

沈埋トンネル用ゴムガスケットの座屈に関する解析と実験

ANALYSES AND EXPERIMENTS ON THE BUCKLING PHENOMENA OF RUBBER GASKET AT IMMERSED TUNNEL JOINT

清宮 理*、神頃 明**、林 信治***

Osamu KIYOMIYA, Akira KAMIGORO, Nobuharu HAYASHI

* 工博 早稲田大学 土木工学科教授 (〒169 東京都新宿区大久保3-4-1)

** 工修 住友ゴム工業株式会社 建設品技術部 (〒651 神戸市中央区脇浜町3-6-9)

*** 住友ゴム工業株式会社 建設品技術部 (〒651 神戸市中央区脇浜町3-6-9)

When rubber gasket at joint part of immersed tunnel is compressed by water pressure load in the joint work of the tunnel, extraordinary zigzag deformation sometimes happens not only in the lateral but also in the lengthwise. This phenomena, "longitudinal buckling", might damage the stability of the rubber gasket and water-tightness. The occurrence of the longitudinal buckling depends on the sectional dimension of rubber gasket, rubber hardness, friction coefficient between rubber gasket and contact surface of the tunnel, irregularities at the ends of the tunnel, and so on. It is very difficult to estimate the influence on these factors. Therefore, we have studied the mechanism of the longitudinal buckling through FEM analyses and experiments and found out the occurrence conditions for the longitudinal buckling.

Key Words: Rubber gasket, Immersed tunnel, Buckling, Loading test, FEM

1. まえがき

沈埋トンネルには、地震あるいは地盤の不等沈下等によって発生するトンネル長手方向の断面力を軽減するために図-1に示すような柔継手が設けられる。柔継手は、圧縮方向のばね機能を果たすゴムガスケットと、引張方向に拘束する連結ケーブルとで構成されている。

近年わが国では、沈埋トンネルの地震対策として兵庫県南部地震を想定して設計されることから、より大きな変形量を得ることができるゴムガスケットの開発が要求されている。一般的には大きな変形量を得ようとすれば、

- ① ゴム硬さを柔らかくする。
- ② ゴムガスケットの高さを高くする。
- ③ ゴムガスケットの形状を大きくする。

等の案が考えられるが、沈埋函の端部鋼殻の幅自体に設計上制限があるため方策は限られている。現状では①②の案が容易に採用できる方策であるが、この考え方に沿って設計された背の高いゴムガスケットを上下方向に圧縮してみると、圧縮率がある程度大きくなると横方向に荷重を加えなくても、ある条件下でゴムガスケットが横倒れを起こすような現象がみられた。従来ゴムガスケットが横倒れを起こす原因としては、図-2に示すような水圧接合作業の進行に伴い、沈埋函の内外圧の圧力差が徐々に大きくなる結果として生まれる横方向の水圧荷重によるものと考えられてきた。

しかし、今回の横倒れ現象は横荷重の作用が無くとも発生することから、この現象をゴムガスケットを圧縮したときの長手方向の伸びを拘束することによって発生する座屈現象の一種ではないかと考えた。(以後この横倒れ現象を縦座屈と称する。)縦座屈が発生すると、ゴムガスケットの安定性を損ね、かつゴムガスケットが沈埋函バルクヘッドよりはみ出す可能性がある。この結果漏水の原因ともなるため、この現象を検討することはトンネル全体の安全性を向上させるためにも重要なことである。本研究では、この縦座屈の発生を促進する要因を抽出し、有限要素法解析及び実験的検討を通して、これらの要因の縦座屈への影響度合いを調べた。

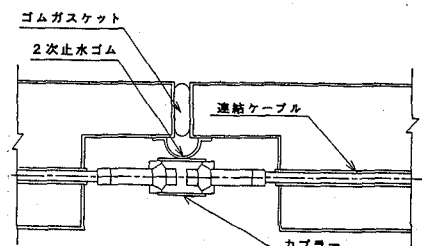
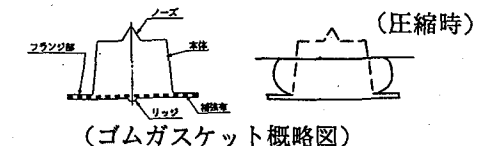


図-1 沈埋トンネルの継手構造

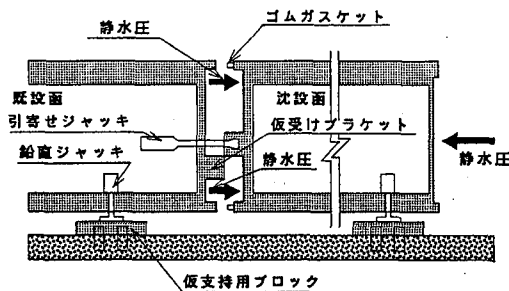


図-2 水圧接合過程の概要

2. 縦座屈を引き起こす要因

一般に座屈現象を引き起こす時の座屈荷重は式-1のように表される。

$$P_{cr} = \frac{k\pi^2 EI}{l^2} \quad (\text{式-1})$$

ここに、 P_{cr} ：座屈荷重 k ：比例定数
 E ：弾性係数 I ：断面二次モーメント
 l ：座屈長さ

ゴムガスケットは通常の柱のように圧縮荷重のみならず、図-3のようにその頂部には摩擦力を受けるとともに、脚部には端部鋼殻に固定することに起因する横変形量に比例する力（横剛性力）を受けてもいる。そのため、座屈荷重 P_{cr} はこれら摩擦力と横剛性力にも影響される。

(断面)

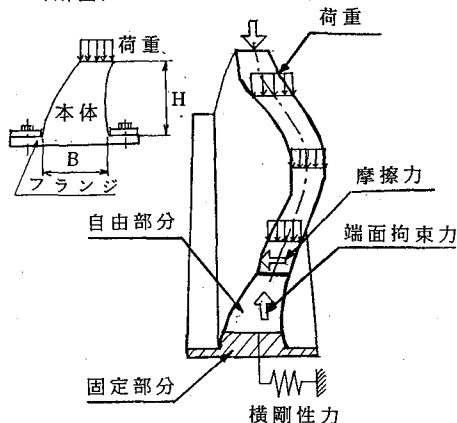


図-3 縦座屈と作用外力

この式(式-1)と実際にゴムガスケットに作用する外力を整理することによって、ゴムガスケットの縦座屈に影響を及ぼす要因が抽出される。具体的にこれらの要因を記すと、ゴムのヤング率（ゴム硬さ）、ゴムガスケットの形状、載荷面の摩擦係数および横剛性力であると考えられる。ゴムガスケットの形状は現在実際に施工されているものに限定し、その断面は矩形断面とみなしても差し支えないことから、ゴムガスケットの形状を定量的に表現する指標として、断面の高さと幅とのアスペクト比(H/B)を採用した。同様に、横剛性力もこの H/B とゴム硬さによって決定されるため、最終的に検討対象として抽出した要因は①ゴム硬さ②高さとの比(H/B)③載荷面の摩擦係数とした。

以下、これらの要因の縦座屈現象への影響をパラメトリックに有限要素法解析及び実験を行った。

3. 有限要素法解析

3.1 目的

縦座屈現象は一種の不安定現象なので有限要素法解析によってその飛び移りの状態を解析することは困難であるが、飛び移り前の前兆は把握することが可能と考えた。

しかし、当初は、形状およびその他の条件がその断面の中心線に関して対称であるため、座屈が有限要素法解析上では発生しなかった。現実問題としては、この有限要素法解析のように全くの対称モデルは存在しえず、ゴムガスケットの製品誤差、載荷面の不陸や施工誤差によって対称性は保持されない。そこで、これらの誤差はゴムガスケットが圧縮された場合に非対称性を発生させる外乱と解釈できるので、非常に小さい横荷重を加えることによってその非対称性を表現した。

このような基本的な解析手法を採用しつつ、 H/B をパラメータとした縦座屈現象発生傾向の確認を行った。

3.2 解析モデル

(1) 断面形状

現在よく使用されるゴムガスケットの H/B を試算してみると、表-1の通り、0.7~1.0程度の範囲である。しかし、縦座屈現象が問題となるのは H/B が大きな場合であるので、計算では H/B を0.8、1.2及び1.6として考えた。

表-1 ゴムガスケットの H/B

型式	H/B
G155-109	0.73
G190-148	0.72
G190-200	0.97

また、計算の対象としたゴムガスケットモデルは、長さを1mとし、断面形状はノーズ、フランジ、リッジ等のない簡易のものとするとともに、後述の実験に用いた供試体と同じく、通常のゴムガスケットの1/2縮尺とした。

(2) ゴム硬さ

材料はゴムであることから、超弾性体として取り扱う。

また、一般によく用いられているゴムガスケットのゴム硬度は40度から50度程度の場合が多い。本解析でも、ゴム硬さを40度及び50度として計算をおこなった。なお、解析に用いた材料定数は、実際のゴム硬さ40および50度のゴムガスケットの圧縮特性と同定してムーニー・リブリン材の定数を設定した。

表-2 ゴム硬さと材料定数

ゴム硬さ(度)	$C10(\text{kgf/mm}^2)$	$C01(\text{kgf/mm}^2)$
40	0.025	0.001
50	0.030	0.001

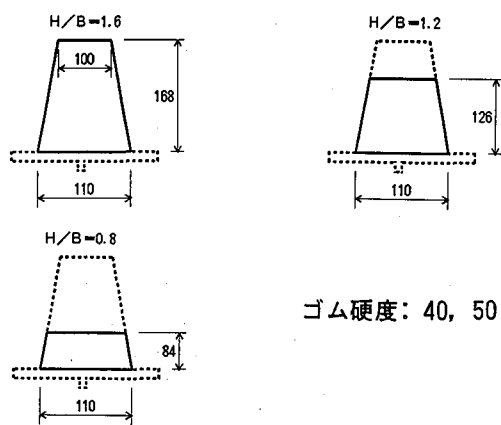


図-4 解析対象ゴムガスケット断面

(3) 解析方法

要素分割は前述の3断面をそれぞれ 8×4 , 6×4 , 4×4 のメッシュに分けるとともに、長さ方向は20分割した。

拘束条件は図-5に示すように、両端面についてはZ軸方向に拘束し、また押さえ板で固定されているフランジ部については、本体側面との交線部分はX, Y, Z方向全てに拘束されたものとし、これら以外の下面の節点の個々については自由とした。

一方、前述したように、解析対象であるゴムガスケットの対称性を崩すための外乱は、解析手法上ゴムガスケットの内部にある節点に横力を加えた。この時、ゴムガスケットの圧縮量や解析対象のモデル形状が異なっても、比較をおこなえるよう、モデル底面でのモーメントを統一($2520 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$ と $20160 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$ の2水準)するよう横力の大きさを決定した。ちなみに、この横力の大きさは水圧接合時に加わる静水圧荷重と比較すると、10%にみえない程度の小さな量である。

なお、ゴムガスケットの頂部に働く摩擦力については接触面との摩擦係数を0.1とした。

以上の条件の下で、ゴムガスケットに0~50mmまでの変位量を与え、中央の節点のX方向の移動量すなわち横倒れ量を計算した。

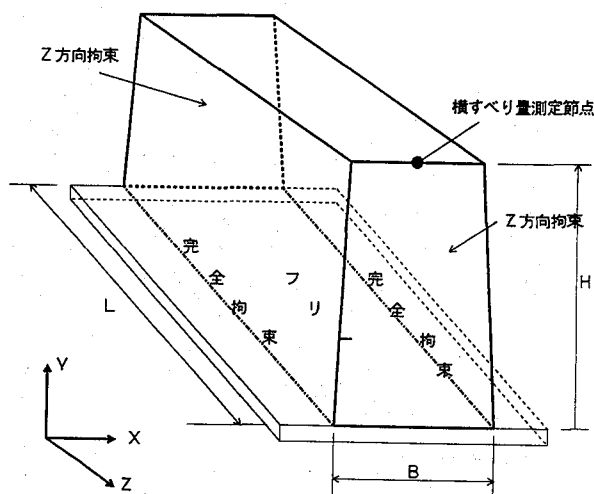


図-5 解析モデル概略図

3.3 計算結果

図-6は外乱であるモーメントが $2520 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$ の時の解析結果であるが、圧縮の変形量が大きくなるに従い、横倒れ量はH/Bの如何にかかわらず大きくなった。

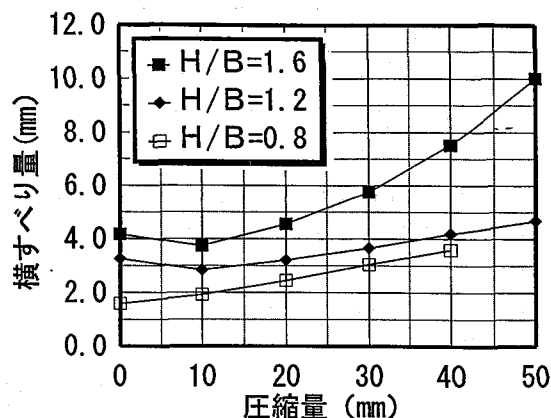


図-6 H/Bの違いによる横倒れ量の変化(硬度50)

しかし、これが現実の問題になるレベルかどうかを判断するには、実際の沈埋トンネルの水圧接合作業の進行度合いと横倒れ量とを対応させて比較する方が理解しやすい。そこで、水圧接合の進行度合いは、沈埋函の間に介在する水の圧力変化として考えられるので、その圧力変化と1対1に対応する物理量であるゴムガスケットの反力を代わりに選び、データを整理し直してみた。その結果を図-7に示す。

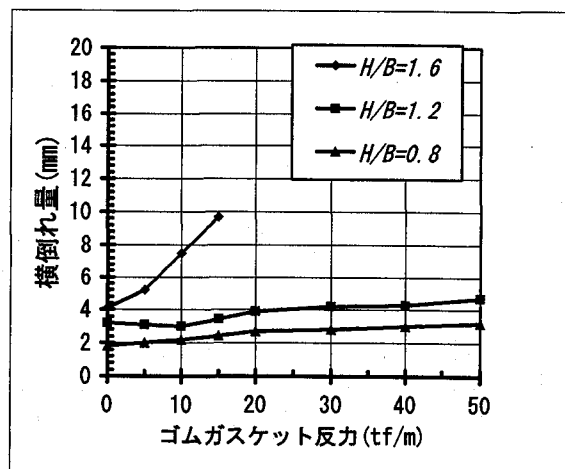
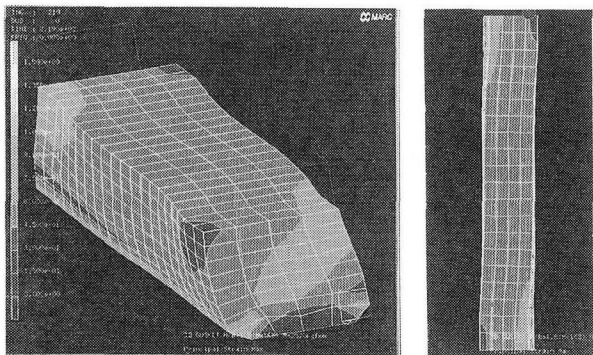


図-7 反力と横倒れ量との関係

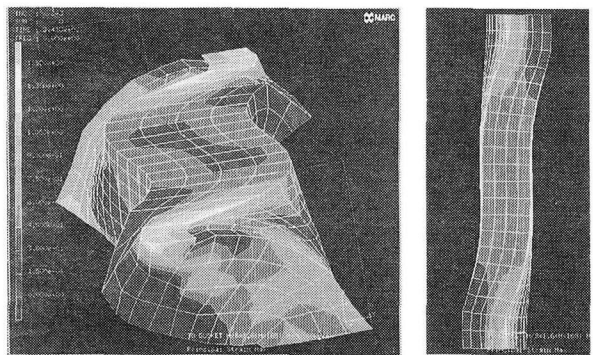
このグラフの横軸はゴムガスケットの反力を表しているが、水圧接合完了時相当荷重としては、一般に40~50 tf/mであることから、その荷重に至るまでの横倒れ量の変化が読みとれる。例えばH/Bが0.8及び1.2の場合は横倒れがほとんどなく、無事水圧接合を終了することがわかる。しかし一方、H/B=1.6の場合は水圧接合完了までにはかなりの横倒れ量が発生することが予想され、適切な水圧接合作業ができないと判断される。また、圧縮が進むにつれて横倒れ量が大きくなった。

なお、図－8はH/B=1.6(ゴム硬度40)のゴムガasketの横方向モーメントが 2520kgf・mmで50mm圧縮時(約15tf/m)の変形形状と主ひずみを示している。ここでは、横倒れ現象は顕著でなく、横倒れ量は最大で18mm程度であった。また、最大主ひずみが約100%である。したがって、この状況ではゴムガasketは目立った座屈を生じておらず、問題となるレベルの主ひずみも生じていない。

図－9は同じH/B=1.6, ゴム硬度40のモデルで横方向のモーメントを 20160kgf・mmのとしたときのゴムガasketの変形と主ひずみ量をあらわしている。横倒れ量は150mmに増加しており、座屈現象が顕著になっている。また、最大の主ひずみが約 150%となっている。このように、静水圧に対応する横荷重を増加させると、横倒れが生じていることがわかった。



図－8 解析結果(H/B=1.6, ゴム硬度=40, モーメント=2520kgf・mm)



図－9 解析結果(H/B=1.6, ゴム硬度=40, モーメント=20160kgf・mm)

4. 載荷実験

4.1 概要

縦座屈を引き起こす要因として、ゴムガasketのH/B, ゴム硬さおよび載荷面の摩擦係数の大小によって、その発生が影響されるものと考えられるので、本実験では①ゴムガasketのH/Bをパラメータとした縦座屈現象発生傾向の確認、②ゴム硬さをパラメータとした縦座屈発生傾向の確認、並びに③ゴムガasketと載荷面との摩擦をパラメータとした縦座屈現象発生傾向の確認を目的として、長さ約6.6mで実物の1/2の断面を持つモデルを用いて載荷試験をおこなった。

4.2 試験方法

用いた載荷試験機はH鋼を構造部材とし、それにセンターホールジャッキ(載荷能力50tf; ストローク200mm)を14本取り付けただもので、油圧ユニットを調整することによって長いゴムガasketを均等に圧縮できるよう工夫した。

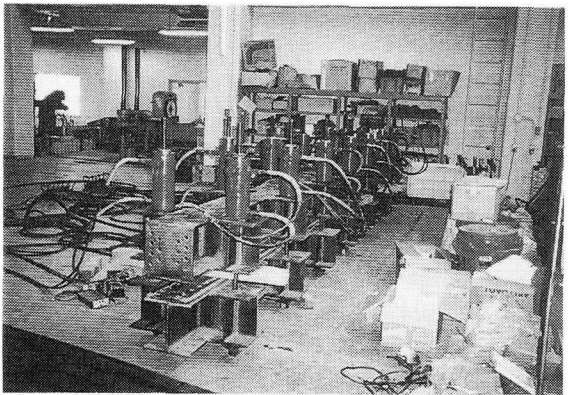
供試体の種類は、断面については実物の1/2のサイズで、高さと底辺の比H/Bが0.6, 1.2, 1.8の3通りを設定。また、ゴム硬さについては、50度と40度の2通りを設定し、合計6本製作した。供試体の長さは約6.6mとした。

表－3 供試体の種類

タイプ名	形状	ゴム硬さ
H/B=1.8		50度
		40度
H/B=1.2		50度
		40度
H/B=0.6		50度
		40度

摩擦については、高摩擦状態と低摩擦状態の2通りを考えた。本実験では、高摩擦状態として、載荷面のH鋼を無処理のままとした。一方、低摩擦状態としては、供試体と載荷面との間にシリコングリースを塗布した。

載荷実験は変位制御として10mmずつ載荷し、その都度横倒れ量を測定するため、載荷面の端からゴムガasketの肩までの距離(図－11のD寸法)を500mmごと合計15箇所の位置で測定した。ただし、載荷実験は、供試体が激しく横倒れし、これ以上の試験続行が難しくなった場合か、もしくはジャッキの最大荷重まで達した時点で終了した。



写真－1 載荷装置全体状況

This technical drawing shows a double-plate lap joint with two vertical stiffeners. The joint consists of two main plates, one above and one below, which overlap. A central vertical stiffener is positioned between the plates, and two additional vertical stiffeners are located on either side. The stiffeners are connected to the plates using bolts. The drawing includes a vertical centerline and dashed lines indicating the internal structure and bolt locations.

図-11 横倒れ量の測定

次に、形状およびゴム硬さの異なるゴムガスケットを一律に評価するために、各ゴムガスケットの水圧接合時に受ける荷重(40~50tf/m)に対応する変形量での横倒れ量を計算したものが、表-4である。この中で、()内の数字は、水圧接合完了時相当の変形量に達することなく、完全に横倒れを起こし、試験続行が不可能になった場合の倒れる直前の横倒れ量の測定値である。

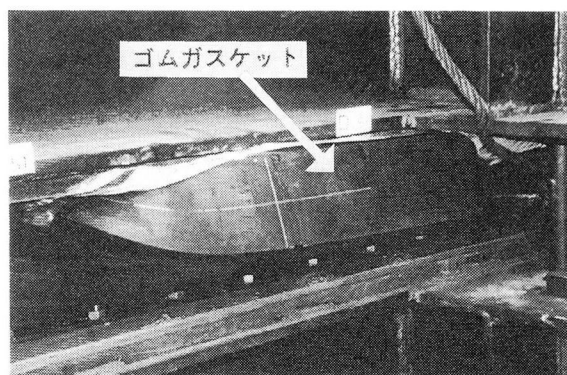


写真-2 ゴムガスケットの縦座屈現象発生状況

実験No.	H/B	ゴム硬さ	摩擦	横倒れ量(mm)
①	1.8	40	低	(98)
②	1.8	40	高	—
③	1.8	50	低	(87)
④	1.8	50	高	4
⑤	1.2	40	低	(56)
⑥	1.2	40	高	10
⑦	1.2	50	低	47
⑧	1.2	50	高	7
⑨	0.6	40	低	5
⑩	0.6	40	高	3
⑪	0.6	50	低	5
⑫	0.6	50	高	4

(-):データ取得失敗

なお、横倒れの波長は、2~3m程度が卓越していたが、供試体全体が同一方向に倒れていたものもあった。

図-12に横倒れ量の一例を示す。

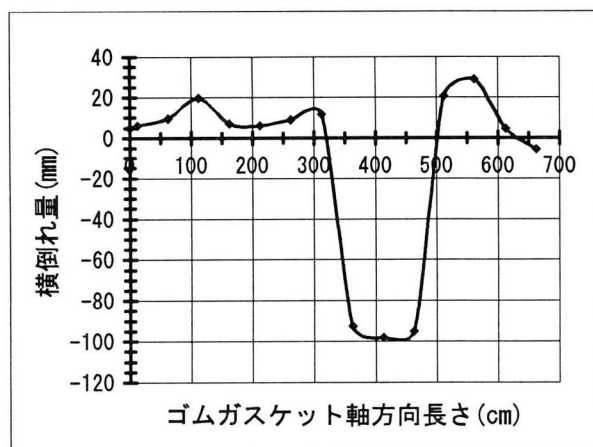


図-12 横倒れの長さ方向の変化(実験No①, 圧縮量40mm)

5. まとめ

有限要素法解析および1/2モデルの載荷実験から以下のことがわかった。

- 1)有限要素法解析で、人為的に非対称性を与えることにより、縦座屈現象の結果としての横倒れが再現できた。その結果、縦座屈発生の予測が可能となり、新しいゴムガスケットを開発する際の有力な評価手段となることがわかった。
- 2)有限要素解析では、ゴムガスケットのアスペクト比(H/B)が1.6以上のものに縦座屈が生じた。
- 3)載荷実験によって、ゴムガスケットの縦座屈現象が実際に生じることが実証された。
- 4)縦座屈を発生させる要因としては、ゴムガスケットの H/B および載荷面の摩擦係数が支配的であるが、ゴム硬さも一定の影響を与えている。
- 5)ゴムガスケットの H/B が0.6ではゴム硬さおよび摩擦係数の高低によらず縦座屈が発生しないことから、 H/B を0.6以下にすれば、安定した変形が得られるものと考えられる。
- 6)ゴムガスケットの H/B が1.2以上では載荷面の摩擦係数が低いと縦座屈が生じたので、実工事では摩擦を増加させる方策が必要である。

あとがき

本研究は平成6～8年度に住友ゴム工業株式会社と運輸省との共同研究として実施したものである。

参考文献

- 1)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. 3
- 2)清宮理, 他4名: 沈埋トンネル用ゴムガスケットの有限要素法解析, 構造工学論文集, Vol. 41A, pp. 113-122, 1995. 3
- 3)Haggblad, B. and Sundberg, J. A.: Large Strain Solution of Rubber Comput. Struct, Vol. 17, No. 5-6, pp. 835-843, 1983
- 4)清宮理, 田辺源吾: 沈埋トンネル用のゴムガスケットの止水と横倒れ実験, 構造工学論文集, Vol. 42A, pp. 35-42, 1996. 3
- 5)清宮理, 小林亨, 滝本孝哉: 沈埋トンネル継手部のゴムガスケット止水性評価, 土木学会論文集, No. 567/VI-35, pp. 91-102, 1997. 6

(1998年1月22日受付)