

ビット切削振動によるシールド切羽土質判別

篠原 茂* 畑山栄一** 三澤孝史**
岡田義純*** 林田正憲*** 笠井 隆***

1. まえがき

近年の市街地のシールド工事では、発進基地用地の確保が難しくなってきたことから長距離施工が要求される傾向にある。長距離施工の場合には、ビットの限界磨耗量から定めた掘進距離が土質に応じておおよそ決められており、それを超える場合には途中でビットを交換するなどの方策を講じる必要がある。

今回の横浜市下水道局発注のシールド工事では、掘進距離が 4,435m と長いため途中でビット交換を実施することにした。掘削地点の地質は堅硬な固結シルト層と自立性の低い砂層から構成されている。ビットを交換するには補助工法なしに約 1 ヶ月を要するためビット交換は切羽が安定しやすい地層構成のところで行うことが望ましいので、切羽の土質分布を把握する技術を開発する必要があった。そこで、切削時のビットの振動から砂層と固結シルト層を判別する手法を考案し、室内試験によりその有効性を確認した後実施工へ適用した。

なお、本土質判別システムの開発は横浜市下水道局と奥村組とで共同で実施したものである。

2. 工事概要

本工事は横浜市北部を流れる鶴見川下流域の浸水解消を目的とした雨水幹線整備工事で、シールド機械の外径が 9,450mm の泥水式シールド工法で施工した。今回の工法は「クルン工法」と称し、最大の特徴は、カッター部分を 180° 回転させてからシールド機内でビットを交換できることである。

土被りは約 52~56m で、地質は大部分が砂層と固結シルト層の互層から構成されており、固結シルト層は一軸圧縮強度が約 5MPa と堅硬であるが、砂層は N 値が 50 以上ではあるが均等係数が 2~3 で粒径がそろっており自立性の低い細砂である。なお、地下水圧はトンネル中心で 0.56MPa と非常に高い。

3. 土質判別システム

3.1 概要

*地盤研究室 **機電研究室 ***東京支社土木部

シールド機械で地山を掘削する場合、機内では電動機等からの大きな音が発生しているが、ビットが地山を切削する音も僅かではあるがその中に含まれている。それらの音は地山が硬くなると音の大きさや音色が変わることが経験的に知られている。つまり、ビットの切削時に発生する音（振動）の大きさや周波数特性は切削する土質の硬さ等により異なると思われる。

本土質判別システムはビットに加速度計を取付け、切削時の振動の大きさ等により砂と固結シルトを識別しようとするものである。

3.2 室内試験

a. 試験目的

本工事で使用する土質判別用ビットと同じビットを用いて実際の切削条件に近い状態で室内試験を行い、振動特性が砂と固結シルトでどの程度違うかを把握する。

b. 試験装置

使用した試験装置の外観を写真-1に示す。装置は試料箱(長さ 100cm、幅 50cm、深さ 20cm)と、試料箱を引張る油圧ジャッキおよびビットから構成されている。ビットは実機のものと同じ形状、材質で、切削幅は 100mm である。ビットの外観を写真-2に示す。

測定に使用した加速度計は共振周波数 40 kHz の圧電型でビット背面内部に写真-3に示すように加速度計の受圧面が切削進行方向を向くように取付けた。

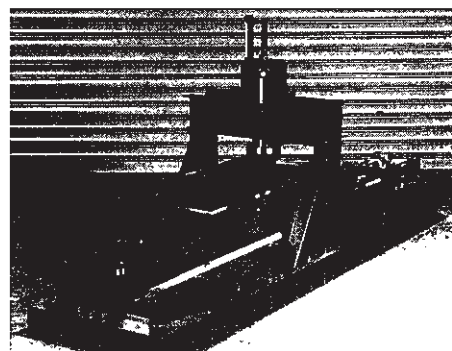


写真-1 試験装置の外観

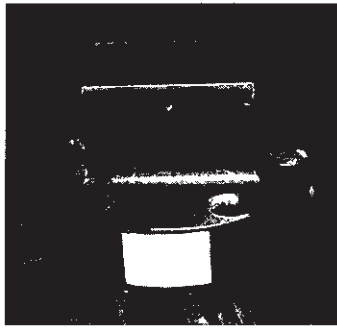


写真-2 土質判別用ビット

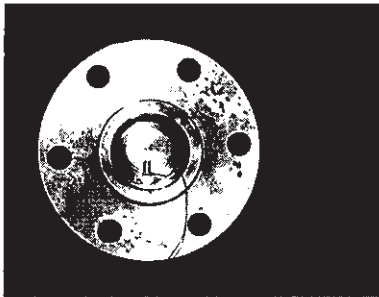


写真-3 ビット内部への加速度計の取付け

c. 試験方法

試料の作成方法は、シールド発達立坑内から採取した砂および固結シルトを、砂については実際の地山条件に近い状態（湿潤密度 1.926g/cm^3 ）になるように、試料箱を予め約半分に仕切った中に締め、固結シルトについては採取したブロックを砂の横に石膏で固定した。試験は、所定の切込み深さになる位置に加速度計を取付けたビットを固定し、試料箱を油圧ジャッキで引張りながら砂および固結シルトを約 70cm 切削し、その時の振動を測定した。

試験条件のうち切削速度については、実機回転数 (0.52rpm) と土質判別用ビットの取付け位置の半径 (約 4.1m) から求めたビットの切削速度と同じ値とし、22cm/sec とした。切削深さについては実際の施工における掘進速度を考慮して 7mm (実施工での掘進速度 2.2cm/min に相当)、10.5mm (掘進速度 3.1cm/min に相当) とした。

d. 試験結果

切削深さ 7mm で試験した時の振動波形を図-1 に示す。この図で振幅 (アンプからの出力電圧で表示) の小さい部分が砂を切削しているとき、振幅の大きい部分が固結シルトを切削しているときで、明らかに固結シルトを切削している時の方が大きな振動を発生していることがわかる。

図-1 の波形を時間軸について 110 等分しそれぞれの

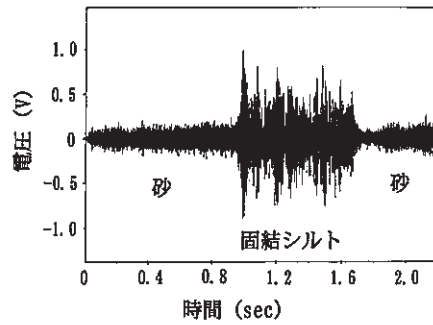


図-1 振動波形

区間内のデータの絶対値の平均値を求め、それらの値を小さい順に並べた結果を図-2 に示す。これによると、電圧 0.05V 以下の区間とそれ以上の区間でデータ列の傾きが大きく異なり、0.05V 以下の傾きの緩やかで振幅の小さいところが砂の切削時に相当し、0.05V 以上の区間が固結シルトに相当する。砂の切削時の振幅がほぼ同じ大きさであるのに対し、固結シルトでは振幅の変化が大きい。これは、ビットによる砂と固結シルトの切削機構が異なるためと思われる。すなわち、砂についてはビットが砂を押しつけるような形で比較的同じ状態で切削するため振動の大きさの変化が少ない。それに対し、固結シルトの場合には刃先が食い込みながら岩片を削り剥がしていくように切削するため、食い込み時にはビットが加圧され、岩片が剥がれる時にその圧力が解放されることにより振動が発生するが、固結シルトの強度が比較的大きいため圧力変化が大きく、その結果、発生する振動の大きさにも幅が生じるためと考えられる。図-2 で傾きが大きく変化する電圧値が砂と固結シルトの判別のしきい値となる。

砂および固結シルト切削時の周波数特性をそれぞれ図-3、4 に示す。これらによると、砂を切削しているときには低い周波数から高い周波数までの成分が含まれているが、固結シルトの場合は低い周波数 (約 100Hz) が卓越していることが分かる。

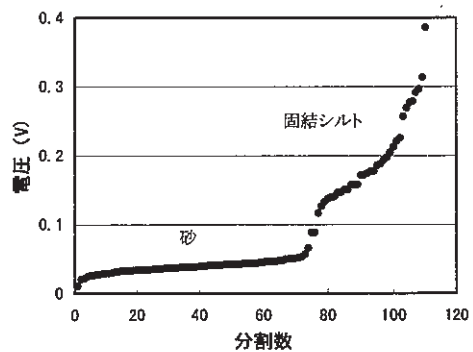


図-2 砂と固結シルトの振幅分布

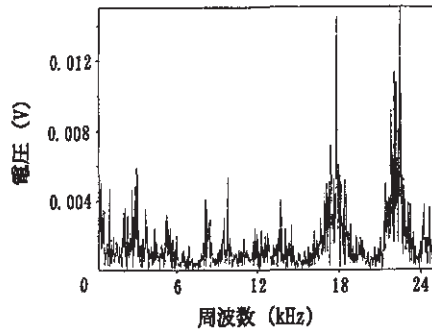


図-3 砂切削時の周波数分布

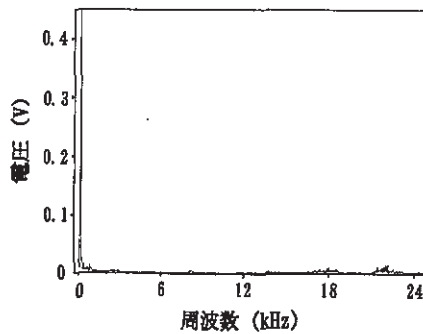


図-4 固結シルト切削時の周波数分布

4. ビット交換地点までの実施工での判別結果

4.1 測定方法

シールド機には図-5に示すようなビットを配列した6本のスポークが機械の中心軸に等角度で取付けてあり、そのうちのNo.3とNo.6の2本のスポークの外周から約50cm内側に入ったところに室内試験と同じように加速度計を取付けたビットを1個ずつ固定した。

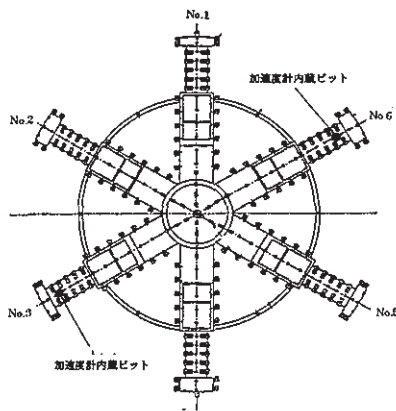


図-5 加速度計内蔵ビットの配置

No.3およびNo.6のスポークに取付けた加速度計内蔵ビットからのケーブルをスポーク回転軸に取付けたス

リップリングに接続し、スリップリングからの出力ケーブルを加速度計の専用アンプを介してA/D変換器へ入力した。A/D変換器にはパソコンを接続し測定用のプログラムを実行して自動的に振動の測定ができるようにした。自動測定を行うために、A/D変換器には加速度計からの出力信号の他に、スポーク回転位置検出装置、スポーク回転速度検出装置、スポーク回転方向検出装置、推進ジャッキストローク計からの出力信号を入力した。測定は、セグメント1リング分(1m)を掘進する毎に、ジャッキストロークが600mmを超えた直後にNo.1スポークが真上に来た時から開始しスポーク1回転(約90秒)分の振動波形をパソコンに取込んだ。これらの測定の系統を図-6に示す。

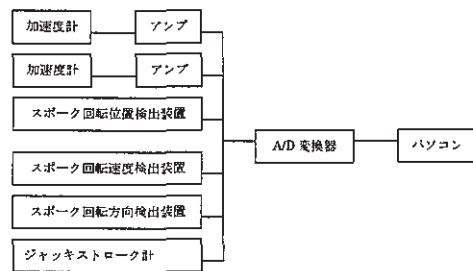


図-6 測定の系統

4.2 土質判別結果

a. セグメント位置1018mでの判別結果

L1018m(L:左回転、セグメント布設位置1018m)の測定波形を図-7に示す。この図で上の波形がNo.3スポークに取付けた加速度計の波形、下の波形がNo.6スポークに取付けた加速度計の波形で、それぞれスポーク1回転分の波形である。振幅はアンプからの出力電圧(±5V)で表示してある。この図で振幅の小さいところが砂を切削しているとき、振幅の大きいところが固結シルトを切削しているときに相当する。

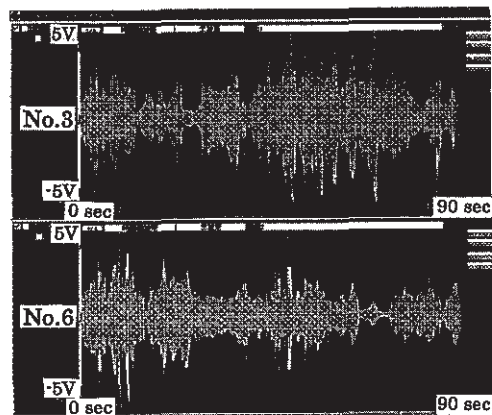


図-7 L1018m測定波形

砂と固結シルトの判別は以下の手順で行った。まず、1回転分の波形データの絶対値を求め、このデータを

360 等分し、それぞれの区間の最大値を求める。この 360 個のデータがビット 1 回転の軌跡に沿った角度 1 度刻み、切削距離にして 7.2cm 間のデータに相当する。図-2 に示した室内試験の結果と同様に No. 3 および No. 6 の 360 個のデータを小さい順に並べた結果を図-8、9 に示す。

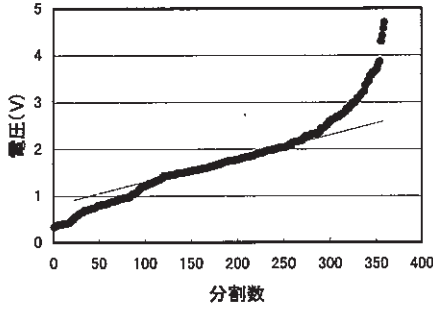


図-8 L1018mNo. 3 波形データの振幅分布

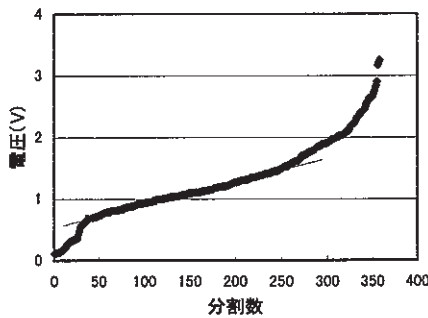


図-9 L1018mNo. 6 波形データの振幅分布

室内試験の結果と同様にこれらのデータ列は、砂の掘削区間に相当する傾きの緩やかな直線で近似できる区間と、それに続く固結シルトの掘削区間に相当する傾きの急なほぼ直線で近似できる区間の 2 つに分けることができる。それぞれの図中に表示した砂を表す直線からの乖離点が砂と固結シルトの判別のしきい値となる。このしきい値で砂と固結シルトを区分し、ビットが 1 回転する軌跡に沿って土質を判別した結果を図-10、11 に示す。これらの図で黒色の部分が固結シルト、灰色の部分が砂を表す。図-10 と図-11 を比べてみると、図-10 の左半分と図-11 の左半分、および図-10 の右半分と図-11 の右半分がほぼ同じ結果になっている。シールド掘削地点の地層は海成の堆積層であり、砂および固結シルトはほぼ水平な地層を形成している可能性が高い。それから判断すると図-10、11 の結果は左右対称になるのが一般的であると考えられるが、実際には左右非対称になっている。このような傾向はこの地点の結果だけではなくほぼすべてのデータについて同じであっ

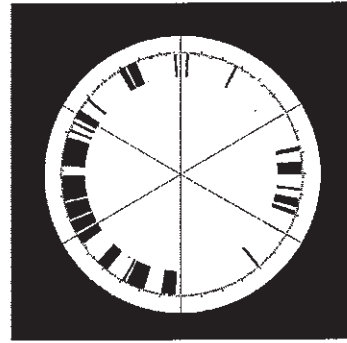


図-10 L1018mNo. 3 データによる判別結果

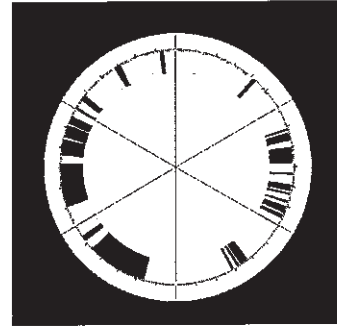


図-11 L1018mNo. 6 データによる判別結果

た。この原因のひとつとして、土質判別のビットは先行ビットより 2cm 低いために先行ビットで地山が先に大きく削られてしまうと判別用のビットで掘削する際に地山が存在しないことが考えられる。

この測定地点から約 20m 離れた 1040m 付近で事前に実施されたボーリング調査から求めたシールド掘削地点の土質分布を図-12 に示す。ここで、黒色の部分が固結シルト、灰色の部分が砂を表す。

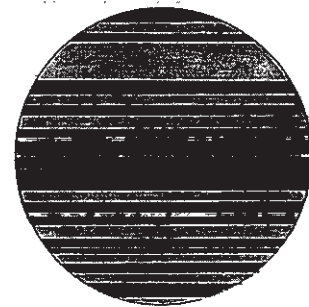


図-12 1040m 付近のボーリング結果

図-12 と図-10、11 とを比べると、図-12 の結果は図-10、11 の左半分の結果とほぼ同じ地層構成になっている。L1018mNo. 3 の左半分を掘削している時のデータだけを用いて、地層が水平になっていると見なして表示した判別結果を図-13 に示す。ここで、黒色の部分が固結シルト、灰色の部分が砂を表す。図-12 と図-13 はほぼ同じ結果になっている。よって、これ以降の結果については、1 回転分の波形データのうちの半分だ

けを用いて図-13 のような表示方法で土質を判別しながら掘削を行った。



図-13 L1018mNo. 3 左半分のデータによる判別結果

b. ビット交換地点の判別結果

ビットの交換は掘進距離 2570m の地点で実施した。その時の測定波形を図-14 に示す。約 1500m 手前の図-7 の波形に比べて全体に振幅が小さくなっているが、原因としてはビットの磨耗の影響が考えられる。No. 3 の波形データのうちのビットが切羽の左半分を掘削しているときのデータを用いて土質を判別した結果を図-15 に示す。ここで、黒色の部分が固結シルト、灰色の部分が砂を表す。これによると切羽の上半分には固結シルトが多く分布しており、切羽の安定性が高いと判断しこの地点でビットの交換を実施した。

5. ビット交換以降の判別結果

5.1 判別ビットの改良

ビット交換前に使用していた判別ビットは、同一掘削パス上に存在する幅 22mm の先行ビットに対して 2cm 引込んでいたため土質の判別が不明瞭なことが時々あった。そこで、交換後の判別ビットについては、高さを 35mm 高くし先行ビットより先に地山を切削するようにした。さらに、ビット幅については 1つは交換前のビットと同じ 100mm としたが、もう 1つは半分の 50mm とした。

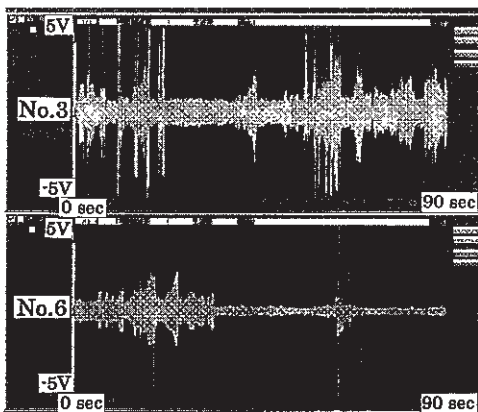


図-14 ビット交換地点の測定波形

なお、幅の広いビットは No. 3 スポーク、幅の狭いビットは No. 6 スポークに取付けた。

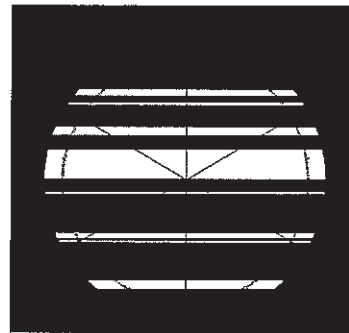


図-15 ビット交換地点の判別結果

5.2 土質判別結果

a. セグメント位置 3201m での判別結果

R3201m (R:右回転、セグメント布設位置 3201m) 掘削時の測定波形を図-16 に示す。No. 3 と No. 6 の波形による判別結果を図-17, 18 に示す。これらの図で、黒色の部分が固結シルト、灰色の部分が砂を表す。図-10, 11 に示した交換前の判別結果では左右非対称であったが、図-17, 18 ではほぼ左右対称になっており、判別ビットを先行ビットより高くした効果が現れている。

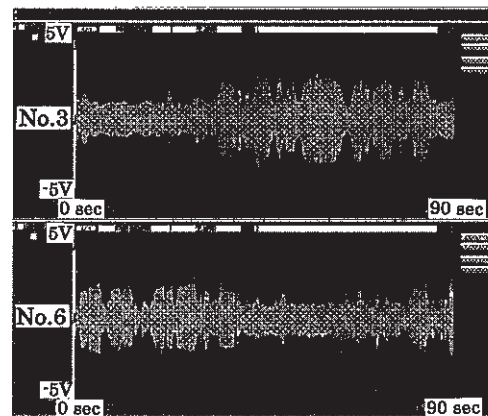


図-16 R3201m 測定波形

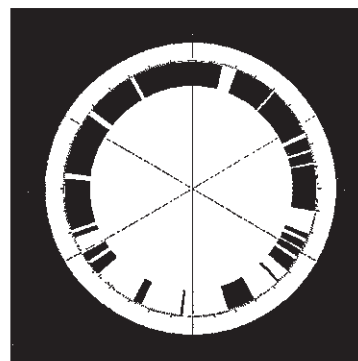


図-17 R3201mNo. 3 のデータによる判別結果

測定地点から約10m離れた3200m付近で事前に実施されたボーリング調査から求めたシールド掘削地点の土質分布を図-19に示す。ここで、黒色の部分が固結シルト、灰色の部分が砂を表す。図-17、18と図-19の結果を比べてみると両者はほぼ同じ地層構成になっており、判別が正確に行われたと言える。

b. 掘進距離と振動の大きさとの関係

ビット交換以降の数m毎の測定結果について、砂に区分した区間の振幅値の平均値と固結シルトに区分した区間の振幅値の平均値を求め、それらの値を交換直後からの掘進距離で表示した結果を図-20に示す。

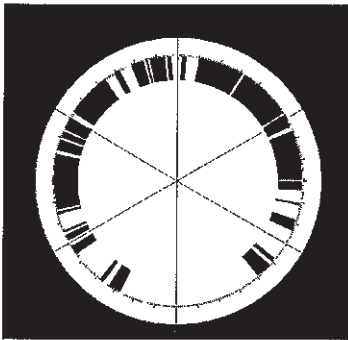


図-18 R3201mNo. 6のデータによる判別結果



図-19 3200m付近のボーリング結果

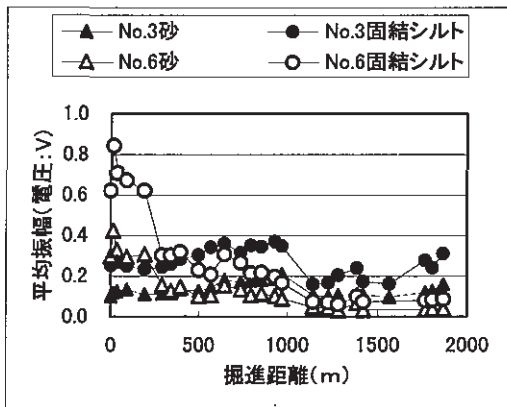


図-20 振幅値の推移

これによると交換から約400mまでは切削幅の小さいNo.6のビットでの振幅値の方が大きいですが、掘進距離の増加に伴い振幅値が大きく減少しており、400m以降についてはNo.3のビットより振幅が小さくなっている。この理由としては磨耗によりビット刃先が丸くなったことが影響していると思われ、掘削幅の小さいNo.6のビットの方が磨耗の影響が大きかったと思われる。

6. あとがき

今回の工事ではシールド掘削地点の地質が砂と固結シルトの2種類で、しかも強度的に大きな差があったことから切削時の振動の大きさの違いから土質を判別することができ、ビット交換を比較的切羽の安定しやすい土質のところで行うことができた。さらに、交換時には土質判別用のビットを改良し最終切羽まで土質を判別しながら掘進を行うことができた。

今後より複雑な地層構成の場所や、強度的に今回ほどの差がないところで実施する場合には振動の違いによる判別の他に、例えば掘削抵抗の違いによる方法を組み合わせる必要があると思われる。

本技術の開発にあたっては共同研究者の横浜市下水道局の担当者から貴重なご意見とご協力を頂いた。さらに、実施工での測定に際しては工事を担当された奥村・五洋・トピー建設共同企業体の職員に多大なご協力を頂いた。ここに感謝の意を表す。

【参考文献】

- 1) 篠原茂、浅葉堯、佐藤泰一他、「ビット切削振動によるシールド切羽土質判別」、土木学会第53回年次学術講演会概要集第6部、pp102-103
- 2) 篠原茂、大久保一文、佐藤泰一他、「ビット切削振動によるシールド切羽土質判別(その2)」、土木学会第55回年次学術講演会投稿中