

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

中山 卓人¹・小林 修²・近藤 紀夫³・加島 豊⁴

¹正会員 戸田建設株式会社 土木工事技術部 (〒104-0032 東京都中央区八丁堀2-8-5)

E-mail: takuto.nakayama@toda.co.jp

²正会員 戸田建設株式会社 土木工事技術部 (〒104-0032 東京都中央区八丁堀2-8-5)

E-mail: osamu.kobayashi2@toda.co.jp

³正会員 日本シールドコンサルタント株式会社 海外コンサルタント部 (〒116-0013 東京都荒川区西日暮里2-26-2)

E-mail: kondou.n@nccnet.co.jp

⁴日本シールドコンサルタント株式会社 技術統括本部 (〒116-0013 東京都荒川区西日暮里 2-26-2)

E-mail: yutakakashima@gmail.com

シールドのテールシールでは、複数段装備したテールシール間（以下、シール室と記述）に充填するテールシール用グリース（以下、テールグリースと記述）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、シール室内に充填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。これに対して、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浸入を防止する新たなシステムを開発した。本開発では、その有効性を確認するための実証実験を実施し、裏込め注入圧に対してシール室内の適正な圧力の範囲を確認し、シール室から裏込め注入層へのテールグリースの漏出の防止、または裏込め注入層からシール室への裏込め注入材の流入の防止が可能であることを確認した。

Key Words: shield tunneling, tail seals, grase for tail sealing, backfill grouting, water leakage

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、シール室内に充填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、裏込め注入厚が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の間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

(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、テールシール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圧力 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) 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バ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。

3. 実証実験の概要

(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压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。

(2) 実験の概要

a) 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

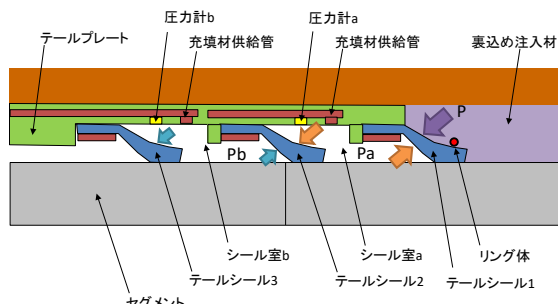


図-1 本システムの圧力管理イメージ

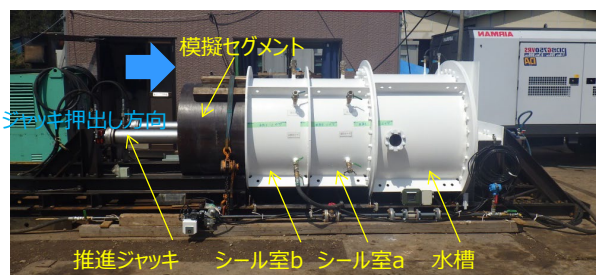


写真-1 実験装置

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。実験装置内に水压を作用させ、最大で0.5MPaの水圧（裏込め注入圧）を作用できる構造とした。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。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。

b) 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。

c) 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。

d) 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。

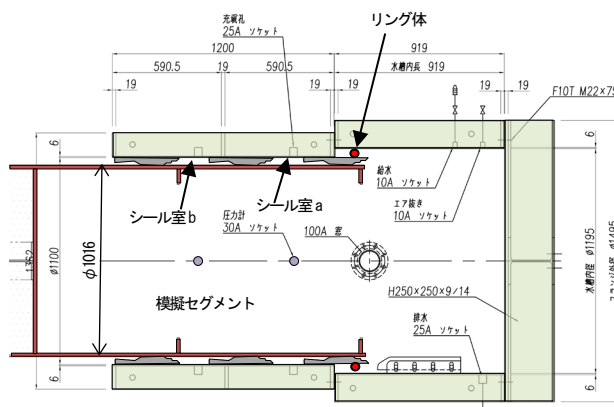


図-2 実験装置図



写真-2 グリースポンプ

- ・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。

e) 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。実験時はワイヤーロープの伸びから、テールブラシに作用するワイヤーロープの緊張力とワイヤーブラシに作用する圧力を求めた。算定方法は、以下のとおりである。

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

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

ここで、 $\angle L$ ：ワイヤーロープの伸び(mm)

W ：ワイヤーロープの緊張力(N)

L ：ワイヤーロープの長さ(mm)

E ：ワイヤーロープの弾性係数(N/mm²)

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

(ワイヤー構成：6×7)

A ：ワイヤーロープの断面積(mm²)

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

n ：ワイヤーロープの本数(本)

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

ここで、 P ：ワイヤーロープによりテールシールに作用する圧力(Pa)

r ：リング体ワイヤーロープの半径(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ーロープの緊張力を求めると表-1のとおりとなる。

(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シ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

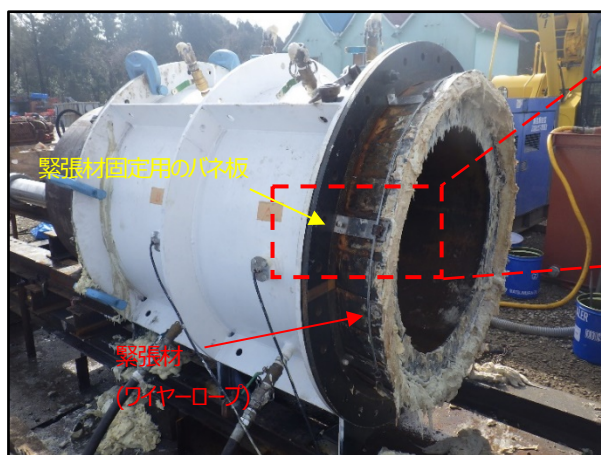


写真-3 リング体テールシール取付状況

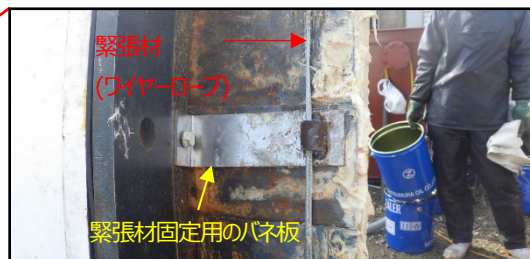


写真-4 リング体テールシール

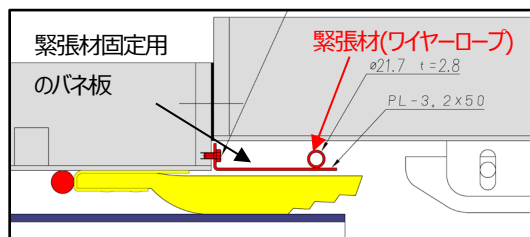


図-3 リング体テールシール固定治具

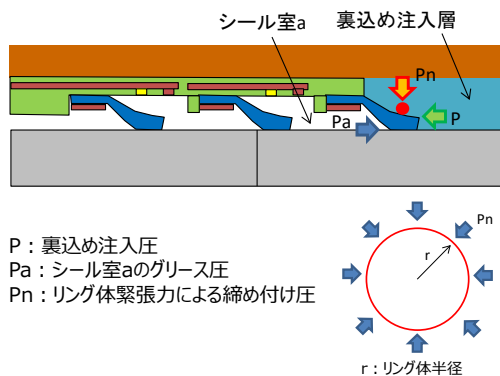


図-4 リング体テールシールの緊張力概要図

表-1 リング体テールシールの緊張力

ワイヤーの伸び	ワイヤーの長さ	弾性係数	断面積	本数
$\angle L$ (mm)	L (mm)	E (N/mm ²)	A (mm ²)	n (本)
42	3500	98100	4.1	2

緊張力	リング体半径	締付幅	圧力
W (kN)	r (mm)	b (mm)	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

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

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。

a) 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の圧力を上昇させ、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。

b) 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の圧力を上昇させ、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。

c) 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

【実験ケース1（偏心なし、リング体なし）】

(1) 初期圧0.20MPa（図-5）

a) 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。

b) 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。

c) 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。

(2) 初期圧0.30MPa（図-6）

d) 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。

e) 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。

f) 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。

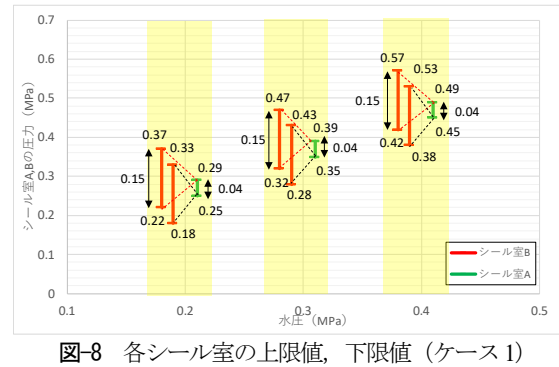
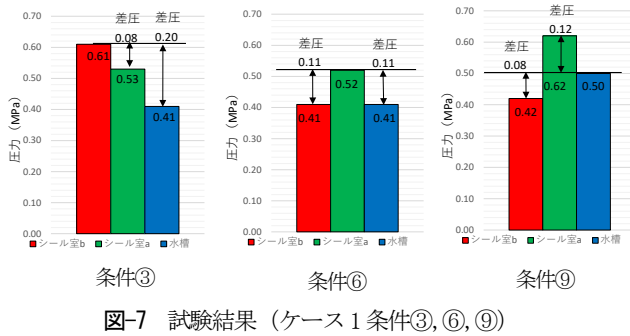
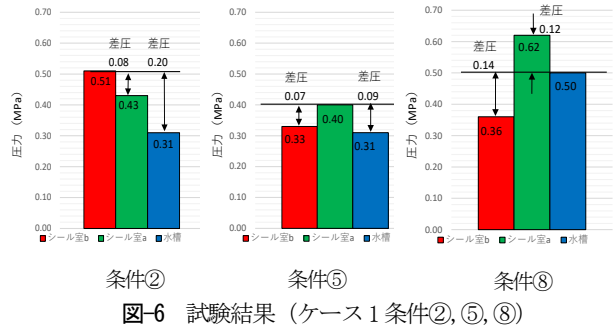
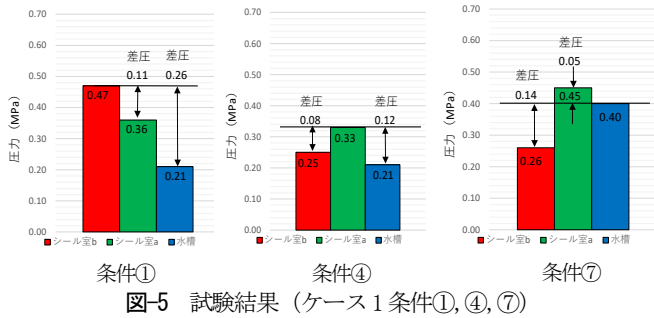
(3) 初期圧0.40MPa（図-7）

g) 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。

h) 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



ヘ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。

i) 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) 実験ケース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。

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。

$$\text{シール室a上限値} = \text{水圧} + 0.09\text{MPa} \quad (5)$$

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。

$$\text{シール室a下限値} = \text{水圧} + 0.05\text{MPa} \quad (6)$$

例えば、水圧0.20MPaでは $0.20\text{MPa} + 0.05\text{MPa} = 0.25\text{MPa}$ とし、同様に水圧0.30MPaでは0.35MPa, 水圧0.40MPaでは0.45MPa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。

$$\text{シール室b上限値} = \text{シール室a圧力} + 0.08\text{MPa} \quad (7)$$

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 $0.29\text{MPa} + 0.08\text{MPa} = 0.37\text{MPa}$ 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 $0.25\text{MPa} + 0.08\text{MPa} = 0.33\text{MPa}$ 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。

$$\text{シール室b下限値} = \text{シール室a圧力} - 0.07\text{MPa} \quad (8)$$

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 $0.29\text{MPa} - 0.07\text{MPa} = 0.22\text{MPa}$ 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 $0.25\text{MPa} - 0.07\text{MPa} = 0.18\text{MPa}$ 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。

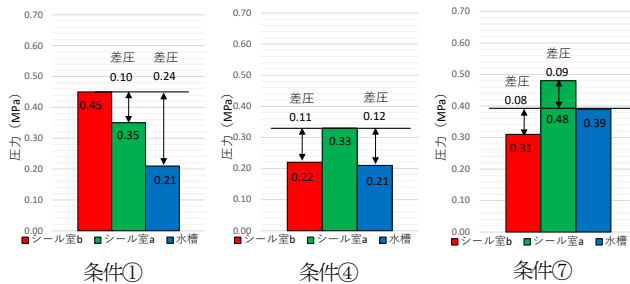


図-9 試験結果（ケース2条件①, ④, ⑦）

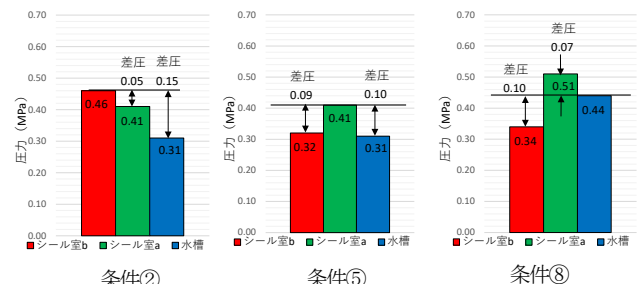


図-10 試験結果（ケース2条件②, ⑤, ⑧）

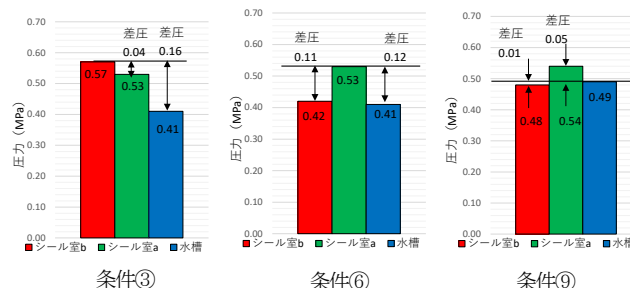


図-11 試験結果（ケース2条件③, ⑥, ⑨）

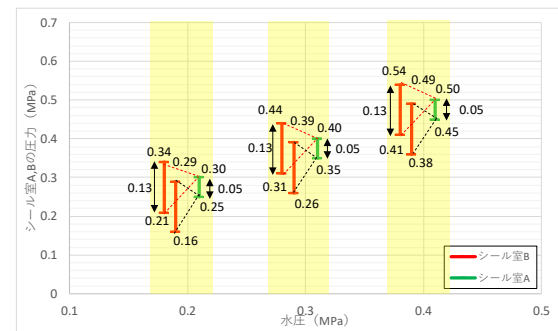


図-12 各シール室の上限値, 下限値（ケース2）

5. 実証実験の結果

【実験ケース2（偏心あり，リング体なし）】

(1) 初期圧0.20MPa（図-9）

a) 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．

b) 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．

c) 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．

(2) 初期圧0.30MPa（図-10）

d) 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．

e) 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．

f) 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．

(3) 初期圧0.40MPa（図-11）

g) 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．

h) 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．

i) 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との差圧が-0.01MPaとなりシールド機内への水の流出がみられた．

(4) 実験ケース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-12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。

$$\text{シール室a上限値} = \text{水圧} + 0.10\text{MPa} \quad (9)$$

例えば、水圧0.20MPaでは $0.20\text{MPa} + 0.10\text{MPa} = 0.30\text{MPa}$ 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。

$$\text{シール室a下限値} = \text{水圧} + 0.05\text{MPa} \quad (10)$$

例えば、水圧0.20MPaでは $0.20\text{MPa} + 0.05\text{MPa} = 0.25\text{MPa}$ とし、同様に水圧0.30MPaでは0.35MPa、水圧0.40MPaでは0.45MPa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。

$$\text{シール室b上限値} = \text{シール室a圧力} + 0.04\text{MPa} \quad (11)$$

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 $0.30\text{MPa} + 0.04\text{MPa} = 0.34\text{MPa}$ 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 $0.25\text{MPa} + 0.04\text{MPa} = 0.29\text{MPa}$ 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との差圧をの中で最も差圧の小さい条件⑤の値を引いた値とした。

$$\text{シール室b下限値} = \text{シール室a圧力} - 0.09\text{MPa} \quad (12)$$

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

【実験ケース3（偏心なし、リング体あり）】

(1) 初期圧0.20MPa（図-13）

a) 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。

b) 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。

c) 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。

(2) 初期圧0.30MPa（図-14）

d) 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。

e) 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。

f) 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。

(3) 初期圧0.40MPa（図-15）

g) 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。

h) 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

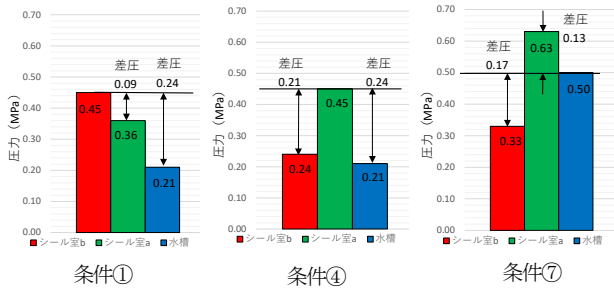


図-13 試験結果（ケース3条件①, ④, ⑦）

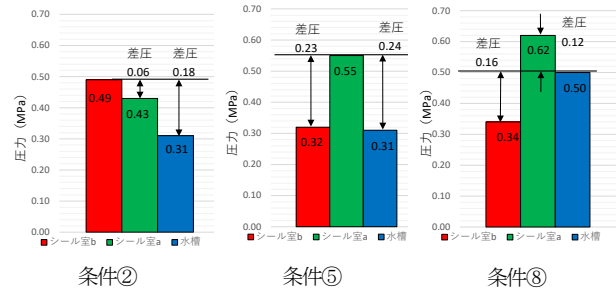


図-14 試験結果（ケース3条件②, ⑤, ⑧）

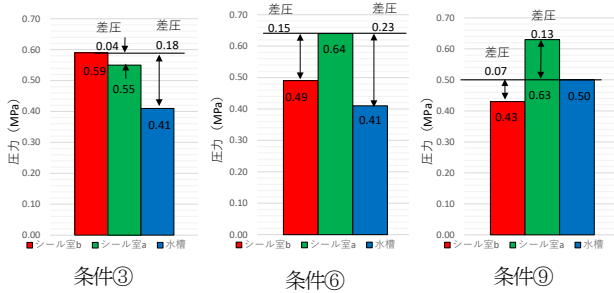


図-15 試験結果（ケース3条件③, ⑥, ⑨）

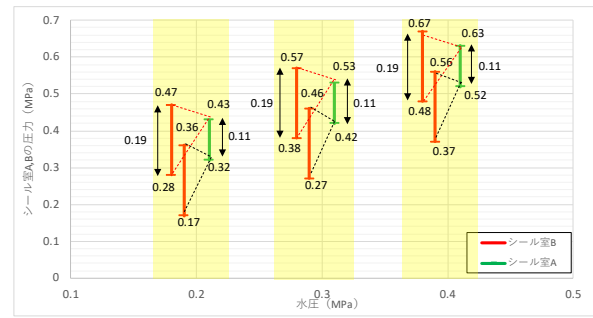


図-16 各シール室の上限値, 下限値（ケース3）

ヘ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。

i) 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となりシールド機内への水の流出がみられた。

(4) 実験ケース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。

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。

$$\text{シール室a上限値} = \text{水圧} + 0.23\text{MPa} \quad (13)$$

例えば、水圧0.20MPaでは0.20MPa + 0.23MPa = 0.43MPa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。

$$\text{シール室a下限値} = \text{水圧} + 0.12\text{MPa} \quad (14)$$

例えば、水圧0.20MPaでは0.20MPa + 0.12MPa = 0.32MPaとし、同様に水圧0.30MPaでは0.42MPa、水圧0.40MPaでは0.52MPa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。

$$\text{シール室b上限値} = \text{シール室a圧力} + 0.04\text{MPa} \quad (15)$$

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0.43MPa + 0.04MPa = 0.47MPa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0.32MPa + 0.04MPa = 0.36MPa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との差圧をの中で最も差圧の小さい条件⑥の値を引いた値とした。

$$\text{シール室b下限値} = \text{シール室a圧力} - 0.15\text{MPa} \quad (16)$$

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0.43MPa - 0.15MPa = 0.28MPa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0.32MPa - 0.15MPa = 0.17MPa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。

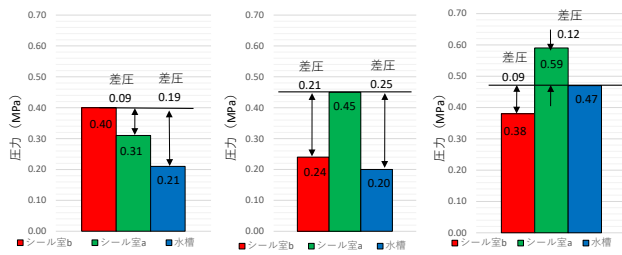


図-17 試験結果 (ケース4条件①, ④, ⑦)

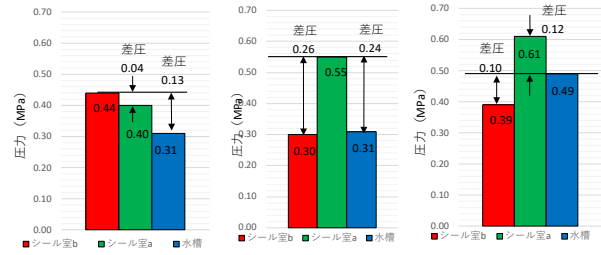


図-18 試験結果 (ケース4条件②, ⑤, ⑧)

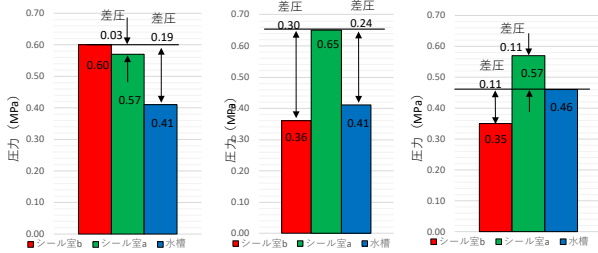


図-19 試験結果 (ケース4条件③, ⑥, ⑨)

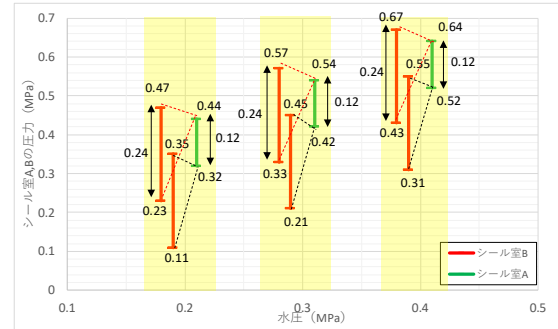


図-20 各シール室の上限値, 下限値 (ケース4)

7. 実証実験の結果

【実験ケース4 (偏心あり, リング体あり)】

(1) 初期圧0.20MPa (図-17)

a) 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。

b) 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。

c) 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+0.12MPa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。

(2) 初期圧0.30MPa (図-18)

d) 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、0.44MPa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。

e) 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。

f) 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0.49MPa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。

(3) 初期圧0.40MPa (図-19)

g) 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。

h) 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。

i) 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+0.11MPa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

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 MPa	下限値 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 MPa	下限値 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

なかった。

(4) 実験ケース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。

$$\text{シール室a上限値} = \text{水圧} + 0.24\text{MPa} \quad (17)$$

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。

$$\text{シール室a下限値} = \text{水圧} + 0.11\text{MPa} \quad (18)$$

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。

$$\text{シール室b上限値} = \text{シール室a圧力} + 0.03\text{MPa} \quad (19)$$

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 $0.32\text{MPa} + 0.03\text{MPa} = 0.35\text{MPa}$ 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。

$$\text{シール室b下限値} = \text{シール室a圧力} - 0.21\text{MPa} \quad (20)$$

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。

(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。

a) 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。

b) 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。

(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。

a) 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のほうが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。

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。

b) 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のほうが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。

(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。

a) 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。

b) シール室b

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。

9. まとめ

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，実証実験によりシール室内の圧力を上限値と下限値の範囲の中で維持することで，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活用し，本システムの有効性をさらに検証していく予定である。

謝辞：本開発及び実験全体について小山幸則立命館大学上席研究員に貴重なご意見，ご指導をいただきました。厚く御礼を申し上げます。

(2020. 8. 7 受付)

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

Takuto NAKAYAMA, Osamu KOBAYASHI, Norio KONDO and
Yutaka KASHIMA

In the tail seals of the shield, the grease for the tail seals to be filled in the tail seal chamber is injected at the pressure of backfill grouting pressure $+\alpha$ or water pressure $+\alpha$, and the pressure is used to inject the backfill grouting and groundwater with sand into the shield. In this case, the grease filled in the seal chamber may leak and mix into the backfill grouting. On the other hand, we have developed a new system that prevents the grease from penetrating into the backfill grouting by properly maintaining the pressure of the grease. In this development, a demonstration experiment was conducted to confirm the proper pressure range of the tail seals and backfill grouting. As the result, it was confirmed that it is possible to prevent the leakage of the grease from the seal chamber to the backfill grouting layer and the backfill grouting from flowing into the seal chamber from the backfill grouting layer.