

深度1000m対応動燃式低水圧 制御水理試験装置の設計

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書)

1992年 2月



大成基礎設計株式会社

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、特に限られた関係者だけに開示するものです。ついては、複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示または内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう特に注意して下さい。

本資料についての問合せは下記に願います。

〒107 東京都港区赤坂 1-9 -13

動力炉・核燃料開発事業団

技術協力部 技術管理室

深度1000m対応動燃式低水圧 制御水理試験装置の設計

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書)

1992年 2 月

大成基礎設計株式会社

深度1000m対応動燃式低水圧 制御水理試験装置の設計

平田 洋一

要 旨

地層処分を初めとする地下空間利用に際しては、深部難透水性岩盤の透水係数、間隙水圧等の水理ファクターを、高精度かつ効率良く測定することが必要であり、そのために我が国においては、動燃式JFT500mを製作した。しかし近年、測定対象とする深度は更に深くなり、1000m程度の測定が要求されるようになった。

そのため今回新たに、1000mまで測定が可能な水理試験装置の概略をここに設計した。概念設計に際しては、500m用動燃式JFTの使用実績を踏まえ、従来に無いいくつかの新しい試みを行った。また広く海外の装置、部品も参考にした。

本報では、開発設計した装置の基本原理と構造の概念について述べる。

本報告書は、大成基礎設計株式会社が、動力炉・核燃料開発事業団との契約により実施した業務の成果である。

契約番号： 030C0250

事業団担当部課室及び担当者名： 環境技術開発推進本部 地層科学研究グループ
(青木和弘)

大成基礎設計株式会社本社研究開発部

Development of hydraulic tester for deep borehole

a b s t r a c t

It is necessary to obtain the hydraulic parameters of ground water in deep low permeability rock mass in order to contribute on the establishment to modelling of regional ground water flow.

So the "New PNC Aquifer Tester (PNC JFT 500)" was developed to measure within 500m depth. But now-a-day, the needs of measurement depth is more deep.

We designed the concept of "New PNC Aquifer Tester (PNC JFT 1000)" to respond that request. In conceptual design, we tried some new technique and referred to foreign system and equipment.

This report describes conceptual design of "New PNC Aquifer Tester (PNC JFT 1000)".

Work performed by Taisei Kiso sekkei Co.,LTD under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation
PNC liaison Radioactive Waste Management Project,
 Geosciences Research Program (Kazuhiro Aoki)
Taisei Kiso sekkei Co.,LTD Head office R&D section

目 次

はしがき	1
1. 概念設計概要	2
1. 1 設計の基本条件	2
1. 1. 1 設計上の性能条件	2
1. 1. 2 設計方針	2
1. 1. 3 設計に必要な条件の設定	2
1. 2 基礎的理論	4
1. 2. 1 水理ファクターに関する概論	4
1. 2. 2 透水試験法の分類と説明	7
1. 3 装置の基本構造	9
1. 3. 1 必要なシステム	9
1. 3. 2 装置の概念	9
1. 4 海外の例	12
1. 4. 1 Umbilical Hose System	12
1. 4. 2 Focussed Packer	14
1. 4. 3 Slug Test	15
2. 各部の概念設計	16
2. 1 中継部分	16
2. 1. 1 問題点の整理	16
2. 1. 2 機械的強度問題	16
2. 1. 3 送水問題	19
2. 2 先端部	25
2. 2. 1 パッカー	25
2. 2. 2 パッカーの多連装化と圧力測定	27
2. 2. 3 トリップバルブ	30
2. 2. 4 ポンプ	32
2. 2. 5 ボアホールテレビ	34
2. 2. 6 電気検層	35
2. 2. 7 コントロールユニット	36

2. 2. 8 インナーパッカー	38
2. 3 地上部	40
2. 3. 1 ホース方式の場合	40
2. 3. 2 ロッド方式の場合	41
3. 全体概略設計	42
3. 1 ロッド方式	42
3. 2 ホース方式	49
4. 評価	53
4. 1 設計の基本条件に対する評価	53
4. 2 その他の条件における評価	54
あとがき	55
謝辞	56
参考文献	57

目 次

図1-1	間隙水圧測定手法	4
図1-2	ロッド方式のブロック図	10
図1-3	ホース方式のブロック図	11
図1-4	Umbilical Hose System ブロック図	13
図1-5	Focussed Packer 概念図	14
図1-6	Slug Test	15
図2-1	変更ロッドネジ	18
図2-2	管径と流量の関係	21
図2-3	レイノルズ数の概念	22
図2-4	透水係数と誤差	24
図2-5	パッカー拡張方式	27
図2-6	圧力測定位置	28
図2-7	電磁バルブにおける損失水頭	31
図2-8	トリップバルブ	32
図2-9	ポンプ概念図	34
図2-10	ボアホールテレビの照明方法	35
図2-11	コントロールユニット回路ブロック図	37
図2-12	インナーパッカー概念	39
図3-1	ロッド方式の地上部分ブロック図	43
図3-2	インナーパッカーケーブル断面図	44
図3-3	コントロールケーブル断面図	45
図3-4	先端部ブロック図	47
図3-5	ロッド方式測定フロー図	48
図3-6	ホース方式の地上部分ブロック図	50
図3-7	ホース断面	51
図3-8	ホース方式測定フロー図	52
表1-1	透水試験の方法と解析法	7
表1-2	装置の基本構成	9
表2-1	ロッド材料強度	17

表 2 - 2	ケプラーとワイヤーの力学的材料特性	.....	19
表 2 - 3	温度と水の粘性係数の関係	.....	20
表 2 - 4	Aタイプバックカー性能表	.....	26
表 2 - 5	Bタイプバックカー性能表	.....	26
表 2 - 6	ゲージの性能比較	.....	29
表 2 - 7	電磁バルブ性能表	.....	30
表 4 - 1	8つの設計上の性能条件に対する評価	.....	53
表 4 - 2	その他の性能に対する評価	.....	54

はしがき

高レベル放射性廃棄物の地層処分に際しての、技術的課題の一つに地下水問題があり、1000m程度の深部における難透水性岩盤の透水係数、間隙水圧等の水理ファクターを精度良く、かつ効率的に測定する必要がある。

現在このような目的のために「動燃式JFT500」が開発されているが、測定深度が500mまでであり、必要条件を十分に満たしていない。またこの装置にはいくつかの追加、改良事項がある。

以上のようなことを考慮してここに新たに1000m対応の動燃式低水圧制御水理試験装置を概念設計するものである。

1. 概念設計概要

1. 1 設計の基本条件

1. 1. 1 設計上の性能条件

今回、1000m用動燃式JFT（以下JFT1000と略す）の設計開発に際し、基本的には以下の諸条件を考慮しこれを満足させるものとする。

- (1) 対象とする岩盤の透水係数は $10^{-4} \sim 10^{-9}$ cm/sとし、十分な精度で各水理定数が測定できること。
- (2) 定常、非定常の2つの方法で透水試験が行える構造とする。
- (3) 上記の岩盤において間隙水圧が十分な精度で測定できること。
- (4) 使用するボーリング孔の掘削径は $\Phi 75 \sim 100$ mm とする。
- (5) 測定最大深度は1000mとする。
- (6) 測定深度設定に際し、孔壁観察のためのボアホールテレビ、または電気検層装置を装着する。
- (7) 測定区間長の変更が容易に行えるように、装置に工夫をすること。
- (8) 装置の信頼性が高く、壊れにくいこと。

1. 1. 2 設計方針

現場水理試験装置の基本的構造には大きく2つの方法がある。1つは動燃式JFTに代表されるロッド方式であり、もう1つはアンビリカルホースシステムに代表されるホース方式である。これらは一長一短がありどちらが良いか一概には決められない。そこでここではどちらか一方に決定せず、両者を同時に設計するものとする。

設計に際しては、概念設計なので詳細部分には触れず、初めに要求された条件を満たすための各部の可能性を論じる。次に各部の接続、操作性といった二次的問題について考察し、最後に全体を評価する。

なおこの内容は、今後の知見によっては変更することもありえる。

1. 1. 3 設計に必要な条件の設定

ここで設計上必要と思われる水理的条件について述べる。

また安全率に関しては、その都度各章毎に記した。

(1) 最大設計水圧

密度 $\gamma_w = 1$ の地下水が地表面まで上昇した場合で、 100 kg/cm^2 を最大設計水圧とする。

(2) 孔内最低水位

地表面 -300 m とする。

(3) パッカー最大差圧

パッカーを拡張して試験区間を設定した際に、パッカーの上下に発生する、圧力差の最大値である。つまり水圧分布が静水圧分布からどの程度ずれるかであり、 200 m (20 kg/cm^2) とする。

(4) 地上操作圧力

通常地上で装置を制御する際の使用圧力である。我が国における空圧制御装置の大部分が 10 kg/cm^2 を上限としているので、装置、部品の入手交換を考慮して、ここでもこの値 10 kg/cm^2 を採用する。

1. 2 基礎的理論

1. 2. 1 水理ファクターに関する概論

一般的に水理ファクターとしては、①間隙水圧、②帯水層厚、③透水係数、④貯留係数、の4つがあり、これを知ることが地下水調査の基本と言える。初めにこれらの水理ファクターに関する概論を述べる。

(1) 間隙水圧

間隙水圧は地下水流れの速度と方向を決定する重要な要素であり、ある深度における圧力または水位で直接示される。

この際、測定手法としては次の3つが考えられるので、ここに述べる。

a 測定深度に直接圧力計を設置した場合

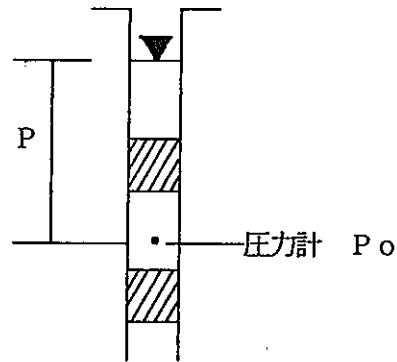
図1-1 (1) のケースであり

$$P = P_0 \quad \dots \dots \dots 1-1$$

P 間隙水圧

P₀ 測定水圧

で示される。



(1)

b 水位として測定した場合

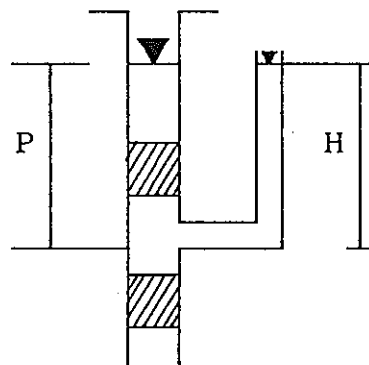
図1-1 (2) のケースであり

$$P = H \cdot \gamma_w \quad \dots \dots \dots 1-2$$

H 水位

γ_w 水の密度

である。



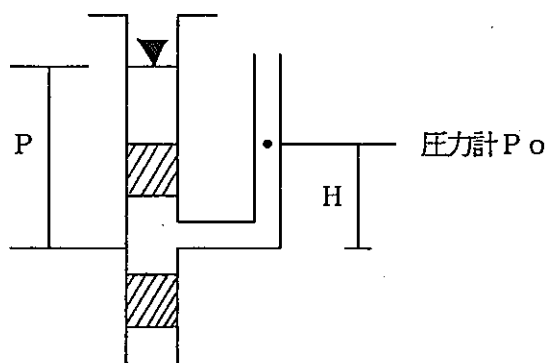
(2)

c ある任意の深度に圧力計を設置した場合

図1-1 (3) のケースであり

$$P = H \cdot \gamma_w + P_0 \quad \dots \dots \dots 1-3$$

となる。



(3)

図1-1 間隙水圧測定手法

(2) 帯水層厚

地下水解析をする際には透水係数 (K) × 帯水層厚 (D) で示される透水量係数を用い、帯水層の厚さは重要な要素である。その設定はボーリングと各種検層により総合的に判断されるので、ここでは省略する。

(3) 透水係数と貯留係数

透水係数の概念はダルシーにより提案されたもので、基本的には1-4式により示される。

$$V = k i \quad \dots 1-4$$

V_a 見かけの流速

k 透水係数

i 動水勾配

ここで V_a は土粒子の間隙を流れる真の流速ではなく、1-5式で示される見かけの流速である。

$$V_a = \frac{Q}{A} \quad \dots 1-5$$

Q 断面Aを流れる流量

A ある断面積

また

$$i = \frac{dh}{dx}$$

h 水頭

x 距離

したがって K は1-6式となる。

$$Q = A k \cdot \frac{dh}{dx} \quad \dots 1-6$$

1-6式により地下水解析をする方法は平衡論と呼ばれ、チームの式等がその代表と言える。平衡論はその名の通り、平衡状態の地下水を論じるには良いのだが、経時的な変化、即ち非平衡、非定常な状態を論じることはできない。また地下水解析上の重要な課題である、水収支-補給水源の問題にも解答を与えていない。

これに対しタイスが1-7式のような非平衡論を展開した。これは正しくはチームの井戸理論の欠点である補給水源問題に対して、帯水層の弾性的体積変化を水源とする井戸理論であり、故酒井軍次郎はこれを弾性説と呼んでいる。

1-4式は井戸の式なので、パラメーターとして井戸からの距離 r や帯水層厚 D を含んでおり、一般には1-8式を用いる。

$$S \cdot \frac{\partial s}{\partial t} = T \cdot \left(\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial s}{\partial r} \right) \dots \dots 1-7$$

S 貯留係数 = $S_s \cdot D$
T 透水量係数 = $K \cdot D$
t 時間
r 井戸からの距離

$$S_s \cdot \frac{\partial h}{\partial t} = k \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \dots \dots 1-8$$

S_s 比貯留係数
k 透水係数
t 時間
h 水位
x 距離

1-8式を種々の条件で解析的に解くことは困難であるが、コンピューターの発達と共に数値解が得られるようになり、最近ではFEMを初めほとんどの地下水解析に1-8式が用いられている。

以上地下水の常数として透水係数と貯留係数の2つがあり、互いに強く影響していることが分かる。実際に地下水問題を解析する上で、収支バランスのとれた平衡状態を対象とするなら透水係数のみでこと足りるが、非定常状態を想定した場合には貯留係数も決定的に関与してくる。

具体的には処分の研究において、ニアフィールドのように処分場建設における地下水変化が発生する場での地下水解析には貯留係数は重要な要素であり、一方ファーフールドでの超長期的地下水問題では透水係数が支配的となる。

1. 2. 2 透水試験法の分類と説明

透水試験の方法と解析法について整理すると、表1-1のようになる。

表1-1 透水試験の方法と解析法

試験方法	基礎理論	適用式
定常	平衡	チーム、ボシレフ
	非平衡	タイス、ヤコブ
非定常	平衡	ボシレフ
	非平衡	クーバー

以下に各方法について述べる。

(1) 定常平衡法

一定の流量または圧力を加え、その値が変動しない平衡状態を待って、その時の流量と圧力から透水係数を求めるものである。チームの式はいわゆる被圧完全井を対象としたもので、透水試験の場合は適用上の問題があるので、一般には次のボシレフの式がよく用いられる。

$$k = \frac{Q \cdot \ln(L/R)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot H} \quad \dots \dots \dots 1-9$$

k 透水係数

Q 流量

L 試験区間長

R 井戸半径

H 水頭表示の圧力

(2) 定常非平衡法

我が国においては、流量を一定として、圧力がある値に収斂する過程から透水係数及び貯留係数を求める方法が用いられ、タイスまたは次に示すヤコブの式が良く適用される。流量を打ち切り、圧力の回復を測定するのは回復法と呼ばれ、やはりヤコブの式が用いられる。海外においては圧力を一定にして、流量の変化を測定する方法も見られるが、国内ではほとんど見られない。

$$T = \frac{Q \cdot \ln(t_1/t_2)}{4 \cdot \pi \cdot \Delta S} \quad \dots \dots \dots 1-10$$

T 透水量係数

t 1、t 2 圧力測定時間

ΔS t 1、t 2 における水位差

(ΔSは圧力に置き換えることもできる)

(3) 非定常平衡法

地質調査の透水試験法において、最も広く用いられている方法であり、瞬間的に水圧に変化を与えて、その消散速度から透水係数を求めるものである。具体的には1-9に示したボシレフの式を非定常に直した、1-11式が適用される。

$$k = \frac{r^2 \cdot \ln(L/R)}{2 \cdot L \cdot (t_1 - t_2)} \cdot \ln(h_2/h_1) \dots 1-11$$

r パイプ半径

h 1、h 2 t 1、t 2 における水位

1-11式は貯留係数を考慮していないので、粘土のような貯留係数が大きい地質の場合には、式の適用に理論的妥当性がなくなる。

(4) 非定常非平衡法

試験方法は上記の非定常平衡法と同様であり、解析手段にクーパー等の式を用いる点異なる。クーパーの解析方法はタイプカーブとのマッチングをさせるため、個人差が生じやすい欠点があり、また、被圧完全井を対象とするので、透水試験においては問題を残す。

1. 3 装置の基本構造

1. 3. 1 必要なシステム

最も基本的な装置としては、試験区間を限定するパッカーシステム、間隙水圧を測定するシステム、透水試験を行うシステムの3つである。

パッカーシステムに関しては、試験区間の変更を容易にする手段として、多連装化を図る。間隙水圧測定に関しては、500m J F Tで成功を取めたインナーパッカーを考慮する。

透水試験は水量と圧力の測定が基礎項目であるが、圧力に関しては間隙水圧測定装置で兼用することができる。水量に関しては、非定常法試験の場合は、圧力をパラメーターとしてこれを求めるので、間隙水圧測定装置で足りる。定常法においては注水、揚水いずれにしても、その水量を測定しなければならない。揚水の場合は、地中にポンプを設置する必要がある。

またそのほかに、岩盤壁面を観察するテレビ等の付帯設備が要求されているので、結局次のようにまとめることができる。

表1-2 装置の基本構成

システム	地上部	地中部	備考
パッカー	拡張収縮装置	パッカー	多連装化を考慮する
間隙水圧測定	指示計	圧力計	インナーパッカー法
定常法透水試験	流量計、注水装置	ポンプ	
非定常法透水試験	バルブ制御	トリップバルブ	間隙水圧測定を併用
付帯設備	指示計	ボアホールテレビ	
		マイクロ検層	

1. 3. 2 装置全体の概念

装置の基本構造は、先端部（地中）、中継部、地上部の3つの部分に分けられる。中継部は、ロッドシステムとホースシステムの2つがあり、それによって基本構造に若干の差がある。

図1-2、図1-3のブロック図にそれぞれを示す。

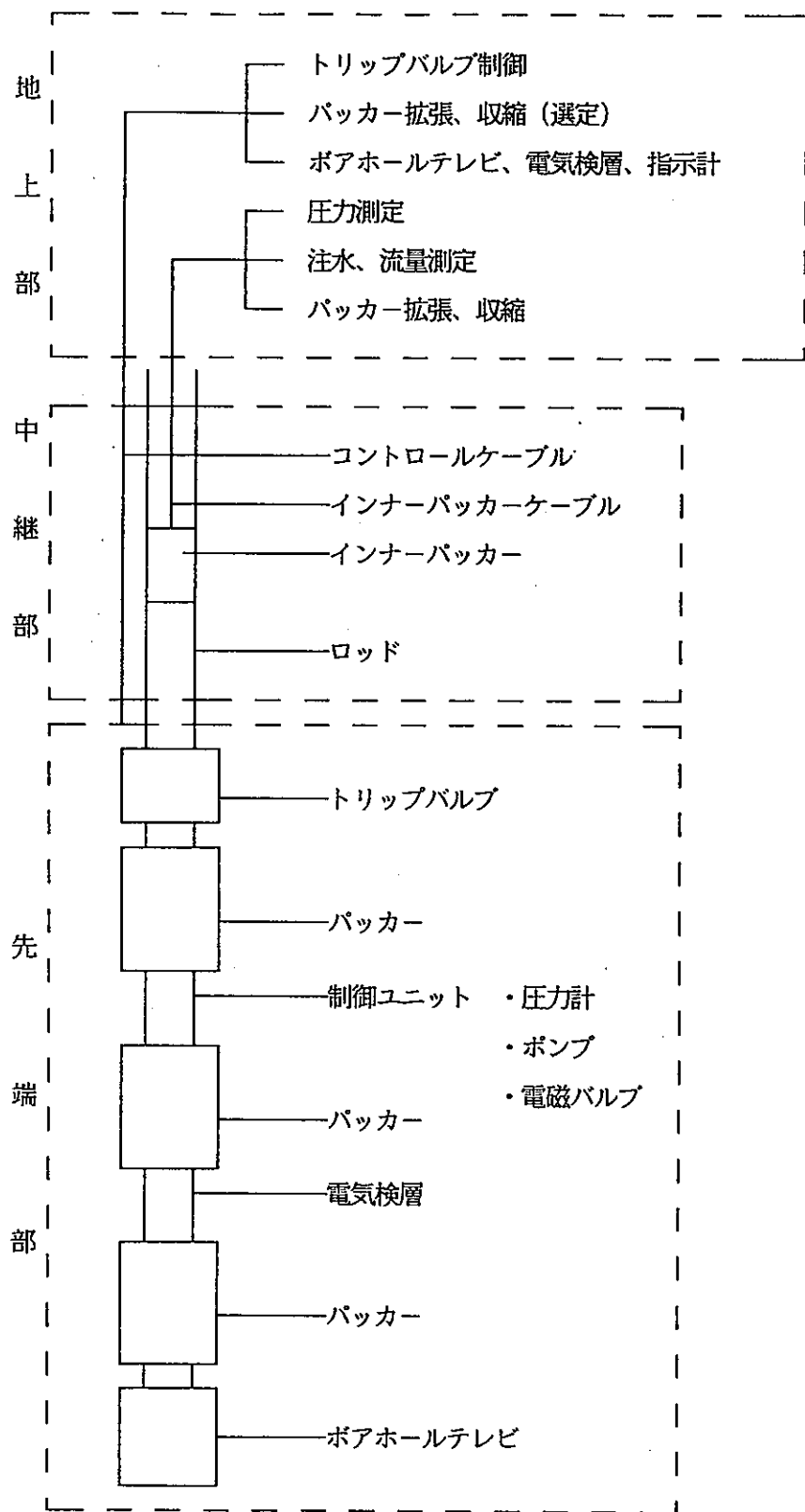


図1-2 ロッド方式のブロック図

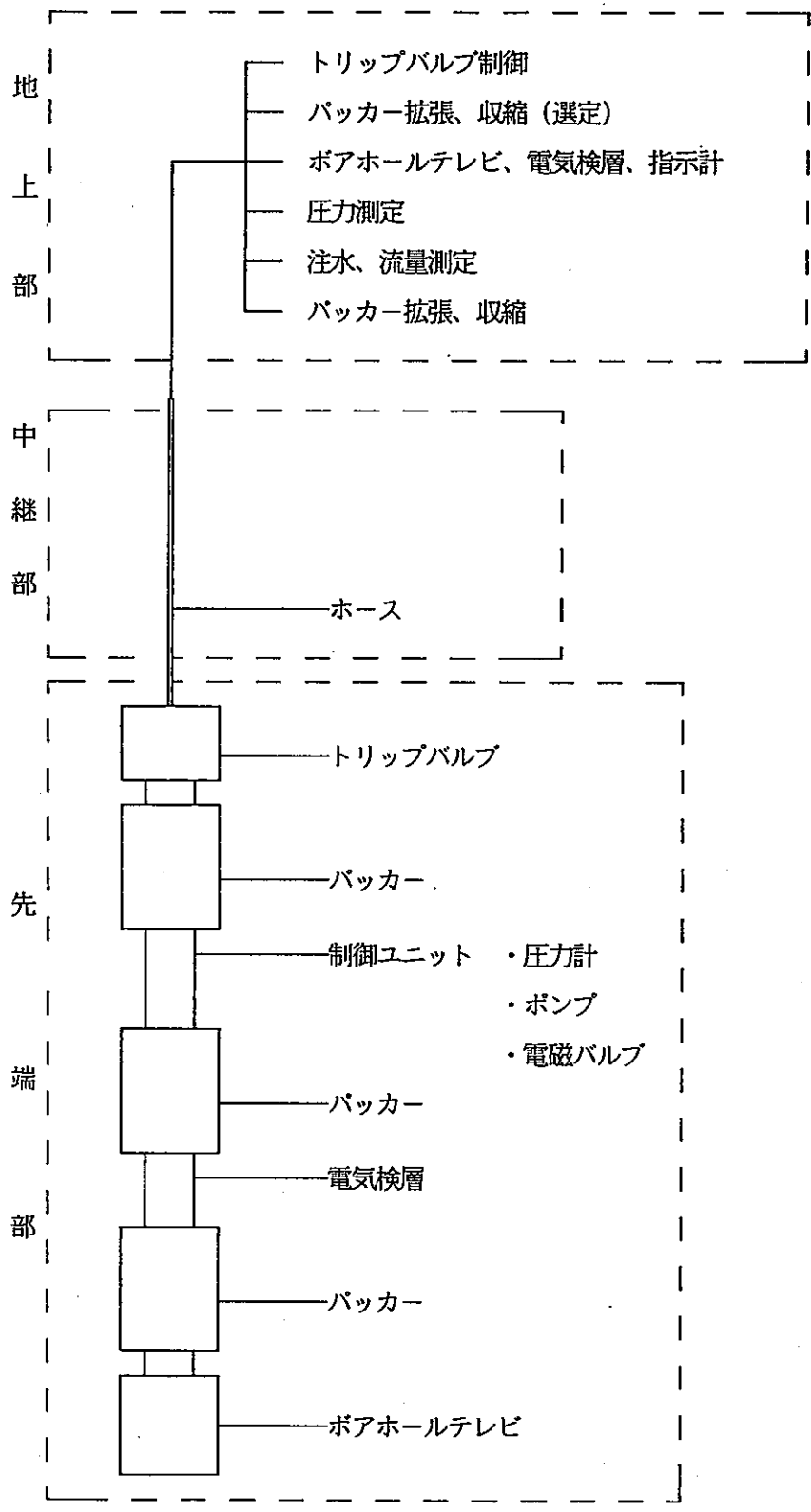


図1-3 ホース方式のブロック図
- 1 1 -

1. 4 海外の例

水理試験装置一式の、システムとして完成されたものは世界的に見ても数少なく、次に示すスエーデン、SKB (IPA社) のアンビリカルホースシステム (Umbilical Hose System) しかない。ただし部品として見ると種々のものがあり、例えばパッカー、バルブ、水位計等がある。そしてそれぞれが、目的に応じてこれらの部品を組み合わせ使用しているのが現状である。

1. 4. 1 アンビリカルホースシステム

大深度水理試験機として世界的に使われている、スエーデン、SKB (IPA社) のアンビリカルホースシステムを例として報告する。

(1) 装置の説明

この装置は図1-4に示す用に、地上部分は3台のトレーラーよりなり、それぞれ電源動力搭載車、水質化学分析装置搭載車、水理試験機搭載車 (ホース巻き上げ装置を含む) に分かれている。その名前の示すように、中継部分はホース方式を採用している。先端部は水理試験用と、水質試験用の2つのユニットがあり、目的に応じて付け替える構造になっている。

水質試験用のユニットにはポンプが設置されており、水質分析用の採水機能があると共に、先端部にも水質測定用のプローブがあり、モニタリングができるようになっている。

水理試験は非定常系の試験は行わず、定常系が主に行われている。また、テレビ等の検層装置はなく、パッカーの多連装化もされていない。

(2) 装置に関する所見

次にアンビリカルホースシステムについての所見を述べる。

ホース方式の水理試験機は、昇降作業が容易であり、また送水ホースと信号系のケーブルが一体なので、先端部との結合が比較的単純である点が大きな利点である。パッカーの多連装化を行わないのも、必要に応じて地上に回収するのが容易であるので、あえて、その必要がないからである。水圧駆動の採水ポンプ等も、ホース方式でのみ可能な手法である。

またホース比重が1.0 ~1.1程度で水中重量が軽く、ホースの伸びによる深度誤差が発生しないように配慮してある。

しかし、この装置は欧米の堅固な岩盤を対象にして開発されており、孔壁の崩壊によるジャミングの危険性に対しては、無防備に近いのが欠点である。またホース方式は、構造的にホース内の水を抜くのが難しく、そのため非定常系の水理試験を行うのが困難である。

現場の搬入条件によっては、ホース方式は致命的な欠点となる可能性がある。つまり最小分解単位が1000mのホースなので、搬入道路の不完全な所では、搬入できない危険性がある。

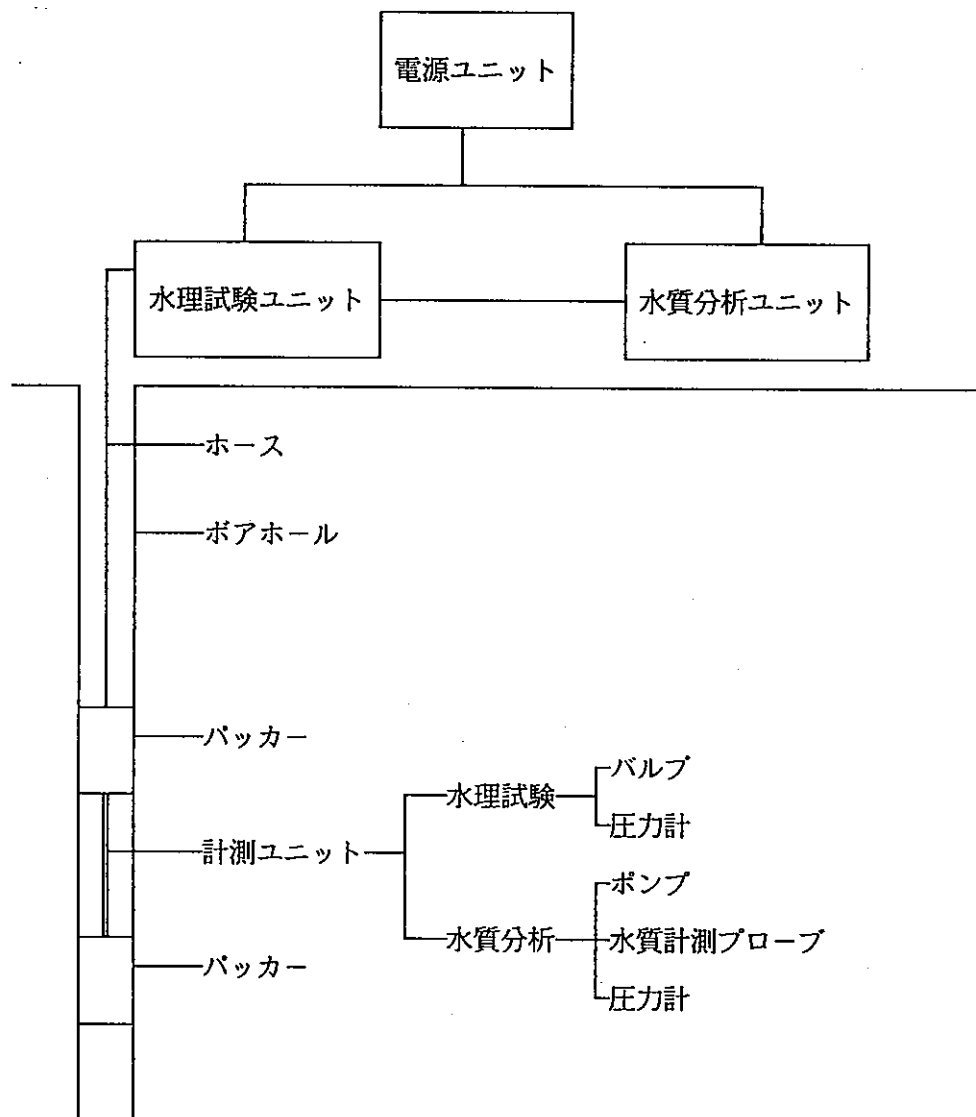


図1-4 アンビリカルホースシステム ブロック図

1. 4. 2 Focussed Packer

透水試験のシステムではなく、その一部分ではあるがここに紹介する。

装置は図1-5に示すように、測定区間を5つのパッカーにより4つに分割できるように工夫したものである。分割された区間はそれぞれ独自に、または組み合わせて測定対象とすることができる。測定区間の変更を行うに際して、作業効率が良くなると共に、水理的擾乱を最小限に押さえることができる。

最初に設定されたパッカー区間自体の変更は容易ではないが、極めて効果的な手法であり、今回の概念設計に際してもこれを採用する。

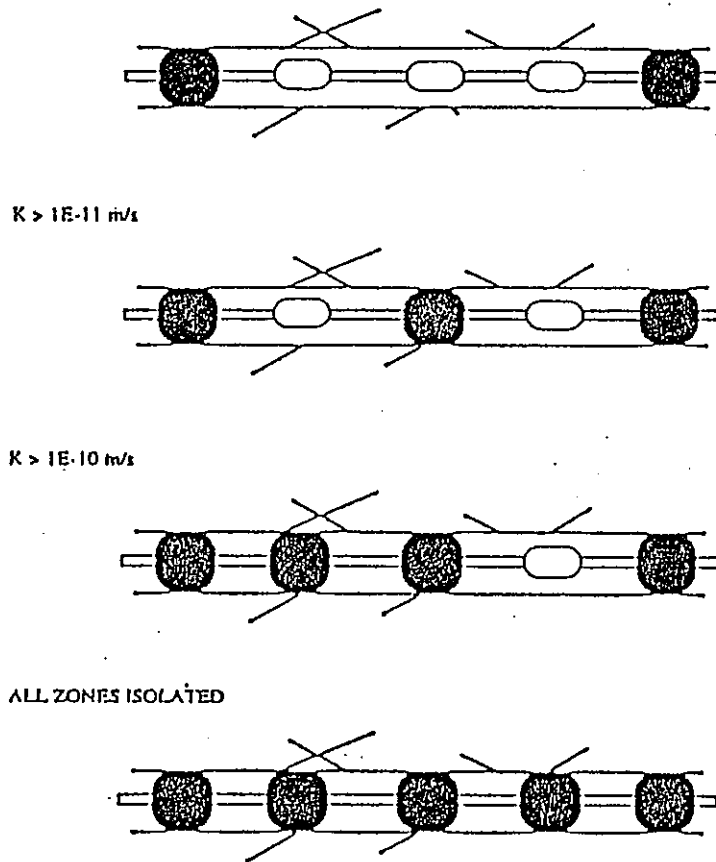


図1-5 Focussed Packer概念図

1. 4. 3 Slug test

Slug testは非定常透水試験の代表的手法であり、Slug methodとも呼ばれ注水式の透水試験の名称のようである。逆に水位を下げる回復法はbailer methodと呼んでいる。水位を瞬間的に変化させる方法として、我が国ではJFTのトリップバルブ、あるいはペーラーが用いられる。

図1-6は米国において用いられるSlug testの透水試験装置である。

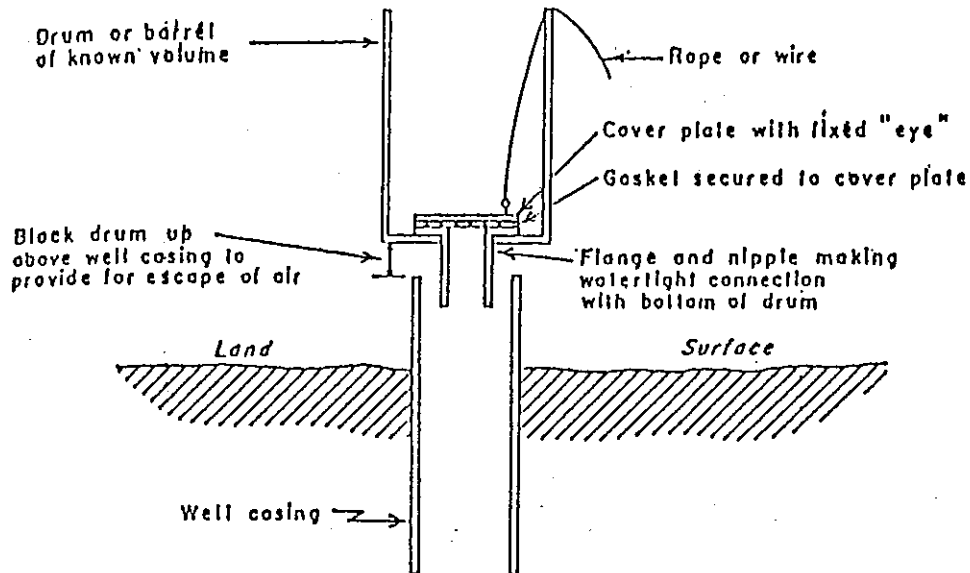


図1-6 Slug test

2. 各部の概念設計

装置の基本構造は図1-2、及び、図1-3のブロック図に示すように、先端部、中継部、地上部の3つの部分に分けられる。整理の都合上、初めに中継部分、以下先端部分、地上部分の順に考察、設計を行う。

2. 1 中継部分

2. 1. 1 問題点の整理

中継部ではロッドかホースかが問題であるが、基本的には

①昇降に関する機械的強度問題（ジャーミング等の異常事態を考慮する）

②送水、または送圧に関する能力、即ち圧力損失

③測定または制御に関する信号、電源等の伝達

の三つが考慮されなければならない。

以下にそれぞれについて考察する。またロッド方式の場合のインナーパッカーケーブル、先端部コントロールケーブルも合わせて、ここで考察する。

2. 1. 2 機械的強度問題

a 安全率

降伏強度の1/2を採用する。異常事態においては1とする。

降伏強度が不明瞭な場合は、破断強度の1/4、1/2をそれぞれ採用する。

b 荷重

引っ張り荷重としてテンションメンバーを含む伝達系の荷重の他に、デッドロードとしてパッカー、バルブ等200kg程度を考える。また安全側に見て浮力は考慮しない。

ジャーミング等の異常事態における予備的荷重としては5tを設定する。

ロッド方式の場合、異常時の回転トルクも考慮する必要がある。しかしジャーミングにおける必要トルクを予測設定するのは、引き抜き力の設定以上に困難である。よってここではあえて必要トルクを予測設定せず、引き抜き力によるのみロッド設計を行い、そのロッドから許容回転トルクを算出することにする。

c 材料選定と強度

テンションメンバーの材料選定は、基本システムに関係するので、分けて考え

る。

① ロッド

ロッド材は耐蝕性の問題から、ステンレス、チタン、ジュラルミンの3つが考えられる。チタンとジュラルミンは強度-自重比が高く、またロッドが軽いので取り扱いも良いが、極めて高価なのが欠点である。また溶接性能が悪いので、欠陥品が生じる危険性が高い。さらに、材料としての一般性がないので、要求に合ったサイズのパイプが市場に無く、特注品となつてますます高価になる恐れもある。従つてステンレスを標準として考え、それでは十分に対応できない場合に他の材料を考慮するべきであろう。

以下に材料の特性を示す。

表2-1 ロッド材料強度

材料名	引っ張り強度 (kg/cm ²)	重さ (g/cm ³)	弾性係数 (kg/cm ²)
ステンレス	2.1×10^3	8	2.1×10^6
ジュラルミン	2.5×10^3	2.7	7.1×10^5
チタン (2種)	3.5×10^3	4.6	1.1×10^6

試算としてJFT500のロッドを用いる。

<ロッド部分>

- ・ロッド断面積 $A = 4.3 \text{ cm}^2$ (外径42.7, 内径35.7)
- ・全重量 $W = 4.3 \times 8 \times 100 + 200 = 3640 \text{ kg}$
- ・ロッド強度 $P = 4.3 \times 2.1 \times 10^3 = 9030 \text{ kg}$
- ・常時安全率 $F_s = 2.4$
- ・短期安全率 $F_t = 1.0$

<ネジ部分>

- ・ネジ強度 = 5814 kg
- ・常時安全率 $F_s = 1.6$
- ・短期安全率 $F_t = 0.7$

ネジ部分に関しては強度が不足しているので、材質、及び形状の変更が必要である。材質をSUS410とし、形状を図2-1とすると、

- ・ネジ強度 = 9690 kg

・常時安全率 $F_s = 2.6$

・短期安全率 $F_t = 1.1$

従ってネジ部分の変更を行えば、JFT500のロッドで、十分1000mに対応できることが分かった。なお、この時の回転トルクは22 kg・mである。次に変形量について同じく試算する。

・変形量 $LD = (3640 \times 50000) \div (4.3 \times 2100000) = 20$
1000mの最大深度においても20cmの伸びに過ぎず問題無いと言えよう。

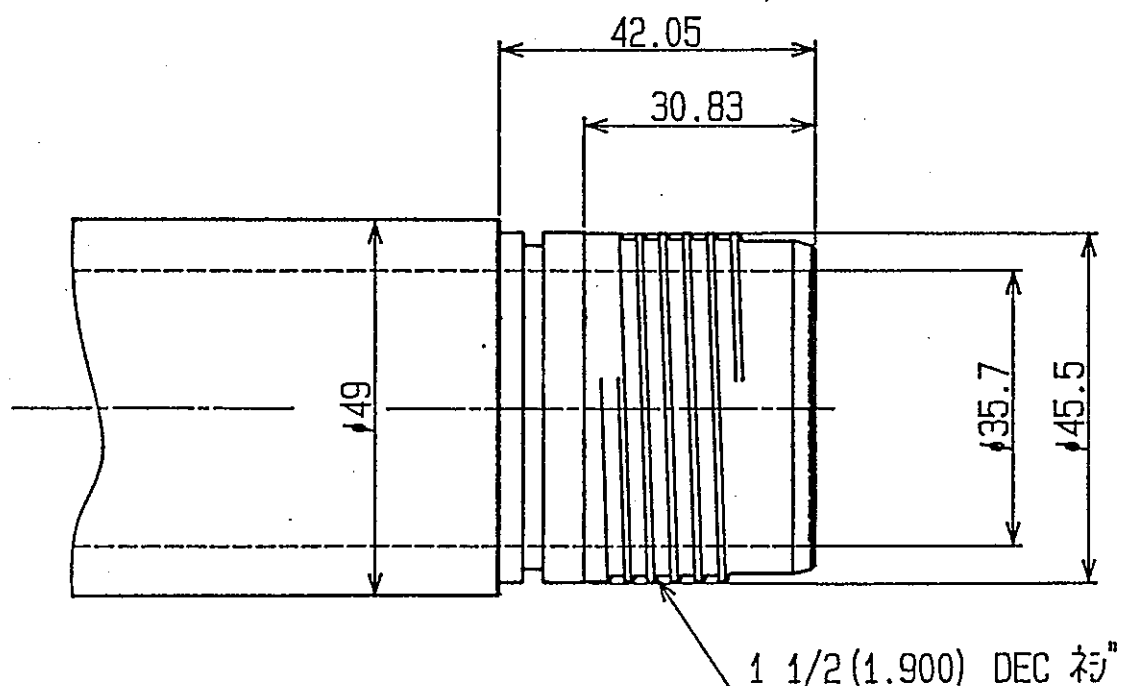


図2-1 変更ロッドネジ

②ケーブル

ケーブルの場合テンションメンバーとしては、ケブラーと鋼線（ピアノ線、ワイヤー）が考えられる。力学的材料特性は表2-2に示すが、単純引っ張り強度ではケブラーが有利である。しかしワイヤーの弾性係数はケブラーの3～4倍は大きいので、許容変形量を考えるとワイヤーが有利である。

ケブラーは繊維状の素材なので、ケーブルの断面設計に際して、例えば隙間充填

の介在物として使用でき、配列の自由度が大きい。また比重が小さいので、ケーブル重量が軽量化できるのもケプラーの利点である。

表2-2 ケプラーとワイヤーの力学的材料特性

材料	比重	引っ張り強度 kg/mm^2	弾性係数 kg/mm^2
ケプラー	1.4	285	6000
ワイヤー	8	100~110	21000

ホース方式の場合、断面設計が終了しないと自重の設定ができないが、仮に自重を4000kgとすると、ケプラーの場合で断面積は56mm² (0.56cm²)、ワイヤーでは160mm² (1.6cm²)が必要である。

2.1.3 送水問題

送水抵抗は作業効率の低下、測定結果の誤差等を発生させるのでその検討を行う。

送水時の流体抵抗は、粘性係数を支配要因とする、ハーゼンのパイプフローの問題と、レイノルズ数を要因とする乱流問題の2つがある。

(1) パイプフロー

次の2-1式による。

$$\Delta p = \frac{81 Q \mu}{\pi r^4} \quad \dots 2-1 \text{式}$$

または

$$Q = \frac{\Delta p \pi r^4}{81 \mu} \quad \dots 2-2 \text{式}$$

Δp …… 送水抵抗による圧力損失 g/cm^2 (cm)

l …… パイプ長さ cm

Q …… 送水流量 cm^3/s

μ …… 水の粘性係数 gs/cm^2

r …… パイプ半径 cm

2-1式は透水試験時における、圧力損失による誤差問題等に用いるが、これについては透水試験における流量と誤差問題の項で述べる。

また2-2式はバッカー拡張等、地上からの給水問題に使用する。

水の粘性係数 μ は、表2-3に示すように温度依存性がある。温度が低い方が μ が大きくなって、流体抵抗が大きくなり、設計上は安全側となる。

ここで条件により

$$l = 1000\text{m} = 100000\text{cm}$$

$$\Delta p = 10\text{kg/cm}^2 = 10000\text{g/cm}^2$$

また、安全側に見て、国内の平均的表層地下水の温度15度程度を採用して

$$\mu = 1.2 \times 10^{-5} \text{gs/cm}^2$$

の数値を用いると2-2式は

$$Q = 3272r^4 \dots\dots\dots 2-3\text{式}$$

となり、図で示すと図2-2のようになる。

通常良く使用する、内径4mmのチューブを例にすると

$$Q = 5.2\text{cm}^3/\text{sec} = 312\text{cm}^3/\text{min}$$

と試算され、あまり実用的ではないと考えられる。

表2-3 温度と水の粘性係数の関係

温度°C	5	10	15	20	30	40	50	60
粘性係数	1.520	1.307	1.138	1.002	0.797	0.653	0.548	0.467

JIS Z 8803による

$\times 10^{-5} \text{gs/cm}^2$

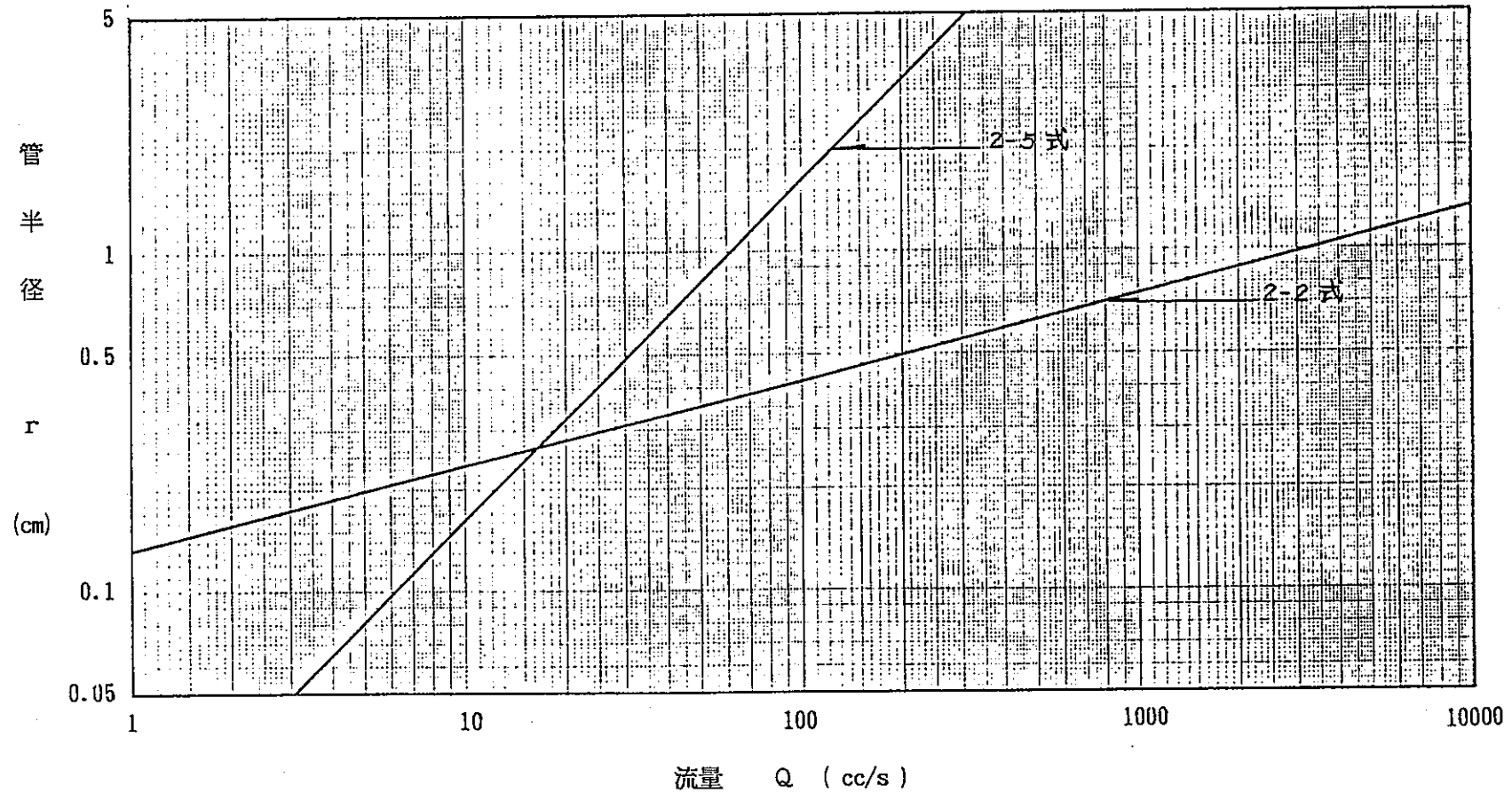


図2-2 管径と流量の関係

(b) 乱流問題

乱流はレイノルズ数により決定されるが、図2-3に示すようにその限界点は上下2つある。一般には安全側に見て低限界レイノルズ数2000を用いるが、これは乱流状態から層流状態に戻る回復点であり、逆に層流状態から乱流状態に戻る回復点は高限界レイノルズ数と呼ばれ、50000に達した例が報告されている。

つまり層流条件が維持されるなら、設計上2000以上のレイノルズ数が採用できることを意味しており、ここでは4000を採用する。

算定式は以下に示す。

$$v = \frac{Re \nu}{D} \quad \dots \dots \dots \text{2-4式}$$

v	.....	管内流速	cm/s
Re	.....	設計レイノルズ数	
ν	.....	動粘性係数	cm ² /s
D	.....	パイプ直径	cm

Re = 4000

ν = 0.01

の条件を用い、更に管内流速を流量Qに書き換えると2-5式となる。

$$Q = 31.4 D^3 r \quad \dots \dots \dots \text{2-5式}$$

図2-2には、2-5式を併記してあるが、パイプ半径が2.5mmを越えるあたりから、乱流になる危険性がある。

2-5式におけるQは、パイプフロー問題と異なり、これが流量のリミットではないことに注意されたい。これを越えると見かけ上の粘性が、大きくなると考えても差し支えないであろう。

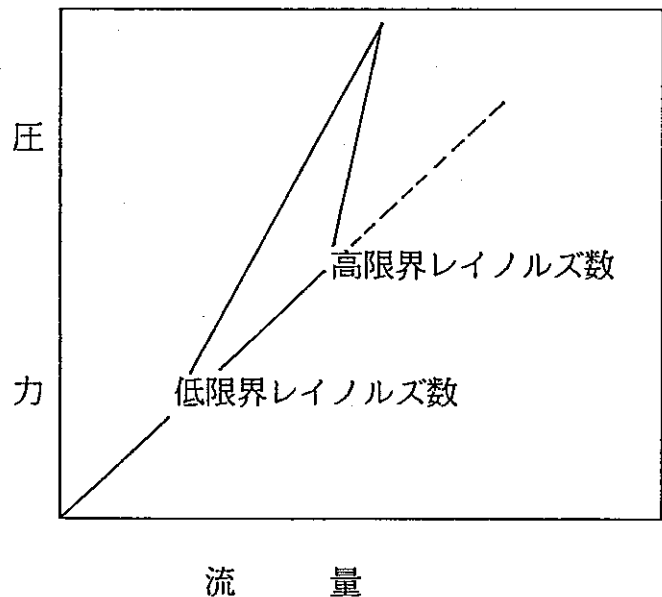


図2-3 レイノルズ数の概念

(3) 透水試験における流量と誤差
 透水試験における流量は、ここでは1-7式に示したボシレフの定常式を用いる。

- ・試験区間 $L = 1000 \text{ cm}$
- ・試験差圧 $H = 500 \text{ cm}$
- ・井戸半径 $R = 5 \text{ cm}$

の条件を用いると、

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1000 \cdot 500 \cdot k}{1 \ln(1000/5)}$$

$$= 5.93 \times 10^5 \cdot k \text{ cm}^3 / \text{s} \quad \dots \dots \dots 2-6 \text{ 式}$$

透水係数 $k = 1 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ とすると、 $Q = 59 \text{ cm}^3 / \text{s}$ となり、図 2-2 または 2-5 式により乱流に関する必要パイプ径を求めると、半径 1 cm 程度が算定される。

また 2-1 式でこの時の損失水頭を求めると、 180 cm となる。

パイプ内の粘性抵抗による透水係数の測定誤差 E としては、

$$E = \frac{\Delta p}{H} \times 100\% \quad \dots \dots \dots 2-7 \text{ 式}$$

で示される。これを 2-1 式と 1-7 式で整理すると、次の 2-8 式となる。

$$E = \frac{16 L \mu \ell k}{r^4 \ln(L/R)} \times 100\% \quad \dots \dots \dots 2-8 \text{ 式}$$

- E 誤差率
- L 試験区間
- μ 粘性係数 $= 1.2 \times 10^{-5}$
- ℓ パイプ長
- k 透水係数
- r パイプ半径
- R 井戸半径

$L = 1000 \text{ cm}$, $\mu = 1.2 \times 10^{-5} \text{ gs/cm}^2$, $\ell = 100000 \text{ cm}$,
 $r = 1 \text{ cm}$, $R = 5 \text{ cm}$ の条件でこれを計算すると

$$E = \frac{362379 \times k}{r^4} \% \quad \dots \dots \dots 2-9 \text{ 式}$$

図 2-4 に計算結果を示す。

誤差を 10% 以下に押さえるなら、パイプ半径は 1.5 cm 以上必要と考える。

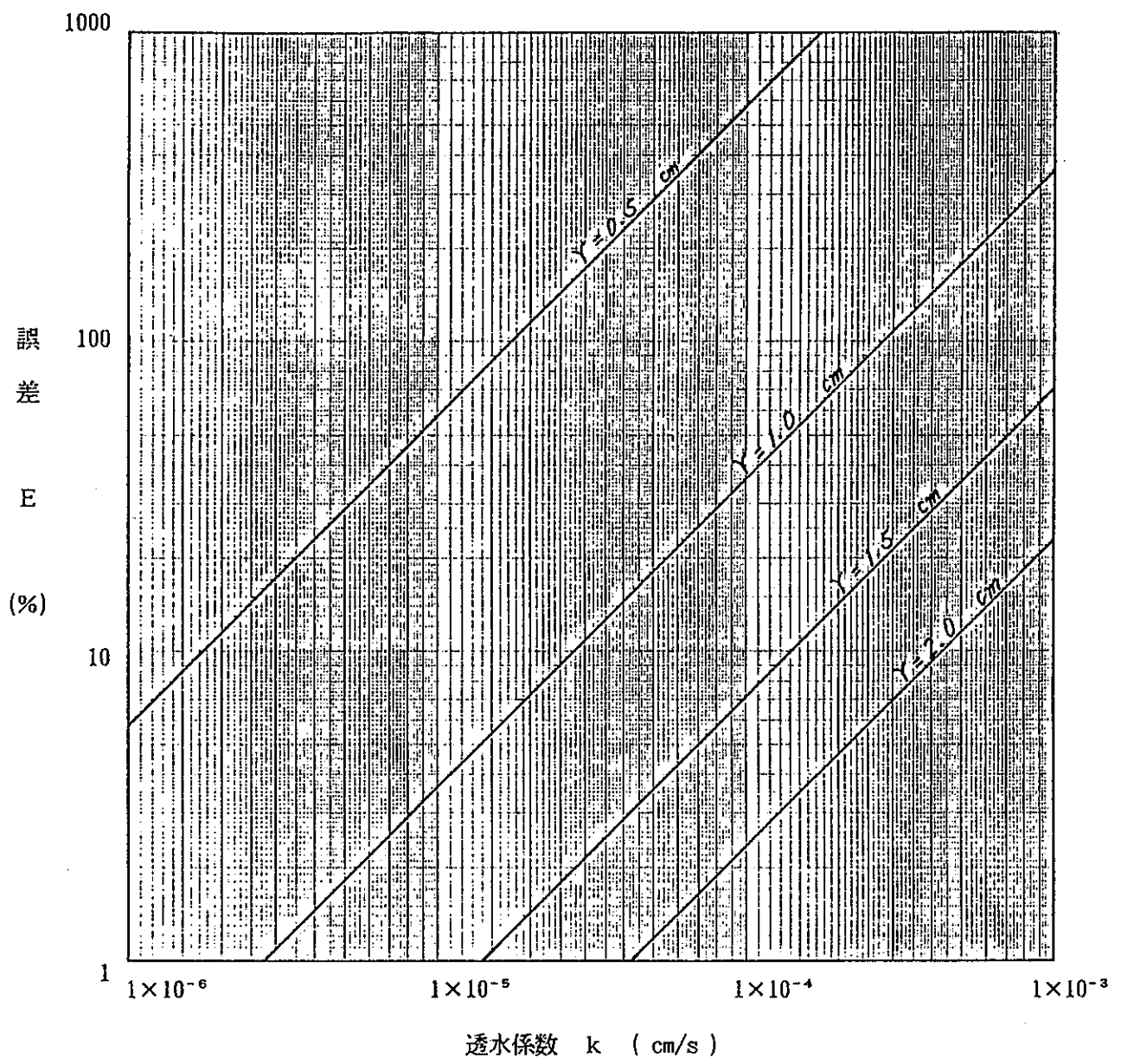


図2-4 透水係数と誤差

2. 2先端部

2. 2. 1 パッカー

(1) 検討項目と問題点

・パッカー長

透水試験では測定区間を限定するため、パッカーを用いてボーリング孔の上下を遮断する。この際に、岩盤割れ目の形状とパッカー長によって、遮断能力は大きく左右される。

一般的には海外の例を含んで1 m前後が多く、JFT500の場合でも1.5 mである。特に我が国のように割れ目の発達したところでは、極力長くしたい。

またラバー自体の硬さも、遮断性能を左右するので、ここで述べておく。

・耐圧問題

最大測定深度1000 mの設計なので、圧力に関しては、最大100kg/cm² の環境下を考慮する必要がある。差圧が大きい訳ではないので、構造、材料的な破壊は心配ない。ラバーの過大変形による、取り付け部分でのシール漏れが懸念される。

・差圧問題

パッカー上下において、間隙水圧の違いから、大きな圧力差が発生する可能性がある。つまり、間隙水圧の大きい方に対して、適正な拡張圧を設定すると、反対側では過剰圧となり、パッカーの異常変形、更には破壊へとつながる危険性がある。

1. 1. 3で述べたように設計最大水頭差圧を20 kg/cm² とすると、これに数kg/cm² のパッカー拡張圧を足したものがパッカー差圧となるので、実際には20～30 kg/cm² 程度のパッカー許容差圧が必要である。

・圧力供給方法

パッカーには最大100kg/cm² 以上の拡張圧力を設定する必要があり、これを地上から、空気圧でコントロールすることは考えられない。水圧コントロールなら地上制御でも可能であるが、送水抵抗が大きいことと、収縮排水時に地下水を汚染する危険性がある。

(2) パッカー選定

パッカーはラバーの構造上2つの形式がある。1つはJFT500等で従来から使用してきた一般型(Aタイプ)であり、もう1つはラバーにワイヤーが入った(Bタイプ)である。

Aタイプは国産品であり、ラバー自体が少量生産品なので、長さ等の形状はもとより材質の変更も簡単に行える。

表2-4 Aタイプパッカー性能表

型式	46	66	76
最大差圧 kg/cm ²	常用20、最大30		
シャフト内径 mm	12	17	17
収縮時外径 mm	44	59	70

性能を表2-4に示したが、差圧問題に関しては常用20 kg/cm²、最大30 kg/cm²まで許されるので、設計条件を満足する。問題は1000mの深度に対しての性能が、不明な点である。つまり、メーカーとしては耐圧を保証しておらず、もちろんその実績もない。

一方Bタイプは外国製品で、保守、部品補給の面でどうしても難がある。またラバーは工場の生産ラインに乗った量産品なので、材質変更は不可能に近い。差圧に関しては表2-5に示したが、最も口径の小さいタイプで設計ぎりぎりであり、形状的に使用が考えられるT.T. 34型では明らかに設計条件を満足しなくなる。Bタイプの利点はラバーが極めて強く、孔壁が多少悪くても破裂することはまずない。このことは、深度が深くなった際の交換作業のロスタイムを考えると、非常に有利な点である。また1000mの深度実績があるのも利点である。

表2-5 Bタイプパッカー性能表

型式	TT. 23B	TT. 34	TT. 36
最大差圧 kg/cm ²	25.3	12.6	10.2
シャフト内径 mm	16	25	32
収縮時外径 mm	42	54	72
拡張時最大外径 mm	100	120	160

結論としてはAタイプを優先して考える。問題点は耐圧がないのではなく、不明なのであるから、実施設計に先立ってこれを実験すれば良い。実験の結果問題がなければ、Aタイプを採用する。問題が発生した場合はBタイプを採用する。

(3) 拡張収縮問題

水質問題に対しては、測定深度付近の地下水を用いて、バッカーを拡張するようになれば解決する。そのためにはポンプを用いても良いのだが、先端部の構造が複雑になるので、ここでは図2-5に示すような地上加圧方式を提案する。

作業手順としては、

- ①トリップバルブを開けた状態で所定の深度に降ろすと、ロッド内に地下水が満たされる。
- ②トリップバルブを閉じ、ロッド内に圧力かける。
- ③電磁バルブ1を開きバッカーを加圧された地下水で拡張する。
- ④電磁バルブ1を閉じるとバッカーは固定される。
- ⑤電磁バルブ2を開くと排水され、バッカーは収縮する。

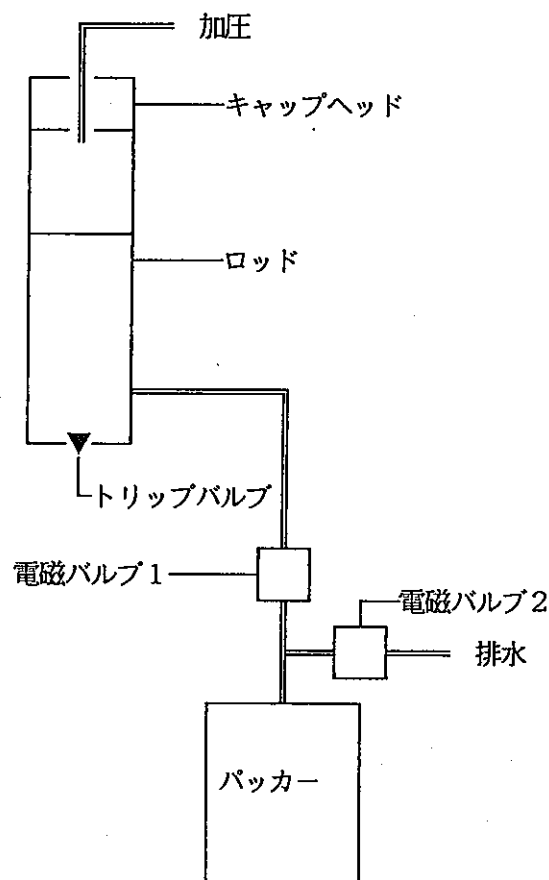


図2-5 バッカー拡張方式

ただし、後述するが電磁バルブは構造上汚れに対して弱く、フィルターが必要である。透水試験と違うので、電磁バルブ、フィルターでの圧力損失を厳密に配慮する必要はない。

2. 2. 2 バッカーの多連装化と圧力測定

バッカーを多連装化し、半固定ではあるが、地上に回収することなく測定区間を変更するのは極めて効果的である。バッカー拡張の構造上は特に問題はなく、図2-5のシステムを複数個接続するのみである。

ただし測定区間を選択した際には、その区間を独立させて中継部分に接続しなければならず、もう1つ試験用のバルブが必要となる。この試験用のバルブに関しては、圧力損失を考慮する必要があるので、次の2. 2. 3項で詳述する。

以上述べたように、1つのパッカーに合計3つのバルブを必要とするので、あまり多連装化すると制御部分が煩雑になり、3～4連装が限度と思われる。

またパッカー拡張圧力の設定、差圧チェックの意味等で種々の圧力を監視する必要がある。図2-6に圧力測定位置を示す。

ここで用いる圧力計は 100 kg/cm^2 以上の容量が必要となり、精度または分解能が問題となる。その要因としては、センサー、アンプ、A/Dコンバーターの3つがあるので、以下に考察を行う。

①センサー

センサーにはひずみゲージ、差動トランス、半導体、等いくつかあるが、大きさの制限からひずみゲージと半導体の2つが考えられる。次の表2-6はひずみゲージと半導体の性能を比較したものである。メーカー、製品等により多少の違いはあるが、精度に関する基本的ファクターにおいて、ひずみゲージが優秀なことがわかる。半導体の利点は出力電圧が圧倒的に大きいことで、センサーからアンプの途中でのノイズに対して強く、また増幅率が小さくてすむので、アンプに負担がかからない。しかし本装置ではセンサーとアンプの距離は近いので、この点はメリットにならず、ひずみゲージを採用する。

②アンプ

ひずみゲージを採用した場合、高精度なアンプが要求される。しかし最近の電子デバイスの発達は著しく、センサーの基本精度を左右することはない。

③A/Dコンバーター

センサーの精度として0.1～0.2%程度が期待できるので、それを上回る分解能がA/D

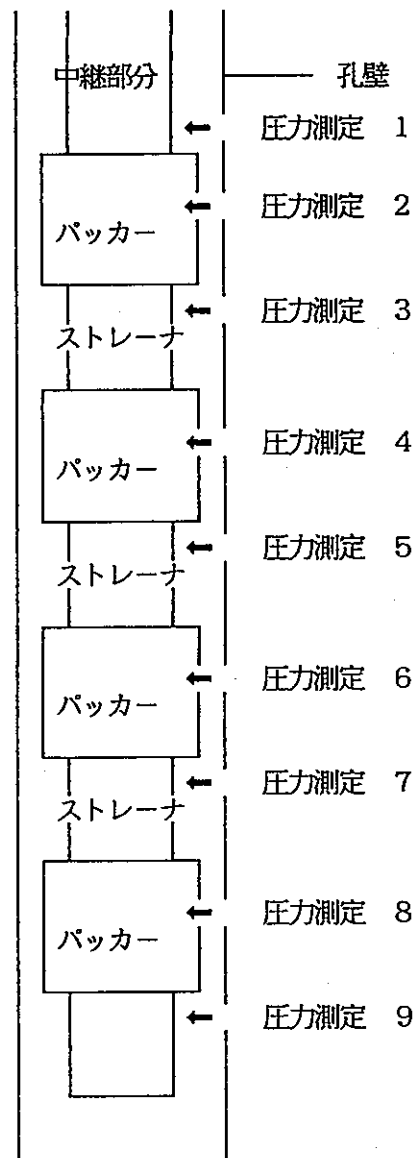


図2-6 圧力測定位置

コンバーターに要求される。0.1%を有効とすると、その10倍は分解したいので13bit以上のA/Dコンバーターが必要である。PC9800用の汎用A/Dコンバーターでは16bitがあるので、これを採用する。

以上のデバイスを使用した場合、最終的にどの程度の精度になるか次に考える。測定精度に最も影響を与えるのは温度である。一般的な地温勾配から見て、1000mの深度では60~80℃程度は考慮する必要がある。表2-6より温度による影響を最大に見積もると、零点の影響が $0.02 \times 60 = 1.2\%$ 、出力の影響が同じく1.2%、アンプ、A/Dコンバーターによる影響を合計すると3%程度の誤差が考えられる。

しかし通常温度ドリフトは一定の方向があり、あらかじめ温度に対して補正をしておけば、誤差を小さく押さえることは十分に可能であり、現実には十分な管理を行えば、0.2%程度に納まると考えられる。

表2-6 ゲージの性能比較

	ひずみゲージ式	半導体ゲージ式
出力電圧	1.5mv/v	11~78mv
非直線性	0.2% R. 0	0.5% R. 0
ヒステリシス	0.2% R. 0	0.5% R. 0
繰り返し性	0.1% R. 0	0.3% R. 0
印加電圧	10V DC	4V DC
入出力抵抗	350オーム	1000オーム
絶縁抵抗	2000Mオーム	100Mオーム
温度保証範囲	-10~80℃	0~50℃
許容温度範囲	-15~100℃	-20~80℃
温度による零点の影響	0.02% R. 0/℃	0.06% R. 0/℃
温度による出力の影響	0.02%/℃	0.03%/℃
許容過負荷	150%	150%
耐振性	50G	10G

2. 2. 3 トリップバルブ

(1) 問題点

トリップバルブは以下のような性能が要求される。

- ①水深1000mの環境下、即ち100kg/cm²の耐圧を有する。
- ②地上操作で自由に開閉できる。
- ③透水試験に対する誤差の問題から、流体抵抗が十分に小さいこと。
- ④非定常透水試験に対する誤差の問題から、短時間にバルブが全開放できる。
- ⑤孔内の地下水に含まれる程度の汚れに対して、確実な作動ができる。

(2) 電磁バルブの使用

遠隔操作のできるバルブとしては、一般に電磁バルブが考えられる。電磁バルブの構造として、直動式とパイロットキック式の2つがあり、それぞれに特徴を持つ。

直動式は小型高耐圧であるが、流体抵抗が大きく、また汚れに対してデリケートである。

一方パイロットキック式は大流量が得られるが、大型であり、耐圧もあまり無い。またソレノイドをトリガーとして、バルブの開閉はバルブに働く差圧を利用する構造なので、圧力差が無い場合には作動不良を起こす危険性が高い。汚れに対してデリケートなのは直動式と同様である。

従って、小型高耐圧という利点から、直動式の電磁バルブの採用が考えられる。

直動式電磁バルブの問題点は、流体抵抗と汚れの2点である。汚れに関してはフィルターの性能に左右される。流体抵抗は通常オリフィス値、またはCv値で表され、流量と損失水頭の関係は次式で示される。

$$Q = 14.28 C_v \sqrt{\Delta P} \quad \dots \dots \dots 2-10$$

Q 流量 ℓ/min

ΔP 損失水頭 kg/cm²

ここで一例としてシーケーディ株式会社のGAGシリーズを選定する。

表2-7 電磁バルブ性能表

形式番号	接続口径	Cv値	耐圧kg/cm ²	許容差圧kg/cm ²	形状
GAG341	PT1/8	0.09	250	10	38×47
GAG342	PT1/8	0.15	250	7	38×47

2-10式を計算した結果を図2-7に示す。

2. 1. 3 (1) で述べた流量をここに適用すると、数 kg/cm^2 の圧力損失があり、実用性がない。許容損失水頭を 50 cm (0.05 kg/cm^2) とすると流量は $0.29\sim 0.48\text{ l/min}$ と算出される。

これは透水係数で考えると、 10^{-5} cm/s の場合の流量である。つまりこのオーダーの透水係数ならば測定上大きな誤差にはならないといえる。

次にバッカーを多連装した際の使用について考える。この場合測定区間が短くなるので、流量もそれに比例して小さくなる。測定区間長を 2 m とすると流量は $1/5$ となり、上記の許容損失水頭 50 cm を採用すると、 $5\times 10^{-5}\text{ cm/s}$ の透水係数が測定できることになる。

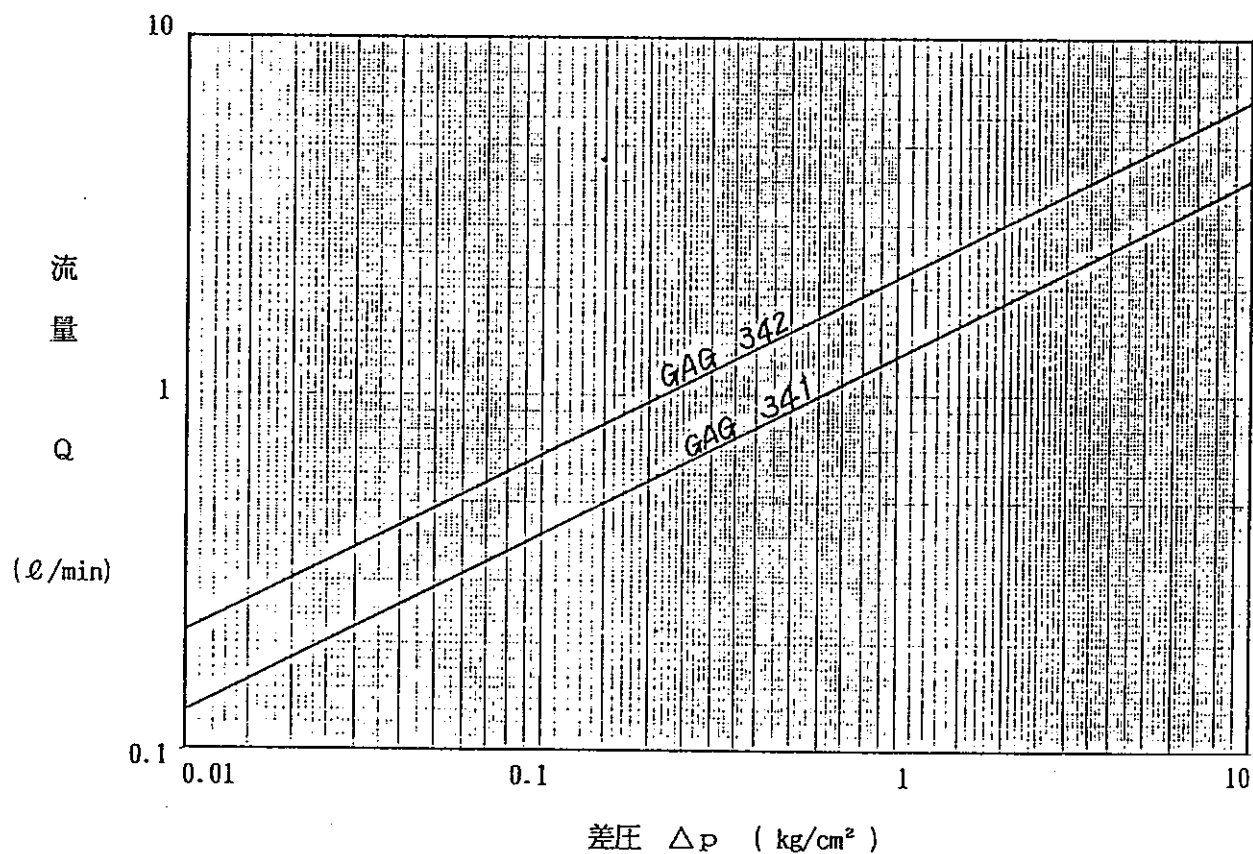


図2-7 電磁バルブにおける損失水頭

(3) 専用トリップバルブの開発

1. 1の設計条件に示した $1 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ の透水係数を測定するためには、一般の電磁バルブは損失水頭が大きく採用できない。動燃式JFT500の開発に際して採用したトリップバルブは、地上からの水圧を用いて操作している。しかし1000mの場合送水抵抗が大きく、④の問題をクリアーすることができないので、やはりここで採用はできない。そこで今回、新たな専用トリップバルブの開発が考えられる。

一般にバルブ構造としては、ボールバルブ、ニードルバルブ、ゲートバルブ等有るが、いずれも弁座が金属であり、これが汚れに対して弱い理由である。従って弁座の材質を柔軟なゴムにすれば、対汚れ問題については対処できる。

スムーズな遠隔操作を行うには、エレクトロニクスを使うのが現実的である。電磁バルブに用いられる電磁石は、原理的にストロークが短くなるので、ここでは図2-8に示すような、モーター駆動のバルブを提案する。

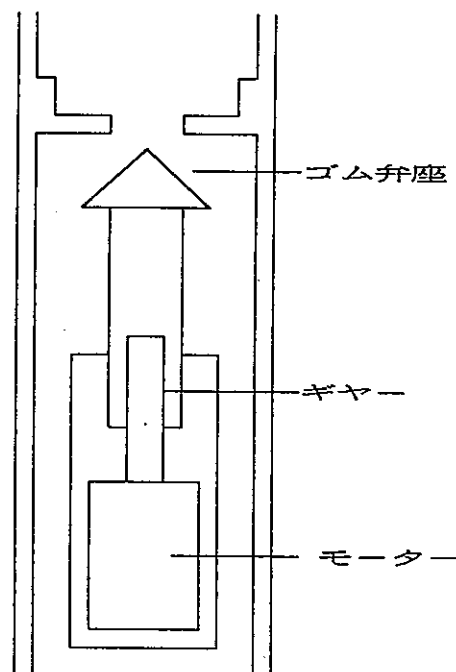


図2-8 トリップバルブ

2. 2. 4 ポンプ

(1) 問題点

透水試験または採水のための揚水ポンプは、以下の性能が要求される。

- ①設計条件より300mの揚程が必要である。
- ②水量がコントロールできること。
- ③小型であること。
- ④ 100 kg/cm^2 の耐圧があること。
- ⑤脈動しないこと。

ポンプの構造として2つに大別することができる。1つはピストン構造であり、高圧が得られるが、流量が小さい。もう1つは羽根車構造であり、低圧大流量が得られ

る。上記の条件を考慮すると、ピストンタイプを採用しなければならないが、このような性能のポンプは、既製品では見当たらない。

アンビリカルホースシステムの場合には、電気モーター使用のポンプと、地上からの水圧を駆動源とするピストン-ピストンポンプの2系統を有している。そして揚程が小さい場合には電動ポンプを使用し、揚程が深くなると水圧駆動ポンプを使用しているようである。つまり、モーター使用ではいずれにしても大揚程ポンプは製作困難なようである。

(2) ポンプ設計

a 動力源

アンビリカルホースシステムのように、動力源としては、電気と圧力の2つが考えらる。圧力を動力源とする場合は、2. 1. 3 (1) で述べたように圧力損失が大きいので、供給方法に問題がある。つまりアンビリカルホースシステムのような、ホース方式ならば送圧チューブ設計に余裕があるので、比較的太いチューブが採用でき、圧力を動力源とすることも可能であるが、ロッド方式の場合には大口徑チューブは使用できないので、圧力を動力源とすることは困難である。

以上のことより、いずれの中継方式でも用いられる方法として、ここでは電力を動力源として採用する。

b 流量の設定

透水試験を基準に流量を設定すると、2. 1. 3 (3) で示したように、最大流量として $60 \text{ cm}^3 / \text{s}$ ($3600 \text{ cm}^3 / \text{min}$) が得られる。一方最低流量は透水係数を $1 \times 10^{-9} \text{ cm} / \text{s}$ として、 $6 \times 10^{-4} \text{ cm}^3 / \text{s}$ ($3.6 \times 10^{-2} \text{ cm}^3 / \text{min}$) が得られる。しかしながら、前記のアンビリカルホースシステムの場合でも、数百 cm^3 / min が最大流量であり、このような性能をポンプに求めるのは設計上困難なように思える。

c ポンプ概略設計

ポンプの性能としては前記の流量、耐圧の他に、形状の制限、透水試験用ポンプとして脈動しないこと、等を考慮しなければならない。

図2-9に概念図として示す。

ピストンはモーター直結の往復複動式で脈動せず、かつモーター軸にスラスト荷重を懸けない構造とした。ピストン式の場合、流量の制御はモーターの速度によっ

て行う必要がある。ここでは制御範囲が極めて広いので、ステップモーターを採用する。通常の小型モーターではトルクが不足するので、以下に高トルクを発生するギヤードタイプのステッピングモーターの一例を示す。

<モーター例>

- ・メーカー オリエンタルモーター株式会社
- ・形式名 UPD533HG1-NB
- ・許容トルク 15kg・cm
- ・回転数 0～70rpm
- ・外径 46mm
- ・長さ 92.5mm

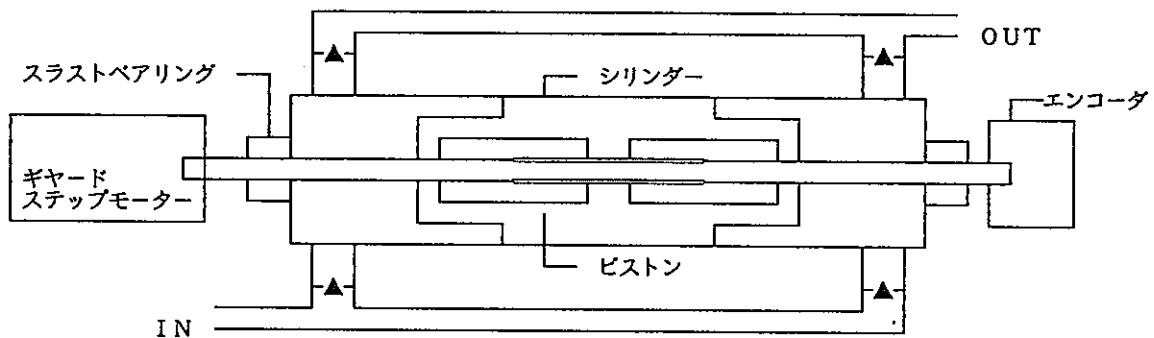


図2-9 ポンプ概念図

2.2.5 ボアホールテレビ

ここでのボアホールテレビは、孔壁の展開図になる通常のボアホールテレビではなく、測定深度設定のための目視観察を目的とする。従ってパイプカメラのように、超ワイドレンズを用い孔底方向を写すものである。そのため、方位計、回転装置等は不要なので、構造的にはシンプルになる。しかし、反面では以下に述べる、いくつかの問題が新たに発生する。

①照明問題

深度方向を撮影する場合、焦点距離が長いので、側面方向撮影とは比較にならないほどの、強力な照明が要求される。この強力な照明装置を、テレビレンズの周辺に設置するのはかなり困難である。対策として図2-10のように、光源は離して置き、

光ファイバーでこれを導く方法が考えられる。

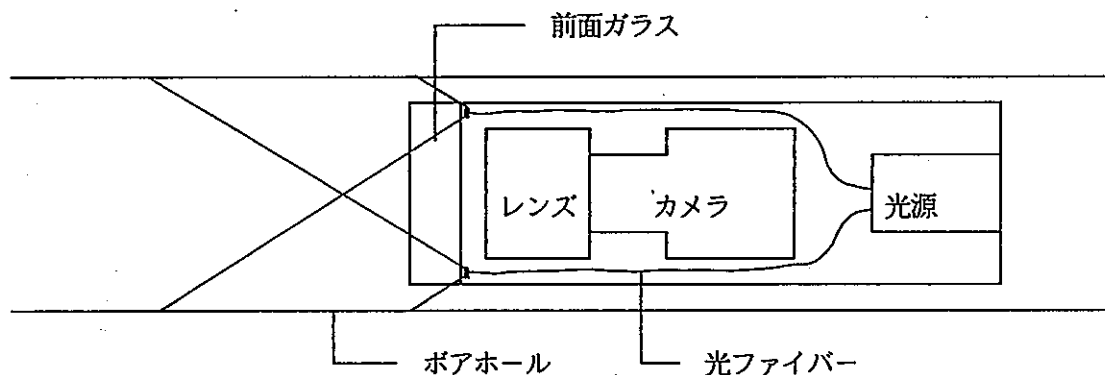


図2-10 ボアホールテレビの照明方法

②前面ガラスの汚れ

一般のボアホールテレビでは、撮影時間は比較的短く、何日も連続して水中に設置されることはない。それに対して、水理試験装置の場合水中に設置される時間は極めて長く、大規模、大深度測定では、数週間から数か月は連続的に測定する可能性がある。その際前面ガラスに、所謂水垢が付着して映像が不鮮明になる可能性が高い。

対策としてはワイパーの設置が考えられ、設計としては可能である。しかし、ワイパーブレードの押圧力、材質、更には効果の程度等不明な要素が多く、課題を残す。

2.2.6 電気検層

電気検層はすでに確立した技術であるが、本件のように他の装置に組み込むとなると、いくつかの問題があるので、以下にそれを整理して述べる。

①電極配列構造

電極の配列には2極法、3極法、4極法の3つがある。このうち一般に電気検層に用いられ、また最も適した方法である2極法をここでは採用する。

②電極間隔

一般にはノルマル検層とマイクロ検層の2つがあるが、両者の間に基本的な差はなく、慣習として2極法の電極間隔が25cm、50cm、100cmのものをノルマル検層、5cm、2.5cmをマイクロ検層と称しているに過ぎない。上記の各数値

についても、特に理論的背景で決定されたものではなく、これにこだわる必要はないであろう。形状的にはノルマルはリング電極、マイクロは点電極を使用している。

マイクロ検層は岩盤の割れ目等、微細な変化を検出するには良いのだが、反面孔壁との密着が悪いと誤差が大きく、全体としての変化は捉えにくい。また密着させるための機構を要求する。ノルマル検層は孔内に吊り下げられた状態なので、泥水の影響を受け、マイクロ検層に比べて反応が鈍い。しかし事実上電極だけの極めて単純な構造であり、またある程度のゾーンとしての地層の変化はマイクロ検層よりも確実に捉える。

結論として本件では、先端部分の構造的な負担を減らす意味で、複雑な機構を必要とするマイクロ電極は避け、構造上単純なノルマル電極を採用する。電極の設置位置は特に電氣的に絶縁されたストレーナ部分とする。電極の直径は60～70mmになるので、孔壁とのクリアランスが狭く泥水の影響が小さくなり、10cmまたはそれ以下の電極間隔が採用できる。電極用ストレーナの上下にはバッカーの金属体が露出し、電位を持つのでその意味では電極間隔は狭い方が有利である。

③深度測定方法

深度情報を得る方法には問題がある。ホース方式ならその巻き取りドラムに、カウンターを設置すれば良いのだが、ロッド方式の場合には極めてランダムな動きになるので、深度情報が得られにくい。コントロールケーブルの送り量を検出して、連続深度情報とし途中で何回か深度補正をする方法が考えられる。

④測定器

既存の測定器で問題はない。ただし、深度情報が不安定なので、レコーダーに直接記録するのは難しい。コンピューターに一度取り込んで、修正処理した後にハードコピーを取るべきであろう。

2. 2. 7 コントロールユニット

(1)

先端部分では多くの制御と計測部分があり、効率良くまた確実に地上と接続されなければならない。コントロールユニットに要求される作業は、まとめると次のようになる。

①バッカー用電磁バルブ、ON, OFF, 10～16個

- ②トリップバルブ用モーター、ON, OFF, 及び正逆転操作
- ③ポンプ用モーター、ON, OFF, 速度制御、及び正逆転操作
- ④圧力測定、及びデータ地上送信, 7~9点
- ⑤ボアホールテレビ、ON, OFF、及びワイパー操作

これだけの作業を行うには、CPUを搭載してコンピュータ制御を行うのが良いと判断される。また1000mの通信距離を考えると、光通信が確実である。しかし光ケーブルはコネクタに難があり、詳細設計の結果によっては装着の困難が予想される。そこでここでは伝送レートを下げ、通常の電気信号を採用しておく。

詳細設計の結果光ケーブルの使用が可能になれば、それを用いる。

回路ブロック図を図2-11に示す。

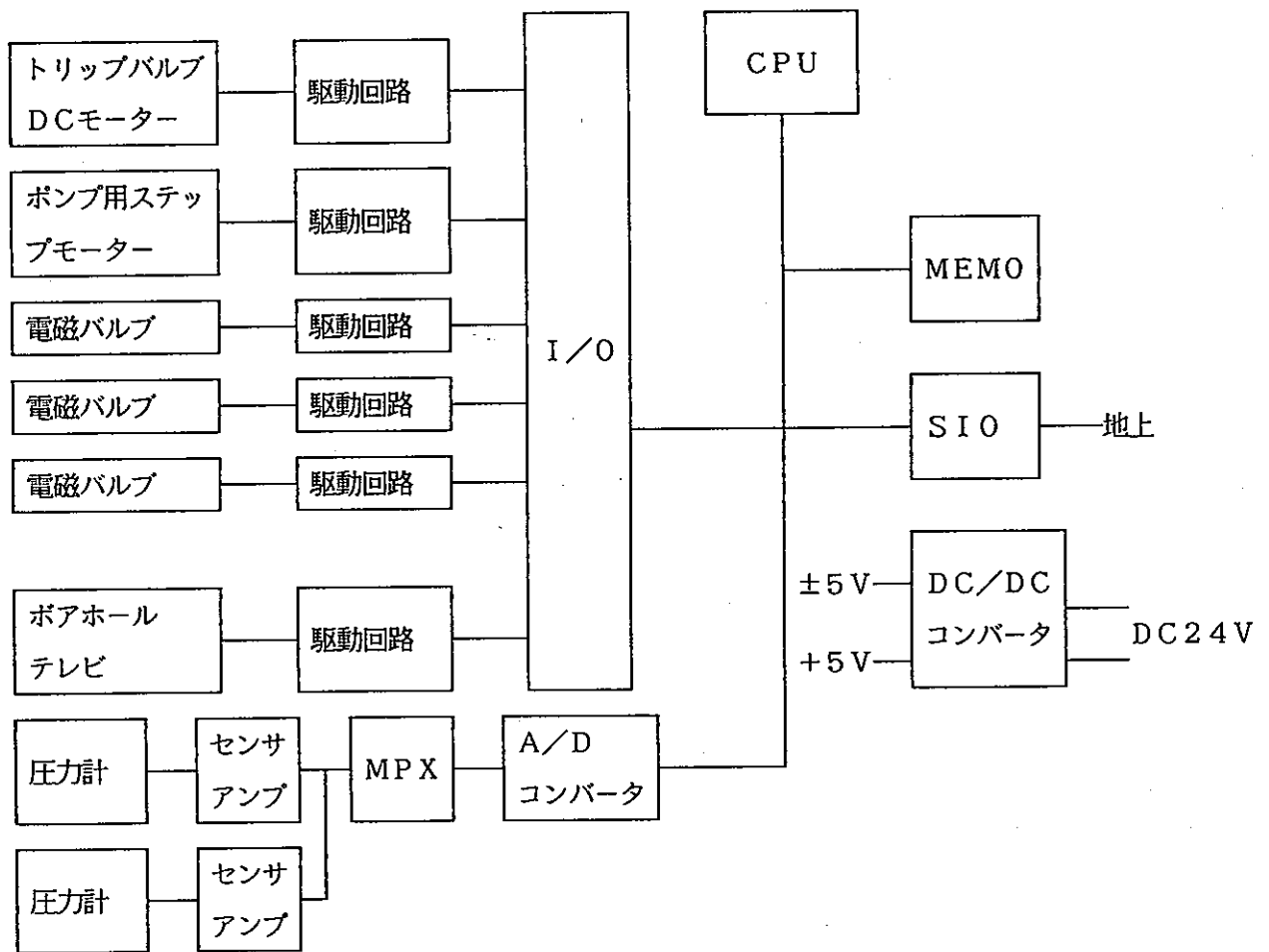


図2-11 コントロールユニット回路ブロック図

回路の主要な仕様は以下に示す。

a 制御部

- ・CPU Z80相当
- ・clock 4MHz
- ・メモリ 64kb (ROM32kb, RAM32kb)

b 圧力データ入力部

- ・CH数 12
- ・レンジ $\pm 5V$
- ・フィルター $FC=1Hz -12db/oct$
- ・A/D変換 16bit 20 μs /サンプル
- ・温度特性 0~80℃にて0.5%

c 外部インターフェイス

- ・RS422A仕様
- ・伝送レート 1kb/s

d 環境

- ・使用温度範囲 0~80℃
- ・保持温度範囲 -25~100℃
- ・湿度 35~90%

2.2.8 インナーパッカー

ロッド方式を採用した場合にのみ、インナーパッカーが必要になる。動燃式JFTですでに十分な実績があるので、基本的には問題はない。ただしケーブル長が従来より長くなることと、定常式透水試験を行う関係で多少の設計変更がある。

(1) チューブ径の変更

従来は内径2.5mmのチューブを用いてきたが、ケーブル全長が300mになるので、圧力損失を小さくするためにチューブ径を大きくするべきである。1サイズ大きい内径4mmのチューブをここに採用する。それに伴ってケーブルの断面設計を新たに行う必要がある。

(2) 測定値電送方法

従来はセンサーをアンプに直結してきたが、ゼロシフト、ノイズ等多少の問題があ

った。今回は更にケーブルが長くなるので、先端にアンプを内蔵させ、電送方法を考慮すべきである。方法としては①電流出力、②周波数（V-F）出力、③デジタル出力の3つが考えられる。インナーバッカーは直径30mm程度で大きさの制約が厳しく、回路が複雑で大型になるデジタル電送は難しい。ケーブル電送中のノイズに対しては、周波数出力が有利であるが、温度シフトに対しては電流出力が有利である。しかし温度シフトに対しては温度特性の良いデバイスを用いれば、十分実用レベルを維持できるので、周波数出力を採用する。

ただし大きさの制約によっては、周波数出力回路でも実装が困難な場合も考えられる。その際は電流出力、または半導体センサーを採用するのもやむを得ない。

（3）リリース電磁バルブの新設

インナーバッカーを拡張した際に、過大圧力が発生し圧力計が破損する危険性がある。それに対処するために、リリース電磁バルブの新設を行う。

以上インナーバッカーの概念図を図2-12に示す。

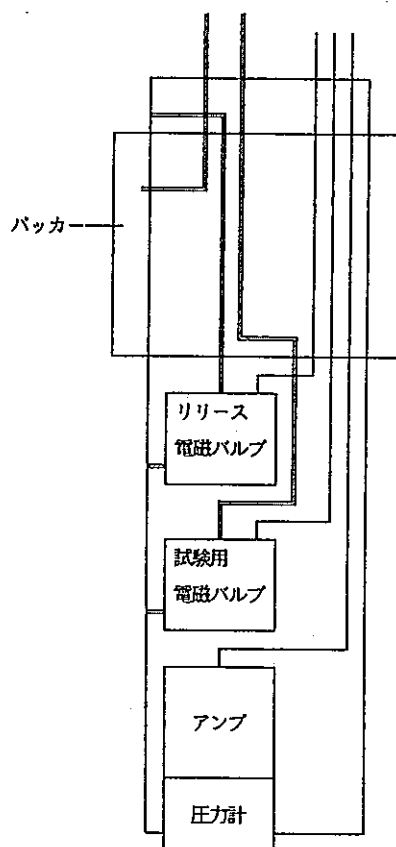


図2-12 インナーバッカー概念

2. 3 地上部

2. 3. 1 ホース方式の場合

(1) 巻き取りドラム

巻き取りドラムに関しては次のような要領で設計する。

- ①ホースの巻き取り、送り出しのための回転をし、速度調整が可能なこと。
- ②整列巻きとする。
- ③電源、信号、流体等すべてが接続された状態で回転できること。つまりスリップリングを設置する。

ドラム本体に関しては特に問題とする点はないのだが、その輸送手段に関しては考慮すべきことがある。即ち①トラックマウントして自走させる、②トレーラー形式で移動時には牽引する、③定地式で移動時にはクレーンでトラックに積み込む、の3つである。

①の方法は移動に関しては最良であるが、イニシャルコストが高くなる。また道路面から外れることがほとんど不可能である、車検等の恒常的経費が必要等の問題がある。②は①と③の折衷案で、中途半端といえる。③は移動に際してクレーンとトラックが必要となり、基本的にまったく動くことができない。しかし1現場での測定が長期にわたるなら、移動問題をそれほど考慮する必要はない。

いずれの方法が良いかここでは決定できないが、多数の現場を測定するなら①の方法、1つの現場で長期間測定するなら③の方法を採用するべきと考える。

(2) 流体制御及び流量測定装置

流体制御はバッカー系と透水試験系の2系統について行う。いずれもコンプレッサーを圧力源とし、これをレギュレーターで調節して各系統に供給する。

測定項目は透水試験の流量であり、その他の圧力はチェックの目的で測定する。透水試験の流量に関しては、揚水時の測定も必要なので、バルブ操作で注入、揚水の切替が必要である。

注入式透水試験では定流量法も、行えるようにする必要がある。つまり地上での圧力制御方式では、地下水位が深くなると水頭圧力が制御できなくなるので、過剰圧力で透水試験を行うことになる。そのための対策としても流量制御装置が必要である。流量制御装置に望まれる性能は、2. 2. 4で示したように $2\text{ cm}^3/\text{h}\sim 200\ell/\text{h}$ と極めて幅広い。また流量制御装置の出力側では、負圧となることに注意しなけ

ればならない。そのため注入する水は脱気水が要求される。流量制御装置は単純なピストン構造では、負圧なので引き込まれてしまい、意味が無い。

ここでは以下の装置を、流量制御装置として推奨する。

- ・オーバル機器工業株式会社製、MASFLO-OVAL：F-900シリーズ
(制御範囲 0.1～500 g/h)
- ・東京理化器械株式会社製、C-16 (制御範囲 6～90 ℓ/h)

ただし、出力側が負圧でベーパーロックした際の、精度に関しては今後メーカーとの打ち合わせが必要であろう。

(3) 先端部計測装置

この部分では計測のみでなく、コントロールも含まれる。2.2.7に示した7つの項目をここで処理しなければならない。デジタルI/Oなので、基本的にはマイクロコンピュータを主体とし、電源、ボアホールテレビのモニター、ハードコピー等の周辺装置が付く程度である。ここでは、測定と制御のソフトが最も重要な課題となる。

2.3.2 ロッド方式の場合

ホース方式の場合と比べて、基本的にはほとんど変わらない。巻き取りドラムの代わりに、インナーパッカードラムと、コントロールケーブルドラムが加わるが、設計上の留意点等、特に問題点はないので説明は割愛する。

3. 全体概略設計

3. 1 ロッド方式

(1) 地上部分

構成は次の通り

- ①電源
 - ・ 1 AC100V安定化電源 500W
 - ・ 2 AC100V動力用 2000W程度
 - ・ 3 DC60V先端部制御用
- ②マイクロコンピューター
 - ・ システムコントロール用
 - ・ A/Dコンバーター
 - ・ BCDボード
 - ・ 光モデム
- ③流体制御装置
 - ・ 流量計
 - ・ 流量制御装置
 - ・ 圧力制御装置
 - ・ インナーバッカー制御装置
 - ・ バッカー制御
 - ・ 圧力計インジケーター
 - ・ リリース電磁バルブ制御
 - ・ 送水電磁バルブ制御
- ④コンプレッサー
 - ・ $10\text{ kg/cm}^2\text{ max}$
- ⑤インナーバッカードラム
 - ・ ケーブル巻き取り送り出し装置
 - ・ 深度測定装置 (BCD出力)
 - ・ 電装及び流体用スリップリング
 - ・ バッカー拡張チューブ
 - ・ 透水試験用送水チューブ
 - ・ 圧力計ケーブル
 - ・ リリース電磁バルブケーブル
 - ・ 送水電磁バルブケーブル
- ⑥コントロールケーブルドラム
 - ・ ケーブル巻き取り送り出し装置
 - ・ 深度測定装置 (BCD出力)

- ・電装用スリッリング
- ・電源ケーブル
- ・ボアホールテレビ用同軸ケーブル
- ・光モデムケーブル

- ⑦ロッドホルダー ・対荷重5 t
- ⑧ロッド昇降用スイベルヘッド・対荷重15 t
- ⑨接続用ケーブル及びチューブ一式

*ロッドの昇降に関しては試錐機を使用するものとする。

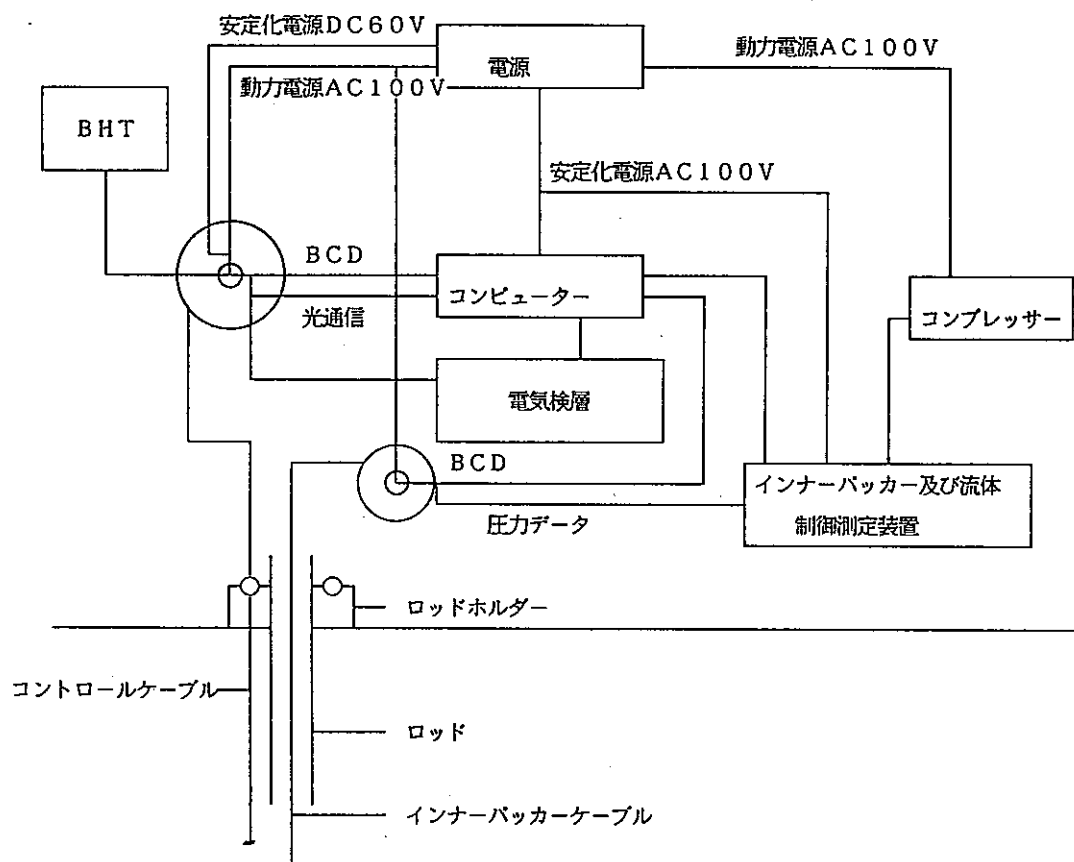


図3-1 ロッド方式の地上部分ブロック図

(2) 中継部分

① ロッド

- ・材質 本体SUS304 ネジSUS410またはSUS610
- ・強度 9030kg/本
- ・重量 3.44kg/m
- ・形状 内径 $\phi 35.7\text{mm}$
外径 $\phi 42.7\text{mm}$
カップリング外径 $\phi 49\text{mm}$

② インナーパッカーケーブル

- ・チューブ $6 \times 4 \times 3$ 本
- ・電線 $0.9\text{mm}^2 \times 8$ 本
 - 抵抗 22オーム/km
 - 絶縁抵抗 1000Mオーム以上
- ・外径 $\phi 19\text{mm}$
- ・概算重量 110kg/300m
- ・破断張力 410kg
- ・引っ張り安全率 $F=3.3$
- ・ヒーター

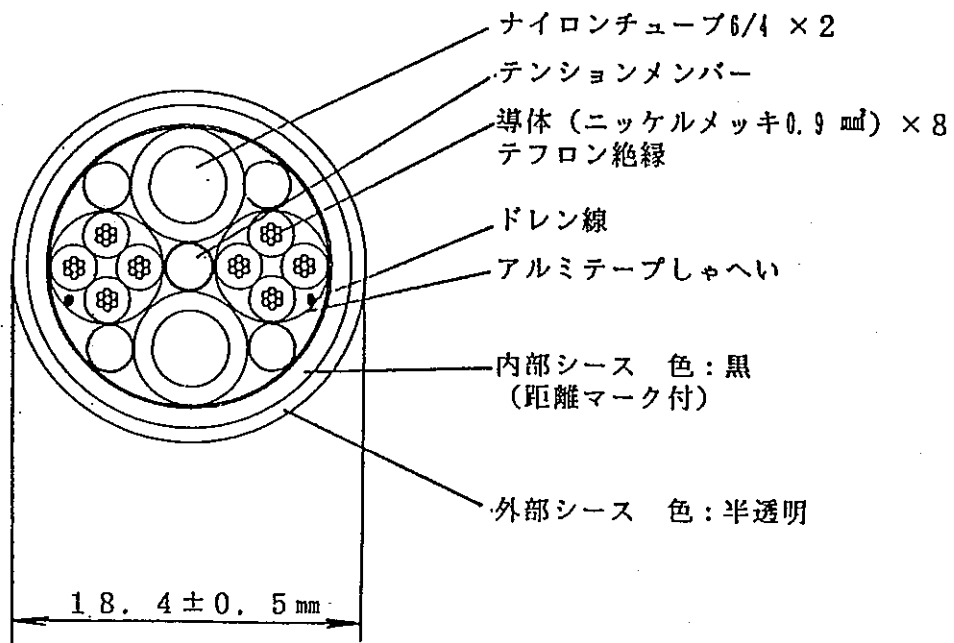


図3-2 インナーパッカーケーブル断面図

③コントロールケーブル

- ・電線
 - 0.4 mm² × 2本 (電源)
 - 抵抗 55 オーム/km
 - 0.2 mm² × 4本 (信号)
 - 抵抗 110 オーム/km
- ・同軸ケーブル 2.5C
 - 特性インピーダンス 75 オーム
 - 減衰率 60 db/km
- ・光ケーブル 2本
 - 種別 50/125GI 石英ファイバー
 - 伝送ロス 3 db/km
- ・引っ張り強度 基本的に考慮せず

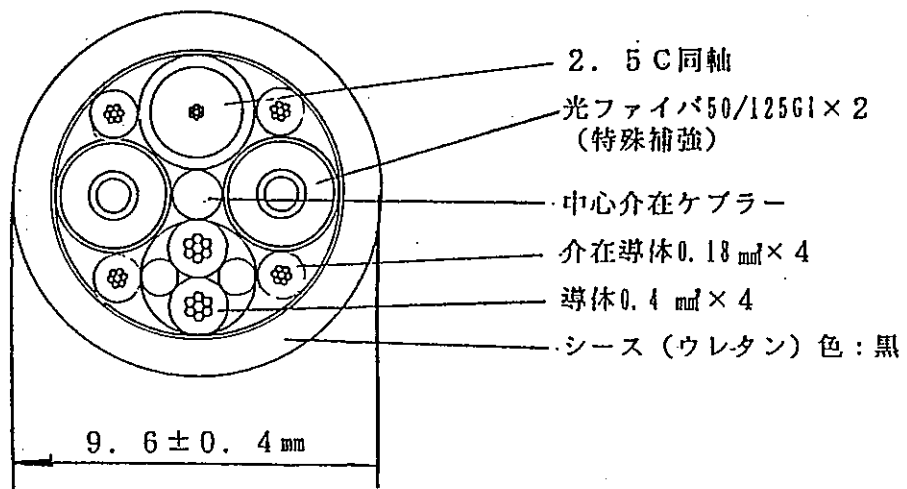


図3-3 コントロールケーブル断面図

(3) 先端部分

図3-4にブロック図を示す。

<コントロール>

①コントロールユニット

<制御系>

①トリップバルブ

図2-6に示す。

・正、反、停止、モータードライブ

②揚水ポンプ

図2-7に示す。

・正、反、停止、モータードライブ

・速度制御用ドライブ回路

③パッカー

76型を使用

④電磁バルブ

GAG341

<測定系>

①圧力測定

②電気検層

③ボアホールテレビ

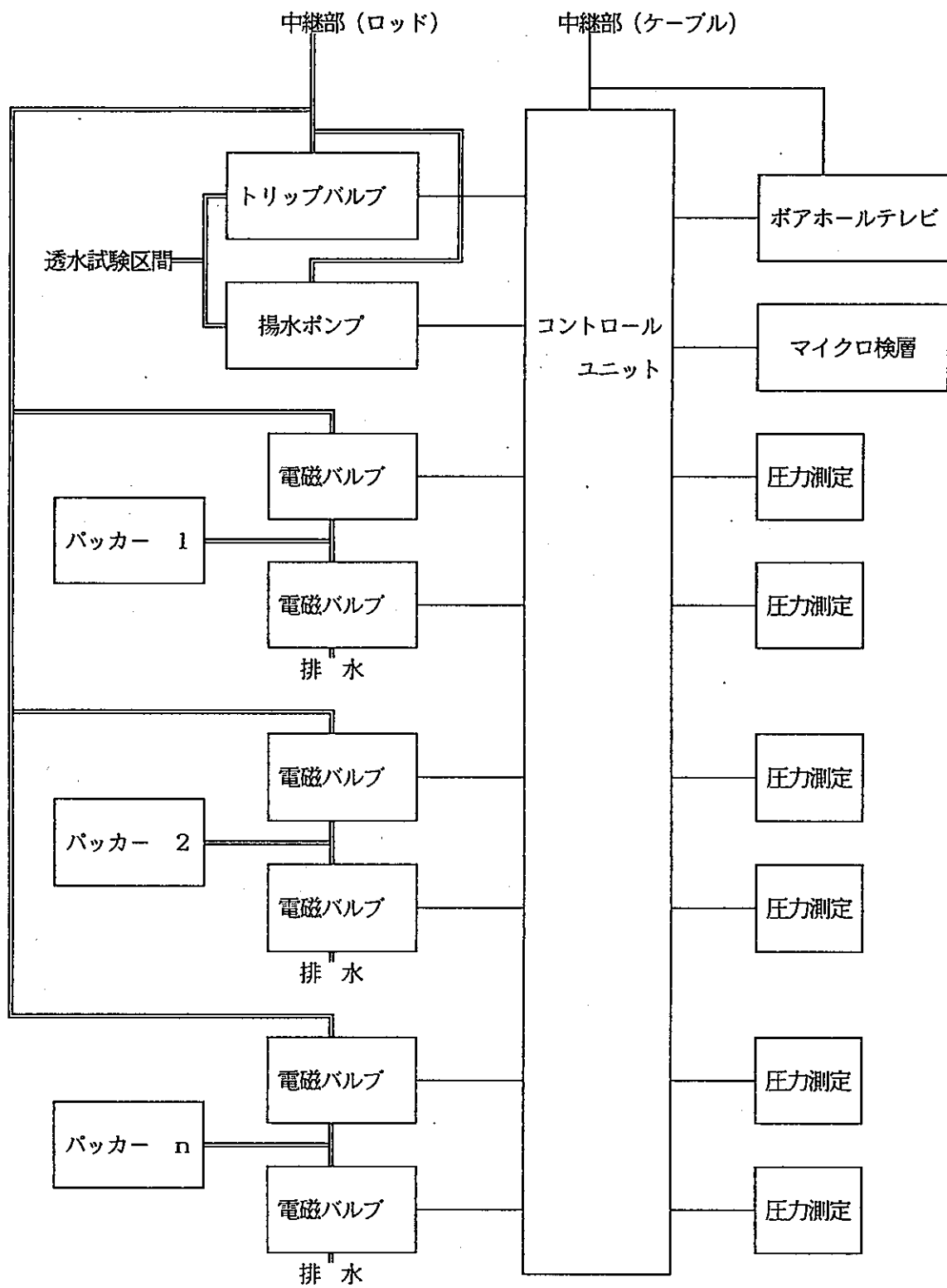


図 3-4 先端部ブロック図

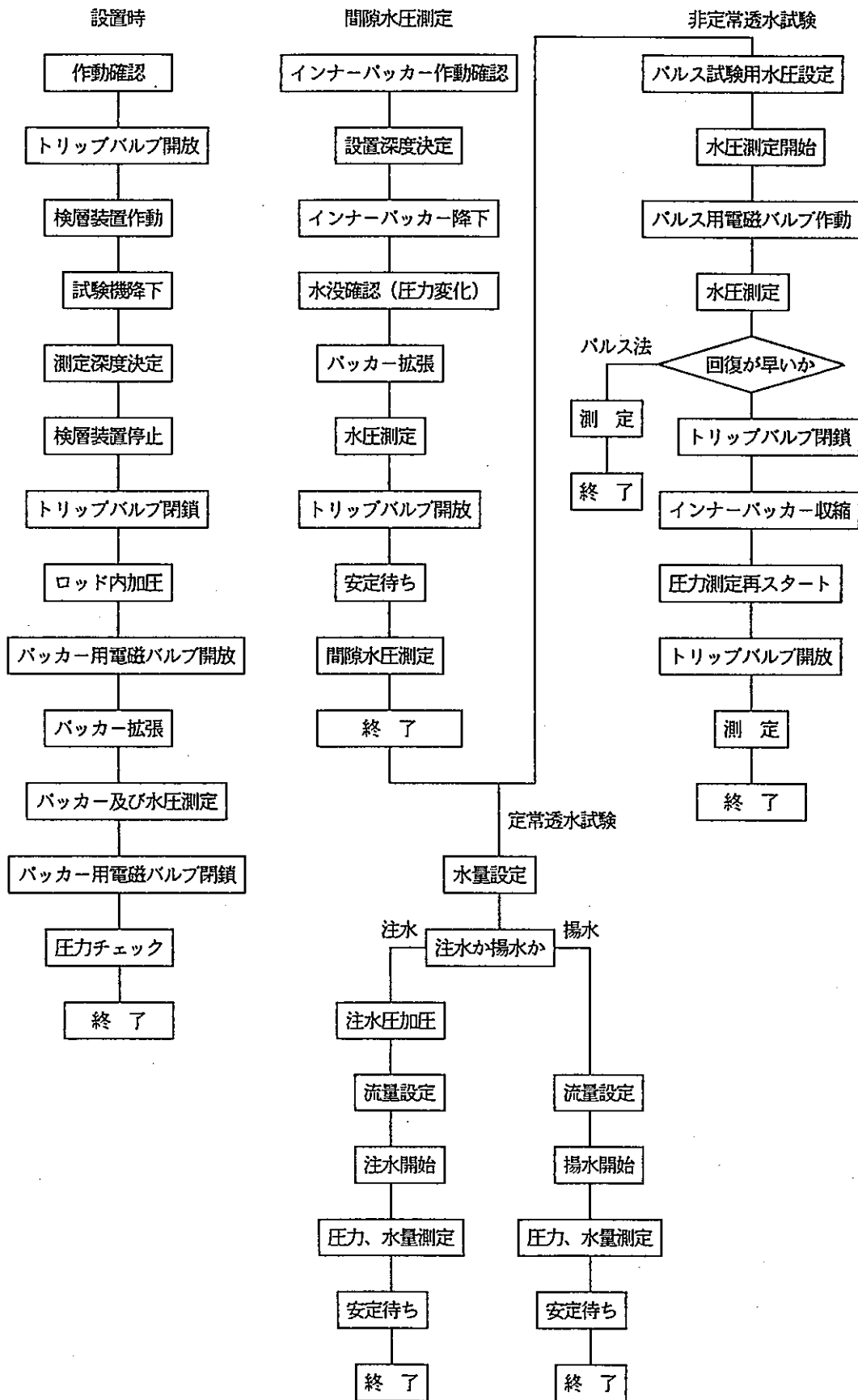


図 3-5 ロッド方式測定フロー図

3. 2 ホース方式

(1) 地上部分

構成は次の通り

- ①電源
 - ・ 1 AC200V動力用 7000W程度
 - ・ 2 AC100V安定化電源 500W
 - ・ 3 AC100V動力用 2000W程度
 - ・ 4 DC60V先端部制御用
- ②マイクロコンピュータ
 - ・ システムコントロール用
 - ・ A/Dコンバーター
 - ・ BCDボード
 - ・ 光モデム
- ③流体制御装置
 - ・ 流量計
 - ・ 流量制御装置
 - ・ 圧力制御装置
- ④コンプレッサー
 - ・ 10kg/cm² max
- ⑤ケーブルドラム
 - ・ ケーブル巻き取り送り出し装置
 - ・ 深度測定装置 (BCD出力)
 - ・ 電装用スリップリング
 - ・ 電源ケーブル
 - ・ ボアホールテレビ用同軸ケーブル
 - ・ 光モデムケーブル
 - ・ 水用
- ⑥接続用ケーブル及びチューブ一式

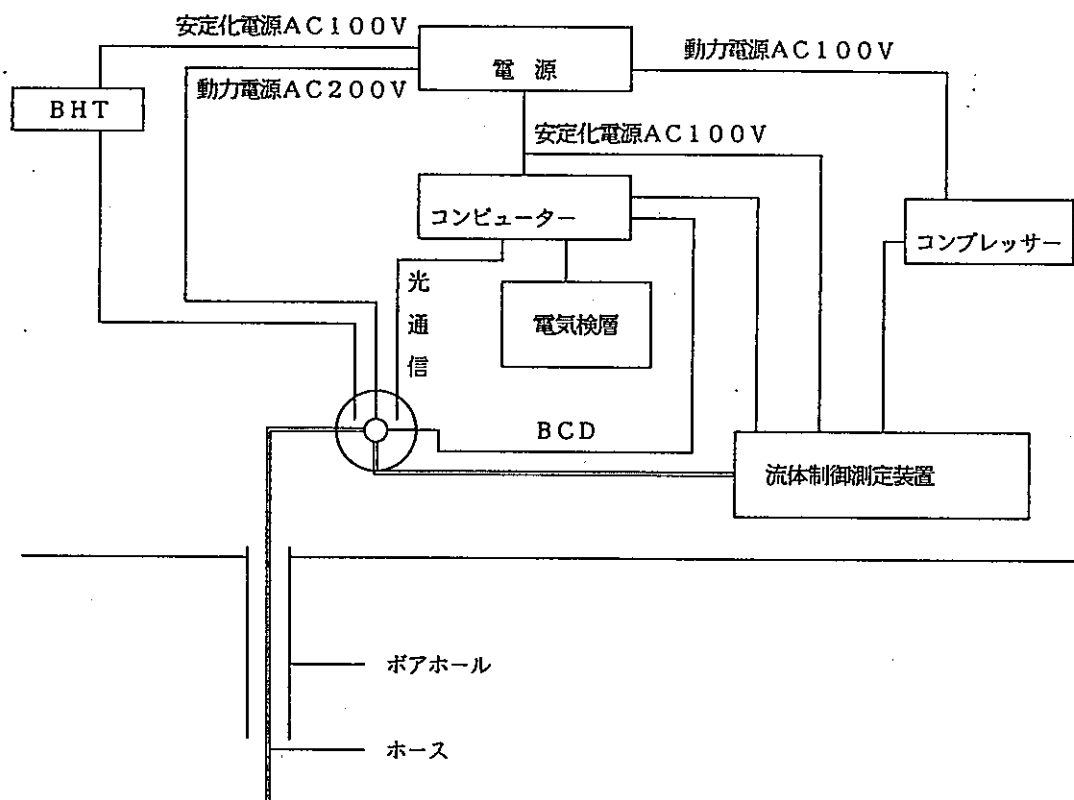


図3-6 ホース方式の地上部分ブロック図

(2) 中継部分

①ホース

- ・強度 13000kg/本
- ・重量 3000kg/km
- ・形状 外径 $\phi 72\text{mm}$
- ・チューブ 9.56×12.7×4本
25.4×33.5×1本
- ・電線 1.4mm²×12本
- ・同軸ケーブル 2.5C
- ・光ケーブル 6本

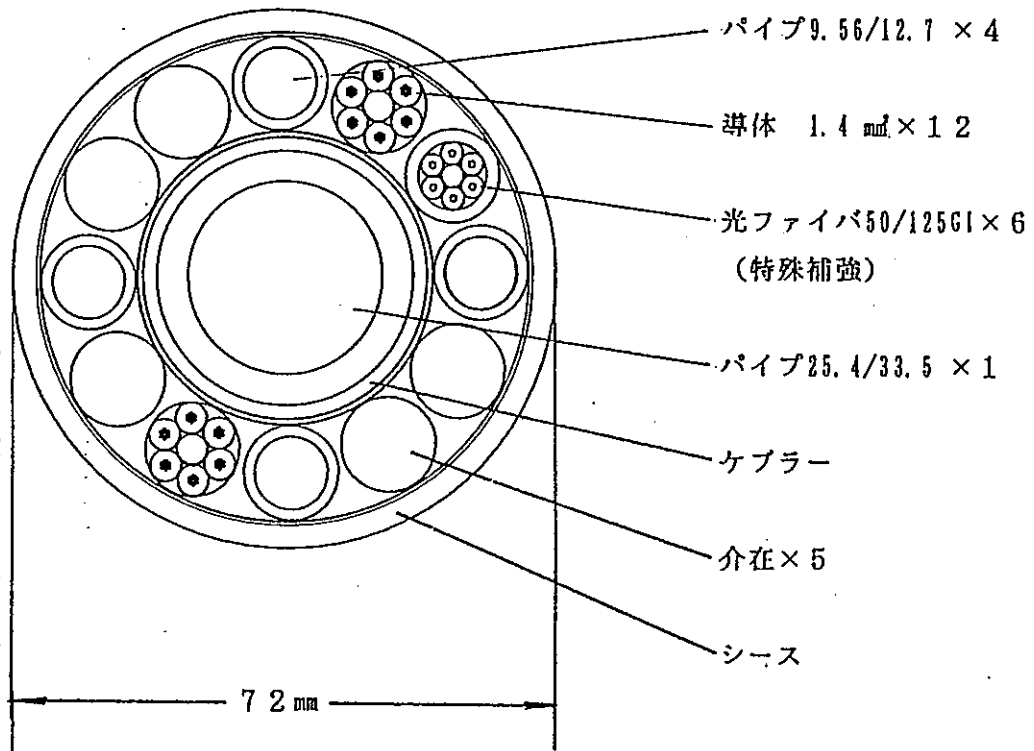


図3-7 ホース断面

(3) 先端部分

ロッド方式と同じにつき省略

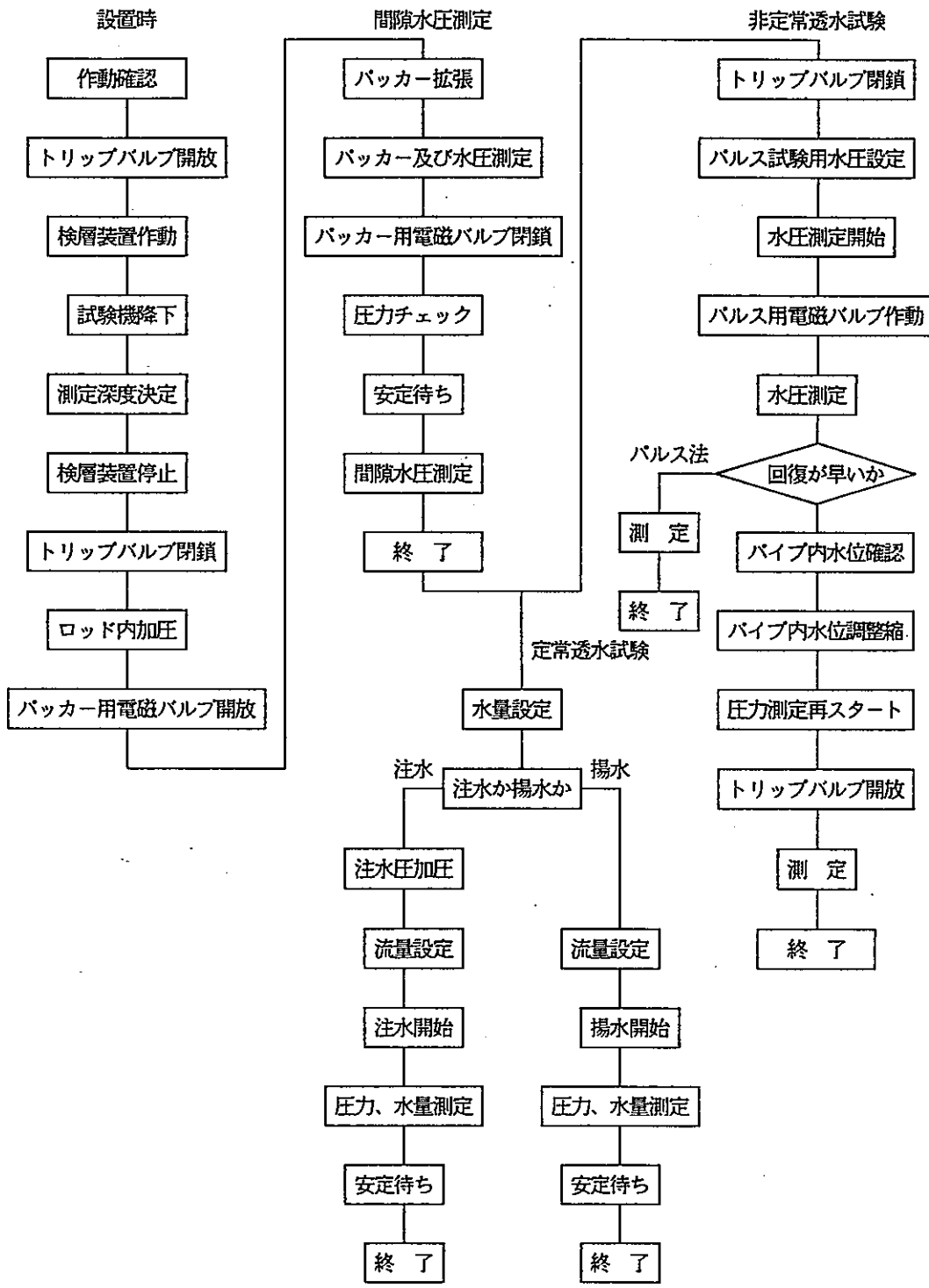


図 3-8 ホース方式測定フロー図

4. 評価

ホース方式とロッド方式の比較評価を行う。

4. 1 設計の基本条件に対する評価

1. 1. 1 で述べた8つの設計上の性能条件に対する評価を表4-1に示す。

表4-1 8つの設計上の性能条件に対する評価

	ロッド方式	ホース方式
1 $10^{-4} \sim 10^{-9}$ cm/sの岩盤を測定対象とする	可能である	可能である
2 定常、非定常のいずれの透水試験も行える	可能である	非定常は困難
3 上記の岩盤で間隙水圧が十分な精度で測定できる	可能である	やや難がある
4 $\phi 75 \sim 100$ mm のボーリング孔を対象とする	可能である	可能である
5 最大測定深度1000mとする	可能である	可能である
6 孔壁観察の装置を有する	可能である	可能である
7 測定区間長の変更が容易にできる	可能である	可能である
8 信頼性が高く壊れない	やや難がある	可能である

(補足説明)

- 1 非定常試験を行うには、パイプ内の水を一度抜く必要がある。ホース方式の場合、ドラムに巻いた状態で水抜きを行っても、十分に抜くことが難しく、またその確認ができないので困難とした。
- 2 間隙水圧の測定には、ロッド方式の場合インナーパッカーシステムが使用できるので、十分な精度が期待できる。ホース方式では 100 kg/cm^2 の水圧計の最小分解能になるので、どうしてもロッド方式に比べて精度が劣る。
- 3 信頼性に関しては、ロッド方式の場合、ロッド接合部の漏れには十分な管理が必要であり、わずかな傷、変形が試験結果に大きな誤差を与える危険性がある。

4. 2 その他の条件における評価

表4-2に示す。

表4-2 その他の性能に対する評価

	ロッド方式	ホース方式
1 ジャーミング等の異常事態における抵抗力	やや強い	弱い
2 現場搬入に際しての問題点	問題ない	問題がある
3 昇降に関する作業効率	悪い	最も良い

(補足説明)

- 1 ジャーミングに対してホース方式では、単純に引っ張るしかできない。それに対してロッド方式では押すこともでき、また多少でも回転を与えられるので、やや強いとした。十分に強いためには本格的なボーリングロッドと同等の性能が必要であるが、それをこのような試験機に求めるのは困難である。
- 2 山間の搬入条件が悪い場合、ロッド方式では最小分解単位は数百kg程度で、ボーリングマシンのそれとほぼ同等である。つまりボーリングマシンが設置できる所なら、搬入が可能である。それに対してホース方式の場合、分解しても数t程度になるため搬入が制限される場合がある。具体的にはボーリングマシンを分解搬入するような現場には、搬入困難であろう。
- 3 ロッド方式の場合、昇降作業を行うにはウインチ、やぐら、及び何人かの作業員を必要とし、試験期間中これを拘束することになる。また昇降速度そのものも遅く、効率が悪い。それに対して、ホース方式は測定員一人でも作業ができ、また付帯装置も原則的に不要である。

あとがき

設計上の8つの性能条件を考慮して、ロッド方式とホース方式の2つの方式でそれぞれ概念設計を行った。その結果ロッド方式では、装置の信頼性等に関して、さらに改良が必要なことが判明した。またホース方式では、非定常透水試験を行うのが困難であることが判明した。しかしいずれのシステム（ロッド、ホース）でも、深度100.0mの難透水性岩盤の水理学的環境を把握するに十分耐え得る性能を持つことが判明し、各装置の基本性能は明らかになった。

今後、本システムの詳細設計、製作にあたっては、運搬状況、計測現場の環境、計測期間等さまざまな使用状況を考慮し、本概念設計をベースにより詳細な検討を加える必要がある。

謝辞

本装置の概念設計に際しては、岡山大学土木工学部、西垣誠先生に多くの御指導を頂いた。また、動力炉・核燃料開発事業団の関係者各位にも、多くの助言と便宜を頂いて頂いた。

ここに感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1 地下水ハンドブック編集委員会、地下水ハンドブック：株式会社建設産業調査会、東京（昭和54年）
- 2 柳澤孝一、西垣誠、平田洋一、動燃式低水圧制御水理試験機（動燃式JFT）の原理と適用例：地下水学会誌、第30巻、第3号、pp127 -137（1988）