

沈埋トンネル柔継手部の新形式ゴムガasketの基本的な力学試験

FUNDAMENTAL MECHANICS TESTS OF NEW-TYPE RUBBER GASKETS FOR IMMERSED TUNNEL

清宮 理*、 佐藤正一**

By Osamu KIYOMIYA and Shoichi SATO

* 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)

** 工修 沿岸開発技術研究センター 部長 (〒102 千代田区隼町3-16)

Rubber gaskets are installed at flexible joint parts of an immersed tunnel. Rubber gaskets are subjected to large compressive force due to water pressure, earthquake force, un-uniform settlement of ambient ground and so on. To cope with these large external forces, three kinds of new type rubber gasket are developed. Static and dynamic loading tests are carried out to know fundamental mechanical properties for 1/2 model test specimens. Relaxation test and eternal deformation test by heat acceleration method are also carried out to know deterioration of the rubber material during long term. This paper describes these test results and mentions design concept of the rubber gasket.

Key words: Rubber gasket, Loading test, Relaxation, Immersed tunnel

1. まえがき

地震や地盤の不等沈下により沈埋トンネル函体に生じる大きな断面力を低減するために図-1に示す柔継手¹⁾が設置される。柔継手にはゴムガasketとPCケーブルが使用されるが、ゴムガasketは主に圧縮力に対して抵抗する構造部材である。また止水機能も保持している。ゴム材は、外力が作用すると大きく変形する。材料非線形性と幾何学非線形性の二つの性質を持ち合わせている。水圧接合時や地震発生時などに、ゴムガasketに大きな軸圧縮力が作用するので耐荷力、変形性能および止水性に関して十分な検討が必要である。特に地震時に動的に繰り返し荷重が作用するので静的だけでなく動的な安全性も照査する必要がある。またゴムガasketは、50-100年と使用されかつ設置後は取り替えも容易でない。このため長期間にわたる力学的性質の変化に関する検討も不可欠である。今回従来より水深が深くかつ地震力も大きな地点に建設される沈埋トンネルを対象に、耐荷力と変形性能に優れたゴムガasketを開発する目的で3種類のゴムガasketを選定して各種の基本的な力学試験を行ったので報告する。

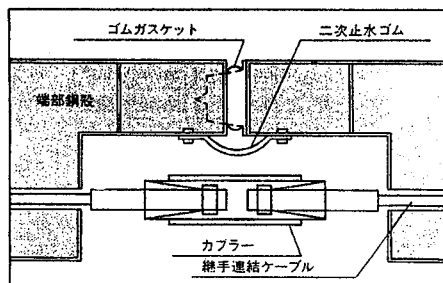


図-1 沈埋トンネルの継手

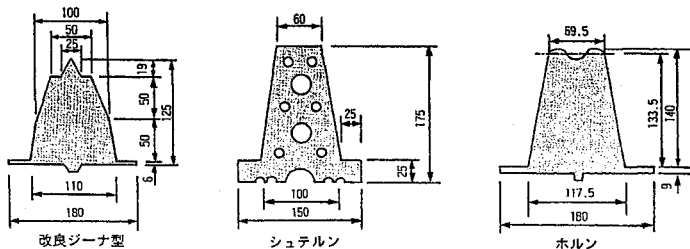


図-2 新形式ゴムガasket

2. ゴムガasketの形状と材質

従来ジーナ型のゴムガasketが広く沈埋トンネルに使用されてきた。この形式よりさらに変形性能を得るた

めに開発されたのが図-2に示す3種類のゴムガasketである。改良ジーナ型は、従来ジーナ型の背を高くし肩の部分を切り落としてある。上部にはノーズと呼ばれる仮止水用の突起が付いている。本体の下部には繊維補

強されたフランジがあり沈埋函本体とボルトで固定される。シュテルン型は、台形の本体に大小8個の貫通孔が設けられている。本体上部が柔らかいことからノーズは取り付けられていない。またフランジ部分はジーナ型より厚くなっている。これは、ボルトでなく押さえ板で沈埋函本体に固定されるからである。ホルン型は、従来ジーナ型よりやはり背が高く、上部に二つの半円形状のノーズが取り付けられている。これは、ジーナ型のノーズよりも圧縮時の応力集中を避けるために工夫されたものである。沈埋函本体にはジーナ型と同様にボルトで固定される。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（エチレンプロレディエンモノマー：EPDM）である。表-1にJIS K6301に従って行った各材料の物性試験結果を示す。

またゴムガスケットは製作工程の関係から工場で行くつかに分割製作してから1本に接合する。1本で全長約80mとなるこれらの接合部は、加硫済みのゴムガスケットを生ゴムを介して再度加硫して製作する。接合部が構造的な弱点になるか調べるため接合部有りとなしの試験体を製作する。シュテルン型は、成形押しだし工法により工場内で連続製作されるので改良ジーナ型のように多数の接合部は存在しない。

表-1 ゴム材の基本的な材料試験

試 験 項 目		改良ジーナ型			シュテルン型	ホルン型	
		硬度 温度	40度	50度	60度	60度	50度
硬 さ 試 験 JISA (度)		10℃	45	55	63	70	52
		20℃	43	52	60	62	50
		30℃	41	50	59	60	49
引張試験 (JIS3号型)	強 さ (kgf/cm ²)	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	
	伸び変化率 (%)	-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	

3. ゴムガスケットの設計

ゴムガスケットの設計については、特に設計指針類はなく個々の沈埋トンネルで個別に検討している。東京湾内の建設予定の某沈埋トンネルでは、地震時の検討でのばね定数の検討と止水性に対する安全性の検討からゴムガスケットの形状と材質が設定されている。ゴムガスケットの荷重変位曲線は履歴を描くが、ばね定数は線形として取り扱われており、一般的にゴムガスケットの載荷時の荷重変位関係を用いて次式により求められる。

ばね定数 $K_c = (P_{max} - P_0) / (\delta_{max} - \delta_0)$ (1)

ここで P_{max} : 地震時にゴムガスケットに作用する最大荷重、
 P_0 : 沈埋トンネル接合時に作用する荷重、
 δ_{max} : 地震時のゴムガスケットの圧縮変形量、
 δ_0 : 沈埋トンネル接合時の圧縮変形量
沈埋函の接合部での止水に対するゴムガスケットの設計圧縮量（許容値）は当トンネルでは次式で求める。

設計圧縮量 = 初期変形量 - 永久変形量 - ノーズの高さ - 外力作用時の変形量 (2)

ここで初期変形量：沈埋トンネル接合時のゴムガスケットの変形量
（施工時の誤差を考慮して0.9を乗じる）
永久変形量：ゴムガスケットの100年後の劣化により圧縮変位量の戻りの低減量
（ゴムガスケット本体高さの15%）
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は組み合わせない）

この圧縮量の時のゴムガスケットの上端の接面応力を計算する。接面応力は設計圧縮量時に作用する軸力を接触面積で除した値で、この接面応力にゴムガスケット係数（1.3をここでは採用）を乗じてゴムガスケット周囲の水圧以上であることを確認する。

作用水圧 ≤ ゴムガスケット係数 × 接面応力 (3)

接面応力について長期にわたる応力緩和についても配慮することが望ましい。100年相当の応力緩和率は、現在80%を用いている。すなわち沈埋トンネル接合時の初期の接面応力の80%を設計時に考慮している。ゴムガスケットの圧縮耐荷力について現状では特に規定がない。載荷試験ではかなりの高荷重まで破断しない結果を得ている。ゴム材の引張による破断は、応力値よりむしろひずみ値で評価される。ゴムの材質により異なるが一般的に一軸状態では約500%、二軸状態では約200%のひずみ²⁾で破断する。大きな値のひずみ量が地震時などに生じないゴムガスケットの形状や材質を選定すべきである。また止水性に関連してゴムガスケット周囲の静水圧によるゴムガスケットの横倒れの検討も設計時に不可欠である。ただしこの横倒れ問題について本論文では言及しない。

4. 力学試験の概要

4.1 試験体の概要

試験体の縮尺は、実物の1/2である。試験体の長さは、50cmである。改良ジーナ型については、硬度40度、50度及び60度、シュテルン型については60

度、ホルン型については50度を取り上げた。ここで硬度とは、ゴム材の堅さを表示する指標で数字が大きいほど堅い材質である。

4. 2 静的圧縮試験

図-3に載荷試験状況を示す。試験体を水平方向に2枚の鋼製の載荷板にはさむ。ゴムガスケット底部を改良ジーナ型とホルン型についてボルトでシュテルン型は止め金具で載荷板に固定する。ゴムガスケット上部をもう一枚の載荷板に押しつける。この載荷板に油圧による振動機をボルトで固定させる。振動機の容量は、荷重振幅150tfである。載荷の際ゴムガスケットが偏心しないように2枚の載荷板間に4本の丸鋼を渡す。この丸鋼は載荷板と極力摩擦を取り除くためベアリングで支持されている。また振動機、載荷板と試験体が載荷試験中に上下方向に偏心しないようにローラーにより試験体下方全体を支持する。ゴムガスケットの端面は厚さ30mmの亚克力板でゴムガスケット軸方向の変形を拘束する。また極力亚克力板との摩擦を少なくするためグリースを塗布する。載荷試験は、図-4に示すように10tf、20tf、30tfまで0.5-1.0tf間隔で徐々に載荷しその都度除荷を行う。最後に100tfまで荷重を増加させ除荷する。100tfがほぼ実物での地震時にゴムガスケットに作用する荷重対応している。

ゴムガスケットの温度環境として10度、20度及び30度を設定する。試験体周囲をベニヤ製の箱で囲い空調装置で所定の温度を載荷試験中に保持する。

測定項目は、載荷荷重、ゴムガスケットの上下方向と横方向の変位置および接面圧（ゴムガスケットと載荷板間）である。変位置は4台の変位計で、接面圧は10台の高感度の圧力変換器で計測する。試験体の中央部の上面と下面に3台ずつ、端部の2箇所の上と下面に1台ずつ配置した。試験体上面の中央部の圧力変換器の間隔は15mmである。静的試験体の試験ケースは表-2示す15であり、再現性を確認するため各ケース3体ずつ製作する。

4. 3 動的圧縮試験

動的圧縮試験での試験体のセットは、静的圧縮試験と同じである。振動機を用いて試験体に周期2-3秒の正弦波形を作用させる。荷重レベルは、3種類である。すなわち25tfを基準に振幅20tf、35tfを基準に振幅30tfおよび45tfを基準に振幅40tfである。環境温度は、室温（約20度）である。動的圧縮試験の対象とする試験体は、静的圧縮試験の場合と同じである。ゴムガスケットの使用期間中に大規模な地震が発生する回数は少ない。大規模な地震でも主要動に当たる箇所の波数は10-20波と考えられる。このため地震動に対する安全性の評価認のためには少なくとも100回以上の繰り返し載荷に耐えられることを確認する。またどの程度の繰り返し回数まで破壊しないかについて

は、5000回程度の繰り返し載荷を行う。測定項目は静的圧縮試験と同じである。試験体のケースは15である。各ケース1体ずつの試験体を製作する。

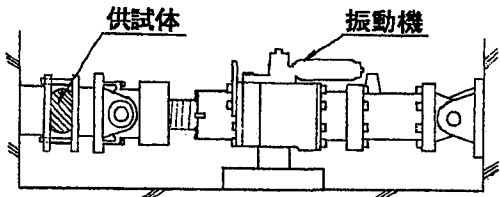


図-3 載荷試験状況

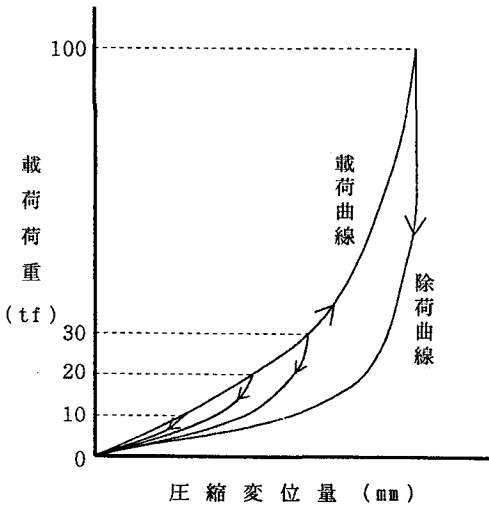


図-4 載荷パターン

表-2 試験ケース

試験供試体	硬 度	温 度
改良ジーナ型	Hs=40	t=10℃
	50	20℃
	60	30℃
シュテルン型	Hs=60	t=10℃
		20℃
		30℃
ホルン型	Hs=50	t=10℃
		20℃
		30℃

4. 4 応力緩和試験⁹⁾

ゴム材は、長期間にわたり持続荷重を受けると初期の接触圧力が低減する。これはゴム材の酸化作用などによる劣化によるものである。化学反応速度論的な考え方によると、温度が高いほど劣化が促進される。アレニウスの理論として知られている。ゴム材を各種温度にある一定期間放置し、近似的に温度と劣化速度の関係を求め、ゴムガスケットの使用温度での劣化寿命を推定する。使用温度として20度、劣化寿命として100年を設定す

る。

いまゴム材料の劣化特性が初期状態 x_0 であったのが t 時間後に x_t に変化したとする。ここで x の t による変化を n 次反応とすると次式が成立する。

$$dx/dt = -kx^n \quad (4)$$

ここで k は速度定数である。ゴム材料では経験的に $n = 1$ (1 次反応) と考えられている。上式の解は次式である。

$$\ln(x_t/x_0) = -kt \quad (5)$$

アレニウスによると速度定数は、温度の関数として次式で与えている。

$$k = A \cdot e^{-E/RT} \quad (6)$$

ここで A : 頻度因子、 E : 見かけの活性化エネルギー (Kcal/mol)、 R : 気体定数 (Kcal/mol $\cdot$ °C)

T : 絶対温度 (°C)

上の 2 式から次式が得られる。

$$\ln(t) = E/RT + \ln\{1/A \cdot \ln(x_0/x_t)\} \quad (7)$$

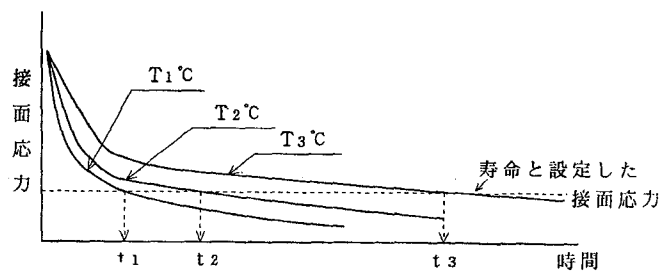
このことは反応次数が変化しないような特定の温度範囲を選ぶなら、温度と反応時間が一義的に関係づけられていることを意味している。すなわち室温における変化と同一な変化が高温で短期間に得られることを示している。

従ってゴム材料の劣化の促進条件を求めるために図-5 に示す次の手順をとる。ゴム材料の 100 度前後の温度 ($T_1, T_2, T_3, \dots$) で劣化促進実験を行い x_t/x_0 が 0.8 (設定する) になる時間 ($t_1, t_2, t_3, \dots$) を求める。次に (7) 式により $t_1, t_2, t_3, \dots$ を $1/T_1, 1/T_2, 1/T_3, \dots$ に対してプロットする。この勾配から E/R が得られる。従ってある環境温度 (沈埋トンネル内なら 20 度ぐらい) における反応時間 t_* を求めることができる。

すなわちすなわちある高温 (T_i 度) で 1 日劣化させたものはある環境温度で t_*/t_i 日劣化させたものと同じとしている。

水圧接合時の初期荷重に相当する圧縮量をゴムガスケットに導入する。試験最初の導入荷重は、25 tf である。この荷重でゴムガスケットの圧縮量を試験中に固定する。長さ 50 cm、幅 30 cm、板厚 2.4 cm の 2 枚の鋼板の間に模型のゴムガスケットを置き、PC 鋼棒 6 本を用いて油圧ジャキにより載荷を行う。所定の圧縮量の位置で PC 鋼棒のナットを固定する。鋼板に取り付けたロードセルと鋼板とゴムガスケット間に設置した圧力変換器 (1 台) で接触圧力の変化を計測する。圧縮量を導入した状態で恒温室の中に放置し、この荷重と圧力の変化を計測する。設定した環境温度は、60 度、70

度及び 80 度である。試験体の総数は 15 体である。



変換

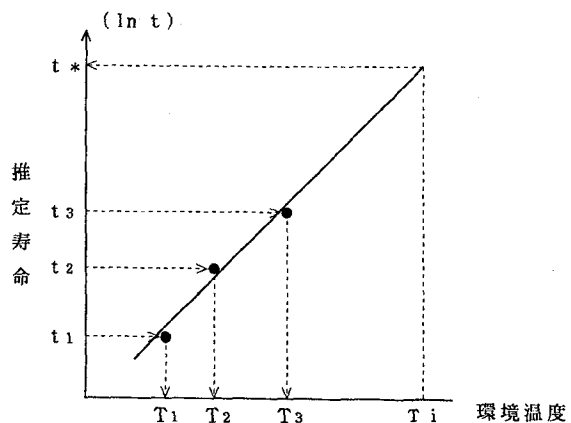


図-5 劣化寿命の計算方法

4.5 永久変形量試験

永久変形量試験の方法は、応力緩和試験とほぼ同様である。一定圧縮量の基に劣化促進させる期間ごとに荷重を取り除きゴムガスケットの高さの変化から 100 年後の永久変位量を推定するものである。ゴムガスケットに与えた初期荷重は 25 tf でこの圧縮量で固定する。この状態で恒温室に放置する。設定した環境温度は 70 度である。測定項目はゴムガスケットの高さのみで、ノギスにより計測する。測定時に載荷治具を取り外し、測定後もとの圧縮量に戻す。測定日時は、1 日、7 日、35 日、57 日である。

5. 試験結果

5.1 静的圧縮試験結果

図-6 に改良ジーナ型 (硬度 50 度) での載荷時の断面の変形状を示す。載荷荷重が増加するにつれてまずノーズ部分がつぶれ次にゴムガスケット本体の中央部が鉛直方向に圧縮され横方向にはらみだした。図中の升目は 1 cm ごとにペンキで描いたものであるが、この升目の変形状態から断面内のひずみ量 ($\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$) が変位量 (u, v) をもとに次式⁴⁾で計算できる。

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= du/dx + 0.5\{(du/dx)^2 + (dv/dx)^2\} \\ \epsilon_y &= dv/dy + 0.5\{(du/dy)^2 + (dv/dy)^2\} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\gamma_{xy} = dv/dx + du/dy + du/dx \cdot du/dy + dv/dx \cdot dv/dy$$

このひずみをグリーンひずみ（変位の変化の2次の項まで考慮）として求めたものを図-7に示す。圧縮量60mmのとき本体中央に約50%の鉛直方向ひずみ（y）が約80%の横方向ひずみ（x）が計算された。本体中央部の図-8にシュテルン型での荷重時の断面の変形状態を示す。シュテルン型ではまず本体上部で圧縮されこの領域が荷重荷重の増加とともに次第に下方へ及んでいった。本体の貫通孔は荷重とともに上下方向に押しつぶされた。ホルン型の変形状態は、ほぼ改良ジーナ型と同じであった。

図-9に改良ジーナ型の硬度50度の試験体での荷重変位曲線を示す。荷重とともに圧縮変位が増加するが、荷重荷重が20tfを越えると圧縮変位が次第に進行しなくなった。除荷を行うと荷重曲線の下方の経路をたどり原点に向かった。図-10に各種形状による荷重時のみの荷重変位曲線を示す。シュテルン型が他の形状よりも大きな変形能力を有していた。ホルン型は、改良ジーナ型の硬度40度とほぼ同じ荷重変位曲線となった。改良ジーナ型は、硬度（Hs）の値が小さいほど変形吸収能力が大きかった。改良ジーナ型とホルン型では圧縮量が60mm、シュテルン型では80mmを越えると荷重変位曲線の勾配が立ち上がってきたが、立ち上がり後の勾配はどの形式でも大きな差はなかった。図-11に環境温度が荷重変位曲線に及ぼす影響を示す。10度-30度の範囲では、高温ほど変形能力が大きくなる傾向を示すものの、環境温度による影響はさほど大きくなかった。静的荷重試験では、今回の最大荷重時の範囲内では、いずれのゴムガスケット試験体に破壊や亀裂の発生などの現象は見られなかった。

図-12にゴムガスケット上端の中央部に設置した圧力変換器で計測された界面圧力と荷重荷重との関係を示す。中央部では改良ジーナ型が一番大きな界面応力にホルン型が一番小さな界面応力となった。これはゴムガスケットの上部の構造によるものである。改良ジーナ型は、ノーズの影響によりゴムガスケット中央部の界面応力度が大きくなり、ホルン型では中央部がくぼんでおり界面応力度が小さくなった。このことは図-13に示すゴムガスケット上部の断面内の界面応力の分布からも言える。式（3）で止水性の検討をすると水深30m沈埋管が設置されると仮定すると約18Kgf/cm²（0.8×30×1.03/1.3）の界面応力時までの圧縮量のところまで止水できることになる。改良ジーナ型は、他の2種類のゴムガスケットより界面応力が大きく止水性に対する安全性が高いことになる。式（1）により計算されたばね定数を表-3に示す。ここでP_{max}は100tf、P₀は25tfとした。環境温度20度で、改良ジーナ型、シュテルン型、ホルン型の順にばね定数の値が大きかった。

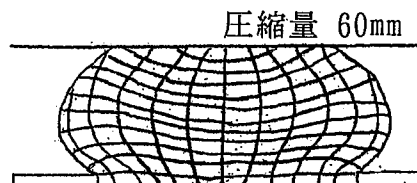


図-6 改良ジーナ型での変形状況

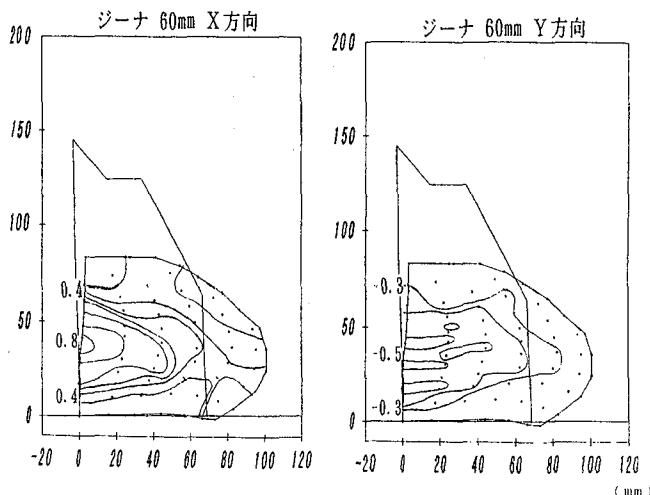


図-7 ひずみ量の分布

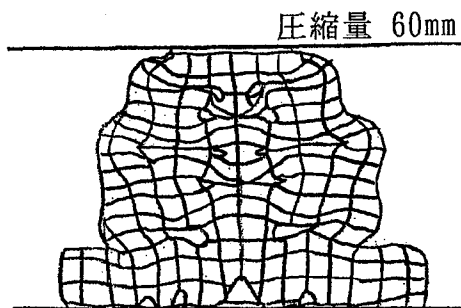


図-8 シュテルン型での変形状況

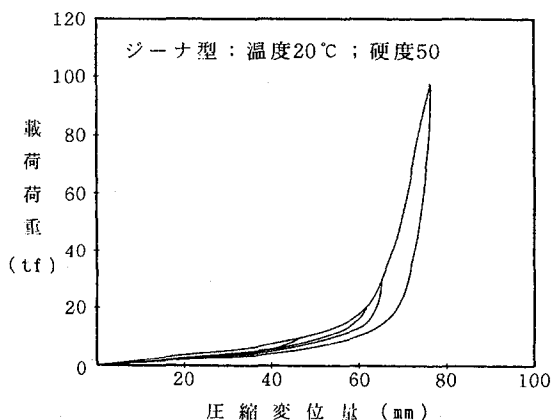


図-9 改良ジーナ型の荷重変位曲線

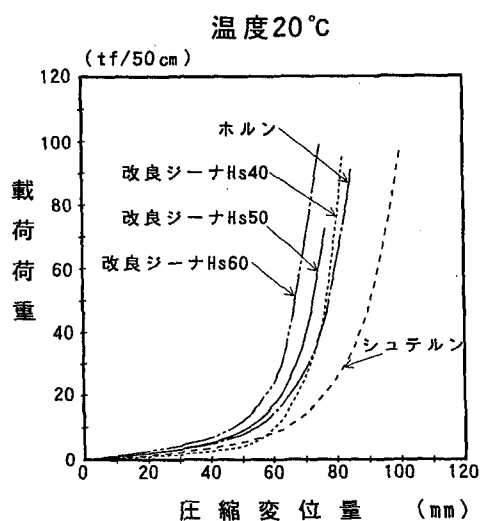


図-10 各種形状での荷重変位関係

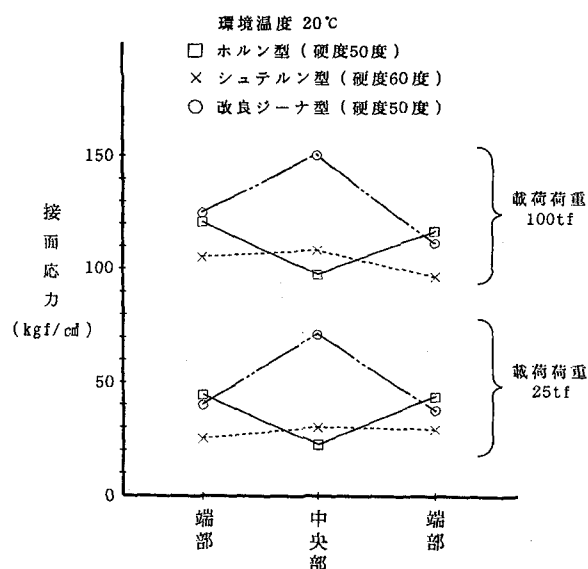


図-13 接面圧力の分布

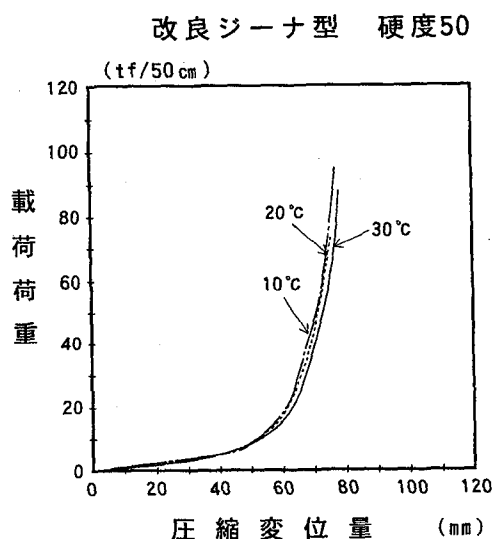


図-11 環境温度の影響

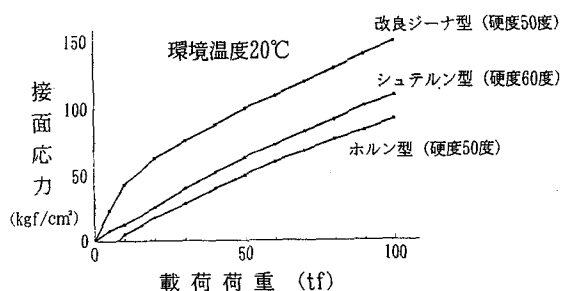


図-12 接面圧力と荷重との関係

表-3 ばね定数の値

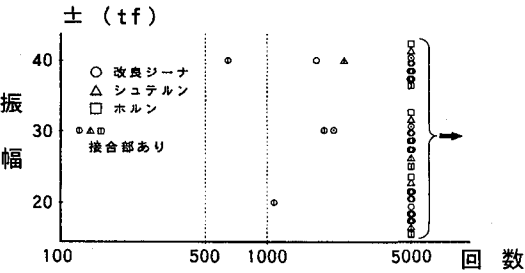
	硬 度	ばね定数 tf/mm/50cm
改良ジーナ型	40°	6.114
	50°	6.016
	60°	5.713
シュテルン型	60°	5.125
ホルン型	50°	4.495

5. 2 動的圧縮試験結果

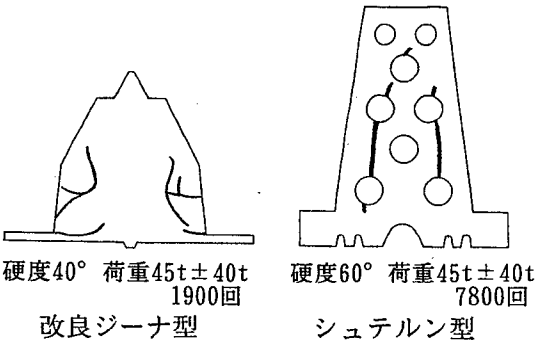
図-14に試験結果の一覧を示す。5000回以上繰り返し載荷しても破壊しなかった試験体を、この図では5000回で打ち切って表示した。大半の試験体で5000回以上繰り返し載荷しても破壊しなかったが、改良ジーナ型で接合部を有する試験体で数百回の繰り返し載荷後破壊した試験体があった。ただし当初想定していた100回程の繰り返し載荷で破壊した試験体はなく、地震時の繰り返し荷重に対して一応の破壊の安全性を確認できたと言える。図-15に改良ジーナ型とシュテルン型での試験体断面の亀裂発生状況を示す。ホルン型では亀裂の発生状況が見られなかった。改良ジーナ型の硬度40度で基準荷重45tfで振幅40tfの場合、約690回の繰り返し載荷後、ゴムガスケット端面の表面に亀裂の発生が認められた。その後亀裂はゴムガスケット断面両側に鉛直方向に発生した。2350回を過ぎると試験体の変位振幅が増加し破壊と認められた。シュテルン型では、ゴムガスケット断面の両側に貫通孔を結ぶ形状で亀裂が生じた。

図-16に繰り返し回数とゴムガスケットの圧縮変位量との関係を示す。改良ジーナ型では、繰り返し回数が1000回を越える付近から圧縮変位量が次第に増加し始めた。改良ジーナ型の硬度50度と60度では亀裂の

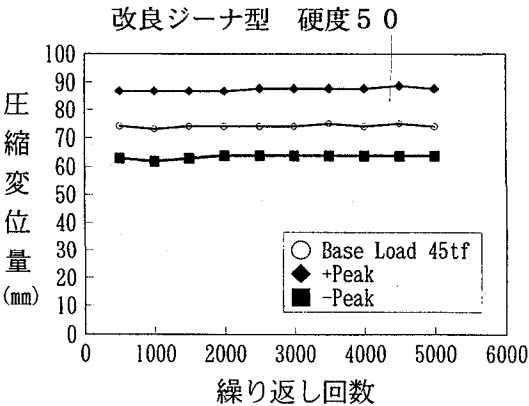
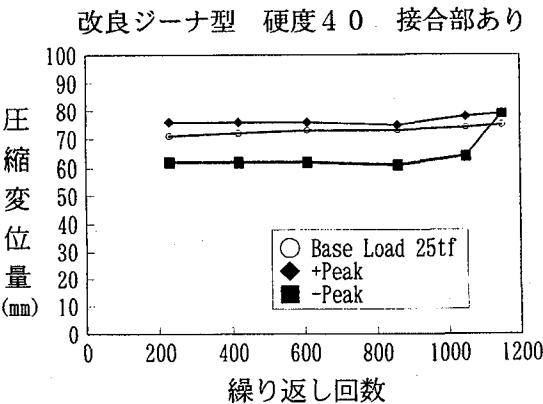
発生も圧縮変位量の増加も見られなかった。接合部を有する硬度40度の場合発生ひずみ量も大きく疲労破壊し易い傾向が見られた。



図－1 4 動的圧縮試験結果



図－1 5 亀裂の発生状況



図－1 6 繰り返し回数と圧縮変位量との関係

5. 3 応力緩和試験結果

応力緩和率(ρ)の定義は、次式で示される。

$$\rho = P_i / P_o \times 100 \quad (\%) \quad (9)$$

ここで P_i : 経過日数後のロードセルの荷重値
 P_o : 初期荷重25tfのときのロードセルの荷重値

図－1 7 から図－1 9 に改良ジーナ型での応力緩和率の経日変化を示す。時間が経つとともに応力緩和率は、小さい値となった。環境温度が高いほど応力緩和率の低減は、大きくなった。また硬度が応力緩和率に及ぼす影響は顕著ではないが硬度が大きいくほど応力緩和率は低下した。ゴムガスケットの設計では、100年後の応力緩和率が80%になったときに劣化が進行しと定義している。このときの経過日数と環境温度との関係を整理したものを図－2 0 に示す。沈埋トンネル内の温度を20度と仮定してこのときの応力緩和率が80%での経過時間を60度、70度及び80度の3点から外捜して求めると約 e^{15} 時間(373年)となる。シュテルン型とホルン型でも約370年となった。従って今回の試験体は、いずれも設計時に想定した以上に応力緩和しないと言える。

5. 4 永久変形量試験結果

永久変形量は、ゴムガスケットの高さの変化から求め、次式により永久圧縮変形率を定義した。

$$\text{永久圧縮変形率} = \frac{\text{初期の高さ} - \text{経過後の高さ}}{\text{初期の高さ}} \times 100\% \quad (10)$$

図－2 1 にゴムガスケットの高さの経日変化を示す。劣化促進初期に大きな変形を示しその後ほぼ一定の高さの変化状態となった。57日経過した時点で各種のゴムガスケットで20mmほどの高さが減少した。この高さの変化から得られた永久圧縮変形率と経日変化の状況を図－2 2 に示す。測定を行った1日、14日、35日および57日での値を外捜して100年後の永久圧縮変形率を求めた。改良ジーナ型では15.5～20%、シュテルン型では5～10%、ホルン型では約15.5%であった。JISに定められている方法での永久圧縮変形率は、ジーナ型とシュテルン型で約8%、ホルン型で10%であった。従って小さな試験片による値よりも今回の試験体の方が大きな永久圧縮変形率を示したことになる。またゴムガスケットの設計では、100年後の永久圧縮変形率を15%と設定しているがこの値よりもジーナ型と

ホルン型に関して試験値の方がやや大きかった。

改良ジーナ型：硬度50

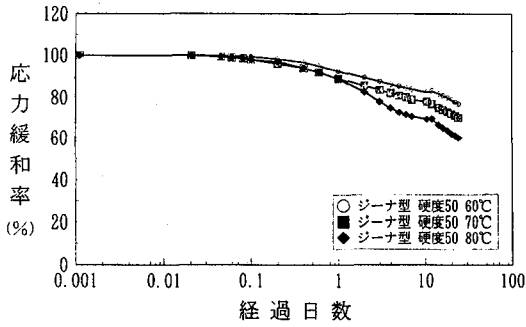


図-17 改良ジーナ型の応力緩和率の経日変化

シュテルン型：硬度60

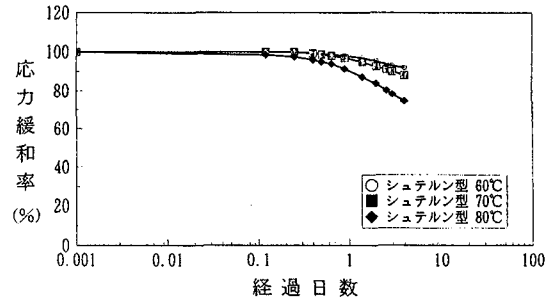


図-18 シュテルン型の応力緩和率の経日変化

ホルン型：硬度50

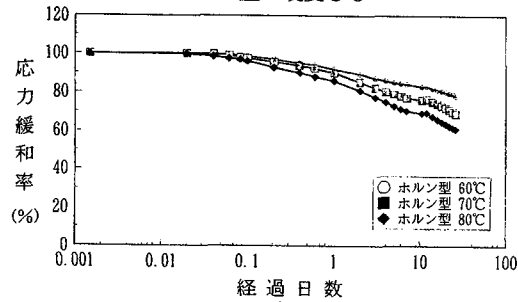


図-19 ホルン型の応力緩和率の経日変化

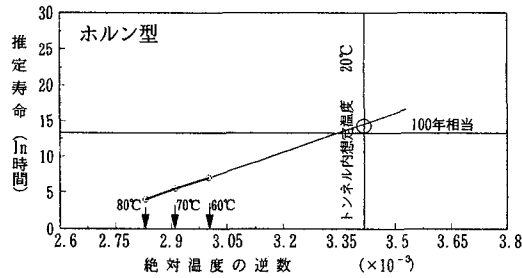
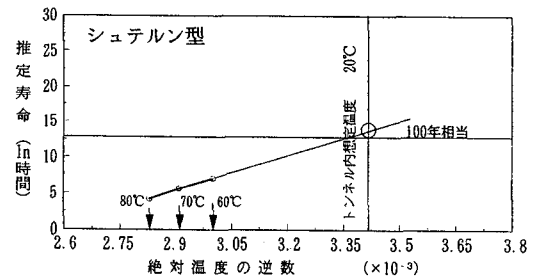
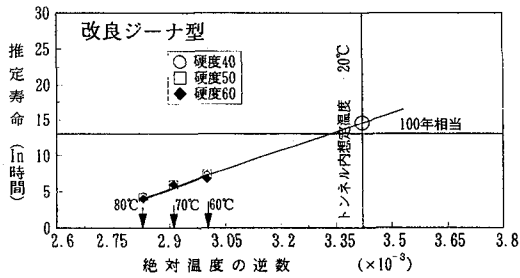


図-20 経過日数と環境温度との関係

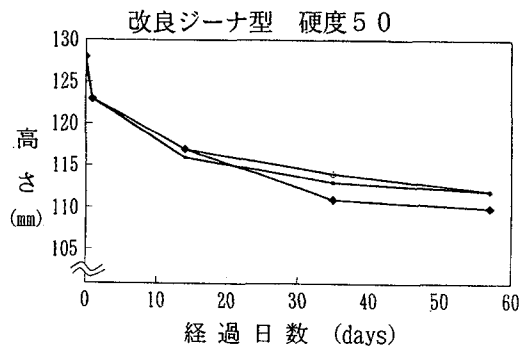


図-21 ゴムガasketの高さの経日変化

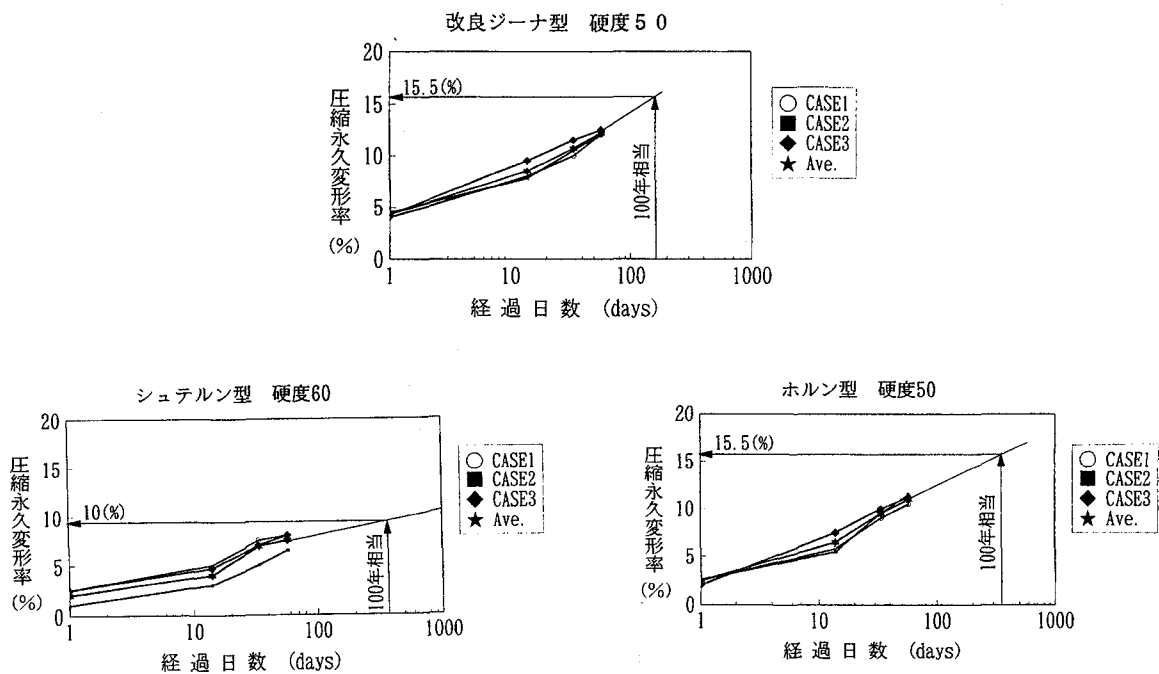


図-2.2 永久圧縮変形率の経日変化

6. 結論

(1) 静的圧縮試験で得られた結果

いずれの試験体も載荷荷重100tfの範囲で亀裂や破壊現象は生じなかった。改良ジーナ型、ホルン型よりもシュテルン型の方が同一荷重に対してかなり大きな圧縮量となった。ゴムガスケットの硬度(40度、50度及び60度)が大きいほど変形能力は小さかったが、環境温度(10度、20度及び30度)による影響はほとんどなかった。

(2) 動的圧縮試験で得られた結果

いずれの試験体もかなりの繰り返し数(数百回)まで亀裂や破壊は生じなかった。使用期間中に何回か設計地震動が来襲しても圧縮強度的には安全と言える。ただしゴムガスケットの接合部がある試験体では、接合部がない試験体より動的な耐荷力が小さかった。また硬度が小さい方が、動的な耐荷力が小さい傾向が見られた。破壊した試験体では、ゴムガスケット本体の両外側の位置に鉛直方向に亀裂が生じた。

(3) 応力緩和試験で得られた結果

環境温度60度、70度及び80度での加熱による促進試験の結果から100年後の応力緩和率はいずれの試験体でも80%以上あった。

(4) 永久変形量試験で得られた結果

環境温度60度、70度及び80度での加熱による促進試験の結果から、永久圧縮変形率は、改良ジーナ型で15.5-20%、シュテルン型で5-10%、ホルン型で約15.5%であった。JISに定められている方法で

の永久圧縮変形率は、ジーナ型とシュテルン型で約8%、ホルン型で10%であった。従って小さな試験片による値よりも今回の試験体の方が大きな永久圧縮変形率を示したことになる。

7. あとがき

本試験は、沿岸開発技術研究センターからの受託試験として実施したものである。試験に際しては、日本シールドエンジニアリングの小林 亨氏ら、港湾技術研究所構造強度研究室の田邊源吾氏の協力を頂いた。ここに感謝の意を表する。今回提示したゴムガスケットは最終的な形状ではない。強度特性以外の止水性、横だおれ等の検討からもよりよい形状を選定、改良したい。なお現在、止水性と横だおれについては実験を実施中なので今後報告したい。

参考文献

- (1) 清宮 理他3名：沈埋トンネル柔継ぎ手の載荷試験、構造工学論文集、Vol.39A, pp.1447-1456, 1993年4月
- (2) 柴田 豊：ゴムの疲労破壊、材料科学、Vol.21, No.6, pp.175-179, 1985年4月
- (3) 日本ゴム協会：長期自然老化と人工促進老化との対比に関する報告書、ゴム工業技術委員会報告、No.8409, 7-6p, 昭和60年3月
- (4) 鶴戸口英善：弾性学、共立出版、昭和41年、pp.17-20

(1994年9月14日受付)