

外郭先行シールドによるトンネル構造の 設計法に関する一考察

Study on design method of tunnel structure with ring prelining shield tunnel

石村利明¹・真下英人²

Toshiaki ISHIMURA and Hideto MASHIMO

¹正会員 独立行政法人土木研究所 道路技術研究グループ (トンネル)

(〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)

E-mail: ishimura@pwri.go.jp

²正会員 工博 独立行政法人土木研究所 道路技術研究グループ (トンネル)

(〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)

This paper is the study on tunnel structure constructed with the ring prelining shield tunnel method. Load test and analysis of the ring prelining tunnel have been carried out. The results are as follows. i) The behavior of the ring prelining shield tunnel depends on the friction resistance of the contact face between test pieces, and ii) In the design of the tunnel structure with the ring prelining tunnel method, the behavior of the contact face can be considered by using the frame analysis in which the appropriate constant of rotational spring on the constant face between prelining tunnels is adopted on the basis of load test results.

Key Words : the ring prelining shield tunnel, tunnel structure, FEM analysis, frame analysis

1. はじめに

都市交通の効率化、渋滞緩和対策の一つとして大都市圏における道路トンネルの建設が見込まれている。都市部に建設される道路トンネルでは地上部とのアクセスのための分岐合流部が必要になるが、トンネルの土被りが大きい場合、従来、浅深度で適用されてきた開削工法は、高コストとなるばかりでなく、工事期間中における車線規制に伴う交通渋滞の原因となるなどから適用が困難な状況にある。そのため、分岐合流部の建設は非開削による施工法の採用となることが予想される。

非開削により分岐合流部等の大断面トンネルを構築する方法の一つとして、小トンネルによりあらかじめ外郭部を構築した後、NATMにより内部を切り拓ける「外郭先行シールド工法」があるが、小トンネルで構成された外郭構造体の挙動が不明確であり合理的なトンネル構造の設計法が確立されていないのが現状である。

本報告では、分岐合流部等の大断面を外郭先行シールド工法により建設する際の合理的なトンネル構造の設計法について検討した。

2. 外郭先行シールド工法の概要とトンネル構造の設計上の課題

外郭先行シールド工法は、図-1に示すように、あらかじめ分岐合流部を包含するように複数の小トンネルによる外郭構造体を構築しておき、その後、先行支保された内部を掘削して大断面トンネルを構築するものである。こうしたトンネルの外郭部を先行した施工法は種々の提案¹⁾がなされているものの、本報告で対象とする積み重ね部を有した外郭構造体とは異なるとともに、トンネル構造の設計法についても外郭部の結合部の要素実験等による検討²⁾³⁾はあるが、積み重ね部を有する外郭構造体のリング全体の挙動を考慮した検討はされていない。

図-1に示すようなトンネル構造の設計にあつ

ては、外郭構造体を構成している小トンネル同士が隣接する積み重ね部の挙動によっては全体構造系の安定性が変化することが考えられ、かつ、積み重ね部がヒンジ的な挙動を生じるのか否かによっても設計法が異なってくる。現状では、外郭構造体を構成している小トンネル同士が隣接する積み重ね部の挙動が不明確である。そこで、本検討においては小トンネルの積み重ね部の挙動に着目した下記の実験および解析を行い、外郭先行シールド工法によるトンネル構造の設計法について検討を行った。

- ①外郭先行シールドによるトンネルの全体挙動の把握: 模型供試体を用いた载荷試験によって外郭先行シールドによるトンネルの全体挙動の把握を行う。
- ②積み重ね部の挙動を考慮した設計手法の検討: 上記①の全体構造系の挙動把握実験による挙動特性を参考にし、FEM 解析および骨組み構造解析を用いた検討を行い、トンネルの構造体の設計手法について検討する。

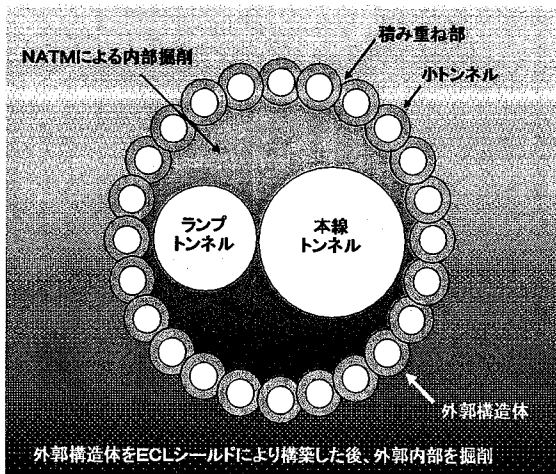


図-1 外郭先行シールド工法の概要

3. 外郭先行シールドによるトンネルの全体挙動の把握

(1) 実験概要

本実験は、非開削による大断面トンネルを構築する方法の一つとして考えられる外郭先行シールドを対象として、無筋コンクリート柱を用いた縮小リングモデルにより全体構造系の挙動を把握するためにを行った。

トンネルの断面は、構造的に安定性が高く、発

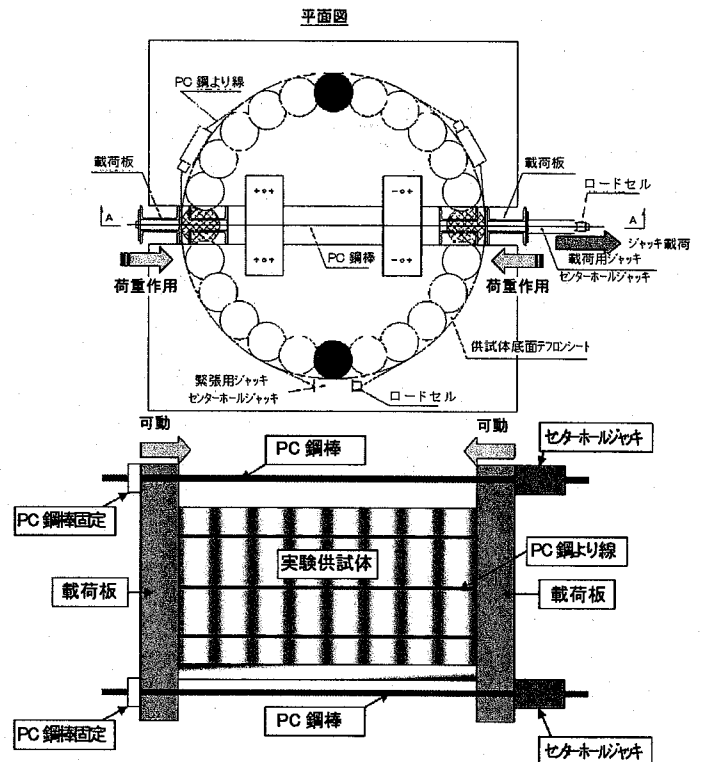


図-2 実験方法の概要図

生応力においても有利となる円形断面（直径 34.7 m、外郭先行シールド外径 ϕ 5 m）を想定した。実験の規模は、積み重ね部の挙動が把握できる大きさとして 1/20 モデルとした。

(2) 実験方法

実験は図-2 に示すように一部切り欠き部を有する直径 250mm、長さ 1,000mm の無筋コンクリート供試体 24 本をリング形状に形成し、軸力の導入、2 点载荷が可能な载荷治具を用いて実施した。表-1 に実験に用いたコンクリート供試体の材料試験結果を示す。

供試体への载荷は、図-2 に示す実験供試体の周囲に巻いたバンド（PC 鋼より線）に油圧ジャッキを用いて張力を加えることで供試体に所要の軸力を導入する。軸力導入後、载荷用の 2 台の油圧ジャッキにより曲げを発生させる荷重 P を徐々に増加させ実験供試体の挙動を確認した。また、実験

表-1 コンクリート供試体の材料試験結果

	材齢 (日)	圧縮強度	静弾性係数	ポアソン 比
		(N/mm ²)	(kN/mm ²)	
ケース 1	25	40.2	24.6	0.17
ケース 2	32	43.0	24.0	0.17
ケース 3	39	43.2	23.8	0.18

表-2 測定項目

測定項目	測定目的	測定機器
載荷荷重	軸力荷重・載荷荷重の確認	ロードセル
変位量	実験供試体変形量の確認	変位計
目開き量	接合面目開き量の確認	クリップ型ゲージ
目違い量	接合面目違い量の確認	クリップ型ゲージ
ひび割れ	ひび割れ発生状況の確認	目視／写真

表-3 実験ケース

	軸力載荷荷重	摩擦条件
ケース 1	100kN×ジャッキ 3 本=300kN	グリス無し
ケース 2	60kN×ジャッキ 3 本=180kN	グリス無し
ケース 3	100kN×ジャッキ 3 本=300kN	グリス有り

時の測定項目、測定目的および測定機器を表-2に示す。

(3) 実験ケース

実験ケースは、軸力および接合面の摩擦条件をパラメータとして表-3に示す3ケースを実施した。ケース1とケース2では、導入する軸力の差による挙動の確認を主な目的とし、ケース1とケース3は、接合面の摩擦条件の違いによる挙動の確認を主な目的とした。軸力（設定張力T）については、別に実施した解析で算出された軸力（実物での軸力Nmax 約 5,200kN）をもとに、実物での ECL

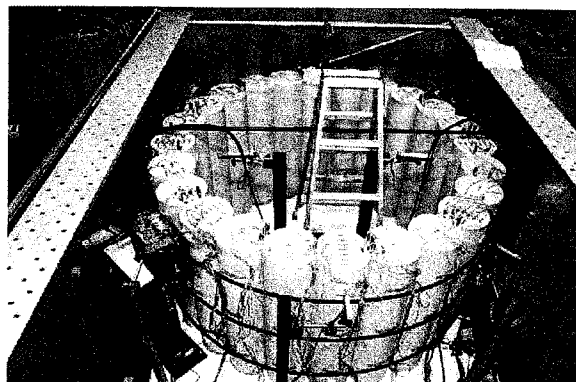


写真-1 実験時の状況

接合面の発生応力とほぼ等しくなる 300kN を基本とした。また、接合面の条件は、コンクリート同士の接合条件が良好で直接接合した場合（グリス無し）と実施工時に接合面に泥水等が介在した場合（グリス有り）を考慮して、接合する表面へのグリス塗布の有無による実験ケースとした。

(4) 実験結果および考察

a) 載荷結果

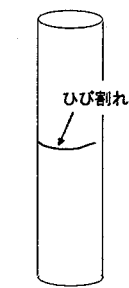
各実験ケースの結果の概要は、表-4に示すとおりであり、各ケースともに供試体の破壊には至らなかった。各実験ケースのトンネル全体の耐力力として考えられる最大荷重は、載荷荷重の増加が停滞し、変位のみが進行したために載荷を終了した時点の載荷荷重とした。

b) 変位量

軸力導入時の変位量については、全てのケースで荷重の増加に伴い縮径する傾向であった。また、

表-4 載荷結果および載荷時の状況

	設定軸力 (kN)	最大荷重 (kN)	載荷時の状況	備 考
ケース1	300	104	- 軸力導入後 94.5kN で、240° (載荷用油圧ジャッキ載荷点を0°とした時の時計回りの角度) の供試体に水平方向にひび割れ(右図参照)が発生した。 - 載荷荷重 60kN 以降、変位増加が顕著になった。 - 載荷重 80kN 以降、軸力が増加し、載荷点(0°)および90°方向の変位、目開きが更に進行した。 - 載荷荷重 104kN で実験を終了した。	- 供試体の破壊はない。 - 載荷荷重の増加が停滞し、変位の進行が顕著となったため実験を終了した。 - 変形挙動は、供試体の接触部の目開きが支配的であった。
ケース2	180	80	- 軸力導入後 67.5kN で、270°の供試体に水平方向のひび割れ(右図参照)が発生した。 - 載荷荷重約 50kN 以降、変位増加が顕著になった。 - 載荷重 60kN 以降、軸力が増加し、載荷点(0°)および90°方向の変位、目開きが更に進行した。 - 載荷荷重 80kN で実験を終了した。	- 供試体の破壊はない。 - 実験供試体が、載荷点垂直方向に移動したため実験を終了した。 - 変形挙動は、供試体の接触部の目開きが支配的であった。
ケース3	300	28	- 軸力導入後 52.5kN で、150°の供試体に水平方向のひび割れ(右図参照)が発生した。 - 載荷荷重 25kN で荷重増加が停滞し、変形のみが進行する挙動となった。 - 載荷点(0°)の変位量が 60mm を超える変位量となり実験を終了した。	- 供試体の破壊はない。 - 載荷荷重が増加せず変位のみが進行する挙動となったため実験を終了した。 - 変形挙動は、供試体の接触部の目開きが支配的であった。



ひび割れ状況

変位量は全てのケースで概ね同値(0.5~2.5mm程度)であった。

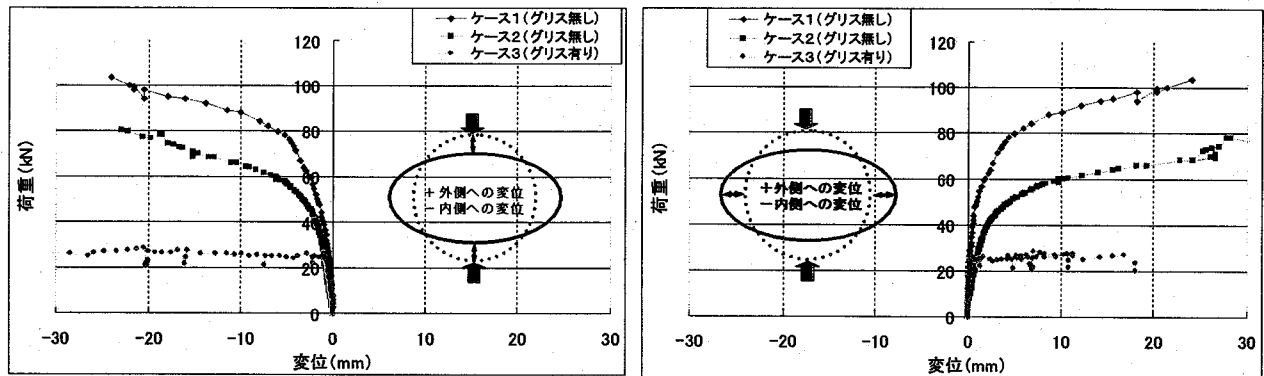
また、載荷荷重導入時の変位量を図-3、図-4に示す。図-3より、軸力の大小および摩擦の大小により急激に変形し始める点が異なっていることが分かる。図-4より、鉛直方向と水平方向は概ね均等に変位しているものの、45°方向は変位していないことが分かる。これより、鉛直2点載荷によるリングの変形がよく再現できたものと判断できる。

c) 目開き量および目違い量

最終荷重時の目開き量および目違い量を図-5、図-6に示す。図より、目開きはケース1およびケ

ース2で鉛直方向が内側の目開き、水平方向が外側の目開きとして発生した。一方、ケース3は全体的な目開きの発生は少なかった。目違い量は、ケース1およびケース2においてほとんど顕著な変形が確認されなかった。ケース3においては鉛直方向で目違いが発生していた。

以上より、図-7に示すように供試体の積み重ねの条件によって変形時の挙動が異なり、供試体同士の摩擦が存在するケース1、ケース2では供試体接触部を支点とした回転で、供試体同士の摩擦が小さいケース3は供試体接触部のすべりによる回転によるものと考えられる。



(a) 載荷軸方向 (0° と 180° の平均値)

(b) 載荷軸に対して垂直方向 (90° と 270° の平均値)

図-3 載荷荷重の荷重と変位の関係

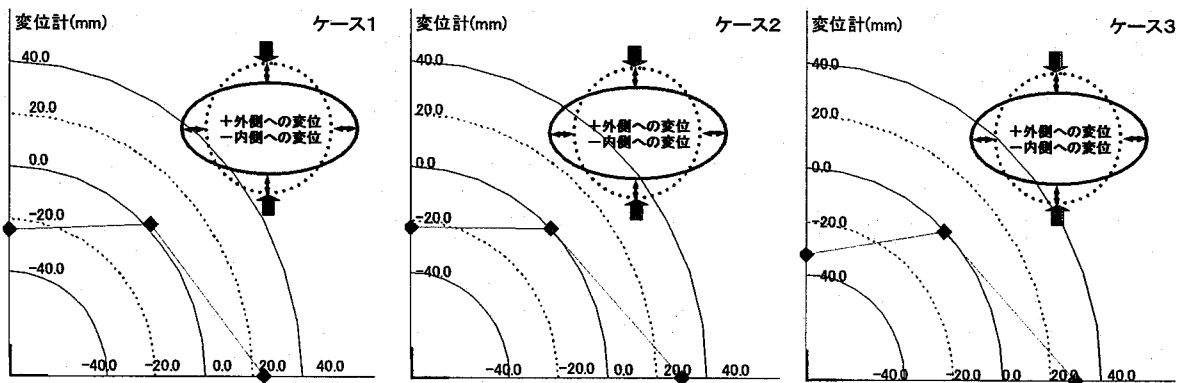


図-4 最終荷重時の変位量分布

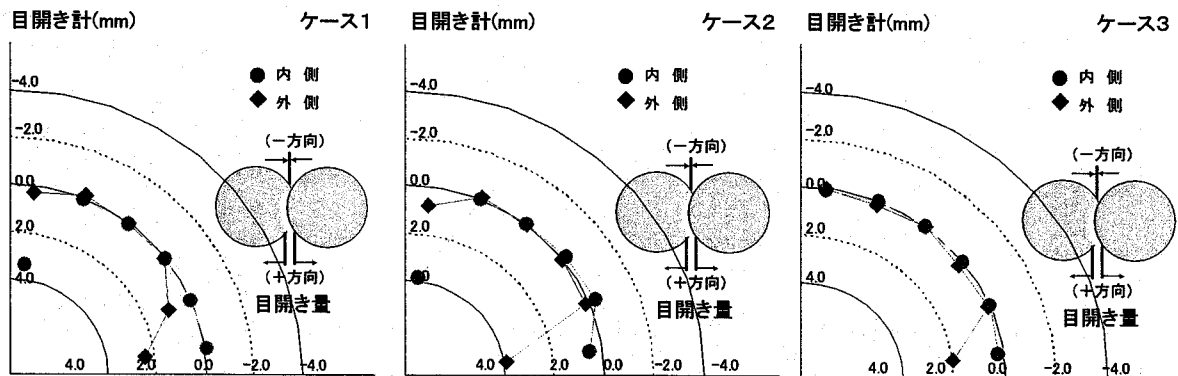


図-5 最終荷重時における目開き量

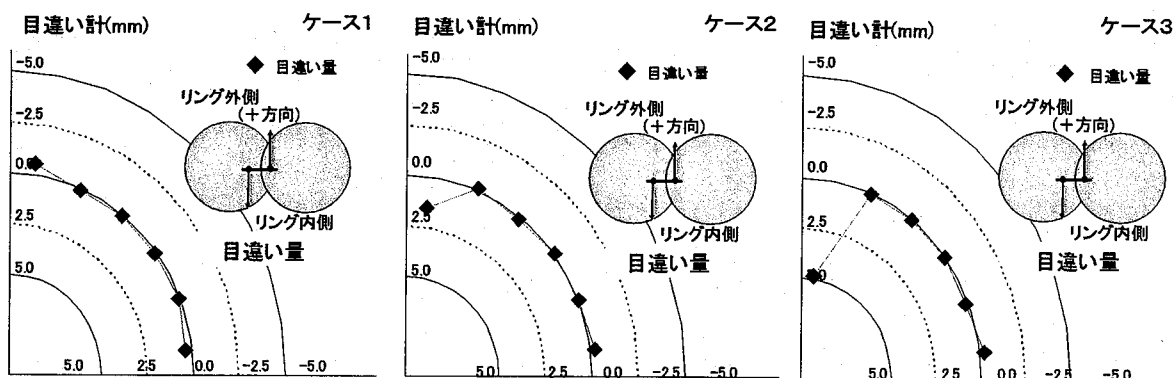
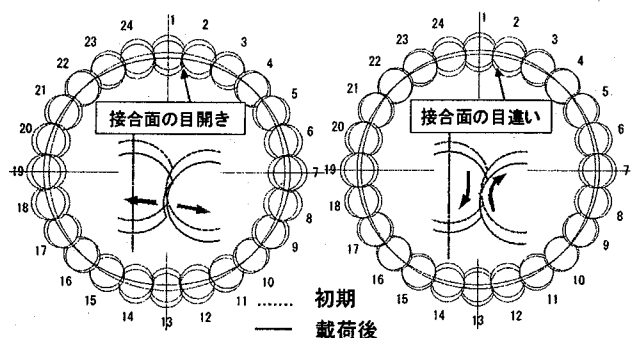


図-6 最終荷重時における目違い量



(a) 摩擦が存在する場合 (b) 摩擦が小さい場合

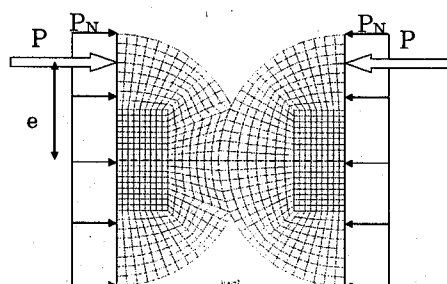
図-7 接触部の摩擦の大小による挙動の違い

4. 積み重ね部の挙動を考慮した設計手法の検討

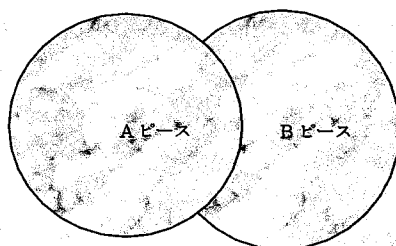
非開削により大断面トンネルを構築する方法の一つとして考えられる外郭先行シールド工法を対象として、その設計手法について検討するため、トンネルの全体構造系の挙動を把握した実験結果をもとに、解析モデルの検討およびその妥当性を検討し、積み重ね部の挙動を考慮したトンネル構造の設計法について考察を加えた。

(1) 部分モデルによるFEM解析

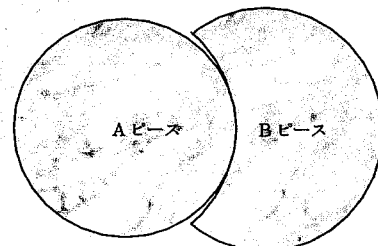
本検討対象としている外郭先行シールドは、円柱供試体をリング状に連続して接続しており、継



(a) 解析モデル



(b) 全接触モデル



(c) 部分接触モデル

図-8 部分解析モデルによる解析モデルと接触条件

手部は面接触の摩擦抵抗のみで構成されている。したがって、解析モデルとして接触部の設定方法が重要な要素となる。そこで接触問題が扱える汎用有限要素法解析コード MARC を用いて解析を行った。接触部は、接触面間の摩擦係数と法線方向応力とで決まる抵抗力を接触面間の接線方向力を超えた場合にすべりを生じる摩擦モデルを用いた。

部分モデルによる検討は、接触部に着目した部分的な縮小モデルを構築し、接触面の設定が解析結果に与える影響および設定方法の妥当性について検証した。

実験に用いた供試体は、製作精度に起因する形状の誤差や表面の粗度等により、円柱供試体同士が全面で接触しているとは考えにくい。そこで、接触面積が解析結果に与える影響について検討を行なった。解析は図-8(a)に示すような解析モデルを用いて、実験時の軸力に相当する P_N を与えた後に載荷重 P を供試体中央より外側に作用させて曲げモーメントの増加に伴う目開き量を求めた。接触部は、全接触モデル(図-8(b))に加え、AピースとBピースの接触端部で1mmの目開きが発生するように円の曲率を変えた部分接触モデル(図-8(c))を作成し、二つのモデルで比較を行った。なお、接触面の摩擦係数はコンクリートの摩擦係数として0.7を用いた。

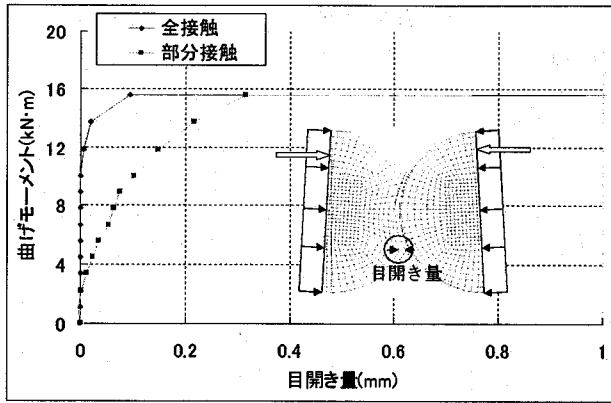


図-9 曲げモーメントと目開き量の関係

図-9に曲げモーメントと目開き量の関係を示す。図より部分接触モデルと全接触モデルでは目開き量0.3mm程度までにおいて、接触部の一部を支点として供試体が目開きを始める曲げモーメントがそれぞれ約2kN・m、約12kN・mと差異があったものの、目開きが約0.3mmを超えた曲げモーメントが約16kN・m以降はほぼ近似した関係を示すことが分かった。したがって、接触面モデルの違いがトンネル全体の耐荷力に及ぼす影響はほとんどないと考えられる。

(2) 全体構造系モデルによる解析

本検討対象である外郭先行シールドの設計を行うにあたって、解析モデルは二次元骨組み構造解析等の簡易なもので検討を行なうことが望ましい。しかし、簡易モデルの作成を行なうにはばね定数や物性値の適切な評価を行ない、様々な荷重条件における構造の挙動について把握する必要がある。

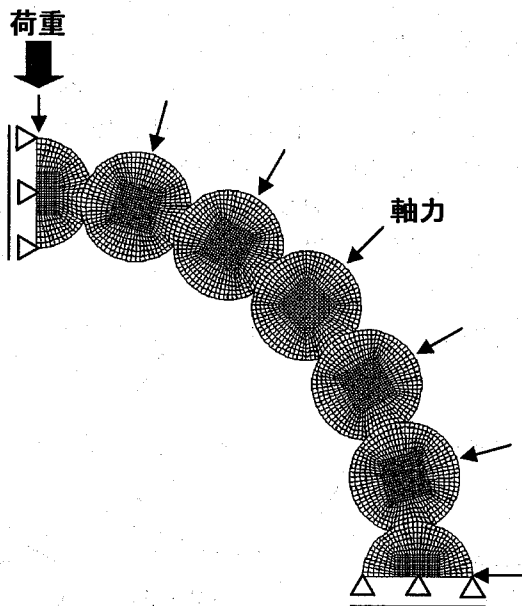


図-10 解析モデル

表-5 解析に用いた各ケースの軸力と摩擦係数

解析ケース	導入軸力	接触条件	摩擦係数
ケース 1	300 kN	グリス無し	0.7
ケース 2	180 kN	グリス無し	0.7
ケース 3	300 kN	グリス有り	0.3

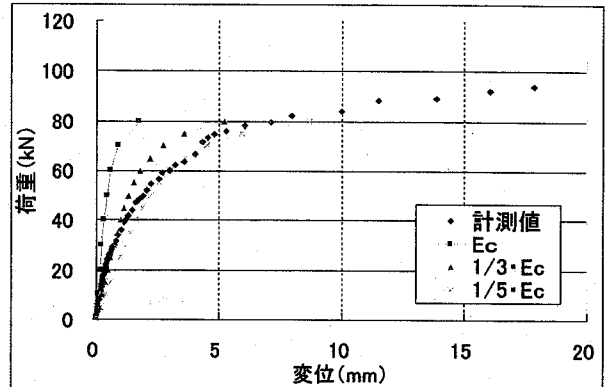


図-11 弾性係数 E_c の違いによる荷重と変位の関係

そこで、全体構造系モデルによるFEM解析（汎用有限要素法解析コードMARC）および骨組み構造解析を行ない、実挙動の再現を試みるとともに全体構造系モデルの妥当性について検討した。

a) FEM 解析

全体構造系モデルにおいては、図-10に示す1/4リングの解析モデルを用いて変形係数をパラメータとして解析を行い、実挙動を再現できる弾性係数を検討した。なお、実験に用いる供試体は、製作精度に起因する形状の誤差や表面の粗度等の影響により、円柱供試体同士が全面で接触しているとは考えにくい。前節で述べたとおり、接触面モデルの違いがトンネル全体の耐荷力に及ぼす影響は小さいと考えられるため、接触面は全接触とした摩擦モデルを設定した。各ケース毎の軸力と接触面の摩擦係数は表-5の値を用いた。

図-11にケース1の場合の荷重と変位の関係の結果を示す。実験値は荷重が増加するに従って変位量が増加し、ある荷重を超えると変位が急速に進行する傾向を示している。これは、積み重ね部の接触面で供試体接触部を支点とした回転により大きく変形が進行することによって考えられる。解析では、接触面に摩擦モデルを用いたことから、供試体接触部を支点とした回転するという現象だけを模擬するものではないが、弾性係数を実験供試体の材料試験結果から得られる1/3とした時には荷重と変位の関係が直線的に増加している接触面の摩擦抵抗を上回らない範囲で実測値を捉える

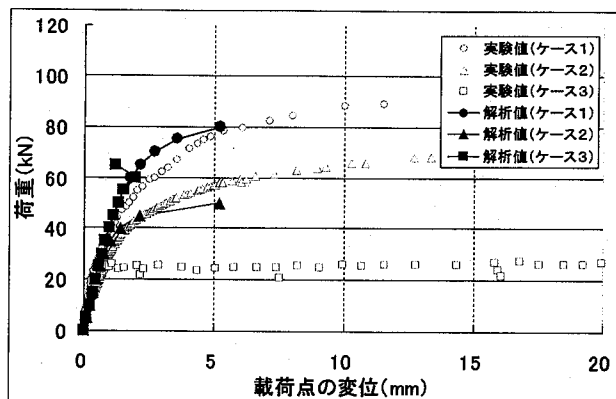


図-12 荷重と載荷点の変位の関係

結果が得られた。したがって、接触面の摩擦抵抗が作用する範囲においては、コンクリート供試体の弾性係数を試験結果の1/3とすれば実験で用いた供試体接触部の挙動を再現できると考えられる。

図-12にコンクリート供試体の弾性係数を1/3とした時のケース1～3の場合の荷重と載荷点の変位の関係を示す。本検討に用いた解析モデルでは計算が収束しなかったため実験の最大載荷重までを解析することができなかった。しかし、ケース1および2の接触面にグリスがない条件では、変位の方法および変位量は最大荷重の2/3程度までは概ね実験値を捉える結果となり、実挙動を再現できる解析モデルであると考えられる。

以上より、供試体接触部に摩擦が存在する場合は、トンネル全体の耐荷力と考えられる最大載荷重の2/3程度までの範囲については、実験値と概ね一致する解析結果となった。

b) 骨組み構造解析

平面ひずみ要素を用いたFEM解析により外郭先行シールドの構造設計を行う場合は、解析メッシュ図の作成や接触部分の評価などの解析モデルの設定が難しく、多くの時間を要する。そこで、実験結果や前述のFEM解析結果をもとに、骨組み構造解析により実挙動の再現が可能な解析モデルの検討を行った。

外郭先行シールドは、独立した円柱がリング状に連続して繋がった構造であり、接触部はボルト等の継手部材を用いず、接触面の摩擦のみで構成されている。そこで、骨組み構造解析に用いたモデルは図-13に示すように一本の供試体円柱をはり要素で構成し、接触部は回転ばね要素を用いた

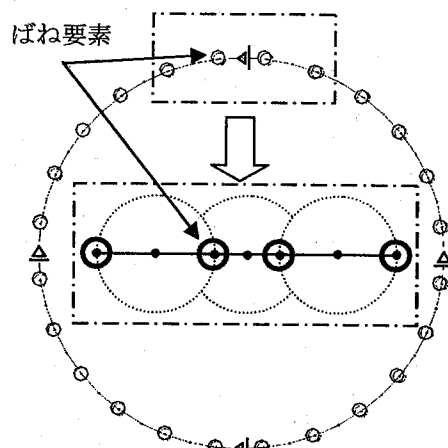


図-13 骨組み構造解析モデル

表-7 骨組み構造解析時の境界条件および物性値等

	設定方法	設定値
境界条件	挙動に影響を与えないことを前提として設定した。	天端部、底部および両側部の4点を中心方向スライド
変形係数	コンクリート供試体による試験結果を使用した。	$E=2.4 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$
有効断面積	FEM解析結果により軸力 $N=300 \text{ kN}$ を導入した時の供試体の変位量 ΔL から有効断面積 A を算出した。	$A=0.185 \text{ m}^2$
断面二次モーメント	FEM解析結果により軸力 $N=300 \text{ kN}$ を導入し、荷重 P を与えた時の供試体の鉛直変位量 ΔL_8 から断面二次モーメント I を算出した。	$I=1.213 \times 10^{-4} \text{ m}^4$
ばね定数	実験時の載荷点の供試体の目開きと曲げモーメントの関係から、変曲点と考えられる荷重における各々の回転ばね定数を設定した。	図-14参照

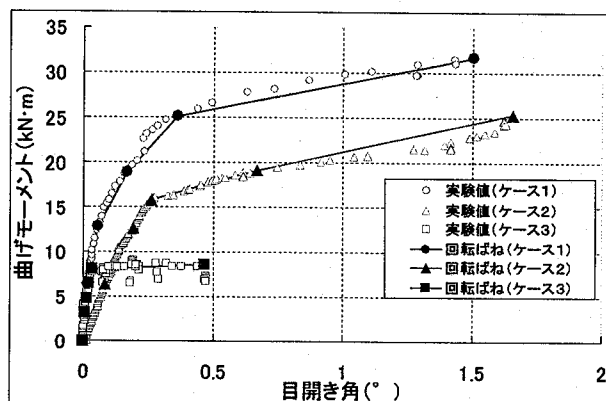


図-14 解析に用いた回転ばね(7.5°の目開き)

解析モデルに実験時の軸力導入、2点載荷を行い全体構造系の挙動を再現することを試みた。

解析にあたって必要となる境界条件、物性値等は表-7に示すとおりであり、解析に用いた回転ばねは非線形の回転ばねとして、図-14に示す載荷点の供試体に設置(載荷点位置を0°として時計回りの方向に7.5°の位置)した目開き計の結果を用いて目開き角と曲げモーメントの関係から求めた値を代表値として各節点に用いた。

図-15に荷重と載荷点の変位の関係の解析結果

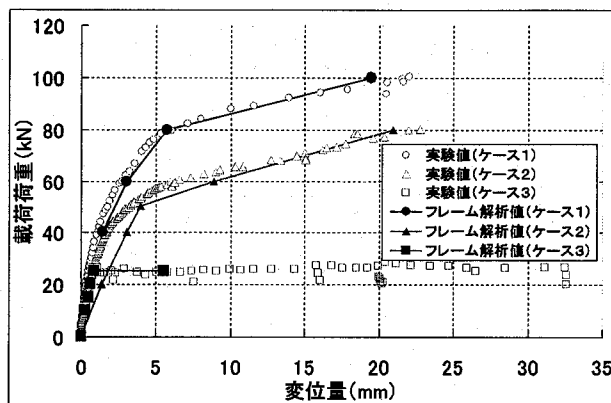


図-15 変位量と載荷荷重の関係

を示す。実験値の変位量推移を概ね近似していることが分かる。

以上より、外郭先行シールドによるトンネル構造の設計手法としては、積み重ね部の接触部を摩擦の大小などの接触条件に応じたばね定数を有する回転ばねでモデル化した骨組み構造解析の適用性が高いことが分かった。

5. まとめと今後の課題

(1) 外郭先行シールドによるトンネルの挙動

外郭先行シールドによるトンネルの全体構造系の挙動を把握した本実験結果より、以下のことが明らかとなった。

- ①外郭先行シールドによるトンネル全体の耐荷力は、供試体強度が十分な場合は供試体自身の破壊が発生する前に供試体の積み重ね部が回転あるいはすべることによって、変位の進行が顕著となり決まるものと考えられる。
- ②供試体の積み重ね部の挙動は、供試体接触部の摩擦の大小により異なり、供試体同士の摩擦が存在する場合は供試体接触部を支点とした回転で、供試体同士の摩擦が少ない場合は供試体接触部のすべりによる回転が支配的となって挙動することが考えられる。

(2) 積み重ね部の挙動を考慮した設計手法

外郭先行シールドによるトンネルの全体構造系の挙動を把握した実験結果等をもとに、解析モデルの検討およびその妥当性を検討した結果、以下のことが分かった。

- ①供試体接触部に摩擦が存在する場合は、全体構造系の FEM 解析を用いて弾性係数を適切に評価することにより、トンネル全体の耐荷力と考えられる最大載荷重の 2/3 程度までの範囲につ

いては、実験値と概ね一致する解析結果が得られる。

- ②外郭先行シールドによるトンネル構造の設計手法としては、積み重ね部の接触部を摩擦の大小などの接触条件に応じたばね定数を有する回転ばねでモデル化した骨組み構造解析の適用性が高い。

今後の課題としては、外郭先行シールドの実施工における施工精度、接触状態がどの程度であるかを把握し、その状態における設計に用いる諸定数を適切に評価する手法を確立することが必要である。

参考文献

- 1) 例えば、上原芳文、阿曾利光：超大断面道路トンネルの分岐合流部非開削築造工法の開発，地下空間シンポジウム論文・報告集，12巻，土木学会，pp.273-278，2007年1月
- 2) 浜口幸一，吉武謙二，富口一隆，伊豆田久雄：小口径シールド結合リングによる超大断面拡幅工法における要素載荷実験，土木学会第61回年次学術講演会，部門VI，pp141-142，2006年9月
- 3) 浜口幸一，矢部幸男，吉武謙二：小口径シールド結合リングによる超大断面拡幅工法（SR-JP工法）の開発，土木学会第61回年次学術講演会，部門VI，pp139-140，2006年9月