

# シールドトンネルの柔構造化技術

柳原純夫<sup>1</sup>・荒川賢治<sup>1</sup>・福居雅也<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 奥村組技術本部 (〒108-8381 東京都港区芝5-6-1)

ハニカムセグメントの耐震性能について、縦断方向は応答変位法、横断方向は静的三次元解析により検証した。横断方向についてはRC矩形セグメントと比較すると地震時発生断面力が大幅に小さくなることがわかった。縦断方向については、変形モードからセグメント本体に負担のかからない構造であることがわかった。これらよりハニカムセグメントは継手部の柔構造により優れた耐震性能を有していることが示唆された。

**Key Words:** Honey-comb Segments, Seismic performance, Level 2 earthquake

## 1. はじめに

ハニカムセグメントはリング方向に左右対称な六角形状をしたRCセグメントであり、全ピース同一形状である。このセグメントはシールド施工の急速化を実現するものであるが、構造上はくさび状に連結された斜辺継手部での応力伝達特性に大きな特徴を有しており、常時の荷重に対しては極めて合理的な抵抗特性を有していることが多くの実験、解析等により立証されてきた<sup>1)</sup>。一方、1995年の阪神大震災の教訓を受け、各種地中管路にもレベル2地震動が考慮されるようになり、シールドトン

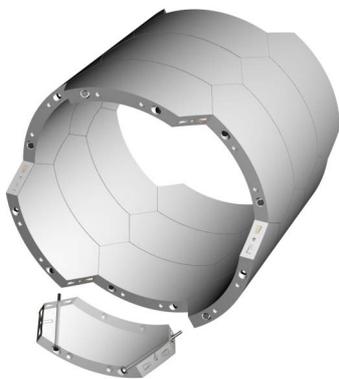


図 - 1 ハニカムセグメント組立概念図

ネルのセグメントにも従来より大きな地震時外力に対応した耐震性能が要求されるようになった<sup>2)</sup>。

本論ではハニカムセグメントをシールドトンネルの柔構造化技術と位置づけ、縦断方向の耐震性能につ

の算定方法、レベル2地震動に対する地震応答解析結果(応答変位法)のRC矩形セグメントと比較した結果について示した。

横断方向の耐震性能については、各セグメントピースが長ボルトで連結されたセグメント構造を、三次元でモデル化し、静的な水平外力を作用させたときの、変形モードを示した。

縦断方向、横断方向の検討結果より、ハニカムセグメントは優れた耐震性能を有していることが示唆された。

## 2. ハニカムセグメントの縦断方向等価剛性

図 - 1 にハニカムセグメントの組立概念図を示す。各セグメントは図 - 2 に示すように斜辺間の継手ボルトで連結され、セグメント継手はくさび状に連結された状態になる。このように組立てられたセグメントがトンネル軸方向に引張力を受けると図 - 3 に示す状態となる。このような状態を仮定し等価剛性を算定する。

ハニカムセグメントの1リングは4ピース以上の偶数ピースで構成されており(ここでは6ピースを対象としている)ボルトは図 - 4 に示すように1ピースあたり斜辺ボルト2本で構成されている。

1ピースに作用するトンネル軸方向の軸力Pと変位との関係から、1ピースあたりの継手軸剛性を算定する。軸力Pが作用するとき、2本の斜辺ボルトの力の釣り

合いは、図 - 4 より下式にて表すことができる。

$$P = 2 \times P' \cos(\theta_B) \quad (1)$$

P: 1ピースに作用するトンネル軸方向軸力(kN)

P': 斜辺ボルト1本に作用す軸力(kN)

$\theta_B$ : ボルト水平面(XZ平面)への射影角(度)

また、斜辺ボルトの軸力P'と変位  $\delta$  の関係は次式で表される。

$$P' = k_B \times \delta = \frac{E_B \times A_B}{l_B'} \times \delta \quad (2)$$

$k_B$ : 斜辺ボルトの軸方向剛性(kN/m)  $\delta$ : 斜辺ボルトの軸方向変位(m)

$E_B$ : 斜辺ボルトの弾性係数(kN/m<sup>2</sup>)  $A_B$ : 斜辺ボルトの断面積(m<sup>2</sup>)

$l_B'$ : ボルトの水平面(xz平面)への射影長(m)

幾何学的な関係から  $\delta = \delta' \times \cos(\theta_B)$

したがって、1ピースに作用するトンネル軸方向の軸力Pと変位  $\delta$  の関係は次式で表され、1ピースにおける継手軸方向剛性 $k_1$ は、斜辺ボルトの軸方向剛性 $k_B$ の  $2 \times \cos^2(\theta_B)$  倍となることがわかる。

$$P = \frac{2 \times E_B \times A_B}{l_B'} \times \delta' \times \cos(\theta_B) = k_1 \times \delta \quad (3)$$

$$k_1 = 2 \times \frac{E_B \times A_B}{l_B'} \times \cos^2(\theta_B) \quad (4)$$

$k_1$ : 1ピースにおける継手軸剛性  
 $\delta$ : トンネル軸方向の変位

ここで、1本の斜辺ボルトの軸方向ばねは $k_1/2$ であり、斜辺部は2本の斜辺ボルトで連結されているため、この2本の斜辺ボルトを直列ばねでモデル化すると  $(k_1/2) \times 1/2$  となる。

それが並列に6組あるから1リングの斜辺ボルトの軸剛性  $K_B = 6 \times (k_1/2) \times 1/2 = (3/2) \times k_1$  となる。

したがって等価剛性は

$$(EA)_{eq} = 1 / \{ (Ks/K_B) + 1 \} \times Es \times As \quad (5)$$

$$(EI)_{eq} = \frac{1}{\cos^3 + (l_B'/2 + \dots) \times \sin} \times Es \times I_s \quad (6)$$

$(EA)_{eq}$ : 等価引張剛性(kN)  $(EI)_{eq}$ : 等価曲げ剛性(kNm<sup>2</sup>)  
 $Es$ : セグメントの弾性係数(kN/m<sup>2</sup>)

$Ks$ : セグメントのパネ剛性(kN/m)

$\theta$ : 中心軸から中立軸までの角度(rad)

上式で算定したハニカムセグメント等価剛性の矩形セグメント(日本下水道協会のシールド工用標準セグメント)等価剛性に対する割合を図 - 6、図 - 7に示す。これより

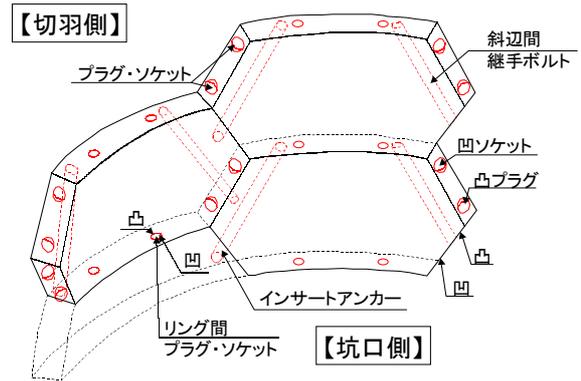


図 - 2 ハニカムセグメント継手部

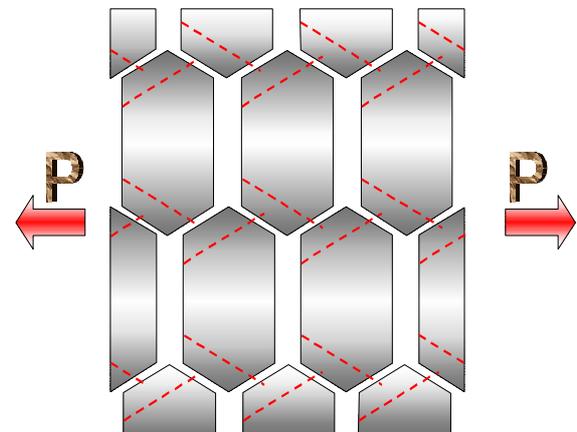


図 - 3 引張力に対する変形

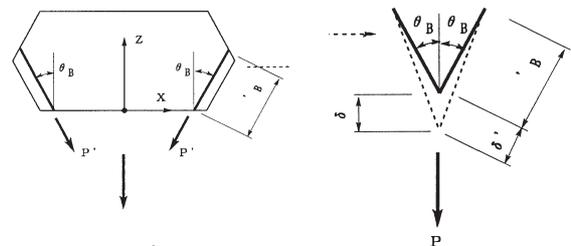


図 - 4 1ピースの釣合

ハニカムセグメントの等価剛性は矩形セグメントと比較すると5~20%と大幅に小さくなるのがわかる。また内径が大きくなるほどハニカムセグメントの等価剛性は矩形セグメントと比較すると小さくなるのがわかる。セグメント幅については、幅が大きくなるほど等価剛性は小さくなっている。このように矩形セグメントと比較してハニカムセグメントの等価剛性が大幅に小さくなるのは、矩形セグメントの等価剛性に対してはボルトボックスの継手板の曲げ剛性が支配的であるのに対し、ハニカムセグメントの等価剛性に対しては継手長ボルトの引張剛性が支配的であることによる。すなわち、矩形セグメントの継手板の曲げ剛性よりハニカムセグメント継手

長ボルトの引張剛性が大幅に小さいことによる。

### 3. 地震応答解析結果

検討対象としたシールドトンネルはセグメント外径 3500mm、路線延長 800m、土被り 10 ~ 20m である。土質

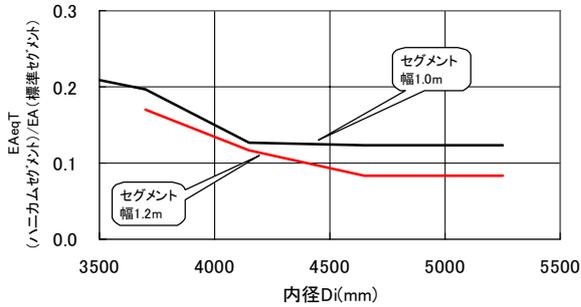


図 - 6 等価剛性の割合(引張)

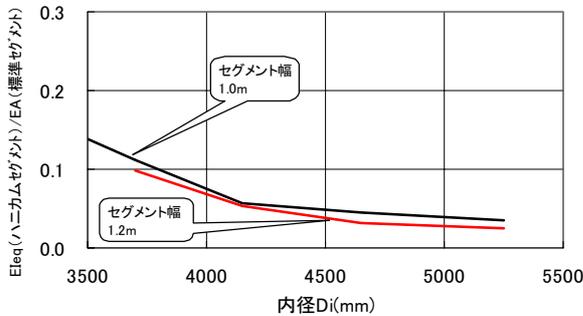


図 - 7 等価剛性の割合(曲げ)

は沖積層と洪積層境界で極端な地層の変化があり、トンネルはこの部分を通る。入力地震動は兵庫県南部地震時にポートアイランド GL-83m で観測された NS 成分を使用した(レベル 2)。図 - 8 に表層地盤の地震応答解析モデル、トンネルの地震応答時刻歴解析モデルを示す。表層地盤モデルは地層構成に基づいて計算した固有周期を有する地盤質点をトンネル軸に沿って並べたものであり、地盤質点間は相互の地盤の弾性変形に基づいたバネで結合される。このモデルによりトンネル軸線に沿った応答変位の時刻歴を算定し、この変位をトンネルモデル(梁要素)のバネ先に静的に入力した(応答変位法)。図 - 9 に引張力、曲げモーメント、せん断力についてハニカムセグメントと矩形セグメントを比較したものを示す。地盤剛性急変点で断面力が大きくなる傾向は両者同じであるが、発生断面力はハニカムセグメントが矩形セグメントと比較しかなり小さくなっている。最大値で比較すると引張力が約 10%、曲げモーメントが約 12%、せん断力が約 11% となっている。これはハニカムセグメントの等価引張剛性、等価曲げ剛性が矩

形セグメントの 10% 程度であることによる。

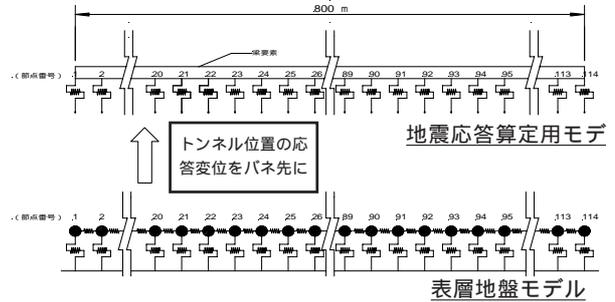


図 - 8 解析モデル

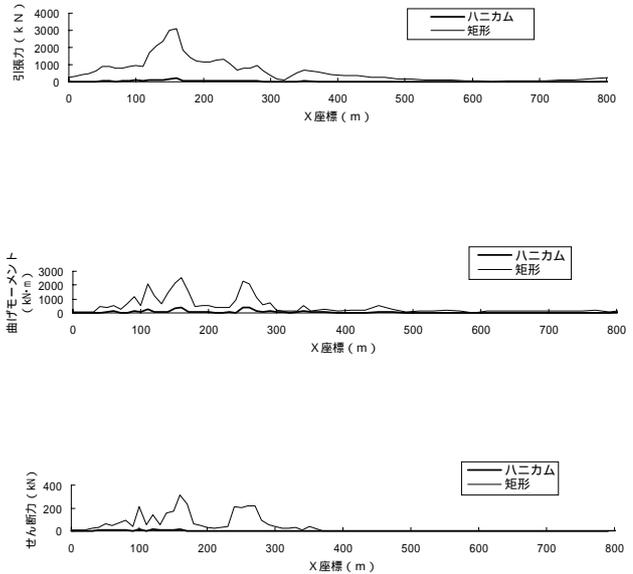


図 - 9 断面力の比較

### 4. 横断方向の耐震性能

横断方向の耐震性能を 3 次元解析により検証した。

セグメントはソリッド要素でモデル化した。1 ピースのハニカムセグメントは  $8 \times 8 \times 4$  層 = 256 個の要素に分割した。斜辺間ボルトはトラス要素とし、図 - 10 に示すように実際の位置に配置し、セグメントピース間を連結した。セグメント間は圧縮力に対しては反力が発生し引張力に対しては抵抗が働かない、接触、非接触の判定が可能な要素を配置した。これにより、セグメントピース間のコンクリートブロックの抵抗挙動を表現すること試みた。荷重は 1109.5 kN/ring のリング方向軸力を導入し、つぎに継手ボルト要素(トラス要素)に、初期

締付力として 許容軸力の 80 % に相当する 139.5 kN/本 の初期応力を設定した。水平荷重はリング載荷試験<sup>3)</sup>における最終荷重 Ph2 = 617.2 kN を載荷した。

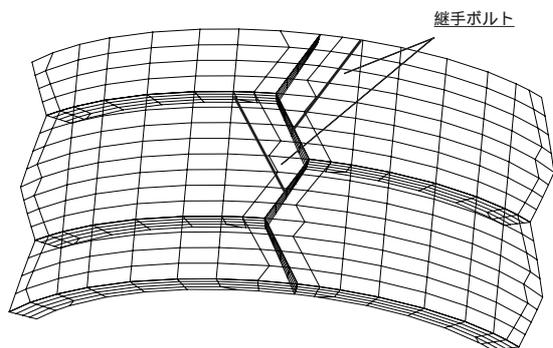


図 - 10 ボルト配置

図 - 11に各荷重段階におけるリング全体の変形モードを示す。継手部における変形が全体の変形モードに対して支配的あり、セグメント本体はあまり変形していないことがわかる。セグメント本体に対して負担のかからない構造であることが示唆される。

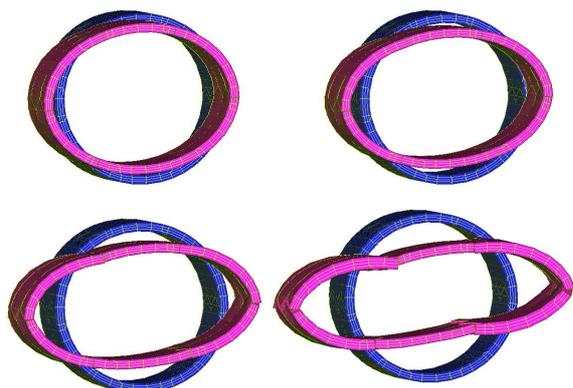


図 - 11 変形モード

## 5 . まとめ

本文を要約すると以下の通りである。

### 縦断方向の耐震性能

トンネル軸方向等価剛性はRC矩形セグメントと比較すると大幅に小さい。

これにより、地震時発生断面力(引張軸力、曲げモーメント、せん断力)が大幅に小さくなる。

したがって、トンネル縦断方向については耐震性能の優れたセグメントである。

### 横断方向の耐震性能

継手構造を詳細に評価した三次元解析によると、セグメント本体に負担のかからない構造であることが示唆された。

### 参考文献

- 1 (財)先端技術センター;先端建設技術・技術審査証明報告書八ニカムセグメント, pp . 140 ~ 144, 平成9年3月
- 2 (社)日本下水道協会;下水道施設の耐震対策指針と解説, 1997年
- 3 )綿谷, 隅野, 太田, 寺田他;レベル2地震動に対する八ニカムセグメントの耐震性能, トンネル工学研究論文報告集第12巻, pp93 ~ 100, 2002年11月

(2003. 9. 10 受付)

## SEISMIC PERFORMANCE OF THE HONEY-COMB SEGMENTS

Honey-comb Segments were examined in respect of seismic performance under the condition of level 2 earthquake. The seismic response in longitudinal direction of the Honey-comb Segments was compared with the response of R.C. Rectangle Segments. The results indicate that the seismic stress resultants of the Honey-comb Segments were very small as compared with those of R.C. Rectangle Segments, owing to the difference of equivalent stiffness .