

大変形に追従可能な 新形式沈埋トンネル用継手構造の開発

DEVELOPMENT OF A NEW FLEXIBLE JOINT STRUCTURE FOR SUBMERGED TUNNELS

横田 弘¹・岩波 光保²・北山 斉³

Hiroshi YOKOTA, Mitsuyasu IWANAMI and Hitoshi KITAYAMA

¹フェロー会員 工博 独立行政法人 港湾空港技術研究所 構造強度研究室長 (〒239-082 横須賀市長瀬 3-1-1)

²正会員 工博 独立行政法人 港湾空港技術研究所 構造強度研究室 (同上)

³正会員 国土交通省 近畿地方整備局 神戸港湾空港技術調査事務所長 (〒651-0082 神戸市中央区小野浜町 7-30)

This paper describes a newly developed flexible joint structure for submerged tunnels. This joint called Crown-seal joint can absorb larger deformation in a submerged tunnel element than other types of flexible joint. Crown-seal joint mainly consists of rubber, which was reinforced by plastic fibers. For investigating its applicability to actual submerged tunnels, some experiments were conducted using a full-scale model of tunnel section including Crown-seal joint. From the experimental results, it was confirmed that no abnormal deformation and local distortion were observed on the surface of rubber even if displacement at the joint occurred in the direction parallel and perpendicular to the tunnel element. Furthermore, water-tightness of the joint was verified through the seepage tests utilizing water pressure.

Key Words: submerged tunnel, flexible joint, rubber, joint displacement, water-tightness

1. はじめに

軟弱地盤上に沈埋トンネルが建設される場合、地盤の不同沈下により沈埋函に異常な断面力が発生しないよう、不同沈下に伴うトンネル変形を吸収するための可撓性継手が設置されるのが一般的である。これにより、沈埋函に発生する断面力を大幅に低減することができ、函体の設計を経済的かつ合理的に行うことが可能となる。現在までに、このような可撓性継手として、「ゴムガスケット+ストッパケーブル」タイプの継手や函体内蔵型のベローズ継手などが開発され、実用化に至っている¹⁾。

現在大阪港で建設が進められている夢洲トンネルの場合には、きわめて大きな地盤沈下による不同沈下が予測されているだけでなく、トンネル線形の特殊性に起因する函体のねじれの発生も懸念されている。このようなトンネル変形に対しては、従来型の継手構造では対応することが困難であり、新形式継手構造の開発が求められている。そこで著者らは、従来型の沈埋トンネル用継手よりもさらに大きな変形に追従可能な新しい継手構造を開発することとした。

本稿では、大変形に追従可能な新形式継手(クラウンシール式継手)の開発の経緯、ならびに沈埋トンネル用継手構造としての適用性を確認するための実証実

験の概要について述べることとする。

2. 開発の経緯

(1) 可撓性継手

沈埋トンネルには、水中での沈埋函どうしの接合のための施工継手が存在する。「ゴムガスケット+ストッパケーブル」タイプの継手構造(図-1)には、函体接合のための施工継手としての機能だけでなく、函体変形を吸収するための可撓性も備えられている。

本継手構造では、函体に発生する圧縮力はゴムガスケットが、また引張力はストッパケーブルが分担する

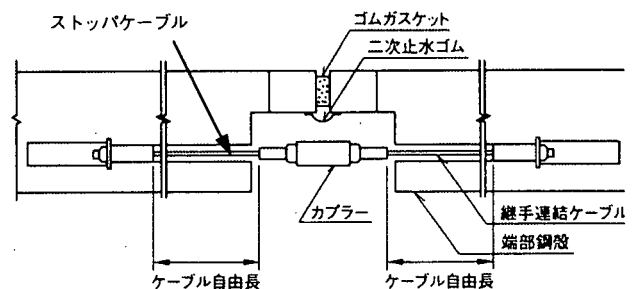


図-1 「ゴムガスケット+ストッパケーブル」タイプの継手構造

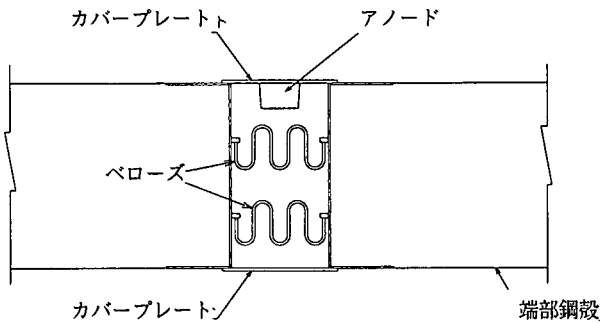


図-2 ベローズ式継手構造

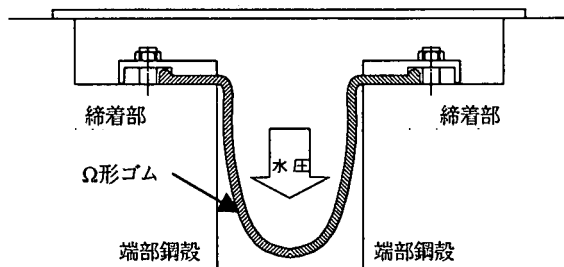


図-3 Ω形ゴムの適用

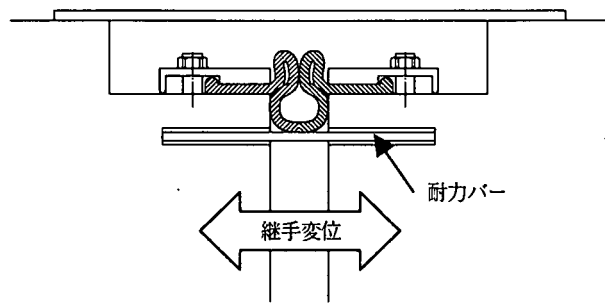


図-4 耐力バーを用いた場合

ことで継手位置に可撓性が付与されている。しかしながら、施工条件や設計条件によっては、ゴムガスケットの圧縮量や圧縮ひずみが許容値を超えることもあり、その適用範囲には限界がある²⁾。

そこで、施工時の函体接合のために必要な継手とは別に、函体変形を吸収することのみを目的とした継手をあらかじめ沈埋函に設置することが提案されている。このような内蔵型継手として、ベローズ式継手構造²⁾が実用化されている(図-2)。本継手は、沈埋函内部に設置した波形鋼板(ベローズ)の弾性によって、函体変形に対応するものである。

現在、大阪港で建設が進められている夢洲トンネルの場合、きわめて大きな地盤沈下が予測されているだけでなく、トンネル線形の特殊性から、大きな不同沈下の発生が懸念されている。これまでの検討により、本トンネルの不同沈下による函体変形は、従来型の継手構造では対応できないことが予測されている。そこで、従来型継手では追従できないほど大きな継手変位

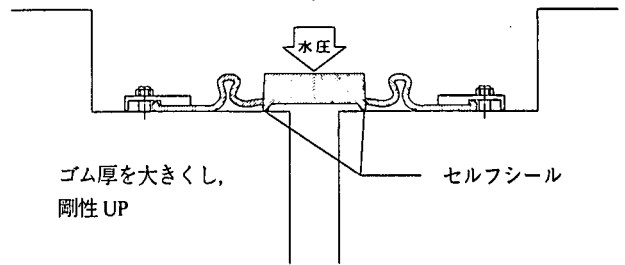


図-5 遊間部へのゴムの落込み防止

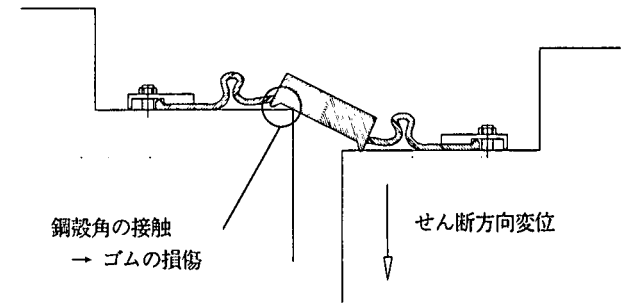


図-6 せん断方向変位が生じた場合の挙動

にも追従可能な新形式継手構造の開発を行った。

(2) 新形式継手構造の開発

従来型の継手構造よりも大きな変形に追従できるようにするためには、その構造を内蔵型継手として、変形追従性に富むゴム材料を用いることが望ましいと考えた。内蔵型継手の構成材料として、剛性の低いゴム材料を用いることで、継手部の止水性能を確保するとともに、より大きな継手変位に対応することが可能となる。例えば、図-3に示すように、沈埋トンネル用継手の二次止水材として一般に用いられるΩ形ゴムを内蔵型継手の主要部材に適用すると、外水圧によりゴムに異常な変形が生じて、過大なひずみが発生するだけでなく、クリーブ破壊の危険性も否定できない。

シールドトンネルではあるが、東京湾横断道路トンネルの継手部には、図-4に示すような耐力バーが設けられ、止水ゴムが遊間に落ち込むことを防止している。しかしながら、沈埋トンネルに発生する継手変位は、シールドトンネルのそれと比較して大きいため、図-4に示すように、止水ゴムに異常な変形が生じることが懸念される。そこで、止水ゴムが遊間に落ち込むことを防ぐために、図-5に示すように、遊間部に位置するゴムの厚さを大きくして剛性を高めることとした。これにより、水圧によるゴムの変形を小さく抑えることができるため、ゴムが遊間に落ち込むことはない。また、厚みを大きくした部分の両側のゴム長さに余裕を持たせることで、沈埋函の軸方向の変位に追従可能となる。このように、厚みを大きくした中央部のゴムとその両側のゴムでは、求められる機能が異なっている

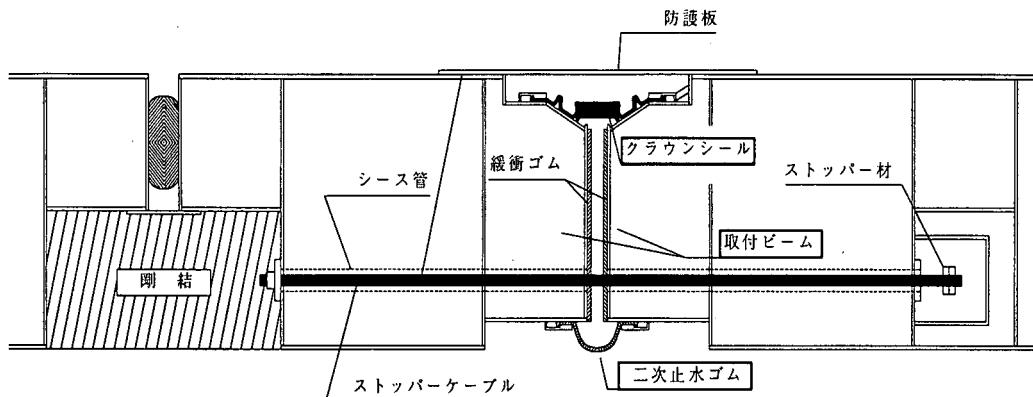


図-7 クラウンシール式継手構造の概要

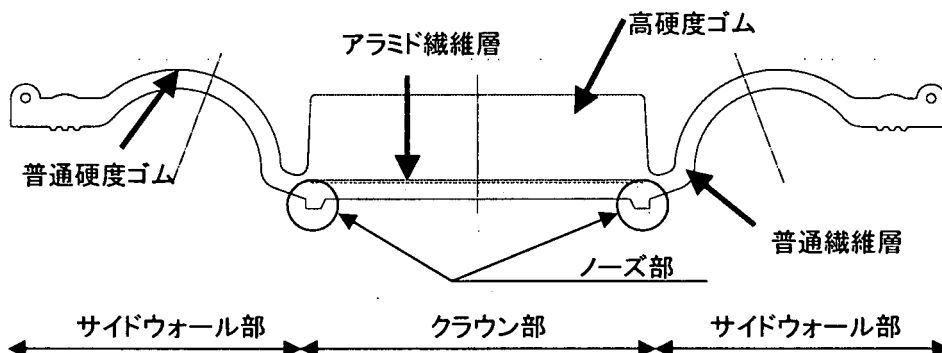


図-8 クラウンシールゴムの詳細

ため、両者のゴム硬度を変えることとした。すなわち、厚みを大きくした中央部は、水圧による変形を極力小さくするため、ゴム硬度を一般の止水用ゴムより大きくした。また、その両側の部分は沈埋函の変形に柔軟に追従する必要があるため、一般の止水ゴムと同程度のゴム硬度とした。

次に、沈埋トンネルの軸方向と直角方向の変位（これ以降、せん断方向変位と呼ぶ）が発生した場合を考えると、図-5の継手構造は、図-6のように変形することとなる。この場合、沈埋函端部の鋼殻角がゴムと接触し、ゴムに損傷が生じてしまう。継手構造の耐久性を考えると、このような損傷の発生は避けなければならないし、止水上の弱点ともなりうる。

そこで最終的には、図-7に示すように、鋼殻角とゴムが接触する部分に傾斜を設けることで、ゴムに損傷が生じないように配慮した。これをクラウンシール式継手構造と呼ぶこととする。さらに、ゴムが鋼殻と接触する位置に、ノーズと呼ばれる小突起を設けることで、継手変位が生じた場合に、これにスムーズに追従できるよう工夫した。またノーズは、ゴムが水圧を受けてたわみ変形した場合に、圧縮されて鋼殻と密着する。この結果、万が一、ゴム締着部に漏水が発生した場合でも、ノーズで止水性能が確保される。この締着部の漏水に対するフェールセーフ機能を、これ以降、セルフシール機能と呼ぶこととする。

3. クラウンシール式継手構造の特徴

以上のような経緯により、従来型継手よりも大変形に追従できる継手構造として、図-7に示すクラウンシール式継手構造を開発した。各構成要素の機能を表-1に示す。

表-1 主要構成要素とその機能

構成要素	主な機能
クラウンシールゴム (一次止水ゴム)	クラウンシールゴムの締着部および水圧を利用したノーズ部で止水を行う。継手の変形（軸方向およびせん断方向）については、ゴム本体の弾性で対応する。
二次止水ゴム	Ω形ゴムによって、一次止水のバックアップを行う。
ストッパーケーブル	軸方向引張変形量が許容値を上回った場合に軸方向引張力を分担する。
取付けビーム	クラウンシールゴムおよび二次止水ゴムの取付け部を有する。軸方向圧縮変形量が許容値を上回った場合に、このビームを介して圧縮力が沈埋函に伝達される。
緩衝ゴム	軸方向圧縮によって、取付けビーム同士が接触する場合、ビームに局所的な応力が発生しないようにする。
防護板	継手内への土砂等の進入を抑える。

表-2 クラウンシールゴムの構成要素とその機能

構成要素	主な機能
高硬度ゴム (硬度 70 度)	クラウン部の大部分を構成する。硬度を高くして、クラウン部の自立性（セルフサポート性）を向上させている。
普通硬度ゴム (硬度 50 度)	サイドウォール部、ノーズ部、ならびにクラウン部の一部を構成する。ノーズ部には止水性を、サイドウォール部には追随性を付与するため、硬度を 50 度としている。
アラミド繊維	クラウン部の引張側に、片織りで配置され、クラウン部のたわみを抑える。
ナイロン繊維	サイドウォール部およびクラウン部に配置される。多方向の変形に追従できるように平織りとしている。

表-3 遊間の初期設定と許容軸方向変形量

設定遊間量	0	50	100	150	200	250	300
許容圧縮変形量	0	50	100	150	200	250	300
許容引張変形量	300	250	200	150	100	50	0

単位：mm

本継手構造は、継手端部間に遊間を設けることで軸方向の継手変位に対応し、その外部に取り付けたクラウンシールゴムで止水性能を確保するものである。本継手の性能は、クラウンシールゴムと呼ばれる一次止水ゴムの特性に大きく影響される。クラウンシールゴムの概要を図-8に、また各部分の機能を表-2に示す。

継手部における軸方向変位に対しては、遊間の伸縮およびクラウンシールゴム本体の弾性で対応し、せん

断方向変位に対しては、クラウンシールゴム本体の弾性変形のみで対応する。ストップケーブルおよびせん断キーは、許容変形量以上の変形が生じて初めて、その機能が発揮されるため、許容変形量以内であれば、断面力をほとんど発生せずにトンネル変形に追従できる。また、遊間の初期設定次第で、様々なパターンの軸方向変位に対して対応できる(表-3)。前述のとおり、セルフシール機能を有していることも、本継手構造の大きな特徴の一つである。

以上のように、本継手構造は、大変形追従型の新しい沈埋トンネル用継手として有効であることが示された。しかしながら、本継手にはいまだ適用実績がなく、継手部の挙動や止水性能に不明確な点も残されている。そこで、継手の三次元模型による実証試験を行うことで、継手部に所定の変形が生じた場合の①クラウンシールゴムの変形挙動、ならびに②止水性能を調べた。

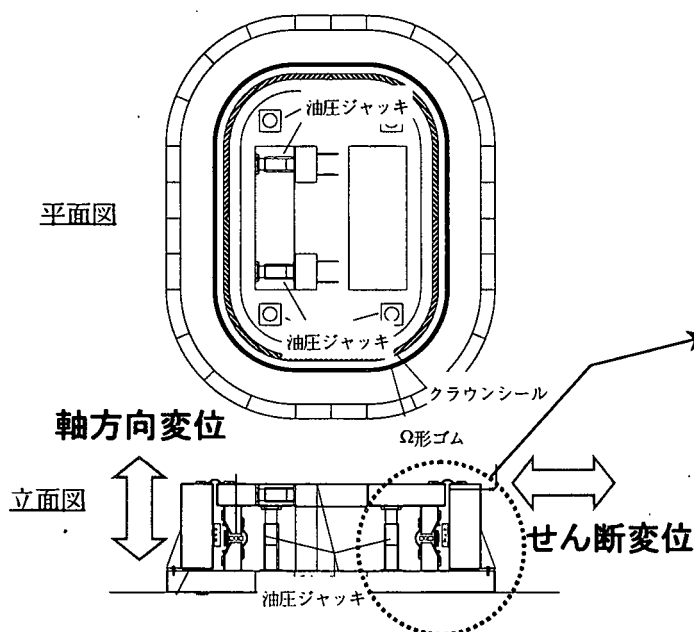
4. 沈埋トンネルへの適用のための実証実験

(1) 実験概要

a) 試験装置

円環状に成形したクラウンシールゴム試験体に対して、軸方向変位およびせん断方向変位を同時に負荷できる試験装置を用いて、ゴム試験体の変形挙動および止水性能を調べた。用いた試験装置を図-9に示す。このように、試験装置内部に据え付けた油圧ジャッキを制御することで、軸方向に0~300mm、せん断方向に0~150mmの継手変位を独立に与えることができる。試

治具およびシステム概念



挙動確認と止水性能確認

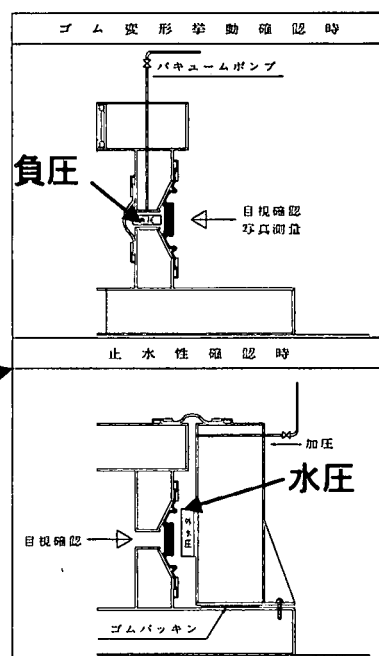


図-9 三次元実験装置の概要

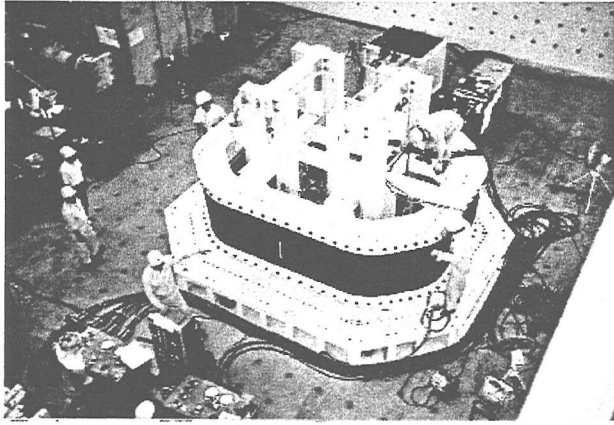


写真-1 実験状況（変形挙動確認実験）

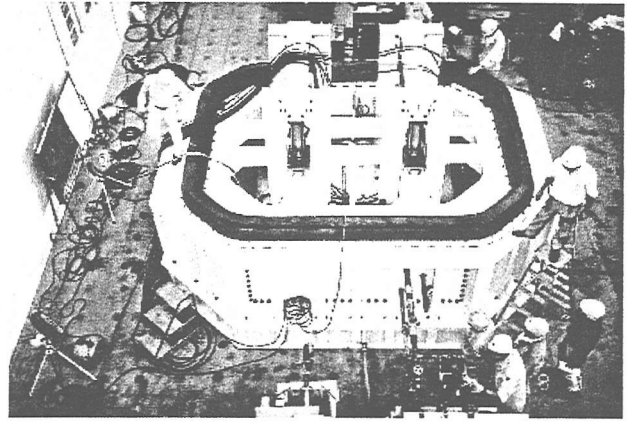


写真-2 実験状況（止水性能確認実験）

験時の状況を写真-1～2示す。

b) ゴム試験体の概要

ゴム試験体の形状・寸法については、ゴムの断面寸法は実際の継手と同一とし、長さ方向のうち、コーナー部分は実際の継手と同一の曲率とし、直線部分はコーナー部分の影響範囲を考慮して可能な限り短くした。これは、コーナー部分が本継手の構造上、止水上の弱点となる可能性が高いと考えたためである。ゴム試験体の種類は、①クラウンシールゴムを円環状に加工したもの（溝なし試験体）と、②継手変位に対する追従性向上を目的として、溝なし試験体のクラウン部に溝を設置したもの（溝あり試験体）の2種類とした。溝の深さおよび幅は、それぞれ90mm、20mmとした。

c) 変形挙動確認実験

ゴムの変形状況を装置周囲から直接観察できるよう、ゴム試験体に対して負圧を作用させ、水圧作用によるゴムの変形を模擬した。そのときの圧力は、 -95kPa とした。ゴムの変形状況を目視にて確認するだけでな

く、ゴム表面を写真測量することで、ゴムの変形挙動を三次元的に追跡した。写真測量箇所は、直線部分～コーナー部分の約3mの範囲とし、測量点は50mmメッシュの格子点とした。これらにより、ゴムの変形量やひずみ量の計測、ならびにゴムの異常な変形の有無の確認を行った。

d) 止水性能確認実験

ゴム試験体とその外周に設置した鋼壁の間に水を注入し、加圧することで、ゴム試験体に対して水圧を作用させた。この際、作用させた水圧の範囲は、 $0\sim 300\text{kPa}$ とした。これは、大阪港夢洲トンネルの建設地点の最大水深がおおよそ30mであることを考慮したものである。試験時には、本来の一次止水点であるクラウンシールゴム締着部における止水性だけでなく、締着部からの漏水に対するフェールセーフとしてのセルフシール機能についても確認を行った。セルフシール機能による止水性能は、サイドウォール内部にも水を充填した状態で水圧を上昇し、漏水の有無を調べた。

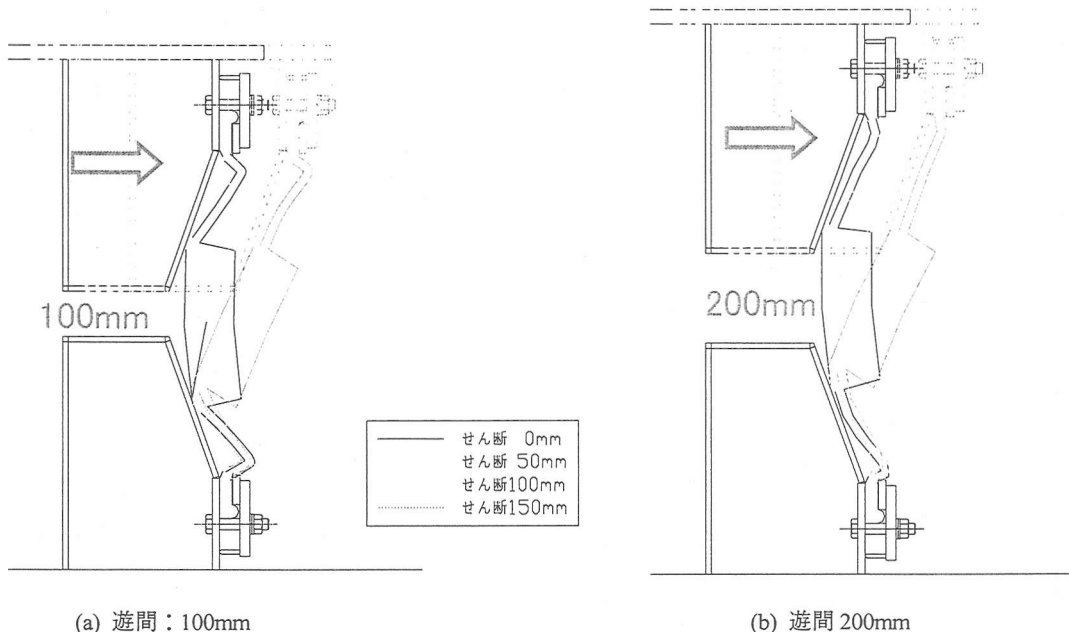


図-10 クラウンシールゴムの変形状況

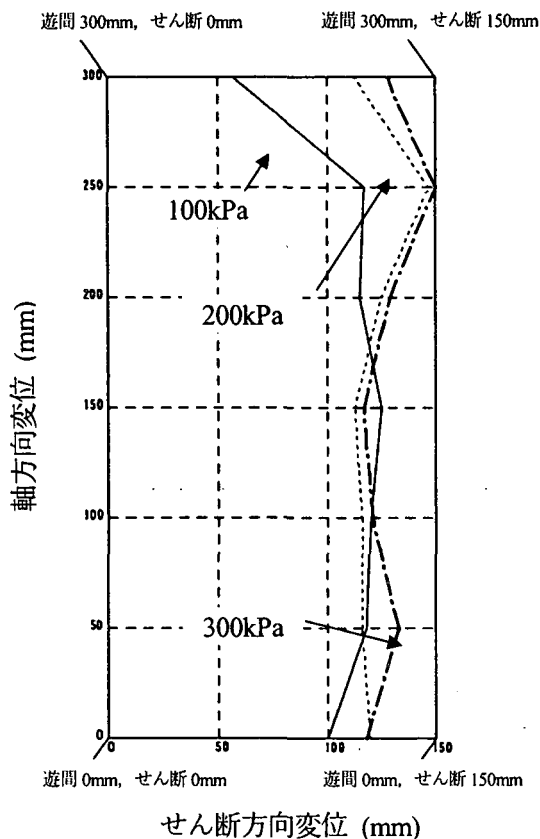


図-11 セルフシール機能の有効範囲

(2) 実験結果

a) 変形挙動確認実験

継手変位の増加に伴うクラウンシールゴムの変形状況を目視にて確認した結果、溝なし試験体においては、ゴムに異常な局所変形やねじれは生じていなかった。また継手全体の挙動をみても、尺取り虫現象や蛇行現象も発生することなく、軸方向変位およびせん断方向変位のいずれに対してもスムーズに追従していた。図-10に、直線部分におけるゴムの変形状況の計測結果を示す。これによれば、軸方向変位やせん断方向変位が生じて、クラウン部の中立性が保ちながら、継手変位にスムーズに追従していることがわかる。

一方、溝あり試験体においては、せん断方向変位を受けた場合、溝部でせん断変形が吸収されてしまい、溝の基部で局所的なねじれが顕著に発生していた。また継手全体の挙動の点でも、溝があることによって、継手変位に対する追従性は必ずしも改善されなかった。よって、クラウンシールゴムに溝を設置しても、敢えて人為的に構造上の弱点を増やしているだけで、特段のメリットを見出せなかった。

b) 止水性能確認実験

水圧を 300kPa まで負荷した状態で、本実験で対象とした継手変位（軸方向：0～300mm、せん断方向：0

～150mm）が生じて、ゴム締着部からの漏水は認められなかった。また別途実施した直線部のみの二次元模型に対する止水試験の結果では、水圧が 400kPa でも漏水は検出されなかった。よって、本継手構造の止水性能は十分であり、大阪港夢洲トンネルに適用された場合でも要求性能を満足できることが確認できた。

一方、万が一、ゴム締着部で漏水が発生した場合のフェールセーフとしてのセルフシール機能について調べた結果を図-11に示す。この図は、各水圧条件ごとに、一定の軸方向変位を与えた状態で、せん断方向変位を増加させていき、漏水が最初に検出されたせん断変位を連ねたものである。これによれば、水圧が 100kPa で軸方向変位が大きい場合に、一部セルフシール機能が劣っている部分があるものの、概ね良好な止水性能を確認できた。水圧が小さい場合には、水圧によるノーズ部の圧着力が小さくなるため、比較的小さいせん断方向変位で漏水する結果となった。

以上のことは、溝の有無によらず同様に確認することができた。

5. まとめ

沈埋トンネル用の大変形追従型の新しい継手構造として、クラウンシール式継手を開発した。三次元模型を用いた実証実験を行った結果、継手部にトンネル軸方向（0～300mm）またはせん断方向（0～150mm）に変位が生じて、クラウンシールゴムに異常な変形が発生することなく継手変位にスムーズに追従した。また、このような継手変位下において、300kPaの水圧が作用しても、ゴム締着部からの漏水はなく、十分な止水性能を確認できた。さらに、ゴム締着部からの漏水に対するフェールセーフとしてのセルフシール機能の有効性についても確認することができた。以上より、新たに開発したクラウンシール式継手構造を、大変形に追従可能な沈埋トンネル用継手として用いることに特段の支障がないことが明らかとなった。

また、クラウンシールゴムに発生する局所ひずみについては、FEM解析による評価を別途実施している。

謝辞

本研究の遂行にあたり、五洋建設株式会社および住友ゴム工業株式会社の関係各位にご協力いただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 清宮理, 矢島貴: 沈埋トンネル用ゴムガスケットの諸特性, 港湾技研資料, No.871, 1997.
- 2) 戸田和彦, 花城盛三, 清宮理, 北澤壮介, 村本哲二, 岡田一郎: 沈埋トンネル用継手の構造による地震応答の相違, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.939-946, 2000.