

JNC TJ7420 2005-066

# 乾式破碎応力測定法の室内試験

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

2000年3月

三井金属資源開発株式会社

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地 49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課  
Tel: 029-282-1122 (代表)  
Fax: 029-282-7980  
e-mail: jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構  
(Japan Nuclear Cycle Development Institute) 2005

2000年3月

乾式破碎応力測定法の室内試験\*

新宮和喜\*\*, 中嶋敏秀\*\*, 山下 貢\*\*

要 旨

岐阜県と富山県の県境付近に位置する神岡鉱山茂住坑には、断層を横断する活断層調査坑道があり、総合的な活断層の調査研究が行われている。本報告書は、断層周辺の応力場を測定する乾式破碎応力測定法の確立のために、室内にて鋼管載荷試験と数値シミュレーションを実施した。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 本試験で得られた肉厚の異なる2種類の鋼管での試験結果の傾向はほぼ同じであり、試験の再現性が確認された。
- (2) 本年度の試験でも改良プローブを使用したが、安定した再開口圧力を得ることができ、各拘束圧条件下での繰り返し載荷を行う必要性はなくなった。
- (3) プローブを載荷した状態のプローブ中心部付近での鋼管に与えらるひずみ量は、プローブを若干(12cm程度)スライドしてずらしてもほぼ同じであることが分かった。
- (4) 本試験で得られた鋼管内載荷試験結果は昨年度の結果を補うことができ、試験結果はシミュレーションの結果と一致した。
- (5) 原位置載荷試験時に計測されるような典型的な圧力-変位曲線を数値解析によって再現することができた。

---

\*本報告書は三井金属資源開発株式会社が核燃料サイクル開発機構との契約により実施した業務成果に関するものである。

機構担当課室：東濃地科学センター 地質安定性研究グループ

\*\*三井金属資源開発株式会社

March, 2000

Laboratory Validation Test of Dry-Fracture Method of Stress Measurement\*

Kazuki Shingu\*\*, Toshihide Nakajima\*\*, Mitsugu Yamashita\*\*,

ABSTRACT

The active fault survey tunnel across the Mozumi-Sukenobu Fault is located at the Kamioka Mine, northern Gifu prefecture, Central Japan. At present, The comprehensive studies of the active fault are being carried out in this tunnel. In this report, the results of the laboratory test using steel pipes and numerical simulation for the new ground stress measuring instrument were presented in order to inspect the stress state around the active fault.

The following points became clear from this investigation.

- (1) The tendency of the laboratory test result for two kinds of steel pipes in thickness was almost same and the reappearance of the test was certified.
- (2) By using the improved instrument, the repetitious loadings like before became unnecessary.
- (3) The expanding displacement at the outer surface of the steel pipe around the central part of the swelling instrument was found to be almost unchanged although the instrument was slid 12cm along the pipe.
- (4) In the loading test using two kind of steel pipes in thickness, there are comparative agreements between the measured values and the computed results.
- (5) Typical pressure-Deformation curves for field measurement were able to be reproduced by numerical analysis.

---

\* This work was performed by Mitsui Mineral Development Engineering Co., LTD. under contract with Japan Nuclear Cycle Institute.

JNC Liaison : Neotectonic Research Group, Tono Geoscience Center

\*\* Mitsui Mineral Development Engineering Co., LTD.

# 乾式破碎応力測定法の室内試験

## 目 次

1.	調査概要	1
1. 1.	件名	1
1. 2.	目的	1
1. 3.	調査期間	1
1. 4.	調査項目	1
1. 5.	担当者	1
2.	乾式一面破碎法による応力測定の概要	2
2. 1.	プローブと計測システム	2
2. 2.	応力測定理論	4
2. 3.	これまでの乾式破碎法による各種試験の概要	7
3.	鋼管内載荷試験	11
3. 1.	試験の概要	11
3. 2.	試験結果	13
4.	鋼管内載荷試験の数値実験	70
4. 1.	BEM (境界要素法) の概念	70
4. 2.	圧肉円筒におけるBEM解析結果と厳密解の比較	72
4. 3.	鋼管内解析モデル	75
4. 4.	解析結果	77
5.	ボーリング孔壁載荷時の数値実験	80
5. 1.	ボーリング孔壁載荷状態のBEM解析	80
5. 1. 1.	解析モデルと境界条件	80
5. 1. 2.	解析結果	83
5. 2.	亀裂進展直前および亀裂再開口時の孔壁内周の載荷状態	85
5. 2. 1.	解析手順	85
5. 2. 2.	解析結果	88
6.	結論	91

## 図 表 一 覧

### 図 一 覧

図2.1.1.	S-800プローブの載荷部の基本構造	2
図2.1.2.	S-800計測システム図	3
図2.2.1.	半無限円孔板の円孔周辺応力概念図	5
図2.2.2.	円孔板の内圧が等応力状態で作用する場合	6
図2.2.3.	内圧が部分的に作用する場合	6
図2.2.4.	円孔周辺の応力	7
図2.3.1.	S-500プローブの断面模式図	9
図2.3.2.	鋼管内載荷試験時に観測されたS-500のプレスケールの結果	9
図2.3.3.	改良型S-800プローブの断面模式図	10
図2.3.4.	鋼管内載荷試験時に観測された改良型のプレスケールの結果	10
図3.1.1.	鋼管載荷試験ゲージ貼り付け位置	12
図3.2.1(a)	鋼管載荷試験における載荷圧－鋼管内変位図 (APT1)	14
図3.2.1(b)	鋼管載荷試験における載荷－時間および直径－時間図 (APT1)	15
図3.2.1(c)	鋼管載荷試験ひずみ計測結果 (APT1 : 1回目)	16
図3.2.1(d)	鋼管載荷試験ひずみ計測結果 (APT1 : 2回目)	17
図3.2.2(a)	鋼管載荷試験における載荷圧－鋼管内変位図 (APT2)	18
図3.2.2(b)	鋼管載荷試験における載荷－時間および直径－時間図 (APT2)	19
図3.2.2(c)	鋼管載荷試験ひずみ計測結果 (APT2 : 1回目)	20
図3.2.2(d)	鋼管載荷試験ひずみ計測結果 (APT2 : 2回目)	21
図3.2.3(a)	鋼管載荷試験における載荷圧－鋼管内変位図 (APT3)	22
図3.2.3(b)	鋼管載荷試験における載荷－時間および直径－時間図 (APT3)	23
図3.2.3(c)	鋼管載荷試験ひずみ計測結果 (APT3 : 1回目)	24
図3.2.3(d)	鋼管載荷試験ひずみ計測結果 (APT3 : 2回目)	25
図3.2.4(a)	鋼管載荷試験における載荷圧－鋼管内変位図 (APT4)	26
図3.2.4(b)	鋼管載荷試験における載荷－時間および直径－時間図 (APT4)	27
図3.2.4(c)	鋼管載荷試験ひずみ計測結果 (APT4 : 1回目)	28
図3.2.4(d)	鋼管載荷試験ひずみ計測結果 (APT4 : 2回目)	29
図3.2.5(a)	鋼管載荷試験における載荷圧－鋼管内変位図 (APT5)	30
図3.2.5(b)	鋼管載荷試験における載荷－時間および直径－時間図 (APT5)	31
図3.2.5(c)	鋼管載荷試験ひずみ計測結果 (APT5 : 1回目)	32

図3.2.5(d)	鋼管載荷試験ひずみ計測結果(APT5 : 2回目)	-----	33
図3.2.6(a)	鋼管載荷試験における載荷圧－鋼管内変位図(APT6)	-----	34
図3.2.6(b)	鋼管載荷試験における載荷－時間および直径－時間図(APT6)	-----	35
図3.2.6(c)	鋼管載荷試験ひずみ計測結果(APT6 : 1回目)	-----	36
図3.2.6(d)	鋼管載荷試験ひずみ計測結果(APT6 : 2回目)	-----	37
図3.2.7(a)	鋼管載荷試験における載荷圧－鋼管内変位図(BPT1)	-----	38
図3.2.7(b)	鋼管載荷試験における載荷－時間および直径－時間図(BPT1)	-----	39
図3.2.7(c)	鋼管載荷試験ひずみ計測結果(BPT1 : 1回目)	-----	40
図3.2.7(d)	鋼管載荷試験ひずみ計測結果(BPT1 : 2回目)	-----	41
図3.2.8(a)	鋼管載荷試験における載荷圧－鋼管内変位図(BPT2)	-----	42
図3.2.8(b)	鋼管載荷試験における載荷－時間および直径－時間図(BPT2)	-----	43
図3.2.8(c)	鋼管載荷試験ひずみ計測結果(BPT2 : 1回目)	-----	44
図3.2.8(d)	鋼管載荷試験ひずみ計測結果(BPT2 : 2回目)	-----	45
図3.2.9(a)	鋼管載荷試験における載荷圧－鋼管内変位図(BPT3)	-----	46
図3.2.9(b)	鋼管載荷試験における載荷－時間および直径－時間図(BPT3)	-----	47
図3.2.9(c)	鋼管載荷試験ひずみ計測結果(BPT3 : 1回目)	-----	48
図3.2.9(d)	鋼管載荷試験ひずみ計測結果(BPT3 : 2回目)	-----	49
図3.2.10(a)	鋼管載荷試験における載荷圧－鋼管内変位図(BPT4)	-----	50
図3.2.10(b)	鋼管載荷試験における載荷－時間および直径－時間図(BPT4)	---	51
図3.2.10(c)	鋼管載荷試験ひずみ計測結果(BPT4 : 1回目)	-----	52
図3.2.10(d)	鋼管載荷試験ひずみ計測結果(BPT4 : 2回目)	-----	53
図3.2.11(a)	鋼管載荷試験における載荷圧－鋼管内変位図(BPT5)	-----	54
図3.2.11(b)	鋼管載荷試験における載荷－時間および直径－時間図(BPT5)	---	55
図3.2.11(c)	鋼管載荷試験ひずみ計測結果(BPT5 : 1回目)	-----	56
図3.2.11(d)	鋼管載荷試験ひずみ計測結果(BPT5 : 2回目)	-----	57
図3.2.12(a)	鋼管載荷試験における載荷圧－鋼管内変位図(BPT6)	-----	58
図3.2.12(b)	鋼管載荷試験における載荷－時間および直径－時間図(BPT6)	---	59
図3.2.12(c)	鋼管載荷試験ひずみ計測結果(BPT6 : 1回目)	-----	60
図3.2.12(d)	鋼管載荷試験ひずみ計測結果(BPT6 : 2回目)	-----	61
図3.2.13(a)	鋼管載荷試験における載荷圧－鋼管内変位図(BPT7)	-----	62
図3.2.13(b)	鋼管載荷試験における載荷－時間および直径－時間図(BPT7)	---	63
図3.2.13(c)	鋼管載荷試験ひずみ計測結果(BPT7 : 1回目)	-----	64
図3.2.13(d)	鋼管載荷試験ひずみ計測結果(BPT7 : 2回目)	-----	65
図3.2.14(a)	鋼管載荷試験における載荷圧－鋼管内変位図(BPT8)	-----	66
図3.2.14(b)	鋼管載荷試験における載荷－時間および直径－時間図(BPT8)	---	67

図3.2.14(c) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(BPT8:1回目)	-----	68
図3.2.14(d) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(BPT8:2回目)	-----	69
図4.1.1. 仮想応力法:FSM	-----	70
図4.1.2. 変位食い違い法	-----	71
図4.1.3. ジョイント要素の表示	-----	71
図4.2.1. 圧肉円筒のモデル図	-----	72
図4.2.2. 圧肉円筒のBEM解析モデル図	-----	73
図4.2.3. 圧肉円筒におけるBEM解と厳密解の比較( $\theta=0^\circ$ )	-----	74
図4.3.1. 鋼管試験のBEM解析モデル図	-----	76
図4.4.1. S-800鋼管試験の実験値とBEM解析の比較	-----	77
図4.4.2. 鋼管試験の載荷状態と鉄管外周に貼り付けられたひずみゲージの配置	-----	78
図4.4.3. 外径100mm,内径64mm(鋼管Bを使用)の場合における 実験値とBEM解析結果の比較	-----	79
図5.1.1. 孔壁内周の載荷状態の解析モデル図( $\lambda=D$ のとき)	-----	81
図5.1.2. 孔壁内周( $\theta=0^\circ\sim 90^\circ$ )のせん断力	-----	83
図5.1.3. 孔壁内周( $\theta=0^\circ\sim 90^\circ$ )のr方向の載荷圧	-----	83
図5.2.1(a) 初期地圧条件のみの載荷状態	-----	87
図5.2.1(b). 孔壁内周の載荷状態	-----	87
図5.2.2. 亀裂進展解析モデル(亀裂長 $\lambda=2D$ の場合)	-----	87
図5.2.3. 圧力-変位曲線	-----	89

表 一 覧

表3.3.1. 鋼管による載荷試験条件	-----	11
表5.1.1. 各亀裂長における要素番号	-----	82
表5.2.1(a). 解析結果( $P_x=P_y=-1$ )のとき	-----	88
表2.2.2(b). 解析結果( $P_x=-1.2$ $P_y=-0.8$ )のとき	-----	88

## 1. 調査概要

### 1.1. 件名

乾式破碎応力測定法の室内試験

### 1.2. 目的

陸域地下構造フロンティア研究では、活断層周辺応力場解明の基礎データを取得することを目的とし、乾式破碎応力測定法の開発を実施している。本件は、昨年度に実施した乾式破碎応力測定法の検証試験の結果を踏まえて、本測定法の実用性を評価するための追加の検証試験を行う。

### 1.3. 調査期間

平成12年1月17日～平成12年3月17日

### 1.4. 調査項目

本調査の内容及び数量は以下のとおりである。

#### ①鋼管を用いた載荷試験

- ・ 2種類の鋼管 鋼管A(内径65mm, 外径89mm, 長さ610mm)と鋼管B(内径64mm, 外径100mm, 長さ800mm)を用いて, 2方向の載荷角度で試験を行う。
- ・ 各々の試験でひずみゲージを鉄管に18枚貼付する。

#### ②数値試験

- ・ 鋼管試験で測定されたひずみ分布から, 境界要素法を用いた数値解析により, 孔内載荷分布を定量的に求める。
- ・ 原位置載荷試験時に計測されるような典型的な圧力-変位曲線を境界要素法を用いた数値解析により再現する。

### 1.5. 担当者

本調査は山口大学工学部水田義明教授と石田毅助教授の指導のもと以下に記す担当者が実施した。

三井金属資源開発株式会社

地球環境事業部 技師長 新宮和喜

地球環境事業部 主任 中嶋敏秀

地球環境事業部 主任 山下 貢

## 2. 乾式一面破碎法による応力測定の概要

### 2.1. プローブと計測システム

乾式破碎法による応力測定原理は、地殻におけるボーリング掘削による円孔内を内圧  
 載荷した時の載荷圧と孔径変化を観測し、地殻応力を推定するものである。

本載荷試験で用いた応力測定装置は、昨年度使用した装置と同じ型のもので、以前の  
 S-500タイプを改良した乾式多面破碎計測装置S-800である。図2.1.1にS-800プローブの  
 概念図を示す。このS-800計測装置は、既往のS-200タイプの乾式破碎法とは異なり、ウ  
 レタン性のプローブの周辺に2つ割れの摩擦シェルを接合し、1方向のみに載荷方向を  
 制御して新規亀裂を発生させ、再載荷時の圧力-直径変化曲線から亀裂に直行する方向  
 の開口応力を決定し、同位置において最低3方向での計測結果から未知数として最大主  
 応力、最小主応力およびその方向を決定する。原理的には、設定した任意方向以外の亀  
 裂は、摩擦シェルの十分な摩擦により開口せず、観測される圧力-直径変化に影響を与  
 えない。S-800プローブの摩擦シェルの表面は摩擦効果を発揮すべく工夫されている。  
 この載荷機構によれば、実岩盤での既存亀裂、潜在亀裂の影響を抑えて亀裂開口時の圧  
 力を求められる可能性が大きい。

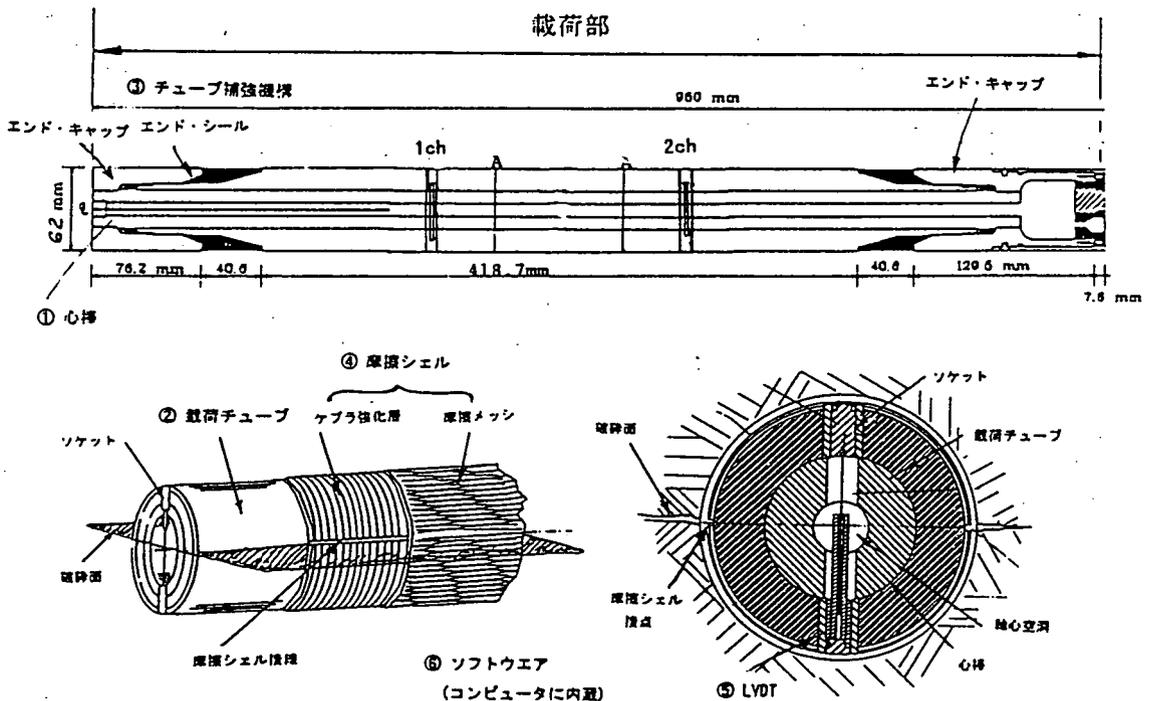


図2.1.1. S-800プローブの載荷部の基本構造

図2.1.2には、S-800を使用する際の計測システムの概要図を示す。この計測システムを用いて計測する項目は、実験開始からの経過時間、S-800プローブの载荷圧、载荷方向のS-800プローブの直径である。なおプローブの直径は、図2.1.1に示すように2カ所で同一方向の変化をLVDT(差動トランス)を利用した機構により計測する。

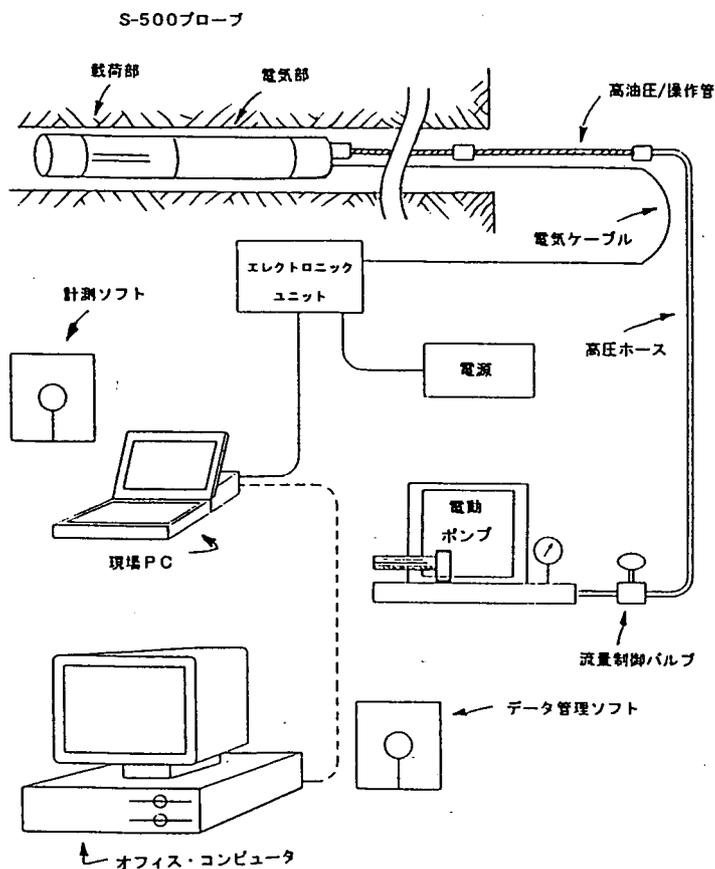


図2.1.2. S-800計測システム図

## 2.2. 応力測定理論

乾式破砕法による応力測定の原理は、基本的には、円孔周辺理論によるものである。半無限板に空いた円孔周辺の応力状態については、弾性論に基づき種々の理論が示されているが、平面ひずみ状態（応力場に関しては平面応力状態も同様）での拘束圧を受ける有孔板の応力については、Kirschの解が代表的なものとして挙げられる。乾式破砕法のような円孔内から内圧を負荷する場合の円孔周辺への応力の影響については、応力制御荷重、変位制御荷重および全面荷重、部分荷重などの荷重状態により異なり、それぞれ弾性理論に基づく理論解または近似解が得られている。応力制御荷重について着目すると、円孔壁面に全面荷重した場合には、Timoshenkoにより近似解が得られており、法線方向応力  $\sigma_r$  および周方向応力  $\sigma_\theta$  は、それぞれ内圧  $p$  がそのまま増加あるいは減少する応力状態となる。また、内圧が円孔壁面に部分的に作用する場合には、Jaegerの理論により、内圧  $p$  の荷重により円孔に分布する法線方向応力  $\sigma_r$  および周方向応力  $\sigma_\theta$  を算出することができる。

本検討で用いた乾式一面破砕式応力測定装置は、通常乾式破砕法の荷重機構である等方圧の加わるウレタンチューブに半円形状に2分割された摩擦シェルを接合し、亀裂の方向を制御するメカニズムになっており、岩盤との摩擦、部分的な不均等荷重などの特徴があり、単純な応力状態にないものと考えられるため、ここではKirschの解による円孔理論を示し、内圧荷重による円孔壁面での応力状態について、Timoshenkoの解、Jaegerの理論を概略説明する。

### (1) 弾性論に基づく円孔周辺応力

#### ① Kirschの解

平面ひずみ状態における半無限円孔板の応力は、Kirschの解として一般的に知られている。半無限円孔板に任意応力  $P$  とそれに直交する応力  $Q$  が作用する場合、円孔中心から  $r$  の距離にあり、 $P$  の作用方向から  $\theta$  の角度における位置の応力は次式で与えられる。

図2.2.1に半無限円孔板の円孔周辺応力概念図を示す。

$$\sigma_r = \frac{P+Q}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{P-Q}{2} \left(1 - \frac{4a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta$$

$$\sigma_\theta = \frac{P+Q}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{P-Q}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{P-Q}{2} \left(1 + \frac{2a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4}\right) \sin 2\theta$$

ここに、 $P, Q$ : 作用力,  $a$ : 円孔半径,  $r$ : 円孔中心からの距離,  $\theta$ :  $P$  方向からの角度

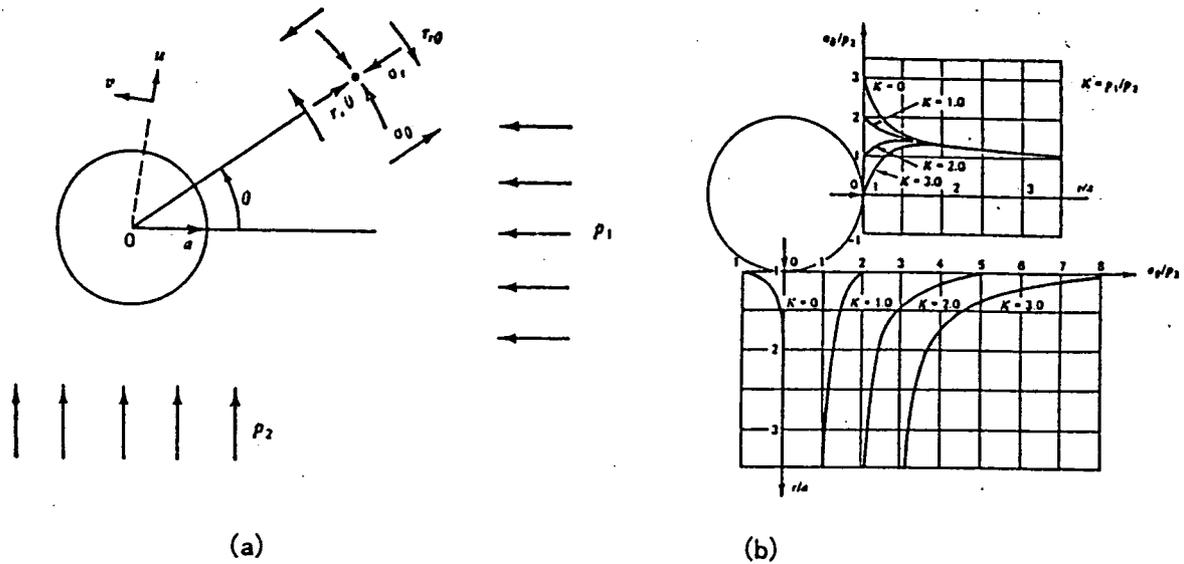


図2.2.1. 半無限円孔板の円孔周辺応力概念図

②内圧载荷による周方向応力  $\sigma_\theta$  の変化

半無限板の円孔に内圧が負荷されることによる円孔壁面での周方向応力  $\sigma_\theta$  は、その载荷状態により異なる。法線方向応力  $\sigma_r$  および周方向応力  $\sigma_\theta$  については、円孔壁面に全面载荷した場合には、Timoshenkoにより近似解が与えられており、部分的に载荷された場合には、Jaegerの理論により与えられている。以下に各理論による内圧  $p$  の負荷による周方向応力  $\sigma_\theta$  に着目して述べる。

円孔板の内圧が等応力状態で作用する場合には、図2.2.2に示す条件において、Timoshenkoの解より内圧  $p$  による周方向応力  $\sigma_\theta'$  は、次式により与えられる。

$$\sigma_\theta' = \frac{a^2 b^2 (P_0 - P_1)}{b^2 - a^2} \cdot \frac{1}{r^2} + \frac{P_0 b^2 - P_1 a^2}{b^2 - a^2} \quad (4)$$

$P_1$ : 内圧,  $P_0$ : 作用力,  $a$ : 円孔半径,  $b$ : 円孔中心からの作用力境界

ここで、作用力境界  $b$  が円孔直径  $a$  に対して十分に大きく、円孔壁面からのみ内圧  $P_1$  が作用した場合の  $\sigma_\theta'$  を算定するには、以下の条件

$$b \gg a, \quad P_0 = 0, \quad r = a$$

を式(4)に代入する。

従って、内圧  $P_1$  による円孔壁面での周方向応力  $\sigma_\theta'$  は

$$\sigma_\theta' = -P_1 \quad (5)$$

となる。すなわち、内圧を全载荷した場合には、円孔周方向応力は、符号を逆にしただけの増分となる。

次に、内圧が等方ではなく、図2.2.3に示すような部分的に作用する場合には、Jaegerの理論により内圧  $p$  による周方向応力  $\sigma_\theta'$  は、次式により与えられている。

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta} &= P_1 - (4P_1\alpha/\pi) & -\alpha < \theta < \alpha, \quad \pi - \alpha < \theta < \pi + \alpha \\ \sigma_{\theta} &= -4P_1\alpha/\pi & \alpha < \theta < \pi - \alpha, \quad \pi + \alpha < \theta < 2\pi - \alpha \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 $\alpha$  : 载荷角度(ラジアン)

(6) 式によれば、内圧を部分载荷した場合、内圧による非载荷部の円孔周方向応力の増加、すなわち、地殻応力((1)式による円孔周辺の初期状態)に対する $\sigma_{\theta}$ の低減率が大きくなり、局所的な引張応力の発生が早くなることを示している。

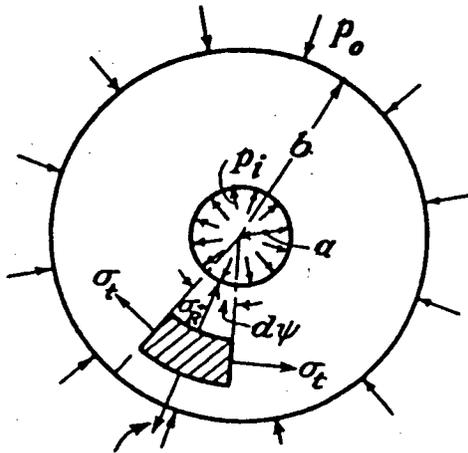


図2.2.2. 円孔板の内圧が等応力状態で作用する場合

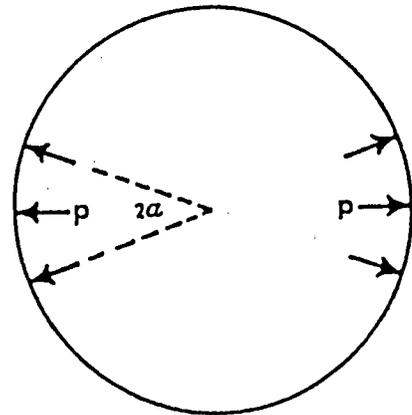


図2.2.3. 内圧が部分的に作用する場合

### ③多面破碎法の地殻応力推定の概念

本検討の多面破碎式応力測定装置では、内圧はほぼ全载荷状態で負荷されているものと考えられる。そこで、Timoshenkoの等方载荷の場合を例にとり、任意方向の亀裂再開応力が捉えられることを前提として、地殻応力推定の概念について述べる。

前にも述べたように、通常の乾式一面破碎式応力測定では、初期载荷により岩盤に亀裂を与え、再载荷による既存亀裂の開口挙動を観測し、最大および最小主応力を推定するものである。この概念では、円孔壁面での内圧と作用力(地殻応力による円孔周辺応力の応力状態の釣り合い)を考えたものであり、(2)式に $a = r$ を代入し、(5)式と合わせた次式により定義される。

$$\sigma_{\theta} = (3Q - P) + 4(P - Q)\sin^2 \theta - P_1 \quad (7)$$

平面内の主応力 $P$ および $Q$ の方向は未知であるため、図2.2.4に示すように最大主応力軸からの角度を $\alpha$ として、式(7)を一般化すると次式が与えられる。

$$\sigma_{\alpha} = (3Q - P) + 4(P - Q)\sin^2(\theta + \alpha) - P_1 \quad (8)$$

既往の二面破碎法の場合、亀裂の方向は、最小主応力直交方向となり、初期载荷で岩盤に亀裂を発生させ、岩盤特性の引張強度を喪失させ、再载荷により岩盤特性には寄与し

ない境界条件の変化（亀裂の再開）による計測挙動変化を評価し、主応力を推定するものであるが、現実には潜在亀裂等の存在により、発生亀裂方向の確認および最大主応力の計測が困難な場合がある。

ここで、亀裂方向が制御できるものとし、二面破碎法での応力推定原理が適用できるものとするれば、式（8）において未知数は、 $P$ 、 $Q$ および $\theta$ であり、内圧 $P_i$ の荷重により最低3方向で $\sigma_\theta$ の値が得られれば、連立方程式から未知数を求めることができる。

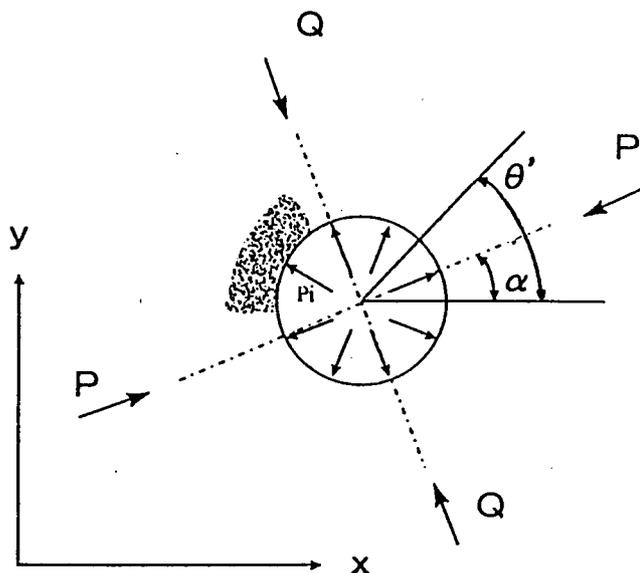


図2.2.4. 円孔周辺の応力

### 2.3. これまでの乾式一面破碎法による各種試験の概要

S-800は、2.1.で述べたように、同位置において最低3方向の亀裂を発生させ、それぞれの亀裂を再開口させたときの圧力-直径変化曲線から亀裂に直行する方向の開口応力を求める必要がある。従って、S-800が必要とされる重要な機能として、「任意方向に破断面を生成出来ること」と、「既存の破断面がある場で、特定の破断面だけを開口させる載荷荷重を精度良く決定できること」をあげることができる。

最初に試作したS-800は、サンダー・ベルト型やワイヤ・ブレード型の摩擦シェルによるプローブと孔壁との摩擦効果を期待して製作され、それを用いて室内試験や現場試験を実施した。これらの試験結果、S-800の性能を評価する上での第一の基本的要件である「任意方向に破断面を生成出来ること」に関して、亀裂の造成が可能であると確認されたが、最初に試作された摩擦シェルについてはどれも、第一方向および第二方向の破断面が存在する状態で、第三方向の破断面の生成について、既存亀裂の開口を確実に押さえることが出来なかった。このことは、最初に試作されたプローブのシェルの摩擦効果がなお不十分であることを示唆していると考えられた。

次に、第二の基本的要件である「既存の破断面がある場で、特定の破断面だけを開口させる載荷荷重を精度良く決定できること」については、室内試験の破断面が存在する場合の破断面再開口をシミュレートし、得られた圧力-変形曲線と試験で得られた圧力-変形曲線の特徴を対比させることにより、破断面の再開口時の荷重を特定する手法を提案することができた。しかし、圧力-変形曲線の上で、亀裂の再開口による折れ点を見つけだすことは理想的ではあるが、FEM解析結果からも、変化点を捉えることが容易ではなく、試験から得られる上部の折れ点圧力は、理論式から求めた折れ点圧力より2～3倍大きいという結果になった。

上述の問題点を踏まえて、大幅にプローブの改良を行った。ここでまず、最初に考案したサンダー・ベルト型やワイヤ・ブレード型の摩擦シェルの利用を諦め、更に大きな摩擦効果と機械強度が期待できる構造を模索した。そして、摩擦シェルの表面を、以前のS-500が外周金属板の表面から単純に垂直に溝を入れていたのに対し、金属表面を鋸の歯のように加工し、プローブの載荷膨張の時に摩擦シェルが孔壁に密着しやすく且つ孔壁に食い込み滑りを最小限に抑える機能を持たせた。また、図2.3.1.に最初に試作されたプローブの断面図を示し、図2.3.2.に鋼管内載荷試験時にプローブに巻き付けたプレスケール（圧力によって発色する紙であり、色の濃淡から圧力の大きさが推定できる）の結果を示す。プローブ中央部の3つのやや白くなっている丸い部分は変位計のソケット2カ所とアンカー部である。一方、黒く太い筋状になっている部分は摩擦部と摩擦部の間、つまり亀裂発生部分である。この結果は、最初に実施した試験に使用したプローブが、事前に想定していた載荷機構（亀裂作成面が摩擦シェル内部のウレタンの等方膨張により引き離され引張破壊が起こっている）通りではなく、亀裂作成面直近の摩擦シェルの強い拘束を受けた状況下（シェルが供試体に食い込んだような状態）で、その内部のウレタンが膨張することによって生じる局部的引張破壊であると考えられた。これを鑑みて改良されたプローブ（S-800）は図2.3.3.に断面図を示すように、亀裂発生箇所から内部のウレタンがはみ出してこない構造となっている。改良後のS-800を使用したときのプレスケールの結果を図2.3.4.に示す。このように、改良前のような亀裂発生部で最も圧力が掛かっている状態では無くなっており、改良型S-800プローブを用いると当初想定した破壊機構通りに破砕が行えるものと考えられた。

この結果、安定した再開口圧力を得ることができるようになり、圧力-変位曲線の再開口圧力と理論式から求めた再開口圧力との相関性は、低圧部から高圧部まで一定の関係があることが示された。また、改良されたS-800を用いて、外部から拘束圧を受けたコンクリート供試体による計測試験を試みた処、計測結果から得られた拘束圧とその方向は試験の設定値とほぼ一致した。

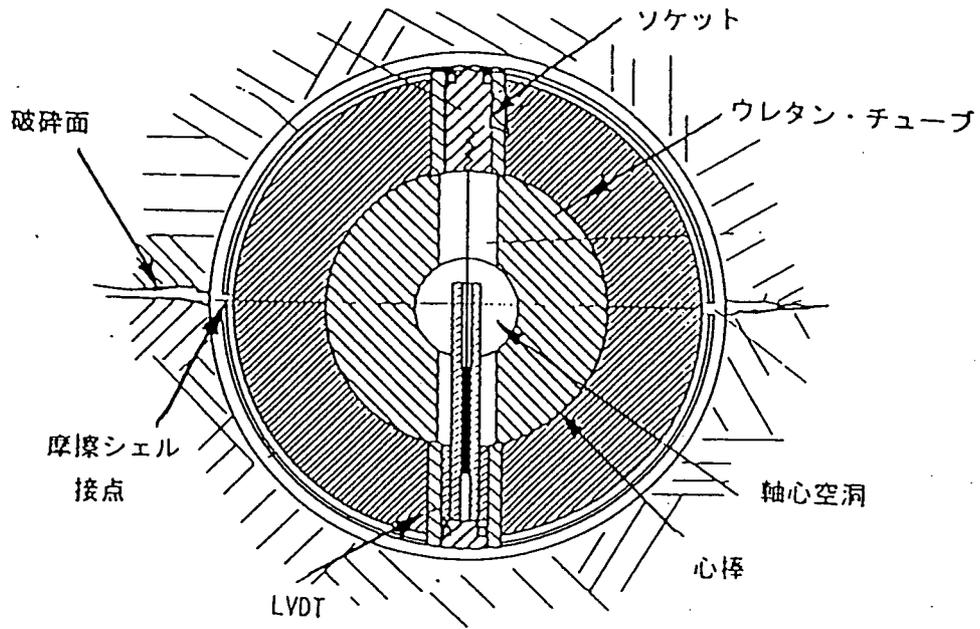


図2.3.1 S-500プローブの断面模式図

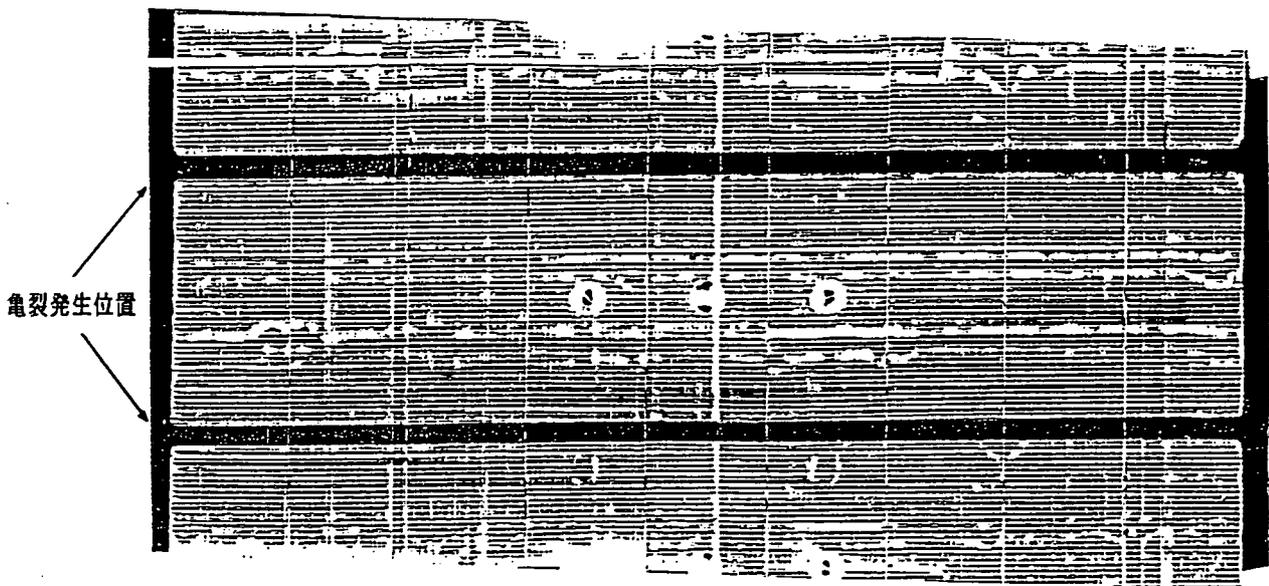


図2.3.2 鋼管内載荷試験時に観測されたS-500のプレスケールの結果

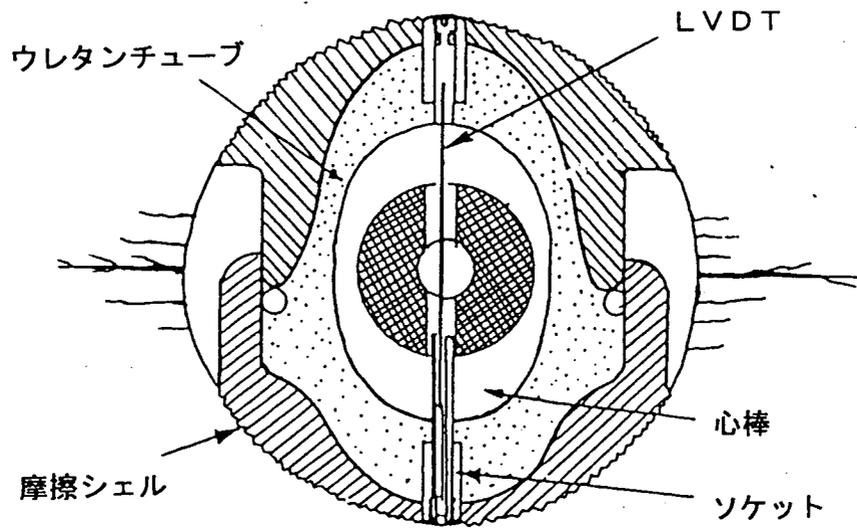


図2.3.3. 改良型S-800プローブの断面模式図

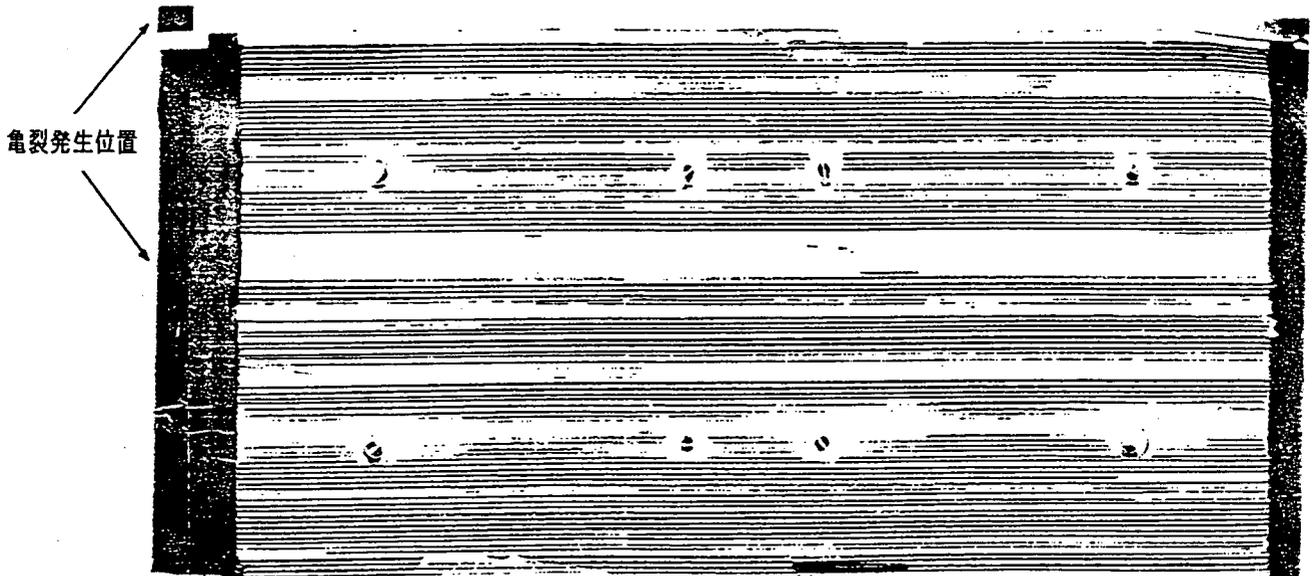


図2.3.4 鋼管内載荷試験時に観測された改良型のプレスケールの結果

### 3. 鋼管内載荷試験

#### 3.1. 試験の概要

昨年度の試験では、供試体を用いた破砕試験の他に、鋼管内で載荷試験を行い、そのときの鋼管外側のひずみを計測した。乾式一面破砕法によって起こされる破壊機構を確認するうえでプローブ上の圧力分布を知る必要があり、得られたひずみの値と数値シミュレーションの結果からプローブが鋼管内壁に与える応力状態を調べることを目的としたものであった。しかしながら、昨年度の鋼管内載荷試験は内径 65mm、外径 89mm、長さ 610mm の鋼管のみで実施し、その試験結果を数値シミュレーションしたものである。S-800 の挙動をさらに明確にするには、別の仕様の鋼管でも同様の試験を実施して、同様のシミュレーションが得られるかチェックすることが望ましい。そこで、本試験では昨年度使用した鋼管を使用して同様の試験を実施すると共に、今年は内径 64mm、外径 100mm、長さ 800mm という内径は小さく、外径は大きい鋼管を使用して、再度鋼管内において載荷試験を試みた。図 3.1.1. に鋼管に貼付したひずみゲージの位置関係を示すが、各鋼管の軸方向の中心部において鋼管外周に 2mm のひずみゲージを 18 枚を貼り付けた。また、表 3.1.1. には試験の条件を示す。

表 3.1.1 鋼管による載荷試験条件

試験名	亀裂作成方向 水平から時計回り (°)	最大載荷圧力 (kg/cm <sup>2</sup> )	試験回数	参照図
APT1	0	500	2	図 3.2.1.
APT2	0	500	2	図 3.2.2.
APT3	90	500	2	図 3.2.3.
APT4	0	500	2	図 3.2.4.
APT5	0	500	2	図 3.2.5.
APT6	0	500	2	図 3.2.6.
BPT1	0	500	2	図 3.2.7.
BPT2	90	500	2	図 3.2.8.
BPT3	0	500	2	図 3.2.9.
BPT4	0	500	2	図 3.2.10.
BPT5	0	500	2	図 3.2.11.
BPT6	90	500	2	図 3.2.12.
BPT7	0	500	2	図 3.2.13.
BPT8	90	500	2	図 3.2.14.

註) 上表で APT5, APT6, BPT3, BPT4, BPT5, BPT6, BPT7 及び BPT8 は、プローブを前又は後にスライド移動させて載荷試験を実施した時の、鋼管中心部のひずみ状況を調べるために実施したものである。

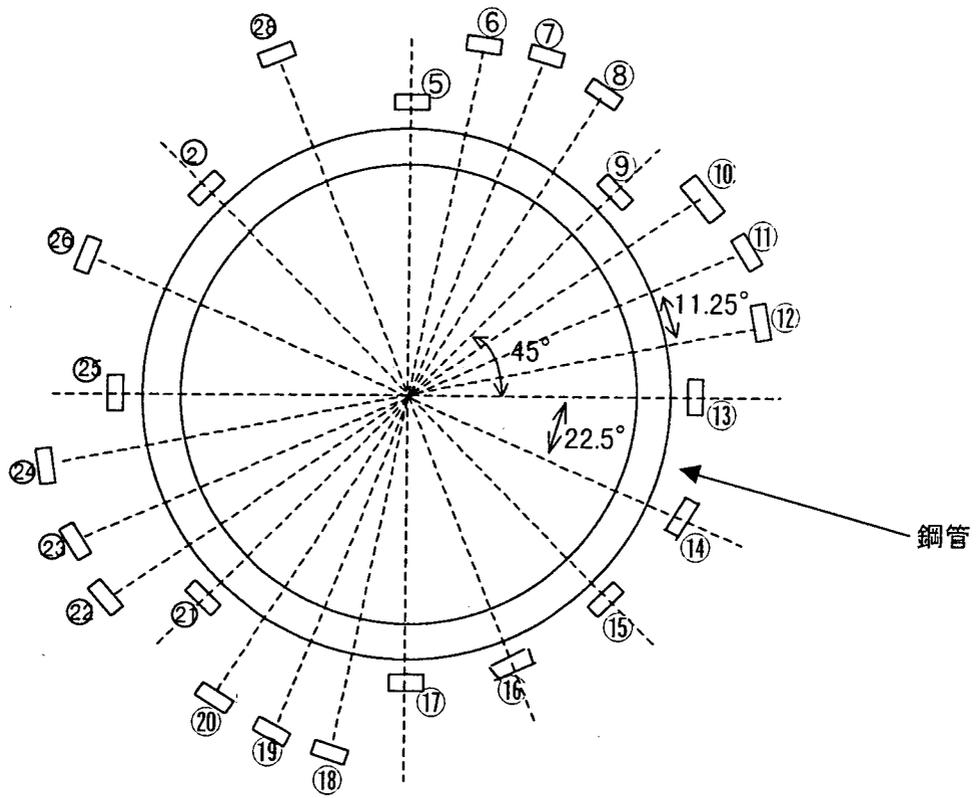


図3.1.1. 鋼管載荷試験ゲージ貼り付け位置

### 3.2. 試験結果

鋼管内載荷試験で得られた試験結果を図 3.2.1(a)～(d)から図 3.2.14(a)～(d)に示す。それぞれ、図(a)にはプローブに設置された2つの LVDT(CH1 および CH2)の鋼管内の変位量とプローブ内の載荷圧を、(b)には CH1 の載荷圧－載荷時間および直径変化－時間を、図(c)と図(d)には各々最高載荷圧における鋼管周囲に貼り付けた歪みゲージによって計測されたひずみ量を示す。

鋼管Aに関する図 3.2.1 の(c)と(d)を見ると、対称となる位置のひずみ量はほぼ等しいことが分かる。即ち、プローブが 13ch と 25ch の位置で対称に開いており、ひずみゲージの方向や計測系が正しく機能していることを示している。亀裂発生位置(13ch および 25ch)の鋼管表面のひずみ量が最も小さく、亀裂発生位置と  $90^\circ$  離れた位置(5ch および 17ch)で最もひずみ量が多いという結果になっている。この現象はプローブを  $90^\circ$  回転させて載荷しても同じである。亀裂面が水平な場合、亀裂発生位置から  $90^\circ$  離れたひずみ量の最も大きい位置(CH5, 17)から、亀裂発生位置のひずみ量の最も小さい位置(CH13, 25)に向かうに伴い、ひずみ量はわずかずつ減少すしていき、 $90^\circ$  の直前(CH12, 24 ( $78.75^\circ$ ))になって急激に減少しているのが分かる。この傾向は、鋼管Bに関する図 3.2.7 の(c)と(d)を見ても概ね同一であるが、鋼管Bの場合の方が緩やかに減少している。両者を比較すると、鋼管Aの外周で計測されるひずみ量は、亀裂面が水平の時、CH8 や 20 付近で約 450 となっている、鋼管Bの同じ位置のひずみ量は約 300 であり、鋼管Aのひずみ量よりも小さい。鋼管Bで計測されたひずみ量が、亀裂発生位置から  $90^\circ$  から亀裂発生位置に向かって鋼管Aよりもなだらかに現象する事や、ひずみ量が鋼管Aよりも小さく計測されることは、鋼管の厚さの影響と思われる。この現象は鉄管AおよびBでの他の試験についてもほぼ同様の傾向が認められ、試験の再現性も充分ある。

また、次に載荷プローブを鋼管の中で前後に動かして載荷したときのひずみ量をみる。鋼管Aの図 3.2.1 の(c)と(d)および図 3.2.5 かつ図 3.2.6 の(c)と(d)のそれぞれを比較すると、ほとんど変化がない。更に、鋼管Bの図 3.2.7 の(c)と(d)および図 3.2.9 から図 3.2.14 の(c)と(d)のそれぞれを比較してもほとんど変化がないことが分かる。これはプローブの膨張部内であれば多少の位置がずれても鋼管に与える影響はほとんど認められないことを表しており、プローブの膨張機構は任意の断面で同一であることを示す。

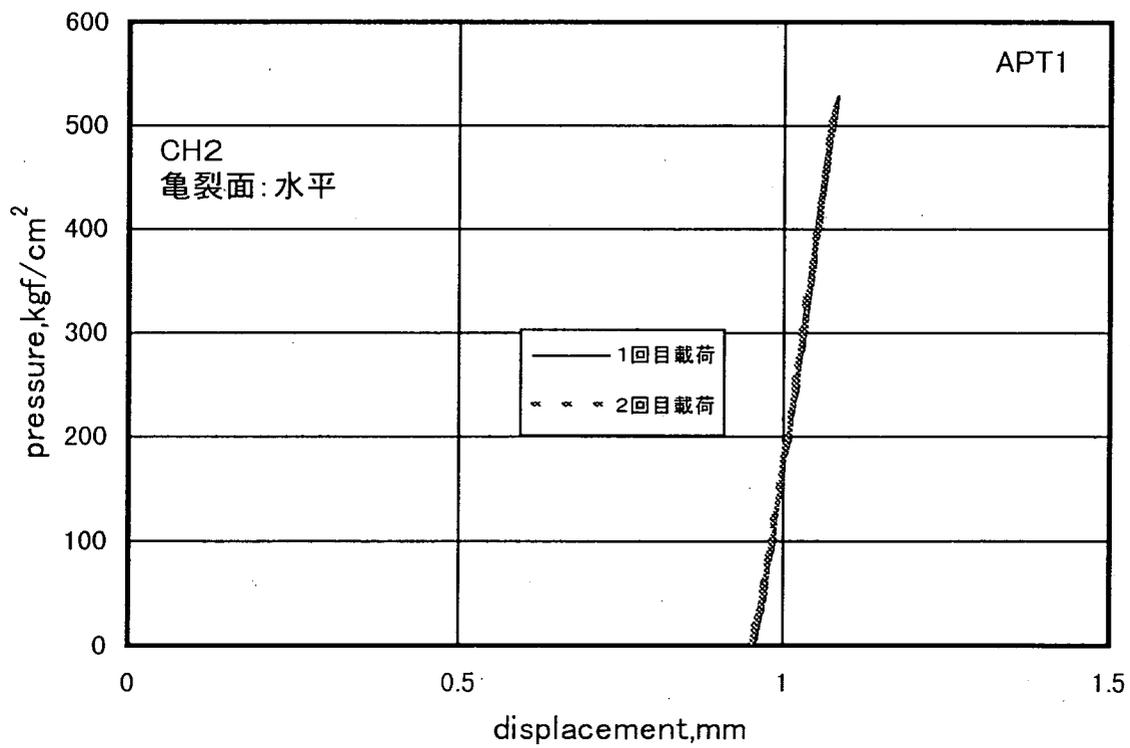
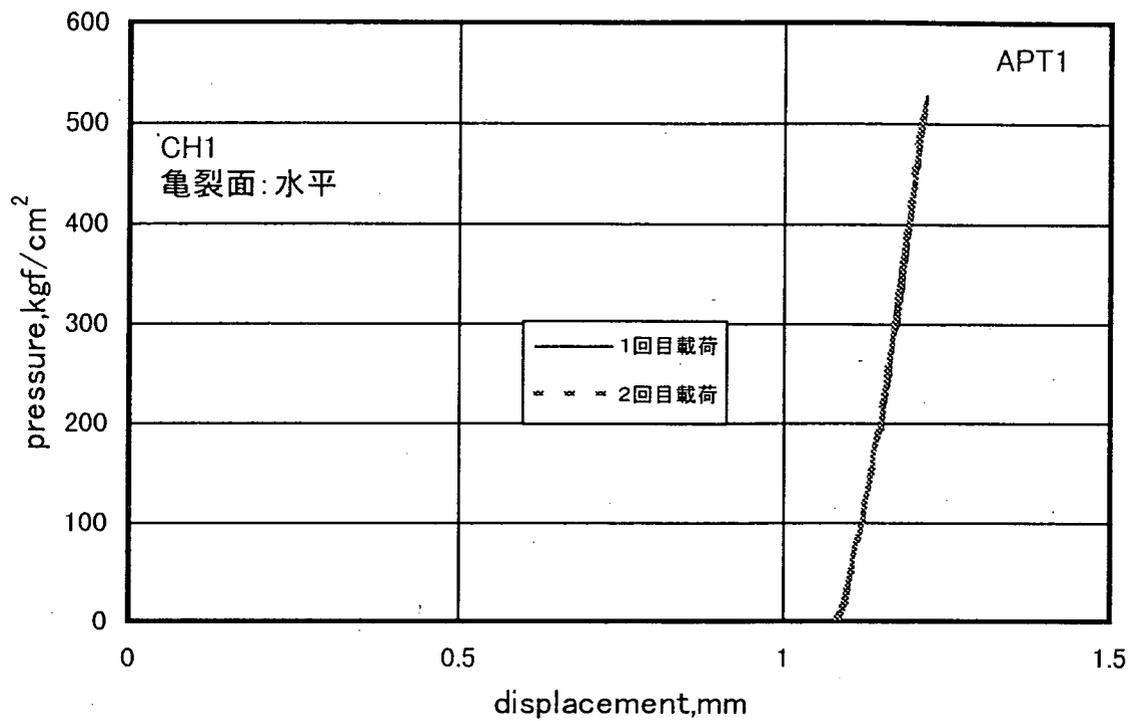


図3.2.1(a) 鋼管载荷試験における载荷圧-鋼管内変位図(APT1)

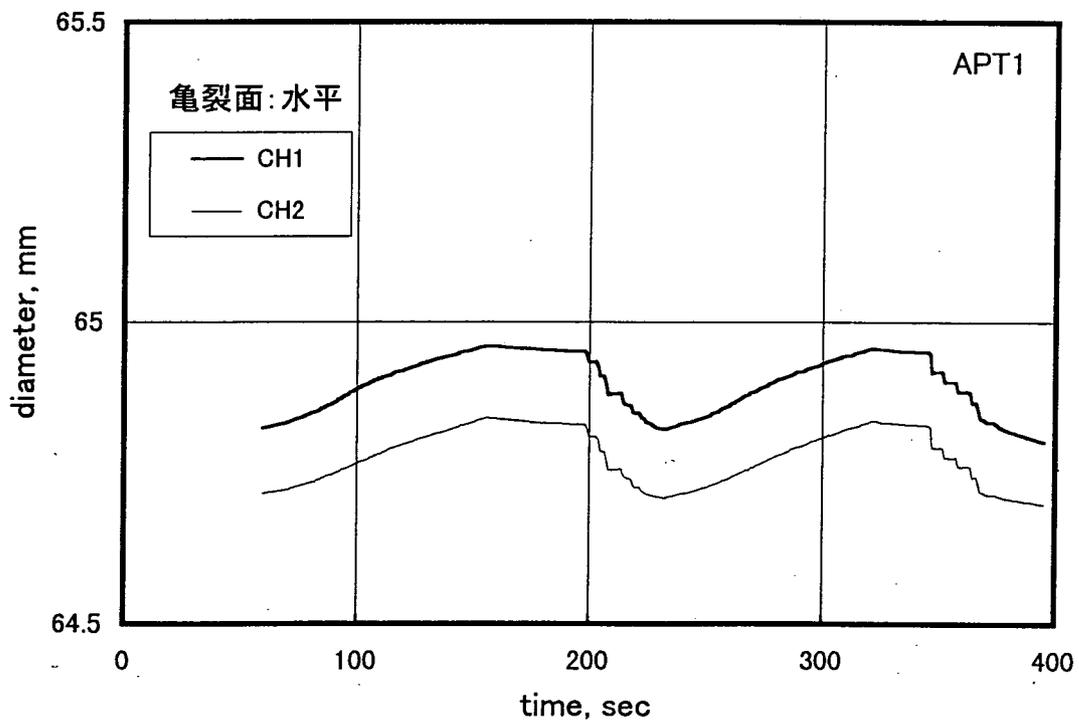
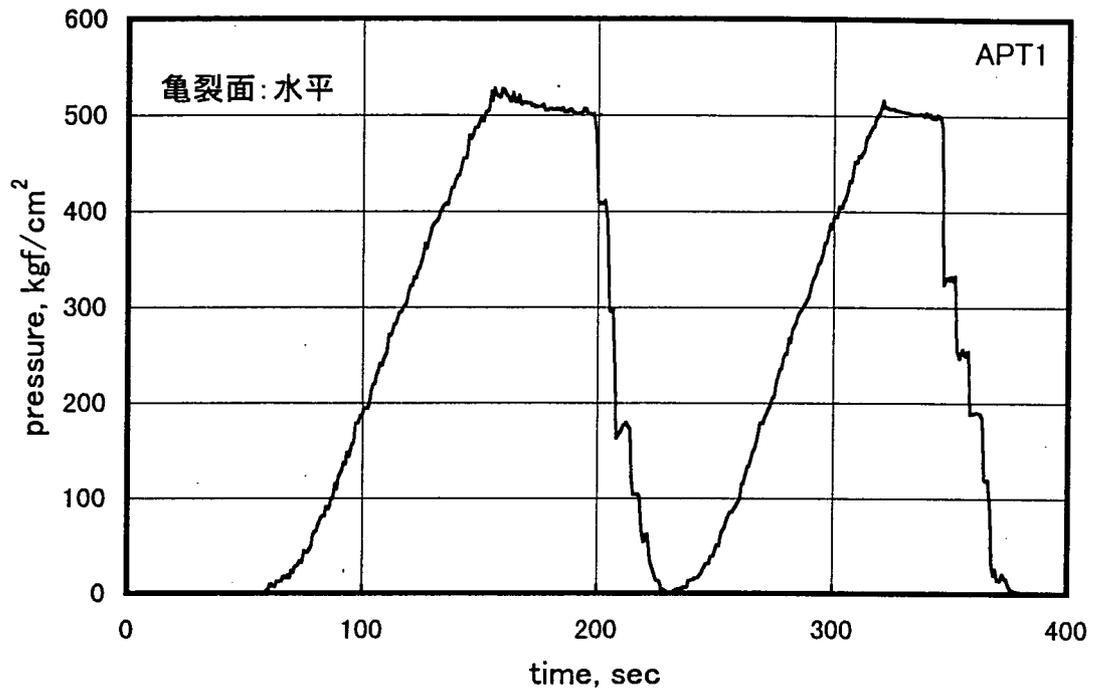


図3.2.1(b) 鋼管載荷試験における載荷—時間および直径—時間図 (APT1)

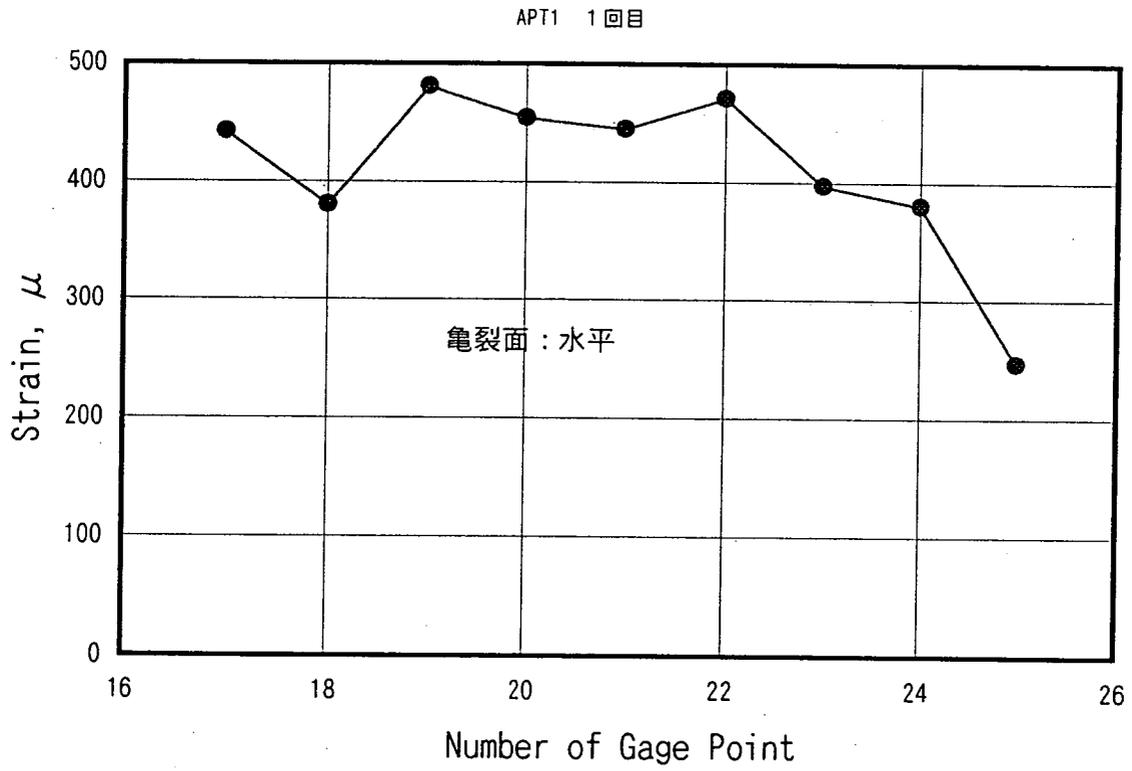
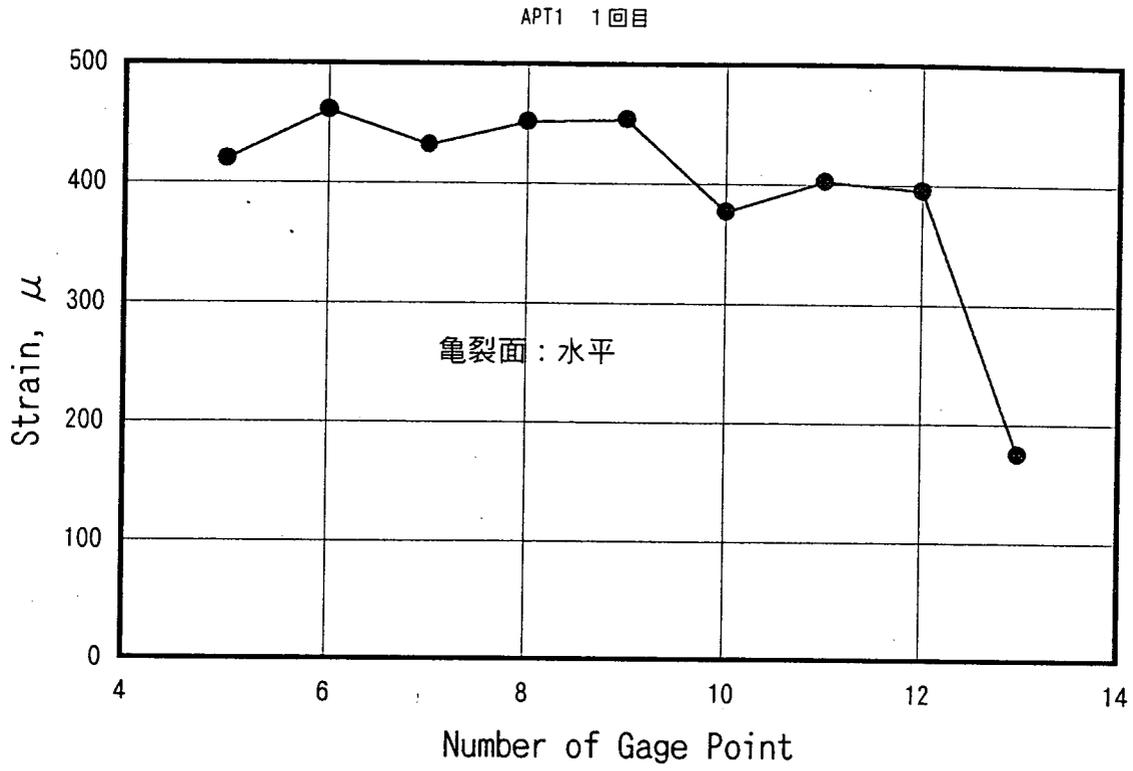


図3.2.1(C) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(APT1 : 1回目)

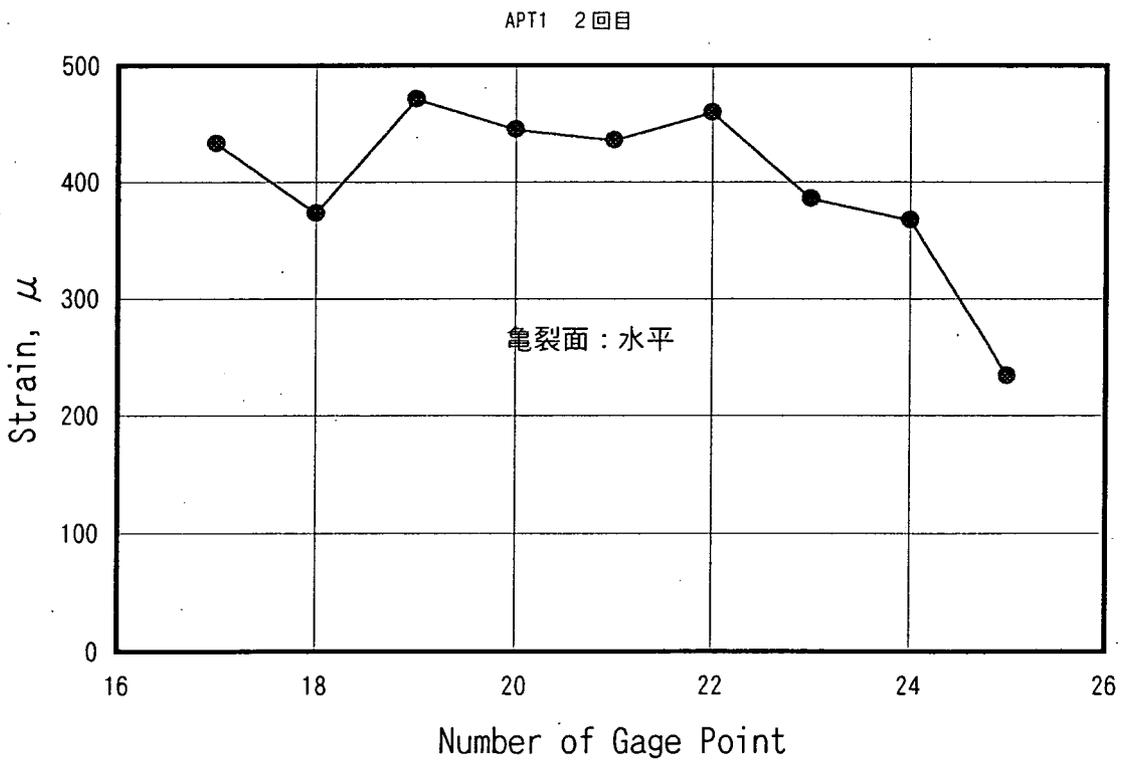
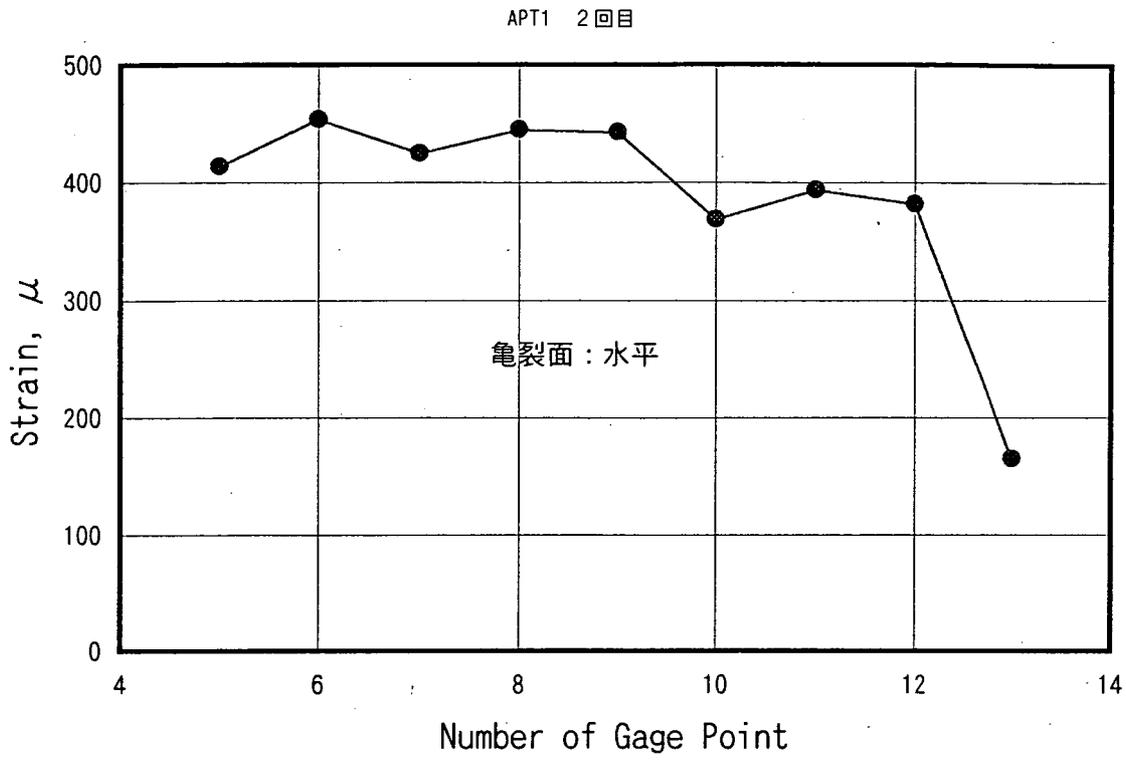


図3.2.1(d) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(APT1 : 2回目)

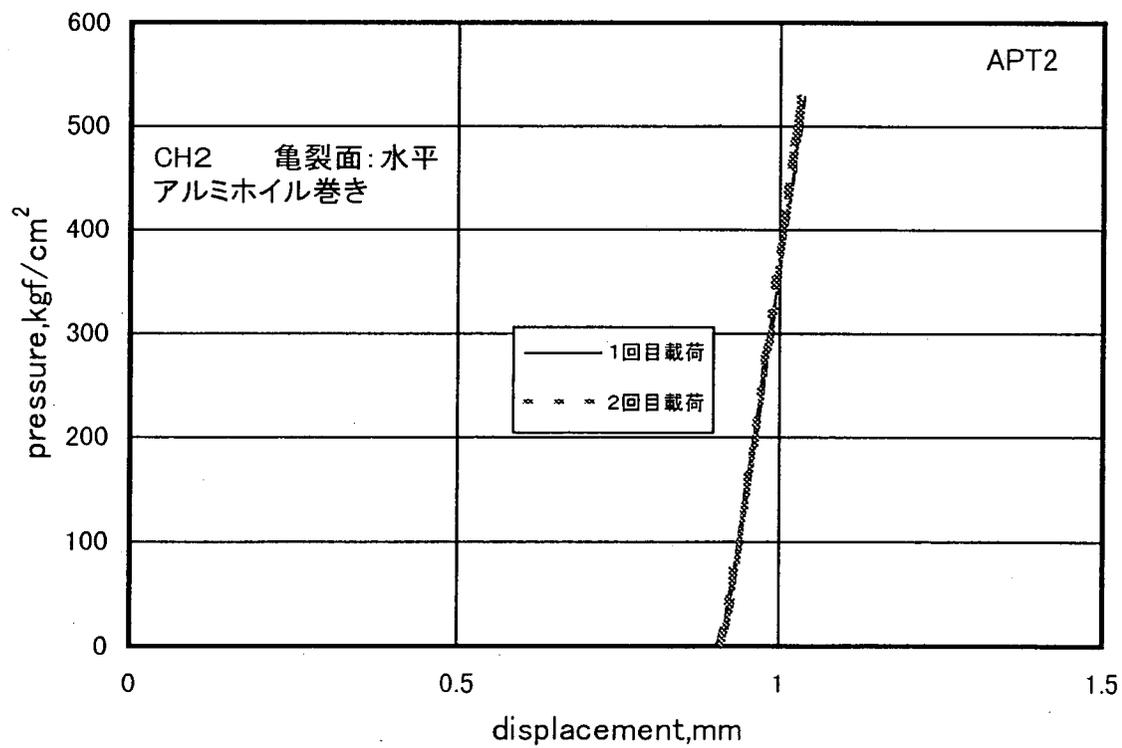
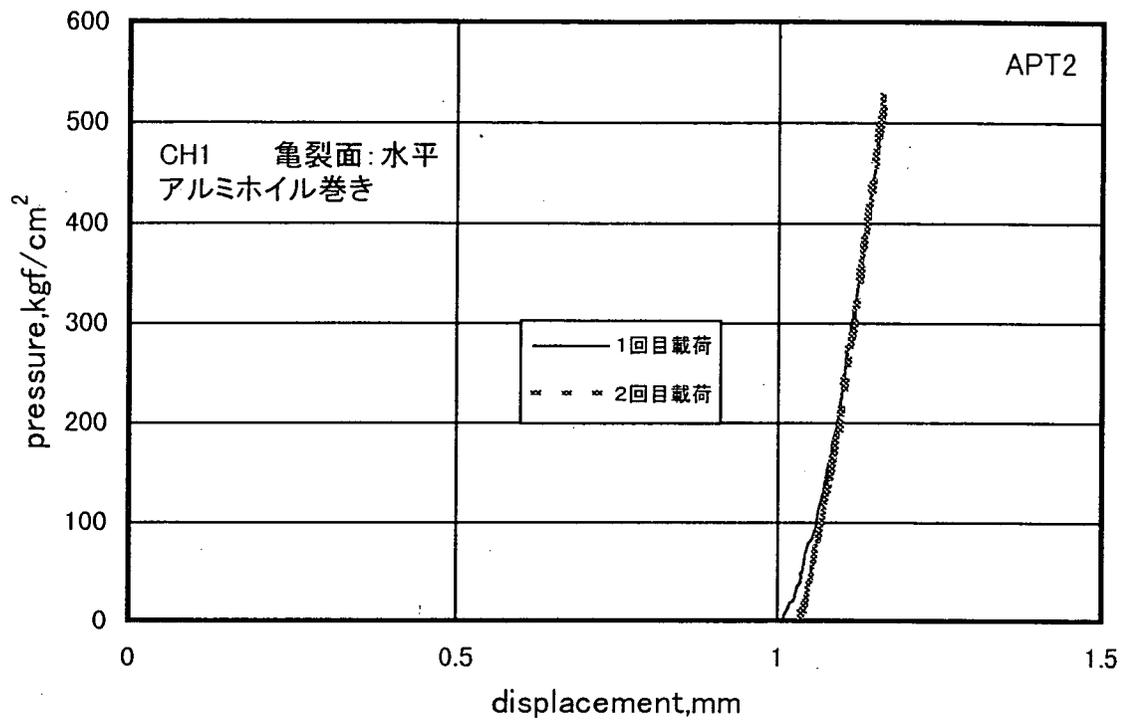


図3.2.2(a) 鋼管載荷試験における載荷圧-鋼管内変位図(APT2)

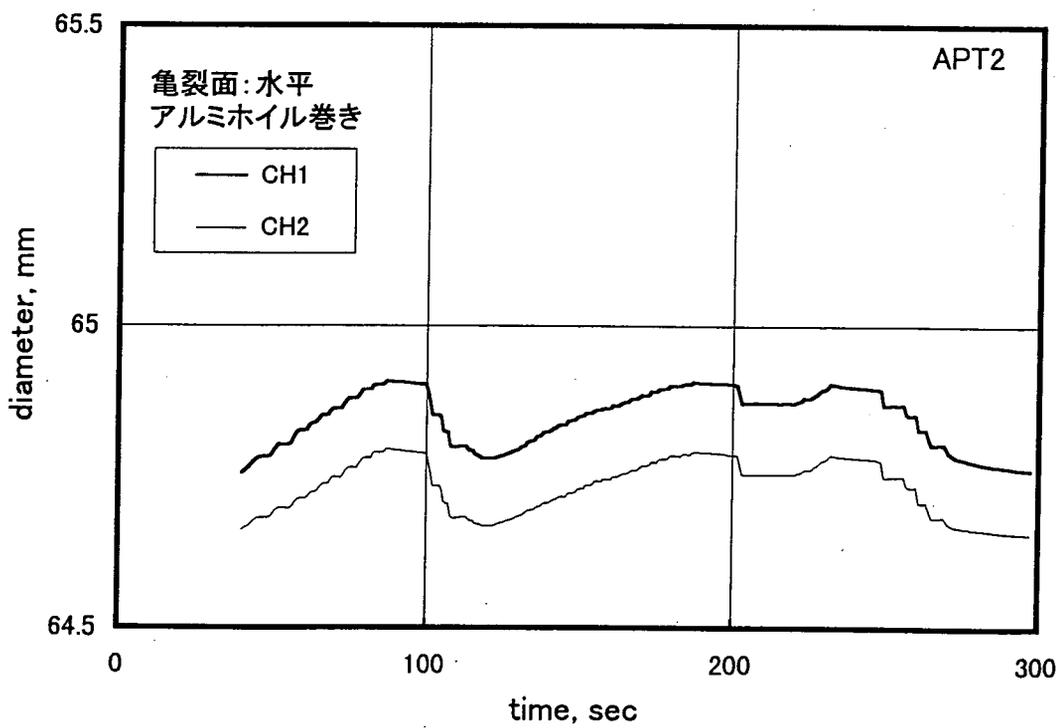
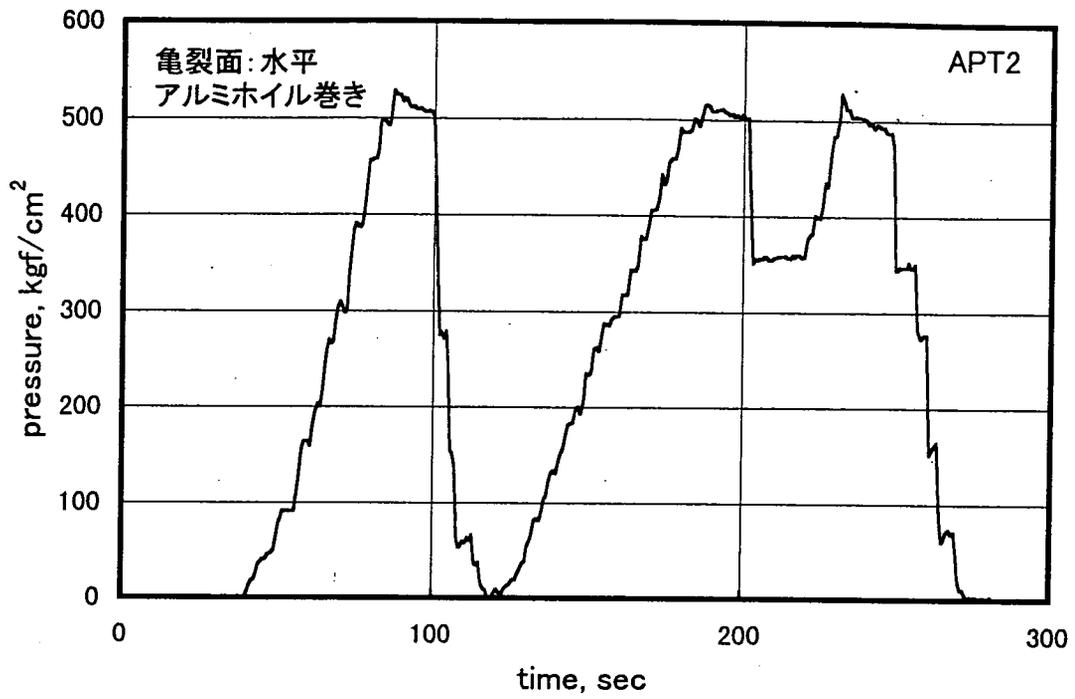


図3. 2. 2(b) 鋼管載荷試験における載荷—時間および直径—時間図 (APT2)

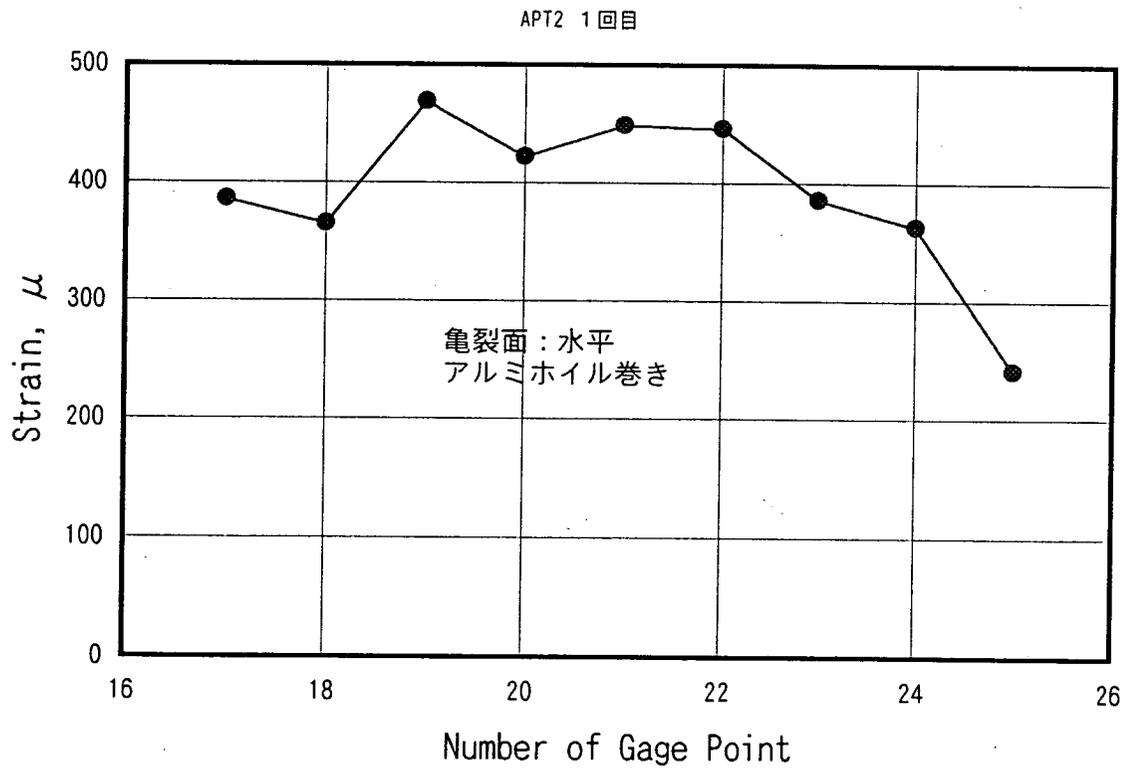
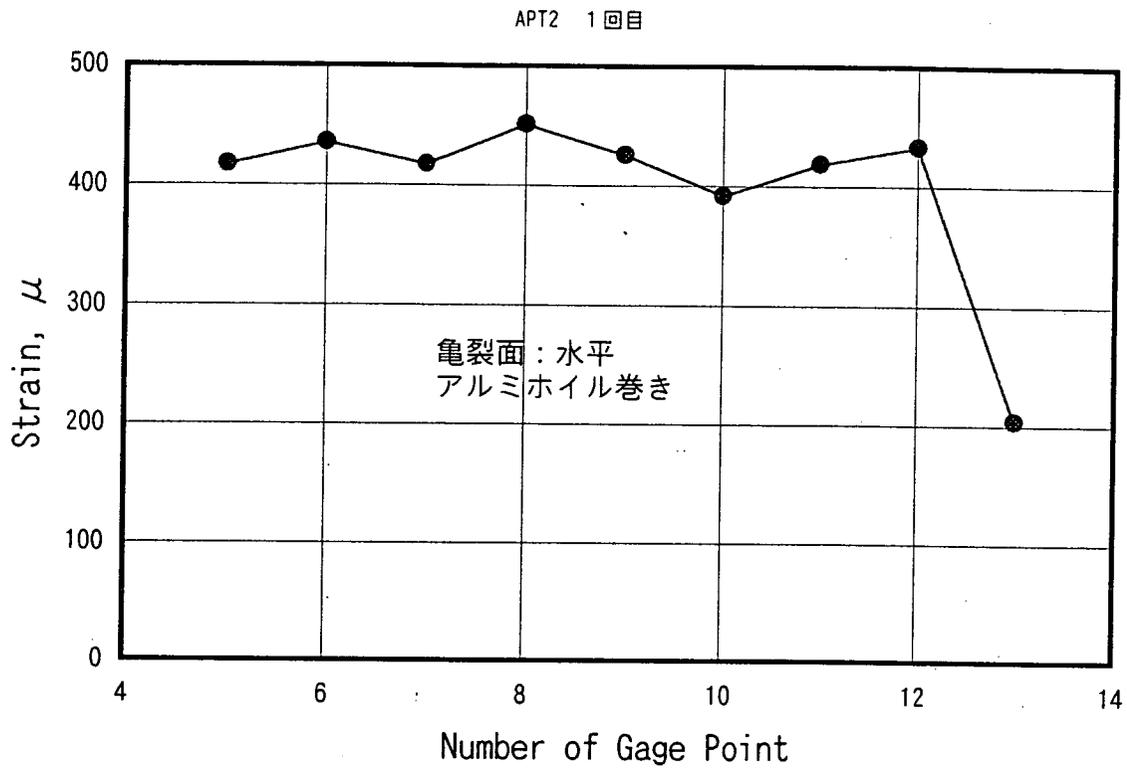


図3.2.2(C) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(APT2: 1回目)

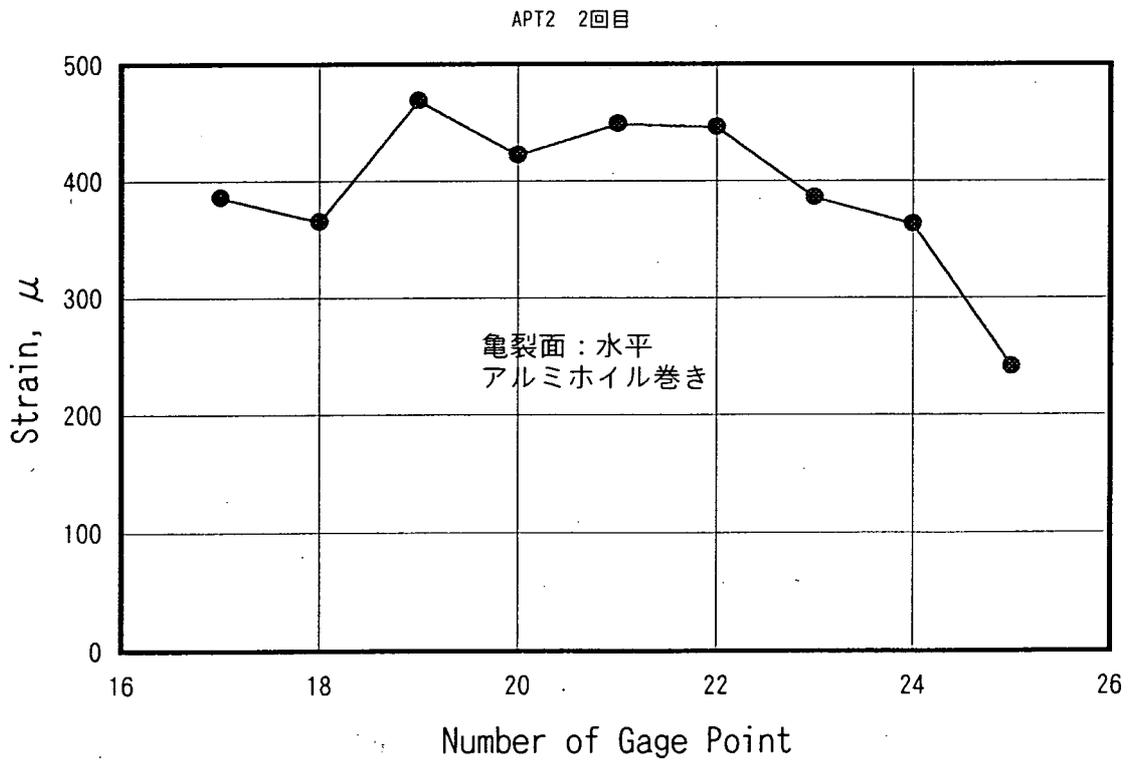
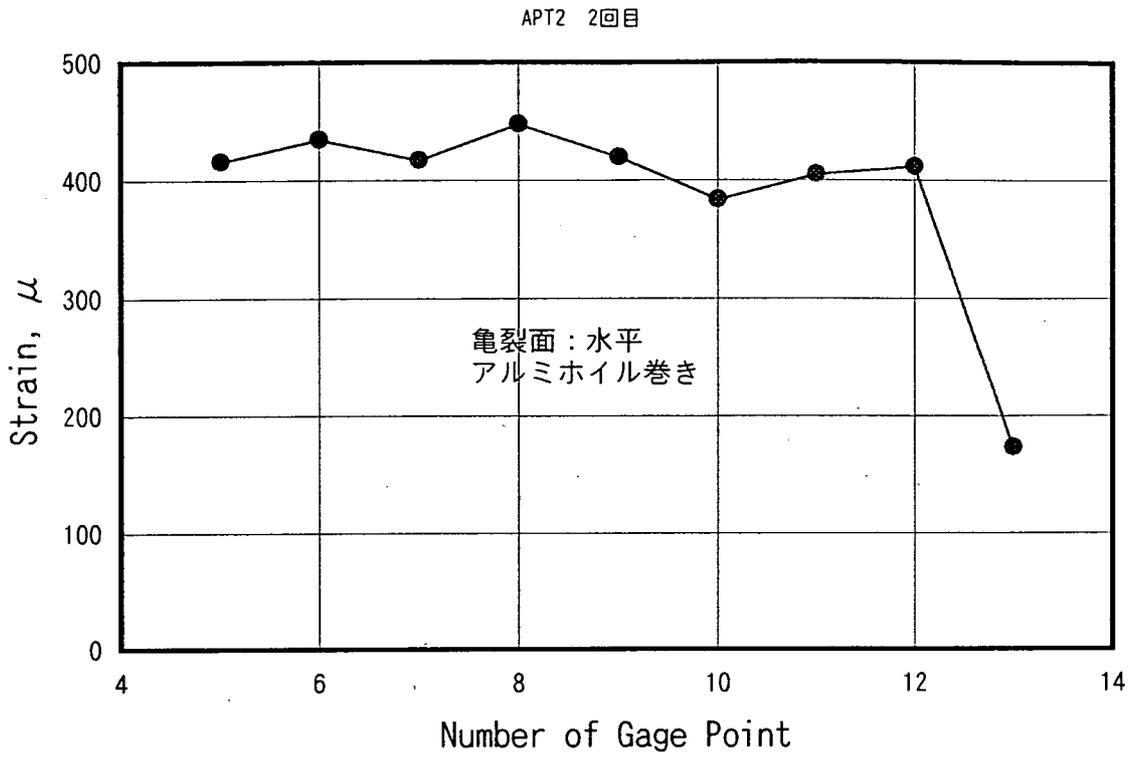


図3.2.2(d) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(APT2 : 2回目)

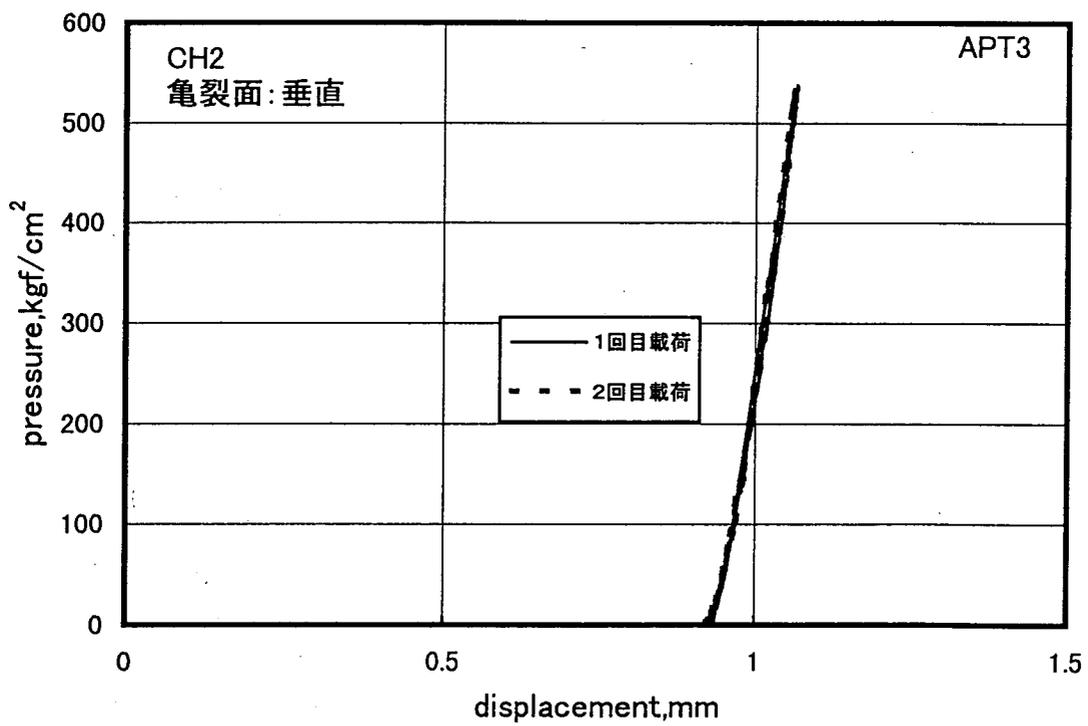
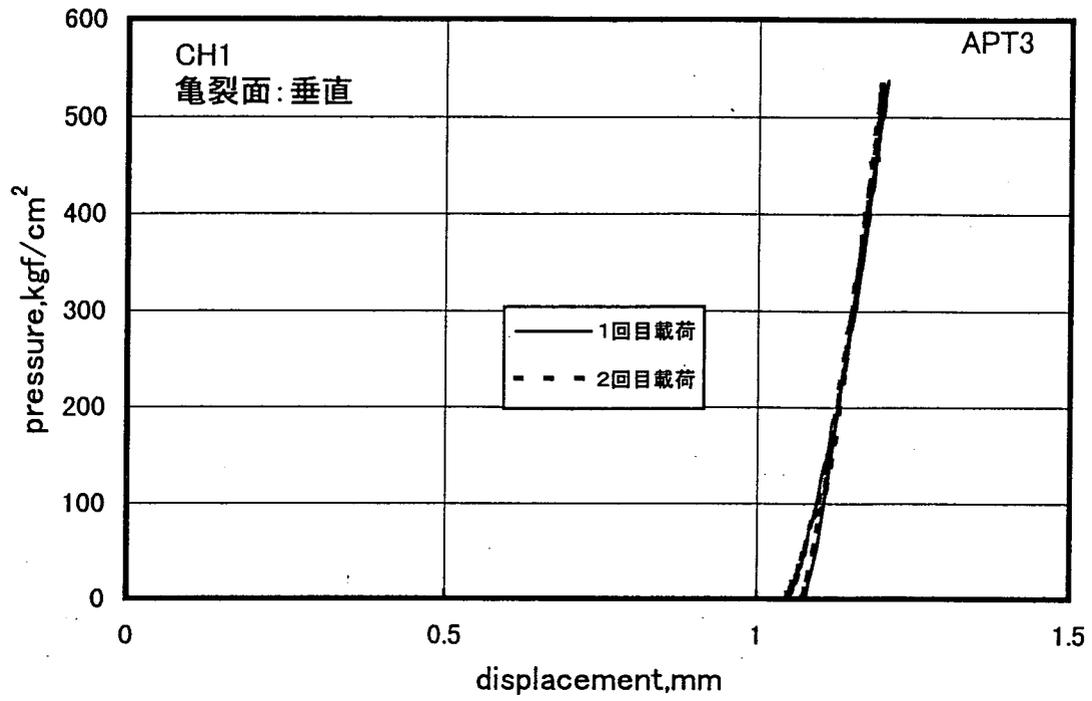


図3. 2. 3(a) 鋼管載荷試験における載荷圧—鋼管内変位図 (APT3)

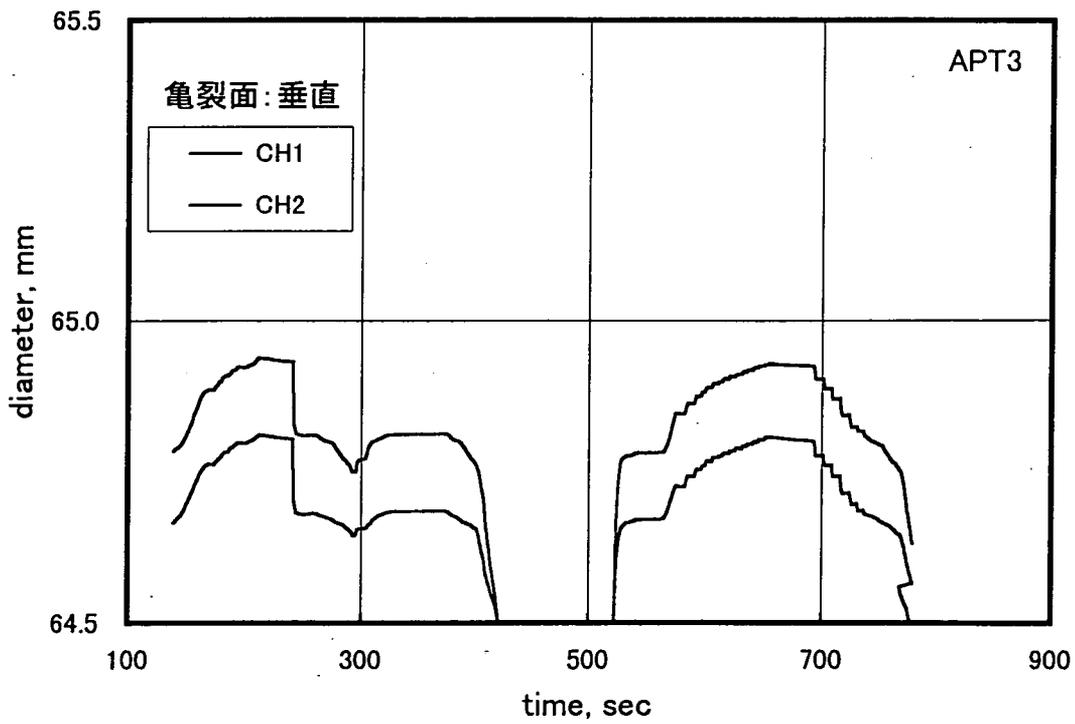
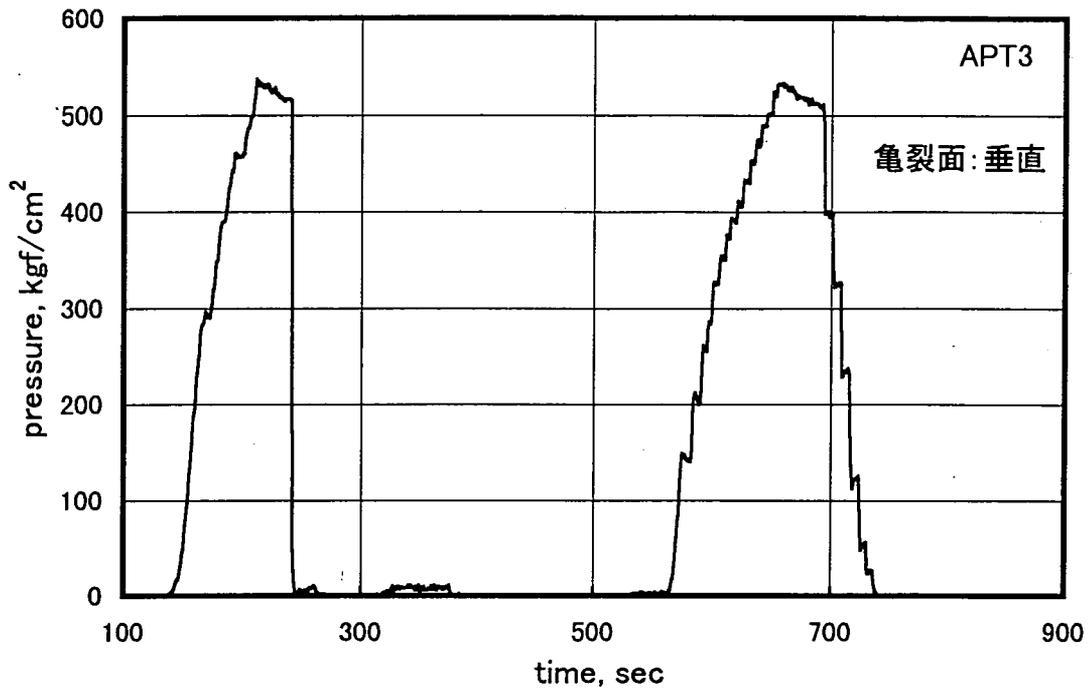


図3. 2. 3 (b) 鋼管載荷試験における載荷-時間および直径-時間図 (APT3)

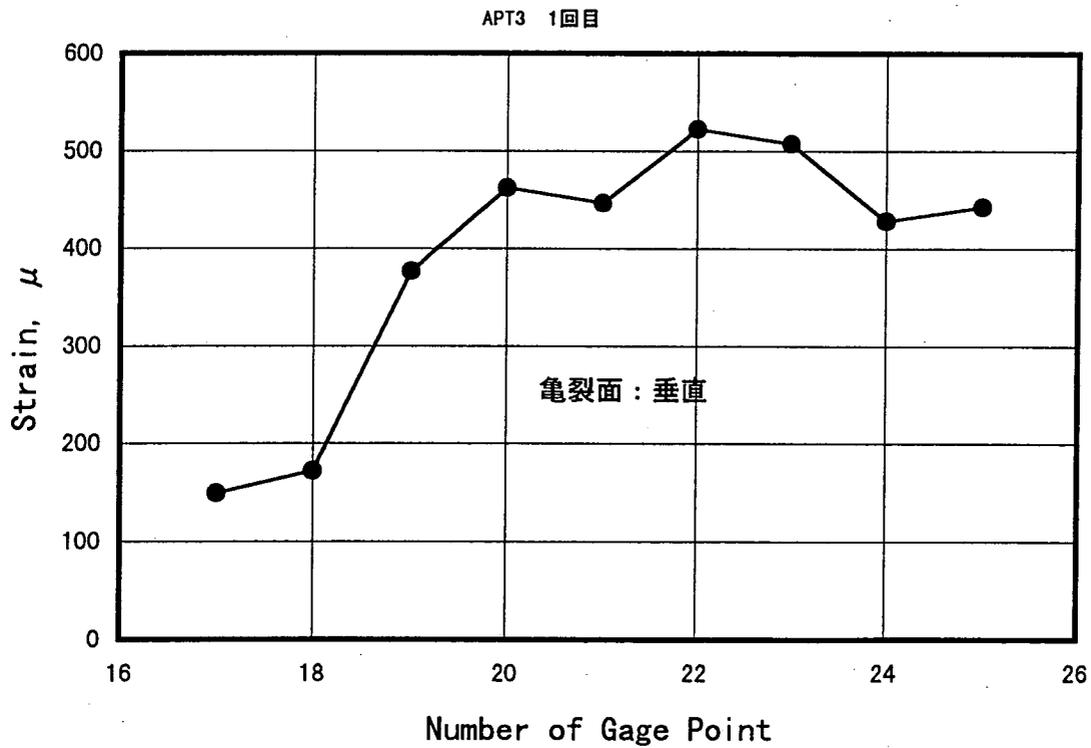
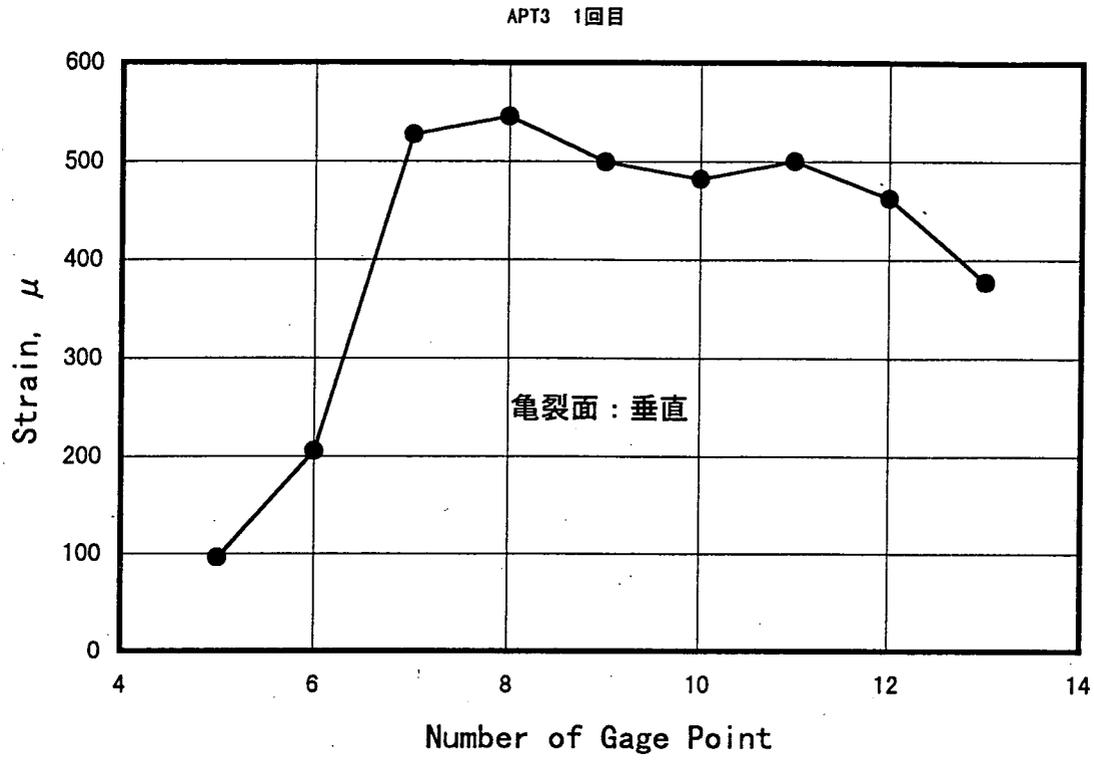


図3.2.3(C) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果 (APT3 : 1回目)

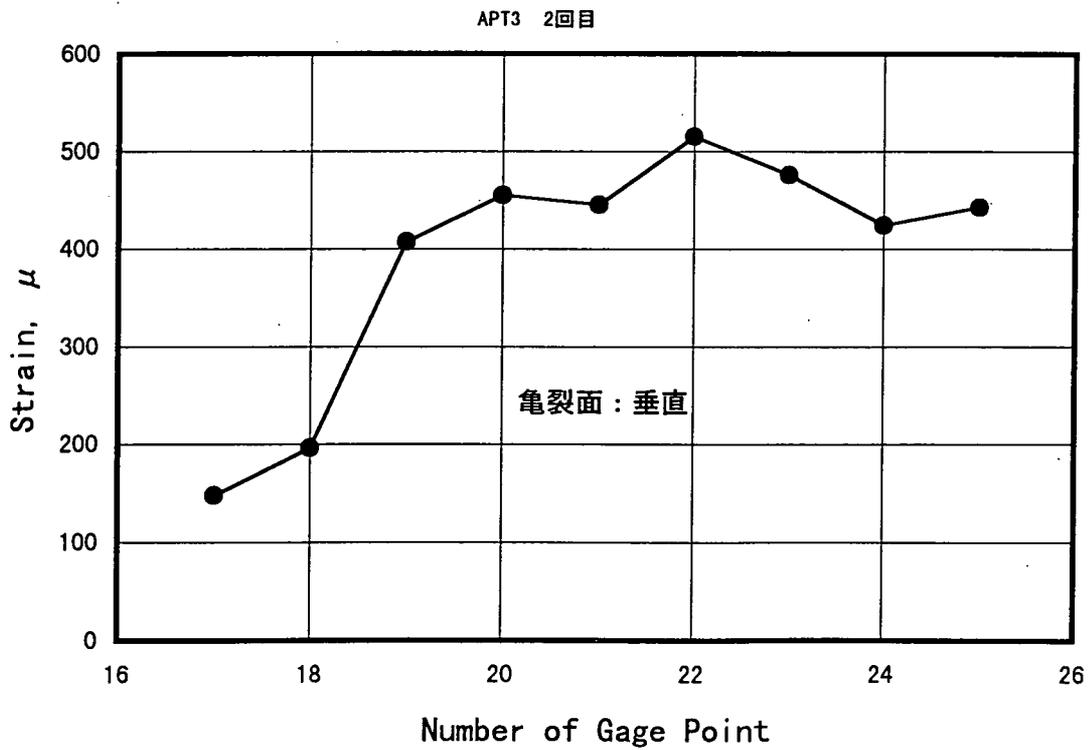
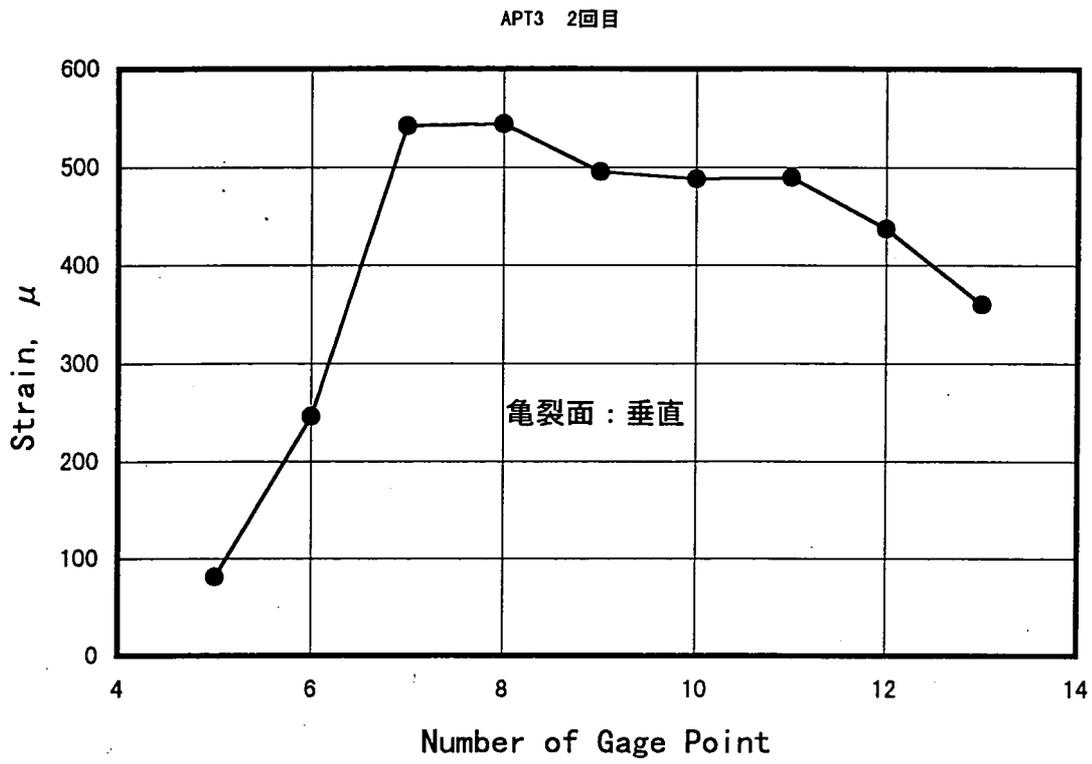


図3.2.3(d) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(APT3:2回目)

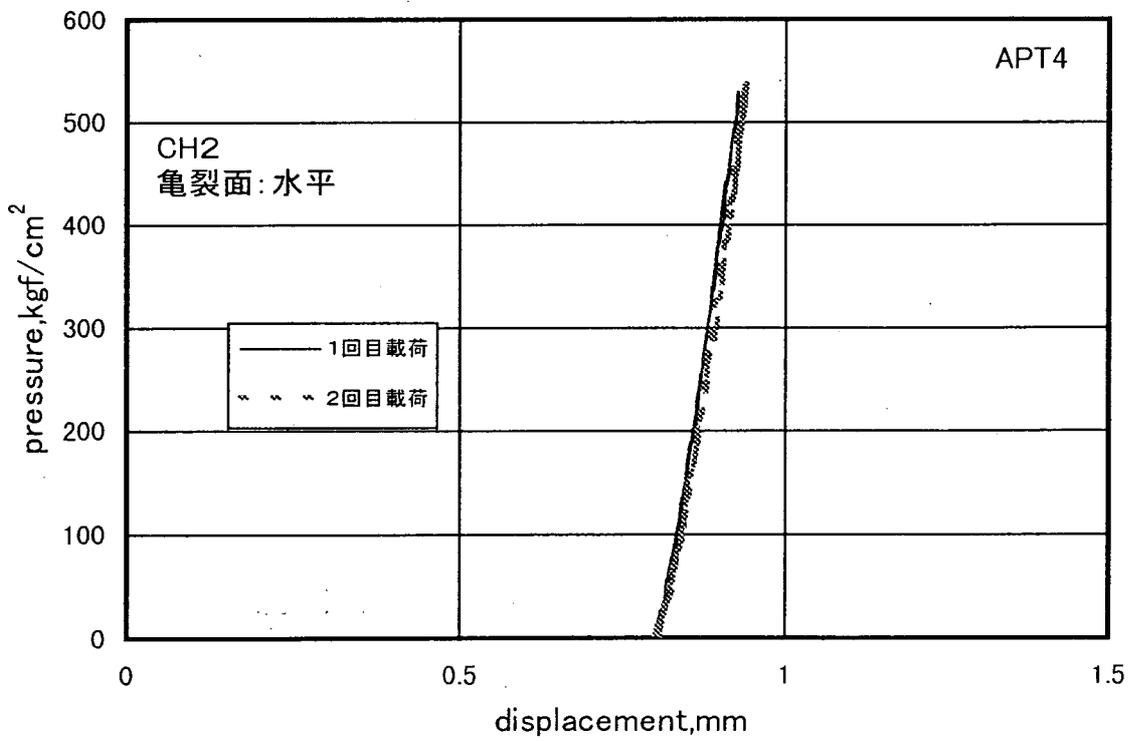
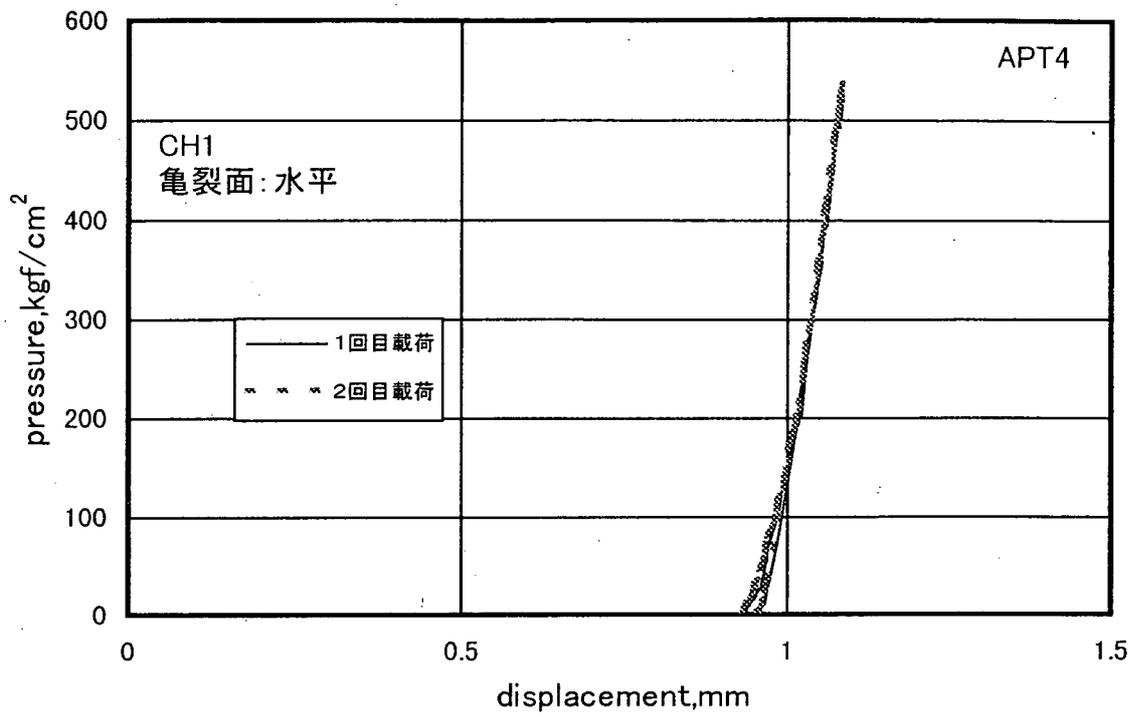


図3.2.4(a) 鋼管载荷試験における载荷圧-鋼管内変位図(APT4)

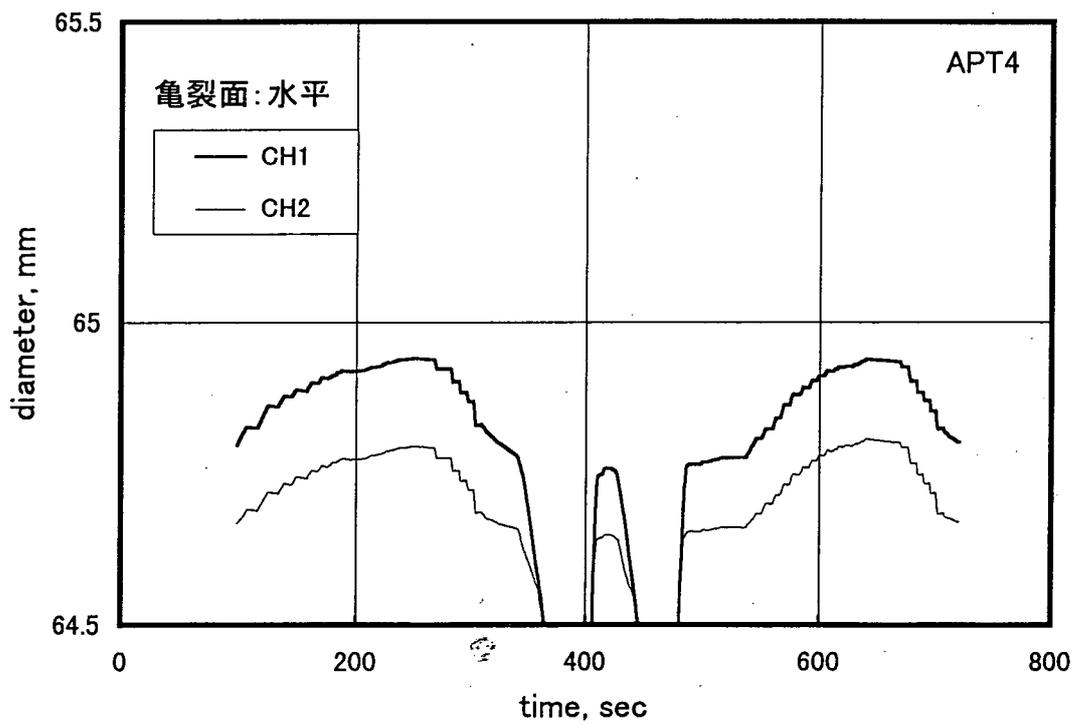
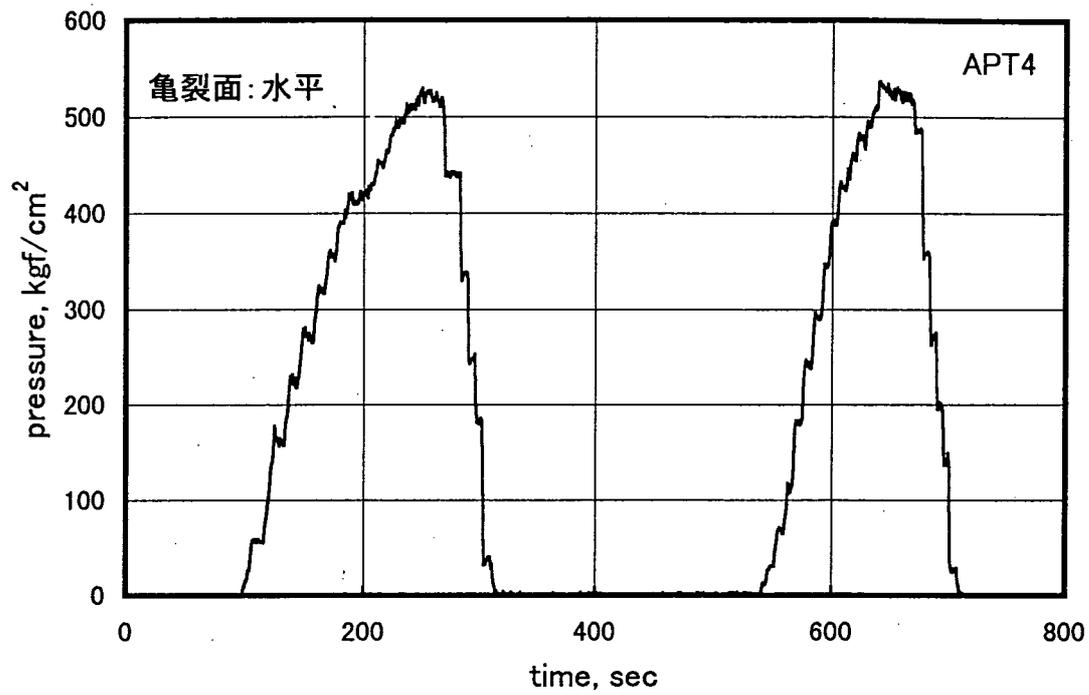


図3.2.4(b) 鋼管載荷試験における載荷圧—鋼管内変位図 (APT4)

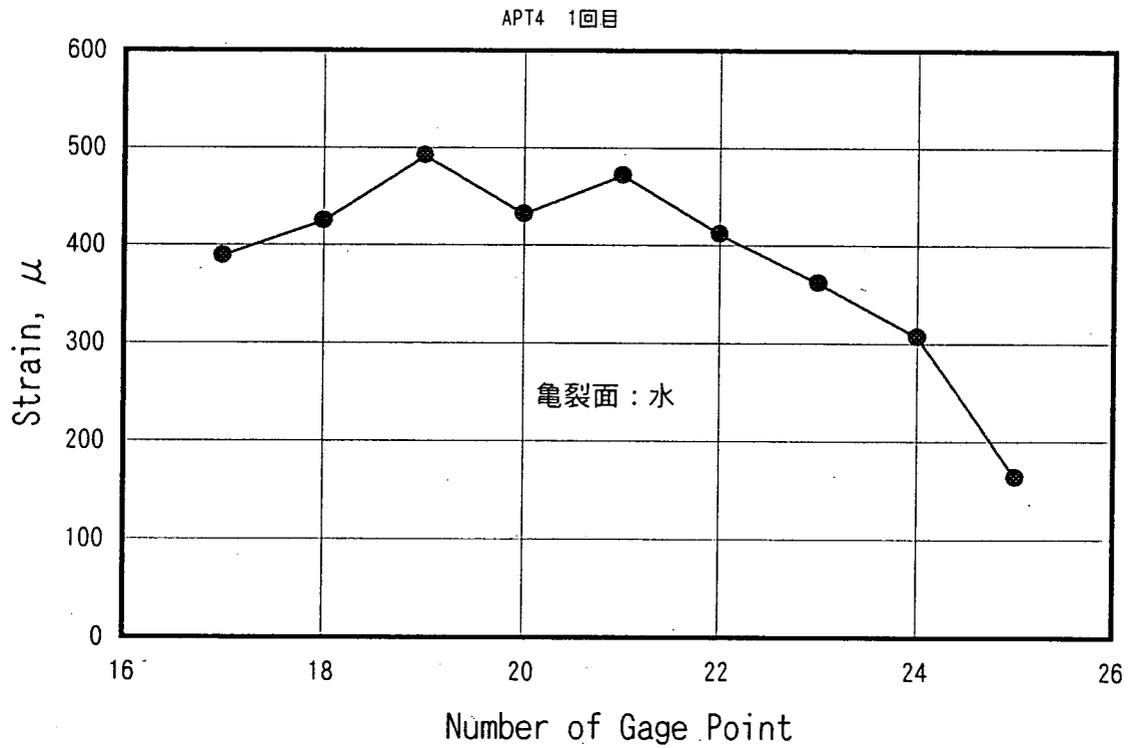
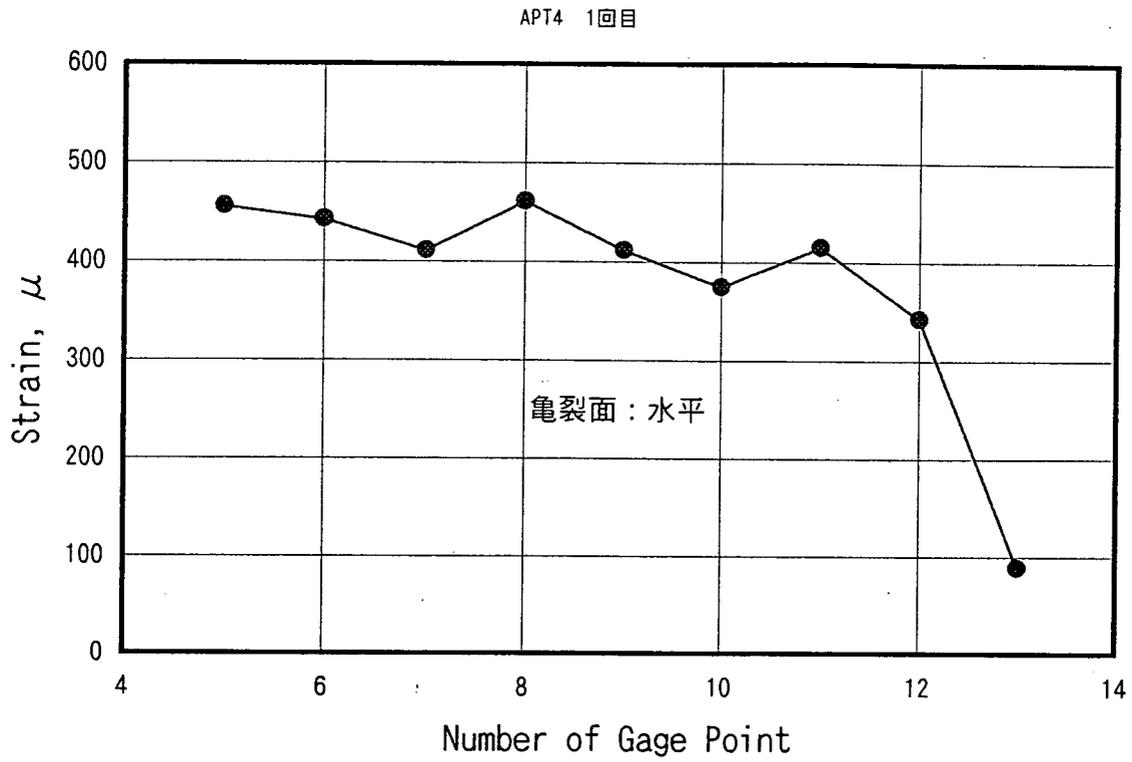
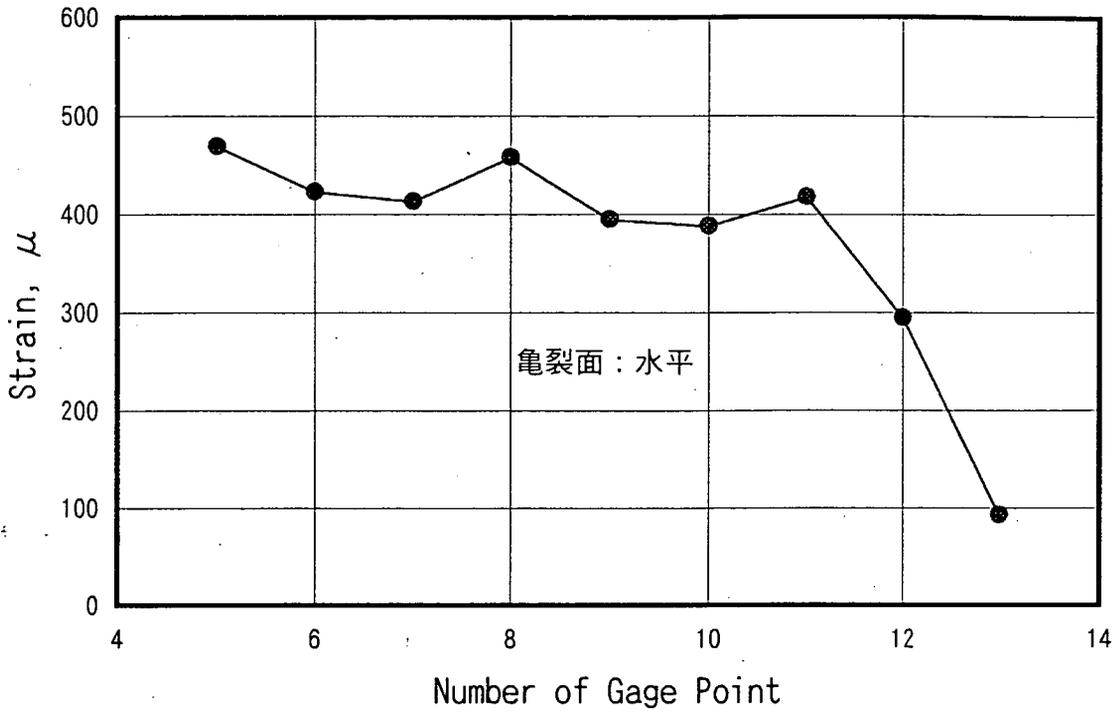


図3.2.4(C) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(APT4 : 1回目)

APT4 2回目



APT4 2回目

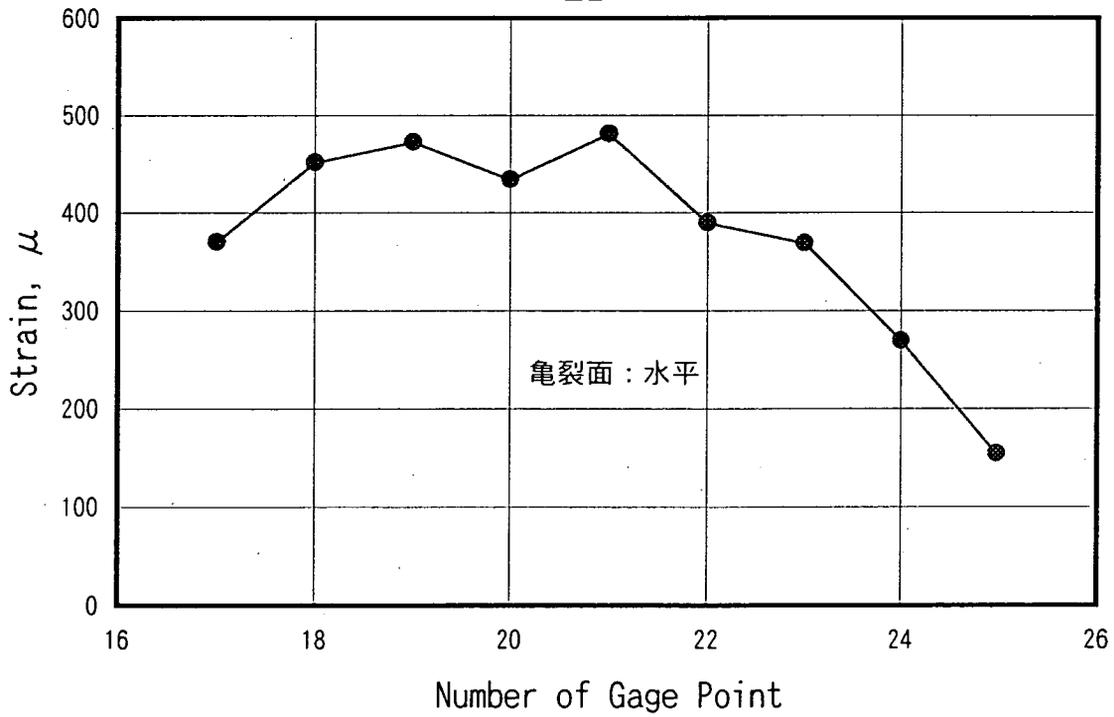


図3.2.4(d) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(APT4 : 2回目)

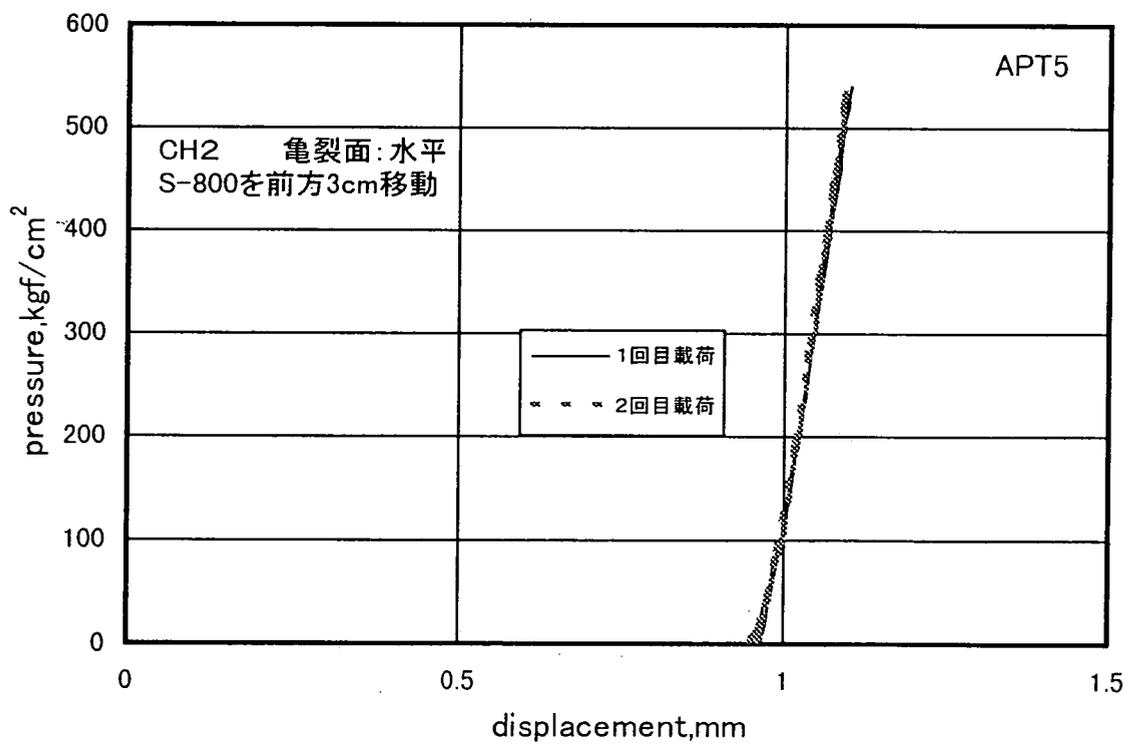
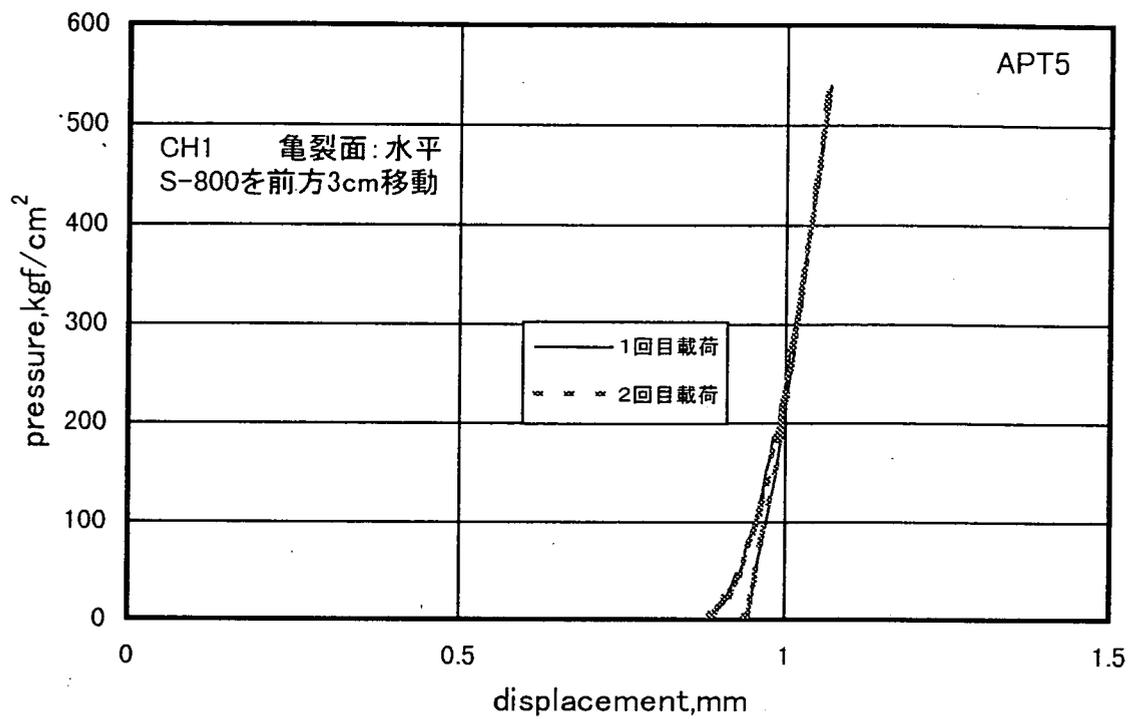


図3.2.5(a) 鋼管載荷試験における載荷圧-鋼管内変位図(APT5)

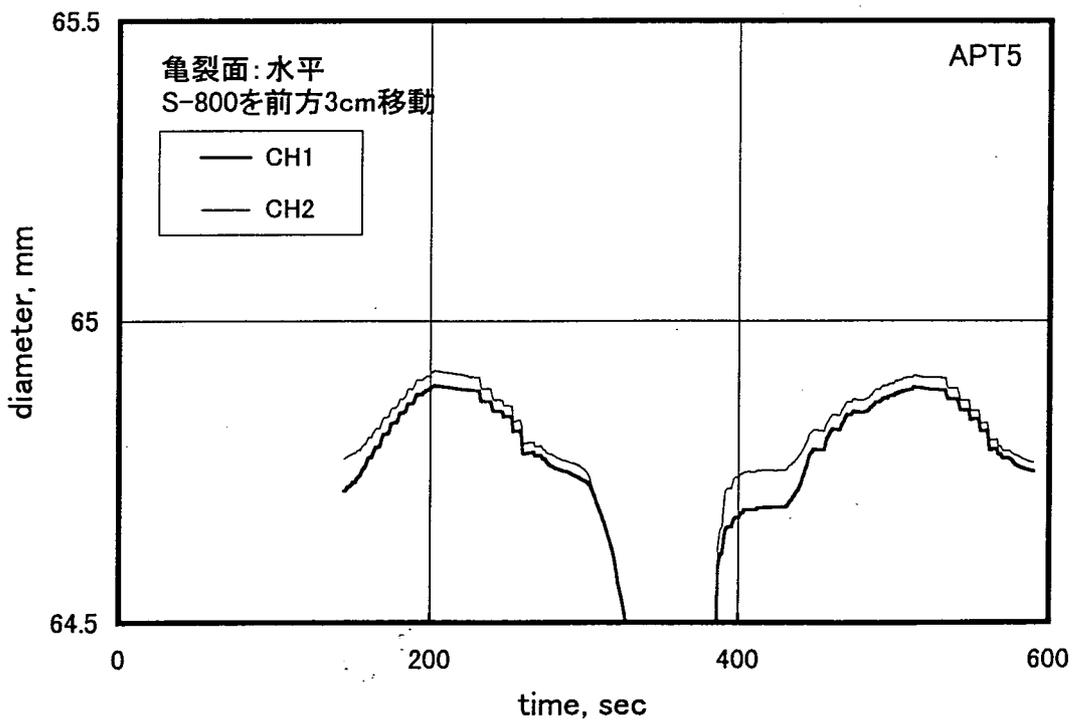
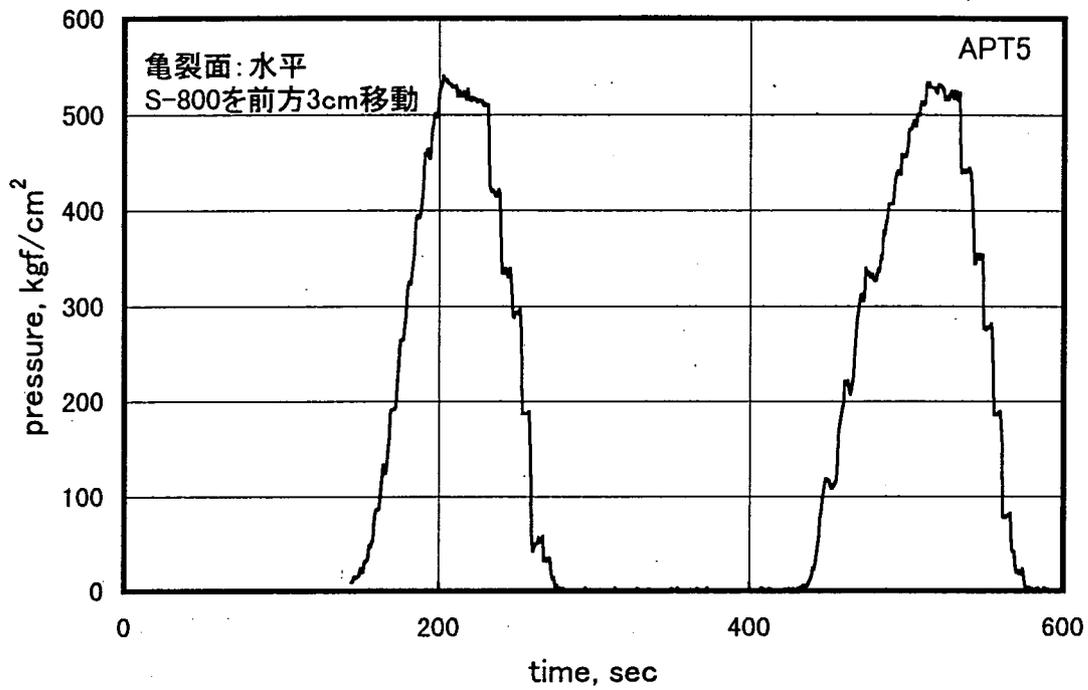


図3. 2. 5 (b) 鋼管載荷試験における載荷—時間および直径—時間図 (APT5)

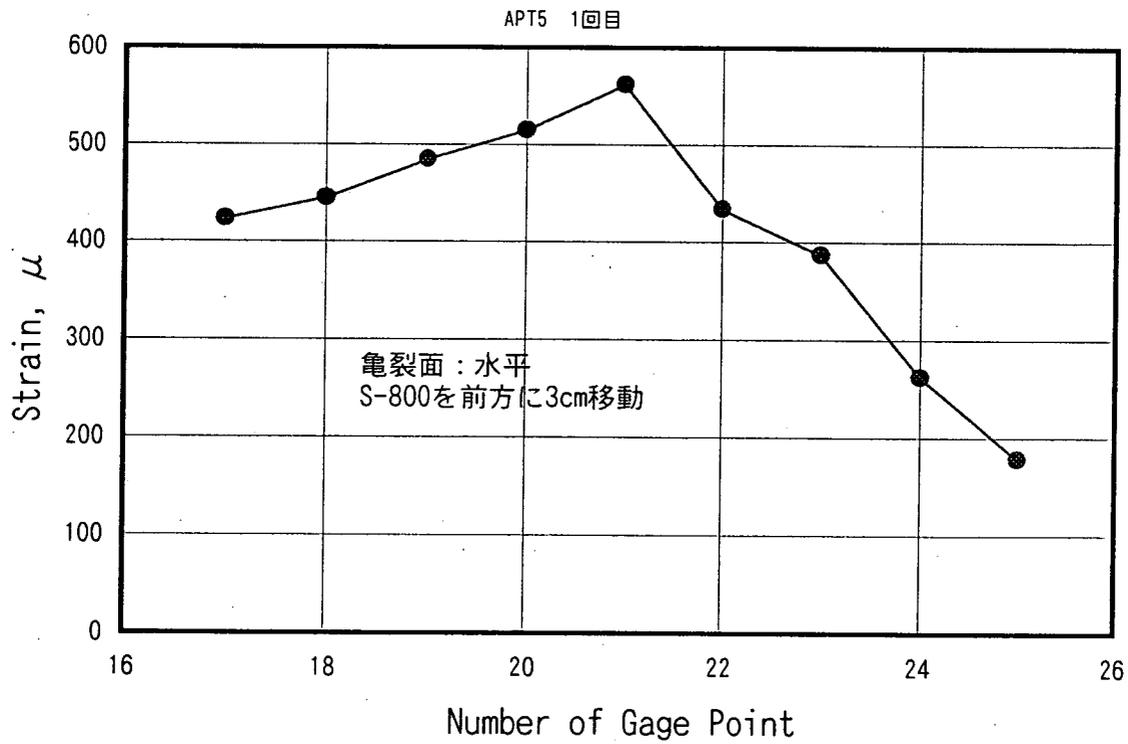
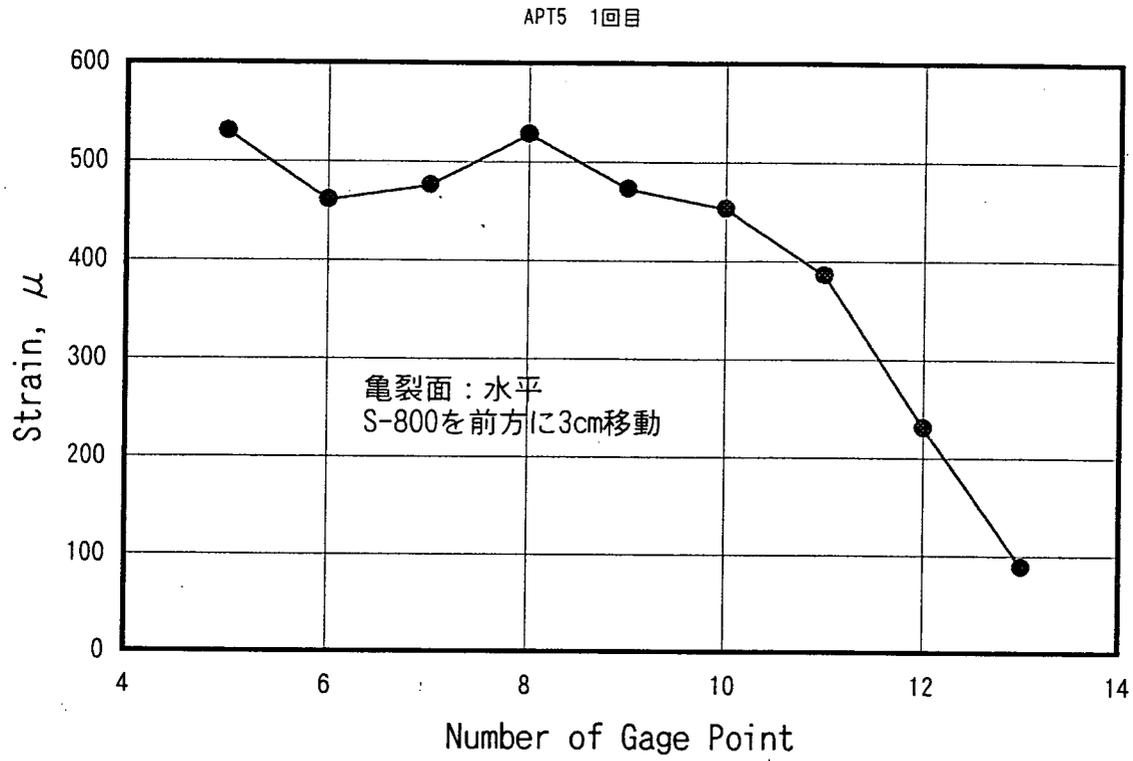


図3.2.5(C) 鋼管載荷試験ひみず計測結果(APT5 : 1回目)

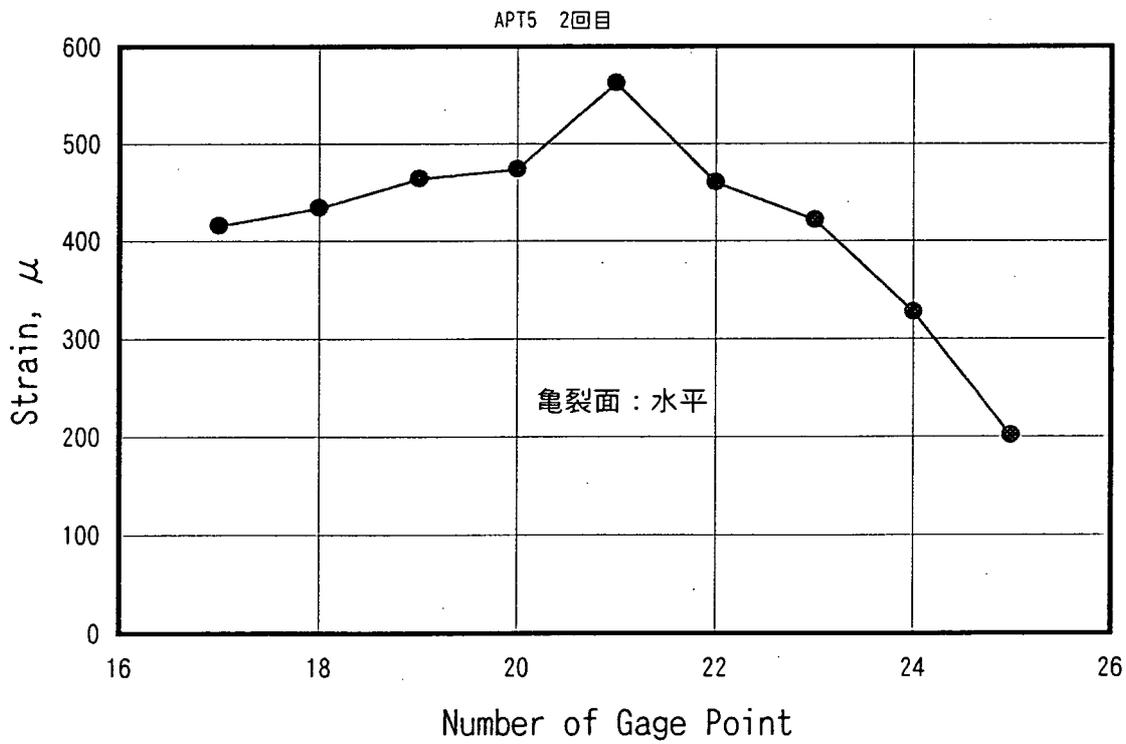
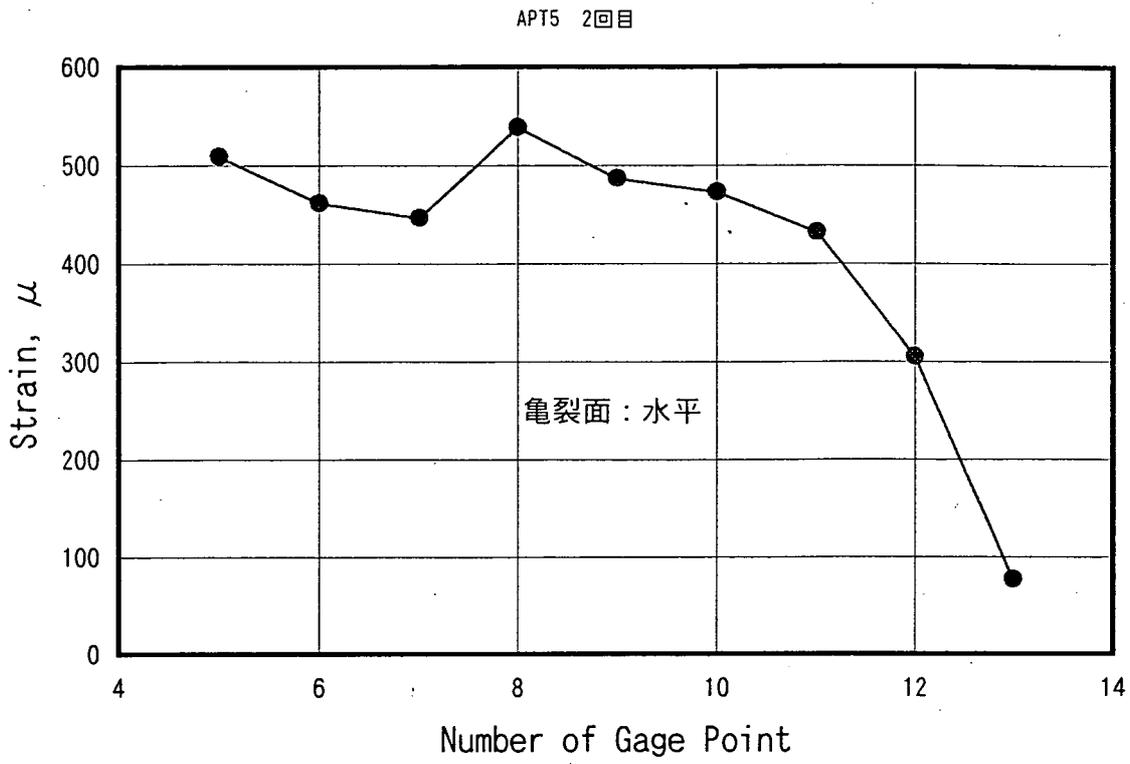


図3.2.5(d) 鋼管差載荷試験ひずみ計測結果(APT5 : 2回目)

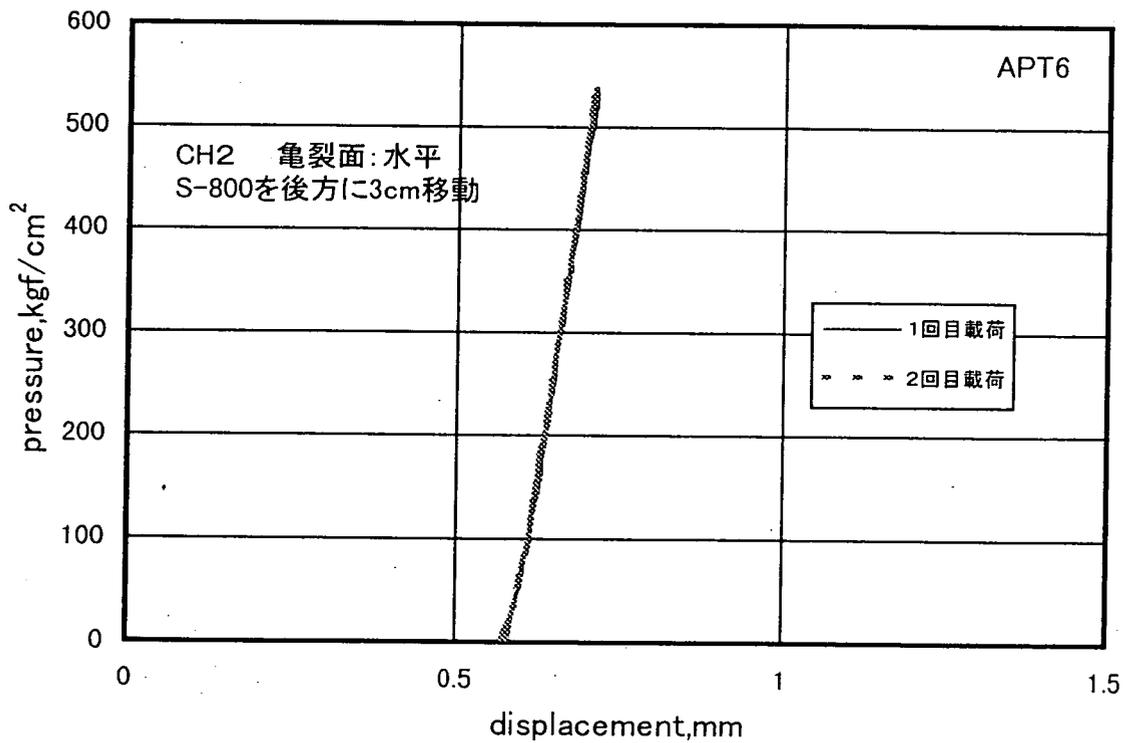
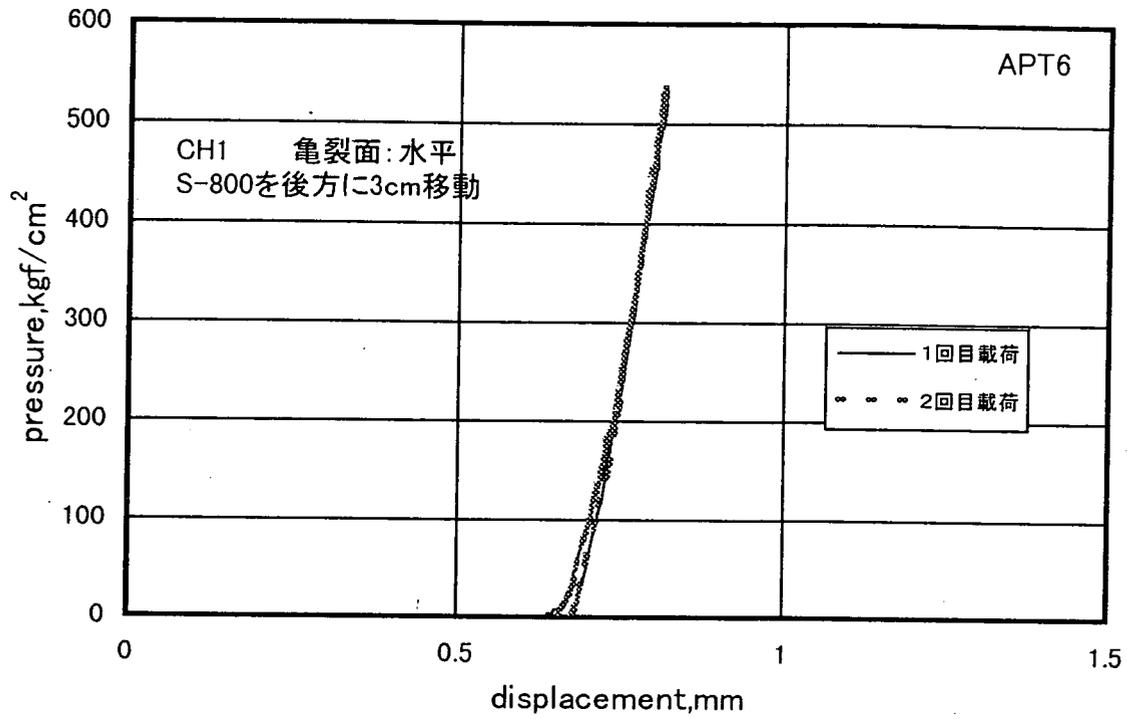


図3.2.6(a) 鋼管載荷試験における載荷圧-鋼管内変位図(APT6)

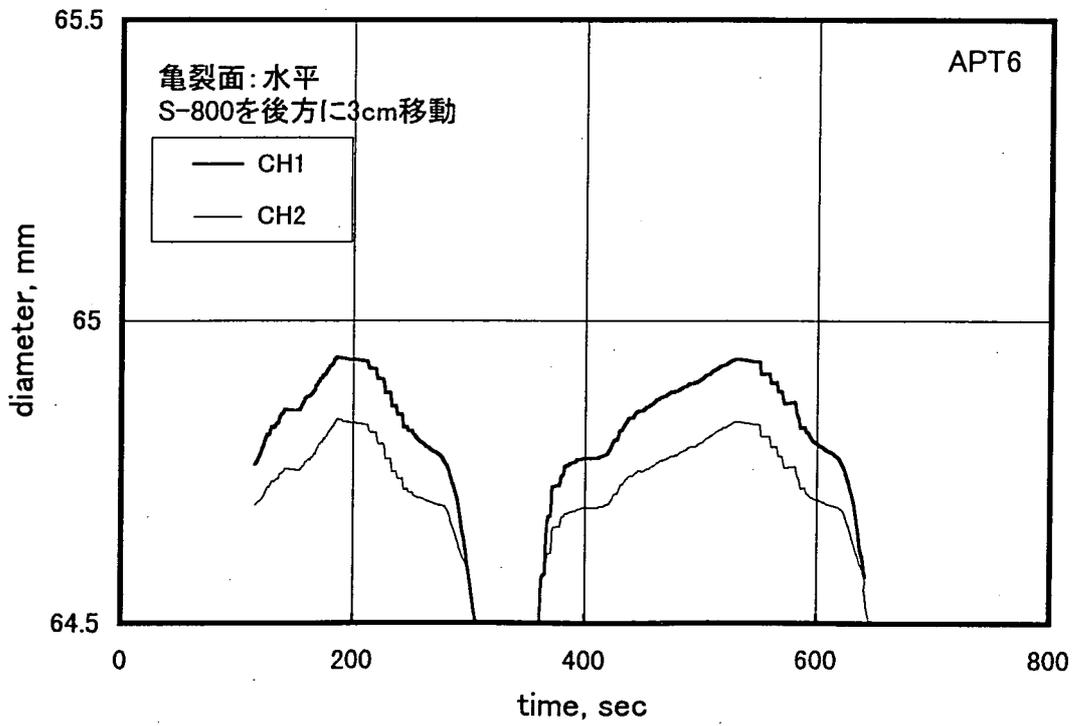
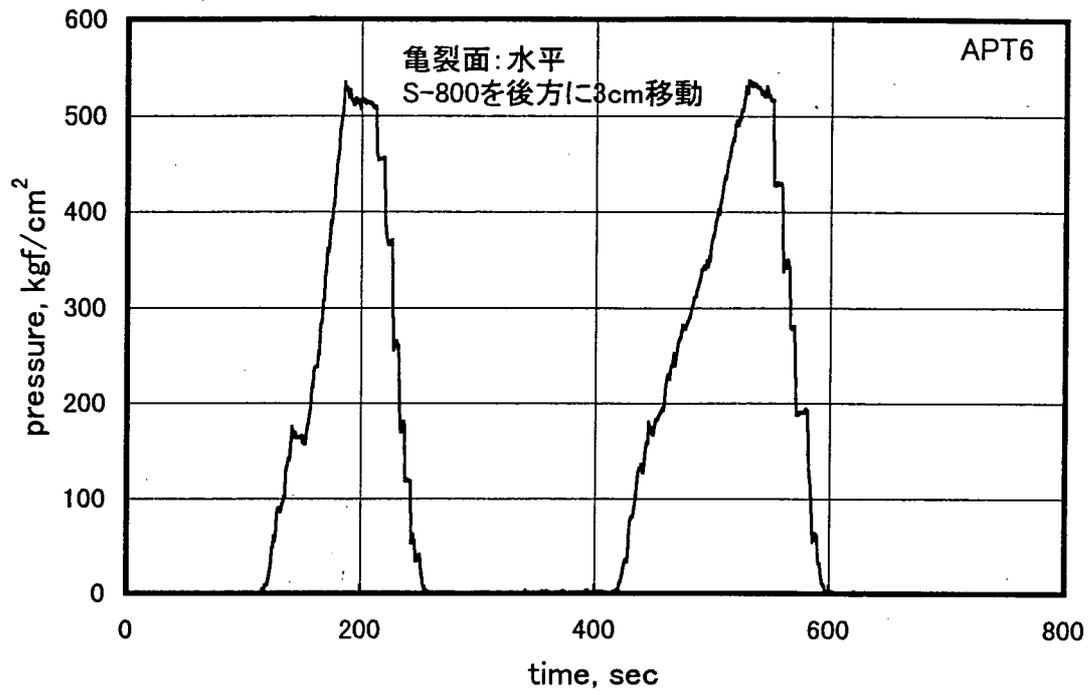


図3.2.6(b) 鋼管載荷試験における荷重-時間および直径-時間図 (APT6)

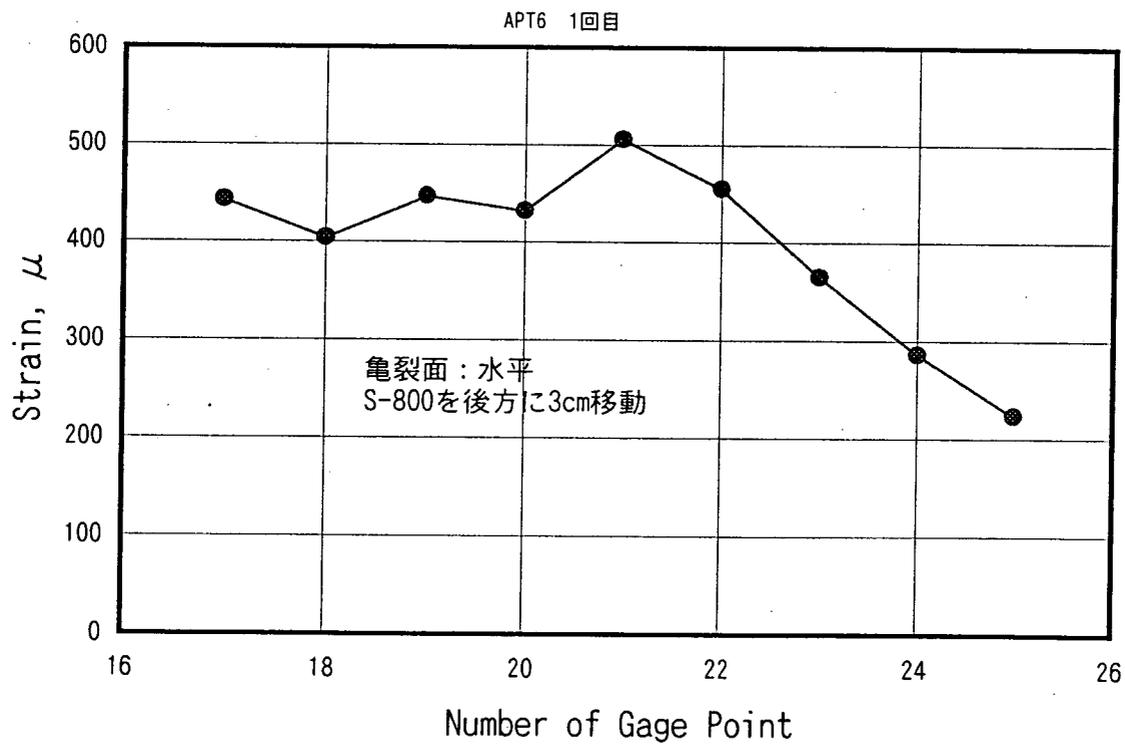
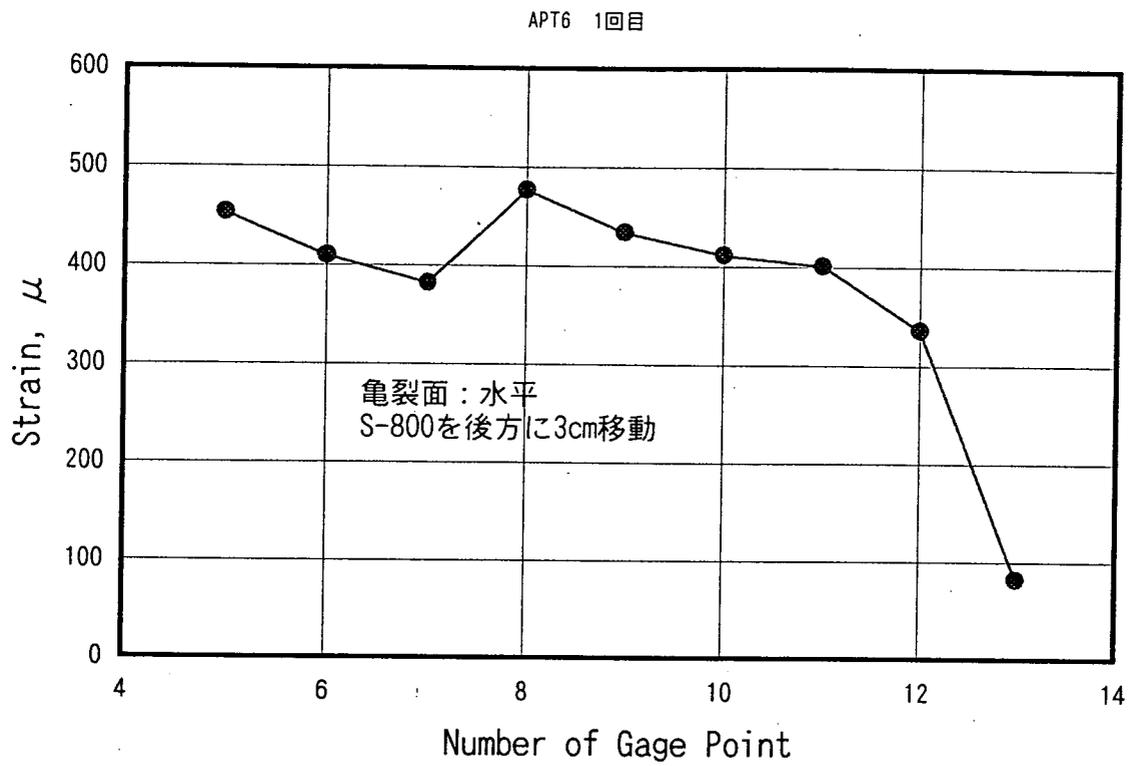


図3.2.6(C) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(APT : 1回目)

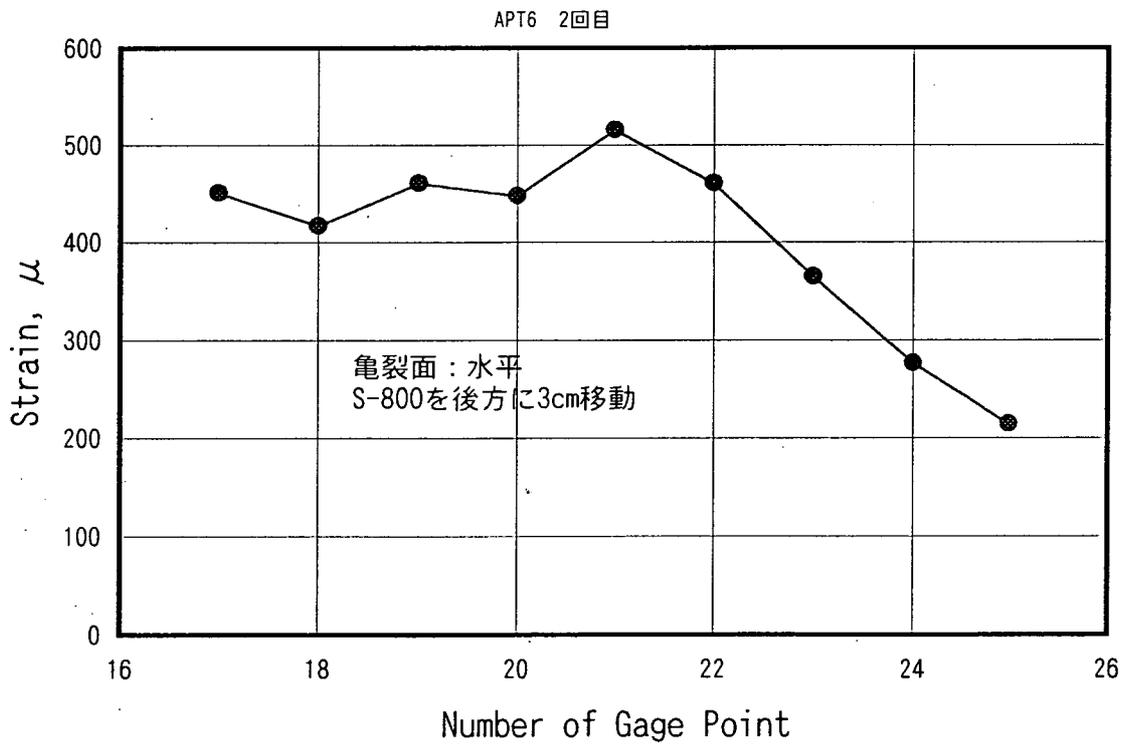
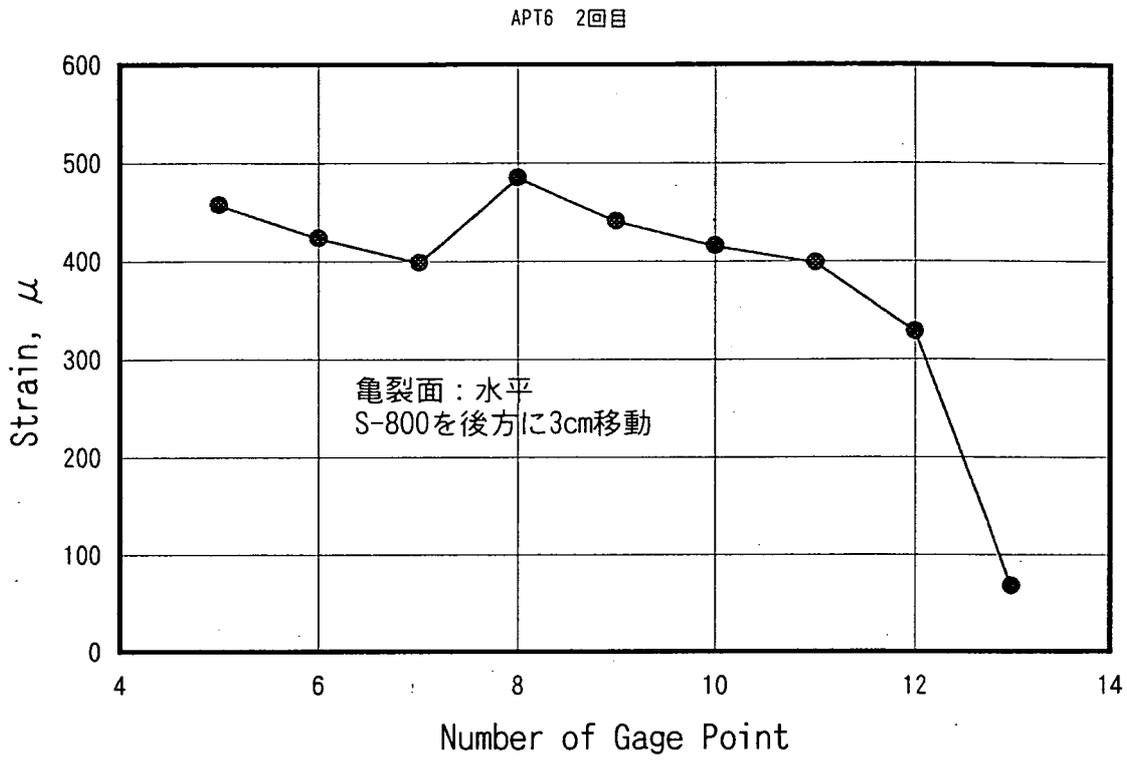


図3.2.6(d) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(APT6 : 2回目)

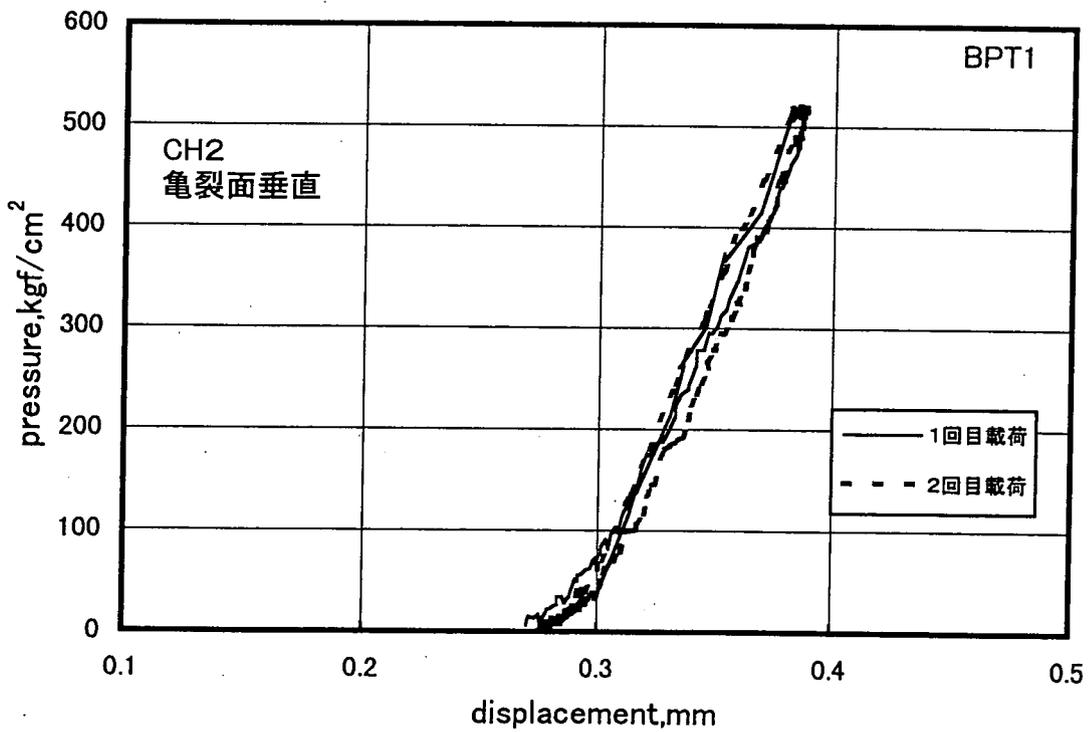
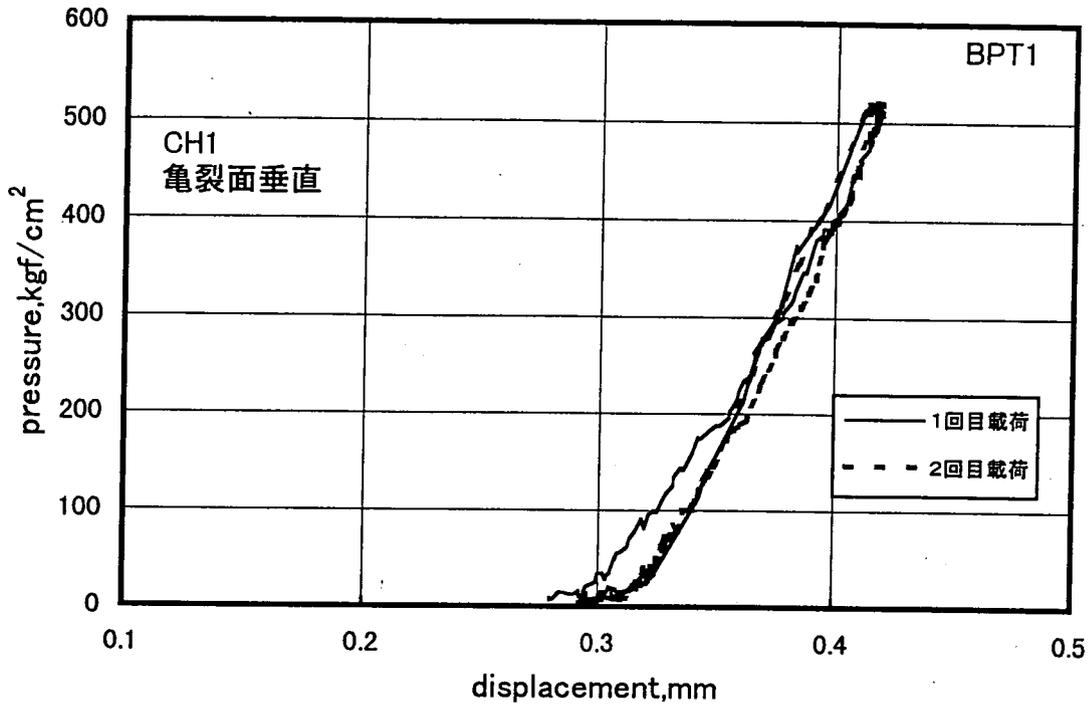


図3. 2. 7(a) 鋼管載荷試験における載荷圧—鋼管内変位図(BPT1)

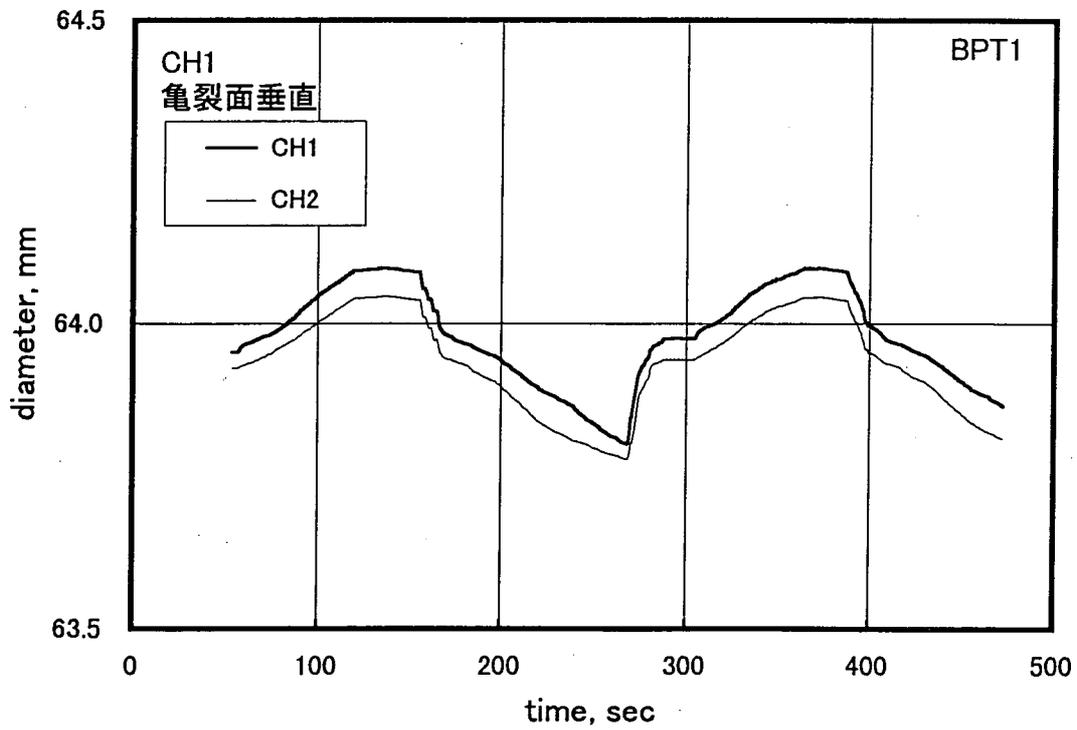
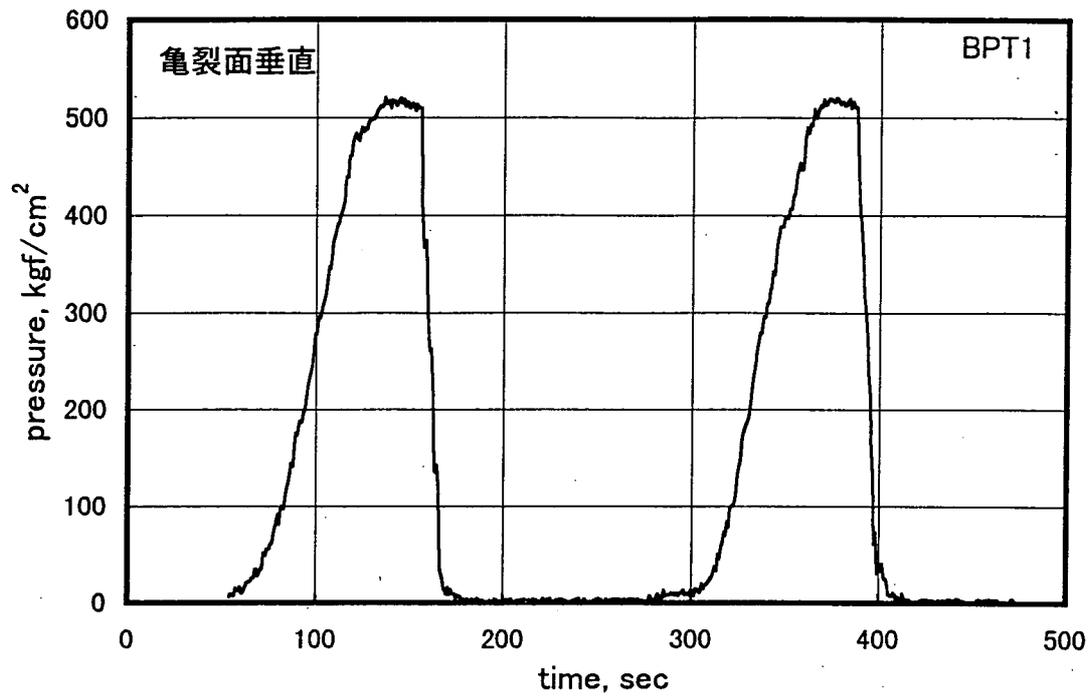


図3.2.7(b) 鋼管載荷試験における載荷-時間および直径-時間図(BPT1)

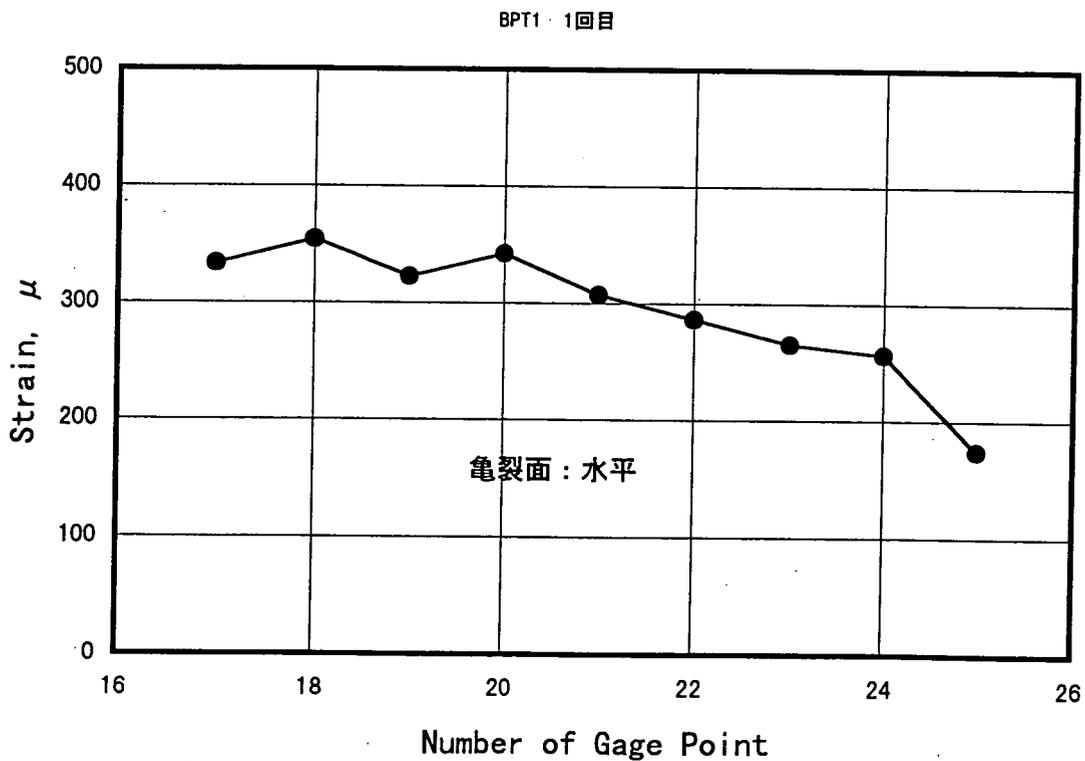
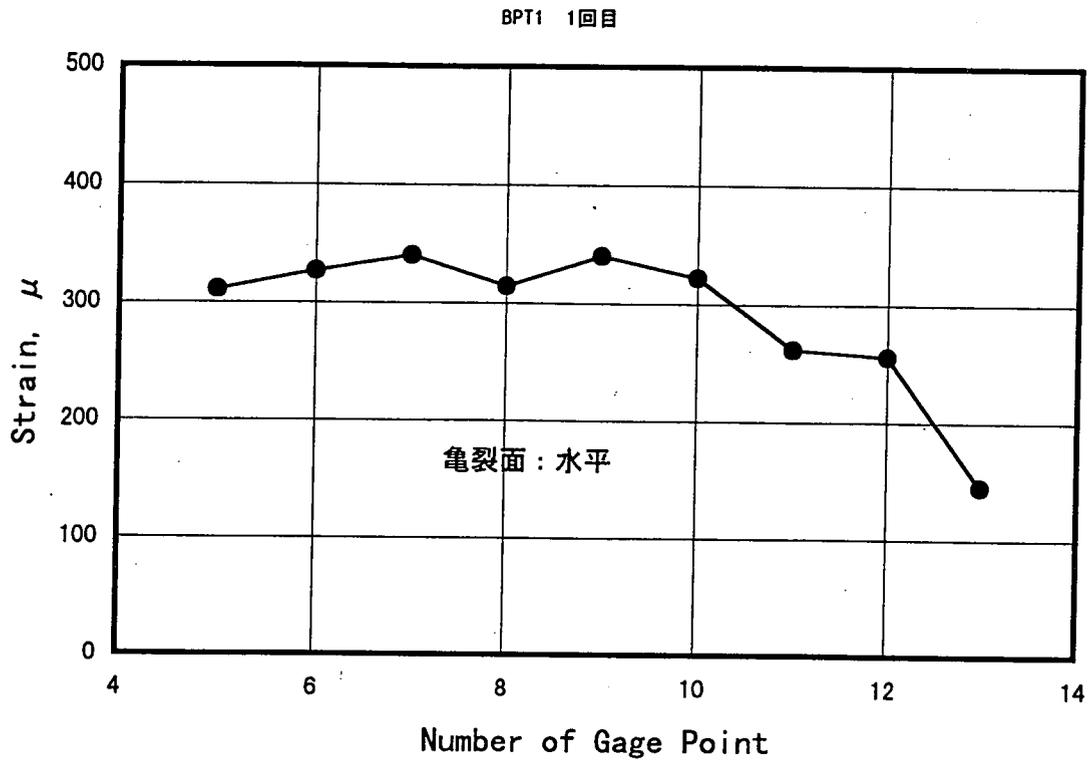
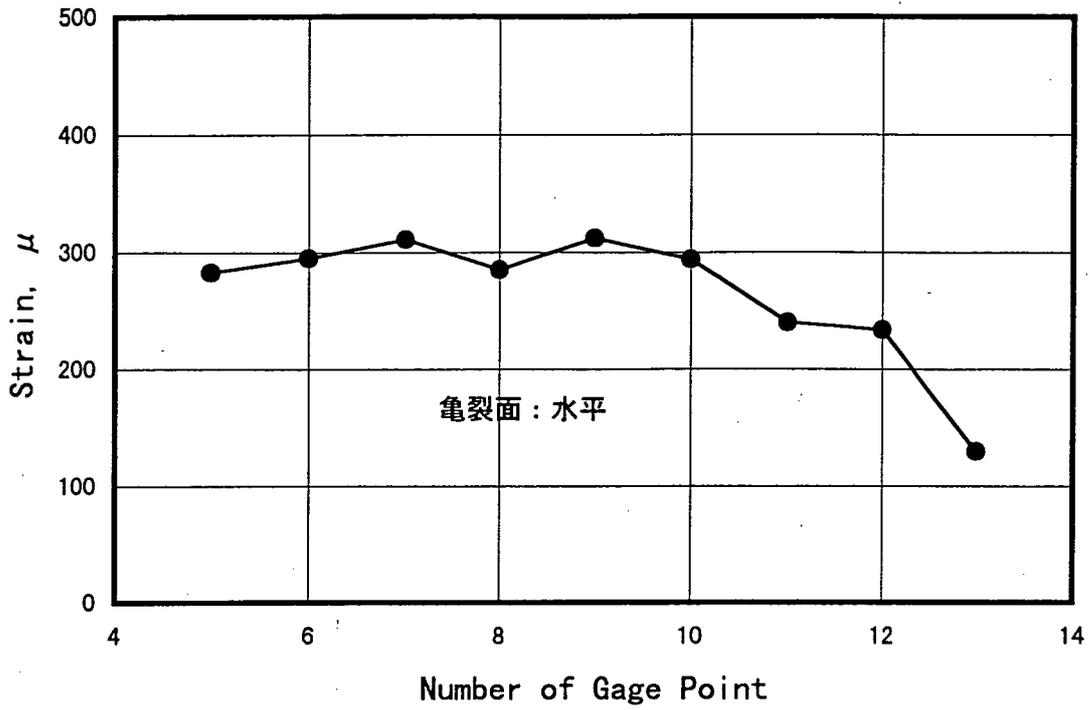


図3. 2. 7(C) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(BPT1 : 1回目)

BPT1 2回目



BPT1 2回目

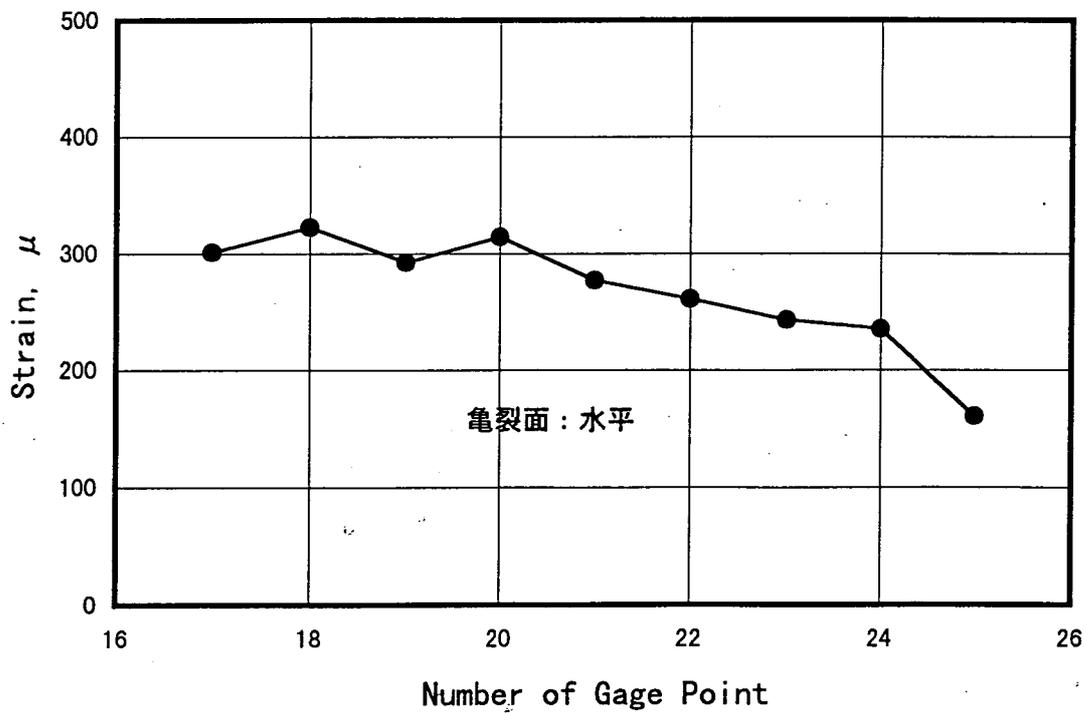


図3. 2. 7(d) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(BPT1 : 2回目)

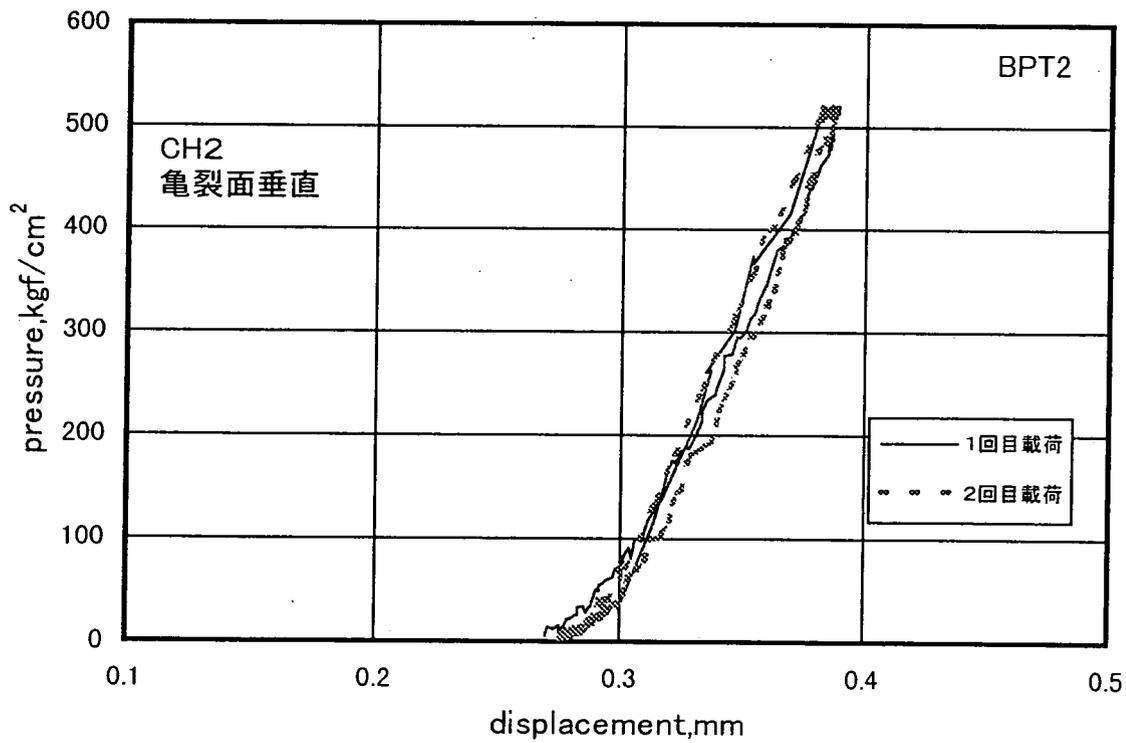
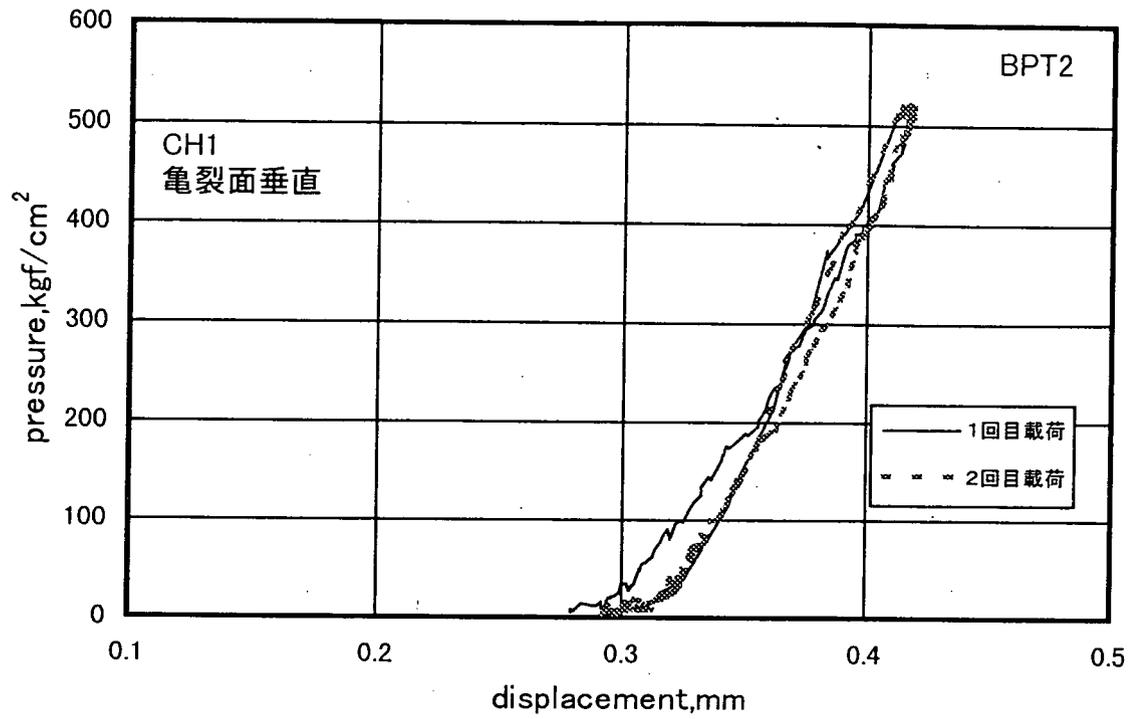


図3.2.8(a) 鋼管載荷試験における載荷圧-鋼管内変位図(BPT2)

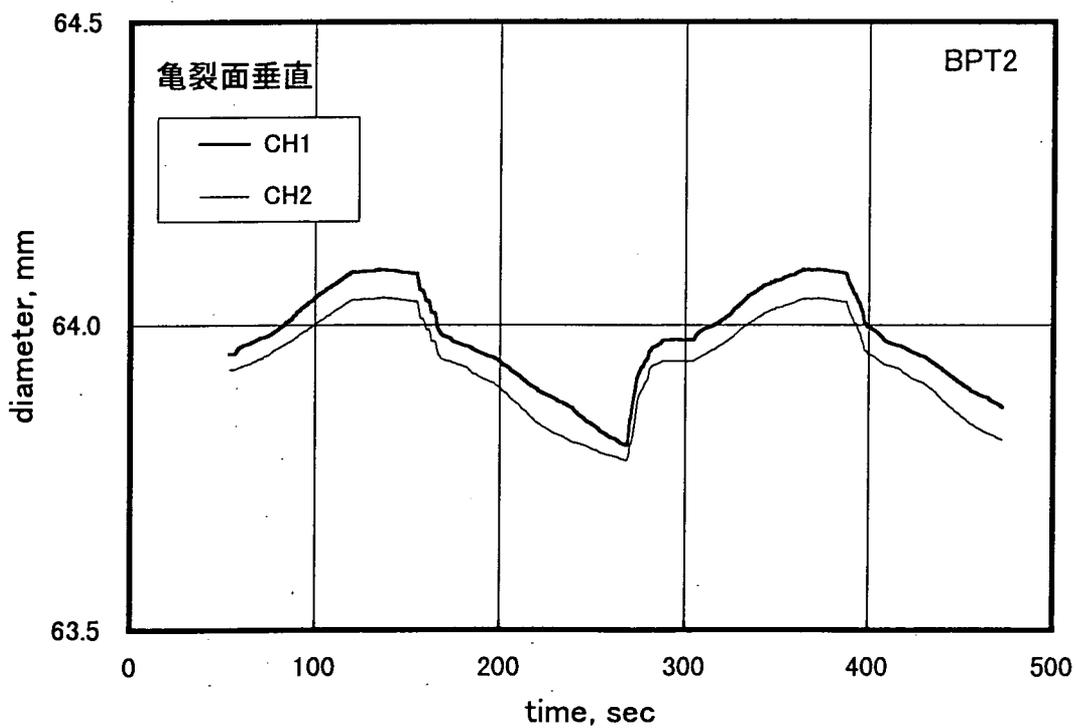
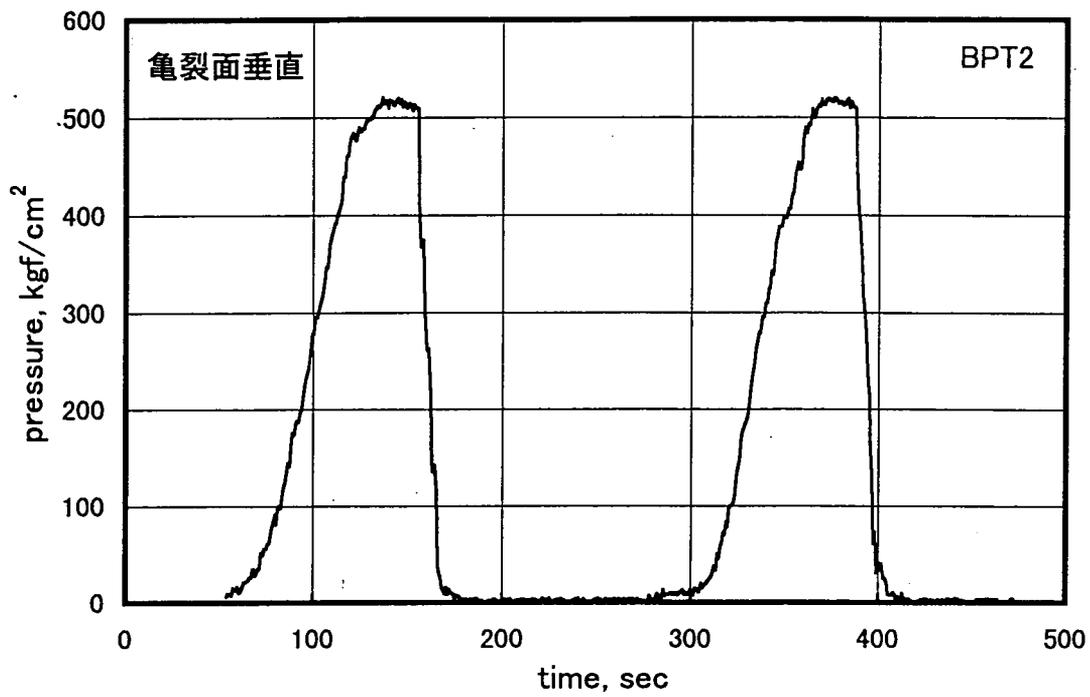


図3.2.8(b) 鋼管載荷試験における載荷-時間および直径-時間図(BPT2)

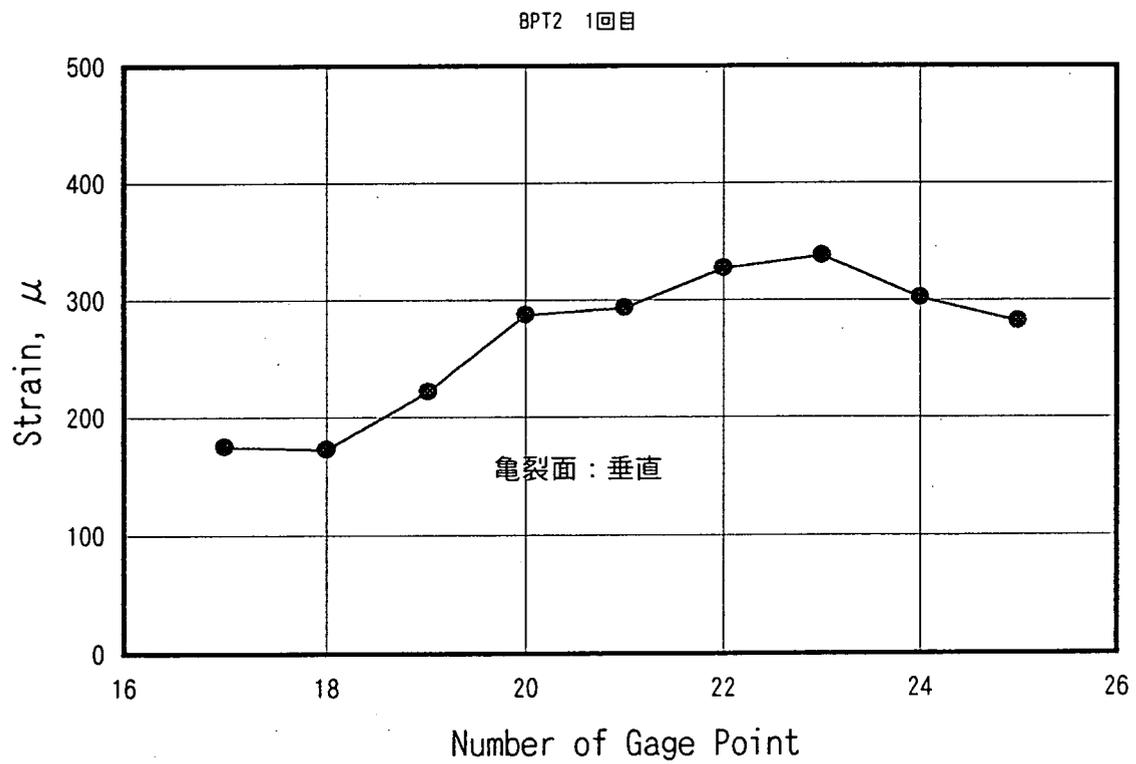
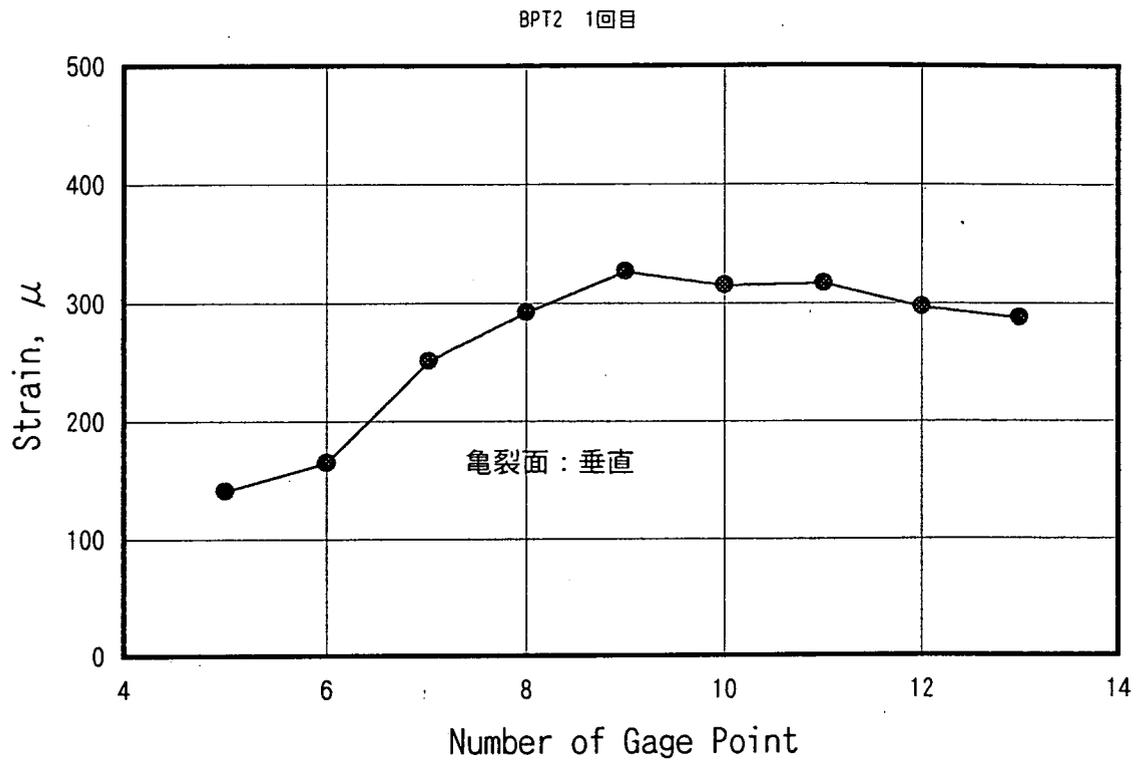
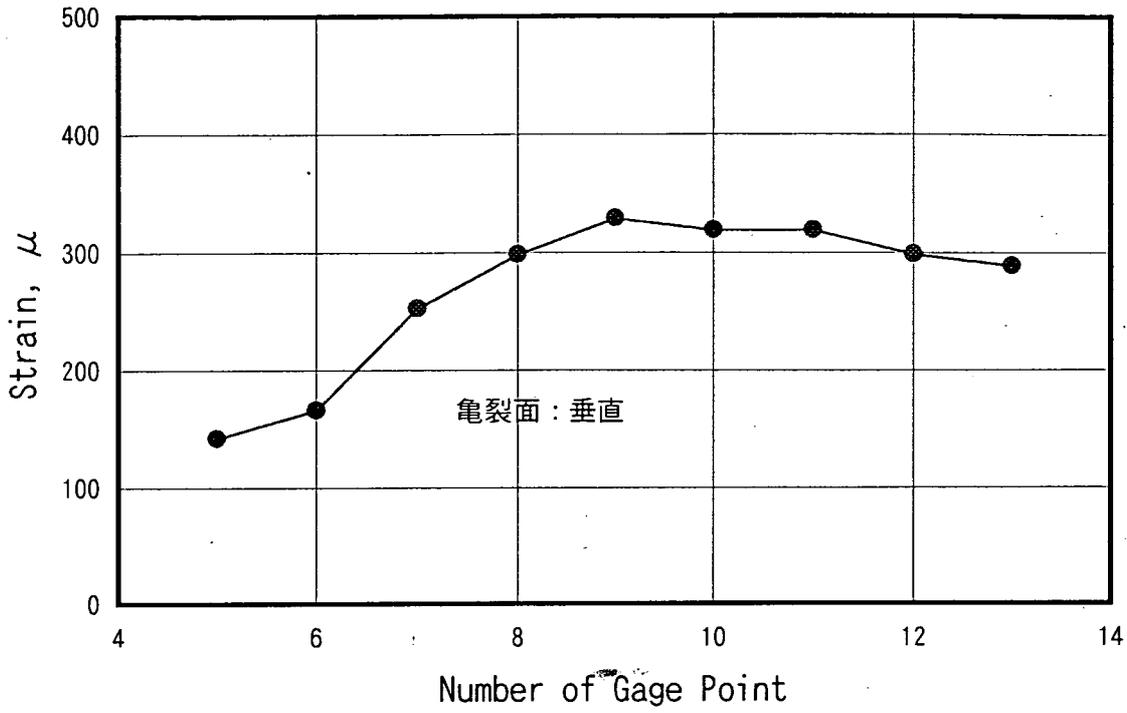


図3.2.8(C) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(BPT2 : 1回目)

BPT2 2回目



BPT2 2回目

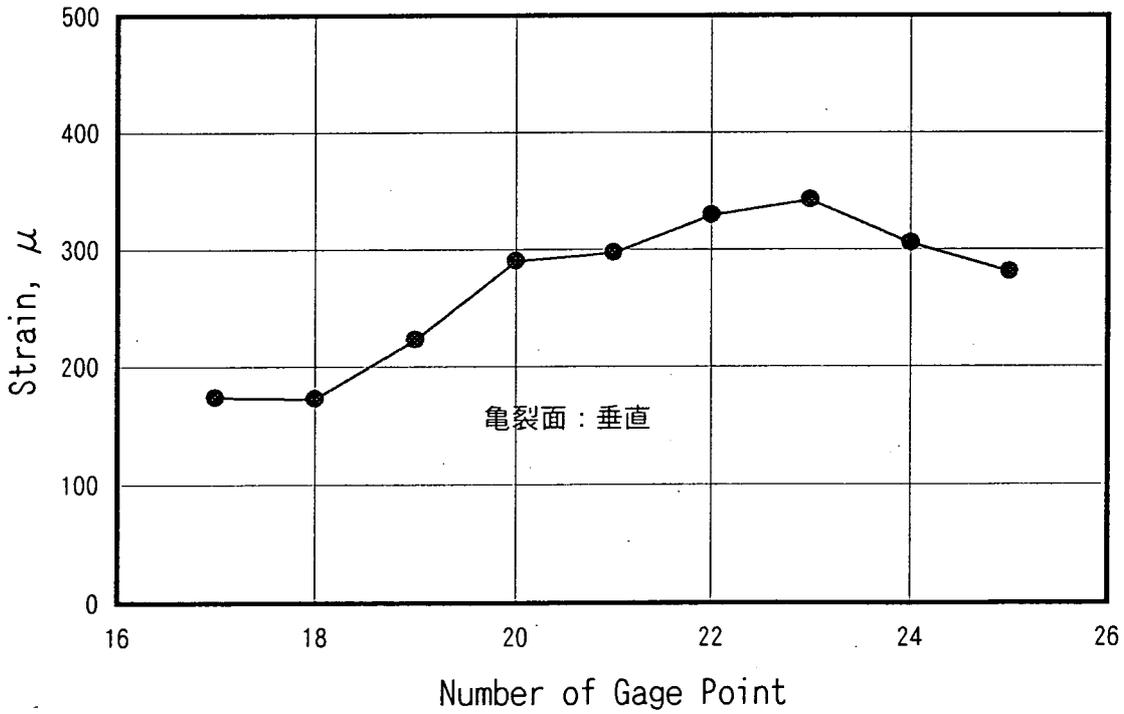


図3.2.8(d) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(BPT2 : 2回目)

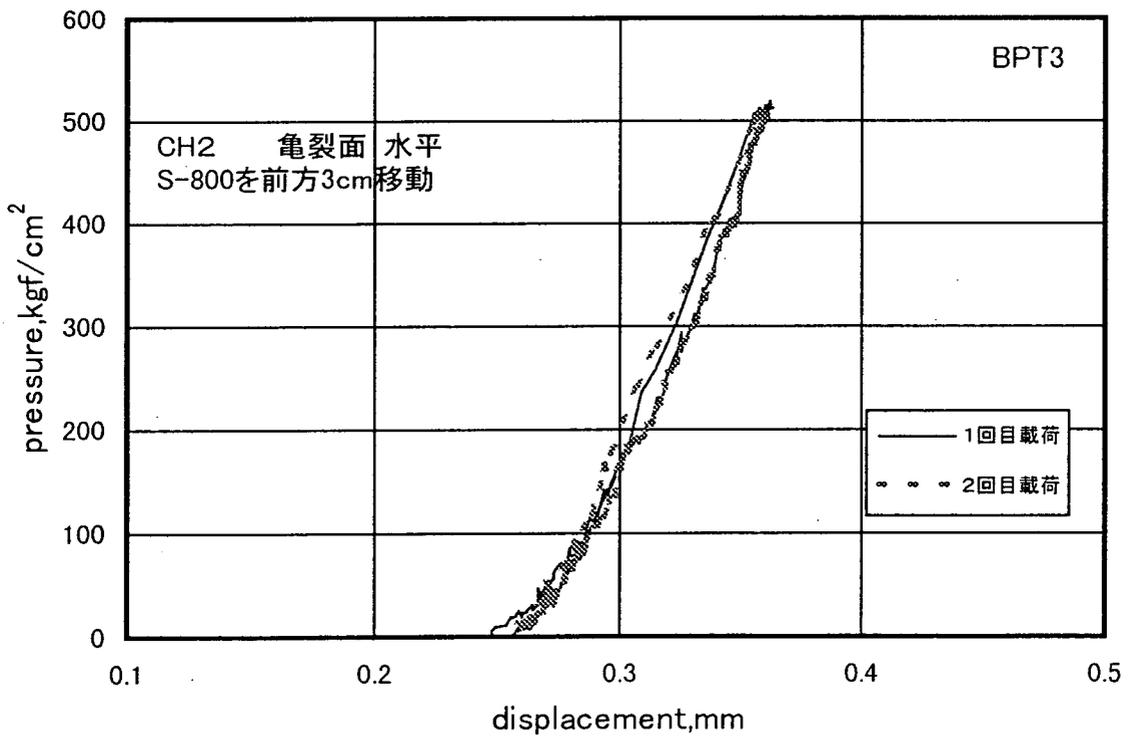
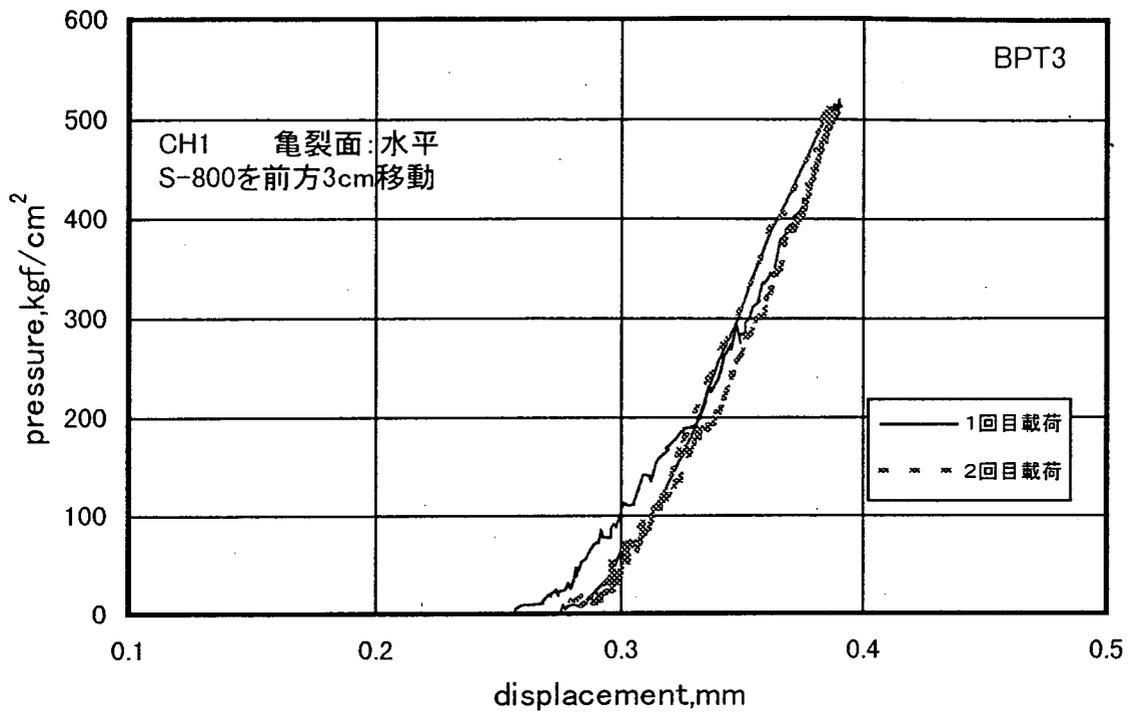


図3.2.9(a) 鋼管載荷試験における載荷圧-鋼管内変位図(BPT3)

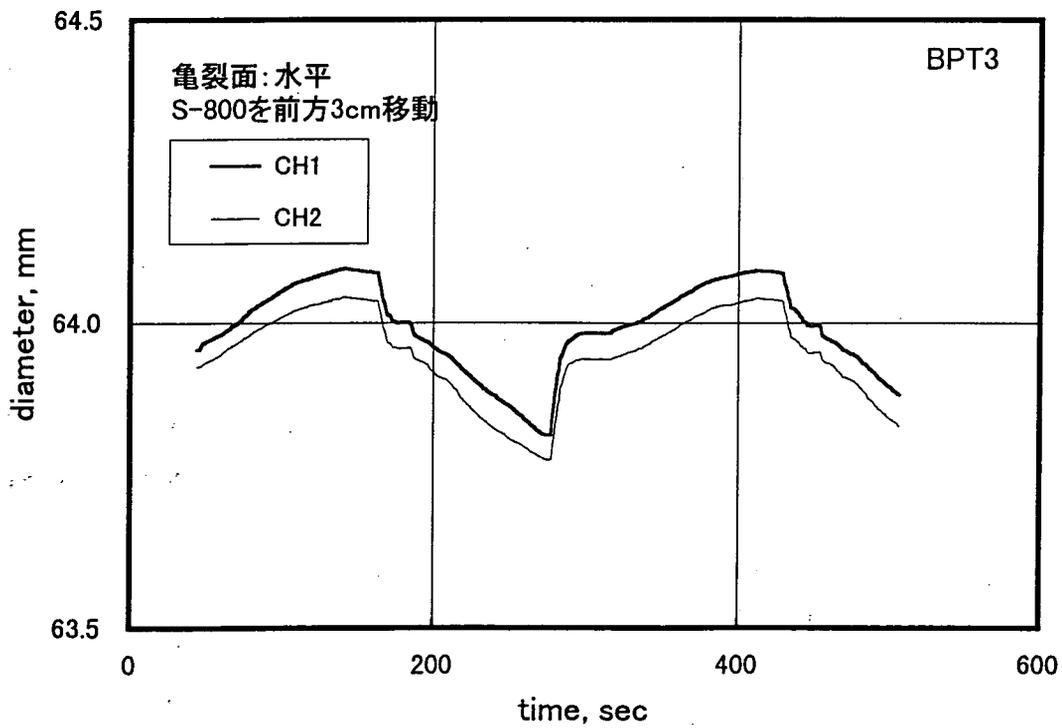
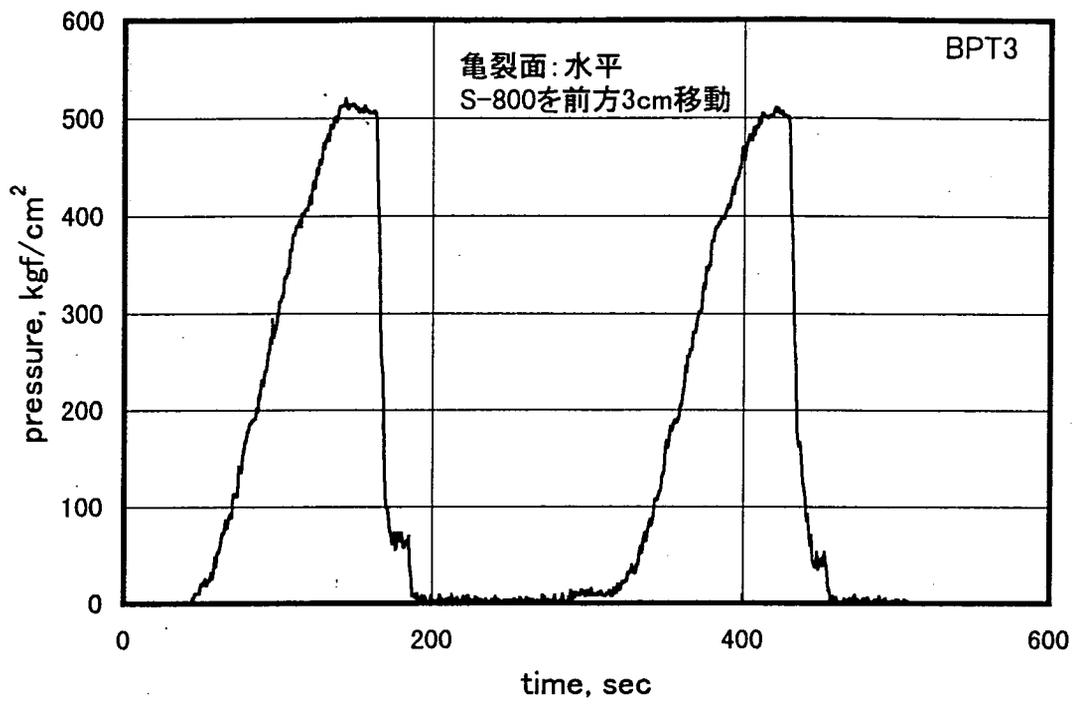


図3. 2. 9 (b) 鋼管載荷試験における載荷—時間および直径—時間図 (BPT3)

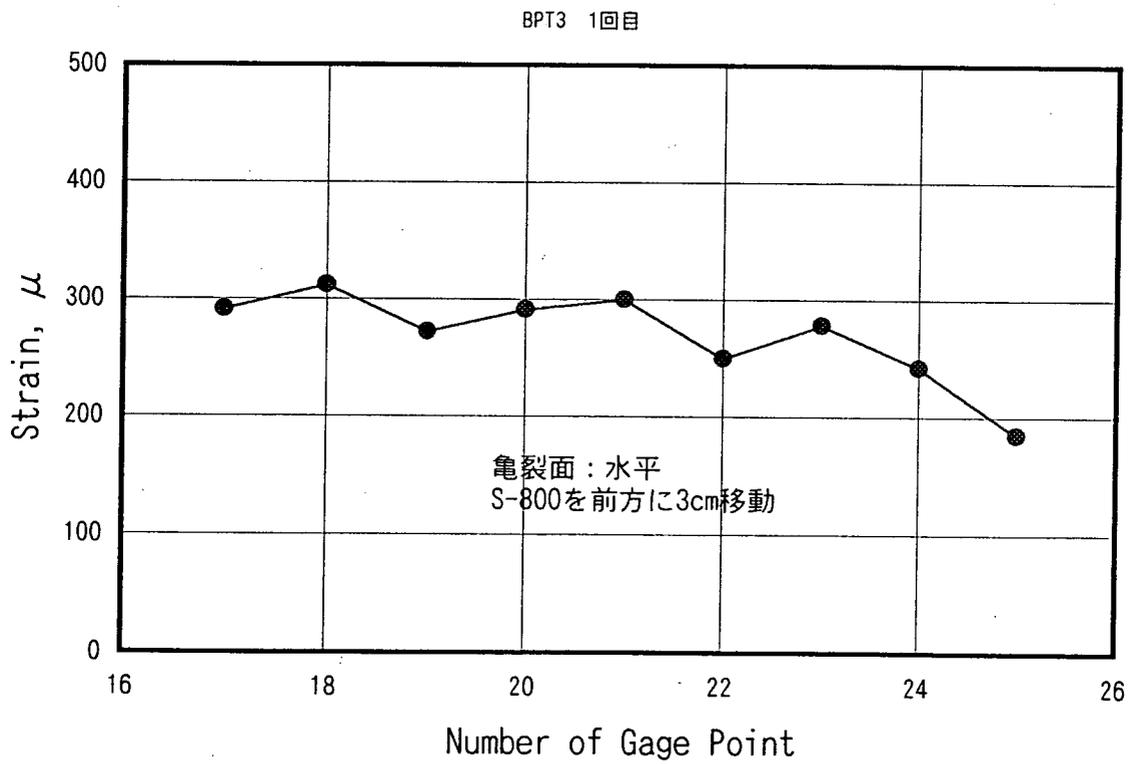
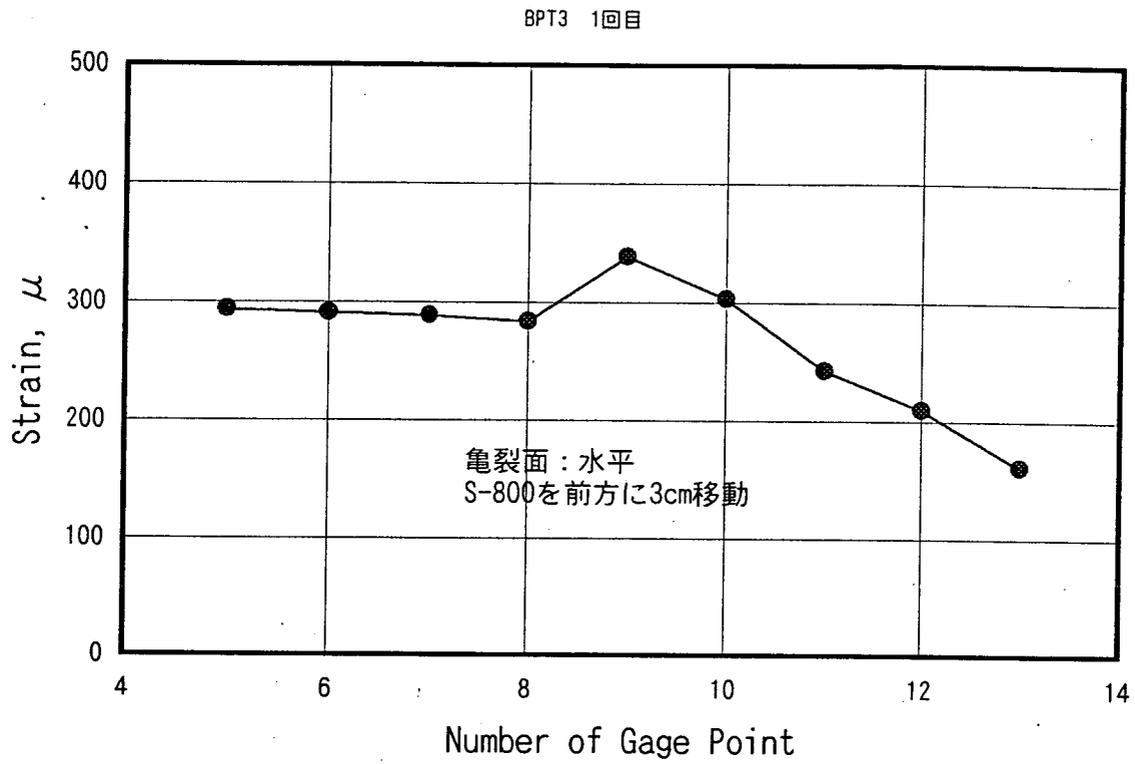


図3.2.9(C) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(BPT3 : 1回目)

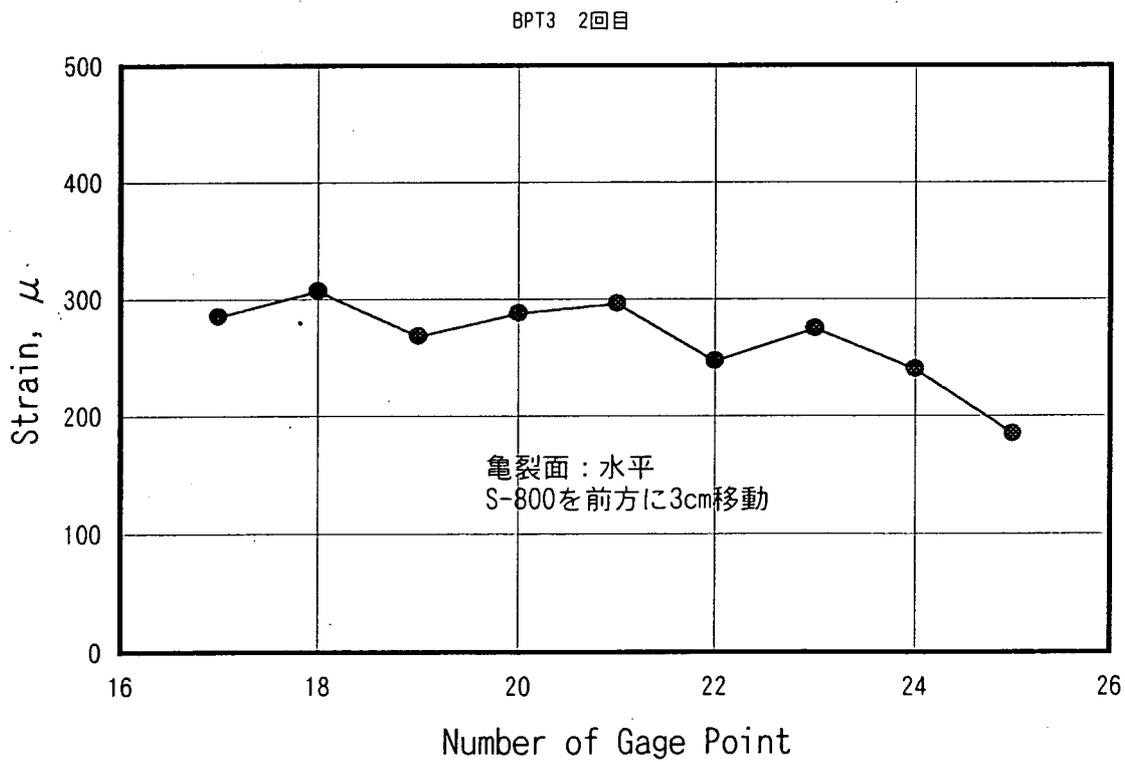
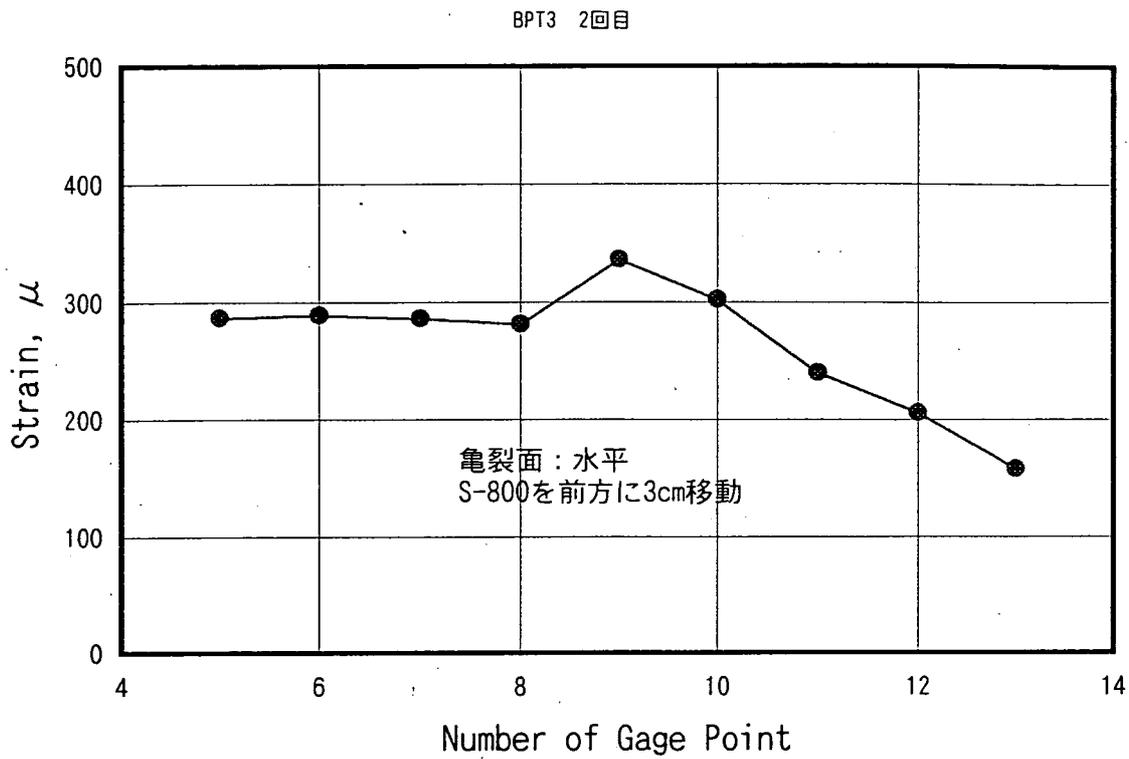


図3.2.9(d) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(BPT3 : 2回目)

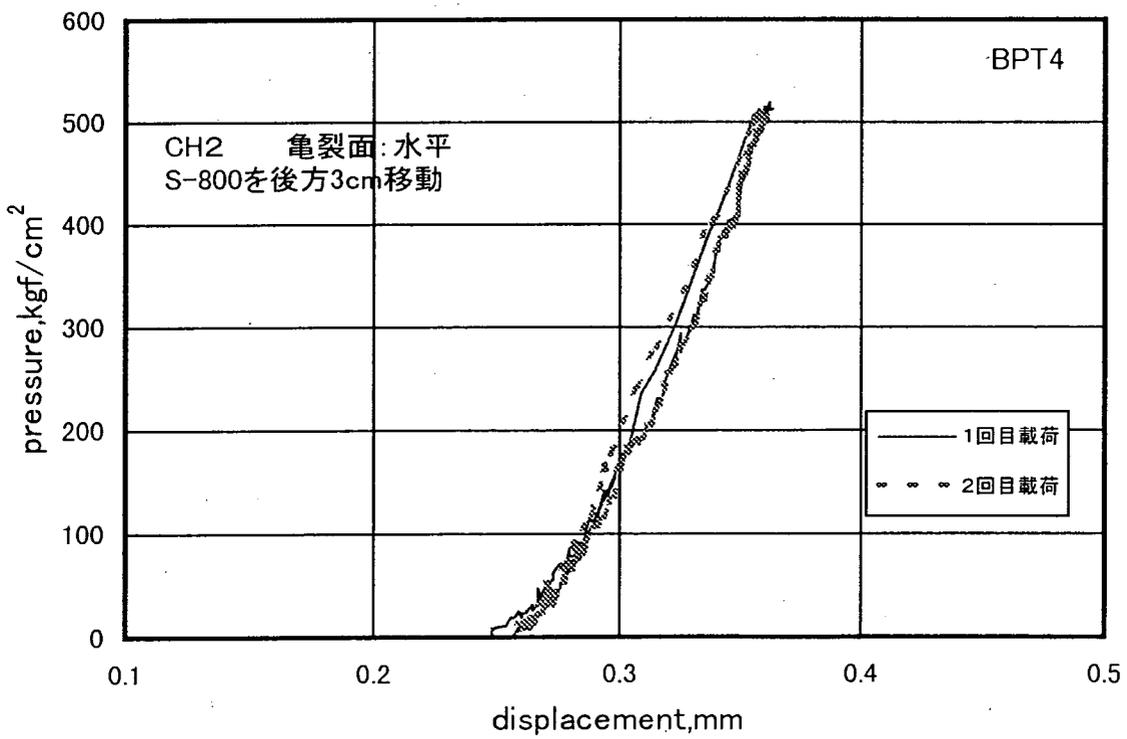
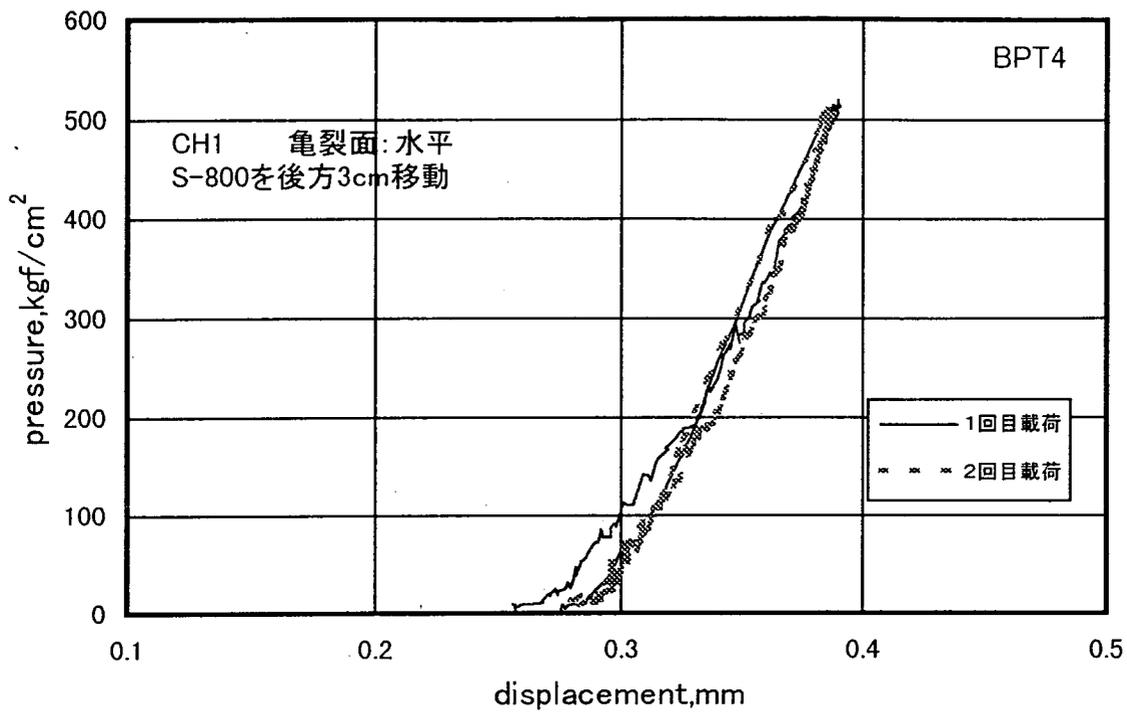


図3.2.10(a) 鋼管載荷試験における載荷圧-鋼管内変位図(BPT4)

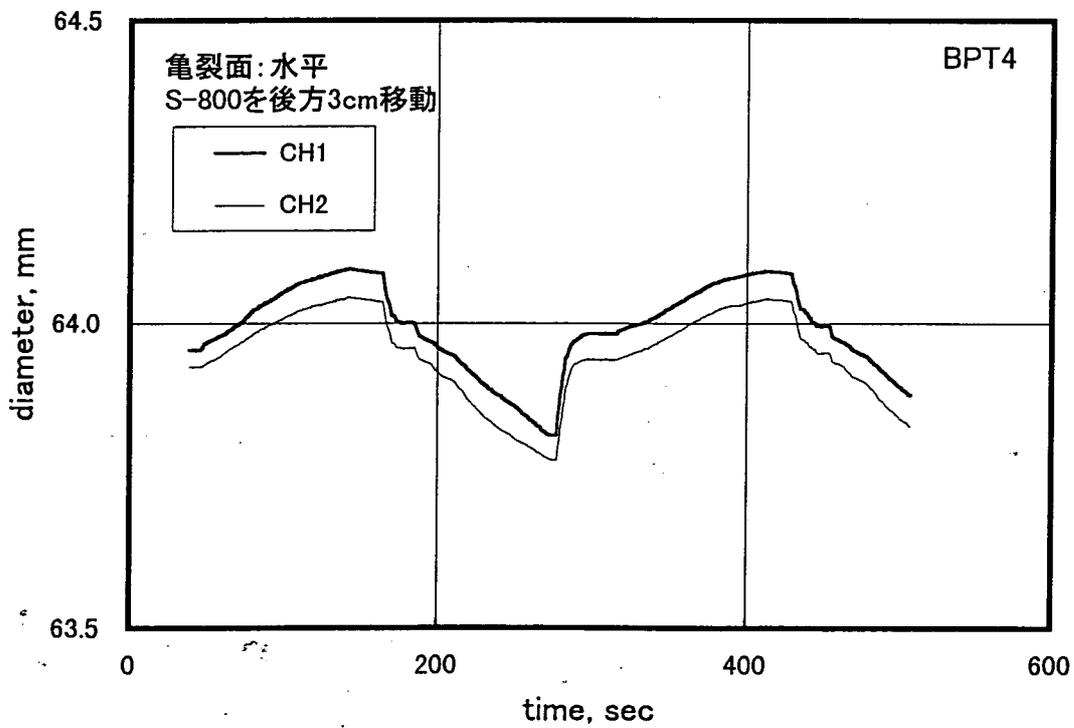
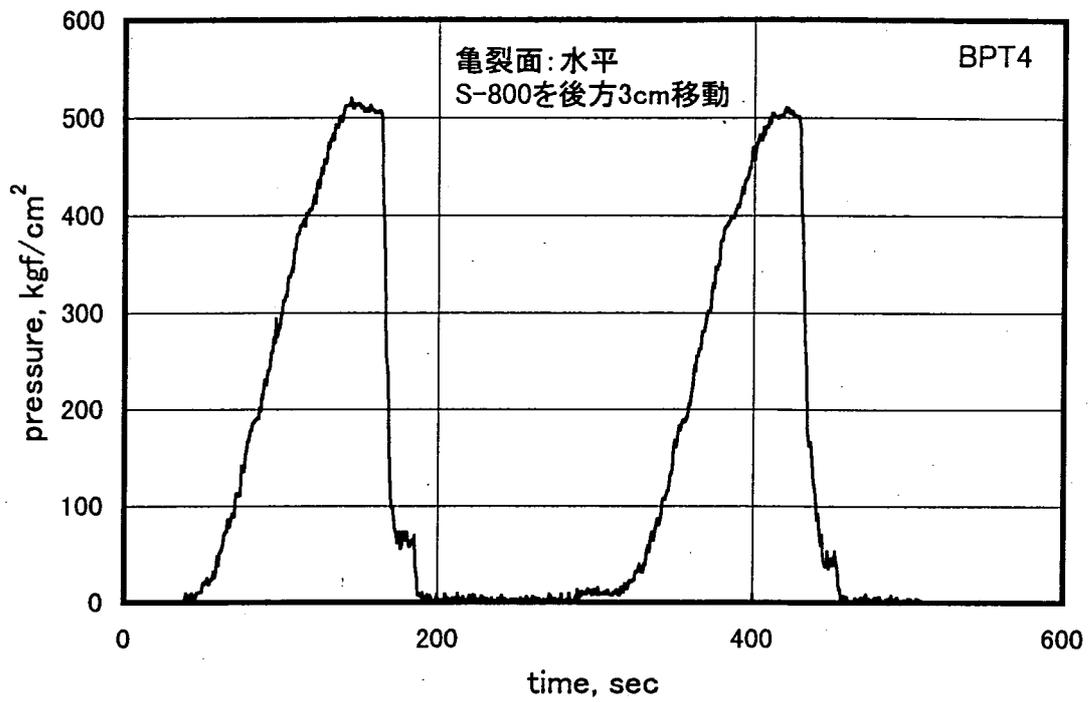


図3.2.10(b) 鋼管載荷試験における載荷—時間および直径—時間図(BPT4)

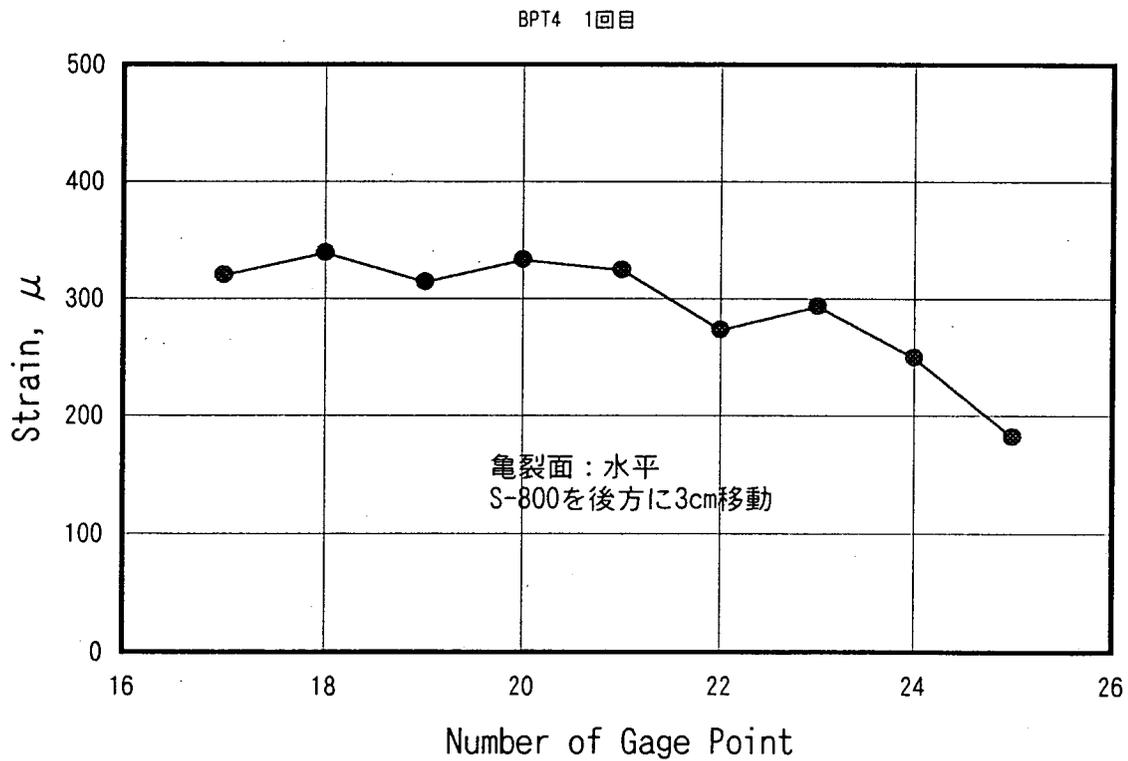
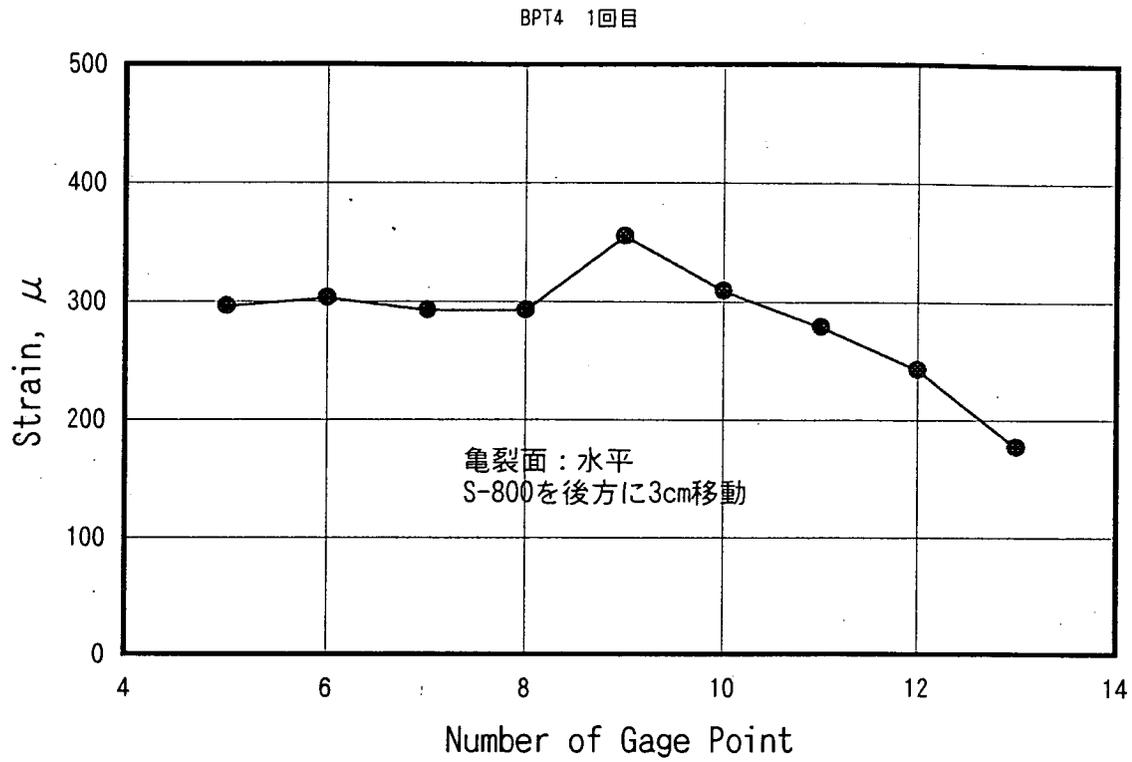
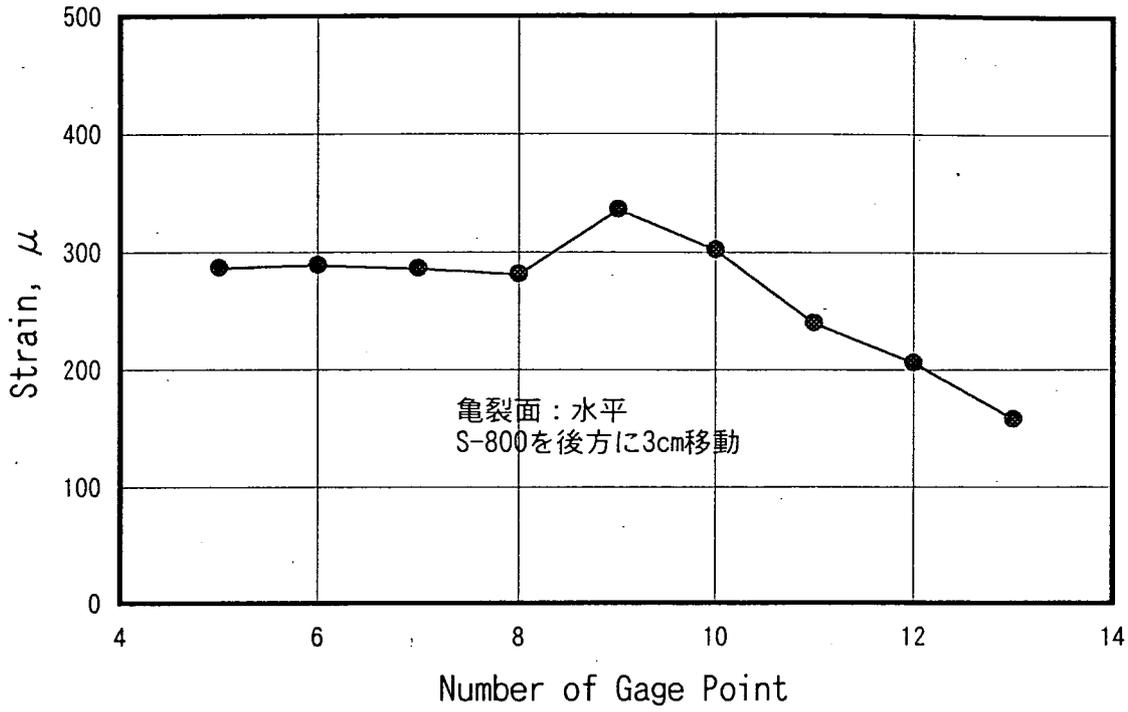


図3.2.10(C) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(BPT4 : 1回目)

BPT4 2回目



BPT4 2回目

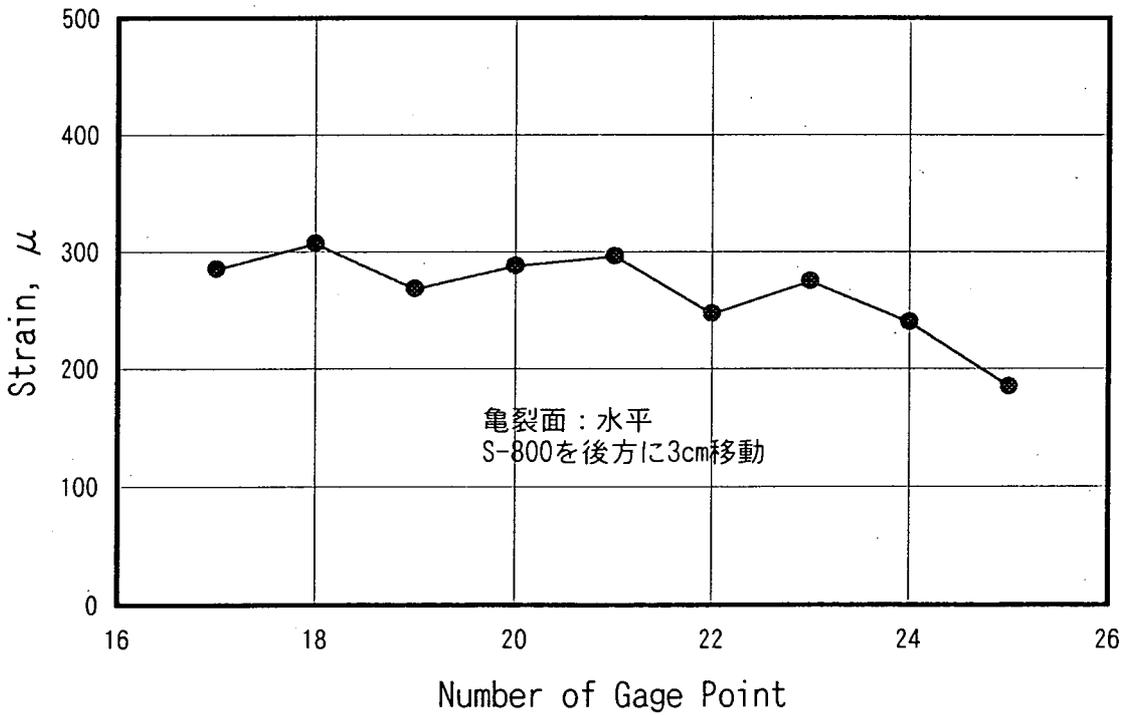


図3.2.10(d) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(BPT4 : 2回目)

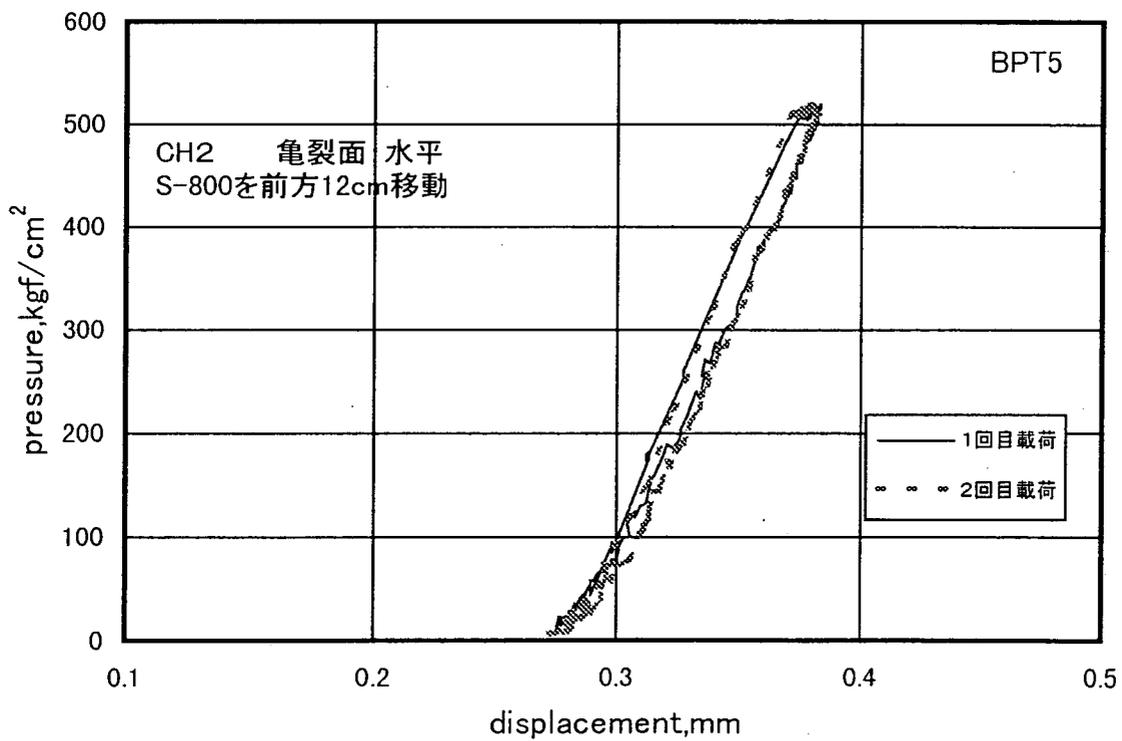
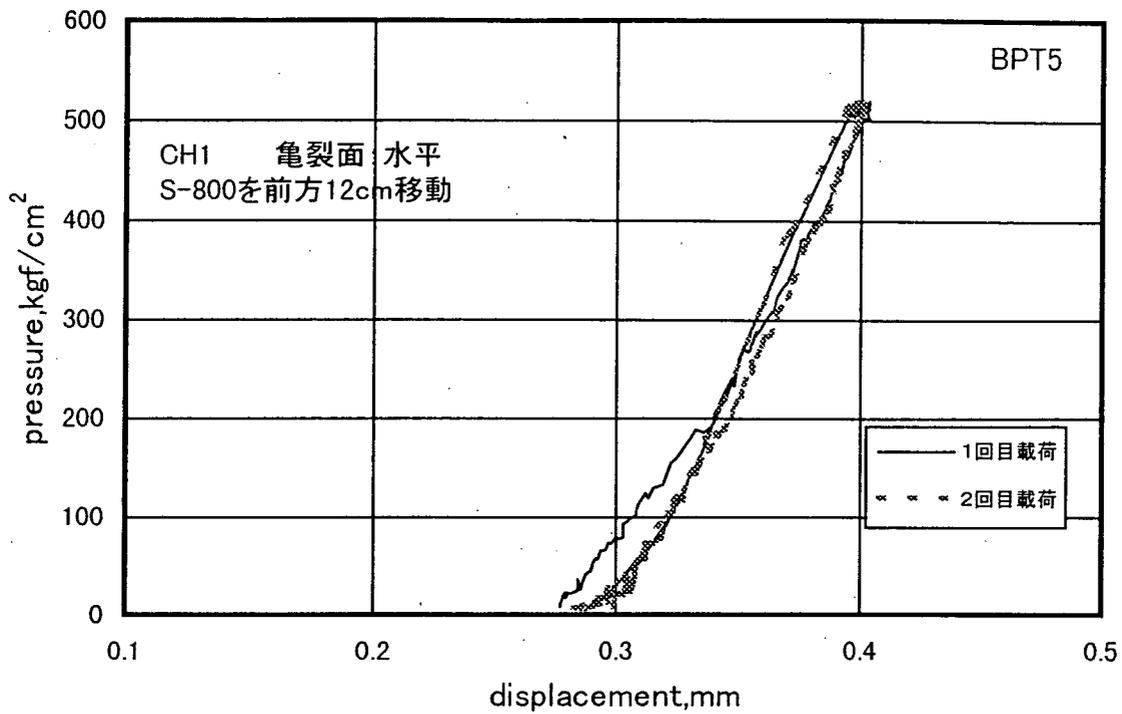


図3.2.11(a) 鋼管載荷試験における載荷圧—鋼管内変位図(BPT5)

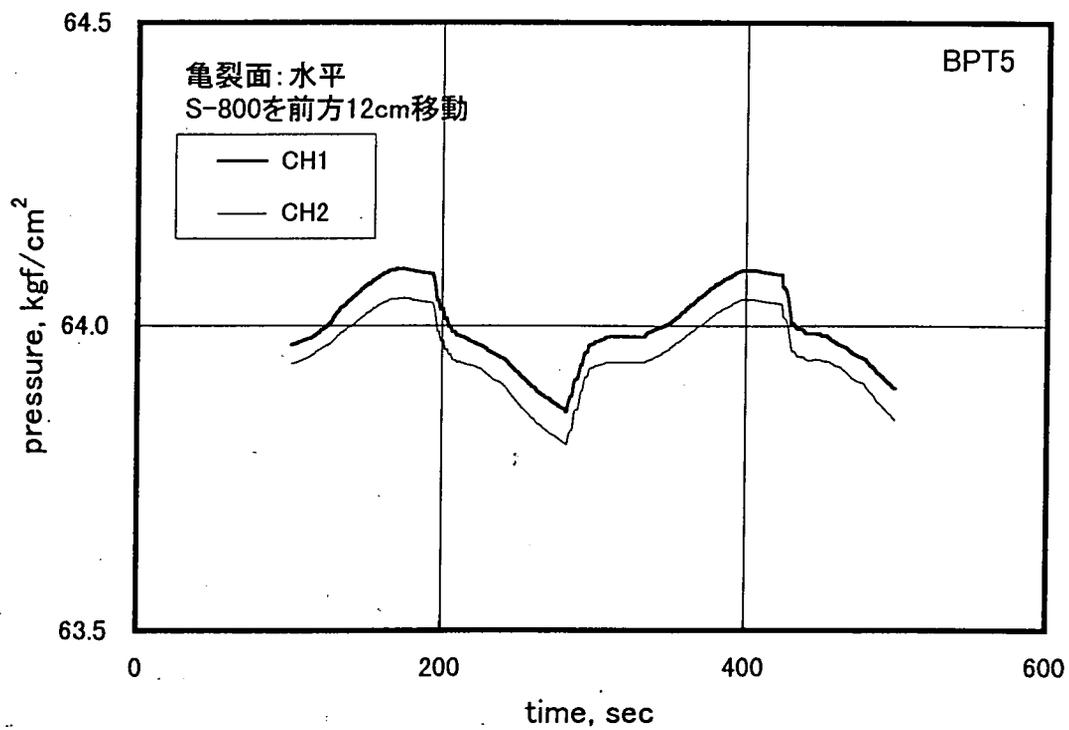
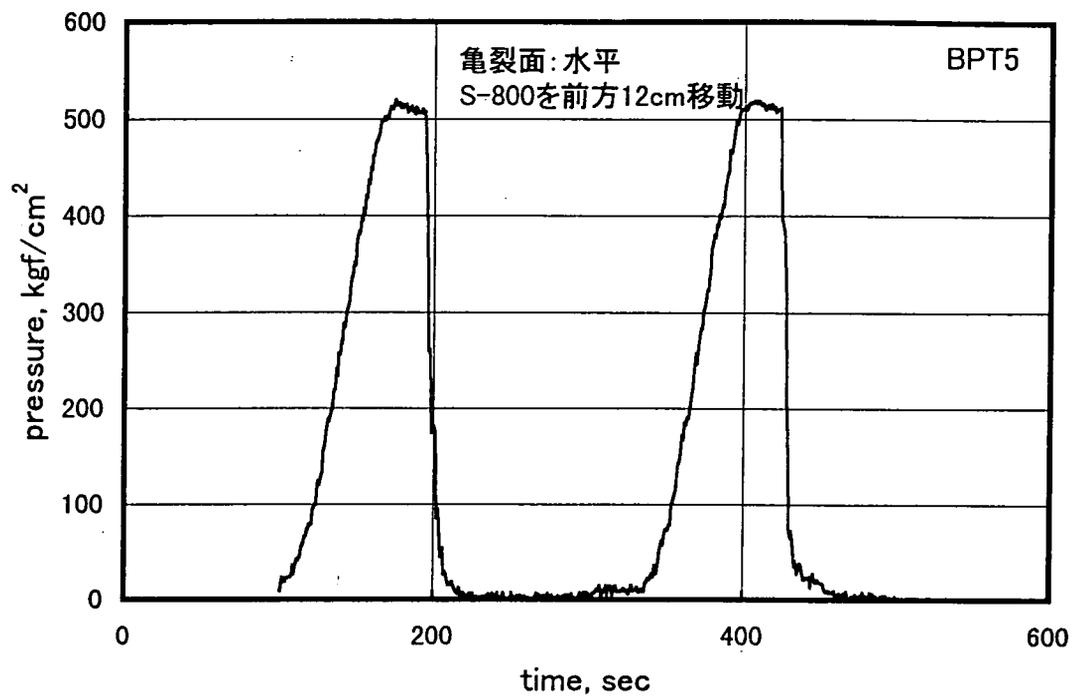


図3. 2. 11 (b) 鋼管載荷試験における載荷—時間および直径—時間図 (BPT5)

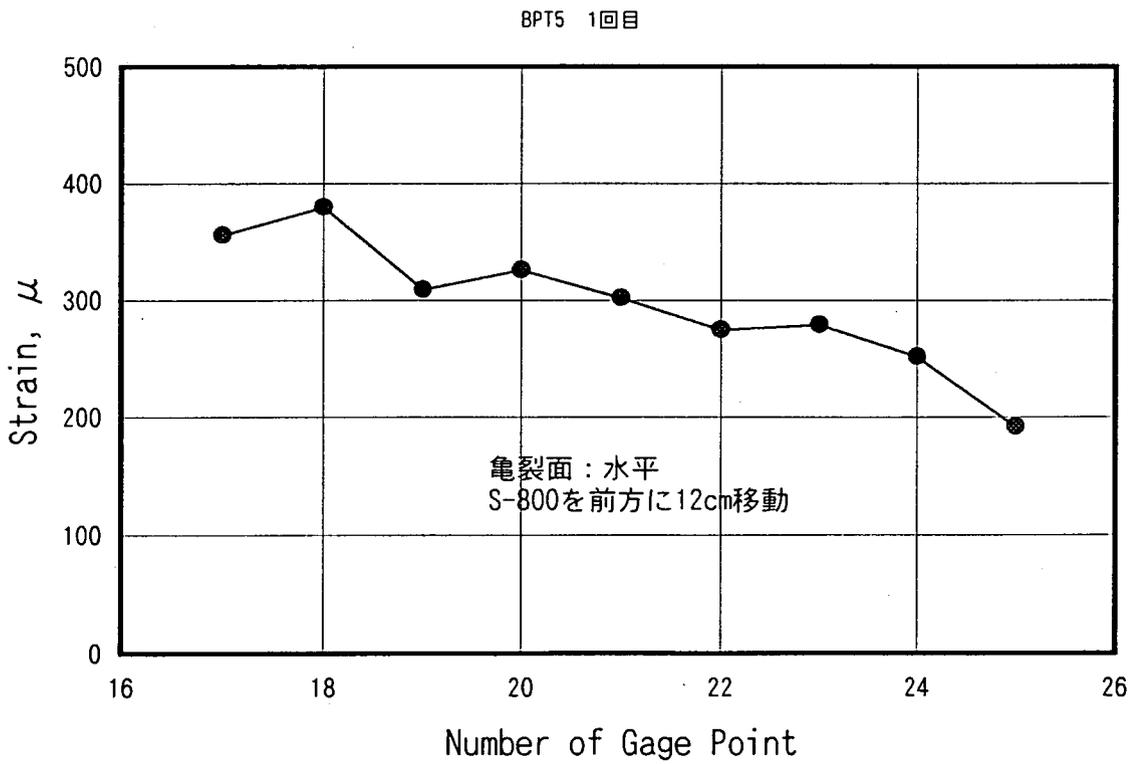
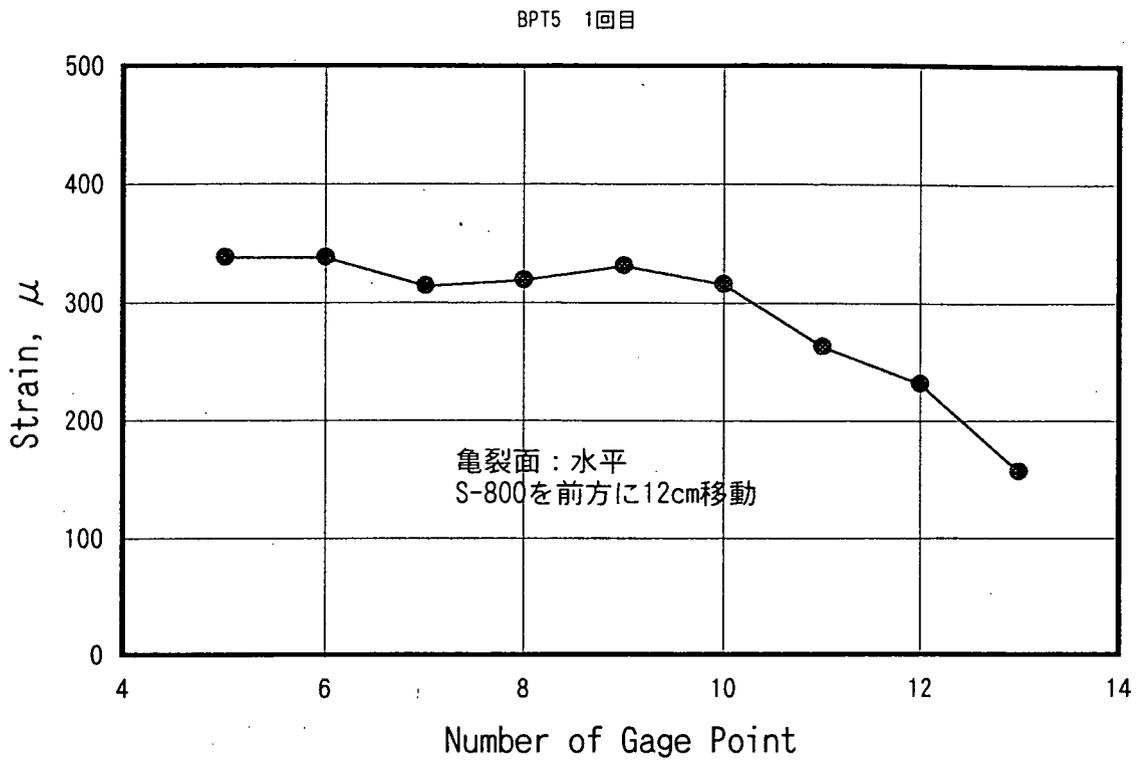


図3.2.11(C) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(BPT5 : 1回目)

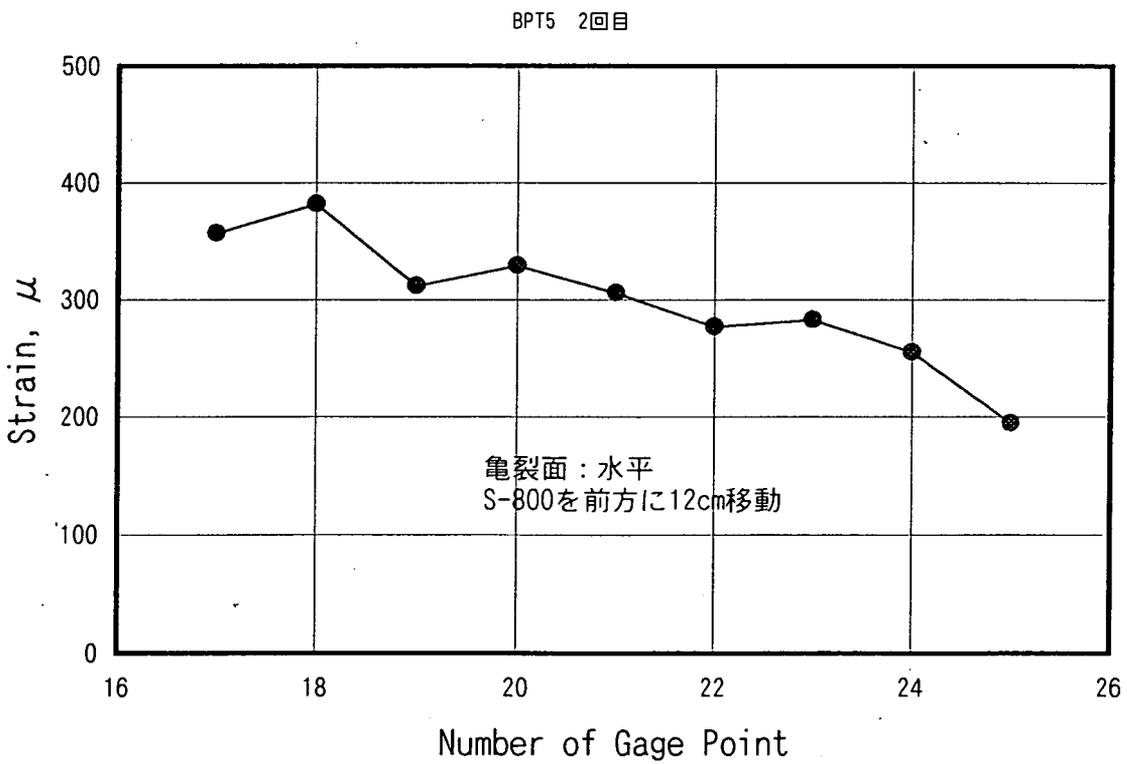
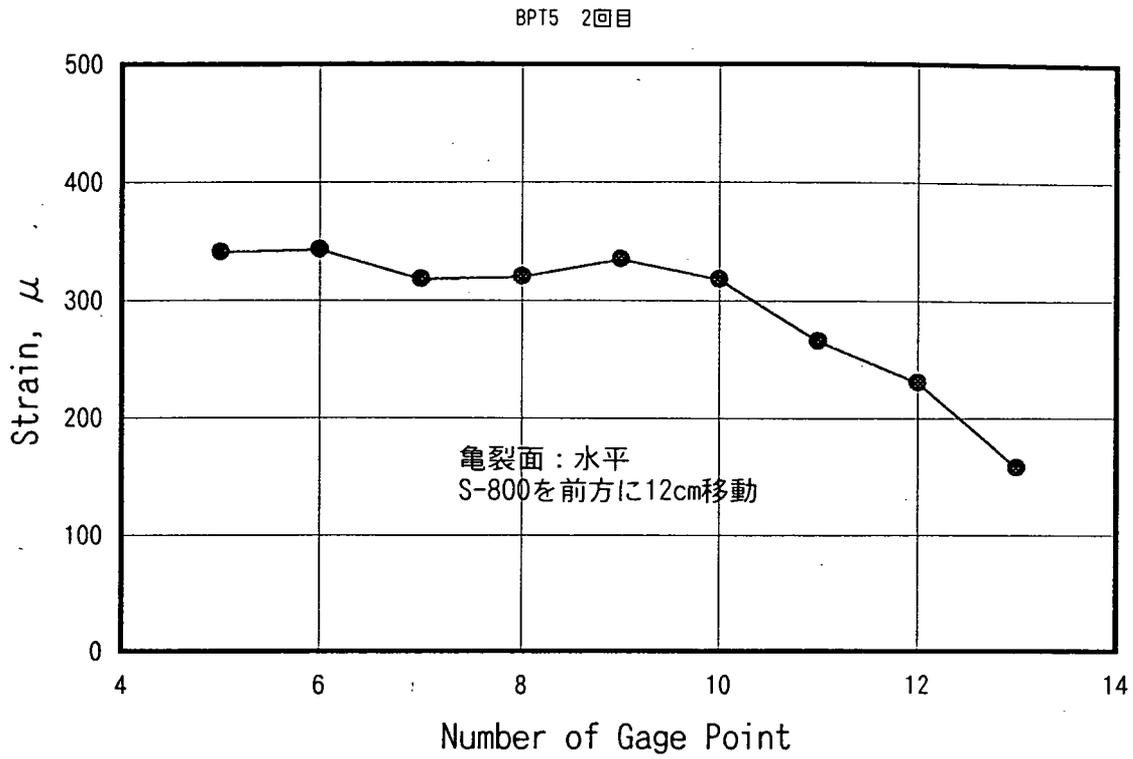


図3.2.11(d) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(BPT5：2回目)

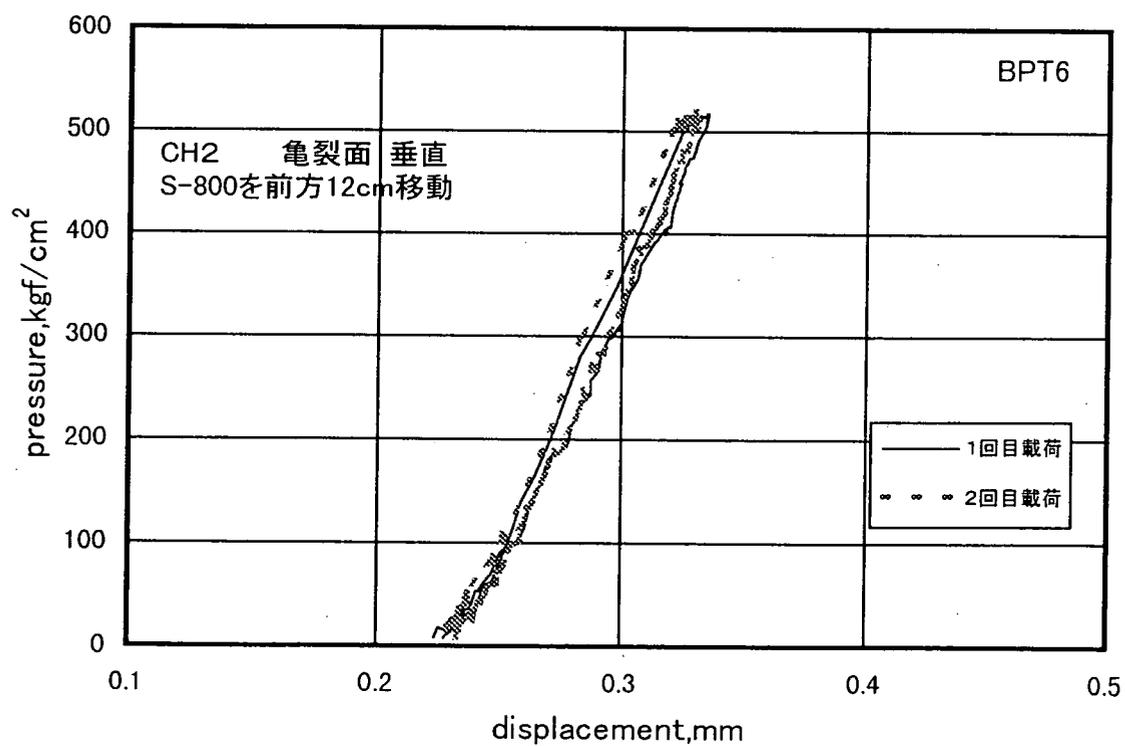
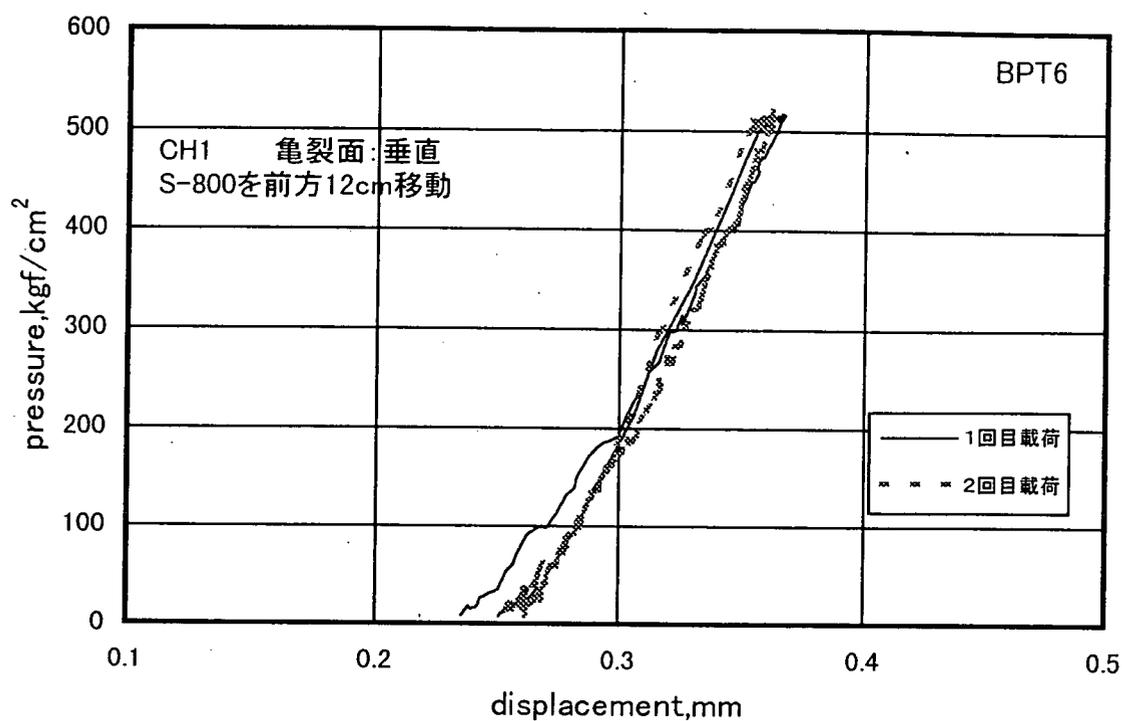


図3.2.12(a) 鋼管載荷試験における載荷圧-鋼管内変位図(BPT6)

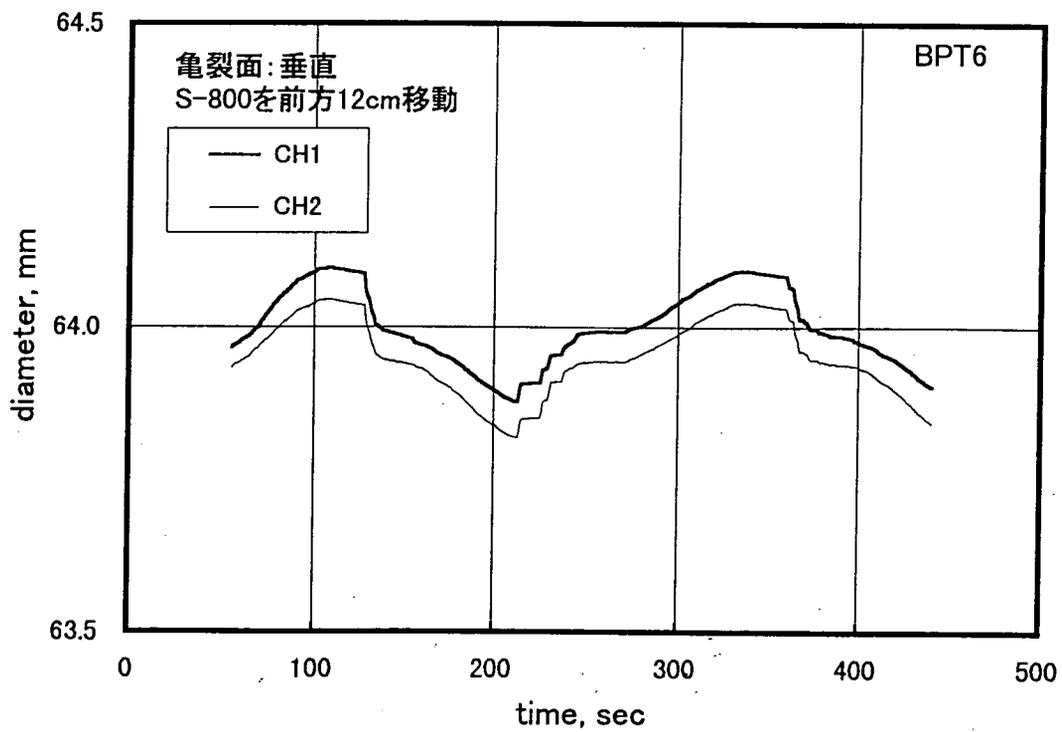
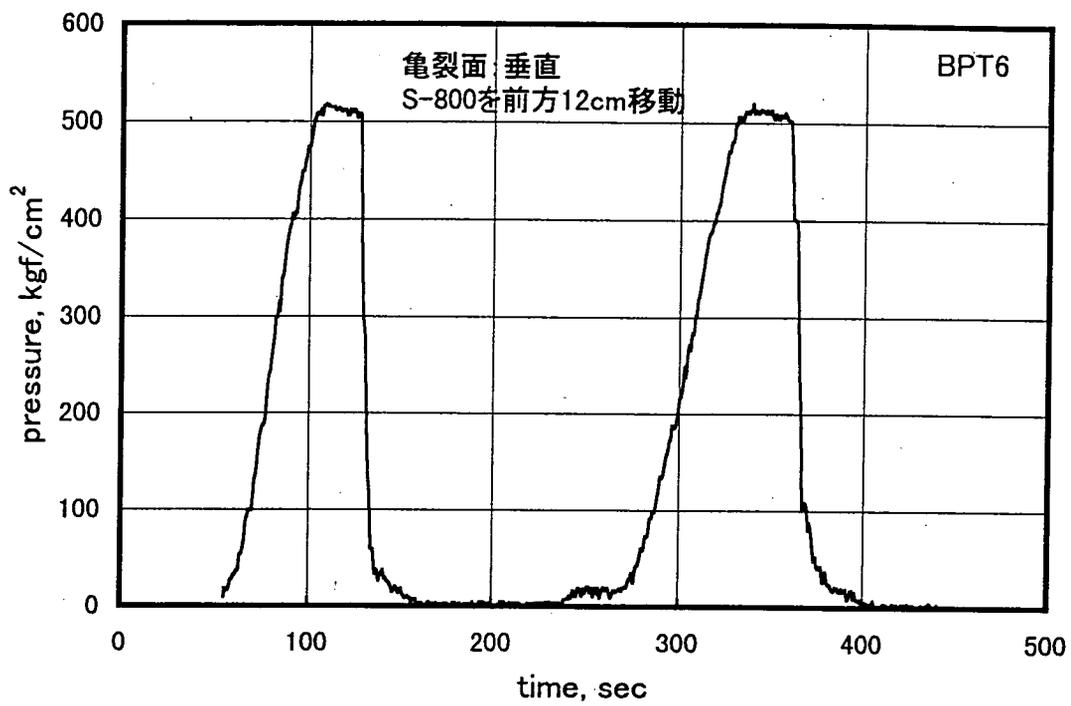
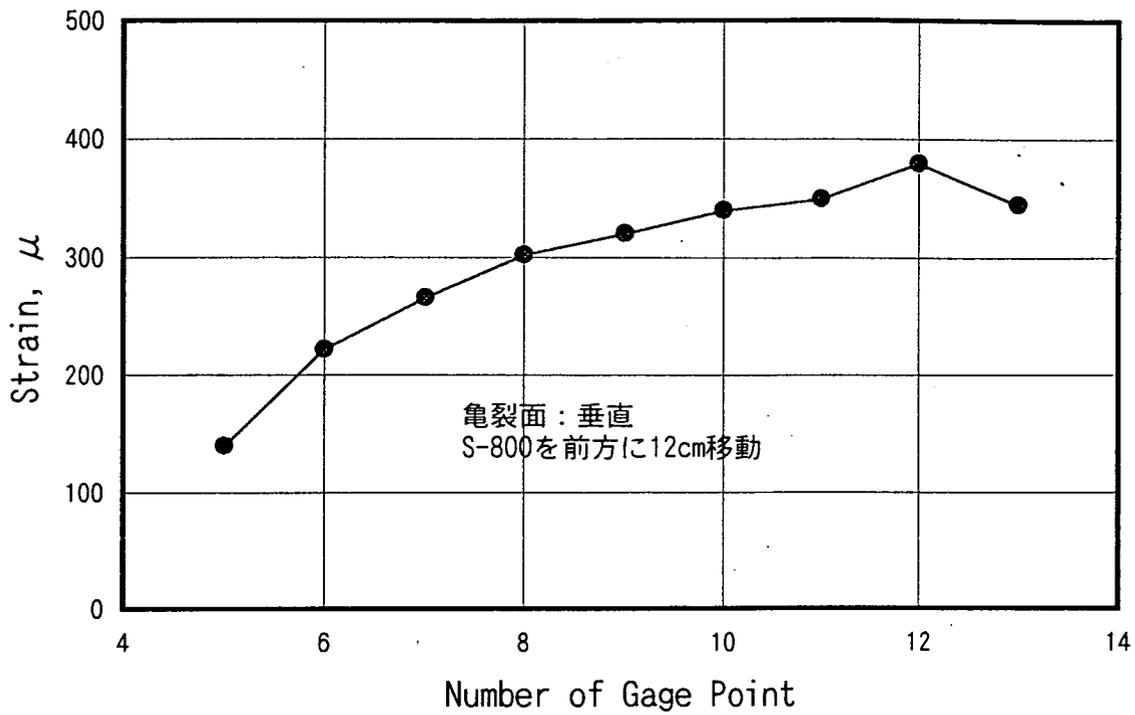


図3. 2. 12(b) 鋼管載荷試験における載荷—時間および直径—時間図(BPT6)

BPT6 1回目



BPT6 1回目

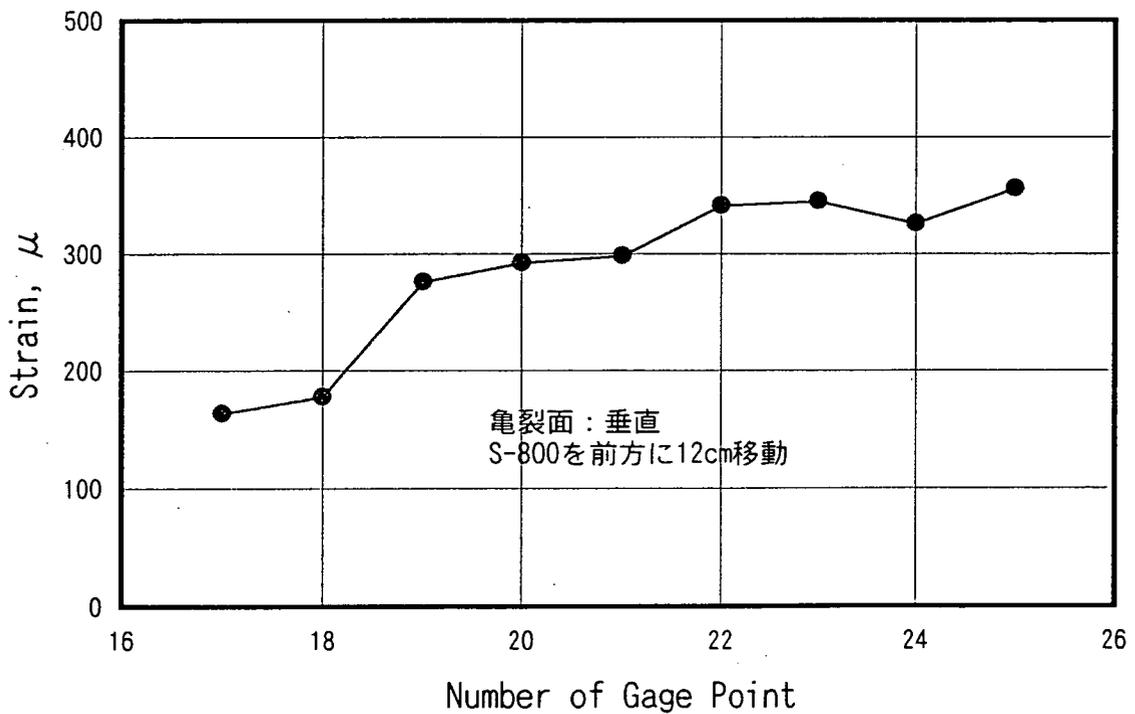


図3.2.12(C) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(BPT6 : 1回目)

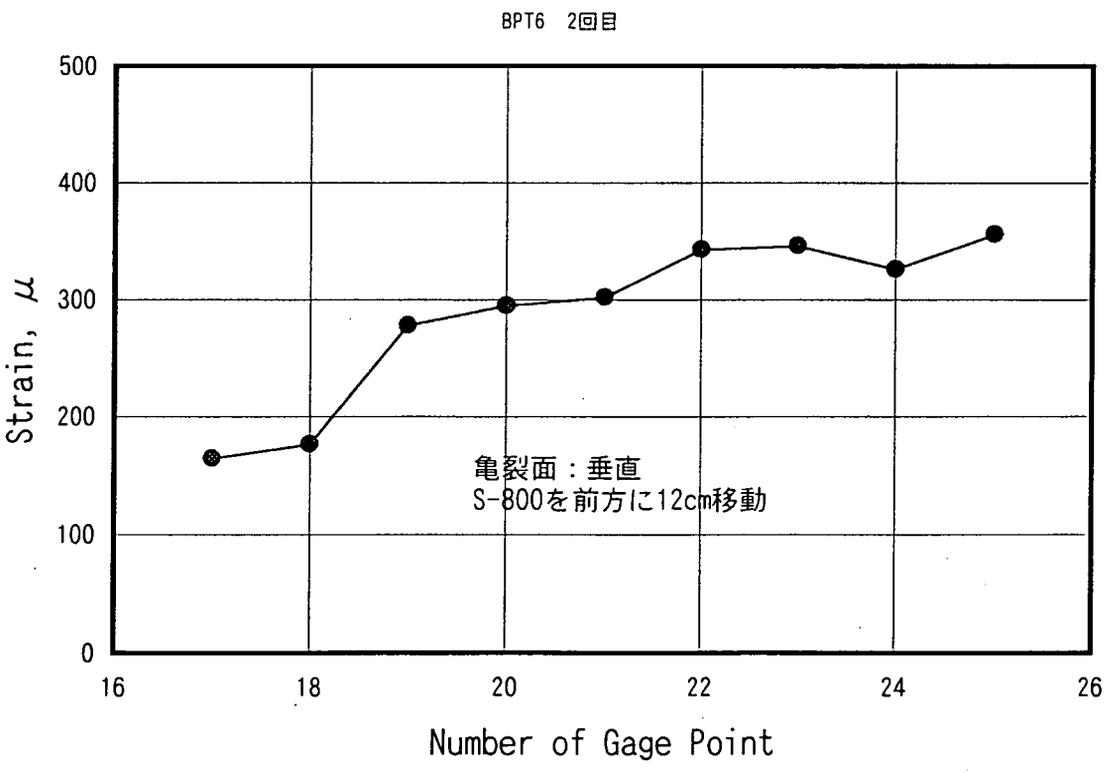
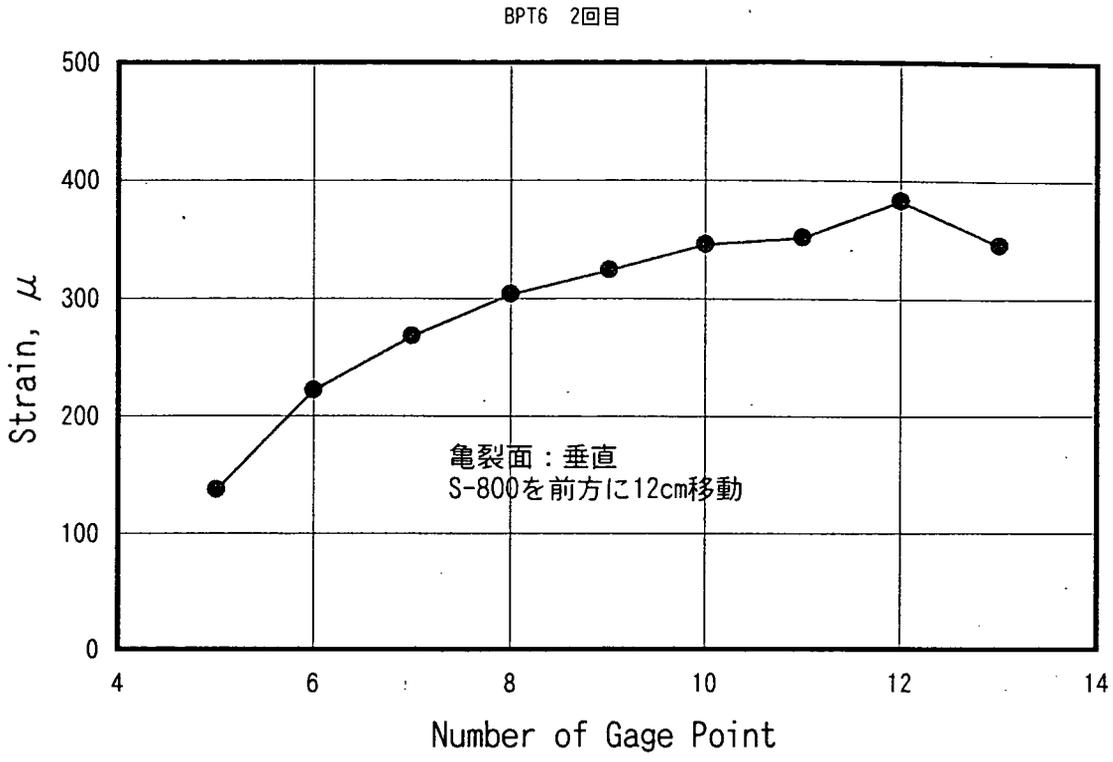


図3.2.12(d) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(BPT6 : 2回目)

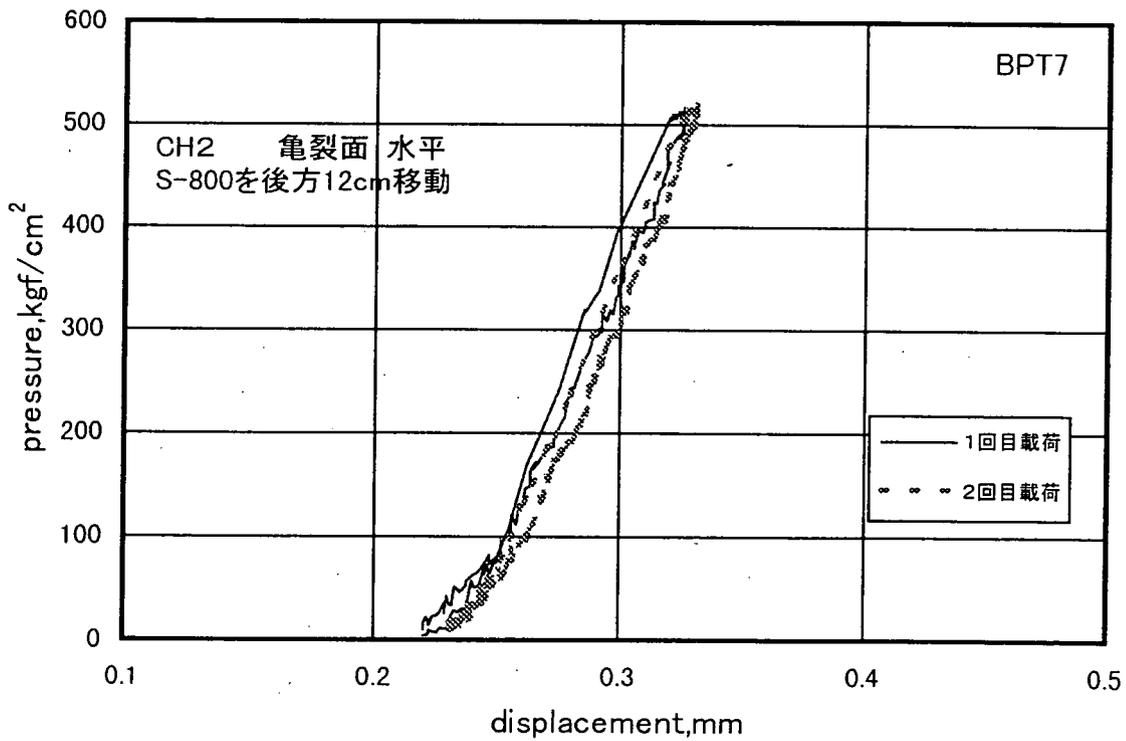
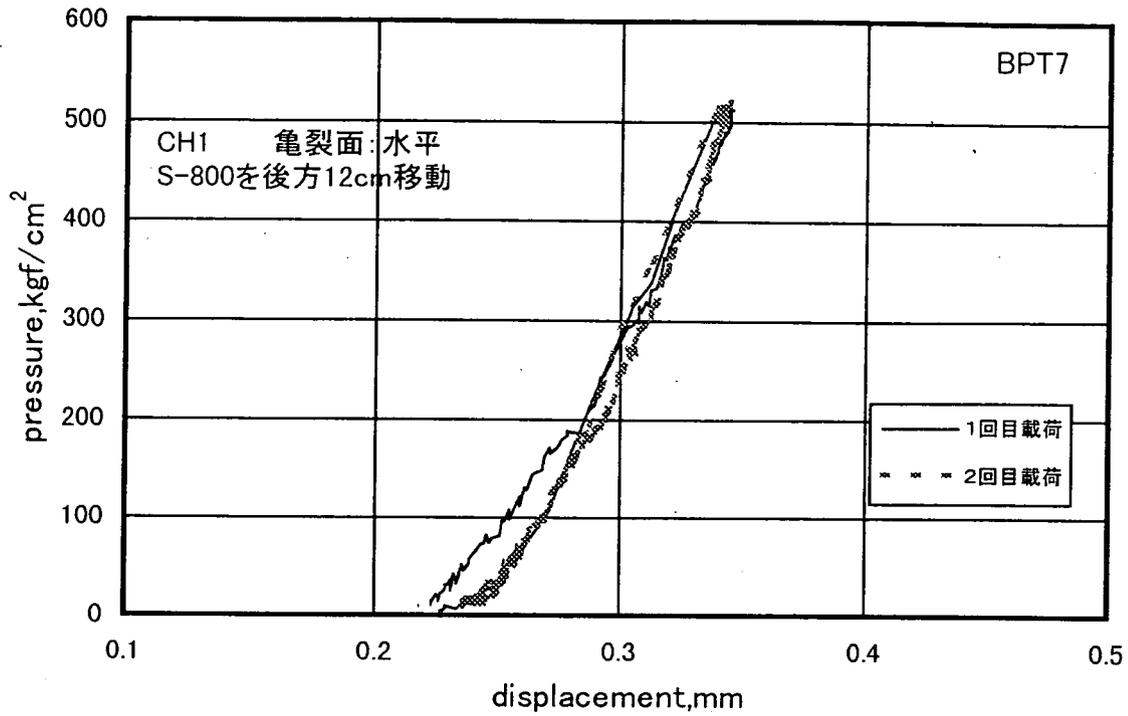


図3.2.13(a) 鋼管載荷試験における載荷圧－鋼管内変位図(BPT7)

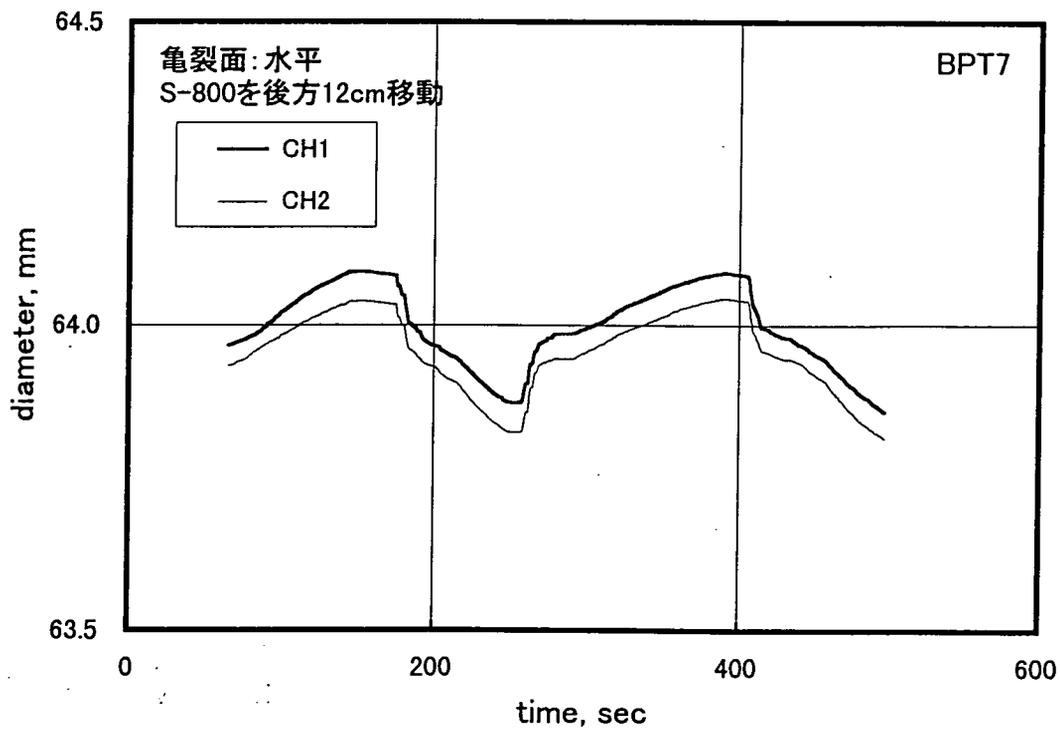
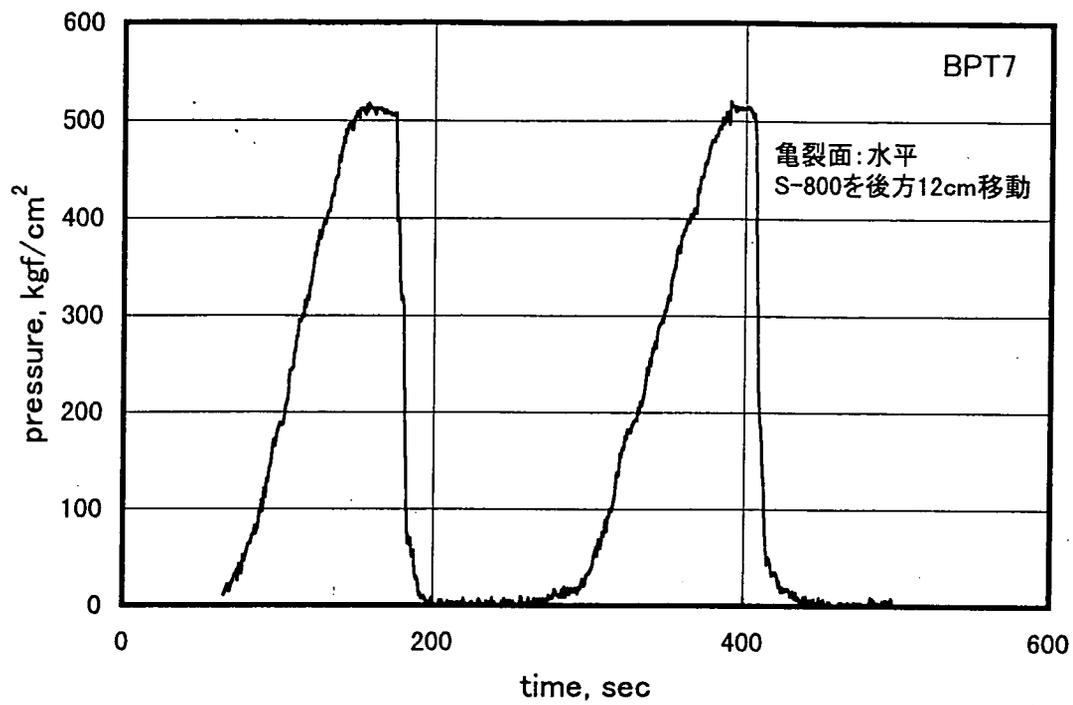


図3.2.13(b) 鋼管載荷試験における載荷—時間および直径—時間(BPT7)

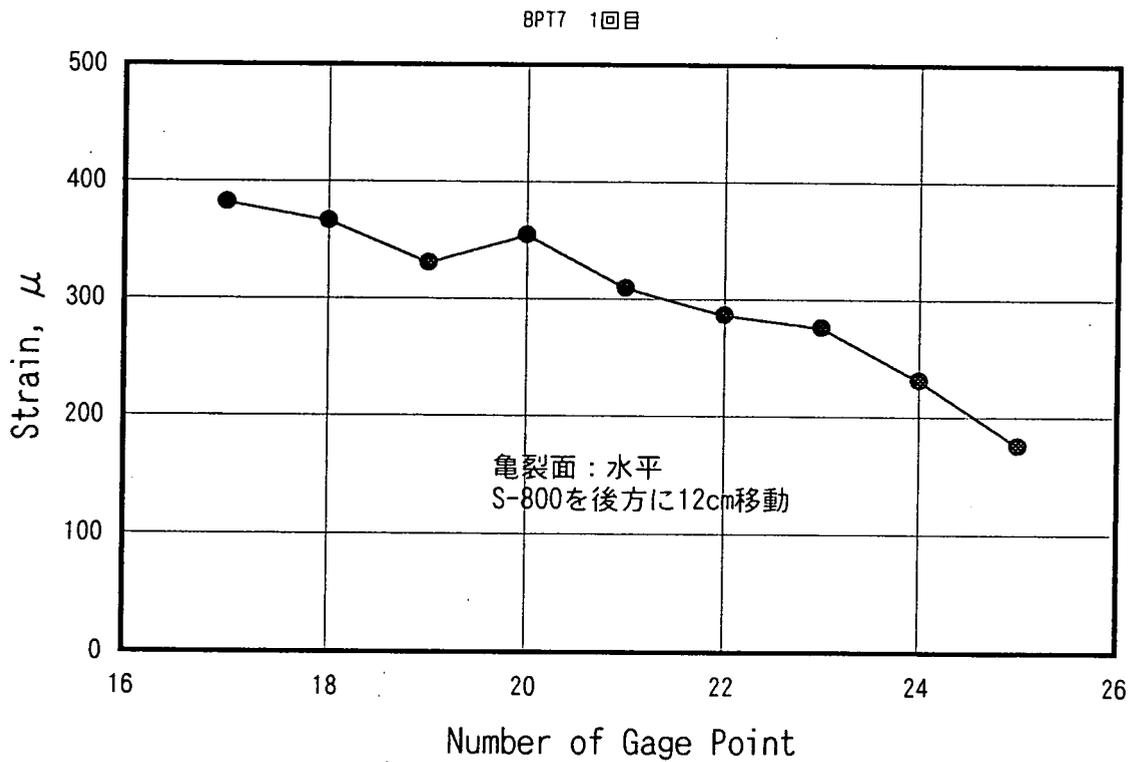
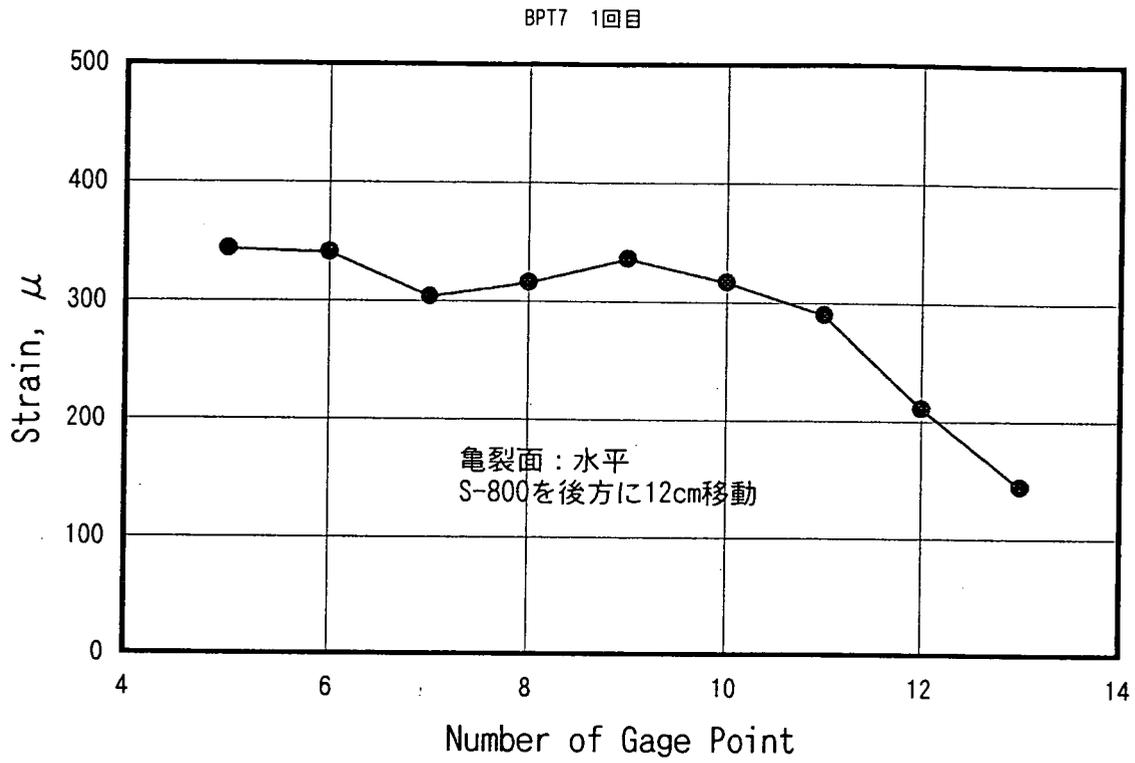
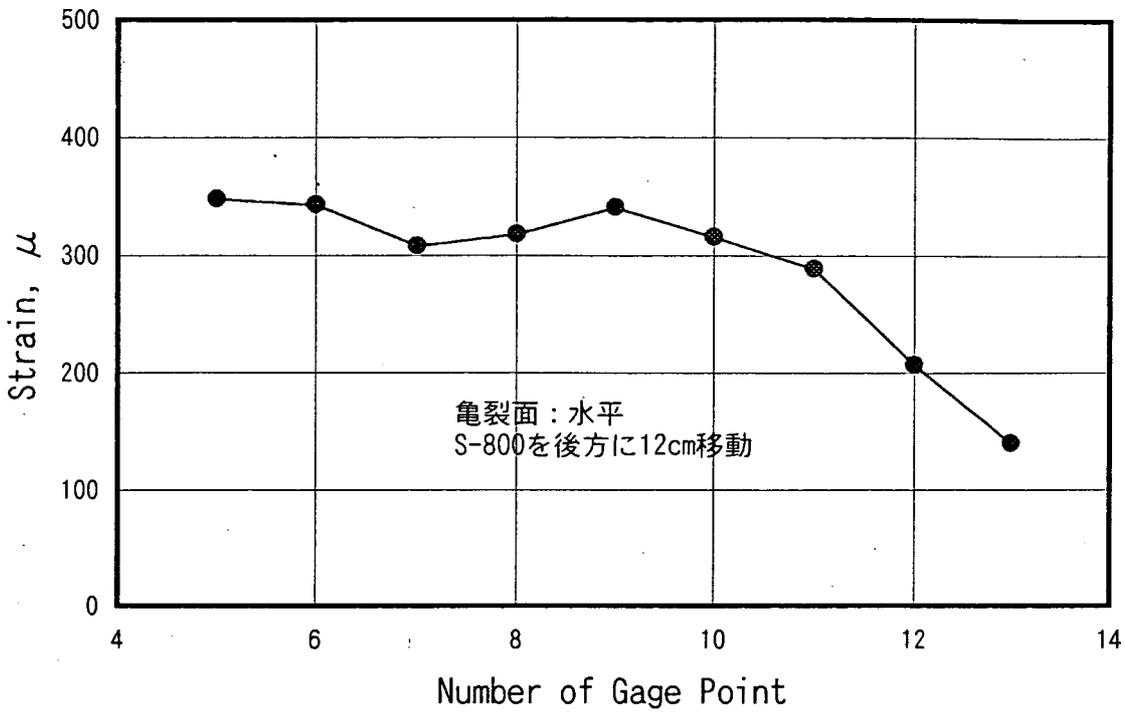


図3.2.13(C) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(BPT7:1回目)

BPT7 2回目



BPT7 2回目

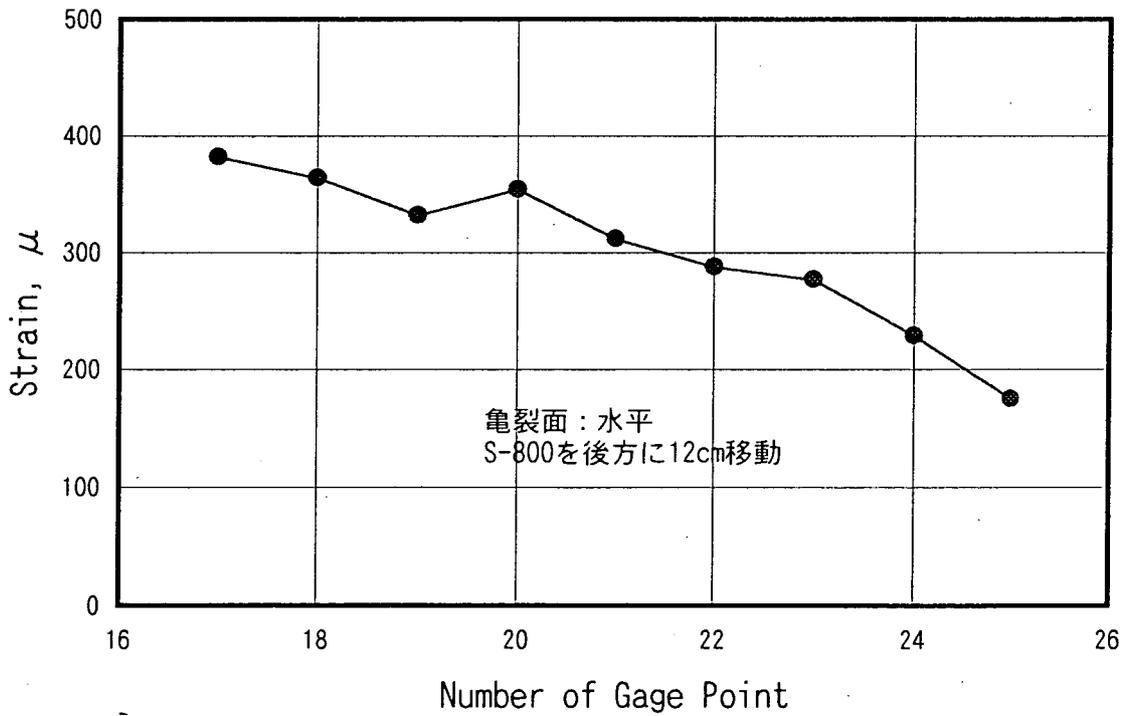


図3.2.13(d) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(BPT7 : 2回目)

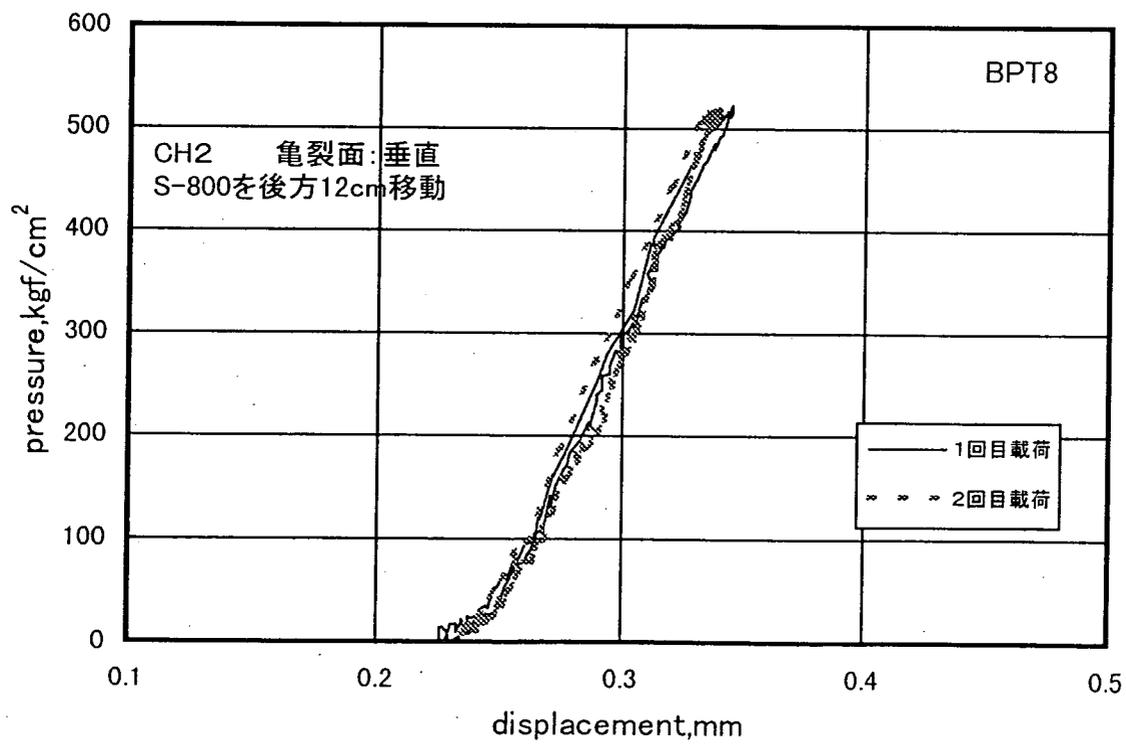
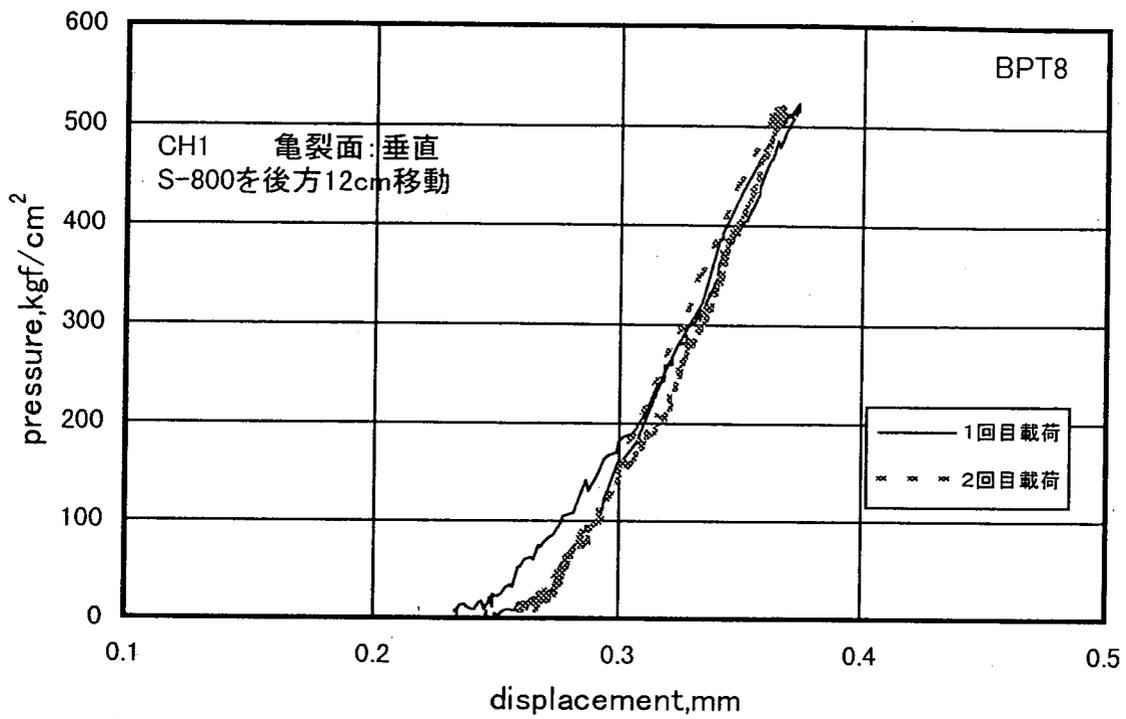


図3.2.14(a) 鋼管載荷試験における載荷圧-鋼管内変位図(BPT8)

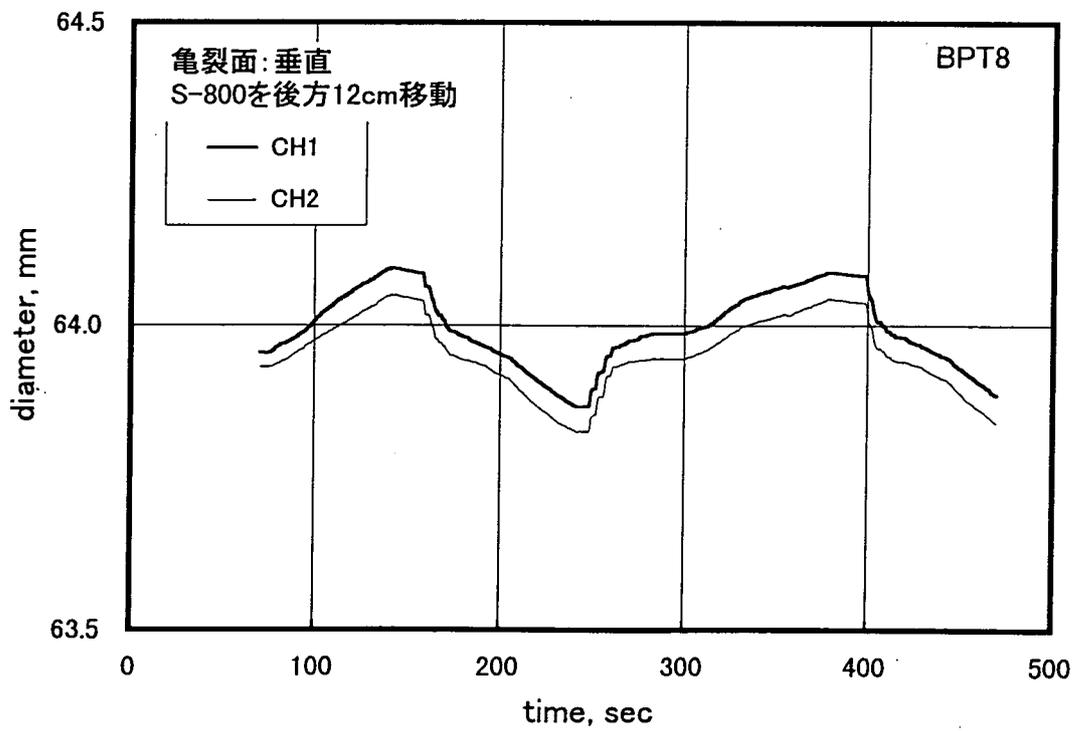
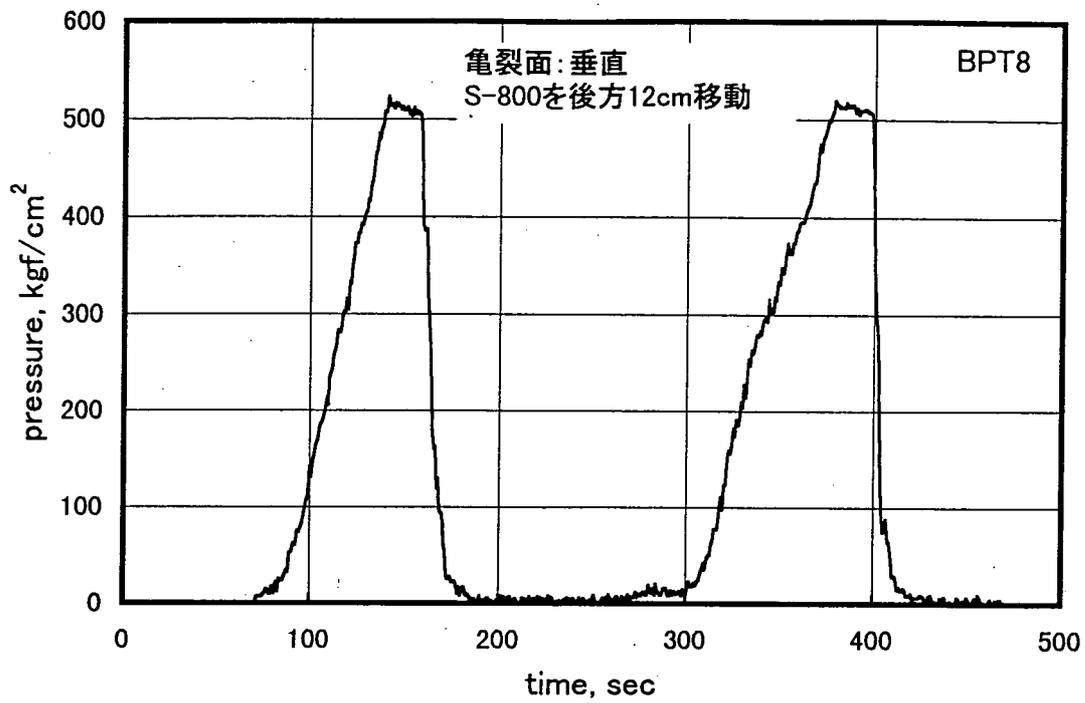


図3.2.14(b) 鋼管載荷試験における載荷—時間および直径—時間図(BPT8)

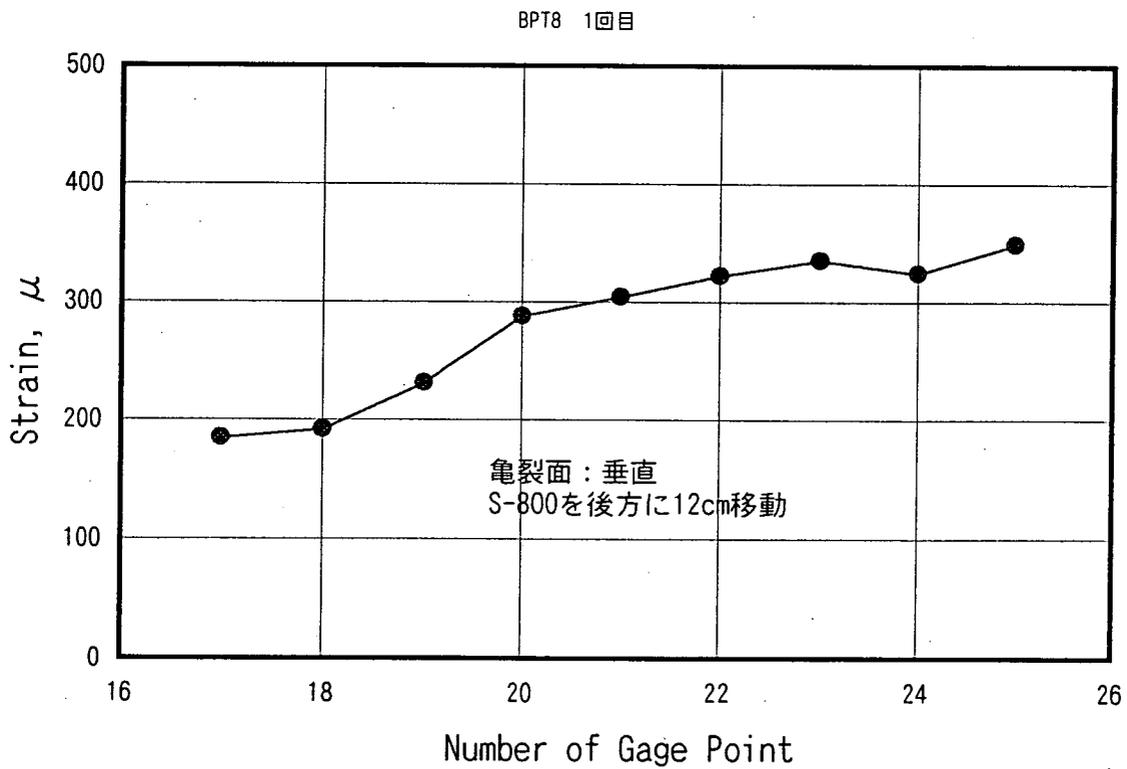
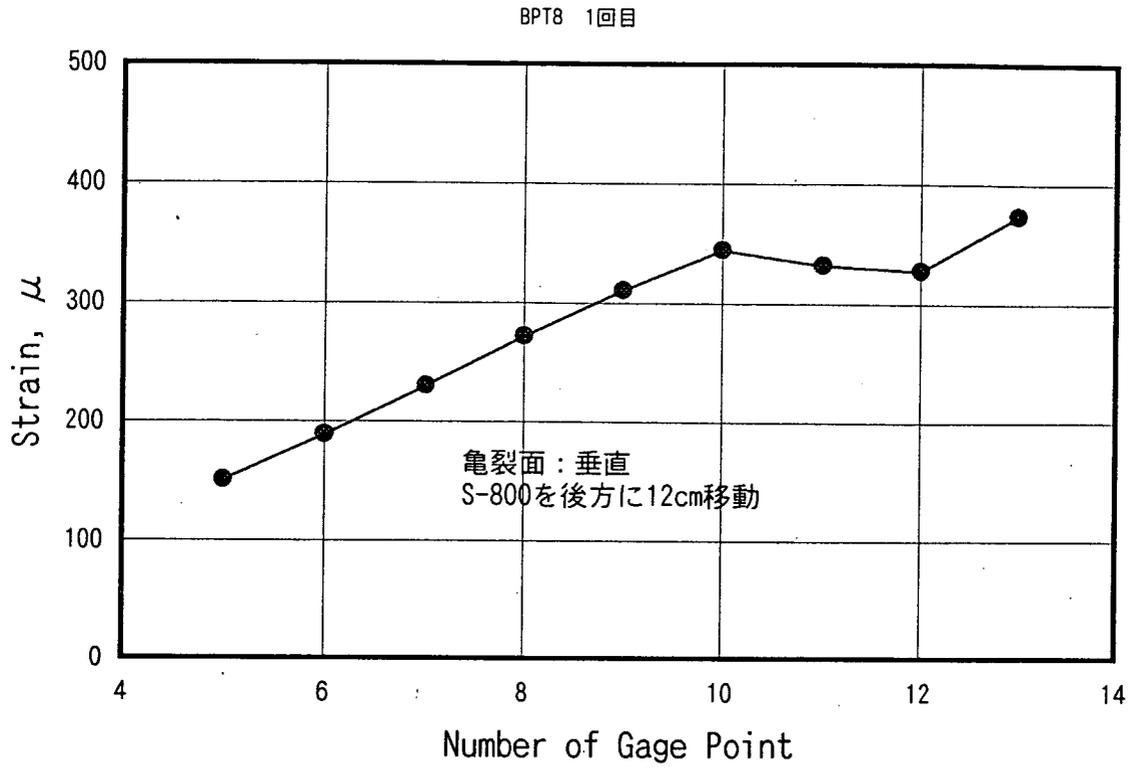


図3.2.14(C) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(BPT8:1回目)

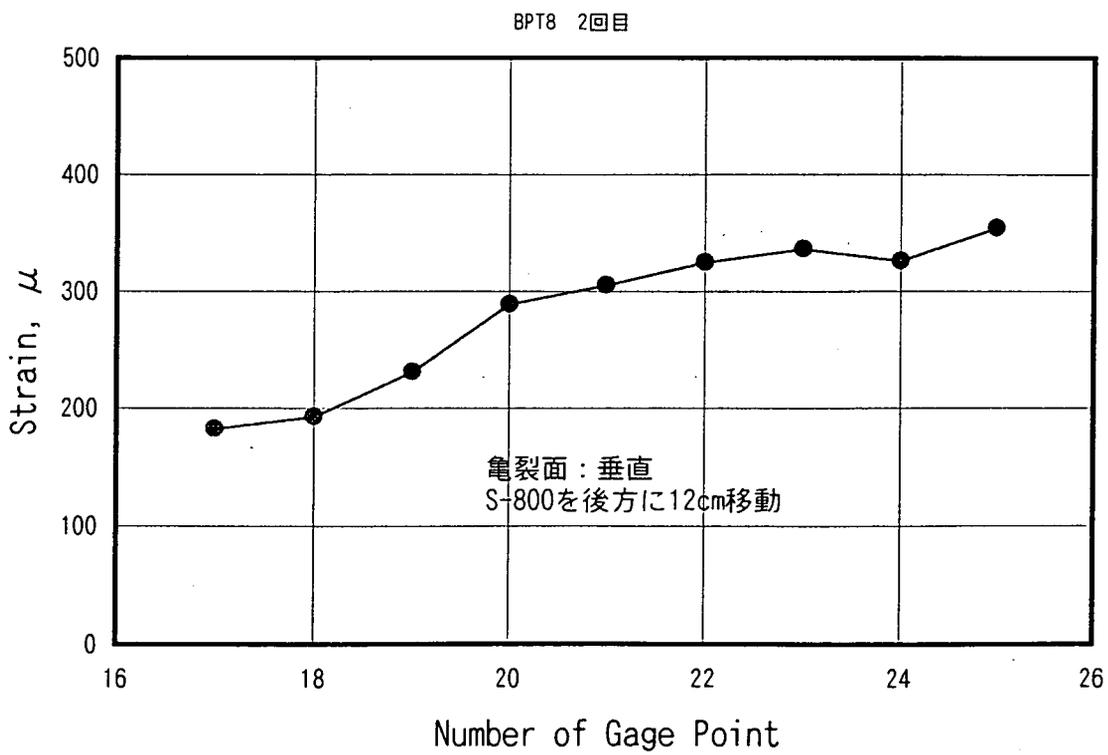
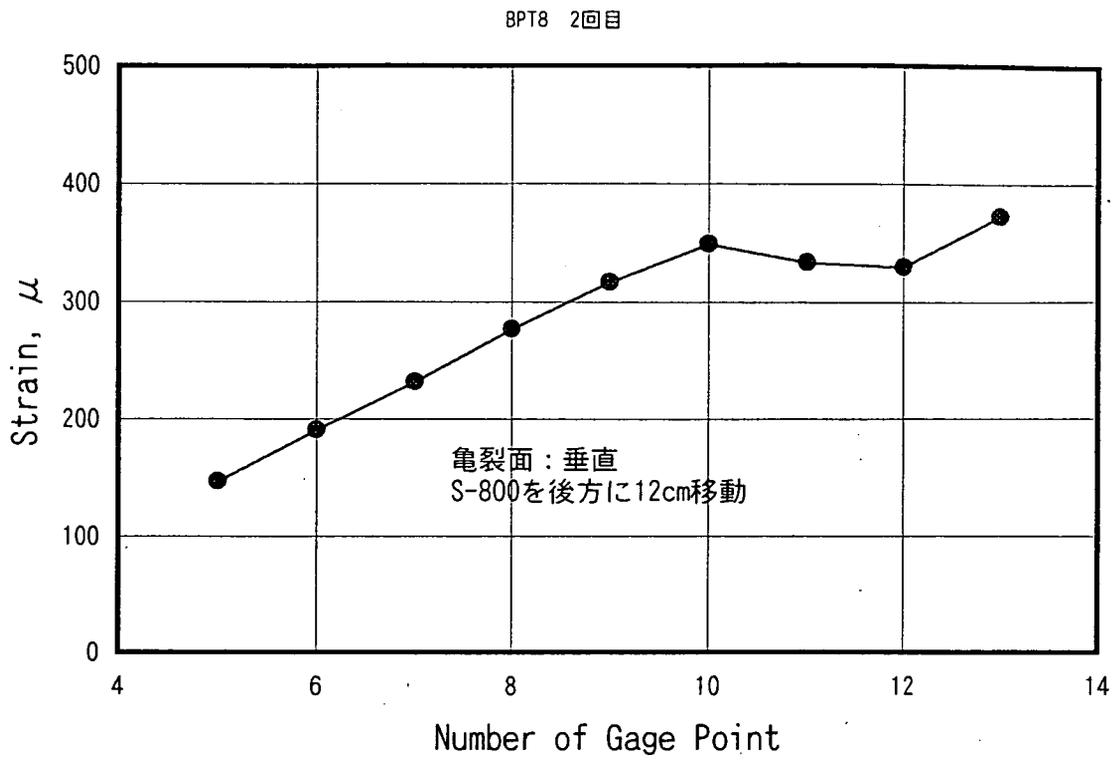


図3.2.14(d) 鋼管載荷試験ひずみ計測結果(BPT8 : 2回目)

#### 4. 鋼管内載荷試験の数値実験

##### 4.1. BEM (境界要素法) の概念

境界要素法による数値解析においては、無限媒体を扱い境界だけが要素分割されるのでモデル化が比較的簡単にできる。また、地表面や地下空洞壁面は仮想応力法 (FSM: Fictitious Stress Method) 要素に分割され、クラック、断層などは、変位食い違い (DDM: Displacement Discontinuity Method) 要素に分割される。

仮想応力法 (FSM) とは、図 4.1.1 のように両端を固定した FSM 要素を弾性体とし、中央部に仮想的な荷重  $P$  が作用する場合を考える。この場合、弾性体の上半分に引張応力  $P/2$ 、下半分に圧縮応力  $-P/2$  が生じて荷重  $P$  と釣り合い、弾性体内の応力は荷重  $P$  の作用点で正負が逆転して不連続となる。このように仮想的な応力の作用を考えるのが仮想応力法である。つまり、地表面や地下構造物としての空洞の自由面として設定された境界には適当な応力不連続分布を与えることでその境界が自由面 (面に作用する直応力とせん断応力が 0) と同様となることを表せる。

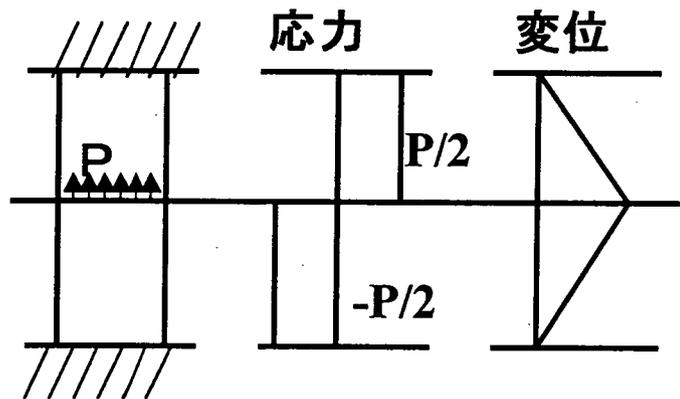


図 4.1.1 仮想応力法: FSM

一方、変位食い違い法は、図 4.1.2 のように仮想荷重の作用のかわりに変位の食い違いを仮想する方法で、この場合は、応力は連続となるが、変位は不連続となる。クラックやジョイントなどの不連続面、あるいは厚みの小さい (スリット状) の空洞として設定された境界には適当な変位不連続分布をあたえることでその境界が上面と下面とに垂直方向とせん断方向の変位の食い違いがある、つまり不連続面となることを表すことができる。本研究ではボーリング孔壁面などの自由面は FSM 要素で、S-800 地圧測定プローブとボーリング孔壁面の接触部を DDM 要素の一種であるジョイント (joint) 要素で表現する。このジョイント要素の両面はスプリングで連結され、そのスプリングにはジョイントを充填している材料の物性をあらわすように選ばれた垂直剛性及びせん断剛性が与えられる。した

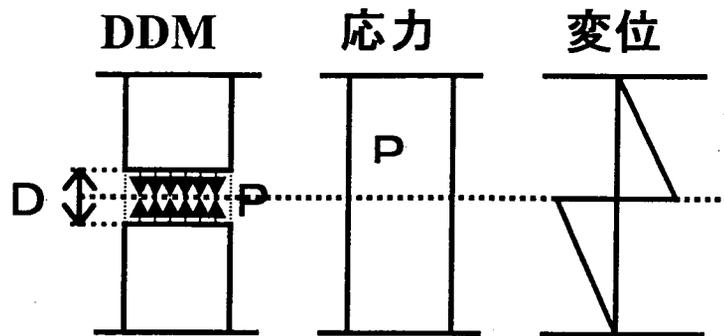
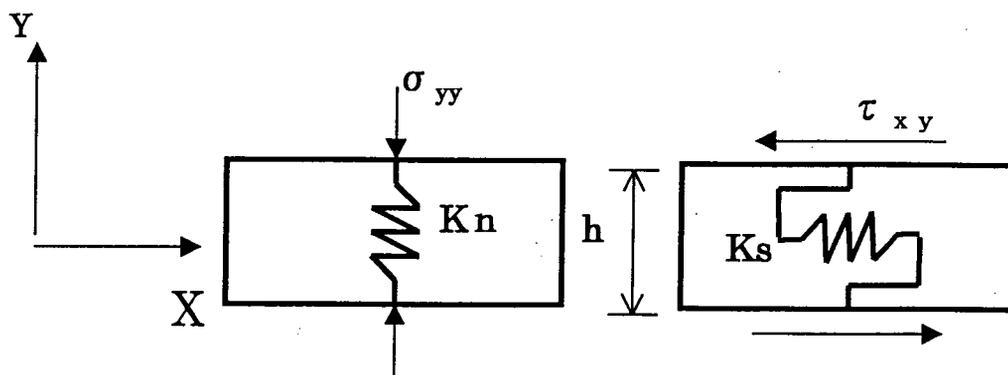


図 4.1.2 変位食い違い法

がって、ジョイント要素の変位食い違い成分の値は要素に作用する直応力とせん断応力とに関係づけられる。本研究で用いたジョイント要素は圧縮とせん断に対して、単純な1次元の応力-ひずみ関係に従うものと仮定される。その関係は、図 4.1.3 に示されるように、 $x$  軸に平行なジョイント要素を考えることによって得られる。圧縮とせん断のケースははっきりと区別して示され、図 4.1.3(a)と(b)は、2自由度を持った1つのジョイント要素を表す。要素はその長さに対して十分に小さいと思われる厚さ  $h$  の有している。



(a) 圧縮

(b) せん断

図 4.1.3 ジョイント要素の表示

#### 4.2. 圧肉円筒における BEM 解析結果と厳密解の比較

S-800 地圧測定プローブによるボーリング孔壁載荷状態の BEM 解析を行う上で、BEM 解析の妥当性を検討するために BEM 解析結果と厳密解の比較を行った。解析を行った圧肉円筒のモデル図を図 4.2.1 に示す。

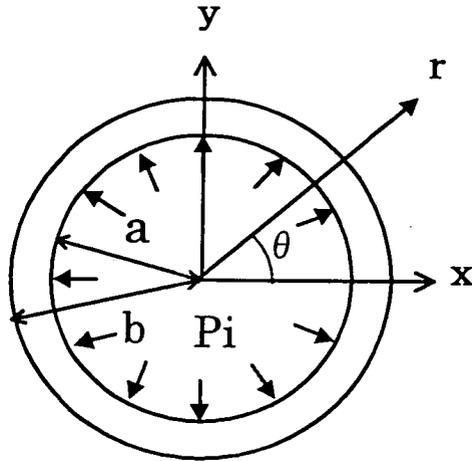


図 4.2.1 圧肉円筒のモデル図

ここで与えられる厳密解(Theo)は内径を  $a$ 、外径を  $b$ 、内圧を  $P_i$  とすると次式で与えられる。

$$\sigma_r = \frac{a^2 \cdot P_i}{b^2 - a^2} \left( 1 - \frac{b^2}{r^2} \right) \quad \sigma_\theta = \frac{a^2 \cdot P_i}{b^2 - a^2} \left( 1 + \frac{b^2}{r^2} \right) \quad (4.1)$$

ここで用いた BEM 解析モデルは図 4.2.2 に示すように、全要素数 320 の次のようなモデルである。

- ・ 内径を FSM 要素で 160 要素に分割
- ・ 外径も FSM 要素で 160 要素に分割
- ・ specified points (参照点) としてまず  $\theta = 0^\circ$  の  $r = 32.5 \sim 44.5\text{mm}$  の範囲に No. 1~No. 7 の 7 点をとった。No. 1 は  $r = 34.625\text{mm}$  の点、No. 7 は  $r = 47.375\text{mm}$  の点で、その間は  $2.125\text{mm}$  の等間隔である。同様に  $\theta = 45^\circ, 90^\circ$  についても No. 8~No. 14, No. 15~No. 21 の各点をとった。

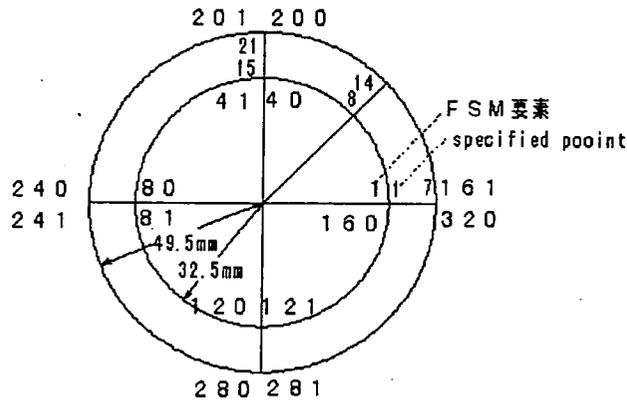


図 4.2.2 圧肉円筒の BEM 解析モデル図

このモデルの BEM 解析結果のうち、 $\theta=0^\circ$  方向の 1~7 の specified points における  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$  を図 4.2.3 に◇印と■印で示す。また式(4.1)式の厳密解に  $a=32.5\text{mm}$ ,  $b=49.5\text{mm}$ ,  $P_i=100$  としして代入し得られた結果を図 4.2.3 に実線と破線で示した。この図で横軸は  $r$  方向の距離を孔壁半径 (内径  $a$ ) で割ることにより無次元化し、縦軸は応力を内圧  $P_i$  で割って無次元化している。これから BEM 解と Theo の解が一致していることが分かる。また、モデルの対称性から  $\theta=45^\circ, 90^\circ$  に対しても全く同じ結果が得られるはずである。BEM と Theo の解をこれらの方向で比較したところ予想通り両者は一致した結果を示した。これらのことから BEM 解析が圧肉円筒の応力状態を求める際にも適用できることが言える。

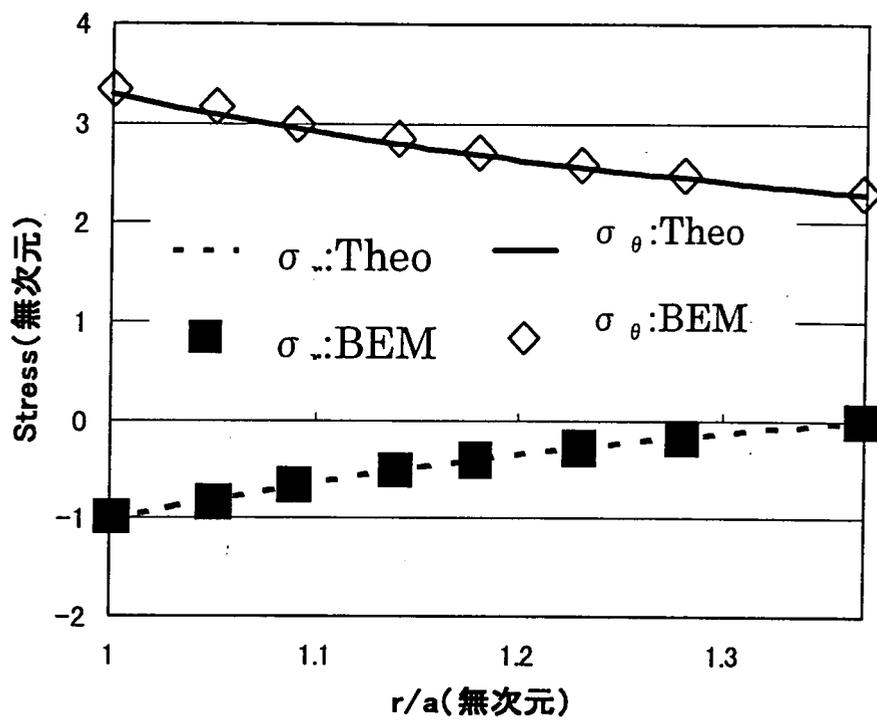


図 4.2.3 圧肉円筒における BEM 解と厳密解の比較 ( $\theta = 0^\circ$ )

#### 4.3. 鋼管内解析モデル

ここでは、S-800 地圧測定プローブによる鉄管試験の BEM 解析シミュレーションをおこなった。

ここで用いた BEM 解析モデルは、図 4.3.1 に示すように全要素数 594 の次のようなモデルである。

- ・自由面である鉄管外周は No. 1~No. 200 の FSM(仮想応力)要素で 200 分割した。
- ・自由面である孔壁内周も No. 201~No. 424 の FSM 要素で 224 分割した。
- ・摩擦シェル(鋸の歯状)と鉄管との接触面で空洞部分を No. 425~No. 508 の DDM(変位食い違い)要素で 84 分割した。
- ・摩擦シェル(鋸の歯状)と鉄管との接触面で鋸の歯の先端の実際に接触している面を No. 509~No. 594 の joint 要素で 86 分割した
- ・圧肉円筒の解析と同様に specified point(参照点)として、 $\theta=0^\circ$  の  $r=32.5\text{mm}$  ~ $44.5\text{mm}$  の範囲に No. 1~No. 8 の 8 点をとった。No. 1 は  $r=32.5\text{mm}$  の点で No. 8 は  $r=43\text{mm}$  の点で、その間は  $1.5\text{mm}$  の等間隔である。 $\theta=45^\circ, 90^\circ$  については No. 9( $r=34\text{mm}$ ) ~No. 15( $r=43\text{mm}$ ), No. 16( $r=34\text{mm}$ )~No. 22( $r=43\text{mm}$ )の各 specified point をとった。
- ・内圧  $P_i$  として  $100\text{MPa}$  载荷した。
- ・外径 :  $89\text{mm}$  内径 :  $65\text{mm}$  孔径 :  $59\text{mm}$
- ・ヤング率 :  $0.21\text{E}+6\text{MPa}$  ポアソン比 :  $0.25$

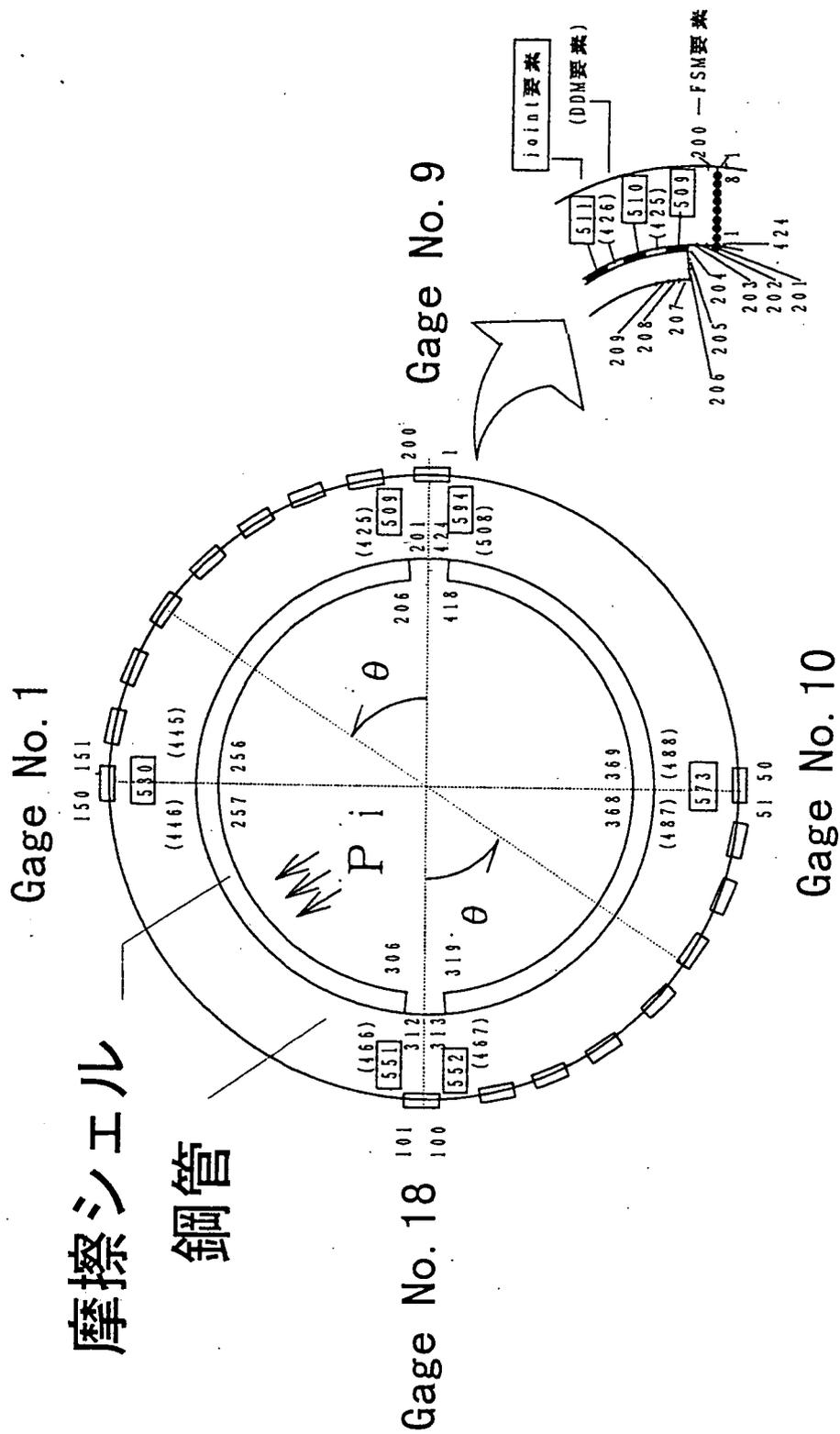


図4.3.1 鋼管試験のBEM解析モデル図

#### 4.4. 解析結果

図 4.4.1 に、4.2. 節で示した鋼管外周  $\theta = 0^\circ \sim 90^\circ$  の位置の gage No. 1~No. 9 ひずみ(=  $\epsilon$ ) の値を  $\blacklozenge$  で  $\theta = 180^\circ \sim 270^\circ$  の位置の gage No. 10~No. 18 のひずみを  $\square$  で表した。ここで比較の対象とした実験値は、実験名 APT4 で得られたひずみの値である(図 3.2.4(C) 参照)。なおこれらのひずみは、ヤング率をかけて応力に換算した値を S-800 の実験時の載荷圧  $P_i$  で除して無次元化している。BEM 解析によって得られた値を  $\bullet$  で表した。この BEM 解析の値も得られた応力値を内圧  $P_i$  で除して表した。

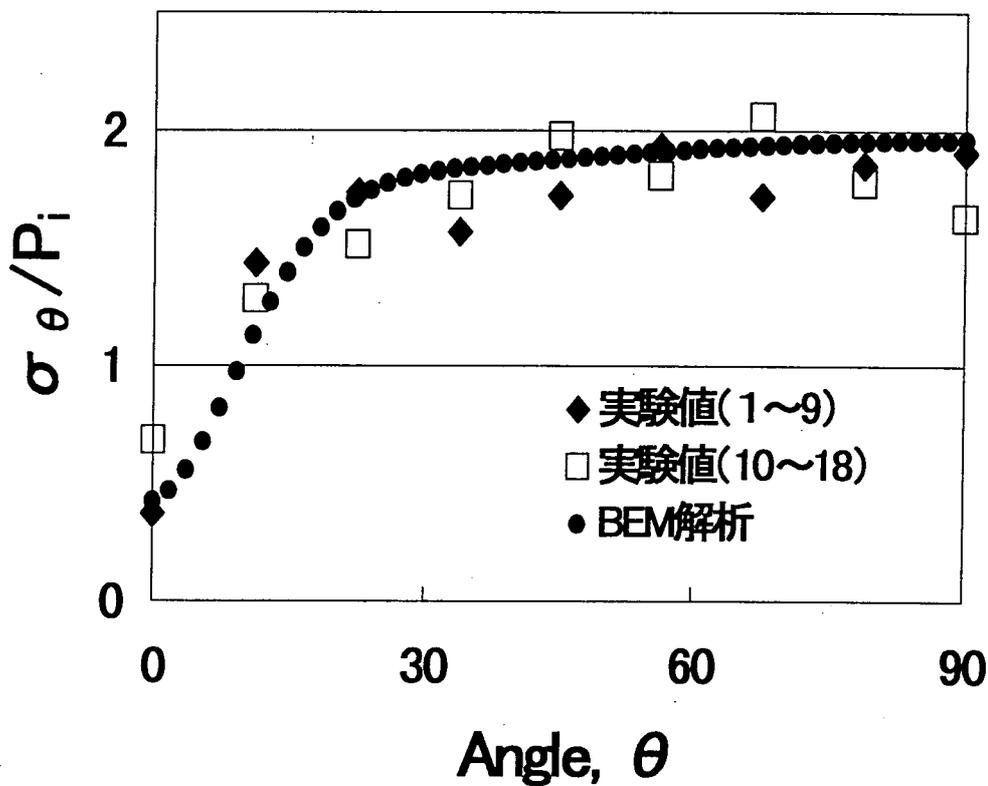


図 4.4.1 S-800 鋼管試験の実験値と BEM 解析の比較

図 4.4.1 から実験値と BEM 解析の結果はよい一致を示していることが分かる。また、亀裂の発生箇所でも最も応力は小さく、 $30^\circ$  付近まで急上昇し、その後緩やかに  $90^\circ$  付近へ向かって上昇している様子が、実測値を補間する形でよく表されている。

次に、圧肉の鋼管B (外径 100mm, 内径 64mm, 内圧  $P_i$  548kgf/cm<sup>2</sup>) を用いて同様の試験を行った結果に対しても BEM 解析を行った。この試験の荷重状態と鋼管外周に貼られたひずみゲージの位置を図 4.4.2 に示し、荷重試験の実測値と BEM 解析結果を比較した図を図 4.4.3 で示す。ここで解析結果と比較した実験値は、実験名 BPT1 で得られた値である (図 3.2.7(C) 参照)。

この図でも実験値と BEM 解析の結果はよい一致を示している。この解析結果も、亀裂の発生箇所でも最も応力は小さく、30° 付近まで鋼管Aよりも緩やかな上昇ではあるが急上昇し、その後緩やかに 90° 付近へ向かって上昇している実測値をよく補間している。

図 4.4.1 や図 4.4.3 の解析結果は、鋼管B (図 4.4.3) の曲線が亀裂発生箇所から 90° へ向かって鋼管A (図 4.4.1) の曲線よりも緩やかに上昇することや、45° 付近から 90° へかけて上昇が緩やかになっている場所の応力値が、鋼管Aよりも鋼管Bのほうが小さいことなどを再現することができている。このことは、本解析が荷重状態の解析として妥当であることを示すものであると思われる。

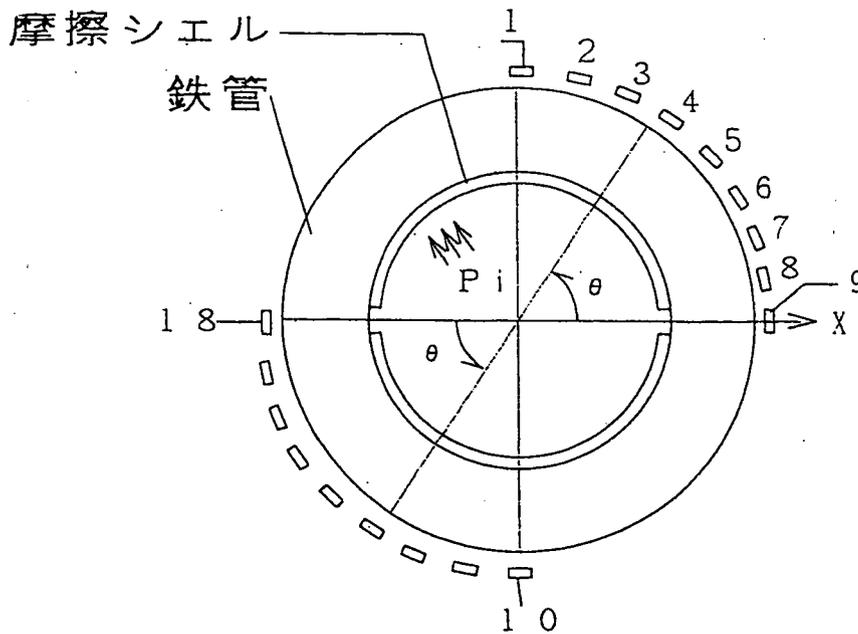


図 4.4.2 鋼管試験の荷重状態と鉄管外周に貼り付けられたひずみゲージの配置

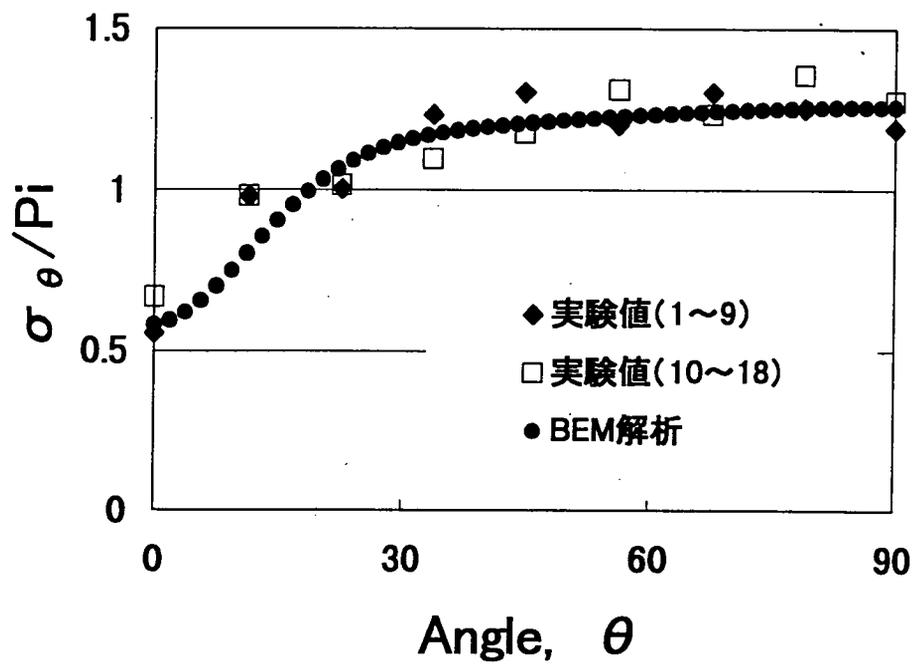


図 4.4.3 外径 100mm, 内径 64mm (鋼管Bを使用) の場合における実験値と BEM 解析結果の比較

## 5. ボーリング孔壁載荷時の数値実験

### 5.1. ボーリング孔壁載荷状態のBEM解析

#### 5.1.1. 解析モデルと境界条件

本章では実際にボーリング孔壁の亀裂の進展に伴う、孔壁内周への S-800 地圧測定プローブによる載荷状態の変化を BEM 解析によって明らかにする。

本解析には無限大鋼鉄中の円孔モデルを用いた。載荷条件は  $P_x = P_y = P_{xy} = 0$  の初期地圧なしと考慮し、内圧  $P_i$  を単位の大きさ載荷する。解析は亀裂長  $\lambda = 0\text{mm}$ ,  $16\text{mm}$ ,  $32\text{mm}$ ,  $64\text{mm}$ ,  $128\text{mm}$  の5つのモデルに対して行った。ここに円孔の直径を  $D$  とすると亀裂長は  $\lambda = 0\text{mm}$ ,  $0.2D\text{mm}$ ,  $0.5D\text{mm}$ ,  $D\text{mm}$ ,  $2D\text{mm}$  である。解析に用いた無限大鋼鉄中の円孔モデルを図 5.1.1 に示した。図 5.1.1 の解析モデルは  $\lambda = D$  の場合を示している。ここで用いた解析モデルは全要素数 424 の次のようなモデルである。

- (1) 自由面である摩擦シェルの内周は FSM 要素で 224 分割した。
- (2) 摩擦シェル(鋸の歯状)の凹部と鉄管との接触面で空洞部分を DDM(変位食い違い)要素で 84 分割した。
- (3) ここでの亀裂は、直径(=D)を 10 分割した長さを1つの要素の長さ(=6.4mm)として、 $\lambda = D$  の場合は亀裂の全長 3D を joint 要素で 30 分割した。なお、この結果円孔直径部分は 10 要素に分割されている。
- (4) 摩擦シェル(鋸の歯状)の凸部と鉄管との接触面で実際に接触している面を joint 要素で 86 分割した。
- (5) 内圧  $P_i$  は単位大きさとして 1MPa 載荷した。
- (6) ボーリング孔径 : 64mm      S-800 の摩擦シェルの内径 : 59mm
- (7) ヤング率 : 0.21E+6MPa      ポアソン比 : 0.25
- (8) joint 要素の剛性係数  $K_n = K_s = 2.1\text{E}+9$

$\lambda = (0\text{mm}, 0.2D\text{mm}, 0.5D\text{mm}, 2D\text{mm})$  の場合のモデルは、 $\lambda = D$  の(1)~(2), (4)~(8)は同様に要素分割される。(3)の亀裂部分は、亀裂長によってモデル化した joint 要素の要素数が異なり分割した要素の要素番号を示すと下の表 5.1.1 のようになる。いずれの場合も1つの要素の長さは  $D/10$  であり、直径部分の要素数は同じ 10 個である。

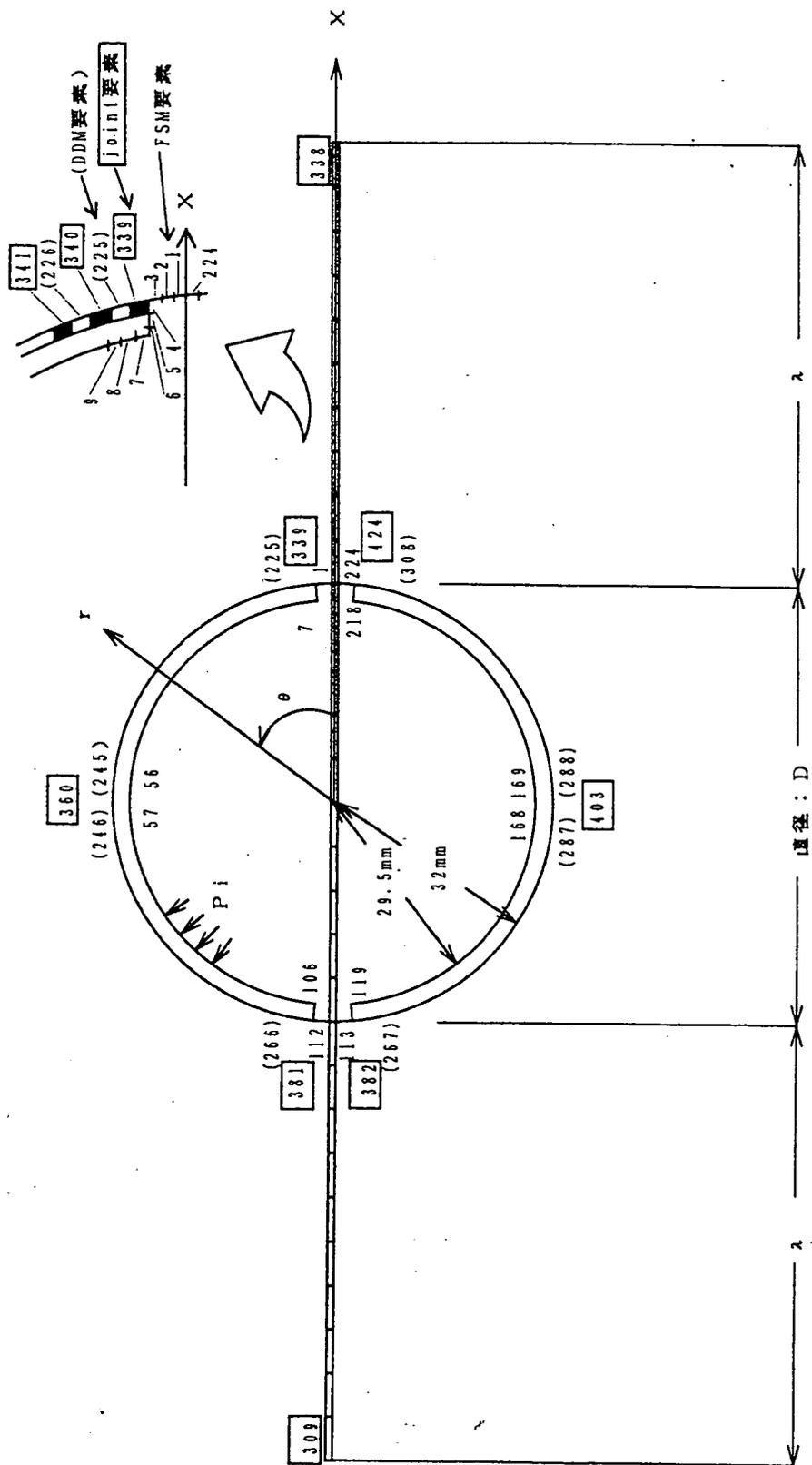


図5.1.1 孔壁内周の載荷状態の解析モデル図 ( $\lambda = D$  のとき)

表 5.1.1 各亀裂長における要素番号

$\lambda$	摩擦シエルの内周 FSM 要素	S-800 凹部の円孔の境界 (DDM 要素)	亀裂と直径 joint 要素	S-800 凸部の円孔の境界 joint 要素
0	No. 1~224	No. 225 ~308	なし	No. 309 ~394
0.2D	No. 1~224	No. 225 ~308	No. 309 ~322	No. 323 ~408
0.5D	No. 1~224	No. 225 ~308	No. 309 ~328	No. 329 ~414
D	No. 1~224	No. 225 ~308	No. 309 ~338	No. 339 ~424
2D	No. 1~224	No. 225 ~308	No. 309 ~358	No. 359 ~444

### 5.1.2. 解析結果

ここで、図 5.1.1 で示した亀裂長の異なるモデルに対し、内圧  $P_i = 1\text{MPa}$  を载荷したときの孔壁内周への载荷状態の解析結果を示した(引張を正)。

図 5.1.2 は  $\theta = 0^\circ \sim 90^\circ$  における孔壁内周上に作用するせん断力( $=\tau_{r\theta}$ )を示している。

図 5.1.3 は  $\theta = 0^\circ \sim 90^\circ$  における孔壁内周上の  $r$  方向の载荷圧( $=\sigma_r$ )を示している。

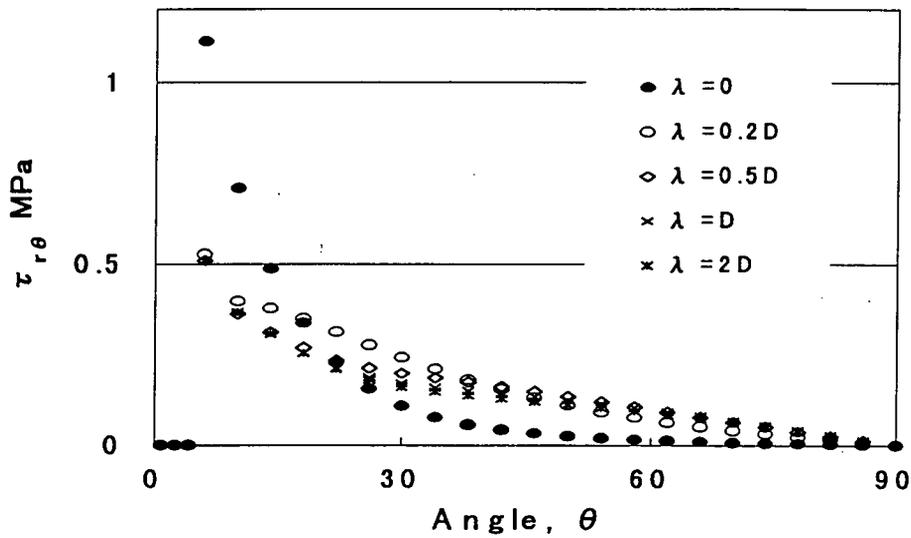


図 5.1.2 孔壁内周 ( $\theta = 0^\circ \sim 90^\circ$ ) のせん断力

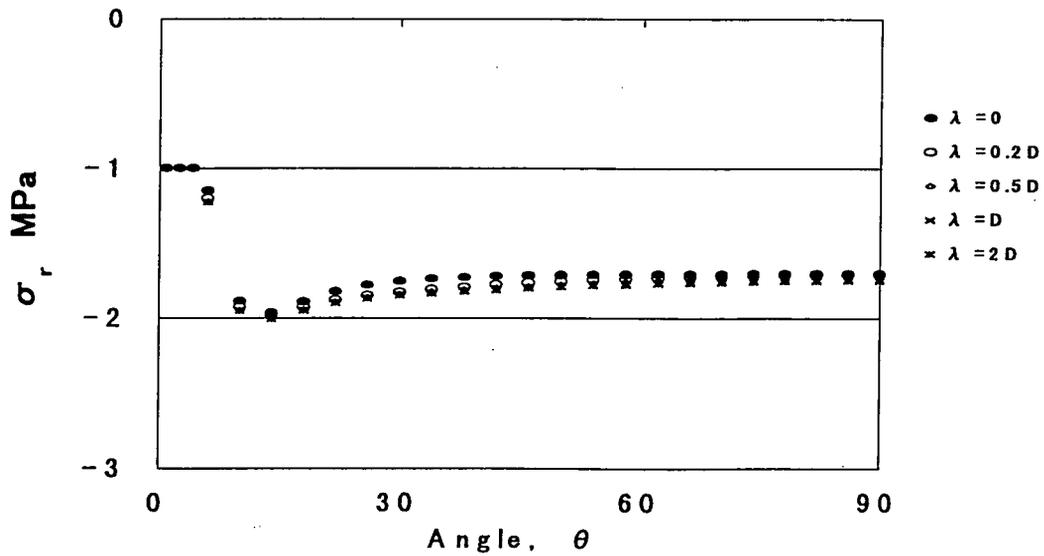


図 5.1.3 孔壁内周 ( $\theta = 0^\circ \sim 90^\circ$ ) の  $r$  方向の载荷圧

図 5.1.2 からは、いずれの亀裂長でもせん断力  $\tau_{r\theta}$  は亀裂の発生部に最も近い荷重部分で最大値を示していることが分かる。亀裂長毎に見ると、亀裂のないモデルのせん断力は亀裂発生部付近で亀裂がある場合よりも大きい。角度が大きくなるに従い  $45^\circ$  付近までにはほぼ 0 になる。しかし、亀裂が長いモデルほど、発生部に近い角度でのせん断力は小さいが、 $50^\circ$  付近からのせん断力は亀裂が長いモデルのほうが大きくなる。

一方、図 5.1.3 から  $r$  方向の荷重圧はいずれの亀裂長でもほぼ等しい値を示しており、その  $r$  方向の荷重圧は亀裂発生方向から  $18.75^\circ$  の角度を有する孔壁部分で最小値を示していることが分かる。また孔壁内周の亀裂進展直前の最大荷重圧は亀裂が長くなるにつれて大きくなることが分かる。

## 5.2. 亀裂進展直前および亀裂再開口時の孔壁内周の載荷状態

### 5.2.1. 解析手順

ここでは亀裂進展直前および亀裂再開口時の孔壁内周の載荷状態を解析し、圧力-変位曲線を再現させることにする。なお解析は以下の手順で行う。

#### (1). 亀裂のない場合 ( $\lambda = 0$ ) の再開口圧と変位の決定

i) 孔壁への載荷がなく、初期地圧条件のみを載荷した状態 (図 5.2.1(a)) で BEM 解析を行い、亀裂の発生位置 ( $\theta = 0^\circ, 180^\circ$ ) の接線方向応力  $\sigma_\theta$  を求める。

図 5.2.1(a) の円孔部の解析に用いるモデルを図 5.2.2 に示す。図 5.2.2 に示したモデルは、円孔の内径、物性値等、前述の図 5.1.1 に示したモデルに準じている。図 5.1.1 のモデルでは、摩擦シェル外周境界の F S M 要素を 182 要素に分割し、亀裂部分は鉄管内周境界より内側の空洞部分を 10 個の DDM ダミー要素に分割した。さらに亀裂部分は 0.0064m を 1 要素として亀裂長さ条件を設定した。亀裂の種類は、 $\lambda = 0\text{mm}, 0.1D\text{mm}, 0.2D\text{mm}, 0.3D\text{mm}, 0.5D\text{mm}, D\text{mm}, 2D\text{mm}$  の 7 種類である。ただし、この手順 (1) の i) の解析では、図 5.2.2 において亀裂と直径の joint 要素のない状態である。

ii) 孔壁の亀裂進展に伴う、孔壁内周への S-800 による載荷状態 (図 5.2.1(b)) の変化を BEM 解析によって行い、亀裂の発生位置 ( $\theta = 0^\circ, 180^\circ$ ) の接線方向応力  $\sigma_\theta$  を求める。図 5.2.2(b) の円孔部の解析モデルは図 5.1.1 で示したモデルであるが、図 5.1.1 の亀裂と直径の joint 要素のない状態である。

iii) i), ii) の解析によって得られた接線方向応力  $\sigma_\theta$  を比較し、ii) で得られた接線方向応力  $\sigma_\theta$  を何倍すれば i) で得られた接線方向応力  $\sigma_\theta$  を打ち消して、亀裂発生位置の接線方向応力  $\sigma_\theta$  を 0 にするか、その倍数  $k$  を求める。この倍数  $k$  を応力集中係数とよび、(5) 式は次のように書き直せる。

$$\sigma_\theta = k P_i$$

同様に (8) 式も次のようになる。

$$\sigma_\theta = (3Q - P) - 4(P - Q)\sin^2(\theta - \alpha) - k P_i$$

ii) の解析の載荷状態である内圧  $P_i$  の  $k$  倍の値が亀裂の再開口に要する S-800 の内圧  $P$  となる。ここで  $P_i = 1$  のとき、 $P = P_{in}$  とする。すなわち  $P_{in} = k$  となる。

iv) S-800 の変位計は、図 5.1.1 のモデル図で  $y$  方向 ( $\theta = 90^\circ, 270^\circ$ ) のボーリング孔の孔径変化を測定している。亀裂再開口時のこの実測変位に対応する変位  $\delta$  は

$$\delta = k \cdot \delta_0$$

ここで、 $\delta_0$  は ii) の BEM 解析で求める F S M 要素の変位量で、

$$\delta_0 = (\theta = 90^\circ \text{ の変位}) - (\theta = 270^\circ \text{ の変位})$$

v)  $\delta$  をボーリング孔の直径  $D$  で除すると、ひずみ ( $\varepsilon$ ) は

$$\varepsilon = \delta / D$$

(2). 亀裂がある場合

i) 孔壁への荷重がなく、初期地圧条件のみを荷重した状態 (図 5.2.1(a)) で BEM 解析を行い、亀裂先端位置の DDM 要素の変位くい違い量を求める。図 5.2.1(a) の円孔部の解析に用いるモデルは図 5.2.2 である。

ii) 孔壁の亀裂進展に伴う、孔壁内周への S-800 による荷重状態 (図 5.2.1(b)) の変化を BEM 解析によって行い、亀裂先端位置の DDM 要素の変位くい違い量を求める。図 5.2.1(b) の円孔部の解析モデルは図 5.1.1 である。

iii) i), ii) の解析によって得られた亀裂先端位置の DDM 要素の変位くい違い量を比較し、ii) で得られた変位くい違い量を何倍すれば i) で得られた変位くい違い量を打ち消して、亀裂先端位置の要素の変位くい違い量を 0 にするか、その倍数  $k$  を求める。ii) の解析の荷重状態である内圧  $P_i$  の  $k$  倍の値が亀裂の再開口に要する S-800 の内圧  $P$  となる。ここで  $P_i = 1$  のとき、

$$P = P_{in} \text{ とする。すなわち } P_{in} = k \text{ となる。}$$

iv) S-800 の変位計は、図 5.1.1 のモデル図で  $y$  方向 ( $\theta = 90^\circ, 270^\circ$ ) のボーリング孔の孔径変化を測定している。亀裂 reopening 時のこの実測変位に対応する変位  $\delta$  は

$$\delta = k \cdot \delta_0$$

ここで、 $\delta_0$  は ii) の BEM 解析で求める F SM 要素の変位量で、

$$\delta_0 = (\theta = 90^\circ \text{ の変位}) - (\theta = 270^\circ \text{ の変位})$$

v)  $\delta$  をボーリング孔の直径  $D$  で除すると、ひずみ ( $\varepsilon$ ) は

$$\varepsilon = \delta / D$$

なお、ここでは拘束圧を等圧の場合 (最大主応力  $P_x$  : 最小主応力  $P_y = 1 : 1$ ) と偏圧の場合 (最大主応力  $P_x$  : 最小主応力  $P_y = 3 : 2$ ) の二通りに変化させて解析を行った。

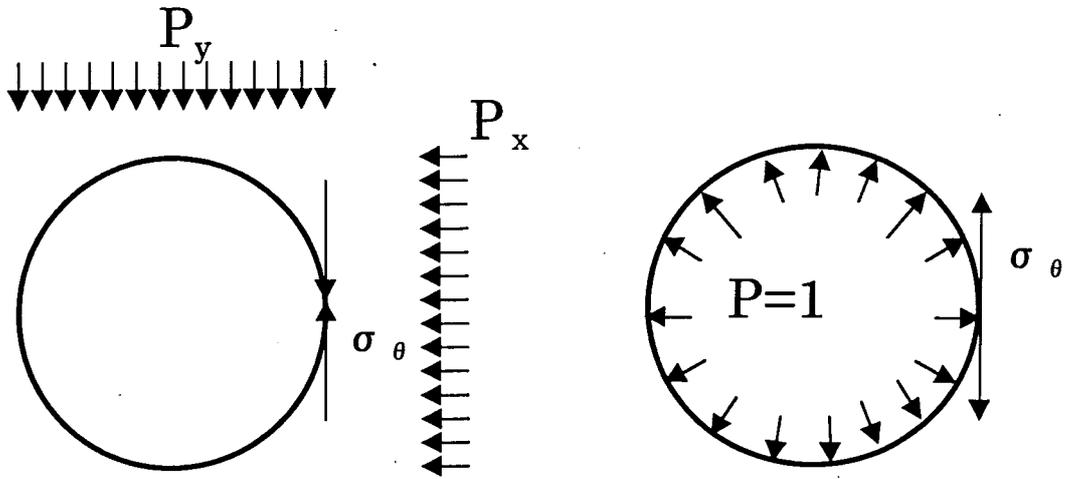


図 5.2.1(a) 初期地圧条件のみの载荷状態

図 5.2.1(b) 孔壁内周の载荷状態

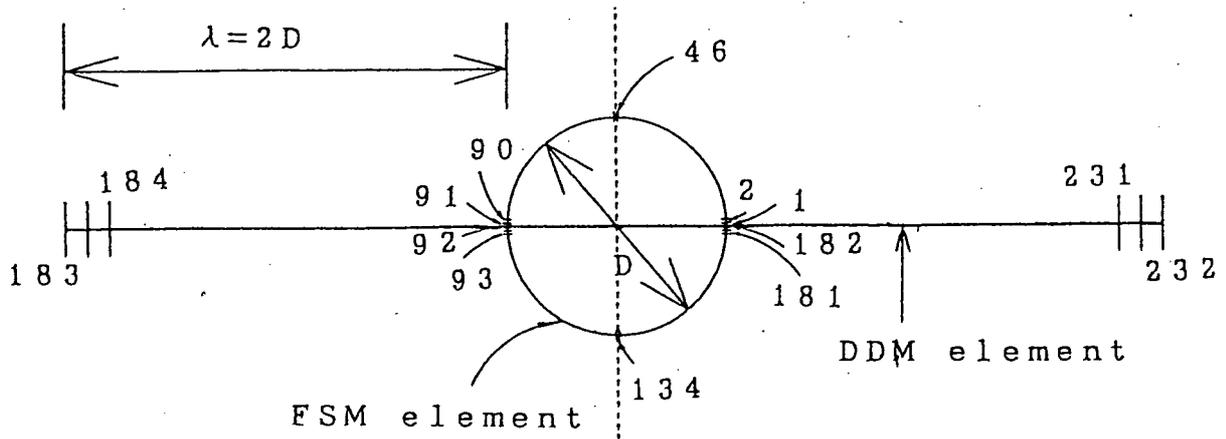


図 5.2.2 亀裂進展解析モデル (亀裂長  $\lambda = 2D$  の場合)

### 5.2.2. 解析結果

以上の手順に従って行った解析の結果はまとめて表 5.2.1(a), (b)に示す。

表5.2.1(a) 解析結果 ( $P_x=P_y=-1$ ) のとき

$\lambda$	$\sigma_\theta$		変位くい違い量		k	$\delta_0$ $\times 10^{-7}$	$\delta$ $\times 10^{-7}$	$\varepsilon$ $\times 10^{-5}$
	孔壁への 載荷なし	亀裂 再開口時	孔壁への 載荷なし $\times 10^{-7}$	亀裂 再開口時 $\times 10^{-7}$				
0	2.003	1.948	—	—	1.028	3.86	3.968	0.620
0.1D	—	—	2.40	-1.44	1.667	4.24	7.068	1.104
0.2D	—	—	3.16	-1.45	2.179	4.66	10.150	1.586
0.3D	—	—	3.63	-1.41	2.574	5.08	13.080	2.044
0.5D	—	—	4.31	-1.32	3.265	5.82	19.000	2.970
1D	—	—	5.46	-1.12	4.875	7.24	35.300	5.516
2D	—	—	7.13	-0.86	8.056	9.04	72.830	11.380

表5.2.1(b) 解析結果 ( $P_x=-1.2$   $P_y=-0.8$ ) のとき

$\lambda$	$\sigma_\theta$		変位くい違い量		k	$\delta_0$ $\times 10^{-7}$	$\delta$ $\times 10^{-7}$	$\varepsilon$ $\times 10^{-5}$
	孔壁への 載荷なし	亀裂 再開口時	孔壁への 載荷なし $\times 10^{-7}$	亀裂 再開口時 $\times 10^{-7}$				
0	1.202	1.948	—	—	0.617	3.86	2.382	0.372
0.1D	—	—	1.59	-1.44	1.104	4.24	7.068	1.104
0.2D	—	—	2.24	-1.45	1.545	4.66	7.200	1.125
0.3D	—	—	2.69	-1.41	1.908	5.08	9.693	1.515
0.5D	—	—	3.31	-1.32	2.508	5.82	14.600	2.281
1D	—	—	4.32	-1.12	3.857	7.24	27.920	4.363
2D	—	—	5.69	-0.89	6.429	9.04	58.120	9.081

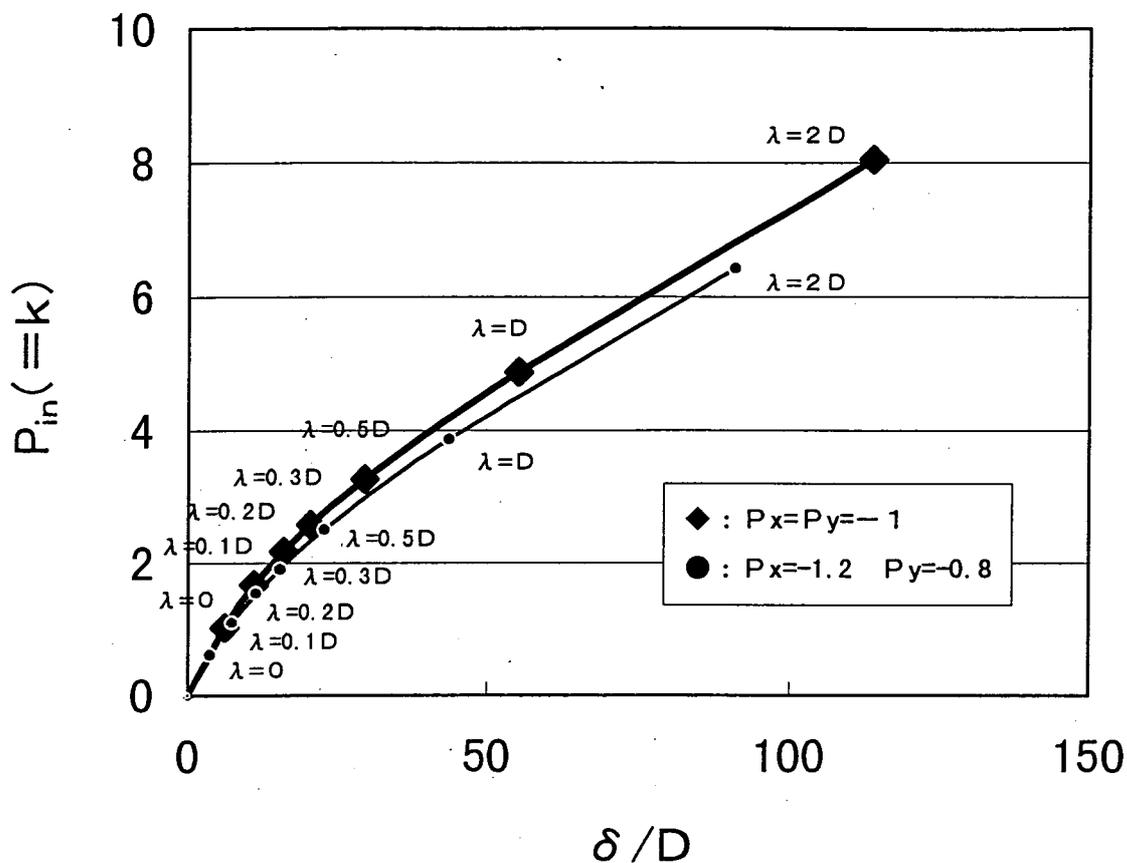


図 5.2.3 圧力-変位曲線

以上の解析結果より図 5.2.3 の圧力-変位曲線が得られる。図 5.2.3 の縦軸は地圧の静水圧成分 1 に対して亀裂開口に要する S-800 の内圧の載荷圧で、 $P_{in} (=k)$  とする。横軸は直方向の変位を孔壁の直径で除した値で、 $\delta/D$  で表す。

◆ で表す曲線は拘束圧  $P_x = P_y = -1$  のときの圧力-変位曲線、● で表す曲線は拘束圧  $P_x = -1.2, P_y = -0.8$  のときの圧力-変位曲線である。

解析結果より、拘束圧の圧縮主応力比が変化しても亀裂が十分開いた後 ( $\lambda = D$  から  $\lambda = 2D$ ) における圧力-変位曲線の傾きは大きく変化しないことがわかる。また、亀裂の再開口点 ( $\lambda = 0$ ) を見ると、拘束圧が等圧の場合に比べて偏圧 (水平応力 > 鉛直応力) のほうが小さい応力で亀裂が再開口することがわかる。これは、理論式から推定される亀裂の再開口点とほぼ等しい。

原点から  $\lambda = 0$  の変曲点を結ぶ直線部分は、亀裂が再開口するまでのボーリング孔内へ

の載荷圧の加圧による孔直径の弾性変形を表わしている。そして、亀裂が長くなるほど曲線の傾きが緩やかになるのは、亀裂が長くなるにつれて亀裂先端の再開口に要する孔内載荷圧と S-800 の変位計による測定位置の孔径変化が大きくなることを示している。2つの曲線から分かるように、折れ点（亀裂の再開点）付近の接線の傾きはあまり急激に変化していない。すなわち曲線の折れ点（亀裂の再開点）を明瞭に読みとれない可能性がある。このことは昨年度の供試体を用いた試験結果でも、必ずしも圧力-変位曲線の折れ点が明瞭でないことは指摘されていた。今後、折れ点付近の解析をより詳細に行うことによって、亀裂の再開点を容易に読みとる方法を検討する必要があると思われる。

## 6. 結論

本業務では、昨年度の室内鋼管載荷試験と数値シミュレーションの結果を踏まえて、乾式破碎応力測定器の孔内載荷分布を詳細に検討するため、2種類の鋼管を用いた室内鋼管載荷試験を実施した。室内試験で測定されたひずみの分布と数値実験による解析値とを比較し、孔内の載荷状況を比較した。また、最後に亀裂のある状態の数値実験を行い、圧力-変位曲線を再現させた。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1)肉厚の異なる2種類の鋼管での載荷試験の結果、鋼管表面でのひずみ分布は2種類の鋼管でほぼ同じであるが、鋼管の厚みの影響で、厚みの大きい鋼管のほうが計測されるひずみ量が小さい。また亀裂発角度や、繰り返し試験を行った結果、試験の再現性が確認された。
- (2)本年度の試験でも改良プローブを使用したが、安定した再開口圧力を得ることができ、各拘束圧条件下での繰り返し載荷を行う必要性はなくなった。
- (3)プローブを載荷した状態のプローブ中心部付近での鋼管に与えらひずみ量は、プローブを若干(3cm, 12cm)スライドさせても鋼管外周で得られるひずみ分布はほぼ同じであることが分かった。
- (4)本試験で得られた鋼管内載荷試験結果と、シミュレーションの結果とを比較した結果、実測値と計算値は鋼管の種類を変えても良く一致した。このことは本解析が妥当なものであることを示唆している。またこの解析によって鋼管の内周および外周の載荷状態が推定された。
- (5)亀裂の長さを数種類変化させたモデルを用いたシミュレーションを行った結果、原位置試験時に計測されるような亀裂が再開口するときの圧力-変位曲線を再現することができた。5章で行った亀裂の再開口時のシミュレーションを詳細に行うことによって、圧力-変位曲線の変曲点(亀裂の再開口点)に判断することがさらに容易になると思われる。

本業務によって、室内では昨年度までの補うデータを取得することができ、室内においては鋼管や供試体を用いた載荷試験のデータを十分蓄積できた。また、今年度の室内鋼管試験結果と、シミュレーションの結果とをあわせることによって、プローブ表面での載荷状態が明らかになった。そのため、今後は乾式破碎応力測定装置の利点を活かし、水圧破碎等では困難な、活断層周辺岩盤等の実際の現場において本測定器を用いた応力測定を行うべきである。