

高速水噴流による破壊に関する研究 第一報

柳井田勝哉

技 術 研 究 所

南川洋士雄

○ 大 橋 昭

緒言

高速水噴流を利用した技術の研究は主として鉱山工学の分野を中心に發展せられ、古くは1916年ソ連での発破孔の穿孔・破碎実験に始まり1950～60年に至つて相次いで総合水力採炭システムが操業を開始し掘削工法としての体系化が一応完了している。近年の諸外国に於ける研究動向としては、超高速水噴流による精密機械加工及び岩盤掘削等の新分野に加えて、水力採炭技術の多様な応用化が各分野で精力的に試みられている。筆者らは、土砂・軟岩の掘削或いは潜函工法を主目的として土木工学全般に実用性の高い施工技术を開発する為に、種々のノズル形状から形成される低圧から高圧（5～300 $\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ ）領域での自由噴流の体系化と、掘削面上における複雑な気水混合流れの挙動と掘削効果の相関性を解明する基礎研究を行い、高速水噴流技術の高度利用を計つた。本報は氣中乱流水ジェットの基本特性と、モルタル試料の掘削実験結果の一部を含めて報告するものである。

2 実験装置及び方法

図 1 に供試ノズル仕様と図 2 に実験装置の要点を示す。ノズルについては、先端に直管部をもつテーパノズル (A)、長い助走管部を有する円筒ノズル (B) と助走管部の短い円筒ノズル (C) という対照的な形状を選び比較検討した。噴流特性の力学計測には三次元移動装置に架装されたピトー管 (測定孔 $0.75 \phi \text{mm}$) を適用し、噴流の任意断面に於ける流圧分布値を測定した。又ピトー管による高速細噴流の測定値の確度を高めるためにストロボ撮影 ($20 \mu\text{s}$) 並びに高速度撮影等の写真計測を併用した。全圧力計測には 10 Kg のロードセルを改造し実験に供した。掘削実験に使用したモルタル試料は $150 \phi \text{mm} \times 150 \text{mm}$ の円筒供試体であり $\sigma_c = 50 \sim 300 \text{ Kg/cm}^2$ の強度範囲を示す配合割合とし試料端面を研磨した上で噴射穿孔した。今回の実験はノズル移動は行わず、固定点噴射を主体としたものであり、掘削点に於ける自由噴流特性との比較に主眼をおいて破砕効果を評価することを目的とした。掘削量の測定には水銀を用い、シユミットハンマーにより硬度の測定も加えて実施した。

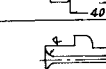
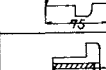
形式	形状 寸法	D [※]	材質	備 考	流量係数
A		1.6 2.5 (5.0)	S55C + 硬膜	・先端 ストレッパ を有するテーパ ノズル ・内口 鏡面仕上	0.90 4 0.93
B		2.0 10.0 (6.3)	BaC	・円筒ノズル ・内面・ハンドラ ビニア	0.83 4 0.90
C		1.3 4 3.5 (5.0)	S55C + 硬膜	・円筒ノズル ・内口 鏡面仕上	0.67 4 0.78

図 1 ノズル仕様

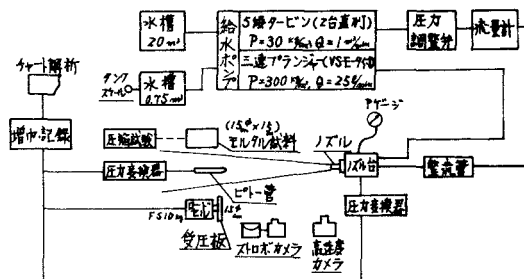


図 2 実験装置のブロック図

3 噴流構造と記号 (図3 参照)

気中乱流水ジェットは周囲流体との間の大きな速度勾配のために噴流中心軸に垂直な微小流れが生じ混合領域を形成する。この混合領域の発達に伴って噴流構造が大きく変化し推移してゆく。即ちノズル口流圧をそのまま保持しているポテンシャルコアをもつ初期区、混合領域が噴流中心軸まで発達し連続波状流となる主要区、初期区から主要区への過渡領域である遷移区、水流が分断され流滴或いは噴霧状態になる拡散区等の領域に特長づけられる。噴流核長は初期区と主要区の軸上流圧より外挿して求めた変曲点の長さであり、全く圧力減衰のない領域のみを指すものではない。

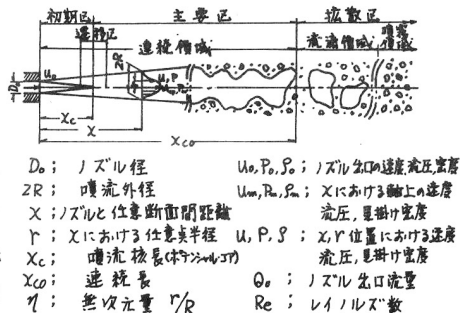


図3 気中乱流水ジェットの構造と記号

4 実験結果及び考察

4.1 噴流実験結果について

a. 流圧と全圧力

噴流構造の実測例を図4に示して前述の領域区分の適合性を考える。

(B)に見るが毎く、軸上流圧減衰曲線より求められた $X_c = 55D_0$ の噴流核長付近に遷移区が認められ初期区と主要区の噴流特性の差異が明瞭に現われており、コアの噴流特性に及ぼす影響が重要なものであることが窺える。(C)より噴霧領域がほぼ $11000D_0$ より始まることが推察され、この点より主流側の噴流領域に於いては運動量の保存則が適用できることがわかる。噴流拡散についてはピトー管による④⑤外径を基準に Schlichting の乱流混合領域の速度分布法則と全圧力値による運動量解折及び写真による外径値を比較表示して、各領域がもつ拡散傾向とピトー管計測の信頼性を得た。

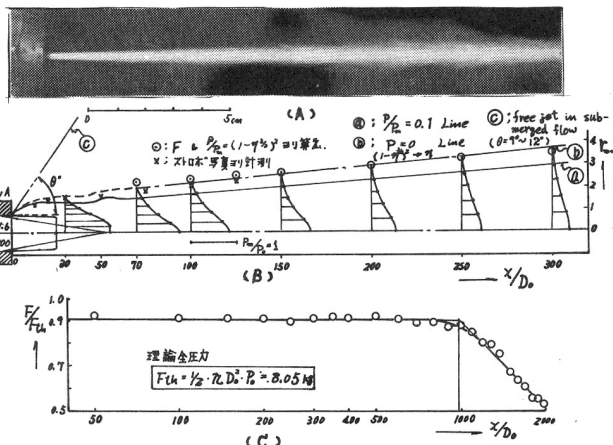


図4 A型ノズル ($D_0 = 1.6 \text{ mm}$, $P = 200 \text{ kg/cm}^2$) の噴流構造と全圧力

の点より主流側の噴流領域に於いては運動量の保存則が適用できることがわかる。噴流拡散についてはピトー管による④⑤外径を基準に Schlichting の乱流混合領域の速度分布法則と全圧力値による運動量解折及び写真による外径値を比較表示して、各領域がもつ拡散傾向とピトー管計測の信頼性を得た。

b. 噴流拡散 (図5 参照)

ノズル出口直後で大きく広がり境界層を形成した噴流は、良好なコンパクト性を維持する混合領域の未発達な初期区、広がり傾向が一様でない遷移区そして安定な指数関数的広がりを示す主要区へと進んでゆく。主要区での広がりを $R = kX^n$ 式と仮定すれば $n = 1/4 \sim 1/2$ の範囲に結果が整理され homogeneous jet

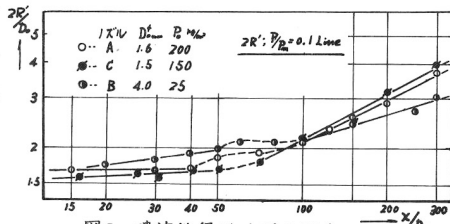


図5 噴流外径とノズル圧力

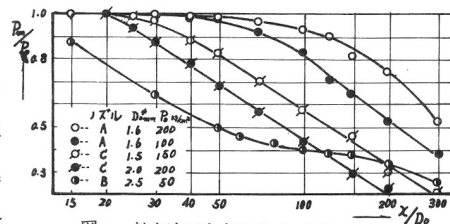


図6 軸上流圧分布とノズル形状

の層流境界層の広がり ($kx^{1/2}$) に近い拡散状況を示している。但し、B型ノズル (特に細噴流) については他のノズル群と異つた傾向をもち、直管部長さが噴流構造に著しい変化を及ぼす一要因であることを示唆している。

c. 噴流軸上流圧分布と半径方向流圧分布

図6, 7に噴流軸上流圧分布を示す。噴流核長で整理すれば主要区における流圧減衰特性の相似性がわかる。

図8でSchlichtingの分布則と主要区での半径方向流圧分布値を比較検討した。半径方向が有する相似則は、初期区での境界層領域と主要区全般に成立することが確認された。大口徑ノズルでは半径方向流圧分布がより分布則に近接し、かつ軸上流圧分布の減衰率が大きくなる傾向が見られ、乱れの強い非定常噴流の動圧 ($\frac{1}{2}\bar{P}U^2, \frac{1}{2}\bar{P}_{\text{max}}U_m^2$) 測定に関するピトー管形状とノズル形状の適合性が実験手法として重要な問題点になると考えられる。

d. ノズル性能と噴流特性

細長い形状のB型ノズル以外については、損失抵抗の大部分が形状抵抗として噴出口における噴流の内部乱れに変換され、初期区の噴流構造に反映される。即ち、噴流核と損失抵抗は密接な関係をもち、ノズル性能を判定する因子として最適なものと云える。噴流核長及び抵抗係数は共にRe数によつて変化すると考えられるが、図9に示す毎く高Re領域に於いて一定の X_c/D_0 値が現われ、高压領域特性として簡便な示数が個々のノズルについて存在することがわかつた。

4. 2 破碎実験結果について

a. 噴流構造と破碎効果

高速水噴流による破碎は、I) 衝撃破壊 II) 疲労破壊 III) 水くさび作用 IV) キャビテーション・エロージョン及び V) 洗掘作用等の機構が複合した複雑な現象と考えられ、理論的・実験的解明が極めて困難である。噴流領域によつてこれらの破碎機構がそれぞれ変化し、重畳した負荷が資料に及ぼされ特有な破碎形態を形成する。モルタル試料の場合構成粒子の結合度によつて大別すれば、表面はく離を生じる破壊と洗掘を主体とした掘削の二形態の破碎状況が観察される。写真1のa b c dは洗掘を主体とした例であり各々 ($25D_0, 100D_0, 300D_0, 500D_0$) の試料位置における60秒噴射後の状況である。穿孔径と穿孔深さが各領域の破碎特性を明瞭に現わしている。表面破壊が生じる試料の破碎状況例をeに示す。この場合、掘削効果

を定量的に計ることが難かしく試料の自由面及

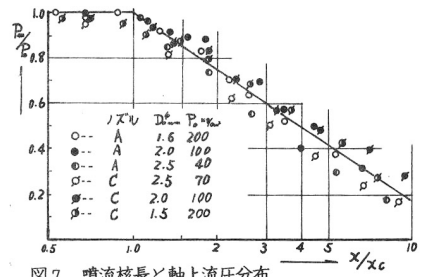


図7 噴流核長と軸上流圧分布

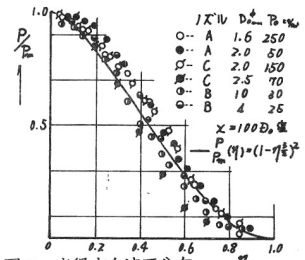


図8 半径方向流圧分布

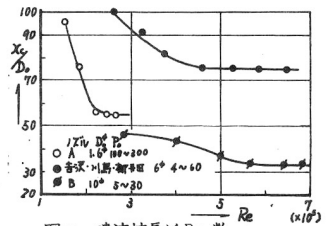


図9 噴流核長とRe数

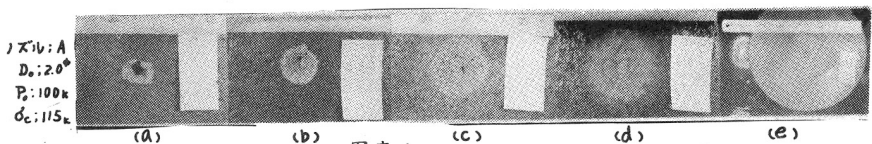


写真1

び容積が掘削効果に少なからず影響を与える。

б. 所要破碎圧力

噴流元圧を上昇させて所定の噴射時間に穿孔される掘削量と表面破壊量をプロットしたのが図10である。このタイプの試料については噴流元圧と掘削量がほぼ直線関係にあり、噴流元圧が一軸圧縮強度以上の範囲で表面破壊の発生頻度が非常に高く、初期区と遷移区において例外なく破壊効果が見られた。

с. 破碎量と噴流元圧及び噴射時間

表面破壊が発生せずに掘削が進行する試料について噴流領域、噴射時間、噴流元圧等の要因を考察したものが図11、12である。固定点噴射に対する最適噴射時間は20秒前後と考えられ、それ以上の噴射による急激な掘削量の増加は望めない。噴流領域は初期区から拡散区の一部まで掘削が可能であり、下流側領域になる程掘削量が増大することがわかる。噴流元圧と掘削量との関係は、図10の試料と同じく圧縮強度付近より急峻な立上りが認められ、掘削効果の急増が期待できる。

5. むすび

この実験結果によつて得られた噴流構造とモルタル掘削に関する知見は次のように要約される。

Ⅰ) 気中乱流水ジェット噴流構造に噴流核が存在し、これが噴流特性に重要な因子となる。

Ⅱ) 軸上流圧分布及び半径方向流圧分布に相以則がみられる。

Ⅲ) 個々のノズルに、定常な高压噴流特性が認められる。

Ⅳ) モルタル試料かもつ一軸圧縮強度以上の噴流元圧範囲で破碎効果が著しく高い。

Ⅴ) 固定点噴射での掘削における最適噴射時間は、本実験の供試材料について20秒程度と考えられる。

Ⅰ) 最適ノズル形状の設定と噴流特性の定式化。

Ⅱ) 破碎試料の均質化と、破碎強度を適切に表わす力学定数の探究。

Ⅲ) 種々の媒体中における噴流挙動。

終わりに本研究に対し、高压ポンプ等の実験設備を提供くださったニツサンフリーズ社に心から感謝します。

参 考 文 献

1. М-Ч-К-И-Г-Н-А-Т-Б (外尾誌), 水力排炭と水力輸送, 上巻, 東大出版会
2. 吉沢・川島・柳井田 東北鉱山 日誌誌 Vol. 11 No 2 (8539-9), Vol. 12 No. 1 (8540-6) Vol. 81 No. 930 (8540-10), Vol. 83 No. 950 (8542-6) Vol. 84 No. 966 (8543-10)
3. H. Schlichting; Boundary Layer Theory (1960) McGraw-Hill
4. Abramovich; the theory of turbulent jets (1963) M.I.T.
5. Г. П. НИКОЛОВ; ИССЛЕДОВАНИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО РАЗРУШЕНИЯ УПРЯГ ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА» МОСКВА 1968
6. D. S. Shaulovsky; First international symposium on JET CUTTING TECHNOLOGY 5th 7th 1972 country

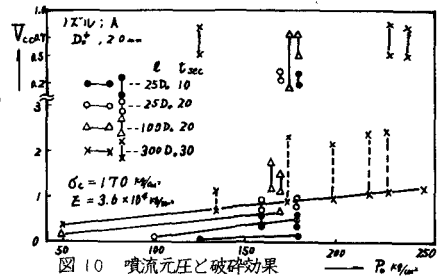


図10 噴流元圧と破碎効果

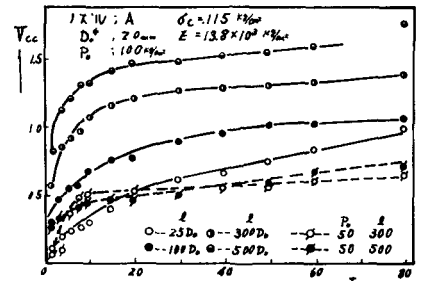


図11 噴射時間と掘削量

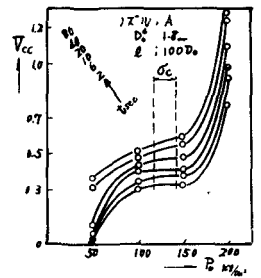


図12 噴流元圧と掘削量