

III-7 ハニカムセグメントの継手曲げ試験

㈱ 奥村組 正会員○荒川 賢治
 ㈱ 奥村組 正会員 奥野 三郎
 石川島建材工業㈱ 正会員 大関 宗孝

1. ま え が き

六角形RCセグメント（ハニカムセグメント）は、①：全ピース同一形状で、省力化、自動化に有利。②：組立順序に制約がない。③：覆工内面に継手金物が露出せず平滑で、二次覆工の省略にも寄与する。などの特長がある。しかし、このセグメントは我国で使用実績がなく、図-1に示すように継手が斜辺で構成されるため、従来のセグメントとは異なった継手部での応力や変形の特性を有する。このため、ハニカムセグメントの実用性の評価と、斜辺継手部の特性把握や継手形式の比較を目的とし、継手曲げ試験を行った。ここでは、ハニカムセグメントの特性や試験結果の概要を報告する。

2. ハニカムセグメントの基本形状と応力・変形特性

ハニカムセグメントの形状は、3次元の応力解析やシールド機械設備との関連から各隅角部の角度を全て120°としている。また、曲線施工時には六角形の半分の台形部分をテーパ形状とする六角形テーパセグメントを用いる。

ハニカムセグメントの斜辺継手部は相互にくさび状の連結状態であり、リング方向の応力は斜辺面を介して図-2に示すようにトンネル軸方向へ分散する。また、継手の変形は通常の開き変形に加え、図-3に示す斜辺中央を中心とした回転変形が発生しようとする。この回転力は斜辺で分散した曲げモーメント（ $M_2 = 0.250M_0$ ）に起因するものであり、これに対して斜辺面の摩擦力（ $f = 0.217N_0$ ）が回転を抑制し、通常の荷重状態では摩擦による回転反力（ $= \frac{1}{4} \cdot fL$ ）が M_2 より大きい。このため、回転変形量は微小でセグメント全体の变形も低位に留まると想定され、斜辺継手ボルトは図-2に示す応力の分散比率により設計を行うことも可能と考えられる。

ハニカムセグメントは継手位置が同一でいも継ぎに近い組立状態であるが、斜辺面の摩擦力や応力分散などによる継手剛性の補強効果があり、大深度で軸力が卓越するほどこの効果は大きい。

3. 継手曲げ試験

外径4050mmの下水道用標準セグメントと同様な形状、配筋とし、表-1に示すボルトレスタイプを含む5種類の斜辺継手形式を用い（表中の概要図は平面的に見た組立て状態を示す）、2リング分組立てた状態で、軸力を段階的に変化させ継手曲げ試験を行った。試験は、水平反力（リング方向軸力）を作用させ、2点載荷で行った。また、比較のため同一の試験水準で標準セグメントの添接曲げ試験も行った。

表-1に軸力50 tf/R 載荷時の試験結果の一例を示し、以下に試験結果の概要を示す。①：ハニカムセグメントは、軸力が大きいほど全体変形量が小さく、ボルトレスの継手形式では特に軸力の相違による変形量の差が大きい。②：斜辺継手の回転変形量は、セグメント本体の抵抗モーメント以上の荷重では徐々に増加する傾向にあるが、これ以下では微小量に留まる。③：表-1のCASE-2～4の継手形式では、標準セグメン

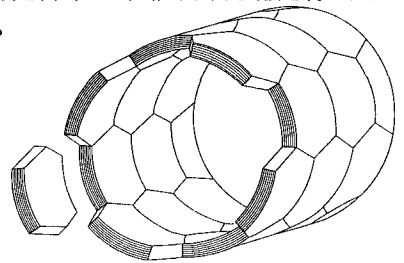


図-1 ハニカムセグメントの組立概念

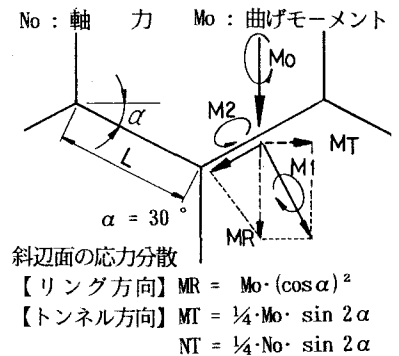


図-2 斜辺面での応力分散

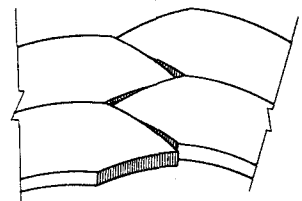
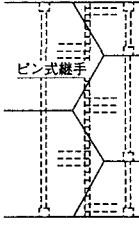
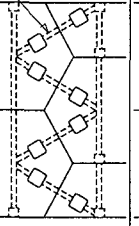
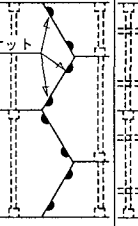
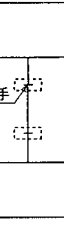


図-3 斜辺継手回転変形【正曲げ時】

表 -1 継手曲げ試験ケース一覧

比較項目	CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4	CASE-5	CASE-10
試験形状	ハニカムセグメント外径 4050mm 桁高 175mm 隅角部角度 120°	ハニカムセグメント外径 4050mm 桁高 175mm 隅角部角度 120°	ハニカムセグメント外径 4050mm 桁高 175mm 隅角部角度 120°	ハニカムセグメント外径 4050mm 桁高 175mm 隅角部角度 120°	ハニカムセグメント外径 4050mm 桁高 175mm 隅角部角度 120°	標準セグメントC-25
斜辺部種別	通し連続ピン式	同芯円弧送りボルト式	ボルトレスソケット式	リング方向軸力導入式	ボルトレス	鋼板継手
継手方向	トンネル軸方向	斜辺法線方向	斜辺2ヶ所にソケット	リング軸方向	---	---
リング間継手	通し連続ボルト式					鋼板継手
ボルト締付力	0 tf	5.8 tf/本	---	10.0 tf/本	---	5.8 tf/本
締付力	5.8 tf/本	5.8 tf/本	5.8 tf/本	5.8 tf/本	5.8 tf/本	5.8 tf/本
載荷水準	負曲げ（リング方向軸力 20tf/R）、正曲げ（リング方向軸力 20, 30, 40, 50 tf/R）					
概要図						
内空変位量	3.2mm	3.0mm	2.2mm	2.2mm	3.3mm	2.8mm
曲げ剛性有効率	0.6	0.7	0.9	0.9	0.6	0.7
回転ばね定数	$1.9 \times 10^{-3} \text{tf} \cdot \text{m/R}$	$5.8 \times 10^{-3} \text{tf} \cdot \text{m/R}$	$7.5 \times 10^{-3} \text{tf} \cdot \text{m/R}$	$7.5 \times 10^{-3} \text{tf} \cdot \text{m/R}$	$2.7 \times 10^{-3} \text{tf} \cdot \text{m/R}$	$3.6 \times 10^{-3} \text{tf} \cdot \text{m/R}$
継手目開き量	0.21mm	0.08mm	0.10mm	0.06mm	0.18mm	0.12mm
目開き回転角	$2.2 \times 10^{-3} \text{rad}$	$7.2 \times 10^{-4} \text{rad}$	$5.6 \times 10^{-3} \text{rad}$	$5.6 \times 10^{-3} \text{rad}$	$1.6 \times 10^{-3} \text{rad}$	$1.2 \times 10^{-3} \text{rad}$
破壊モーメント	---	7.56tf・m	---	6.41tf・m	---	7.61tf・m

注：試験結果はリング方向軸力50tf/R、曲げモーメント4.2tf・m/本抵抗モーメント載荷時の値である。

破壊モーメントは軸力0tf/Rでの値である。継手ボルトの位置はCASE-2で内縁より65mm、CASE-4で87.5mm、CASE-10で60mmである。

トより継手目開きや全体変形量が小さく、標準セグメントより継手剛性が高い。参考のため図-4に継手ケース毎の回転ばね定数と曲げモーメントの相関を示す。④：CASE-2、4では標準セグメントと同程度の破壊強度を有する。⑤：歪計測結果からは、斜辺近傍で図-2に示す分散比に近似した応力分散の傾向が得られた。⑥：試験の事前・事後解析では、ハニカムセグメント斜辺頂部を回転ばねで連結しリング方向のみに理想化した2リングはりばね計算モデルの適用性を検証した。この計算結果と、試験の実測値およびセグメント断面内の応力分布検証のため実施した3次元有限要素法による解析結果が良く一致しており、ハニカムセグメントに特化した2リングはりばね計算モデルは今後の実施設計に適用可能と考える。⑦：斜辺の継手をボルトレスとし回転変形抑制を狙いにソケットを取付けた表-1のCASE-3は予想以上の継手剛性が得られ、良質地盤では斜辺の継手をボルトレスとすることも可能と考えられる。したがって、今後は継手ボルトの設置に加え、継手剛性強化のためソケットまたはほぞと併用する継手形式に絞り検討を行うこととした。

5. あ と が き

今回の継手曲げ試験によりハニカムセグメントは十分に実用的なセグメントであることが立証された。今後は、外径や桁高の異なるセグメントに対する各種の試験の実施により、さらに斜辺部の特性把握に努めたい。なお、このセグメントの開発は、シールドの長距離・急速化施工を狙った掘進とセグメント組立の同時施工法の開発の一環で行っているものであり、現在、全体システムの自動化を前提に、セグメントを精度良く組立てるための機械設備と制御面の充実を図っている。

最後に、この開発に当っては、東京大学 久保慶三郎名誉教授、東京都立大学 山本稔名誉教授、から種々の有益なご助言を頂いており、ここに深甚なる謝意を表します。

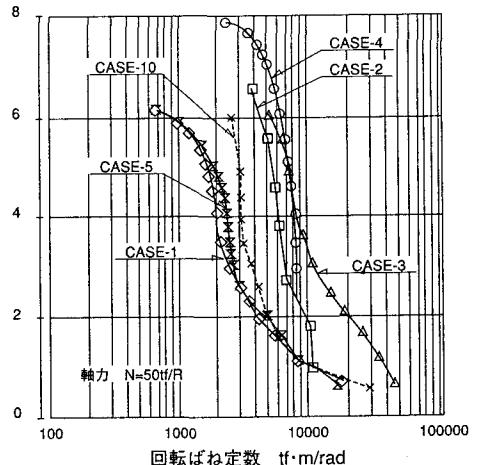


図-4 曲げモーメント～回転ばね定数相関