

新形式可とう性セグメントの開発

DEVELOPMENT OF THE NEW TYPE FLEXIBLE SEGMENTS

山崎 宏¹⁾・磯 陽夫¹⁾・渡邊 徹¹⁾・太田 亘²⁾・河島庸一²⁾

Hiroshi YAMAZAKI, Akio ISO, Toru WATANABE, Wataru OTA, Yoichi KAWASHIMA

Recently, many flexible segments are used to shield linings since Kobe earthquake. But general flexible segments need complicated work and are high cost because they have many process to construct.

Therefore, authors have developed new type flexible segments which attain little work and low cost as the result of thrust transmission parts function as structural parts.

This paper describes a fundamental structure, process to construct, advantages of the new type flexible segments, 3D-FEM analysis of the rubber block, and performance tests with prototype segments.

Key Words: shield lining, segment, flexibility, seismic stability, low cost

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震では、十分に耐震能力があると考えられていた地下構造物にも被害が生じた。シールドトンネル本体は、比較的軽微な被害であったが、振動特性の異なるトンネル本体と立坑との接合部においてクラックの発生等が報告されている。そのため、近年では、トンネルと立坑の接合部に、免震効果を期待して可とう性セグメントを用いる例が多くなっている。可とう性セグメントは、シールド掘進時のトンネルの変位・変形を防止するため、組立直後からジャッキ推力に対して剛性が必要であり、完成後には可とう性を有する構造へ変換することが必要である。このため、剛体から可とう体への変換が容易な構造および作業の簡素化が求められる。

そこで筆者らは、可とう部のゴムブロックを鋼桁とあらかじめ一体化することにより、一般のセグメントと同じ要領で組立を可能とし、推力伝達部材の一部を取り外すことで可とう体への変換を容易にした「フレキシブルセグメント」を開発した。本報文は、可とう性セグメントの一種であるフレキシブルセグメントの概要と、ゴムブロックリングの止水性等を確認する目的で行った止水試験、および設計にあたりゴムブロックの挙動を把握できる解析手法を検討するために行った3次元FEM解析について報告するものである。

2. フレキシブルセグメントの概要

(1) 構造

フレキシブルセグメントは、図-1に示すように、2つの鋼桁とそれに挟まれたゴムブロック、およびゴムブロックを貫通して設けられた推力ロッドから構成されている。これらは製作工場では一体化しているため、従来のセグメントと同様、1ピースごとに搬入・リング組立が可能である。各部材の機能を以下に示す。

1) 正会員 西松建設(株) 技術研究所 土木技術課
2) 正会員 横浜ゴム(株) MB開発本部

ゴムブロック……地震時のトンネル変位を吸収する部分。

トンネル軸方向には推力ロッドを通すための孔を設けている。トンネルに引張変位が発生した場合にゴム体に大きな引張応力が生じないように、設計引張変位量に若干の余裕を考慮した量であらかじめ圧縮して取り付ける。なお、鋼桁と連結するためリング継手側の円周方向にボルト付き鋼板を内蔵させている。

推力ロッド……シールドジャッキ推力を伝達する部材。

ジャッキ推力の影響がなくなった後は、ゴム部に作用する外水圧を鋼桁へ伝達する。

鋼桁部……ゴムブロックを挟む状態で一対となっており、外荷重に対抗する。

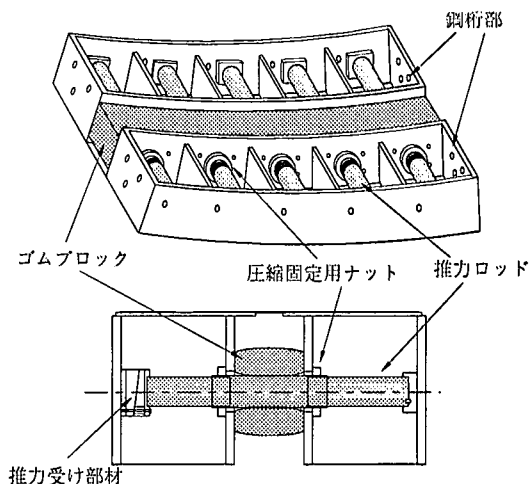


図-1 フレキシブルセグメントの構成

(2) 施工法

フレキシブルセグメントの施工順序を以下に示す。なお、①、②は工場における作業、③、④は現場での作業である。

- ① ゴムブロックに推力ロッドを通した後、ゴムブロックと鋼桁をボルトにより接続する（図-2）。
- ② ゴムブロックを圧縮し、ナットにより圧縮状態を保持させ推力受け部材を挿入する。
- ③ ゴムブロック接合面に接着剤を塗布し、リングを組み立てる。
- ④ ジャッキ推力の影響がなくなった後、ナットを緩め、推力受け部材を取り外す。

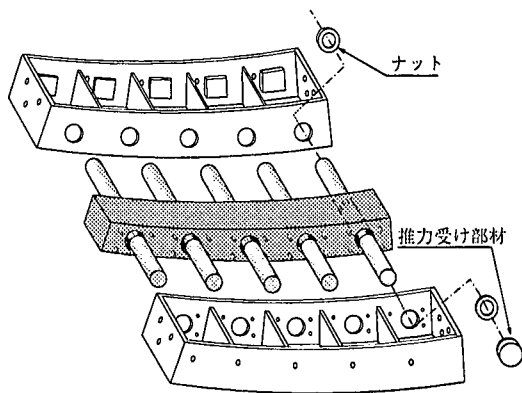


図-2 セグメントの組立

3. フレキシブルセグメントの特長

フレキシブルセグメントを採用することによる利点を以下に示す。

- ① 可とう部をあらかじめ組み込んだ構造のセグメントであるため、リングの組立は従来のセグメントと同様であり、施工速度が向上する。
- ② 圧縮を保持しているナットを緩め、推力受け部材を取り外すのみで可とう体となるため、作業が容易であり、全体工期に与える影響が少ない。
- ③ 常にゴムブロックが圧縮状態にあり、止水性が高度に保てる。
- ④ 可とう部のゴムがブロック状であり、貫通するロッドで保持されているため、内水圧にも対応可能である。
- ⑤ 以上のことから、セグメント価格および施工価格のコストダウンが図れる。

4. 止水試験

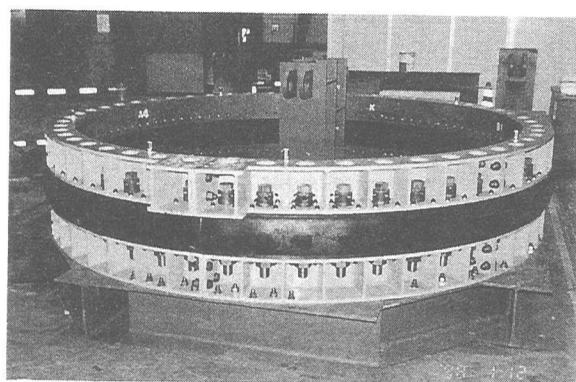
(1) 試験目的

接着剤による接合でリングを形成しているゴムブロック継手面の止水性の確認を目的として、外径 ϕ

表－１ 設計変位量

項 目	設 計 値
沈 下 量	85mm
伸 び 量	30mm
縮 み 量	30mm

3,000mmの実物大フレキシブルセグメントを用いて止水試験を行った。また、ゴムブロック圧縮所要力、リング組立性についても確認を行った。



写真－１ フレキシブルセグメント外観

(2) フレキシブルセグメントの基本設計値と形状寸法
今回の試験における設計変位量を表－１に示す。これにより、ゴムブロック幅、推力ロッド径および鋼桁は、次のように設計している。

① ゴムブロック幅

組立時のゴムブロックの圧縮量は、最大設計伸び状態において若干の圧縮力が保持され、最大設計縮み状態においてはゴムブロックに過大な圧縮応力が発生しないように設定する。

そこで、圧縮量は設計伸び量30mm＋余裕代20mmの50mmとし、ゴムブロック幅は圧縮率が20%となるように、製作時には250mm、組立時は200mmとした。

② 推力ロッド径

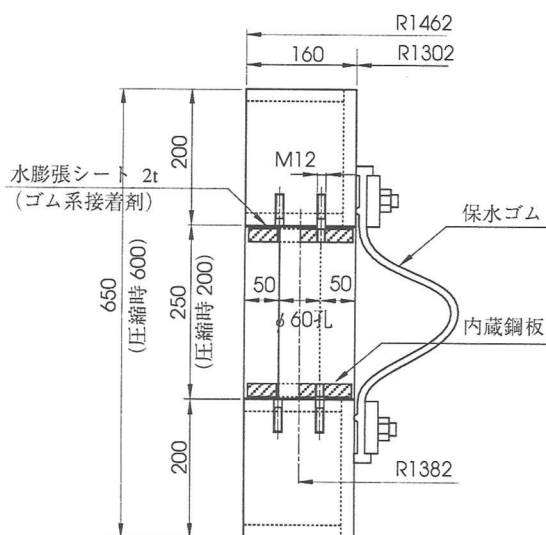
推力ロッドの外径は、シールドジャッキ推力による座屈に対する検討により決定する。

シールドジャッキ装備推力をシールド外径3mクラスの実績の平均的な110tf/m²とし、設計シールドジャッキ推力は装備推力の80%と想定し、ロッド径を45mmとした。

③ 鋼桁の桁高および幅

今回の試験では、鋼桁はセグメントを組み立てるうえで必要最小限のサイズとすることとし、桁高はゴムブロックと同一の160mm、桁幅200mmとした。

試験に用いたフレキシブルセグメントを写真－１、図－３に示す。



図－３ 止水試験用フレキシブルセグメントの寸法

(3) 試験方法

試験方法は、図－４に示すように、平組みしたリングの内面に水封用保水ゴムを設置し、供用時よりも厳しい条件である内水压を作用させた。また、上部鋼桁リングの4箇所油圧ジャッキを配置し、圧縮を解放した状態で水平方向に変位させることでゴムリングにせん断変形を与えた。

作用水压は0kgf/cm²から最大6kgf/cm²まで1kgf/cm²ピッチで与え、それぞれの水压においてせん断変位を85mmまで与えた。

(4) 試験結果

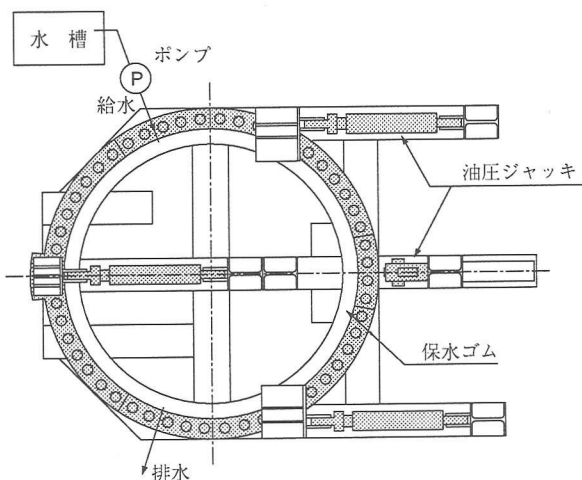


図-4 試験方法概要

①リング組立性

セグメントの50mm圧縮は、200tfアムスラー万能試験機を用いて行った。

リング組立は、継手面のゴムが突出しているため、AおよびBセグメントについては、長ボルトを締め付けて引き寄せることで接合し、Kセグメントは軸方向挿入により行った。AおよびBセグメントの接合状況は、ほとんど段差がなくゴムブロック継手面の接着状況も良好であった。Kセグメントについては、挿入時に塗布した接着剤が擦り取られているように見られたが、止水試験から接着性に影響を及ぼす程度ではなく、十分に接合されていることが確認された。

②止水試験

圧縮状態での水圧とゴムブロック変形量の関係を図-5に示す。水圧が作用していない状態では、ロッド部とロッド間では、ゴムブロックの膨らみに違いが見られるが、水圧が上昇するに伴い、ほぼ一様にゴムブロックが膨らむことが判る。このことは、写真-2に示すように、目視によっても確認できた。

また、圧縮状態では、水圧6kgf/cm²においても漏水は確認されなかったことから、フレキシブルセグメントは常時の状態で十分な止水性を有していることが確認された。

一方、圧縮を解放した状態では、水圧6kgf/cm²でせん断変位50mmを作用させたとき、わずかにB-K間のゴムブロック継手面からにじみが発生した。内水圧を作用させたために、継手面に実際よりも大きな引張力が生じていたことが原因と考えられたこと、また漏水状況はわずかであったことから、実工事においては止水性に問題ないと考えられる。

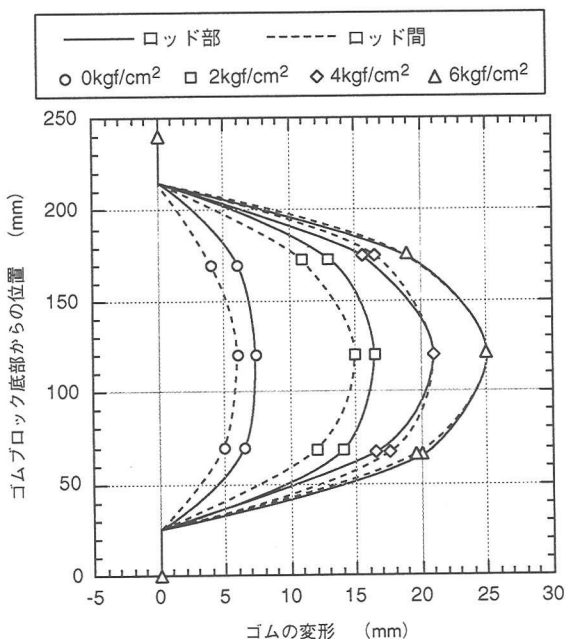


図-5 水圧とゴム変位量の関係

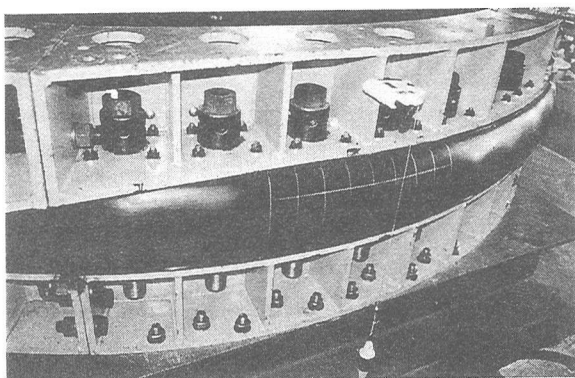
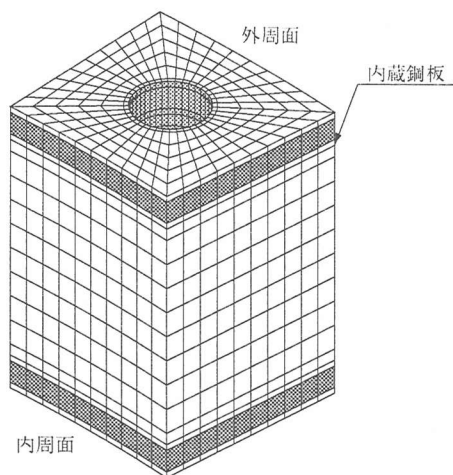


写真-2 圧縮状態で水圧作用時のゴムブロック

5. FEM解析



図－6 圧縮特性用部分モデル

(1) 解析目的

設計条件に適したゴムブロックの仕様を決定するため、供用時におけるゴムブロックの圧縮特性ならびに継手面の止水性、すなわち継手面における面圧状況を把握する必要がある。この観点から、ゴムブロックの継手面の接触状況状況を考慮した3次元FEM解析を行った。

以下に、部分モデルによる圧縮時におけるゴムブロックの挙動のシミュレーション結果、および全リングモデルによる解析結果の一例を示す。

(2) 解析モデル

ゴムブロックの圧縮特性を把握するための解析モデルは、解析の効率性を考慮し、図－6に示すようにAセグメントのうちロッド1本を含む部分を対象とした。

継手面における止水性を把握するための解析モデルは止水試験に用いられた全リングを対象としている。この場合には推力ロッド (M45) および推力ロッド孔 ($\phi 60$) を考慮すると解析モデルが複雑になるため、解析の実用性および経済性を考慮して今回はこれを省略した。このため、反力特性は実験値よりも大きな値となってしまうが、全体の変形の様子、および接合面における接触面圧を把握する上では問題はないものとする。図－7に解析モデルを示す。

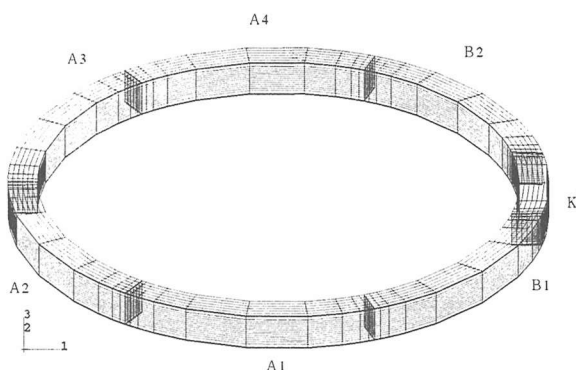
(3) 解析結果

① 圧縮反力特性

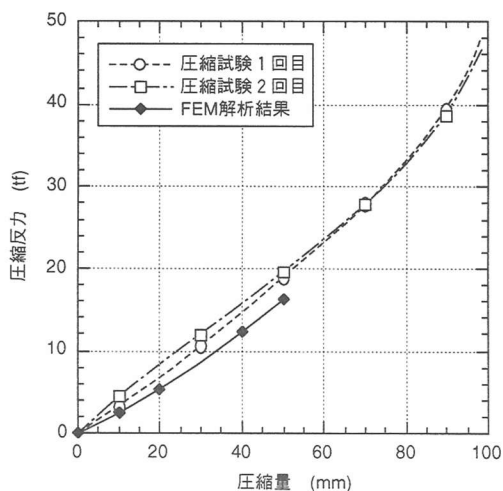
解析結果を圧縮試験結果と併せて図－8に示す。今回の解析では拘束条件によって圧縮量が50mmまでの結果しか得られなかったが、解析結果は試験結果をほぼシミュレートできている。

② 圧縮変形特性

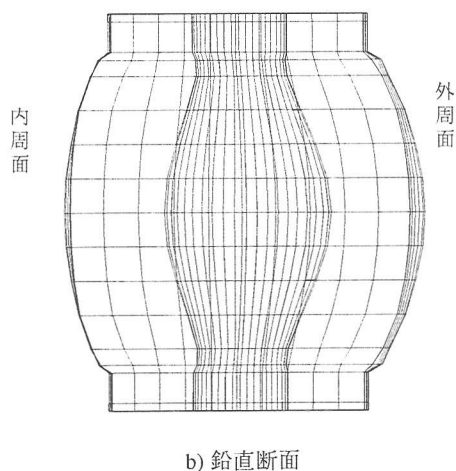
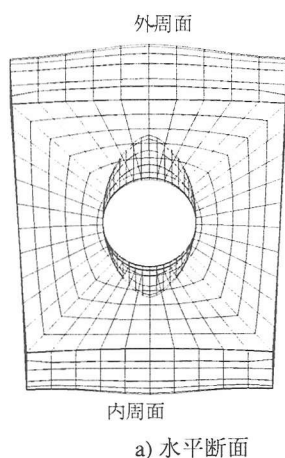
ゴムブロックの張り出し量を表－2に示す。圧縮試験における計測値との誤差は1mm程度であり、良くシミュレートできている。圧縮量50mm時の変形を図－9に示す。鉛直断面では、ゴムブロックは試験時と同様に内蔵鉄板の内側にくびれが生じている。また、水平断面では、ロッド孔は圧縮により半径方向に広がり、円周方向につぶれてロッドと接触している挙動を示している。圧縮に伴い、ロッドがゴムブロックに拘束される



図－7 全リングモデル



図－8 圧縮反力特性



図－9 圧縮時のゴムブロックの変形

現象が止水試験時に確認されていることから、解析でもこの現象がシミュレートできたといえる。

③ リング変形特性

ゴムブロックの継手面の接触状況を考慮した全リングモデルによる3次元FEM解析によって、セグメントの圧縮変形およびせん断変形時のゴムブロックに発生するひずみ分布および継手面における面圧の状況を把握することができる。解析結果の一例として、最大伸び量状態である軸方向圧縮量20mmにおける水圧6kgf/cm²、せん断変位100mmでのAセグメントのひずみ分布を図－10に示す。

FEM解析結果により次のことが可能となる。

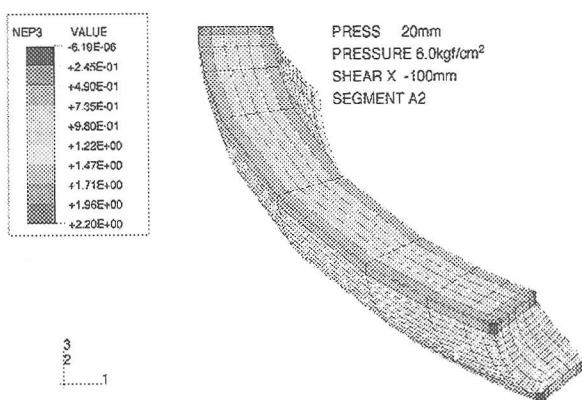
① 供用時におけるセグメントに発生するひずみ分布を把握し、供用時の安全性を評価する。

② 接合面圧から止水性を評価し、施工条件における最適な組立時のゴムブロック圧縮量等の仕様を設定する。

以上から、ゴムブロックの圧縮時の挙動は部分モデルによるFEM解析で十分シミュレートできること、またロッドを無視し、継手面の接着を考慮しない全リングモデルにおいても、十分にフレキシブルセグメントの挙動が把握できることが確認された。

表－2 ゴムブロックの張り出し量 (単位:mm)

	計測点	試験値	解析値	誤差
外周面	推力ロッド部	34.8	35.7	+0.9
	推力ロッド間	28.2	29.7	+1.5
内周面	推力ロッド部	28.7	29.7	+1.0
	推力ロッド間	22.8	24.0	+1.2



図－10 全リングモデルによる解析結果の一例

6. おわりに

本報告は、フレキシブルセグメントの概要と性能確認試験およびFEM解析結果を示した。フレキシブルセグメントは、西松建設(株)と横浜ゴム(株)の共同開発によるものである。現在、各種施工条件に対し、合理的な設計を行うための解析手法の検討を行っている。今後は、実工事への適用をめざし、施工性の検討を行っているところである。今後は、現場での適用を通して施工性を確認するとともに、さらなる合理化を検討する予定である。