

近接工事施工におけるオープンシールド工法の適用性に関して

オープンシールド協会 ○中村 充博

1. はじめに

家屋等の重要構造物が近接している道路下や既設水路内に函体や開渠を埋設する場合、従来の開削工法（例えば鋼矢板土留め工法）では、周辺環境および地盤への影響が懸念される。そこで、本報告では狭隘部の函体敷設にて採用されるオープンシールド工法の概要と特長を概説後、鋼矢板土留め工法とオープンシールド工法の二次元平面ひずみ条件での FEM による線形弾性解析結果の例により、近接工事施工でのオープンシールド工法の適用性について述べる。更に、施工現場にて変位測定を行った結果についても報告を行う。

2. オープンシールド工法の概要

オープンシールド工法とは、開削工法やシールド工法に代わる施工方法で、函体・開渠を地中に埋設する工法である。主に、市街地、近接施工、硬質地盤、軟弱地盤、地下水のある地盤等を中心に、安全性はもとより経済性と環境に配慮した工法である。平成 27 年度末現在で 890 件を超える施工実績がある。

施工方法により、裏込注入タイプ (NOS I 型)、裏込注入なしタイプ (NOS II 型)、推進タイプ (NOS III 型)、自走タイプ (NOS V 型) の 4 つのタイプがあり、様々な施工条件において、これらのタイプの使い分けを行っている。本稿では、裏込注入タイプ (NOS I 型) について述べる。(以下、オープンシールド工法という。)

オープンシールド工法は、上部が開放されたオープンシールド機 (以下、シールド機という。) を使用し、切羽内部をバックホウにより掘削・排土しながら、敷設した函体を反力としシールドジャッキによりシールド機を 1 函体長分掘進する。掘進と同時に発生するテールボイド (シールド機部材厚分) へは可塑状の裏込注入材を充填する (二次注入)。また、掘進と同時に函体上部の埋戻しも順次行う。1 函体長分を掘進後、シールド機テール部のスペースに函体を設置し、函体外側とテール部との間に裏込注入材を函体底部から充填する (一次注入)。以上の作業を繰り返して函体を敷設する工法である。

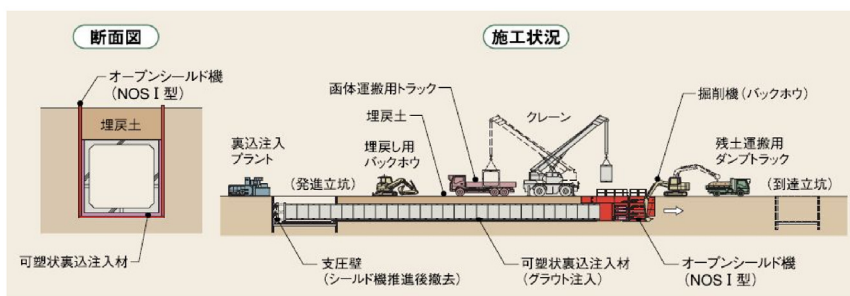


図-1 オープンシールド工法施工概要図



写真-1 オープンシールド機

3. オープンシールド工法の特長

以下に、狭隘箇所でのオープンシールド工法と開削工法（鋼矢板土留め工法）の概略比較の一例を示すことにより、本工法の特長を述べる。

- (1) シールド機幅は函体外幅+約 40cm 程度であり、鋼矢板土留め工法の施工幅（函体外幅+約 120cm 程度）と比較して施工幅が小さいため、狭隘部での施工が可能であり建設発生土量が少ない。
- (2) 鋼矢板工法特有の矢板の根入れが無く、鋼矢板の圧入や引抜作業に伴う地盤の乱れが少ないため、周辺地盤への影響が少ない。
- (3) 函体側部および底部の空隙部へは可塑状の裏込注入材の充填を即時に行うため、開削工法での函体側部の埋戻し材の転圧不足による埋戻し材の緩みが少ない。
- (4) シールド機は剛性が高いため、鋼矢板土留め工法にて使用する鋼矢板のたわみ量よりも少ない。
- (5) シールド機は側板と底板からなる土留め機構となるため、掘削基礎地盤のヒービング、ボイリングや地下水の流入が少なく、函体の敷設作業を安全にできる。
- (6) 開削工法と比較して短い施工帯で開口部が小さいため、転落災害や第三者災害等における安全性が高い。

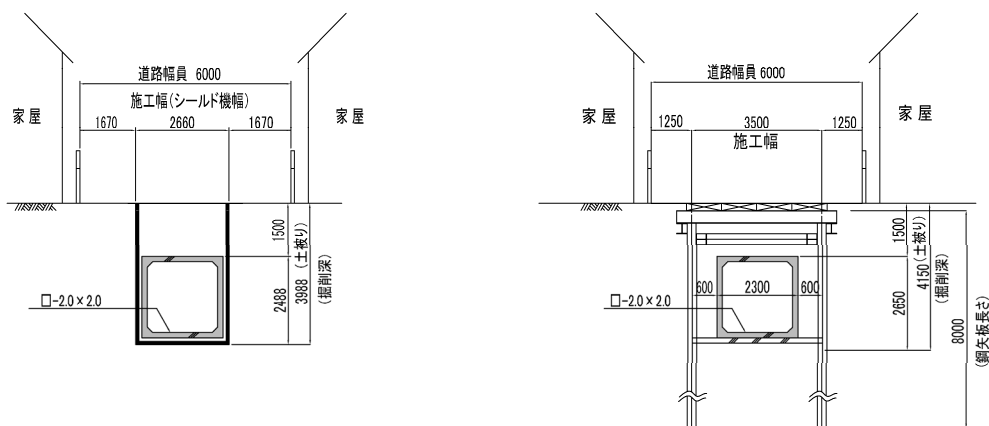


図-2 オープンシールド工法（左図）と開削工法（右図）の比較例図

4. FEM 解析によるオープンシールド工法と開削工法との比較

函体や開渠等のコンクリート構造物を地中に埋設する工事は、家屋等の重要構造物に近接して施工する事例が多くなっている。重要構造物に対して近接施工を行う場合、工事に伴う地盤変状の影響を定量的に把握し、評価する事が必要になってきている。地盤変状の予測を定量的に行う方法としては、FEM による数値解析が多く利用されている。以下に、オープンシールド工法と開削工法（鋼矢板土留工法）との FEM 解析結果の比較例を示す。

(1) オープンシールド工法の FEM 解析手法について

1) 解析手法について

FEM 解析によるオープンシールド工法における周辺地盤の変位量の予測として、地下トンネル工事に用いるシールド工法の手法を参考にする。

近接施工技術総覧¹⁾によると、シールド施工法による地盤変形の発生要因は、①切羽掘削の影響、②シールド部、③テールボイド部、④敷設済みセグメント部の4段階によって生じるものとされている。

また、シールド工事における FEM 解析は、二次元平面ひずみモデルによる地盤変状に及ぼす要因を応力解放率 α により代表させた応力解放率手法が多く用いられており、この応力解放率 α は、シールド工事では現場計測結果や文献等などの多くの実績により、その相関性が確認されている。

したがって、オープンシールド工法においても応力解放率 α を用いた二次元平面ひずみモデルによる FEM 解析を採用する。また、地盤変形の発生要因については、切羽掘削、函体敷設・裏込注入、函体上部埋戻しの各施工段階での影響が考えられ、次項に述べる解析ステップを設定する。

2) 応力解放率 α の算出方法と弾性係数 E の設定について

オープンシールド工法における応力解放率 α の算出は、オープンシールド工法の施工現場において、地表面の平面変位測定を行い、その結果から FEM による逆解析を行い、応力解放率 α を算出することとした。

地表面の平面変位測定は、図-3 に示すように測定箇所をあらかじめ定め、①切羽掘削時、②シールド機推進時、③函体敷設・裏込注入時、④函体上部埋戻し・施工完了時の各時点で、舗装や地盤等の目地開き量とその箇所でのシールド機からの離れを測定する。

これによって測定した値を、FEM 解析にて、①掘削、②函体敷設・裏込注入時、③函体上部埋戻し時・施工完了時と、各々のステップ毎において応力解放率 α を変えながら、地表面変位測定結果にほぼ近似するように、応力開放率 α の決定を行う。

弾性係数 E について山田ら²⁾ は、シールド機推進時の摩擦による地盤の乱れとして、トンネルの 1m 側方で孔内水平載荷試験を実施して求めた結果、施工後の弾性係数 E が施工前の弾性係数 E に比べ、1/2 程度となる結果であると示している。そのため、オープンシールド工法での FEM 解析においても、シールド機推進時の摩擦による影響等を考慮し、掘削時以降においてはシールド機側面から左右 1m は、地盤の弾性係数 E を 1/2 に低減するものとした。

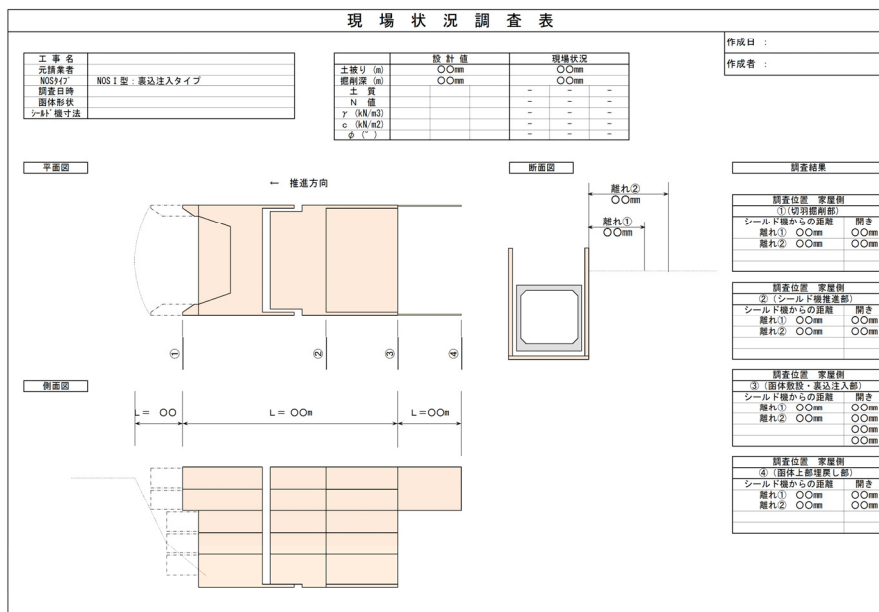


図-3 地表面の平面変位測定図

(2) 開削工法の FEM 解析手法について

FEM 解析での開削工事における周辺地盤の変位量の予測方法としては、①土留め工と地盤とを一体とし、掘削前の初期応力と施工段階に応じて開放する逐次解析による方法、②弾塑性法により別途求めた土留め壁の変位を強制変位として与え解析する方法がある。本解析においては後者の方法を採用した。なお、土留め壁に使用する鋼矢板の圧入や引抜に伴う地盤への影響は考慮しないものとした。

(3) FEM による解析例

1) 解析条件

以下に、オープンシールド工法と開削工法の解析条件を示す。

① 解析地盤

函体敷設工事におけるオープンシールド工法と開削工法での影響量を検証するため、二次元平面ひずみ条件での線形弾性解析手法による FEM 解析を、砂質土地盤のケース（以下、Case-1）と粘性土地盤のケース（以下、Case-2）の 2 ケースについて解析を行った。なお、FEM 解析ソフトは、2D- σ （柵地層科学研究所）を使用した。

② 解析領域の境界条件

解析領域の境界条件については、側方境界は水平方向の変形のみを拘束し、下方境界は、水平方向と鉛直方向の変形を拘束した。水平方向の境界は、掘削深さの 3 倍程度を見込み、鉛直方向の境界は、掘削深さの 2.5 倍程度を見込むものとした。

③ 解析ステップ

オープンシールド工法での解析ステップは、施工前の状況（現況）における初期応力解析（ステップ 1）、次に $\alpha_1\%$ の応力を解放させた掘削（ステップ 2）、次に $\alpha_2\%$ の応力を解放させた函体敷設・裏込注入（ステップ 3）、最後に函体上部埋戻しにて残りの応力を全て解放させる 4 ステップ方式を用いた。また（1）項で述べたように、掘削時以降のステップにおいて、シールド機側面から左右 1m は、地盤の弾性係数 E を 1/2 に低減するものとした。

開削工法での解析ステップは、オープンシールド工法と同様に、ステップ 1 にて初期応力解析を行った後、ステップ 2 での掘削解析時において、弾塑性法により別途求めた土留め壁の土留め壁の変位を強制変位として与え、ステップ 3 にて函体敷設・埋戻しを行う 3 ステップ方式とした。

④ 解析図および物性値

各ケースにおける解析図および物性値を、図-4、図-5 に示す。ポアソン比に関しては、トンネル標準示方書³⁾の地盤諸定数の数値を採用した。弾性係数 E に関しては、トンネル解析での実績の多い $E = 700\text{N}$ を採用した。オープンシールド工法における応力解放率 α は、本検討条件に近い逆解析による砂質土地盤および粘性土地盤の各ステップでの応力解放率 α の実績より、Case-1 では、ステップ 2 の掘削時において $\alpha_1 = 35\%$ 、ステップ 3 の函体敷設・裏込注入時において $\alpha_2 = 35\%$ 、ステップ 4 の函体上部埋戻し・施工完了時にて残り $\alpha = 30\%$ とした。Case-2 では、ステップ 2 の掘削時において $\alpha_1 = 15\%$ 、ステップ 3 の函体敷設・裏込注入時において $\alpha_2 = 25\%$ 、ステップ 4 の函体上部埋戻し・施工完了時にて残り $\alpha = 60\%$ とした。



図-4 Case-1 (砂質土地盤) での解析図および解析物性値



図-5 Case-2 (粘性土地盤) での解析図および解析物性値

2) 解析結果および考察

Case-1 および Case-2 におけるオープンシールド工法と開削工法の施工終了時での FEM 解析結果図および累計水平変位量を図-6、図-7 に示す。水平変位量の負号と方向は、「+」は右方向への変位、「-」は左方向への変位である。また、図中に表記した水平変位量の測定値は、敷設函体の側壁部から 1.0m、1.5m、2.0m、2.5m での地表面での数値を示した。

Case-1 では、オープンシールド工法の水平変位量の最大値は、函体側壁部から 1.0m の位置において 6.7mm であり、開削工法では、同位置で 24.9mm の結果となった。また、オープンシールド工法の水平変位量の割合は、開削工法と比較して約 25% 程度の結果となった。

Case-2 では、オープンシールド工法の水平変位量の最大値は、函体側壁部から 1.0m の位置において 5.5mm であり、開削工法では、同位置で 42.7mm の結果となった。また、オープンシールド工法の水平変位量の割合は、開削工法と比較して約 12% 程度の結果となった。

これらの結果から、Case-1 および Case-2 のどちらの結果においても、オープンシールド工法は開削工法と比較して変位量が小さい結果となった。

また、Case-2 の N 値が低い粘性土では、開削工法の鋼矢板の変位量が大きいため、オープンシールド工法と比較して変位量の割合が大きくなっていることが分かる。

このように、オープンシールド工法が開削工法より周辺への影響が小さい結果となるのは、剛構造のシールド機で土留めを行いながら函体を敷設すること、シールド機推進とのバランスをとりながら切羽地山の掘削を行うこと、函体底部および函体両側部外周を裏込注入材で即時充填することにより周辺地山の緩みを小さく抑えることができることなどによるものと考えられる。

以上より、FEM 解析の計算結果から、オープンシールド工法は開削工法と比較して変位量が小さく、近接施工において適していると考えられる。

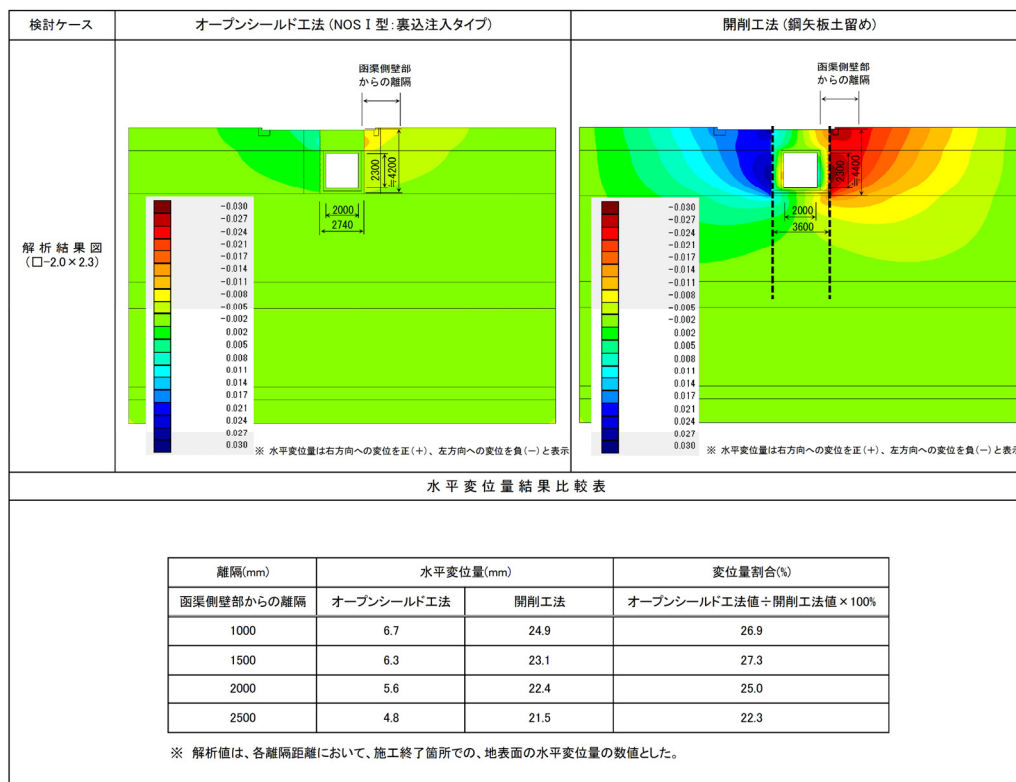


図-6 Case-1 (砂質土地盤) での FEM 解析結果

および函体側壁部から各離隔距離における地表面の水平変位量と変位量の割合

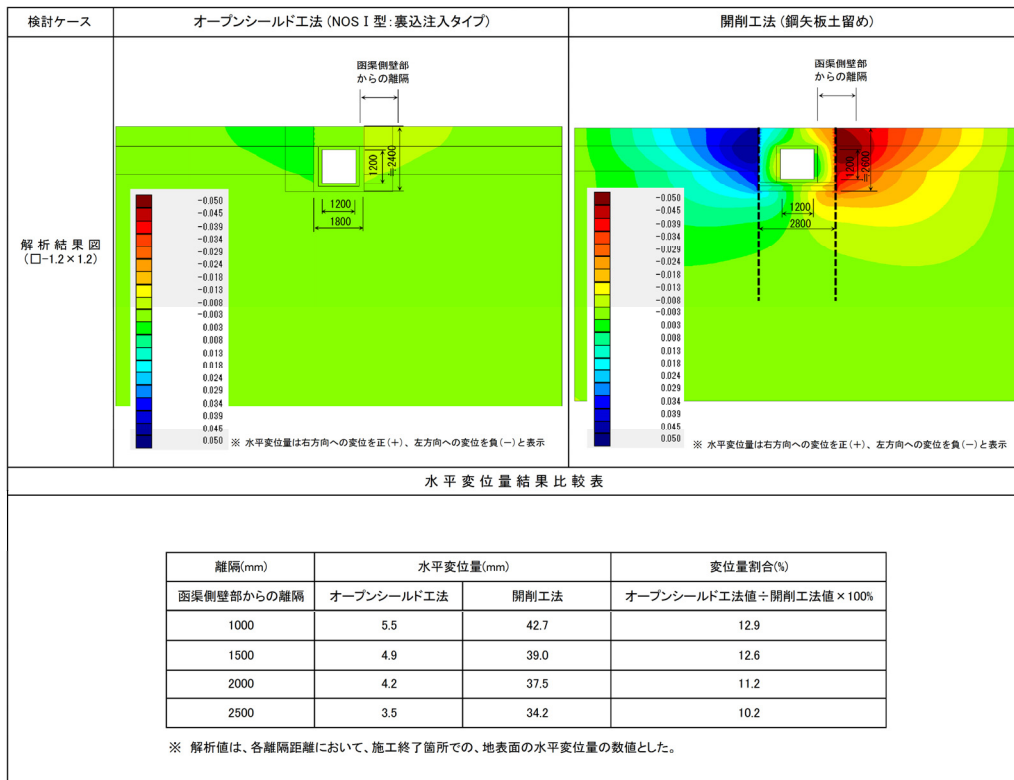


図-7 Case-2 (粘性土地盤) での FEM 解析結果
および函体側壁部から各離隔距離における地表面の水平変位量と変位量の割合

5. 施工現場におけるオープンシールド工法での変位結果の報告

以下に、4 章にて述べたオープンシールド工法の各ケースでの FEM 解析結果と、施工現場において実測した地表水平変位との比較結果を述べる。施工現場にて測定した地表面の水平変位量と、FEM 解析にて算出した水平変位量の計算結果の比較を、図-8 に示す。

施工現場での測定は、施工完了箇所において、図中に表記したシールド機側部からの離隔位置において地表面の目開き量を測定した。この目開き量を FEM 解析値での水平変位量として比較を行った。

結果より、Case-1 に関しては、FEM 解析値と現場測定値の結果の差は 0.2~0.4mm 程度と近い値となった。Case-2 に関しては、FEM 解析値と現場測定値の結果の差は 0.7mm 程度なり、Case-1 と比較して 2 倍近い開きとなった。ただし、Case-1 および Case-2 とも施工現場の変位量は、FEM 解析値と比較して小さい値となった。

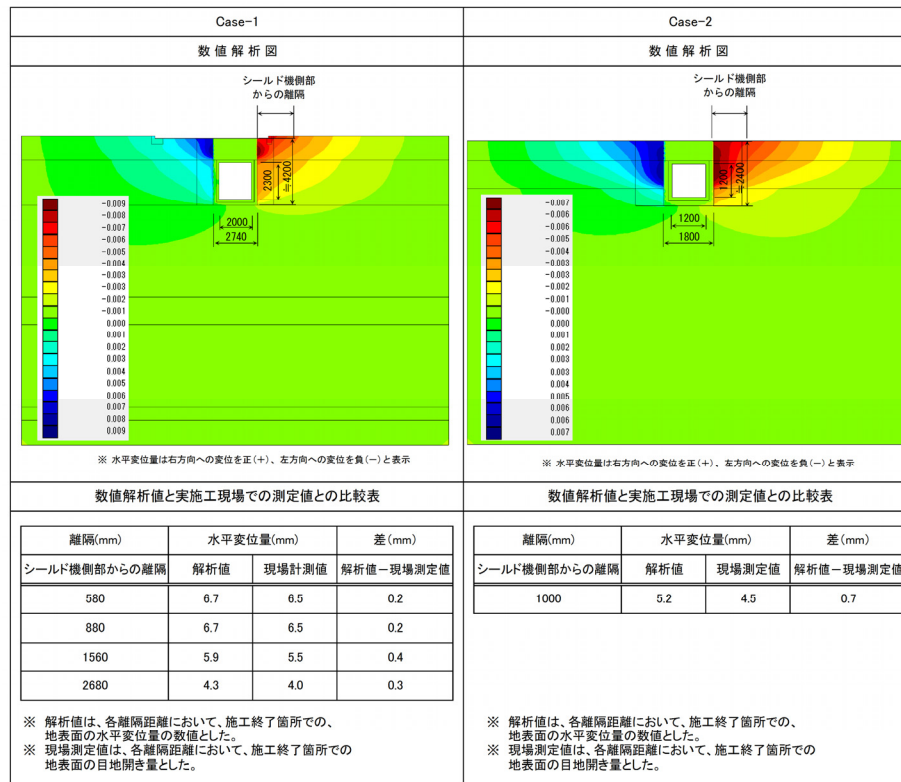


図-8 Case-1（砂質土地盤）、Case-2（粘性土地盤）でのオープンシールド工法における FEM 解析結果と施工現場における測定値との比較

6. まとめ

- ・ FEM 解析によるオープンシールド工法と開削工法（鋼矢板土留工法）との比較例より、本工法は開削工法と比較して周辺地盤への影響は小さく、家屋等の重要構造物の近接工事での施工工法として適していると考えられる。
- ・ オープンシールド工法で設定した応力解放率を用いた二次元平面ひずみ条件での線形弾性解析手法による FEM 解析値と実測した地表面変位量とは若干の差はあるが、ほぼ実測値に近い値となった。
- ・ 本工法においては、今後さらに施工現場における計測データ収集と解析の蓄積および関連文献の調査等を行い、適切な解析モデルと応力解放率の設定により、解析値と実測データとの相関性を深めていく予定である。

7. 参考文献

- 1) 近接施工技術総覧（1997年3月）：(株)産業技術サービスセンター
- 2) 山田孝治, 吉田保, 間片博之, 橋本定雄：沖積地盤におけるシールド掘進に伴う地盤変状とその予測解析に付いて、土木学会論文集, 第373号/VI-5, 1986年9月
- 3) トンネル標準示方書-開削工法編-同解説（平成8年度版）：社団法人 土木学会