

内水圧対抗型ハニカムセグメントの開発

白石浩司* 荒川賢治* 大塚義一*
奥野三郎** 森本克秀*** 初山長一****

1. はじめに

現在建設されている地下河川トンネルや導水路トンネルなどは、満流の通水状態を想定しており、覆工には内水圧が作用する。これらのトンネルのうち作用する内水圧が地下水圧より小さい場合は、通常のボルト式継手によるセグメントでも対応可能である。一方、作用する内水圧が地下水圧より大きい場合は、内水圧による引張力に対してボルト式継手では対応できず、止水性を確保できないだけでなく、覆工構造として不安定となる。そのため、従来は鋼管や有筋のコンクリート等による強度補強を目的とした二次覆工を施す方法が採られていた。したがって、経済性や施工性の両面から内水圧が作用するトンネルを一次覆工のみで築造できる新形式のRCセグメントの開発が望まれている。また、これらのトンネルは一般に長距離トンネルとして計画されており、急速施工に適したセグメントの適用が望まれている。

以上を背景に、(株)奥村組では内面が平滑で二次覆工省略に適し、シールド掘進とセグメント組立の同時施工による急速施工に適した形状として実用化されたハニカムセグメントの特長¹⁾をそのまま活かし、作用する内水圧が地下水圧に対して卓越し、通常のボルト式継手では対応が困難なトンネルに対しても、所要の継手剛性を備え、二次覆工の省略が可能な継手構造とした内水圧対抗型ハニカムセグメント（継手をハニカムロックジョイントと呼ぶ）を石川島建材工業(株)と共同で開発した。

2. 適用範囲と基本形状

2.1 適用範囲

内水圧の作用するトンネルにおいても、作用する内水圧の大小により一次覆工に作用する応力状態は大きく2種類に分類できる。図-1に示すように、一般に作用する内水圧が地下水圧より小さい場合は、トンネルは内側に縮むように挙動するため継手部は圧縮状態であり、通常のボルト式継手によるセグメントでも対応可能である。

一方、作用する内水圧が地下水圧より大きい場合は、トンネルは外側に膨らむような挙動を示すため、リングには引張力が作用する。通常のボルト式継手では、ボルト

の初期締付力以上の引張力が作用するとボルトに軸方向ひずみが発生し、継手は目開き状態となり、止水性を確保できない。さらに、継手部はヒンジ状の挙動を示し、覆工構造として不安定になる。

今回開発した内水圧対抗型ハニカムセグメントは、作用する内水圧が地下水圧より大きく、通常のボルト式継手では対応が困難なシールドトンネルを対象としたセグメントである。ただし、作用する内水圧が極端に大きく、セグメント本体部をRC構造とすることが必ずしも経済的でない場合があり、その場合にはSRC構造等への変更などを考慮することが必要となる。作用内水圧の高低による適用領域の概念を、図-2に示す。

2.2 基本形状と継手構造

内水圧対抗型ハニカムセグメントの形状は、強度面と施工面の両面の検討から、通常型のハニカムセグメントと同様に全隅角部が120°の正六角形をリング方向に伸ばした全ピース同一形状を基本としている。したがって、シールド掘進とセグメント組立の同時施工によ

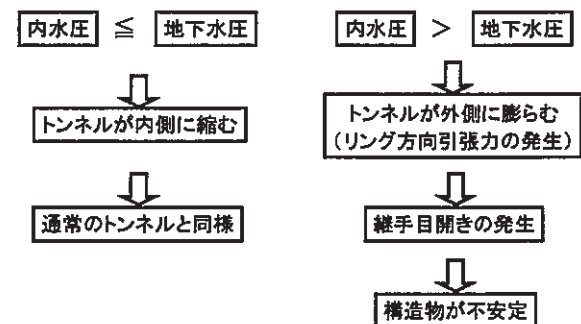


図-1 内水圧作用トンネルの特長

内水圧	低	高
作用軸力	(圧縮) 0 (50)	(引張) (300)
本体構造	RC構造 (許容応力度法+ひび割れ幅の検討)	RC構造 適用範囲外
継手構造	通常型 (斜辺間継手ボルト)	ハニカムロックジョイント (斜辺間継手ボルト+嵌合金具)
セグメント種別	通常型 ハニカムセグメント	内水圧対抗型 ハニカムセグメント

注) 図中の数字は、トンネル径5m程度での適用領域の目安である。(単位: kN/R)

図-2 内水圧対抗型ハニカムセグメント適用領域

*技術開発部 **本社土木部 ***本社土木設計部 ****情報システム室

る急速施工も可能な形状となっている。

内水圧対抗型ハニカムセグメントの継手は、通常型のハニカムセグメントで使用する斜辺間継手ボルトに加え斜辺継手部に嵌合金具を設置する構造であり、写真-1

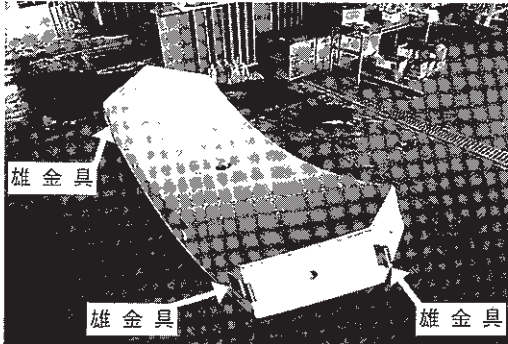


写真-1 内水圧対抗型ハニカムセグメント

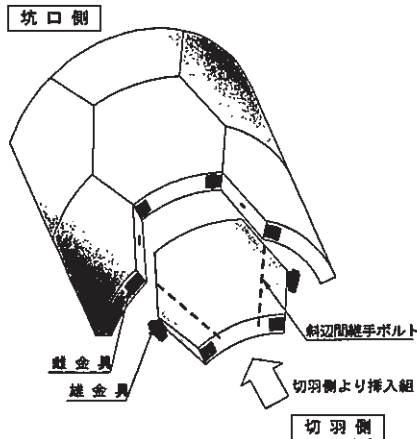


図-3 内水圧対抗型ハニカムセグメント組立概念

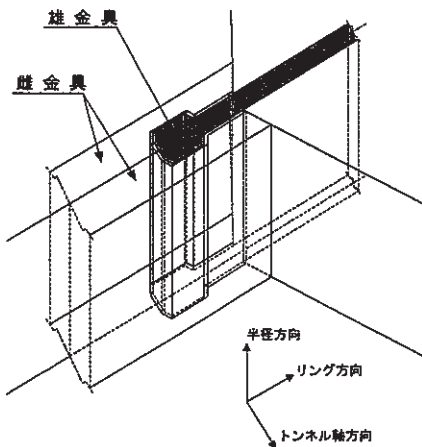


図-4 ハニカムロックジョイント嵌合概念

表-1 継手曲げ試験供試体仕様

	通常型 ハニカムセグメント	内水圧対抗型 ハニカムセグメント
セグメント幅	1200mm	1200mm
セグメント厚	275mm	275mm
斜辺間継手ボルト	M30(10・9)	M30(10・9)
嵌合金具高	—	125mm
嵌合金具最小幅	—	9mm

に示すように覆工内面に継手金物や継手用の箱抜きが露出せず、二次覆工を省略した場合でも覆工内面の平滑性が確保される。

斜辺間継手ボルトは、通常型のハニカムセグメントと同様にセグメントの切羽側端面から挿入、締結され、斜辺継手部の変形を抑制する応力部材として機能するとともに、組立精度の向上や地震時の抵抗部材としても機能する。一方、嵌合金具（ハニカムロックジョイント）は、リング方向の六角形頂部2箇所に雄金具を、リング間端面の両端の4箇所に雌金具を予め埋め込み製作する。内水圧対抗型ハニカムセグメントは、図-3に示すようにトンネル軸方向に挿入して組立てられるため、セグメントを組立てるだけで図-4に示すように雌雄金具は嵌合し、特別な締結作業を必要としない。この嵌合金具は、内水圧により継手部に作用する引張軸力に抵抗する応力部材であり、継手部の目開きを抑制し、止水性を向上させるとともに、継手部の剛性を確保する。

2.3 特長

内水圧対抗型ハニカムセグメントの特長は、以下のとおりである。

- i. 一次覆工のみで長期の内水圧や施工時の短期荷重に対して十分な耐力を有する
- ii. 覆工内面が平滑で、二次覆工を省略した場合でも穴埋め処理が不要である
- iii. 継手の連結が容易で、シールド掘進とセグメント組立の同時施工による急速施工に適する
- iv. 従来の二次覆工を施す内水圧作用トンネルの覆工構造より工事費の低減が可能である

3. 実物大載荷試験

3.1 継手曲げ試験

内水圧対抗型ハニカムセグメントと通常型のハニカムセグメントの基本的性能²⁾の相違を確認するために、継手部に引張軸力を作用させた状態で曲げ試験を実施した。試験は、表-1に示す実物大の平板型セグメントを2リング分組立てて実施した。

引張軸力 98kN/R を載荷した状態での曲げ試験の計測値のうち、図-5に導入曲げモーメントと鉛直変位との相関を示す。

図-5によれば、斜辺間継手ボルトのみの通常型ハニカムセグメントの場合、鉛直変位は許容曲げモーメントの80%程度を境にバイリニア的な挙動を示している。これは、斜辺間継手ボルトに作用する引張力がボルトの初期締付力以下であれば、継手の目開きが抑制されセグメント桁高全面が曲げモーメントに抵抗するのに対し、斜辺間継手ボルトに作用する引張力がボルトの初期締付力以上になるとボルトの伸びが発生し、継手がヒンジ状態に近づくためである。

一方、斜辺間継手ボルトと嵌合金具を併用する内水圧対抗型ハニカムセグメントの場合、通常型のハニカムセグメントのような明確な変曲点は認められず、曲げモーメントの増加に対して鉛直変位は漸増している。これは、嵌合金具の断面積が斜辺間継手ボルトの断面積に比べ大きく、曲げモーメントにより継手部に作用する引張力が斜辺間継手ボルトの初期締付力より大きくなった場合でも、嵌合金具が斜辺間継手ボルトと複合して継手目開き量を抑制するためである。

また、トンネルの使用方法によっては内水圧が繰り返し作用する状態が考えられることから、内水圧対抗型ハニカムセグメントに引張軸力 98kN/R を載荷した状態で曲げモーメントを繰り返し載荷した。その試験時の導入曲げモーメントと鉛直変位の相関を、図-6 に示す。載荷を繰り返した状態でも変位曲線はほぼ同じで、許容曲げモーメント載荷時の変動は 0.1mm 以下であり、繰り返し荷重に対してもその性能の低下は認められなかった。

3.2 リング載荷試験

a. リング載荷試験方法

内水圧対抗型ハニカムセグメントの基本的性能の確認と実用化を目指し、実物大のセグメントを用いリング載荷試験を実施した。試験に用いた供試体の寸法を表-2 に示す。試験装置は、図-7 に示すように外周側に供試体リング（セグメント外径 5300mm）を、内周側に水密性を有した反力リング（セグメント外径 3900mm）を設置し、その上下を厚さ 5mm のゴムパッキンで閉塞し、さらに鋼板にて抑えた。この閉塞された内外周リングの間隙に水道水を充填し、これを加圧することで外周側の供試体リングに直接内水圧を作用させ、リング方向の引張力を導入した。曲げモーメントは、通常のリリング載荷試験と同様に 2 方向よりローディングビームを介して集中荷重（線荷重）を載荷する方式とし、リング方向引張力と曲げモーメントを同時に載荷できる方法とした。なお、試験時に供試体リングの変形を拘束しないように、ゴムパッキンは半径方向を蛇腹状の構造とし、また押え鋼板は幅 30cm 程度に分割して設置した。試験装置の全景を、写真-2 に示す。

表-3 に、実施した試験ケースを示す。ここで、曲げ載荷試験における正曲げ試験とは、スプリングライン上に設置した継手部分がトンネルの内側に変位する曲げ試験、負曲げ試験とは同継手部分がトンネルの外側に変位する曲げ試験として実施した。

b. リング載荷試験結果

(a) 純引張試験結果

内水圧のみを載荷した純引張試験における導入軸力と継手目開き量との相関を、図-8 に示す。内水圧を 0.2Mpa に載荷し、供試体リングに 500kN/R のリング方向引張力を導入した時点で継手部からの漏水はなかった。また、その時点の継手目開き量は 0.5mm 以下であり、リ

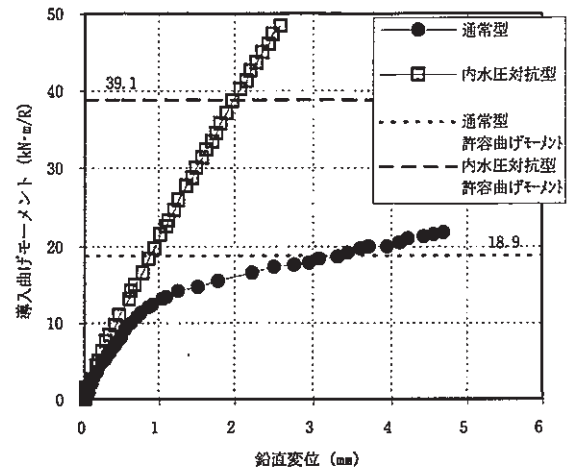


図-5 導入曲げモーメントー鉛直変位相関
(引張軸力 98kN/R 導入時継手曲げ試験)

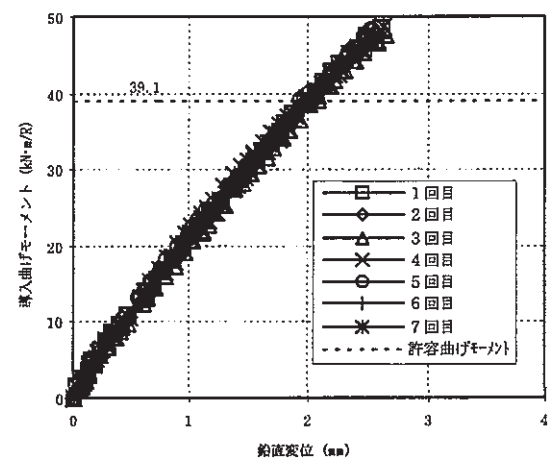


図-6 導入曲げモーメントー鉛直変位相関
(引張軸力 98kN/R 導入時継手曲げ繰り返し載荷試験)

表-2 リング載荷試験供試体仕様

供試体各部	寸法・仕様	供試体各部	寸法・仕様
セグメント外径	5300mm	セグメント内径	4800mm
セグメント厚	250mm	セグメント幅	1000mm
セグメント分割数	等大6分割	斜辺間継手ボルト	M27(10・9)
雄金具高	90mm	雄金具最小幅	14mm

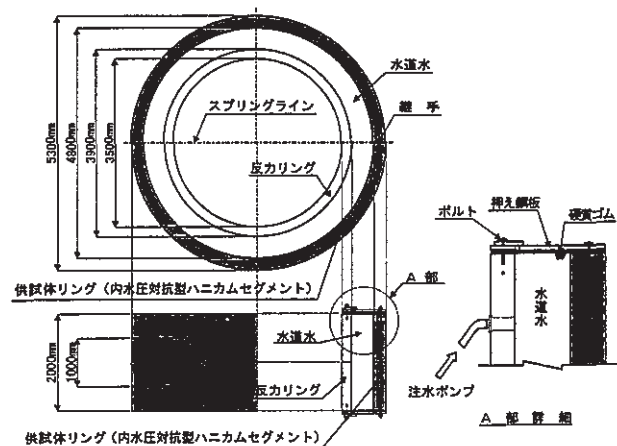


図-7 リング載荷試験装置

ング方向引張力に対してハニカムロックジョイントが十分な強度と剛性を有していることが確認された。

また、同試験時の導入軸力と斜辺間継手ボルト増加軸

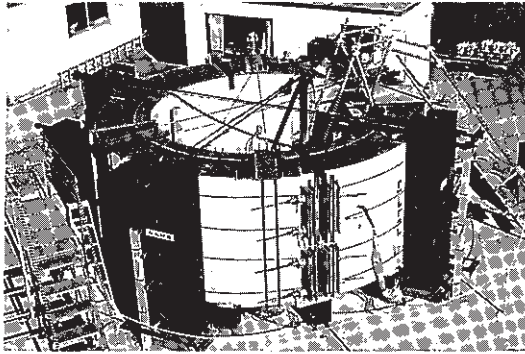


写真-2 リング載荷試験装置全景

表-3 リング載荷試験ケース一覧

試験項目	試験内容
純引張試験	内水圧載荷のみ
曲げ試験	圧縮軸力 10kN/R : 正曲げ試験
	軸力 0kN/R : 正負曲げ試験
	引張軸力 10kN/R : 正負曲げ試験
破壊試験	引張軸力 20kN/R : 正負曲げ試験
	引張軸力 20kN/R : 負曲げ試験

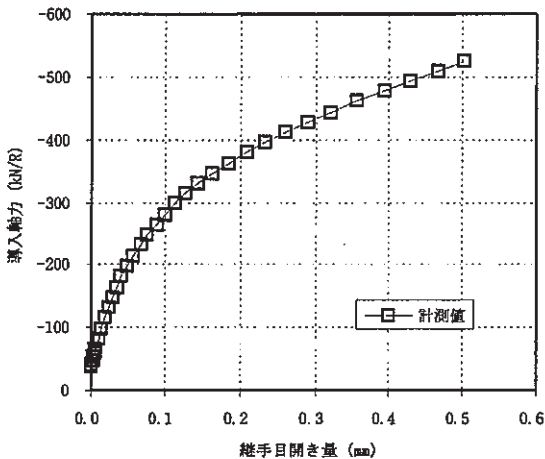


図-8 導入軸力-継手目開き量相関 (純引張試験)

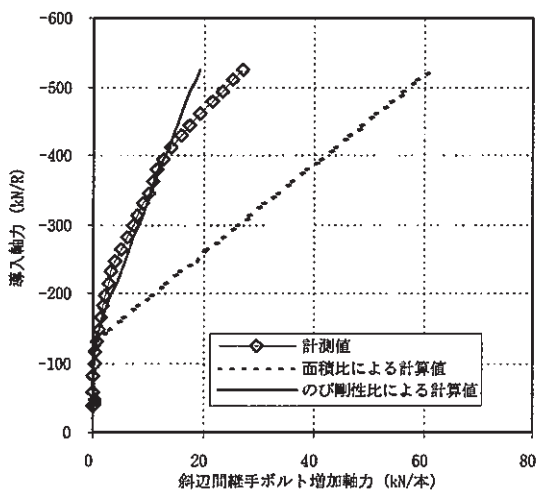


図-9 導入軸力-斜辺間継手ボルト増加軸力相関 (純引張試験)

力および雄金具作用引張力との相関を、図-9、10 に示す。図中には、以下の仮定に基づく計算値を示した。

- i. 導入引張軸力が斜辺間継手ボルトの初期締付力以下の場合、斜辺間継手ボルトのみが引張力を負担する (下記仮定 ii、iii と同)
- ii. 初期締付力以上の導入引張軸力を、斜辺間継手ボルトと嵌合金具がそれぞれの断面積の比率に応じて負担する (図-9、10 中、点線)
- iii. 初期締付力以上の導入引張軸力を、斜辺間継手ボルトと嵌合金具がそれぞれの引張剛性の比率に応じて負担する (図-9、10 中、実線)

図-9、10 によれば、上記仮定 iii に基づいた計算値に近似した結果が得られ、継手部に作用する引張力に対して斜辺間継手ボルトと嵌合金具がそれぞれの引張剛性の比率に応じて抵抗することが確認された。

(b) 曲げ試験結果

導入引張軸力が 98kN/R の場合の負曲げ試験時の継手部導入曲げモーメントと内空変位との相関を、図-11 に示す。図-11 中の破線は、計算上の継手部の許容曲げモーメントを、実線はリング剛性一様とした場合の計算変位を、一点鎖線は継手部の回転剛性を $K\theta^* = 1$ ($K\theta = 1.97 \times 10^4 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$) とした場合の計算変位を示す。また、表-4 には各試験ケースにおける着目した継手部の許容曲げモーメントを導入した時点における内空変位の計測値と各理論計算値を示す。ここで、 $K\theta^*$ とは継手部の曲げ剛性とセグメント本体部の曲げ剛性の比であり、式-1 で表される。

$$K\theta^* = K\theta \cdot r / EI \quad \text{式-1}$$

ここで、 $K\theta$: 継手部回転ばね定数

r : セグメント圆心半径

EI : セグメント本体部曲げ剛性

この $K\theta^*$ は、通常の圧縮状態にあるシールドトンネルでは $10^{-1} \sim 10^1$ の範囲にあるとされている³⁾。

図-11 によれば、内空変位は継手部へ導入した曲げ

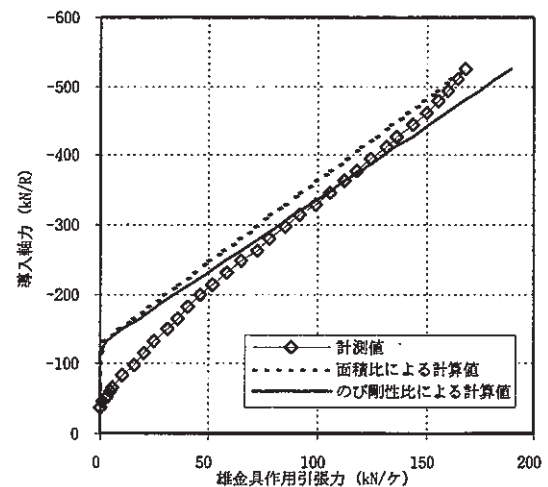


図-10 導入軸力-嵌合(雄)金具作用引張力相関 (純引張試験)

モーメントが小さい場合にはリング剛性一様とした場合の計算値に近似した変位を示し、曲げモーメントを導入するにしがたい変位が漸増する。また、表-4によればいずれの軸力においても、継手部に許容曲げモーメントまで導入した時点での内空変位は、 $K\theta^*=1$ とした場

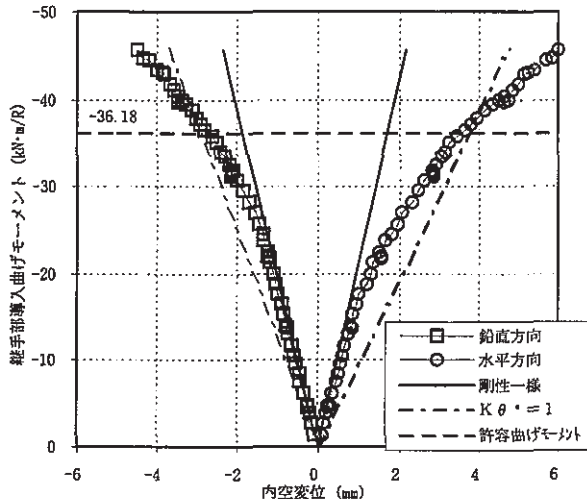


図-11 継手部導入曲げモーメント-内空変位相関
(引張軸力 98kN/R : 負曲げ試験)

表-4 リング載荷試験(曲げ試験)内空変位一覧
(着目継手部に許容曲げモーメントを導入した時点)

作用軸力	曲げ状態	水平方向			鉛直方向		
		δ 計測値 (mm)	$ D/\delta $	$K\theta^*=1$ 計算値 (mm)	δ 計測値 (mm)	$ D/\delta $	$K\theta^*=1$ 計算値 (mm)
0kN/R	正曲げ	-4.47	1130	-4.47	3.01	1678	3.43
	負曲げ	5.10	990	5.27	-3.87	1305	-4.12
引張 98kN/R	正曲げ	-3.21	1573	-3.39	2.16	2338	2.45
	負曲げ	3.66	1380	3.76	-2.78	1817	-2.94
引張 196kN/R	正曲げ	-2.13	2371	-2.18	1.48	3412	1.58
	負曲げ	2.36	2140	2.41	-1.79	2821	-1.88

1) 計測値、計算値符号: 内径拡大(+), 内径縮小(-)

2) D: セグメント軸心径=5050mm

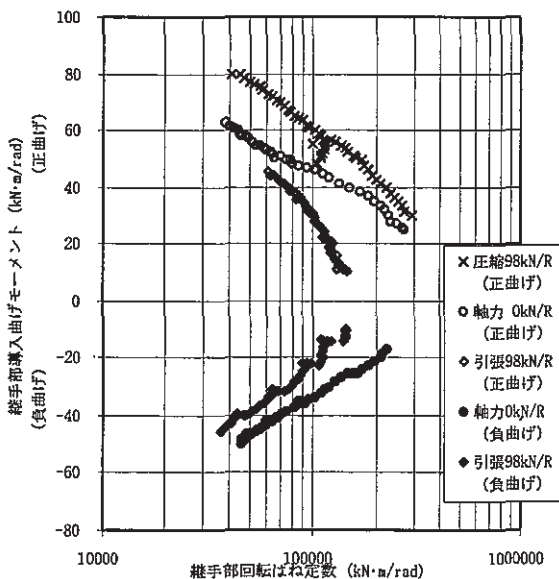


図-12 継手部導入曲げモーメント
-継手部回転ばね定数相関

合の計算値に比べて小さく、またトンネル軸心径 ($D=5050\text{mm}$) に対しても約 $D/1000$ 以下であり、実用上問題のない変形量であった。

図-12 に、各導入軸力に対する継手部導入曲げモーメントと継手目開き量より算定した継手部回転ばね定数 $K\theta$ との相関を示す。 $K\theta$ は、負曲げ試験時に比べ正曲げ試験時が若干大きく、正負曲げいずれの場合も継手部へ導入した曲げモーメントの増加に伴い減少する。しかし、いずれの試験ケースにおいても許容曲げモーメントの載荷時点で得られた $K\theta^*$ は 1 以上であり、セグメントが圧縮軸力作用時に得られる回転剛性と同様の回転剛性を有しており、引張軸力が作用した状態においても覆工の機能として十分な変形性能を有していることが確認された。

(c) 引張曲げ破壊試験結果

リング方向引張力 196kN/R を作用させた状態で曲げ破壊試験を実施した。この試験時の継手部導入曲げモーメントと内空変位との相関を図-13 に、継手目開き量との相関を図-14 に示す。図-13、14 によれば、継手部へ導入した曲げモーメントが 40~60kN·m/R 付近を変曲点として内空変位と継手目開き量は増大する。継手部へ導入した曲げモーメントが 40kN·m/R 時点での内空変位は、鉛直方向で-3.4mm、水平方向で 4.2mm であり、 $K\theta^*=1$ として計算した内空変位と同等であった。また、その時点での継手目開き量は 0.3mm であり、継手部からの漏水もなかった。さらに曲げモーメントの載荷を継続した結果、継手部へ導入した曲げモーメントが 80kN·m/R 付近の荷重で継手部の一部から漏水が始まり、内空変位および継手目開きに変化が見られ、それ以降も載荷を継続したが徐々に内水圧の保持が困難になった。以上から、構造的な破壊には至っていないもの継手部へ導入した曲げモーメントが 80kN·m/R 付近の荷重で覆工機能(止水性)が損なわれたと考えられる。

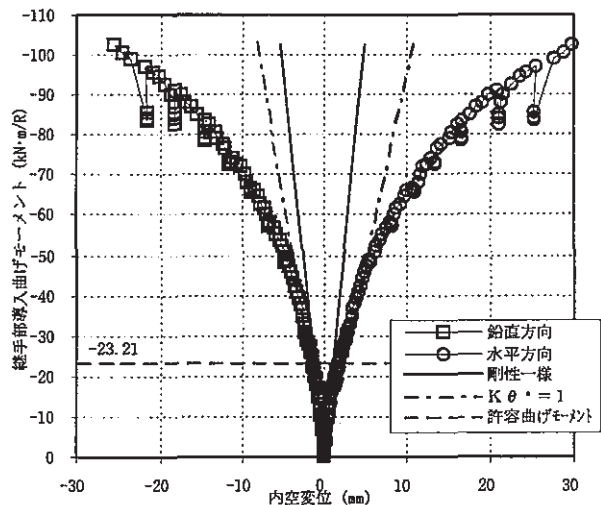


図-13 継手部導入曲げモーメント-内空変位相関
(引張軸力 196kN/R : 負曲げ破壊試験)

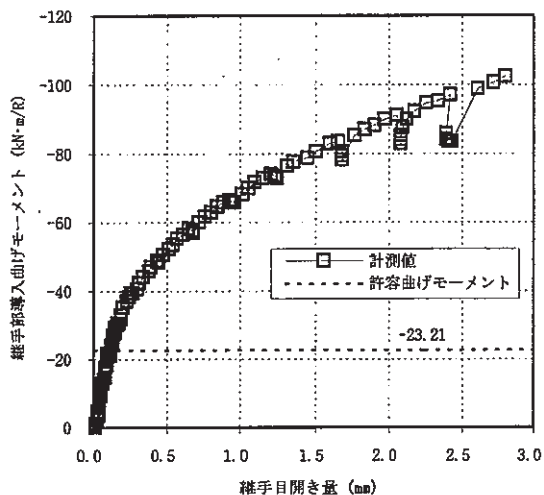


図-14 継手部導入曲げモーメント
—継手目開き量相関
(引張軸力 196kN/R : 負曲げ試験)

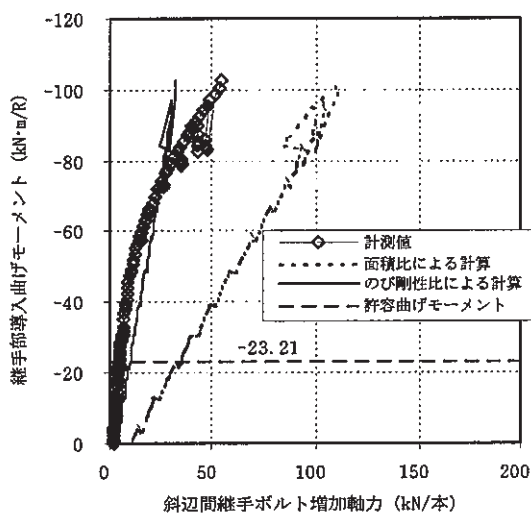


図-15 継手部導入曲げモーメント
—斜辺間継手ボルト増加軸力相関
(引張軸力 196kN/R : 負曲げ試験)

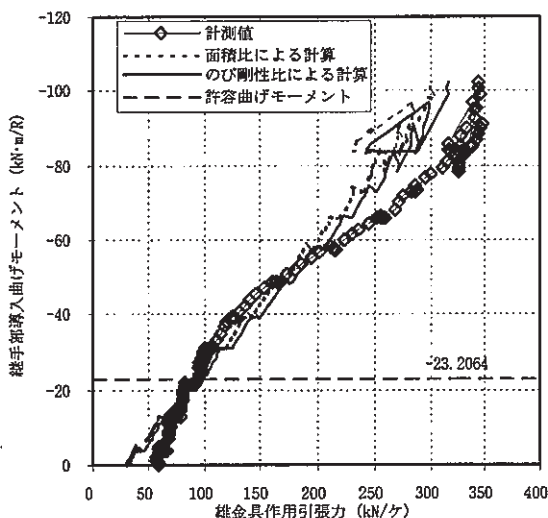


図-16 継手部導入曲げモーメント
—嵌合(雄)金具作用引張力相関
(引張軸力 196kN/R : 負曲げ試験)

また、継手部導入曲げモーメントと斜辺間継手ボルト増加軸力および嵌合金具に作用する引張力との相関を図-15、16 に示す。各図の点線および実線は、斜辺形状に応じて曲げモーメントが分散した^{1),2)}うえて純引張試験結果(図-9、10)と同様の仮定に基づいた計算値を示している。図-15、16 によれば、斜辺間継手ボルトの増加軸力および嵌合金具に作用する引張力は継手部へ導入した曲げモーメントが 80kN・m/R 前後に達するまでは、継手部に作用する引張力に対して斜辺間継手ボルトと嵌合金具がそれぞれの引張剛性の比率に応じて分担するとして求めた計算値(図中実線)に対してほぼ近似した傾向を示す。その後、嵌合金具に作用する引張力はほとんど増加せず、一方、斜辺間継手ボルトに作用する引張力は増加し、斜辺間継手ボルトの分担比率が増加する。このことから、継手部へ導入した曲げモーメントが 80kN・m/R 程度に達した時点で継手としてはまだ引張力に対して抵抗できる状態ではあるが、継手部特に嵌合部付近でのずれが生じたと考えられる。

変位計測結果および斜辺間継手ボルト増加軸力と嵌合金具作用引張力の計測結果から、継手部へ導入した曲げモーメントが 80kN・m/R に達した時点で継手部の覆工機能が損なわれたとした場合でも、引張軸力 196kN/R の場合の計算上の継手の許容曲げモーメント (23.2kN・m/R) に対して一般的に要求される許容の3倍以上の耐力を有しており、覆工機能として十分な安全性を備えていることを確認した。

4. おわりに

ハニカムセグメントの適用領域の拡大を狙いに、内水圧対抗型ハニカムセグメントの開発を行った。各種の試験の結果、内水圧が作用するトンネルに対しても実用上十分な耐力と剛性および止水性を有していることを確認した。今後、製作性や施工性を考慮した細部構造の改良を加え、実施工への適用を図りたい。

最後に、開発にあたり山本稔東京都立大学名誉教授および小泉淳早稲田大学理工学部教授をはじめ多くの有識者の方々に有益な助言を賜っており、ここにあらためて謝意を表す。

【参考文献】

- 1) 荒川賢治・白石浩司、「ハニカムセグメント」、トンネルと地下、Vol. 26, No. 12, 1998. 12, pp91~94
- 2) 奥野三郎・荒川賢治ほか、「シールドトンネルの長距離・急速施工法の開発(第3報)」、奥村組技術年報、No. 20, 1994. 11, pp15~22
- 3) 村上博智・小泉淳、「シールドセグメントリングの耐荷機構について」、土木学会論文報告集、第 272 号、1978. 4, pp103~105