

現場計測に基づいたほぞ付きセグメントの 軸方向等価剛性に関する考察

STUDY ON LONGITUDINAL STIFFNESS FOR TENONED SEGMENTAL TUNNEL LINING BASED ON THE SITE MEASUREMENT

中山 元¹⁾, 南川 昭夫¹⁾, 三ツ川 修治²⁾, 窪塚 直亮²⁾, 小嶋 啓市³⁾

Hajime NAKAYAMA, Akio MINAMIKAWA, Shuuji MITSUKAWA, Naoaki KUBOZUKA, Keiichi KOJIMA

Recently, the number of shield tunnel projects which use reinforced concrete tenoned segment has been increased in order to reduce cost and save time. The New Kuwana Cable Tunnel (No.4th Section) is one of the sites which use these segments and this is the first experience in Japan to use the segments for horizontal curved area(radius 130m).The site measurement for longitudinal direction was carried out in order to simulate the tunnel behavior in the curved area. In addition , by using the beam model which has an equivalent longitudinal tunnel stiffness, site measurement results were simulated for the parameter of soil spring element and tunnel stiffness of the model .

In this report, equivalent longitudinal stiffness of the tunnel is proposed in consideration of the effect of the inter-rare materials attached with the tenoned segment.

Key Words : Shield tunnel,Tenoned segment,Site measurement,Tunnel behavior in the longitudinal direction, Equivalent longitudinal stiffness

1. はじめに

我が国におけるシールド工法は、経済の高度成長時代を背景にして、主に沖積平野上に広がる大都市部の中浅深度地盤中のインフラ整備のためのトンネル構築法として急速に発展してきた。また近年、シールド工法に種々の改良が施され、シールド工法の適用範囲はさらに拡大される傾向にある。一方、最近では建設費を縮減することが社会資本整備を行う上での重要な課題となっており、電力洞道の建設においても例外ではない。

現在、シールド工事の建設費を縮減するための一つの方法としてセグメントのコストを低減するための研究や開発が盛んに行われている。ほぞ付きセグ

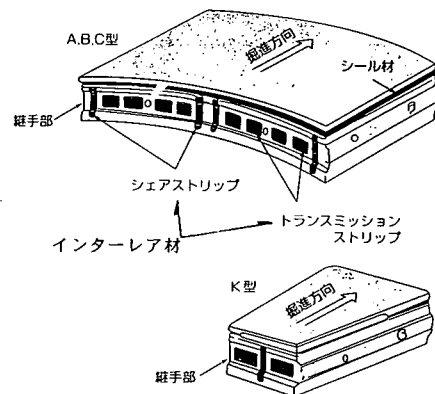


図-1 ほぞ付きセグメント一般図

- 1) 中部電力中央送変電建設所地中線土木課
- 2) 正 会 員 中部電力中央送変電建設所地中線土木課
- 3) フェロー 工学博士 佐藤工業土木本部設計部門

メントはこのような状況を受けて、欧州から導入されたセグメントである。ほぞ付きセグメントは図-1に示すようにセグメントどうしを締結する継手を簡素化することでそのコストの低減を可能にしたものである。

現在施工中の桑名地区洞道新設工事(総延長約 9.5km)では、比較的自立性の高い地盤が多いことから、ほぞ付きセグメントを本格的に採用した。その導入区間は延長約 5.9km である。しかし、我が国におけるほぞ付きセグメントの施工実績は少なく、未だ明確にされていない点も残されている。シールドトンネルの曲線施工等におけるトンネルの軸方向挙動もその未解明なものの一つである。

本研究はほぞ付きセグメントの実施工における各種計測結果のうち、トンネルの軸方向挙動に着目してそれらを分析するとともにその挙動を説明するための解析手法について述べたものである。

2. 工事概要および計測概要

本工事は前述した桑名地区洞道新設工事のうちの一つ(第4工区)であり、泥土圧シールド(中折れ機構採用：後胴押し)により、外径 5m、延長約 4km の洞道を建設するものである。このうち、曲線半径が 130m および 150m の曲線区間を含む延長約 3.3km にほぞ付きセグメントを導入した。本セグメントを使用した区間は二次覆工を施す区間と省略する区間とがあり、セグメントの厚さを前者では 200mm、また後者では 280mm としている。なお、セグメントの幅は両者ともに 1200mm である。シールドトンネルの通過する地盤は土盛りが 15~43m、地下水压が 0.05~0.25MPa、N 値が 50 以上の第三紀の東海層群と称される砂質土層、砂礫層および固結シルト層である。

ほぞ付きセグメントの軸方向の挙動を把握するための計測は曲線半径が 130m で、約 2.5% の下り勾配となる区間(セグメント厚さ 280mm)で実施した²⁾。なお、計測位置における地盤条件は土盛り約 25m、地下水压 0.06MPa、N 値 50 以上の第三紀固結シルト層である。図-2 は各種計器の設置位置を示したものである。本文において検討の対象とする軸方向の鉄筋ひずみ計は 1 リング中に 8 箇所、4.8m ピッチの 4 リングに設けている。また計測期間は約 3 ヶ月である。

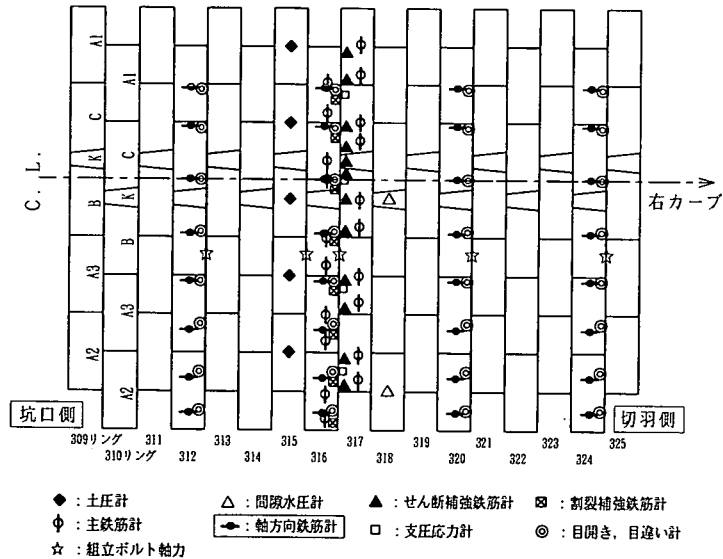


図-2 各種計器の設置位置

3. 計測結果に基づくトンネル軸方向挙動の分析

計測区間における掘進データのうち、総推力と推力の偏心によって生じる曲げ(以下、作用モーメントと呼ぶ)の実績値を図-3に示す。これらの値は掘進リングごとの平均値を示したものである。この図から、総推力の最大値および平均値はそれぞれ 16MN および 10MN、また曲線の内側への作用モーメントの最大値および平均値はそれぞれ 14MN・m および 4MN・m であることがわかる。なお、計測区間を含む曲線区間の

施工中の中折れ角度は約 1.7 度であり、裏込注入はシールド機のテールプレートからの同時注入(注入圧の平均値は 0.3MPa)方式で行っている。

トンネル軸方向の鉄筋応力の経時変化の一例を図-4に示す。この図から、トンネル軸方向の応力は掘進に伴うジャッキ推力の影響を顕著に受けて変動し、掘進時には圧縮応力が生じ、停止時にはその応力がほぼ解放された状態となっていることがわかる。

図-5はシールドの掘進時と停止時との圧縮応力の差分の平均値を示したものである。この図は 330 リングを掘進している時の4つの計測リングで計測された値から求めた一例である。掘進に伴う圧縮応力はシールドが遠ざかるにつれて減少し、またトンネルの横断面内における圧縮応力の分布傾向はシールドと計測リングの距離に関わらずほぼ同じであることがわかる。

次に、シールドの進行に伴うトンネル軸方向の挙動を把握するために、図-5に示した計測値を用いてトンネル軸方向の断面力を求めた。具体的には、図-6に示すように鉄筋ひずみの計測位置を基にリング全体を8つのブロックに分け、各々の計測値を各ブロックの代表値として、トンネル軸方向に生じた軸力および曲げモーメントを求めている。なお、鉄筋とコンクリートのヤング係数比はコンクリ

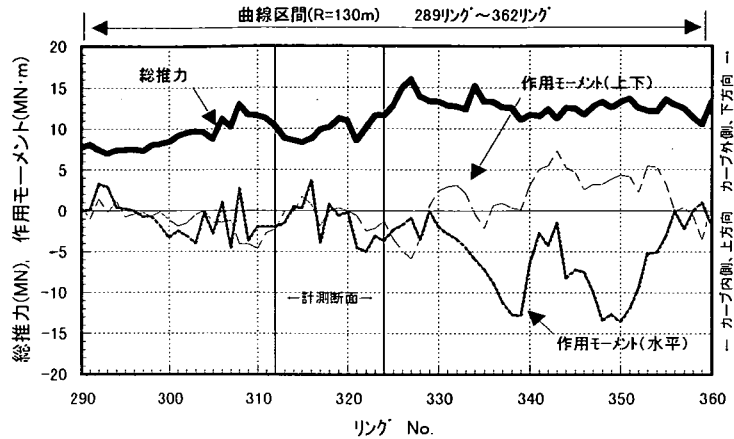


図-3 総推力と作用モーメントの実績値

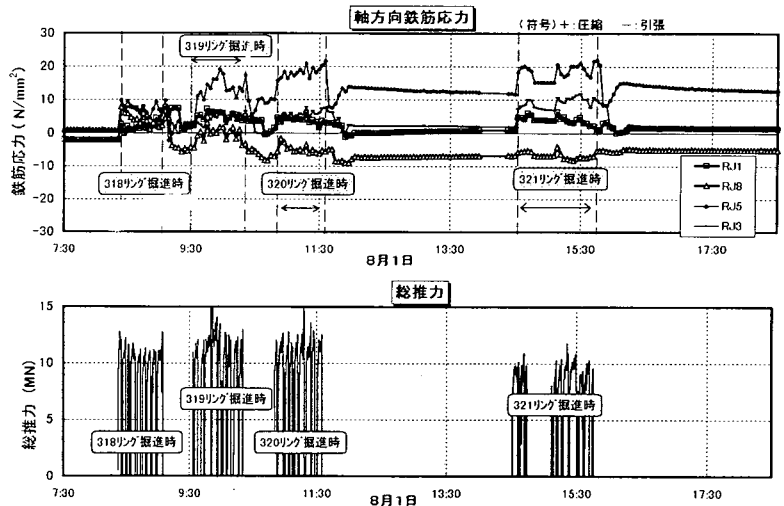


図-4 トンネル軸方向の鉄筋応力の経時変化

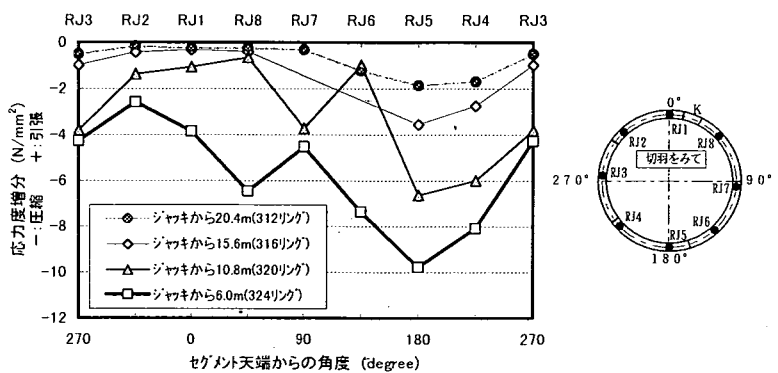


図-5 掘進に伴う応力の分布状況

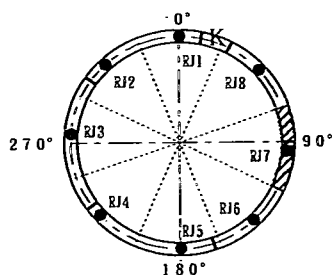


図-6 軸方向の鉄筋ひずみ計の配置とブロックの分割

ートの圧縮試験結果から 5.8 とした。またこのようにして求めた断面力は総推力や作用モーメントの変動の影響を受けるものと考え、軸力については総推力、曲げモーメントについては作用モーメントでそれぞれ除して無次元化した。さらに、このバラツキを減じるために 4 つの計測リングの値(シールドと計測リングとの距離が同じ時の計測値)を平均するとともに、3 リング分の逐次的な平均値を求めた。以下、この値を移動平均値と呼ぶ。

図-7 はシールドの進行に伴う軸力と曲げモーメントの変化を表したものである。図中の曲線は移動平均値の近似曲線である。このうち、軸力の近似曲線にはジャッキ推力の作用する位置(推力の作用点)が遠ざかるにつれて減衰する傾向を表現できるように指数関数を用いた。一方、曲げモーメントは計測値にバラツキが大きく、指数関数によって近似できるような単純な減衰傾向を示していないことから、図-8 に示すように作用モーメントによって生じる曲げモーメントだけでなく、曲線施工の進捗に伴う軸力成分の偏心量によって生じる曲げモーメントの影響をもあわせ考え、移動平均値を概ね表現できる近似式として多項式を用いた。

図-7 の移動平均値をみると、軸力は推力の作用点で最大値となり、その位置が遠ざかるにつれて減少し、25~30m 離れた位置では推力の影響がほとんどなくなっている。また曲げモーメントは推力の作用点から 2~3m 離れた位置で最大値となり、離れが約 25m 程度になると作用モーメント等の影響がほぼなくなっていることがわかった。

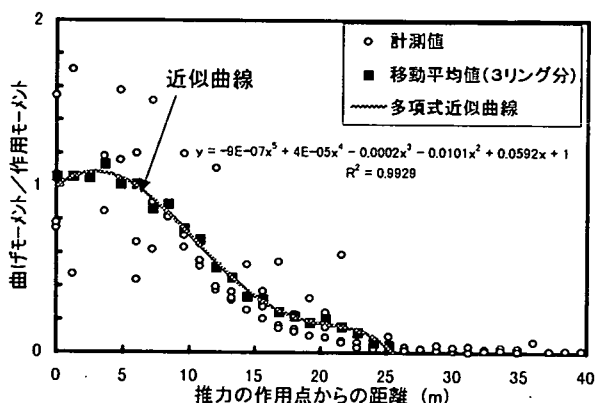
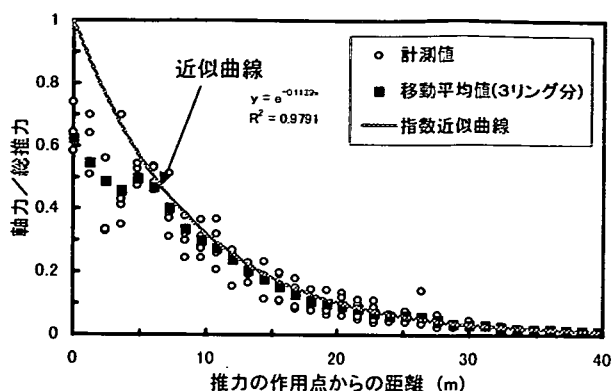


図-7 断面力の発生傾向

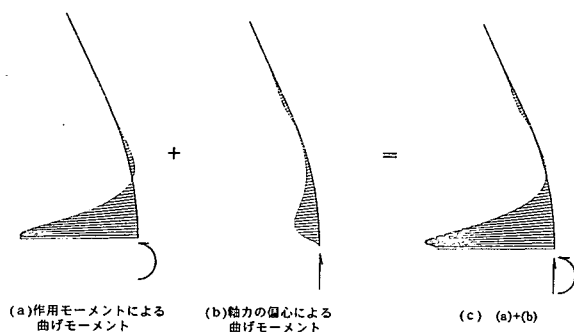


図-8 曲げモーメントの発生要因

4. トンネル軸方向挙動の解析

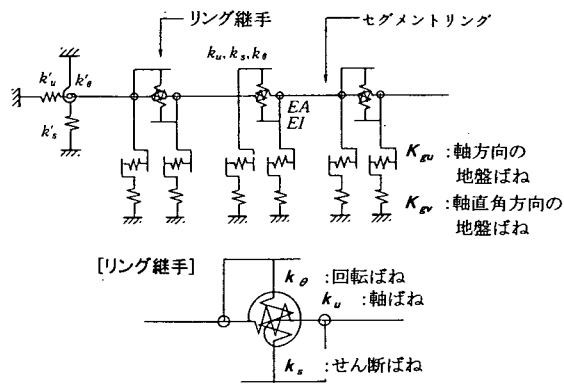
4. 1 解析の概要

従来、トンネルの軸方向挙動を把握するための解析モデルは棒構造モデル³⁾⁴⁾や等価剛性梁モデル⁵⁾⁶⁾等が提案されている(図-9 参照)。しかしながら、これらのモデルはボルト等によりセグメントどうしが締結される構造を前提としており、ほぞ付きセグメントのようにコンクリートどうしの突き合わせのみで構築されるセグメントリングの場合、従来の考え方をそのまま適用することはできない。そこで、ここではほぞ付きセグメントの継手部の剛性低下を考慮した等価剛性梁モデルでトンネル軸方向の構造をモデル化するものとし、計測結果を踏まえて等価剛性(等価軸剛性および等価曲げ剛性)を評価することを考えた。図-10 は本解析で用いた等価剛性梁モデルの概要を示したものである。

トンネル軸方向の等価剛性を評価するにあたり、まず初めに基本的な解析条件となる推力の作用点の支承条件および裏込注入材の充填や硬化が期待できない区間の支承条件を定めるための事前解析を行った。その結果、推力の作用点の支承条件はトンネル軸方向、軸直角方向および回転方向の3方向ともに拘束せず、また推力の作用点から2リング分のトンネル軸方向および軸直角方向の地盤ばねを取り除く条件の場合の解析結果が計測結果を概ね表現できることを確認した。

トンネル軸方向の等価剛性の評価は、このようにして定めた基本的な解析条件のもとで、パラメータ解析を行った結果と計測結果とを詳細に比較することにより行った。解析に用いたパラメータは表-1 に示すとおりであり、トンネル軸直角方向の地盤反力係数および継手部の剛性低下を考慮したセグメン

(a) 棒構造モデル



(b) 等価剛性梁モデル

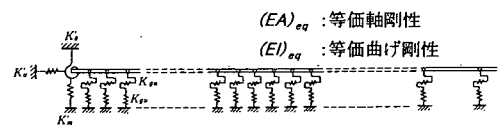


図-9 トンネル軸方向の解析モデルの例

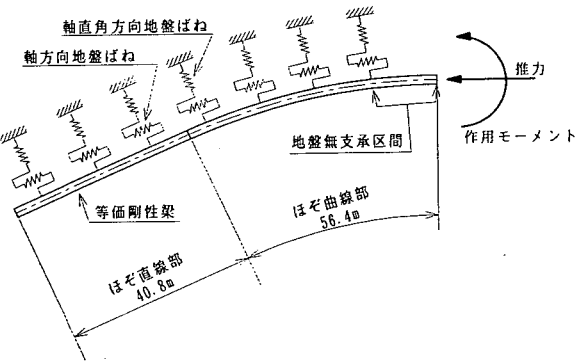


図-10 解析モデルの概要

表-1 解析に用いたパラメータ

トンネル軸直角方向の地盤反力係数	K_v	MN/m^3	20, 50, 80, 100
トンネル軸方向の地盤反力係数	K_h	MN/m^3	$K_v/3$
等価軸剛性*	$(EA)_{eq}$	$\times 10^4 \text{MN}$	14.94(100%), 11.21(75%), 7.47(50%), 2.99(20%)
等価曲げ剛性*	$(EI)_{eq}$	$\times 10^4 \text{MN/m}^2$	41.77(100%), 31.33(75%), 20.89(50%), 8.35(20%)

注*) () 内はセグメントリング本体の軸剛性や曲げ剛性に対する比率を示す。

トリング本体の等価軸剛性、等価曲げ剛性である。なお、トンネル軸方向の地盤反力係数は地盤を弾性体、またそのポアソン比を 0.5 と仮定して弾性係数とせん断弾性係数の比からトンネル軸直角方向の地盤反力係数の 1/3 とした。

4. 2 計測結果と解析結果との比較に基づく等価剛性の評価

計測結果と解析結果との比較の一例を図-11に示す。この図は推力の作用点からの距離とトンネル軸方向の軸力および曲げモーメントとの関係を示したものである。図中の解析値はトンネル軸直角方向の地盤反力係数が 50MN/m³ の場合の結果である。またここに示した計測値は先に求めた軸力および曲げモーメントを無次元化した移動平均値の近似値に、317~345 リングを掘進したときの総推力および作用モーメントの平均値(12.3MN および 4.6MN・m)をそれぞれ乗じて求めたものである。

曲げモーメントの結果をみると、セグメントリングの曲げ剛性をセグメントリング本体の曲げ剛性の 50% とした場合の解析値が計測値と符合している。一方、軸力の結果をみると、推力の作用点から遠ざかるにつれて軸力が減少する傾向は計測値と解析値とで似ているものの定量的な一致は示していない。そこで、軸力の変化率が大きい 5~20m の距離において軸力の減衰が線形であると仮定してその勾配を求め、計測値と解析値とを比較した。その結果、軸力についても曲げモーメントと同様に、軸剛性をセグメントリング本体のその 50%とした場合の解析値が最も良く計測値を表現していることがわかった。

このようにして、トンネル軸直角方向の地盤反力係数が 50MN/m³ 以外の解析ケースについても計測値を最も表現できる地盤反力係数と等価軸剛性および等価曲げ剛性との組合せを調べた。その結果を表-2に示す。等価軸剛性や等価曲げ剛性と地盤反力係数で表現される地盤の剛性との比がほぼ一定 $(EA)_{eq}/Kh=4200 \sim 4500m^3$, $(EI)_{eq}/Kv=3900 \sim 4200m$ となる場合の解析値が計測値を良く表現できるようである。またこのことは、セグメントリングの等価剛性の評価にあたっては地盤反力係数の影響も無視できない可能性を示唆している。そこで、地盤の一軸圧縮強度試験結果に基づいてトンネル軸直角方向の地盤反力係数を求めてみると、その値は 40~60MN/m³ となり、表-2に示す CASE2 の条件と近いことがわかる。

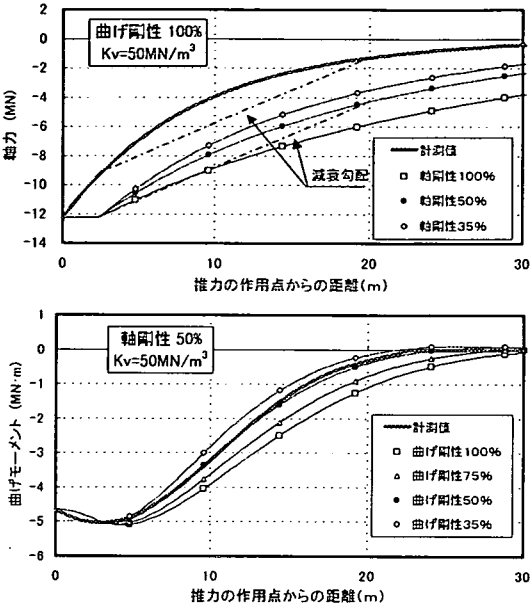


図-11 計測結果と解析結果の例

表-2 計測値を表現できる解析パラメータの組合せ

解析ケース		CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	
トンネル軸直角方向の地盤反力係数	K_v	MN/m ³	20	50	80	100
トンネル軸方向の地盤反力係数	K_h (=Kv/3)	MN/m ³	7	17	27	33
等価軸剛性	(EA) _{eq}	×10 ⁴ MN	2.99	7.47	11.21	14.94
等価曲げ剛性	(EI) _{eq}	×10 ⁴ MN/m ²	8.35	20.89	31.33	41.77
	(EA) _{eq} /K _h	×10 ⁴ m ³	0.43	0.44	0.42	0.45
	(EI) _{eq} /K _v	×10 ⁴ m	0.42	0.42	0.39	0.42

(1) 等価軸剛性の評価方法

図-1に示したように、ほぞ付きセグメントはリング間に種々のインターレア材が介在することから、トンネル軸方向の等価軸剛性の評価にあたってはこれらを適切にモデル化することが重要となる。そこで、図-12に示すようにセグメントリング本体とインターレア材とを弾性ばねでモデル化して、それらが直列に繋がれる構造を等価軸ばねで表し、これにセグメント幅を乗じて等価軸剛性を評価した。式(1)は等価軸剛性と等価軸ばね定数との関係を示したものである。式(1)で示される等価軸剛性はトンネル横断面内の軸方向応力がすべて圧縮応力となることを前提としたものであり、今回の計測結果と同じ応力状態である。

なお、シール材はゴムガスケットを用いており、それが剛性に与える影響は極めて小さいことから、ここではシール材の剛性を無視している。また式(2)はいわゆる等価軸剛性の定義を示した式である。

$$K_n = \frac{(EA)_{eq}}{L + L_t} = \frac{K_s \times K_t}{K_s + K_t} \quad \text{----- 式(1)}$$

$$(EA)_{eq} = \alpha \cdot EcAc \quad \text{----- 式(2)}$$

ここで、 K_n はトンネル軸方向の等価軸ばね定数(MN/m)、 $(EA)_{eq}$ はトンネル軸方向の等価軸剛性(MN)、 K_s はセグメントリング本体の軸方向ばね定数($=Ec \times Ac / L = 12.45 \times 10^4$ MN/m)、 K_t はインターレア材の軸方向ばね定数($=Et \times At / L_t + Ki \times Ai = 8.31 \times 10^4 \sim 11.42 \times 10^4$ MN/m)、 Ec はコンクリートのヤング係数($=3.6 \times 10^4$ MN/m²)、 Ac はトンネル横断面の面積($=4.15$ m²)、 L はセグメント幅($=1.2$ m)、 Et はトランスミッション材の弾性係数($=2.29 \times 10^3 \sim 3.17 \times 10^3$ MN/m²)、 Ki はシェアストリップ材の圧縮剛性($=1.11 \times 10^4$ MN/m³)、 At および Ai はそれぞれトランスミッション材およびシェアストリップ材のトンネル軸方向の投影面積($=0.884, 0.189$ m²)、 L_t はトランスミッション材の厚さ($=2.5 \times 10^{-3}$ m)である。また、 $EcAc$ はセグメントリング本体の軸剛性($=14.94 \times 10^4$ MN)、 α は軸剛性の有効率である。

式(1)から求まる等価軸剛性は $5.98 \times 10^4 \sim 7.15 \times 10^4$ MN であり、軸剛性の有効率は $\alpha = 40 \sim 50\%$ となっている。

(2) 等価曲げ剛性の評価方法

等価曲げ剛性の評価にあたっては等価軸剛性の場合と同様に式(1)に示すような形でそれを明確に定義づけることが望ましいが、前述のとおりトンネルの横断面内の軸方向応力がすべて圧縮応力であることから、ここでは等価軸剛性に関連づけて等価曲げ剛性を評価することにした。すなわち、先に求めた等価軸剛性をコンクリートのヤング係数で除してまずトンネル横断面の有効面積を求める。次に、セグメントリングの厚さをリング全周にわたって均一に低減し、その有効面積となるようにその断面の断面二次モーメントを求める。この場合に断面の図心軸は変化しないものとしている。最後にこれにコンクリートのヤング係数を乗じて等価曲げ剛性を評価する。図-13はその概要を示したものである。このようにし

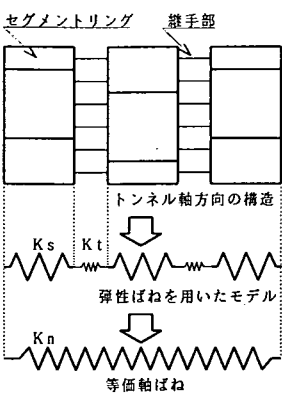


図-12 弾性ばねを用いた等価軸ばね定数の考え方

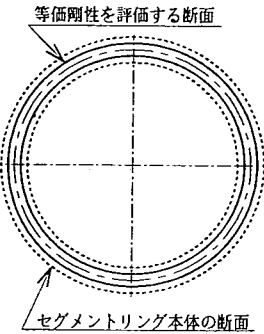


図-13 等価曲げ剛性の評価

て求めた曲げ剛性は $16.66 \times 10^4 \sim 20.83 \times 10^4 \text{ MN} \cdot \text{m}^2$ であり、式(3)に示す曲げ剛性の有効率 β は 40～50% となった。

$$(EI)_{eq} = \beta \cdot Eclc \quad \text{-----式(3)}$$

式(3)中の β は曲げ剛性の有効率、 $(EI)_{eq}$ はトンネル軸方向の等価曲げ剛性($\text{MN} \cdot \text{m}^2$)、 $Eclc$ はセグメントリング本体の曲げ剛性($=41.77 \times 10^4 \text{ MN} \cdot \text{m}^2$)、 Ic はトンネル横断面の断面二次モーメント($=11.603 \text{ m}^4$)である。

以上の考察から、地盤反力係数を $40 \sim 60 \text{ MN/m}^3$ 、等価軸剛性を $5.98 \times 10^4 \sim 7.15 \times 10^4 \text{ MN}$ および等価曲げ剛性を $16.66 \times 10^4 \sim 20.83 \times 10^4 \text{ MN} \cdot \text{m}^2$ とした等価剛性梁モデルによる解析がトンネルの軸方向挙動をよく説明できることが判明した。

5. おわりに

本研究で得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- ①曲線施工におけるトンネルの軸方向挙動を分析した結果、トンネル軸方向に生じる曲げモーメントは推力の偏心による曲げモーメントだけでなく曲線施工の進捗に伴う軸力成分の偏心量によって生じる曲げモーメントの影響も受けることが確認できた。
- ②トンネル軸方向に圧縮力および曲げが作用してもトンネル横断面内がすべて圧縮応力状態となる場合、セグメントリング本体とインターレア材の圧縮剛性等から求まる等価軸剛性および等価曲げ剛性を用いれば等価剛性梁モデルによる解析でトンネルの軸方向挙動をほぼ説明できる。
- ③本研究が対象とした条件のもとでは、ほぞ付きセグメントを用いたトンネルの等価軸剛性および等価曲げ剛性はトンネル本体の剛性の 40～50% となった。

今後はここで述べた以外の計測データについてもさらに詳細な検討を加え、ほぞ付きセグメントのより合理的な評価方法を考えていく予定である。

<参考文献>

- 1) 林光俊、斉藤正幸、小泉淳：ガス導管シールドトンネル用セグメントの力学実験と解析について、土木学会論文集No 5 3 5 /Ⅲ- 3 4、1996.3
- 2) 窪塚直亮、中山元、南川昭夫、三ツ川修治、山本忠：ほぞ付セグメントに関する現場計測および解析(軸方向挙動)、土木学会第 5 3 回年次学術講演会講演概要集、Ⅲ-B 1 4 0、1998.10
- 3) 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 3 9 4 /Ⅲ- 9、1988.6
- 4) 小泉淳、村上博智、石田智朗、高松伸行：急曲線施工用セグメントの設計法について、土木学会論文集No 4 4 8 /Ⅲ- 1 9、1992.6
- 5) 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 3 7 6 /Ⅲ- 6、1986.12
- 6) 岸下崇裕、四戸一夫、矢島大、今野勉：柔継手構造を有するセグメントチューブの縦断方向耐震性の検討、土木学会第 5 2 回年次学術講演会講演概要集、Ⅲ-B 8 5、1997.9