	9.41	6.19	3.36
	σ_z	53.63	53.78	54.37	55.91	55.64	51.29	28.30	10.82	4.79	1.90	0.66
	τ_{xz}	0.00	0.85	1.67	2.29	6.29	13.96	17.59	12.78	7.72	4.34	2.13
	σ_c	53.85	54.02	54.68	56.28	56.82	55.92	39.97	34.90	84.83	16.85	9.69
0.3	σ_x	13.81	12.86	12.79	11.50	9.86	9.33	10.70	11.20	9.69	7.85	5.53
	σ_z	50.56	50.19	50.24	50.21	46.16	39.64	25.64	14.33	7.71	4.03	1.71
	τ_{xz}	0.00	1.63	3.48	5.29	9.65	14.24	15.83	13.46	9.54	6.53	3.80
	σ_c	50.77	50.47	50.78	51.13	48.77	45.48	35.83	34.22	27.31	21.40	14.22
0.4	σ_x	8.49	7.71	8.04	7.40	7.08	7.62	8.67	9.29	8.71	7.81	6.39
	σ_z	46.57	45.79	45.40	44.27	39.19	33.23	23.70	15.51	9.56	5.88	2.98
	τ_{xz}	0.00	2.15	4.65	6.77	10.42	13.27	14.10	12.69	9.96	7.62	5.13
	σ_c	46.76	46.10	46.17	45.67	42.45	39.03	32.30	32.22	27.49	22.99	17.26
0.5	σ_x	4.91	4.37	4.98	4.83	5.14	6.09	6.94	7.57	7.44	7.09	6.41
	σ_z	41.84	40.81	40.25	38.64	33.77	28.83	21.89	15.61	10.58	7.16	4.20
	τ_{xz}	0.00	2.32	5.02	7.04	9.95	11.94	12.44	11.56	9.67	7.92	5.96
	σ_c	42.01	41.13	41.12	40.21	37.05	34.09	30.06	30.41	26.74	23.06	18.91

B=表面からの深さ (cm) A=B/作用円半径 C=応力の種類 D=作用円の中心からの距離 (cm) E=D/作用円半径
 $\sigma_x = x$ 軸方向垂直応力 (kg/cm²) $\sigma_z = z$ 鉛直方向垂直応力 (kg/cm²) $\tau_{xz} = \tau_{zx}$ せん断応力 (kg/cm²)
 $\sigma_c = \sigma_c$ 破壊される岩石の限界の圧縮強度 (kg/cm²)

哥 機

附表-I-8 11mmφ ノズル使用の場合噴流が岩盤の各点におよぼす応力，および限界の圧縮強度 σ_c
ノズルからの距離=5.0cm ポンプ比=0.25 作用円半径=1.10cm

	ノズルからの距離=5.0cm											
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	
E A B C D	σ_x	0.00	-2.12	-5.68	-7.29	-6.93	-5.80	-4.63	-3.66	-2.91	-2.35	-1.92
	σ_z	106.79	89.55	55.08	27.40	12.20	5.24	2.27	1.01	0.47	0.23	0.12
	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	σ_c	107.24	111.14	112.15	100.47	81.65	63.34	48.65	37.67	29.62	23.73	19.33
0.1	σ_x	23.93	23.46	20.82	15.82	10.35	6.00	3.14	1.45	0.50	0.00	-0.26
	σ_z	107.31	94.95	63.81	34.93	16.86	7.66	3.43	1.55	0.72	0.35	0.13
	τ_{xz}	0.00	11.09	14.93	12.29	7.91	4.51	2.44	1.31	0.73	0.41	0.27
	σ_c	107.76	97.04	68.77	41.11	22.26	11.46	5.75	2.83	2.58	3.35	4.25
0.2	σ_x	8.82	9.60	11.03	11.20	9.75	7.52	5.34	3.61	2.36	1.51	0.94
	σ_z	68.58	62.36	46.18	29.01	16.27	8.54	4.36	2.22	1.14	0.60	0.29
	τ_{xz}	0.00	9.16	13.17	13.14	10.09	6.83	4.33	2.68	1.67	1.05	0.68
	σ_c	68.87	64.18	51.08	36.12	23.71	14.94	9.25	5.71	3.84	3.09	2.77
0.3	σ_x	3.20	3.99	5.73	7.10	7.38	6.70	5.54	4.31	3.23	2.37	1.72
	σ_z	48.87	45.35	36.02	25.14	15.93	9.47	5.43	3.07	1.73	0.99	0.56
	τ_{xz}	0.00	6.61	10.64	11.39	9.89	7.59	5.41	3.72	2.52	1.71	1.17
	σ_c	49.07	46.58	39.55	30.77	22.53	15.86	10.94	8.31	6.65	5.12	4.08
0.4	σ_x	0.95	1.52	2.89	4.28	5.11	5.23	4.82	4.14	3.40	2.71	2.12
	σ_z	36.20	34.16	28.56	21.54	14.99	9.84	6.22	3.85	2.37	1.46	0.90
	τ_{xz}	0.00	4.64	7.85	9.05	8.59	7.24	5.65	4.22	3.08	2.22	1.59
	σ_c	36.35	34.95	30.90	25.52	20.04	15.80	12.99	10.49	8.40	6.56	5.19
0.5	σ_x	0.02	0.40	1.39	2.53	3.41	3.86	3.88	3.61	3.18	2.70	2.23
	σ_z	27.62	26.38	22.88	18.26	13.63	9.66	6.60	4.41	2.90	1.91	1.25
	τ_{xz}	0.00	3.28	5.76	7.00	7.10	6.42	5.38	4.30	3.33	2.53	1.90
	σ_c	27.73	26.94	24.98	22.40	19.60	16.72	13.94	11.45	9.32	7.44	5.96

B=表面からの深さ (cm) A=B/作用円半径 C=応力の種類 D=作用円の中心からの距離 (cm) E=D/作用円半径
 $\sigma_x = x$ 軸方向垂直応力 (kg/cm²) $\sigma_z = z$ 鉛直方向垂直応力 (kg/cm²) τ_{xz} =せん断応力 (kg/cm²) σ_c = 破壊される岩石の限界の圧縮強度 (kg/cm²)

寄

来

附表-1-9 11mmφノズル使用の場合噴流が岩盤の各点におよぼす応力, および限界の圧縮強度 σ_c
ノズルからの距離=1.0cm ボアソン比=0.25 作用円半径=2.20cm

	E										0.9	1.0				
	A	B	C	D	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5			0.6	0.7	0.8	0.9
0.0	σ_x	σ_z	τ_{xz}	σ_c	0.00	-1.66	-4.45	-5.72	-5.44	-4.55	-3.63	-2.87	-2.28	-1.84		-1.51
					83.76	70.24	43.20	21.49	9.57	4.11	1.78	0.79	0.37	0.18		0.09
					0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00
					84.11	87.17	87.96	78.80	64.04	49.68	38.16	29.55	23.23	18.62		15.16
0.1	σ_x	σ_z	τ_{xz}	σ_c	18.77	18.40	16.33	12.41	8.12	4.71	2.46	1.14	0.39	0.00		-0.21
					84.17	74.48	50.05	27.40	13.23	6.01	2.69	1.22	0.57	0.27		0.10
					0.00	8.69	11.71	9.14	6.21	3.53	1.91	1.03	0.57	0.32		0.21
					84.52	76.11	53.94	32.25	17.46	8.99	4.51	2.22	2.02	3.63		3.33
0.2	σ_x	σ_z	τ_{xz}	σ_c	6.92	7.53	8.65	8.78	7.64	5.89	4.19	2.83	1.85	1.18		0.74
					53.79	48.91	36.22	22.75	12.76	6.70	3.42	1.74	0.89	0.47		0.23
					0.00	7.19	10.72	10.30	7.91	5.36	3.40	2.10	1.31	0.82		0.54
					54.02	50.34	40.06	28.33	18.60	11.72	7.25	4.48	3.01	2.43		2.17
0.3	σ_x	σ_z	τ_{xz}	σ_c	2.51	3.13	4.50	5.57	5.79	5.25	4.34	3.38	2.53	1.86		1.35
					38.33	35.57	28.25	19.71	12.49	7.43	4.26	2.41	1.36	0.78		0.44
					0.00	5.19	8.34	8.93	7.76	5.95	4.25	2.92	1.98	1.34		0.92
					38.49	36.53	31.02	24.13	17.67	12.44	8.58	6.52	5.22	4.01		3.20
0.4	σ_x	σ_z	τ_{xz}	σ_c	0.75	1.19	2.27	3.36	4.01	4.10	3.78	3.25	2.67	2.12		1.66
					28.39	26.79	22.40	16.89	11.75	7.72	4.88	3.02	1.86	1.15		0.71
					0.00	3.64	6.15	7.10	6.74	5.68	4.43	3.31	2.41	1.74		1.25
					28.51	27.41	24.23	20.02	15.72	12.39	10.19	8.23	6.59	5.15		4.07
0.5	σ_x	σ_z	τ_{xz}	σ_c	0.02	0.32	1.09	1.98	2.68	3.03	3.04	2.83	2.49	2.12		1.75
					21.66	20.69	17.95	14.33	10.69	7.57	5.18	3.46	2.28	1.50		0.98
					0.00	2.58	4.51	5.49	5.57	5.03	4.22	3.37	2.61	1.98		1.49
					21.75	21.13	19.60	17.57	15.38	13.12	10.93	8.98	7.31	5.84		4.68

B = 表面からの深さ (cm) A = B/作用円半径 C = 応力の種類 D = 作用円の中心からの距離 (cm) E = D/作用円半径

$\sigma_x = x$ 軸方向垂直応力 (kg/cm²) $\sigma_z = z$ 鉛直方向垂直応力 (kg/cm²) $\tau_{xz} =$ せん断応力 (kg/cm²)

$\sigma_c =$ 破砕される岩石の限界の圧縮強度 (kg/cm²)

等

差

附表-1-10 11mmφ ノズル使用の場合噴流が岩盤の各点におよぼす応力, および限界の圧縮強度 σ_c
ノズルからの距離=15.0cm ポアソン比=0.25 作用円半径=3.30cm

	E										0.9	1.0			
	A	B	C	D	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5			0.6	0.7	0.8
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-1.02	-2.73	-3.50	-3.33	-2.79	-2.23	-1.76	-1.40	-1.13	-0.92
	σ_x	σ_z	τ_{xz}	σ_c	σ_x	σ_z	τ_{xz}	σ_c	σ_x	σ_z	τ_{xz}	σ_c	σ_x	σ_z	τ_{xz}
0.1	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	43.01	26.46	13.16	5.86	2.52	1.09	0.49	0.23	0.11	0.06
	σ_x	σ_z	τ_{xz}	σ_c	σ_x	σ_z	τ_{xz}	σ_c	σ_x	σ_z	τ_{xz}	σ_c	σ_x	σ_z	τ_{xz}
0.2	0.66	0.00	0.00	0.00	0.00	53.38	53.87	48.26	39.22	30.43	23.37	18.09	14.23	11.40	9.29
	σ_x	σ_z	τ_{xz}	σ_c	σ_x	σ_z	τ_{xz}	σ_c	σ_x	σ_z	τ_{xz}	σ_c	σ_x	σ_z	τ_{xz}
0.3	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00	46.61	33.03	19.75	10.69	5.50	2.76	1.36	1.24	1.61	2.04
	σ_x	σ_z	τ_{xz}	σ_c	σ_x	σ_z	τ_{xz}	σ_c	σ_x	σ_z	τ_{xz}	σ_c	σ_x	σ_z	τ_{xz}
0.4	1.32	0.00	0.00	0.00	0.00	4.61	5.30	5.38	4.68	3.61	2.57	1.73	1.13	0.72	0.45
	σ_x	σ_z	τ_{xz}	σ_c	σ_x	σ_z	τ_{xz}	σ_c	σ_x	σ_z	τ_{xz}	σ_c	σ_x	σ_z	τ_{xz}
0.5	1.65	0.00	0.00	0.00	0.00	29.95	22.18	13.93	7.82	4.10	2.09	1.06	0.55	0.29	0.14
	σ_x	σ_z	τ_{xz}	σ_c	σ_x	σ_z	τ_{xz}	σ_c	σ_x	σ_z	τ_{xz}	σ_c	σ_x	σ_z	τ_{xz}
						4.40	6.57	6.31	4.85	3.28	2.08	1.29	0.80	0.50	0.33
						30.83	24.53	17.35	11.39	7.18	4.44	2.74	1.85	1.49	1.33
						1.92	2.75	3.41	3.55	3.22	2.66	2.07	1.55	1.14	0.83
						21.78	17.30	12.07	7.65	4.55	2.61	1.47	0.83	0.48	0.27
						3.18	5.11	5.47	4.75	3.65	2.60	1.79	1.21	0.82	0.56
						22.37	19.00	14.78	10.82	7.62	5.26	3.99	3.19	2.46	1.96
						0.73	1.39	2.06	2.45	2.51	2.32	1.99	1.63	1.30	1.02
						16.41	13.72	10.35	7.20	4.73	2.99	1.85	1.14	0.70	0.43
						2.23	3.77	4.35	4.13	3.48	2.72	2.03	1.48	1.06	0.77
						16.79	14.84	12.26	9.63	7.59	6.24	5.04	4.04	3.15	2.49
						0.19	0.67	1.21	1.64	1.85	1.86	1.73	1.53	1.30	1.07
						12.67	10.99	8.77	6.55	4.64	3.17	2.12	1.39	0.92	0.60
						1.58	2.76	3.36	3.41	3.08	2.58	2.06	1.60	1.21	0.91
						12.94	12.00	10.76	9.42	8.03	6.70	5.50	4.47	3.57	2.86

B = 表面からの深さ (cm) A = B / 作用円半径 C = 応力の種類 D = 作用円の中心からの距離 (cm) E = D / 作用円半径
 $\sigma_x = x$ 軸方向垂直応力 (kg/cm²) $\sigma_z = z$ 鉛直方向垂直応力 (kg/cm²) $\tau_{xz} = \tau_{xz}$ せん断応力 (kg/cm²)
 $\sigma_c = \sigma_c$ 破碎される岩石の限界の圧縮強度 (kg/cm²)

附 表

附表-1-11 11mmφ / ズル使用の場合噴流が岩盤の各点におよぼす応力, および限界の圧縮強度 σ_c
 / ズルからの距離 = 20.0cm ポゾン比 = 0.25 作用円半径 = 4.40cm

	E										0.9	1.0						
	A	B	C	D	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5			0.6	0.7	0.8			
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.58	-1.54	-1.98	-1.88	-1.58	-1.26	-0.99	-0.79	-0.64	0.06	0.08	0.00	5.25
0.1	0.44	0.00	0.00	0.00	0.00	5.37	5.65	4.29	2.81	1.63	0.85	0.39	0.14	0.00	0.09	0.04	0.07	1.15
0.2	0.88	0.00	0.00	0.00	0.00	16.92	17.32	9.48	4.58	2.08	0.93	0.42	0.20	0.20	0.11	0.07	0.70	0.25
0.3	1.32	0.00	0.00	0.00	0.00	24.99	25.78	11.16	2.65	1.22	0.66	0.36	0.20	0.45	0.28	0.19	1.04	0.75
0.4	1.76	0.00	0.00	0.00	0.00	30.17	30.44	18.67	2.74	0.85	0.51	0.25	0.70	0.84	0.84	0.75	1.81	1.11
0.5	2.20	0.00	0.00	0.00	0.00	30.17	30.44	18.67	2.74	0.85	0.51	0.25	0.70	0.84	0.84	0.75	1.81	1.11
		0.01	0.01	0.01	0.01	1.08	1.56	1.93	2.00	1.82	1.50	1.17	0.88	0.64	0.47	0.32	0.28	0.25
		7.50	7.50	7.50	7.50	12.31	12.53	7.87	4.32	2.57	1.47	0.83	0.47	0.27	0.15	0.08	0.08	0.08
		0.00	0.00	0.00	0.00	1.79	2.89	3.09	2.69	2.06	1.47	1.01	0.68	0.46	0.32	0.19	0.19	0.19
		7.53	7.53	7.53	7.53	12.64	13.87	9.81	6.44	4.06	2.51	1.55	1.04	0.64	0.47	0.32	0.28	0.25
		0.26	0.41	0.41	0.41	0.41	0.78	1.16	1.39	1.42	1.31	1.13	0.92	0.74	0.58	0.47	0.43	0.43
		9.83	9.27	9.27	9.27	9.27	7.75	5.85	4.07	2.67	1.69	1.05	0.64	0.40	0.24	0.15	0.15	0.15
		0.00	1.26	1.26	1.26	1.26	2.13	2.46	2.33	1.96	1.53	1.15	0.84	0.60	0.43	0.32	0.28	0.25
		9.87	9.49	9.49	9.49	9.49	8.39	6.93	5.44	4.29	3.53	2.85	2.28	1.78	1.41	1.11	0.91	0.91
		0.01	0.11	0.11	0.11	0.11	0.38	0.69	0.93	1.05	1.05	0.98	0.86	0.73	0.61	0.52	0.52	0.52
		7.50	7.16	7.16	7.16	7.16	6.21	4.96	3.70	2.62	1.79	1.20	0.79	0.52	0.34	0.24	0.19	0.19
		0.00	0.89	0.89	0.89	0.89	1.56	1.90	1.93	1.74	1.46	1.17	0.90	0.69	0.52	0.43	0.32	0.28
		7.53	7.31	7.31	7.31	7.31	6.78	6.08	5.32	4.54	3.78	3.11	2.53	2.02	1.62	1.41	1.11	0.91

B = 表面からの深さ (cm) A = B / 作用円半径 C = 応力の種類 D = 作用円の中心からの距離 (cm) E = D / 作用円半径
 $\sigma_x = x$ 軸方向垂直応力 (kg/cm²) $\sigma_z = z$ 鉛直方向垂直応力 (kg/cm²) $\tau_{xz} =$ せん断応力 (kg/cm²)
 $\sigma_c =$ 破壊される岩石の限界の圧縮強度 (kg/cm²)

三

六

附表-1-12 11mmφ / ズル使用の場合噴流が岩盤の各点におよぼす応力, および限界の圧縮強度 σ_c
 / ズルからの距離=25.0cm ポアソン比=0.25 作用円半径=5.50cm

	E										
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
A	D										
	0.0	0.5	1.1	1.6	2.2	2.7	3.3	3.8	4.4	4.9	5.5
0.0	C										
	σ_x	-0.34	-0.91	-1.17	-1.11	-0.93	-0.74	-0.59	-0.47	-0.38	-0.31
0.0	σ_z	17.07	8.80	4.38	1.95	0.84	0.36	0.16	0.08	0.04	0.02
	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.0	σ_c	17.14	17.93	16.06	13.05	10.13	7.78	6.02	4.73	3.79	3.09
	σ_x	3.82	3.75	3.33	2.53	1.65	0.96	0.50	0.23	0.08	-0.04
0.1	σ_z	17.15	15.18	10.20	5.58	2.70	1.22	0.55	0.12	0.06	0.02
	τ_{xz}	0.00	1.77	2.39	1.96	1.27	0.72	0.39	0.12	0.12	0.04
0.1	σ_c	17.22	15.51	10.99	6.57	3.56	1.83	0.92	0.41	0.54	0.68
	σ_x	1.41	1.53	1.76	1.79	1.56	1.20	0.85	0.58	0.38	0.24
0.2	σ_z	10.96	9.97	7.38	4.64	2.60	1.37	0.70	0.18	0.10	0.05
	τ_{xz}	0.00	1.46	2.18	2.10	1.61	1.09	0.69	0.27	0.17	0.11
0.2	σ_c	11.01	10.26	8.16	5.77	3.79	2.39	1.48	0.61	0.49	0.44
	σ_x	0.51	0.64	0.92	1.14	1.18	1.07	0.89	0.69	0.52	0.27
0.3	σ_z	7.81	7.25	5.76	4.02	2.55	1.51	0.87	0.28	0.16	0.09
	τ_{xz}	0.00	1.06	1.70	1.82	1.58	1.21	0.87	0.40	0.27	0.19
0.3	σ_c	7.84	7.44	6.32	4.92	3.60	2.54	1.75	1.06	0.82	0.65
	σ_x	0.15	0.24	0.46	0.68	0.82	0.84	0.77	0.54	0.43	0.34
0.4	σ_z	5.79	5.46	4.56	3.44	2.40	1.57	0.99	0.38	0.23	0.14
	τ_{xz}	0.00	0.74	1.25	1.45	1.37	1.16	0.90	0.49	0.35	0.25
0.4	σ_c	5.81	5.59	4.94	4.08	3.20	2.52	2.08	1.34	1.05	0.83
	σ_x	0.00	0.06	0.22	0.40	0.55	0.62	0.62	0.51	0.43	0.36
0.5	σ_z	4.41	4.22	3.66	2.92	2.18	1.54	1.05	0.46	0.31	0.20
	τ_{xz}	0.00	0.52	0.92	1.12	1.13	1.03	0.86	0.53	0.40	0.30
0.5	σ_c	4.43	4.31	3.99	3.58	3.13	2.67	2.23	1.49	1.19	0.95
	σ_x										

B=表面からの深さ (cm) A=B/作用円半径 C=応力の種類 D=作用円の中心からの距離 (cm) E=D/作用円半径
 $\sigma_x = x$ 軸方向垂直応力 (kg/cm²) $\sigma_z = z$ 鉛直方向垂直応力 (kg/cm²) $\tau_{xz} = \tau_{zx}$ せん断応力 (kg/cm²)
 $\sigma_c = \sigma_{c0}$ 破碎せられる岩石の限界の圧縮強度 (kg/cm²)

寄 表

附表-2-1 ノズルからの各距離における岩盤の表面に生ずる各応力，および限界の圧縮強度 (13mmφ ノズル使用の場合)

ポアソン比 0.10 の場合

1	2				3				4			
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	
5.0	σ_x	0.00	-2.79	-7.46	-9.58	-9.11	-7.63	-6.09	-4.81	-3.83	-3.09	-2.52
	σ_z	87.69	73.53	45.23	22.50	10.02	4.30	1.86	0.83	0.39	0.19	0.10
	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	σ_c	88.05	101.71	120.09	118.44	101.23	80.63	62.79	48.99	38.68	31.07	25.34
10.0	σ_x	0.00	-1.73	-4.63	-5.94	-5.65	-4.73	-3.78	-2.98	-2.37	-1.91	-1.56
	σ_z	54.38	45.60	28.05	13.95	6.21	2.67	1.15	0.52	0.24	0.12	0.06
	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	σ_c	54.61	63.07	74.47	73.45	62.78	50.00	38.94	30.38	23.98	19.27	15.72
15.0	σ_x	0.00	-1.01	-2.69	-3.46	-3.29	-2.75	-2.20	-1.74	-1.38	-1.11	-0.91
	σ_z	31.66	26.55	16.33	8.12	3.62	1.55	0.67	0.30	0.14	0.07	0.03
	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	σ_c	31.79	36.72	43.36	42.76	36.55	29.11	22.67	17.69	13.96	11.22	9.15
20.0	σ_x	0.00	-0.72	-1.93	-2.48	-2.36	-1.98	-1.58	-1.25	-0.99	-0.80	-0.65
	σ_z	22.37	19.06	11.73	5.83	2.60	1.11	0.48	0.22	0.10	0.05	0.02
	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	σ_c	22.83	26.37	31.13	30.71	26.24	20.90	16.28	12.70	10.03	8.05	6.57
25.0	σ_x	0.00	-0.46	-1.24	-1.59	-1.51	-1.27	-1.01	-0.80	-0.64	-0.51	-0.42
	σ_z	14.58	12.23	7.52	3.74	1.67	0.72	0.31	0.14	0.06	0.03	0.02
	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	σ_c	14.64	16.91	19.97	19.69	16.83	13.41	10.44	8.15	6.43	5.17	4.21
30.0	σ_x	0.00	-0.33	-0.89	-1.15	-1.09	-0.91	-0.73	-0.58	-0.46	-0.37	-0.30
	σ_z	10.51	8.82	5.42	2.70	1.20	0.52	0.22	0.10	0.05	0.02	0.01
	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	σ_c	10.56	12.20	14.40	14.20	12.14	9.67	7.53	5.87	4.64	3.73	3.04

1 ノズルと岩盤の距離 (cm)
 2 作用円半径 (cm)
 3 応力の種類
 4 (作用円中心からの距離)/(作用円半径)

単位

附表-2-2 ノズルからの各距離における岩盤の表面に生ずる各応力，および限界の圧縮強度 (13 mmφ ノズル使用の場合)
ポアソン比 0.15 の場合

1	4				0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
	2	3	σ_x	σ_z											
5.0	1.10		0.00		0.00	-2.44	-6.53	-8.38	-7.97	-6.67	-5.33	-4.21	-3.35	-2.70	-2.21
			87.69		87.69	73.53	45.23	22.50	10.02	4.30	1.86	0.83	0.39	0.19	0.10
			0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
			88.05		88.05	98.23	110.75	106.46	89.84	71.09	55.18	42.97	33.89	27.21	22.19
10.0			0.00		0.00	-1.51	-4.05	-5.20	-4.94	-4.14	-3.30	-2.61	-2.08	-1.67	-1.37
	2.20		54.38		54.38	45.60	28.05	13.95	6.21	2.67	1.15	0.52	0.24	0.12	0.06
			0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
			54.61		54.61	60.91	68.68	66.02	55.71	44.09	34.22	26.65	21.02	16.87	13.76
15.0			0.00		0.00	-0.88	-2.36	-3.03	-2.88	-2.41	-1.92	-1.52	-1.21	-0.97	-0.80
	3.30		31.66		31.66	26.55	16.33	8.12	3.62	1.55	0.67	0.30	0.14	0.07	0.03
			0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
			31.79		31.79	35.46	39.99	38.44	32.43	25.67	19.92	15.51	12.24	9.82	8.01
20.0			0.00		0.00	-0.63	-1.69	-2.17	-2.07	-1.73	-1.38	-1.09	-0.87	-0.70	-0.57
	4.40		22.73		22.73	19.06	11.73	5.83	2.60	1.11	0.48	0.22	0.10	0.05	0.02
			0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
			22.83		22.83	25.47	28.71	27.60	23.29	18.43	14.30	11.14	8.79	7.05	5.75
25.0			0.00		0.00	-0.41	-1.09	-1.39	-1.33	-1.11	-0.89	-0.70	-0.56	-0.45	-0.37
	5.50		14.58		14.58	12.23	7.52	3.74	1.67	0.72	0.31	0.14	0.06	0.03	0.02
			0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
			14.64		14.64	16.33	18.42	17.70	14.94	11.82	9.17	7.14	5.64	4.52	3.69
30.0			0.00		0.00	-0.29	-0.78	-1.00	-0.96	-0.80	-0.64	-0.50	-0.40	-0.32	-0.26
	6.60		10.51		10.51	8.82	5.42	2.70	1.20	0.52	0.22	0.10	0.05	0.02	0.01
			0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
			10.56		10.56	11.78	13.28	12.77	10.77	8.52	6.62	5.15	4.06	3.26	2.66

1 ノズルと岩盤の距離 (cm)

2 作用円半径 (cm)

3 応力の種類

4 (作用円中心からの距離)/(作用円半径)

附表-2-3 ノズルからの各距離における岩盤の表面に生ずる各応力, および限界の圧縮強度 (13mmφ / ズル使用の場合)

ポアソン比 0.20 の場合

1	4				0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
	1	2	3	4											
5.0	σ_z				0.00	-5.60	-7.18	-6.83	-5.72	-4.57	-3.61	-2.87	-2.31	-1.89	
	σ_r	1.10			87.69	45.23	22.50	10.02	4.30	1.86	0.83	0.39	0.19	0.10	
	τ_{rz}				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	σ_c				88.05	101.42	94.48	78.44	61.55	47.56	36.95	29.10	23.35	19.03	
10.0	σ_z				0.00	-3.47	-4.45	-4.24	-3.55	-2.83	-2.24	-1.78	-1.44	-1.17	
	σ_r	2.20			54.38	28.05	13.95	6.21	2.67	1.15	0.52	0.24	0.12	0.06	
	τ_{rz}				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	σ_c				54.61	62.89	58.59	48.64	38.17	29.49	22.91	18.05	14.48	11.80	
15.0	σ_z				0.00	-2.02	-2.59	-2.47	-2.07	-1.65	-1.30	-1.04	-0.84	-0.68	
	σ_r	3.30			31.66	16.33	8.12	3.62	1.55	0.67	0.30	0.14	0.07	0.03	
	τ_{rz}				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	σ_c				31.79	36.62	34.11	28.32	22.22	17.17	13.34	10.51	8.43	6.87	
20.0	σ_z				0.00	-1.45	-1.86	-1.77	-1.48	-1.18	-0.94	-0.74	-0.60	-0.49	
	σ_r	4.40			22.73	11.73	5.83	2.60	1.11	0.48	0.22	0.10	0.05	0.02	
	τ_{rz}				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	σ_c				22.83	26.29	24.49	20.34	15.96	12.33	9.58	7.55	6.05	4.93	
25.0	σ_z				0.00	-0.93	-1.19	-1.14	-0.95	-0.76	-0.60	-0.48	-0.38	-0.31	
	σ_r	5.50			14.58	7.52	3.74	1.67	0.72	0.31	0.14	0.06	0.03	0.02	
	τ_{rz}				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	σ_c				14.64	16.86	15.71	13.04	10.23	7.91	6.14	4.84	3.88	3.16	
30.0	σ_z				0.00	-0.57	-0.86	-0.82	-0.67	-0.55	-0.43	-0.34	-0.28	-0.23	
	σ_r	6.60			10.51	5.42	2.70	1.20	0.52	0.22	0.10	0.05	0.02	0.01	
	τ_{rz}				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	σ_c				10.56	12.16	11.33	9.41	7.38	5.70	4.43	3.49	2.80	2.28	

1 ノズルと岩盤の距離 (cm) 2 作用円半径 (cm)
 3 応力の種類 4 (作用円中心からの距離)/(作用円半径)

等 規

附表-2-4 ノズルからの各距離における岩盤の表面に生ずる各応力, および限界の圧縮強度 (13mmφ ノズル使用の場合)
ポアソン比 0.25 の場合

1	2				3				4			
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	
5.0	σ_x	0.00	-1.74	-4.66	-5.99	-5.69	-4.77	-3.80	-3.01	-2.39	-1.93	-1.58
	σ_z	87.69	73.53	45.23	22.50	10.02	4.30	1.86	0.83	0.39	0.19	0.10
	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	σ_c	88.05	91.26	92.09	82.50	67.04	52.01	39.95	30.93	24.32	19.49	15.87
10.0	σ_x	0.00	-1.08	-2.89	-3.71	-3.53	-2.96	-2.36	-1.87	-1.48	-1.20	-0.98
	σ_z	54.38	45.60	28.05	13.95	6.21	2.67	1.15	0.52	0.24	0.12	0.06
	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	σ_c	54.61	56.59	57.11	51.16	41.58	32.26	24.77	19.18	15.08	12.09	9.84
15.0	σ_x	0.00	-0.63	-1.68	-2.16	-2.06	-1.72	-1.37	-1.09	-0.86	-0.70	-0.57
	σ_z	31.66	26.55	16.33	8.12	3.62	1.55	0.67	0.30	0.14	0.07	0.03
	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	σ_c	31.79	32.95	33.25	29.79	24.20	18.78	14.42	11.17	8.78	7.04	5.73
20.0	σ_x	0.00	-0.45	-1.21	-1.55	-1.48	-1.24	-0.99	-0.78	-0.62	-0.50	-0.41
	σ_z	22.73	19.06	11.73	5.83	2.60	1.11	0.48	0.22	0.10	0.05	0.02
	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	σ_c	22.83	23.66	23.87	21.39	17.38	13.48	10.36	8.02	6.30	5.05	4.12
25.0	σ_x	0.00	-0.29	-0.78	-1.00	-0.95	-0.79	-0.63	-0.50	-0.40	-0.32	-0.26
	σ_z	14.58	12.23	7.52	3.74	1.67	0.72	0.31	0.14	0.06	0.03	0.02
	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	σ_c	14.64	15.17	15.31	13.72	11.15	8.65	6.64	5.14	4.04	3.24	2.64
30.0	σ_x	0.00	-0.21	-0.56	-0.72	-0.68	-0.57	-0.46	-0.36	-0.29	-0.23	-0.19
	σ_z	10.51	8.82	5.42	2.70	1.20	0.52	0.22	0.10	0.05	0.02	0.01
	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	σ_c	10.56	10.94	11.04	9.89	8.04	6.24	4.79	3.71	2.92	2.34	1.90

1 ノズルと岩盤の距離 (cm)

2 作用円半径 (cm)

3 応力の種類

4 (作用円中心からの距離)/(作用円半径)

附表-2-5 ノズルからの各距離における岩盤の表面に生ずる各応力，および限界の圧縮強度（13 mmφ ノズル使用の場合）
ポアソン比 0.30 の場合

1	4				0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
	1	2	3	4											
5.0	σ_x	0.00	-1.39	-3.73	-4.79	-4.56	-3.81	-3.04	-2.41	-1.91	-1.54	-1.26	0.19	0.00	0.00
	σ_z	87.69	73.53	45.23	22.50	10.02	4.30	1.86	0.83	0.39	0.19	0.10	0.00	0.00	0.00
	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	σ_c	88.05	87.77	82.75	70.52	55.65	42.47	32.33	24.91	19.53	15.63	12.72	0.00	0.00	0.00
10.0	σ_x	0.00	-0.86	-2.31	-2.97	-2.82	-2.36	-1.89	-1.49	-1.19	-0.96	-0.78	0.06	0.00	0.00
	σ_z	54.38	45.60	28.05	13.95	6.21	2.67	1.15	0.52	0.24	0.12	0.06	0.00	0.00	0.00
	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	σ_c	54.61	54.43	51.32	43.73	34.51	26.34	20.05	15.45	12.11	9.69	7.89	0.00	0.00	0.00
15.0	σ_x	0.00	-0.50	-1.35	-1.73	-1.64	-1.38	-1.10	-0.87	-0.69	-0.59	-0.46	0.03	0.00	0.00
	σ_z	31.66	26.55	16.33	8.12	3.62	1.55	0.67	0.30	0.14	0.07	0.03	0.00	0.00	0.00
	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	σ_c	31.79	31.69	29.88	25.46	20.09	15.33	11.67	8.99	7.05	5.64	4.59	0.00	0.00	0.00
20.0	σ_x	0.00	-0.36	-0.97	-1.24	-1.18	-0.99	-0.79	-0.62	-0.50	-0.40	-0.33	0.02	0.00	0.00
	σ_z	22.73	19.06	11.73	5.83	2.60	1.11	0.48	0.22	0.10	0.05	0.02	0.00	0.00	0.00
	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	σ_c	22.83	22.76	21.45	18.28	14.43	11.01	8.38	6.46	5.06	4.05	3.30	0.00	0.00	0.00
25.0	σ_x	0.00	-0.23	-0.62	-0.80	-0.76	-0.63	-0.51	-0.40	-0.32	-0.26	-0.21	0.02	0.00	0.00
	σ_z	14.58	12.23	7.52	3.74	1.67	0.72	0.31	0.14	0.06	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00
	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	σ_c	14.64	14.59	13.76	11.73	9.25	7.06	5.38	4.14	3.25	2.60	2.11	0.00	0.00	0.00
30.0	σ_x	0.00	-0.17	-0.45	-0.57	-0.55	-0.46	-0.37	-0.29	-0.23	-0.19	-0.15	0.01	0.00	0.00
	σ_z	10.51	8.82	5.42	2.70	1.20	0.52	0.22	0.10	0.05	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00
	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	σ_c	10.56	10.52	9.92	8.46	6.67	5.09	3.88	2.99	2.34	1.87	1.53	0.00	0.00	0.00

1 ノズルと岩盤の距離 (cm)

2 作用円半径 (cm)

3 応力の種類

4 (作用円中心からの距離)/(作用円半径)

寄

添

附表-2-6 ノズルからの各距離における岩盤の表面に生ずる各応力，および限界の圧縮強度（11mmφ ノズル使用の場合）
ポアソン比 0.10 の場合

	4				3				2				1																										
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0																	
5.0	σ_z 0.00	-3.39	-9.09	-11.66	-11.10	-9.29	-7.41	-5.86	-4.66	-3.76	-3.07	σ_z 106.79	89.55	55.08	27.40	12.20	2.27	1.01	0.47	0.23	0.12	τ_{zz} 0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	σ_c 107.24	123.87	146.25	144.24	123.28	98.20	76.47	59.66	47.10	37.84	30.86
10.0	σ_z 0.00	-2.66	-7.13	-9.15	-8.70	-7.28	-5.82	-4.60	-3.65	-2.95	-2.41	σ_z 83.76	70.24	43.20	21.49	9.57	1.78	0.79	0.37	0.18	0.09	τ_{zz} 0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	84.11	97.15	114.71	113.14	96.70	77.02	59.98	46.80	36.94	29.68	24.21
15.0	σ_z 0.00	-1.63	-4.36	-5.60	-5.33	-4.46	-3.56	-2.81	-2.24	-1.81	-1.48	σ_z 51.29	43.01	26.46	13.16	5.86	1.09	0.49	0.23	0.11	0.06	τ_{zz} 0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	51.51	59.50	70.25	69.29	59.22	47.17	36.73	28.66	22.62	18.17	14.82
20.0	σ_z 0.00	-0.92	-2.48	-3.18	-3.02	-2.53	-2.02	-1.60	-1.27	-1.02	-0.84	σ_z 29.10	24.40	15.01	7.47	3.32	0.62	0.28	0.13	0.06	0.03	τ_{zz} 0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	29.22	33.75	39.85	38.30	33.59	26.76	20.84	16.26	12.83	10.31	8.41
25.0	σ_z 0.00	-0.54	-1.45	-1.86	-1.77	-1.48	-1.19	-0.94	-0.74	-0.60	-0.49	σ_z 17.07	14.31	8.80	4.38	1.95	0.36	0.16	0.08	0.04	0.02	τ_{zz} 0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	17.14	19.80	23.38	23.06	19.71	15.70	12.22	9.54	7.53	6.05	4.93
30.0	σ_z 0.00	-0.33	-0.87	-1.12	-1.07	-0.89	-0.71	-0.56	-0.45	-0.36	-0.30	σ_z 10.25	8.60	5.29	2.63	1.17	0.22	0.10	0.05	0.02	0.01	τ_{zz} 0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.30	11.89	14.04	13.85	11.84	9.43	7.34	5.73	4.52	3.63	2.96

1 ノズルと岩盤の距離 (cm)

2 作用円半径 (cm)

3 応力の種類

4 (作用円中心からの距離)/(作用円半径)

附表-2-7 ノズルからの各距離における岩盤の表面に生ずる各応力，および限界の圧縮強度 (11 mmφ ノズル使用の場合)
ポアソン比 0.15 の場合

1	2				3				4			
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	
5.0	σ_x	0.00	-2.97	-7.95	-10.21	-9.71	-8.13	-6.49	-5.13	-4.08	-3.29	-2.69
	σ_z	106.79	89.55	55.08	27.40	12.20	5.24	2.27	1.01	0.47	0.23	0.12
	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	σ_c	107.24	119.62	134.88	129.65	109.41	86.58	67.20	52.33	41.27	33.14	27.02
10.0	σ_x	0.00	-2.33	-6.24	-8.01	-7.61	-6.37	-5.09	-4.02	-3.20	-2.58	-2.11
	σ_z	83.76	70.24	43.20	21.49	9.57	4.11	1.78	0.79	0.37	0.18	0.09
	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	σ_c	84.11	93.83	105.79	101.69	85.81	67.91	52.70	41.05	32.37	25.99	21.19
15.0	σ_x	0.00	-1.43	-3.82	-4.90	-4.66	-3.90	-3.12	-2.46	-1.96	-1.58	-1.29
	σ_z	51.29	43.01	26.46	13.16	5.86	2.52	1.09	0.49	0.23	0.11	0.06
	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	σ_c	51.51	57.46	64.79	62.28	52.55	41.59	32.28	25.14	19.82	15.92	12.98
20.0	σ_x	0.00	-0.81	-2.17	-2.78	-2.65	-2.21	-1.77	-1.40	-1.11	-0.90	-0.73
	σ_z	29.10	24.40	15.01	7.47	3.32	1.43	0.62	0.28	0.13	0.06	0.03
	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	σ_c	29.22	32.59	36.75	35.33	29.81	23.59	18.31	14.26	11.25	9.03	7.36
25.0	σ_x	0.00	-0.47	-1.27	-1.63	-1.55	-1.30	-1.04	-0.82	-0.65	-0.53	-0.43
	σ_z	17.07	14.31	8.80	4.38	1.95	0.84	0.36	0.16	0.08	0.04	0.02
	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	σ_c	17.14	19.12	21.56	20.72	17.49	13.84	10.74	8.36	6.60	5.30	4.32
30.0	σ_x	0.00	-0.28	-0.76	-0.98	-0.93	-0.78	-0.62	-0.39	-0.39	-0.32	-0.26
	σ_z	10.25	8.60	5.29	2.63	1.17	0.50	0.22	0.10	0.05	0.02	0.01
	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	σ_c	10.30	11.49	12.95	12.45	10.51	8.31	6.45	5.02	3.96	3.18	2.59

1 ノズルと岩盤の距離 (cm)

2 作用円半径 (cm)

3 応力の種類

4 (作用円中心からの距離)/(作用円半径)

等

差

附表-2-8 ノズルからの各距離における岩盤の表面に生ずる各応力，および限界の圧縮強度 (11 mmφ ノズル使用の場合)
ポアソン比 0.20 の場合

	4				3				2				1									
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
5.0	σ_x	0.00	-2.54	-6.82	-8.75	-8.32	-6.97	-4.40	-3.49	-2.82	-2.30	σ_x	0.00	-2.54	-6.82	-8.75	-8.32	-6.97	-4.40	-3.49	-2.82	-2.30
	σ_z	106.79	89.55	55.08	27.40	12.20	5.24	1.01	0.47	0.23	0.12	σ_z	106.79	89.55	55.08	27.40	12.20	5.24	1.01	0.47	0.23	0.12
	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	σ_c	107.24	115.38	123.51	115.06	95.53	74.96	45.00	35.44	28.43	23.18	σ_c	107.24	115.38	123.51	115.06	95.53	74.96	45.00	35.44	28.43	23.18
10.0	σ_x	0.00	-2.00	-5.35	-6.86	-6.53	-5.46	-3.45	-2.74	-2.21	-1.81	σ_x	0.00	-2.00	-5.35	-6.86	-6.53	-5.46	-3.45	-2.74	-2.21	-1.81
	σ_z	83.76	70.24	43.20	21.49	9.57	4.11	0.79	0.37	0.18	0.09	σ_z	83.76	70.24	43.20	21.49	9.57	4.11	0.79	0.37	0.18	0.09
	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	σ_c	84.11	90.50	96.88	90.25	74.93	58.80	35.30	27.80	22.30	18.18	σ_c	84.11	90.50	96.88	90.25	74.93	58.80	35.30	27.80	22.30	18.18
15.0	σ_x	0.00	-1.22	-3.27	-4.20	-4.00	-3.35	-2.11	-1.68	-1.35	-1.11	σ_x	0.00	-1.22	-3.27	-4.20	-4.00	-3.35	-2.11	-1.68	-1.35	-1.11
	σ_z	51.29	43.01	26.46	13.16	5.86	2.52	0.49	0.23	0.11	0.06	σ_z	51.29	43.01	26.46	13.16	5.86	2.52	0.49	0.23	0.11	0.06
	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	σ_c	51.51	55.42	59.33	55.27	45.88	36.01	21.62	17.03	13.66	11.13	σ_c	51.51	55.42	59.33	55.27	45.88	36.01	21.62	17.03	13.66	11.13
20.0	σ_x	0.00	-0.69	-1.86	-2.38	-2.27	-1.90	-1.20	-0.95	-0.77	-0.63	σ_x	0.00	-0.69	-1.86	-2.38	-2.27	-1.90	-1.20	-0.95	-0.77	-0.63
	σ_z	29.10	24.40	15.01	7.47	3.32	1.43	0.28	0.13	0.06	0.03	σ_z	29.10	24.40	15.01	7.47	3.32	1.43	0.28	0.13	0.06	0.03
	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	σ_c	29.22	31.44	33.65	31.35	26.03	20.43	12.26	9.66	7.75	6.32	σ_c	29.22	31.44	33.65	31.35	26.03	20.43	12.26	9.66	7.75	6.32
25.0	σ_x	0.00	-0.41	-1.09	-1.40	-1.33	-1.11	-0.70	-0.34	-0.45	-0.37	σ_x	0.00	-0.41	-1.09	-1.40	-1.33	-1.11	-0.70	-0.34	-0.45	-0.37
	σ_z	17.07	14.31	8.80	4.38	1.95	0.84	0.16	0.05	0.04	0.02	σ_z	17.07	14.31	8.80	4.38	1.95	0.84	0.16	0.05	0.04	0.02
	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	σ_c	17.14	18.44	19.74	18.39	15.27	11.98	7.19	5.67	4.55	3.70	σ_c	17.14	18.44	19.74	18.39	15.27	11.98	7.19	5.67	4.55	3.70
30.0	σ_x	0.00	-0.24	-0.65	-0.84	-0.80	-0.67	-0.42	-0.34	-0.27	-0.22	σ_x	0.00	-0.24	-0.65	-0.84	-0.80	-0.67	-0.42	-0.34	-0.27	-0.22
	σ_z	10.25	8.60	5.29	2.63	1.17	0.50	0.10	0.05	0.02	0.01	σ_z	10.25	8.60	5.29	2.63	1.17	0.50	0.10	0.05	0.02	0.01
	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	σ_c	10.30	11.08	11.86	11.05	9.17	7.20	4.32	3.40	2.73	2.23	σ_c	10.30	11.08	11.86	11.05	9.17	7.20	4.32	3.40	2.73	2.23

1 ノズルと岩盤の距離 (cm)

2 作用円半径 (cm)

3 応力の種類

4 (作用円中心からの距離)/(作用円半径)

附

添

附表-2-9 ノズルからの各距離における岩盤の表面に生ずる各応力，および限界の圧縮強度（11mmφ ノズル使用の場合）
ボアソン比 0.25 の場合

1	4				0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
	1	2	3	4											
5.0	σ_x				0.00	-2.12	-5.68	-7.29	-6.93	-5.80	-4.63	-3.66	-2.91	-2.35	-1.92
	σ_z	1.10			106.79	89.55	55.08	27.40	12.20	5.24	2.27	1.01	0.47	0.23	0.12
	τ_{xz}				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	σ_c				107.24	111.14	112.15	100.47	81.65	63.34	48.65	37.67	29.62	23.73	19.33
10.0	σ_x				0.00	-1.66	-4.45	-5.72	-5.44	-4.55	-3.63	-2.87	-2.28	-1.84	-1.51
	σ_z	2.20			83.76	70.24	43.20	21.49	9.57	4.11	1.78	0.79	0.37	0.18	0.09
	τ_{xz}				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	σ_c				84.11	87.17	87.96	78.80	64.04	49.68	38.16	29.55	23.23	18.62	15.16
15.0	σ_x				0.00	-1.02	-2.73	-3.50	-3.33	-2.79	-2.23	-1.76	-1.40	-1.13	-0.92
	σ_z	3.30			51.29	43.01	26.46	13.16	5.86	2.52	1.09	0.49	0.23	0.11	0.06
	τ_{xz}				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	σ_c				51.51	53.38	53.87	48.26	39.22	30.43	23.37	18.09	14.23	11.40	9.29
20.0	σ_x				0.00	-0.58	-1.55	-1.99	-1.89	-1.58	-1.26	-1.00	-0.79	-0.64	-0.52
	σ_z	4.40			29.10	24.40	15.01	7.47	3.32	1.43	0.62	0.28	0.13	0.06	0.03
	τ_{xz}				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	σ_c				29.22	30.28	30.56	27.38	22.25	17.26	13.26	10.26	8.07	6.47	5.27
25.0	σ_x				0.00	-0.34	-0.91	-1.17	-1.11	-0.93	-0.74	-0.59	-0.47	-0.38	-0.31
	σ_z	5.50			17.07	14.31	8.80	4.38	1.95	0.84	0.36	0.16	0.08	0.04	0.02
	τ_{xz}				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	σ_c				17.14	17.76	17.93	16.06	13.05	10.13	7.78	6.02	4.73	3.79	3.09
30.0	σ_x				0.00	-0.20	-0.55	-0.70	-0.67	-0.56	-0.44	-0.35	-0.28	-0.38	-0.18
	σ_z	6.60			10.25	8.60	5.29	2.63	1.17	0.50	0.22	0.10	0.05	0.02	0.01
	τ_{xz}				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	σ_c				10.30	10.67	10.77	9.65	7.84	6.08	4.67	3.62	2.84	2.28	1.86

1 ノズルと岩盤の距離 (cm)

2 作用円半径 (cm)

4 (作用円中心からの距離)/(作用円半径)

3 応力の種類

圧

剪

附表-2-10 ノズルからの各距離における岩盤の表面に生ずる各応力, および限界の圧縮強度 (11 mmφ ノズル使用の場合)

ポアソン比 0.30 の場合

	1				2				3				4										
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	
5.0	1.10	σ_x	0.00	-1.70	-4.54	-5.83	-5.55	-3.71	-2.93	-2.33	-1.88	-1.54	σ_x	0.00	-1.70	-4.54	-5.83	-5.55	-3.71	-2.93	-2.33	-1.88	-1.54
		σ_z	106.79	89.55	55.08	27.40	12.20	2.27	0.00	0.00	0.47	0.23	0.12	σ_z	106.79	89.55	55.08	27.40	2.27	0.00	0.47	0.23	0.12
		τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		σ_c	107.24	106.90	100.78	85.88	67.77	51.73	39.37	30.34	23.79	23.79	15.49	σ_c	107.24	106.90	100.78	85.88	51.73	39.37	30.34	23.79	23.79
10.0	2.20	σ_x	0.00	-1.33	-3.56	-4.57	-4.35	-2.91	-2.30	-1.83	-1.47	-1.20	σ_x	0.00	-1.33	-3.56	-4.57	-4.35	-2.91	-2.30	-1.83	-1.47	-1.20
		σ_z	83.76	70.24	43.20	21.49	9.57	1.78	0.79	0.37	0.18	0.09	σ_z	83.76	70.24	43.20	21.49	9.57	1.78	0.79	0.37	0.18	0.09
		τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		σ_c	84.11	83.84	79.05	67.36	53.15	40.57	30.88	23.80	18.66	14.93	12.15	σ_c	84.11	83.84	79.05	67.36	40.57	30.88	23.80	18.66	14.93
15.0	3.30	σ_x	0.00	-0.81	-2.18	-2.80	-2.66	-1.78	-1.41	-1.12	-0.90	-0.74	σ_x	0.00	-0.81	-2.18	-2.80	-2.66	-1.78	-1.41	-1.12	-0.90	-0.74
		σ_z	51.29	43.01	26.46	13.16	5.86	1.09	0.49	0.23	0.11	0.06	σ_z	51.29	43.01	26.46	13.16	5.86	1.09	0.49	0.23	0.11	0.06
		τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		σ_c	51.51	51.35	48.41	41.25	32.55	24.85	18.91	14.57	11.43	9.14	7.44	σ_c	51.51	51.35	48.41	41.25	24.85	18.91	14.57	11.43	9.14
20.0	4.40	σ_x	0.00	-0.46	-1.24	-1.59	-1.51	-1.01	-0.80	-0.63	-0.51	-0.42	σ_x	0.00	-0.46	-1.24	-1.59	-1.51	-1.01	-0.80	-0.63	-0.51	-0.42
		σ_z	29.10	24.40	15.01	7.47	3.32	1.43	0.62	0.28	0.13	0.06	σ_z	29.10	24.40	15.01	7.47	3.32	1.43	0.62	0.28	0.13	0.06
		τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		σ_c	29.22	29.13	27.46	23.40	18.47	14.09	10.73	8.27	6.48	5.19	4.22	σ_c	29.22	29.13	27.46	23.40	14.09	10.73	8.27	6.48	5.19
25.0	5.50	σ_x	0.00	-0.27	-0.73	-0.93	-0.89	-0.74	-0.47	-0.37	-0.30	-0.25	σ_x	0.00	-0.27	-0.73	-0.93	-0.89	-0.74	-0.47	-0.37	-0.30	-0.25
		σ_z	17.07	14.31	8.80	4.38	1.95	0.84	0.36	0.16	0.08	0.04	σ_z	17.07	14.31	8.80	4.38	1.95	0.84	0.36	0.16	0.08	0.04
		τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		σ_c	17.14	17.09	16.11	13.73	10.83	8.27	6.29	4.85	3.80	3.04	2.48	σ_c	17.14	17.09	16.11	13.73	8.27	6.29	4.85	3.80	3.04
30.0	6.6.	σ_x	0.00	-0.16	-0.44	-0.56	-0.53	-0.45	-0.28	-0.22	-0.18	-0.15	σ_x	0.00	-0.16	-0.44	-0.56	-0.53	-0.45	-0.28	-0.22	-0.18	-0.15
		σ_z	10.25	8.60	5.29	2.63	1.17	0.50	0.22	0.10	0.05	0.01	σ_z	10.25	8.60	5.29	2.63	1.17	0.50	0.22	0.10	0.05	0.01
		τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	τ_{xz}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		σ_c	10.30	10.26	9.68	8.25	6.51	4.97	3.78	2.91	2.28	1.83	1.49	σ_c	10.30	10.26	9.68	8.25	4.97	3.78	2.91	2.28	1.83

1 ノズルと岩盤の距離 (cm)
 2 作用円半径 (cm)
 3 応力の種類
 4 (作用円中心からの距離)/(作用円半径)