

人工バリア健全性試験設備の設計研究

(動力炉・核燃料開発事業団 研究委託概要報告書)

技術資料		
開示区分	レポート No.	受領日
7	J1162 97-002	98.01 14
この資料は技術管理室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です 動力炉・核燃料開発事業団 技術協力部技術管理室		

1997年 2月

株式会社 竹中工務店

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又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い合わせは下記に願います。

〒319-11

茨城県那珂郡東海村大字村松 4-33

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所

技術開発推進部・技術管理室

人工バリアの健全性試験設備の設計研究

鈴木吉夫¹⁾, 下河内隆文¹⁾, 白井克己¹⁾

重野喜政¹⁾, 高治一彦²⁾

要 旨

高レベル放射性廃棄物処分場閉鎖後において人工バリアを形成する緩衝材には、オーバーパックの腐食膨張等による外力が長期間作用すると考えられる。これらの外力に対する緩衝材の力学的変形挙動を明らかにするためには、実験的研究と解析的研究を比較することにより、人工バリアの力学的健全性の評価を行う必要がある。

本研究の目的は、模型試験を実施することにより、効果的に人工バリアの腐食膨張による力学変形挙動を調べるための、試験手法の事前検討をふまえた装置の設計、および実現象を想定した予備解析である。

まず、模型形状の選定を行った結果、全体モデルと2次元平面ひずみモデルが有効であると考え、これに対し強制変位速度の検討、計測項目・計測方法の選定、および緩衝材設置手法確立のための検討等を行った。その検討結果に基づき試験装置の設計を行い、製作手順、製作要領を設定し、装置の見積を行った。

また、解析的研究として実際の処分場を想定したオーバーパックの腐食膨張について解析手法の検討および実現象の解析を行った結果、オーバーパック周辺部を中心に塑性領域が広がることが確認できた。

本報告書は、株式会社 竹中工務店が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究内容結果である。

契約番号：080D0283

事業団担当部課室および担当者：環境技術開発部 地層処分開発室(GIS) 石川博久

1)：技術研究所 応用研究開発部

2)：原子力・エネルギー エンジニアリング本部

Study on design of experiments for mechanical stability of engineered barrier system

Yoshio Suzuki¹⁾, Takafumi Shimogochi¹⁾, Katumi Sirai¹⁾
Yoshimasa Shigeno¹⁾, Kazuhiko Takaji²⁾

Abstract

After closing HLW depository, the buffer material that is the main component of engineered barriers is subjected to pressure induced by the over pack corrosion for a long time. To predict mechanical behavior of the buffer under that pressure, it is necessary to evaluate mechanical endurance of the buffer material through experimental and analytical study.

The purposes of this study are design of the experimental equipment and preliminary analysis of the buffer material under the over pack's expansion pressure.

According to the investigation, the axisymmetric model and the plain strain model are selected for experimental models. And for these two models, the deformation rate, the measurement items, the measurement methods and the setting methods of specimen are studied. Based on these evaluation, the experimental equipment is designed and the cost is estimated.

And according to the preliminary analysis of the buffer material under the over pack's expansion pressure, plastic region spreads around the boundary between the overpack and the buffer.

Work performed by Takenaka Corporation under contact with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

PNC Liaison : Geological Isolation Technology Section (GIS) Waste Technology Development Division
Hirohisa Ishikawa

1) : Applied Technology Department Research and Development Institute

2) : Office of Energy and Nuclear Engineering

目 次

	ページ
1 まえがき	1
2 研究の背景・位置づけ	2
2.1 研究の背景	2
2.2 研究の位置づけ	2
3 研究委託の範囲	6
4 研究の前提条件	7
5 研究委託の内容	8
5.1 試験手法の検討・選定	8
5.1.1 模型形状の選定	8
5.1.2 載荷もしくは強制変位方法の選定	19
5.1.3 計測項目・計測方法の選定	25
5.1.4 試験手法の確立	41
5.2 試験装置の検討・設計	48
5.2.1 装置の設計	48
5.2.2 製作手順，製作要領の設定	78
5.3 緩衝材力学変形挙動解析	82
5.3.1 解析手法の検討	82
5.3.2 実現象の解析	83
5.3.3 解析結果	84
5.3.4 まとめ	85
5.4 試験装置見積り	89
6 あとがき	90
参考文献	91

1 まえがき

高レベル放射性廃棄物の地層処分の研究開発において、人工バリアに要求される各機能を確保するには、人工バリアが長期間力学的に安定であることが不可欠である。処分場閉鎖後において、人工バリアを形成する緩衝材には、オーバーパックの腐食膨張および周辺岩盤の変形（クリープ変形、崩落等）による外力が、長期間作用すると考えられる。このため、人工バリアの性能評価を行うには、これらの外力に対する緩衝材の力学的変形挙動を明らかにすることが必要がある。

これら人工バリアの長期力学的変形挙動に関しては、今後解析的評価を行うことが予定されているが、さらに実験的評価を行っておくことが重要である。そこで、人工バリア健全性試験設備を設計・製作し、人工バリア（緩衝材）の長期健全性を調べる試験を行う必要がある。そして、有限要素法等を用いた解析的検討と比較することにより、人工バリアの力学的健全性の評価を行う。本研究の目的は、効果的に人工バリアの健全性を調べるための模型試験の計画および試験装置の設計である。

2 研究の背景・位置づけ

2.1 研究の背景

本研究で対象としている緩衝材に関して、「高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書－平成3年度－（動力炉・核燃料開発事業団）」（以下、平3レポートと称す）では、表2.1-1に示すように7つの機能項目（①止水性 ②自己シール性 ③核種吸着遅延性 ④熱伝導性 ⑤化学的緩衝性 ⑥オーバーバック支持性 ⑦応力緩衝性）が挙げられ、これらの機能の信頼性の前提として人工バリアの構造力学的安定性についての検討が必要であることが述べられている。そして、人工バリアの構造力学的安定性に影響を及ぼす可能性のある事象及びプロセスとして、以下の5項目を取り上げ、概略的評価検討結果が報告されている。

ア．緩衝材の膨張圧の発生

イ．緩衝材中のオーバーバックの変位（空間的移動）

ウ．オーバーバック腐食生成物による応力の発生

エ．オーバーバック腐食に伴う水素ガスの移行

オ．ニアフィールドの水理場における緩衝材の物理的安定性

「ウ．オーバーバック腐食生成物による応力の発生」において、今回対象としているオーバーバックの腐食膨張および周辺岩盤の変形という事象の内、オーバーバックの腐食膨張に関する解析結果より、「腐食の生成に伴い発生する応力は緩衝材によって緩和され、周辺岩盤への応力影響が緩衝される」と述べられている。これは、表2.1-1に示す緩衝材の主な機能の内、⑦応力緩衝性についての評価である。

今後の課題としては、これらオーバーバックの腐食膨張および周辺岩盤の変形という事象が、緩衝材の持つ応力緩衝性以外の機能に及ぼす影響の評価検討が考えられる。また、影響評価にあたっては、総合的評価および解析手法の妥当性の確認・確証のために実験的研究が必要である。このような背景・経緯のもとでの本研究の位置づけを次に行う。

2.2 研究の位置づけ

オーバーバックの腐食膨張および周辺岩盤の変形という事象が緩衝材に及ぼす力学的現象を考えるにあたり、基本的な緩衝材の特性を見ると、緩衝材に対しては自己シール性という機能が期待されており、このため可塑性を有するベントナイトが候補材料として検討されている。すなわち、緩衝材の力学挙動の評価にあたっては塑性変形が前提となる。オーバーバックの腐食膨張および周辺岩盤の変形という事象においても、緩衝材に塑性変形

が生じることにより緩衝材の剛性が低下し、オーバーバックの沈下等の移動を引き起こし、岩盤と廃棄物との距離が接近するために緩衝材の止水性機能が損なわれる現象が考えられる（図2.2-1）。

このような現象を評価するために図2.2-2に示すような実験的研究と解析的研究を実施する研究フローが考えられる。すなわち、模型試験による実験的研究とそれをシミュレーションする解析的研究を行い、オーバーバックの腐食膨張および周辺岩盤の変形に対する緩衝材の塑性変形挙動を把握するとともに、模型実験のシミュレーションにより解析手法の妥当性を確認する。そして、妥当性が確認された解析手法によりプロトタイプの解析を実施し、実現象の予測評価を行う。本研究は、このような研究フローの内、実験的研究である模型試験の計画および試験装置の設計と解析的研究における解析手法の検討と位置づけられる。

表2.1-1 緩衝材の主な機能

機能項目	内容
①止水性	オーバーバックへの地下水の接触の遅延および地下水で飽和後の緩衝材中の地下水移動の抑制
②自己シール性	周辺岩盤との間隙および亀裂開口部等の充填
③核種吸着遅延性	廃棄物から溶出する放射性核種移行の遅延
④熱伝導性	廃棄物からの放熱による人工バリアの温度上昇の抑制
⑤化学的緩衝性	緩衝材の空隙水のpHおよび酸化還元電位の適正な維持
⑥オーバーバック支持性	オーバーバックの固定・保持
⑦応力緩衝性	周辺岩盤の変形およびオーバーバック腐食生成物により生じる応力（歪）の緩和

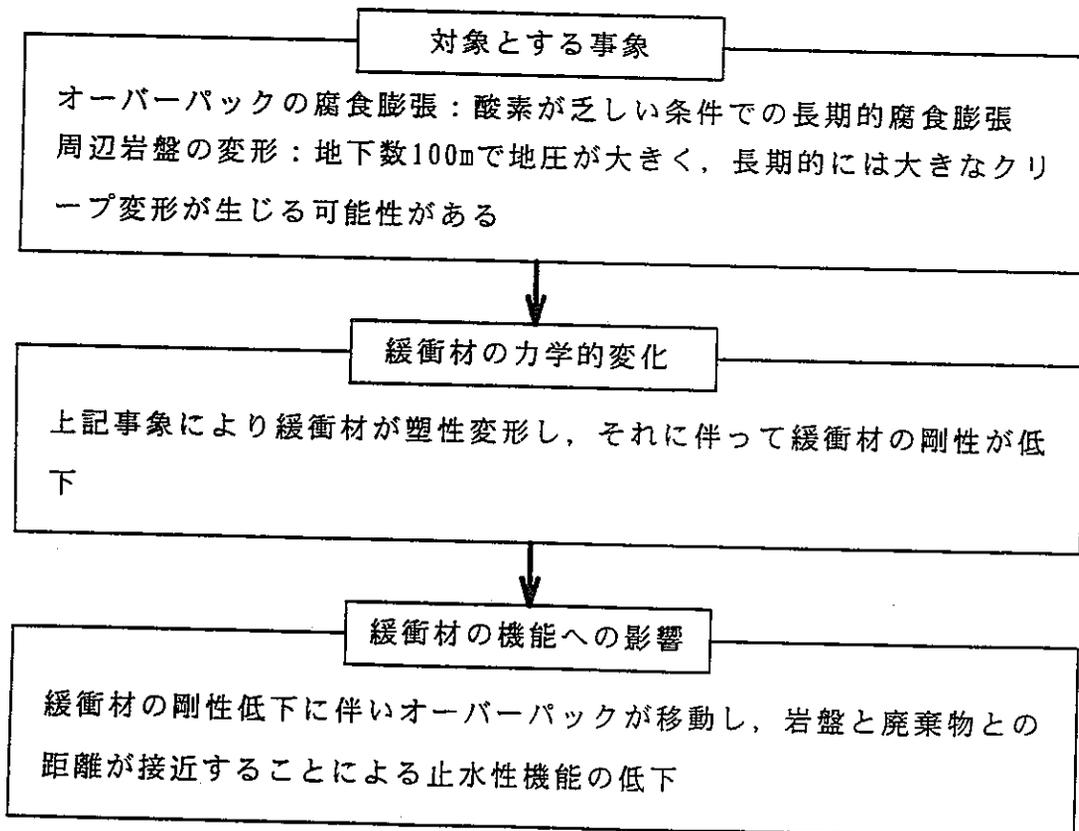


図2.2-1 対象とする事象と予想される現象

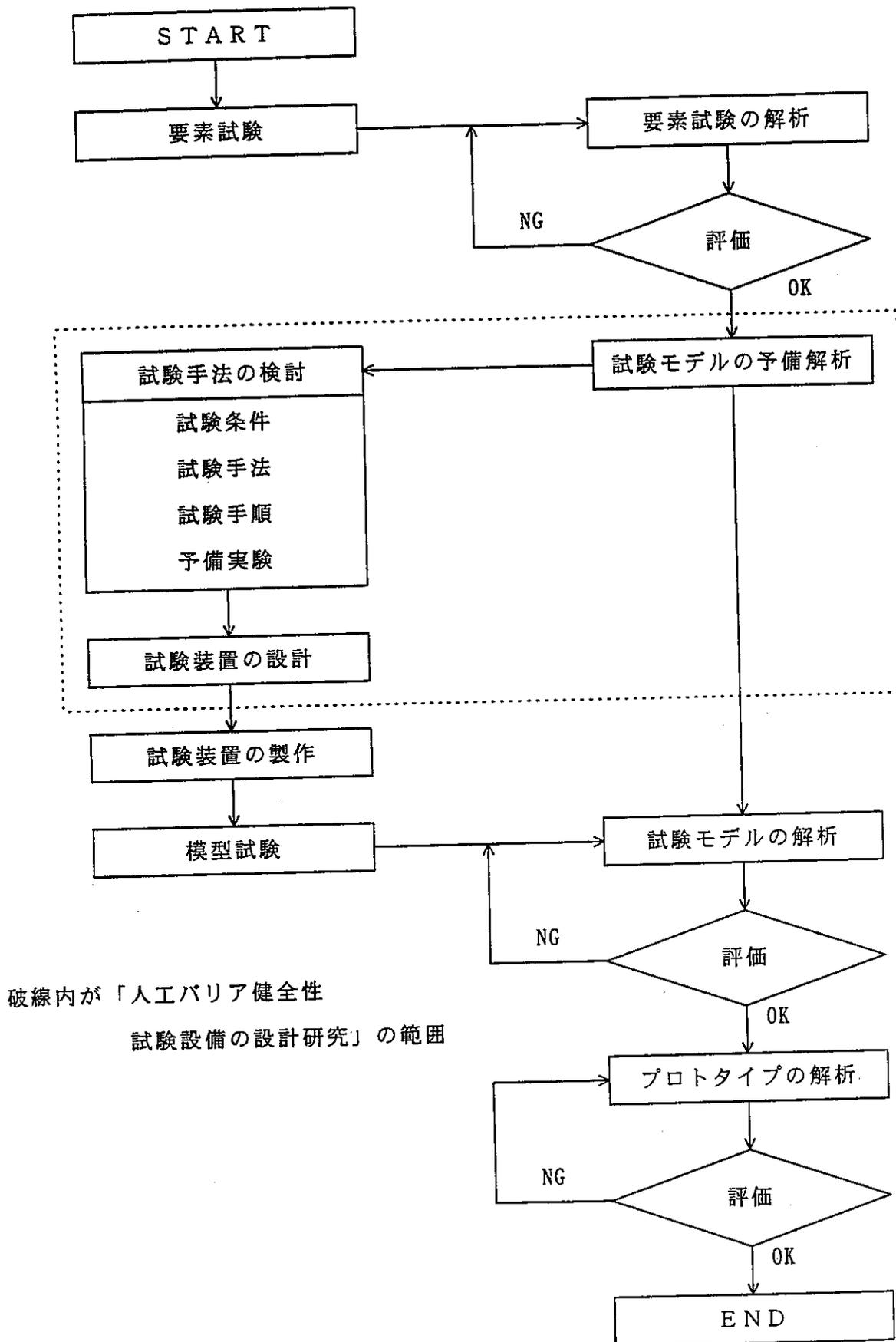


図2.2-2 研究フロー

3 研究委託の範囲

本研究の範囲・項目は、以下のとおりである。なお、章番号は後述の“5 研究委託の内容”に対応している。

5.1 試験手法の検討・選定

5.1.1 模型形状の選定

5.1.2 載荷もしくは強制変位方法の選定

5.1.3 計測項目、計測方法の選定

5.1.4 試験手法の確立

5.2 試験装置の検討・設計

5.2.1 装置の設計

5.2.2 製作手順、製作要領の設定

5.3 緩衝材力学変形挙動解析

5.3.1 解析手法の検討

5.3.2 実現象の解析

5.4 試験装置見積り

4 研究の前提条件

本研究の実施に際して、下記を前提とする。

① 処分場の状況

本試験では、再冠水後の処分場を想定する。廃棄体からの放射線および温度の影響は考慮しない。

② 処分場及びオーバーバックの形状

図4-1に示すように処分坑道は円形とし、坑道半径は1.5mを想定する。オーバーバックは炭素鋼とし、半径0.5m、長さ2.0mの円柱形とする。ただし、試験ではこれらを縮尺した模型を用い、幾何学的相似も完全に満たす必要はないものとする。模型縮尺は1/20、1/10とする。また、オーバーバック1個の膨張の影響を考慮する。

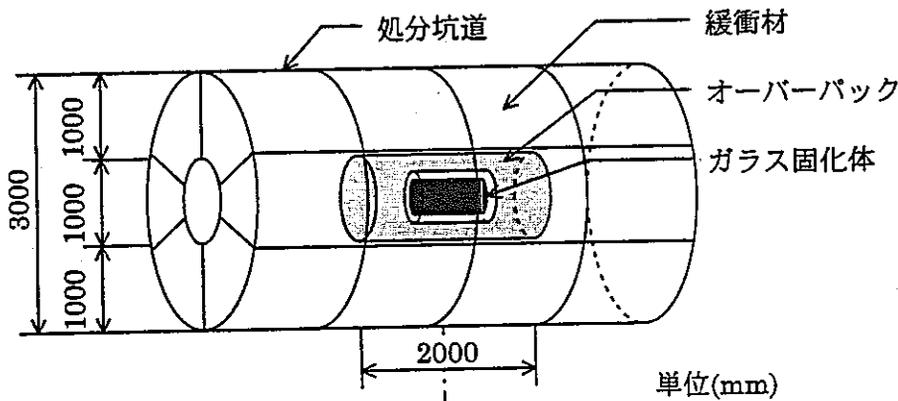


図4-1 人工バリア仕様形状（坑道横置方式）

③ 緩衝材の条件

緩衝材はベントナイト(100%)とし、乾燥密度は 1.6g/cm^3 、 1.8g/cm^3 とする。また、緩衝材は飽和状態を条件とする。

④ オーバーバックの腐食膨張

膨張速度及び腐食膨張評価期間は装置スペック、試験期間に依存するが、目安として最初の1000年間に減肉量が30mm、膨張量はその倍、その後9000年間は $1\text{mm}/1000\text{年}$ 程度とする。オーバーバックの腐食膨張の実験的模擬方法は、オーバーバックの軸方向と半径方向をそれぞれ単独で模擬することとする。

⑤ 周辺岩盤の変形

周辺岩盤の長期的変形は定量的に把握されておらず、緩衝材に作用する外力としてその値を決めることが困難なため、本設計研究において周辺岩盤の変形は考慮しない。

5 研究委託の内容

5.1 試験手法の検討・選定

オーバーバックの腐食膨張による外力を模擬する試験手法として、オーバーバックと緩衝材の境界部に腐食膨張に相当する変位や応力を与える方法が考えられる。これらの内、応力を与える手法はより実現象に近い試験であると考えられる。しかしながら、現状では腐食膨張に相当する応力の値が不明確であり、また試験における応力の制御が困難である。従って、オーバーバックと緩衝材の境界部に変位を与える手法を用いるのが現実的であると考えられる。

本研究では、オーバーバック腐食膨張を変位を用いて模擬することにし、その場合の模型形状の選定、载荷もしくは強制変位の選定、計測項目・計測方法の選定、及び試験手法の確立の各項目を検討する。

5.1.1 模型形状の選定

(1) 人工バリアを模擬した模型形状の選定

(a) 試験装置の実現性からみた模型形状の選定

図4.2-1に示す人工バリアの仕様を模擬した模型で、オーバーバックの腐食膨張に相当する変位を緩衝材に作用させる手法としては、①オーバーバックと緩衝材の境界部全体に変位を与える手法、②オーバーバックモデルを貫入する手法が考えられる。①の境界部全体に変位を与える手法は、境界部に水圧等を作用させれば可能と思われる。しかしながら、決められた変位量を均一に与えることは非常に困難であり、不均一な変形になった場合の試験結果の解釈も困難である。この点からみて境界部全体に変位を与える手法は適切ではないと考える。一方、オーバーバックモデルの貫入による手法は、試験としては制御がしやすく試験装置としての実現性も高い。以上から試験手法としては、オーバーバックモデル貫入による手法が適当と考える。

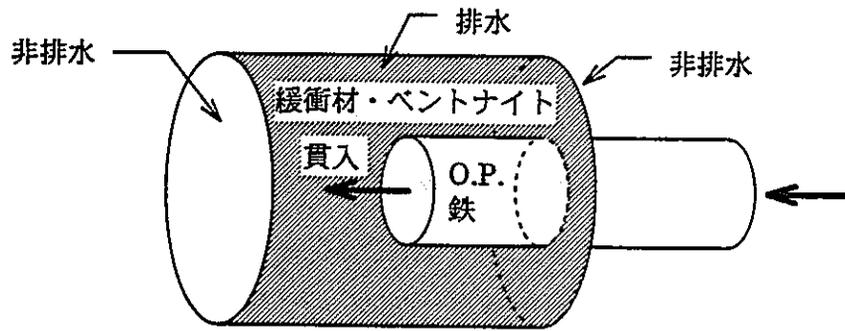
オーバーバックモデルを貫入する手法では、一度の試験で境界部全体を変形させることは不可能であり、軸方向と半径方向に変形させる試験を個別に行う。このような条件下での模型形状の選択を行うが、試験には①緩衝材の応力を計測する、②緩衝材内部の変形を計測するという2点が求められ、これらを考慮したモデル形状の選定を行う必要がある。

軸方向の貫入の試験模型としては、図5.1.1-1(a)に示した全体モデルが考えられる。その他の模型形状を考えることも可能であるが、全体モデルは形状が単純であり、か

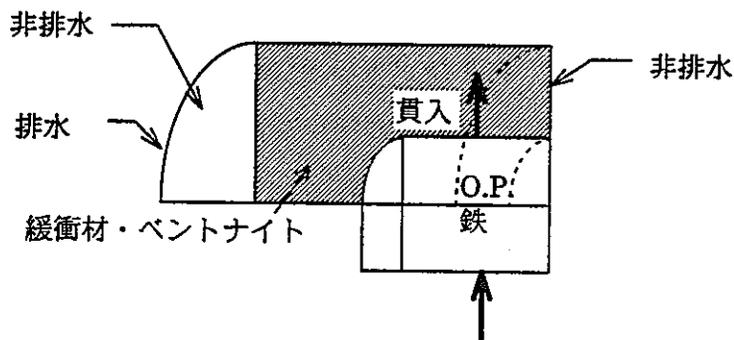
つ境界部の影響を受けにくい点で最も優れている。ただし、この試験模型では、5.1.3で述べるように放射線により変形を計測する手法も検討を行うが、緩衝材内部の変形計測は不可能である場合も考えられ、応力を計測するのが試験の主たる目的となる。

半径方向の貫入の試験では、全周膨張を模擬できるのではなく1方向のみの貫入となる。従って応力は全周膨張の場合と若干異なることになり、緩衝材の変形状況を計測することに重点が置かれる。この点を踏まえると、模型形状の選択には変形計測の容易さという観点が必要となる。供試体の変形を目視で調べるために試験模型の断面にアクリル板を装着する手法が考えられる。この手法を用いる場合、図5.1.1-1(b)に示した1/8モデル及び(c)に示した平面ひずみモデルを模型形状の候補として挙げることができる。また、放射線による変形計測を考慮すると、平面ひずみモデルの方が透過距離が短い点で優れている。平面ひずみモデルは試験や解析での取り扱いやすさの点でも優れている。従って、平面ひずみモデルを選択するのが適当であると考えられる。

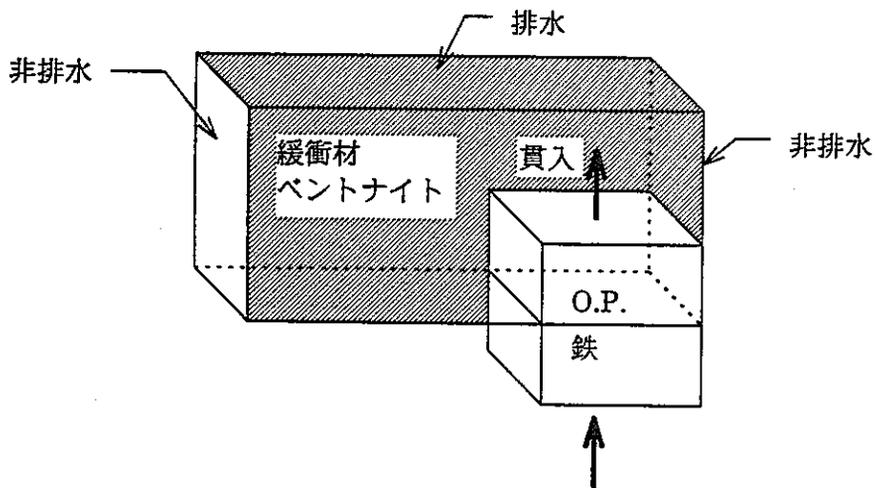
以上の検討からオーバーバック膨張の模擬試験として、オーバーバックモデルを軸方向及び半径方向に貫入する手法を選定し、軸方向の貫入モデルには全体モデルを、半径方向の貫入モデルには平面ひずみモデルを用いることにする。



(a) 全体モデル(軸方向貫入)



(b) 1/8 モデル(半径方向貫入)



(c) 平面ひずみモデル(半径方向貫入)

図5.1.1-1 模型形状

(b) 解析的検討

(a)で選定した全体モデルと平面ひずみモデルの解析的検討を行う。また、比較のためプロトタイプ解析と全体モデルで半径方向の膨張を設定した解析を行う。

本節での解析は、水を考慮せず固相のみの弾性解析とする。模型の縮尺は1/10とし、プロトタイプ、全体モデルは軸対称条件により、平面ひずみモデルは平面ひずみ条件により解析する。緩衝材の乾燥密度は、 1.6 g/cm^3 とする。弾性係数は動力炉・核燃料開発事業団殿より提供を受けた値である13MPaを用いる。ポアソン比は、乾燥密度 1.6 g/cm^3 における値が求められていないので、平3レポートP4-77に示されている乾燥密度 1.8 kg/cm^3 の場合の値である0.4を用いる。オーバーパックの膨張量は1万年で0.1mとする。初期の膨張圧は1MPaとする。尚、強制変位による応力の発生状況を調べるので自重は考慮しない。それぞれのモデルの境界条件を図5.1.1-2に示し、解析に使用するデータを表5.1.1-1に示す。

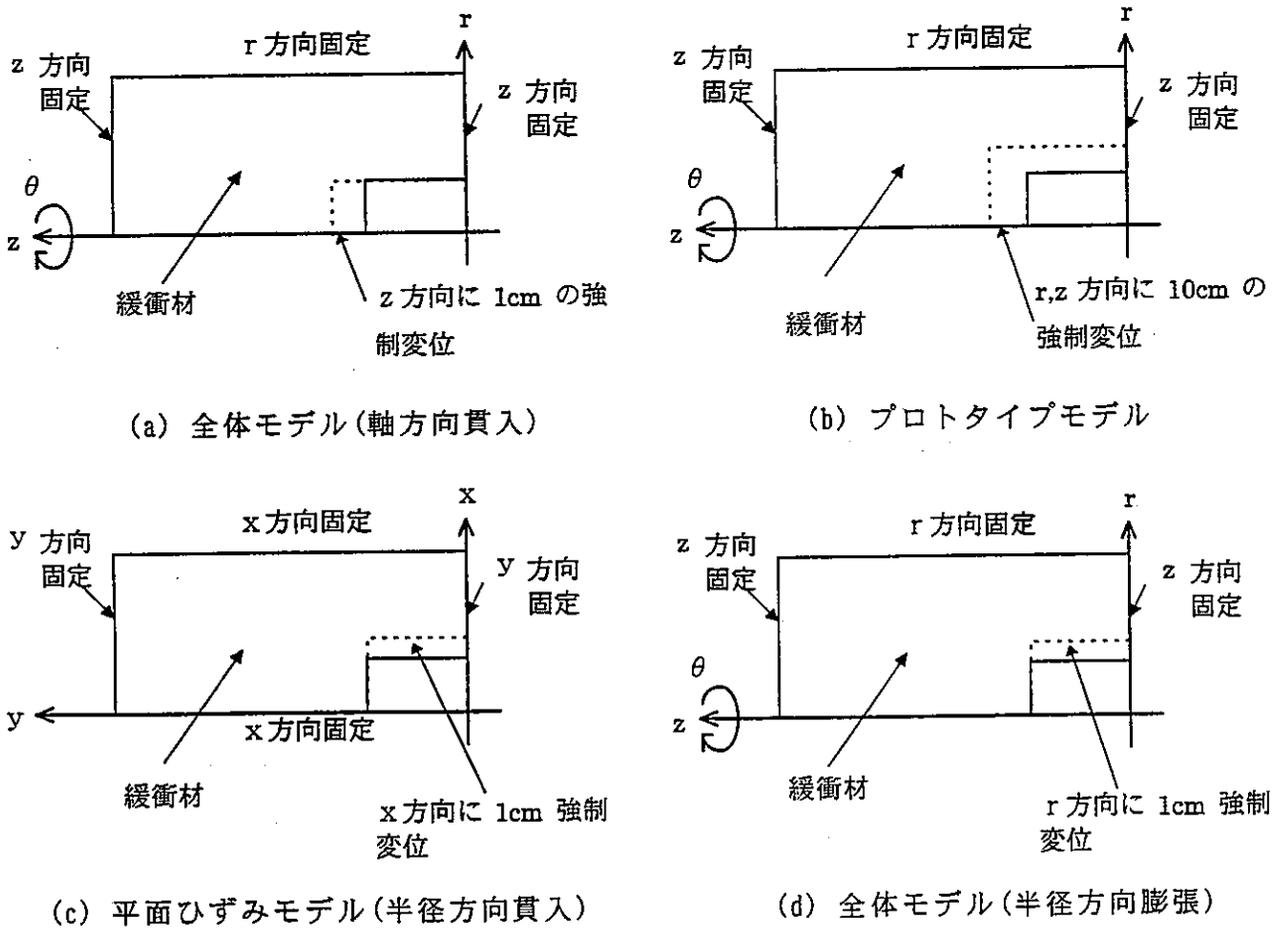


図5.1.1-2 各モデルの境界条件

表5.1.1-1 緩衝材の物性値

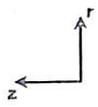
弾性係数	13 MPa
ポアソン比	0.4
オーバーバックの膨張量	0.1 m
初期膨張圧	1 MPa

図5.1.1-3に全体モデル(軸方向貫入)とプロトタイプとの軸方向の応力図を示す。軸方向の応力の大きさは全体モデルの方が大きいが同程度の値である。また、オーバーバックと緩衝材の軸方向の境界では圧縮になり上部の境界では引っ張りになるなど応力の傾向も一致しており、軸方向の膨張を模擬するモデルとして全体モデルは特に問題はないと言える。

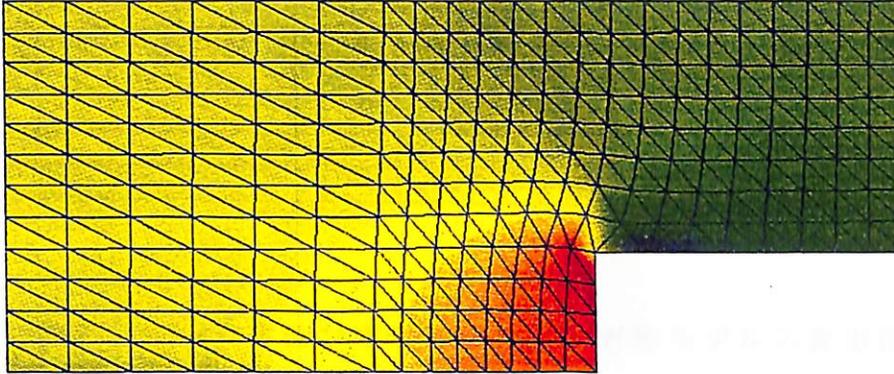
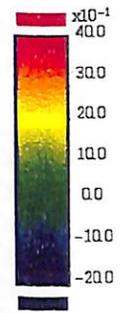
平面ひずみモデルは半径方向に膨張する場合の代替と捉えることができるので、軸対称モデルにより半径方向の膨張を解析した結果と比較する。両者の変形を比較すると、図5.1.1-4の変形図からわかるように、平面ひずみモデルの変形がオーバーバック上方で鉛直方向に、また左上方で水平方向に若干大きくなっている。その差はそれぞれ最大で2mmおよび3mmである。しかしながら、変形の傾向は同じであり、変形に関しての大差はないと言える。応力に関して平均主応力と偏差応力のコンター図を図5.1.1-5と5.1.1-6に示す。平均主応力は平面ひずみモデルでオーバーバック上部の値が大きくなっているが、全体的な傾向は同じである。偏差応力に関しては軸対称モデルの方がより大きな値であるが、両者ともオーバーバック左側で大きな値をとなる。従って応力に関しても両者は同様の傾向となる。

解析的検討からの結論として、オーバーバック膨張のモデルとして全体モデル(軸方向貫入)および平面ひずみモデルを採用することに特に問題はないと言える。

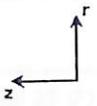
供試体の容器にかかる応力については、全体モデル(軸方向貫入)は周方向の面が1.2 MPa、軸方向の面が1.3MPaであり、平面ひずみモデルは上部にかかる応力の最大値が3.1MPa、面外方向にかかる応力の最大値が3.8MPaである。また、緩衝材の変形に必要な力は全体モデル(軸方向貫入)が4.1tf、平面ひずみモデルが30tfである。以上の結果を表5.1.1-2に示す。



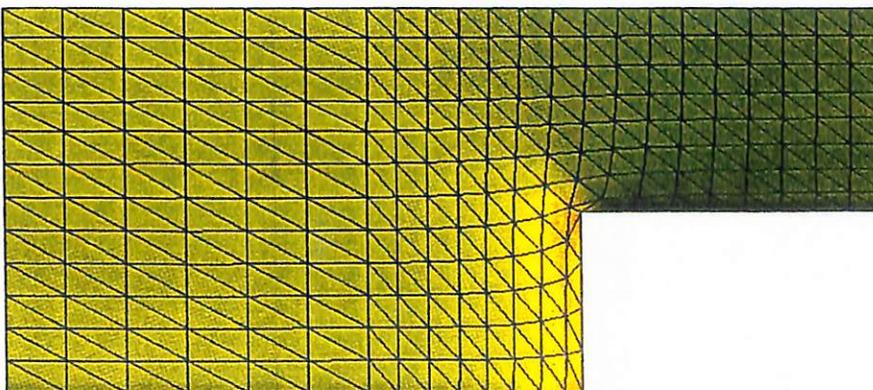
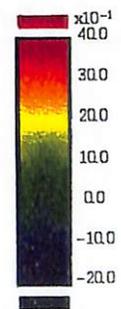
STRESS ZZ (MPa)



(a)全体モデル(軸方向貫入)



STRESS ZZ (MPa)



(b)プロトタイプモデル

図 5. 1. 1-3 全体モデルとプロトタイプモデルの軸方向応力

—— 平面ひずみモデル
 —— 軸対称モデル

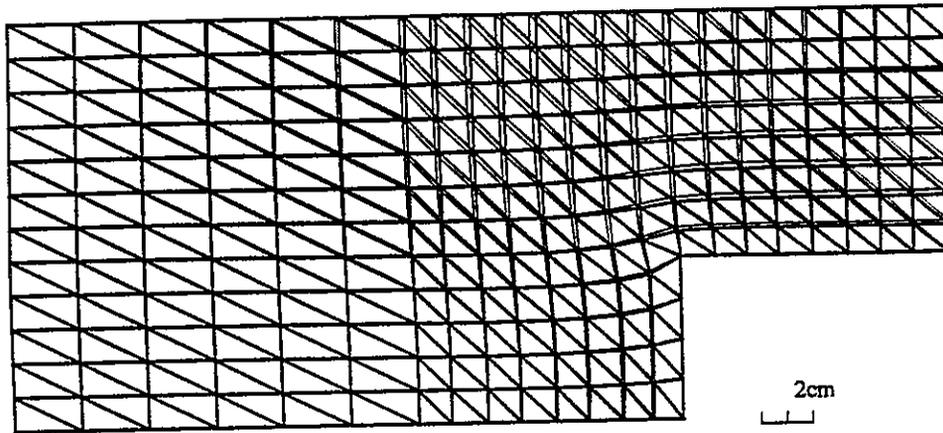
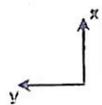


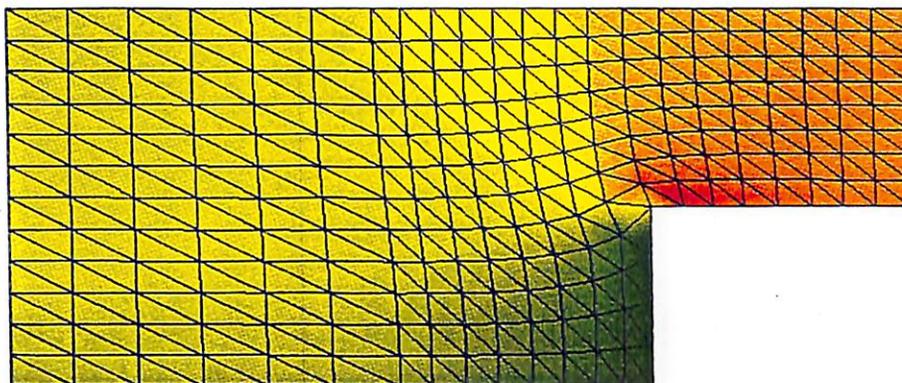
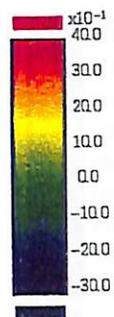
図5.1.1-4 平面ひずみモデルと軸対称モデルの変形図

表5.1.1-2 供試体容器にかかる応力と緩衝材の変形に必要な力

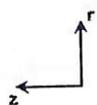
	全体モデル	平面ひずみモデル
供試体容器にかかる応力	1.2 MPa(周方向の面)	3.1 MPa(上部)
	1.3 MPa(軸方向の面)	3.8 MPa(面外)
緩衝材の変形に必要な力	4.1 tf	30.0 tf



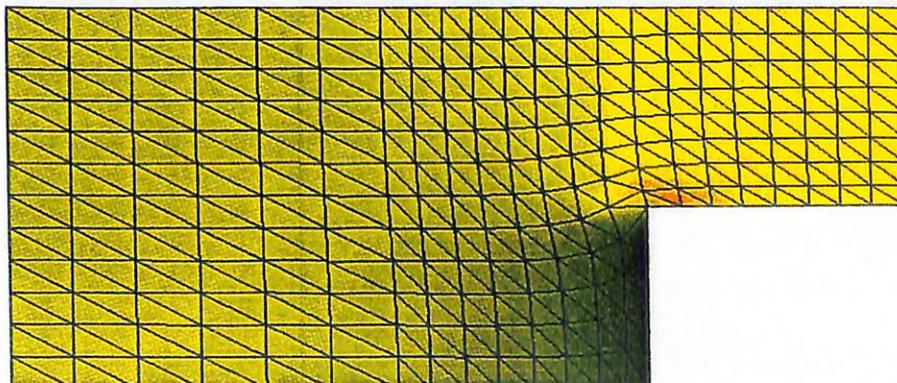
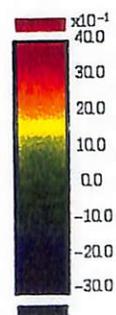
MEAN STRESS (MPa)



(a)平面ひずみモデル

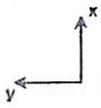


MEAN STRESS (MPa)

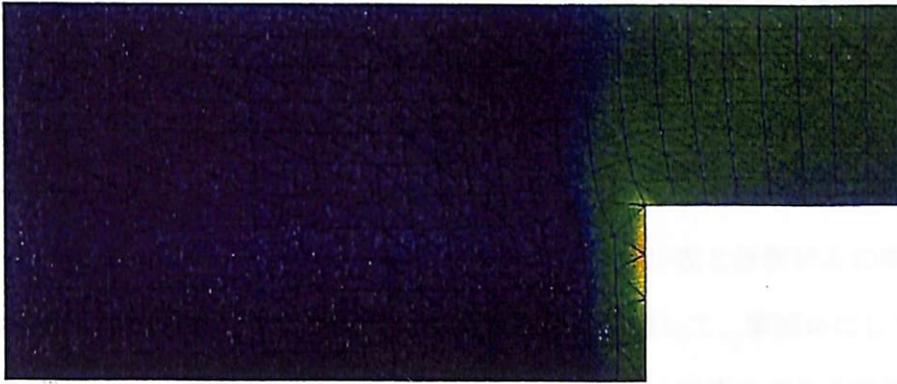
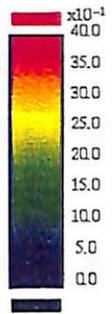


(b)軸対称モデル

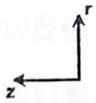
図 5. 1. 1-5 平面ひずみモデルと軸対称モデルの平均主応力



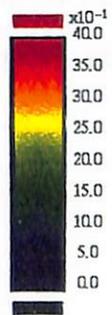
DEVIATE STRESS (MPa)



(a)平面ひずみモデル



DEVIATE STRESS (MPa)



(b)軸対称モデル

図 5. 1. 1-6 平面ひずみモデルと軸対称モデルの偏差応力

(2) 境界条件の検討

上述したように平面ひずみモデルでは緩衝材の変形を視覚的に調べるためモデル断面にアクリル板を装着する。この場合アクリル板と緩衝材の間に摩擦力が作用し、緩衝材の変形挙動に影響を及ぼす可能性がある。本節では摩擦力による影響を解析的に検討する。

摩擦力は、面外応力に摩擦係数を掛けた値が変形を抑制する方向に作用するものと捉えることができる。従って、面外応力に摩擦係数を掛け、各節点に変位方向と反対方向の節点力として作用させれば、摩擦による影響の概要を調べることができる。厳密に言えば、この問題は3次元的な問題であるが、事前の影響評価としては上記の簡便な手法による評価で十分であると考えられる。面外応力および節点の変位は摩擦を考慮しない場合の解析結果を用いる。

緩衝材の物性値は、(1)と同じである(表 5.1.1-1 参照)。アクリル板と緩衝材との摩擦係数は得られていないが、粘性土の場合内部摩擦角が 17° 程度であることを考慮して、摩擦角にして、 15° 、 30° 、 45° の3つの値を用いる。即ち、摩擦係数を、0.268、0.577、1 とする。解析モデルの境界条件とモデルの概念図を図 5.1.1-7 に示す。

摩擦の有無による変形の比較を図 5.1.1-8 に示す。また、変位の変化率の最大値を表 5.1.1-3 に示す。各ケースとも摩擦を考慮することによる影響はオーバーパック左上方の境界付近で顕著となり、水平方向の変位を抑制する作用が見られる。変位の変化率は摩擦係数が 1.0 の場合最大となり、摩擦を考慮しない場合の 81%となる。しかしながら、オーバーパック左上方の境界付近は、応力的には特に注意を要する領域ではない。従って、オーバーパックの健全性試験という観点から見れば、摩擦による影響は特に大きな問題ではないと言える。

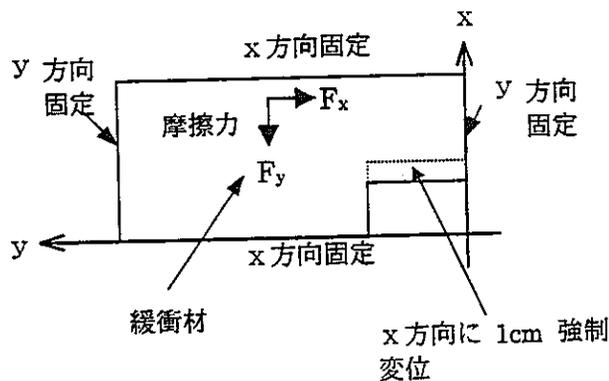
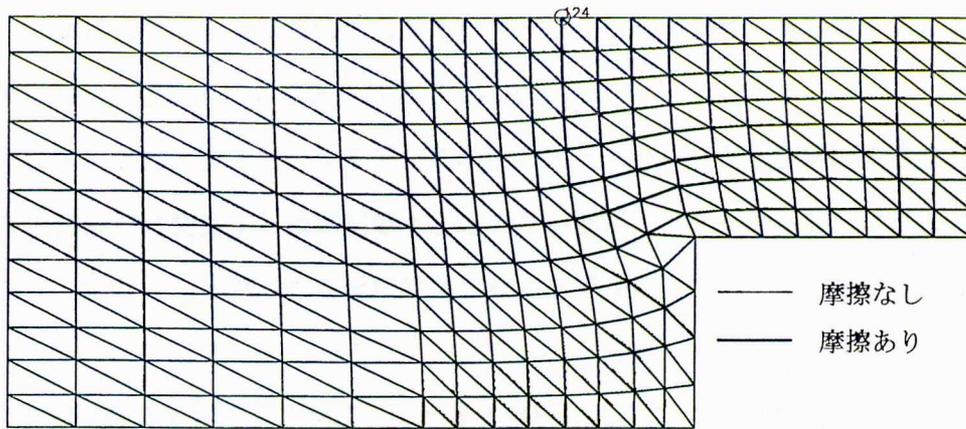


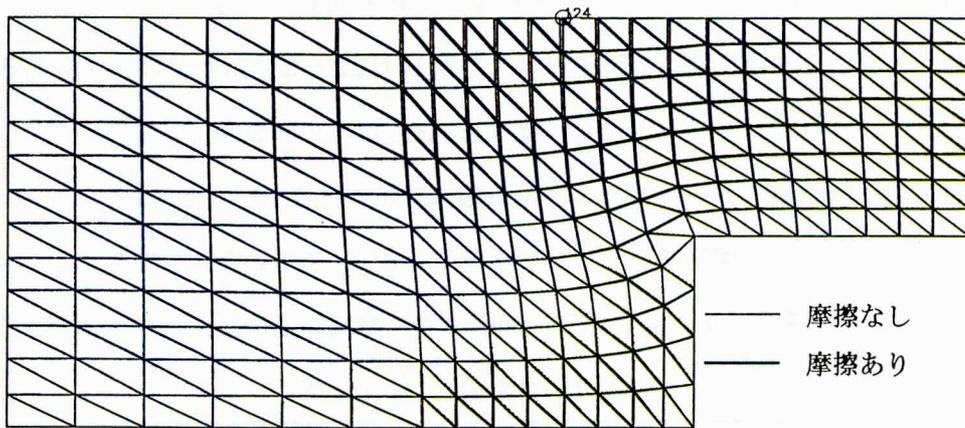
図 5.1.1-7 解析モデルの境界条件とモデルの概念図

表 5.1.1-3 摩擦の有無による変位と応力比の最大変化率 $\text{Max}(\text{摩擦有}/\text{摩擦無}) \times 100$

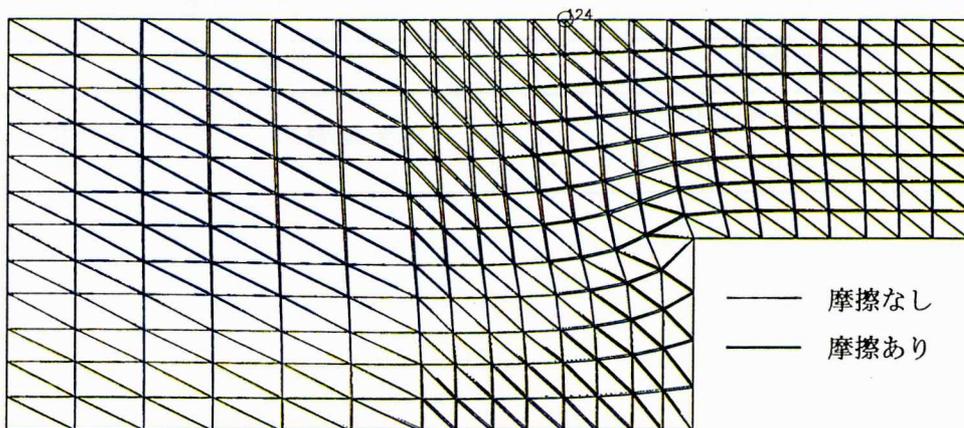
摩擦係数	0.268	0.577	1.0
変位の最大変化率	95%	89%	81%



(a) 摩擦係数 0.268(摩擦角 15°) の場合



(b) 摩擦係数 0.577(摩擦角 30°) の場合



(c) 摩擦係数 1.0(摩擦角 45°) の場合

図 5.1.1-8 摩擦の有無による変形の比較

5.1.2 荷重もしくは強制変位方法の選定

前節で述べたようにオーバーバックの膨張は、オーバーバックモデルの貫入により模擬する。貫入の制御には荷重制御と変位制御とがあるが、試験としては変位の方が制御しやすく設定した膨張速度に合わせやすい。本研究では、強制変位によりオーバーバックモデル貫入を制御することにする。従って、膨張速度は強制変位速度により表されることになる。

強制変位速度に関しては、実スケールモデルにおいてオーバーバックを全周膨張させた場合発生する過剰間隙水圧と試験時に発生する過剰間隙水圧との差が極端に大きくなるように選定する。以降実スケールモデルでオーバーバックを全周膨張させるモデルをプロトタイプモデルと呼ぶことにする。

プロトタイプの過剰間隙水圧の発生状況を弾性連成解析により調べる。緩衝材の物性値は 5.1.1 と同様に弾性係数を 13MPa、ポアソン比を 0.4 とし、透水係数については平 3 レポート P3-27 より乾燥密度 1.6 kg/cm³ の時の値である 5.0×10^{-13} m/s を用いる。オーバーバックの膨張速度は 3×10^{-5} m/年(1,000 年で 3cm)とする。緩衝材の物性値を表 5.1.2-1 に示す。解析モデルは軸対称モデルとし、境界条件は図 5.1.2-1 に示すように設定する。初期ヘッドは 3.5m とする。

1,000 年後におけるヘッドを図 5.1.2-2 に示す。図に示すようにヘッドの値は初期値からほとんど変化せず、初期値からの増加分は最大でも 0.02m である。従って過剰間隙水圧の発生はほとんどない。この結果を踏まえれば、強制変位速度は試験可能な期間内で極力遅くする必要がある。

表 5.1.2-1 緩衝材の物性値

弾性係数	13 MPa
ポアソン比	0.4
透水係数	5.0×10^{-13} m/sec
初期膨張圧	1 MPa
オーバーバックの膨張速度	3.0×10^{-5} m/year (3 cm / 1,000 years)

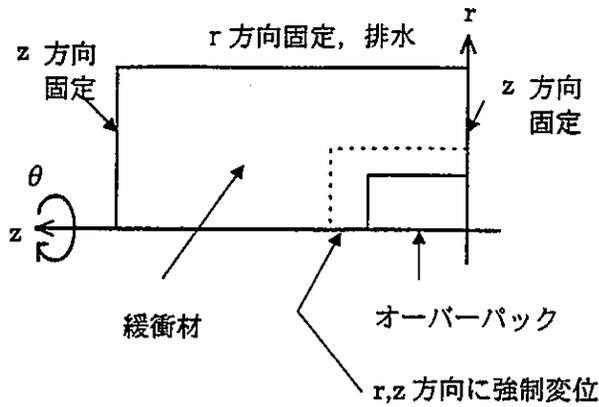


図 5.1.2-1 プロトタイプ境界条件

次に全体モデルを用いた軸方向の貫入試験試験の解析的検討により、試験における強制変位速度を選定する。解析モデルには軸対称モデルを用いる。モデル形状と境界条件を図 5.1.2-3 に示す。模型の縮尺は、10 分の 1 とする。周方向の側面は排水条件とし、固定水頭として 35cm を与える。両端部の境界は対称面となるので非排水となる。緩衝材の物性値には、プロトタイプ値として示した表 5.2.1-1 と同じ値を用いる。オーバーバックモデルの総貫入量は、プロトタイプで 10cm の膨張がある場合を想定し 1cm とする。試験期間は、5 日、10 日、20 日、40 日、60 日、80 日、100 日の 7 ケースとする。従って貫入速度はそれぞれ、0.2cm/day、0.1cm/day、0.05cm/day、0.04cm/day、0.017cm/day、0.013cm/sec、0.01cm/day となる。

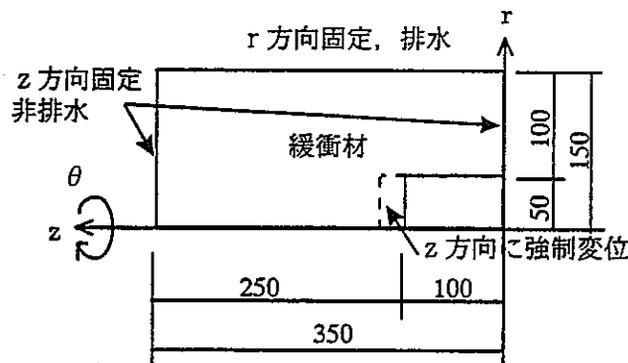


図 5.1.2-3 強制変位速度選定に用いる解析モデル

7 ケースについて最終ステップで発生した水頭の最大値と最小値を図 5.1.2-4 に示す。図からわかるように、解析期間が長くなるにつれて発生する水頭の最大値、最小値の絶対値は小さくなる。特に解析期間が 5 日から 60 日にかけての減少は急激であり、最大値で見ると約 140m 減少している。一方、60 日から 100 日までの減少は 9m ほどである。従って、試験期間を 60 日以上にしても、発生する過剰間隙水圧を抑制するという意味からはあまり効果がないと考えられる。

次に、過剰間隙水圧の影響を評価する。水頭は試験期間が 5 日の場合に最大となり、そ

Head (m)

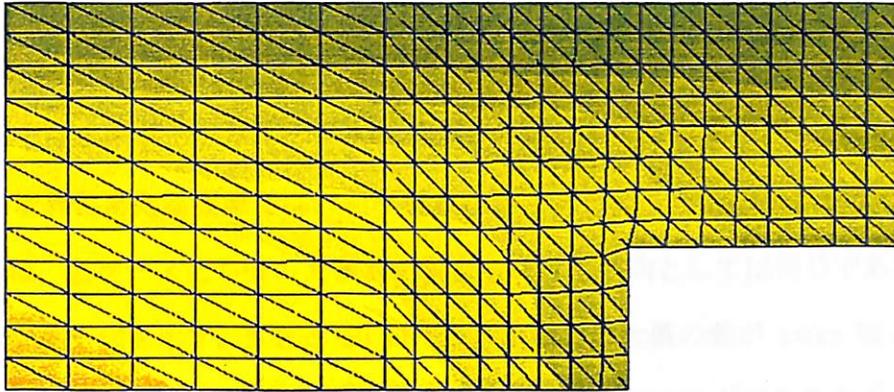
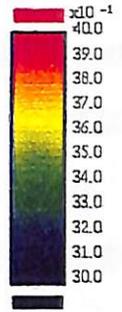


図 5.1.2-2 プロトタイプにおける 1000 年後のヘッド

の値は 163m, 過剰間隙水圧に換算して 1.6MPa である。この水頭が発生する要素は、軸方向に強制変位を与えている境界に隣接した要素である。この要素では、5.1.1 節における間隙水を考慮しない解析で 2.6MPa の平均応力が発生しており、過剰間隙水圧はその 60%となる。また、初期の膨張圧 1MPa に対しては 1.6 倍の値となる。以上の点から、試験期間が 5 日の場合は過剰間隙水圧により大きな影響が出る。試験期間が 60 日の場合では、水頭の最大値が 23.7m, 過剰間隙水圧で 0.24MPa であり、5.1.1 節の場合の最大平均有効応力の 10%程度である。この場合は、試験期間 5 日の場合ほど大きな影響は出ない。

図 5.1.2-5, 6 に試験期間が 5 日と 60 日の最終ステップにおける水頭のコンター図を示す。強制変位で押されている要素では水頭が上がり、その水頭が十分発散していない様子が見られる。また、オーバーバック側面との境界にあたる要素では、引っ張り状態であり周りからの吸水が間に合わずに負圧になっている。これは、各ケースとも値の大きさが異なるだけで傾向としては同じである。図 5.1.2-7,8 に平均有効応力のコンター図を示す。5 日と 60 日では、水頭の最大値の差が 140m ほどあり、過剰間隙水圧で約 1.4MPa となる。1.4MPa の水圧は最大平均有効応力の 50%ほどであるため、5 日の場合の平均応力が、60 日の場合と比較して全体的に小さくなっている。これは、上述したように比較的試験期間が短いと、固相に発生する応力の影響が顕著に現れてくることを表している。

以上の検討結果から、試験期間が短いと過剰間隙水圧の影響は無視できなくなるが、60 日程度の試験期間をとれば、あまり大きな影響は出ないと言える。図 5.1.2-4 に示した結果も併せて考えると、20 日から 60 日程度の間で試験期間を選択するのが妥当であると考ええる。

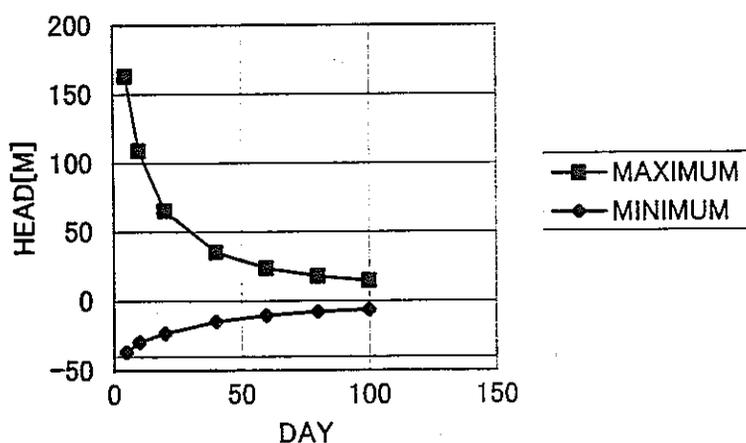


図 5.1.2-4 試験の最終ステップにおける水頭の最大値と最小値

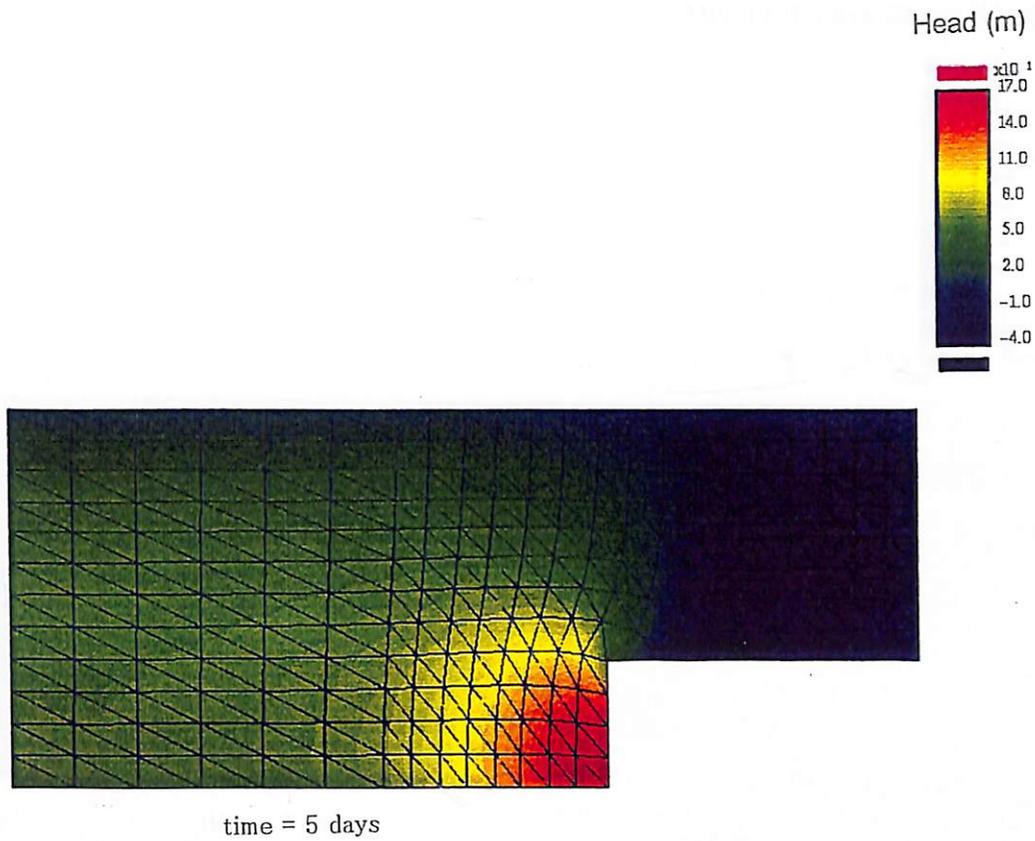


図 5.1.2-5 1cm/5 日の場合の最終ステップによるヘッド

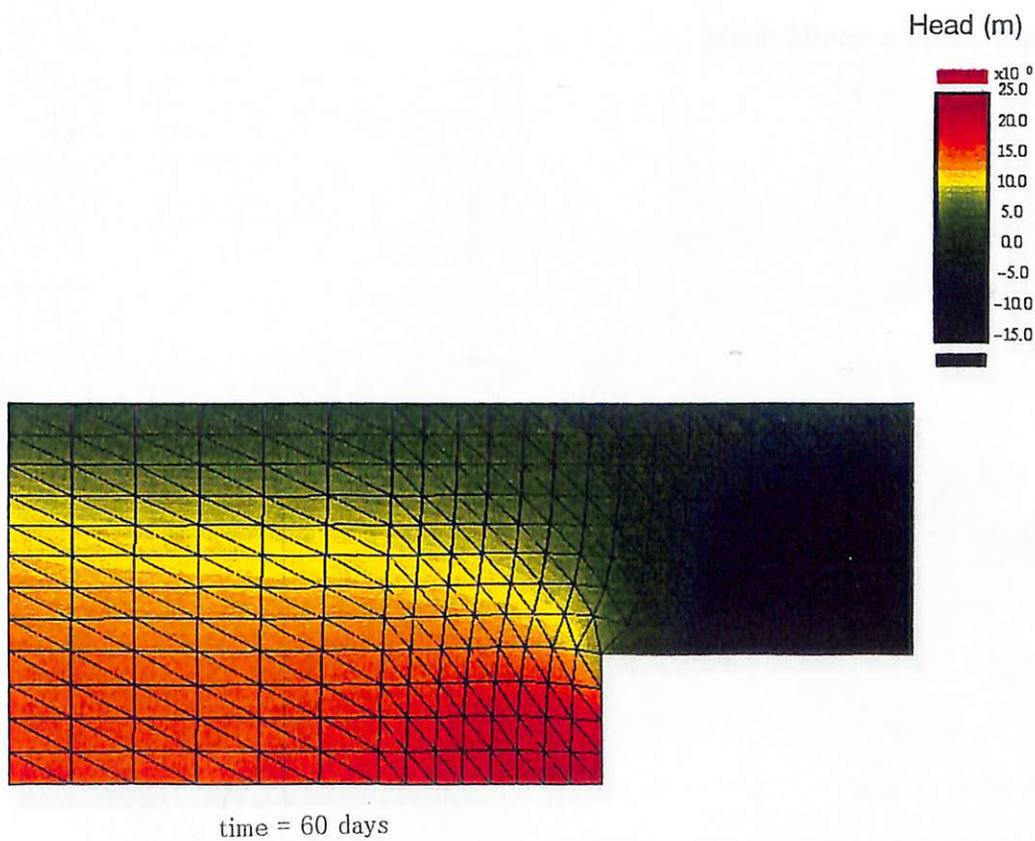
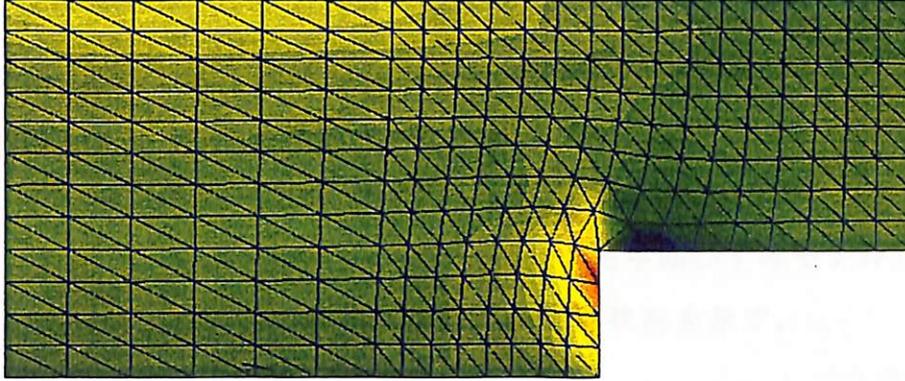
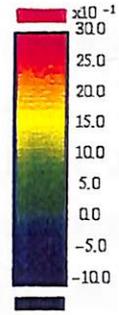


図 5.1.2-6 1cm/60 日の場合の最終ステップによるヘッド

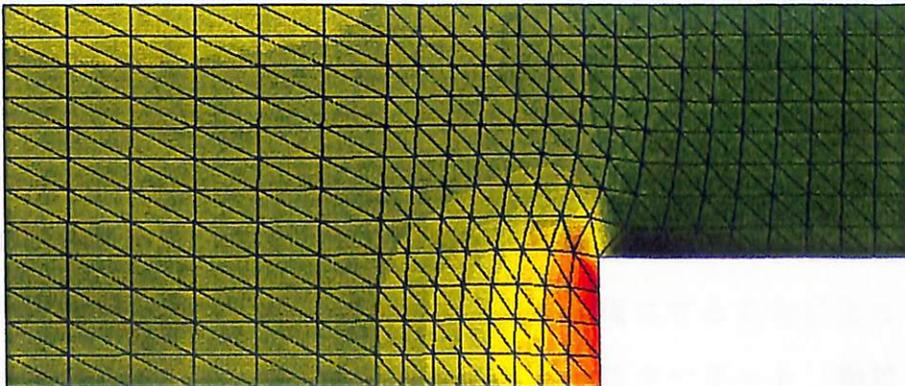
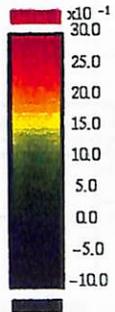
Mean Effective Stress (Mpa)



time = 5 days

図 5.1.2-7 1cm/5 日の場合の最終ステップによる平均有効応力

Mean Effective Stress (Mpa)



time = 60 days

図 5.1.2-8 1cm/60 日の場合の最終ステップによる平均有効応力

5.1.3 計測項目・計測方法の選定

人工バリア健全性試験設備を用いて行われる実験において、シミュレーション解析に必要な計測項目を抽出し、各計測項目について有効な計測方法を検討した。

境界部に作用する土圧：オーバーバック，試験容器内壁に設置した土圧計により計測

境界部の間隙水圧：オーバーバック，試験容器内に設置した間隙水圧計により計測

オーバーバックの貫入抵抗：オーバーバックに取り付けたロードセルにより計測

オーバーバックの変位：オーバーバックに取り付けた変位計により計測

緩衝材の体積変化量：緩衝材より排水された間隙水量を界面式体積計により計測

緩衝材の変位：緩衝材中に埋め込んだターゲット（鉛）の動きを、放射線撮影により計測

直視により計測（2次元平面ひずみモデル）

図5.1.3-1, 2に土圧計設置状況，間隙水圧計設置状況を示す。

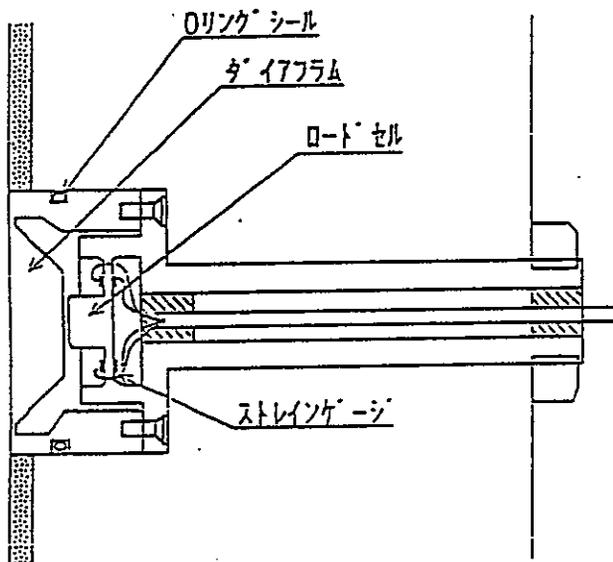


図5.1.3-1 土圧計設置状況

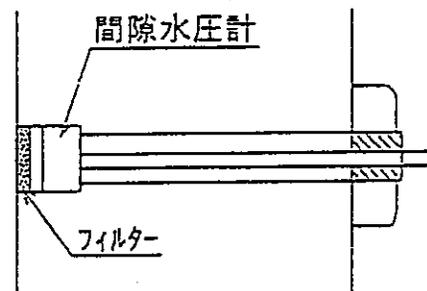


図5.1.3-2 間隙水圧計設置状況

境界部（オーバーバック，試験容器内壁）の土圧，間隙水圧，オーバーバックの貫入抵抗・変位，緩衝材の体積変化については，データロガーにより計測データをA/D変換し，コンピュータによりデータを取り込む方法とする。

計測項目の内，特に緩衝材の変位計測は技術的に難しいものと考えられる。2次元平面ひずみモデルにおいては，貫入部前面をアクリル板にすることによって，直視により変位計測が可能と考えられる。また，緩衝材中に配したターゲット（鉛粒）の動きを，X線・ γ 線撮影することで，非破壊で緩衝材内部の変位を計測出来る可能性がある。この方法の実現性について以下の検討を行った。

(1) X線, γ 線撮影による変位計測に関する予備検討

X線, γ 線撮影による各種計測においては, 以下のような様々な要因が透過写真の像質に影響する。

①放射線装置の性能

放射線透過試験に利用できる放射線は主にX線と γ 線である。X線は管電圧が高い程透過力が増し, 携帯用X線装置の最高電圧は470kVである。また, γ 線源には ^{192}Ir や ^{60}Co , ^{137}Cs 等を用いるが, この内 ^{192}Ir の透過力が携帯用X線装置と同程度で応用範囲が広く, 各方面で利用されている。同じ厚さの試験体であれば γ 線はX線に比べ写真の鮮明度が劣り, また, 撮影に数十倍の時間を要することから, X線撮影が優先的に選択される。

②試験体厚さ

携帯用のX線装置ではコンクリート厚さで500mm程度の内部に埋め込まれた $\phi 6 \sim 9 \text{ mm}$ の鉄筋の識別が可能である。それ以上の厚さに対しては γ 線が用いられる。 γ 線の透過限界は, コンクリート厚で約800mmである。ただし, 試験体が厚い程, 像質は悪くなる。

③フィルム, 増感紙

X線フィルムには感度の異なるものがあり, フィルムの感度と粒状性は相反する性質がある。つまり, 高感度のものはコントラストが低く, 高コントラストのものは低感度である。増感紙にも, 感度の点で優れているもの, コントラストの点で優れているものがあり, 使用目的, 放射線源の透過力と試験体の種類に応じて使い分ける必要がある。

④撮影時間

写真濃度は撮影時間, 照射線量に依存する。また, ①にも述べたが, X線フィルム, 増感紙の感度は放射線のエネルギーに著しく依存し, 同一フィルム濃度を得るためにはX線に対し, γ 線は10~20倍の線量が必要である。従って, 撮影時間も γ 線はX線の数十倍を要する。

⑤撮影配置

透過写真は影絵写真と同じ仕組みである。X線管の焦点 f は, ある有限な大きさを持っているので, 図5.1.3.-3に示すように, 半影 U が生じ像がぼける。

半影の大きさ U は、簡単な幾何学により、次式のように表される。

$$U = f \cdot L_2 / L_1 \quad (5.1.3-1)$$

ここで、 f : 焦点の大きさ

L_1 : 焦点・試験体間距離

L_2 : 試験体・フィルム間距離

従って、撮影精度を上げるためには、 L_2 をなるべく小さく、 L_1 をなるべく大きくすればよいが、 L_1 を大きくする程、露出時間が増加する。

焦点とフィルムの距離として、携帯式X線装置では約60 cmにとることが多い。また、JIS Z 3104では、高い精度

を要求する特級の像質では L_1/L_2 を5 f 以上とし、普通級では2.5 f 以上と定めている。

(以上、①～⑤は、参考文献1)～3)による。)

X線、 γ 線検査を行うにあたっては、試験目的、要求精度等に応じて以上のような項目を総合的に判断し、最適な計測方法を選択しなければならない。手順としては、試験体厚さの評価を行い、フィルムに写る像の要求精度、測定時間の限度によって、放射線装置の種類、フィルム、撮影配置を決定する。

この内、人工バリア健全性試験装置において、透過能に対する試験体厚さが不明である。すなわちベントナイト、アクリル板の透過限界に対する厚さが不明であるので、これについて実験的検討を行った。また、その結果を用いて実際の試験装置を模擬した配置でX線または γ 線撮影を実施し、撮影精度について検討した。ただし、対象とした試験モデルは1/20モデルと平面ひずみモデルである。

また、これらの実験的検討結果から、放射線撮影によるひずみ計測の実現性について評価した。

(2) ベントナイトの鉄厚比を求める実験

試験体全体の撮影方向の透過能を評価するために、ベントナイト、アクリル板の鉄相当厚さ（鉄厚比）について実験を含めた検討を行った。

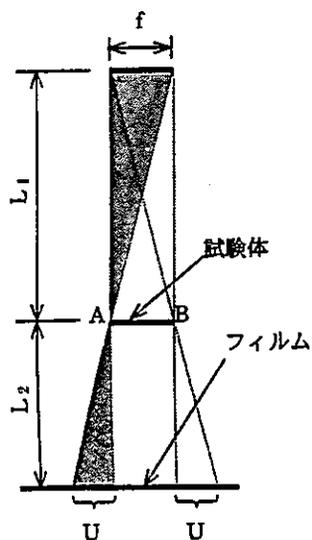


図5.1.3-3 実像と半影像の関係

(a) 装置

①フィルム

「FUJI#100」は、富士写真フィルム社製微粒子フィルムであり、工業利用においての標準フィルムとされおり、X線の場合0.03mm厚さの鉛箔増感紙と組み合わせて使用するのが一般的である。

「AGFA D8P」はAGFA社製 超高感度フィルムであり、粒子の細かさよりも感度に重点をおいたフィルムである。「FUJI#100」に対して、露出量で10倍～20倍の感度をもつ。

②増感紙

「LF003」は、KYOKKO社製 鉛箔0.03mm厚の増感紙。

「AGFA NDT1200」は、AGFA社製 蛍光増感紙であり、「AGFA D8P」との組み合わせで、「FUJI#100」と「LF003」の組み合わせに対して、露出量で50～70倍の感度をもつ。

③X線発生装置

X線発生装置は、理学電機製RF200EGS-2を使用した。管電流は5mA固定で、管電圧は最低80kVp～最高200kVpまで段階的に発生する。

④γ線装置

γ線装置は、ポニー工業製PI-104H型を使用した。装備される放射性同位元素は ^{192}Ir 370GBqであり、γ線エネルギーは平均で約400keVである。

⑤濃度計

濃度計は、Macbeth製TD901型を使用し、写真濃度を小数点以下2位まで測定した。

(b) 試験条件

後述の圧縮ベントナイト飽和用セルを用いて飽和させたベントナイト及びアクリル板の、厚さ50mm、100mm、150mm各3種類の供試体を用い、供試体と段階的に板厚を変えた鉄板（以下TPとする）を同時に撮影し、その濃度を計測することにより、鉄換算厚さを求めた。

表5.1.3-1, 2にベントナイトおよびアクリルの撮影パラメータを示す。

表5.1.3-1 ベントナイトの撮影パラメータ

線源、フィルム 増感紙 板厚	γ 線	γ 線	X線 (100kVp)	X線 (200kVp)
		FUJI#100 LF003	AGFA D8P AGFA NDT1200	FUJI#100 LF003
50mm	○	○	○	○
100mm	○	○	○	○
150mm	○	○	○	○

1/20モデルの放射線透過試験において γ 線の透過能力及び照射時間を考慮し、高感度フィルム「AGFA D8P」と、蛍光増感紙「AGFA NDT1200」の組み合わせをパラメータに加えた。

表5.1.3-2 アクリルの撮影パラメータ

線源、フィルム、増感紙 板厚	γ 線	X線 (100kV p)	X線 (200kV p)
		FUJI#100 LF003	FUJI#100 LF003
50mm	○	○	○
100mm	○	○	○
150mm	○	○	○

アクリルの場合、X線、 γ 線共に透過能力、照射時間に問題はないと判断し、高感度フィルム「AGFA D8P」、蛍光増感紙「AGFA NDT1200」の組み合わせはパラメータに加えないこととした。

撮影概略を図5.1.3-4に示す。また、表5.1.3-3,4にX線、 γ 線撮影条件を示す。

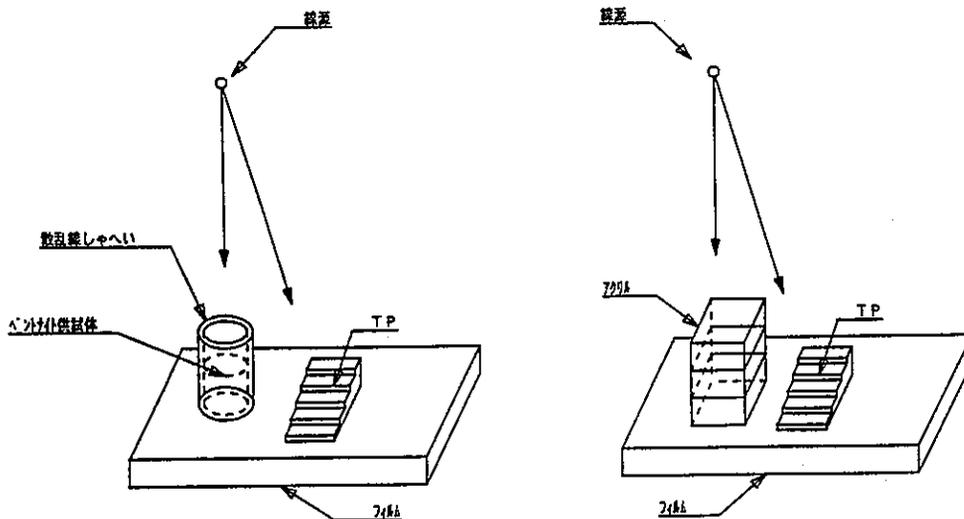


図5.1.3-4 撮影概略図

表5.1.3-3 X線撮影条件

フィルムマーク FILM MARK	撮影条件					
	CONDITION OF EXPOSURE					
	管電圧 TUBE VOLTAGE	管電流 TUBE CURRENT	焦点- フィルム間距離 SOURCE-FILM DISTANCE	露出時間 EXPOSURE TIME	フィルム FILM TYPE	増感紙 SCREEN
B-T50-100-E100	100kVp	5mA	600mm	0.3min	FUJI #100	KYOKKO LF003
B-T100-100-E100	100kVp	5mA	600mm	0.9min	FUJI #100	KYOKKO LF003
B-T150-100-E100	100kVp	5mA	600mm	2.0min	FUJI #100	KYOKKO LF003
B-T50-100-E200	200kVp	5mA	600mm	0.2min	FUJI #100	KYOKKO LF003
B-T100-100-E200	200kVp	5mA	600mm	0.5min	FUJI #100	KYOKKO LF003
B-T150-100-E200	200kVp	5mA	600mm	1.3min	FUJI #100	KYOKKO LF003
A-T50-100-E100	100kVp	5mA	1500mm	0.3min	FUJI #100	KYOKKO LF003
A-T100-100-E100	100kVp	5mA	1500mm	0.5min	FUJI #100	KYOKKO LF003
A-T150-100-E100	100kVp	5mA	1500mm	0.8min	FUJI #100	KYOKKO LF003
A-T50-100-E200	200kVp	5mA	1500mm	0.2min	FUJI #100	KYOKKO LF003
A-T100-100-E200	200kVp	5mA	1500mm	0.3min	FUJI #100	KYOKKO LF003
A-T150-100-E200	200kVp	5mA	1500mm	0.5min	FUJI #100	KYOKKO LF003

備考

1. フィルムマークの説明

例) A-T50-100-E100

1項目	2項目	3項目	4項目
A:アクリル	T50:板厚50mm	100:フィルム(富士写真フィルム製)#100	E100:X線(100kVp)で撮影
B:ベントナイト	T100:板厚100mm T150:板厚150mm	D8P:フィルム(AGFA社製)D8P	E200:X線(200kVp)で撮影 G:γ線で撮影

2. 増感紙について

KYOKKO LF003は、KYOKKO社製 鉛箔0.03mm厚の増感紙。

表5.1.3-4 γ 線撮影条件

フィルムマーク FILM MARK	撮影条件					
	CONDITION OF EXPOSURE					
	核種 NUCLIDE	強度 INTENSITY	焦点- フィルム間距離 SOURCE-FILM DISTANCE	露出時間 EXPOSURE TIME	フィルム FILM TYPE	増感紙 SCREEN
B-T50-100-G	^{192}Ir	370GBq	600	6.5min	FUJI #100	KYOKKO LF003
B-T100-100-G	^{192}Ir	370GBq	600	20.0min	FUJI #100	KYOKKO LF003
B-T150-100-G	^{192}Ir	370GBq	600	29.0min	FUJI #100	KYOKKO LF003
B-T50-D8P-G	^{192}Ir	370GBq	600	7sec	AGFA D8P	AGFA NDT1200
B-T100-D8P-G	^{192}Ir	370GBq	600	16sec	AGFA D8P	AGFA NDT1200
B-T150-D8P-G	^{192}Ir	370GBq	600	29sec	AGFA D8P	AGFA NDT1200
A-T50-100-G	^{192}Ir	370GBq	600	4.0min	FUJI #100	KYOKKO LF003
A-T100-100-G	^{192}Ir	370GBq	600	6.5min	FUJI #100	KYOKKO LF003
A-T150-100-G	^{192}Ir	370GBq	600	12.0min	FUJI #100	KYOKKO LF003

備考

1. フィルムマークの説明

例) B-T50-100-G

1項目	2項目	3項目	4項目
A:アクリル	T50:板厚50mm	100:フィルム(富士写真フィルム製)#100	E100:X線(100kVp)で撮影
B:ベントナイト	T100:板厚100mm T150:板厚150mm	D8P:フィルム(AGFA社製)D8P	E200:X線(200kVp)で撮影 G: γ 線で撮影

2. フィルムについて

AGFA D8PはAGFA社製 超高感度フィルム。

3. 増感紙について

AGFA NDT1200は、AGFA社製 蛍光増感紙。

4. その他

AGFA D8PとAGFA NDT1200は、高感度である特徴を考慮し、組み合わせて使用することとした。

(c) 測定データの換算方法

①写真濃度の測定

写真濃度の測定にはMacbeth製の濃度計を用い、小数点以下2位まで測定した。TPは、板厚範囲の中心部を1回測定し測定値とし、供試体は板厚範囲の中心部を3回測定し、平均を求めて測定値とした。

②鉄換算値の算出方法

鉄換算値の算出には、供試体の50mm、100mm、150mmを1ブロックとし、撮影条件毎に、鉄換算厚さを算出することとした。ここで、TPの測定値には誤差が含まれるため、数学的に回帰方程式を求め定量化し、供試体の測定値を回帰方程式にのせることで鉄換算厚さを求めた。また、回帰方程式の種類には「線形近似」、「対数近似」、「多項式近似」、「累乗近似」、「指数近似」等の方法があるが、「 R^2 」が0.99以上となるような方法を採用した。

以上の理由から、X線透過写真の回帰には「累乗近似」を採用し、 γ 線透過写真の回帰には、「指数近似」を採用した。

(d) 試験結果

撮影結果から、(c)項に示した換算方法により、各条件におけるベントナイト、アクリルの鉄換算厚を求めた。

表5.1.3-5および図5.1.3-5にベントナイトの鉄換算結果を示す。

表5.1.3-6および図5.1.3-6にアクリルの鉄換算結果を示す。

表5.1.3-5 ベントナイトの鉄換算結果

		ベントナイト			
供試体厚さ		γ 線	γ 線	X線(100kVp)	X線(200kVp)
		D8P	#100	#100	#100
鉄換算厚 (mm)	50	9.98	16.13	2.94	3.87
	100	23.45	26.08	8.57	10.82
	150	33.23	37.21	15.45	20.21

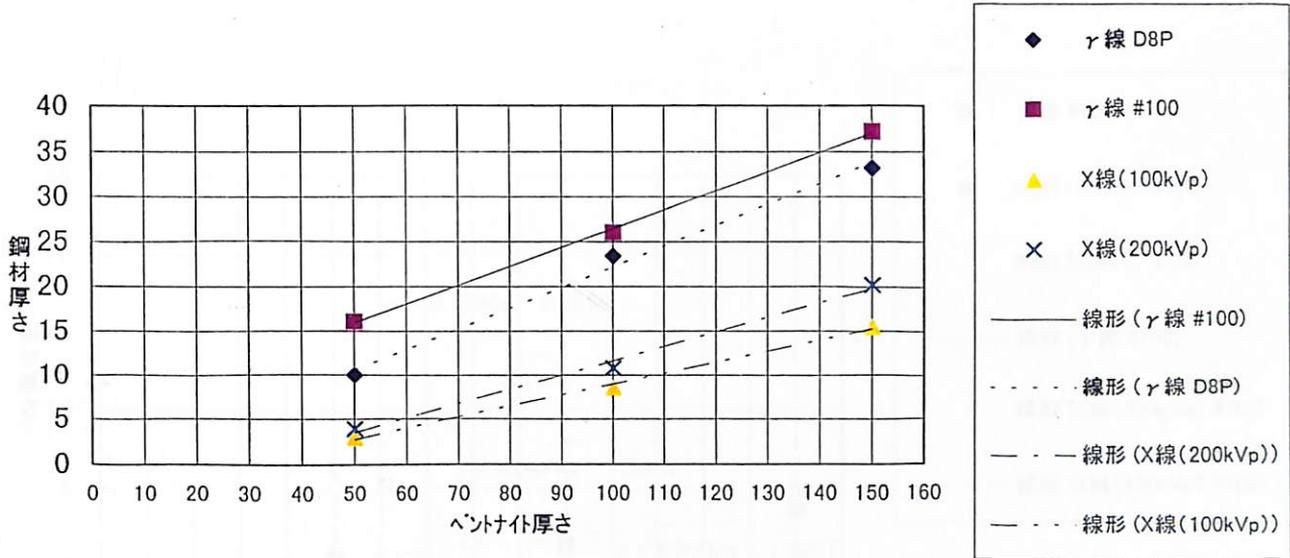


図5.1.3-5 ベントナイトの鉄換算結果

図5.1.3-6 アクリルの鉄換算結果

		アクリル		
		γ線	X線(100Kv ρ)	X線(200kVp)
供試体厚さ		#100	#100	#100
鉄換算 厚 (mm)	50	5.23	0.58	0.72
	100	11.42	1.48	2.09
	150	20.61	3.60	4.86

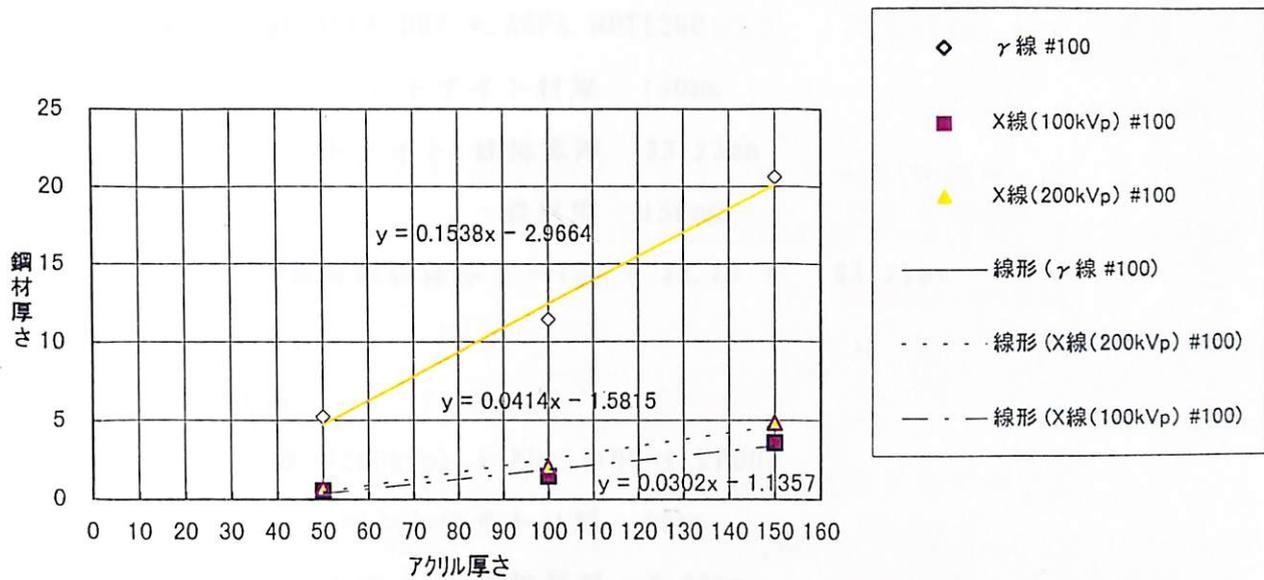


図5.1.3-6 アクリルの鉄換算結果

(e) 試験結果からの鉄換算厚さの推定

試験結果から放射線エネルギーが高いほど鉄換算厚さは大きくなっている。

これは、エネルギーの低い放射線は絶対的透過力が小さいが、光電効果及びコンプトン効果等の相互作用のため密度の低い材質は透過するが、密度の比較的大きい鉄の場合は自己吸収されてしまうためと考えられる。

ここで、1/20モデルと平面ひずみモデルの鉄換算厚さを示す。

① 1/20モデル

検査条件： γ 線+AGFA D8P + AGFA NDT1200

ベントナイト材厚 150mm

ベントナイト 鉄換算厚 33.23mm

鉄材厚 150mm

鉄換算試験体厚さ = $150 + 33.23 = 183.23$ mm

② 平面ひずみモデル

検査条件：X線 (200kVp) + FUJI#100 + LF003

ベントナイト材厚 50mm

ベントナイト 鉄換算厚 3.87mm

アクリル材厚 200mm

アクリル鉄換算厚 6.70mm※

鉄換算試験体厚さ = $3.87 + 6.70 = 10.57$ mm

検査条件：X線 (100kVp) + FUJI#100 + LF003

ベントナイト材厚 50mm

ベントナイト 鉄換算厚 2.94mm

アクリル材厚 200mm

アクリル鉄換算厚 4.90mm※

鉄換算試験体厚さ = $2.94 + 4.90 = 7.84$ mm

※アクリル鉄換算厚は、「線形近似」により算出した。

(3) ターゲットの撮影精度を調べる実験

1/20モデル及び平面ひずみモデルについて、実際の撮影条件と同等に試験体の鉄換算厚さに相当する鉄板を負荷とした状態で、供試体中にはターゲット（2.7φの鉛球）を配置し、放射線透過試験を行い、フィルムに写ったターゲット像から、撮影誤差等を評価する。

(a) 線源－フィルム間距離

撮影精度を得るため幾何学的ぼけを考慮すれば、 $U \geq 2.5 f$ としなければならないので、5.1.3-1式により線源－フィルム間距離（ $L_1 + L_2$ ）（以下「SFD」とする）を決定する。

①1/20モデル

$$L_2 = \text{鉄厚} 75\text{mm} + \text{ベントナイト厚} 150\text{mm} = 225\text{mm}$$

$$L_1 = 2.5 \times f (2.0\text{mm}) \times L_2 (225\text{mm}) = 1125\text{mm}$$

$$\text{SFD} = 1350\text{mm}$$

②平面ひずみモデル

$$L_2 = \text{アクリル厚} 100\text{mm} + \text{ベントナイト厚} 50\text{mm} = 150\text{mm}$$

$$L_1 = 2.5 \times f (2.0\text{mm}) \times L_2 (150\text{mm}) = 750\text{mm}$$

$$\text{SFD} = 900\text{mm}$$

(b) 試験条件

①1/20モデル

検査条件： γ 線+AGFA D8P + AGFA NDT1200 SFD : 1350mm

ベントナイト材厚 150mm

ベントナイト 鉄換算厚 33.23mm

鉄材厚 150mm

鉄換算試験体厚さ = 150 + 33.23 = 183.23mm

ここで、ベントナイト供試体の直径方向の材厚は50mmなので1/20モデルとの負荷を同一にするため、差の100mmを鉄に換算し、鉄板を追加して撮影する必要がある。

ここで、表5.1.3-5より、 γ 線、AGFA D8P + AGFA NDT1200において、ベントナイト供試体100mmの鉄換算厚さは、23.45mmなので24mm分の鉄板を負荷として追加して撮影するものとする。

②平面ひずみモデル

100kVpのX線での撮影

検査条件：X線（100kVp）＋FUJI#100＋LF003 SFD：900mm

ベントナイト材厚 50mm

ベントナイト 鉄換算厚 2.94mm

アクリル材厚 200mm

アクリル鉄換算厚 6.70mm※

鉄換算試験体厚さ＝2.94＋6.70＝9.64mm

※アクリル鉄換算厚は、「線形近似」により算出した。

200kVpのX線での撮影

検査条件：X線（200kVp）＋FUJI#100＋LF003 SFD：900mm

ベントナイト材厚 50mm

ベントナイト 鉄換算厚 3.87mm

アクリル材厚 200mm

アクリル鉄換算厚 4.90mm※

鉄換算試験体厚さ＝2.09＋4.90＝6.99 mm

※アクリル鉄換算厚は、「線形近似」により算出した。

撮影概略を図5.1.3-8に示す。

表5.1.3-7,8にX線、 γ 線撮影条件を示す。

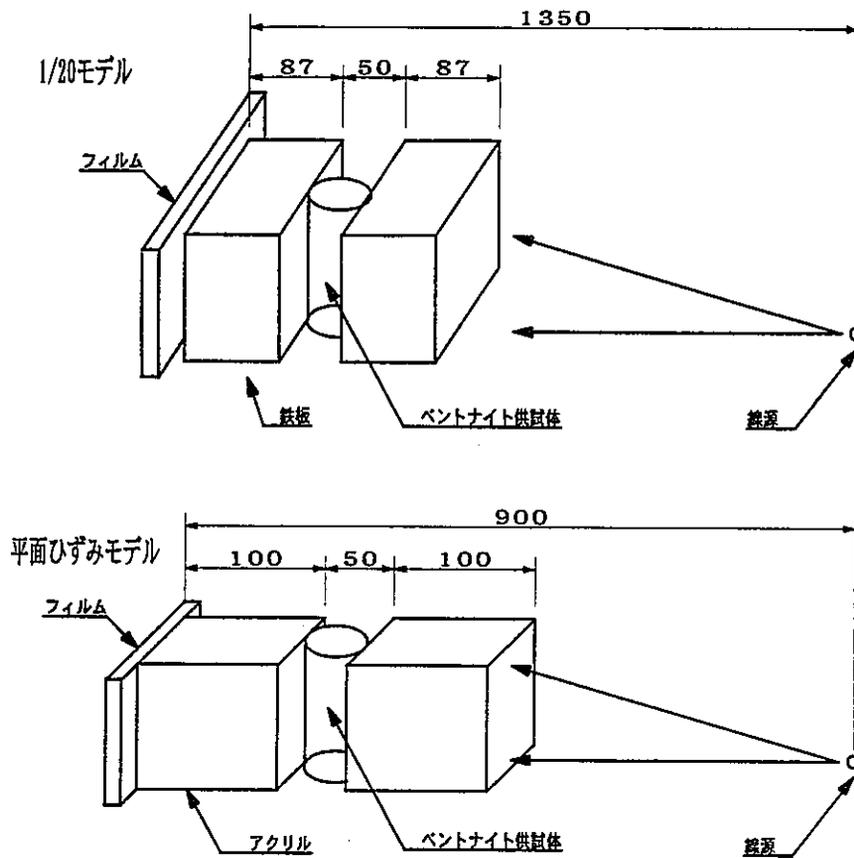


図5.1.3-7 撮影概略

表5.1.3-7 γ 線撮影条件 (1/20モデル)

フィルムマーク FILM MARK	撮影条件 CONDITION OF EXPOSURE					
	核種 NUCLIDE	強度 INTENSITY	焦点- フィルム間距離 SOURCE-FILM DISTANCE	露出時間 EXPOSURE TIME	フィルム FILM TYPE	増感紙 SCREEN
B50+F174-G	^{192}Ir	370GBq	1350	60min	AGFA D8P	AGFA NDT1200
備考						
1. フィルムマークの説明						
B50+F174-G						
1 項目			2 項目			
B50+F174:ベントナイト 50mm+鉄174mm			G: γ 線で撮影			

表5.1.3-8 X線撮影条件（平面ひずみモデル）

フィルムマーク FILM MARK	撮影条件					
	CONDITION OF EXPOSURE					
	管電圧 TUBE VOLTAGE	管電流 TUBE CURRENT	焦点- フィルム間距離 SOURCE-FILM DISTANCE	露出時間 EXPOSURE TIME	フィルム FILM TYPE	増感紙 SCREEN
A200+B50-E100-X	100kVp	5mA	900mm	7.0min	FUJI #100	KYOKKO LF003
A200+B50-E100-Y	100kVp	5mA	900mm	7.0min	FUJI #100	KYOKKO LF003
A200+B50-E200-X	200kVp	5mA	900mm	1.5min	FUJI #100	KYOKKO LF003
A200+B50-E200-Y	200kVp	5mA	900mm	1.5min	FUJI #100	KYOKKO LF003

備考

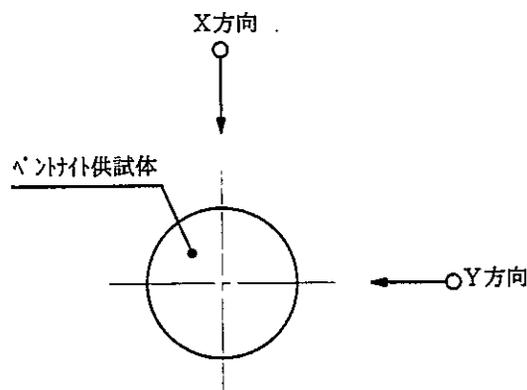
1、フィルムマークの説明

例) A200+B50-E100-X

1項目	2項目	3項目
A200+B50:アクリル 200mm+ベントナイト 50mm	E100:X線(100kVp)で撮影	X:撮影方向
		Y:撮影方向

2、撮影方向の説明

下図のとおり、ベントナイト供試体を90°2方向で撮影した。



(c) 試験結果

①1/20モデル

1/20モデルでは、鉄換算厚さを考慮するとX線での撮影は不可能なので、 γ 線にて撮影することとしたが、60分間照射してもフィルム上に像が写っていないため(写真5.1.3-3)、 ^{192}Ir の γ 線は透過不能と考えられる。

②平面ひずみモデル

平面ひずみモデルでは、100kVpと200kVpのX線で撮影し、どちらも鉛球を確認できた。また、100kVpと200kVpでは撮影したフィルムの像質に顕著な差は認められなかった。ただし、100kVpでの照射時間は7.0分であり、200kVpでの照射時間は1.5分であることから200kVpでの撮影のほうが効率が良いと思われる。

また、アクリル及びベントナイト自体による散乱線の影響もあり、鉛球の像がぼやけるため測定精度としては、フィルム上で1.0mmと思われる。

ただし、上記の精度は、放射線発生装置の設置精度を考慮していない。

(4) その他注意事項

①設置精度

放射線は点線源であるため放射線装置設置時は、一連の試験において撮影毎に線源とターゲットの位置を極めて高精度で配置しないとずれによる誤差を含むことになり、設置に関しては細心の注意が必要である。

②安全管理

撮影作業に当たっては電離放射線障害防止規則の適用を受けるので、現場での安全性については十分配慮する必要がある。

5.1.4 試験手法の確立

人工バリア健全性試験設備においては、緩衝材は飽和状態の高密度のベントナイト（乾燥密度 $\rho_d=1.6\sim 1.8\text{g/cm}^3$ ）を用いることが予定されている。しかし、要素試験レベルでは飽和した高密度のベントナイトを用いた試験が行われているものの、中規模以上の模型試験ではベントナイトの飽和に時間がかかるため実施例はほとんどない。また、上記した試験設備では、圧縮成型したベントナイトブロック（以後、圧縮ベントナイトという。）を、試験容器内において積み重ねることで緩衝材を作製する方法が考えられるが、圧縮ベントナイトの継ぎ目が飽和時に一体化することの確認を行う必要がある。ここでは、緩衝材の飽和時間の短縮のために圧縮ベントナイトを予め飽和し、これを試験装置に設置した後再注水することで圧縮ベントナイトを一体化する方法、および気乾状態の圧縮ベントナイトが水と接触した際の膨潤圧により一体化することの確認、の2点について実験的に検討することを目的とした。

以下では、①実験計画、②試験装置及び③実験結果について報告する。

(1) 実験計画

緩衝材（圧縮ベントナイト）作製方法の検討は、圧縮ベントナイト間の継ぎ目がせん断すべり面の角度と一致するものとして、供試体軸方向に対して45度で切断・接合した供試体を用い、圧密非排水三軸圧縮試験（以後、CU試験という。）により行うこととした。

以下に、供試体作製からCU試験までの手順を示す。

- ① $\phi 5\times H11\text{cm}$ の飽和した圧縮ベントナイト（乾燥密度 $\rho_d=1.6\text{g/cm}^3$ ）を、図5.1.4-1に示すように供試体軸方向に対して45度で切断する。

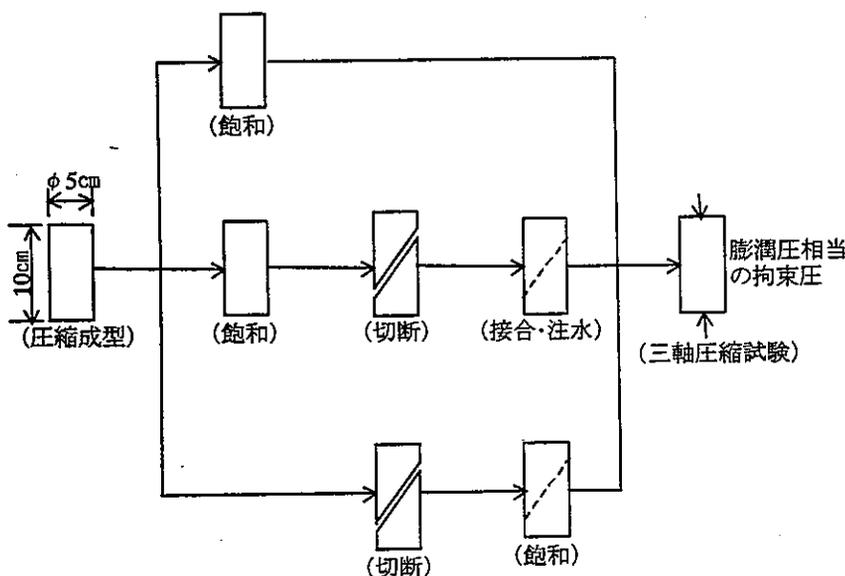


図5.1.4-1 試験手順

② 切断した供試体を再度接合し、周囲を拘束した条件下で水を注入しベントナイトの膨潤により一体化させる。

③ 乾燥密度 $\rho_d=1.6\text{g/cm}^3$ の圧縮ベントナイトの膨潤圧に相当する拘束圧の下で、CU試験を行う。なお、比較対照用として圧縮成型後に供試体軸方向に対して45度で切断・接合・飽和した供試体、および継ぎ目無しの供試体のCU試験も同時に行う。

供試体作製条件及びCU試験条件を、表5.1.4-1に示す。

緩衝材（圧縮ベントナイト）の一体化の評価は、通常の三軸圧縮試験用供試体（継ぎ目無しの供試体）と、図5.1.4-1の手順で作製した供試体の応力-ひずみ曲線を比較することで行う。

表5.1.4-1 供試体作製条件及びCU試験条件

項目	仕様
乾燥密度 $\rho_d(\text{g/cm}^3)$	約1.6
寸法 (cm)	$\phi 5 \times H10$
接合面の軸方向に対する角度 (度)	継ぎ目無し (飽和-CU試験) 45度 (飽和-切断-接合・再飽和-CU試験) 45度 (切断-接合・飽和-CU試験)
拘束圧	膨潤圧相当 (約1MPa)
背圧	約0.7~0.8MPa
せん断速度	0.01mm/min

(2) 試験装置

(a) 供試体作製装置

供試体作製用に用いた装置は、(i)含水比調整機、(ii)ベントナイト圧縮成型機、(iii)圧縮ベントナイト飽和用セル（2種類）及び(iv)圧縮ベントナイト切断・整形用治具、の4つである。

以下に、各装置の概要を示す。

(i) 含水比調整機

含水比調整機は、耐荷容量100kNのベントナイト圧縮成型機で乾燥密度 $\rho_d=1.6\text{g/cm}^3$ の圧縮ベントナイトの成型が可能のように、ベントナイトを適切な含水比に調整するための装置である。

本装置は、ベントナイト粉末と水分の混合攪拌機及び水の噴霧器より構成されている。

(ii) ベントナイト圧縮成型機

本装置は、ベントナイト粉末を圧縮成型するための装置である。構成は、①載荷フレーム（耐荷容量：200kN）、②油圧ジャッキ（容量：100kN）、③載荷ピストン（直径48.5mm）、④成型型枠（二つ割り、内径49×高さ300mm）、⑤成型型枠底版及び⑥供試体高さ調整用スペーサーより成っている。

(iii) 圧縮ベントナイト飽和用セル

圧縮ベントナイト飽和用セルは、変形を拘束しながら圧縮ベントナイトを飽和するためのものである。供試体作製には、 $\phi 50 \times H100$ mm供試体用飽和セルと $\phi 50 \times H110$ mm供試体飽和用セルの2種類を用いた。

$\phi 50 \times H100$ mm供試体用飽和セルは、「飽和-CU試験」及び「切断-接合・飽和-CU試験」の手順で三軸圧縮試験を行うための供試体の飽和セルである。構成は、①加圧盤（上部・下部）、②外筒（内径60mm）及び③モールド（二つ割り、内径50mm）より成っており、供試体上・下端面及び周面より、脱気及び水の注入が可能な構造としている。

$\phi 50 \times H110$ mm供試体用飽和セルは、「飽和-切断-接合・注水-CU試験」の手順で三軸圧縮試験を行うための供試体の飽和セルである。構成は、①加圧盤（上部・下部）、②外筒（内径80mm）、③外筒用スペーサー（内径80mm、高さ10mm）、④上部・下部内筒（二つ割り、内径60mm）、⑤内筒用スペーサー（二つ割り、内径50mm、高さ10mm）及び⑥上部・下部モールド（二つ割り、内径50mm）より成っており、供試体上・下端面及び周面より、脱気及び水の注水が可能な構造となっている。三軸圧縮試験用供試体は、直径約49mm×高さ約105mmに成型した圧縮ベントナイトを、本セル内で飽和する。つぎに、内筒用スペーサーを取り外して供試体を切断・端面整形することで直径50mm×高さ100mmの供試体とし、再度本セル内で注水することで作製する。

(iv) 圧縮ベントナイト切断・整形治具

本治具は、圧縮ベントナイトを供試体軸方向に対して45度で切断・端面整形するためのものである。

(b) 三軸圧縮試験機及び三軸セル

CU試験に用いた三軸圧縮試験機、および三軸セルの概要を以下に示す。

(i) 三軸圧縮試験機

本実験に用いた三軸圧縮試験機は、100kNの耐荷容量を有し、軸変位は5~0.005mm/minの一定変位速度の制御が可能となっている。また、セル圧・背圧供給装置及び排水量測定装置をそれぞれ2台保有し、

供試体の圧密と軸圧縮を同時に行うことが可能な構造となっている。

(ii) 三軸セル

三軸セルは、供試体全面に側圧（拘束圧）を作用させながら軸荷重を加えるためのものである。実験に用いた三軸セルは、2MPaの耐圧容量を有し、キャップ及びペDESTALを換えることにより直径50mmから75mmの供試体まで対応可能な構造となっている。

(3) 実験結果及び考察

(a) 圧縮ベントナイトの成型結果

圧縮ベントナイトは、「飽和-CU試験」用供試体（継ぎ目無し供試体）、「切断-接合・飽和-CU試験」用供試体及び「飽和-切断-接合・再飽和-CU試験」用供試体について、予備用供試体を含めて各々2本で合計6本を作製した。

作製した圧縮ベントナイトは、飽和セルに収納し、脱気後、0.5MPaの水圧の下で飽和を行っている。

表5.1.4-2に、作製した圧縮ベントナイトの寸法、重量、含水比（含水比調整後のベントナイトの含水比）及び飽和後の乾燥密度の計算値を示す。切断時に接合部端面が欠けた「切断-接合・飽和-CU試験」用供試体の一部を除き、ほぼ所定の乾燥密度に成型されていることが分かる。

表5.1.4-2 圧縮ベントナイトの寸法・重量・含水比及び乾燥密度

	圧縮成型ベントナイトの寸法・重量・含水比				飽和後供試体の 計算乾燥密度(g/cm ³)
	直径 (cm)	高さ (cm)	重量 (g)	含水比 (%)*	
継ぎ目無し	4.92	9.71	345.79	12	1.57
	4.93	9.68	347.62		1.58
切断-接合 -飽和	4.94	-	345.79	12	1.57
	4.93	-	333.35		1.52
飽和-切断 -接合-再 飽和	4.94	10.8	381.93	12	1.58
	4.93	10.89	383.29		1.58

*: 含水比は、含水比調整後に測定した値である。

(b) 圧密非排水 (CU) 三軸圧縮試験結果

表5.1.4-3及び表5.1.4-4に、圧密前及びせん断時の供試体の状態を示す。

図5.1.4-3に、CU試験の結果を示す。

写真5.1.4-14に、飽和セルから取り出した直後の供試体の外観を示す。また、写真5.1.4-15に、CU試験後の供試体の外観を示す。

これらの結果より、以下のことがいえる。

- ① 供試体を軸方向に対して45°で切断し接合した供試体CU2は接合面で破壊しており、継ぎ目無し供試体CU1の樽型の破壊形状と異なっている。
- ② 供試体CU2の応力-歪み曲線は、1%程度の軸歪みに達するまで供試体CU1とほぼ同じ挙動を示している。一方、飽和-切断・接合-再飽和を行った供試体CU3は、ごく初期の歪みレベルから供試体CU1と異なった応力-歪み曲線となっている。破壊形状は、接合面で破壊している点において供試体CU2と類似している。
- ③ 供試体CU2の最大軸差応力は供試体CU1の8割に達している。飽和もしくは圧密期間が本試験条件よりもさらに長期間となった場合、一体化する可能性も考えられる。
- ④ 本試験設備における緩衝材は、供試体CU2の一体化の可能性より、圧縮ベントナイトブロックを積み重ねる方法により作製することが推奨される。

表5.1.4-3 圧密前供試体の状態

供試体番号	CU 1	CU 2	CU 3
	継ぎ目無し	切断-接合-飽和	飽和-切断-接合-再飽和
飽和期間 (日)	97	72	31
圧密期間 (日)	15	14	15
含水比 (%)	12	12	12
乾燥重量 (g)	314.0	313.1	313.0
湿潤重量 (g)	396.6	395.7	395.3
高さ、直径(mm)	100.2, 50.1	100.3, 50.1	100.2, 49.7
体積 (cm ³)	197.4	197.8	194.4
間隙比	0.698	0.705	0.678

注1) 含水比は圧縮成型時に計測

注2) 乾燥重量は三軸圧縮試験後に計測

注3) CU3供試体の飽和期間は再飽和の期間

表5.1.4-4 せん断時(圧密後)供試体の状態

供試体番号	CU 1	CU 2	CU 3
	継ぎ目無し	切断-接合-飽和	飽和-切断-接合-再飽和
圧密応力 (MPa)	1.0	1.0	1.0
体積 (cm ³)	203.0	203.4	202.7
体積変化 (cm ³)	-5.6	-5.6	-8.3
体積歪み	-0.0284	-0.0283	-0.0427
高さ、直径(mm)	101.2, 50.6	101.2, 50.6	101.6, 50.4
間隙比	0.746	0.754	0.750

注1) 体積変化及び歪みは圧縮方向を正

注2) せん断時体積はせん断終了後の供試体重量より算出

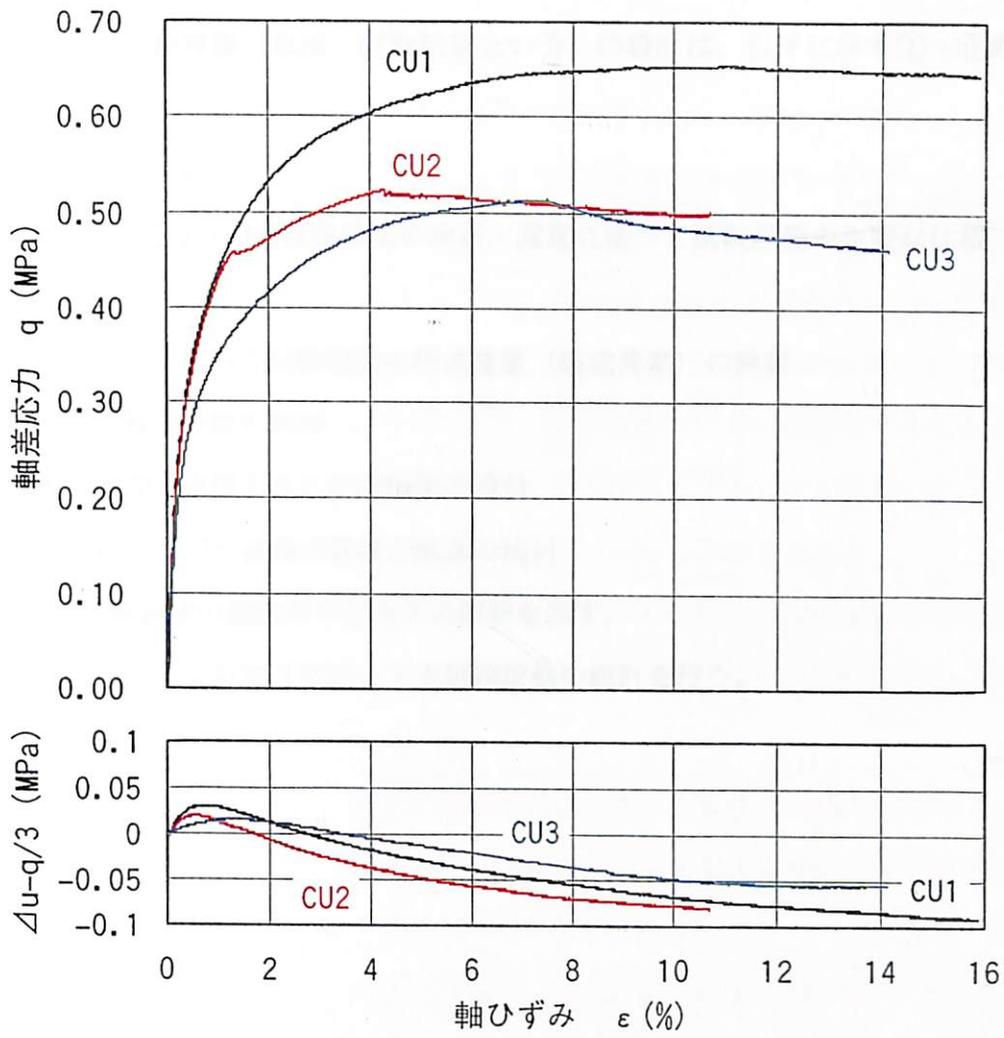


図5.1.4-3 圧密非排水三軸圧縮試験結果

5.2 試験装置の検討・設計

5.2.1 装置の設計

人工バリア健全性試験設備（以後、試験設備という）の設計は、以下に示す①～⑥のプロセスに従った。

- ①試験設備の目的の設定
- ②試験設備の目的及び5.1項の試験手法の検討・選定に基づく試験設備の主要な仕様（性能）の設定
- ③主要仕様（性能）に基づく試験設備の構成装置（構成要素）の検討
- ④各構成装置に必要な機能の検討
- ⑤各構成装置の機能を実現するための機構の検討
- ⑥構成装置の機構に基づく各構成装置の構造の検討

図5.2.1-1に、試験設備の設計のプロセスの概要を示す。

以下では、同図に示すプロセスに沿って本試験設備の設計を行う。

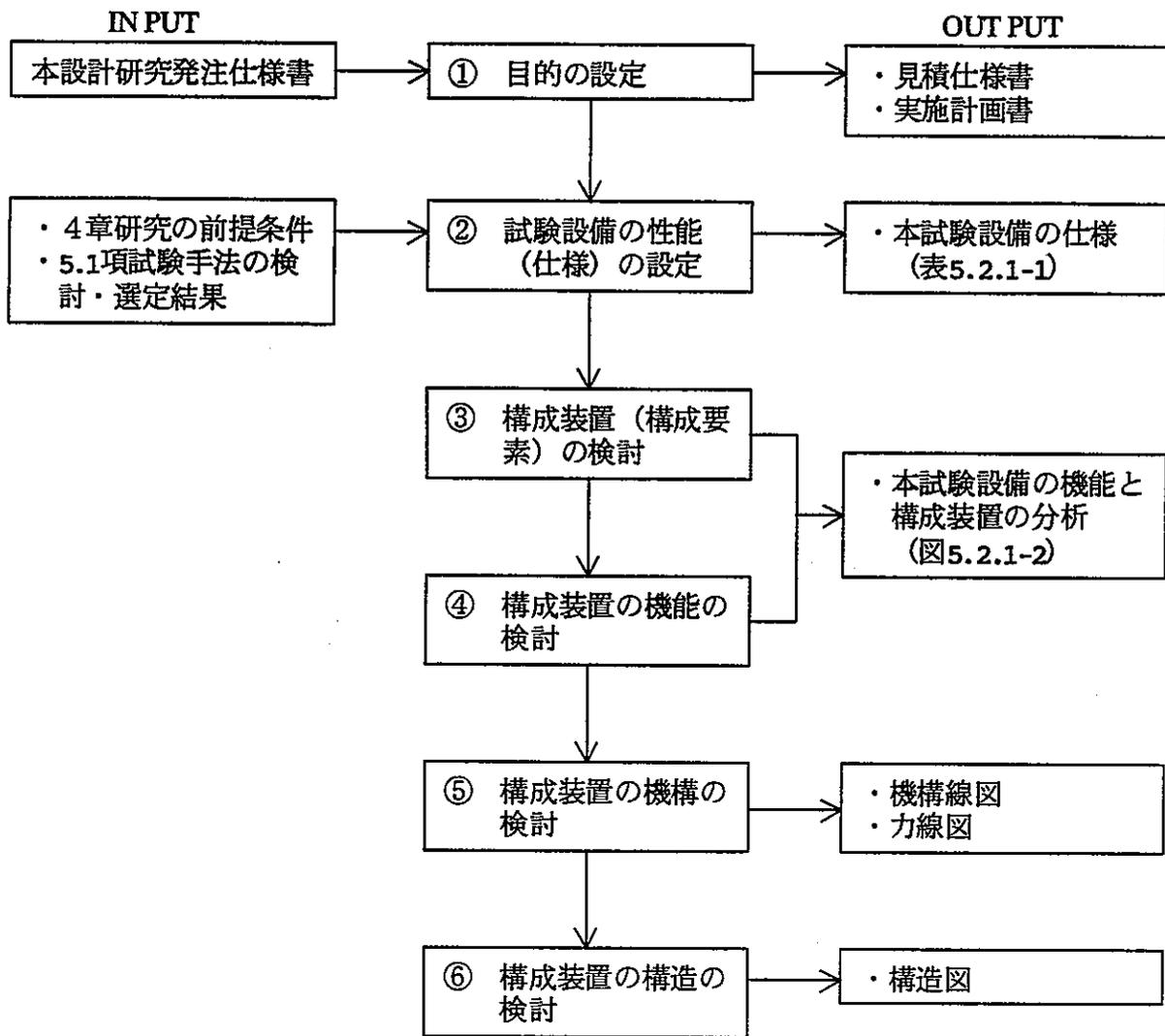


図5.2.1-1 人工バリア健全性試験設備の設計プロセス

(1) 試験設備の仕様（性能）

試験設備の仕様（性能）は、以下に示す本試験設備の目的、本設計研究の前提条件及び試験手法の検討・選定結果の3項目を反映している必要がある。

- ①試験設備の目的 : オーバーパックの腐食膨張を模擬することにより、緩衝材の長期的な力学変形挙動を予測・実証するための解析手法の妥当性を検討するために必要な実験データを取得する。
- ②本設計研究の前提条件 : ・ 模型縮尺は1/10及び1/20とする。
・ 放射線及び温度の影響を考慮しない。

- ・幾何学的相似は完全に満たす必要はない。
- ・緩衝材の乾燥密度は1.6（膨張圧約1MPa）及び1.8g/cm³（膨張圧約5MPa）とする。
- ・緩衝材は飽和状態とする。
- ・プロトタイプの腐食膨張量は約100mmとする。
- ・オーバーパックスの腐食膨張は軸方向と半径方向で単独に模擬する。

③試験手法の検討・選定

- ・オーバーパックスの腐食膨張は一定変位速度で一方向（軸方向または半径方向）に貫入させることで模擬することが可能である。
- ・軸方向貫入モデルは軸対称モデル（全体モデル）を用いる。
- ・半径方向貫入モデルは平面ひずみモデルを用いる。
- ・軸対称モデルは応力の計測を主目的とする。
- ・平面ひずみモデルは緩衝材の変形計測を主目的とする。
- ・軸対称モデルに発生する応力は最大1.3MPa（ $\rho_d=1.6\text{g/cm}^3$ ）
- ・平面ひずみモデルに発生する応力は最大3.8MPa
- ・オーバーパックスの貫入に必要な力は軸対称モデルで40.2kN、平面ひずみモデルで294.2kNである（ $\rho_d=1.6\text{g/cm}^3$ ）
- ・0.5mm/day以下の貫入速度では過剰間隙水圧の発生量は小さい。
- ・計測項目は境界部の土圧・間隙水圧、オーバーパックス貫入抵抗・変位、緩衝材の体積変化量を基本項目とする。
- ・平面ひずみモデルの計測項目は、上記項目に加え緩衝材の変形計測を行う。
- ・緩衝材は成型した圧縮ベントナイトをモデル容器内に設置することで行う。

試験設備の仕様は、上記した3項目の内容を反映させ表5.2.1-1のように設定した。

同表に示すように、模型形状は5.1.1項の模型形状の選定結果より軸対称モデルと平面ひずみモデルを採用することとした。その縮尺は1/10を基本として、軸対称モデルに関しては緩衝材の飽和時間を考慮して1/20縮尺モデルの設計も行うこととした。

用いる緩衝材の乾燥密度としては、軸対称モデルに関しては1.6及び1.8g/cm³の乾燥密度に対応させることとした。平面ひずみモデルに関しては目視による変形計測を行えるように透明アクリル窓付の構造とする必要があるため、乾燥密度1.8g/cm³の緩衝材を用いた場合にアクリル部分の撓み量が大き

くなり試験設備の目的を満足することができなくなる可能性が考えられる。このため、平面ひずみモデルに用いる緩衝材の乾燥密度は $1.6\text{g}/\text{cm}^3$ に限定した。

モデル拘束容器の耐圧容量は、各モデルで発生する最大応力(解析値)に対して十分な余裕をみて 10MPa に設定した。モデル最大貫入荷重も同様に、各モデルにおいてオーバーパック模型の貫入に必要な力に対して十分な余裕をみて 490kN とした。オーバーパック模型の貫入速度は、貫入速度をパラメータとした実験の可能性を考慮して $10\sim 0.01\text{mm}/\text{day}$ を無断変速で設定できる仕様とした。またオーバーパックの貫入ストロークについては、模型の縮尺に対応したストロークにするとの考え方もあるが、緩衝材の破壊が観察されるまでオーバーパック模型を貫入させる可能性を考慮し貫入ストロークを 100mm に設定した。

表5.2.1-1 人工バリア健全性試験設備の仕様

項目	仕様
模型形状	軸対象モデル 平面ひずみモデル
縮尺	軸対象モデル：1/10、1/20 平面ひずみモデル：1/10
緩衝材乾燥密度	軸対象モデル：1.6および $1.8\text{g}/\text{cm}^3$ に対応 平面ひずみモデル： $1.6\text{g}/\text{cm}^3$ に対応
モデル拘束容器耐圧容量	軸対象モデル： 10MPa (約 $100\text{kgf}/\text{cm}^2$) 平面ひずみモデル： 10MPa (約 $100\text{kgf}/\text{cm}^2$)
オーバーパックモデル 最大貫入荷重	490kN (約50tonf)
オーバーパックモデル 貫入速度	$10\sim 0.01\text{mm}/\text{day}$ (無段変速)
オーバーパックモデル 貫入ストローク	100mm

(2) 試験設備の構成装置 (構成要素)

本試験設備の仕様 (性能) を満足するために、ここではまず試験設備に要求される機能を検討し、つぎに試験設備の機能を実現するために試験設備を構成する装置について検討した。さらに、それぞれの構成装置について仕様を決定するとともに、その機能から主な構成要素を検討した。

本試験設備の機能は、(1)試験設備の仕様で示した「試験設備の目的」、「本設計研究の前提条件」及び「試験手法の検討・選定結果」を集約することで、①人工バリアを模擬した縮小模型を実現する、②オーバーパックの腐食膨張量に相当する変位を縮小模型に負荷する、③境界部に作用する土圧・間隙水圧及び緩衝材の変形を計測する、の3点にまとめることができる。

第1の機能である「人工バリアを模擬した縮小模型を実現する」という項目からは、「モデル拘束容器（1/10及び1/20軸対称モデル、平面ひずみモデル）」が構成装置として抽出される。このモデル拘束容器についてもその機能よりモデル拘束容器の移動・組立を行うための「ホイスト」、およびモデル拘束容器中の緩衝材を飽和することを主な目的とした「空気・水系制御装置」という2つの構成装置が抽出される。第2の「オーバパックの腐食膨張量に相当する変位を縮小模型に負荷する」という機能からは、「載荷装置」と載荷装置に作用する反力に耐える「載荷フレーム」が抽出される。また、第3の「境界部に作用する土圧・間隙水圧および緩衝材の変形を計測する」という機能からは、「計測・記録装置」が本試験設備の構成装置として抽出される。なお、試験結果の温度の影響を極力低くすることを考慮して、付帯装置として本試験設備を一定温度に保つための「恒温室」を構成装置に加えた。図5.2.1-2に、本試験設備の機能と構成装置に関する分析結果を示す。図5.2.1-3に、本試験設備の構成装置の概要を示す。

以下では、図5.2.1-2にあげた構成装置のうち本試験設備の中核となるモデル拘束容器、載荷装置、載荷フレーム、空気・水系制御装置および計測・記録装置について、仕様及び構造に関する検討結果を示す。

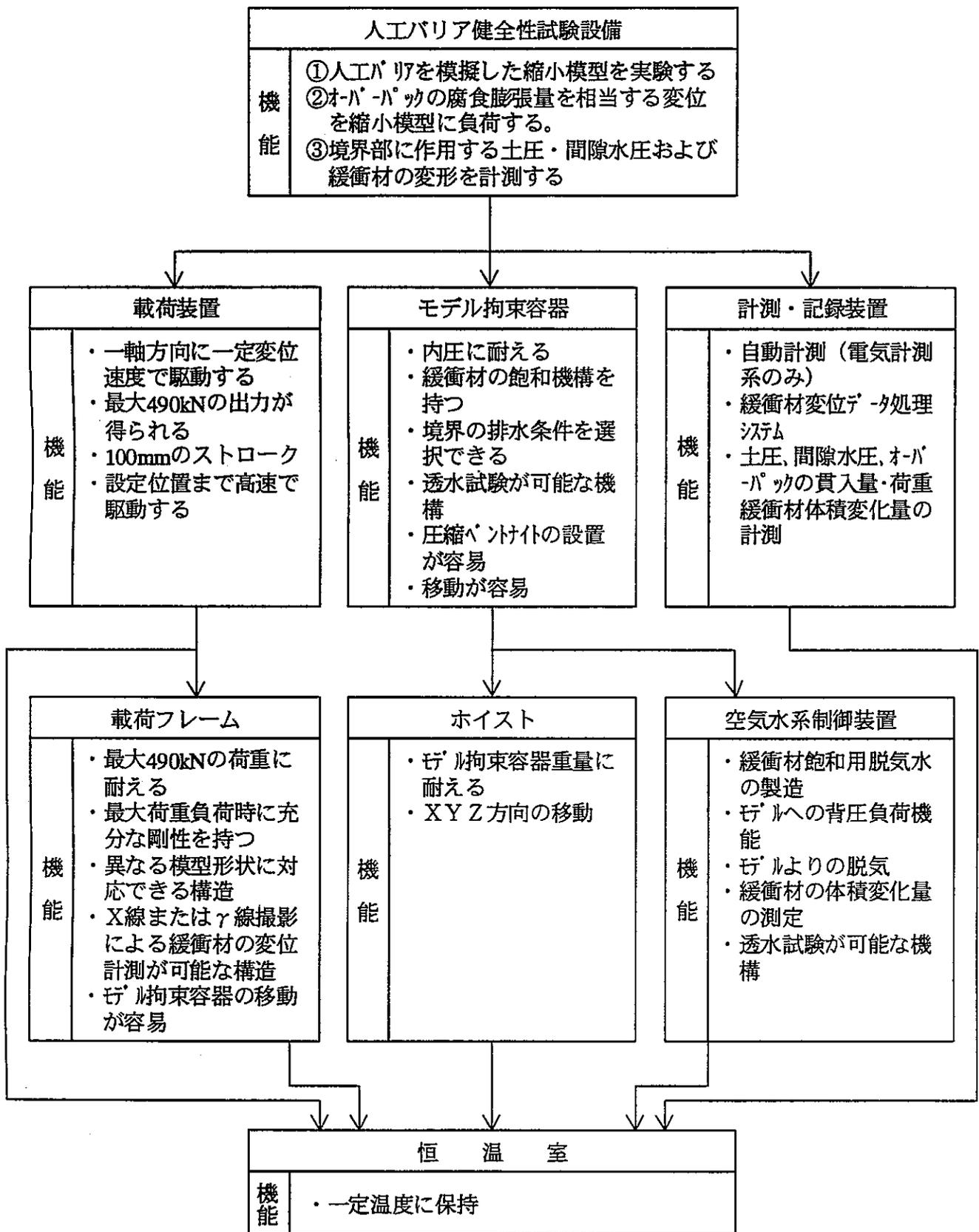


図5.2.1-2 人工バリア健全性試験設備の機能と構成装置の分析

平面重モデル拘束容器 1/20軸対象モデル拘束容器
 詳細別図参照 詳細別図参照

ホイスト
 チェーンブロック式 3トン

1/10軸対象モデル拘束容器搭載載荷装置
 詳細別図参照

空気・水系パネル
 詳細別図参照

制御機器用ラック

- ① 名称パネル
- ② DCサーボモーター制御器
実位制御
- ③ DCサーボモーター制御器
位置制御
- ④ ブランクパネル
- ⑤ ボックス

計測機器及びコンピューター用デスク

- ① コンピューター
- ② データローガー
TDS-303 (東京測器研究所製)
- ③ スイッチボックス
ASW-50C-05 (東京測器研究所製)

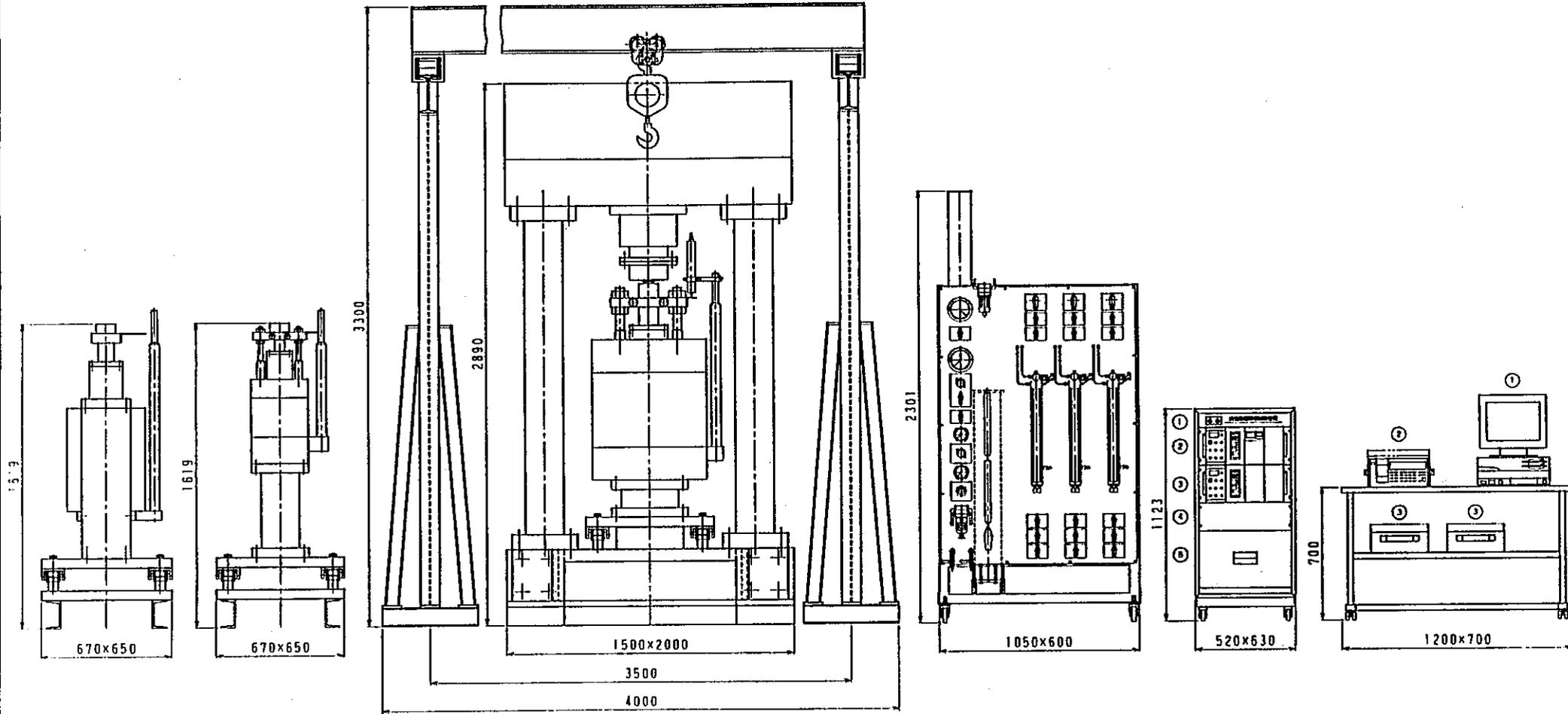


図5.2.1-3 人工重力健全性試験設備の構成装置

部 号	品 名	材 質	表面処理	備 考	電 気 記 号
01	名称パネル	FRP	塗装		
02	DCサーボモーター制御器 実位制御	FRP	塗装		
03	DCサーボモーター制御器 位置制御	FRP	塗装		
04	ブランクパネル	FRP	塗装		
05	ボックス	FRP	塗装		
06	名称パネル	FRP	塗装		
07	DCサーボモーター制御器 実位制御	FRP	塗装		
08	DCサーボモーター制御器 位置制御	FRP	塗装		
09	ブランクパネル	FRP	塗装		
10	ボックス	FRP	塗装		
11	名称パネル	FRP	塗装		
12	DCサーボモーター制御器 実位制御	FRP	塗装		
13	DCサーボモーター制御器 位置制御	FRP	塗装		
14	ブランクパネル	FRP	塗装		
15	ボックス	FRP	塗装		
16	名称パネル	FRP	塗装		
17	DCサーボモーター制御器 実位制御	FRP	塗装		
18	DCサーボモーター制御器 位置制御	FRP	塗装		
19	ブランクパネル	FRP	塗装		
20	ボックス	FRP	塗装		
21	名称パネル	FRP	塗装		
22	DCサーボモーター制御器 実位制御	FRP	塗装		
23	DCサーボモーター制御器 位置制御	FRP	塗装		
24	ブランクパネル	FRP	塗装		
25	ボックス	FRP	塗装		
26	名称パネル	FRP	塗装		
27	DCサーボモーター制御器 実位制御	FRP	塗装		
28	DCサーボモーター制御器 位置制御	FRP	塗装		
29	ブランクパネル	FRP	塗装		
30	ボックス	FRP	塗装		
31	名称パネル	FRP	塗装		
32	DCサーボモーター制御器 実位制御	FRP	塗装		
33	DCサーボモーター制御器 位置制御	FRP	塗装		
34	ブランクパネル	FRP	塗装		
35	ボックス	FRP	塗装		
36	名称パネル	FRP	塗装		
37	DCサーボモーター制御器 実位制御	FRP	塗装		
38	DCサーボモーター制御器 位置制御	FRP	塗装		
39	ブランクパネル	FRP	塗装		
40	ボックス	FRP	塗装		
41	名称パネル	FRP	塗装		
42	DCサーボモーター制御器 実位制御	FRP	塗装		
43	DCサーボモーター制御器 位置制御	FRP	塗装		
44	ブランクパネル	FRP	塗装		
45	ボックス	FRP	塗装		
46	名称パネル	FRP	塗装		
47	DCサーボモーター制御器 実位制御	FRP	塗装		
48	DCサーボモーター制御器 位置制御	FRP	塗装		
49	ブランクパネル	FRP	塗装		
50	ボックス	FRP	塗装		
51	名称パネル	FRP	塗装		
52	DCサーボモーター制御器 実位制御	FRP	塗装		
53	DCサーボモーター制御器 位置制御	FRP	塗装		
54	ブランクパネル	FRP	塗装		
55	ボックス	FRP	塗装		
56	名称パネル	FRP	塗装		
57	DCサーボモーター制御器 実位制御	FRP	塗装		
58	DCサーボモーター制御器 位置制御	FRP	塗装		
59	ブランクパネル	FRP	塗装		
60	ボックス	FRP	塗装		
61	名称パネル	FRP	塗装		
62	DCサーボモーター制御器 実位制御	FRP	塗装		
63	DCサーボモーター制御器 位置制御	FRP	塗装		
64	ブランクパネル	FRP	塗装		
65	ボックス	FRP	塗装		
66	名称パネル	FRP	塗装		
67	DCサーボモーター制御器 実位制御	FRP	塗装		
68	DCサーボモーター制御器 位置制御	FRP	塗装		
69	ブランクパネル	FRP	塗装		
70	ボックス	FRP	塗装		
71	名称パネル	FRP	塗装		
72	DCサーボモーター制御器 実位制御	FRP	塗装		
73	DCサーボモーター制御器 位置制御	FRP	塗装		
74	ブランクパネル	FRP	塗装		
75	ボックス	FRP	塗装		
76	名称パネル	FRP	塗装		
77	DCサーボモーター制御器 実位制御	FRP	塗装		
78	DCサーボモーター制御器 位置制御	FRP	塗装		
79	ブランクパネル	FRP	塗装		
80	ボックス	FRP	塗装		
81	名称パネル	FRP	塗装		
82	DCサーボモーター制御器 実位制御	FRP	塗装		
83	DCサーボモーター制御器 位置制御	FRP	塗装		
84	ブランクパネル	FRP	塗装		
85	ボックス	FRP	塗装		
86	名称パネル	FRP	塗装		
87	DCサーボモーター制御器 実位制御	FRP	塗装		
88	DCサーボモーター制御器 位置制御	FRP	塗装		
89	ブランクパネル	FRP	塗装		
90	ボックス	FRP	塗装		
91	名称パネル	FRP	塗装		
92	DCサーボモーター制御器 実位制御	FRP	塗装		
93	DCサーボモーター制御器 位置制御	FRP	塗装		
94	ブランクパネル	FRP	塗装		
95	ボックス	FRP	塗装		
96	名称パネル	FRP	塗装		
97	DCサーボモーター制御器 実位制御	FRP	塗装		
98	DCサーボモーター制御器 位置制御	FRP	塗装		
99	ブランクパネル	FRP	塗装		
100	ボックス	FRP	塗装		

総相立図

株式会社 竹中工務店

Y360-20000-1

(a) モデル拘束容器

モデル拘束容器には、1/10軸対称モデル拘束容器、1/20軸対称モデル拘束容器及び平面ひずみモデル拘束容器の3種類がある。ここでは、まず各モデル拘束容器の仕様を決定し、仕様を実現するための構造を検討した。

以下に、各モデル拘束容器の構造決定に至るまでの検討結果を示す。

(i) 1/10及び1/20軸対称モデル拘束容器

表5.2.1-2及び表5.2.1-3に、1/10及び1/20軸対称モデル拘束容器の仕様を示す。

主な仕様の設定根拠は以下の通りである。

- ①材 料 : ・内面が水と接触することから錆にくいSUS304とした。
- ②構 造 : ・緩衝材の飽和を早めるため、拘束容器内面にはステンレス製ポラスフィルターを内張りすることとした。
 - ・各境界面の排水条件をそれぞれ設定できるように、モデル境界面は独立真空脱気・給排水可能な構造とした。
 - ・圧縮ベントナイトの設置が容易となるように、拘束容器は組立式とした。
- ③耐圧容量 : ・表5.2.1-1の試験設備の仕様より決定した。
- ④拘束容器剛性: ・拘束容器内法寸法に対して、各部材の撓み量が1mm以下となることを目標として設定した。
- ⑤耐荷重容量 : ・表5.2.1-1の試験設備の仕様より決定した。

軸対称モデル拘束容器は、図5.2.1-4の機構線図に示すようにオーバーパック模型が軸方向に貫入するとともに、容器と緩衝材が接する境界面において水の出入りが可能な機構となっている必要がある。また、図5.2.1-5の力線図で示すように、拘束容器はオーバーパック模型の貫入により発生する内圧に耐える必要がある。これらの機構図及び力線図に基づくと、軸対称モデル拘束容器はロッドガイド上板部、円筒部、下板部及びオーバーパック模型を主な構成要素とする構造となることが理解される。また、ロッドガイド上板部はスクレーパー、ストロークベアリング及びOリングが必要となるとともに、拘束容器内面にはポラスメタルフィルターが必要となる。

図5.2.1-6に、軸対称モデル拘束容器の機能と主な構成要素の分析結果を示す。

図5.2.1-7及び図5.2.1-8に、軸対称モデル拘束容器の構成要素の分析結果に基づく1/10軸対称モデル拘束容器及び1/20軸対称モデル拘束容器の構造図を示す。

表5.2.1-2 1/10軸対称モデル拘束容器の仕様

項 目	仕 様
寸 法	<ul style="list-style-type: none"> ・内法寸法：φ300mm×H350mm ・オーバーパック模型：φ100mm
材 料	<ul style="list-style-type: none"> ・SUS304
構 造	<ul style="list-style-type: none"> ・拘束容器内側にステンレス製10μポラスフィルター材を内張りする ・モデル境界面は独立真空脱気・給排水可能な構造 ・拘束容器は組立て式
耐圧容量	<ul style="list-style-type: none"> ・10MPa (約100kgf/cm²)
拘束容器剛性	<ul style="list-style-type: none"> ・拘束部ひずみ：0.1%以下
耐荷重容量	<ul style="list-style-type: none"> ・490kN (約50tonf)
ハンドリング	<ul style="list-style-type: none"> ・空圧リフト式移動車輪4個を有する ・アイボルト3個を有する

表5.2.1-3 1/20軸対称モデル拘束容器の仕様

項 目	仕 様
寸 法	<ul style="list-style-type: none"> ・内法寸法：φ150mm×H175mm ・オーバーパック模型：φ50mm
材 料	<ul style="list-style-type: none"> ・SUS304
構 造	<ul style="list-style-type: none"> ・拘束容器内側にステンレス製10μポラスフィルター材を内張りする ・モデル境界面は独立真空脱気・給排水可能な構造 ・拘束容器は組立て式
耐圧容量	<ul style="list-style-type: none"> ・10MPa (約100kgf/cm²)
拘束容器剛性	<ul style="list-style-type: none"> ・拘束部ひずみ：0.1%以下
耐荷重容量	<ul style="list-style-type: none"> ・490kN (約50tonf)
ハンドリング	<ul style="list-style-type: none"> ・空圧リフト式移動車輪4個を有する ・アイボルト3個を有する

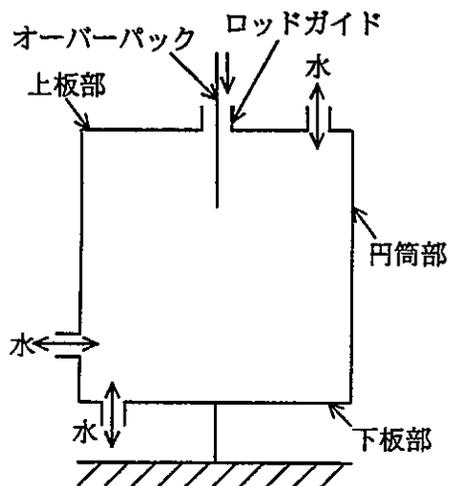


図5.2.1-4 軸対称モデル拘束容器
の機構線図

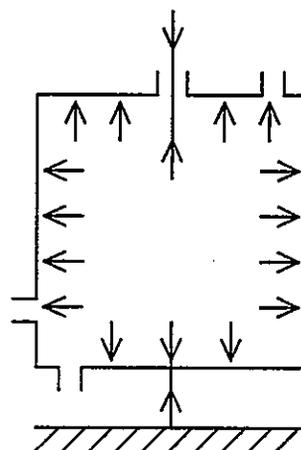


図5.2.1-5 軸対称モデル拘束容器
の力線図

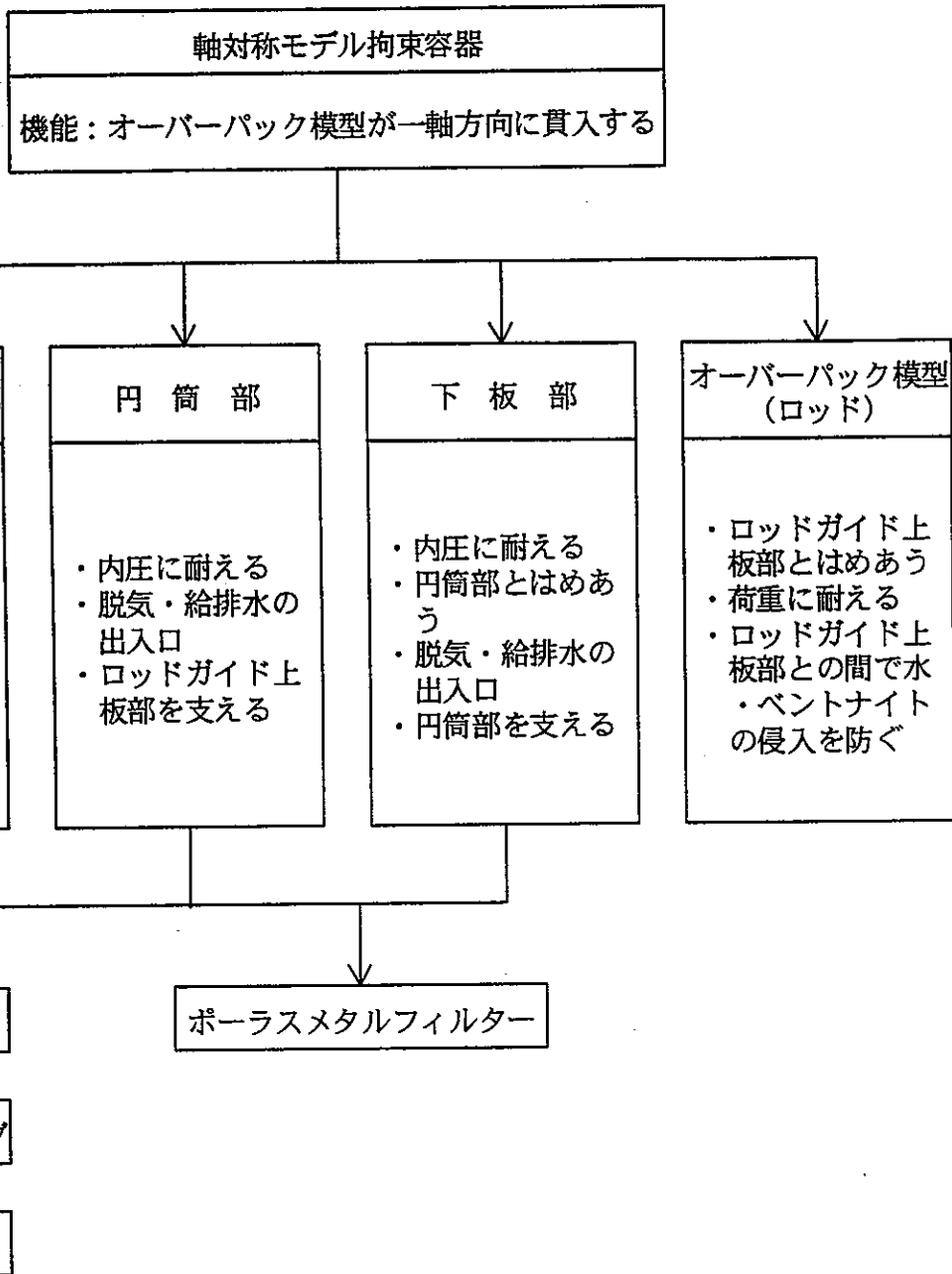


図5.2.1-6 軸対称モデル拘束容器の機能と主な構成要素

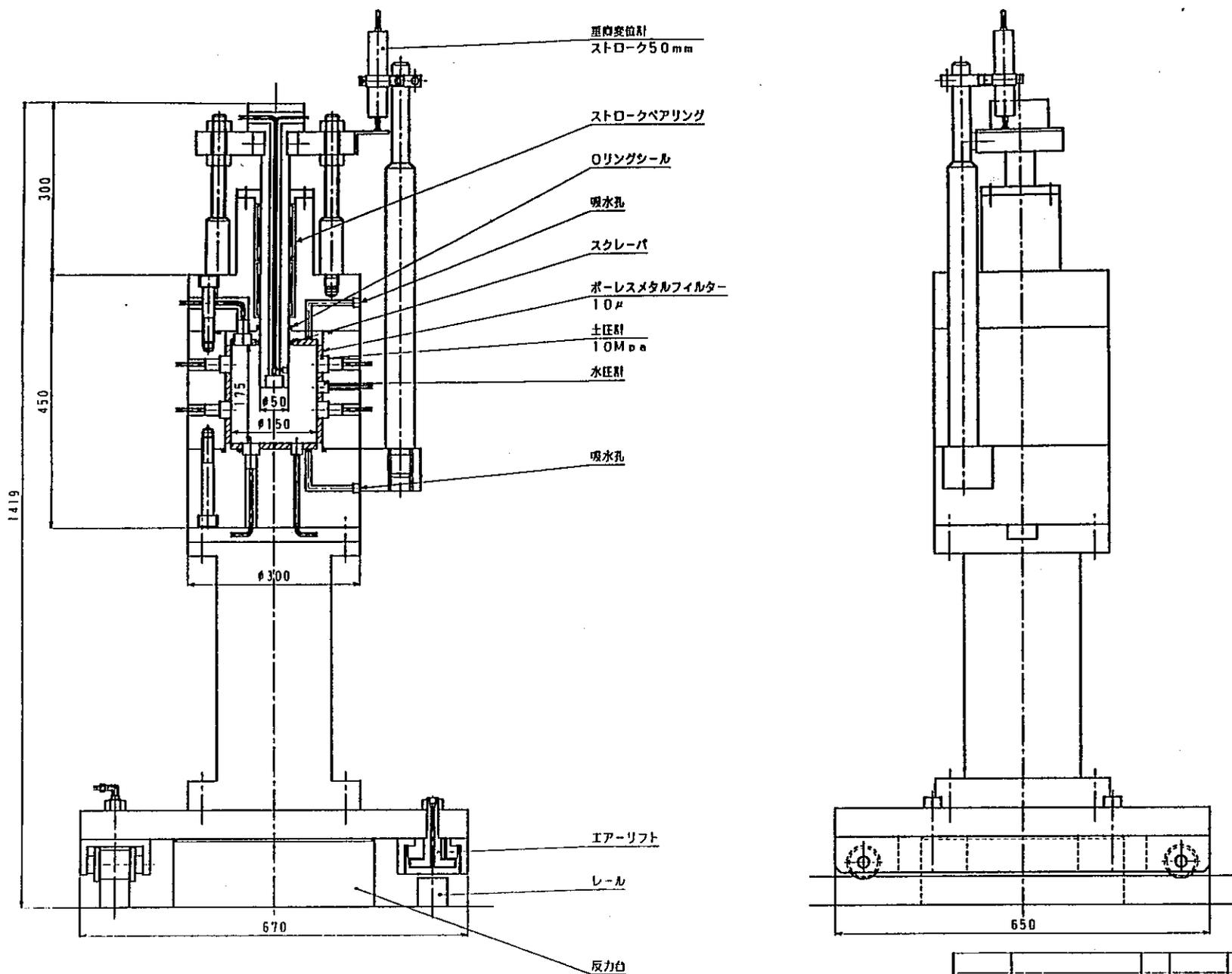


図5.2.1-8 1/20軸対称モデル拘束容器の構造

1/20軸対象モデル拘束容器

品名	数量	材質	製造番号	備考	備註
1/20軸対象モデル拘束容器	1	SS.1	1/5		
株式会社 竹中工務店					
Y360 - 21200				/	

(ii) 平面ひずみモデル拘束容器

平面ひずみモデル拘束容器の仕様を表5.2.1-4に示す。平面ひずみモデル拘束容器は、緩衝材の変形計測を主な目的としていることから、その仕様には軸対称モデル拘束容器において設定した仕様に加えて、アクリル製の窓付きとすること、およびX線及び γ 線撮影による変形計測に対応するために鉛球の基準点を設置することを付加した。

図5.2.1-9に、平面ひずみモデル拘束容器の機構線図を示す。

図5.2.1-10に、平面ひずみモデル拘束容器の力線図を示す。

図5.2.1-11に、平面ひずみモデル拘束容器の機能と主な構成要素の分析結果を示す。

これらの図より、平面ひずみモデル拘束容器は容器の剛性の点から不利な長方形断面であることから、本体をSUS304の角柱ブロックからフライス加工により直接削りだし、一体構造とすることとした。また、アクリル盤はボルト留めが不可能であることから、アクリル盤を押さえると同時にアクリル盤に作用した応力を本体枠に伝達するための鋼製枠が必要な要素となることを確認した。

図5.2.1-12に、平面ひずみモデル拘束容器の構成要素の分析結果に基づく構造図を示す。

表5.2.1-4 平面ひずみモデル拘束容器の仕様

項目	仕様
寸法	<ul style="list-style-type: none"> ・内法寸法：W350×D50×H150mm ・オーバーパック模型：W100×D50mm
材料	<ul style="list-style-type: none"> ・SUS304
構造	<ul style="list-style-type: none"> ・拘束容器内側にステンレス製10μポラスフィルター材を内張りする ・モデル境界面は独立真空脱気・給排水可能な構造 ・拘束容器は組立て式 ・前面及び背面拘束壁はアクリル製透明窓付き ・背面拘束壁は内側に鉛製標点を有する。
耐圧容量	<ul style="list-style-type: none"> ・10MPa (約100kgf/cm²)
拘束容器剛性	<ul style="list-style-type: none"> ・拘束部ひずみ 0.1%以下
耐荷重容量	<ul style="list-style-type: none"> ・490kN (約50tonf)
ハンドリング	<ul style="list-style-type: none"> ・空圧式移動車輪4個を有する ・アイボルト4個を有する

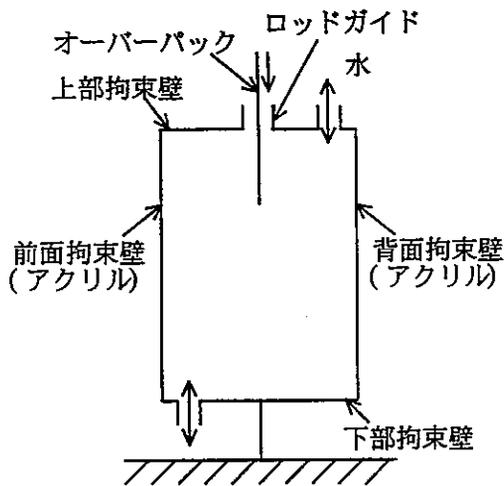


図5.2.1-9 平面ひずみモデル拘束容器の機構線図

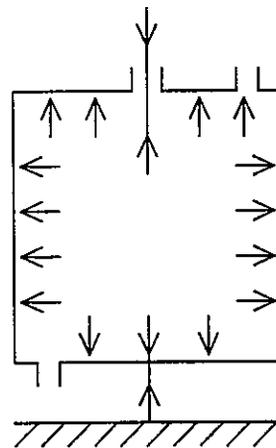


図5.2.1-10 平面ひずみモデル拘束容器の力線図

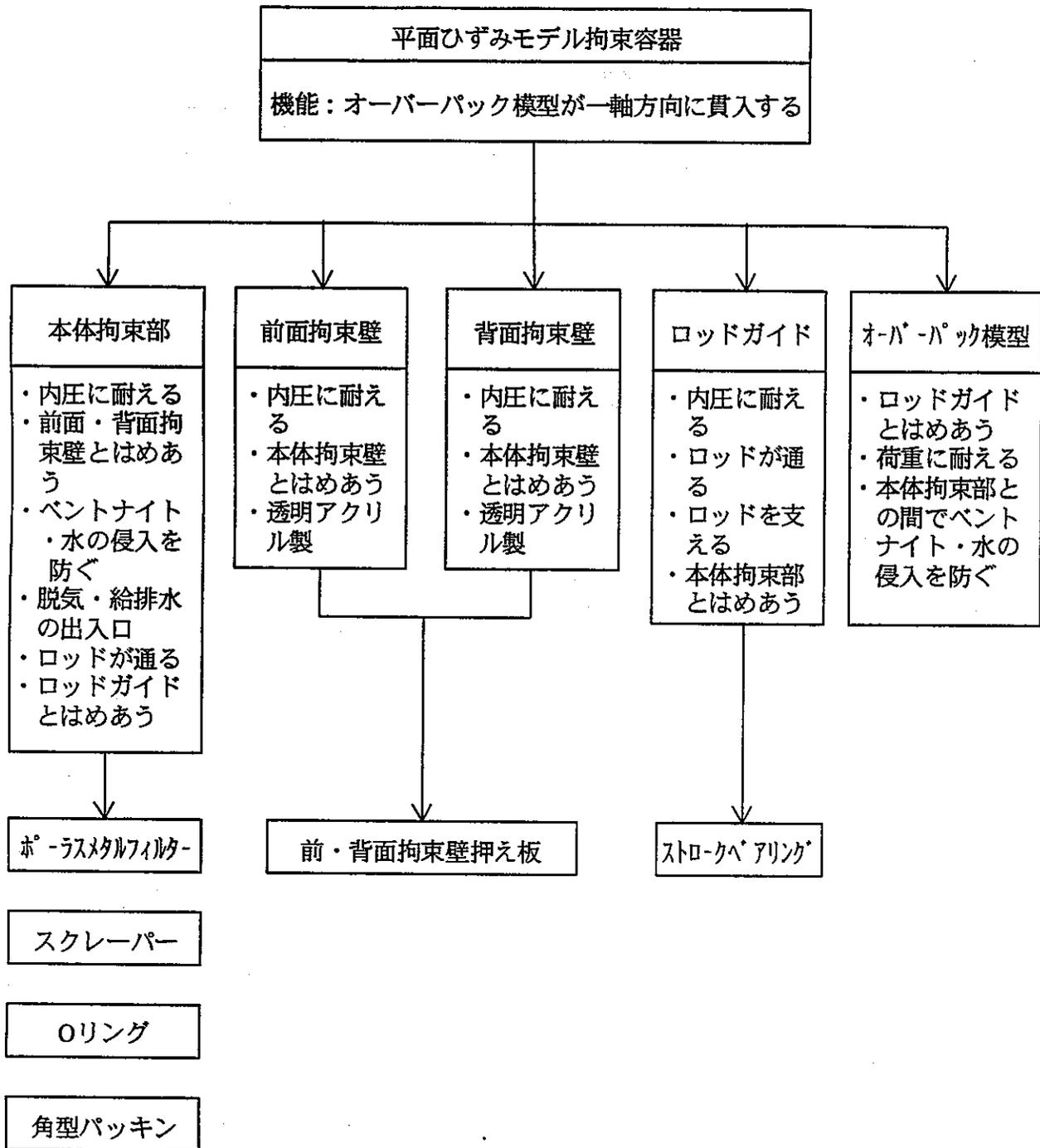


図5.2.1-11 平面ひずみモデル拘束容器の機能と主な構成要素

(b) 載荷装置

載荷装置の仕様を表5.2.1-5に示す。

同表に示したように、本載荷装置ではDCサーボモーターとコントローラーにタコジェネレータ及びロータリーエンコーダーを取り付けたサーボコントローラーを組み合わせ、電動モーター駆動による載荷方法をとることとした。ある機構を動かすための駆動方法には電動モーター駆動の他に、油圧駆動や空気圧駆動がある。油圧シリンダーや空気圧シリンダーは、直接直線運動が得られるという利点をもっている。また油圧駆動方式の場合、高圧の油を駆動源とすることから小型で大出力が得られるという利点をもっている。しかし、油圧及び空気圧駆動方式は一定速度制御や位置制御の容易さという点において電動駆動方式に比べて著しく劣っている。このため、本載荷装置では上記したように電動モーター駆動方式を用いることとした。

表5.2.1-5 載荷装置の仕様

項目	仕様
最大出力	・ 490kN (約50tonf)
載荷方式	・ ボールネジジャッキによるDCサーボモーター駆動方式
制御方式	・ タコジェネレータによる一定変位速度制御
ストローク	・ 100mm
変位速度	・ オーバーバックモデル貫入時：0.01～10mm/day (無段変速) ・ ジャッキ位置決め時：0～30mm/min (無段変速)

(c) 載荷フレーム

載荷フレームの仕様を表5.2.1-6に示す。

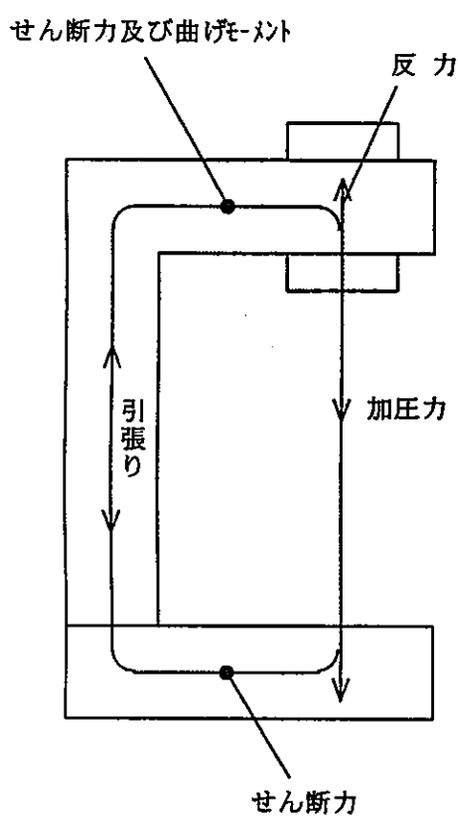
縦型載荷フレームとしては、図5.2.1-13に示したようにC字型と門型の2種類の構造が考えられる。

両者とも力線図はフレーム内で閉じており静的な力の釣り合い条件の面では両構造方式とも成立する
と考えられる。しかし、荷重をモデルに作用させた場合、C字型フレームはクロスヘッドや支柱の剛性
が足りないと曲げモーメントによって変形してしまい、試験結果に影響する可能性が考えられる。こ
のため、載荷フレームとしては門型構造を用いることとし、X線またはγ線撮影による緩衝材の変形
計測の可能性を考慮して4本支柱構造とした。

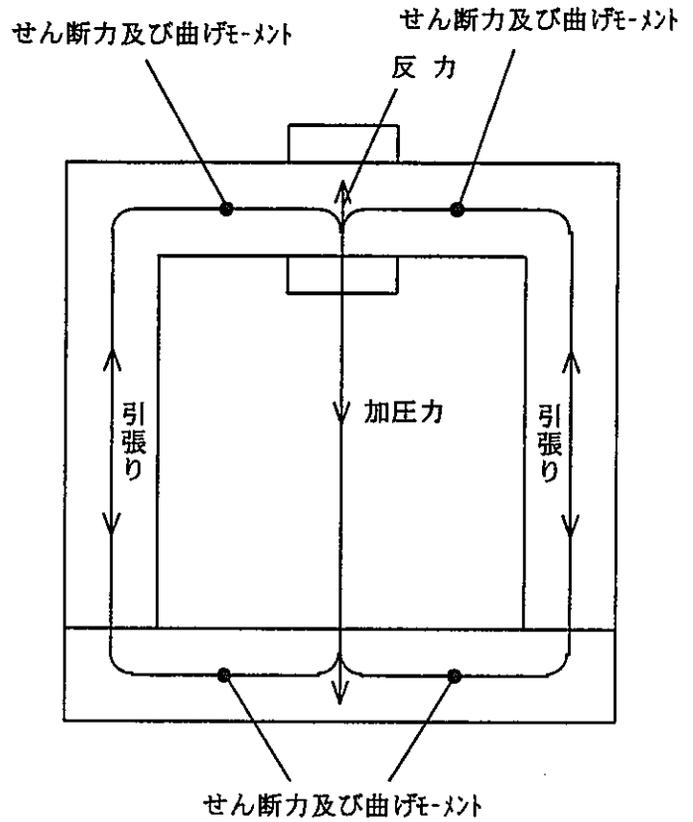
図5.2.1-15～図5.2.1-17に、載荷フレームの構造を示す。

表5.2.1-6 載荷フレームの仕様

項 目	仕 様
構 造	・支柱4本の門型構造
材 料	・クロスヘッド、フレームベース等の主な部材：SS400 ・支柱：S45C
載荷フレーム剛性	・圧縮間隔に対して0.1%以下のひずみ（最大荷重負荷時）
付帯装置	・モデル拘束容器移動レール

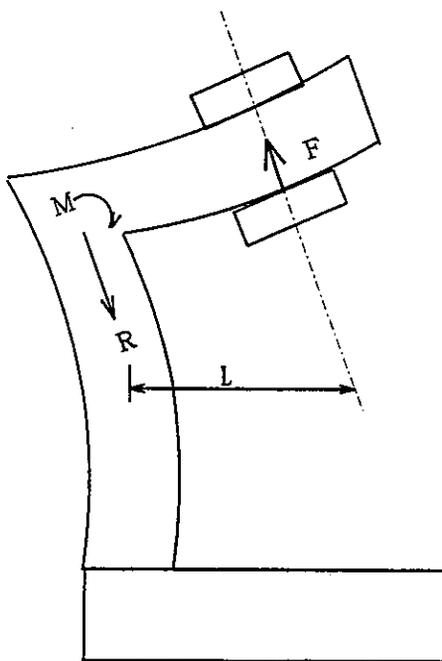


(a) C字型フレーム

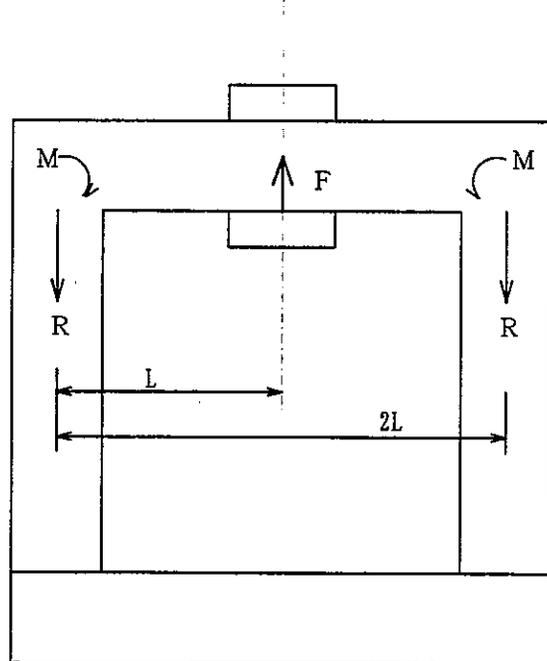


(b) 門型フレーム

図5.2.1-13 載荷フレームの構造の違いによる力線図の比較



(a) C字型フレーム



(b) 門型フレーム

(R : 反力, F : せん断力, M : 曲げモーメント)

図5.2.1-14 載荷フレームの構造の違いによる変形の比較

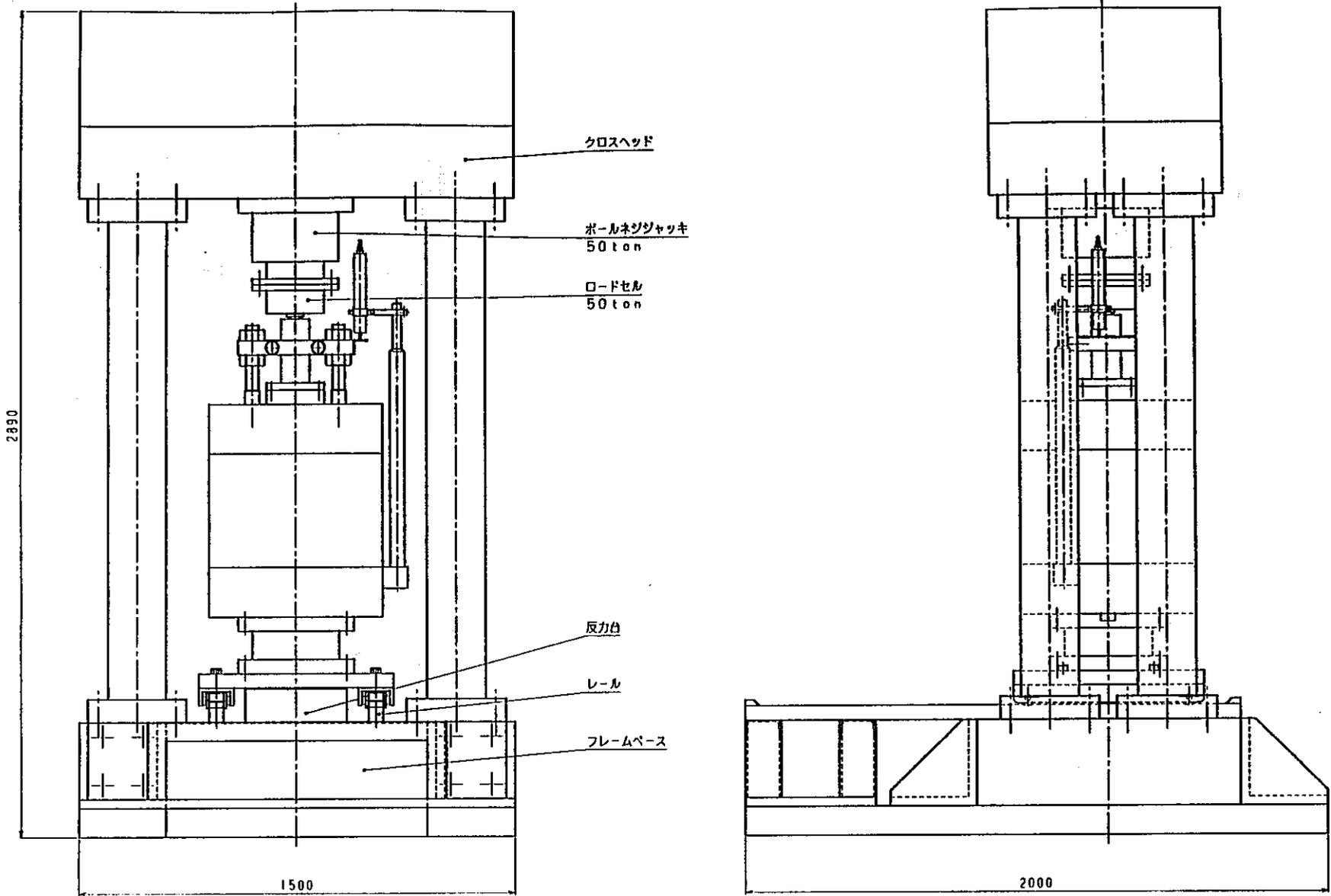


図5.2.1-15 載荷フレームの構造 (その1)

部 番	品 名	数量	材質	取付位置	備 考	注 意
					株式会社 竹中工務店	
					Y360	22100

1/10軸対象モデル拘束容器搭載載荷装置

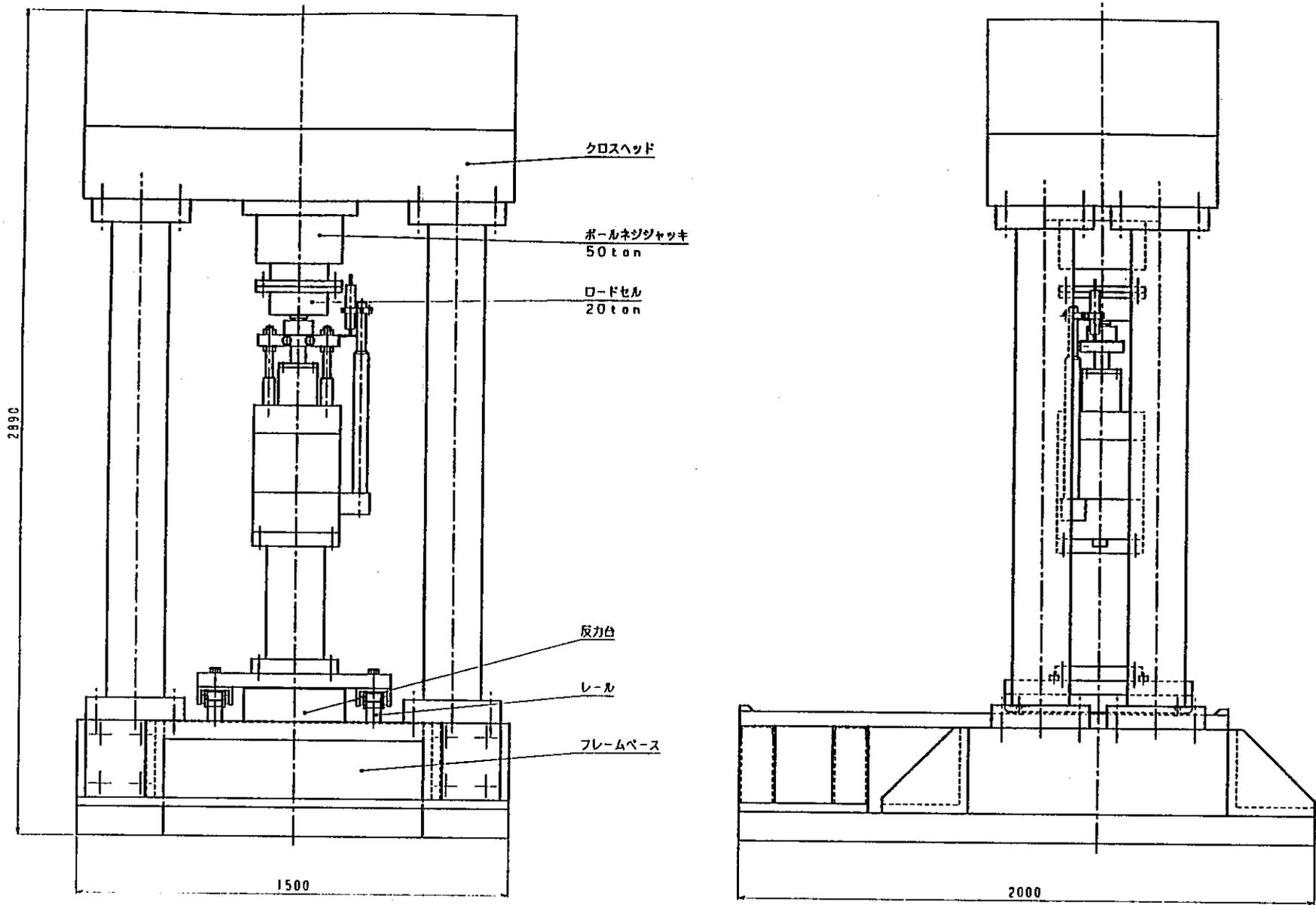


図5.2.1-16 載荷フレームの構造 (その2)

品名	数量	単位	材料	表面処理	備考	図番	子番
FR-1	1	個	FR-1	3			
株式会社 竹中工務店							

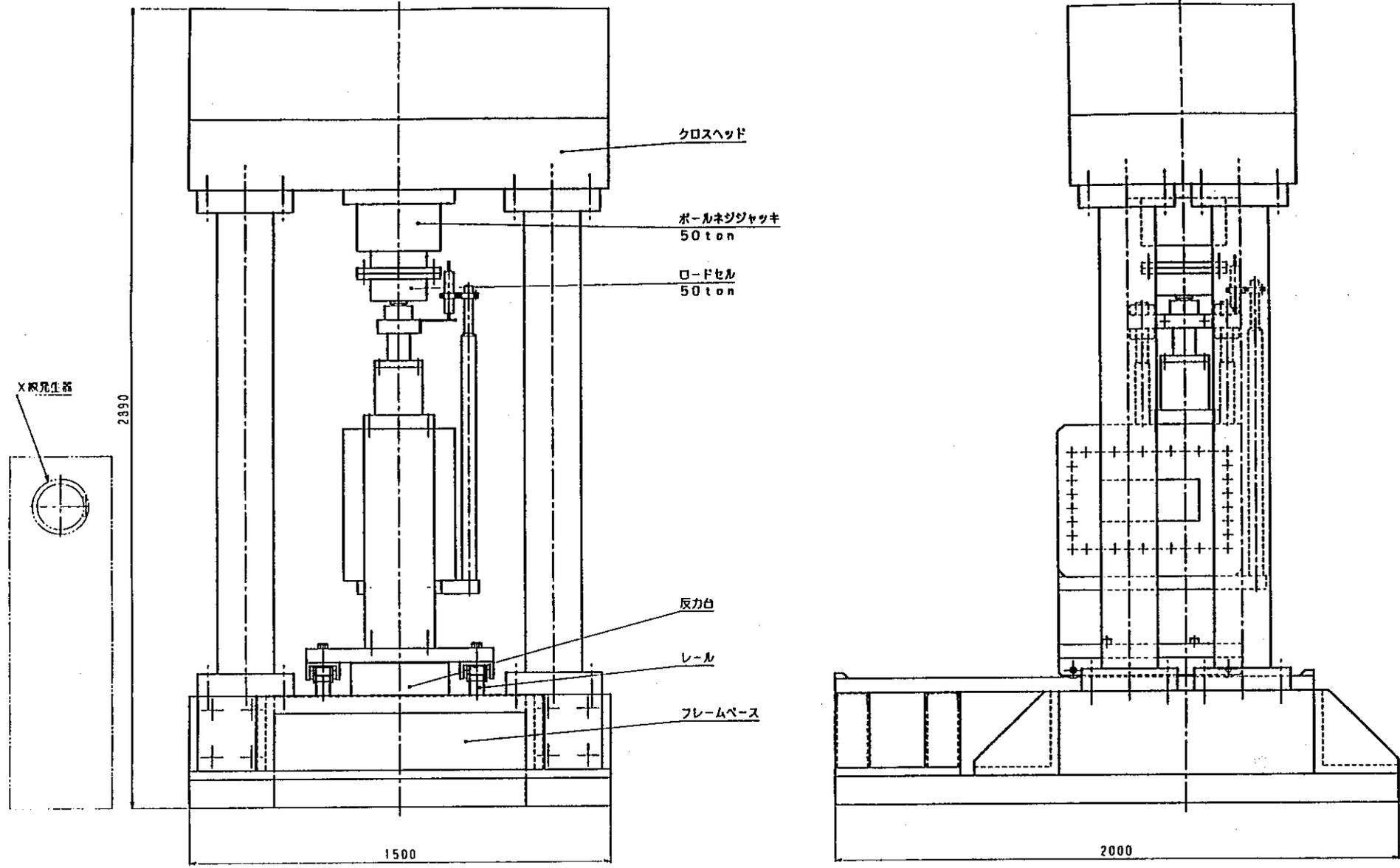


図5.2.1-17 荷重フレームの構造 (その3)

平面歪モデル拘束容器搭載荷重装置

部 品	品 名	材 質	表面処理	備 考	注 意	備 考
		H9.1	10			
				株式会社 竹中工務店		
				Y360	22300	

(d) 空気・水系制御装置

表5.2.1-7に空気・水系制御装置の仕様を示す。

空気・水系制御装置は、緩衝材の飽和機構、試験中の緩衝材の体積変化量測定及び試験前後の透水試験が可能な機構を機能としてもつ必要がある。このために本装置は、図5.2.1-18に示すように真空・脱気水製造部、体積変化量測定部及び配管系という3つの構成要素から成り立っている。真空・脱気水製造部及び体積変化量測定部に関しては、表5.2.1-7に示したような仕様とした。

図5.2.1-19及び図5.2.1-20に、仕様及び上記検討結果に基づく空気・水系制御装置及び同装置配管系を示す。

表5.2.1-7 空気水系制御装置の仕様

項目	仕様
背面負荷能力	・ 1 MPa (約10kgf/cm ²)
真空脱気製造部	・ 真空タンク容量：5 L ・ 脱気水タンク容量：20 L
体積変化量測定部	・ 二重管式体積計（界面ゲージ式）：容量10mL （精度：1 %F.S.）

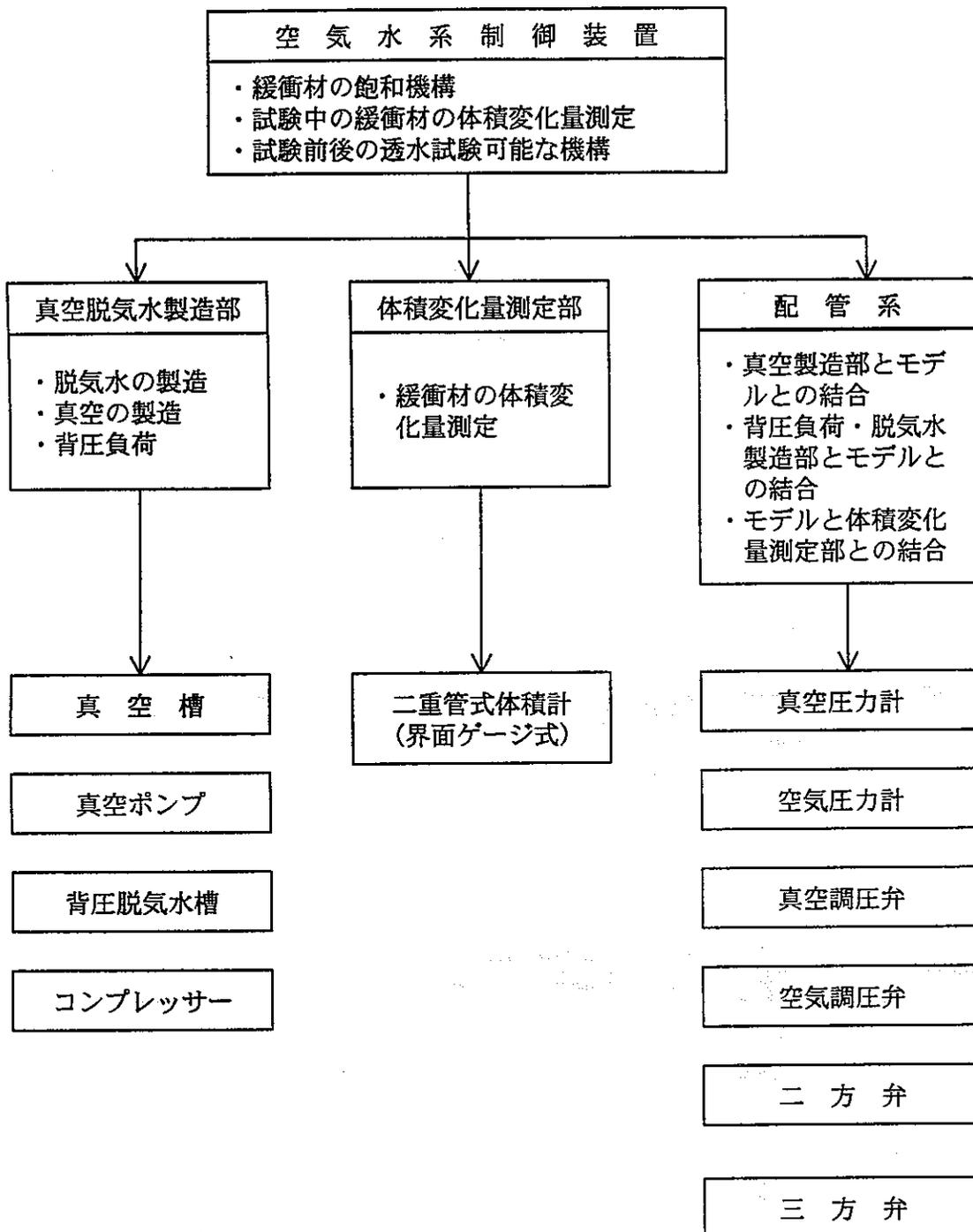


図5.2.1-18 空気水系制御装置の機能と主な構成要素

(e) 計測・記録装置の仕様

表5.2.1-18に計測・記録装置の仕様を示す。

本装置は、図5.2.1-2に示したように主に1/10軸対称モデル拘束容器、1/20軸対称モデル拘束容器及び平面ひずみモデル拘束容器に取り付けられた間隙水圧計、土圧計等の検出器のデータを計測するための自動計測部、および平面ひずみモデルにおいて撮影されたX線または γ 線フィルムより、緩衝材の変形量を計測するための緩衝材変形測定部より構成されている。

図5.2.1-21に(a)1/10及び1/20軸対称モデル拘束容器、(b)平面ひずみモデル拘束容器、(c)载荷装置、(d)载荷フレーム、(e)空気・水系制御装置（空気・水系制御パネル）及び(f)計測・記録装置の配置図を示す。同図より、作業空間等を考慮すると人工バリア健全性試験設備は、5.0×6.0m程度の床面積となり、恒温室もこれを考慮した組立式パネル方式を用いることとする。

表5.2.1-8 計測・記録装置の仕様

項 目		仕 様		
自動計測部	検出器	・オーバーバック模型：ロードセル 490.3kN(50tonf) 1台		
		ロードセル 196.1kN(20tonf) 1台		
		変位計 100mm 1台		
		10mm 1台		
自動計測部	検出器	・1/10軸対称モデル：間隙水圧計 2MPa 13台		
		土圧計 10MPa 13台		
		体積変化計 10mL 1台		
		・1/20軸対称モデル：間隙水圧計 2MPa 8台		
自動計測部	検出器	土圧計 10MPa 8台		
		体積変化計 10mL 1台		
		・平面ひずみモデル：間隙水圧計 2MPa 10台		
		土圧計 10MPa 9台		
自動計測部	検出器	体積変化計 10mL 1台		
		測定器	・デジタル静ひずみ測定器（データロガー） 1台	
		・スイッチボックス 50チャンネル 2台		
		計測制御用コンピュータ	・デスクトップ型パーソナルコンピュータ 1台	
自動計測部	計測ソフト	CPU：Pentium 200Hz		
		メモリー：32MByte		
		ハードディスク容量：2GByte		
		OS：MS-Windows95		
自動計測部	計測ソフト	ディスプレイ：17インチ		
		・データロガー制御用ソフト 1式		
		緩衝材変形測定部	・ターゲット(鉛球)座標読みとりシステム	・バックライト付きデジタイザー 1台
		緩衝材変形測定部	計算処理システム	・デスクトップ型パーソナルコンピュータ (計測制御用コンピュータと兼用)
・ターゲット座標読みとりソフト 1式				
その他	動ひずみアンプ	・デスクトップ型パーソナルコンピュータ (計測制御用コンピュータと兼用)		
		・ターゲット変位ベクトル計算ソフト 1式		
その他	動ひずみアンプ	・ボールネジジャッキ位置制御変位計用 1台		

5.2.2 製作手順、製作要領の設定

(1) 製作手順

人工バリア健全性試験設備は、基本設計（コンセプトまたは構想の段階）、詳細設計（部品の寸法、材質、加工法及び組立方式を考慮した計画図作成段階）そして製作設計（部品図及び組立図の作成段階）の設計過程を経て、機械製作～工場検査～現地工事～現地検査～完成図書作成～納入という過程をたどることになる。本設計研究では、上記過程のうち人工バリア健全性試験設備のコンセプトの設定、および同試験設備が機構・構造的に成立するかどうかの検討という主に基本設計に当たる部分を実施した。この検討結果をもって本試験設備の製作を行うためには、次段階としては詳細設計より行うこととなる。

図5.2.2-1に、詳細設計から試験設備の据付までの概略工程を示す。

項目	ヶ月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
設計													
詳細設計 (載荷装置、容器等)													
製作設計 (機械)													
詳細設計 (計測項目、機器類)													
製作設計 (電気)													
詳細設計 (データ計測処理システム)													
製作設計 (データ計測処理システム)													
購入品手配													
機械関係、電気制御関係													
プログラム製作													
プログラム作製、デバック													
機械製作													
機械加工													
組立て													
塗装													
試運転、工場検査													
現地工事													
現地試験、検査													
完成図書作成													

図5.2.2-1 人工バリア健全性試験設備の製作工程

(2) 製作要領

人工バリア健全性試験設備の製作に当たっては、長期試験において各部にひずみを発生させぬよう以下に期す要領にて設計・製作を行うこととする。

(a) 1/10及び1/20軸対称モデル拘束容器

(i) 拘束容器

上下板と円筒との接合部は精密加工とし、封印部の封印材と接する面の加工は特に精密加工を要求する。上下板と円筒とを組み立てるボルトはステンレス製六角穴付きボルトを使用すること。また、10MPaの圧力に対して各ボルトの伸長がないように締付力はトルクレンチによって規定トルクに揃えること。

(ii) オーバーパック模型（貫入ロッド）

オーバーパック模型の材質はステンレス鋼とし、長期使用にひずみが発生せぬ処理を行った後に加工を行うこと。オーバーパック模型外径表面は硬質クロームメッキを厚く施し、その後に研磨、パフ仕上を行い、表面荒さは0.9ミクロン以内の精度にすること。

(b) 平面ひずみモデル

本体枠と前面及び背面アクリル窓押さえ盤との接合面の加工は精密加工とし、封印部の封印材と接する面の加工は特に精密加工を行うこと。本体枠と前面及び背面アクリル窓押さえ盤との接合ボルトはステンレス製六角穴付きボルトを使用すること。また、10MPaの圧力に対して各ボルトの伸長がないように締付力はトルクレンチによって規定トルクに揃えること。

オーバーパック模型の加工に関しては、軸対称モデル拘束容器と同様な要領で行うこと。

(c) 載荷装置

載荷装置のスクリュウジャッキの軸力を発生させるネジ軸は、与圧式精密ボールネジを使用すること。スクリュウジャッキと連結する減速機、継ぎ手等はバックラッシュのない構造の機器を使用すること。電動機のDCサーボモーターは長時間の運転による発熱を極力抑えるために、十分な出力容量を持ったモーターを選択すること。

(d) 載荷フレーム

上部クロスヘッド、下部ベース、支柱及びその他の材料は加工前に調質を行うこと。

上部クロスヘッド、下部ベースと支柱との接合面は精密仕上げ加工とする。また、4本の支柱の長さは同一寸法仕上げとし、圧縮間隔の正確な平行度を確保すること。支柱と上部クロスヘッド、下部ベースとの組立ボルトはハイテンション六角穴付きボルトを使用し、締付力は定格容量以上の軸力を確保するためトルクレンチによって、各ボルトの締付軸力を規定トルクによって揃えること。

(e) 空気・水系制御装置

空気圧調節弁、空気圧回路及び水圧回路の弁、ならびに継ぎ手等は長期試験に耐える部品を選択すること。配管は、空気圧回路は高圧ナイロンチューブとする。水圧回路はステンレス管及び高圧ナイロンチューブを使用し、配管継ぎ手は空気圧回路には真鍮製、水圧回路にはステンレス製を使用すること。

(f) 計測・記録装置

各拘束容器に取り付ける検出器は、長期試験に耐える材質で製作する。また、拘束容器境界面の形状に沿った受圧面またはフィルターをもった検出器とする。

測定器及び計測制御用コンピュータは、長期試験中の瞬時停電に対する対応策として十分な容量を持った無停電電源装置に接続する。また、計測データを保護するためにソフト的な対応を施すこと。

5.3 緩衝材力学変形挙動解析

5.3.1 解析手法の検討

緩衝材の力学的変形挙動は、飽和粘性土の力学的変形挙動として取り扱うことができる。また、間隙水圧が緩衝材の挙動に影響を及ぼすので、土骨格の挙動のみではなく間隙水の挙動も考慮に入れる必要がある。従って、土の構造骨格と間隙水の相互作用を表現できる力学的数学モデルが必要となる。一般的に、このような力学的数学モデルとして、2相混合体理論に基づく支配方程式が用いられる。混合体理論は Biot が示した理論であり、3次元弾性論の立場から飽和粘土の圧密現象の基礎方程式を導いたものである。2相混合体理論に基づく支配方程式は、次式で表される。

$$(\sigma'_{ij} + p_w \delta_{ij})_{,j} + b_i = 0 \quad \text{つり合い式} \quad (5.3.1-1)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = - (k_{ij} h_{,j})_{,i} \quad \text{連続条件式} \quad (5.3.1-2)$$

ここに、 σ' は有効応力、 p_w は水圧、 b 物体力、 ε_v 体積ひずみ、 k は透水係数、 h はヘッドである。

Biot が示した混合体理論は、土の構造骨格の構成則として線形弾性体を仮定していた。しかしながら、緩衝材は可塑性を示す材料であるので、構成則には弾塑性モデルを用いる必要がある。緩衝材は、粘弾塑性を示すことが平3レポートで述べられているが(P4-75)、ここでは弾塑性のみの検討とする。

粘性土の弾塑性構成則としては、Schofield('68)らにより提案された Cam clay モデルが標準的なモデルとしてよく用いられている。Cam clay モデルは、一般応力で表現した Hvorslev 破壊規準を間隙比と関係づけることにより定義された状態曲面と、Drucker の仮説及び塑性変形による消散エネルギー量の仮説とを結びつけることにより構築された弾塑性構成則である⁵⁾。Cam clay モデルは、破壊状態のみならず破壊に至る応力状態を表現し得る点が古典的な構成則に比較して優れている。

Cam clay モデルにおいて降伏曲面は次式により表される。

$$f = MD \ln \frac{P}{P_0} + D\eta \quad D = \frac{\lambda - k}{M(1 + e_0)} \quad (5.3.1-3)$$

ここに、 M は限界状態係数、 P は平均有効応力、 P_0 は初期平均有効応力、 η は偏差有効応力、 λ は圧縮指数、 k は膨張指数、 e_0 は初期間隙比である。応力ひずみ関係式は、塑性体積ひずみを硬化パラメータとした塑性ポテンシャル式

$$f = \varepsilon_v^p \quad (5.3.1-4)$$

と、関連流れ則から導かれる⁷⁾。

緩衝材力学変形挙動解析には、以上に述べた 2 相混合体理論に基づく支配方程式を力学的数学モデルとして用い、構成則に Cam clay モデルを用いるのが適当である。ただし、発生する過剰間隙水圧が平均有効応力に対して無視しうる程度であるならば液相を無視して 1 相系で解析しても問題はない。

5.3.2 実現象の解析

解析モデル形状は、図 4.2-1 に示す人工バリア形状に従いオーバーパックパック 1 本分に相当する部分を取り出し、対称性を考慮し軸方向に垂直な平面で 2 分割したものをを用いる。解析モデルには軸対称モデルを用いる。モデル形状と境界条件を図 5.3.2-1 に示す。オーバーパックは剛体であると仮定しモデルには含まず、オーバーパックの腐食膨張にあたる変形をオーバーパックと緩衝材の境界部に強制変位として作用させる。岩盤と緩衝材の境界部は岩盤が変形しないと仮定し、緩衝材から岩盤への鉛直方向の変位を固定とする。また、緩衝材から岩盤部への水理学的条件は排水条件とし、初期水頭である 3.5m を固定水頭として与える。両端部の境界は対称面となるので、軸方向の変形は固定で非排水となる。軸となる境界は、軸と垂直な方向の変形が固定で非排水となる。以上のモデル形状と境界条件を図 5.3.2-1 に示し、解析メッシュを図 5.3.2-2 に示す。

緩衝材の物性値は、弾性係数は動力炉・核燃料開発事業団殿より提供していただいた値である 13MPa を用いる。ポアソン比は、を 0.4 とする。透水係数は、平 3 レポート P3-27 より、乾燥密度 1.6g/cm³ の時の値である 5.0×10^{-13} m/s を用いる。構成則モデルである Cam clay モデルのパラメータは、圧縮指数 λ 、膨張指数 κ 、限界状態係数 M である。これらのパラメータに関しては、動力炉・核燃料開発事業団殿より提供していただいた。また、初期間隙比も同様に提供していただいた。オーバーパックの腐食膨張速度は、動力炉・核燃料開発事業団殿と協議の上、初期 1,000 年間は 3cm とし、その後 9,000 年間は 7cm とした。従って、オーバーパックの変位量は合計で 10cm となり、解析期間は 10,000 年である。解析に用いるデータを表 5.3.2-1 に示す。

表 5.3.2-1 解析に用いるデータ

弾性係数		13 MPa
ポアソン比		0.4
透水係数		5.0×10^{-13} m/sec
初期間隙比		0.686
Cam clay モデル	圧縮指数	0.117
	膨張指数	0.078
	限界状態係数	0.58

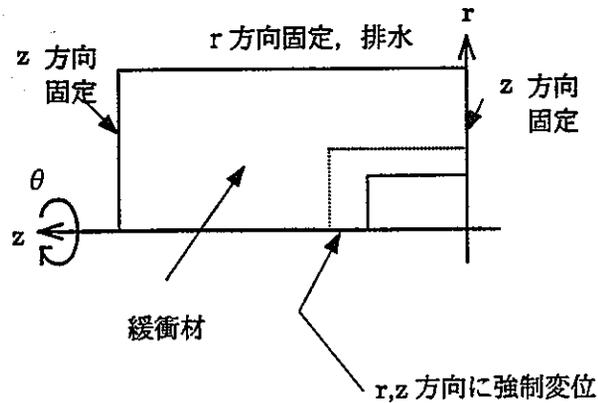


図 5.3.2-1 実現象の解析における解析モデル

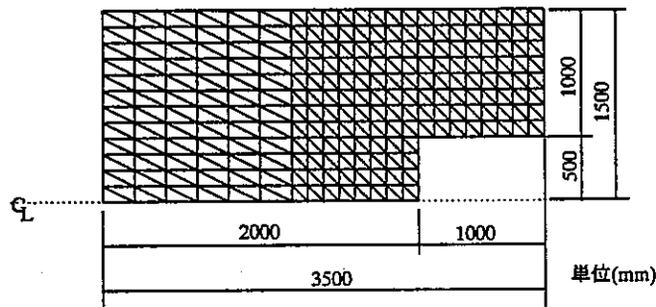


図 5.3.2-2 実現象の解析におけるメッシュ図

5.3.3 解析結果

1,000年後と10,000年後の過剰間隙水圧を図5.3.2-3に示す。過剰間隙水圧のオーダーは1,000年後で 10^{-3} MPa、10,000年後で 10^{-4} MPaであり、緩衝材の初期拘束圧が1MPaであること考慮すると無視する値であることがわかる。1,000年後の方が大きな値になっているのは、1,000年までのオーバーパックの膨張速度がそれ以降よりも大きいためである。透水係数が小さな値であるにもかかわらず、過剰間隙水圧があまり上昇しないのは、時間が十分に長いためであると考えられる。以上の結果から、今回の解析条件下では過剰間隙水圧の影響を考慮する必要がないといえることができる。

10,000年後の応力状態を図5.3.2-3に示す。各色は応力の状態を示しており、赤：限界状態、黄：塑性、緑：塑性、青：弾性である。各色に対応する効力履歴を図5.3.2-4に示す。赤色は、要素が破壊していることを示しており、応力が限界状態線に到達してから、限界状態線上を平均有効応力が低下する方向に移動している状態である。黄色は、破壊はしていないが、正のダイレイタンスが発生し平均応力が低下しており、限界状態に近づいている状態を示している。赤色の要素は、オーバーパック近傍と隅角部に限られている。また、黄色の要素もオーバーパックの隅角部である。図5.3.2-5に示した変形図からこれらの要素はオーバーパックの膨張に伴い引張りを受けることにより状態にあることがわかる。一方緑色の要素は、圧密が進行している状態を示しており、応力的な問題はない。成型時の

圧密応力により過圧密状態になっているため解析領域の半分以上は弾性のままである。

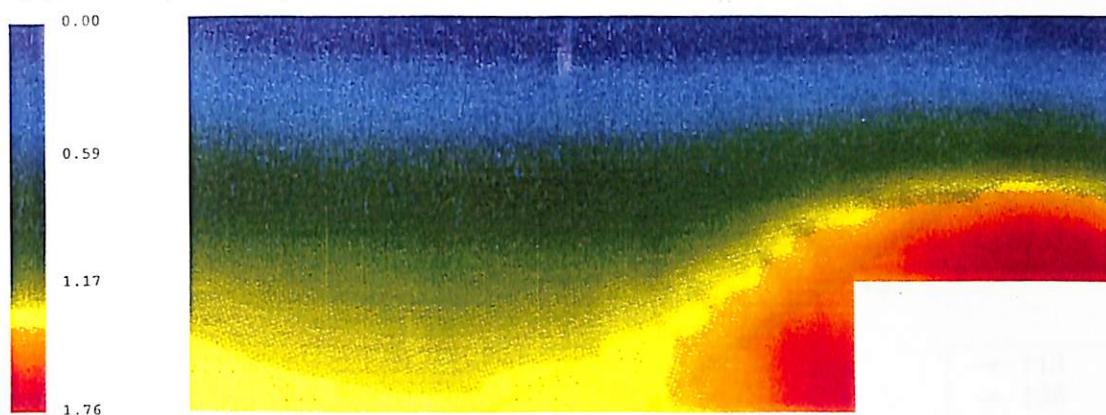
上記の状態は、図 5.3.2-6 の平均応力と偏差応力のコンター図からもわかる。オーバーバック境界と隅角部では平均応力、偏差応力ともに低下しており、応力が限界曲面状を平均応力が 0 の方へ向かい進んでいることを示している。オーバーバック上部、左側は、平均応力、偏差応力ともに増加しており、せん断を受けながら圧密が進行している状況を示している。

5.3.4 まとめ

プロトタイプモデルにおいて、オーバーバックの膨張が 1,000 年で 3cm、それ以降 9,000 年で 7cm の速度であると仮定し 2 相系非線形解析を行い、次の結果を得た。

- ①過剰間隙水圧はほとんど発生せず、その影響を考慮する必要はない。
- ②オーバーバックの膨張によりオーバーバックと隅角部は破壊に至るものの、人工バリア全体がダメージを受けるような破壊には至らない。

過剰間隙水圧($\times 10^{-3}$ MPa)



(a) 1,000 年後の過剰間隙水圧(10^{-3} MPa)

過剰間隙水圧($\times 10^{-3}$ MPa)



(b) 10,000 年後の過剰間隙水圧(10^{-3} MPa)

図 5.3.2-2 過剰間隙水圧のコンター図

- 弾性
- 塑性
($\sigma_m > \sigma_{m0}$)
- 塑性
($\sigma_m < \sigma_{m0}$)
- 限界状態

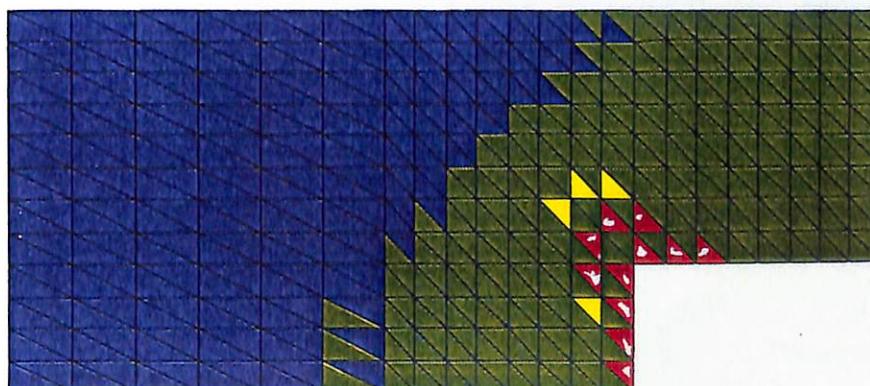


図 5.3.2-3 各要素の応力状態($t = 10,000$ 年)

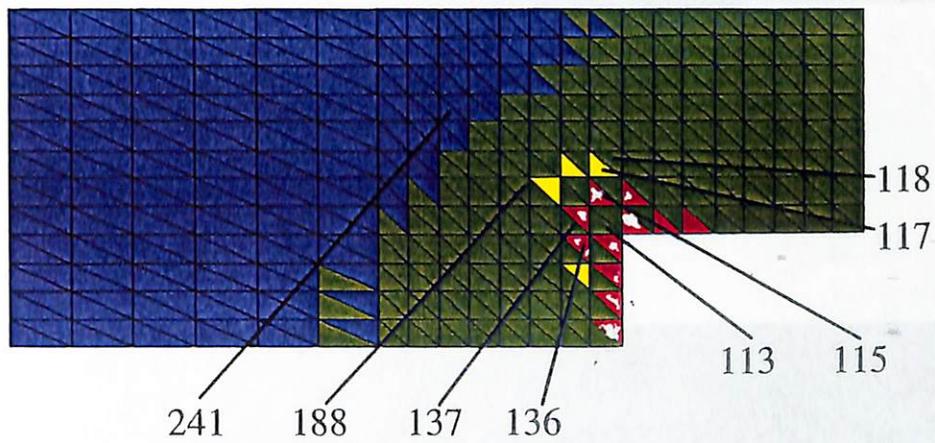
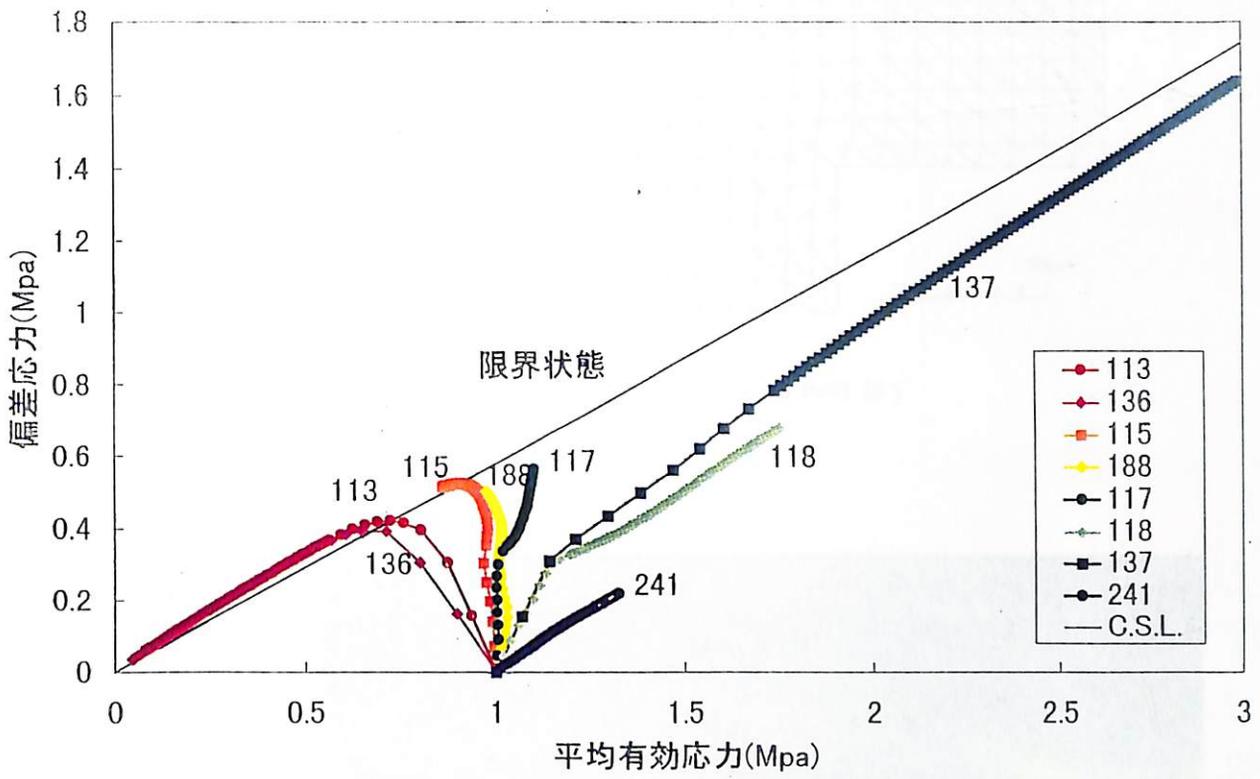


图 5.3.2-4 应力経路

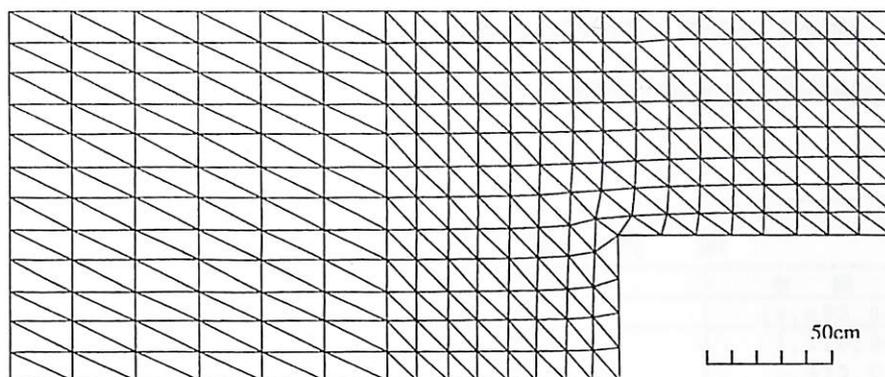
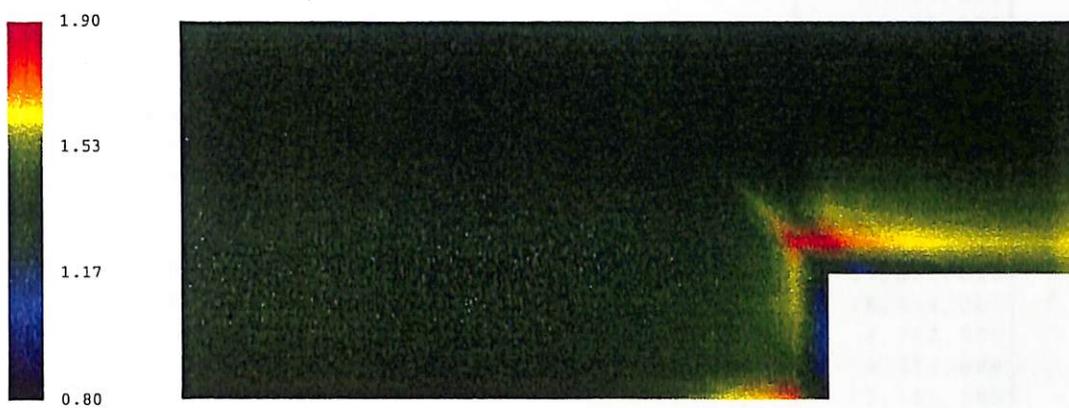


図 5.3.2-5 変形図 ($t = 10,000$ 年)

平均有効応力(MPa)



(a) 平均有効応力

偏差応力(MPa)



(b) 偏差応力

図 5.3.2-6 平均有効応力と偏差応力のコンター図 ($t = 10,000$ 年)

5.4 試験装置見積

上記 5.2 項で設計した試験装置について見積を行った。表 5.4-1 に示すように、項目として①構成装置別の材料費、②構成装置別の購入品等、③構成装置別の制作費、④現地工事費、⑤設計費、⑥工場試験／検査費、⑦現地試験／検査費、⑧提出図書作成費、⑨梱包・輸送費、⑩恒温室工事費、⑪旅費・交通費、に分けて見積を行った。

表 5.4-1 見積内訳

記号	項目	金額	備考
①	材料費	10,093,000	①の合計
①-1	せん断載荷フレーム及び載荷装置	2,710,000	
①-2	1/10軸対象モデル拘束容器	3,823,000	
①-3	1/20軸対象モデル拘束容器	944,000	
①-4	平面歪みモデル拘束容器	2,360,000	
①-5	空気水系制御装置	256,000	
②	購入品等	29,364,000	②の合計
②-1	せん断載荷フレーム及び載荷装置	6,587,000	
②-2	1/10軸対象モデル拘束容器	98,000	
②-3	1/20軸対象モデル拘束容器	35,000	
②-4	平面歪みモデル拘束容器	130,000	
②-5	空気水系制御装置	1,182,000	
②-6	計測記録及び制御機器	20,098,000	
②-7	圧縮空気源及び真空供給装置	1,046,000	
②-8	無停電電源装置	188,000	
③	製作費	64,955,000	③の合計
③-1	せん断載荷フレーム及び載荷装置	25,832,000	
③-2	1/10軸対象モデル拘束容器	18,644,000	
③-3	1/20軸対象モデル拘束容器	8,203,000	
③-4	平面歪みモデル拘束容器	9,720,000	
③-5	空気水系制御装置	2,556,000	
④	現地工事費	9,635,000	
⑤	設計費	39,980,000	
⑥	工場試験／検査費	3,084,000	
⑦	現地試験／検査費	2,277,000	
⑧	提出図書作成費	710,000	
⑨	梱包、輸送費	1,610,000	
⑩	恒温室工事費	3,927,000	
⑪	旅費、交通費	400,000	
	諸経費（①～⑪の20%）	33,207,000	
	全体合計	199,242,000	

6 あとがき

高レベル放射性廃棄物処分場閉鎖後において人工バリアを形成する緩衝材には、オーバーパックの腐食膨張等による外力が長期間作用すると考えられる。これらの外力に対する緩衝材の力学的変形挙動を明らかにするためには、実験的研究と解析的研究を比較することにより、人工バリアの力学的健全性の評価を行う必要がある。

本研究の目的は、模型試験を実施することにより、効果的に人工バリアの腐食膨張による力学変形挙動を調べるための、試験手法の事前検討をふまえた装置の設計、および実現象を想定した予備解析である。

まず、模型形状の選定を行った結果、オーバーパックモデルの貫入による手法が適当であると考えた。また、軸方向と半径方向に個別に変形させることとし、軸方向貫入は、全体モデル、半径方向貫入は2次元平面ひずみモデルが有効であることを解析的検討により確認した。このモデルを前提に、強制変位速度の検討、計測項目・計測方法の選定、および緩衝材設置手法確立のための検討等を行った。

強制変位速度は模型縮尺1/10において、1cmの変位を与えるのに20～60日程度の試験期間をとれば、過剰間隙水圧の大きな影響が出ないことが分かった。計測項目については、シミュレーション解析に必要な計測項目を抽出し、有効な計測方法を検討した。この内変位計測は、非破壊で計測が可能なX線撮影による計測について、その適用性を検討した。また、緩衝材設置手法確立のために、圧縮成型ベントナイトを容器内に積み重ねて設置する際の継ぎ目部の一体化を確認するための予備試験（圧密非排水三軸圧縮試験）を実施した。

これらの検討結果に基づき、試験設備の性能の設定を行った。さらに、この性能を満足する機能を実現するための構成装置の検討を行った。その結果、構成装置として、「モデル拘束容器」「ホイスト」「空気・水系制御装置」「载荷装置」「载荷フレーム」「計測・記録装置」「恒温室」を抽出し、各構成装置の仕様、構造について検討を行った。次に、装置製作手順、製作要領を設定し、最後に装置の見積を行った。

解析的研究としては、実際の処分場を想定したオーバーパックの腐食膨張について解析手法の検討および実現象の予備解析を行った結果、オーバーパック周辺部を中心に塑性領域が広がることが確認できた。

以上のことから、本研究によって装置のコンセプトの設定、実現性の検討といった基本設計が完了した。装置の製作に至るまでには、さらに、計画図、組立図等を作製するための詳細設計、製作設計を行う必要がある。

参考文献

- 1) 富士 岳, 放射線による検査技術の基礎：非破壊検査, 第39巻, 第9号, p.711~723 (1990)
- 2) コンクリートの非破壊試験法研究委員会報告書：(社)日本コンクリート工学協会, 東京, p.128~131 (1992)
- 3) 花田 広, 放射線によるコンクリート内の鉄筋及び欠陥状態の検出：非破壊検査, 第34巻, 第10号, p.709~717 (1985)
- 4) 竹内 清, 放射線遮蔽設計計算の理論と実際：第三巻 総集編：(株)日本原子力情報センター, 東京, p.411~414
- 5) 太田秀樹, カムクレイに学ぶー3. 模索ー新事実発見ーの時代：土と基礎, Vol41, No.8, p.69~76 (1993)
- 6) 太田秀樹, カムクレイに学ぶー4. 流れ則の応用ーカムクレイ・モデルー：土と基礎, Vol41, No.9, p.61~68 (1993)
- 7) 飯塚 敦, 沈下予測解析における規準と初期条件の重要性：土と基礎, Vol45, No.2, p.15~17 (1997)