

二次覆工されたシールドトンネルの断面力に現われるジベル効果について STUDY ON BEHAVIOR OF THE SHIELD TUNNEL COMBINED SECONDARY LINING WITH SEGMENT LINING BY MEANS OF JIBEL REINFORCING BAR

栗木 実*・真鍋 尚**・加藤 大輔**
Minoru KURIKI, Takashi MANABE and Daisuke KATO

In this paper, we discuss lining design method of the shield tunnel including secondary lining. In particular, we consider of the transmitted force to segment lining by the weight of the secondary lining, using beam-spring design model. Because the secondary lining in our discussion has been combined with segment lining by means of JIBEL reinforcing bar. Therefore, we estimate local bond-slip relation between JIBEL and secondary lining concrete at the non-linear spring in our analitical model.

Finally, we show that stress and deformation of segment lining due to secondary lining construction has been trend to increase, and dead load stress of secondary lining has been generated tension axial-force at crown of the tunnel.

keywords: shield tunnel, secondary lining, bond-slip of JIBEL and secondary lining concrete, beam-spring design model

1. はじめに

わが国のシールド工法で建設されるトンネルは、それぞれの用途やトンネルを管理する各機関の考え方によって目的は異なるものの、二次覆工を施工されるシールドトンネルが多数を占める。

一般的なシールドトンネルの覆工設計は、地盤条件、土被り条件に応じた土水圧を荷重系とし、セグメントリングのみを構造系にした構造計算がなされている。二次覆工は、トンネル止水、蛇行修正といった非構造部材に位置付けられることが多く、現行の指針・基準類には、二次覆工された後の覆工応力状態を与える設計手法は見当たらない。

二次覆工の耐荷能力が発揮された後は、二次覆工が一次覆工を補強する効果が期待できるため、その研究は早くから行われており、半谷¹⁾や村上・小泉²⁾が、二次覆工されたシールドトンネルの横断面挙動の解析モデルを提案している。ただし、一、二次覆工間のモデル化は、両覆工間がせり合う場合にだけ抵抗するトンネル半径方向、円周方向ばねを一様に配し、覆工断面力の分配を行うものであり、二次覆工の落下防止、覆工間のずれ防止に用いられるジベル筋が反映できていない。

本報告は、ジベル効果を取り入れた二次覆工施工後の覆工応力状態を与える筆者らの解析モデルで、トンネル断面形状の違いによる解析結果を述べたものである。筆者らの解析モデルは、ジベル筋を二次覆工コンクリートとの付着特性から導いたばね部材にモデル化することで、両覆工間の断面力を伝達させ、既に土水圧によって断面変形したセグメントリングに、二次覆工が施工されたことによる二次覆工自重の累加に伴う荷重系の変化を考慮した覆工解析手法である。

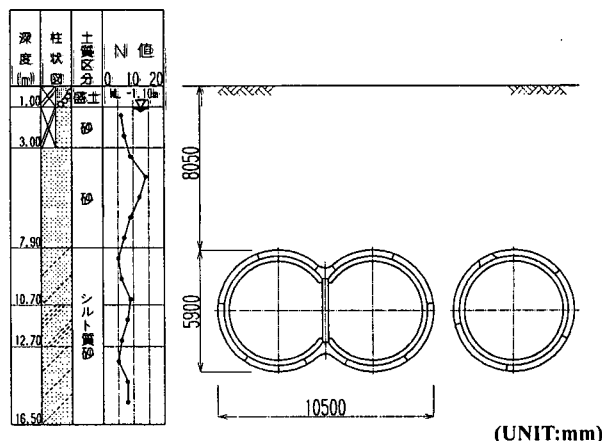


図-1 二次覆工されたシールドトンネルの例

* 日本工営株式会社 コンサルタント事業本部 広島支店 技術部

**株式会社富士総合研究所 解析技術第1部

2. 二次覆工されたシールドトンネル覆工設計の技術的課題

例えば、図-1 に示す沖積地盤の軟弱地盤条件下で土被りの浅い位置に建設される、わが国の典型的なシールドトンネルを例にする。シールドトンネルの条件として、形状は一般的な単円形断面と重複円形断面を考え、いずれも現場打ちコンクリートの二次覆工が、一次覆工施工後に数日経て施工されるものとした。トンネル断面形状の違いによる覆工断面力を考察する。

シールドトンネルの覆工諸元、地盤条件は表-1 に示すとおりである。便宜上、土被り、覆工部材の諸元は両トンネルで同一とし、重複円形断面の縦径に単円形断面の径を合わせている。

また、一・二次覆工間には、二次覆工の脱落防止、両覆工間のずれ防止に用いられるジベル筋を、図-2 に示すように配置することを想定した。ジベル筋は、D19 を使用し、端部の処理はセグメント側をねじ止め固定で、二次覆工側には定着長 100mm で埋め込むモデル化をした。

二次覆工されたシールドトンネルの覆工設計には、以下の技術的課題が考えられる。

①セグメントリングの継手効果と添接効果

一次覆工であるセグメントリングは、幾つかのセグメントを通常ボルトなどで結合することによって組み立てられる。したがって、セグメントリングは、セグメント単体と同じ剛性を持つ剛性一様なリングと比べて変形しやすい。これは継手部分における剛性が、セグメント単体の剛性に比して低下していることに起因する。

さらに上述の継手効果による変形を抑制する目的で、地盤条件にもよるが、リング間はセグメント間の継手位置が千鳥になるように組み立てられ、これもボルトなどで結合される。

千鳥組されたセグメントリングは、セグメント間継手部が若干のヒンジ的挙動を示し、覆工断面力の曲げモーメントがリング間継手のせん断抵抗によって、千鳥に組まれた隣接セグメントに伝達され、曲げモーメントの増加が生じる添接効果が現われる。

②一・二次覆工間のジベル効果

一次覆工内側に現場打ちコンクリートで巻き立てられる二次覆工の脱落、ずれ防止を目的として、両覆工間にジベル筋が施されるトンネルは少なくない。両覆工間が互いにせり合う場合は、接触面に十分な摩擦力が生じ、覆工断面力にジベル効果は表われにくい。ところが、両覆工間が離間、ずれを生じた場合、ジベル効果が表われ、離間に対して軸力、ずれに対してせん断力がジベル筋に働き、ジベル筋を介して断面力が両覆工間に伝達される。

③二次覆工が施工された後のトンネル荷重系

シールド機後方で組み立てられたセグメントリングは、その自重と地盤条件、土被り条件に応じた土水圧に伴う断面力が発生する。

表-1 シールドトンネルの覆工諸元と地盤条件

覆工諸元	一次覆工		二次覆工
	A・B・C型	D型	
幅 (m)	0.8	0.32	1.6
厚 (m)	0.3	0.3	0.25
断面積 (m ²)	2.4×10^{-1}	9.6×10^{-2}	0.4
断面二次モーメント (m ⁴)	1.8×10^{-3}	7.2×10^{-4}	2.083×10^{-3}
弾性係数 (tf/m ²)	3.6×10^6	3.6×10^6	2.452×10^6
単位長重量 (tf/m)	6.2×10^{-1}	2.5×10^{-1}	9.6×10^{-1}

土層	層厚 (m)	単位体積重量 (tf/m ³)	側方土圧係数	地盤反力係数 (kgf/cm ³)
Ums	1.75	1.85	-	-
Us	4.25	2.00	-	-
Ucs	-	1.74	0.5	kh=0.524 kv=0.175

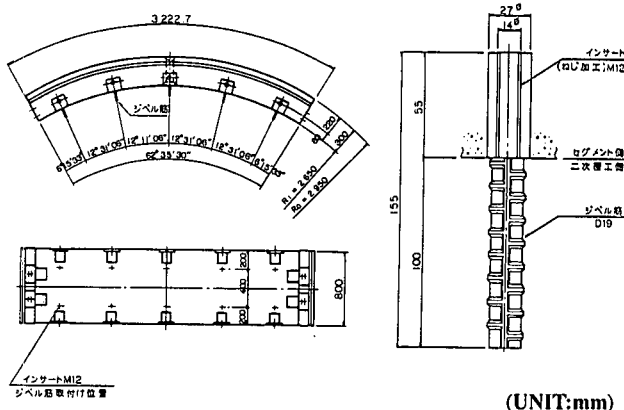


図-2 セグメントリングと二次覆工との接合面に設けたジベル筋（リング間継手箇所に D19 を 2 列）

その後、二次覆工が打設されたトンネルは、二次覆工の自重が累加され、セグメントリングの応力状態が変化する。両覆工間にジベル筋を配する場合には、二次覆工コンクリートの打設に伴って、セグメントリングクラウン部の正曲げモーメントをさらに助長させる傾向にあり、二次覆工されたシールドトンネルの覆工設計において無視できない荷重系の変化である。

上述の二次覆工が施工された後の荷重系を与える現行の指針・基準類は見当らず、二次覆工が施工されるシールドトンネルの多いわが国の実状からすれば、二次覆工の存在を考慮した荷重系にて覆工設計を行う必要がある。これまで二次覆工厚は、過去の事例、経験的に定めることも少なくなく、二次覆工された後の覆工応力状態を的確に評価することは、構造的な観点からも試算できると考えられる。

継手効果、添接効果をセグメントリングの構造系に反映する考え方は、例えば村上・小泉がセグメント本体をその形状に即したはりに、セグメント間継手部を軸ばね、せん断ばね、そして回転ばねに、リング間継手部を軸ばねとせん断ばねで現すはりーばねモデル³⁾⁴⁾を提案しており、はりーばねモデルによる解析手法の妥当性を現場実測と共に立証している。①の課題に対して筆者らは、村上・小泉が提案するはりーばねモデルに準じて、セグメント間継手部の剛性低下、セグメントリングの千鳥組による添接効果をモデル化することとした。

次に、筆者らが特に着目してきたのは二次覆工されたシールドトンネルの応力状態であり、②のジベル効果、③の荷重系の評価について検討を行ってきた。前者のジベル効果は、ジベル筋と二次覆工コンクリートとの付着特性を考慮して、ジベル筋位置に両覆工間の離間方向に働くトンネル半径方向ばね、トンネル円周方向に働くせん断ばねを配し、両覆工間の変位拘束条件をモデル化した。また後者の二次覆工されたシールドトンネルの荷重系は、既に地山からの土水圧荷重によって断面変形したセグメントリングに、二次覆工の自重を累加させる時系列なステップ解析評価を行った。その場合、二次覆工自重を累加させるステップでは、モデル化されたジベル筋のばねで結合した二次覆工の剛性を考慮する。

3. 覆工間の離間に応じたジベル筋のモデル化

現場打ちのコンクリートで施工される二次覆工は、十分な養生期間を経て型枠が脱型される。脱型された二次覆工は、その自重によって断面変形を起こし、変形が顕著な部位のクラウン部はセグメントリングと離間方向に変位する⁵⁾。覆工間にジベル筋を配する場合には、二次覆工の断面変形がジベル筋を介してセグメントリングに伝達されることになる。

一般的なジベル筋は、二次覆工が施工される前に予め、セグメント内側に設けられるねじ切りされたインサート孔に固定される。その後二次覆工のコンクリートが打設され、セグメントとは剛結に近い状態になり、ジベル筋に働く引張力に対して二次覆工とは付着力のみで抵抗することとなる。ただし、覆工間が圧縮領域となってせり合う場合には、両覆工部材間の摩擦力が支配的となって、両覆工は一体化構造として挙動するため、ジベル効果が現れにくい。

覆工間が離間した後のジベル筋1箇所あたりの二次覆工コンクリートとジベル筋との付着特性を考慮した変位ならばに力のつり合いは、図-3のように現せる。

吉川・田辺⁶⁾は、部材軸 x にわたって一様な引張応力 σ を受ける鉄筋コンクリートの単軸部材を考え、鉄筋とコンクリート間の付着すべり機構に基づき、鉄筋コンクリートのひびわれ部

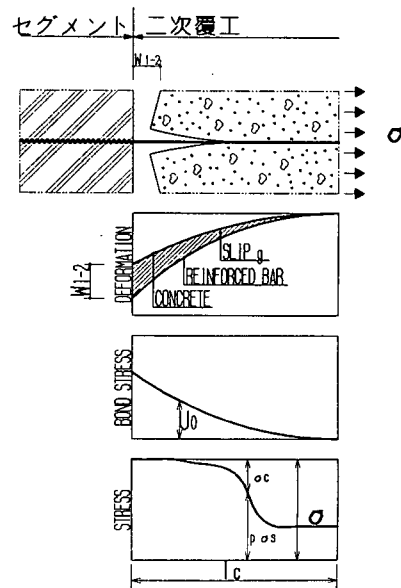


図-3 覆工間が離間した後のジベル筋と二次覆工コンクリートの応力状態

分の引張剛性 E_{RC} を次式(1)のように提案している。鉄筋とコンクリート間の付着特性値 b は、次式(2)の鉄筋とコンクリートとのすべり量に依存していることがわかる。同式の無次元化した付着応力~すべり関係の勾配 k は、図-4に示すように勾配 $k u_0 / g_0$ をもつ線形付着応力~すべり関係を仮定して、 $k=1.0$ とおくことでコンクリートにひびわれが生じた瞬間の付着特性値 b を得ることができる。

$$E_{RC} = \frac{(np+1)pE_s}{np + \frac{\tanh(bl_c)}{bl_c}} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 n :鉄筋とコンクリートの弾性係数比
 p :鉄筋比
 E_s :鉄筋の弾性係数
 b :付着特性値
 l_c :ひびわれ間隔

$$b^2 = \frac{k u_0 \phi (1+np)}{g_0 A_s E_s} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 k :無次元化した付着応力~すべり関係の勾配
 u_0 :付着強度
 ϕ :鉄筋の周長
 g_0 :鉄筋とコンクリートの相対的変位(鉄筋のすべり量)
 A_s :鉄筋の有効断面積

$$k_{1-2u} = \frac{E_{jc} \cdot A_j}{w_{1-2}} \dots\dots\dots(3)$$

$$k_{1-2s} = \frac{G_j \cdot A_j}{D} \dots\dots\dots(4)$$

ただし、 $\left(G_j = \frac{E_j}{2(1+\nu_j)} \right)$

ここで、 k_{1-2u} :覆工間のトンネル半径方向ばねのばね定数
 k_{1-2s} :覆工間のトンネル円周方向ばねのばね定数
 w_{1-2} :覆工間の離間量
 A_j :ジベル筋の有効断面積
 G_j :ジベル筋のせん断剛性
 D :ジベル筋の直径
 E_j :ジベル筋の弾性係数
 ν_j :ジベル筋のポアソン比

$$E_{JC} = \frac{(np+1)pE_j}{np + \frac{\tanh(bl_j)}{bl_j}} \dots\dots\dots(5)$$

$$b^2 = \frac{k u_0 \phi (1+np)}{w_{1-2} A_j E_j} \dots\dots\dots(6)$$

ここで、 n :ジベル筋と二次覆工コンクリートの弾性係数比
 p :鉄筋比
 b :付着特性値
 l_j :ジベル筋の二次覆工埋込み長さ
 k :無次元化した付着応力~すべり関係の勾配($k=1.0$)
 u_0 :付着強度
 ϕ :ジベル筋の周長

吉川・田辺が提案する鉄筋コンクリートのひびわれ部分の引張剛性に関する考え方を、覆工間のジベル筋1箇所あたりのそれにあてはめ、式(3)のトンネル半径方向ばね k_{1-2u} を評価した。この考え方に基づくジベル筋1箇所あたりの引張剛性 E_{JC} ならびに付着特性値 b は、式(5)および式(6)として改められる。式(3)から得られるばね定数 k_{1-2u} は、図-5に示すように覆工間の離間量に応じて非線形な値となる。

また、ジベル筋1箇所あたりのトンネル円周方向ばね k_{1-2s} は、式(4)としてジベル筋のもつせん断剛性から覆工間の離間量に不変の値として算定できる。

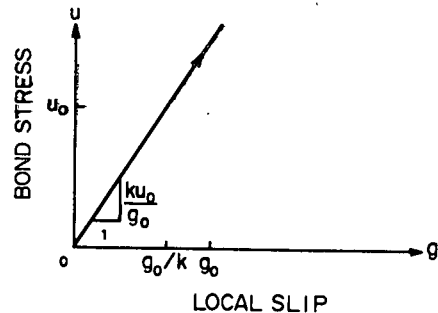


図-4 鉄筋とコンクリートの無次元化した付着応力~すべり関係の勾配 k ⁶⁾

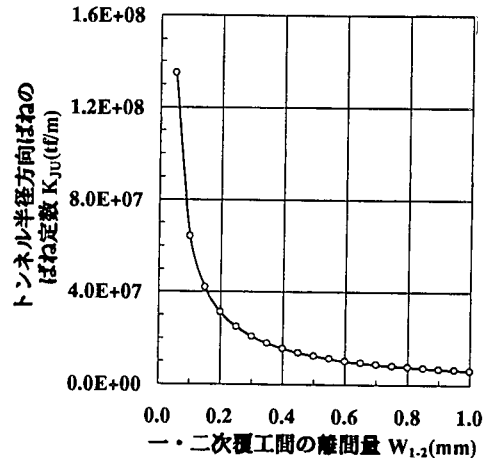


図-5 ジベル筋の覆工間半径方向ばねの特性

4. 荷重系と構造系

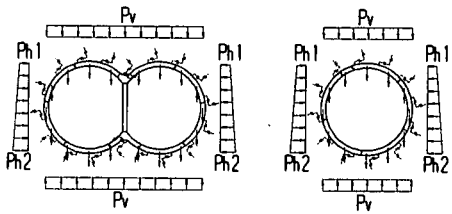
シールド機のテール後方で組み立てられたセグメントリングは、先ず自重、次にテール脱出後に地盤条件、土被り条件に応じた土水圧によって、断面変形と覆工応力の発生が起こる。その後に二次覆工が施工されると、さらにその自重がセグメントリングに累加され、断面変形、覆工応力を助長させることになる。

沖積の軟弱な砂質シルト地盤条件下で施工されたシールドトンネルのセグメントに作用する土圧計測結果⁷⁾によると、シールド機から土中に出た直後から、地盤条件、土被り厚に応じた土圧が数日経ても不変であることが報告されている。すなわち、一次覆工であるセグメントリングには、地盤条件、土被り条件に応じた土水圧を外力として与える一般的な覆工設計の考え方が妥当であることを示唆している。

筆者らは、二次覆工されたシールドトンネルの荷重系について、二次覆工が施工される前後で図-6 に示す区分を行うこととした。二次覆工を行う以前は、セグメントリングの自重と、現行の指針・基準類に準拠した地盤条件、土被り厚から算定される土水圧を荷重系とし、次に二次覆工が施工されると、その自重がさらに累加されるものとして扱った。

ただし、二次覆工が施工され、その自重が累加される時点のセグメントリングは、既に土水圧によって断面変形をしていると考えるべきである。そこで、図-6 に示すように、土水圧によって断面変形したセグメントリングの構造系に、二次覆工部材をジベル筋のばねで結合させ、その自重応力解析を行った。

1STEP 荷重系：土水圧、セグメントリングの自重
構造系：セグメントリング



2STEP 荷重系：二次覆工の自重
構造系：セグメントリング、二次覆工

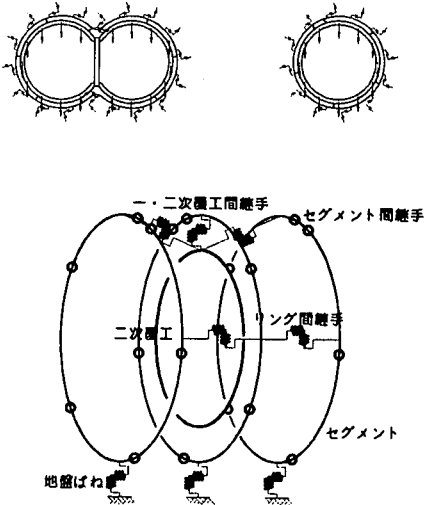


図-6 二次覆工の施工を考慮した荷重系と構造系

5. トンネル断面形状の違いによる解析結果

トンネル断面形状を単円形、重複円形断面の2通りについて行った覆工応力の解析事例を示す。はりばねモデルに用いた各種ばねのばね定数は表-2の値を用いた。

二次覆工が施工された後の覆工応力状態は、ジベル筋の存在を考慮したいずれのトンネル断面形状とも、セグメントリングクラウン部の正曲げモーメントが助長され、軸力低下が見られた。また、二次覆工についても、クラウン部に正曲げモーメントと引張の軸力が発生している。

①セグメントリングと二次覆工の離間

図-7は、二次覆工施工後に生じた、それとセグメントリングとの離間量を示したものである。特に顕著な離間が生じたのは、ジベル筋が無い場合の単円形断面のケースである。一方ジベル筋がある場合のいずれの断面形状とも、離間量は僅少である。離間量は、ジベル筋が無い場合で $1.50 \times 10^{-3} \text{mm} \sim 6.29 \times 10^{-2} \text{mm}$ 、有りの場合で $1.08 \times 10^{-3} \text{mm} \sim 1.63 \times 10^{-2} \text{mm}$ であった。

②二次覆工施工後の覆工断面力

図-8に、覆工断面力の推移を示す。重複円

表-2 各種ばねのばね定数

継手ばね	セグメント間継手		リング間継手
	A-A・B・C 間	D-B・C 間	
法線方向 (tf/m)	7.377×10^4	3.768×10^4	6.554×10^3
回転方向 (tf・m/rad)	5.958×10^3 (正曲げ) 1.809×10^3 (負曲げ)	3.747×10^3	—
せん断方向 (tf/m)	∞		

ジベル筋 (離間時)		地盤ばね (受働側)	
トンネル半径方向 (tf/m)	図-5 参照	法線方向 (tf/m ³)	5.236×10^2
トンネル円周方向 (tf/m)	1.217×10^5	接線方向 (tf/m ³)	1.745×10^2

形断面のケースでは、ジベル筋の有無による解析結果の違いが見られなかった。重複円形断面の場合は、セグメントリングと二次覆工の離間量に、ジベル筋の有無による相違がなく、かつ量的に僅かであることが原因と考えられる。

(a) 曲げモーメント

セグメントリングに発生する曲げモーメントは、いずれの断面形状とも、トンネルクラウン部の土水圧荷重による正曲げモーメントが助長される解析結果が得られている。クラウン部での増加した曲げモーメントは、ジベル筋無の単円形断面で 2.730tfm、重複円形断面で 1.125tfm である。ジベル筋有のケースでは、それを介して二次覆工からの力が伝達されることで、セグメントリングクラウン部の曲げモーメントはさらに助長されている。

また、二次覆工については、セグメントリングの応力状態と傾向が一致しており、クラウン部が正曲げモーメント、インパート部で負曲げモーメントが発生している。単円形断面の場合はジベル効果が顕著な曲げモーメントが生じており、ジベル筋が位置する箇所では小さい曲げモーメント分布である。

(b) 軸力

単円形断面では、二次覆工のクラウン部にジベル筋の有無による違いが明らかである。ジベル筋無の場合、クラウン部で広範に離間しており、二次覆工の自重応力を拘束することなく、圧縮の軸力が発生している。一方、ジベル筋有の場合、覆工間のトンネル円周方向にジベル筋の拘束効果が現れ、二次覆工のクラウン部が引張領域となっている。

重複円形断面の場合は、ジベル筋の有無による違いはなく、いずれも単円形断面のジベル筋有の軸力分布と傾向が一致している。

参考文献

- 1) 半谷哲夫：二次覆工を有するシールドトンネル覆工の力学的特性に関する研究，鉄道技術研究所報告，No.1303,1985
- 2) 村上博智，小泉 淳：二次覆工された千鳥組セグメントリングの挙動について，土木学会論文集，第 430 号/Ⅲ-15,1991
- 3) 村上博智，小泉 淳：シールドセグメントリングの耐荷機構について，土木学会論文集，第 272 号，1978
- 4) 村上博智，小泉 淳：シールド工事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，1980
- 5) 松崎茂樹：下水道シールドトンネル二次覆工の脱型時構造安定評価方法に関する研究，1987
- 6) 吉川弘道，田辺忠顕：鉄筋コンクリート部材の引張剛性に関する解析的研究，土木学会論文集，第 366 号/V-4,1986
- 7) 東京都下水道局シールド分科会編：柴又幹線シールド工事実態調査解析報告書，1980

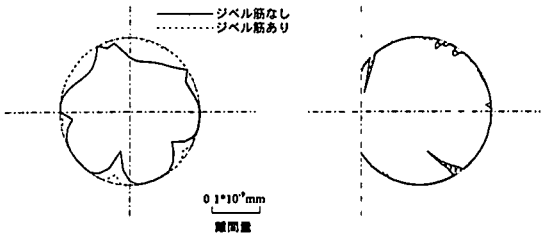
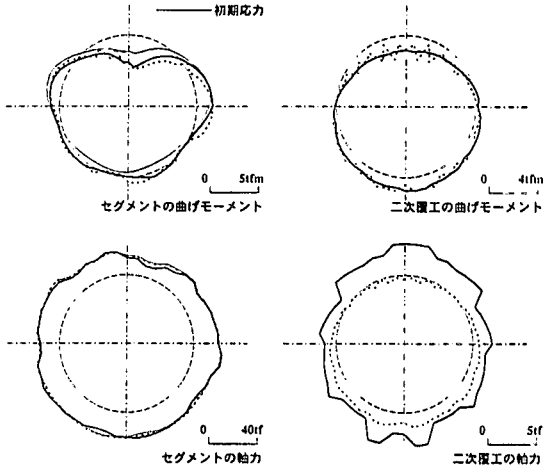
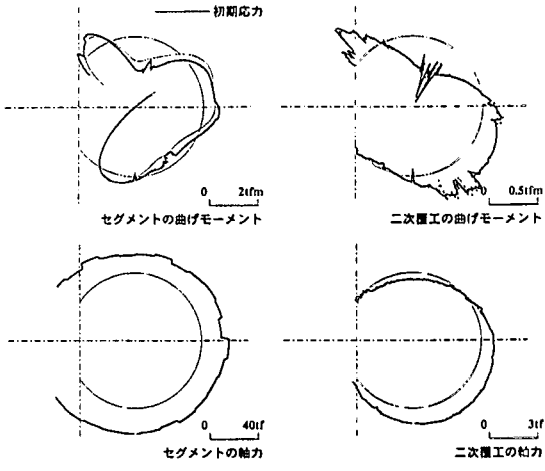


図-7 セグメントリングと二次覆工の離間



(a) 単円形断面のケース



(b) 重複円形断面のケース

図-8 セグメントリングと二次覆工の離間