

軟弱な地盤における水平ボーリングの 削孔方向制御に関する一検討

小田恵之輔¹・鍛冶茂仁²・佐久間孝夫³・中川浩二⁴

¹正会員 工博 株式会社奥村組 情報システム部 (〒545-8555 大阪市阿倍野区松崎町2-2-2)

²正会員 工博 ジェオフロンテ研究会 副会長

³正会員 東興建設株式会社 東京土木支店 技術部部长

⁴フェロー会員 工博 山口大学工学部 臨床トンネル工学研究所

軟弱な地盤において30mを越える長尺の水平ボーリングを行う場合には削孔精度が問題となる場合がある。例えば高圧噴射工法においては、噴射に先立つボーリングの削孔精度が低いと改良目的を達成できない可能性がある。精度を向上させるためには、目的とする方向から逸脱したボーリングの方向修正が必要となる。

削孔方向制御に関して簡便で利用の多いクサビ方式の採用を前提とし、削孔実験を実施するとともに、修正効果の予測値を近似的に算定し実測値と比較検討した。その結果、適切なクサビ角度の選定を含む先端ビットの構造の選択によって削孔方向制御が可能であることが示された。

Key Words: horizontal boring, drilling accuracy, control boring, soft ground

1. はじめに

軟弱な地盤において30mを越える長尺の水平ボーリングを行う場合には削孔精度が問題になる場合がある。例えば高圧噴射工法におけるボーリングにおいて、精度が低い場合には再削孔を行う必要性が生じるなど施工効率の低下につながる問題が生じている。

比較的固い地盤においては方向制御装置が実用化されているが、軟弱な地盤に関するボーリングの方向制御技術に関して地盤との関係や、制御可能な限界等に関する文献は筆者らの知る限り見られない。

そのため既存の削孔機に搭載が容易な可動部分のないクサビ方式で方向制御を行う場合を想定し、軟弱な地盤におけるクサビによる方向制御に関して、解析的に基本的な特性を検討し¹⁾別途報告した。

今回、実地盤においてクサビ方式を用いて水平方向に約60mの方向制御実験を実施するとともに、解析的に検討した同手法を用いて修正量の予測値を算定し、実験結果と比較した。この結果、削孔方向の制御に関して有益と思われる知見が得られたので報告する。

2. 方向制御技術の現状

削孔径が150mm程度と比較的小さい口径の水平ボー

リングの場合、方向制御方式として削孔の面板や切削機器の方向を強制的に小型ジャッキなどを用いて目的とする方向に変える中折方式²⁾、高圧ジェットや機械式で地盤を部分的に拡幅してロッドを誘導する方法などがある。

一方簡便な方法として多様されているのが削孔ビット先端を斜めに切断した形状とし方向を変える場合は回転させずに地盤に押し込むいわゆるクサビ方式³⁾(ウエッジ方式とも呼ばれる)である。この簡便で利用の多いクサビ方式において軟弱地盤に対するクサビ角度と方向修正量などの制御特性を明らかにすることは、今後の水平ボーリングの展開において特に有用と思われる。

3. クサビ方式を用いた方向制御技術

(1) 実験地盤と実験方法

実験した地盤はN値3~4程度の粘性土の埋土で、土被りは既存の立坑を利用するため2m程度とした。削孔機器の先端部は図-1に示すように角度30°のクサビ形状とし、施工時にクサビによる方向修正効果の増大を目的としてクサビ先端上部に高さ約1cmのオーバーカットビットを設置した。

実験を行った噴射攪拌工法⁴⁾に使用するロッドは1本1.5m、外径142mmのものを接続して用い、排泥を効率的に行う目的で排泥専用のパイプを内蔵している。さらに、

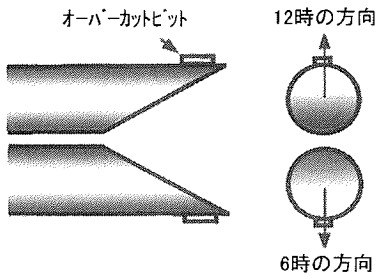


図-1 角度30°のクサビとクサビ方向の表示法

硬化材の圧送用のパイプ等数種のパイプが設置してあり、このロッドを多孔管と称している。

複数のパイプを内蔵するためロッドは回転でなく任意の角度から正逆半回転まで可能な揺動運動を行って硬化材を噴射し造形体を作成する。そのため、噴射攪拌に先行するボーリングも揺動を行い切削することになる。

修正すべき方向が例えば鉛直上向の場合、図-1に示すようにクサビの先端部を上に向ける。クサビの方向を示す方法として立坑から見た時計の文字盤になぞらえてクサビ先端部が上にある場合、つまりオーバーカットビットが上にある場合を「12時の方向」、下にある場合を「6時の方向」と表示することにする。

揺動は360°の任意の方向を基準にして正逆半回転までの角度で揺動することが可能である。実験では方向修正するためのクサビの方向を、例えば4時の方向を基準にして左右にそれぞれ30°程度の揺動を行い切削した。

今回の実験の目的は制御可能性の検証、さらに制御特性を把握することである。そのため位置の測定はリアルタイムではなく切削終了後に行った。

水平方向の測定にはマルチセンサ[®]と、鉛直方向の絶対傾斜を測定するための傾斜計とを組み合わせた市販の測定器を排泥用のパイプに挿入し、ロッドの方向を3次元的に計測した。

これは実際の施工時にリアルタイムに位置の情報を得るため、削孔機に搭載可能なことを前提条件として測定機器を選定したものである。

なお、実施工における施工精度は水平、上下方向とも±20cmを設定している。

(2) 実験結果

図-2に削孔後の孔の位置と削孔時のクサビの方向を示す。実験の主な目的が上述のように方向制御特性の把握であるため意識的に方向を変更したり、水平あるいは鉛直方向のみの修正に着目して実験を行った結果、図-2に示すようなロッドの軌跡が得られた。

図-2の測定結果を用いて方向修正動作による修正効果を明示するため、図-3に示すように修正動作を加え

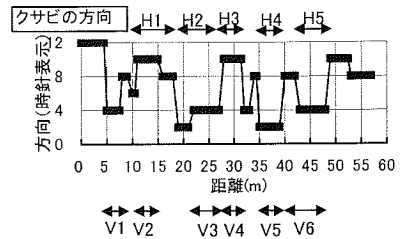
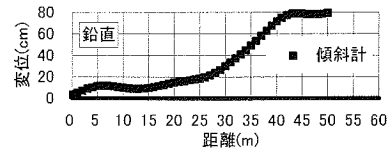
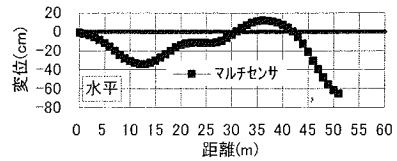


図-2 ロッドの位置の測定結果と設定したクサビの方向

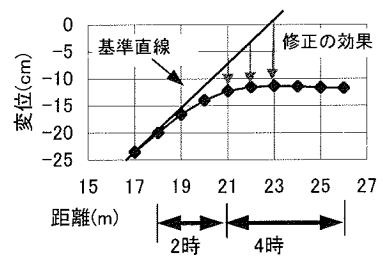


図-3 修正動作に対する修正効果の算定

る直前の1m区間を延長したものを基準直線として、その直線から測定値までの離間距離を修正効果と考えた。

修正の効果を算定するデータはロッド約3本分に相当する区間以上で同じ方向にクサビを向けて切削した場合に有効なデータとし、図-2下段に水平方向には5区間(H1~H5)、鉛直方向には6区間(V1~V6)を示している。

図-3は水平方向修正(H2)の実測データであり17mから18mの区間を延長し26mまでの修正効果を算定している。ただし、同図では21m地点で2時の方向から4時の方向にクサビの向きを変えているが、両方向の水平分力は同じ方向と大きさであることから修正に寄与する力は同じと考え連続したクサビ方向として扱っている。

このような方法で修正効果を示したのが図-4である。

同図によれば、水平方向では全5事例で目的とした方向にロッドが変位しており、修正量にばらつきはあるものの、ほぼ同程度と考えられ、地盤のばらつきを考慮すれば安定した方向修正効果があると考えられる。

一方、鉛直方向の6事例においては、ほぼ目的とした

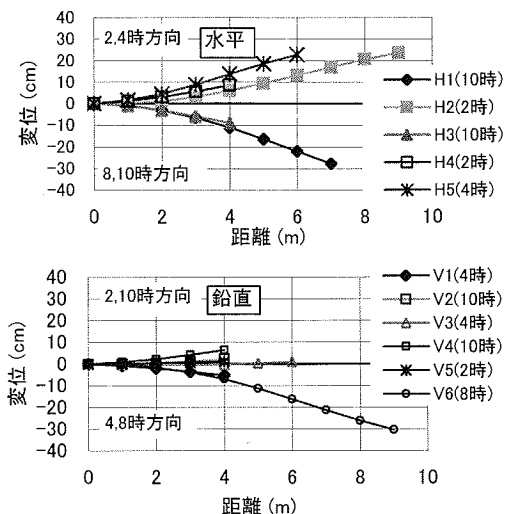


図4 修正動作に対する修正効果の実測値

方向に修正されているが、修正量が小さく修正効果が明らかではない事例もある。

(3) 修正変位量の予測

地盤内に水平に敷設されたボーリングロッド先端が延伸時に自重によって沈下するのに抗して、元の水平状態を維持させるために必要な修正用の外力と、クサビから得られる修正用の外力を検討し別途報告¹⁾した。

報告¹⁾では、ロッドを弾性地盤上の半無限長の梁²⁾と仮定し、単位長さを延伸した場合の自重による沈下量を修正するために必要な外力を算定している。ここではこの外力を偏向力 F と称している。

さらに、クサビを推進することによって得られる偏向力は2次元連続基礎の先端部を斜めに切断したものをクサビのモデルとし、FEMを用いて計算した。これらの計算方法に関しては同報告¹⁾を参照されたい。

また、同報告¹⁾では変位量を既知とし、偏向力 F を未知として計算したのに対して、今回の修正変位量の予測値の計算では同じ計算手法を用いて、FEM計算で求めたクサビから得られる偏向力 F を既知として、ロッド先端部の変位を未知として計算することになる。

ここでは、図-4の実験結果と比較するために初期値のたわみとたわみ角をともに0として予測計算を行った。既存の資料³⁾を参照し、実験地盤のN値(3~4)を用い、さらにロッドの載荷幅を考慮すれば、地盤反力係数 k は $k=0.3$ MPa/cm程度と推定されるが、計算では k をパラメータとしてその値は $k=0.3, 0.5, 1.0, 2.0$ MPa/cmとした。

偏向力 F の値は実験に使用した角度 30° のクサビに対して、計算のパラメータに使用する k 値から粘着力 C を推定し⁴⁾、FEM計算の結果¹⁾を用いて円筒状のクサビに対

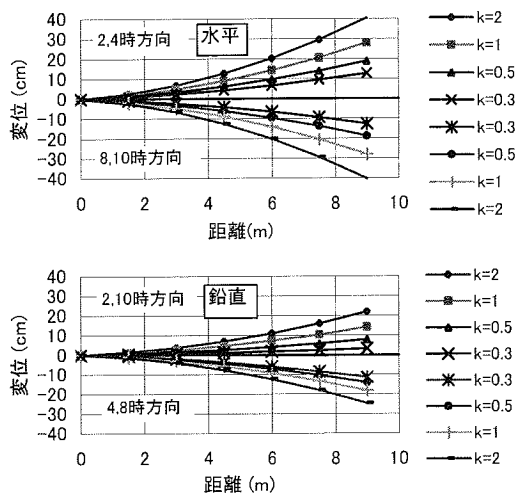


図5 地盤反力係数 k をパラメータとした修正効果の予測値

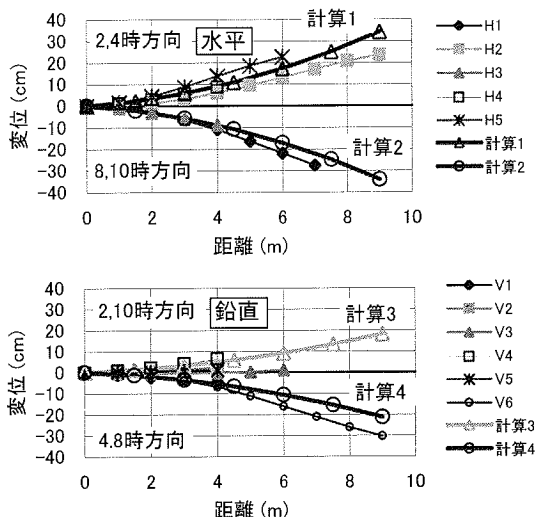


図6 実測値と $k=1.5$ とした場合の修正効果の予測値

する値に換算して用いた。

地盤反力係数 $k=0.3$ MPa/cmに対して $F=2.5$ kN、 $k=0.5$ では 4.7 kN、 $k=1.0$ では 9.4 kNとし、 $k=2.0$ では 18.8 kNとした。なお、 $k=1.0$ MPa/cmに対応する粘着力は $C=85$ kN/m²としている。

以上の方法で求めた予測値を図-5に示す。

(4) 実験結果と予測値

実験時のクサビの方向は主に2, 4, 8, 10時である。この方向における偏向力の鉛直分力は水平分力のおよそ60%程度であるため、鉛直方向の平均的な修正量が水平方向の修正量と比較して少なくなった要因と考えられる。実測値を示す図-4と予測値の図-5を比較すると地盤

反力係数 k が 1.0~1.5 MPa/cm 程度の変形状態と概ね一致し、実験状況がある程度シミュレートできていると考えられる。明示するために実測値の図-4 に $k=1.5$ とした場合の予測計算値を重ねて図-6 に示す。

実験地盤の N 値から推定される $k=0.3$ MPa/cm に対する予測値よりも修正の効果が大きくなった要因として以下のことが考えられる。

実験ではオーバーカットビットによってロッド周辺の地盤が変位すべき方向に拡幅されており、ロッドが変形しやすい条件となっている。実際の地盤が拡幅された状況は複雑であり、拡幅した影響を計算に取り入れることは困難と考えて今回の計算では考慮していない。

また、3本のボルトで接続されたロッドの剛性を全延長で均一な鋼製円柱とした計算上の仮定⁹⁾が過大な剛性を与え予測値を過小にしている可能性もある。

以上のように、現状では、現実に生じている現象を十分に予測計算に反映することは困難であり、精度の高い予測計算値を得ることは容易ではない。

しかしながら、各種の要因を含めて今回の実験条件の場合 $k=1.0\sim 1.5$ MPa/cm 程度を仮定すれば図-6 に示すように概略の予測値が得られることになる。実施工においても、設計時には地盤の N 値から地盤反力係数を推定し、施工が始まれば修正効果の実測値をフィードバックして地盤反力係数の推定を行うことによって精度の高い制御が可能になるとと思われる。

4. 方向制御のまとめと課題

今回の方向制御実験で方向修正に関してはほぼ安定した修正効果が得られるものの、方向修正効果と直進安定性の両立の観点から見れば、実験地盤に対して今回採用した 30° のクサビは若干過度の修正効果があり、 30° のクサビ以外にも 45° 、 60° 等のクサビを準備し地盤特性に応じて適切な選択をすべきであると思われる。

また、オーバーカットビットの大きさと揺動角度も検討すべき課題である。すなわち、オーバーカットビットの高さが大きく、かつ揺動角度が大きければ拡幅する領域が拡大しクサビによる修正効果は大きくなる一方、過大な拡幅は直進安定性の低下の原因となる。

クサビ方式を用いて目的とする方向への地盤の特性に応じた修正量の予測がある程度可能になったことから実績データを収集し、削孔機器の構造を適切に選択することによって水平削孔精度の向上が可能になるとと思われる。

謝辞：本研究を行うにあたりジェオフロンテ研究会およびM J S工法協会のご協力を得た。関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 小田恵之輔, 松田博, 重田佳幸, 中川浩二: 軟弱地盤における水平ボーリングのくさび方式を用いた方向修正, 土と基礎, vol.51, No.4, pp.8-10, 地盤工学会, 2003.4.
- 2) 本章弘: アンクルモール工法の開発と実績, 月刊推進技術, Vol.13, No4, pp.53-63, 1999.4.
- 3) 青木健一: ハイパー工法, 土木技術 54 巻 4 号, pp.91-99, 1999.4.
- 4) 小田恵之輔, 鍛冶茂仁, 中島浩平, 中川浩二: 強制排泥装置を有する水平方向噴射攪拌工法に関する実験的研究, 土木学会論文集, No528/VI-29, pp.155-165, 1995.12.
- 5) 高木博, 川野谷仁: 管路計測装置, 建設機械, pp.65-69, 1994.11.
- 6) 土木学会構造工学委員会: 構造力学公式集, pp.172-180, 土木学会, 2001.1.
- 7) 土質試験結果の解釈と適用例, 土質基礎工学ライブラリー4, p.56, pp.79-80, 土質工学会(現地盤工学会), 1980.8.

(2003.2.13 受付)

STUDY OF CONTROLLING THE HORIZONTAL BORING IN SOFT GROUND

Keinosuke ODA, Shigehito KAJI, Takao SAKUMA and Koji NAKAGAWA

In long horizontal boring, exceeding 30 m, the accuracy of drilling becomes a problem in soft ground. In the jet-mixing method, once the exact accuracy of drilling cannot be obtained, the purpose of ground improvement may be unable to be achieved. To improve the accuracy of horizontal drilling, the direction controlling method was needed. In order to correct the direction, a mechanically simple wedge system was introduced. The prediction value of the amount of corrections, and the experiment results of drilling for 60 meters were compared and discussed. As a result, it has been recognized that by selecting of a suitable wedge angle and size of the bit, the drilling direction is controllable.