

大水深に適用する沈埋トンネル継手の破壊実験

平野逸雄*¹・金子研一・土屋正彦*²・木村政俊*³

Keywords : immersed tube tunnel, rubber gasket, high water pressure

沈埋トンネル, ゴムガスケット, 高水圧

1. はじめに

ボスポラス海峡にアジアとヨーロッパをつなぐ海底トンネルを建設するプロジェクト (MARMARAY 計画) (図-1) をターゲットに、水深 60m という経験の無い水深に沈埋函を敷設する研究をしている。実際に、この工事が沈埋トンネル工法で施工が可能か否かの判断は、沈埋函の継手性能の評価にかかっているといつて過言では無い。

昨年度の報告¹⁾で、水深 60m の沈埋トンネルの継手を設計するにあたり、函体の端部に設置するゴムガスケットは水圧接合にだけ利用し、函体間は剛結合にすることを推奨した。地震あるいは地盤の変形に対しては、別途、可撓性継手部を設ける。これにより、高さの低いガスケットを採用でき、横倒れの危険性を小さくできる。

しかし、1992 年 8 月の川崎航路トンネルでのゴムガスケット (本体部の硬度 40 度、ノーズ部 33 度、高さ 200mm) の破損事故の記憶から水深 60m での施工例に対し、ゴムガスケットの耐力を不安視する声があった。

これを払拭するために、実大規模の試験体を用いて破壊荷重を確認する実験を行ったのでここに報告する。

2. 経緯

近年、我が国では沈埋函体接続部のゴムガスケットを永久に可撓性継手として利用する設計が定着している。この場合、ゴムガスケットの高さは、沈埋トンネルの深度が深くなるにつれ、高くなる傾向にある。さらに、接合時の横倒れを考慮して幅が広くなり、この考え方を踏襲すると MARMARAY 計画におけるゴムガスケットは

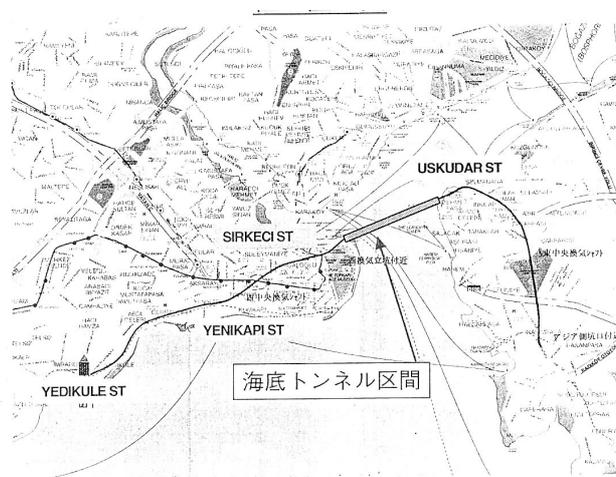


図-1 位置図

Site Location

300mm を超える高さとなった。

ゴムガスケットの大型化は水圧接合時の横倒れの不安を引き起こすだけでなく、ガスケット取り付け時のハンドリングの悪さ、函体壁の厚さの増加をもたらす。このため、ガスケット自体のコストの増加だけでなく、函体コストの増加も必至である。

筆者等は、前述のようにゴムガスケットは水圧接合にだけ利用し、函体の接続部は剛結合に設計し、トンネルの変位については函体の内部にシールド工事において可撓性セグメントとして実績のある構造を組み込むことにした。

水面下 60m の水圧接合にだけ用いるとすると、図-2 に示す高さ 148mm、肩幅 190mm のゴムガスケット (本体部の硬度 50 度、ノーズ部の硬度 50 度) で施工できる。検討している沈埋函の水圧接合時荷重は 1637kN/m であり、修正時に許容される目開き量は 17.1mm である。この値は函尾の位置修正量 100mm に相当し、施工上十分な値と考える。

* 1 東北支店土木工事作業所

* 2 土木本部国際土木部

* 3 土木本部土木技術部

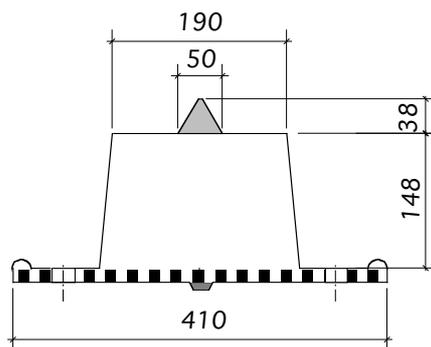


図-2 GINA 型ゴムガスケット
Rubber Gasket(Gina Type)



写真-1 試験装置
Test Machine

3. 実験

3.1 実験の目的

実験の目的は、事故以後、国内において生産されているゴムガスケットの耐力を確認することである。当時と異なり、ノーズ部を本体部より柔らかくする構造はやめ、ジョイント部のゴム成分はイオウ分を 2.0%から 1.33%に減らして製造している。

破壊の形態として以下の2点が予測され、これらを試験方法に反映させた。

- ①本体部あるいは継手部が圧縮荷重に起因して破壊する。
- ②本体部あるいは継手部が圧縮と同時に横荷重を受けて倒れ、さらなる圧縮荷重で破壊する。

3.2 ガスケットの耐力確認実験

(1) 試験体

形状：ジーナ型 (図-2)

試験体の長さ：1000mm

材質：天然ゴム、硬度 50 度 (本体, ノーズ共)

フランジ部をナイロン布で補強

種類と数量：

本体部 (接続のないもの) 1 体 (番号：NJ1)

継手部 (加硫による接続をしたもの) 3 体

(番号：AJ1～AJ3)

(2) 試験装置と試験方法

圧縮荷重 20,000kN、水平荷重 5,000kN が同時に載荷できる大型二軸試験機 (写真-1) を使用した。

- ①単純圧縮試験：載荷速度 20kN/sec、最大 18,000kN/m (水圧接合荷重 1,640kN/m の 10 倍以上) まで載荷。
- ②圧縮せん断試験：せん断変位量 (20mm) を与えた状態で圧縮荷重を載荷する。



写真-2 試験状況
Test Setup

せん断変位量は、位置修正時の内外水圧差 0.9MPa (実施工での水圧差 0.6MPa×1.5) がかった状態を FEM 解析によって求めた値 13.5mm から決めた (図-3)。

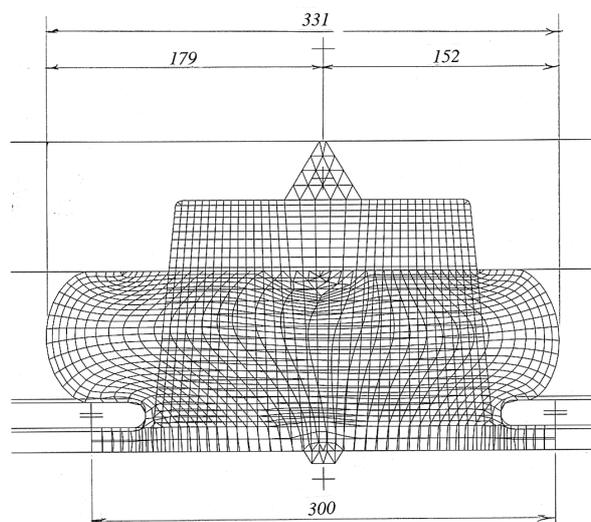


図-3 FEM計算結果 (水圧接合時)
Result of FEM Analysis (when connected)

3.3 試験結果

(1) 荷重と変位量の関係

①単純圧縮と②圧縮せん断の試験を同一試験体で行った。まず、水圧接合荷重相当の1,600kN/mまで圧縮し、除荷後、15,000kN/mまで載荷した。3回目に水圧接合時の外水圧によるせん断変形を考慮して、50mm圧縮後に幅方向に20mmの変位を与えてから18,000kN/mまで載荷した。

この時、20mmの水平変位を与えるのに要した荷重は13~15kN/mであった。

これでも破壊に至らないため、最後の試験体(AJ3)には3回目に変位を与えずに、18,000kN/mまで3回の繰り返し荷重をかけたが破壊しなかった。

図-4に試験体NJ1の荷重と変位量の関係、図-5に試験体AJ3の荷重と変位量の関係を示す。いずれの試験も、荷重と変位の関係は安定した曲線形状を示し、ばらつきは少なく、水圧接合荷重1,600kN/mでの変位量は111mm~117mmであった。この値は従来設定している基準値±5mmを満足している²⁾。

同一試験体で、1回目の圧縮変位量に対し、2回目以降の変位量が2mm~4mm程度増化しているが、ゴムの残留ひずみと考えられる。試験体には写真-3に示すように、断面中央部で高さにして1cm程度の大きな残留ひずみが生じている。

また、16,000kN/m以上の荷重をかけても、変位量の増加はわずかである。

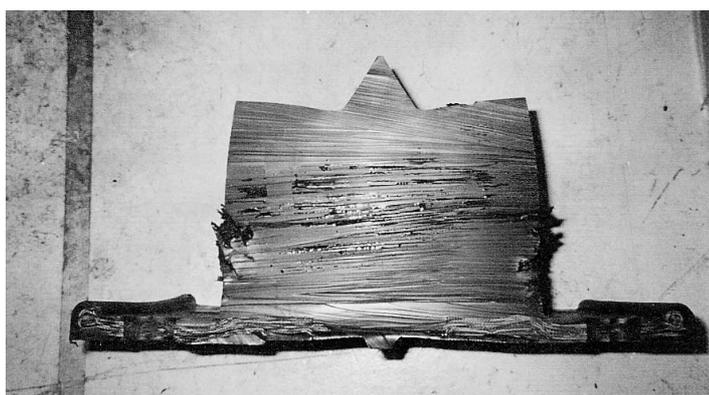


写真-3 試験後の試験体切断面
Crosscut of Tested Specimen

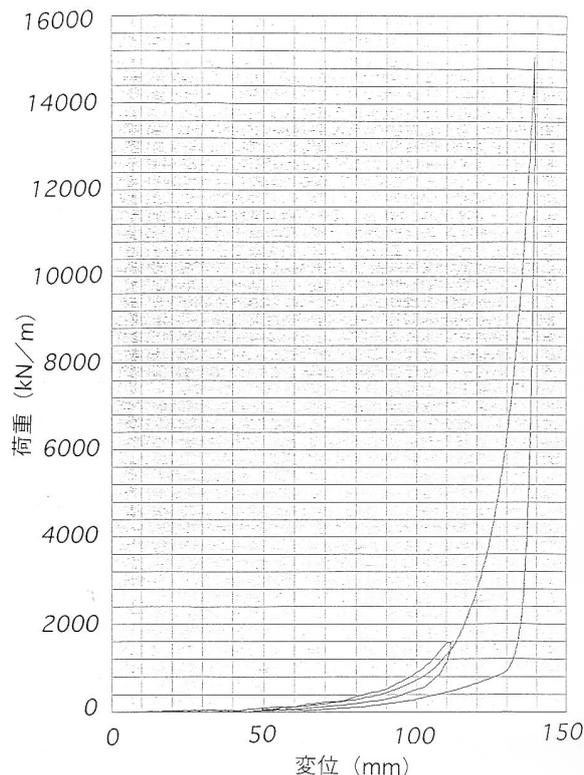


図-4 荷重と変位量の関係(NJ1)
Load-displacement Curves (NJ1)

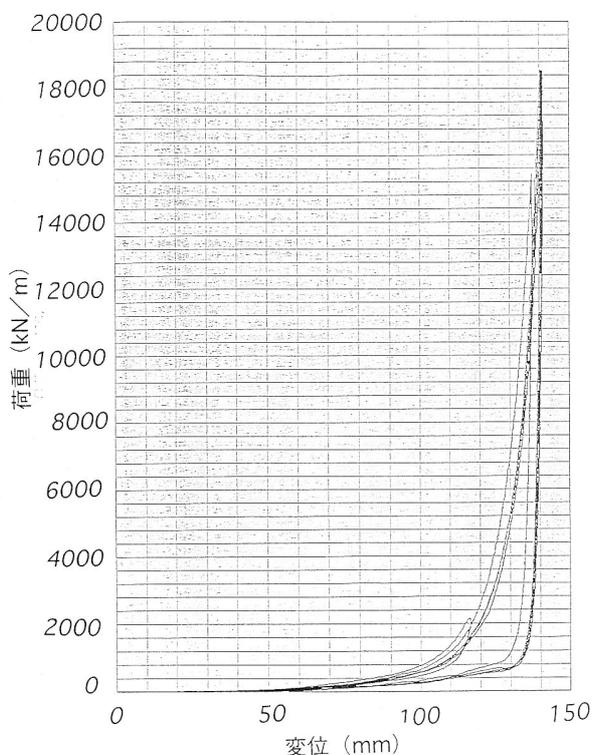


図-5 荷重と変位量の関係(AJ3)
Load-displacement Curves (AJ3)

(2) 外観およびX線試験

圧縮試験後、ゴムガスケット表面に取付け金具の接触面および圧縮面板エッジ接触面で表層ゴムが擦り傷や表層亀裂が認められた。これらの傷の深さは、最大 20mm に留まっていて、圧縮により亀裂が成長するような破壊現象はなかった。

さらに、継手部3体 (AJ1~AJ3) について、試験前後に X 線検査を行ったが、撮影した全ての接合面で、エアの混入、はく離等の異常は無かった。表-1 は平均値であるため、ゴム硬さに変化はみられないが、1 度低くなるものもあった。



写真-4 切り出し状況
Cutting off

表-1 ゴムの物性試験結果
Result of Quality Test

	単位	圧縮前	圧縮後		
			本体部 NJ1	本体部 AJ1~AJ3	接合部
引張強さ	MPa	23.5	24.5	23.0	17.9
伸び	%	596	609	583	608
ゴム硬さ	Hs	47	47	47	47

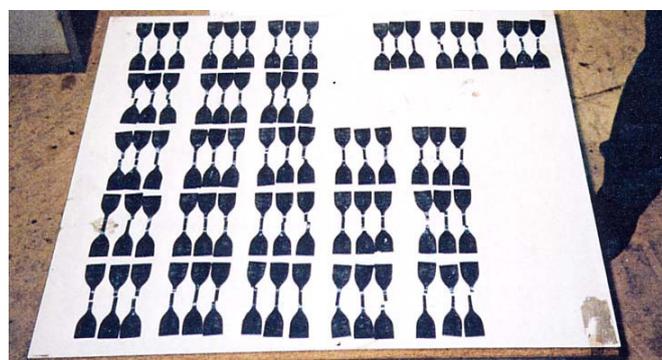


写真-5 引張り試験体
Test Pieces

(3) ゴム物性試験

圧縮試験後、試験体中央部より 3 方向に 3 号試験片 (JIS K6301) を切り出し、引張り強さ、破断時の伸び、ゴムの硬さの変化を測定した。写真-4 は試験体本体を切り出した状況であり、写真-5 は、さらにダンベル状に切り出した試験体の状況である。

試験結果を表-1 に示す。本体部分については顕著な変化はみられないが、接合部の引張り強さが 24%程度低下し、伸びが 2%大きくなっていることがわかる。これは天然ゴム固有の性質でもあり、国内の実施例における規格値 (接合部の引張り強さおよび伸びは本体部の 2/3 とする) ²⁾ を満たしている。

4. おわりに

実物大の試験体を破壊する目的で、水圧接合時の 10 倍以上の荷重で圧縮実験を行ったが、破壊に至らなかった。さらに、くり返し载荷するという過酷な条件においても現在国内で製造されているゴムガスケットが耐力を有することを確認し、実工事においても安心して利用で

きることを確認した。

本実験は、単に製品検査のために行ったものではなく、過去に、実規模の試験体でここまでの荷重をかけたことのない貴重な記録であることを付け加えておく。

ゴムガスケットは横浜ゴム (株) で製作し、同社の試験装置を借りて実験した。安全上の理由から 20,000kN 試験機の利用範囲として設定されている値を超えて 18,000kN まで、無理をお願いして载荷していただいたことに感謝する。

参考文献

- 1) 平野ほか:大水深・大変形に追従する沈埋函継手に関する考察, 第 35 号大成建設技術センター報, 15-1, 2002
- 2) 運輸省第 3 港湾建設局, 大阪市港湾局監修:大阪港 咲洲トンネル工事誌, pp II-22, 1999