

シールド工法におけるテールシール圧力制御システムの開発および基礎実験

DEVELOPMENT AND DEMONSTRATION OF THE CONTROL SYSTEM FOR TAIL SEAL PRESSURE FOR SHIELD DRIVING

中山卓人*¹, 小林 修*², 田中 孝*³, 田中宏典*⁴
Takuto NAKAYAMA, Osamu KOBAYASHI, Takashi TANAKA and Hirofumi TANAKA

During tunneling with a shield machine, usually tail seal grease is injected into the seal chambers, under a backfill grouting pressure + x or a groundwater pressure + x to provide counter pressure preventing flow into the shield machine of the groundwater entraining backfill material and muck. From previous experience, we learned that the tail grease filling the tail seal chamber may leak, and mingle with the backfill material. To cope with this problem, we have developed a new approach to prevent the leaking of tail grease into the backfill material by managing and maintaining the pressure of tail grease at an appropriate level. For this project, a demonstration was conducted to verify the validity of the injection system by determining ranges of pressure suitable for seal chamber and backfill grouting, through which we confirmed it was possible to prevent the grease leaking from the seal chamber into the backfill grouting layer as well as the backfill material inflow into the seal chamber.

Keywords : shield tunneling, tail seals, grase for tail sealing, backfill grouting, water leakage
シールド, テールシール, テールグリース, 裏込め注入材, 漏水

1. はじめに

シールドのテールシールでは、シール室内に充填するテールグリースを裏込め注入圧+ α や水圧+ α の圧力で注入し、その圧力で裏込め注入材や土砂を伴う地下水のシールド内への流入を防止している。この場合、シール室内に充満したテールグリースが漏出し、裏込め注入材に混入することがあった。一般的に使用されるテールグリースは繊維質で高粘性の材料のため、漏出したグリースが塊状でセグメント外周面に張り付いた場合、裏込め注入均一にならないおそれがある。また、テールシールがセグメントを押し付ける力が弱くなるとシール性が低下し、テールシールとセグメント外周面に間隙が発生し裏込め注入材が流入するおそれもある。さらに流入した裏込め注入材がテールシールに付着して固結すると、テールシールの可とう性が阻害され止水性の低下を招くおそれがある。

そこで、これらの課題に対してテールグリースの圧力を適正に保持・管理することで、テールグリースの裏込め注入材への漏出の防止またはシール室への裏込め注入材の流入の防止を可能とするテールシール圧力制御システム（以下、本システムと記述）を開発した。

本稿では、本システムの概要について説明するとともに、本システムの有効性を確認するための実証実験を実施したので、実験の概要と結果について報告する。

2. システムの概要

2.1 テールシール圧力制御システム

本システムは、複数のシール室内の圧力をそれぞれ適正に管理することで、テールグリース材の地中への漏出を防ぎロスを最小限にするとともに、高水圧下でも裏込め注入材のシール室内への流入を防止し、テールブラシの止水性を高め、劣化を防止することが可能となる。図 1 にテールグリースの圧力管理イメージを示す。シール室 a 内のグリース圧力 P_a を裏込め注入材圧力 P より常時同程度か小さく管理するとともに、シール室 b 内のグリース圧力 P_b をシール室 a のグリース圧力 P_a および裏込め注入材 P より小さく管理するものである。

シール室 a とシール室 b には、それぞれ独立した供給管から供給ポンプによりテールグリースを供給し、排出管から排出可能としている。シール室内の圧力は、圧力計 a および圧力計 b で検知し、それぞれ圧力表示計に表示する。

2.2 リング体テールシール

リング体テールシールは、テールシール背面のパネ板にリング状の弾性緊張材（リング体）を取り付け、リング体を緊張することでテールシールをセグメントリングへ締め付ける。テールシールを所定の圧力で締め付けることで、テールシールとセグメント間の隙間をなくし、裏込め注入材のテールブラシ内への流入を防止する。

*1 戸田建設株式会社技術部 修士（工学）

*2 戸田建設株式会社技術部

*3, *4 戸田建設株式会社技術開発センター

Civil Engineering Dept., TODA CORPORATION, M.Eng.

Civil Engineering Dept., TODA CORPORATION

Research and Development Center, TODA CORPORATION

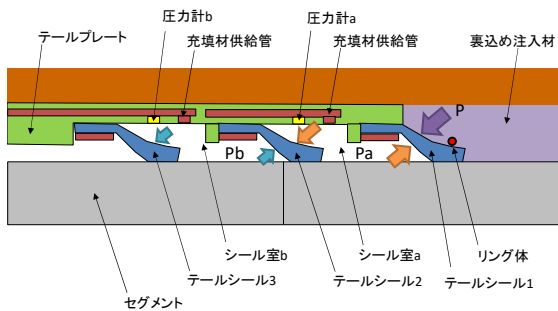


図1 本システムの圧力管理イメージ

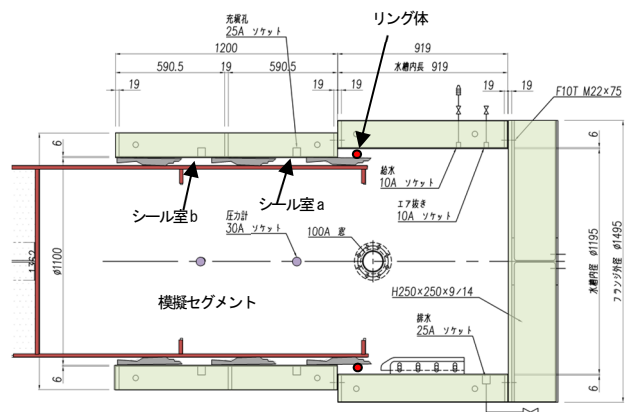


図2 実験装置図

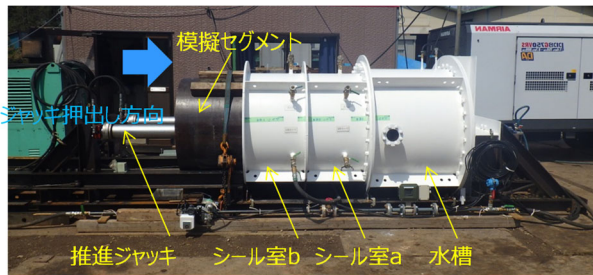


写真1 実験装置



写真2 グリースポンプ

3. 実証実験の概要

3.1 実験の目的

本システムの適用性を確認するため、シールドテール部を模擬した実験装置を製作し、テールグリース圧力制御の確認試験を行った。各シール室内の圧力、裏込め注入圧の代わりに水槽内に水圧を作用させることで、各シール室内でのテールグリースの最適な圧力を確認し、本システムの適用性を確認した。

3.2 実験の概要

(1) 実験装置

図2、写真1に実験装置を示す。鋼管によりシールドマシン内径1,100mm、セグメント外径1,016mm、テールクリアランス42mmを模擬した実験装置を製作した。実験装置内に水圧を作用させ、最大で0.5MPaの裏込め注入圧を再現できる構造とした。テールブラシを3段設け、2つのシール室（シール室a、シール室b）を設けた。3段目のテールシールは、シリコンシールとした。2つのシール室と裏込め層（水槽）内には圧力計を設置し各圧力を計測できるようにした。シール室の左右スプリングライン位置にアクリル板による観測用窓を設け、シール室内の状況を確認できるようにした。掘進に伴う排水はコントロールバルブにて排水量を自動調整し、水槽内の圧力を一定に保てるようにした。

(2) テールグリース

実験に使用するテールグリースとして、松村石油社製テールシーラー#8000N（テールブラシ手塗用）、#8000NP（ポンプによる注入用）を使用した。

(3) グリースポンプ

写真2にグリースポンプを示す。実験に使用するグリースポンプとして、ヤマダ社製縦置き型グリースポンプを使用した。グ

リースポンプは2系統とし、シール室a、bそれぞれに注入できるようにした。

(4) リング体テールシール

実験用のリング体テールシールの緊張材として、一般的なステンレス製ワイヤーロープを使用した。

- ・ワイヤーロープ公称径：3mm
- ・ワイヤーロープ構成：6×7

緊張材の固定治具としてステンレス製バネ板を同心円状に45度間隔で配置した。

写真3、4にリング体テールシールの取付け状況、図3に固定治具の構造図を示す。

(5) リング体テールシールの緊張方法

図4にリング体テールシールの緊張力の概要図を示す。ブラシ抵抗圧にワイヤーロープの緊張力として、水槽の圧力の10%程度を加算することで、水槽からシール室a内への水の流入抵抗力の向上の有無を確認した。

ワイヤーロープ締め付け圧 P_n が等分布荷重として作用する場合、リング体テールシールの緊張力 W は(1)式から求める。

$$W = P_n \cdot r \quad (1)$$

この緊張力 W を最外周部のテールシールに作用させる。

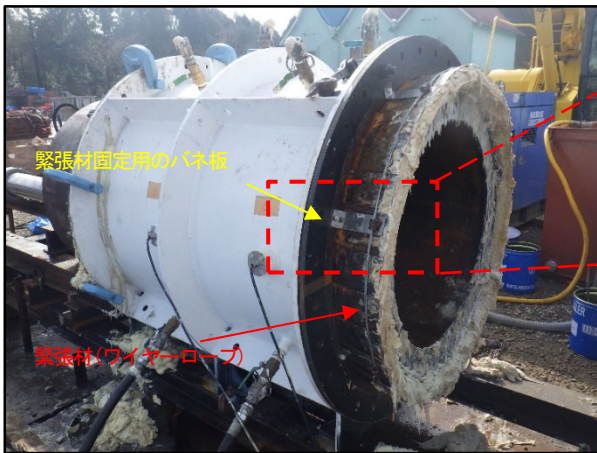


写真3 リング体テールシール取付状況

表1 リング体テールシールの緊張力

ワイヤの伸び ΔL (mm)	ワイヤの長さ L (mm)	弾性係数 E (N/mm ²)	断面積 A (mm ²)	本数 n (本)
42	3500	98100	4.1	2

緊張力 W (kN)	リング体半径 r (mm)	締付幅 b (mm)	圧力 P (kPa)
4.83	557	200	43.4

表2 圧力変化条件

試験条件	シール室b	シール室a	水槽
① 初期圧力 (MPa)	0.20 ↗	0.20	0.20
②	0.30 ↗	0.30	0.30
③	0.40 ↗	0.40	0.40
圧力設定	変更	固定	固定
④ 初期圧力 (MPa)	0.20	0.20 ↗	0.20
⑤	0.30	0.30 ↗	0.30
⑥	0.40	0.40 ↗	0.40
圧力設定	固定	変更	固定
⑦ 初期圧力 (MPa)	0.20	0.20	0.20 ↗
⑧	0.30	0.30	0.30 ↗
⑨	0.40	0.40	0.40 ↗
圧力設定	固定	固定	変更

※ ↗ : 圧力上昇

実験時はワイヤロープの伸びから、テールブラシに作用するワイヤロープの緊張力とワイヤブラシに作用する圧力を求めた。算定方法は、(2)~(4)式のとおりである。

$$\Delta L = W \times L / (E \times A \times n) \quad (2)$$

$$W = (\Delta L \times E \times A \times n) / L \quad (3)$$

ここで、L: ワイヤロープの伸び (mm)

W: ワイヤロープの緊張力 (N)

L: ワイヤロープの長さ (mm)

E: ワイヤロープの弾性係数 (N/mm²)

$$E = 98,100 \text{ N/mm}^2$$

(ワイヤ構成: 6×7)

A: ワイヤロープの断面積 (mm²)

$$A = 4.1 \text{ mm}^2 \text{ (ワイヤ径 } 3.0 \text{ mm)}$$

n: ワイヤロープの本数 (本)



写真4 リング体テールシール

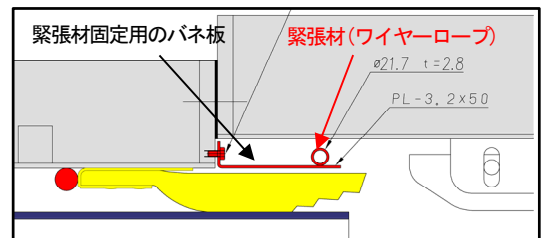
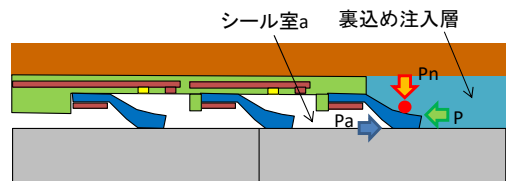


図3 リング体テールシール固定道具



P: 裏込め注入圧
Pa: シール室aのグリース圧
Pn: リング体緊張力による締め付け圧

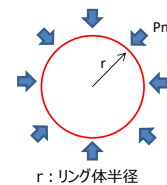


図4 リング体テールシールの緊張力概要図

表3 実験ケース

ケース	試験条件	偏心(上部へ20mm)	リング体
1	①~⑨	なし	なし
2	①~⑨	あり	なし
3	①~⑨	なし	あり
4	①~⑨	あり	あり

$$P = W / (r \times b) \quad (4)$$

ここで、P: ワイヤロープによりテールシールに作用する圧力 (Pa)

r: リング体ワイヤロープの半径 (mm)

b: リング体のセグメント締付幅 (mm)

上記の式からリング体テールシールのワイヤロープの緊張力を求めると表1のとおりとなる。

3.3 実験の手順

表2に圧力変化条件、表3に実験ケースを示す。本システム耐圧確認実験として、シール室a, bにテールグリース、水槽に水を満たした状態で、それぞれの室と水槽の圧力を徐々に上昇させ、各室の圧力差をつけた状態でテールグリースが隣のテール室ま

たは水槽に漏れ出す圧力、水がシール室内に浸入する圧力の確認した。この9条件でセグメントの偏心20mmとリング体設置のそれぞれ、あり、なしの4ケースを比較した。各圧力変化条件で確認する内容は、以下のとおりである。

(1) 圧力変化条件①, ②, ③

シール室 a, b, 水槽の3室が等圧の状態からシール室 b のみテールグリースを充填して圧力を上昇させ、シール室 b からシール室 a を通過して水槽内へテールグリースが漏れ出す圧力を確認する。テールグリースが水槽へ漏れ出したとする判断基準は、水槽の圧力が初期圧から0.01MPa上昇した時点(例えば、水槽の初期圧を0.20MPaとすると、0.21MPaとなったとき)でテールグリースが水槽へ漏れ出したと判断することにした。この実験によりシール室 b の圧力の上限値を明らかとする。

(2) 圧力変化条件④, ⑤, ⑥

シール室 a, b, 水槽の3室が等圧の状態からシール室 a のみテールグリースを充填して圧力を上昇させ、シール室 a から水槽内へテールグリースが漏れ出す圧力を確認する。テールグリースが水槽へ漏れ出したとする判断基準は、水槽の圧力が初期圧から0.01MPa上昇した時点(例えば、水槽の初期圧を0.20MPaとすると、0.21MPaとなったとき)でテールグリースが水槽へ漏れ出したと判断することにした。この実験によりシール室 a の圧力の上限値を明らかとする。

(3) 圧力変化条件⑦, ⑧, ⑨

シール室 a, b, 水槽の3室が等圧の状態から水槽のみ水を注入して圧力を上昇させ、水がシール室 a, b を通過してシールド機内へ漏れ出す圧力を確認する。この実験によりシール室 a, b の圧力の下限値を明らかとする。

4. 実証実験の結果(ケース1(偏心なし, リング体なし))

4.1 初期圧0.20MPa(図5)

(1) 圧力変化条件①

条件①では、シール室 b のグリース圧を0.20MPaから徐々に上げた結果、0.47MPaとなるとシール室から水槽へテールグリースが流出した。シール室 a との差圧は-0.11MPa, 水槽との差圧は-0.26MPaであった。

(2) 圧力変化条件④

条件④では、シール室 a のグリース圧を0.20MPaから徐々に上げた結果、0.33MPaとなるとシール室から水槽へテールグリースが流出した。シール室 b との差圧は-0.08MPa, 水槽との差圧は-0.12MPaであった。

(3) 圧力変化条件⑦

条件⑦では、水圧の上昇とともにシール室 a の圧力の上昇がみられ差圧は+0.05MPaとなったが、水圧が0.40MPaのときにシール室 b との差圧-0.14MPaが保たれ、シール室への水の流入やテールグリースの流出はみられなかった。

4.2 初期圧0.30MPa(図6)

(2) 圧力変化条件②

条件②では、シール室 b のグリース圧を0.30MPaから徐々に上げた結果、0.51MPaとなるとシール室から水槽へテールグリースが流出する結果した。シール室 a との差圧は-0.08MPa, 水槽との差圧は-0.20MPaであった。

(2) 圧力変化条件⑤

条件⑤では、シール室 a のグリース圧を0.30MPaから徐々に上げた結果、0.40MPaとなるとシール室から水槽へテールグリースが流出した。シール室 b との差圧は-0.07MPa, 水槽との差圧は-0.09MPaであった。

(3) 圧力変化条件⑧

条件⑧では、水圧の上昇とともにシール室 a の圧力の上昇がみられ差圧は+0.12MPaとなったが、水圧が0.50MPaのときにシール室 b との差圧-0.14MPaが保たれ、シール室への水の流入やテールグリースの流出はみられなかった。

4.3 初期圧0.40MPa(図7)

(1) 圧力変化条件③

条件③では、シール室 b のグリース圧を0.40MPaから徐々に上げた結果、0.61MPaとなるとシール室から水槽へテールグリースが流出した。シール室 a との差圧は-0.08MPa, 水槽との差圧は-0.20MPaであった。

(2) 圧力変化条件⑥

条件⑥では、シール室 a のグリース圧を0.40MPaから徐々に上げた結果、0.52MPaとなるとシール室から水槽へテールグリースが流出した。シール室 b との差圧は-0.11MPa, 水槽との差圧は-0.11MPaであった。

(3) 圧力変化条件⑨

条件⑨では、水圧の上昇とともにシール室 a の圧力の上昇がみられ差圧は+0.12MPaとなったが、水圧が0.50MPaのときにシール室 b との差圧0.08MPaが保たれ、シール室への水の流入やテールグリースの流出はみられなかった。

4.4 ケース1のまとめ

実験ケース1の圧力変化条件①~⑨の実験の結果、各水圧(裏込め注入圧)におけるシール室 a, b の圧力の上限値と下限値を設定すると図8のとおりとなる。

(1) シール室 a

シール室 a の圧力の上限値は、各水圧に圧力変化条件④, ⑤, ⑥における水槽との差圧の中で最も差圧の小さい条件⑤の値を加えた値とした。

$$\text{シール室 a 上限値} = \text{水圧} + 0.09\text{MPa}$$

例えば水圧0.20MPaでは $0.20\text{MPa} + 0.09\text{MPa} = 0.29\text{MPa}$ とし、同様に水圧0.30MPaでは0.39MPa, 水圧0.40MPaでは0.49MPaとした。

シール室 a の圧力の下限値は、各水圧に圧力変化条件⑦, ⑧, ⑨における水槽との差圧の中で最も差圧の小さい条件⑦の値とした。

$$\text{シール室 a 下限値} = \text{水圧} + 0.05\text{MPa}$$

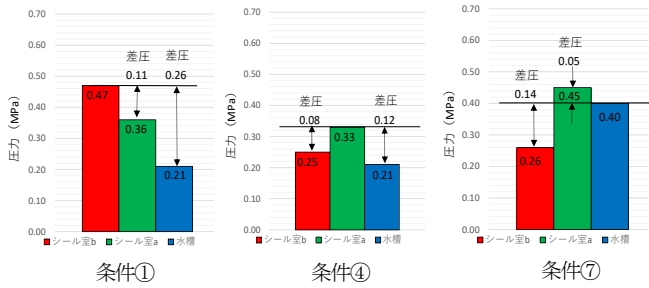


図5 試験結果 (ケース1条件①,④,⑦)

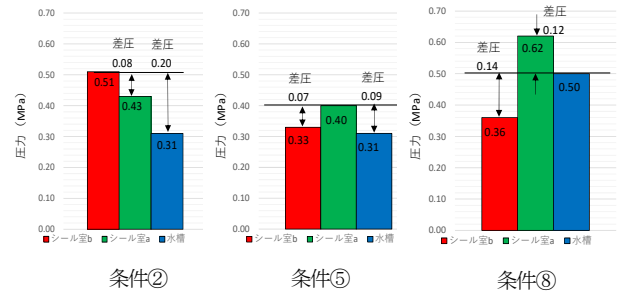


図6 試験結果 (ケース1条件②,⑤,⑧)

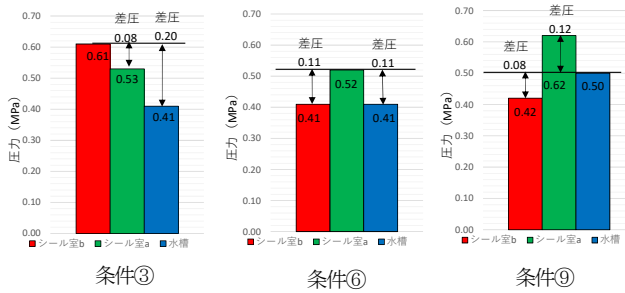


図7 試験結果 (ケース1条件③,⑥,⑨)

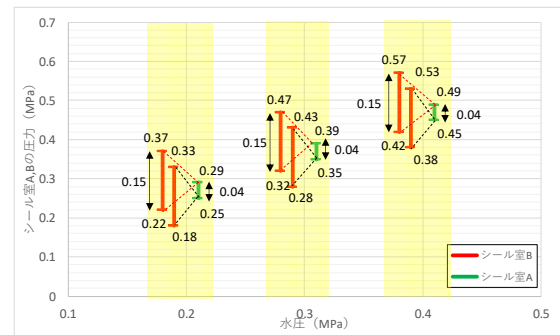


図8 各シール室の上限値, 下限値 (ケース1)

例えば、水圧 0.20MPa では 0.20MPa + 0.05MPa = 0.25MPa とし、同様に水圧 0.30MPa では 0.35MPa、水圧 0.40MPa では 0.45MPa とした。

(2) シール室 b

シール室 b における圧力の上限値は、各シール室 a の圧力に圧力変化条件①, ②, ③におけるシール室 a との差圧の中で最も差圧の小さい条件②, ③の値を加えた値とした。

$$\text{シール室 b 上限値} = \text{シール室 a 圧力} + 0.08\text{MPa}$$

シール室 a の圧力に従いシール室 b の圧力の上限値が変化する。例えば、シール室 a の圧力が上限値の場合、水圧 0.20MPa では 0.29MPa + 0.08MPa = 0.37MPa となり、同様に水圧 0.30MPa では 0.47MPa、水圧 0.40MPa では 0.57MPa となる。しかし、シール室 a の圧力が下限値の場合、水圧 0.20MPa では 0.25MPa + 0.08MPa = 0.33MPa となり、同様に水圧 0.30MPa では 0.43MPa、水圧 0.40MPa では 0.53MPa となる。

シール室 b における圧力の下限値は、各シール室 a の圧力に圧力変化条件④, ⑤, ⑥におけるシール室 a との差圧の中で最も差圧の小さい条件⑤の値を引いた値とした。

$$\text{シール室 b 下限値} = \text{シール室 a 圧力} - 0.07\text{MPa}$$

シール室 a の圧力に従いシール室 b の圧力の下限値も変化する。例えば、シール室 a の圧力が上限値の場合、水圧 0.20MPa では 0.29MPa - 0.07MPa = 0.22MPa となり、同様に水圧 0.30MPa では 0.32MPa、水圧 0.40MPa では 0.42MPa となる。しかし、シール室 a の圧力が下限値の場合、水圧 0.20MPa では 0.25MPa - 0.07MPa = 0.18MPa となり、同様に水圧 0.30MPa では 0.28MPa、水圧 0.40MPa では 0.38MPa となる。

5. 実証実験の結果 (ケース 2 (偏心あり, リング体なし))

5.1 初期圧 0.20MPa (図 9)

(1) 圧力変化条件①

条件①では、シール室 b のグリース圧を 0.20MPa から徐々に上げた結果、0.45MPa となるとシール室から水槽へテールグリースが流出した。シール室 a との差圧は -0.10MPa、水槽との差圧は -0.24MPa であった。

(2) 圧力変化条件④

条件④では、シール室 a のグリース圧を 0.20MPa から徐々に上げた結果、0.33MPa となるとシール室から水槽へテールグリースが流出した。シール室 b との差圧は -0.11MPa、水槽との差圧は -0.12MPa であった。

(3) 圧力変化条件⑦

条件⑦では、水圧の上昇とともにシール室 a の圧力の上昇がみられ差圧は +0.09MPa となったが、水圧が 0.39MPa のときにシール室 b との差圧 -0.08MPa が保たれ、シール室への水の流入やテールグリースの流出はみられなかった。

5.2 初期圧 0.30MPa (図 10)

(1) 圧力変化条件②

条件②では、シール室 b のグリース圧を 0.30MPa から徐々に上げた結果、0.46MPa となるとシール室から水槽へテールグリースが流出した。シール室 a との差圧は -0.05MPa、水槽との差圧は -0.15MPa であった。

(2) 圧力変化条件⑤

条件⑤では、シール室 a のグリース圧を 0.30MPa から徐々に上げた結果、0.41MPa となるとシール室から水槽へテールグリースが流出した。シール室 b との差圧は -0.09MPa、水槽との差圧は -0.10MPa であった。

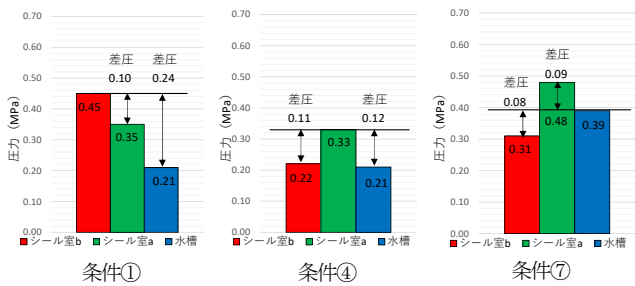


図9 試験結果 (ケース2条件①,④,⑦)

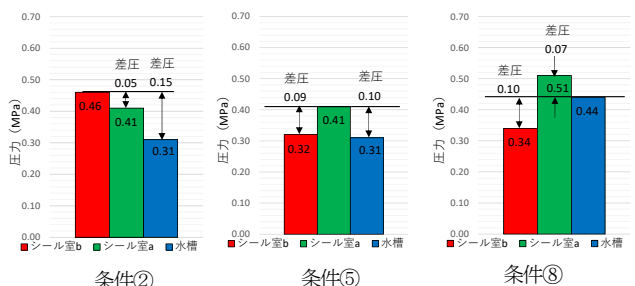


図10 試験結果 (ケース2条件②,⑤,⑧)

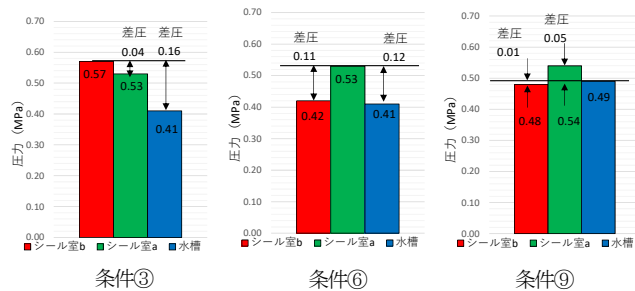


図11 試験結果 (ケース2条件③,⑥,⑨)

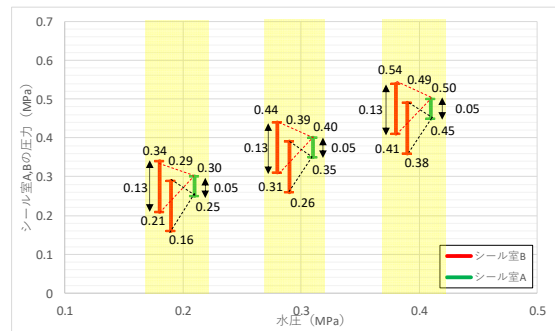


図12 各シール室の上限值, 下限値 (ケース2)

(3) 圧力変化条件⑧

条件⑧では、水圧の上昇とともにシール室 a の圧力の上昇がみられ差圧は+0.07MPa となったが、水圧が 0.44MPa のときにシール室 b との差圧-0.10MPa が保たれ、シール室への水の流入やテールグリースの流出はみられなかった。

5.3 初期圧 0.40MPa (図 11)

(1) 圧力変化条件③

条件③では、シール室 b のグリース圧を 0.40MPa から徐々に上げた結果、0.57MPa となるとシール室から水槽へテールグリースが流出した。シール室 a との差圧は-0.04MPa、水槽との差圧は -0.16MPa であった。

(2) 圧力変化条件⑥

条件⑥では、シール室 a のグリース圧を 0.40MPa から徐々に上げた結果、0.53MPa となるとシール室から水槽へテールグリースが流出した。シール室 b との差圧は-0.11MPa、水槽との差圧は -0.12MPa であった。

(3) 圧力変化条件⑨

条件⑨では、水圧の上昇とともにシール室 a の圧力の上昇がみられ差圧は+0.05MPa となったが、水圧が 0.49MPa でシール室 b との差圧 0.01MPa がとなりシールド機内への水の流出がみられた。

5.4 ケース 2 のまとめ

実験ケース 2 の圧力変化条件①～⑨の実験の結果、各水圧 (裏込め注入圧) におけるシール室 a, b の圧力の上限值と下限値を設定すると図 12 のとおりとなる。

(1) シール室 a

シール室 a の圧力の上限值は、各水圧に圧力変化条件④、⑤、⑥における水槽との差圧の中で最も差圧の小さい条件⑤の値を加えた値とした。

$$\text{シール室 a 上限値} = \text{水圧} + 0.10\text{MPa}$$

例えば、水圧 0.20MPa では 0.20MPa + 0.10MPa = 0.30MPa とし、同様に水圧 0.30MPa では 0.40MPa、水圧 0.40MPa では 0.50MPa とした。

シール室 a の圧力の下限値は、各水圧に圧力変化条件⑦、⑧、⑨における水槽との差圧の中で最も差圧の小さい条件⑨の値とした。

$$\text{シール室 a 下限値} = \text{水圧} + 0.05\text{MPa}$$

例えば、水圧 0.20MPa では 0.20MPa + 0.05MPa = 0.25MPa とし、同様に水圧 0.30MPa では 0.35MPa、水圧 0.40MPa では 0.45MPa とした。

(2) シール室 b

シール室 b における圧力の上限值は、各シール室 a の圧力に圧力変化条件①、②、③におけるシール室 a との差圧の中で最も差圧の小さい条件③の値を加えた値とした。

$$\text{シール室 b 上限値} = \text{シール室 a 圧力} + 0.04\text{MPa}$$

シール室 a の圧力に従いシール室 b の圧力の上限值が変化する。例えば、シール室 a の圧力が上限値の場合、水圧 0.20MPa では 0.30MPa + 0.04MPa = 0.34MPa となり、同様に水圧 0.30MPa では 0.44MPa、水圧 0.40MPa では 0.54MPa となる。しかし、シール室 a の圧力が下限値の場合、水圧 0.20MPa では 0.25MPa + 0.04MPa = 0.29MPa となり、同様に水圧 0.30MPa では 0.39MPa、水圧 0.40MPa では 0.49MPa となる。

シール室 b における圧力の下限値は、各シール室 a の圧力に圧力変化条件④、⑤、⑥におけるシール室 a との差圧の中で最も差圧の小さい条件⑤の値を引いた値とした。

シール室 b 下限値 = シール室 a 圧力 - 0.09MPa

シール室 a の圧力に従いシール室 b の圧力の下限値も変化する。例えば、シール室 a の圧力が上限値の場合、水圧 0.20MPa では $0.30\text{MPa} - 0.09\text{MPa} = 0.21\text{MPa}$ となり、同様に水圧 0.30MPa では 0.31MPa、水圧 0.40MPa では 0.41MPa となる。しかし、シール室 a の圧力が下限値の場合、水圧 0.20MPa では $0.25\text{MPa} - 0.09\text{MPa} = 0.16\text{MPa}$ となり、同様に水圧 0.30MPa では 0.26MPa、水圧 0.40MPa では 0.36MPa となる。

6. 実証実験の結果 (ケース 3 (偏心なし, リング体あり))

6.1 初期圧 0.20MPa (図 13)

(1) 圧力変化条件①

条件①では、シール室 b のグリース圧を 0.20MPa から徐々に上げた結果、0.45MPa となるとシール室から水槽へテールグリースが流出した。シール室 a との差圧は -0.09MPa、水槽との差圧は -0.24MPa であった。

(2) 圧力変化条件④

条件④では、シール室 a のグリース圧を 0.20MPa から徐々に上げた結果、0.45MPa となるとシール室から水槽へテールグリースが流出した。シール室 b との差圧は -0.21MPa、水槽との差圧は -0.24MPa であった。

(3) 圧力変化条件⑦

条件⑦では、水圧の上昇とともにシール室 a の圧力の上昇がみられ差圧は +0.13MPa となったが、水圧が 0.50MPa のときにシール室 b との差圧 -0.17MPa が保たれ、シール室への水の流入やテールグリースの流出はみられなかった。

6.2 初期圧 0.30MPa (図 14)

(1) 圧力変化条件②

条件②では、シール室 b のグリース圧を 0.30MPa から徐々に上げた結果、0.49MPa となるとシール室から水槽へテールグリースが流出した。シール室 a との差圧は -0.06MPa、水槽との差圧は -0.18MPa であった。

(2) 圧力変化条件⑤

条件⑤では、シール室 a のグリース圧を 0.30MPa から徐々に上げた結果、0.55MPa となるとシール室から水槽へテールグリースが流出した。シール室 b との差圧は -0.23MPa、水槽との差圧は -0.24MPa であった。

(3) 圧力変化条件⑧

条件⑧では、水圧の上昇とともにシール室 a の圧力の上昇がみられ差圧は +0.12MPa となったが、水圧が 0.50MPa のときにシール室 b との差圧 -0.16MPa が保たれ、シール室への水の流入やテールグリースの流出はみられなかった。

6.3 初期圧 0.40MPa (図 15)

(1) 圧力変化条件③

条件③では、シール室 b のグリース圧を 0.40MPa から徐々に上げた結果、0.59MPa となるとシール室から水槽へテールグリース

が流出した。シール室 a との差圧は -0.04MPa、水槽との差圧は -0.18MPa であった。

(2) 圧力変化条件⑥

条件⑥では、シール室 a のグリース圧を 0.40MPa から徐々に上げた結果、0.64MPa となるとシール室から水槽へテールグリースが流出した。シール室 b との差圧は -0.15MPa、水槽との差圧は -0.23MPa であった。

(3) 圧力変化条件⑨

条件⑨では、水圧の上昇とともにシール室 a の圧力の上昇がみられ差圧は +0.13MPa となったが、水圧が 0.50MPa のときにシール室 b との差圧 -0.07MPa がとなりシールド機内への水の流出がみられた。

6.4 ケース 3 のまとめ

実験ケース 3 の圧力変化条件①～⑨の実験の結果、各水圧 (裏込め注入圧) におけるシール室 a, b の圧力の上限値と下限値を設定すると図 16 のとおりとなる。

(1) シール室 a

シール室 a の圧力の上限値は、各水圧に圧力変化条件④, ⑤, ⑥における水槽との差圧の中で最も差圧の小さい条件⑥の値を加えた値とした。

$$\text{シール室 a 上限値} = \text{水圧} + 0.23\text{MPa}$$

例えば、水圧 0.20MPa では $0.20\text{MPa} + 0.23\text{MPa} = 0.43\text{MPa}$ とし、同様に水圧 0.30MPa では 0.53MPa、水圧 0.40MPa では 0.63MPa とした。

シール室 a の圧力の下限値は、各水圧に圧力変化条件⑦, ⑧, ⑨における水槽との差圧の中で最も差圧の小さい条件⑧の値とした。

$$\text{シール室 a 下限値} = \text{水圧} + 0.12\text{MPa}$$

例えば、水圧 0.20MPa では $0.20\text{MPa} + 0.12\text{MPa} = 0.32\text{MPa}$ とし、同様に水圧 0.30MPa では 0.42MPa、水圧 0.40MPa では 0.52MPa とした。

(2) シール室 b

シール室 b における圧力の上限値は、各シール室 a の圧力に圧力変化条件①, ②, ③におけるシール室 a との差圧の中で最も差圧の小さい条件③の値を加えた値とした。

$$\text{シール室 b 上限値} = \text{シール室 a 圧力} + 0.04\text{MPa}$$

シール室 a の圧力に従いシール室 b の圧力の上限値が変化する。例えば、シール室 a の圧力が上限値の場合、水圧 0.20MPa では $0.43\text{MPa} + 0.04\text{MPa} = 0.47\text{MPa}$ となり、同様に水圧 0.30MPa では 0.57MPa、水圧 0.40MPa では 0.67MPa となる。しかし、シール室 a の圧力が下限値の場合、水圧 0.20MPa では $0.32\text{MPa} + 0.04\text{MPa} = 0.36\text{MPa}$ となり、同様に水圧 0.30MPa では 0.46MPa、水圧 0.40MPa では 0.56MPa となる。

シール室 b における圧力の下限値は、各シール室 a の圧力に圧力変化条件④, ⑤, ⑥におけるシール室 a との差圧の中で最も差圧の小さい条件⑥の値を引いた値とした。

$$\text{シール室 b 下限値} = \text{シール室 a 圧力} - 0.15\text{MPa}$$

シール室aの圧力に従いシール室bの圧力の下限値も変化する。例えば、シール室 a の圧力が上限値の場合、水圧 0.20MPa では $0.43\text{MPa} - 0.15\text{MPa} = 0.28\text{MPa}$ となり、同様に水圧 0.30MPa では 0.38MPa 、水圧 0.40MPa では 0.48MPa となる。しかし、シール室 a の圧力が下限値の場合、水圧 0.20MPa では $0.32\text{MPa} - 0.15\text{MPa} = 0.17\text{MPa}$ となり、同様に水圧 0.30MPa では 0.27MPa 、水圧 0.40MPa では 0.37MPa となる。

7. 実証実験の結果 (ケース 4 (偏心あり, リング体あり))

7.1 初期圧 0.20MPa (図 17)

(1) 圧力変化条件①

条件①では、シール室 b のグリース圧を 0.20MPa から徐々に上げた結果、0.40MPa となるとシール室から水槽へテールグリースが流出した。シール室 a との差圧は -0.09MPa 、水槽との差圧は -0.19MPa であった。

(2) 圧力変化条件④

条件④では、シール室 a のグリース圧を 0.20MPa から徐々に上げた結果、0.45MPa となるとシール室から水槽へテールグリースが流出した。シール室 b との差圧は -0.21MPa 、水槽との差圧は -0.25MPa であった。

(3) 圧力変化条件⑦

条件⑦では、水圧の上昇とともにシール室 a の圧力の上昇がみられ差圧は $+0.12\text{MPa}$ となったが、水圧が 0.47MPa のときにシール室 b との差圧 -0.09MPa が保たれ、シール室への水の流入やテールグリースの流出はみられなかった。

7.2 初期圧 0.30MPa (図 18)

(1) 圧力変化条件②

条件②では、シール室 b のグリース圧を 0.30MPa から徐々に上げた結果、0.40MPa となるとシール室から水槽へテールグリース

が流出した。シール室 a との差圧は -0.04MPa 、水槽との差圧は -0.13MPa であった。

(2) 圧力変化条件⑤

条件⑤では、シール室 a のグリース圧を 0.30MPa から徐々に上げた結果、0.55MPa となるとシール室から水槽へテールグリースが流出した。シール室 b との差圧は -0.26MPa 、水槽との差圧は -0.25MPa であった。

(3) 圧力変化条件⑧

条件⑧では、水圧の上昇とともにシール室 a の圧力の上昇がみられ差圧は $+0.12\text{MPa}$ となったが、水圧が 0.49MPa のときにシール室 b との差圧 -0.10MPa が保たれ、シール室への水の流入やテールグリースの流出はみられなかった。

7.3 初期圧 0.40MPa (図 19)

(1) 圧力変化条件③

条件③では、シール室 b のグリース圧を 0.40MPa から徐々に上げた結果、0.60MPa となるとシール室から水槽へテールグリースが流出した。シール室 a との差圧は -0.03MPa 、水槽との差圧は -0.19MPa であった。

(2) 圧力変化条件⑥

条件⑥では、シール室 a のグリース圧を 0.40MPa から徐々に上げた結果、0.65MPa となるとシール室から水槽へテールグリースが流出した。シール室 b との差圧は -0.30MPa 、水槽との差圧は -0.25MPa であった。

(3) 圧力変化条件⑨

条件⑨では、水圧の上昇とともにシール室 a の圧力の上昇がみられ差圧は $+0.11\text{MPa}$ となったが、水圧が 0.46MPa のときにシール室 b との差圧 0.11MPa が保たれ、シール室への水の流入やテールグリースの流出はみられなかった。

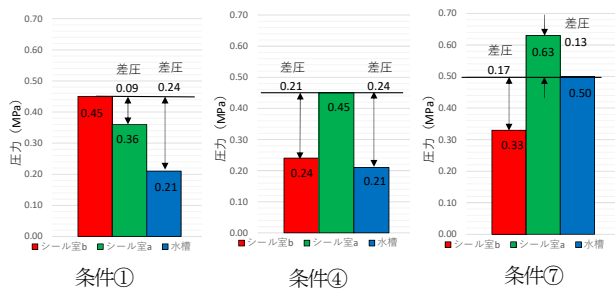


図 13 試験結果 (ケース 3 条件①,④,⑦)

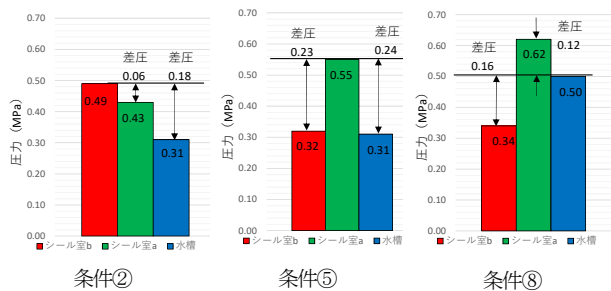


図 14 試験結果 (ケース 3 条件②,⑤,⑧)

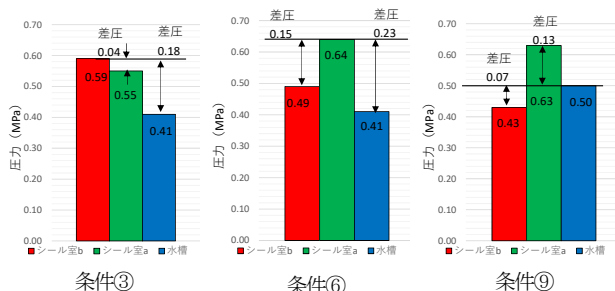


図 15 試験結果 (ケース 3 条件③,⑥,⑨)

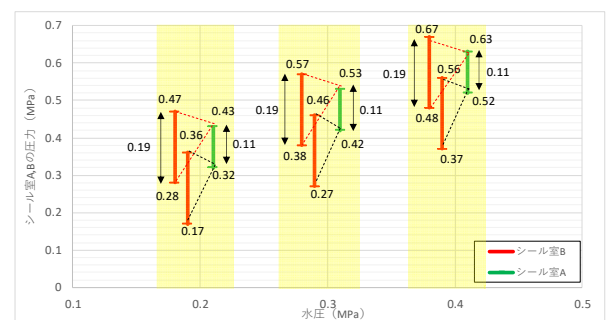


図 16 各シール室の上限値, 下限値 (ケース 3)

7.4 ケース 4 のまとめ

実験ケース 4 の圧力変化条件①～⑨の実験の結果、各水圧（裏込め注入圧）におけるシール室 a, b の圧力の上限値と下限値を設定すると図 20 のとおりとなる。

a) シール室 a

シール室 a の圧力の上限値は、各水圧に圧力変化条件④, ⑤, ⑥における水槽との差圧の中で最も差圧の小さい条件④, ⑤の値を加えた値とした。

$$\text{シール室 a 上限値} = \text{水圧} + 0.24\text{MPa}$$

例えば、水圧 0.20MPa では $0.20\text{MPa} + 0.24\text{MPa} = 0.44\text{MPa}$ とし、同様に水圧 0.30MPa では 0.54MPa、水圧 0.40MPa では 0.64MPa とした。

シール室 a の圧力の下限値は、各水圧に圧力変化条件⑦, ⑧, ⑨における水槽との差圧の中で最も差圧の小さい条件⑨の値とした。

$$\text{シール室 a 下限値} = \text{水圧} + 0.11\text{MPa}$$

例えば、水圧 0.20MPa では $0.20\text{MPa} + 0.11\text{MPa} = 0.31\text{MPa}$ とし、同様に水圧 0.30MPa では 0.41MPa、水圧 0.40MPa では 0.51MPa とした。

b) シール室 b

シール室 b における圧力の上限値は、各シール室 a の圧力に圧力変化条件①, ②, ③におけるシール室 a との差圧の中で最も差圧の小さい条件③の値を加えた値とした。

$$\text{シール室 b 上限値} = \text{シール室 a 圧力} + 0.03\text{MPa}$$

シール室 a の圧力に従いシール室 b の圧力の上限値が変化する。例えば、シール室 a の圧力が上限値の場合、水圧 0.20MPa では $0.44\text{MPa} + 0.03\text{MPa} = 0.47\text{MPa}$ となり、同様に水圧 0.30MPa では 0.57MPa、水圧 0.40MPa では 0.67MPa となる。しかし、シール室 a の圧力が下限値の場合、水圧 0.20MPa では $0.32\text{MPa} + 0.03\text{MPa} =$

0.35MPa となり、同様に水圧 0.30MPa では 0.45MPa、水圧 0.40MPa では 0.55MPa となる。

シール室 b における圧力の下限値は、各シール室 a の圧力に圧力変化条件④, ⑤, ⑥におけるシール室 a との差圧の中で最も差圧の小さい条件④の値を引いた値とした。

$$\text{シール室 b 下限値} = \text{シール室 a 圧力} - 0.21\text{MPa}$$

シール室 a の圧力に従いシール室 b の圧力の下限値も変化する。例えば、シール室 a の圧力が上限値の場合、水圧 0.20MPa では $0.44\text{MPa} - 0.21\text{MPa} = 0.23\text{MPa}$ となり、同様に水圧 0.30MPa では 0.33MPa、水圧 0.40MPa では 0.43MPa となる。しかし、シール室 a の圧力が下限値の場合、水圧 0.20MPa では $0.32\text{MPa} - 0.21\text{MPa} = 0.11\text{MPa}$ となり、同様に水圧 0.30MPa では 0.21MPa、水圧 0.40MPa では 0.31MPa となる。

8. 考察

実験ケース 1～4 により得られたシール室 a, b の上限値、下限値をまとめると表 4 のとおりとなる。

8.1 ケース 1 とケース 2 の比較

実験ケース 1（偏心なし、リング体なし）と実験ケース 2（偏心あり、リング体なし）の結果を次のように考察する。

(1) シール室 a

シール室 a の上限値は、ケース 1 では水圧+0.09MPa となったが、ケース 2 では水圧+0.10MPa となり同程度の値となった。

シール室 a の下限値は、ケース 1 では水圧+0.05MPa となったが、ケース 2 では水圧+0.05MPa となり同じ値となった。

したがって、シール室 a ではセグメントが偏心することによるシール室内の圧力への影響はみられなかった。

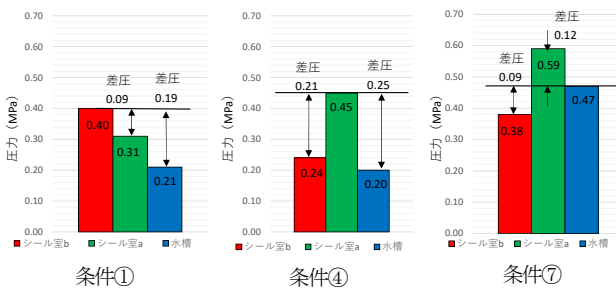


図 17 試験結果（ケース 4 条件①,④,⑦）

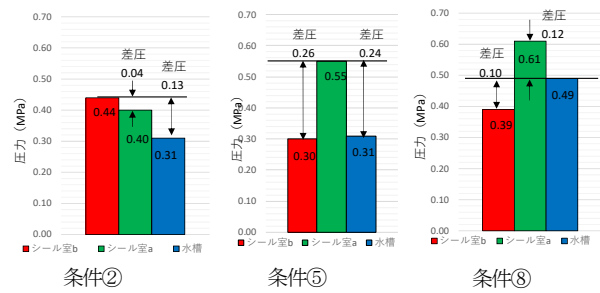


図 18 試験結果（ケース 4 条件②,⑤,⑧）

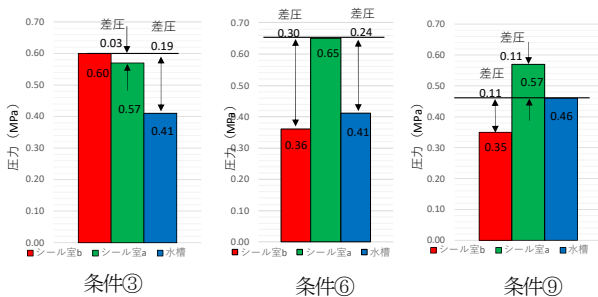


図 19 試験結果（ケース 4 条件③,⑥,⑨）

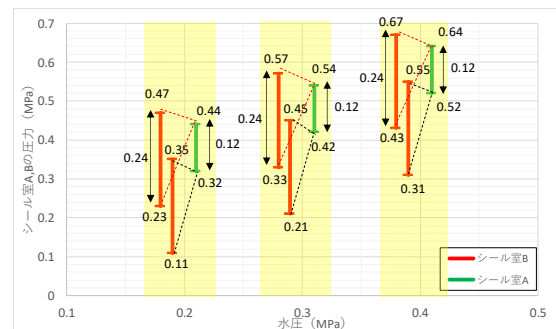


図 20 各シール室の上限値、下限値（ケース 4）

表4 シール室 a, b の圧力管理値

ケース	偏心	リング体	対象箇所	上限値	下限値
				MPa	MPa
1	なし	なし	シール室 a	水圧+0.09	水圧+0.05
2	あり	なし		水圧+0.10	水圧+0.05
3	なし	あり		水圧+0.23	水圧+0.12
4	あり	あり		水圧+0.24	水圧+0.11
ケース	偏心	リング体	対象箇所	上限値	下限値
				MPa	MPa
1	なし	なし	シール室 b	シール室 a 圧力+0.08	シール室 a 圧力-0.07
2	あり	なし		シール室 a 圧力+0.04	シール室 a 圧力-0.09
3	なし	あり		シール室 a 圧力+0.04	シール室 a 圧力-0.15
4	あり	あり		シール室 a 圧力+0.03	シール室 a 圧力-0.21

(2) シール室 b

(2) シール室 b

シール室 b の上限値は、ケース 1 では水圧+0.08MPa となったが、ケース 2 では水圧+0.04MPa となり同程度の値となった。

シール室 b の下限値は、ケース 1 では水圧-0.07MPa となったが、ケース 2 では水圧-0.09MPa となり同程度の値となった。

したがって、シール室 b でもセグメントが偏心することによるシール室内の圧力への影響はみられなかった。

シール室 b の上限値は、ケース 3 では水圧+0.04MPa となったが、ケース 4 では水圧+0.03MPa となり同程度の値となった。

シール室 b の下限値は、ケース 3 では水圧-0.15MPa となったが、ケース 4 では水圧-0.21MPa となり同程度の値となった。

したがって、シール室 b でもセグメントが偏心することによる影響はみられなかった。

8.2 ケース 1 とケース 3 の比較

実験ケース 1 (偏心なし, リング体なし) と実験ケース 3 (偏心なし, リング体あり) の結果を次のように考察する。

(1) シール室 a

シール室 a の上限値は、ケース 1 では水圧+0.09MPa となったが、ケース 3 では水圧+0.23MPa となりケース 3 の上限値が高くなった。

シール室 a の下限値は、ケース 1 では水圧+0.05MPa となったが、ケース 3 では水圧+0.13MPa となった。また、両ケースとも下限値が水圧よりも高くなった。

したがって、シール室 a ではリング体テールシールの締め付け効果により上限値が上昇することがわかった。

(2) シール室 b

シール室 b の上限値は、ケース 1 では水圧+0.08MPa となったが、ケース 3 では水圧+0.04MPa となり同程度の値となった。

シール室 b の下限値は、ケース 1 では水圧-0.07MPa となったが、ケース 3 では水圧-0.15MPa となりケース 3 の下限値が低くなった。

したがって、シール室 b ではリング体テールシールの締め付け効果により下限値が低下することがわかった。

8.3 ケース 3 とケース 4 の比較

実験ケース 3 (偏心なし, リング体あり) と実験ケース 4 (偏心あり, リング体あり) の結果を次のように考察する。

(1) シール室 a

シール室 a の上限値は、ケース 3 では水圧+0.23MPa となったが、ケース 4 では水圧+0.24MPa となり同程度の値となった。

シール室 a の下限値は、ケース 3 では水圧+0.12MPa となったが、ケース 4 では水圧+0.11MPa となり同程度の値となった。

したがって、シール室 a ではセグメントが偏心することによるシール室内の圧力への影響はみられなかった。

9. おわりに

実証実験により、以下のことが明らかとなった。

- ①シール室 b は、上限値と下限値の間の管理幅でテールグリース圧を管理することで、テールグリースの漏出と水（裏込め注入材）の流入を抑えることができる。
- ②シール室 a は、上限値と下限値の間の管理幅でテールグリース圧を管理することで、テールグリースの漏出を抑えることができる。
- ③20mm のセグメントの偏心ではシール室内の圧力の上限値、下限値への影響はみられない。
- ④リング体テールシールを設置すると緊張体の締め付け効果により、シール室内の圧力の上限値の上昇と下限値の低下がみられ、シール室から水槽へのテールグリースの漏出抵抗性が向上する。

以上の結果から、実証実験によりテールグリース圧力を管理幅の範囲で維持することで、テールグリースの裏込め注入層への漏出と裏込め注入材のシール室内への流入を抑えることができることを確認し、本システムの有効性を確認することができた。

今後は、実際のシールド工事において本システムを適用し、本システムの有効性をさらに検証していく予定である。