

氏 名	八 尋 暉 夫
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 56 年 10 月 14 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭和 34 年 3 月 東北大学工学部鉱山工学科卒業
学位論文題目	高速気水噴流による地盤切さくとその応用に関する 研究
論文審査委員	東北大学教授 小林 良二 東北大学教授 石浜 渉 東北大学教授 川島 俊夫 東北大学教授 佐武 正雄

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 論

坑内切羽において、炭層に水噴流を当て、その衝撃力により炭層を掘さくする水力採炭は、各国において広く行われているが、その水噴流の速度をさらに高め、200 m/sec 以上の高速水噴流にすると、岩石その他の硬い材料を穿孔、切さくできるようになる。

近年、地下構造物の築造、地下水処理あるいは地盤改良を目的として、軟弱な地盤を上記の水噴流により切さくし、地盤内の切さく空洞内にセメントミルクを注入する工法、すなわち、誘導注入工法が各国で注目されるようになってきたが、この場合の高速水噴流の噴射環境は清水中もしくは固体粒子懸濁液中となるので、噴流軸上圧力の減衰が大きく、従って、その有効射程距離が短くなり、切さく性能、切さく範囲が著しく低下するため、この点の解決に関心がよせられている。

そこで、筆者は、このような環境下における高速水噴流の有効射程距離をのばすために次の方法を試みた。すなわち、高速水噴流を空気中に噴射した場合には、それを水中に噴射した場合よりもその有効射程距離がはるかに長くなる点に注目し、水中に噴射した高速水噴流を大気中に噴射した高速水噴流の特性に近づけるため、本研究では、高速水噴流の噴射孔周囲より、円筒状の空気膜噴流を高速水噴流と同時に噴射する方法を開発した。

本研究では、この高速気水噴流による地盤切さく法を各種の人工地盤をつくる誘導注入工法に

利用する目的で、まず基礎研究として、清水および固体粒子懸濁液中における高速水噴流ならびに高速気水噴流の流体力学的特性および穿孔性を究明し、また、中間試験として清水および固体粒子懸濁液中における高速気水噴流の地盤切さく特性について研究を行った。さらに、建設現場において、本研究で開発した誘導注入工法による地下水処理、地盤改良に関する応用研究を行い、次の各章でのべる成果を得た。

第2章 水中における高速気水噴流の噴流特性に関する基礎研究

水中における高速気水噴流の切さく性の把握を目的として、その噴射環境を種々変えた場合の流体力学的性質を明らかにするための実験を行った。実験結果から水中における高速気水噴流の切羽面および穿孔底に対する衝撃圧力などを明らかにした。これらを要約すると次のようになる。

1) 本研究に使用した高速気水噴流用ノズルは吐出圧力を出来るだけ長く保持する特性を有するものを選定した。その形状はノズル内面の収縮角が 13° でノズル出口直線部分の長さはノズル直径の2.5倍である。このノズルの加工に当っては、ノズル出口の真円精度、内面の粗さや突起の存在がその性能に鋭敏に影響するので特に注意して製作した。また、ノズル内面に摩耗や壊食を極力少なくするように超硬合金を使用した。

2) 高速水噴流によって地盤や岩盤を穿孔する場合、その特性に大きく影響する因子は、高速水噴流の軸上圧力が支配的である。しかし、この軸上圧力は噴射環境の違い、例えば、水中噴射であるか、あるいは大気中噴射であるかによって異なり、水中噴射の場合は、噴流軸上圧力の減衰が大きい。これを考慮して、本研究では清水や固体粒子懸濁液中で水噴流の吐出圧力を保持する距離をできるだけ長くするため、空気と水を同時に噴射する同軸環状ノズルを使用した。

3) 高速気水噴流を大気中に噴射した場合、その噴流性状は、既往の高速水噴流の研究結果と同様にノズル出口から距離を規準にして初期領域、遷移領域および主要領域に大別できる。

4) 固体粒子懸濁液中における噴射の場合、高速気水噴流の中心軸上圧力の減衰をできるだけ少なくするためには、空気噴流の噴射速度を速くするほど有効である。この場合、その効果が顕著になるのは、マッハ数 $1/2$ 程度からである。

5) 水中における高速気水噴流の初期領域、遷移領域および主要領域の長さはそれぞれ、 $8\sim 11\text{ cm}$ 、 $36\sim 55\text{ cm}$ 、 $100\sim 150\text{ cm}$ である。これらの領域のうち、ノズル出口より遷移領域末端までの長さを、水中における高速水噴流の場合に比較すると約6倍で、ほぼ大気中における高速水噴流の場合に等しい。

6) 水中における高速気水噴流の穿孔底に対する実測衝突圧力(P_{ms})は、高速水噴流の中心点の速度(U_m)より計算した動圧(P_m)に近似している。また穿孔時における孔壁の水噴流に対する影響は殆んど認められなかった。

第3章 高速気水噴流による土および岩石試料の穿孔

清水および固体粒子懸濁液中において、高速気水噴流による土や岩石試料の穿孔実験を行い、高速気水噴流の特性と穿孔機構、静水圧などの噴射環境との関係を究明し、次のような知見が得

られた。

1) 高速気水噴流で各種の土や岩石を破壊するためには、それら対象物の結合強度以上の吐出圧力が必要である。この場合、破壊に密接に関係する物性としては、間隙比、一軸圧縮強度などである。

2) 水中における高速気水噴流の土、岩石に対する穿孔深さは、高速水噴流の場合の約3倍から約7倍に達する。

3) 懸濁液中において、高速気水噴流を用いて土、岩石を穿孔する場合、懸濁液の静水圧がその穿孔特性に影響をおよぼす。しかし、高速水噴流で穿孔する場合に比べるとその影響は極めて小さい。

4) 穿孔速度と空気噴流の噴射速度との関係を見ると、水噴流の吐出圧力が $200\text{kg}/\text{cm}^2$ から $700\text{kg}/\text{cm}^2$ の範囲内では、空気噴流の噴射速度の増加に伴って増加する。しかし、噴射速度がマッハ数 $1/2$ 以上になると増加率は著しく小さくなる。

第4章 高速気水噴流による現位置切さく試験

前章までに述べた高速気水噴流の穿孔性、切さく性を検証するため、現位置で中間規模の試験を行い、その結果についてまとめると次のようになる。すなわち、

1) 高速気水噴流による地盤の切さく機構は、切さく面に対する水噴流のせん断力と切さく対象地盤のせん断強度の釣り合いにもとづいて考察することができ、切さく深さ(h)は次式で与えられる。

$$h = 2 \mu_w \frac{d_0 P_0}{\tau_0} \int_0^{\theta_0} \frac{e^{\mu_w (\theta - \theta_0)} \sin \theta}{1 + \left(\frac{V}{C}\right) \sin \theta} \cdot d\theta$$

上式において、 d_0 はノズルの直径、 P_0 は水噴流の吐出圧力、 θ_0 は水噴流の衝突角度、 τ_0 は切さく対象地盤のせん断強度、 μ_w は水と土の摩擦係数、 V はノズルの移動速度、 K は地盤の透水係数、 ζ は水の粘性係数、 f は地盤の間隙率、 g は粒子径である。また、 C は噴流による切さく係数であり、次式で求められる。

$$C = \frac{K \tau_0}{\zeta f \mu_r g}$$

2) 高速気水噴流による現地盤の切さくで、その切さく速度は、高速水噴流の吐出圧力、噴射環境の静水圧、ノズルの移動速度などに影響をうける。これらのうち、高速水噴流の吐出圧力を $100\text{kg}/\text{cm}^2$ から $300\text{kg}/\text{cm}^2$ まであげた場合、切さく速度は1.46～1.86倍になる。また、静水圧 $0.05\text{kg}/\text{cm}^2$ と $2.0\text{kg}/\text{cm}^2$ の場合の切さく速度を比較すると、後者は前者の40～50%減となる。さらにノズルの移動速度との関係を見ると、その移動速度を $4\text{cm}/\text{sec}$ から $20\text{cm}/\text{sec}$ の範囲に変えた場合の実験では、ノズル移動速度が約 $4\text{cm}/\text{sec}$ において切さく速度が最大となった。

3) 切さく速度(V_c)を高速気水噴流の吐出圧力(P)、ノズル直径(d)、地盤の一軸圧縮強度(S_c)、ノズル出口にかかる静水圧(P_s)、ノズルの移動速度(V_{tr})、切さく回数(N)の関

数として次の実験式を得た。

$$V_c = 374 \frac{P^{0.39} d^{0.81}}{S_c^{0.5} V_{tr}^{0.45} N^{0.72}} \left(\frac{P_0}{P_0 + P_s} \right)^{1.2}$$

4) 高速気水噴流によって、土や岩石を切さくして生じた礫の搬出は、ガイドホールを上昇する空気噴流のエアリフト作用によって行われる。そこで、エアリフト・ポンプの理論を適用して、空気量および流管の大きさについて検討した結果、礫排出に必要な空気量は0.3～1.8m³/min程度であることが明らかになった。これに対し、本工法では直径2mの範囲の地盤を破碎するのに、1～4m³/min程度の空気量を使用しているため、実用上は適量と考えられる。

5) 高速気水噴流によって土や岩石を切さくする場合、ノズルを小さく動かすことは水噴流の有効利用、帰り水による切さく能率の低下を防ぐなどの点で効果的である。そこで、切さく深さと切さく回数について次の実験式を得た。

$$h(N) = h(1) \cdot N^{0.27} \quad (\text{泥岩の場合})$$

$$h(N) = h(1) \cdot N^{0.21} \quad (\text{関東ロームの場合})$$

上式において、 $h(1)$ は切さく回数が1回の場合の切さく深さ、 $h(N)$ は切さく回数がN回の場合の切さく深さである。

第5章 高速気水噴流を利用した地下工法の開発と応用

本章では、水資源の確保や地下工事に伴う地下水の汚染および枯渇の防止を主目的とした壁状固結体および軟弱地盤の改良を主目的とした円柱状固結体の築造のために応用される高速気水噴流による掘さく法について述べる。

この方法は、水力モータより高速気水噴流を噴射して地盤を破碎し、その切さく空洞をセメントミルクなどの注入材で置換するもので、水力モータを直接引き揚げるか、あるいは回転させながら引き揚げるかによって、壁状または円柱状の固結体が築造できる。本研究では、これらの固結体築造法を、6箇所の現場の応用例について述べ、従来工法との対比を行っている。これらの結果をまとめると次のようになる。

1) 水噴流、空気噴流の流速、流量と固結体の形状などについてしらべた結果、その有効射程距離は、1.5mから2.0mであることが認められた。これは基礎研究の結果と一致している。また、セメントミルクの注入圧力を高くするほど壁厚が厚く、かつ均質なものが築造できた。さらに、セメントミルク注入後10日目の採取試料による一軸圧縮強度は50～110kg/cm²となり、止水壁として十分な強度が得られた。また、壁状固結体の止水効果は、施工前後の透水係数で比較すると、現地盤の1/100～1/1000程度低下することがわかった。

2) 施工方法についてみると、ガイドホール間隔および水力モータの引揚速度は高速気水噴流の地盤破碎特性と密接な関係がある。これについては150箇所以上の現場の施工データを解析したところ基礎研究の結果とよい一致を示している。

3) 高速気水噴流は固体粒子懸濁液中でその有効射程距離を大きくとることができ、また、高

速気水噴流として噴射される空気は、ガイドホール内でエアリフト・ポンプと同様な効果をもたらす、これによって破碎研の一部を有効に排除できる。

4) 固結体の直径は水噴流の吐出圧力、流量の増加とともに大きくなる。一方、空気噴流についてはマッハ数1/2程度までは、その速度の増加とともに直径を増すが、この速度以上になると殆んど変わらない。また、注入材の吐出圧力と出来上り径との関係をみると、砂質土では、その関係を明確に出来なかったが、粘性土では、吐出圧力が高くなるほど出来上り径が大きくなる。

5) 円柱状固結体の注入後の物性は、砂質土に築造した場合、一軸圧縮強度は $30\sim 50\text{kg/cm}^2$ 、粘性土に築造した場合は $13\sim 50\text{kg/cm}^2$ 。また、P波・S波の伝播速度はそれぞれ $1.2\sim 2.4\text{km/sec}$ 、 $0.5\sim 1.2\text{km/sec}$ 程度である。

6) 高速気水噴流の地盤破碎特性と密接な関係を有する水力モニタの最適回転速度は $5\text{r}\cdot\text{p}\cdot\text{m}$ 、引揚速度は 5cm/min で基礎研究の結果とよい一致をみた。

第6章 結 論

以上、高速気水噴流による土および岩石の穿孔、切さくに関する基礎ならびに応用研究について述べた。本研究の成果は、止水を主目的として、地盤内に壁状固結体を築造する工法や、地盤改良を主目的として地盤内に円柱状固結体を築造する工法として実用化され、水資源の保全や軟弱地盤、岩盤改良のために、本法はすでに150箇所以上の現場の地下工事に利用されている。

審査結果の要旨

従来、軟弱地盤に築造する構造物の基礎として、高速水噴流により掘さくした地盤内の空洞にセメントミルクを注入し、基礎を築造する工法、すなわち誘導注入工法が用いられているが、注入の噴射環境が清水もしくは懸濁液中となるため、有効射程距離が短く、切さく性能が著しく低い。

本論文は、上記環境下で有効射程距離を伸ばすため考案した高速気水噴流発生装置を用いて、地盤切さくならびに構造物基礎の築造工法に関する研究を系統的に行い、その成果をまとめたもので、全編6章よりなる。

第1章は緒論である。第2章では、円筒状の空気膜噴流の中を高速水噴流が噴射できる同心円環状ノズルの設計について述べている。また、このノズルを用いて、水中における高速気水噴流の性状に関する基礎研究を行い、空気噴流の噴射速度を速くする程、高速気水噴流の有効射程距離が伸び、高速水噴流の場合の約7倍となることを明らかにしている。これは貴重な成果である。

第3章では、高速気水噴流による地盤の水中穿孔試験によると、同一穿孔条件のもとにおける穿孔深さは、高速水噴流の場合の3～7倍になること、また、その穿孔特性におよぼすノズル周辺の静水圧の影響は、高速水噴流の場合に比べて、極めて少ないことなどを明らかにしている。

第4章では、現位置における切さく試験を行い、水噴流の切さく力と地盤強度との関係、切さく速度と水噴流の吐出圧力ならびに噴射環境の静水圧との関係を実験式などによって解析し、高速気水噴流による最適な切さく条件を求めている。さらに地盤内に穿孔されたガイドホールを上昇する空気噴流のエアリフト作用を検討し、この作用により切さくずりを地上に搬出可能な噴射空気量を算定するなど、有用な設計資料を求めている。

第5章では、高速気水噴流を利用した地下工法として、6箇所の現場応用例を挙げ、本工法と従来工法との対比を行って、本工法の有効性を示している。

第6章は結論である。

以上要するに、本論文は高速気水噴流による地盤の切さく性に関する基礎研究を行い、また本研究を応用した誘導法入工法を検討して、いくつかの有用な知見を得たもので、掘さく工学ならびに資源工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。