

沈埋トンネルの大変形追従型可撓性継手の提案

Proposal of new flexible joint with large deformation capacity for immersed tunnels

清宮 理*, 羽田 宏**, 下石 誠**, 林 信治***, 桐沢 芳広****

Osamu Kiyomiya, Hiroshi Haneda, Makoto Shimoishi, Nobuharu Hayashi, Yoshihiro Kirisawa

*工博, 早稲田大学教授, 工学部土木工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3丁目)

** 正会員, 五洋建設(株)土木部門土木本部土木設計部 (〒112-8576 東京都文京区後楽2丁目)

***住友ゴム工業(株)産業品事業部産業品第1事業部 (〒651-0072 兵庫県神戸市中央区脇浜町3丁目)

****(株)オリエンタルコンサルタンツ交通運輸部 (〒213-0011 川崎市高津区久本3丁目)

This paper describes a new flexible joint structure called Crown-Seal joint for immersed tunnels. Crown-Seal joint can absorb larger deformation between immersed tunnel elements than other types of flexible joint. Crown-Seal joint mainly consists of rubber block and sidewall, which was reinforced by plastic fibers. Basic performance of the joint became clear by an experiment and analysis. From the experimental results, it was confirmed that Crown-Seal joint shows the behavior that followed deformation and kept neutral position. By two dimensional FEM analysis, intolerable distortion did not occur in a straight line part. Furthermore, calculating some model cases showed that this joint could reduce section force and be handled as a pin structure in the seismic design calculation.

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

キーワード: 沈埋トンネル, 可撓性継手, ゴム, 継手変位, 止水

1. はじめに

軟弱地盤上に建設される沈埋トンネルは, 不同沈下や地震動にともなう変形に追従するため, 沈埋函の接合部分や函体内部に可撓性継手を設置することが多い。従来方式として, 接合部分に設置するゴムガスケット+継手連結ケーブル形式の継手や函体内部に設置する鋼製ベローズ継手等がある。^{1) 2)} これらの変形追従性能は水平(函軸)方向で±約100mm以下, 鉛直(せん断)方向はせん断キークが力を伝達するとともに, キー接触面の緩衝ゴムがバネとして作用する。

兵庫県南部地震以降, 沈埋トンネルにおいても従来以上の厳しい地震動に対する設計が要求されている。また, 施工上の制約で, 若齢埋立地盤における急速施工が要求される場合もある。いずれの場合も, 函体間で大きな継手変位が発生する可能性があり, 従来方式の継手では函体の発生断面力の増大や, 継手部分の止水性能の低下が懸念される。

本稿では, 従来以上の大変形に対応し, 止水性能に優れたゴム製の函体内蔵型継手として, クラウンシール式継手を提案する。

2. 従来の可撓性継手

2.1 ゴムガスケット, PC 連結ケーブルを用いた継手

東京港第二航路海底トンネル(東京都1980年)において始めて採用された方式であり, 函軸方向の圧縮に対して

はゴムガスケットで, 引張に対してはPC連結ケーブルで, また, 曲げに対しては両者の組合せで力を伝達させる可撓構造である。なお, せん断に対しては鉛直, 水平せん断キークが力を伝達するとともに, キー接触面の緩衝ゴムがバネとして作用する。

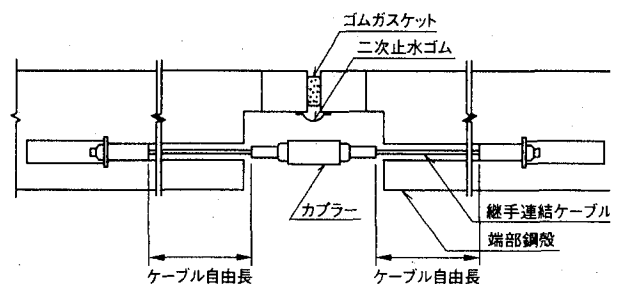


図-1 ゴムガスケット+継手連結ケーブル形式

東京港臨海トンネル(東京都2002年)ではより大きな軸方向変位を吸収するため, ゴムガスケットの背を高くして圧縮変形能力を大きくすることで対処している。しかし, この背を高くすることで, 水圧接合時の圧縮力によって横倒れし易くなり, その対策が必要となっている。また, 浅水域での継手では必要なゴム圧縮量を得られないケースもあり, 汎用的な継手としては課題も生じてきている。

2. 2 鋼製ベローズ継手

沈埋函の接合部分に可撓性を持たせるのは限界があることから、接合部分は施工時の止水等の必要な機能のみを持たせ、可撓性の機能についてはあらかじめ函体に設置した継手に受け持たせる内蔵継手が提案されている。このような継手として、鋼製ベローズ継手が実用化されている。(那覇港トンネル、1996～施工中)

これは、プラントの配管等で実績のあった継手を沈埋函の可撓性継手に応用したものである。函軸方向の圧縮、引張および曲げに対しては波板状のベローズで、せん断に対してはベローズ自身の高いせん断剛性で抵抗するものである。

また、ベローズ鋼板の防錆対策として、カバープレートの内側に電気防食用の陽極(アノード)を設置している。

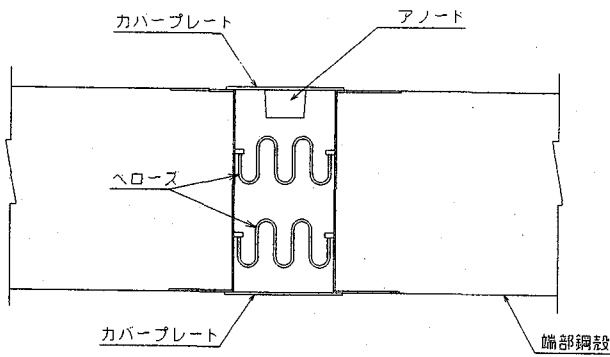


図-2 ベローズ式継手構造

2. 3 耐力バー式継手(シールドトンネル)

東京湾アクアライン(1997)は、層厚40m程度にもおよびぶ沖積軟弱層を掘進するため、トンネル軸方向の大きな変位を吸収する必要があった。このため、ゴム支承を使用し、その周囲をΩ型ゴム(二重構造)で止水する可撓構造で変位を吸収している。³⁾

一次止水ゴムは耐力バーでサポートする構造であり、継手を構成する要素がやや多くなっている。

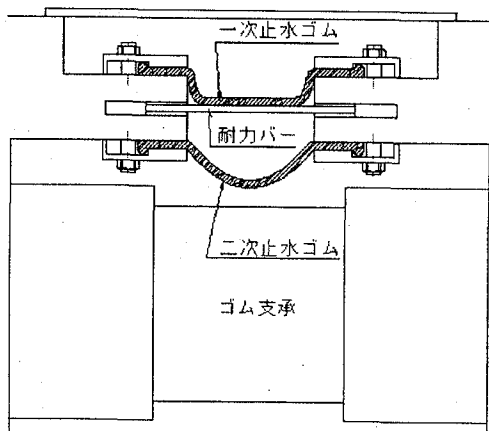


図-3 耐力バー式継手構造(シールドトンネル)

3. 新形式の可撓性継手

3. 1 形状の決定経緯

以上のような従来型の継手の特徴・課題をふまえ、大変形を吸収できる継手は内蔵継手で、その構成材料は変形追従性に富むゴム材料が望ましいと判断した。以下にゴム材料の形状の決定までの経緯を示す。

まず、従来の可撓性継手の二次止水に用いられているΩ型ゴムの使用を検討した。しかし、図-4に示すように止水ゴムに恒常的に張力が作用するため、クリープ変形が発生し、目地間に大きく脱落した状態になる。この状態で大きな軸方向変位が発生した場合、ゴムに有害な変形・破損が生じる可能性があるかと判断した。

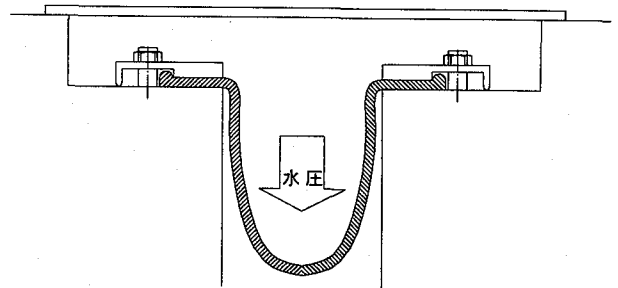


図-4 Ω型ゴムによる止水方式

次に、アクアラインの耐力バー式継手を参考に、ゴムが目地間に脱落しないよう耐力バーを設け、外水圧に抵抗することを検討した。しかし、シールドセグメントに比べ函体長が80~100m程度長い沈埋トンネルは、より大きな軸方向変位が発生し、図-5に示すように止水ゴムに過大なせん断や圧縮が発生し、有害な変形が予測される。

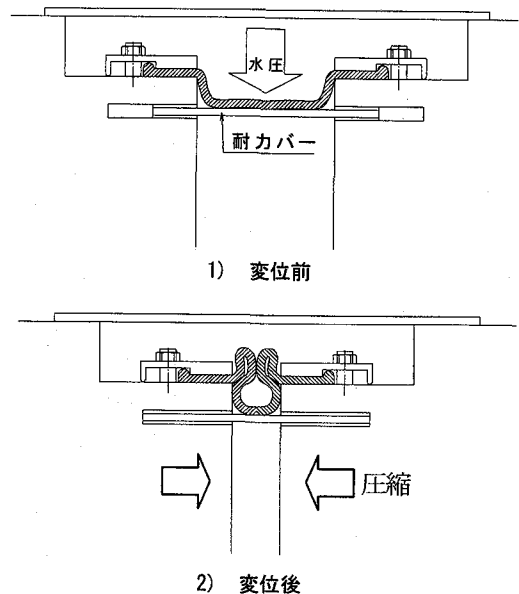


図-5 耐力バー式による止水方式

そこで、ゴム形状を変えて機能を付加することを検討した。第一に、ゴム部材の断面を大きくすることによって、剛性を上げて目地から脱落しないようにした。これによって、ゴムが自立することからこの機能をセルフサポートと呼ぶことにする。また、断面を大きくした部分をクラウン部、その両サイドをサイドウォール部と呼ぶことにする。

第二に、ゴムと鋼殻の接触面にノーズと呼ぶ小突起を設け、この部分を外水圧によって圧縮することによって止水機能を持たせた。この機能をセルフシールと呼ぶ。セルフシール機能により、ゴム締着部の止水との二重止水構造を有することになる。図-6に機能追加のイメージを示す。

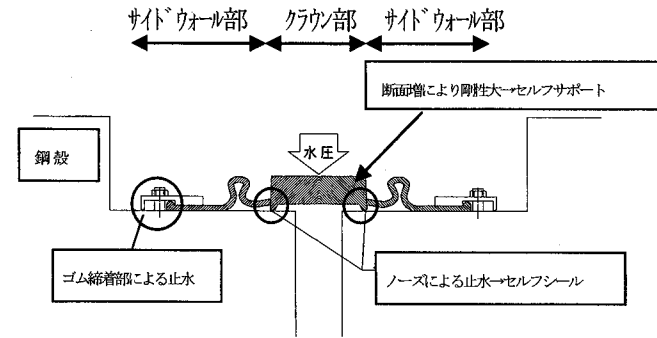


図-6 機能追加イメージ

さらに、大きなせん断変位が発生した場合でもセルフシール機能を保持することが出来るように、ノーズと接触する鋼殻部分を傾斜させることにした。

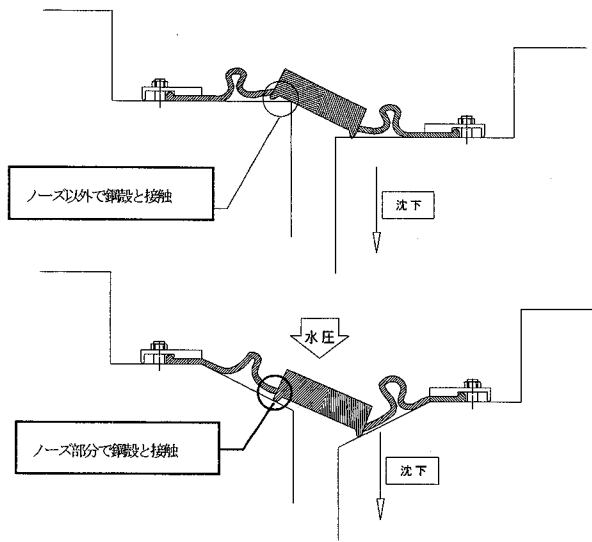


図-7 鋼殻形状変更

3. 2 クラウンシール式継手の特徴

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-8に示すクラウンシール式継手を提案する。ここで示す二次止水ゴムは従来継手にあるものと同じ機能で万一の漏水に備えるものであり、主要部材はクラウンシールゴムと呼ぶゴム部材である。

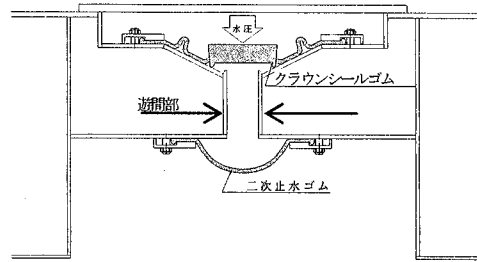


図-8 クラウンシール式継手

可撓性継手に必要な機能を止水機能と変形追従機能と定義すれば、従来継手はそれぞれ止水部材と変形に対する抵抗部材を有している。したがって、変形追従機能は抵抗部材の部材特性で決まっている。しかし、クラウンシール式継手には抵抗部材は無く、目地間隔(以後遊間部と呼ぶ)とクラウンシールゴムの幅(ノーズ間)によって追従可能な変形量が決定される。表-1に従来継手とクラウンシール式継手の各機能に関する部材を示す。また、クラウンシールゴムの幅を300mmとした場合を例に、遊間の初期設定次第で、様々なパターン of 軸方向変位に対して対応できることを表-2に示す。

表-1 各可撓性継手の構成部材

	止水部材	抵抗部材	
		圧縮	引張
ゴムガスケット+PCケーブル継手	ジーン型ゴムガスケット	ゴムガスケット	PCケーブル
ベローズ式継手	波形鋼板	波形鋼板	波形鋼板
クラウンシール式継手	クラウンシールゴム	(遊間部)	(遊間部)

表-2 遊間の初期設定と許容軸方向変位量

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

(単位 mm)

クラウンシール継手を函体に内蔵した場合の概念図を図-9に示す。ここでは、許容引張変位量を上回った場合の対策としてストッパーケーブルを配置している。また、施工継手は水圧接合後、剛結合とする。クラウンシール継手は継手変位に対して、図-10に示すようにスムーズに追従すると考えられるが、4.1において実験で確認する。

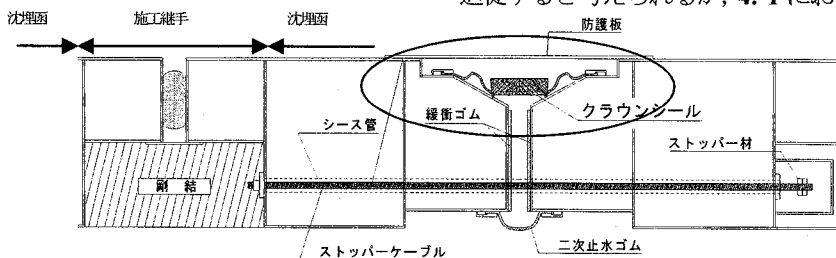


図-9 クラウンシール式継手概念図

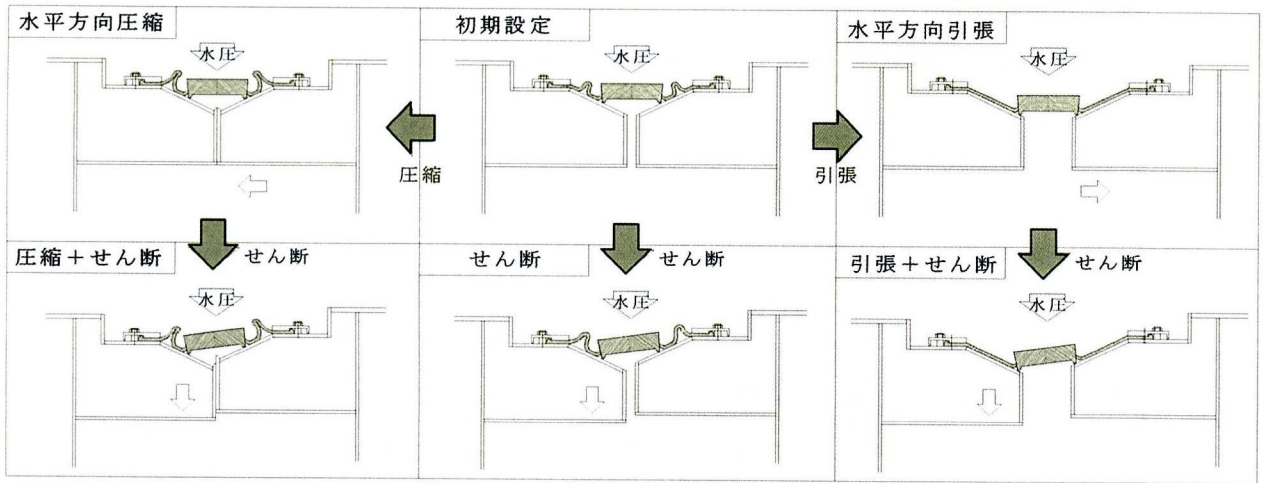


図-10 クラウンシールゴム追従状況

4. クラウンシール継手の基本性能確認

クラウンシール継手の基本性能を確認するため、以下の実験および解析を行った。まず、二次元実験を行い、継手変位に対する直線部分のクラウンシールゴムの挙動について確認した。供試体は既成のゴムを改良して製作するため、幅（ノーズ間）は130mmに設定し、挙動については定性的な特徴を把握することを目的とした。次に二次元FEM解析を行い、水圧下で継手変位を与えた時のゴムの歪みについて計算した。解析はモデルの幅を240mmと大きくして、より大きい変形に追従できるゴムに発生する歪みを定量的に把握することを目的とした。さらに、継手のバネ特性を周辺地盤と同程度に設定してトンネル縦断方向の全体解析を行い、沈埋トンネルに発生する断面力について、従来継手との比較を試みた。

4. 1 追従性確認試験

継手変位に対し、クラウンシールゴムの追従状況を確認するため、以下の実験を行った。ゴムの直線部分を二次元的にモデル化し、供試体の延長を1.2mとした。この供試

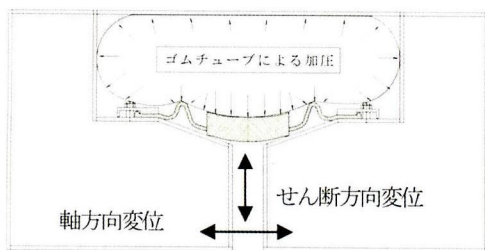


図-11 実験概要

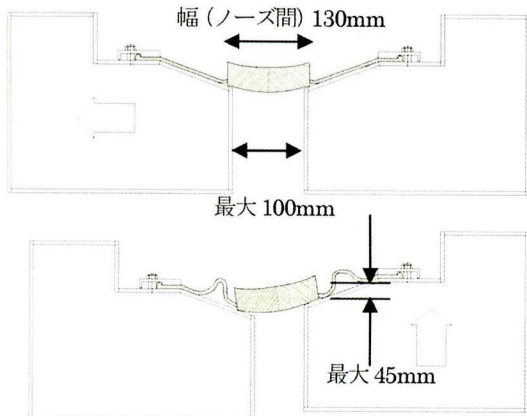


図-12 追従状況（上；軸方向変位 下；せん断変位）

体に水圧に模したゴムチューブで外圧を与え、その状態で試験架台を軸方向、せん断方向の二方向に移動させてクラウンシールゴムの挙動を調べた。ゴムチューブによる外圧は水深10m相当の0.1Mpaとした。

実験概要および供試体の諸元を図-11、架台の移動ケースを表-3、試験装置を写真-1に示す。

◇試験結果 どの移動ケースでも以下の挙動が確認できた。ゴムの追従の状況を図-12および写真-2に示す。

- ・ 軸方向変位、せん断変位に対しゴムがほぼ中立を保持しながら与えた変位に対し抵抗なく追従する。
- ・ サイドウォール長は軸方向（開き）変位の最大値に合わせて決定するため、変位によってクラウン部が遊間部に脱落することはない。

表-3 架台移動ケース

	軸方向変位(遊間量)	せん断方向変位
CASE1	30→100mm	0mm(固定)
CASE2	30→100mm	45mm(固定)
CASE3	30mm(固定)	0→45mm
CASE4	100mm(固定)	0→45mm

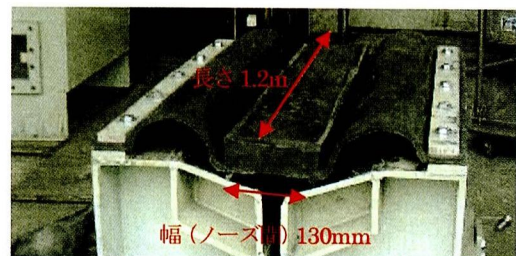


写真-1 試験装置および供試体

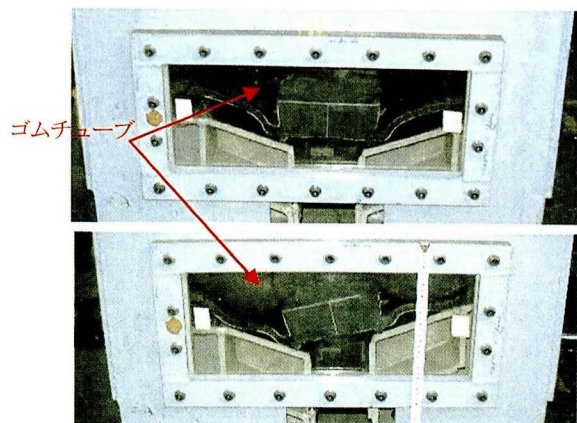


写真-2 追従状況（上；軸方向変位 下；せん断変位）

4. 2 二次元FEM解析

クラウンシールの主部材は天然ゴムだが、引張による局所歪みを緩和する目的で、クラウン部にはアラミド繊維、クラウン・サイドウォールの両部分にナイロン繊維を配置して補強する。図-13 に解析モデルを示す。

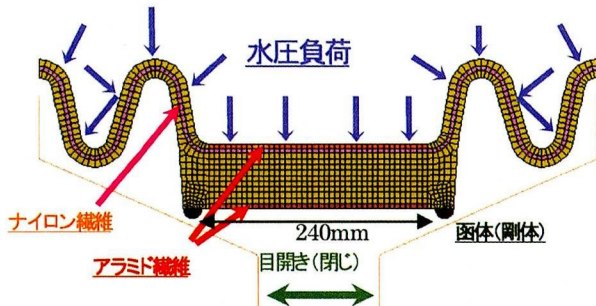


図-13 解析モデル

FEM 解析のモデル概要を以下に示す。ゴム部材は Mooney-Rivlin 則で示される非線形超弾性体とし、繊維要素は引張方向のみ弾性を持つはり要素とした。なお、ゴムおよび繊維の材料物性、摩擦係数は従来の沈埋函に用いられるゴムガスケットの材料と同等にした。

◇モデル概要

- ・解析プログラム：MARC
- ・要素タイプ：ゴム部→平面歪み要素
繊維部→リバー要素（はり要素）
- ・ゴム物性：硬度 50 度 破断歪み 450%
 $C_{10}=3.7\text{N/mm}^2$ $C_{01}=0.0\text{N/mm}^2$ (Mooney-Rivlin 則)
- ・アラミド繊維：弾性係数 $3.0 \times 10^3\text{N/mm}^2$
破断歪み 5%
- ・ナイロン繊維：弾性係数 $5.6 \times 10\text{N/mm}^2$
破断歪み 35%
- ・解析プロセス：①初期中立状態にセット
②水圧（等分布荷重）負荷
③遊間部変位 0mm→240mm
- ・ゴムと鋼殻（函体）の摩擦係数：0.4
- ・水圧負荷：0.1~0.3Mpa（水深 10~30m 相当）

なお、FEM 解析モデルはサイドウォールとクラウン部の取付をノーズと反対側にしているが、ノーズ側に取付けた解析と極値歪みに関して有意な差は生じないと判断した。解析結果を図-14 に示す。

◇解析結果

- ・サイドウォール部は函体の変位に十分追従する。
- ・ゴム部材に発生する最大歪みは、ノーズ部分で局所的に発生し 100% 程度である。硬度 50 度のゴムの破断歪みが 450% 程度であり、長期耐久性に影響を及ぼす歪みが 100% 程度であることを考慮すると、クラウンシールゴムに悪影響を与えるような歪みは発生しない⁶⁾。
- ・0.2Mpa よりも水圧を上げると、FEM 解析上の問題でサイドウォール部の安定解が得られない場合がある。これに対する対策として、サイドウォール部を非線形パネモデルにする等、解析の簡略化が考えられる。

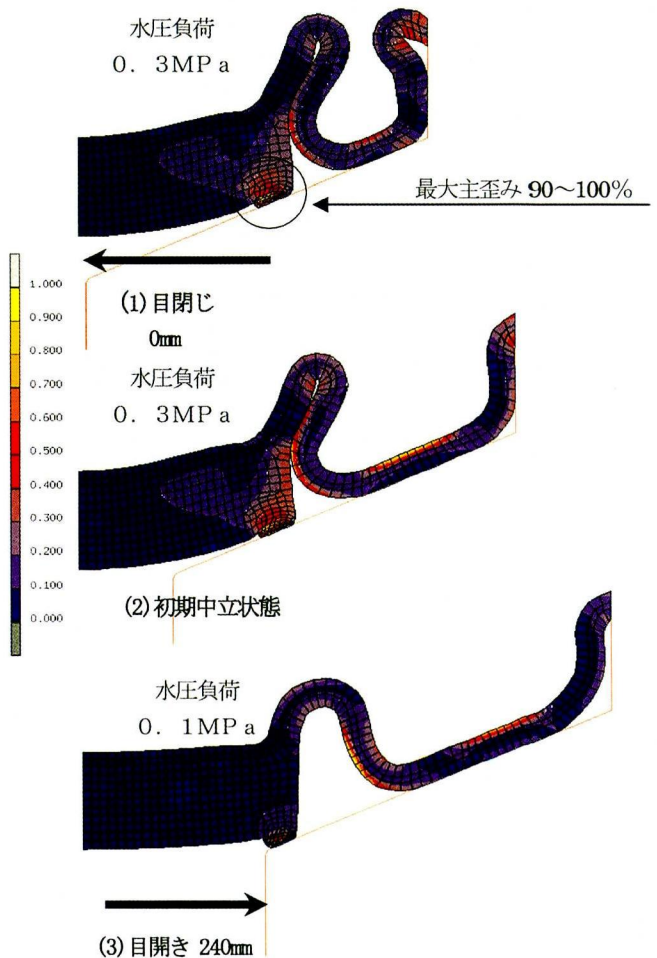


図-14 解析結果

4. 3 全体系解析による地震時の断面力の算定

従来継手とクラウンシール継手の継手性能を比較するため、全体系解析を行った。ここでは、図-15 に示す約 800m 区間で 8 函、9 継手の沈埋トンネルをモデルとして、地震時に発生する断面力を算定した。計算結果は有限要素法による動的応答計算により得られたものである⁷⁾。

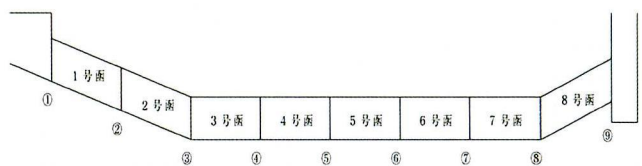


図-15 沈埋トンネル全体解析用モデル

◇検討ケース

- case A-1 ①~⑨継手：ゴムガスケット
+継手連結ケーブル形式継手
- case A-2 ①~⑨継手：クラウンシール式継手
クラウンシール式継手のばね定数は抵抗材がなく、実験でも特別な抵抗無しに中立を保って移動することから、全ての継手について継手バネ値を周辺地盤（沖積粘土 Ac2 層）のせん断剛性とほぼ同じ値、 $k=2.0 \times 10^3\text{tf/m}$ とした。また、ゴムガスケット+継手連結ケーブル式継手は圧縮側をゴムガスケットで $k \approx 約 5.0 \times 10^5\text{tf/m}$ 、引張側を PC ケ

ープルの $k = \text{約} 7.0 \times 10^5 \text{tf/m}$ のバネ値を用いて計算した。

基盤に入力する地中基盤波 (E+F) は「大阪市土木・建築構造物災害対策技術検討会」(4B-37E地点, 2E成分, 最大加速度 443gal) をもとに, SHAKE により抽出した。図-16 に入力地震波を示す。

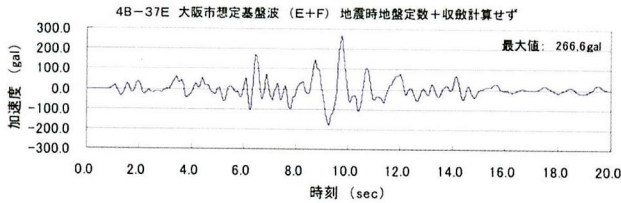


図-16 入力地震波 (L2レベル E+F)

有限要素法による動的応答計算より得られた結果を図-17 に示す。それぞれ, 函体および函体間継手に発生する断面力 (軸引張, 軸圧縮, 水平せん断, 水平曲げモーメント) をトンネル延長方向にプロットしている。

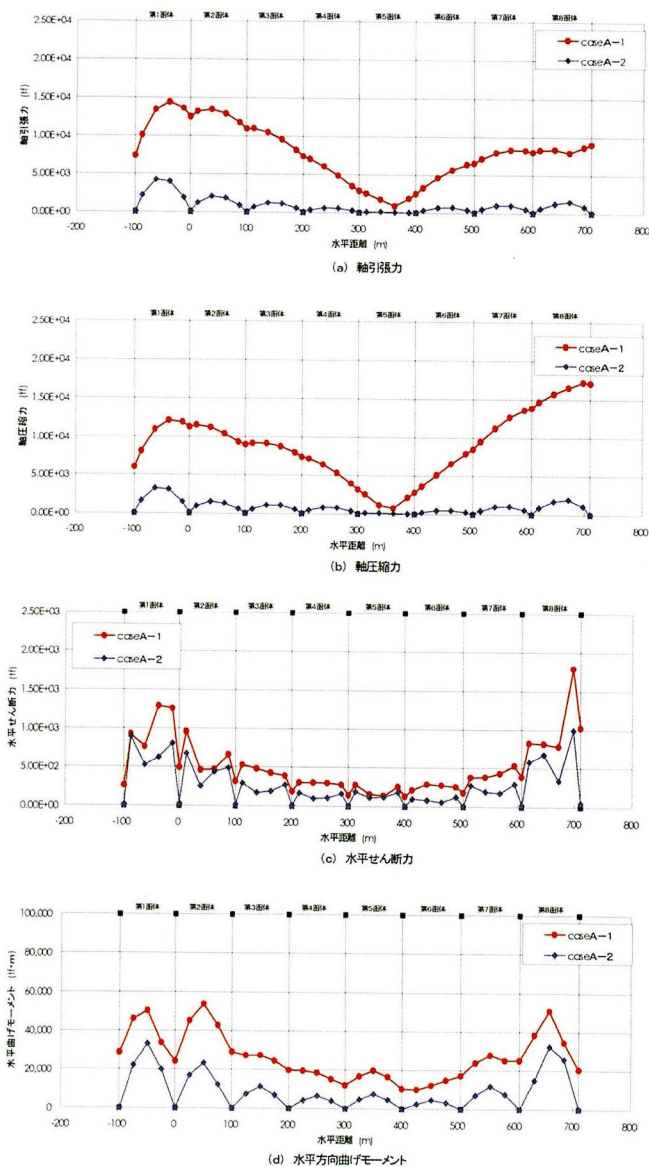


図-17 動的応答計算結果

各断面力とも CASEA-2 のクラウンシール継手位置で急減していることが明らかである。実際の継手はせん断キーの拘束があり, ここまで激減しない可能性はあるが, 継手部分には微少な周辺地盤のせん断抵抗しか働かないため, 実質的にヒンジ構造となる。したがって従来継手に比べてクラウンシール式継手は函体の軸方向鉄筋の減少等, 断面の縮小が期待できる。

5. おわりに

本稿では基本実験および解析により, 沈埋函の新型継手であるクラウンシール式継手の直線部分の挙動を概ね把握し, 不同沈下等の変形に追従できることを確認した。追従できる変形量は継手ゴムの大きさ, 遊間部の設定によって可変であるが, 実験モデル (幅 130mm) で軸方向 100mm (±50mm), せん断方向 ±45mm を確認できた。ゴムの幅は水圧の受圧面積の増加につながり, 支点となるノーズ近傍に発生する歪みも大きくなるが, 二次元 FEM モデル (幅 240mm) では発生する歪みは破断歪みに対して十分小さい値であった。このことより, クラウンシールゴムの実用化に当たって, ゴムの幅を 240~300mm 程度に設定すれば, 軸方向で 200mm (±100mm) 以上, せん断方向で ±100mm 以上の変形に追従が期待できる。

また, 継手部に抵抗部材が無く, 縦断方向の全体系解析によって, 新型継手はほぼヒンジ構造として設計上の取り扱いができることが明らかになった。

今後, クラウンシール式継手の実用化にあたっては, 本論文で未検討であるコーナー部分の挙動, 発生歪みおよび止水性能を確認する必要がある。

(付記)

上記の事項を確認のため, 国土交通省が環状の実物大供試体を用いた三次元実験および三次元 FEM 解析を実施したところである⁸⁾。今後, クラウンシール継手は大阪湾で建設中の沈埋トンネルで採用される予定である。

参考文献

- 1) (財) 沿岸開発技術研究センター: 沈埋トンネル技術マニュアル
- 2) (社) 日本埋立浚渫協会(1998): 沈埋トンネル工法と施工事例
- 3) 日経 BP 社: 東京湾横断道路のすべて
- 4) 清宮理・矢島貴(1997): 沈埋トンネル用ゴムガasket の諸特性, 港湾技研資料, No.871
- 5) 清宮理・藤沢孝夫他(1992): 沈埋トンネル柔継手の力学的特性, 港湾技研資料, No.728
- 6) 日本ゴム協会(1985): 長期自然老化と人工促進劣化との対比に関する報告書, ゴム技術委員会報告 No.8409
- 7) 戸田和彦他(2000): 沈埋トンネル柔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.793~800,
- 8) 横田弘他(2002): 大変形に追従可能な新形式沈埋トンネル用柔継手構造の開発, 海洋開発論文集, Vol.18, PP.587~592 (2002年9月13日受付)

(last page)