ラッピング工法用可とうセグメント の開発

ラッピング工法の特長を活かしたシールドトンネル免震技術

島田哲治・栄　毅熾・芳賀由紀夫

Keywords: shield tunneling, wrapped lining method, waterproofing sheets, flexible segments
シールドトンネル，外周被覆工法，防水シート，可とうセグメント

1.　序

シールド工法において可とうセグメントは，トンネルの不同沈下や地震時の変位に対応するために用いられている．変形可能なセグメントで，地層境界やトンネルと立坑の接続部のように地震時の変位差によって大きな断面力が発生する箇所で，免震的対策として用いられている．しかしながら，現在実用化されている可とうセグメントは，その多くが現状では高価であり施工手間がかかるといった点から，構造物の重要度を考慮した上で使用されている．

このたび筆者等は　五洋建設，奥村組と共同で「ラッピング工法」の特長である高い止水性を活かして，既往の可とうセグメントが高価になっている要因である可とう部の構造を簡素化し，施工性・経済性に優れた可とうセグメントを開発した．

本報では，開発したラッピング工法用可とうセグメント（以下，本可とうセグメントと称す）の概要と変形性能および止水性能を確認するために実施した実物大での性能確認実験結果について報告する．

2.　ラッピング工法用可とうセグメントの概要

本可とうセグメントの概要を図-1 に示す．

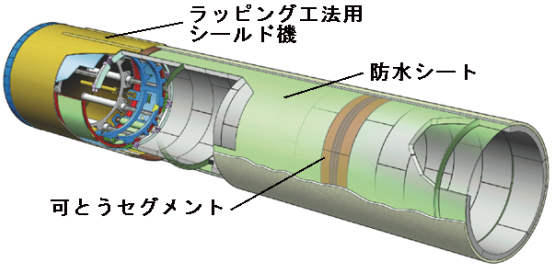

図-1　ラッピング工法用可とうセグメント概要
Wrapping Method with flexible segments

本可とうセグメントは，ラッピング工法により構築されたシールドトンネルの地震や不等沈下等により発生する応力や変位を吸収するものである．

既往の可とうセグメントは，可とう部（ゴム部）に止水機能と耐荷機能を持たせているため，構造が複雑になり施工手間がかかるのに対して，本可とうセグメントは，セグメント外周に被覆した防水シートが止水性を保持できるため，可とう部は土水圧に対する耐荷機能のみを持たせた簡素化された構造となっている．さらに，１リング組立後は，ゴムの加硫接合等を行う作業が不要である．以上のことより，本可とうセグメントは，既往の可とうセグメントに対して施工性の向上とコストダウンを図ることができる．

本可とうセグメントを写真-1に，また施工順序を図-2に示す．構造は，図-2に示すように緩衝ゴムを２つの鋼枠（外枠セグメント）で挟み，緩衝ゴムの下部には耐圧板・推力受材および変位規制材が設けてある．

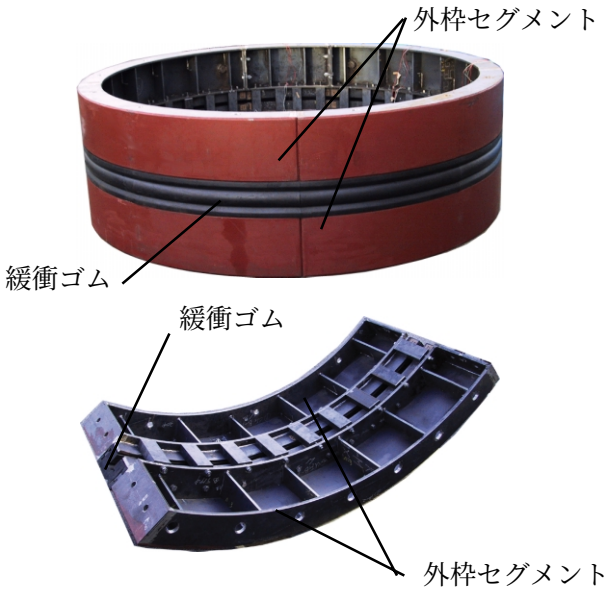

写真-1　ラッピング工法用可とうセグメント
Flexible segment for Wrapping Method

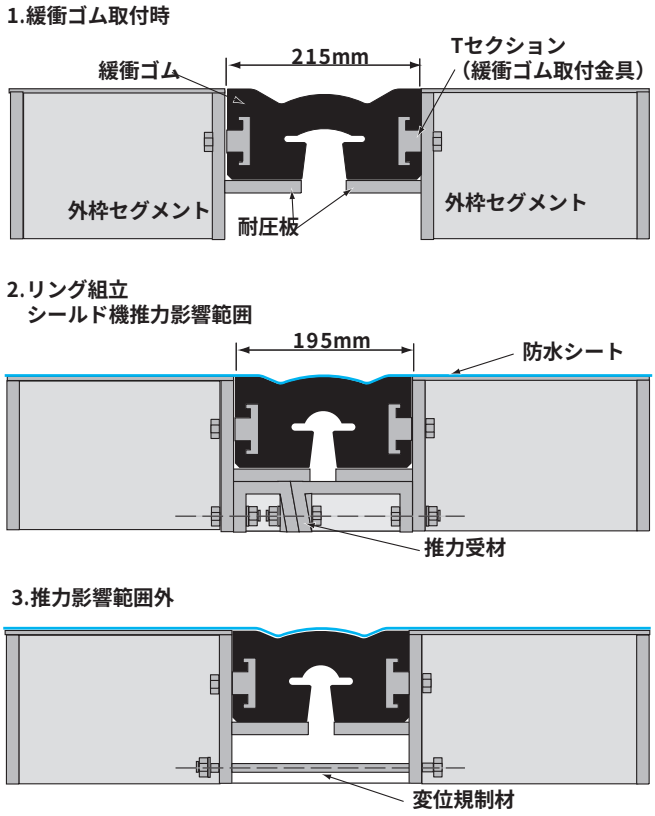

図-2　施工順序
Process of execution

以下に各部の機能を示す．

・緩衝ゴム：地震時等のトンネル変位を吸収する部分．可とう部が伸縮や偏心等を受けて変位する時，それらの動きに隙間を生ずることなく追随し，外圧（土水圧）に耐え，防水シートを緩衝保護できる．

・外枠セグメント：左右一対でセグメントの骨格を形成するもので緩衝ゴムを保持するとともに，外圧（土水圧）に対抗する．

・Tセクション：緩衝ゴムを左右の外枠セグメントに固定するためのT字金具．

・耐圧板：緩衝ゴムが外圧を受けた時，外圧に耐え，ゴムを保持する部材．左右の耐圧板の間には必要空隙を設け，可とう部の変形を可能にしている．

・推力受材：工場でセグメントピースに緩衝ゴムを組込む時点において，緩衝ゴムを所定の幅(195mm)に調整し保持する部材．また，シールド推力の影響を受ける間は緩衝ゴムが圧縮されないように，推力を伝達する部材．シールド推力の影響を受けなくなった時点で取外す．

・変位規制材：緩衝ゴムが，伸びや偏心を受けても許容変位以上に開かないための規制材である．シールド推力の影響を受けなくなった時点で，推力受材を撤去し，替わりに必要数量の変位規制材が等分布に設置される．

3.　開発経過

3.1　基本構造の決定

可とう部の構造は，シートとともに外圧力に耐えることと，伸び・圧縮等の変位を受けるセグメントの動きに追随できる必要がある．そこで，ゴムの非圧縮性を活かし，剛体の密封容器内にゴムを配置し，外圧により隙間（必要伸縮量）からゴムが抜け出すことなくシートを緩衝保護できる構造を基本型とした．また，この緩衝ゴムは従来技術の可とう部材であるクロロプレンゴムを使用することにした．

次に，仕様を決定した．使用条件は，実際に可とうセグメントを使用した工事の実績や防水シートの弾性変形量を考慮して，仕様を伸縮量±20mm，偏心量30mm，耐水圧1.0MPaとした．この仕様をもとに，長期使用を考慮して，ゴムの弾性変形範囲（10～20%），シートの弾性変形範囲（4%）から，緩衝ゴムの幅と厚さ寸法を200×100と仮定した．

3.2　緩衝ゴム形状の決定

緩衝ゴムは矩形状態ではあまりに硬く，伸びや圧縮，曲げが出来ない．そこで，変形に追従できるように形状の検討を行った．

・下部にV字型の切込みを入れる．
・V字頂点に空洞を設ける．
・空洞内部をきのこ形状にする．
・上部にくびれを入れる．

以上の過程を経て耐圧性を確保し，かつ，セグメントの動きに追従できるようにした．また，緩衝ゴムは引張り状態で使用するとクリープの影響をうけやすく寿命に関わるため，図-3に示すようセグメントピース製作時に事前に，設計伸び量20mm分を圧縮することで，変位吸収時に緩衝ゴム自体の伸びを発生させないようにした．

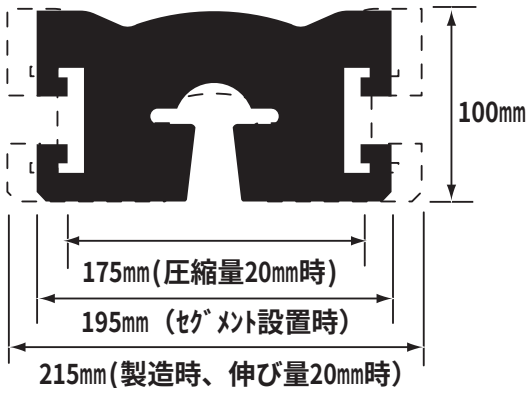

図-3　緩衝ゴム
Buffer rubber

3.3　緩衝ゴム要素実験

緩衝ゴムの変形状況を確認するため，写真-2に示す奥行き方向100mmの試験体に，自由面を拘束した状態で外圧をかけ，圧縮・伸び・偏心試験を行った．また，同条件で，アムスラー試験機を用いて圧縮変形させて荷重～変位関係を調べ，変形抵抗力がセグメント本体の剛性に比べ充分小さいことを確認した．

次に，外圧(2.0MPa)下で緩衝ゴムが変形した際の緩衝ゴムの状態，耐圧板およびTセクションに発生する応力とひずみを調べた．

実験より，目標とする本可とうセグメントの使用条件1.0MPaの２倍の外圧2.0MPa下でも緩衝ゴムは，耐圧板より抜出すことなく耐圧性を有していることを確認した．また，本試験の仕様であれば，耐圧板およびTセクションに発生する応力とひずみは，非常に小さいことを確認した．

以上の要素実験により，可とう部の基本的な性能を確認した．

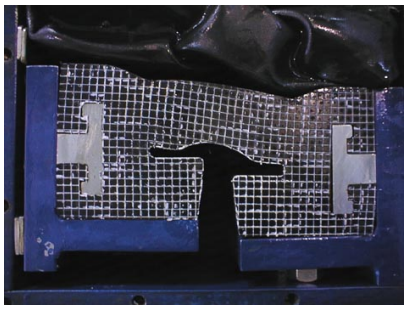

写真-2　緩衝ゴム負荷試験
A test under external pressure

4.　実験概要

4.1　実験目的

今年度は，実物大の試験体を製作しラッピング工法施工区間に，可とうセグメントの施工が完了した状態を想定し，外圧を加えた状態で設計量変位させることにより以下の事項について総合的な検証を行った．

●本可とうセグメントの変形性能が，表-1に示す設計変位量を満足する．

●変形時において，外周に敷設した防水シートの止水性に悪影響を与えない．

表-1　　設計変位量
Design displacement

圧縮量	伸び量	偏心量	屈曲角※1
20mm	20mm	30mm	0.8deg

※1屈曲角：今回試験体での設計値

4.2　試験体

試験体寸法は実大規模とし，実験装置に合わせセグメント外径φ2800mm，緩衝ゴムを取り付ける鋼製の外枠セグメント幅は，各350mmとした．また，外枠セグメントは，外水圧0.5MPaに耐えうる構造にした．
図-4に試験体形状断面を示す．

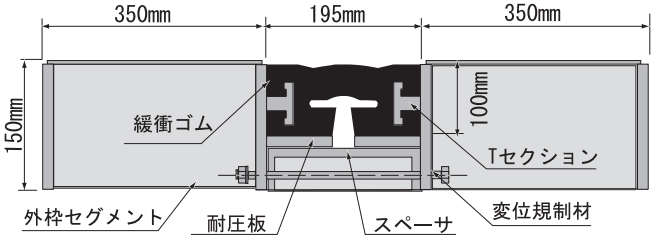

図-4　　試験体断面
Test segment section

4.3　実験装置

実験装置を写真-3に示す．実験装置の仕様を表-2に示す．この装置は，計4本のスクリュージャッキにより載荷フレームを移動する機構である．上下のスクリュージャッキが独立に作動可能なため，載荷フレームを傾けることにより載荷フレーム間に設置した試験体にせん断変形を与えることができる．

写真-3　実験装置
The test equipment

表-2　実験装置の仕様
Specification of test equipment

耐軸推力	4000kN
試験体最大口径	φ3200mm
フレーム面間寸法	最大1100mm～最大8000mm
フレーム傾斜角度	±7.5deg
フレーム移動速度	2段階(Lo:32mm/min,Hi:125mm/min)

4.4　実験方法

実験は，圧縮，伸び，偏心の各変形，偏心と圧縮・伸びを組合わせた変形，および屈曲角について設計変位量まで与えた（外圧負荷実験）．

外圧は，シート外周に設置した外筒管（スリーブ管）に注水加圧することにより0.5MPaまで作用させた．写真-4にシート設置状況，写真-5に実験状況を示す．なお，緩衝ゴムの変形状態を確認するために，シートを設置する前に，外圧を作用させない外圧無負荷実験も実施した．また，設計変位量の２倍近くまでの変形性能の余裕度の確認も行った(変形裕度確認実験)．表-3に実験ケースをまとめて示す．

写真-4　防水シート設置状況
Wrapping test segment with waterproofing sheet

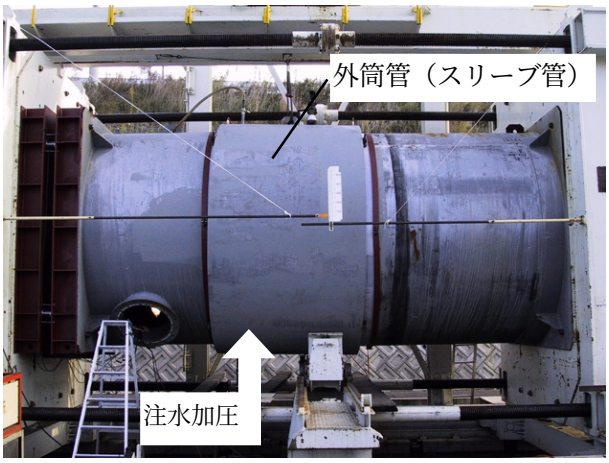

写真-5　外圧負荷実験状況
Test under external pressure

4.4　計測内容

セグメントの変形と外圧により，緩衝ゴムおよび緩衝ゴム固定金具が受ける影響を確認するため，計測装置を配置した．計測項目は，荷重，変位，Tセクションに作用する圧力とひずみ，耐圧板に作用する圧力，Tセクション固定ボルトの軸力および外圧力（注水圧）である．試験体および計測器の配置を図-5に示す．

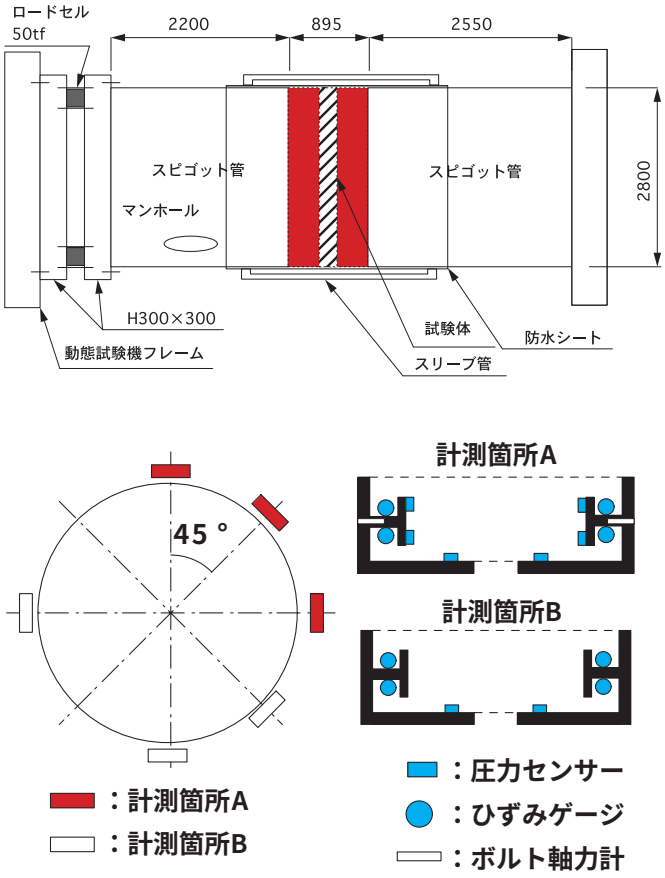

図-5　試験体および計測器配置図
Location of gauges

5.　実験結果

5.1　変形性能

外圧負荷実験より，最大外圧0.5MPa作用下において，設計変位量まで，全て問題なく変形することを確認した．また，本可とうセグメントの可とう部に使用している緩衝ゴムは，従来の可とうセグメントに使用される止水ゴムに比べ肉厚であるため，リング状の緩衝ゴムに大きな外圧が作用した場合，緩衝ゴムの形状係数が変わり抵抗力が大きくなることが懸念されたが，図-6および表-

表-3　実験ケース一覧表
Test cases

実験名	実験内容　　単位：mm						最大外圧
	圧縮	伸び	偏心	偏心＋圧縮	偏心+伸び	屈曲角	
外圧負荷実験	0～20	0～20	0～30	偏30+圧0～20	偏30+伸0～20	0.8 °	0.5MPa
外圧無負荷実験	0～20	0～20	0～30	偏30+圧0～20	偏30+伸0～20	0.8 °	無し
変形裕度確認実験	0～30		0～60		偏0～60+伸20	1.6 °	無し

4に示すようにその作動抵抗力(剛性)は十分に小さく，可とう性に影響を及ぼすものではなかった．なお，表-4は，今回の試験体外径に近い標準セグメントを選び算出したトンネルの等価剛性と，実験より得られた0.5MPa下での試験体の等価剛性を比較したものである．

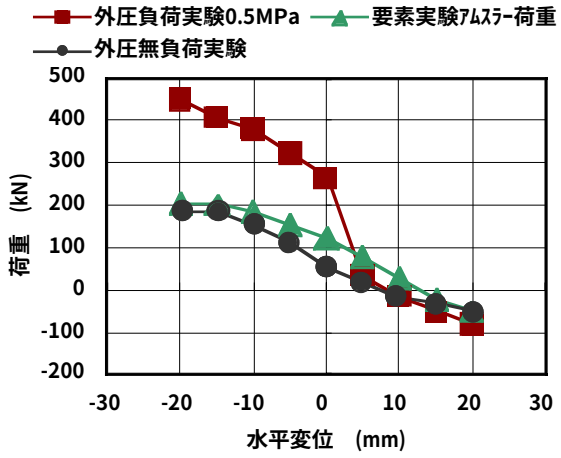

図-6　荷重～変位関係
Load - displacement diagram

表-4　トンネル軸方向剛性比較
Comparison of tunnel axial modulus

		STｾｸﾞﾒﾝﾄ	RCｾｸﾞﾒﾝﾄ	試験体
EA(kN)	圧縮	8.86×10^{6}	3.40×10^{7}	2.72×10^{3}
	引張	4.06×10^{5}	1.70×10^{6}	
EI(kN/m²)		8.59×10^{5}	3.53×10^{6}	2.49×10^{3}

緩衝ゴムの変形状態の一例として，写真-6に変形裕度確認実験における変形状況を示す．設計変位量の２倍程度まで変形させた変形裕度確認実験においても，ピース間の突き合わせ部も含め，問題となるような変形挙動は見られなかった．

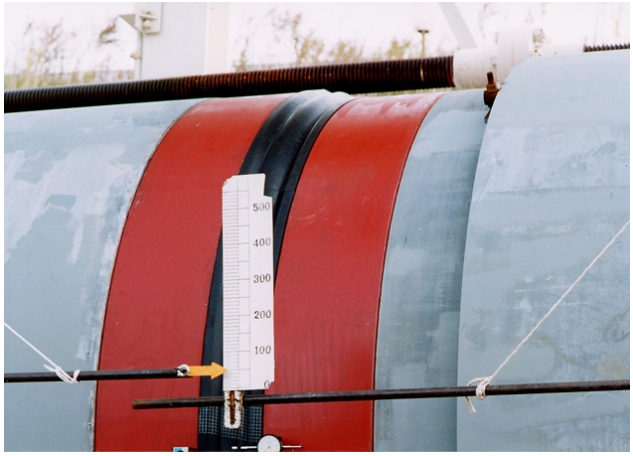

写真-6　変形状況（偏心量60mm）
Eccentricity of 60mm

5.2　止水性

外圧負荷実験より，外圧0.5MPa作用下においても漏水は見られなかった．これより，本可とうセグメントは，外周に敷設したシートの止水性に悪影響を与えることなく変形性能を発揮することを確認できた．

5.3　緩衝ゴム固定治具への影響

外圧負荷実験および外圧無負荷実験において，緩衝ゴム幅が195mmの初期状態からの各変形により得られた計測値から，耐圧板・TセクションおよびTセクション固定ボルトに生じた最大応力について調査した．表-5に一覧表を示す．

耐圧板及びTセクション側部に生じた応力は，実際の圧力分布とは異なると考えられるが，最大圧力が一様に作用していると仮定して算出した．

表-5に示すように，今回選定した試験体の部材では，設計変位量分の変形により発生する応力は，非常に小さく問題がないことが確認できた．

表-5　発生応力
Table of stresses

部材名	測定最大値（最小値）	最大値 発生ケース	発生応力
耐圧板 圧力	0.91N/mm²	偏心30mm +引張20mm 外圧0.5MPa	σ=130N/mm² τ=6.3N/mm²
Tセクション 側部圧力	1.32N/mm²	圧縮20mm 外圧0.5MPa	σ=11N/mm² τ=2.2N/mm²
Tセクション 柱部ひずみ	36μ	偏心30mm +引張5mm 外圧0.5MPa	引張側 9.9N/mm²
	-157μ	引張15mm 外圧0.5MPa	圧縮側 -32.9N/mm²
固定ボルト 軸力	0.8kN	偏心30mm +引張15mm 外圧0.5MPa	0.6N/mm²
(実験で用いた鋼材の許容応力度) 耐圧板（SM470）：σa=185N/mm², τa=105N/mm² Tセクション(SS400)：σa=185N/mm², τa=105N/mm² 固定ボルト(M16:区分4.6)：σa=185N/mm², τa=105N/mm²			

6.　設計への展開

6.1　本可とうセグメントの採用に関する考え方

本可とうセグメントをシールドトンネルに用いる場合は，既往の可とうセグメントと同様の設計手法によって設計が可能である．また，耐震設計により要求される変位量が，本可とうセグメント1基の許容変位量を超える場合は，複数個使用することにより対応する．

複数個使用する場合は，変位規制材により個々の変形量が一様になるよう考慮する．

6.2　本可とうセグメント自体の設計

本可とうセグメントは，外圧を緩衝ゴムを介して耐圧板で支える構造である．また，変位吸収は，緩衝ゴムに伸びを発生させない構造となっている．以下に，実験結果をふまえ，可とう部設計にあたっての考え方を示す．

図-7に可とう部の断面図を示す。

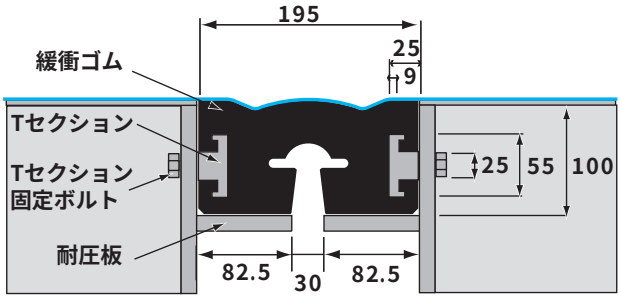

図-4　　可とうセグメント断面
Flexible segment section

(1)緩衝ゴム

緩衝ゴムは，最大許容外圧(1MPa)以内であれば，セグメント外径・幅に関わらず図-7に示した断面形状・寸法のものを使用する．

(2)耐圧板

耐圧板は，緩衝ゴムを介して伝達される外圧（土水圧）に耐える部材とする．

耐圧板の幅は，緩衝ゴムの形状と同様に一定である．使用時は，作用する外圧に応じて耐圧板の板厚についてのみ検討する．

緩衝ゴムの変形がない状態では，ほぼ均等に外圧が作用するが，変形を伴うと緩衝ゴムを介しているため一様な圧力が作用しないことが実験より確認されている．

理論上，耐圧板に作用する荷重は，可とう部の幅が変形が伸び20mm＋偏芯30mmの時最大となり，外圧の1.3倍の圧力が作用することになる．しかしながら要素実験および実物大実験より，耐圧板に作用する最大圧力は，部分的に外圧の1.5倍程度の圧力が作用していることを確認している．

耐圧板の板厚の設計を行う際には，作用する外圧に対して安全を見た圧力で検討を行う必要がある．

(3)Tセクション

Tセクションの断面形状・寸法は，緩衝ゴムの断面形状・寸法が一定であるため同じものとする．

要素実験および実物大実験より，Tセクション側部上部には，ゴムの変形抵抗もあり外圧の2.5倍程度の圧力が作用することがわかっているが，表-5に示すように発生する応力は非常に小さい．

最大許容外圧(1.0MPa)時に，安全を見て外圧の3倍の圧力がTセクション側部に作用したと仮定して，今回試験体で使用した鋼材(SS400)で応力度照査を行った結果も，発生する応力は，許容応力度に対して十分小さく問題ない．

(4)Tセクション固定ボルト

Tセクションの高さは，25mmであるが緩衝ゴムのTセクション部の高さは26mmにしており，Tセクション固定ボルトで締付けることで，緩衝ゴムを抜出しにくくしている．それゆえ，Tセクション固定ボルトは，基本的に緩衝ゴムを1mm締付ける強度を有するものとする．

安全を考え，Tセクション柱部に最大許容外圧(1.0MPa)が作用するとして検討を行った結果，固定ボルトは，M16で強度区分6.8であれば充分外圧に耐えうることができる．

(5)推力受材

推力受材は，ジャッキ推力に耐える構造とする．

(6)変位規制材

変位規制材は，一般部セグメントのリング間ボルトと同程度の性能部材とする．

(7)外枠セグメント

外枠セグメントは，一般部セグメントと同様に設計荷重に耐える構造とする．

7.　おわりに

実験より，本可とうセグメントが開発目標とした性能を有することが確認できた．実験より得られたデータの反映と実施工に向けた詳細検討のまとめもほぼ終わり実用化の準備は整ったと考えている．

今後は，本技術開発によりラッピング工法の効果がトンネルの安全性確保にまで広がったこともPRし，ラッピング工法のさらなる普及に努めていく所存である．

最後に，本可とうセグメントの開発から実験にあたり，御指導御協力頂いた皆様に深謝いたします．

参考文献

1）川島一彦：地下構造物の耐震設計,p155-166,1994
2）島田哲治，原修一，畑山栄一　共著：ラッピング工法用可とうセグメントの開発（その１）,土木学会第57回年次講演会,第VI部門，2002
3）三澤他：ラッピング工法用可とうセグメントの開発（その２）,土木学会第57回年次講演会,第VI部門，2002