

# 沈埋トンネル柔継手部のゴムガスケット止水性評価

清宮 理<sup>1</sup>・小林 亨<sup>2</sup>・滝本 孝哉<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 構造強度研究室長(〒239 横須賀市長瀬3-1-1)

<sup>2</sup>正会員 日本シビックコンサルタント株式会社 技術研究室長(〒116 荒川区西日暮里2-26-2)

<sup>3</sup>正会員 日本シビックコンサルタント株式会社 企画調査室長(〒116 荒川区西日暮里2-26-2)

沈埋トンネルの柔継手のゴムガスケットは、断面力を伝達する構造部材と継手部の止水材としての役割を担っている。今回、従来より水深が深くかつ地震力も大きい地点に建設される沈埋トンネルでは、耐荷力と変形性能に優れたゴムガスケットが必要である。今回選定した3種類の新形式ゴムガスケットを対象に止水試験を実施した結果、漏水に至る過程および周囲の静水圧によるゴムガスケットの横倒れ現象を把握した。本試験結果を基に横倒れの防止策とゴムガスケットの止水に対する安全性の評価法を提案した。この評価法を用いることで、ゴムガスケットの止水に対する安全性の評価をより多くの観点から合理的にできる。

*Key Words: rubber gasket, immersed tunnel, water-tightness, leakage test*

## 1. まえがき

沈埋トンネルには、地震や地盤の不等沈下によって発生する函体の大きな断面力を低減するために柔継手<sup>1)</sup>が設置される。柔継手は図-1に示すようにゴムガスケットとPCケーブルで構成される。ゴムガスケットには、沈埋函のトンネル方向に発生する圧縮力を隣接函体に伝達する構造部材および止水材としての機能が求められる。近年、大水深でかつ地震力の大きい地点で沈埋トンネルが建設されるようになった。この際、従来のゴムガスケット以上の変形能力を備えたゴムガスケットが必要となり、この対策として3種類の新形式ゴムガスケット<sup>2)</sup>を選定した。この新形式のゴムガスケットの強度特性と耐久性<sup>3)</sup>に関しては既に検討がなされており、所定の性能を得ているが、止水性の検討についてはなされていない。

沈埋函同志の水圧接合で圧縮された状態でゴムガスケットは、静水圧に対して十分な止水能力を有している。しかし水圧接合時でゴムガスケットが十分に圧縮されていない状態や地震などによって継手間が開き、圧縮荷重が解放される状態では止水性が低く、漏水したりゴムガスケットが横倒れを生じる可

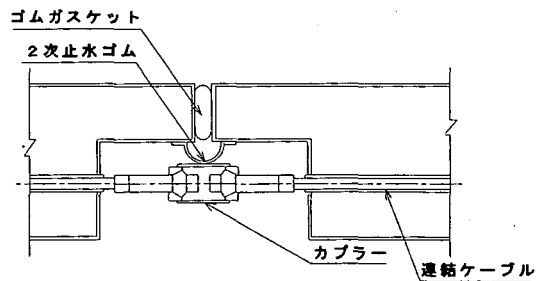


図-1 沈埋トンネルの継手構造

能性があり、小さな圧縮荷重状態でもゴムガスケットは十分な止水性能を有しておく必要がある。今回止水性を確認するために新形式のゴムガスケットの止水試験を行い、止水性能の現象の把握を行った。またゴムガスケットは設置後50~100年と長期間使用され、かつ設置後の交換は容易ではない。このため、長期に渡って止水性能を維持するためにはゴム材の劣化の進展を考慮したゴムガスケットの設計が必要となる。

今回、止水試験から得られた結果を基にして、劣化の進展を考慮した止水に対する安全性の評価方法および横倒れ防止策を提案したので報告する。



図-2 ジーナ型ゴムガスケット

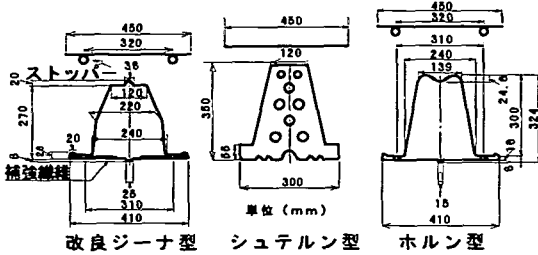


図-3 新形式のゴムガスケット

## 2. ゴムガスケットの形状と材質<sup>2), 3)</sup>

沈埋トンネルに従来から広く使用されているゴムガスケットは図-2に示すジーナ型と呼ばれ、オランダのフレッドシュタイン社が考案したものである。しかし、地震外力が大きくかつ設置水深が深い場合には、より大きい変形性能が要求され従来の大きさのジーナ型ゴムガスケットでは十分な止水性能が得られない。ジーナ型より大きな変形性能を得るために開発したのが図-3に示す3種類のゴムガスケットである。改良ジーナ型は、従来のジーナ型の背を高くして肩の部分の切り落とすことによりゴムガスケットの圧縮剛性を小さくし、小さい荷重で変形性能が得られるように工夫した。上部にはノーズと呼ばれる施工時の一時的な止水のために突起が付いており、本体の下部のフランジの箇所では沈埋函の端部にボルトで固定する。シュテルン型は台形の本体にφ30mmの8個の貫通孔を設けており、この貫通孔により大きな変形性能を得ることができる。フランジ部分はジーナ型より厚くして押さえ板で沈埋函端部に固定している。ホルン型は、背を高くするとともに上部に半円形状のノーズを2箇所設けてある。半円形状により圧縮時の応力集中を避ける工夫をしている。フランジ部の固定はジーナ型と同様である。改良ジーナ型とホルン型の材質は、天然ゴム(NR)である。シュテルン型は、合成ゴム(SBR)である。図-3中のストッパーは横倒れ防止用に取付けられる鋼材である。

表-1にJIS K6301にしたがって行った各材料の物性試験結果を示す。

また、各ゴムガスケットを対象に静的荷重試験を

表-1 ゴム材の基本的な材料試験

試験項目	硬度 温度	改良ジーナ型			シュテルン型	ホルン型	
		40度	50度	60度	60度	50度	
硬さ試験 JIS A(度)	10℃	45	55	63	70	52	
	20℃	43	52	60	62	50	
	30℃	41	50	59	50	49	
引張試験 (JIS 3号型)	強さ (kgf/cm <sup>2</sup> )	10℃	298	322	244	188	249
		20℃	252	300	240	182	232
		30℃	223	303	237	178	233
	のび (%)	10℃	550	560	420	440	480
		20℃	600	580	430	400	540
		30℃	580	570	410	420	540
永久のび試験(%)		2	5	5	5	5	
老化試験 ギヤー式 70±1℃ ×96時間	硬度変化(度)	+2	+3	+1	+1	+2	
	引張強さ変化率 変化(%)	+7.9	+4.3	+3.5	-4.7	-2.5	
	のび変化率(%)	-4.4	-6.2	-4.2	-9.6	-8.5	
永久ひずみ試験(%) (70±1℃×22時間)		6	8	5	8	10	

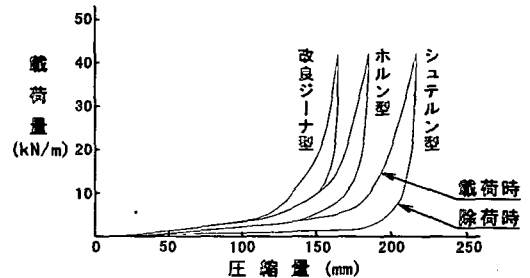


図-4 ゴムガスケット圧縮特性

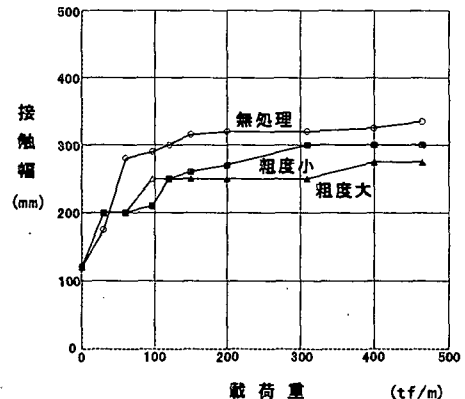


図-5 載荷重と接触幅との関係  
(改良ジーナ型)

行った。載荷試験より得られた各ゴムガスケットの荷重変位曲線を図-4に示す。この図からわかるようにゴムガスケットは荷重値が増加するにしたがい変形量がある一定以上大きくならない材料非線形性

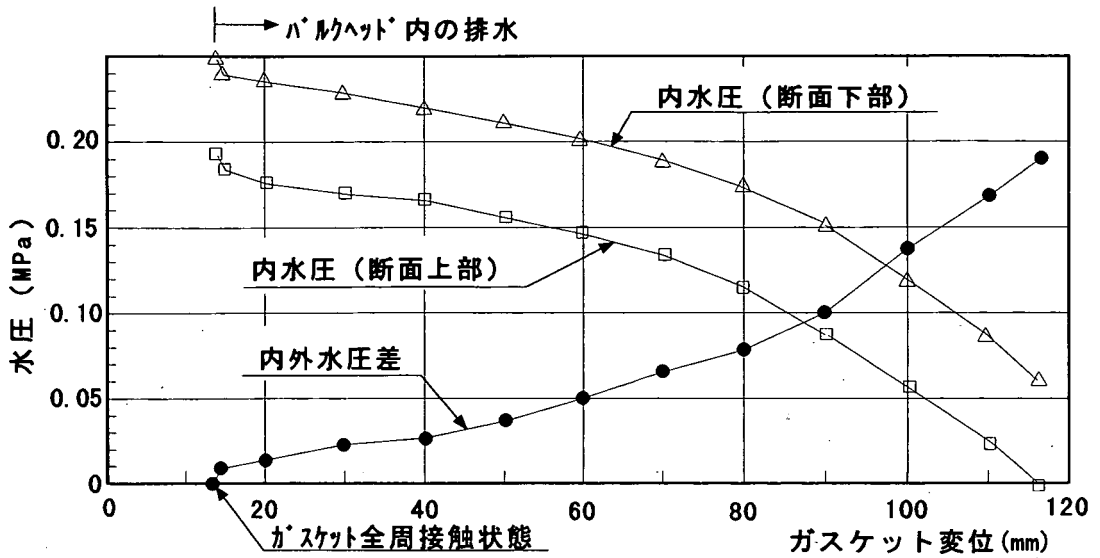


図-7 水圧接合時のバルクヘッド内の水圧と外水圧との差 (全作業時間約35分)

触幅との関係を示す。接触幅は、ゴムガスケットの表面の粗度の状況によりかなり異なった。

### 3. 止水性を考慮する状態

ゴムガスケットの止水に対する安全性は、沈埋函の設置から供用期間中までのゴムガスケットの状態を次の3種類に分けて考えた。

#### (1) 水圧接合時の状態

浮遊曳航して建設現場に運ばれた沈埋函は、水バラストにより海底面に沈設される。図-6に示すように、沈設された沈埋函を引き寄せジャッキで既設の沈埋函に引き寄せ、ゴムガスケットの頂部(ノーズ部)を既設の沈埋函の端部鋼殻に接触させる。沈埋函の端部鋼殻間のバルクヘッド内の水を徐々に抜き、ゴムガスケットを沈埋函の端部から水平方向に作用する静水圧により圧縮変形させながら水圧接合する。水を抜き始めるとゴムガスケットは外側より設置水深に対応する静水圧を受ける。設置水深が20 mならば約0.2MPaの静水圧を受ける。水圧接合荷重が全てゴムガスケットを介して既設の沈埋函に伝達されると接合作業は終了する。このときゴムガスケットに作用する荷重はおおよそ10kN/mである。

引き寄せジャッキの役割は、新設函に設置しているゴムガスケットの全周が既設函の端部鋼殻の端面に全て接触するまで新設函を引き寄せることである。そのため、引き寄せジャッキには次の3要素を合計

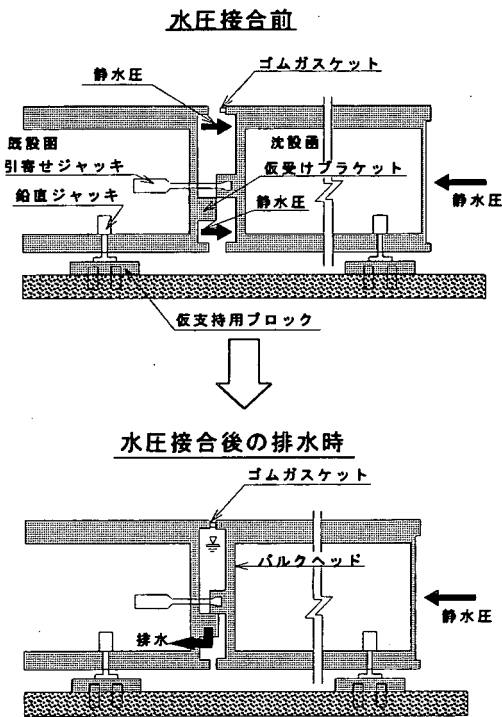


図-6 水圧接合過程の概要

を示すとともに、載荷時と除荷時では荷重変位曲線の経路が異なる特徴を有している。今回シュテルン型が背が一番高くかつ孔があいていることから一番大きな変形性能を有している。図-5に改良ジーナ型での載荷荷重とゴムガスケットの端部鋼殻への接

した能力が必要となる。

- ①ゴムガasketの製作精度、据付時のたわみ等のばらつき量の合計以上に圧縮変形させる能力。
- ②新設函は仮受けブラケットと仮支持用ブロックの上を滑りながら引き寄せられるため、その摩擦抵抗による損失分に対する能力。
- ③過去の実績を考慮した施工上の余裕分に対する能力。

水圧接合時のバルクヘッド内の水圧ならびにこの水圧と静水圧との差を計測した結果を図-7に示す。横軸にはゴムガasketの変形量を示している。

この計測例では、ゴムガasketが約14mm圧縮変形した状態でバルクヘッドが完全に密閉された状態となり、これ以上は引き寄せジャッキの能力ではバルクヘッド内の水圧が抵抗して引き寄せられず、排水による水圧接合作業に取りかかった。バルクヘッド内の排水を開始してからはバルクヘッド内の水圧は断面の下部位置(△印)と上部位置(□印)で一定の水頭差を維持して減少してゆき、ゴムガasketの変位量が約116mm変形した時点でバルクヘッド内に空間ができ水面が生じた。内水圧と静水圧との水圧差(●印)はゴムガasketの変形が進むに連れて増加し、バルクヘッド内に水面が生じるまでは、ゴムガasketのどの位置でも水圧差は同じであった。また、排水に時間を掛けて(この例では約30分を掛けている)行うことでゴムガasketの変形量は均等化され、ゴムガasketの一部に急激に荷重が作用することはなかった。

## (2) 常時状態

常時状態とは水圧接合完了時から供用期間中の状態を言う。この状態ではゴムガasketが十分圧縮されているので止水に対する安全性は非常に高い。しかしながらゴム材は長期間圧縮状態が継続すると応力緩和(長期的荷重と変形を受けて内部応力が減少する現象)や永久変形(荷重を除いても変形量が初期に戻らない現象)が生じて止水に必要な界面応力(ゴムガasketが圧縮された際にゴムガasketと鋼殻の接触面に発生する応力の総称)が低下する。これらの劣化は、時間の経過とともに増加する量である。常時状態で止水に対する安全性を評価する際には、この劣化を考慮する必要がある。ゴムガasketに作用する常時状態の荷重は主に静水圧であるが、必要に応じて沈埋函内の温度変化や基礎地盤の沈下なども考慮する場合がある。

## (3) 地震時状態<sup>4)</sup>

地震時状態は、常時状態において地震時荷重を受

けた状態を言う。この地震力により、ゴムガasketは常時状態を起点として圧縮と引張りの繰返し荷重を受けることになる。圧縮された場合には、ゴムガasketが圧縮力により破壊しない耐荷力が必要となる。大規模な地震に対して3000~5000kN/mもの軸圧縮力を受けると耐震設計計算から予想されている。ゴムガasketは圧縮されるほど反発力が増して止水性能は高まるので、この際に破壊しない限り止水性は確保されている。引張られた場合には、ゴムガasketは荷重の解放に伴って変形が復元する。ゴムガasketのノーズ高さ以上の圧縮変形が残っていれば、止水性は一応確保されている。このときゴムガasketは、横方向から静水圧を受けているので圧縮荷重が抜けると横倒れを起こす可能性がある。ノーズ部が端部鋼殻から離れれば外部より大量の水が沈埋函内部に流入する。万一のことを考え、二次止水ゴムが柔継手部に設けられている。しかしゴムガasketからの漏水は望ましくない。二次止水ゴムが存在したとしても地震後に二次止水ゴムだけで長期的な止水性を確保することが困難であることと、新たな止水工事は施工性や工費の上から望ましいことではないからである。

以上から、止水に対する安全性を評価する上で最も厳しい地震時荷重作用状態は、ゴムガasketの常時状態の接合荷重が最も解放されたときであり、この状態での止水性を最重点に検討する必要がある。

## 4. ゴムガasketの止水に対する現行の設計法<sup>5)</sup>

水圧接合時のゴムガasketの従来の設計は、ノーズ部分が引き寄せジャッキによりつぶされていれば良いとしている。常時状態では止水の検討をしていない。地震時では、地震時に発生する沈埋函継手部の目開き量に対して止水性が確保できるようにゴムガasketの形状と材質を設定している。地震時の設計圧縮量(許容値)は、荷重変位曲線における除荷曲線を用いて式(1)で求めている。

設計圧縮量 = 初期変形量 - 永久変形量 - 先端ノーズの高さ - 外力作用時の変形量 (1)

ここで、初期変形量：沈埋トンネル接合時のゴムガasket変形量

永久変形量：ゴムガasketの100年後の劣化による圧縮変位量の戻り量の低減量(ゴムガasket本体高さの15%)

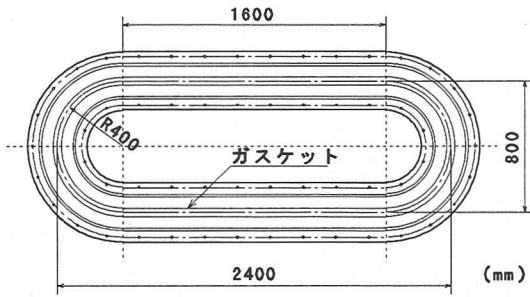


図-8 供試体と載荷治具

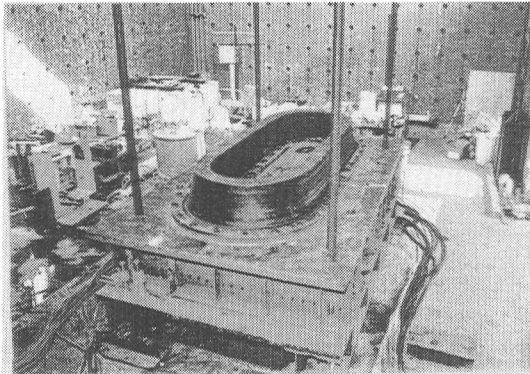


写真-1 ゴムガスケット設置状況

外力作用時の変形量：地震による変形量（温度など他の荷重との組み合わせない）

従来の設計では、設計圧縮量において止水が可能であれば良いとしていた。したがって現行の設計法には次のような問題点が含まれている。①ゴムガスケットの出来形の精度や端部鋼殻の不陸などは、先端ノーズの高さに含まれると考えており、各種のゴムガスケット、特にノーズのない形状には適用できない。②周囲の静水圧によるゴムガスケットの横倒れ現象や端部鋼殻とゴムガスケットの摩擦の影響なども反映させずらい。③止水に対する安全率も考慮されていない。従来のゴムガスケットの止水に対する安全性は、施工時と完成時の水圧に対してゴムガスケットが漏水しないことを止水実験で確認を行っている。したがって安全率の概念がない。

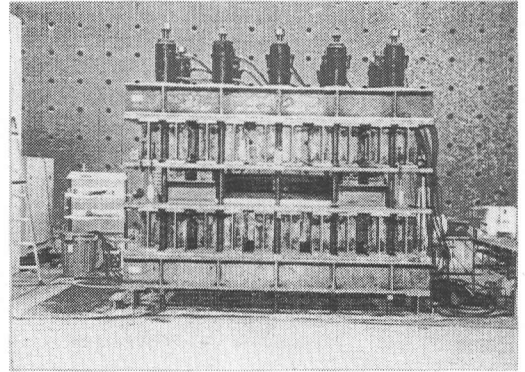


写真-2 載荷装置全体概要

表-2 止水試験の結果

状態	載荷重 (kN/m)	作用水圧 (MPa)	最大作用水圧 (MPa)
地震時	24.2	0.188~0.299	0.226~0.359
	48.3		
	83.4		
常時	530	0.188	0.564
	970	0.299	0.900

## 5. 止水試験

### (1) 試験の目的

新形式のゴムガスケットの前述の地震時と常時状態で止水性能を調べるとともに横倒れ現象が生じないかの確認を行う。水圧接合時の初期段階は、地震時の除荷時とゴムガスケットは同じように小さい圧縮量であるが、この際にはバルクヘッド内に水が残っており地震時より安全なので試験の対象とはしなかった。すなわち地震時の状況を見てジャッキ接合時の状態を類推することとする。またゴムガスケットと端部鋼殻間の摩擦がどのように止水性や横倒れに対して影響するか確認のため止水試験を行う。

### (2) 試験の方法

図-8に載荷治具と供試体の平面図を示す。供試体は、ゴムガスケット中心で長さ2400mm、幅800mmのトラック状に製作した。周長は6112mmである。断面の縮尺は実物大である。下部鋼板への固定は実際と同じにして取付金具とボルトで行った。コーナー一部の曲率 R=400mmは、既往の沈埋トンネルの施工事例を参考に設定した。写真-1に供試体を試験治具の下部鋼板に設置した状況を示す。写真-2に止水試験中の状況を示す。ゴムガスケットを2枚の鋼板で上下から挟みPC鋼棒で鋼板を連結した。この状態でセンターホールジャッキでPC鋼棒を引張りこの

反力でゴムガasketを均等に圧縮載荷した。この際鋼板の変形を押さえるために、上下の鋼板の外側にH鋼を配置して鋼板の剛性を増した。センターホールジャッキは9.8kN用を10台使用し、1台の油圧機で荷重を制御した。ゴムガasketの圧縮変形量を所定の値に制御した状態で、ゴムガasketと鋼用板で囲まれた空間に水道水と手押しポンプにより水圧を作用させた。水圧は、窒素ガスによるアキュムレーターにより試験中に一定となるよう保持した。実際の沈埋函ではゴムガasketの外側から静水圧が作用するが、今回は実験上の制約から内側から作させた。横倒れの確認は、供試体の直線部を対象とした。

測定項目はジャッキ圧、ならびに水圧、ゴムガasketの圧縮量、外側への横倒れ量である。ジャッキ圧と水圧は圧力計で、圧縮量は変位計で計測した。横倒れ量は周囲8箇所をメジャーで人力により測定した。

試験の手順は、先に表-2に示す状態の荷重に対応した圧縮量まで、ゴムガasketを変形させた後に水圧を上昇させる過程で行った。接触面の粗度の違いによる横倒れ量の差を確認するための試験ケースは、上部鋼板の接触面に機械用グリスを塗布（粗度小）したもの、鋼板に錆止め塗料を塗布（無処理）したもの、けい砂を含む防汚塗料を塗布（粗度大）した計3種類で行った。粗度が小さい状況は、生物や浮泥によりゴムガasketが滑り易くなった状況を想定した。ゴムガasketの圧縮荷重は、水圧接合相当荷重の2種類（530kN/m、970kN/m）、地震時に圧縮荷重が解放された場合の3種類（24.2kN/m、48.3kN/m、83.4kN/m）の計5種類を設定した。ゴムガasket設置水深を20m~30mと設定した。水深30mで圧縮荷重は約970kN/mである。この際ゴムガasketには0.188MPa~0.299MPaの静水圧が作用する。止水試験では0.02MPa間隔でゴムガasketから漏水が生じるまで水圧を単調増加で作用させた。止水試験での最大の作用水圧は0.9MPaである。また地震時のゴムガasketの除荷時に対しては、0.188MPaあるいは0.299MPaの水圧を作用させた状態でセンターホールジャッキの荷重を次第に緩め、除荷時の状態で水圧を作用させて漏水が生じるか調べた。地震時と常時状態では漏水が生じたときの水圧と設置水深での静水圧の比を漏水に対する安全率（安全率=漏水圧/静水圧）とここでは定義する。安全率については明確な定義はないが、今回地震時の安全率は1.2、常時の安全率を3.0を設計上用いた。

表-3 止水試験結果

載荷重	表面状況	改良ジーナ型		シュテルン型		ホルン型	
			安全率		安全率		安全率
24.2kN/m	粗度小	0.24MPaで漏水	0.80	—	—	0.20MPaで漏水	0.67
	無処理	0.31MPaで漏水	1.04	—	—	0.21MPaで漏水	0.70
	粗度大	0.24MPaで漏水	0.80	0.24MPaで漏水	0.80	0.35MPaで漏水	1.17
48.3kN/m	粗度小	0.35MPaで漏水	1.17	—	—	0.21MPaで漏水	0.70
	無処理	0.40MPaで漏水	1.34	0.20MPaで漏水	0.67	0.38MPaで漏水	1.27
	粗度大	0.40MPaで漏水	1.34	0.32MPaで漏水	1.07	0.48MPaで漏水	1.61
83.4kN/m	粗度小	0.54MPaで漏水	1.81	—	—	0.35MPaで漏水	1.17
	無処理	0.51MPaで漏水	1.71	0.43MPaで漏水	1.43	0.55MPaで漏水	1.84
	粗度大	0.52MPaで漏水	1.74	0.40MPaで漏水	1.34	0.60MPaで漏水	2.01

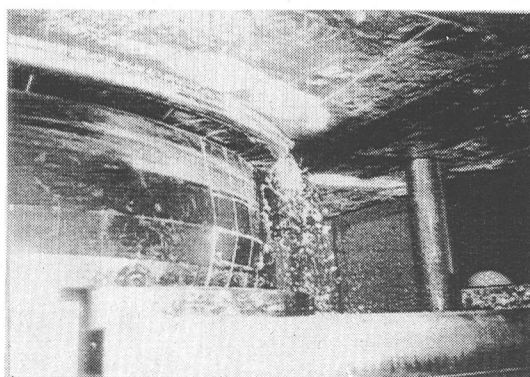


写真-3 漏水状況

## 6. 試験結果

### (1) 予備試験での横倒れ現象

各供試体を対象に予備的に止水試験を行ったところ、ゴムガasketの横倒れ量が大きく所定の止水性能が得られなかった。横倒れにより止水性能は大きく低下した。この原因は、フランジ部の強度不足による固定部の破壊と水圧によるゴムガasket本体の横方向移動時にゴムガasketの肩が鋼板より離れたことにある。このような現象は、従来の背の低いゴムガasketでは見られない現象で背の高いゴムガasket特有な現象と考える。これは背を高くすることによりゴムガasketに大きな静水圧が作用することまた転倒に対する安定性が悪くなることによる。これらの現象に対して対策が必要となった。今回の対策としてフランジ部をナイロン繊維を織り込み補強するとともにフランジ端部にすべり防止用に断面を大きくした箇所を設けた。さらにゴムガasketの横方向への過大な移動防止のために鋼棒（ストッパー）を鋼板に溶接した。鋼棒の溶接位置は図-3に示してある。改良ジーナ型は肩の位置から10cmの位置に、ホルン型は7.5cmにストッパーが取り付けられている。ただしシュテルン型のゴム

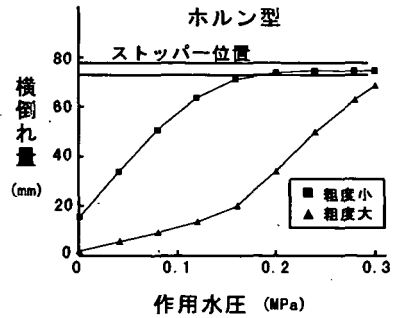
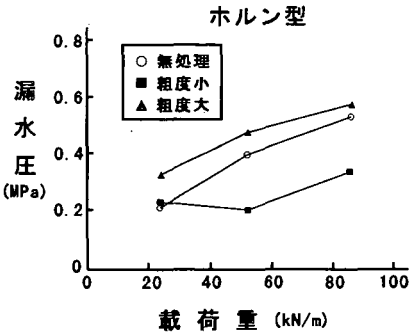
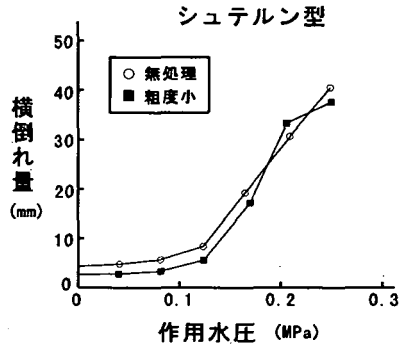
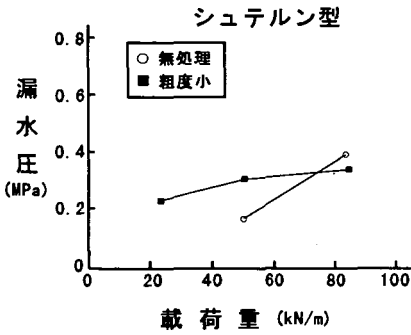
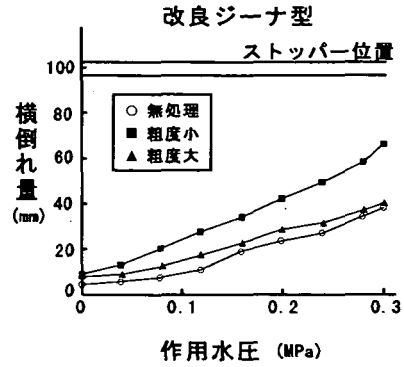
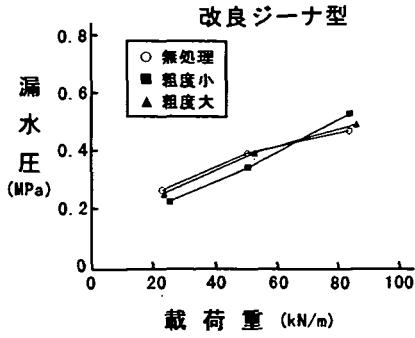


図-9 漏水圧と載荷重の関係

図-10 横倒れ量と作用水圧の関係

ガスケットは、横倒れ量が少なかったのでストッパーは取り付けない。ストッパーの位置は、端部鋼殻の広さの制約と、別途行った有限要素解析で設定した。有限要素法では、ストッパーにより横倒れ現象を防止できることとゴムガスケットの圧縮時にストッパーの存在によりゴムガスケット本体に有害なひずみが生じないことを確認した。このような対策を講じた状況で止水試験を行った。

表-4 常時状態での漏水圧と安全率

載荷重	表面状況	改良ジーナ型		シュテルン型		ホルン型	
		安全率	安全率	安全率	安全率		
530kN/m	粗度小	0.584MPaまで漏水なし	≥3	0.584MPaまで漏水なし	≥3	0.584MPaまで漏水なし	≥3
	無処理	0.584MPaまで漏水なし	≥3	0.584MPaまで漏水なし	≥3	0.584MPaまで漏水なし	≥3
	粗度大	0.584MPaまで漏水なし	≥3	0.584MPaまで漏水なし	≥3	0.584MPaまで漏水なし	≥3
970kN/m	粗度小	0.9MPaまで漏水なし	≥3	0.9MPaまで漏水なし	≥3	0.62MPaまで漏水	2.73
	無処理	0.9MPaまで漏水なし	≥3	0.9MPaまで漏水なし	≥3	0.9MPaまで漏水なし	≥3
	粗度大	0.9MPaまで漏水なし	≥3	0.9MPaまで漏水なし	≥3	0.9MPaまで漏水なし	≥3

## (2) 地震時除荷時の試験結果

表-3に地震時の除荷時の各条件での漏水圧と安全率を示す。ゴムガスケットからの漏水状態を写真-3に示す。漏水は供試体が作用水圧の増加とともに

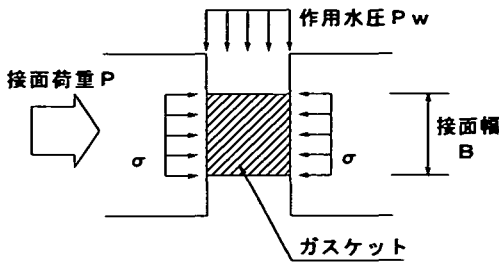


図-1-1 パッキンの理論の概念図

に外側に膨れだした所で生じた。図-9に各ゴムガスケット種類に対する載荷重とそのときの漏水圧との関係を示す。載荷重が増加すれば漏水圧も増加する傾向があった。改良ジーナ型ゴムガスケットでは、表面の処理状態により漏水圧がさほど変わらなかったが、ホルン型のゴムガスケットでは表面粗度の小さい方が漏水圧が小さい傾向が見られた。

図-10に載荷重48.3kN/mのときの作用水圧と横倒れ量との関係を示す。図に示すように作用荷重が大きくなれば横倒れ量は大きくなった。改良ジーナ型では表面粗度が小さいと横倒れ量が大きくなったが、粗度が小さいと粗度が大きいときの5割以上の横倒れ量となった。しかしストッパーにはゴムガスケットの肩が接触しなかった。ホルン型でも粗度が小さいと横倒れ量も大きくなった。しかし粗度が小さいと作用水圧が0.15MPaを越えるとゴムガスケットの肩がストッパーに接触した。横倒れ量は、その後増加せずストッパーの効果が認められた。シュテルン型も同様な傾向が見られたが横倒れ量は他のゴムガスケットと比べると比較的小さかった。また横倒れが生じていた状況でゴムガスケットが再圧縮されることは望ましくないが、除荷を行えば横倒れ量は減少しゴムガスケットは初期の位置に戻った。

表-3に示すように載荷重が24.2kN/mのとき、いずれのゴムガスケットも安全率が1.2以上とならなかった。載荷重が48.3kN/mのときシュテルン型は安全率が1.2に達しなかったが、他のゴムガスケットは粗度が小さいとき以外1.2に達していた。載荷重が83.4kN/mのとき改良ジーナ型は表面粗度に関係なく安全率が1.2に達していたがホルン型では粗度が小さいとき1.2をやや下回った。載荷重が大きくなるほど止水の安全率は高くなるが、以上述べたようにゴムガスケットの種類により安全率に差が生じた。改良ジーナ型は比較的止水性能が良くシュテルン型はやや悪く、ホルン型は両者の中間的な性能であった。この要因は、ゴムガスケットのノーズの存在によるところが大きいと考えられる。

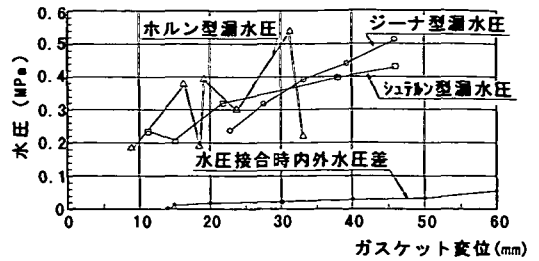


図-1-2 ガスケットの漏水圧と水圧接合時の内外水圧差

載荷重が小さいと止水性能は良くなく、地震時の除荷時にもある程度の載荷重をゴムガスケットに残しておく必要がある。また粗度が小さいときには、一般的に漏水を起こしやすい傾向にあり止水性能を向上させるためには表面粗度を大きくする方が良いことを示唆している。

### (3) 常時状態の試験結果

表-4に常時状態の各条件に対する漏水圧と安全率を示す。水圧接合荷重530kN/m(接面応力4.42MPa)の場合0.564MPa水圧を作用させてもいずれのゴムガスケットも漏水しなかった。水圧接合荷重970kN/函(接面応力8.08MPa)の場合0.9MPaの水圧を作用させても改良ジーナ型とシュテルン型のゴムガスケットは、表面粗度に関係なく漏水しなかった。ホルン型では0.82MPaの水圧で表面粗度が小さいときに漏水が生じた。いずれにせよ常時状態での止水に対する安全性は高かった。改良ジーナ型とシュテルン型のゴムガスケットでは、漏水に対する安全率は3以上となった。ホルン型でも2.7の安全率を保有していた。ゴムガスケットが水圧接合時に十分圧縮されていれば漏水の問題は小さいと言える。

## 7. 止水に対する安全性の評価法

### (1) ゴムガスケットの止水に対する考え方

本論文では、所定の圧縮量時でゴムガスケットの止水できる作用水圧は、式(2)および図-11に示すパッキンの理論<sup>6)・7)</sup>に基づいて算出し、式(2)の右辺で求めた接面応力が作用水圧に比較して大きければ止水可能とした。

$$P_w < m \cdot \sigma = m \cdot P / B \quad (2)$$

ここで、 $P_w$ :作用水圧(MPa)



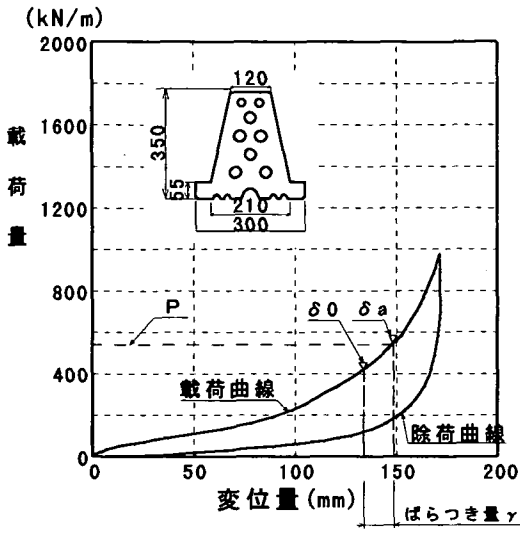


図-13 載荷試験結果

P : ガasket作用する接面荷重 (kN/m)

B : ガasketと母材の接触幅 (m)

$\sigma$  : 接面応力 (MPa)

m : ガasket係数 (ガasketの形状ならびに材質, 硬度, 接触面の粗度状態, ストッパーの効果などで設定される定数)

後述するように, ガasket係数 (m) は今回のようなゴムガasketでは定数でない。ゴムガasketの形状や圧縮量などにより図-5に示すようにゴムガasket上部の端部鋼殼との接触面積が異なるからである。

### (2) 水圧接合時の評価

図-12に各ゴムガasketの漏水圧と水圧接合時のバルクヘッドの内外の水圧差 (図-7中の内外水圧差を転記) との関係を示す。図中の各ゴムガasketの漏水圧は地震時の止水試験から得られたものを利用して。前述の計測結果より116mmのゴムガasketの圧縮量のときにバルクヘッド内に空間ができる。したがって排水時からそれまでの間では, バルクヘッド内外の水圧差は非常に小さく漏水の可能性はほとんどないことが分かる。前述に対する止水の安全率の定義からすれば20以上ある。またバルクヘッド内に空間ができ内外の水圧差が周辺の静水圧になった時点では, すでに116mmの圧縮量がゴムガasketに生じていると予想される。この圧縮量に対応したかなりの接面応力がゴムガasketに生じており止水に対する安全性は高いといえる。

従来の設計では, 図-2に示すジーナ型を対象と

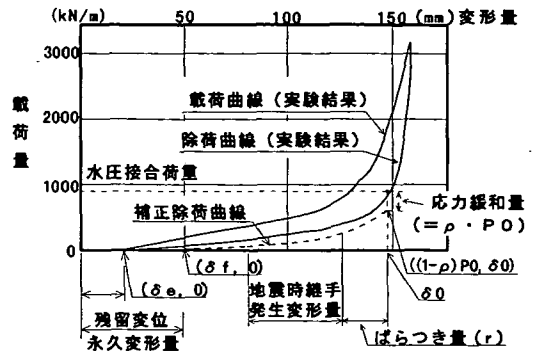


図-14 補正除荷曲線の算出方法

して, ゴムガasketのノーズ高さ以上に引き寄せジャッキで圧縮変形させることができれば止水に対して安全であるとしている。

いずれにせよ引き寄せジャッキ荷重を大きくとり, ゴムガasket全周を端部鋼殼に接触させれば止水と横倒れの問題は少ないと判断できる。ただし設計では, 端部鋼殼の製作上の不陸とゴムガasketの製作上の不均質さを考慮する必要がある。この不陸は溶接ひずみや温度応力などにより生じるものであるが, 今までの端部鋼殼の施工実績から $\pm 10\text{mm}$ の不陸量を考慮するものとする。またゴムガasketの硬度は規格値に対して $\pm 5$ 度程度ある。ここで硬度とは, 硬度計で計測されたゴムガasketの強度で数値が大きいほど硬い材質を表示する。この硬度による変形量のバラツキは,  $\pm 2\text{mm}$ 程度である。

以上のバラツキを考慮した圧縮量に対応したゴムガasketの反力と油圧ジャッキの摩擦損失(約5kN/1基)以上の能力の引き寄せジャッキを設置すれば水圧接合が可能となる。

### (3) 常時状態の評価方法

既往の設計では, 水圧接合時に止水性が確保されていれば, 常時の状態はそれ以上の止水性能を有するというで照査は行われていない。しかし, ゴム材が圧縮荷重を継続的に受けた場合には, 応力緩和と永久変形量が同時に生じる。これらの値が大きいゴムガasketは, 供用期間中に接面応力が低下して漏水する可能性がある。今回は, ゴムガasketの応力緩和を考慮して評価するものとした。

荷重変位曲線は図-13に示すように荷重の載荷と除荷で履歴を描くが, 常時の状態は大きな荷重変動が無く沈埋函水圧接合完了時の状態が維持されているものと仮定して, 評価には載荷曲線を用いる。同図を用いて止水に対する安全率を求める手順を下記に示す。

表-5 試計算の結果

設計条件	①作用水圧 $P_w$ (MPa)	0.253		
	②水圧接合荷重 $P_o$ (kN/m)	951		
	③地震時発生変形量 $\delta_o$ (mm)	46		
	ガスケット名称	改良ジーナ型	シュテルン型	ホルン型
④	水圧接合変形量 $\delta_o$ (mm)	132	174	160
⑤	ばらつき量 $\gamma$ (mm)	12	15	12
⑥=④-⑤	変形量 $\delta_g$ (mm)	74	113	92
⑦⑧での荷重 置13より	換算荷重 $P_g$ (mm)	25.6	61.0	69.0
⑨置15より	補正係数 $\gamma$	16	10	10
⑩×⑦/1000⑪	止水に対する安全率	1.3	1.7	2.0

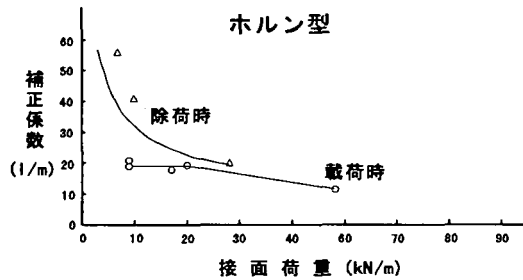
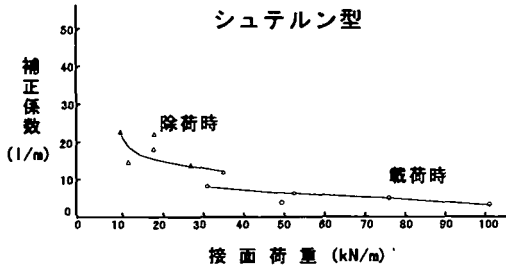
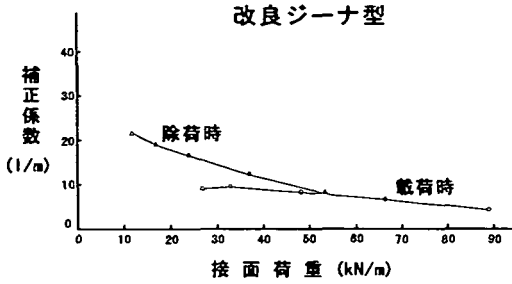


図-15 補正係数

上記の  $(1-\rho) \cdot \sigma_o$  がゴムガスケットに作用する作用水圧に比較して大きければ止水は可能と判断され、今回は設計上で安全率  $(= (1-\rho) \cdot \sigma_o / \text{作用水圧})$  が、3.0以上であれば止水に対して安全であると評価した。常時状態でばらつき量として、端部鋼殻の不陸量とゴムガスケットの硬度差および温度による影響を考慮する。ゴムガスケットの温度による変形量のばらつき量は、ゴムガスケットの材質（生ゴム系または合成ゴム系）や形状・規模によって異なるが、実験では作用荷重が約200~1000kN/mの範囲で12℃あたり0.9~3.0mmであった。温度差は、既存の沈埋トンネルの通年の温度測定<sup>5)</sup>より設定した。

(4) 地震時の評価方法

常時状態において沈埋トンネルが地震時荷重を受けると、継手部のゴムガスケットは圧縮および除荷荷重に応じた変形を繰り返す。従来の地震時の評価では除荷曲線を用いているが、本論文では、この除荷曲線にゴムガスケットの応力緩和と永久変形量を考慮した式(3)および図-14に示す補正除荷曲線を用いることとした。式(3)の変位項は永久変形量に対する残留変位の比率を除荷曲線の各点に乗じて求めた。

$$(P, \delta) = [(1-\rho) \cdot P_i, \delta_o - (\delta_o - \delta_i) \times (\delta_o - \delta_f) / (\delta_o - \delta_e)] \quad (3)$$

ここで、 $(P, \delta)$ : 補正除荷曲線の接面荷重と変形量 (MPa, mm),

$\rho$ : 応力緩和率

$P_i, \delta_i$ : 除荷曲線の接面荷重と変形量 (MPa, mm)

$\delta_o$ : 水圧接合荷重での変形量 (mm)

$\delta_f$ : 永久変形量 (mm)

$\delta_e$ : 残留変形量 (mm: 繰り返し試験では、変形量は0に戻らない)

地震時の設計圧縮量は式(3)で求めた補正除荷曲線を使用して式(4)で求める。

$$\text{設計圧縮量} = \text{初期変形量} - \text{ばらつき量} - \text{地震時発生変形量} \quad (4)$$

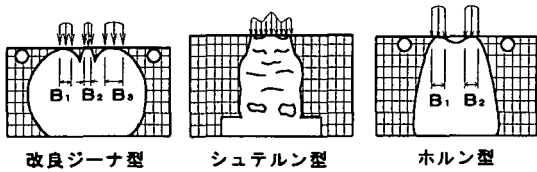


図-16 接触面での接面圧

- 1) 水圧接合荷重(P)に相当する初期変形量  $\delta_o$  を載荷曲線から求める。
- 2) 設定したばらつき量  $\gamma$  を  $\delta_o$  から差し引き、有効な変形量  $\delta_g$  を求める。
- 3)  $\delta_g$  に対する接面応力  $\sigma_o (= P_o / B; B$  は接触幅) を求める。
- 4) 応力緩和を考慮するために、 $\sigma_o$  に  $(1-\rho)$  を乗ずる。ここで  $\rho$  は応力緩和試験から求めた応力緩和率である。

止水性試験から得られた補正係数（式5に示す）を図-15に示す。ジーナ型では90kN/mまでの接面荷重で補正係数を求めた。除荷時には接面荷重が10kN/mのとき約20の補正係数が得られ、接面荷重が50kN/mとなると10程度の補正係数に低減した。一方載荷時には補正係数は5~10の範囲にあった。シュテルン型はほぼジーナ型と同じ様な補正係数の傾向が得られた。ホルン型では、接面荷重が10kN/m付近で40~55と大きな値となり20~30kN/mでは、20程度に低減した。ホルン型の止水試験は漏水圧のパラツキが大きく補正係数もやや範囲が広くばらついていた。載荷時の補正係数は10~20の範囲であった。

ここで、設計圧縮量が残留変形量および永久変形量を上回っていることが必要である。

式(4)で得られた設計圧縮量に対する接面荷重から求めた接面応力が、静水圧を上回っていれば止水が確保できていると評価できる。ここで、接面応力の算出にはガスケット係数を乗じた値を使用する。

ゴムガスケットの先端は図-3に示すように凹凸形状をしていたり本体に孔があることで、図-16に示すように接触面での接面応力の分布は一様でなく、接触幅も圧縮変形量に応じて逐次変化することから、ガスケット係数 $m$ が定数として得られない。止水試験の結果から得られる既知の値(漏水圧 $P_w$ と接面荷重 $P$ )から式(5)に定義する補正係数( $\eta$ )を算出して、接面荷重に乗じることで止水可能な接面応力を求める。すなわち $m/B=P_w/P$ とする。したがって補正係数は接面荷重により異なることになる。

$$\eta = P_w / P \quad (5)$$

### (5) 地震時の止水性評価の試算

今回の3種類のゴムガスケットに対する試算例を表-5に示す。水深約30mの東京湾の海底に設置された沈埋トンネルを対象としている。水圧接合荷重は951kN/mで動的応答計算による継手部に計算された変形量は46mmである。応力緩和率( $\rho$ )は各ゴムガスケットで20%、永久変形量を求める永久変形率( $\alpha$ )は改良ジーナ型で16.5%、シュテルン型で12.8%、ホルン型で17.0%であった。応力緩和率と永久変形率は長期間の耐久性試験から別途<sup>3)</sup>得た。変形量のばらつき量には、端部鋼殻の不陸、温度変化、硬度のばらつきを考慮して設定した。地震時の止水に対する安全率の設定は容易ではないが、ここでは1.2を設定した。試算によるといずれのゴムガスケットもこの安全率を満足していた。

## 8. 結論

1) 地盤の不等沈下や地震荷重が大きいとき、従来より背が高く変形性能に優れたゴムガスケットが必要となる。ただしこのようなゴムガスケットでは周囲の静水圧によりゴムガスケットが横倒れを起こす可能性が高い。そこでゴムガスケット下部のフランジ部を補強しかつ端部鋼殻にストッパーを取り付けることにより過度の横倒れを防止できる。

またゴムガスケットと端部鋼殻の摩擦(粗度)が小さい状況では、横倒れ量が大きくかつ止水性の確保が困難となる。極力摩擦を小さくしない対策が必要であり、生物付着防止用の塗料の選定や浮泥の除去などに注意が必要である。

2) ゴムガスケットは、地震時の除荷時に止水に対する安全率が小さくなるとともに横倒れ量が大きくなる。ゴムガスケットの種類や表面粗度により止水性能はかなり異なる。地震時の除荷時にもゴムガスケットに載荷重がある程度残るように設計する必要がある。

地震時のこれらの安全性の評価がゴムガスケットの設計では、非常に重要となる。一方、接合時の引き寄せジャッキ作用時と常時状態の止水性に対する安全性は非常に大きい。

3) 従来、ゴムガスケットの止水性はゴムガスケットの変形量で評価がなされていたが、背の高いゴムガスケットの場合には、従来のゴムガスケットの変形量の照査で止水性を確認するだけでなく、静水圧とゴムガスケットの接面応力の比較でも評価する必要がある。接面応力が止水性、横倒れと密接な関係があるからである。この際にゴムガスケットの長期使用に伴う応力緩和、永久変形およびゴムガスケットの製作上、施工上の精度を考慮する必要がある。今回これらを考慮したゴムガスケットの止水に対する安全性の評価手法を提案した。

4) パッキンの理論では、接面応力に係数を乗じて静水圧との比較をするが、ゴムガスケットでは載荷重により接触幅が一定とならず、この係数を求められない。そこであらたに接触幅の変化を考慮して、接面荷重と係数値の関係を求めた。止水試験からゴムガスケット除荷時のこの係数値は、ゴムガスケットの種類により異なるが、概ね10~50の範囲であった。接面荷重が大きくなるとこの補正係数は低減する傾向を示すが、ほぼ10程度の値に収束した。

5) 今回選定した3種類の新形式のゴムガスケットを、水深が30mと深くかつ地震活動の大きな地点に建設される沈埋トンネルに適用できるかどうかを、今回

新たに提案した評価方法により止水性を検討した。  
この試計算結果では、いずれのゴムガスケットも安全率が1.2を満足しており採用が可能と判断された。  
6) ゴムガスケットに関しては、止水性のほか耐久性、耐火性、地震時の力学特性などの観点からの検討も必要であり、採用にあたっては総合的に判断する必要がある。

**謝辞：**止水試験は、(財)沿岸開発技術研究センターからの受託試験として港湾技術研究所で実施したものである。試験に際しては港湾技術研究所構造研究室の田邊源吾氏らの協力を頂いた。また供試体は横浜ゴム工業㈱、住友ゴム工業㈱およびフェニックス㈱より提供を受けた。止水性の評価方法については、現在東京都港湾局で建設中の東京港臨海道路沈埋トンネル（仮称）に関連した技術検討委員会（委員長：田村重四郎教授）で審議されたものである。ここに関係各位に感謝の意を表する。

#### 参考文献

- 1) 清宮理, 藤澤孝夫, 山田昌郎, 田邊源吾: 沈埋トンネル柔継手の載荷試験, 構造工学論文集, Vol. 39A, pp. 1447-1456, 1993年4月.
- 2) 清宮理, 佐藤正一: 沈埋トンネル柔継手部の新形式ゴムガスケットの基本的な力学試験, 構造工学論文集, Vol. 41A, pp. 103-111, 1995年3月.
- 3) 清宮理, 藤澤孝夫, 山田昌郎, 本多宗隆: 沈埋トンネル柔継手の力学性状, 港湾技研資料, No. 728, 32p, 1992年6月.
- 4) 清宮理, 小島朗史, 竹村純一: 柔継手の非線形性を考慮した沈埋トンネルの地震応答計算, 地震工学シンポジウム, pp. 1273-1278, 1994年12月.
- 5) 社団法人土木学会: 東京港トンネル工事誌, p. 77, 1997年3月.
- 6) 岩波繁蔵, 近森徳重: パッキン技術便覧, 産業図書㈱, 昭和1981年2月.
- 7) 岩崎二郎: ガスケット入門, 高分子文庫19, 憚高分子刊行会, 1982年2月.

(1995. 9. 29 受付)

## EVALUATION ON WATER-TIGHTNESS OF RUBBER GASKET AT IMMersed TUNNEL JOINT

Osamu KIYOMIYA, Tooru KOBAYASHI and Takaya TAKIMOTO

Rubber gasket at joint part of immersed tunnel is required to both bearing capacity of compression force and water-tightness. To cope with large scale earthquake force and large water pressure, three kinds of new type rubber gasket which have large deformation capacity are proposed. Water-tightness test for these rubber gaskets is carried out to know phenomena of water leakage and lateral movement of the rubber gaskets. It is made clear through the test that smooth surface of the rubber gaskets gives large lateral movement and stopper is effective to prevent from this lateral movement and water-tightness.