

JNC TJ7440 99-012

深部岩盤における初期応力 測定用プローブの設計

核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書

1999年3月

日本国土開発株式会社

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下さい。

〒509-5102 岐阜県土岐市泉町定林寺 959-31

核燃料サイクル開発機構

東濃地科学センター 研究調整グループ

Inquires about copyright and reproduction should be addressed to :

Co-ordination Group,

Tono Geoscience Center,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

959-31 Sonodo Jyorinji Izumi, Toki, Gifu 509-5102,

Japan

深部岩盤における初期応力測定用プローブの設計

菊地慎二*

要 旨

核燃料サイクル開発機構では、超深地層研究所計画の一環として、地表から深度1000mまでの初期応力状態を把握することとしている。

本業務は応力測定法のうち、最も信頼性の高いとされる応力解放法を用いて、深度1000mまで測定可能な3次元初期応力測定用のプローブを開発することを目的として、まずそのプローブの設計を実施するものである。

プローブは、ひずみ測定を行うSIセルとその上部で測定されたデータを記録・保存するアッパーセルに大別される。SIセルは直径18mm、長さ200mmのエポキシ樹脂製で、パイロット孔内に挿入・接着される。SIセルの先端には液状のエポキシ樹脂を貯留しているグリューカプセルが装着されている。アッパーセルは、直径45mm、長さ863mmで方位計、傾斜計、電子回路および電源が内蔵されている。

SIセルがパイロット孔内に挿入され、グリューカプセル下端部が孔底に達するとグリューカプセルからエポキシ樹脂が抽出され、セルと壁面を接着し、固定する構造となる。

これら一連の作業のうち、エポキシ樹脂によるセルと壁面の水中での接着・固定およびオーバーコアリングでのひずみ変化測定の模型による室内実験が行われ、いずれの機能も確認された。

本報告書は、日本国土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の成果である。

契約番号:10C1123

担当部課室および担当者:核燃料サイクル開発機構東濃地科学センター 地質環境情報グループ グループリーダー 坪田浩二

*:日本国土開発株式会社 土木本部 土木企画室

Design of Probe for In Situ Stress Measurement In Deep Rock Stratum

S. Kikuchi*

ABSTRACT

JNC is planned to determine the complete in situ stress state at depths ranging from surface to 1,000m under the Mizunami Underground Research Laboratory Project.

The objective of this research is to develop the probe for the measurements of 3-dimensional in situ stress applicable by 1,000m in depth by means of the Stress Relief Method which is regarded as the most reliable method of the stress measurement.

The probe consists of SI-cell to measure the strain of the rock and Upper-cell for the record of the measured data.

200mm in length and 18mm in diameter epoxy resin SI-cell is to be inserted in to the pilot borehole and to be fixed in the hole by epoxy glue which is stored in the capsule at the bottom end. 863mm in length and 45mm in diameter Upper-cell contains compass, inclinometer, IC board and power unit.

When the SI-cell reached at the bottom of the borehole, the liquid epoxy resin would be filled within the gap between SI-cell and hole surface and fix them together.

In this process, laboratory tests were executed to ensure the unification of the cell and rock hole by the epoxy resin in the water, and the measurement of the strain on the deformation by over-coring around the unified cell.

Work Performed by JDC Corporation under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

Contract No. 10C1123

JNC Liaison: Koji Tsubota, Group Leader, Geological Environment Research group,
Tono Geoscience Center

* : JDC Corporation , Civil Engineering Department

目 次

1. はじめに	1
2. 設計の概要	2
3. 初期応力測定用プローブの設計	4
3.1 プローブの概要	4
3.2 SIセル	5
3.2.1 測定部	5
3.2.2 グリューカプセル	7
3.2.3 アッパセル連結部	9
3.3 アッパセル	9
3.3.1 電子回路部	9
3.3.2 方位・傾斜計	15
3.3.3 耐圧容器	16
3.3.4 レコーダ	21
3.3.5 電源	22
3.4 プローブ運搬装置	22
3.4.1 運搬装置の構成	22
3.4.2 測定手順	23
4. 初期応力測定システムに関する調査	27
4.1 接着剤の適用性	27
4.1.1 調査対象品目	27
4.1.2 接着剤の仕様比較	28
4.1.3 耐水性適用実験	29
4.2 ひずみゲージとレコーダの接続方法	30
4.3 レコーダの小型化	30
4.4 音響データ通信装置	31
5. 確認実験	32
5.1 実験の概要	32
5.2 オーバーコアリング実験	32
5.2.1 概要	32
5.2.2 実験装置	36
5.2.3 実験手順	36
5.2.4 実験結果	37
5.3 水中接着実験	45
5.3.1 概要	45

5.3.2 実験装置	45
5.3.3 実験手順	46
5.3.4 実験結果	47
6. 応力測定理論	49
6.1 確認実験に関する理論解析	49
6.1.1 解析手法および解析モデル	49
6.1.2 定式化	49
6.1.3 数値計算手順	50
6.1.4 数値計算例および考察	50
6.2 初期応力を考慮したシミュレーション計算	52
6.2.1 定式化	52
6.2.2 計算例	56
6.3 逆解析手法	62
6.4 順解析と逆解析	64
7. おわりに	68

—付 図 目 次—

図 3-2-1	SI セル設計図	6
図 3-2-2	SI セル配置模式図	7
図 3-2-3	グリユーカプセル図	8
図 3-3-1	電子回路図	10
図 3-3-2	7mm ^φ -セル配置	11
図 3-3-3	耐圧容器組立図	17
図 3-4-1	プローブ切離し図	25
図 3-4-2	測定手順	26
図 4-1-1	水中接着性試験	30
図 5-2-1	供試体のひずみゲージ配置模式図	33
図 5-2-2	SI セル内のゲージ配置模式	37
図 5-2-3	花崗岩のゲージ貼付配置図	38
図 5-2-4	載荷応力とひずみの関係	38
図 5-2-5	オーバーコアリングによるひずみ変化	40
図 5-2-6	オーバーコアリングによる差分ひずみ変化	40
図 5-2-7(a)	オーバーコアリングによる差分ひずみ変化 1ch	41
図 5-2-7(b)	オーバーコアリングによる差分ひずみ変化 2ch	42
図 5-2-7(c)	オーバーコアリングによる差分ひずみ変化 3ch	42
図 5-2-8	圧裂試験結果	44
図 6-1-1	確認実験解析モデル	49
図 6-1-2	載荷時のひずみ変化(ゲージ 1-2, 2-2, 3-2)	53
図 6-1-3	理論値に及ぼすポアソン比の影響(ゲージ 3-2) E2/E1=1.0 の場合	53
図 6-1-4	理論値に及ぼすポアソン比の影響(ゲージ 3-2) E2/E1=0.9 の場合	54
図 6-1-5	理論値に及ぼすポアソン比の影響(ゲージ 3-2) E2/E1=0.8 の場合	54
図 6-1-6	理論値に及ぼすポアソン比の影響(ゲージ 3-2) E2/E1=0.7 の場合	55
図 6-1-7	理論値に及ぼすハットホール半径の影響(ゲージ 3-2) E2/E1=0.9 の場合	55
図 6-2-1	シミュレーション計算モデル	56
図 6-2-2	ハットホール掘削時の主ひずみの分布	58
図 6-2-3	コア内部のひずみ分布	59
図 6-2-4	接着層とセルのひずみ分布	60
図 6-2-5	ゲージ上の応力分布	61
図 6-3-1	直接定式化法における逆解析手法	63
図 6-4-1	一軸応力が作用する場合の逆解析のためのノモグラム	65
図 6-4-2	二軸応力が作用する場合の逆解析のためのノモグラム	67

—付 表 目 次—

表 2-2-1 仕様書の相違項目と報告書の対応箇所	3
表 3-2-1 SI セル仕様	5
表 3-2-2 ひずみゲージ仕様	5
表 3-2-3 温度ゲージ仕様	6
表 3-2-4 マトリックス仕様	6
表 3-2-5 グリユーカプセル仕様	8
表 3-2-6 接着剤仕様	8
表 3-3-1 電子回路部仕様	14
表 3-3-2 方位計仕様	15
表 3-3-3 傾斜計仕様	16
表 3-3-4 耐圧容器円筒部耐圧設計条件	18
表 3-3-5 耐圧容器仕様	19
表 4-1-1 接着剤の仕様比較	28
表 5-2-1 SI セル仕様	33
表 5-2-2 測定機器仕様	33
表 5-2-3 供試体仕様	33
表 5-2-4 载荷諸元	34
表 5-2-5 接着剤と接着手順	34
表 5-2-6 オーバーコアリング機器仕様	34
表 5-3-1 試料仕様	45
表 5-3-2 接着方法	45
表 5-3-3 実験環境	45

—写 真 目 次—

写真 3-2-1 SI セル概観	6
写真 3-2-2 グリユーカプセル概観	8
写真 5-2-1 オーバーコアリング状況	34
写真 5-2-2 オーバーコア部分拡大	35
写真 5-2-3 オーバーコア断面	43
写真 5-3-1 水中接着実験後の概観	48

1. はじめに

核燃料サイクル開発機構東濃地科学センターでは、超深地層研究所計画の一環として地表から深度 1000m までの地層の初期応力状態を把握することとしている。しかしながら、国内外ともに深度 1000m 程度までの3次元初期応力を測定した実績は少なく、信頼性も高いとは言えない。そこで、前年度までに大深度ボーリング孔およびそこから採取されたコアを用いる様々な応力測定方法の現状調査を実施している。また、現在最も信頼性の高いとされている応力解放法のなかで、大深度に適用できる2方法について調査も実施している。

本契約業務は、応力解放法を用いて深度 1000m まで測定可能な3次元初期応力測定用のプローブを開発することを目的として、測定用プローブの設計を実施するものである。ここでは、応力解放法のうち、埋設型計測装置(インクルージョンセル)を用いた方法を採用した。この方法は、あらかじめひずみゲージを内蔵した円柱あるいは円筒状のセルを孔内に埋設・固定し、オーバーコアリングによって変化するひずみを測定する方法で、浅深度では既に実用化されていること、セルの孔壁への接着が比較的容易であること、オーバーコア径の小径化に関する理論解が得られていることなどの利点を有している。

本報告書は、大きく4つに分けられる。まず第1は、初期応力測定用のプローブの設計である。設計したプローブは、測定部である SI セルとデータを記録・保持するアッパーセルから構成されており、エポキシ樹脂製の SI セルをパイロット孔に挿入後、孔壁面に接着・固定させる構造としている。第2に、本方法において問題点と想定される項目について調査内容を記述している。第3に、本方法を採用するにあたり、事前に確認を要する項目として、SI セルが水中のパイロット孔壁に接着・固定し、オーバーコアリングによるひずみ変化が測定可能であることをあげ、その確認のための室内模型実験を実施し、結果を報告している。最後に、本方法で得られたデータから初期応力を算出するための理論について記述している。

2. 設計の概要

(1) 件名

「深部岩盤における初期応力測定用プローブの設計」

(2) 設計の目的

核燃料サイクル開発機構では、超深地層研究所計画の一環として、地表から深度 1000m までの初期応力状態を把握する予定としている。しかしながら、国内外ともに深度 1000m 程度までの3次元初期応力を測定した実績が少なく、信頼性も高いとは言えない。このため本設計では、もっとも信頼性の高いとされる応力解放法に基づく深度 1000m 対応の初期応力測定用のプローブを用いて3次元初期応力を測定することを目的としてそのプローブの設計を行う。また、あわせて初期応力測定用システムについて調査を行い、設計に反映するものとする。

(3) 設計の内容

本設計業務の内容は次のとおりである。

- ①初期応力測定用プローブの設計
- ②初期応力測定システムに関する調査
- ③上記報告書の作成および報告会の開催

(4) 工期

工期 平成 10 年 11 月 16 日～平成 11 年 3 月 19 日

(5) 仕様書の項目と報告書の対応箇所

仕様書で示された内容に相当する本業務報告書での対応箇所を表 2-1-1 に示す。

表 2-1-1 仕様書の相違項目と報告書の対応箇所

仕様書内の項目	本業務報告書内の対応箇所
(想定方式) ひずみゲージを直接パイロット孔壁に貼付後、オーバーコアリングを行い、ひずみを測定する。	(採用方式) インクルージョンセルをパイロット孔内に埋設し固定後、オーバーコアリングを行い、ひずみを測定する。
接着材格納部分 (ひずみゲージと接着剤を格納する部分)	SIセル下部のグリューカプセル (接着剤を格納する部分、ただし、接着はSIセルと孔壁間)
レコーダー	アッパーセル(格納容器)内の IC メモリー
方位測定装置	と方位・傾斜計
貼付装置収納ケース	SIセル
レコーダー支持装置	(左記の機能とは必ずしも一致しない)

3. 初期応力測定用プローブの設計

3.1 プローブの概要

プローブは、SIセル部とアッパーセルに分けられる。SIセルは、エポキシ樹脂製、直径18mm、長さ200mmで3軸のロゼットひずみゲージ3枚および温度測定用ひずみゲージ1枚が内蔵されている。その先端には液状のエポキシ樹脂を貯留している真鍮製のグリューカプセルを装着する構造となっている。

SIセルの上部にあるアッパーセルは、鋼製で直径45mm、長さ863mm、肉厚2mmの耐圧容器で出来ており、方位計、傾斜計、電子回路および電源を内蔵している。

アッパーセルとSIセルとの連結部は、SIセルがアッパーセルのエントキャップに差し込む状態で連結され、境界接触面にはOリングを用いて水密構造としている。

また、アッパーセルはボーリングのインナーチューブとピンで接続されており、プローブはボーリングビット位置まで正確に降下させることが出来る。さらにボーリングチューブの上下動と一体化して動くため、ボーリングマシンによってプローブのスピードをコントロール出来、SIセルをパイロット孔に着実に挿入することが出来る。

プローブ下部のSIセルは、パイロット孔内に挿入され、その下部のグリューカプセルの下端にあるピストンが孔底に達すると、グリューカプセルからエポキシ樹脂がSIセル周辺に抽出され、セルと壁面の間に充填される。所定時間経過後に壁面とSIセルは接着し、固定・一体化される。

3.2 SIセル

現在までに開発されたSIセルは、エポキシ樹脂製で直径18mm長さ120～150mmである¹⁾が、今回の設計仕様(φ38mm以内)を満足しているため、この形状をそのまま採用するものとした。さらに、セル内に温度ゲージを内蔵することにより格納容器の小型化にも貢献している。なお、温度ゲージ採用により、温度計の仕様は、以下のように変更した。

測定範囲 -30～+70℃ → -20～+200℃

SIセルの長所は、SIセルの直径をある程度自在に変更できる点であり、今後の機器改良に際し、有利な点といえる。

今回は、SIセル、すなわち円柱状のセルを採用したが、中空円筒状のセルも適用でき今後の検討課題とする。

参考文献

- 1) 菊地慎二:「地山応力測定に用いる応力解放法の高精度化に関する基礎的研究」,北海道大学博士論文,1996.3.

3.2.1 測定部

SIセルの寸法は以下のような根拠により決定されている。

ボーリングの孔底から直径 20mm のパイロット孔が掘削され、SI セルはパイロット孔内に埋設されるが、埋設位置がボーリング孔底に近いとパイロット孔端部の応力集中の影響を受けることになる。通常、円周端の応力集中は直径の 3 倍程度離ればその影響はなくなると考えられる。したがって、SI セルのひずみゲージ埋設位置は、パイロット孔直径の 3 倍の位置すなわち 60mm とする。また、オーバーコアリング後に得られるオーバーコアの下端側の応力集中も考慮して、SIセルのひずみゲージ位置から下端側にも同様に 60mm とすることにす。

さらに、SI セルをアッパーセル内に挿入する分(50mm)とアッパーセルがボーリング孔底に接触してしまうとグリューカプセルから接着剤が抽出しなくなることを防ぐためのアッパーセル下端とボーリング孔底間の余裕しろ(30mm)を加え、SIセルの全長を 200mm とした。

SI セルは、まずエポキシ樹脂の三角柱を製作し、その表面(三面)にひずみゲージを貼付する。それを内径 18mm の円筒状型枠に入れ、エポキシを流し入れて製作する。

(1) セル仕様

表 3-2-1 SIセル仕様

名称	YUGCT-3D SI cell (自作)
形式	埋設型ひずみゲージ式
寸法	直径 18mm 全長 200mm (+リード保護管 30mm)
ひずみゲージ	3 軸ロゼットひずみゲージ 3 枚 三角柱コアの平面部に貼付(それぞれの開き角 45°)
温度計	温度ゲージ

(2) ひずみゲージ仕様

表 3-2-2 ひずみゲージ仕様

製品名	東京測器製ロゼットゲージ FRA5-11
形式	120Ω3 線式(3×3 枚)
寸法	ゲージ長さ 5mm ベース長さ 11mm
測定範囲	±30000×10 ⁻⁶ (室温)
分解能	1×10 ⁻⁶
測定精度	±0.1%FS
使用温度範囲	-20～+80℃

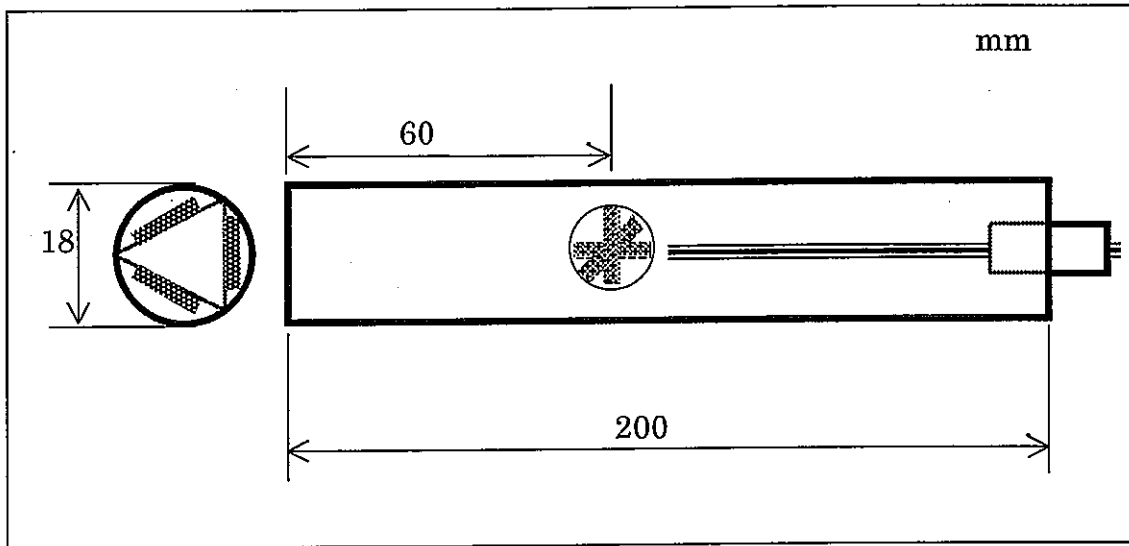


図 3-2-1 SI セル設計図

(3) 温度ゲージ仕様

表 3-2-3 温度ゲージ仕様

製品名	東京測器製温度ゲージ TFL-8
形式	120Ω3線式ひずみゲージタイプ
測定範囲	-20～+200℃
分解能	0.01℃
測定精度	±1℃以内

(4) マトリックス仕様

表 3-2-4 マトリックス仕様

製品名	(主 剤)長瀬チバ製アラルダイト CY230 (硬化剤)長瀬チバ製ハードナー HY956
材 質	エポキシ系レジン

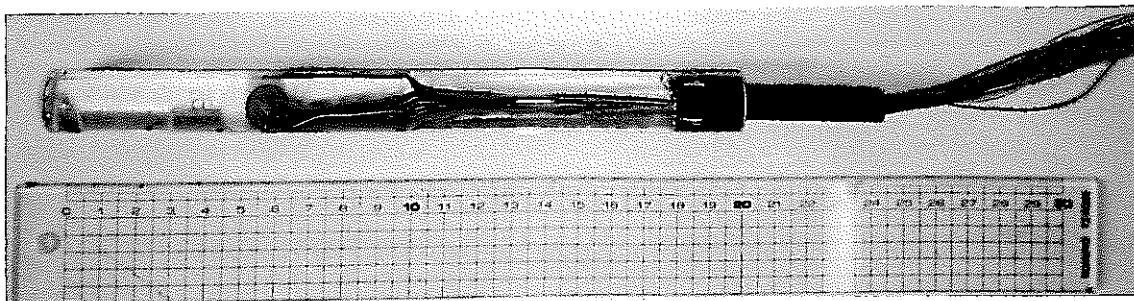


写真 3-2-1 SI セル概観

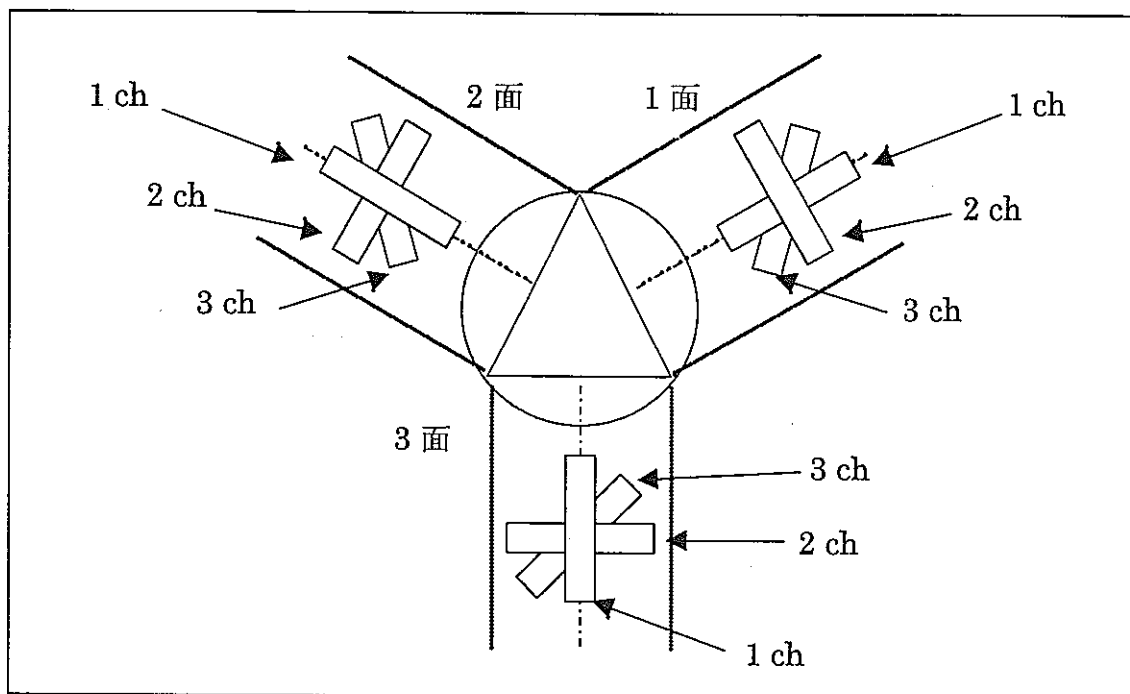


図 3-2-2 SI セルゲージ配置模式図

3.2.2 グリユーカプセル

接着剤の抽出方法は、確実で簡便であることが重要であり、CSIRO で採用しているシリンダ形式を採用した。材質としては、耐圧性があり水環境に強い材料であることが要求される。ここでは入手が容易でかつ安価である高力黄銅に準ずる黄銅 2 種 (Bs2) を用いる。黄銅 2 種の引張強度は $450\text{Mpa}(4600\text{kgf/cm}^2)$ 以上である。

カプセルの諸元は表 3-2-5 に示す。これにより、接着剤の容量は約 20cc となる。パイロットホール $\phi 20\text{mm}$ と SI セル $\phi 18\text{mm}$ の隙間は 1mm しかなく、SI セルの接着される長さ 120mm に必要な容量は約 9cc であり、2 倍以上の容量があるため、十分に接着可能と考えられる。また、余分になった量はパイロットホールの外へあふれることになる。カプセルは、抽出口のある円筒体であるので水中においては内圧と外圧は等しく、したがって耐圧計算は必要ない。

次に地表から測定位置までの挿入時に誤作動を防ぐ必要があるが、その対策としてシリンダ内のゴムパッキンの直径を調整することにより、パイロット孔到達までに数 kg の荷重がかかると動かないような構造としている。また、これにより接着直前まで接着剤が水中に滲み出すことが防止できる。

パイロット孔着底後、パイロット孔内の水は、上部のボアホール側に排出される必要がある。それと同時に抽出された接着剤は SI セル部のみに留まって硬化しなければならない。このため、水は排出されるが、接着剤は漏洩しないような構造となるように、厚さ 1mm の多孔質シートをカプセル上端部の接着剤抽出口の下部に巻きつけた。この方式により、実際に穿孔されたパイロット孔の径によって抽出量の微調節も可能と

なった。ただし、100 気圧下での作動についてはあらかじめシートに水を含ませて気泡を取り除き、水圧によって収縮しないよう注意する必要がある。

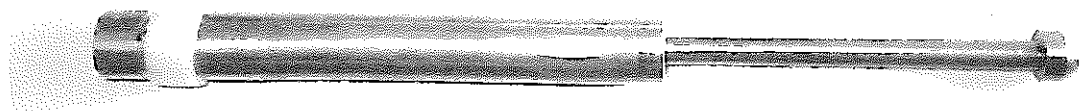


写真 3-2-2 グリューカプセル概観

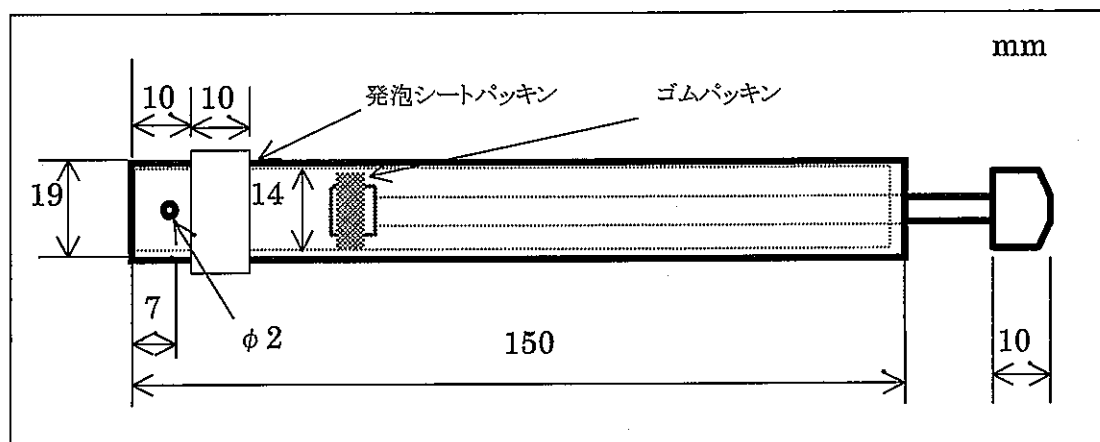


図 3-2-4 グリューカプセル図

表 3-2-5 グリューカプセル仕様

名称	グリューカプセル
形式	円筒ピストンシリンダー形式
寸法	直径 19mm 全長 200mm (カプセル部) 外径 19mm 内径 17mm 全長 150mm (ピストン部) 外径 14mm 内径 8mm 全長 150mm (内部パッキン) 直径 14mm 長さ 6mm (天然ゴム製 2 重パッキン) (外部パッキン) 幅 10mm 厚さ 1mm (発泡シート)
材質	真鍮 (C2700 (Cu65:Zn35))
引張強さ	450Mpa (4600kgf/cm ²) 以上
比重	8.43

表 3-2-6 接着剤仕様

製品名	長瀬チバ製アラルダイト CY230 (硬化材 HY956)
接着形式	自作グリューカプセルより抽出方式

3.2.3 アッパーセル連結部

SI セルとアッパーセル(すなわち、耐圧容器)との接続に必要な SI セル側の構造について述べる。以下の説明では、図番が前後するが、耐圧容器組立図(図 3-3-3)に併記した SI セル外形図を参照されたい。

SI セルは、アッパーセル(耐圧容器)のエンドキャップに 53mm 差し込む状態で接続される(図 3-3-3)。接続に際し、SI セルは水密を保つために SI セルの O リングに接する面(信号線引き出し側より 20~33mm の間の円周面)を O リングシールに必要な精度(アラサ 6-S 以下)をもって仕上げる必要がある。表面仕上げが所定の精度を満たし、傷などがなく、十分な潰ししろがあれば、O リングシールにより、水深 1,000m までの水密を十分確保することができる。実際、非常に安全性が求められる「しんかい 6500」を始めとする有人潜水船(最大潜航深度 6,500m)の水密方法としても O リングが用いられている。SI セルには脱落防止用の溝を信号線引き出し側より 49~54mm 間の円周上に深さ 1.25mm で設ける。信号線はアッパーセルの水密区画内に引き出されるため、信号線が水中に直接露出することはない。

3.3 アッパーセル

3.3.1 電子回路部

図 3-3-1 に本装置の電池回路のブロックダイアグラムを、図 3-3-2 にアッパーセル配置図を示す。電子回路部は 1 枚の高密度基板(長さ 250mm、幅 36mm)上に実装される。電子回路部はアナログ信号処理回路、デジタル回路、電源回路の3つから構成される。

(1) アナログ信号処理回路

アナログ回路部は SI セルに埋設された 3 個 9 成分の Cu-Ni 箔ひずみゲージおよび 1 個の Ni 合金箔温度ゲージからのアナログ信号を、選択(マルチプレクサ回路)・変換(ブリッジ回路)・増幅(DC アンプ)し、デジタル信号に変換するまでの処理を行う。

a) マルチプレクサ回路

本装置では、ひずみゲージ 9 成分、温度ゲージ 1 つの計 10 成分のセンサが使用される。通常、10 成分のセンサで同時測定を行う場合、10 組の測定回路が必要となる。マルチプレクサは 1 つの測定回路に複数のセンサを順次繋ぎ変える働きをする回路であり、ブリッジ回路、センサアンプ回路を共通にすることができる。マルチプレクサ回路は半導体を用いるカリレー接点を用いる方法がある。半導体を用いた場合、切り替え速度は高速(数マイクロ秒)だが、ON 抵抗が低い素子を用いても、数十オームの抵抗がある。今回使用するひずみゲージは、抵抗が 120Ω で最大の抵抗変化率が約 ±7% であるので、ON 抵抗値の大きい半導体を用いた場合、その値

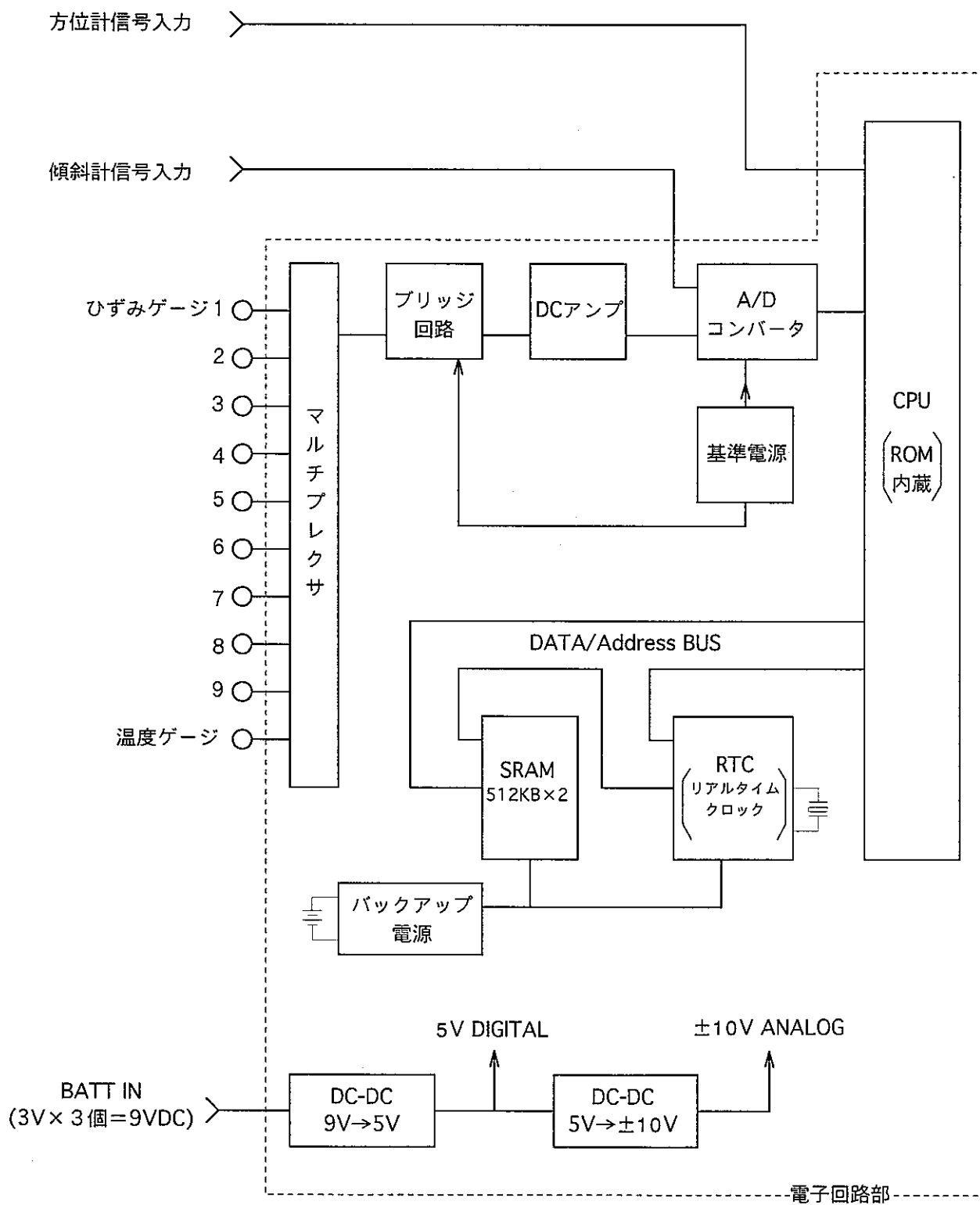
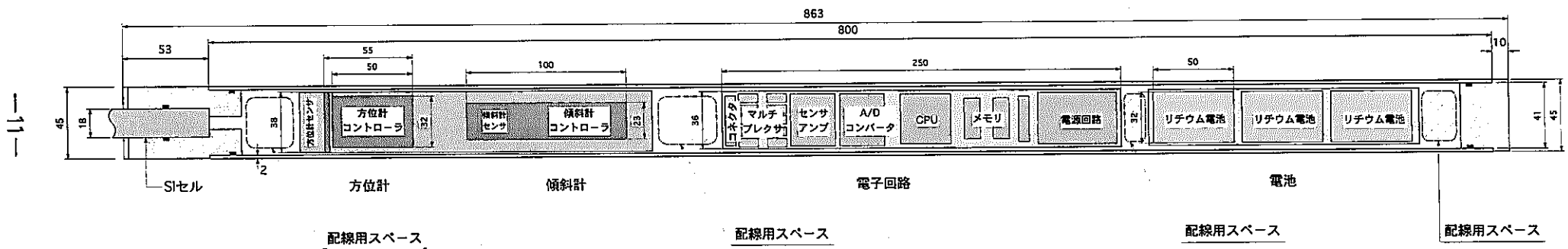


図3-3-1 電子回路構成



単位：mm

図 3-3-2 アッパーセル配置図

の変化が直接精度に影響を与える。よって、本装置ではリレーによるマルチプレクサを採用する。

各センサーは、物理量の変化を抵抗の変化として変換するため、電子回路部からは、各センサーに対して抵抗測定のための電圧を供給する必要がある。抵抗測定のためのゲージ印加電圧は 2.5 V で、センサの抵抗は 120 Ω であるから、1つのセンサが消費する電流は、約 21 mA となる。したがって、10 個のセンサに同時に電源を供給すると、210 mA の基準電源が必要となる。本装置では各センサへの電力供給もマルチプレクサを経由して行い、消費電力の低減と基準電源回路の簡易化を図っている。

b) ブリッジ回路

ひずみゲージおよび温度ゲージはともに、測定物理量を電気抵抗の変化量に変換して出力する。ブリッジ回路は 4 つの抵抗器(その内1つは測定ゲージ)を用いて、ゲージの微小な抵抗変化を電圧変化に変換する回路である。

ブリッジ回路では、使用する抵抗器の特性が揃っている必要がある。抵抗器の特性としては、絶対値のほか温度特性が重要なファクタを占める。

いま回路周辺の温度変化を最大 70°C とし、ブリッジ回路の温度変化による誤差をひずみゲージの精度(±0.1%)以下とした場合、 $0.1/70 = 14 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ となる。これに対し、通常の金属皮膜抵抗器の温度特性は ±50ppm 程度あり使用できない。本装置では、金属箔精密抵抗器とよばれる、温度係数が極めて低い抵抗器(±5 ppm/°C 以下)を使用する。

c) DC アンプ回路

いま、センサに 2.5 V の基準電源を与えた時、ブリッジ回路から出力される電圧出力は、センサ抵抗が最大変化(±7Ω)した場合で ±3.5mV となる。A/D コンバータの入力レンジは最大 ±2.5 V であるので、 $2.5 \text{ V}/35 \text{ mV} = 71.4$ となり、約 70 倍の増幅をする必要がある。本装置の DC アンプ回路は、オペアンプ(高増幅率の増幅器の一種)を2個使用した差動増幅回路により構成され、70 倍の増幅率を得ている。

DC アンプで発生する誤差の最大は、温度ドリフトである。A/D コンバータは、±2.5 V を 16 ビットに分解するため、1ビット当りの電圧量は約 75 μV となる。回路周辺の温度変化を最大 50°C とすると、約 1.5 μV/°C の温度特性で1ビットの誤差となる。アンプゲインが約 70 倍であるから入力換算では、0.02 μV/°C の特性が必要となる。

今回使用するオペアンプは、入力オフセットドリフトが標準で 0.01 μV/°C であり、このスペックを満足する。

d) A/D コンバータ

ひずみゲージの限界が ±30,000 μ であり、分解能 1 μ を満たすために、16 ビット

(±32,768 の分解能)の A/D コンバータを用いる。

(2) デジタル回路

a) CPU

CPU は、実務スペースとプログラムの開発環境の観点から、One Chip タイプの CPU(H8/3048)を使用する。この CPU チップには、16 ビット CPU コア部のほか、256KB のプログラム格納用 EEPRM(Electrically Erasable Programmable Read Only Memory; 電氣的に記憶内容の消去・書き込みが可能な固定記憶装置、非常に小型で電源が遮断されても記憶内容は保持されるのが特徴)、シリアル通信コントローラ (2ch)、デジタル入出力端子など、本装置が必要とするデジタル系の回路のほとんどが内蔵されている。

シリアル通信コントローラの1つは方位計との通信に使用され、もう1つはコマンドの入力とデータの吐出しのために、外部のパソコンと接続される。

b) メモリ

3.3.4 項「レコーダ」を参照

c) 時計機能 (Real Time Clock)

時計機能は、最小サンプリング間隔である1秒信号の発生と、年月日時分秒の自動カウントを行う。自動カウントに際して、閏年は自動的に補正される。また、年は2桁で管理しているため、2000 年には年の値が 00 となるが、これによる障害は発生しない。

(3) 電源回路

本装置の電源はリチウム電池を前提としている。リチウム電池の出力電圧は、3V であり 3 個直列で 9V を得る。一方、内部に必要な電源電圧は、デジタル系 5V、DC アンプ±8～10V、A/D コンバータ±5V である。

電源の安定性などの理由から、デジタル回路用には、9V の入力スイッチングレギュレータ(内部で直流を高い周波数の交流に変換し、小型の変圧器で電圧変えた後、再度、整流を行って入力と異なる直流出力電圧得る回路。大型の低周波用変圧器が不要で、小型軽量なのが特徴。)を用いて 5V を作っている。電池の電圧はその消耗の度合いにより変動する。今回使用しているスイッチングレギュレータ回路では、入力電圧がDC4VかDC2Vまでの変動に対して、DC5Vを安定して供給することができる。5V の電源の安定度は、負荷電流が 0 から 100mA 変動した場合のワースト値で 5V±0.2V である。

さらに、この 5V をチャージポンプ回路(変圧器の代わりに2個直列のコンデンサーに交互に充電し、その両端の電圧を取りだす昇圧回路、回路が簡便で小型なのが特

徴)で±10V とし、DC アンプの電源に使用する。チャージポンプ回路は入力電圧の2倍の正電圧負電圧を出力するので、この回路の安定度は、5V の安定度に依存する。5V 電源の変動幅は最大で 0.4V あり、チャージポンプ回路出力の変動は最大 0.8 V となる。しかし DC アンプの電源電圧変動に対する電源変動除去比が約 120dB と高いため、電源電圧が 0.8 V 変動した時の出力に対する影響は、0.8 μV 以下に押さえられる。

A/D コンバータに必要な±5V の電源電圧は±10V からシリーズレギュレータ(ドロップパー式電源とも言われる。電流が変化しても、いつでも一定の電圧を出力することができる直流電源の一種)を用いて安定化して供給する。

表 3-3-1 電子回路部仕様

測定方式	リレー切換えによるマルチプレクス測定
A/D コンバータ	分解能:16ビット
フィルタ	2~3 個の A/D 変換値の平均化処理
ひずみゲージ	抵抗値:120Ω ゲージ率:K=約 2.1 測定範囲: $\varepsilon_{\max} = \pm 30,000 \times 10^{-6}$ (3%) ひずみ限界時の抵抗変化: $\Delta R = \varepsilon_{\max} KR = \text{約} \pm 7.56 \Omega$ 精度: ±0.1%フルスケール 収録精度: 1×10^{-6} ひずみ(∴ ±30,000 ステップ)
温度ゲージ	抵抗値:120Ω 測定範囲:-20~+200°C 抵抗変化: $\Delta R = \text{約} 15.12 \Omega$ 収録精度:0.1°C
インタフェース	方位計:シリアル 傾斜計:アナログ2ch PC:RS232C
測定間隔	1 秒~60 秒(設定変更可)
最大測定数	24,000 レコード(400 分~16.6 日)
収録データ	測定時刻 ひずみデータx9 成分 温度データ 方位データ 傾斜データx2 成分
使用メモリ	SRAM 512KB×2 = 1MB
電源	DC9V
消費電流	記録時:DC9V100mA スタンバイ時:DC9V25mA

3.3.2 方位・傾斜計

原位置における地盤の応力状態を復元するためには、接着剤により岩盤に固定される SI セルの原位置における地理学的方位および鉛直方向からのずれ(傾斜)を計測する必要がある。精度、簡易性、コスト等を検討した結果、本装置では方位計としてフラックスゲート方位計を、傾斜計として重力加速度検出型傾斜計をそれぞれ用いる。

(1) 方位計

フラックスゲート型方位計は、原理的には地球磁場の直交3成分を3つのコイルを用いて検出し、ベクトル合成することにより、地球磁場の方向と強度(ベクトル)を得るフラックスゲート磁力計と同じ磁気検出型センサである。そのため、測定地点の地磁気の偏角データを用いて、測定された磁場基準の方位データを地理学的な北(真北)からの角度に変換する必要がある。測定地点の地磁気の偏角データは、理科年表等の既存の資料により知ることができる。

一般的に、地球磁場に対する岩石磁化起源の局所磁場の大きさは有意に小さいので、測定孔周辺の岩石による磁場が測定データの誤差として現れることは少ないと考えられる。しかし、岩盤を構成する岩石の中には、種類により比較的強い磁化を持つものがあり、孔内での測定のように、センサが岩石の極く近傍にある場合には、あらかじめボーリングコアサンプルを用いて、岩石の磁化(できれば、誘導磁化と自然残留磁化)を調べるなどの事前調査を行うことが望ましい。そのような岩石としては、磁鉄鉱を多く含む安山岩や玄武岩、さらに蛇紋岩等が挙げられる。一方、一般に堆積岩や変成岩、花崗岩等のフェルシクな火成岩等は磁化強度が小さく、方位測定上の問題とはならない。

上記と同じ理由で、強い磁化を持つ鋼鉄製のケーシングやビットは方位計測上の障害となる。方位計測時にはケーシングをセンサが磁気的影響を受けない程度まで引上げることで、この障害を回避することが可能である。この障害の回避の方法については、3.4「プローブ運搬装置」で詳しく述べる。

表 3-3-2 方位計仕様

方 式	フラックスゲート
測定範囲	0~360° 全周方向
測定精度	±1°
出 力	RS-232C, 2,400 bps, 非同期シリアル伝送
電 源	DC 5 V, 25 mA
想定型式	エイプラス製 AM-12C(改)
既製品寸法	センサ部; W32×L32×H5, 回路部; W32×L50×H20 (単位 mm) 高さ H は概寸

(2) 傾斜計

傾斜計は、ガラス容器内の水銀の位置を定量的に知ることによって、鉛直(重力加速度方向)からのずれ角を測定するセンサである。重力を基準としたセンサであるので、上記のフラックスゲート方位計と比べて、機械的な精度以外で測定精度を左右する様な問題点は少ない。

表 3-3-3 傾斜計仕様

方 式	導電性液体の変位による重力加速度方向検知 (傾斜角はセンサの抵抗値に変換・出力される)
測定範囲	鉛直より±20°
精 度	±0.5°
分解能	±0.01°
出 力	X, Y 方向2成分, ±2 V DC
スケールファクタ	100 mV/deg
時定数	約1秒
電源	DC 12 V, 8 mA
想定型式	アプライドジオメカニクス製 Model902
寸 法	W23×L100×H23(センサ・回路一体型)

方位計に関しては内径 41 mm の耐圧容器に実装可能な既製品が見当たらないため、実装形態に合わせた改良を施す必要がある。傾斜計は既存のものを用いることが可能である。

3.3.3 耐圧容器

アッパーセル耐圧容器は本装置の構成要素の中で水およびその圧力からの隔離を必要とする全ての部位、すなわち、電子回路部、方位・傾斜計および電池などを格納する。

(1) 外形寸法

耐圧容器はステンレス(304)製の円筒型で、大きさは外径φ45mm であり、長さは耐圧容器に格納される部品の配置から、全長 863mm である(図 3-3-3)。ただし、配線や作業の容易さのために確保してあるスペース(図 3-3-3)に関しては、実機の製作段階で再検討の余地があると考えられる。

(2) 容器の肉厚

アッパーセル(耐圧容器)の外径は、45mm である。一方、格納物の大きさから円筒半径方向の大きさをできるだけ確保する必要がある。そのため、今回の設計では、板厚を 2 mm とし、内径 41mm を確保した。

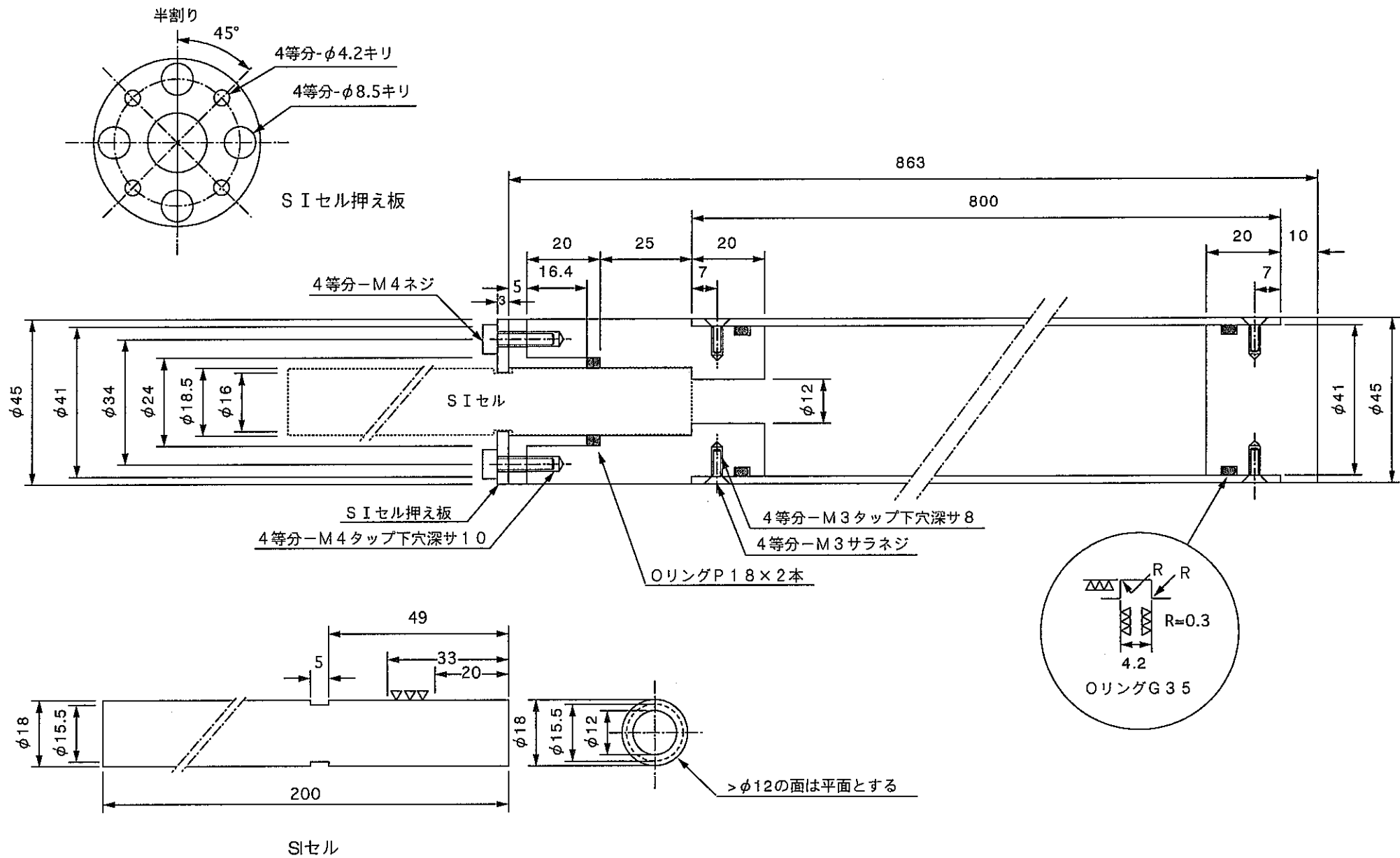


図 3-3-3 耐圧容器組立図

材質：SUS
単位：mm

耐圧計算は以下のパラメータを用いて、弾性座屈(薄肉弾性安定)強度および厚肉破壊強度について行った。

表 3-3-4 耐圧容器円筒部耐圧設計条件

形 状	円筒耐圧容器
最大使用深度	1000 m
外 径	45 mm
内 径	41 mm
板 厚	2 mm
円筒長さ	800 mm
使用材料	ステンレス鋼 SUS304
ヤング率	200 Gpa
耐 力	206 MPa
引張強度	520 MPa
ポアソン比	0.3
端部条件	エンドキャップ付 (軸方向外部圧力有)

その結果、与えられた条件下では、弾性座屈は外部圧力が 44.2MPaまで起こらないが、この場合、板内部で発生する合成(圧縮)応力が、使用材料の耐力を越えてしまう。したがって、円筒の破壊は、外圧によって生じる板内の圧縮応力が使用材料の耐力を越えた時点でおきる¹⁾。

厚肉円筒内の各応力は以下の式で計算される²⁾。

$$\text{軸方向応力 } \sigma_1 = -qa^2/(a^2-b^2)$$

$$\text{周方向応力 } \sigma_2 = -qa^2(r^2+b^2)/\{r^2(a^2-b^2)\}$$

$$\text{半径方向応力 } \sigma_3 = -qa^2(r^2-b^2)/\{r^2(a^2-b^2)\}$$

$$\text{合成応力 } \sigma_T = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^{1/2}$$

ただし、

q; 外部圧力 (Pa)

a; 外半径 (m)

b; 内半径 (m)

r; 任意半径(板内)(m)

である。

今回の場合、 $\sigma_T \geq$ 耐力 (= 206 MPa) で破壊が生じ、その時点での外部圧力は 15.7 MPa(水深 1600 m 相当)となる。すなわち、肉厚 2 mm の円筒部は最大使用水深に対し安全係数 1.6 を有し、仕様を満足する。ちなみに、肉厚 3 mm では、22.9

MPa(水深2340 m相当)まで耐えられる計算となり、より圧壊のリスクが低減されるが、収納部品の小型化をさらに行う必要がある。

(3) 遮水構造

脱着静止面の密封法には直接密封と間接密封がある。直接密封は接合面を有する部分を強く締付け、接合面を直接接触させて密封する方法であるが、本耐圧容器のような形状では、接合面を有する部分を強く締付けることは難しく、この方法は適さない。

一方、間接密封は接合面をガスケットを介して強圧する方法である。接合面の仕上がりが完全であり、両方の接合面が締付けによって良好に接合しているならばガスケットは必要ないのだが、実際には良好に接合するような面仕上げを行うことは多くの工数を要するので、面仕上げは簡単にし、ガスケットで補った方が有利である。また、ガスケットを用いない場合、始めは漏れなくとも使用中に温度、圧力等の影響によって漏れを生ずる様になるためガスケットを用いたほうがよい。補修に際しても、容易に交換が可能なガスケットが有利である。

間接密封法は接合面の形式と使用するガスケットの種類により分類することができる。

固体ガスケットを使用する場合、接合面の形式としては突合ワセ形、印ロウ形およびオウトツ形等が選択でき、ガスケットの跳びだしを考慮すると、オウトツ形が最も高圧での使用に適している。固体ガスケットには紙、ゴム(板)、石綿、クリンケット(石綿とゴムを圧縮して固めたもの)、皮、金属ガスケット、O リング等がある。紙、石綿、クリンケット等は主に低圧用で今回の目的には適さない。また、皮は主に耐油性パッキンとして用いられるものである。金属ガスケットは鉛、銅、鋼などの材質が用いられるが、タワミ性が非金属材料にくらべて不十分で、低温での漏れの危険性がある。金属ガスケットは主に耐圧2MPa以下で用いられることが多い。さらに、O リングを除く固体ガスケットでは、強い締付け圧が必要であり、締付けによって潰されたこれらのガスケットは、開閉時は基本的に交換する必要がある。

O リングは、固定ガスケットの一種であるが、他の固体ガスケットが強い締付けによって密封を得るのに対して、O リングは、密封圧の上昇と共に自己密封作用が働くため、弱い予圧だけで高圧まで十分な密封を得ることができる。O リングは、温度的には -60°C ~ 200°C 、圧力的には100MPa(水深約10,000m相当)程度またはこれ以上までの広い範囲で密封機能を有し³⁾、傷を付けないように注意すれば、接合面の開閉毎にO リングを交換する必要はなく、作業性も良好である。

液状ガスケットは、液体であるので、接合面の形状に自由度を持たせること

ができ、耐圧も 25MPa（水深約 2,500m）位までは標準化されているが、開閉を頻繁に行う部位では、通常採用されない。

以上のように、O リングによる密封法は、原理的に優れ作業性も高い。このため、通常、耐圧容器の水密性を持たせる方法として、極く特殊な場合を除いて、O リングが用いられる²⁾。本耐圧容器の使用環境は、常温、外圧という一般的な条件であるので、構造的に単純で、取扱いが容易な O リングシールを採用した。また、本耐圧容器の各接合面は構造的に強い締付けを行えないが、O リングの採用によりこの問題も解決される。

本耐圧容器には合計 3 ケ所の接合部があり、2 ケ所は胴部とエンドキャップの接合部で、残り 1 ケ所は耐圧容器下側エンドキャップと SI セルとの連結部である。

前者は筒の内側で O リングシールを行うため、O リングを押し込むために筒とエンドキャップ間に若干のクリアランスが必要となる。しかし、そのクリアランスが大きすぎると、圧力により O リングのはみ出しや破断が生じる可能性が大きくなる。今回はこれらのことを考慮して、容器のクリアランスが比較的小さく、O リングのつぶししろが大きく確保できる一般的な太さの G 型の O リングを採用した。

一方、樹脂製の SI セルは、耐圧容器下側エンドキャップに対して厳密には固定されない。そのため、O リングのつぶししろを大きく確保するために、太めの規格である P 型の O リングを採用した。また、P 型の O リングを 2 個用いることで、SI セルの固定と傷などによる浸水の危険性の低減を図っている。

(4) エンドキャップ

耐圧容器下端のエンドキャップは、SI セルとの連結部としての機能も果たすように設計されている。すなわち、耐圧容器下側エンドキャップは SI セル挿入用の貫通孔および SI セル脱落防止板が設けられている。SI セルから引き出されたひずみゲージおよび温度ゲージの信号線は、この SI セル挿入用孔内の O リングによりシールされた防水区画内で耐圧容器内へ連結される。

耐圧容器上端のエンドキャップには、現在の段階では、耐圧以外の機能は特にないが、将来的に 4.4 節で述べるような音響データ通信を検討する場合にはトランスポンダ等の取付けベースを兼ねることになる。

表 3-3-5 耐圧容器仕様

形状	円筒型
長さ	863 mm (ネジを除く)
外径	45 mm
円筒部長さ	800 mm
円筒部肉厚	2 mm
材質	ステンレス鋼 SUS304
重さ(空中)	約 2.8 kg (容器のみ) 約 4.0 kg (装置全体)
重さ(水中)	約 2.5 kg (装置全体)
最大使用深度	1,000 m
安全係数 (理論破壊深度/最大使用深度)	1.57

参考文献

- 1) 浦 環, 高川: 海中ロボット, 成山堂, p.114-132, 1997.
- 2) Young, W. C.: Roak's Formulas for Stress and Strain, 6th edition, McGraw-Hill Book Company, p.638-639, 1989.
- 3) 日刊工業新聞社刊「機械設計便覧」, 1974

3.3.4 レコーダ

本装置ではデータを記録するための装置として SRAM(Static Random Access Memory、リフレッシュ動作が不要で、随時書き込み、読み出しができるメモリの総称)を用い、いわゆるデータレコーダは使用しない。IC メモリは電子回路部の基板上に直接実装されており、装置の小型化、省電力化、信頼性の向上が図られている。

1データレコードのデータには、データをバイナリで記憶した場合、時刻(6Byte)、10ch 分のA/D変換データ(2x10Byte)、方位、傾斜(x、y)を含め 32 バイトのメモリが必要になる。本装置は、1MB のメモリを実装しており、24,000 回の測定記録の収録に必要な 750KB 以上の容量を有する。

SRAM は小型ニッカド電池を内蔵しているため、メモリ内のデータは主電源が低下あるいは切断した後も保持される。

本装置の制御は RS232C 経由での PC からの制御コマンドによって行う。想定されるコマンドを以下に示す。

- ・時刻設定
- ・記録インターバル設定

- ・ステータス出力(内部時計、設定インターバル、メモリ使用状況)
- ・メモリデータクリア
- ・A/D 変換値の表示(ひずみ 9ch、温度 1ch)
- ・記録時の RS232C 出力 ON/OFF 設定(音響通信使用時)
- ・記録開始
- ・記録終了
- ・メンテナンスコマンド

3.3.5 電源

本装置の電源はエネルギー密度の高いリチウム電池(3 V、5 Ah)を使用する。1 個の大きさは、直径 32 mm、長さ 50 mm である。このリチウム電池を直列で3本使用することとして、9V の電圧と 15Ah の容量が確保できる。これにより、記録間隔を 30 秒と仮定した場合、メモリ容量一杯の 24,000 回分のデータを取り終える 8.3 日後までの電源が確保される。

本装置はスタンバイ時にも電流を消費するために、測定間隔がこれより大きくなる場合、記録可能なデータ数が 24,000 回より少なくなる。しかし、今回想定されている運用形態においては、十分な容量である。

3.4 プローブ運搬装置

装置全体を測定孔の中心に保持し、確実に SI セルを直径 ϕ 20mm のパイロット孔に挿入するために、以下の様な運搬装置および測定手順を提案する。

3.4.1 運搬装置の構成

プローブ運搬装置は、基本的にワイヤーライン工法のインナーチューブをプローブ運搬用に改造したものをを用いる。

ワイヤーライン工法は、アウターチューブの先端に付いたドリルビットによって岩盤を掘削し、内側に設置されたインナーチューブ内に岩石コアサンプルを格納する、ボーリング孔における岩石コアサンプリングのための方法である。ワイヤーライン工法では、インナーチューブの長さは約 3m であり、3m 掘削する毎にインナーチューブは岩石コアサンプルで一杯になる。そのため、その度にワイヤーでインナーチューブは地上まで引上げられ、岩石コアサンプルが回収されることになる。

今回提案するプローブの運搬装置は 1) ワイヤーライン工法のインナーチューブ、2) プローブ切離しアタッチメント、および 3) アッパーセルリテーナーから構成される(図 3-4-1)。

プローブ切離しアタッチメントはプローブをインナーチューブに固定するための特殊治具である。プローブ切離しアタッチメントは、ピン、ピン固定リング、ピン固定リングケースから構成され、SI 孔の先端に装着されたピストンが完全に収縮した後に、アウターチューブの自重（インナーチューブは、上下方向にはアウターチューブに固定されており、上方にインナーチューブだけせり上がることはない）でピンが折れ、プローブ運搬装置（インナーチューブおよびプローブ切離しアタッチメント）から、プローブが切離される。ピン切断による測定機器の切離しは、孔内地震計の設置等ですでに実績がある方法であるが、ピンの切断強度等に関しては、製作段階において、最適なものを選択する必要がある。

アップパーセルリテーナー（図 3-4-1 の青色の部分）は、プローブのアップパーセルとインナーチューブのクリアランスを調整し、プローブをボーリング孔の中心で鉛直に保つ役割を果たす。アップパーセルリテーナーはアップパーセルに被せる形で使用し、その外径は使用するインナーチューブの内径に合わせて製作する。これにより径の異なるボーリング孔での測定が可能になる。アップパーセルリテーナーの下部には切離しピン用の穴が設けられる。アップパーセルリテーナーの長さは、最大で約 3m（インナーチューブの長さ）まで延長することが可能であり、以下の測定手順の⑤方位計測で述べるように、安全にアウターチューブを孔底から 3m 引上げることが可能になる。

3.4.2 測定手順（図 3-4-2 参照）

① プローブのインナーチューブへの挿入

はじめに、プローブをワイヤーライン工法で用いるインナーチューブに挿入する。続いて、ワイヤーライン工法でコアリフターケースが装着される部分に、プローブ固定用の特殊治具（以後、プローブ切離しアタッチメントと呼ぶ）を装着する。プローブ切離しアタッチメントは、プローブ固定ピン、ピン固定リング、ピン固定リングケースから構成され、プローブの先端部（正確にはアップパーセル下部）を測定孔の中心に固定し、プローブの孔底着底時にインナーチューブからプローブを切離す方法を提供する。また、アップパーセルに装着したアップパーセルリテーナーはプローブの傾斜を抑制する。アップパーセルリテーナーは測定の行なわれる孔の径に合わせて製作し、これを交換することで、異なる径の測定孔での本装置の使用を可能にする。

② プローブの投下

インナーチューブに固定されたプローブをフリーフォール、またはワイヤーにて孔底まで下ろす。その際、あらかじめアウターチューブを数 m 程孔底より引上げておく。ワイヤーライン工法では、インナーチューブはビットの直前で止まるように設計されている。また、インナーチューブには撚り戻し機構が付いており、アウターチューブの回転時に

も、インナーチューブが回転することはない。

③ SI セルのパイロット孔への挿入

アウターチューブを徐々に降下させ、グリューカプセルと SI セルをパイロット孔に挿入する。グリューカプセルのピストンが作動し、接着剤がパイロット孔内に充填される。さらにアウターチューブを降下させるとプローブ切離しアタッチメントのプローブ固定ピンが切断され、プローブがインナーチューブから切離される。この状態で接着剤が完全に固化するまで待つ。

④ インナーチューブの引上げ

ワイヤーラインを降し、インナーチューブを地上まで引上げる。音響通信を行う場合には、この時点で通信が可能になる。

⑤ 方位計測

アウターチューブは強い磁化を持っており、方位計測データに誤差を与える可能性がある。そのため、正確な方位データを得るために、アウターチューブを方位計に影響を及ぼさない程度まで引上げる。しかし、インナーチューブに比べて、アウターチューブの肉厚は大きいので、これをアップパーセルよりも上まで引上げてしまうと、再挿入の際にアップパーセルに当てたり、場合によっては、SI セルに無理な力を及ぼす可能性がある。このため、アウターチューブの引上げはアップパーセルの上端以下に抑える必要がある。

今回、プローブの運搬に用いられるインナーチューブの長さは約 3m あり、必要に応じて、アップパーセルリテーナーの長さを、その長さまで延長することができる。その結果、アウターチューブを方位計からより遠くに離すことができ、かつ、安全に再挿入ができる(図 3-4-2 の手順 5)。

いずれにしても、事前に使用ビット、チューブ類の磁化の測定を行い、その影響を見積もる必要がある。非常に強い磁場が生じることが判明した場合には、ビットやチューブの消磁や、強磁性を持たない材質によるビットやチューブの開発を考慮しなければならない。

⑥ オーバーコアリング

再びアウターチューブを孔底まで降した後、コアキャッチャーを装着したインナーチューブをフリーフォールにて降下させる。その後ビットを回転させオーバーコアリングを行う。オーバーコアリングはパイロット孔よりも十分深く行う。

⑦ コアの回収

ワイヤーラインを降し、インナーチューブを引上げる。オーバーコアリングされたコアは、コアキャッチャーにより切断され、プローブごと地上まで引上げられる。

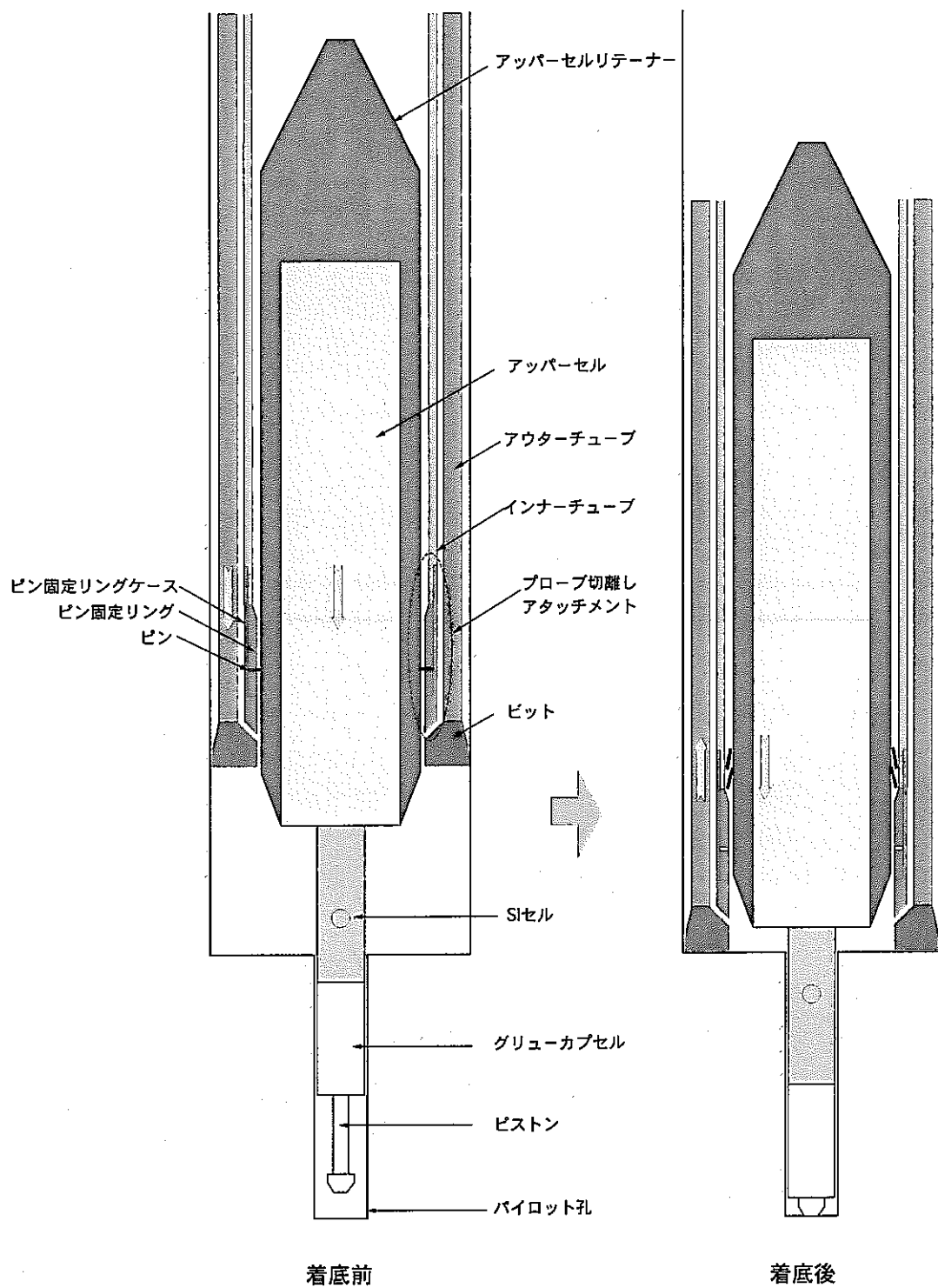
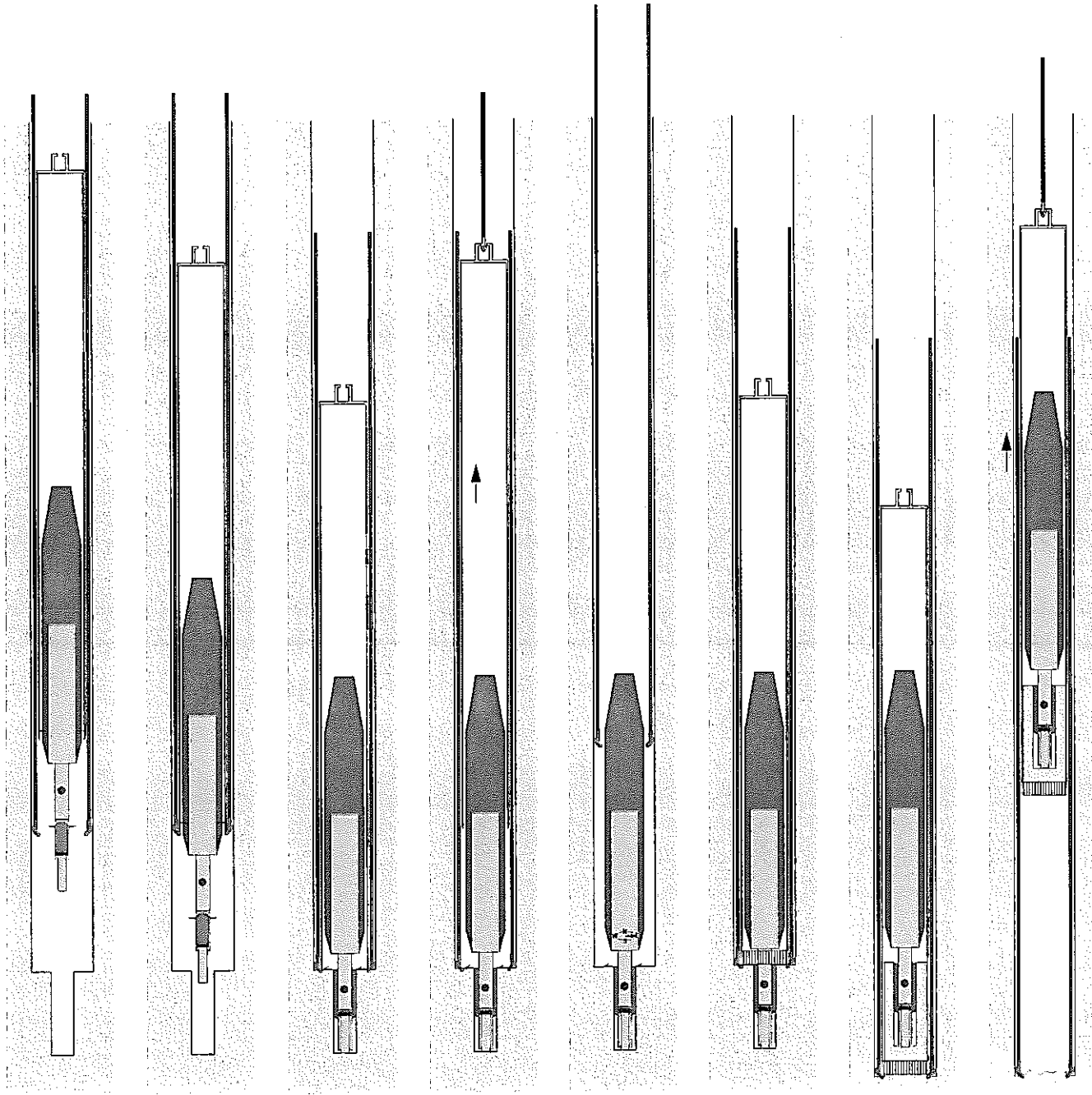


図 3-4-1 プローブ切離し装置



1
 アウターチューブを孔底より数メートル引揚げた状態で、コアリフターケースをプローブ切離しタッチメントに交換したインナーチューブに格納されたプローブを降下させる。

2
 インナーチューブとプローブはアウターチューブ先端直前で固定される(図では省略しているが、ワイヤーライン工法の構造上、インナーチューブはアウターチューブから完全に切離され、アウターチューブが回転中も地面に対して固定されている)...

3
 アウターチューブを孔底まで徐々に降下させる。アウターチューブ着底前にピストンがパイロット孔孔底に着底し接着剤をパイロット孔内押し込める。その後、プローブ切離しタッチメントのピンが折れ、プローブがインナーチューブより切離される。

4
 接着剤硬化後、プローブ切離しタッチメント付のインナーチューブを地上まで引上げる。(音響通信を行う場合には、この状態で初めて、通信可能となる。)

5
 アウターチューブが持つ磁化の影響を避けるため、アウターチューブをアッパーセルリテナー(青色の部分)の長さを越えない範囲(1~3m程度)で孔底より引上げ、方位計測を行う。

6
 アウターチューブを再度孔底まで降下させ、その後、コアリフターを装着したインナーチューブを降下させる。

7
 オーバーコアリングを行う。

8
 コアを切断し、プローブごとインナーチューブを引上げる。

図 3-4-2 測定手順

4. 初期応力測定システムに関する調査

4.1 接着剤の適用性

本研究で用いる接着剤の性質としては、空隙を完全に充填できるような高い流動性が必要であり、かつプローブが測定位置に到達する時間の関係から、固化開始までの時間は1時間程度に調整できる必要がある。

接着剤の種類には

- ①天然高分子系
- ②半合成高分子系
- ③合成高分子系

がある。その中で、高弾性であるのは合成高分子系である。また、接着剤として良く使われるのは、フェノール系、エポキシ系、不飽和ポリエステル系、アクリル系である。アクリル系以外は熱硬化性樹脂であるのに対し、アクリルは熱可塑性樹脂である。測定用プローブを設置する位置付近の地中温度は不明であるが、高温において可塑化するアクリル系は温度に対する検討が必要である。また、エポキシ系は硬化時の収縮割合が小さいことが特徴であり、初期応力を変動させない長所がある。

諸外国の報告によればアクリル系レジンをを用いている例も多いが、日本国内での販売は現調査段階においては見つかっていない。ここではエポキシ系レジンについてのみ報告する。

ここでの検討項目は、成分、混合比、硬化時間などである。

4.1.1 調査対象品目

- (A) 長瀬チバ株式会社
 - a. アラルダイト CY230+HY956
- (B) 国際ケミカル株式会社
 - b. プラスセメント CEP-9
 - c. プラスセメント CEP-10
 - d. 積層用プラスセメント RT-400
- (C) コニシ株式会社
 - e. 水中接着剤 ボンド E380
 - f. 短期硬化汎用エポキシ接着剤 E
- (D) ケミカルアンカー
 - g. サンレジンカプセル R

4.1.2 接着剤の仕様比較

表 4-1-1 接着剤の仕様比較

項目	a. CY230	b. CEP-9	c. CEP-10	d. RT-400	e. E380	f. ボンド E	g. サンレジン R
材質	エポキシ	エポキシ	エポキシ	エポキシ	エポキシ	エポキシ	不飽和ポ リエステル
混合比 (重量)	100:20	100:45	100:30	100:20	100:100	100:100	2液 破碎混合
粘度 (mPa・s)	1000	600	800	600	パテ状	20000	骨材入り
硬化時間 (20℃)	1day	1day	1day	1day	12hr	2days	0.5hr
作業時間	45min	2hr	2hr	2hr	1hr	1hr	100days
硬化温度 (℃)	20-60	5-80	5-110	5-80	0-50	-20-110	-5-常温
比重	1.13	1.2	1.2	1.2	1.6	1.1	---
引張強度 (kgf/mm ²)	4-6	6	4	6	3	1.4	0.4
圧縮強度 (kgf/mm ²)	6-7	7	12	7	6	-----	-----
耐水性	○	○	○	△	○	○	○

※作業時間:接着剤を混ぜてから、型枠に流し込める程度の粘性を保持できる時間

上記品目に対して比較する。

まず g.は硬化時間は短いですが、カプセルを破碎して接着剤を抽出しなければならず、破碎機構を開発する必要があることから、現時点では比較の対象外とする。

f.は汎用性が高く水中での接着性も良好であるが、粘性が高すぎ、地下孔内での抽出方法が困難と考えられ、これも対象外とする。

e.は水中での接着性に優れているが、パテ状であるためカプセルからの抽出が困難であり、充填しにくい欠点が生じたことから、ここでは不採用とした。

d.は混合時の発熱が高く、プローブに局所的熱変形の影響を与える可能性があり、ここでは不採用にした。

b.、c.は粘性も低くカプセルからの抽出もしやすいが、常温で硬化した後の弾性係数が1週間程度経過しないと所定の硬さが得られない(ただし、薄膜状での使用では早まる。)ため、今回は作業効率の面から避けることにした。

a. は粘性も低く、カプセルからの抽出もしやすく、硬化時間も常温であれば1日所定の硬さを得ることができる。また、硬化後はSIセルと同じ材質となるため検討の対象とし、

次項の耐水性の実験を行った。ただし、a.は、温度により作業時間が変化するので注意をする必要はある。すなわち、カタログでは 20℃程度の室温雰囲気中で作業時間は約 45 分と表示されているが、実際に使用してみると 1 時間程度まで流動性があった。また、室温が 30℃になると作業時間は 30 分程度であるが、10℃程度の室温になると 2 時間になる。したがって、実際に使用する際には使用する位置の温度を測定して対処する必要がある。

4.1.3 耐水性適用実験

(1) 実験方法

写真フィルムのケース(直径 30mm 長さ 50mm 程度の円筒、以下 FC と略称)を用いて、室温にて以下のような各種環境条件において実験した。

- (a)大気中で接着剤を FC に注入(標準の固化)
- (b)大気中にて接着剤を FC に注入後、水を注入
- (c)水中に FC を沈め、接着剤を FC に注入
- (d)プローブと同剤のパイプ状のコア(擬似 SI セル(図参照))を製作し水中の FC 内に沈め、水中にて注射器により抽出
- (f)水中の FC に軟鋼丸棒を入れた状態で、接着剤を注入

(2) 実験結果

実験結果をまとめると以下のようなものである。

- (a) 透明に固化した。
- (b) 水面のみ乳化、白濁したが、内部は透明に固化した。
- (c) (b)と同様に、水面のみ乳化、白濁した。ただし、フィルムケースと接する面は薬品処理のためか硬化が遅かったが、白濁はしなかった。
- (d) 水面のみ乳化、白濁したが、内部は透明で底面から見るとコアとの境界も乳化せず、クリアだった。よって、完全に固化していると思わせる。
- (e) 水面のみ乳化、白濁したが、内部は透明で底面から見ると鉄のまわりも白濁した部分はなく、接着している。

以上の結果により水中でも硬化することが判明した。また、その性状は大気中での硬化と同様な性状にあるものと考えられる。メーカーの資料では 20℃で 48 時間後の含水割合は 0.6%という報告もある。ただし、大気中硬化と水中硬化の機械的性質の厳密な差異については諸種の計測装置を用いて測定する必要があることを付記する。上述の予備実験により、今回の確認実験での接着剤はこのエポキシ系接着剤(アラルダイト)を使用することとした。

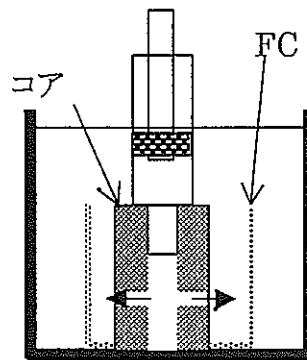


図 4-1-1 水中接着性実験

4.2 ひずみゲージとレコーダーとの接続方法

本装置では、ひずみゲージは SI セル中に完全にモールドされる。さらに、SI セルはアップパーセル耐圧容器に直接接続される。接続部の遮水は O リングによる密封による。3.3.3項の(3)で記したように、O リングは、開閉・脱着を行う接合面における最も信頼性が高い密封方式で、温度的には -60°C ～ 200°C 、圧力的には 100MPa(水深約 10,000m 相当)程度またはこれ以上までの広い範囲で使用が可能である¹⁾。したがって、ひずみゲージとレコーダの電気的な接続は、通常のコネクタ接続で十分である。本装置においては、ひずみデータは A/D 変換後に IC メモリにより収録をされるので、ひずみゲージの信号線は電子回路基板のコネクタで接続される。SI セルとアップパーセルの接続の詳細は3章を参照されたい。

1) 日刊工業新聞社刊、「機械設計便覧」, 1974

4.3 レコーダーの小型化

データを記録する方法としては、磁気を利用したものや光を利用したもの、半導体を利用したものがある。このうち半導体メモリーは集積回路技術により記憶機能回路を IC 化したものであり、他のものに比べ非常に小型で大量のデータを記録できる。本装置では記録するための装置としてフラッシュ IC メモリ(電源を切っても内容が保存される不揮発性メモリー)を用いる。IC メモリは電子回路部の基板の上に直接実装されており、装置の小型化、省電力化、信頼性の向上が図られている。IC メモリを含む電子回路基板は長さ 250mm、幅 36mm で製作可能で、この他に方位傾斜計および電池を含めても、必要なアップパーセルの長さ(必要格納長)は 800mm 程度に抑えることができる(図 4-3-1)。当然、アップパーセルの外径は $\phi 45\text{mm}$ とする。

4.4 音響データ通信装置

地上からの水中音響データ通信により、装置の各種制御や作動状況の確認、さらにはリアルタイムでのデータの送受信が可能になる。この技術は電波による通信が難しい、海中での通信手段として広く使われている技術である。しかし、ボーリング孔での実績が無く、残響や複雑な波線の影響が考えられることから、1000m という比較的長距離の通信には、それに先立つ各種の実験が必要である。今回の設計には音響データ通信装置を含んでいない。しかし、本通信装置の実現により、長大なケーブルを用いることなく、リアルタイムモニタが可能になり、測定における信頼性も格段に向上する。現在、事前試験では内径φ100mm の塩ビパイプを挿入したボーリング孔で距離 27m までの音響による通信が確認されている。ただし、現段階では、試験データも少なく、使用した機器の調整も十分とは言えない状態である。今後、使用する周波数や孔壁の材質、孔径等の音響的な環境を考慮し、最大使用可能距離や信頼性を調査する必要がある。

5. 確認実験

5.1 実験の概要

確認実験は、本設計業務の中でホアホール底部のパイロット孔内に測定用プローブを挿入して接着・固定させ、オーバーコアリング作業によりひずみを測定するという一連の作業が可能であることを確認することを目的として行われた。

実験は、群馬高専の実験室内にて、オーバーコアリング実験と水中接着実験の2種類の実験を行った。

オーバーコアリング実験は、供試体に一軸載荷する装置を製作し、供試体中心のパイロット孔内に SI セルを埋設して供試体と一体化させ、オーバーコアリング作業時にひずみ変化を測定した。

また、水中接着実験はアクリル製のメスシリンダー内に水を満たし、その中に擬似パイロット孔をセッし、その中に SI セルを挿入し、状況を観察した。

5.2 オーバーコアリング実験

5.2.1 概要

供試体(花崗岩)に直径 22mm の貫通孔(パイロット孔)を設け、プローブを埋め込み、オーバーコアリングを行い、その過程中的ひずみを測定した。

供試体の寸法は 300×300×150mm とした。反力枠は 150mm 角の H 鋼を使用し、直径 28mm 軟鋼丸棒で補強した。載荷は一軸状態で油圧ジャッキ容量 30ton を用い、25ton を保持するよう随時調節するものとした。(ただし、オーバーコアリング中の圧力の低下は見られなかった。)このときの載荷圧は 55.5kgf/cm²であった。

コアドリルビットは内径 68mm のものを用い、削孔深さ 5mm 毎にひずみを測定した。オーバーコアリング中のひずみはモニタ画面で随時確認し、ひずみの変化もグラフによって確認しながら実施した。

実験中の主な着目は、オーバーコアリングによって圧縮面内のひずみである 1 面と 2 面の 2ch のひずみの変化状況であった。

5.2.2 実験装置

(1) SI セル

表 5-2-1 SI セル仕様

名称	YUGCT-3D SI cell
寸法	直径 18mm 長さ 130mm
ひずみゲージ	3 軸ロゼットひずみゲージ 東京測器製 FRA5-11 120Ωタイプ ゲージファクタ 2.1 (三角柱コア 3 面貼付)
温度計	温度ゲージ TFL-8
マトリックス	エポキシ樹脂材 (アラルダイト CY230)

(2) 測定機器

表 5-2-2 測定機器仕様

ひずみ計測器	共和電業(株) 静ひずみ計測器 UCAM-20PC システム 30 点自動切替スイッチボックス使用
ひずみ計測点	SI セル内計 9 点 花崗岩両側面クロスゲージ計 4 点
温度	SI セル内 1 点

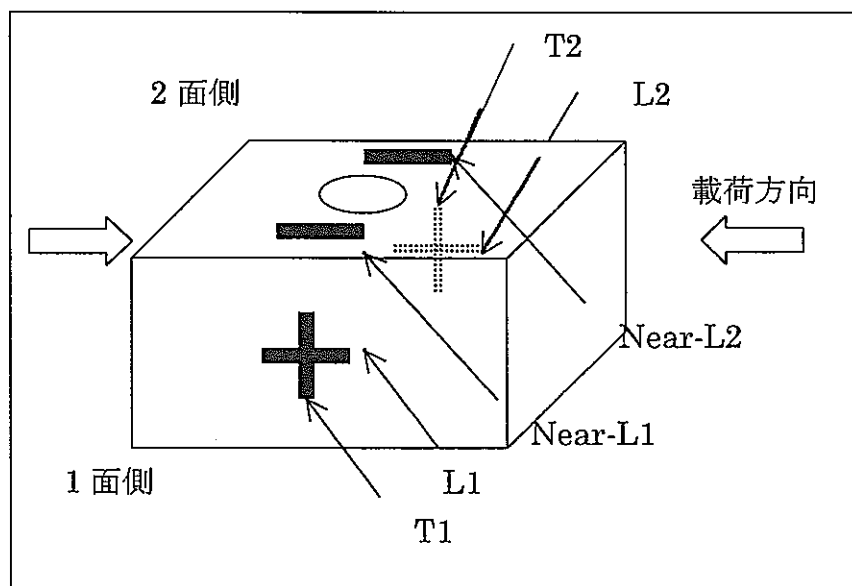


図 5-2-1 供試体のひずみゲージ配置模式図

(3) 供試体

表 5-2-3 供試体仕様

材料	花崗岩
寸法	300mm×300mm×150mm
パイロットホール	直径 22mm

(4) 載荷諸元

表 5-2-4 載荷諸元

負荷方式	1 軸載荷
負荷装置	油圧ジャッキ容量 30ton
載荷荷重	25ton (載荷応力 55.5kgf/cm ²)

(5) 接着方法

表 5-2-5 接着剤と接着手順

接着剤	長瀬チバ製アラルダイト (主剤 CY230 硬化材 HY956)
手順	① テープでパイロット孔背面を塞ぐ。 ② SI セルの上端と下端に角度 120 度毎に 5mm 角 3mm 厚のスポンジを 3 枚貼付し、パイロット孔の中心に SI セルが設置されるようにする。 ③ ゲージの方位、中心位置を目視で確認して挿入する。 ④ 供試体にセルの方位面(1、2、3面)をマーキングしておく。 ⑤ 接着剤を上から流し込む。 ⑥ 硬化時間は室温(約 20℃)にて 48 時間とする。

(6) オーバーコアリング

表 5-2-6 オーバーコアリング機器仕様

コアドリル (可搬式)	渋谷商事(株)ブルービット 外径 75mm 内径 68mm 長さ約 300mm
穿孔能力	約 5mm /min

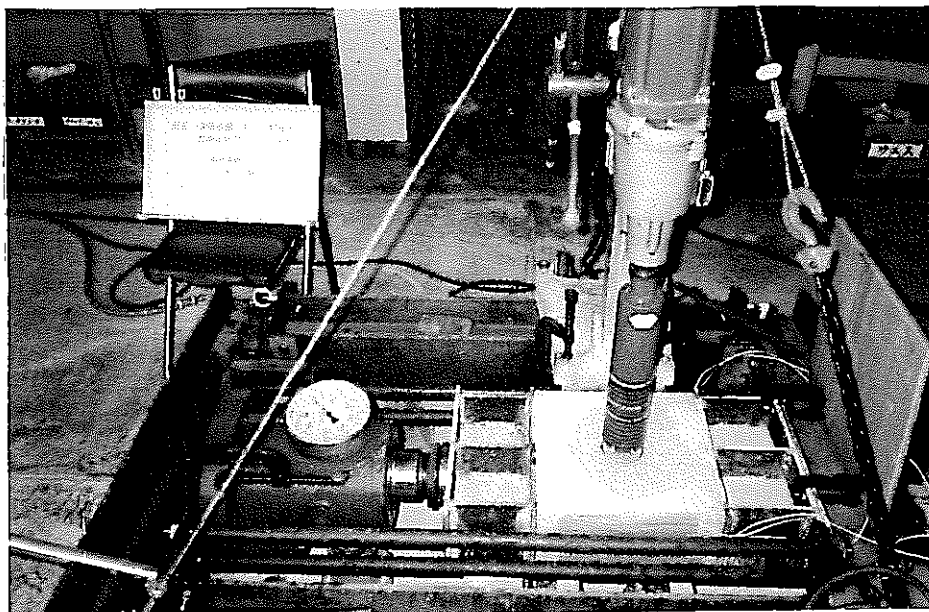


写真 5-2-1 オーバーコアリング状況

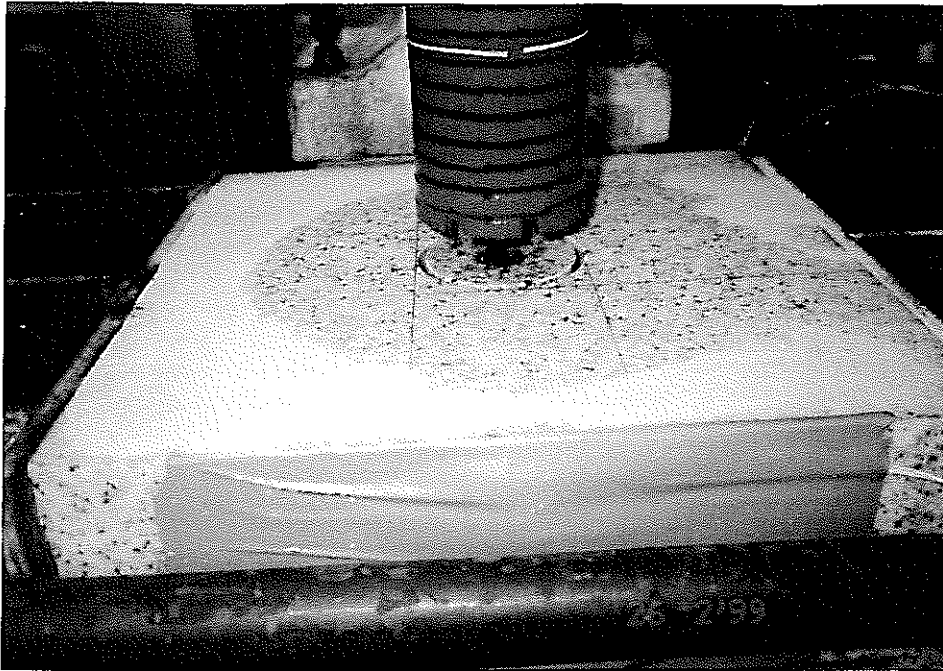


写真 5-2-2 (a) オーバーコア部分拡大図

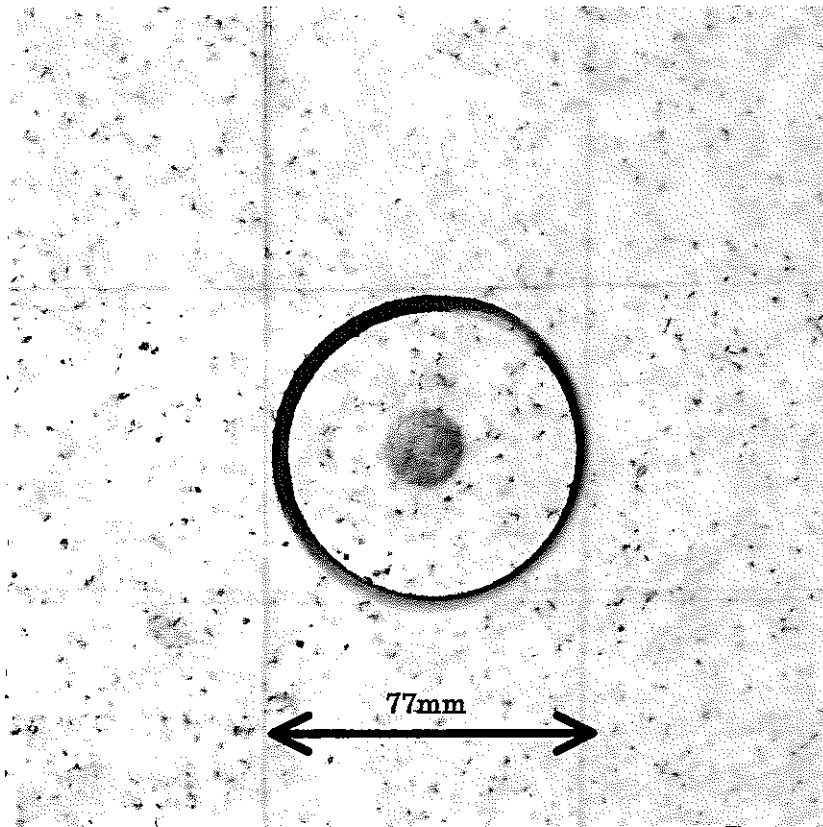


写真 5-2-2 (b) オーバーコア部分拡大図

5.2.3 実験手順

(1) SI セル埋め込み

無負荷状態で SI セルを埋設し、接着剤を 48 時間かけて硬化させる。

(2) 載荷

油圧ジャッキにより 25ton まで 1 軸方向から載荷する。応力に換算すると、約 55.5kgf/cm^2 である。

1 分ごとに 5ton ずつ載荷し、そのときのひずみを計測する。

25ton まで達したのち、油圧ジャッキの荷重計、花崗岩に貼付したひずみゲージが安定していることを確認し、オーバーコアリングを開始する。

(3) オーバーコアリング

オーバーコアリングは連続的に行う。

オーバーコアリングが削孔深さ 5mm 進む毎にひずみと温度を計測する。

ドリルを背面まで貫通させるとセルとのケーブルが切れてしまうため、オーバーコアリングの深さは 145mm までとする。145mm に達した後、その後のひずみ変化を確認する。

(4) グラフ整理

オーバーコアリング時のひずみ、温度の変化はモニタ上でリアルタイムで確認できる。また、グラフを表示させることにより、ひずみの解放の経緯を目視により確認できるようにした。

(5) 切断および圧裂試験

オーバーコアリング終了後、コアを切断しコアと SI セルの接着状況を観察した。また、別なコアを用いて圧裂試験を実施した。

5.2.4 実験結果

(1) 載荷時のひずみ変化

載荷時のひずみの変化を示す。

グラフ中のキャプションは前述のゲージ配置である(図 5-2-2, 図 5-2-3)。

図 5-2-4 は応力-ひずみの関係である。

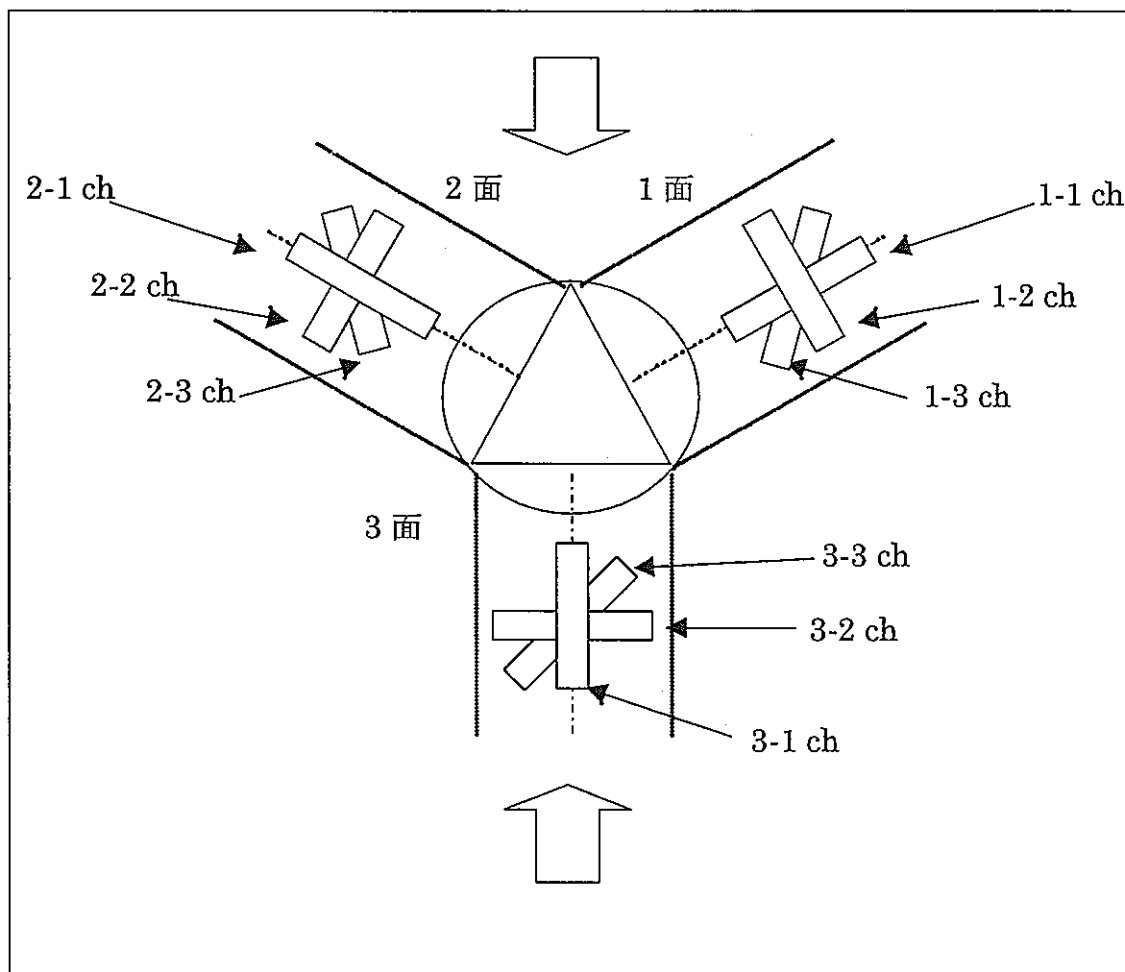


図 5-2-2 SI セル内のゲージ配置模式

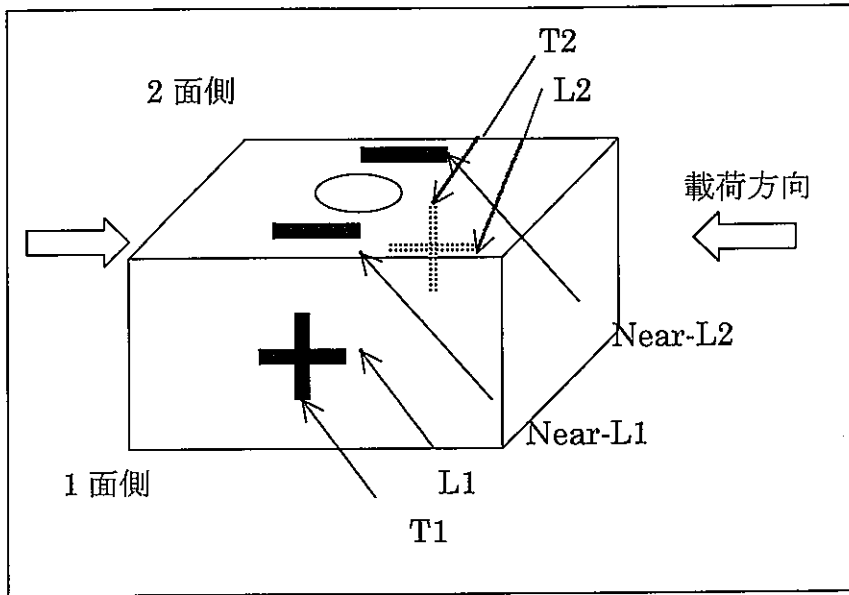


図 5-2-3 花崗岩のゲージ貼付配置図

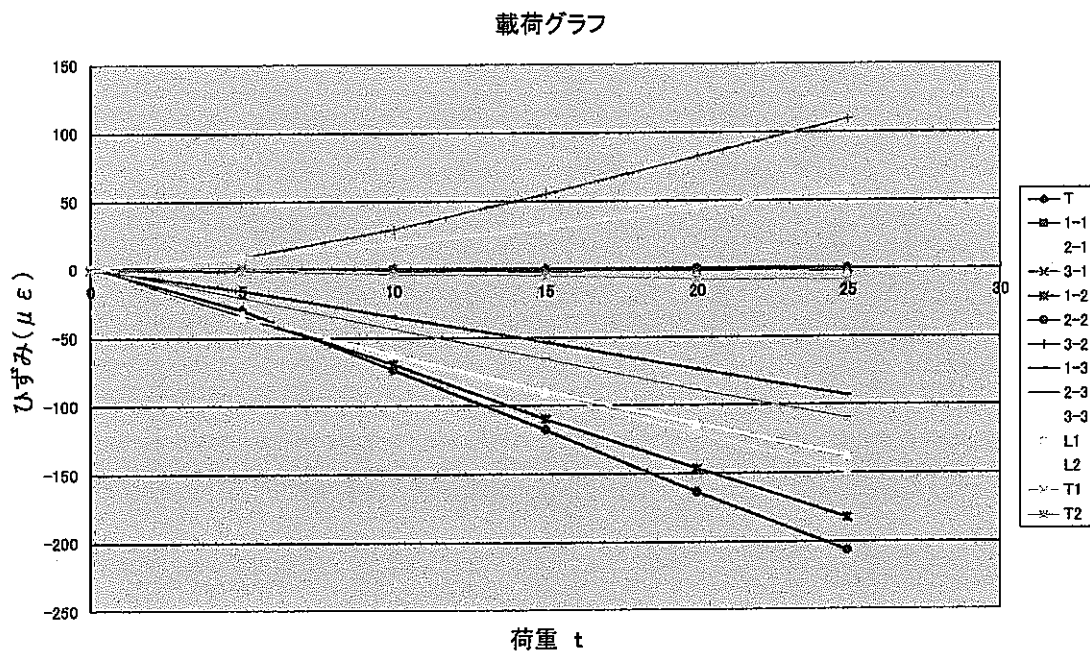


図 5-2-4 载荷応力とひずみの関係

図の縦軸がひずみを示し、横軸が応力(kgf/cm²)である。縦軸の+軸が引張ひずみを示し-軸が圧縮を示している。

载荷によって花崗岩の側面に貼った縦ひずみ L1,L2 はほぼ線形に圧縮ひずみが生じていることが分かる。よって、弾性範囲内のひずみであるため、応力解放によって弾性回復ひずみが検出できることが予想された。55.5kgf/cm²において、供試体側面の縦ひずみ(L1,L2)の値は-149 $\mu\epsilon$ と-138 $\mu\epsilon$ であり、左右の偏載は8%程度である。

セル内部のひずみを見ると、セルの軸直角方向のゲージである1chは、-1~-4 $\mu\epsilon$ 程度であり、どの面もほぼ等しく0に近い値を示している。面内ひずみを検出する2chは1,2面は圧縮を示し、3面は引張を示した。1面(-183 $\mu\epsilon$)と2面(-207 $\mu\epsilon$)の差異は16%程度であった。

また、3chのせん断方向のひずみは1chと2chの間の値をとっていることが分かった。

(2) オーバーコアリング時のひずみ計測

オーバーコアリング時に計測したひずみの変化を図5-2-5に示す。横軸がオーバーコアリングの深さであり、縦軸がひずみである。図中のキャプションは前述の载荷グラフと同一である。グラフの初期点は载荷によって生じたひずみであるため、同一にはならない。

全体の傾向として、SIセル内のゲージ位置に相当する削孔深さ75mm近傍でひずみが大きく変化していることが分かる。

1chはどの面もほぼ同一の傾向を示し、深さ30~40mm程度から引張ひずみが生じ始め、ゲージ位置(75mm)をピークにひずみが減少している。ただし、载荷前の初期値には戻っていない。

2chのうち1,2面はほぼ同様な軌跡をたどっており、ゲージ位置より10mm程度浅いところ(削孔深さ約65mm)から圧縮ひずみが減少し始めていることがわかる。ゲージのベース長さが11mmであるが、直接ゲージに影響を及ぼすのではなく、ゲージ先端より約10mm前方からひずみが解放され始めていることになる。

3chも2ch同様1,2面の挙動は近似している。また、3chは全ての面で1,2chの曲線の間接値をとっていることが分かる。

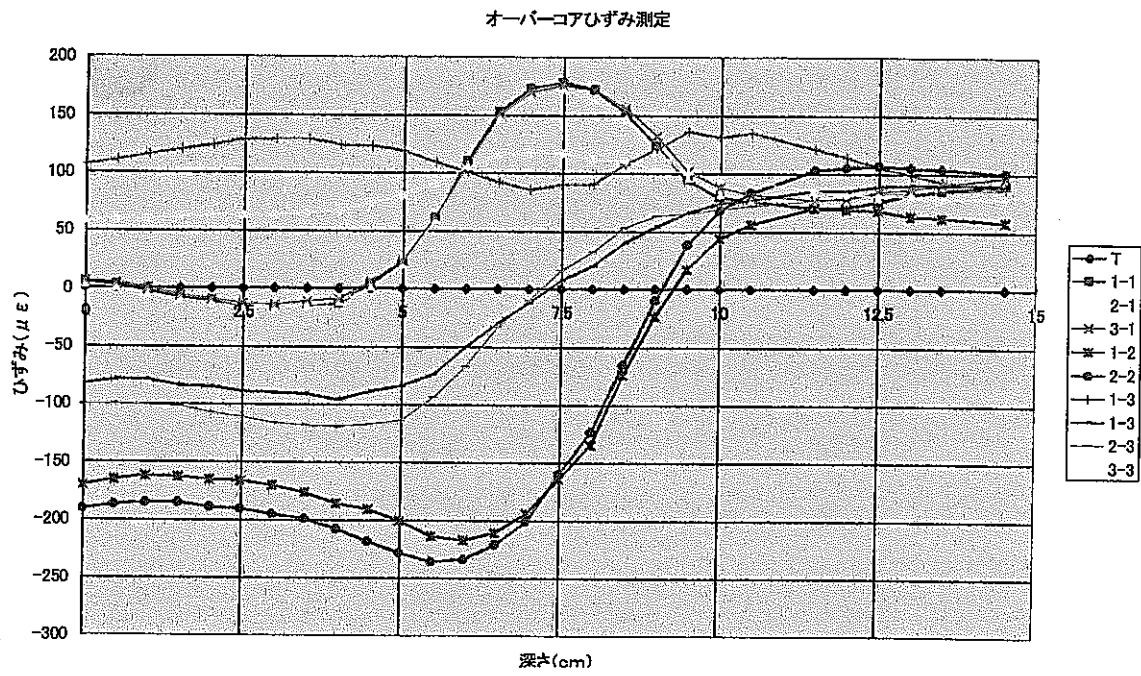


図 5-2-5 オーバーコアリングによるひずみ変化

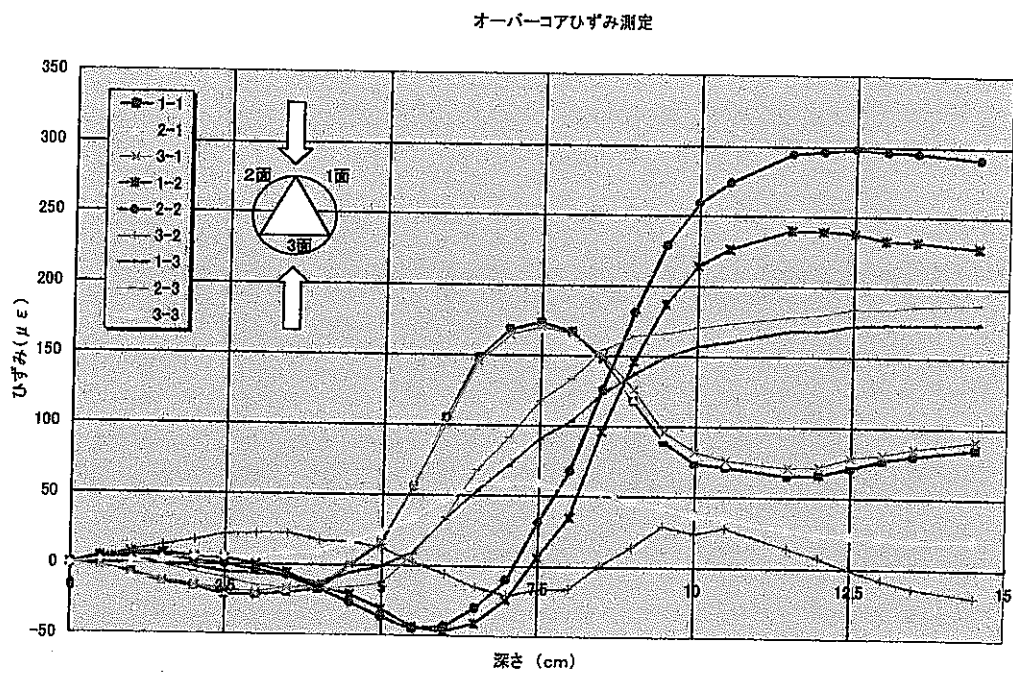


図 5-2-6 オーバーコアリングによる差分ひずみ変化

(3) ひずみ解放

図 5-2-5 のデータでは応力解放の値が不明瞭であるため、25ton 荷重時点でのひずみ量をそれぞれ初期値として 0 にした結果を図 5-2-6 に示す。また、チャンネル毎のグラフを図 5-2-7(a)~(c)にそれぞれ分けて示す。

図 5-2-7(a)の 1ch は当初ひずみは圧縮を示すが、35mm 付近から引っ張りとなりゲージ位置の 75mm でピークの値をとりその値は $170 \mu \epsilon$ 程度となっている。

図 5-2-7(b)の 2ch の 1,2 面はゲージ位置の 10mm 程度手前から解放され始め、最終的には $250 \mu \epsilon$ 以上解放されたことになる。

他の ch の挙動でも同様であるが、上述のようにコアリングが進行するにつれひずみは荷重時でのひずみ変化以上の変化を示している。コアリングの進行によりゲージ位置周辺の形状が変化し、3次元的な複雑な応力変化によるものと判断される。

また、今回は 1 軸荷重によってオーバーコアリングしたため、1ch の軸方向の 3 次元的な応力が小さかったにもかかわらずオーバーコアリング終了後においても、 $80 \sim 90 \mu \epsilon$ のひずみが残留している。他の ch でも最終ひずみとして $60 \sim 100 \mu \epsilon$ を示している。今回の確認実験においては供試体を荷重状態とする前に SI セルを挿入・固定している。その後、荷重を行いオーバーコアリングを行っている。このため、SI セルの応力履歴は、圧縮→除荷となったため、エポキシ樹脂の残留ひずみが現れたものと推定される。実際の測定においては、除荷時の弾性挙動のみとなるためこのような誤差は生じないものと考えられる。

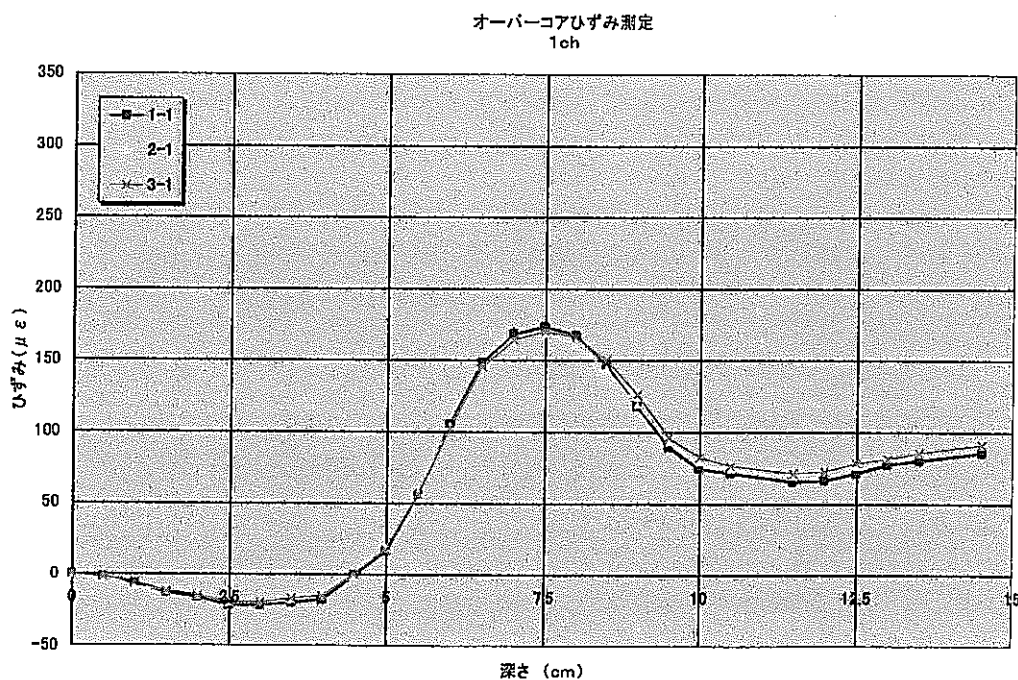


図 5-2-7 (a) オーバーコアリングによる差分ひずみ 1ch

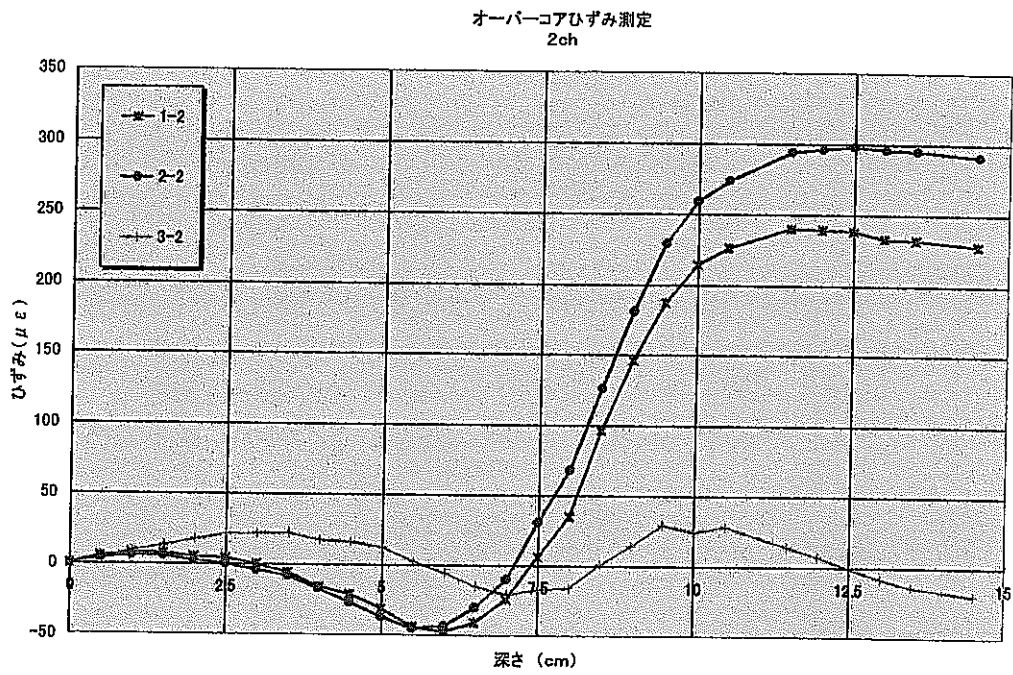


図 5-2-7 (b) オーバーコアリングによる差分ひずみ 2ch

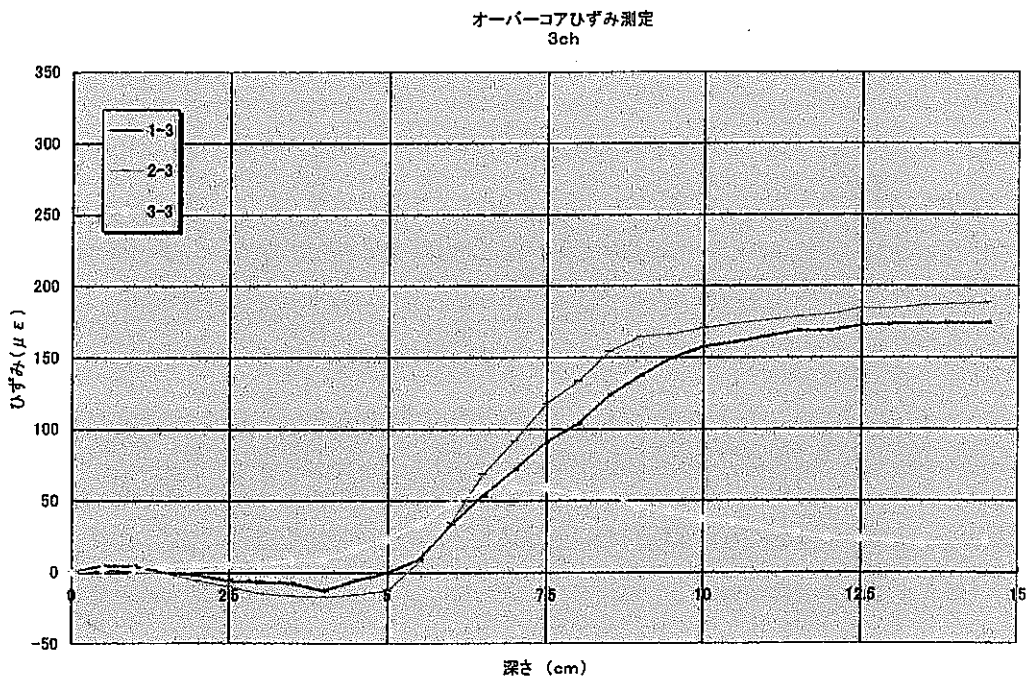


図 5-2-7 (c) オーバーコアリングによる差分ひずみ 3ch

(4) コア断面観察

オーバーコアリング後に縦断面を切断観察した写真を写真 5-11 に示す。

切断はコンクリートカッターを使用したため、断面にグリスを塗布して写真撮影している。その結果、セルと花崗岩の間には剥離したような面はなく、一様に接着されていることが確認された。コア内部に剥離したように観察されるのは、断面から生じているため、カッティングによって生じた振動により剥離したもの推測され、接着状態には問題ないと考えられる。

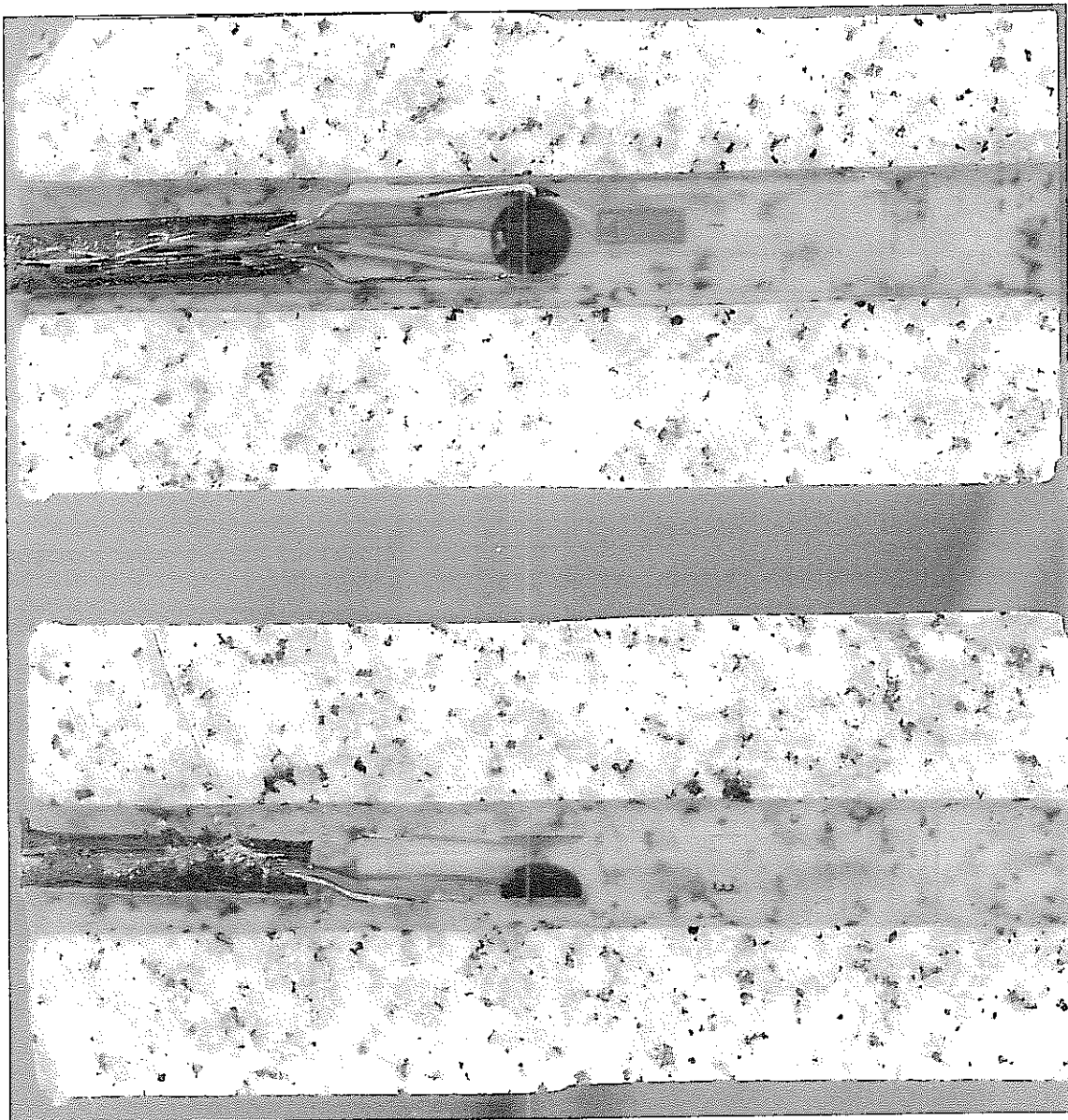


写真 5-2-1 オーバーコア断面

(5) 圧裂試験

オーバーコア供試体を用いて、圧裂試験を実施した。試験結果を図-5-2-8 に示す。載荷中のひずみ変化はほぼ直線的に変化していることが分かる。SI セルと岩盤との接着が良好であることを示す。破壊強度は 3.72 t であった。

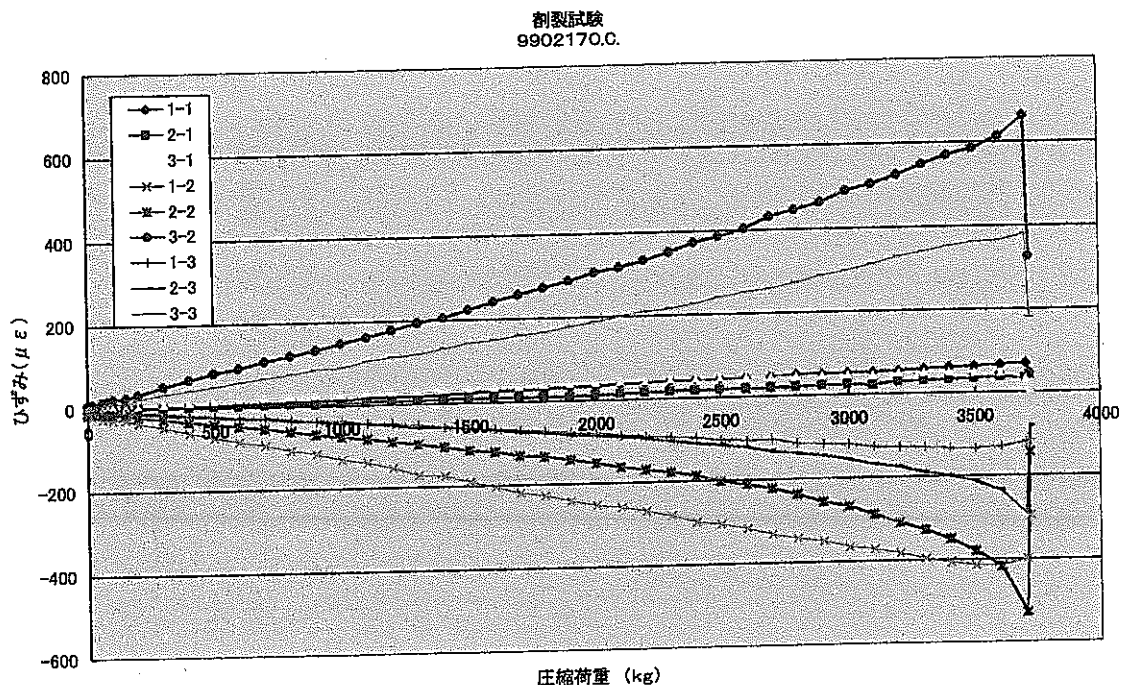


図 5-2-8 圧裂試験結果

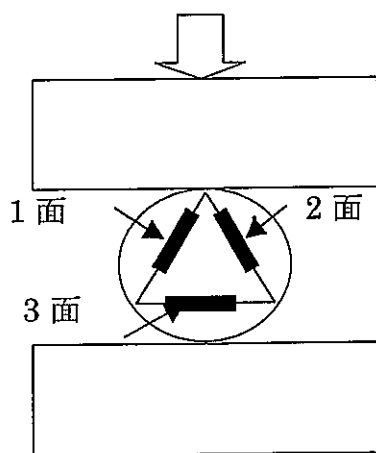


図 5-2-9 圧裂試験模式図

5.3 水中接着実験

5.3.1 概要

アクリル製水槽に擬似パイロット孔として内径 21mm 長さ 500mm のアクリルパイプを沈め、接着剤入りグリューカプセルをプローブに付けて挿入し、着底後、接着剤の抽出により水中接着の状況を観察した。

水槽は高さ 800mm、直径 100mm (内径 90mm) で、擬似パイロット孔の底は鉄板で接着し自立させ、底からの水の出入りは出来ないよう密封してある。

擬似パイロット孔中にあらかじめ水が入っているため、

- (a) カプセルが着底するまでに、パイロット孔に入っていた水は上部へ排出されること
- (b) 上記の動作時に接着剤は抽出されないこと
- (c) 抽出された接着剤はセル部分のみに留まり、グリューカプセル部に漏洩しないことを確認する必要がある。

確認方法について、(a)では自重によりカプセルが着底するまでにピストン部が押し込まれないことおよび(b)では接着剤が抽出する時に乳化(白濁)するので、乳化するか否かを目視により確認した。(c)は接着剤抽出後、乳化部分がプローブ部分のみとなり、セル部まで乳化しないことを確認した。

5.3.2 実験装置

(1) 試料

表 5-3-1 試料仕様

セル	YUGCT-3D SI cell (オーバーコアリング実験と同種)
寸法	直径 18mm 長さ 130mm

(2) 接着方法

表 5-3-2 接着方法

接着剤	長瀬チバ製アラルダイト CY230 (硬化材 HY956)
挿入方式	自由落下(重錘として銅パイプ使用約 1kg)

接着確認方法: 白濁せず、無色透明になること。

(3) 環境

表 5-3-3 実験環境

環境温度	室温(約 20 度)
水中環境	内径 100mm 高さ 80mm アクリルパイプ(クリア)
擬似パイロットホール	内径 21mm 高さ 50mm アクリルパイプ(クリア)

5.3.3 実験手順

(1) 接着剤作成

主剤 30g、硬化剤 6g を計量して、混合。

均一になるまで攪拌。

(2) カプセル内注入

カプセル内に 30cc 分セットする。

ラフな環境条件によっても硬化可能か調べるため、脱泡せずにそのままカプセルに流し込んだ。

(3) SI セルと接合

カプセルと SI セルを接合する。

接合方法はピン止めとするが、今回ははめ込み式とした。はめ込んだ SI セルを抜き取るのは容易ではない。ただし、はめ込み式は地下の水圧による影響により、状況が変わる可能性があるためピン止め方式にする予定である。

(4) 水中環境挿入

擬似パイロットホールである水中のアクリルパイプに挿入する。

このとき、接着剤が滲み出さないか確認する。

(5) 自由落下により着底

SI セルとカプセルの自重により着底させる。

このとき、ピストンが押し込まれないか確認すると同時に、接着剤が抽出されていないか確認する。

(6) 接着剤抽出

着底後、錘を用いて、カプセルのピストンが押し込まれ接着剤を抽出する。

このとき、乳化により接着剤の抽出が確認される。

(7) 接着状況観察

乳化部分がどのように変化するか確認する。

SI セル部分の乳化がなくなり、無色透明化するか確認する。

時間の経過と共に、接着剤が下部に漏れないか確認する。

5.3.4 実験結果

プローブを水中に入れた時には中の接着剤の漏れは確認できなかったため、続けて擬似パイロット孔のアクリルパイプに挿入した。

アクリルパイプに挿入後、自由落下により着底した。このとき、カプセル内部のピストンは水圧によっても押し込まれず、パイロット孔内部の水はカプセルの外側のパッキンを通して排出されていることになる。これは着色した水によって別途、確認している。

カプセルのピストン先端が着底した後、自重によりピストンが押し込まれ、接着剤が抽出される。カプセルのみの自重ではピストンが押し込まれないため、約 1kg の銅パイプを錘として用いた。予め測定した押し込み開始に必要な力は約 4kg であり、開始後は約 1kg であったためである。

今回の実験では、ピストン先端が着底した後、錘だけでは抽出が始まらなかったため、手で若干、力を加えた。それと共に、カプセルに設けた穴より接着剤が滲み出し、乳化した部分が認められた。ピストンが最後端まで達し、全ての接着剤が抽出された後、SI セルの長さの2倍程度まで乳化部分が生じた。その後、時間の経過と共に乳化部分が下に移動していった。これは接着剤の比重が大きいためである。その際、グリュウカプセルの外パッキンより下の部分の乳化は確認されなかったことにより、外パッキン位置で接着剤は止まっていることが確認された。

約2時間経過後、乳化部分は水面との境界部のみとなり、SI セル部分は透明になった。つまり、SI セルと外壁が接着できたことになる。その概観を写真 5-3-1 に示す。

写真中の3本のセルは時間差をおいて水中で硬化させたものである。左側が10日前、右側が当日2時間前、中央が当日行ったものである。写真撮影はその後、10日経過した状態のものである。

どの試料も錘の銅パイプ付近で白く乳化したままの部分が観察されるが、セル部分は透明になり接着されている。また、カプセルの外パッキンより下の部分では乳化が認められず、接着剤の漏洩はないことが確認された。

以上により、確認すべき3点、

- (1) プローブ挿入時にパイロット孔内部の水が排出されること
- (2) カプセル着底までに接着剤が滲み出さないこと
- (3) 抽出された接着剤が下部にもれないこと

は全て達成されたことになる。



写真 5-3-1 水中接着実験後の概観

6. 解析理論

本章においては確認実験の理論解析について説明し、その応用として初期応力が作用する場合を想定した計算例を示す。なお、理論の詳細については、章末の参考文献^{1),2)}を参照して頂きたい。

6.1 確認実験に関する理論解析

6.1.1 解析手法および解析モデル

今回の実験の妥当性を検証するために、セル内の2チャンネルのひずみに着目し、2次元面内応力状態を想定してモデル計算を実施した。解析には2次元線形弾性論による複素応力関数を用いることにより、応力・ひずみが任意の点で求められることになる。解析モデルとしては図 6-1-1 に示すように、接着層を含む3層問題として遠方より一様荷重が作用する場合を想定している。

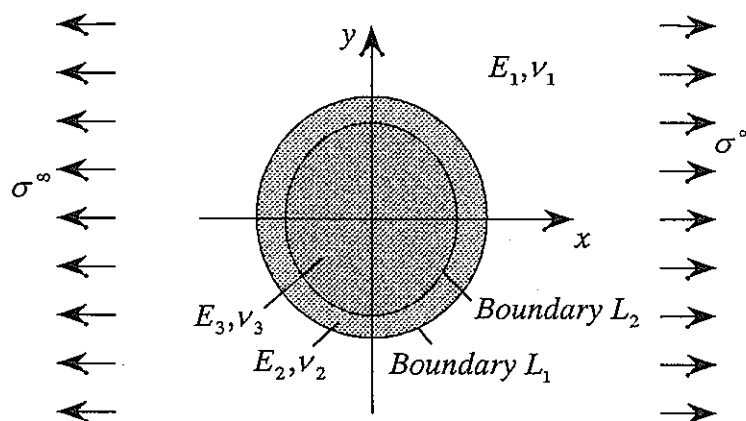


図 6-1-1 確認実験解析モデル

6.1.2 定式化

本解析には図 6-1-1 に示すように外側より母材、接着層、セルをそれぞれ領域1、2、3とし、それぞれの弾性係数、ポアソン比を E_i, ν_i ($i = 1, 2, 3$) とする。作用荷重は任意の角度から作用する無限遠一様荷重とする。

次に各領域における解析解を次式のように設定する。

$$\left. \begin{aligned} \Phi_k(z) &= A_3^{(k)} z^3 + A_1^{(k)} z + A_{-1}^{(k)} z^{-1}, \\ \Psi_k(z) &= B_2^{(k)} z^2 + K^{(k)} \ln z + B_{-2}^{(k)} z^{-2}. \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.1)$$

上式中の係数 A, B は以下に示す境界条件によって決定される未定係数である。式中

の $k(k=1,2,3)$ は各領域を示す。

<境界条件>

図 6-1-1 の3つの領域の接合境界 L_1, L_2 において応力・変位の連続条件が完全に達成されているとすれば、次の境界条件が成立する。

$$\left. \begin{aligned} u_r^{(n)} - iu_\theta^{(n)} &= u_r^{(n+1)} - iu_\theta^{(n+1)}, \\ \sigma_r^{(n)} - i\tau_{r\theta}^{(n)} &= \sigma_r^{(n+1)} - i\tau_{r\theta}^{(n+1)}. \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(6.2)$$

また、遠方での作用応力の条件ならびに原点0での応力の有限性の条件を考慮する必要がある。

上記によって求められた解析解を次式に代入することにより、任意の着目点 $z = x + iy$ において、応力および変位が求められることになる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x^{(k)} + \sigma_y^{(k)} &= 4 \operatorname{Re}[\Phi'_k(z)], \\ \sigma_x^{(k)} - i\tau_{xy}^{(k)} &= 2 \operatorname{Re}[\Phi'_k(z)] - \left\{ z\Phi''_k(z) + \Psi''_k(z) \right\}, \\ u_x^{(k)} - iu_y^{(k)} &= \frac{1}{2G_k} \left[\kappa_k \overline{\Phi_k(z)} - \left\{ z\Phi'_k(z) + \Psi'_k(z) \right\} \right]. \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(6.3)$$

上式中の κ_k は平面ひずみ状態のとき $\kappa_k = 3 - 4\nu_k$ および平面応力状態のとき $\kappa_k = (3 - \nu_k)/(1 + \nu_k)$ の値をとる。

6.1.3 数値計算手順

- ① パラメーター入力
形状パラメーター: セル半径、接着層の半径、
オーバーコア半径
弾性パラメータ: 各領域の弾性係数、ポアソン比
- ② 作用荷重入力
- ③ 解析解に必要な係数決定
- ④ 着目点の指定
- ⑤ 応力・ひずみ・変位の計算
- ⑥ データの整理(主応力、主ひずみ、およびそれらの分布図 etc.)

6.1.4 数値計算例および考察

上記で得られた解析解を用いて、確認実験の結果に関する考察を行う。なお、今回の確認実験では、パイロットホールを開削する段階で岩盤試料に外荷重(初期応力)を加えずにセルの接着ならびにオーバーコアリングを行っているため有限位置で

のオーバーコアの影響が現れない。

ここでの計算には次に示す条件を用いている。

【計算条件】

- ◎ 作用応力としてx軸方向より無限遠で一様な直応力 σ_x^∞ が圧縮で作用する場合を想定した。
- ◎ 平面ひずみ状態を想定した。

なお、作用応力の作用位置が確認実験ではパイロットホール半径の約7倍の位置に対し、理論解析では無限遠としている点に関しては、円孔の応力集中の影響が半径の5倍の位置でほとんどないことより、セル内の応力・ひずみに対する影響は少ないと考えられる。

上記の条件で理論解析を行い、以下に荷重載荷時のひずみの変化について考察する。

確認実験における荷重載荷時のゲージ1-2、2-2、3-2の変化と理論値を図 6-1-2 に示す。理論値は、次に示す値を用いてゲージ中央の位置でのひずみを計算した。

形状パラメーター:

パイロットホール半径 $R0=1.1 \text{ cm}$
セル半径 $R1=0.9 \text{ cm}$

弾性パラメーター:

花崗岩の弾性係数 $E_1 = 36.03 * 10^4 \text{ kgf / cm}^2$
ポアソン比 $\nu_1 = 0.25$

接着層とセルの弾性係数 $E_2 = E_3 = 3.0 * 10^4 \text{ kgf / cm}^2$
ポアソン比 $\nu_2 = \nu_3 = 0.35$

作用荷重 (25t) $\sigma_x^\infty = 55.56 \text{ kgf / cm}^2$

(なお、花崗岩弾性係数は事前に実験により求めた値であり、それ以外の弾性パラメータは文献^{3)~6)}による値である。)

図より、実験値のゲージ 1-2 と 2-2 の値が一致しないのはセルを埋設する段階で荷重軸に対し、所定方向よりある程度の回転があったためと考えられる。この回転量がひずみに与える影響については後述のシミュレーション計算例で図 6-2-4 において計算結果を示している。図 6-2-4 では初期応力や、材料パラメーターが違うため厳密には比較できないが、セルの軸が $\pm 2^\circ$ 回転するとひずみは約5%影響を受けると推測

される。今の場合、25t 載荷時の実験値のゲージ 1-2 と 2-2 の値の差とそれらの平均から、割合を計算すると 6.15% となることから、セルは約 ±2° 程度の回転誤差があったと考えられる。このことより、今後の実験等ではこの誤差が発生しないような工夫が必要である。

次に、各ゲージに対して理論値と実験値の差の割合を計算するとゲージ 1-2 が 18.8%、ゲージ 3-2 が 19.5% であった。ゲージ 3-2 が若干大きく理論値とずれている。この差異の原因は各種の要因が考えられるが、ここでは以下の3点について理論値に及ぼす影響を計算した。

- ① 花崗岩のポアソン比の影響 (計算では文献による値を用いていたため)
- ② 接着層の弾性係数の影響 (硬化時間による材料定数の変化を考慮するため)
- ③ パイロットホールとセル径の影響

計算結果を図 6-1-3~6-1-7 に示す。ポアソン比、接着層の弾性係数ともに、実験結果の差異を大きく修正するほどの影響はないものの、接着層の弾性係数が小さくなるにつれてまた、接着層が厚くなるにつれて、セル内のひずみにとって接着層が緩衝材的な働きをするため計算結果の値は小さくなっていくことが認められる。

6.2 初期応力を考慮したシミュレーション計算

確認実験では、パイロットホールを開削する段階で岩盤試料に外荷重 (初期応力) を加えずにセルの接着ならびにオーバーコアリングを行っているため有限位置でのオーバーコアの影響が現れない。そこで上記の解析解を用いて図 6-2-1(A) と (B) を重ね合わせることで、初期応力が作用する岩盤にセルを埋設し、オーバーコアを施すシミュレーション計算を行う。

6.2.1 定式化

図 6-2-1(A) に示す様に初期応力が作用する岩盤にパイロットホールを開削した場合の解析解は、遠方より一様荷重が作用する場合の解析解を用いる。

$$\left. \begin{aligned} \Phi_A(z) &= Az - 2A \frac{R_0^2}{z}, \\ \Psi_k(z) &= 2Bz - \left(A + \bar{A}\right) \frac{R_0^2}{z} - 2B \frac{R_0^4}{z^3}. \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.4)$$

ここに、上式中の R_0 はパイロットホールの半径、係数 A, B は作用荷重によって決定される。

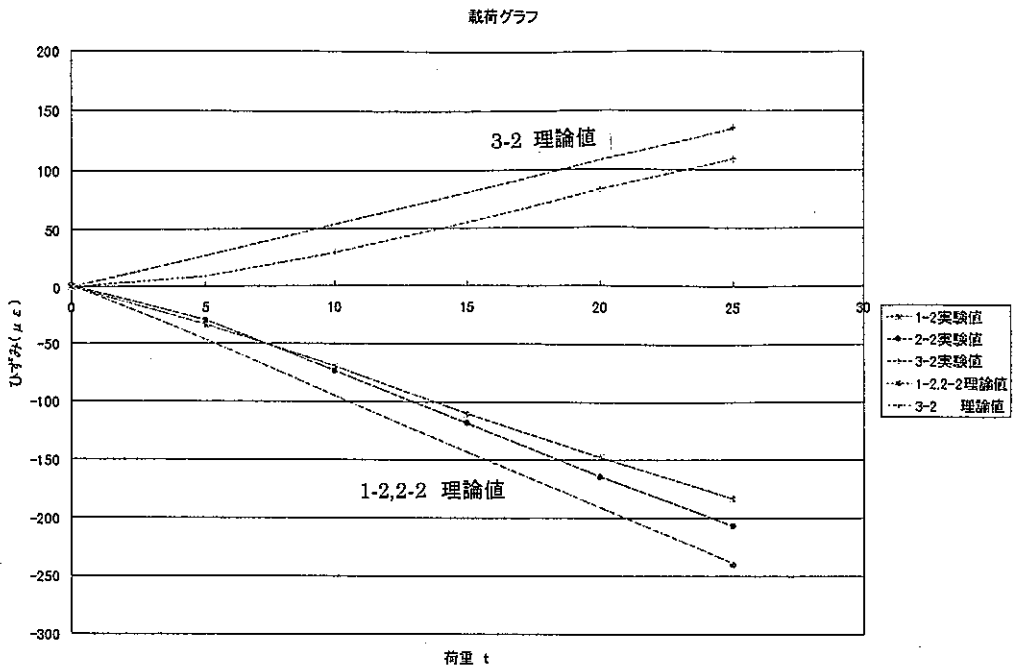


図 6-1-2 載荷時のひずみ変化
(ゲージ 1-2,2-2,3-2)

Effect of Poisson ratio

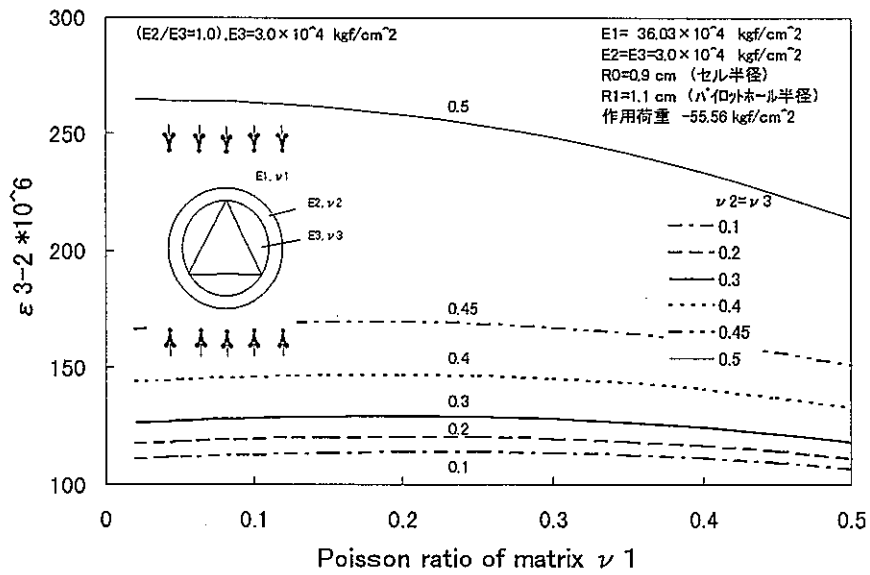


図 6-1-3 理論値に及ぼすポアソン比の影響
(ゲージ 3-2) $E2/E3=1.0$ の場合

Effect of Poisson ratio

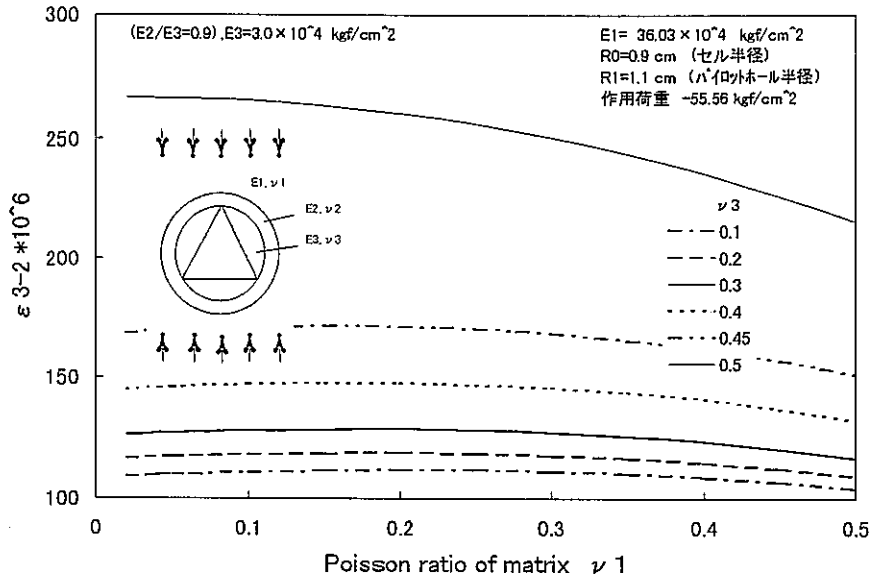


図 6-1-4 理論値に及ぼすポアソン比の影響
 (ゲージ 3-2) $R2/R3=0.9$ の場合

Effect of Poisson ratio

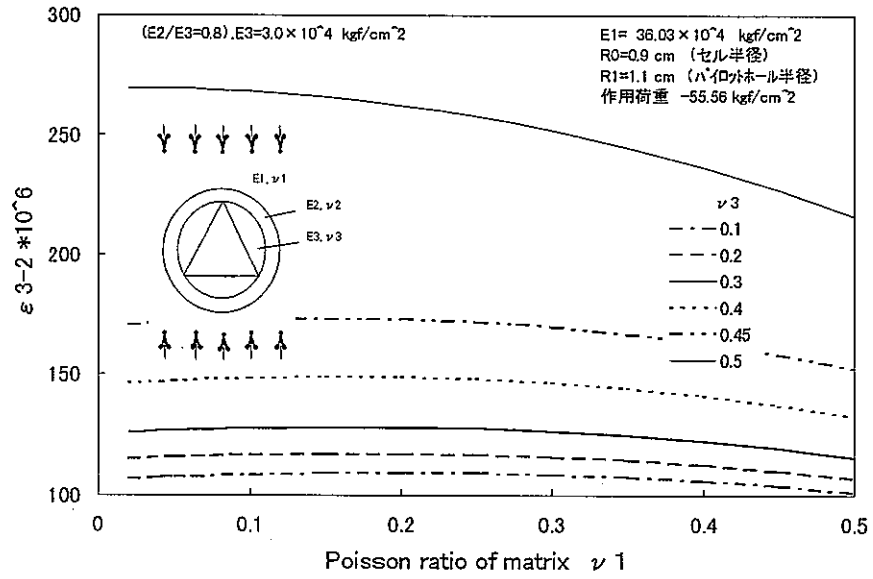


図 6-1-5 理論値に及ぼすポアソン比の影響
 (ゲージ 3-2) $R2/R3=0.8$ の場合

Effect of Poisson ratio

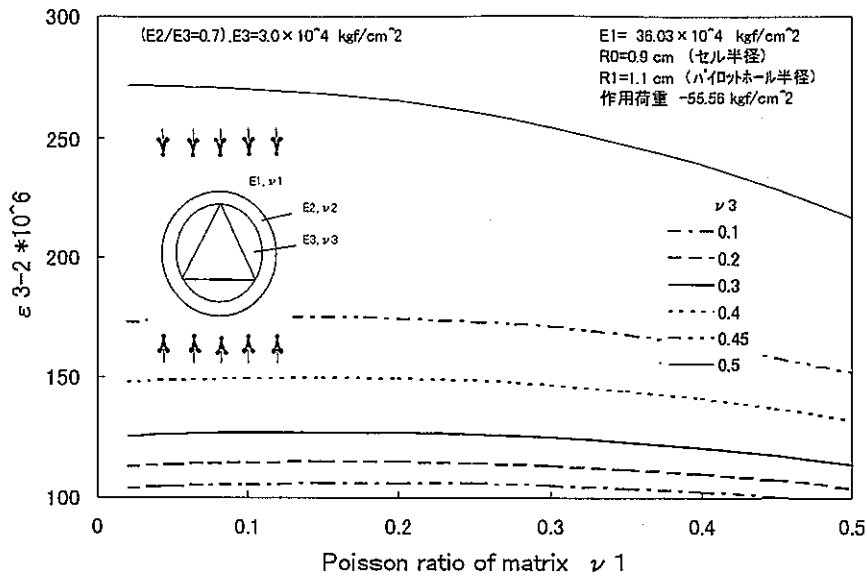


図 6-1-6 理論値に及ぼすポアソン比の影響
(ゲージ 3-2) $E2/E3=0.7$ の場合

Effect of Pilot Hole Radius

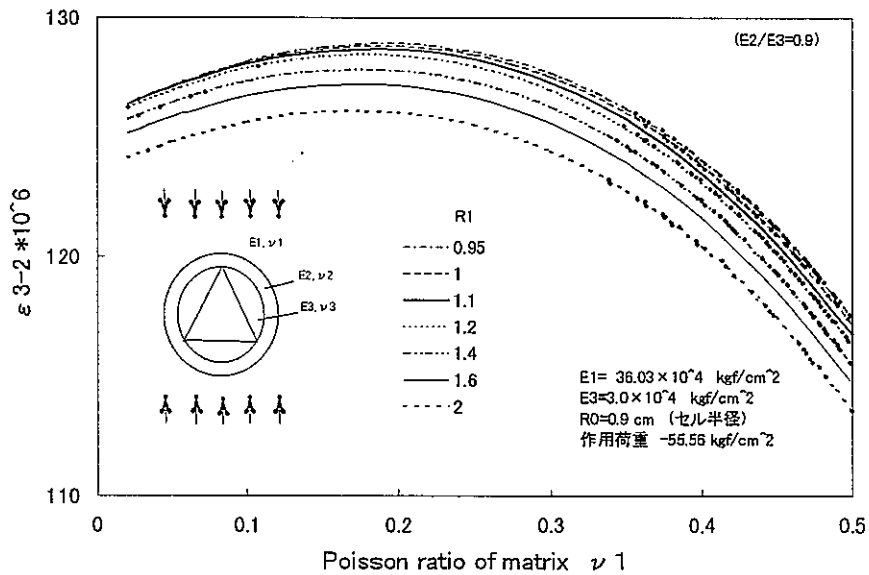


図 6-1-7 理論値に及ぼすパイロットホール半径の影響
(ゲージ 3-2) $E2/E3=0.9$ の場合

いま、作用荷重を $\sigma_x^\infty, \sigma_y^\infty, \tau_{xy}^\infty$ とすると、係数 A, B は次式で決定される。

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{1}{4}(\sigma_x^\infty + \sigma_y^\infty), \\ B &= -\frac{1}{4}(\sigma_x^\infty - \sigma_y^\infty) + \frac{i}{2}\tau_{xy}^\infty. \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(6.5)$$

次にオーバーコアによる半径 R_c 上の境界が自由境界となるには、次に示す順序で図 6-2-1(A)と(B)を重ね合わせればよい。

- ①図 6-2-1(A)にしめす仮想境界 L_3 上での応力 σ^0, τ^0 を式(6.4)より求める。
- ②図 6-2-1(B)に示すように半径 R_c 上に応力 $-\sigma^0, -\tau^0$ が作用する場合の解析解を求める。この場合の解析解は前節で示した式(6.1)と同じ形となり、前節同様に境界条件により係数を決定する。

6.2.2 計算例

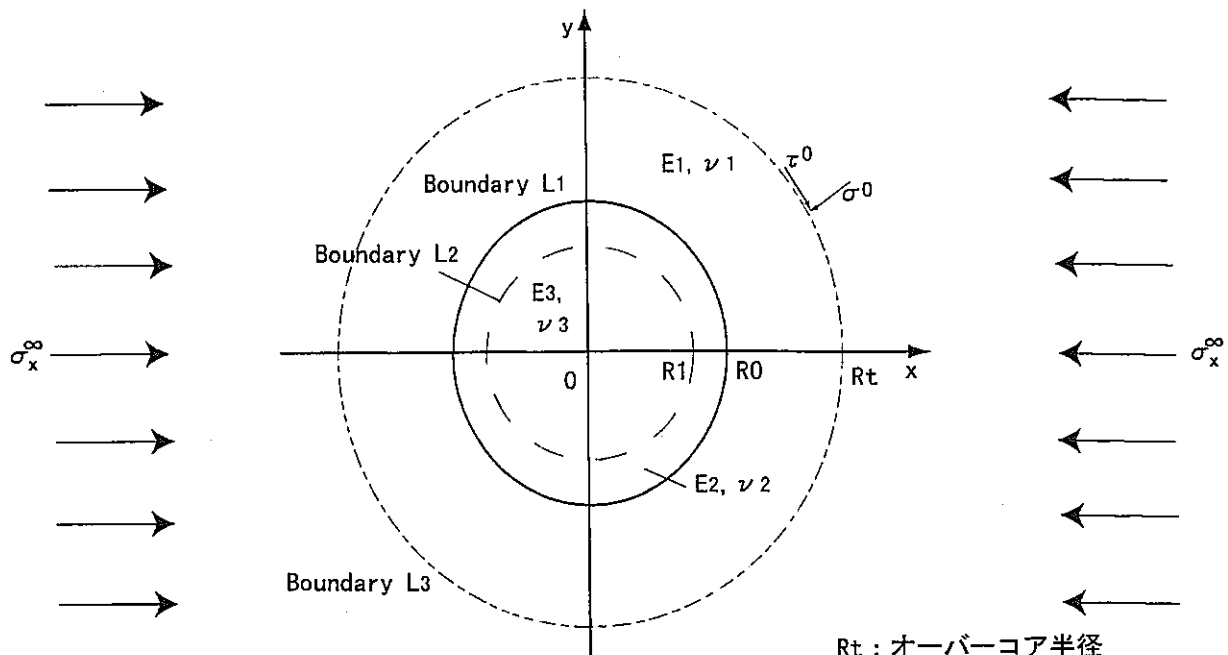
実際の測定では初期応力が作用している岩盤にパイロットホールを掘削し、その後セルを埋設する。その後、有限位置でオーバーコアリングを行って、応力解放し、岩盤、接着層およびセルの弾性回復現象によりセルに設置してあるゲージがひずみを検出することになる。この各段階における岩盤、接着層およびセル内部のひずみ場の変化を、解析解を用いてシミュレーション計算することができる。

確認実験ではセルと接着層は同じエポキシ樹脂系の材料であるが、ここでは制作・接合後の時間差による弾性特性を考慮できるように岩盤、接着層、およびセルからなる3層問題として解析を行う。

図 6-2-2 は一軸性の一様な応力状態にある岩盤にパイロットホールを掘削した場合の最大ひずみ分布と最小ひずみ分布を示したものである。この計算結果は自由境界を有する円孔に遠方より一軸性の一様荷重が作用する場合の計算結果である。

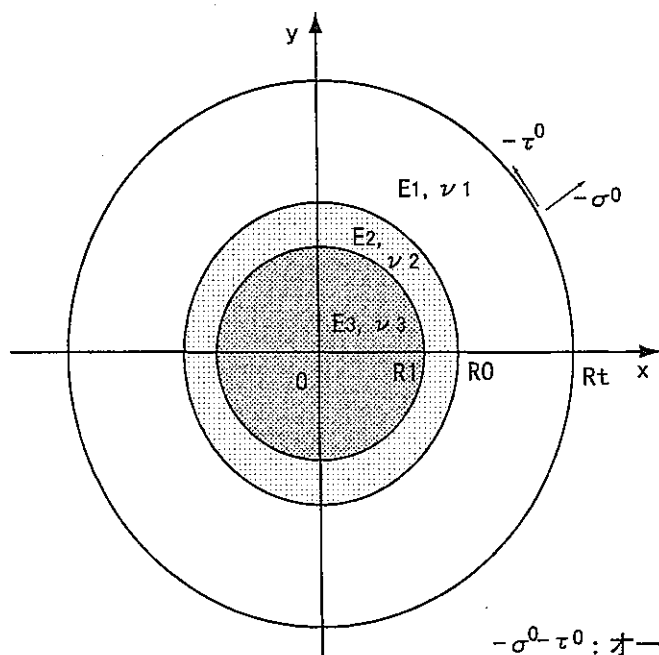
次に、図 6-2-3、6-2-4 はオーバーコアリングにより取り出されたコア内部の最大ひずみと最小ひずみ分布である。コアとして取り出された岩盤部分では埋設された接着層とセルにより変位が拘束を受けるため図のような残留ひずみの分布となる。もちろん、岩盤部分の外側境界での応力自由の条件は達成されている。また、図 6-2-4 で示されているようにセル内で楕円形のひずみ分布をしている。

図 6-2-5 では、セル内に設置されたゲージ線上のひずみ分布を計算したものである。この図よりゲージ 1-2, 2-2 はゲージ中央の値がほぼゲージ範囲の平均値となるのに対し、ゲージ 3-2 はゲージ全体の平均と中央のひずみとは差が生じるため、計測結果と計算結果との比較にはゲージ長さを考慮する必要があることを示している。



(A) パイロットホール掘削

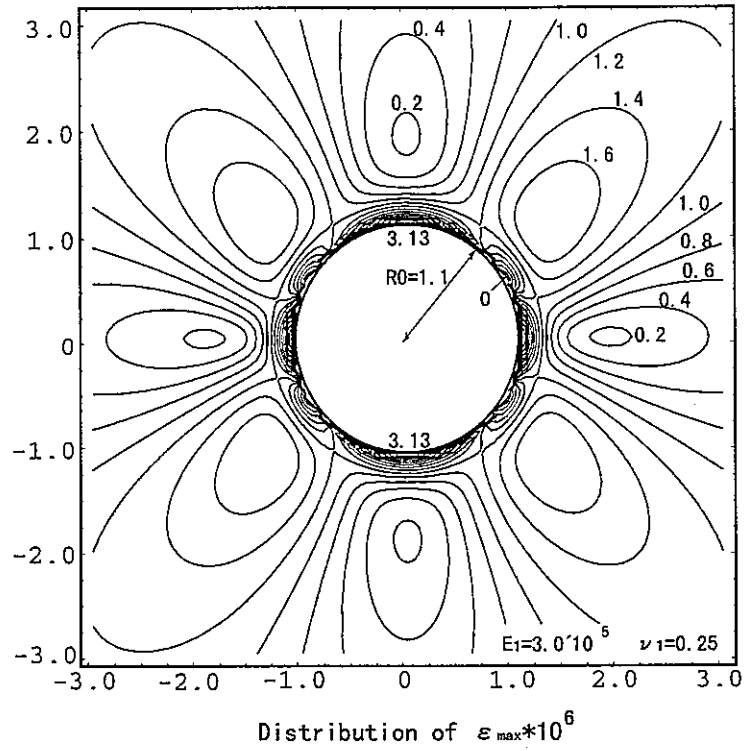
R_t : オーバーコア半径
 R_0 : パイロットホール半径
 R_1 : セル半径
 E_i : ヤング率
 ν_i : ポアソン比
 ($i=1$: 岩盤 $i=2$: 接着層 $i=3$: セル)
 $\sigma^0 \tau^0$: オーバーコア仮想境界上の作用応力 σ_x^∞ により生じる応力



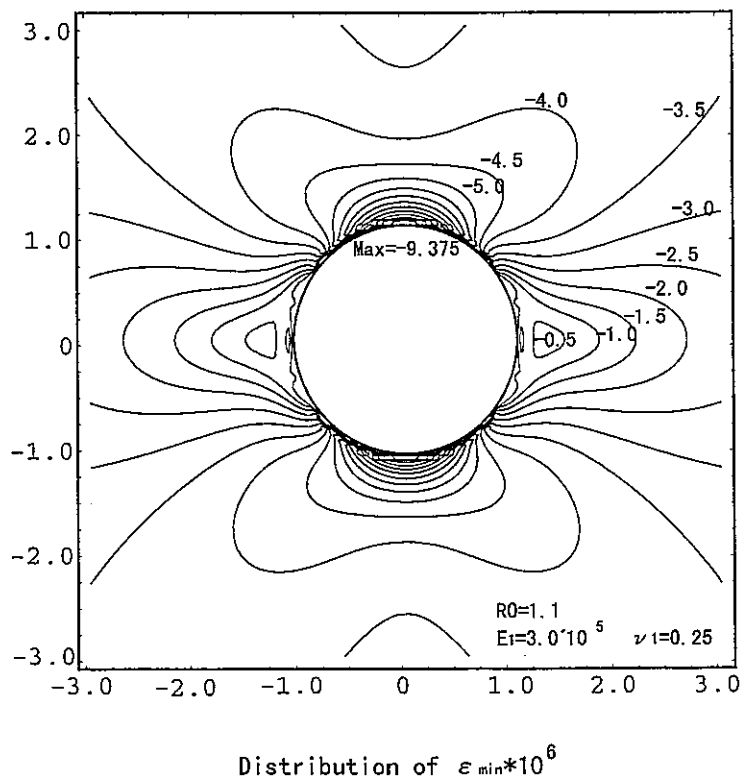
(B) オーバーコア

$-\sigma^0 -\tau^0$: オーバーコア境界上の作用荷重により生じる応力

図6-2-1 シミュレーション計算モデル

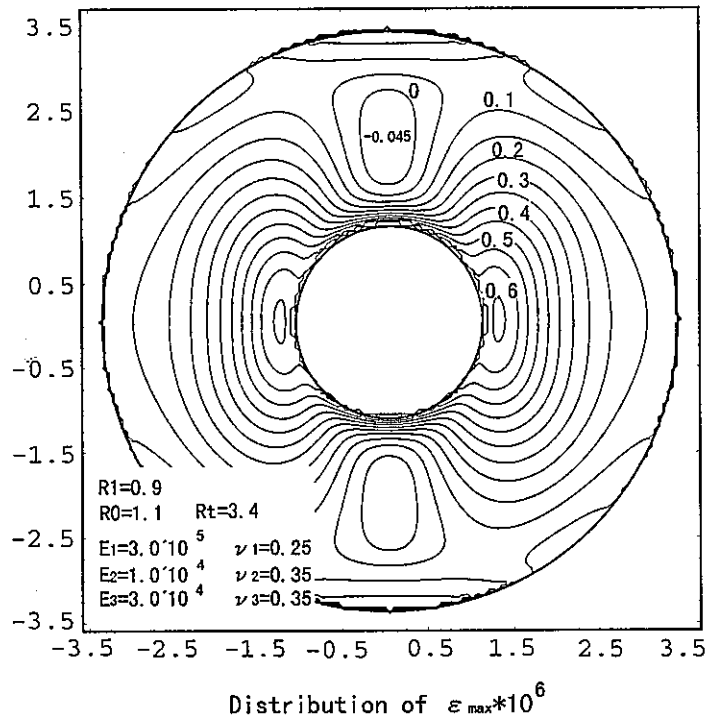


(A) 最大主ひずみ ε_{\max} の分布

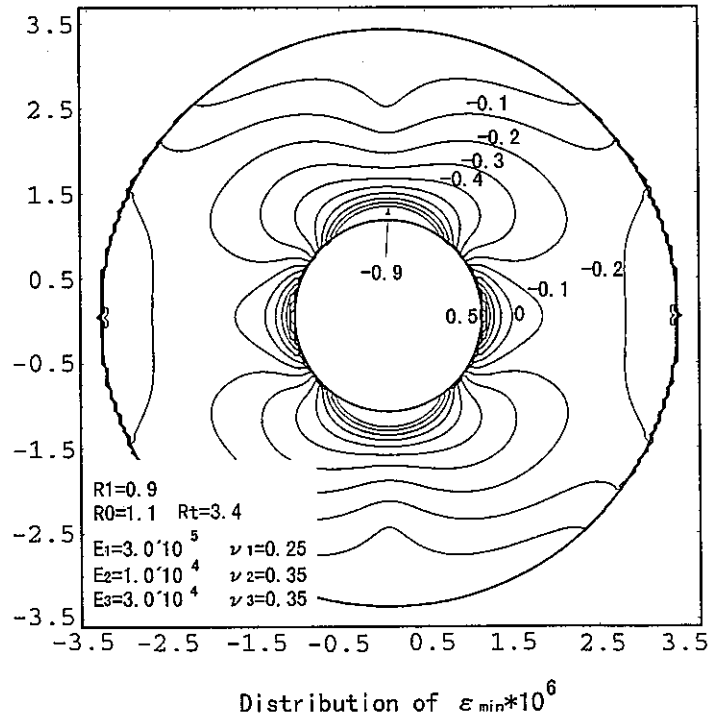


(B) 最小主ひずみ ε_{\min} の分布

図6-2-2 パイロットホール掘削時の主ひずみの分布

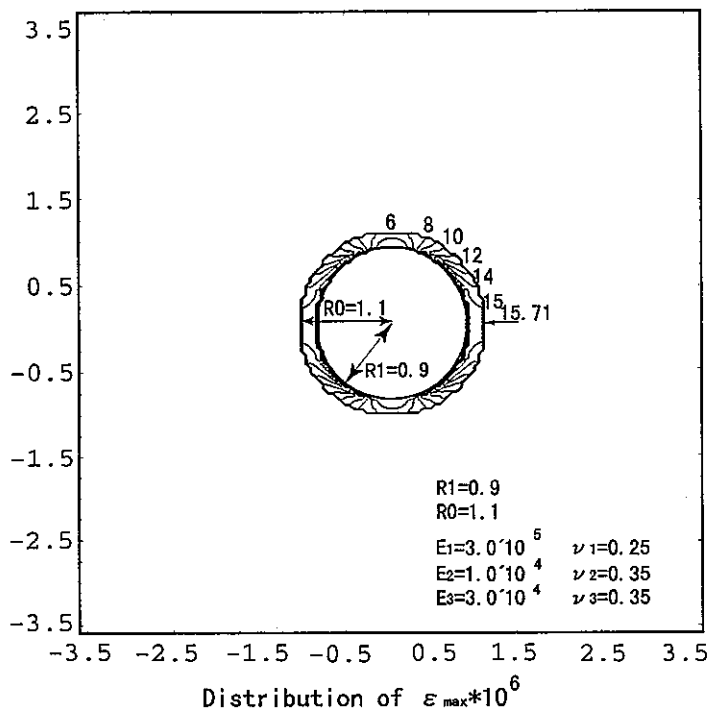


(A) 応力解放後の主ひずみ ε_{\max} 分布

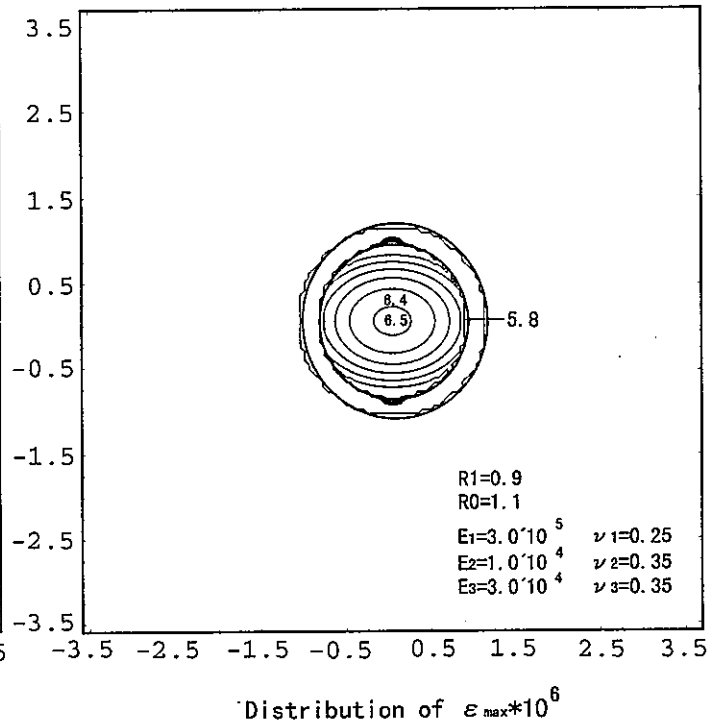


(B) 応力解放後の主ひずみ ε_{\min} 分布

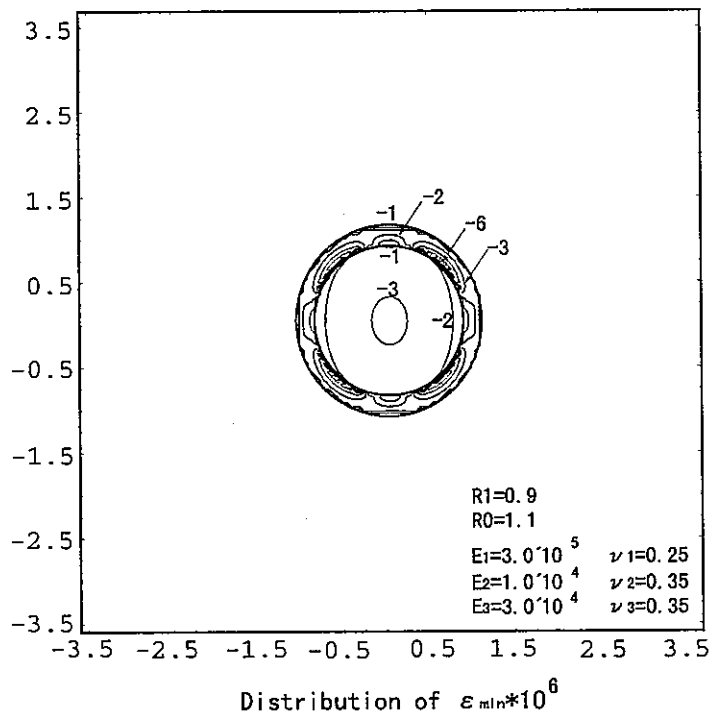
図6-2-3 コア内部のひずみ分布



(A) 応力解放後の主ひずみ ε_{\max} 分布
(接着層)



(B) 応力解放後の主ひずみ ε_{\max} 分布
(セル)



(C) 応力解放後の主ひずみ ε_{\min} 分布

図6-2-4 接着層とセルのひずみ分布

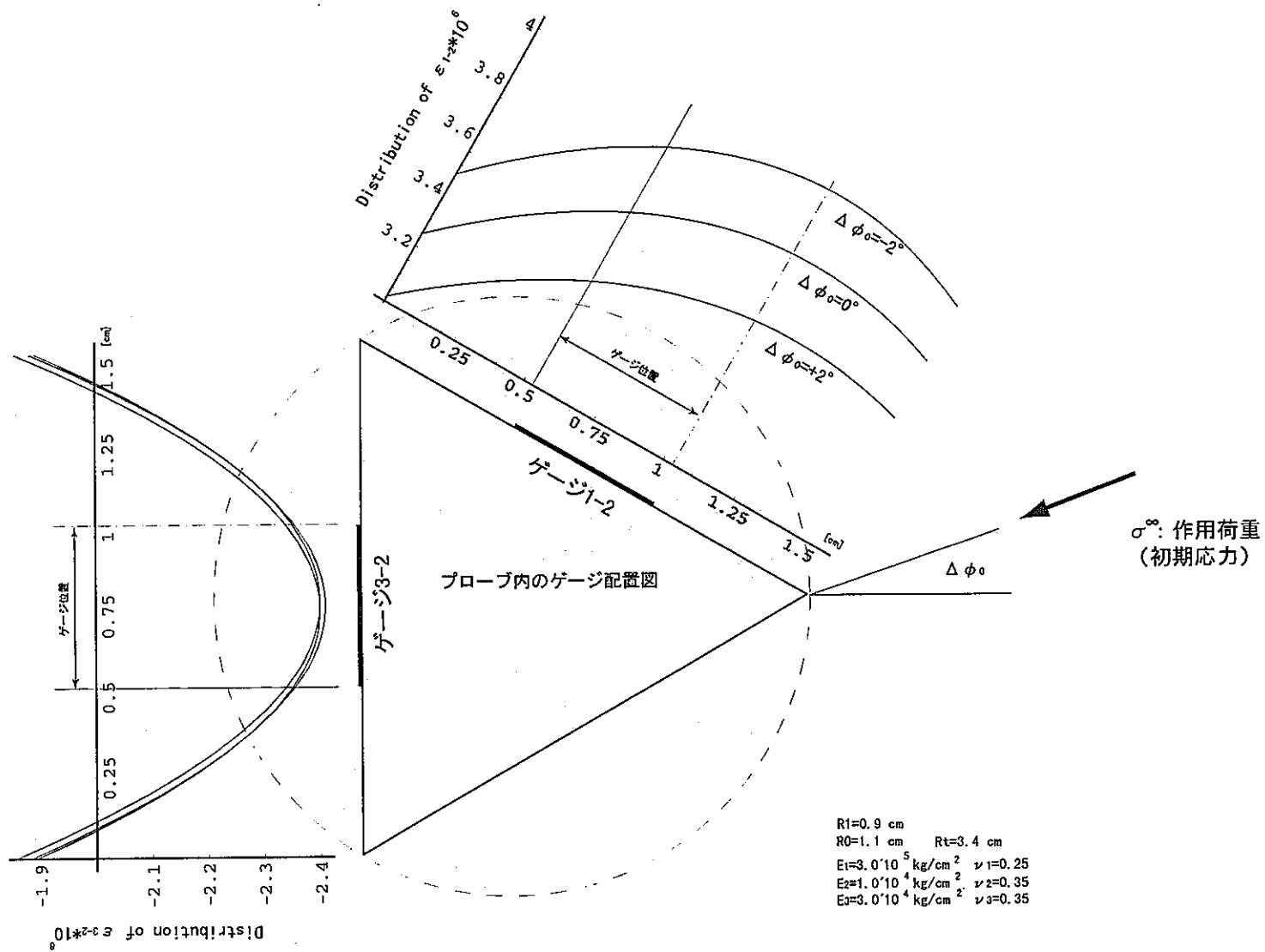


図6-2-5 ゲージ上の応力分布

また、図 6-2-5 では、セルを埋設する際の所定の方向からの回転を考慮し、その影響を示したものである。

6.3 逆解析手法

これまでに示した解析手法や計算結果はすべて、初期応力を既知量と仮定しての順解析である。しかし、実際にはセル内の測定ひずみよりセルに影響のない位置での岩盤に作用している初期応力を求める逆解析が必要である。このことの判りやすい考え方の例をこの節の最後に提示することにする。ここでは第 6.2 節で示した解析解を利用して、目的とする初期応力の算定のための逆解析の流れを図 6-3-1 に示す。なお、以下に示す材料パラメータは事前の予備実験などで判明しているとする。

《既知材料パラメータ》

岩盤の弾性係数、ポアソン比	E_1, ν_1
接着層の弾性係数、ポアソン比	E_2, ν_2
セルの弾性係数、ポアソン比	E_3, ν_3

なお、岩盤の弾性係数、ポアソン比は、オーバーコアによって得られたコアを用いた室内実験により求められる。

同定パラメータの設定値修正の逐次操作を実施する際に必要となる収束判定の条件式は次式の最小2乗誤差の和がある一定値に収まるように設定することである。

$$\sum_k^K (\varepsilon_{ij}^* - \varepsilon_{ij})^2 \equiv \Delta \varepsilon_{er}^2 < \Delta \varepsilon_{er}^2 \dots \dots \dots (6.6)$$

ここに、 ε_{ij}^* および ε_{ij} はそれぞれ現場における測定ひずみおよび解析解より得られるひずみである。また、 $\Delta \varepsilon_{er}$ は許容誤差を表す。

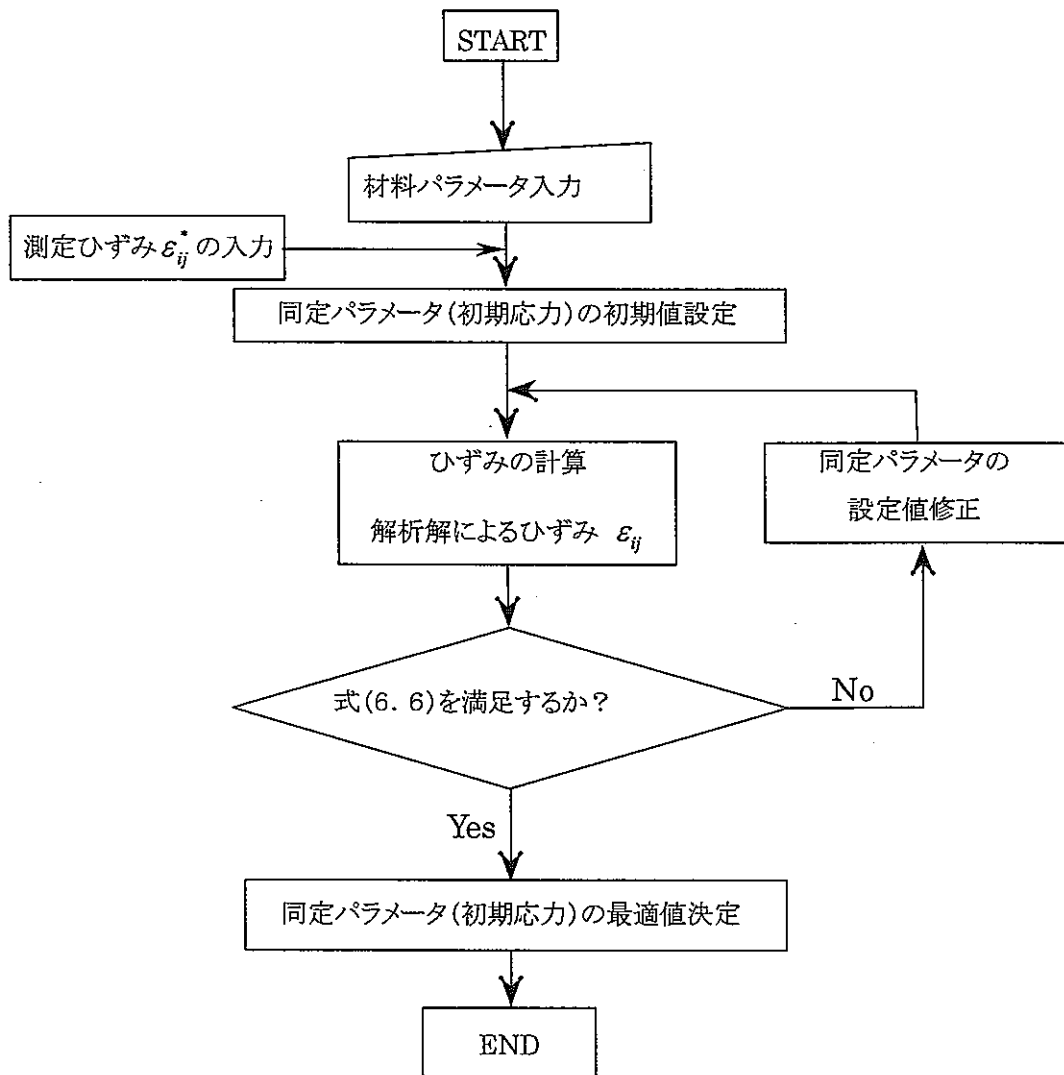


図 6-3-1 直接定式化法における逆解析手法

6.4 逆解析と順解析

通常の工学問題の理解あるいは取り扱い、対象とする構造系等に外部から作用する荷重や擾乱を与えたときに、その系内の任意点の応答（応力、ひずみ、変位等）の値を、支配方程式により初期条件・境界条件のもとで解析して求めるのが普通であり、これは通常、解析または順解析 (Analysis) と呼ばれる。これに対し、工学問題の設計等では着目位置が系内または境界表面にあつて、計測等によりその点での値が与えられた場合に外部作用の荷重や擾乱を求める（推定する）ことが種々の例で要求されるが、これは先の順解析に対応して、逆解析 (Inverse Analysis, Back Analysis) と呼ばれる。

ここで対象とする問題はセル内の計測ひずみからセルやボアホール開削等の影響のない位置での岩盤初期応力を算定する逆解析である。この手法の手順を簡単な例を通して説明する。理解を容易にするために接着層の存在しない岩盤とセルの2層状態で一軸または二軸の岩盤初期応力を推定するものとする。

<例1> 一軸の初期応力 σ_x^0 の推定 (逆解析1)

まず、第 6.1 節で示した理論解析により σ_x^0 を与えてセル内に生じる主ひずみ ε_{\max} および ε_{\min} を計算する。これはいわゆる順解析である。その計算は岩盤およびセルの材料パラメータ（弾性係数、ポアソン比）が与えられれば、図 6-4-1 のように得られる。この図で特定の σ_x^0 を与えて、材料パラメータにより定まる線まで水平線を伸ばし、その交点から鉛直方向に直線を下して $\pm \varepsilon_{\max}$ （および $\mu \varepsilon_{\min}$ ）の線との交点が求める順解析の主ひずみの値である。

これに対し逆解析では、今の例とは逆で実験によって計測されたセル内の主ひずみ ε_{\max}^T 、 $-\varepsilon_{\min}^T$ から図 6-4-1 に示した手順で σ_x^0 が推定できることになる。（一軸応力の仮定から ε_{\max} と ε_{\min} は 1:1 対応がある。すなわち ε_{\min} は ε_{\max} に従属して決定される。）

なお、主ひずみ軸と岩盤の主応力軸は等方性弾性体を対象としていることから必ず一致することになるので岩盤初期応力の作用方向は理論的に特定できることになる。主ひずみ ε_{\max}^T の方向が σ_1^0 の方向となり、その方向から、例えば σ_x^0 方向までの角度のずれ θ_x は実測できる。したがって、次式により、座標軸方向の応力成分が計算できることになる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x^0 &= \sigma_1^0 \cos^2 \theta_x, \sigma_y^0 = \sigma_1^0 \sin^2 \theta_x, \\ \tau_{xy}^0 &= \sigma_1^0 \sin \theta_x \cos \theta_x. \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.7)$$

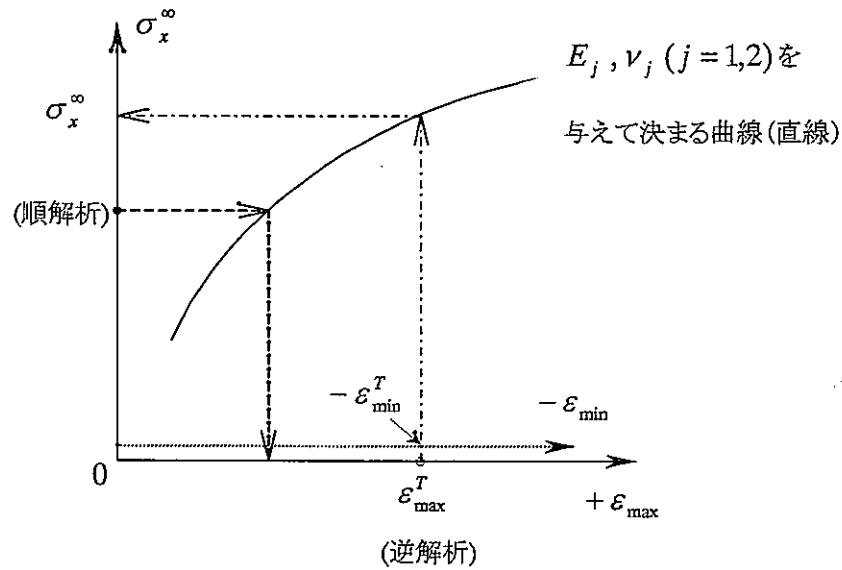


図 6-4-1 一軸応力が作用する場合の 逆解析のためのノモグラム

<例2> 二軸の初期応力 σ_x^∞ および σ_y^∞ の推定 (逆解析2)

2次元の平面状態を対象とし、<例1>の場合と同様にセル内の主ひずみ ε_{\max} , ε_{\min} の値と直交するそれらの角度方向が実験結果より求められる。

ここで、 ε_{\max} の方向を x 軸、 ε_{\min} の方向を y 軸にとるものとするれば、等方性弾性体 (岩盤およびセル) の場合、 x , y 軸が共に岩盤の主応力 σ_1^∞ および σ_2^∞ の方向となる。したがって、次式が成立する。

$$\sigma_x^\infty = \sigma_1^\infty, \sigma_y^\infty = \sigma_2^\infty, \tau_{xy}^\infty = 0 \dots \dots \dots (6.8)$$

さて以下では二軸の初期応力 σ_x^∞ , σ_y^∞ の求め方 (逆解析法) について記述する。

図 6-4-2(a) のように横軸に $\varepsilon_{\min} / \varepsilon_{\max}$, 縦軸に $\sigma_y^\infty / \sigma_x^\infty$ をとったの理論計算の結果を図

示する。一般に $\varepsilon_{\min} / \varepsilon_{\max}$ の負のある値で $\sigma_y^\infty / \sigma_x^\infty$ が零すなわち σ_x^∞ のみの一軸状態

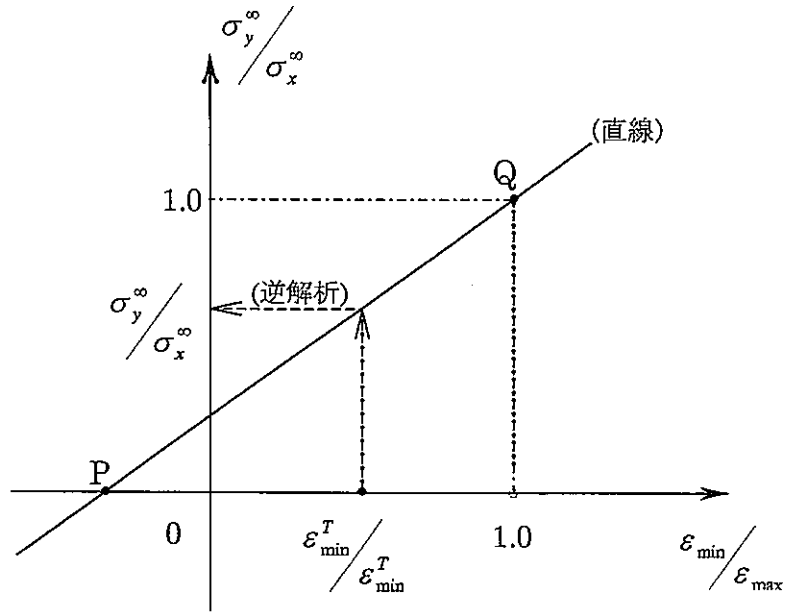
(i.e. $\sigma_y^0 = 0$)の点 P と Q(1,1)を通る右上がりの直線が得られる。この図を用いて、実測値の主ひずみ比 $\varepsilon_{\min}^T / \varepsilon_{\max}^T$ の値から二軸応力比 σ_y^0 / σ_x^0 が決定される。続いて図 6-4-2(b)より、横軸の実測主ひずみ ε_{\max}^T から<例1>の場合と同様の操作により σ_x^0 が求められ、これらの結果を組み合わせれば、岩盤初期応力 σ_x^0, σ_y^0 の値が具体的に決定できることになる。

上記のような逆解析手法は一般的な 3 次元岩盤初期応力の計算の場合にもそのまま適用できるが、今少し複雑になるのは否めない。そのため本節の最初に示したように、図 6-3-1 のフローチャートの直接定式化法によって計算機を利用して求める手法がすでに確立されている^{7),8)}。

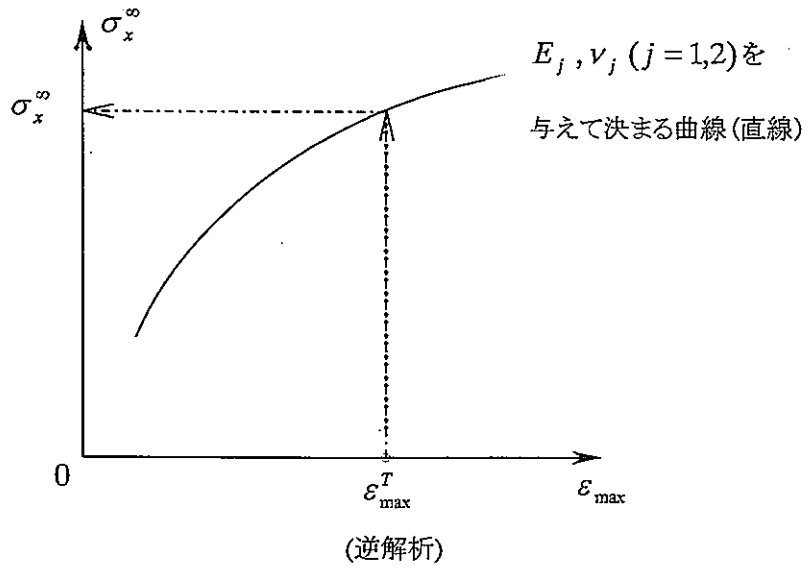
さらに、逆解析の解の一意性の証明もすでにいろいろな形でされており、セル内の実測ひずみから岩盤初期応力を推定することは一意性の成立により正しい結果となると考えてよい。

参考文献

- 1) 平島健一, 佐久間彰三, 菊地慎二, 松田武: 「円柱状埋設型計測装置を用いた地山応力測定結果に及ぼす接着層, すべりおよびオーバーコアリング径の影響の理論解析」, 土木学会論文集, No.424, pp.207~216, 1990.
- 2) 菊地慎二, 佐久間彰三, 平島健一, 松田武: 「三次元地山応力測定のための中空埋設型測定装置の理論解析」, 土木学会論文集 No.430, pp.143~152, 1991.
- 3) 川田雄一, 河本実, 横堀武夫, 宮川松男: 「材料強度工学ハンドブック」, 朝倉書店, pp.319.
- 4) 応力測定技術研究社編: 「応力測定法」, 朝倉書店, pp.575.
- 5) 日本材料科学会編: 「接着と材料」東京裳華房, pp.77.
- 6) Michel F. Ashby, David R. H. Jones, Engineering Materials, Pergamon Press, pp.31.
- 7) 山下幸夫: 「トンネル・地下空洞の掘削に伴う順解析および逆解析に関する研究」, 山梨大学工学博士論文, 268pp, 1995.3.
- 8) 柴田善央: 「粘弾性特性を考慮した各種介在物を有する材料の力学挙動に関する研究」, 山梨大学工学博士論文, 180pp, 1996.3.



(a) 主応力比と主ひずみ比の関係



(b) ϵ_{\max} と σ_x^∞ の関係

図 6-4-2 二軸応力が作用する場合の
逆解析のためのノモグラム

7. おわりに

本報告書は、地下深度 1000m までの3次元初期応力を測定するための測定用プローブの設計業務について、その内容をまとめたものである。

設計したプローブは埋設型測定装置であり、ひずみを測定する SI セルとその上部に接続して測定データを記録・保存するアッパーセルに分けられ、SI セルはエポキシ樹脂製で直径 18mm、長さ 200mm、アッパーセルは鋼製で直径 45mm、長さ 863mm である。

測定では、パイロット孔内に SI セルを挿入し、接着・固定後にオーバーコアリングを行いひずみ変化を測定するが、この一連の作業のうちパイロット孔での SI セルの水中接着およびオーバーコアリングによるひずみ変化測定に関しては、室内模型実験を行い、その機能を確認している。

本業務では、基本的な設計を遂行することにより、地下 1000m という大深度においても3次元の初期応力測定が可能であるとの見通しを得ることができた。とはいえ、まだ机上の検討段階であり、ハンドリング時に関する検討の余地も残っている。今後、実機の製作や実証実験を経る過程で多くの課題を解決し、改良していく必要がある。これは、プローブのみの課題ではなく、ボーリング作業等も含めトータルのシステムという観点から様々な改良を加えていくべきものとする。

また、プローブ設置時の姿勢やオーバーコアリング時でのデータなどをリアルタイムで把握できれば、応力測定作業の飛躍的な向上につながる。このため、水深 1000m のボーリング孔底のプローブと通信できる有力な方法である音響通信についても、今後開発を進めていくべきと考える。