

マイクロフィルム用資料

I S S N 0386-5878

土木研究所資料第3725号

土木研究所資料

砂礫地盤中のシールドトンネルに
作用する荷重に関する研究報告書

平成12年3月

建設省土木研究所
道路部トンネル研究室

Copyright © (2000) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

砂礫地盤中のシールドトンネルに 作用する荷重に関する研究報告書

トンネル研究室 室 長 真 下 英 人

主任研究員 石 村 利 明

交流研究員 藤 井 邦 男*

要 旨

本報告書は、実際に施工された2本のシールドトンネルを対象として土圧および水圧、鉄筋応力の現場計測を行い、計測結果について取りまとめるとともに、シールドトンネルの作用土圧および水圧について検討を加えたものである。

キーワード：シールドトンネル、作用荷重、現場計測、砂礫地盤

* 交流研究員在職期間（平成10年4月1日から12年3月31日）

まえがき

セグメントの設計は、シールドトンネルの作用荷重の設定の大小により大きく影響するため、シールドトンネルに作用する荷重を適切に評価する必要がある。本報告書は、実際に施工された2本のシールドトンネルを対象として土圧および水圧、鉄筋応力の現場計測を行い、計測結果について取りまとめるとともに、シールドトンネルの作用土圧および水圧について検討を加えたものである。

本資料がより合理的なシールドトンネルの設計のための参考となることを願うものである。

平成12年3月

トンネル研究室

室長 真下 英人

主任研究員 石村 利明

交流研究員 藤井 邦男

目次

第1章 はじめに	1
第2章 調布共同溝における現場計測	2
2.1 計測方法	2
2.1.1 計測目的	2
2.1.2 トンネルの概要と計測位置	2
2.1.3 地質状況	7
2.1.4 計測項目	8
2.1.5 計測機器の配置および設置要領	13
2.1.6 測定方法	15
2.1.7 測定頻度および計測期間	15
2.2 施工管理の状況	16
2.2.1 総推力	16
2.2.2 裏込め注入材料および注入量・圧力	16
2.3 計測結果	19
2.3.1 土圧計	19
2.3.2 水圧計	20
2.3.3 円周方向鉄筋計	21
2.3.4 軸方向鉄筋計	21
2.3.5 ダミー供試体鉄筋計	21
2.3.6 覆工体に発生する断面力	60
第3章 楠味美共同溝における現場計測	92
3.1 計測方法	92
3.1.1 計測目的	92
3.1.2 トンネルの概要と計測位置	92
3.1.3 地質状況	97
3.1.4 計測項目	98
3.1.5 計測機器の配置および設置要領	102
3.1.6 測定方法	103
3.1.7 測定頻度および計測期間	104
3.2 施工管理の状況	104

3.2.1 総推力	104
3.2.2 裏込め注入材料および注入量・圧力	104
3.3 計測結果	107
3.3.1 土圧計	107
3.3.2 水圧計	108
3.3.3 円周方向鉄筋計	109
3.3.4 覆工体に発生する断面力	131
第4章 砂礫地盤中のシールドトンネルの作用土圧	161
4.1 土圧計および水圧計による作用土圧	161
4.2 覆工断面力から推定される作用土圧	162
4.2.1 解析方法	162
4.2.2 解析モデル	162
4.2.3 解析条件	165
4.2.4 解析結果	170
4.3 まとめ	208
第5章 結論	210

謝辞

巻末資料

第1章 はじめに

近年、大都市部およびその周辺の土地利用状況は、地表部においては既に飽和状態にあるといっても過言ではなく、今後の社会資本整備にあたっては地下空間の利用が益々図られるものと考えられる。こうした情勢にあってシールド工法は、開削工法や山岳工法などの他の工法に比べて地表面沈下や周辺構造物および環境に与える影響などの環境保全面、シールドによる切羽保護などによる施工時の安全面などで有利な工法として都市部での地下空間建設工法の代表的な工法として適用される機会が増えることと予想される。しかし、シールド工法においてもセグメント製作費のトンネル工事費全体に占める割合が大きく、このコストダウンが大きな課題となっている。その一つの方法として、合理的なセグメント構造や継手構造の開発などが考えられるが、最も重要なことは合理的な設計手法の確立、とりわけトンネルに作用させる設計荷重（作用土圧）を十分な精度で設定することが挙げられる。設計荷重を正しく設定できない場合には過小、あるいは過大なセグメント設計になる可能性がある。また、今後の地下空間の利用ニーズとして土被りの深いシールドトンネルや大断面シールドトンネルは、作用土圧の評価によって覆工の構造が大きく異なるため、覆工設計時の設計荷重の設定方法に関する調査が急がれている。

現在のシールドトンネルの覆工の一般的な設計法は、設計荷重を設定し、構造計算を行ってセグメントの材質・断面寸法を決定する方法である。しかしながら、現状では設定荷重の基本となるシールドトンネルに作用する土圧に関しては、主に施工対象とする地盤を粘性土地盤か砂質土地盤に分類を行い、地盤強度とトンネル諸条件によって全土被り土圧か緩み土圧かのいずれかを設定しているのが現状である。トンネルに作用する荷重は、理論的に把握することは困難であるが、これまでの知見および現場計測から得るものは多く、特に、現場計測結果は作用土圧の評価を行う上で非常に重要となる。

したがって、シールドトンネルの現場計測を数多く長期間に渡り実施し、これらの結果を分析し、トンネルに作用する土圧を正しく評価していく必要がある。

本報告書は、トンネルに作用する土圧を評価する資料の一つとして砂礫地盤中に施工される単設のシールドトンネルを対象として行った現場計測結果を取りまとめを行い、砂礫地盤中のシールドトンネルに作用する荷重について検討を加えたものである。

第2章 調布共同溝における現場計測

2.1 計測方法

2.1.1 計測目的

セグメントの覆工構造は、シールドトンネルへの作用荷重の設定の大小により大きく影響するため、適切なシールドトンネルの作用荷重を評価する必要がある。このため、実際に施工されるシールドトンネルを対象として土圧、水圧およびセグメントの鉄筋応力の現場計測を行い、トンネルに作用する土圧の評価について検討をすることを目的とした。

2.1.2 トンネルの概要と計測位置

本現場計測は、図－2.1に示す調布共同溝のシールドトンネルで実施した。調布共同溝は、関東地方建設局の相武国道工事事務所で施工を行ったシールドトンネルであり、東京都調布市上上原の中央自動車道の調布インターチェンジ内（N0.6発進立坑）より、調布市内国領町の調布警察署前（N0.1到達立坑）までの国道20号の直下を施工する延長2,548m、トンネル外径6.2m、土被り約9mの単設のシールドトンネルである。途中N0.5～N0.2までの4つの中間立坑を有している。国道20号は車道幅員13.0mの4車線、その両側に幅員2.5mの歩道部で構成される。

セグメントの構造・形式は、桁高275mm、幅100cmの6分割のRC平板型セグメントである。また、シールド掘削方式は、密閉型の泥土加圧式シールドであり、施工に使用したシールド機の構造概要を図－2.2に示す。なお、計測地点付近の工事の進捗は、平均的な掘進速度は約5～9m/日であった。

共同溝のトンネル諸元を表－2.1に、平面線形、縦断線形（土質条件）および一次覆工（セグメント）の概要を図－2.3～図－2.5に示す。

表－2.1 調布共同溝シールドの諸元

トンネル延長	2,548m
シールド外径	6,340mm
セグメント外径	6,200mm
セグメント内径	5,650mm
最小曲線半径および箇所数	R=150m, 10箇所

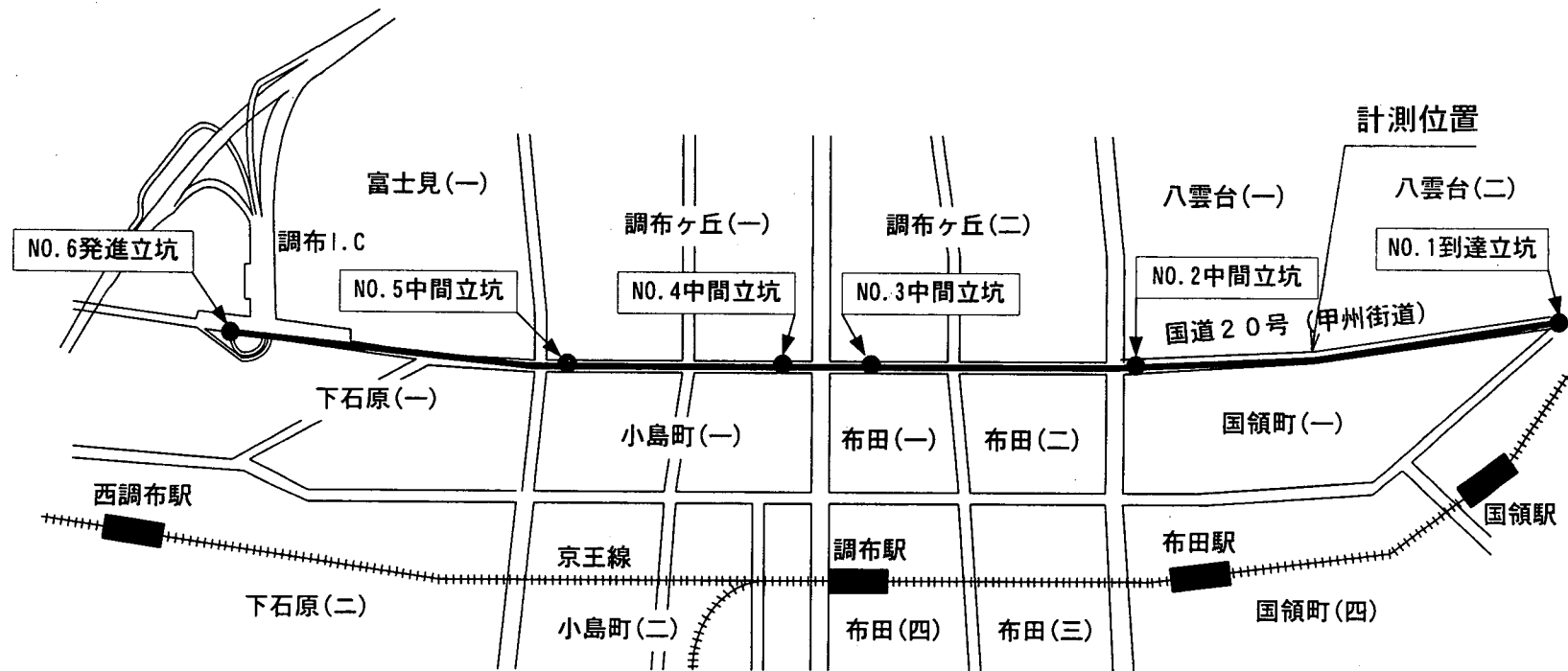


図-2.3 トンネルの平面線形

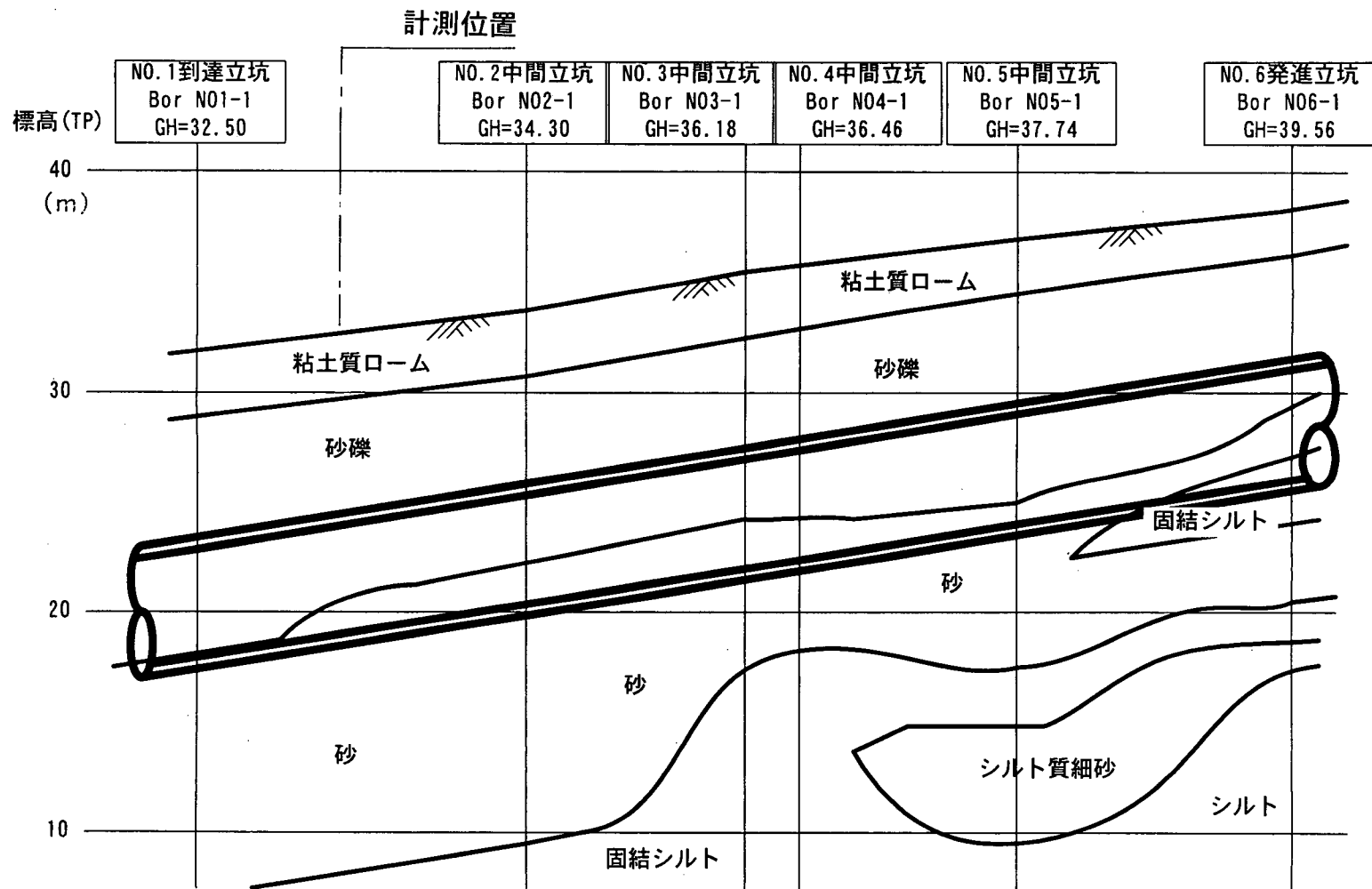
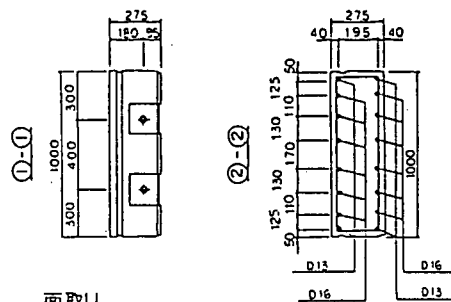
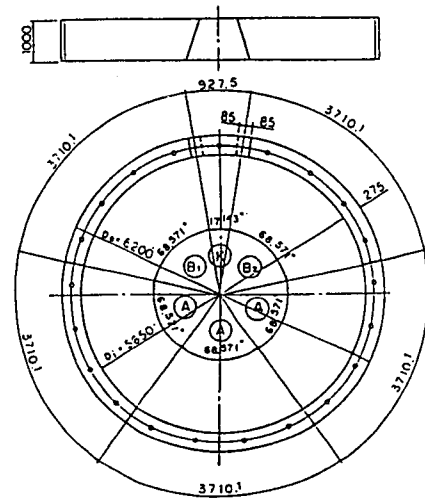
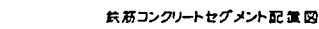


図-2.4 トンネルの縦断線形

A 型セグメント

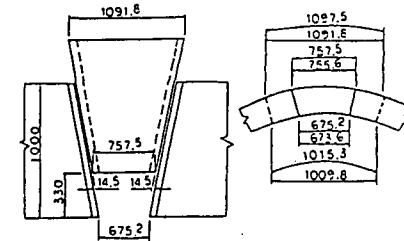
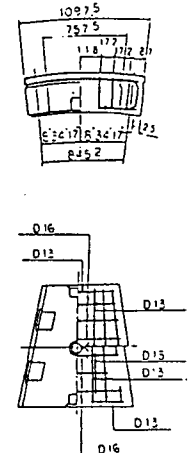
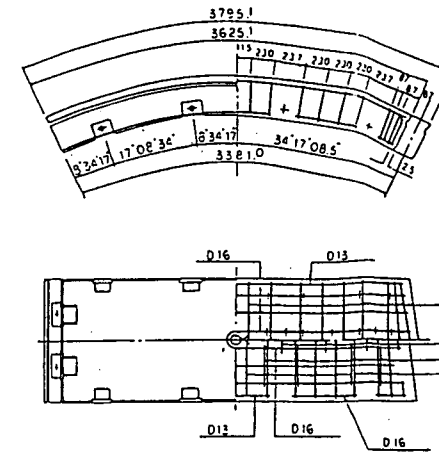
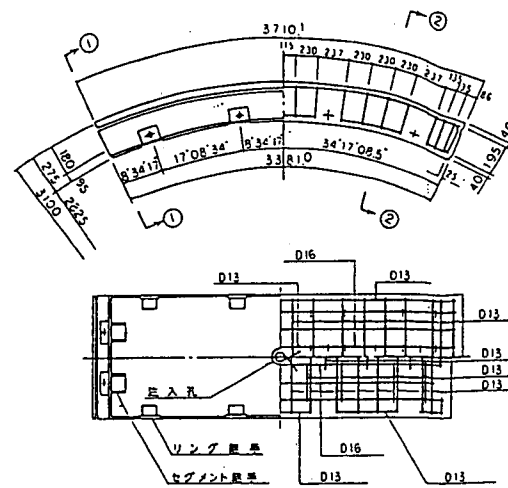
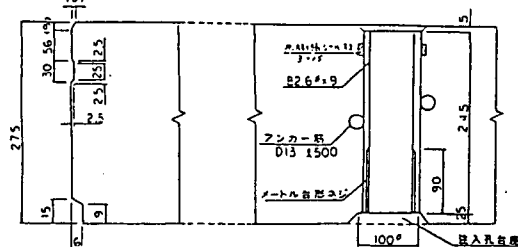
B 型セグメント

K型セグメント



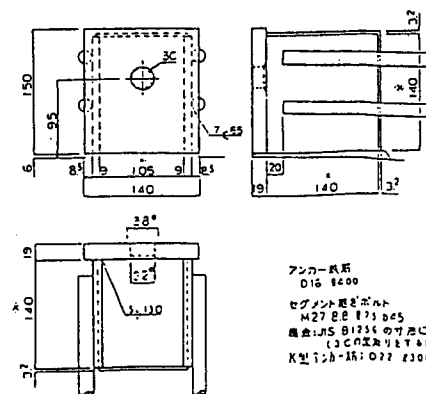
面取り
コーキング溝
シール溝詳細図

はリング間寸法を示す



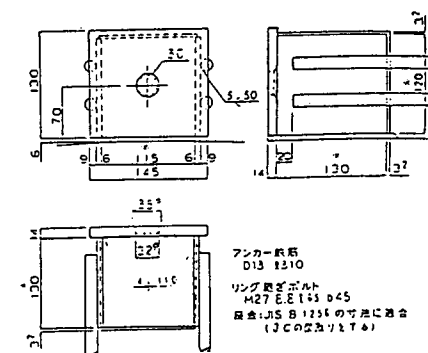
継手金物一般図

セグメント経手金物



アンカー鉄石
 016 8400
 セグメント型ポルト
 M27 22 873 065
 機会: 115 81236 の寸法に適合
 (300 の重なりを有する)
 K型アンカー鉄石: 022 8300

リング 選手 食物



フンカー 旅順
D13 2310
リング 足ボルト
M27 E.E 165 045
履金:JS B 1256 の方法に適合
(JC の要領を参照)

材 料 表

（ラングラー）			
品 名	形 状 寸 法	材 質	
コンクリート	$f_{cm} = 420 \text{ kg/cm}^2$		5.19 (m)
鉄 筋	SD295A D13		50.6 (kg)
	016		38.0
	022		14.6 "
			"
			"
合 計			90.0 7 (kg)
セグメント型手金物	S540R R19		24 (kg)
リング型手金物	— R14		12 "
セグメント起吊ボルト	M27 B5 135 b45		12 (kg)
リング起吊ボルト	— 145 -		21 "
エレクター用埋込入孔	STK113A E2.6 #1 — ノール金型		6 "
セグメント型金型	A型 2.5 8型 2.5		14.0 6 (7.9)
注 入 ポ ラ ー	ABS25		6 (kg)

図-2.5 一次覆工の概要

2. 1. 3 地質状況

シールドトンネルが施工される付近の地質は、地表上部から埋土・表土、洪積第一粘性土、洪積第一砂礫層、洪積第一砂質土層から構成されており、周辺のボーリング調査によれば、洪積第一粘性土、洪積第一砂礫層、洪積第一砂質土層のN値は、それぞれ3～7、30以上130未満、50以上110未満となっている。シールドトンネルは、主に洪積第一砂礫層と洪積第一砂質土層を通過するため、シールドの掘削対象となる土質は、N値が30以上の硬質の砂礫層および砂質土層となる。計測付近のボーリングデータをもとにトンネル位置と地質の柱状図の関係を図-2.6に示す。

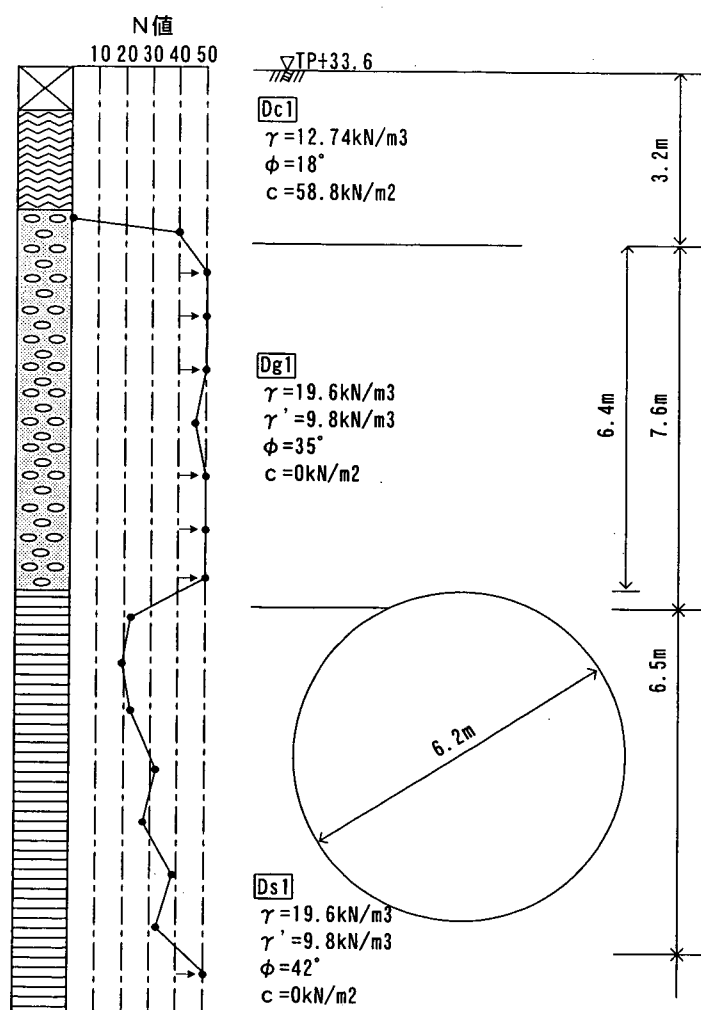


図-2.6 トンネル位置と地質柱状図の関係

2. 1. 4 計測項目

本現場計測における測定項目は以下に示す土圧、水圧、鉄筋応力である。また、測定機器・数量は表－2. 2に示すとおりである。現場計測を実施した位置は、現場計測の位置の選定にあたっては、

- ①直線区間であること。
- ②付近でボーリング調査を実施していること。
- ③3ヶ月以上の計測期間が確保できること。

の3条件を満足する地点としてN0. 6の発進立坑からシールドが発進後、N0. 5, 4, 3の中間立坑を通過後のリングナンバーのN0. 2, 040リングおよびN0. 2, 041リングの2リングとした。図－2. 7は各測定リングの計測位置の概要を示したが、土圧計および水圧計の測定リングは2, 040リングの1断面、鉄筋計の測定リングは2, 040および2, 041リングの2断面とした。また、各計測器の設置位置の展開図を図－2. 8、図－2. 9に示す。

各計測項目の計測の概要および目的は以下に示すとおりである。

①土圧計測

セグメントに作用する土水圧（土圧、水圧）を土圧計により測定する。

セグメントに作用する施工時荷重（裏込め注入圧力等）を測定する。

②水圧計測

セグメントに作用する水圧を水圧計により測定する。

③円周方向鉄筋応力計測

セグメントのリング方向に鉄筋計を設置し、外荷重によってセグメントリングに発生する応力度（円周方向）を測定する。

④軸方向鉄筋応力計測

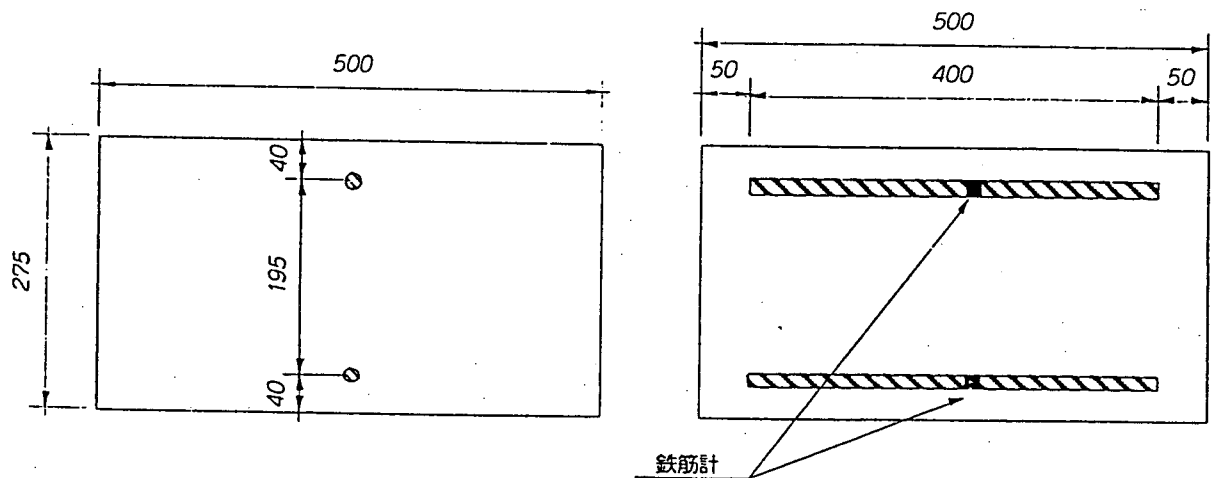
セグメントリングに作用するジャッキ推力の影響をセグメントのトンネル軸方向に鉄筋計を設置し、測定する。

⑤その他

RC型のコンクリートセグメントの乾燥収縮による影響を把握するため、計測点の各リングを打設したセグメントと同じロットのコンクリートで図－2. 10に示すようなダミー供試体（寸法500mm×500mm×275mm）を製作し、実際の計測に使用する鉄筋計と同様の鉄筋計を埋設し、そのひずみを測定する。なお、ダミー供試体の数量は1体とし、養生条件はセグメントと同一とする。セグメント組立後においてもダミー供試体は坑内に置いて継続して測定する。

表－2.2 測定計器・数量

項目	測定計器名および形式	数量	備 考
①	土圧計（容量490kN/m ² BE-5KF）	8 点	8 点×1 リング (設置リング No. : 2040リング)
②	水圧計（容量490kN/m ² BS-5KC）	4 点	4 点×1 リング (設置リング No. : 2040リング)
③	円周方向鉄筋計（容量294N/mm ² BF-16CT）	4 4 点	1 1 箇所×内側と外側×2 リング (設置リング No. : 2040, 2041リング)
④	軸方向鉄筋計（容量294N/mm ² BF-13CT）	1 6 点	1 1 箇所×内側と外側×1 リング (設置リング No. : 2041リング)

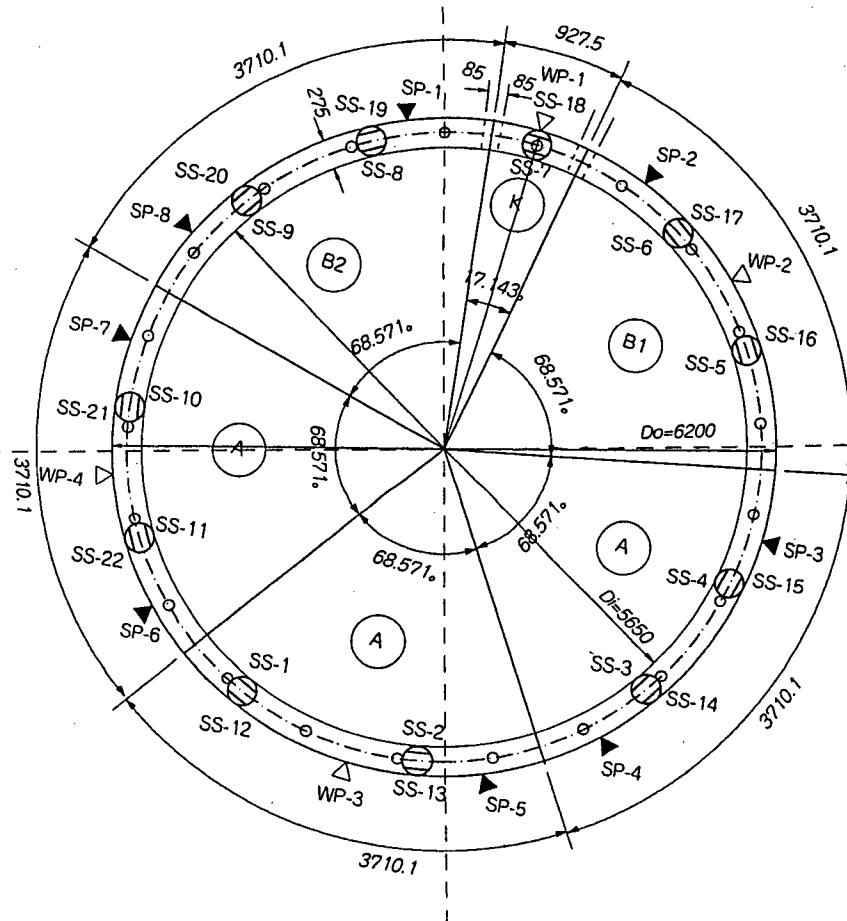


単位：mm

図－2.10 ダミー供試体の概要

2040R

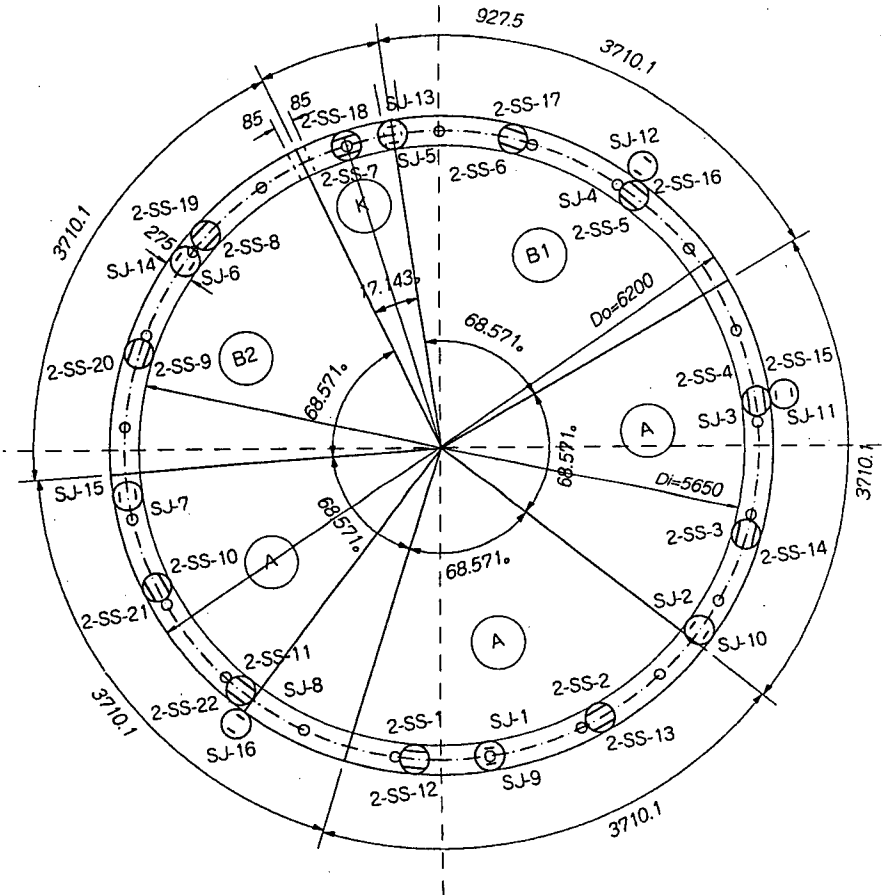
天



凡 例	センサ	記 号	数 量
▽	水圧計	WP-1~WP-4	4
▼	土圧計	SP-1~SP-8	8
⊖	鉄筋計 (周方向)	SS-1~SS-22	22

2041R

天



凡 例	センサ	記 号	数 量
⊖	鉄筋計 (軸方向)	SJ-1~SJ-16	16
⊖	鉄筋計 (周方向)	2-SS-1~2-SS-22	22

図-2.7 2,040、2,041リング計測器（土圧計、水圧計、円周方向鉄筋計）の設置位置の概要

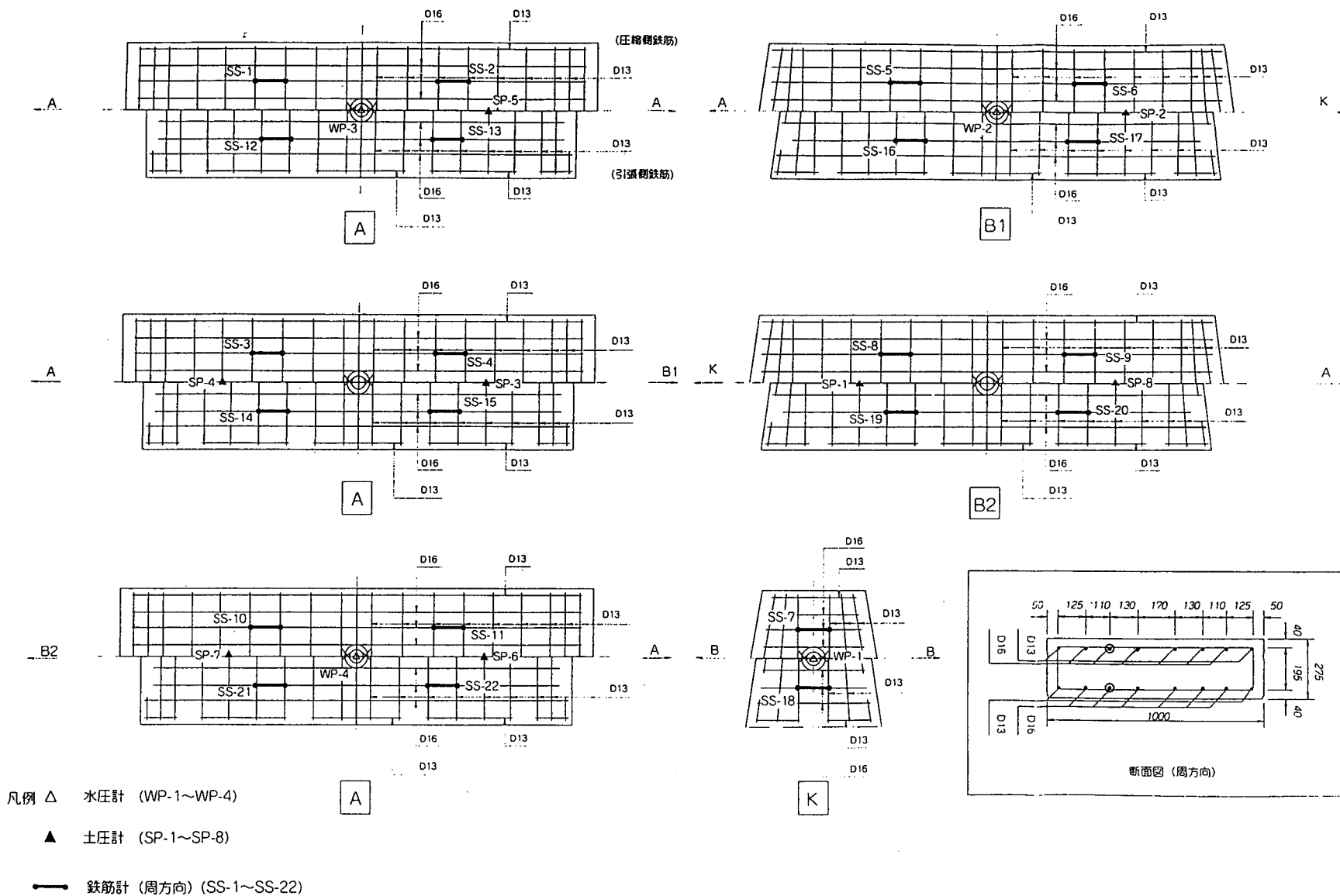


図-2.8 2,040リング計測器 (土圧計、水圧計、円周方向鉄筋計) の設置位置の展開図

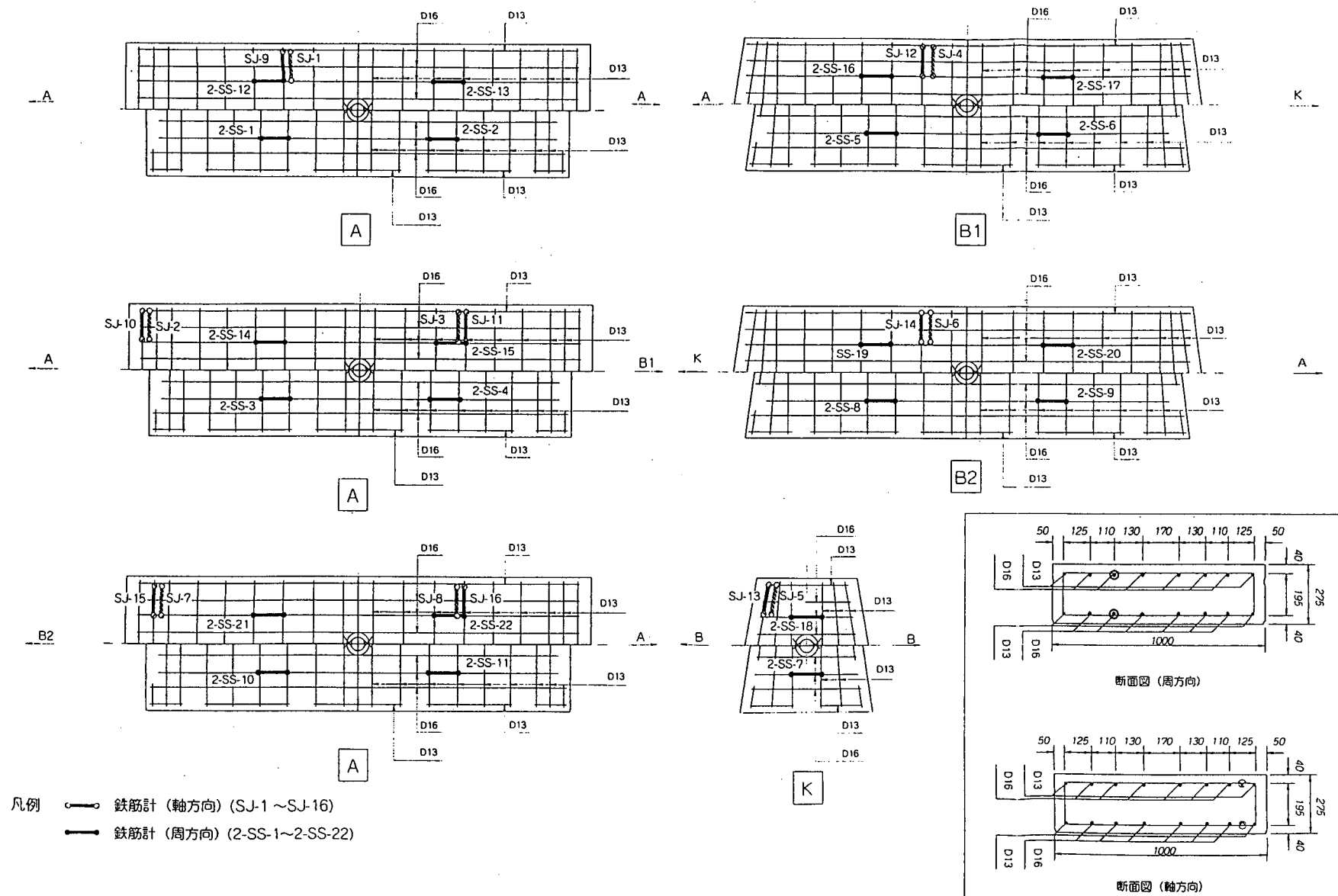


図-2.9 2,041リング計測器（土圧計、水圧計、円周方向鉄筋計）の設置位置の展開図

2.1.5 計測機器の配置および設置要領

各計器を以下の要領で設置した。

①土圧計

土圧計の設置は、図-2.11に示すようにRCセグメントに土圧計を設置するため、セグメント製作時にコンクリート打設前にあらかじめ設置場所を型抜きし、取り付け用治具をセグメントに埋設する。土圧計の設置はセグメント組立後にあらかじめ型抜きを施して製作したセグメントの取り付け用治具に受圧有効直径16cmのひずみゲージ式の土圧計を設置した。設置位置は図-2.7に示す位置の8点とした。

②水圧計

図-2.8および図-2.9に示したセグメントの中央部にある裏込め注入孔に水圧計を設置するため、図-2.12に示した水圧計取り付け用の止水用のボールバルブ等を介在させて外径3cmの水圧計を設置した。なお、水圧計の取付は、裏込め注入後に実施し、裏込め注入が硬化した後にグラウト孔を通して地山を削孔し、地下水の流入を確認した後に設置した。

③円周方向鉄筋計

円周方向鉄筋計をセグメント製作時にコンクリート打設前に鉄筋籠の所定の位置に定着部を溶接し固定した。円周方向鉄筋計の取り付けの詳細図は、図-2.8、図-2.9に示すとおりである。

④軸方向鉄筋計

軸方向鉄筋計を円周方向鉄筋計と同様に所定の位置に定着部を溶接し固定した。軸方向鉄筋計の取り付けの詳細図を図-2.9に示す。

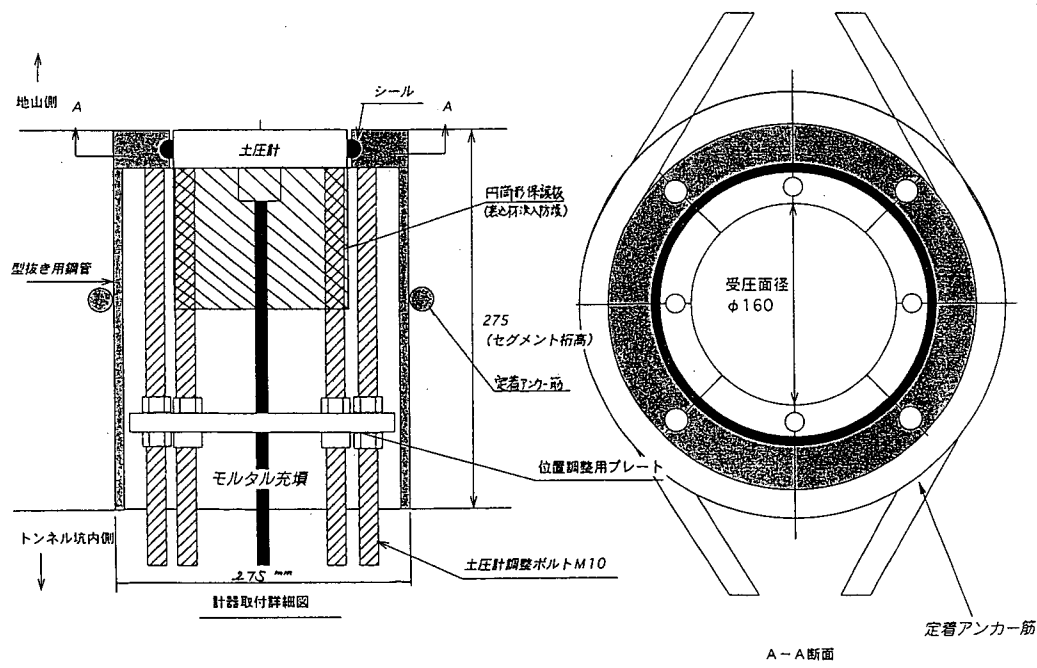


図-2.11 土圧計取り付け詳細図

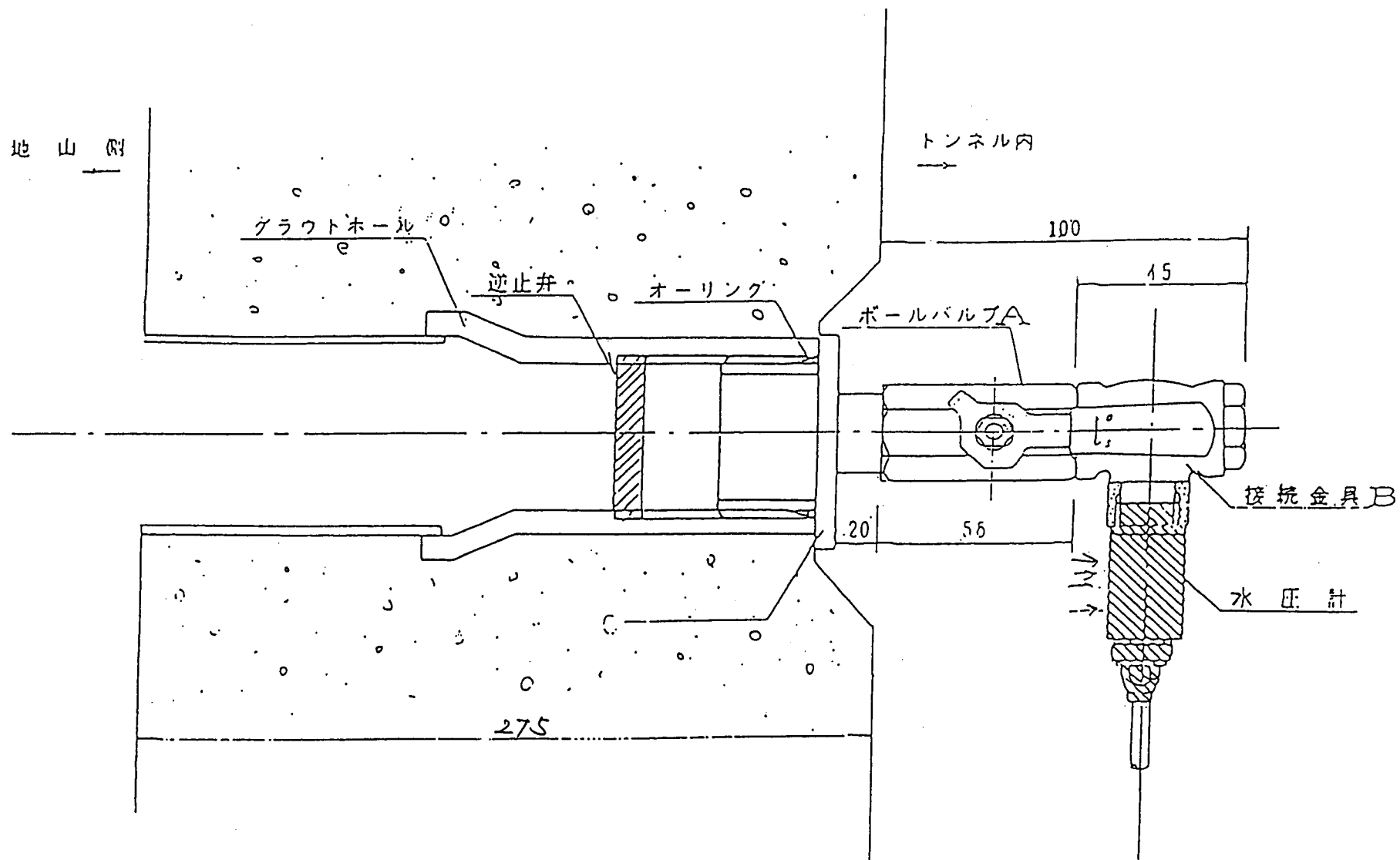
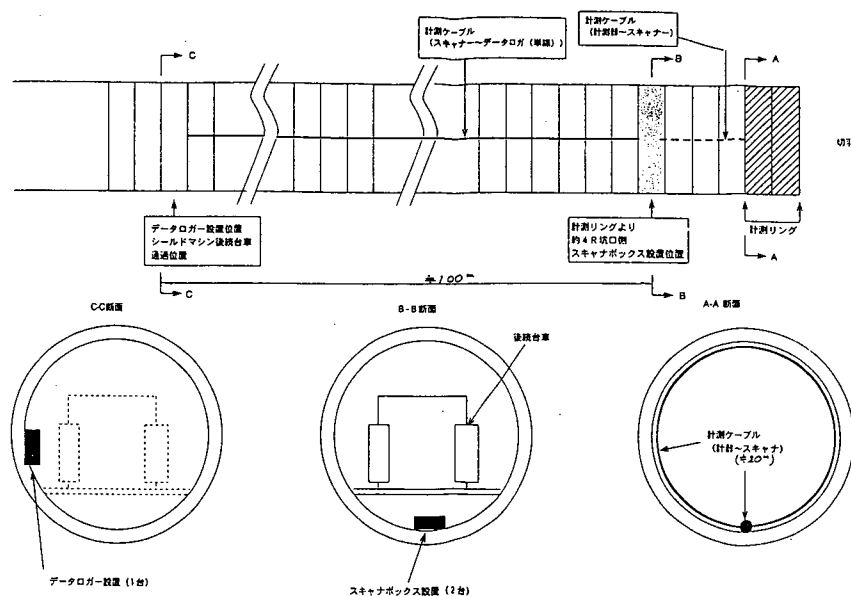


図-2.12 水圧計取り付け詳細図

2. 1. 6 測定方法

測定は、図－2. 1 3に示すようにトンネル坑内に計測用の箱を設けてその中にデータロガ（デジタル式静ひずみ測定器（TDS-601A））を設置し、自動計測方式とした。計測システムは、各センサからケーブルで計測リング近傍に設置したスキャナへ接続し、1本の計測ケーブルにて約100m後方の坑内の所定の場所に設置されたデータロガーへ接続した。また、測定データは、データロガーに内蔵のフロッピーディスクドライブでランダムファイル形式に収録した。



図－2. 1 3 計測システム図

2. 1. 7 測定頻度および計測期間

（1）測定頻度

測定の頻度は、掘進、裏込め注入の影響、地山の荷重の変化等が分かるように、それらの影響を受けると考えられる区間の頻度を短く設定することとし、表－2. 4に示す3つの期間に区分し頻度を設定した。

表－2. 4 計測頻度

掘進、裏込め注入の影響、地山の荷重変化が著しい期間	施工の影響により計測値に変動が生じている期間	計測器が安定した期間
2分間隔（組立から26時間）	15分間隔（9日間）	1時間間隔（90日間）

（2）計測期間

計測期間は、各計測器の値が安定すると考えられるセグメント組立後約3ヶ月とした。

2.2 施工管理の状況

計測されたデータからシールドトンネルに作用する荷重を検討する場合、施工の状況を把握しておく必要がある。シールドトンネルに作用する土圧、あるいは周辺地盤の挙動等に影響すると考えられる施工管理データを調査した。施工管理データの把握は、シールドトンネルの掘削時の総推力、裏込め注入に関する材料および圧力とした。調査した施工管理の区間は、計測セグメントの位置から前後にそれぞれトンネル直径程度および2倍程度を目安に計測用リングのN0. 2, 040リングの手前約7リング (N0. 2, 032リング) から13リング後方のN0. 2, 060リングとした。

2.2.1 総推力

総推力に関する施工管理データを、表-2.5および図-2.14に示す。総推力のデータは、掘削リングの平均値で示した。

総推力は、各掘削リングで約8,820kN~12,740kNで変動しているものの、平均的には約10,780kNでほぼ安定した掘削となっている。本現場のシールド機の直径が6.34mであるので、シールド前面の面積が約31.57m²となり、総推力から計算される掘進時のシールド前面の圧力は約341kN/m²となる。

2.2.2 裏込め注入材料および注入量・圧力

(1) 裏込め注入材料

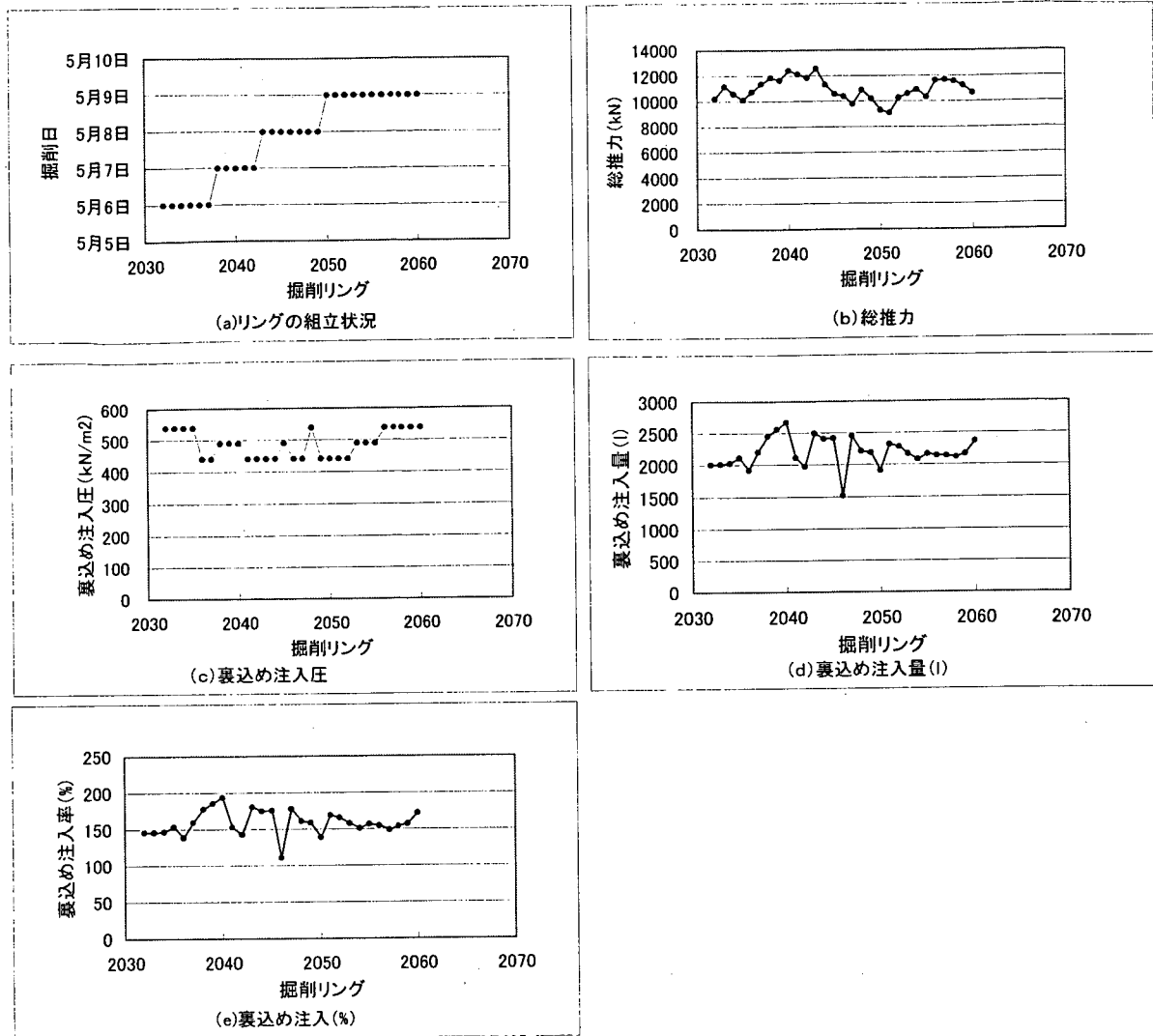
裏込め注入材料および注入量・圧力の施工管理データを表-2.5および図-2.14に示す。また、裏込め注入材は表-2.6に示す配合表に示す2液性の可塑性材料を使用した。裏込め注入材の基準値および試験結果は、表-2.7に示すように、設計基準値で1時間強度で約29.4kN/m²、7日強度で1,960kN/m²に対して、それぞれ1時間強度で34.3kN/m²、7日強度で3,038kN/m²ある。

(2) 裏込め注入量・圧力

裏込め注入は、シールド機の後方から掘進時にセグメントの裏込め注入孔から注入する即時裏込め注入方式で施工された。裏込め注入位置は、シールド工法から切羽に向かって左右交互の天端付近の裏込め注入孔（時計の2時、10時方向）から実施されている。裏込め注入圧は、約450~550kN/m²の範囲でばらついており、計測用セグメント付近の圧力は約450kN/m²となっている。裏込め注入量は、突出値を除き2,000~2,500リットルの範囲で注入されており、理論ボイド量に対する注入率は、計算されるボイド量約1,380リットルに対し140から190%前後の値となっている。また、計測セグメントの2,040リングでは、1次注入としてセグメント組立時に注入量約1,489ℓ、108%の注入率で実施し、その後、セグメント組立2日後に、注入量約1,183ℓ、注入率86%の追加の2次注入を行った。その結果、注入量約2,672ℓ、注入率194%となっている。なお、注入位置は、1次注入で時計の2時方向の注入孔から、2次注入で11時、9時、4時方向の注入孔からそれぞれ実施した。

表-2.5 施工管理データ一覧表

掘削リング	掘削日時	総推力 (kN)	裏込め注入圧 (kN/m ²)	裏込め注入量 (l)	注入率 (%)
2032	5月6日	10238	539	2009	146
2033	5月6日	11189	539	2014	146
2034	5月6日	10611	539	2034	147
2035	5月6日	10130	539	2119	154
2036	5月6日	10758	441	1923	139
2037	5月6日	11376	441	2206	160
2038	5月7日	11856	490	2456	178
2039	5月7日	11650	490	2564	186
2040	5月7日	12415	490	2672	194
2041	5月7日	12131	441	2115	153
2042	5月7日	11846	441	1978	143
2043	5月8日	12582	441	2502	181
2044	5月8日	11307	441	2412	175
2045	5月8日	10591	490	2422	176
2046	5月8日	10385	441	1524	111
2047	5月8日	9787	441	2456	178
2048	5月8日	10905	539	2219	161
2049	5月8日	10219	441	2193	159
2050	5月9日	9297	441	1915	139
2051	5月9日	9101	441	2327	169
2052	5月9日	10268	441	2284	166
2053	5月9日	10621	490	2173	158
2054	5月9日	10925	490	2084	151
2055	5月9日	10346	490	2168	157
2056	5月9日	11660	539	2144	155
2057	5月9日	11699	539	2139	149
2058	5月9日	11582	539	2120	154
2059	5月9日	11258	539	2170	157
2060	5月9日	10670	539	2369	172
2061	5月13日	11209	—	—	—
2062	5月13日	12709	—	—	—
2063	5月13日	11474	—	—	—



図－2.14 施工管理の実績

表－2.6 裏込め注入の配合表（1 m³当たり）

固化材	助材	安定剤	水	急硬剤
230kg	60kg	2%	823%	75%

表－2.7 裏込め注入材の基準値および試験結果

項目	試験結果	基準値
A値フロー値	8.88秒	9.5±1秒
ゲルタイム	7.42秒	6～11秒
A液ブリージング1H後	0.4%	5% 以下
一軸圧縮強度試験 1時間後	34.3kN/m ²	29.4kN/m ² 以上
〃 7日後	3038kN/m ²	1960kN/m ² 以上

2.3 計測結果

本現場計測で得られた結果を次項以降に示す。計測開始からほぼ安定するまでの経時的な変化を見るために、計測開始時点から計測終了時点までの主なデータを表-2.8のように抽出した。以下の検討にあたっては表中に示す各時期および経過時間の結果を適宜用いて考察を加える。

なお各測定値の初期値は、以下に示す時期とした。

- ・土圧計は、計測用リングを組み立てる直前の大気中のフリーの状態を初期値とした。
- ・水圧計は、計測用リングに計測器を設置する直前の大気中のフリーの状態を初期値とした。
- ・鉄筋計は、計測用リングを組み立てた直後の値を初期値とした。

表-2.8 主な計測データと主要な時期と経過時間

NO.	計測日時	時期及び経過日時
1	97/ 5/ 7 16:04	2040リング セグメント組立直後
2	97/ 5/ 7 21:36	2041リング セグメント組立直後
3	97/05/07 23:56	2040リング 土圧計テール脱出
4	97/05/08 02:36	2040リング テール脱出直後
5	97/05/08 03:02	2040リング 裏込め注入直後
6	97/05/08 08:00	2041リング テール脱出直後
7	97/05/08 08:54	2041リング 裏込め注入直後
8	97/05/10 14:45	2040リング 補足裏注（11時方向）
9	97/05/10 15:30	2040リング 補足裏注（9時方向）
10	97/05/10 16:15	2040リング 補足裏注（4時方向）
11	97/ 5/ 8 16:30	2040リング 1日後
12	97/ 5/ 8 21:44	2041リング 1日後
13	97/ 5/10 16:30	2040リング 3日後
14	97/ 5/10 21:45	2041リング 3日後
15	97/ 5/14 16:27	2040リング 1週間後
16	97/ 5/14 20:12	2041リング 1週間後
17	97/05/27 16:50	リング 組立後20日後
18	97/06/16 18:52	リング 組立後40日後
19	97/07/06 16:52	リング 組立後60日後
20	97/ 8/ 5 14:05	リング 組立後90日後（安定時）

2.3.1 土圧計

図-2.15 (1)～(3)に2,040リングの土圧の経時変化を示す。なお、ここでいう土圧とは、特に断らない限り水圧を含めた値をいう。3ヶ月後の最終的な土圧計の値の断面分布図を図-2.16に示す。

図-2.15 (1)～(3)から、土圧の経時変化は、計測リングをシールド機内で組立終了時の荷重が作用していない状態から、次の①～④までの状態へと変化しているものと考えられる。

- ①シールド推進によりシールド機との接触による若干の荷重の増加
- ②テールブラシとの接触による荷重の増加
- ③土圧計の計測リングがシールド機外へ出ることによる土圧の作用
- ④裏込め注入による作用土圧の変動

図より、①および②によるシールド機およびテールシールとの接触による変化は、土圧計により異なるが、部分的に40～80kN/m²程度の高い値を示すことがある。また、③の土圧計の計測リングがシールド機外へ出たテール脱出直後の土圧計の値は、10～70kN/m²程度とばらついており、トンネル上部の土圧計で小さく、下部の土圧計で大きい傾向となっている。すなわち、この時点での土圧計の値は、後述する周辺の地下水位調査結果および水圧調査結果から考えると、水圧程度の値しか作用していないものと考えられる。その後、裏込め注入を実施することにより土圧計の値が徐々に変動する。特に、計測リング組立てた後の約3日後に実施した裏込め再注入により大きく変動している。その後、計測リング組立後27日頃に実施した土圧計の埋設治具の漏水処理で土圧計の値が変動しているが、その後の大きな変動はなく、3ヶ月後のほぼ安定したと考えられる最終的な土圧は、70～130kN/m²程度となっている。

裏込め注入の施工管理データによれば、計測リングの裏込め注入の圧力は、400～500kN/m²程度で実施されているが、裏込め注入時の土圧計の値はその値まで上昇していないことが分かる。過去に実施された粘性土地盤中における同様の現場計測結果では、ほぼ裏込め注入圧程度の圧力が記録されていたが、本共同溝の礫地盤を対象とした本計測結果では裏込め注入時の圧力は礫地盤中に散逸し、圧力が上昇しなかったものと考えられる。

一方、3ヶ月後のほぼ安定したと考えられる天端に作用する最終的な土圧結果は、70kN/m²程度となっており、セグメント設計の荷重の考え方を土水分離の全土被り荷重を想定し地下水位面をトンネル天端と仮定すると、天端に作用する鉛直荷重は、水圧で0kN/m²、土圧で約160kN/m²程度となり、この値と比較すると、セグメントに作用する土圧は全土被り土圧の約4～5割が作用していることになる。本トンネルでの緩み荷重が約98.4kN/m²であることからほぼ緩み荷重に近い荷重が作用しているものと考えられる。

表－2.9 計測位置の相違による土圧計測値の比較

計測日時	計測位置 (土圧計NO.)	2,040リング
97/ 8/5 (3ヶ月後)	天端位置 (NO. 1)	71.7 kN/m ²
	下端位置 (NO. 5)	85.2 kN/m ²
	平均値	78.5 kN/m ²

2.3.2 水圧計

図－2.17に水圧の経時変化を示す。また、セグメント組立後約3ヶ月後の断面分布図を図－2.18に示す。

図－2.17から、測定値の経時的な変化は、計測期間中に生じた電源トラブルを除いて大きな変化はない。ただし、緩やかではあるが、徐々に水圧が上昇していることが分かる。天端付近に設置した負圧値のNO.1を除いた水圧計による測定値から地下水位を推定すると、図－2.19に示すようにトンネル天端から約0.5m程度となる。また、図－2.20に計測地点周辺の2ヶ所のボーリング（ボーリングNO.1；2,170リング、ボーリングNO.2；1,933リング）で観測された水位変動値を示すが、2,040リングが施工された5月7日以降の水位は、

5月23日および6月20日あたりの変動状況とよく一致していることが分かる。2ヶ所の観測水位からシールドトンネルの天端 (T. P33. 6m-土被り9. 6m=T. P24. 0m) から1～2m付近に地下水位があるものと推定される。水圧の断面分布形状は、図-2. 19に示すように、地質調査結果等に基づいて想定される地下水位面からの理論値での静水圧分布とよく一致していることが分かる。以上のことより、本現場計測地点付近の地下水位は、トンネル天端付近にあるものと考えることができる。また、本地盤条件と同程度であれば、トンネルに作用する水圧は、地下水位から求められる静水圧が作用するものと考えられる。

2. 3. 3 円周方向鉄筋計

図-2. 21 (1)～(6) および図-2. 22 (1)～(6) にセグメントの主鉄筋 (内側および外側) に配置した鉄筋計の応力測定結果を示す。また、主要な時期における鉄筋応力計測結果を表-2. 10に、断面分布図を図-2. 23 (1)～(5) および図-2. 24 (1)～(5) に示す。

セグメントの鉄筋応力は、2040リングでセグメントがシールドテールから脱出する前後に、圧縮で70N/mm²程度、引張で45N/mm²程度であり、長期的にも圧縮で60N/mm²程度、引張で20N/mm²程度となっている。また、同様に2041リングでセグメントがシールドテールから脱出する前後に、圧縮で30N/mm²程度、引張で10N/mm²程度以下であり、長期的にも異常値を除き、圧縮で40N/mm²程度、引張で20N/mm²程度となっており、両計測リングともに鉄筋 (SD295) の許容応力度が、180N/mm²であることを考えると実際に生じた応力は非常に小さいことが分かる。鉄筋計の経時的な変化は、一部の計測データを除き、約20日程度で一定値に収束している傾向にあることが分かった。これらの経時的な変化は、先に示した土圧計の変化とも傾向が一致している。

2. 3. 4 軸方向鉄筋計

図-2. 25 (1)～(6) に2041リングのセグメントの軸方向鉄筋計 (内側および外側) の応力測定結果を示す。図より、セグメント外側の軸方向鉄筋計の値は、セグメント組立後の次リング推進時においてもほとんど変化がないことが分かる。一方、セグメント内側の軸方向鉄筋計の値は、次リング推進時から最大で50N/mm²の圧縮力が作用しており、この応力は、推進時以外の時に若干小さくなるものの、シールドと計測リングの距離が大きくなってもあまり低下せず、ほぼ値が収束した時点においても当初の応力が残っていることが分かった。別途、計測を行った軟弱な粘性土地盤における計測値は、シールドと計測リングとの距離が直近の場合に若干の圧縮力が作用したものの、その後10N/mm²以下の圧縮力のみが作用していたのに対し、本トンネルの地盤のような礫質地盤では、当初に作用した軸方向力がそのままセグメントに作用していることが分かった。

2. 3. 5 ダミー供試体鉄筋応力

図-2. 26にダミー供試体内に設置した鉄筋計の計測結果を示す。図より、経過日数が約40日程度までは時間とともに圧縮応力が増加し、その後約8～10N/mm²程度でほぼ収束していることが分かる。

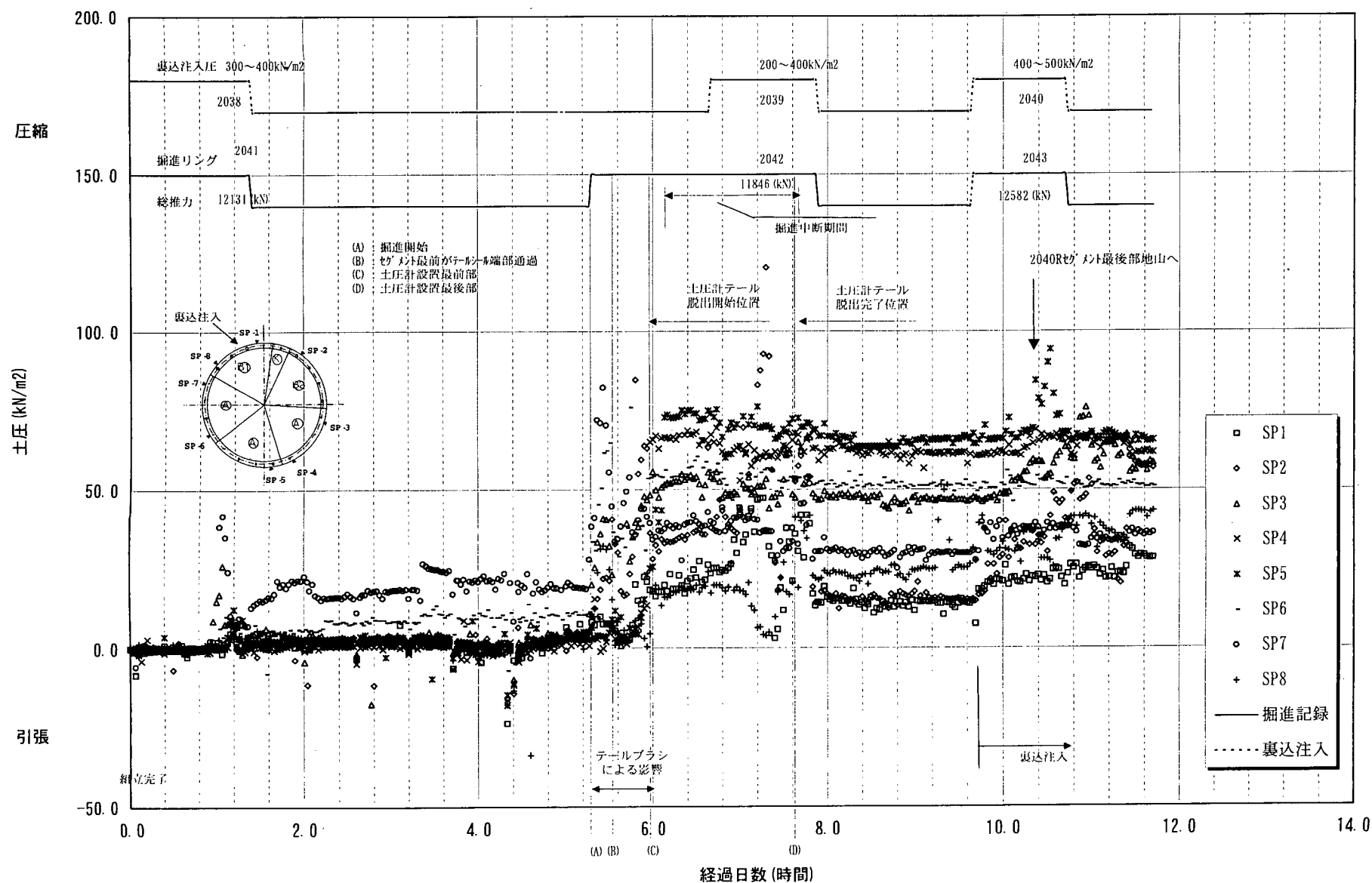


図-2.15 (1) 土圧計の経時変化図 (2040R)

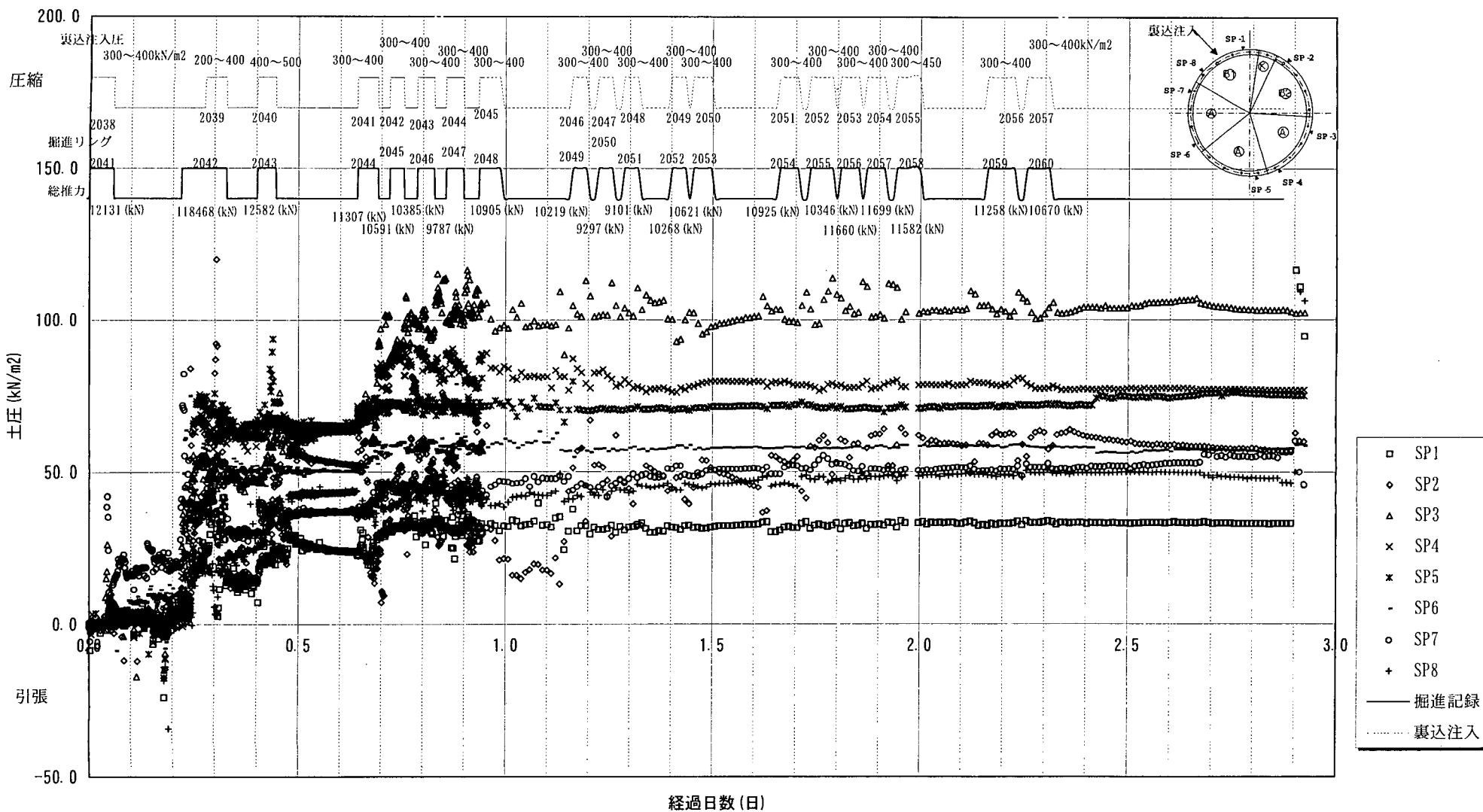


図-2.15(2) 土圧計の経時変化 (2040 R)

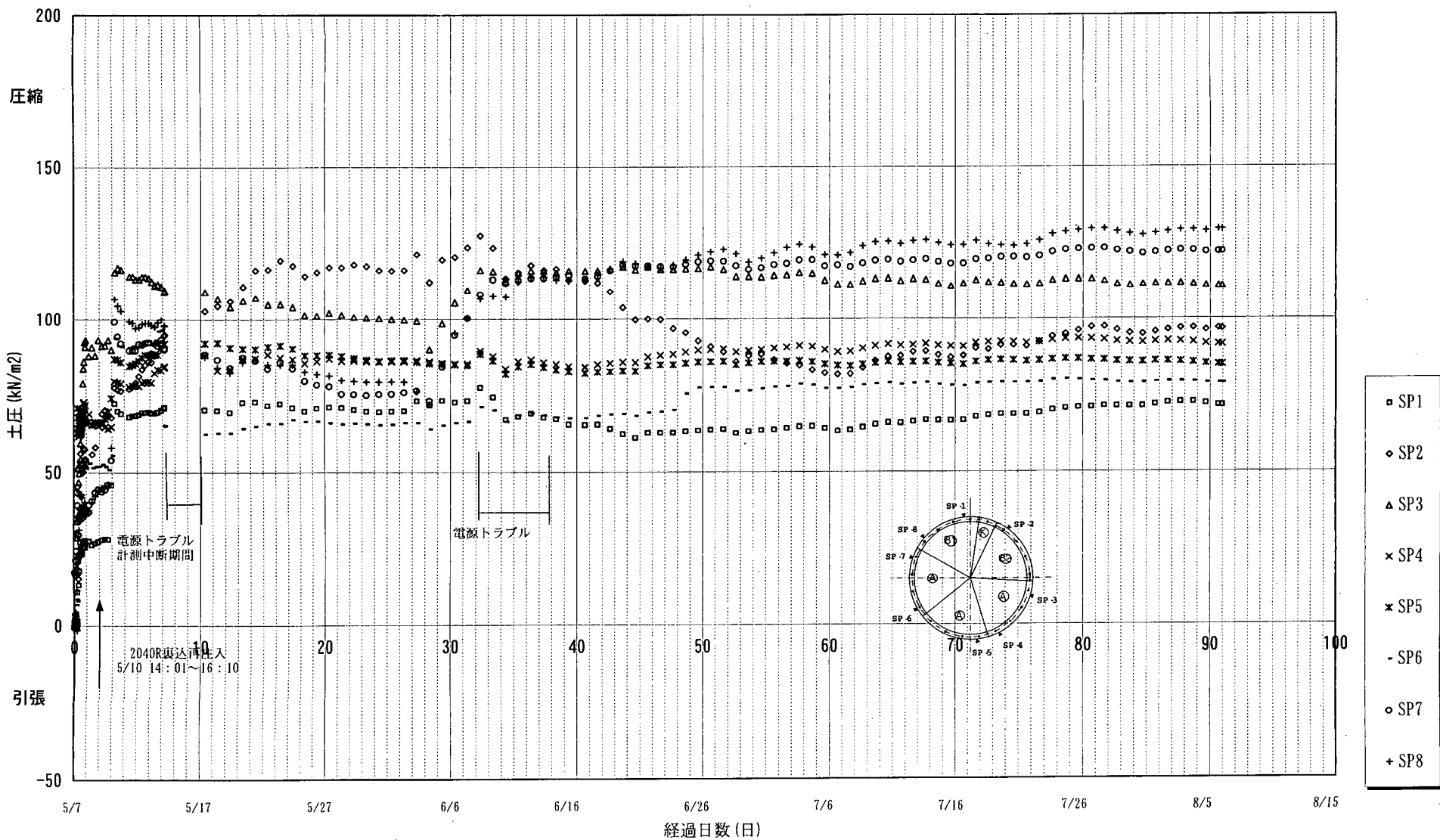


図-2.15(3) 土圧計の経時変化(2040R)

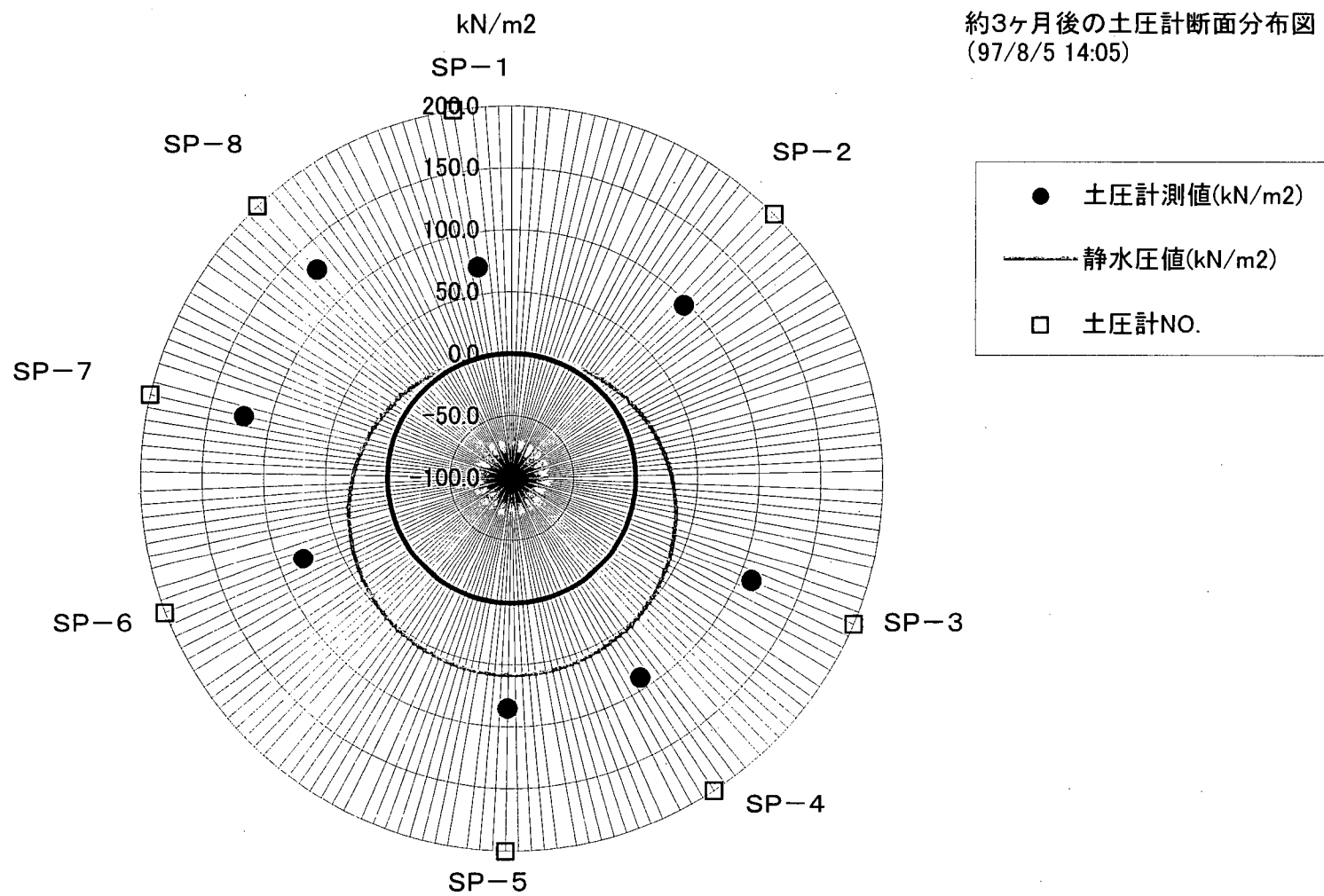


図-2.16 土圧計の断面分布図(3ヶ月後)

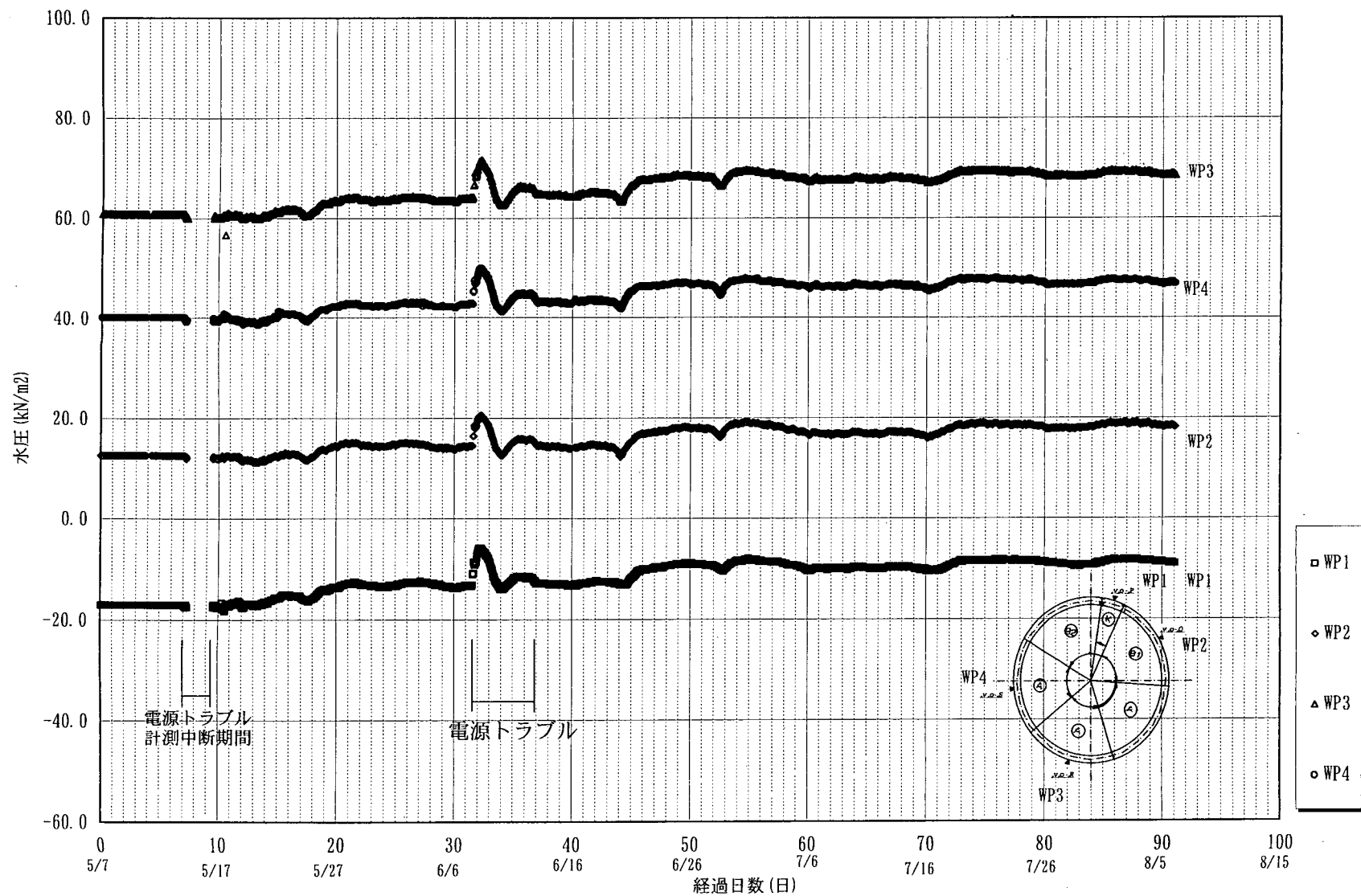


図-2.17 水圧計の経時変化

約3ヶ月後の水圧計断面分布図
(97/8/5 14:05)

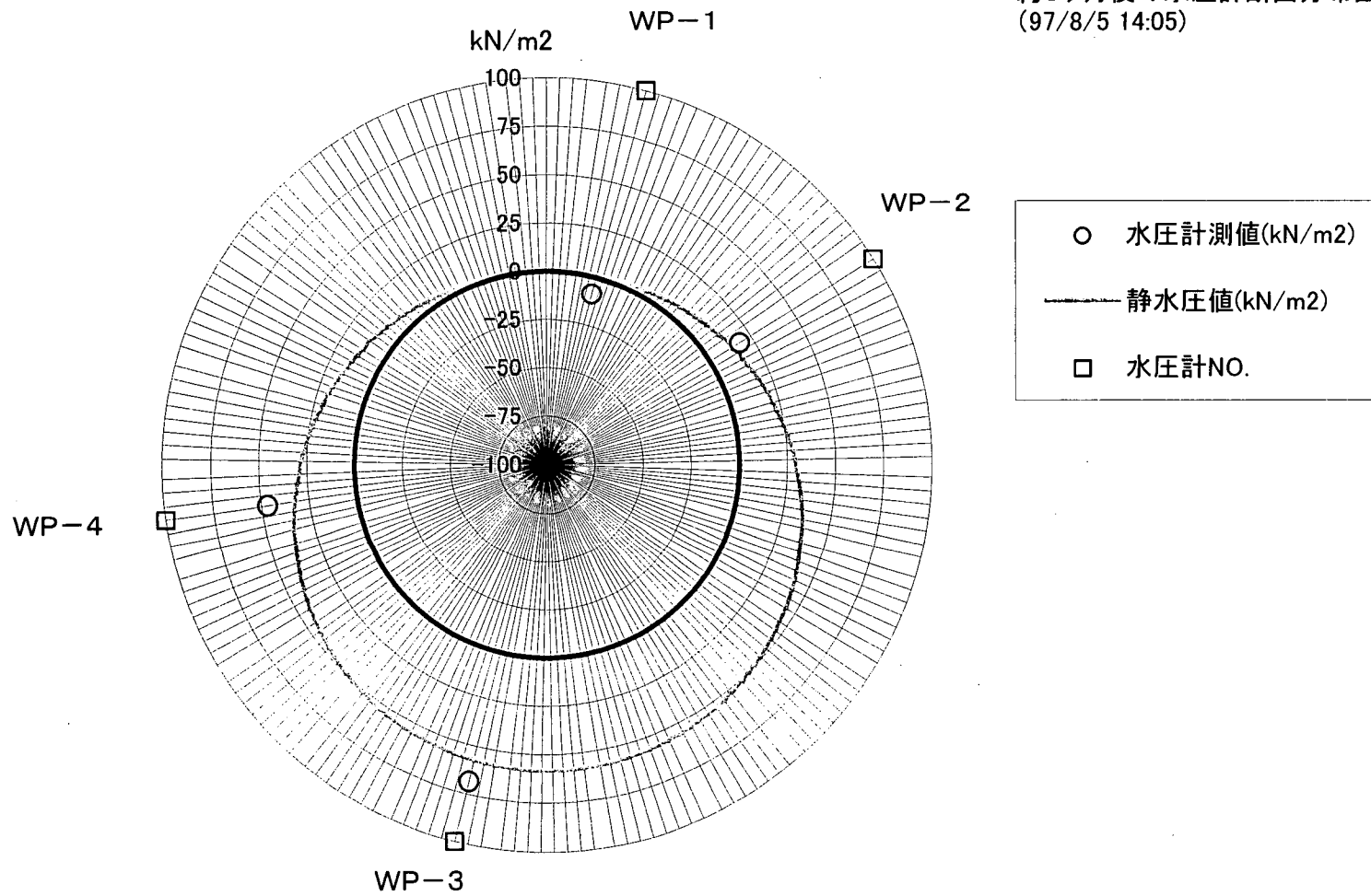


図-2.18 水圧計の断面分布図(3ヶ月後)

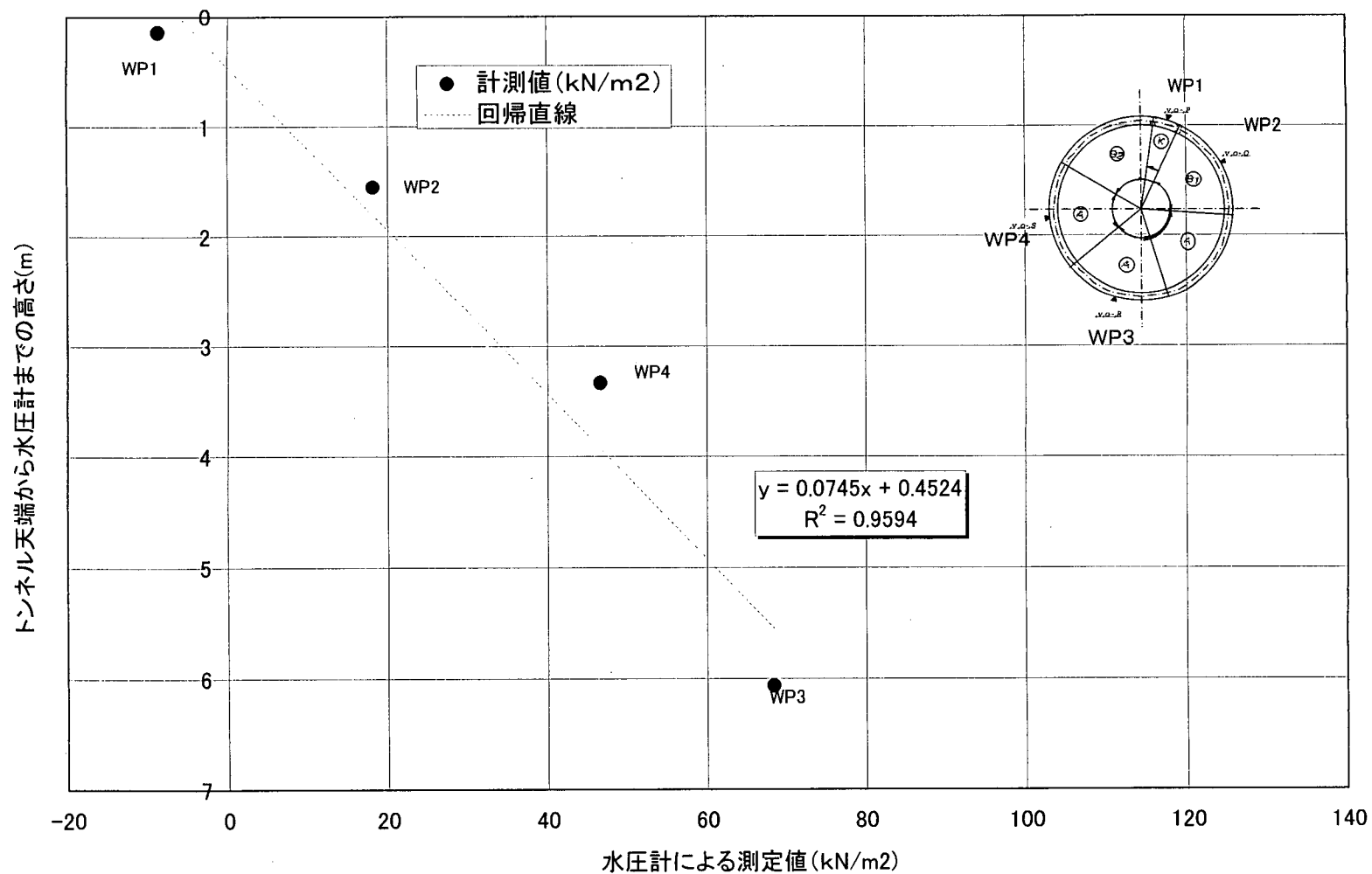


図-2.19 計測された水圧値とトンネル天端からの高さの関係

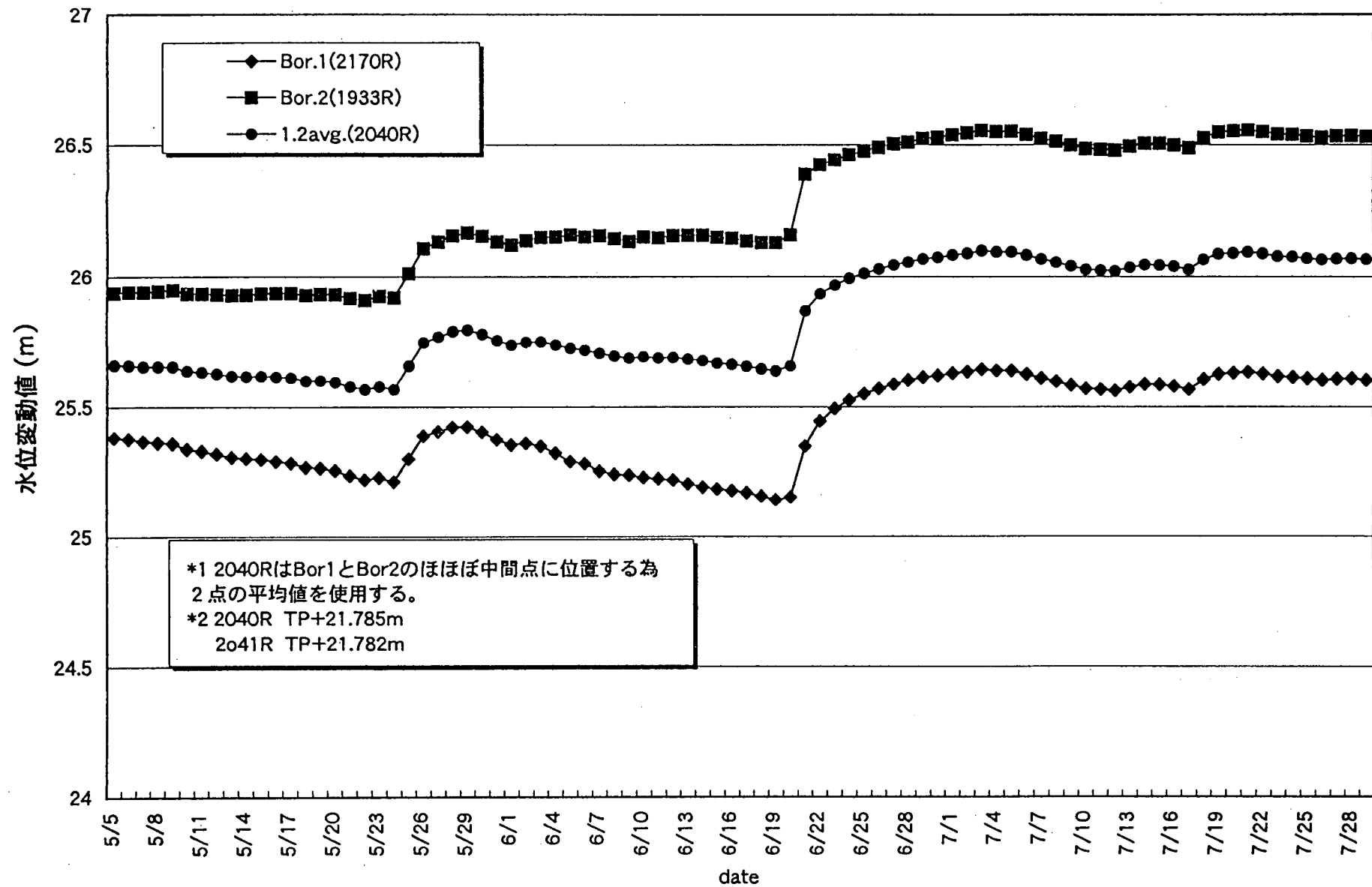


図-2.20 計測地点周辺のボーリング孔の水位変動

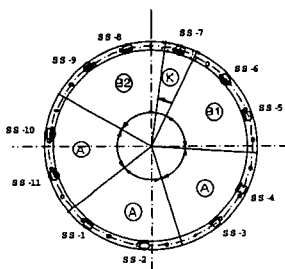
表-2.10 円周方向鉄筋応力計測結果

調布共同溝 周方向鉄筋計 (内側) 応力 (N/mm²)

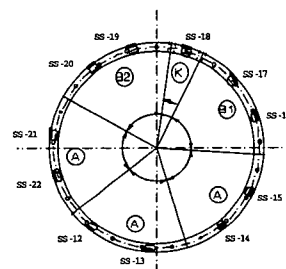
状態	日付	時間	2040リング		2040リング 内側鉄筋											2041リング 内側鉄筋										
			経過時間(日)	経過時間(日)	SS1	SS2	SS3	SS4	SS5	SS6	SS7	SS8	SS9	SS10	SS11	2SS1	2SS2	2SS3	2SS4	2SS5	2SS6	2SS7	2SS8	2SS9	2SS10	2SS11
20402 土組立完了	97/05/07	16:20:00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
20412 土組立完了	97/05/07	21:36:17	0.22	0.00	-15.49	-10.53	-30.55	-13.34	-22.22	-41.49	-14.03	-8.16	-26.14	-3.83	-7.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
2040土圧計A脱出	97/05/07	23:56:00	0.32	0.10	-17.56	-7.77	-19.22	-6.67	-18.68	-34.95	-41.79	-18.39	-15.61	-5.05	-3.82	-6.57	-12.94	-4.62	-17.05	-0.54	-9.48	-4.40	-15.72	-18.61	-14.74	
2040土圧計B脱出	97/05/08	02:36:00	0.43	0.21	-17.63	-8.92	-2.91	2.25	-4.92	-16.83	-22.95	-15.56	-4.15	-2.53	-4.81	-10.77	-16.01	-10.62	-17.35	-25.27	-35.42	-8.11	-11.83	-8.53		
2040環込の注水直後	97/05/08	03:02:00	0.45	0.23	-8.17	-9.30	-2.99	2.33	-4.00	-17.71	-21.01	-15.03	-5.23	-4.14	-3.36	-4.97	-12.42	-3.77	-10.67	-20.91	-40.78	-3.63	-8.01	-8.92		
2041土圧計A脱出直後	97/05/08	08:00:45	0.65	0.43	-8.71	-11.61	-6.05	0.47	-6.84	-22.94	-22.78	-15.79	-6.61	-4.75	-6.11	-2.83	-7.93	-3.39	-6.07	-31.94	-34.72	-3.25	-1.30	-4.84		
2041土圧計B脱出直後	97/05/08	08:54:45	0.69	0.47	-9.17	-11.23	-5.21	2.25	-5.69	-22.40	-20.40	-15.95	-7.69	-3.14	-5.73	-3.13	-9.80	-3.77	-3.76	-37.99	-36.81	-5.56	-5.04	-3.46		
2040環込の注水直後	97/05/08	16:29:39	1.01	0.79	-11.64	-14.07	-12.87	7.21	-6.23	-24.17	-21.17	-12.05	-9.15	-4.21	-5.81	-6.80	-10.03	-2.93	-4.07	-39.67	-40.93	-12.29	-11.52	-11.30		
2041環込の注水直後	97/05/08	21:44:39	1.23	1.01	-13.49	-15.45	-11.79	7.14	-7.77	-22.86	-21.09	-12.89	-7.69	-4.14	-5.73	-4.74	-6.51	-1.00	-3.69	-39.52	-40.00	-11.82	-12.36	-11.30		
2040環込の注水(11時方向)	97/05/10	14:45:16	2.93	2.71	-13.33	-15.15	-10.80	2.71	-7.84	-23.86	-22.32	-15.72	-12.46	0.92	-3.06	-4.81	-10.03	-0.85	-2.99	-40.59	-41.86	-11.59	-11.90	-11.23		
2040環込の注水(9時方向)	97/05/10	15:30:16	2.97	2.75	-15.57	-18.14	-12.94	7.99	-10.46	-25.40	-23.70	-18.23	-15.61	-3.68	-5.35	-5.04	-9.43	-1.00	-3.76	-41.21	-42.64	-12.21	-12.51	-12.53		
2040環込の注水(4時方向)	97/05/10	16:15:16	3.00	2.78	-14.11	-17.61	-11.95	4.34	-10.46	-26.10	-24.39	-18.46	-15.53	-4.52	-6.65	-5.04	-11.37	-0.69	-3.15	-41.74	-43.42	-12.44	-13.35	-12.84		
2040環込の注水(3時方向)	97/05/10	16:30:16	3.01	2.79	-13.64	-17.76	-11.34	4.19	-10.61	-25.94	-24.23	-18.54	-15.45	-4.44	-6.80	-4.97	-11.45	-0.92	-3.23	-41.74	-43.34	-12.52	-13.35	-12.84		
2041環込の注水直後	97/05/10	21:45:16	3.23	3.01	-12.87	-17.99	-11.57	1.47	-9.92	-25.64	-23.85	-18.01	-14.84	-4.44	-7.18	-4.66	-11.00	-0.92	-2.99	-41.44	-43.11	-12.29	-12.51	-12.22		
2040環込の注水(3時方向)	97/05/10	16:30:16	3.01	2.79	-13.64	-17.76	-11.34	4.19	-10.61	-25.94	-24.23	-18.54	-15.45	-4.44	-6.80	-4.97	-11.45	-0.92	-3.23	-41.74	-43.34	-12.52	-13.35	-12.84		
2041環込の注水(7時方向)	97/05/14	20:12:07	7.16	6.94	-11.64	-13.38	-13.02	9.08	-8.23	-24.63	-22.01	-16.25	-13.22	-0.15	-4.81	-0.99	-10.63	1.15	-0.77	-38.91	-41.40	-10.36	-9.00	-9.38		
2041環込の注水(20時方向)	97/05/27	16:50:30	20.02	19.80	-8.56	-9.38	-15.55	4.03	-7.77	-23.79	-15.49	-17.17	-14.22	0.92	-4.28	17.04	-7.48	0.08	-2.23	-26.19	-42.33	-9.20	-11.75	-12.07		
2041環込の注水(40時方向)	97/06/16	18:52:28	40.11	39.89	-6.47	-7.38	-15.78	0.39	-8.15	-23.71	-18.48	-17.85	-15.38	0.46	-4.89	12.53	-6.36	-0.15	-2.84	-112.05	-43.42	-8.89	-12.82	-13.61		
2041環込の注水(60時方向)	97/07/06	16:52:31	60.02	59.80	-4.86	-5.77	-12.33	2.25	-7.61	-23.40	-19.25	-17.70	-15.38	0.31	-4.05	6.80	-5.84	0.15	-2.23	-432.27	-44.04	-9.66	-12.67	-13.84		
2041環込の注水(安定時)	97/08/05	14:05:42	89.91	89.69	-2.85	-3.46	-6.51	0.93	-3.77	-19.86	-18.87	-14.19	-12.15	1.99	-1.22	16.42	-4.56	4.31	1.31	*****	-42.25	-9.12	-9.00	-10.69		

調布共同溝 周方向鉄筋計 (外側) 応力 (N/mm²)

状態	日付	時間	2040リング 外側鉄筋											2041リング 外側鉄筋											
			経過時間(日)	経過時間(日)	SS12	SS13	SS14	SS15	SS16	SS17	SS18	SS19	SS20	SS21	SS22	2SS12	2SS13	2SS14	2SS15	2SS16	2SS17	2SS18	2SS19	2SS20	2SS21
2040リング外組立完了	97/05/07	16:20:00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2041リング外組立完了	97/05/07	21:36:17	0.22	0.00	12.90	-16.42	-13.41	-14.61	2.00	46.58	-50.87	-10.27	42.55	-14.50	-11.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2040土圧計・A脱出	97/05/07	23:56:00	0.32	0.10	15.13	-16.04	-6.71	-4.82	-25.33	-1.61	-30.37	-21.46	19.94	-3.51	-4.48	-3.25	-2.98	-11.55	-3.53	-14.53	-6.77	-1.31	-14.92	-1.53	1.92
2040土圧計・B脱出	97/05/08	02:36:00	0.43	0.21	9.37	-10.24	-3.81	0.69	-4.77	10.56	-9.33	-3.96	10.92	4.20	-6.02	-13.99	-11.15	-3.77	-3.61	-16.99	-14.16	1.62	-22.64	-3.89	-0.08
2040環込の注水直後	97/05/08	03:02:00	0.45	0.23	8.83	-9.93	-3.81	-1.91	-0.31	10.71	-16.22	-3.73	10.77	4.35	-7.87	-13.06	-8.02	0.46	0.92	-22.37	-3.08	-1.39	-28.15	-5.65	2.76
2041土圧計・A脱出直後	97/05/08	08:00:45	0.65	0.43	5.45	-13.60	-2.97	-2.75	-2.54	13.62	-21.11	-6.16	9.47	2.06	-6.17	-7.03	-3.21	-0.59	-5.84	-16.45	-3.93	-3.47	-23.56	-9.08	7.06
2041土圧計・B脱出直後	97/05/08	08:54:45	0.69	0.47	7.68	-13.60	-4.04	-3.82	-3.46	12.01	-33.66	-2.05	5.50	1.30	-4.09	-8.58	-4.97	0.62	-8.45	-2.31	1.85	-5.09	-23.41	-9.92	4.75
2040環込の注水直後	97/05/08	16:29:39	1.01	0.79	14.74	-16.12	-4.88	-11.70	-6.00	7.73	-33.35	-5.56	5.35	-1.37	0.69	-1.24	-2.29	-0.77	-8.60	-3.77	1.08	-5.87	-20.81	-8.32	6.14
2041環込の注水直後	97/05/08	21:44:39	1.23	1.01	13.44	-14.36	-4.11	-13.46	-7.70	10.02	-31.06	-6.24	5.73	-0.15	1.23	0.93	-0.99	-1.69	-8.91	-4.77	1.08	-4.94	-22.03	-7.93	5.75
2040掘定直注 (11時方向)	97/05/10	14:45:16	2.93	2.71	12.75	-11.38	-6.63	-5.20	-4.00	13.92	-32.13	-2.28	12.38	1.14	2.78	1.70	2.37	-2.46	-8.98	-5.46	1.62	-3.94	-23.41	-4.65	7.29
2040掘定直注 (9時方向)	97/05/10	15:30:16	2.97	2.75	11.06	-14.67	-6.93	-6.27	-4.16	13.85	-31.59	-2.28	9.78	1.75	1.70	2.32	0.92	-3.23	-10.60	-4.92	2.08	-3.70	-25.40	-6.56	10.97
2040掘定直注 (4時方向)	97/05/10	16:15:16	3.00	2.78	7.06	-15.36	-11.12	-3.60	-6.39	12.85	-31.74	-2.21	10.24	3.20	3.01	0.08	3.51	-3.93	-13.51	-5.07	1.92	-3.86	-23.94	-6.41	11.81
2040掘定直注	97/05/10	16:30:16	3.01	2.79	7.06	-14.67	-11.43	-3.29	-6.39	13.08	-31.97	-2.05	10.16	3.20	2.93	-0.23	3.67	-4.70	-13.28	-5.07	1.92	-3.94	-23.94	-6.49	11.96
2041掘立直後	97/05/10	21:45:16	3.23	3.01	7.68	-13.14	-11.58	-3.60	-5.93	13.31	-32.05	-2.13	9.47	4.35	3.94	-0.23	2.90	-3.70	-13.05	-5.07	2.00	-3.94	-24.48	-6.49	9.51
2040掘立直後	97/05/14	16:27:07	7.00	6.79	8.22	-14.90	-10.44	-7.88	-11.32	10.25	-37.71	-7.23	4.13	2.21	-1.16	-2.16	3.97	-7.16	-18.20	-9.53	-1.54	-8.41	-28.91	-10.76	6.44
2041掘立直後	97/05/14	20:12:07	7.16	6.94	8.06	-15.20	-12.19	-7.27	-10.16	10.48	-37.79	-7.23	4.13	2.06	-0.15	-2.63	4.05	-5.47	-16.51	-9.53	-1.54	-8.57	-28.68	-10.68	7.59
掘立後20日	97/05/27	16:50:30	20.02	19.80	12.36	-11.38	-10.13	-2.45	-7.54	16.06	-40.92	-6.54	5.88	9.08	2.86	5.25	6.11	-5.93	-17.05	-8.53	-1.39	-16.13	-29.76	-12.67	5.06
掘立後40日	97/06/16	18:52:28	40.11	39.89	15.82	-10.31	-8.92	-1.61	-9.39	16.75	-51.33	-6.62	4.35	6.18	2.93	7.73	8.56	-6.77	-18.58	-9.61	-3.77	-25.24	-30.67	-14.27	8.13
掘立後60日	97/07/06	16:52:31	60.02	59.80	16.82	-8.56	-8.00	-0.38	-8.08	17.90	-57.45	-7.38	4.81	7.40	5.87	8.27	9.70	-4.39	-16.97	-10.23	-4.85	-26.09	-27.15	-13.66	10.89
掘立後90日 (安定時)	97/08/05	14:05:42	89.91	89.69	19.12	-5.50	-4.95	3.29	-3.08	19.05	-57.75	-3.35	9.93	10.30	10.42	9.89	12.45	-0.31	-15.06	-8.61	-1.54	-19.91	-22.03	-9.38	15.11



2040リング 計測位置



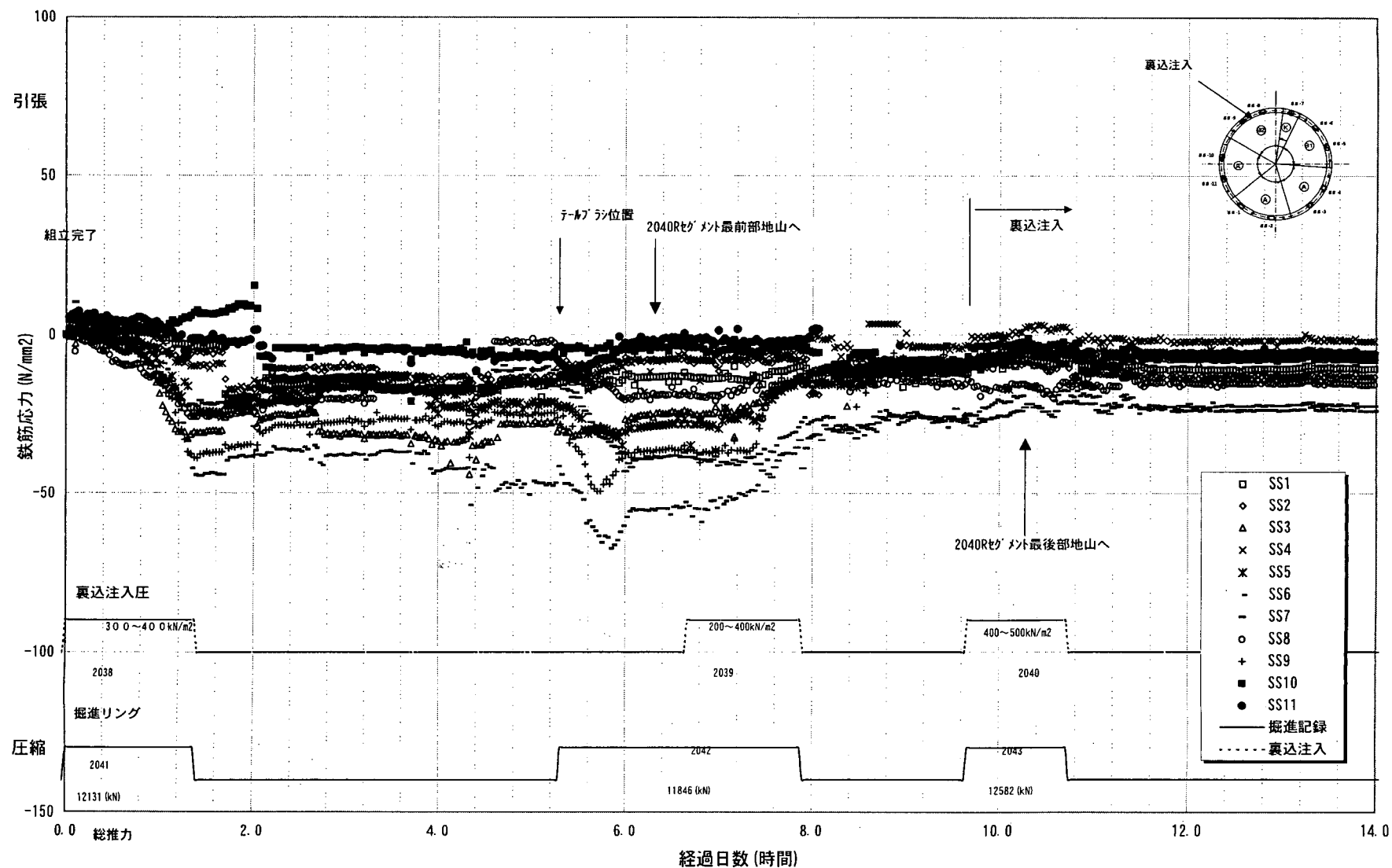


図-2.21 (1) 周方向鉄筋応力 (2040 R 内側)

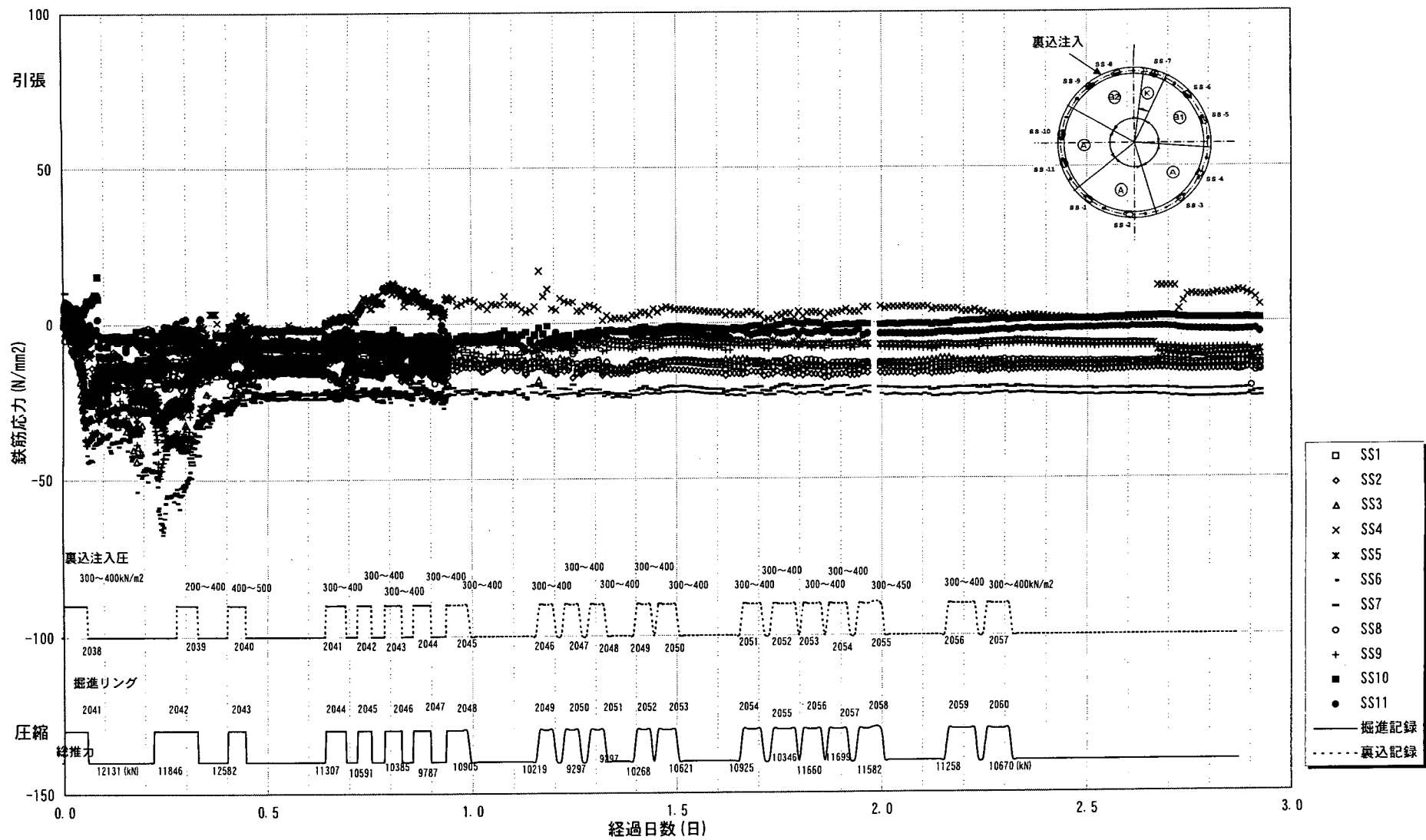


図-2.21(2) 周方向鉄筋応力 (2040R内側)

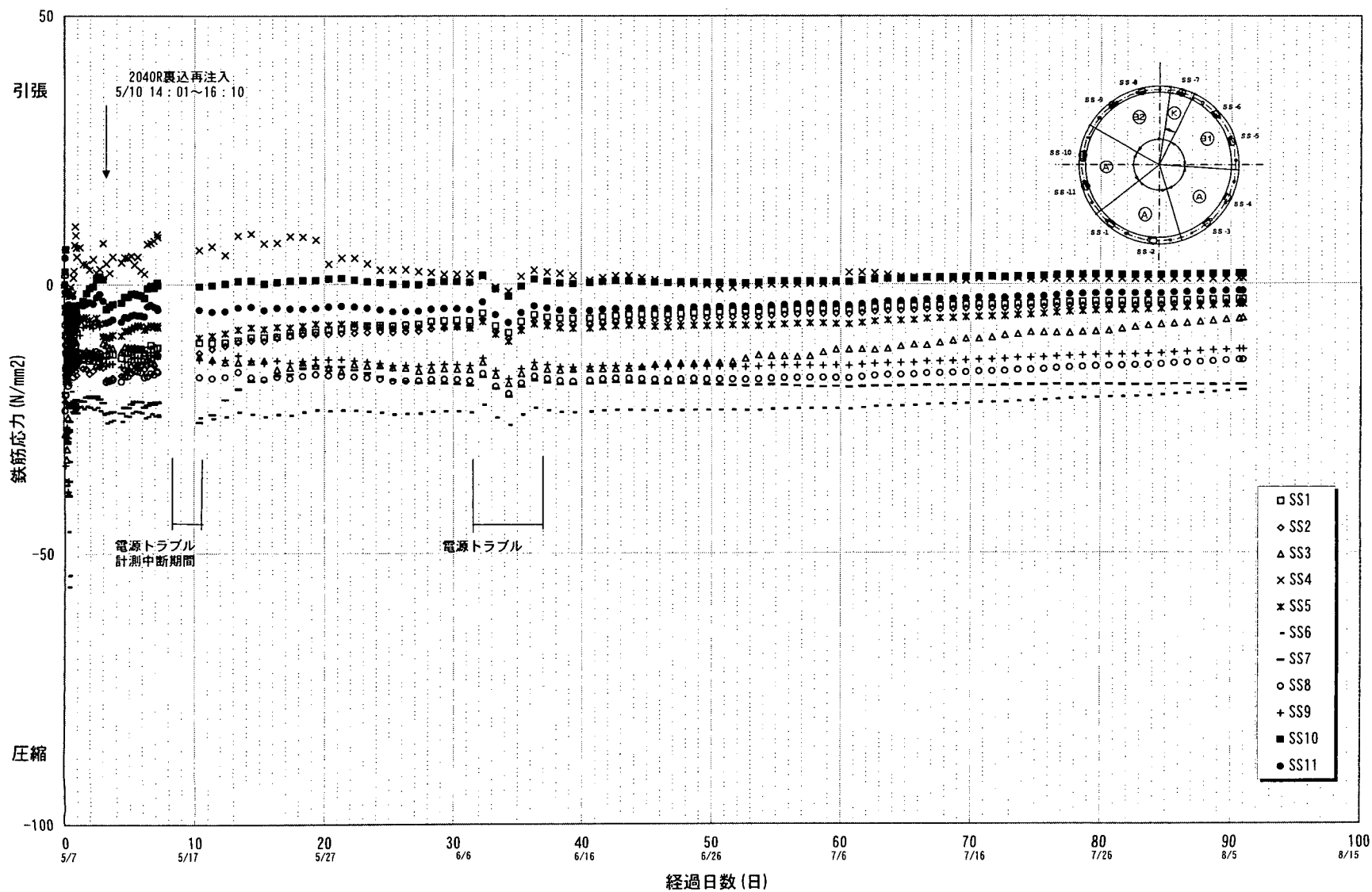


図-2.21 (3) 周方向鉄筋計 (2040R内側)

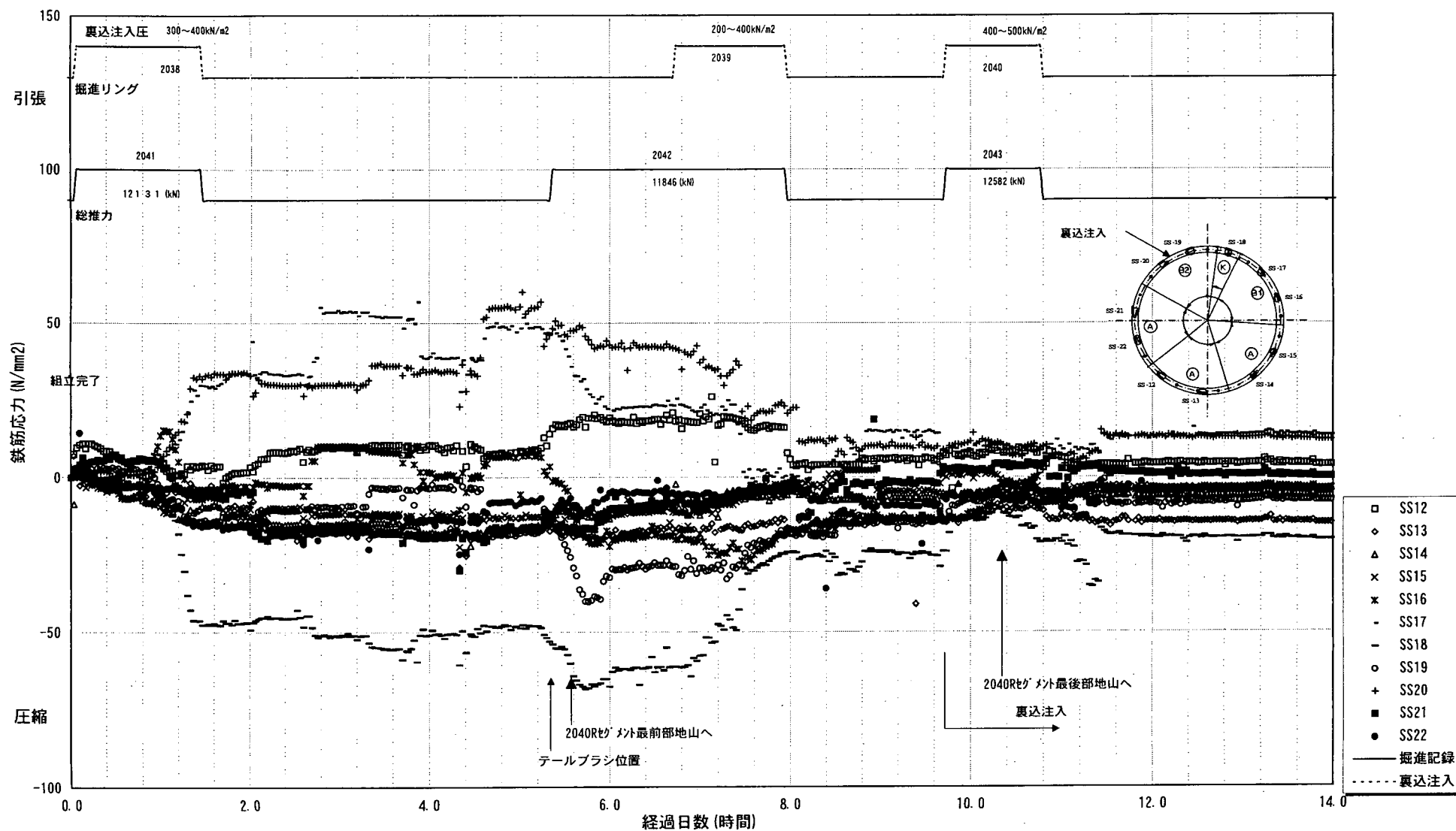


図-2.21 (4) 周方向鉄筋応力(2040R外側)

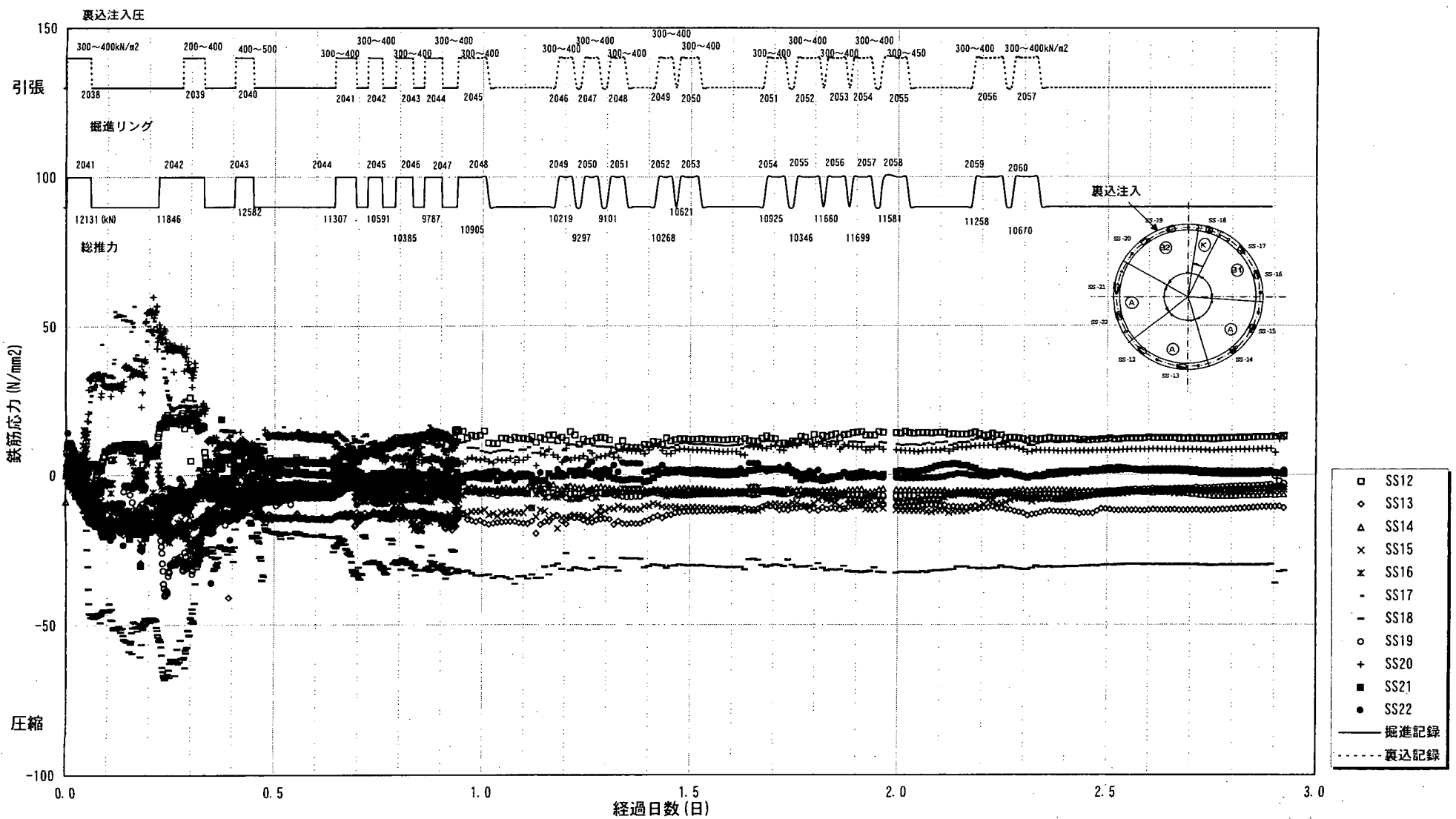


図-2.21 (5) 周方向鉄筋計 (2040R外側)

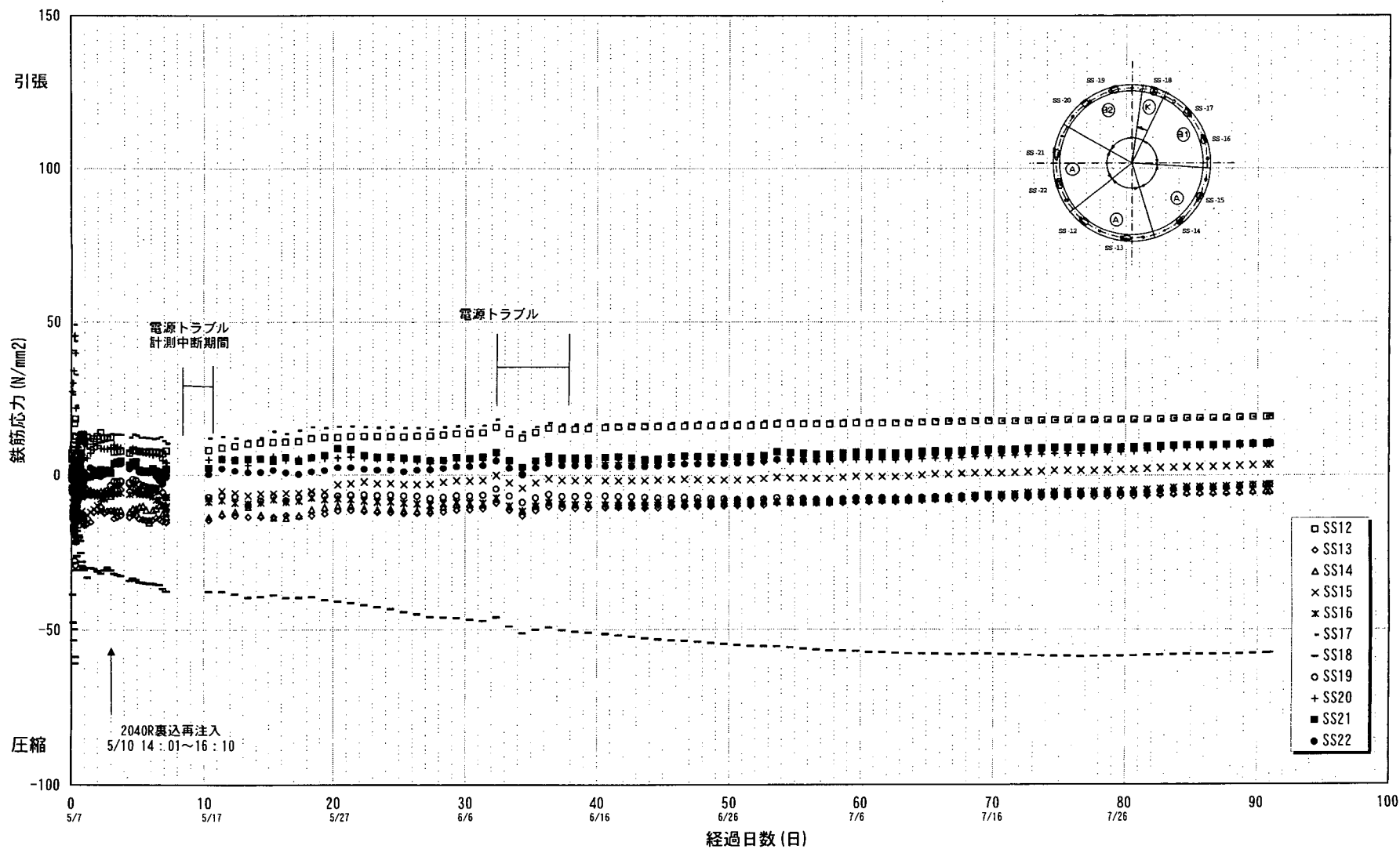


図-2.21 (6) 周方向鉄筋応力 (2040R外側)

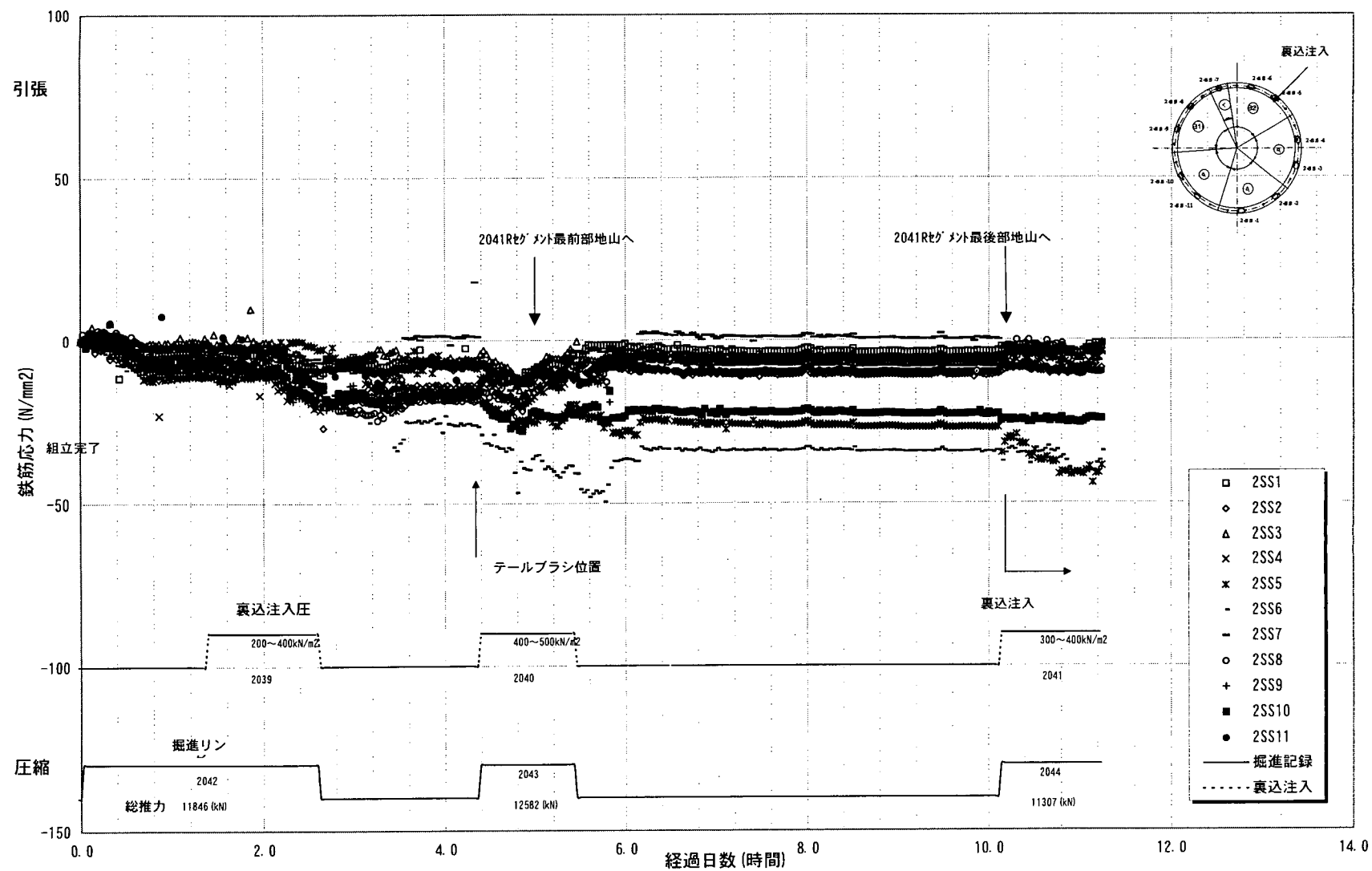


図-2.2.2 (1) 周方向鉄筋応力 (2041R内側)

図-2.22 (2) 周方向鉄筋応力 (2041R内側)

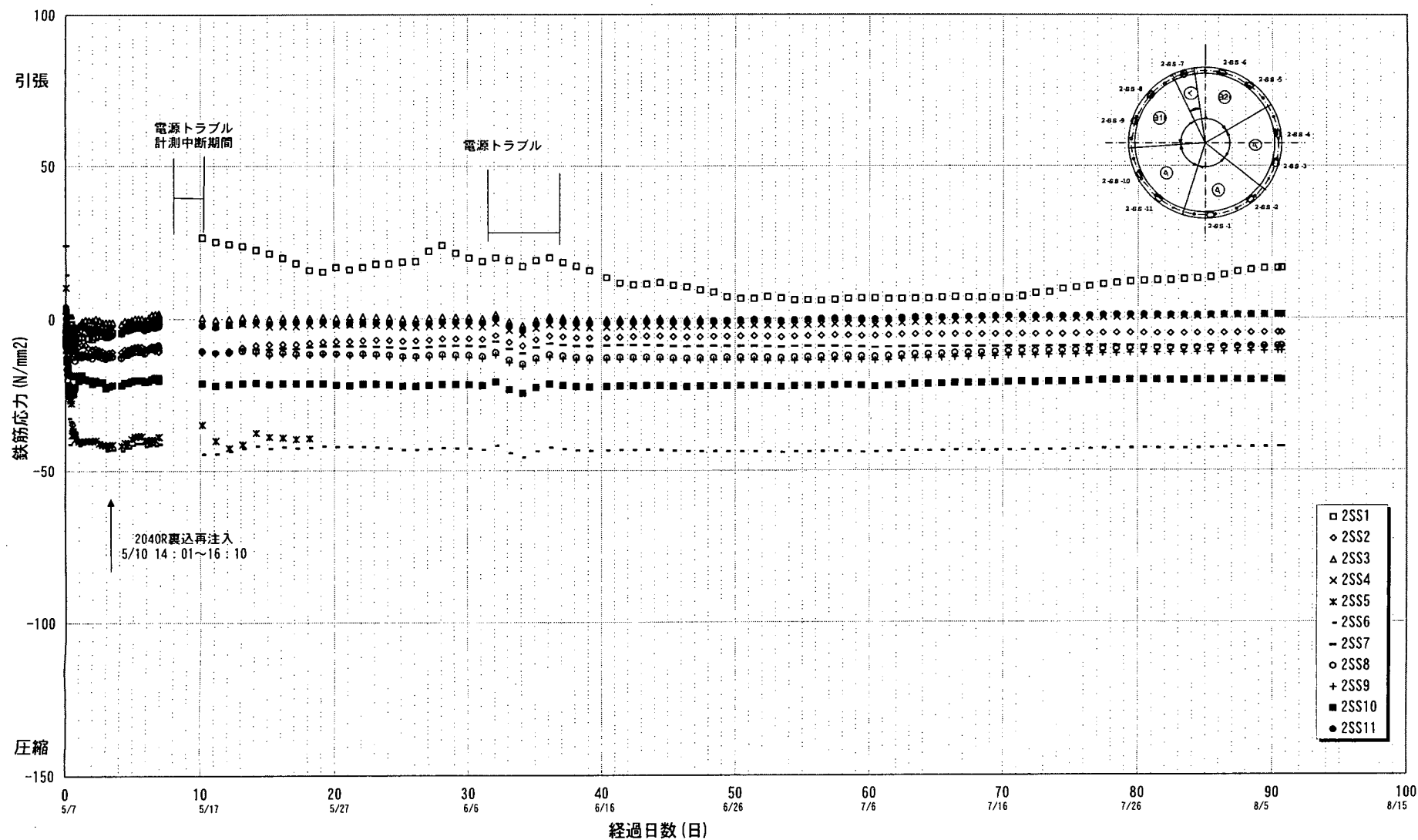


図-2.22 (3) 周方向鉄筋応力 (2041R内側)

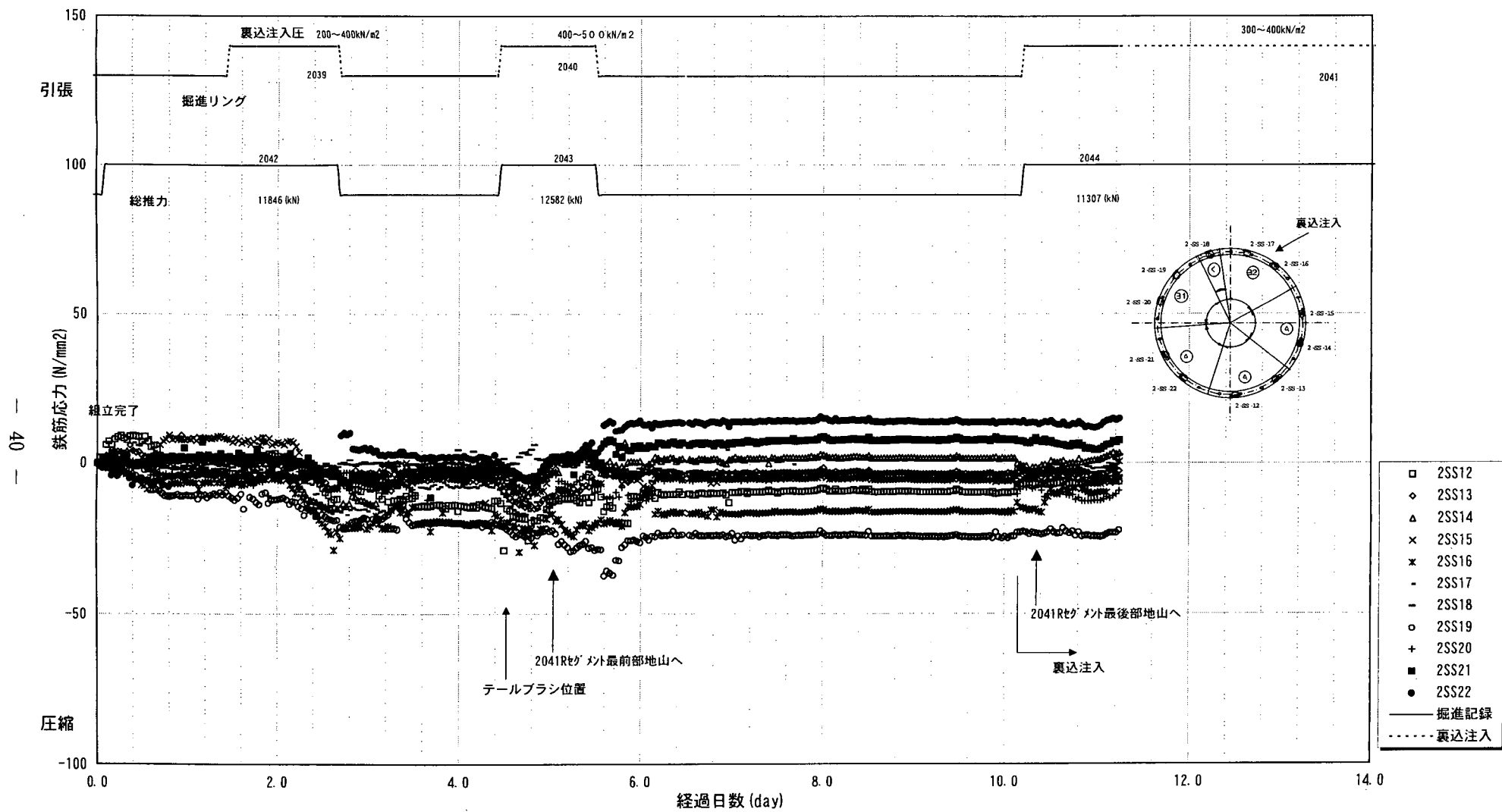


図-2.2.2 (4) 周方向鉄筋応力 (2041R外側)

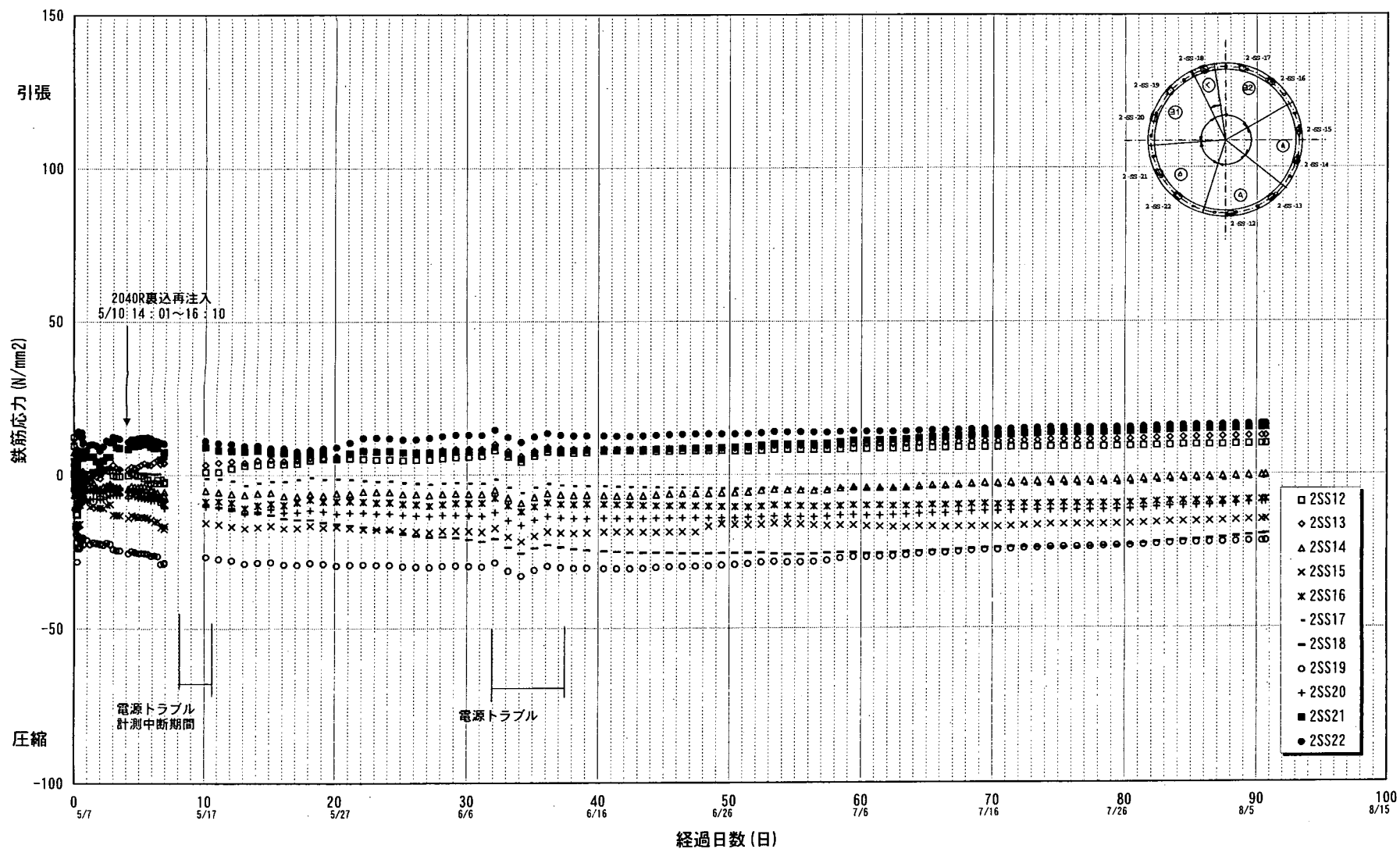
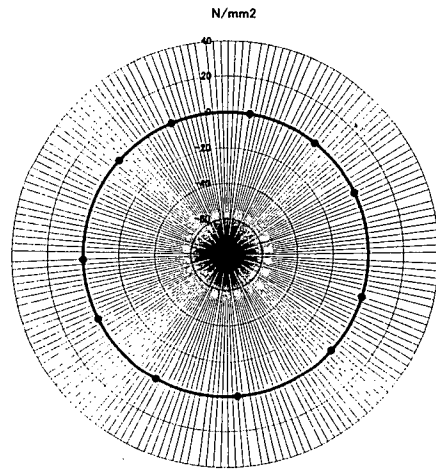


図-2.22(6) 周方向鉄筋応力(2041外側)

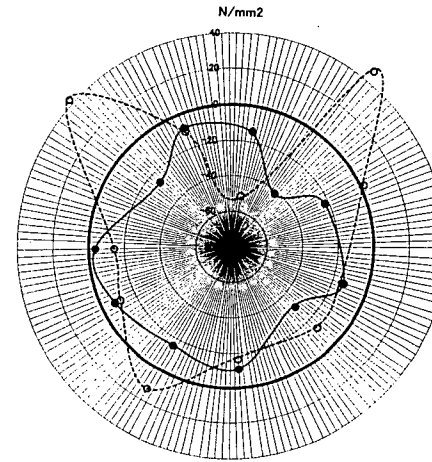
2040リング周方向鉄筋応力



97/05/07 16:20:00
2040リングセグメント組立完了
初期値からの経過日(0.00日)

- 内側鉄筋応力
- 外側鉄筋応力

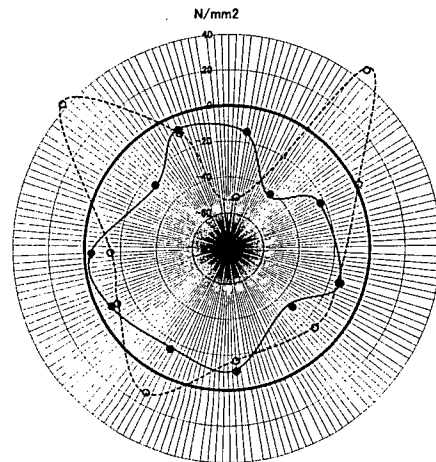
2040リング周方向鉄筋応力



97/05/07 21:36:17
2041リングセグメント組立完了
初期値からの経過日(0.22日)

- 内側鉄筋応力
- 外側鉄筋応力

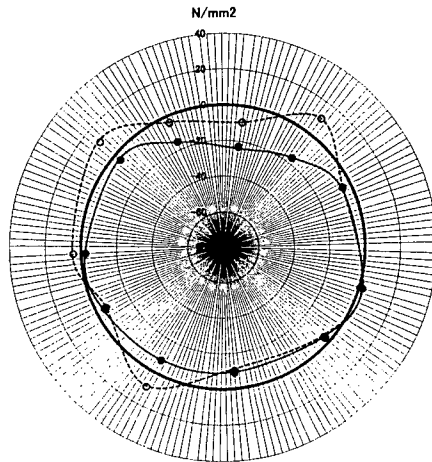
2040リング周方向鉄筋応力



97/05/07 23:56:00
2040リング土圧計テール脱出
初期値からの経過日(0.32日)

- 内側鉄筋応力
- 外側鉄筋応力

2040リング周方向鉄筋応力

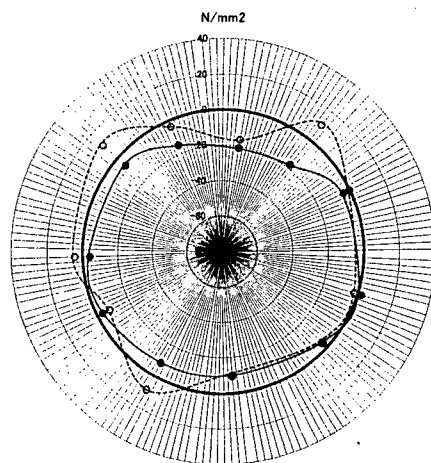


97/05/07 2:38:00
2040リングテール脱出直後
初期値からの経過日(0.43日)

- 内側鉄筋応力
- 外側鉄筋応力

図-2.23 (1) 円周方向鉄筋応力分布 (2040R)

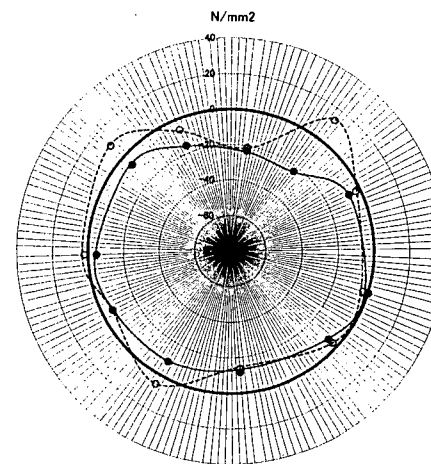
2040リング周方向鉄筋応力



97/05/08 3:02:00
2040リング裏込め注入直後
初期値からの経過日(0.45日)

- 内側鉄筋応力
- 外側鉄筋応力

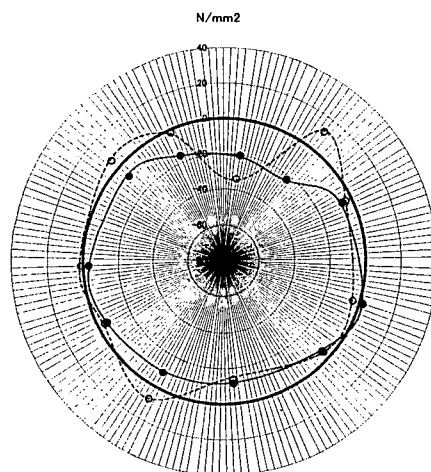
2040リング周方向鉄筋応力



97/05/08 8:00:45
2041リングテール脱出直後
初期値からの経過日(0.65日)

- 内側鉄筋応力
- 外側鉄筋応力

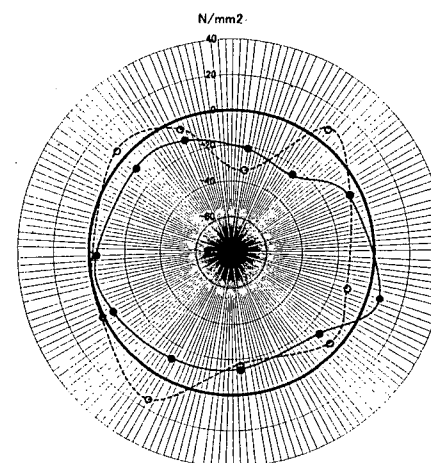
2040リング周方向鉄筋応力



97/05/08 8:54:45
2041裏込め注入直後
初期値からの経過日(0.69日)

- 内側鉄筋応力
- 外側鉄筋応力

2040リング周方向鉄筋応力

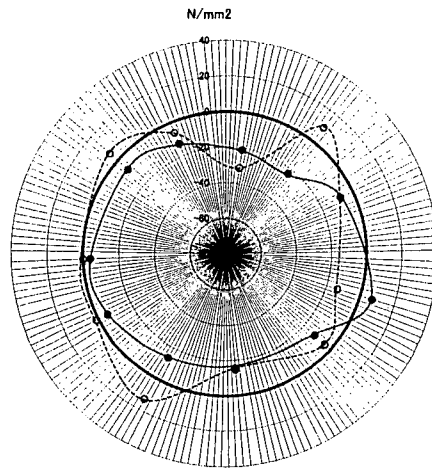


97/05/08 16:29:39
2040組立後1日
初期値からの経過日(1.01日)

- 内側鉄筋応力
- 外側鉄筋応力

図-2.23 (2) 円周方向鉄筋応力分布(2040R)

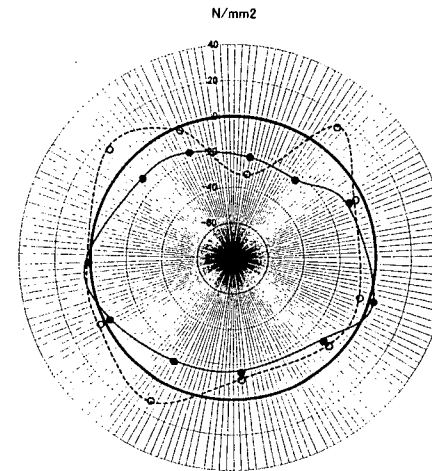
2040リング周方向鉄筋応力



97/05/08 21:44:39
2041組立後1日
初期値からの経過日(1.23日)

● 内側鉄筋応力
○ 外側鉄筋応力

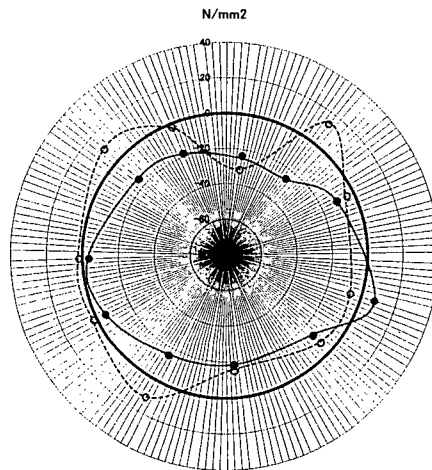
2040リング周方向鉄筋応力



97/05/10 14:45:16
2040補足裏込め注入(11時方向)
初期値からの経過日(2.93日)

● 内側鉄筋応力
○ 外側鉄筋応力

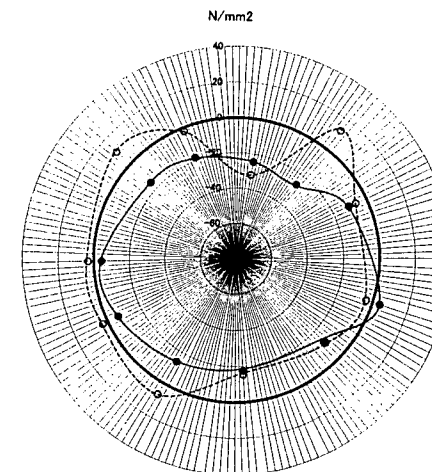
2040リング周方向鉄筋応力



97/05/10 15:30:16
2040補足裏込め注入(9時方向)
初期値からの経過日(2.97日)

● 内側鉄筋応力
○ 外側鉄筋応力

2040リング周方向鉄筋応力

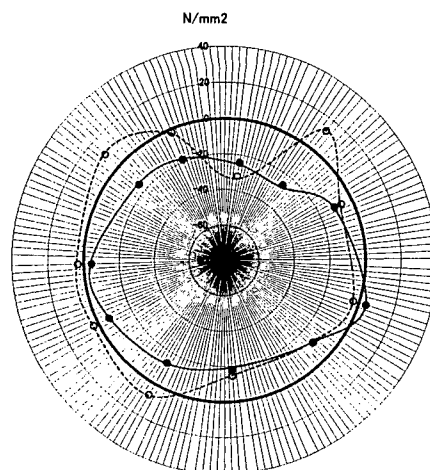


97/05/10 16:15:16
2040補足裏込め注入(4時方向)
初期値からの経過日(3.00日)

● 内側鉄筋応力
○ 外側鉄筋応力

図-2.23 (3) 円周方向鉄筋応力分布(2040R)

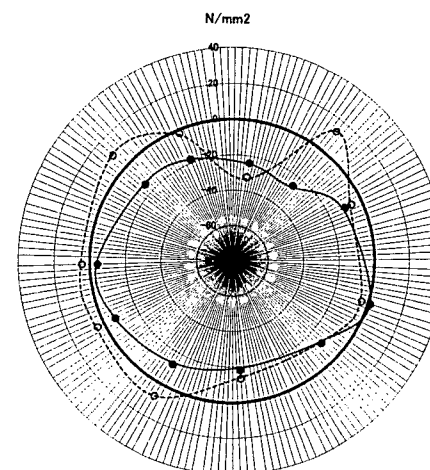
2040リング周方向鉄筋応力



97/05/10 16:30:16
2040組立後3日
初期値からの経過日(3.01日)

● 内側鉄筋応力
○ 外側鉄筋応力

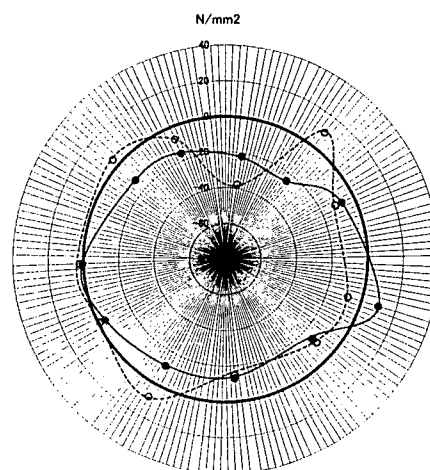
2040リング周方向鉄筋応力



97/05/10 21:45:16
2041組立後3日
初期値からの経過日(3.23日)

● 内側鉄筋応力
○ 外側鉄筋応力

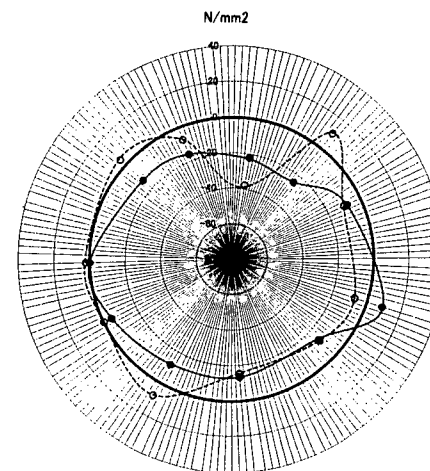
2040リング周方向鉄筋応力



97/05/14 16:27:07
2040組立後7日
初期値からの経過日(7.00日)

● 内側鉄筋応力
○ 外側鉄筋応力

2040リング周方向鉄筋応力

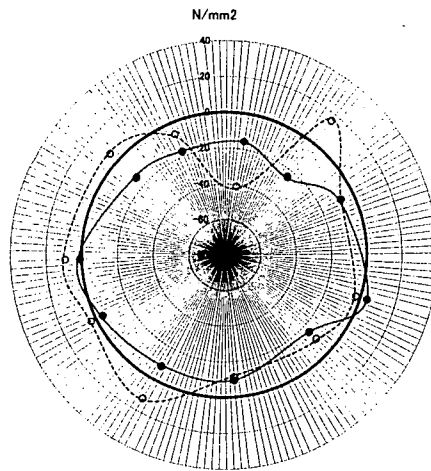


97/05/14 20:12:07
2041組立後7日
初期値からの経過日(7.16日)

● 内側鉄筋応力
○ 外側鉄筋応力

図-2.23(4)円周方向鉄筋応力分布(2040R)

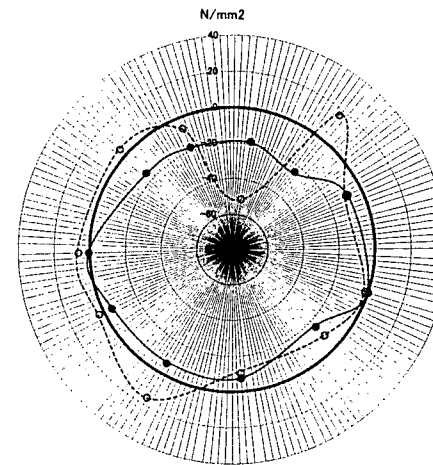
2040リング周方向鉄筋応力



97/05/27 16:50:30
2041組立後20日
初期値からの経過日(20.02日)

● 内側鉄筋応力
○ 外側鉄筋応力

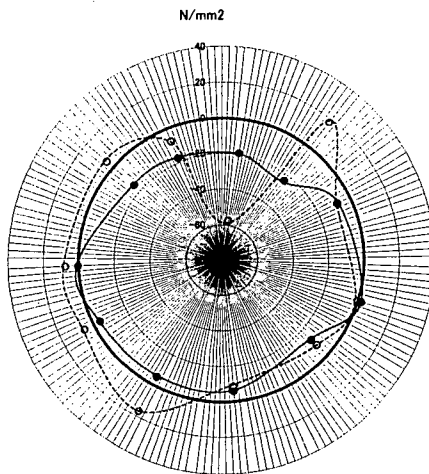
2040リング周方向鉄筋応力



97/06/16 18:52:28
組立後40日
初期値からの経過日(40.11日)

● 内側鉄筋応力
○ 外側鉄筋応力

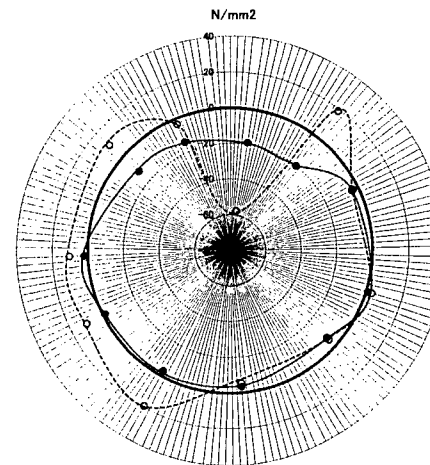
2040リング周方向鉄筋応力



97/07/08 16:52:31
組立後60日
初期値からの経過日(60.02日)

● 内側鉄筋応力
○ 外側鉄筋応力

2040リング周方向鉄筋応力

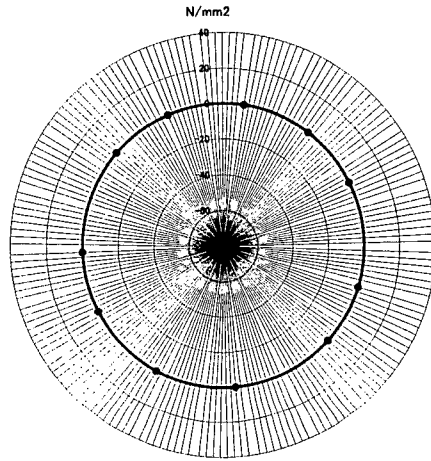


97/08/05 14:05:42
組立後90日(安定時)
初期値からの経過日(89.91日)

● 内側鉄筋応力
○ 外側鉄筋応力

図-2.23(5) 円周方向鉄筋応力分布(2040R)

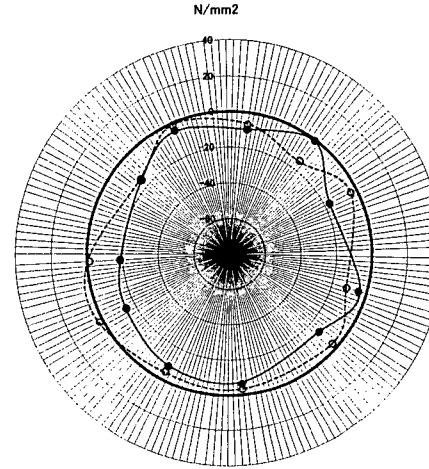
2041リング周方向鉄筋応力



97/05/07 21:38:17
2041リングセグメント組立完了
初期値からの経過日(0.00日)

● 内側鉄筋応力
○ 外側鉄筋応力

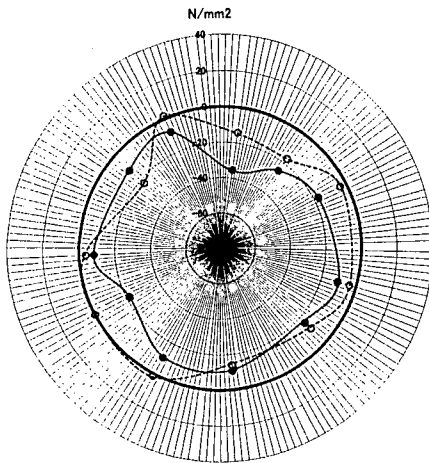
2041リング周方向鉄筋応力



97/05/07 23:56:00
2040リング土圧計テール脱出
初期値からの経過日(0.10日)

● 内側鉄筋応力
○ 外側鉄筋応力

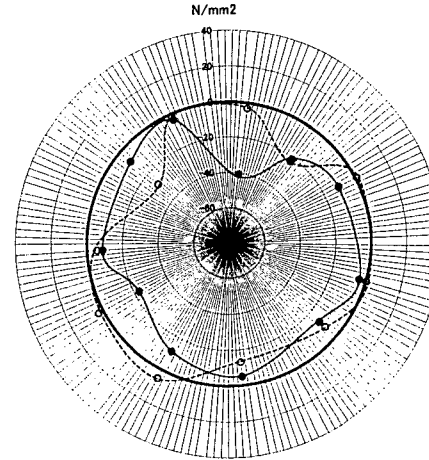
2041リング周方向鉄筋応力



97/05/07 2:36:00
2040リングテール脱出直後
初期値からの経過日(0.21日)

● 内側鉄筋応力
○ 外側鉄筋応力

2041リング周方向鉄筋応力

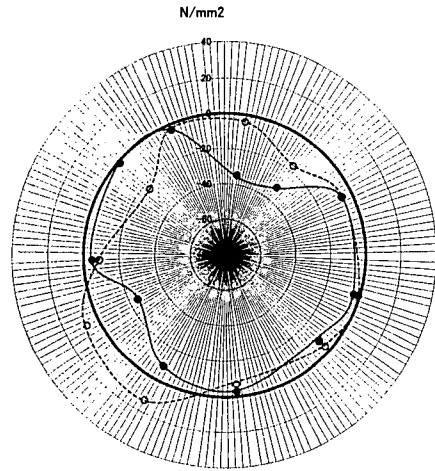


97/05/08 3:02:00
2040リング裏込め注入直後
初期値からの経過日(0.23日)

● 内側鉄筋応力
○ 外側鉄筋応力

図-2.24(1) 円周方向鉄筋応力分布(2041R)

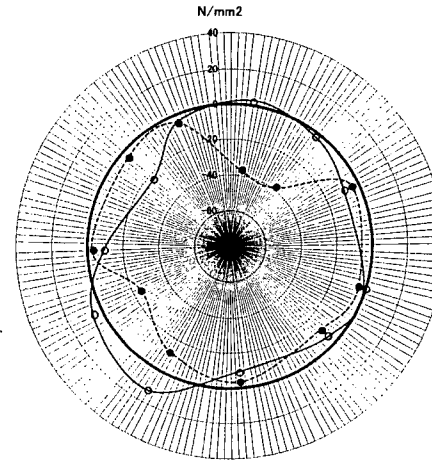
2041リング周方向鉄筋応力



97/05/08 8:00:45
2041リングテール脱出直後
初期値からの経過日(0.43日)

- 内側鉄筋応力
- 外側鉄筋応力

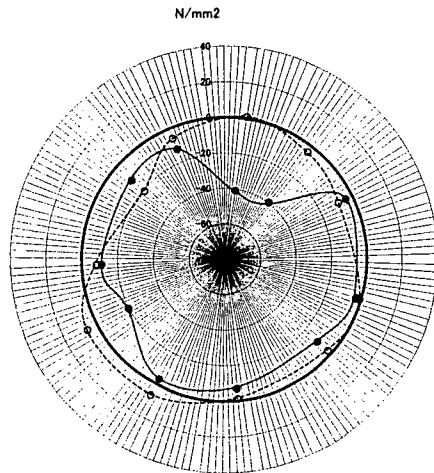
2041リング周方向鉄筋応力



97/05/08 8:54:45
2041環込め注入直後
初期値からの経過日(0.47日)

- 内側鉄筋応力
- 外側鉄筋応力

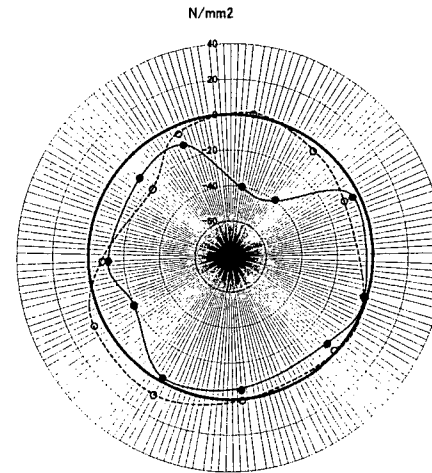
2041リング周方向鉄筋応力



97/05/08 16:29:39
2040組立後1日
初期値からの経過日(0.79日)

- 内側鉄筋応力
- 外側鉄筋応力

2041リング周方向鉄筋応力

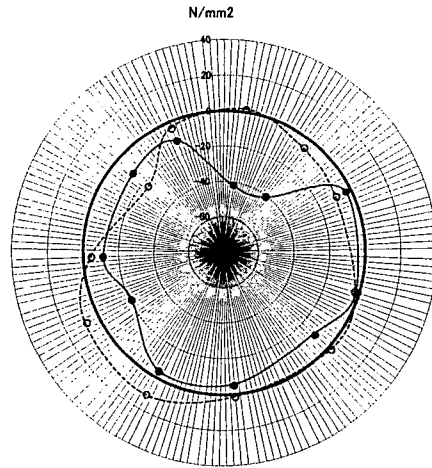


97/05/08 21:44:39
2041組立後1日
初期値からの経過日(1.01日)

- 内側鉄筋応力
- 外側鉄筋応力

図-2.24(2) 円周方向鉄筋応力分布(2041R)

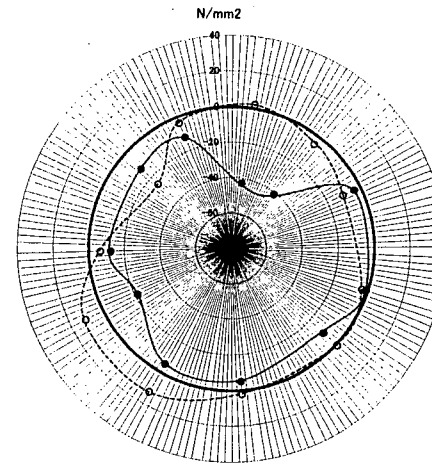
2041リング周方向鉄筋応力



97/05/10 14:45:16
2040補足裏込め注入(11時方向)
初期値からの経過日(2.71日)

● 内側鉄筋応力
○ 外側鉄筋応力

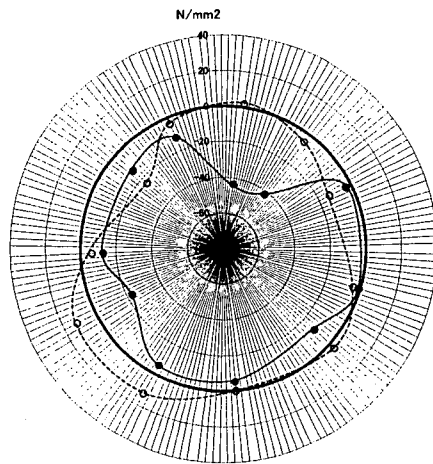
2041リング周方向鉄筋応力



97/05/10 15:30:16
2040補足裏込め注入(9時方向)
初期値からの経過日(2.75日)

● 内側鉄筋応力
○ 外側鉄筋応力

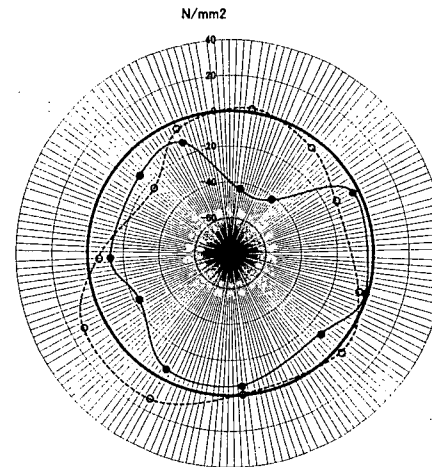
2041リング周方向鉄筋応力



97/05/10 16:15:16
2040補足裏込め注入(4時方向)
初期値からの経過日(2.78日)

● 内側鉄筋応力
○ 外側鉄筋応力

2041リング周方向鉄筋応力

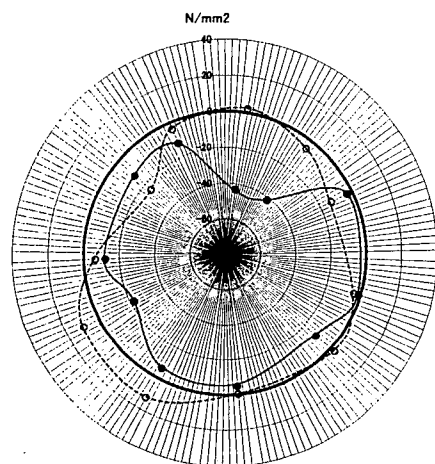


97/05/10 16:30:16
2040組立後3日
初期値からの経過日(2.79日)

● 内側鉄筋応力
○ 外側鉄筋応力

図-2.24(3) 円周方向鉄筋応力分布(2041R)

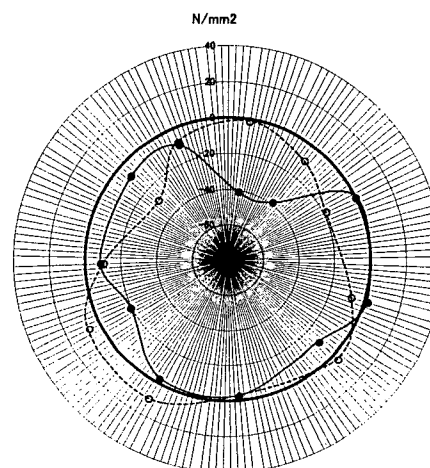
2041リング周方向鉄筋応力



97/05/10 21:45:16
2041組立後3日
初期値からの経過日(3.01日)

● 内側鉄筋応力
○ 外側鉄筋応力

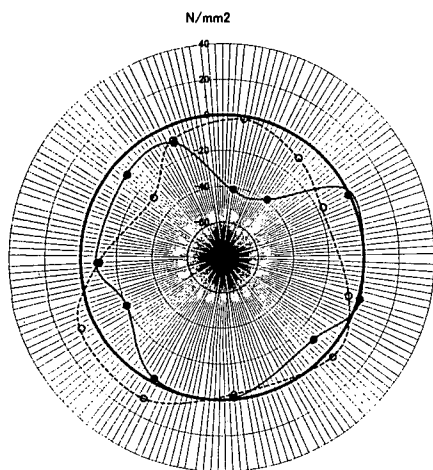
2041リング周方向鉄筋応力



97/05/14 16:27:07
2040組立後7日
初期値からの経過日(6.79日)

● 内側鉄筋応力
○ 外側鉄筋応力

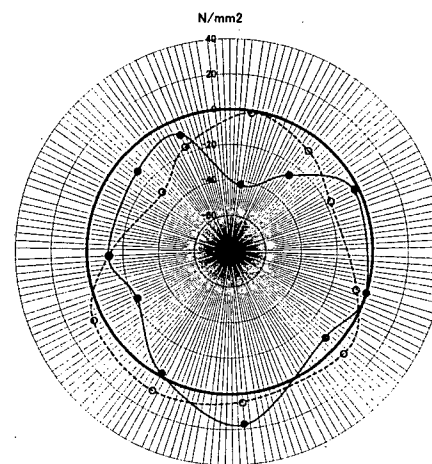
2041リング周方向鉄筋応力



97/05/14 20:12:07
2041組立後7日
初期値からの経過日(6.94日)

● 内側鉄筋応力
○ 外側鉄筋応力

2041リング周方向鉄筋応力

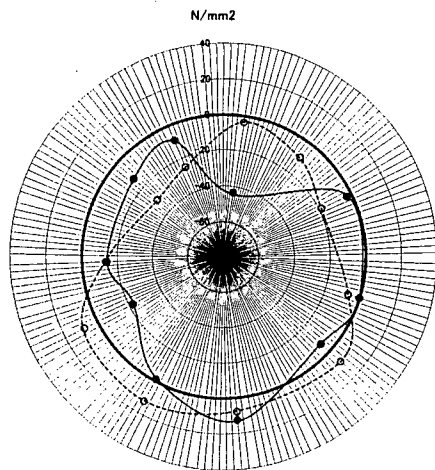


97/05/27 16:50:30
2041組立後20日
初期値からの経過日(19.80日)

● 内側鉄筋応力
○ 外側鉄筋応力

図-2.24(4) 円周方向鉄筋応力分布(2041R)

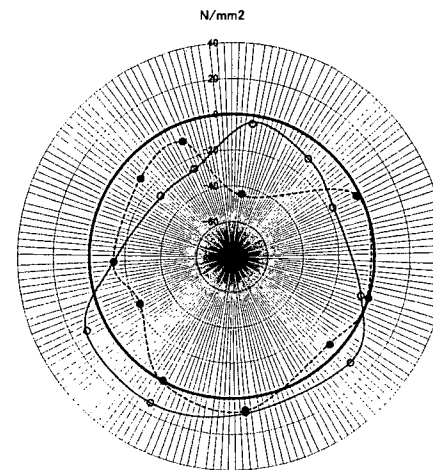
2041リング周方向鉄筋応力



97/06/16 18:52:28
組立後40日
初期値からの経過日(39.89日)

● 内側鉄筋応力
○ 外側鉄筋応力

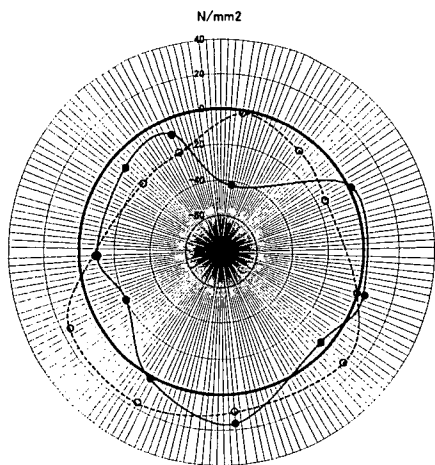
2041リング周方向鉄筋応力



97/07/06 16:52:31
組立後60日
初期値からの経過日(59.80日)

● 内側鉄筋応力
○ 外側鉄筋応力

2041リング周方向鉄筋応力



97/08/05 14:05:42
組立後90日(安定時)
初期値からの経過日(89.89日)

● 内側鉄筋応力
○ 外側鉄筋応力

図-2.24(5) 円周方向鉄筋応力分布(2041R)

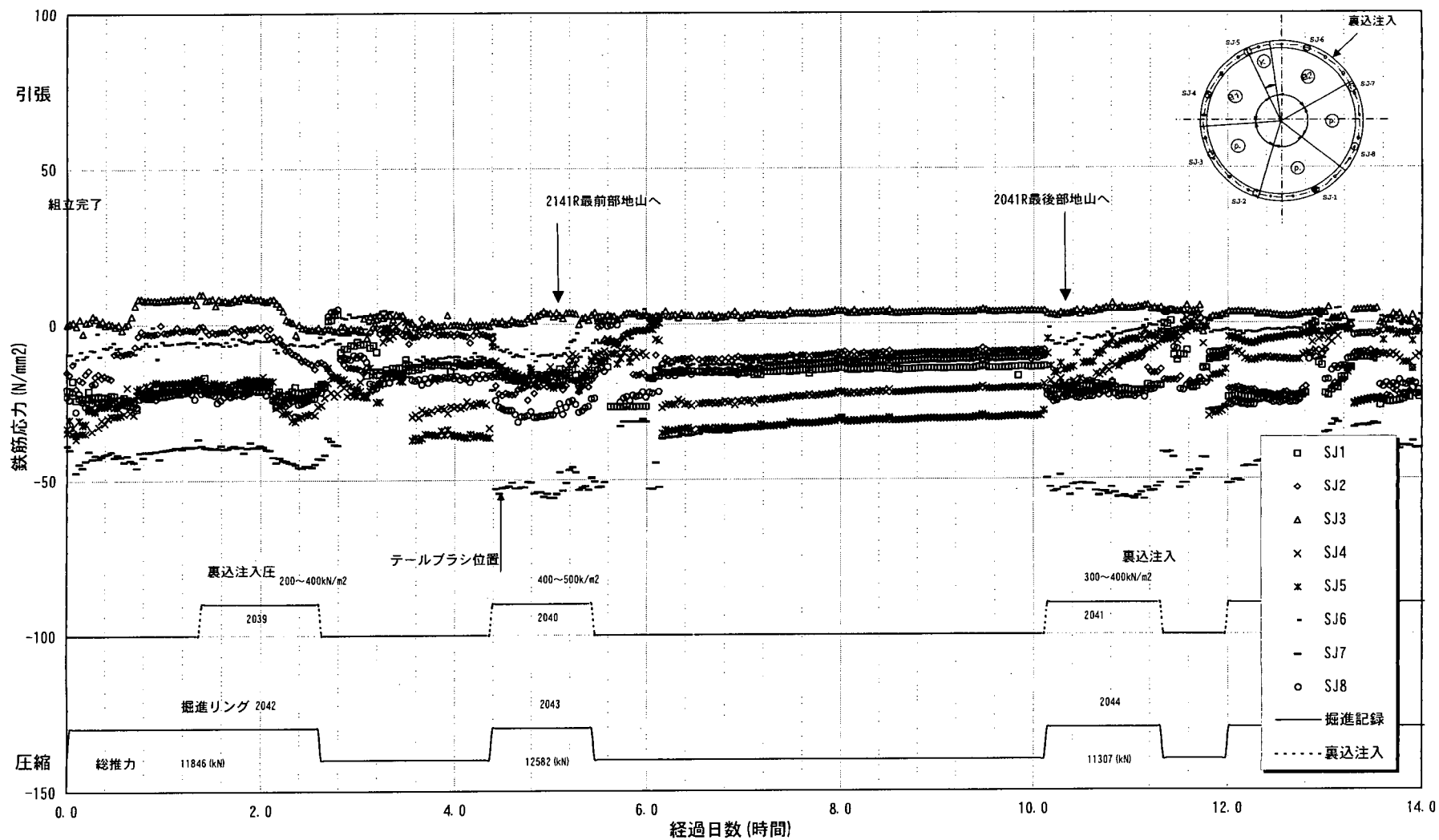


図-2. 25 (1) 軸方向鉄筋応力 (2041 R 内側)

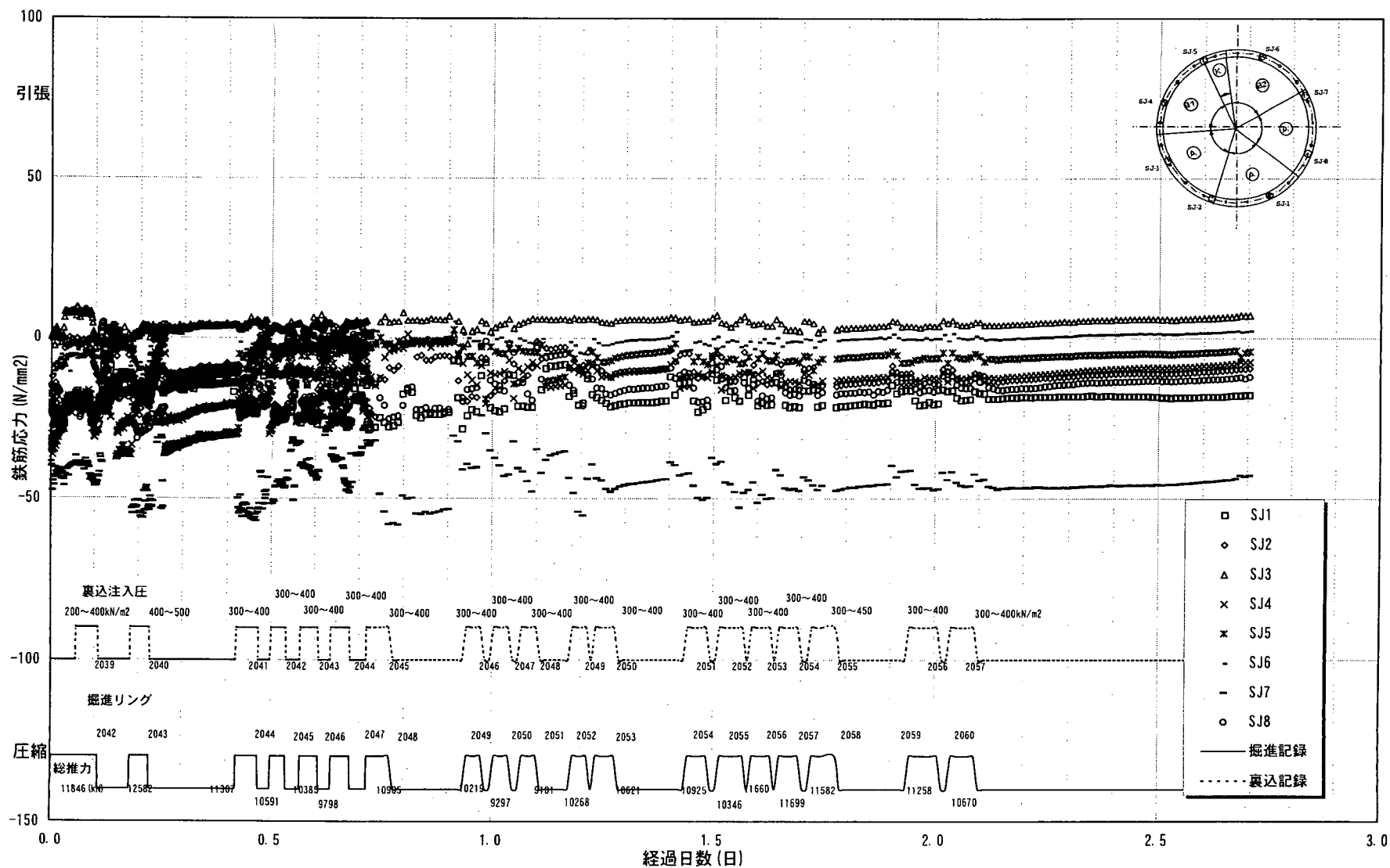


図-2.25 (2) 軸方向鉄筋応力 (2041R 内側)

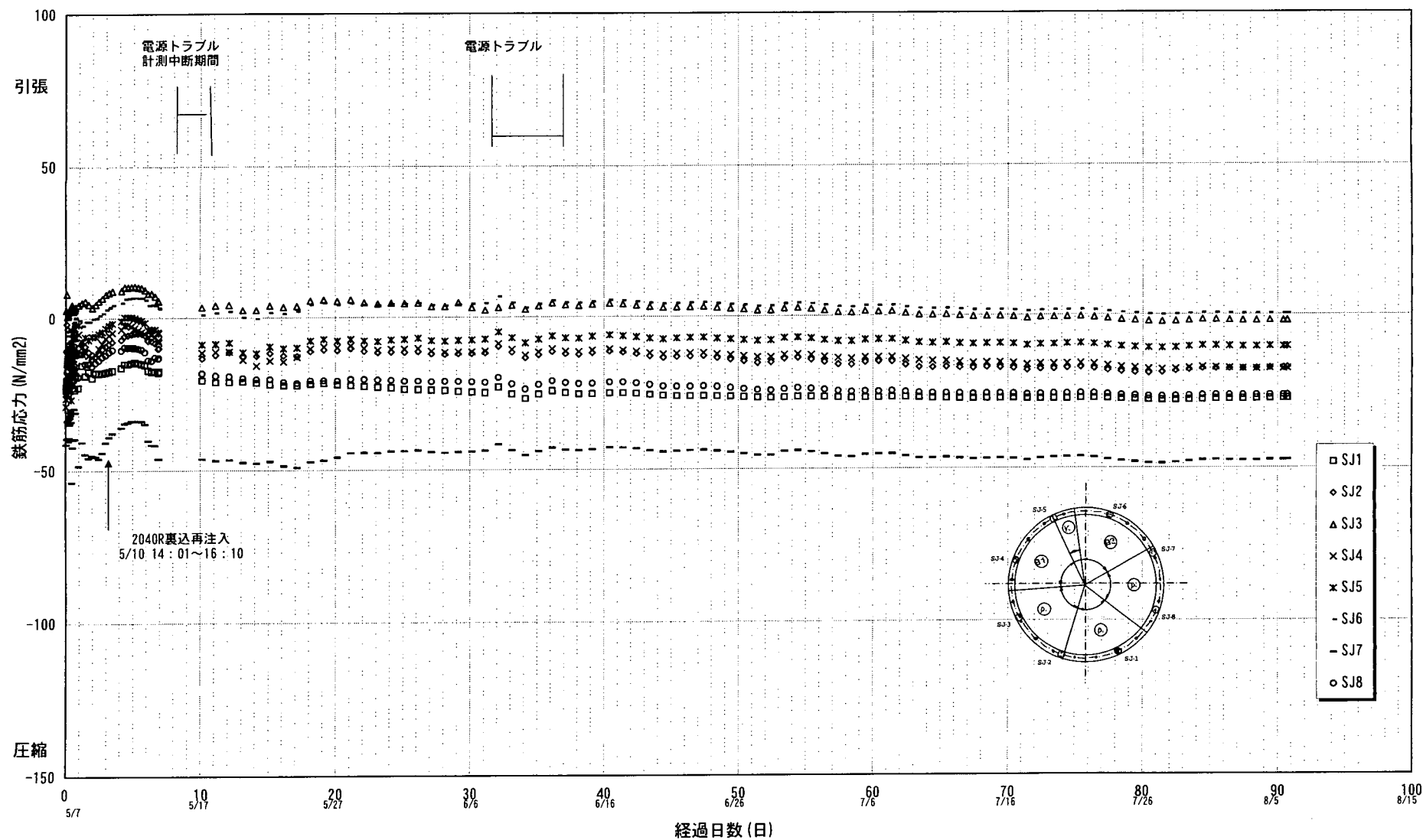


図-2.25 (3) 軸方向鉄筋応力 (2041R内側)

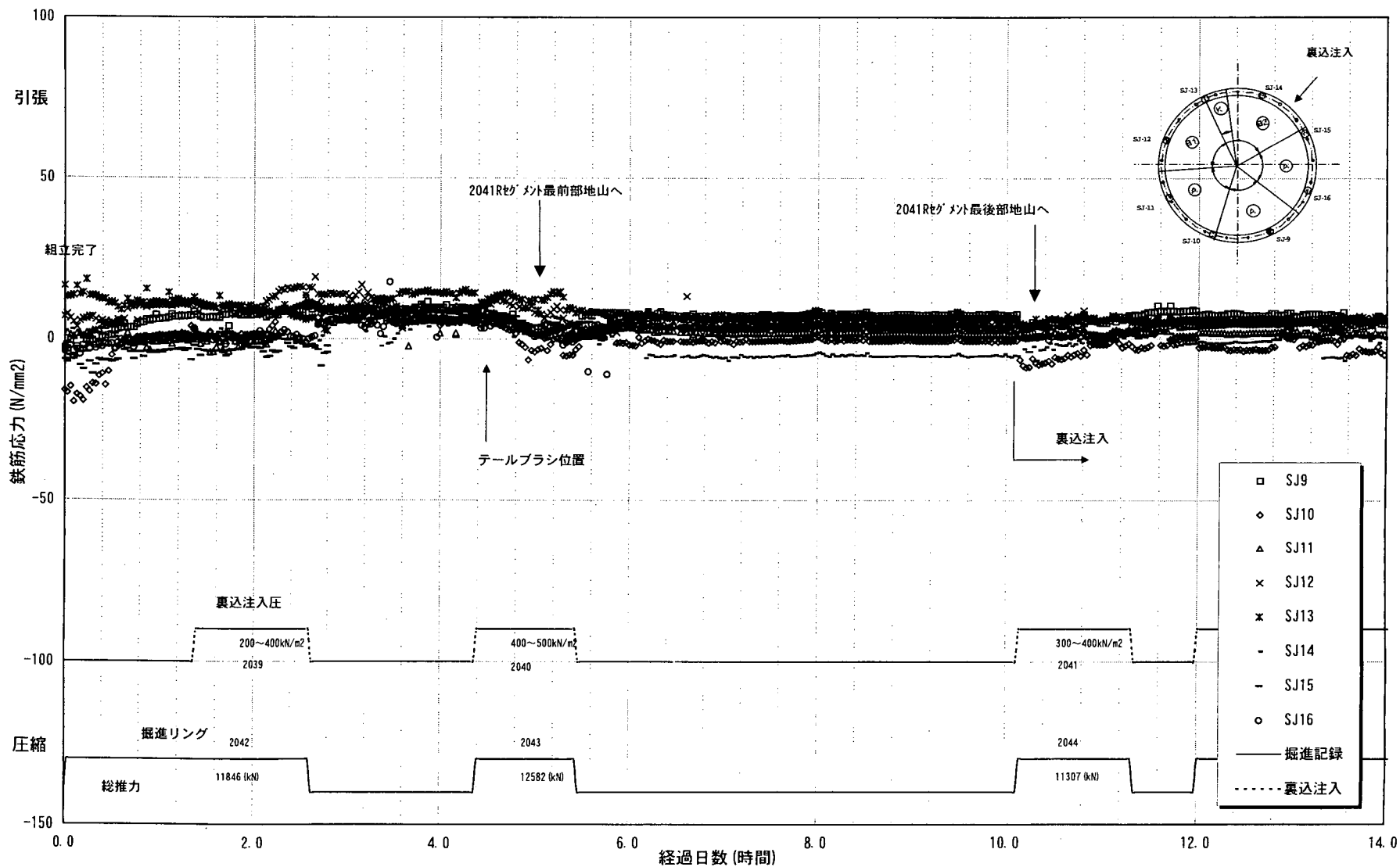


図-2.25 (4) 軸方向鉄筋応力 (2041R外側)

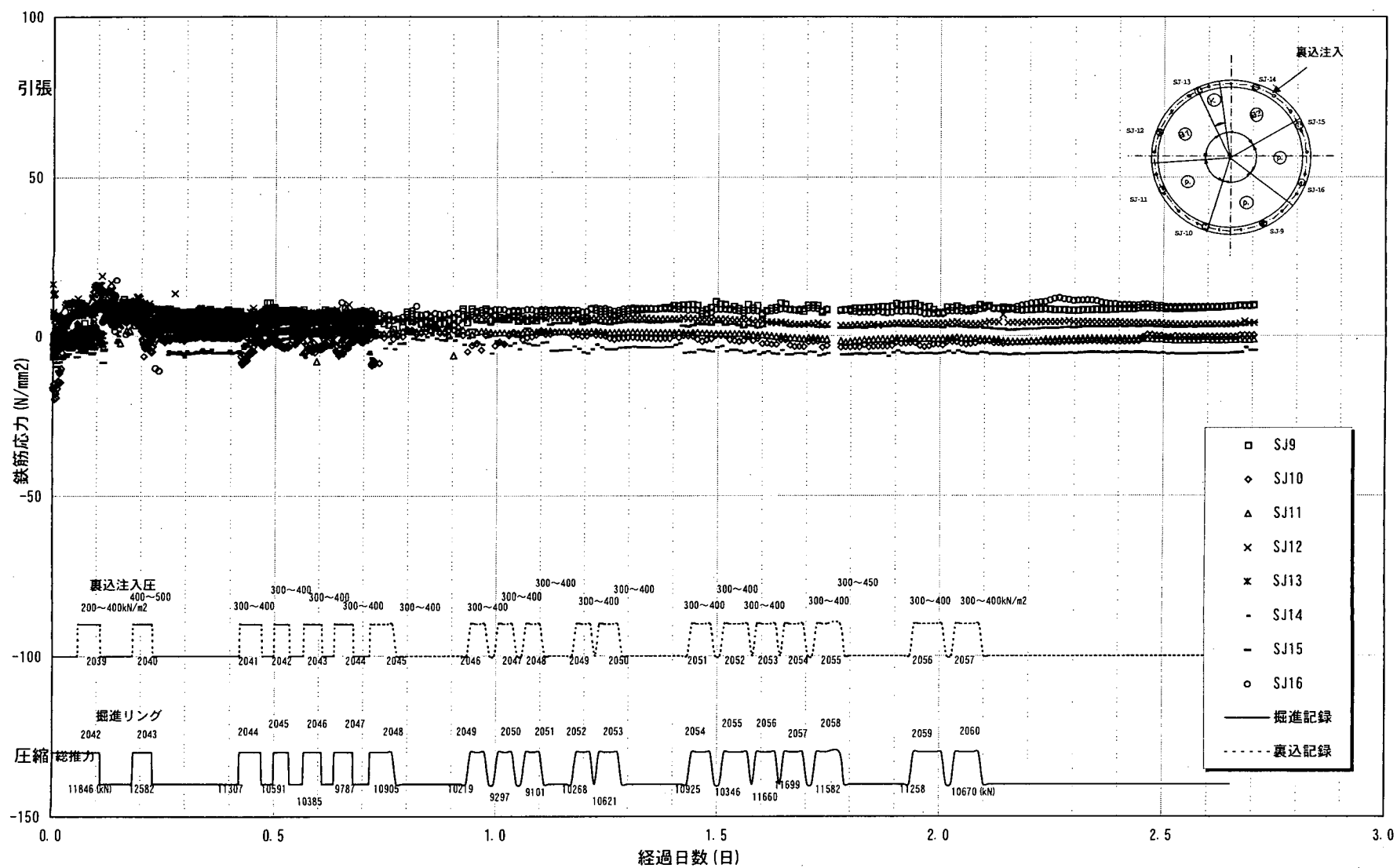


図-2.25 (5) 軸方向鉄筋応力 (2041 R 外側)

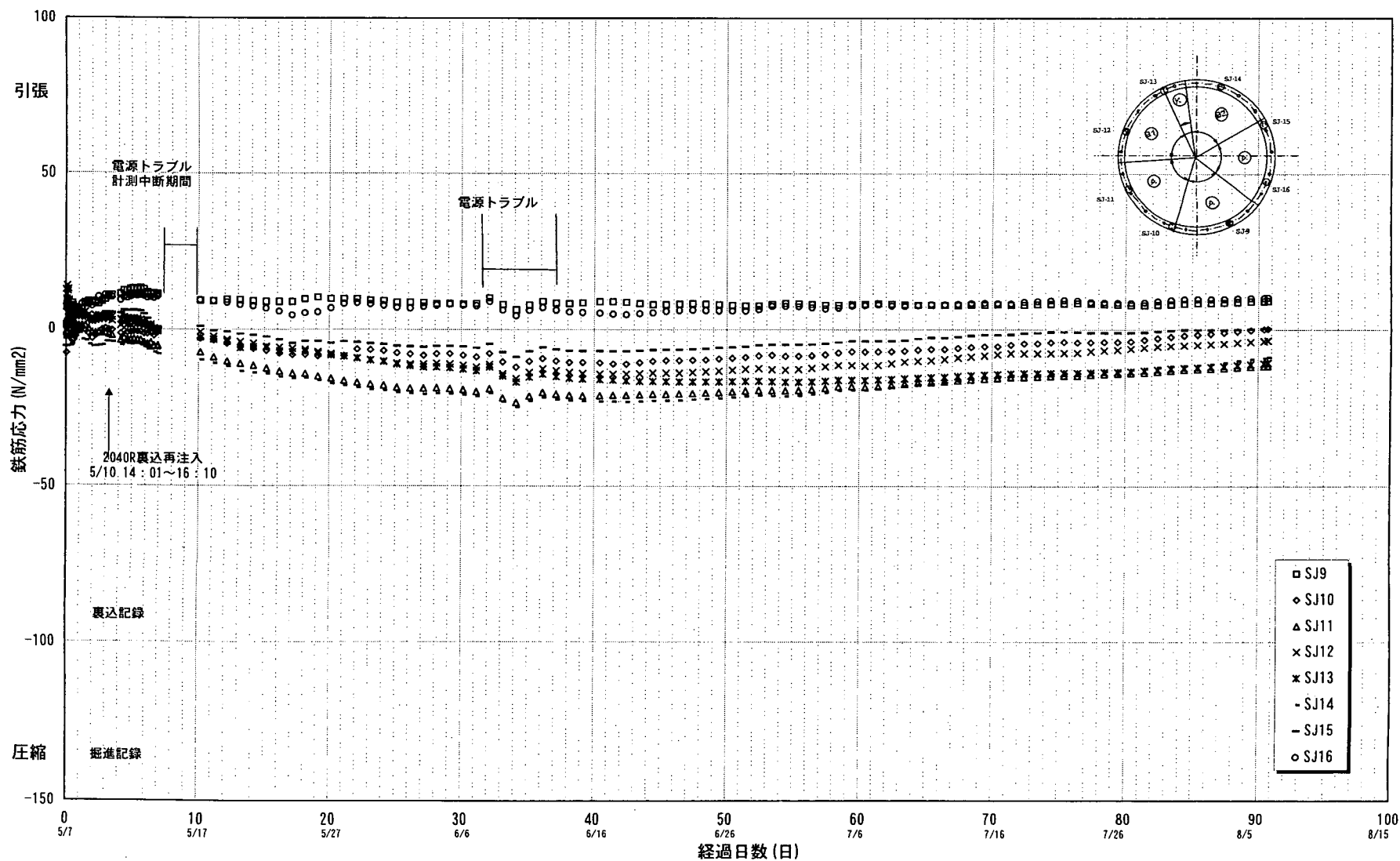


図-2.25 (6) 軸方向鉄筋応力 (2041R外側)

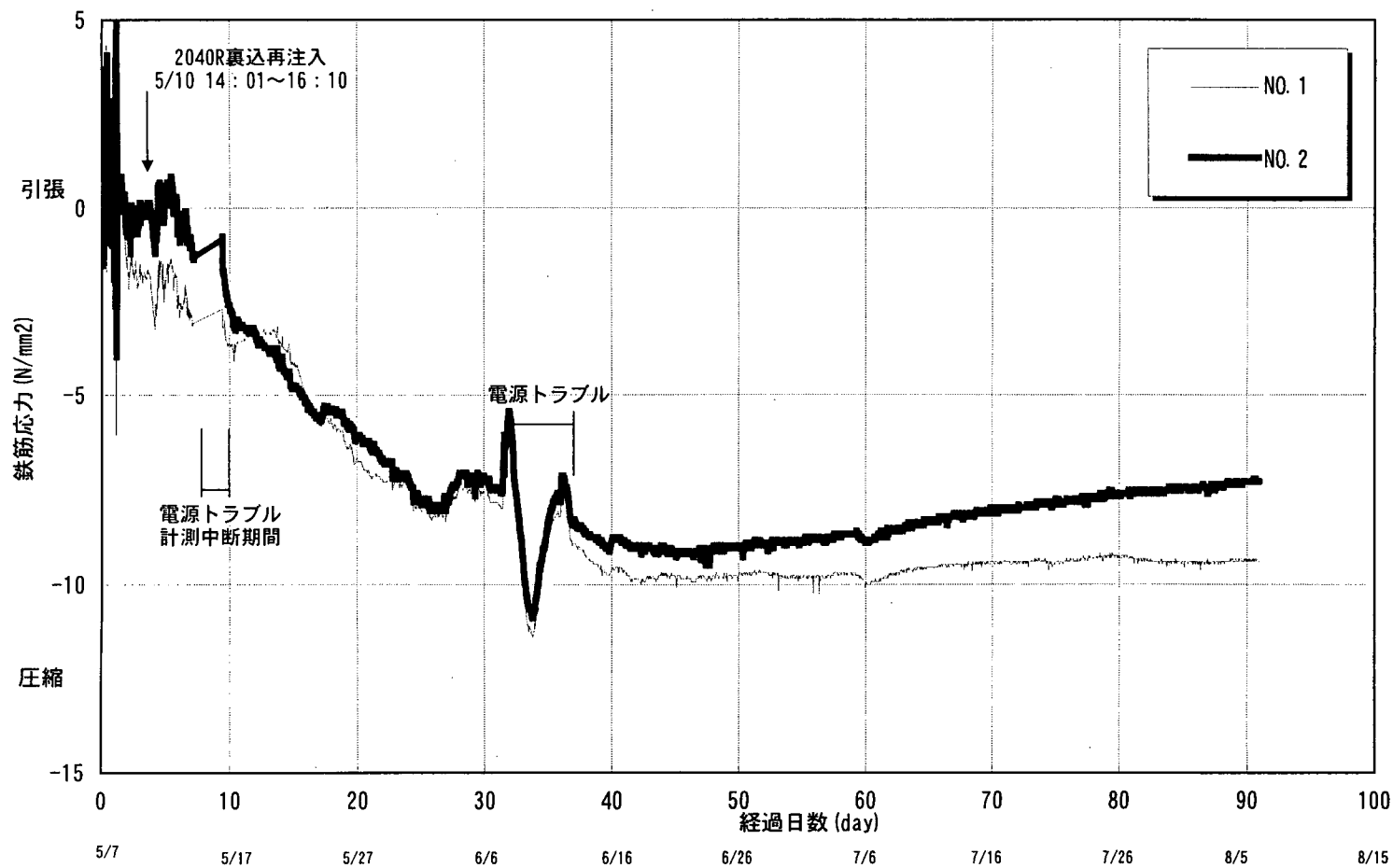


図-2.26 ダミー供試体鉄筋応力経時変化

2.3.6 覆工体に発生する断面力

(1) 曲げモーメント

鉄筋計の測定値より算出した主要な時期の各点の曲げモーメントの値を表-2.11(1)~(2)、経時変化を図-2.28(1)~(2)、図-2.29(1)~(2)に示す。また、曲げモーメントの断面分布図を図-2.30(1)~(5)、図-2.31(1)~(5)に示す。ここで、組立後90日後の安定した時期においては、ダミー供試体の鉄筋応力測定値を用いて、コンクリートの乾燥収縮量を考慮した(巻末資料参照)曲げモーメント(図-2.30(5)、図-2.31(5)参照)も算出した。

曲げモーメントはセグメントの断面形状が図-2.27に示すとおりであり、この断面を用いてコンクリートの引張り応力を無視し、コンクリートの弾性係数を 32kN/mm^2 として計算した。

なお、本トンネルに用いたセグメントの設計は、慣用計算法により実施しており、設計計算用土圧として全土被り土圧を考慮して、側方土圧係数 $\lambda=0.45$ 、地盤反力係数 $k=50\text{kN/mm}^3$ と設定された。

セグメント厚さ	$h=0.275\text{m}$
セグメント幅	$B=1.0\text{m}$
断面二次モーメント	$I=1.7311\times 10^{-3}\text{m}^4$
断面積	$A=0.275\text{m}^2$

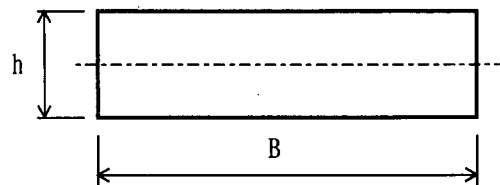


図-2.27 セグメントの断面形状

鉄筋計が安定している組立後90日時点での最大の曲げモーメントが発生する点は、2040リングでは正曲げがトンネル頂部(計測点SS-7(SS-18))で約 $58\text{kN}\cdot\text{m}$ 、負曲げが右肩部(計測点SS-6(SS-17))で約 $32\text{kN}\cdot\text{m}$ であり、2041リングでは正曲げが右側スプリングライン付近(計測点2-SS-4(2-SS-15))で約 $22\text{kN}\cdot\text{m}$ 、負曲げがトンネル頂部(計測点2-SS-6(2-SS-17))で約 $58\text{kN}\cdot\text{m}$ である。ただし、2040リングの最大正曲げ部(計測点SS-7(SS-18))と2041の最大負曲げ部(計測点2-SS-6(2-SS-17))はともにトンネル天端から右に約15度前後の位置であり、他の計測点に比べ局所的な値となっていることから、裏込め注入孔(時計の2時方向)付近であることによる裏込め注入圧の影響、2040リングのKセグメントの位置の影響(計測点SS-7(SS-18)はKセグメント内の鉄筋計)などが考えられる。この局所的な値を除けば、セグメントに発生する曲げモーメントは概ね $20\text{kN}\cdot\text{m}$ 程度以下であり、設計上での最大曲げモーメント(正曲げ約 $51\text{kN}\cdot\text{m}$ 、負曲げ約 $36\text{kN}\cdot\text{m}$ 、(自重による曲げモーメントは控除))に比べて小さなものとなっている。また、経時的な変化については、2040リングでは組立完了から2041リングの組立完了時点においてトンネル頂部(計測点SS-7(SS-18))に約 $55\text{kN}\cdot\text{m}$ の正曲げ、左右の肩部(計測点SS-9(SS-20)、SS-6(SS-17))にそれぞれ約44、 $67\text{kN}\cdot\text{m}$ の負曲げが発生しているが、セグメントがシールドテールを脱出するまでには減少し、裏込め注入後は補足裏込め注入時に多少、一時的な増加が見られるものの、上述したトンネル天端(計測点SS-7(SS-18):Kセグメント内の鉄筋計)を除いてはそれほど大きな増加は見られず安定した状態で推移している。2041リングでは組立完了から2040リングの土圧計がシールドテールを脱出する時点ではスプリングライン付近(計測点2-SS-4(2-SS-15)、2-SS-9(2-SS-20))に $20\sim 25\text{kN}\cdot\text{m}$ 程度の負曲げが発生しているが、その後徐々に減少し、2040リングと同様に裏込め注入後は上述したトンネル天端(計測点

2-SS-6(2-SS-17)) および組立後20日以降計測値異常となる計測点2-SS-5を除いては安定した状態で推移している。

(2) 軸力

鉄筋計の測定値より算出した主要な時期の各点の軸力の値を表-2.12(1)~(2)に、経時変化を図-2.32(1)~(2)、図-2.33(1)~(2)に示す。また、軸力の断面分布図を図-2.34(1)~(5)、図-2.35(1)~(5)に示す。ここで、組立後90日後の安定した時期においては、ダミー供試体の鉄筋応力測定値を用いて、コンクリートの乾燥収縮量を考慮した(巻末資料参照)軸力(図-2.34(5)、図-2.35(5)参照)も算出した。

鉄筋計が安定している組立後90日時点では、2040、2041リングとも曲げモーメントと同様に2040リングのKセグメント位置付近(計測点SS-7(SS-18)、SS-8(SS-19)、2-SS-6(2-SS-17))で局所的な軸力(圧縮力約1.0~1.7MN)が生じているが、それらを除けば2040リングで約400kN、2041リングで約700kN以下の圧縮力となった。また、経時的な変化については両リングとも、テール脱出直後に急激な軸力(圧縮力)の変化が見られるが、裏込め注入直後からは緩和され、組立後1日でほぼ安定した状態となっている。

参考文献

- 1) 一般国道20号 調布共同溝工事パンフレット

表-2. 11(1) 周方向の鉄筋応力より算出した各点の曲げモーメント

調布共同溝 モーメント: M(kN・m)				2040リング											
状態	日付	時間	2040リング 経過時間(日)	計測点											
				SS-1(12)	SS-2(13)	SS-3(14)	SS-4(15)	SS-5(16)	SS-6(17)	SS-7(18)	SS-8(19)	SS-9(20)	SS-10(21)	SS-11(22)	
2040セグメント組立完了	1997/5/7	16:20:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2041セグメント組立完了	1997/5/7	21:36:17	0.22	-24.75	8.74	-25.47	1.89	-32.18	-67.47	54.71	3.14	-43.90	15.84	5.16	
2040土圧計テール脱出	1997/5/7	23:56:00	0.32	-19.02	12.28	-18.60	-2.74	9.86	-47.52	-16.97	4.57	-25.62	-2.30	0.97	
2040テール脱出直後	1997/5/8	2:36:00	0.43	-12.49	1.95	1.33	0.17	-0.22	-26.21	-20.08	-17.23	-7.53	-4.26	1.79	
2040裏込め注入直後	1997/5/8	3:02:00	0.45	-13.25	0.92	1.22	3.12	-5.33	-27.84	-7.12	-16.78	-10.53	-6.70	6.69	
2041テール脱出直後	1997/5/8	8:00:45	0.65	-13.72	2.94	-4.58	4.14	-6.39	-36.04	-2.47	-14.30	-10.96	-7.35	0.09	
2041裏込め注入直後	1997/5/8	8:54:45	0.69	-14.66	3.52	-1.74	6.05	-3.31	-35.02	19.70	-20.32	-12.18	-4.85	-2.44	
2040組立後1日	1997/5/8	16:29:39	1.01	-19.10	3.03	-11.87	18.53	-0.34	-36.88	18.10	-9.65	-14.36	-4.22	-8.49	
2041組立後1日	1997/5/8	21:44:39	1.23	-21.77	-1.63	-11.41	21.20	-0.10	-35.41	14.81	-9.88	-12.21	-5.66	-8.58	
2040補足裏注(11時方向)	1997/5/10	14:45:16	2.93	-21.47	-5.60	-6.20	8.19	-5.71	-37.46	14.58	-19.69	-20.09	-0.06	-4.90	
2040補足裏注(9時方向)	1997/5/10	15:30:16	2.97	-24.67	-5.17	-8.93	10.25	-9.36	-39.75	11.73	-23.31	-24.58	-5.72	-8.16	
2040補足裏注(4時方向)	1997/5/10	16:15:16	3.00	-21.98	-3.35	-1.23	5.86	-6.04	-40.64	10.93	-23.73	-24.52	-7.16	-10.31	
2040組立後3日	1997/5/10	16:30:16	3.01	-21.30	-4.60	0.14	5.38	-6.27	-40.44	11.50	-24.02	-24.39	-7.05	-10.52	
2041組立後3日	1997/5/10	21:45:16	3.23	-20.23	-7.22	0.02	5.61	-5.93	-40.02	12.19	-23.17	-23.39	-7.16	-11.24	
2040組立後7日	1997/5/14	16:27:07	7.00	-18.32	2.59	-4.98	12.87	5.73	-37.49	23.55	-13.05	-19.70	-0.25	-4.75	
2041組立後約7日	1997/5/14	20:12:07	7.16	-18.42	2.70	-1.23	11.87	2.87	-38.10	23.44	-13.39	-20.15	-0.61	-6.60	
組立後20日	1997/5/27	16:50:30	20.02	-14.20	2.97	-8.04	4.08	-0.33	-37.60	37.78	-15.77	-21.96	-1.31	-6.76	
組立後40日	1997/6/16	18:52:28	40.11	-11.56	4.35	-10.20	2.45	1.84	-37.56	48.79	-16.68	-23.32	-0.99	-7.69	
組立後60日	1997/7/6	16:52:31	60.02	-9.45	4.13	-6.44	0.87	0.70	-37.22	56.74	-15.32	-23.43	-1.36	-6.72	
組立後90日(安定時)	1997/8/5	14:05:42	89.91	-7.27	3.02	-2.32	-0.35	-1.03	-31.98	57.76	-16.10	-19.38	-1.22	-3.57	
組立後90日(安定時・ダミー考慮)	1997/8/5	14:05:42	89.91	-3.26	0.14	-0.29	-0.59	-0.24	-19.14	57.76	-7.89	-7.21	-1.45	-1.84	

表-2. 11(2) 周方向の鉄筋応力より算出した各点の曲げモーメント

調布共同溝 モーメント: M(kN・m)				2041リング											
状態	日付	時間	2041リング 経過時間(日)	計測点											
				2-SS-1(12)	2-SS-2(13)	2-SS-3(14)	2-SS-4(15)	2-SS-5(16)	2-SS-6(17)	2-SS-7(18)	2-SS-8(19)	2-SS-9(20)	2-SS-10(21)	2-SS-11(22)	
2040セグメント組立完了	1997/5/7	16:20:00													
2041セグメント組立完了	1997/5/7	21:36:17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
2040土圧計テール脱出	1997/5/7	23:56:00	0.10	-4.93	-14.79	10.29	-20.07	20.24	-4.01	-4.60	-1.20	-24.68	-21.62	-5.06	
2040テール脱出直後	1997/5/8	2:36:00	0.21	4.78	-7.21	-10.17	-20.42	-12.30	-31.57	-12.11	16.06	-6.90	-30.37	-15.29	
2040裏込め注入直後	1997/5/8	3:02:00	0.23	12.03	-6.53	-5.52	-15.44	2.18	-54.35	-3.33	29.91	-4.86	-33.47	-18.21	
2041テール脱出直後	1997/5/8	8:00:45	0.43	6.25	-7.01	-4.00	-0.34	-23.00	-44.90	0.33	32.46	6.29	-37.52	-14.20	
2041裏込め注入直後	1997/5/8	8:54:45	0.47	8.10	-7.18	-5.58	6.96	-51.16	-52.54	-0.70	27.28	9.59	-36.85	-18.98	
2040組立後1日	1997/5/8	16:29:39	0.79	-8.25	-11.48	-3.20	6.73	-52.09	-57.83	-9.54	13.79	-4.44	-30.18	-5.48	
2041組立後1日	1997/5/8	21:44:39	1.01	-7.06	-8.09	1.03	7.76	-50.76	-56.53	-10.23	14.36	-5.00	-29.31	-4.38	
2040補足裏注(11時方向)	1997/5/10	14:45:16	2.71	-7.37	-15.08	2.40	8.90	-51.44	-59.46	-11.37	17.08	-9.76	-32.11	-6.86	
2040補足裏注(9時方向)	1997/5/10	15:30:16	2.75	-7.82	-13.68	3.32	10.15	-52.98	-60.82	-12.64	19.13	-8.87	-33.77	-9.06	
2040補足裏注(4時方向)	1997/5/10	16:15:16	2.78	-7.08	-17.32	4.80	15.40	-53.56	-61.81	-12.75	15.72	-9.55	-35.83	-9.61	
2040組立後3日	1997/5/10	16:30:16	2.79	-6.74	-17.46	5.60	14.94	-53.56	-61.70	-12.75	15.72	-9.44	-35.97	-10.21	
2041組立後3日	1997/5/10	21:45:16	3.01	-6.32	-16.63	4.12	14.94	-53.12	-61.42	-12.41	17.77	-8.53	-34.33	-10.07	
2040組立後7日	1997/5/14	16:27:07	6.79	1.63	-15.78	11.04	25.89	-43.51	-56.16	-2.43	30.47	2.73	-29.47	-4.70	
2041組立後約7日	1997/5/14	20:12:07	6.94	2.43	-16.34	8.28	22.86	-43.63	-56.59	-2.66	29.23	1.93	-31.16	-4.96	
組立後20日	1997/5/27	16:50:30	19.80	1.24	-11.94	8.47	22.16	-26.23	-58.02	10.30	26.74	0.88	-33.33	-3.94	
組立後40日	1997/6/16	18:52:28	39.89	0.37	-10.48	9.51	23.63	計測値異常	-57.37	24.28	26.52	0.98	-34.30	-4.06	
組立後60日	1997/7/6	16:52:31	59.80	-0.37	-9.82	6.33	22.06	計測値異常	-57.10	24.40	21.52	-0.27	-34.90	-3.42	
組立後90日(安定時)	1997/8/5	14:05:42	89.69	0.52	-8.34	1.15	22.12	計測値異常	-57.78	16.03	19.34	-1.94	-32.09	-2.57	
組立後90日(安定時・ダミー考慮)	1997/8/5	14:05:42	89.69	0.28	-2.52	0.31	9.59	計測値異常	-49.47	15.12	18.20	-1.82	-19.05	-2.39	

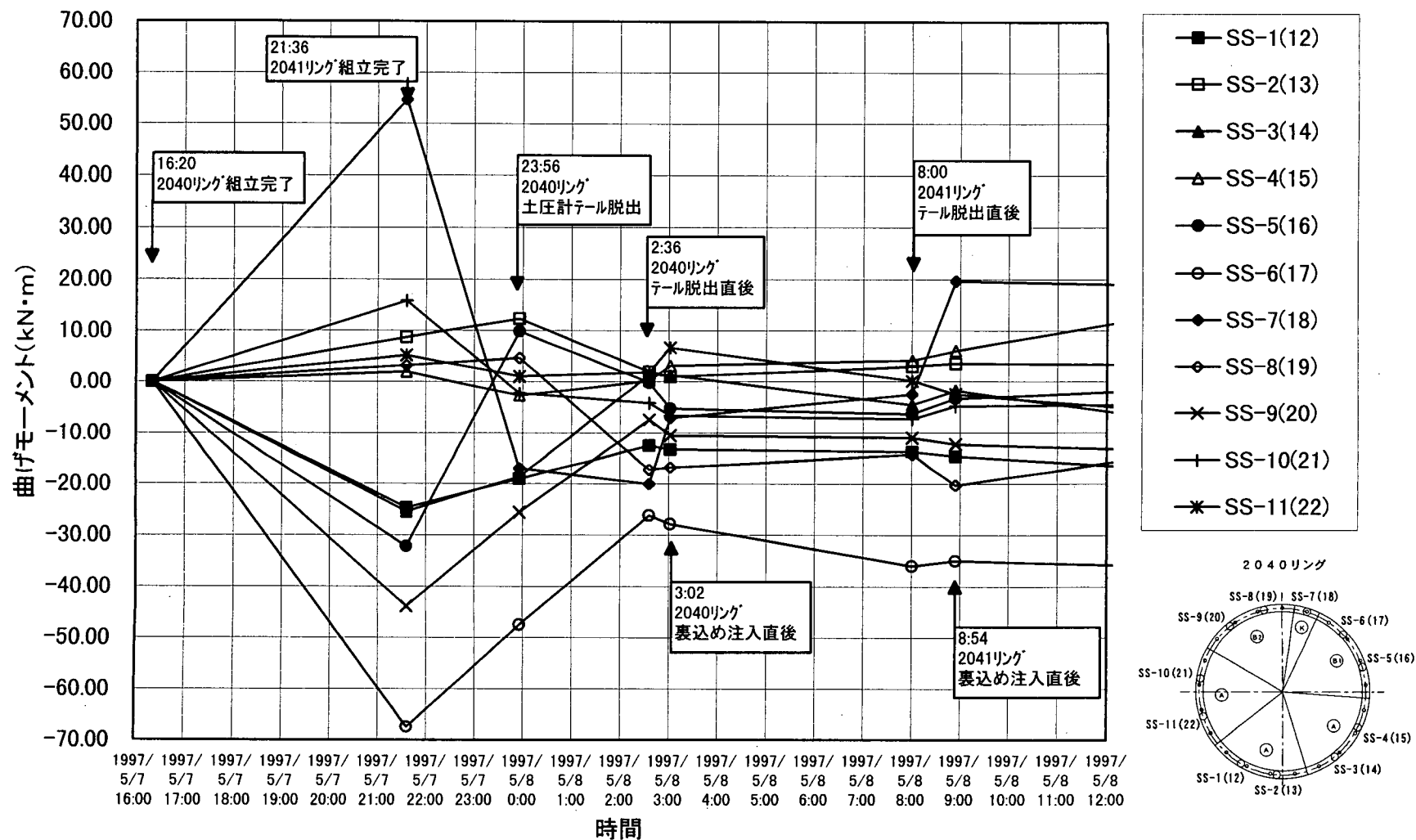


図-2. 28(1) 曲げモーメントの経時変化(2040リング)

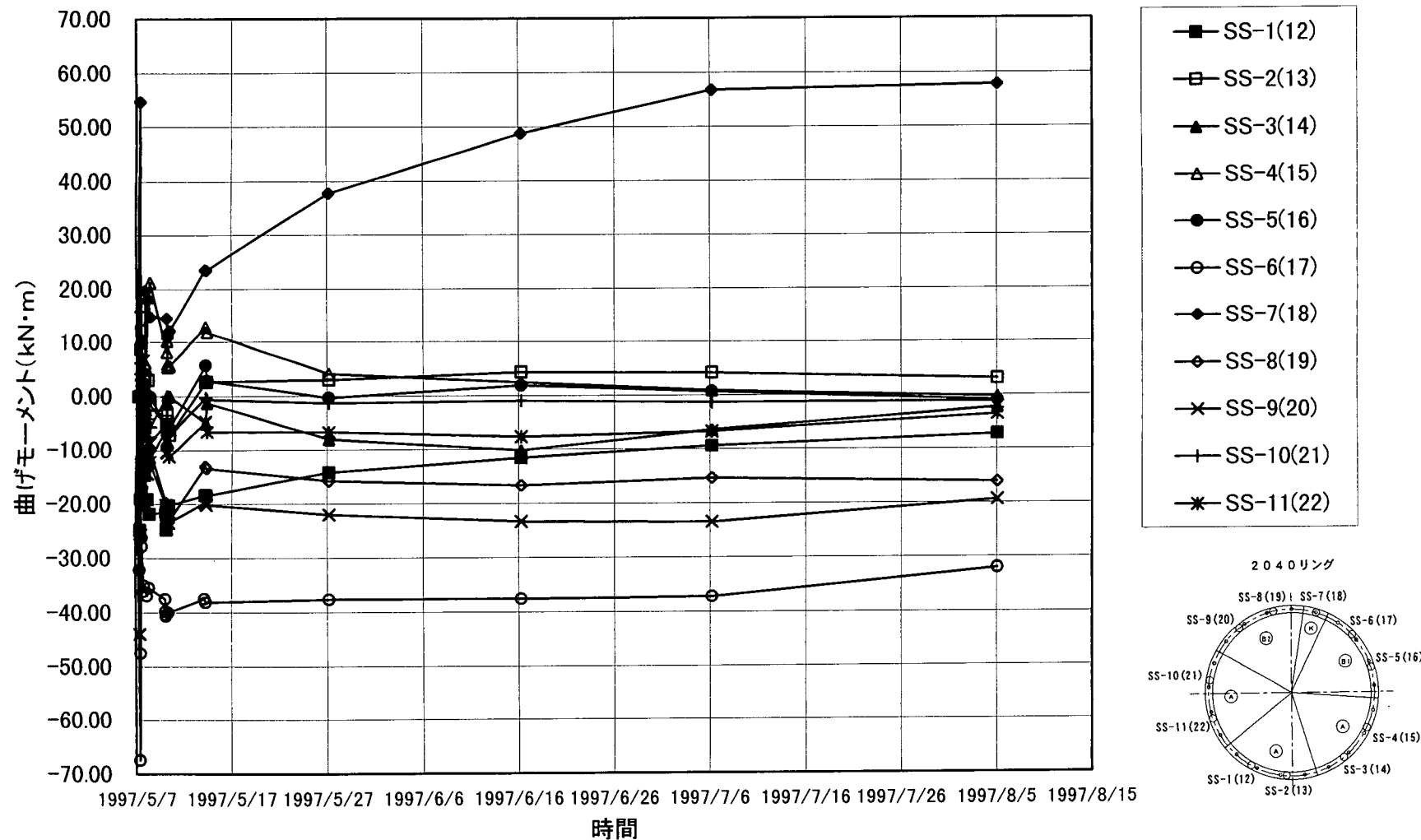


図-2. 28(2) 曲げモーメントの経時変化(2040リング)

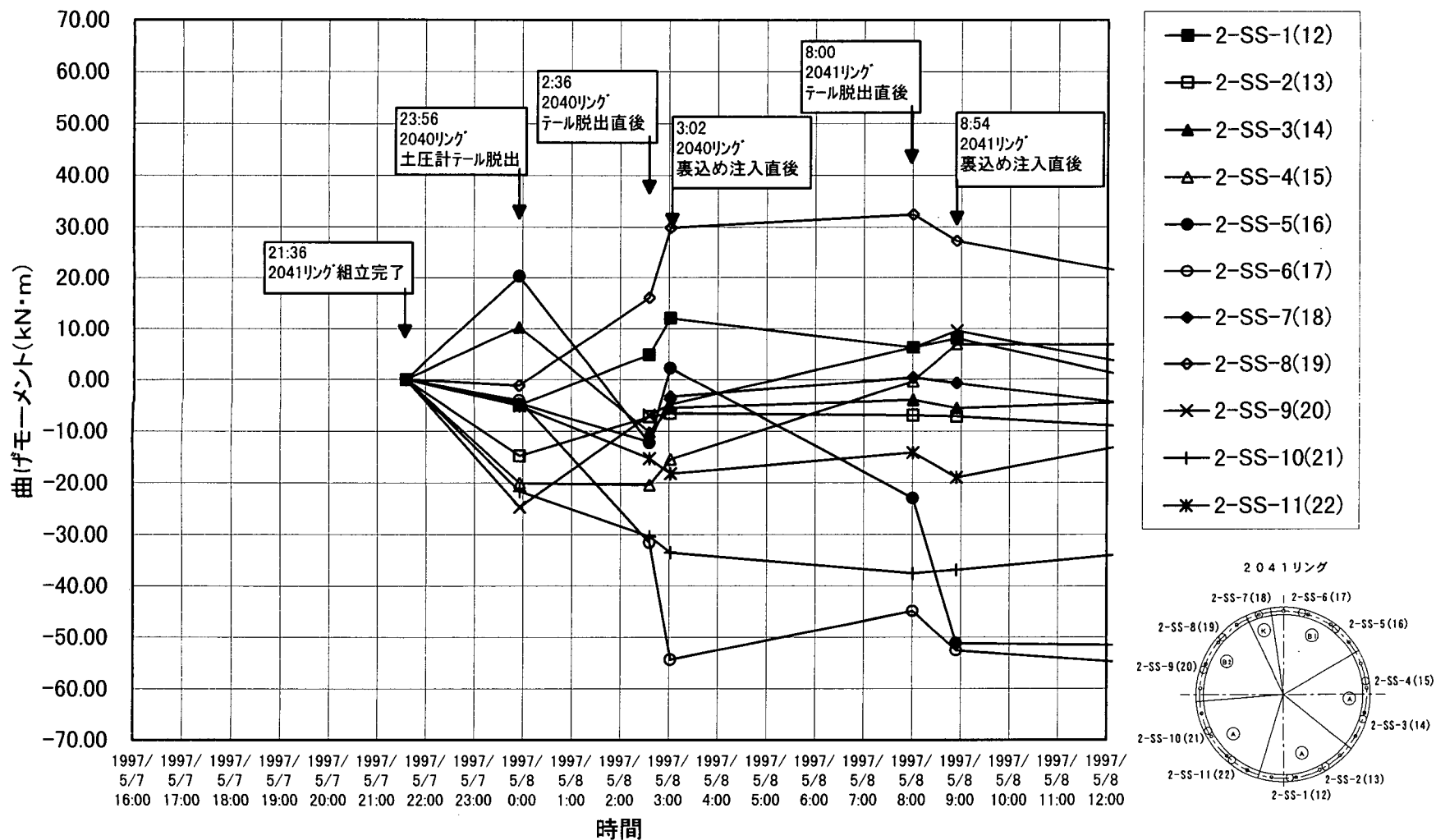


図-2. 29(1) 曲げモーメントの経時変化(2041リング)

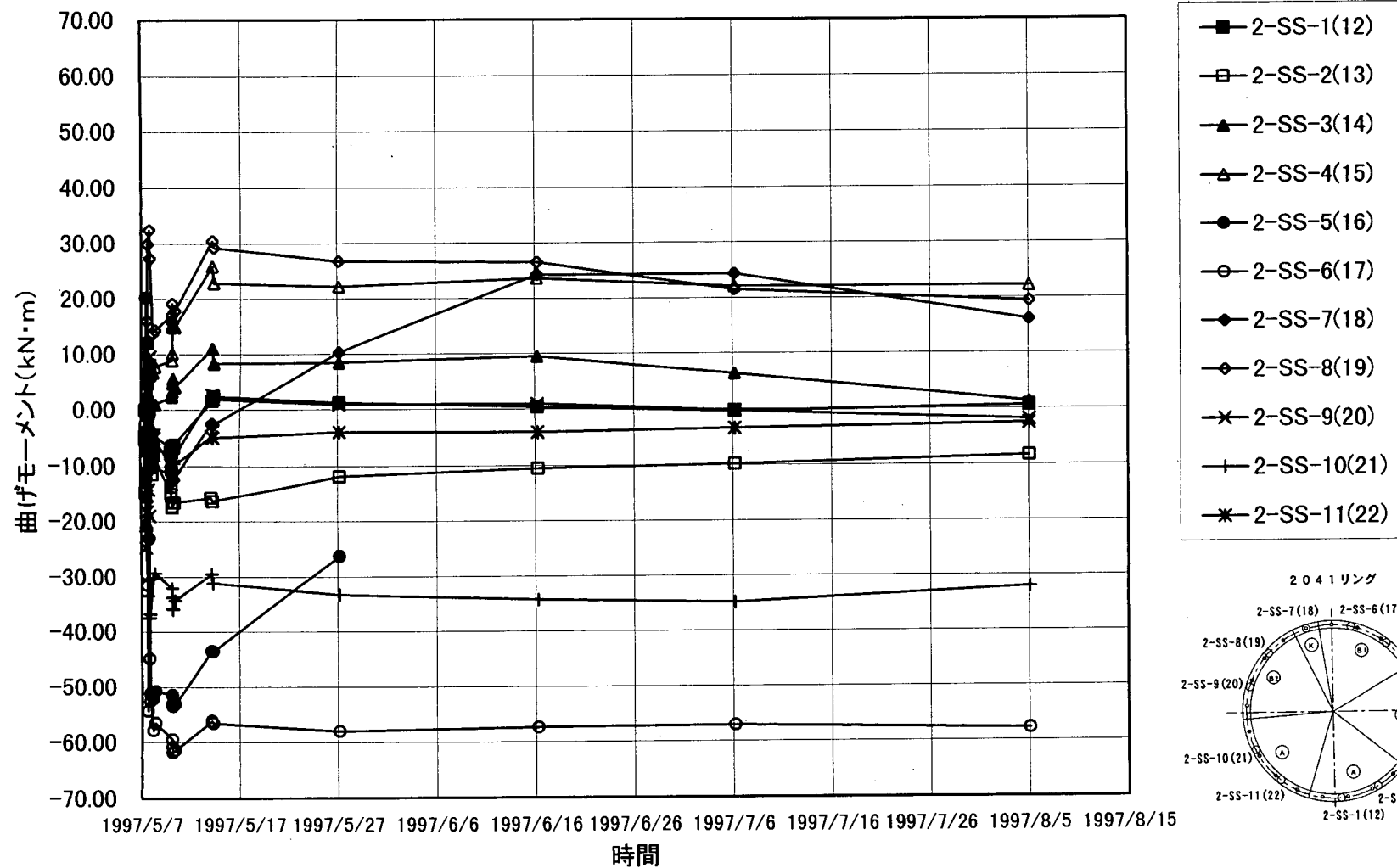


図-2. 29(2) 曲げモーメントの経時変化(2041リング)

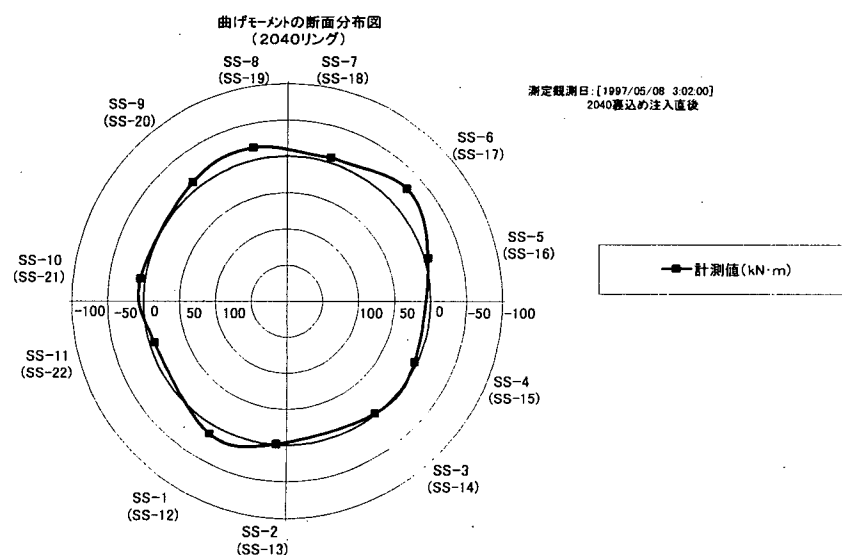
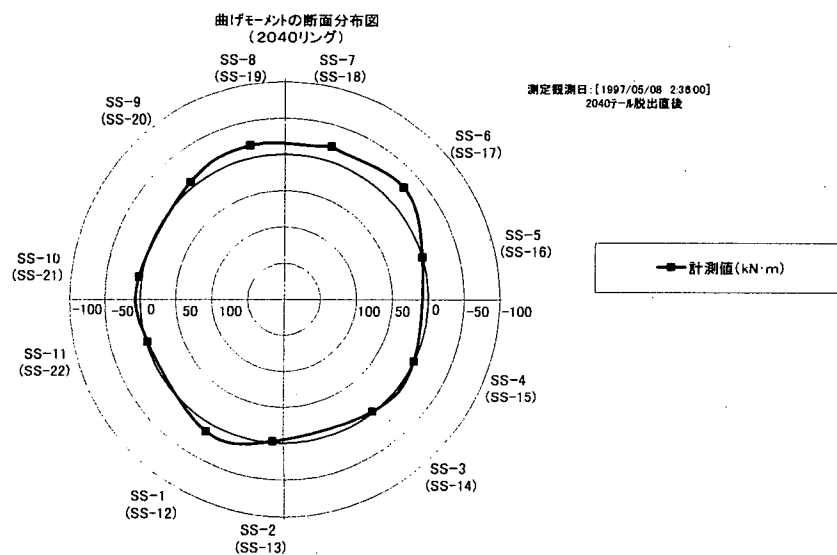
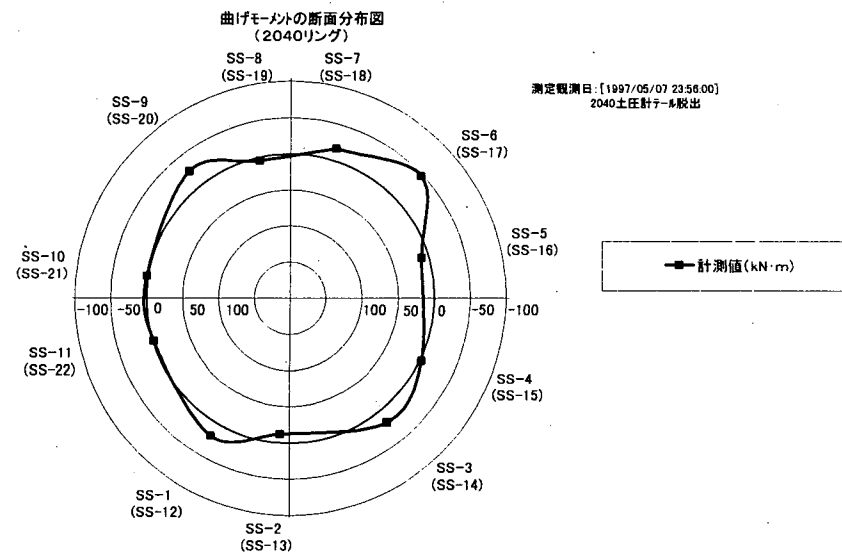
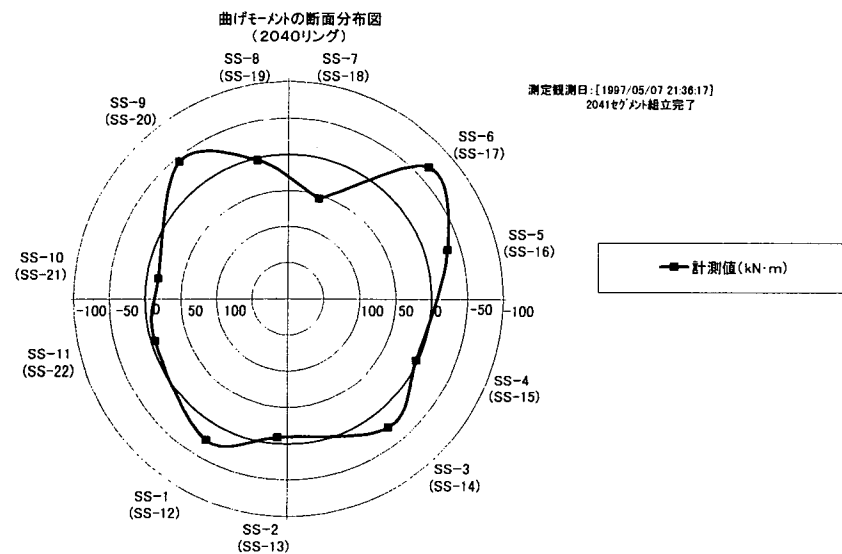


図-2. 30(1) 曲げモーメントの断面分布図(2040リング)

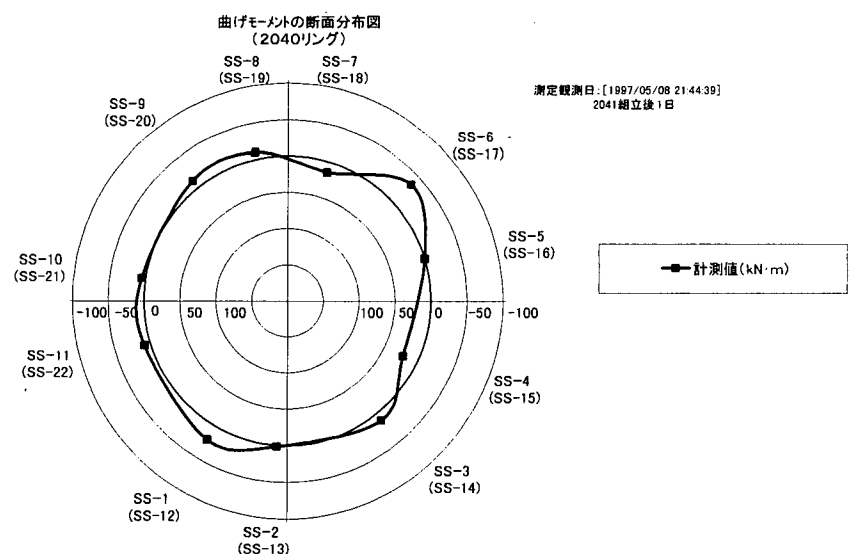
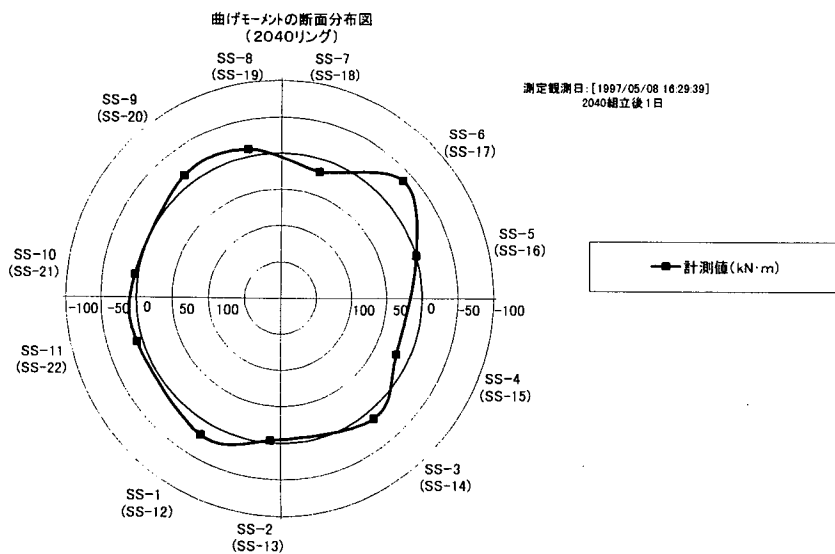
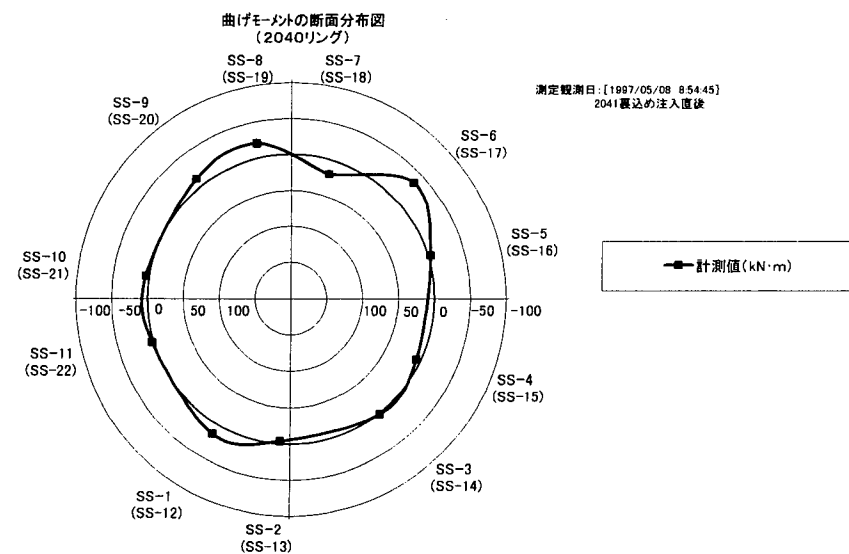
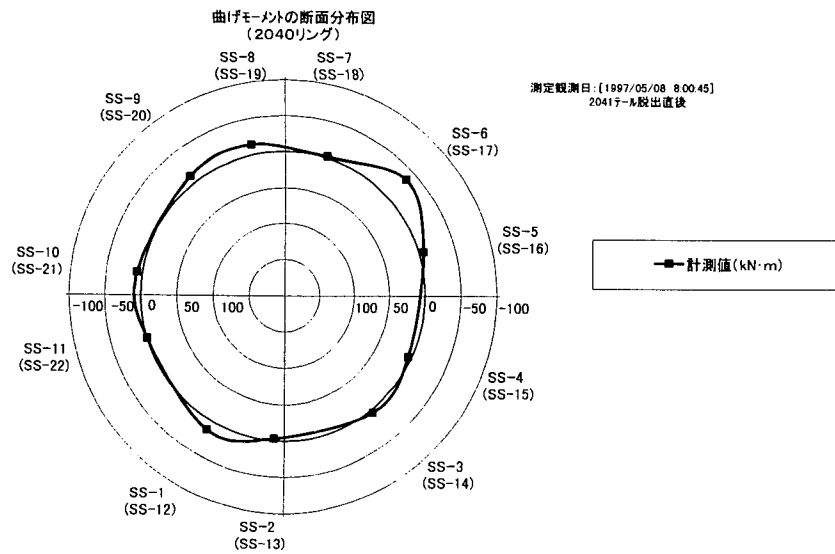


図-2. 30(2) 曲げモーメントの断面分布図(2040リング)

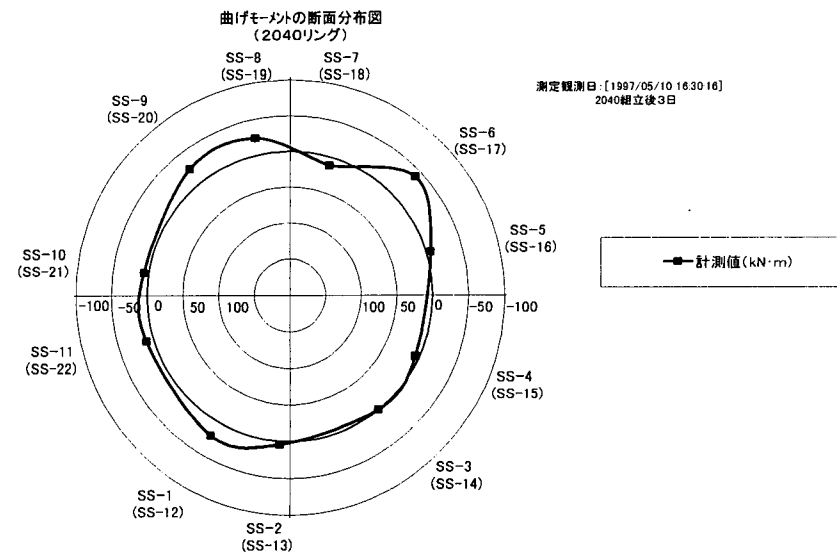
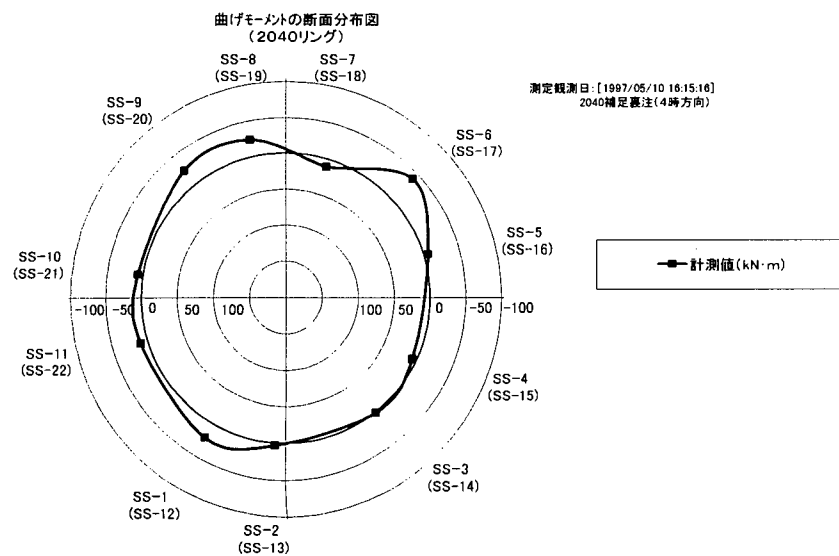
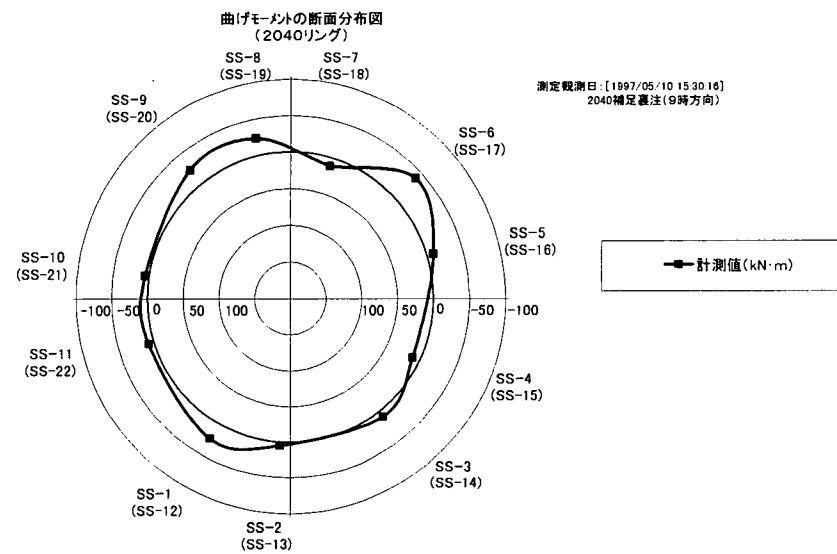
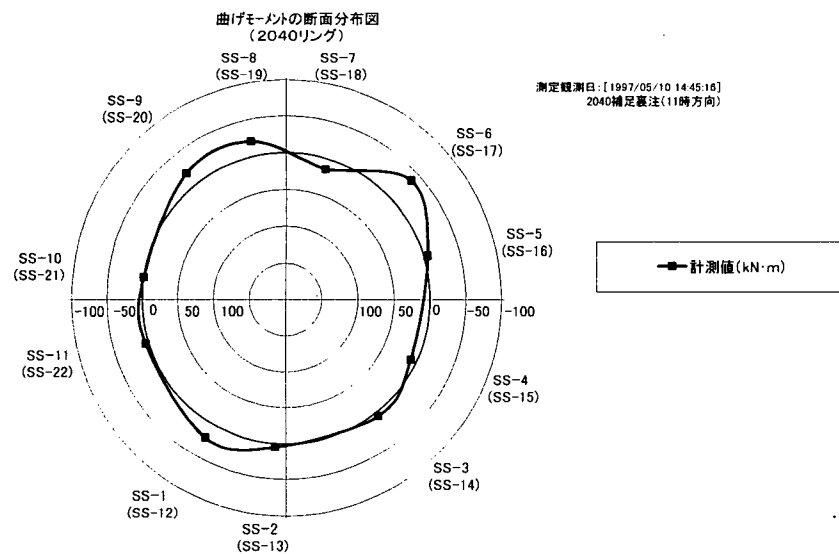


図-2. 30(3) 曲げモーメントの断面分布図(2040リング)

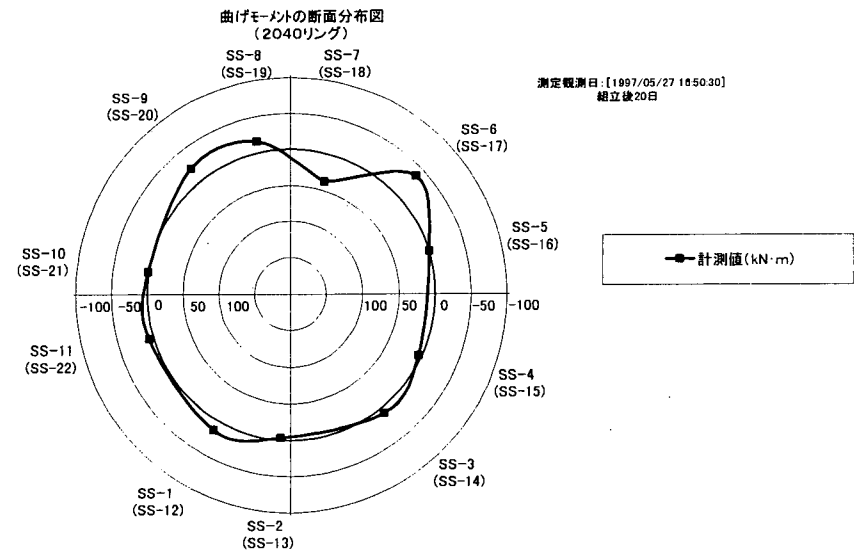
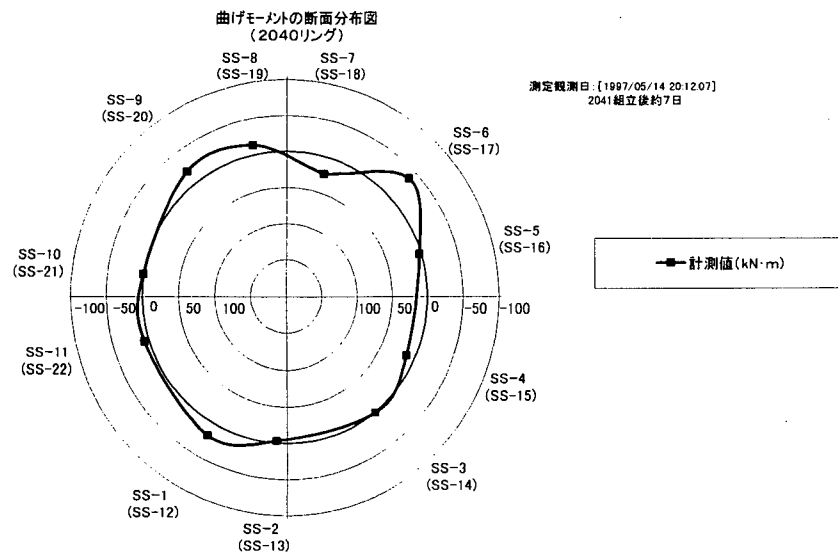
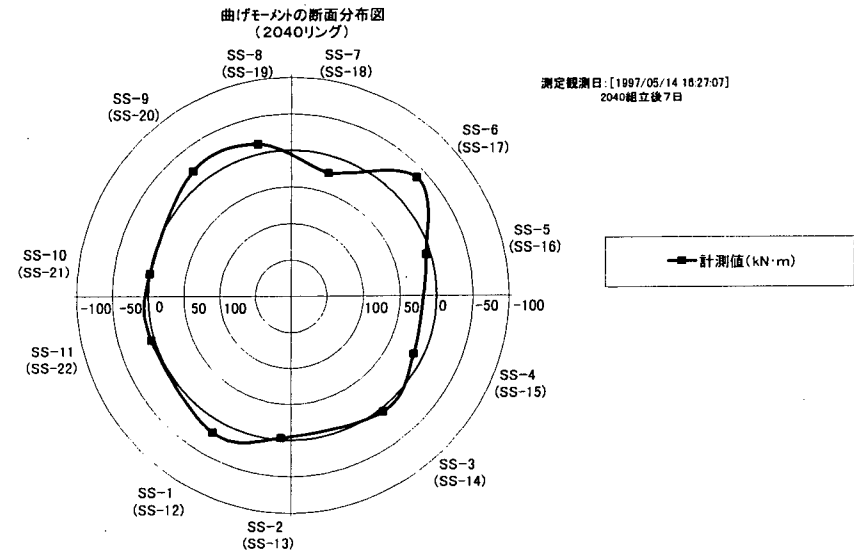
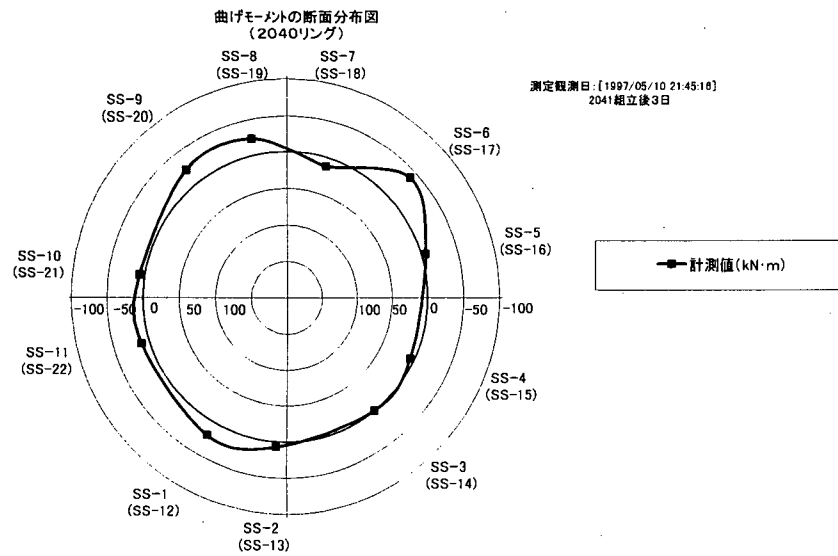


図-2. 30(4) 曲げモーメントの断面分布図(2040リング)

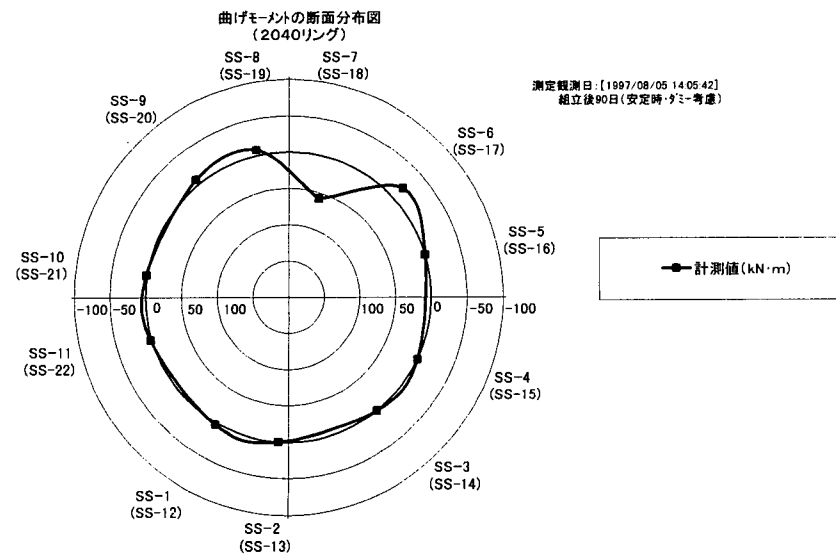
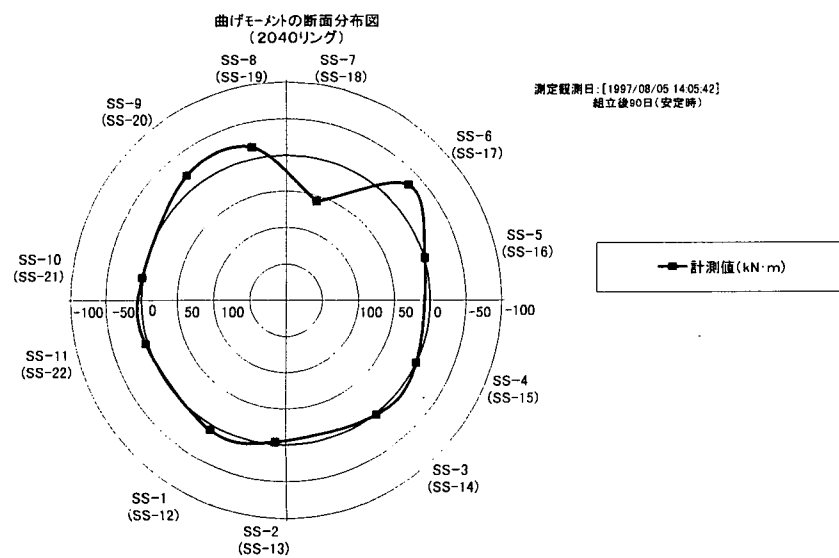
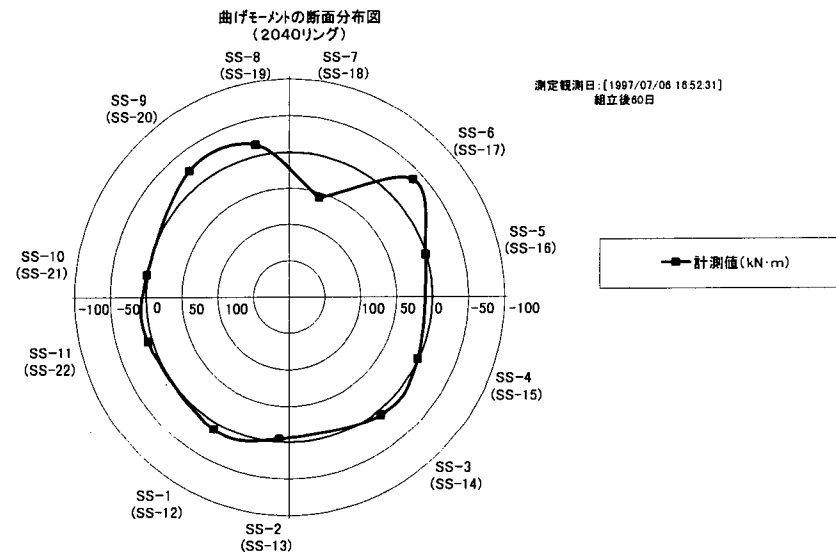
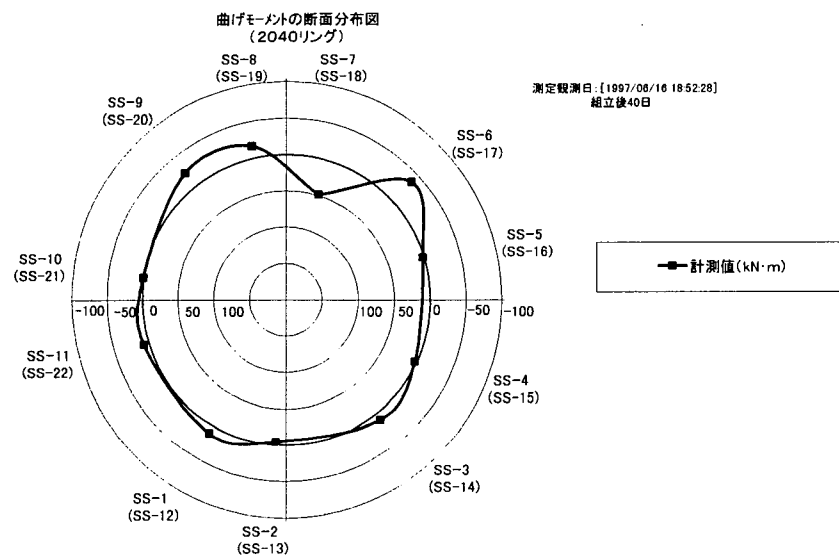


図-2. 30(5) 曲げモーメントの断面分布図(2040リング)

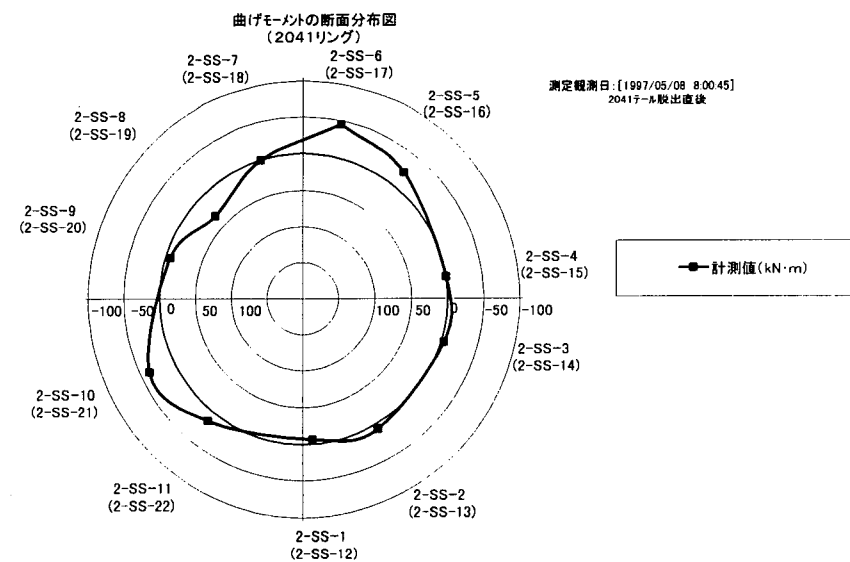
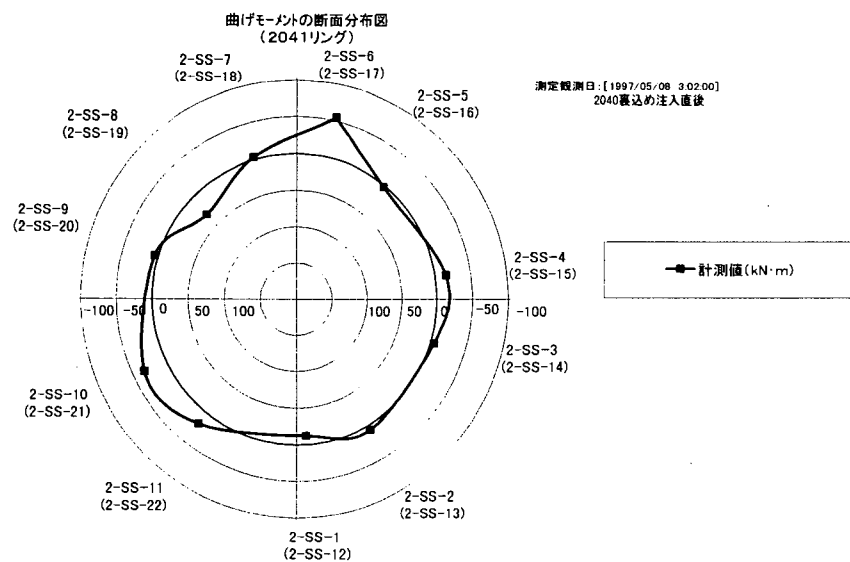
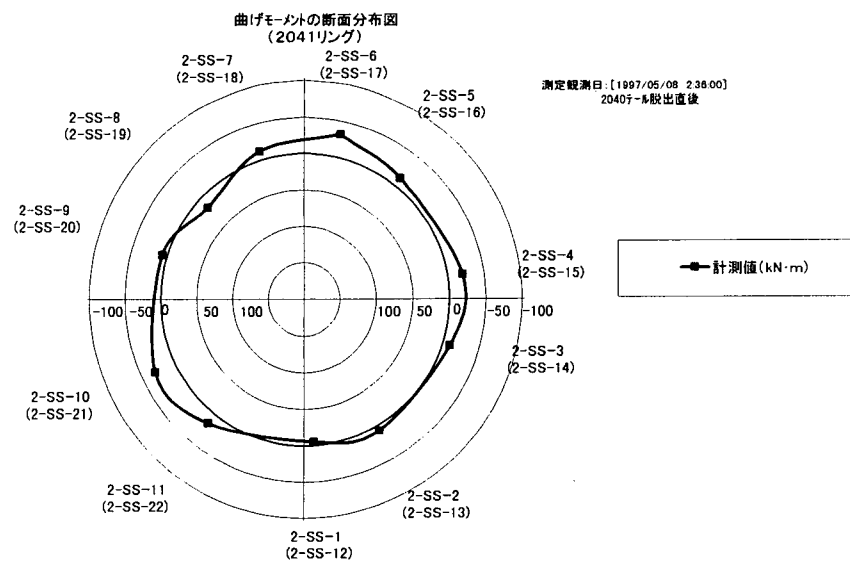
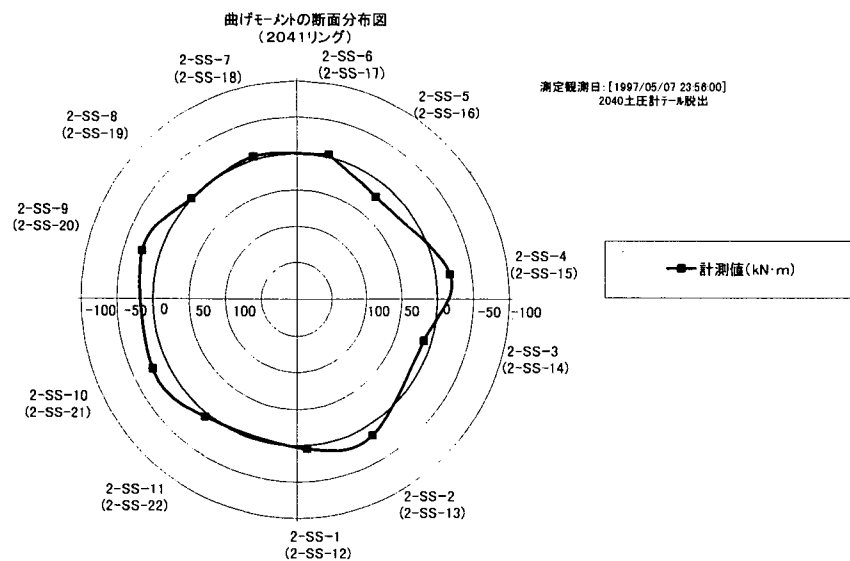


図-2. 31(1) 曲げモーメントの断面分布図(2041リング)

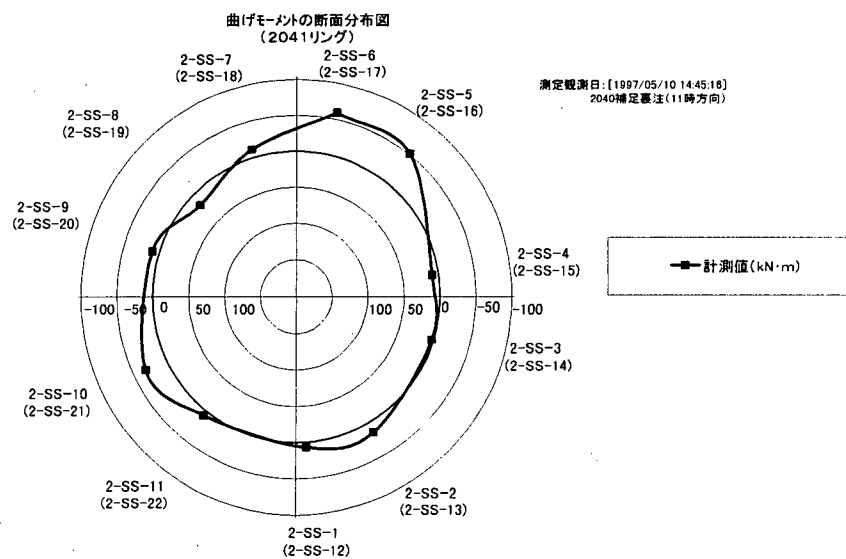
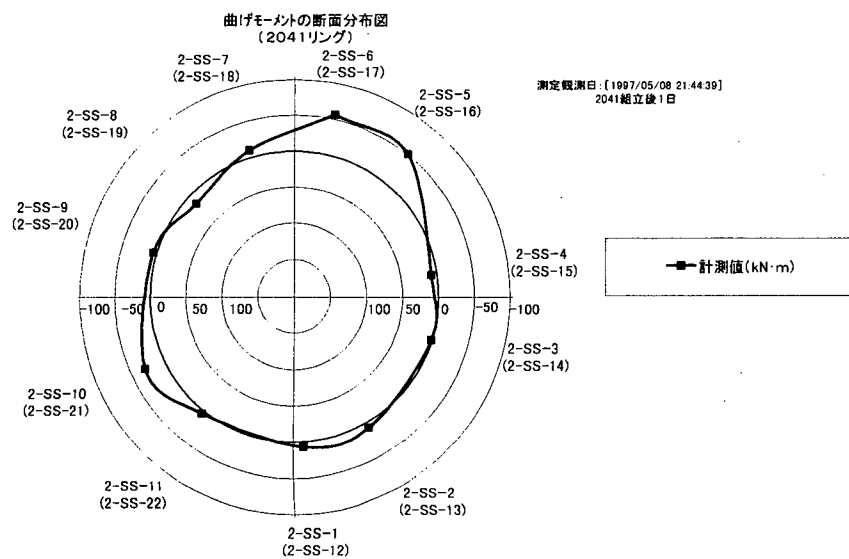
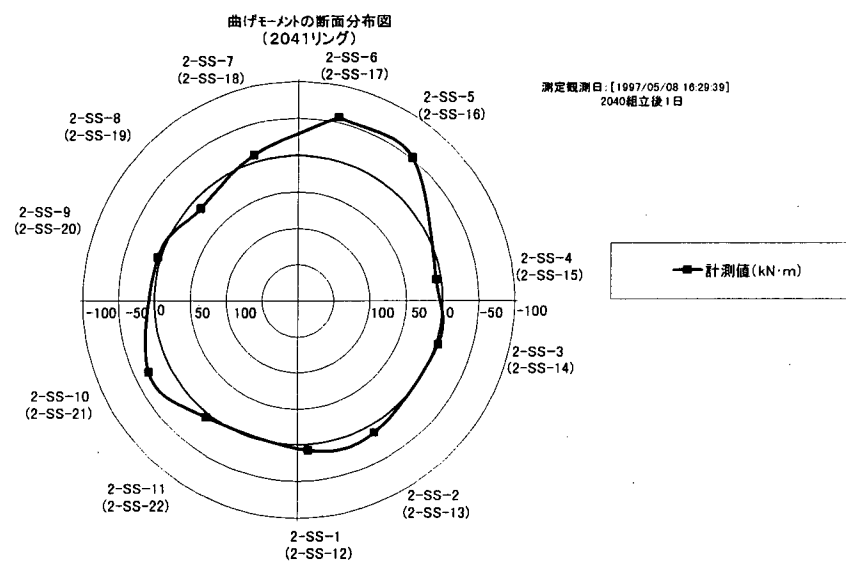
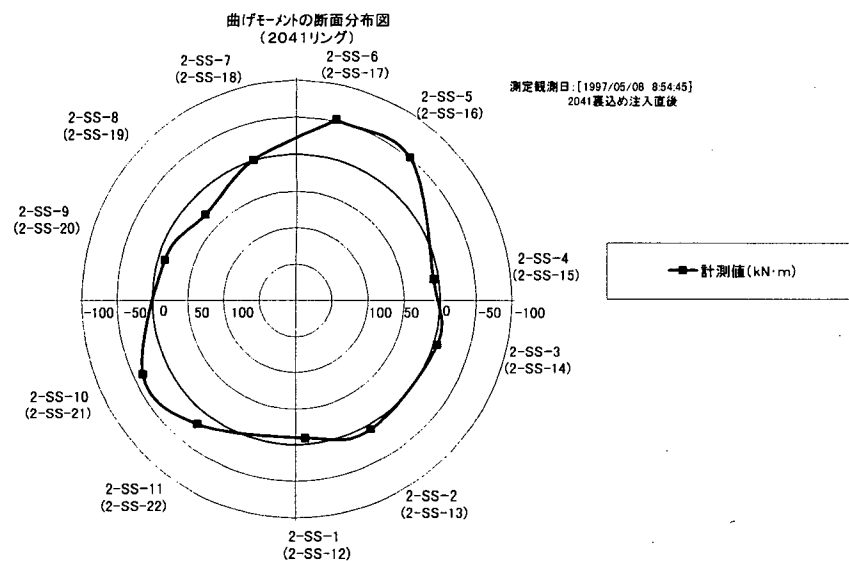


図-2. 31(2) 曲げモーメントの断面分布図(2041リング)

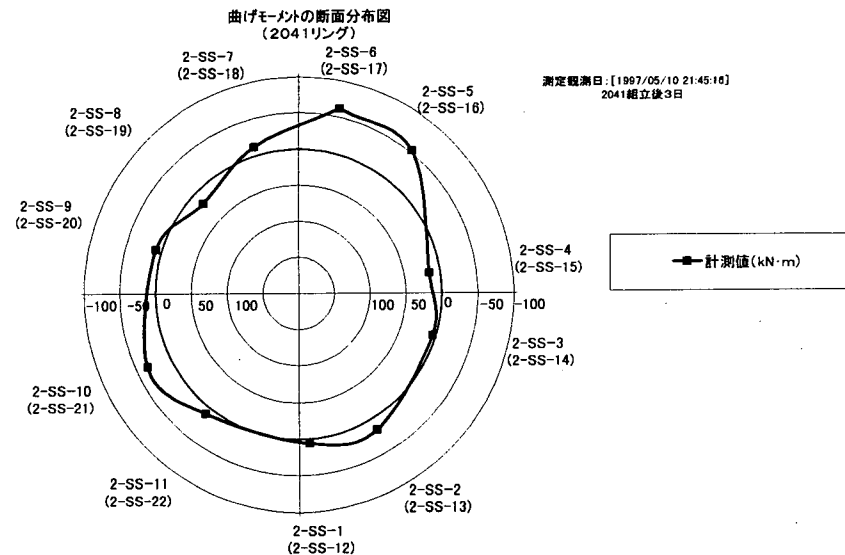
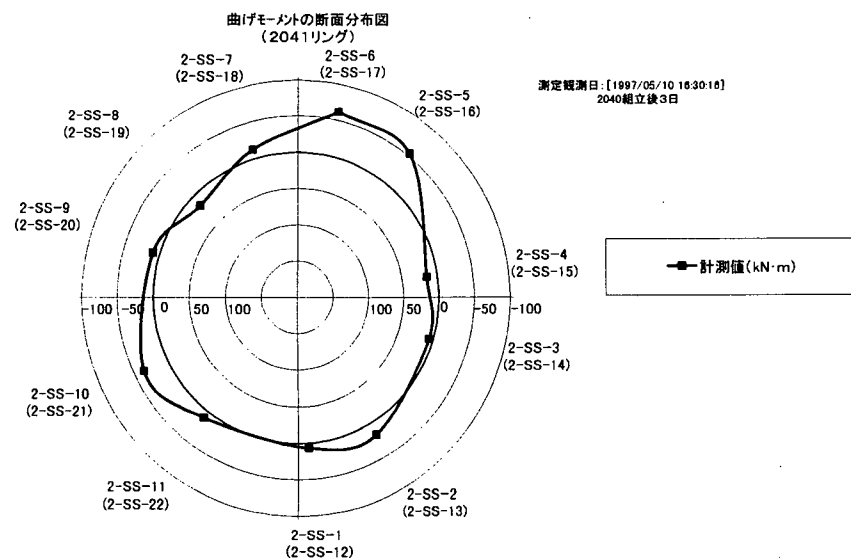
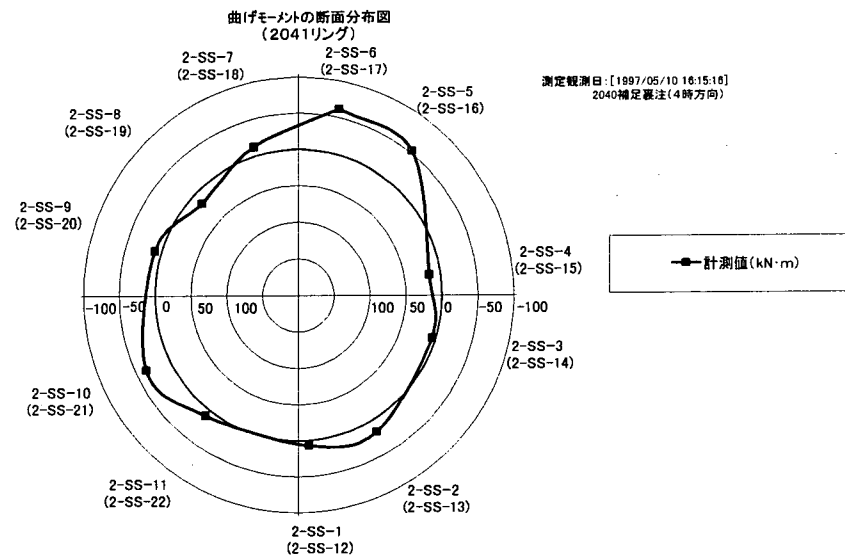
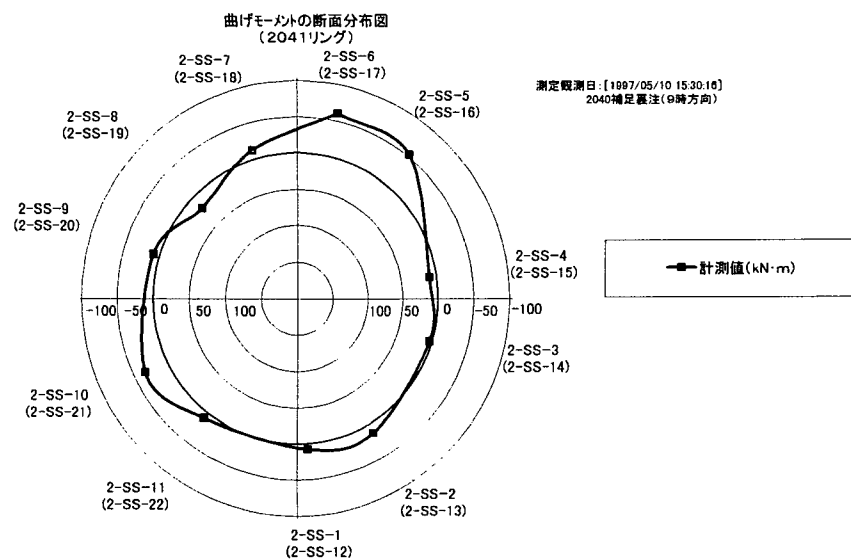


図-2. 31(3) 曲げモーメントの断面分布図(2041リング)

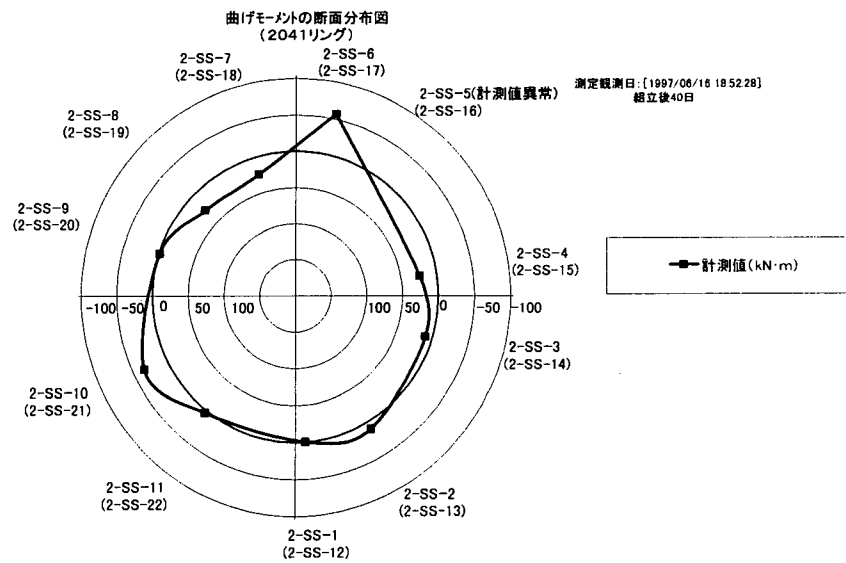
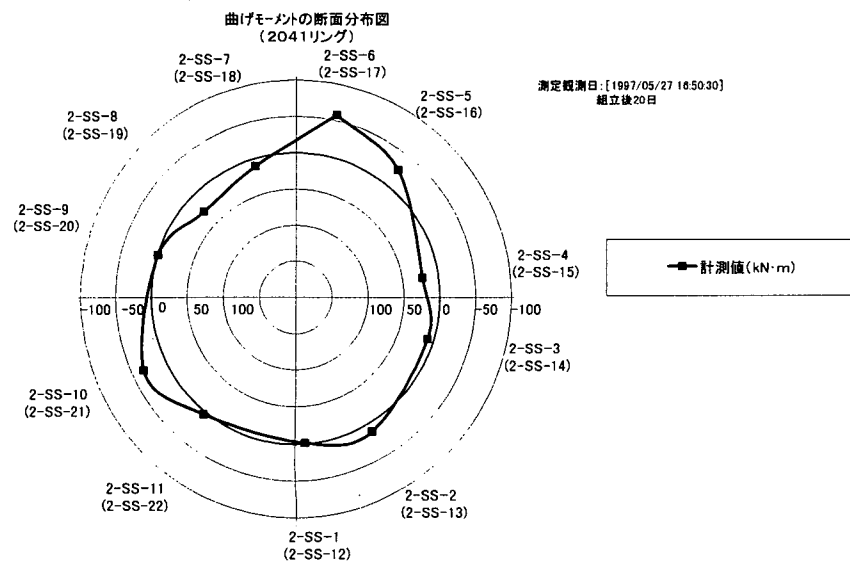
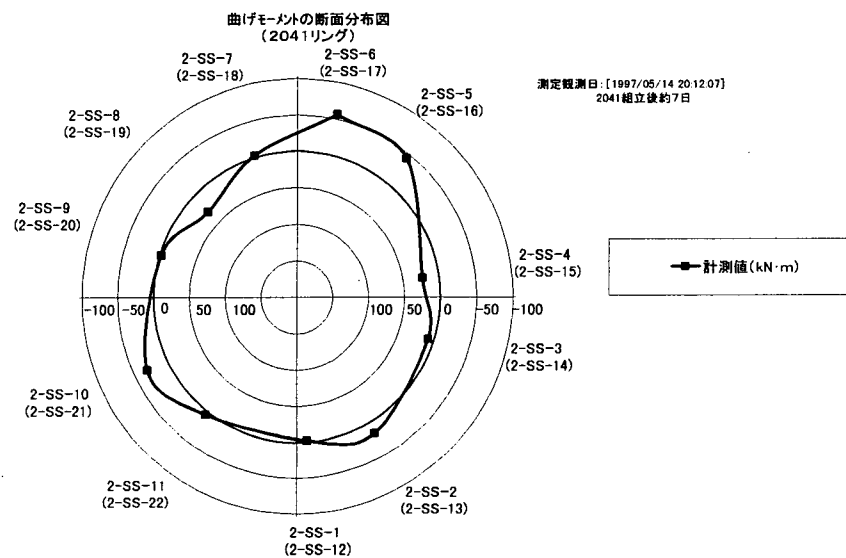
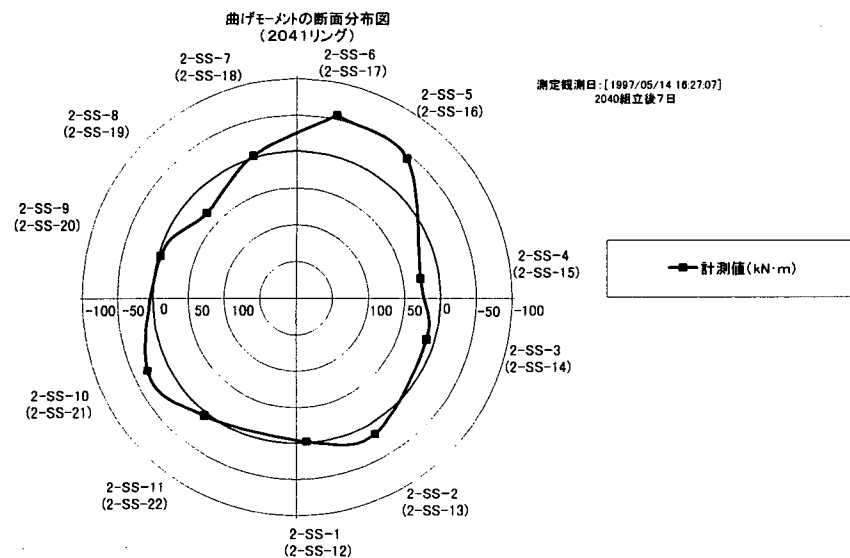


図-2. 31(4) 曲げモーメントの断面分布図(2041リング)

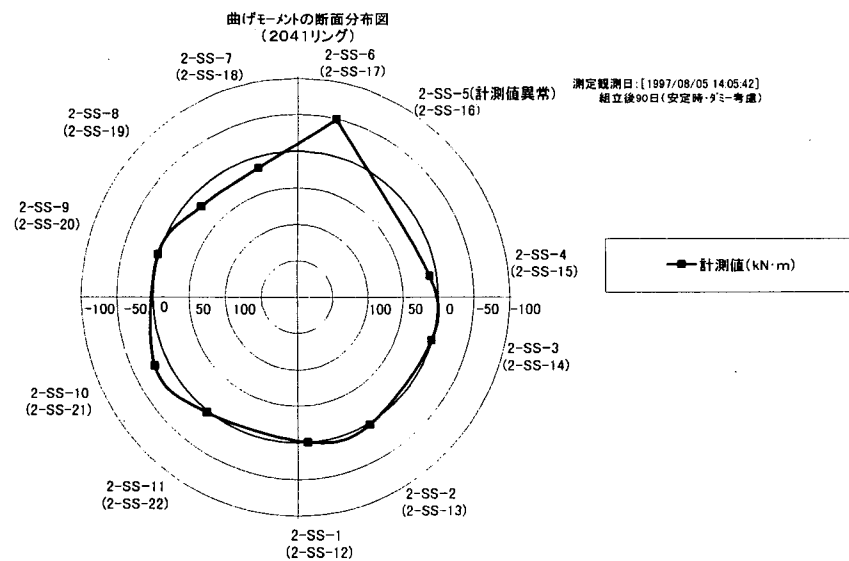
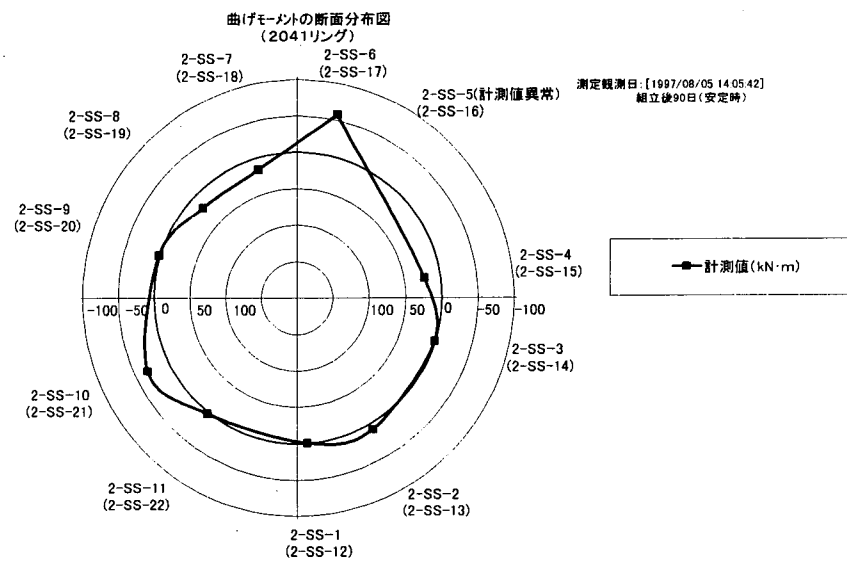
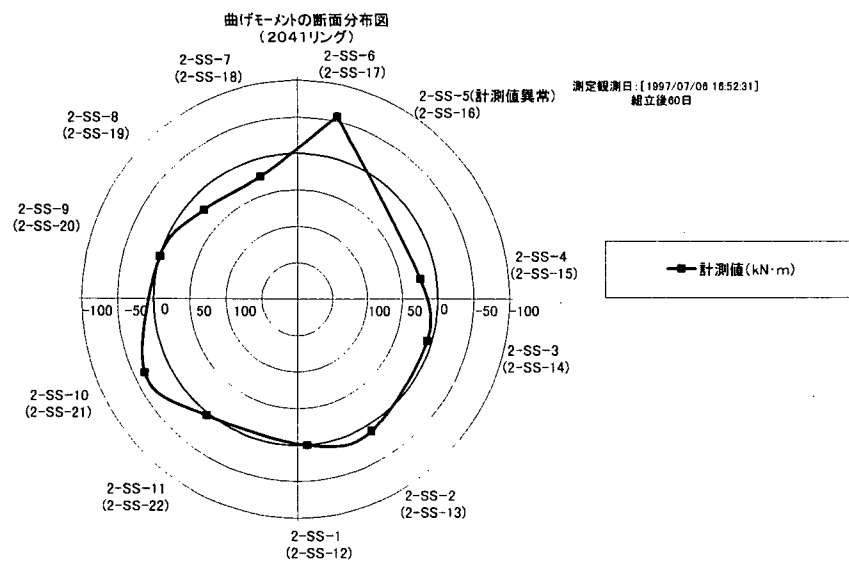


図-2. 31(5) 曲げモーメントの断面分布図(2041リング)

表-2. 12(1) 周方向の鉄筋応力より算出した各点の軸力

調布共同溝 2040リング				(圧縮+, 引張-)										
状態	日付	時間	2040リング 経過時間(日)	計測点										
				SS-1(12)	SS-2(13)	SS-3(14)	SS-4(15)	SS-5(16)	SS-6(17)	SS-7(18)	SS-8(19)	SS-9(20)	SS-10(21)	SS-11(22)
2040セグメント組立完了	1997/5/7	16:20:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2041セグメント組立完了	1997/5/7	21:36:17	0.22	238.11	602.22	2062.28	623.74	477.88	581.63	1452.69	411.67	320.38	410.12	422.17
2040土圧計テール脱出	1997/5/7	23:56:00	0.32	153.85	532.25	1367.87	372.76	982.72	823.50	2330.29	889.46	209.36	288.75	185.09
2040テール脱出直後	1997/5/8	2:36:00	0.43	103.84	427.57	149.93	-3.68	225.78	274.50	1570.38	1167.22	40.97	30.74	241.75
2040裏込め注入直後	1997/5/8	3:02:00	0.45	116.02	429.24	151.63	27.19	96.44	295.74	1132.79	1130.93	74.49	59.22	251.11
2041テール脱出直後	1997/5/8	8:00:45	0.65	144.37	562.68	395.47	57.33	480.81	384.91	1083.90	1096.85	85.09	85.22	274.02
2041裏込め注入直後	1997/5/8	8:54:45	0.69	140.78	554.15	280.09	65.87	344.73	384.74	1207.73	400.58	123.14	56.88	322.58
2040組立後1日	1997/5/8	16:29:39	1.01	156.65	673.82	899.73	199.42	287.17	457.86	1217.88	802.52	154.08	303.87	122.58
2041組立後1日	1997/5/8	21:44:39	1.23	196.53	734.48	839.24	237.05	349.43	409.57	1164.69	846.26	121.81	96.77	114.52
2040補足裏注(11時方向)	1997/5/10	14:45:16	2.93	196.78	829.61	651.80	91.89	506.54	402.04	1215.94	400.19	181.56	-2.75	45.75
2040補足裏注(9時方向)	1997/5/10	15:30:16	2.97	249.92	951.73	822.45	87.86	723.41	434.71	1234.55	456.71	258.51	64.72	101.37
2040補足裏注(4時方向)	1997/5/10	16:15:16	3.00	245.97	877.78	566.71	51.20	632.45	456.54	1253.29	460.33	254.03	72.53	118.27
2040組立後3日	1997/5/10	16:30:16	3.01	236.20	918.92	507.79	46.09	645.58	451.57	1255.04	459.03	252.93	70.98	122.15
2041組立後3日	1997/5/10	21:45:16	3.23	215.80	1000.86	516.30	66.54	605.33	443.39	1248.25	448.49	244.65	65.05	122.70
2040組立後7日	1997/5/14	16:27:07	7.00	185.57	625.93	751.56	110.73	419.36	437.45	1331.02	1072.98	244.72	-3.84	324.69
2041組立後約7日	1997/5/14	20:12:07	7.16	188.05	637.90	614.78	102.42	410.51	443.85	1336.13	1092.52	251.47	-0.31	112.22
組立後20日	1997/5/27	16:50:30	20.02	109.82	463.51	914.35	31.52	355.70	386.69	1261.90	1198.57	257.69	-13.18	69.73
組立後40日	1997/6/16	18:52:28	40.11	66.39	395.17	983.63	32.19	391.53	380.97	1561.65	1254.09	296.68	-8.15	81.81
組立後60日	1997/7/6	16:52:31	60.02	40.94	319.93	726.68	2.70	350.23	368.16	1715.96	1210.06	292.25	-8.29	51.88
組立後90日(安定時)	1997/8/5	14:05:42	89.91	12.48	200.21	353.98	-5.86	196.34	292.70	1714.32	1074.79	187.62	-17.26	3.06
組立後90日(安定時・ダミー考慮)	1997/8/5	14:05:42	89.91	-48.94	-12.65	-9.81	-30.58	-15.78	101.89	1296.00	65.08	11.34	-41.98	-38.32

表-2. 12(2) 周方向の鉄筋応力より算出した各点の軸力

調布共同溝 2041リング				(圧縮+, 引張-)										
状態	日付	時間	2041リング 経過時間(日)	計測点										
				2-SS-1(12)	2-SS-2(13)	2-SS-3(14)	2-SS-4(15)	2-SS-5(16)	2-SS-6(17)	2-SS-7(18)	2-SS-8(19)	2-SS-9(20)	2-SS-10(21)	2-SS-11(22)
2040セグメント組立完了	1997/5/7	16:20:00												
2041セグメント組立完了	1997/5/7	21:36:17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2040土圧計テール脱出	1997/5/7	23:56:00	0.10	428.29	983.39	361.46	1311.20	343.62	532.84	322.55	734.15	450.23	309.54	506.79
2040テール脱出直後	1997/5/8	2:36:00	0.21	552.80	912.23	753.01	1334.29	1465.07	2446.16	163.57	770.33	569.93	498.71	221.21
2040裏込め注入直後	1997/5/8	3:02:00	0.23	403.20	733.25	79.46	230.05	965.69	982.07	253.45	809.28	531.25	483.08	210.70
2041テール脱出直後	1997/5/8	8:00:45	0.43	220.51	546.11	260.76	280.03	2055.79	860.88	149.81	564.50	310.98	476.56	104.91
2041裏込め注入直後	1997/5/8	8:54:45	0.47	261.96	634.20	77.58	272.94	904.83	811.93	267.42	636.86	299.12	500.80	164.62
2040組立後1日	1997/5/8	16:29:39	0.79	529.71	762.30	218.20	283.20	969.87	917.01	809.87	722.37	625.90	377.20	33.80
2041組立後1日	1997/5/8	21:44:39	1.01	95.72	166.81	60.11	281.57	985.92	895.76	808.03	768.45	641.45	369.05	16.08
2040補足裏注(11時方向)	1997/5/10	14:45:16	2.71	89.67	198.27	73.97	267.97	1024.13	930.29	829.12	789.19	768.55	391.78	33.52
2040補足裏注(9時方向)	1997/5/10	15:30:16	2.75	89.45	201.90	94.66	321.18	1026.97	941.30	891.32	847.35	802.41	376.64	50.70
2040補足裏注(4時方向)	1997/5/10	16:15:16	2.78	113.81	216.61	103.37	373.02	1042.13	961.21	904.82	833.36	834.88	398.00	56.55
2040組立後3日	1997/5/10	16:30:16	2.79	117.08	216.81	125.77	369.55	1042.13	959.44	908.27	833.36	831.77	398.51	61.83
2041組立後3日	1997/5/10	21:45:16	3.01	110.12	214.35	103.31	359.28	1035.23	953.02	888.49	826.75	779.26	399.37	60.97
2040組立後7日	1997/5/14	16:27:07	6.79	72.30	187.97	137.76	418.49	2926.12	962.13	514.81	834.90	439.04	362.55	13.75
2041組立後約7日	1997/5/14	20:12:07	6.94	81.01	195.42	111.15	393.14	2932.66	969.21	534.91	843.29	447.56	374.02	16.98
組立後20日	1997/5/27	16:50:30	19.80	-27.89	115.60	135.46	432.49	1888.09	987.86	565.79	928.25	551.76	440.76	10.79
組立後40日	1997/6/16	18:52:28	39.89	-26.09	83.76	158.60	480.06	計測値異常	1054.78	763.27	972.54	621.82	414.37	0.72
組立後60日	1997/7/6	16:52:31	59.80	-20.05	70.94	98.83	430.87	計測値異常	1089.47	799.46	890.21	624.89	393.48	-8.31
組立後90日(安定時)	1997/8/5	14:05:42	89.69	-33.86	44.20	0.37	328.57	計測値異常	988.68	648.93	693.98	529.88	319.69	-22.05
組立後90日(安定時・ダミー考慮)	1997/8/5	14:05:42	89.69	-58.58	-37.27	-29.42	69.75	計測値異常	649.22	239.03	286.24	29.93	115.10	-49.94

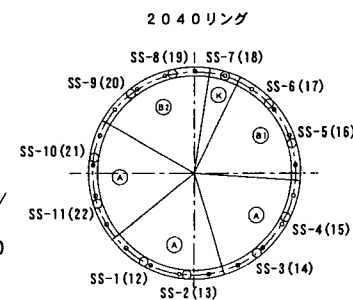


図-2.32(1) 軸力の経時変化(2040リング)

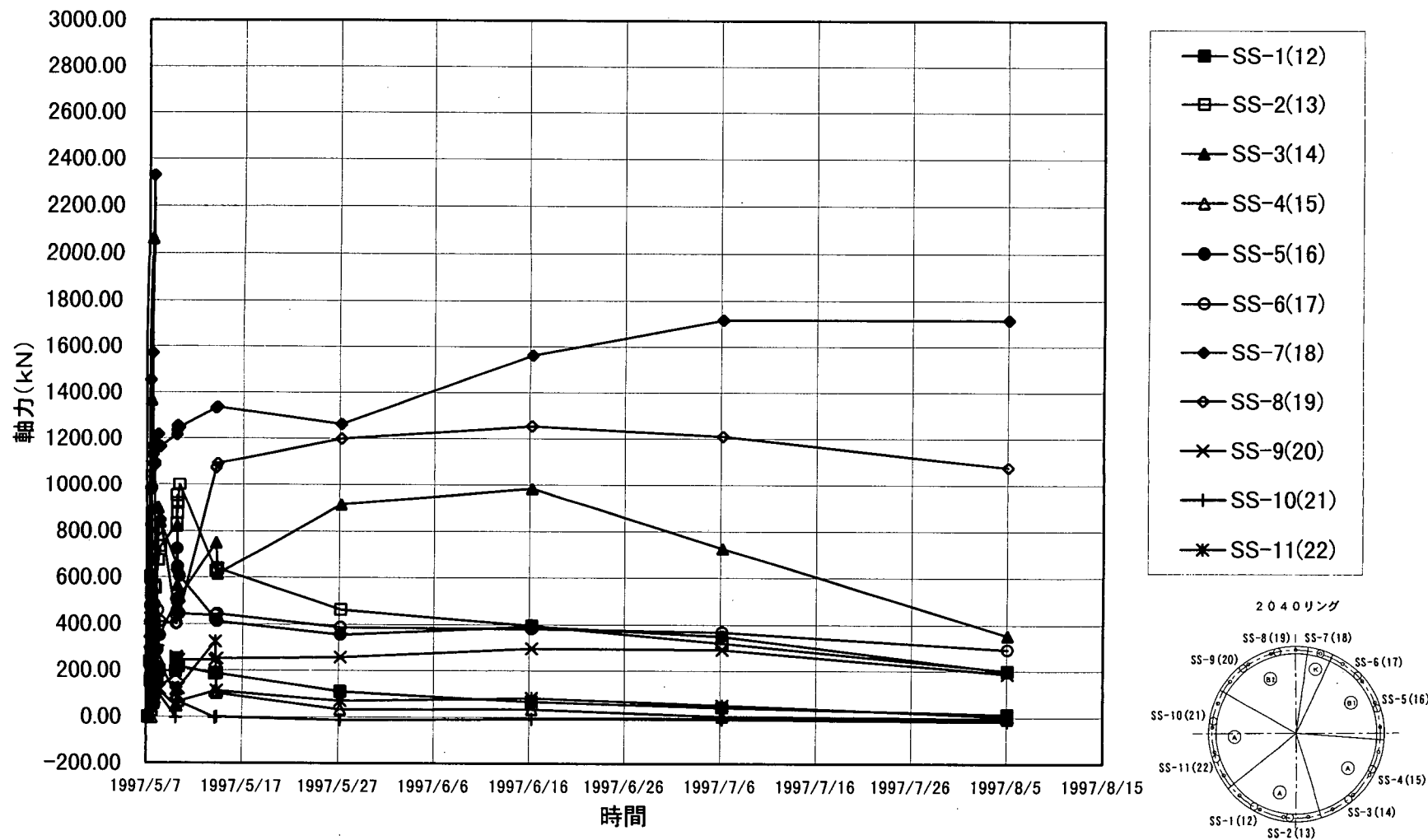


図-2. 32(2) 軸力の経時変化(2040リング)

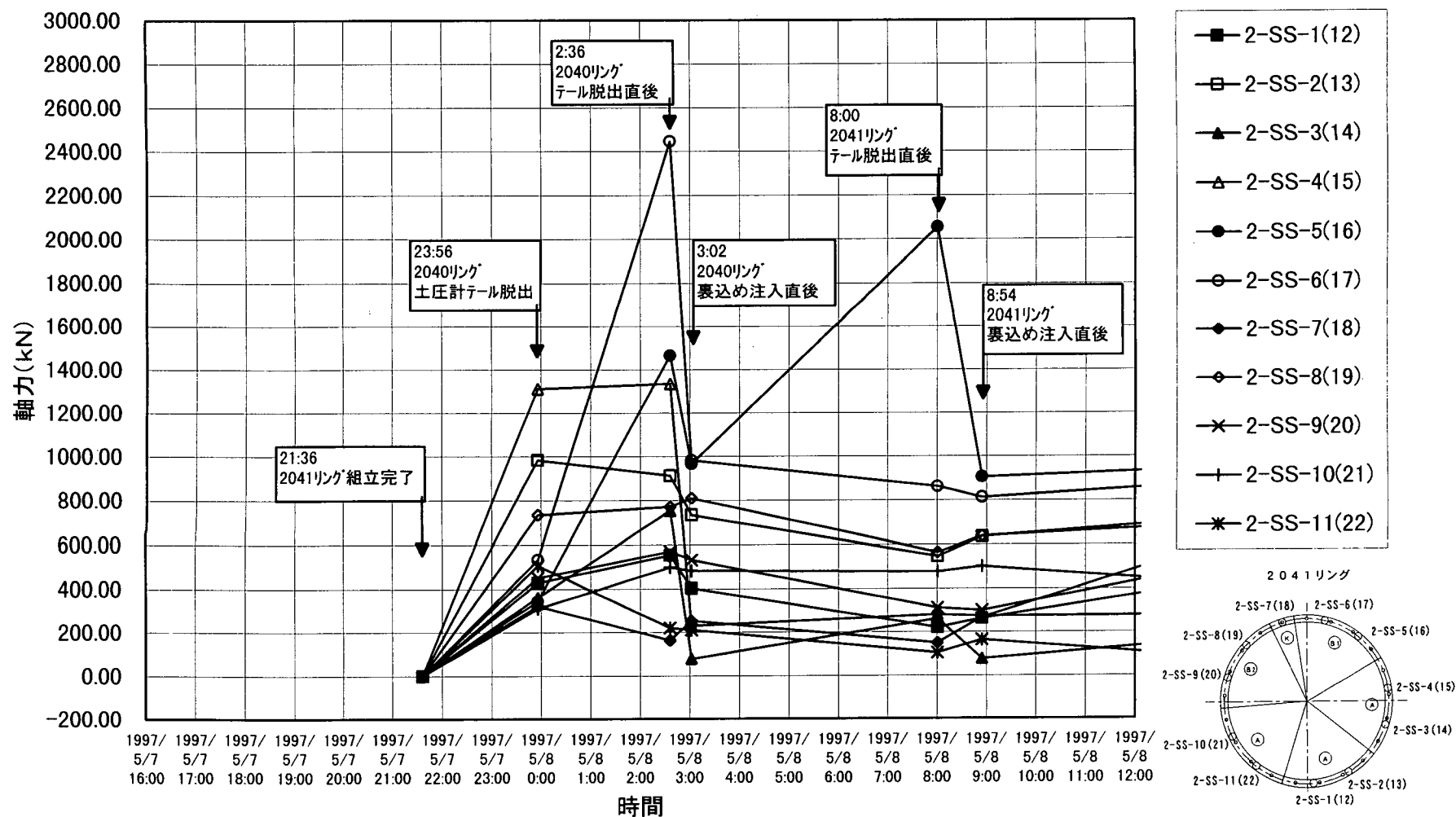


図-2. 33(1) 軸力の経時変化(2041リング)

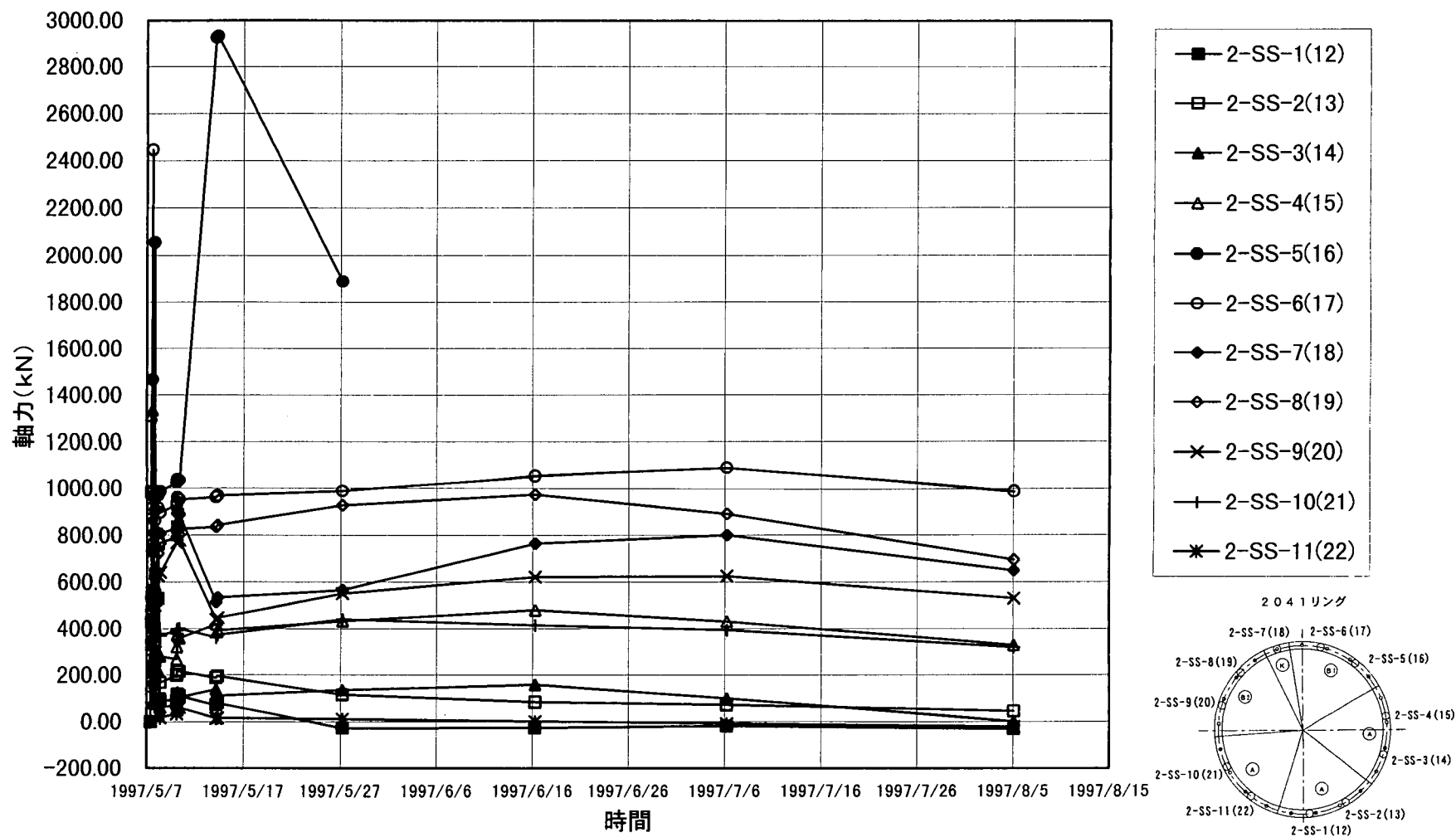


図-2. 33(2) 軸力の経時変化(2041リング)

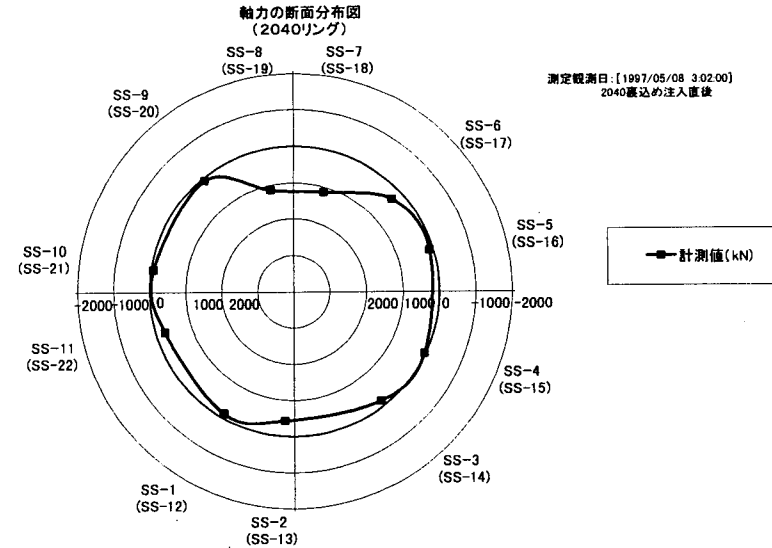
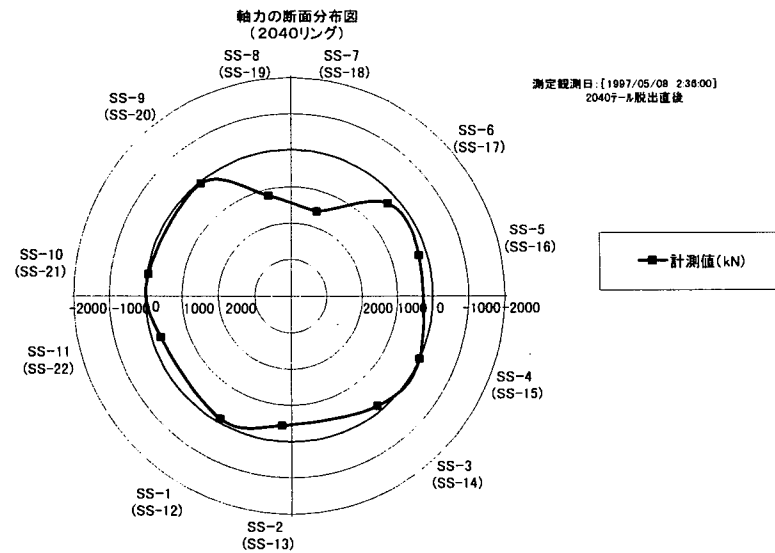
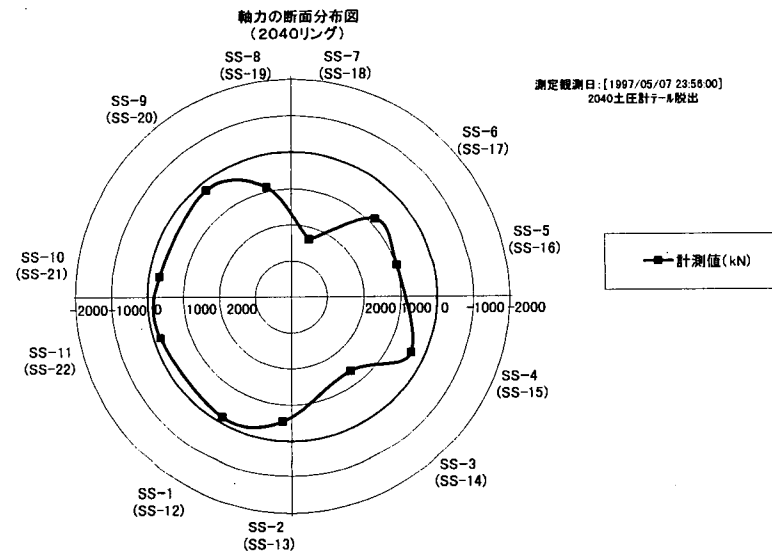
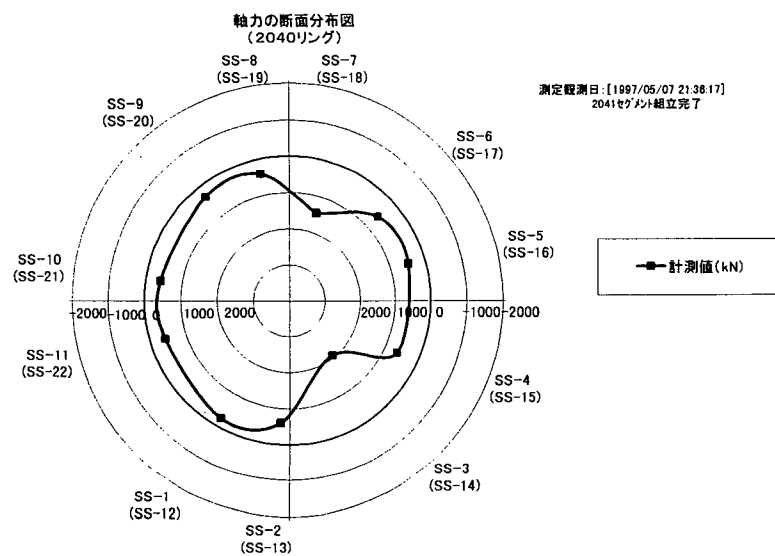


図-2. 34(1) 軸力の断面分布図(2040リング)

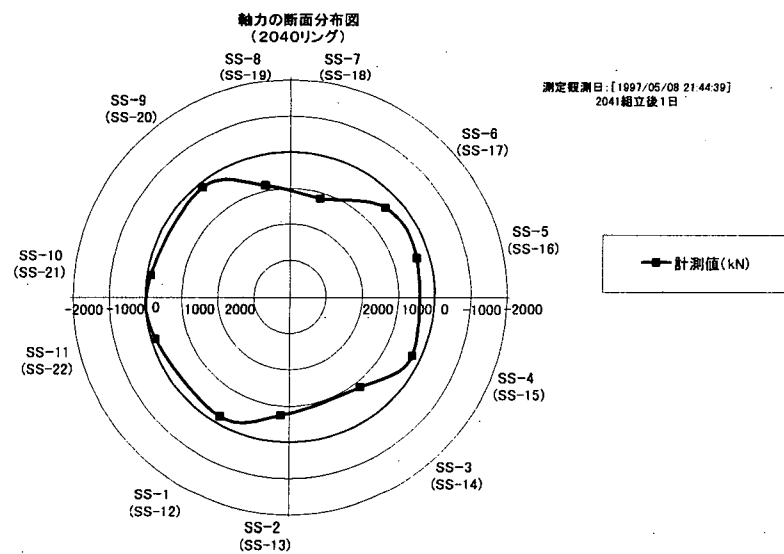
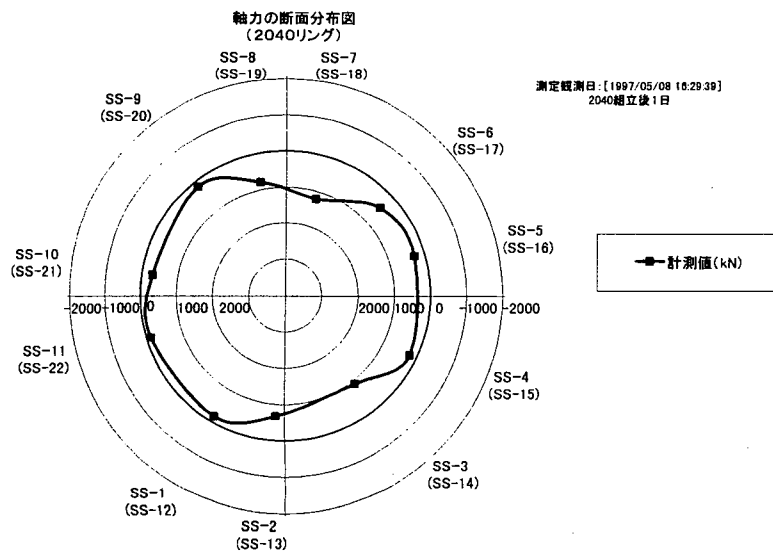
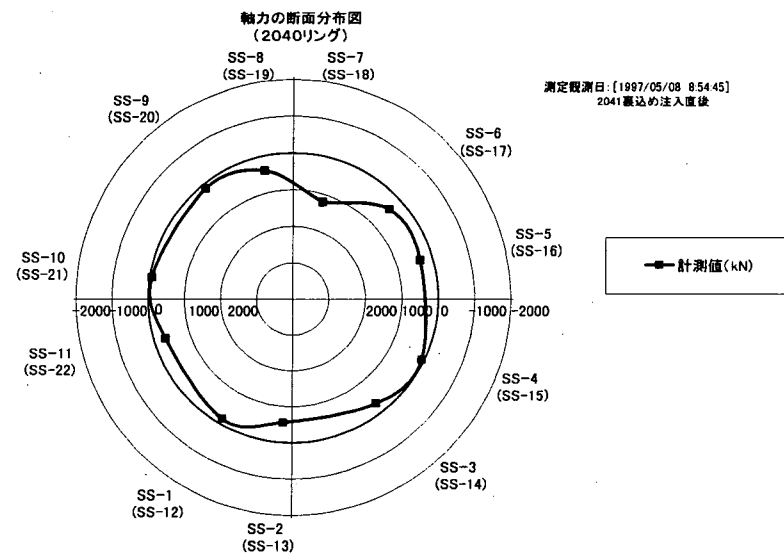
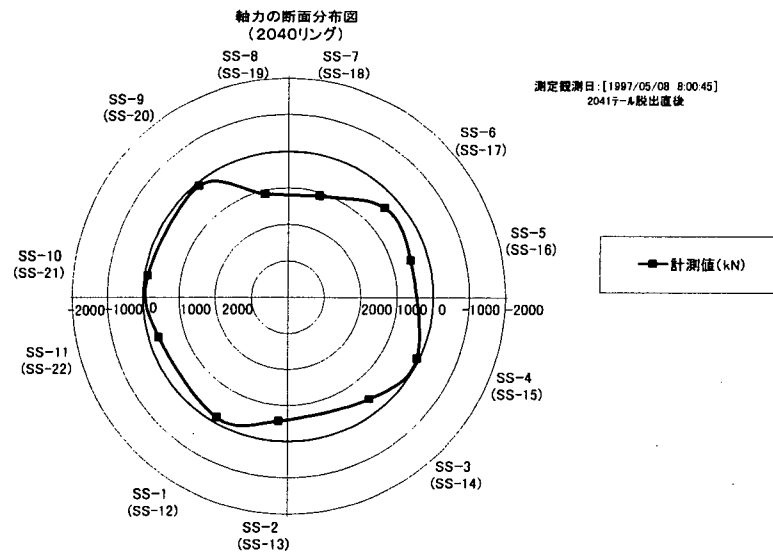


図-2. 34(2) 軸力の断面分布図(2040リング)

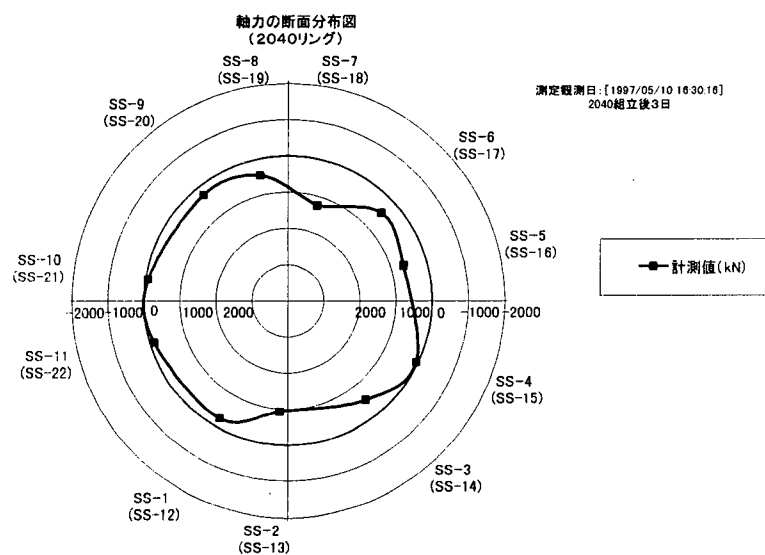
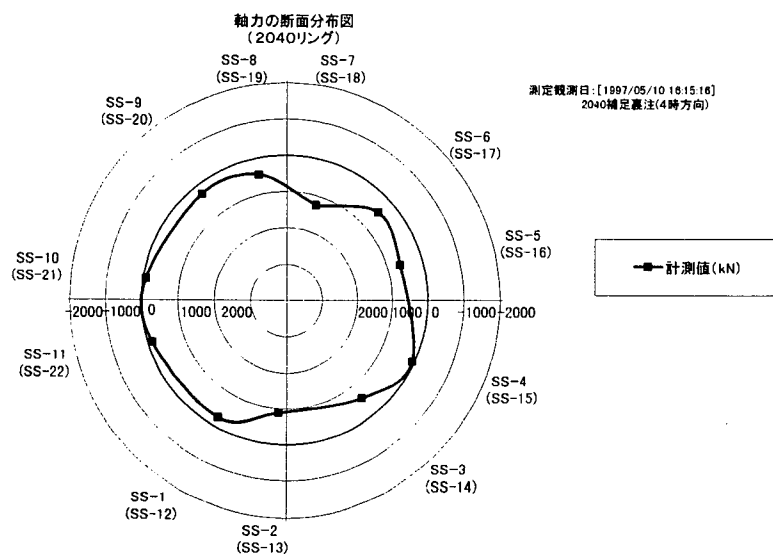
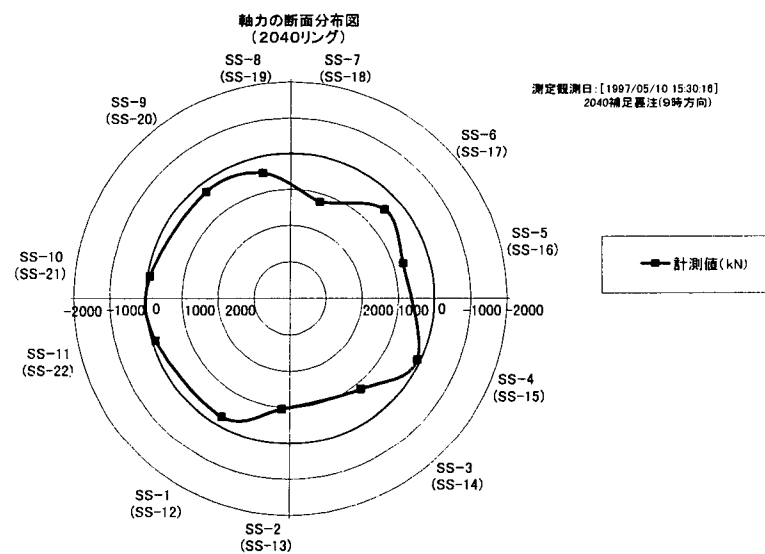
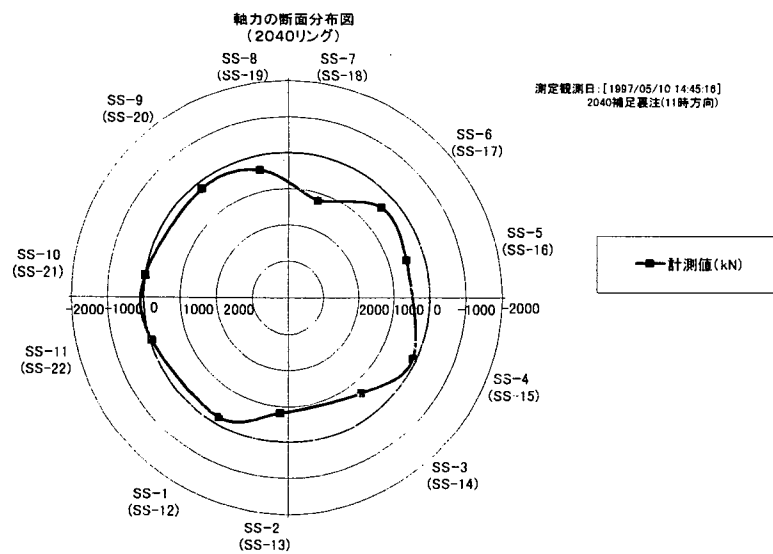


図-2. 34(3) 軸力の断面分布図(2040リング)

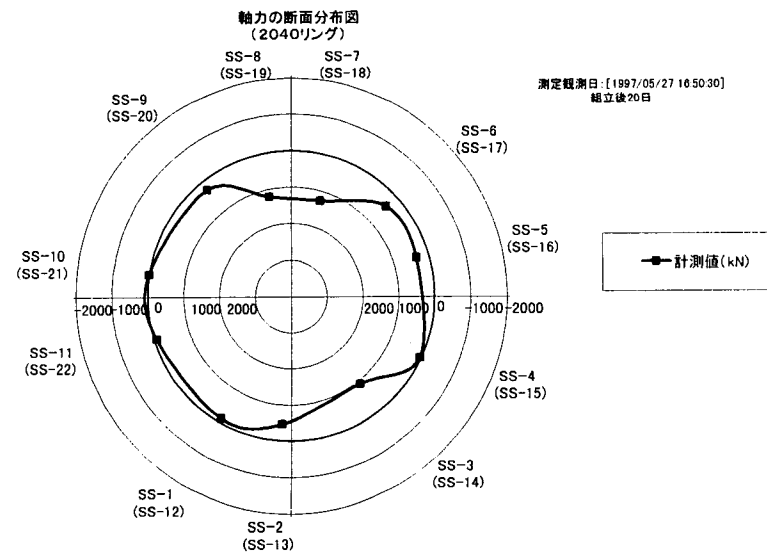
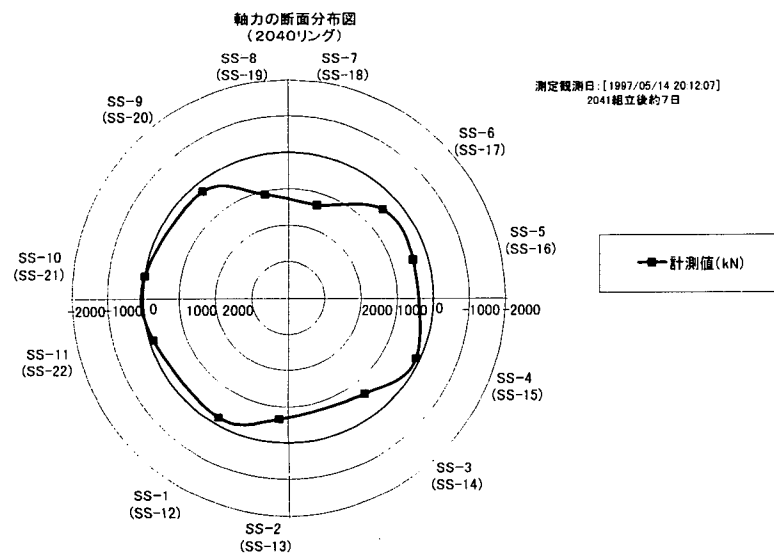
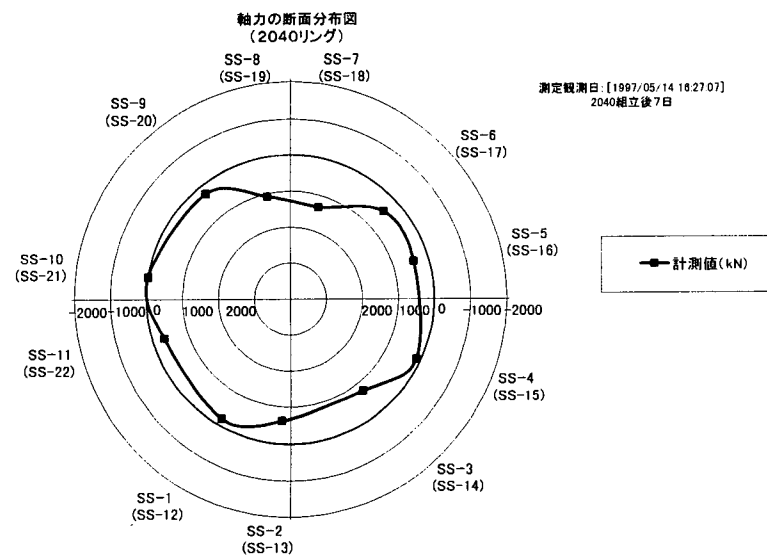
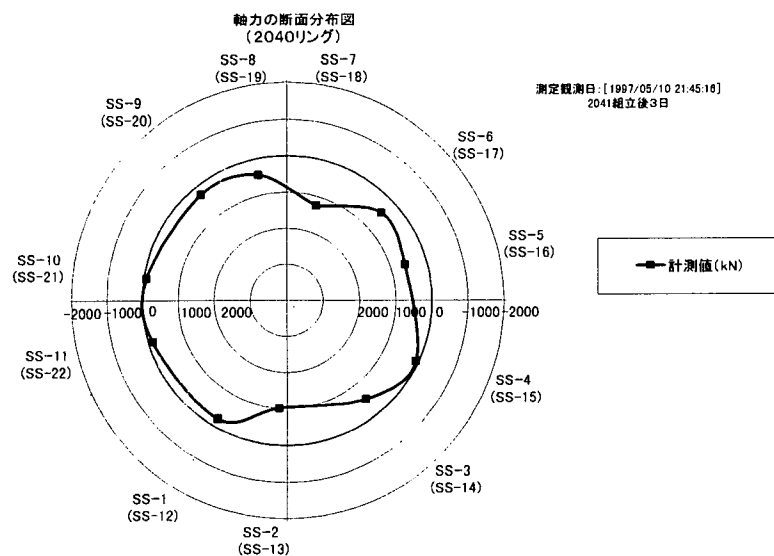


図-2. 34(4) 軸力の断面分布図(2040リング)

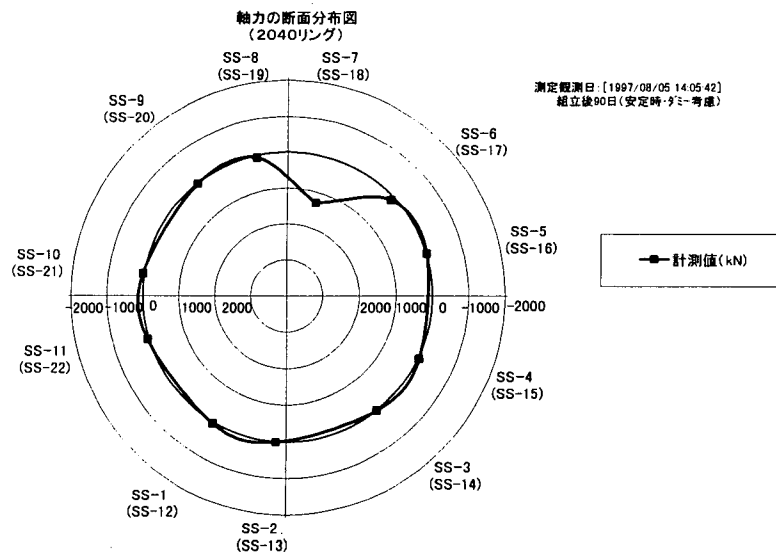
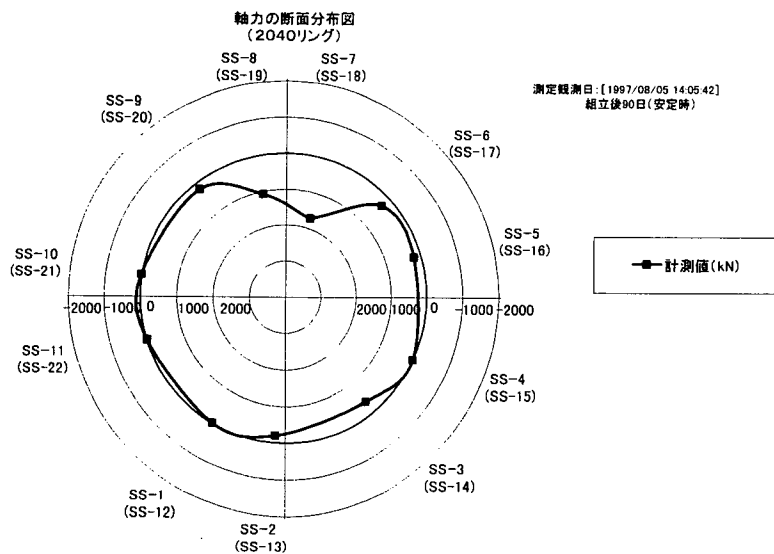
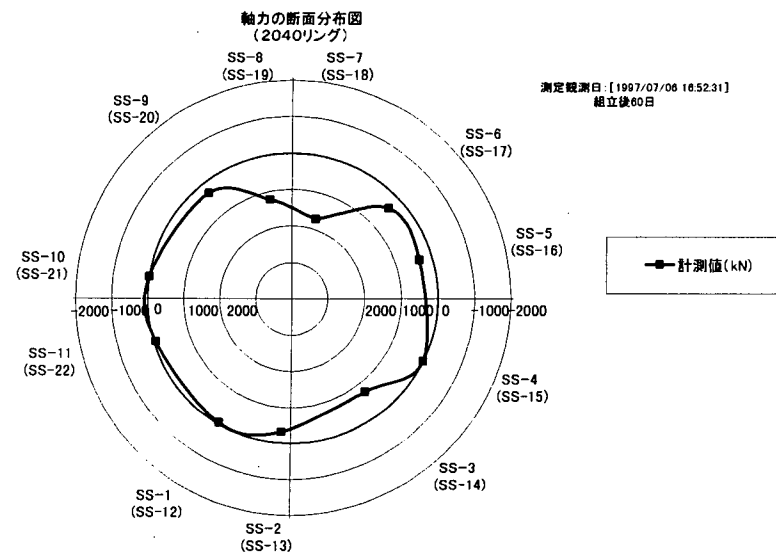
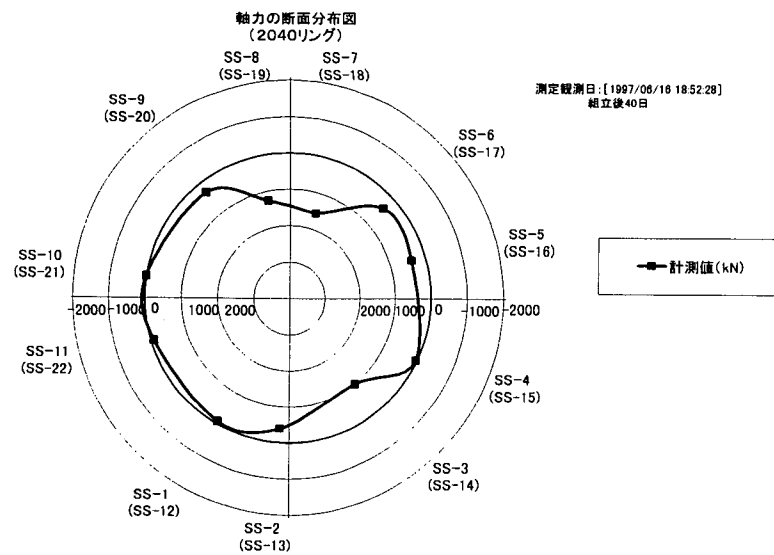


図-2. 34(5) 軸力の断面分布図(2040リング)

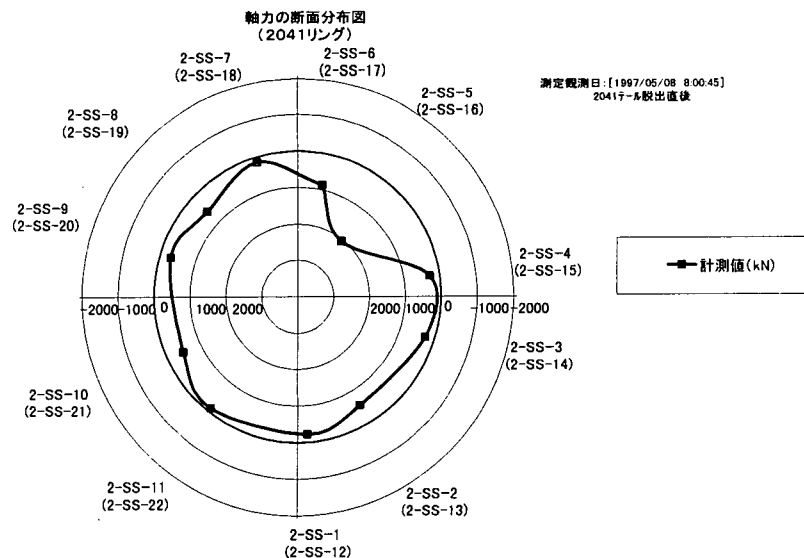
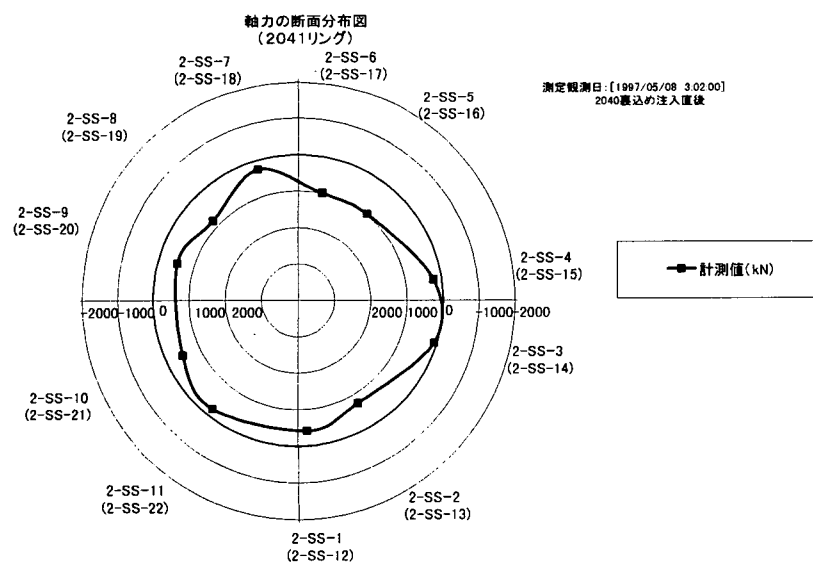
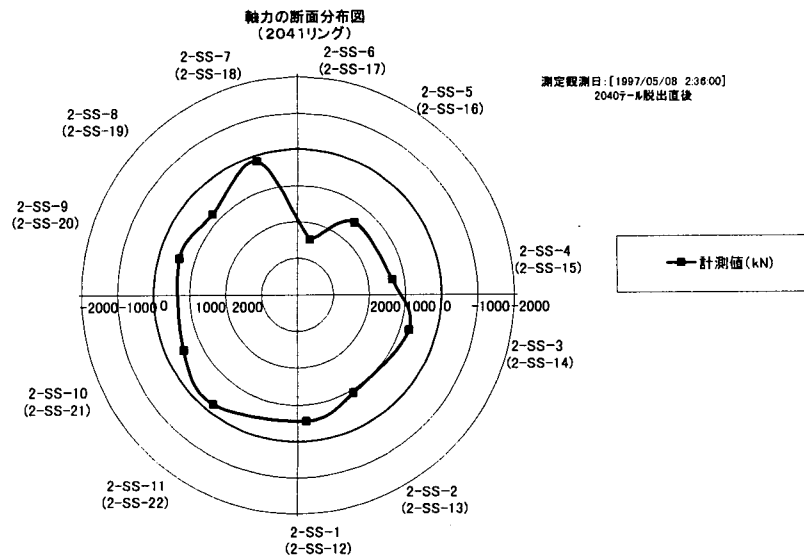
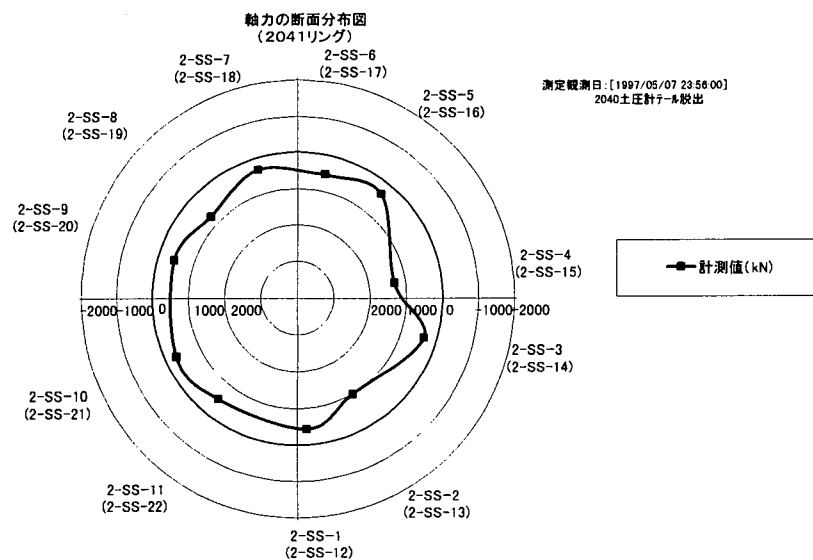


図-2. 35(1) 軸力の断面分布図(2041リング)

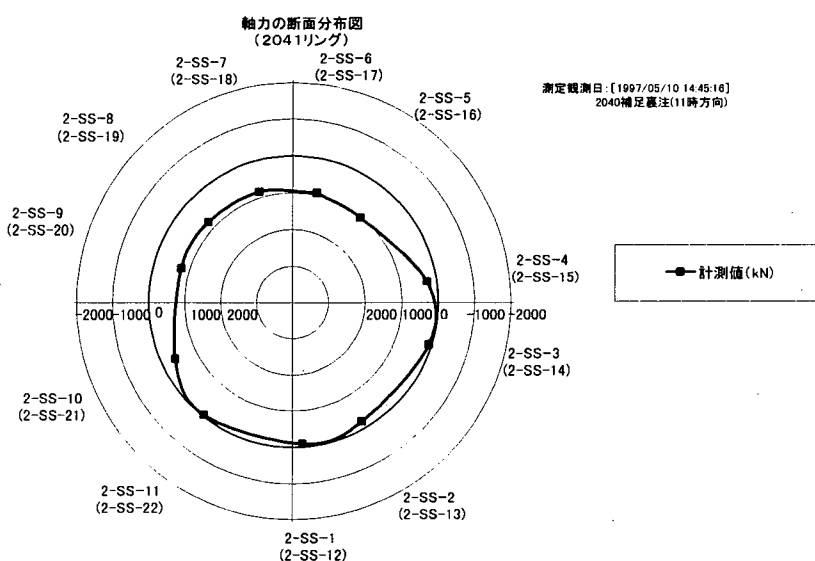
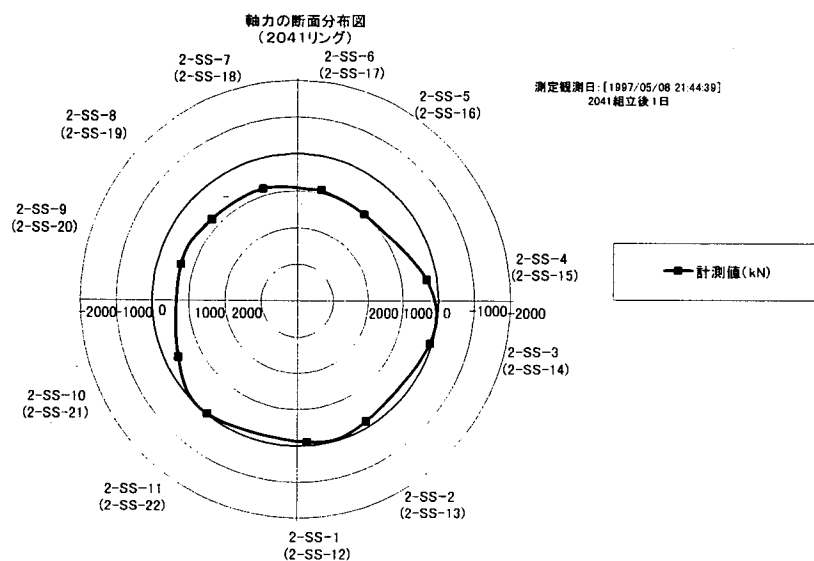
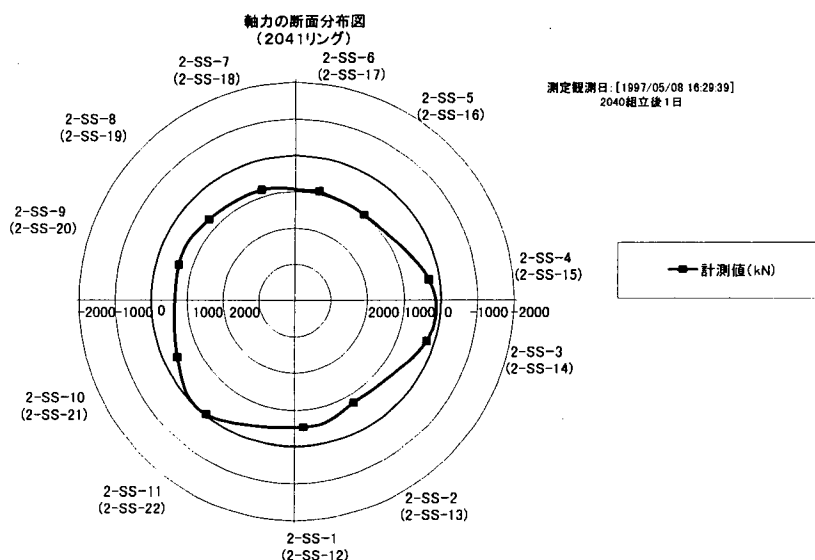
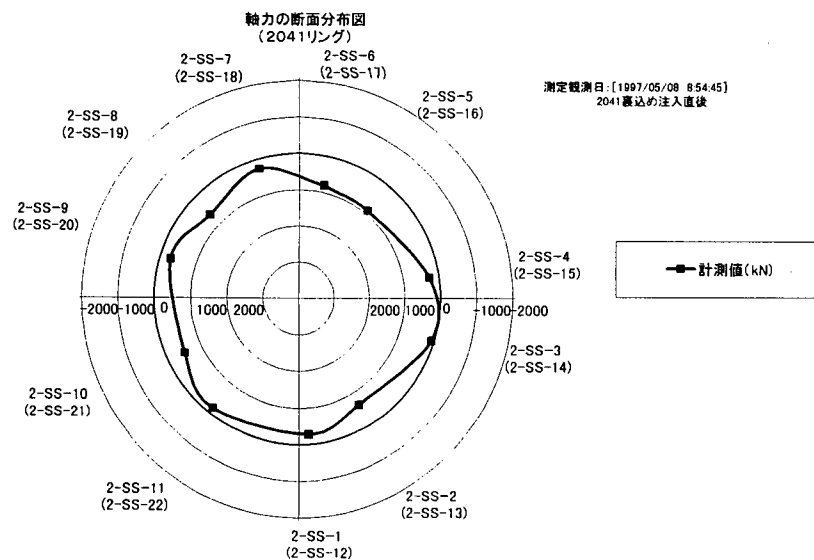


図-2. 35(2) 軸力の断面分布図(2041リング)

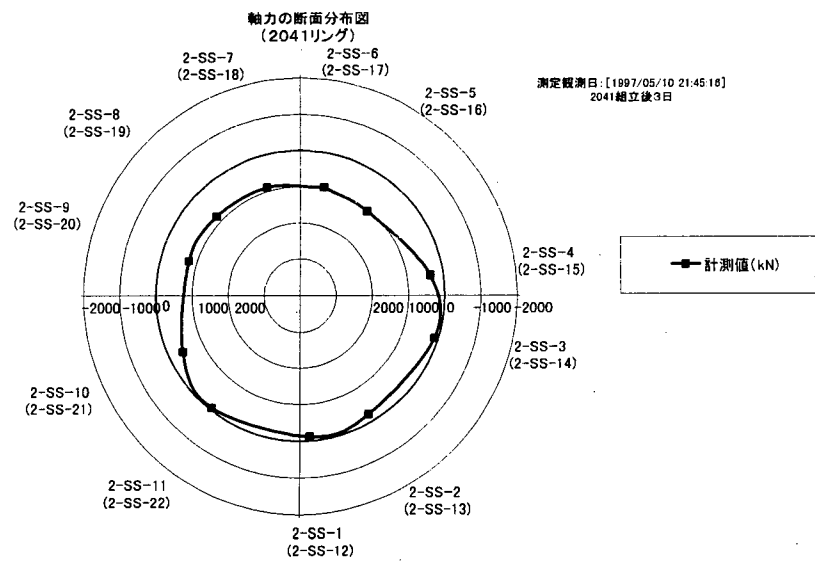
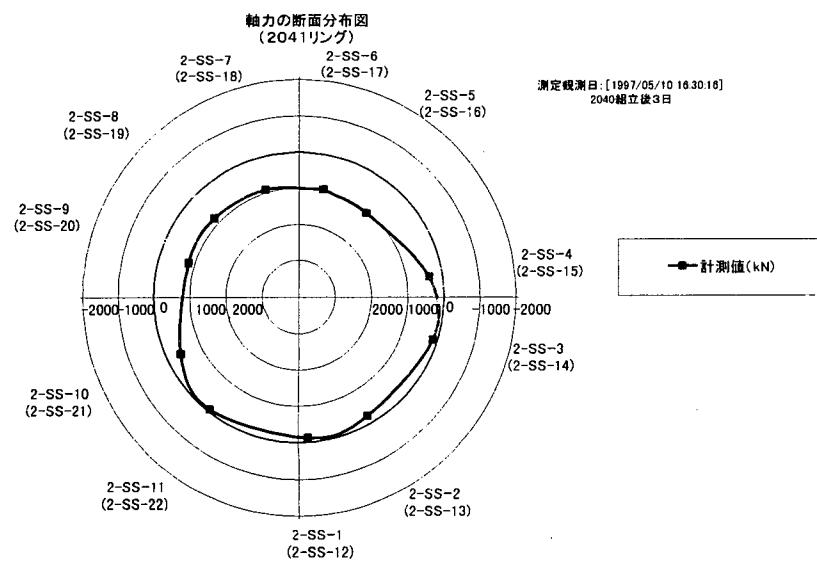
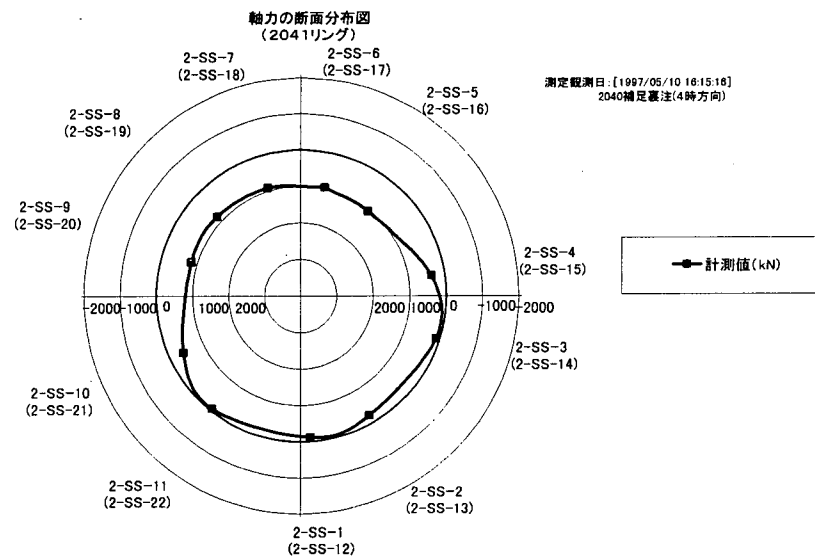
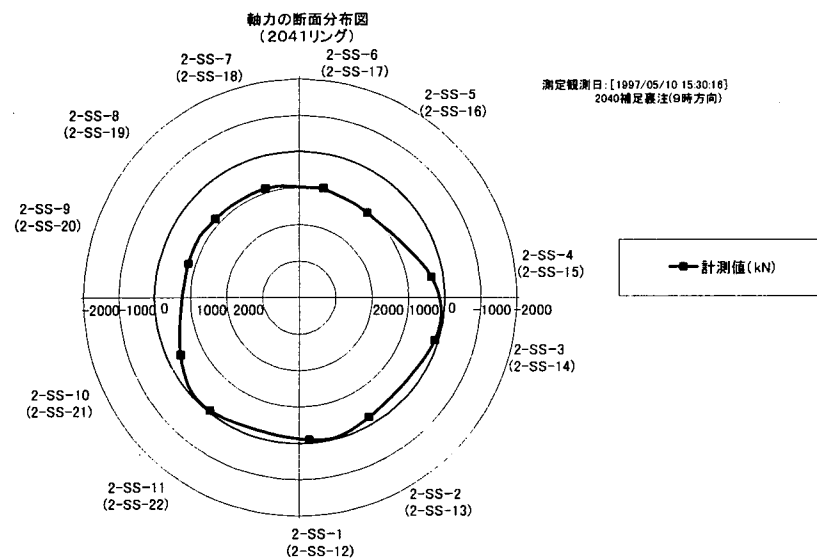


図-2. 35(3) 軸力の断面分布図(2041リング)

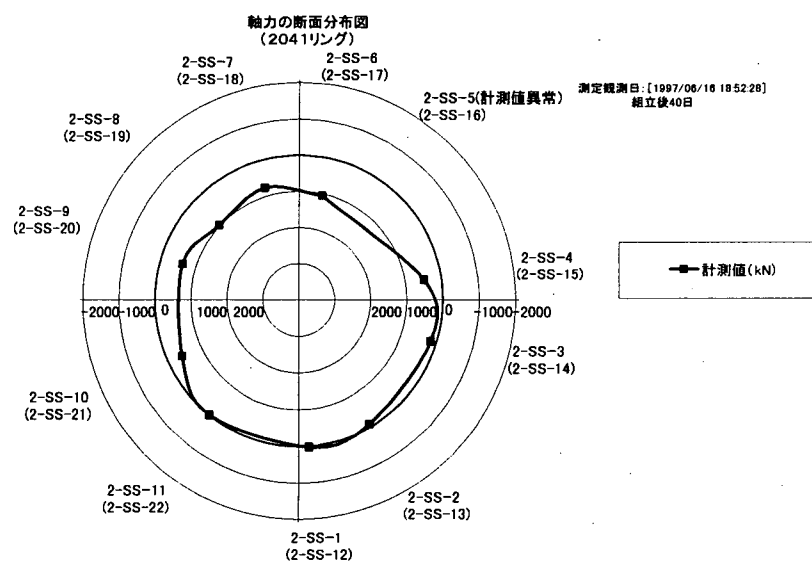
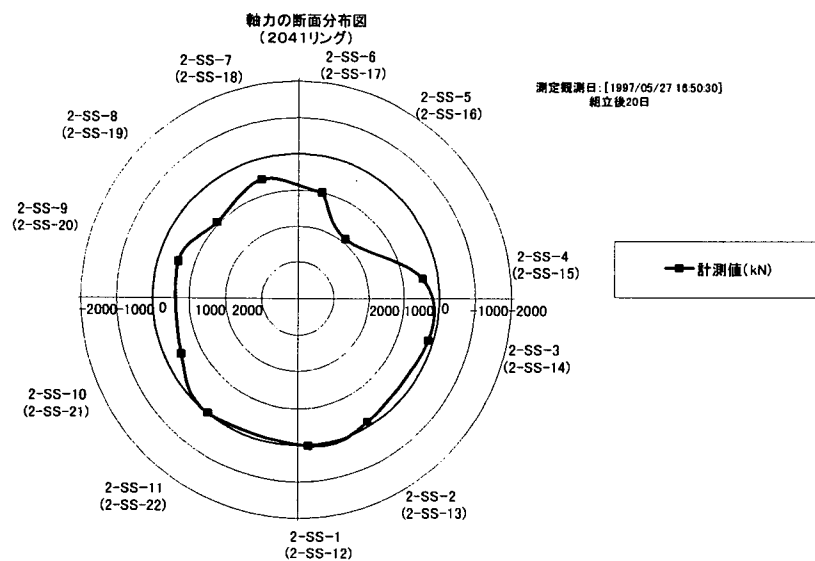
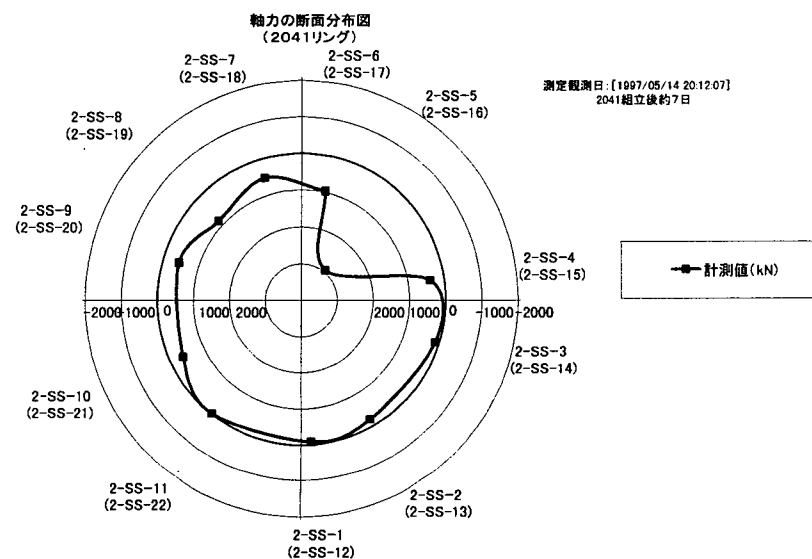
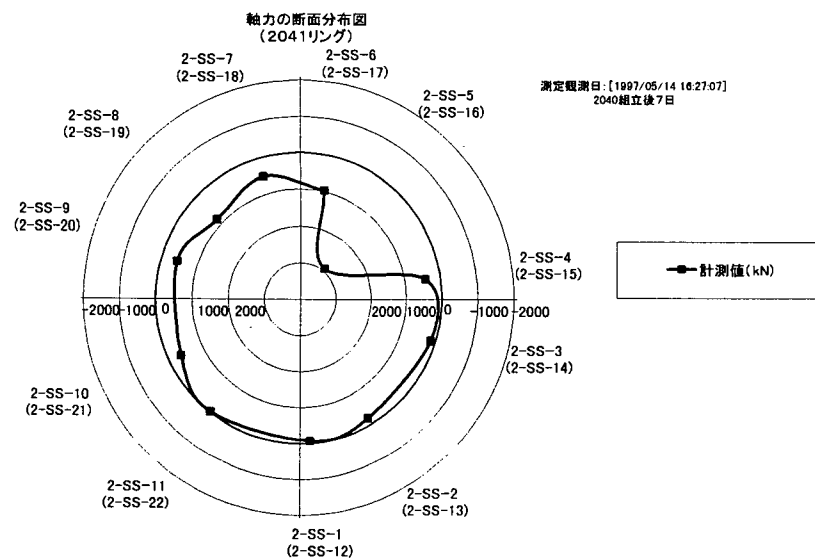


図-2. 35(4) 軸力の断面分布図(2041リング)

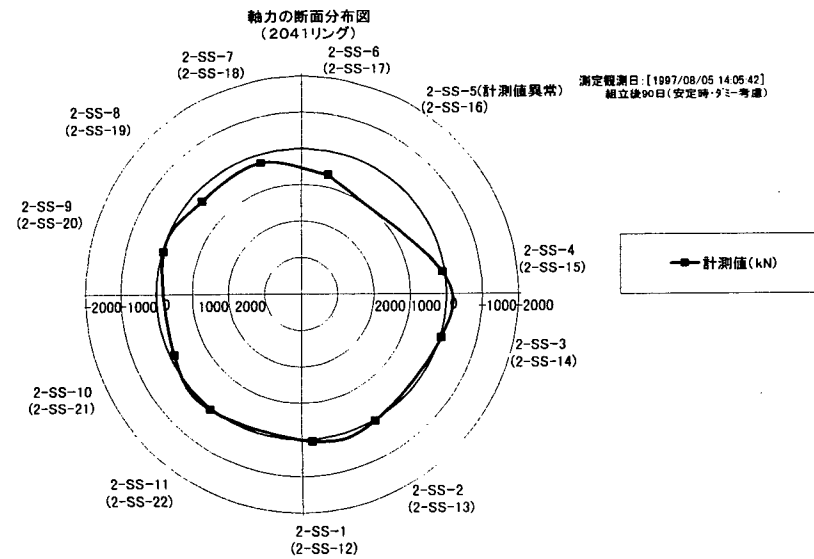
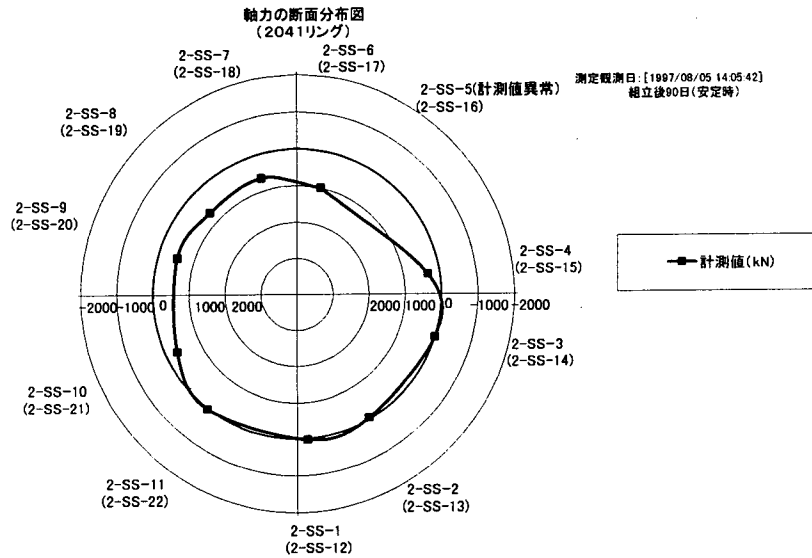
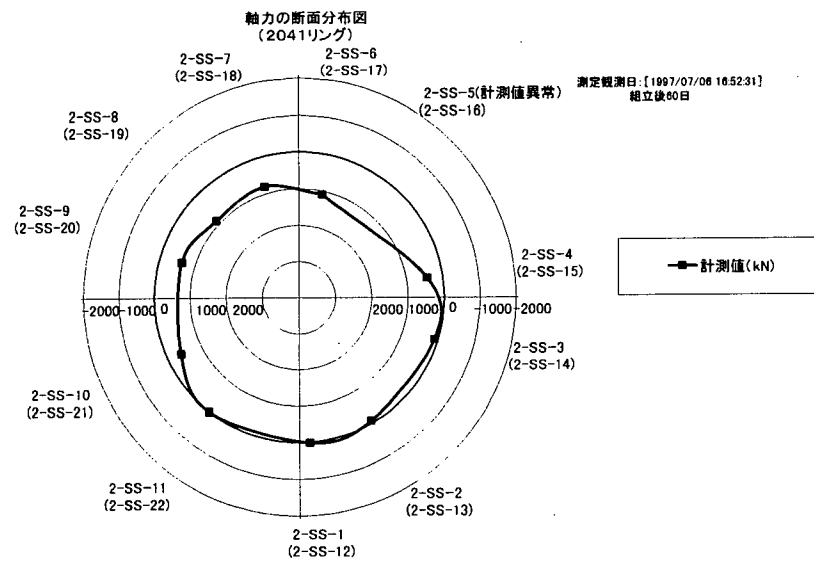


図-2. 35(5) 軸力の断面分布図(2041リング)

第3章 楠味美共同溝における現場計測

3.1 計測方法

3.1.1 計測目的

セグメントの覆工構造は、シールドトンネルへの作用荷重の設定の大小により大きく影響するため、適切なシールドトンネルの作用荷重を評価する必要がある。このため、実際に施工されるシールドトンネルを対象として土圧、水圧およびセグメントの鉄筋応力の現場計測を行い、トンネルに作用する土圧について検討した。また、本共同溝においては、設計時のセグメントの自重の取扱いについて検討を行うことを目的として、セグメント組立時での連続した計測によりセグメント自重の影響の程度を把握した。

3.1.2 トンネルの概要と計測位置

本現場計測は、図－3.1に示す楠味美共同溝のシールドトンネルで実施した。楠味美共同溝は、中部地方建設局の名古屋国道工事事務所で施工を行ったシールドトンネルであり、愛知県名古屋市北区丸進町から春日井市勝川町までの国道302号の直下を施工する延長3,075m、トンネル外径4.75m、最大土被り約15mの単設のシールドトンネルである。途中2つの中間立坑を有している。国道302号は片側2車（車線幅員3.5m）の上下線の計4車線の道路である。

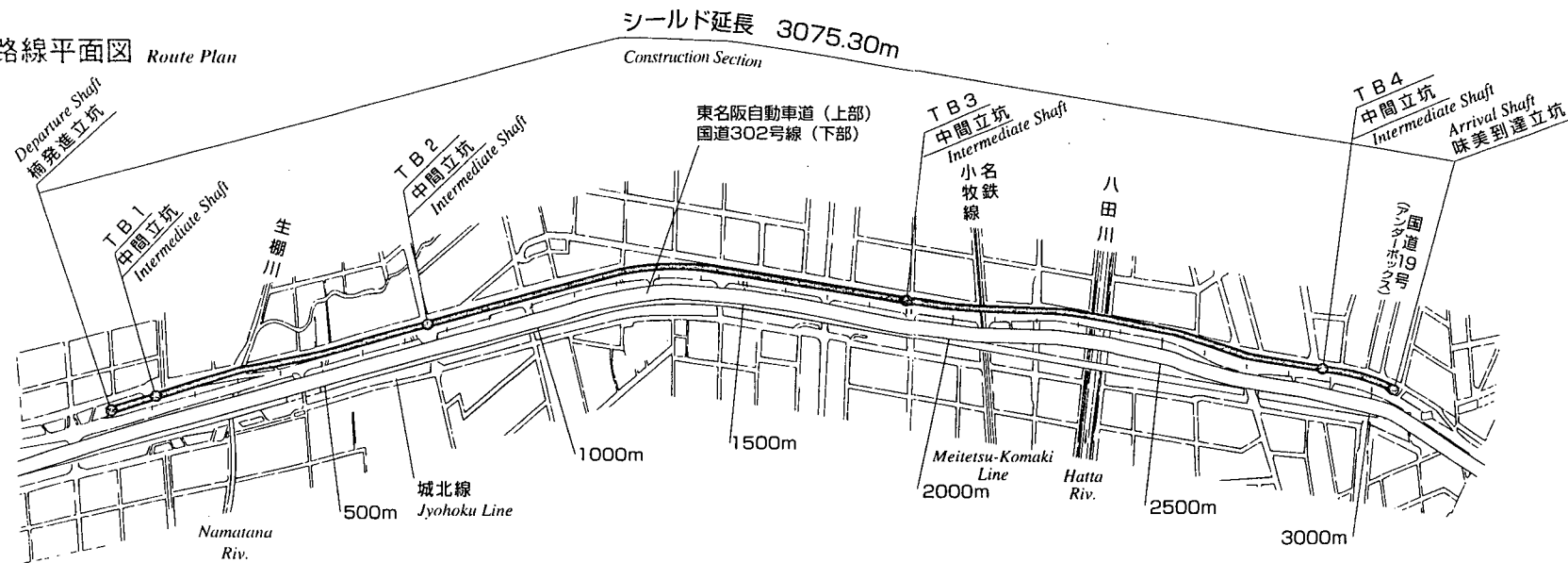
セグメントの構造・形式は、桁高225mm、幅120cmの6分割のRC平板型セグメントである。リング継手にはオス側とメス側の金物を有する楔式ピン継手を用いている。また、シールド掘削方式は、密閉型の泥土加圧式シールドで添加剤に気泡を用いて地山の流動化を促進させる方法を採用した。施工に使用したシールド機の構造概要を図－3.2に示す。なお、計測地点付近の工事の進捗は、平均的な掘進速度は約4～17m/日であった。

なお、共同溝のトンネル諸元を表－3.1に、平面線形、縦断線形（土質条件）および一次覆工（セグメント）の概要、楔式ピン継手について図－3.3～図－3.5に示す。

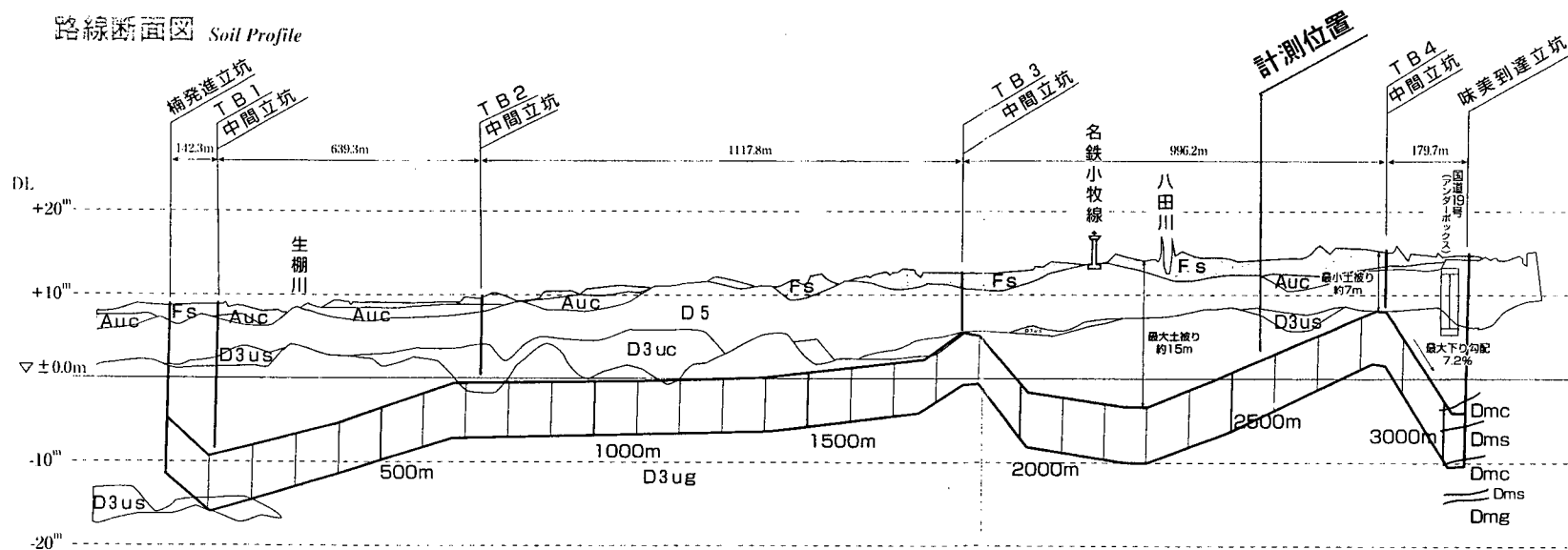
表－3.1 楠味美共同溝シールドの諸元

トンネル延長	3,075m
シールド外径	4,890mm
セグメント外径	4,750mm
セグメント内径	4,300mm
最小曲線半径	R=200m

路線平面図 Route Plan



路線断面図 Soil Profile



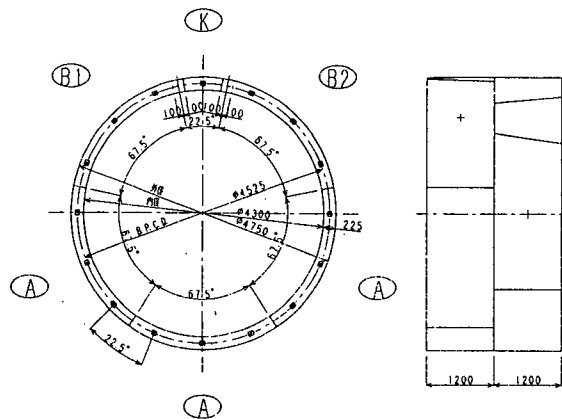
【地質凡例】

地質	記号	N値
軟土・硬土	Fs	24
砂層	Auc	—
砂層	D5	45
砂層	D3uc	6
砂層	D3us	—
砂層	D3ug	47
砂層	Dmc	13
砂層	Dms	50
砂層	Dmg	50

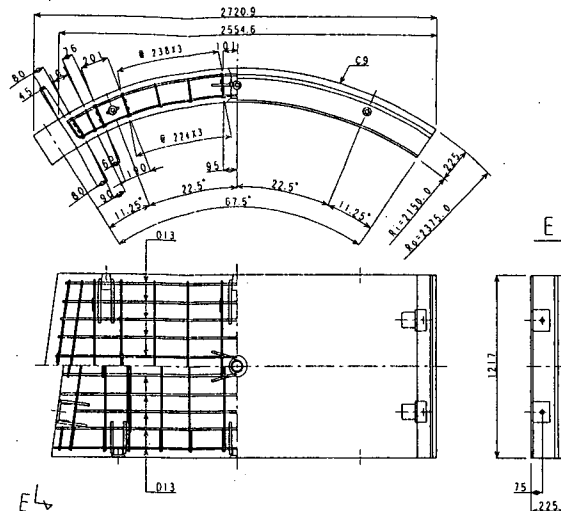
図-3.3 トンネルの平面線形および縦断線形¹⁾

RCセグメント一般構造図

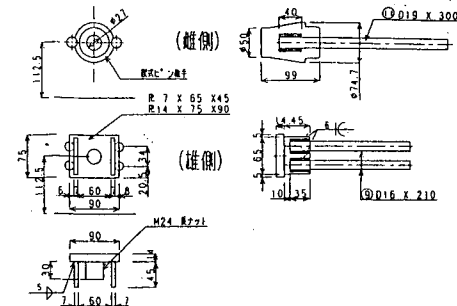
組立図 S=1/40



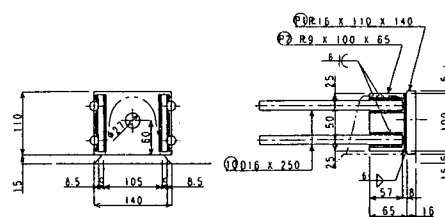
B1型 S=1/15



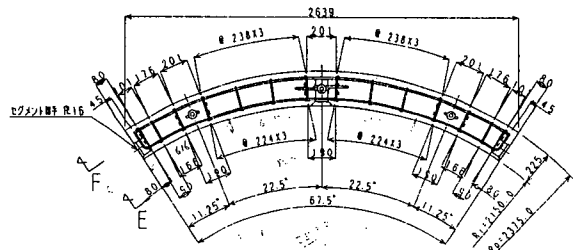
リング間継手詳細図 S=1/4



セグメント継手詳細図 S=1/4

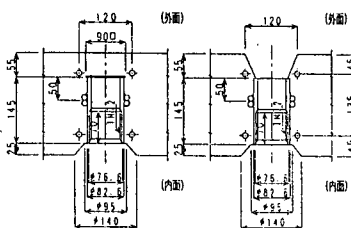


A型 S=1/15

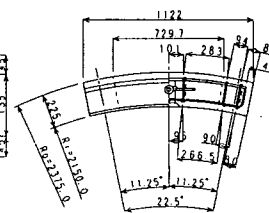


エレクター孔詳細図 (A型, K型) S=1/5

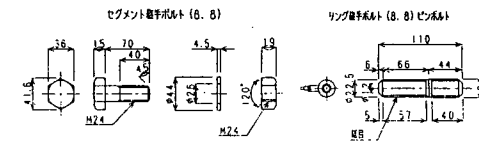
グラウト詳細図 (B1型, B2型) S=1/5



K型 S=1/15



ボルト、ナット、ワッシャー S=1/3



シール溝・コーキング溝及び面取り詳細 S=1/5

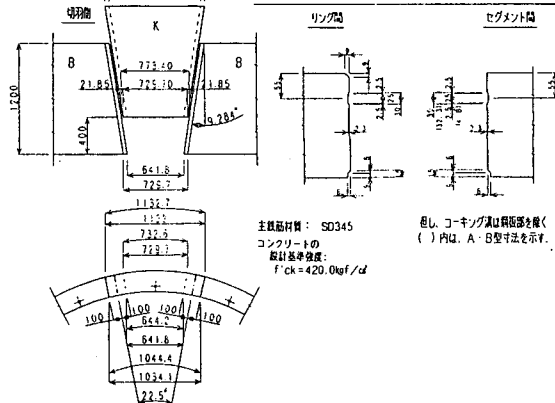


図-3.4 一次覆工の概要

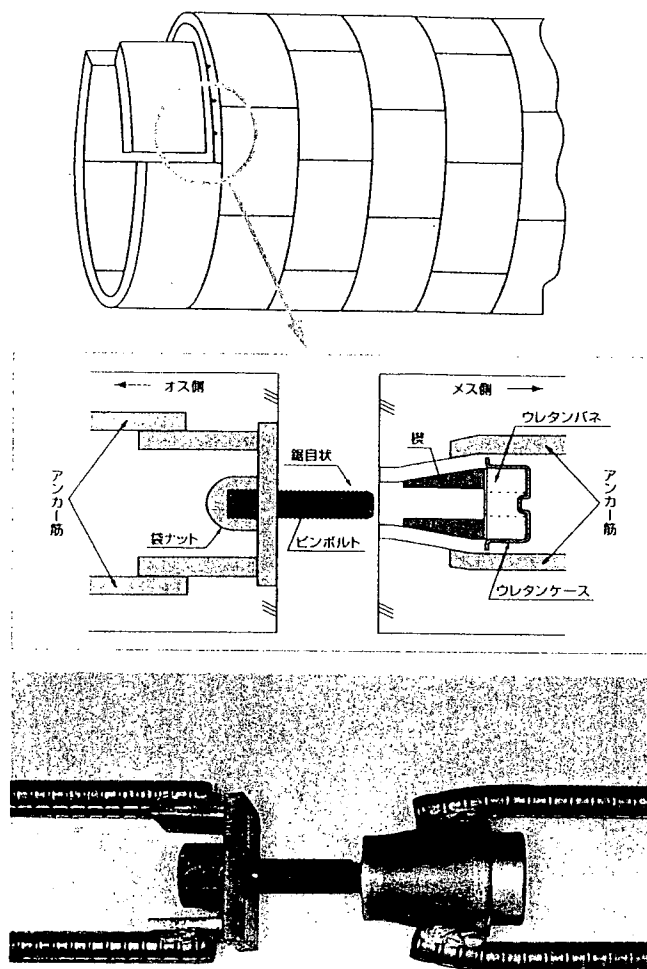


図-3.5 楔形ピン継手の概要図¹⁾

3. 1. 3 地質状況

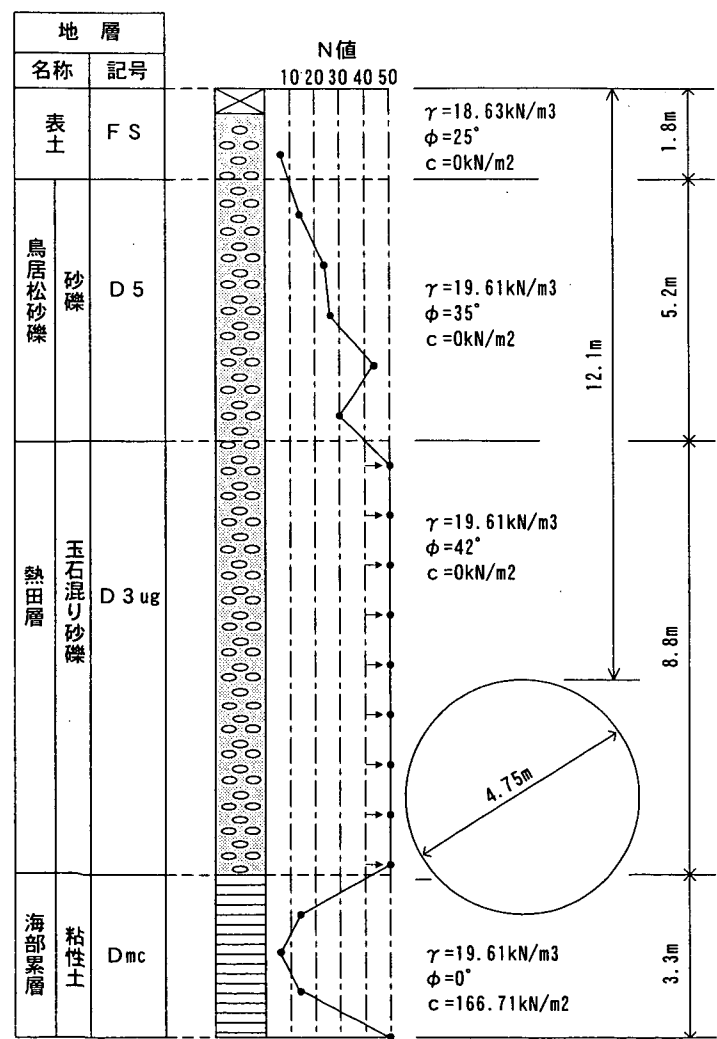
シールドトンネルが位置する地形・地質状況は、沖積低地と低位段丘との地形境界付近の沖積低地側にあり、地盤は上部から盛土・表土層、洪積層の鳥居松礫層、熱田層上部層の層序となっている。

盛土・表土層は、国道302号改良工事に伴うもので玉石を含んだ礫層となっている。

洪積層の鳥居松礫層は、φ20～50mmの礫を主体とする礫層であり、N値42～48とよく締まった状態で、透水係数 $k=1.0\times10^{-2}$ cm/sec程度であり、透水性は良い状態である。地下水位は、GL-4.8m付近にあり、自由水面の状態である。

熱田層上部は、礫層でφ20～50mmの礫を主体とし、所々でφ70～150mm程度の玉石を含んでいる。N値は、20～50の範囲にばらつきがあるが、ほとんどはN値が30以上のよく締まった状態にある。透水係数 $k=4.0\times10^{-2}$ cm/sec程度であり、透水性は良い状態である。

シールドトンネルは、主に熱田層上部層を通過するため、シールドの掘削対象となる土質は、N値が30以上の硬質の砂礫層となる。計測付近に最も近傍のボーリングデータ（中間立坑TB4ボーリングデータ）をもとにトンネル位置と地質の柱状図の関係を図－3.6に示す。



図－3.6 トンネル位置と地質柱状図の関係

3. 1. 4 計測項目

本現場計測における測定項目は以下に示す土圧、水圧、鉄筋応力である。また、測定機器・数量は表－3. 2に示すとおりである。現場計測を実施した位置は、中間立坑TB3から中間立坑TB4の間の土被り約1.2mのリングナンバーのN0. 2, 141リングおよびN0. 2, 142リングの2リングとした。図－3. 7は各測定リングの計測位置の概要を示したが、土圧計・水圧計の測定リングは2, 141リングの1断面、鉄筋計の測定リングは2, 141および2142リングの2断面とした。また、各計測器の設置位置の展開図を図－3. 8、図－3. 9に示す。

各計測項目の計測の概要および目的は以下に示すとおりである。

①土圧計測

セグメントに作用する土水圧（土圧、水圧）を土圧計により測定する。

セグメントに作用する施工時荷重（裏込め注入圧力等）を測定する。

②水圧計測

セグメントに作用する水圧を水圧計により測定する。

③円周方向鉄筋応力計測

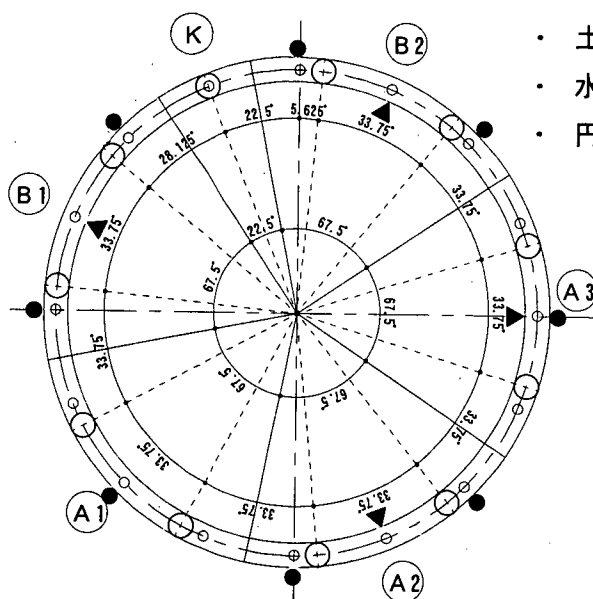
セグメントのリング方向に鉄筋計を設置し、外荷重によってセグメントリングに発生する応力度（円周方向）を測定する。

表－3. 2 測定計器・数量

項目	測定計器名および形式	数量	備 考
①	パッド式土圧計（受圧面：650mm×320mm） （容量490kN/m ² GTI-E-210-5K）	8 点	8 点×1 リング （設置リング No. : 2141リング）
②	水圧計（容量490kN/m ² BP-5KB）	4 点	4 点×1 リング （設置リング No. : 2141リング）
③	円周方向鉄筋計（容量294N/mm ² ）	4 4 点	1 1 箇所×内側と外側×2 リング （設置リング No. : 2141, 2142リング）

計測リング A (2141 リング)

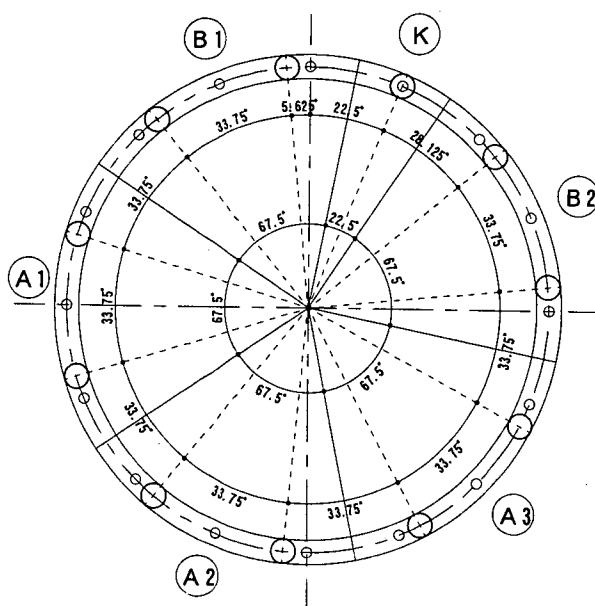
注) セグメント幅 : 1200 mm



- ・ 土圧計 (8 点)
- ・ 水圧計 (4 点)
- ・ 円周方向鉄筋計

計測リング B (2142 リング)

- ・ 円周方向鉄筋計



凡例

- : 土圧計
- : 円周方向鉄筋計
- ▲ : 水圧計

図-3.7 2, 141、2, 142リング計測器 (土圧計、水圧計、円周方向鉄筋計) の設置位置の概要

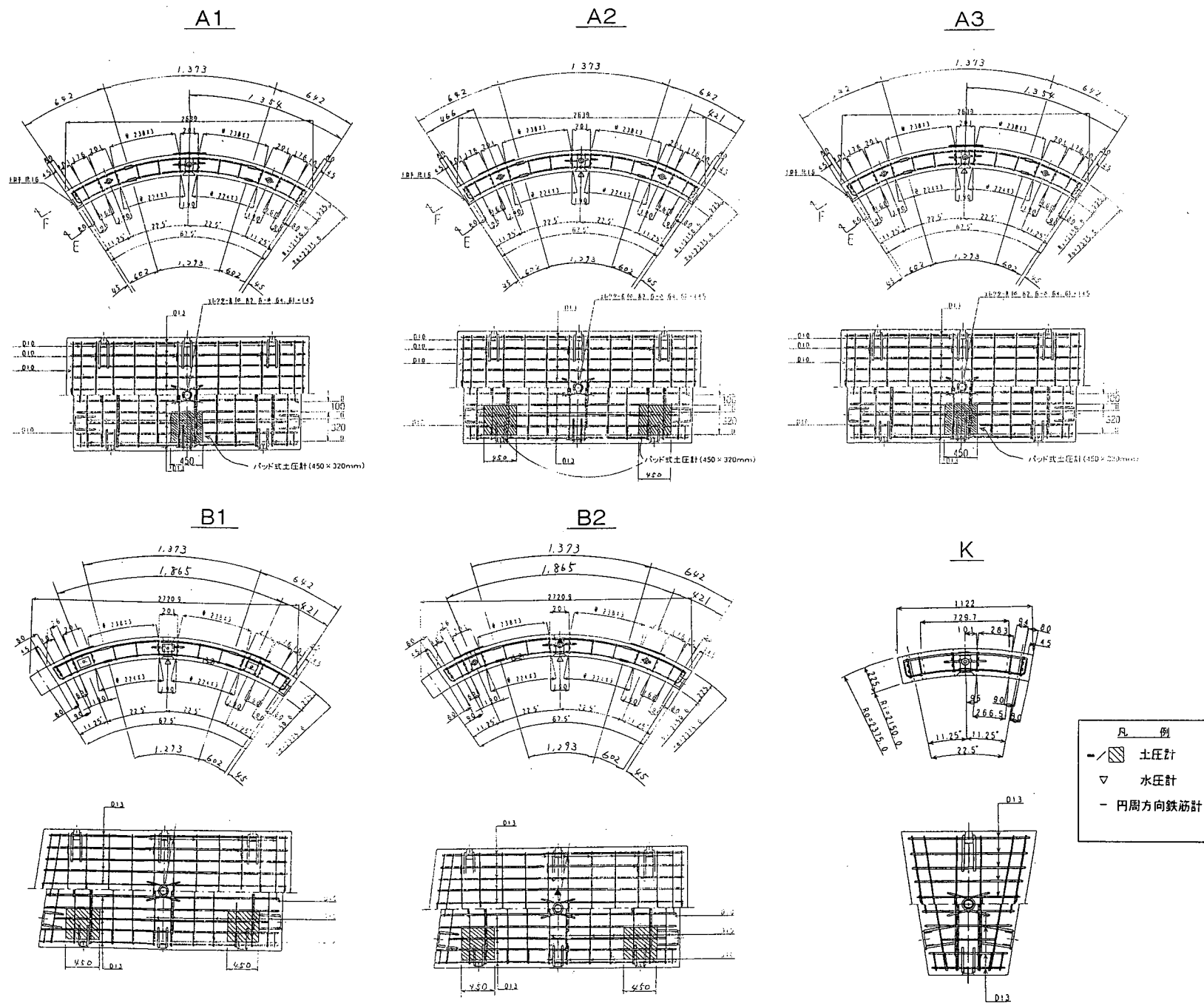
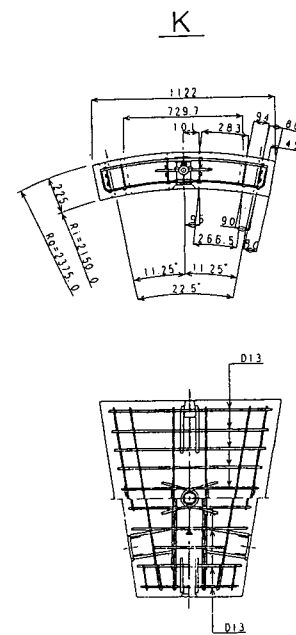
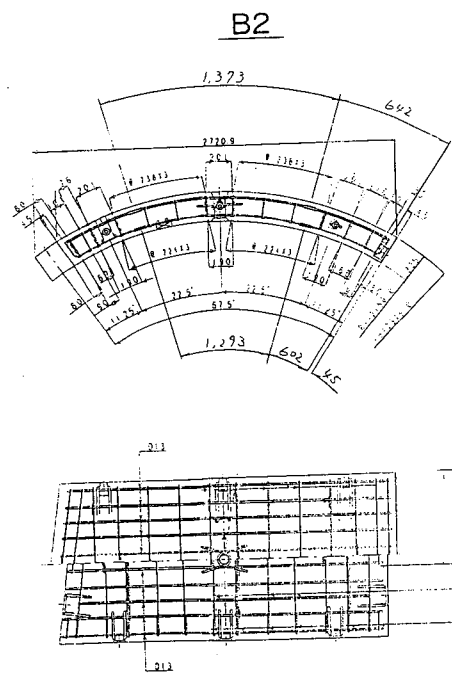
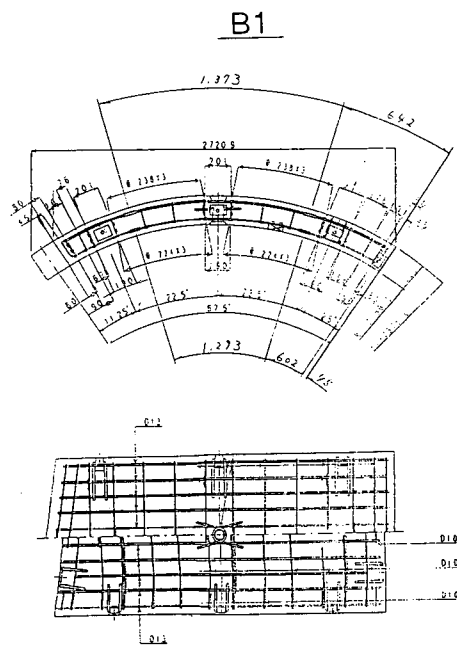
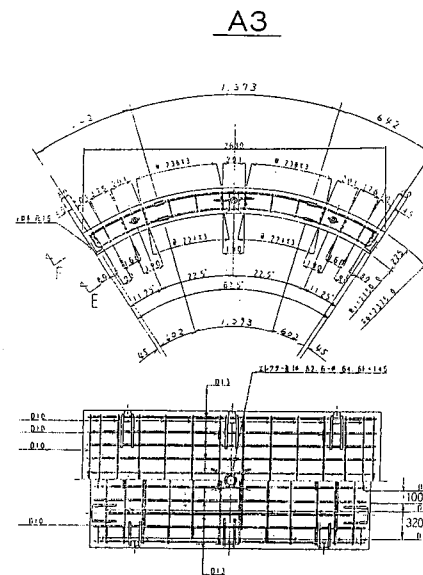
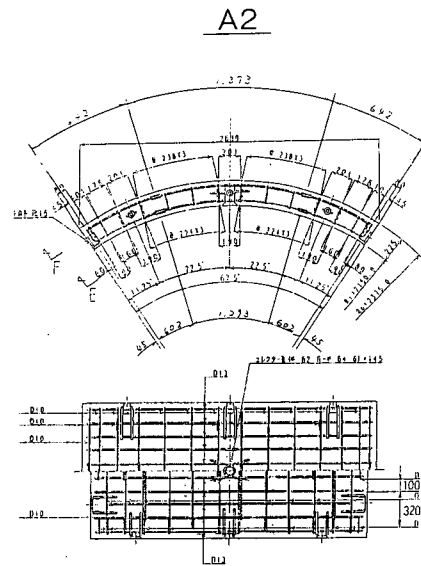
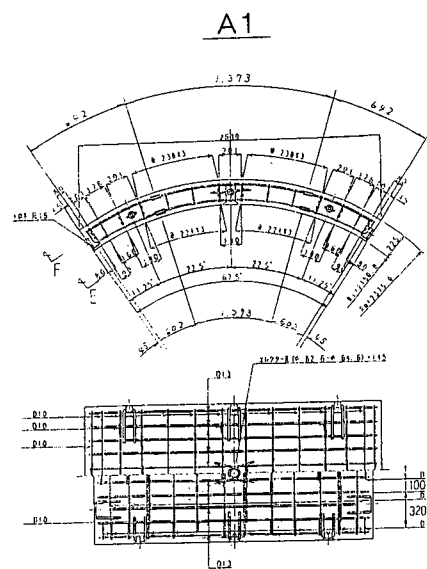


図-3.8 2, 141リング計測器(土圧計、水圧計、円周方向鉄筋計)の設置位置の展開図



凡 例

一 円周方向鉄筋計

図-3.9 2,142リング計測器（円周方向鉄筋計）の設置位置の展開図

3.1.5 計測機器の配置および設置要領

各計器を以下の要領で設置した。

①土圧計

土圧計は、図-3.10に示すパッド式土圧計をRCセグメントの外周面に設置した。設置にあたっては、セグメント製作時にコンクリート打設前にあらかじめ設置場所をセグメントの一部に型抜きを行っておき、セグメント脱型後・コンクリートが硬化した後に所定の位置に受圧寸法650mm×320mmのパッド式土圧計を設置した。設置位置は図-3.7に示す位置の8点とした。

②水圧計

図-3.8に示したセグメントの中央部にある裏込め注入孔に水圧計を設置するため、図-3.11に示した水圧計取り付け用の止水用のボールバルブ等を介在させて外径3cmの水圧計を設置した。なお、水圧計の取付は、裏込め注入後に実施し、裏込め注入が硬化した後にグラウト孔を通して地山を削孔し、地下水の流入を確認した後に設置した。

③円周方向鉄筋計

セグメント製作時に円周方向鉄筋計として主鉄筋の所定の位置にひずみゲージを貼付した。円周方向鉄筋計の取り付けの詳細図は、図-3.8、図-3.9に示すとおりである。

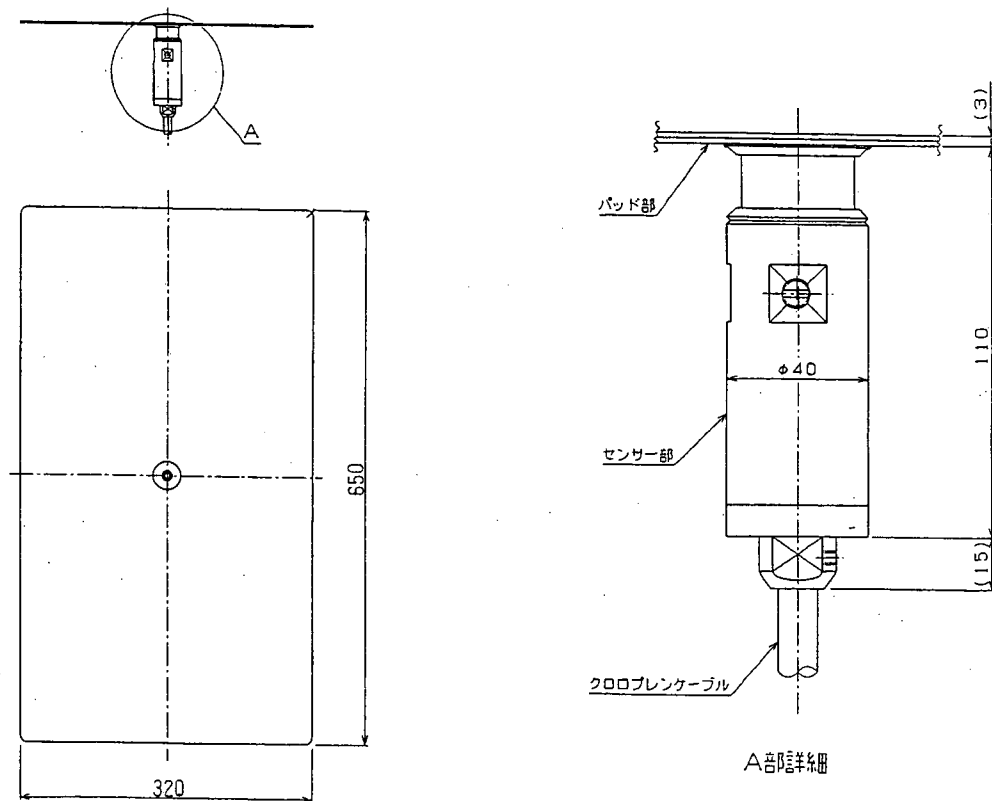
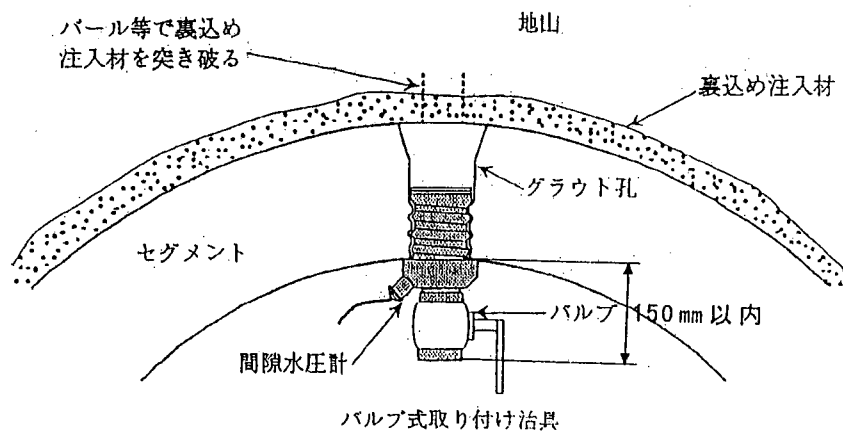


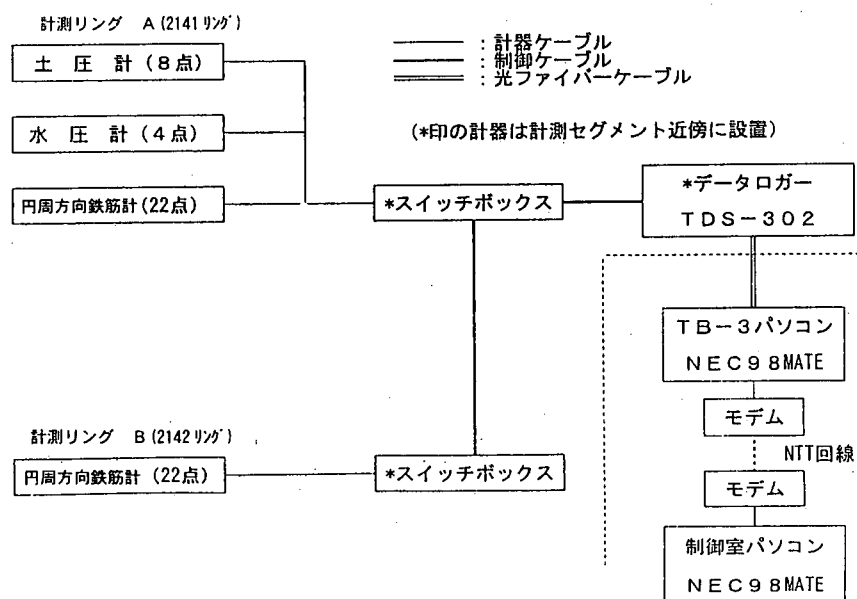
図-3.10 土圧計詳細図



図－3.1.1 水圧計取り付け詳細図

3.1.6 測定方法

測定は、図－3.1.2に示すようにトンネル坑内に計測用の箱を設けてその中にデータロガー（デジタル式静ひずみ測定器（TDS-302））で自動計測を行った。計測システムは、各センサからケーブルで計測リング近くに設置したスキャナ（スイッチボックス）へ接続し、1本の計測ケーブルにて計測リング付近に設置されたデータロガーへ接続した。データロガーから約700m後方のデータ収録のためのパソコンまでは光ファイバケーブルにて接続し、データを伝送した。さらにパソコンから地上の制御室内に設置したパソコンにモデムを利用して転送した。



図－3.1.2 計測システム図

3. 1. 7 測定頻度および計測期間

(1) 測定頻度

測定の頻度は、掘進、裏込め注入の影響等が分かるように、それらの影響を受けていると考えられる区間の頻度を短く設定することとし、表－3. 4 に示す3つの期間に区分し頻度を設定した。

表－3. 4 計測頻度

セグメント組立中、掘進中、裏込め注入の影響、地山の荷重変化が著しい期間	施工の影響により計測値に変動が生じている期間	計測器が安定した期間
1 分間隔（組立から10時間） （組立から6/7 18:30）	5 分間隔（5日間） （～6/11 11:30）	3 0 分間隔（90日間） （～9/21 0:00）

(2) 計測期間

計測期間は、各計測器の値が安定すると考えられるセグメント組立後約3ヶ月とした。

3. 2 施工管理の状況

計測されたデータからシールドトンネルに作用する荷重を検討する場合、施工の状況を把握しておく必要がある。シールドトンネルに作用する土圧、あるいは周辺地盤の挙動等に影響すると考えられる施工管理データを調査した。施工管理データの把握は、シールドトンネルの掘削時の総推力、裏込め注入に関する材料および圧力とした。調査した施工管理の区間は、計測セグメントの位置から前後にそれぞれトンネル直径程度および2倍程度以上を目安に計測用リングのN0. 2, 141リングの手前約10リング（N0. 2, 131リング）から20リング後方のN0. 2, 162リングとした。

3. 2. 1 総推力

総推力に関する施工管理データを、表－3. 5 および図－3. 1 3 に示す。総推力のデータは、掘削リングの平均値で示した。

総推力は、各掘削リングで約7000kN～13, 000kNで変動しているものの、平均的には約10, 000kNでほぼ安定した掘削となっている。本現場のシールド機の直径が4. 89mであるので、シールド前面の面積が約18. 78m²となり、総推力から計算される掘進時のシールド前面の圧力は約533kN/m²となる。

3. 2. 2 裏込め注入材料および注入量・圧力

(1) 裏込め注入材料

裏込め注入材料および注入量・圧力の施工管理データを表－3. 5 および図－3. 1 4 に示す。また、裏込め注入材は表－3. 6 に示す配合表に示す2液性の可塑性材料を使用した。裏込め注入材の基準値および試験

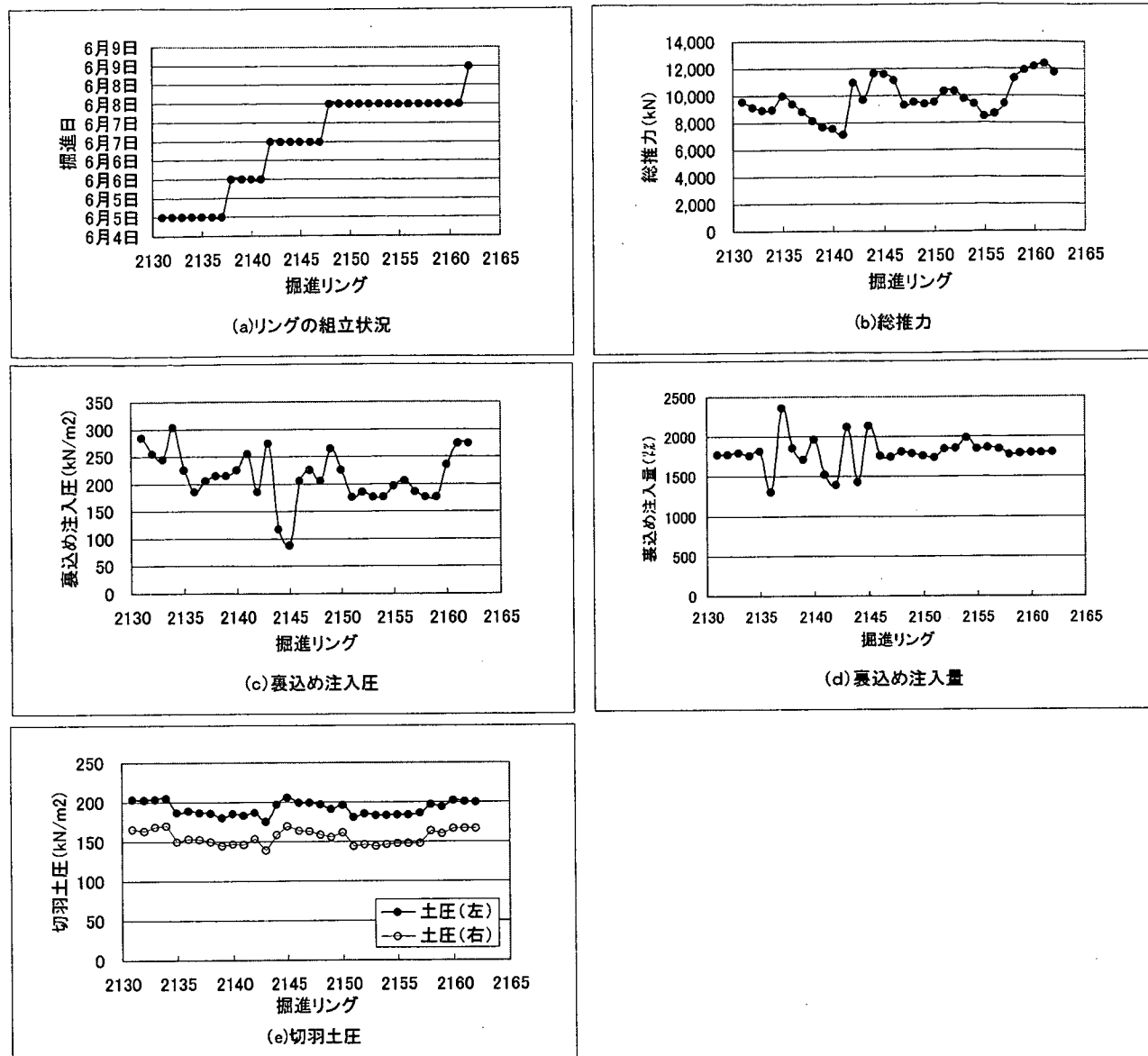
結果は、表－3.7に示すように、設計基準値で1時間強度で約147kN/m²、7日強度で1,960kN/m²に対して、それぞれ1時間強度で235kN/m²、7日強度で2,695kN/m²ある。

(2) 裏込め注入量・圧力

裏込め注入は、シールド機の後方から掘進時にセグメントの裏込め注入孔から注入する即時裏込め注入方式で施工された。裏込め注入位置は、シールド機後方から切羽に向かって天端付近のセグメントの裏込め注入孔の左右（時計の2時、10時方向）から実施されている。裏込め注入圧は、約90～300kN/m²の範囲でばらついており、計測用セグメント付近（掘進リング2144、2145リングに対応）の圧力は約100kN/m²となっている。裏込め注入量は、1,300～2,400リットルの範囲で注入されており、理論ボイド量に対する注入率は、計算されるボイド量約1,270リットルに対し102から190%前後の値となっている。なお、計測セグメントの2,141リングでは、裏込め注入量約1,430ℓ、113%の注入率で、2142リングでは、裏込め注入量約2,136ℓ、168%の注入率で裏込め注入を実施した。なお、注入位置は、2141リングで時計の10時方向の注入孔から、2142リングで時計の2時方向の注入孔から実施した。

表－3.5 施工管理データ一覧表

掘進リング	掘進日	裏込め注入量	裏込め注入圧	土圧(左)	土圧(右)	総推力
		(ℓ)	kN/m ²	kN/m ²	kN/m ²	kN
2131	6月5日	1780	284	204	166	9,591
2132	6月5日	1780	255	203	164	9,159
2133	6月5日	1797	245	204	169	8,944
2134	6月5日	1763	304	205	171	8,973
2135	6月5日	1824	226	187	150	9,983
2136	6月5日	1305	186	189	154	9,424
2137	6月5日	2365	206	187	153	8,865
2138	6月6日	1860	216	186	150	8,159
2139	6月6日	1712	216	180	145	7,688
2140	6月6日	1962	226	185	147	7,571
2141	6月6日	1526	255	183	146	7,159
2142	6月7日	1395	186	187	154	10,983
2143	6月7日	2124	275	176	139	9,689
2144	6月7日	1430	118	197	159	11,640
2145	6月7日	2136	88	206	170	11,631
2146	6月7日	1760	206	199	164	11,170
2147	6月7日	1750	226	199	163	9,336
2148	6月8日	1816	206	197	159	9,512
2149	6月8日	1794	265	191	156	9,405
2150	6月8日	1765	226	196	162	9,552
2151	6月8日	1742	177	181	144	10,326
2152	6月8日	1850	186	185	146	10,336
2153	6月8日	1855	177	183	144	9,807
2154	6月8日	1988	177	183	146	9,395
2155	6月8日	1850	196	184	148	8,453
2156	6月8日	1864	206	184	148	8,679
2157	6月8日	1852	186	186	148	9,454
2158	6月8日	1776	177	197	164	11,327
2159	6月8日	1792	177	194	160	11,915
2160	6月8日	1796	235	202	167	12,180
2161	6月8日	1801	275	201	167	12,386
2162	6月9日	1808	275	200	167	11,729



図－ 3. 1 3 施工管理の実績

表－ 3. 6 裏込め注入の配合表 (1 m³ 当たり)

硬化材	助材	安定剤	水	凝結剤
261kg	108kg	1%	733%	75%

表－ 3. 7 裏込め注入材の基準値および試験結果

項目	試験結果	基準値
生比重	1.27	1.27±0.02
フロー値 (cm)	42×45	30以上
ゲルタイム	8.11秒	15秒以内
一軸圧縮強度試験 1時間後	235kN/m ²	147kN/m ² 以上
” 7日後	2,695kN/m ²	1,960kN/m ² 以上

3.3 計測結果

本現場計測で得られた結果を次項以降に示す。計測開始からほぼ安定するまでの経時的な変化を見るために、計測開始時点から計測終了時点までの主なデータを表-3.8のように抽出した。以下の検討にあたっては表中に示す各時期および経過時間の結果を適宜用いて考察を加える。

なお各測定値の初期値は、以下に示す時期とした。

- ・土圧計は、計測用リングを組み立てる直前の大気中のフリーの状態を初期値とした。
- ・水圧計は、計測用リングに計測器を設置する直前の大気中のフリーの状態を初期値とした。
- ・鉄筋計は、計測用リングを組み立てる直前の値を初期値とした。

表-3.8 主な計測データと主要な時期と経過時間

NO.	計測日時	時期及び経過時間
1	1999/6/7 9:05	9:09 Aリング組立開始
2	1999/6/7 11:55	11:55 Aリング組立完了
3	1999/6/7 12:17	12:17 Aリングセグメント端がテールシール (ジャッキストローク150mm)
4	1999/6/7 12:53	12:53 Aリングセグメント端が地山 (ジャッキストローク1000mm)
5	1999/6/7 14:40	14:40 Bリング組立開始
6	1999/6/7 17:38	17:38 Bリング組立完了
7	1999/6/7 18:24	18:24 Aリングセグメント全てが地山、Bリングセグメント端が地山 (ジャッキストローク1000mm)
8	1999/6/7 20:15	20:14 Aリング裏込め注入 (B1セグメントから)
9	1999/6/7 21:25	21:22 Bリング裏込め注入 (B2セグメントから)
10	1999/6/8 9:05	Aリング組立約1日
11	1999/6/8 14:40	Bリング組立約1日
12	1999/6/10 9:05	Aリング組立約3日
13	1999/6/10 14:40	Bリング組立約3日
14	1999/6/14 9:00	Aリング組立約7日
15	1999/6/14 14:30	Bリング組立約7日
16	1999/6/27 9:00	ABリング組立約20日
17	1999/7/17 9:00	ABリング組立約40日
18	1999/8/6 9:00	ABリング組立約60日
19	1999/9/5 9:00	ABリング組立約90日
20	1999/9/21 0:00	ABリング組立約105日 (最終)

3.3.1 土圧計

図-3.14 (1)～(2)に2,141リングの土圧の経時変化を示す。なお、ここでいう土圧とは、特に断らない限り水圧を含めた値をいう。また、3ヶ月後の最終的な土圧計の値の断面分布図を図-3.15に示す。主要な時期における土圧・水圧の値の一覧表を表-3.9に示す。

図-3.14 (1)～(2)から、土圧の経時変化は、計測リングをシールド機内で組立終了時の荷重が作用していない状態から、次の①～④までの状態へと変化しているものと考えられる。

- ①シールド推進によりシールド機との接触による若干の荷重の増加
- ②テールブラシとの接触による荷重の増加
- ③土圧計の計測リングがシールド機外へ出ることによる土圧の作用
- ④裏込め注入による作用土圧の変動

図-3.14 (1)より、①から②によるシールド掘進中におけるシールド機およびテールシールとの接触等

による変化が極めて大きいことが分かる。土圧計により異なるが、部分的に $1,800\text{kN/m}^2$ 程度の高い値を示した。この、施工時の詳細な変化を見るため、図-3.16(1)～(2)に計測リングを組み立て後の2リングの掘進時の土圧計の変化を示した。これより、掘進を初めた後に変化が現れはじめ、ある時点で急激に土圧値が上昇していることが分かる。これは、土圧計のセンサー部分がシールド内周・テールシールと接触することによって大きな変化が生じたものと考えられる。その後、ずり鋼車入れ替えのために一端掘進停止に伴い一端落ち着くものの、再掘進によって変化が生じ始めるものと考えられる。なお、①から②の状態による変化は、トンネル上部の土圧計で小さく、下部の土圧計で大きい傾向となっており、トンネル下側の土圧計がシールド機との接触が大きいものと考えられる。③の土圧計の計測リングがシールド機外へ出たテール脱出直後の土圧計の値は、徐々に低下し、2142リングの掘進完了時点で約 $100\sim350\text{kN/m}^2$ 程度で一端安定し、2143リング掘進完了時点で約 $90\sim130\text{kN/m}^2$ 程度に安定しており、計測リングと掘進リングとの距離が長くなるにしたがって、その影響は小さくな傾向を示している。

裏込め注入の施工管理データによれば、計測リングの裏込め注入の圧力は、 120kN/m^2 程度で実施されているが、掘進時の影響が大きく変化していたため、裏込め注入時の土圧計の値の変化は認められない。

その後、長期的な変化は、図-3.14(2)より、経過時間とともに、土圧の値は大きく減少し、約3ヶ月後に収束しており、3ヶ月後のほぼ安定したと考えられる最終的な土圧は、約 $80\sim170\text{kN/m}^2$ 程度となっている。この土圧の値は、後述する水圧計の値から判断すると地下水位がトンネル天端から上約9mに位置することから、この静水圧が作用していると考えたと図-3.17に示すようにトンネルには水圧のみが作用し、土圧は作用していないものと考えられる。

以上の計測結果から、土圧計の組立時から収束する間の経時変化は、シールド掘進に伴う施工時に受ける影響が極めて高いことが分かった。しかし、土圧計の値としては、時間の経過とともにこれらの施工時による影響は徐々に減少し、ほぼ一定値に収束する。ほぼ収束した後の約3ヶ月後の土圧計の値は、後述する周辺の地下水位調査結果および水圧調査結果から考えると、水圧程度の値しか作用していないものと考えられる。

3.3.2 水圧計

図-3.18に水圧の経時変化を、セグメント組立後約3ヶ月後の水圧計の値をトンネル天端から水圧計までの高さとの関係を図-3.19に、断面分布図を図3.20に示す。

図-3.18から、測定値の経時的な変化は、計測期間中に若干の変動は認められるものの、大きな変化はない。また、図-3.19からトンネルに作用している水圧は、ほぼ静水圧に近い値が作用しているものと判断できる。このときの静水圧としては、回帰直線からトンネル天端から上約8m時の圧力であると考えられる。

図-2.20の水圧の断面分布図から、想定される地下水位面からの理論値での静水圧分布とよく一致していることが分かる。以上のことより、本現場計測地点付近の地下水位は、トンネル天端から上約9m付近にあるものと考えることができる。従って、本地盤条件と同程度であれば、トンネルに作用する水圧は、地下水位から求められる静水圧が作用するものと考えられる。

3.3.3 円周方向鉄筋計

図-3.21 (1)～(2) および図-3.22 (1)～(2) にセグメントの主鉄筋（内側および外側）に配置した鉄筋計の応力測定結果を示す。また、主要な時期における鉄筋応力計測結果を表-3.10 に、断面分布図を図-3.23 (1)～(5)、図-3.24 (1)～(5)、に示す。

(1) セグメント組立時

セグメント組立時の鉄筋計の応力変化は、最大でも 10N/mm^2 程度以下であり、開始から完了時まで大きな変化は認められない。このことから、セグメント組立時のセグメント自重による影響は極めて小さいことが分かった。

(2) セグメント組立後の経時変化

セグメントの鉄筋応力は、2141リングでセグメントがシールドテールから脱出する前後に、圧縮で 45N/mm^2 程度、引張で 110N/mm^2 程度発生しているが、長期的には圧縮で 10N/mm^2 程度、引張で 60N/mm^2 程度が最大となっている。また、同様に2142リングでセグメントがシールドテールから脱出する前後に、圧縮で 30N/mm^2 程度、引張で 20N/mm^2 程度以下であり、長期的にも圧縮で 30N/mm^2 程度、引張で 20N/mm^2 程度となっており、両計測リングともに鉄筋（SD295）の許容応力度が、 180N/mm^2 であることを考えると実際に生じた応力は非常に小さいことが分かる。鉄筋計の経時的な変化は、約40日程度で一定値に収束している傾向にあることが分かった。

表-3.9 楠味美共同溝 セグメント組立時の計測データ表(2141リング土圧計・水圧計)

日時	Aリング組立開始からの経過時間(日)	Bリング組立開始からの経過時間(日)	状態	計測リングA 土圧計								計測リングA 水圧計			
				単位:kN/m ²											
				A- 0-EP	A- 45-EP	A- 90-EP	A-135-EP	A-180-EP	A-225-EP	A-270-EP	A-315-EP	A- 23-WP	A- 90-WP	A-158-WP	A-303-WP
1999/6/7 9:05	0.0	-0.2	9:09 Aリング組立開始				43	40							
1999/6/7 11:55	0.1	-0.1	11:55 Aリング組立完了	32	32	49	41	40	58	42	36				
1999/6/7 12:17	0.1	-0.1	12:17 Aリングセグメント端がテールシール(ジャッキストローク150mm)	30	32	49	36	36	55	33	34				
1999/6/7 12:53	0.2	-0.1	12:53 Aリングセグメント端が地山(ジャッキストローク1000mm)	664	548	1253	922	718	1047	710	763				
1999/6/7 14:40	0.2	0.0	14:40 Bリング組立開始	111	108	199	171	141	198	316	96				
1999/6/7 17:38	0.4	0.1	17:38 Bリング組立完了	118	114	189	157	149	181	268	105				
1999/6/7 18:24	0.4	0.2	18:24 Aリングセグメント全てが地山、Bリングセグメント端が地山(ジャッキストローク1000mm)	166	174	170	193	214	193	167	162				
1999/6/7 20:15	0.5	0.2	20:14 Aリング裏込め注入(B1セグメントから)	93	100	107	138	160	130	104	82				
1999/6/7 21:25	0.5	0.3	21:22 Bリング裏込め注入(B2セグメントから)	109	125	114	146	181	133	132	113				
1999/6/8 9:05	1.0	0.8	Aリング組立約1日	161	134	125	134	180	118	126	139				
1999/6/8 14:40	1.2	1.0	Bリング組立約1日	151	121	116	129	176	119	124	130				
1999/6/10 9:05	3.0	2.8	Aリング組立約3日	117	109	111	112	170	113	112	108				
1999/6/10 14:40	3.2	3.0	Bリング組立約3日	112	106	109	111	169	112	111	105				
1999/6/14 9:00	7.0	6.8	Aリング組立約7日	90	99	92	106	157	108	103	85				
1999/6/14 14:30	7.2	7.0	Bリング組立約7日	90	98	91	106	157	108	103	84				
1999/6/27 9:00	20.0	19.8	ABリング組立約20日	86	97	91	107	154	108	100	79	85	103	122	96
1999/7/17 9:00	40.0	39.8	ABリング組立約40日	84	97	114	107	150	129	97	78	86	105	123	97
1999/8/6 9:00	60.0	59.8	ABリング組立約60日	83	97	114	107	150	131	95	76	85	104	123	95
1999/9/5 9:00	90.0	89.8	ABリング組立約90日	85	101	121	114	159	137	97	78	87	107	126	97
1999/9/21 0:00	105.6	105.4	ABリング組立約105日(最終)	85	101	121	115	160	136	97	78	87	107	126	97

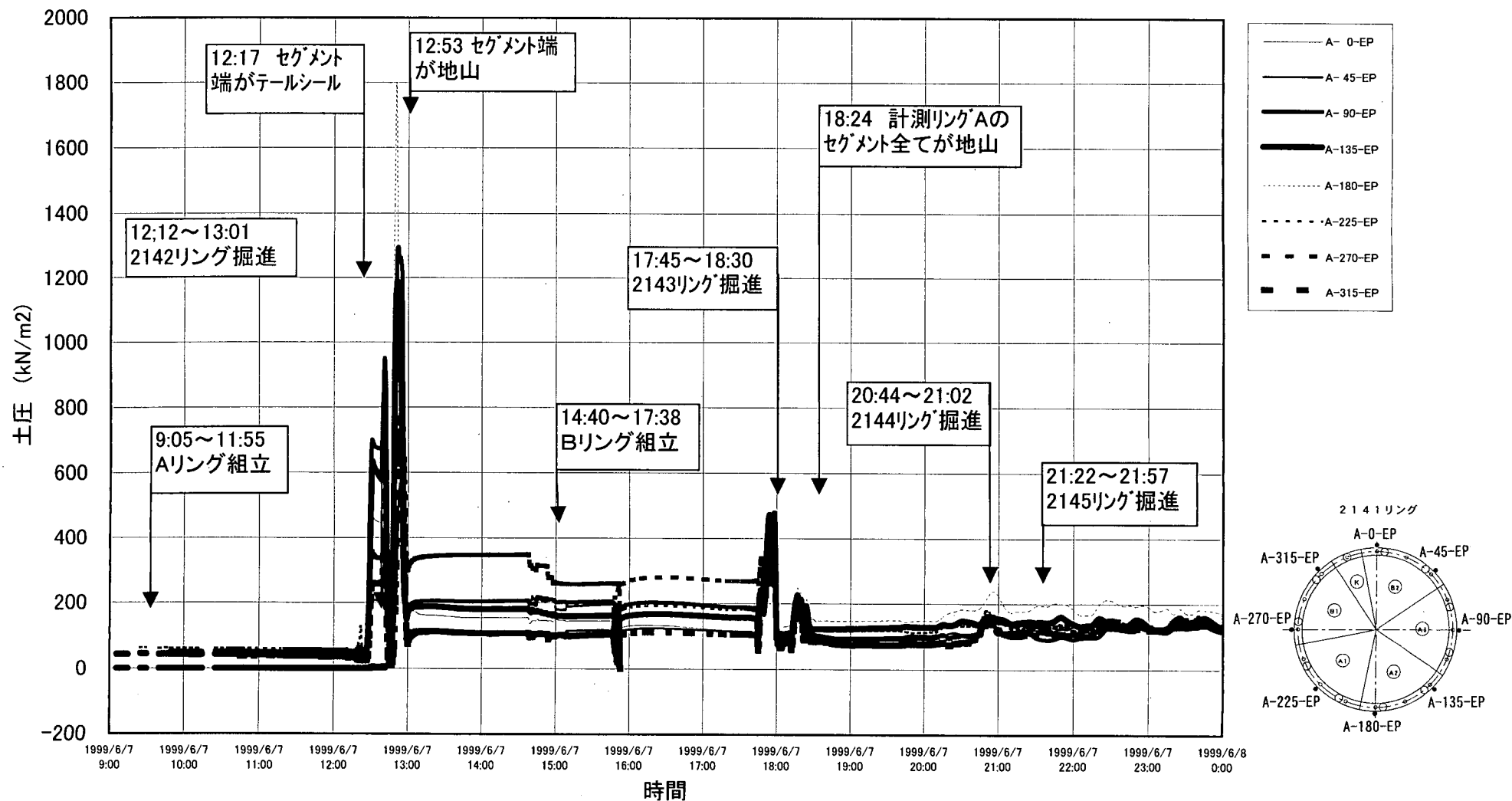
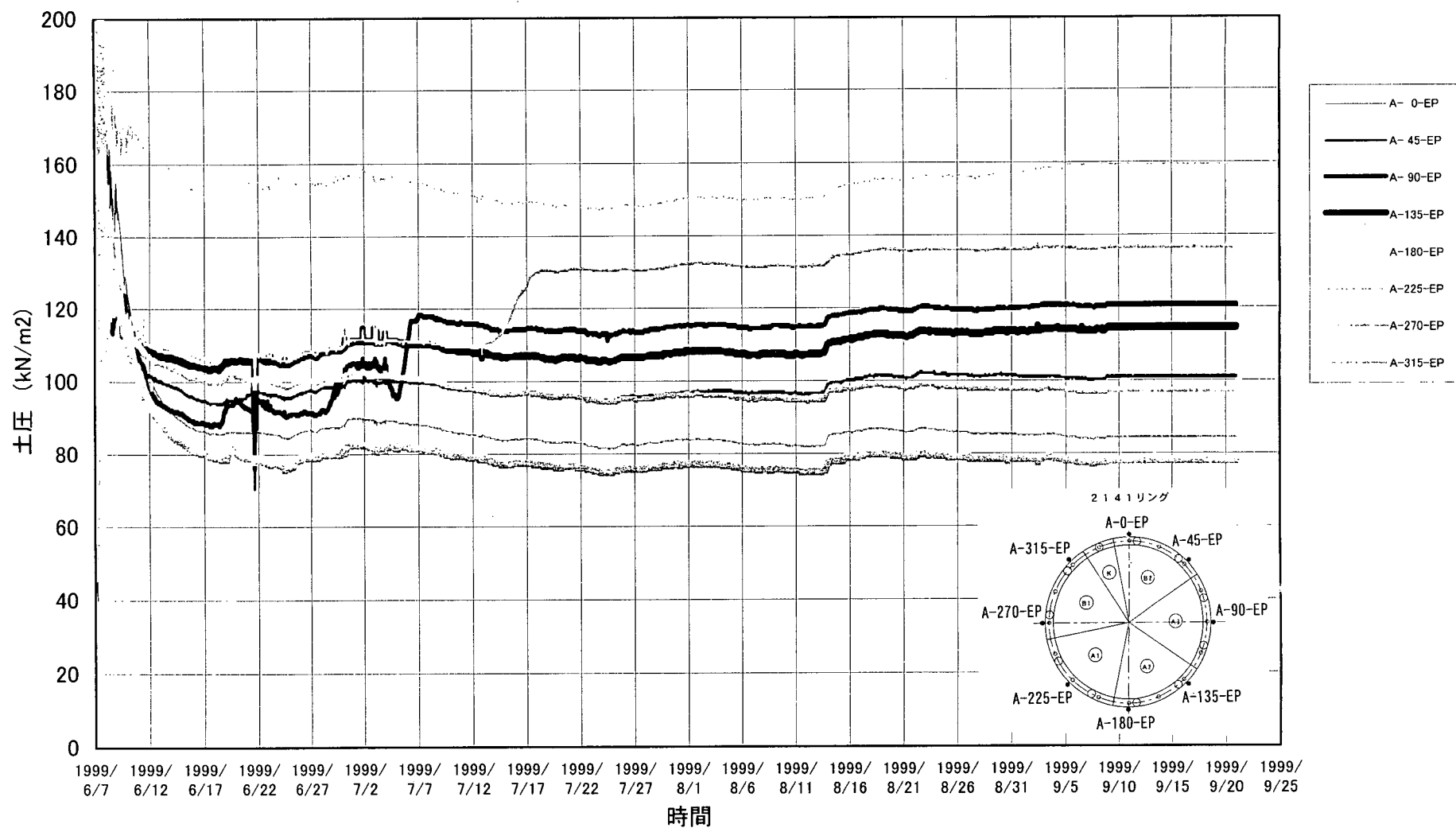


図-3. 14(1) 楠・味美共同溝セグメント組立時の土圧計経時変化(2141リング)



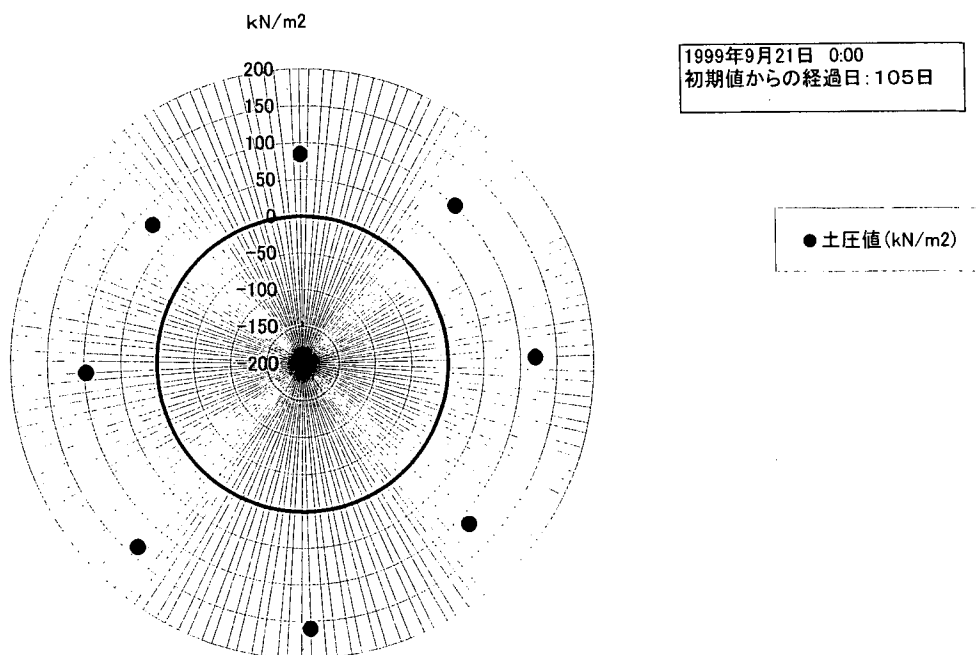


図- 3. 1 5 土圧の断面分布図 (セグメント組立後約 3 ヶ月後)

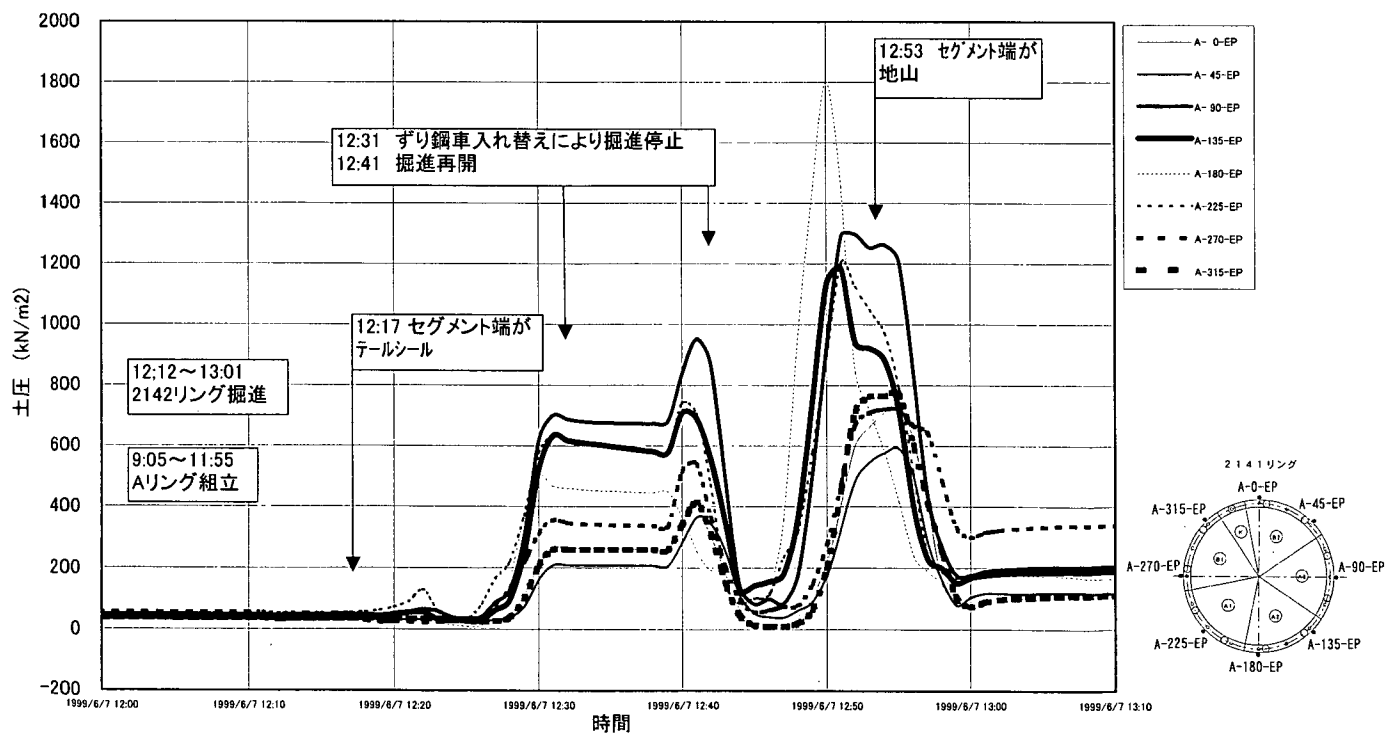


図- 3. 1 6 (I) 土圧計の経時変化 (2142リング掘進時)

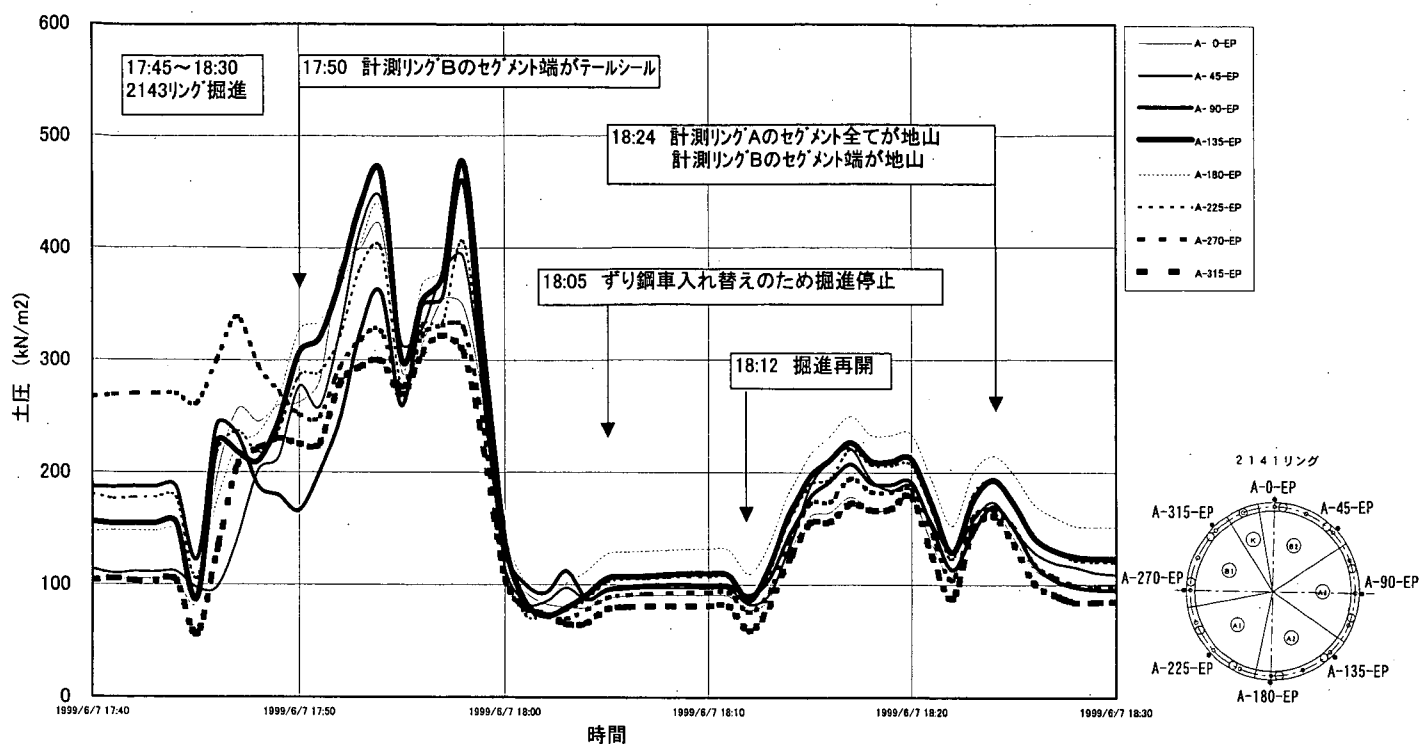


図-3.16 (2) 土圧計の経時変化 (2143リング掘進時)

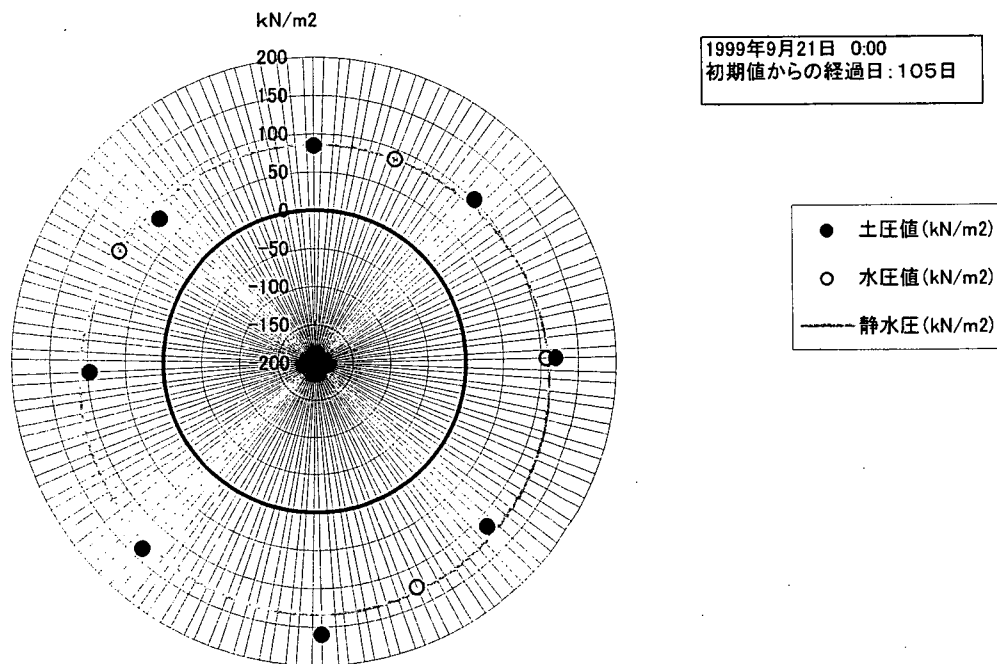


図-3.17 土水圧の断面分布図 (セグメント組立後約3ヶ月後)

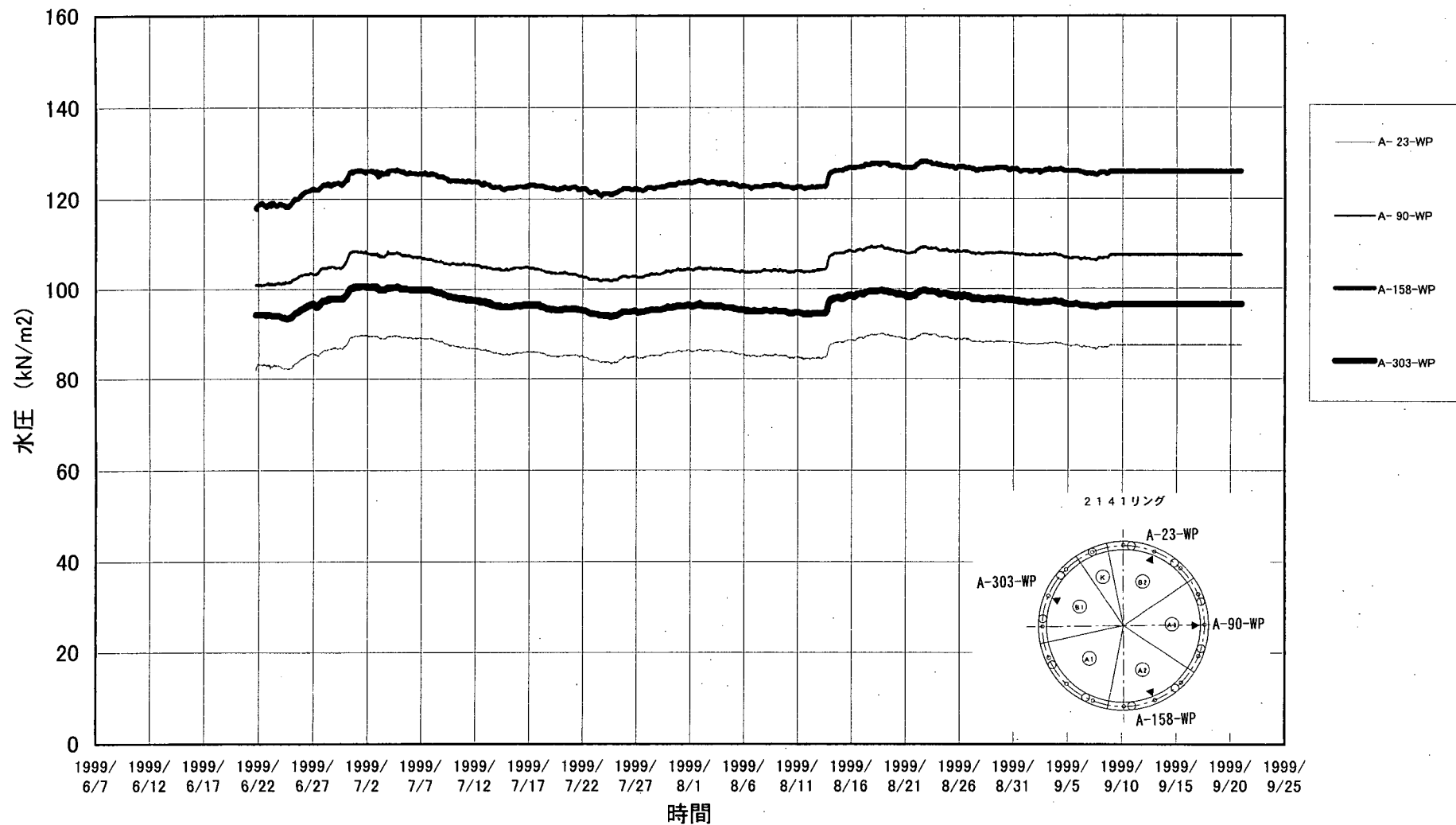
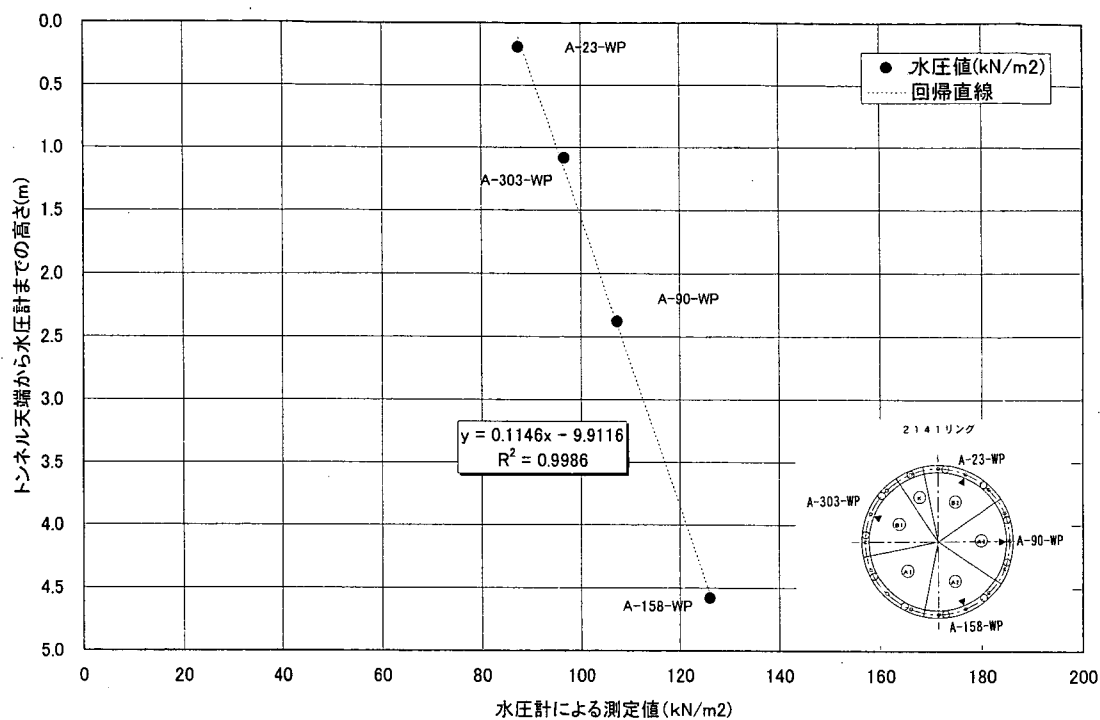
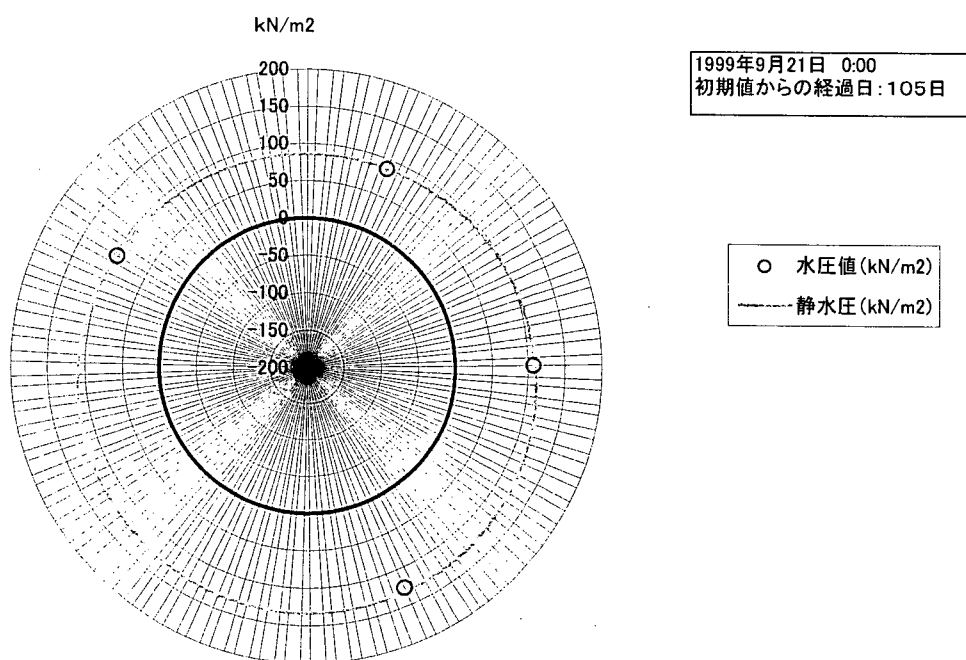


図-3. 18 楠・味美共同溝セグメント組立時の水圧計経時変化(2141リング)



図－ 3. 1 9 計測された水圧値とトンネル天端からの高さの関係（3ヶ月後）



図－ 2. 2 0 水圧計の断面分布図（3ヶ月後）

表-3.10(1) 楠味美共同溝 セグメント組立時の計測データ表(2141リング鉄筋応力)

日時		Aリング組立開始からの経過時間(日)	Bリング組立開始からの経過時間(日)	状態	計測リングA B2セグメント				計測リングA A3セグメント				計測リングA A2セグメント				計測リングA A1セグメント				計測リングA B1セグメント				計測リングA Kセグメント		単位: N/mm2		
					A-5-OL	A-5-IL	A-39-OL	A-39-IL	A-73-OL	A-73-IL	A-106-OL	A-106-IL	A-140-OL	A-140-IL	A-175-OL	A-175-IL	A-209-OL	A-209-IL	A-243-OL	A-243-IL	A-275-OL	A-275-IL	A-309-OL	A-309-IL	A-337-OL	A-337-IL			
1999/6/7 9:05	0.0	-0.2		9:09 Aリング組立開始									0.00	0.00	0.00	0.00													
1999/6/7 11:55	0.1	-0.1		11:55 Aリング組立完了				-1.24	3.50	0.82	2.68	1.44	2.68	1.44	2.68	2.47	2.47	2.47	5.56	-0.41	3.09	0.82	1.85	2.27	3.50	3.09	5.97	2.88	4.94
1999/6/7 12:17	0.1	-0.1		12:17 Aリングセグメント端がケーブル(ジャッキストローク150mm)				0.41	3.30	-2.47	0.21	0.21	-1.85	6.38	1.03	7.83	7.41	5.15	9.47	3.71	3.09	3.09	0.21	-9.68	15.03	-4.32	15.24	15.03	10.08
1999/6/7 12:53	0.2	-0.1		12:53 Aリングセグメント端が地山(ジャッキストローク1000mm)				-8.03	-5.77	-2.27	-3.30	-0.21	-3.71	18.33	-30.07	8.86	-17.30	-7.41	70.23	2.06	-16.27	10.50	-28.63	27.80	3.91	-6.58	15.65	5.15	7.21
1999/6/7 14:40	0.2	0.0		14:40 Bリング組立開始				-19.15	2.88	-7.21	1.44	2.27	-10.09	18.95	-42.42	0.62	-22.86	-16.27	71.26	4.74	-16.06	16.68	-32.95	25.54	1.65	-3.09	3.09	-2.27	9.27
1999/6/7 17:38	0.4	0.1		17:38 Bリング組立完了				-16.68	9.88	-7.21	4.32	4.94	-10.50	17.71	-29.04	7.62	-13.80	-12.77	86.70	8.85	-12.97	37.69	-24.09	24.92	2.88	-1.85	-1.44	-12.15	27.39
1999/6/7 18:24	0.4	0.2		18:24 Aリングセグメント全てが地山、Bリングセグメント端が地山(ジャッキストローク1000mm)				-21.01	1.85	-10.71	0.21	-1.44	-8.03	10.09	-27.18	7.00	-22.04	-15.45	70.43	-5.97	-6.18	16.88	-20.18	18.95	-17.09	-10.09	-9.06	-19.56	25.74
1999/6/7 20:15	0.5	0.2		20:14 Aリング裏込め注入(B1セグメントから)				-4.94	8.44	-2.06	4.32	0.82	-1.24	17.09	-14.21	12.15	-12.15	-1.44	68.99	2.06	-1.24	21.83	-8.86	23.07	-2.47	4.53	-3.09	-3.50	27.18
1999/6/7 21:25	0.5	0.3		21:22 Bリング裏込め注入(B2セグメントから)				-4.74	6.80	2.06	1.85	1.24	-0.21	12.56	-11.94	11.53	-11.33	1.65	64.25	0.00	0.62	18.74	-8.24	19.15	0.21	3.91	-2.06	-4.12	28.01
1999/6/8 9:05	1.0	0.8		Aリング組立約1日				-2.88	2.88	1.03	5.77	0.62	1.65	12.77	-12.36	12.36	-11.53	-0.62	64.25	-2.06	0.62	19.15	-8.03	19.15	2.88	3.71	5.77	-1.85	28.83
1999/6/8 14:40	1.2	1.0		Bリング組立約1日				-3.71	1.44	1.44	3.91	1.24	0.21	12.97	-14.00	12.77	-11.74	-1.24	68.17	-1.44	2.47	19.98	-7.21	19.77	2.88	2.88	3.91	-1.03	31.30
1999/6/10 9:05	3.0	2.8		Aリング組立約3日				-4.53	1.65	0.62	3.91	2.06	-0.82	13.80	-14.21	14.62	-11.74	-1.03	69.61	-0.41	3.09	21.01	-7.00	20.80	4.32	2.27	4.74	0.62	21.42
1999/6/10 14:40	3.2	3.0		Bリング組立約3日				-4.32	1.44	0.62	3.50	2.06	-0.82	13.80	-14.00	14.83	-12.15	-0.82	70.84	-0.41	3.09	21.21	-7.21	21.01	4.12	2.47	4.32	0.62	23.07
1999/6/14 9:00	7.0	6.8		Aリング組立約7日				-4.74	1.44	0.62	2.47	2.06	0.62	14.00	-12.77	15.24	-11.33	-1.03	61.99	0.41	1.65	21.21	-6.80	21.42	6.18	1.85	5.15	1.24	9.89
1999/6/14 14:30	7.2	7.0		Bリング組立約7日				-4.74	1.44	0.62	2.88	1.85	0.82	14.21	-12.36	15.45	-11.12	-0.82	64.05	0.41	2.06	21.21	-6.38	21.42	6.18	2.06	5.15	1.24	11.74
1999/6/27 9:00	20.0	19.8		ABリング組立約20日				-4.12	5.15	0.21	5.97	1.03	3.71	13.80	-10.50	15.24	-8.24	-0.62	59.52	-0.41	4.53	19.77	-1.44	20.80	11.12	-1.85	9.06	-0.21	9.27
1999/7/17 9:00	40.0	39.8		ABリング組立約40日				-3.91	8.86	0.21	6.58	-6.58	4.94	13.39	-9.27	14.62	-6.80	-1.44	53.34	-1.03	5.56	19.15	0.00	19.98	13.80	-1.03	11.53	-0.62	4.32
1999/8/6 9:00	60.0	59.8		ABリング組立約60日				-3.91	10.30	0.00	8.03	-9.47	6.18	13.18	-8.65	14.21	-5.97	-2.06	51.90	-1.03	5.77	18.12	0.62	19.36	15.03	0.00	12.77	-1.03	4.12
1999/8/5 9:00	80.0	89.8		ABリング組立約90日				-4.53	10.91	-0.21	7.62	-9.68	6.38	12.56	-8.24	13.39	-5.15	-3.30	50.87	-1.65	5.56	16.88	0.82	18.12	15.86	-4.53	13.39	-2.27	3.71
1999/9/21 0:00	105.6	105.4		ABリング組立約105日(最終)				-4.32	10.71	-0.21	7.41	-9.89	6.59	12.56	-8.24	13.39	-4.84	-2.88	51.28	-1.44	5.77	16.88	1.24	17.92	16.06	-4.53	13.59	-2.06	4.94

表-3.10(2) 楠味美共同溝 セグメント組立時の計測データ表(2142リング鉄筋応力)

単位: N/mm ²																									
日時	Aリング組立開始からの経過時間(日)	Bリング組立開始からの経過時間(日)	状態	計測リングB Kセグメント		計測リングB B2セグメント				計測リングB A3セグメント				計測リングB A2セグメント				計測リングB A1セグメント				計測リングB B1セグメント			
				B-23-OL	B-23-IL	B-51-OL	B-51-IL	B-85-OL	B-85-IL	B-119-OL	B-119-IL	B-152-OL	B-152-IL	B-185-OL	B-185-IL	B-219-OL	B-219-IL	B-253-OL	B-253-IL	B-287-OL	B-287-IL	B-321-OL	B-321-IL	B-355-OL	B-355-IL
1999/6/7 9:05	0.0	-0.2	9:09 Aリング組立開始																						
1999/6/7 11:55	0.1	-0.1	11:55 Aリング組立完了																						
1999/6/7 12:17	0.1	-0.1	12:17 Aリングセグメント端がケーブル(ジャッキストローク150mm)																						
1999/6/7 12:53	0.2	-0.1	12:53 Aリングセグメント端が地山(ジャッキストローク1000mm)																						
1999/6/7 14:40	0.2	0.0	14:40 Bリング組立開始									0.41	0.21	0.00	0.62	-1.24	1.03	-0.82	1.03	0.21	0.41	0.21	0.00		
1999/6/7 17:38	0.4	0.1	17:38 Bリング組立完了	-5.77	17.92	1.85	-0.82	1.65	-1.03	2.06	0.41	1.85	3.09	1.85	7.00	3.09	3.09	2.27	1.24	1.03	2.06	2.47	-0.62	1.03	-1.85
1999/6/7 18:24	0.4	0.2	18:24 Aリングセグメント全てが地山、Bリングセグメント端が地山(ジャッキストローク1000mm)	-4.74	2.88	3.50	-0.62	15.86	-21.21	16.27	-21.01	8.03	-9.88	-3.71	7.41	13.18	-10.91	12.36	-7.41	3.30	-4.74	0.82	-4.12	-10.71	3.50
1999/6/7 20:15	0.5	0.2	20:14 Aリング裏込め注入(B1セグメントから)	-6.38	3.91	5.56	-14.21	16.48	-29.04	16.06	-28.01	1.65	-13.39	-11.94	3.50	5.15	-12.56	11.12	-5.15	4.94	-16.06	5.77	-22.65	-6.03	4.53
1999/6/7 21:25	0.5	0.3	21:22 Bリング裏込め注入(B2セグメントから)	-10.91	2.68	1.65	0.21	7.62	-10.30	3.50	-14.42	-3.09	-4.12	-7.62	3.50	0.00	-4.74	3.91	-3.30	2.27	-8.44	-1.03	-10.91	-11.12	5.15
1999/6/8 9:05	1.0	0.8	Aリング組立約1日	-2.47	18.33	-5.15	3.50	2.88	-7.00	3.09	-12.15	-6.80	-1.65	-7.83	4.32	-4.53	-1.85	1.03	-1.85	-3.09	1.24	-1.44	-3.71	1.65	-1.65
1999/6/8 14:40	1.2	1.0	Bリング組立約1日	-0.21	31.51	-3.30	2.27	3.50	-9.06	4.12	-12.77	-6.80	-1.24	-8.65	5.56	-3.09	-1.03	1.65	-2.27	-3.09	1.65	-1.65	-6.18	2.88	-5.35
1999/6/10 9:05	3.0	2.8	Aリング組立約3日	1.24	46.54	-3.09	3.71	4.53	-8.89	4.53	-12.36	-6.38	0.00	-8.24	7.21	-1.85	-0.21	3.09	-1.24	-1.85	1.03	-1.44	-5.56	3.50	-6.38
1999/6/10 14:40	3.2	3.0	Bリング組立約3日	1.65	46.34	-3.09	3.71	4.94	-10.09	4.94	-12.77	-6.18	-0.62	-8.03	7.00	-1.44	-0.21	3.30	-1.44	-1.65	0.82	-1.24	-5.97	3.50	-6.59
1999/6/14 9:00	7.0	6.8	Aリング組立約7日	1.65	43.66	-2.68	2.27	4.32	-7.41	4.94	-12.77	-5.77	-1.24	-8.65	8.86	-1.44	-0.62	3.50	-0.82	-0.82	0.21	-1.03	-7.21	3.30	-7.41
1999/6/14 14:30	7.2	7.0	Bリング組立約7日	1.44	43.87	-2.68	2.47	4.53	-7.21	5.15	-12.77	-5.56	-0.62	-8.65	8.86	-1.44	-0.21	3.71	-0.62	-0.82	0.62	-1.03	-7.21	3.30	-7.21
1999/6/27 9:00	20.0	19.8	ABリング組立約20日	-0.21	58.07	-2.88	6.80	3.91	-4.94	4.12	-11.33	-6.18	0.21	-9.68	9.68	-2.47	2.88	3.09	2.27	-5.77	-6.18	-1.44	-4.53	2.88	-4.53
1999/7/17 9:00	40.0	39.8	ABリング組立約40日	-1.24	50.87	-3.30	8.24	2.88	-3.50	3.09	-10.50	-6.80	0.21	-10.50	9.68	-3.91	4.32	1.85	3.91	-6.59	-17.92	-1.65	-3.50	2.68	-3.30
1999/8/6 9:00	60.0	59.8	ABリング組立約60日	-1.65	46.34	-3.71	9.27	2.27	-2.47	2.68	-10.30	-7.21	0.00	-10.91	9.47	-4.94	4.53	1.24	4.53	-6.18	-24.71	-2.06	-3.30	2.47	-3.30
1999/8/5 9:00	80.0	89.8	ABリング組立約90日	-3.09	21.01	-4.74	9.06	0.62	-2.47	1.24	-10.91	-8.44	-1.24	-12.15	8.65	-6.59	4.12	-0.41	4.32	-4.94	-28.07	-3.09	-3.71	0.00	-4.53
1999/9/21 0:00	105.6	105.4	ABリング組立約105日(最終)	-3.30	20.80	-4.94	8.86	0.82	-2.27	1.03	-10.91	-8.44	-1.44	-12.15	8.24	-6.59	3.91	-0.41	4.32	-4.74	-27.38	-3.30	-3.91	-0.21	-4.74

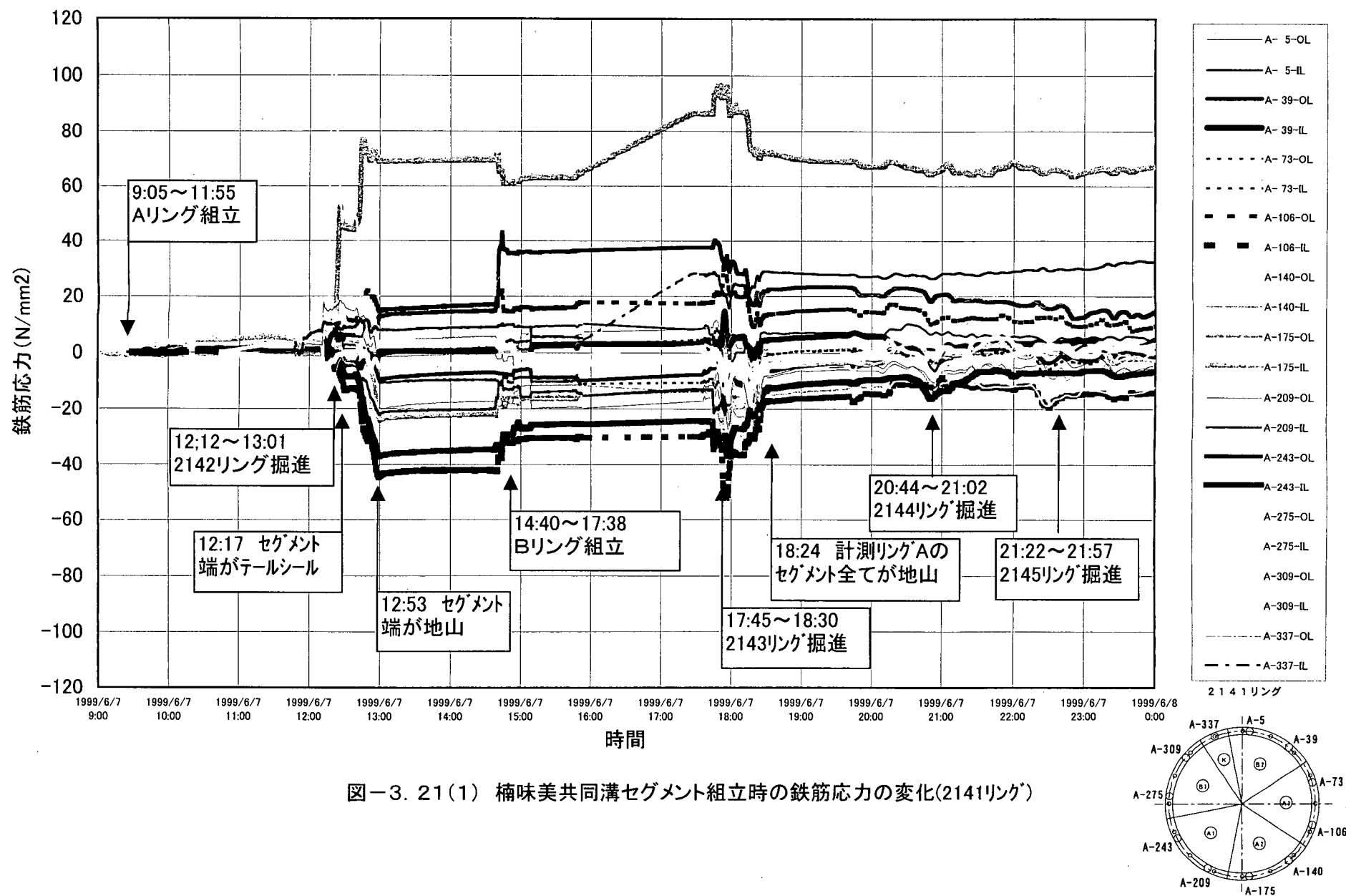


図-3. 21(1) 楠味美共同溝セグメント組立時の鉄筋応力の変化(2141リング)

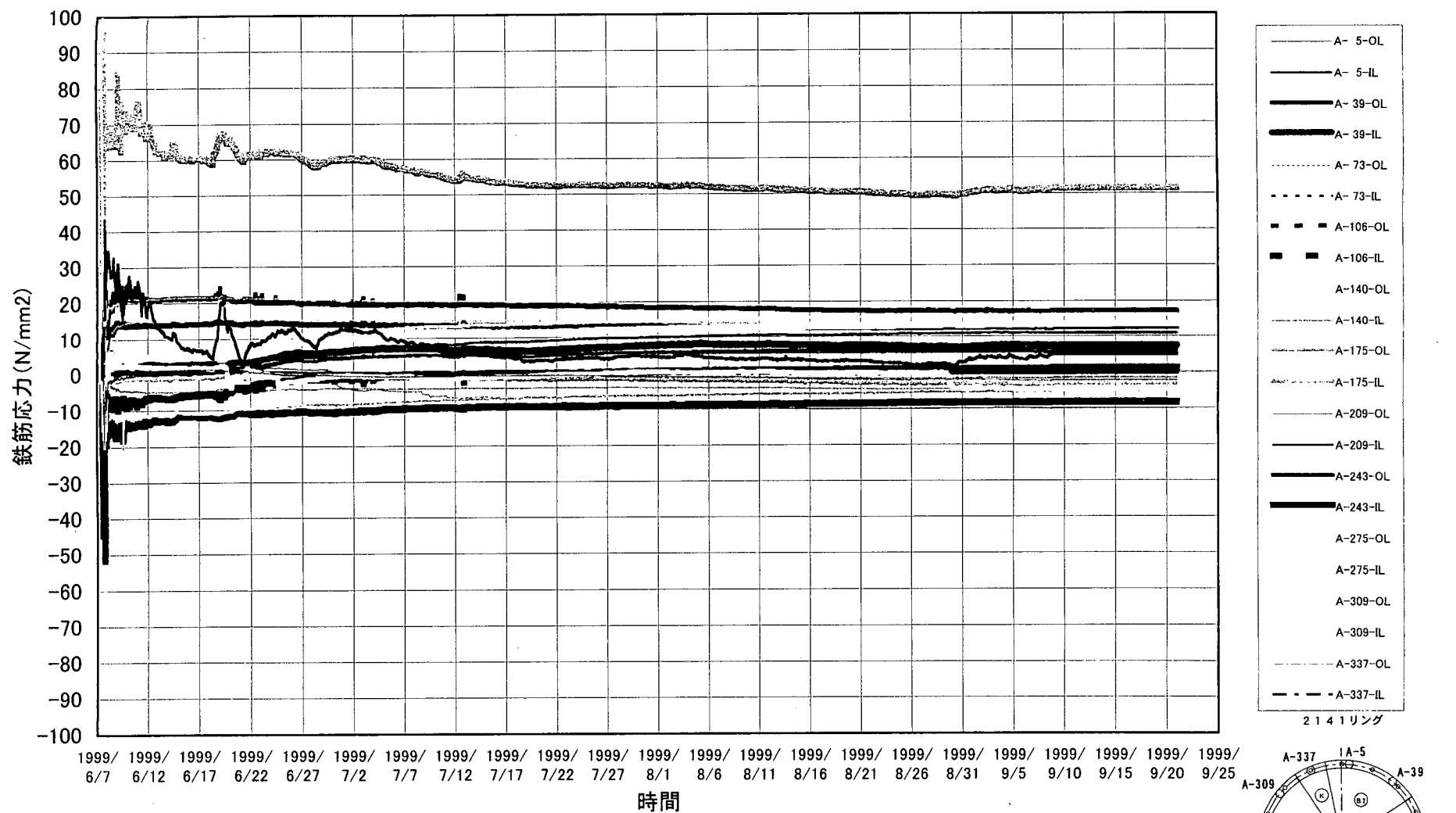
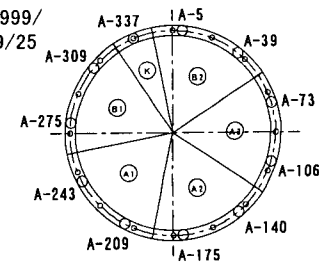


図-3. 21(2) 楠味美共同溝セグメント組立時の鉄筋応力の変化(2141リング)



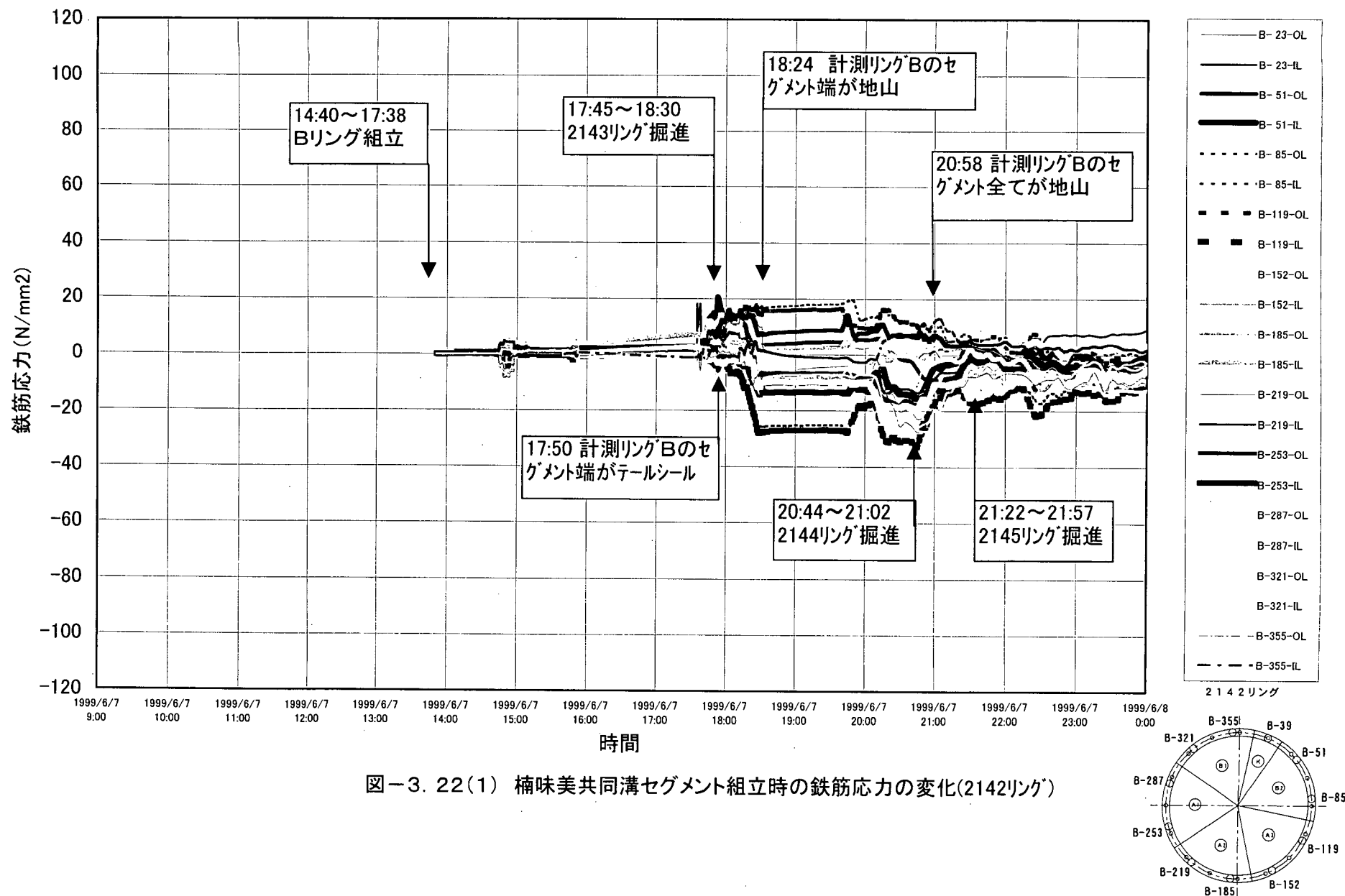


図-3. 22(1) 楠味美共同溝セグメント組立時の鉄筋応力の変化(2142リング)

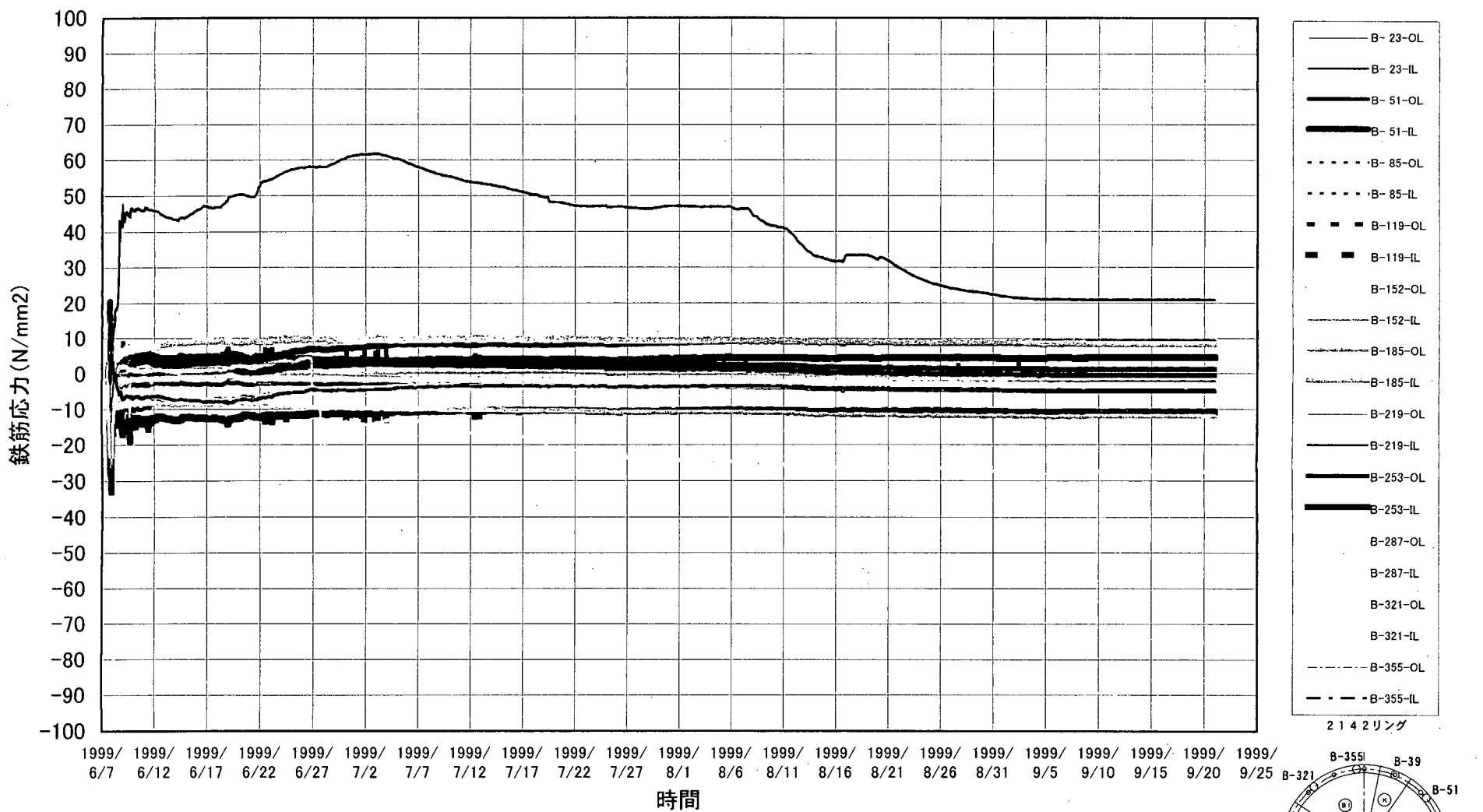


図-3. 22(2) 楠味美共同溝セグメント組立時の鉄筋応力の変化(2142リング)

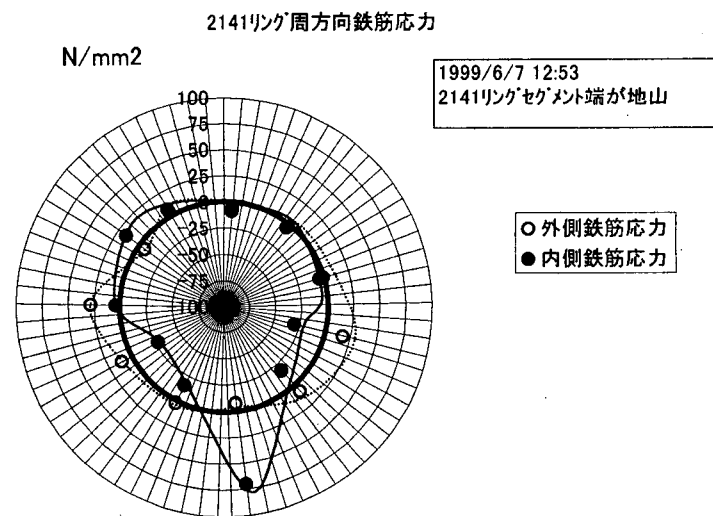
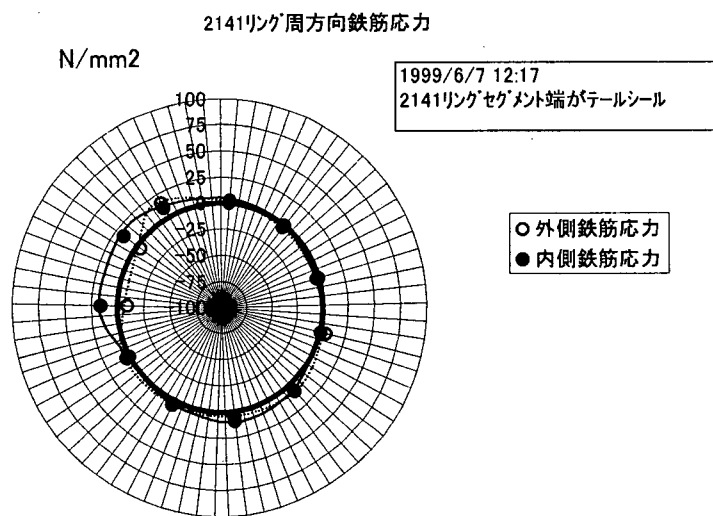
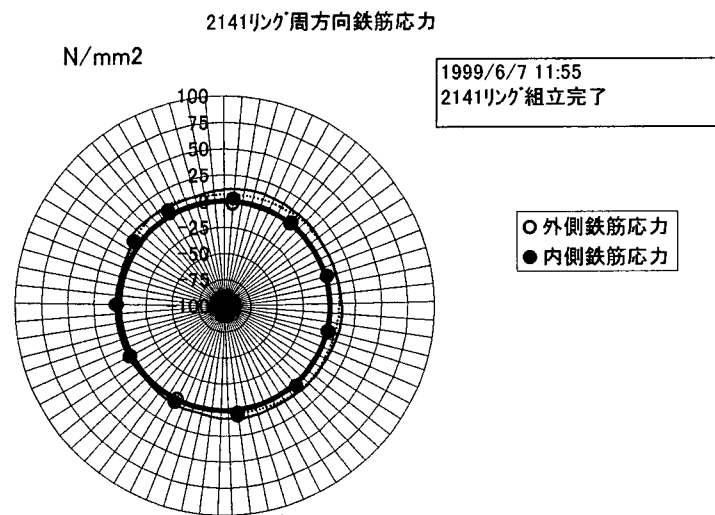
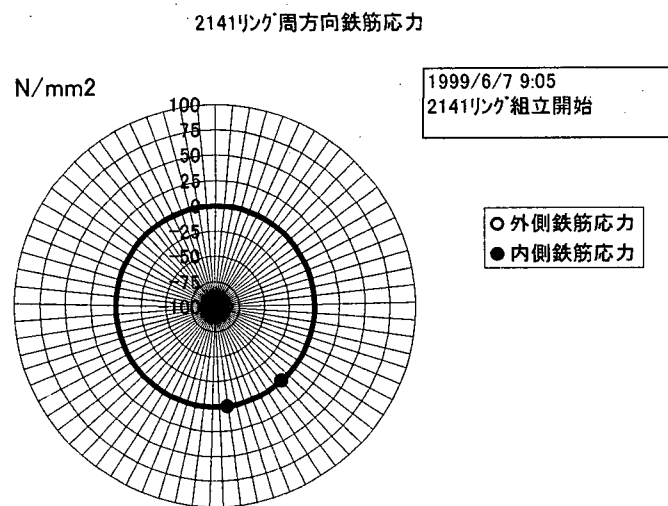


図-3. 23(1) 円周方向鉄筋応力分布(2141リング)

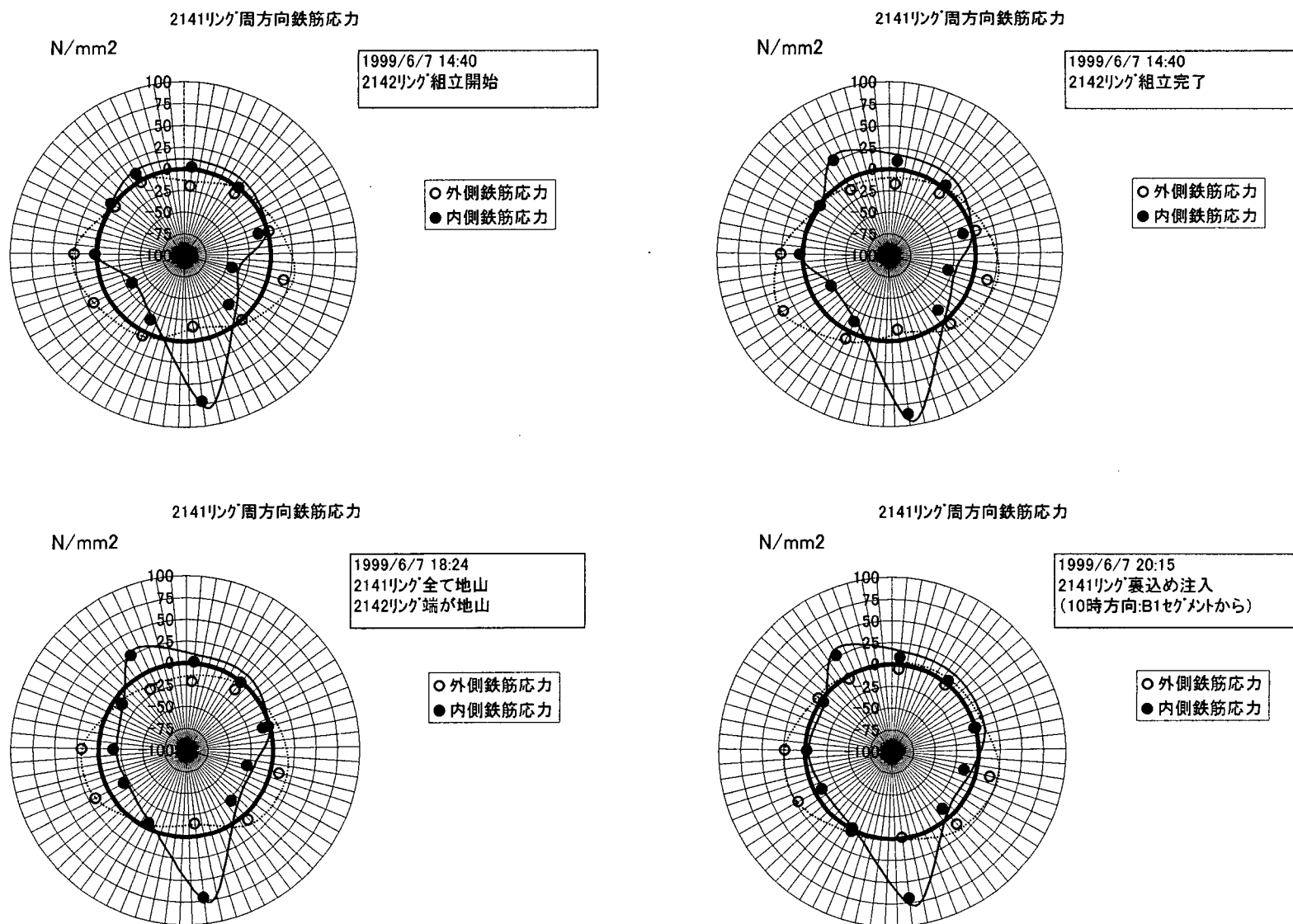


図-3. 23(2) 円周方向鉄筋応力分布(2141リング)

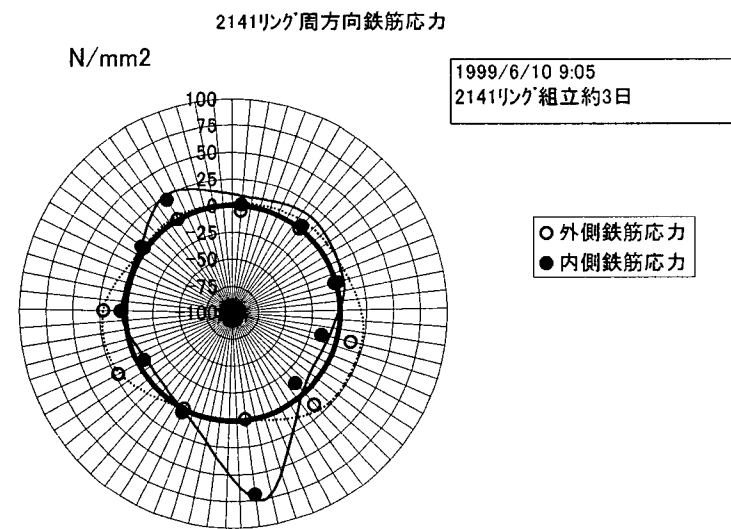
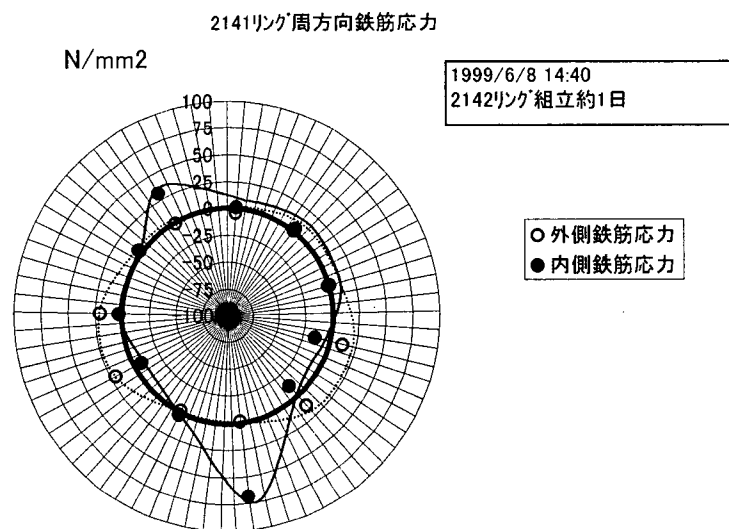
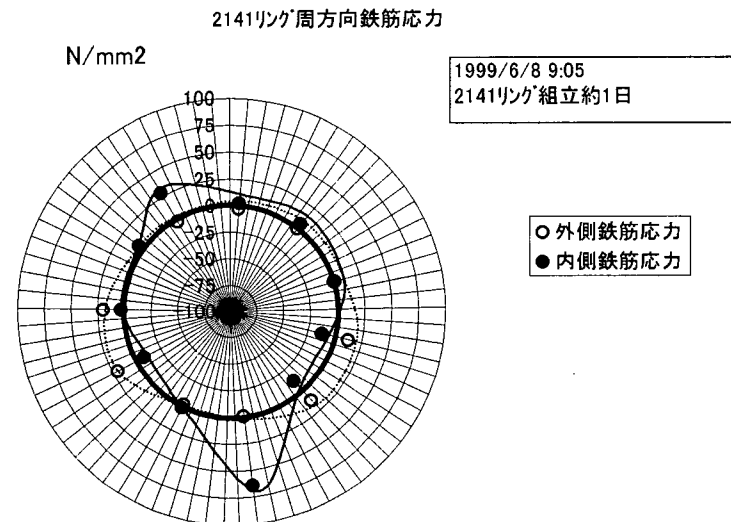
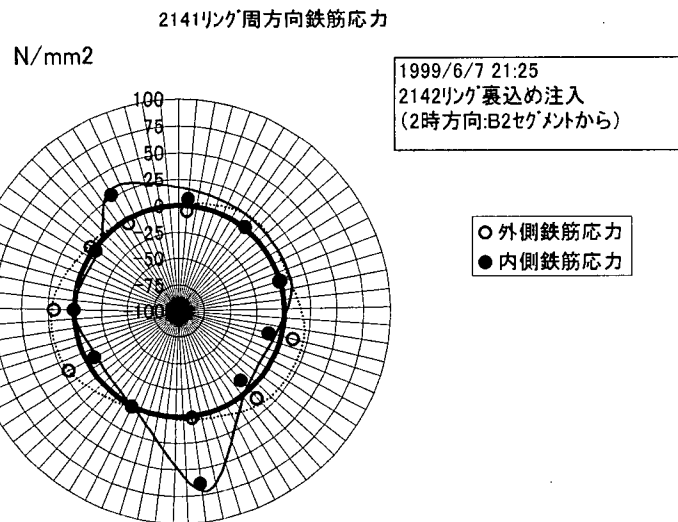


図-3. 23(3) 円周方向鉄筋応力分布(2141リング)

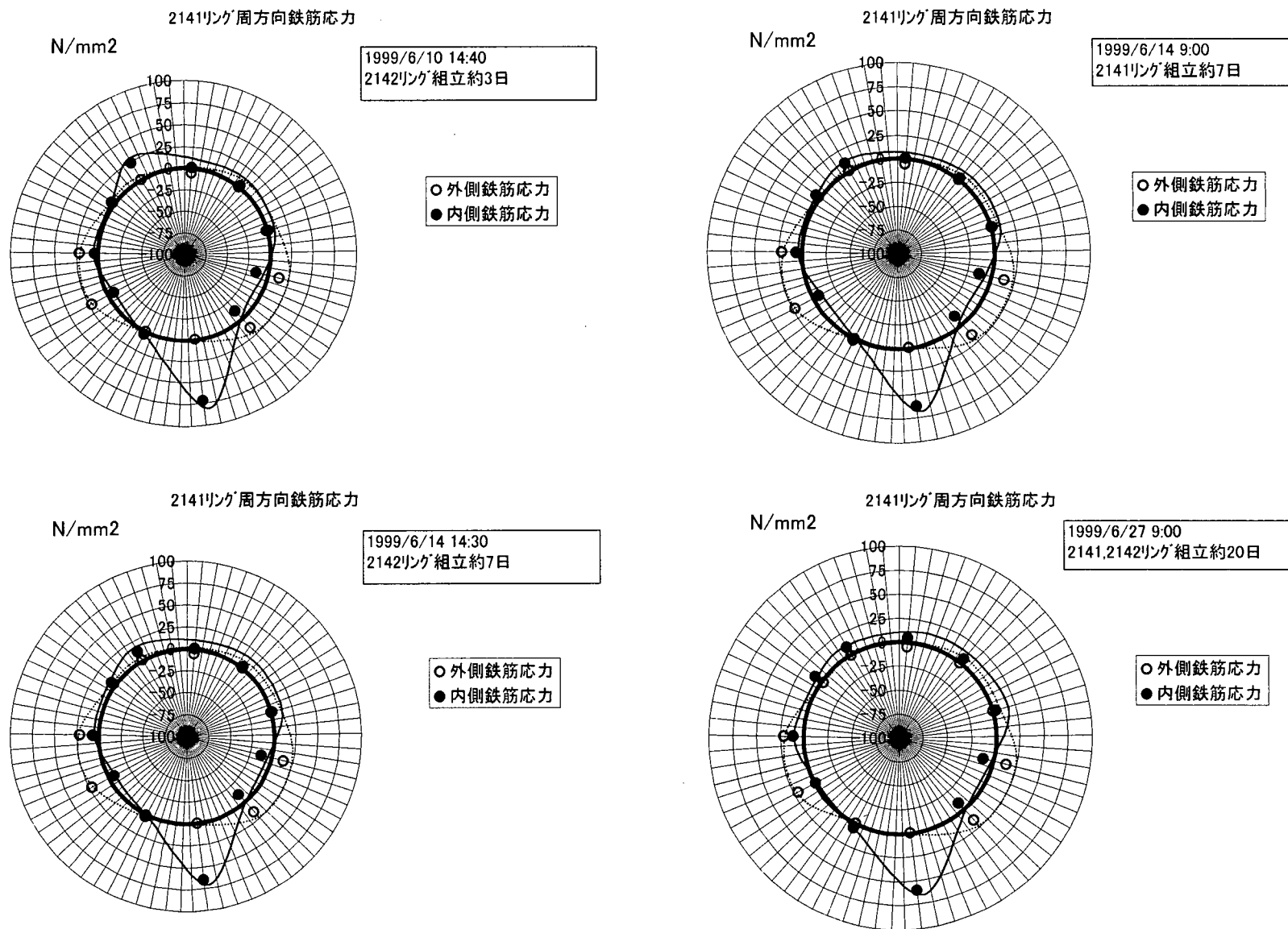


図-3. 23(4) 円周方向鉄筋応力分布(2141リング)

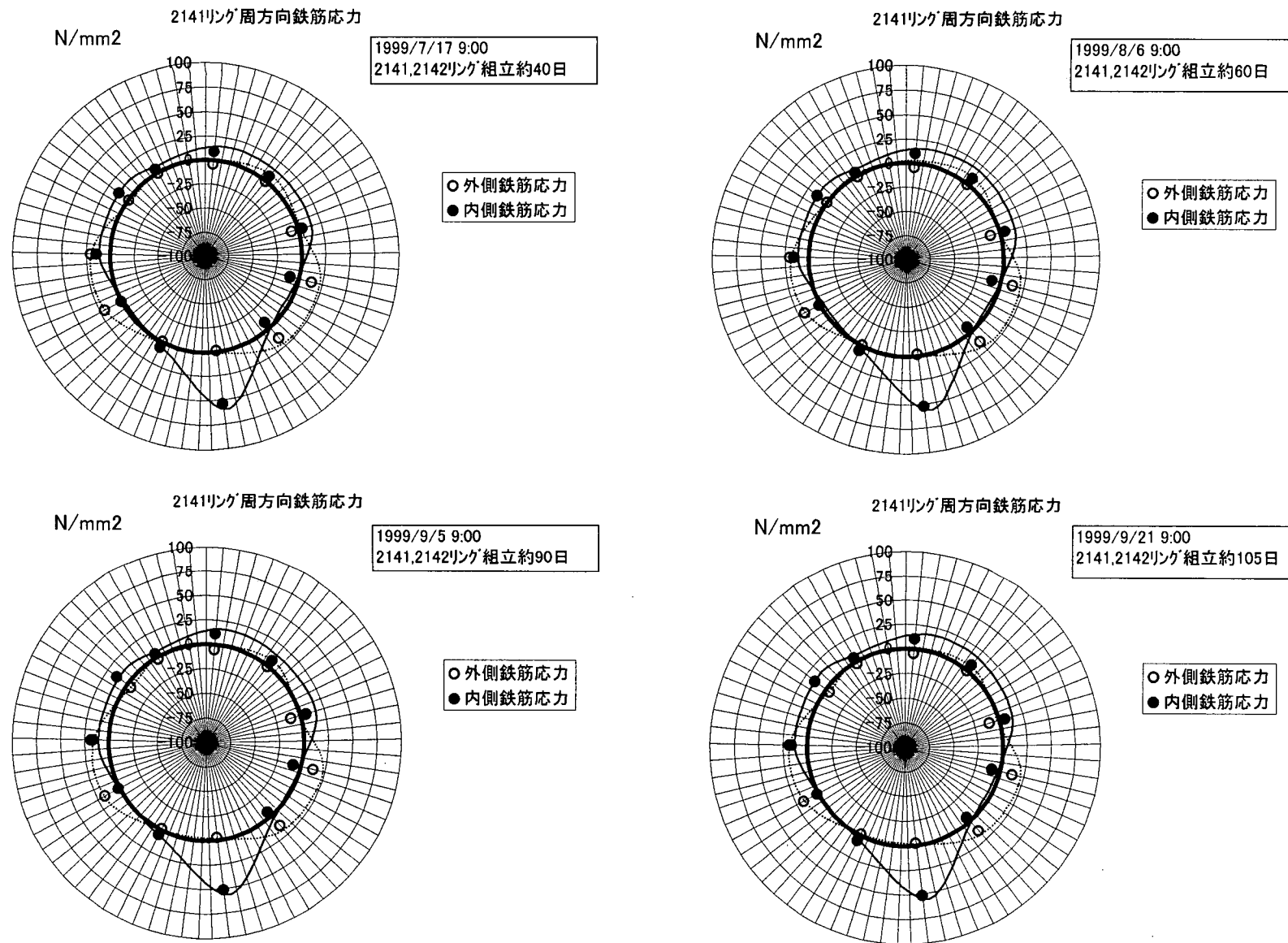


図-3. 23(5) 円周方向鉄筋応力分布(2141リング)

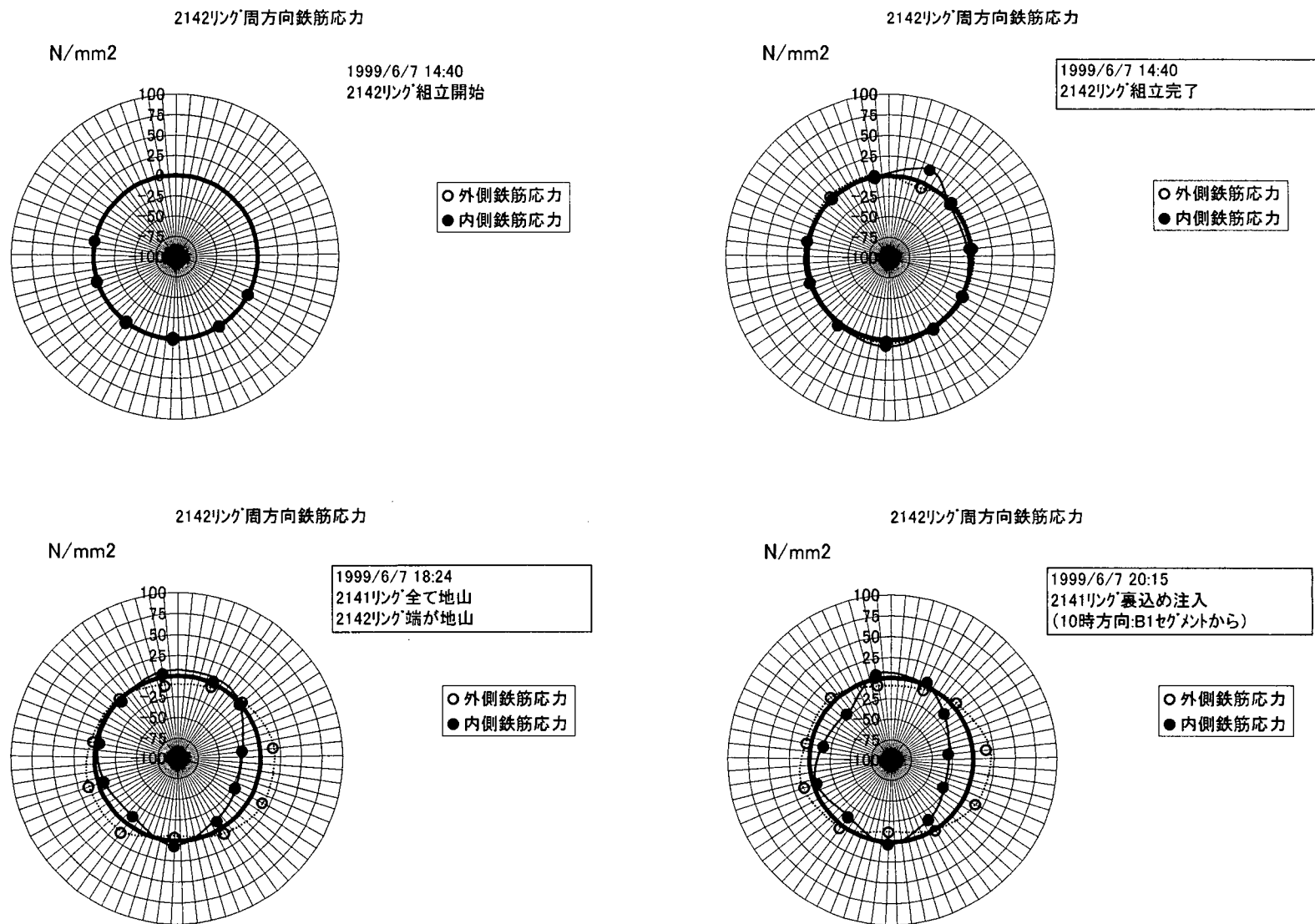


図-3. 24(1) 円周方向鉄筋応力分布(2142リング)

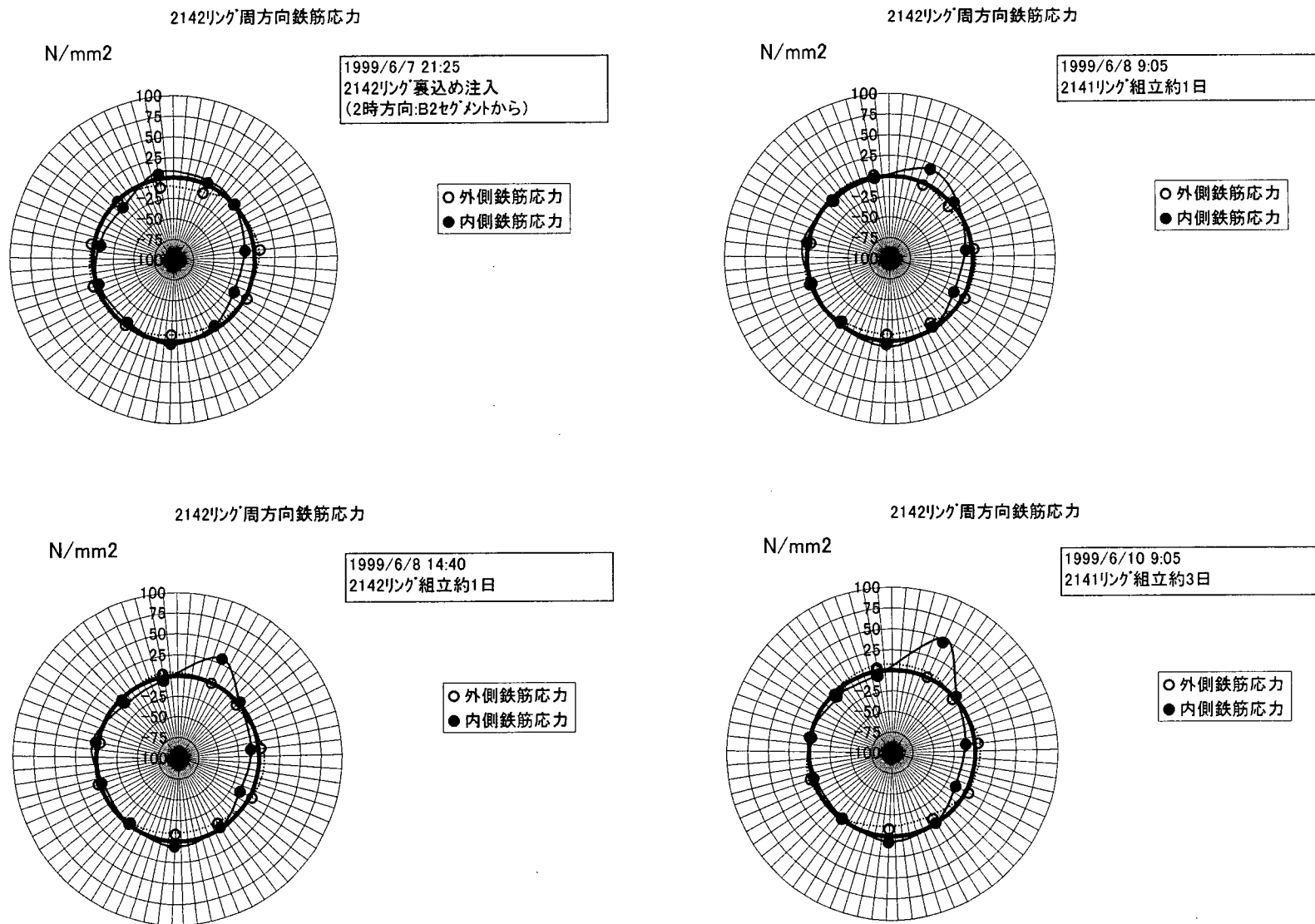


図-3. 24(2) 円周方向鉄筋応力分布(2142リング)

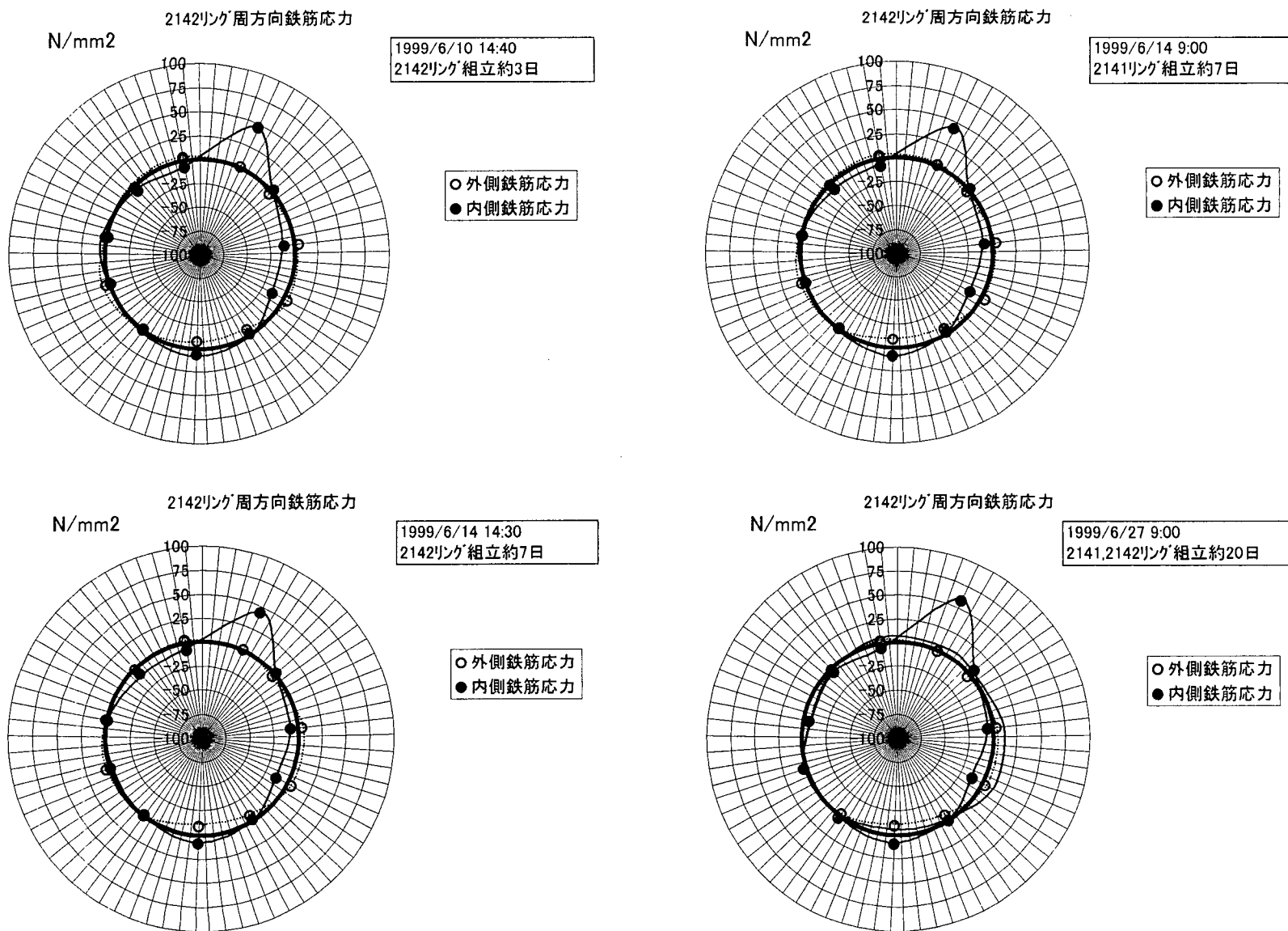
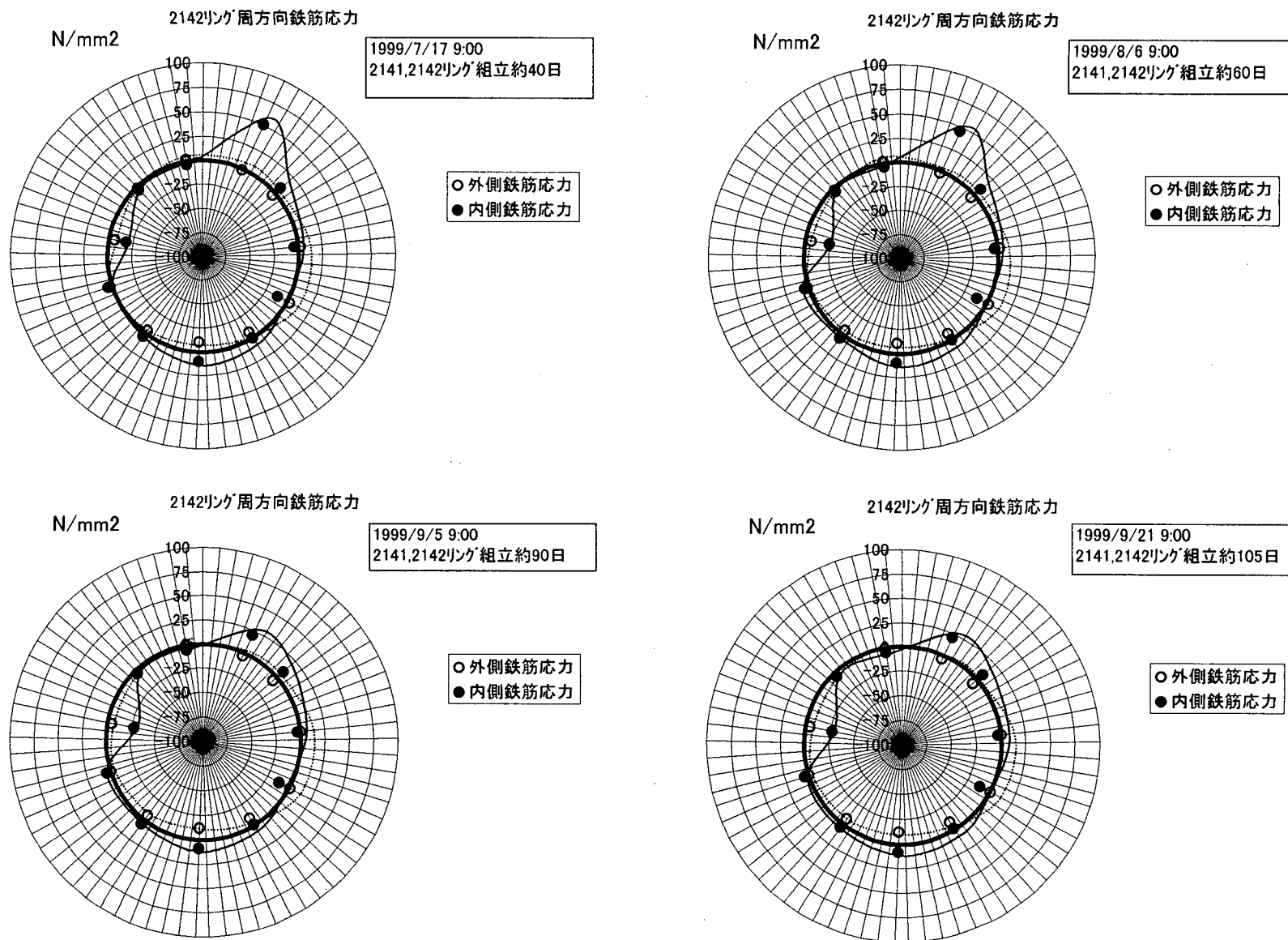


図-3. 24(3) 円周方向鉄筋応力分布(2142リング)



図－3. 24(4) 円周方向鉄筋応力分布(2142リング)

3.3.4 覆工体に発生する断面力

(1) 曲げモーメント

鉄筋計の測定値より算出した主要な時期の各点の曲げモーメントの値を表-3.11(1)～(2)、経時変化を図-3.26(1)～(2)、図-3.27(1)～(2)に示す。また、曲げモーメントの断面分布図を図-3.28(1)～(5)、図-3.29(1)～(4)に示す。ここで、組立約105日後の安定した時期においては、調布共同溝での検討を参考に、コンクリートの乾燥収縮量を考慮した(巻末資料参照)曲げモーメント(図-3.28(5)、図-3.29(4)参照)も算出した。

曲げモーメントはセグメントの断面形状が図-3.25に示すとおりであり、この断面を用いてコンクリートの引張り応力を無視し、コンクリートの弾性係数を 33kN/mm^2 として計算した。

なお、本トンネルに用いたセグメントの設計は、慣用計算法により実施しており、設計計算用土圧としてセグメント外径の2倍(=9.5m)の鉛直土圧を採用し、側方土圧係数 $\lambda=0.45$ 、地盤反力係数 $k=50\text{kN/mm}^3$ と設定された。

セグメント厚さ	$h=0.225\text{m}$
セグメント幅	$B=1.2\text{m}$
断面二次モーメント	$I=1.139\times 10^{-3}\text{m}^4$
断面積	$A=0.27\text{m}^2$

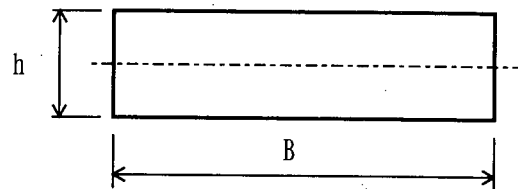


図-3.25 セグメントの断面形状

鉄筋計が安定している組立後105日時点での最大の曲げモーメントが発生する点は、2141リングでは正曲げがトンネル底部(計測点A-175)で約 $14\text{kN}\cdot\text{m}$ 、負曲げが右側壁部(計測点A-106)で約 $13\text{kN}\cdot\text{m}$ であり、2142リングでは正曲げがトンネル底部(計測点B-185)で約 $18\text{kN}\cdot\text{m}$ 、負曲げがトンネル左側壁部(計測点B-287)で約 $32\text{kN}\cdot\text{m}$ であり、設計上での最大曲げモーメント(正曲げ約 $56\text{kN}\cdot\text{m}$ 、負曲げ約 $40\text{kN}\cdot\text{m}$)に比べて小さなものとなっている。また、経時的な変化については、両リングとも組立完了時には大きな曲げモーメントの発生はなく、セグメント自重による影響は小さいものとなっている。2141ではセグメント端が地山に出た時点で、トンネル底部(計測点A-175)に $23.6\text{kN}\cdot\text{m}$ の正曲げ、側壁の左右下部(計測点A-243、A-106)にそれぞれ 39.8 、 $43.2\text{kN}\cdot\text{m}$ の負曲げが発生し、さらにセグメントの全てが地山に出た時点ではトンネル底部(計測点A-175)が $33.1\text{kN}\cdot\text{m}$ 、側壁の左右下部(計測点A-243、A-106)がそれぞれ 29.7 、 $37.8\text{kN}\cdot\text{m}$ となり、トンネル頂部(計測点A-5)に $27.6\text{kN}\cdot\text{m}$ の正曲げが発生し、設計時に慣用計算法で求められる曲げモーメントの断面分布形状に近い状況となるが、裏込め注入時には曲げモーメントが1/2程度に低減し、その後は概ね減少する方向で推移し、組立後40日ではほぼ安定した状態となっている。2142リングではセグメント端が地山に出た後、2141リングの裏込め注入時点においてトンネル頂部(計測点B-355)、底部(計測点B-185)にそれぞれ 11.5 、 $16.4\text{kN}\cdot\text{m}$ の正曲げ、トンネル左右の側壁部(計測点B-321、B-85)にはそれぞれ 30.9 、 $41.5\text{kN}\cdot\text{m}$ の負曲げが発生するが、2141リングと同様に裏込め注入時に1/2程度の値となる。その後トンネル底部付近は正曲げ状態として曲げモーメントが多少増加していき、トンネル頂部付近は左側(計測点B-355)が負曲げ状態へと移行し、左右の側壁

部は曲げモーメントが徐々に減少していくが、左側壁部の計測点B-287部については組立後約20～40日に負曲げの曲げモーメントが発生し、最終的には31.5kN・mの値を示した。

(2) 軸力

鉄筋計の測定値より算出した主要な時期の各点の軸力の値を表－3.12(1)～(2)に、経時変化を図－3.30(1)～(2)、図－3.31(1)～(2)に示す。また、軸力の断面分布図を図－3.32(1)～(5)、図－3.33(1)～(4)に示す。ここで、組立約105日後の安定した時期においては、調布共同溝での検討を参考に、コンクリートの乾燥収縮量を考慮した（巻末資料参照）軸力（図－3.32(5)、図－3.33(4)参照）も算出した。

鉄筋計が安定している組立後90日時点では、2142リングの計測点B-287の値（約730kN）が突出しているが、その他の値は概ね250kN以下である。経時的な変化については、2141リングでは2142リングの組立開始からセグメント全てが地山に出る間に最大800kN程度の軸力が作用しているが、裏込め注入とともに減少し、組立後約1日でほぼ安定した状態となっている。2142リングにおいても組立完了から裏込め注入の間に最大560kN程度の軸力が作用し、組立後約1日で最大値が300kN程度に低減する。その後は一部（計測点B-287、B-321）で局所的な増加が見られるが、ほぼ300kN以下の値で推移した。

参考文献

- 1) 平成 8年302号 楠味美共同溝工事パンフレット

表-3. 11(1) 周方向の鉄筋応力より算出した各点の曲げモーメント

楠味美共同溝
モーメント: M(kN・m)

2141リング

状態	日付	時間	2141リング 経過時間(日)	計測点											
				A- 5	A- 39	A- 73	A-106	A-140	A-175	A-209	A-243	A-275	A-309	A-337	
9:09 2141リング組立開始	1999/6/7	9:05:30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
11:55 2141リング組立完了	1999/6/7	11:55:00	0.12	2.23	0.16	0.11	0.11	0.00	0.26	1.14	0.09	0.11	0.25	0.18	
12:17 2141リングセグメント端がテールシール(ジャッキストローク150mm)	1999/6/7	12:17:00	0.13	0.38	3.24	-2.45	-0.60	-0.04	0.37	-0.05	-0.50	15.32	8.37	-0.42	
12:53 2141リングセグメント端が地山(ジャッキストローク1000mm)	1999/6/7	12:53:00	0.16	3.20	-1.45	-4.61	-43.18	-24.55	23.58	-21.59	-39.82	-2.96	11.35	0.18	
14:40 2142リング組立開始	1999/6/7	14:40:00	0.23	25.57	9.73	-13.69	-59.70	-29.41	34.26	-22.09	-46.73	-4.18	4.62	4.64	
17:38 2142リング組立完了	1999/6/7	17:38:00	0.36	23.91	10.34	-14.83	-41.70	-19.68	33.26	-18.75	-38.18	-3.07	0.58	20.66	
18:24 2141リングセグメント全てが地山、 2142リングセグメント端が地山(ジャッキストローク1000mm)	1999/6/7	18:24:00	0.39	27.57	13.74	-9.18	-37.84	-30.41	33.08	-0.29	-29.71	-25.87	1.45	30.23	
20:14 2141リング裏込め注入(B1セグメントから)	1999/6/7	20:15:00	0.46	7.95	3.45	-1.79	-21.71	-18.19	16.86	-1.98	-15.39	-7.78	-4.85	9.85	
21:22 2142リング裏込め注入(B2セグメントから)	1999/6/7	21:25:00	0.51	7.41	-0.02	-0.50	-17.97	-16.99	12.77	0.14	-14.04	-4.08	-3.38	10.74	
2141リング組立約1日	1999/6/8	9:05:00	1.00	4.32	0.49	0.09	-18.56	-17.39	14.97	2.83	-13.84	-1.92	0.18	8.36	
2142リング組立約1日	1999/6/8	14:40:00	1.23	5.17	0.21	-0.11	-20.81	-17.73	16.47	2.32	-12.93	-2.04	0.09	8.04	
2141リング組立約3日	1999/6/10	9:05:00	3.00	6.30	0.38	-1.44	-21.21	-18.01	16.58	1.14	-12.86	-1.52	0.21	4.19	
2142リング組立約3日	1999/6/10	14:40:00	3.23	5.98	0.30	-1.44	-20.93	-18.60	16.65	1.14	-13.16	-1.63	0.16	4.56	
2141リング組立約7日	1999/6/14	9:00:00	7.00	6.52	0.16	-0.12	-19.30	-17.56	14.88	0.11	-12.64	-1.30	0.28	1.15	
2142リング組立約7日	1999/6/14	14:30:00	7.23	6.52	0.18	-0.09	-18.78	-17.31	15.13	0.16	-12.11	-1.30	0.26	1.54	
2141,2142リング組立約20日	1999/6/27	9:00:00	20.00	6.32	1.14	0.23	-16.23	-13.44	13.91	1.45	-5.92	-0.83	3.85	2.28	
2141,2142リング組立約40日	1999/7/17	9:00:00	40.00	6.66	1.27	9.61	-14.51	-11.44	13.37	2.38	-4.28	-0.53	3.66	1.64	
2141,2142リング組立約60日	1999/8/6	9:00:00	60.00	6.92	1.79	13.67	-13.65	-10.29	13.69	2.43	-3.46	-0.37	2.85	2.09	
2141,2142リング組立約90日	1999/9/5	9:00:00	90.00	7.83	1.91	13.98	-13.00	-9.07	14.78	3.14	-3.00	-0.19	8.28	3.62	
2141,2142リング組立約105日(最終)	1999/9/21	0:00:00	105.62	7.53	1.86	14.29	-13.00	-8.81	14.43	2.93	-2.64	-0.16	8.32	3.56	
2141,2142リング組立約105日(最終・乾燥収縮補正)	1999/9/21	0:00:00	105.62	1.29	0.65	3.81	-3.61	-1.70	7.68	0.62	-1.34	-0.16	1.61	0.60	

表-3. 11(2) 周方向の鉄筋応力より算出した各点の曲げモーメント

楠味美共同溝
モーメント: M(kN・m)

2142リング

状態	日付	時間	2142リング 経過時間(日)	計測点											
				B-23	B-51	B-85	B-119	B-152	B-185	B-219	B-253	B-287	B-321	B-355	
14:40 2142リング組立開始	1999/6/7	14:40:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
17:38 2142リング組立完了	1999/6/7	17:38:00	0.12	10.71	-1.40	-1.64	-0.16	0.11	0.44	0.00	-0.09	0.09	-1.25	-2.64	
18:24 2141リングセグメント全てが地山、2142リングセグメント端が地山(ジャッキストローク1000mm)	1999/6/7	18:24:00	0.16	6.80	-1.46	-30.93	-30.72	-14.51	6.14	-16.68	-11.87	-6.87	-5.56	14.80	
20:14 2141リング裏込め注入(B1セグメントから)	1999/6/7	20:15:00	0.23	9.17	-19.84	-41.49	-40.05	-17.74	16.42	-17.59	-8.67	-22.13	-30.92	11.47	
21:22 2142リング裏込め注入(B2セグメントから)	1999/6/7	21:25:00	0.28	14.87	-0.19	-15.00	-19.63	-1.45	10.74	-6.03	-5.03	-11.55	-13.28	15.68	
2141リング組立約1日	1999/6/8	9:05:00	0.77	6.77	7.45	-9.76	-16.58	7.27	11.16	3.78	-2.64	4.32	-3.20	-2.47	
2142リング組立約1日	1999/6/8	14:40:00	1.00	7.24	4.77	-12.64	-17.64	7.75	12.47	2.91	-3.30	4.40	-6.39	-7.62	
2141リング組立約3日	1999/6/10	9:05:00	2.77	9.21	4.72	-13.93	-17.19	8.13	12.17	1.97	-2.16	2.64	-5.81	-9.10	
2142リング組立約3日	1999/6/10	14:40:00	3.00	8.78	4.72	-14.28	-17.82	7.49	11.87	1.70	-2.46	2.33	-6.65	-9.38	
2141リング組立約7日	1999/6/14	9:00:00	6.76	8.18	3.94	-10.61	-17.82	6.37	12.98	1.16	-1.71	1.12	-8.49	-10.43	
2142リング組立約7日	1999/6/14	14:30:00	6.99	8.42	3.98	-10.37	-17.86	6.69	12.98	1.70	-1.51	1.20	-8.49	-10.16	
2141,2142リング組立約20日	1999/6/27	9:00:00	19.76	13.18	4.96	-7.24	-15.75	7.97	14.49	3.76	-0.07	-0.58	-4.36	-6.53	
2141,2142リング組立約40日	1999/7/17	9:00:00	39.76	12.61	5.75	-5.15	-14.44	8.75	15.60	5.92	0.18	-15.99	-2.62	-4.84	
2141,2142リング組立約60日	1999/8/6	9:00:00	59.76	12.03	6.47	-3.67	-14.07	9.18	16.12	7.34	0.28	-26.16	-1.74	-4.81	
2141,2142リング組立約90日	1999/9/5	9:00:00	89.76	8.05	7.78	-3.37	-14.43	9.92	17.65	9.48	1.40	-32.11	-0.87	-5.77	
2141,2142リング組立約105日(最終)	1999/9/21	0:00:00	105.39	8.25	8.02	-3.15	-14.35	9.73	17.58	9.45	1.40	-31.50	-0.87	-5.92	
2141,2142リング組立約105日(最終・乾燥収縮補正)	1999/9/21	0:00:00	105.39	2.21	1.18	-0.26	-3.68	0.81	6.64	0.92	0.41	-24.24	-0.05	-0.39	

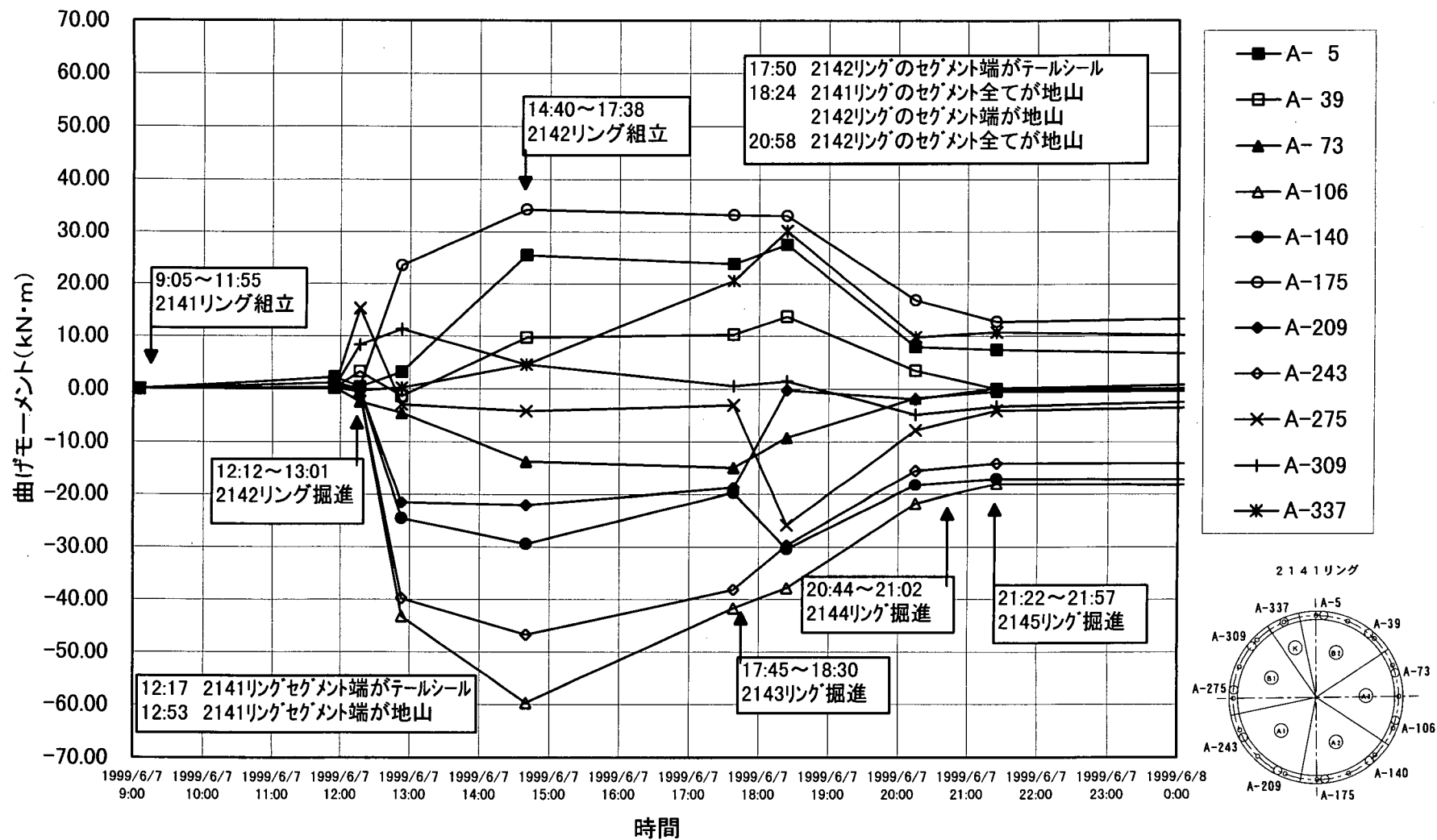


図-3. 26(1) 曲げモーメントの経時変化(2141リング)

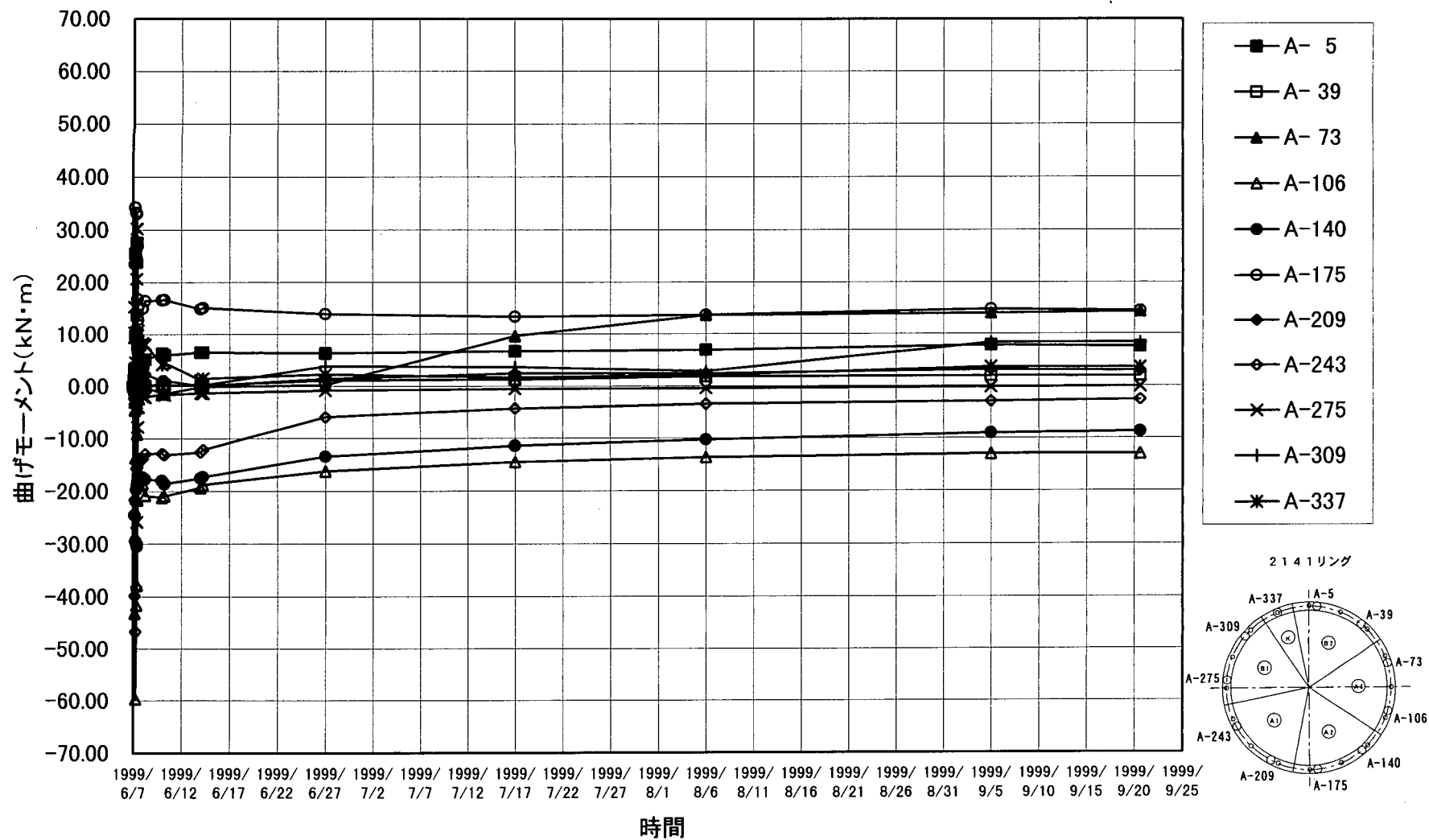


図-3. 26(2) 曲げモーメントの経時変化(2141リング)

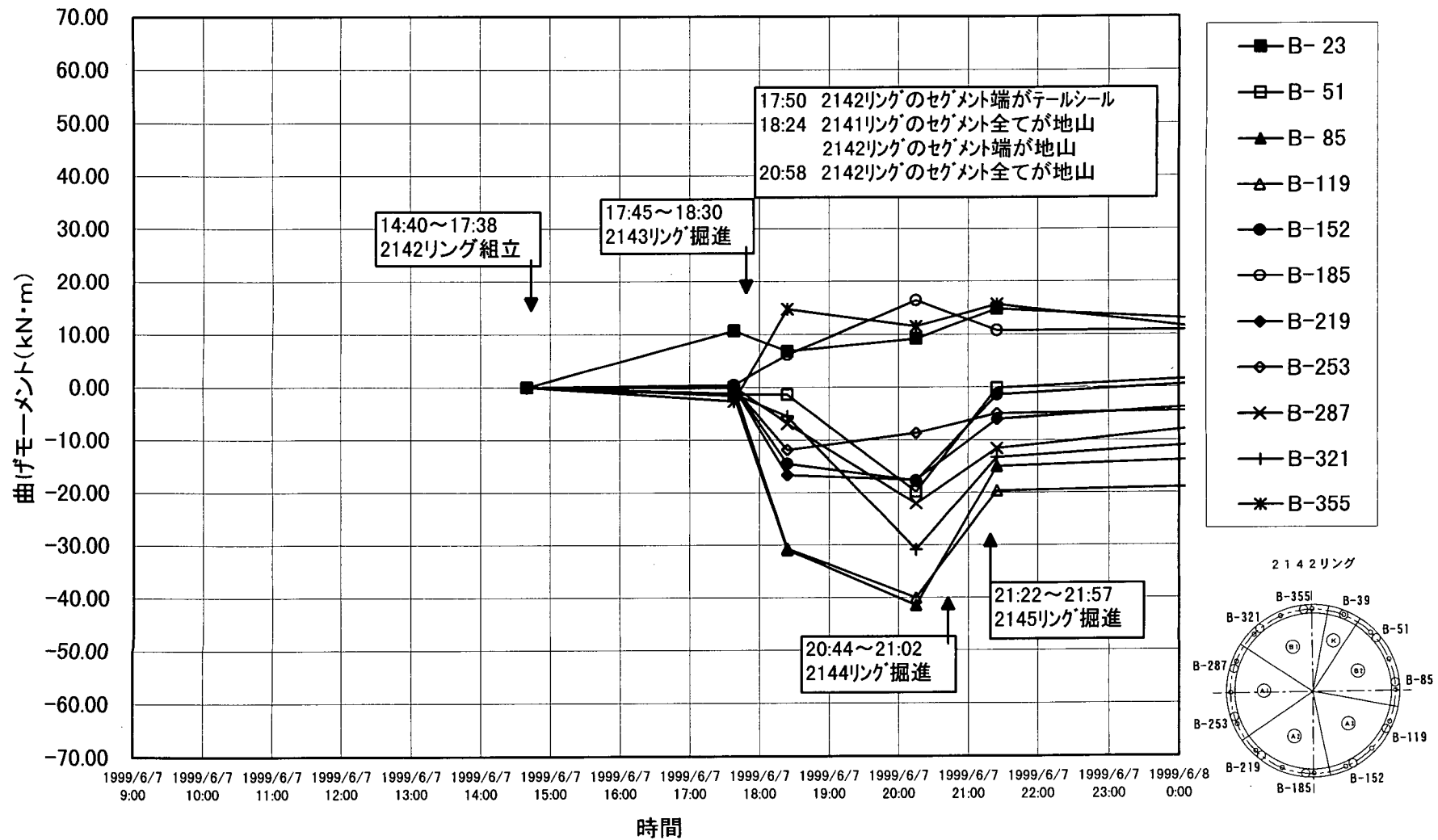


図-3. 27(1) 曲げモーメントの経時変化(2142リング)

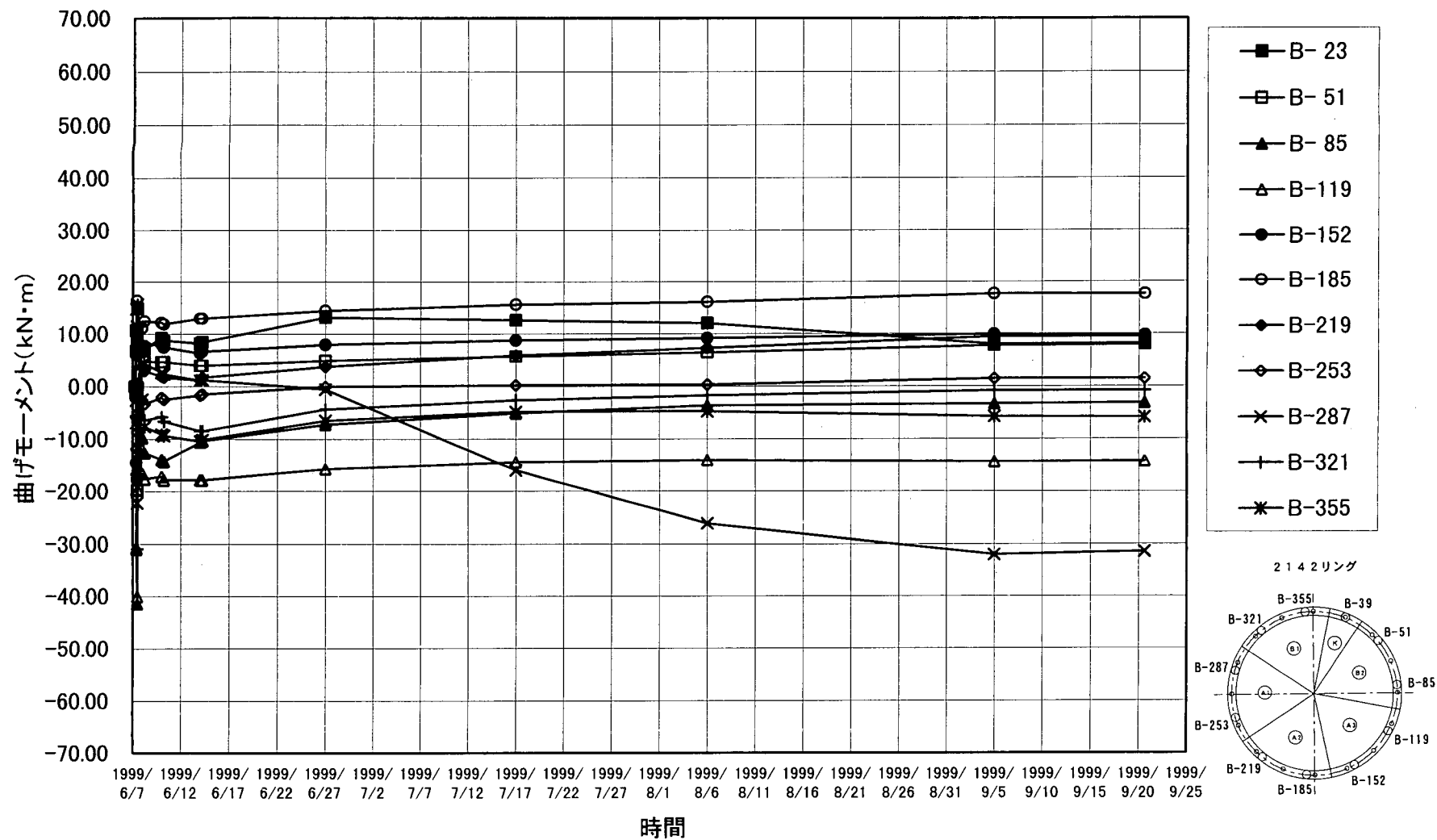


図-3. 27(2) 曲げモーメントの経時変化(2142リング)

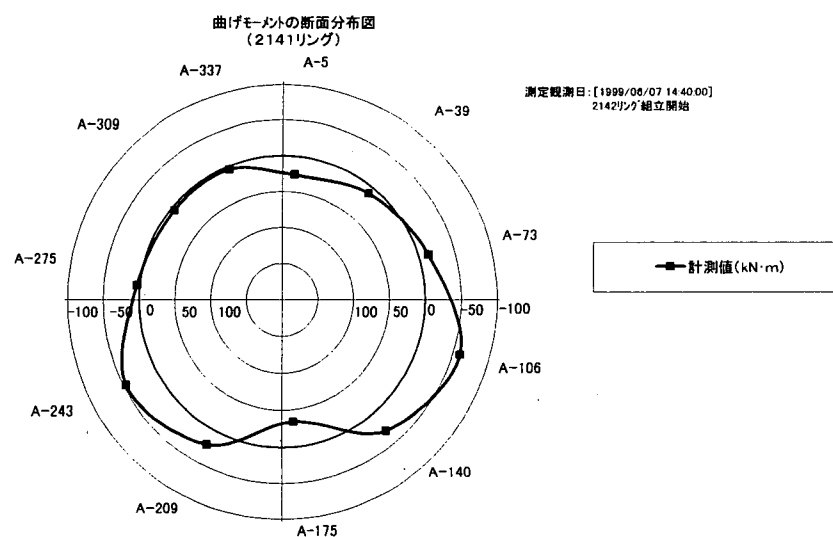
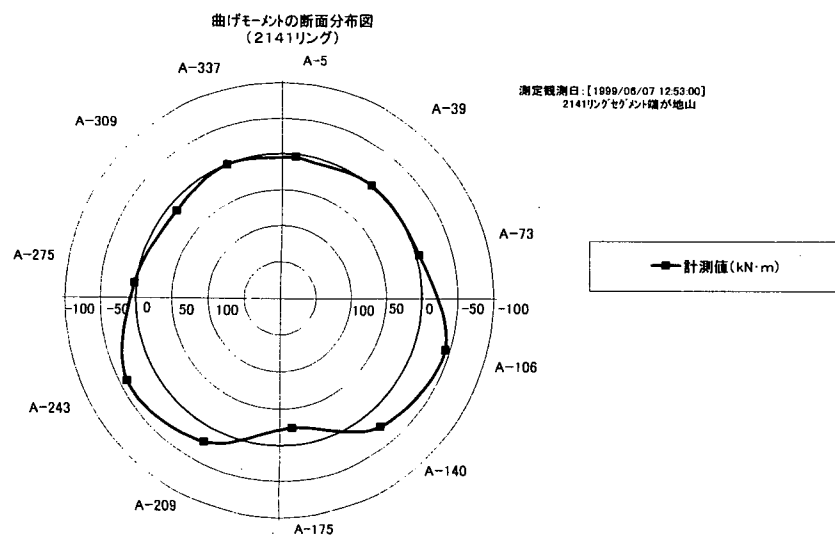
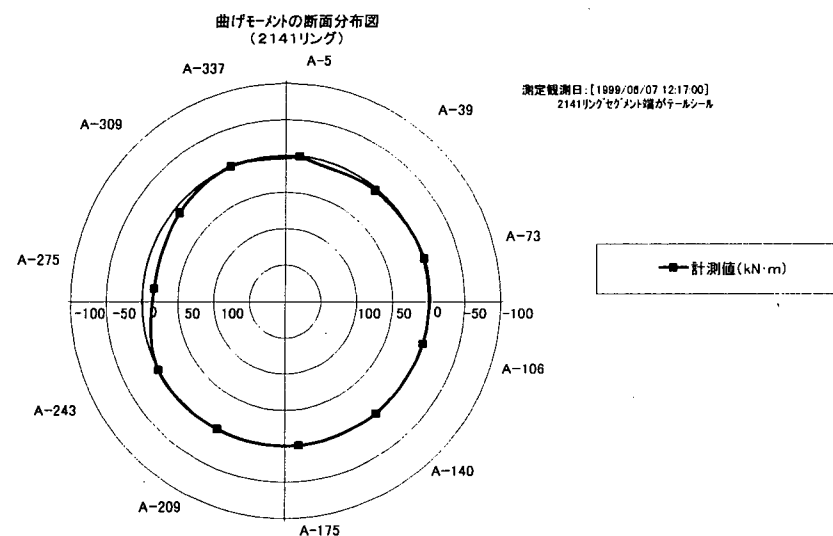
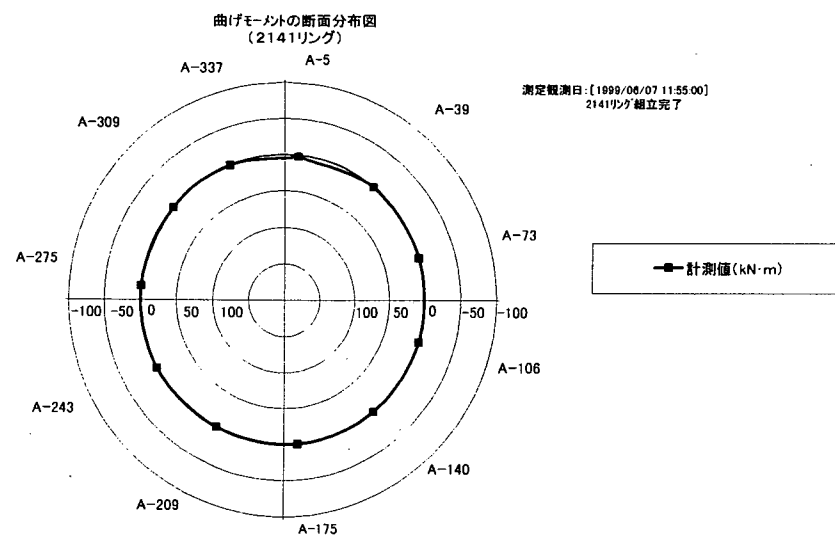
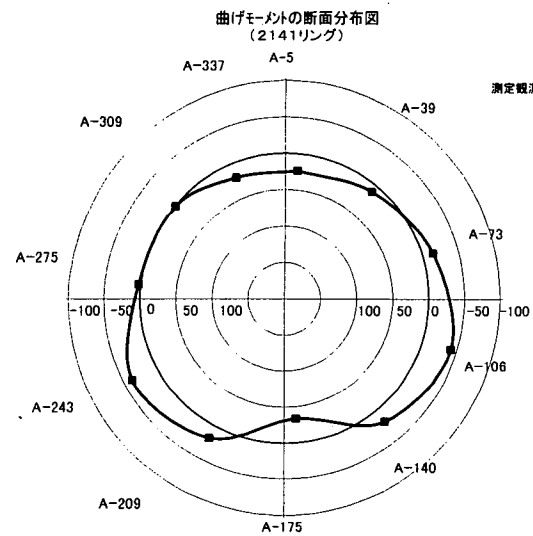
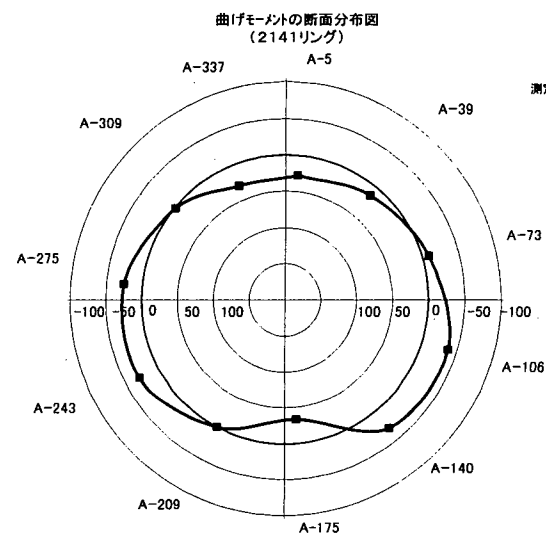


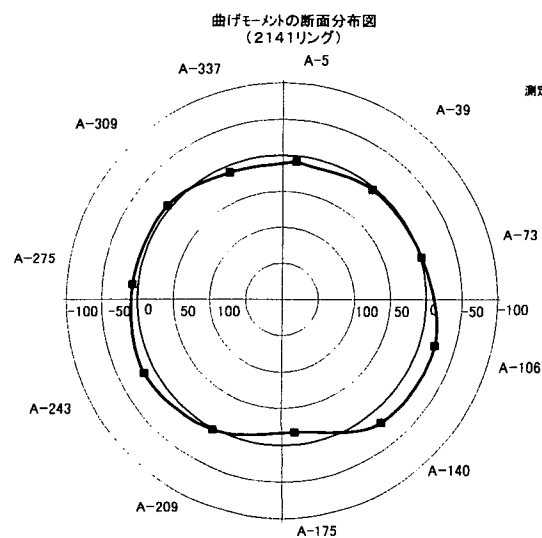
図-3. 28(1) 曲げモーメントの断面分布図(2141リング)



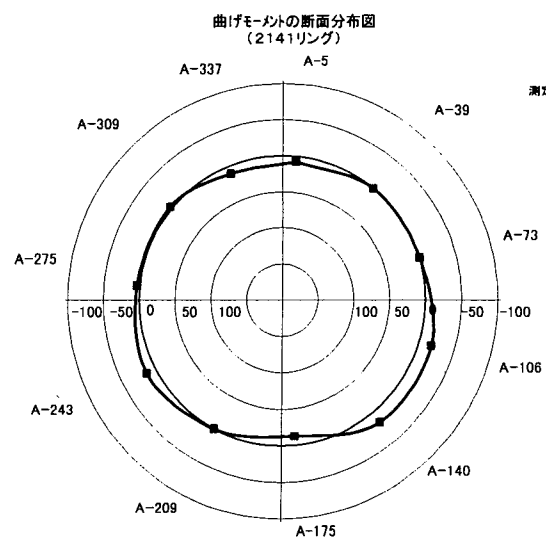
■ 計測値 (kN·m)



■ 計測値 (kN·m)



■ 計測値 (kN·m)



■ 計測値 (kN·m)

図-3. 28(2) 曲げモーメントの断面分布図(2141リング)

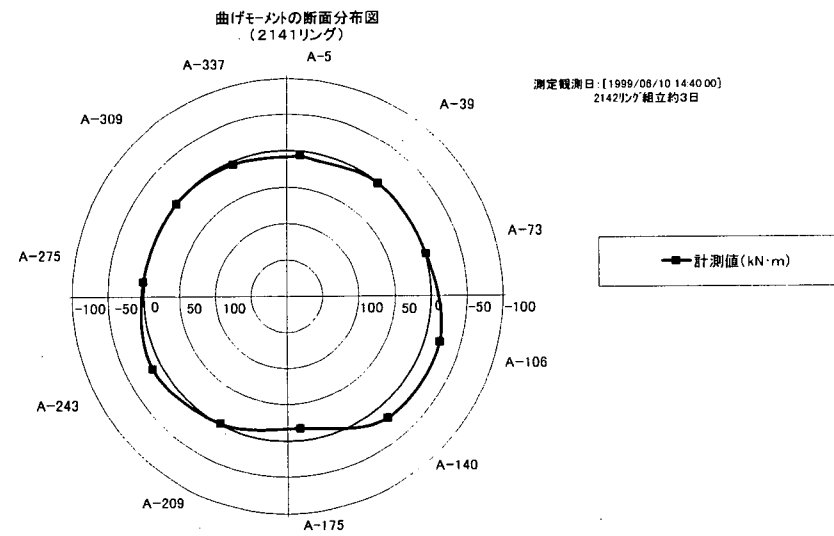
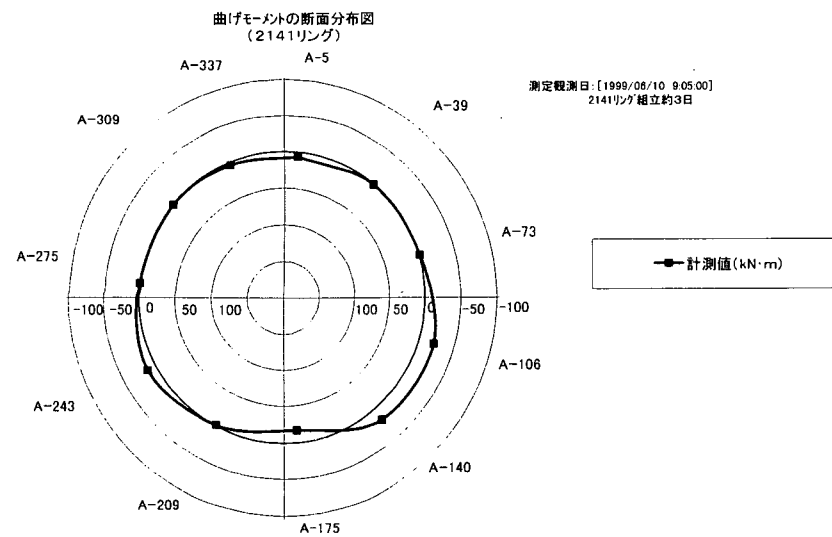
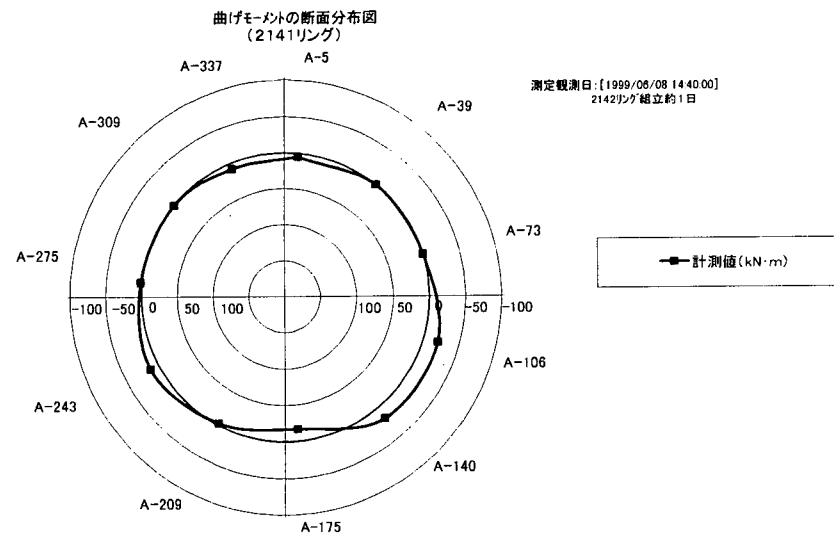
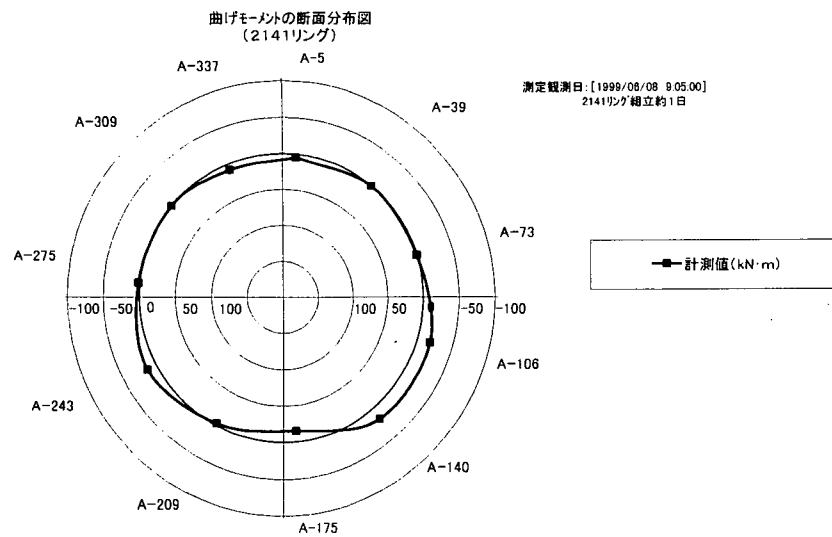


図-3. 28(3) 曲げモーメントの断面分布図(2141リング)

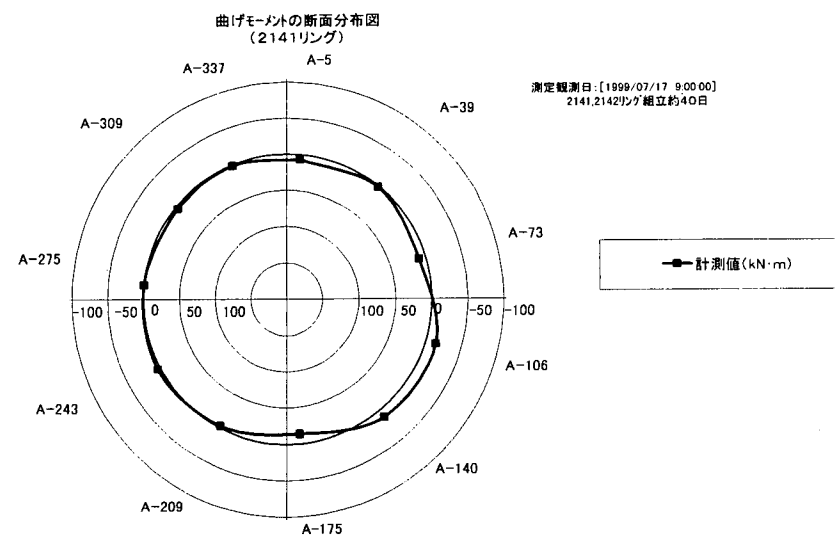
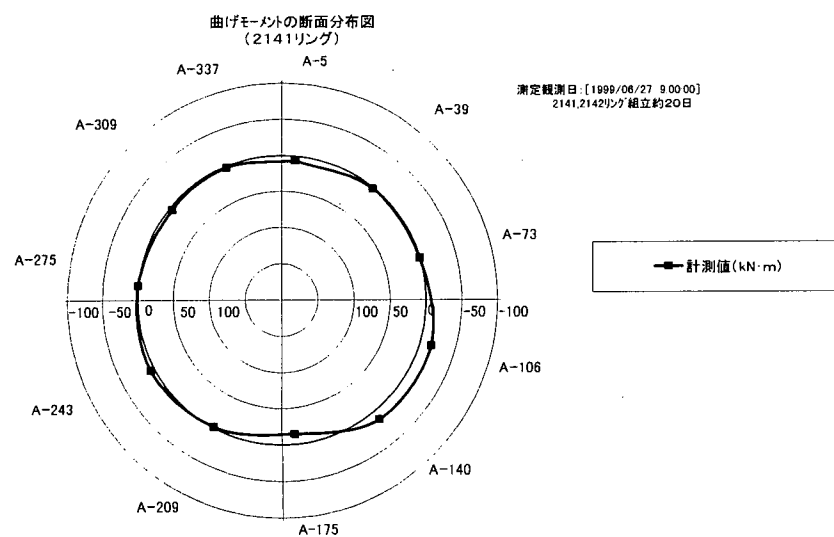
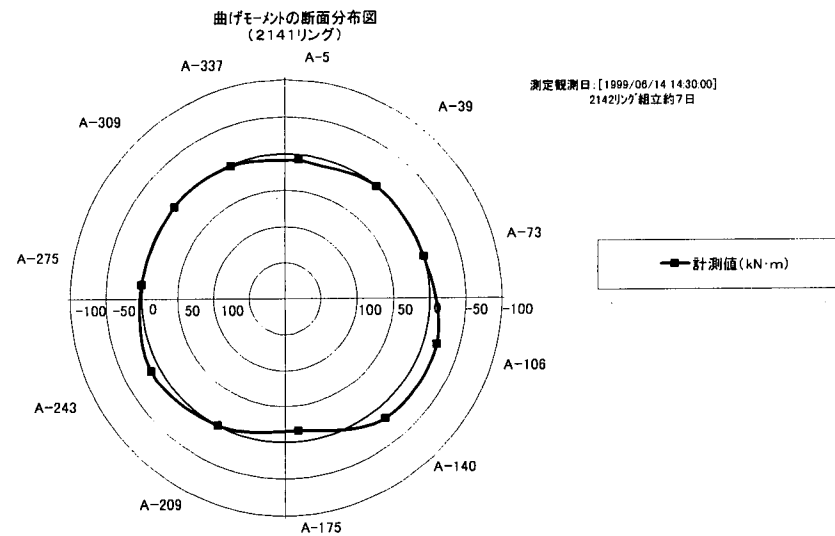
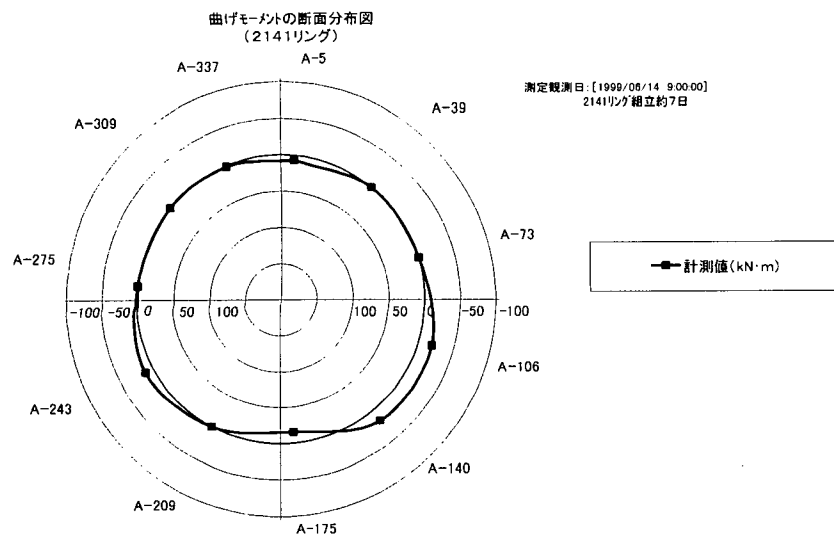


図-3. 28(4) 曲げモーメントの断面分布図(2141リング)

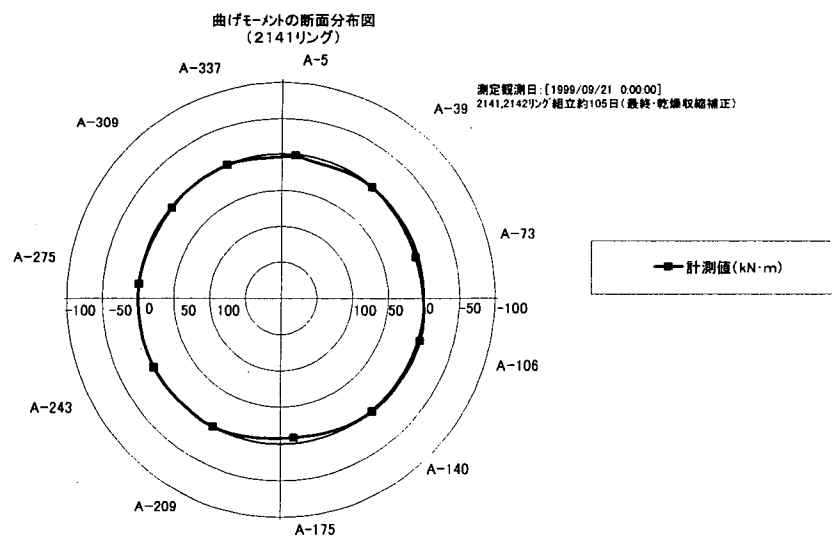
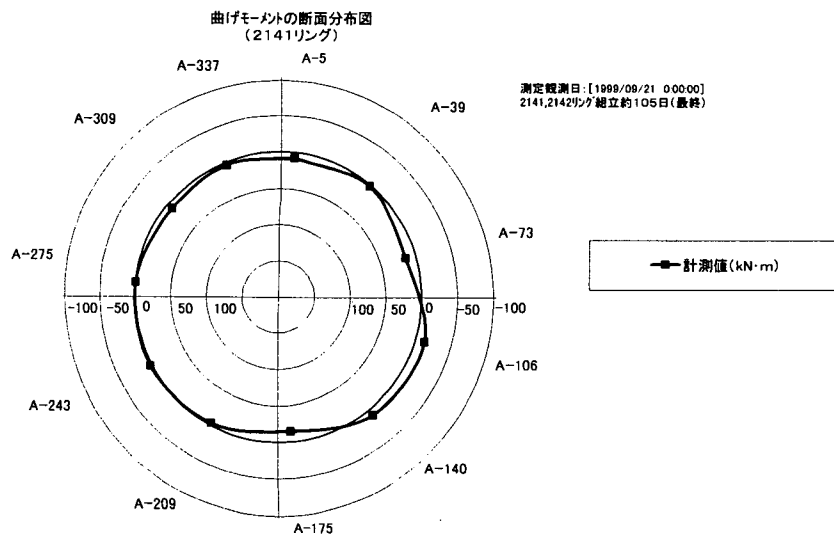
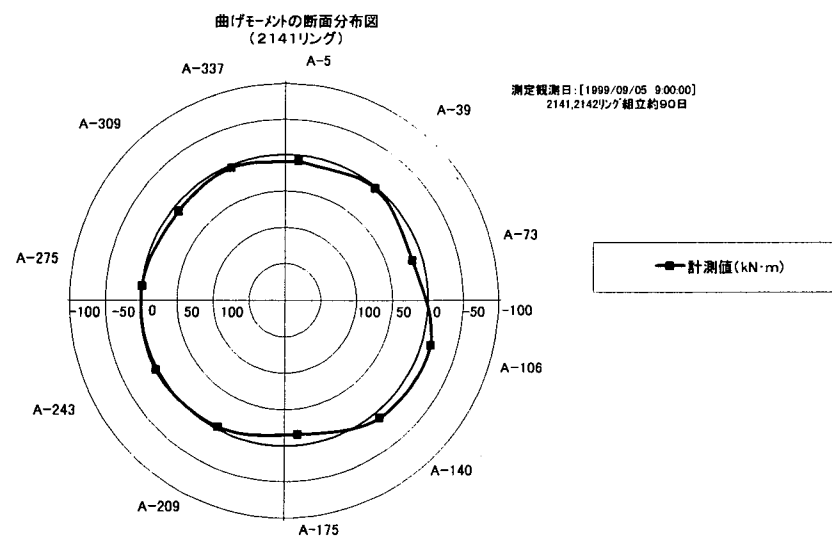
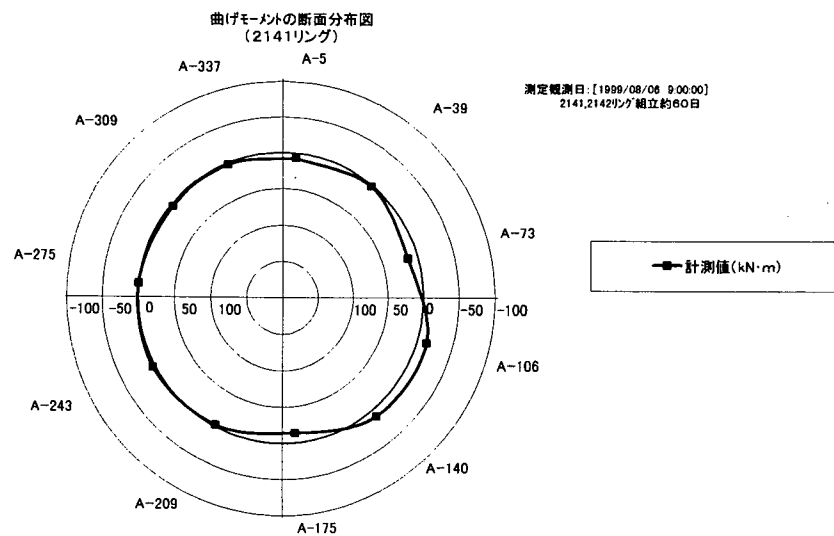


図-3. 28(5) 曲げモーメントの断面分布図(2141リング)

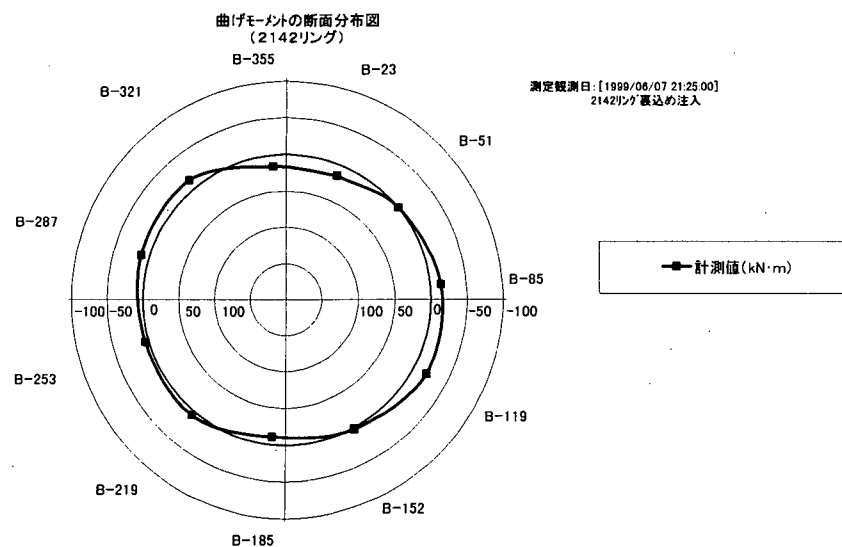
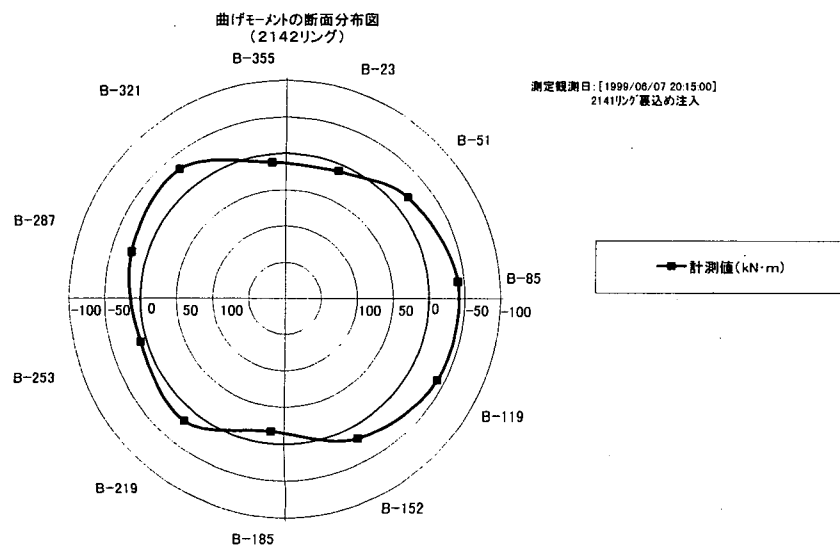
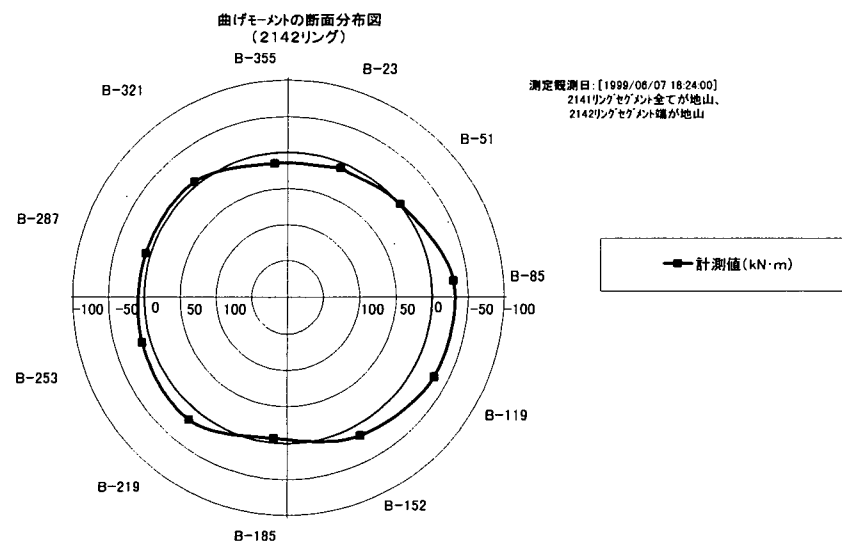
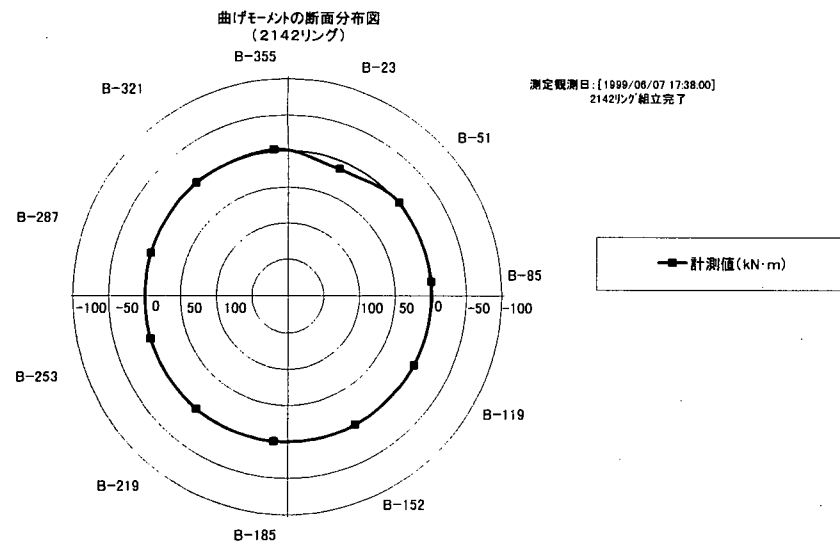


図-3. 29(1) 曲げモーメントの断面分布図(2142リング)

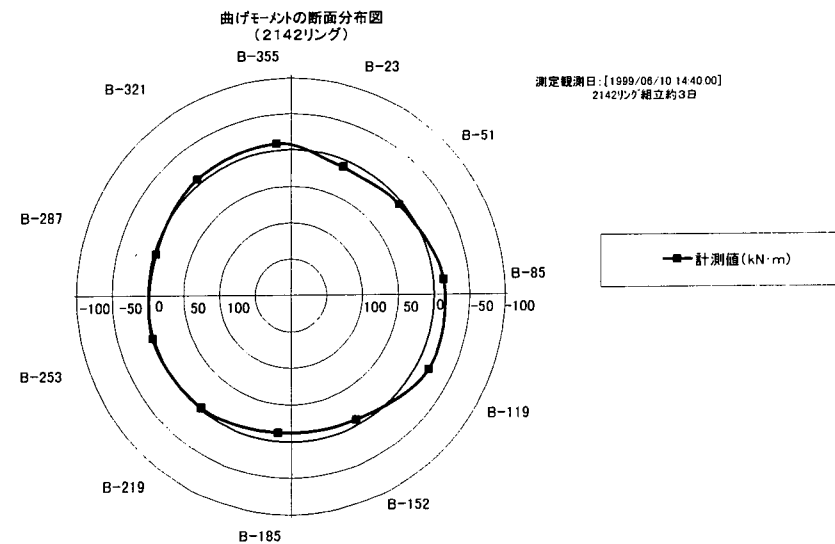
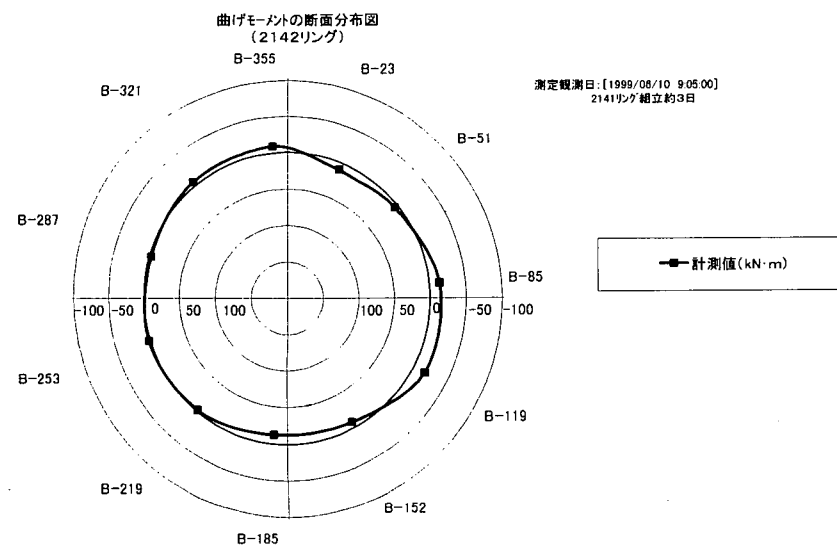
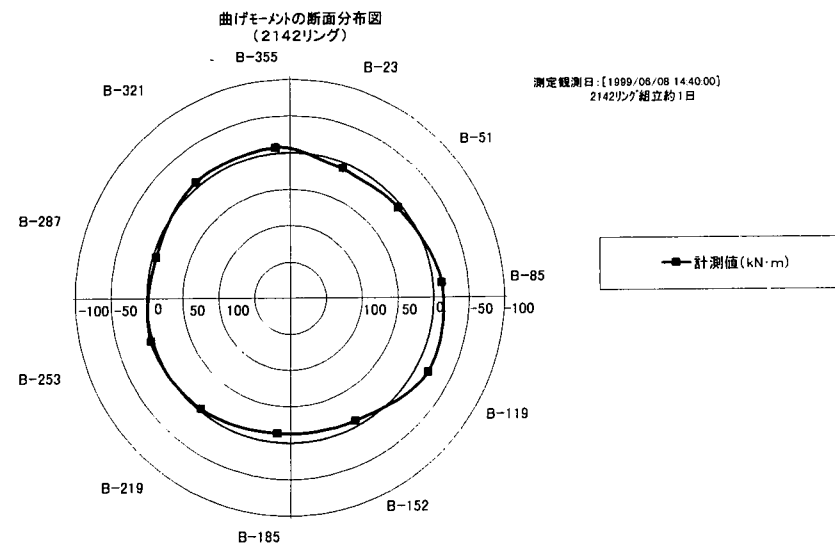
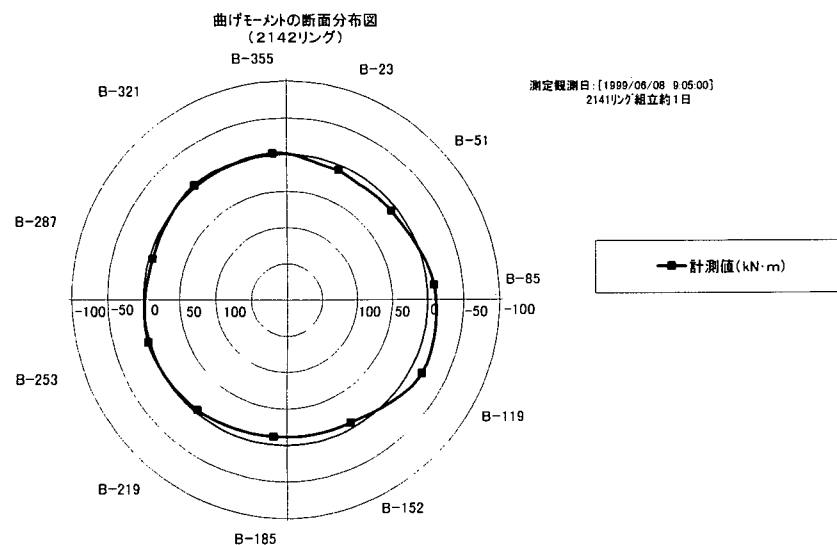


図-3. 29(2) 曲げモーメントの断面分布図(2142リング)

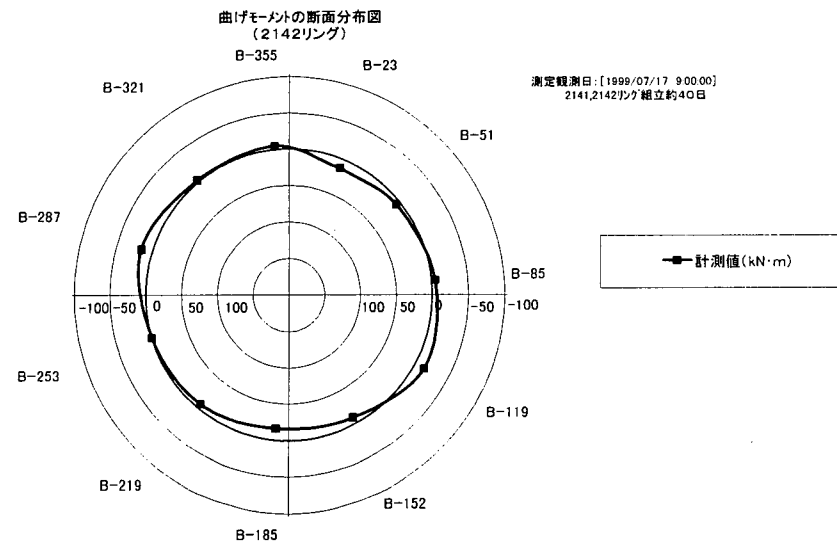
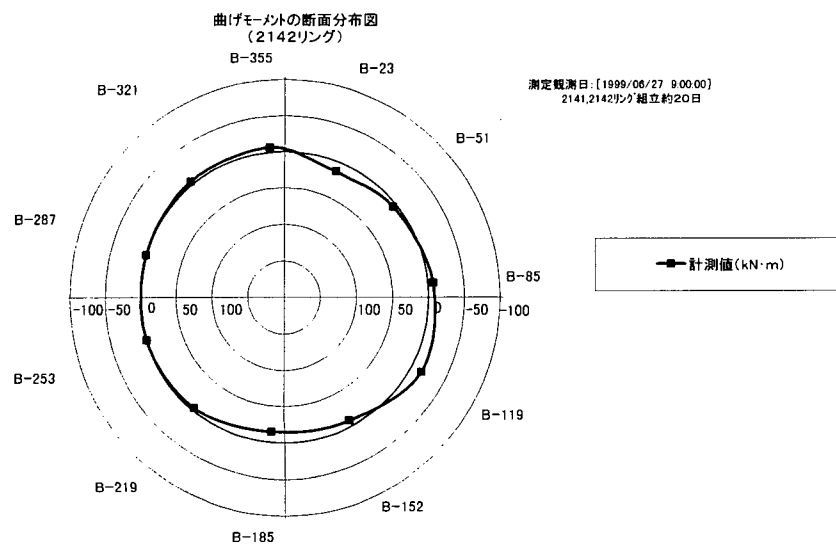
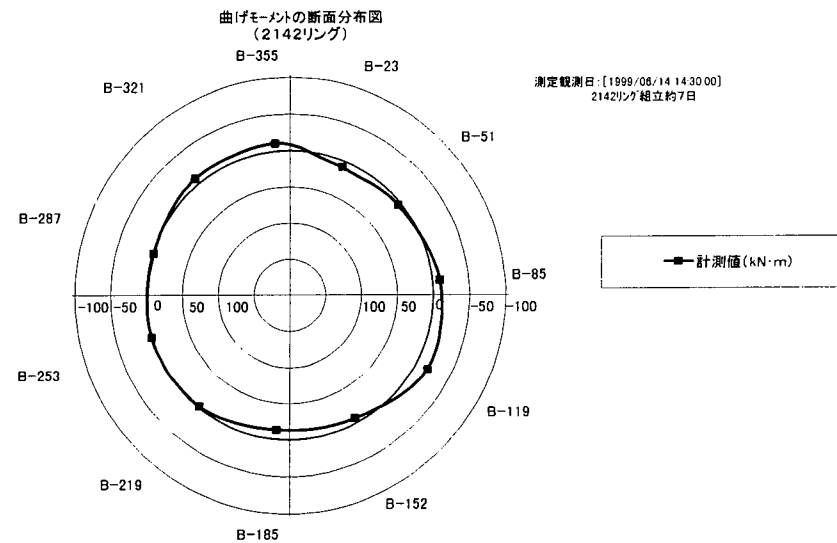
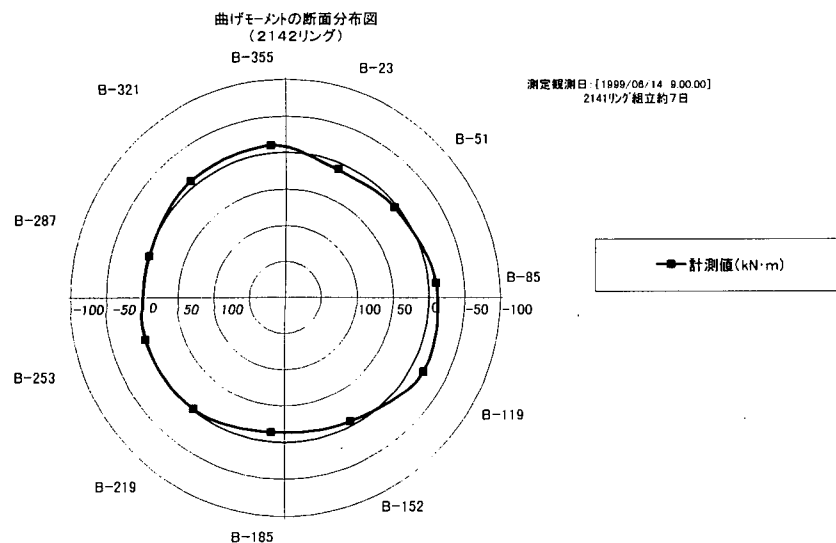


図-3. 29(3) 曲げモーメントの断面分布図(2142リング)

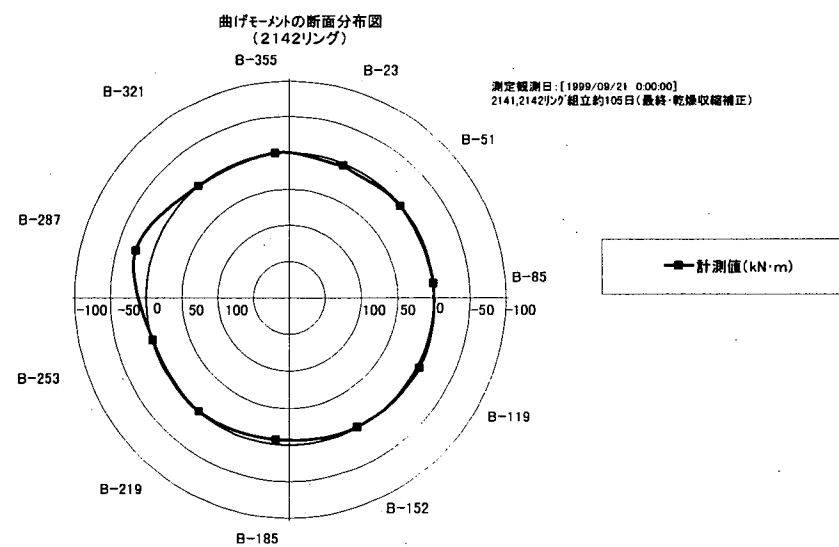
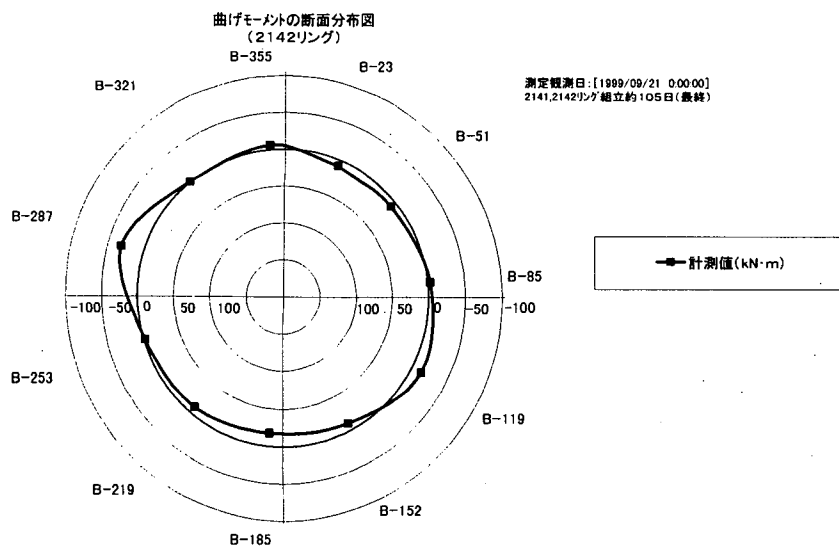
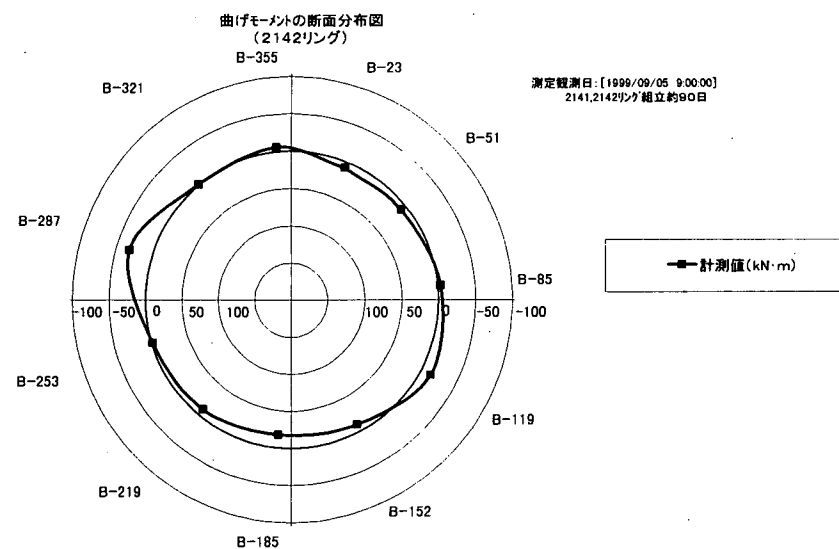
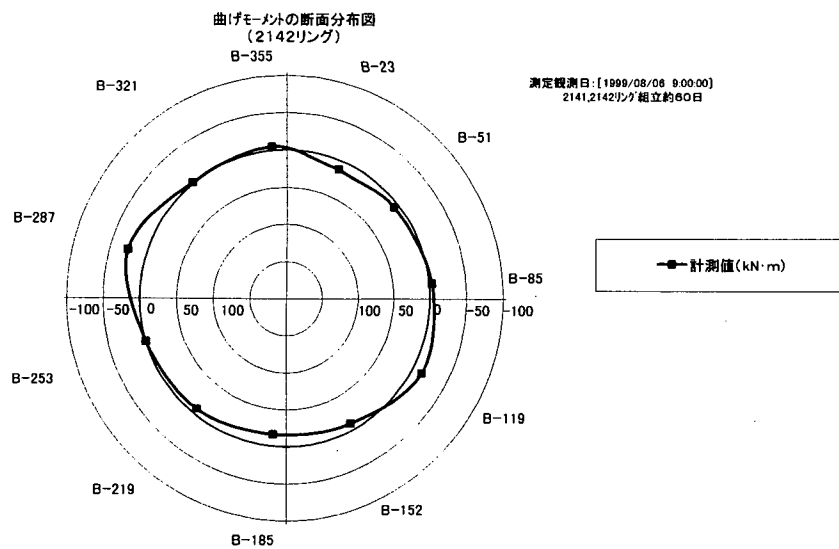


図-3. 29(4) 曲げモーメントの断面分布図(2142リング)

表-3. 12(1) 周方向の鉄筋応力より算出した各点の軸力

楠味美共同溝

軸力: N(kN)

2141リング

(圧縮+, 引張-)

状態	日付	時間	2141リング 経過時間(日)	計測点										
				A-5	A-39	A-73	A-106	A-140	A-175	A-209	A-243	A-275	A-309	A-337
9:09 2141リング組立開始	1999/6/7	9:05:30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11:55 2141リング組立完了	1999/6/7	11:55:00	0.12	18.42	-4.44	-5.22	-5.22	-6.26	-10.18	5.67	-3.39	-7.31	-11.48	-9.92
12:17 2141リングセグメント端がテールシール(ジャッキストローク150mm)	1999/6/7	12:17:00	0.13	-3.37	56.66	41.96	-8.04	-19.31	-18.53	-8.61	-1.66	158.56	62.71	-31.83
12:53 2141リングセグメント端が地山(ジャッキストローク1000mm)	1999/6/7	12:53:00	0.16	310.20	202.17	91.32	576.23	340.12	102.14	365.80	587.77	-31.44	100.75	-15.66
14:40 2142リング組立開始	1999/6/7	14:40:00	0.23	426.19	157.16	217.92	849.82	538.67	230.67	337.98	648.86	-13.19	54.61	32.33
17:38 2142リング組立完了	1999/6/7	17:38:00	0.36	321.06	138.47	208.92	556.45	268.35	176.21	245.24	394.23	-23.72	74.08	187.24
18:24 2141リングセグメント全てが地山、2142リングセグメント端が地山(ジャッキストローク1000mm)	1999/6/7	18:24:00	0.39	480.54	253.35	214.07	557.39	459.95	218.21	288.59	367.72	296.86	430.57	329.80
20:14 2141リング裏込め注入(B1セグメントから)	1999/6/7	20:15:00	0.46	79.67	32.09	23.36	243.30	214.80	26.63	20.00	134.63	34.04	51.10	48.18
21:22 2142リング裏込め注入(B2セグメントから)	1999/6/7	21:25:00	0.51	78.66	-4.96	2.86	209.34	199.62	-8.38	0.09	126.77	0.55	32.61	56.84
2141リング組立約1日	1999/6/8	9:05:00	1.00	50.97	-7.80	-2.87	217.21	201.47	16.44	43.25	122.71	-22.87	-12.00	26.37
2142リング組立約1日	1999/6/8	14:40:00	1.23	75.58	-6.78	-1.59	250.82	204.53	24.12	23.22	107.76	-23.02	-8.61	16.53
2141リング組立約3日	1999/6/10	9:05:00	3.00	93.13	-4.85	12.50	252.48	199.77	21.94	5.67	103.57	-30.78	-8.87	-3.51
2142リング組立約3日	1999/6/10	14:40:00	3.23	89.79	-4.70	12.50	248.20	207.52	19.75	5.67	106.88	-30.11	-8.61	-3.29
2141リング組立約7日	1999/6/14	9:00:00	7.00	99.33	-3.91	-3.39	222.16	190.20	20.84	-2.61	100.01	-34.96	-8.87	-10.10
2142リング組立約7日	1999/6/14	14:30:00	7.23	99.33	-4.15	-3.39	213.23	185.71	18.77	-2.99	93.21	-34.96	-9.13	-10.22
2141,2142リング組立約20日	1999/6/27	9:00:00	20.00	70.05	-1.33	-6.00	177.10	131.02	15.75	5.70	20.26	-40.44	22.96	3.72
2141,2142リング組立約40日	1999/7/17	9:00:00	40.00	60.26	-1.24	122.25	153.72	105.49	24.44	14.37	2.82	-42.79	14.27	8.52
2141,2142リング組立約60日	1999/8/6	9:00:00	60.00	58.93	1.18	179.68	142.15	91.28	31.64	14.33	-3.95	-43.57	1.88	14.73
2141,2142リング組立約90日	1999/9/5	9:00:00	90.00	69.12	3.49	183.26	135.37	77.67	46.84	24.01	-6.17	-43.05	67.15	36.78
2141,2142リング組立約105日(最終)	1999/9/21	0:00:00	105.62	65.71	3.46	186.85	135.37	74.13	41.70	20.62	-10.07	-43.05	67.01	31.44
2141,2142リング組立約105日(最終・乾燥収縮補正)	1999/9/21	0:00:00	105.62	-32.72	-33.76	4.29	-11.91	-34.09	-56.37	-30.11	-47.59	-67.68	-35.60	-28.28

表-3. 12(2) 周方向の鉄筋応力より算出した各点の軸力

楠味美共同溝

軸力: N(kN)

2142リング

(圧縮+, 引張-)

状態	日付	時間	2142リング 経過時間(日)	計測点										
				B-23	B-51	B-85	B-119	B-152	B-185	B-219	B-253	B-287	B-321	B-355
14:40 2142リング組立開始	1999/6/7	14:40:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
17:38 2142リング組立完了	1999/6/7	17:38:00	0.12	84.90	12.70	16.78	-2.99	-6.26	-11.22	-7.83	-4.44	-3.91	8.84	36.02
18:24 2141リングセグメント全てが地山、2142リングセグメント端が地山(ジャッキストローク1000mm)	1999/6/7	18:24:00	0.16	90.80	8.59	393.71	387.64	180.99	58.21	186.76	120.00	88.93	89.80	222.83
20:14 2141リング裏込め注入(B1セグメントから)	1999/6/7	20:15:00	0.23	122.25	289.50	562.50	541.69	301.44	251.47	254.46	79.87	336.46	483.66	155.72
21:22 2142リング裏込め注入(B2セグメントから)	1999/6/7	21:25:00	0.28	233.84	-1.68	191.43	309.13	239.21	152.06	113.18	56.55	179.36	275.14	221.70
2141リング組立約1日	1999/6/8	9:05:00	0.77	34.03	97.02	143.06	259.45	189.83	152.18	143.52	36.02	62.76	285.50	29.13
2142リング組立約1日	1999/6/8	14:40:00	1.00	6.96	61.98	184.90	266.07	181.44	164.42	92.60	42.23	60.38	515.45	104.52
2141リング組立約3日	1999/6/10	9:05:00	2.77	-6.51	52.91	197.33	253.73	152.55	148.97	42.33	18.75	36.02	466.07	124.29
2142リング組立約3日	1999/6/10	14:40:00	3.00	-10.80	52.91	199.63	260.48	156.28	145.34	37.48	22.17	32.50	162.36	128.89
2141リング組立約7日	1999/6/14	9:00:00	6.76	-11.15	48.69	143.03	260.48	157.62	152.29	46.30	11.71	17.62	187.38	148.61
2142リング組立約7日	1999/6/14	14:30:00	6.99	-9.01	47.98	137.49	259.16	141.62	152.29	37.48	8.57	15.28	187.38	143.94
2141,2142リング組立約20日	1999/6/27	9:00:00	19.76	10.86	44.13	90.88	232.82	145.12	171.11	42.54	-6.78	299.39	365.75	86.26
2141,2142リング組立約40日	1999/7/17	9:00:00	39.76	21.66	49.99	63.96	221.04	159.88	188.28	67.99	-7.31	1399.74	254.64	60.33
2141,2142リング組立約60日	1999/8/6	9:00:00	59.76	25.94	56.24	44.34	219.40	172.24	197.66	88.68	-7.31	694.47	212.97	61.13
2141,2142リング組立約90日	1999/9/5	9:00:00	89.76	42.63	74.93	52.85	246.87	220.00	227.30	125.82	5.69	744.93	199.08	108.26
2141,2142リング組立約105日(最終)	1999/9/21	0:00:00	105.39	45.59	79.03	46.56	248.99	223.68	229.07	126.80	5.69	726.70	208.34	115.89
2141,2142リング組立約105日(最終・乾燥収縮補正)	1999/9/21	0:00:00	105.39	-45.44	-29.58	-22.80	16.47	-10.06	33.50	-21.07	-29.58	373.54	-15.49	-18.36

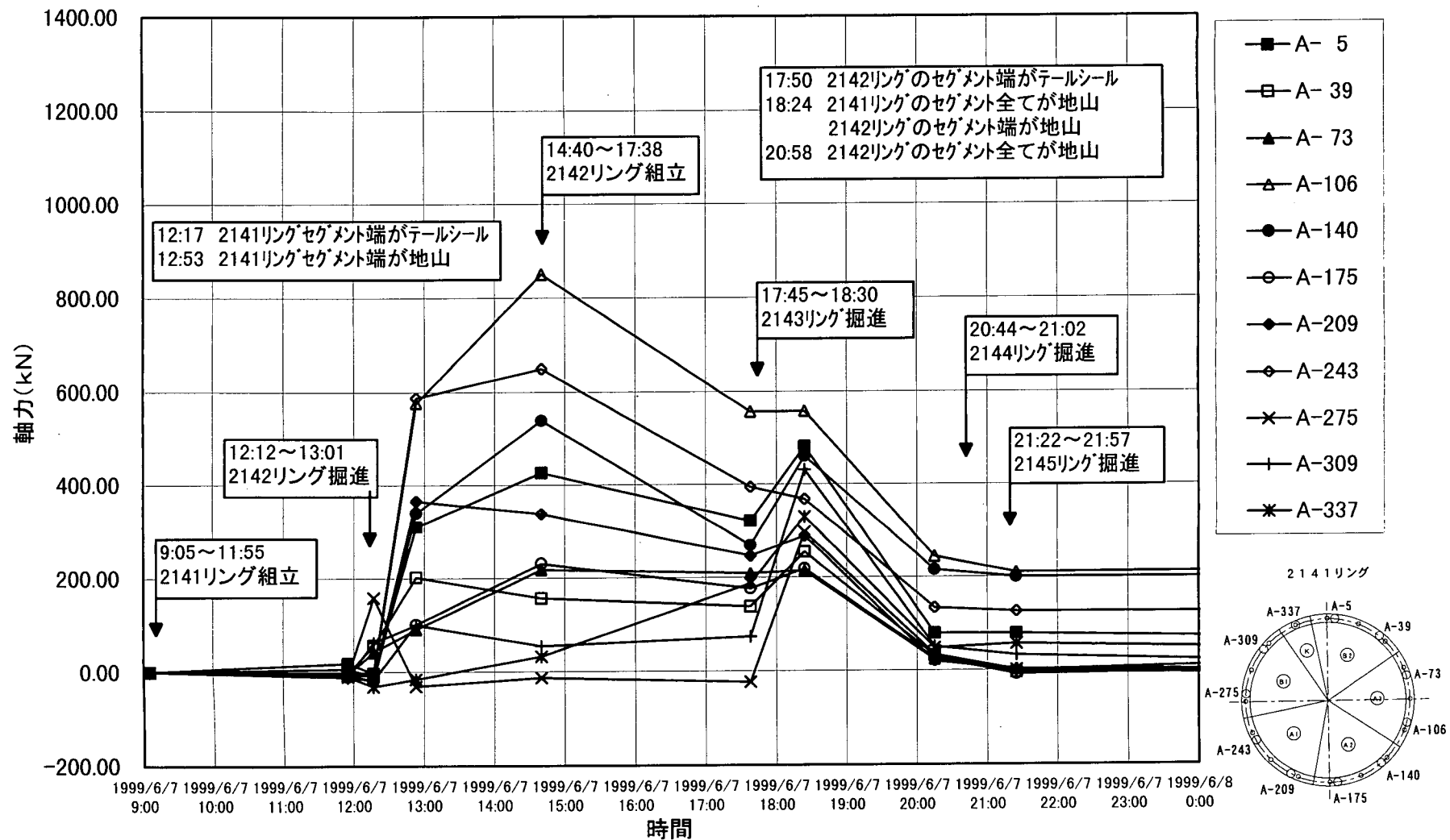


図-3. 30(1) 軸力の経時変化(2141リング)

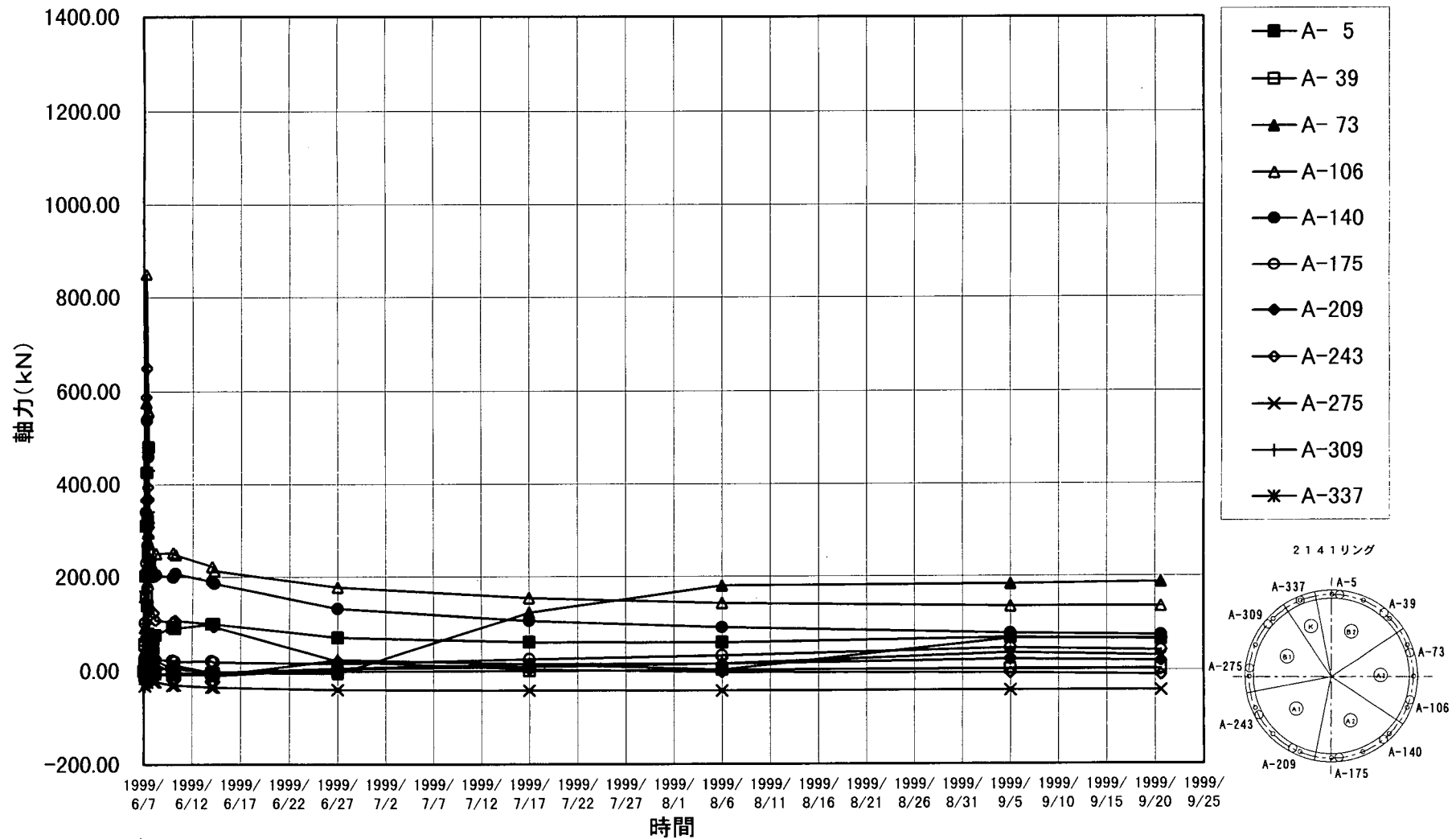


図-3. 30(2) 軸力の経時変化(2141リング)

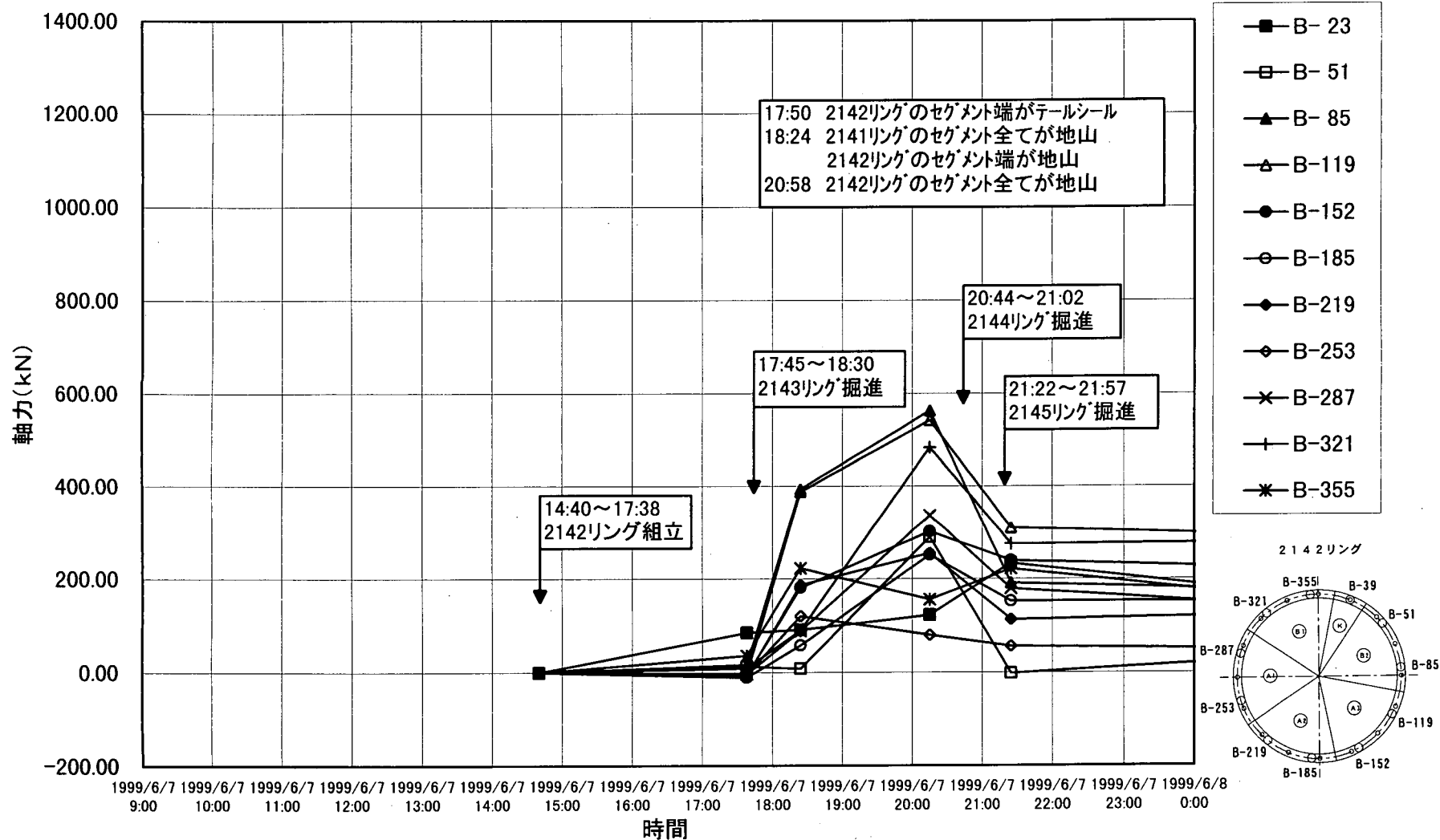


図-3. 31(1) 軸力の経時変化(2142リング)

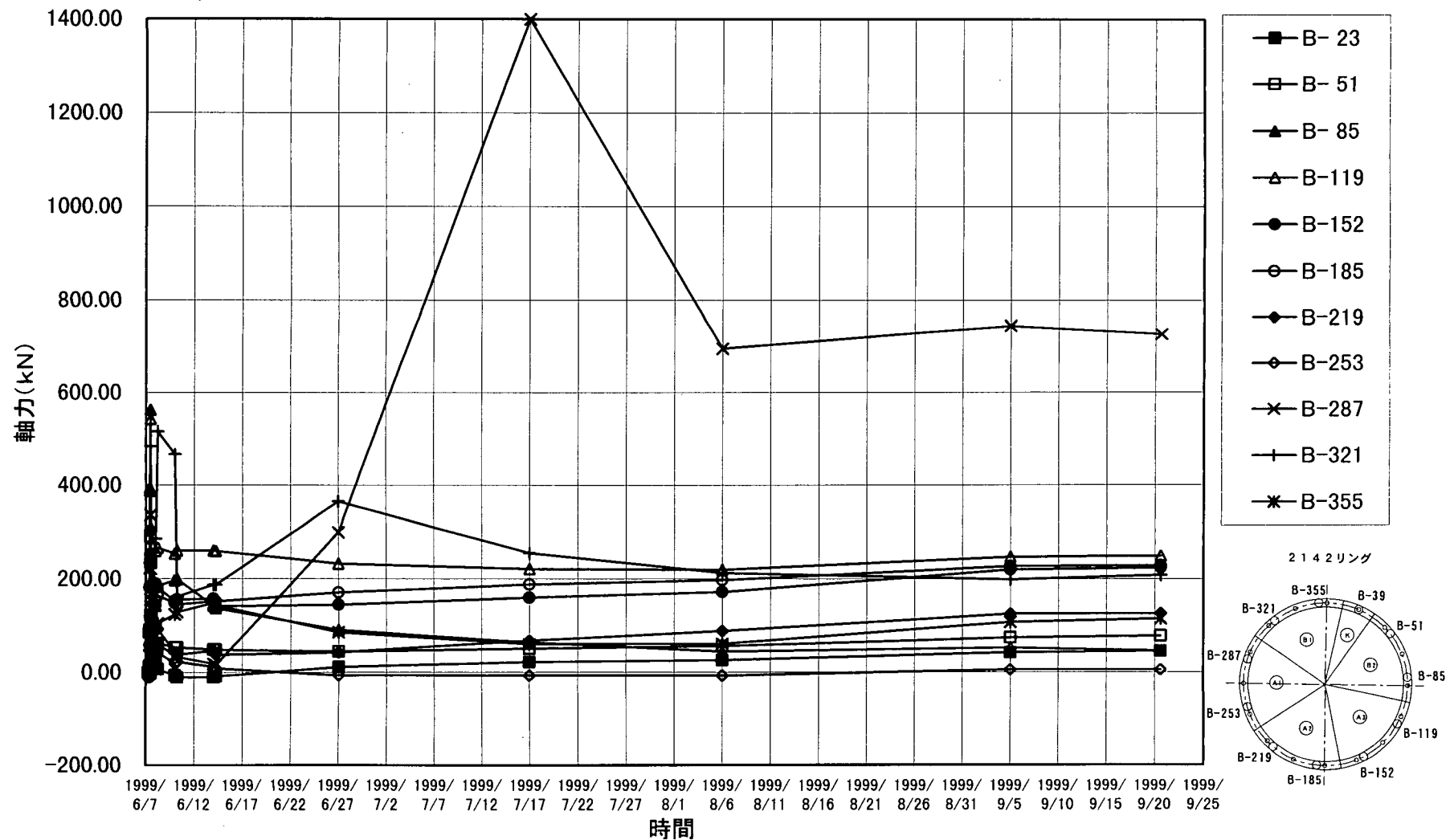


図-3. 31(2) 軸力の経時変化(2142リング)

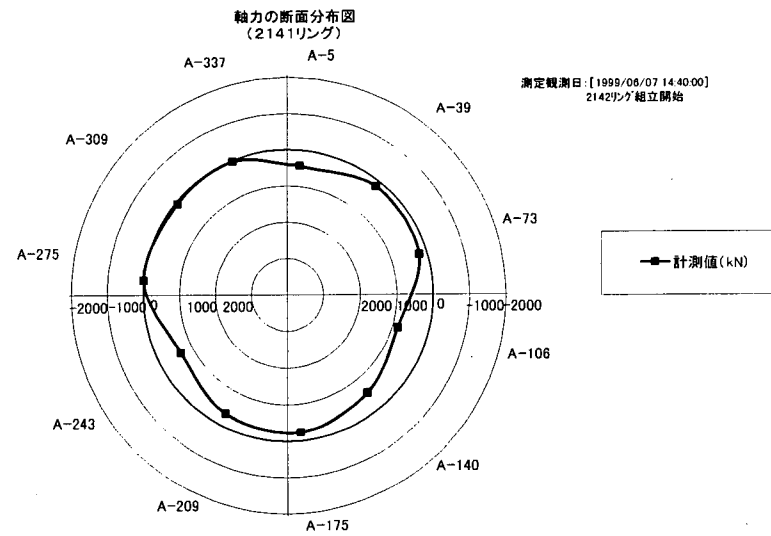
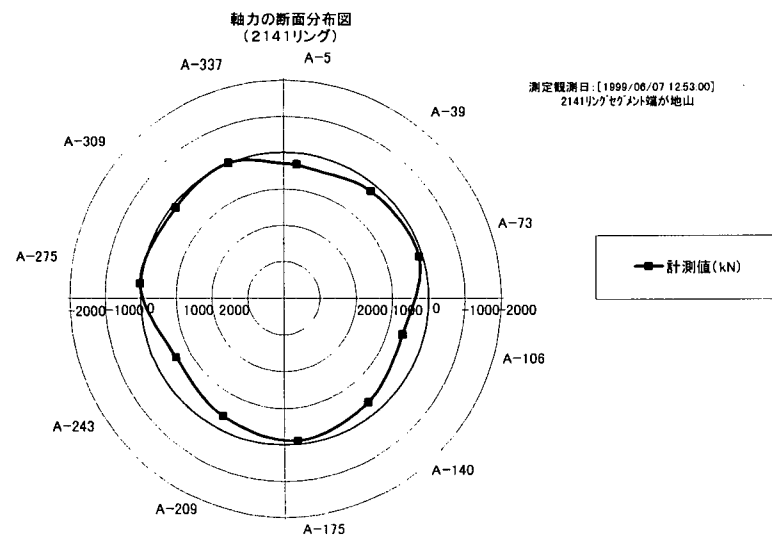
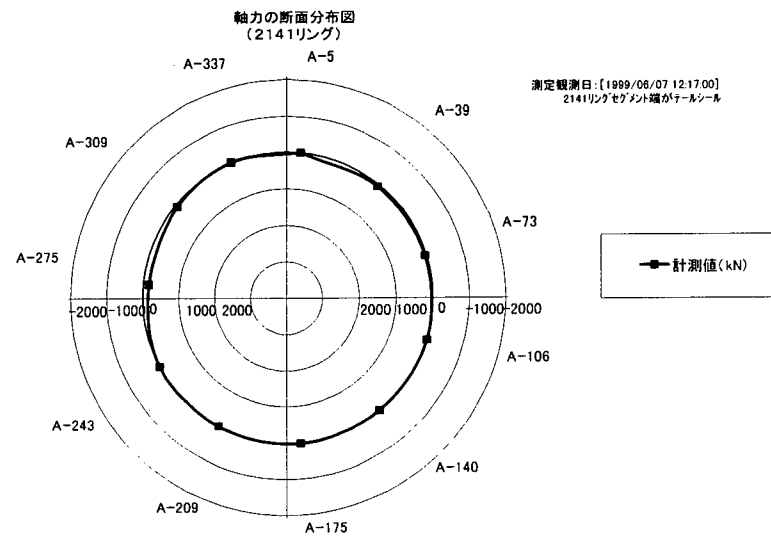
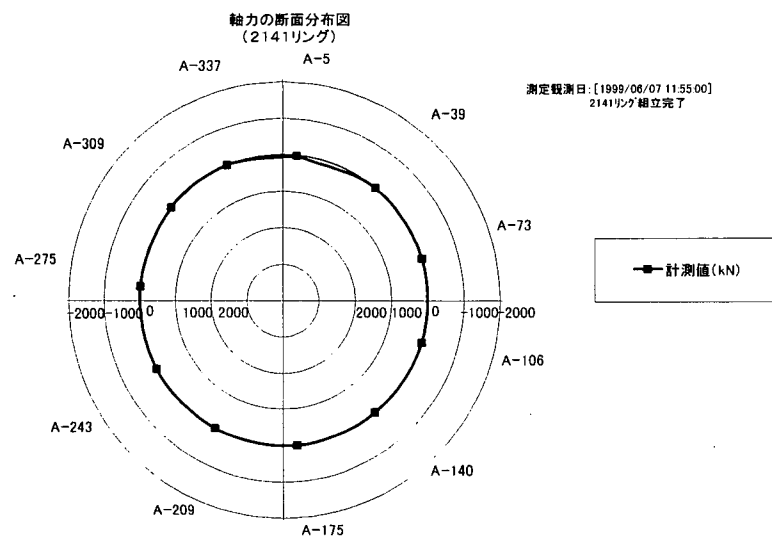


図-3. 32(1) 軸力の断面分布図(2141リング)

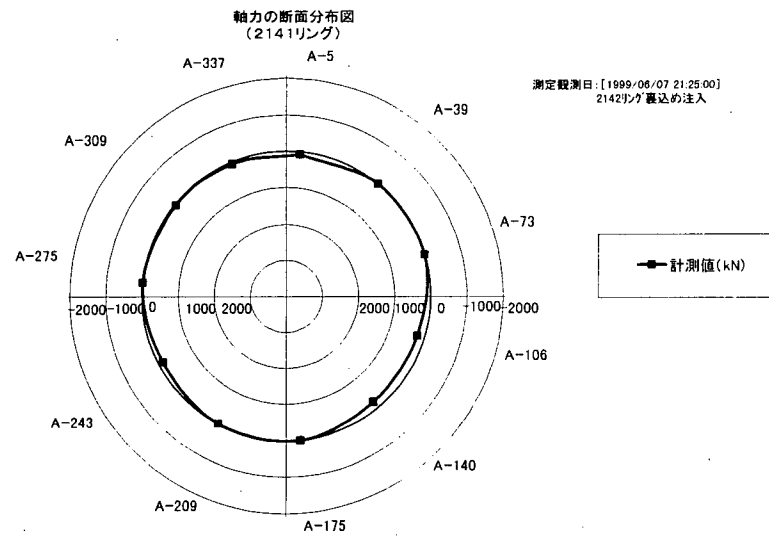
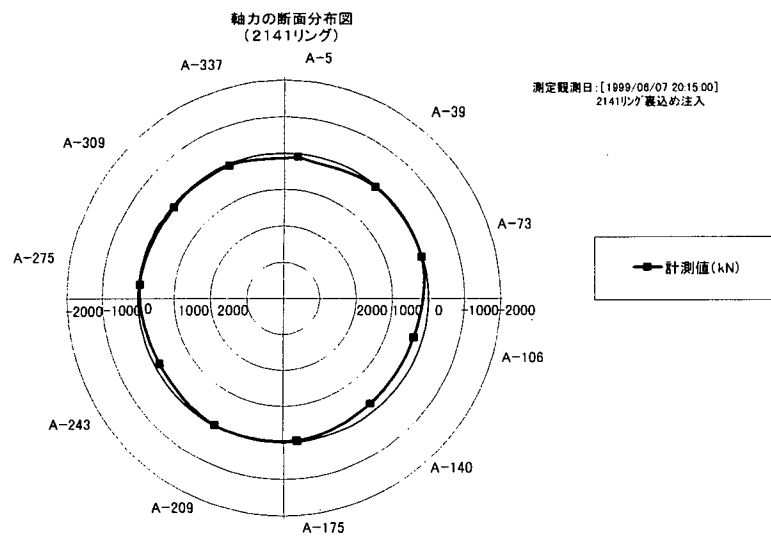
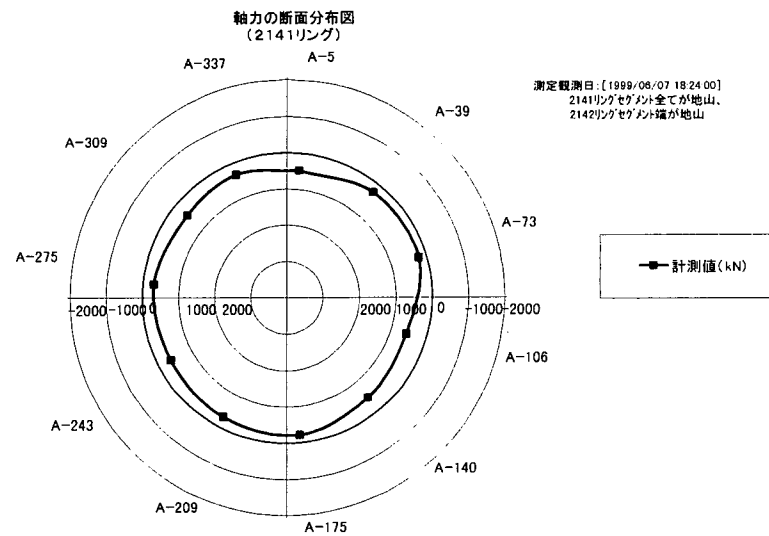
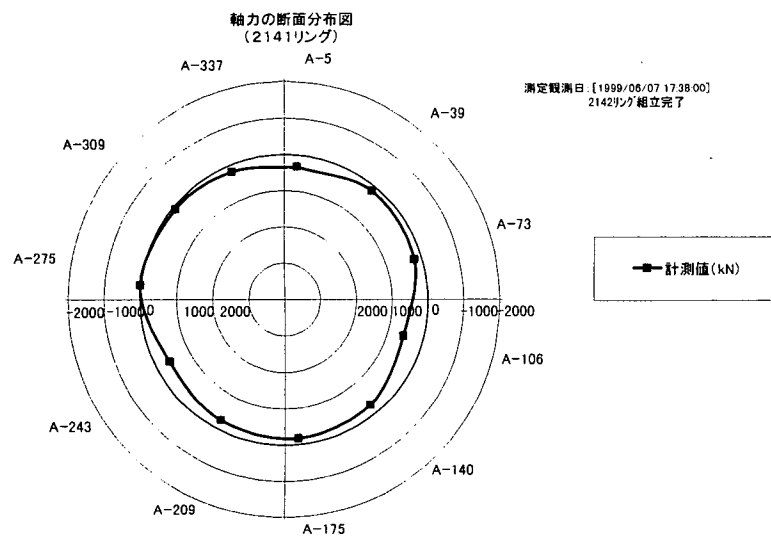


図-3. 32(2) 軸力の断面分布図(2141リング)

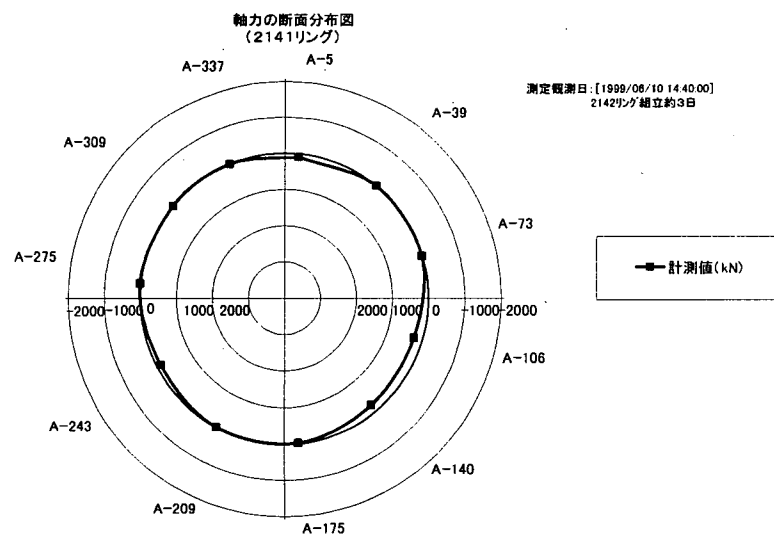
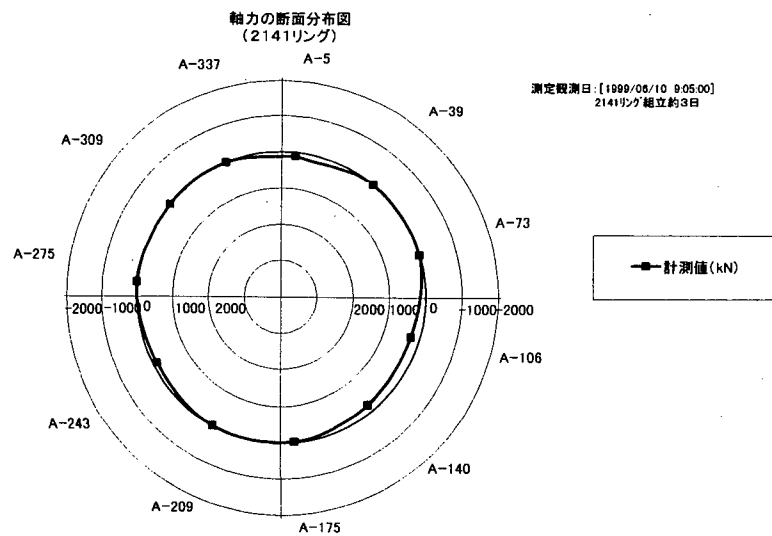
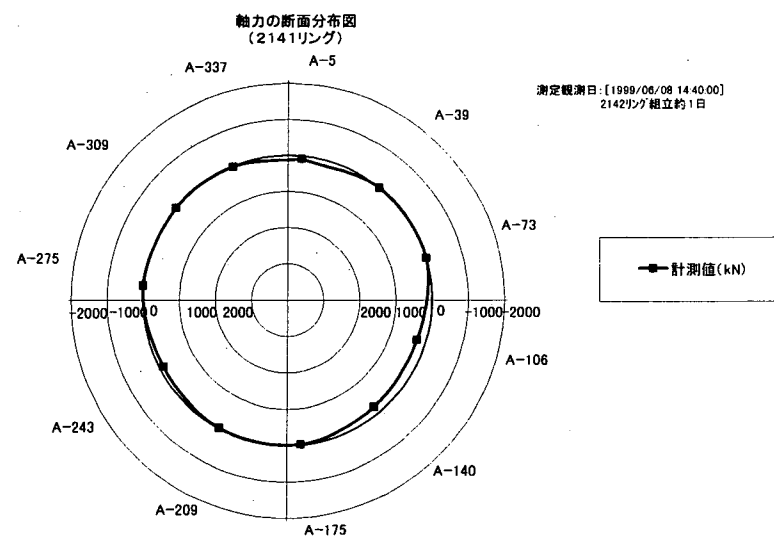
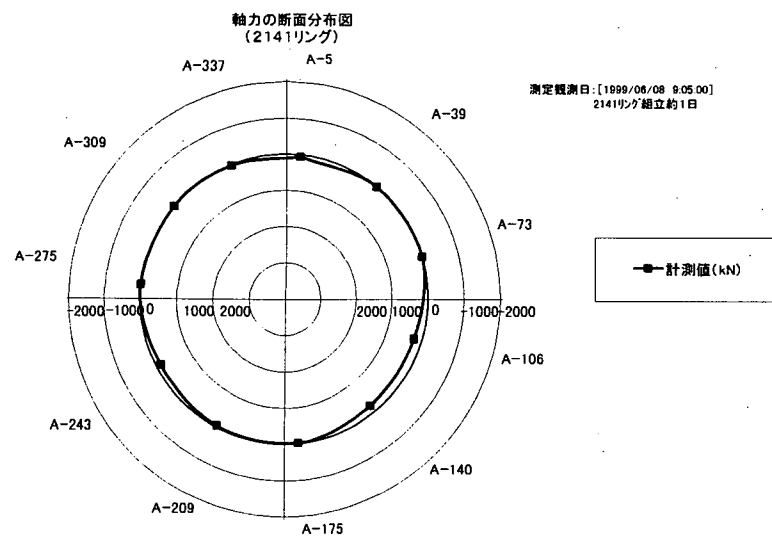


図-3. 32(3) 軸力の断面分布図(2141リング)

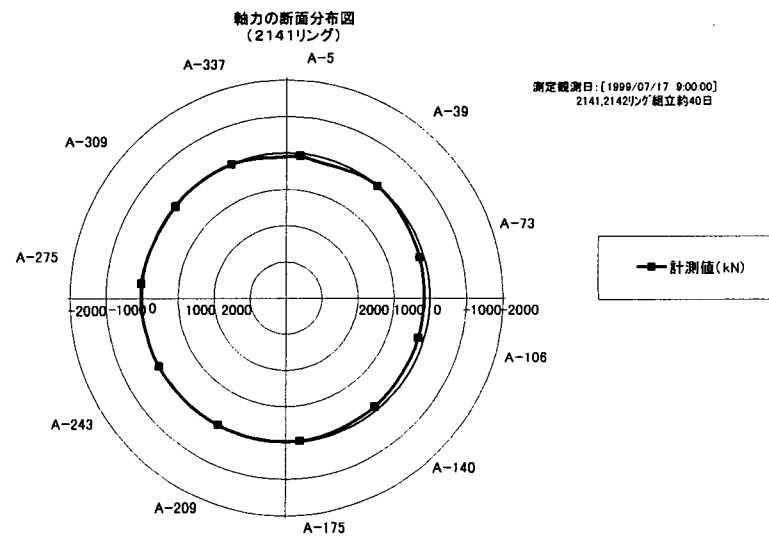
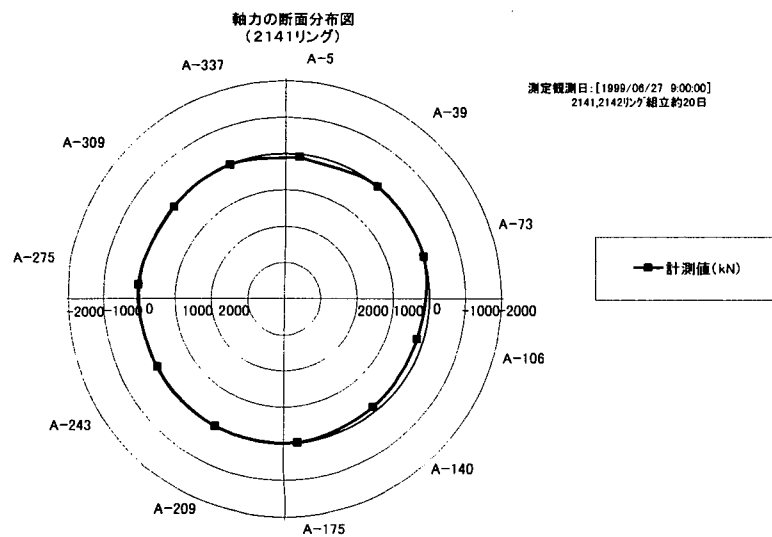
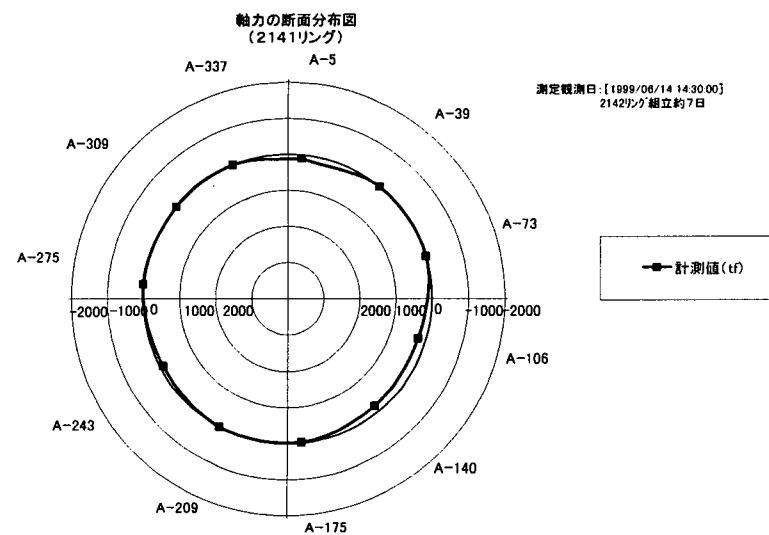
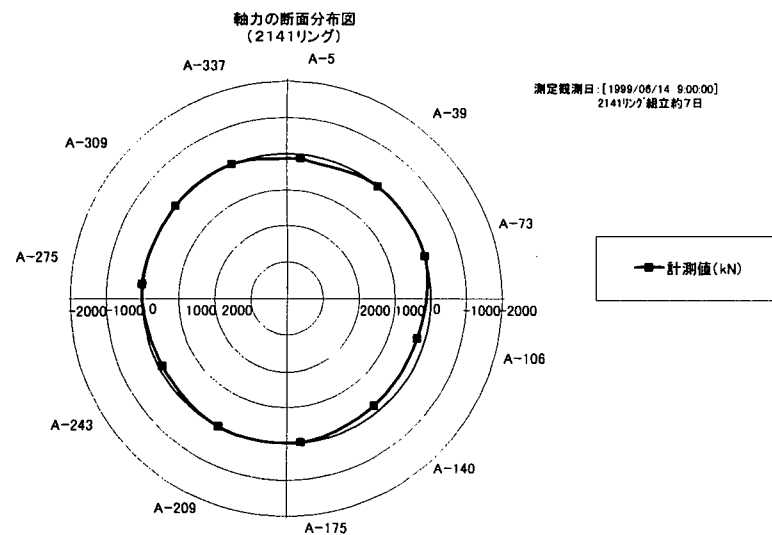


図-3. 32(4) 軸力の断面分布図(2141リング)

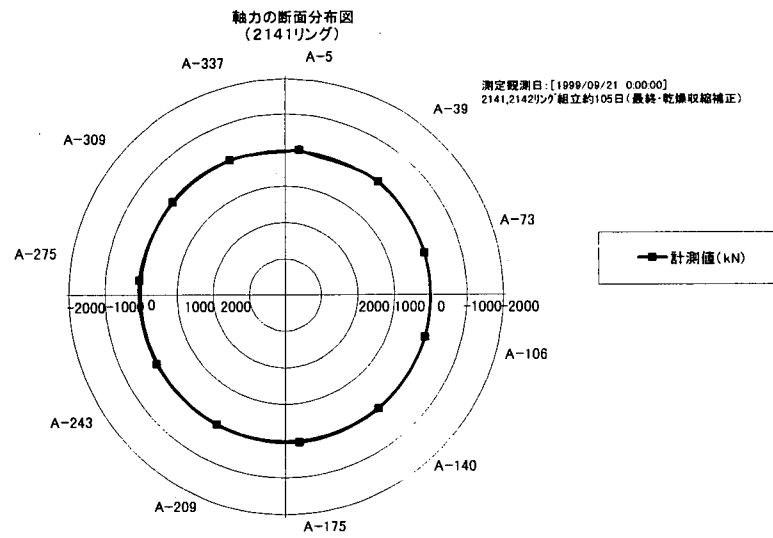
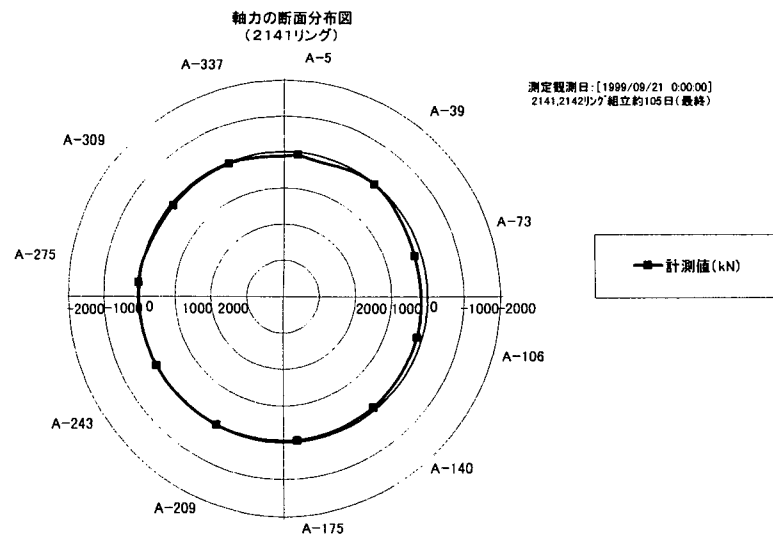
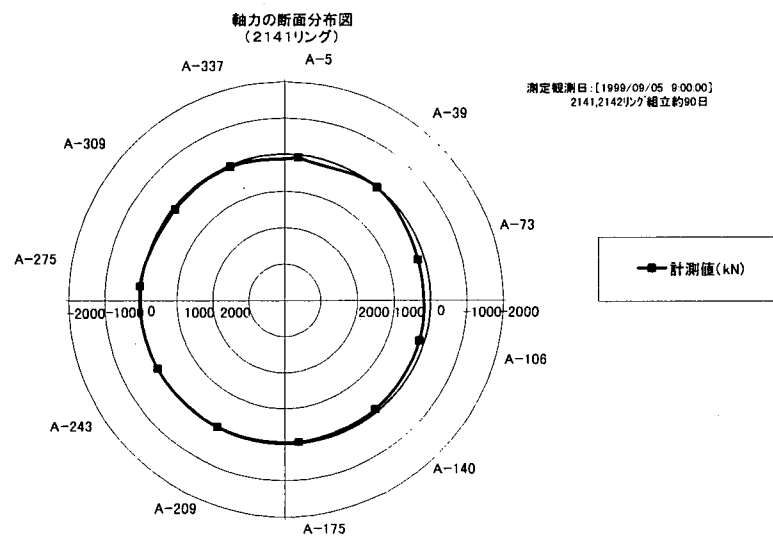
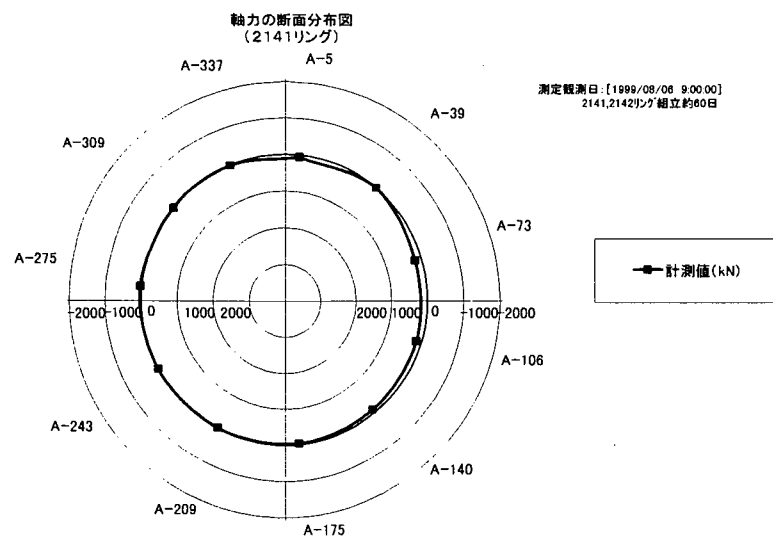


図-3. 32(5) 軸力の断面分布図(2141リング)

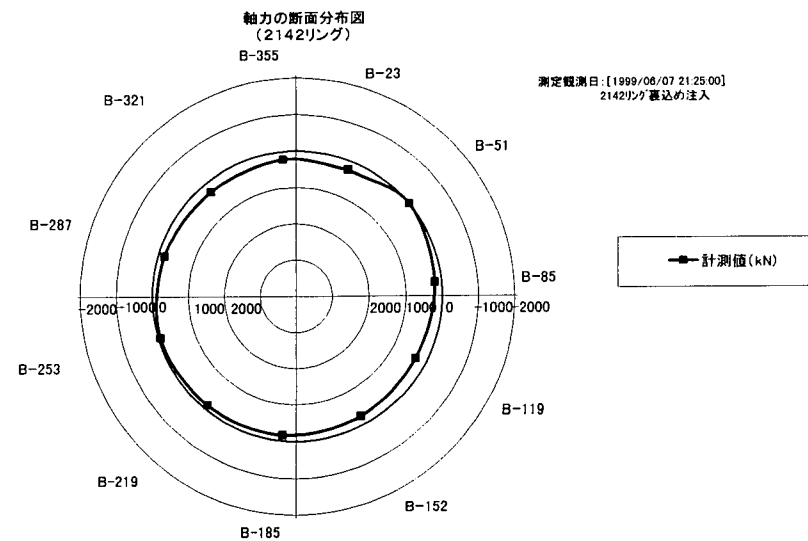
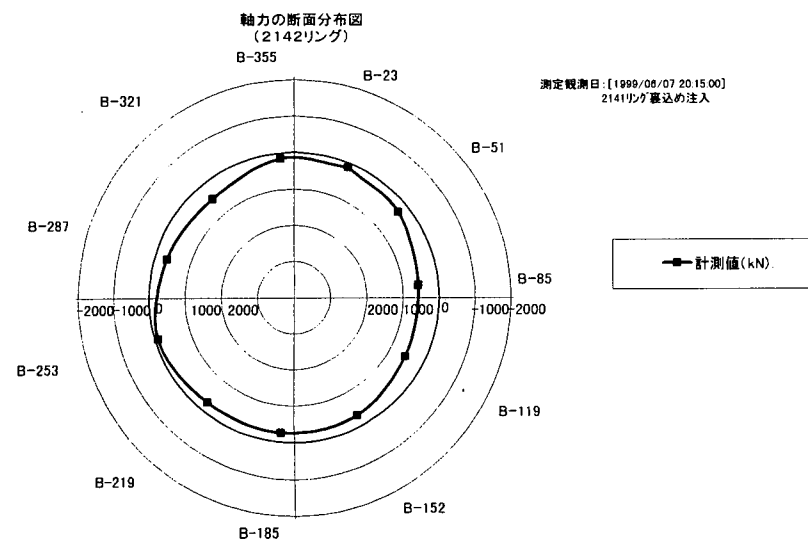
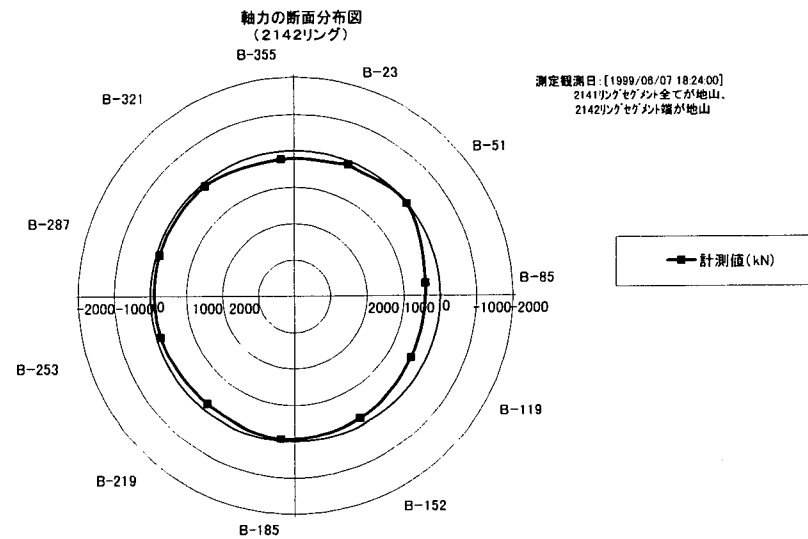
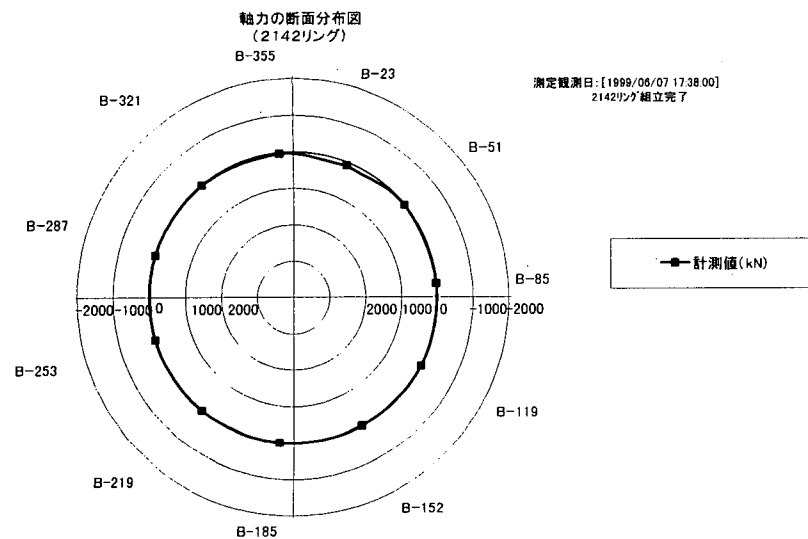


図-2. 33(1) 軸力の断面分布図(2142リング)

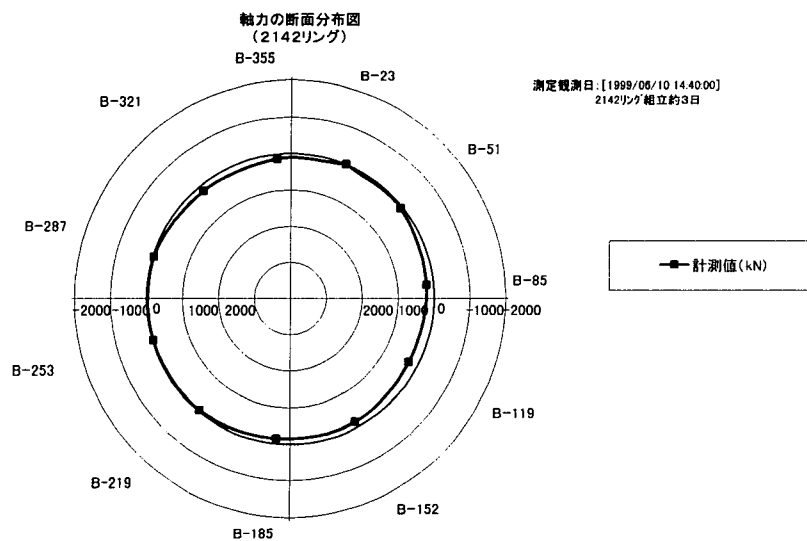
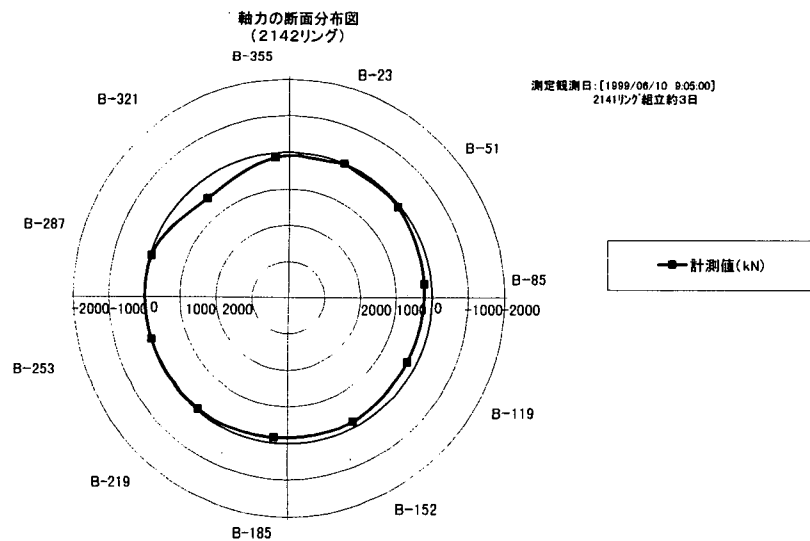
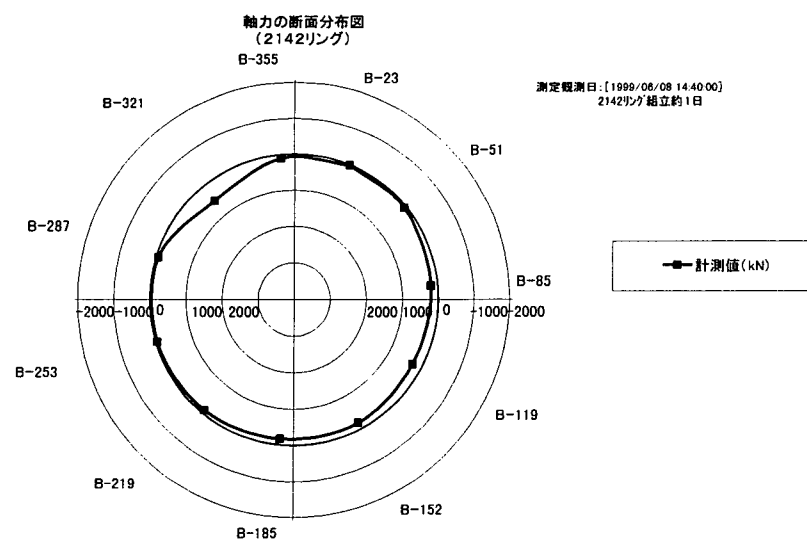
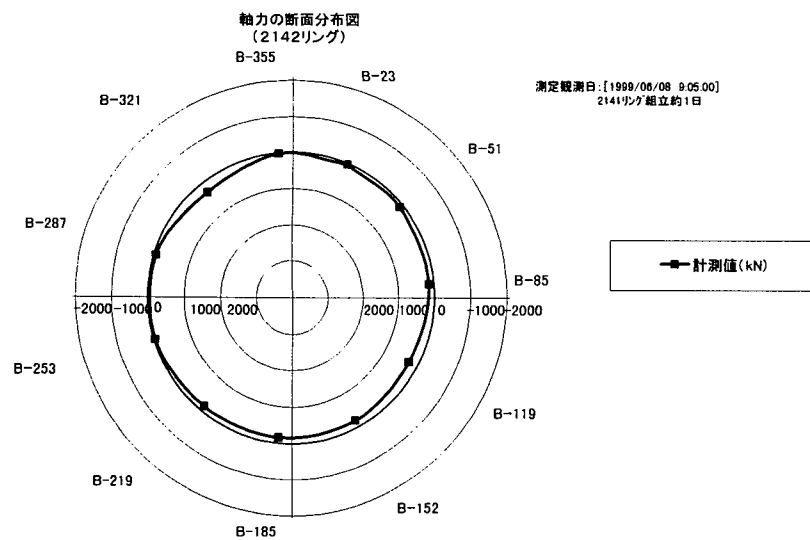


図-2. 33(2) 軸力の断面分布図(2142リング)

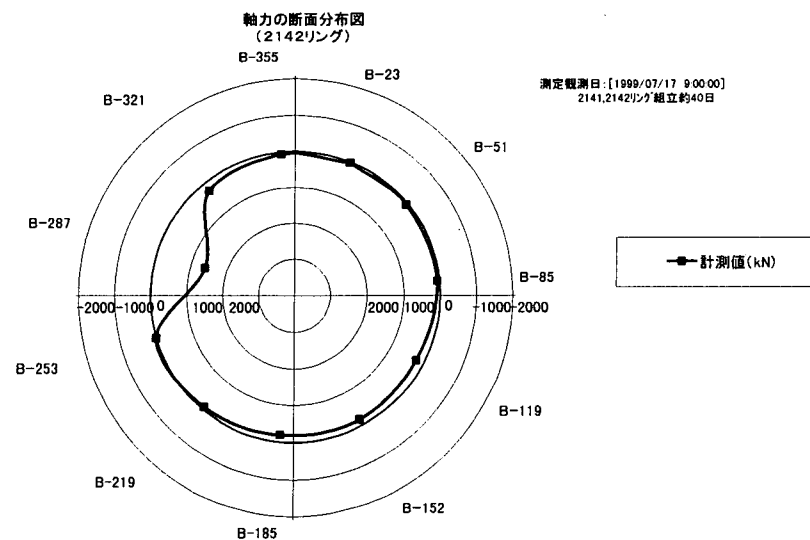
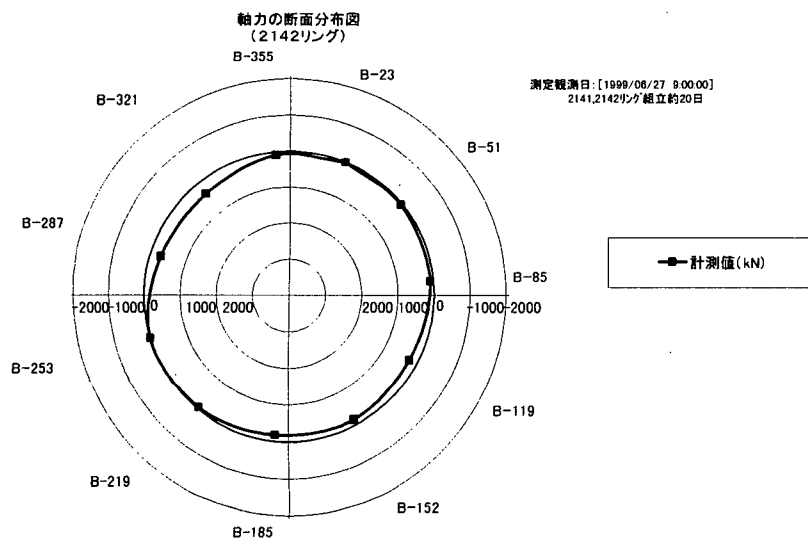
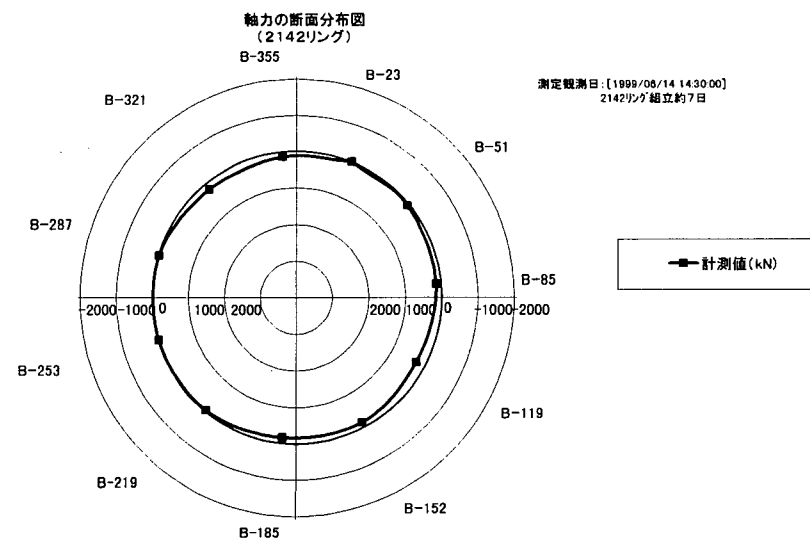
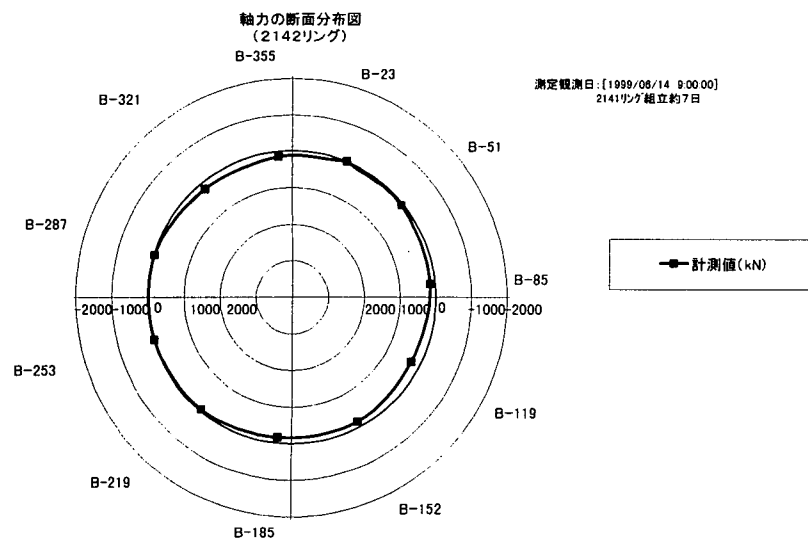


図-2. 33(3) 軸力の断面分布図(2142リング)

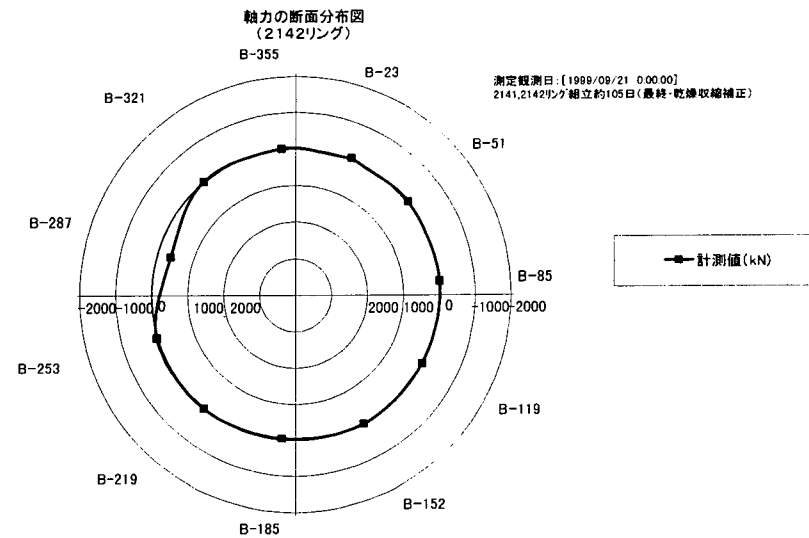
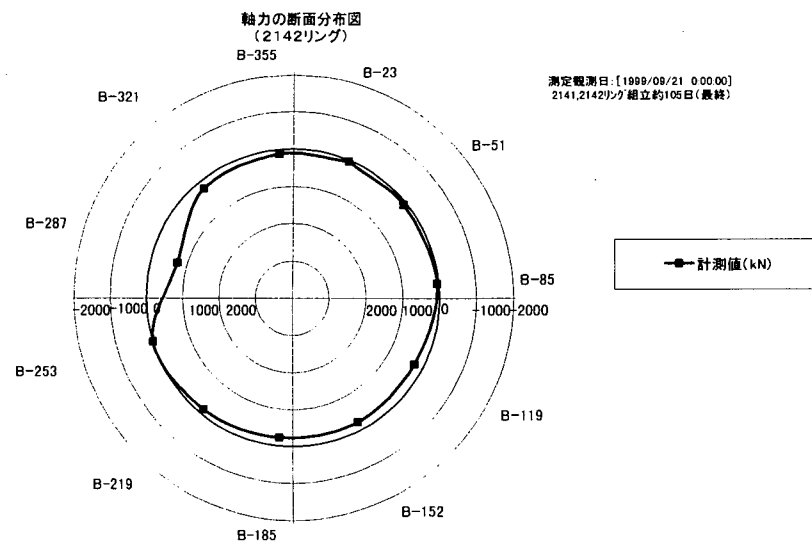
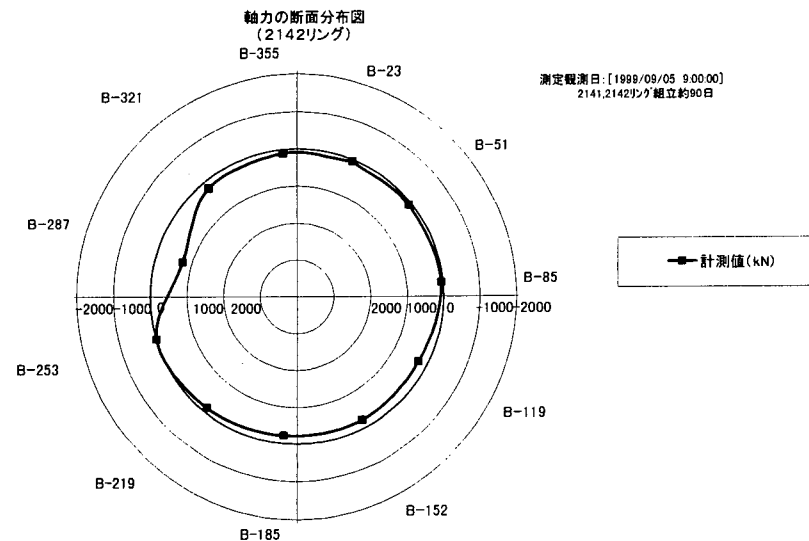
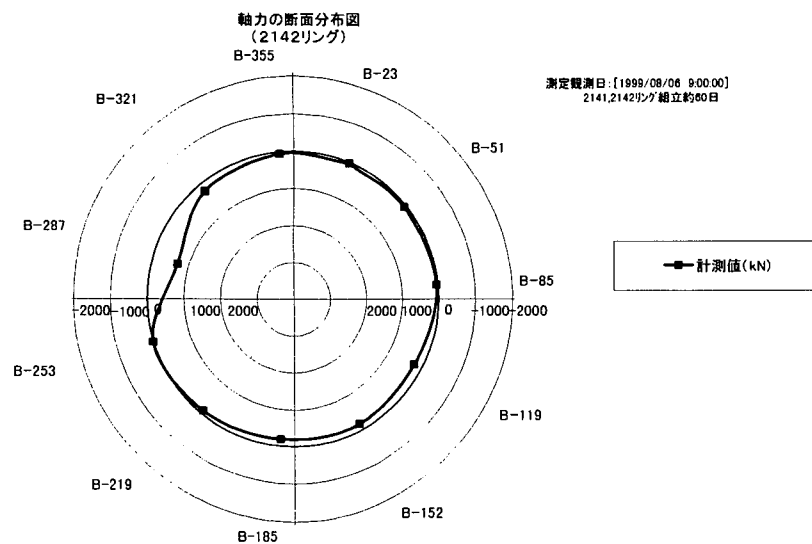


図-2.33(4) 軸力の断面分布図(2142リング)

第4章 砂礫地盤中のシールドトンネルの作用土圧

4.1 土圧計および水圧計による作用土圧

土圧計および水圧計による計測値を調布共同溝に対して図-4.1(1)~(2)、楠味美共同溝に対して図-4.2(1)~(2)に示す。

調布共同溝では、3ヶ月後のほぼ安定したと考えられる天端に作用する最終的な土圧結果は、 70kN/m^2 程度であり、水圧計からは地下水位はトンネル天端付近にあると考えられることからセグメント設計の荷重の考え方を土水分離の全土被り荷重を想定し地下水面をトンネル天端と設定すると、天端に作用する鉛直荷重は、水圧で 0.0kN/m^2 、土圧で約 160kN/m^2 程度となり、この値と比較すると、セグメントに作用する土圧は全土被り土圧の約4~5割となる。また、参考としてゆるみ土圧の計算値は 98.4kN/m^2 (図-4.6(1)(p.165)および(b)2層地盤の場合のゆるみ土圧(p.166)参照)と全土被り土圧の約6割である。

楠味美共同溝では、3ヶ月後のほぼ安定したと考えられる最終的な土圧は、 $80\sim 170\text{kN/m}^2$ 程度となっている。この土圧の値は水圧計の値から判断すると地下水位がトンネル天端から上約9mに位置することから、この静水圧が作用していると考えられ、トンネルには水圧のみが作用し、土圧は作用していないものと判断できる。

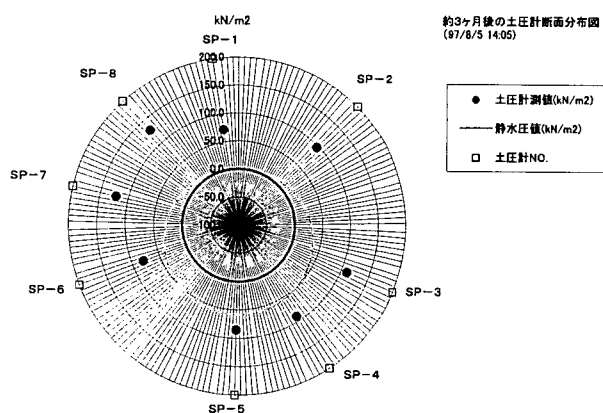


図-4.1(1) 土圧計の断面分布図 (3ヶ月後)
(調布共同溝)

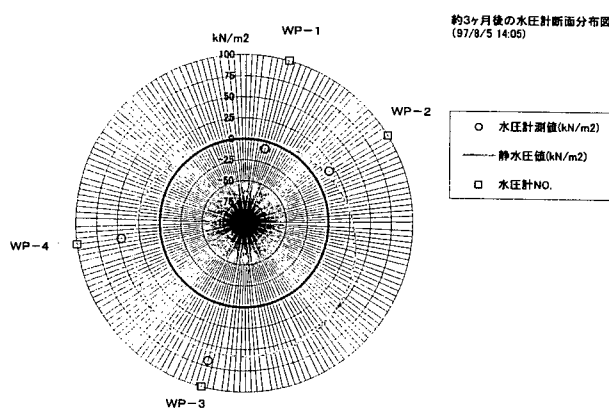


図-4.1(2) 水圧計の断面分布図 (3ヶ月後)
(調布共同溝)

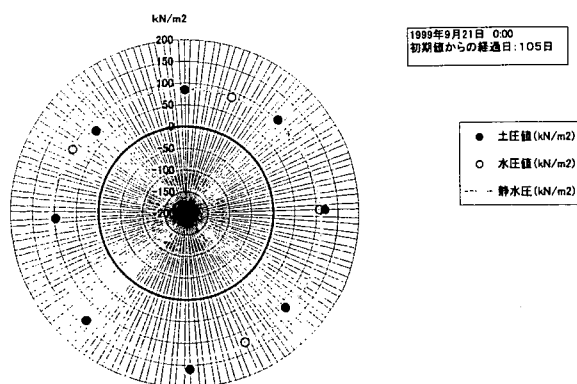


図-4.2(1) 土圧計の断面分布図 (3ヶ月後)
(楠味美共同溝)

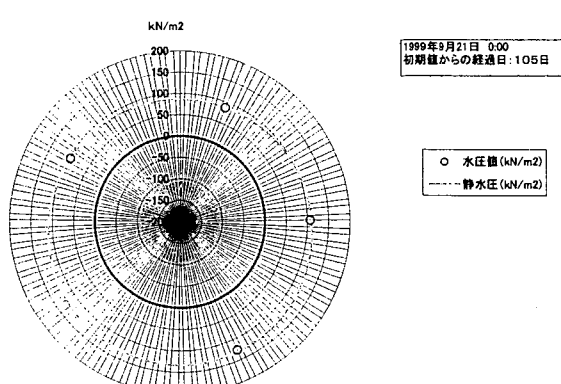


図-4.2(2) 水圧計の断面分布図 (3ヶ月後)
(楠味美共同溝)

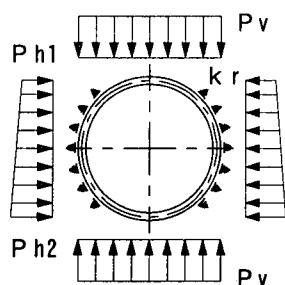
4.2 覆工断面力から推定される作用土圧

シールドトンネルに作用する土水圧を検討するため、鉄筋計から求めた断面力（曲げモーメント）と以下に示す解析方法により算定した断面力との比較を行った。断面力については、計測データが収束したと考えられる最終値（約3ヶ月後のデータ）に着目して検討を行った。

また、楠味美共同溝については土水圧の他、セグメント組立直後のセグメント自重のみが作用する場合の影響に対する検討も行った。

4.2.1 解析方法

図-4.3に示すような慣用設計法で用いられる荷重モデルを考えた場合、覆工に発生する曲げモーメントは鉛直土圧 P_v 、側方土圧係数 λ および地盤反力係数 k の設定による影響を受けることから、本検討においてはそれらをパラメータとした解析を実施した。また、セグメントの自重については、調布共同溝においては計測結果から求められている曲げモーメントはセグメント組立直後を初期としており、自重の影響が含まれていないことから考慮しない。楠味美共同溝においてはセグメント組立直前を初期としていることからセグメント自重の影響を考慮するものとした。



ここに

P_v : 鉛直土圧

P_{h1} : 上部水平土圧 ($= (P_v + h/2 \cdot \gamma t) \cdot \lambda$)

P_{h2} : 下部水平土圧 ($= P_{h1} + 2 R c \cdot \gamma t \cdot \lambda$)

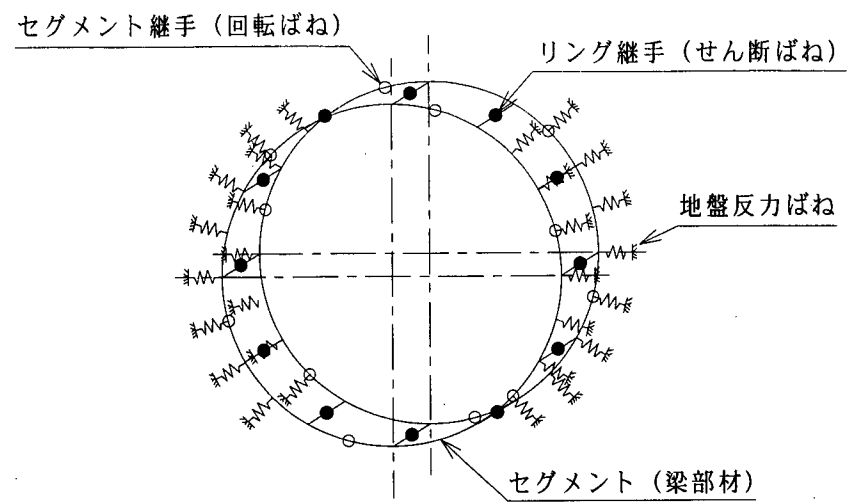
図-4.3 荷重モデル

4.2.2 解析モデル

セグメント覆工は、セグメントをボルトにより組み立てた構造であることを考慮し、本解析に用いた解析モデルは、図-4.4に示すようにセグメントを直線梁、セグメントのピース間継ぎ手を回転ばね定数 k_θ の回転ばね、リング間継ぎ手をせん断ばね定数 k_s の接線方向と半径方向のばね、地盤反力を表現する地盤ばねにモデル化した梁ばねモデルを使用した。

解析に用いた各セグメントの諸定数を表-4.1に示す。セグメントの断面二次モーメントは、通例、セグメントの断面力を計算する際に用いられる鉄筋を無視した全断面有効の場合を用いた。セグメントの組立状

況を図－4.5 (1)～(2)に示す。調布共同溝、楠味美共同溝のセグメントの組立状況は、それぞれトンネル天端から左右に17.1度、22.5度の位置にKセグメントの中心がくるような2リング千鳥組みで組み立てられている。



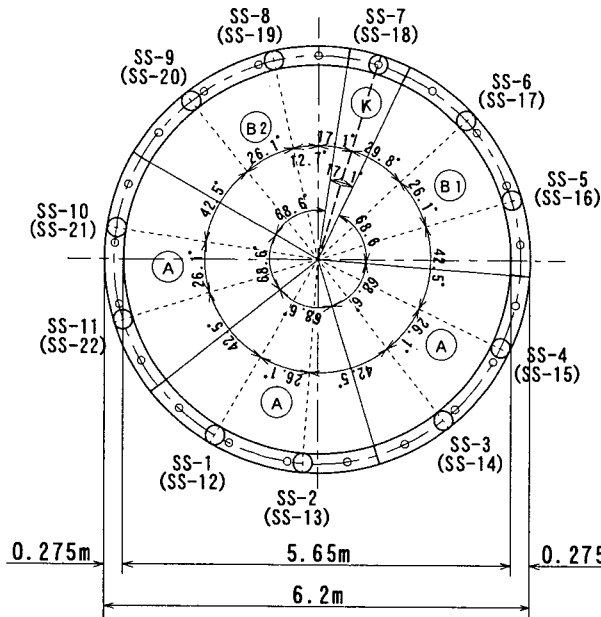
図－4.4 解析モデル図

表－4.1 解析に用いたセグメントの諸定数

セグメント部位	調布共同溝	楠味美共同溝
外径 R_a (m)	6.200	4.750
内径 R_i (m)	5.650	4.300
中心径 R_c (m)	5.925	4.525
厚さ h (m)	0.275	0.225
幅 B (m)	1.000	1.200
断面二次モーメント I (m ⁴)	0.001733	0.001139
弾性係数 E_c (kN/mm ²)	31.44 (実験値)	32.36 (設計値)

※ I は全断面有効・鉄筋無視で計算

2040リング



2041リング

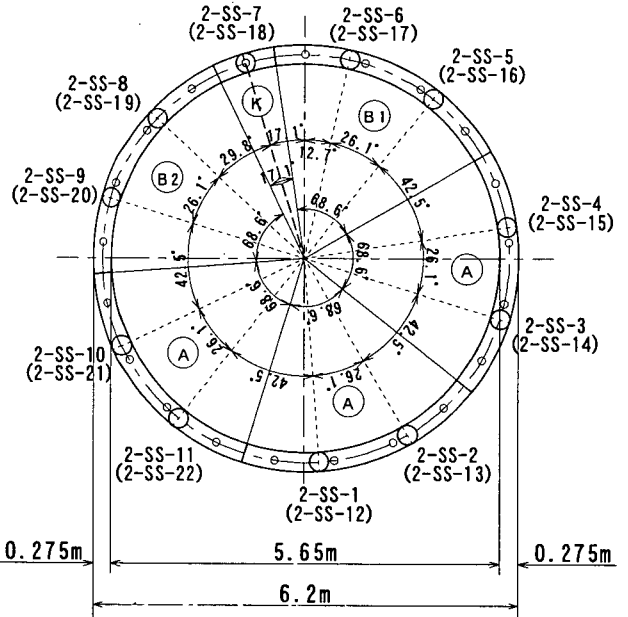
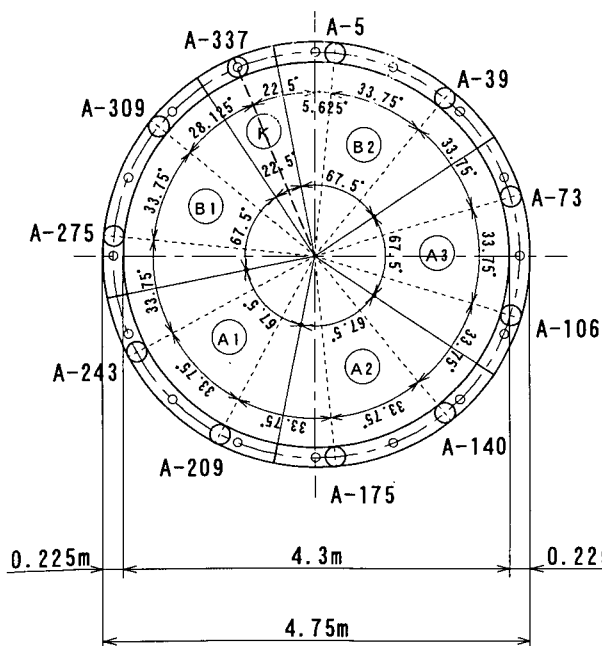


図-4.5 (1) セグメントの組立状況 (調布共同溝)

2141リング



2142リング

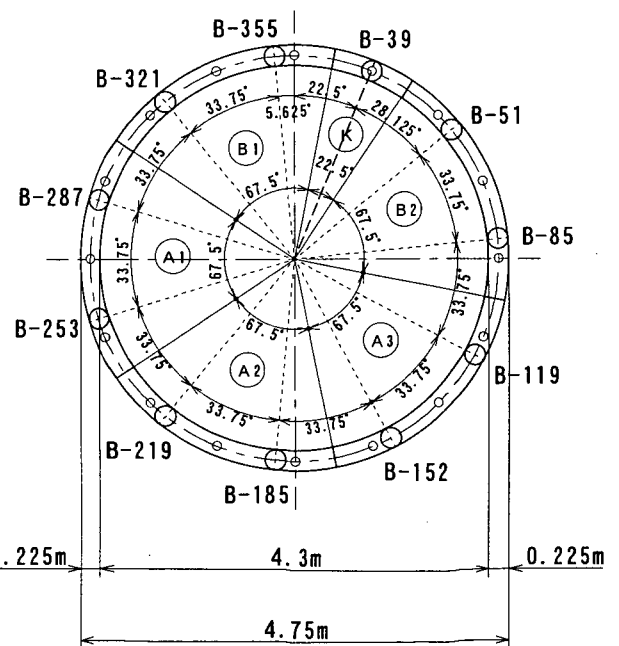


図-4.5 (2) セグメントの組立状況 (楠味美共同溝)

4.2.3 解析条件

(1) 荷重条件

解析に用いた地盤条件図を図-4.6(1)~(2)に示す。
鉛直土圧・水圧は以下に示す条件をパラメータとする。

- ①全土被り土圧
- ②Terzaghiのゆるみ土圧
- ③水圧のみ

なお、土圧の算定にあたっては、今回対象とする調布共同溝、楠味美共同溝は共に硬質の砂礫層および砂質層中での施工であることから、土と水を分離して取り扱う（土水分離）ものとした。

ここで、②のゆるみ土圧は互層地盤および地下水位を考慮した計算により算出した。（次頁参照）

また、③の水圧のみの場合は図-4.7(1)~(2)に示すように従来の慣用モデルの水圧に加えて静水圧分布の場合についても解析を行った。

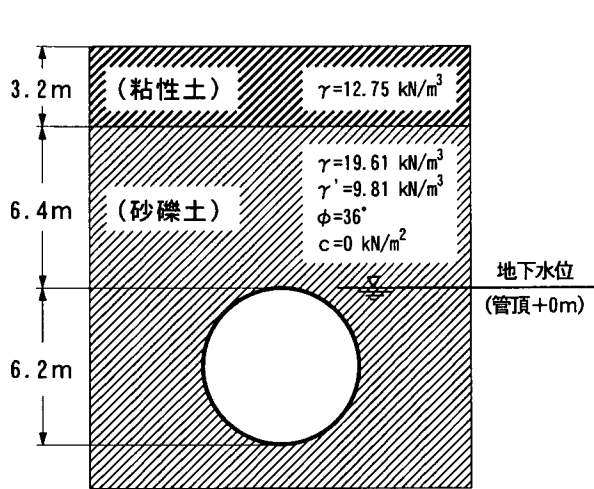


図-4.6(1) 地盤条件図（調布共同溝）

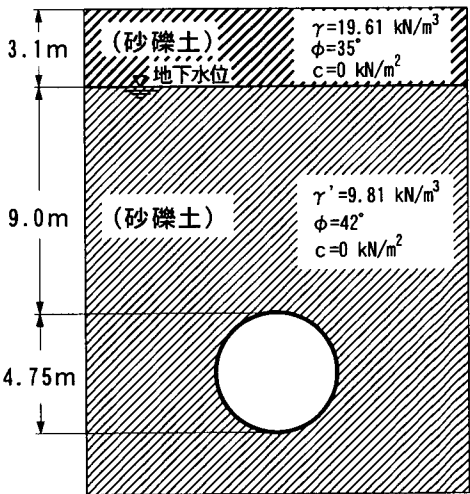


図-4.6(2) 地盤条件図（楠味美共同溝）

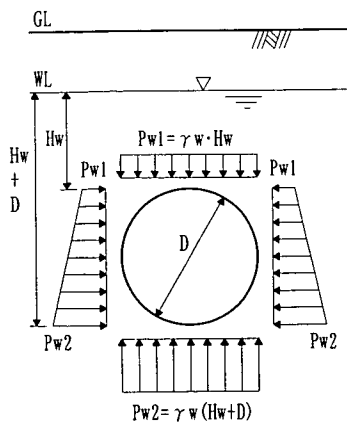


図-4.7(1) 慣用モデルの水圧

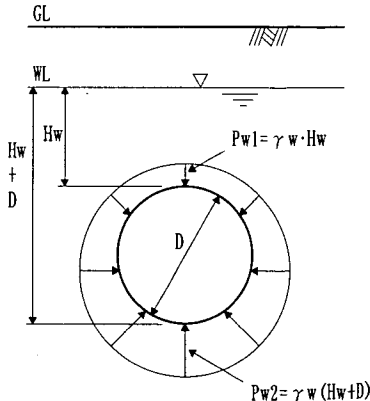


図-4.7(2) 静水圧分布

(a) Terzaghiのゆるみ土圧基本式

$$\sigma_v = \frac{B_1(\gamma - c/B_1)}{K_0 \tan \phi} \cdot (1 - e^{-K_0 \tan \phi \cdot H/B_1}) + p_0 e^{-K_0 \tan \phi \cdot H/B_1}$$

$$B_1 = R_0 \cot \left[\frac{\pi/4 + \phi/2}{2} \right]$$

ここに、 σ_v : Terzaghiのゆるみ土圧

K_0 : 水平土圧と鉛直土圧の比 (通常 $K_0=1$)

ϕ : 土の内部摩擦角

p_0 : 上載荷重の影響

γ : 土の単位体積重量

c : 土の粘着力

(b) 2層地盤の場合のゆるみ土圧

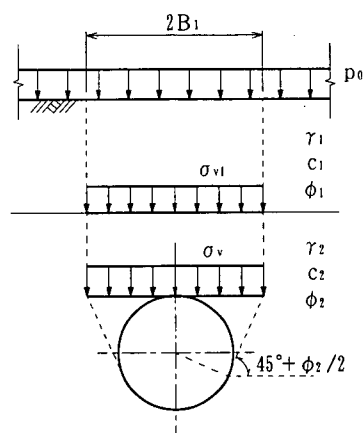
$$\sigma_{v1} = \frac{B_1(\gamma_1 - c_1/B_1)}{K_0 \tan \phi_1} \cdot (1 - e^{-K_0 \tan \phi_1 \cdot H_1/B_1}) + p_0 e^{-K_0 \tan \phi_1 \cdot H_1/B_1}$$

$$\sigma_v = \frac{B_1(\gamma_2 - c_2/B_1)}{K_0 \tan \phi_2} \cdot (1 - e^{-K_0 \tan \phi_2 \cdot H_2/B_1}) + \sigma_{v1} e^{-K_0 \tan \phi_2 \cdot H_2/B_1}$$

$$= \frac{B_1(\gamma_2 - c_2/B_1)}{K_0 \tan \phi_2} \cdot (1 - e^{-K_0 \tan \phi_2 \cdot H_2/B_1})$$

$$+ \frac{B_1(\gamma_1 - c_1/B_1)}{K_0 \tan \phi_1} \cdot (1 - e^{-K_0 \tan \phi_1 \cdot H_1/B_1}) \cdot e^{-K_0 \tan \phi_2 \cdot H_2/B_1}$$

$$+ p_0 e^{-K_0(\tan \phi_1 \cdot H_1 + \tan \phi_2 \cdot H_2)/B_1}$$



(c) 地下水位がある場合のゆるみ土圧

$$\sigma_{v1} = \frac{B_1(\gamma - c/B_1)}{K_0 \tan \phi} \cdot (1 - e^{-K_0 \tan \phi \cdot (H-H_w)/B_1})$$

$$+ p_0 e^{-K_0 \tan \phi \cdot (H-H_w)/B_1}$$

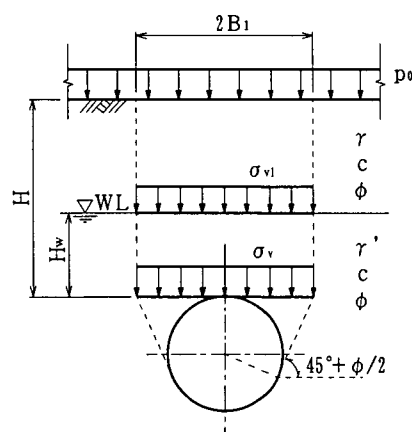
$$\sigma_v = \frac{B_1(\gamma' - c/B_1)}{K_0 \tan \phi} \cdot (1 - e^{-K_0 \tan \phi \cdot H_w/B_1}) + \sigma_{v1} e^{-K_0 \tan \phi \cdot H_w/B_1}$$

$$= \frac{B_1(\gamma' - c/B_1)}{K_0 \tan \phi} \cdot (1 - e^{-K_0 \tan \phi \cdot H_w/B_1})$$

$$+ \left\{ \frac{B_1(\gamma - c/B_1)}{K_0 \tan \phi} \cdot (1 - e^{-K_0 \tan \phi \cdot (H-H_w)/B_1}) + p_0 e^{-K_0 \tan \phi \cdot (H-H_w)/B_1} \right\} e^{-K_0 \tan \phi \cdot H_w/B_1}$$

$$= \frac{B_1(\gamma' - c/B_1)}{K_0 \tan \phi} \cdot (1 - e^{-K_0 \tan \phi \cdot H_w/B_1})$$

$$+ \frac{B_1(\gamma - c/B_1)}{K_0 \tan \phi} \cdot (1 - e^{-K_0 \tan \phi \cdot (H-H_w)/B_1}) e^{-K_0 \tan \phi \cdot H_w/B_1} + p_0 e^{-K_0 \tan \phi \cdot H/B_1}$$



(2) 側方土圧係数および地盤反力係数

側方土圧係数および地盤反力係数の設定は、「トンネル標準示方書（シールド編）・同解説」²⁾に示された表－4.2を参考に今回の地盤条件から表－4.3に示した組合せによるパラメータ解析を行った。

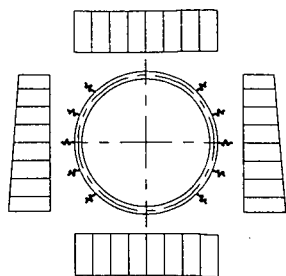
また、地盤反力はトンネル半径方向の変位に応じて生じる地盤ばねの反力として評価し、具体的には地盤ばねが分担するセグメント（梁）の長さ B_r に地盤反力係数 k_r を乗じて地盤ばね定数 K_r として与えるが、地盤ばねの配置としては図－4.8(1)～(2)に示すように、地盤反力はセグメントリングが地盤方向へ変位（圧縮側）する場合のみ生じるものとし、セグメント内方への変位（引張側）によっては生じないものとする部分地盤ばねモデルを基本とし、引張側も考慮する全周地盤ばねモデルについても解析を行った。ただし引張側の地盤ばね定数の値については既往の研究³⁾などを参考に圧縮側の1/2の値に設定するものとした。

表－4.2 側方土圧係数（ λ ）および地盤反力係数（ k ）²⁾

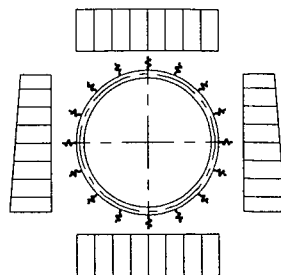
土水の扱い	土の種類	λ	k (kN/mm ³)	N値による目安
土水分離	非常によく締まった砂質土	0.35～0.45	30～50	$30 \leq N$
	締まった砂質土	0.45～0.55	10～30	$15 \leq N < 30$
	緩い砂質土	0.50～0.60	0～10	$N < 15$
	固結した粘性土	0.35～0.45	30～50	$25 \leq N$
	硬い粘性土	0.45～0.55	10～30	$8 \leq N < 25$
	中位の粘性土	0.45～0.55	5～10	$4 \leq N < 8$
土水一体	中位の粘性土	0.55～0.65	5～10	$4 \leq N < 8$
	軟らかい粘性土	0.65～0.75	0～5	$2 \leq N < 4$
	非常に軟らかい粘性土	0.75～0.85	0	$N < 2$

表－4.3 側方土圧係数（ λ ）と地盤反力係数（ k ）との組合せ

λ k (kN/mm ³)	0.35	0.45	0.55
10	CASE11	CASE12	CASE13
30	CASE21	CASE22	CASE23
50	CASE31	CASE32	CASE33



図－4.8(1) 部分地盤ばねモデル



図－4.8(2) 全周地盤ばねモデル

本解析に用いる荷重条件の一覧を表－４．４に示す。

表－４．４ 荷重条件の一覧

(単位：kN/m)

		全土圧			ゆるみ土圧			水圧のみ	
		側方土圧係数λ			側方土圧係数λ			慣用式	静水圧
		0.35	0.45	0.55	0.35	0.45	0.55	(ケ-ス1)	(ケ-ス2)
調布共同溝 (H= 9.6m) (セグメント幅1.0m 当たりの荷重)	頂部鉛直荷重	166.3	166.3	166.3	98.4	98.4	98.4	0.0	0.0
	頂部水平荷重	60.0	76.8	93.6	36.2	46.2	56.2	1.3	1.3
	底部水平荷重	138.5	161.0	183.6	114.7	130.5	146.2	59.5	59.5
	底部鉛直荷重	166.3	166.3	166.3	98.4	98.4	98.4	60.8	59.5
楠味美共同溝 (H=12.1m) (セグメント幅1.2m 当たりの荷重)	頂部鉛直荷重	284.8	284.8	284.8	154.5	154.5	154.5	105.9	107.2
	頂部水平荷重	170.4	188.4	206.4	124.7	129.7	134.7	107.2	107.2
	底部水平荷重	242.3	265.6	289.0	196.6	206.9	217.3	160.5	160.5
	底部鉛直荷重	284.8	284.8	248.8	154.5	154.5	154.5	161.8	160.5

(3) 自重 (楠味美共同溝での検討のみ)

セグメントの自重は次式で計算する。

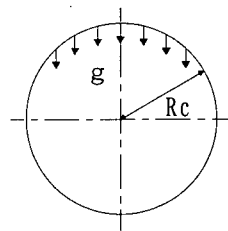
$$g = \frac{W}{2\pi \cdot R_c}$$

ここに、 g : セグメントの図心線に沿った単位周長当りのセグメントの自重
(トンネル縦断方向に単位長さ)

W : セグメント1リング分の重量 (トンネル縦断方向に単位長さ)

R_c : セグメントの図心半径

楠味美共同溝で使用するセグメントの単位体積重量は $\gamma_c=25.50\text{kN/m}^3$ 、 $R_c=2.2625\text{m}$ であるから上式から $g=5.74\text{kN/m}$ となる。



図－４．９ 自重の考え方

なお、自重の反力については以下のように取り扱うものとした。

- ①セグメント組立直後の自重解析においては地盤反力を考慮し、地盤反力係数 $k = 1, 10, 30, 50, 100\text{kN/mm}^3$ と変化させ、部分地盤ばねモデルとして解析を行った。
- ②計測データが収束したと考えられる最終時 (組立後約3ヶ月) の検討においては、表－４．４に示した荷重に自重を加え同一の地盤ばねで支持されるものと考え解析を行った。

(4) ばね定数

本解析に用いたばね定数は、回転ばね定数については、村上・小泉によるばね算定モデル¹⁾を参考とした計算値を基本とし、調布共同溝においては同シールドトンネル施工時に実施した載荷実験結果の $k\theta=8.88\text{MN}\cdot\text{m}/\text{rad}$ を用いた解析も行った。せん断ばね定数については、調布共同溝、楠味美共同溝ともに、過去に行ったほぼ同規模のシールドトンネルでの検討時に用いた値 $k_s=1.96\times10^3\text{MN}/\text{m}$ を採用した。表－4.5に解析に用いた回転ばね定数の値を示す。(算定の詳細は巻末資料を参照。)なお、回転ばねの特性は線形として取り扱った。

表－4.5 各解析ケースの回転ばね定数 (単位: $\text{MN}\cdot\text{m}/\text{rad}$)

	地盤反力 係 数 kN/mm^3	曲 げ モーメントの 正 負	全土圧			ゆるみ土圧			水圧のみ		自重
			側方土圧係数 λ			側方土圧係数 λ			慣用式	静水圧	
			0.35	0.45	0.55	0.35	0.45	0.55	(ケ-1)	(ケ-2)	
調 布 共 同 溝	10	正曲げ	24.5	27.5	35.3	26.5	32.4	57.9	23.5		—
		負曲げ	9.8	13.7	36.3	12.7	27.5	147.1	7.9		—
	30	正曲げ	28.4	33.3	45.1	29.4	36.3	53.9	28.4		—
		負曲げ	23.5	49.0	117.7	23.5	51.0	127.5	21.6		—
	50	正曲げ	31.4	38.2	53.0	31.4	37.3	52.0	29.4		—
		負曲げ	55.9	98.1	156.9	36.3	65.7	117.7	6.1		—
楠 味 美 共 同 溝	10	正曲げ	13.7	17.7	30.4	117.7	98.1	117.7	117.7		—
		負曲げ	6.7	16.7	67.7	127.5	97.1	127.5	107.9		—
	30	正曲げ	17.7	26.5	52.0	117.7	117.7	107.9	117.7		—
		負曲げ	38.2	76.5	107.9	127.5	117.7	98.1	127.5		—
	50	正曲げ	23.5	36.3	69.6	107.9	127.5	117.7	107.9		—
		負曲げ	82.4	107.9	117.7	323.6	127.5	117.7	98.1		—
	1, 10,	正曲げ	—	—	—	—	—	—	—		8.3
	30, 50	負曲げ	—	—	—	—	—	—	—		2.2

※リング間継ぎ手のせん断ばね定数 k_s は全ケース $k_s=1.96\times10^3\text{MN}/\text{m}$

4.2.4 解析結果

(1) 調布共同溝の場合

1) 地盤反力・側方土圧係数および荷重条件の検討

鉄筋計の計測値から求めた断面力（ダミー供試体によるコンクリートの乾燥収縮の影響を考慮した補正值および補正前の値）と地盤反力の考え方を部分地盤ばね、回転ばね定数を計算値とした場合（基本設定）の解析より得られた断面力について、側方土圧係数 λ 、地盤反力係数 k 、荷重条件の違いによる最大曲げモーメント値を表－4.6、図－4.10(1)～(2)に示す。ただし、計測断面力のうち2040リングの計測点SS-7(SS-18)および2041リングの計測点2-SS-6(2-SS-17)の局所的な値については施工時荷重等の影響が考えられるため除外した。

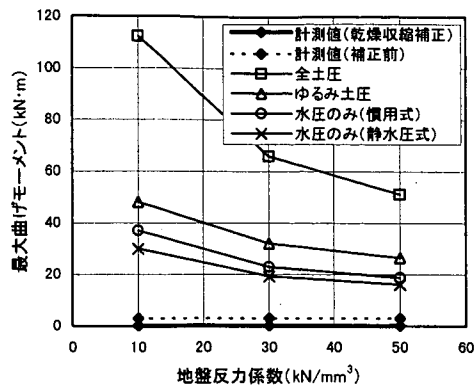
設計時においては土被りが約1.5D（D：セグメント外径）と浅いことを考慮し全土被り土圧（側方土圧係数 $\lambda=0.45$ 、地盤反力係数 $k=50\text{kN/mm}^3$ ）を採用しているが、解析からはゆるみ土圧程度の土圧が作用している結果となった。これは、解析条件として設定したトンネル天端のゆるみ土圧は 98.4kN/m^2 と全土被り土圧 166.3kN/m^2 の約6割であり、土圧計および水圧計による計測値が全土被り土圧の約4～5割となっている（4.1 土圧計および水圧計による作用土圧(p.161)参照）ことから整合性があると言える。

また、計測断面力と計算断面力の断面分布について、側方土圧係数 λ 、地盤反力係数 k 、荷重条件の違いにより整理したものを図－4.11(1)～(3)、図－4.12(1)～(3)に示す。これより、荷重条件をゆるみ土圧とし、側方土圧係数を $\lambda=0.45$ 、地盤反力係数を $k=50\text{kN/mm}^3$ （設計時と同様の値）と設定した場合に概ね計測断面力（乾燥収縮を考慮した補正值）の断面分布に近似していることが分かる（図－4.13(1)～(2)参照）。近似する場合（ゆるみ土圧、 $\lambda=0.45$ 、 $k=50\text{kN/mm}^3$ に設定）の曲げモーメントとその設定での軸力の断面分布図を図－4.14(1)～(2)に示す。

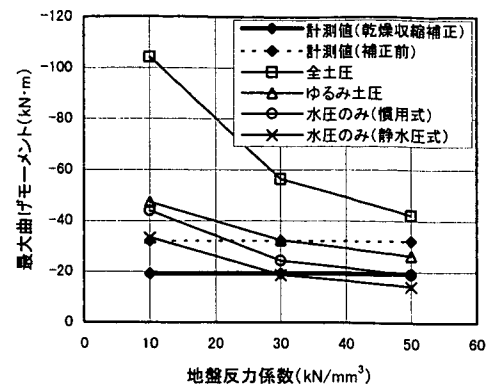
表－4.6 地盤定数（ λ ， k ）・荷重条件と最大曲げモーメント値

（単位： $\text{kN}\cdot\text{m}$ ）

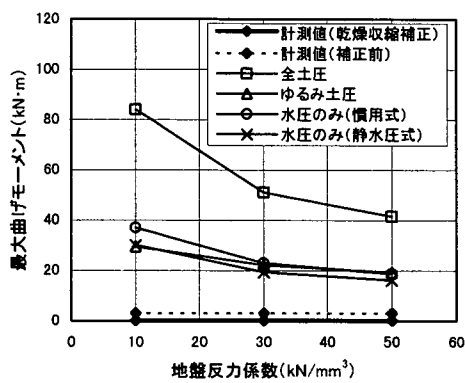
荷重条件		k (kN/mm^3)	最大曲げモーメント（正曲げ）			最大曲げモーメント（負曲げ）		
			$\lambda=0.35$	$\lambda=0.45$	$\lambda=0.55$	$\lambda=0.35$	$\lambda=0.45$	$\lambda=0.55$
全土圧		10	112.41	84.04	54.49	-104.03	-76.56	-51.30
		30	65.89	51.15	37.26	-56.36	-44.61	-33.72
		50	51.27	41.57	31.96	-42.09	-35.31	-29.19
ゆるみ土圧		10	48.06	29.44	19.16	-47.31	-31.72	-21.64
		30	32.00	22.15	17.67	-32.23	-23.09	-17.06
		50	26.48	19.20	16.17	-26.23	-19.58	-14.93
水圧のみ （慣用式）		10	37.00			-43.93		
		30	22.93			-24.17		
		50	18.74			-18.87		
水圧のみ （静水圧式）		10	30.10			-33.39		
		30	19.40			-18.70		
		50	16.29			-14.52		
計測値 (2040リング)	乾燥収縮補正	—	0.14			-19.14		
	補正前	—	3.02			-31.98		
計測値 (2041リング)	乾燥収縮補正	—	18.20			-19.05		
	補正前	—	22.12			-32.09		



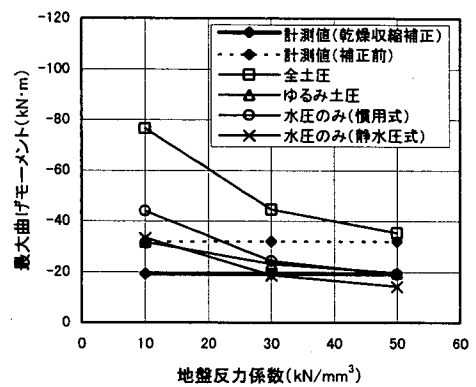
a) $\lambda = 0.35$ (正曲げ)



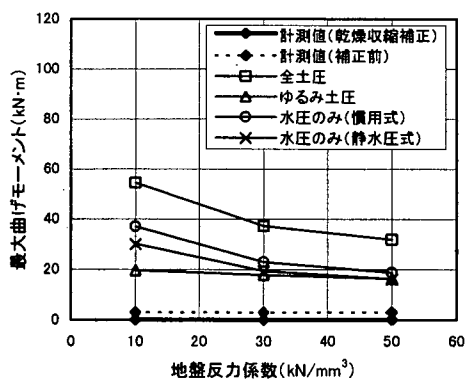
b) $\lambda = 0.35$ (負曲げ)



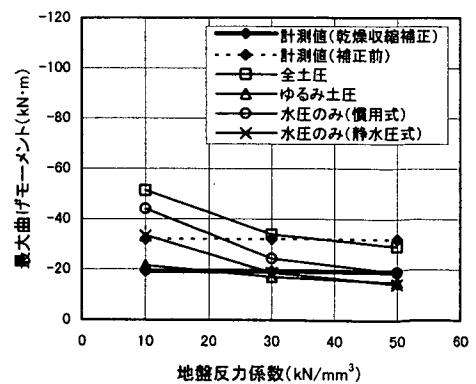
c) $\lambda = 0.45$ (正曲げ)



d) $\lambda = 0.45$ (負曲げ)

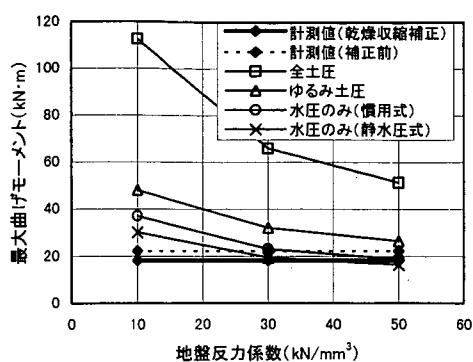


e) $\lambda = 0.55$ (正曲げ)

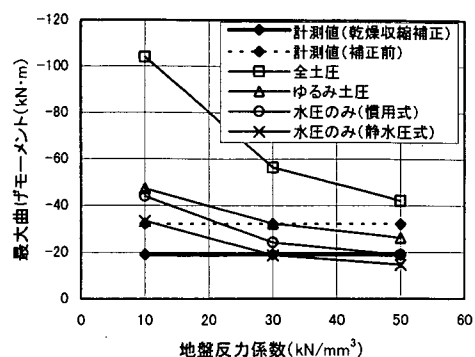


f) $\lambda = 0.55$ (負曲げ)

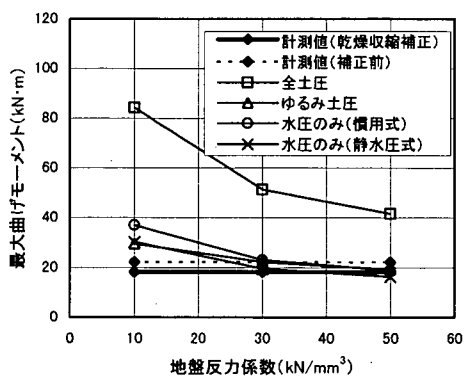
図-4.10(1) 地盤定数 (λ , k)・荷重条件と最大曲げモーメントの関係 (2040リソ')



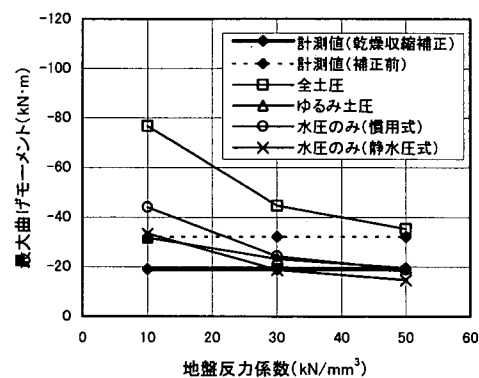
a) $\lambda = 0.35$ (正曲げ)



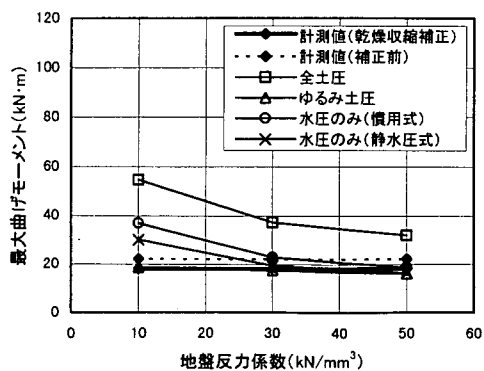
b) $\lambda = 0.35$ (負曲げ)



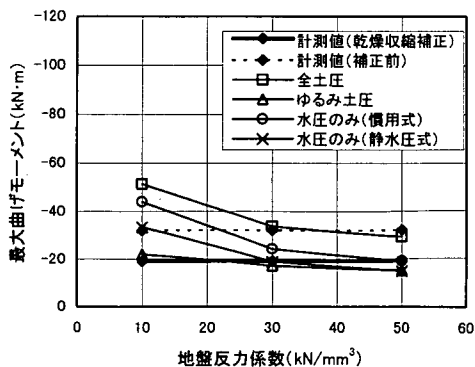
c) $\lambda = 0.45$ (正曲げ)



d) $\lambda = 0.45$ (負曲げ)

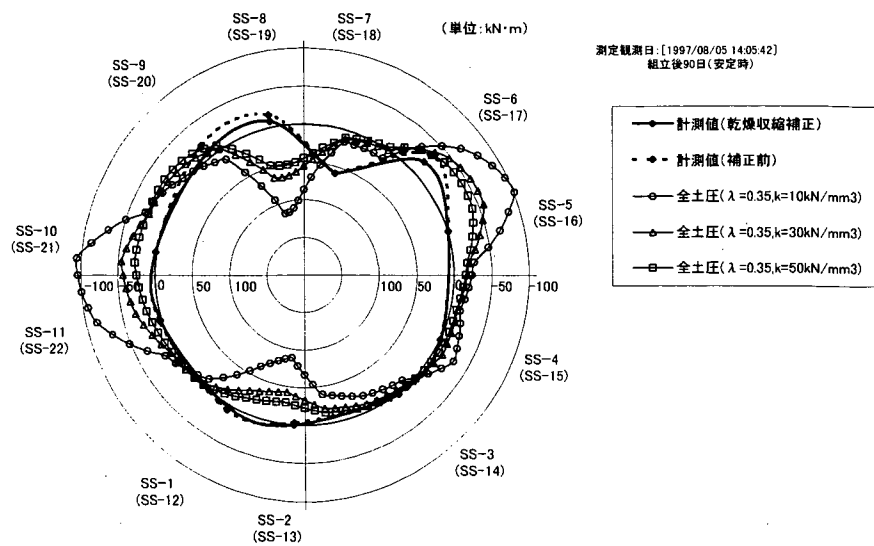


e) $\lambda = 0.55$ (正曲げ)

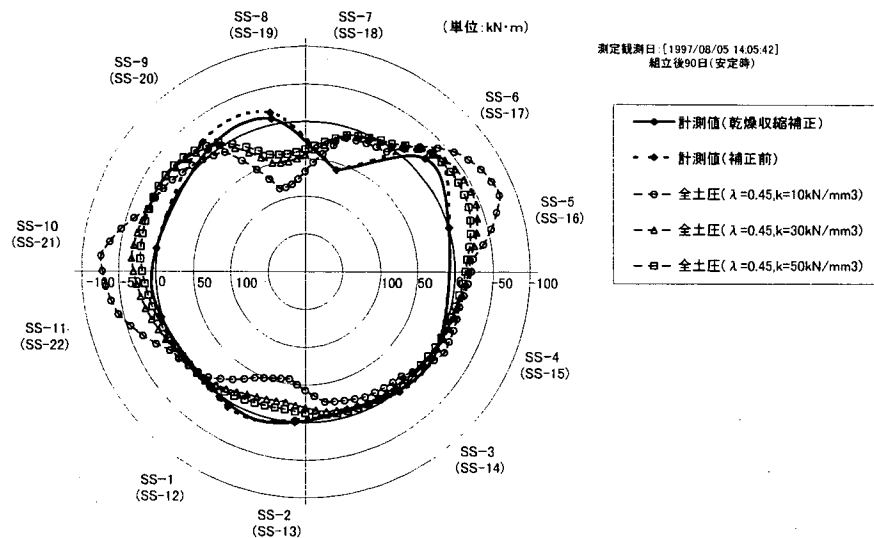


f) $\lambda = 0.55$ (負曲げ)

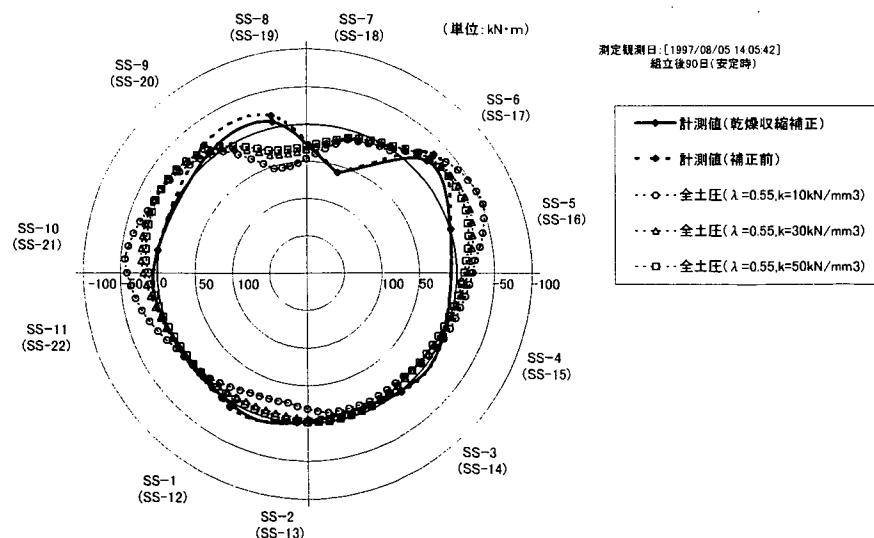
図-4.10(2) 地盤定数 (λ , k) ・荷重条件と最大曲げモーメントの関係 (2041リング*)



a) $\lambda=0.35$, 全土圧

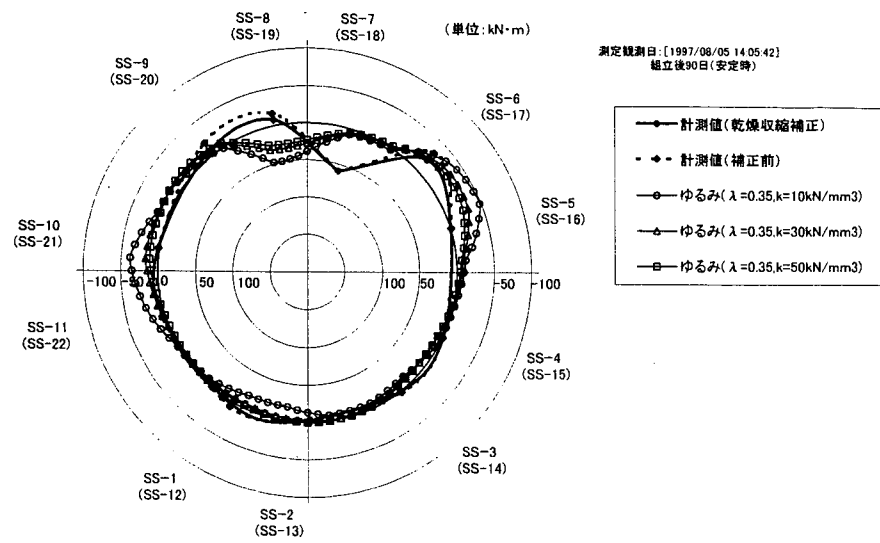


b) $\lambda=0.45$, 全土圧

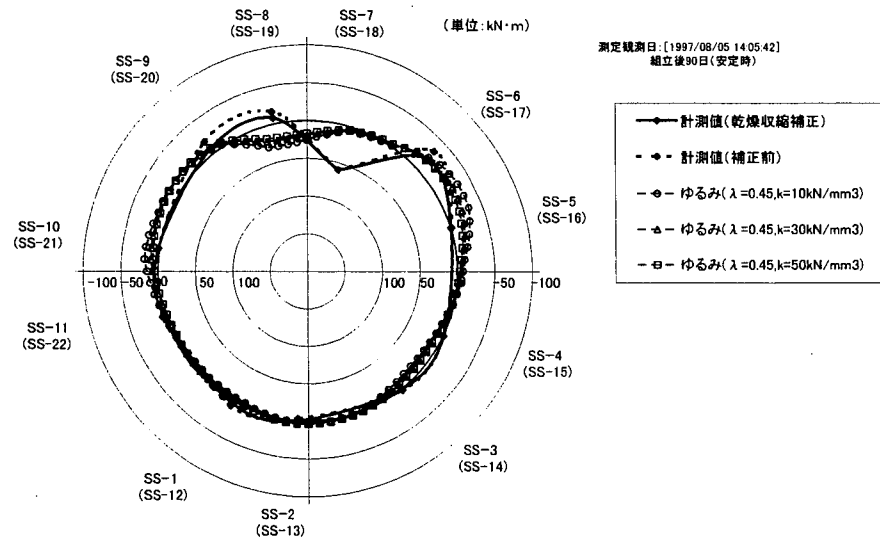


c) $\lambda=0.55$, 全土圧

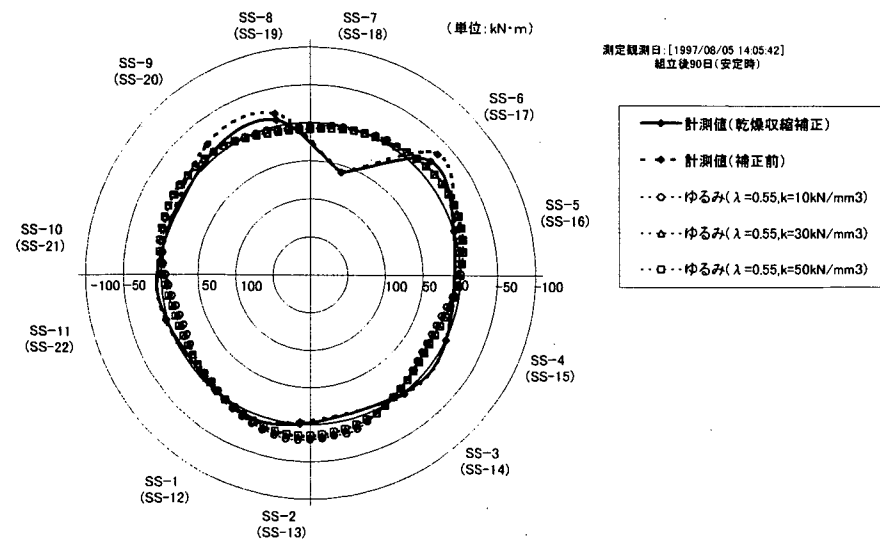
図-4.11(1) 計測断面力と計算断面力の断面分布図 (λ , k , 荷重条件の違い, 2040リソ)



a) $\lambda=0.35$, ゆるみ土圧



b) $\lambda=0.45$, ゆるみ土圧



c) $\lambda=0.55$, ゆるみ土圧

図-4.11(2) 計測断面力と計算断面力の断面分布図 (λ , k , 荷重条件の違い, 2040リング)

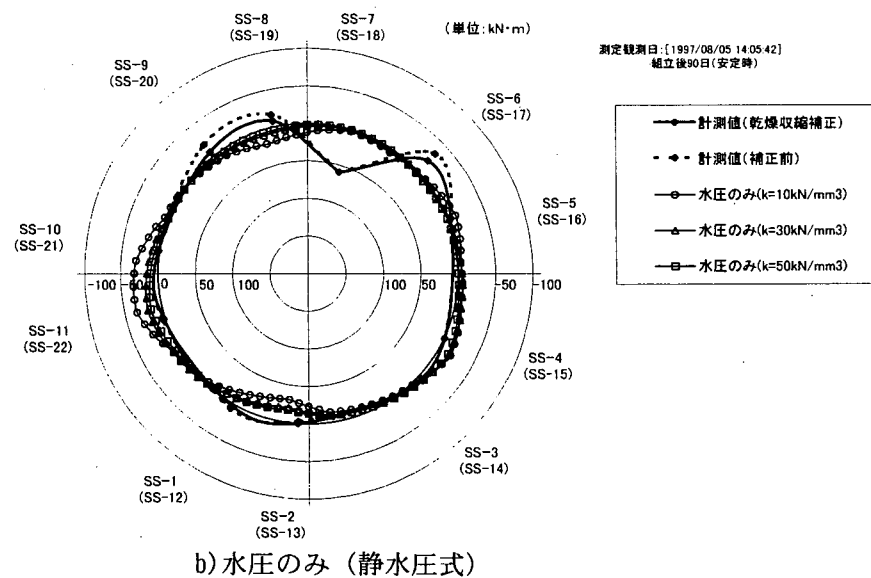
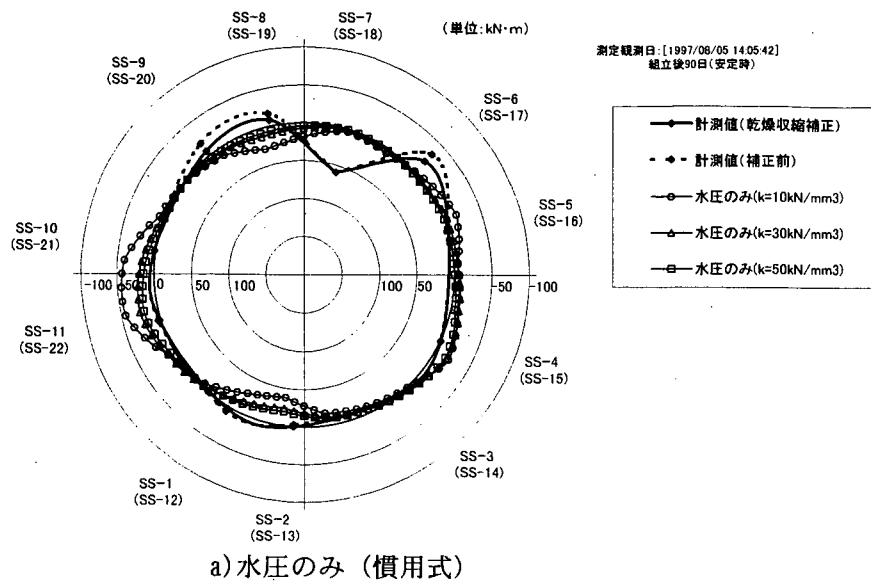
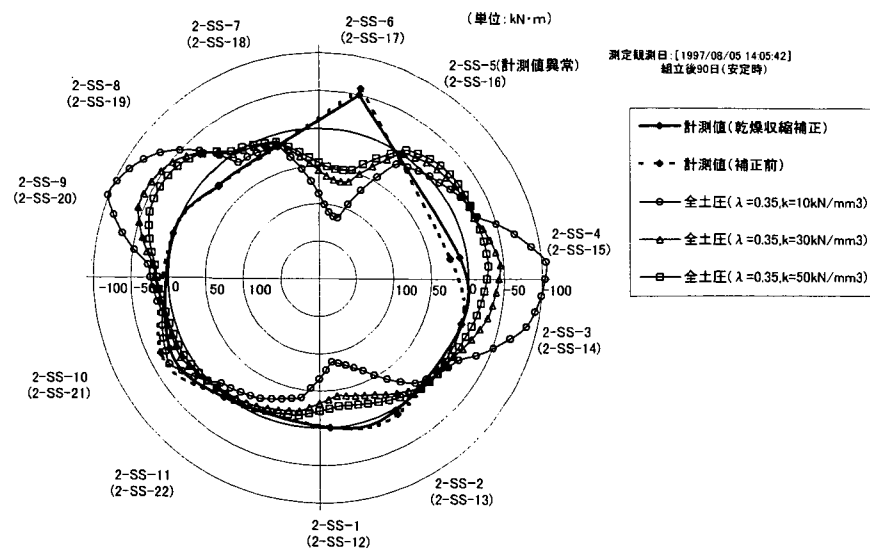
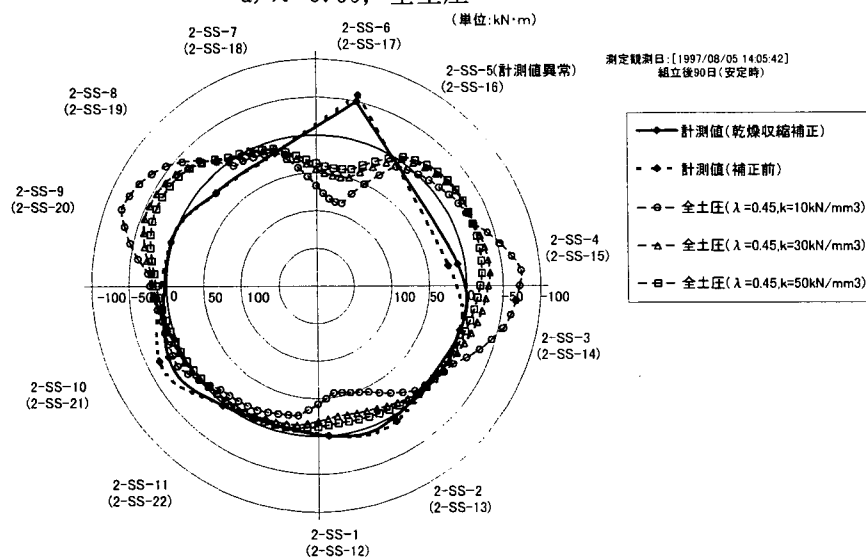


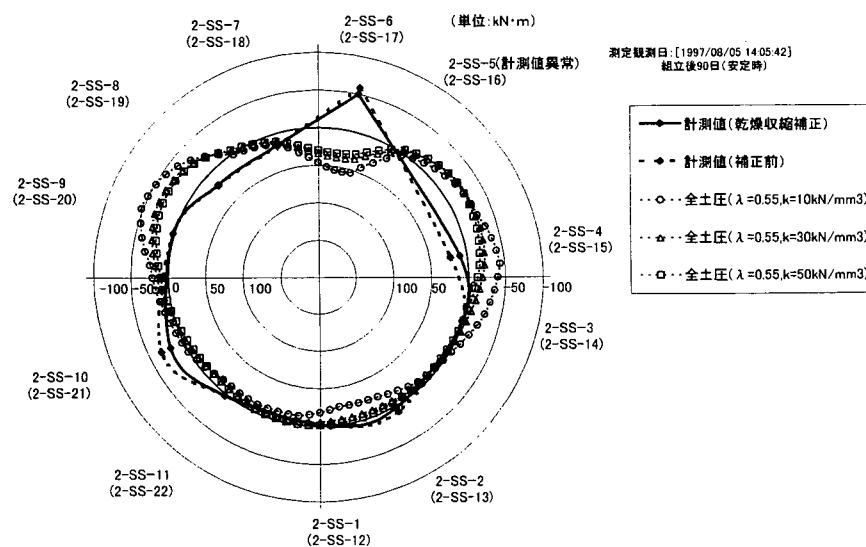
図-4.11(3) 計測断面力と計算断面力の断面分布図 (λ , k , 荷重条件の違い, 2040リタ')



a) $\lambda=0.35$, 全土圧

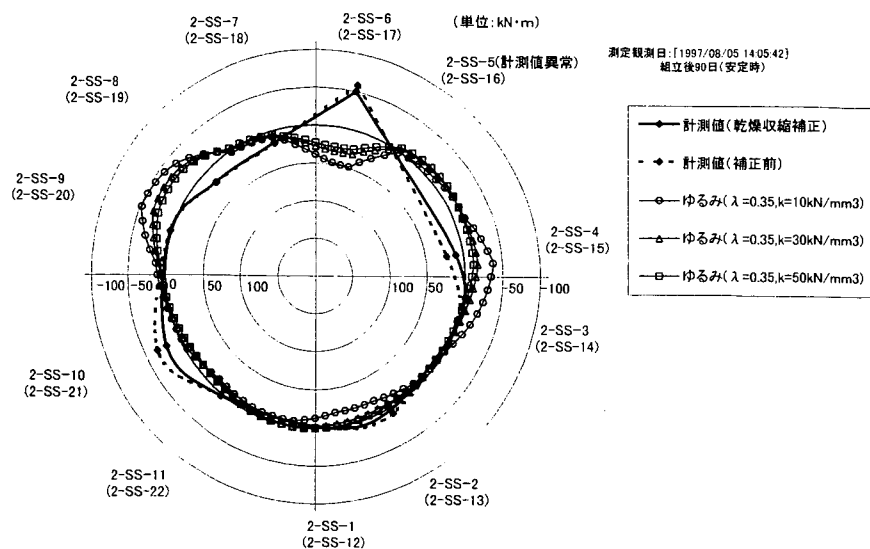


b) $\lambda=0.45$, 全土圧

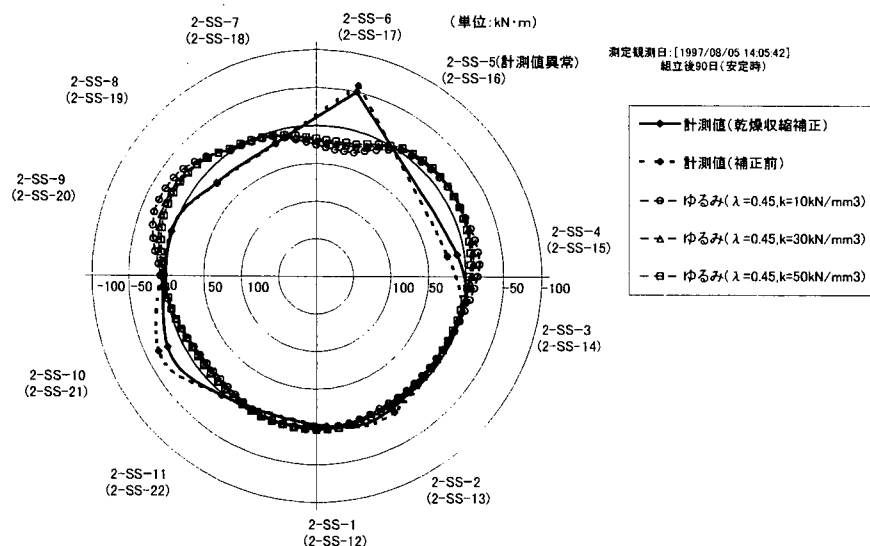


c) $\lambda=0.55$, 全土圧

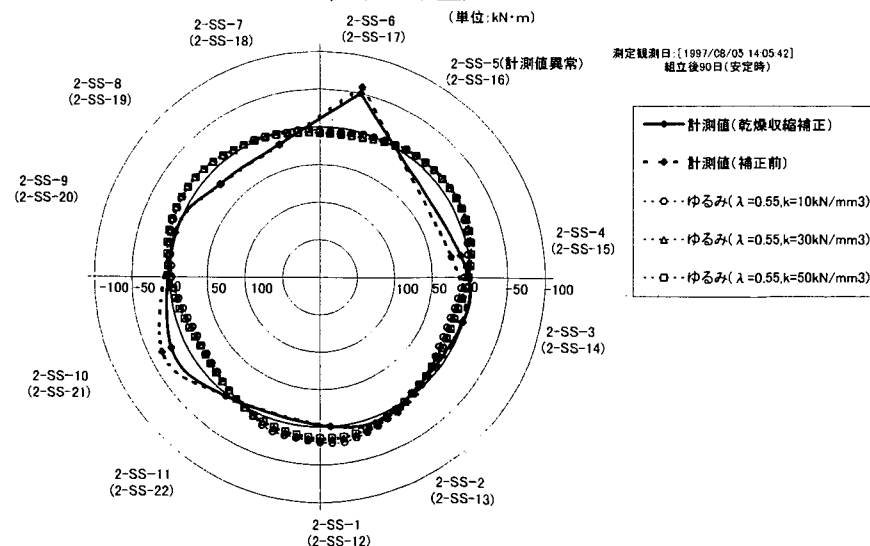
図-4.12(1) 計測断面力と計算断面力の断面分布図 (λ , k , 荷重条件の違い, 2041リング)



a) $\lambda=0.35$, ゆるみ土圧

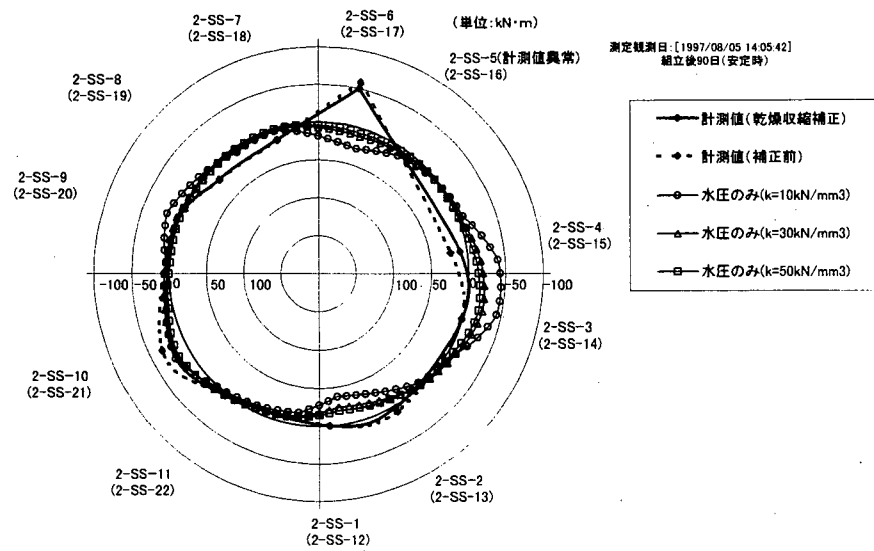


b) $\lambda=0.45$, ゆるみ土圧

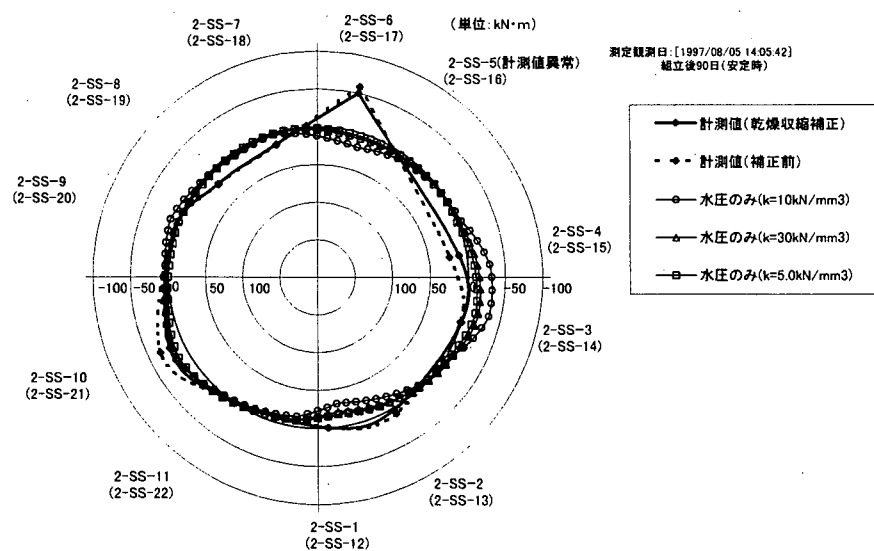


c) $\lambda=0.55$, ゆるみ土圧

図-4.12(2) 計測断面力と計算断面力の断面分布図 (λ , k , 荷重条件の違い, 2041リング)



a) 水圧のみ (慣用式)



b) 水圧のみ (静水圧式)

図-4.12(3) 計測断面力と計算断面力の断面分布図 (λ , k , 荷重条件の違い, 2041リング)

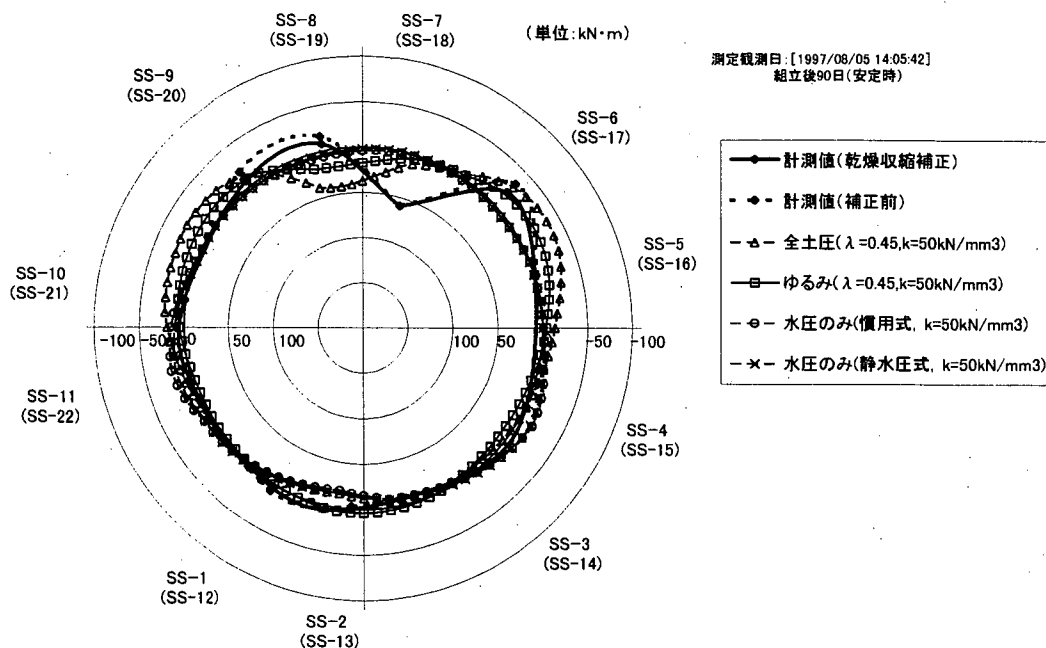


図-4.13(1) 計測断面力と計算断面力の断面分布図
($\lambda=0.45$, $k=50\text{kN/mm}^3$, 荷重条件の違い, 2040リング)

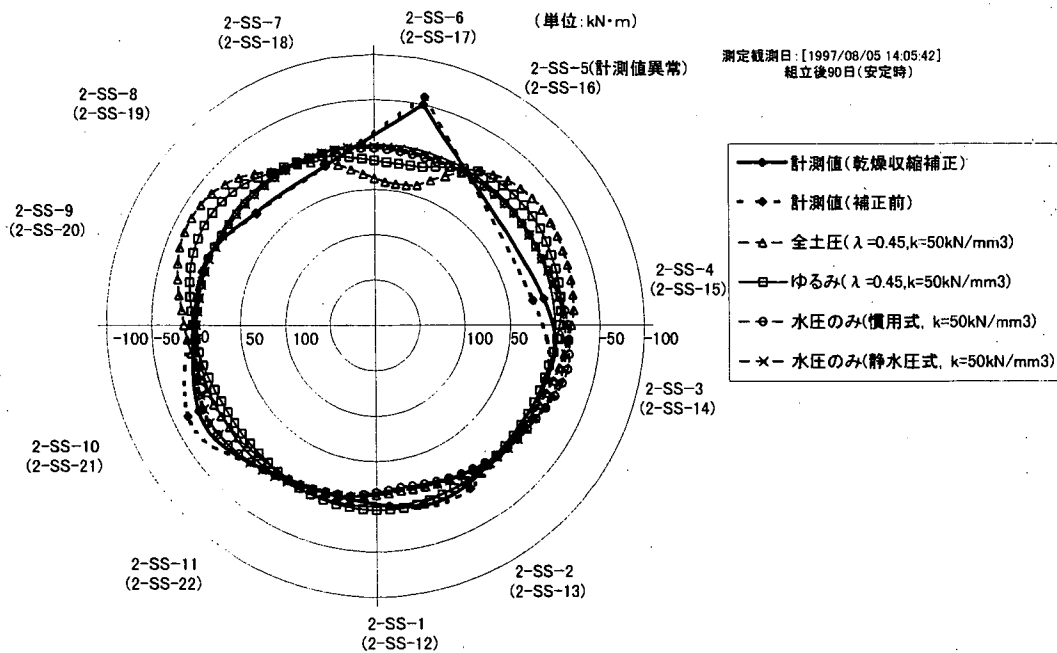


図-4.13(2) 計測断面力と計算断面力の断面分布図
($\lambda=0.45$, $k=50\text{kN/mm}^3$, 荷重条件の違い, 2041リング)

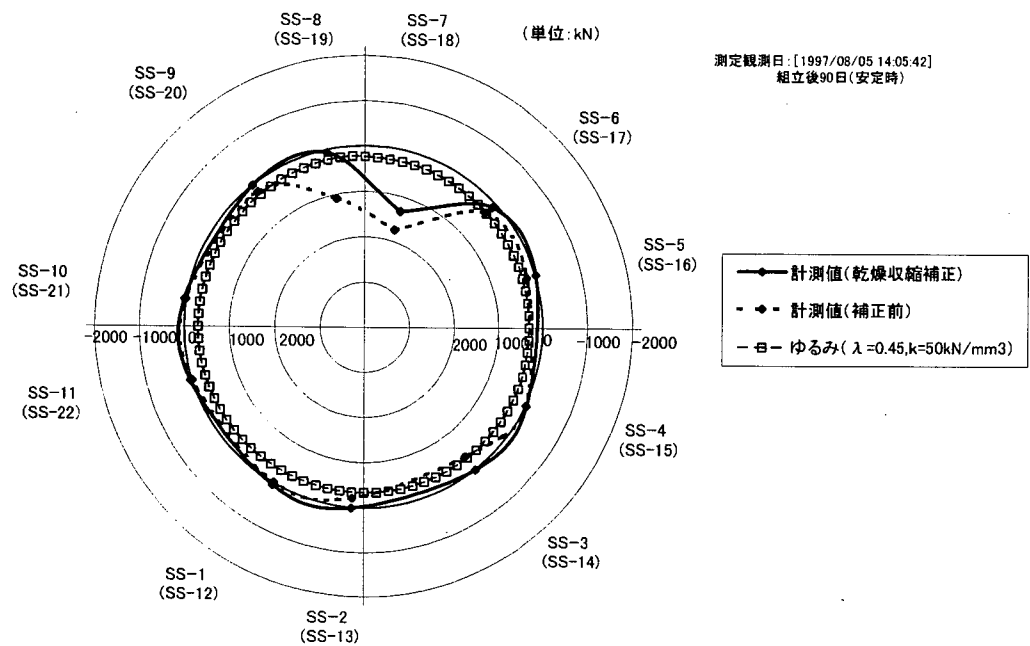
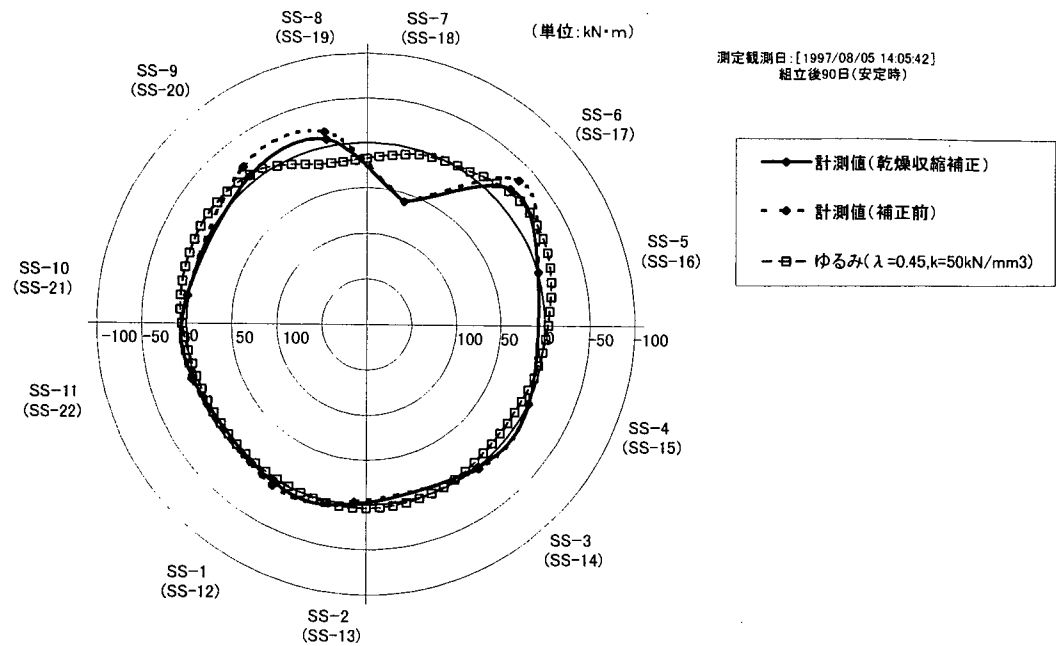
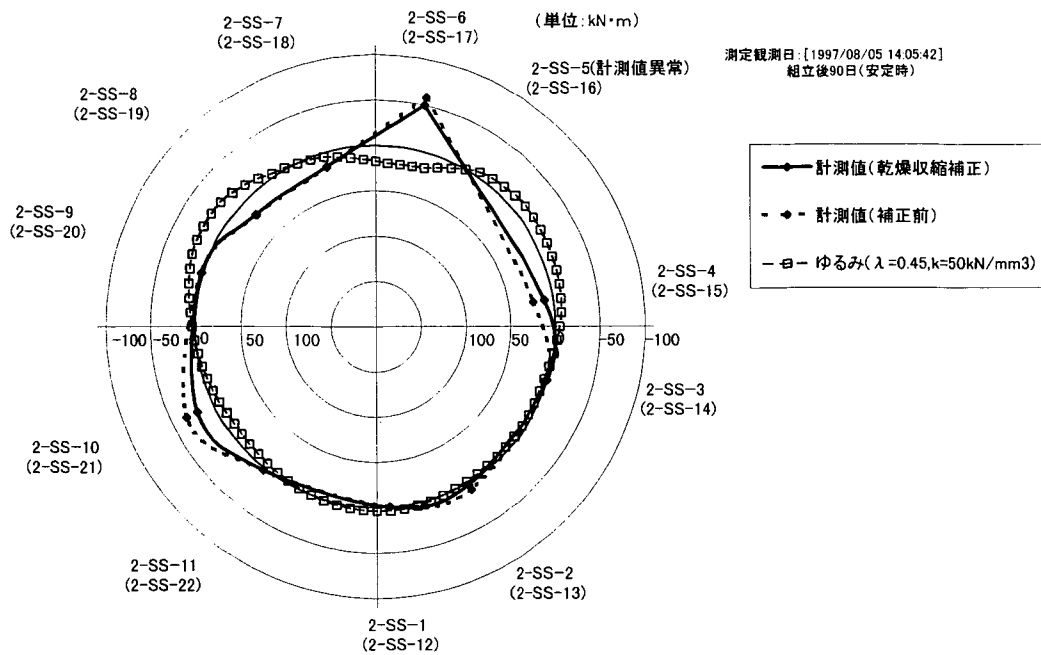
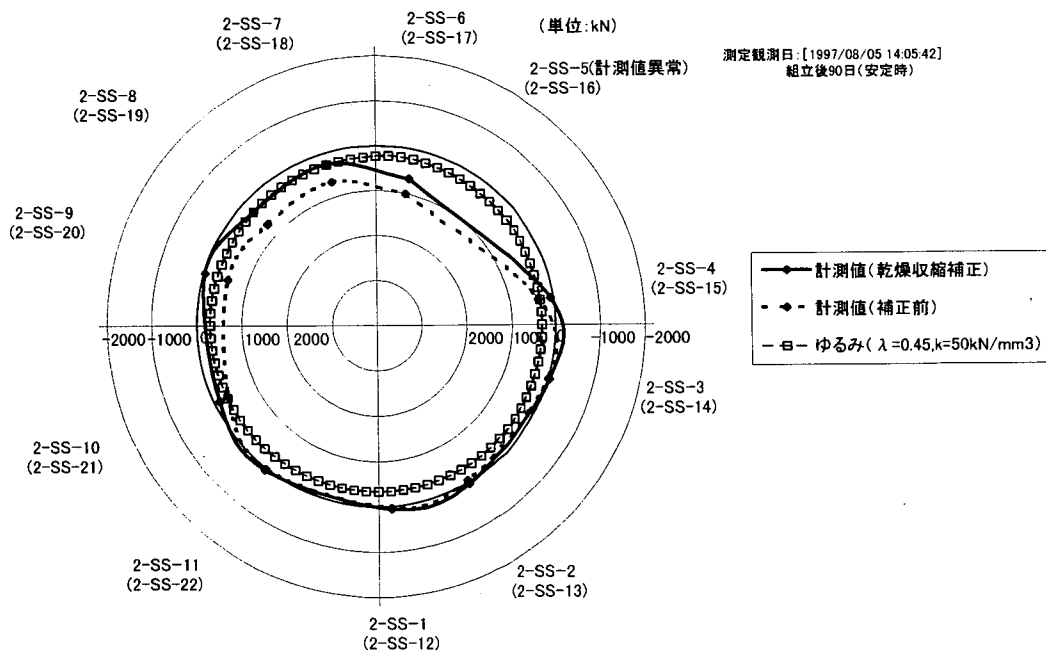


図-4.14(1) 計測断面力に近似する計算断面力の断面分布図
($\lambda=0.45$, $k=50\text{kN/mm}^3$, ゆるみ土圧, 2040リッパ)



a) 曲げモーメント



b) 軸力

図-4.14(2) 計測断面力に近似する計算断面力の断面分布図
($\lambda=0.45$, $k=50\text{kN/mm}^3$, ゆるみ土圧, 2041リング)

2) 解析方法の違いによる算定結果の検討

地盤反力の考え方を部分地盤ばね、回転ばね定数を計算値とした場合（基本設定）の解析と回転ばね定数を実験値（ $8.88\text{MN}\cdot\text{m}/\text{rad}$ ）とした場合および地盤反力を全周地盤ばねとした場合（引張側の地盤ばね定数の値については圧縮側の1/2の値に設定）による結果の違いを検討するために計測断面力と各解析方法による計算断面力（ $\lambda=0.45$ 、 $k=50\text{kN}/\text{mm}^3$ の場合）の荷重条件の違いによる断面分布図を図－4.15(1)～(4)、図－4.16(1)～(4)に示す。

また部分地盤ばね、回転ばね定数が計算値（基本設定）の解析において、計測断面力（乾燥収縮を考慮した補正值）の断面分布に近似している解析ケース（側方土圧係数 $\lambda=0.45$ 、地盤反力係数 $k=50\text{kN}/\text{mm}^3$ 、ゆるみ土圧）を基本ケースとし、回転ばね定数が実験値（ $8.88\text{MN}\cdot\text{m}/\text{rad}$ ）の場合と全周地盤ばねの場合の最大曲げモーメントを比較したものを表－4.7に示す。表中の最大曲げモーメントの比は基本ケースの最大曲げモーメントを1として求めたものである。各解析方法とも曲げモーメントの断面分布モードには大きな差は見られないが、回転ばね定数が $8.88\text{MN}\cdot\text{m}/\text{rad}$ の場合は基本ケースに比べ、正曲げの曲げモーメントはほぼ同値であるが、負曲げの曲げモーメントは2割ほど大きくなっている。また、全周地盤ばねの場合は正曲げ、負曲げとも曲げモーメントが部分地盤ばね（基本ケース）の場合の約6割程度となっている。これより、設計時に全周地盤ばねモデルを用いる場合は側方土圧係数、地盤反力係数の設定によっては過小な断面力を算出する可能性があるため、地盤条件等を十分に考慮したうえで慎重に設定する必要があると言える。

表－4.7 各解析方法の最大曲げモーメントの比較（ $\lambda=0.45$ 、 $k=50\text{kN}/\text{mm}^3$ ，ゆるみ土圧）

解析ケース		基本ケース	回転ばねの変更	地盤ばねの変更
地盤反力の考え方		部分地盤ばね		全周地盤ばね
回転ばね定数($\text{MN}\cdot\text{m}/\text{rad}$)	正曲げ	37.3(計算値)	8.88(実験値)	37.3(計算値)
	負曲げ	65.7(計算値)	8.88(実験値)	65.7(計算値)
正曲げ	最大曲げモーメント M_{max} ($\text{kN}\cdot\text{m}$)	19.2	19.9	10.8
	M_{max} の大きさの比	1.00	1.04	0.56
負曲げ	最大曲げモーメント M_{max} ($\text{kN}\cdot\text{m}$)	-19.6	-23.4	-12.2
	M_{max} の大きさの比	1.00	1.19	0.62

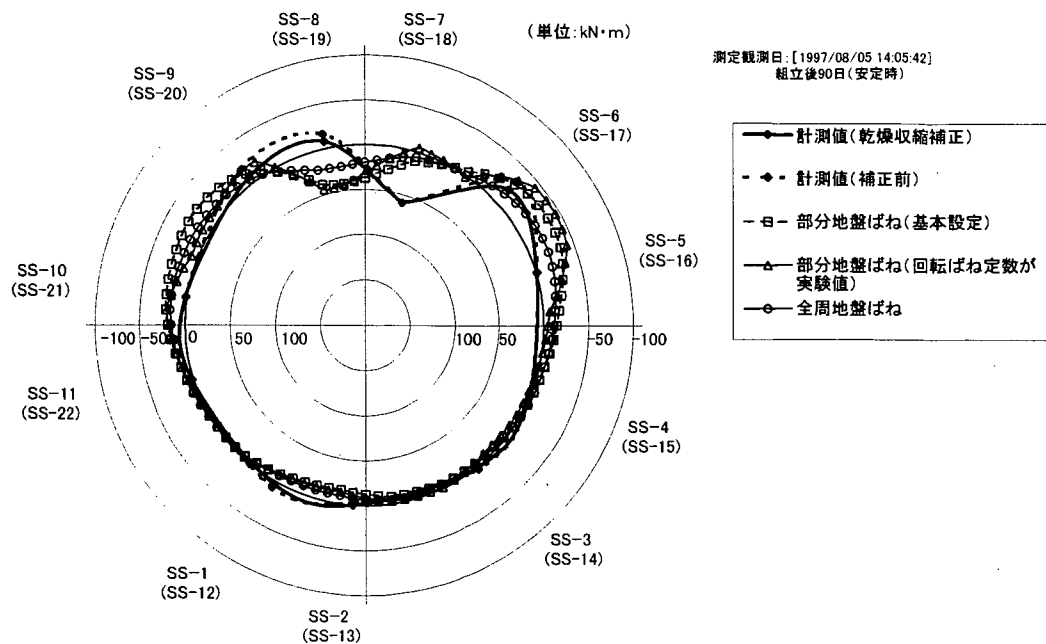


図-4.15(1) 計測断面力と各解析方法による計算断面力の断面分布図
($\lambda=0.45$, $k=50\text{kN/mm}^3$, 全土圧, 2040リソ')

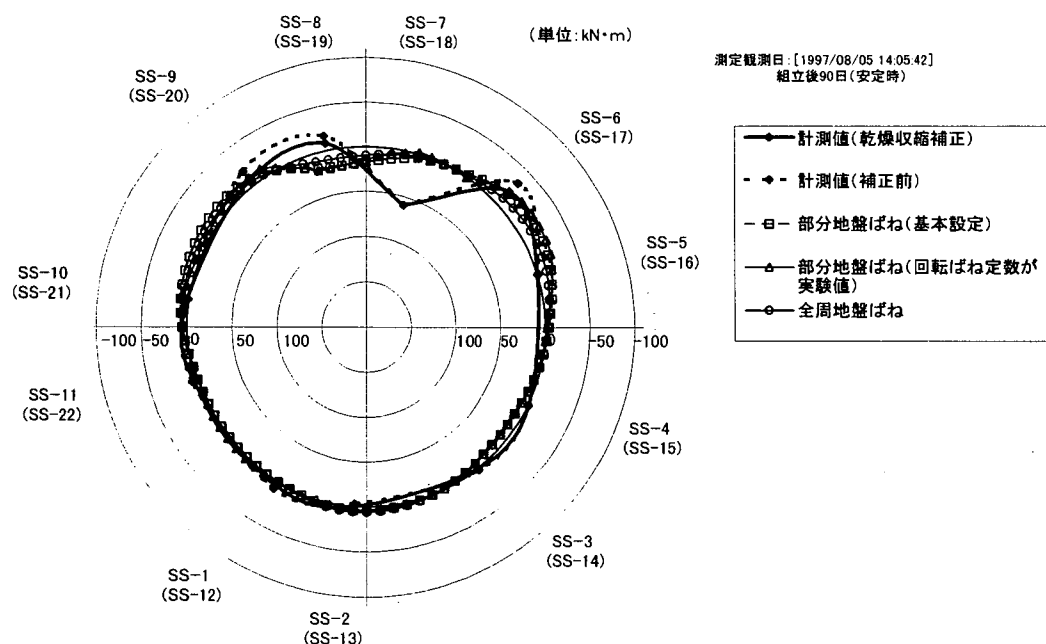
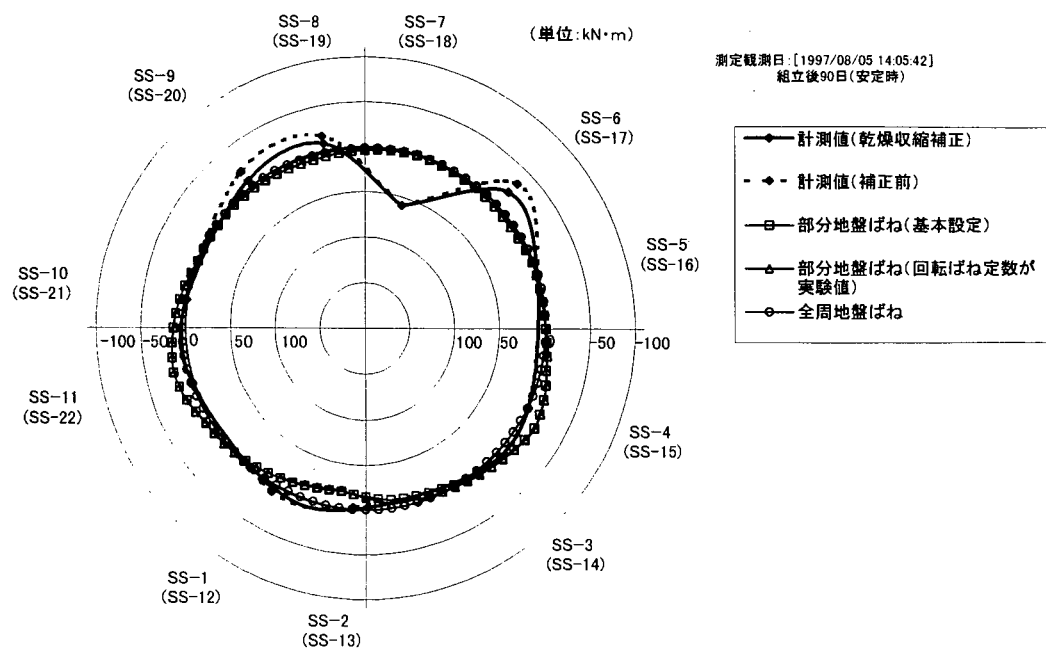
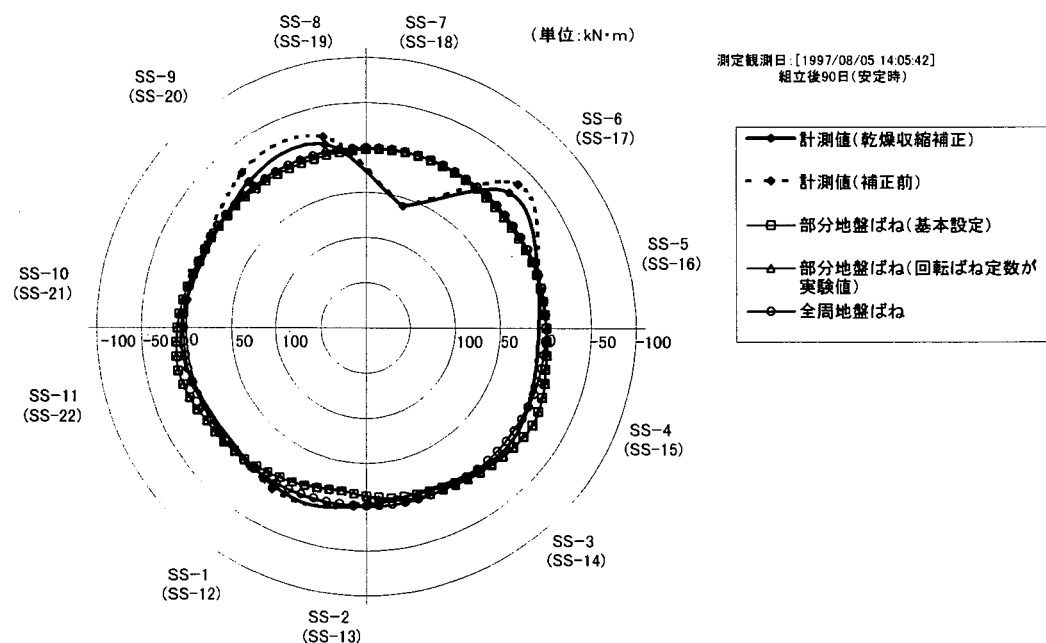


図-4.15(2) 計測断面力と各解析方法による計算断面力の断面分布図
($\lambda=0.45$, $k=50\text{kN/mm}^3$, ゆるみ土圧, 2040リソ')



図－4.15(3) 計測断面力と各解析方法による計算断面力の断面分布図
($k=50\text{kN/mm}^3$, 水圧のみ(慣用式), 2040リング)



図－4.15(4) 計測断面力と各解析方法による計算断面力の断面分布図
($k=50\text{kN/mm}^3$, 水圧のみ(静水圧式), 2040リング)

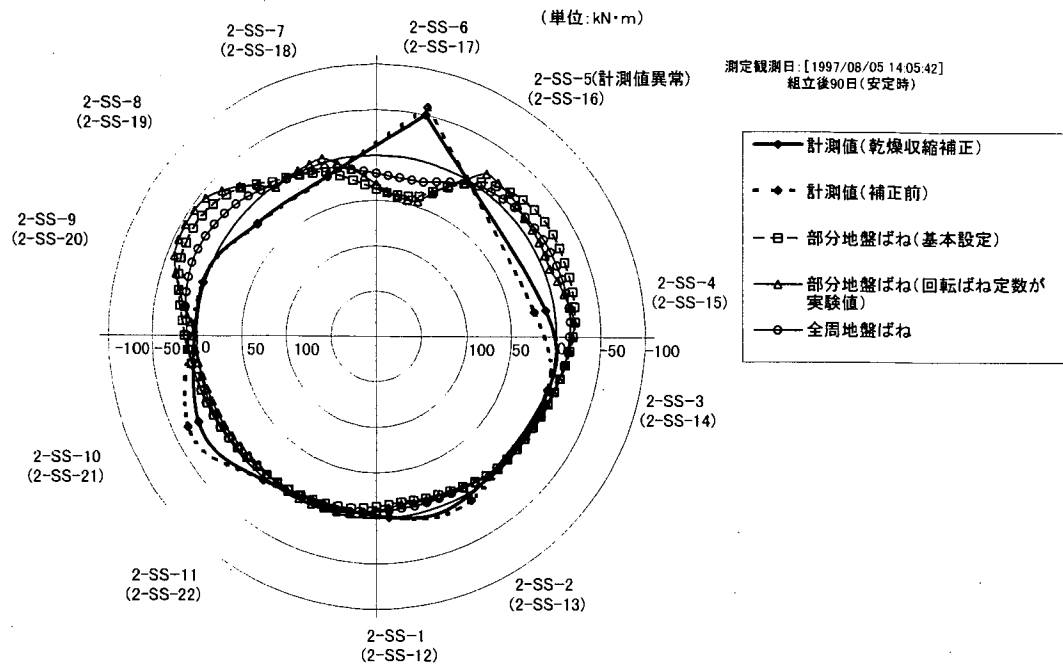


図-4.16(1) 計測断面力と各解析方法による計算断面力の断面分布図
($\lambda=0.45$, $k=50\text{kN/mm}^3$, 全土圧, 2041リング)

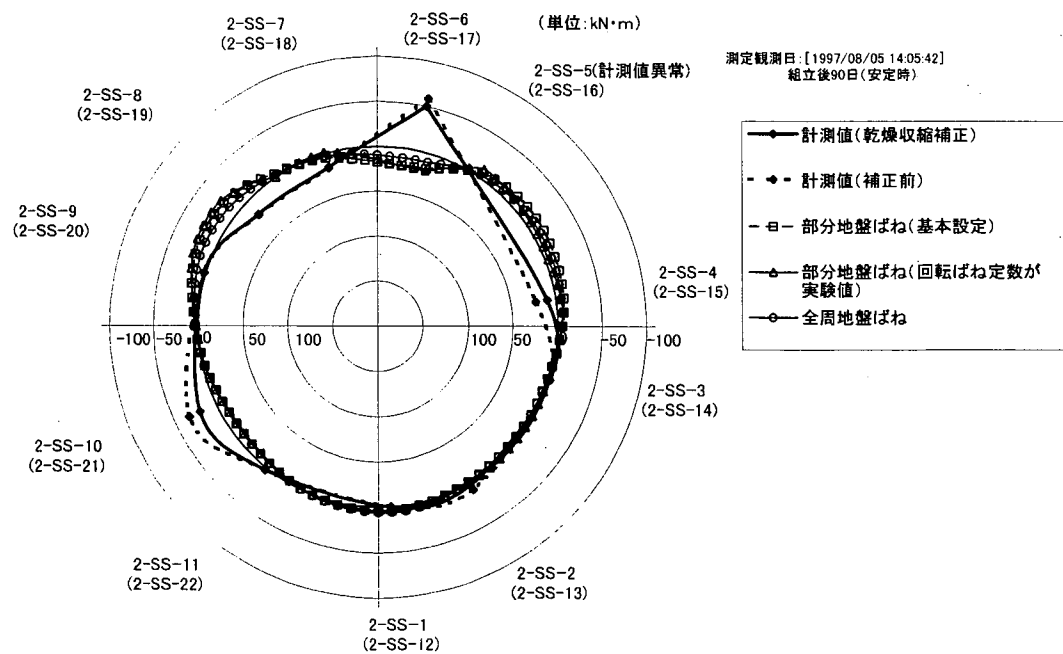


図-4.16(2) 計測断面力と各解析方法による計算断面力の断面分布図
($\lambda=0.45$, $k=50\text{kN/mm}^3$, ゆるみ土圧, 2041リング)

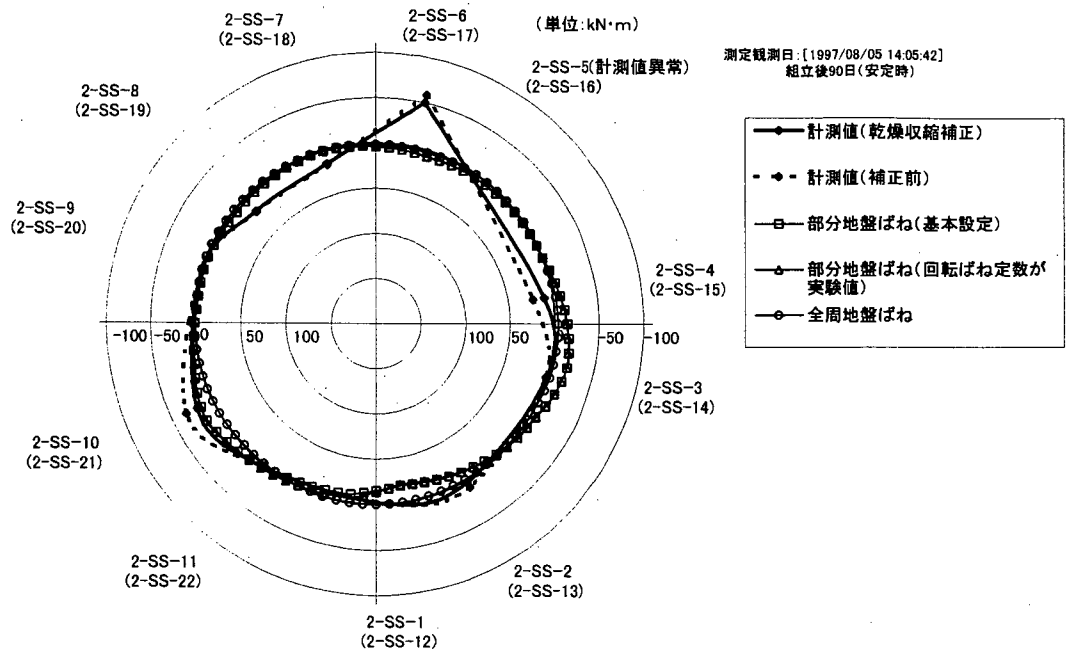


図-4.16(3) 計測断面力と各解析方法による計算断面力の断面分布図
($k=50\text{kN/mm}^3$, 水圧のみ(慣用式), 2041リング)

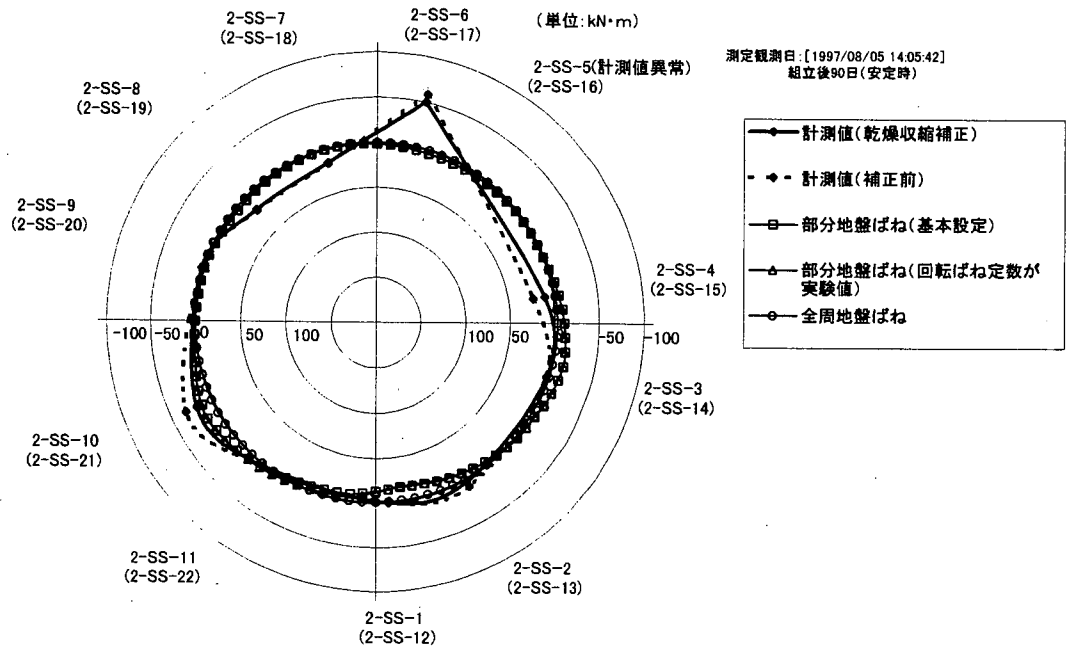


図-4.16(4) 計測断面力と各解析方法による計算断面力の断面分布図
($k=50\text{kN/mm}^3$, 水圧のみ(静水圧式), 2041リング)

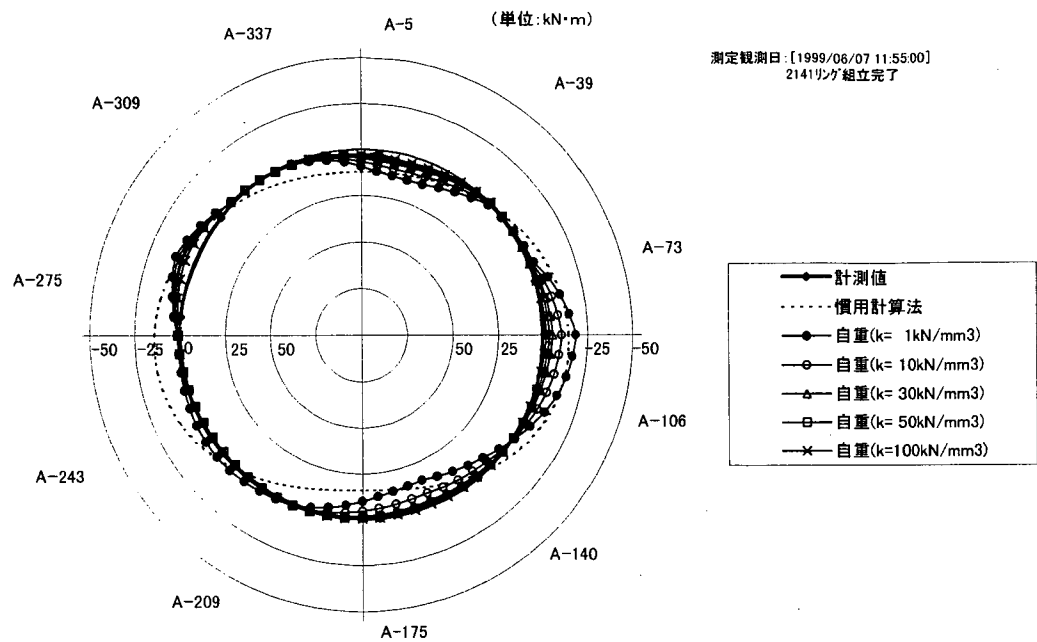
(2) 楠味美共同溝の場合

1) テール内における自重の影響

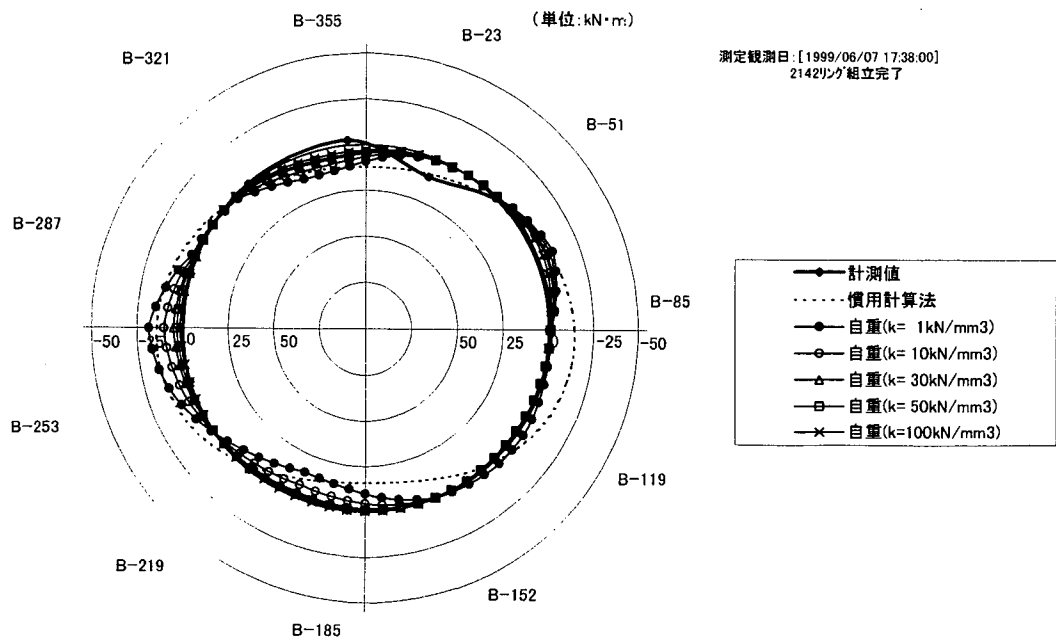
セグメント組立直後の鉄筋計の計測値から求めた断面力と解析より得られた断面力の断面分布図を図－4.17(1)～(2)に示す。図には参考として設計時に慣用計算法で求められた自重による曲げモーメントの値も示している。また、計測値および解析より得られた断面力について、最大曲げモーメント値を表－4.8に示す。図－4.17(1)～(2)および表－4.8より局所的な値は除けば概ね計測断面力が計算断面力より小さいことが分かる。従来の設計法である慣用計算法においては、テール内でのセグメントが自重だけで変形することを前提に、地盤反力を考慮せずに自重による断面力を算定し、これに土水圧が作用した場合の断面力を重ね合わせて設計断面力を決定している。しかし、現場での計測値からはテール内での発生断面力は小さく、これまで考慮していた自重による設計断面力を低減できることを示している。ただし、今回はシールド外径が4.75mと中口径であるため、大口径の場合においては別途検討が必要であると考えられる。

表－4.8 自重の影響に関する計測および解析による最大曲げモーメント値

	最大曲げモーメント Mmax (kN・m) (正曲げ)	最大曲げモーメント Mmax (kN・m) (負曲げ)
2 1 4 1 リング計測値	2.23	—
2 1 4 2 リング計測値	10.71	-2.64
地盤反力係数 $k = 1\text{kN/mm}^3$	14.66	-18.02
地盤反力係数 $k = 10\text{kN/mm}^3$	8.78	-9.97
地盤反力係数 $k = 30\text{kN/mm}^3$	6.18	-6.98
地盤反力係数 $k = 50\text{kN/mm}^3$	5.08	-6.04
地盤反力係数 $k = 100\text{kN/mm}^3$	3.77	-4.59
慣用計算法 (設計時)	15.53	-14.13



図－4.17(1) 自重の影響に関する計測断面力と計算断面力の断面分布図 (2141リング)



図－4.17(2) 自重の影響に関する計測断面力と計算断面力の断面分布図 (2142リング)

2) 地盤反力・側方土圧係数および荷重条件の検討

鉄筋計の計測値から求めた断面力（調布共同溝を参考としてコンクリートの乾燥収縮の影響を考慮した補正值および補正前の値）と地盤反力の考え方を部分地盤ばね、回転ばね定数を計算値とした場合（基本設定）の解析より得られた断面力について、側方土圧係数 λ 、地盤反力係数 k 、荷重条件の違いによる最大曲げモーメント値を表－4.9、図－4.18(1)～(2)に示す。ただし、2142リングの計測点B-287の計測断面力については図－3.22(2) (p.121) より組立後約20日を過ぎた時点で計測値の急激な変化が見られ、局所的な値であることからここでは除外して検討した。

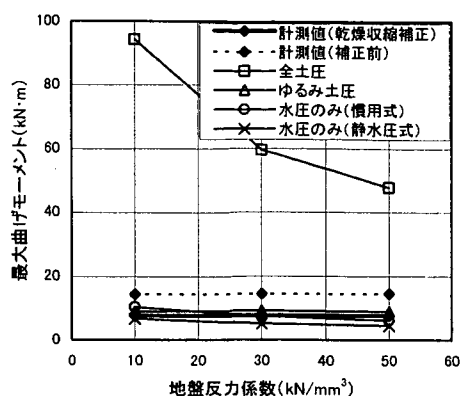
設計時においては、ゆるみ高さとセグメント外径の2倍を比較し、セグメント外径の2倍（=9.5m）の土水圧（側方土圧係数 $\lambda=0.45$ 、地盤反力係数 $k=50\text{kN/mm}^3$ ）を採用しセグメント仕様を決定しているが、解析からは水圧のみが作用する結果となった。これは、土圧計および水圧計による計測値とも一致している。ただし、水圧分布形式を慣用式にした場合と静水圧分布にした場合とでは静水圧分布とした場合の方が約2～3割程度最大曲げモーメントの計算値が小さくなっている。

また、計測断面力と計算断面力の断面分布について、側方土圧係数 λ 、地盤反力係数 k 、荷重条件の違いにより整理したものを図－4.19(1)～(3)、図－4.20(1)～(3)に示す。これより、荷重条件を水圧のみ（慣用式）とし、地盤反力係数を $k=50\text{kN/mm}^3$ （設計時と同様の値）と設定した場合に概ね計測断面力（乾燥収縮を考慮した補正值）の断面分布に近似していることが分かる（図－4.21(1)～(2)参照）。近似する場合（水圧のみ（慣用式）、 $k=50\text{kN/mm}^3$ に設定）の曲げモーメントとその設定での軸力の断面分布図を図－4.22(1)～(2)に示す。

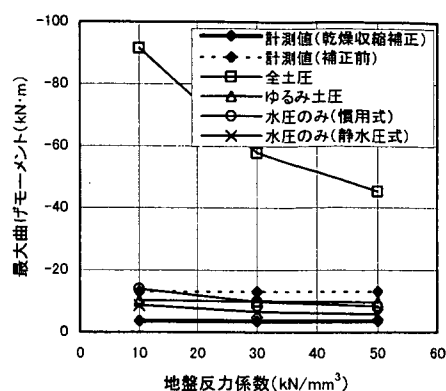
表－4.9 地盤定数（ λ 、 k ）・荷重条件と最大曲げモーメント値

（単位：kN・m）

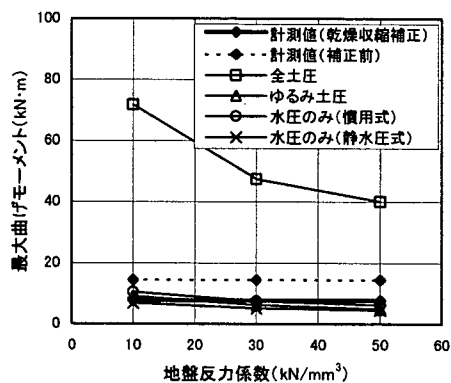
		最大曲げモーメント（正曲げ）			最大曲げモーメント（負曲げ）		
荷重条件	k (kN/mm ³)	$\lambda=0.35$	$\lambda=0.45$	$\lambda=0.55$	$\lambda=0.35$	$\lambda=0.45$	$\lambda=0.55$
全土圧	10	94.30	71.72	49.44	-91.47	-69.06	-47.52
	30	59.60	47.36	36.99	-57.66	-45.76	-35.17
	50	47.78	40.04	32.01	-45.24	-37.54	-29.99
ゆるみ土圧	10	8.99	9.05	15.24	-10.09	-11.99	-19.53
	30	9.16	6.18	12.51	-10.07	-8.23	-14.02
	50	8.84	4.84	11.47	-9.67	-6.44	-11.70
水圧のみ （慣用式）	10	10.38			-13.85		
	30	7.44			-9.84		
	50	6.17			-8.33		
水圧のみ （静水圧式）	10	6.80			-8.72		
	30	5.17			-6.56		
	50	4.52			-5.80		
計測値 (2141リング)	乾燥収縮補正	7.68			-3.61		
	補正前	14.13			-13.00		
計測値 (2142リング)	乾燥収縮補正	6.64			-3.68		
	補正前	17.58			-14.35		



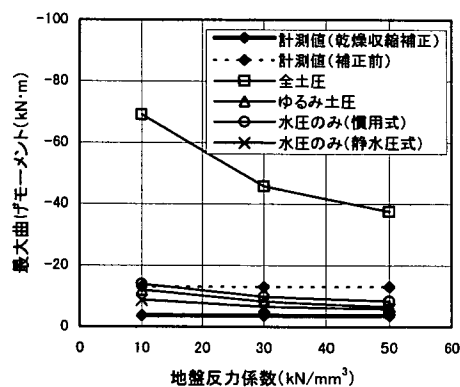
a) $\lambda = 0.35$ (正曲げ)



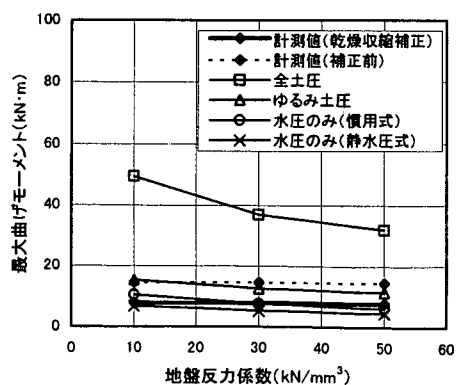
b) $\lambda = 0.35$ (負曲げ)



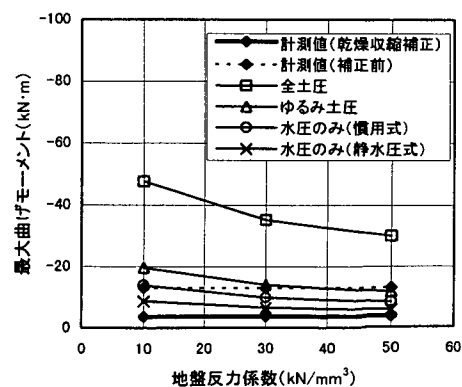
c) $\lambda = 0.45$ (正曲げ)



d) $\lambda = 0.45$ (負曲げ)

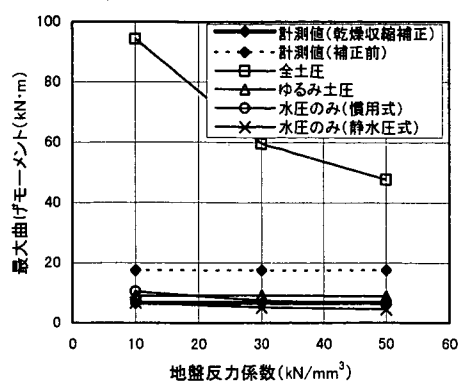


e) $\lambda = 0.55$ (正曲げ)

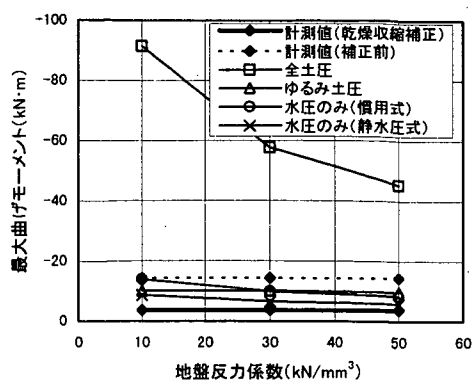


f) $\lambda = 0.55$ (負曲げ)

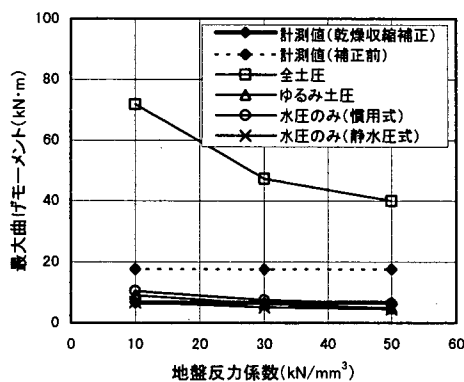
図-4.18(1) 地盤定数 (λ , k)・荷重条件と最大曲げモーメントの関係 (214リソク)



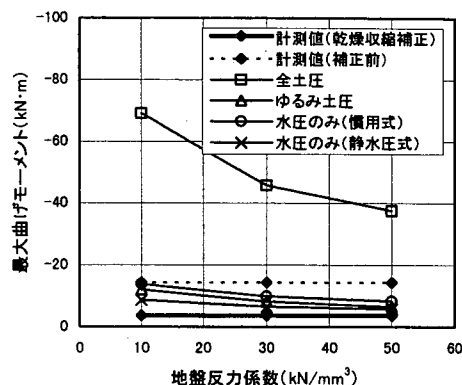
a) $\lambda=0.35$ (正曲げ)



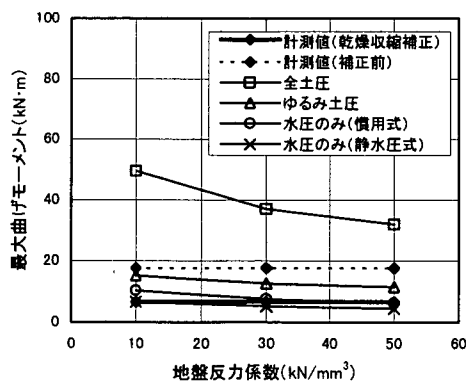
b) $\lambda=0.35$ (負曲げ)



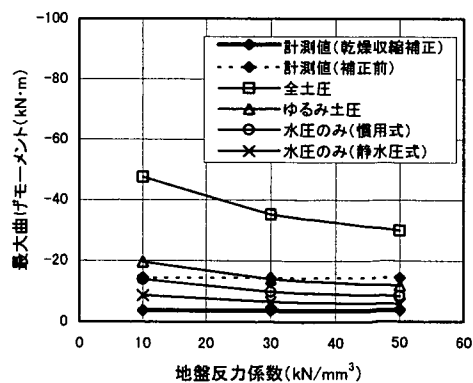
c) $\lambda=0.45$ (正曲げ)



d) $\lambda=0.45$ (負曲げ)

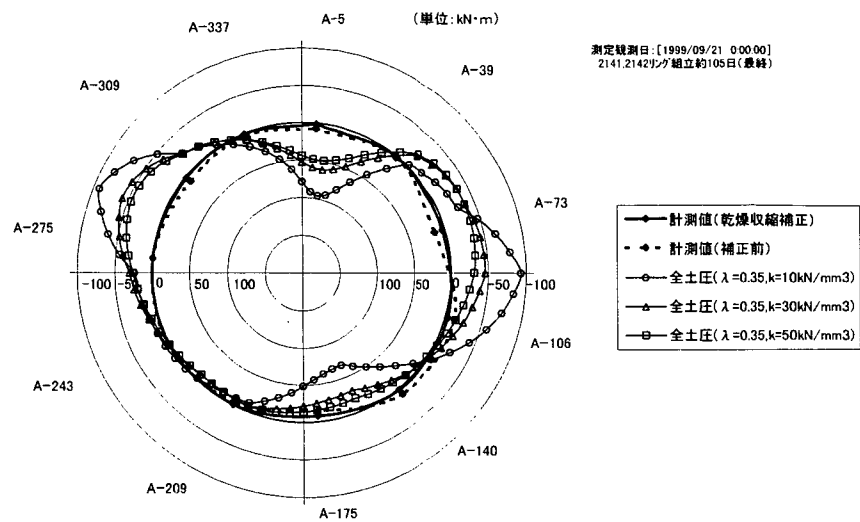


e) $\lambda=0.55$ (正曲げ)

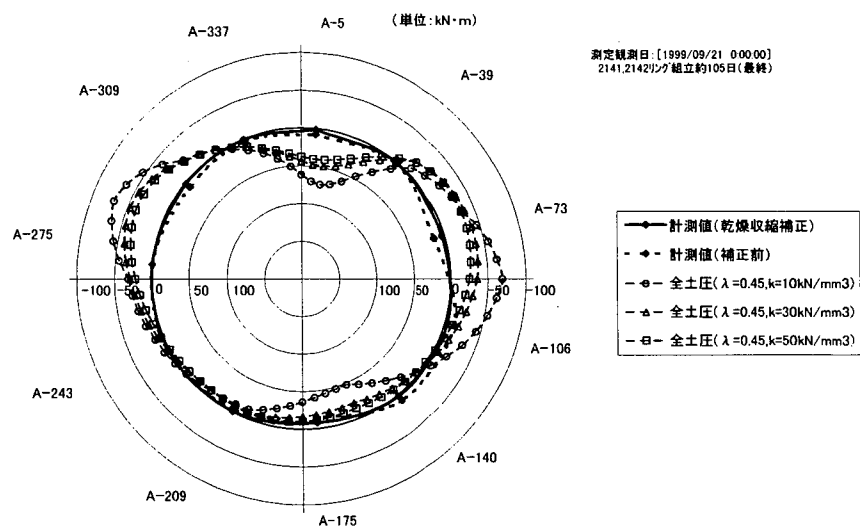


f) $\lambda=0.55$ (負曲げ)

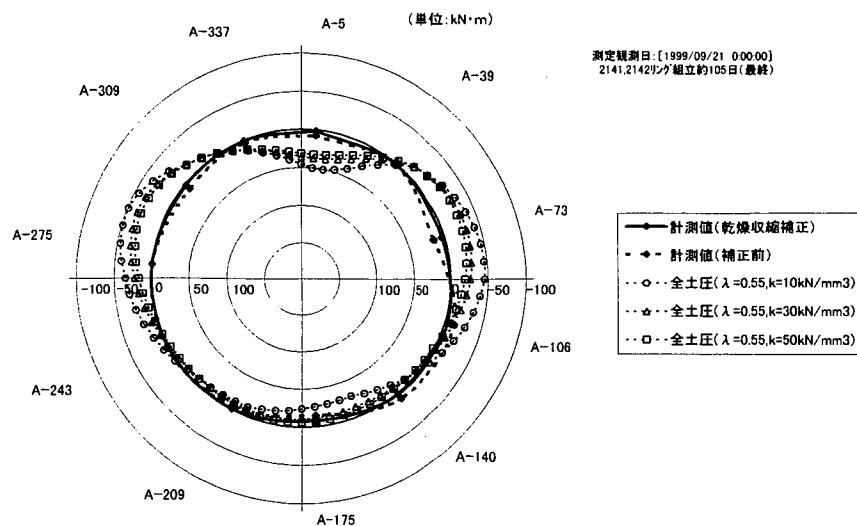
図-4.18(2) 地盤定数 (λ , k)・荷重条件と最大曲げモーメントの関係 (2142リング)



a) $\lambda=0.35$, 全土圧



b) $\lambda=0.45$, 全土圧



c) $\lambda=0.55$, 全土圧

図-4.19(1) 計測断面力と計算断面力の断面分布図 (λ , k , 荷重条件の違い, 2141リング)

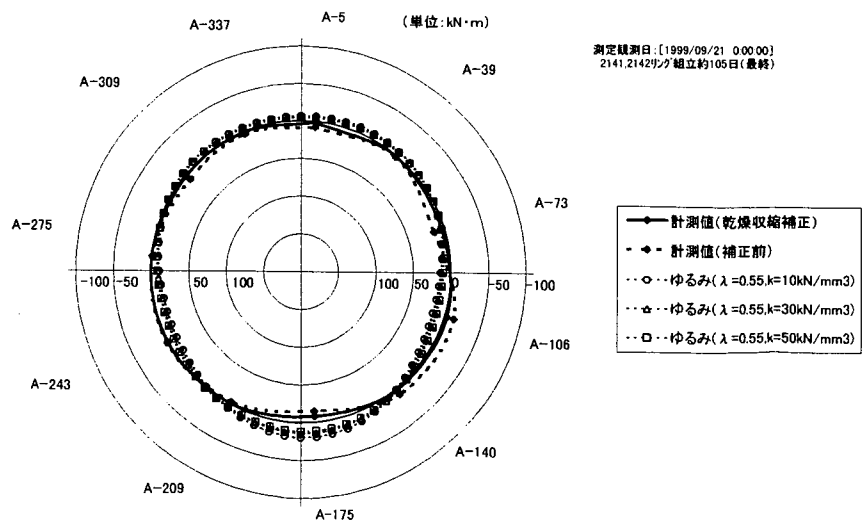
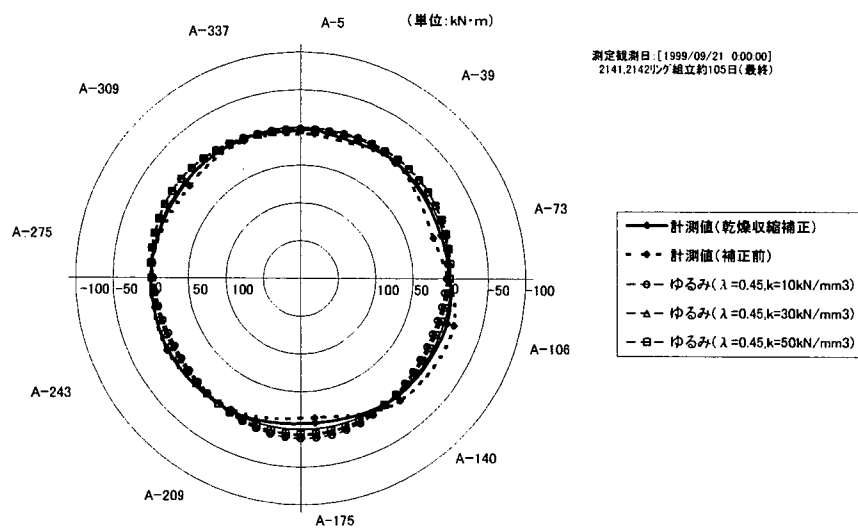
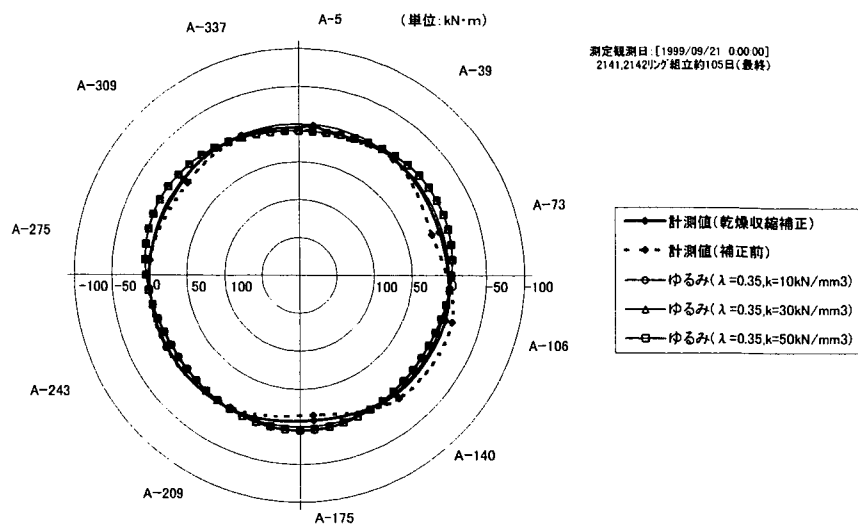


図-4.19(2) 計測断面力と計算断面力の断面分布図 (λ , k , 荷重条件の違い, 2141リング)

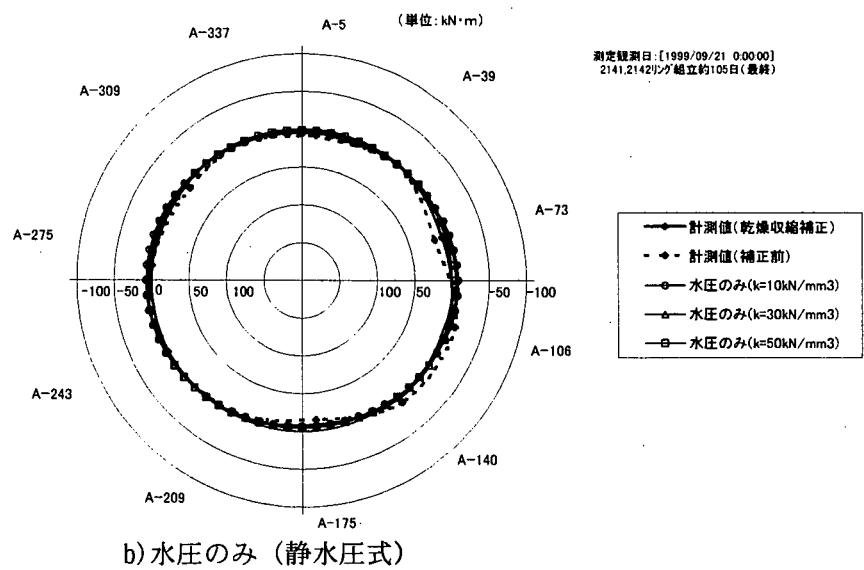
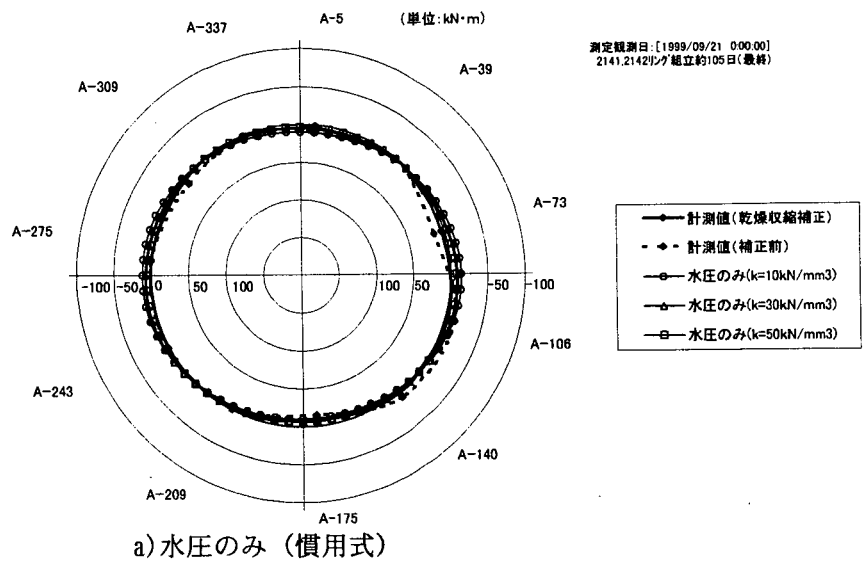


図-4.19(3) 計測断面力と計算断面力の断面分布図 (λ , k , 荷重条件の違い, 2141リング)

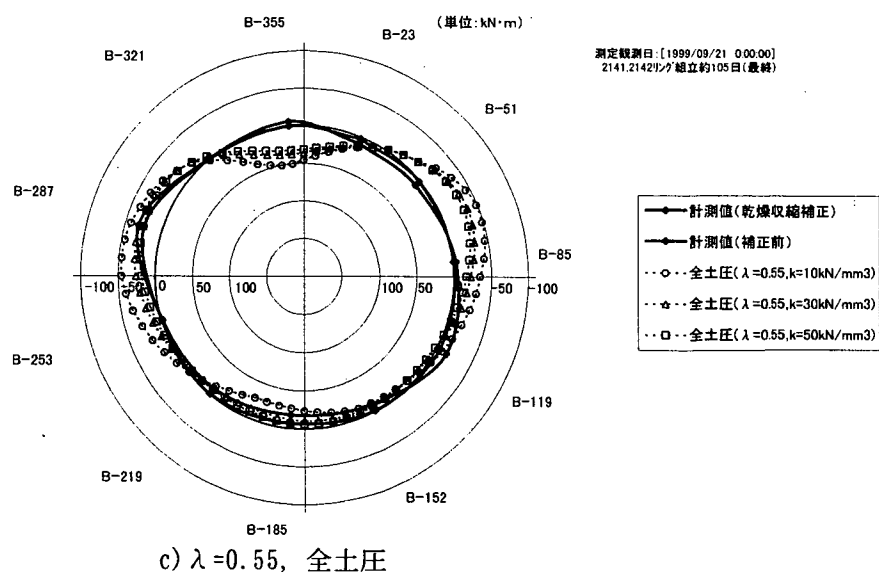
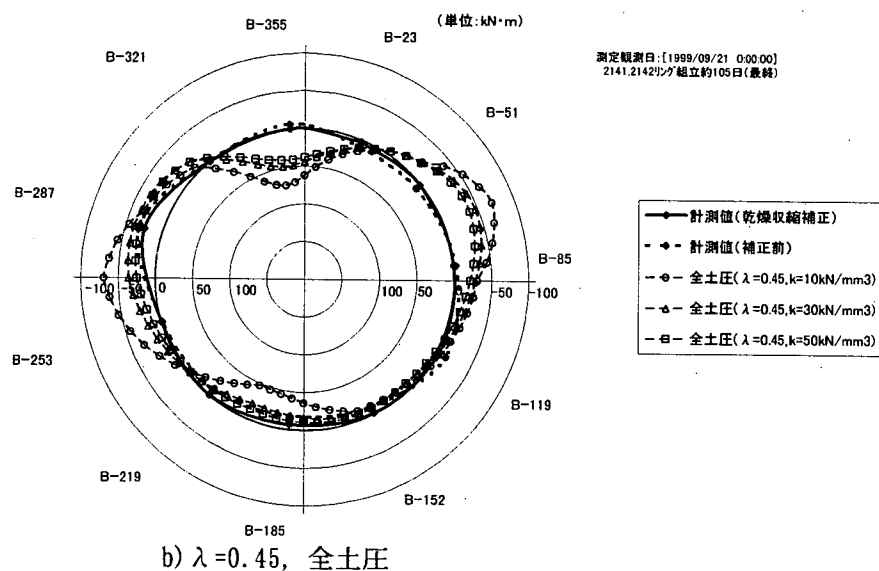
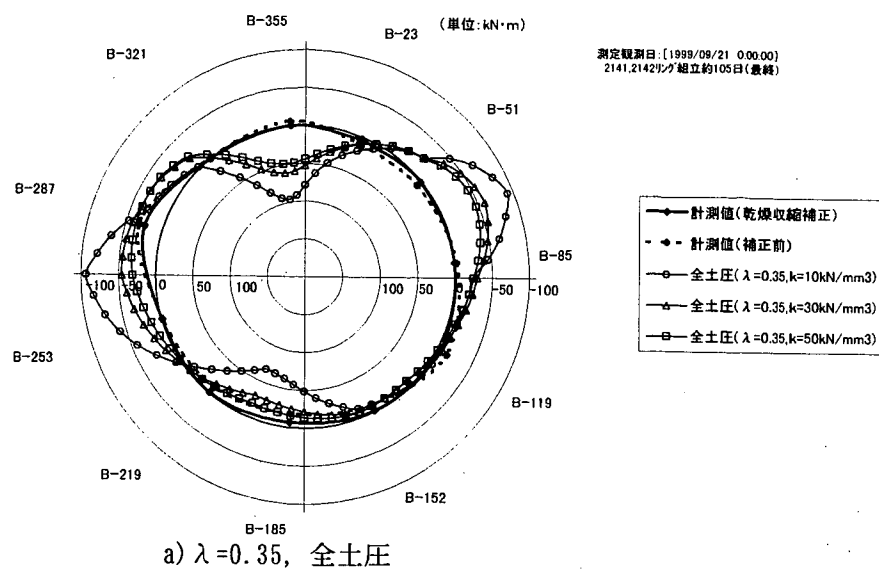


図-4.20(1) 計測断面力と計算断面力の断面分布図 (λ , k , 荷重条件の違い, 2142リソ)

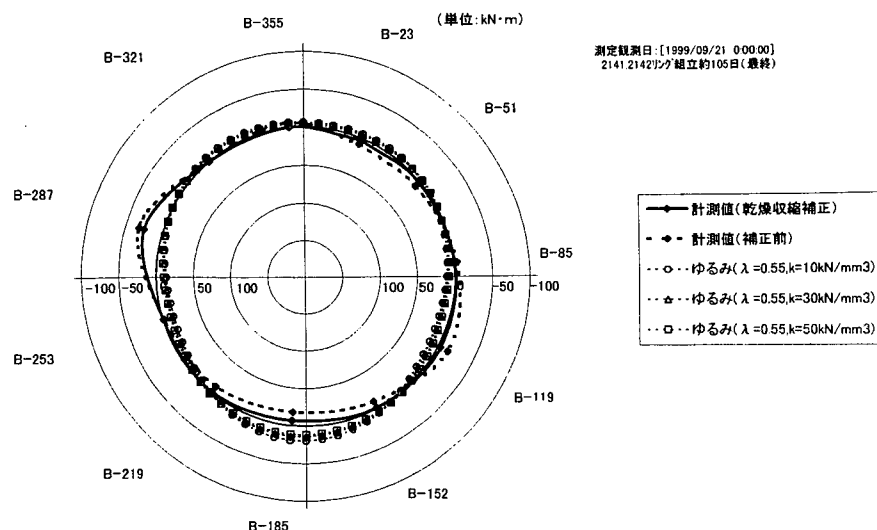
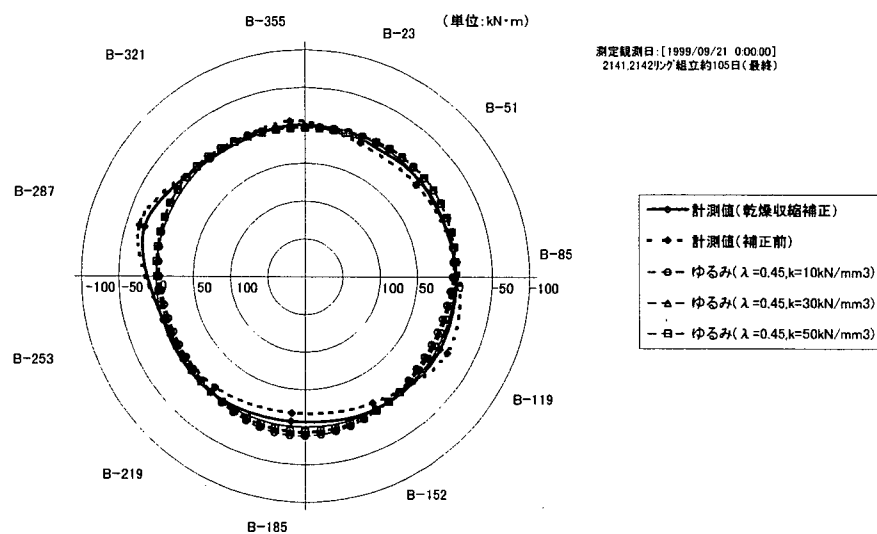
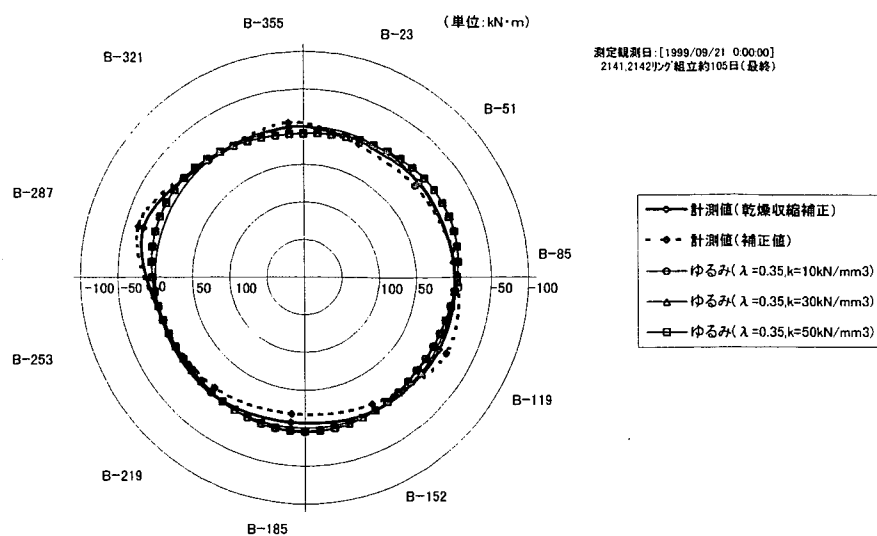


図-4.20(2) 計測断面力と計算断面力の断面分布図 (λ , k , 荷重条件の違い, 2142リング)

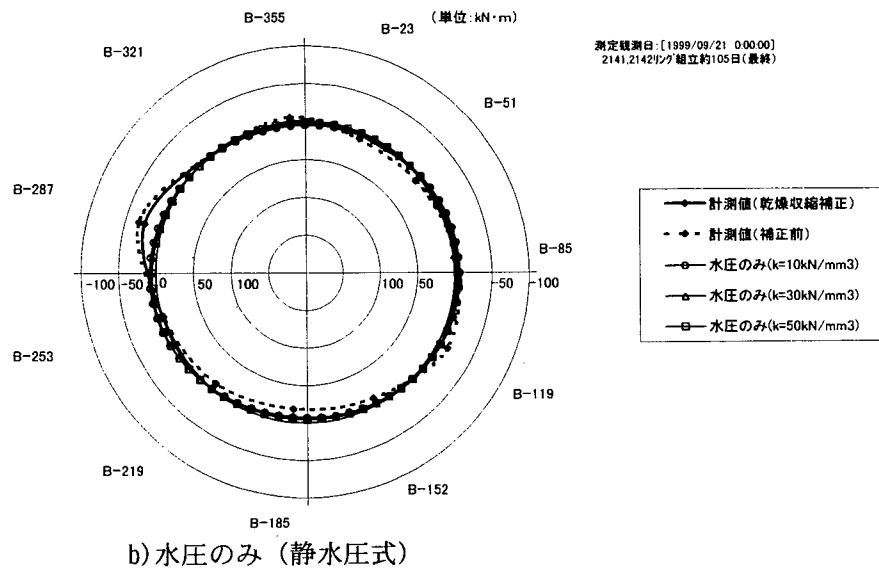
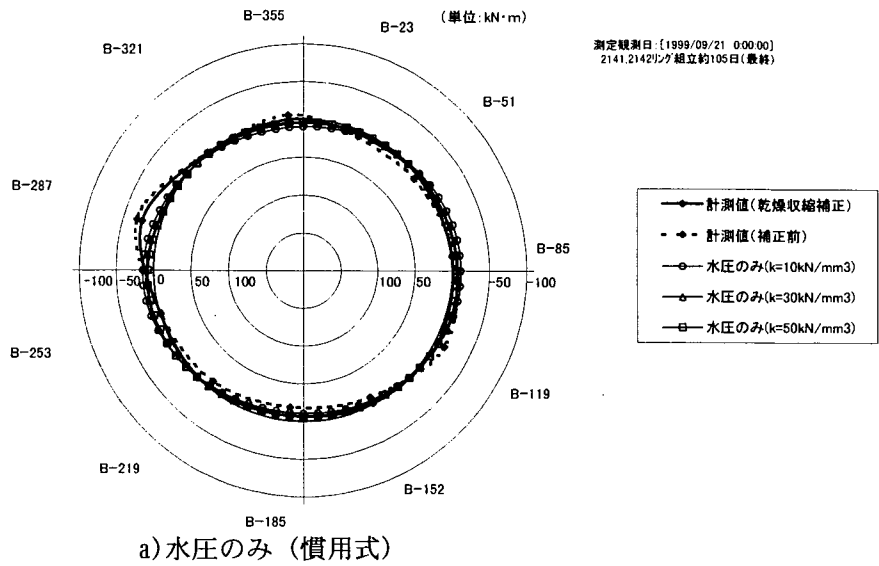


図-4.20(3) 計測断面力と計算断面力の断面分布図 (λ , k , 荷重条件の違い, 2142リング)

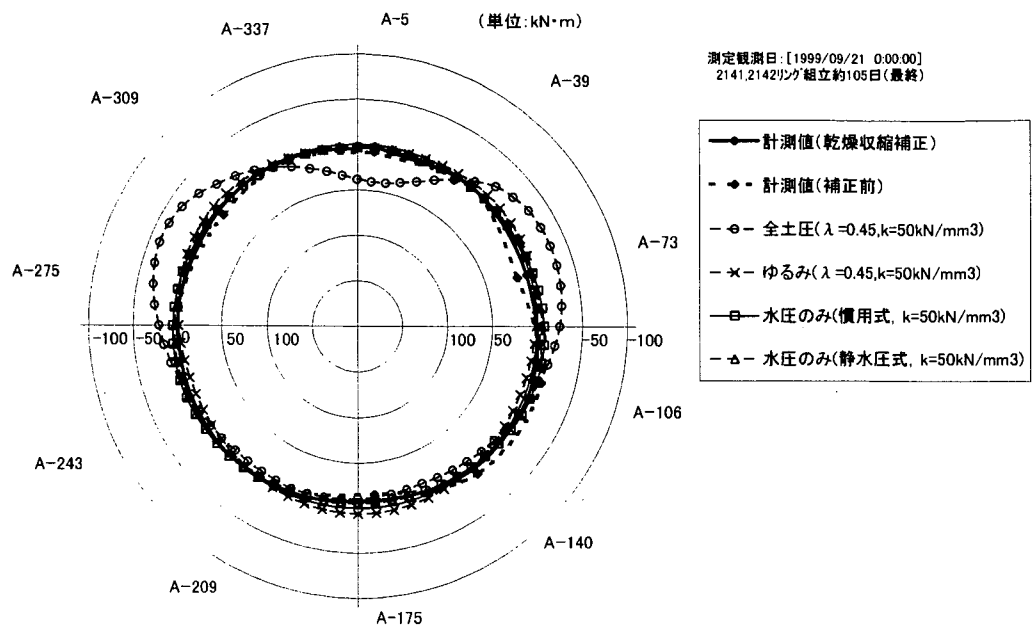


図-4.21(1) 計測断面力と計算断面力の断面分布図
($\lambda=0.45$, $k=50\text{kN/mm}^3$, 荷重条件の違い, 2141リング)

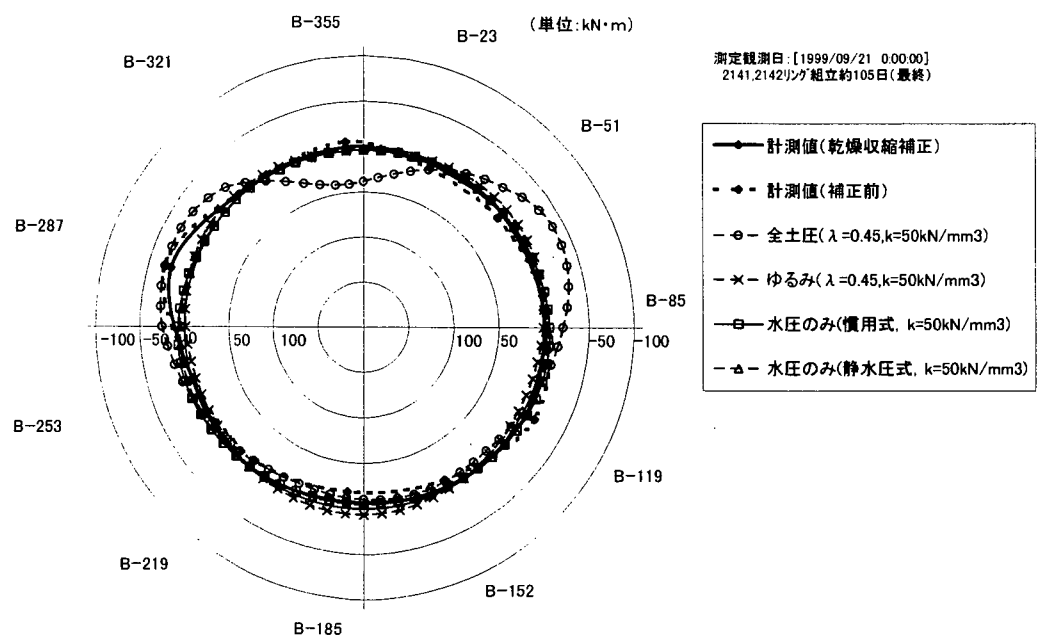


図-4.21(2) 計測断面力と計算断面力の断面分布図
($\lambda=0.45$, $k=50\text{kN/mm}^3$, 荷重条件の違い, 2142リング)

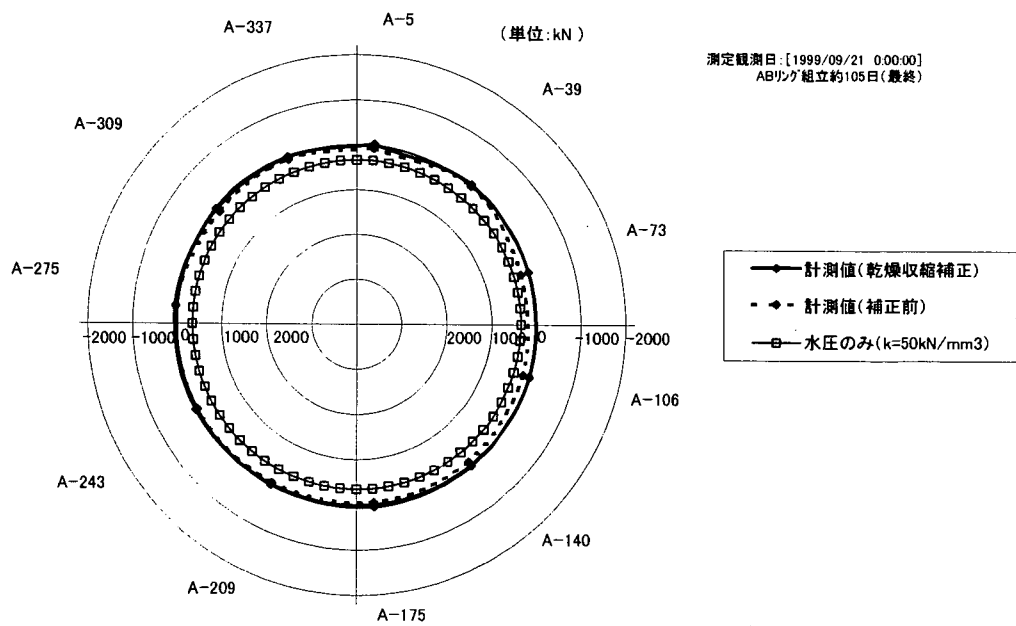
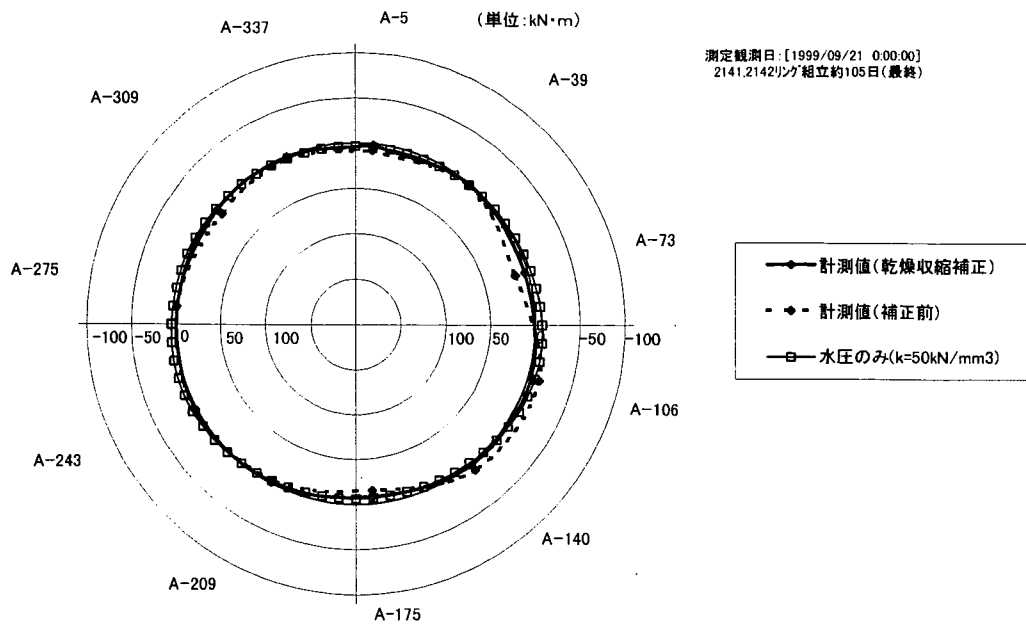


図-4.22(1) 計測断面力に近似する計算断面力の断面分布図
($k=50\text{kN/mm}^3$, 水圧のみ(慣用式), 2141リング)

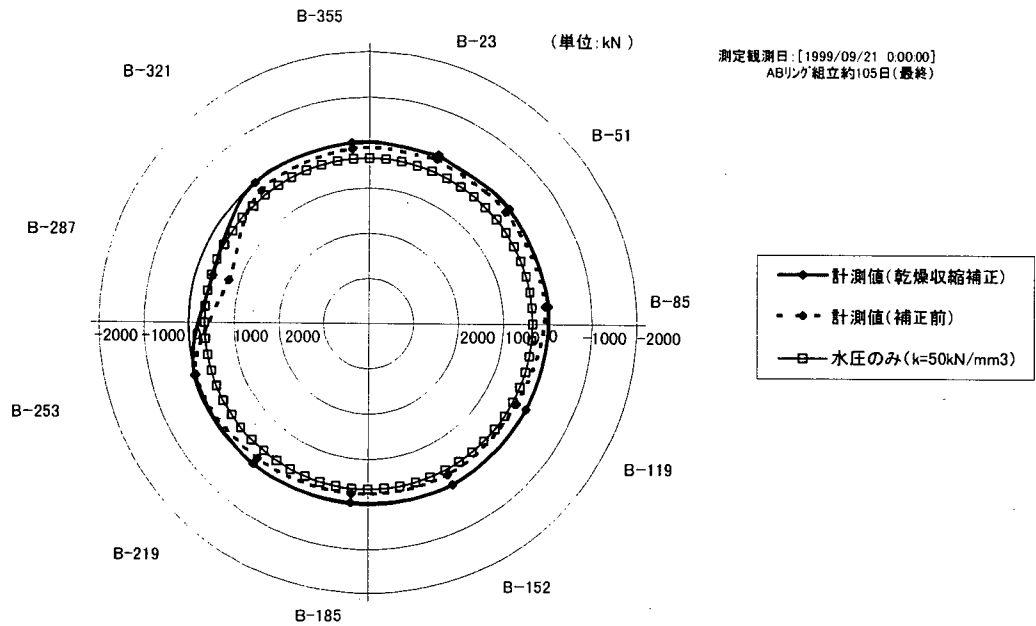
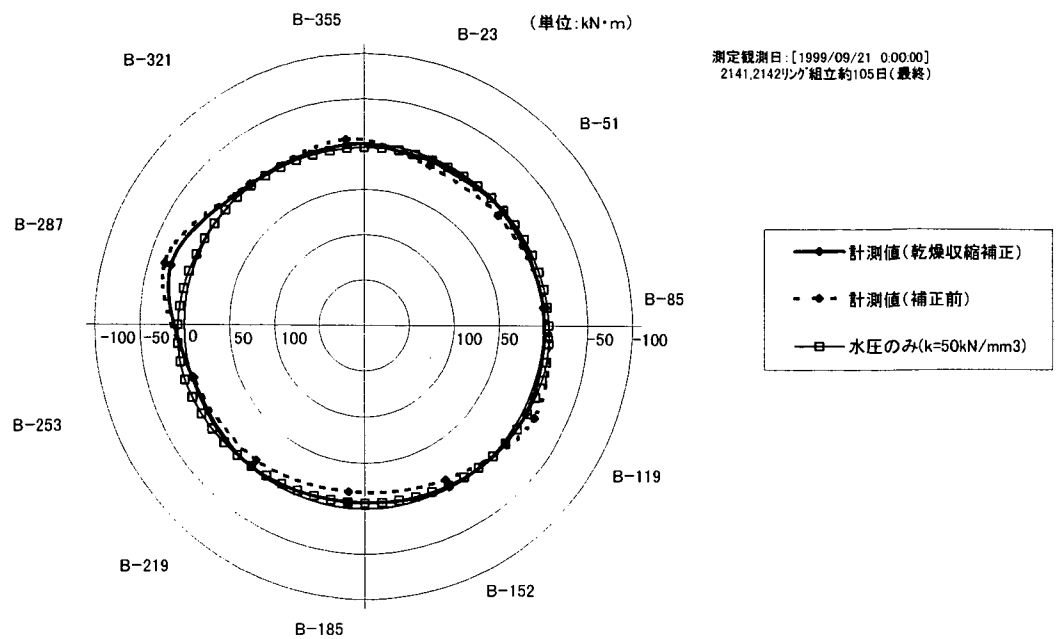


図-4.22(2) 計測断面力に近似する計算断面力の断面分布図
($k = 50 \text{ kN/mm}^3$, 水圧のみ(慣用式), 2142リング)

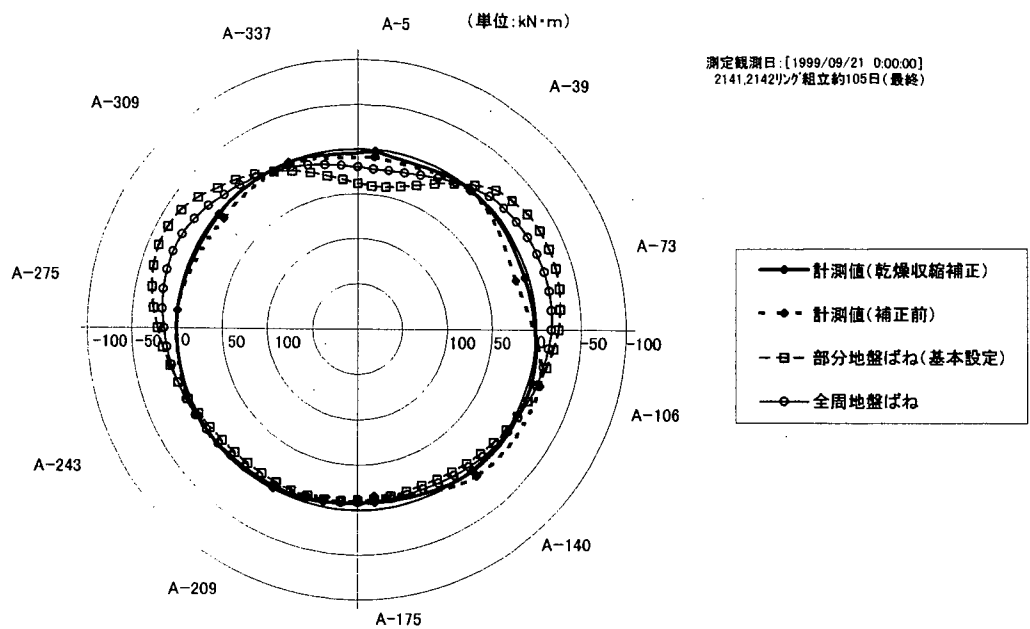
3) 解析方法の違いによる算定結果の検討

地盤反力の考え方を部分地盤ばね（基本設定）の解析と地盤反力を全周地盤ばねとした場合（引張側の地盤ばね定数の値については圧縮側の1/2の値に設定）による結果の違いを検討するために計測断面力と両解析方法による計算断面力（ $\lambda=0.45$ 、 $k=50\text{kN/mm}^3$ の場合）の荷重条件の違いによる断面分布図を図－4.23(1)～(4)、図－4.24(1)～(4)に示す。

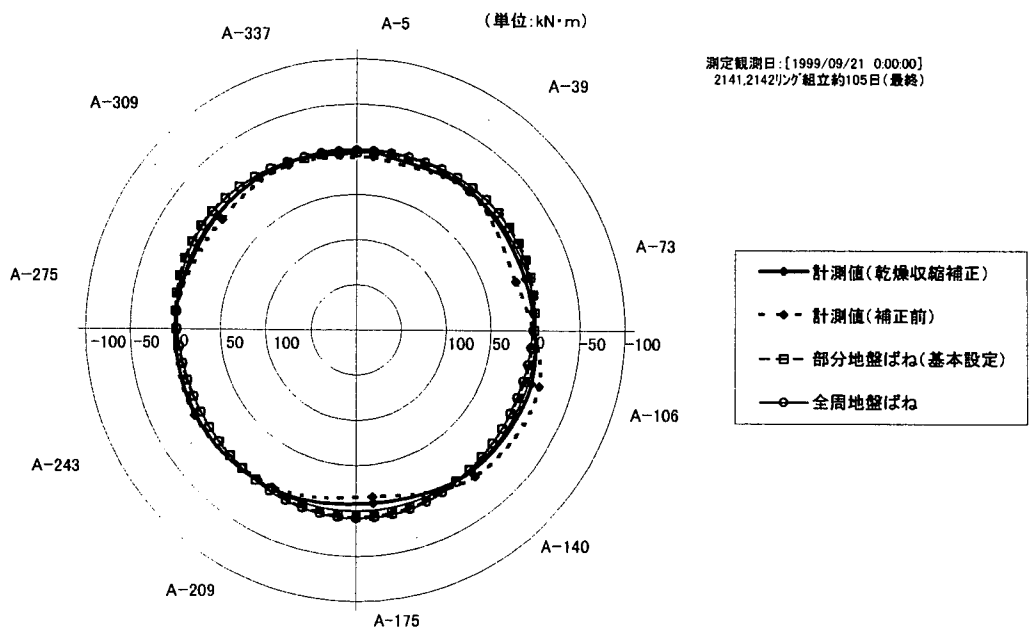
また部分地盤ばね（基本設定）の解析において、計測断面力（乾燥収縮を考慮した補正值）の断面分布に近似している解析ケース（地盤反力係数 $k=50\text{kN/mm}^3$ 、水圧のみ（慣用式））を基本ケースとし、全周地盤ばねの場合の最大曲げモーメントを比較したものを表－4.10に示す。表中の最大曲げモーメントの比は基本ケースの最大曲げモーメントを1として求めたものである。両解析方法とも曲げモーメントの断面分布モードには大きな差は見られないが、全周地盤ばねの場合は正曲げ、負曲げとも曲げモーメントが部分地盤ばね（基本ケース）の場合の約2～3割しか発生しない結果となり、計測断面力に近似させるためには地盤反力係数をさらに小さい値にする必要があることが分かる。今回パラメータとして与えた数値は表－4.2 (p.167)より本トンネルの地盤条件（掘進部のN値が30以上）を考慮し設定したものであるが、全周地盤ばねでの解析を行う場合は地盤反力係数の設定によっては過小な断面力を算出する可能性があるため、地盤条件等を十分に考慮したうえで慎重に設定する必要があると言える。

表－4.10 両解析方法の最大曲げモーメントの比較（ $k=50\text{kN/mm}^3$ ，水圧のみ（慣用式））

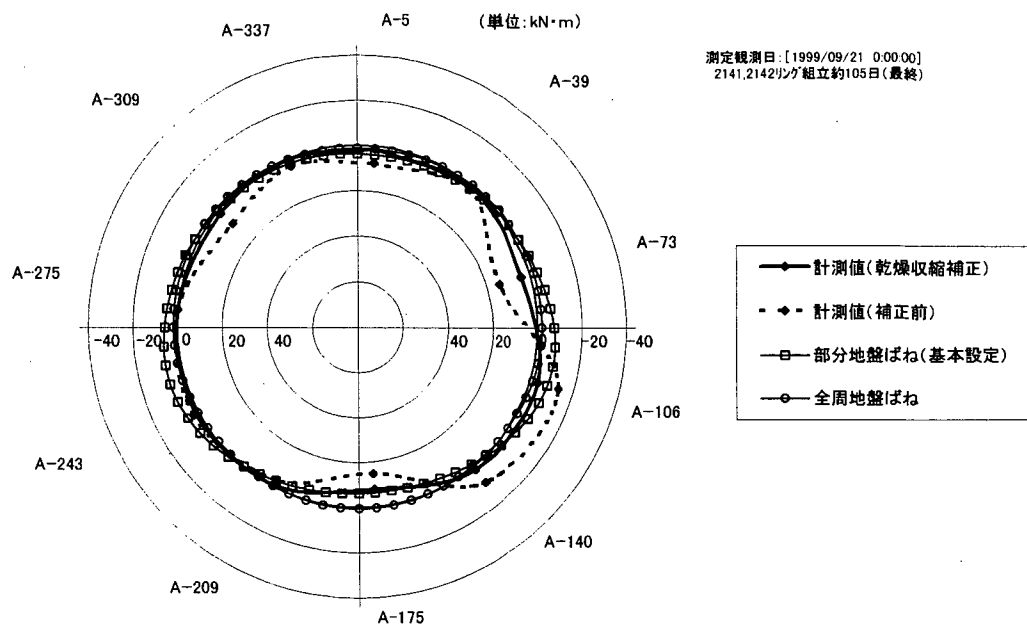
解析ケース		基本ケース	地盤ばねの変更
地盤反力の考え方		部分地盤ばね	全周地盤ばね
正曲げ	最大曲げモーメント $M_{\max}$ (kN・m)	6.17	1.33
	$M_{\max}$ の大きさの比	1.00	0.22
負曲げ	最大曲げモーメント $M_{\max}$ (kN・m)	-8.33	-2.11
	$M_{\max}$ の大きさの比	1.00	0.25



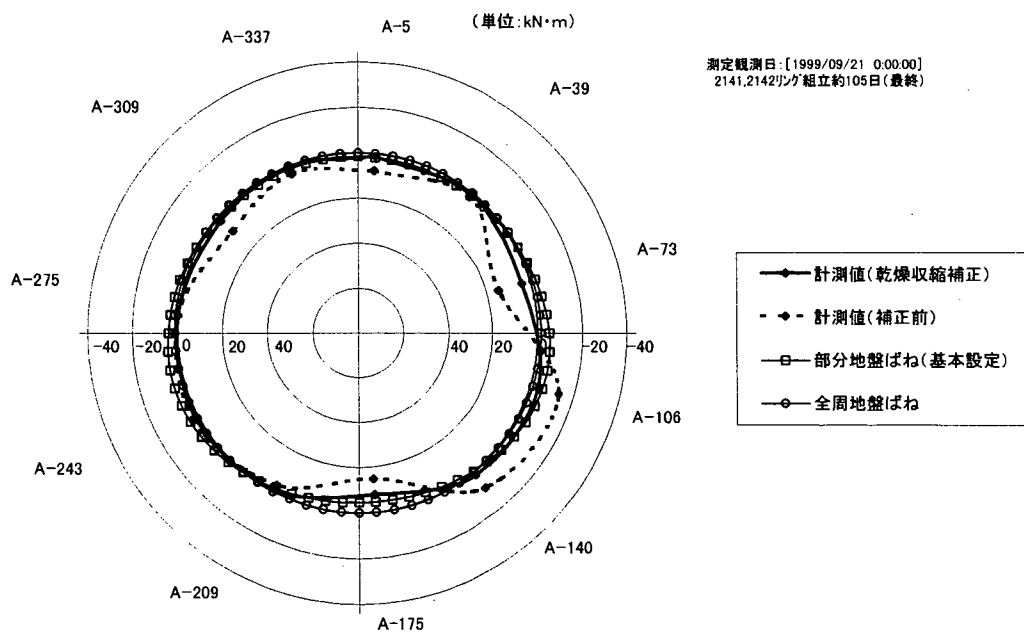
図－4.23(1) 計測断面力と各解析方法による計算断面力の断面分布図
($\lambda=0.45$, $k=50\text{kN/mm}^3$, 全土圧, 2141リング)



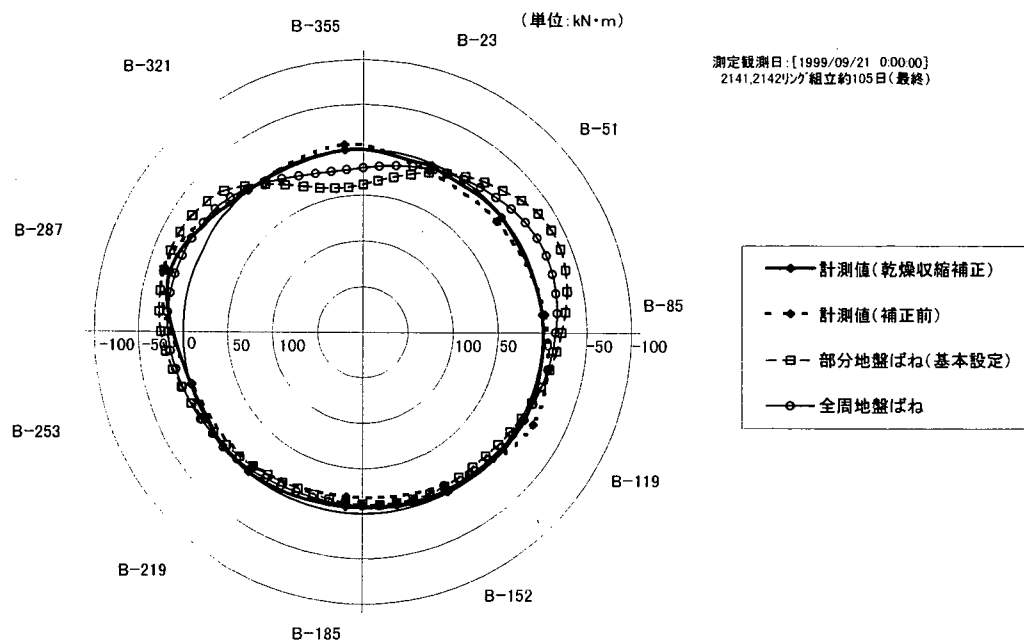
図－4.23(2) 計測断面力と各解析方法による計算断面力の断面分布図
($\lambda=0.45$, $k=50\text{kN/mm}^3$, ゆるみ土圧, 2141リング)



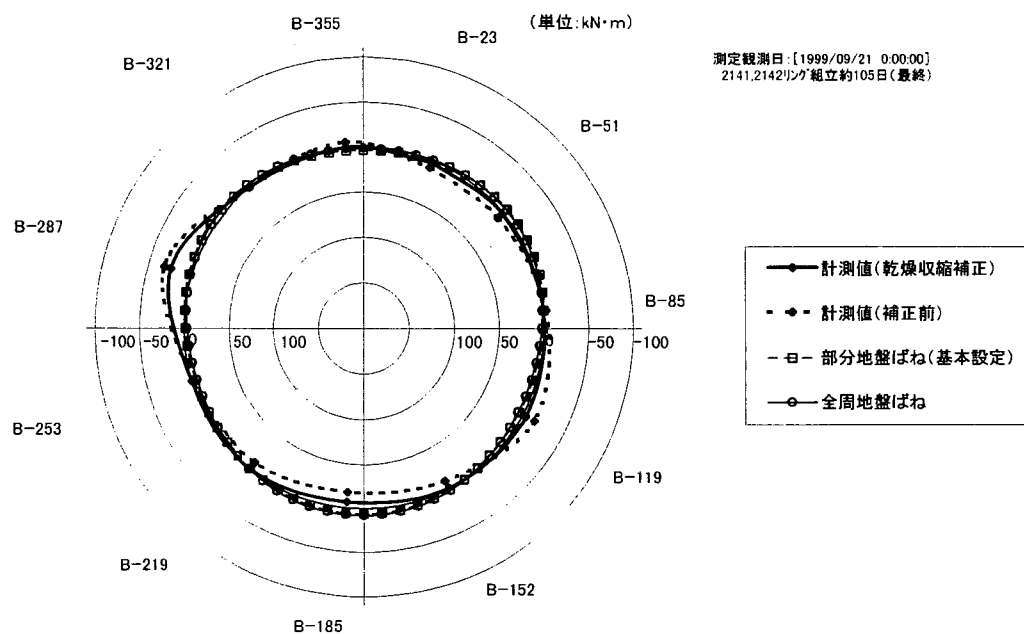
図－ 4. 23(3) 計測断面力と各解析方法による計算断面力の断面分布図
($k=50\text{kN/mm}^3$, 水圧のみ(慣用式), 2141リング)



図－ 4. 23(4) 計測断面力と各解析方法による計算断面力の断面分布図
($k=50\text{kN/mm}^3$, 水圧のみ(静水圧式), 2141リング)



図－4.24(1) 計測断面力と各解析方法による計算断面力の断面分布図
($\lambda=0.45$, $k=50\text{kN/mm}^3$, 全土圧, 2142リング)

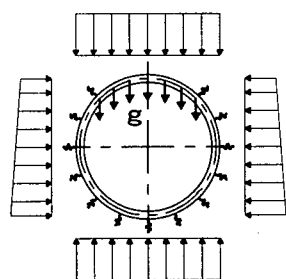


図－4.24(2) 計測断面力と各解析方法による計算断面力の断面分布図
($\lambda=0.45$, $k=50\text{kN/mm}^3$, ゆるみ土圧, 2142リング)

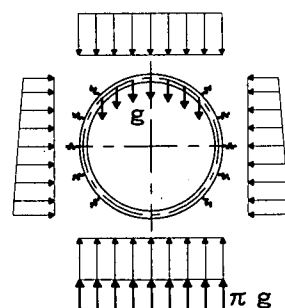
4) 自重の取り扱いの検討

本検討におけるセグメント自重の取り扱いについては、図－4.25(1)に示したとおり、土圧・水圧の外荷重に自重を加え同一の地盤ばねで支持されるものと考え解析を行ったが、従来の慣用計算法の荷重モデルにおいては自重の反力として図－4.25(2)に示すように地盤の変位に独立に定まる反力として等分布荷重 πg (g : セグメントの図心線に沿った単位周長当りのセグメントの自重) の底部地盤反力を考えられている。また、図－4.25(3)に示すように自重解析で求めた断面力に外荷重（土圧・水圧）が作用した場合の断面力を重ね合わせる方法も考えられる。ここでは、各方法が断面力算定結果に与える影響の検討を行った。ただし、図－4.25(3)における自重解析での地盤ばねについては、従来の慣用計算法では自重による変形に伴う地盤反力は考慮されていないことに対応させ、地盤反力係数 $k = 1\text{kN/mm}^3$ と十分に小さい値を与えた場合の地盤ばね定数を用いるものとした。

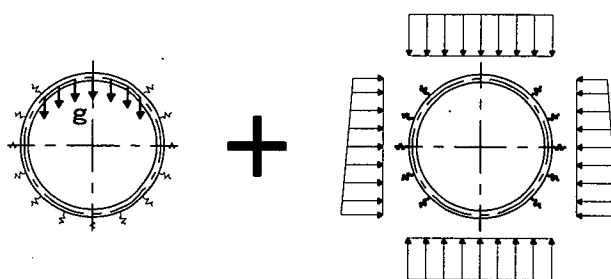
図－4.26(1)～(2)は計測断面力と部分地盤ばね（基本設定）、自重を地盤ばね支持する場合（基本ケース）の解析において、計測断面力（乾燥収縮を考慮した補正值）の断面分布に近似している解析ケース（地盤反力係数 $k = 50\text{kN/mm}^3$ ，水圧のみ（慣用式））の断面力と底部地盤反力を考慮した場合の解析および自重解析結果に外荷重（土圧・水圧）解析結果を重ね合わせる方法により算定した断面力の断面分布を示したものである。また、表－4.11は各方法で解析した場合の最大曲げモーメントを比較したものである。表中の曲げモーメントの比は地盤ばね支持（基本ケース）の場合の曲げモーメントを1として求めたものである。各方法による曲げモーメントの断面分布モードに大きな差は見られないが、底部地盤反力を考慮した場合は地盤ばね支持（基本ケース）の場合の約2～3倍、同様に自重解析結果に外荷重解析結果を重ね合わせた場合は約3～4倍の曲げモーメントを算出する結果となっている。よって、現場計測結果から得られた実現象を評価できるセグメント自重の取り扱い方法については、本検討のように梁ばねモデルを使用し、地盤ばねにより支持させる解析モデルが一つの方法であると考えられる。



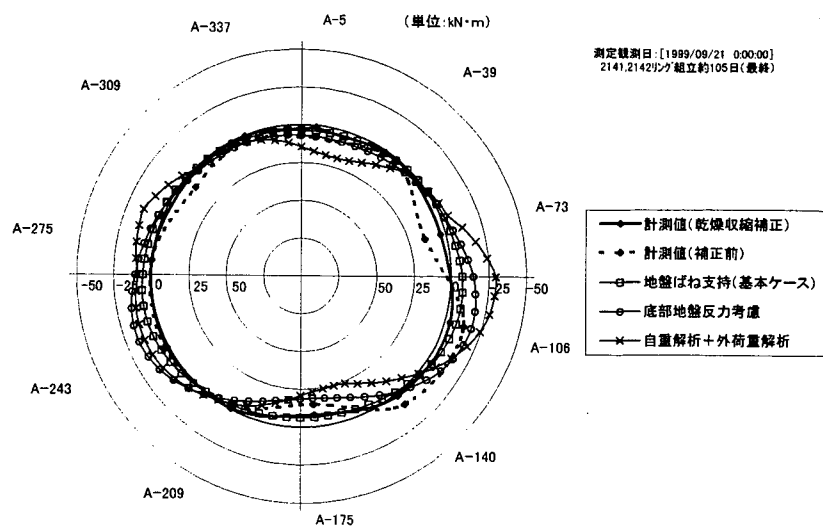
図－4.25(1) 自重を地盤ばね支持する方法



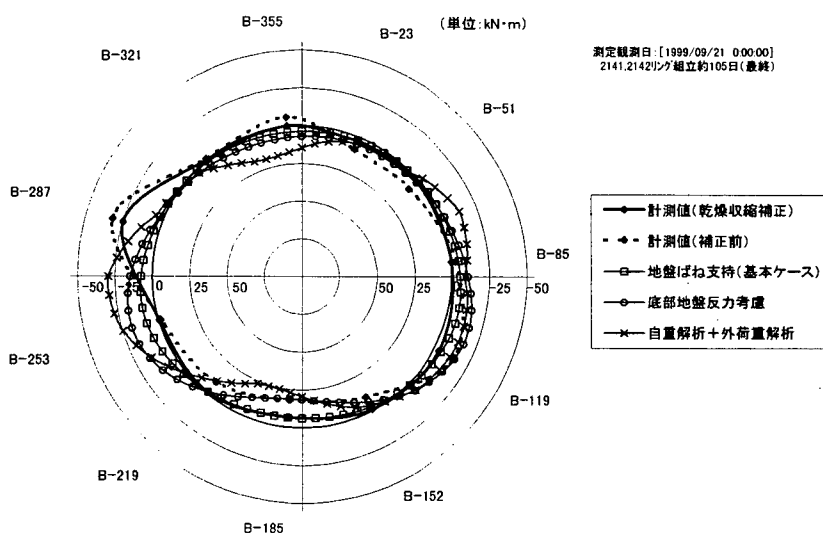
図－4.25(2) 自重反力を底部地盤反力とする方法



図－4.25(3) 自重解析結果に外荷重（土圧・水圧）解析結果を重ね合わせる方法



図－4.26(1) 計測断面力と自重の取り扱い方法による計算断面力の断面分布図
($k=50\text{kN/mm}^3$ ，水圧のみ(慣用式)，2141リノ*)



図－4.26(2) 計測断面力と自重の取り扱い方法による計算断面力の断面分布図
($k=50\text{kN/mm}^3$ ，水圧のみ(慣用式)，2142リノ*)

表－4.11 自重の取り扱い方法による最大曲げモーメントの比較
($k=50\text{kN/mm}^3$ ，水圧のみ(慣用式))

自重の取り扱い方法		地盤ばね支持 (基本ケース)	底部地盤反力 考慮	自重解析 ＋ 外荷重解析
正曲げ	最大曲げモーメントMmax (kN・m)	6.17	18.27	23.82
	Mmaxの大きさの比	1.00	2.96	3.86
負曲げ	最大曲げモーメントMmax (kN・m)	-8.33	-18.08	-28.93
	Mmaxの大きさの比	1.00	2.17	3.47

4.3 まとめ

N値30以上の硬質の砂礫地盤中の単設シールドトンネル（セグメント外径6.2m、土被り9.6m（約1.5D₁）およびセグメント外径4.75m、土被り12.1m（約2.5D₂））に作用する荷重について、実際のシールドトンネルでセグメントに土圧計、水圧計、鉄筋計を設置して現場計測を行った。

その結果、以下のことが明らかになった。

土圧計および水圧計の計測値より、セグメント組立後約3ヶ月程度で作用土圧は収束し、土被り約1.5D₁（D₁=6.2m：調布共同溝）の場合で全土被り土圧の約4～5割程度、土被り約2.5D₂（D₂=4.75m：楠味美共同溝）の場合は土圧は作用せず、水圧のみ（地下水高さ：トンネル天端から上約9m）であった。

鉄筋計の計測値から求めた断面力（曲げモーメント）と解析により求めた断面力との比較検討より、土被り約1.5D₁の場合（調布共同溝）で全土被り土圧の約6割程度のゆるみ土圧、土被り約2.5D₂の場合（楠味美共同溝）で水圧のみが作用する結果となり、土圧計および水圧計による計測値とほぼ一致するものとなった。

また、セグメント組立て直後のテール内における自重の影響については小さく、従来の慣用計算法で考慮されていた自重による設計断面力を低減できることが分かった。テール内において自重の影響が小さい理由としては、添接リング・セグメントジャッキ・シールド内壁によって自重によるリングの変形に対して抑制されていることなどが考えられる。したがって、実現象を評価できるセグメント自重の取り扱いに方法については、本章で示した梁ばねモデルを使用した地盤ばねで受ける解析モデルが一つの方法と考えられる。

以上から、砂礫地盤中のシールドトンネルの作用土圧は、水圧については静水圧を、土圧についてはゆるみ土圧程度以下であることが明らかとなった。現在設計時に採用されている荷重と比較し、実際に作用している荷重はそれよりも小さいものであると考えることができる。これは、今後、今回と同様な硬質の砂礫地盤中でのセグメント設計を行う場合、セグメント厚さの低減や鉄筋量の減少によるセグメント設計の経済化を図れる可能性があることを示している。ただし、第2章、第3章で示したとおり、セグメントの組立完了から裏込め注入までの期間におけるシールド推進時に作用するシールド機との接触および裏込め注入圧等の影響と考えられる一時的な施工時荷重による断面力が発生するため、セグメント設計の合理化を考える上では、長期的安定時の作用荷重に加えて短期的な施工時荷重による安全性および施工時荷重の長期的な影響度の把握がより重要になると言える。

よって、今後の課題としては、本検討結果を踏まえた上で今回対象としたような硬質の砂礫地盤中における設計荷重のより合理的な設定方法の確立、施工時における荷重の主要因および発生メカニズム等の解明および施工時荷重の定量化等があげられる。自重の影響については今回対象としたセグメント外径5～6m程度の中口径に比べて大口径の場合の検討（現場計測および解析）を行う必要がある。

参考文献

- 1) (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年
- 2) 村上博智・小泉淳：「シールド工事用セグメントのセグメント継手の挙動について」、土木学会論文報告集第296号、1980年4月
- 3) 木村定雄・野本雅昭・渡邊誠司・小泉淳：「トンネルに作用する土圧と覆工変形の相互作用に関する模型実験」、トンネル工学研究発表会論文・報告集第5巻、1995年11月

第5章 結論

セグメントの覆工構造は、シールドトンネルへの作用荷重の設定の大小により大きく影響するため、適切なシールドトンネルの作用荷重を評価する必要がある。本報告書は、N値30以上の硬質の砂礫地盤中に施工される2本の単設のシールドトンネルを対象として実施された土圧、水圧およびセグメントの鉄筋応力の測定結果をとりまとめるとともに、セグメントに発生する断面力をもとに2リング梁ばねモデルを用いた解析を行った。その結果、硬質の砂礫地盤中におけるシールドトンネルのセグメント設計時のトンネルへの作用荷重（土圧および水圧）およびセグメント自重の取扱いについて、以下の知見を得た。

- 1) トンネルには、ほぼ静水圧が作用する。
- 2) トンネルに作用する土圧は、土被り比が1.5程度の場合は緩み土圧程度以下、さらに土被り比が約2.5程度と大きい場合は静水圧程度となる場合がある。
- 3) セグメント組立時のセグメント自重に相当する断面力はほとんど発生せず、従来、慣用計算法で考慮されていた自重による断面力を低減できることが明らかとなった。
- 4) セグメント組立完了から裏込め注入までのしばらくの間、シールド推進時に作用するシールド機との接触、あるいはその他の裏込め注入圧など一時的な施工時荷重等の影響が大きい。

以上より、現在設計時に採用されている荷重よりも、実際に作用している荷重は小さいと考えられることから、今後、硬質な砂礫地盤中におけるセグメント設計の合理化が図れる可能性があることが明らかとなった。

今後の課題としては、シールドトンネルの合理化を図っていくために、本検討結果を踏まえた上で今回対象としたような硬質の砂礫地盤中における設計荷重のより合理的な設定方法の確立、施工時における荷重の主要因および発生メカニズム等の解明および施工時荷重の定量化等があげられる。また、大口径シールドトンネルの場合のセグメント自重の影響を把握することが必要である。これらの課題解決のためには現場計測が有効な方法の一つであり、さらに多くのシールドトンネルで現場計測を実施するとともに、分析を行っていくことが必要である。

謝辞

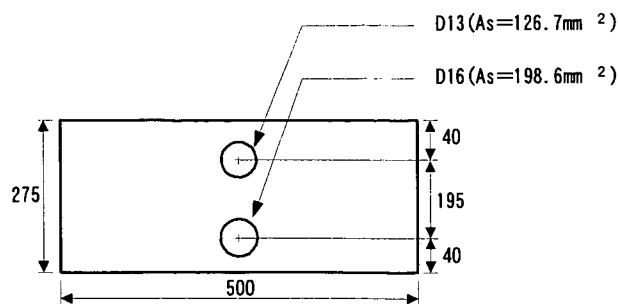
本報告書をとりまとめるにあたり、貴重なデータを提供していただいた、関東地方建設局総武国道工事事務所、および中部地方建設局名古屋国道工事事務所および施工企業者の関係各位に深甚の謝意を表します。

巻末資料

1. コンクリートの乾燥収縮による影響の検討
2. セグメント継手回転ばね定数の算定

巻末資料 1.1 コンクリートの乾燥収縮による影響の検討（調布共同溝）

ダミー供試体



鉄筋断面積	$A_s = 126.7 + 198.6 = 325.3 \text{ (mm}^2\text{)}$
コンクリート断面積	$A_c = 500 \times 275 = 1.375 \times 10^5 \text{ (mm}^2\text{)}$
鉄筋比	$p = A_s / A_c = 2.37 \times 10^{-3}$
鉄筋のヤング率	$E_s = 2.059 \times 10^5 \text{ (N/mm}^2\text{)}$
コンクリートのヤング率	$E_c = 3.144 \times 10^4 \text{ (N/mm}^2\text{)}$
ヤング係数比	$n = E_s / E_c = 6.55$

ひずみの関係式	$:\ \varepsilon_{sh} = \varepsilon_c + \varepsilon_{s'}$
コンクリートの全引張力 C	$:\ C = A_c \sigma_c = A_c E_c \varepsilon_c$
鉄筋の全圧縮力 S'	$:\ S' = A_s \sigma_{s'} = A_s E_s \varepsilon_{s'}$
内部のつり合い条件	$:\ C = S'$

$$A_c E_c \varepsilon_c = A_s E_s \varepsilon_{s'}$$

$$\therefore \varepsilon_c = \frac{E_s}{E_c} \cdot \frac{A_s}{A_c} \varepsilon_{s'} = np \varepsilon_{s'}$$

$$\varepsilon_{s'} = \frac{E_c}{E_s} \cdot \frac{A_c}{A_s} \varepsilon_c = \frac{1}{np} \varepsilon_c$$

$$\varepsilon_{sh} = \varepsilon_c + \varepsilon_{s'}$$

$\varepsilon_c = np \varepsilon_{s'}$ を代入

$$\varepsilon_{sh} = np \varepsilon_{s'} + \varepsilon_{s'} = (np+1) \varepsilon_{s'}$$

$$\therefore \epsilon s' = \frac{1}{1+np} \epsilon sh$$

$$\epsilon s' = \frac{1}{np} \epsilon c \quad \text{を代入}$$

$$\epsilon sh = \epsilon c + \frac{1}{np} \epsilon c = \frac{np+1}{np} \epsilon c$$

$$\therefore \epsilon c = \frac{np}{1+np} \epsilon sh$$

以上をまとめて、

$$\text{ひずみ} : \epsilon c = \frac{np}{1+np} \epsilon sh \quad \dots\dots ①$$

$$\epsilon s' = \frac{1}{1+np} \epsilon sh \quad \dots\dots ②$$

$$\text{応力} : \sigma c = \frac{np}{1+np} E_c \epsilon sh \quad \dots\dots ③$$

$$\sigma s' = \frac{1}{1+np} E_s \epsilon sh \quad \dots\dots ④$$

いま、 $\sigma s' = 9.807 \text{ (N/mm}^2\text{)}$: 計測値であるから、

式④より、

$$\begin{aligned} \epsilon sh &= \frac{1}{E_s} (1+np) \sigma s' \\ &= \frac{1}{2.059 \times 10^5} (1 + 6.55 \times 2.37 \times 10^{-3}) \times 9.807 \\ &= 48.4 \times 10^{-6} \end{aligned}$$

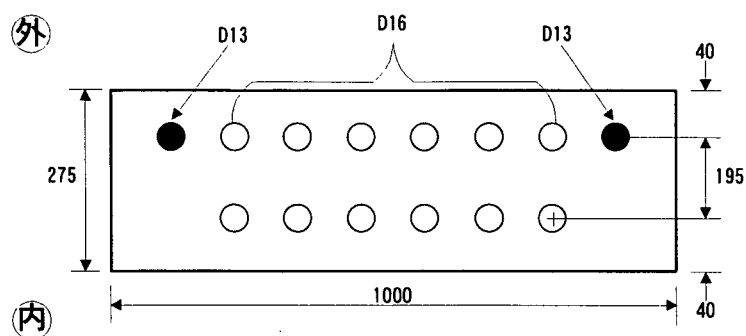
式①に代入して、

$$\varepsilon_c = \frac{6.55 \times 2.37 \times 10^{-3}}{1 + 6.55 \times 2.37 \times 10^{-3}} \times 48.4 \times 10^{-6} = 0.740 \times 10^{-6}$$

また、

$$\varepsilon_{s'} = \frac{\sigma_{s'}}{E_s} = \frac{9.807}{2.059 \times 10^5} = 47.6 \times 10^{-6}$$

セグメント



$$A_s = 126.7 \times 2 + 198.6 \times 12 = 2636.6 \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$A_c = 1000 \times 275 = 2.75 \times 10^5 \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$p = A_s/A_c = 9.588 \times 10^{-3}$$

ε_{sh} は一定であることをふまえて、

式④より、

$$\begin{aligned} \sigma_{s'} &= \frac{1}{1 + 6.55 \times 9.588 \times 10^{-3}} \times 2.059 \times 10^5 \times 48.4 \times 10^{-6} \\ &= 9.378 \text{ (N/mm}^2\text{)} \end{aligned}$$

よって、コンクリートの乾燥収縮の影響として、 $\sigma_{s'} = 9.378 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ （圧縮）の鉄筋応力を考慮するものとする。

巻末資料 1.2 コンクリートの乾燥収縮による影響の検討（楠味美共同溝）

「コンクリート標準示方書〔設計編〕（平8）土木学会」では、コンクリートの収縮ひずみとして、資料表-1.2.1の値を示している。

資料表-1.2.1 コンクリートの収縮ひずみ（ $\times 10^{-6}$ ）

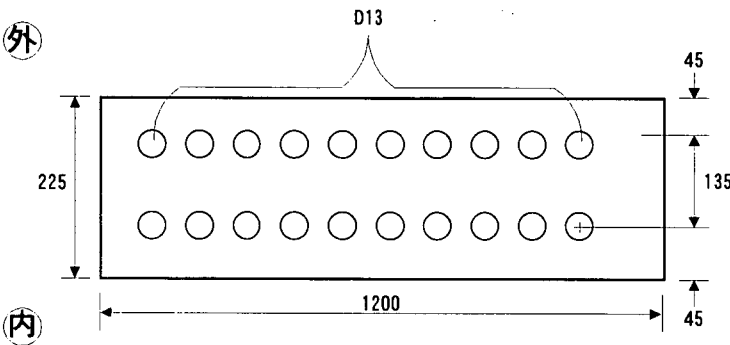
環境条件	コンクリートの材齢*				
	3日以内	4～7日	28日	3か月	1年
屋 外	400	350	230	200	120
屋 内	730	620	380	260	130

* 設計で収縮を考慮するときの乾燥開始材齢

ここではセグメントの組立後約3か月時点での検討を行うことから、セグメントの製作から現場へ搬入するまでの期間を考慮すると、表より $150 \sim 200 (\times 10^{-6})$ 程度の収縮ひずみを想定できる。

ただし、前述した調布共同溝においては $\epsilon_{sh} = 48.4 \times 10^{-6}$ であったことから、楠味美共同溝の施工環境条件が調布共同溝と大きく異なることはないと判断し、 $\epsilon_{sh} = 50 \times 10^{-6}$ と設定することによりコンクリートの乾燥収縮による影響を検討した。

セグメント



鉄筋断面積	$A_s = 126.7 \times 20 = 2534 (\text{mm}^2)$
コンクリート断面積	$A_c = 1200 \times 225 = 2.70 \times 10^5 (\text{mm}^2)$
鉄筋比	$p = A_s/A_c = 9.385 \times 10^{-3}$
鉄筋のヤング率	$E_s = 2.059 \times 10^5 (\text{N/mm}^2)$
コンクリートのヤング率	$E_c = 3.236 \times 10^4 (\text{N/mm}^2)$
ヤング係数比	$n = E_s / E_c = 6.363$

式④より、

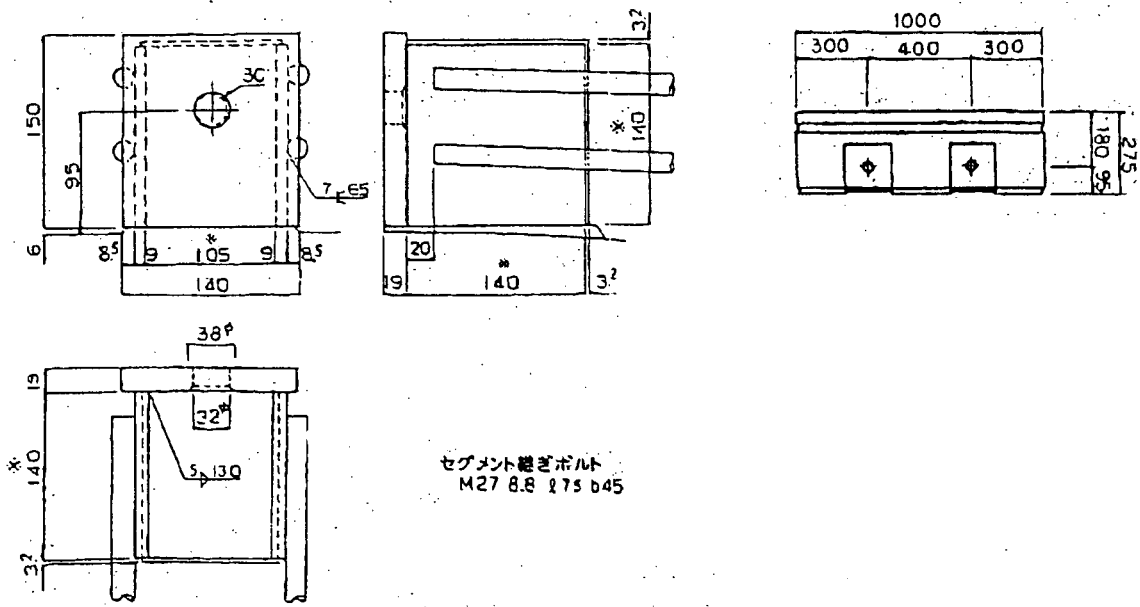
$$\begin{aligned}\sigma_{s'} &= \frac{1}{1+np} E_s \epsilon_{sh} \\ &= \frac{1}{1 + 6.363 \times 9.385 \times 10^{-3}} \times 2.059 \times 10^5 \times 50 \times 10^{-6} \\ &= 9.715 (\text{N/mm}^2)\end{aligned}$$

よって、コンクリートの乾燥収縮の影響として、 $\sigma_{s'} = 9.715 (\text{N/mm}^2)$ （圧縮）の鉄筋応力を考慮するものとする。

巻末資料 2.1
セグメント継手回転バネ定数の算定（調布共同溝）
1. 設定条件

資料表-2.1.1 セグメント継手回転バネ定数設定条件

項目	記号	単位	数値	備考
セグメント高さ	h	mm	275	
セグメント幅	b		500	継手1箇所当たり
ボルトヤング率	E_b	N/mm ²	2.059E+05	
継手板ヤング率	E_p		2.059E+05	スチール
セグメントヤング率	E_{seg}		3.144E+04	試験結果より
ボルト呼び径	d_b	mm	27	M 2 7
ボルト純断面積	A_e	mm ²	459	
ボルト山無部断面積	A_{bl}		572.6	
ナット高さ	l_H	mm	22	
ワッシャー半径	r_w		25	
ワッシャー厚さ	t_w		4.5	
ボルト孔半径	r_a		15	
継手板厚さ	$t_p^{(+)}$		19	スチール
	$t_p^{(-)}$		19	
有効高さ	$d^{(+)}$		180	ボルト孔位置
	$d^{(-)}$		95	
継手板水平幅	$l_l^{(+)}$		105	
	$l_l^{(-)}$		105	



資料図-2.1.1 セグメント継手概略図

2. セグメント継手回転バネ定数の算定 (組立時)

(1) ボルトのバネ定数 (k_b)

$$k_b = \frac{E_b \cdot A_e}{l_1 \cdot A_e / A_{b1} + l_n + l_e} = 1.775E+06 \text{ (N/mm)}$$

$$\text{ただし, } l_1 = 35.00 \text{ mm}$$

$$l_n = 12.00 \text{ mm}$$

$$l_e = 0.6 \times l_H = 13.20 \text{ mm}$$

(2) 継手のバネ定数 (圧縮増加側: k_{pu} 圧縮減少側: k_{pl})

$$k_{pu} = \frac{E_p \cdot A_u}{(t_p/2 + t_w)} = 2.226E+07 \text{ (N/mm)}$$

$$\text{ただし, } A_u = \pi (r_u^2 - r_a^2) = 1513.222 \text{ mm}^2$$

$$r_u = r_w + t_p/12 = 26.583 \text{ mm}$$

$$k_{pl} = \frac{E_p \cdot A_l}{t_p} = 2.577E+07 \text{ (N/mm)}$$

$$\text{ただし, } A_l = \pi (r_l^2 - r_a^2) = 2377.488 \text{ mm}^2$$

$$r_l = r_w + t_p/3 = 31.333 \text{ mm}$$

(3) ボルトと継手板の軸剛性バネの合成バネ定数

(離間前)

$$k = \frac{2 k_b \cdot k_{pu}}{2 k_b + k_{pu}} + 2 k_{pl} = 5.460E+07 \text{ (N/mm)}$$

(離間後)

$$k' = \frac{2 k_b \cdot k_{pu}}{2 k_b + k_{pu}} = 3.062E+06 \text{ (N/mm)}$$

(4) 中立軸の算定 (単鉄筋長方形梁の中立軸)

$$x = \frac{n A_e}{b} \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2 b d}{n A_e}} \right)$$

$$x (+) = 40.900 \text{ mm (正曲げ)}$$

$$x (-) = 28.318 \text{ mm (負曲げ)}$$

$$n = E_p / E_{seg} = 6.55$$

(5) 継手板の梁モデルのバネ値

正曲げ

$$k_1(+) = \frac{192 D(+)}{l_1(+)^3} = 1.141E+06 \text{ (N/mm)}$$

$$\text{ここで, } D(+) = b_e(+)^3 / \{12(1 - \nu^2)\} \cdot E_p = 6.877E+09 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

$$b_e(+)^3 = 2(r_w + t_p(+)/12)^3 = 53.167 \text{ mm}^3$$

$$\nu = 0.3 \text{ (スチール)}$$

負曲げ

$$k_1(-) = \frac{192 D(-)}{l_1(-)^3} = 1.141E+06 \text{ (N/mm)}$$

$$\begin{aligned} \text{ここで、} \quad D(-) &= b_e(-) \cdot t_p(-)^3 / \{12(1-\nu^2)\} \cdot E_p = 6.877\text{E}+09 \text{ N}\cdot\text{mm}^2 \\ b_e(-) &= 2(r_w + t_p(-)/12) = 53.167 \text{ mm} \\ \nu &= 0.3 \text{ (スチール)} \end{aligned}$$

(6) ボルトと継手板と梁モデルの合成バネ値 (ボルト 1 本当たり)

正曲げ
(離間前)

$$K(+) = \frac{k(+) \cdot k_1(+)}{k(+) + k_1(+)} = 1.118\text{E}+06 \text{ (N/mm)}$$

(離間後)

$$K'(+) = \frac{k'(+) \cdot k_1(+)}{k'(+) + k_1(+)} = 8.312\text{E}+05 \text{ (N/mm)}$$

負曲げ
(離間前)

$$K(-) = \frac{k(-) \cdot k_1(-)}{k(-) + k_1(-)} = 1.118\text{E}+06 \text{ (N/mm)}$$

(離間後)

$$K'(-) = \frac{k'(-) \cdot k_1(-)}{k'(-) + k_1(-)} = 8.312\text{E}+05 \text{ (N/mm)}$$

(7) 回転バネ値

$$k_{r\theta} = \frac{(d-x/3)(d-x)}{2} K$$

正曲げ
(離間前)

$$k_{r\theta}(+) = 1.293\text{E}+10 \text{ (N}\cdot\text{mm/rad)} = 12.932 \text{ (MN}\cdot\text{m/rad)}$$

(離間後)

$$k_{r\theta}'(+) = 9.618\text{E}+09 \text{ (N}\cdot\text{mm/rad)} = 9.618 \text{ (MN}\cdot\text{m/rad)}$$

負曲げ
(離間前)

$$k_{r\theta}(-) = 3.188\text{E}+09 \text{ (N}\cdot\text{mm/rad)} = 3.188 \text{ (MN}\cdot\text{m/rad)}$$

(離間後)

$$k_{r\theta}'(-) = 2.371\text{E}+09 \text{ (N}\cdot\text{mm/rad)} = 2.371 \text{ (MN}\cdot\text{m/rad)}$$

(8) セグメント継手 (ボルト 2 本当たり) のバネ値

正曲げ
(離間前)

$$k_{r\theta}(+) = 2 \times 12.932 = 25.864 \text{ (MN}\cdot\text{m/rad)}$$

(離間後)

$$k_{r\theta}'(+) = 2 \times 9.620 = 19.240 \text{ (MN}\cdot\text{m/rad)}$$

負曲げ
(離間前)

$$k_{r\theta}(-) = 2 \times 3.188 = 6.376 \text{ (MN}\cdot\text{m/rad)}$$

(離間後)

$$k_{r\theta}'(-) = 2 \times 2.371 = 4.742 \text{ (MN}\cdot\text{m/rad)}$$

3. セグメント継手回転ばね定数の算定（完成時）

完成時の回転ばね定数は、セグメント継手に発生する断面力（M，N）を考慮し算定するものとするが、ここでは各解析ケースで慣用計算法から求めた断面力のうち、正・負の最大曲げモーメントおよび軸力に対する回転ばね定数を算出し、梁ばねモデルにおける入力値とした。

具体的には、慣用計算法で得られた正負の最大曲げモーメントおよび軸力から(1)、(2)式により回転角、(3)式より $k_{r\theta}$ を求め、さらに離間している場合の回転ばね定数の低減を、軸力が作用していない場合の‘ボルトと継手板と梁モデルの合成ばね値（上述2. (6)参照）’の比で考慮し算出した $k_{r\theta}' (+)$ 、 $k_{r\theta}' (-)$ を解析に用いる回転ばね定数とした。

資料表－2 に各解析ケースで用いた回転ばね定数を示す。

$$\begin{aligned} & \text{(正曲げ)} \\ \theta (+) &= \frac{M - P(h/2 - x/3)}{K(+)(d - x/3)(d - x)/2} \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{(負曲げ)} \\ \theta (-) &= \frac{M - P(h/2 - x/3)}{K(-)(d - x/3)(d - x)/2} \quad (2) \end{aligned}$$

$$M = k_{r\theta} \cdot \theta \quad (3)$$

資料表－2.1.2 各解析ケースの回転ばね定数

(単位：MN・m/rad)

	地盤反力 係 数 kN/mm ³	曲 げ モーメントの 正 負	全土圧			ゆるみ土圧			水圧のみ		自重
			側方土圧係数入			側方土圧係数入			慣用式	静水圧	
			0.35	0.45	0.55	0.35	0.45	0.55	(η - λ 1)	(η - λ 2)	
調 布 共 同 溝	10	正曲げ	24.5	27.5	35.3	26.5	32.4	57.9	23.5		—
		負曲げ	9.8	13.7	36.3	12.7	27.5	147.1	7.9		—
	30	正曲げ	28.4	33.3	45.1	29.4	36.3	53.9	28.4		—
		負曲げ	23.5	49.0	117.7	23.5	51.0	127.5	21.6		—
	50	正曲げ	31.4	38.2	53.0	31.4	37.3	52.0	29.4		—
		負曲げ	55.9	98.1	156.9	36.3	65.7	117.7	6.1		—

※リング間継ぎ手のせん断ばね定数 k_s は全ケース $k_s = 1.96 \times 10^3 \text{ MN/m}$

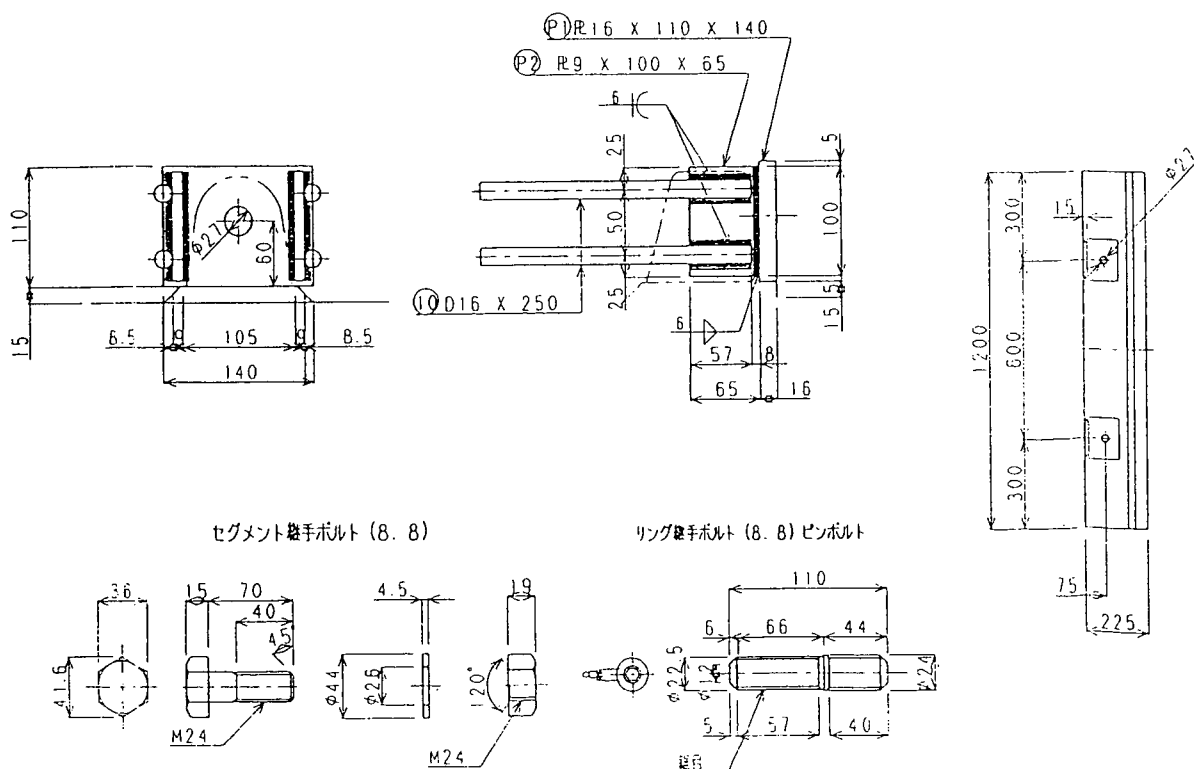
巻末資料 2.2

セグメント継手回転バネ定数の算定（楠味美共同溝）

1. 設定条件

資料表-2.2.1 セグメント継手回転バネ定数設定条件

項目	記号	単位	数値	備考
セグメント高さ	h	mm	225	
セグメント幅	b		600	継手 1 箇所当たり
ボルトヤング率	E_b	N/mm ²	2.059E+05	
継手板ヤング率	E_p		2.059E+05	スチール
セグメントヤング率	E_{seg}		3.236E+04	
ボルト呼び径	d_b	mm	24	M 24
ボルト純断面積	A_e	mm ²	353	
ボルト山無部断面積	A_{bl}		452	
ナット高さ	l_H	mm	19	
ワッシャー半径	r_w		22	
ワッシャー厚さ	t_w		4.5	
ボルト孔半径	r_a		13.5	
継手板厚さ	$t_p^{(+)}$		16	スチール
	$t_p^{(-)}$		16	
有効高さ	$d^{(+)}$		150	ボルト孔位置
	$d^{(-)}$		75	
継手板水平幅	$l_l^{(+)}$		105	
	$l_l^{(-)}$		105	



資料図-2.2.1 セグメント継手概略図

2. セグメント継手回転バネ定数の算定 (組立時)

(1) ボルトのバネ定数 (k_b)

$$k_b = \frac{E_b \cdot A_e}{l_1 \cdot A_e / A_{b1} + l_n + l_e} = 1.586E+06 \text{ (N/mm)}$$

$$\begin{aligned} \text{ただし、} l_1 &= 30.00 \text{ mm} \\ l_n &= 11.00 \text{ mm} \\ l_e &= 0.6 \times l_H = 11.40 \text{ mm} \end{aligned}$$

(2) 継手のバネ定数 (圧縮増加側: k_{pu} 圧縮減少側: k_{pl})

$$k_{pu} = \frac{E_p \cdot A_u}{(t_p/2 + t_w)} = 1.875E+07 \text{ (N/mm)}$$

$$\begin{aligned} \text{ただし、} A_u &= \pi (r_u^2 - r_a^2) = 1137.867 \text{ mm}^2 \\ r_u &= r_w + t_p/12 = 23.333 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$k_{pl} = \frac{E_p \cdot A_l}{t_p} = 2.284E+07 \text{ (N/mm)}$$

$$\begin{aligned} \text{ただし、} A_l &= \pi (r_l^2 - r_a^2) = 1774.564 \text{ mm}^2 \\ r_l &= r_w + t_p/3 = 27.333 \text{ mm} \end{aligned}$$

(3) ボルトと継手板の軸剛性バネの合成バネ定数 (離間前)

$$k = \frac{2 k_b \cdot k_{pu}}{2 k_b + k_{pu}} + 2 k_{pl} = 4.839E+07 \text{ (N/mm)}$$

(離間後)

$$k' = \frac{2 k_b \cdot k_{pu}}{2 k_b + k_{pu}} = 2.713E+06 \text{ (N/mm)}$$

(4) 中立軸の算定 (単鉄筋長方形梁の中立軸)

$$x = \frac{n A_e}{b} \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{2 b d}{n A_e}} \right]$$

$$x (+) = 29.979 \text{ mm (正曲げ)}$$

$$x (-) = 20.248 \text{ mm (負曲げ)}$$

$$n = E_p / E_{seg} = 6.364$$

(5) 継手板の梁モデルのバネ値

正曲げ

$$k_1 (+) = \frac{1}{9} \frac{2 D (+)}{l_1 (+)^3} = 5.980E+05 \text{ (N/mm)}$$

$$\begin{aligned} \text{ここで、} D (+) &= b_e (+) \cdot t_p (+)^3 / \{12 (1 - \nu^2)\} \cdot E_p = 3.605E+09 \text{ N} \cdot \text{mm}^2 \\ b_e (+) &= 2 (r_w + t_p (+) / 12) = 46.667 \text{ mm} \\ \nu &= 0.3 \text{ (スチール)} \end{aligned}$$

負曲げ

$$k_1 (-) = \frac{1}{9} \frac{2 D (-)}{l_1 (-)^3} = 5.980E+05 \text{ (N/mm)}$$

$$\begin{aligned} \text{ここで、} \quad D(-) &= b_e(-) \cdot t_p(-)^3 / \{12(1-\nu^2)\} \cdot E_p = 3.605E+09 \text{ N}\cdot\text{mm}^2 \\ b_e(-) &= 2(r_w + t_p(-)/12) = 46.667 \text{ mm} \\ \nu &= 0.3 \text{ (スチール)} \end{aligned}$$

(6) ボルトと継手板と梁モデルの合成バネ値 (ボルト1本当たり)

正曲げ
(離間前)

$$K(+) = \frac{k(+) \cdot k_1(+)}{k(+) + k_1(+)} = 5.907E+05 \text{ (N/mm)}$$

(離間後)

$$K'(+) = \frac{k'(+) \cdot k_1(+)}{k'(+) + k_1(+)} = 4.900E+05 \text{ (N/mm)}$$

負曲げ
(離間前)

$$K(-) = \frac{k(-) \cdot k_1(-)}{k(-) + k_1(-)} = 5.907E+05 \text{ (N/mm)}$$

(離間後)

$$K'(-) = \frac{k'(-) \cdot k_1(-)}{k'(-) + k_1(-)} = 4.900E+05 \text{ (N/mm)}$$

(7) 回転バネ値

$$k_{r\theta} = \frac{(d-x/3)(d-x)}{2} K$$

正曲げ
(離間前)

$$k_{r\theta}(+) = 4.963E+09 \text{ (N}\cdot\text{mm/rad)} = 4.963 \text{ (MN}\cdot\text{m/rad)}$$

(離間後)

$$k_{r\theta}'(+) = 4.117E+09 \text{ (N}\cdot\text{mm/rad)} = 4.117 \text{ (MN}\cdot\text{m/rad)}$$

負曲げ

(離間前)

$$k_{r\theta}(-) = 1.104E+09 \text{ (N}\cdot\text{mm/rad)} = 1.104 \text{ (MN}\cdot\text{m/rad)}$$

(離間後)

$$k_{r\theta}'(-) = 9.155E+08 \text{ (N}\cdot\text{mm/rad)} = 0.916 \text{ (MN}\cdot\text{m/rad)}$$

(8) セグメント継手 (ボルト2本当たり) のバネ値

正曲げ

(離間前)

$$k_{r\theta}(+) = 2 \times 4.963 = 9.926 \text{ (MN}\cdot\text{m/rad)}$$

(離間後)

$$k_{r\theta}'(+) = 2 \times 4.117 = 8.234 \text{ (MN}\cdot\text{m/rad)}$$

負曲げ

(離間前)

$$k_{r\theta}(-) = 2 \times 1.104 = 2.208 \text{ (MN}\cdot\text{m/rad)}$$

(離間後)

$$k_{r\theta}'(-) = 2 \times 0.916 = 1.832 \text{ (MN}\cdot\text{m/rad)}$$

3. セグメント継手回転ばね定数の算定（完成時）

完成時の回転ばね定数は、セグメント継手に発生する断面力（M、N）を考慮し算定するものとするが、ここでは各解析ケースで慣用計算法から求めた断面力のうち、正・負の最大曲げモーメントおよび軸力に対する回転ばね定数を算出し、梁ばねモデルにおける入力値とした。

具体的には、慣用計算法で得られた正負の最大曲げモーメントおよび軸力から(1)、(2)式により回転角、(3)式より $k_{r\theta}$ を求め、さらに離間している場合の回転ばね定数の低減を、軸力が作用していない場合の‘ボルトと継手板と梁モデルの合成ばね値（上述2. (6)参照）’の比で考慮し算出した $k_{r\theta}' (+)$ 、 $k_{r\theta}' (-)$ を解析に用いる回転ばね定数とした。

資料表-2に各解析ケースで用いた回転ばね定数を示す。

$$\begin{aligned} & \text{(正曲げ)} \\ \theta (+) &= \frac{M - P(h/2 - x/3)}{K(+)(d - x/3)(d - x)/2} \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{(負曲げ)} \\ \theta (-) &= \frac{M - P(h/2 - x/3)}{K(-)(d - x/3)(d - x)/2} \quad (2) \end{aligned}$$

$$M = k_{r\theta} \cdot \theta \quad (3)$$

資料表-2.2.2 各解析ケースの回転ばね定数

(単位：MN・m/rad)

	地盤反力 係 数 kN/mm ³	曲 げ モーメントの 正 負	全土圧			ゆるみ土圧			水圧のみ		自重
			側方土圧係数入			側方土圧係数入			慣用式	静水圧	
			0.35	0.45	0.55	0.35	0.45	0.55	(ケ-71)	(ケ-72)	
楠 味 美 共 同 溝	10	正曲げ	13.7	17.7	30.4	117.7	98.1	117.7	117.7		—
		負曲げ	6.7	16.7	67.7	127.5	97.1	127.5	107.9		—
	30	正曲げ	17.7	26.5	52.0	117.7	117.7	107.9	117.7		—
		負曲げ	38.2	76.5	107.9	127.5	117.7	98.1	127.5		—
	50	正曲げ	23.5	36.3	69.6	107.9	127.5	117.7	107.9		—
		負曲げ	82.4	107.9	117.7	323.6	127.5	117.7	98.1		—
	1, 10,	正曲げ	—	—	—	—	—	—	—		8.3
	30, 50	負曲げ	—	—	—	—	—	—	—		2.2

※リング間継ぎ手のせん断ばね定数 k_s は全ケース $k_s = 1.96 \times 10^3 \text{ MN/m}$