

III-306 ウォータージェットによる土砂掘削時に生ずる特異現象についての検討

日本電信電話公社茨城電気通信研究所 正会員○田中邦男

正会員 保科 宏

正会員 有岡良祐

1. まえがき

掘削作業は、土木工事の基本的な工程をなすものであつて、適切なる掘削方法の開発は、工事の近代化、合理化に必須のものである。電電公社では、かかる掘削技術開発の一環として、ウォータージェットによる土砂掘削方法の検討を行ってきた。この土砂掘削方法では、高圧水と土砂との接触部における切削過程が、高圧水の乱流運動と土粒子の衝撃運動とともにとくに独特の諸現象が生ずる。本報告は、このようなジェット水による土砂掘削時に生ずる特異現象の中、掘削効率に直接影響する噴射角度や切削速度(図1)に起因する切削効果変動現象、エネルギー交換直後の土粒子の挙動に起因する圧力効果増加現象、およびその他の、顕著な現象である発熱現象、くさび現象、侵食現象、選択現象について、検討結果をまとめたものである。

2. 切削効果変動現象

ジェット水を掘削面に対し、斜め噴射しながら移動切削する場合、噴射角度 θ および切削速度 v の値によって、掘削深度が変動する現象が生ずる。この現象の主な原因是、噴射角度および切削速度にもとづき、噴射に伴う排水、排土特性の差が生じ、反射流作用、渦流作用、渦流作用等(図2)の圧力緩和要素の影響が相異することによるものと考えられる。

この圧力緩和作用の大小を、図3のように、排水、排土の難易に対する空間的要素 $\sin^m(\theta + \psi)$ 、時間的要素 $v^{-\alpha}$ で表わし、また、圧力増加作用の大小を、斜め噴射時の噴射圧密度、噴射幅、切削率の変化要素 $\sin^n\theta$ 、噴射圧要素 $[p(l=0)]^{\beta}$ 、噴射時間要素 $v^{-\beta}$ で表わすと、平均掘削深度 \bar{l} の一般的表示式として、式(1)が導入できる。

$$\bar{l} = K \sin^m(\theta + \psi) \sin^n\theta [p(l=0)]^{\beta} \left[\frac{1}{v} \right]^{\alpha + \beta} \quad (1)$$

ここで、 $K, m, n, \alpha + \beta, \psi, \psi$ は、土質等より定まる定数であつて、ローム土の実験例では、 $K=0.3, m=4, n=1, \alpha+\beta=0.4, \psi=0.9, \psi=15^\circ$ となり、極大値附近においては、理論値と実験値が類似する。

式(1)より、ローム土における斜め噴射時の噴射角度 θ と切削比との関係は、図4に示す如く変動し、 $\theta = 75^\circ$ 付近で切削効果が最大となることがわかった。また、単位噴射時間当たりの掘削深度、すなわち掘削能率は、図5のように切削速度 v が大きくなる程、高能率となることが言えた。これは、切削速度が大きくなると、圧力緩和によるエネルギーの消耗が防止でき、かつ、図6に示す衝撃効果が大きくなつて、ジェット水激突点の応力集中効果が高まることによるものと考えられる。

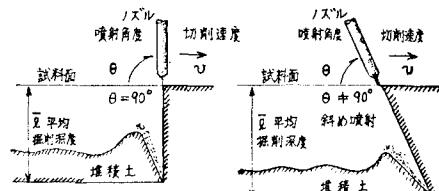


図-1. ジェット水による掘削過程。

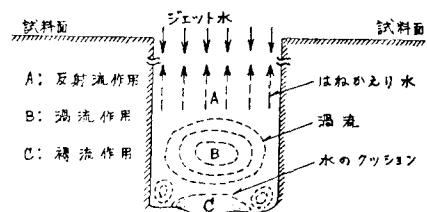
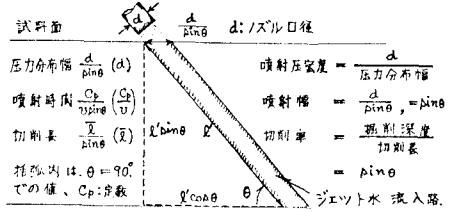


図-2. 圧力緩和をもたらす諸作用



排水、排土の難易に対する空間的要素: $(C_p \sin\theta + C_m \cos\theta)^m$ による切削能率の喷射時の喷射圧密度、喷射幅、切削率、の変化要素: $\sin^n\theta, C_p, C_m$ 定数

図-3. 斜め噴射時の切削効果変動要素

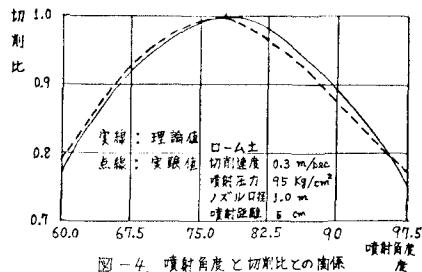


図-4. 噴射角度と切削比との関係

3. 壓力効果増加現象

ジェット水を土中に噴射する場合の、最もユニークな現象は、図7のように、圧力効果が最大となる深度 l ($l \neq 0$)が存在する点にある。すなわち、圧力効果の最大値は、地表面ではなくて、土中のある深さの所に生ずる。

この圧力効果は、ジェット水のもつ大なるエネルギーが、土粒子群に衝撃運動を生じさせることにもとづくものであって、土粒子の速度増分がジェット水との相対速度差に比例し(比例定数 λ_1)、ジェット水の深度 l における平均速度 \bar{v} が $\bar{v} = \lambda_1 l$ で表わされるものとすると、次式の如き土圧力エネルギー $E(l)$ を示せる。

$$E(l) = \frac{\bar{m}}{2} \left(\frac{\lambda_1 \bar{v}_0}{\lambda_1 - \lambda_2} \right)^2 \left[l \bar{v} - \frac{-2\lambda_1 l - 2\lambda_2 l - (\lambda_1 + \lambda_2)l}{2(\lambda_1 - \lambda_2)} \right] \quad (2)$$

\bar{m} : 土粒子の平均質量, \bar{v} : 単位深度当りの平均土粒子数
式(2)で、 $\lambda_1 = 20$, $\lambda_2 = 2$ なる場合の圧力比と深度との関係を示すと、図7のようになり、土粒子およびジェット水による圧力比の変化状況は、実験例に類似することが言える。

このような圧力効果増加現象は、土粒子の大きさに影響され、砂質土では著しい衝撃作用、切削作用が生じるが、粘性土では、土粒子の径が小さいため、圧力効果は小となる。

4. その他の特異現象

(1). 純熱現象。ジェット水の乱流運動のもつ力学的エネルギーは、絶えず熱に転換される。特に、固定切削時においては、この熱作用とジェット水のもつ冷却作用による平衡点の温度まで急上昇し、鉛板、PE被覆の融解が生じた。(図8、図9)

(2). くさび現象。ジェット水の作り出す水力くさびによって、鋼管のジェットの剥離が多数生じた。このくさび現象は、その本質的な特性より推測して、亜裂の多い軟岩質地盤や間隙比が大きい土壤等の掘削に応用すれば、有効と考えられる。

(3). 侵食現象。噴射直後のジェット水の急速な圧力の変化に応じて生じた空気のつぶが、後続の高压水流により破壊され、局部的な異常高圧が発生して、侵食作用をもたらす。この特殊な作用により、陶管表面に多数の小クレーターが生じた。

(4). 選択現象(迂回現象)。ジェット水が、掘削対象物の中、堅い部分を、そのまま残して切削して行く作用で、砂礫掘削時等で生じた。この独特の作用は、土砂、岩石等強度が不連続なものに対する掘削方法として、全体を取り崩す場合等に有効である。

5. あとがき

ウォータージェットによる土砂掘削方法を検討することによって、ジェット水のもつ多くの特異現象がわかつってきた。これらの特異現象の中には、深い検討を要する興味深い問題が多く含まれており、今後の研究を必要とする。

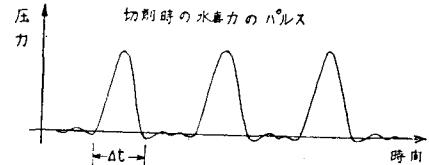
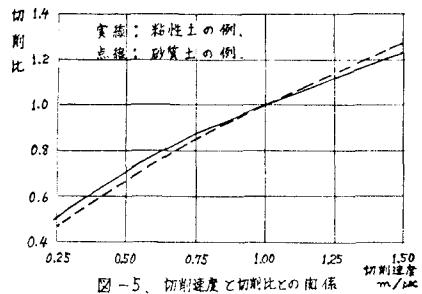


図-5. 切削速度と切削比との関係
 Δt : 1回の切削時間, $\Delta t = \frac{d}{v}$

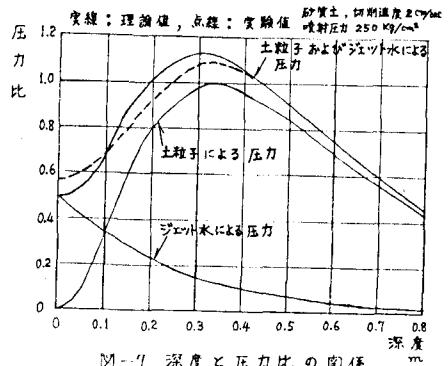


図-6. 繰返し切削により生ずる一連の衝撃力

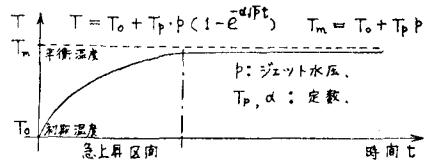


図-7. 深度と圧力比の関係

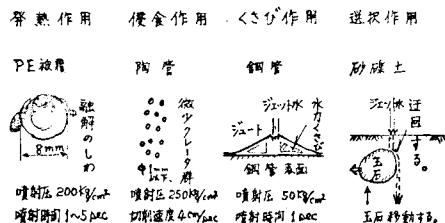


図-8. ジェット水激突点の温度

図-9. その他の特異現象の例