

土木研究所資料

シールドトンネルの耐震性に関する研究 —(その6)正負交番の曲げおよびねじり荷重を受ける シールドトンネル模型の載荷実験—

Development of Seismic Resistant Design Procedure
for Shield Tunnels

—Part 6 Loading Tests of Shield Tunnel Specimen Subjected
to Alternative Bending and Torsion Moment—

平成元年7月

建設省土木研究所
地震防災部・耐震研究室

「Copyright © (1989) 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。」

シールドトンネルの耐震性に関する研究 —(その6)正負交番の曲げおよびねじり荷重を受ける シールドトンネル模型の載荷実験—

Development of Seismic Resistant Design Procedure
for Shield Tunnels
—Part 6 Loading Tests of Shield Tunnel Specimen Subjected
to Alternative Bending and Torsion Moment—

耐震研究室 室長 川島 一彦
研究員 杉田 秀樹
加納 尚史

要 旨

本資料は、シールドトンネルの耐震性を評価する上で重要な、曲げおよびねじりに対する変形特性を明らかにするために行ったシールドトンネル模型の正負交番曲げおよびねじり載荷実験の結果をとりまとめたものである。

本検討により、シールドトンネルの変形特性および破壊特性が把握されるとともに、耐震設計上注意を要する点が明らかにされた。

目 次

1. ま え が き	1
2. シールドトンネル模型の正負交番曲げ載荷実験	2
2.1 実験の概要	2
2.2 実験供試体	2
2.3 実験に用いた施設および装置	14
2.4 計 測	15
2.5 載荷条件	15
2.6 二次覆工のない場合の変形および破壊特性	23
(1) 破壊の進展状況	23
(2) 供試体の変形特性	30
(3) アンカー鉄筋およびリング継手金具面板の変形	32
(4) セグメント継手の挙動特性	32
(5) リング接合面の相対変位	35
(6) 継ぎボルトの軸力	35
2.7 二次覆工がある場合の変形および破壊特性	42
(1) 破壊の進展状況	42
(2) 供試体の変形特性	49
(3) アンカー鉄筋およびリング継手金具面板の変形	51
(4) セグメント継手の挙動特性	53
(5) リング接合面の相対変位	53
(6) 継ぎボルトの軸力	53
(7) 二次覆工鉄筋に生じるひずみ	60
2.8 結 論	67
3. シールドトンネル模型の正負交番ねじり載荷実験	69
3.1 実験の概要	69
3.2 実験供試体	69
3.3 実験に用いた施設および装置	69
3.4 計 測	70
3.5 載荷条件	70
3.6 二次覆工のない場合の変形および破壊特性	79
(1) 破壊の進展状況	79

(2) 供試体全体の変形特性	81
(3) 継手の挙動特性	81
(4) リング接合面の相対変位	82
3.7 二次覆工がある場合の変形および破壊特性	94
(1) 破壊の進展状況	94
(2) 供試体全体の変形特性	95
(3) 継手の挙動特性	95
(4) リング接合面の相対変位	96
3.8 結 論	109
参考文献	112

1. ま え が き

シールドトンネルは、上下水道、地下鉄道、電力・通信用ケーブルなど都市機能を支える重要度の高い構造物として建設されることが多く、その設計に際しては、地震の影響に関する十分な検討が必要とされる。

地震力がシールドトンネルに及ぼす影響について、検討が必要と考えられる項目は大きく次の2つに分けられる。

- 1) トンネルの長手方向に沿う地盤変形により、トンネルに生じる変形（軸方向変形、曲げ変形、ねじり変形）に対する検討
- 2) トンネルの面内方向の地盤変形により、トンネルに生じる変形に対する検討

このうち、一般に、シールドトンネルに対しては1)の影響が支配的と考えられるため、まず、これについて先行的に検討を加えてきた。^{2) 3) 8)}すなわち、現在までに、シールドトンネルの長手方向剛性の算出法を提案するとともに、セグメントの一部をトンネル長手方向に切り出した部分模型供試体を用いた動的載荷実験や、リング状にセグメントを組んだ模型供試体を用いて動的載荷実験を行い、長手方向の剛性および変形特性につき検討を行ってきた。^{4) 5) 6) 7)}

本報告は、これに引続き、トンネルがそれぞれ曲げモーメントおよびねじりモーメントを独立に受けた場合の剛性および変形特性を検討するために行った動的載荷実験結果をとりまとめたものである。曲げモーメント、ねじりモーメント等の地震力は必ずしも独立にトンネルに作用するわけではないが、昨年度検討した軸力の影響とも併せて、まず、独立した荷重作用条件下におけるトンネルの挙動を検討しようとするものである。

検討のポイントは以下の通りである。

曲げに対して、

- 1) 変形特性（トンネル各部の損傷の進展と、これにともなう中立軸の移動）
- 2) 破壊特性（セグメント、二次覆工、継手の破壊の順番と相互作用）
- 3) 剛性および耐力の評価方法との比較

ねじりに対して、

- 1) 変形特性（トンネル各部の損傷の進展、セグメントリング間の滑り）
- 2) 破壊特性（セグメント、二次覆工、継手の破壊の順番と相互作用）
- 3) 剛性および耐力の評価方法の検討

2. シールドトンネル模型の正負交番曲げ載荷実験

2.1 実験の概要

シールドトンネル本体の耐震性を検討する上では、トンネル軸方向に地震力が作用した場合とトンネル断面の面内方向に地震力が作用した場合の両者に対する検討が必要である。一般に線状地中構造物の耐震設計では、構造物の断面寸法が小さいと軸方向の地震力の影響が卓越し、これに対して、構造物の断面寸法が大きくなると面内方向の地震力の影響が重要になる。

本実験は、セグメントを組み立てた模型を用いて正負交番曲げ載荷を行い、曲げモーメント載荷時の模型の破壊性状、耐力及び変形性能、曲げ剛性を把握することを目的とするものである。

2.2 実験供試体

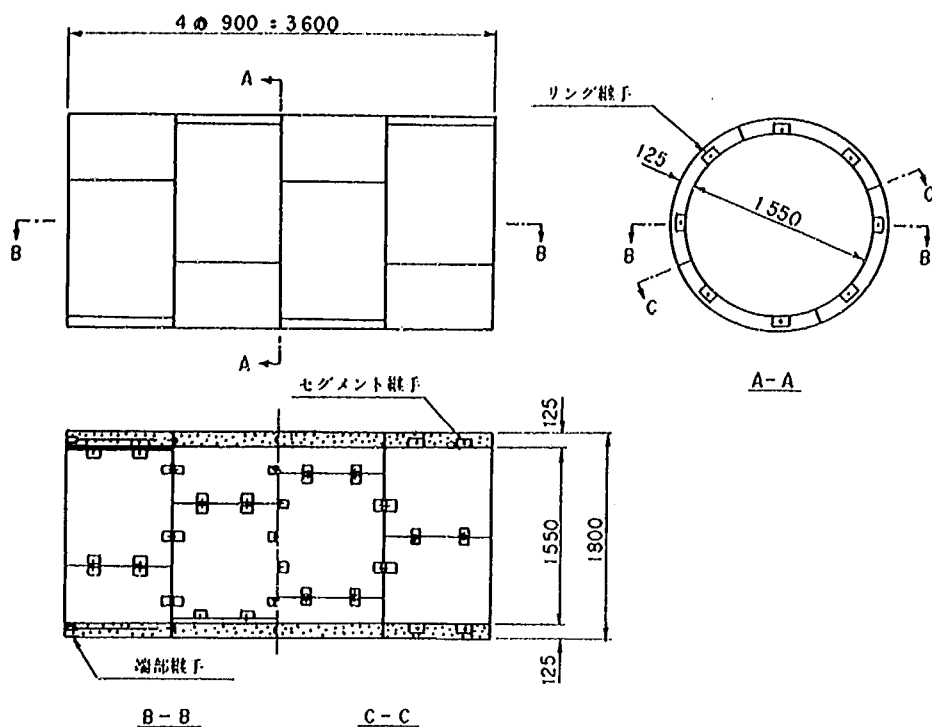
実験に用いた供試体は、図-2.1に示すように、外径1.8mの鉄筋コンクリートシールドトンネルをモデル化したDタイプ供試体およびこれに二次覆工を施したEタイプ供試体の2体である。ここで、供試体番号がDおよびEと途中から始まっているのは、耐震研究室において現在までに実施したセグメントの部分模型実験に用いた^{4) 5) 6) 7)}A、B、Cの供試体に対する連番の供試体番号を用いているためである。

使用したRCセグメントは、日本下水道協会規格のシールド工事用標準セグメントを参考として模型用に製作したものである。各供試体の特徴は以下のとおりである。

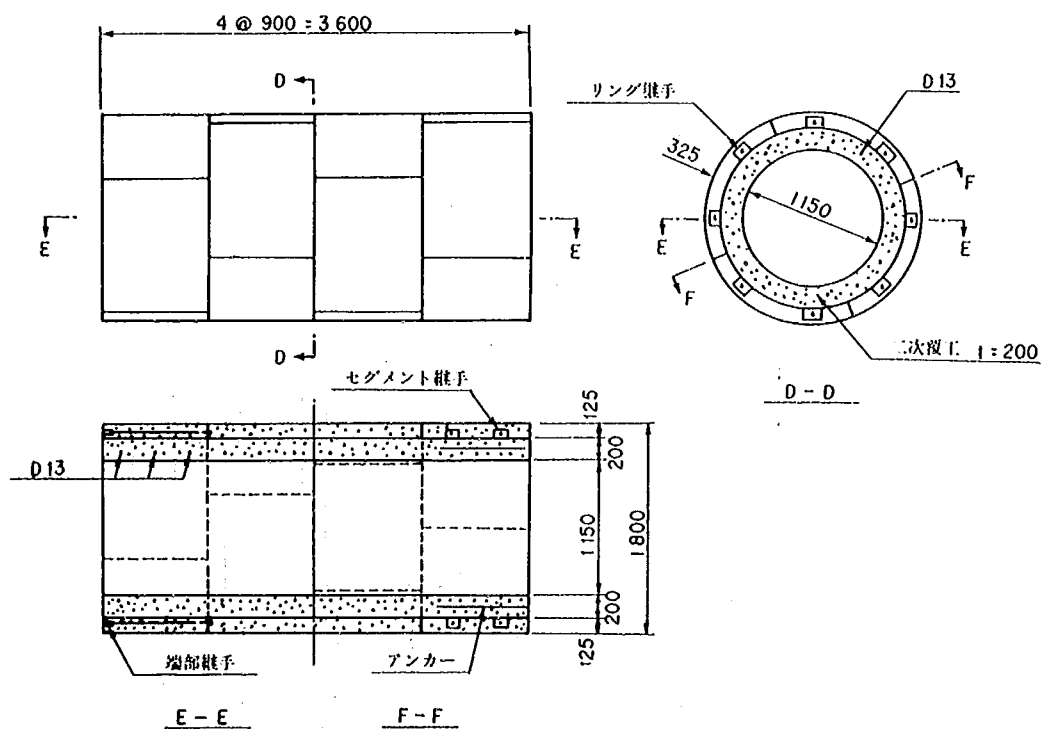
(1) Dタイプ供試体

厚さ125mm、長さ900mmのセグメント4個をリング状に組み、これをリング継手によって4リング分だけ連結して一体構造とした供試体である。セグメントの寸法、リング継手およびセグメント継手の構造は「シールド工事用標準セグメント」(土木学会、日本下水道協会共編、1982年改訂)に示されるセグメント番号2番(外径1.8m)のセグメントに従って定めた。標準セグメントではリング分割は5分割(Aセグメント×2、Bセグメント×2、Kセグメント×1)であるが、ここでは模型を簡単にするために、Aセグメント(中心角90°)のみを4体用いることとした。なお、トンネル長手方向のリング接合は、各々45°づつずらして千鳥組みとした。

図-2.2はDタイプ供試体の断面を示したものである。セグメント内の配筋を図-2.3に示す。各々のセグメントの中には、長手方向に14本(D10)、円周方向にはリング筋として12本(D10)の鉄筋が配置されている。ただし、供試体の両端の2リングにおいて、載荷力を確実に供試体に伝達させるために、機械継手を設置してある。したがって、合計4リングから成る供試体であるが、両端の2リングは取付治具としての機能も有していることから、後述するように計測は主として中間部の2リングに対して行った。表-2.1はD10およびD13の鉄筋の強度試験を行った結果を示したものである。破断強度の平均値は4920kgf/cm²(D10)および5300kgf/cm²(D13)程度である。



(a) Dタイプ供試体



(b) Eタイプ供試体

図-2.1 実験に用いた供試体

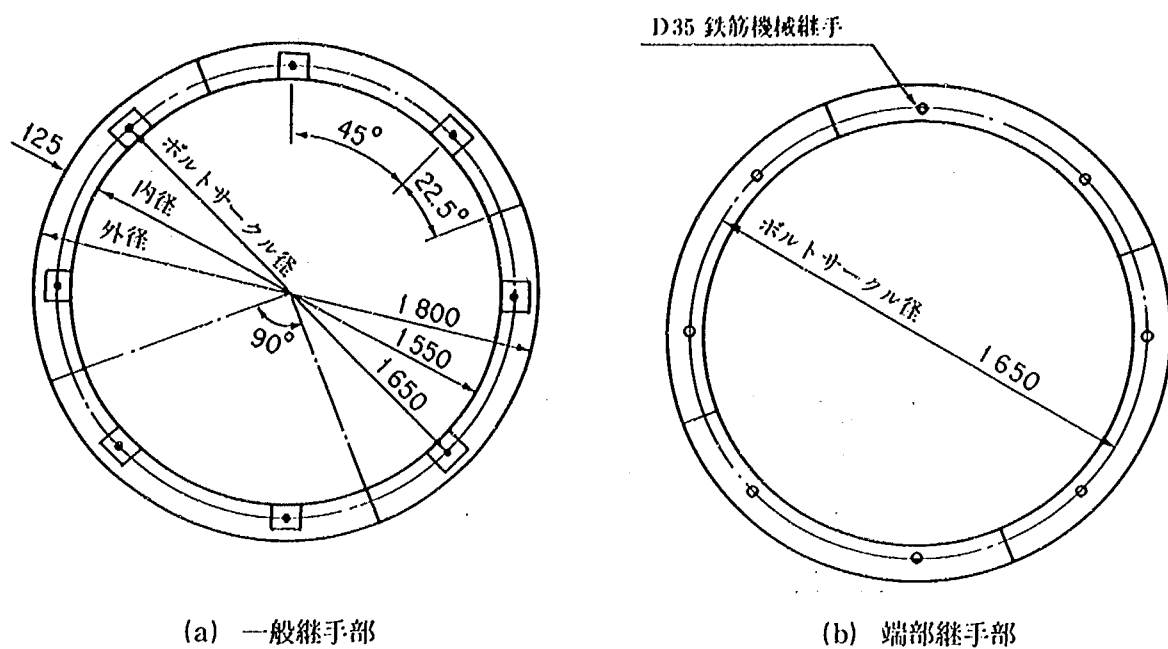


図-2.2 Dタイプ供試体の断面

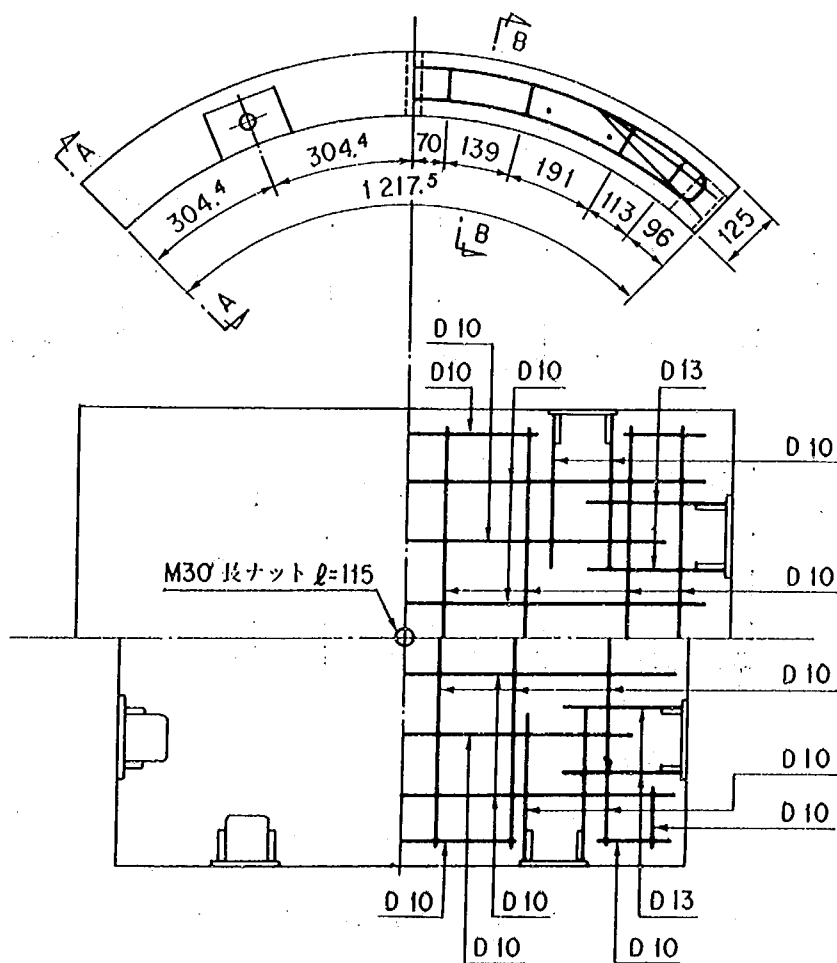


図-2.3 Dタイプ供試体一般部セグメント内の配筋

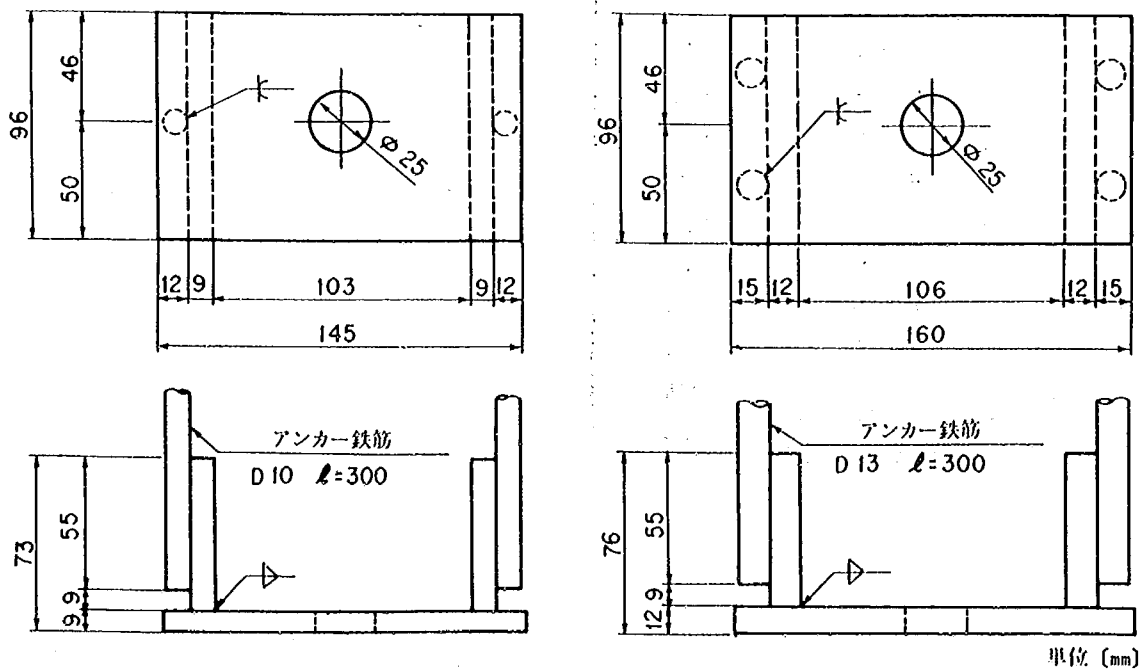
表-2.1 鉄筋強度試験結果

鉄筋の 種 類	試験片 No	降伏荷重 (tonf)	降伏応力 (kgf/cm ²)	降伏ひずみ ($\times 10^6$)	ヤング率 (kgf/cm ²)	破断荷重 (tonf)	破断強度 (kgf/cm ²)	破断時の 伸び(%)
D 10 ¹⁾	No 1	2.80	3925	2050	1.91×10^6	3.92	5496	18.9
	No 2	2.78	3897	2060	1.89×10^6	3.89	5454	19.3
	No 3	2.80	3925	2112	1.86×10^6	3.93	5510	18.1
	平均値	2.79	3916	2074	1.89×10^6	3.91	5487	18.8
D 13 ²⁾	No 1	4.50	3552	1825	1.95×10^6	7.00	5525	19.7
	No 2	4.50	3552	2050	1.73×10^6	7.40	5840	20.3
	No 3	4.50	3552	2031	1.73×10^6	6.98	5509	20.5
	平均値	4.50	3552	1969	1.80×10^6	7.13	5625	20.2

注 1) : 公称断面積 = 0.7139cm²

2) : 公称断面積 = 1.267cm²

リング継手およびセグメント継手としては図-2.4に示す構造を用いることとした。リング継手は厚さ9mmの面板(材質:SS41)に同じ厚さで同じ材料の定着板を溶接した構造となっており、定着板に溶接したアンカー鉄筋($\ell = 300$ mm, SD30, D10)2本によってセグメントに定着されている。また、セグメント継手は厚さ12mmの面板及び定着板(材質:SS41)により構成されており、定着板に溶接したアンカー鉄筋($\ell = 300$ mm, SD30, D13)4本によってセグメントに定着されている。



(a) リング継手金具

(b) セグメント継手金具

図-2.4 実験に用いた継手金具

リング継手およびセグメント継手とも、継ぎボルトには M 20 × 55mm (強度区分 8.8) を用いた。ボルトの有効面積は 2.45cm² である。

継ぎボルトの締め付けは、ボルトの許容応力度の 80% に相当する約 4.7tf を目標としてボックスレンチを用いて人力で行った。なお、載荷実験直前に締め付け力の再確認を行ったところ、4.7tf からの低下が激しかったため、増し締めをした。この結果、ボルトの初期軸力は表 - 2.2 に示す値となっている。

リング継手は合計 24 個あり、本実験ではこれらを 図 - 2.5 に示すようにナンバリングすることとした。このナンバリングは E タイプ供試体についても同様である。

表 - 2.2 D タイプ供試体のボルトの初期軸力

(a) リング継ぎボルト

No		軸 力 (ton・f)
J T - 1	B - 1	6.49
	B - 2	3.17
	平 均	4.83
J T - 2	B - 3	4.22
	B - 4	4.70
	B - 5	3.45
	B - 6	4.16
	B - 7	4.59
	B - 8	4.73
	B - 9	4.75
	B - 10	5.36
	平 均	4.50
J T - 3	B - 11	3.99
	B - 12	4.44
	平 均	4.22
全 体 平 均		4.50
標 準 偏 差		0.83

(b) セグメント継ぎボルト

No	軸 力 (ton・f)
B - 13	4.04
B - 14	3.45
B - 15	3.42
B - 16	4.52
平 均	3.86

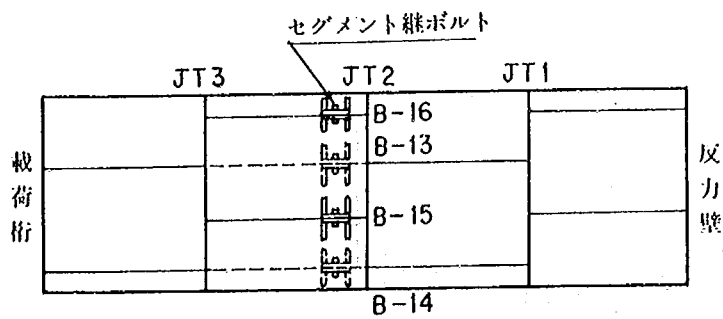
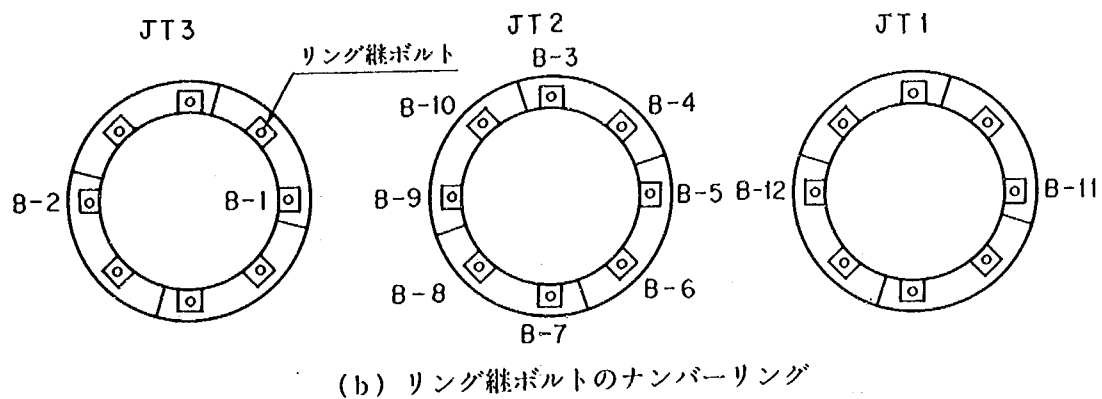
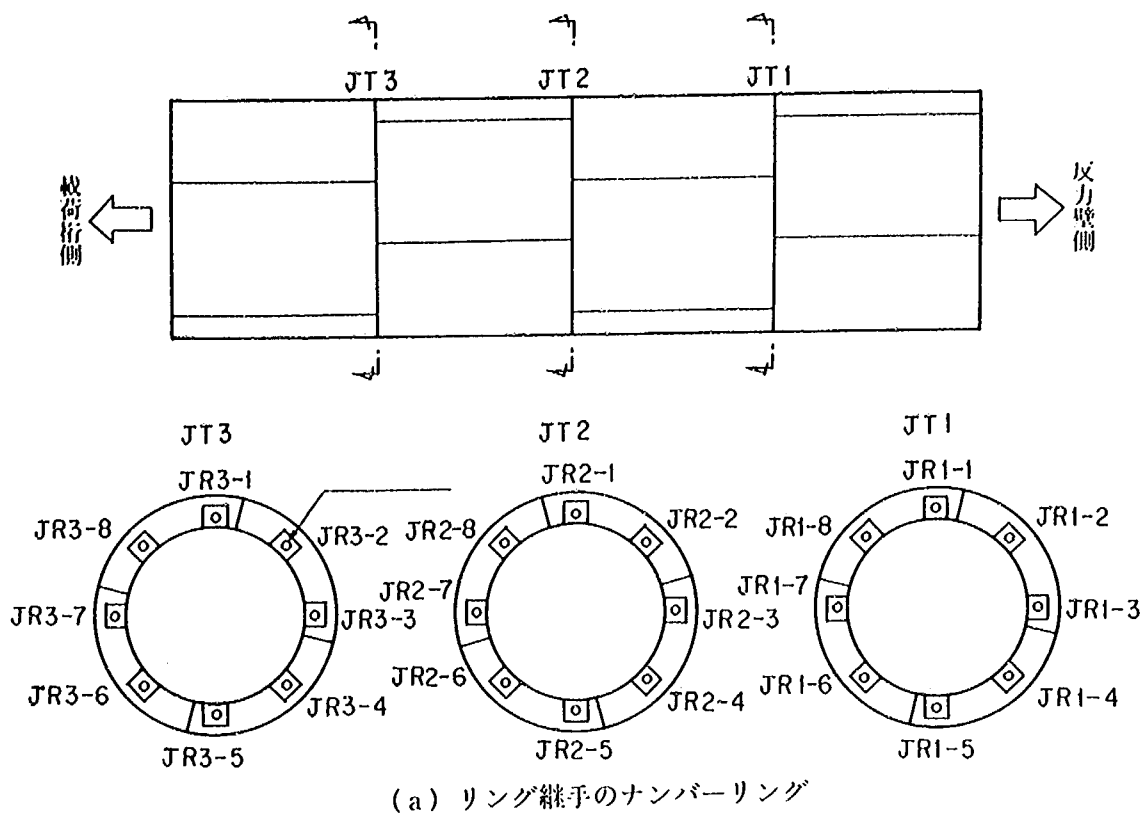


図-2.5 継手部分のナンバーリング

(2) Eタイプ供試体

Eタイプ供試体は、Dタイプ供試体の内側に厚さ 20 cm の二次覆工を施したものであり、セグメントおよび継手構造はDタイプ供試体と同様である。

図 2.6 および図 - 2.7 は、それぞれEタイプ供試体の断面およびセグメント、二次覆工の配筋を示したものである。二次覆工には、図 - 2.8 に示すように長手方向に16本 (D13)、円周方向に12本 (D13) の鉄筋が配置されている。本供試体の特徴は、二次覆工の長手方向鉄筋を供試体の全長にわたって連続させたことと、図 - 2.7 に示すように、ジベル筋を用いて二次覆工とセグメントとの付着を確保している点である。なお、本供試体においても、端部セグメントに、載荷力を確実に伝達させるための機械継手を設置しており、二次覆工にも機械継手を設置している。

継ぎボルトの締め付けは、Dタイプ供試体と同じく約 4.7tf を目標とした。ただし、Eタイプ供試体では、二次覆工を打設した後にボルトを増し締めすることができない。そのため、表 - 2.3 に示すように実験直前の継ぎボルトの軸力は 2.65tf ~ 3.74tf の範囲となっており、平均して初期軸力は目標値を下回っている。また、個々のボルトごとに見ると、初期締め付け力には大きなバラツキがある。

表 - 2.3 Eタイプ供試体のボルトの初期軸力

(a) リング継ぎボルト

No		軸 力 (ton・f)
JT - 1	B - 1	0.30
	B - 2	-
	平 均	0.30
JT - 2	B - 3	2.45
	B - 4	-
	B - 5	-
	B - 6	3.78
	B - 7	2.87
	B - 8	-
	B - 9	-
	B - 10	-
	平 均	3.03
JT - 3	B - 11	-
	B - 12	2.75
	平 均	2.75
全 体 平 均		2.43
標 準 偏 差		1.15

(b) セグメント継ぎボルト

No	軸 力 (ton・f)
B - 13	2.67
B - 14	-1.19
B - 15	-
B - 16	-
平 均	0.74

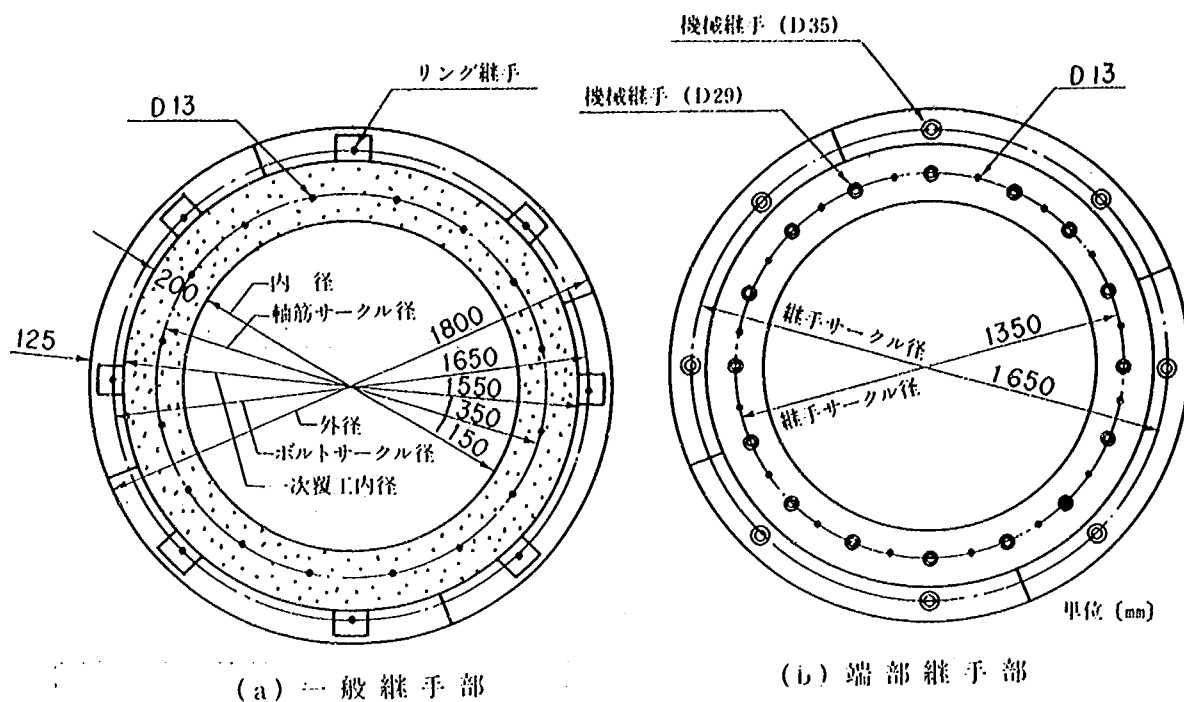


図-2.6 Eタイプ供試体断面図

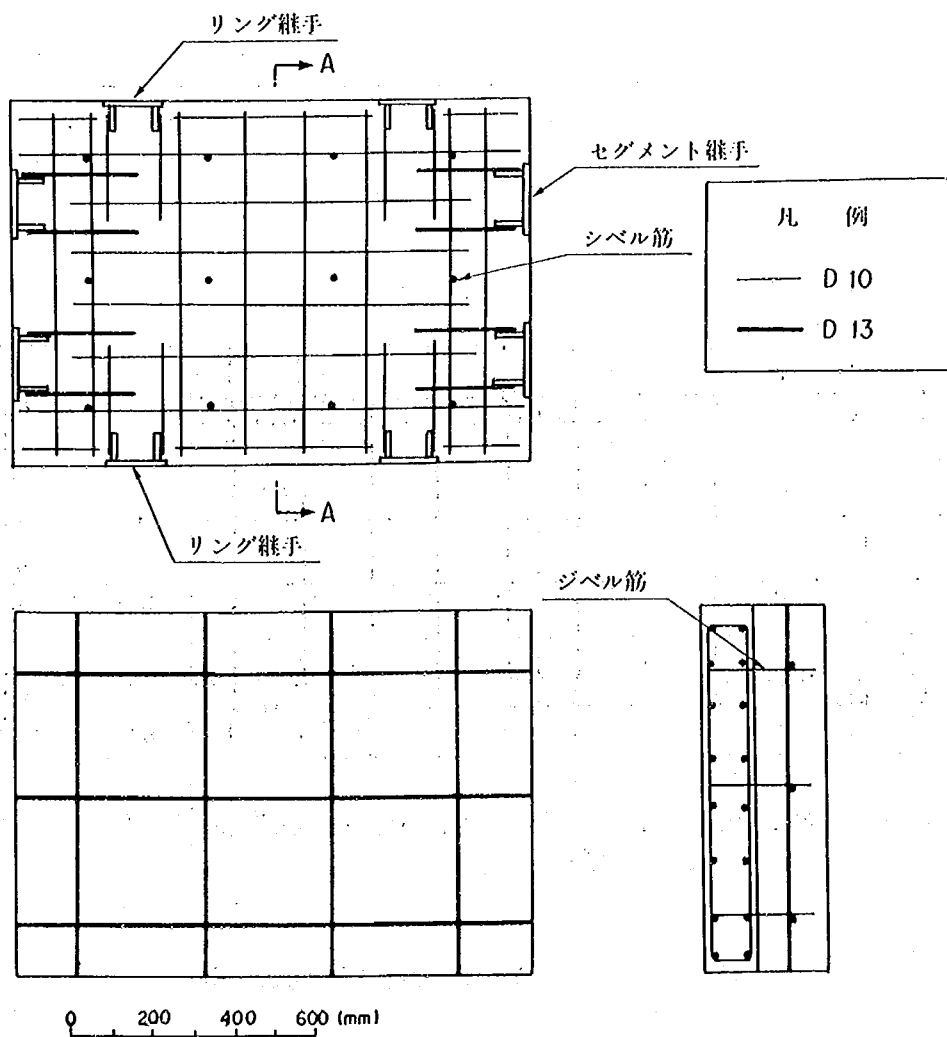


図-2.7 Eタイプ供試体のセグメントおよび二次覆工配筋図

(3) 使用コンクリート

供試体の製作に用いたコンクリート（セグメントおよび二次覆工）の仕様は以下のとおりである。

(a) 主要材料

セメント：D、Eタイプセグメント 普通ポルトランドセメント

E タイプ二次覆工 早強ポルトランドセメント

細骨材：千葉県富津市鬼淵山産砂および栃木県安蘇郡田沼町産砕砂の2種混合材

粗骨材：栃木県安蘇郡田沼町産碎石

(b) 示方配合

設計基準強度をセグメント 420 kgf/cm^2 、二次覆工 180 kgf/cm^2 として表-2.4 に示す配合を用いた。

表-2.4 示方配合表

	粗骨材 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント 比 (%)	細骨材 率 (%)	配 合 (kgf/cm ³)				
						水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
セグメント	20	3	1	37.1	36	155	418	620	1220	①*
二次覆工 コンクリート	20	21	1	73.5	49	206	280	888	925	②*

* 混和材 ① セグメント : ポゾリスNa 4000, 7.106 kgf/m^3

② 二次覆工 : ポゾリスNo. 70, 2.8 kgf/m²

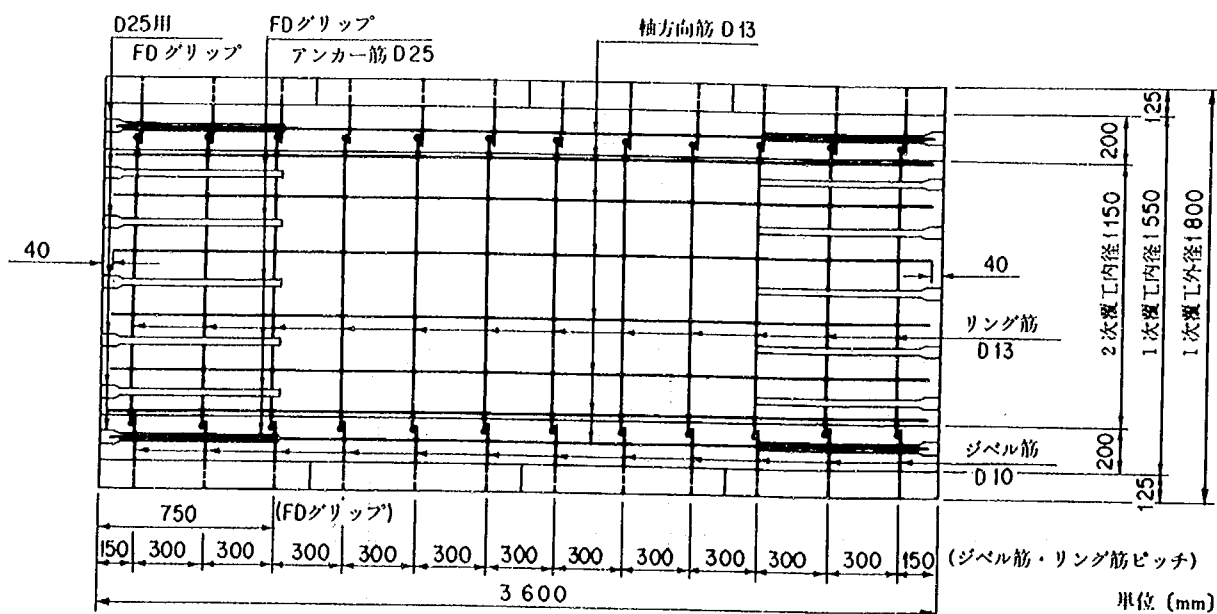


図-2.8 Eタイプ供試体二次覆工鉄筋配置状況

(c) 養生方法

セグメントは図-2.9に示すとおり65℃で4時間の蒸気養生を行った後、水中養生した。二次覆工コンクリートは自然養生とした。

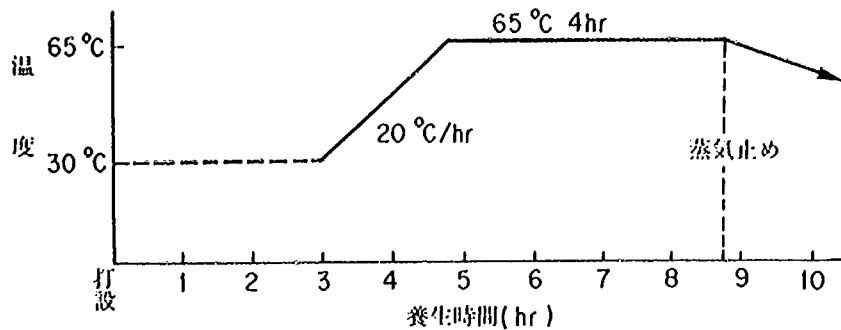
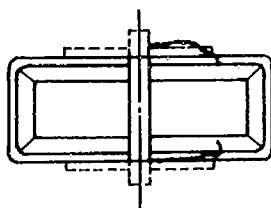


図-2.9 蒸気養生条件

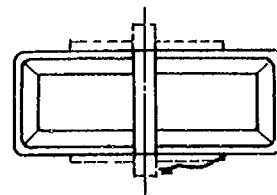
(4) 初期クラック

工場で製作した供試体を部材耐震強度実験施設に運搬する際に、十分注意を払ったが、微細なクラックが発生している。

Dタイプ供試体では、図-2.10に示すように、供試体の内側にJR 3-3 および JR 3-7 のリング継手の定着板に沿って初期クラックが生じていた。ただし、セグメント継手の周辺には初期クラックは認められなかった。また、供試体外面には初期クラックは生じなかった。



(a) JR 3-3



(b) JR 3-7

図-2.10 Dタイプ供試体リング継手付近の初期クラックの状況

Eタイプ供試体では、図-2.11に示すように二次覆工に初期クラックが生じた。図中には二次覆工のリング筋の位置も示しているが、初期クラックの位置はこれとよく一致していることから、初期クラックは二次覆工コンクリートの乾燥収縮に伴うものと考えられる。なお、供試体外面には初期クラックは認められなかった。

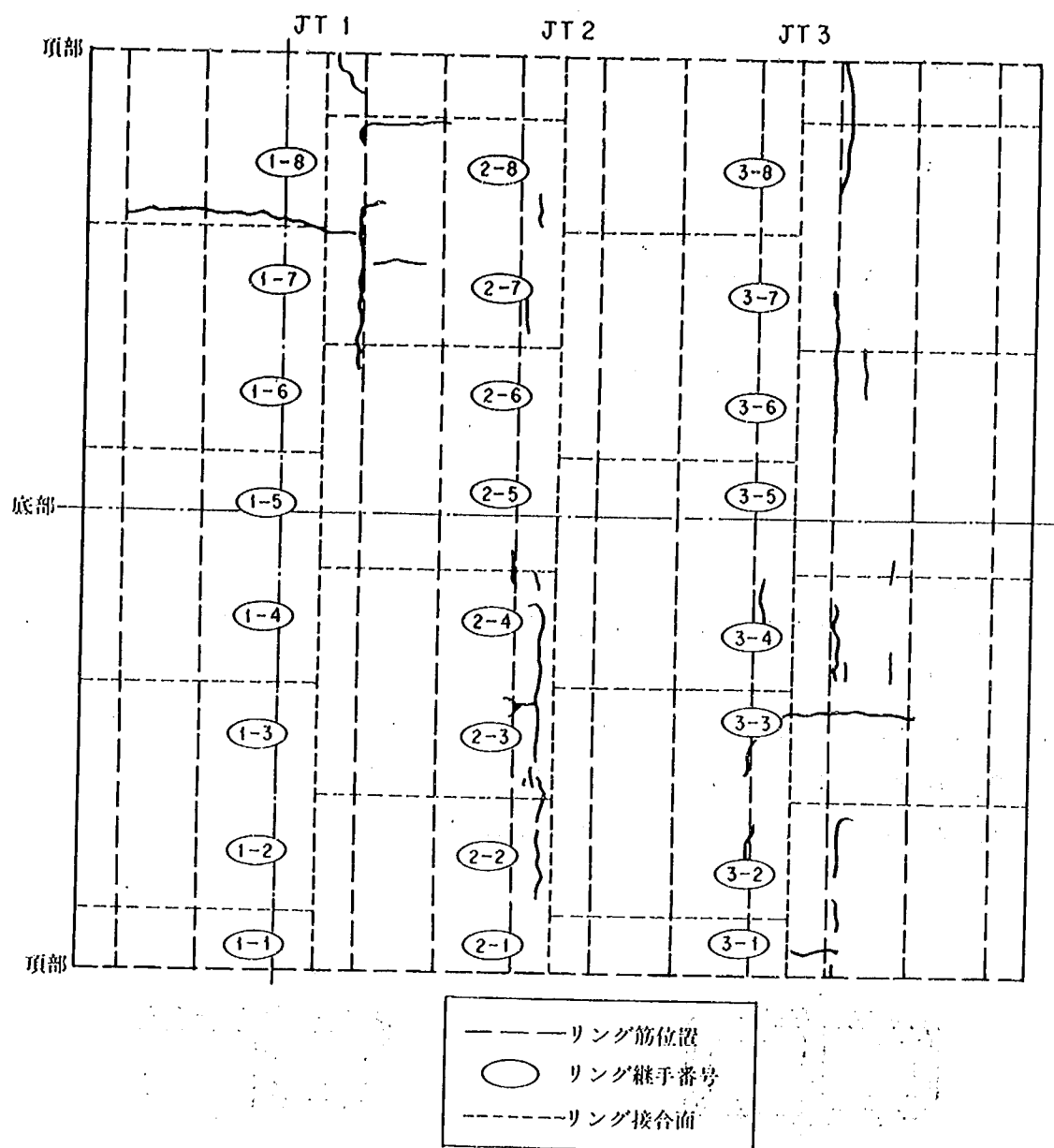


図-2.11 Eタイプ供試体の初期クラック（二次覆工の展開図）

(5) 強度および弾性係数

DおよびEタイプ供試体のセグメントとEタイプ供試体の二次覆工コンクリートの各々について、強度試験用の円柱供試体を作成し、強度試験を行った。強度試験により求められた実験当日のコンクリートの圧縮強度および弾性係数（割線係数）は表-2.5に示すとおりである。

表-2.5 コンクリートの強度試験結果

供 試 体 タ イ プ	テ ス ト ピ ー ス	圧 縮 強 度 σ_c (kgf/cm ²)	引 張 強 度 σ_T (kgf/cm ²)	ヤ ン グ 率 E_{24} (kgf/cm ²)	ス ラ ン プ (cm)	空 気 量 (%)
D タイプ セグメント	No. 1	552	48.0	3.83×10^5	4.0	1.2
	No. 2	537	47.5	4.25×10^5	3.7	1.1
	No. 3	504	45.0	3.75×10^5	3.5	1.3
	No. 4	526	45.7	3.83×10^5	2.8	1.1
	No. 5	499	40.5	3.95×10^5	4.0	1.2
	No. 6	461	41.9	3.66×10^5	3.8	1.2
	No. 7	513	44.8	3.80×10^5	4.2	1.1
	No. 8	531	46.5	3.54×10^5	3.7	1.2
平 均		515.4	45.0	3.83×10^5	3.71	1.18
E タイプ セグメント	No. 1	557	41.0	3.43×10^5	4.4	1.2
	No. 2	535	45.9	3.42×10^5	3.9	1.3
	No. 3	583	41.5	3.46×10^5	4.0	1.2
	No. 4	557	47.9	3.85×10^5	4.0	1.4
	No. 5	537	45.6	3.73×10^5	4.2	1.4
	No. 6	557	46.4	4.02×10^5	3.7	1.2
	No. 7	512	44.9	3.05×10^5	4.2	1.3
	No. 8	518	41.4	3.73×10^5	3.4	1.2
平 均		544.5	44.3	3.59×10^5	3.98	1.28
二 次 覆 工	No. 1	295	22.6	2.56×10^5	20.5	1.3
	No. 2	291	23.4	2.36×10^5		
	No. 3	295	23.7	2.13×10^5		
平 均		293.7	23.2	2.35×10^5	20.5	1.3

2.3 実験に用いた施設および装置

実験は、建設省土木研究所部材耐震強度実験施設において実施した。図-2.12は、供試体への載荷方法を示したものである。供試体は固定治具を介して、一端が反力壁に固定され、他端は載荷桁に固定されている。載荷桁の両端にはそれぞれ動的加振機が接続されており、この2台の加振機をデジタル制御で逆位相で操作することにより、供試体に曲げを作用させた。供試体の自重は床面によって支持されているが、供試体と床面との間の摩擦力をできるかぎり小さくするために、テフロン板および角材から成る滑り支承を設けた。

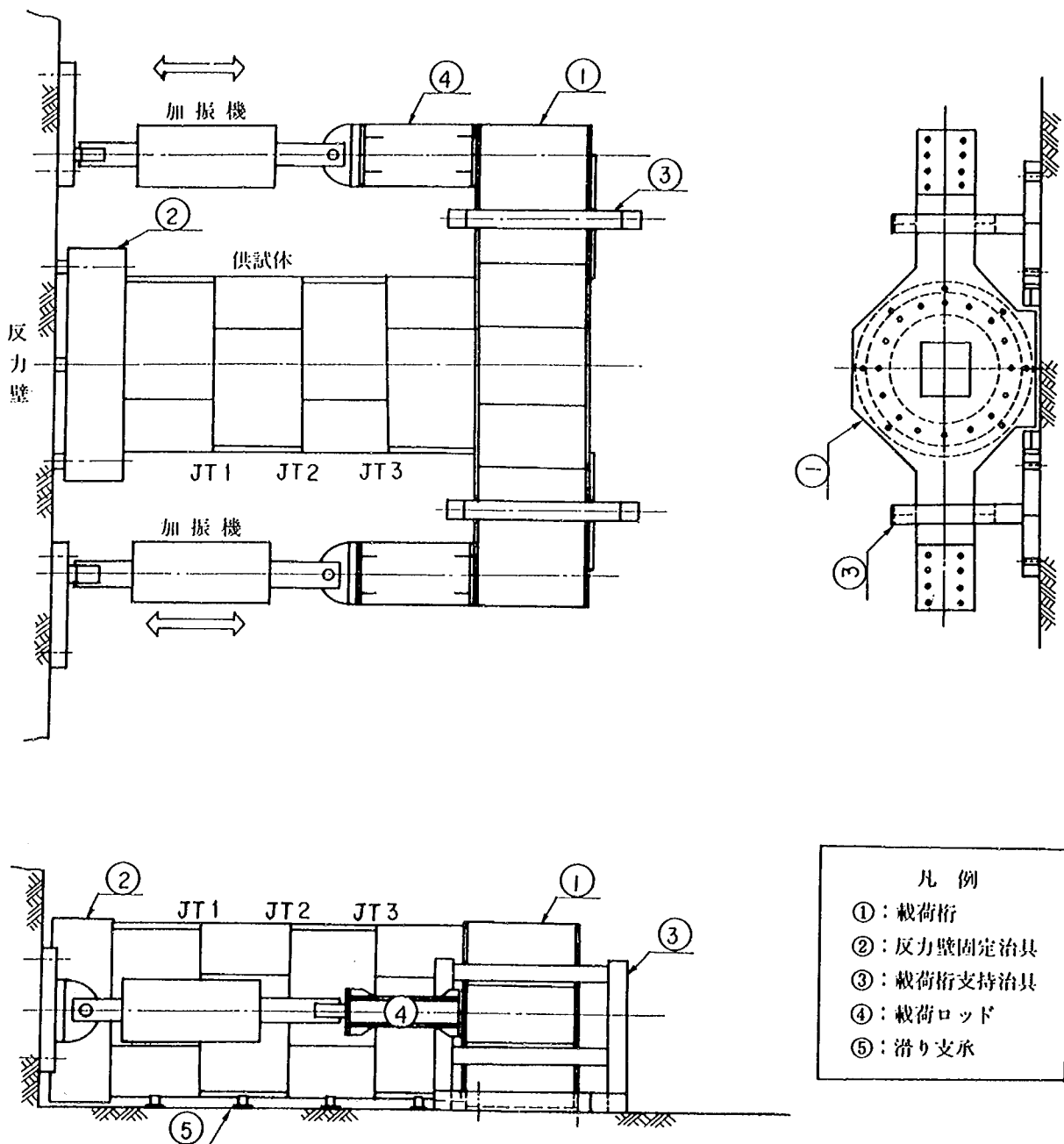


図-2.12 載荷装置図

2.4 計 測

計測は図-2.13に示すように中央の2リングを中心に、A、B、……、Hの8断面で行った。

計測項目を供試体および計測断面ごとに整理すると、表-2.6のようになる。Dタイプ供試体の計測配置は、すべてEタイプ供試体の計器配置に含まれている。

図-2.14はボルト頭部に貼りつけたひずみゲージの詳細図を示したものである。

2.5 載荷条件

(1) Dタイプ供試体

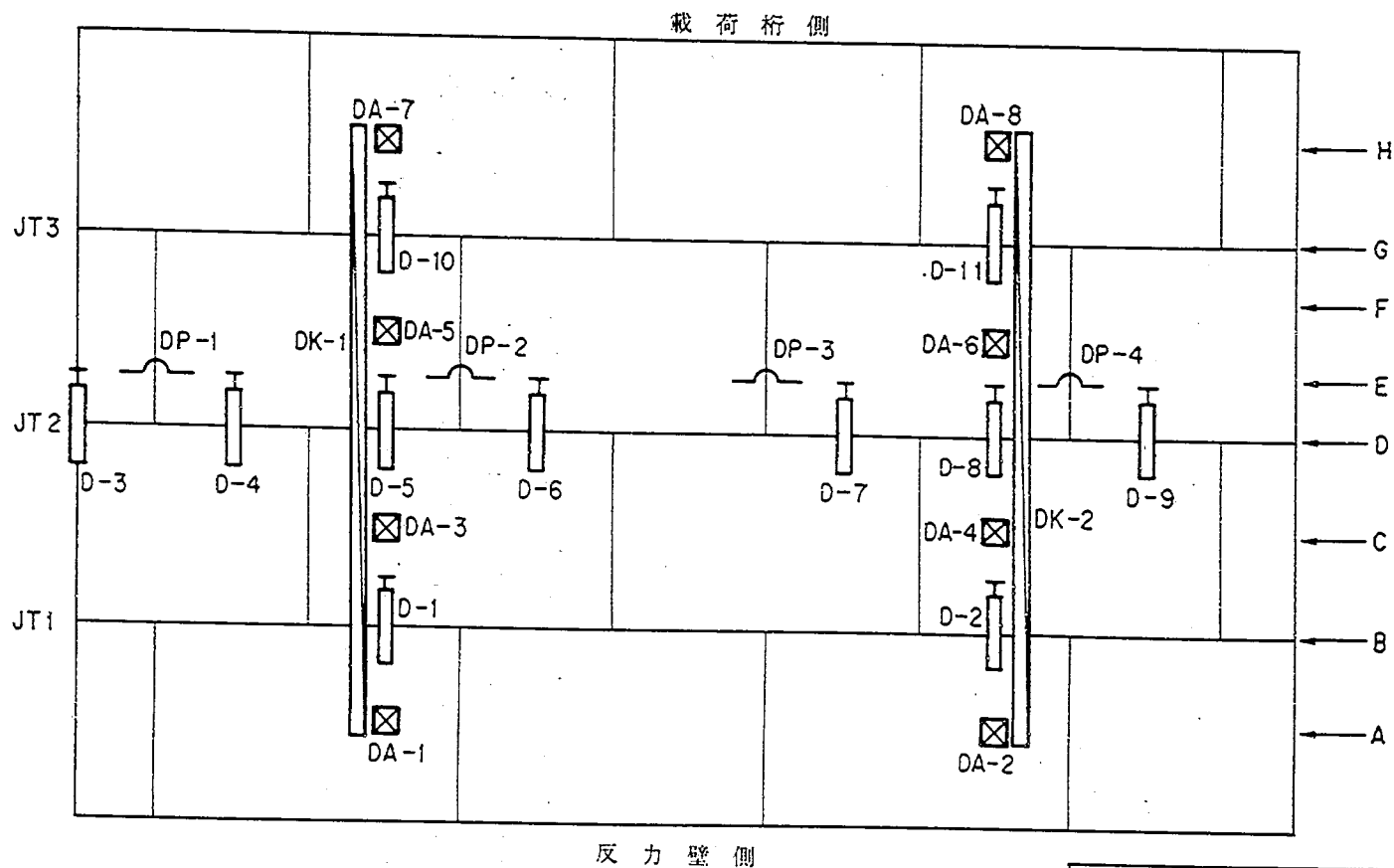
載荷のパターンを図-2.15に示す。加振機の制御は変位制御とし、2台の加振機の載荷荷重が、正負が逆で、同じ値になるように調整しながら、曲げモーメントを発生させることとした。なお、曲げモーメントの正負については、加振機No.1が正の荷重の場合を正の曲げモーメントとし、逆に加振機No.2が正の荷重の場合を負の曲げモーメントとした。

載荷は、まず目標曲げモーメントを設定し、10tfm、-20tfmをピーク値とする1サイクルの載荷を行った。この後の載荷では、供試体の破壊の進行につれて、供試体の耐力が変動して行くことが予想されたため、加振機の変位を設定して載荷を行うこととした。加振機の目標変位を、5mm、-10mm、20mm、-30mmと増加させ、その後、破壊に至るまで、正の曲げモーメントを載荷することとした。

各グループでの目標変位および曲げモーメントまでのステップ数は各グループでバラツキがあるが、これは、破壊の進行を詳細に見ながら載荷を行ったためである。

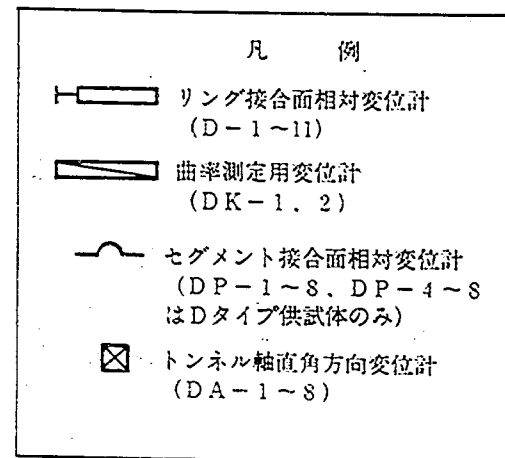
(2) Eタイプ供試体

基本的にDタイプ供試体と同様の載荷方法を用いて、図-2.16に示すような正負交番載荷を行った。ただし、Eタイプ供試体では、載荷の進展に伴い、荷重がゼロになっても供試体に変位が残留し、累積していくことが考えられる。そこで、各グループにおける最終ステップ（荷重はゼロ）の状態で残留している加振機変位量を平均して、その平均残留変位に次のループの目標変位を加え合わせた変位量をピーク値として載荷を行うこととした。

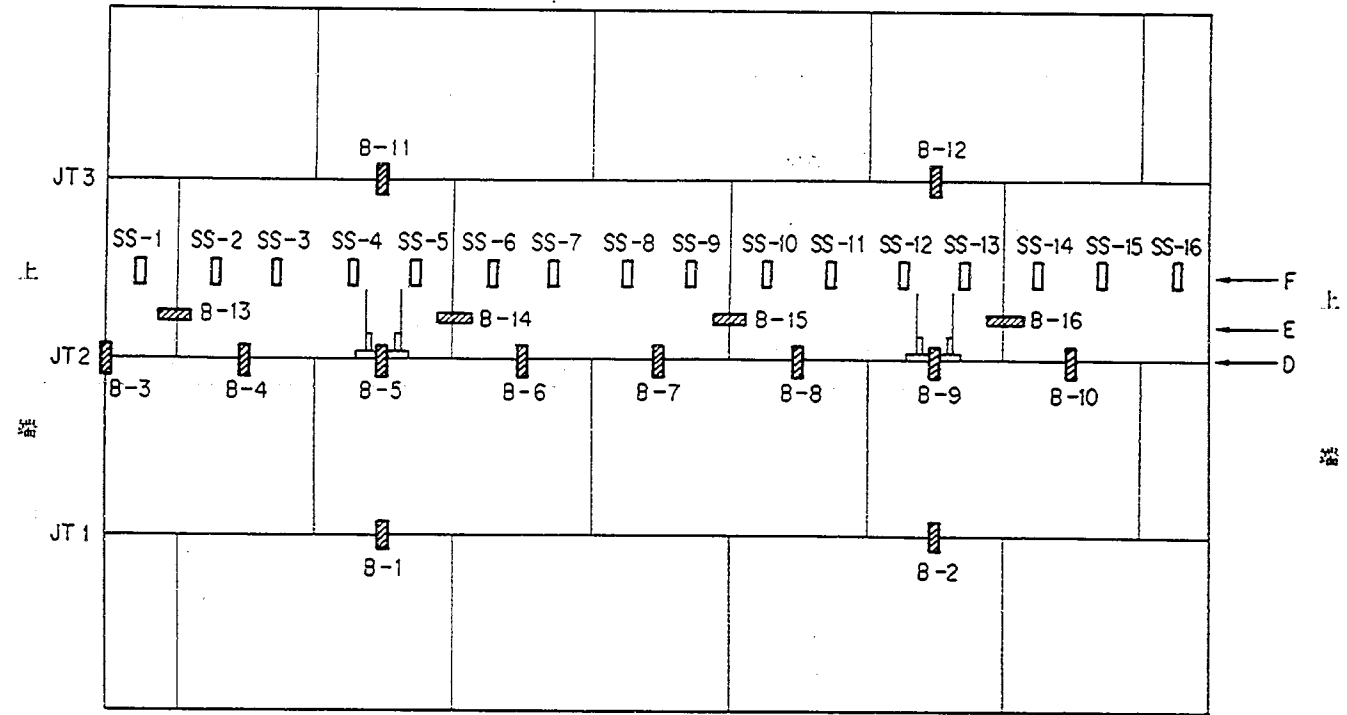


(a) 変 位 計

図 - 2.13 計測器配置図 (1)



載荷荷側



反力壁側

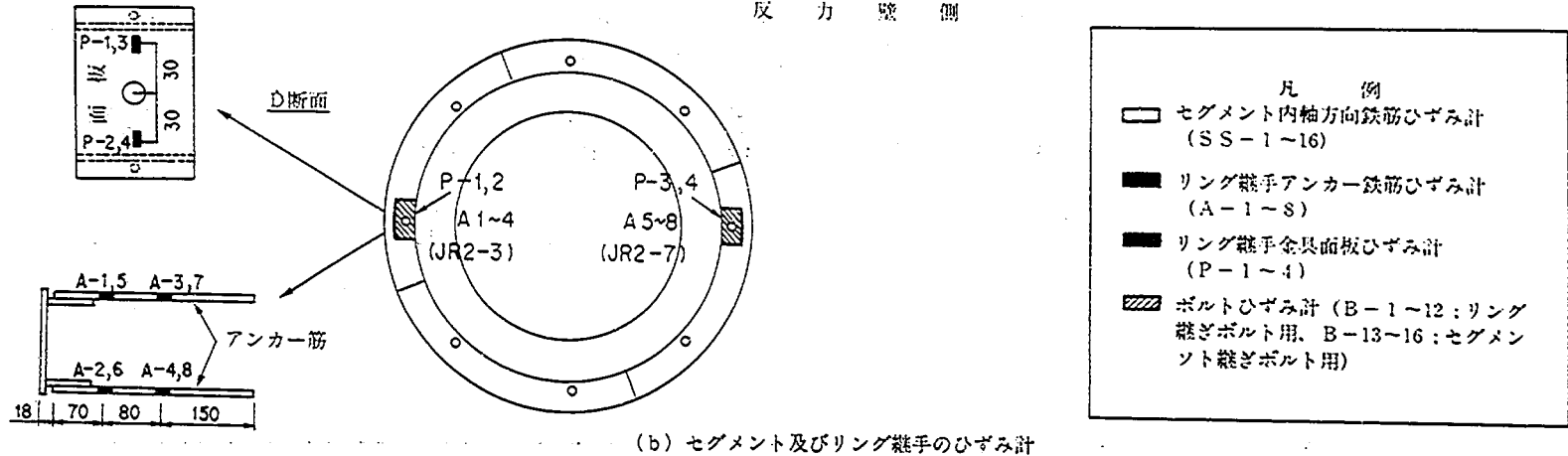
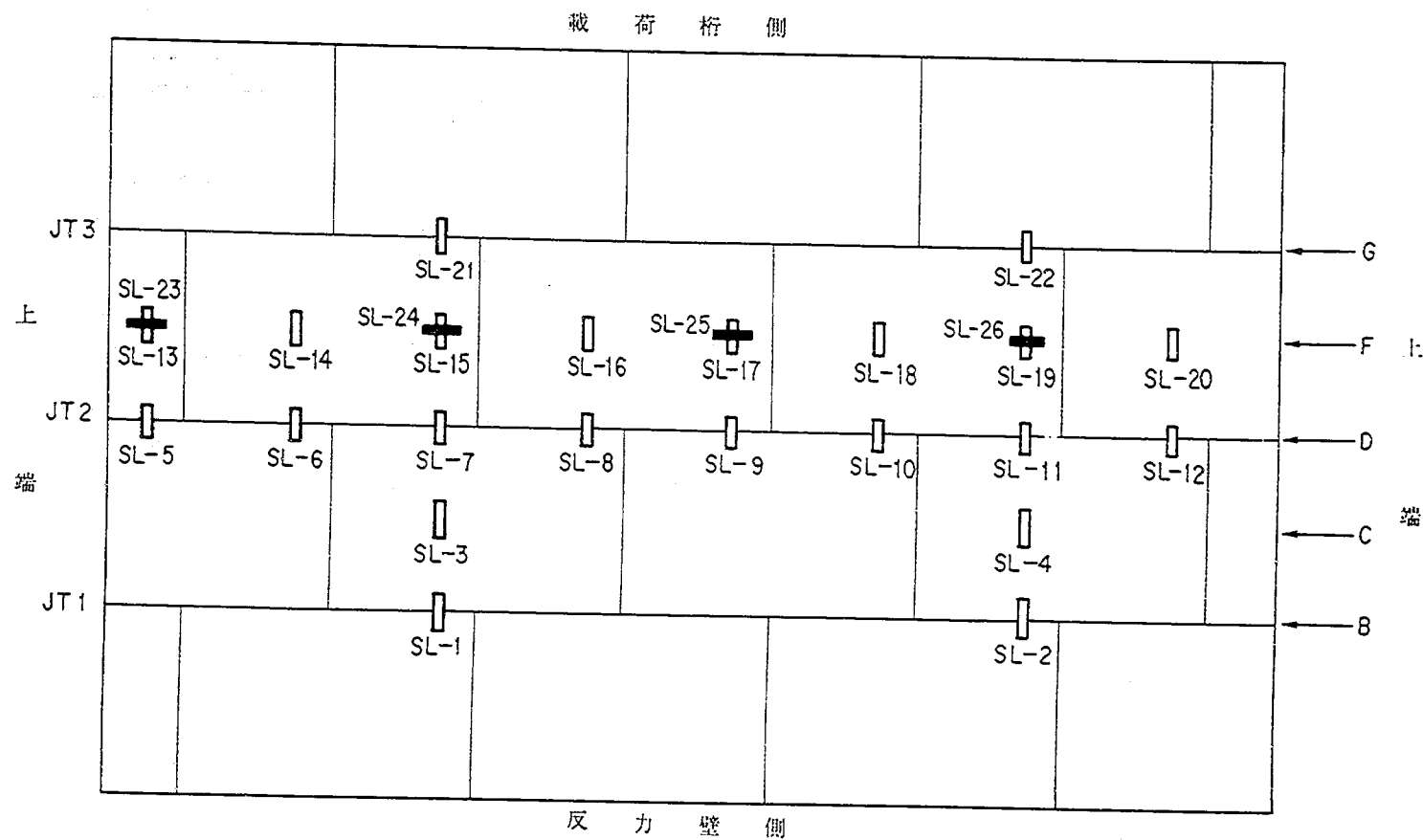


図-2.13 計測器配置図(2)



(c) 二次覆工鉄筋のひずみ計

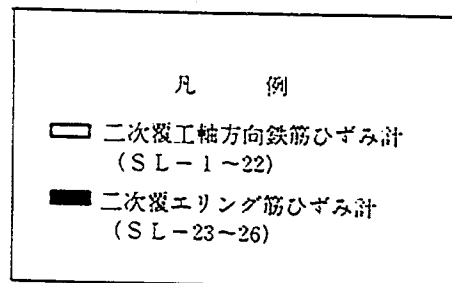


図-2.13 計測器配置図 (3)

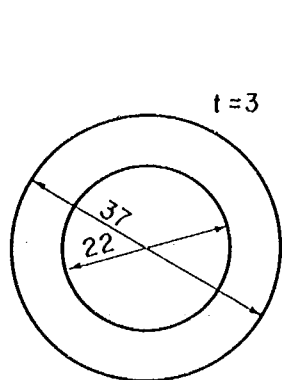
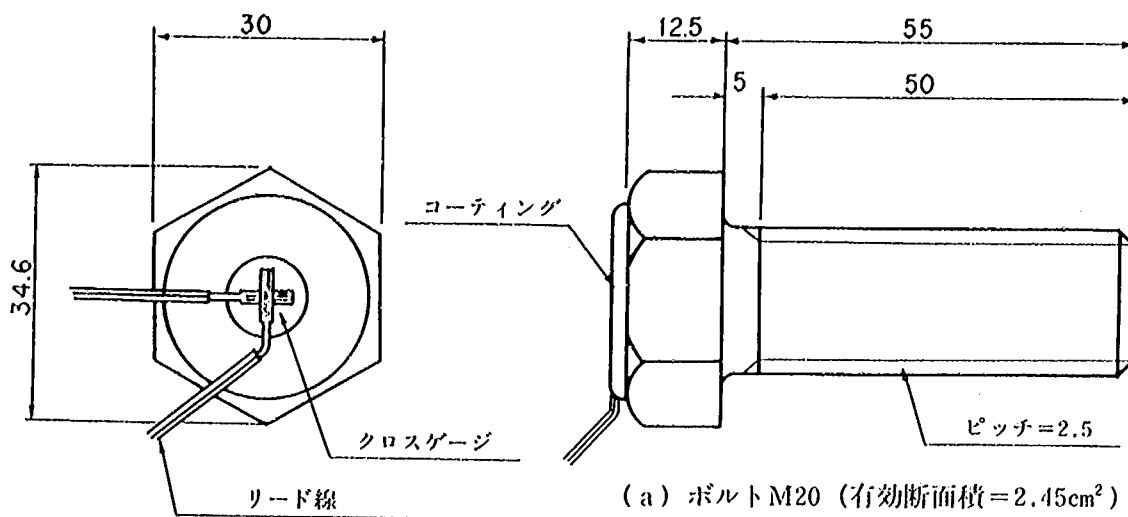
表-2.6 計測項目

(a) Dタイプ供試体

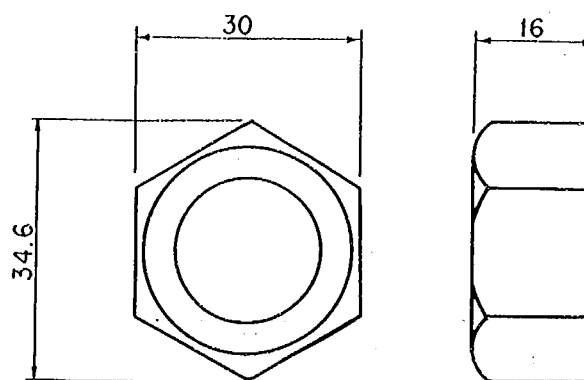
		断面記号	A	B	C	D	E	F	G	H	計
		計測項目									
加振機		加振機の載荷荷重 (LOAD-1~2)	--	--	--	--	--	--	--	--	2
セグメント	軸方向	各リングの絶対変位 (DA-1~8)	2	--	2	--	--	2	--	2	8
		曲率算定用のリング間相対変位 (DK-1~6)	--	--	--	--	--	--	--	--	6
		リング間継手の相対変位 (D-1~11)	--	2	--	7	--	--	2	--	11
		リング継ボルトのひずみ (B-1~12)	--	2	--	8	--	--	2	--	12
		アンカー鉄筋のひずみ (A-1~8)	--	--	--	8	--	--	--	--	8
		継手金具面板のひずみ (P-1~4)	--	--	--	4	--	--	--	--	4
		セグメント鉄筋のひずみ (SS-1~16)	--	--	--	--	--	16	--	--	16
	円周方向	セグメント間継手の相対変位 (DP-1~8)	--	--	--	--	8	--	--	--	8
		セグメント継ボルトのひずみ (B-13~16)	--	--	--	--	4	--	--	--	4
		合計	2	4	2	27	12	18	4	2	79

(b) Eタイプ供試体

		断面記号	A	B	C	D	E	F	G	H	計
セグメント	軸方向	加振機	計測項目	加振機の載荷荷重 (LOAD-1~2)	-	-	-	-	-	-	2
			各リングの絶対変位 (DA-1~8)	2	-	2	-	-	2	-	8
			曲率算定用のリング間相対変位 (DK-1~6)	-	-	-	-	-	-	-	6
			リング間継手の相対変位 (D-1~11)	-	2	-	7	-	-	2	11
			リング継ボルトのひずみ (B-1~12)	-	2	-	8	-	-	2	12
			アンカー鉄筋のひずみ (A-1~8)	-	-	-	8	-	-	-	8
			継手金具面板のひずみ (P-1~4)	-	-	-	4	-	-	-	4
			セグメント鉄筋のひずみ (SS-1~16)	-	-	-	-	-	16	-	16
	円周方向		セグメント間継手の相対変位 (DP-1~8)	-	-	-	-	4	-	-	4
			セグメント継ボルトのひずみ (B-13~16)	-	-	-	-	4	-	-	4
二次覆工			軸方向鉄筋のひずみ (SL-1~22)	-	2	2	8	-	8	2	22
			円周方向鉄筋のひずみ (SL-23~26)	-	-	-	-	-	4	-	4
		合 計		2	6	4	35	8	30	6	101



(b) ワッシャー



(c) ナット

図- 2.14 使用ボルトおよびひずみゲージ

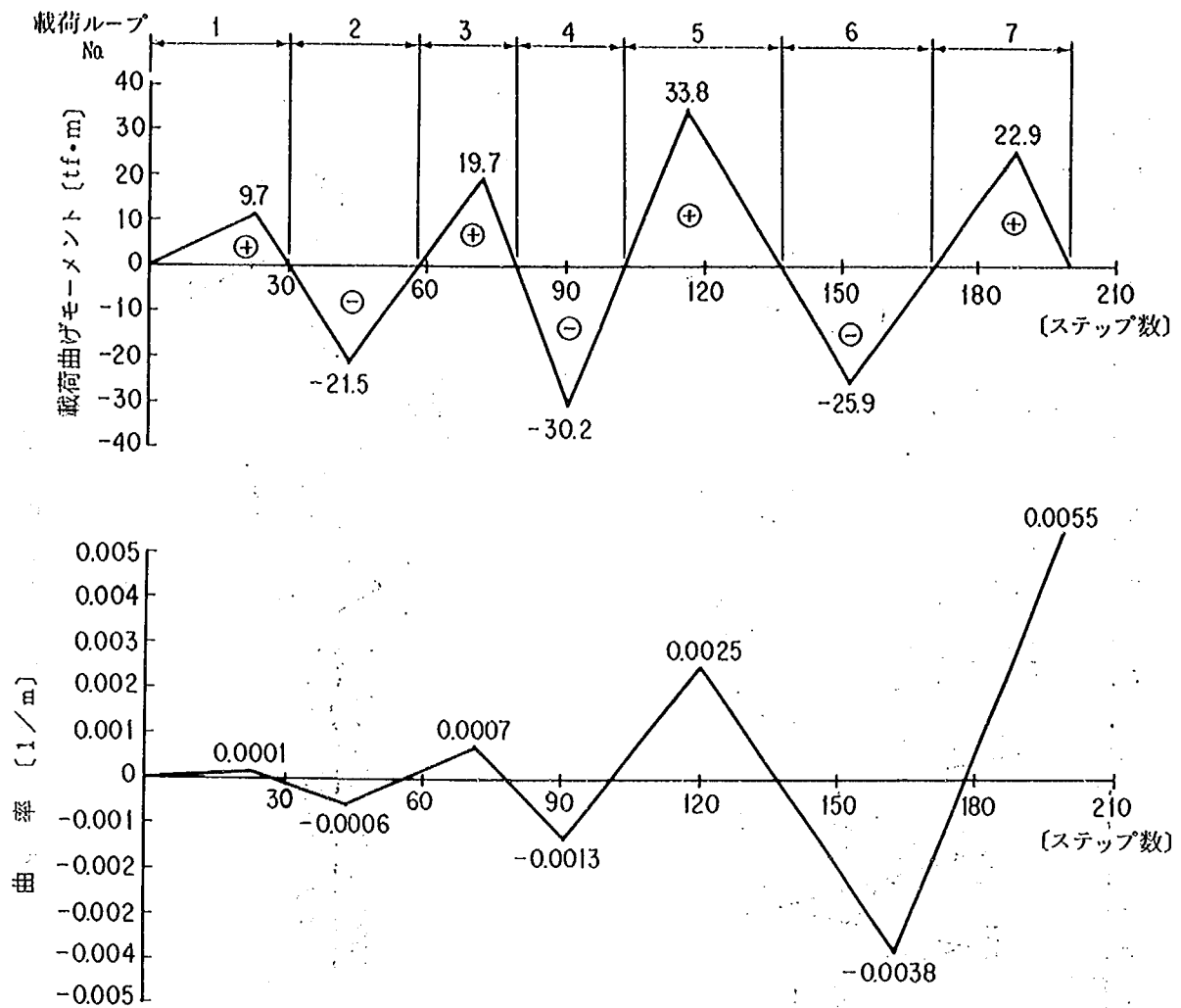


図- 2. 15 Dタイプ供試体の載荷パターン

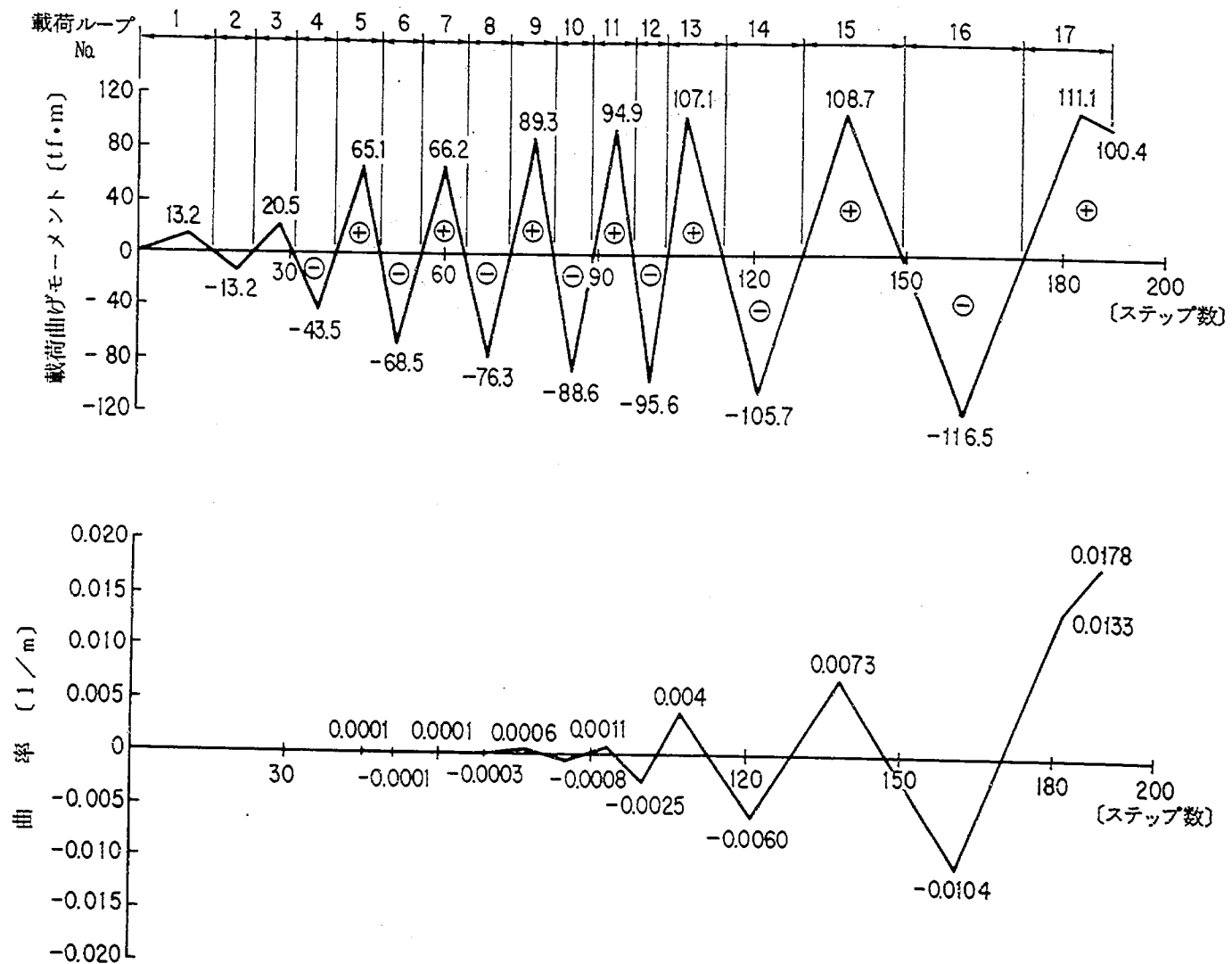


図-2.16 Eタイプ供試体の載荷パターン

2.6 二次覆工のない場合の変形および破壊特性

(1) 破壊の進展状況

二次覆工のないDタイプ供試体では、載荷に伴う破壊は、リング接合面においてのみ生じ、その他の箇所には損傷は生じなかった。Dタイプ供試体の最終的な破壊状況を図-2.17に示す。

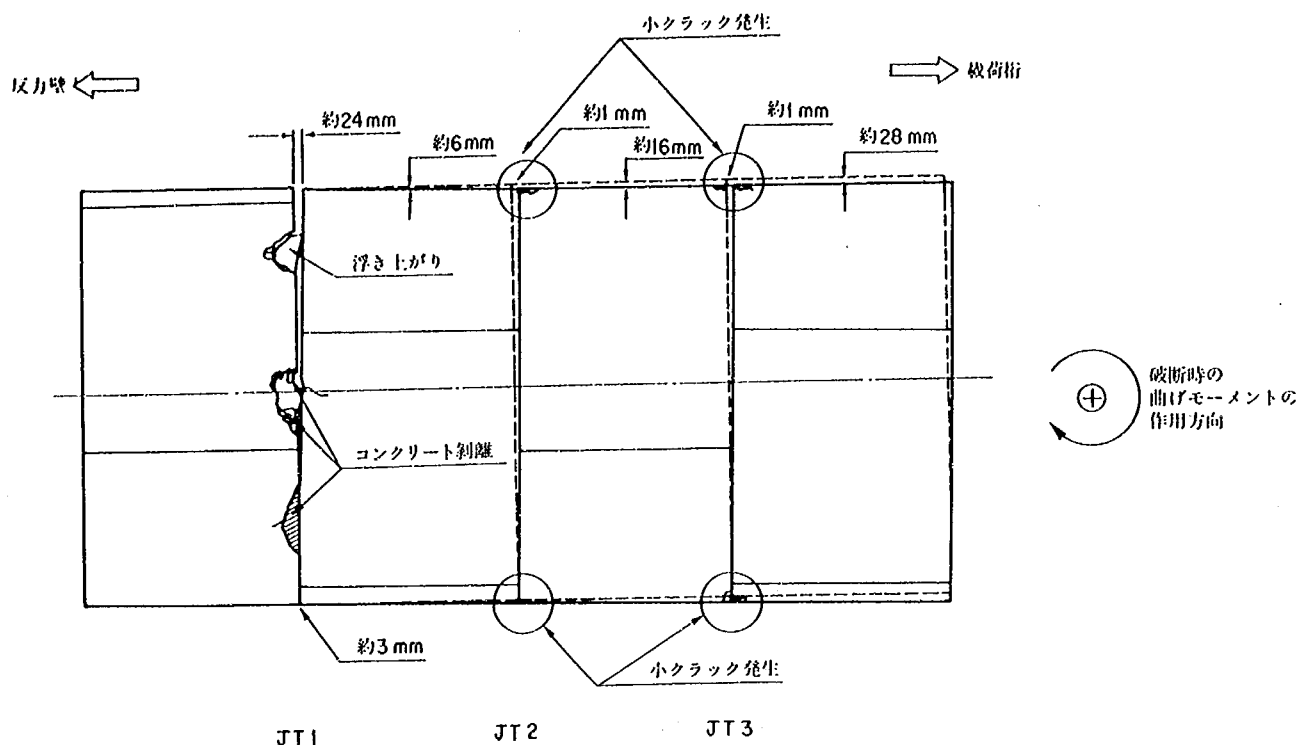


図-2.17 Dタイプ供試体の最終破壊状況

表-2.7に破壊の進展状況を、また図-2.18にリング継手周辺のクラックの進展状況を、それぞれ示す。載荷に伴う供試体の破壊の進展状況をまとめると、以下のとおりである。

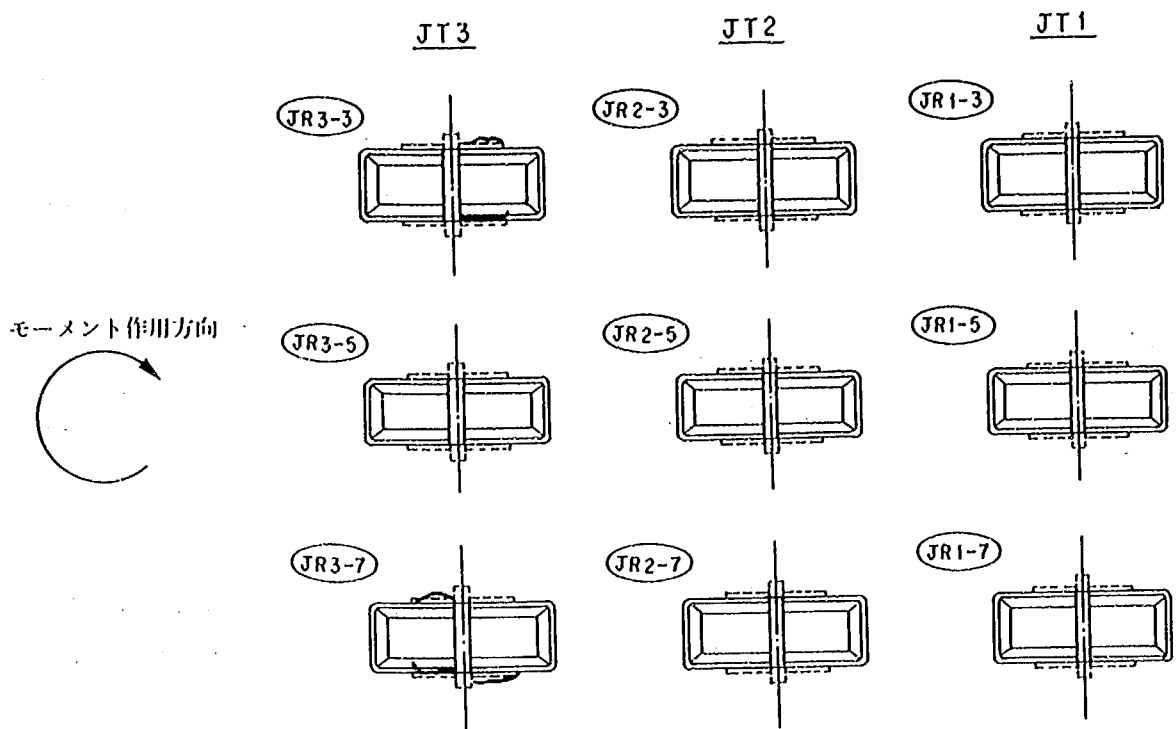
① 初期状態から曲げモーメント $9.68 \text{ tf} \cdot \text{m}$ （1ループ目）に至る過程において載荷荷重の増加に伴い、供試体側面のリング継手近傍にクラックが発生した。クラックの発生したリング継手は、供試体の曲げ引張縁側にあたる。

② 2ループ目では、負の曲げモーメントの載荷により、1ループ目の①では圧縮縁側だったリング継手が引張力を受け、新たにクラックが生じた。その後、クラックは、3ループ目、4ループ目と載荷が進行するにつれて、引張縁側に位置するリング継手周辺に徐々に進展した。

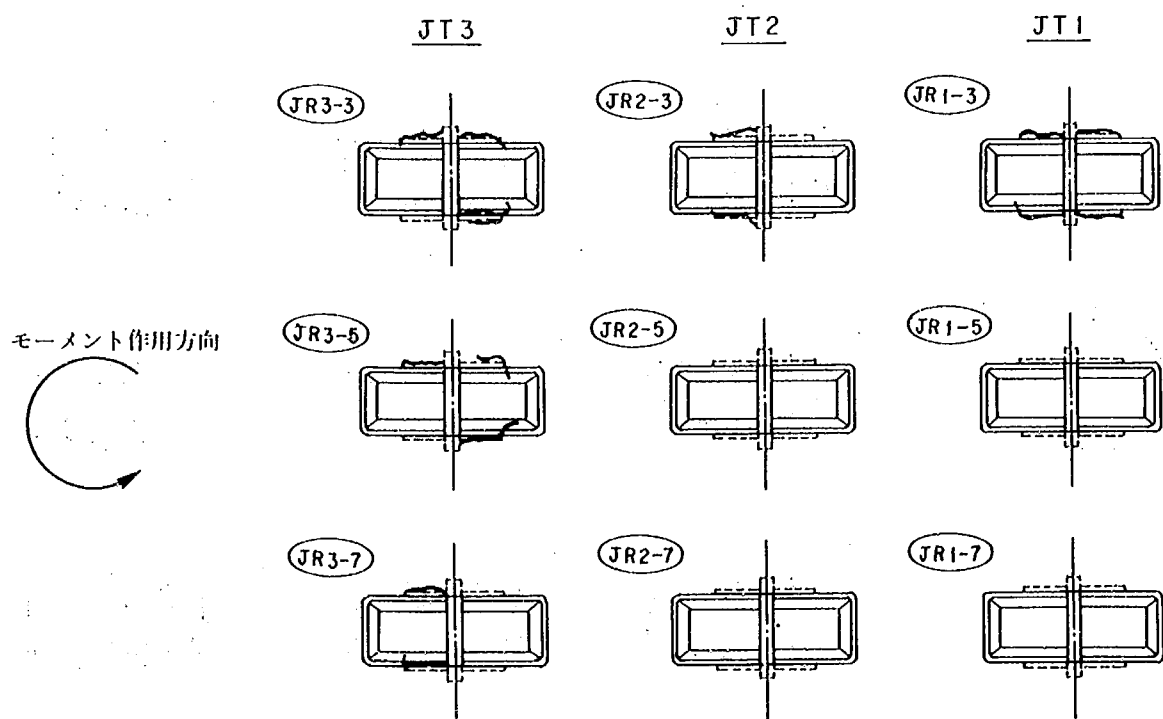
表-2.7 破壊の進展状況(曲げDタイプ)

載荷 ループ 番号	載荷 ステップ 番号	曲げ モーメント M (tonf・m)	曲率 K (1/m)	主要載荷ステップにおける 状況または変状	継手の相対変位 D (mm)					
					JT-1		JT-2		JT-3	
					D-1	D-2	D-5	D-8	D-10	D-11
1	23	9.68	0.0001	目標 10tf・m のループのピーク値 リング継手金具周辺にクラック発生	-0.06	0.15	-0.10	0.13	0.01	0.02
2	43	-21.54	-0.0006	目標 -20tf・m のループのピーク値	0.68	-0.06	0.96	-0.11	1.19	-0.38
	49~50	...	...	加振機発振 D-11 盛りかえ, B-1, 2 ボルト軸 力調整後再載荷	...	...	...	...	...	...
3	72	19.70	0.0007	目標 5mm のループのピーク値	-0.28	0.89	-0.31	0.99	-0.46	0.88
4	91	-30.15	-0.0013	目標 -10mm のループのピーク値	2.28	-0.20	2.09	-0.33	2.28	-0.46
5	115~116	33.10*	0.0019*	アンカー筋の降伏開始	-0.38*	2.98*	-0.43*	3.25*	-0.68*	3.11*
	116	33.84	0.0020	最大曲げモーメント作用時	-0.38	3.20	-0.43	3.36	-0.67	3.25
	116~117	33.10*	0.0021*	セグメント外面にクラック発生 (JR 1-7, D-11 に対応) 継手金具面板の降伏開始 (JT-2 の計測位置)	-0.38*	3.91*	-0.45*	3.36*	-0.67*	3.30*
	120	31.97	0.0025	目標 15mm のループのピーク値	-0.46	...	-0.49	3.36	-0.67	3.34
6	153~154	-25.85*	-0.0025*	セグメント外面コンクリート剥落 (JR 1-3)	23.01*	...	2.56*	-0.30*	2.75*	-0.43*
	157~158	-24.56*	-0.0031*	アンカー筋破断 (JR 1-3)	...	...	2.49*	-0.29*	2.79*	-0.44*
	163	-23.81	-0.0038	目標 -20mm のループのピーク値 リング継手面板の変形確認	...	...	2.43	-0.30	2.77	-0.46
7	188~189	22.88*	0.0028*	アンカー筋破断 (JR 1-7, 8)	...	...	-0.39*	2.76*	-0.38*	2.62*
	190~191	20.10*	0.0037*	アンカー筋破断 (JR 1-7)	...	...	-0.40*	2.56*	-0.38*	2.54*
	194~195	18.06*	0.0044*	アンカー筋破断 (JR 1-6)	...	...	-0.39*	2.33*	-0.37*	2.40*
	195~196	14.71*	0.0047*	アンカー筋破断 (JR 1-8)	...	...	-0.35*	2.06*	-0.33*	2.20*
	196~197	10.80*	0.0049*	アンカー筋破断 (JR 1-1)	...	...	-0.26*	1.84*	-0.24*	1.92*
	197~198	7.07*	0.0052*	アンカー筋破断 (JR 1-6)	...	...	-0.14*	1.57*	-0.14*	1.58*
	198~199	4.28*	0.0054*	アンカー筋破断 (JR 1-5)	...	...	0.03*	1.36*	0.01*	1.35*
	199	2.61	0.0055	載荷終了	...	...	0.12	1.30	0.10	1.25

* 直前・直後の載荷ステップの平均値

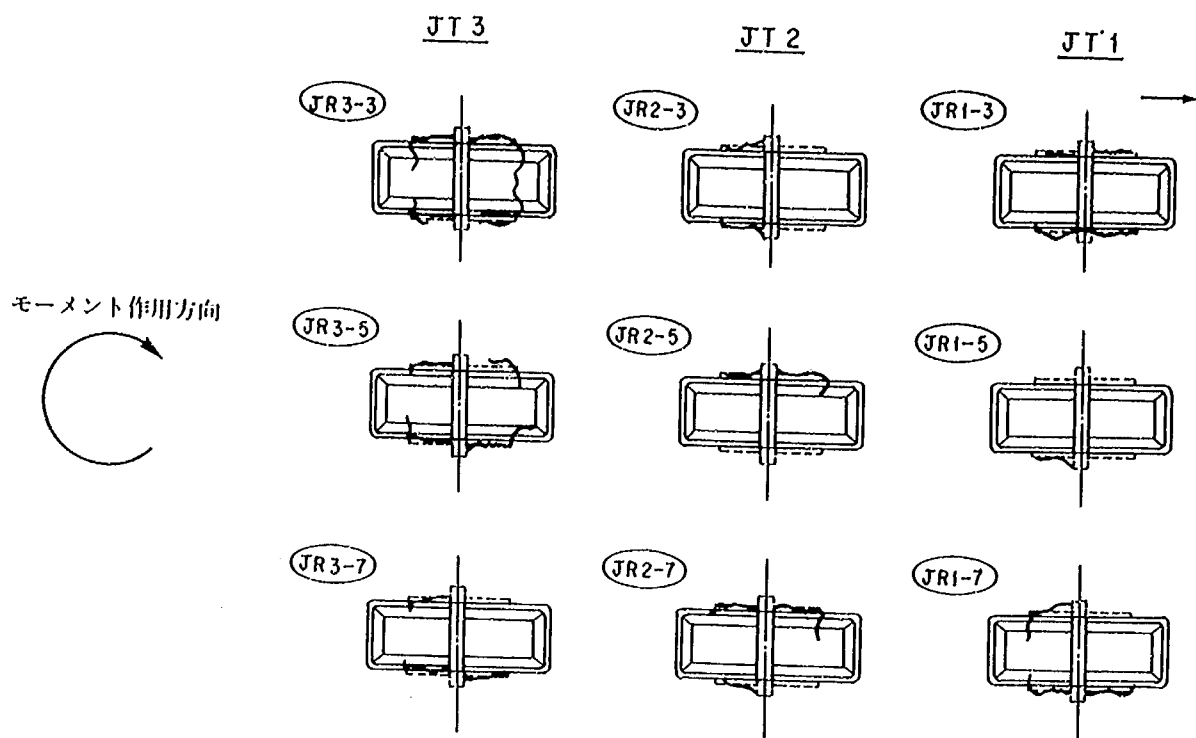


(a) 1 ループ目 (23ステップ, 9.68 tf・m)

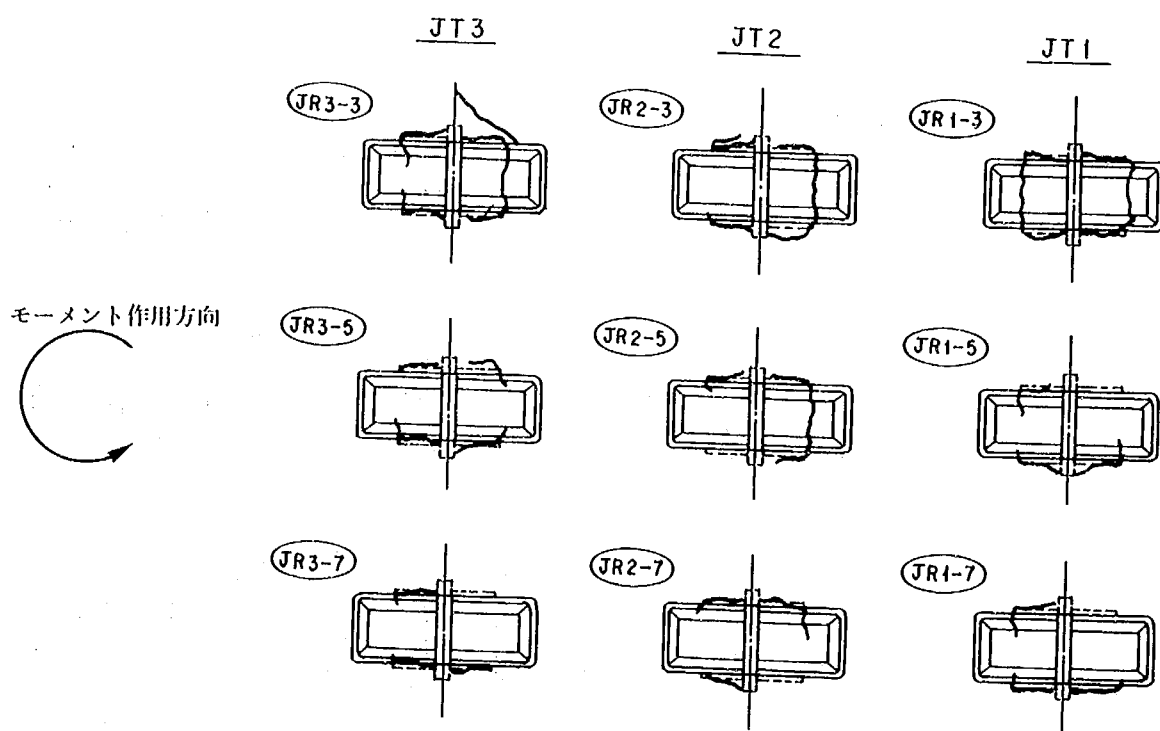


(b) 2 ループ目 (43ステップ, -21.5 tf・m)

図-2.18 リング継手周辺のクラックの進展状況 (1)

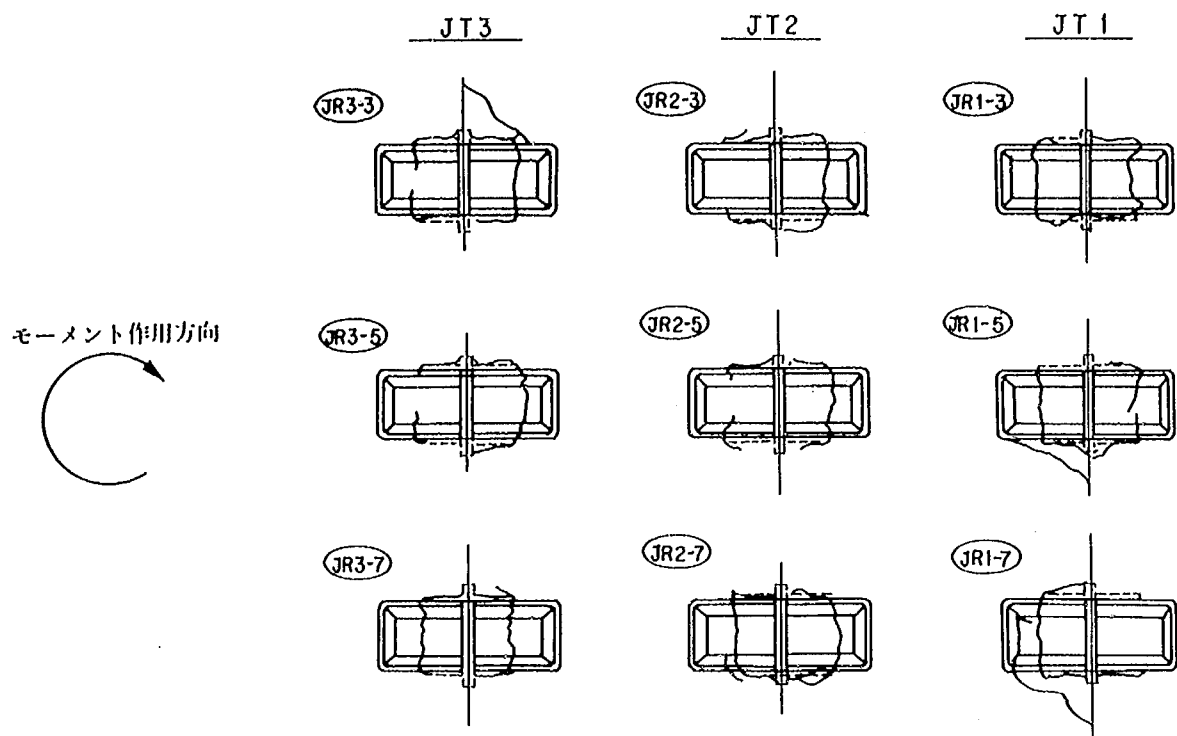


(c) 3 ループ目 (72ステップ, 19.7 tf·m)

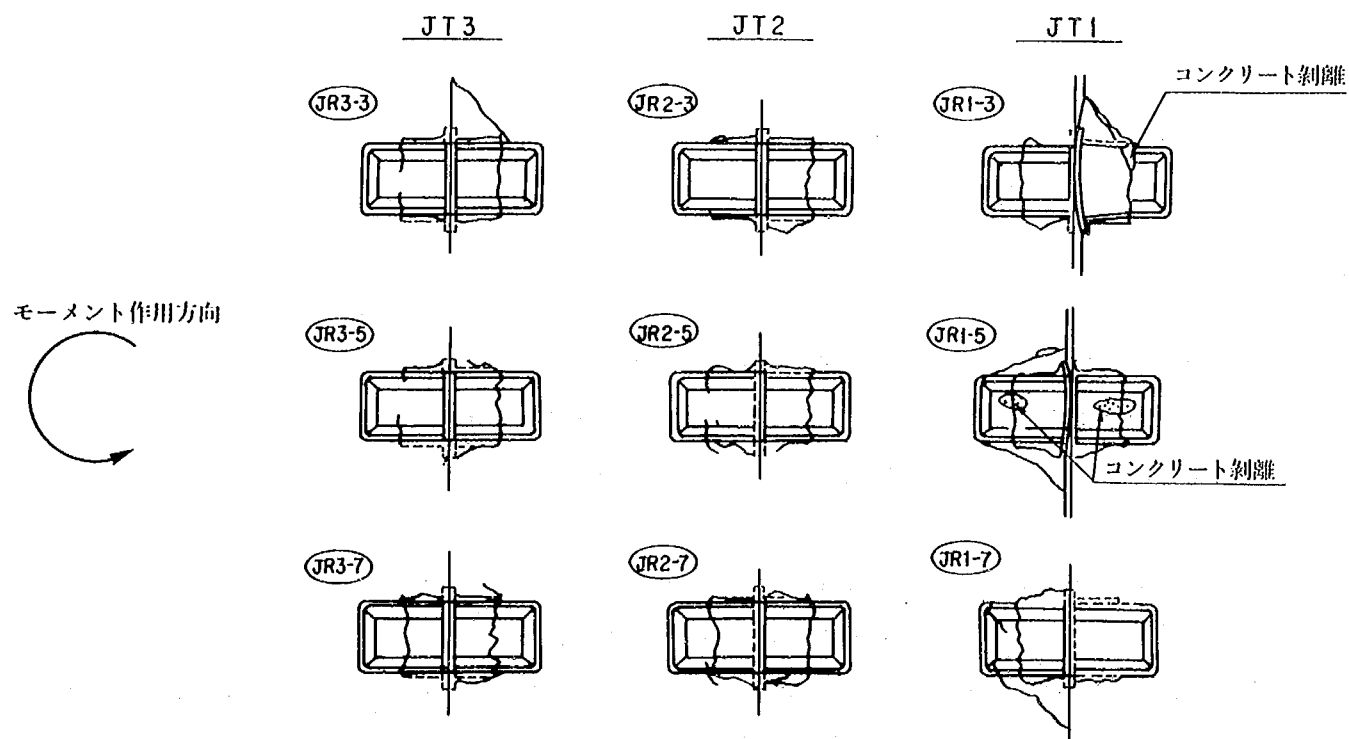


(d) 4 ループ目 (91ステップ, -30.2 tf·m)

図-2.18 リング継手周辺のクラックの進展状況 (2)



(e) 5 ループ目 (120ステップ, 32.1tf・m)



(f) 6 ループ目 (163ステップ, -23.81tf・m)

図-2.18 リング継手周辺のクラックの進展状況 (3)

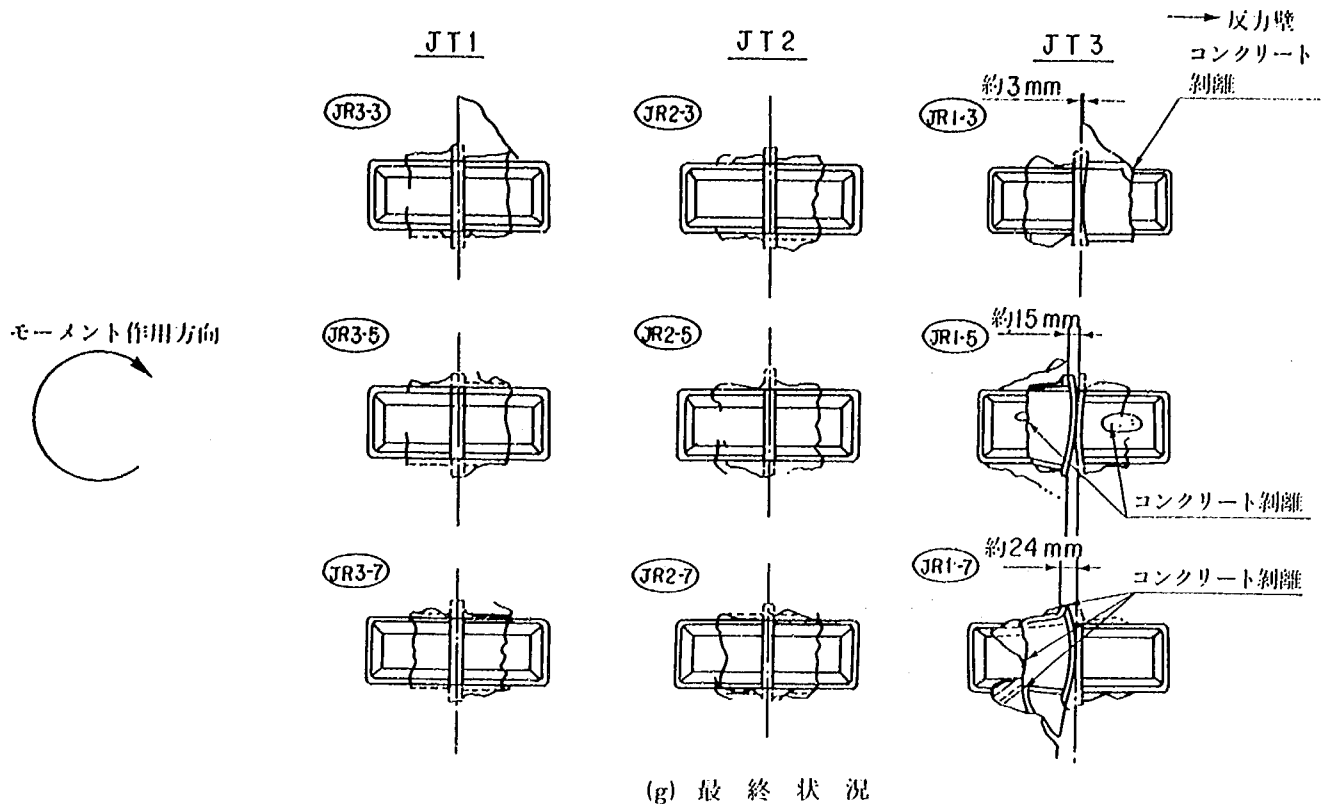


図-1.2.18 リング継手周辺のクラックの進展状況 (4)

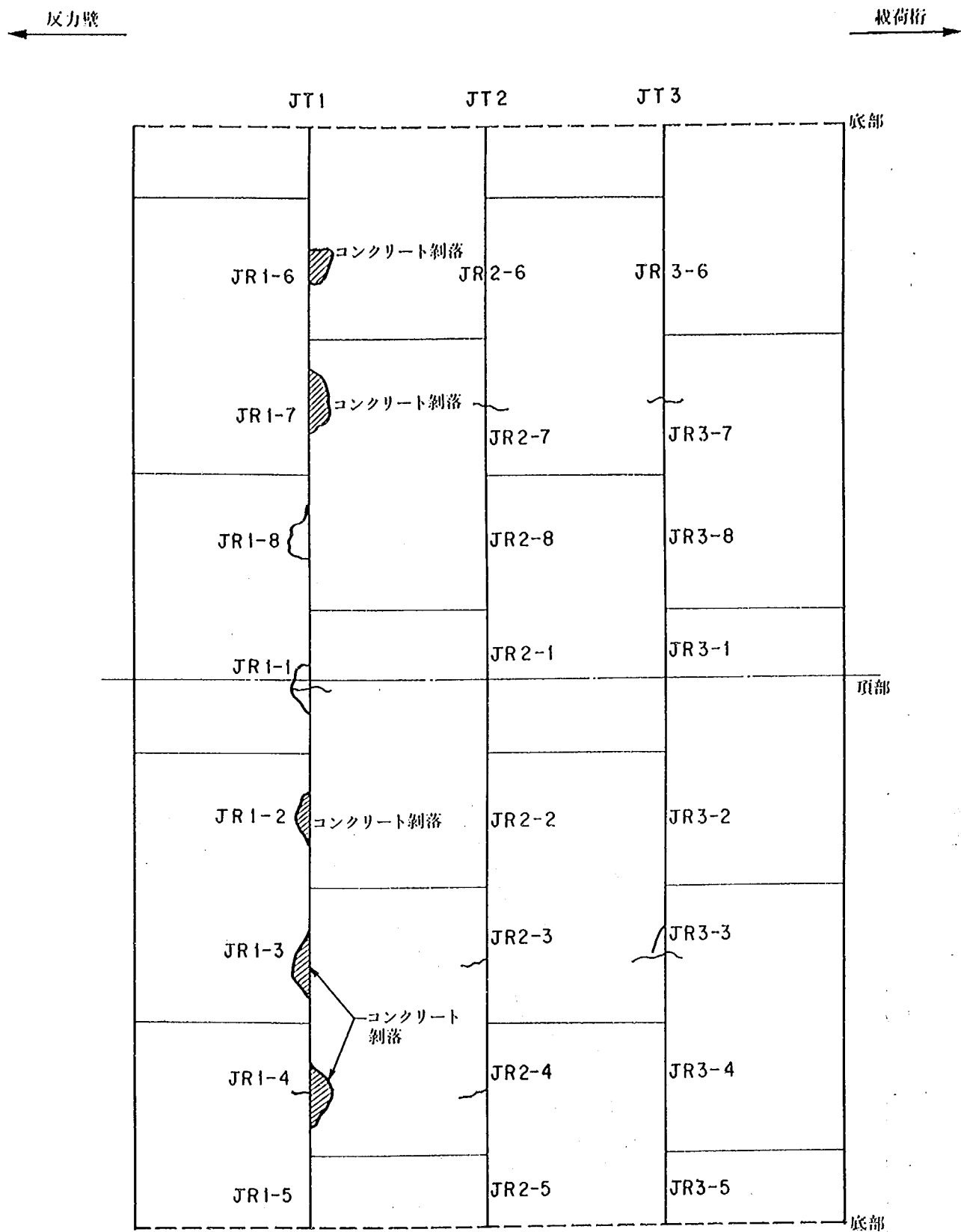
③ 載荷曲げモーメントが $33.1 \text{ tf} \cdot \text{m}$ (5 ループ目) に達した時点からアンカー鉄筋の降伏が始まった。その次のステップにおいて、最大曲げモーメント $33.84 \text{ tf} \cdot \text{m}$ が発生した。ついで、セグメントの引張縁側のリング継手 JR 1-6, 7 および 8 付近のセグメント外周面にクラックが発生した。このクラックは、JR 2-7 および JR 3-7 においても発生したが、JT 3 の継手位置において発生したクラックに比べると小さなものであった。なお、JR 2-7 のリング継手の面板の降伏も開始した。

④ 負の曲げモーメントが $-25.85 \text{ tf} \cdot \text{m}$ (6 ループ目) に達した時点で、JR 1-3 付近のセグメント外周面のコンクリートが剥落した。ついで、曲げモーメントが $-24.56 \text{ tf} \cdot \text{m}$ に達した後、JR 1-3 のアンカー鉄筋が破断した。外周面コンクリートの剥落は、JR 1-2 および JR 1-4 においても発生した。

⑤ 正の曲げモーメントを載荷して、アンカー鉄筋を破断させた。アンカー鉄筋の破断は、JT 1 の継手位置に集中した。アンカー鉄筋が破断するに従って曲げモーメントは低下し、JR 1-1 (供試体天端付近) のアンカー鉄筋が破断した後、 $2.61 \text{ tf} \cdot \text{m}$ に低下したところで載荷を終了した。セグメント外周面の破壊の最終状況を示すと図-2.19 のとおりである。

以上が D タイプ 供試体の破壊の進展状況である。これから、以下の点が指摘される。

1) リング継手の破壊は、結果的にリング接合面 JT 1 に集中して発生し、他のリング接合面では、リング外周面にクラックが発生しただけにとどまった。これに対して、後述する二次覆工のある



図ー 2.19 Dタイプ供試体セグメント外周面の破壊の最終状況

供試体では、リング継手の破壊は1箇所のリング接合面には集中していない。このことから、一次覆工のみのシールドトンネルでは、ある特定のリング接合面に耐力が減少する程度の損傷が生じると、そのリング接合面のみに損傷が集中しやすいものと考えられる。この現象は、軸方向の交番載荷実験においても見られたものであり、シールドトンネルの耐震設計を考える上で、重要な判断材料と考えられる。

- 2) リング継手では、定着板に溶接されたアンカー鉄筋が定着板の端部位置において破断している。これは載荷に伴う引張力により継手金具面板が“く”の字型に変形し、定着板が内側に曲げられ、これにともないアンカー鉄筋に生じた曲げの影響によるものである。これについても、軸方向の正負交番載荷結果と同様の結果である。したがって、定着板の変形を抑えるようにすることが、アンカー鉄筋の破断を防止する上で有効と考えられる。
- 3) リング継手が破壊するに至る過程も、軸方向の交番載荷実験と同様であり、リング継手が破壊するのは引張力によるところが大きいことがわかる。

(2) 供試体の変形特性

供試体全体の曲げ変形と載荷荷重の関係を見るために、供試体の曲率と載荷曲げモーメントとの履歴を示した結果が図-2.20である。ここで、供試体の曲率は、図-2.21に示すように、供試

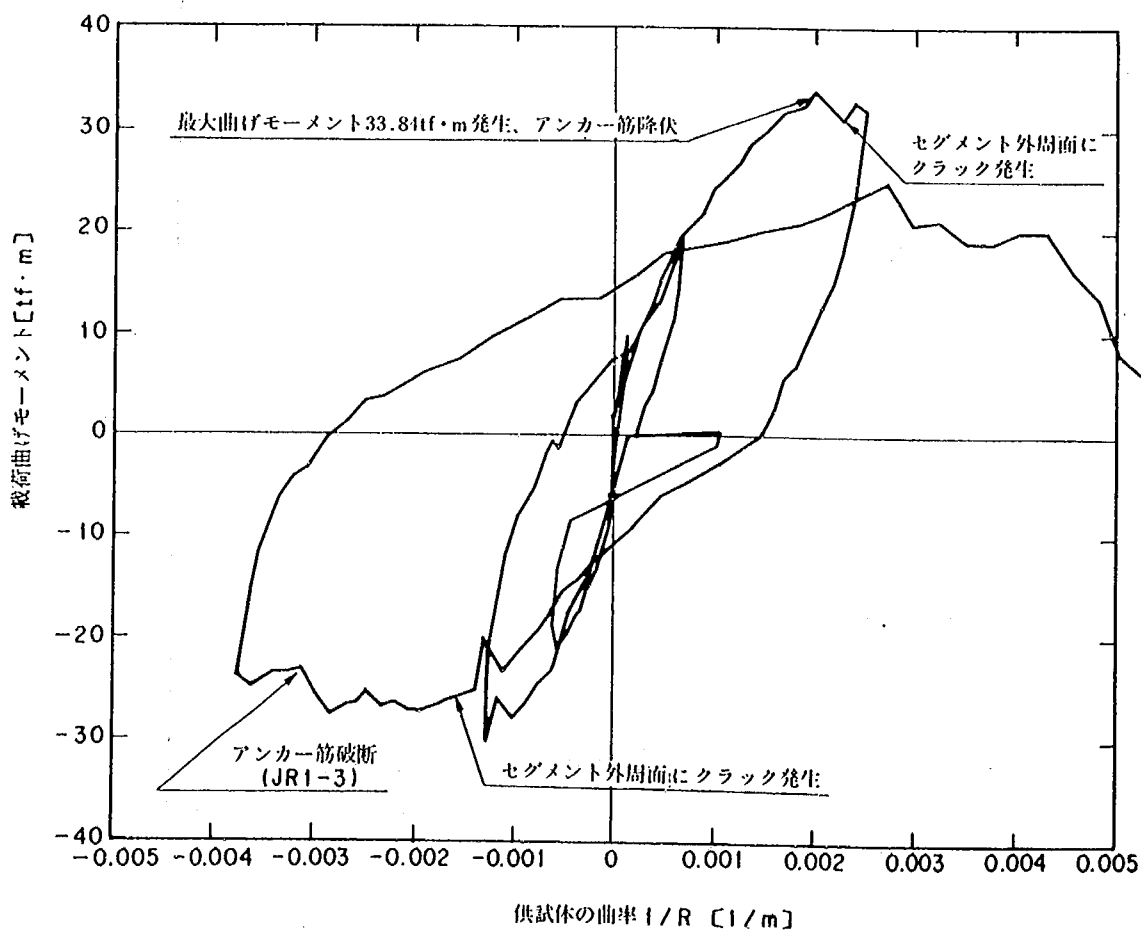
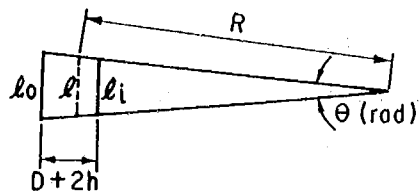
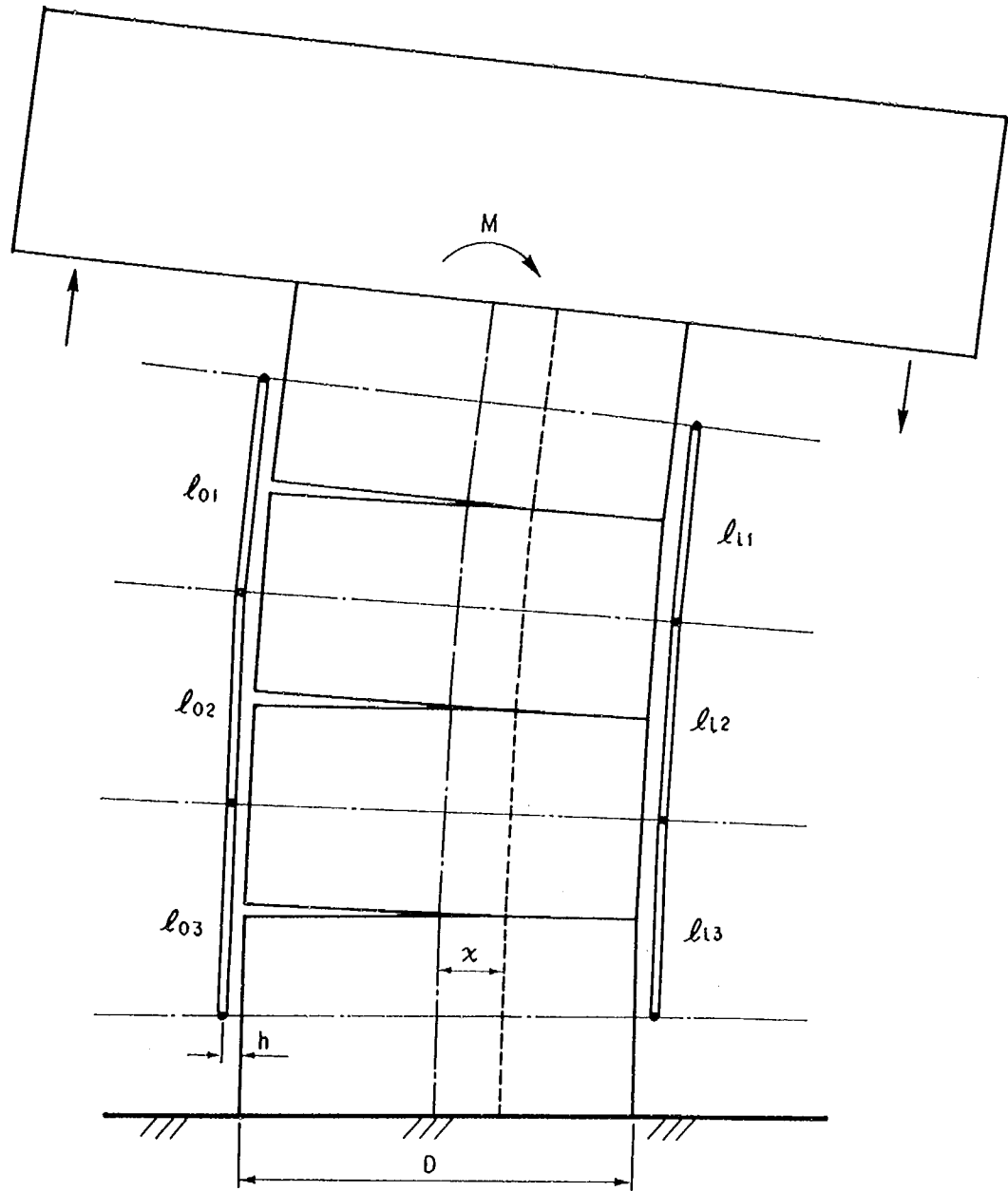


図-2.20 Dタイプ供試体の載荷履歴



ℓ : 反力壁側のリング中央から載荷桁側のリング中央までの距離 (= 270cm)

δ_o : 引張縁側のセグメントの伸び量

δ_i : 圧縮縁側のセグメントの縮み量

$$\delta_o = (\ell_{01} + \ell_{02} + \ell_{03}) - \ell$$

$$\delta_i = (\ell_{11} + \ell_{12} + \ell_{13}) - \ell$$

$$x = \left(\frac{D}{2} + h \right) \frac{\delta_o + \delta_i}{\delta_o - \delta_i}$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\delta_o - \delta_i}{D + 2h} \right) \div \frac{\delta_o - \delta_i}{D + 2h}$$

$$R = \frac{D + 2h}{\delta_o - \delta_i} \cdot \ell$$

図- 2.21 供試体の曲率の算定方法

体の左右両端で引張縁側および圧縮縁側の変位量を計測し、両者の差から供試体全体の中立位置を求めた上で、算出した。

最大曲げモーメントは、正の曲げモーメント $33.84 \text{ tf} \cdot \text{m}$ を作用させた 5 ループ目において生じている。その後、供試体の外周面に前述したクラックが生じると、これにともないアンカー鉄筋が降伏し、これ以降、供試体の耐力は徐々に低下していく。この傾向は、次の負の曲げモーメントを載荷するループにおいて、引続き生じている。これは、正の曲げモーメント載荷時に引張力を受けて剛性が低下した供試体上面および下面のリング継手が、負の曲げモーメント載荷ループに移行しても、依然として引張領域に入って引続き引張力を受けるためである。

なお、最終的な供試体の曲率は $0.0055 (1/\text{m})$ であった。これを曲率半径に直すと約 180 m である。

(3) アンカー鉄筋およびリング継手金具面板の変形

上述したように、シールドトンネル全体としての破壊は最終的に JT 1 のリング接合面におけるアンカー鉄筋の破断によって生じた。ここでは、アンカー鉄筋およびリング継手金具面板のひずみをもとに、リング継手部の変形特性を検討する。ただし、今回の実験では、JT 2 においてのみアンカー鉄筋およびリング継手金具面板のひずみの測定を行ったため、破壊した JT 1 の検討は行うことができない。

図-2.22 はリング継手 JR 2-7 (図-2.5 及び図-2.13 参照) におけるアンカー鉄筋のひずみの載荷履歴を示したものである。JT 2 リング接合面においては、他のアンカー鉄筋についてもひずみを計測しているが、いずれも図-2.22 に示した履歴とほとんど同一の特性を示している。表-2.1 に示したように、アンカー鉄筋の降伏ひずみは 1800μ 程度であるが、図-2.22 によればアンカー鉄筋の継手金具に最も近い部分は、加振機変位が 20 mm の載荷 (5 ループ目) 途中の段階 (曲げモーメント約 $33 \text{ tf} \cdot \text{m}$) で急激にひずみが増加し、降伏ひずみに達している。これは、リング継手金具と周辺コンクリートとの付着が切れ、アンカー鉄筋に大きな引張力が発生したためである。これ以降は、塑性ひずみが大きく進展し、測定精度は怪しいが、 2500μ 程度のひずみが生じている。

次に、リング継手 JR 2-7 (図-2.13 参照) における継手金具面板のひずみの履歴曲線を図-2.23 に示す。これによれば、面板のひずみは、上述したアンカー鉄筋のひずみと同様に、5 ループ目の、載荷曲げモーメントが約 $20 \text{ tf} \cdot \text{m}$ となった段階から急激に発生している。ここで面板の降伏は、前述のアンカー鉄筋の降伏よりも早く生じている。

(4) セグメント継手の挙動特性

セグメント継手 DP-3 (図-2.13 参照) の相対変位を図-2.24 に示す。セグメント継手の相対変位は 8 点で計測しているが、各測点とも大差はないため、ここでは DP-3 の結果を示すこととする。

図-2.24 によれば、加振機が発振した時に、一次的に 0.1 mm 程度の相対変位が生じているが、

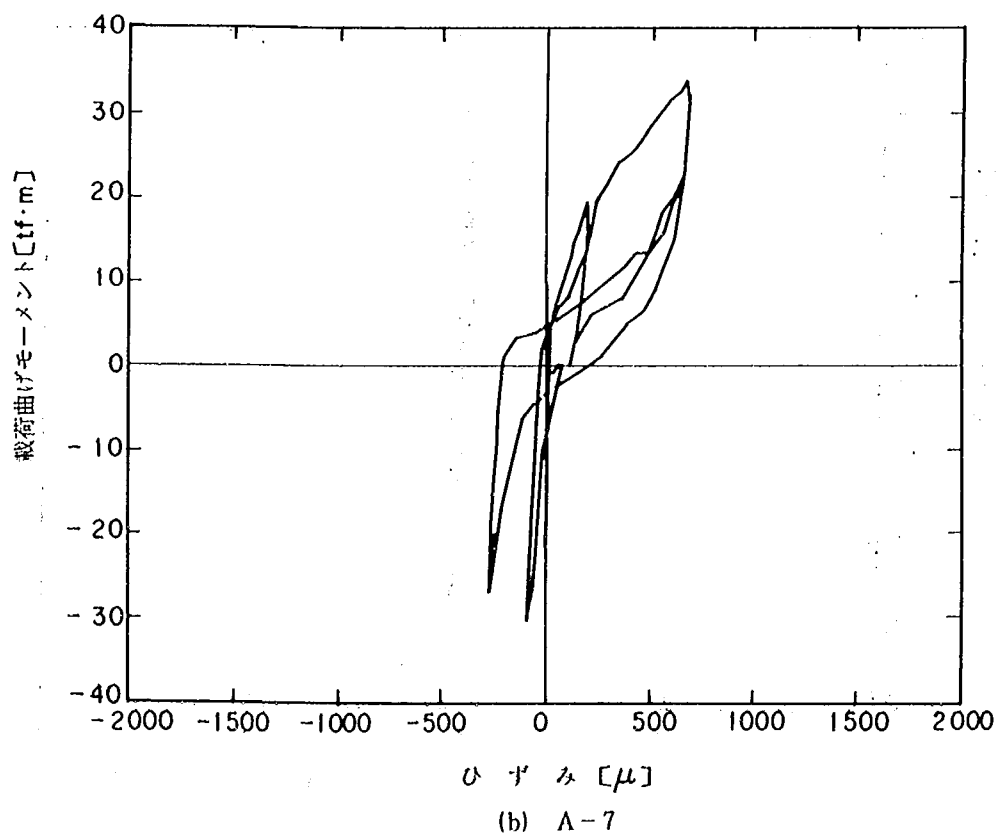
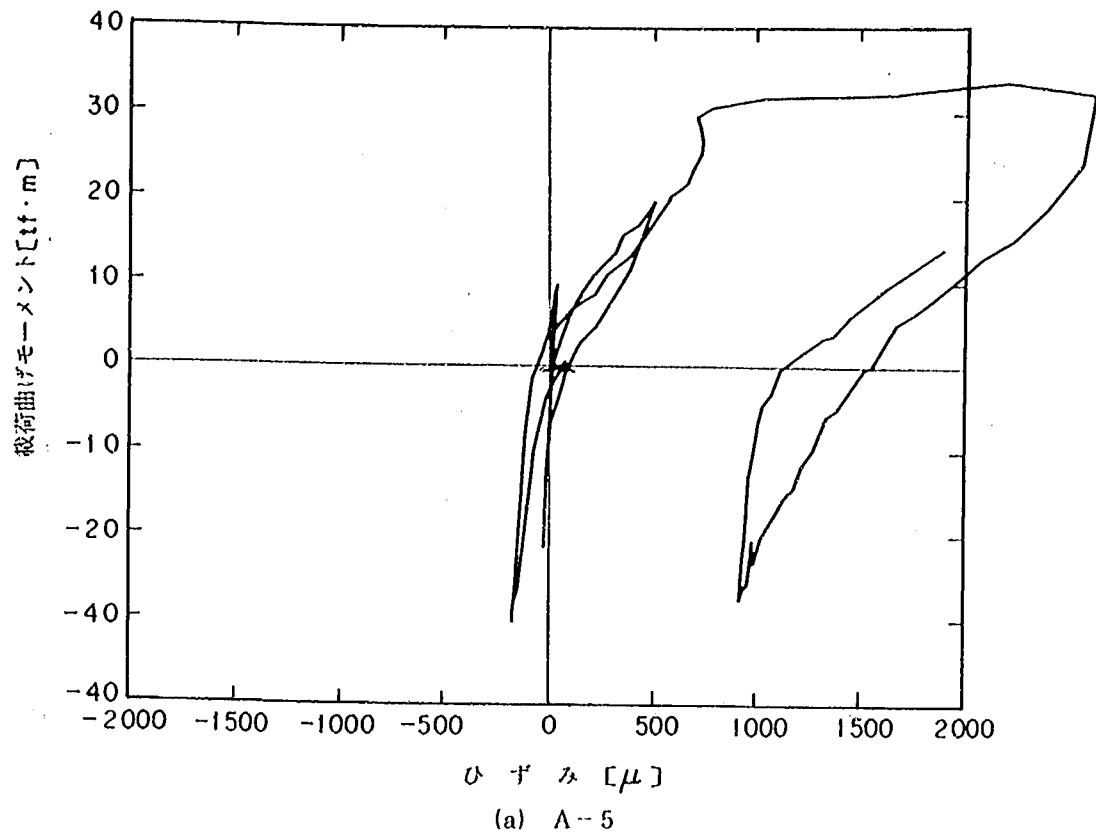


図- 2.22 リング継手アンカー鉄筋のひずみの履歴

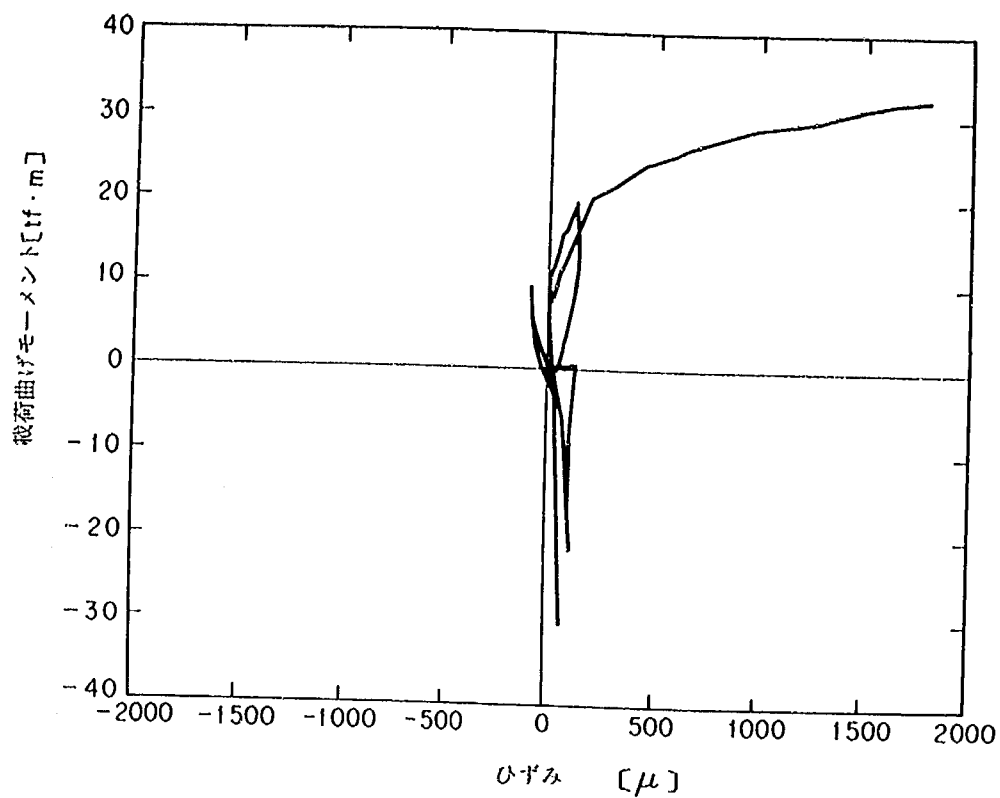


図-2.23 リング継手金具面板のひずみの履歴

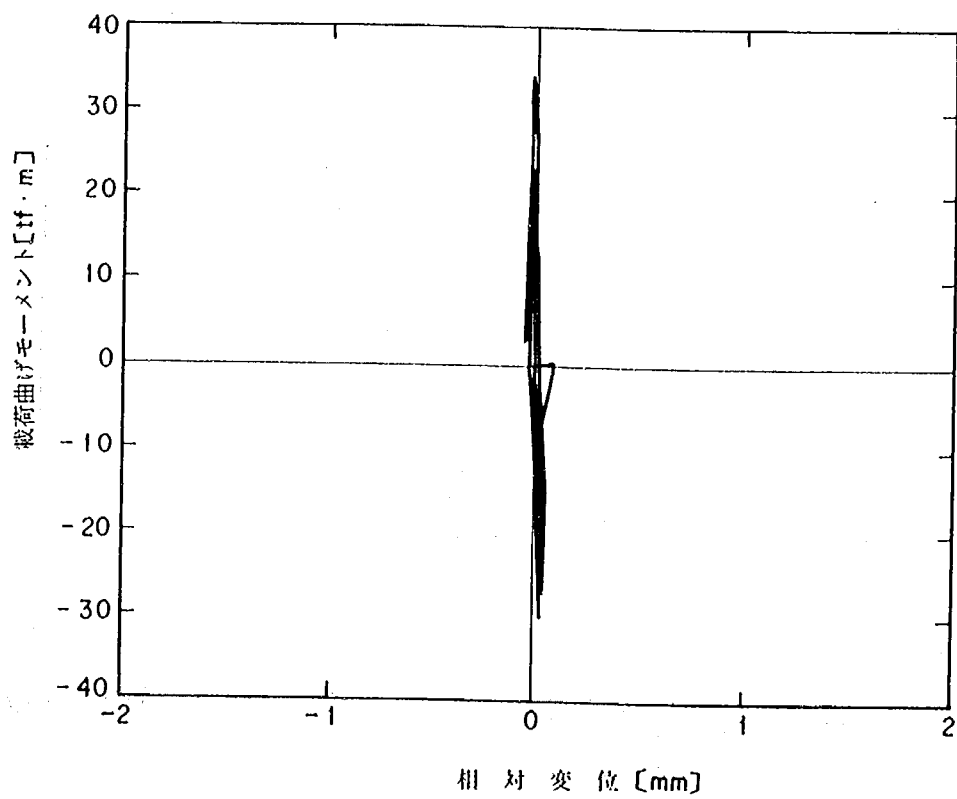


図-2.24 セグメント継手の相対変位の履歴 (DP-3)

これを除けばセグメント継手の相対変位は全載荷を通じてほぼゼロであるといってもよい。これは、曲げモーメントを作用させても、セグメント継手に生じる力が小さく、セグメント継手が弾性挙動できる範囲にとどまっていることを意味している。

(5) リング接合面の相対変位

各リング接合面に生じた軸方向の相対変位を図-2.25に示す。ここで相対変位とは、供試体の左右端部において、引張縁側のリング接合面を含むセグメントの相対変位と圧縮縁側のリング接合面を含むセグメントの相対変位との差をとったものである。

これによると、5ループ目で最大曲げ耐力 $33.84 \text{ tf} \cdot \text{m}$ が発生するまでは、各リング継手接合面付近の相対変位は、載荷桁側のリング接合面 JT 3 付近で大きく、次いで JT 2, JT 1 の順番である。その後、リング接合面 JT 1 の外周コンクリートにクラックが発生すると、これ以降は JT 1 の相対変位のみが拡大しており、他のリング接合面では相対変位の増加はほとんど認められない。これは、前述したようにリング接合面 JT 1 にセグメント外周クラックが最初に発生したことから、これ以降の載荷においてはリング接合面 JT 1 にのみ損傷が集中したことを示している。

図-2.26は、リング接合面 JT 2 における、各リング継手位置の相対変位の分布を示したものである。各載荷状態において、圧縮相対変位が発生しているリング継手は、載荷初期の段階では3箇所であるが、5ループ目の曲げモーメント $33.1 \text{ tf} \cdot \text{m}$ 載荷時から圧縮相対変位の発生するリング継手位置は1~2箇所に減少しており、供試体の中立軸位置が圧縮縁側に移行しているのがわかる。なお、供試体天端のリング継手では、中立軸位置の関係で、正負いずれの曲げモーメントを作用させても、常に引張方向の相対変位が生じることに注意しなければならない。ここでは計測していないが、供試体下端のリング継手においても同様であろう。

(6) 継ぎボルトの軸力

図-2.27は、リング接合面 JT 2 位置のリング継手におけるボルト軸力と載荷モーメントとの履歴曲線を示したものである。ここで、継ぎボルトに生じる軸力と載荷力との関係を一般的に示すと以下ようになる。すなわち、図-2.28に示すように、載荷前のリング接合面には、継ぎボルトの締め付け力 N_0 によって圧縮力 Q_0 が作用しており、これによって、圧縮ひずみが生じている。この状態で比較的小さな荷重 P を載荷するとセグメント接合面に存在していた圧縮ひずみの弾性回復により、圧縮力 Q は ΔQ だけ減少する。この時ボルト軸力は ΔN だけ減少するが、これは $P - \Delta Q$ ($< P$) である。すなわち、載荷力が小さい場合には、継ぎボルトに作用する荷重の増分は載荷力の増分より小さい。載荷力が大きくなりセグメント接合面が開くと、これまで接合面が、その弾性回復によって負担していた荷重の分担がなくなって、継ぎボルトには載荷力が直接作用し、載荷力の増分が継ぎボルトの荷重増分に等しくなる。さらにセグメント接合面が降伏し、その弾性回復が期待できず、残留変形が生ずれば初期状態に戻る段階で載荷力の減少分は残留変形部に消費され、その結果、継ぎボルトに作用する圧縮力が減少することが有り得ると考えられる。

以上のような関係を念頭において図-2.27の結果を考察すると以下のことが指摘される。

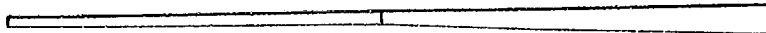
① 1 ループめ 23 ステップ 載荷曲げモーメント $9.68 \text{ t}\cdot\text{m}$

JT1 (0.05 mm) JT2 (0.15 mm) JT3 (0.51 mm)



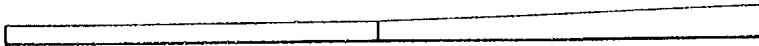
② 2 ループめ 43 ステップ 載荷曲げモーメント $-21.54 \text{ t}\cdot\text{m}$

JT1 (-0.63 mm) JT2 (-0.84 mm) JT3 (-1.76 mm)



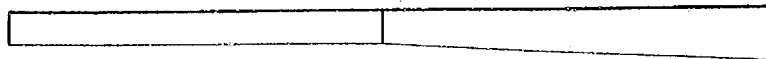
③ 3 ループめ 72 ステップ 載荷曲げモーメント $19.70 \text{ t}\cdot\text{m}$

JT1 (0.86 mm) JT2 (1.07 mm) JT3 (1.84 mm)



④ 4 ループめ 91 ステップ 載荷曲げモーメント $-30.15 \text{ t}\cdot\text{m}$

JT1 (-2.02 mm) JT2 (-2.13 mm) JT3 (-3.15 mm)



⑤ 5 ループめ 116 ステップ 載荷曲げモーメント $33.84 \text{ t}\cdot\text{m}$

JT1 (3.09 mm) JT2 (3.68 mm) JT3 (4.51 mm)



⑥ 5 ループめ 120 ステップ 載荷曲げモーメント $31.97 \text{ t}\cdot\text{m}$

JT1 (5.86 mm) JT2 (3.87 mm) JT3 (4.50 mm)



図-2.25 各リング接合面の軸方向相対変位の変化 (1)

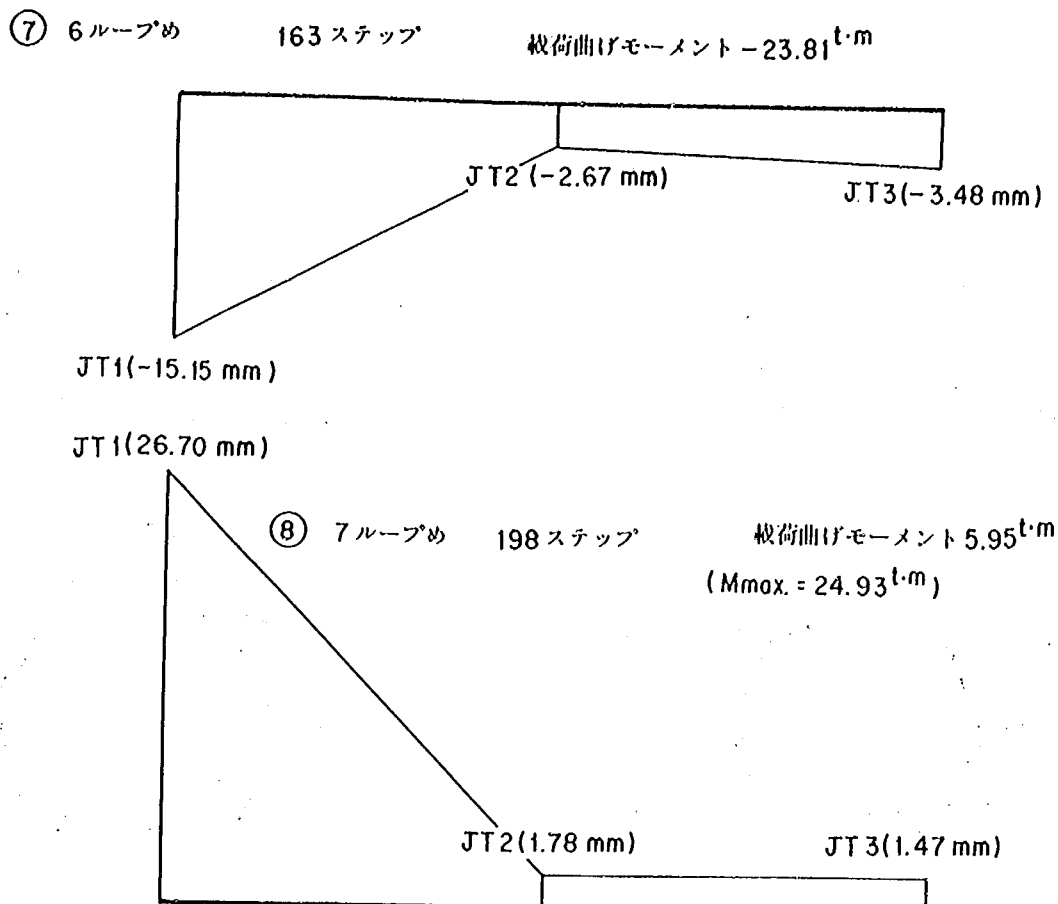
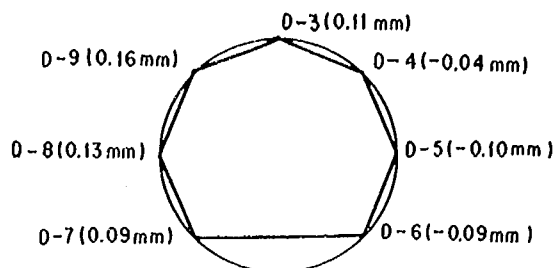


図 - 2.25 各リング接合面の軸方向相対変位の変化 (2)

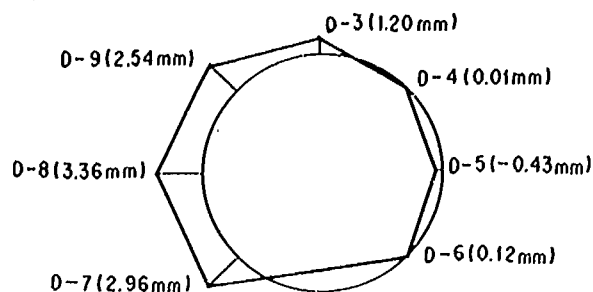
- 1) 初期軸力は、載荷を繰り返すことによって減少するが、その程度は、供試体の左右端部に位置するリング継ぎボルトにおいて顕著である。これは前述したように、リング継手金具面板は、曲げモーメントを作用させた場合に引張側の最外縁となる付近から降伏を開始するためである。
- 2) 供試体の天端および下端に位置するリング継ぎボルトでは、作用曲げモーメントの正負に関わらず常に引張力を受けるが、左右端部の継手に比較すると、軸力が小さいためボルト軸力の減少の度合いは小さい。また、損傷の進展がなかったため、残留ボルト軸力の変動も小さかった。

セグメント継手のボルト軸力と載荷荷重との履歴を B-13 について示すと、図 - 2.29 のようになる (図 - 1.2.13 (1) 参照)。セグメント継ぎボルトの軸力は 4 点で計測しているが、各測点ともほぼ同様の傾向を示しているため、ここでは B-13 のみの結果を示すこととする。これによれば、セグメント継ぎボルトの軸力は、載荷荷重に関わらず、ほぼ初期軸力を保っている。これは、全ての載荷過程を通じてボルトにはほとんど軸力が作用しなかったためであり、上述したように、セグメント接合面に相対変位が生じなかったことと対応している。また、ボルトに軸力が作用していないため、リング継ぎボルトにみられるような初期軸力の低下は生じていない。

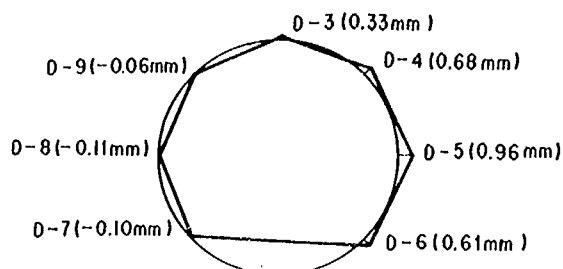
① 1 ループめ 23 ステップ



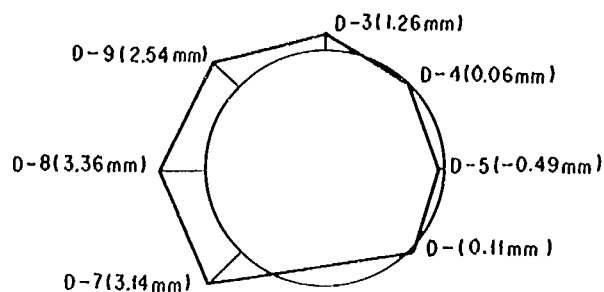
⑤ 5 ループめ 116 ステップ



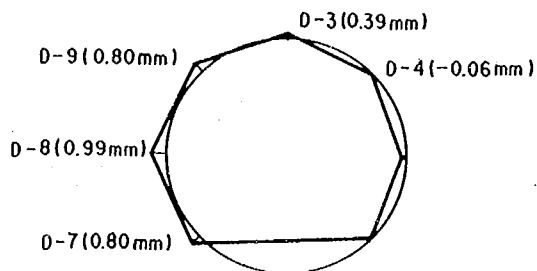
② 2 ループめ 43 ステップ



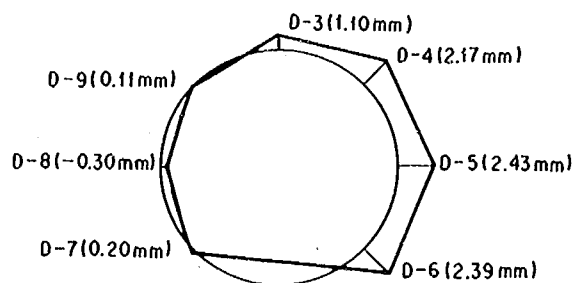
⑥ 5 ループめ 120 ステップ



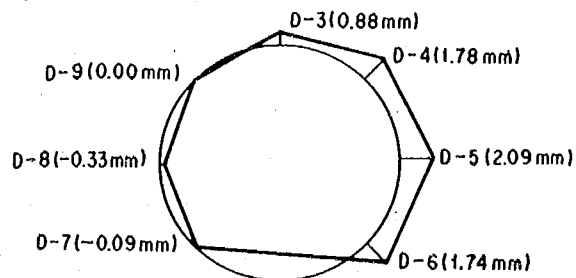
③ 3 ループめ 72 ステップ



⑦ 6 ループめ 163 ステップ



④ 4 ループめ 91 ステップ



⑧ 7 ループめ 198 ステップ

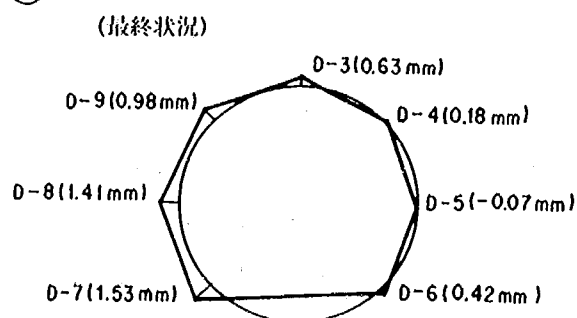


図- 2.26 リング接合面JT 2におけるリング継手位置の相対変位分布

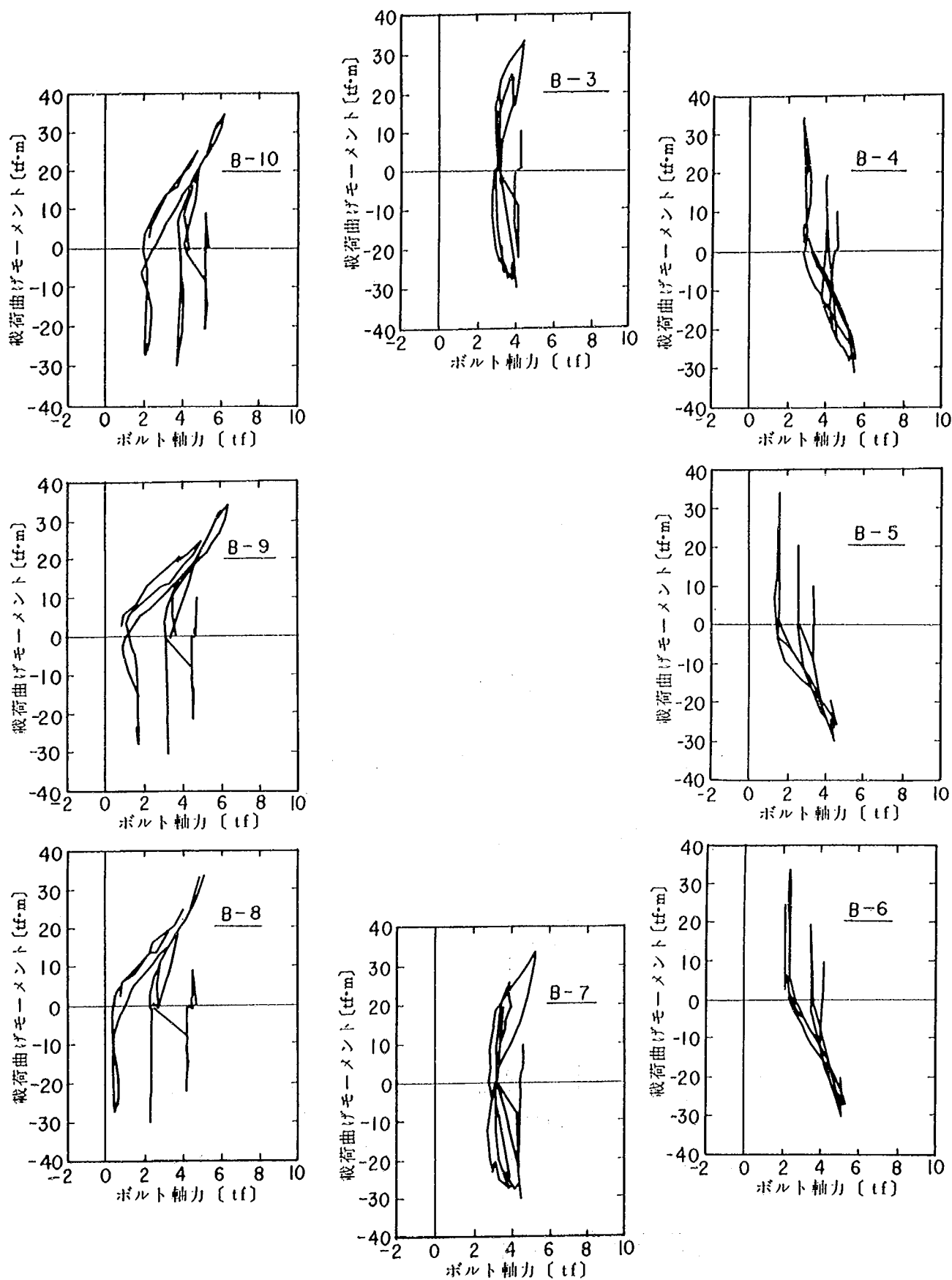
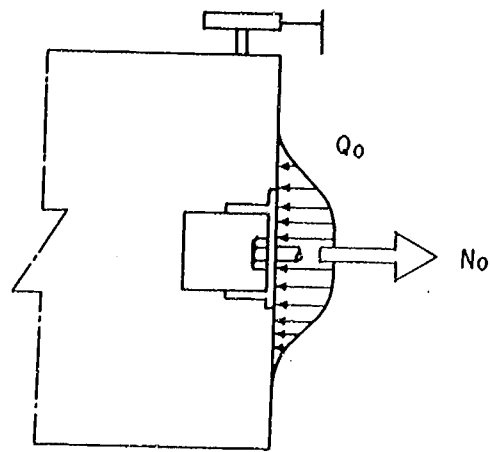


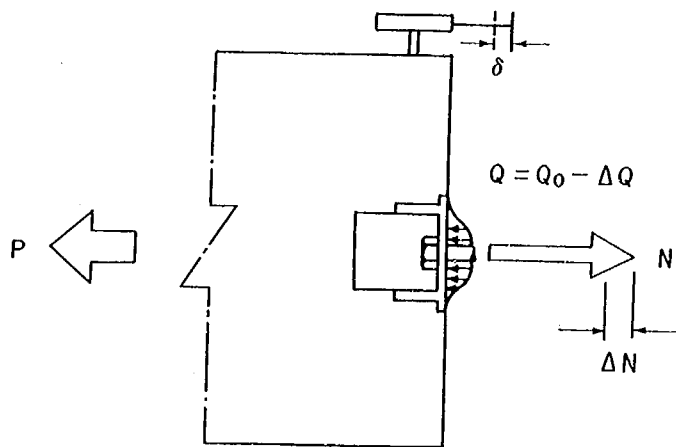
図- 2.27 リング接合面 JT 2 のリング継ぎボルト軸力の履歴



$$N_0 = Q_0$$

$$\Delta N = 0$$

(a) 初期締付け時

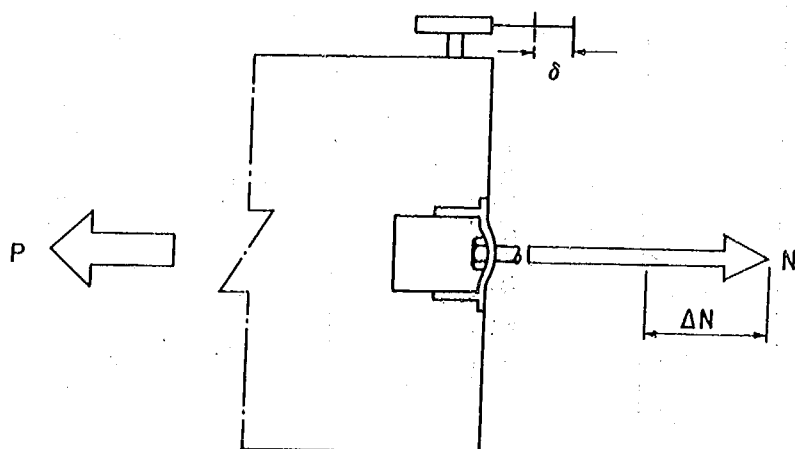


$$N = Q + P$$

$$= N_0 - \Delta Q + P$$

$$\Delta N = P - \Delta Q$$

(b) 載荷時 (継手離間前)



$$N = P$$

$$\Delta N = P - N_0$$

(c) 載荷時 (継手離間後)

図- 2.28 リング継手部の挙動

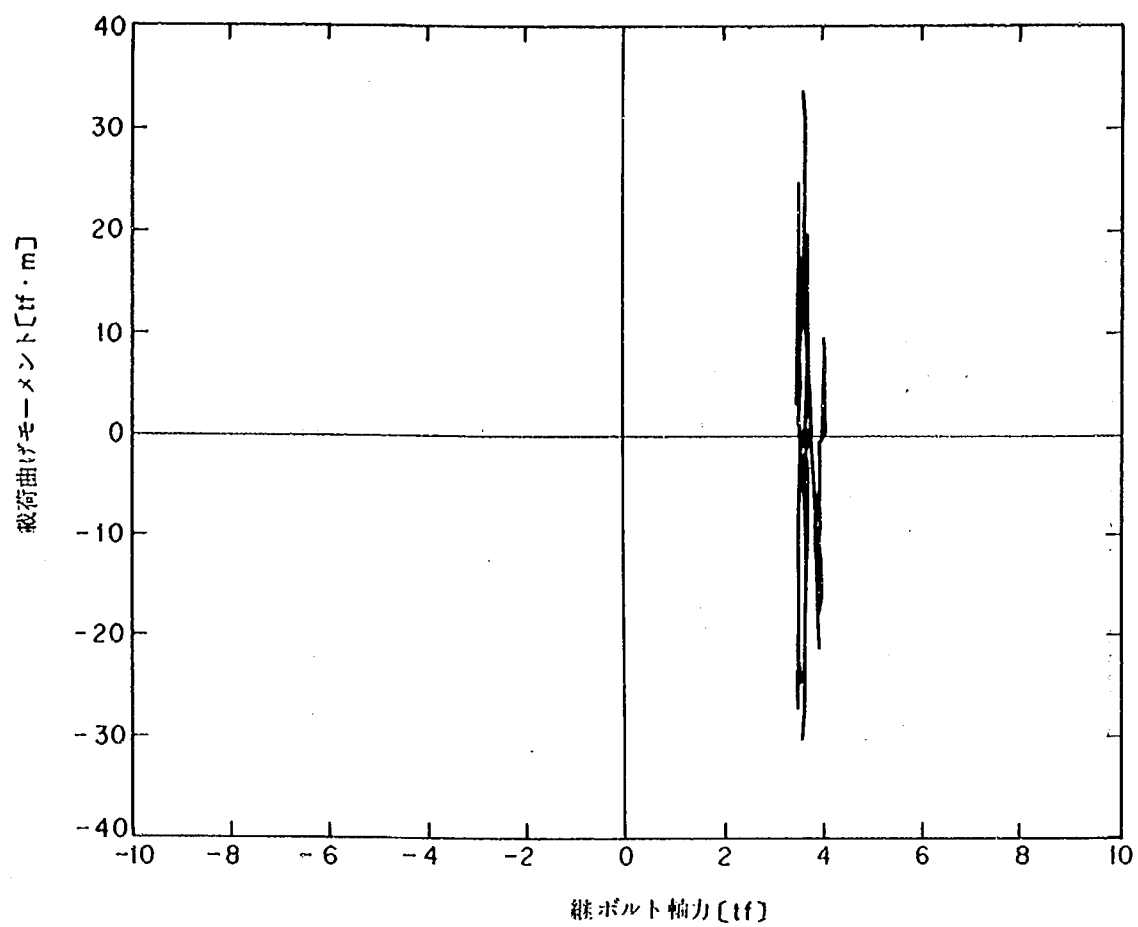


図- 2.29 セグメント継ぎボルトの軸力の履歴 (B-13)

2.7 二次覆工がある場合の変形および破壊特性

(1) 破壊の進展状況

二次覆工のあるEタイプ供試体では、載荷に伴う破壊はリング接合面において生じ、その他の箇所には損傷は生じなかった。このような点は、二次覆工の無いDタイプ供試体と共通である。Eタイプ供試体の最終的な破壊状況を図-2.30に示す。

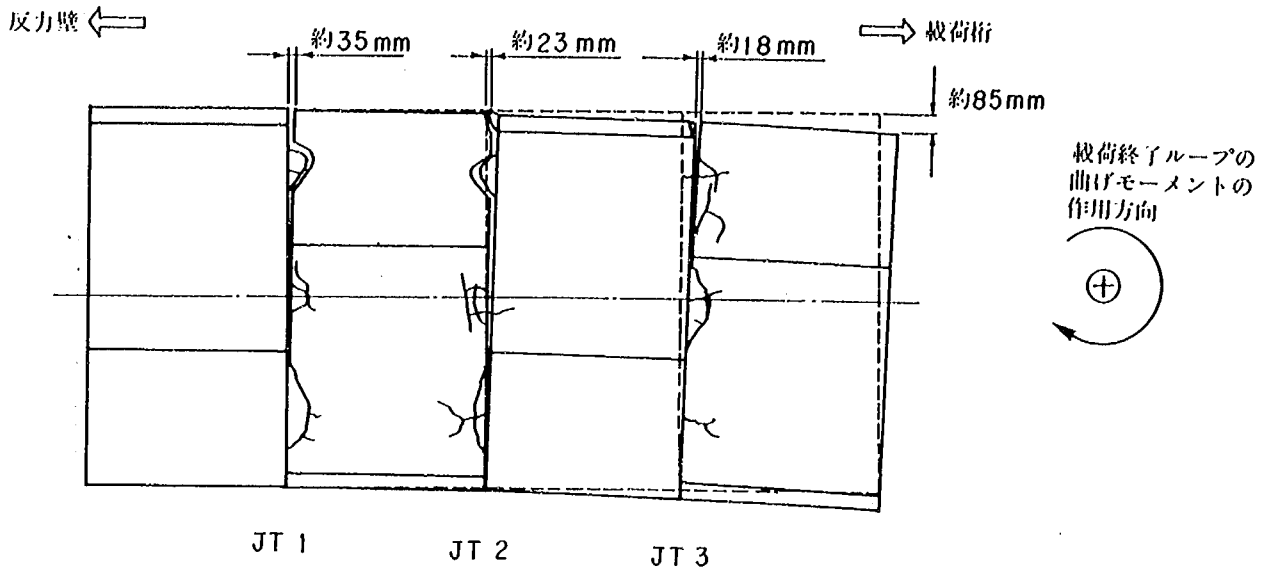


図-2.30 Eタイプ供試体の最終破壊状況（平面図）

表-2.8に破壊の進展状況を、また、図-2.31に二次覆工コンクリートに生じたクラックの進展状況を、それぞれ示す。また、図-2.32にはセグメント外周面のクラックの進展状況を示している。載荷に伴う供試体の破壊の進展状況をまとめると、以下のとおりである。

- ① 初期状態から載荷曲げモーメントが $-40 \text{ tf} \cdot \text{m}$ （4ループ目）に達するまでは、供試体に損傷は生じなかった。つぎのピーク荷重 $65.1 \text{ tf} \cdot \text{m}$ のループ（5ループ目）では、二次覆工リング筋位置に小さなクラックが発生した程度であった。
- ② 6ループ目のピーク荷重 $-68.47 \text{ tf} \cdot \text{m}$ （目標曲げモーメント $-70 \text{ tf} \cdot \text{m}$ ）において、リング接合面JT1付近の二次覆工コンクリートにクラックが生じた。このクラックは、初期クラックにつながる形でJT1に最も近い位置にある二次覆工リング筋の位置に発生した。この後、前述したように目標引張変位を設定して載荷を続けたところ、目標変位 4 mm （8ループ目、 $-76.27 \text{ tf} \cdot \text{m}$ ）のループにおいてJT3付近の二次覆工コンクリートに、また次の目標変位 6 mm （9ループ目、 $89.3 \text{ tf} \cdot \text{m}$ ）のループにおいてJT2付近の二次覆工コンクリートに、それぞれクラックが発生した。
- ③ 10ループ目（目標変位 8 mm 、 $-88.57 \text{ tf} \cdot \text{m}$ ）の載荷途中で二次覆工鉄筋の降伏が始まった。この時の曲げモーメントは $-70 \text{ tf} \cdot \text{m}$ 程度であった。その後、二次覆工コンクリートのクラックが

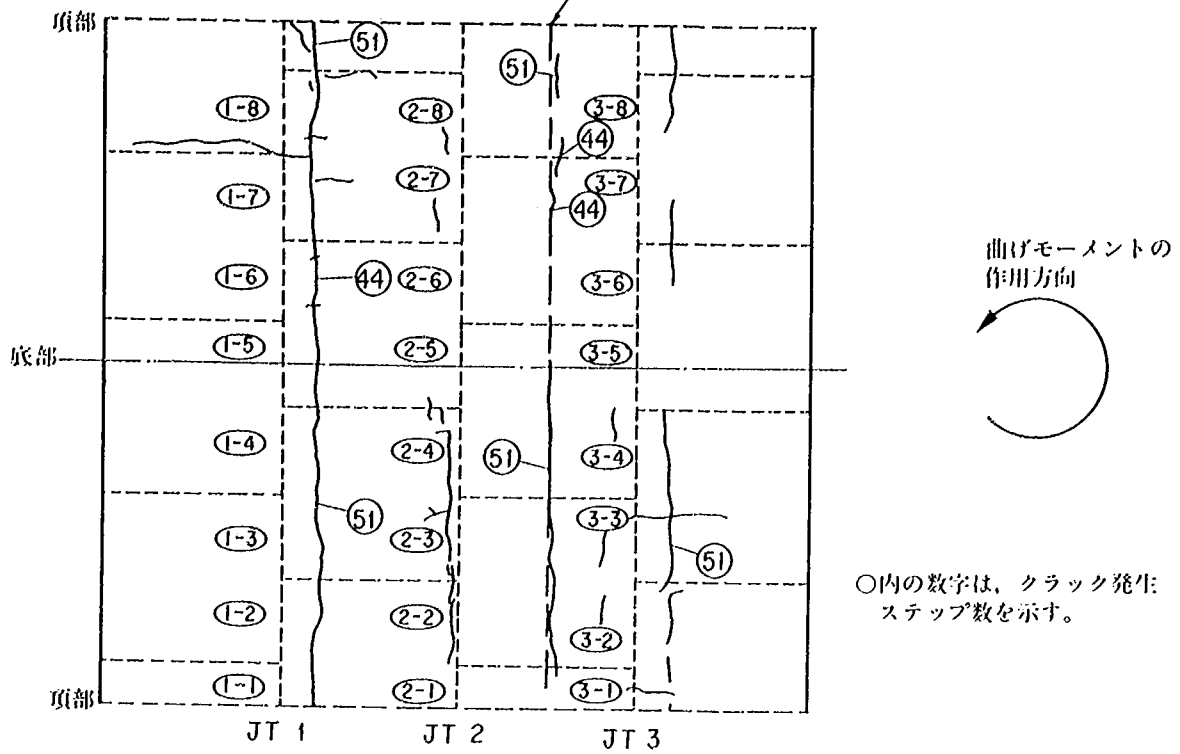
表- 2.8 破壊の進展状況 (曲げEタイプ)

載荷 ループ 番号	載荷 ステップ 番号	曲 げ モーメント M (tonf・m)	曲 率 K (1/m)	主要載荷ステップにおける 状況または変状	継手の相対変位 D (mm)					
					JT- 1		JT- 2		JT- 3	
					D- 1	D- 2	D- 5	D- 8	D- 10	D- 11
3	28	20.48	0.0000	目標 20tf・m のループのピーク値	-0.01	-0.01	-0.07	0.01	-0.01	-0.01
4	36	-43.52	-0.0000	目標 -40tf・m のループのピーク値	0.02	-0.07	0.05	0.00	0.11	0.01
5	43 ~ 44	56.94*	0.0001*	二次覆工リング筋位置に小クラック発生 (JT- 2 ~ JT- 3 間)	-0.01*	0.11*	-0.07*	0.10*	0.00*	0.05*
	45	65.10	0.0001	目標 60tf・m のループのピーク値	0.01	0.20	-0.05	0.10	0.00	0.09
6	51	-68.47	-0.0001	目標 -70tf・m のループのピーク値 JR- 1 付近の二次覆工にクラック発生	0.13	-0.08	0.04	-0.05	0.10	-0.01
7	60	66.23	0.0001	目標 2mm のループのピーク値	0.00	0.30	-0.06	0.10	0.00	0.11
8	69	-76.27	-0.0003	目標 -4mm のループのピーク値 JR- 3 付近の二次覆工にクラック発生	0.69	-0.08	0.04	-0.07	0.76	-0.10
9	77	89.30	0.0006	目標 6mm のループのピーク値 JR- 2 付近の二次覆工にクラック発生	-0.01	1.15	-0.17	0.11	-0.11	1.50
10	82 ~ 83	-69.00*	-0.0004*	二次覆工鉄筋降伏開始	0.83*	-0.04*	0.05*	-0.07*	1.04*	-0.05*
	85	-88.57	-0.0008	目標 -8mm のループのピーク値	1.54	-0.08	0.05	-0.09	2.42	-0.20
11	93	91.91	0.0011	目標 10mm のループのピーク値	-0.08	2.10	-0.17	0.12	-0.18	3.48
12	100	-95.60	-0.0025	目標 -20mm のループのピーク値	3.28	-0.20	2.75	-0.30	5.85	-0.53
13	105 ~ 106	94.86*	0.0029*	継手金具面板降伏開始	-0.10*	3.78*	-0.49*	4.40*	-0.25*	6.05*
	107	107.14	0.0040	目標 30mm のループのピーク値 セグメント外面にクラック発生 (JR 1- 2, 3, JR 2- 2)	-0.10	5.15	-0.66	6.48	-0.30	7.79
14	121	-105.66	-0.0057	目標 -40mm のループのピーク値	7.03	-0.27	8.60	-0.54	10.74	-0.82
15	138	108.66	0.0073	目標 50mm のループのピーク値	-0.23	10.17	-0.71	11.70	-0.39	12.72
16	155 ~ 156	-90.98*	-0.0068*	アンカー筋降伏開始	6.89*	-0.38*	8.97*	-0.30*	12.78*	-0.65*
	161	-116.47	-0.0104	目標 -70mm のループのピーク値 最大曲げモーメント作用時	6.98	-0.67	9.78	-0.67	17.52	-0.95
17	181 ~ 182	110.51*	0.0133*	JR 2- 8 アンカー筋破断	-0.89*	12.62*	-0.79*	13.03*	-0.46*	16.70*
	182 ~ 183	111.07*	0.0138*	JR 1- 8 アンカー筋破断	-0.90*	12.68*	-0.85*	13.39*	-0.45*	16.73*
	183 ~ 184	109.34*	0.0149*	JR 1- 6, 8 アンカー筋破断	-0.95*	12.73*	-0.85*	13.52*	-0.45*	16.73*
	184 ~ 185	104.13*	0.0151*	JR 1- 7 アンカー筋破断	-1.04*	...	-0.85*	13.47*	-0.46*	16.70*
	186 ~ 187	102.50*	0.0164*	JR 1- 6 アンカー筋破断	-1.17*	...	-0.85*	13.42*	-0.47*	16.69*
	189	100.44	0.0178	載荷終了	-1.63	...	-0.85	13.35	-0.46	16.70

* 直前・直後の載荷ステップの平均値

反力壁側

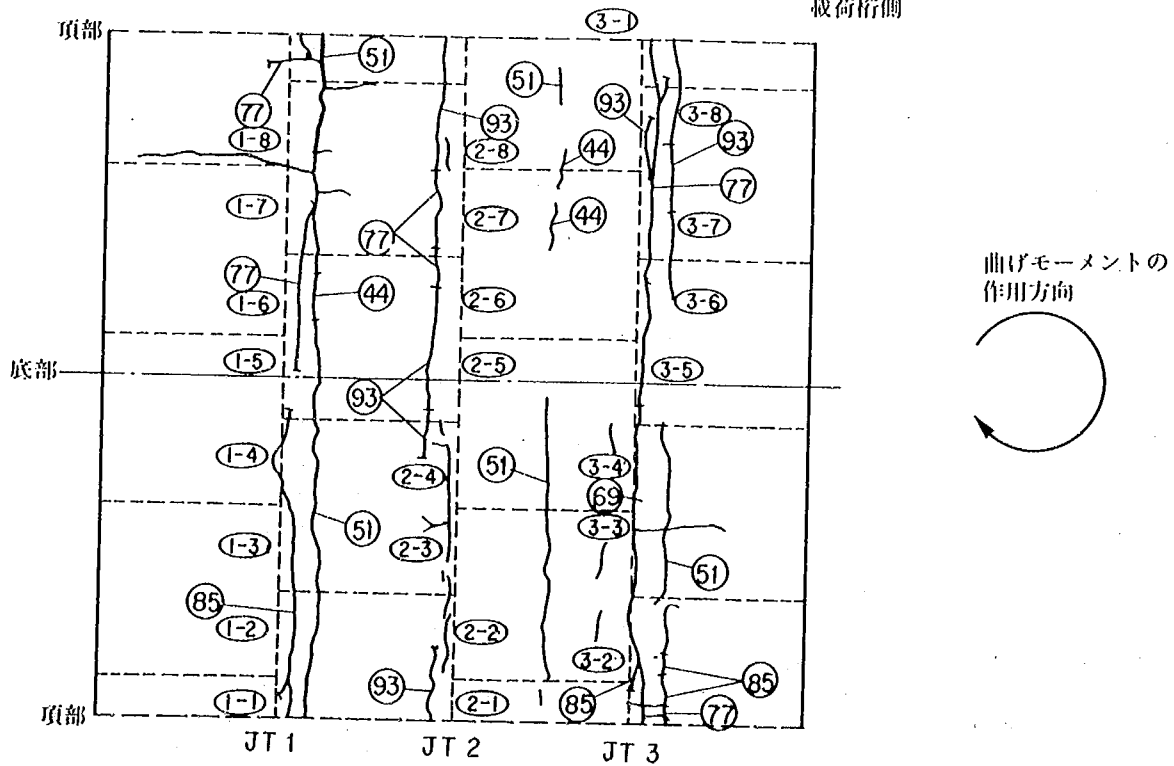
リング筋位置 載荷桁側



(a) 6 ループ目 (51ステップ, $-68.5 \text{ tf} \cdot \text{m}$)

反力壁側

載荷桁側

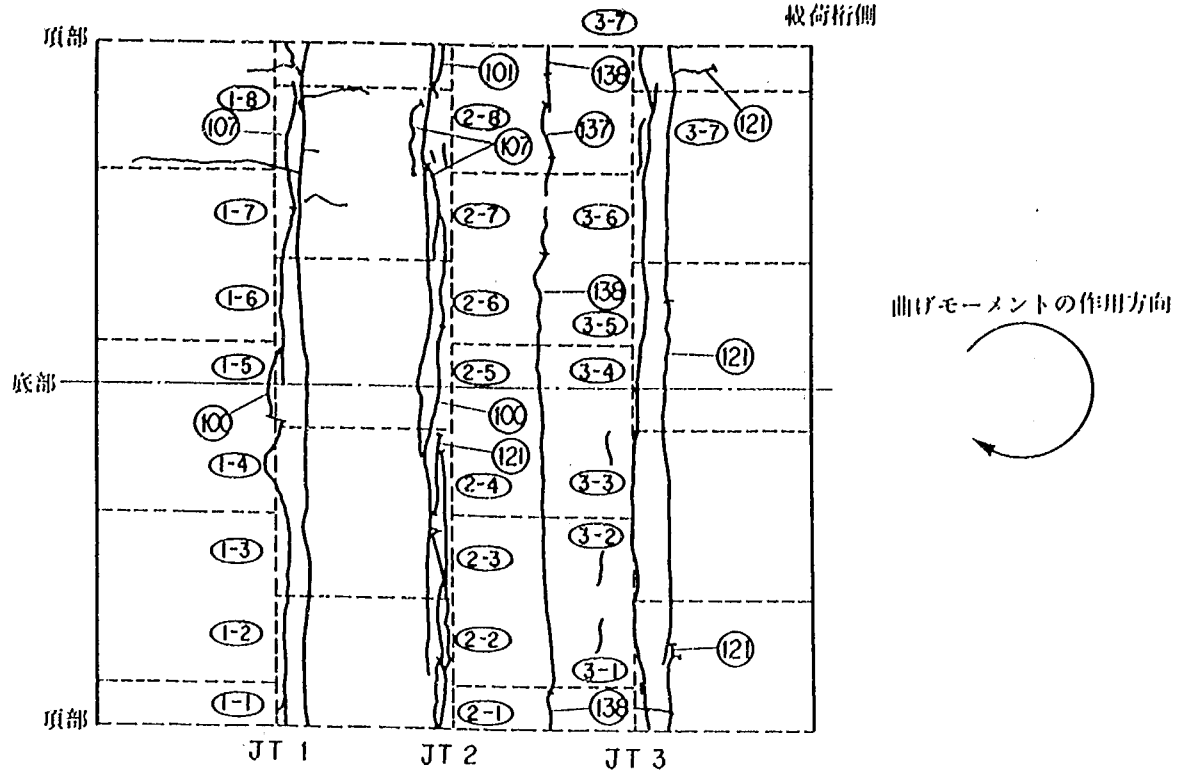


(b) 11 ループ目 (93ステップ, $91.9 \text{ tf} \cdot \text{m}$)

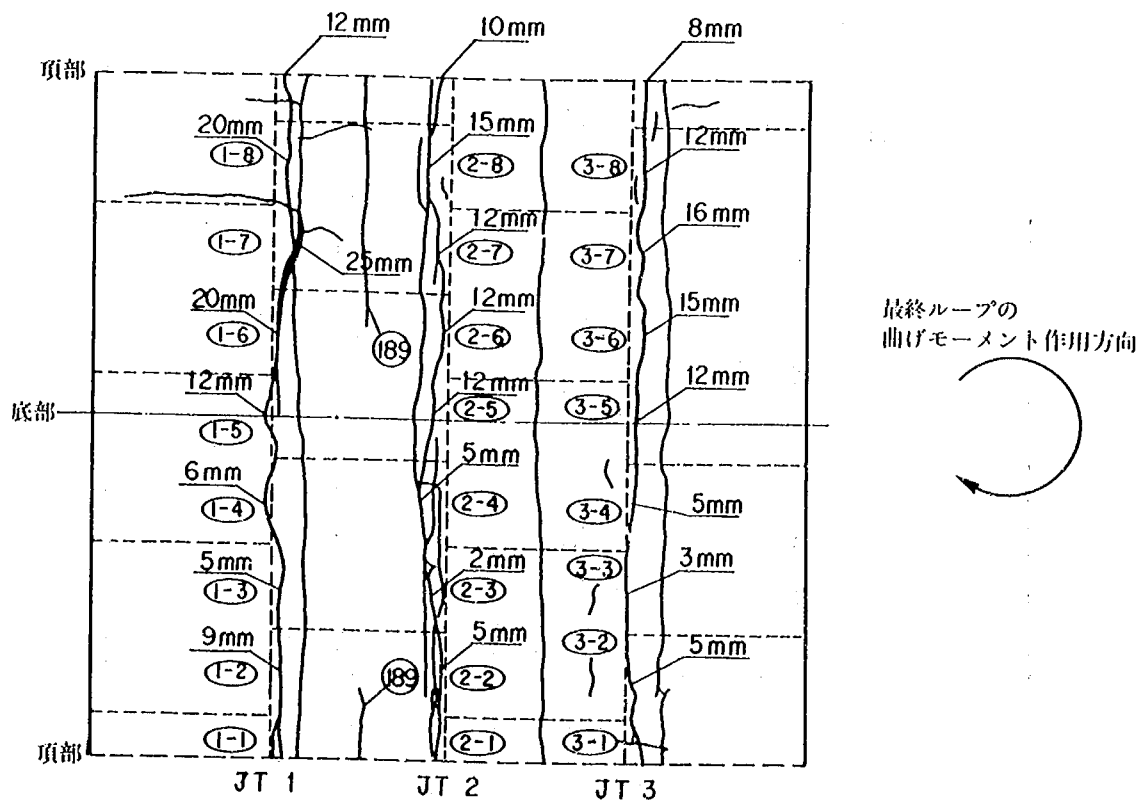
図- 2.31 二次覆工コンクリートに生じたクラックの進展状況 (1)

反力壁側

載荷側

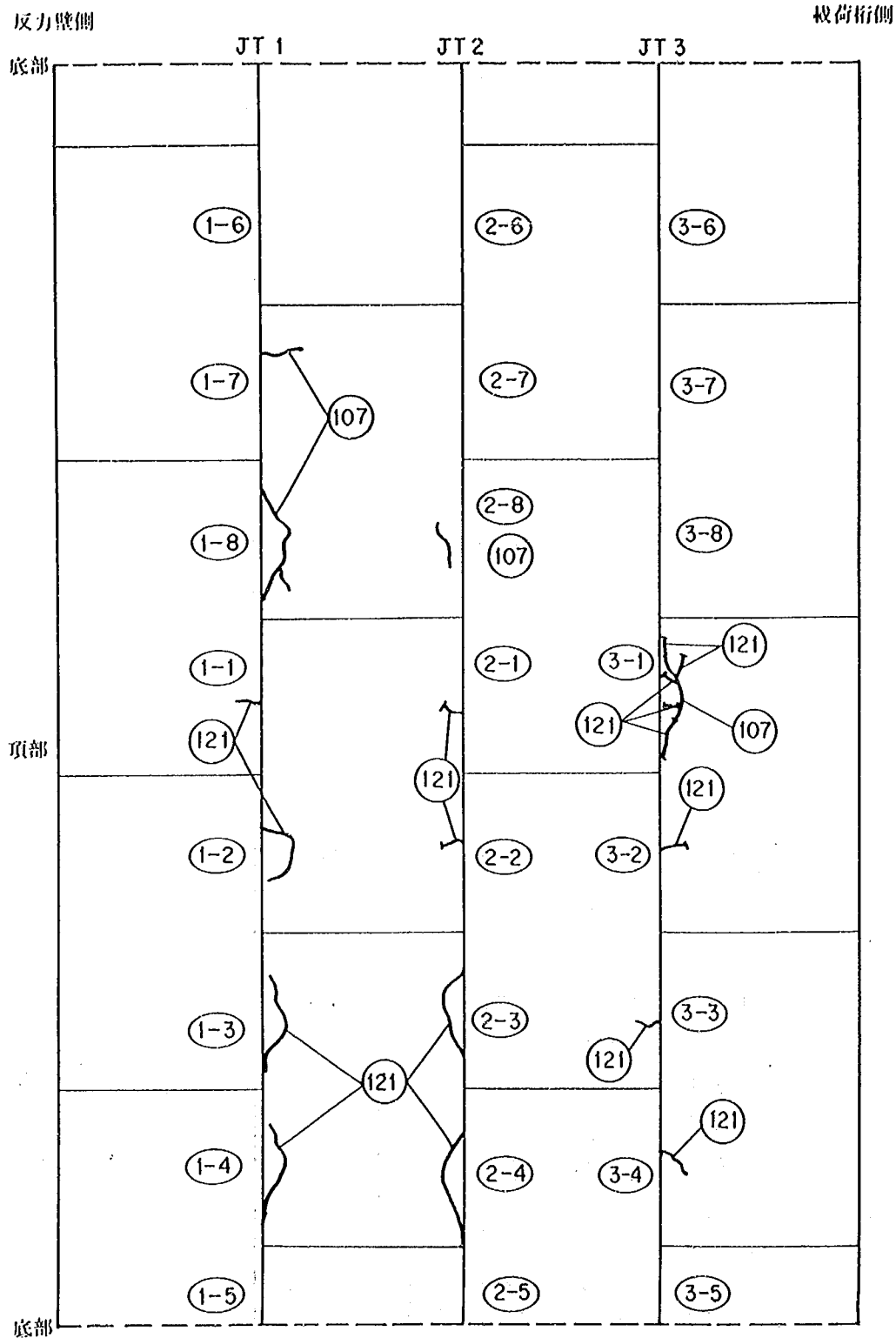


(c) 15ループ目 (138ステップ, 108.7tf・m)



(d) 最終状況

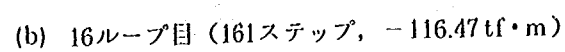
図-2.31 二次覆工コンクリートに生じたクラックの進展状況 (2)



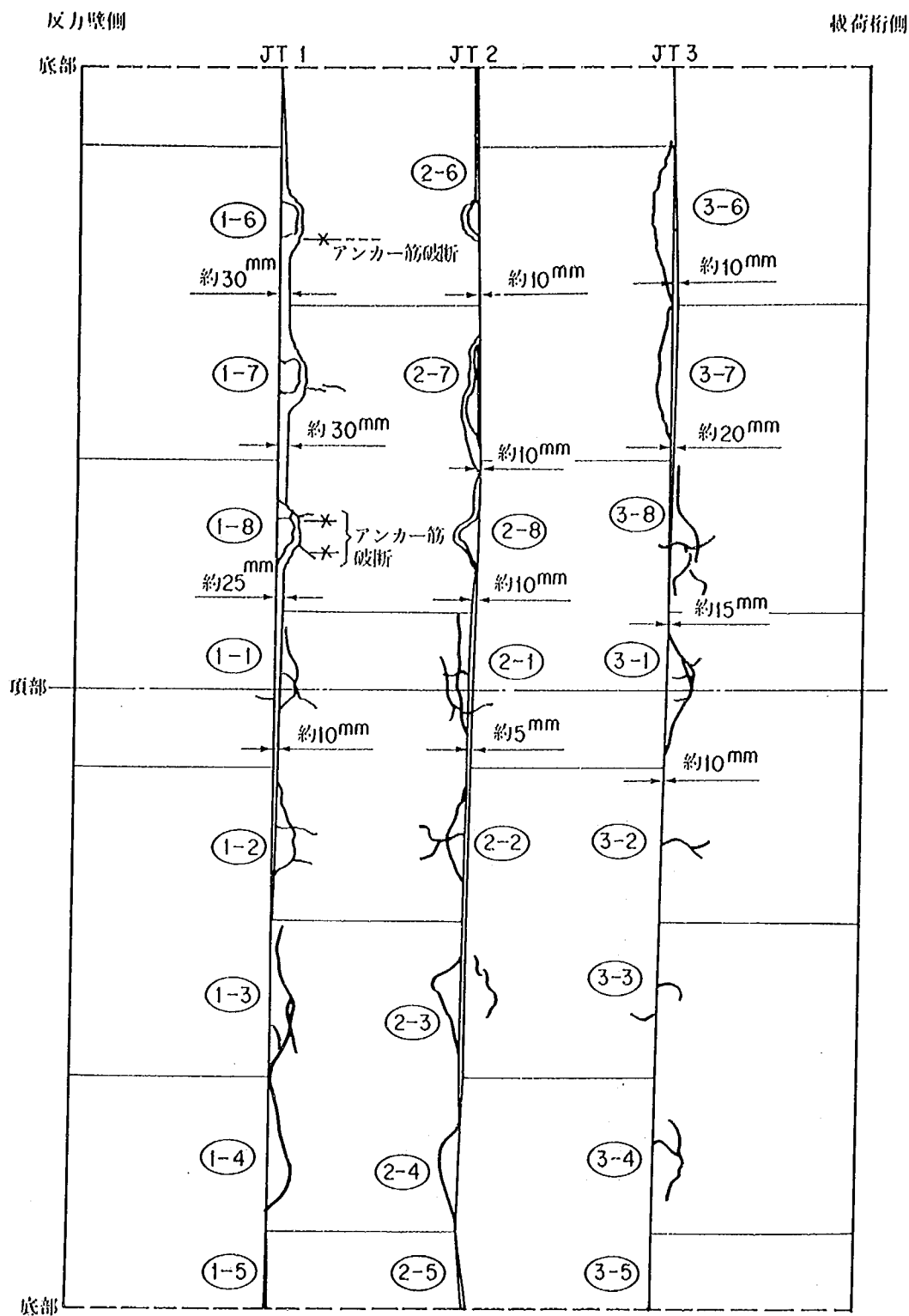
注) ○内の数字は、クラックの発生したステップ数を示す。

(a) 14ループ目 (121ステップ, $-105.7 \text{ tf} \cdot \text{m}$)

図- 2.32 セグメント外周面のクラックの進展状況 (1)



— 47 —



(c) 最終状況

図-2.32 セグメント外周面のクラックの進展状況(3)

進行していった。

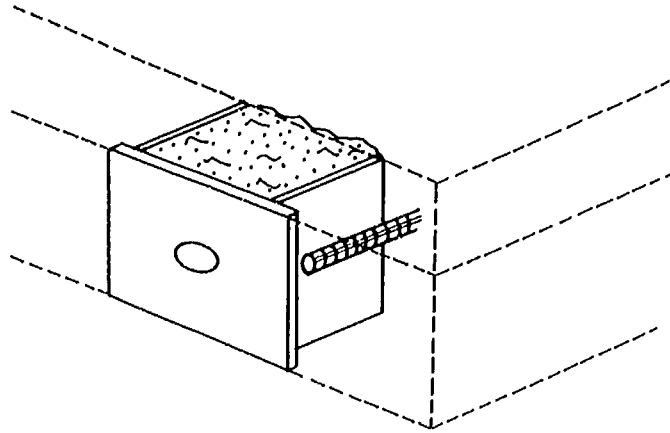
- ④ 13ループ目(目標変位 30mm)の載荷途中、曲げモーメントが $-94.86 \text{ tf} \cdot \text{m}$ に達した段階で、リング継手金具面板の降伏が始まった。その次のステップでは、本ループの目標変位に達した($107.14 \text{ tf} \cdot \text{m}$)が、ここで、リング継手 JR 1-7, 1-8 および JR 2-8 付近のセグメント外周面にクラックが発生した。セグメント外周面クラックは、載荷の進行にしたがっていずれのリング接合面でも発生したが、特に JT 1 および 2 のリング接合面で多く発生した。
- ⑤ 16ループ目(目標変位 70mm)の載荷途中において、曲げモーメント $-90.98 \text{ tf} \cdot \text{m}$ でアンカー鉄筋の降伏が始まった。目標変位 70mm において、本載荷を通じて最大の曲げモーメント $-116.47 \text{ tf} \cdot \text{m}$ が発生した。
- ⑥ 最終ループでは、正の曲げモーメントを作用させて損傷を進展させた。まず、曲げモーメント $110.51 \text{ tf} \cdot \text{m}$ でリング継手 JR 2-8 のアンカー鉄筋が破断した。その後、相次いでリング継手のアンカー鉄筋が破断していった。リング継手 JR 1-6 のアンカー鉄筋が破断した後、供試体の曲がりが増加し、載荷桁が載荷治具と接触したため、載荷を終了した。この段階までに二次覆工鉄筋の破断は生じなかった。

以上が E タイプ供試体の破壊の進展状況である。これから、以下の点が指摘される。

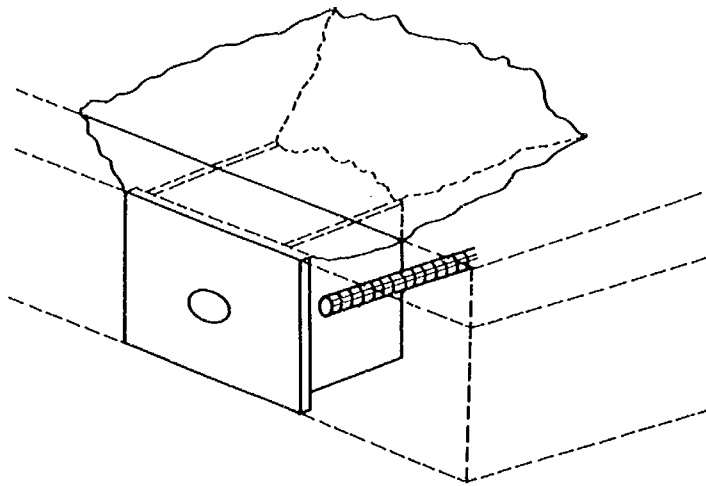
- 1) 二次覆工の著しいクラックは、ほとんどが円周方向にリング接合面に沿うかたちで生じている。また、一次覆工の損傷はリング接合面においてのみ生じ、そのほかの箇所には損傷は生じていない。
- 2) リング継手では、D タイプ供試体と同様に、定着板に溶接されたアンカー鉄筋が定着板の端部位置において破断している。これは、リング継手金具に力が作用すると、図-2.33(a)もしくは(b)のように、まず継手金具とコンクリートとの付着が切れると、アンカー鉄筋は図-2.33(c)に示すように、付着切れを起こした部分と、起こさない部分との境界部で軸力を受けるようになる。このため、この位置で破断が生じたと考えられる。
- 3) 二次覆工の無い D タイプ供試体では特定のリング接合面に開きが集中したのに比べ、E タイプ供試体では、図-2.30 に示したようにそれぞれのリング接合面に開きが分散されている。このような結果は、軸方向の正負交番載荷実験の結果と同じである。これは二次覆工内に、二次覆工コンクリートの引張強度を上回る鉄筋が配置されていれば、鉄筋のねばりにより、特定のリング接合面で二次覆工コンクリートに引張クラックが入った途端に、それ以降、そのリング接合面のみ損傷が進展していくといった状況にはならないためである。

(2) 供試体の変形特性

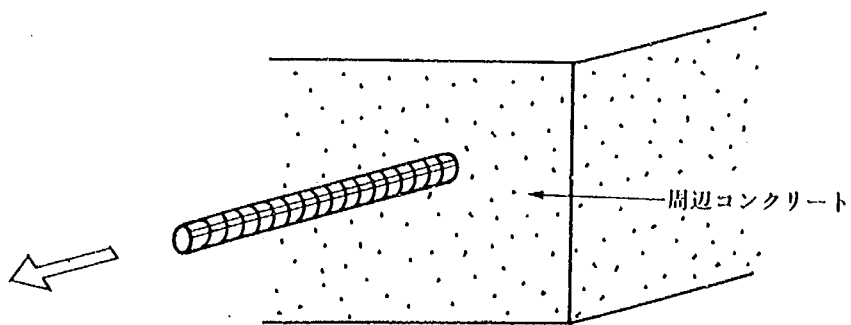
供試体全体の曲げ変形と載荷荷重の関係を検討するために、供試体の曲率と載荷曲げモーメントとの履歴を示した結果が図-2.34 である。供試体の最大曲げ耐力 $-116.47 \text{ tf} \cdot \text{m}$ は曲率が $-0.0104 (1/\text{m})$ の時点で生じている。これは、リング継手のアンカー鉄筋や二次覆工鉄筋が降伏を始めた後に相当する。



(a) 周辺のコンクリートとの付着切れ



(b) 周辺のコンクリートとの付着切れ



(c) アンカー鉄筋の状態

図- 2.33 コンクリートの付着切れにともなうアンカー鉄筋の状態

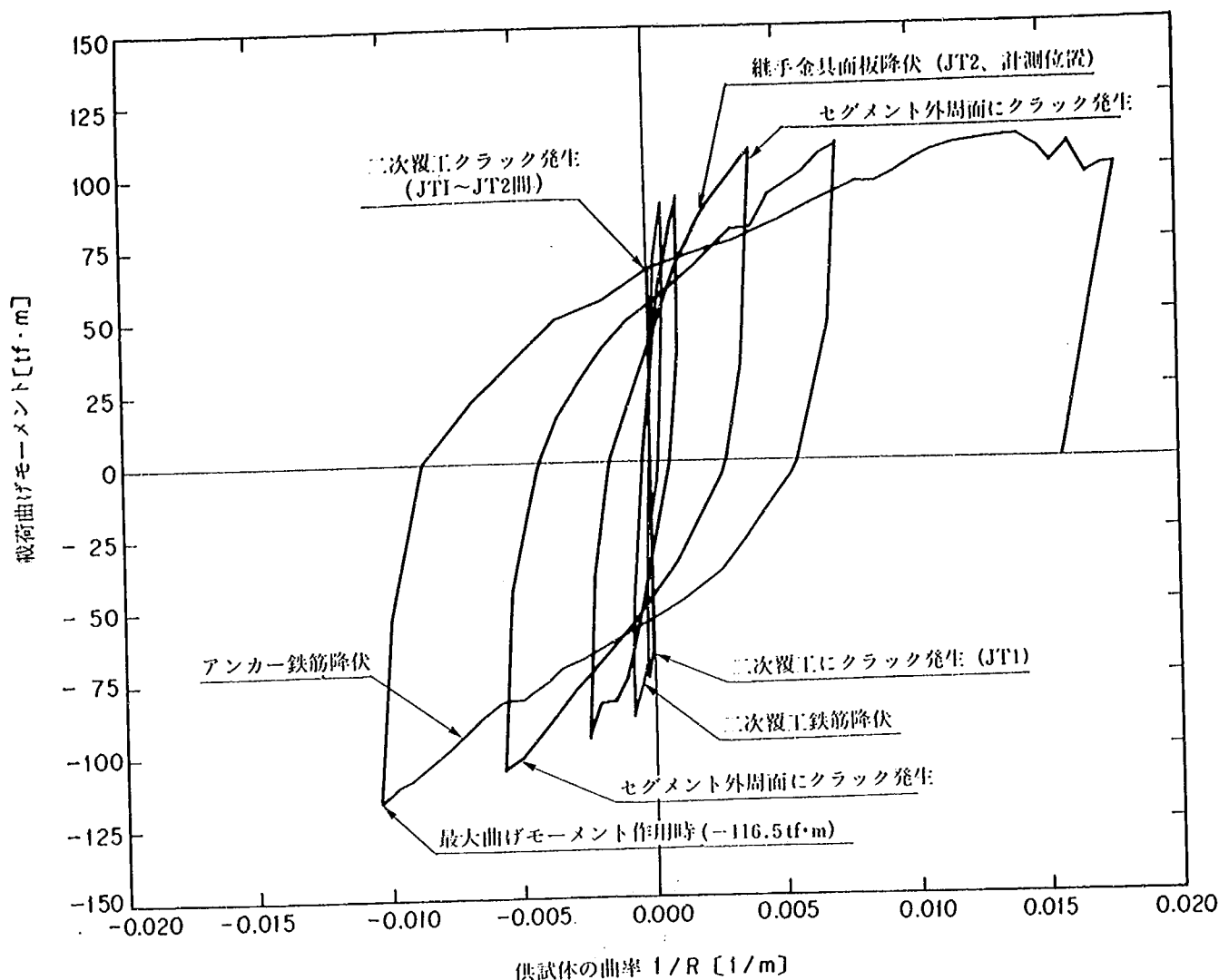
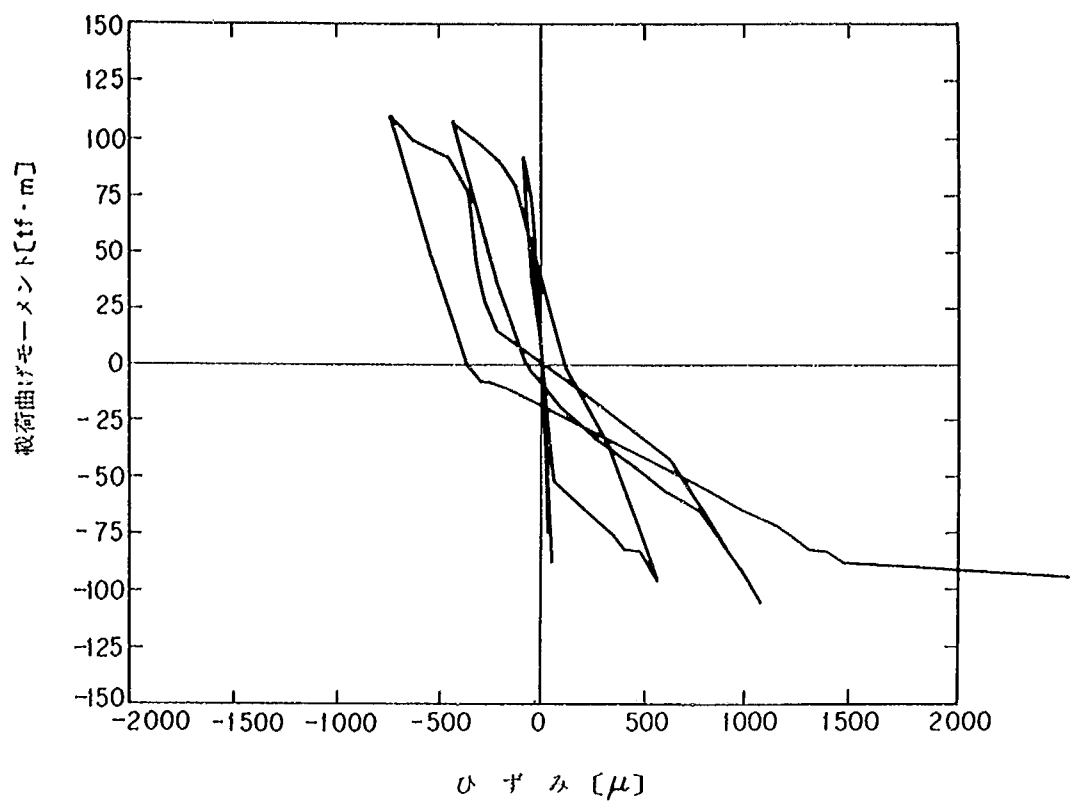


図- 2.34 Eタイプ供試体の載荷履歴

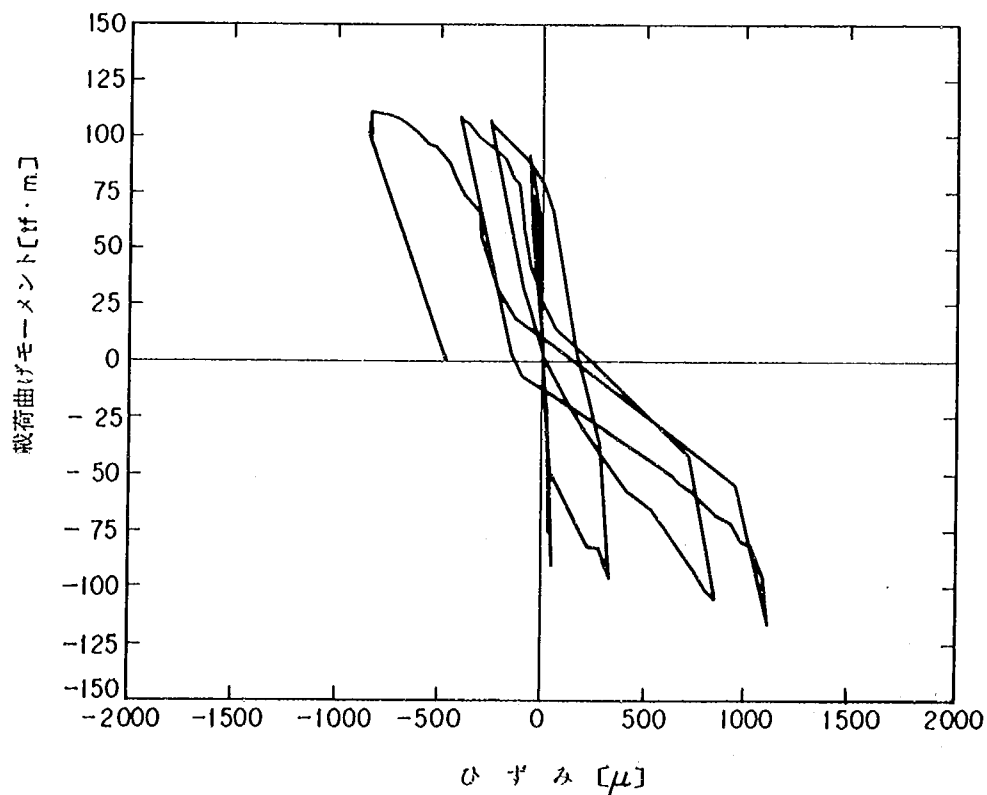
載荷終了後の供試体の曲率は0.0178 (1/m) であり、これを曲率半径に直すと約56 mである。これは、供試体としての最終状態という訳ではなく、供試体と載荷治具との接触が生じたために、載荷を打ち切った時点での曲率半径である。したがって、Dタイプ供試体のように、供試体が最終的に破断した状態の曲率半径と比較しても大きな意味はないが、Dタイプ供試体の破断時の曲率半径が約180 mであったことから、曲率半径にして、Eタイプ供試体の方が約3倍以上ねばりのある構造であることがわかる。

(3) アンカー鉄筋およびリング継手金具面板の変形

図- 2.35 はリング継手JR 2-7 (図- 2.5 参照) におけるアンカー鉄筋のひずみと載荷モーメントとの履歴を示したものである。継手金具に近い位置では、ひずみが1500 μ に達した段階でアンカー鉄筋が降伏した。ここでアンカー鉄筋のひずみは、載荷ループを重ねるごとに大きくな



(a) $\Lambda - 1$



(b) $\Lambda - 3$

図- 2.35 リング継手アンカー鉄筋のひずみの履歴

っているが、これは継手金具周辺のコンクリートにクラックが発生し、継手金具と周辺コンクリートとの付着が切れて、アンカー鉄筋に生じる軸力が大きくなっていったためと考えられる。

次に、JR 2-7のリング継手における継手金具面板のひずみの履歴を図-2.36に示す。この面板では、2箇所ではひずみを計測していた（図-2.13参照）が、一方の測点のひずみが計測できなかったため、1点の結果のみを示している。これによれば、面板のひずみは最終ループまでほとんど発生していないが、最終ループでは載荷曲げモーメントが $70\text{tf}\cdot\text{m}$ となった時点から、ひずみが急増し降伏している。Eタイプ供試体におけるリング継手金具の変形を模式化すると図-2.37のようになり、リング継手のボルトボックス内に二次覆工コンクリートが充填され、定着板の変形が拘束される結果、面板はボルト孔付近を中心として円錐台状に変形する。このため、載荷の初期の段階では面板のひずみを計測していた位置では大きなひずみが発生せず、載荷の最終段階になって面板の降伏域が測点に近づいたため、ひずみが急激に発生したと考えられる。

(4) セグメント継手の挙動特性

セグメント継手の相対変位と載荷荷重の履歴を図-2.38に示す。セグメント継手の相対変位の計測点は、図-2.13に示したように4点あるが、各測点とも大差はないため、ここではDP-3における計測結果のみを示す。

図-2.38によれば、セグメント継手の相対変位は全載荷を通じてほぼゼロであるといってもよい。このことは、曲げモーメントがセグメントに作用した際、円周方向に加わる力に対してセグメント継手は十分剛であることを意味している。

(5) リング接合面の相対変位

リング接合面に生じる長手方向の相対変位を図-2.39に示す。ここで相対変位とは、リング接合面で引張縁側の相対変位と圧縮縁側の相対変位との差をとったものである。

これによると、11ループ目の曲げモーメント $91.9\text{tf}\cdot\text{m}$ までは、JT 2の相対変位がJT 1、JT 2に比較して小さいが、その次のループ以降では、JT 2においても他のリング継手と同程度の相対変位が生じている。細かくみると、相対変位はJT 3の位置で最も大きく、次いでJT 2、JT 1の順となっているが、3箇所間で大きな差はない。これは、1箇所のリング接合面でのみ相対変位が増大していったDタイプ供試体と大きく異なる点である。

図-2.40は、リング継手接合面JT 2における、各リング継手位置の相対変位の分布を示したものである。各載荷状態において、相対変位が圧縮となっているリング継手は1箇所程度であり、特に、セグメント外周面にクラックの発生した13ループ目以降は、相対変位が圧縮となっているリング継手は1箇所のみである。これは、損傷の進行によって引張縁となる覆工の領域が拡大し、中立軸が圧縮縁側に移行していくためと考えられる。

(6) 継ぎボルトの軸力

リング継ぎボルト軸力に関しては、計測状態が悪く、精度が十分ではないため、ここでは、セグメント継ぎボルトの軸力についてのみ示す。

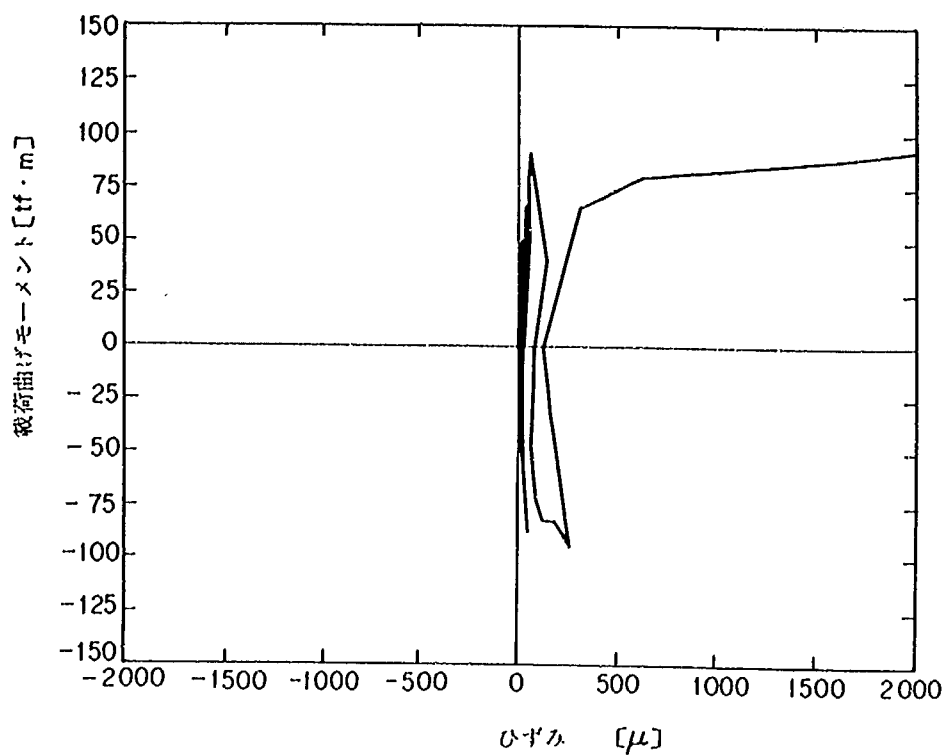


図- 2.36 リング継手金具面板のひずみの履歴 (P-3)

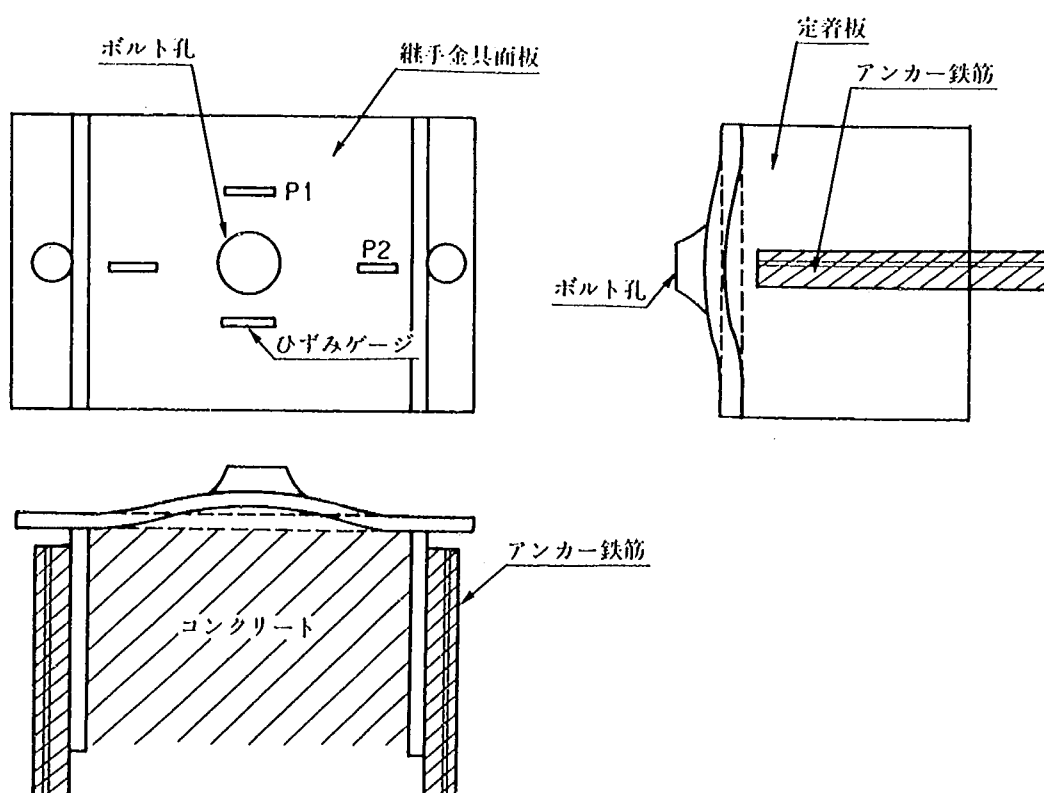
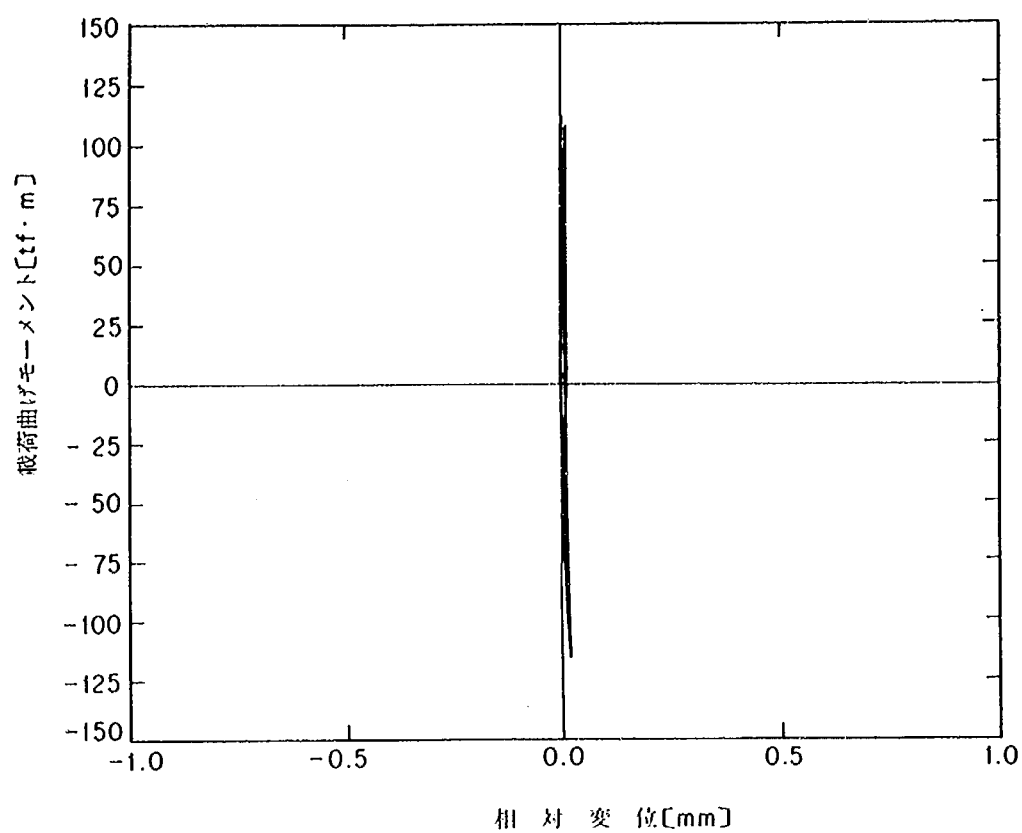


図- 2.37 リング継手金具の変形



図－2.38 セグメント継手の相対変位の履歴（DP－3）

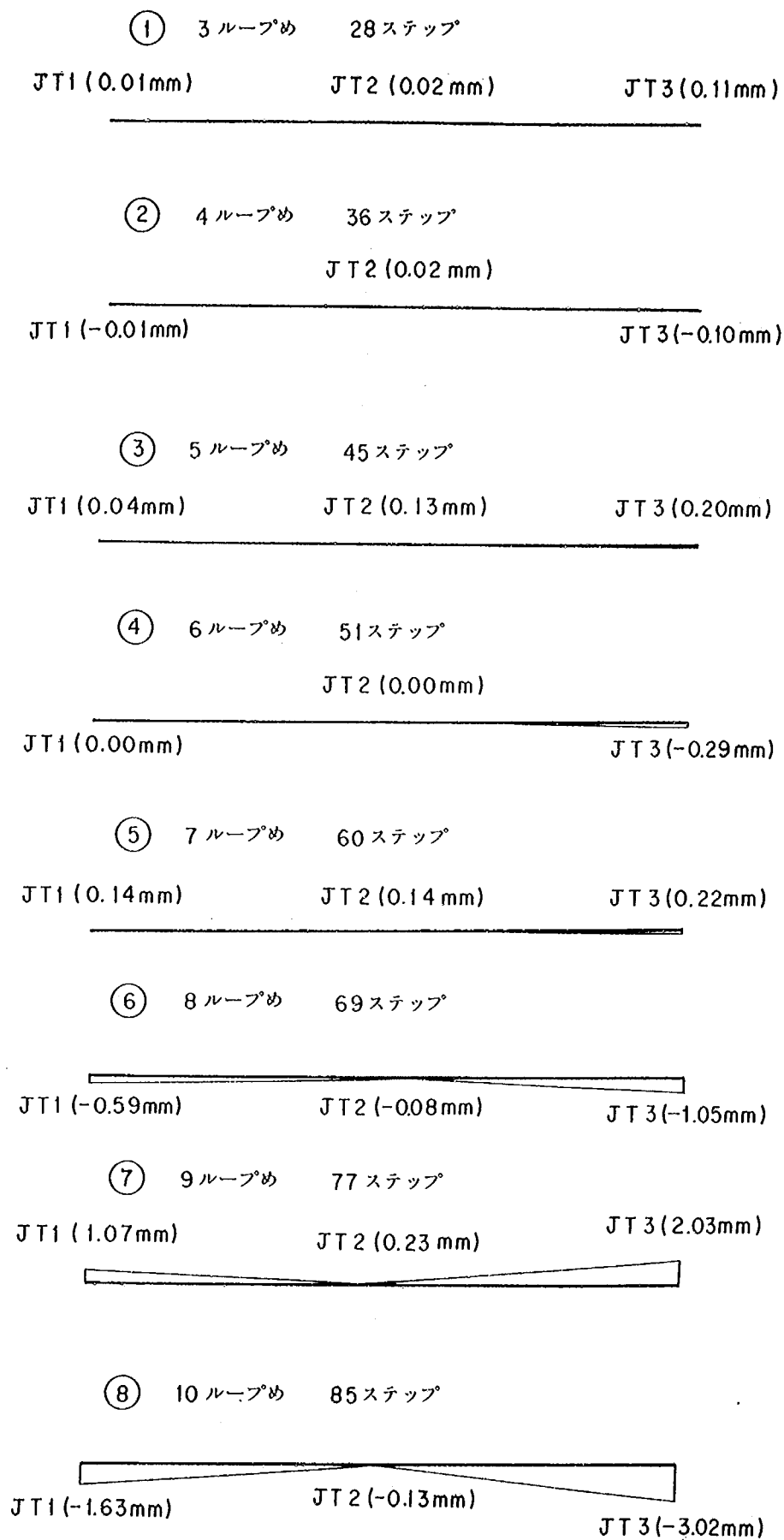


図- 2.39 各リング接合面の軸方向相対変位の変化 (1)

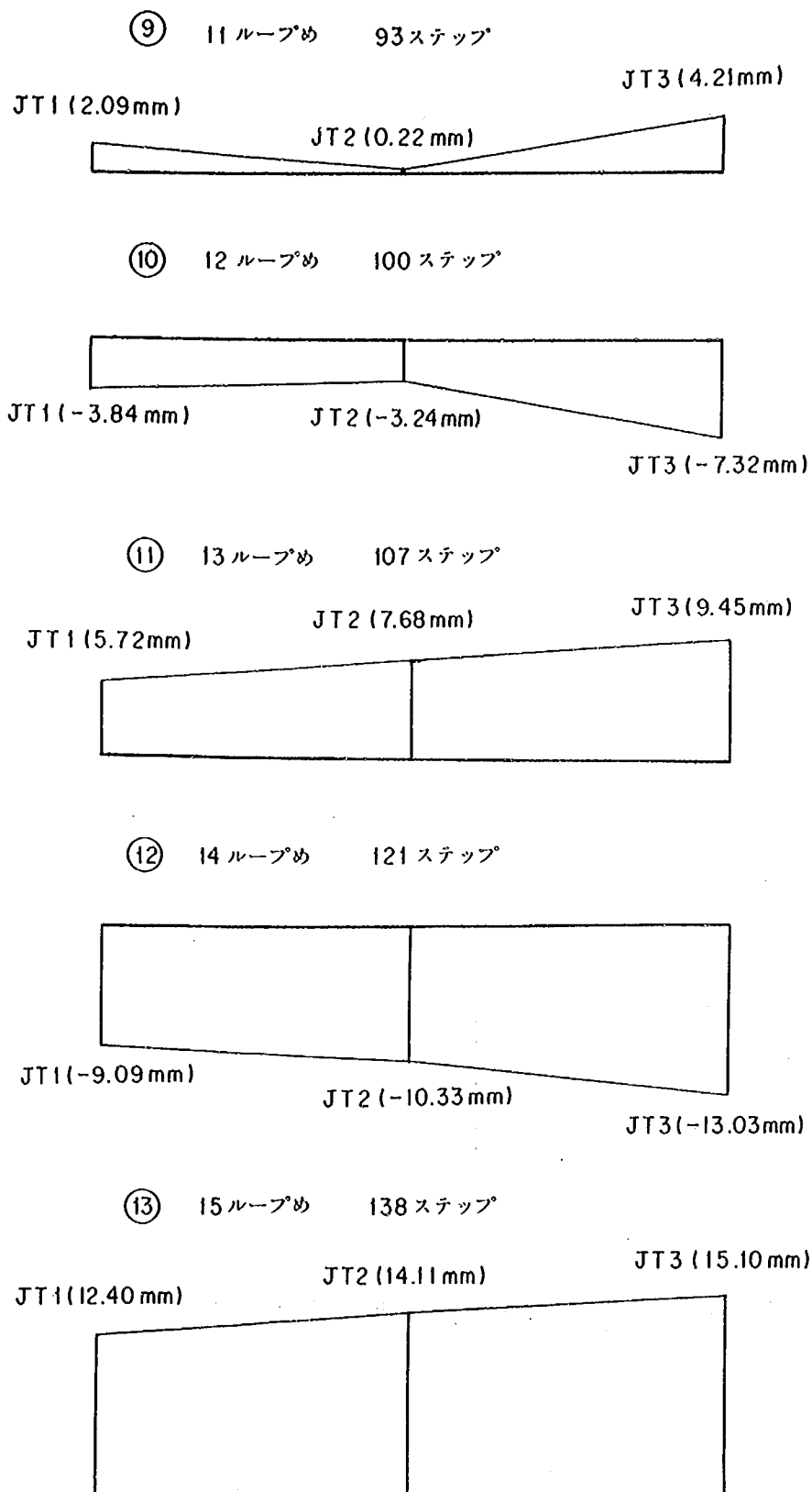
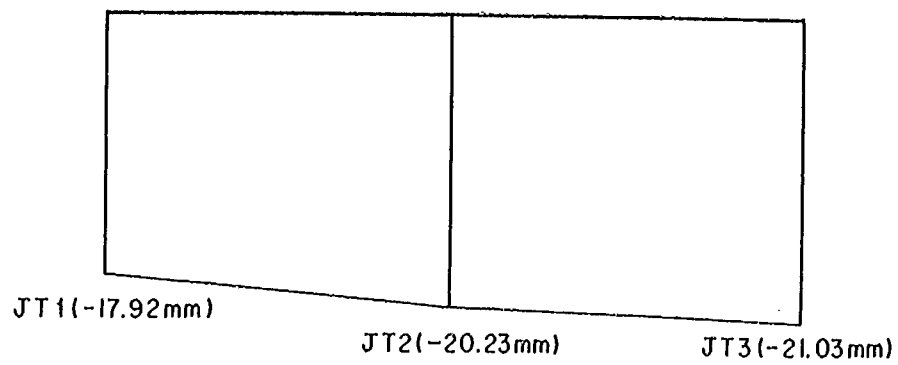


図- 2.39 各リング接合面の軸方向相対変位の変化 (2)

⑭ 16 ループめ 161 ステップ



JT1 (44.10mm)

⑮ 17 ループめ 189 ステップ

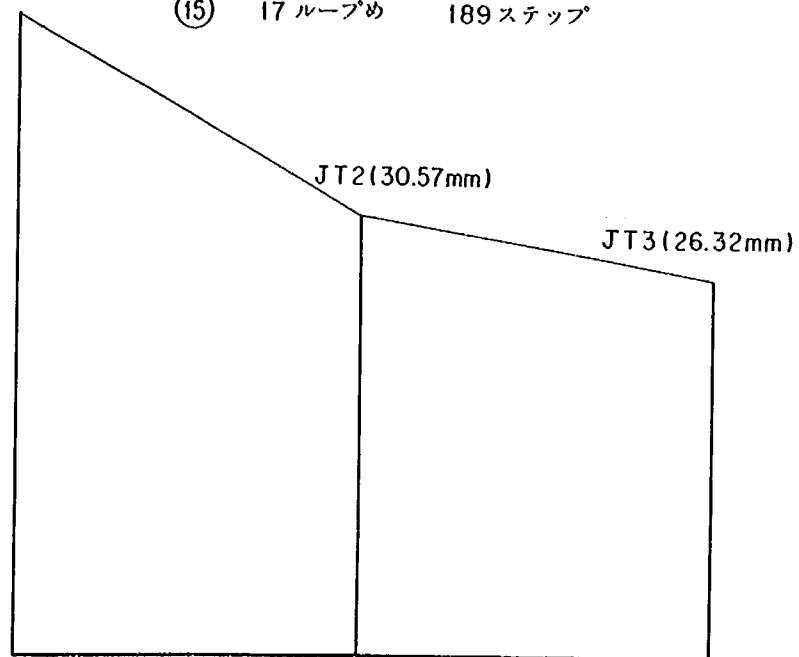
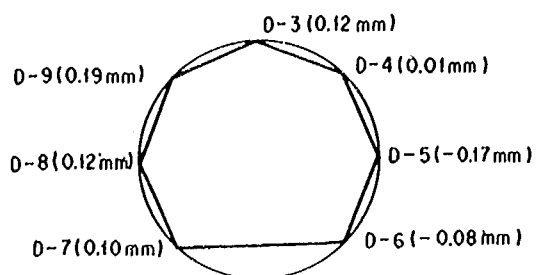
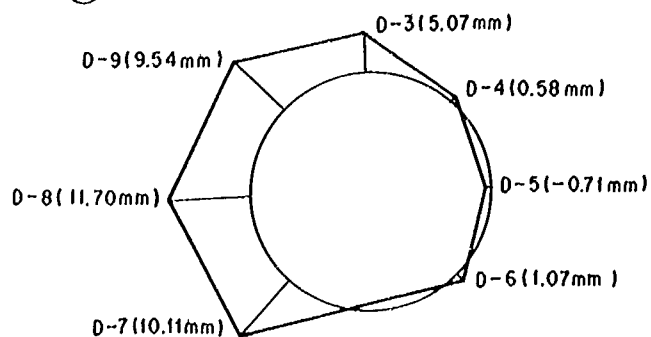


図- 2.39 各リング接合面の軸方向相対変位の変化 (3)

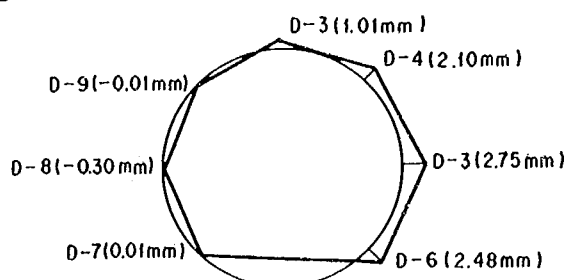
① 11 ループめ 93 ステップ



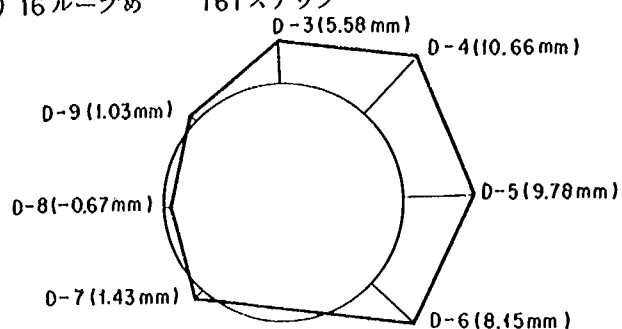
⑤ 15 ループめ 138 ステップ



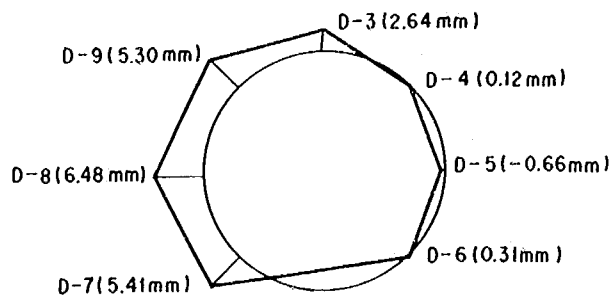
② 12 ループめ 100 ステップ



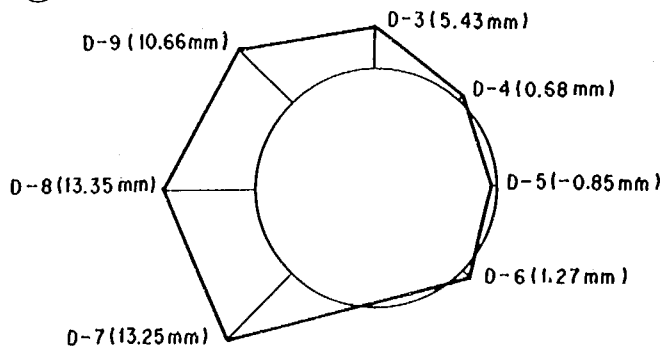
⑥ 16 ループめ 161 ステップ



③ 13 ループめ 107 ステップ



⑦ 17 ループめ 189 ステップ



④ 14 ループめ 121 ステップ

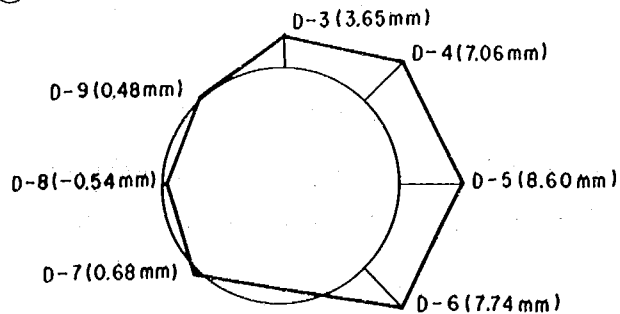


図-2.40 リング接合面 JT2 におけるリング継手位置の相対変位分布

セグメント継手のボルト軸力と載荷荷重との履歴を示すと、図-2.41 のようになる（図-2.13 参照）。これによれば、セグメント継ぎボルトの軸力は、載荷荷重に関わらず、ほぼ初期軸力を保っている。これは、全ての載荷過程を通じてボルトにはほとんど軸力が作用しなかったことを示すものであり、前述したように、セグメント接合面に相対変位が生じなかったことと対応している。

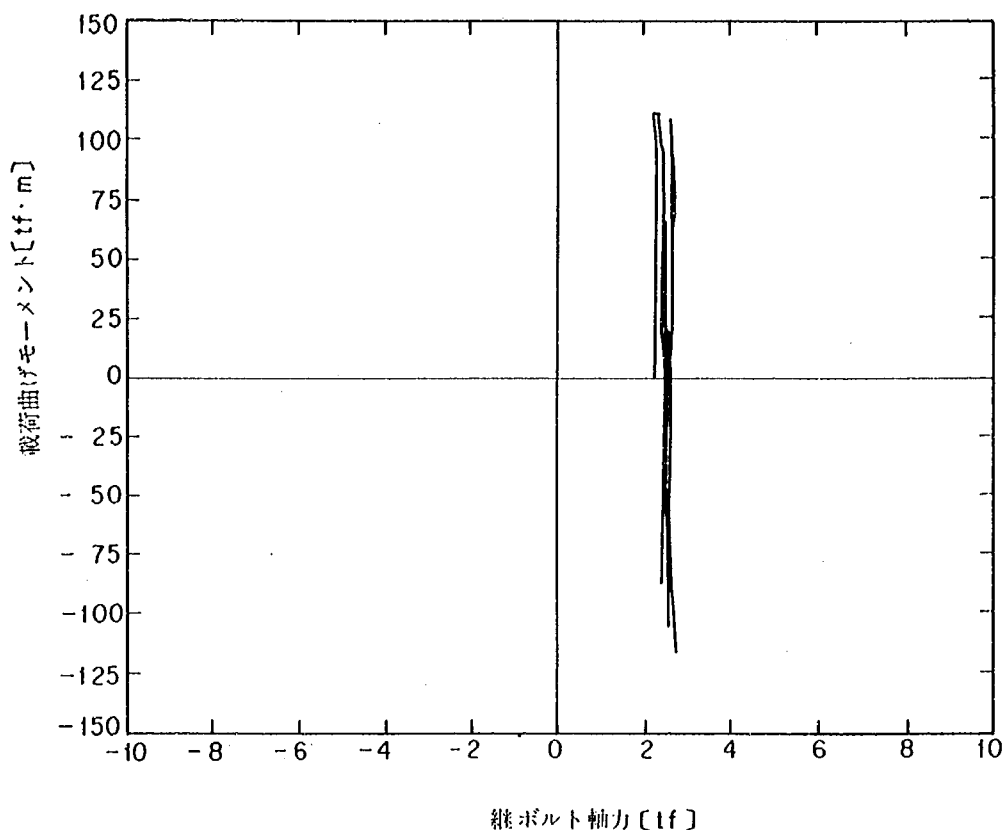


図-2.41 セグメント継ぎボルトの軸力の履歴（B-13）

(7) 二次覆工鉄筋に生じるひずみ

Eタイプ供試体の二次覆工には、図-2.8に示すように、供試体の軸方向に16本、円周方向に12本（ともにD13）の二次覆工鉄筋が配置されている。

載荷にしたがって軸方向の二次覆工鉄筋がどのように挙動しているかを調べるために、リング接合面JT2および反力壁側から3番目のリングの中央（図-2.13参照）における二次覆工鉄筋のひずみの載荷履歴を示した結果を、図-2.42、43にそれぞれ示す。軸方向に配置された二次覆工鉄筋の挙動について以下の点が指摘される。

- 1) リング接合面JT2位置では、二次覆工にクラックが発生すると、それまで二次覆工コンクリートにより負担されていた載荷力の大部分が、二次覆工鉄筋で受け持たれることになるため、急にひずみが増加する。鉄筋のひずみが 1800μ に達した段階で降伏している。

2) リングの中央位置での二次覆工鉄筋のひずみは、正の曲げモーメント（当該箇所には圧縮力が作用）が作用する場合に小さく、負の曲げモーメントが作用する場合に大きくなっており、一次覆工の剛性の違いを反映している。載荷が進行するにしたがって、ひずみが正側に残留するようになるが、これは二次覆工コンクリートと二次覆工鉄筋との付着が、リング接合面位置から徐々に切れていくためと考えられる。

3) リング中央位置での二次覆工鉄筋のうち、リング上下端部付近の二次覆工鉄筋(S-16, S-20)に生じるひずみは、載荷に伴い曲げモーメントの正負に関わらず、常に正側にひずみが残留する傾向にある。これは、供試体の上下端部は常に引張縁となるため、二次覆工鉄筋には常に引張力が作用し、このため、正側の残留ひずみが生じるためである。

つぎに、同じリングの中央断面位置の二次覆工リング筋に生じるひずみを示すと、図-2.44 のようになる。これによれば、全般的に圧縮ひずみが卓越しており、最大で 300μ 程度のひずみが生じている。ただし、軸方向の二次覆工鉄筋に生じるひずみと比較すると、極めて小さいものである。

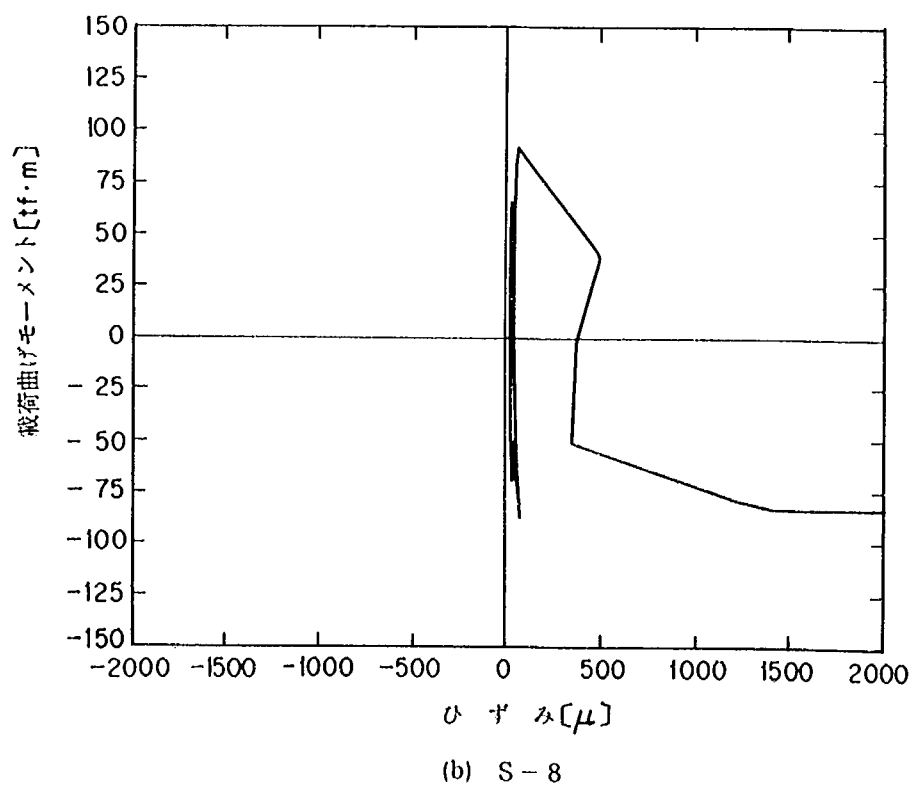
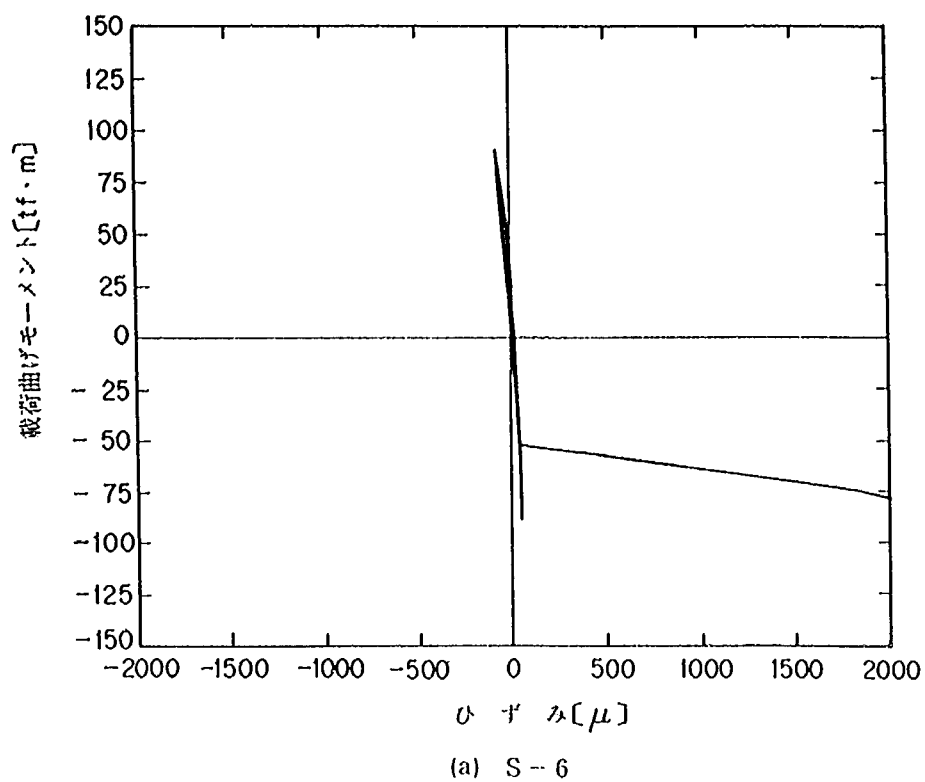
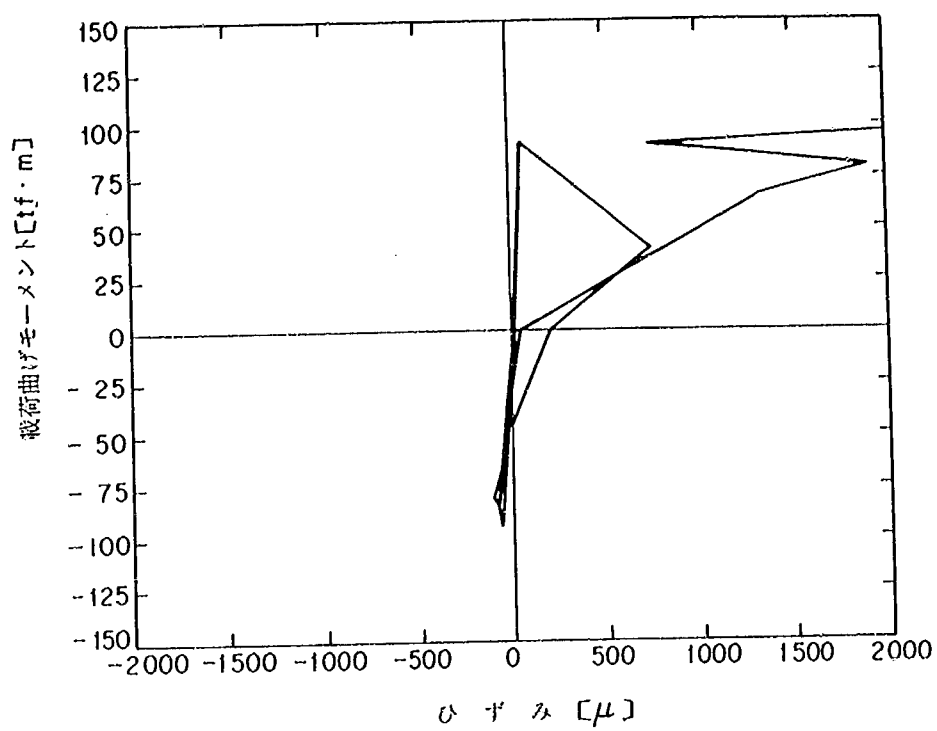
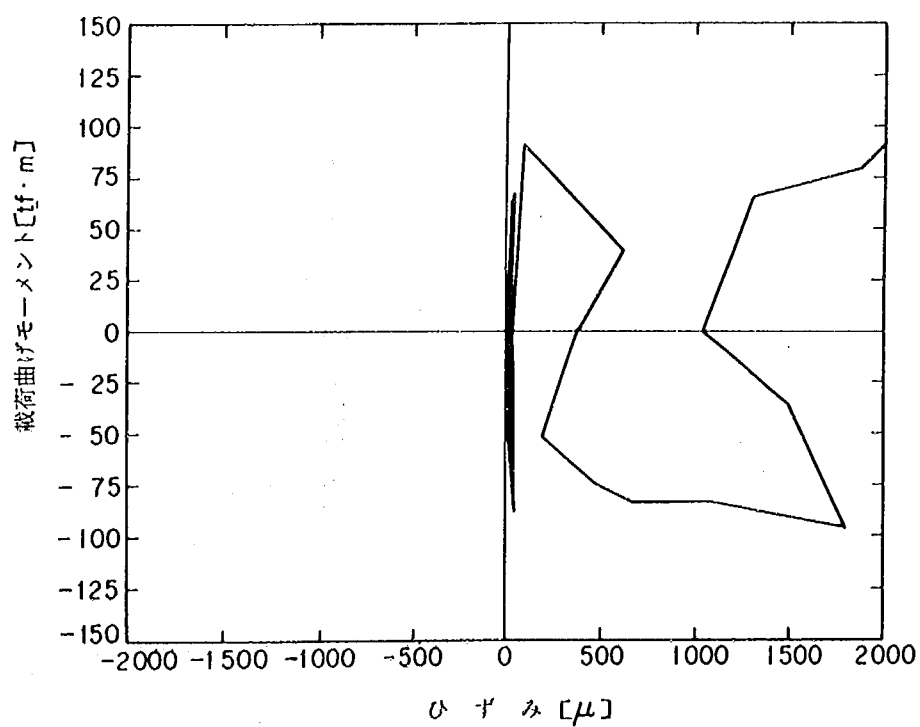


図-2.42 リング接合面 JT2 における二次覆工鉄筋のひずみの履歴 (1)

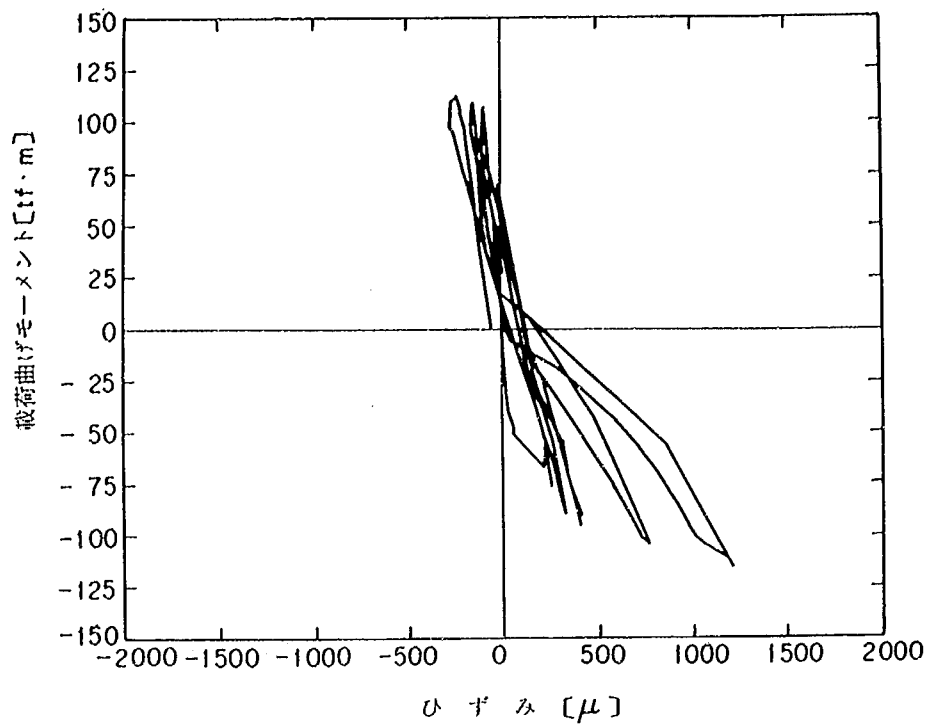


(c) S-10

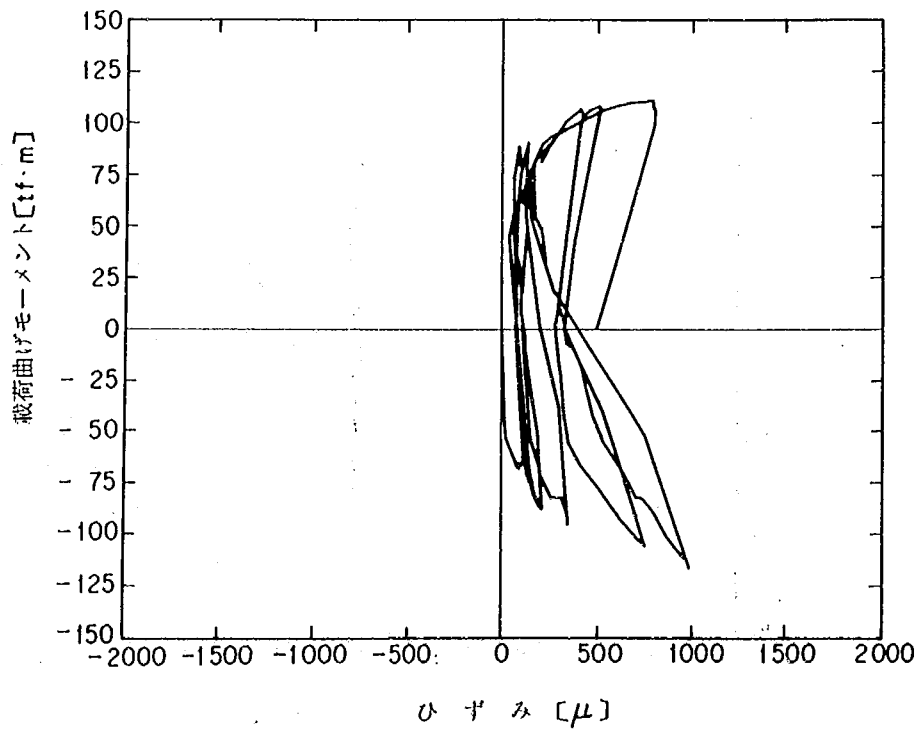


(d) S-12

図- 2.42 リング接合面 JT2 における二次覆工鉄筋のひずみの履歴 (2)

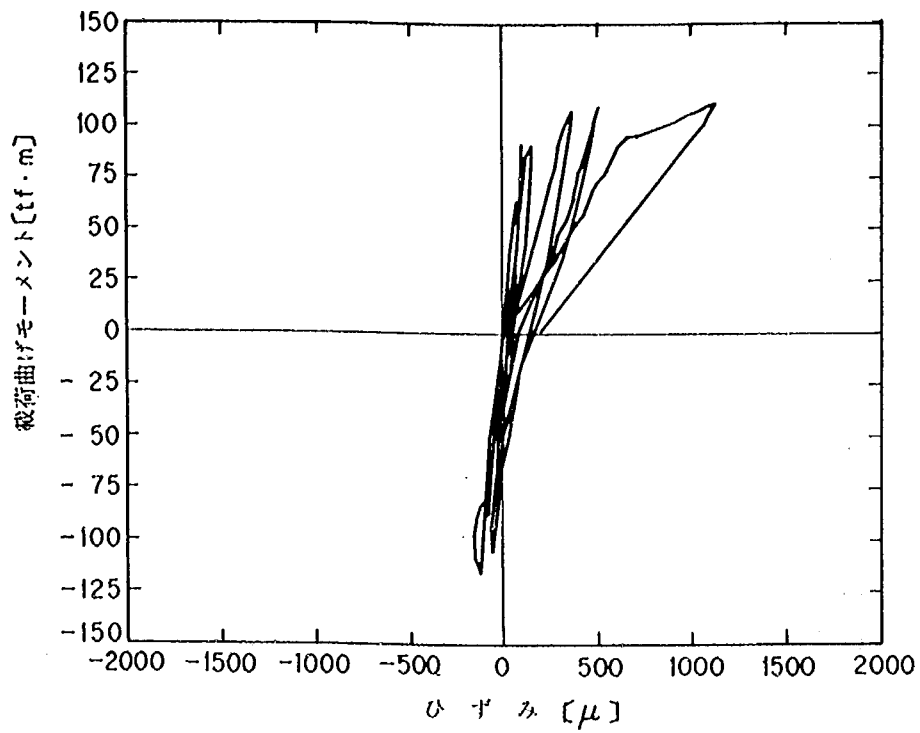


(a) S-14

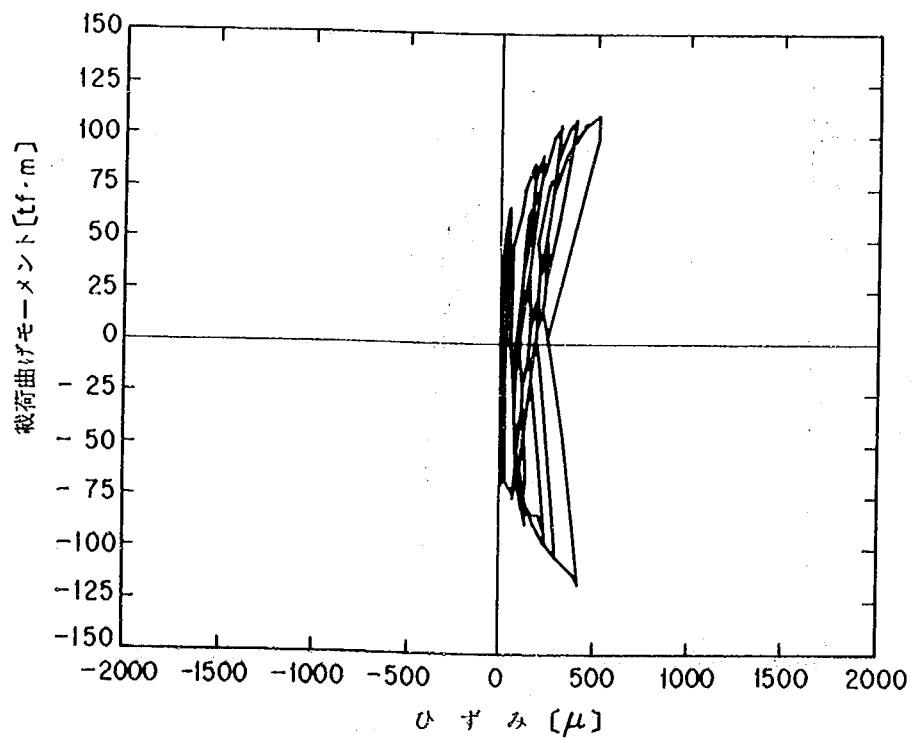


(b) S-16

図-2.43 リングの中央断面位置における二次覆工鉄筋のひずみの履歴(1)



(c) S-18



(d) S-20

図-2.43 リングの中央断面位置における二次覆工鉄筋のひずみの履歴 (2)

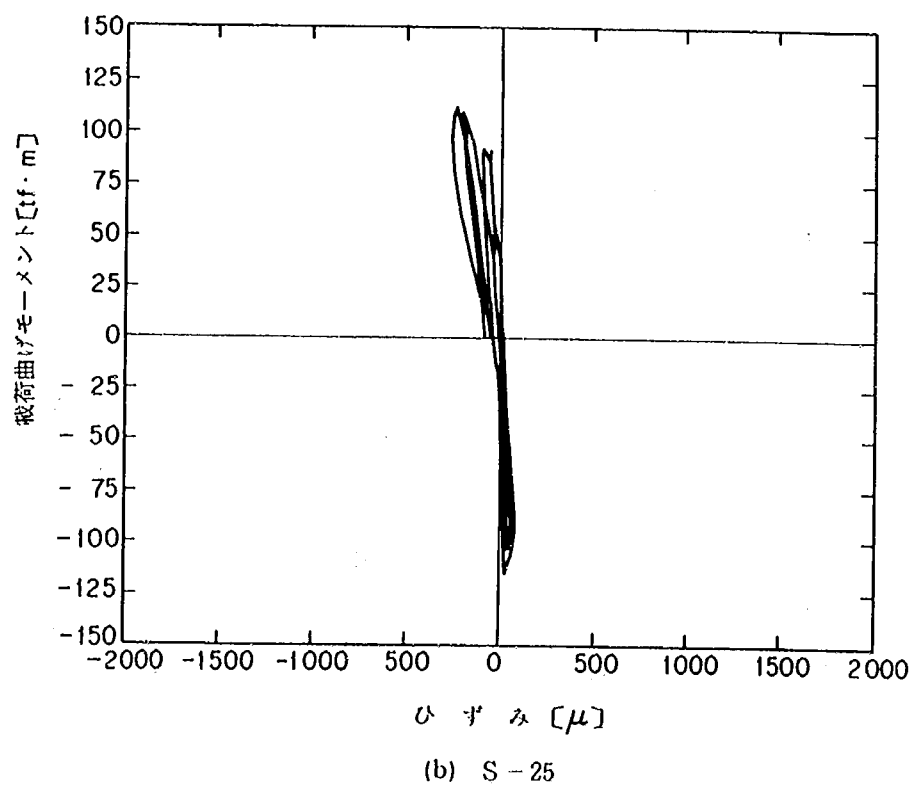
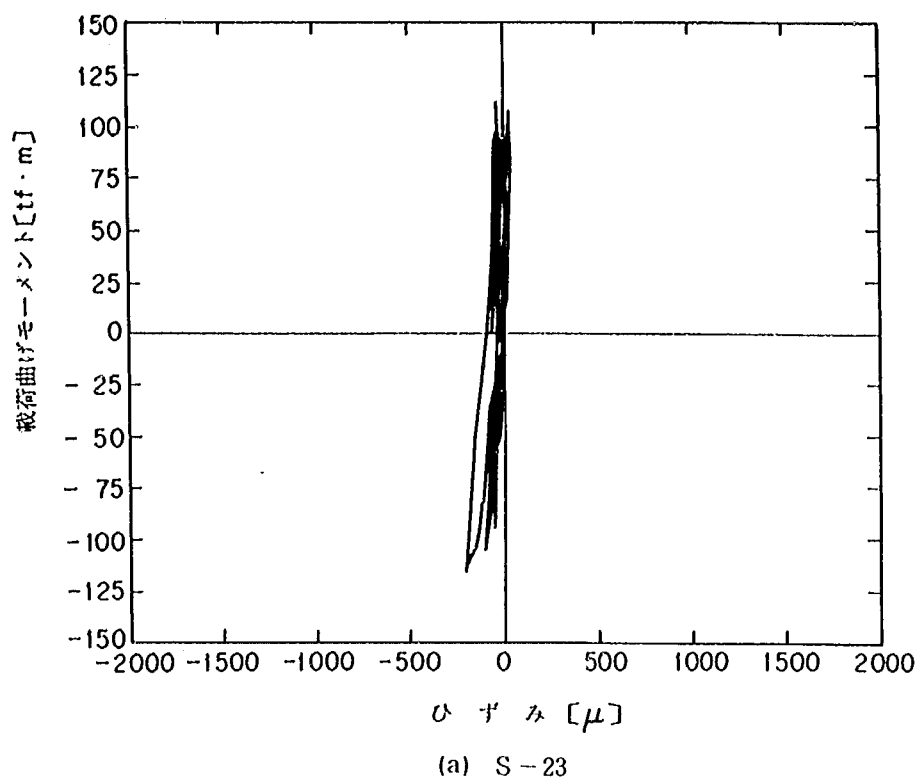


図-2.44 円周方向の二次覆工リング筋に生じるひずみの履歴

2.8 結 論

地震によりシールドトンネルに曲げモーメントが作用した場合の変形特性及び耐力を把握することを目的として、シールドトンネル模型に対する正負交番曲げ载荷実験を実施した。供試体としては、厚さ 125 mm、長さ 900 mm のセグメント 4 個をリング状に組み、これをリング継手により 4 リング連結した D タイプ 供試体、および、これに厚さ 200 mm の鉄筋コンクリート製の二次覆工を施した E タイプ 供試体の 2 種類を用いた。

本実験の結果ならびに検討結果をまとめると以下のとおりである。

1) シールドトンネルの最終的な破壊は、D および E タイプ 供試体ともにリング接合面において生じ、これ以外の部分には損傷が生じなかった。したがって、リング接合面における挙動の把握がシールドトンネルの耐震設計を考える上で最も重要である。

2) D タイプ 供試体の変形、損傷は供試体の曲げ変形の増加にともなって以下の順序で進行した。

- ① リング継手の周辺にクラックが発生
- ② リング継手金具面板の降伏
- ③ リング継手のアンカー鉄筋の降伏
- ④ リング接合面の位置で供試体外周面にクラックが発生
- ⑤ リング継手のアンカー鉄筋の破断

以上の過程において、変形の進行の特徴は以下のとおりである。

i) 上記の③までは、各リング接合面の相対変位はほぼ均等であるが、④以降になると、最初に外周面にクラックが発生したリング接合面 (JT 1) にのみ相対変位が生じ、これ以降このリング接合面に変形、損傷が集中した。

ii) 円周方向のリング継手位置の相対変位は、供試体中立軸を境として引張と圧縮に分けられる。

iii) 供試体の中立軸は、リング継手の損傷の進展にしたがって圧縮縁側に移行する傾向がみられる。

3) E タイプ 供試体の変形、損傷は供試体の曲げ変形の増加にともなって、以下の順序で進展した。

- ① リング接合面位置の二次覆工コンクリートにクラック発生
- ② リング接合面位置の二次覆工鉄筋が降伏
- ③ リング継手金具面板の降伏
- ④ リング接合面位置で供試体の外周面にクラックが発生
- ⑤ リング継手のアンカー鉄筋の降伏
- ⑥ リング継手のアンカー鉄筋の破断

以上の過程において、変形の進行の特徴は以下のとおりである。

i) 上記⑥に至るまで、リング接合面に生じる相対変位は、いずれの箇所においてもほぼ同程度に分散して生じた。これは D タイプ 供試体のように、特定のリング接合面において損傷が集中したものと大きく異なる。

ii) 供試体の中立軸は、各リング接合面のリング継手の損傷にともなって、圧縮縁側に移行する傾

向がみられる。

- 4) 上述した供試体の損傷の進展状況は、Dタイプ供試体及びEタイプ供試体ともに、軸方向に交番載荷を行った場合と同様であり、曲げモーメントを作用させた場合の破壊の進展も、中立軸位置を考慮すれば基本的には軸方向の交番載荷を受ける場合と同じ土俵の上で考えることができる。
- 5) 最終的な供試体の変形を、供試体全体の曲率半径によって比較すると、Dタイプ供試体が180 m程度なのに対して、Eタイプ供試体では約56 m（以上）であり、Eタイプ供試体の方が約3倍（以上）のねばりがある。
- 6) 両供試体ともセグメント継手の損傷はなく、セグメント継手に発生する引張及び圧縮力は、リング継手に比較して小さい。

3. シールドトンネル模型の正負交番ねじり載荷実験

3.1 実験の概要

シールドトンネルが異種構造物と接続する箇所では、構造物間の振動特性の違いから複雑な地震時挙動をとることが予想される。特に立坑との接続部近傍においては、立坑のロッキング振動にともない、シールドトンネルには大きなねじりモーメントが作用することが考えられる。

ここでは、シールドトンネルがねじりモーメントを受けた場合の変形特性および破壊性状を明らかにするために、模型供試体を用いた正負交番ねじり載荷実験を行った結果を示すものである。

3.2 実験供試体

実験に用いた供試体は、外径 1.8 m の鉄筋コンクリートシールドトンネルをモデル化した D タイプ供試体、および、これに二次覆工を施した E タイプ供試体の 2 種類である。これらは、前述した正負交番曲げ載荷実験に用いたのと同じものである。

なお、本供試体には 3 つのリング接合面があるが、本実験では反力床に近い方からそれぞれ JT 1, JT 2, JT 3 と名付けている。また、リング継手およびセグメント継手は、それぞれ 24 個および 32 個、合計 56 個あり、これらを図-3.2 に示すようにナンバリングすることとした。これらのナンバリングは E タイプ供試体についても同様である。

使用コンクリート、配合および養生方法は、2.2 (3) に示した通りである。

D タイプおよび E タイプ供試体のセグメントと E タイプ供試体の二次覆工コンクリートの各々につき、打設毎に圧縮強度の試験用として 1 個、引張強度の試験（割裂試験）用として 1 個の計 2 個の円柱供試体を作成し、強度試験を行った。強度試験により求められた実験当日のコンクリートの圧縮強度、引張強度および弾性係数（割線係数）を示すと表-3.1 の通りである。

継ボルトの締め付けは許容応力度の 80% に相当する約 4.7 tf を目標にして、ボックスレンチを用いて人力で行った。D タイプ供試体においては、載荷実験の直前に締め付け力の確認を行ったところ 4.7 tf からの低下が激しかったため、増し締めをした。この結果、D タイプ供試体におけるボルトの初期軸力は表-3.2(a) に示す値となっている。また、E タイプ供試体では、二次覆工を打設した後は増し締めが行えないため、実験直前の締め付け力示すと表-3.2(b) のようにリング継手では 3.64 ～ 5.52 tf とばらついている。ただし、これらの平均値はほぼ 4.7 tf 程度となっている。

3.3 実験に用いた施設および装置

実験は、建設省土木研究所部材耐震強度実験施設において実施した。図-3.3 および写真-3.1 は実験時の載荷方法を示したものである。供試体は架台を介して反力床上に立てた状態で固定し、上端には載荷板を取り付けた。載荷板の両端には各々動的加振機を接続し、2 台の動的加振機をデジタルの荷重制御で逆位相で操作することにより、供試体に正負交番の純ねじりモーメントを作用させた。

実際にシールドトンネルが地震力を受ける場合には、ねじりモーメントとともに、いくらかの軸力（トンネル長手方向力）を同時に受けることが予想される。本実験ではトンネル長手方向にはねじり載荷板の重量約5 tf が作用しているだけであり、これ以外の軸力を付加していない。したがって、軸力の大きさがトンネルのねじり変形特性に及ぼす影響については、別途検討が必要である。

3.4 計 測

計測は、トンネル4リングのうち中間の2リングを中心にA～Gの7断面で行った。ここに計測器の配置は、セグメントの挙動を把握することに重点をおいて、図-3.4に示すセグメントに多く配置した。

計測項目を計測断面ごとに整理すると表-3.3および図-3.5のようになる。Dタイプ供試体の計器配置は全てEタイプ供試体の計器配置に含まれている。

3.5 載荷条件

(1) Dタイプ供試体

載荷パターンを示すと図-3.6の通りである。なお、ここでねじりモーメントの方向は、加振機No.1が正の荷重の場合を正のねじりモーメントとし、逆に加振器No.2が正の荷重の場合を負のねじりモーメントとする。

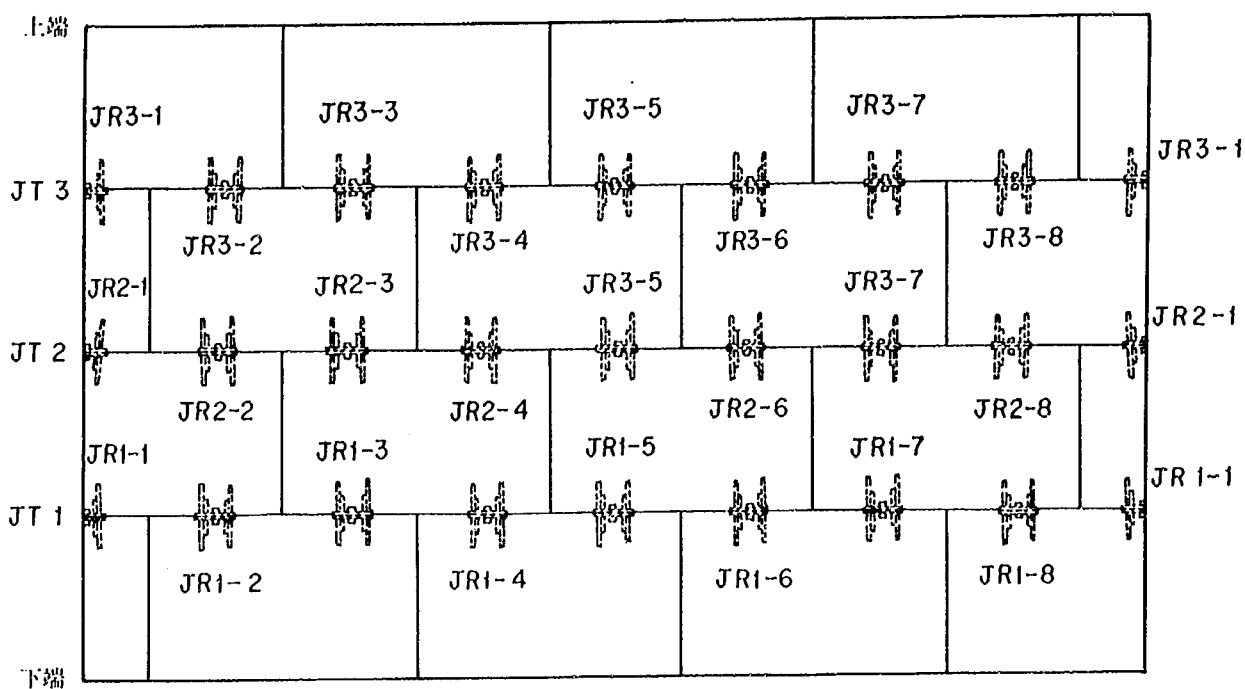
なお、以降の実験結果の整理では特にことわらない限り、変位は供試体の上端に設置した2個の接線方向の変位計による変位の平均値を、また、ねじりモーメントは加振機の載荷ロードに貼付したひずみゲージにより検出した軸力に加振機間の距離（モーメント長）3.0 mを乗じた値を示すものとする。

(2) Eタイプ供試体

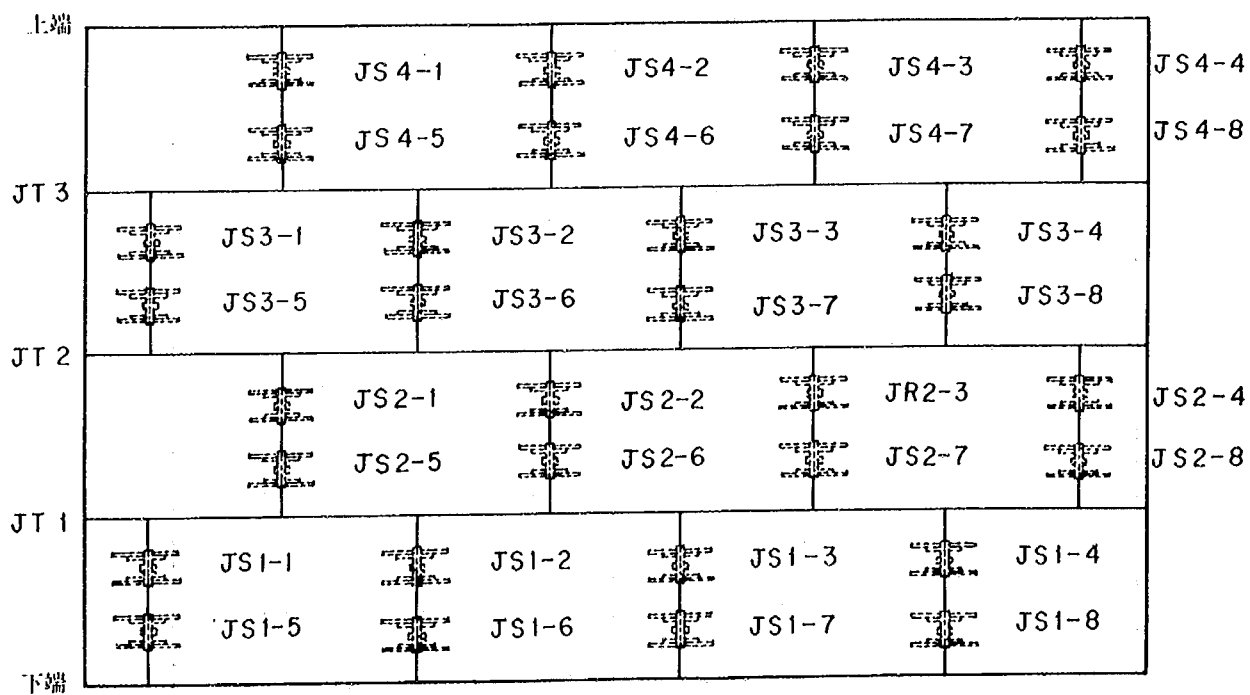
基本的にDタイプ供試体と同様の載荷方法を用いて、図-3.7に示すような正負交番載荷を行った。

二次覆工のあるEタイプ供試体では、正と負の載荷で、それぞれ二次覆工にクラックを生じさせた後、供試体の破壊まで正負交番でねじりモーメントを加えることとした。

なお、Dタイプ供試体、Eタイプ供試体ともに、載荷装置と供試体とのなじみを得ることを目的として、予備的に±1 tf・m程度の正負交番載荷を行うこととした。



(a) リング継手



(b) セグメント継手

図- 3.2 継手のナンバリング (展開図)

表-3.1 コンクリートの強度試験結果

供 試 体	テスト ピース No	圧 縮 強 度 σ_c (kgf/cm ²)	引 張 強 度 σ_t (kgf/cm ²)	ヤ ン グ 率 (割線係数) E (kgf/cm ²)
D タイプ セグメント	No 1	596	48.1	3.67×10^5
	No 2	614	54.8	3.71×10^5
	No 3	538	46.0	3.57×10^5
	No 4	588	49.2	3.59×10^5
	No 5	624	51.1	4.23×10^5
	No 6	615	43.9	3.72×10^5
	No 7	512	41.0	3.66×10^5
	No 8	560	41.4	3.22×10^5
平 均		580.9	46.9	3.67×10^5
E タイプ セグメント	No 1	580	46.4	3.96×10^5
	No 2	615	49.5	3.48×10^5
	No 3	619	46.4	3.74×10^5
	No 4	624	55.7	3.83×10^5
	No 5	619	49.5	3.66×10^5
	No 6	607	48.5	3.81×10^5
	No 7	594	45.0	3.71×10^5
	No 8	628	56.0	4.16×10^5
平 均		610.8	49.6	3.79×10^5
二 次 覆 工	No 1	291	29.3	2.75×10^5
	No 2	289	25.8	2.40×10^5
	No 3	288	23.6	2.79×10^5
平 均		289.3	26.2	2.65×10^5

表－ 3.2 (a) ボルトの初期軸力 (Dタイプ供試体)

① リング継ボルト

リング接合面	ボルト No	初期軸力 (tf)
J T 1	B - 1	4.42
J T 2	B - 2	4.65
	B - 3	4.29
J T 3	B - 4	4.78
	B - 5	5.00
平 均		4.63
標 準 偏 差		0.25

注) ボルト No は図 - 3.5 参照

② セグメント継ボルト

ボルト No	初期軸力 (tf)
B - 6	4.12
B - 7	4.31
B - 8	4.30
B - 9	4.36
平 均	2.21
標 準 偏 差	3.66

注) ボルト No は図 - 3.5 参照

表－ 3.2 (b) ボルトの初期軸力 (Eタイプ供試体)

① リング継ボルト

リング接合面	ボルト No	初期軸力 (tf)
J T 1	B - 1	4.67
J T 2	B - 2	3.64
J T 3	B - 4	5.52
	B - 5	5.42
平 均		4.81
標 準 偏 差		0.75

注) ボルト No は図 - 3.5 参照

② セグメント継ボルト

ボルト No	初期軸力 (tf)
B - 7	5.18
B - 8	3.09
B - 9	5.07
平 均	4.45
標 準 偏 差	0.96

注) ボルト No は図 - 3.5 参照

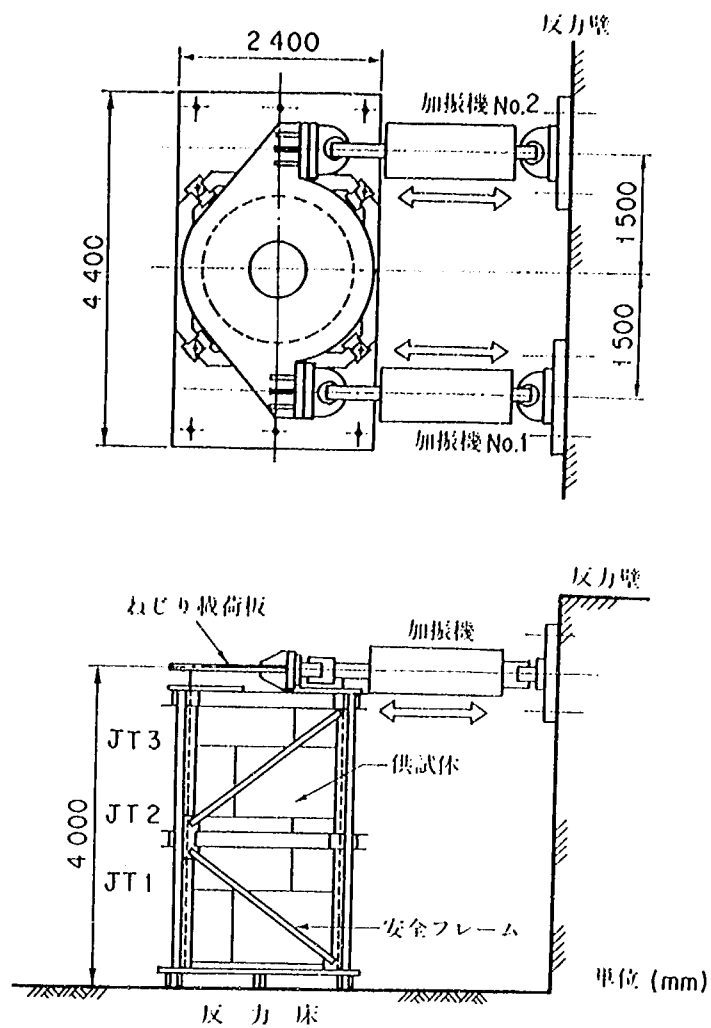


図- 3.3 載荷方法

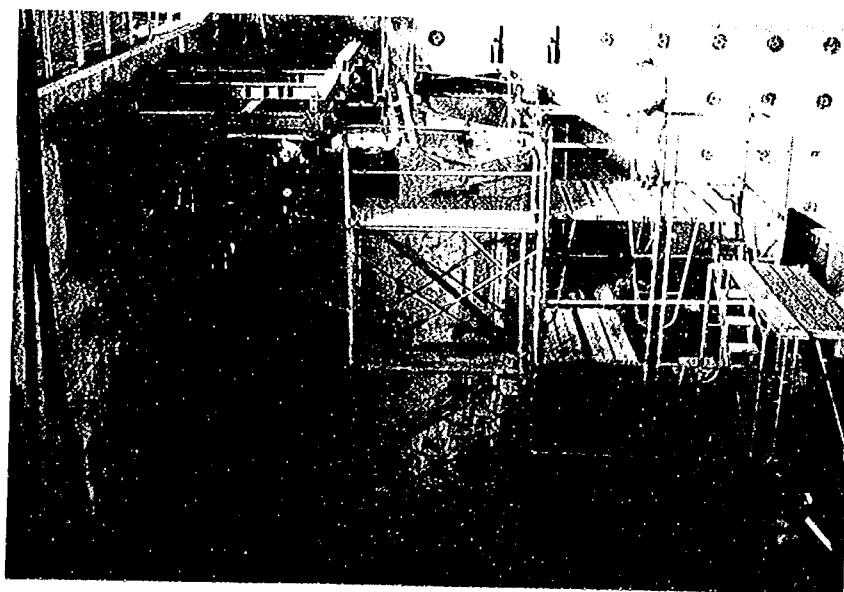
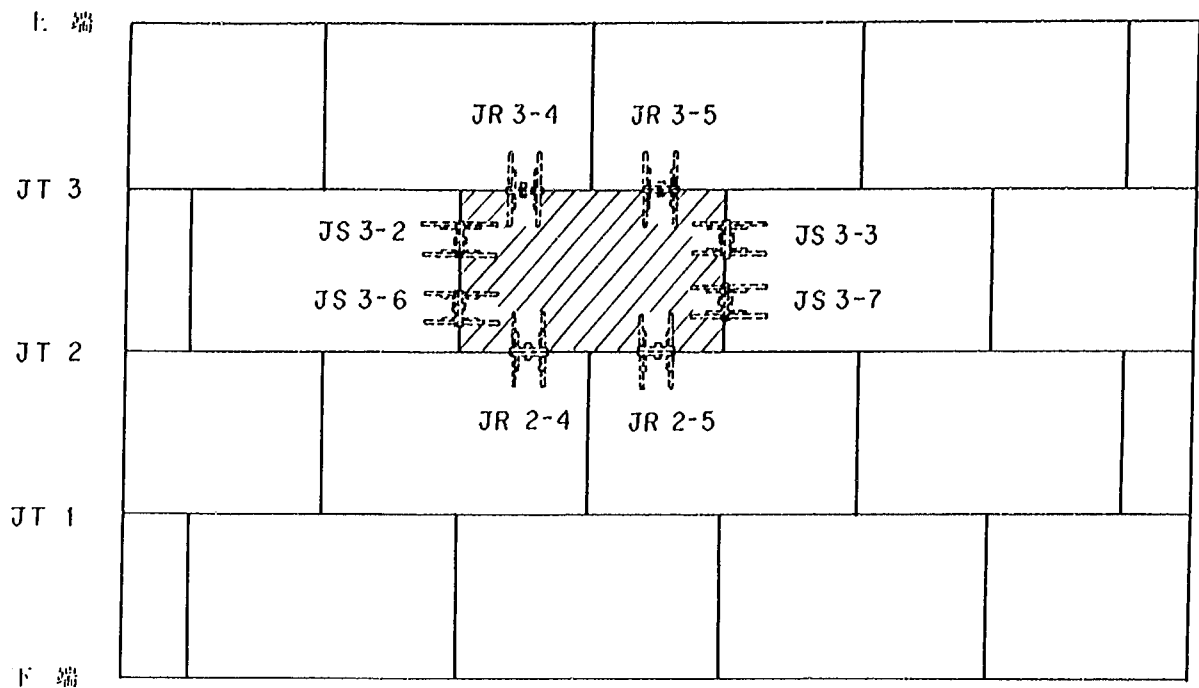


写真- 3.1 載荷方法



図－ 3.4 着目したセグメント (展開図)

表－ 3.3 計測項目

	計 測 項 目	記 号	A	B	C	D	E	F	G	計
加振機	加 振 機 の 載 荷 荷 重	LOAD-1, 2								2
セグメント	リング継ボルトのひずみ	B-1～5		1	2			2		5
	リングの半径方向絶対変位	DR-1, 2							2	2
	リングの円周方向絶対変位	DT-1, 2							2	2
	リングの長手方向絶対変位	DL-1, 2							2	2
	セグメント継ボルトのひずみ	B-6～9				2	2			4
	リング継手の円周方向相対変位	D-1～9	1	2	3			3		9
	リング継手の長手方向相対変位	D-10～17		2	3			3		8
	セグメント継手長手方向相対変位	D-18～19				2				2
	セグメント継手円周方向相対変位	D-20～23				2	2			4
合 計			1	5	8	6	4	8	6	38

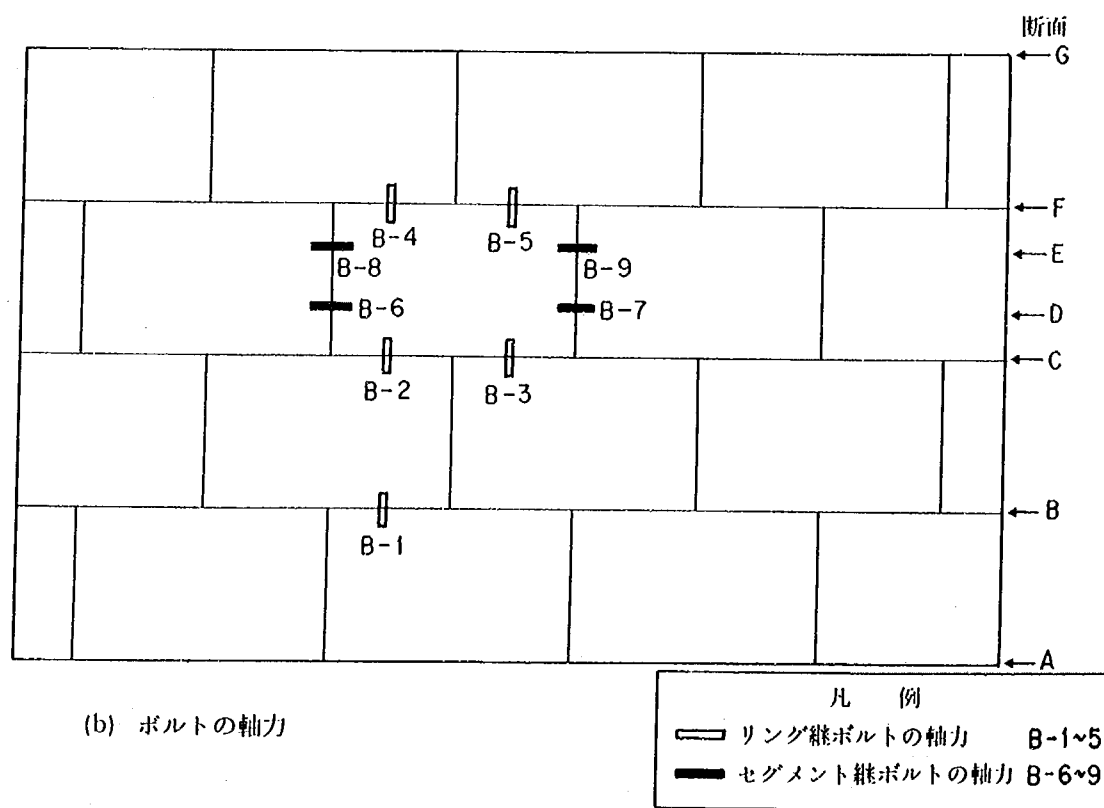
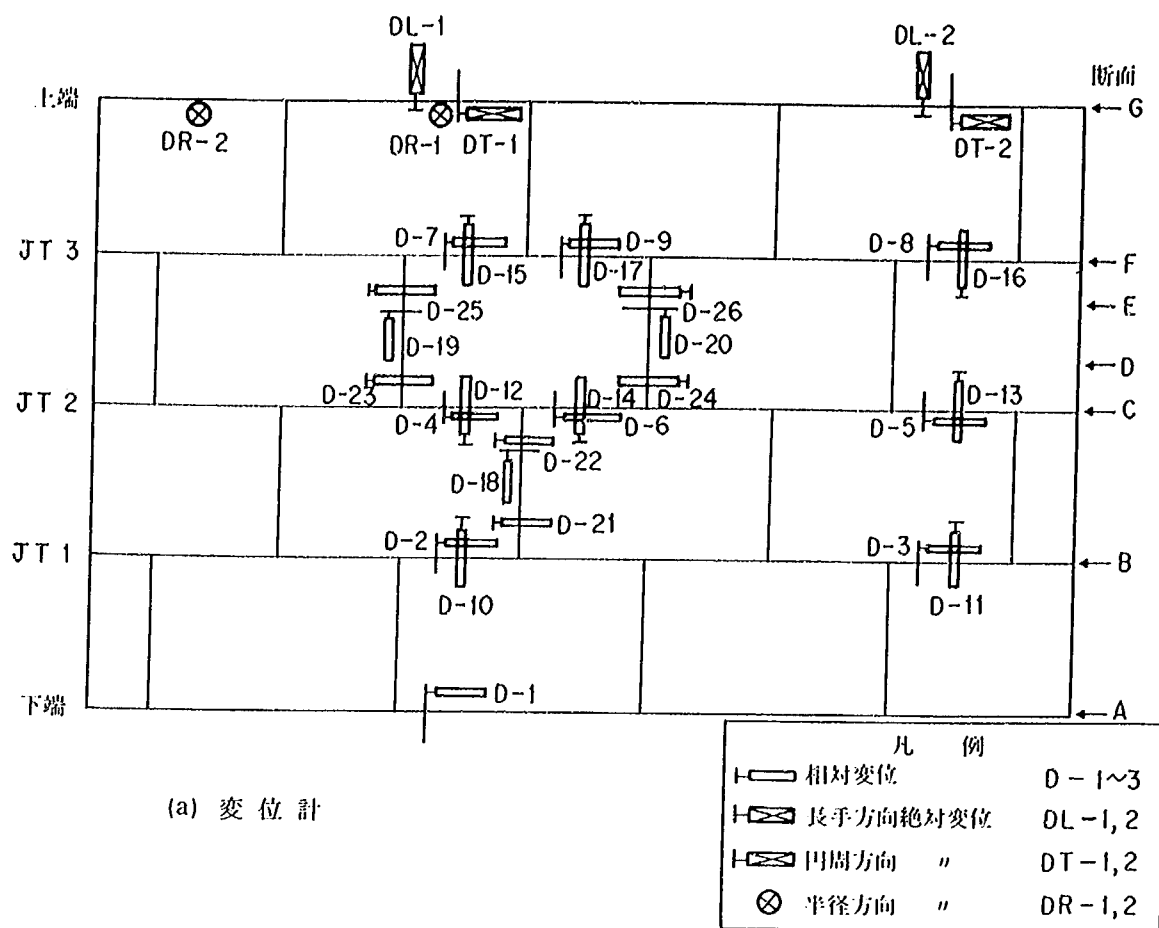


図-3.5 計測器配置図

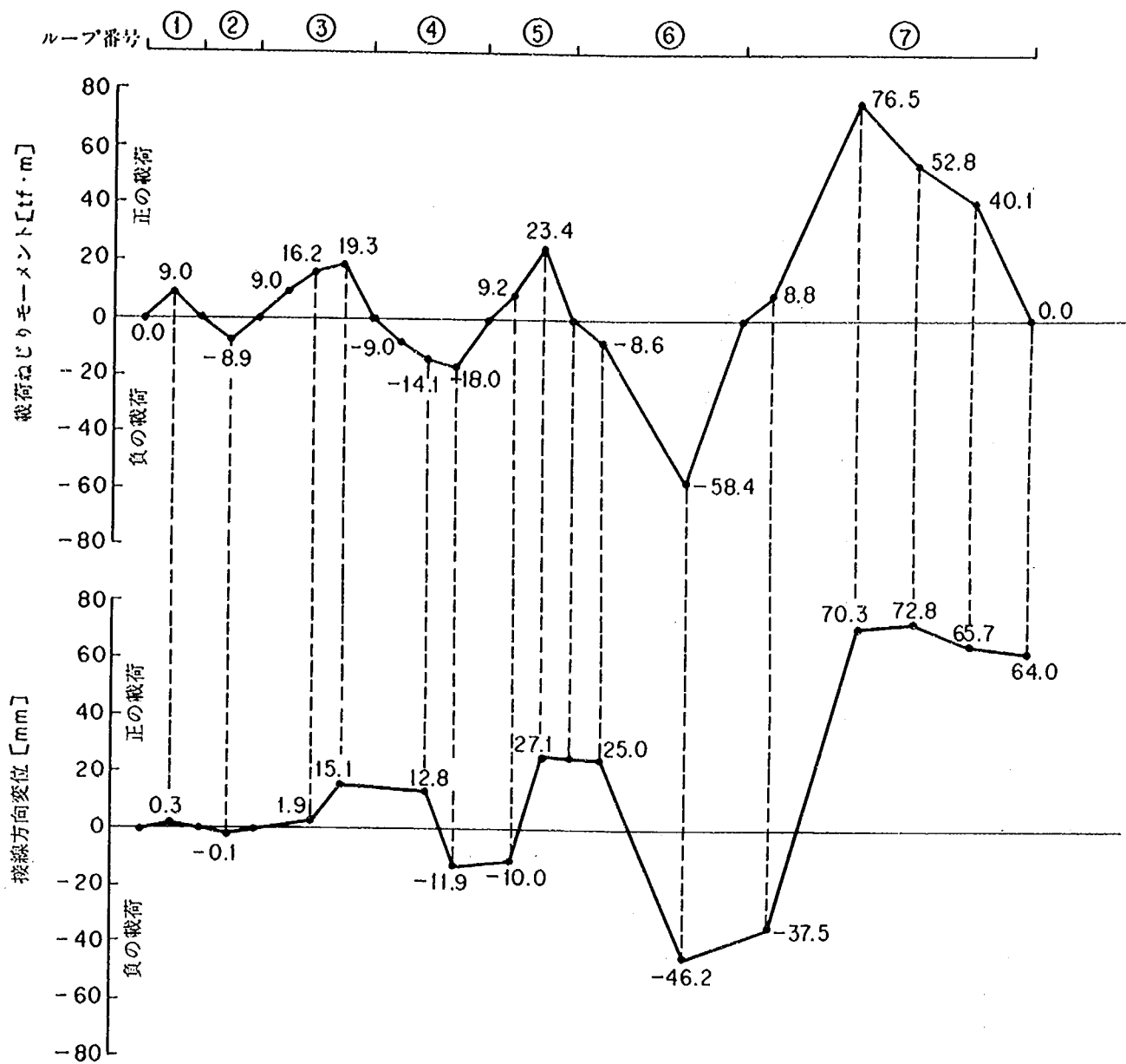


図- 3.6 Dタイプ供試体に用いた载荷パターン

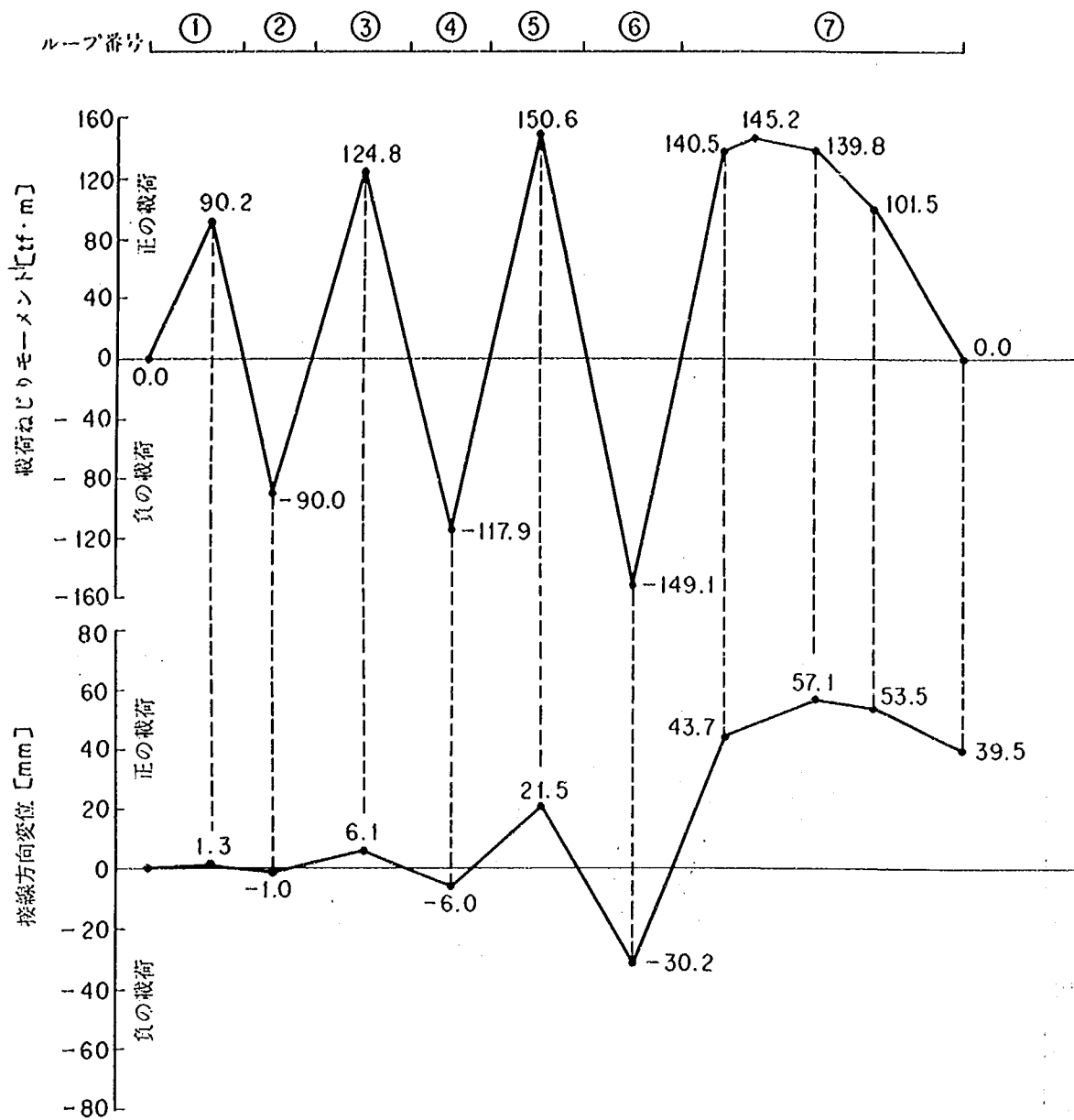


図-3.7 Eタイプ供試体を用いた載荷パターン

3.6 二次覆工のない場合の変形および破壊特性

(1) 破壊の進展状況

載荷にともない、リング継手およびセグメント継手を中心として、トンネルの内外面に多数のクラックが発生し、やがて、リング継手のアンカー鉄筋および継ボルトの破断により最終的な破壊に至った。表-3.4に破壊の進展状況を示す。

載荷途中および載荷終了時のクラックの発生状況を供試体の内側から見ると図-3.8の通りである。また、これと同じ状況を供試体の外側から見ると図-3.9の通りである。

載荷にともなう供試体の破壊の進展状況は以下のようである。

- ① (1ループ目) 初期状態からピーク荷重の9.0 tf・mに至るまで、供試体にはなんら変化は認められなかった。
 - ② (2ループ目) ピーク荷重-9.0 tf・mに至るまで、供試体にはなんら変化が認められなかった。
 - ③ (3ループ目) 荷重16.2 tf・m、変位1.85 mmに至った時、リング接合面JT3で滑りが生じた。わずかに荷重を増加させようとする、リング接合面JT3が滑ることによって荷重はほぼ16.2 tf・mに保たれ、結局、変位が8.9 mmに至った時、リング接合面JT2でも滑りが生じた。この後はJT2とJT3が滑り続けたが、変位が15.1 mmになると、荷重を19.3 tfまで増加させてももはや滑りは生じなかった。なお、リング接合面JT1では滑りは生じていない。
 - ④ (4ループ目) 荷重-14.1 tf・m、変位12.8 mmに至った時、リング接合面JT3で滑りが生じた。変位が2.4 mmに至るとJT2でも滑りが生じた。変位が-11.9 mmになると、荷重を-18.0 tfまで増加させてももはや滑りは生じなかった。なお、リング接合面JT1では滑りが生じていない。
 - ⑤ (5ループ目) 荷重23.0 tf・m、変位18.42 mmに至った時、リング接合面JT1でも滑りが生じた。さらに、荷重23.4 tf・m、変位27.1 mmに至った段階で、リング継手の定着板端部からリング接合面に向かう微細なクラックが生じた。
 - ⑥ (6ループ目) 荷重-58.4 tf・m、変位-46.2 mmに至った時、図-3.8(a)に見られるような、リング継手位置からセグメント継手位置に向かう大きな斜め引張クラックが生じた。このクラックは、セグメントを貫通して、供試体の外側でも認められた(図-3.9(a)参照)。
 - ⑦ (7ループ目) 荷重69.0 tf・m、変位61.0 mmに至った段階で、まずリング継手JR2-5(図-3.2参照)のアンカー鉄筋が破断した。さらに、荷重を増加させるにつれて、リング継手JR2-1、JR2-3およびJR2-7のアンカー鉄筋が相次いで破断した。荷重64.6 tf・m、変位71.5 tfに至った段階では、リング継手位置を中心として、供試体外面のコンクリートが剥離を開始し、リング継手JR2-4の継ボルトが破断して最終状況に至った(図-3.8(b)、図-3.9(b)参照)。
- 以上がDタイプ供試体の破壊の進展状況である。これにより、以下の点が指摘される。
- a) リング接合面の滑りは荷重を増加させるにつれて、JT3 JT2, JT1の順番で生じた。これは供試体の下方にいくほど、供試体の自重が上載圧に加わり、リング接合面の摩擦抵抗が増加す

るためと考えられる。

- b) 供試体の破壊はリング継手の周辺にとどまらず、全体にわたって生じた。これは、供試体に加えられたねじり変形は、当初リング接合面が滑ることによって吸収されるが、変形が大きくなってリング接合面の滑りだけで吸収できなくなった後は、セグメントの回転が生じるためである。すなわち、個々のセグメントはリング継手およびセグメント継手によって拘束されているために、せん断変形を強制され、セグメントには斜め引張クラックが生じることになる。

次に、アンカー鉄筋の破断やリング継ボルトの破断が生じたリング接合面 JT2 について、代表して 2 つのリング継手の損傷状況を示すと図- 3. 10 の通りである。リング接合面 JT1 および JT3 におけるリング継手の損傷状況も似通ったものである。

図- 3. 10 によれば、リング継手の損傷状況に関して以下の点が指摘される。

- a) リング継手の変形状況は 2 つのタイプに分けることができる。1 つめは、図- 3. 10(a) に示すタイプで、向かい合った継手金具がせん断変形と引張変形を同時に生じるものであり、このタイプでは継手金具面板が“く”の字状に変形している。2 つめは、図- 3. 10(b) に示すタイプで、向かい合った継手金具がせん断変形だけを生じているものである。アンカー鉄筋の破断は全て 1 つめのタイプの継手で、また、継ボルトの破断は 2 つめのタイプの継手において、それぞれ生じている点が注目される。
- b) a) に示した 2 つのタイプの変形状況は、供試体全体からみると、ある一定の規則で現われている。例えば 1 つめのタイプの変形を生じたリング継手の位置を図- 3. 11 に示すが、これによれば同一のリング接合面内では 1 つおきにこのタイプの損傷が生じていることがわかる。これは、セグメントが回転することによって、図- 3. 12 に示すようにセグメントの同一辺上にある 2 つのリング継手の、一方が向かいのセグメントに押しつけられ、もう一方が向かいのセグメントから離されるためである。
- c) リング継手のアンカー鉄筋は、定着板の端部位置において破断している。これは、継手金具面板が“く”の字状に変形し、定着板がボルトボックス内に折り曲げられた結果、アンカー鉄筋には引張力および曲げモーメントが同時に作用したためである。このような継手の破壊形状は、正負交番軸力⁶⁾ 軸力⁷⁾ 実験^{6) 7)} および、正負交番曲げ⁶⁾ 軸力⁷⁾ 実験^{6) 7)} でも生じており、継手が引張力を受けて破壊する場合の特徴である。基本的に継手金具面板の変形を抑えることが、アンカー鉄筋の破断を防止し、トンネルの耐力を増加させる上で有効と考えられる。
- d) リング継手 JR2-4 の継ボルトは、ほぼ純粋なせん断変形で破断している。ボルトの破断が生じたのは JR2-4 のみであるが、この継手は図- 3. 10(b) に示したようにせん断変形のみを生じた継手である。このタイプの継手では、アンカー鉄筋がほとんど変形することなく、全ての変形は継ボルトに集中するものと考えられる。また、JR2-4 を除くと、せん断変形のみを生じたタイプの継手は、最後までアンカー鉄筋および継ボルトが破断していないが、これらについても、さらに载荷を続ければやがてボルトが破断したと想像される。

(2) 供試体全体の変形特性

供試体全体のねじり変形量と載荷ねじりモーメントとの関係を検討するために、供試体上端に取り付けた円周方向の変位計による変位と載荷ねじりモーメントとの履歴を示すと図-3.13のようになる。

これによれば、最大荷重は正の載荷時（7ループ目）に生じた $76.5 \text{ tf} \cdot \text{m}$ であり、この時の変位は 70.3 mm である。ここに至るまでにすでにリング継手 JR 2-5 のアンカー鉄筋は破断している。その後、JR 2-5 以外のリング継手においてもアンカー鉄筋の破断やリング継ボルトの破断が始まり、また供試体の外面でコンクリートの剥離が生じ、リング継手およびセグメントの耐力が低下するのにもとない、供試体としての耐力も低下した。

(3) 継手の挙動特性

1) リング継手

本実験では、特定のセグメントの挙動に着目した計測を行っている（図-3.4 参照）。このセグメントについて、リング継手 JR 3-4、および、JR 3-5（図-3.2 参照）に生じた供試体長手方向の相対変位の載荷履歴を示すと図-3.14 の通りである。

図-3.14 によれば、リング継手 JR 3-4 における相対変位は 6 ループ目（負の載荷）まではほとんど生じていないが、7 ループ目（正の載荷）になると、荷重が $35 \text{ tf} \cdot \text{m}$ 程度になった段階から徐々に生じ始め、荷重が $76.5 \text{ tf} \cdot \text{m}$ になった段階では約 8 mm に達している。また、リング継手 JR 3-5 における相対変位は、6 ループ目（負の載荷）で約 2.5 mm 生じているものの、7 ループ目ではほとんど生じていない。したがって、リング継手 JR 3-4 は正の載荷時に、また、リング継手 JR 3-5 は負の載荷時に供試体長手方向の引張力を受けていたことがわかる。

2) セグメント継手

セグメント継手 JS 3-7、および、JS 3-3（図-3.2 参照）に生じた供試体円周方向の相対変位の載荷履歴を示すと図-3.15 の通りである。

図-3.15 によれば、セグメント継手 JS 3-7 では 6 ループ目（負の載荷）にわずかな負の相対変位が生じているものの、これを除けば、全ての載荷過程を通じて相対変位は生じていない。また、セグメント継手 JS 3-3 における相対変位は、6 ループ目までは生じていないが、7 ループ目（正の載荷）になると、荷重が 35 tf 程度になった段階から徐々に生じ初め、 76.5 tf になった段階では約 1.2 mm に達している。したがって、セグメント継手 JS 3-3 は正の載荷時に供試体円周方向の引張力を受けていたことがわかる。

ここに、リング継手 JR 2-4 とセグメント継手 JS 3-7 に生じた相対変位量を比較すると、約 7 倍ほど JR 2-4 の方が大きい。これは、リング継手の方が金具面板の厚さが薄く、アンカー鉄筋の本数もセグメント継手の 4 本に対して 2 本であるなど（図-2.4 参照）、継手としての剛性が小さく、変形しやすいためであると考えられる。

(4) リング接合面の相対変位

1) 供試体長手方向

リング接合面 JT 1 ～ 3 に生じた供試体長手方向の相対変位が、荷重にともなって、どのように変化しているかを検討するために、リング継手 JR 1-4, JR 2-5, および, JR 3-4 (図-3.2 参照) に生じた相対変位の荷重履歴を比較して示すと図-3.16 の通りである。なお、ここに挙げた 3 つのリング継手は、いずれも正の荷重時に引張力を受けたタイプの継手である。

図-3.17 によれば、以下の点が指摘される。

- a) 初期状態から 5 ループ目 (正の荷重) までは、いずれのリング継手においても相対変位は生じていない。
- b) 6 ループ目 (負の荷重) では、リング継手 JR 1-4 で 2 mm 程度の相対変位が生じているが他のリング継手ではなんら相対変位は生じていない。
- c) 7 ループ目 (正の荷重) に至ると、リング継手 JR 1-4, JR 2-5, および, JR 3-4 でそれぞれ約 6.0 mm, 12.0 mm, および, 7.0 mm の相対変位が生じた。

以上の結果によれば、3 つのリング接合面に生じた供試体長手方向の相対変位は、正の荷重および負の荷重に対して同じように変化していることがわかる。また、リング接合面 JT 2 には、他のリング接合面より大きめの相対変位が生じているが、相対変位が JT 2 だけに集中しているわけではなく、3箇所^{6) 7)}のリング接合面に分散して生じていることがわかる。これは、これまでに行った正負交番軸力荷重実験および正負交番曲げ荷重実験において、二次覆工のない供試体では相対変位が全て 1 つのリング接合面に集中したのと大きく異なるものである。

リング接合面 JT 2 の相対変位が他よりも大きくなった理由としては、次の点を挙げる事ができる。すなわち、リング接合面 JT 1 および JT 3 では、向かい合うセグメントの 2 辺のうち 1 辺は、荷重装置で固定されているため、供試体の長手方向に自由に動くことができないのに対し、リング接合面 JT 2 では、セグメントの向かい合う 2 辺がともに自由に動くことができ、JT 1 および JT 2 に比較して変位を生じやすかったためである。

2) 供試体円周方向

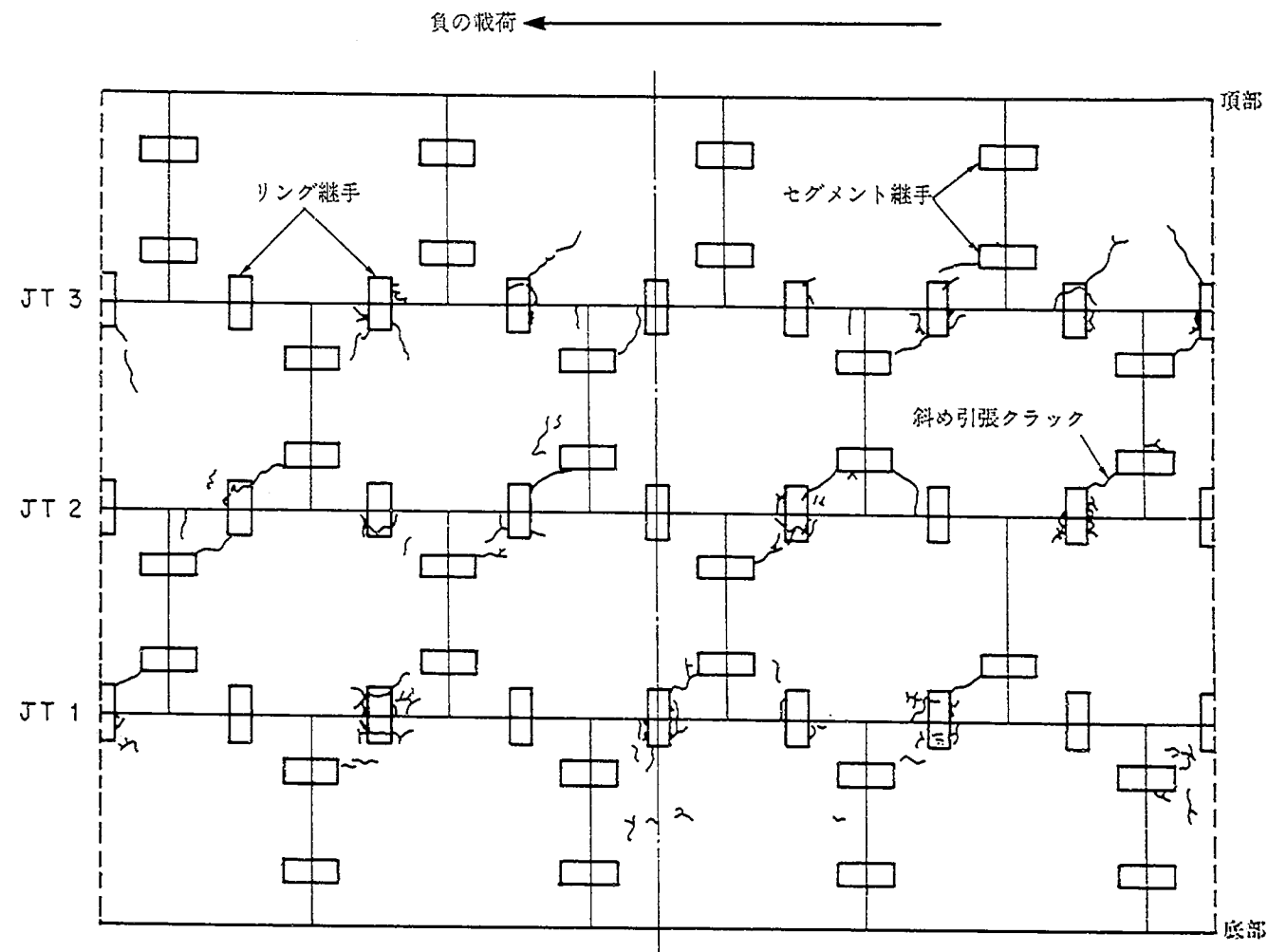
リング接合面 JT 1 ～ JT 3 に生じた供試体円周方向の相対変位が、荷重にともなってどのように変化しているかを検討するために、上記 1) と同じリング継手 JR 1-4, JR 2-5, および, JR 3-4 に生じた供試体円周方向の相対変位の荷重履歴を比較して示すと図-3.17 の通りである。

図-3.17 によれば、リング継手 JR 1-4, JR 2-5, および, JR 3-4 に生じた供試体円周方向の相対変位は、正の荷重および負の荷重に対してほぼ同じように変化しており、7 ループ目 (正の荷重) ではそれぞれ、11 mm, 13 mm, および, 11 mm 程度となっている。リング接合面 JT 2 では、1) と同様に、JT 1 および JT 3 よりも大きな相対変位が生じていることになるが、JT 2 に集中してゐるわけではなく、3箇所^{6) 7)}のリング接合面に分散して生じている。

表- 3.4 破壊の進展状況

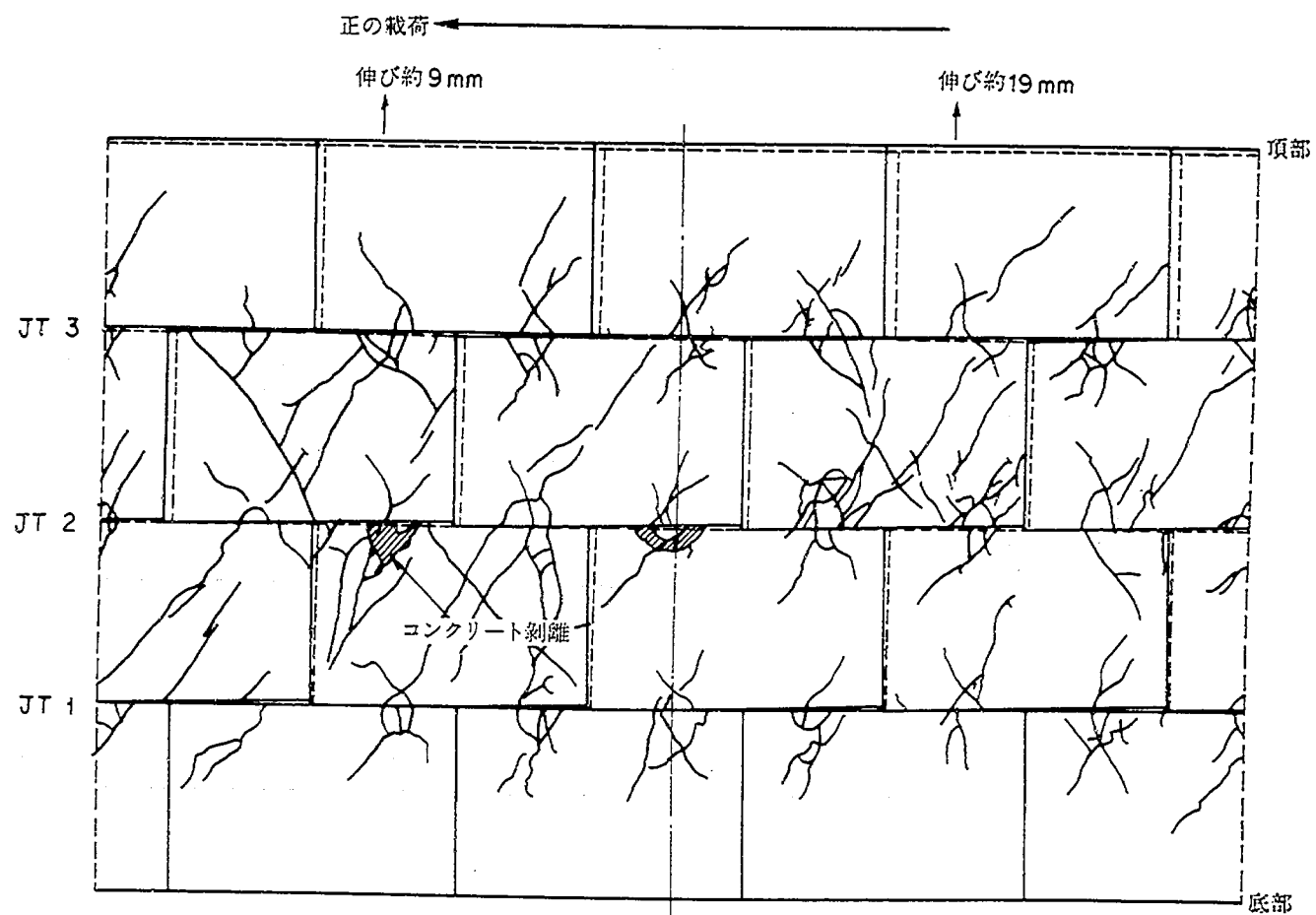
載荷 ループ 番号	載 荷 ステップ 番 号	ね じ り モーメント M (ton・m)	上端の 接線方 向変位 (mm)	主要載荷ステップにおける 状況または変状	継手の相対変位 D (mm)					
					D-2	D-4	D-7	D-19	D-12	D-23
1	22	9.00	0.25	目標9t・mのループのピーク値	0.05	-0.01	0.01	0.01	0.00	-0.14
2	37	-8.85	-0.10	目標-9t・mのループのピーク値	0.00	-0.01	-0.06	-0.01	0.00	-0.18
3	59	16.20	1.85	正方向すべり開始 (JT-3)	0.25	0.14	0.82	-0.06	0.01	0.16
	69	16.20	8.88	正方向すべり開始 (JT-2)	0.32	0.81	6.16	-0.06	0.00	-0.12
	78	19.26	15.12	正方向すべり停止直後	0.37	6.17	6.37	-0.07	-0.21	-0.15
4	97	-14.07	12.81	負方向すべり開始 (JT-3)	0.10	5.72	5.75	-0.01	-0.21	-0.03
	110	-16.34	2.43	負方向すべり開始 (JT-2)	-0.02	5.05	-1.42	-0.02	-0.20	0.03
	127~128	-17.66*	-11.54*	継手金具面板降伏開始	-0.03*	-5.52*	-2.92*	-0.01*	0.15*	-0.02*
	128	-18.00	-11.89	負方向すべり停止直後	-0.02	-5.83	-5.27	-0.01	0.15	-0.02
5	137	9.15	-10.03	正方向すべり開始 (JT-2)	0.20	-5.16	-2.50	-0.01	0.14	-0.21
	152	10.88	2.10	正方向すべり開始 (JT-3)	0.25	4.78	-1.59	-0.01	-0.17	0.17
	173	23.03	18.42	正方向すべり開始 (JT-1)	0.85	7.00	8.68	0.00	-0.25	-0.15
	186	23.40	27.11	目標30mmのループのピーク値 継手金具近傍にクラックが若干発生	7.86	7.20	8.99	-0.01	-0.28	-0.14
6	234~235	-52.5*	-36.85*	セグメント外面にクラック発生 (JR2-4)	-8.95*	-10.69*	-5.56*	2.16*	2.51*	-0.13*
	240	-58.43	-46.15	目標-50mmのループのピーク値 セグメント内・外面のクラック進行	-9.17	-11.32	-5.44	4.69	4.95	-0.54
7	285~286	51.71*	41.66*	継手部外面コンクリート浮き上がり (JR2-5)	...	10.58*	11.92*	-4.66*	0.01*	0.04*
	295~296	68.96*	60.82*	アンカー筋破断開始 (JR2-5)	...	16.21*	11.92*	-8.33*	0.90*	0.61*
	300	76.50	70.31	最大ねじりモーメント作用時	...	20.09	11.93	-9.05	2.53	0.79
	300~301	64.64*	71.53*	外面コンクリート剥離開始 (JR2-5)	...	20.32*	14.38*	-9.05*	2.57*	0.86*
	304	40.08	...	載荷終了	...	20.92	17.70	-9.05	3.00	0.16

* 直前・直後の載荷ステップの平均値



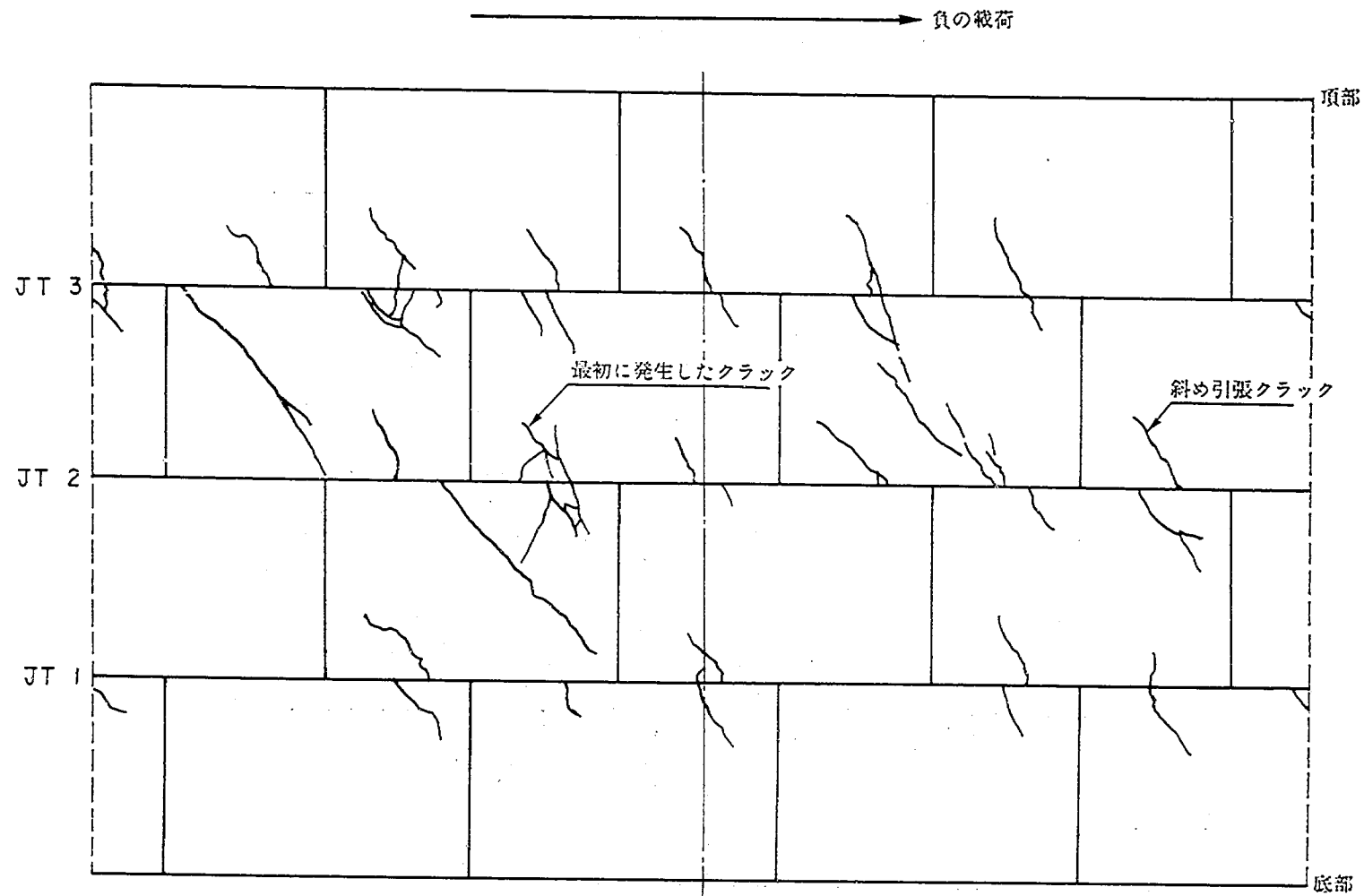
(a) 6 ループ目 (— 58.4 tf・m, — 46.2 mm)

図- 3.8 供試体の内側からみたクラックの発生状況 (展開図)



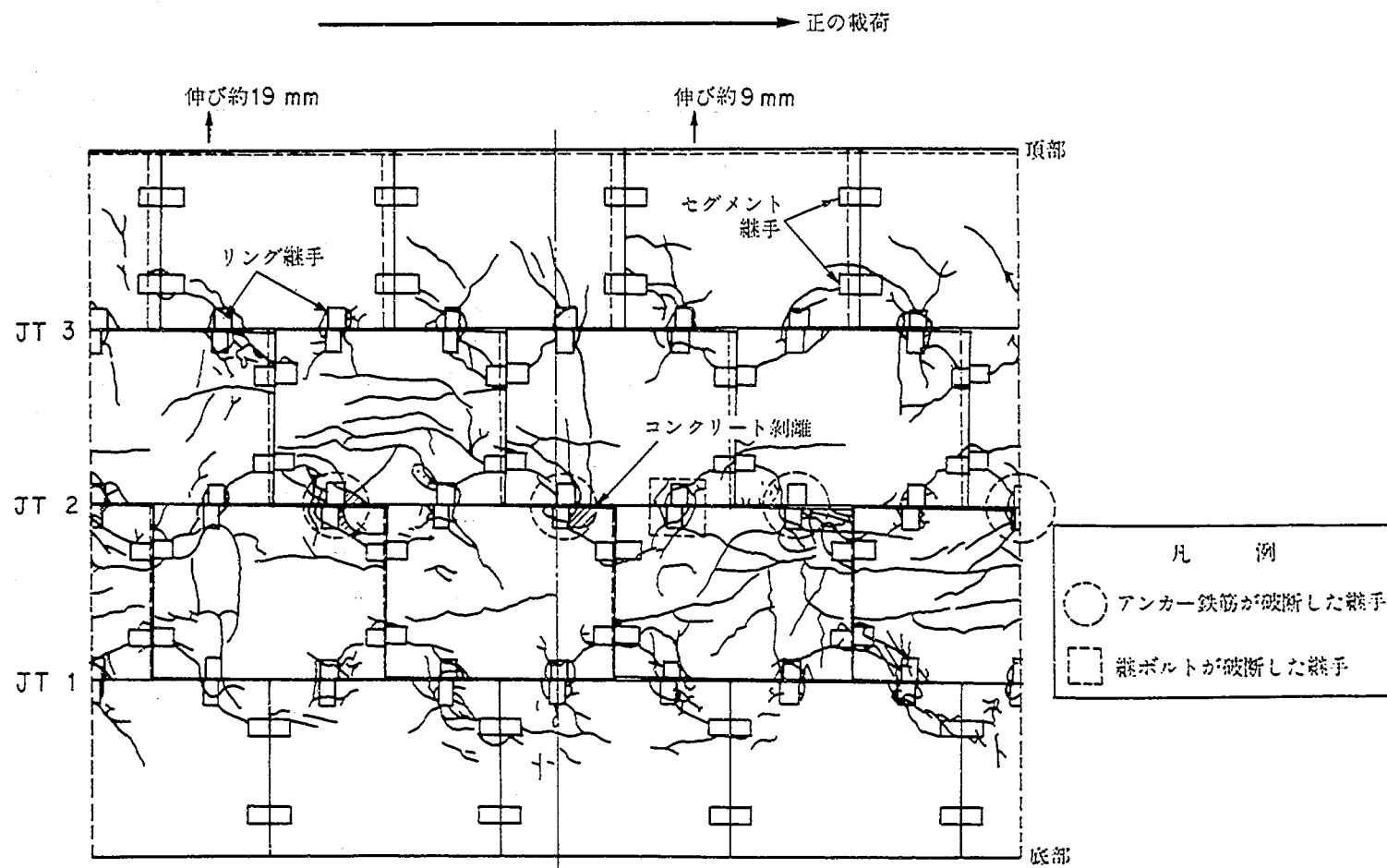
(b) 最終状況 (7ループ目終了時)

図-3.8 供試体の内側からみたクラックの発生状況 (展開図)



(a) 6 ループ目 ($-58.4 \text{ tf} \cdot \text{m}$, -46.2 mm)

図-3.9 供試体の外側からみたクラックの発生状況 (展開図)



(b) 最終状況 (7 ループ目終了時)

図- 3. 9 供試体の外側からみたクラックの発生状況 (展開図)

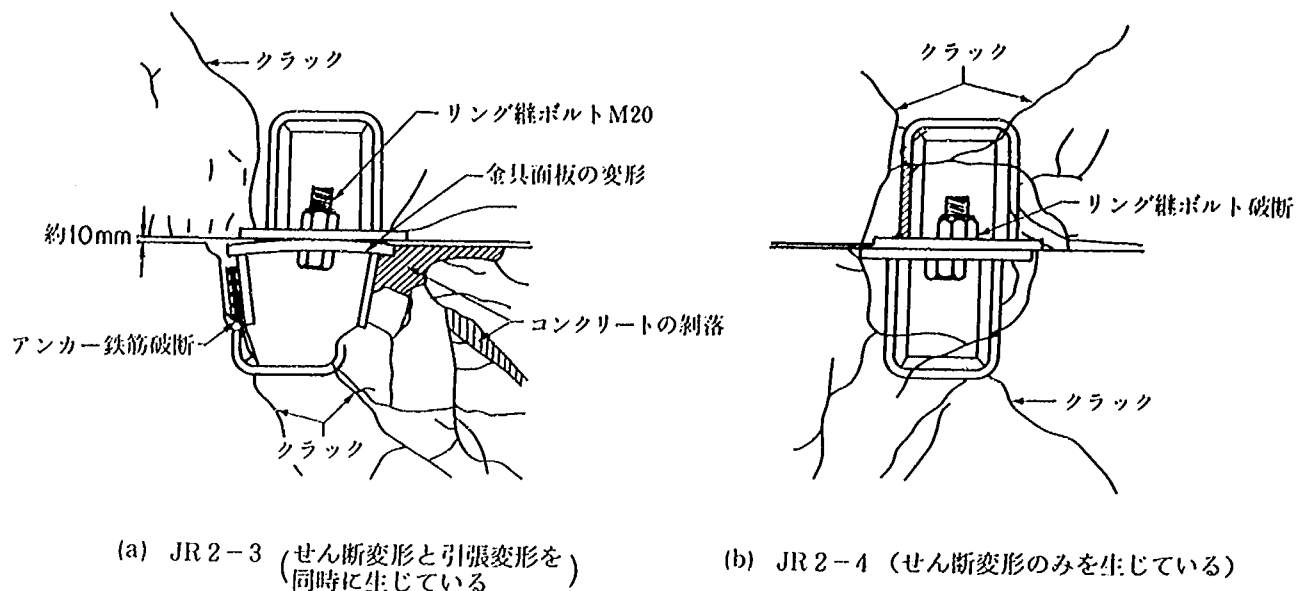


図- 3.10 リング継手の損傷状況

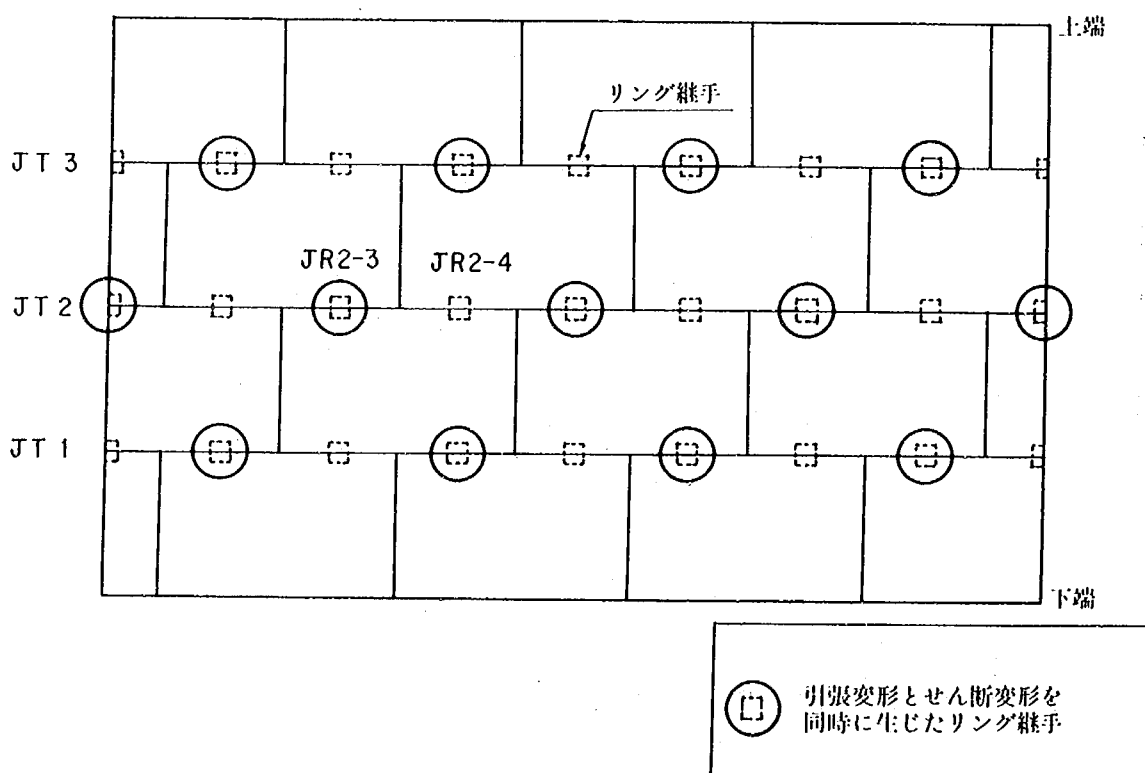


図- 3.11 せん断変形と引張変形を同時に生じたリング継手の分布

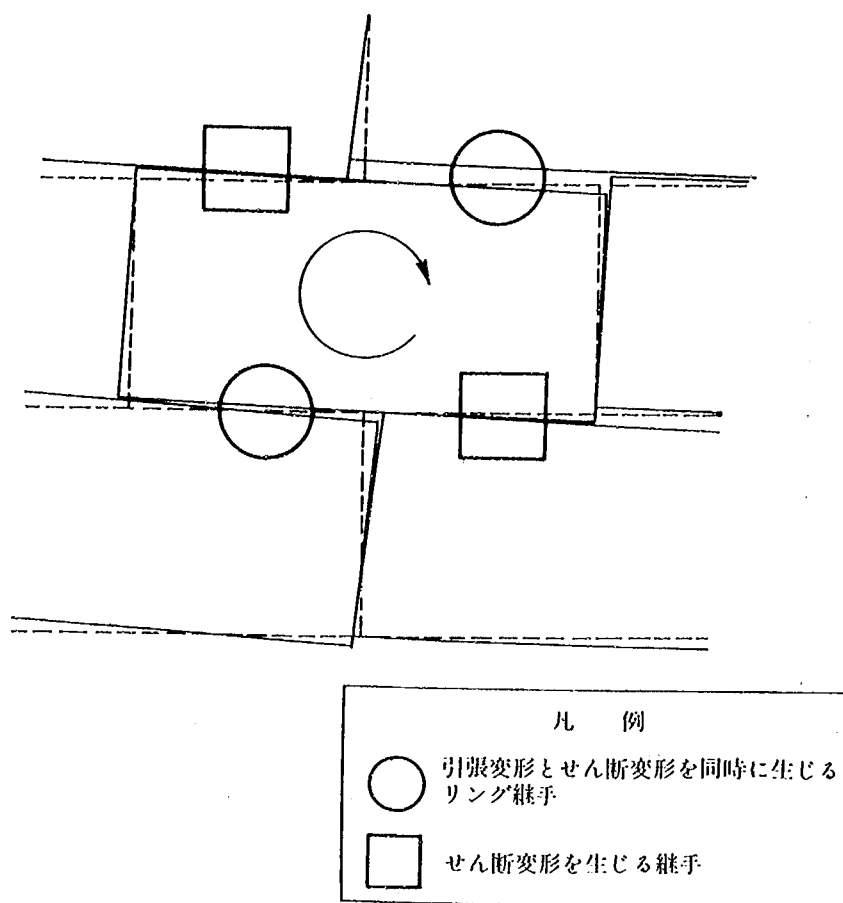


図-3.12 セグメントの回転（概念図）

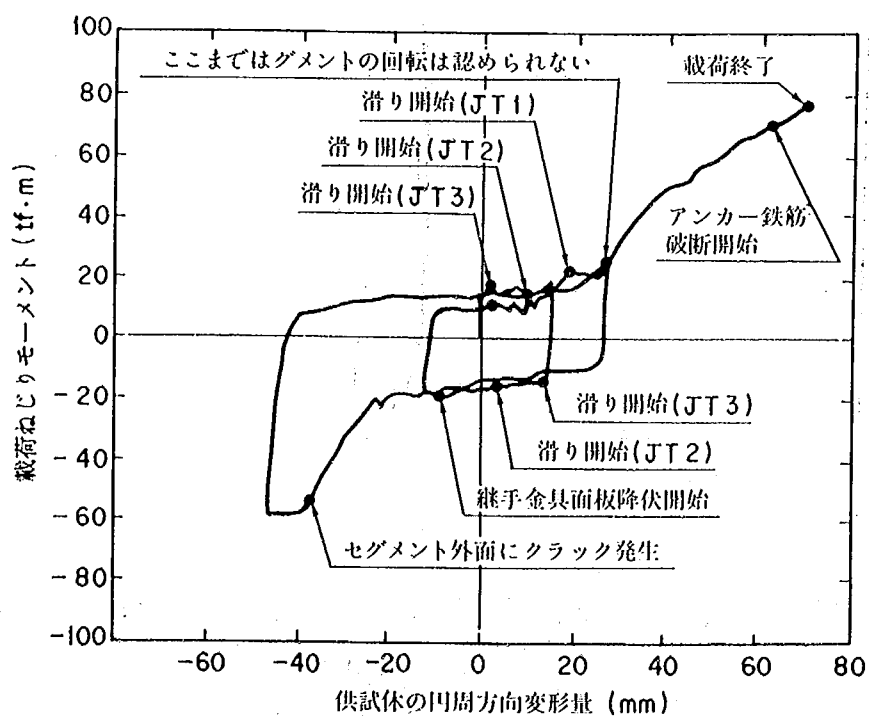
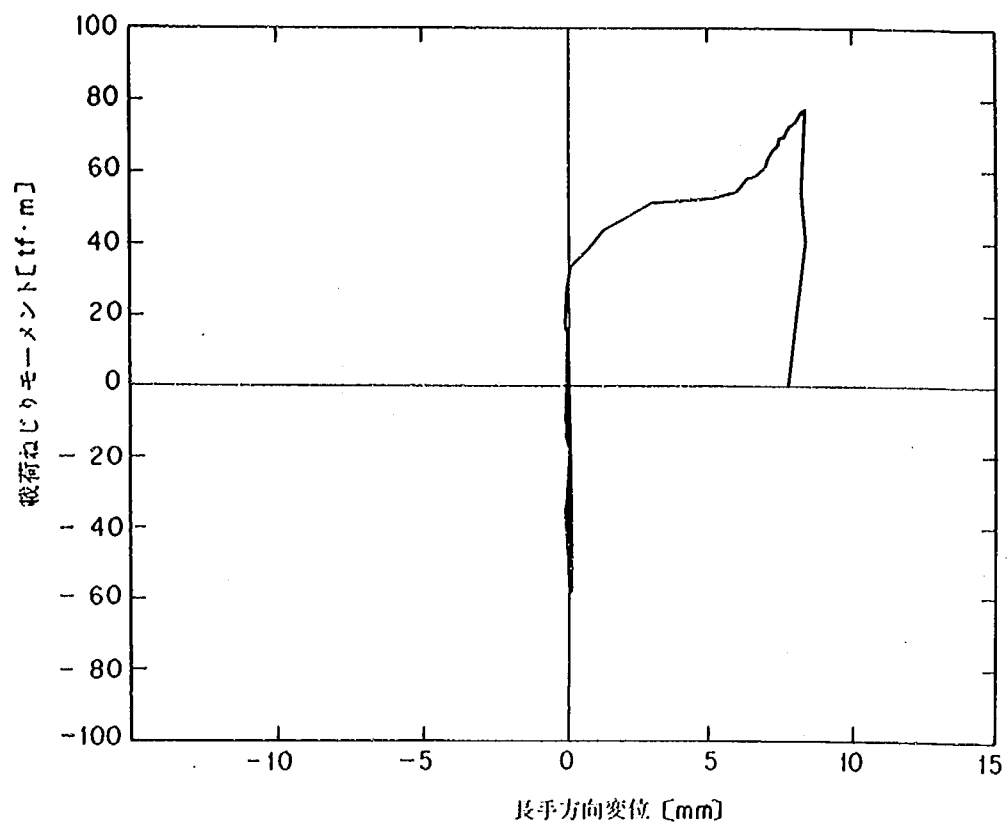
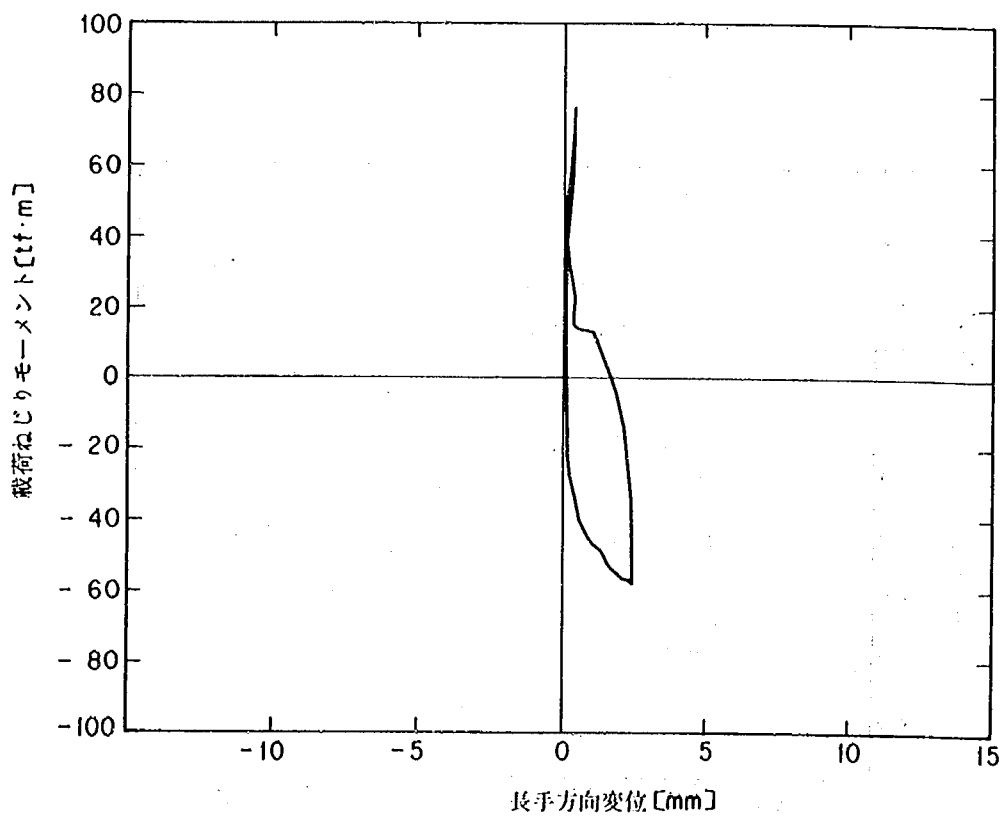


図-3.13 Dタイプ供試体の載荷履歴

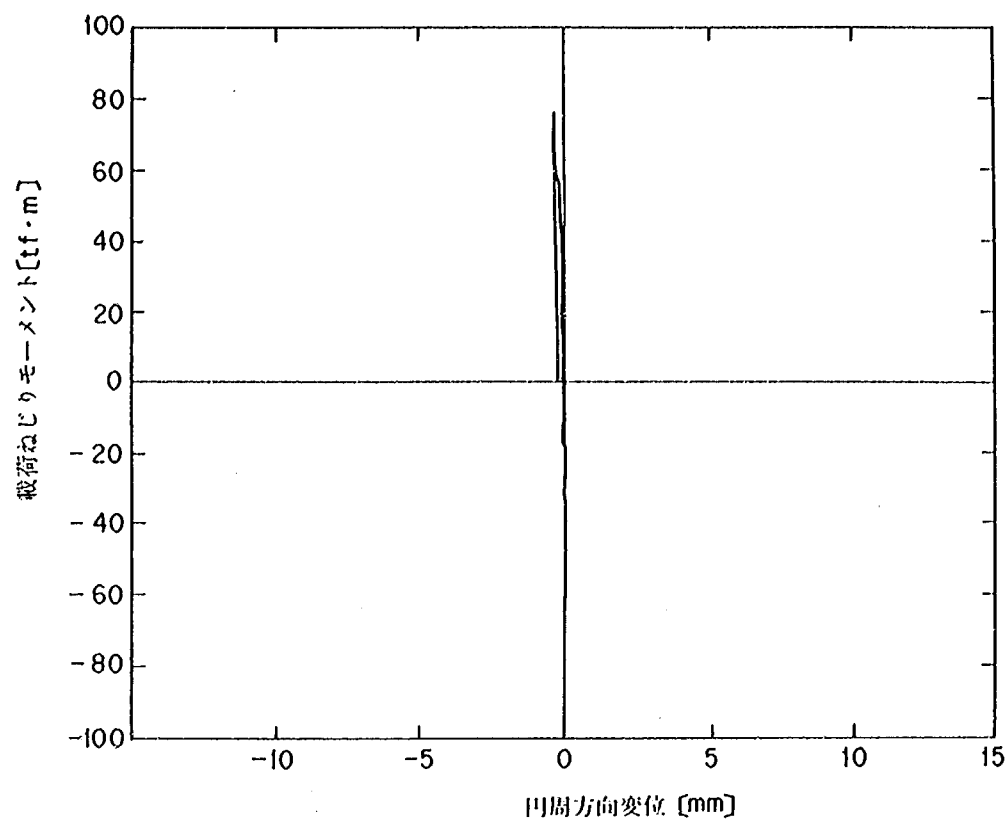


(a) JR3-4

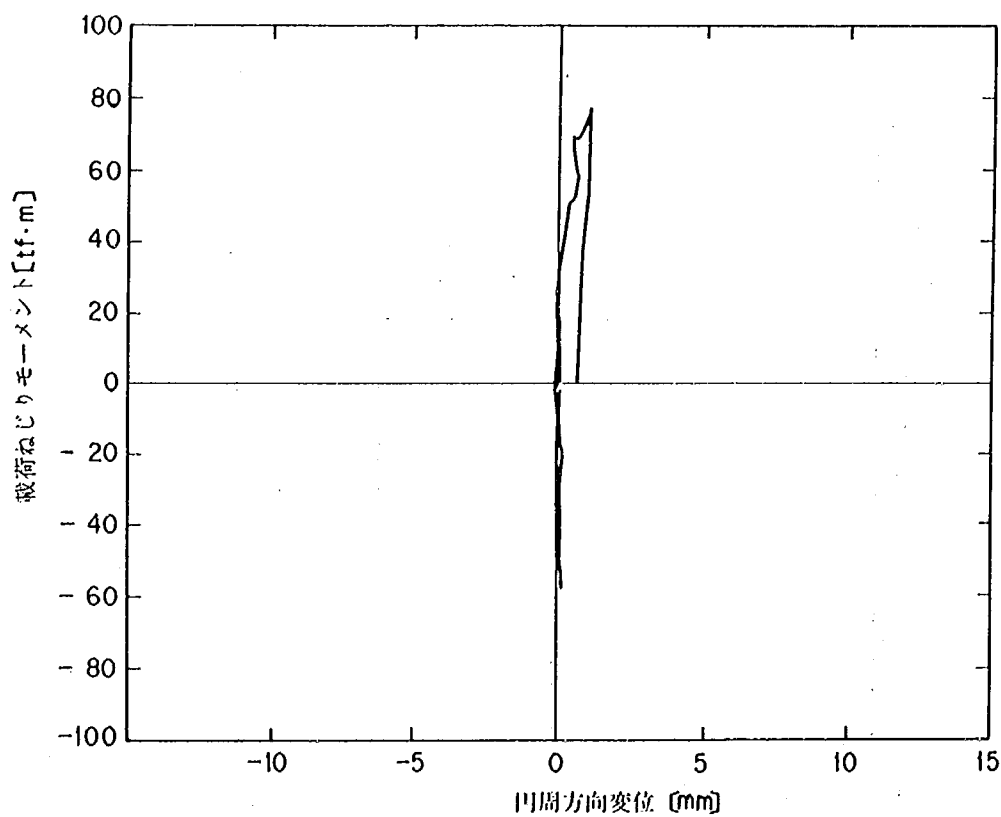


(b) JR3-5

図-3.14 リング継手の長手方向変位の載荷履歴



(a) JS3-7



(b) JS3-3

図-3.15 セグメント継手の円周方向変位の荷履歴

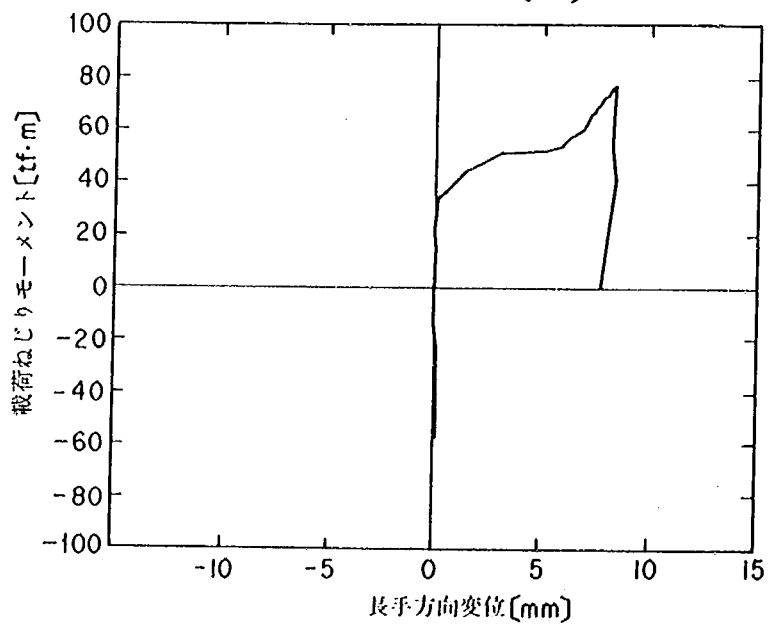
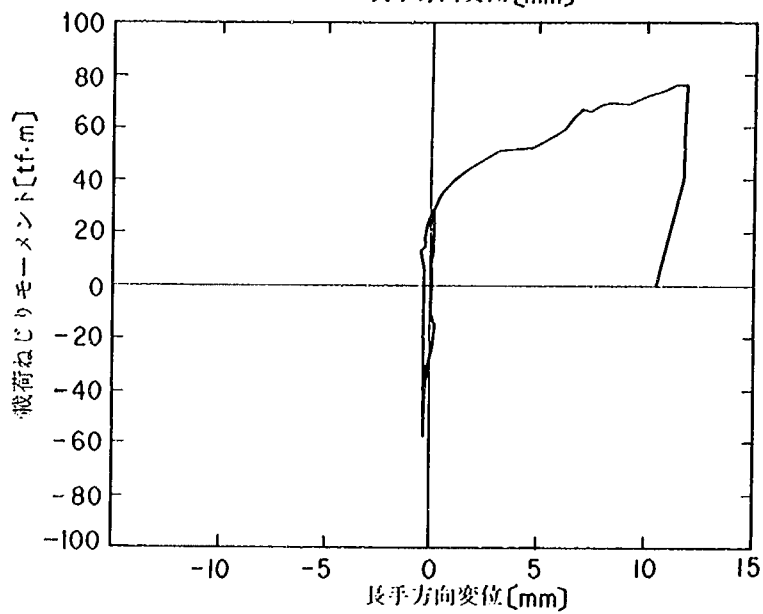
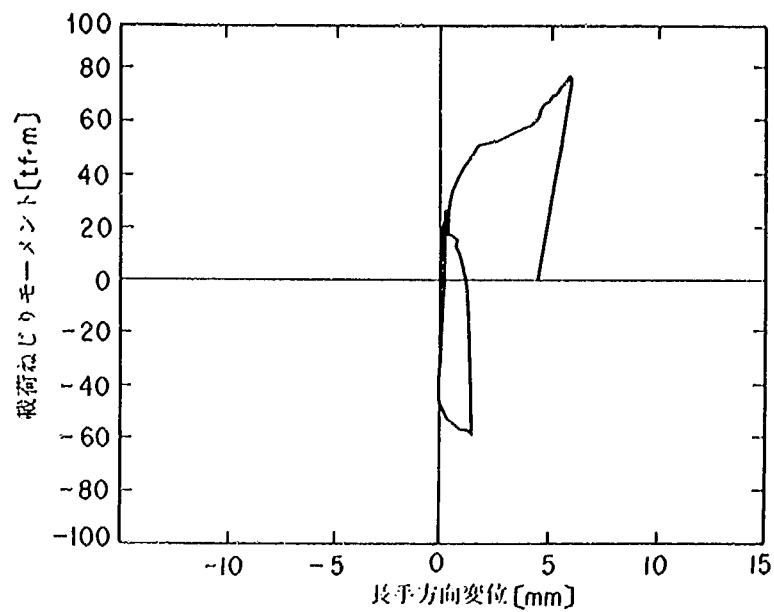
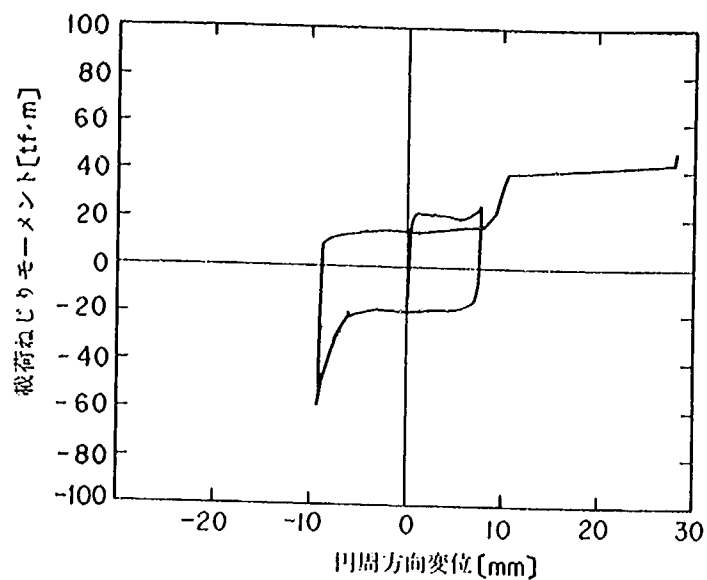
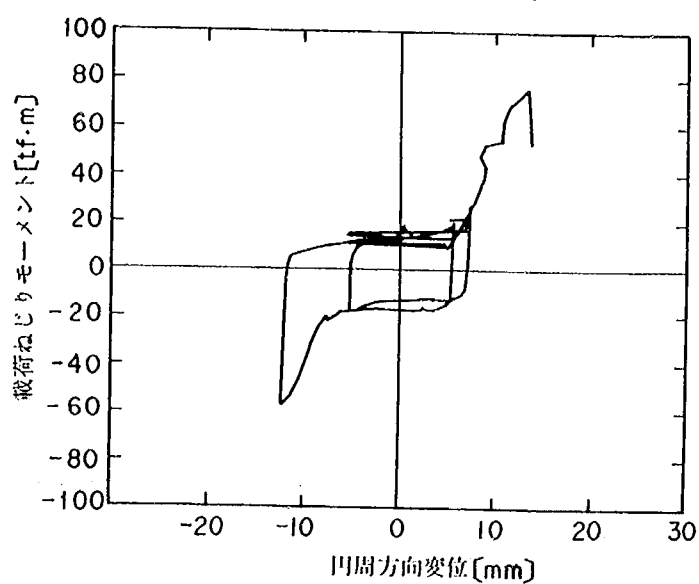


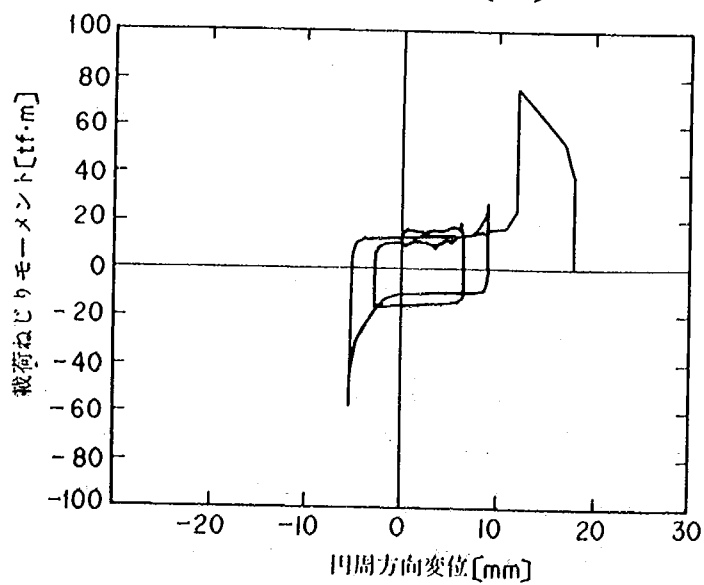
図- 3.16 リング接合面の長手方向相対変位



(a) JR 1-4
(JT 1)



(b) JR 2-5
(JT 2)



(c) JR 3-4
(JT 3)

図-3.17 リング接合面の円周方向相対変位

3.7 二次覆工がある場合の変形および破壊特性

(1) 破壊の進展状況

載荷にともない、セグメントおよび二次覆工の両方に無数のクラックが発生し、やがて、セグメントの分断、および二次覆工コンクリートの剥落が生じて最終的な破壊に至った。表-3.5に破壊の進展状況を示す。

3ループ目、4ループ目、および7ループ目の載荷が終了した時点のクラックの発生状況を、セグメントについて示すと（供試体の外側から見ると）図-3.18の通りである。また、二次覆工について示すと（供試体の内側から見ると）図-3.19の通りである。

なお、破壊の進展にともない、供試体の自立が不安定になったため、継手の破壊、および二次覆工鉄筋の破断が生じる前に載荷を終了している。

載荷にともなう供試体の破壊の進展状況は以下のようである。

- ①（1ループ目） 初期状態からピーク荷重の90.2 tf・mに至るまで、供試体にはなんら変化は認められなかった。
- ②（2ループ目） ピーク荷重90.0 tf・mに至るまで、供試体にはなんら変化は認められなかった。
- ③（3ループ目） 荷重116.8 tf・m、変位2.9 mmに至ったとき、二次覆工に数本の斜め引張クラック（図-3.19(a)参照）が発生した。セグメントにはリング継手の定着板端部からリング接合面に向かう微細なクラック（図-3.18(a)参照）が発生した。
- ④（4ループ目） 荷重105.2 tf・m、変位2.8 mmに至ったとき、二次覆工には③で生じた斜め引張クラックと逆向きの斜め引張クラック（図-3.19(b)参照）が発生した。また、セグメントでは、③までの載荷でクラックが生じていないリング継手位置にも定着板端部からリング接合面に向かうクラック（図-3.18(a)参照）が発生し、この段階で、ほぼ全てのリング継手の周辺にクラックが発生した。
- ⑤（5ループ目） 載荷にともない、セグメントの内部に亀甲状のクラックが発生した。荷重128.0 tf・m、変位9.8 mmに至ったとき、亀甲状クラックの両端がそれぞれリング接合面、およびセグメント接合面に達し、供試体の3箇所セグメントの分断（図-3.18(c)参照）が生じた。二次覆工では、斜め引張クラックの幅が徐々に進展した。
- ⑥（7ループ目） 荷重140.5 tf・m、変位38.6 mmに至った段階で、まず二次覆工コンクリートが剥離した。さらに荷重を増加させると、セグメントでもコンクリートの剥離が生じ、二次覆工鉄筋および継手のアンカー鉄筋が露出して最終状況に至った（図-3.18(c)、図-3.19(c)参照）。以上がEタイプ供試体の破壊の進展状況である。これにより、以下の点が指摘される。
 - a) リング接合面での滑りはほとんど生じていない。本供試体では、各セグメントに配置された12本ずつのジベル筋（図-2.7参照）によりセグメントと二次覆工間の付着が確保されている上、二次覆工に生じた斜め引張クラックの影響により、リング接合面の滑りが抑制されたものと考えられる。

- b) セグメントの最終状況を示した図－ 3. 18 (c) によれば、Dタイプ供試体で生じたセグメントの回転が、本供試体においても生じているのが認められる。
- c) 二次覆工には何本もの斜め引張クラックが生じた。この斜め引張クラックは、コンクリート円筒が長手方向と円周方向の荷重を同時に受ける場合に生じる斜め引張クラックに類似するものである。
- d) セグメント内部には亀甲状のクラックが生じた。これは、一次覆工と二次覆工の挙動を拘束しているジベル筋の位置に応力が集中したためであると考えられる。

本供試体では、セグメントの内側に打設した二次覆工のために継手の変形状況をあきらかにすることができない。したがって、比較的大きな目開きを生じたリング接合面 JT 2 について、リング継手 JR 2－5 (図－ 3. 2 参照) の変形をセグメントの外側から観察すると図－ 3. 20 のようになる。

図－ 3. 20 によれば、リング継手の損傷状況に関して以下の点が指摘される。

- a) リング継手金具面板は、ボルト孔を中心とした円錐台状に変形している。これはボルトボックス内に充填されたコンクリートにより、継手金具定着板の変形が抑えられたためである。
- b) a) に示した継手の変形は、正負交番軸力⁶⁾載荷実験でも生じている。正負交番載荷実験において、継手の最終的な破壊はアンカー鉄筋が定着板の端部で破断することによって生じていることから、本供試体についても載荷を続ければやがてアンカー鉄筋が破断したと予想される。

(2) 供試体全体の変形特性

供試体全体のねじり変形量と載荷ねじりモーメントとの関係を検討するために、供試体上端に取り付けた円周方向の変位計による変位と載荷ねじりモーメントとの履歴を示すと図－ 3. 21 のようになる。

これによれば、最大荷重は 5 ループ目 (正の載荷) に生じた $150.6 \text{ tf} \cdot \text{m}$ であり、この時の変位は 21.5 mm である。ここに至るまでにすでに二次覆工には斜め引張クラックが、また、セグメントには亀甲状のクラックが発生している。その後、クラックが進展し、コンクリートの剥離が生じるのにもとない、供試体としての耐力は低下した。

本供試体、および、Dタイプ供試体の耐力、および、変形能を比較して示すと表－ 3. 4 のようになる。本供試体は Dタイプ供試体の約 2 倍の最大耐力を有している。しかし反面、Dタイプ供試体でセグメントにクラックが生じ始めたねじり変位 36.9 mm の段階で、本供試体はセグメント、二次覆工ともにすでに大きな損傷を生じている点が着目される。

(3) 継手の挙動特性

1) リング継手

計測で着目した特定のセグメント (図－ 3. 4 参照) について、リング継手 JR 3－4、および、JR 3－5 (図－ 3. 2 参照) に生じた供試体長手方向の相対変位の載荷履歴を示すと図－ 3. 22 の通りである。

図－ 3. 22 によれば以下の点が指摘される。

- a) リング継手 JR 3-4, および JR 3-5 では, 載荷にともない残留変位の累積が生じている。これは, リング継手金具面板および二次覆工のクラック位置で二次覆工鉄筋が降伏したためである。リング継手 JR 3-4, および JR 3-5 に生じた最大残留変位は, それぞれ約 7 mm, 約 4 mm に達している。
- b) リング継手 JR 3-4 における相対変位は, 二次覆工に斜め引張クラックが発生するまではなら生じていないが, 斜め引張クラックが発生した後は正の載荷時に増加し, 5 ループ目 (正の載荷), および, 7 ループ目 (正の載荷) ではそれぞれ約 3 mm, および, 9 mm に達している。
- c) リング継手 JR 3-5 における相対変位は, 二次覆工に斜め引張クラックが発生した後, 負の載荷時に増加し, 4 ループ目 (負の載荷), および, 6 ループ目 (負の載荷) ではそれぞれ約 2 mm, および, 6 mm に達している。
- d) リング継手 JR 3-4, および JR 3-5 は, それぞれ正の載荷, および負の載荷時に相対変位の増加が生じていることから, それぞれ正の載荷, および負の載荷時に供試体長手方向の引張力を受けていたことがわかる。

2) セグメント継手

セグメント継手 JS 3-7, および, JS 3-3 (図- 3. 2 参照) に生じた供試体円周方向の相対変位の載荷履歴を示すと図- 3. 23 の通りである。

図- 3. 23 によれば以下の点が指摘される。

- a) セグメント継手 JS 3-7, および JS 3-3 においても, リング継手と同様に, 載荷にともなう残留変位の累積が生じている。両継手に生じた最大残留変位は, それぞれ約 2 mm, 約 3 mm 程度である。
- b) セグメント継手 JS 3-7, および JS 3-3 における相対変位は, 二次覆工に斜め引張クラックが生じた後増加し, 最大相対変位は両継手とも約 4 mm 程度である。
- c) 両継手とも, リング継手とは異なり, 正の載荷時および負の載荷時の両方で相対変位の増加が認められる。セグメントが回転しているにも関わらず, セグメントの同一辺に位置する 2 つのセグメント継手が同じような挙動を示した理由は明かでない。ただし, 本供試体では二次覆工によりセグメントの挙動が拘束されている上, リング継手に比べると相対変位量も 1/2 程度と小さいことから, 本セグメント継手の挙動には一定の傾向が現れにくいかもしれない。

リング接合面の相対変位

1) 供試体長手方向

リング接合面 JT 1 ~ 3 に生じた供試体長手方向の相対変位が, 載荷にともなって, どのように変化しているかを検討するために, リング継手 JR 1-4, JR 2-5, および, JR 3-4 (図- 3. 2 参照) に生じた相対変位の載荷履歴を比較して示すと図- 3. 24 の通りである。なお, ここに挙げた 3 つのリング継手は, いずれも正の載荷時に引張力を受けたタイプの継手である。

図- 3. 24 によれば, 以下の点が指摘される。

a) 初期状態から二次覆工に斜め引張クラックが生じるまでは、いずれのリング継手においても相対変位は生じていない。

b) 7 ループ目（最終ループ）に至ると、リング継手 JR 1-4, JR 2-5, および, JR 3-4 でそれぞれ約 6 mm, 20 mm, および, 9 mm の相対変位が生じた。

以上の結果によれば、リング接合面 JT 2 には、他のリング接合面の 2 倍以上の相対変位が生じているものの、相対変位が JT 2 だけに集中しているわけではなく、D タイプ供試体と同様に 3 箇所のリング接合面に分散して生じていることがわかる。ここに、リング接合面 JT 2 の相対変位が他に比べて大きくなった理由は、すでに 3.6 (4) に示した通りである。

以前に行った正負交番軸力載荷実験では、二次覆工のある E タイプ供試体の損傷は 3 つのリング接合面に分散して生じ、これは二次覆工に配置された長手方向の鉄筋の影響によるものであった。本供試体では、アンカー鉄筋や二次覆工鉄筋の破断まで載荷を行っておらず、こうした損傷が各リング接合面に分散して生じるか否かは別途検討の必要がある。

2) 供試体円周方向

リング接合面 JT 1 ~ JT 3 に生じた供試体円周方向の相対変位が、載荷にともなって、どのように変化しているかを検討するために、上記 1) と同じリング継手 JR 1-4, JR 2-5, および, JR 3-4 (図- 3.2 参照) に生じた円周方向の相対変位の載荷履歴を比較して示すと図- 3.25 の通りである。

図- 3.25 によれば、以下の点が指摘される。

a) 初期状態から二次覆工に斜め引張クラックが生じるまでは、いずれのリング継手においても相対変位は生じていない。

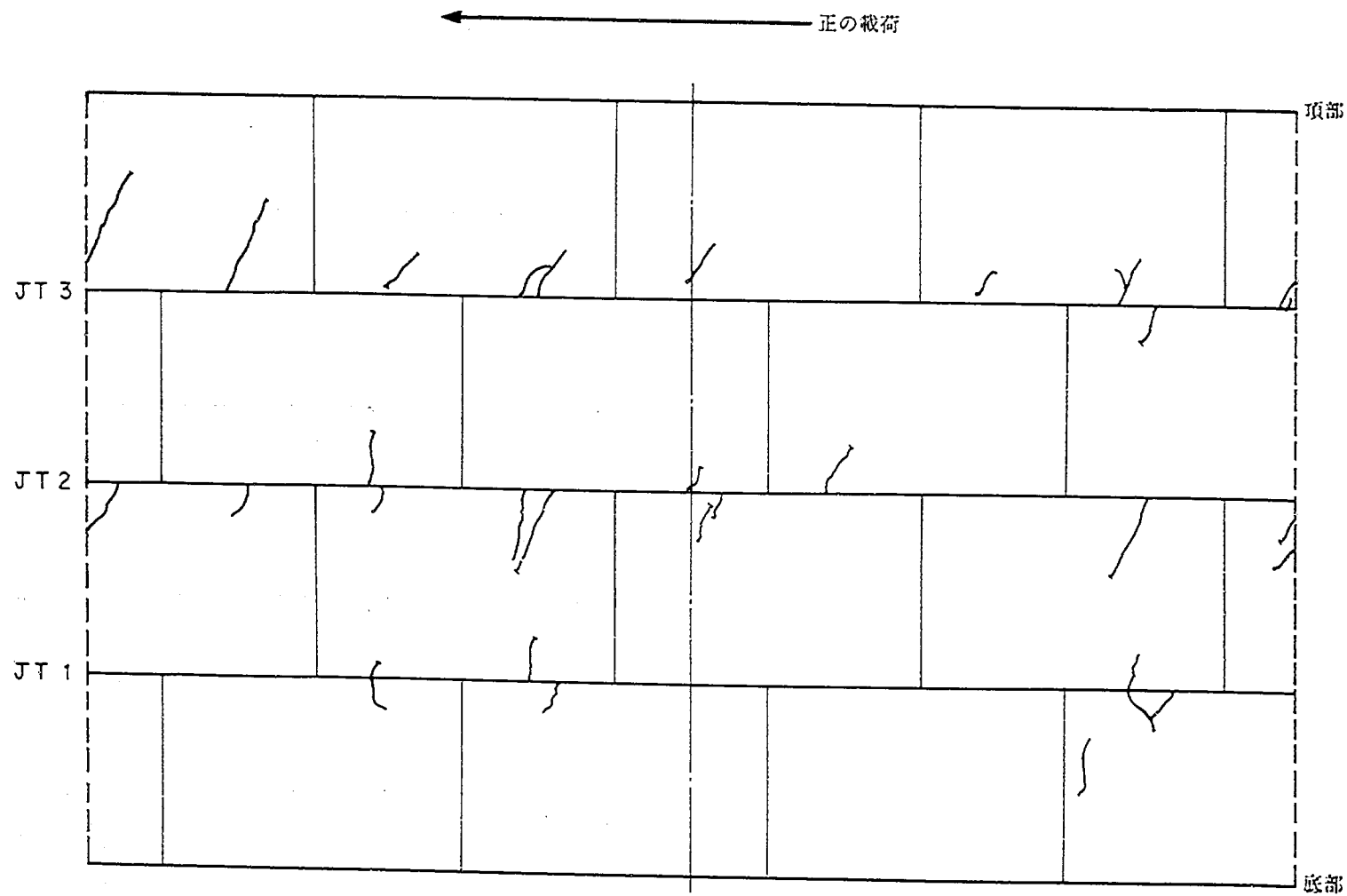
b) 7 ループ目（最終ループ）に至ると、リング継手 JR 1-4, および, JR 3-4 でそれぞれ約 10 mm, 19 mm の相対変位が生じた。リング継手 JR 2-5 では 7 ループ目の載荷中に計測器が損傷しているが、6 ループ目までの載荷で約 6 mm の相対変位が生じている。

以上の結果によれば、リング接合面の円周方向の相対変位も、長手方向の相対変位と同様に 3 つのリング接合面に分散して生じていることがわかる。

表-3.5 破壊の進展状況

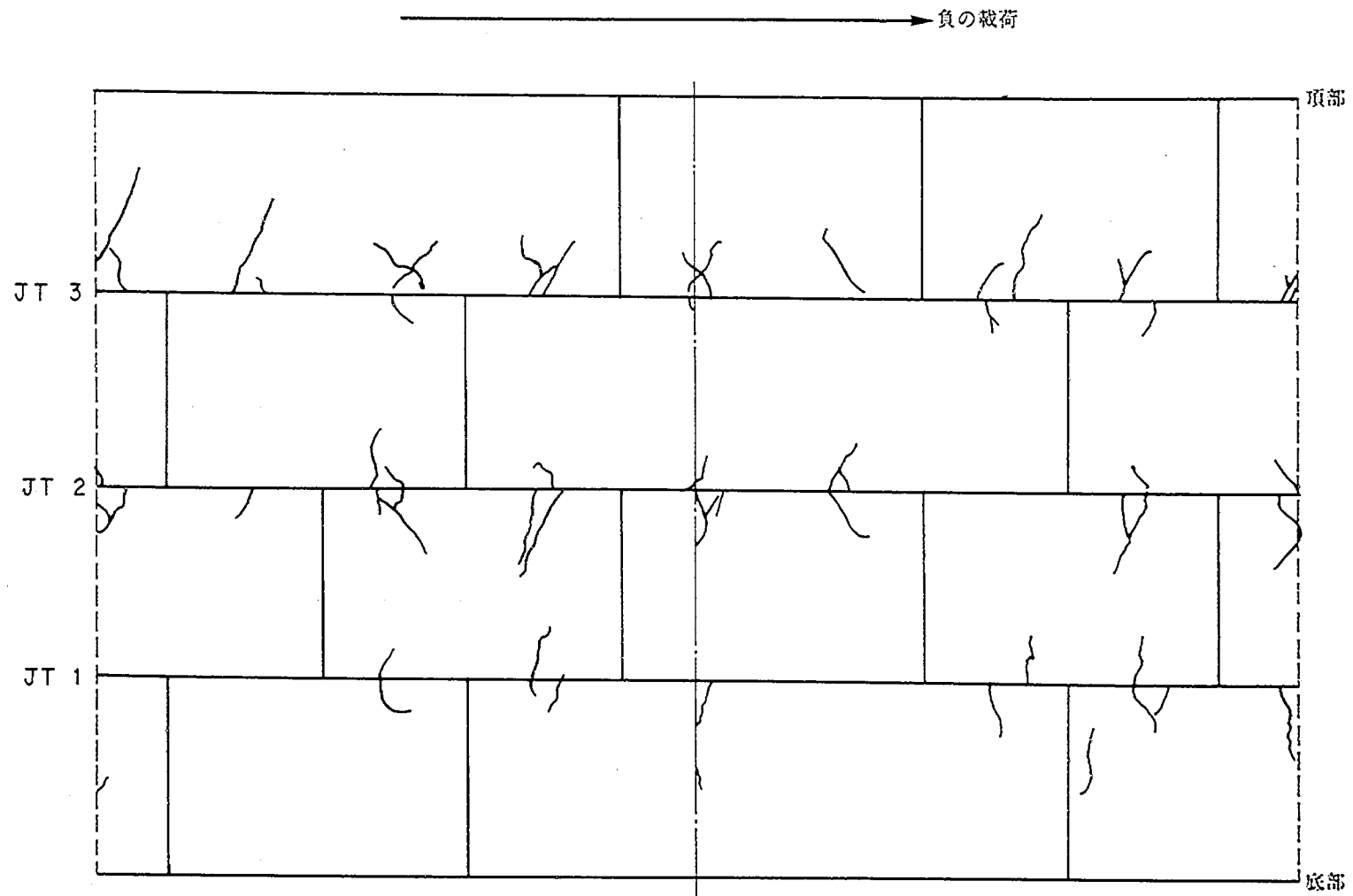
載荷 ループ 番号	載 荷 ステップ 番 号	ね じ り モーメント M (ton・m)	上端の 接線方 向変位 (mm)	主要載荷ステップにおける 状況または変状	継手の相対変位 D (mm)					
					D-2	D-4	D-7	D-19	D-12	D-23
1	12	90.15	1.25	目標 90 t・m のループのピーク値	0.03	0.09	0.05	-0.01	-0.01	-0.00
2	21	-90.00	-0.99	目標 -90 t・m のループのピーク値	-0.07	-0.01	-0.02	-0.01	0.01	0.00
3	30 ~ 31	116.84*	2.88*	二次覆工斜めクラック発生 セグメント外面クラック発生 (JR 1-4, 8, 2-5, 3-1, 3, 4)	0.35*	0.26*	0.58*	-0.39*	0.09*	0.38*
	32	124.80	6.13	目標 9mm のループのピーク値	1.11	0.58	1.29	-0.97	0.27	1.05
4	43 ~ 44	-105.22*	-2.82*	二次覆工斜めクラック発生	-0.09*	-0.84*	-0.33*	0.54*	1.02*	0.74*
	44 ~ 45	-109.04*	-4.62*	二次覆工鉄筋降伏開始	-0.26*	-1.22*	-0.48*	0.79*	1.41*	0.94*
	45	-117.90	-5.98	目標 -9mm のループのピーク値	-0.40	-1.41	-0.53	0.89	1.60	1.00
5	56 ~ 57	120.50*	7.65*	継手金具面板降伏開始	1.56*	0.95*	1.70*	-1.11*	0.66*	1.35*
	58	127.98	9.81	JR-2 ~ JR-3 間のセグメント にリング継手とセグメント継手 を結ぶクラックが発生	1.83	1.42	2.08	-1.37	0.94	1.53
	66	150.60	21.54	目標 30mm のループのピーク値 最大ねじりモーメント作用時	3.24	3.69	4.34	-3.05	2.35	2.57
6	85	-149.12	-30.16	目標 -36mm のループのピーク値	-1.96	-5.08	-4.51	3.14	8.62	2.15
7	108 ~ 109	140.54*	38.64*	供試体内側のコンクリート剥落	4.56*	9.04*	9.48*	-4.48*	7.28*	3.49*
	126	101.46	...	載荷終了	9.29	16.86	...	-6.73	11.87	3.45

* 直前・直後の載荷ステップの平均値



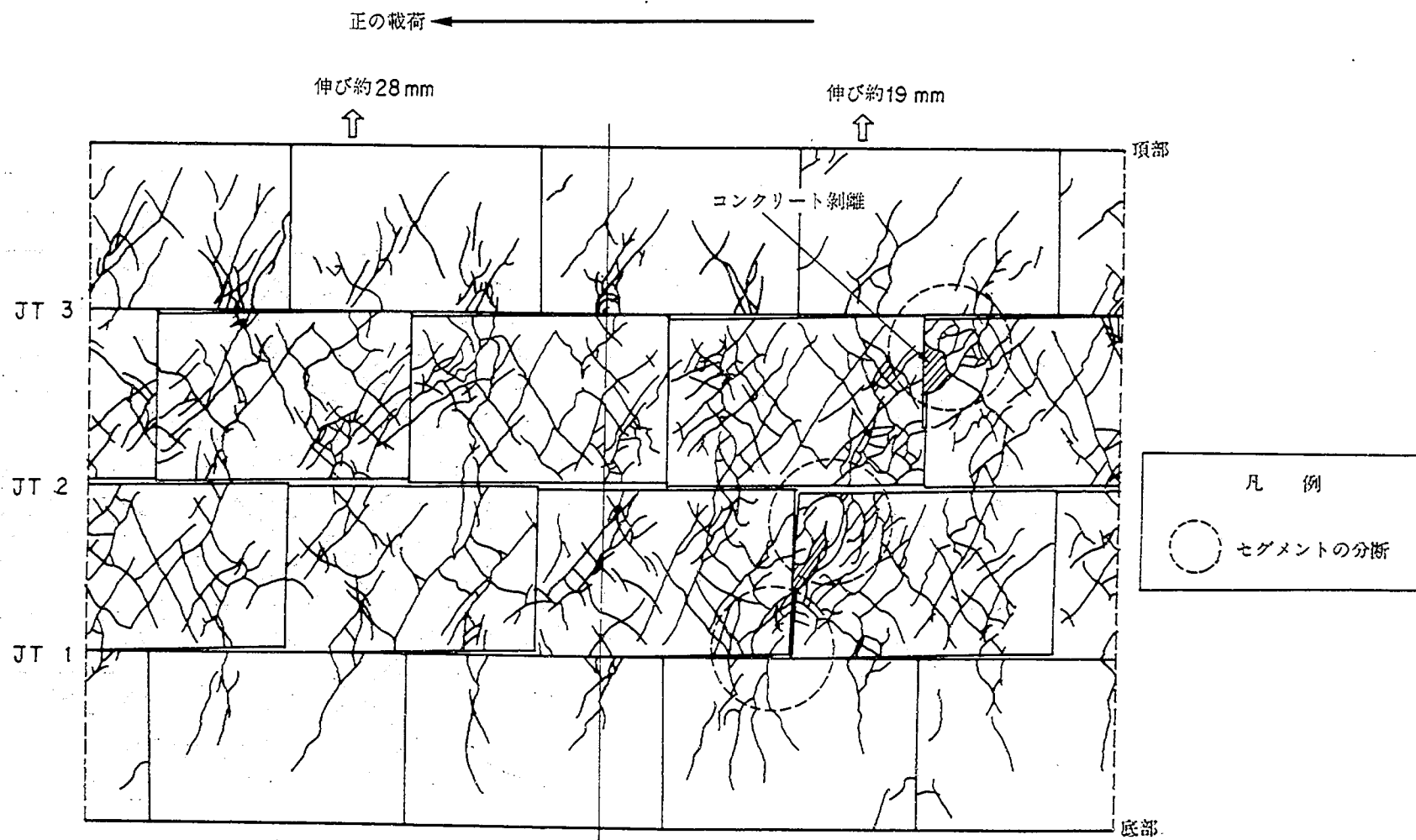
(a) 3 ループ目 (124.8 tf・m, 6.1 mm)

図-3.18 供試体の外側からみたクラックの発生状況 (展開図)



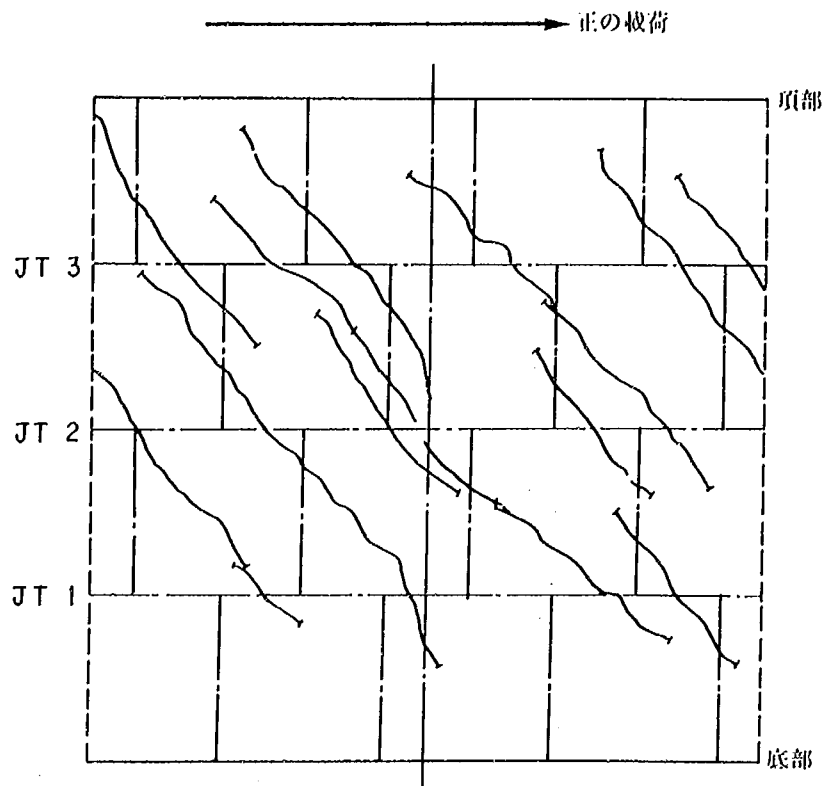
(b) 4 ループ目 ($-117.9 \text{ tf} \cdot \text{m}$, -6.0 mm)

図-3.18 供試体の外側からみたクラックの発生状況 (展開図)

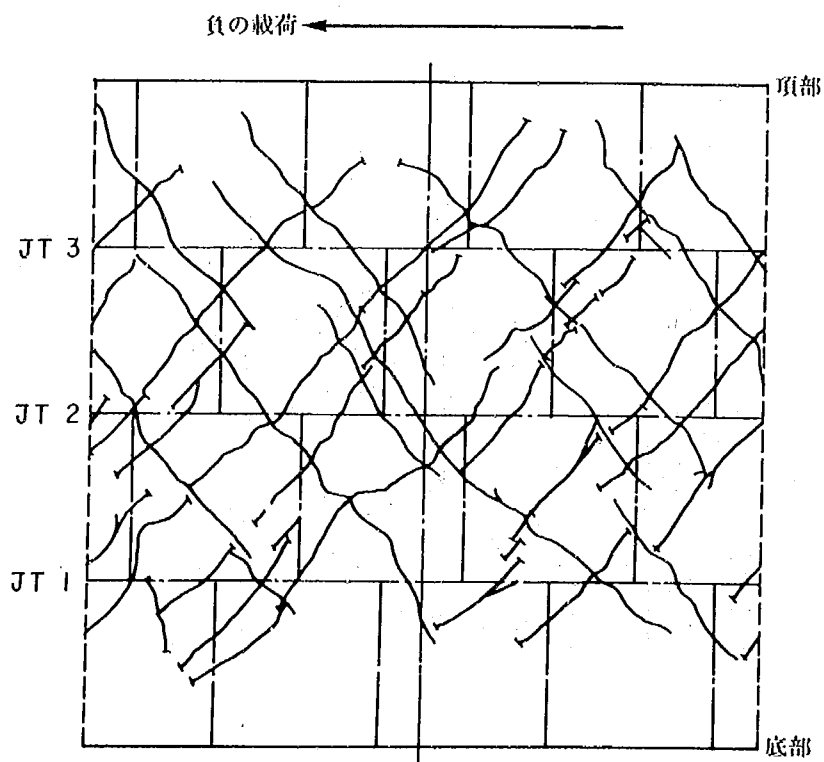


(c) 最終状況 (7 ループ目終了時)

図-3.18 供試体の外側からみたクラックの発生状況 (展開図)



(a) 3 ループ目 ($124.8 \text{ tf} \cdot \text{m}$, 6.1 mm)



(b) 4 ループ目 ($-117.9 \text{ tf} \cdot \text{m}$, -6.0 mm)

図-3.19 供試体内側からみたクラックの発生状況 (展開図)

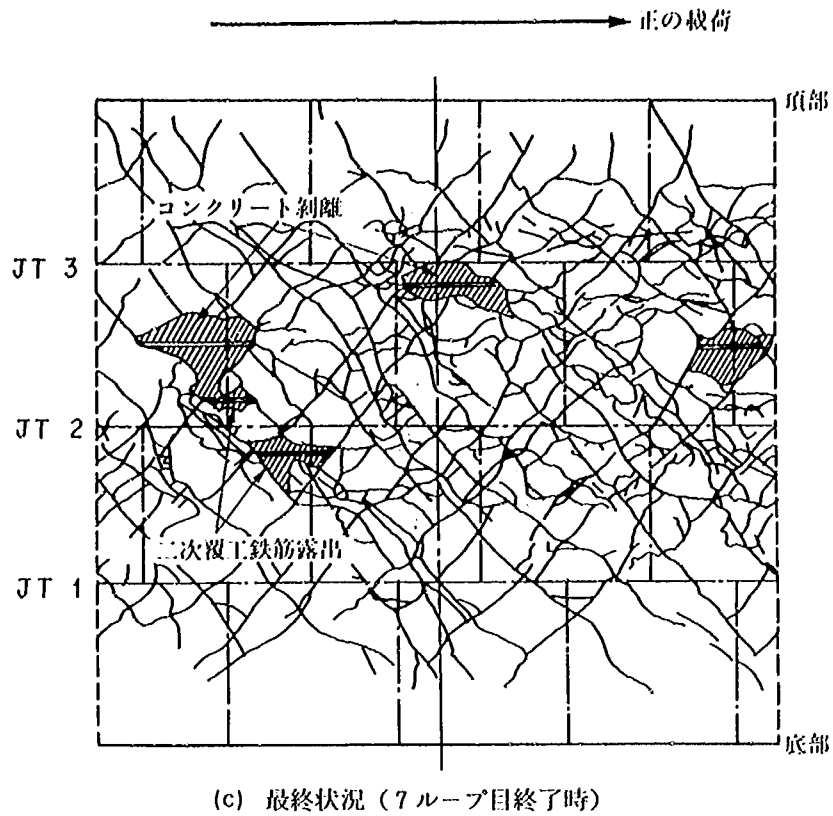


図- 3.19 供試体内側からみたクラックの発生状況 (展開図)

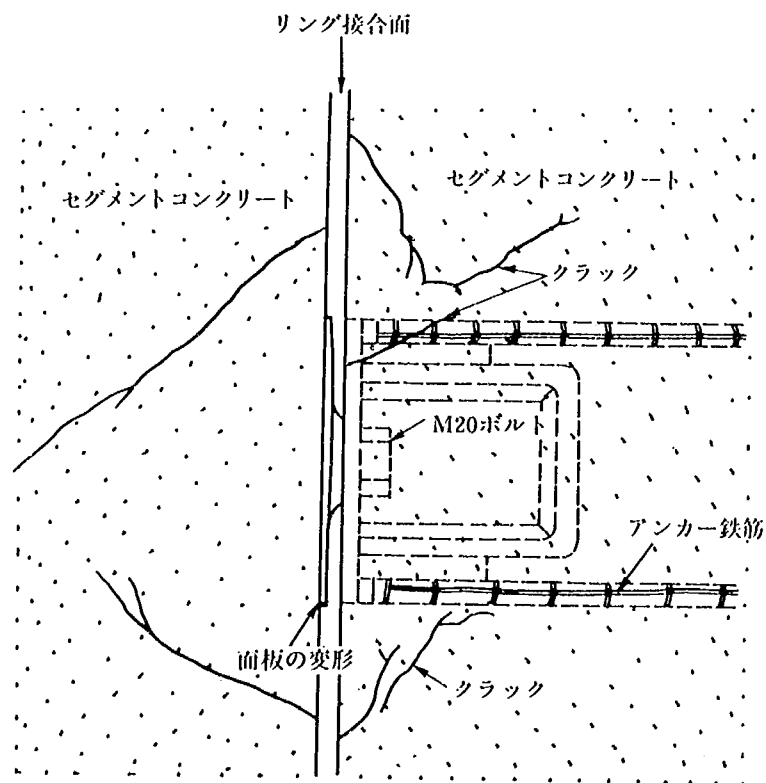


図- 3.20 リング継手の変形状況

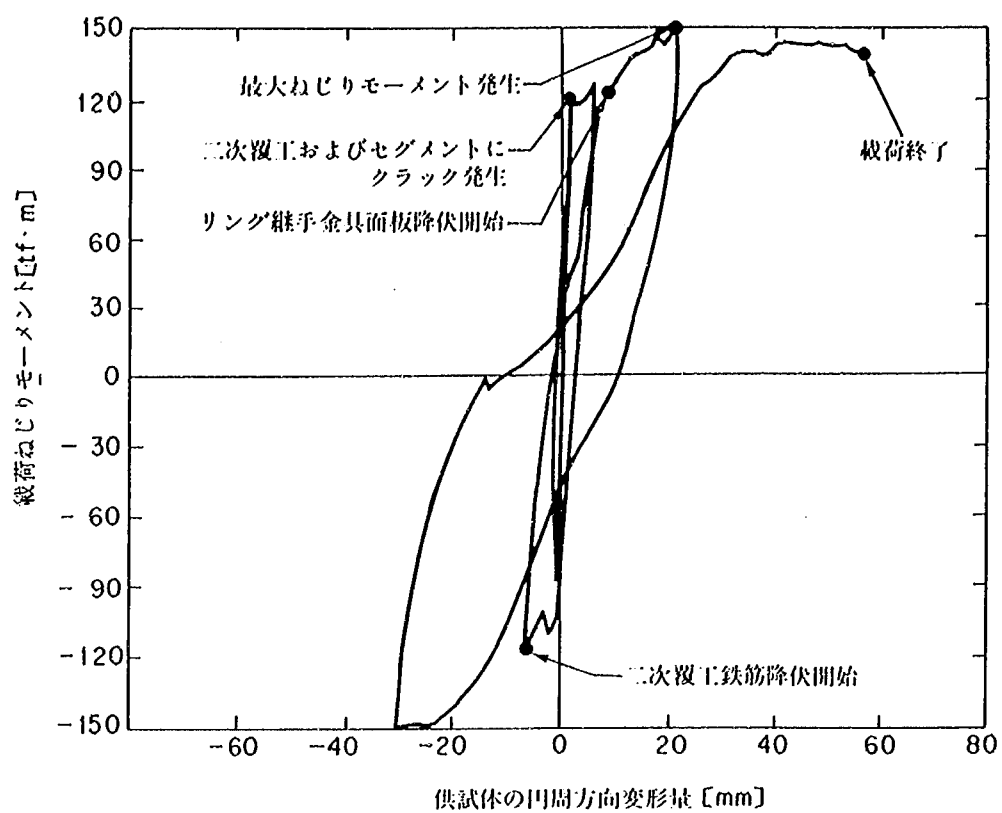
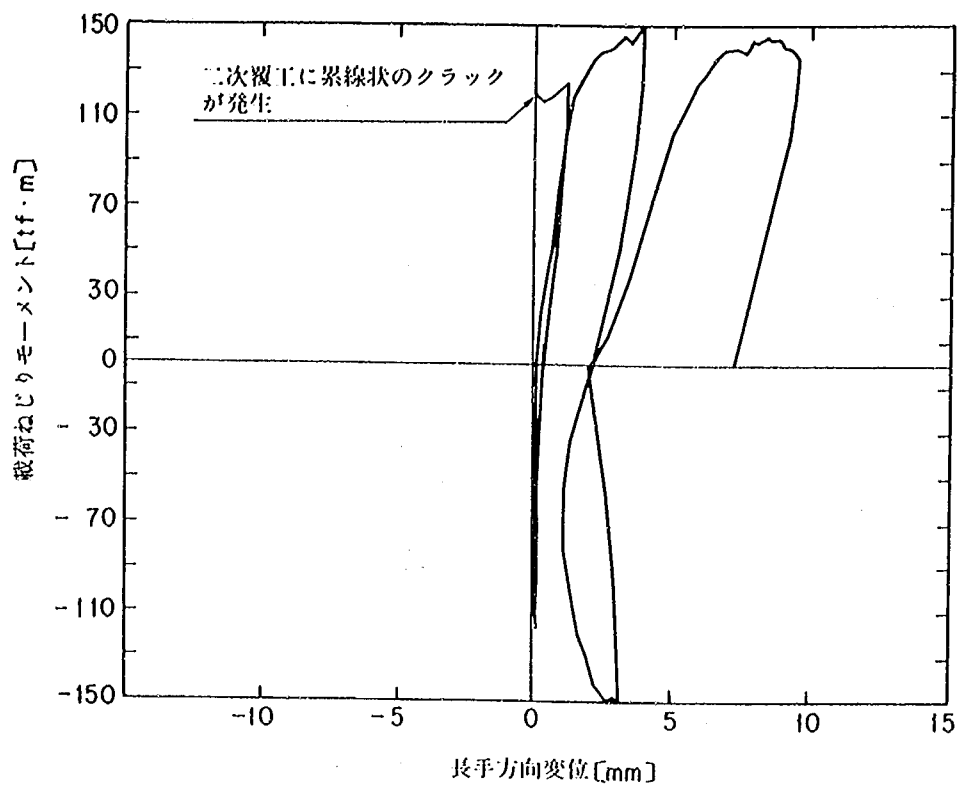
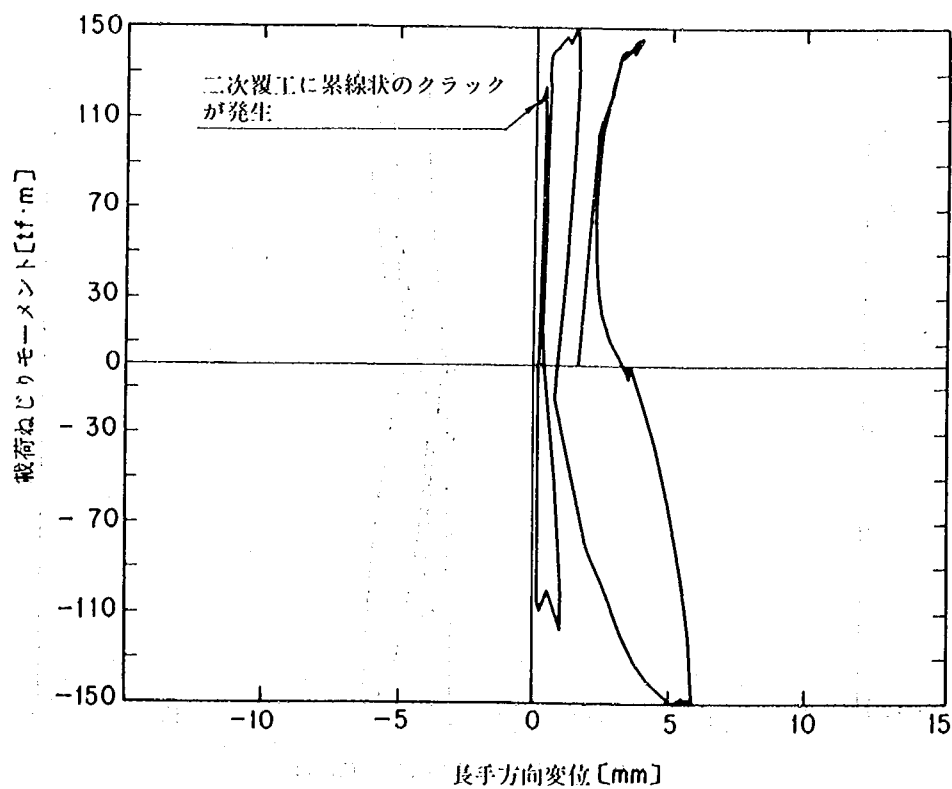


図- 3.21 Eタイプ供試体の載荷履歴

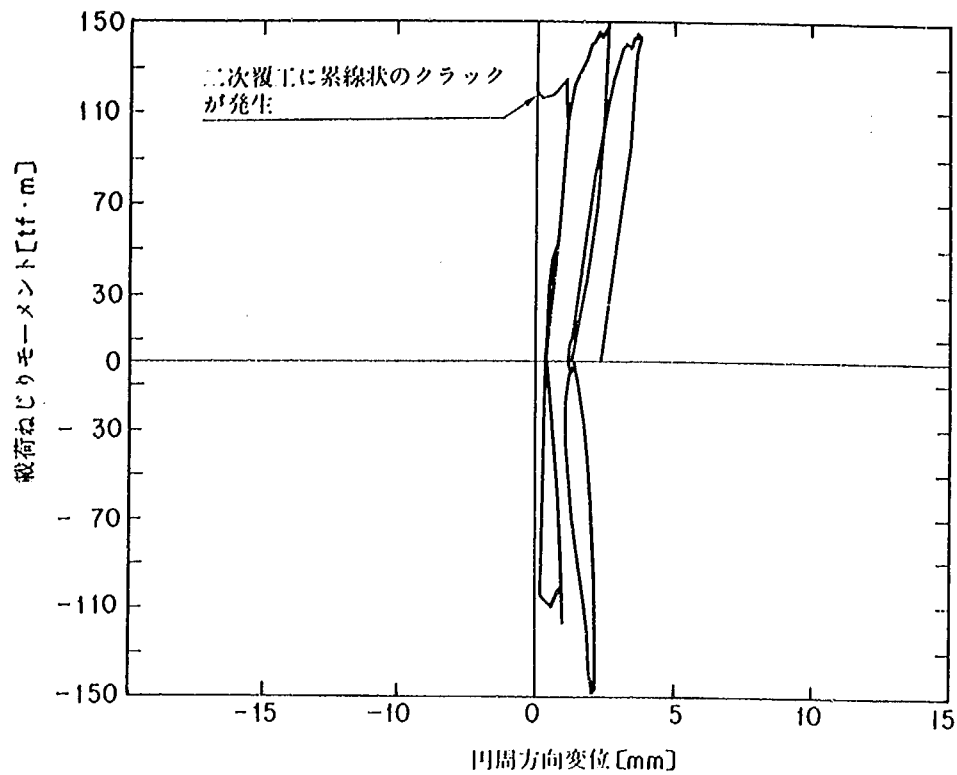


(a) JR 3 - 4

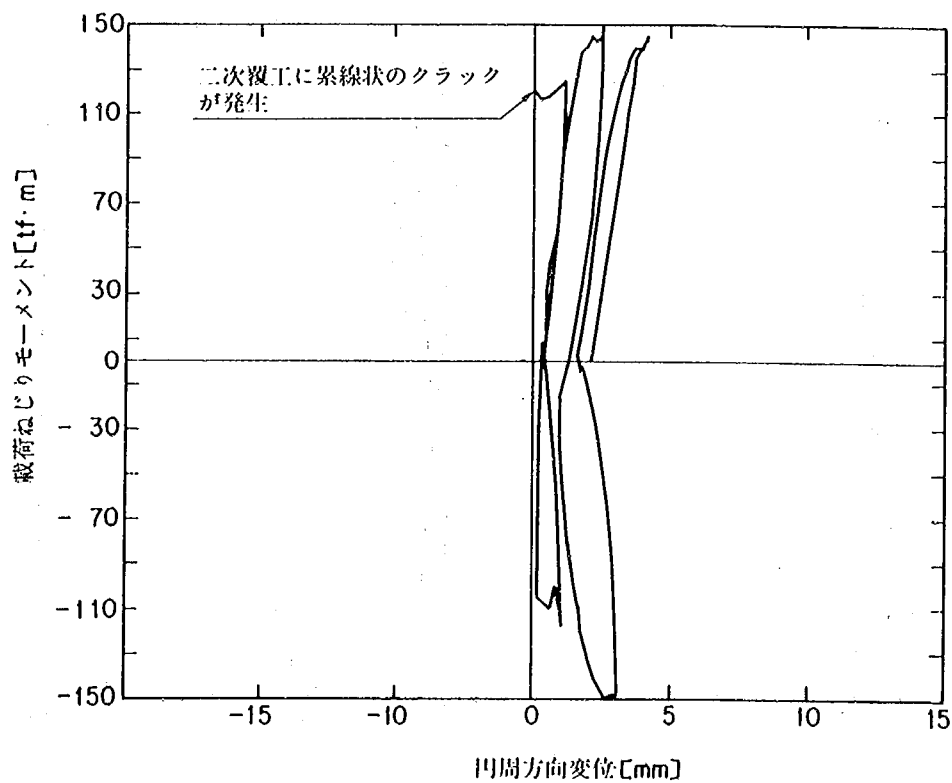


(b) JR 3 - 5

図-3.22 リング継手の長手方向変位の載荷履歴

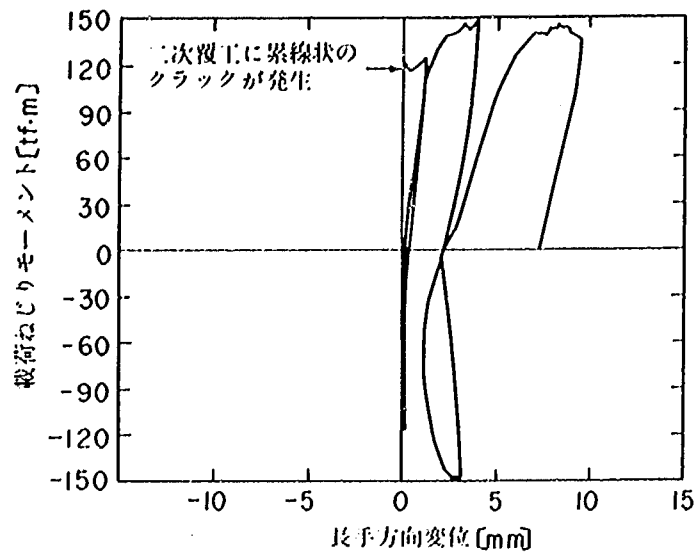


(a) JS3-7

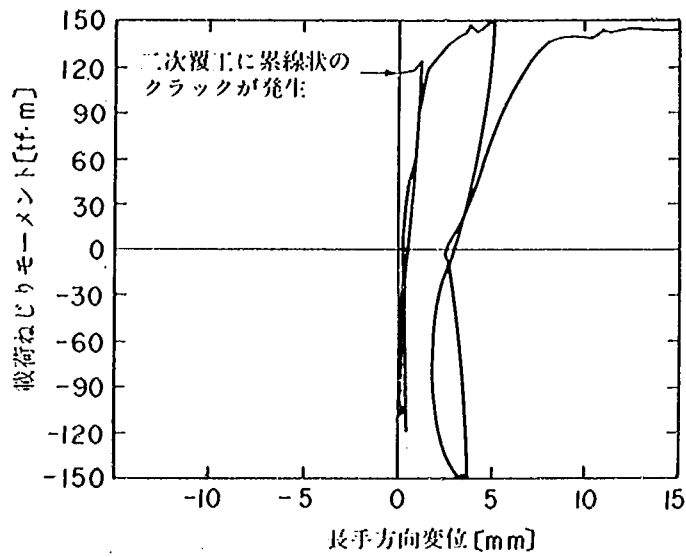


(b) JS3-3

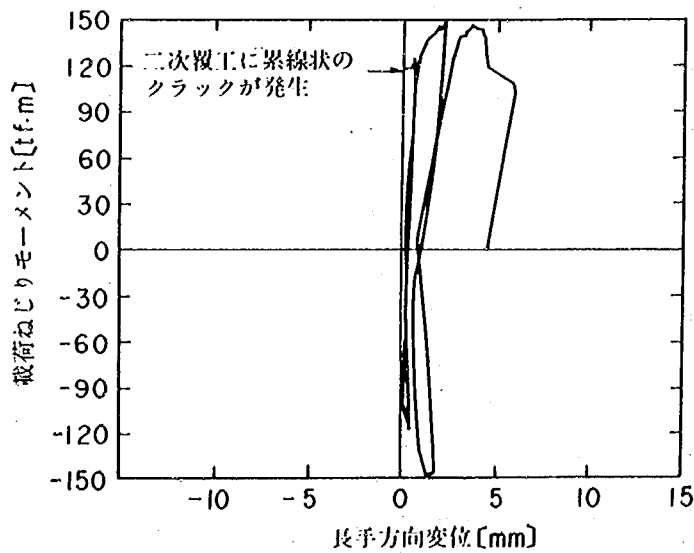
図-3.23 セグメント継手の円周方向変位の荷履歴



(a) JR1-4 (JT1)

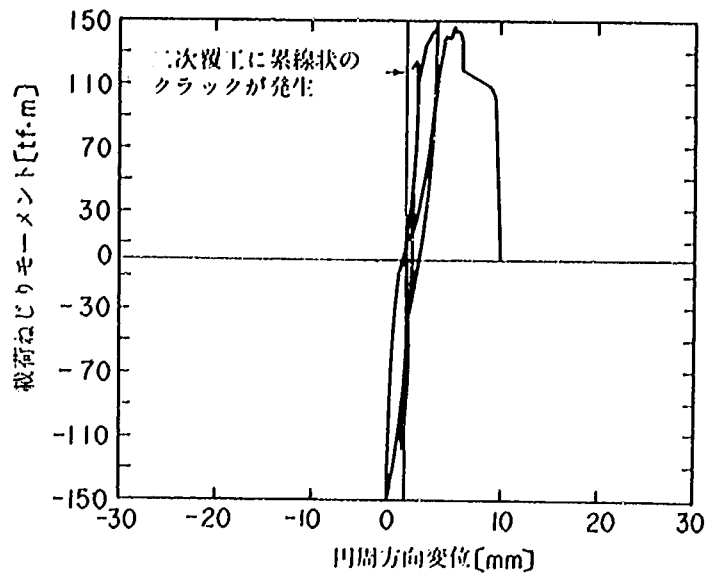


(b) JR2-5 (JT2)

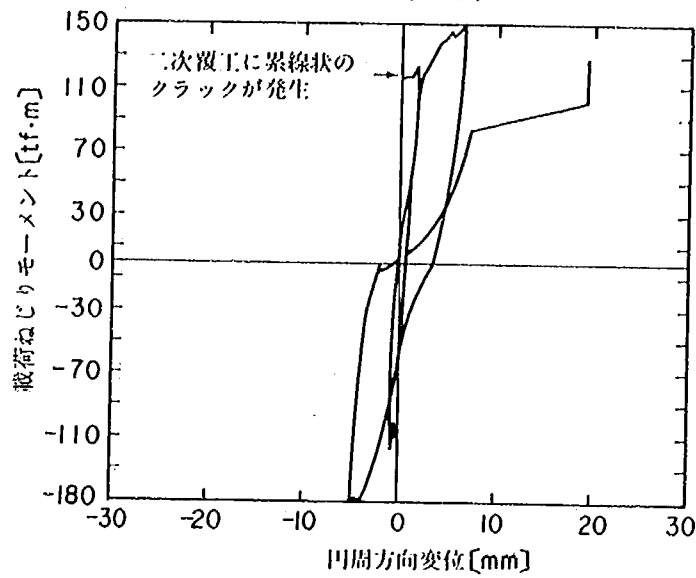


(c) JR3-4 (JT3)

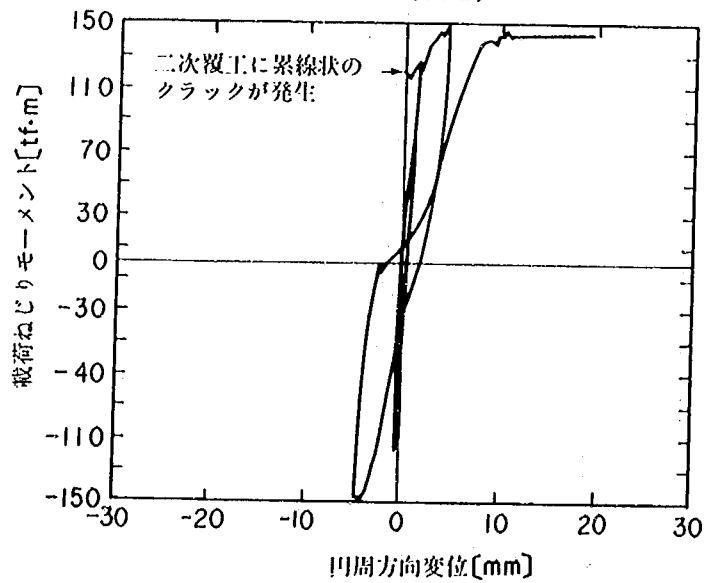
図-3.24 リング接合面の長手方向相対変位



(a) JR1-4 (JT1)



(b) JR2-5 (JT2)



(c) JR3-4 (JT3)

図-3.25 リング接合面の円周方向相対変位

3.8 結 論

シールドトンネルがねじりモーメントを受けた場合の変形特性および破壊性状を明らかにすることを目的として、リングを組んだシールドトンネル模型を用いて正負交番ねじり載荷実験を実施した。実験供試体は、厚さ 125 mm、長さ 900 mm のセグメント 4 個をリング状に組み、これをリング継手により 4 リング分だけ連結した D タイプ供試体、およびこれに厚さ 200 mm の鉄筋コンクリート製の二次覆工を施した E タイプ供試体の 2 種類である。

本載荷実験の結果をまとめると以下の通りである。

(1) 破壊特性

1) D タイプ供試体

載荷にともない、リング継手およびセグメント継手を中心として、トンネルの内外面に多数のクラックが発生し、やがて、リング継手のアンカー鉄筋および継ボルトが破断して最終的な破壊に至った。

2) E タイプ供試体

載荷にともない、セグメントおよび二次覆工の両方に無数のクラックが発生し、やがて、セグメントの分断、および二次覆工コンクリートの剥落が生じて最終的な破壊に至った。なお、本供試体については、継手の破壊、あるいは二次覆工鉄筋の破断まで載荷を行っていない。

(2) 変形および損傷の進展

1) D タイプ供試体

D タイプ供試体の変形および損傷の進展は、載荷荷重の増加にともない次の順序で進展した。

- ① リング接合面で滑りが発生 (JT 3, JT 2, JT 1 の順)
- ② リング継手金具定着板の端部からリング接合面に向かうクラックが発生 (JT 1, JT 2, JT 3)
- ③ リング継手位置からセグメント継手位置に向かう斜め引張クラックが発生 (JT 1, JT 2, JT 3)
- ④ リング継手のアンカー鉄筋が破断 (JT 2)
- ⑤ リング継ボルトが破断 (JT 2)

2) E タイプ供試体

E タイプ供試体の変形および損傷の進展は、載荷荷重の増加にともない次の順序で進展した。

- ① 二次覆工に斜め引張クラックが発生
- ② リング継手金具定着板の端部からリング接合面に向かうクラックが発生 (JT 1, JT 2, JT 3)
- ③ セグメント内部に亀甲状のクラックが発生 (JT 1, JT 2, JT 3)
- ④ 亀甲状のクラックがリング接合面およびセグメント接合面に到達して、セグメントの分断が発生 (JT 1, JT 2, JT 3)
- ⑤ 二次覆工コンクリートおよびセグメントコンクリートが剥落し、二次覆工鉄筋およびアンカー鉄筋が露出

上記のうち、リング接合面の滑り、二次覆工の斜め引張クラック、および、セグメント内部の亀甲状のクラックは以前に行った正負交番軸力⁶⁾載荷実験では認められておらず、シールドトンネルがねじり力を受けて破壊する場合の特徴である。

(3) セグメントの挙動特性

Dタイプ供試体、および、Eタイプ供試体で、同一セグメントの同一辺上にある2つのリング継手は異なった変形を生じた。すなわち、一方は向かい合った金具面板がこすれ合うように変形し、他方は金具面板が継ボルト位置で引張力を受けて“く”の字状（Eタイプ供試体ではボルト孔を中心とした円錐台状）に変形した。また、同一辺上にある2つのセグメント継手でもこれと同様の変形が認められた。これら継手の変形特性は、供試体を構成する個々のセグメントが、載荷にともない回転したことを示すものである。

以上の結果によれば、ねじり力を受けるシールドトンネルは、ねじり変位が小さいうちはリング接合面が滑ることによって、また、ねじり変位が大きくなってリング継ボルトがボルト孔の端部にぶつかった後は個々のセグメントが回転することによってねじり変位を吸収するものと考えられる。ただし、本実験では、供試体長手方向にはねじり載荷板の重量約5tfが作用しているだけであり、地震時にねじり力とともにさらに大きな長手方向力を受ける場合には、セグメントの回転が拘束されることも予想されるため、トンネル長手方向力の大きさがトンネルのねじり変形特性に及ぼす影響については別途検討が必要である。

(4) 損傷の分散

1) Dタイプ供試体

アンカー鉄筋の破断、および、継ボルトの破断はリング接合面JT2においてのみ生じているものの、セグメントのクラック、および、リング接合面の開きは3つのリング接合面に分散して生じた。これは、以前に行った正負交番軸力⁶⁾載荷実験において、供試体の損傷が全て1つのリング接合面に集中したのと大きく異なっている。

2) Eタイプ供試体

二次覆工の斜め引張クラックは供試体の全長にわたって、また、リング接合面の開きは3つのリング接合面に分散して生じた。本供試体では、リング継手の破壊や二次覆工鉄筋の破断まで載荷を行っていないため、このような損傷についても分散して生じるか否かは、別途検討の必要がある。

(5) 供試体の耐力、変形態

Dタイプ供試体、および、Eタイプ供試体の耐力、および、変形能を比較して示すと表-3.4（3.7(2)参照）の通りである。これによれば、Eタイプ供試体の最大耐力は $150.6\text{tf}\cdot\text{m}$ で、Dタイプ供試体の最大耐力 $76.5\text{tf}\cdot\text{m}$ の2倍に達している。しかし、反面、Dタイプ供試体でセグメントにクラックが生じ始めたねじり変位 36.9mm においては、Eタイプ供試体はセグメント、二次覆工ともに、すでに大きな損傷を生じている。以上の結果によれば、トンネル内に二次覆工を施した場合には、

ねじり耐力は向上するものの、リング接合面での滑りやセグメントの挙動が二次覆工によって抑制されるために、ねじり変形能は著しく低下するものと考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会・日本下水道協会共編：シールド工事に用標準セグメント，昭和57年11月改訂
- 2) 川島一彦・大日方尚巳・志波由紀夫・加納尚史：シールドトンネルの耐震性に関する研究——（その1）シールドセグメントの等価剛性の評価および応答変位法の適用——，土木研究所資料，第2262号，昭和60年10月
- 3) 川島一彦・大日方尚巳・志波由紀夫・加納尚史：シールドトンネルの耐震性に関する研究——（その2）覆工の軸剛性の非線形性を考慮した動的応答解析——，土木研究所資料，第2277号，昭和60年12月
- 4) 川島一彦・大日方尚巳・志波由紀夫・加納尚史：シールドトンネルの耐震性に関する研究——（その3）鉄筋コンクリートシールドセグメントの載荷実験——，土木研究所資料，第2381号，昭和61年4月
- 5) 川島一彦・大日方尚巳・志波由紀夫・加納尚史：連接したRCシールドセグメントの載荷実験，土木学会第42回年次学術講演会，昭和62年9月
- 6) 川島一彦・杉田秀樹・加納尚史：シールドトンネルの耐震性に関する研究——（その5）軸方向正負交番荷重を受けるシールドトンネル模型の載荷実験——，土木研究所資料，第2649号，昭和63年7月
- 7) K. Kawashima, H. Sugita, T. Kanoh: Loading Test of Shield Tunnel Specimens Subjected to Alternative Axial Loading, 4th U. S. National Conference on Earthquake Engineering, 1990. 5.
- 8) 川島一彦・杉田秀樹・加納尚史：シールドトンネルの耐震性に関する研究——（その8）シールド管渠の地震応答に及ぼす立坑の影響——，土木研究所資料，第2815号，平成2年1月

シールドトンネルの耐震性に関する研究

—(その6)正負交番の曲げおよびねじり荷重を受けるシールドトンネル模型の載荷実験—
要旨

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第2786号
平成元年7月(1989)

川島一彦, 杉田秀樹
加納尚史

本資料は、シールドトンネルの耐震性を評価する上で重要な、曲げおよびねじりに対する変形特性を明らかにするために行ったシールドトンネル模型の正負交番曲げおよびねじり載荷実験の結果をとりまとめたものである。
本検討により、シールドトンネルの変形特性および破壊特性が把握されとともに、耐震設計上注意を要する点が明らかにされた。



郵便はがき

四十一円切
手をはって
下さい。

305-□□

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所

耐震研究室 行

No. 112

No. 112

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第 2786 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏 名

印