

耐高水圧セグメント用シール材の研究・開発

Research and Development of Segment Seals against High Hydraulic Pressure

野本 寿*
Toshi Nomoto

増田 修一**
Shūichi Masuda

渡辺 徹**
Tōru Watanabe

新藤 敏郎***
Toshirō Shindō

要 約

本研究は、地下水圧10kgf/cm²の地盤条件を対象とした大断面シールドのセグメント用シール材（以下、シール材という）について研究開発を行ったものである。最初の試験体として加硫ゴムタイプを選定し、止水実験などを行った結果、断面形状、セグメントコーナ部の止水効果を向上させる形状などについて2、3の知見を得ることができた。

目 次

- §1. はじめに
- §2. 開発計画
- §3. 材質の選定
- §4. 断面形状の検討
- §5. 基本性能確認試験
- §6. 大型止水試験
- §7. まとめ

§1. はじめに

近年のシールド工事は、河川・海底横断並びに深層化、大断面化などに伴う高水圧下といった、厳しい施工条件で計画されることが多くなっている。

このような条件下において、セグメント継手からの漏水防止は、工事の安全並びにトンネル完成後の使用目的に対して不可欠である。この漏水防止には、シール材の止水能力の向上が最大の課題となる。

本研究は、高水圧下（10kgf/cm²）施工を考慮した大断面シールドのシール材の研究開発を行うものである。材質は、従来からシール材に使用されている、(1)非加硫ブチルゴムタイプ、(2)加硫ゴムタイプ、(3)複合ゴムタイプ、(4)水膨潤ゴムタイプなどがあり、性能比較の観点からは

全材質で試験が必要となるが、時間的制約もあり、今回は加硫ゴムについて試験をすることにした。Fig. 1 に開発フローチャートを示す。

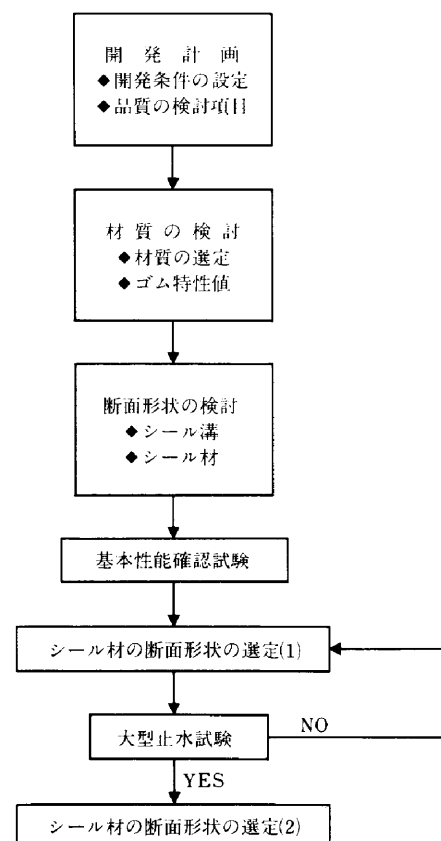


Fig.1 開発フローチャート

*技術研究部土木技術課副課長
**技術研究部土木技術課係長
***技術研究部土木技術課

§ 2. 開発計画

2-1 開発条件の設定

シール材の開発に当たっての条件は、以下のとおり設定した。

- (1) 耐水圧 10kgf/cm² (最大目開き量=10mm)
- (2) 目標耐用年数 100年

2-2 品質の検討項目

要求される品質は開発条件に示したとおり、耐高水圧で、かつ耐用年数も非常に長いものである。これらをふまえて、シール材に要求される品質の検討項目を、(1)止水性、(2)耐外力性、(3)耐久性、(4)施工性の4項目に区分し検討を行った。品質の検討項目を Table 1 に示す。

2-3 止水機構

止水機構は下記の3点を基準とした。

- (1) ガスケットの止水原理に基づく止水機構 (材質、圧縮率)。

セグメント間で圧縮状態にあるシール材の圧縮応力は、作用水圧より常に大きいことが止水の上で必要である。

- (2) シール材幅による止水機構

シール材の接面面積が大きいほど、止水効果は向上する。

- (3) シール溝による止水機構

セグメントにシール溝を設けることは、止水効果を向上させることができるとともに、シール材がジャッキ推力やセグメントボルト締付け力により圧縮されたとき、弾性変形領域を確保するためのスペースともなる。

§ 3. 材質の選定

最初の供試体としては、実績からみた耐久性の優位か

ら、加硫ゴムを選定して試験を行うことにした。シール材としての加硫ゴム特性値は、沈埋トンネルのガスケットに使用されているゴム特性値を参考とした。Table 2 にゴム特性値を示す。

Table 2 ゴム特性値

試験項目		特性値
引張試験	引張強さ	kgf/cm ²
	伸び	%
引張強さ		130以上
伸び		450以上
老化試験		
条件 70℃×168hours		
引張強さ変化率		%
伸び変化率		%
ゴム硬さ変化		度
引張強さ変化率		20以下
伸び変化率		20以下
ゴム硬さ変化		8以下
圧縮永久歪み試験		
条件 70℃×22hours		
永久歪み		%
永久歪み		20以下
ゴム硬度		度
ゴム硬度		33～60
圧縮率(使用範囲)		%
圧縮率(使用範囲)		10～50

§ 4. 断面形状の検討

4-1 シール溝

4-1-1 シール溝の深さ及びシール材の厚さ

シール溝の深さを決めるに当たっては、ゴム特性値のうち圧縮率を参考とした。

しかし、シール材はガスケットと違い、シールドジャッキによる繰り返し荷重が加わることから、圧縮率の範囲を10%～40%とした。この圧縮率とシール材の厚さ及び目開き量の関係は(1)式で表される。

Table 1 品質の検討項目

区 分	検 討 項 目	
耐 水 性	高圧を止水する	地下水圧を止水する、裏込めモルタルの漏出を防止する
	セグメントの組立誤差を吸収する	段差、目違い目開きに追従する
耐 外 力 性	ジャッキ推力に耐える	ジャッキ推力、繰り返し推力及びボルト締付け力に耐える
耐 久 性	耐久性がある	耐水性、耐海水性、耐候性、耐アルカリ性、耐薬品性、耐バクテリア性、耐熱性、耐寒性
	セグメントの変位、変形に追従する	目地縮小、目地拡大及びせん断変形に追従する
施 工 性	取り付けが容易である	垂れや変形が無い、種類と工程数が少ない
	セグメントの組立への影響がない	セグメント組立に支障を及ぼさない
	覆工への影響がない	セグメントのクラック発生を防止する
	接着性に優れている	セグメントとの接着性が良い

$$\text{圧縮率} = \frac{m - h - w/2}{m} \times 100 (\%) \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに m : 圧縮前のシール材の厚さ (片側)

h : シール溝の深さ (片側)

w : 目開き量 (Fig. 2 参照)

今、目開き量 0 mm のときの圧縮率を 40%、目開き量 10 mm のときの圧縮率を 10% とすると式(1)から、シール材厚さは 16.7 mm、シール溝深さは 10.0 mm となる。

4-1-2 シール溝の幅

シール溝の幅を検討するに当っては、実施工時におけるセグメントシール溝の製作を考慮し、Fig. 3 に示す断面形状とした。

4-2 シール材

シール材形状は、下記に示す(1)~(3)の条件を考慮して検討した。選出した各種断面形状を Fig. 4 に示す。

- (1) シール材は、圧縮による体積変化はないものとする。
(ポアソン比=0.5)
- (2) シール材の断面積は、シール溝の断面積とほぼ同じにする。
- (3) シール材の厚さは、圧縮率を 10%~40% の範囲としたことから 16.7 mm とする。

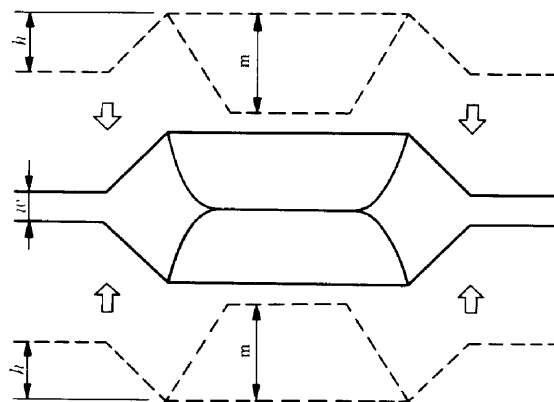


Fig.2 シール材の厚さ、シール溝の深さ、目開き量の関係

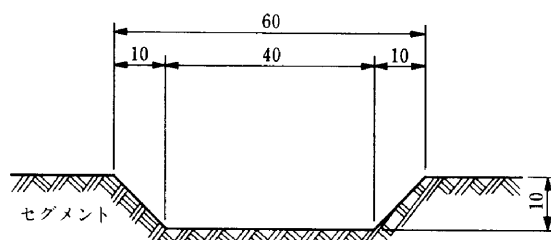
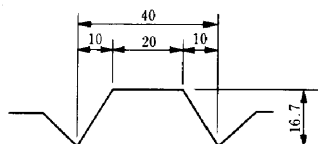
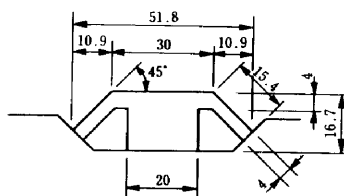


Fig.3 シール溝断面形状

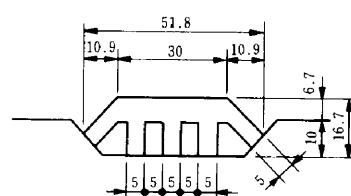
断面形状番号 No.1



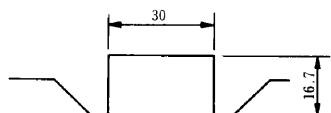
断面形状番号 No.5



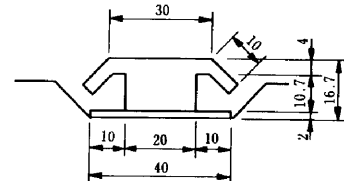
断面形状番号 No.9



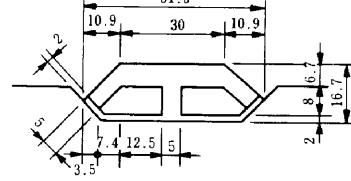
断面形状番号 No.2



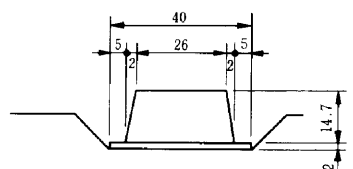
断面形状番号 No.6



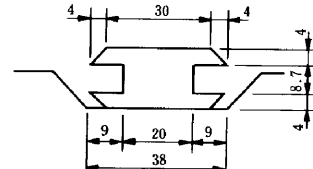
断面形状番号 No.10



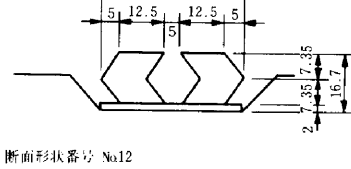
断面形状番号 No.3



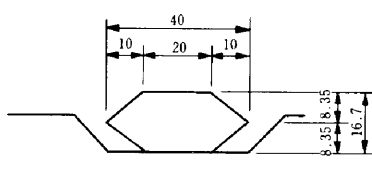
断面形状番号 No.7



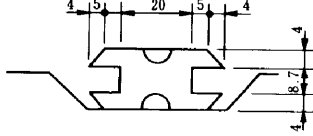
断面形状番号 No.11



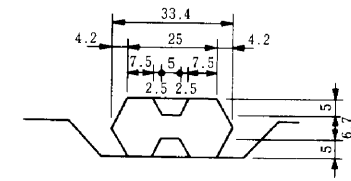
断面形状番号 No.4



断面形状番号 No.8



断面形状番号 No.12



供試体の長さ $L=250\text{mm}$
シール溝の断面積 $S=500\text{mm}^2$

Fig.4 シール材の検討形状

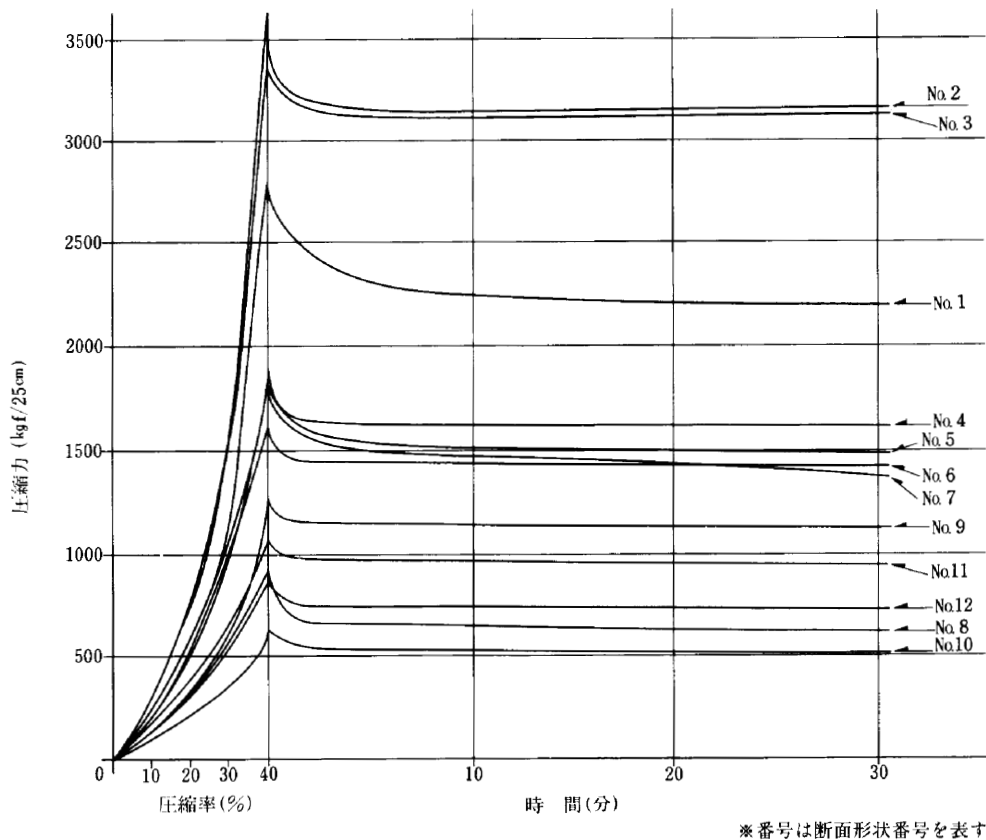


Fig.5 圧縮試験及び応力緩和試験

§ 5. 基本性能確認試験

前述した材質及び断面形状のシール材について基本性能確認試験を行った。試験内容は、以下に示す(1)～(3)の試験項目とした。

- (1) 圧縮試験
- (2) 応力緩和試験
- (3) 基本止水性能試験

5-1 圧縮試験

供試体は Fig. 4 に示す断面形状とし、長さは $l=250$ mmとした。Fig. 5 に試験結果を示す。

5-2 応力緩和試験

試験方法は、圧縮試験同様の供試体をロードセルを配した圧縮面間に設置し、所定の圧縮率を保持する。そして、そのときの圧縮力の経時変化を測定する。経時変化は30分までを測定し、長期的な応力緩和の推定をすることとした。圧縮率40%のときの試験結果を Fig. 5 に示す。

長期的な応力緩和（耐久性）を表す1つの指標として次式が用いられている。

$$R\sigma = a - b \times \log t \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに

$$R\sigma: \text{圧縮力比} = \frac{\text{放置後の圧縮力}}{\text{初期の圧縮力}}$$

t : 定歪み下での放置時間（時間）

a, b : 係数

経過時間が20分及び30分の圧縮力から式(2)の係数 a, b を求め、100年後の圧縮応力を推定したところ、全ての形状で 10 kgf/cm^2 を越え、作用水圧（開発条件: 10 kgf/cm^2 ）より大きく、前述の止水機構の1つをクリアすることが推定できた。

5-3 基本止水性能試験

試験方法は、Fig. 6 に示す試験装置を用いてリング状に成形したシール材の圧縮率と最大止水圧の関係を測定するものである。

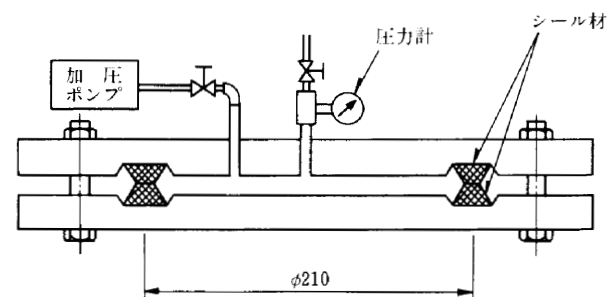


Fig.6 基本止水性能試験装置

各供試体の圧縮率10%における止水性能試験結果は、10kgf/cm²以上であった。

5-4 断面形状の選定

大型止水試験に用いるシール材の断面形状は、基本止水性能試験結果、シール材の製作及びセグメントへの貼付けの作業性などを総合的に判断し、No.1形状を基本とした。

§6. 大型止水試験

大型止水試験は、セグメント組立を考慮した試験である。つまり、シール材を取り付けたセグメントを目開き量及び目違い量を変えて組み立て、止水性に関する評価を行うものである。

試験装置は内径1200mmの鋼製セグメントリングを2段重ねた圧力容器であり、装置内には水を充填して手動ポンプにより加圧するものである。

1リング当りのセグメント数は4ピースであり、幅は750mmである。セグメントのリング間ボルト位置及びピース間の締付量を変えることにより、リング間・ピース間の目開き量及び目違い量を変えて試験することができ

る。セグメントには、Fig. 3に示すシール溝が設けられている。また、セグメント1ピースに貼り付けるシール材は1段配置とし、シームレス加工されたものを使用する。Photo 1に試験装置を示す。

試験方法は、1kgf/cm²加圧すると10分間その圧力を保ち、漏水のないことを確認した後に次の加圧に移った。最大加圧力は10kgf/cm²以上とした。

形状については、基本止水性能試験で選定したNo.1断面形状のものを基本とし、その後、コーナ部の形状を順次改良して試験を行った。

大型止水試験に用いたシール材の断面形状を Table 3に、試験結果一覧表を Table 4に示す。

6-1 大型止水試験(1)

大型止水試験(1)に用いたシール材の断面形状は、Table 3に示す断面形状タイプ(以下タイプという) Iのものである。

試験結果は Table 4に示すとおりで、リング間及びピース間の目開き量が4mmのときの最大止水水圧は10kgf/cm²以上であった。しかし、リング間及びピース間の目開き量8mmのときの最大止水水圧は1kgf/cm²であり、それ以上の水圧ではセグメントコーナ部及びそれ以外の一般部で漏水を確認した。

基本止水性能試験と大型止水試験(1)の結果には、大き

な差があり、その原因は、目違い・シール変形状態及び圧縮率不足などにあると判断した。

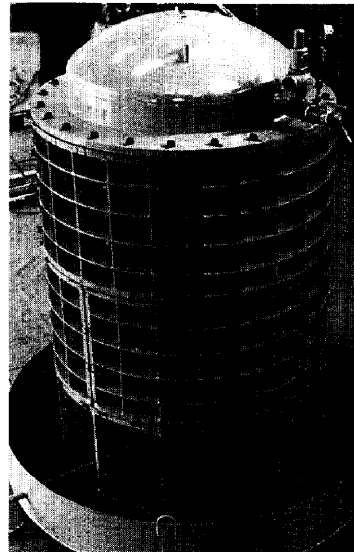


Photo 1 大型止水試験装置

Table 4 大型止水試験結果一覧表

止水試験 種 別	断面形状 タイプ	試 験 番 号	目開き量 (mm)		一般部の 圧縮率 (%)	最 大 止水水圧 (kgf/cm ²)	備 考
			ピース間	リング間			
大 型 止水試験 (1)	I	No. 1	4	4	29	10	
		No. 2	8	8	18	1	
大 型 止水試験 (2)	II	No. 3	8	8	26	10	
		No. 4	10	10	21	6	
大 型 止水試験 (3)	III	No. 5	10	10	21	10	
		No. 6	8	8	26	10	コーナ部硬度 を50°から38°に 変更
		No. 7	10	10	21	1	
	IV	No. 8	10	10	21	10	
		No. 9	8	8	26	10	
		No. 10	10	10	21	2	
	V	No. 11	10	10	21	7	
		No. 12	10	10	21	7	

6-2 大型止水試験(2)

大型止水試験(1)において満足すべき結果を得ることができなかった。そこで、大型止水試験(2)では、シール材の圧縮率を大きくすることにより止水効果の向上を図るために、シール材の厚さを19mmとした。シール材形状は Table 3に示すタイプIIである。また、コーナ部の変形による影響を除くために、セグメントリング間のコーナ部に厚さ2mm、幅10mm、長さ50mmのシール材と同質のテープ状シール材(以下、テープ状シール材という)を取り付け補強した。取付位置の説明図を Table 3のD部に示す。

Table 3 大型止水・水浸・鯨シール木材の開形状

[illegible]

試験結果は、Table 4 に示すとおりで、止水性能は、目開き量 8mm のとき最大止水圧が 10kgf/cm^2 以上であった。これ以上に目開き量を大きくしたときの漏水箇所はセグメントのコーナ部に集中し、それ以外の一般部には発生しなかった。従って、シール材の厚さを 2mm 増加させたことにより一般部の止水効果は向上したと判断できた。

6-3 大型止水試験(3)

大型止水試験(3)においては、セグメントコーナ部からの漏水原因に着目し、コーナ部のシール材形状について検討を加えることとした。

シール材の形状は、Table 3 に示すタイプⅢ、Ⅳ、Ⅴの 6 形状である。以下に各シール材の形状についての説明をする。

(1) タイプⅢについて

タイプⅢの一般部はタイプⅡと同形状であるが、セグメントコーナ部の漏水対策として、コーナ部の厚さを増加させて体積の増加を図った。

特に、試験番号 No. 6 及び No. 7 に用いたシール材は、コーナ部の硬度を 50 度から 38 度に変えたものである。

(2) タイプⅣについて

タイプⅣはタイプⅢに比べコーナ部の上面幅を広くしたものであるが、それによる体積増加を避けるために厚さを減少させたものである。また、試験番号 No. 8 には、タイプⅡと同様にテープ状シール材を取り付けたものである。

(3) タイプⅤについて

タイプⅤはコーナ部におけるセグメントピース間のシール厚さを増し、リング間は減じた形状とした。また、試験番号 No. 12 には、テープ状シール材を取り付けた。

以上、各形状について大型止水試験を行った結果、リング間及びピース間の目開き量 10mm のときの最大止水圧 10kgf/cm^2 を満足したものは試験番号 No. 5 及び No. 8 である。

6-4 考察

6-4-1 コーナ部形状

(1) タイプⅢについては、コーナ部の硬度を下げる(50~38度)止水効果は減少する。

このことは、止水機構(1)の圧縮応力の減少に原因があると考えられる。

(2) タイプⅣについては、テープ状シール材の効果が確認できた。

このことは、コーナ部における圧縮率の向上と変形の吸収が、テープ状シール材を取り付けることによって得られた結果と考えられる。

(3) タイプⅤについては、テープ状シール材の効果は確認できなかった。

このことは、コーナ部片側のみの圧縮率の増加が、シール材の変形に悪影響を与えたものと考えられる。

6-4-2 体積率

コーナ部における圧縮率は、計算式で求めることができない。そこでシール材の体積とシール溝空間の体積比(体積率)から、止水効果を検討することにした。試験番号 No. 1~No. 12 における、体積率と最大止水圧の関係を Fig. 7 に示す。なお、体積率は Fig. 7 の説明図に示す範囲で算定した。

この結果から、同一形状のシール材では体積率の高いほど止水圧が高くなることが分かる。しかし、形状別の体積率に注目すると、同一体積率でも止水圧に差があり、コーナ部の止水は体積率以外に形状による効果が大きいことが分かる。

6-4-3 一般部の圧縮率

Table 4 から一般部の圧縮率に着目すると、21~26% が止水性能に深く関係していることが分かる。このことは、基本止水性能試験と異なり、セグメント組立・コーナ部形状及び目違いの発生などの影響があるため、高い

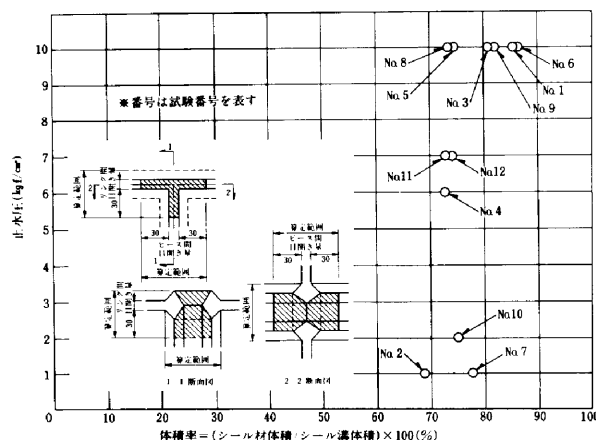


Fig.7 体積率と最大止水圧の関係

圧縮率が好結果をもたらしたと考える。従って、圧縮率を 21% 以上で計画することが止水性能向上のために有利と考えられる。この圧縮率を用いて、各目開き量に対するシール材厚さ及びシール溝深さを求めたものを Fig. 8 に示す。

6-4-4 FEM解析

コーナ部止水効果の減少をチェックするため、FEM 解析を試みた。シール材厚さ及びシール溝深さについては Fig. 8 を参考とし、各々 27mm, 16mm とした。

解析に当たっては、コーナ部を 2 次元平面応力問題とし

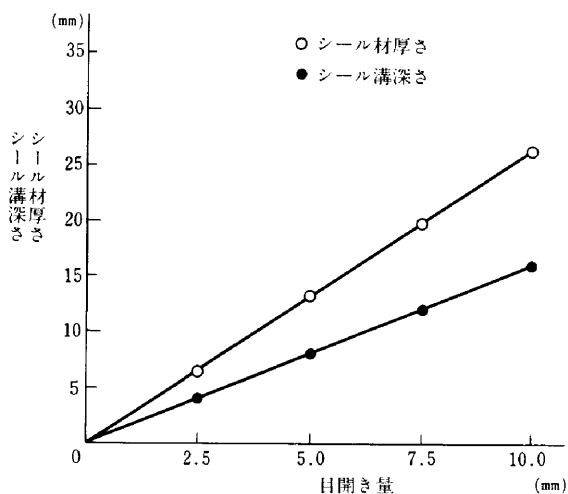


Fig.8 目開き量に対するシール材厚とシール溝深さ

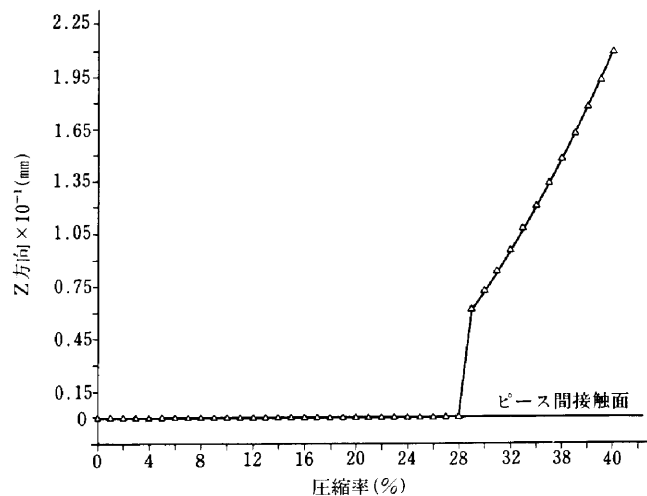


Fig.11 コーナー先端部の変位量と圧縮率の関係図

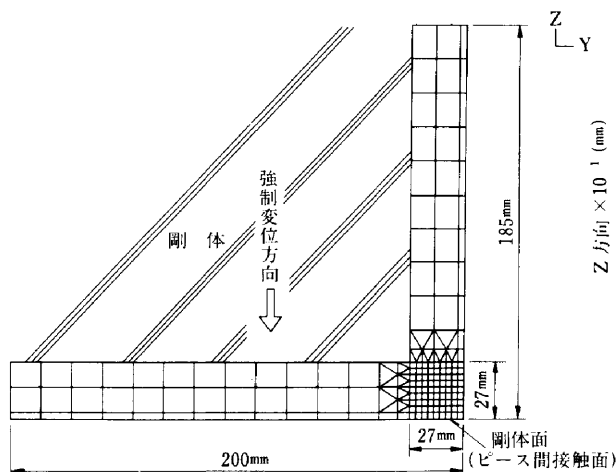


Fig.9 解析範囲とシール材分割図

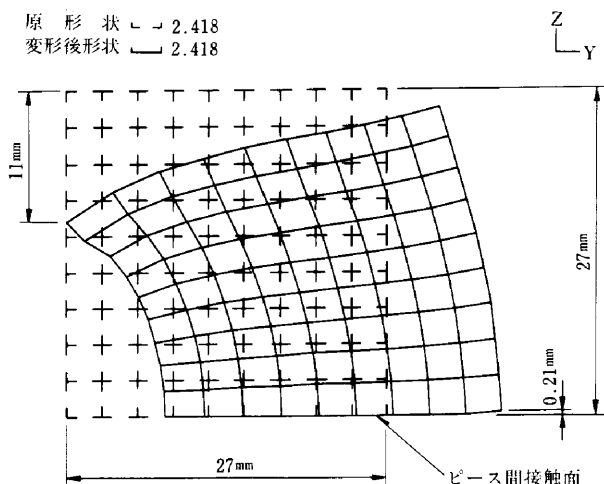


Fig.10 圧縮率40%時のコーナ部詳細変形図

て取り扱い、大変形挙動に適合するように解析用剛性値は Mooney の式を用いて算出した。また、変形は1方向に強制変位を与えたものを想定し、圧縮率1%増加ごとに解析した。

解析範囲とシール材分割図、圧縮率40%時のコーナ部(27mm)詳細変形図、コーナ先端部の変位量と圧縮率の関係図を Fig. 9～11 に示す。

Fig. 11 から、圧縮率29%時にコーナ先端部がベース間接触面から離れることが判る。この結果、大型止水試験でのコーナ部のゴム変形をよく表しており、この離れによって生じる空隙が止水の弱点となっていることが推察できる。

§7. まとめ

耐高水圧シール材の止水試験を大型試験装置で行った結果、シール材の欠点はコーナ部に集中し、コーナ部の止水効果は体積率とともに形状の効果大きいことが判明した。形状では試験番号Na.5, Na.8 に示したものが今後の参考となる。しかし体積率増加、圧縮率増加に伴う応力緩和についての新たな問題が生じた。

今後は、これらをふまえシール材の材質・形状・耐久性並びにシール溝の形状などの研究を続ける必要がある。

最後に、本研究開発にあたり横浜ゴム(株)の多大な御協力を得られたことに対して、深く感謝する次第であります。

参考文献

- 1) 岩崎 二郎：ガスケット入門，(株)高分子刊行会

- 2) 村山 博智, 小泉 淳, 浦沢 義彦: シール溝付き
鋼製セグメントの継手耐水圧性, トンネルと地下,
Vol.14, No.8, pp.675-682, 1983年
- 3) 小林 辰夫: ゴム材料, 土木施工, Vol.126, No.5, pp.
239-280: 1985年
- 4) 鎌形 慶二, 加硫ゴムの応力緩和について, 日本ゴ
ム協会誌, Vol.26, No.5, 1985年