

大深度シールドトンネルにおける施工時荷重
作用時のセグメントの損傷に関する研究

Study on the Damage to the Segments Caused by Load
during Construction of Shield Tunnel in Deep Underground

2014 年 2 月

斉藤 仁

Jin SAITO

大深度シールドトンネルにおける施工時荷重
作用時のセグメントの損傷に関する研究

Study on the Damage to the Segments Caused by Load
during Construction of Shield Tunnel in Deep Underground

2014 年 2 月

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

斉藤 仁

Jin SAITO

目 次

第 1 章 序論	1
1-1 本研究の背景と目的	1
1-1-1 シールドトンネルの歴史と電力設備	1
1-1-2 シールドトンネルの実績とセグメントの設計の方向性	3
1-1-3 施工時荷重に対するセグメントの設計法の推移と既往の研究	5
1-1-4 研究の目的と課題	7
1-2 本論文の構成	7
第 2 章 現場計測にもとづくセグメントの損傷の原因	11
2-1 はじめに	11
2-2 工事概要	11
2-3 セグメントおよびシールドの仕様	12
2-3-1 セグメントの仕様	12
2-3-2 シールドの仕様	14
2-4 トンネルの出来形	18
2-4-1 目開き量, 目違い量, 真円度	18
2-4-2 割れ・欠け, ひび割れ	24
2-5 セグメントの損傷の部位とその発生時期	26
2-6 計測結果にもとづく損傷の原因の推定	30
2-6-1 計測計画	30
2-6-2 挙動の分析	32
2-6-3 損傷の原因	46
2-7 まとめ	49
第 3 章 三次元シェルばねモデル解析によるセグメントの損傷の原因	51
3-1 はじめに	51
3-2 解析モデルの設定	51
3-2-1 解析範囲の設定	51
3-2-2 解析ケースの設定	52
3-2-3 作用荷重	52
3-2-4 構造モデル	52
3-2-5 境界条件の設定	56
3-3 解析結果	63
3-3-1 解析ケース 1 における B セグメントの鋭角部に生じる割れや欠け	63
3-3-2 解析ケース 1 および解析ケース 9 における K セグメントの切羽側 に生じるトンネル軸方向のひび割れ	65

3-3-3 解析ケース 8 における B セグメントの切羽側に生じるトンネル軸 方向のひび割れ	68
3-4 まとめ	69
第 4 章 K セグメントの形状に着目したセグメントの損傷抑制策の分析	73
4-1 はじめに	73
4-2 解析条件の設定	73
4-2-1 K セグメントの形状の設定	73
4-2-2 解析上の留意点	74
4-2-3 解析上の施工ステップ	75
4-3 解析結果	75
4-3-1 施工ステップ 2 における B セグメントの鋭角部の応力状態	77
4-3-2 施工ステップ 2 における K セグメントの切羽側の応力状態	77
4-4 損傷の抑制効果	84
4-5 まとめ	85
第 5 章 設計・施工条件に着目したセグメントの損傷抑制策の分析	87
5-1 はじめに	87
5-2 ジャッキパターンに着目した損傷抑制効果の分析	87
5-2-1 施工ステップ 6 における A1 セグメントと B1 セグメントの継手部	87
5-2-2 施工ステップ 9 における B1 セグメントと K セグメントの切羽側	88
5-3 リング効果に着目した損傷抑制効果の分析	92
5-3-1 解析パラメータの設定	92
5-3-2 解析結果	92
5-4 まとめ	96
第 6 章 結論	99
6-1 本研究により得られた知見	99
6-1-1 セグメントの挙動計測結果にもとづく損傷の原因	99
6-1-2 三次元 FEM 解析にもとづく損傷の原因	99
6-1-3 K セグメントの形状に着目した損傷の抑制策	100
6-1-4 設計・施工条件に着目した損傷の抑制策	101
6-2 今後の課題	101
謝 辞	104

第 1 章 序 論

第 1 章 序 論

1-1 本研究の背景と目的

1-1-1 シールドトンネルの歴史と電力設備

非開削のトンネル構築工法であるシールド工法は、フランス人技師 M. I. Brunel により 1825 年に考案された工法であり、Brunel によりイギリスのテムズ河を横断する水底トンネルにはじめて適用された。このトンネルの完成は 1841 年であった。当該トンネルは、幅 11.43m、高さ 6.78m の矩形断面のトンネルであり、その覆工部材には「れんが」が用いられた。その後も 1800 年代後半にかけて Greathead や Barlow らにより改良が加えられ、Brunel の特許にあるような円形断面のトンネルや鋳鉄製のセグメントが採用され、現在のシールド工法の基礎となった¹⁾。

わが国における初めてのシールド工法の採用は、1920 年の奥羽本線折渡トンネルであるが、大きな地圧を受けたことにより途中で断念せざるを得なかったようである。完成に至った最初のシールドトンネルは、1936 年の関門鉄道トンネルであったが、本格的に都市部のトンネルに円形シールドトンネルが採用されたのは、1961 年の名古屋市地下鉄の覚王山トンネルや 1962 年の東京都下水道局の石神井川トンネルであった²⁾。

一方、電力設備としてのシールドトンネルの用途は、主に都心部における超高压送電線の収容設備や火力発電所の燃料である LNG を輸送するガス導管の収容設備である。シールド工法により構築されたトンネルは、歴史的にみると超高压送電線の収容設備としてのものが多く、とくに、高度経済成長を迎えた 1960 年代よりシールド工法が多く採用されてきた。わが国の中心である首都圏に電力を供給する東京電力株式会社におけるシールドトンネルの歴史は、表-1.1 に示すように、1963 年の城北線管路工事での全面開放型の手掘り式シールドをはじめとして、現在までに約 60 件のシールドトンネルが構築されてきている。その結果として、表-1.2 に示すように、都区内における送電線の地中化率は 90%を超え、首都圏の電力安定供給を担う重要な電力設備となっている。

第1章 序 論

表-1.1 東京電力(株)におけるシールドトンネルの累積建設量と技術変遷

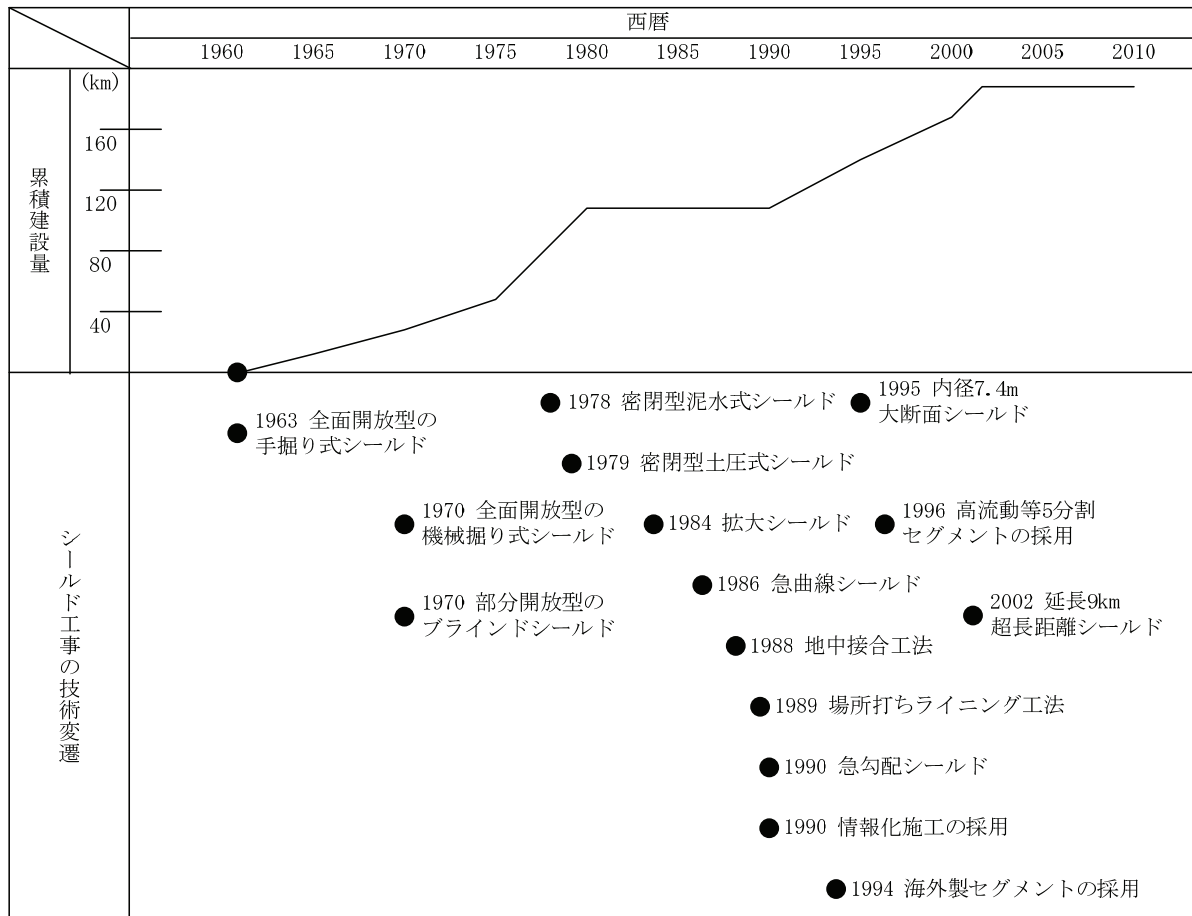


表-1.2 東京電力(株)における送電線の地中化率

年度末	全体			都区内(23区)		
	架空線(km)	地中線(km)	地中化率(%)	架空線(km)	地中線(km)	地中化率(%)
昭和 40	15,379	2,830	15.5	2,301	2,195	48.8
45	18,393	3,764	17.0	2,331	2,704	53.7
50	20,636	4,833	19.0	785	3,296	80.8
55	22,964	5,967	20.6	741	3,783	83.6
60	24,841	6,548	20.9	695	4,018	85.3
平成 2	26,126	7,548	22.4	644	4,335	87.1
7	27,706	8,820	24.1	616	4,949	88.9
12	28,847	10,933	27.5	619	6,373	91.0
15	28,693	11,120	27.9	606	6,477	91.4
17	28,643	11,237	28.2	602	6,567	91.6
19	28,563	11,510	28.7	588	6,764	92.0
21	28,543	11,767	29.2	578	6,814	92.2
22	28,566	11,925	29.5	572	6,901	92.3
23	28,492	12,067	29.8	572	6,975	92.4

1-1-2 シールドトンネルの実績とセグメントの設計の方向性

電力設備に限らず，都市部における鉄道，道路，下水道，水道，ガス等のインフラ設備の構築において，シールド工法は非常に重要な位置づけを担っている．そのため，近年における工事实績は多種多様なものとなってきている．

図-1.1 は近年のシールド外径の実績を示したものであるが，シールド外径が10mを超えるものが増加していることがわかる．また，図-1.2 はシールドの掘進延長の実績を示したものであり，また，図-1.3 はシールドの最大土被りの実績を示したものであるが，これらの図をみると，シールド工法の長距離化，大深度化の傾向が表れていることがわかる．

また，トンネルの主覆工部材であるセグメントは，一般的に，セグメントリング外径に対するセグメント厚さの比は4%以上⁶⁾，セグメント厚さに対するセグメント幅の比は7以内⁷⁾と言われているが，経済性の追求から，薄肉化や幅広化のセグメントを採用するような事例が増えてきている．

このように，シールド工法は長距離化，大深度化する一方，セグメントは薄肉化，幅広化するような傾向が見受けられる．一般に，トンネルが大深度に位置する場合，周辺地盤は堅固であることから，作用する土圧は小さく，水圧が卓越する．また，大深度地下では，トンネルが構築される地盤それ自体が工学的基盤面に相当するため，地震による影響はほとんどない．したがって，周辺地盤から作用する荷重は水圧が卓越することとなり，円形断面であればトンネル断面方向の軸力が主動的になり，結果としてセグメントの厚さは薄くできるため，セグメントの薄肉化は土水圧による荷重や地震動による荷重に対しては問題とならない場合が多い．

一方で，大深度化により水圧が高くなることから，ジャッキ推力，裏込め注入圧，止水用のシール材の反発力，およびテールシールの拘束力などの施工時荷重が増大する．さらには，長距離化にともなう高速施工においてもジャッキ推力は大きくなる傾向にある⁸⁾．このように，近年のシールドトンネルの大深度化によって，セグメントの設計においては，施工時荷重が他の荷重に比べてクリティカルな荷重になることから，施工時荷重に対する設計法の確立が重要な課題となってきている．

第1章 序 論

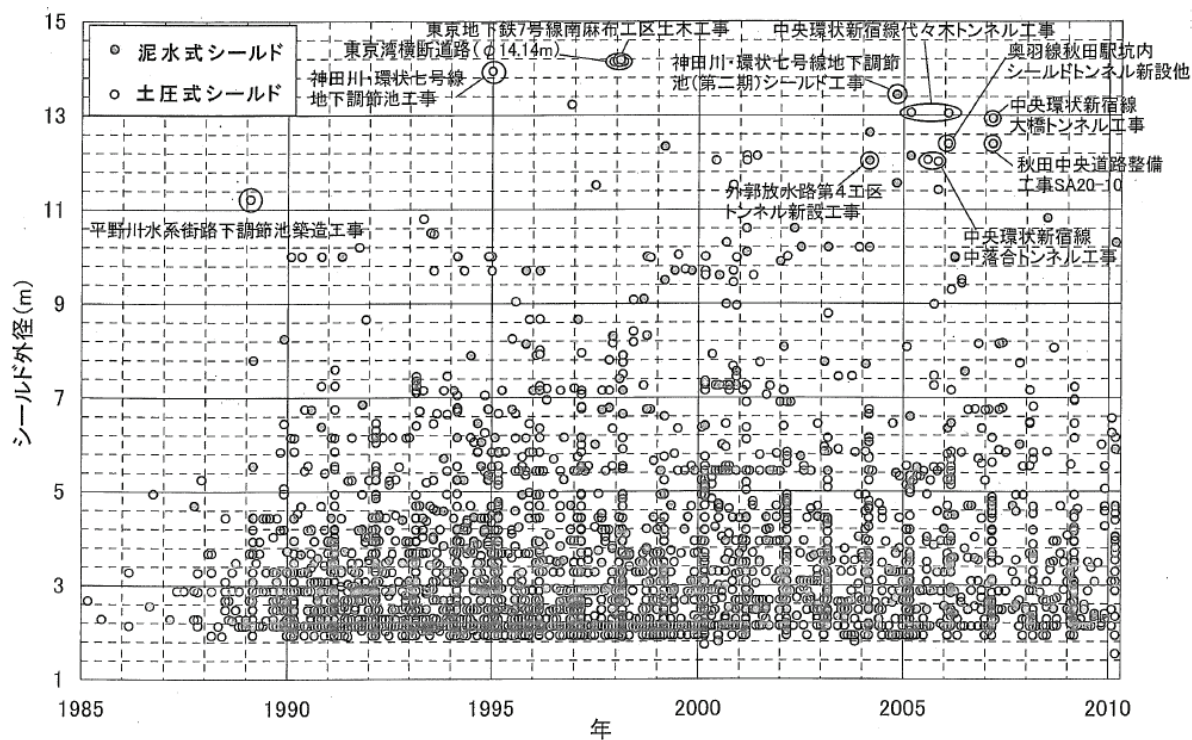


図-1.1 シールド外径の実績³⁾

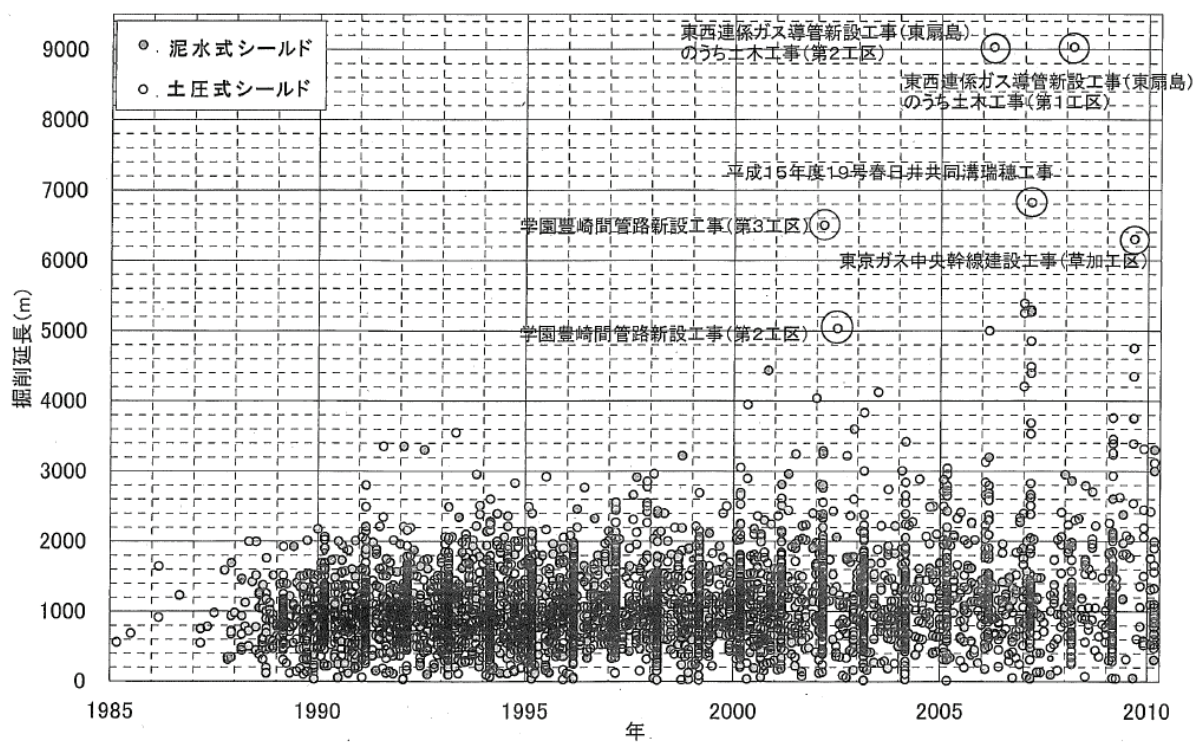


図-1.2 シールド掘進延長の実績⁴⁾

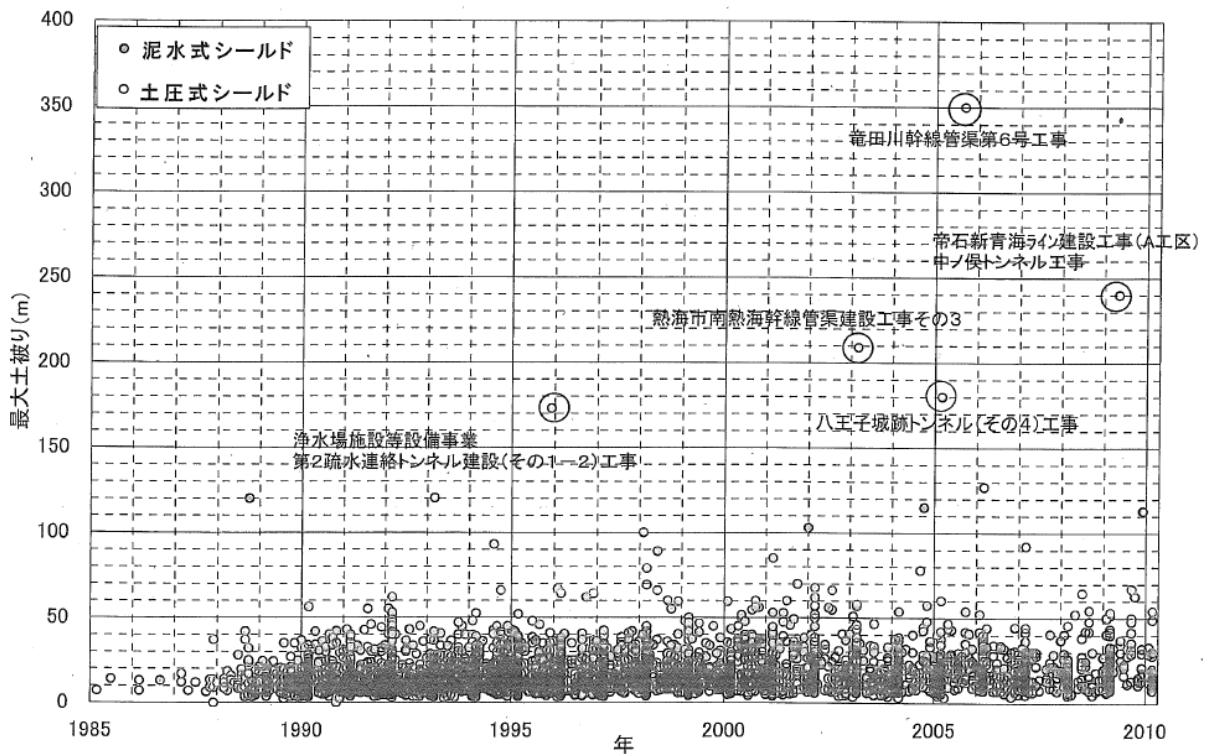


図-1.3 シールドの最大土被りの実績⁵⁾

1-1-3 施工時荷重に対するセグメントの設計法の推移と既往の研究

シールドトンネルの設計法の標準的な手法は、1969年の「シールド工法指針」(土木学会)⁹⁾に初めて記述された。この指針では、ジャッキ推力を考慮すべき施工時荷重として取り上げているが、そのほかの施工時荷重については、設計上注意が必要であることの記述に留められている。

その後、1977年にはこの指針を改訂して、「トンネル標準示方書(シールド編)・同解説」(土木学会)¹⁰⁾が発刊された。この示方書では、明確に施工時荷重の条文が設定され、ジャッキ推力、裏込め注入圧、エレクターの操作荷重、およびその他の荷重に分けて、これらを施工にあたって考慮する荷重として規定している。しかしながら、これらの荷重に対する設計方法を具体的に示したわけではなく、設計において考慮すべき荷重であることを宣言しているに過ぎない。さらに、本示方書以降、1996年の改定版¹¹⁾に至るまで、その間の工事の実績を踏まえ、施工時荷重の留意点に関する記述は増えたが、基本的な内容は変わっていない現状にある。

第1章 序 論

施工時荷重によるセグメントの損傷には、トンネルの崩壊に至るような断面破壊から、トンネルの耐力や長期にわたる耐久性に影響を与えるような割れや欠け、あるいはひび割れなどが実際には存在する。これらの損傷はすべて設計の対象とすることがあるが、とくに困難なのは断面破壊を生じるような損傷ではなく、セグメントの割れや欠け、ひび割れなどに対する設計と考えられる。現在までのところ、施工時荷重により断面破壊を生じた例はほとんどなく、実際に発生するのは比較的小さな損傷がほとんどである。また、その小さな損傷によりトンネルの耐久性に影響を与えている事例も少なからず存在している。しかし、その小さな損傷は施工時荷重がどのように作用した結果として発生したのかを特定することが非常に困難であり、既往の研究をみても、そのことに言及した事例は極めて少ない。

現場計測やその解析から、施工時荷重がセグメントに与える影響を検討した研究事例の多くは、曲線施工時のテールシールのせりや裏込め注入の偏圧などが対象となっている^{12), 13), 14)}。また、最近では性能照査型設計法における施工時荷重の照査方法の提案^{15), 16)}なども行われているが、いずれも大深度のトンネルを対象にしたものではない。

小山らはオランダにおける施工時荷重に関する研究を紹介している¹⁷⁾が、これによると、現場における施工時のセグメントの動きを観察した結果から、セグメントの組立て時にジャッキが引き戻されると、すでに組み立てられたセグメントが動き、その結果として局所的な応力集中によりセグメントが損傷することを指摘している。しかしながら、セグメントの動きの程度、その原因、および損傷との関連性などについては言及されていない。

大深度のシールドトンネルでは、その施工時に大きな施工時荷重を受ける。このような場合の施工時荷重による影響を研究した事例はほとんどなく、今後のシールドトンネルの大深度化の傾向を考えると、大きな施工時荷重に対するセグメントの設計を確立することが急務となってきている。

1-1-4 研究の目的と課題

これまで述べてきたように、大深度地下に構築されるシールドトンネルでは、それまでの土圧や水圧などの主荷重に比べて、施工時荷重がセグメントの設計に与える影響が大きくなるものと予想される。

本研究は、このような観点から、大深度地下に構築されるシールドトンネルにおいて、その覆工部材に鉄筋コンクリート製セグメントを用いた場合を対象に、トンネルの施工時に発生する損傷の原因を明らかにするとともに、損傷を抑制する具体的な方策を提案するものである。

1-2 本論文の構成

本論文は全6章からなる。各章の構成および概要は以下のとおりである。

第1章は序論であり、まず、本研究の背景と目的を示し、近年増えつつある大深度トンネルにおけるセグメントの設計における課題および既往の研究の動向を述べ、それらをもとに本研究の目的および本論文の構成を示した。

第2章は現場におけるセグメントの挙動の計測から確認できたセグメントの損傷の原因を述べた章である。すなわち、まず、大深度シールドトンネルにおけるトンネルの出来形やセグメントの損傷の特徴を示して、セグメントに損傷が発生するタイミングを現場の観察記録をもとに整理し、つぎに、施工時荷重が作用するときのセグメントの挙動の計測結果から、確認できた損傷と施工時荷重との関連性および損傷の原因を考察した。

第3章では三次元シェルばねモデル解析を用いて、確認できたセグメントの損傷の原因を検討した。すなわち、まず、解析モデルの設定の詳細を述べ、つぎに、それを用いた解析結果から施工時に発生する可能性がある損傷とその原因について考察した。

第4章は三次元シェルばねモデル解析を用いて、Kセグメントの形状に着目して損傷を抑制する方策を述べた。まず、解析パラメータを設定し、つぎに、解析パラメータにより変化する損傷の可能性を分析し、最後に、損傷の抑制効果について考察した。

第1章 序 論

第5章は三次元シェルばねモデル解析を用いて、施工方法に着目して損傷を抑制する方策を具体的に述べた章である．ここでは、ジャッキパターンの違いやトンネル半径方向およびトンネル円周方向の拘束効果に着目した損傷の抑制効果について考察した．

第6章は結論であり、本研究で得られた知見をまとめるとともに、今後の研究課題について述べた．

参考文献

- 1) (社)地盤工学会：地盤工学・実務シリーズ 29 シールド工法，pp. 4-7，2012. 2.
- 2) (社)土木学会：日本土木史，1974. 4.
- 3) (社)地盤工学会：地盤工学・実務シリーズ 29 シールド工法，p. 21，2012. 2.
- 4) (社)地盤工学会：地盤工学・実務シリーズ 29 シールド工法，p. 22，2012. 2.
- 5) (社)地盤工学会：地盤工学・実務シリーズ 29 シールド工法，p. 23，2012. 2.
- 6) (社)土木学会：トンネル標準示方書シールド編・同解説，p. 70，2006.
- 7) (社)土木学会，(社)日本下水道協会：シールド工事用標準セグメント，pp. 260-261，2001. 7.
- 8) 佐藤東洋司，金森研二，斉藤仁，神崎正：シールドトンネルにおける掘進組立同時施工の実用化，第 10 回ロボットシンポジウム論文集，pp. 415-420，2004. 9.
- 9) (社)土木学会：シールド工法指針，1969.
- 10) (社)土木学会：トンネル標準示方書[シールド工法編]・同解説，1977.
- 11) (社)土木学会：トンネル標準示方書[シールド工法編]・同解説，1996.
- 12) 中村益美，松浦将行，沢里能雄：大深度急曲線シールドトンネルの施工時荷重とその対策，トンネルと地下，第 34 巻 1 号，pp. 35-41，2003.
- 13) 田嶋仁志，岸田政彦，深井直光，斉藤正幸：三次元 FEM モデルを用いたシールドトンネルの施工時荷重に関する検討，トンネル工学報告集，第 14 巻，pp. 353-360，2004.
- 14) 田嶋仁志，春日清志，深井直光，団昭博，斉藤正博：セグメント挙動計測に基づいた大断面シールドトンネルにおける施工時荷重の影響検討，トンネル工学報告集，第 15 巻，pp. 293-300，2005.
- 15) 吉本正浩，阿南健一，大塚正博：シールドトンネルの施工時荷重の照査方法に関する一提案，土木学会論文集，No. 756/VI-62，pp. 131-144，2004.
- 16) 吉本正浩，阿南健一，大塚正博，小泉淳：地中送電用シールドトンネルの性能規定と限界状態設計法による照査，土木学会論文集，No. 764/Ⅲ-67，pp. 255-274，2004.
- 17) 小山幸則，小西真治，P. S. Jovanovic，橋本正：シールドトンネルに施工時荷重が及ぼす影響，トンネルと地下，Vol. 33，No. 8，pp. 35-43，2002.

第 2 章 現場計測にもとづくセグメントの損傷の原因

第2章 現場計測にもとづくセグメントの損傷の原因

2-1 はじめに

東西連係ガス導管新設工事において使用した鉄筋コンクリートセグメントでは、施工時荷重の作用により割れや欠け、あるいはひび割れなどの損傷がKセグメントの周辺位置に発生した。

本章では、まず、これらの損傷の発生時期について現場での観察により把握し、つぎに、とくに損傷が多く生じたKセグメントの施工時の挙動に着目した計測を行った。これらの結果から、セグメントの損傷の原因について考察した。

2-2 工事概要

東京電力株式会社が所有する東京湾内のLNG火力発電所への燃料の供給は、図-2.1に示すように、京葉側では富津LNG基地、京浜側では東扇島LNG基地を起点として両者が独立して行っていた。このため、一方で事故などの不具合が生じた場合には、そのバックアップがない状態であった。また、京浜側の火力発電所で計画されていた高効率火力へのリプレイスに対応するには、東扇島LNG基地のガス容量だけでは十分な燃料の確保に至らない状況であった。そこで、これらの問題を解決するために、東京湾を挟んで東西に立地するこれらのLNG基地を連係したものが、東西連係ガス導管新設工事であった。

東西連係ガス導管新設工事は、図-2.2に示すように、東京湾の中央部を境に扇島工区と富津工区に分かれている。シールドトンネルは、内径3.0m、外径3.44mであり、扇島工区と富津工区からそれぞれ延長9kmのシールドの掘進を行い、東京湾の中央部で地中接合するものである。このトンネルの平面線形はほぼ直線であり、かつ縦断線形は全線の約70%が海面下50m以深に位置することから、代表的な大深度のシールドトンネル工事であった¹⁾。



図-2.1 東京湾内のガス導管ルート

2-3 セグメントおよびシールドの仕様

2-3-1 セグメントの仕様

セグメントは長距離海底トンネルであることから、止水性、耐久性、施工性、および経済性を勘案し、総合的に優れる平板型の鉄筋コンクリート製セグメントを全線に適用した。

各工区のセグメントの仕様は表-2.1に示すとおりである。セグメントの幅および分割数は、セグメントの組立て時間の高速化を目的として選定し、切羽でのハンドリング、トンネル内の離合部での搬送スペース、シールドの機長、および立坑における荷降ろし設備への影響などを各工区で総合的に判断して決めた²⁾。

セグメントの厚さは、耐久性を確保するために鉄筋かぶりを50mmとしたため、硬質地盤中の同径のセグメントより若干厚くなっている。また、図-2.3に示すようなセグメントの挿入角および継手角は、エレクターによるトンネル軸方向の挿入代を確保できるように設定した。これらは同径の同じ分割数のセグメントとほぼ同等な角度になっている³⁾。

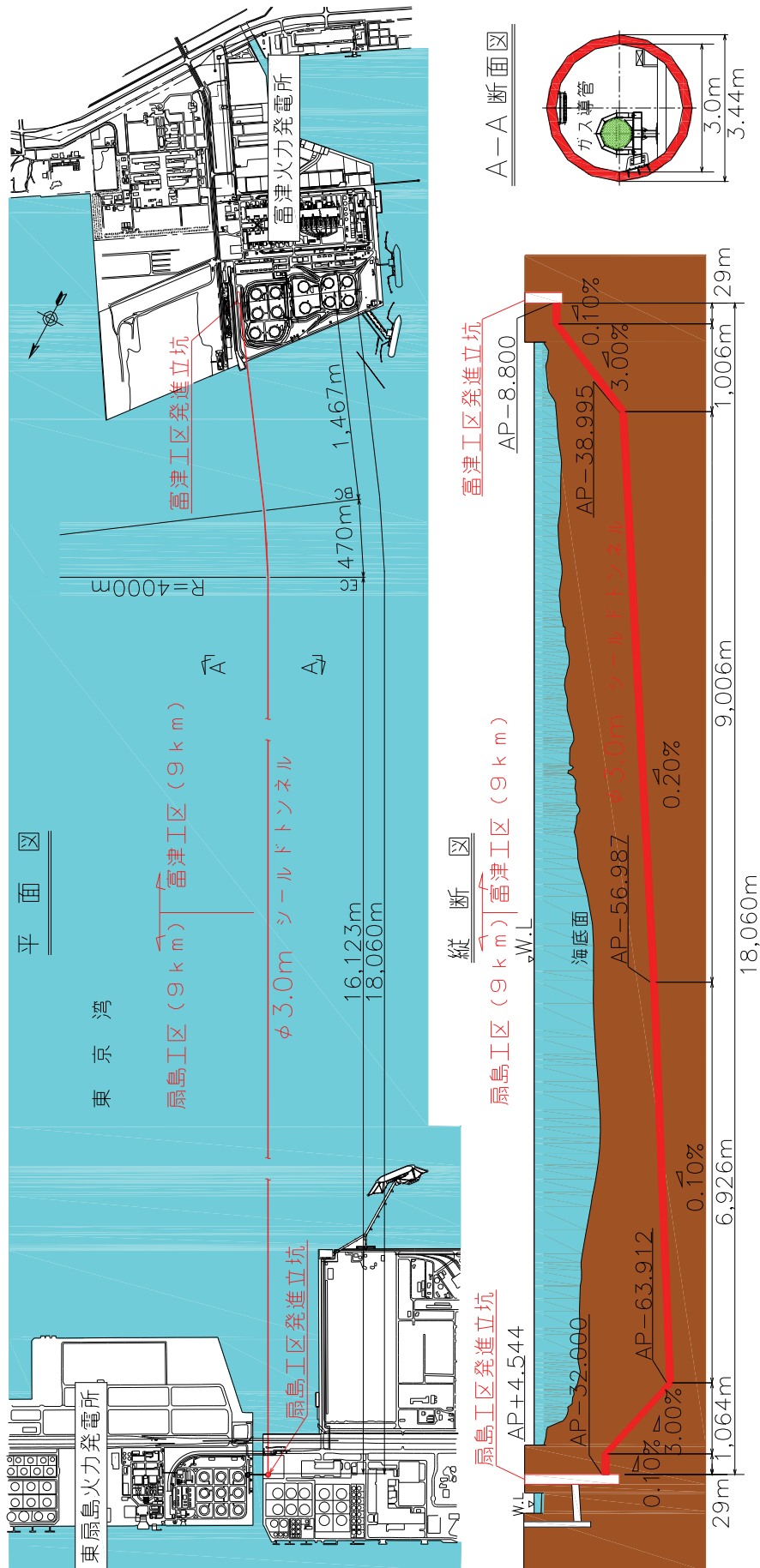



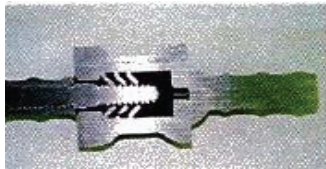


図-2.2 東西連係ガス導管新設工事の平縦断線形

表-2.1 セグメントの仕様

項目	扇島工区	富津工区
内径	3,000mm	3,000mm
セグメント幅	1,200mm	1,350mm
セグメント厚さ	220mm	220mm
分割数	等 5 分割	等 6 分割
1 ピース重量	13.9kN	13.0kN
挿入角	15.4 度	11.3 度
継手角	12.0 度	12.0 度
リング総数	7,519 リング	6,682 リング
シール材段数	地山側 1 段 内空側 1 段	地山側 1 段 内空側 1 段
セグメント継手	軸方向挿入型 	突合せ型 
リング継手	軸方向挿入型 	軸方向挿入型 

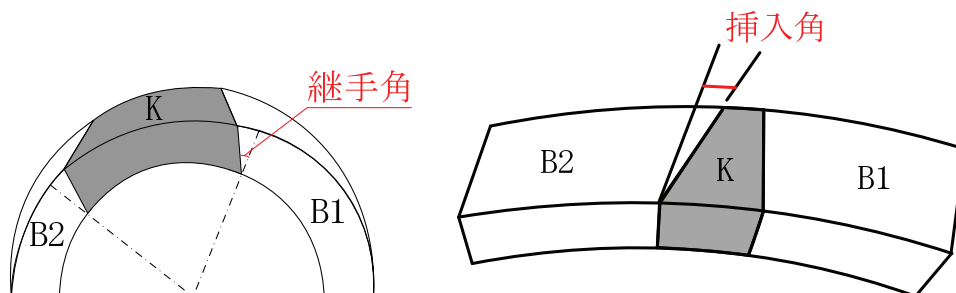


図-2.3 Kセグメントの挿入角と継手角

2-3-2 シールドの仕様

シールドは高速掘進を実現するために、セグメントの組立てとシールドの掘進を同時に実現できる機構（以下、同時掘進機構という）を取り入れた構造を採用した⁴⁾⁵⁾。各工区のシールドの仕様および構造を表-2.2、図-2.4に示す。

両工区とも、同時掘進機構を取り入れたシールドの構造としたことから、セグメントとシールドとの相対位置関係は、図-2.5に示すように、セグメントの組立

て位置(Ring4)から2リング前の位置(Ring2)でテールシールによる拘束を受け,3リング前の位置(Ring1)で地山による拘束を受ける状況に,また,1リング前の位置(Ring3)では基本的にトンネル半径方向の拘束を受けない状況になっている.

表-2.2 シールドの仕様

扇島工区	同時掘進機構		ロングジャッキ式
	シールド外径		3,590mm
	シールド機長		11,645mm
	シールドジャッキ	推力	1,680kN/本
		本数	20本
		総推力	33,600kN
	テールクリアランス		25mm
富津工区	同時掘進機構		内胴スライド式
	シールド外径		3,620mm
	シールド機長		12,180mm
	シールドジャッキ	推力	1,225kN/本
		本数	18本
		総推力	22,050kN
	テールクリアランス		30mm
	テールシール段数		4段

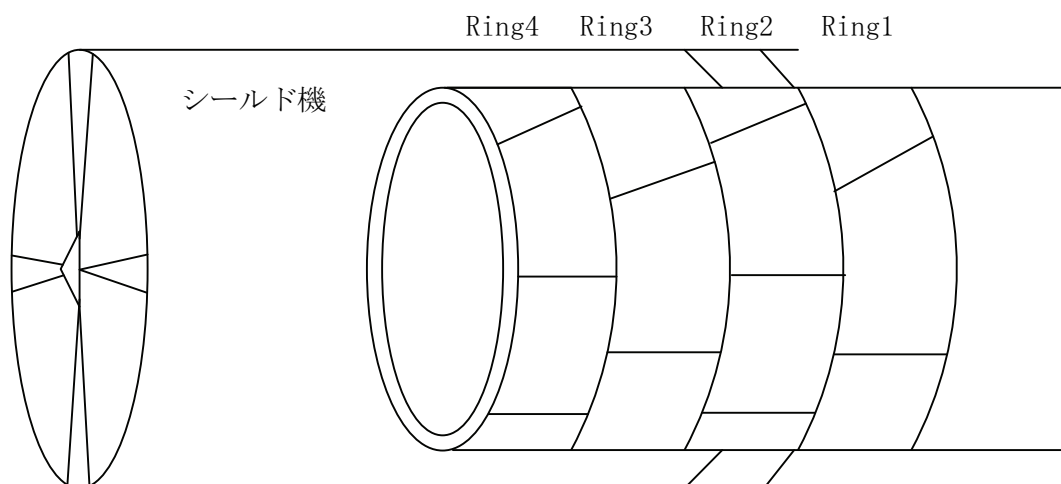


図-2.5 セグメントとシールドとの相対位置関係

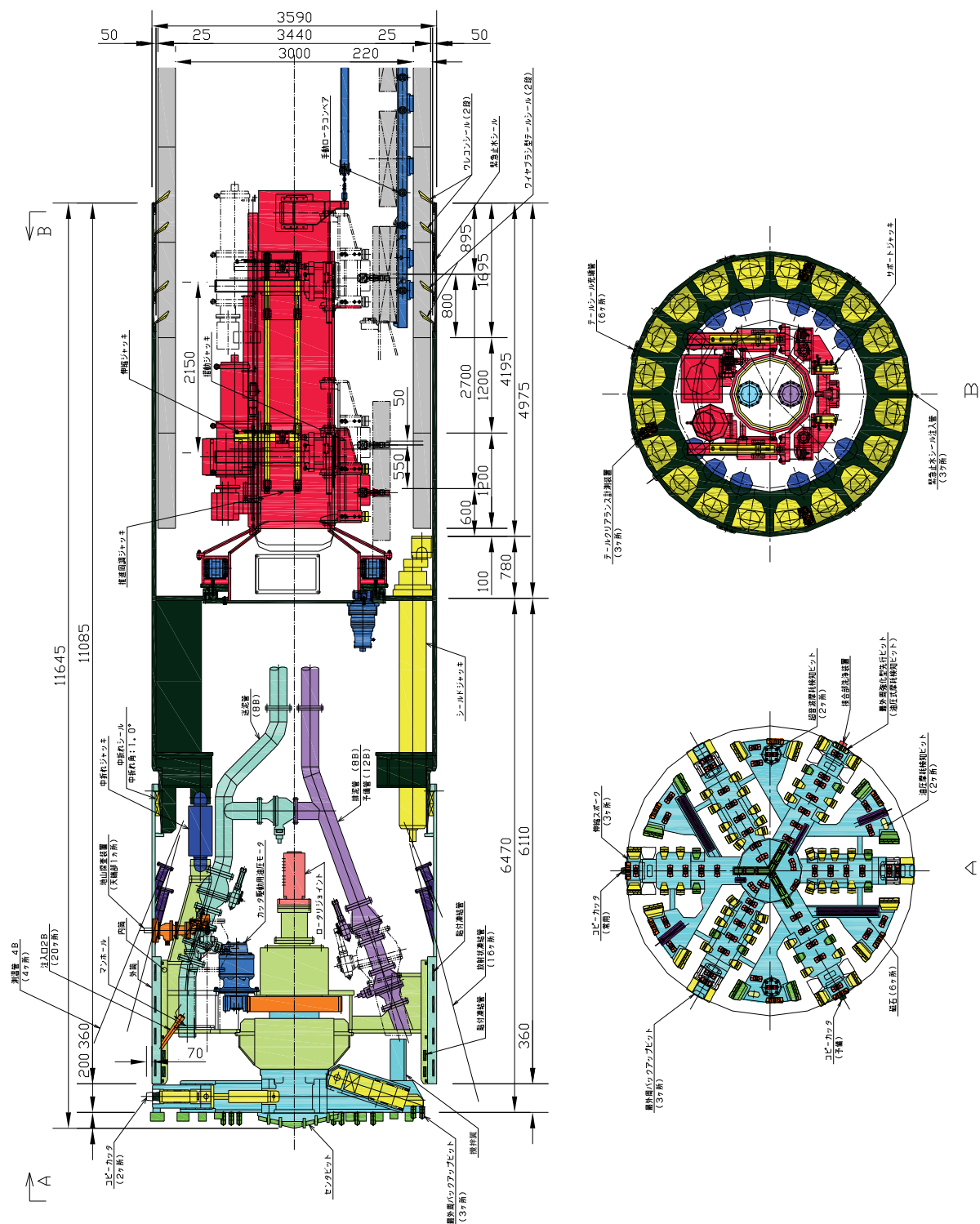


図-2.4a 扇島工区のマシン構造図

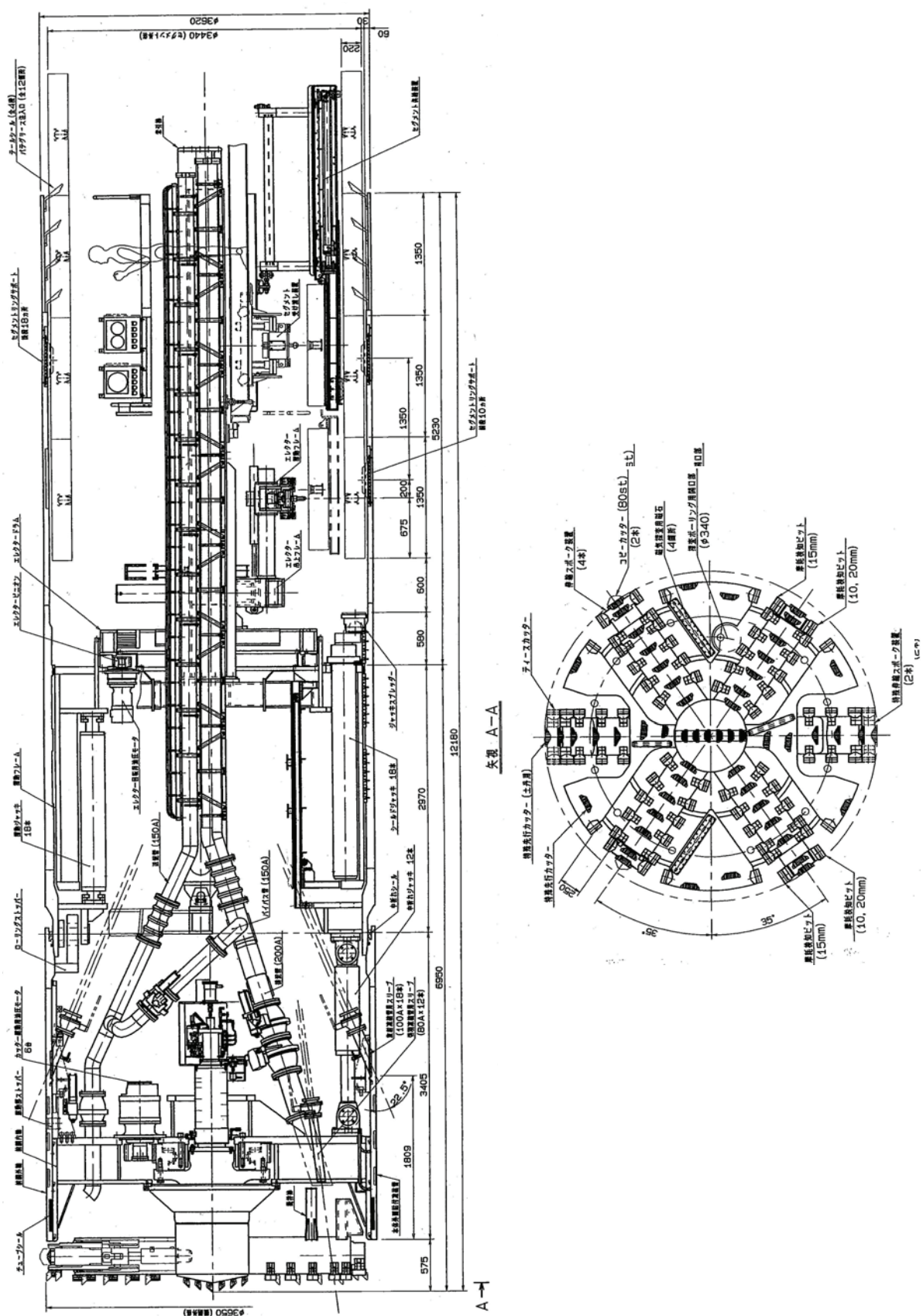


図-2.4b 富津工区のマシン構造図

2-4 トンネルの出来形

2-4-1 目開き量，目違い量，真円度

セグメントの継手面に生じる目開き量および目違い量とは図-2.6 に示すとおりである．ここでは，図-2.7 に示すように，セグメント継手，リング継手位置の目開き量および目違い量について，約 20 リング間隔で測定した．図-2.8，図-2.9 はその測定結果を示したものであり，また，図-2.10 はトンネルの真円度の測定結果を示したものである．

目開き量および真円度については，顕著な特異性は見あたらない結果であったが，目違い量については，Kセグメントに接する継手部で大きな値が発生する結果になった．この原因については2-5 節以降で詳述するが，精度よく組み立てられたセグメントは，その後のセグメントの組立てのためにジャッキを押し引きすることにより微小な挙動を繰り返し，その結果が最終的な出来形になるということに起因するものと考えられる．とくに，Kセグメントではその挙動が大きいことから，顕著な目違い量になったものと思われる．

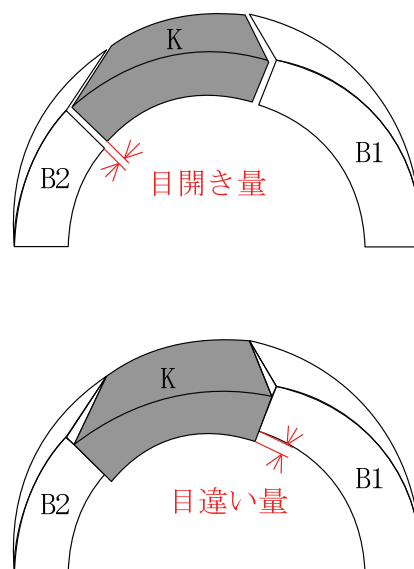
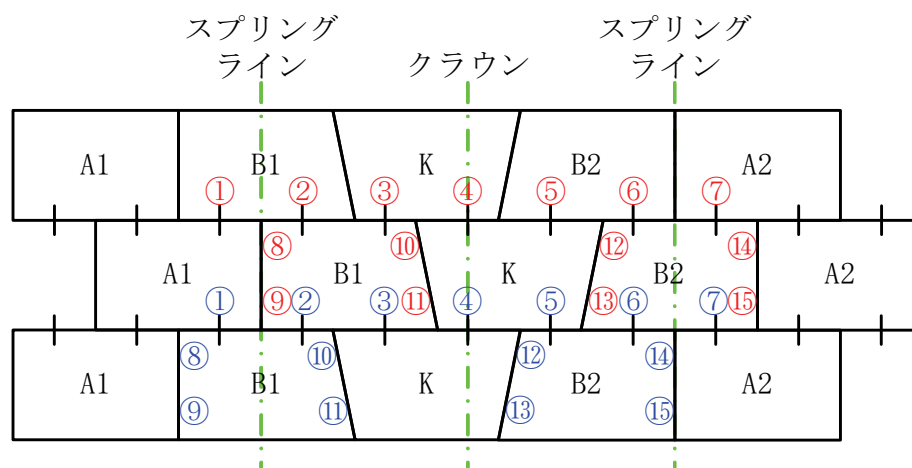
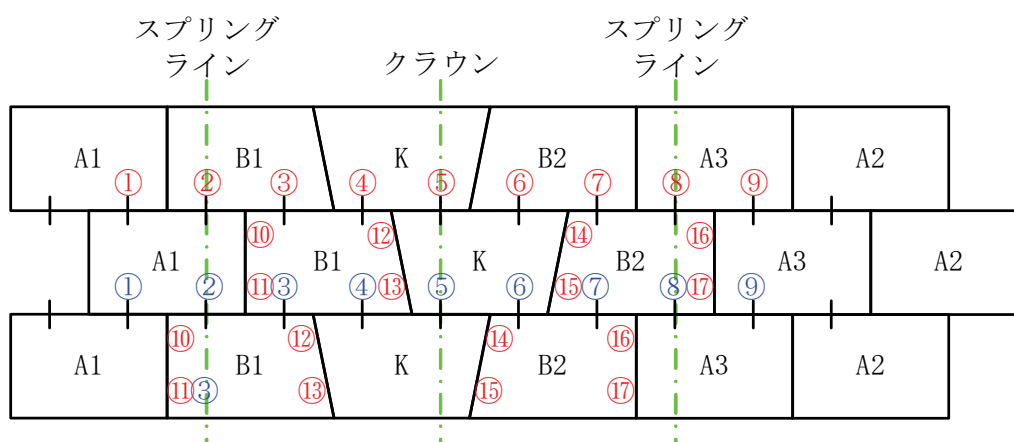


図-2.6 目開き量と目違い量



(a) 扇島工区



(b) 富津工区

図-2.7 目開き量および目違い量の測定箇所

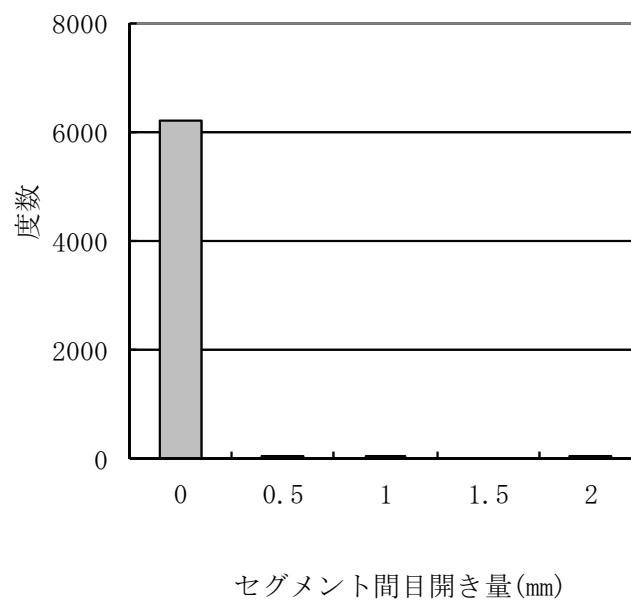
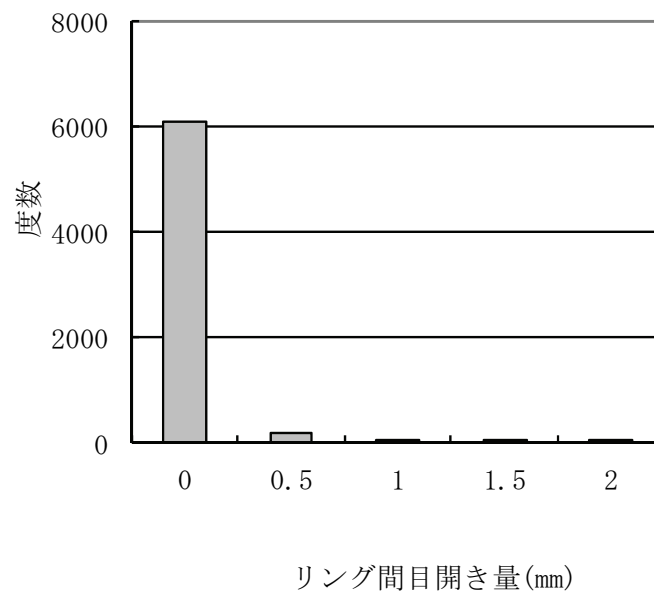


図-2.6a 扇島工区における目開き量の測定結果

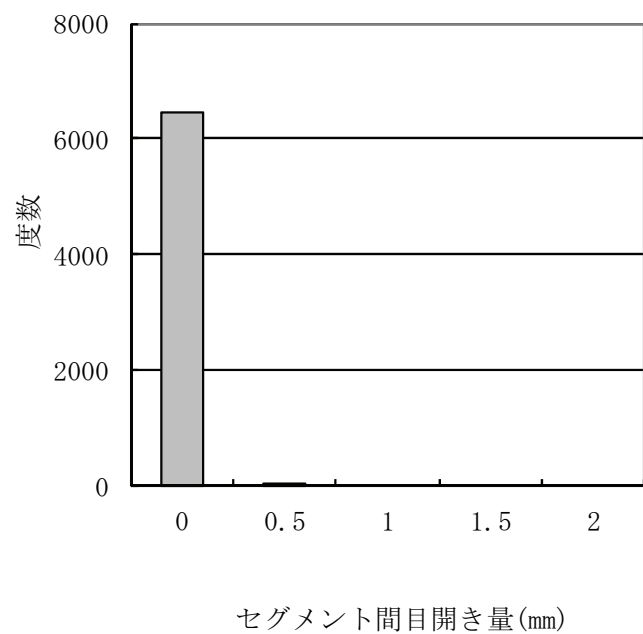
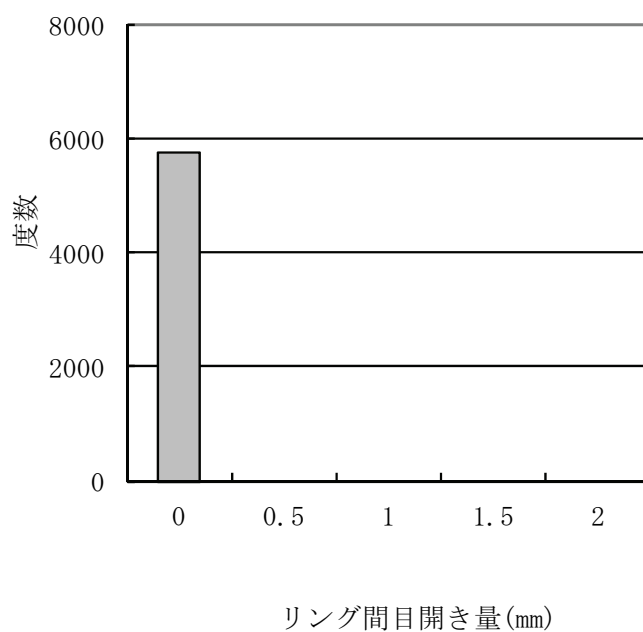


図-2.6b 富津工区における目開き量の測定結果

第2章 現場計測にもとづくセグメントの損傷の原因

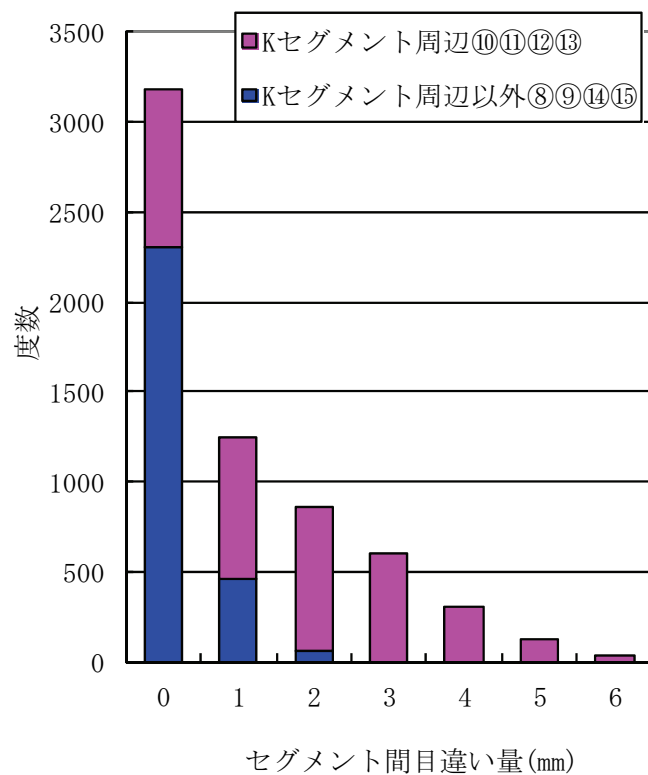
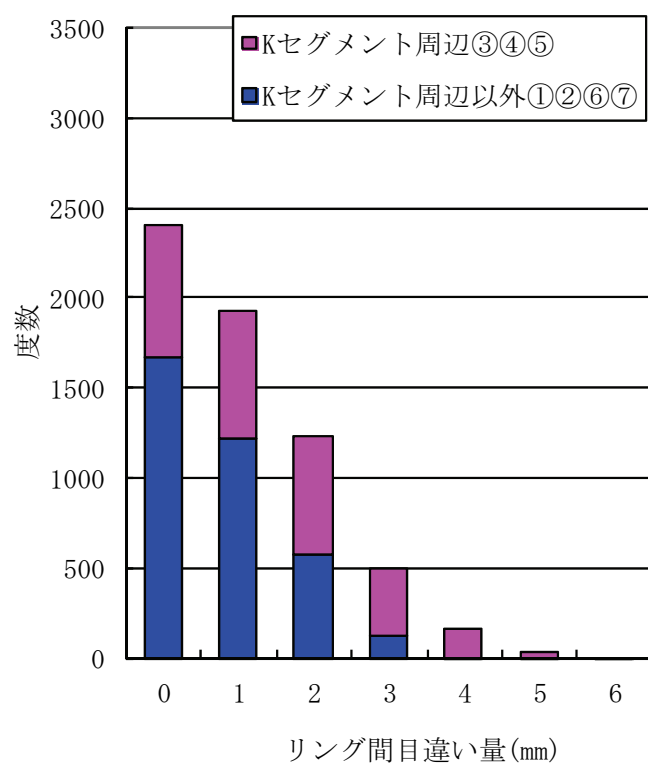


図-2.7a 扇島工区における目違い量の測定結果

第2章 現場計測にもとづくセグメントの損傷の原因

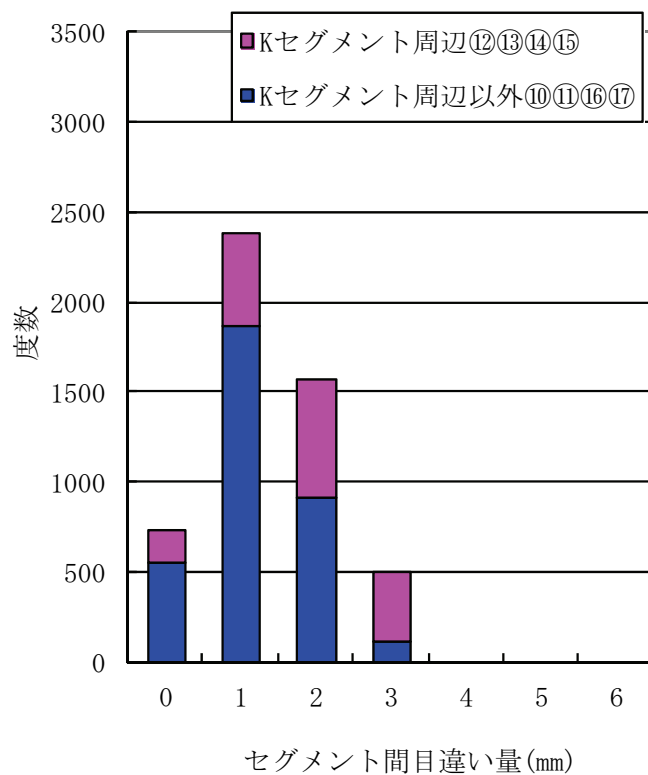
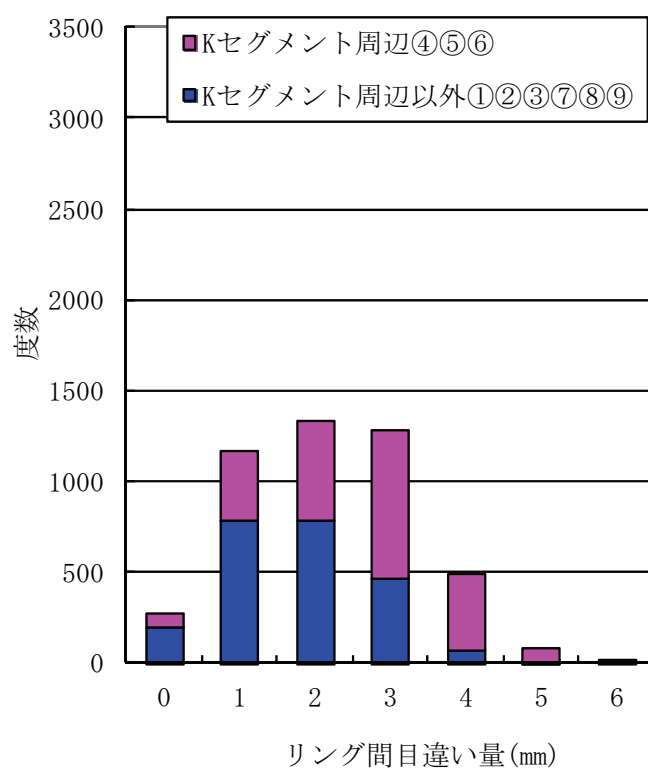


図-2.7b 富津工区における目違い量の測定結果

第2章 現場計測にもとづくセグメントの損傷の原因

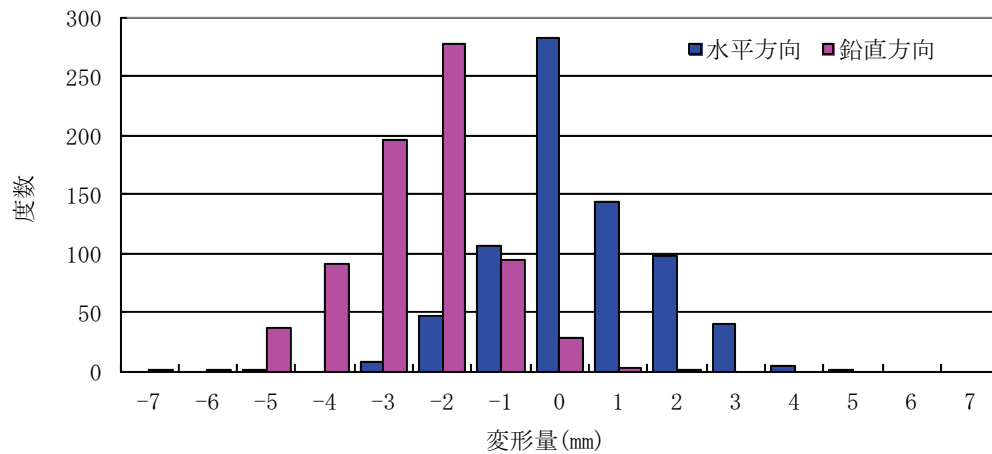


図-2.8a 扇島工区における真円度(内空変位量)の測定結果

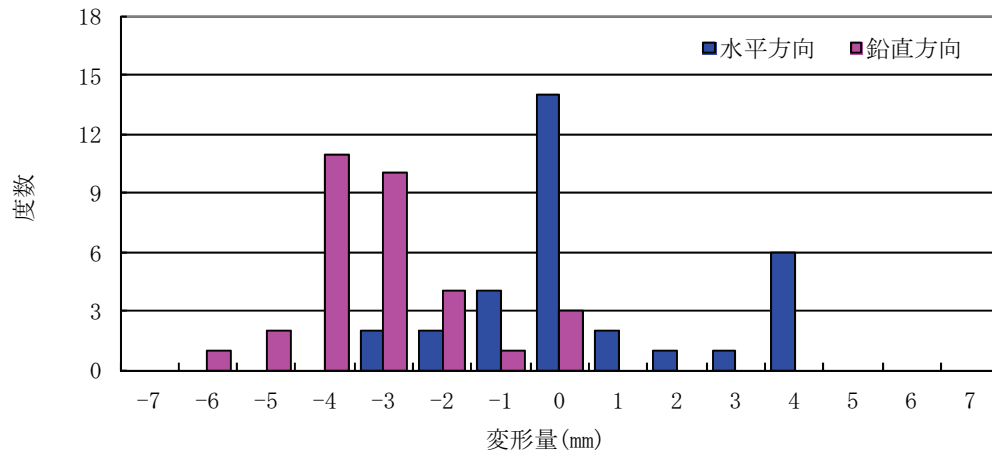


図-2.8b 富津工区における真円度(内空変位量)の測定結果

2-4-2 割れ・欠け，ひび割れ

セグメントの割れ・欠け，およびひび割れの発生状況の例を写真-2.1 に示す。写真-2.1 からわかるように，割れや欠けは，かぶりコンクリートの表面的な剥離が大半を占め，シール溝まで達し止水性を侵すような割れや欠けはほとんど発生していない状況であった。また，ひび割れは，表-2.3 に示すように，許容ひび割れ幅 0.2mm を超えるようなひび割れはみられなかった。しかしながら，地下水のにじみを伴うひび割れがひび割れ幅 0.1mm 以上の箇所では発生する場合があった。このように，割れ・欠け，およびひび割れの程度は小さいものと考えられるが，とくに，地下水のにじみを伴うようなひび割れ箇所では，長期的な耐久性が

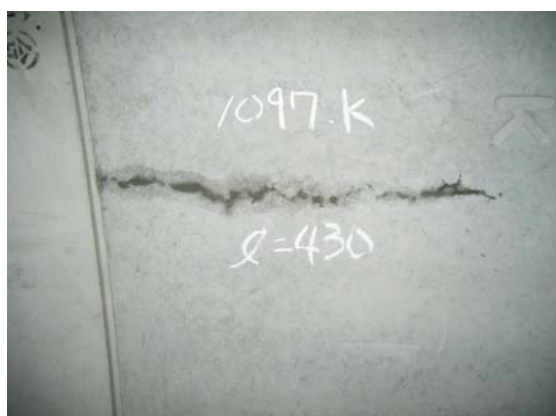
第2章 現場計測にもとづくセグメントの損傷の原因

懸念されるものとも考えられ、今後は定期的なモニタリングを行うものとして考えている。

つぎに、図-2.11 はセグメントの部位別に割れ・欠け、およびひび割れの発生率を整理したものである。図-2.11 から、割れ・欠け、およびひび割れは、Kセグメントあるいはそれに接するBセグメントに多いことがわかる。この原因についても2-5節以降にて詳述するが、Kセグメント周辺の目違い量が多いことと関連しているものと考えられる。



(a) 割れ・欠けの例



(b) ひび割れの例

写真-2.1 割れ・欠けおよびひび割れの例

表-2.3 ひび割れ幅の分布

ひび割れ幅	～0.05mm	～0.1mm	～0.15mm	～0.2mm
発生割合(%)	52	41	3	4

第2章 現場計測にもとづくセグメントの損傷の原因

1	2	4	5	3	5	8	0	4	2	1	2	1	1	1
0	A1	0	0	B1	8	1	K	1	1	B2	0	0	A2	0
4	0	6	3	3	12	3	0	4	4	2	13	1	0	2

(a) 割れ，欠けの発生率(単位：%)

2			8			21			12			0		
0	A1	0	1	B1	6	15	K	13	5	B2	3	0	A2	0
1			5			6			2			0		

(b) ひび割れの発生率(単位：%)

図-2.11a 扇島工区における箇所別の損傷発生率

2	2	2	2	1	1	11	1	6	2	1	2	6	2	1	2	2	2	2
A1			B1			K			B2			A3			A2			
3	0	4	7	0	7	3	0	3	8	0	5	3	0	2	3	0	4	

(a) 割れ，欠けの発生率(単位：%)

1	8	1	2	2	0	8	15	5	1	2	1	1	5	1	2	15	1
A1			B1			K			B2			A3			A2		
0	0	2	1	0	7	1	1	1	11	0	1	1	1	0	2	0	1

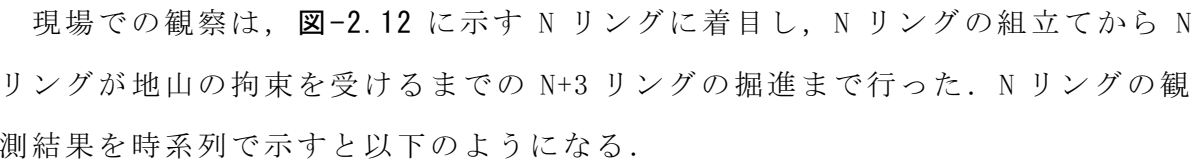
(b) ひび割れの発生率(単位：%)

図-2.11b 富津工区における箇所別の損傷発生率

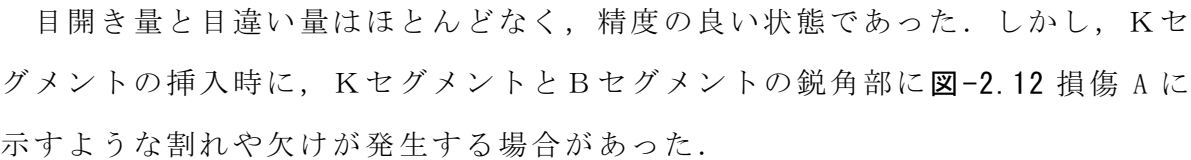
2-5 セグメントの損傷の部位とその発生時期

前節で示したように、セグメントの割れや欠け、およびひび割れなどの損傷は、Kセグメントあるいはそれに隣接するBセグメントに多いことがわかった。そこで、これらの損傷がどのような時期に発生するのかを両工区における現場での観察から把握することとした。

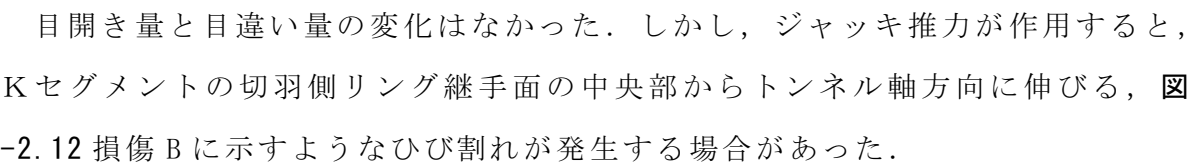
第2章 現場計測にもとづくセグメントの損傷の原因

現場での観察は、-2.12 に示す N リングに着目し、N リングの組立てから N リングが地山の拘束を受けるまでの N+3 リングの掘進まで行った。N リングの観測結果を時系列で示すと以下ようになる。

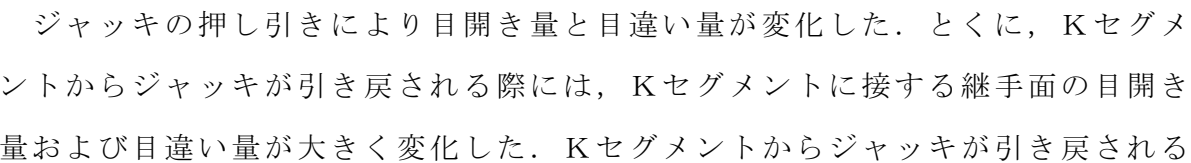
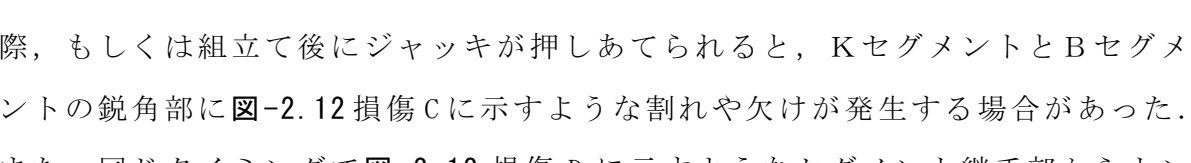
① N リングの組立て時

目開き量と目違い量はほとんどなく、精度の良い状態であった。しかし、Kセグメントの挿入時に、KセグメントとBセグメントの鋭角部に-2.12 損傷 A に示すような割れや欠けが発生する場合があった。

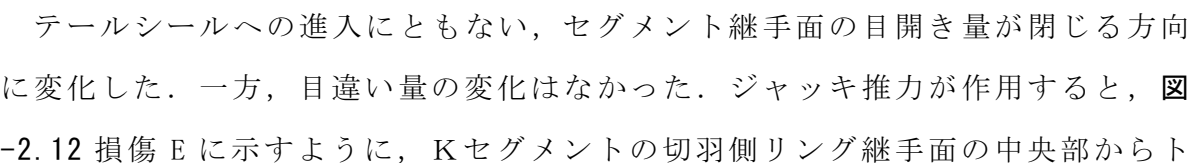
② N+1 リングの掘進時

目開き量と目違い量の変化はなかった。しかし、ジャッキ推力が作用すると、Kセグメントの切羽側リング継手面の中央部からトンネル軸方向に伸びる、-2.12 損傷 B に示すようなひび割れが発生する場合があった。

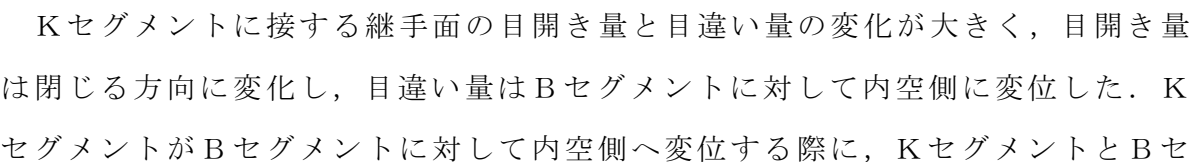
③ N+1 リングの組立て時

ジャッキの押し引きにより目開き量と目違い量が変わった。とくに、Kセグメントからジャッキが引き戻される際には、Kセグメントに接する継手面の目開き量および目違い量が大きく変化した。Kセグメントからジャッキが引き戻される際、もしくは組立て後にジャッキが押しあてられると、KセグメントとBセグメントの鋭角部に-2.12 損傷 C に示すような割れや欠けが発生する場合があった。また、同じタイミングで-2.12 損傷 D に示すようなセグメント継手部からトンネル円周方向に伸びるひび割れが発生する場合があった。

④ N+2 リングの掘進時

テールシールへの進入にともない、セグメント継手面の目開き量が閉じる方向に変化した。一方、目違い量の変化はなかった。ジャッキ推力が作用すると、-2.12 損傷 E に示すように、Kセグメントの切羽側リング継手面の中央部からトンネル軸方向に伸びるひび割れが発生する場合があった。

⑤ N+2 リングの組立て時

Kセグメントに接する継手面の目開き量と目違い量の変化が大きく、目開き量は閉じる方向に変化し、目違い量はBセグメントに対して内空側に変位した。KセグメントがBセグメントに対して内空側へ変位する際に、KセグメントとBセグメントの鋭角部に-2.12 損傷 F に示すような割れや欠けが発生する場合があった。

⑥ N+3 リングの掘進以降

目開き量と目違い量の変化が収束し、特異な損傷は発生しなかった。

以上の観察結果は、両工区ともに同様な傾向を示した。とくに、目開き量と目違い量の変化、および損傷の部位とその発生時期はKセグメントで特徴的に確認することができ、一連の施工の流れの中では、N+1 リングの組立て時が顕著であった。また、N リングが地山からの拘束を受けた以降は大きな変化は見られなくなるという傾向を示した。さらに、損傷の部位別の発生時期に着目すると、つぎのように整理することができる。

KセグメントあるいはBセグメントの鋭角部の割れや欠け(損傷 A, C, F)、あるいはセグメント継手面からトンネル円周方向に伸びるひび割れ(損傷 D)は、セグメントの組立て時のジャッキの押し引きにより発生するものであった。なお、損傷 D は扇島工区のみで確認されたものであった。これは、富津工区ではセグメント継手に拘束力のない突き合わせ型の継手を採用していたためと考えられる。

また、Kセグメントの切羽側のリング継手面からトンネルの軸方向に伸びるひび割れ(損傷 B, E)は、シールドの掘進時にジャッキ推力が作用することにより発生するものであった。

このような損傷のうち、その発生原因が明確なのは損傷 A のみである。これは、KセグメントとBセグメントの鋭角部が点接触している状態でジャッキにより挿入されるためと考えられる。その他の損傷はセグメントの動きとジャッキの作用が複合して生ずるものと推察されるが、この観察のみでは明確な発生原因は把握できなかった。

そこで、Kセグメントの施工時の挙動を把握するために、Kセグメントを中心とした目開き量および目違い量の計測結果をもとに、損傷の原因にいてさらに詳細な検討を行うこととした。

第2章 現場計測にもとづくセグメントの損傷の原因

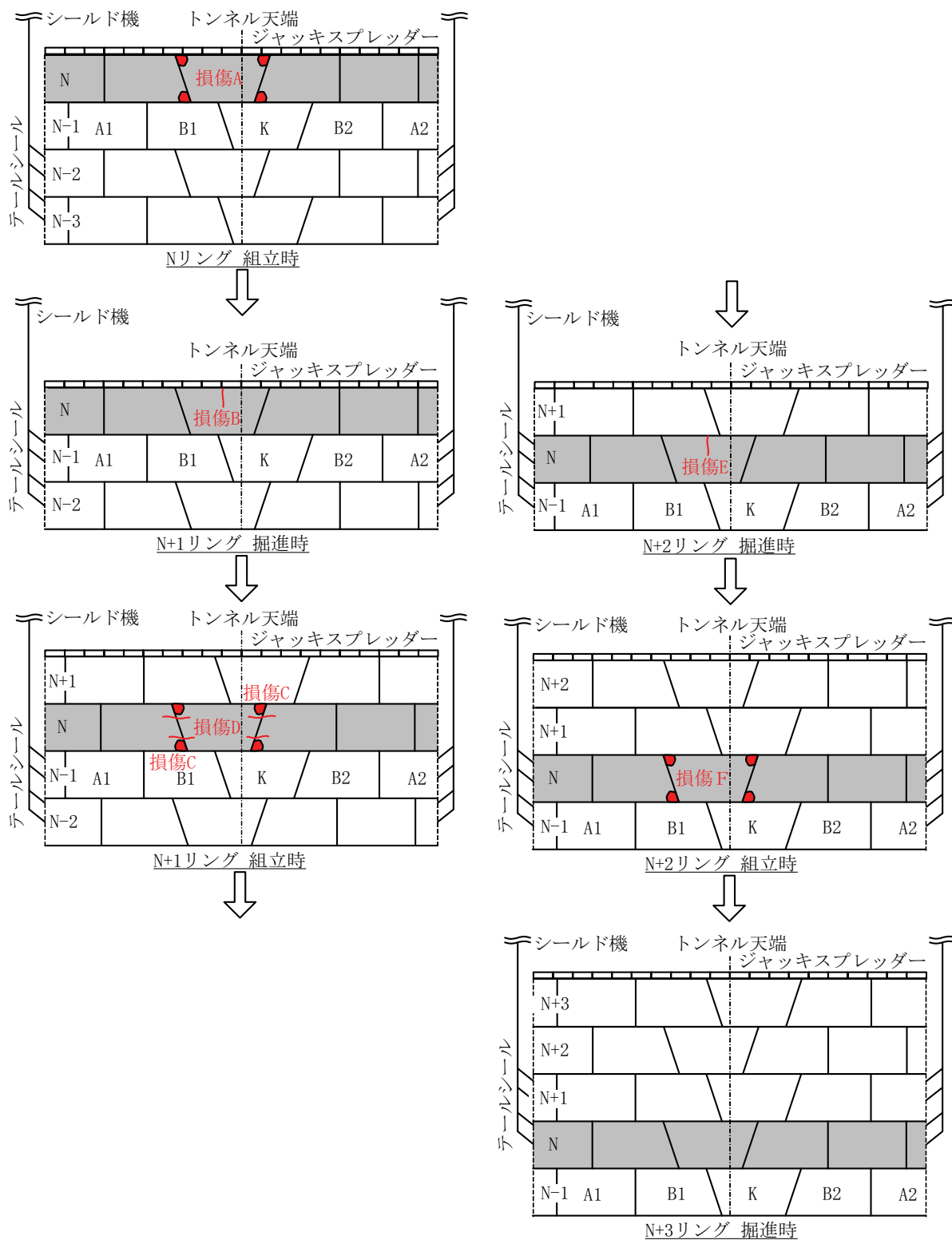


図-2.12 観察の対象としたリングと損傷の部位

2-6 計測結果にもとづく損傷の原因の推定

2-6-1 計測計画

KセグメントとBセグメントの相対的な動きを把握することを目的に、図-2.13に示すように継手部にそれぞれ目開き計および目違い計を設置した。各計測器は、図-2.14に示すように、目開き計測はパイ型変位計、目違い計測はカンチレバ型変位計を用いることとした。また、これらの計測器の測定範囲および精度は表-2.4に示すとおりで、0.1mm程度の目開き量および目違い量の変化を測定するには十分な計測器を選定した。

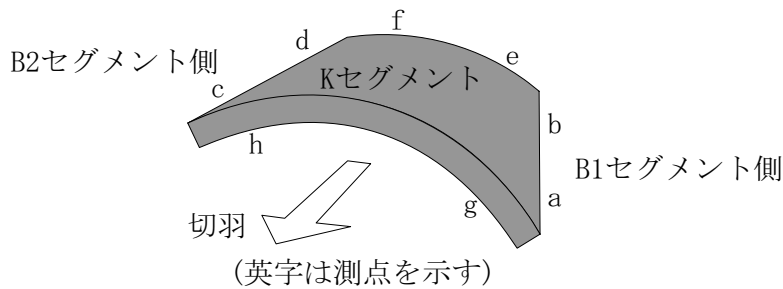


図-2.13 目開き計および目違い計の設置位置

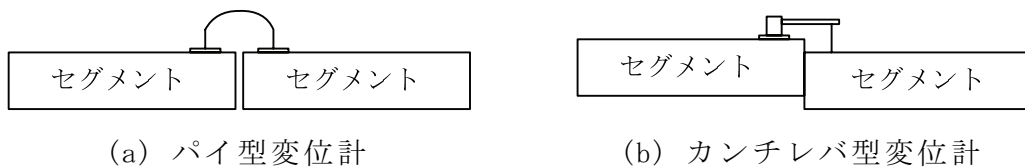


図-2.14 目開き計および目違い計

表-2.4 目開き計および目違い計の測定範囲と精度

計測器	測定範囲	精度
パイ型変位計 (目開き計測)	±5mm	1%R0
カンチレバ型変位計 (目違い計測)	10mm	1%R0

第2章 現場計測にもとづくセグメントの損傷の原因

計測の開始時期は、測点 a～f では組立て直後からとし、測点 g, h ではつぎのリングの組立て直後からとした。また、計測の期間は、図-2.15 に示すように、計測対象のセグメントがシールド内にある状態までを基本とし、テールシールの脱出直後まで実施した。なお、計測断面は、図-2.16 に示すように、扇島工区で 4 断面、富津工区で 1 断面とした。これらの計測断面の施工条件は表-2.5 に示すとおりである。

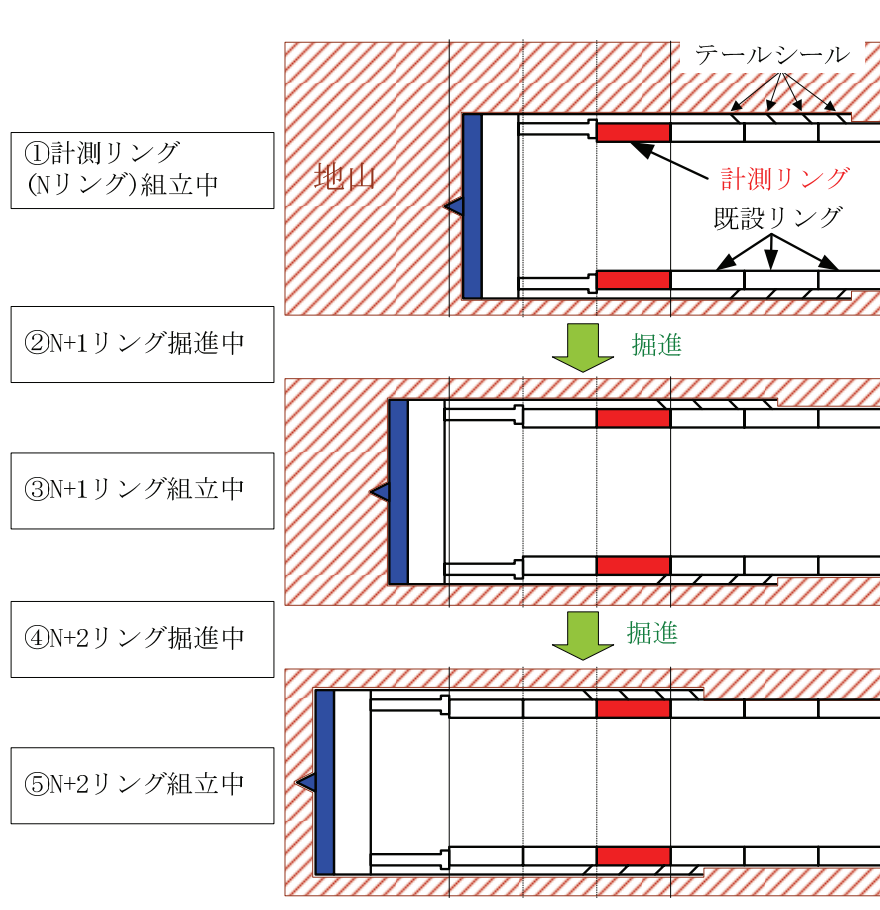


図-2.15 計測リングの計測期間

第2章 現場計測にもとづくセグメントの損傷の原因

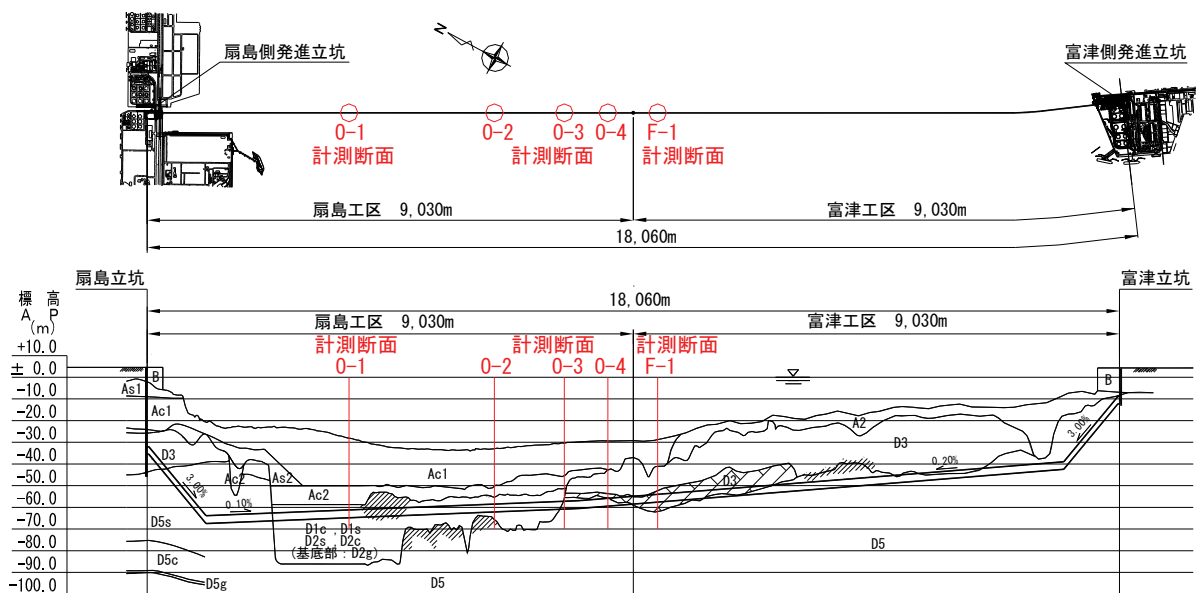


図-2.16 計測断面

表-2.5 計測断面の施工条件

計測断面	発進立坑からの距離 (m)	切羽水圧 (MPa)	総推力 (kN)	掘進方式※
0-1	3,751	0.65	8,300	同時
0-2	6,451	0.63	7,700	逐次
0-3	7,749	0.63	8,300	逐次
0-4	8,557	0.62	8,400	逐次
F-1	8,579	0.58	7,328	逐次

※ 同時とは同時掘進機構により掘進した場合であり，逐次とはセグメントの組立てとシールドの掘進を交互に実施した場合を示す．

2-6-2 挙動の分析

図-2.17 は各計測値の経時変化を示した図である．この図はKセグメントのBセグメントに対する相対的な動きを把握するために，目開き量および目違い量の初期値を 0mm として図化したものである．この図から，いずれの計測断面においても，2-5 節で示した目視による観測結果をトレースしたような結果であり，基本的には表-2.6 に示すような挙動になっていることがわかる．ここで，計測断面 0-1 は同時掘進機構を用いた施工条件になっているため，シールドの掘進とセグメントの組立てを切り離して評価することはできないが，そのほかの計測断面と

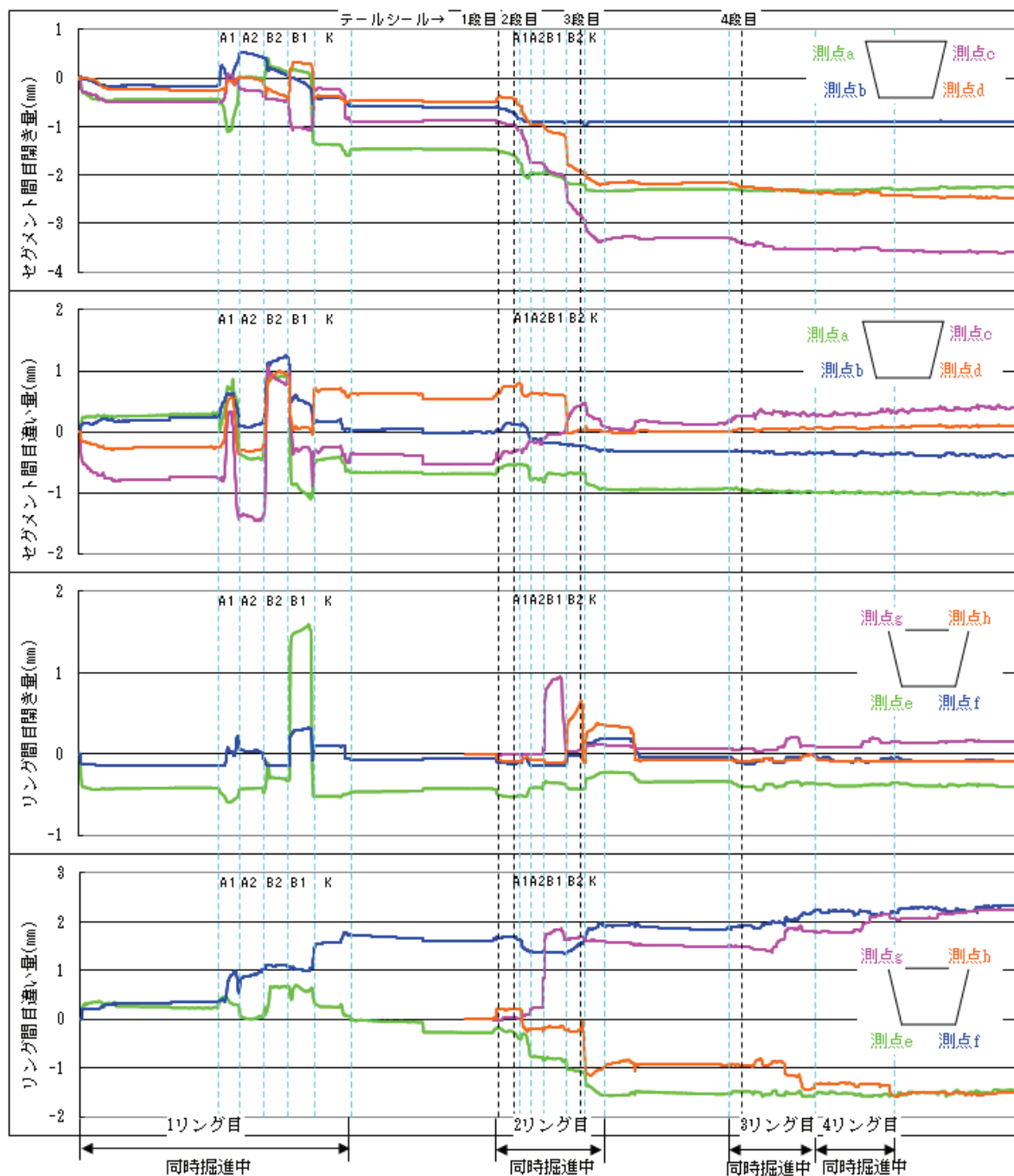
同じ位置づけで評価を行うために、組立てのためにジャッキを切り替えるタイミングを組立て時とした。

図-2.17 および表-2.6 からわかるように、Kセグメントの挙動はジャッキ推力やシール材の反発力など、施工時荷重の作用方向に従って刻々と変化しており、とくに、N+1 リングの組立て中に生じる挙動が顕著である。表-2.7 は扇島工区における N+1 リング組立て中の計測値の変化を示したものである。同表中の網掛け部は、目開き量あるいは目違い量に $\pm 0.5\text{mm}$ 以上の大きな変化を生じた箇所を示したもので、この大きな変化が集中するタイミングは、計測断面 0-1～0-3 では B1 セグメントの組立て時であり、計測断面 0-4 では B2 セグメントの組立て時となっている。この両者を見ると、セグメントが異なるタイミングで大きな変化を生じている結果となっているが、これはセグメントの千鳥組による組立て手順の違いによるものであり、実際には同じタイミングで生じているものである。このため、本論ではこのタイミングを B1 セグメントの組立て時とみなすことにした。以上のことから、とくに Kセグメントの挙動が大きい N+1 リング組立て中の B1 セグメントの組立て時について詳細な分析を行った。

(1) B1 セグメントの組立て時のジャッキの引き戻し時の挙動

図-2.18 は B1 セグメントの組立て時におけるジャッキパターンの変化を示した図である。また、表-2.8 はこの施工ステップにおける計測値の変化を抽出したもので、計測断面 0-2, F-1 を代表として示した。図-2.18 および表-2.8 から、ジャッキが引き戻される過程では、ジャッキが引き戻される側のリング継手面の測点において大きく目開き量を生じていることがわかる。扇島工区では測点 e (計測断面 0-4 では測点 f)において $0.9\sim 2.3\text{mm}$ 、富津工区では測点 e および測点 f において $2.3\sim 2.9\text{mm}$ となっている。また、セグメント継手面の目違い量(測点 a～d)は、すべて Kセグメントが Bセグメントに対して内空側に変位する方向に移動し、その大きさはジャッキが引き戻される位置の測点において切羽側の方が大きくなっている。とくに、計測断面 0-1, 0-2, F-1 では、切羽側の測点 a および測点 c は坑口側の測点 b および測点 d に対して(扇島工区ではジャッキの引き戻し側である測点 a と測点 b のみの対比になる)、 1mm 以上大きく内空側に変位してい

第2章 現場計測にもとづくセグメントの損傷の原因



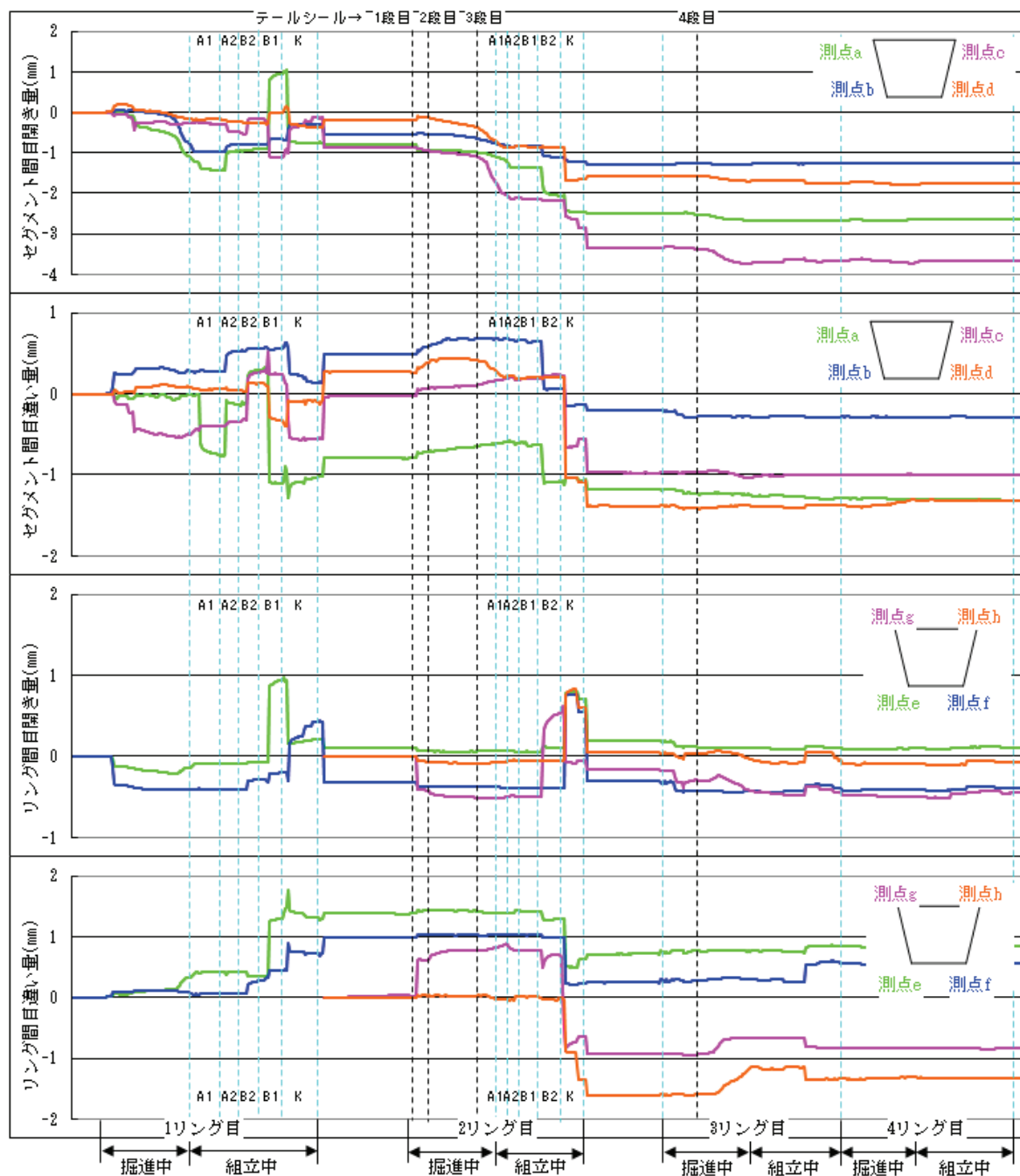
目開き量の方 向 + : 開く方向への変化 - : 閉じる方向への変化

目違い量の方 向 + : BセグメントがKセグメントに対して内空側に変位

- : KセグメントがBセグメントに対して内空側に変位

図-2.17a 計測断面 0-1 の経時変化

第2章 現場計測にもとづくセグメントの損傷の原因



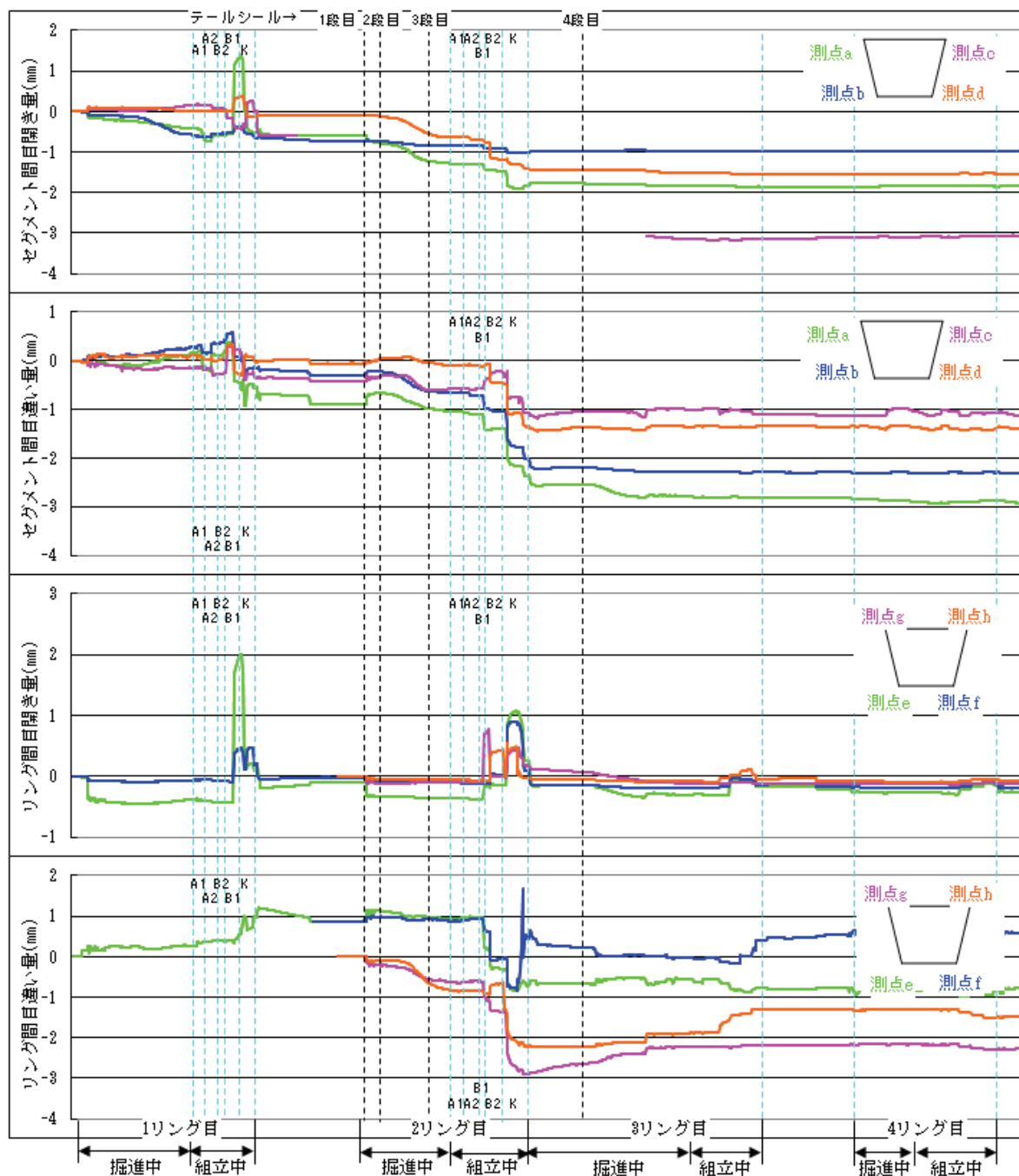
目開き量の方 向 + : 開く方向への変化 - : 閉じる方向への変化

目違い量の方 向 + : BセグメントがKセグメントに対して内空側に変位

- : KセグメントがBセグメントに対して内空側に変位

図-2.17b 計測断面 0-2 の経時変化

第2章 現場計測にもとづくセグメントの損傷の原因



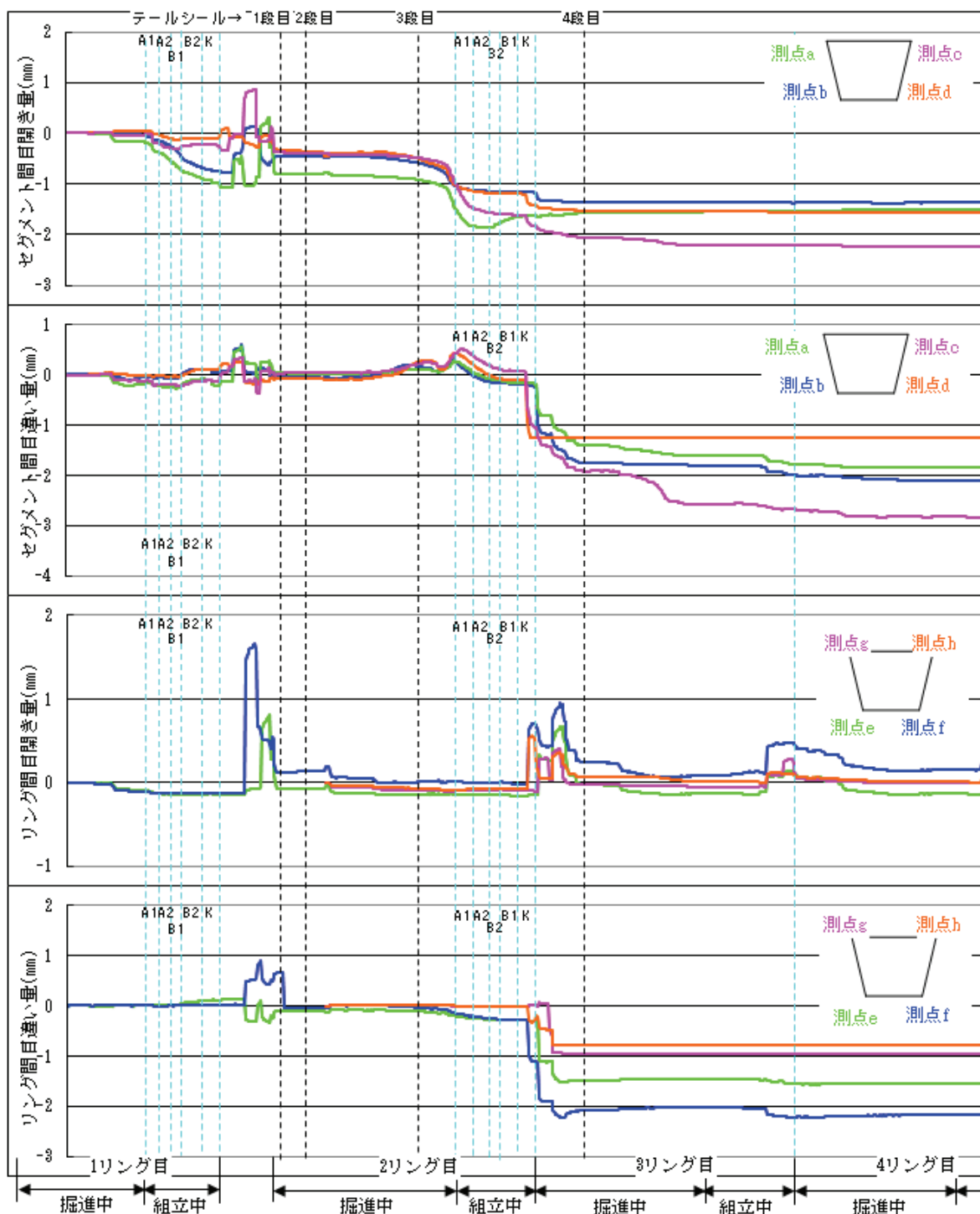
目開き量の方 向 + : 開く方向への変化 - : 閉じる方向への変化

目違い量の方 向 + : BセグメントがKセグメントに対して内空側に変位

- : KセグメントがBセグメントに対して内空側に変位

図-2.17c 計測断面 0-3 の経時変化

第2章 現場計測にもとづくセグメントの損傷の原因

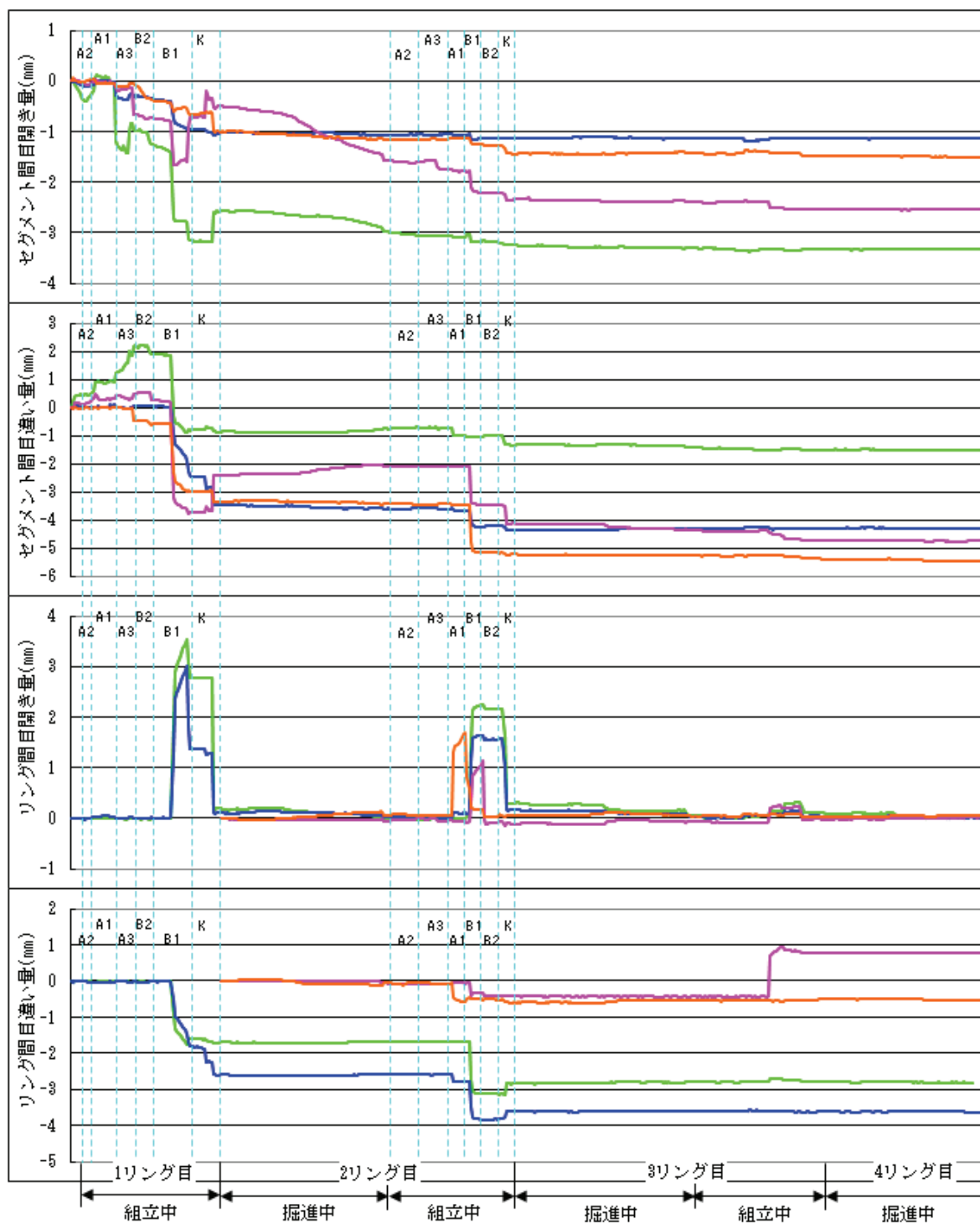


目開き量の方 向 + : 開く方向への変化 - : 閉じる方向への変化

目違い量の方 向 + : BセグメントがKセグメントに対して内空側に変位

- : KセグメントがBセグメントに対して内空側に変位

図-2.17d 計測断面 0-4 の経時変化



目開き量の方 向 + : 開く方向への変化 - : 閉じる方向への変化

目違い量の方 向 + : BセグメントがKセグメントに対して内空側に変位

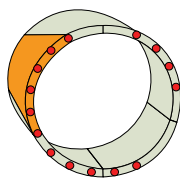
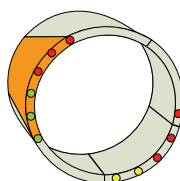
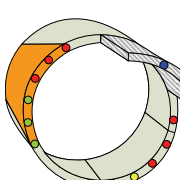
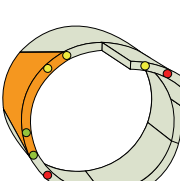
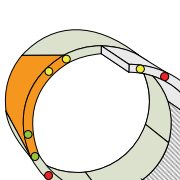
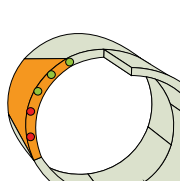
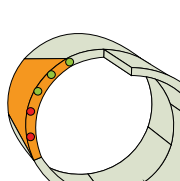
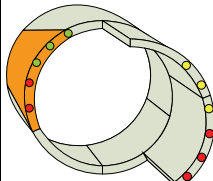
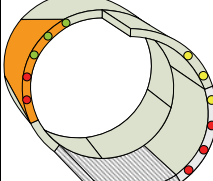
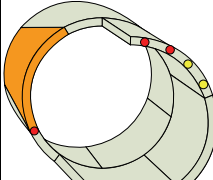
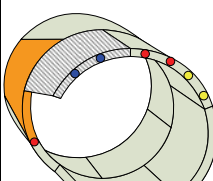
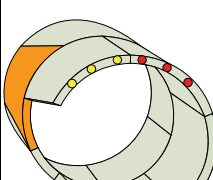
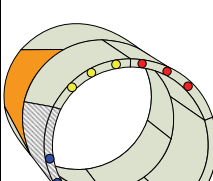
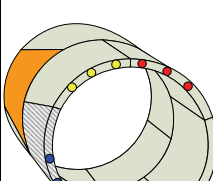
- : KセグメントがBセグメントに対して内空側に変位

図-2.17e 計測断面 F-1 の経時変化

表-2.6 全体的な挙動の傾向と分析

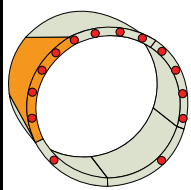
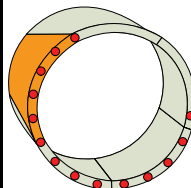
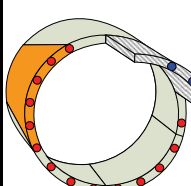
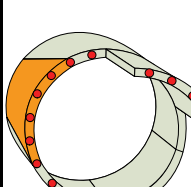
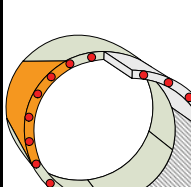
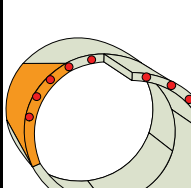
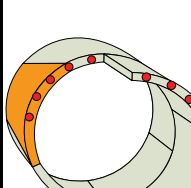
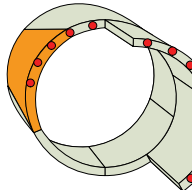
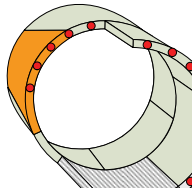
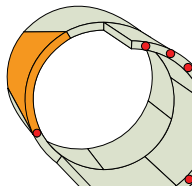
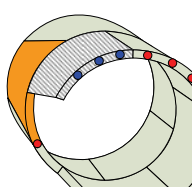
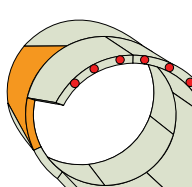
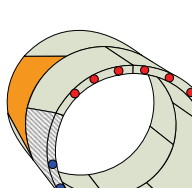
施工 ステップ	継手	挙動	挙動分析
N+1リング 掘進中	セグメント間	目開き量	<ul style="list-style-type: none"> 支配的な施工時荷重はジャッキ推力で、トンネル軸方向に大きく拘束するため大きな挙動の変化はない。 一方、既設リングがテールシールの拘束力により締め付けられることにより、掘進終了にかけて目が閉じる方向に変化するものと考えられる。
		目違い量	<ul style="list-style-type: none"> 支配的な施工時荷重であるジャッキ推力により、トンネル半径方向の変化が誘発されるものと考えられ、とくに自重の影響を受けやすいKセグメントが内空側に変化する。
	リング間	目開き量	<ul style="list-style-type: none"> 支配的な施工時荷重であるジャッキ推力により、リング間のシール材が封入されることで目が閉じる方向に変化する。
		目違い量	—
N+1リング 組立て中	セグメント間 リング間	目開き量 目違い量	<ul style="list-style-type: none"> ジャッキの押し引きによりトンネル軸方向の拘束力が変化し、その拘束力が小さくなる箇所ではシール材反発力が支配的な施工時荷重となる。 これらの移り変わりにより、目開き量、目違い量ともに刻々と変化するものと考えられる。
		目開き量	<ul style="list-style-type: none"> 掘進終了にかけて目が閉じる方向に変化する。 とくに、3段目のテールシール拘束力が作用し始める。 めると大きく目が閉じる方向に変化する。
N+2リング 掘進中	セグメント間 リング間	目開き量	<ul style="list-style-type: none"> 掘進終了にかけて目が閉じる方向に変化する。 とくに、3段目のテールシール拘束力が作用すると、ほぼセグメントの幅に対して全域にテールシールの拘束力が作用するため、より大きく変化するものと考えられる。
		目違い量	—
		目開き量 目違い量	—
N+2リング 組立て中	セグメント間	目開き量	<ul style="list-style-type: none"> ジャッキの押し引きによりトンネル軸方向の拘束力が変化し、その拘束力が小さくなる箇所ではテールシールの拘束力が支配的な施工時荷重となる。
		目違い量	<ul style="list-style-type: none"> このため、ジャッキが引き戻される過程ではセグメント間の目開き量は閉じる方向に変化し、目違い量はKセグメントが内空側に増加するものと考えられる。
	リング間	目開き量	<ul style="list-style-type: none"> ただし、リング間の目開き量については、シール材反発力が支配的な施工時荷重であるため、その方向性はジャッキの押し引きに応じて両方向に変化するものと考えられる。
		目開き量 目違い量	<ul style="list-style-type: none"> 地山の土水圧荷重によりトンネル周方向の拘束が卓越すること
		目開き量 目違い量	<ul style="list-style-type: none"> で、施工時荷重の影響を受けにく状態になったものと考えられる。

表-2.7a N+1 リング組立て中の計測値の変化(計測断面 0-1)

施工ステップ	掘進時	A1組立時						A2組立時						B2組立時																			
		ジャッキ引き戻し時			ジャッキ押しあて時			ジャッキ引き戻し時			ジャッキ押しあて時			ジャッキ引き戻し時			ジャッキ押しあて時																
ジャッキパターン																																	
	423kN/本							赤：1211kN/本，黄：227kN/本，緑：149kN/本																									
	測点番号						a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f									
	目開き量の変化(mm)						0.7	0.2	0.6	0.2	0.2	0.2	1.1	0.5	0.3	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2							
目違い量の変化(mm)						0.4	0.4	1.0	0.8	0.2	0.6	1.0	0.5	1.7	0.9	0.3	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1								
施工ステップ	ジャッキパターン	B2組立時						B1組立時						K組立時																			
		ジャッキ引き戻し時			ジャッキ押しあて時			ジャッキ引き戻し時			ジャッキ押しあて時			ジャッキ引き戻し時			ジャッキ押しあて時																
																																	
		赤：1118kN/本，黄：582kN/本，緑：252kN/本									赤：1159kN/本，黄：898kN/本，緑：810kN/本						赤：648kN/本，黄：820kN/本，緑：727kN/本																
測点番号						a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f										
目開き量の変化(mm)						0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.5	0.7	1.8	0.5	1.3	0.2	0.8	0.6	1.9	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2					
目違い量の変化(mm)						0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	0.6	1.2	1.0	0.0	0.0	0.5	0.4	0.0	0.7	0.4	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	0.2	0.2

※ 赤字は変化量が負の場合を示すものとし, 変化量の符号は図-2.17と同様である。

表-2.7b N+1 リング組立て中の計測値の変化(計測断面 0-2)

施工ステップ	掘進時	A1組立時						A2組立時						B2組立時																	
		ジャッキ引き戻し時			ジャッキ押しあて時			ジャッキ引き戻し時			ジャッキ押しあて時			ジャッキ引き戻し時			ジャッキ押しあて時														
ジャッキ パターン																															
	450kN/本																														
	測点番号		a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f											
目開き量の変化 (mm)		0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.2	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0												
目違い量の変化 (mm)		0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0												
施工ステップ	ジャッキ パターン	B2組立時						B1組立時						K組立時																	
		ジャッキ引き戻し時			ジャッキ押しあて時			ジャッキ引き戻し時			ジャッキ押しあて時			ジャッキ引き戻し時			ジャッキ押しあて時														
																															
ジャッキ推力		485kN/本																		525kN/本						450kN/本					
測点番号		a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f												
目開き量の変化 (mm)		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	0.2	0.8	0.3	0.9	0.1	1.8	0.3	0.6	0.4	0.6	0.4												
目違い量の変化 (mm)		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	0.0	0.1	0.3	0.8	0.1	0.1	0.3	0.7	0.3	0.0	0.3												

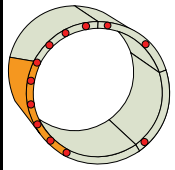
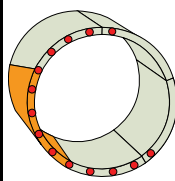
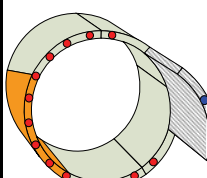
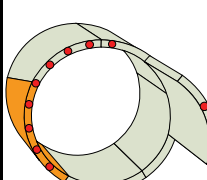
※ 赤字は変化量が負の場合を示すものとし、変化量の符号は図-2.17と同様である。

表-2.7c N+1 リング組立て中の計測値の変化(計測断面 0-3)

施工ステップ	挿進時	A1組立時						A2組立時						B2組立時											
		ジャッキ引き戻し時			ジャッキ押しあて時			ジャッキ引き戻し時			ジャッキ押しあて時			ジャッキ引き戻し時			ジャッキ押しあて時								
ジャッキ パターン								—																	
	450kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン								—																	
	485kN/本																								
	測点番号																								
	目開き量の変化 (mm)																								
ジャッキ パターン																									

※ 赤字は変化量が負の場合を示すものとし、変化量の符号は図-2.17と同様である。

表-2.7d N+1 リング組立て中の計測値の変化(計測断面 0-4)

施工ステップ	掘進時	A1組立時						A2組立時						B1組立時								
		ジャッキ引き戻し時			ジャッキ押しあて時			ジャッキ引き戻し時			ジャッキ押しあて時			ジャッキ引き戻し時			ジャッキ押しあて時					
ジャッキ パターン																						
	450kN/本																					
	測点番号		a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f		
	目開き量の変化(mm)		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	
ジャッキ パターン	目違い量の変化(mm)		0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	0.0	0.0	0.6	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0	
	K組立時																					
	測点番号		a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f		
	目開き量の変化(mm)		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
ジャッキ パターン	目違い量の変化(mm)		0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	0.0	0.0	0.6	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0	
	B2組立時																					
	測点番号		a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f		
	目開き量の変化(mm)		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
ジャッキ パターン	目違い量の変化(mm)		0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	0.0	0.0	0.6	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0	
	485kN/本																					
	測点番号		a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f		
	目開き量の変化(mm)		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.4	0.7	0.1	0.1	1.7	1.0	0.7	0.9	0.2	0.0	0.9	0.3	0.8
ジャッキ パターン	目違い量の変化(mm)		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.5	0.5	0.4	0.4	0.5	0.3	0.0	0.3	0.1	0.4	0.4	0.2	0.2
	525kN/本																					
	測点番号		a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f		
	目開き量の変化(mm)		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.5	0.5	0.4	0.4	0.5	0.3	0.0	0.3	0.1	0.4	0.4	0.2	0.2
ジャッキ パターン	目違い量の変化(mm)		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.5	0.5	0.4	0.4	0.5	0.3	0.0	0.3	0.1	0.4	0.4	0.2	0.2
	450kN/本																					
	測点番号		a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f		
	目開き量の変化(mm)		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ジャッキ パターン	目違い量の変化(mm)		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

※ 赤字は変化量が負の場合を示すものとし、変化量の符号は図-2.17と同様である。

第2章 現場計測にもとづくセグメントの損傷の原因

ることがわかる．すなわち，Kセグメントは切羽側に押し出されると同時に，とくに切羽側ではBセグメントに対して内空側に変位することがわかる．

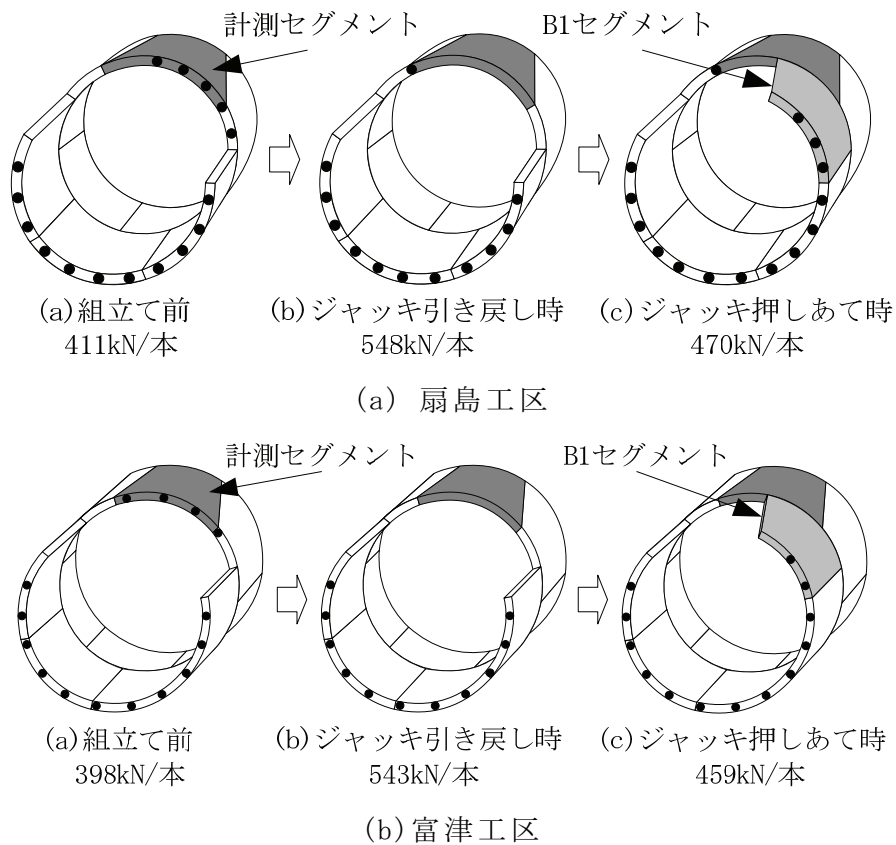


図-2.18 N+1 リング B1 セグメント組立て時のジャッキパターンの変化

表-2.8 N+1 リング B1 セグメント組立て時の計測値の変化

施工 ステップ		組立て前 ↓ ジャッキ引き戻し時						ジャッキ引き戻し時 ↓ ジャッキ押しあて時					
		a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f
計測 断面 0-2	目開き量 (mm)	1.7	0.2	-0.8	0.3	0.9	0.1	-1.8	0.3	0.6	-0.4	-0.6	0.4
	目違い量 (mm)	-1.4	0.0	-0.1	-0.3	0.8	0.1	0.1	-0.3	-0.7	0.3	0.0	0.3
計測 断面 F-1	目開き量 (mm)	-1.4	-0.4	-0.9	-0.1	2.3	2.9	-0.3	0.0	0.7	-0.1	-1.2	-0.5
	目違い量 (mm)	-2.4	-1.3	-3.5	-2.1	-0.9	-1.3	-0.1	0.4	0.2	0.0	0.2	-0.2

(2) B1 セグメントの組立て時におけるジャッキの押しあて時の挙動

一方、ジャッキが押しあてられる過程では、表-2.8 に示すように、ジャッキが引き戻される過程において生じたリング間の目開き量は閉じる方向に変位する傾向を示しているが、計測断面 0-1 以外では、発生した目開き量をすべて戻すような値にはなっていない。また、ジャッキが引き戻される過程で生じたセグメント間の目違い量はほとんど変化せず、残留していることがわかる。したがって、B セグメントの組立て終了時には、図-2.19 に示すように、K セグメントは切羽側に押し出され、かつ B セグメントに対して、とくに切羽側で内空側に変位した出来形になることがわかる。

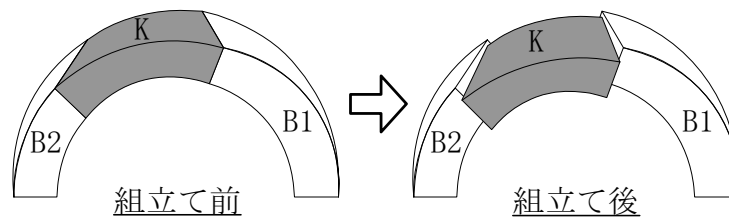


図-2.16 N+1 リング B1 セグメントの組立て時
における計測セグメントの挙動

(3) 挙動のメカニズム

N+1 リングの B1 セグメントの組立て時に生じる K セグメントの挙動のメカニズムは、施工時荷重の作用力および作用方向から説明できる。図-2.20 に示すように、ジャッキが引き戻されると、K セグメントにはシール材の反発力と自重とが施工時荷重として卓越して作用する。この作用力に抵抗する継手は、シール材の初期反発力より小さい締結力であり、とくにセグメント継手はトンネル軸方向に無拘束な構造であるため、K セグメントからジャッキが引き戻されると、K セグメントは切羽側に押し出され、リング継手面に目開き量が発生する。さらに、自重の影響により B セグメントに対して内空側に変位するものと考えられる。また、K セグメントの形状からその重心が切羽側にあるため、切羽側ではより内空側への変位が大きくなるものと思われる。

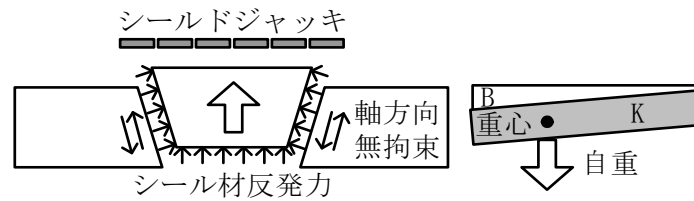


図-2.20 Kセグメントに作用する施工時荷重

一方，ジャッキを押しあてた際には，その作用方向と一致するリング継手面の目開き量はもとに戻る傾向にあるものの，自重により生じたセグメント継手面の目違い量を戻す方向とは一致しないため，目違い量による変位は残留した状態になるものと考えられる．

2-6-3 損傷の原因

図-2.11 に示したように，発生率が高いセグメントの損傷は，KセグメントあるいはBセグメントの鋭角部の割れや欠け，セグメント継手からのひび割れ，およびKセグメントのリング継手面からのひび割れである．これらの損傷の原因を計測結果に示された特徴的な挙動をもとに推察する．

(1) 鋭角部の割れや欠け(損傷 C, F)

N+1 リングのB1セグメントの組立て中のジャッキ引き戻し時には，Kセグメントは，図-2.21 に示すように，隣接するBセグメントと鋭角部が点接触の状態になる．この状態からジャッキが押しあてられることで，点接触の箇所に割れや欠けが生じるものと考えられる．なお，N+2 リングの組立て時に発生する損傷 F についても，損傷 C と同様な原因によるものと考えられる．

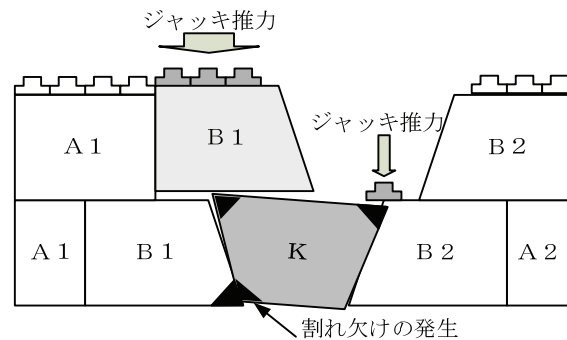


図-2.21 Kセグメントの挙動と鋭角部の接触状態

(2) セグメント継手からのひび割れ(損傷 D)

N+1 リングのB1セグメント組立て中のジャッキ引き戻し時には、KセグメントとBセグメントのセグメント継手は、図-2.22 に示すように、雌金物と雄金物が接触するような状態になる。この状態からジャッキが押しあてられることで、雌金物が押し広げられ、その結果、セグメント継手からひび割れが発生するものと考えられる。

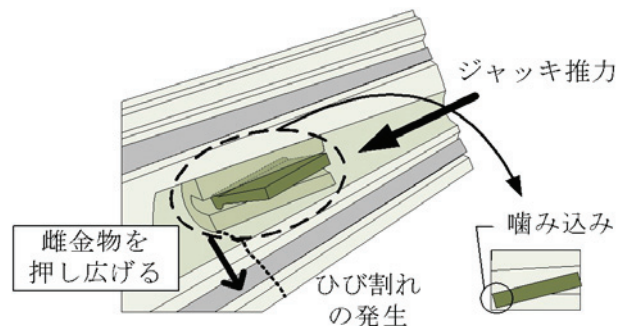


図-2.22 Kセグメントの挙動とセグメント継手の接触状態

(3) リング継手面からのひび割れ(損傷 B, E)

N+1 リングのB1セグメントの組立て完了後のKセグメントは、N+1 リングのKセグメントの組立て完了まで挙動に変化がない。したがって、図-2.23 に示すように、N リングのKセグメントの切羽側の両端部は、隣り合うBセグメントより切羽側に位置するため、N+1 リングのKセグメントとBセグメントの支点になる。このため、N+1 リングの掘進時にジャッキ推力が作用すると、図-2.24 に示すように、N+1 リングのKセグメントには支点の反対側で切羽側の中央部からトンネル

2-7 まとめ

東西連係ガス導管新設工事で実施した，施工時の現場観察によるセグメントの挙動の把握，およびKセグメントを中心した施工時の挙動計測により，以下のことがわかった．ただし，これらの知見は損傷の原因の一つの側面を示したものであり，Kセグメントの形状やその組立て位置，あるいはジャッキパターンなどが複合して生じる結果と考えられる．このため，3章以降では，これらの複合する原因を詳細に分析するとともに，その対策についても検討することにする．

- ① 現場観察結果から，セグメントは精度良く組み立てられたとしても，その後のセグメントの組立てによるジャッキの押し引きにより微小な動きを繰り返すことで，最終的な出来形になることがわかった．とくに，Kセグメントについてはこれらの動きが顕著であった．
- ② Kセグメントを中心とした目開き量および目違い量の計測結果から，損傷が生じた部位ならびにその発生時期は異なるものの，損傷の原因は施工時荷重の作用によってセグメントが変位するためであることがわかった．
- ③ とくに，組立てられたKセグメントからジャッキが引き戻されると，Kセグメントは切羽側に押し出され，かつ切羽側でより大きく隣接するBセグメントに対して内空側に変位することがわかった．この結果，Kセグメントの鋭角部の接触やつぎのリングとの間に支点が発生するため，割れや欠け，あるいはひび割れなどの損傷が生じるものと推察できた．

参考文献

- 1) 白井伸一，富所達哉，野口和博：東西連係ガス導管新設工事の計画概要，トンネルと地下，Vol.34，No.11，pp.39-47，2003.
- 2) 富所達哉，権守英樹，中川雅由，服部佳文：海底シールドの覆工設計，トンネルと地下，Vol.37，No.7，pp.18-25，2006.
- 3) (社)土木学会：トンネル標準示方書シールド工法・同解説，pp.71-72，2006.
- 4) 佐藤東洋司，金森研二，斉藤仁，神崎正：シールドトンネルにおける掘進組立同時施工の実用化，第10回ロボットシンポジウム論文集，pp.415-420，2004.9.
- 5) 米沢実，隈部毅彦，齊藤祐輔，黒崎秀：長距離シールドにおける高速施工(富津工区)，トンネルと地下，Vol.37，No.7，pp.34-39，2006.

第 3 章 三次元シェルばねモデル解析による セグメントの損傷の原因

第3章 三次元シェルばねモデル解析によるセグメントの損傷の原因

3-1 はじめに

第2章では、Kセグメントの施工時の挙動を計測した結果、セグメントは精度よく組立てられたとしても、その後のジャッキの押し引きにより微小な挙動を繰り返し、その過程において損傷を生じる可能性があることを示した。また、この原因は、Kセグメントの形状やその組立て位置、あるいはジャッキパターンなどが複合して生じる結果であることを推察した。

本章では、これらの複合する原因の詳細分析とさらなる損傷の可能性を考察するために、シールドの掘進とセグメントの組立ての施工ステップを模擬した三次元 FEM 解析を行い、各施工ステップで得られた応力状態および変形状態を分析することとした。なお、本解析における施工条件は扇島工区のものをを用いている。

3-2 解析モデルの設定

3-2-1 解析範囲の設定

現場におけるセグメントの挙動の観察およびKセグメントの挙動の計測から、セグメントは裏込め注入の影響はほとんど受けず、セグメントがシールドのテール部から脱出するとセグメントの挙動は収束するという結果が確認された。そこで、解析範囲は、図-3.1に示すように、シールド機内にある3リングとテール脱出後の1リングの計4リングとした。

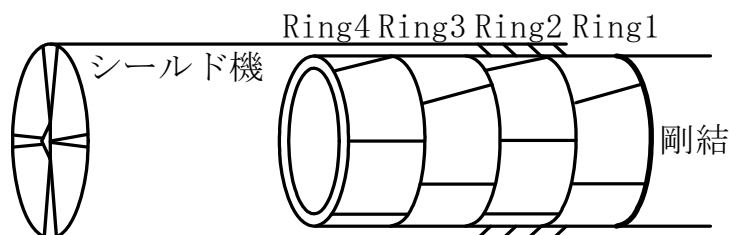


図-3.1 解析範囲

3-2-2 解析ケースの設定

解析ケースは、1 リングの掘進と組立てをシミュレートするために、表-3.1 に示すように、Ring4 の掘進時(1 ケース)と組立て時(10 ケース：セグメント 1 ピースの組立てに対しジャッキの引き戻し過程と押しあて過程の 2 ケースがある)とした。

ここで、各解析ケースはそれぞれが独立であるものとして解析を行うこととした。これは、施工ステップごとに発生するセグメントの応力状態や変形を組立て誤差のない状態で解析することで、損傷に対するジャッキ推力などの施工時荷重の影響を詳細に評価するためである。

3-2-3 作用荷重

作用荷重は各リングの拘束状態から、以下に示すように設定した。なお、すべてのセグメントにおいて自重を考慮している。

① Ring1

当該現場におけるセグメントの土圧計測結果¹⁾から、土水圧による荷重 0.5MPa をセグメントの幅方向に等分布荷重として作用させた。

② Ring2

Ring1 と同様に土圧計測結果から、テールシールによる拘束力 0.5MPa をセグメントの幅方向に等分布荷重として作用させた。

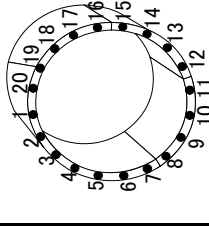
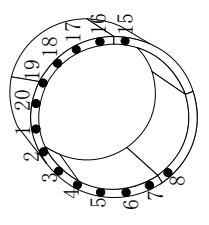
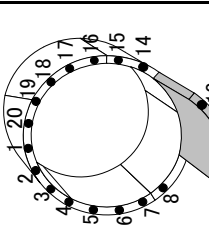
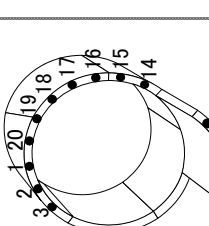
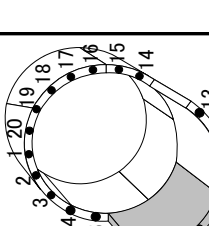
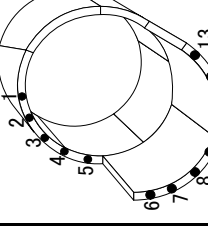
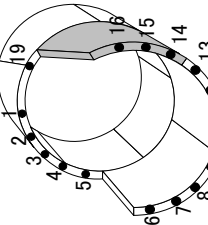
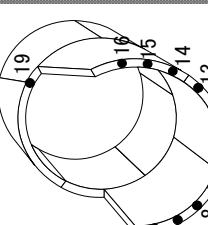
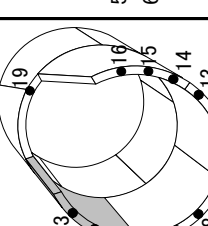
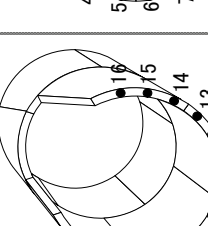
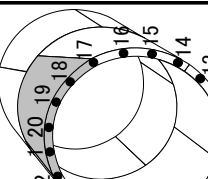
③ Ring3 および Ring4

ジャッキ推力による荷重を作用させた。ジャッキ推力の作用点および作用力は、実施工の状態を忠実に再現することとし、表-3.1 に示すとおりとした。

3-2-4 構造モデル

構造モデルには三次元シェルばねモデルを用いた。セグメントリングを構成する各部材は以下に示すようにモデル化した。図-3.2 は解析モデルの概念図を、図-3.3 は解析メッシュ図の一例を、また、表-3.2 は各要素の物性値を示したものである。

表-3.1 解析ケースごとのジャッキの作用点および作用力

解析 ケース	1	2	3	4	5	
	Ring4 掘進時	A2セグメント組立て時				
		ジャッキ押しあて				
		ジャッキ引き戻し				
推力	415.0 kN/本	442.9 kN/本	326.3 kN/本	442.9 kN/本	310.0 kN/本	
作用点						
解析 ケース	6	7	8	9	10	11
	B1セグメント組立て時	B2セグメント組立て時				
		ジャッキ押しあて				
		ジャッキ引き戻し				
推力	476.9 kN/本	364.7 kN/本	516.7 kN/本	413.3 kN/本	442.9 kN/本	310.0 kN/本
作用点						

※ ● : ジャッキ作用点

① セグメント本体

中間節点を考慮した 8 節点のシェル部材にモデル化した。要素分割は、継手位置やジャッキ配置を考慮して、図-3.4 に示すように、トンネルの円周方向に 80 分割 (1 要素の長さ : 126.5mm), トンネルの軸方向に 10 分割 (1 要素の長さ : 120.0mm) とした。

② 継手

セグメント継手は棒状のばね部材にモデル化し、リング継手は集中ばね部材にモデル化した。各ばね要素は、図-3.5 に示すように、6 自由度系の方向成分を保有するものとした。

③ 継手面

セグメント同士の力の伝達を行うために、ジョイント要素として棒状のばね部材を考慮した。

本構造モデルではセグメントの厚さや継手角度、およびシール材はモデル化していない。これらをモデル化するには、三次元ソリッド要素を用いた FEM モデルが理想的であると考えられるが、これは要素数が非常に多くなり、解析に時間を必要とすることから、施工時の一事象について詳細な検討を行うような場合に適用される事例が一般的である²⁾³⁾。一方、本解析では施工ステップごとの応力や

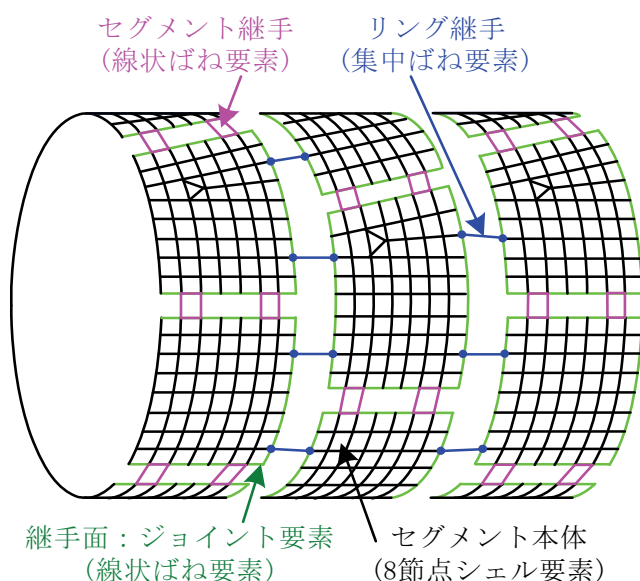


図-3.2 解析モデルの概念図

第3章 三次元シェルばねモデル解析によるセグメントの損傷の原因

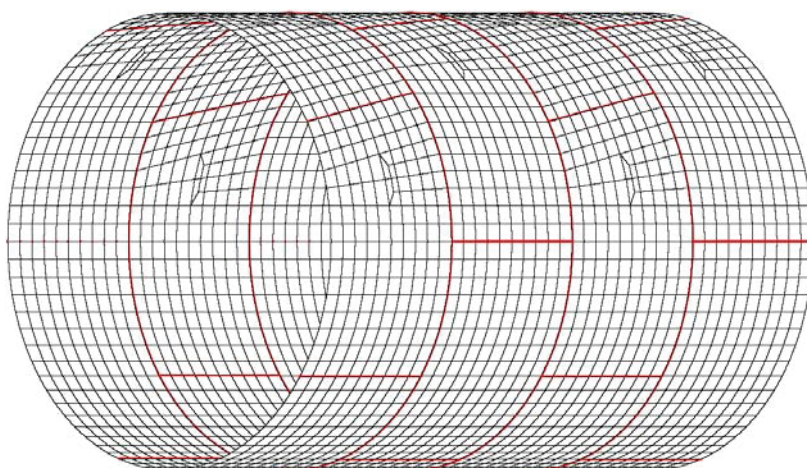


図-3.3 解析メッシュ図の一例(解析ケース 11 の場合)

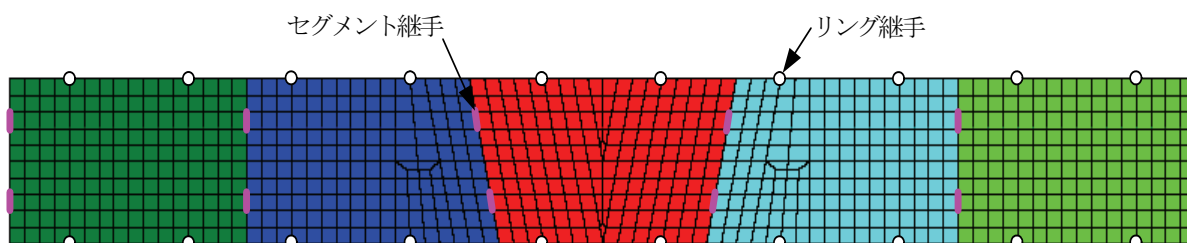


図-3.4 メッシュ図(1 リングの展開図)

表-3.2 各要素の物性値

部材		コンクリート	
ヤング率		$4.5 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$	
ポアソン比		0.17	
単位体積重量		26.0 kN/m^3	
部材		リング継手	セグメント継手
ばね定数	軸方向直ばね	$1.5 \times 10^5 \text{ kN/m}$	0 kN/m
	軸方向回転ばね	$0 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$	$0 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$
	周方向直ばね	$9.8 \times 10^4 \text{ kN/m}$	$1.0 \times 10^5 \text{ kN/m}$
	周方向回転ばね	$0 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$	$1.0 \times 10^3 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$
	半径方向直ばね	$9.8 \times 10^4 \text{ kN/m}$	$4.5 \times 10^5 \text{ kN/m}$
	半径方向回転ばね	$0 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$	$0 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$
部材		継手面	
ばね定数	圧縮時	$1.0 \times 10^9 \text{ kN/m}$	
	引張時	0 kN/m	

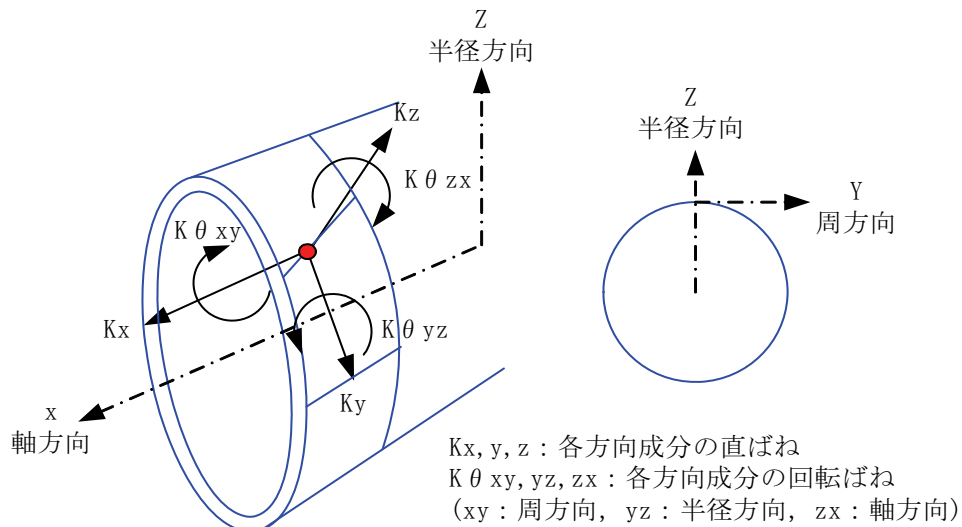


図-3.5 継手ばね要素の方向成分

変形状態を分析することを主眼にしているため、解析ケースが非常に多くなり、三次元ソリッド要素を用いることは実務的ではないと思われる。このため、三次元ソリッド要素に比べて、モデル化と断面力の抽出が容易な三次元シェルばねモデルを用いることとした。したがって、割れや欠けの発生については、セグメントの表面に発生する圧縮応力度の分布を評価し推定することとした。

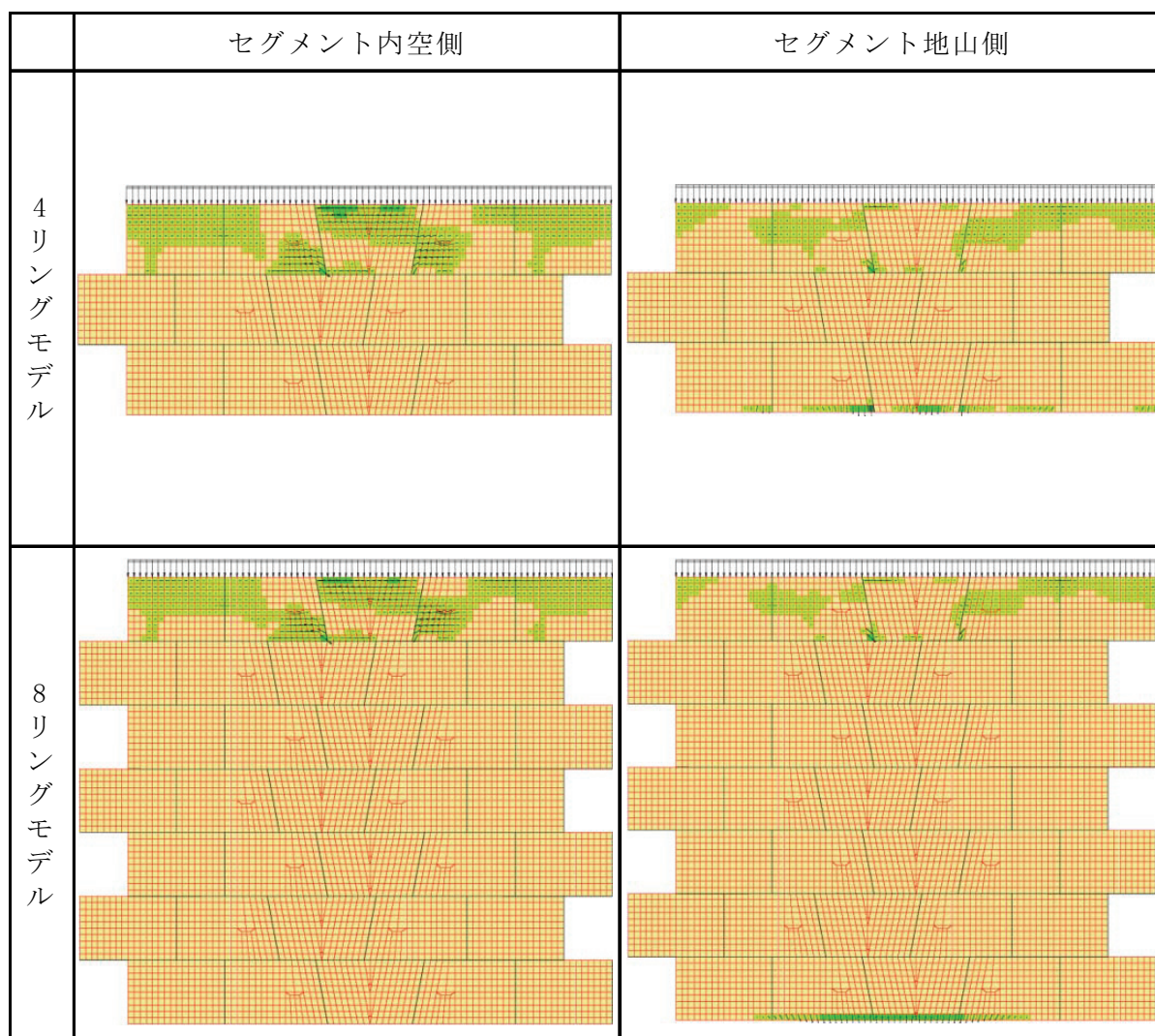
3-2-5 境界条件の設定

本解析モデルでは、図-3.1に示すように、Ring1の坑口側は剛な境界条件を設定している。一方で、この境界条件が解析結果の評価範囲である切羽側の2リング(Ring3およびRing4)に対して、どの程度影響を与えるかを確認する必要がある。そのため、ここでは、8リングを対象とした解析モデルを設定し、4リングの解析モデルによる場合の解析結果と比較することで、境界条件の影響度を確認した。

8リングの解析モデルは、図-3.1に示した解析モデルのRing1より坑口側にさらに4リングを足したものである。この付加された4リングは地山に完全に拘束されているとともに、セグメントの挙動は収束していると思われることから、セグメント継手面を剛結とした剛性一様なリングとしてモデル化した。

両者の解析結果の一例を表-3.3、表-3.4、および表-3.5に示す。これらの表中に示す図は、セグメントの応力度の分布を視覚的に表示したものであり、各要素に発生した圧縮応力度と引張応力度とを分けて、主応力度の方向および大きさを

表-3.3a 解析ケース1における4リングモデルと8リングモデルの解析結果
(引張応力度の分布)



※ 矢印は主応力度の方向を示す.

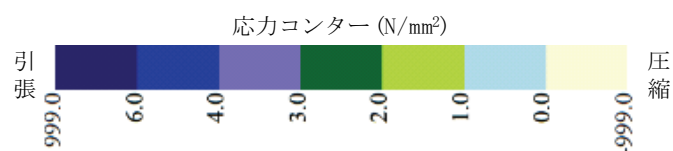
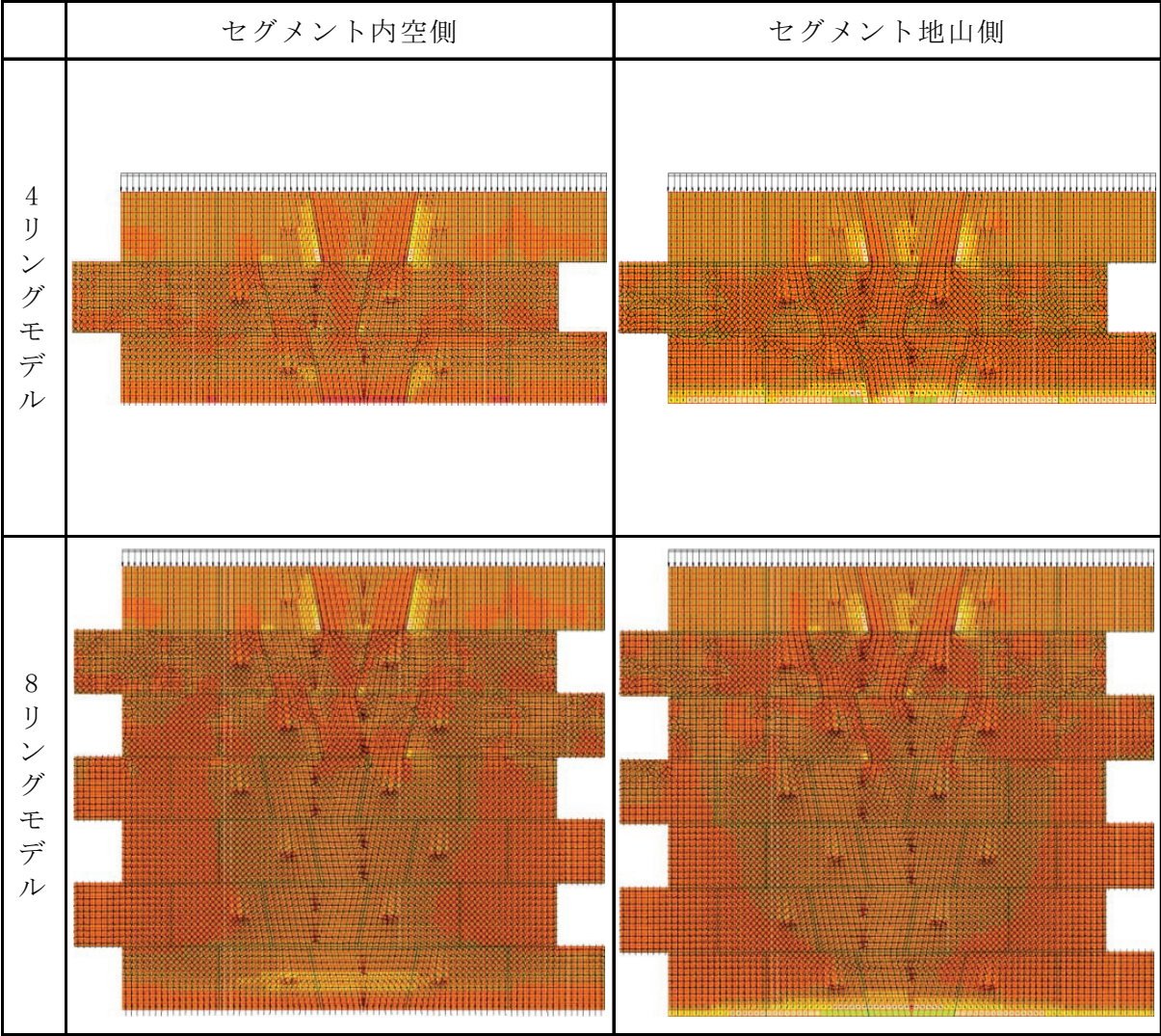


表-3. 3b 解析ケース 1 における 4 リングモデルと 8 リングモデルの解析結果
(圧縮応力度の分布)



※ 矢印は主応力度の方向を示す.

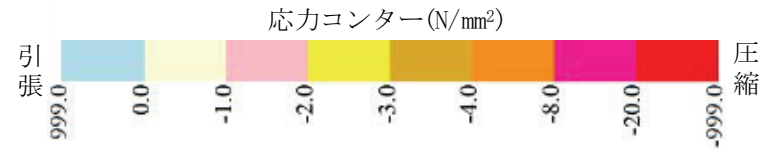
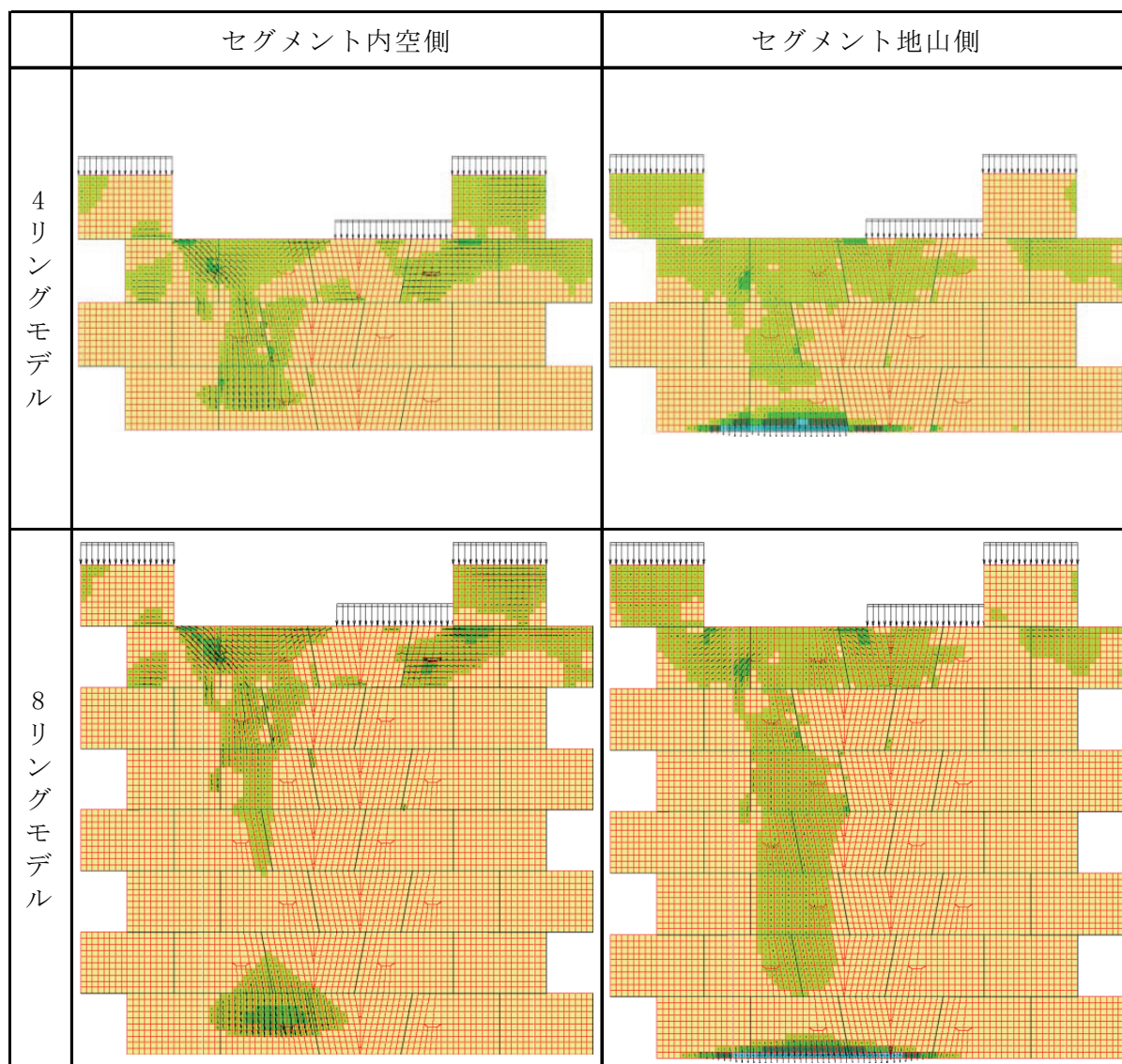


表-3.4a 解析ケース6における4リングモデルと8リングモデルの解析結果
(引張応力度の分布)



※ 矢印は主応力度の方向を示す.

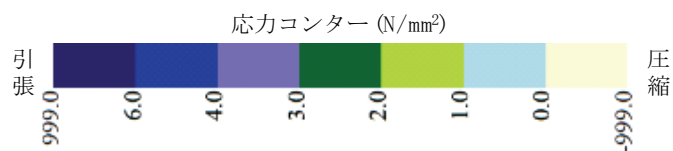
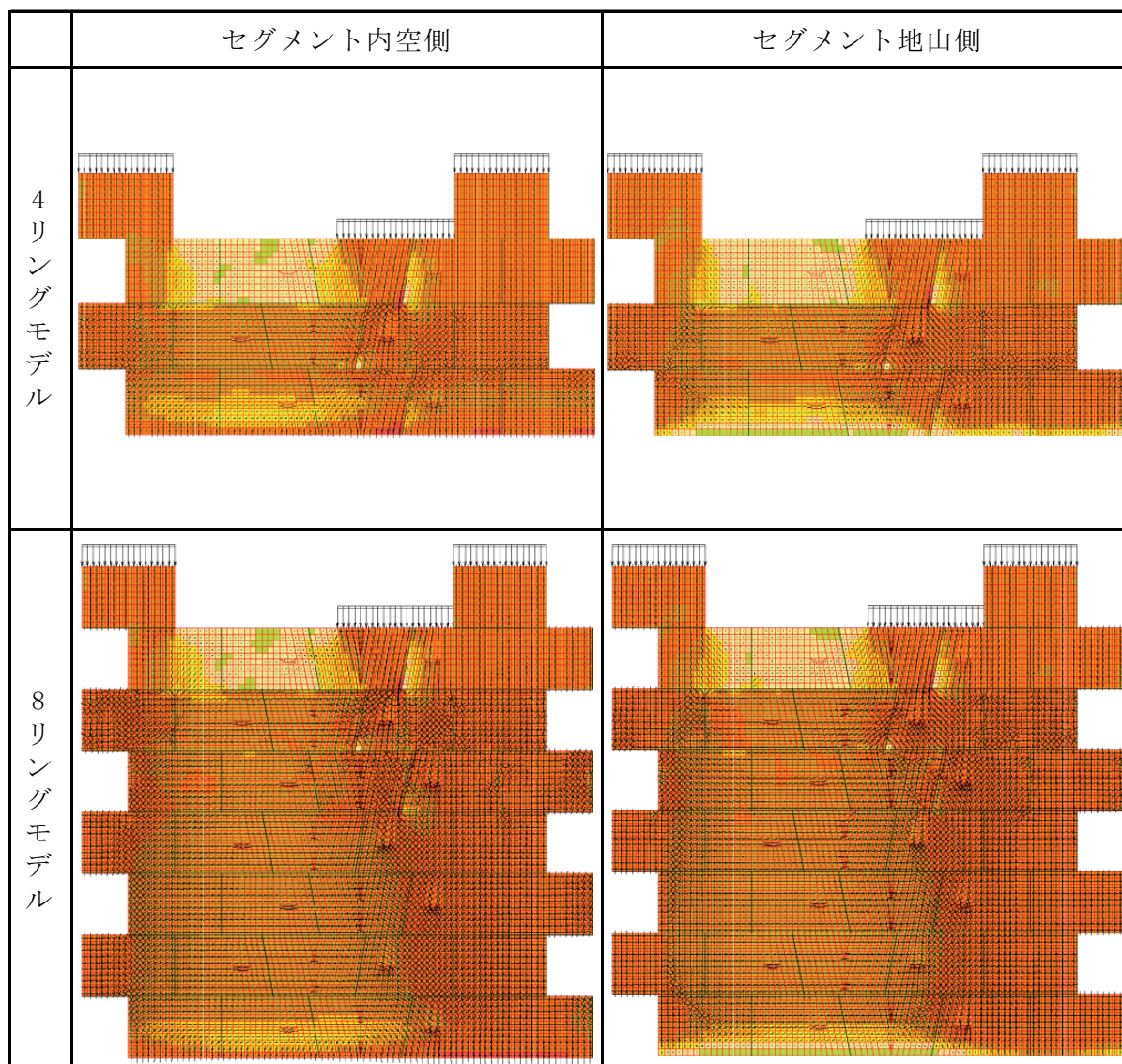


表-3. 4b 解析ケース 6 における 4 リングモデルと 8 リングモデルの解析結果
(圧縮応力度の分布)



※ 矢印は主応力度の方向を示す.

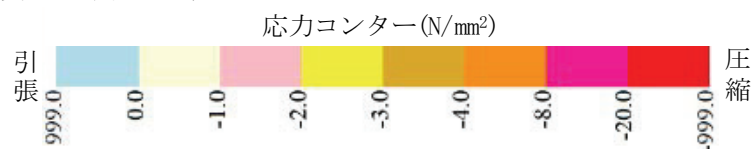
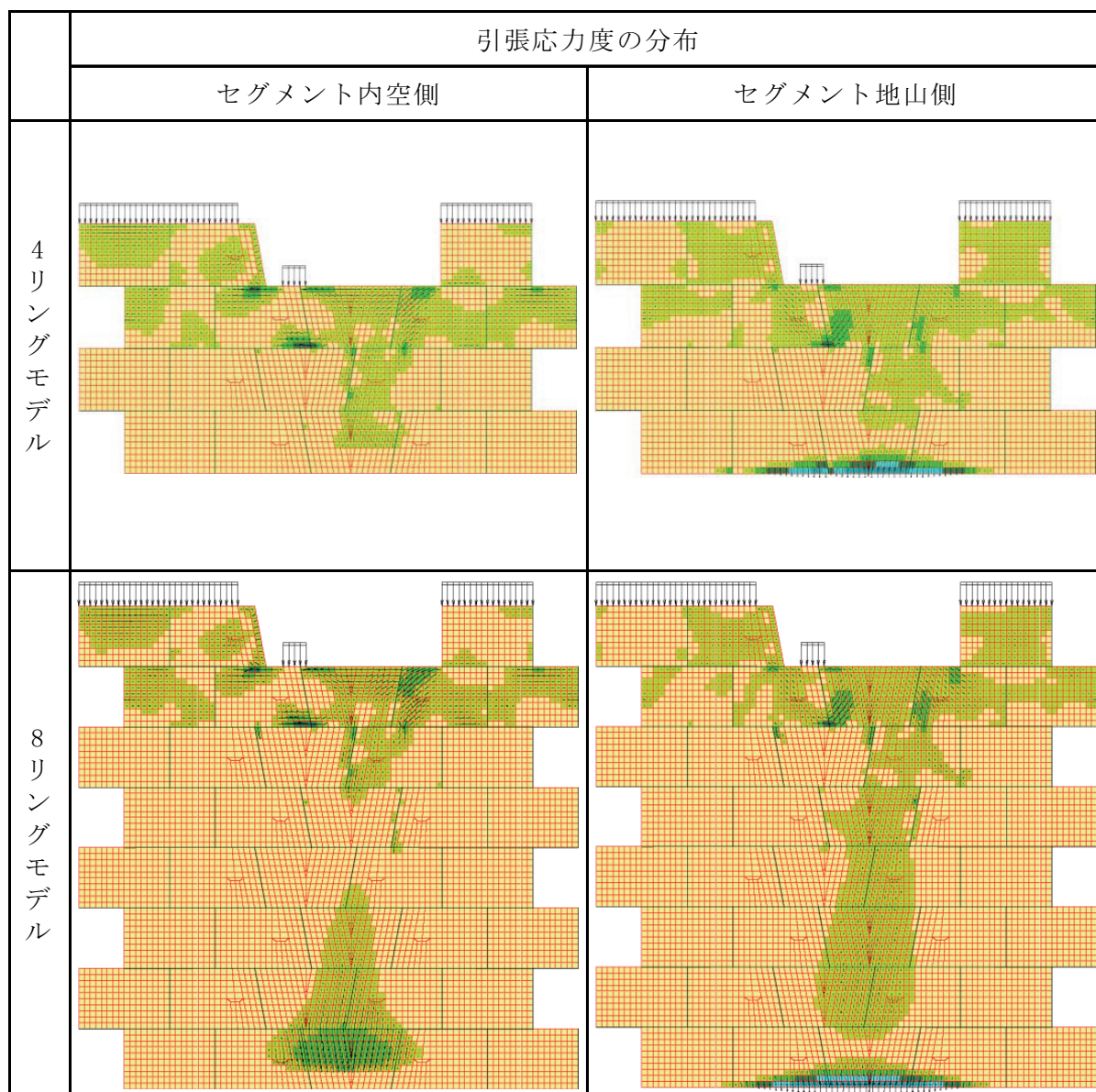


表-3.5a 解析ケース 8 における 4 リングモデルと 8 リングモデルの解析結果
(引張応力度の分布)



※ 矢印は主応力度の方向を示す.

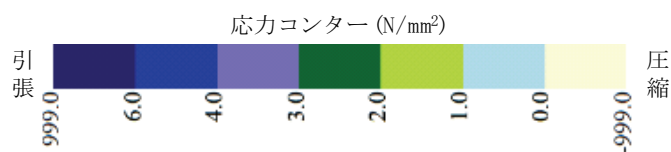
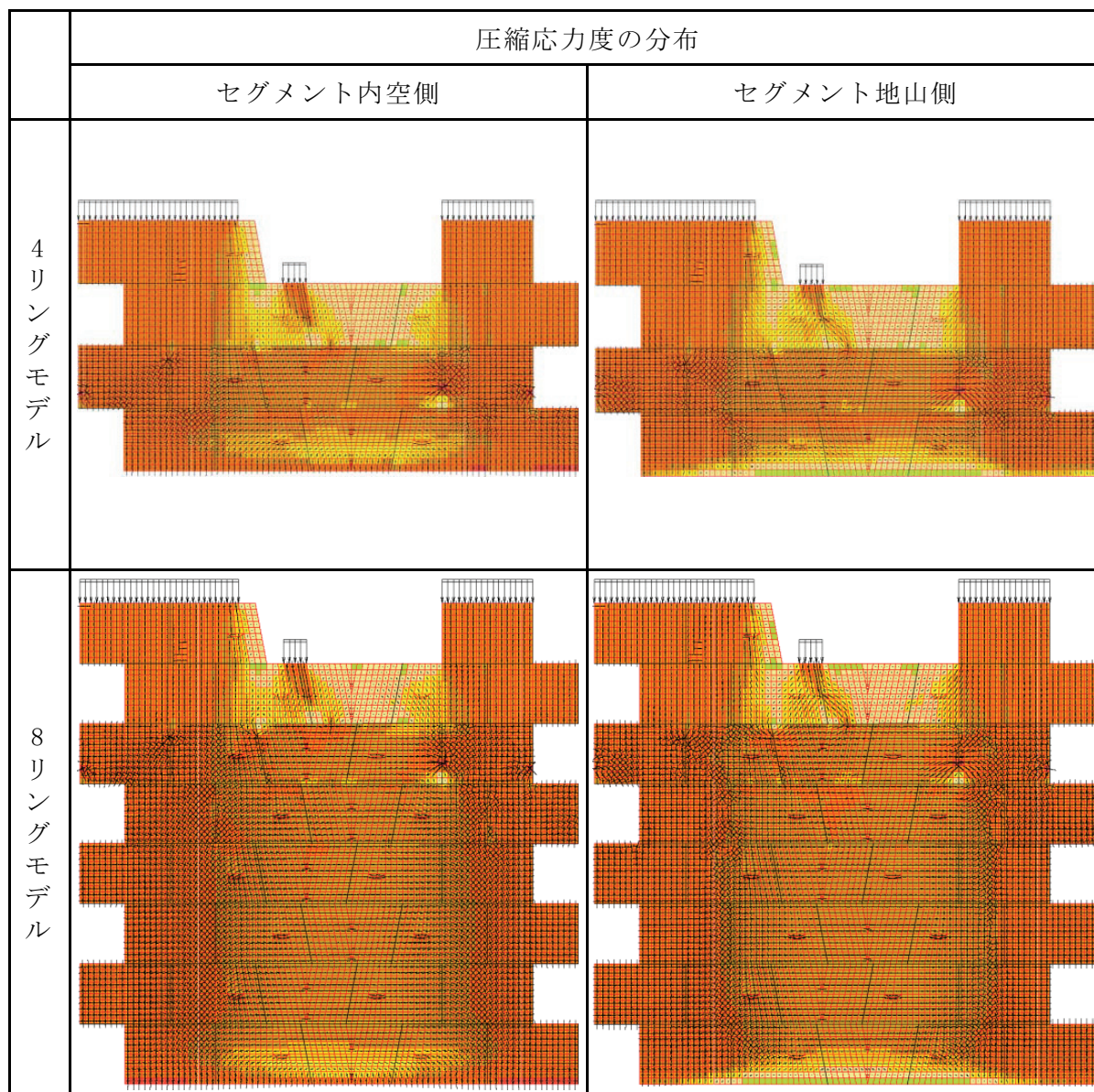
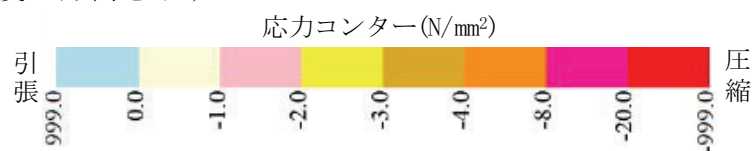


表-3.5b 解析ケース 8 における 4 リングモデルと 8 リングモデルの解析結果
(圧縮応力度の分布)



※ 矢印は主応力度の方向を示す.



示したものである．これらの比較の結果，Ring3 および Ring4 の応力状態はほぼ同等な結果になった．このことから，境界条件が解析結果に与える影響はないものと判断し，4 リングを対象とした解析モデルの Ring1 の坑口側では剛な境界条件を設定することとした．

3-3 解析結果

損傷の可能性がみられた解析ケースを抽出し，その原因について分析した．以下に分析の詳細を示す．

3-3-1 解析ケース 1 における B セグメントの鋭角部に生じる割れや欠け

解析ケース 1 で得られたセグメントの圧縮応力度の分布を図-3.6 に示す．この解析ケースでは，すべてのセグメントに均等なジャッキ推力が作用しているにもかかわらず，Ring3 の B セグメントの鋭角部に発生する圧縮応力度が極端に小さい結果となった．これは，図-3.7 に示すように，本研究の目的とは別の目的で実施された当該現場におけるセグメント内部の配力鉄筋におけるひずみ計測の結果と傾向が一致している．同図から，当該部にはジャッキ推力が作用しているにもかかわらず，ひずみが発生していない結果となっていることがわかる．

この事象は，K セグメントの挿入角が 15.4 度と比較的大きいことから，ジャッキ推力により生じる応力球根が B セグメントの鋭角部まで伝播しなかったものと思われ，K セグメントの形状に起因するものと考えられる．一方，テールシールによるトンネル半径方向の拘束を受ける Ring2 では，トンネル円周方向の圧縮応力度が卓越し，このような事象は確認できない．すなわち，Ring3 ではトンネル半径方向の拘束を受けないことから，セグメント同士の力の伝達あるいは変形の拘束が少ないことがその原因の一つと考えられる．

このように，Ring3 の位置では，B セグメントの鋭角部はジャッキ推力が伝播されずトンネル軸方向の拘束を受けない状態にある．このため，シール材の反発力等により微小な目開き量や目違い量を生じやすい状況にあると考えられる．したがって，図-2.18 に示したような K セグメントの挙動に関わらず，B セグメントの鋭角部は割れや欠けが生じやすい状態にあるものと推察される．

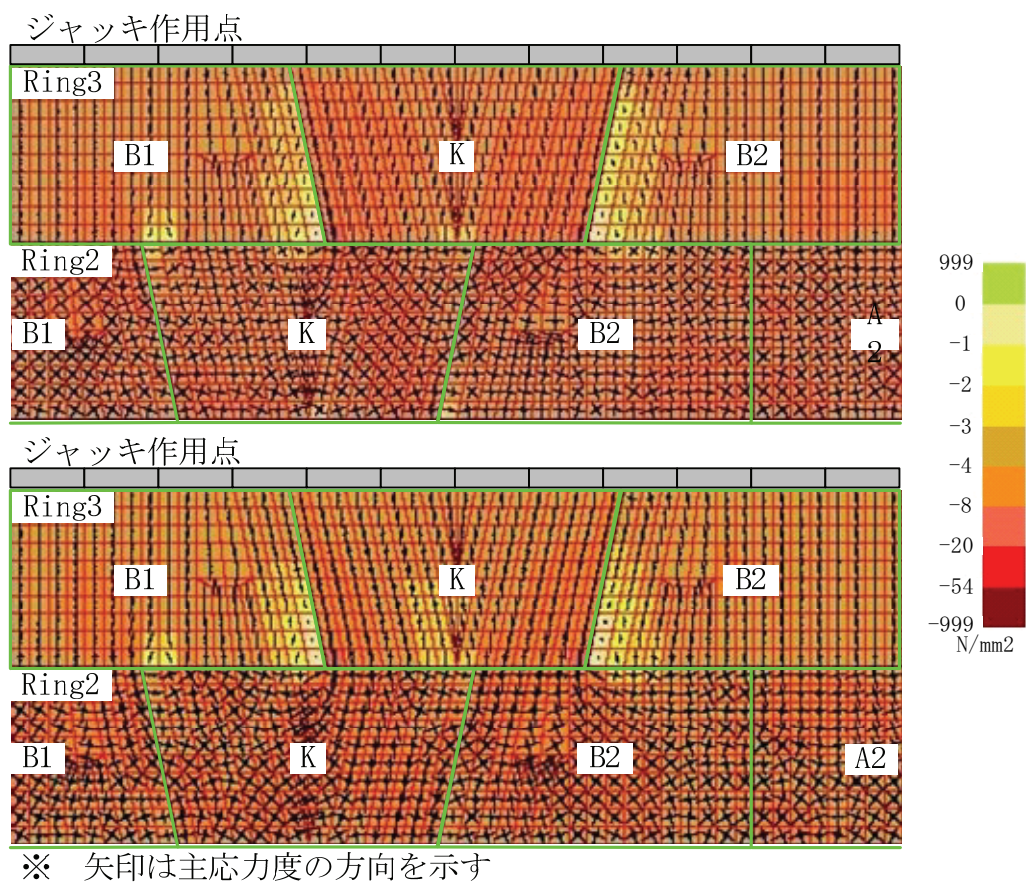
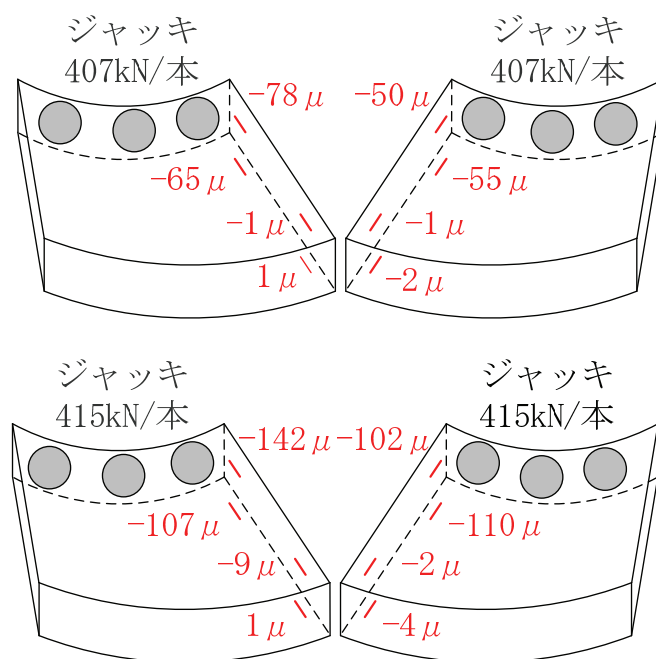


図-3.6 解析ケース 1 における圧縮応力度の分布(上：内空側，下：地山側)



(上：富津工区，下：扇島工区)

図-3.7 Bセグメントの鋭角部に発生する配力鉄筋のひずみ

3-3-2 解析ケース1および解析ケース9におけるKセグメントの切羽側に生じるトンネル軸方向のひび割れ

解析ケース1で得られたセグメントの引張応力度の分布を図-3.8に示す. この解析ケースでは, すべてのセグメントに均等なジャッキ推力が作用しているにもかかわらず, Ring3のKセグメントの切羽側では, トンネルの内空側にコンクリートの引張強度 3.3N/mm^2 に近いトンネル円周方向の引張応力度約 3N/mm^2 が発生する結果となった.

この事象は, 変位図から説明することができる. 図-3.9はRing3の坑口側と切羽側の節点におけるトンネル半径方向の変位を示したものである. すべてのジャッキが作用しているにもかかわらず, とくに, Kセグメントの切羽側は, 自重の作用方向がトンネル半径方向と合致するトンネル天端付近において変位量が大きくなり, トンネル円周方向に面外方向の曲げが発生していることがわかる. これは, Kセグメントの形状によるものと考えられる. すなわち, Kセグメントは切

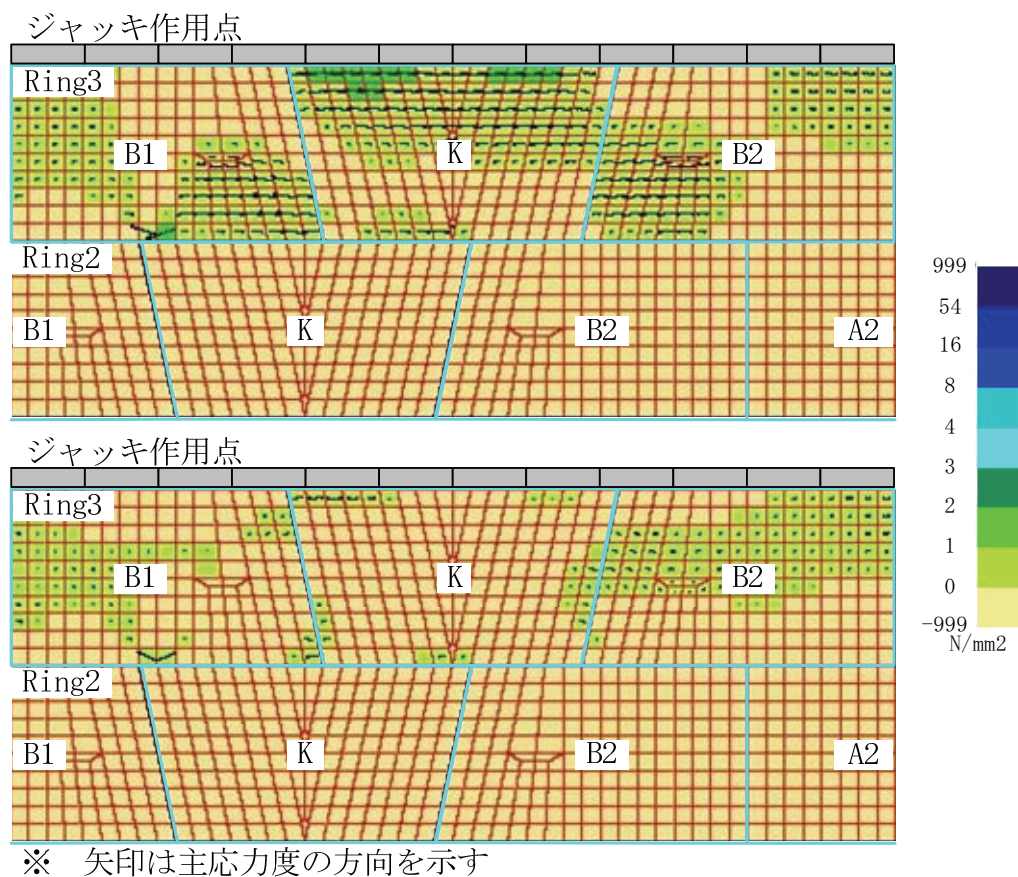


図-3.8 解析ケース1における引張応力度の分布(上:内空側, 下:地山側)

羽側の方が坑口側より弧長が大きいいため、切羽側ではトンネル半径方向の変位がより大きく自重の影響を受けるためと考えられる。また、図-3.10はRing3のKセグメントの外周の節点におけるトンネル円周方向と軸方向の変位を示したものである。同図から、ジャッキの作用により切羽側ではBセグメント側に変位していることがわかる。とくに、切羽側の端部の節点は中央部の節点と比較してトンネル軸方向にもより大きく変位しているため、トンネル円周方向に面内方向の曲げが発生していることがわかる。これは、Kセグメントの挿入角の大きさが原因と考えられ、同じ大きさのジャッキ推力でも鋭角部ではより大きくジャッキ推力の影響を受けるためと考えられる。以上のことから、Ring3のKセグメントの切羽側では、その内空側にトンネル円周方向の引張応力が発生するものと考えられる。

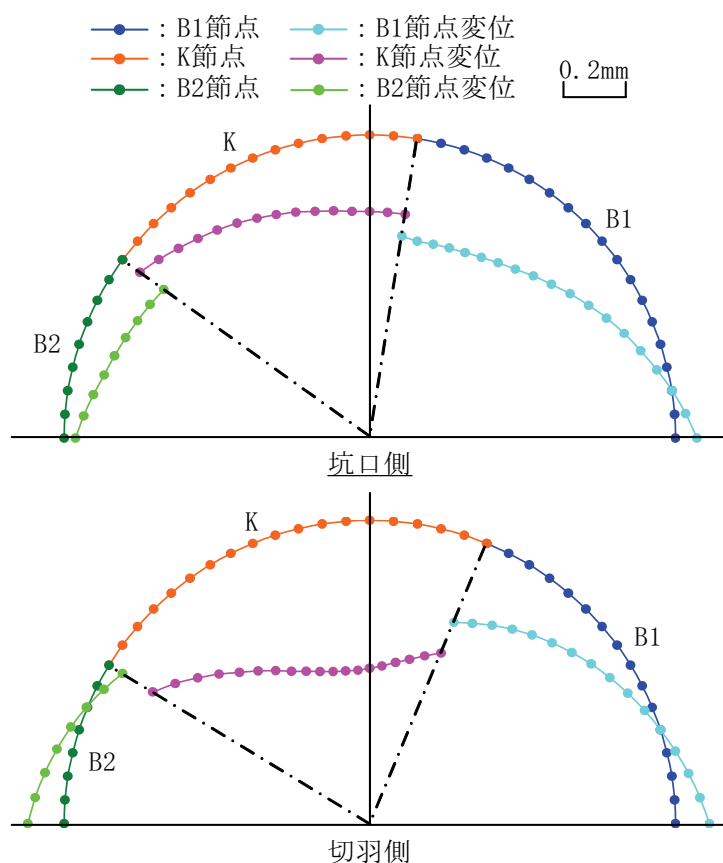


図-3.9 Ring3のトンネル半径方向の変位(解析ケース1)

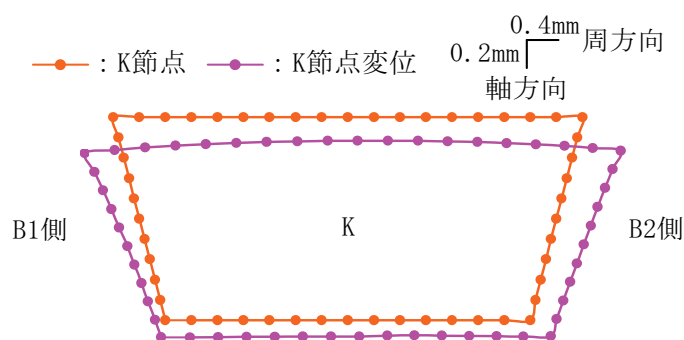


図-3.10 Ring3 の K セグメントのトンネル周方向および
トンネル軸方向の変位(解析ケース 1)

つぎに、解析ケース 9 で得られたセグメントの引張応力度の分布を図-3.11 に示す。このケースでは、Kセグメントの切羽側の中央部で、その内空側に発生するトンネル円周方向の引張応力度がコンクリートの引張強度相当になっていることがわかる。これは、ジャッキ推力がKセグメントの両端部にのみ作用する状態であり、解析ケース 1 と比較すると、自重の影響を受けやすく、かつジャッキ推力の影響も受けやすい状態にあるためと考えられる。この結果、トンネル円周方向の面外の曲げと面内の曲げの影響がKセグメントの中央部で大きくなるものと思われる。

このように、Kセグメントの切羽側では組立て誤差のない理想的な状態においても、内空側ではトンネル円周方向にコンクリートの引張強度に近い引張応力度が発生するケースがある。一方、2-5 節に示した現場観察の記録では、N+1 リングあるいは N+2 リングの掘進時に、観察リング(N リング)のKセグメントの切羽側の中央部にひび割れが発生する場合があることを述べた。これは、図-2.24 に示したように、Kセグメントの挙動により支点が発生することでひび割れを生じる可能性があることを指摘したが、Kセグメントの形状から、ジャッキ推力が作用すると切羽側ではトンネル円周方向の引張応力が発生しやすい状態にあることも、原因の一つであると考えられる。すなわち、支点の発生の有無にかかわらず、ジャッキ推力がさらに大きくなるような場合には、同位置にひび割れが発生する可能性が高くなるものと推察できる。

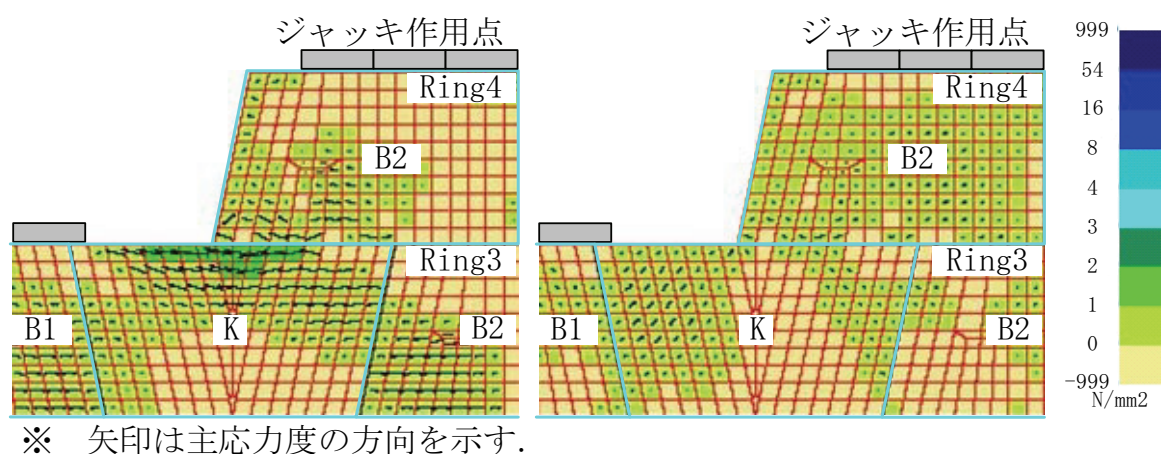


図-3.11 解析ケース 9 における引張応力度の分布 (左：内空側，右：地山側)

3-3-3 解析ケース 8 における B セグメントの切羽側に生じるトンネル軸方向のひび割れ

解析ケース 8 で得られたセグメントの引張応力度の分布を図 3-12 に示す。同図から、Ring3 の B1 セグメントの切羽側の中央部で、とくにその内空側ではトンネル円周方向の引張応力度がコンクリートの引張強度に近い 3N/mm^2 程度発生していることがわかる。これは、図-3.13 に示すように、ジャッキの作用スパンが小さい状態でジャッキ推力が作用するために、応力球根の間に局所的な引張応力度が発生するものと考えられる。

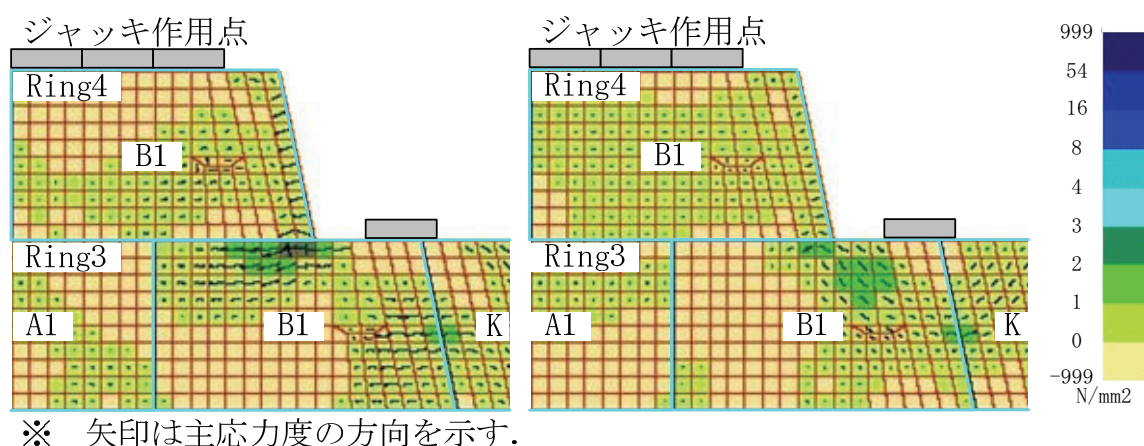


図-3.12 解析ケース 8 における引張応力度の分布 (左：内空側，右：地山側)

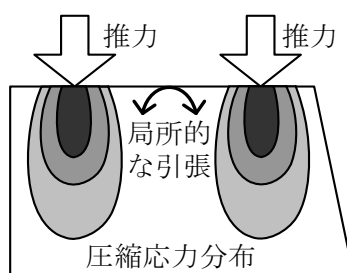


図-3.13 ジャッキ推力が作用するスパンと局所的な引張応力度の発生

このように、ジャッキの作用スパンが小さい状態でジャッキ推力が作用する場合には、コンクリートの引張強度に近いトンネル円周方向の引張応力度が発生する可能性がある。この損傷については、2-5 節で示した現場観察の記録においては確認できなかったが、ジャッキ推力が大きくなると、当該箇所のひび割れの可能性は否定できないものになると考えられる。

3-4 まとめ

実際の施工ステップを模擬した三次元シェルばねモデルによる FEM 解析を行い、各施工ステップで得られた応力状態および変形状態を分析することで、以下のことがわかった。

- ① Bセグメントの鋭角部にはジャッキ推力が伝播しないことがわかった。これは Kセグメントの挿入角の大きさにより、ジャッキ推力が伝播しにくい形状であるためと考えられる。このため、シール材の反発力により微小な目開き量や目違い量を生じる可能性があり、組立て誤差のない理想的な状態においても割れや欠けが発生しやすい状態にあるものと推察される。
- ② Kセグメントの切羽側では、ジャッキ推力が作用するとその内空側にトンネル円周方向の引張応力が卓越して発生することがわかった。これは、Kセグメントの形状によるもので、トンネル円周方向の面外および面内の曲げが発生し、その影響が切羽側の中央部で大きくなるためと考えられる。このため、組立て誤差のない理想的な状態においても、Kセグメントの切羽側では、その内空側にトンネル軸方向のひび割れを生じやすい状態にあるものと推察される。

- ③ジャッキの作用スパンが小さい状態でジャッキ推力が作用すると、そのスパンの中央部には内空側にトンネル円周方向に引張応力が卓越して発生することがわかった。これにより、トンネル軸方向のひび割れを生じる可能性があることがわかった。
- ④実施工で観察されたセグメントの損傷は、第2章で示した計測結果を本章で示した解析結果から説明することができた。損傷の原因は、Kセグメントの形状、継手の締結力やその剛性などに加えて、施工条件、とくにKセグメントの組立て位置、ジャッキの配置とその押し引き、テールシールの位置や剛性などが組み合わさって生じていることがわかった。

参考文献

- 1) 齊藤仁，中島崇，竹林基，白井伸一：東京湾海底下七号地層におけるセグメントの荷重計測結果について，土木学会第60回年次学術講演会，pp.219-220，2005.9.
- 2) 竹内友章，江森吉洋，須田悦弘，小泉淳：シールドトンネル施工時のジャッキ推力による覆工への影響について，土木学会論文集 F，Vol.66，No.4，pp.599-611，2010.11.
- 3) 田嶋仁志，岸田政彦，深井直光，齊藤正幸：三次元 FEM モデルを用いたシールドトンネルの施工時荷重に関する検討，トンネル工学報告集，第14巻，pp.353-360，2004.

第 4 章 K セグメントの形状に着目したセグメント の損傷抑制策の分析

第4章 Kセグメントの形状に着目したセグメントの損傷抑制策の分析

4-1 はじめに

第2章では、Kセグメントに着目した現場計測結果から、セグメントは精度よく組み立てられたとしても、その後のジャッキの押し引きにより微小な変位を繰り返し、その過程において損傷を生じる可能性があることを示した。また、この微小な変位はKセグメントの形状にも起因していることを示した。

第3章では、三次元シェルばねモデルによるFEM解析結果から、施工ステップによっては、Kセグメントの挿入角の大きさに起因する特異な応力状態が発生し、損傷を生じる可能性があることを示した。

以上のことから、セグメントの損傷にはKセグメントの形状が大きく影響するものと考えられる。したがって、本章では、Kセグメントの形状に着目し、Kセグメントの弧長の大きさ、および挿入角の大きさをパラメータとした三次元シェルばねモデルによるFEM解析を行い、その結果を比較分析することとした。また、比較分析により、損傷に対するKセグメントの形状の影響の程度を定量的に評価するとともに、損傷の抑制効果について考察を加えた。なお、本章で行った三次元シェルばねモデルの解析モデルは3-2節で示した解析モデルと同じものとした。

4-2 解析条件の設定

4-2-1 Kセグメントの形状の設定

Kセグメントの弧長および挿入角の大きさは、主にセグメントの分割数およびエレクターによるトンネル軸方向の挿入代によって決定される。本検討においては、第2章で示した現場で用いられたセグメントと内径、幅、厚さ、および継手形式を同じ条件とし、弧長ならびに挿入角をパラメータとして、表-4.1に示す解析ケースを設定することとした。なお、いずれの解析ケースも継手角度は10度程度を想定するものとし、解析ケース1は現場条件と弧長ならびに挿入角も同じ条件にしたものである。

表-4.1 解析ケースの設定

解析ケース		1	2	3	4	5
分割数		等 5 分割※ ¹	等 5 分割※ ¹	等 6 分割	等 5 分割※ ¹	5 分割
エレクターの 挿入代		500mm 相当	500mm 相当	500mm 相当	800mm 相当	800mm 相当
挿入角※ ²		11.9°	11.9°	11.9°	8.0°	2.8°
弧長	切羽側	2276mm	2023mm	1939mm	2192mm	839mm
	坑口側	1770mm	1517mm	1433mm	1855mm	717mm

※¹ 解析ケース 1 および 4 はセグメントの幅方向の中央部で等 5 分割とし、解析ケース 2 はセグメントの幅方向の切羽面で等 5 分割とした。

※² 挿入角は平面に投影した場合の角度である。

4-2-2 解析上の留意点

表-4.2 は各解析ケースの要素数を示したものである。とくに、トンネル円周方向の要素数は、セグメントの分割数、挿入角、リング継手の位置、千鳥組の状況、およびジャッキの配置を考慮して設定したものである。なお、ジャッキの本数はすべてのケースで 20 本とした。

解析ケース 3 および解析ケース 5 は、トンネル円周方向の要素数を決定するためのすべての条件を満たすことが困難であったことから、図-4.1 に示すように、KセグメントとBセグメントの一部で要素の幅を調整した。このため、ジャッキ 1 本あたりの作用幅が本来の施工条件と異なることから、図-4.2 に示すように、当該の要素に作用するジャッキ推力は要素の幅に応じて比例配分して作用させることとした。

表-4.2 各解析ケースの 1 リングあたりの要素数

解析ケース		1	2	3	4	5
トンネル 円周方向	要素数	80	80	120	120	104
	要素幅 (mm)	126	126	84	84	97
トンネル 軸方向	要素数	10				
	要素幅 (mm)	120				

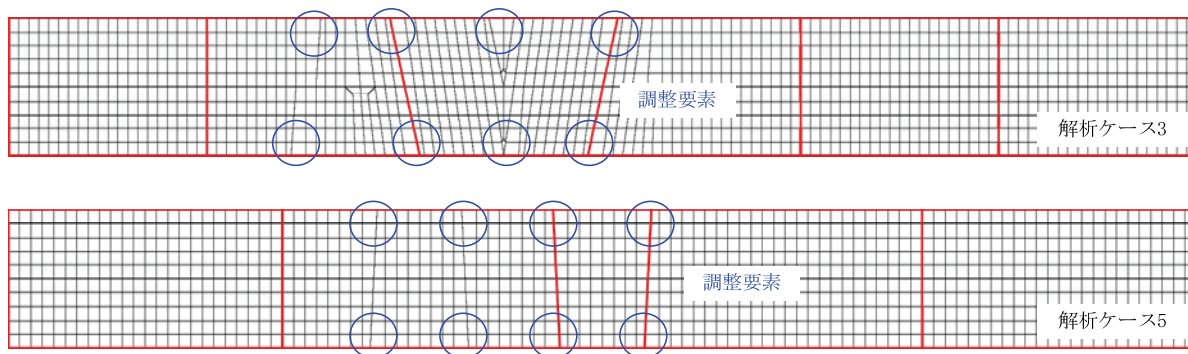


図-4.1 調整要素の位置図(1 リングの展開図)

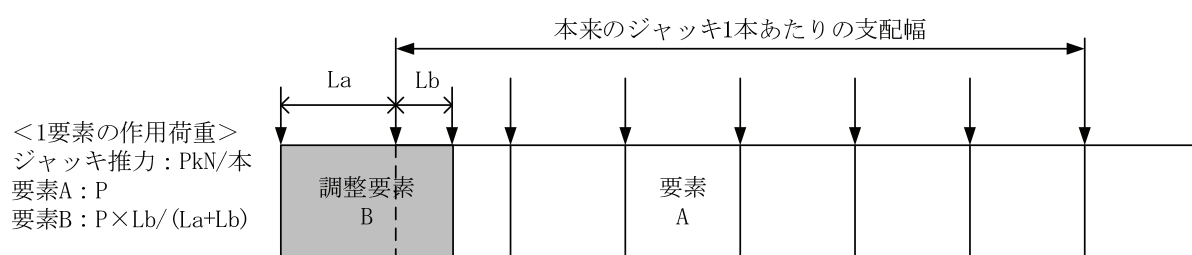


図-4.2 調整要素に作用するジャッキ推力の考え方

4-2-3 解析上の施工ステップ

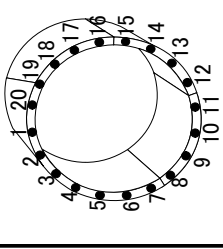
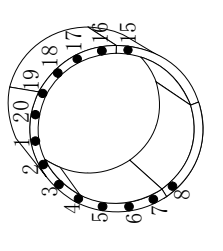
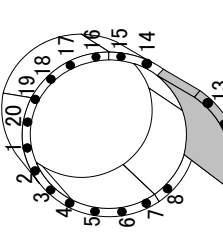
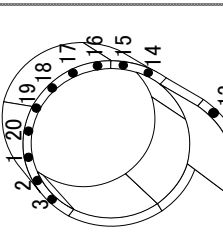
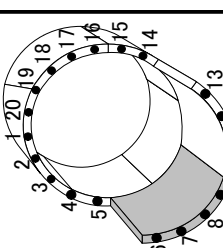
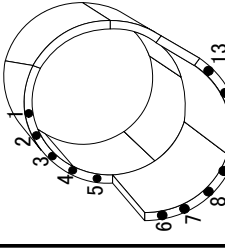
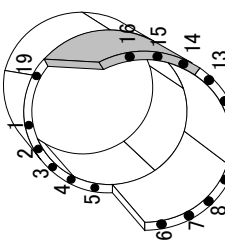
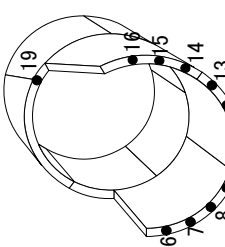
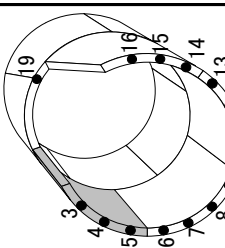
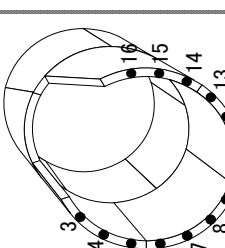
解析には施工ステップを考慮した。施工ステップは、3-2-2 節で示した施工ケースと同様に、掘進時(1 ステップ)と組立て時(10 もしくは 12 ステップ：セグメント 1 ピースの組立てに対しジャッキの引き戻し過程と押しあて過程の 2 ステップがある)とし、解析においてはそれぞれが独立した施工ステップとした。

表-4.3 は解析ケース 1 における施工ステップごとのジャッキ推力およびその作用点を示したもので、第 3 章で示した表-3.1 と同様のものである。そのほかの解析ケースについても、表-4.3 と同様に施工ステップごとのジャッキ推力およびその作用点を設定している。

4-3 解析結果

損傷の可能性がみられた施工ステップを抽出し、解析ケースの違いによる応力状態の相対的な比較や応力状態の違いについて分析した。

表-4.3 解析ケース1における施工ステップごとのジャッキの作用点および作用力

施工 ステップ	1		2		3		4		5			
	掘進時	Ring4	A1セグメント組立て時		A2セグメント組立て時		ジャッキ引き戻し		ジャッキ押しあて			
			ジャッキ引き戻し		ジャッキ押しあて		ジャッキ引き戻し		ジャッキ押しあて			
			442.9 kN/本		326.3 kN/本		442.9 kN/本		310.0 kN/本			
推力	415.0 kN/本											
施工 ステップ	6		7		8		9		10		11	
	掘進時	B1セグメント組立て時	ジャッキ押しあて		ジャッキ引き戻し		B2セグメント組立て時		Kセグメント組立て時		ジャッキ押しあて	
			ジャッキ引き戻し		ジャッキ押しあて		ジャッキ引き戻し		ジャッキ押しあて			
			476.9 kN/本		364.7 kN/本		516.7 kN/本		413.3 kN/本		442.9 kN/本	
推力	476.9 kN/本											
作用点												

※ ●：ジャッキ作用点

4-3-1 施工ステップ2におけるBセグメントの鋭角部の応力状態

施工ステップ2であるA1セグメントを組み立てる際のジャッキの引き戻し時は、BセグメントとKセグメントに同時にすべてのジャッキが作用し、かつ最大のジャッキ推力となる施工ステップである。この施工ステップにおいては、3-3-1節で示したように、Bセグメントの鋭角部にジャッキ推力が伝播されないような応力状態がみられる。図-4.3および図-4.4はRing3の位置でセグメントに発生する圧縮応力度の分布を示したものである。これらの図から、挿入角が等しく弧長が異なる解析ケース1～3については、Bセグメント鋭角部の応力状態に大きな差異は認められないが、挿入角を小さくした解析ケース4,5では、当該部に分布する圧縮応力度の範囲が大きくなる傾向にあることがわかる。この結果は、Ring3のBセグメントとKセグメントとの間のジョイント要素の状態から説明することができる。図-4.5は、当該部のジョイント要素の状態を示したものである。ここで、図-4.5に示すジョイント要素のONとOFFとはつぎのとおりである。

- ・ONの状態：圧縮側のばねが作用してセグメント同士の力の伝達がある状態
- ・OFFの状態：圧縮側のばねが作用せずセグメント同士の力の伝達がない状態

図-4.5から、BセグメントとKセグメントとの間のジョイント要素は、セグメント継手の位置以外では解析ケースによらずほとんどがOFFの状態になっていることがわかる。すなわち、ジャッキ推力が作用することにより、セグメント継手面では目開きを生じるように変形するものと考えられ、それぞれのセグメントが単体で変位するような状態にあると思われる。このことから、図-4.3、図-4.4に示したように、KセグメントからBセグメントにジャッキ推力による圧縮応力度がほとんど伝播されないことが説明できる。一方で、解析ケース4,5では、挿入角が小さいことから、結果として、Bセグメント単体でジャッキ推力により作用する圧縮応力度がその鋭角部にまで伝播されたものと推定される。

4-3-2 施工ステップ2におけるKセグメントの切羽側の応力状態

施工ステップ2では、前節で示したような特異な応力状態以外に、3-3-2節で示したように、Kセグメントの切羽側では、内空側にトンネル円周方向の引張応力度が発生する。図-4.6、図-4.7はRing3の位置でセグメントに発生する引張応力度の分布を示したものである。これらの図から、前節と同様に、挿入角が等し

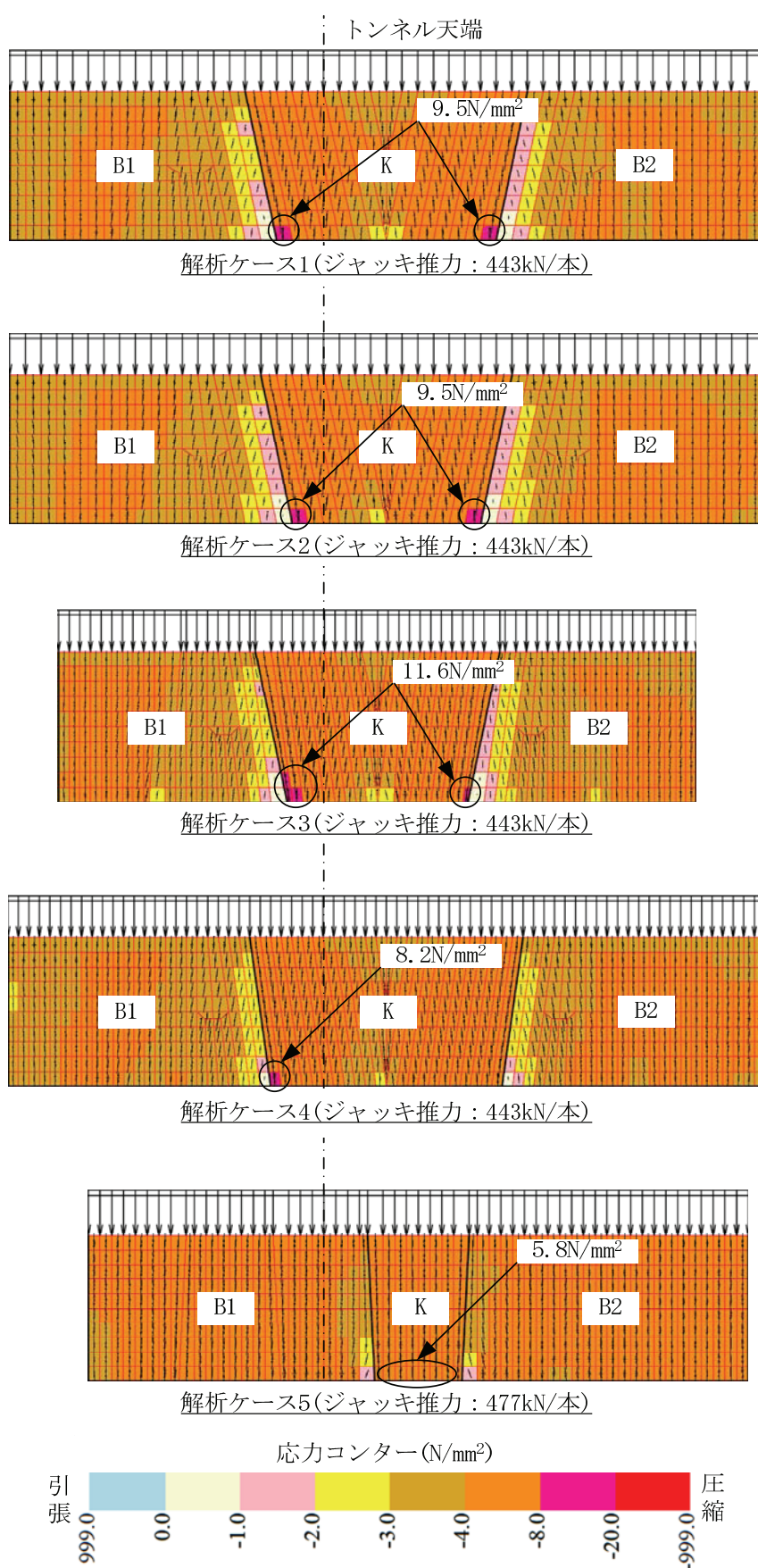


図-4.3 施工ステップ2における内空側の圧縮応力度の分布

第4章 Kセグメントの形状に着目したセグメントの損傷抑制策の分析

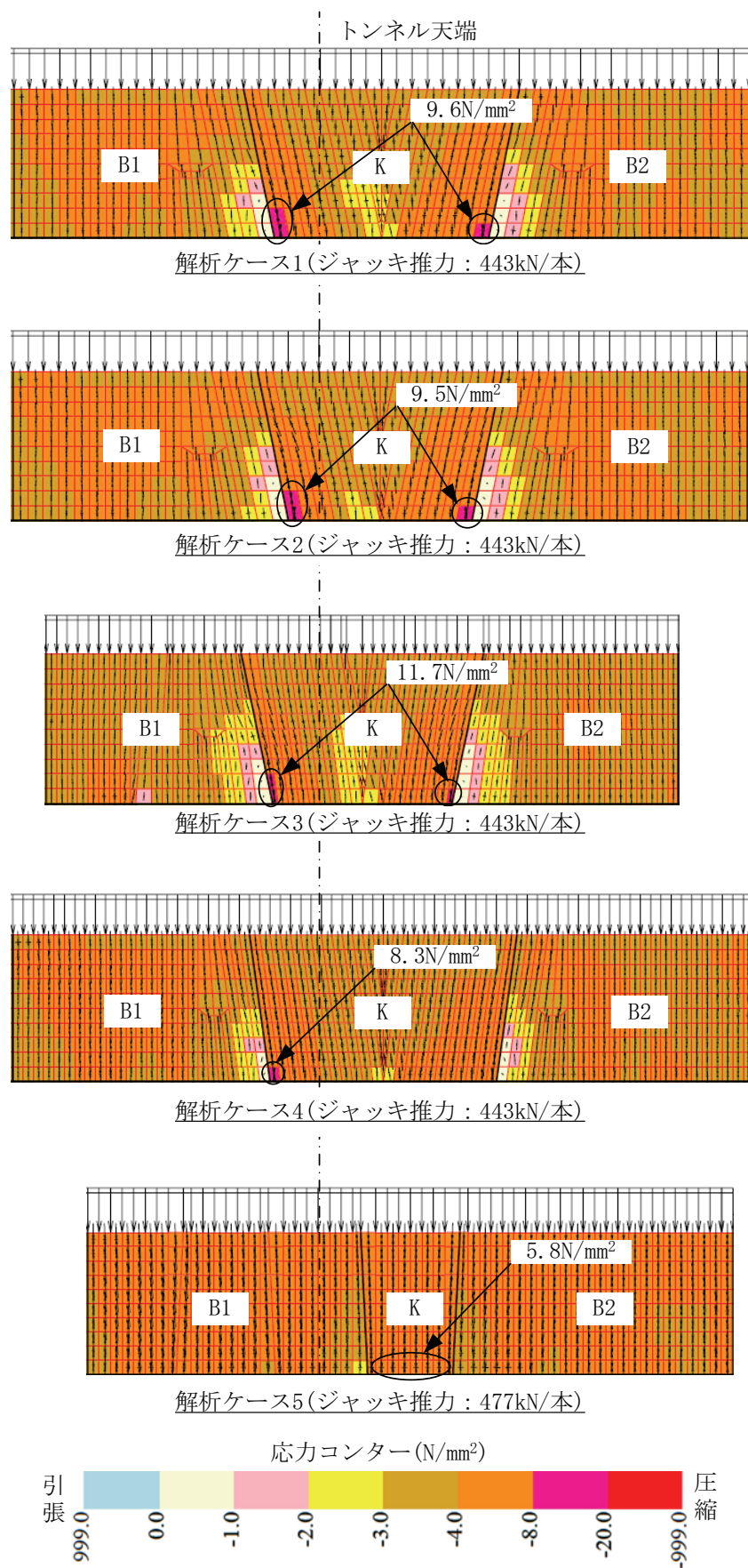


図-4.4 施工ステップ2における地山側の圧縮応力度の分布

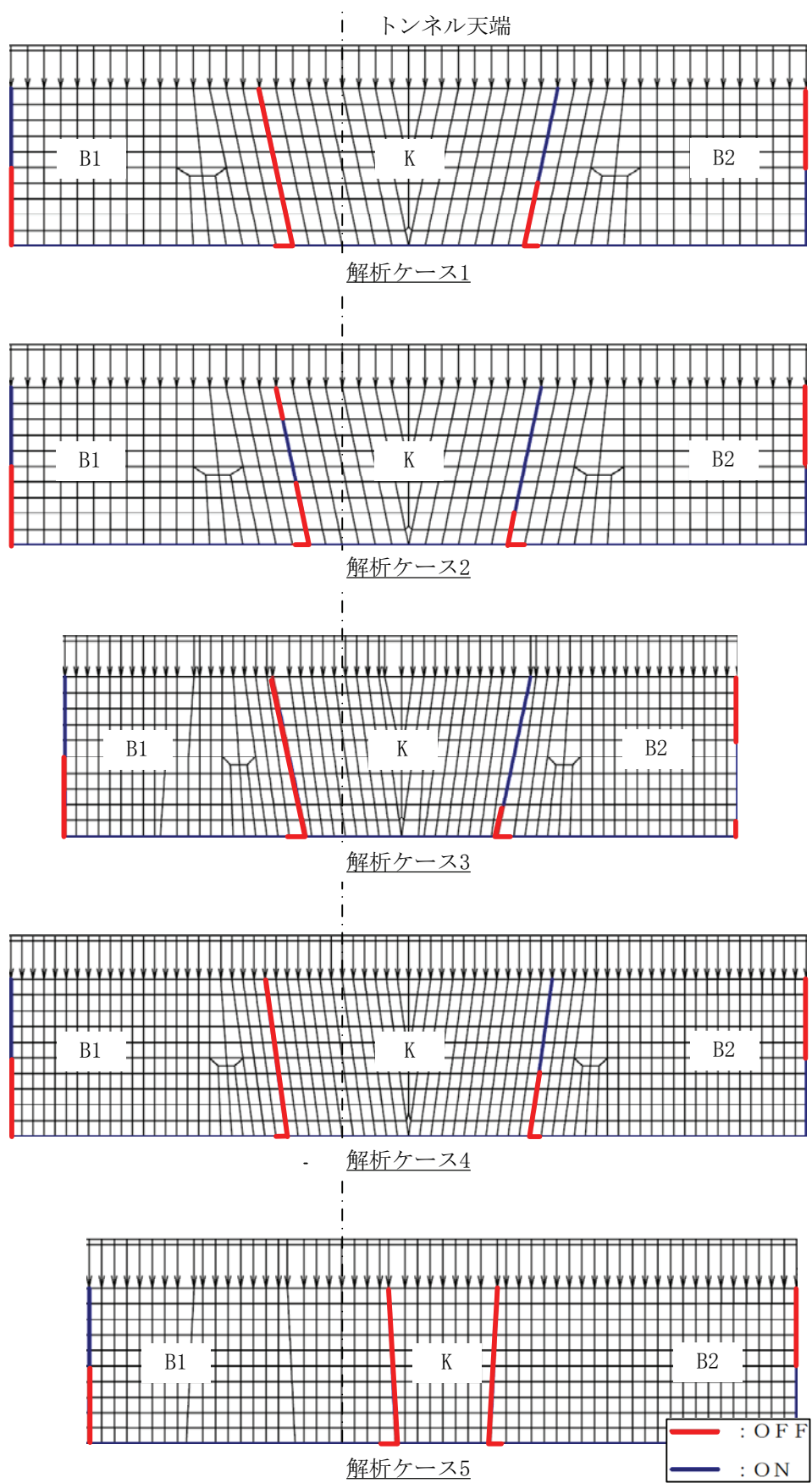


図-4.5 ジョイント要素の状態

第4章 Kセグメントの形状に着目したセグメントの損傷抑制策の分析

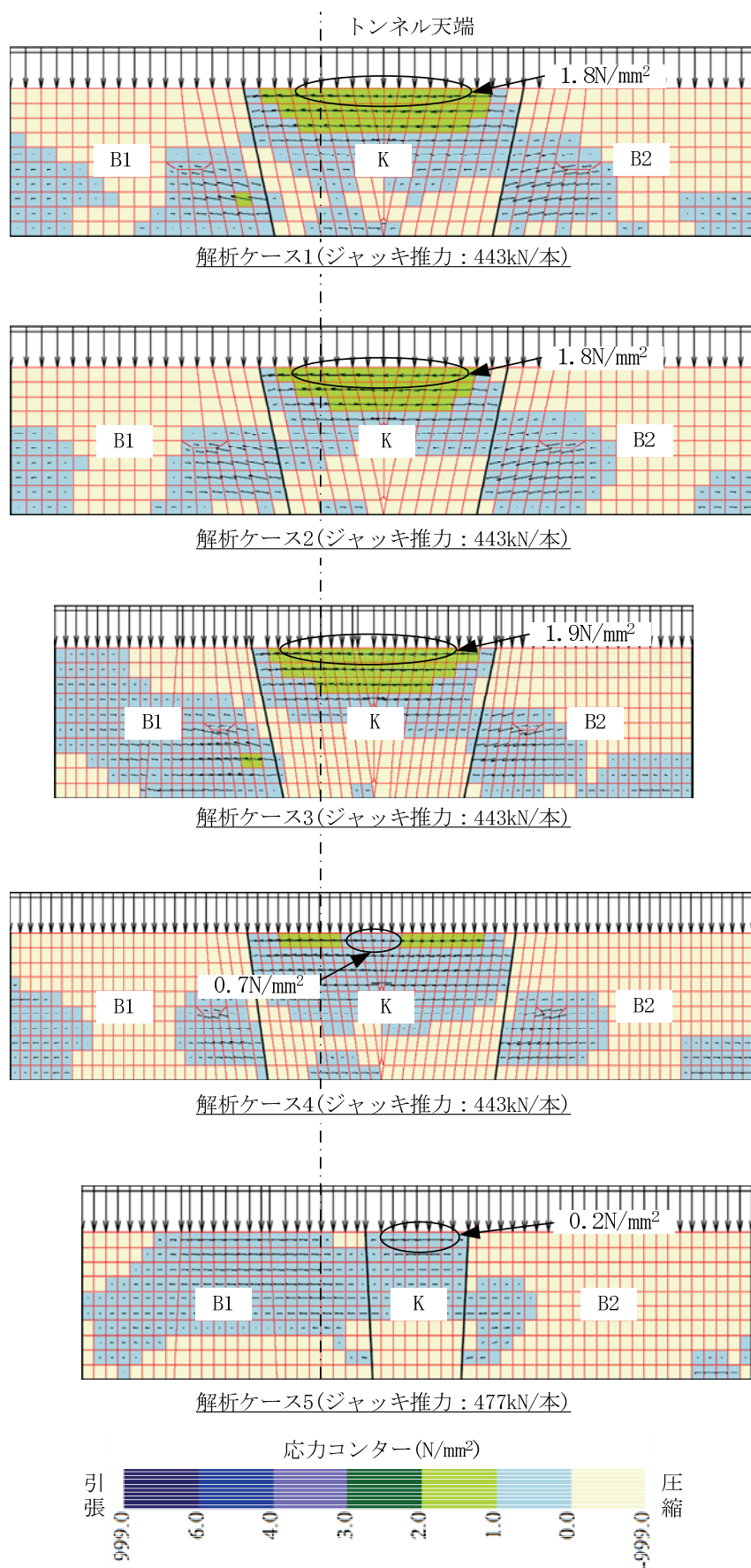


図-4.6 施工ステップ2における内空側の引張応力度の分布

第4章 Kセグメントの形状に着目したセグメントの損傷抑制策の分析

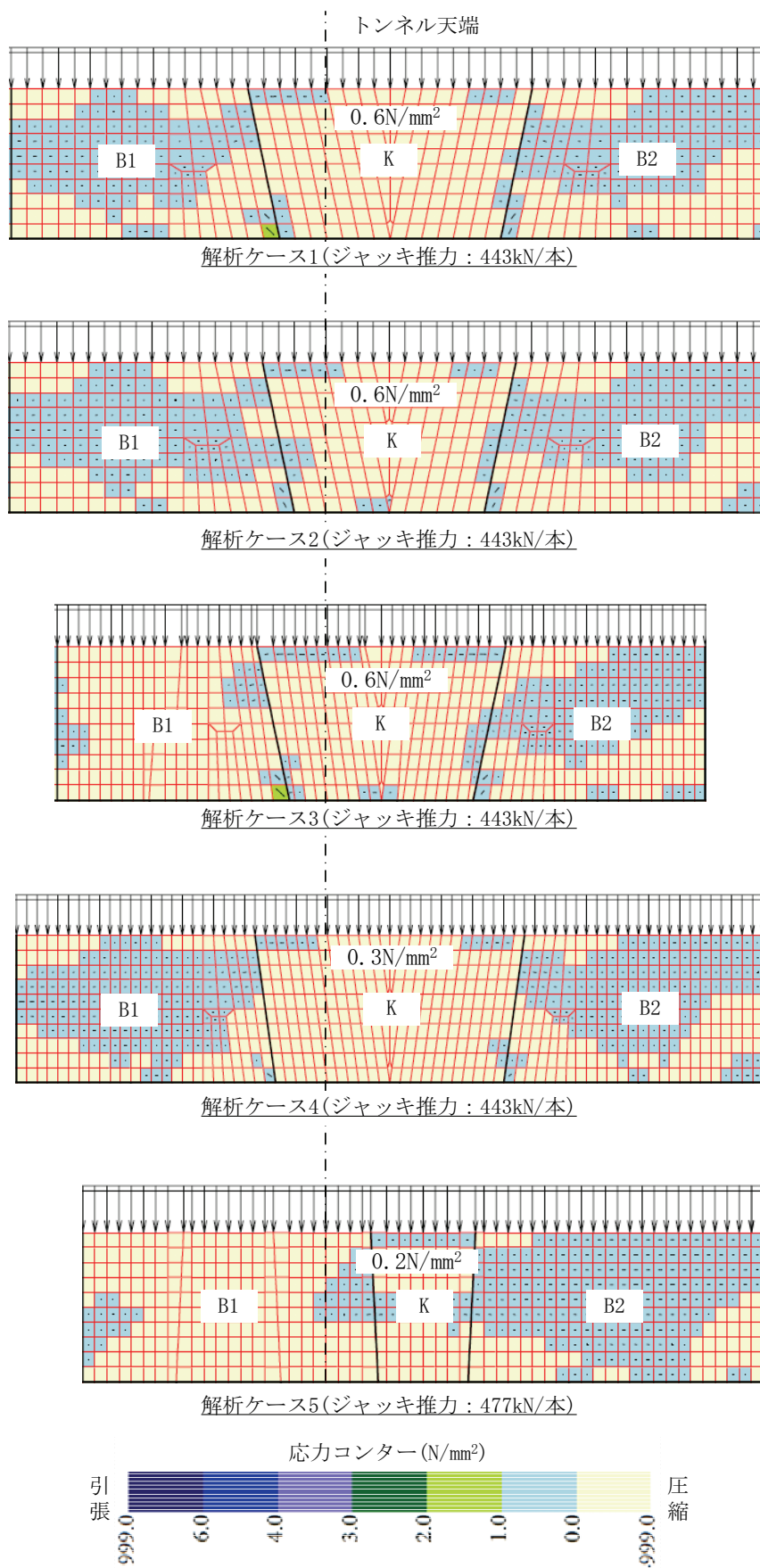


図-4.7 施工ステップ2における地山側の引張応力度の分布

く弧長が異なる解析ケース1～3については、Kセグメントの切羽側の応力状態に大きな差異は認められないが、挿入角を小さくした解析ケース4, 5では、当該部に生じる引張応力度が減少する傾向にあることがわかる。この結果は、セグメントの変形状態から説明することができる。図-4.8は、当該部であるRing3のKセグメントの外周にある節点におけるトンネル軸方向とトンネル円周方向の変形状態を示したものである。また、図-4.9は、Ring3の切羽側の節点におけるトンネル半径方向の変形状態を示したものである。なお、両図ともに挿入角の違いによる結果を比較するために、分割形状がほぼ等しく、かつジャッキ推力の作用位置および推力が等しい解析ケース1および解析ケース4を抽出して示している。

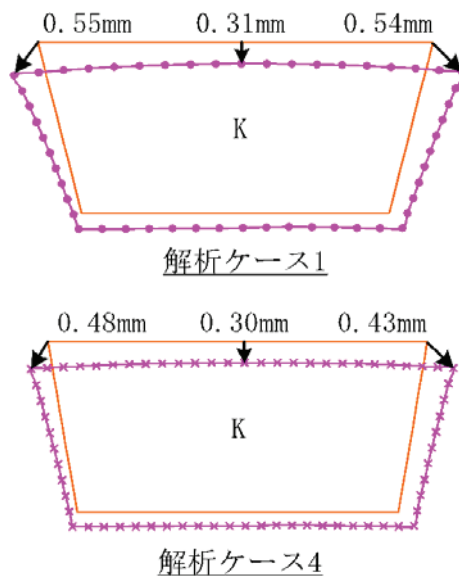


図-4.8 Kセグメントの外周にある節点における
トンネル軸方向および円周方向の変形図

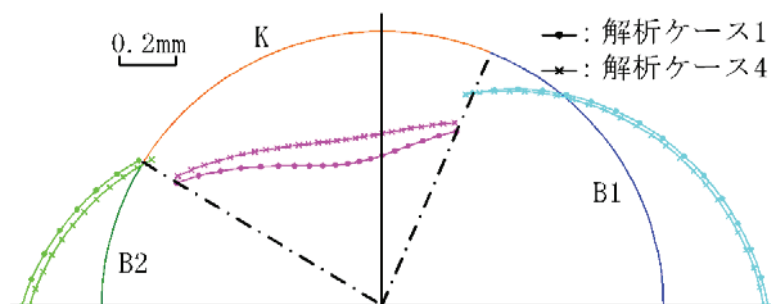


図-4.9 Ring3の切羽側の節点におけるトンネル半径方向の変形図

図-4.8 から、切羽側の中央部の節点では、両解析ケースの変形量はほぼ等しいが、両端部の節点では挿入角の大きい解析ケース1の方が大きくなっていることがわかる。これは、図-4.5 に示したように、KセグメントとBセグメントとの間のジョイント要素がほとんど OFF の状態になっていることから、Kセグメントの両端部に作用するジャッキ推力をBセグメントに伝播することができないことを示している。このため、当該部に発生する変位量が大きくなるものと考えられ、挿入角が大きくなるほどその影響が顕著になるものと考えられる。

また、図-4.9 に示すように、Kセグメントは自重の影響によりトンネル内空側の半径方向に変形することがわかるが、とくに挿入角の大きい解析ケース1では、切羽側の中央部で局所的に大きな変形を生じている。これは、前述したKセグメントの両端部の節点におけるトンネル円周方向への変形が影響しているものと考えられる。このため、挿入角が大きい場合には、Kセグメントの切羽側の中央部ではトンネル円周方向に面外方向の曲げが作用することになり、結果としてセグメントの内空側にトンネル円周方向の引張応力度が卓越するものと推定される。

4-4 損傷の抑制効果

セグメントの損傷に対するKセグメントの弧長や挿入角の大きさが与える影響の程度は、挿入角の大きさが主要因であることがわかった。ここでは、挿入角の大きさをどの程度にすることが望ましいかを考察した。

施工ステップ2において、ジャッキ推力に対してコンクリートのポアソン比により発生するトンネル円周方向の引張応力度は、次式から計算できる。

① ジャッキ1本あたりの作用面積 $A(\text{mm}^2)$

$$A = \pi / 4 \times (D_o^2 - D_i^2) / N_j$$

ここで、 D_o : セグメント外径 (3,440mm)

D_i : セグメント内径 (3,000mm)

N_j : ジャッキ本数 (20 本)

② ジャッキ1本あたりの推力 $F_j(\text{N})$ により生じるトンネル軸方向の圧縮応力度

$$\sigma_c (\text{N/mm}^2)$$

$$\sigma_c = F_j / A$$

- ③ コンクリートのポアソン比 ν ($=0.167$) により生じるトンネル円周方向の引張応力度 σ_t (N/mm^2)

$$\sigma_t = \sigma_c \times \nu$$

算定結果は解析ケース 1～4 では 0.66N/mm^2 で、解析ケース 5 では 0.71N/mm^2 となった。この応力度は、図-4.6 の応力コンターの水色で示す範囲であり、解析ケース 1～3 では、Kセグメントの切羽側の中央部においてトンネル円周方向に発生する応力度はポアソン比により生じる応力度以上であり、過度な応力集中を生じていることがわかるが、解析ケース 4, 5 はポアソン比により生じる引張応力度相当あるいはそれ以下であることがわかる。

また、解析ケース 4, 5 は、図-4.3 および図-4.4 で示したように、Bセグメントの鋭角部にも圧縮応力度が伝播されるとともに、Kセグメントの端部の応力集中も緩和されていることから、結果として割れや欠けの抑制効果があるものと考えられる。

以上のことから、Kセグメントの挿入角はその分割数にかかわらず 8 度程度以下にすることが望ましいと判断される。また、この場合には、ジャッキ推力に対してポアソン比により発生するトンネル円周方向の引張応力度を設計時に照査すればよいことになる。

4-5 まとめ

本章ではKセグメントの形状をパラメータにした三次元シェルばねモデルによる FEM 解析を行い、各施工ステップで得られた応力状態および変形状態を詳しく分析した。その結果、以下のことがわかった。

- ① Kセグメントの弧長や挿入角の大きさがセグメントの損傷に与える影響のうち、主要因となるのは挿入角の大きさであることがわかった。
- ② トンネル半径方向に拘束がない Ring3 の位置では、KセグメントとBセグメントにすべてのジャッキ推力が作用する場合、これらのセグメント継手面は目開き量を生じるように変形するため、相互に力の伝達がないことがわかった。

- ③ したがって，Bセグメントの鋭角部にはジャッキ推力による圧縮応力度が伝播されないことがわかった．挿入角が小さくBセグメントの形状が長方形に近くなるにしたがって，当該部に伝播される圧縮応力度が大きくなる結果となった．
- ④ 同様に，Kセグメントが単体で変形することにより，Kセグメントの切羽側の内空側にはトンネル円周方向に引張応力度が卓越して発生することがわかった．
- ⑤ Kセグメントの挿入角の大きさは8度程度以下にすることがセグメントの損傷の抑制には効果が高いことがわかった．これにより，ジャッキ推力によって生じるトンネル円周方向の引張応力度をポアソン比により生じる応力度程度に制限することができ，設計時にはこれを照査することも可能になった．

第 5 章 設計・施工条件に着目したセグメントの損傷抑制 策の分析

第5章 設計・施工条件に着目したセグメントの損傷抑制策の分析

5-1 はじめに

第4章では、Kセグメントの形状に着目してセグメントの損傷の可能性やその原因、さらには損傷の抑制効果について分析した。

本章では、Kセグメントの形状に関わらず発生する可能性のある損傷について、ジャッキパターンの違いやトンネル半径方向およびトンネル円周方向の拘束効果をパラメータとした、三次元シェルばねモデルによるFEM解析を行うことで、損傷抑制の効果について考察した。なお、本論文ではこの拘束効果をリング効果と呼ぶことにした。また、本章で用いた三次元シェルばねモデルの解析モデルは、3-2節で示した解析モデルと同じものである。

5-2 ジャッキパターンに着目した損傷抑制効果の分析

ジャッキパターンの影響により損傷を生じる可能性がある施工ステップは、表-4.1で示した解析ケースのいずれのケースにおいても同じ位置に同程度の応力の発生が確認できたものとし、以下に代表的な施工ステップの解析結果について示す。なお、施工ステップは表4-3に示すとおりである。

5-2-1 施工ステップ6におけるA1セグメントとB1セグメントの継手部

施工ステップ6は、B1セグメントを組み立てるために、ジャッキを引き戻したときである。図-5.1はこの施工ステップにおいて、Ring3のA1セグメントとB1セグメントに発生したセグメント継手部周辺のセグメント内空側の引張応力度の分布を示したものである。なお、ジャッキパターン1は実際の施工を模擬したもので、組立てスペースを大きく確保した場合であり、ジャッキパターン2は組立てに支障のない範囲でRing3に最大限のジャッキ本数を作用させた場合である。

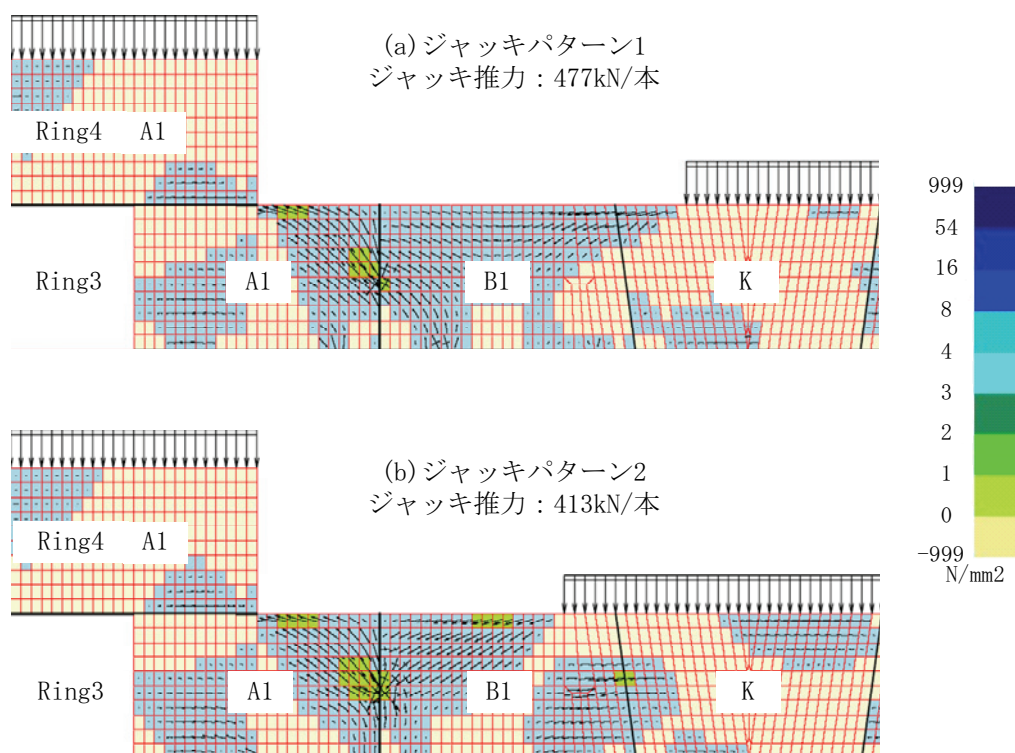
図-5.1から、ジャッキパターン1の方が1本あたりのジャッキ推力は大きいですが、セグメント継手部に生じる引張応力度は小さくなっていることがわかる。この結

果は、当該部のセグメントの変形状態から説明することができる。図-5.2 は、Ring3 の A1 セグメントと B1 セグメントの外周節点におけるトンネル軸方向とトンネル円周方向の変形図を示したものである。この図から、当該継手部には目開きが生じるような変形がみられる。継手部はこの変形を拘束するため、当該部に引張応力度が集中するものと推定される。さらに、変形量の大きさはジャッキパターン 2 の方が大きいことがわかる。これは、ジャッキパターン 1 では A1 セグメントの端部にのみジャッキ推力が作用するが、ジャッキパターン 2 では A1 セグメントの端部のみならず、B1 セグメントの端部にもジャッキ推力が作用するためと思われる。すなわち、どちらか一つのセグメントに対してジャッキ推力が片押しの状態で作用し、継手部ではより大きな目開き量を生じているものと考えられる。隣り合うセグメント同士で、セグメント継手部と反対側の位置でジャッキ推力が片押しとなるような場合には、継手部には応力集中が生じることになる。したがって、このようなジャッキパターンを採用しないことが、セグメントの損傷を抑制する施工条件になるものと判断される。

一方、図-5.1 ではジャッキの作用点の近傍、たとえば Ring3 の A1 セグメントの切羽側の中央部でも、トンネル円周方向に引張応力度が集中していることがわかる。これは、図-5.2 からわかるように、ジャッキの作用点の近傍では、トンネル軸方向にその変形状態が大きく変化していることが確認でき、このため引張応力度が発生するものと考えられる。この変形によって生じる引張応力度は、ジャッキパターンを変えることによって抑制することはできない。したがって、ジャッキパターン以外での損傷の抑制方法を検討する必要がある。これについては 5-3 節で検討を加える。

5-2-2 施工ステップ 9 における B1 セグメントと K セグメントの切羽側

施工ステップ 9 は、B2 セグメントを組み立てるために、ジャッキを押しあてたときである。図-5.3 はこの施工ステップにおいて、Ring3 の B1 セグメントと K セグメントの切羽側の中央部のセグメント内空側に発生する引張応力度の分布を示した図である。なお、ジャッキパターン 1 は実際の施工を模擬したもので、ジャッキパターン 2 は組立てに支障のない範囲で、Ring3 に最大限のジャッキ本数を作用させた場合である。また、ジャッキパターン 3 は組立てに支障のない範



※ 矢印は主応力度の方向を示す。

図-5.1 施工ステップ6における内空側の引張応力度の分布

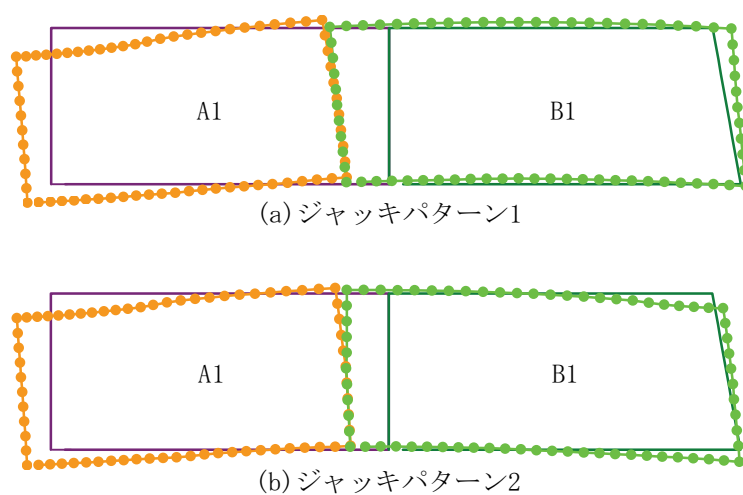
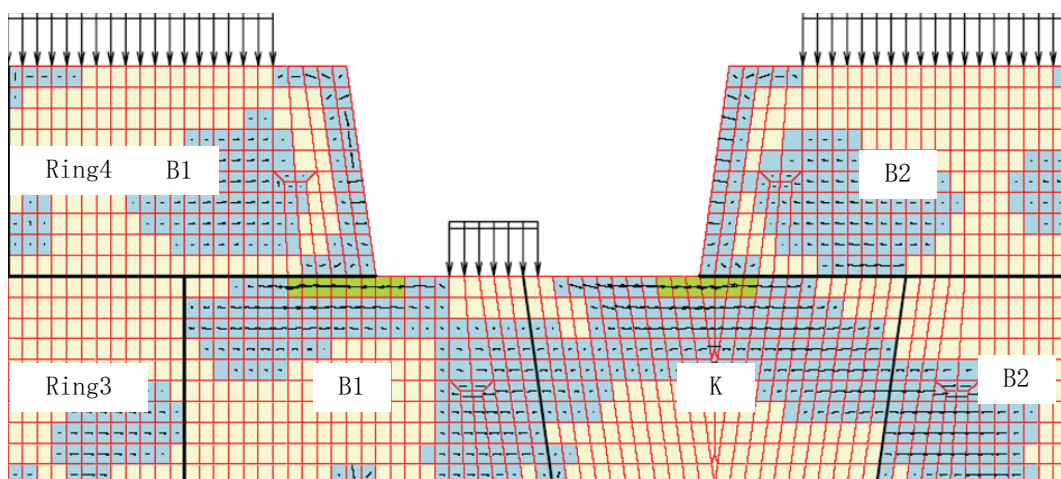
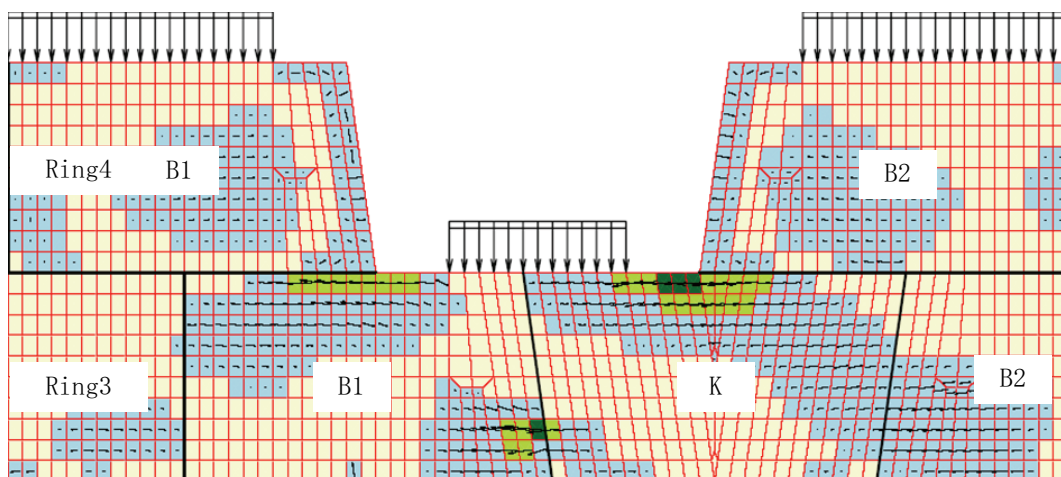


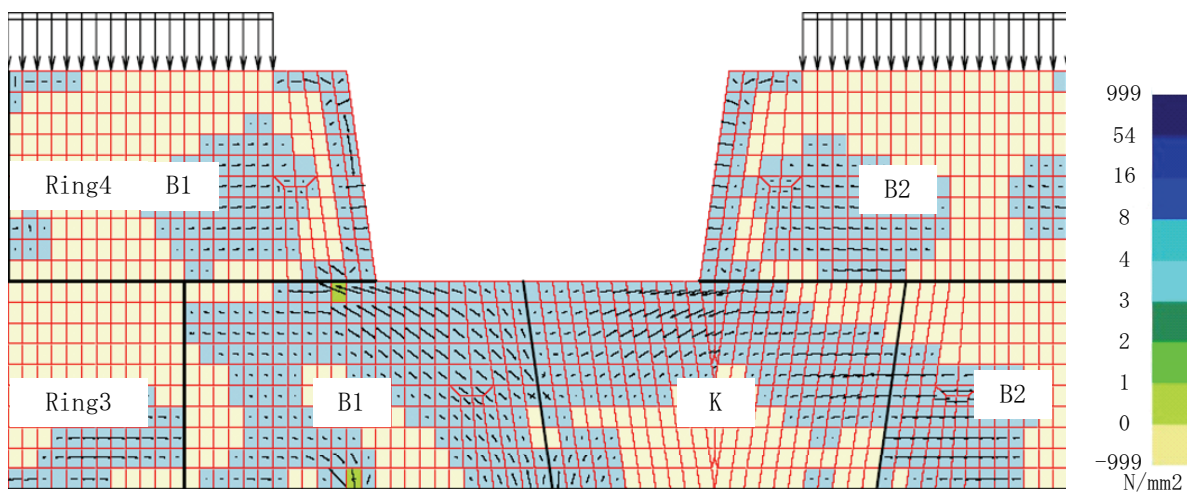
図-5.2 A1, B1セグメントの外周節点における
トンネル軸方向および円周方向の変形図



(a) ジャッキパターン1 ジャッキ推力：413kN/本



(b) ジャッキパターン2 ジャッキ推力：388kN/本



(c) ジャッキパターン3 ジャッキ推力：443kN/本

※ 矢印は主応力度の方向を示す。

図-5.3 施工ステップ9における内空側の引張応力度の分布

囲で Ring3 に作用するジャッキ本数を最小にした場合である。

図 5-3 から、1 本あたりのジャッキ推力が大きいジャッキパターン 3 では、B1 セグメントと K セグメントの切羽側の中央部に集中する引張応力度は小さく、1 本あたりのジャッキ推力が小さいジャッキパターン 2 では、当該部の引張応力度が大きくなっていることがわかる。この応力集中は、前述したように、ジャッキの作用点の近傍で発生する応力集中と同じものと考えられる。また、図-5.3 に示したジャッキパターン 1 とジャッキパターン 2 から、ジャッキの作用スパンが小さくなるとその作用点の近傍で発生する応力集中の度合いが大きくなることがわかる。これに対して、Ring3 にジャッキの作用点がないジャッキパターン 3 では、当該部の応力集中がほとんど生じていないことがわかる。この結果は、図-5.4 に示すように、Ring3 の B1 セグメントと K セグメントの外周節点におけるトンネル軸方向とトンネル円周方向の変形状態から説明することができる。すなわち、ジャッキの作用スパンを小さくすると、トンネル軸方向の変形状態がより大きく変化していることが確認でき、その結果として大きな引張応力度が発生するものと考えられる。したがって、ジャッキの作用スパンが小さくなるようなジャッキパターンを採用しないことが損傷の抑制になるものと判断される。

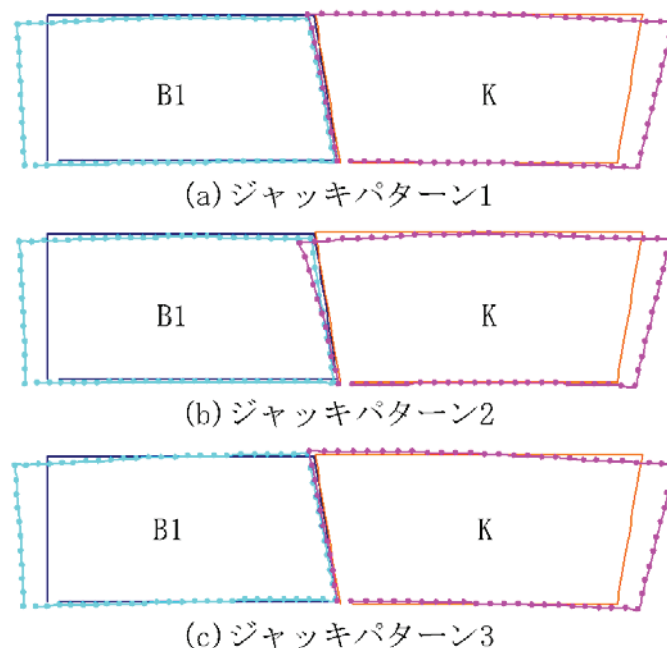


図-5.4 B1, Kセグメント外周節点における
トンネル軸方向および円周方向の変形図

5-3 リング効果に着目した損傷抑制効果の分析

5-2 節で示したように，たとえば図-5.1 における Ring3 の A1 セグメントに発生する応力集中などは，Kセグメントの形状やジャッキパターンだけでは抑制することができない．これは，ジャッキ推力の大きさそのものが大きな原因になっているためと考えられるが，ここでは，トンネル半径方向の拘束効果，すなわちリング効果に着目し，損傷の抑制効果について考察する．

5-3-1 解析パラメータの設定

リング効果を確認するために，表-5.1 に示す二つの条件を Ring3 の位置におけるセグメントに設定し，解析ケース 6 および 7 とした．これらの条件は，いずれも剛性一様なリングにすることを目的としたものである．なお，セグメントの諸条件は表-4.1 に示した解析ケース 1 と同じものとした．

表-5.1 リング効果の解析条件

解析 ケース	解析条件	解析条件に相当する 設計・施工条件
6	セグメント継手面のジョイント要素のすべて強制的に ON とする．	セグメント継手の拘束力が十分に大きく，セグメント継手部では目開きを生じない場合に相当する．
7	上記ケースに加えて，セグメントの地山側にトンネル半径方向の外圧 (0.5MPa※) をセグメントの幅方向全体に作用させる．	上記のケースに加えて，外圧により生じるトンネル円周方向の軸力を考慮できる場合に相当する．

※ 外圧 0.5MPa はテールシールの拘束力に相当するものであり，これにより発生するトンネル円周方向の軸力は約 1,900kN/ring (圧縮応力度では約 7N/mm²) となる．

5-3-2 解析結果

(1) 施工ステップ 2 の応力状態

4-3-1 節および 4-3-2 節で，施工ステップ 2 で生じる特異な応力状態は K セグメントの挿入角の大きさにより抑制することができることを示したが，ここでは，リング効果によるその抑制効果について検討する．

図-5.5 および図-5.6 は施工ステップ 2 において、Ring3 の位置でセグメントの内空側に発生する圧縮応力度と引張応力度の分布を示したものである。なお、これらの図中には、表-4.1 の解析ケース 1 の結果も併せて示してある。

図-5.5 から、Bセグメントの鋭角部にはジャッキ推力により作用する圧縮応力度が伝播されていることがわかり、剛性一様リングとして挙動していることが確認できる。また、図-5.6 から、Kセグメントの切羽側の中央部に発生する引張応力度が比較的小さな値になっていることがわかる。とくに、トンネル円周方向に軸力が発生するようにした解析ケース 7 では、トンネル円周方向の引張応力度が打ち消されていることがわかり、ひび割れなどに対する十分な抑制効果があることがわかる。

(2) 施工ステップ 9 における応力状態

5-2-2 節では、施工ステップ 9 で生じる特異な応力状態はジャッキパターンにより抑制することができることを示したが、ここでは、リング効果によるその抑制効果を検討する。

図-5.7 は施工ステップ 9 において、Ring3 の位置のセグメントの内空側に発生する引張応力度の分布を示したものである。図中の解析ケース 6 をみると、ジャッキの作用点の近傍に発生する応力集中は、緩和されていないことがわかる。一方、解析ケース 7 では、この応力集中が緩和されていることがわかる。すなわち、ジャッキ推力の影響など、局所的に発生するトンネル円周方向の引張応力度を小さくするには、それを打ち消すだけの圧縮応力度を作用させる必要があるものと推定される。

以上のことから、Kセグメントの形状に起因するような損傷は、セグメント継手などに工夫することによって、リング効果による抑制が可能であるが、ジャッキパターンに起因するような損傷は、トンネル円周方向に軸圧縮力を発生させるような施工上の工夫、たとえば、シールドテール内に設置されるリングサポート機構¹⁾などが有効であると判断される。

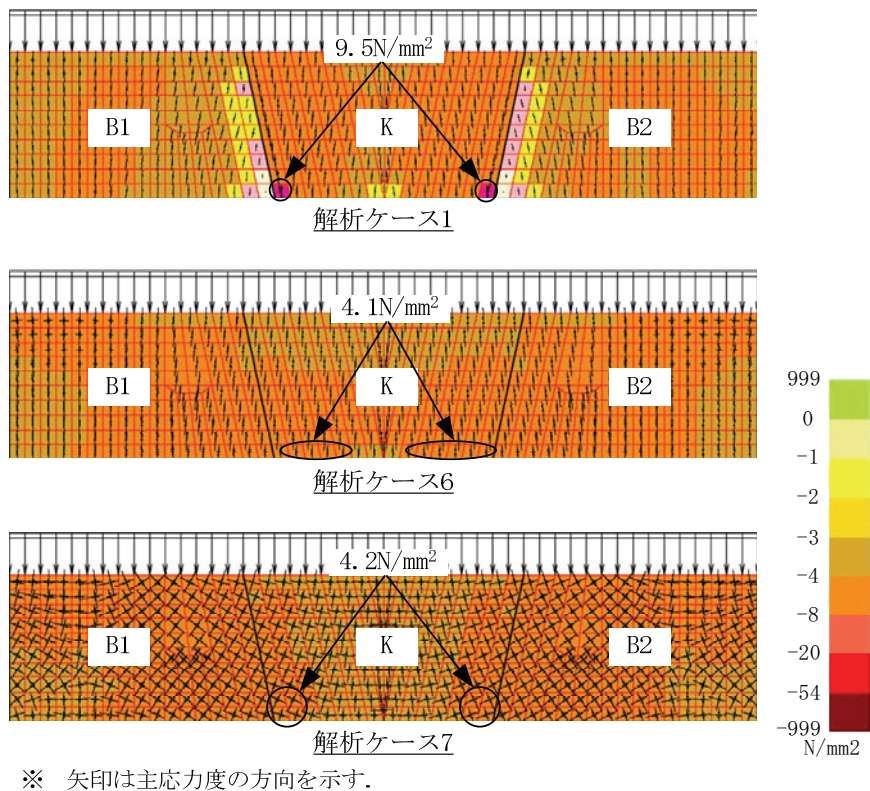


図-5.5 施工ステップ2における内空側の圧縮応力度の分布

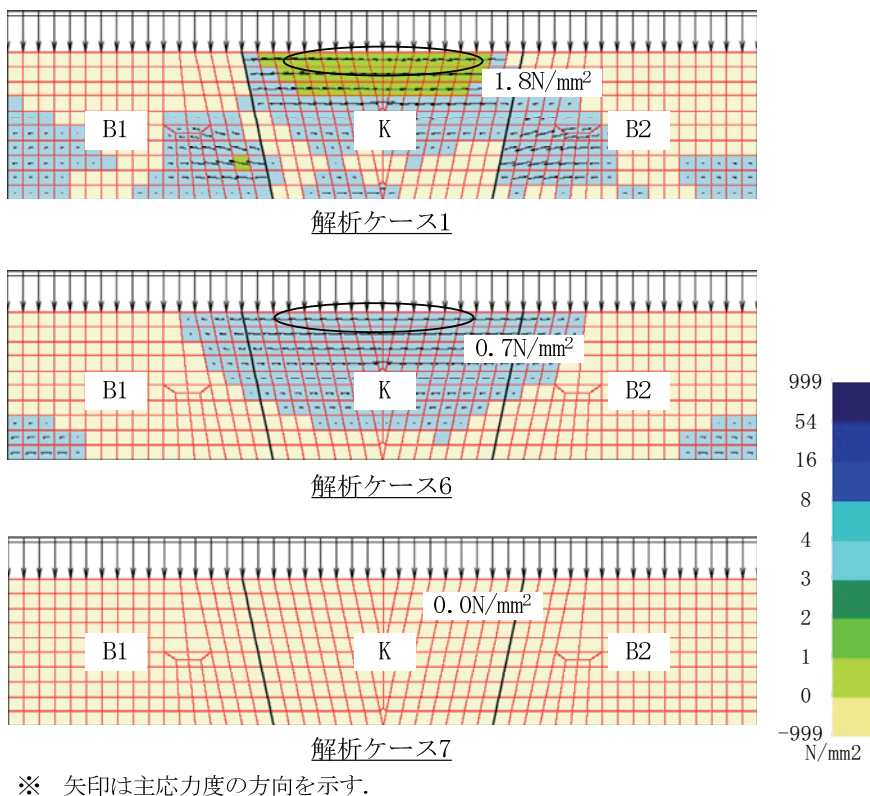
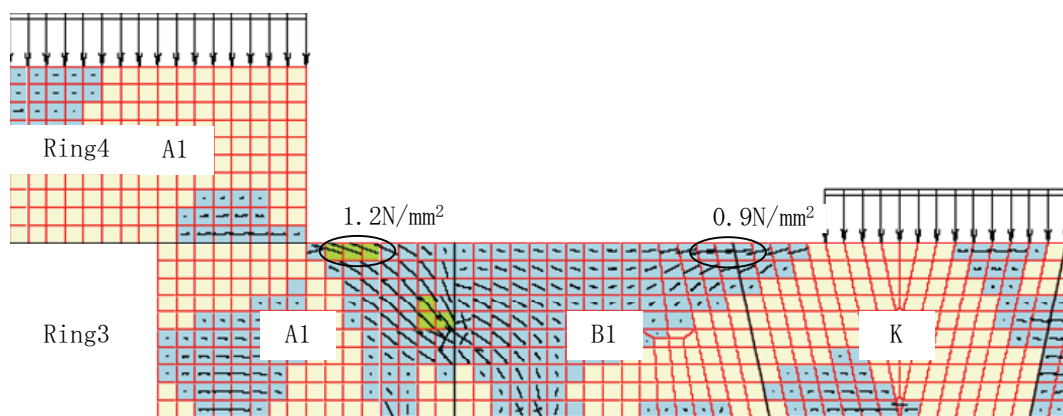
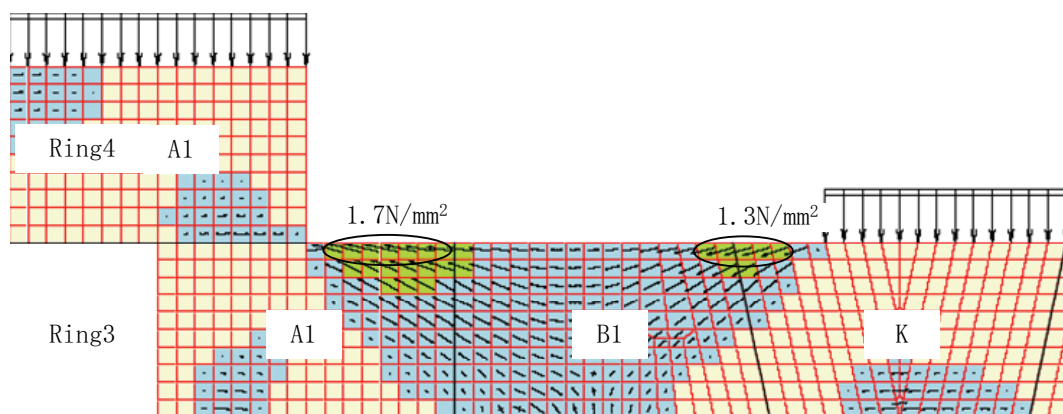


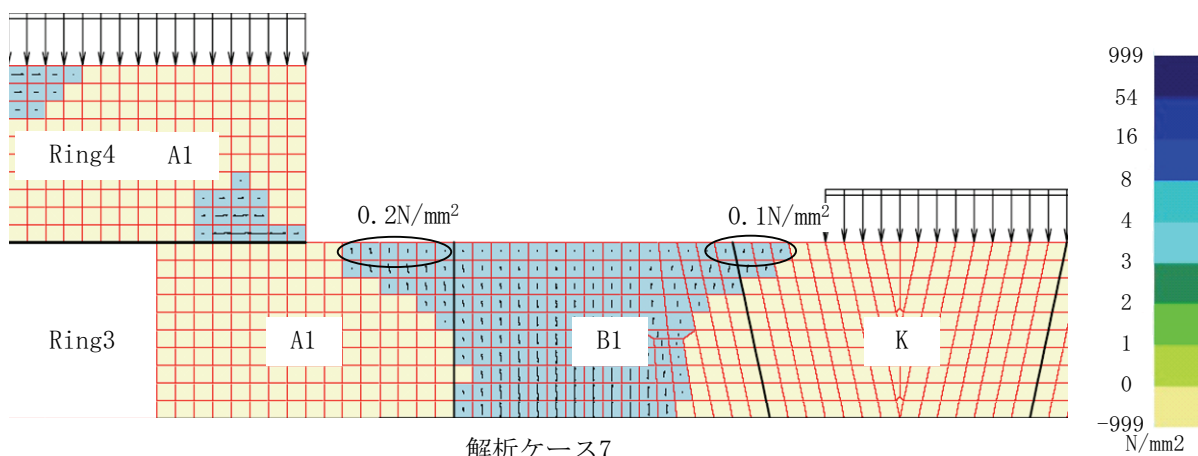
図-5.6 施工ステップ2における内空側の引張応力度の分布



解析ケース1



解析ケース6



※ 矢印は主応力度の方向を示す。

図 5-7 施工ステップ 9 における内空側の引張応力度の分布

5-4 まとめ

ジャッキパターンやリング効果をパラメータとした三次元シェルばねモデルによる FEM 解析を行い、各施工ステップで得られた応力状態および変形状態を分析することで、以下のことが確認できた。

- ① セグメントの組立て時に、セグメントに損傷を与える可能性が高いジャッキパターンには、つぎの2つのケースがあることがわかった。
 - ・ 隣り合うセグメント同士のセグメント継手面と反対側にジャッキが作用し、それぞれのセグメントが片押しになるような場合
 - ・ 一つのセグメントに対して、ジャッキを1本だけ引き戻すなど、小さいスパンでジャッキが作用するような場合したがって、このようなジャッキパターンにならないような施工計画をあらかじめ立案することが重要になる。
- ② Kセグメント形状に起因するような損傷を抑制するには、リング効果を発揮させることが有効である。リング効果はセグメント継手に工夫を加えるなどにより十分に発揮させられることがわかった。
- ③ ジャッキの作用点の近傍では、局所的にトンネル円周方向の引張応力度が卓越することがわかった。このような応力状態を抑制するには、トンネルの外側からトンネル円周方向に軸圧縮力を発生させること、すなわち、リング効果に期待することが有効であり、これには施工上の工夫が必要となることがわかった。

参考文献

- 1) 富所達哉，権守英樹，中川雅由，服部佳文：海底シールドの覆工設計，トンネルと地下，Vol.37，No.7，pp.18-25，2006.

第 6 章 結 論

第 6 章 結 論

本研究は、大深度のシールドトンネルを対象として、現場におけるセグメントの挙動の計測結果および三次元 FEM による解析結果をもとに、セグメントの組立て時の応力状態や変形状態から、施工時にセグメントに発生する損傷の原因を詳細に分析するとともに、それらの損傷を抑制する方法について提案を行ったものである。

以下に、本研究により得られた知見ならびに今後の課題を述べる。

6-1 本研究により得られた知見

6-1-1 セグメントの挙動計測結果にもとづく損傷の原因

- ① セグメントは精度よく組み立てられ、最終的な出来形として目開き量あるいは目違い量がほとんどない状態であっても、セグメントの組立てにともなうジャッキの押し引きにより、最大 3mm 程度の目開き量あるいは目違い量を生じる過程が存在することがわかった。すなわち、ジャッキの押し引きによりセグメントは微小な移動を繰り返すことで最終的な出来形になるということである。とくに、Kセグメントについてはこれらの挙動が顕著であった。
- ② 上記の挙動は、ジャッキ推力、シール材の反発力、およびテールシールの拘束力などの施工時荷重の作用によって生じ、これらの移動の最中に損傷を生じることがわかった。
- ③ とくに、すでに組み立てられたKセグメントからジャッキが引き戻される過程では、Kセグメントは切羽側に押し出され、かつ切羽側でBセグメントに対してより大きく内空側に変位することがわかった。この結果、Kセグメントの鋭角部がBセグメントに接触したり、つぎのリングとの間に支点が発生したりするため、割れや欠け、あるいはひび割れなどの損傷が生じる可能性があることを示した。

6-1-2 三次元 FEM 解析にもとづく損傷の原因

- ① Kセグメントの挿入角の大きさによっては、Bセグメントの鋭角部にジャッ

キ推力が伝播しないことがわかった．このため，シール材の反発力により微小な目開き量や目違い量を生じる可能性があり，組立て誤差のない理想的な状態においても割れや欠けを発生しやすい状態にあることを示した．

- ② Kセグメントの切羽側では，ジャッキ推力が作用するとその内空側にトンネル円周方向の引張応力が卓越して発生することがわかった．これは，Kセグメントの形状によりトンネル円周方向の面外および面内の曲げが発生し，その影響が切羽側の中央部で大きくなるためである．この結果，組立て誤差のない理想的な状態においても，Kセグメントの切羽側では，その内空側にトンネル軸方向のひび割れを生じやすい状態にあることを示した．
- ③ ジャッキの作用スパンが小さい状態でジャッキ推力が作用すると，そのスパンの中央部には内空側にトンネル円周方向に引張応力が卓越して発生することがわかった．これにより，トンネル軸方向のひび割れを生じる可能性があることを示した．
- ④ 施工時に発生するセグメントの損傷は，Kセグメントの形状，継手の締結力やその剛性などに加えて，施工条件，とくにKセグメントの組立て位置，ジャッキの配置とその押し引きのパターン，およびテールシールの拘束力が作用する位置などが組み合わさっていることがわかった．

6-1-3 Kセグメントの形状に着目した損傷の抑制策

- ① Kセグメントの弧長と挿入角の大きさのうち，セグメントの損傷に与える影響が大きいのは，挿入角の大きさであることがわかった．
- ② KセグメントとBセグメントにすべてのジャッキ推力が作用する場合，トンネル半径方向に拘束されない位置では，これらのセグメントの継手面は目開き量を生じるように変形するため，相互に力の伝達がないことがわかった．
- ③ ①および②の結果，Bセグメントの鋭角部にはジャッキ推力による圧縮応力度が伝播されないため，挿入角が小さくBセグメントの形状が長方形に近くなるに従って，当該部に伝播される圧縮応力度が大きくなることがわかった．
- ④ したがって，Kセグメントが単体で変形することにより，Kセグメントの切羽側の内空側にはトンネル円周方向に引張応力度が卓越して発生することがわかった．

- ⑤ Kセグメントの挿入角の大きさは 8 度程度以下にすることがセグメントの損傷を抑制する効果が高いことを示した．これにより，ジャッキ推力によって生じるトンネル円周方向の引張応力度をコンクリートのポアソン比により生じる応力度程度に制限することができ，設計時に照査することが可能になることを示した．

6-1-4 設計・施工条件に着目した損傷の抑制策

- ① 損傷を与える可能性が高いセグメントの組立て時のジャッキパターンは，つぎのケースであることがわかった．
- ・ 隣り合うセグメント同士のセグメント継手面と反対側にジャッキが作用し，それぞれのセグメントが片押しになるような場合．
 - ・ 一つのセグメントに対して，ジャッキを 1 本だけ引き戻すなど，小さいスパンでジャッキが作用するような場合．
- このため，このようなジャッキパターンにならないような施工計画を立案することが重要になる．
- ② Kセグメントの形状に起因するような損傷を抑制するには，リング効果を発揮させることが有効であることがわかった．リング効果は，セグメント継手の工夫などにより十分に発揮させることができる．
- ③ ジャッキの作用点の近傍では局所的にトンネル円周方向の引張応力が卓越して発生することがわかった．このような応力状態を抑制するには，外圧によりトンネル円周方向の軸力を発生するようなリング効果が必要であり，施工上の工夫が必要になることを示した．

6-2 今後の課題

本研究では，大深度のシールドトンネルにおいて，施工時荷重が作用するときのセグメントの損傷の原因を，現場におけるセグメントの挙動計測やセグメントの組立てを模擬した三次元 FEM 解析により詳細に検討した．また，Kセグメントの形状，ジャッキパターン，およびリング効果に着目してこのような損傷の抑制策を提案した．

しかしながら，本研究で対象としたトンネルは内径 3.0m，トンネル深度が 60m

程度という条件である．このため，さらに大断面あるいは大深度のトンネルの場合には，とくにKセグメントの形状について本論文に示したような検討を行い，最適な挿入角の大きさを決定する必要があるものと思われる．

また，三次元 FEM 解析では，継手角やシール材の反発力の影響を無視している．これらの影響については今後の研究課題の一つであるが，Kセグメントの形状や継手の構造も含めて検討する必要があるものと考えている．

一方で，大深度化にともないジャッキ推力がさらに大きくなるような場合には，その作用点の近傍にトンネル円周方向の引張応力が卓越して発生することから，組立て誤差がなく，かつジャッキの作用方向にもずれがないような理想的な状態においても，ひび割れが生じるとともに，割れや欠けが生じる可能性がある．このため，このような場合には，損傷の可能性が高いK，Bセグメントの損傷を抑制することがトンネルの品質の向上やコストの低減になる．したがって，セグメントを補強する工夫として，合成セグメントや鋼繊維補強コンクリートの使用などが考えられる．また，割れや欠けには，継手面の接触面を面取りするなど簡易な対応も有効な方策と考えられる．さらに，トンネル円周方向に軸力を導入できるような施工上の工夫，たとえばリングサポート機構を採用するなど，低コストで実現できる技術開発が今後の課題と考えられる．

最後に，今後の設計では，考慮すべき施工条件を細分化する必要がある，セグメントの設計者，シールドの設計者，および施工計画の立案者の間の相互の連携が，今まで以上に重要な位置づけになるものと考えられる．すなわち，設計者は設計条件を明確に示し，施工計画の立案にそれらを的確に反映させることが重要となる．また一方で，施工計画の立案者が設計条件を施工計画に反映できない場合には，それを設計にフィードバックさせることが重要となると考えられ，このような相互の連携を確実に実施していくことにより，セグメントに割れや欠け，あるいはひび割れを生じさせない最適な設計が可能になるものと考えている．

謝 辞

本論文は、早稲田大学理工学術院創造理工学部社会環境工学科 小泉淳教授のご指導のもとにとりまとめたものです。小泉教授には、研究テーマの設定から進め方、論文のまとめに至るまでの長期にわたる懇切丁寧なご指導とご鞭撻を賜りました。さらには、筆者の遅々として進まない論文執筆に対しても、幾度となく叱咤激励をいただきました。これらがなければ、本論文の完成はあり得ませんでした。ここに心から深く感謝申し上げます。

また、同社会環境工学科の依田照彦教授、清宮理教授、秋山充良教授には、論文の審査を通じて、適切なるご指導、ご助言をいただきました。謹んで感謝の意を表する次第です。

さて、本研究は 2003 年 4 月から 2006 年 4 月にかけて建設された東京電力(株)東西連係ガス導管新設工事を担当したことに端を発しています。この工事は、神奈川県東扇島火力発電所 LNG 基地と千葉県富津火力発電所 LNG 基地間を東京湾の海底下で総延長 18km のシールドトンネルにより連係したもので、全線の約 70%が海面下 50m 以深に位置することから、世界に先駆けた長距離・大深度のシールドトンネルでした。筆者は、本工事を担当する以前からトンネルの覆工体であるセグメントに関わる研究を実施していたこともあり、本工事におけるセグメントの品質確保を重点課題として業務を実施していました。とくに、施工時に発生するセグメントの損傷について、何とかして原因の一端を見つけ、その対策を検討したいと考えていました。そのような折、当時の上司である白井伸一氏(現、東電設計(株))、黒崎秀氏(現、東京パワーテクノロジー(株)執行役員)、竹林基氏(現、東京パワーテクノロジー(株))にセグメントの挙動計測や解析に関わる研究を実施する機会を与えていただくとともに、本論文をまとめることを強く勧められ、長期にわたり温かく見守って頂きました。ここに、深く感謝する次第です。

研究の実施にあたりましては、当時研究部門を担務しておられた竹内友章氏(現、日本国土開発(株)執行役員)、綿引秀夫氏、高橋晃氏には、筆者の研究計画について、多大なるご理解とご指導をいただきました。とくに、竹内友章氏には、論文の作成が完了するまでご指導をいただきました。関係各位に厚くお礼を申し上げます。

ます．

現場におけるセグメントの挙動計測にあたりましては，狭隘な切羽における計測の実施について全面的なご協力をいただいた，大成建設(株)日々谷譲氏，秋山秀夫氏，鹿島建設(株)隈部毅彦氏，米沢実氏をはじめとする関係各位に，厚くお礼申し上げます．また，大量な挙動計測データの分析を協力して実施していただいた，当時の先輩ならびに同僚である丸山実氏，竹村光弘氏，矢部弘一氏，野口和博氏，中島崇氏にも心より感謝申し上げます．

解析の実施にあたりましては，非常に多くの解析ケースの実施と解析結果の整理を(株)ARS 相川幸雄氏にさせていただきました．また，同氏には解析手法の選定，モデル化，解析条件の設定，および結果の分析等について，多くの時間を割きディスカッションさせていただいたとともに，ご助言をいただきました．心より感謝申し上げます．

上記の方々の他，本論文の完成に至るまでの間，叱咤激励やお手伝いを頂戴した方々として，富所達哉氏，権守英樹氏，笠井靖浩氏，松永浩氏，白鳥光雄氏，齋藤勝氏，吉本正浩氏，松本功氏，内藤幸弘氏，末永貴志氏，岡滋晃氏の各氏に心からお礼申し上げます．

最後に，この論文は家族の応援と理解なしには完成しませんでした．妻 紫麻に感謝いたします．

そして，今後ともよろしくお願い申し上げます．

平成 26 年 2 月

大深度シールドトンネルにおける施工時荷重作用時のセグメントの損傷に関する研究

齊藤 仁

1920 年にわが国において初めてシールド工法が採用された以降、数多くのシールド工法によるトンネルが、都市部の鉄道、道路、上下水道、通信用とう道、ガス導管路などのインフラ設備を中心として構築されてきた。電力設備においても、高度成長期を迎えた 1960 年代より都市部における超高压地中送電線や火力発電所の燃料となる LNG を輸送するガス導管を収容する設備として、シールド工法によるトンネルが構築されてきた。その結果、都区内における送電線の地中化率は 90%を超え、首都圏の電力安定供給を担う重要な電力設備となっている。

近年のシールド工法は長距離化、大深度化する一方で、トンネルの主覆工部材であるセグメントは、その技術革新や経済性の追求から薄肉化、幅広化する傾向が見受けられるようになった。一般に、トンネルが大深度に位置する場合、周辺地盤は自立性が高いことから、セグメントに作用する土圧は小さくなるものの、一方で水圧が卓越する。また、大深度地下に構築されるトンネルは、地盤それ自体が設計上の工学的基盤面に相当するため、地震による影響はほとんどないものと考えられている。したがって、周辺地盤からトンネルに作用する主たる荷重は水圧となるため、トンネルが円形断面であれば、トンネルの横断面方向に発生する断面力は軸力が主動的になる。その結果として、設計上はセグメントの厚さが薄くでき、鉄筋量も軽減できる場合が多い。

一方で、大深度地下にシールドトンネルを構築する場合は、高い水圧によってジャッキ推力、裏込め注入圧、止水用のシール材の反発力、およびテールシールの拘束力などの施工時荷重が増大することになる。また、トンネルが深くなるとシールドの発進用または到達用の立坑も深くなるため、立坑の構築費用が格段に増加する。立坑の数を減らしてシールドの掘進距離を長くすれば、掘削を高速化することが要求されるため、その施工方法によってもジャッキ推力は大きくなる傾向にある。このように、シールドトンネルが大深度

化するにともない、施工時荷重が他の荷重に比べてクリティカルな荷重になることから、施工時荷重に対するセグメントの設計法の確立が重要な位置づけとなってきている。

施工時荷重によるセグメントの損傷には、トンネルの崩壊に至るような断面破壊から、トンネルの耐力や長期にわたる耐久性に影響を与えるような割れや欠け、あるいはひび割れなどがある。わが国にシールド工法が導入された初期からしばらくの間はともかく、近年ではそれらの損傷はほとんど見られなくなったが、シールドトンネルの構築深度が深くなるとともに、再びそれらの損傷の発生が顕在化してきている。これらの損傷はすべて設計の対象とする必要があるが、とくに困難なのは断面破壊を生じるような損傷ではなく、セグメントの割れや欠け、ひび割れなどに対する設計と考えられる。現在までのところ、施工時荷重により断面破壊を生じた例はほとんどなく、実際に発生するのは比較的小さな損傷がほとんどである。これらの損傷がトンネルの耐久性に影響を与えている事例も少なからず存在しているが、小さな損傷は施工時荷重がどのように作用した結果として発生したのかを特定することが非常に困難であり、既往の研究においても、詳細にこれに言及した事例は極めて少ない。

本研究は、このような状況を背景として、大深度地下に構築されるシールドトンネルにおいて、その覆工部材に鉄筋コンクリート製セグメントを用いた場合を対象に、実際の現場におけるセグメントの挙動の計測、およびセグメントの組立てと掘進とを模擬した三次元 FEM 解析から、トンネルの施工時に発生するセグメントの損傷の原因を明らかにするとともに、Kセグメントの形状、シールドジャッキの作用パターン、およびトンネル半径方向あるいは円周方向の拘束効果などをパラメータとした三次元 FEM 解析により、セグメントの損傷を抑制する具体的な方策を提案したものである。

本論文は6章から構成されている。各章の概要は以下に示すとおりである。

第1章は序論である。ここでは、まず、シールド工法の歴史、および電力設備としてのシールドトンネルの役割を述べ、つぎに、近年増えつつある大深度トンネルにおける施工時のセグメントの設計上の課題ならびに、既往の研究の動向を整理し、本研究の目的と本論文の構成を記述した。

第2章は現場におけるセグメントの計測から確認できた、セグメントの損傷の種類と原因を述べた章である。セグメントの計測を実施した工事は、東京電力(株)の千葉県富津火力発電所 LNG 基地と神奈川県東扇島火力発電所 LNG 基地との間を、東京湾の海底下で連係したシールドトンネル工事である。トンネルの平面線形はほぼ直線であるが、縦断線形は全線の約70%が海面下50m以下に位置することから、代表的な大深度のシールドトンネル工事であった。本工事では、施工時にKセグメントおよびそれに接するBセグメントに割れや欠け、あるいはひび割れが発生する確率が高いことが想定されたため、まず、現場におけるセグメントの挙動を詳細に観察し、その挙動と損傷との関係を把握した。その結果、セグメントの組立てにともなうシールドジャッキの押し引きにより、Kセグメントの継手には顕著な目開きや目違いが発生することがわかった。また、それらによって割れや欠け、あるいはひび割れが発生する場合があることを把握した。そこで、つぎに、Kセグメントの挙動を定量的に把握することを目的に、Kセグメントを中心とした目開き量および目違い量の計測を実施した。その結果、セグメントリングが精度よく組み立てられたとしても、それが地山からの拘束を受けるまでの間は、つぎのリングの組立ての際のシールドジャッキの押し引きにより、Kセグメントが最大3mm程度の微小な動きを繰り返すことがわかった。とくに、組み立てられたKセグメントからシールドジャッキが引き戻されると、Kセグメントは切羽側に押し出され、かつ切羽側に隣接するBセグメントに対してより大きく内空側に変位することがわかった。この動きの過程において、Kセグメントの鋭角部の接触やつぎのリングとの間に支点が発生するため、割れや欠け、あるいはひび割れなどの損傷が生じる可能性があることを示した。

第3章は、前章で述べた工事の現場条件を模擬して、セグメントの組立てとシールドの掘進過程をシミュレートし、セグメントの損傷の可能性とその原因について、三次元シェルばねモデル解析法を用いて詳細に

検討した章である。ここでは、まず、解析モデルを設定するうえでの解析範囲、解析ステップ、作用荷重、構造モデル、および境界条件について詳述した。つぎに、解析結果として得られる応力状態や変形状態を解析ステップごとに分析することで、損傷を生じる可能性がある施工ステップを抽出するとともに、抽出された施工ステップにおいては、Kセグメントの形状、継手の締結力やその剛性などに加えて、施工条件、とくにKセグメントの組立て位置、シールドジャッキの配置とその押し引き、テールシールの位置や剛性などが組み合わさることで、損傷を生じる可能性があることを示した。

第4章は、Kセグメントの形状をパラメータとして、セグメントの組立てとシールドの掘進過程の三次元シェルばねモデル解析法を用いた検討を行い、その結果をもとに、Kセグメントの形状に着目した損傷の抑制方策について述べた章である。すなわち、Kセグメントの弧長や挿入角の大きさが与えるセグメントの損傷に対する影響は、挿入角の大きさが主要因であること、さらに、挿入角の大きさは8度程度以下にすることが、セグメントの損傷の抑制には効果が高いことが解析の結果からわかった。これにより、シールドジャッキの推力によって生じるトンネル円周方向の引張応力度を、コンクリートのポアソン比により生じる引張応力度程度に制限することができれば、ひび割れを抑制することが可能になること、設計時にはこれを照査することが可能になることを示した。

第5章は、シールドジャッキの作用パターンやトンネルの半径方向および円周方向の拘束効果をパラメータとし、前章と同様に三次元シェルばねモデル解析法を用いて、セグメントやシールドマシンの設計条件および施工条件に着目した損傷の抑制方策について述べた章である。すなわち、セグメントの組立て時に、セグメントに損傷を与える可能性が高いジャッキパターンが存在すること、このようなジャッキパターンを避けるような施工計画を立案することが重要になることを示した。また、トンネル半径方向あるいは円周方向の拘束効果が、セグメントの損傷の抑制に高い効果を発揮することを示し、セグメント継手による拘束のみならず、セグメントの外側からトンネル円周方向に軸圧縮力を発生させるような施工上の工夫が、状況に応じて必要になることを示した。

第6章は結論であり、本研究で得られた知見をまとめるとともに、今後の研究の課題についても言及した。

Study on the Damage to the Segments Caused by Load during Construction of Shield Tunnel in Deep Underground

By

Jin SAITO※

After the shield tunneling method was adopted for the first time in Japan in 1920, many tunnels have been constructed by this method mainly for infrastructure systems. Additionally, tunnels have been constructed by this method also for the electric power systems including urban extra-high-voltage underground power transmission lines and the facilities for storing gas conduit to transport LNG, used as the fuel for a thermal electric power plant, since 1960's. As a result, the ratio of underground power transmission lines in Tokyo exceeds 90% and they are the important electric power systems supplying the stable electric power in the Metropolitan area.

While the recent shield tunneling method makes tunnels longer and deeper, the segments have been thinner and wider with technological innovation. In deep underground, the earth pressure is much smaller than the water pressure. Also, an earthquake is considered to rarely affect tunnels in deep underground. Therefore, the major load applied to a tunnel should be water pressure. Accordingly, if a tunnel has a circular cross-section surface, the cross-section force generated in the cross-section direction of the tunnel is mainly the axial force. As a result, thinner segment can be designed and the amount of reinforcing bars can be reduced in many cases.

On the other hand, when constructing a shield tunnel in deep underground, the load during construction increases due to high water pressure. Also, as the deep tunnel has a deep shaft for starting of the shield and reaching, the shaft construction costs increase exponentially. If the number of shafts is reduced and a longer shield tunneling distance is set, tunneling should be conducted at a higher speed with a greater jack thrust. Thus, the load during construction of a shield tunnel becomes critical and it is important to establish the design method during construction.

Damages to the segments caused by load during construction range from the cross-section destruction, broken segments and chipping, or cracking. These damages have not been often seen recently. However, as the shield tunnel becomes deeper, occurrence of these damages have become apparent. All of these damages should be taken into consideration in the design, but the assessment for the breaking, chipping and cracking is much more difficult than the damages that can cause cross-section destruction, in the design of segments. Although these damages affect the endurance of the tunnel in many cases, existing studies provide few cases describing the details of this issue.

This study examines the shield tunnel in deep underground with the reinforced concrete segments, explicitly describing the causes of the damage to the segments during tunneling based on the measurement of segment behaviors in the actual construction site and the 3-D FEM analysis simulating the segment assembly and tunneling. This study also proposes how to control the damage to the segments, based on the 3-D analysis using the parameters for K segment shape, shield jack action pattern, and the binding effect in the tunnel radius direction or in the circumference direction.

This paper consists of 6 chapters.

The Chapter 1 is the preface to describe the history of shield tunneling method and the role of the shield

tunnel as the electric power systems. This chapter also explains the purpose and composition of this study and organizes the increasing issues of design for the segments of tunnel in deep underground during construction and the trend of existing studies.

The Chapter 2 describes the types and causes of damages to the segments that have been confirmed from the segment measurement in the field. Measurement of the segments have been conducted for the shield tunnel construction work to link under the seabed of the Tokyo Bay between the LNG bases of Futtsu Thermal Power Station and of Higashi-Ohgishima Thermal Power Station. 70% of the total line of this tunnel is located at 50 m below the surface of the sea or deeper. Since it should be highly likely that the K segment and the B segment suffer from several damages during the construction work, the segment behaviors were observed to identify the relation between the behavior and the damage. As a result, it was confirmed that the joint of the K segment had a prominent gap or misalignment due to pushing and pulling of the shield jack for assembling the segment. Also, it was identified that this caused breaking, chipping or cracking in some cases. Moreover, measurement of gap and misalignment mainly on the K segment showed that until the segment ring is bound by the ground, the K segment repeats minute motions up to 3 mm due to pushing and pulling of the shield jack for assembling the next ring, even if it is assembled precisely. Particularly when the shield jack is pulled back from the assembled K segment, the K segment was pushed out to the face side, causing a significant displacement toward inner space side against the adjacent B segment on the face side. This Chapter also shows that the damages can occur due to contacting of sharply-angled parts of the segment or a point of support generated between the next ring and the current one.

The Chapter 3 examines the segment damage possibilities and the causes by simulating the conditions in the construction work and the processes of assembling of the segments and of shield tunneling with the 3-D shell spring model analysis method. This Chapter describes the analysis model used in this study. Then, the stress state and deformation state obtained as the analysis result are analyzed for each analysis step to extract the construction steps that can cause damage. Also, this Chapter shows that the construction conditions, assembling position for the K segment in particular, the shield jack placement and its pushing and pulling, the tail seal position and rigidity as well as the shape of the K segment, the fastening power and the stiffness of the joint can cause damage.

The Chapter 4 examines the processes for constructing the shield tunnel according to the 3-D shell spring model by using the shape of the K segment. Based on the examination results, this chapter describes how to control the damage of the K segment. The model analysis results show that the size of the insertion angle is the main cause and that the size of the insertion angle should be under approximately 8 degrees. Accordingly, the examination shows that: if the tensile stress in the tunnel circumference direction caused by the shield jack thrust is controlled to approximately the tensile stress caused by the Poisson's ratio of the concrete, cracking can be reduced and the stress can be inspected in the design process.

The Chapter 5 describes the measures to control the damage with a focus on the design conditions and construction conditions of the segments and the shield machine according to the 3-D shell spring model analysis. In other words, this chapter shows that a jack pattern with a high risk of damage to the segments during segment assembling exists and that it is important to make a construction plan without this jack pattern. Also, it shows that the binding effect in the tunnel radius direction or the circumference direction is highly effective in controlling the damage to the segments. Furthermore, the chapter indicates that an innovative construction method to generate not only the binding force with the segment joint but also the axial compression force from the outside of the segments toward the tunnel circumference direction will be necessary according to the situation.

The Chapter 6 is the conclusion to summarize the findings of this study and refer to the future research challenges.

※(Tokyo Electric Power Company, Incorporated)

研究業績

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
1. 論文	
○ 論文	大深度シールドトンネルにおける施工時荷重作用時に発生するセグメントの損傷の原因，土木学会論文集 F Vol. 63 No. 2，2007 年 6 月， <u>斉藤仁</u> ，黒崎秀，高橋晃，竹内友章，小泉淳
○ 論文	大深度シールドトンネルにける施工時荷重作用時のセグメントの損傷抑制策に関する提案，土木学会論文集 F Vol. 64 No. 2，2008 年 6 月， <u>斉藤仁</u> ，黒崎秀，高橋晃，竹内友章，小泉淳
論文	シールド掘進による地盤の剛性低下と作用土圧，トンネル工学研究論文・報告集 Vol. 12，2002 年 12 月， <u>斉藤仁</u> ，綿引秀夫，前島俊雄，久保賀也，宇野晴彦
2. 報告	
○ 報告	施工時荷重作用時のセグメント挙動について，トンネル工学報告集 第 15 巻，2005 年 12 月， <u>斉藤仁</u> ，中島崇，高橋晃，竹内友章，白井伸一
○ 報告	施工時荷重作用時の RC セグメントへの影響について，トンネル工学報告集 第 16 巻，2006 年 11 月，竹内友章，高橋晃， <u>斉藤仁</u> ，中川雅由，須田悦弘
報告	大深度ニューマチックケーソンの施工実績，電力土木，2012 年 7 月， <u>斉藤仁</u> ，白鳥光雄，松永浩
報告	シールドセグメントにおける中位の粘性土への緩み土圧適用拡大による合理的設計，トンネル工学報告集 第 20 巻，2010 年 11 月，山根謙二，高瀬正司， <u>斉藤仁</u> ，松永浩
報告	東京湾横断の 18km 海底シールドトンネルはこうして完成した！－東西関係ガス導管プロジェクトのシールドトンネル技術－，土木学会誌 92 巻 2 号，2007 年 2 月，黒崎秀， <u>斉藤仁</u>
3. その他	
講演	東京湾海底下七号地層におけるセグメントの荷重計測結果について，土木学会年次学術講演会概要集第 6 部 Vol. 60，2005 年 9 月， <u>斉藤仁</u> ，中島崇，竹林基，白井伸一
講演	都市トンネルの非線形解析手法に関する検討，土木学会年次学術講演会講演概要集第 6 部 Vol. 59，2004 年 9 月，高橋晃，竹内友章，久保賀也， <u>斉藤仁</u> ，安部明夫

研究業績

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	シールドトンネルにおける掘進組立同時施工の実用化，第 10 回ロボットシンポジウム論文集，2004 年 9 月，佐藤東洋司，金森研二， <u>斉藤仁</u> ，神崎正
講演	巻き厚を縮小した二次覆工の材料選定に関する検討(その 1. 充填性確認試験)，土木学会年次学術講演会講演概要集第 6 部 Vol.54，1999 年 9 月， <u>斉藤仁</u> ，福沢勇，須田嘉彦，藍沢博高
著書	シールドトンネルを対象とした性能照査型設計法のガイドライン，(社)日本トンネル技術協会，2003 年 6 月