

急曲線施工用セグメントの設計法について

小泉 淳*・村上博智**・石田智朗***・
高松伸行****

本論文は、シールドトンネル急曲線施工用セグメントの設計法を提案したものである。まず、トンネルを棒部材とばね部材にモデル化してトンネルに発生する断面力を求め、その断面力を用いてリング継手断面の応力度および変形量を算出し設計を行う手法を提示している。次に、現場計測結果を用いて提案した設計法の妥当性を検証し、最後に、代表的な標準セグメントの数例を対象として急曲線施工用セグメントの設計例を示したものである。

Keywords : shield tunnel, segment, sharply curved tunnel

1. はじめに

シールドトンネルは、公道下に構築されるのが一般的である。地下鉄や道路では通過車両の速度をある程度確保するため、急曲線を含む線形を選定することは避けなければならないが、電力・通信用および上下水道用などのシールドトンネルでは、公道の線形に合わせて施工される場合が多い。近年、都市の過密化や交通事情などによる制約から立坑用地の確保が困難となってきたばかりでなく、公道の交差点に方向転換立坑を建設することは不可能に近い。このような背景からシールド工事において急曲線施工を行う場合が急激に増加している。

シールドトンネルの急曲線施工区間用のセグメントとしては、応急的な対応がとりやすいことから、鋼製セグメントを用いる場合が多いが、過去においては、無理な推進により過大な推力をセグメントに作用させるため、リング継ぎボルトが破断したり、鋼製セグメントの縦リブが座屈するなどの例が見られた。そのため、施工法的には、トンネル周辺の地山を自立が可能な程度にまで改良し、余掘りをかなり大きくした上で推力を軽減してトンネルを構築したり、一方、セグメントには圧縮側の断面にブッシュロッドを挿入し、引張側の断面にはクリップ状の鋼材を溶接したり、または、圧縮側・引張側ともに形鋼を溶接するなどそれぞれの現場に応じた応急的な処置を施してきたのが一般的であった。また、通常のセグメント幅の2分の1程度の幅を持ったセグメントを使用することによりシールドテール部でのシールドとセグメントとの競りを少なくする等の対策が取られてきた。

しかしながら、これらの場合においてもセグメントリングの設計は、通常のトンネル横断面内の挙動を考慮したのみで、トンネル軸方向の挙動に対しての設計は特別になされていない実状にあったように思われる。

現行の急曲線施工では、このように、施工面における対応により工事を進めているのが実状であり、設計面からのアプローチはほとんど行われていなかった。しかし、今後、急曲線施工はさらに必要度を増すことが予想され、それに伴い地盤改良を行うための地上用地の確保が困難であったり、補助工法を用いること自体が不可能である場合が生じてくると考えられる。また、シールドの性能向上による中折れ装置の採用や施工技術の進歩により補助工法を用いなくても急曲線施工がある程度可能になってきつつあるため、急曲線施工用セグメントの設計方法の確立が急務となってきた。

本論文は、セグメントリングを棒部材に、リング継手をばね部材に置換したシールドトンネルの軸方向棒構造モデル¹⁾を準用し、新たに急曲線施工時のシールドトンネルの構造モデルを提示するとともに、急曲線施工用セグメントの設計方法を提案したものである。

2. 急曲線施工時のシールドトンネルのモデル化²⁾⁻⁵⁾

(1) 解析モデル

a) 構造モデル

直線区間に接続する急曲線区間のシールドトンネルは、図-1および図-2に示すようにその中心線を折れ線に表示して、セグメント1リング分を軸剛性EAおよび曲げ剛性EIをもつ棒部材に置換し、これが相互にリング継手部を置換したばねで結合されている棒構造モデルで評価する。リング継手を評価するばねは、軸ばね K_a 、せん断ばね K_s および回転ばね K_r からなっている。 K_a は圧縮に対しては無限度とし、引張に対する軸ばね

* 正会員 工博 東洋大学助教授 工学部土木工学科
(〒350 川越市鯨井中野台 2100)

** 正会員 早稲田大学教授 理工学部土木工学科

*** 正会員 工修 日本国土開発株式会社 エンジニアリング
本部技術開発部

**** 正会員 工修 東急建設株式会社 技術本部土木技術部

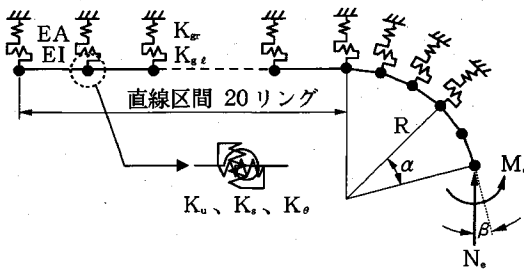


図-1 解析モデル1 (荷重点の拘束がない場合)

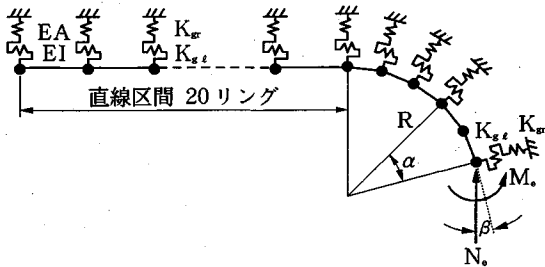


図-2 解析モデル2 (荷重点の拘束がある場合)

定数, せん断ばね定数および回転ばね定数はシールドトンネルの立体構造モデル¹⁾を用いて評価する。

図-1に示す解析モデル1は荷重点の拘束がない場合を示し、図-2に示す解析モデル2は荷重点に拘束がある場合を示す。セグメントリングとシールドテール部との間にはテールクリアランスが存在し、解析モデル1によって求めた荷重点の半径方向の変位がこのクリアランス以下であれば、その解析結果はそのままトンネルの挙動を示すが、クリアランスを越える場合には解析モデル1と解析モデル2との重ね合わせによってその挙動を示すことができる。

b) 地盤ばね定数 K_{gr} , K_{gl}

急曲線区間の検討に用いる棒構造モデルにおいて、トンネルと周辺地盤との相互作用を表すばねのばね定数 K_{gr} および K_{gl} は以下に示すように考えられる。

トンネル横断方向の地盤ばね定数 K_{gr} は、トンネル周辺地盤の反力を評価するものであるから、トンネルの直線区間および曲線区間においてそれぞれ式 (1) および式 (2) により示すことができる。

$$K_{gr} = k \cdot A_0 = k \cdot D_0 \cdot B \dots \dots \dots (1)$$

$$K_{gr} = k \cdot A_0' = k \cdot D_0 \cdot B_T \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 k はトンネル周辺地盤の地盤反力係数であり、 A_0 および A_0' は、普通リングおよびテーパリング1リング当りの射影面積を、 D_0 はセグメント外径を、 B は普通リングのリング幅を表し、 B_T はテーパリングの最大幅を示している。

トンネル長手方向の地盤ばね定数 K_{gl} は、トンネルの周辺摩擦を評価するものであることから、トンネル直線区間および曲線区間においてそれぞれ式 (3) および式

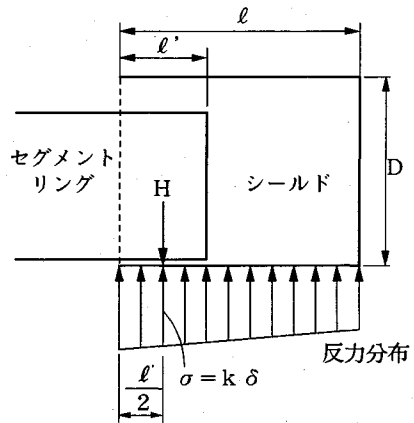


図-3 シールドとトンネルとの相対関係

(4) により与えるものと考えられる。

$$K_{gl} = k \cdot A_1 = k \cdot \pi \cdot D_0 \cdot B \dots \dots \dots (3)$$

$$K_{gl} = k \cdot A_1' = k \cdot \pi \cdot D_0 \cdot \bar{B} \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 A_1 および A_1' は、普通リングおよびテーパリング1リング当りの周面積を示し、 \bar{B} はテーパリングの平均幅を示している。

なお、地盤ばねモデルとしてより複雑 (バイリニア、トリリニア、非線形など) なばねモデルも考えられるが、本解析では計算の簡単化を主に、計算される変位量の大きさ、トンネルのモデル化の精度、周辺地山性状の把握精度などを考え、線形ばねモデルを採用している。

試算の結果によれば、直線区間の長さが20リングを越すとそれが曲線区間の挙動に及ぼす影響はほとんどないことが確かめられている⁵⁾。したがって、解析モデルとしては図-1および図-2に示すように直線区間を20リングとしている。また、シールドテールを出たばかりのセグメントリングは、裏込め注入が十分な強度を発揮していないものと考えて、地盤反力のばね定数は零にする。この区間 (図中、中心角 α の区間) は施工の実状を考慮して決定するものとする。

c) シールドテール部の拘束を表すばねのばね定数

$$K'_{gr}, K'_{gl}$$

曲線区間の先端、すなわち荷重点はシールドテール内にあるので、解析モデル1で荷重点の半径方向変位がテールクリアランスを超えようとする荷重点の変形は拘束を受ける。図-3は、シールドとトンネルとの相対関係を示している。いま、シールドを剛体と考え、地盤反力係数を k 、シールドとトンネルとの接触点をシールドテール部の中心と仮定すれば、横断方向のばね定数 K'_{gr} は次式で示される。

$$K'_{gr} = H/\delta = k \cdot D \cdot l / (4 - 6\lambda + 3\lambda^2) \dots \dots \dots (5)$$

ただし $\lambda = l'/l$ であり、 δ は接触点の変位量である。

また、この点の軸方向の抵抗はセグメントとシールド

内面との摩擦力と考えられるので、そのばね定数 K_{gi} は、

$$K_{gi} = \mu \cdot K_{gr} \dots\dots\dots (6)$$

とする。ここに μ は摩擦係数である。

(2) 荷重

シールドが曲線を切るには、シールド内に装備された推進用のジャッキ（シールドジャッキ）による推力の合力の作用位置は、トンネル横断面内でカーブの外側に偏心させる。いま、急曲線施工時に、トンネルの鉛直直径面から片側のシールドジャッキのみをフルに用いたとすれば、トンネルをモデル化した棒構造モデルの先端には、軸力 N_e とモーメント M_e が作用することになる。これらの外力を具体的に示せば以下のとおりである。

a) 軸力 N_e

軸力 N_e は、シールドジャッキ一本当りの推力を P 、装備されたジャッキの本数を m とすれば、

$$N_e = P \cdot \frac{m}{2} \dots\dots\dots (7)$$

で表される。

シールド工事現場における実測結果⁶⁾によれば、この軸力は図-1 および図-2 に示すように、シールドジャッキの作用点における急曲線の接線方向より曲線の内側に β だけわずかに傾斜している。解析を行うに当っては現場での施工条件を考慮して実状に応じた角度 β を決定する必要がある。

b) モーメント M_e

ジャッキ推力は、スプレッダーによってセグメントリングに均等に作用すると考えられるので、この等分布する圧縮応力度を σ_N とすると、 σ_N は、

$$\sigma_N = \frac{N_e}{A} = \frac{P \cdot \frac{m}{2}}{A} = \frac{P \cdot m}{2A} \dots\dots\dots (8)$$

で示される。ここに、 A はセグメント1リング当りの圧縮有効面積である。この圧縮応力度が図-4 に示すようにリング断面の図心半径 r_c に沿ってリング片側だけに作用すると考えると、 y 軸に関するモーメント M_e は、同図を参照して、

$$M_e = \int x \cdot dp = \int_0^\pi r_c \cdot \sin\phi \cdot r_c \cdot t' \cdot \sigma_N \cdot d\phi = 2r_c^2 \cdot t' \cdot \sigma_N \dots\dots\dots (9)$$

となる。ここに、 dp は図-4 に斜線で示した微小面積に作用する圧縮力、 x はその作用位置までの距離であってそれぞれ次式で示される。

$$dp = r_c \cdot d\phi \cdot t' \cdot \sigma_N \dots\dots\dots (10)$$

$$x = r_c \cdot \sin\phi \dots\dots\dots (11)$$

また、 t' はリング断面の圧縮有効面積をリング図心に沿って分布させた時の分布幅を表し、次式で与えられる。

$$t' = \frac{A}{2\pi r_c} \dots\dots\dots (12)$$

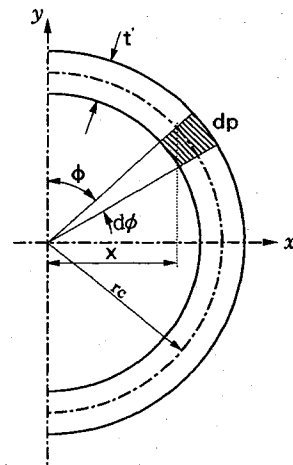


図-4 等分布荷重に評価したジャッキ推力

3. 急曲線施工用セグメントの設計方法

(1) 設計手順

通常のセグメントでは、長期にわたって作用する土圧などに対するトンネル横断面内の設計とジャッキ推力に対する設計とがそれぞれ独立に行われている。これは、土圧がある時間の経過の後に設計荷重状態に達するのに対して、施工中の一時的荷重であるジャッキ推力に対する設計は、ジャッキ推力を受けるセグメントリングのみに対して行えば十分であると考えられるからである。

急曲線施工用セグメントの設計に当たっても、土圧に対する挙動は通常のセグメントと同様であるし、後述するようにジャッキ推力によるシールドトンネルの軸方向断面力の最大値は、推力を受けるリングから数リング目に発生していることから、両者に対する挙動は独立に検討するものとする。

急曲線施工用セグメントのジャッキ推力に対する設計は、図-5 に示すフローに従って行う。すなわち、それぞれの現場に応じた設計・施工条件より構造モデルと荷重を決定し、リング継手断面に作用する断面力を算定する。このようにして求めた断面力からリング継手断面に作用する最大圧縮応力度とボルトに作用する最大引張応力度および主桁の面外の最大曲げ応力度の検討を行い、最後に継手断面に生ずる変形量の検討を行う。これらの検討の際、計算値が許容値よりも大きくなる場合には適宜セグメント構造の検討を行い修正する。以下にこれらの具体的な方法を示す。

(2) リング継手断面に作用する断面力

セグメントの応力度を求める際には、まず、図-1 に示す解析モデル1によりリング継手断面に生ずる断面力 M_1 、 N_1 、 S_1 および荷重点の半径方向変位 δ_1 を計算する。ここで、 δ_1 がテールクリアランス δ_0 を超えなければ解

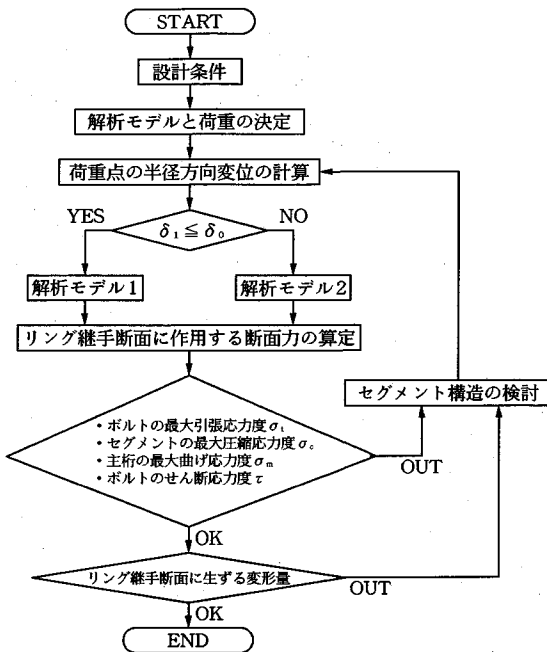


図-5 急曲線施工用セグメントの設計手順

析モデル1によって算定された断面力によってリング継手断面の検討を行う。しかしながら、解析モデル1を用いて解析を行った結果、荷重点の半径方向変位 δ_1 がテールクリアランス δ_0 を超える場合には解析モデル1と解析モデル2の重ね合わせによってリング継手断面に生ずる断面力を求める。すなわちリング継手断面の設計用断面力 (M, N, S) は次のように定めれば良い。

a) $\delta_1 \leq \delta_0$ の場合

解析モデル1による任意点の曲げモーメントとその位置における軸力との組み合わせにより最大圧縮応力度と最大引張応力度が生ずる位置の曲げモーメント M_1 と軸力 N_1 との組み合わせおよび最大せん断力 S_1 が設計用断面力としてそのまま用いられる。

b) $\delta_1 > \delta_0$ の場合

下式で示す任意点の曲げモーメント M とその位置に生ずる軸力 N との組み合わせにより最大圧縮応力度と最大引張応力度が生ずる位置の曲げモーメント M と軸力 N との組み合わせおよび最大せん断力 S が設計用断面力として用いられる。

$$M = \alpha M_1 + (1 - \alpha) M_2 \dots\dots\dots (13)$$

$$N = \alpha N_1 + (1 - \alpha) N_2 \dots\dots\dots (14)$$

$$S = \alpha S_1 + (1 - \alpha) S_2 \dots\dots\dots (15)$$

ここで、 $\alpha = \delta_0 / \delta_1$ であり、 M_2, N_2, S_2 は解析モデル2による曲げモーメント、軸力およびせん断力を示す。

(3) リング継手断面に生ずる応力度

リング継手の圧縮有効断面の幅 t_c は、縦リブおよび継手板の断面積にスキンプレーットのそれぞれの場合に対

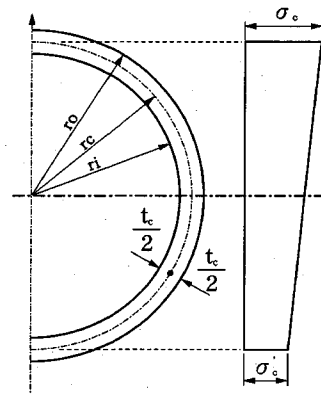


図-6 リング継手断面の模式図 (圧縮のみ)

する有効断面積⁵⁾の合計 A_c をセグメントリングの図心の長さで除した次式で示される。

$$t_c = \frac{A_c}{2\pi r_c} \dots\dots\dots (16)$$

一方、リング継手の引張有効断面の幅 t_t は、全ボルトの有効断面積を A_t とすれば次式で示される。

$$t_t = \frac{A_t}{2\pi r_c} \dots\dots\dots (17)$$

このように考えたリング継手部が断面力を受けて弾性的挙動をする範囲で平面保持の仮定が成立するものとするれば、リング継手断面に生ずる応力度は、発生する軸力の偏心距離が継手断面の核内にあるか否かによって以下の2つの場合に分けられる。

a) 継手断面に圧縮応力度のみが生ずる場合

軸力の偏心距離 e が継手断面の核内にあれば、トンネルに生ずる応力度は全断面圧縮応力度のみとなる。いま、図-6に示すように、継手断面を圧縮有効幅 t_c なる等厚円環で示せば、その核は円となり核半径 r_{co} は次式のように示される。

$$r_{co} = \frac{W}{A_c} = \frac{r_c}{2} \left[1 + \frac{1}{4} \left(\frac{t_c}{r_c} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (18)$$

$$W = \frac{I}{r_c} \dots\dots\dots (19)$$

ここで、 I は圧縮有効断面の断面二次モーメントを表す。この場合、最大圧縮応力度は次式で示される。

$$\sigma_{cmax} = \frac{N}{A_c} + \frac{M}{I} r_{co} \dots\dots\dots (20)$$

b) 継手断面に引張応力度も生ずる場合

① セグメントの最大圧縮応力度 σ_c およびボルトの最大引張応力度 σ_t

軸力の偏心距離 e が継手断面の核外に出れば、断面の一部に引張応力度が発生する。このような場合のリング継手断面を模式的に示したものが図-7である。

いま、中立軸位置を示す中心角を ϕ_c とすれば、圧縮応力の合力 C とその x 軸に関するモーメント M_c は次

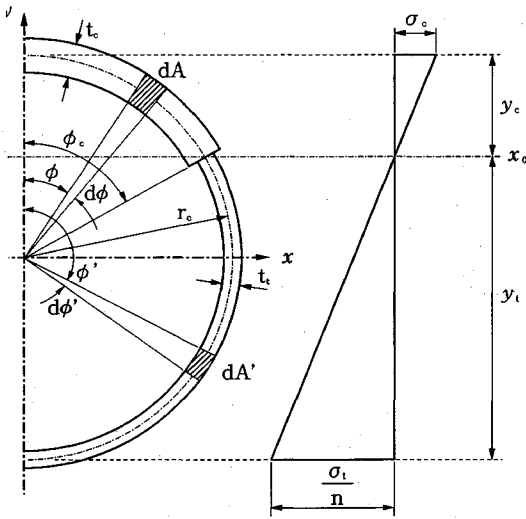


図-7 リング継手断面の模式図 (圧縮+引張)

式で示される。

$$C = 2 \int_0^{\phi_c} r_c \cdot t_c \cdot \sigma_c \frac{\cos\phi - \cos\phi_c}{1 - \cos\phi_c} d\phi$$

$$= \frac{2r_c t_c}{1 - \cos\phi_c} (\sin\phi_c - \phi_c \cdot \cos\phi_c) \cdot \sigma_c \dots (21)$$

$$M_c = 2 \int_0^{\phi_c} r_c \cdot t_c \cdot \sigma_c \frac{\cos\phi - \cos\phi_c}{1 - \cos\phi_c} \times (r_c \cdot \cos\phi) d\phi$$

$$= \frac{r_c^2 \cdot t_c}{1 - \cos\phi_c} (\phi_c - \frac{1}{2} \sin 2\phi_c) \sigma_c \dots (22)$$

一方、引張応力の合力 T とその x 軸に関するモーメント M_T は次式のようになる。

$$T = 2 \int_{\phi_c}^{\pi} n \cdot r_c \cdot t_i \cdot \sigma_t \frac{\cos\phi_c - \cos\phi}{1 - \cos\phi_c} d\phi'$$

$$= \frac{2n \cdot r_c \cdot t_i}{1 - \cos\phi_c} (\pi \cos\phi_c - \phi_c \cdot \cos\phi_c + \sin\phi_c) \sigma_t \dots (23)$$

$$M_T = 2 \int_{\phi_c}^{\pi} n \cdot r_c \cdot t_i \cdot \sigma_t \frac{\cos\phi_c - \cos\phi}{1 - \cos\phi_c} \times (-r_c \cdot \cos\phi) d\phi'$$

$$= \frac{n \cdot r_c^2 \cdot t_i}{1 - \cos\phi_c} (\pi - \phi_c + \frac{1}{2} \sin 2\phi_c) \sigma_t \dots (24)$$

ここで、これらの力のつり合いを求めると、

$$\left. \begin{aligned} N &= C - T \\ M &= M_c + M_T \end{aligned} \right\} \dots (25)$$

となる。また、

$$M = N \cdot e = (C - T) \cdot e = M_c + M_T \dots (26)$$

から中立軸位置を示す ϕ_c は次式を満足する必要がある。

$$2e \{ (t_c - n \cdot t_i) \sin\phi_c - (t_c \cdot \phi_c + \pi n t_i - n \cdot t_i \cdot \phi_c) \cos\phi_c \}$$

$$= r_c \{ (t_c \cdot \phi_c + \pi n \cdot t_i - n \cdot t_i \cdot \phi_c) - \frac{1}{2} (t_c - n \cdot t_i) \sin 2\phi_c \}$$

$$\dots (27)$$

ここに n はヤング係数比である。

上式より ϕ_c を求めれば、圧縮縁の最大応力度 σ_c およびボルトの最大引張応力度 σ_t は次式で与えられる。

$$\sigma_c = \frac{N(1 - \cos\phi_c)}{2r_c \{ (t_c - n t_i) \sin\phi_c - (t_c \cdot \phi_c + \pi n t_i - n t_i \cdot \phi_c) \cos\phi_c \}} \dots (28)$$

$$\sigma_t = n \sigma_c \frac{1 + \cos\phi_c}{1 - \cos\phi_c}$$

$$= \frac{n \cdot N(1 + \cos\phi_c)}{2r_c \{ (t_c - n t_i) \sin\phi_c - (t_c \cdot \phi_c + \pi n t_i - n t_i \cdot \phi_c) \cos\phi_c \}} \dots (29)$$

② 主桁または継手板の最大曲げ応力度 σ_m

ボルトに生ずる最大引張力 T_b は、使用するボルト 1 本当りの有効断面積を A_b とすれば、

$$T_b = \sigma_t \cdot A_b \dots (30)$$

で表すことができる。この T_b が鋼製セグメントの主桁の面外変形を生ぜしめようとする力である。これにより主桁に生ずる最大曲げ応力度 σ_m は、縦リブ間の主桁を両端固定梁とし集中荷重 T_b が支間中央点に作用するモデルまたは、文献(7)で述べられているてこ反力を用いたモデルによって求めることができる。

③ リング継ぎボルトに生ずるせん断応力度 τ

リング継ぎボルトに生ずるせん断応力度 τ は、安全側を考慮して、求められた最大せん断力をボルトの有効断面積 A_t で除して得られる。

このようにして求められた各応力度は、ジャッキ推力が施工時における一時的な荷重であるので、一時的荷重に対する許容応力度を超えてはならない。

(4) リング継手断面に生ずる変形量 δ_j

リング継手断面の開口量 $2\delta_j$ は、ボルトに発生する最大引張力 T_b と、リング継手 1 個所当りの軸ばね定数 k_{rv}^{II} を用いて次式により計算される。

$$\delta_j = T_b / k_{rv} \dots (31)$$

また継手部の回転角 2θ は、リング継手片側の開口量と図-7に示す距離 y_i を用いて次式により計算される。

$$\theta = \tan^{-1}(\delta_j / y_i) \dots (32)$$

4. 現場計測例とその解析

本例は、セグメント外径 $D_0 = 6000$ mm の下水道シールド工事において現場計測された例である^(8),9)。直線区間内および曲線半径 $R = 20$ m の曲線区間内の 2 断面(それぞれ A 断面および B 断面と呼ぶ)で計測が行われた。以下にその結果と本論文の方法による解析結果とを比較し検討を加える。

(1) 計測の概要

図-8 は、計測区間付近のトンネル線形を表したものである。トンネルは、主に幅員 6 m の道路下に構築されたが、既設構造物の基礎杭や各種地中埋設物が近接しているため曲線が多くなっている。トンネルは、東京低地と呼ばれる三角州性沖積低地に位置し、土質は全工区にわたって東京レキ層上に堆積した軟弱なシルトおよび

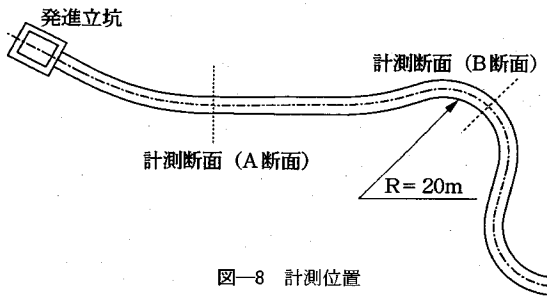


図-8 計測位置

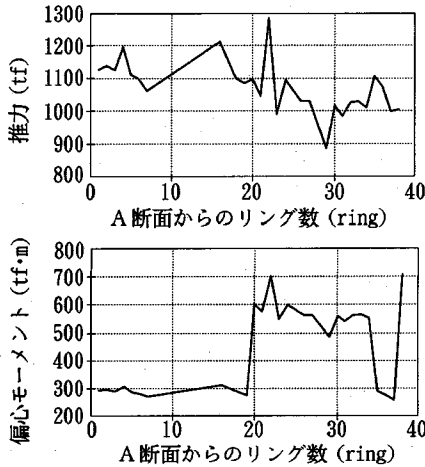


図-9 A断面における推力および偏心モーメント

砂質シルトを主体としている。N値は0~3程度である。また、曲線半径 $R=20\text{ m}$ の区間では曲線外側に噴射攪拌杭を設け、トンネル上部および内側には薬液注入（二重管ロッド注入）を施した。シールドの掘削形式は土圧式で、急曲線に対応するため中折れ装置とカッター屈曲装置を装備している。

計測項目は、縦リブのひずみ、リング継ぎボルトのひずみおよびリング継手の目開き量で、A断面では、トンネルスプリング位置の縦リブに左右対称に3箇所ずつひずみゲージを取り付けている。B断面では、圧縮側スプリング位置の縦リブ3箇所にA断面と同様にひずみゲージを取り付け、引張側スプリング位置ではリング継ぎボルト3箇所にひずみゲージを、また、計測ボルトと同じ位置に π 型変位計を設置している。

(2) 計測結果と解析結果との比較および検討

図-9および図-10は、A断面およびB断面におけるシールドの推力と偏心モーメントの計測値である。解析にはこれらの値を軸力 N_0 と曲げモーメント M_0 として直接用いた。また、図-1および図-2に示す軸力 N_0 の傾斜角度 β は、 $\beta=3^\circ$ とし、式(6)における摩擦係数 μ は、 $\mu=0.3$ とした。

図-11は、A断面における縦リブの応力度の計測結果と解析結果の代表的な例を示したものである。図中実

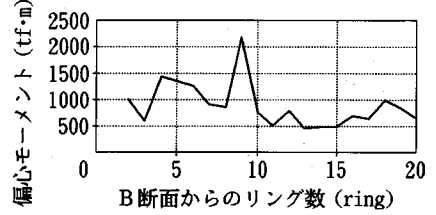
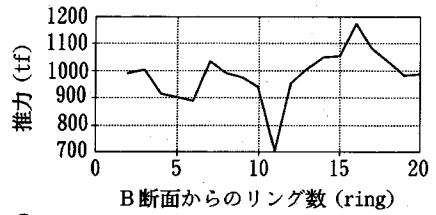


図-10 B断面における推力および偏心モーメント

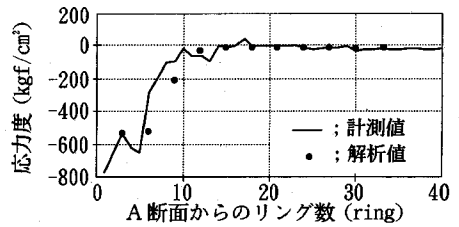


図-11 縦リブ応力の計測結果と解析結果 (A断面)

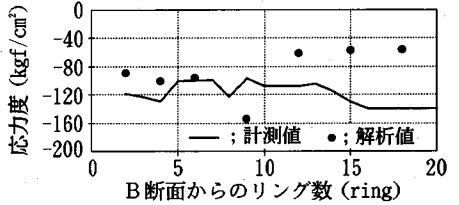


図-12 縦リブ応力の計測結果と解析結果 (B断面)

線は計測値を、点は解析値を示す。両者は良く符合している。図-12は、B断面における縦リブの応力度の計測結果と解析結果の代表的な例を示したものである。ジャッキ推力の作用位置がB断面から離れると計測値と解析値とに差があるものの両者は概ね符合している。縦リブに発生した応力度を見ると、急曲線区間内のB断面の方が蛇行修正によるものが主因となっている直線区間内のA断面のそれよりも小さい。これは、急曲線区間の地盤改良が十分に行われ、大きな余掘り量を確保できたのに加えて、入念な施工が実施されたためであると考えられる。

図-9および図-10を見ると、図-9では、A断面から20リング程度までは偏心モーメントに大きな変動がないのに対して、図-10では、B断面から10リング程度までの間に偏心モーメントが大きく変動している。B断面の偏心モーメントの経時変化をさらに詳細に調べると、1リングの推進中に何度もジャッキパターンを変えており、セグメントに大きな応力度が発生しないように

表-1 トンネルと地盤

セグメント外径 D _s (mm)	2150	2550	3150	4550	6000
曲線半径 R (m)	20, 30, 40	20, 30, 40	20, 30, 40	30, 40, 50	40, 50, 60
地盤反力係数 k (kgf/cm ²)	0.25, 1.0, 2.0				
直線区間の リング数	20				
曲線区間の リング数	30, 50				
直線区間のリン グ幅 B (mm)	1000				
曲線区間のリン グ幅 B _r (mm)	250, 300, 450, 500, 750, 900, 1000				
裏込め注入が硬化 し始めるリング数	6リング目				

細心の注意をはらっていることがわかる。急曲線施工時に計測を行った例は多いが、それらのデータを見ると、直線施工時よりも小さな応力度しか発生していない例がほとんどであり、また、逆に問題となるような応力度が発生した場合は公表されていないようである。筆者らは、特別な配慮をせずに急曲線施工が可能となるセグメントを考えているため、A断面における計測データの方が提示したモデルの検証には有効と考えている。

以上より、本論文で示した解析方法は、急曲線施工時のセグメントリングの挙動を良く説明できているものと考えられる。

5. 急曲線施工用セグメントの設計例

本例は、鋼製標準セグメント¹⁰⁾のうち、代表的な5つの口径のセグメントについて曲線半径、地盤条件および曲線区間のリング幅をパラメータとして、補助工法を使わないという条件のもとで急曲線施工を行う場合のセグメントの設計例を示したものである。

(1) 設計条件

a) トンネルと地盤

検討の対象としたトンネルの外径と地盤条件を表-1に示す。トンネルは『シールド工用標準セグメント』に記載されているものの中から代表的な5つのタイプを選んだ。トンネルの線形は、第2章で示したように直線区間を20リングとし、曲線区間では、テーパセグメントを30リング用いた場合と50リング用いた場合を検討した。曲線半径は、セグメント外径により最小曲線半径が変化するため表-1に示すように実状に応じてそれぞれ3種類を検討した。

対象とした地盤は地盤反力係数で規定し、軟弱地盤を評価したものから中程度の比較的地盤反力が期待できるものまで3種類を検討した。

b) 荷重

設計に用いた軸力 N_e は、文献10)の表2-87 (p.199)に示されている『ジャッキ設計推力』の値を用い、トン

表-2 許容応力度および許容変形量

許容 応 力 度	材種	鋼材		ボルト	
		SS41	SM50	8・8	10・9
圧縮 (kgf/cm ²)		2400	3200	—	—
引張 (kgf/cm ²)		2400	3200	6400	9000
せん断 (kgf/cm ²)		—	—	3700	5200
リング継手の 許容開口量 (mm)		1.0			

ネルの鉛直直径面から片側のみフルに作用するものとした。また、図-1および図-2に示す軸力 N_e の傾斜角度 β は、 $\beta=3^\circ$ とし、式(6)における摩擦係数 μ は、 $\mu=0.3$ とした。

c) 解析ケース

上述のセグメントおよび地盤の条件に加え、図-1および図-2で示したように施工上考えられる3通りの条件を設定した。

① Case 1

本検討では、セグメントリングとシールドとのテールクリアランスを5cmとし、Case 1では、セグメントリングの荷重点での半径方向変位がテールクリアランスを超えないように設計する場合を想定した。

② Case 2

Case 2では、セグメントリングの荷重点での変位がテールクリアランスを超えてセグメントとシールドが接触し、シールドが地山に押されても良い場合を想定した。

③ Case 3

上述のCase 1およびCase 2では、シールド推進直後の裏込め注入材は十分な強度を持たないものとして表-1に示すように裏込め注入材の効果を評価する地盤ばねを荷重点から6リング目以降に付した。しかし、瞬結性の裏込め注入材を用いた同時裏込め注入が近年行われるようになったため、Case 3としてセグメントがシールドから出てすぐに地盤反力が期待できる場合を想定した(他の条件はCase 1と同じ)。

なお、設計に用いた各部材の許容応力度およびリング継手の許容変形量は一時的な荷重に対するものとし、表-2に示す値を用いた。また、変更できる主桁板厚の最大値は40mmとした。

(2) 計算結果

a) Case 1

Case 1の中で、代表的な断面図として、外径4550mm、曲線部のセグメント幅500mmおよび曲線半径40mmでテーパセグメントを30リング構築する場合を図-13~15に示す。図中、実線は地盤反力係数が2kgf/cm²のときを、一点鎖線および点線は地盤反力係数が1kgf/cm²および0.25kgf/cm²のときを示す。

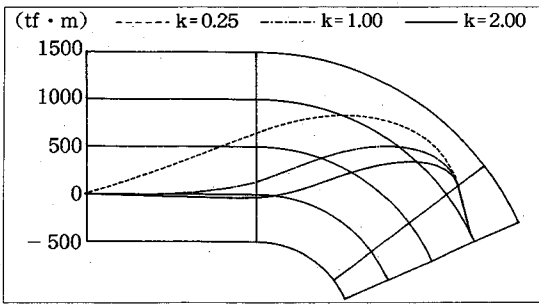


図-13 曲げモーメント図

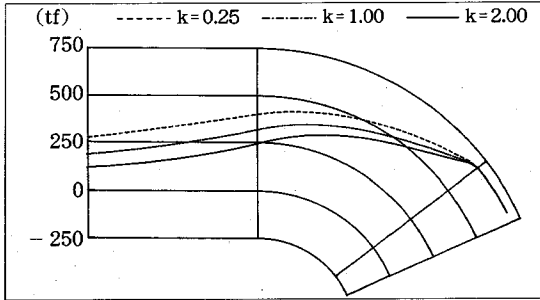


図-14 軸力図

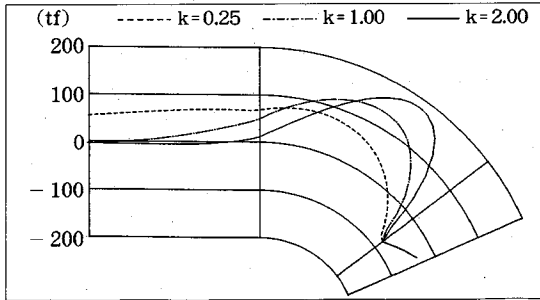


図-15 せん断力図

図-13より、曲げモーメントの最大値は裏込め注入材が硬化し、地盤反力が期待できるとした位置から数リング目に発生することがわかる。また、地盤が悪いほど先端から遠くで発生し、その値は大きい。一方、地盤が良いと曲げモーメントは最大値が発生した後急速に減少するのに対して、地盤が悪いとなかなか減少せず、直線区間まで曲げの影響が及ぶ。

図-14より、軸力は裏込め注入材が硬化する位置まではほとんど変化せず、位置から後では徐々に減少し、その割合は地盤が良くなるほど大きいことがわかる。

図-15より、せん断力の極値は裏込め注入材が硬化する位置とそれより先10~20リング目ぐらいに現れることがわかる。最大値は地盤が悪いほど先端から遠くで発生し、地盤が良いほど大きい。また、地盤が悪いとせん断力は直線部に至ってもほとんど減少しない。

表-3~5は、図-13~15に基づいて各部応力度と変

表-3 計算結果 ($D_0=4550$ mm, $B_r=300$ mm) Case 1

曲率半径 R (m)	標準の主桁厚 t (cm)	地盤反力係数 k (kgf/cm ²)	必要な主桁厚 (cm)	応力度 (kgf/cm ²)				開口量 (mm)	荷重点の変位量 (cm)
				σ_c	σ_m	σ_t	τ		
30	1.6	0.25	4.0	1455	478	1053	46	0.25	7.86
		1.0	2.3	1402	1000	728	250	0.3	4.55
		2.0	1.8	1383	1358	606	420	0.45	4.34
40	1.6	0.25	4.0	1422	387	852	80	0.2	7.26
		1.0	2.0	1379	1183	651	132	0.37	4.99
		2.0	1.6	1373	1627	573	307	0.59	4.97
50	1.6	0.25	4.0	1407	356	784	43	0.19	6.86
		1.0	2.0	1373	1134	624	92	0.36	4.85
		2.0	1.6	1366	1565	552	262	0.56	4.88

表-4 計算結果 ($D_0=4550$ mm, $B_r=450$ mm) Case 1

曲率半径 R (m)	標準の主桁厚 t (cm)	地盤反力係数 k (kgf/cm ²)	必要な主桁厚 (cm)	応力度 (kgf/cm ²)				開口量 (mm)	荷重点の変位量 (cm)
				σ_c	σ_m	σ_t	τ		
30	1.6	0.25	4.0	1608	774	1704	53	0.41	8.65
		1.0	2.5	1520	1334	1148	263	0.41	4.80
		2.0	1.8	1493	2087	931	481	0.69	4.97
40	1.6	0.25	4.0	1541	578	1273	117	0.30	7.92
		1.0	2.3	1483	1373	1000	139	0.42	4.86
		2.0	1.8	1462	1860	829	370	0.62	4.78
50	1.6	0.25	4.0	1508	511	1126	67	0.27	7.43
		1.0	2.3	1460	1257	915	83	0.38	4.68
		2.0	1.8	1439	1702	759	304	0.56	4.66

表-5 計算結果 ($D_0=4550$ mm, $B_r=500$ mm) Case 1

曲率半径 R (m)	標準の主桁厚 t (cm)	地盤反力係数 k (kgf/cm ²)	必要な主桁厚 (cm)	応力度 (kgf/cm ²)				開口量 (mm)	荷重点の変位量 (cm)
				σ_c	σ_m	σ_t	τ		
30	1.6	0.25	4.0	1683	942	2075	92	0.49	8.46
		1.0	2.5	1574	1569	1350	263	0.48	4.96
		2.0	2.0	1538	1951	1074	539	0.61	4.54
40	1.6	0.25	4.0	1603	745	1642	5	0.39	7.73
		1.0	2.5	1525	1334	1148	160	0.41	4.67
		2.0	1.8	1497	2096	935	381	0.69	4.96
50	1.6	0.25	4.0	1548	590	1300	90	0.31	7.24
		1.0	2.3	1486	1386	1010	69	0.42	4.82
		2.0	1.8	1477	1948	869	343	0.65	4.21

形量の最大値および荷重点の変位量をまとめたもので、曲線区間のセグメント幅を300 mmから500 mmまで変化させたときのものである。これらの表より、セグメント幅が小さくなると、発生する断面力や変形量は小さくなり、要求される主桁の板厚も薄くなる事がわかる。また、地盤が悪い場合にはセグメント幅を小さくしても荷重点の変形量が5 cm以上となり要求される主桁板厚は40 mmより厚くなるため実用的でない。

b) Case2

Case 1と同様、代表的な断面力図として図-13~15と同じ条件のときのものを図-16~18に示す。

図-16より、地盤が良いと曲げモーメントの最大値は裏込め注入材が硬化している位置かそれより1~2リング先で発生するのに対して、地盤が悪いと最大値はトンネル先端で発生する。また、曲げモーメント分布は

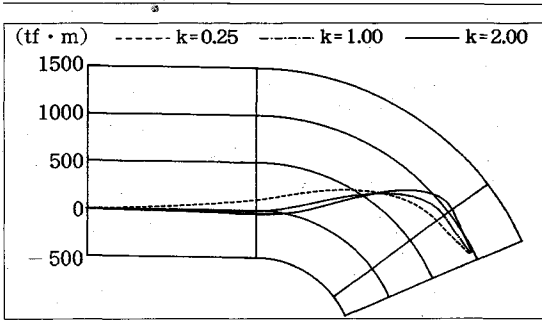


図-16 曲げモーメント図

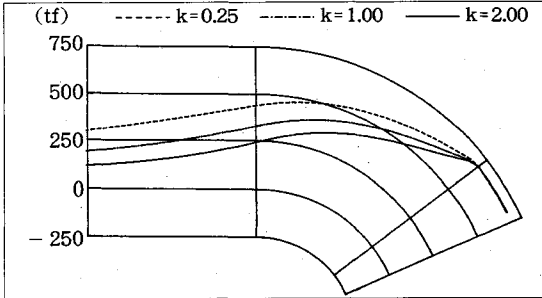


図-17 軸力図

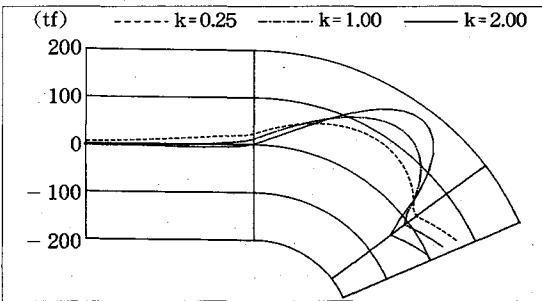


図-18 せん断力図

Case 1 と異なり地盤によって大きな差異はない。

図-17より、軸力に関してはCase 1 とほとんど同じである。

図-18より、裏込め注入材が硬化するとした位置より手前のせん断力の分布形状はCase 1 とかなり異なるが、最大値の発生位置とその値はCase 1 と概ね一致する。一方、Case 1 とは異なり、地盤が悪い場合でも最大値が発生した後せん断力は速やかに減少する。

表-6および表-7は、Case 1 と同様外径4550 mmの場合について各部応力度と変形量の最大値および荷重点の変位量をまとめたものである。表中、荷重点の変位量が5 cmを超えているのはシールドが地盤を押ししているためである。試算を行ったケースではいずれも標準セグメントの主桁板厚を変更する必要がないことがわかる。なお、セグメント幅は広い方がボルトのせん断応力度を除いて発生する応力度が小さく継手の開口量も少ないが、先端の変位量はセグメント幅の狭い方が小さい。

表-6 計算結果 ($D_0=4550$ mm, $B_r=500$ mm) Case 2

曲率半径 R (m)	標準の主桁厚 t (cm)	地盤反力係数 k (kgf/cm ²)	必要な主桁厚 (cm)	応力度 (kgf/cm ²)				開口量 (mm)	荷重点の変位量 (cm)
				σ_c	σ_m	σ_s	τ		
30	1.6	0.25	1.6	1216	652	230	716	0.23	8.46
		1.0	1.6	1234	727	256	418	0.26	5.62
		2.0	1.6	1334	1536	541	130	0.55	5.17
40	1.6	0.25	1.6	1227	688	243	599	0.25	8.08
		1.0	1.6	1243	763	269	317	0.27	5.54
		2.0	1.6	1342	1544	544	82	0.56	5.13
50	1.6	0.25	1.6	1229	691	243	526	0.25	7.84
		1.0	1.6	1245	768	271	255	0.28	5.49
		2.0	1.6	1346	1549	546	54	0.56	5.11

表-7 計算結果 ($D_0=4550$ mm, $B_r=1000$ mm) Case 2

曲率半径 R (m)	標準の主桁厚 t (cm)	地盤反力係数 k (kgf/cm ²)	必要な主桁厚 (cm)	応力度 (kgf/cm ²)				開口量 (mm)	荷重点の変位量 (cm)
				σ_c	σ_m	σ_s	τ		
30	1.6	0.25	1.6	1156	409	144	931	0.15	9.08
		1.0	1.6	1166	462	163	805	0.17	5.92
		2.0	1.6	1183	548	193	648	0.20	5.40
40	1.6	0.25	1.6	1174	466	164	762	0.17	8.53
		1.0	1.6	1187	536	189	644	0.19	5.79
		2.0	1.6	1201	614	216	496	0.22	5.33
50	1.6	0.25	1.6	1187	509	179	656	0.18	8.19
		1.0	1.6	1198	579	204	545	0.21	5.71
		2.0	1.6	1210	649	229	403	0.23	5.30

表-8 計算結果 ($D_0=4550$ mm, $B_r=500$ mm) Case 3

曲率半径 R (m)	標準の主桁厚 t (cm)	地盤反力係数 k (kgf/cm ²)	必要な主桁厚 (cm)	応力度 (kgf/cm ²)				開口量 (mm)	荷重点の変位量 (cm)
				σ_c	σ_m	σ_s	τ		
30	1.6	0.25	4.0	1331	318	700	19	0.17	5.27
		1.0	1.6	1309	1077	379	443	0.39	3.59
		2.0	1.6	1309	1077	379	443	0.39	2.50
40	1.6	0.25	3.6	1324	312	556	114	0.14	4.95
		1.0	1.6	1304	1046	369	416	0.38	3.49
		2.0	1.6	1304	1046	369	416	0.38	2.45
50	1.6	0.25	2.8	1314	475	513	68	0.15	4.97
		1.0	1.6	1304	1046	369	400	0.38	3.42
		2.0	1.6	1304	1046	369	400	0.38	2.38

c) Case 3

表-8は、セグメント外径4550 mm、テーパセグメントの幅500 mmの場合の各応力度と変形量の最大値および荷重点の変位量をまとめたものである。この表より、Case 3はCase 1 に比べ発生する応力度も変形量も小さくなるのがわかる。また、Case 1 では地盤が悪い場合に主桁板厚を40 mmにしても先端の許容変位量を満足しなかったのに対して、Case 3では主桁板厚を40 mm以下としても満足するケースが出てきている。したがって、セグメント幅をさらに小さくするとCase 3ではすべての許容量を満足した上実用的な主桁板厚で設計が納まることが予測される。

(3) 考察

以上の検討を行った結果以下の知見が得られた。

- ① 地盤がある程度以上に良好であれば、標準セグメ

ントより若干厚い主桁板を用いれば、補助工法なしで急曲線施工を行うことが可能である。

② セグメント幅を小さくすることは、急曲線を切るための幾何学的条件を満足するばかりでなく、力学的にも有効である。

③ 地盤が相当に悪い場合には、主桁の板厚を増加させたり、セグメント幅を小さくしたりするだけでは急曲線施工が困難であり、何らかの補助工法が必要となる。

④ 瞬結性の同時裏込め注入は、地山の沈下を防止するばかりでなく、急曲線施工用セグメントの設計にとっても有効である。

⑤ セグメントがシールドマシンを介して地盤からの反力を受けても良いとする場合は、急曲線施工用セグメントを特に用いる必要はなく、標準セグメントを用いて良いという結果が得られたが、セグメントとシールドマシンが接触する部分には相当大きな力が作用することになる。したがって、この接触力に対するセグメントの設計検討は別途行う必要があるが、この力はシールド本体を動かし、さらに地山を押し込むほどの力であることを考えると、リングの横断面内に発生する断面力や、セグメント単体に直接発生する応力度は相当な大きさになることが推定できるため、Case 1, すなわちトンネル先端の変位が一定値を越えないように設計する方が、合理的かつ経済的な設計法であると考えられる。

6. おわりに

地盤改良などの補助工法が、地上条件や地中環境の保全という立場から制約を受けるケースが今後ますます増えると予想されるため、今までの現場対応を主とした施工法に代わって急曲線施工用に設計された高強度セグメントを用いることによって、補助工法を使わないで急曲線施工を行う方法は、非常に有効な方法の一つであると考えられる。

筆者らは、補助工法を用いずに急曲線施工を行うことが、シールド工法の本来の姿であると考えている。しかしながら、補助工法を用いて施工するのも一つの方法である。両者のいずれを選ぶかは各々の経済性、地表面への影響および安全性などを比較検討することになる。

なお、急曲線区間の地盤が相当に悪い場合に、補助工法を用いざるを得ないケースがあることは本論文でも述

べているが、この場合、セグメントリングのトンネル軸方向剛性を高めるために、縦リブ間にそれぞれの縦リブに寄せて2本のリング継ぎボルトを配置したセグメントが有効であると筆者らは考えている。

すでに、本論文で提案した設計法はいくつかの実設計に適用されているが、今後さらに多くの実測結果との検証を進め、適用精度を高めてゆきたいと考えている。

本論文をまとめるにあたり、大変貴重な計測データを提供戴いた関係各位ならびに東洋大学および早稲田大学の大学院生諸君に深く感謝する次第である。

参考文献

- 1) 小泉 淳・村上博智・西野健三：シールドトンネルの軸方向特性のモデル化について、土木学会論文集，No. 394，Ⅲ-9，pp. 79～88，1988年6月。
- 2) 村上博智・小泉 淳・桜木 満・大口克人：シールドトンネル急曲部における鋼製セグメント主桁の面外変形について、土木学会第41回年次学術講演会概要集，Ⅲ-419，pp. 837～838，1986年11月。
- 3) 石田智朗・小泉 淳・村上博智・山口貴志：シールドトンネルの急曲線施工時の検討について、土木学会第42回年次学術講演会概要集，Ⅲ-268，pp. 560～561，1987年9月。
- 4) 村上博智・井戸 明・小泉 淳・山口貴志：鋼製セグメントを用いたシールドトンネル急曲部の挙動に関する研究、土木学会第43回年次学術講演会概要集，Ⅲ-467，pp. 976～977，1987年10月。
- 5) 小泉 淳・石田智朗・村上博智：シールドトンネルの急曲線施工時の検討，東洋大学工学部研究報告，第22号，pp. 63～76，1987年。
- 6) 西野健三・吉田和夫・小泉 淳：シールドトンネル縦断方向の現場載荷試験とその考察，土木学会論文集，No. 376，Ⅲ-6，pp. 131～140，1986年12月。
- 7) 村上博智・小泉 淳：シールド工用セグメントのセグメント継手の挙動について，土木学会論文集，第296号，pp. 73～86，1980年4月。
- 8) 豊田章司・大谷賢司：連続する超急曲線を土圧シールドで掘進，トンネルと地下，Vol. 21，No. 4，pp. 33～43，1990年4月。
- 9) 大谷賢司・佐藤英之・桑原秀樹・豊田章司：大断面・超急曲線シールドの施工結果について，土木学会第45回年次学術講演会概要集，VI-1，pp. 26～27，1990年9月。
- 10) (社)土木学会・(社)日本下水道協会共編：シールド工用標準セグメント，(社)日本下水道協会，1982年11月。

(1991. 9. 4 受付)

DESIGN METHOD OF SEGMENTS AT A SHARPLY CURVED SECTION

Atsushi KOIZUMI, Hiroto MURAKAMI, Tomoaki ISHIDA and Nobuyuki TAKAMATSU

This paper proposes the design method in the longitudinal direction for the shield tunnel at a sharply curved section. Firstly, member forces are calculated using the beam-spring model. Stresses and deformations at ring joints are, then, calculated in order to design segments. Secondly, the propriety of the method is shown comparing with data obtained by in situ measurement. Finally, typical examples for designing segments at a sharply curved section are presented.