

R 15 m急曲線部のシールド洞道覆工設計と現場計測結果
LINING DESIGN OF SHARPLY CURVED SHIELD TUNNEL IN 15 METERS RADIUS
OF THE CURVE AND ACTUAL LINING BEHAVIOR DURING CONSTRUCTION

小林重仁* 児玉守広* 杉戸 孝*
田中 弘** 阪本隆広**

Shigehito KOBAYASHI, Morihiro KODAMA, Takashi SUGITO,
Hiroshi TANAKA and Takahiro SAKAMOTO

The authors designed tunnel lining segments for a sharply curved shield tunnel in 15 meters radius of the curve in consideration of structural stability in the longitudinal direction of a tunnel during sharply curved tunnel construction. To supervise safety construction, in-situ measurements of the segments were carried out at the curved portion and detailed lining behavior well corresponded with the construction manner was obtained.

Keywords: shield tunnelling, sharply curved tunnel, lining stress, in-situ measurement

1. まえがき

都市部市街地における地中線洞道建設は、地上ならびに地下の既設構造物、あるいは周辺交通や環境条件等の制約を受けることからシールド工法がその代表的な工法となっている。また、一般に、市街地に構築する地中線洞道は公道下に計画される場合が多く、その線形は道路線形に支配される。しかも極力道路敷地内に配置することが望ましいため、急曲線施工を余儀なくされることが近年増大している。

著者らはこれまでに、シールドトンネル覆工の、特に、トンネル軸方向構造評価に関する研究¹⁾や模型実験²⁾、ならびに曲線施工時の覆工挙動に関する現場計測(例えばR90m³⁾、R25m⁴⁾)などを継続して実施しているが、今回は、R=15mの急曲線を含む洞道建設に際して、急曲線施工時のトンネル軸方向の構造安定性を考慮にいたれた急曲線用のセグメントを設計し、また、施工時に約2m間隔の計測断面を計画してR=15m急曲線施工時の詳細な覆工挙動を調査したので報告する。

2. 1 現場概要と覆工設計概要

今回報告する現場は、名古屋市内における仕上がり内径 $\phi=3.2\text{m}$ (覆工外径 3.91m)、洞道延長 2.2k

* 正会員 中部電力㈱中央送変電建設所 地中線土木課

** 正会員 日本工営㈱コンサルタント第五事業部都市土木部

mの洞道工事のうち、曲線半径R=15m、曲線区間長23.4mの急曲線施工区間である。急曲線部の土被りは18.6m（4.5D、D：シールド外径）と深く、掘進地盤はN値 11～19程度の熱田砂層である。本工事で採用したシールド機は外径 4.1mの泥土圧式シールドで、R=15m急曲線施工のために右 10.5°の中折れ機構を備えた前胴押しタイプの中折れ式シールドである。

一次覆工セグメントは、直線部が幅1m、曲線部は幅30cm（直線用より直径を4cm縮小）の鋼製セグメントで、曲線部は遮へい袋付きを交互に用いている。また、急曲線用セグメントは西野らが提案した軸方向構造解析モデル¹⁾を用いて、急曲線施工時の覆工構造安定が確保されるようにトンネル軸方向の覆工設計検討を別途行い、主桁厚さを直線用12mmに対し22mmに増強し、リング継ぎボルトを2穴式とした。

3. 本現場計測計画の特徴

図-1にR=15m急曲線区間の覆工挙動の計測断面位置図を示す。これまでの曲線施工時の現場計測では、2～4断面程度の計測断面箇所を実施していた³⁾⁴⁾。したがって、覆工挙動の分析は限られた数のセグメントの計測値を基にするしかなく、計測セグメント断面からしだいに遠ざかるシールド推進ジャッキ位置の距離との関係で計測データを整理し、推力の後方伝播分布等の分析を行なってきた（図-2(b)参照）。計測値のこうした整理法が適用できるのは、例えば、直線部を順調に施工している時のように掘進推力が一定の場合には有効である。ところが、曲線施工時にはややもすればシールド機の掘進条件（総推力や使用ジャッキパターンなど）が変動し易く、こうした場合は、ジャッキ推力の変化が含まれたままの計測値で後方伝播分布を分析せざるを得なかった。

そこで、今回の計測では、計測セグメント断面の計測項目を倏約するかわりに、ジャッキ推力の後方伝播分布等を直接的に得られるように（図-2(a)参照）、計測セグメント断面を計16断面配置し、R=15m急曲線部の覆工挙動を詳細に計測できる計画とした。本報告では約 2.1m間隔で計測されたスチールセグメン

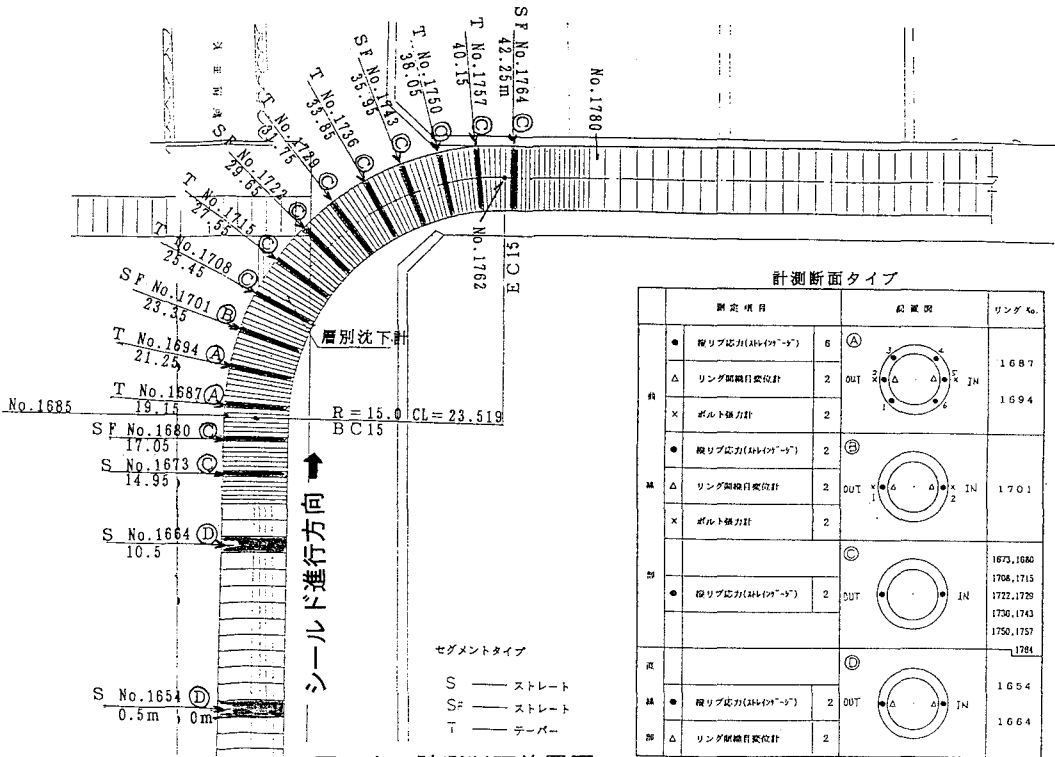


図-1 計測断面位置図

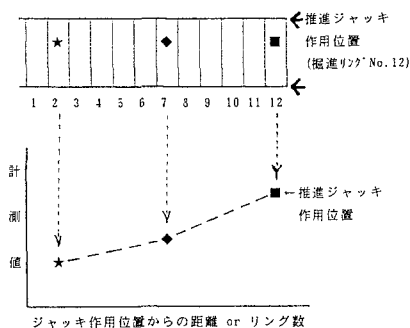


図-2 (a) 「直接分布」の整理法

トの縦リブひずみ（曲線内側と外側に対応するセグメントリングの水平方向に配置）データを中心に紹介する。

4. 計測結果と考察

4.1 急曲線部の施工状況

計測した覆工挙動の解釈を行うために、シールド掘進管理データの収集も同時に行なった。覆工挙動を紹介する前に、図-3～図-6に代表的な掘進管理データを示し、今回のR=15m急曲線部の施工がどのように行われたかを示す。なお、各図の横軸の距離目盛りは第一計測リング位置を原点0mとして表している。

図-3は曲線部手前の直線区間のトンネル進行方位を0度として表したシールド機の進行方位変化図である。太線が直線区間、細線がR=15m区間である。細線で示す曲線部では進行方位の角度変化が一定しており、R=15mの曲線線形を正確に描く安定した施工が行われている。ただし、シールド機が曲線部にスムーズに侵入できるように曲線開始部より約3.3m手前からシールド機の進行方位が変化し始めている。図-5はコピーカッターストローク（設計ストローク長275mm）の変化図である。曲線部を黒のプロットで示しているが、コピーカッターの使用も曲線開始より約6.3m手前から始まっている。

本シールド機は合計16台の推進ジャッキを装備している。計測区間では概ね11～14台のジャッキを稼働させており、直線、曲線部での使用ジャッキ数の差は特に無いが、図-4にジャッキ総推力（各リン

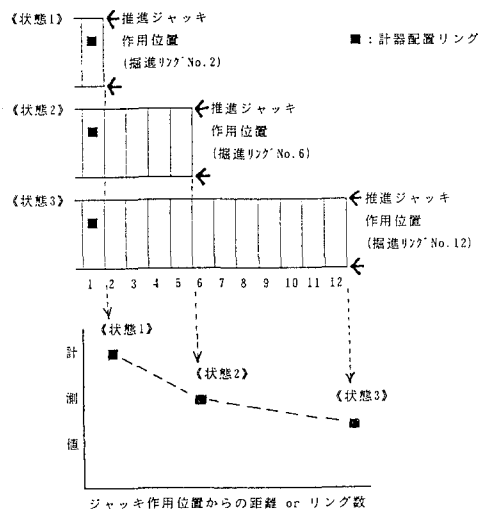


図-2 (b) 「読替え分布」の整理法

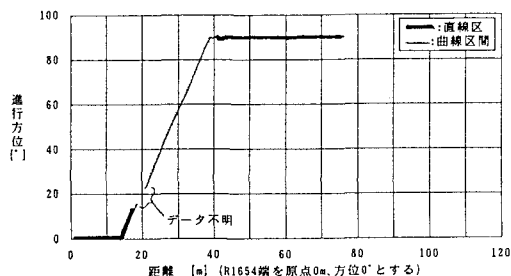


図-3 シールド機の進行方位

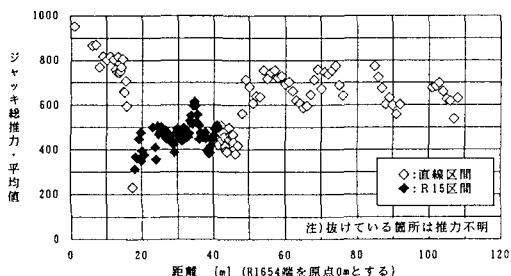


図-4 総推力（リング当たり平均値）

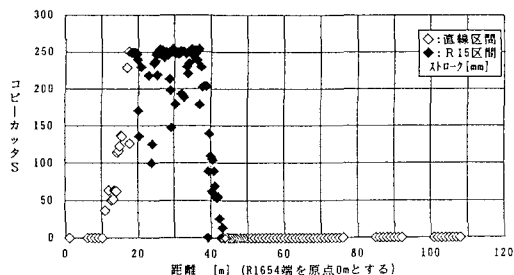


図-5 コピーカッターストローク変化

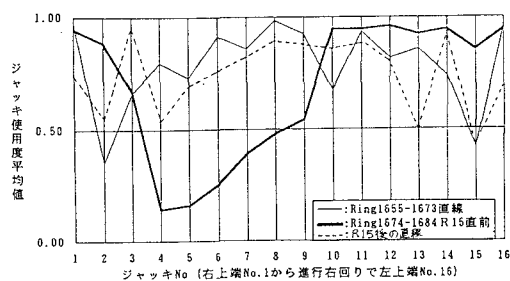


図-6 (a) 直線部のジャッキ使用度

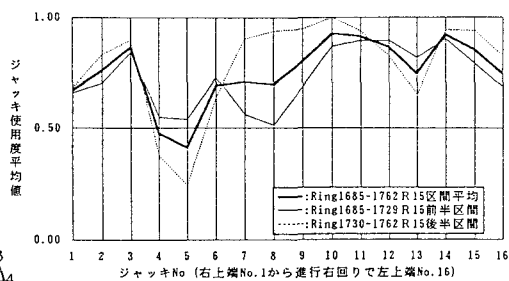


図-6 (b) 曲線部のジャッキ使用度



グ掘進中の平均値)の変化を示す。直線部では600～800tf程度であるのに対し、曲線部では500tf前後と小さい総推力で順調な曲線施工が行われている。図-6にジャッキ使用度(ジャッキ片押し度)を示す。縦軸のジャッキ使用度とは、ジャッキ使用時を1.0、未使用時を0.0として各ジャッキの使用度を数値化したものである。ジャッキ操作は各リング推進中にも逐次変化させており、また、施工区間毎の平均値で表しているため0.0～1.0の間の値も登場している。図-6(a)は直線部、図-6(b)は曲線部でのジャッキ使用度である。また図-6(a)では、曲線開始部の手前約3.3m区間の直線部でのジャッキ使用度を特に太線で別に示した。同図より、今回の曲線施工では図-6(a)の太線で示した曲線手前の直線区間から偏心させたジャッキ操作が行われ、しかも、片押し度としては曲線部を順調に推進している時より大きいことがわかる。

4.2 覆工の発生応力分布

図-7にR=15m急曲線施工時の縦リブ発生応力分布(図-2(a)の整理方法)を示す。図中の計測プロット右端がシールドジャッキ作用位置に相当し、上から順にシールドの進行過程を追って示している。また、各図の横軸は第一計測リング位置を原点0mとして表しており、横軸18.4～41.8mの間がR=15m急曲線部である。ここに示した曲線内側(白プロット)と曲線外側(黒プロット)の縦リブ発生応力は、前節で解説したシールド掘進の施工状況を非常によく反映したものとなっている。すなわち、ジャッキ操作の片押し度が最も大きい曲線開始部手前数mで内外の縦リブ応力差が最大を示し、偏心ジャッキ操作による曲げモーメントが増大している。一方、総推力やジャッキ片押し度が比較的小さく順調に施工された曲線区間の方では、むしろ曲げモーメント(内外の縦リブ応力差)は小さいことがわかる。また、同図の最下図は、第一計測リング(横軸0mの断面)計測開始から1ヶ月、曲線部通過から21日経過した時点での応力分布であるが、施工に伴って生じた覆工応力はほとんど変わらずに残留している点が注目される。

図-8は、計測4断面を例にとり、計測断面と推進ジャッキとの距離の関係(この場合の横軸の距離目盛りは、各計測リング位置を原点0mとする)で整理した縦リブ発生応力変化図(図-2(b)の整理方法)である。この図でも、計測断面からシールド機が10m程度進んだ時点での発生応力がその後も残留する傾向を示す。用いた裏込材の試験練り圧縮強度から判断すると、約15 kgf/cm²程度の強度発現時期(材令5日程度)が一定の残留応力となる時期と一致する。

4.3 推力伝播分布

シールド掘進が進み推進ジャッキが遠ざかるにつれ、覆工はしだいに作用推力の伝播影響を受けなくなる。図-9は、代表的な計測2断面に対して、この推力伝播分布を断面力で示したものである。ただしここでは、今回配置した約2.1m間隔の計測断面で直接計測したデータから得た推力伝播の直接分布(図中黒プロット:図-2(a)の整理方法)と、計測断面数が限られていたこれまでの現場計測の場合に採用していた、推進

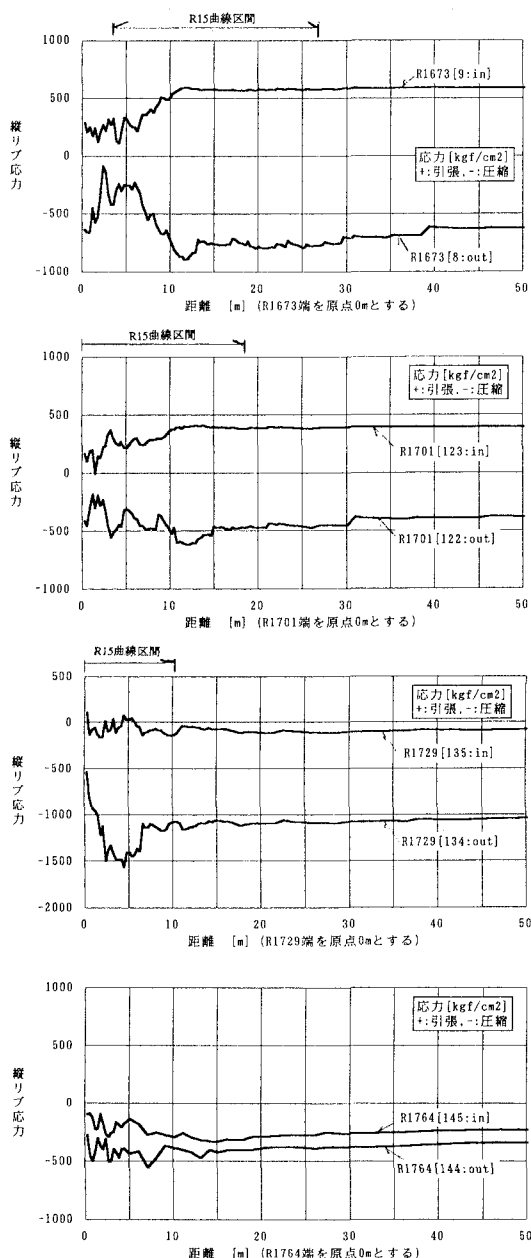
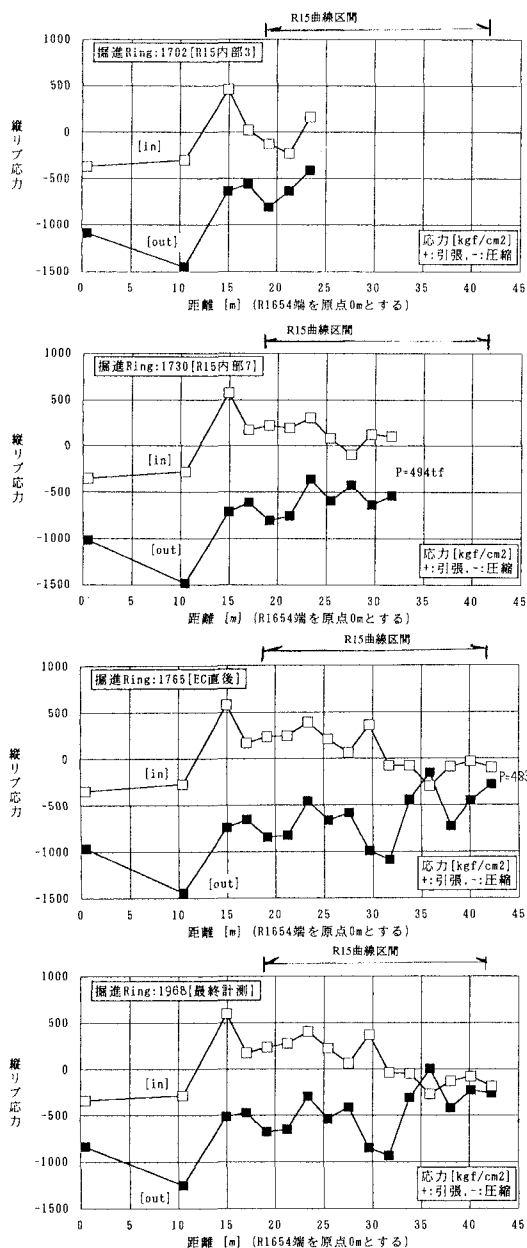
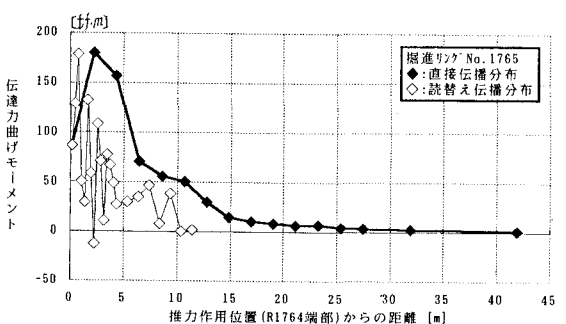
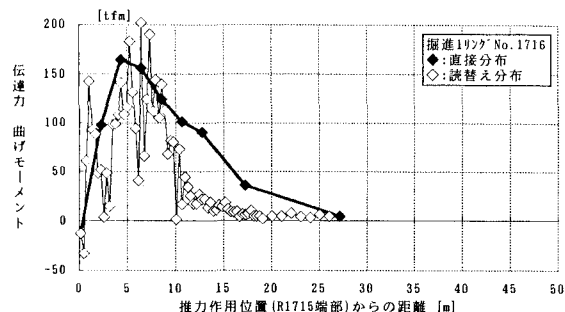
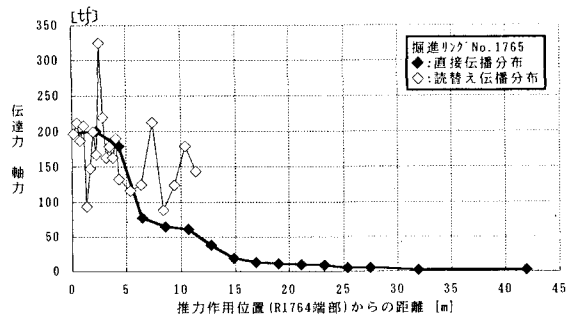
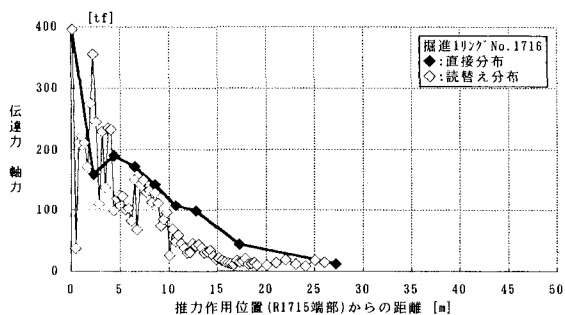


図-7 縦リブ発生応力カトンネル軸方向分布

図-8 ジャッキ推力の距離と縦リブ発生応力

ジャッキとの距離の関係で読み替えて整理した読替え分布 (図中白プロット: 図-2 (b) の整理方法) とを比較して示す。図-9 (a) は $R=15\text{m}$ 急曲線区間のほぼ中間位置での計測断面を横軸の原点 0m として、それより後方リングへの推力伝播を示した場合、図-9 (b) は $R=15\text{m}$ 急曲線が終了する位置での計測断面を横軸の原点 0m とした場合である。

これまで用いることの多かった読替え分布 (図中白プロット) は、曲線施工時中、ないしは曲線と直線の施工の違いによる総推力や使用ジャッキパターンの変動の影響を含んだ計測値のまま表示することになるため、かなり不安定で不正確な伝播分布図となる。それに対して、実際の推力伝播分布は図中黒プロットで示



(a) R 1 5 曲線部中間施工時

(b) R 1 5 曲線部通過直後施工時

図－9 トンネル軸方向推力伝播分布図

すようになっている。また、図－9 (a)によると推進ジャッキ後方25～30m程度にわたって推力の影響が伝播しているのに対し、図－9 (b)ではそれが15m程度と小さくなっているのは、R=15m曲線線形のためにそれ以遠のトンネル覆工の軸方向が推力作用方向に対して完全に直交しているためである。

5. あとがき

今回のR=15m急曲線施工は、曲線部進入開始直前にシールド方向制御のジャッキ操作を最も大きく行い、それ以降は曲線部に入ってから極端な偏心ジャッキ操作を行うこと無く、R=15mの曲線線形をスムーズに描く典型的な曲線施工条件が確保されたため、約2m間隔で直接的に捕らえた覆工挙動も、一般的な曲線施工条件下での覆工挙動として貴重な資料となった。末筆ながら、佐藤工業㈱をはじめとする現場担当者の協力に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Nishino, K., Koizumi, A., Murakami, H. & Tanaka, H.: Study on shield tunnel lining design by taking into account segment joint characteristics, Proc. of Int. Congre. of I.T.A. on Progress and Innovation in Tunnelling, Toronto, Canada, 1989
- 2) 滝 英治, 依田 真, 水野竜也, 和田正樹, 田中 弘: シールドトンネル一次覆工 (スチールセグメント) の軸方向剛性評価の実規模実験, 昭和63年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, III-4, pp.302-303, 1988
- 3) 滝 英治, 奥田康三, 武内秀行, 和田正樹: 曲線シールド洞道施工時の現場計測結果とその考察, 昭和63年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, III-1, pp.296-297, 1988
- 4) 木村 稔, 塩谷清司, 児玉守広: 急曲線シールドトンネルの軸方向設計, 電力土木, No.242, pp.33-40, 1992