

セグメントの二重螺旋形組立てによるシールドトンネルの構造

CONSTRUCTION OF SHIELD TUNNELS BY ERECTING SEGMENTS INTO A DOUBLE HELIX STRUCTURE

石井昌次¹⁾・金子研一²⁾・畑野真仁³⁾・北山仁志⁴⁾・橋本博英⁵⁾

Masatsugu ISHII, Kenichi KANEKO, Shinji HATANNO, Hitoshi KITAYAMA, Hirohide HASHIMOTO

The longer lengths of tunnels call for the need to speed up execution. To do continuously the methods for rapid execution, through simultaneous excavation and segment erection, our solution is to have the segments erected in the shape of a double helix. Single-action joints are used between the rings for rapid execution.

This paper will describe the results from the tests and calculations performed, in order to understand the behavior of the new segments. Through the calculation using data obtained from the test, it was confirmed that there is no functional problem in calculating the helix structure as a ring model.

Key Words: shield, rapid execution, helix & segment

1. はじめに

近年、都市部における立坑の用地を確保することが難しくなったことや工事費を低減する目的で、途中の立坑を省き、1台のシールドで掘進する区間を長くする傾向にある。当然、長距離になればトンネル工事の期間が長くなるが、コストを縮減する目的で、少しでも速い施工が要求される。施工速度を速くするために、シールドの掘進あるいはセグメントの組立て作業をそれぞれ高速で行うことは有効であるが、従来の施工方法と作業手順が変わらないため限界が生じる。これに対し、シールドの掘進とセグメントの組立てを同時に行う施工方法は、シールドトンネルの施工時間を大幅に短縮することができる。さらに、セグメントを二重の螺旋状に組立てることにより、作業の連続性を付与し、より高速施工ができる方法（以下DNAシールドと呼ぶ）を開発した。本文では、DNAシールドによって組立てられた螺旋形のトンネル構造特性について論じる。

2. DNAシールドの概要

DNAシールドは直径6m以上のトンネルを対象としたもので、掘進中に180度反対側の2つのセグメントを同時に組立てる施工方法である。組立てたセグメントの形状は二重の螺旋構造を呈しているが、小型のトンネルでは一重の螺旋構造、また大型のトンネルでは三重の螺旋構造も可能である。

セグメントは長方形の対偶から直角三角形を切り取ったものを用いる。図-1に示すようにセグメントの弧長を L 、幅を B 、切り取る長さをそれぞれ x 、 y とする。 x は L/x が3より大きな整数になる寸法とし、トンネル直径に応じてシールドジャッキが等間隔に配置できる長さに設定する。 y は掘進速度とセグメントの組立て時間から合理的な長さを決める。シールドの掘進速度を毎分5cm、セグメントの幅を1.2mとした場合、

1) 正会員 大成建設(株) 技術開発第二部

2) 正会員 博士(工学) 大成建設(株) 技術開発第二部

3) 正会員 修士(工学) 成和コンサルタント(株) 設備部

4) 石川島播磨重工業(株) 設備部

5) 正会員 石川島建機工業(株) 土木設備部

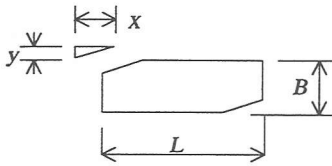


図-1 DNAのセグメント形状

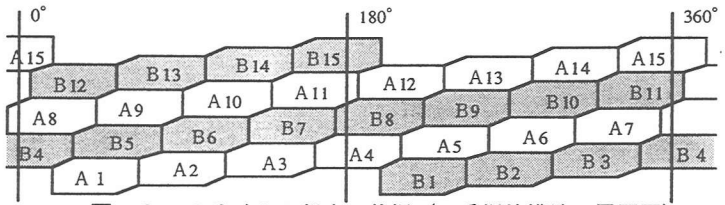


図-2 1サイクル組立て状況（二重螺旋構造の展開図）

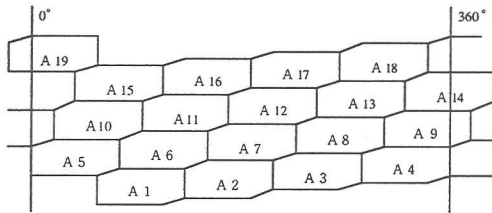


図-3 一重螺旋組立て状況

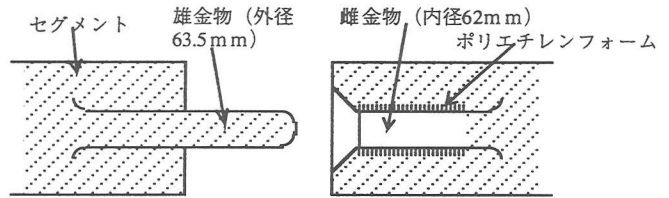


図-4 ANEX継手

y を30cmとすると6分間の掘進時間の中でセグメントを同時に2ピースを組み立てれば良く、 y を20cmとすると4分間でセグメントを組立てる必要がある。もし、作業の連続性を確保できない場合には、掘進速度を遅くすれば良い。

例えば $x = 1/4 L$ 、 $y = 1/4 B$ のセグメントを組立てると図-2に示すような構造になる。A1から順にA列のセグメントを螺旋に組み立てるとすでに組立てられたセグメントとの間に隙間が生じる。この隙間をB列のセグメントで埋めると二重の螺旋構造となる。もとの状態に戻るまで30ピースのセグメントが必要となる。この数は $(L/x \times B/y - 1) \times n$ で表せる。ここに n は螺旋が n 重であることを意味する。

図-2のA4セグメントの次をB5セグメント、B8セグメントの次をA9セグメントとすることで隙間のない一重の螺旋構造になる。セグメントを多く分割できない小型のトンネルではこの構造が有効である。図-3は $x = 1/4 L$ 、 $y = 1/5 B$ の一重螺旋構造の例を示している。

継手形式は任意に選択できるが、高速施工を目的としているため、リング間の継手にはCONEX継手（文献1）やANEX継手（文献2）といったワンタッチ式のものをを用いる。これらの継手は接合にシールドジャッキの推力を必要とするため、同時掘進作業に適している。

DNAシールドはリングを閉合するためのKセグメントが無い場合組立て作業が一定であり、直線区間に関してはセグメントが同一のため連続的な供給が行える等、セグメント組立ての自動化に適している。その他、DNAシールドを一次覆工に採用すると以下の利点が見られると考える。①対称位置のセグメントを組み立てるためバランスが良く、シールドの方向制御が容易である。②シールド機長は従来と比べて若干長くなるが、増分はセグメントの切り欠き長さ程度と小さい。③従来の掘進速度でもセグメントの組立て時間が短くなるために高速施工となる。

3. 継ぎ手

(1) リング間継手

今回の検討ではリング間にANEX継手を採用した。ANEX継手はあらかじめセグメントに雄金物と雌金物を設置しておき、シールドジャッキの推力を利用して両者を接合する。材質はSTKM13Bであり、引き抜きに対して金物間の摩擦で抵抗する。今回の実験に用いた継手形状を図-4に示す。雌金物の内径が62mmに対し、雄金物の外径は63.5mmと1.5mm大きい。雌金物の周囲には厚さ5mmのポリエチレンフォームが巻かれていて、雄金物が挿入することによる膨らみを吸収することでコンクリートへの引張応力の発生を防ぎつつ、セグメント組立て時の調芯機能を可能にしている。

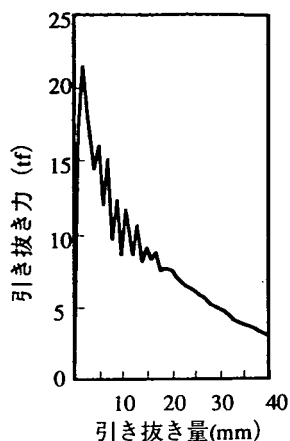


図-5 引き抜き試験結果

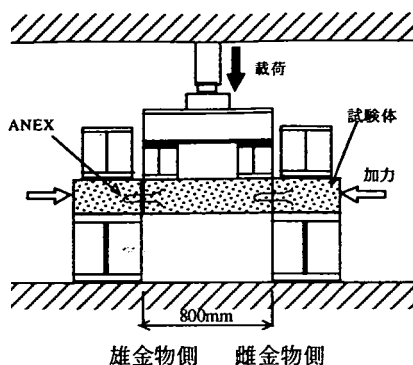


図-6 セン断試験装置

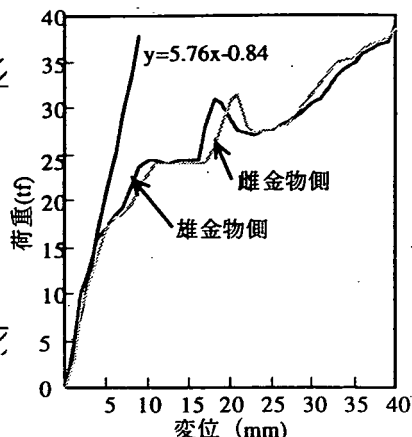


図-7 セン断試験結果

接合のための押し込み力として平均24tfを要し、引き抜き力は平均15tfであった。引き抜き試験時の引き抜き力と引き抜き量の関係は図-5に示すようになる。いずれのケースも引き抜き力は押し込み力の60～70%程度であった。試験体が2mm抜けたところで最大引き抜き力が発生し、その後徐々に抜ける。引き抜き時にアネクタ側のコンクリート表面にクラックが発生したケースがあるが、13tf以下で抜ける場合はクラックが発生することなく、引き抜けた。引き抜き剛性は7000～14000tf/m/本であった。

(2) ANEX継手のせん断試験

80cm×80cm×25cmの試験体の両側に1/2の大きさの試験体を合せ、両側の試験体をボルトで床に固定して、中央の試験体に鉛直荷重を載荷して行った。図-6に示すように継手は中央に1本ずつ、同一方向に向いている。継ぎ手に対する軸力14tfの導入の有無で試験は各2ケース行った。

荷重と変位の関係を図-7に示す(軸力無し)。荷重が15tf程度までの変形は直線的であり、その後雌金物側が先行しながら変形した。40mm変位しても試験体はつながっていたが、軸力を導入したケースでは荷重が55tf(変位38～40mm)を超えるとANEXが切断した。実験から求められたANEXのせん断バネ定数は2600～2900tf/m/本であり、以下の解析では2600tf/m/本を用いる。

(3) セグメント継手

セグメント間の継手にはコーンコネクタ(文献3)を採用した。図-8に示す形状の雄金物と雌金物から構成され、あらかじめセグメントに開けられた、半円形の溝内に設置されていて、セグメントが軸方向にスライドするのに伴い、金物どおしが接合される構造になっている。

以下の解析で用いる回転バネ定数は軸力を考慮して算定した。具体的には、コーンコネクタを引張鉄筋と見なし、鉄筋コンクリート理論より中立軸およびコーンコネクタの引張力を求め(文献3)、式1で算定した回転バネ定数と、CONEXの設計で提案(文献1)されているレオンハルトのコンクリート継手に関する理論式から導いた回転バネ定数のうち、図-9に実線で示すように同じ荷重偏心率(=M/(N・H)、Nは継手部に発生する軸力)で比較して大きい方の値とした。

$$k_{\theta} = \frac{M(d-x)K_T}{T} \quad \dots \text{式1}$$

ここに、dはコーンコネクタの有効高さ、xはセグメント圧縮端から中立軸までの距離、Tはコーンコネクタの引張力、K_Tはコーンコネクタの引張剛性、Hはセグメント高さ、Bはセグメント幅、Eはコンクリートのヤング係数、mは荷重偏心率を表す。

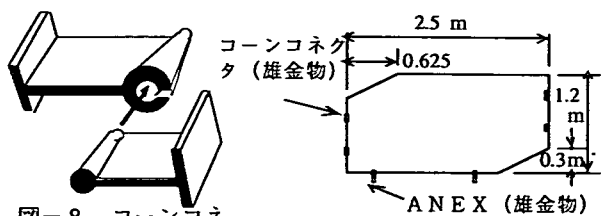


図-8 コーンコネクタ概念図

図-10 セグメント形状

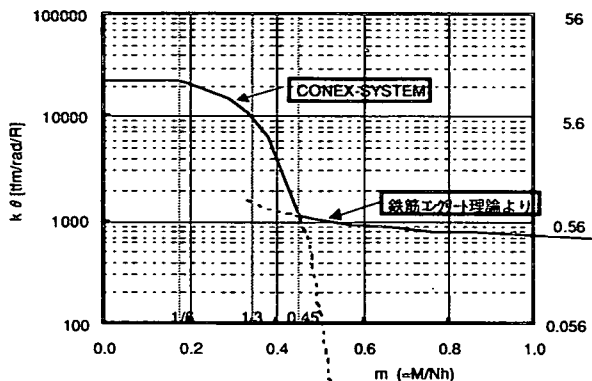


図-9 コーンコネクタの回転剛性

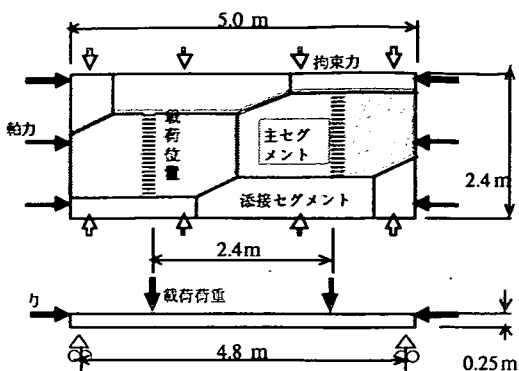


図-11 添接曲げ実験の概要図

表-1 添接曲げ実験ケース

試験体	実験ケース	軸力 [tf]	拘束条件	载荷内容
1	1	42	完全拘束	弾性範囲内
	2	21	完全拘束	弾性範囲内
	3	0	完全拘束	破壊まで
2	4	42	バネ拘束	弾性範囲内
	5	21	バネ拘束	弾性範囲内
	6	0	なし	破壊まで

4. 添接曲げ実験

(1) 目的

リング間にANEX継手、セグメント間にコーンコネクタを用いたDNAセグメントを用いて、切り欠き長さ分位相をずらしながらセグメントを組み立てる構造の特性を把握するために行った。同時に試験体の組み立て時にセグメントの施工性を確認することも目的としている。

(2) 試験方法

実験に使用した供試体は直径5mクラスのトンネルを想定して厚さは250mmとし、幅は急速施工を考慮して1200mmとした。引張鉄筋比は約1%としている。セグメントを2ピース組み立てた両脇に6ピースのブロックを添接させたもので、試験体全体で幅2.4m、長さ5mの平板とした。セグメントの寸法図を図-10、添接曲げ実験の概要図を図-11に示す。

添接曲げ実験は導入する軸力およびトンネル軸方向の拘束条件をパラメータに6ケースで行った。軸力は試験体の両端部に設置した軸力载荷フレームを介して試験体の外側に配置したφ32mmのPC鋼棒により試験体に導入した。実験で導入した軸力は想定した径(外径6.6m)のトンネル鉛直荷重を10tf/m²と仮定した時の発生軸力42tf/リングとした。実験ではその半分の21tf/リング、および全く無い状態の2ケースを加えた。

また、DNAセグメントは斜辺を有することから、トンネル軸方向への応力伝達および変形が想定されるため、ケース1～3はトンネル軸方向をφ32mmのPC鋼棒で完全に固定し(以後完全拘束と呼ぶ)、ケース4～5はゴムを挟み込むことで(以後バネ拘束と呼ぶ)変形を許す実験とした。ケース6では拘束を外している。表-1は実験ケースをまとめたものである。

载荷方法は軸力を導入した後、主セグメントに対して2点载荷とし、鉛直変位、水平変位、コンクリート

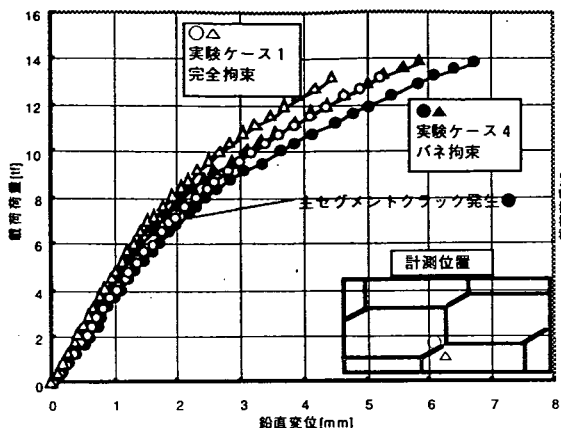


図-12 荷重と変位の関係
(軸力42tfでの拘束条件による比較)

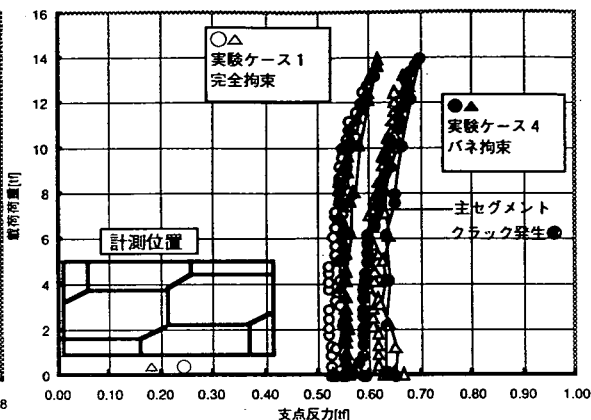


図-13 荷重と支点反力の関係
(軸力42tfでの拘束条件による比較)

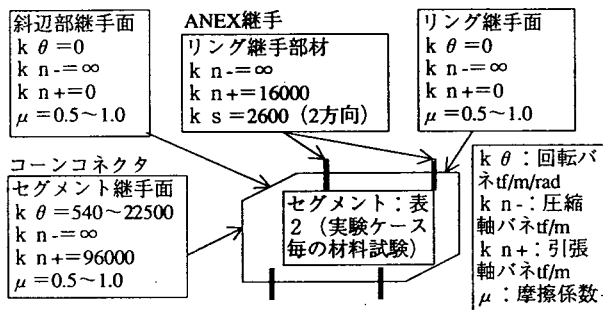


図-14 材料定数

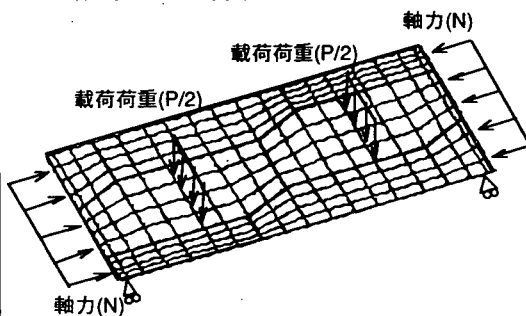


図-15 解析メッシュおよび境界条件

表-2 コンクリートの物性

実験ケース	圧縮強度 [kgf/cm ²]	ヤング率 [kgf/cm ²]	ポアソン比
1, 2, 3	424	3.40×10 ⁹	0.17
4, 5, 6	478	3.53×10 ⁹	0.19

ひずみ、鉄筋ひずみおよび継手面での目開き量、目違い量、拘束治具の反力を計測した。支持スパンは4800mmとし、載荷スパンは事前解析により曲げ破壊になるように2400mmに設定した。

(3) 施工性

試験体を組み立てることで、DNAセグメントの施工性を確認した。最初にトンネル坑口側の添接セグメントを組み立て、2ピースの主セグメント、切羽側の添接セグメントを順次挿入する。組み立てには油圧ジャッキを用い、ANEX 1本あたり平均20tfの力を要した。シールをめくるともなく、コンコネクタのガイドとしての効果も確認できた。

(4) 実験結果

図-12はトンネル軸方向の拘束条件を変えた場合の荷重と鉛直変位の関係を示したもので、軸力が42tf/リングで完全拘束(ケース1)およびバネ拘束(ケース4)における、主セグメントおよび添接セグメントの中央部における荷重と鉛直変位の関係を示す。載荷荷重が6tfまでは線形関係であるが、その後は荷重の増加とともに変位が大きく出ている。また、いずれのケースも主セグメントの変位と比較して、添接セグメントの変位は小さい。次に、主セグメントの鉛直変位を比較すると変位が1mm程度まで、両者は一致しているが、その後、バネ拘束条件の方が変形がわずかに大きくでている。これは、完全拘束の場合、斜辺部を介して応力の伝達が行われ、高い剛性となるためと考えられる。同時に、バネ拘束の場合でもトンネル軸方向変位が大きく発生しないことを示している。

図-13は図中の○△印の位置における支点反力の推移を示している。実験は、トンネル軸方向の拘束治具を0.5tfで締めつけた後、所定の軸力(ここでは42tf/リング)を導入してから添接曲げ実験を開始している。軸

力導入時に0.1tf程度の支点反力の増加がみられるが、載荷荷重6tf程度までは添接曲げ実験中の支点反力の増加はほとんどみられない。このことは、斜辺継手を設けてもトンネル軸方向の応力状態が、通常のセグメントとほとんど変わらないことを示している。

5. 添接曲げ実験の事後解析

(1) 目的

添接曲げ実験の事後解析を行うことにより、DNAセグメントの構造特性を把握し、設計モデルへフィードバックする。

(2) 解析モデル

解析モデルは、セグメントピースを薄肉シェル要素、継ぎ手面をインターフェイス要素、継ぎ手部材を軸バネ、せん断バネ、回転バネを用いてそれぞれモデル化した。インターフェイス要素とは滑り面をモデル化した厚さのない要素であり、摩擦係数の設定が可能な要素である。図-14に継手の材料定数を、図-15にセグメントのメッシュ分割および境界条件を示す。また、実際に添接曲げ試験で使用したコンクリートの物性値は表-2に示すとおりである。

(3) 解析方法

各継手部の摩擦係数 μ を0.5または1.0に仮定し、荷重増分法を用いて解析した。実験では荷重として自重がかかった状態を初期状態として整理している。解析では図-9から算定した $M-\theta$ 曲線を、自重による発生曲げモーメントを解析によって算定した後、 $M-\theta$ 曲線をこの発生モーメントに従ってシフトさせて、実験における整理方法と同じ条件にした。

(4) 解析結果

図-16はケース1とケース6の実験結果(変位と荷重の関係)に摩擦係数 μ が0.5のときの解析結果を重ねたものである。実験ケース1の解析では、コーンコネクタの回転バネ定数の遷移点が6tf/リング付近にあったが、実験でも解析値とはほぼ同様に、荷重6tf/リング付近に変曲点が見られた。解析ケース1では主セグメントには実験結果に影響を与えるような顕著なクラックが発生していなかったことを併せて考えると回転バネ定数の設定が妥当であったと判断できる。実験ケース6でも6tf/リング付近に変曲点が見られるが、解析ではこれが見られないことから、この変曲点はセグメントのひびわれの進展によるものと考えられる。

図-17はケース4、6の○と△の位置(図-13参照)における荷重と水平変位の関係を示したものである。試験体が外側へ向かう変位を正にしている。実験ケース4において、○の位置では変位がほとんどみられない

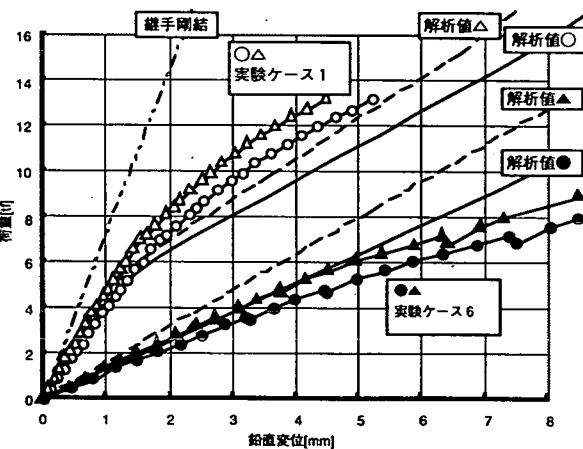


図-16 荷重と鉛直変位の関係
(軸力および拘束条件の有無による比較)

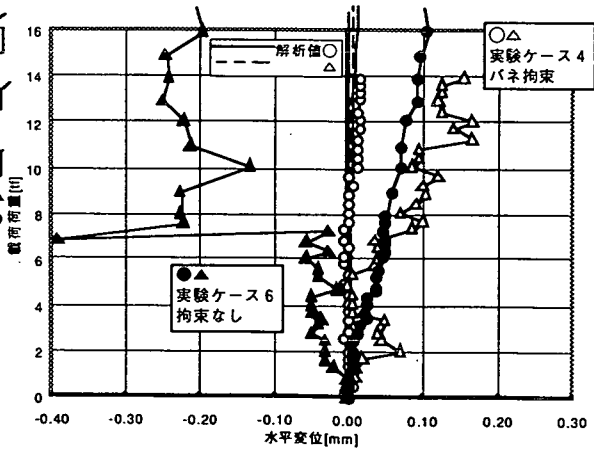


図-17 荷重と水平変位の比較
(軸力および拘束条件の有無による比較)

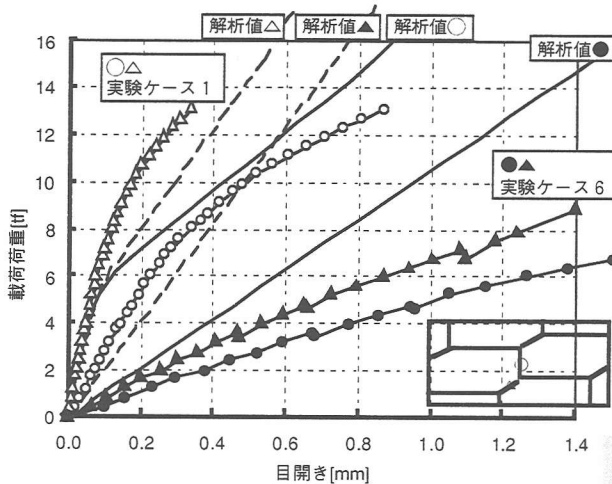


図-18 荷重と目開きの関係
(軸力および拘束条件の有無による比較)

点で解析結果と実験結果は概ね一致する。△の位置でも荷重が7tf/リング程度までは水平変位はほとんど発生しないが、それ以上の荷重では、セグメントのクラックの進展に伴って、外側へ増大する傾向にある。実験ケース6では○位置の水平変位は載荷荷重の増加にともなって外側に増加するが、△位置における水平変位は荷重が7tf程度から内側へ向かう。なお、このケースの解析結果では水平変位はでない。つまり、トンネル軸方向に拘束されていなくても、弾性範囲では水平変位はほとんど生じていないことがわかった。

図-18には図-16と同じケースのセグメント継手と斜辺部継手の載荷荷重-目開き曲線の実験結果を併せて示した。これからも実験ケース1の回転バネ定数の設定が妥当であることが確認できた。しかし、実験ケース6では軸力がかかっていないことで、セグメント継手に緩みが生じていた等の原因も考えられるが、設定した回転バネ定数の値が多少大きかったと考えられる。また、斜辺部継手では、実験、解析共にセグメント継手に比べて継手部材が無いにもかかわらず、継手面の目開きが充分に小さかった。このことは斜辺部継手においても応力が伝達されていることを示していると考えられる。

6. 3次元FEMによる構造計算

(1) 目的

DNAシールドのセグメントは螺旋状に組み立てられているためリングで閉合しないこと、セグメントに斜辺が存在することが従来のシールド工法には無い特徴である。このため、実験および事後解析で得られた結果をもとに3次元シェルで数値計算を行い、リングに組み立てた状態でのDNAシールドの構造特性を確認する。また、はり-ばねモデル解析を行い、従来の設計手法で代用することが可能かどうかを検討する。

(2) 解析条件

直径(図心径)が9400mm、4リングで1サイクルの二重螺旋構造のトンネルで検討する。図-19に全体の概念および解析条件を示す。図-20のセグメントのメッシュ分割図に示すように、長方形のセグメントから切り取る直角三角形の寸法をセグメントの幅および弧長の1/4とすると、セグメント1ピースの弧長は、円周の長さを7.5分割した長さとなる。セグメントの幅は1200mm、セグメント高さは400mmとした。

コンクリートの材料定数は $\sigma = 450 \text{ kgf/cm}^2$ のコンクリートを仮定し、 $E = 3.6 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $\nu = 0.17$ とし

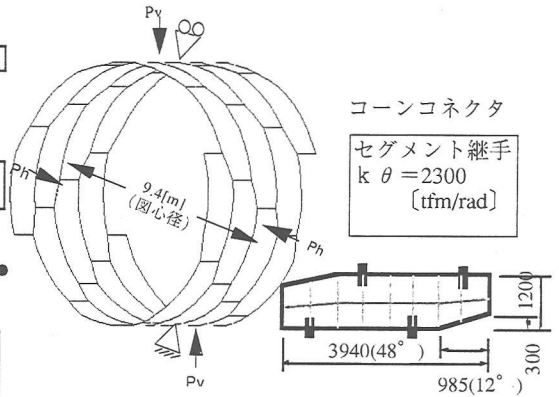


図-19 解析条件

図-20 セグメント
ピースのモデル

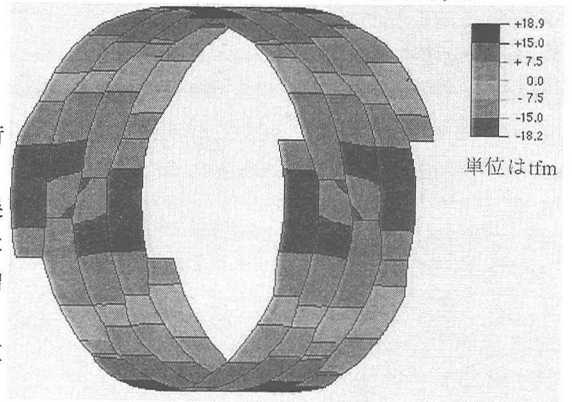


図-21 曲げモーメント図
(トンネル円周方向)

た。継手部材の材料定数は図-14に示す値とした。ただし、セグメント継ぎ手面の回転バネ定数は2300 tf/m/本 （一定）、斜辺部継手とリング継手の摩擦係数 μ は安全側になるよう0.0にしている。

この1サイクルが始まる端部と反対側にできる端部をバネで結ぶことでモデル化し、無限に続いているトンネルから1ユニットを取り出した状況を再現している。トンネル下部で半径方向と円周方向の変位を拘束し、頂部でトンネルの円周方向の変位を拘束する。荷重条件は側方地盤反力を含めた荷重とし、 $P_h/P_v=0.7\sim0.85$ （ $P_v=10\text{tf/m}^2$ ）とした。 $P_h/P_v=0.7$ の荷重条件は $\lambda=0.6$ 程度の粘性土地盤の場合と同様な荷重条件である。

(3) 解析結果

通常の千鳥組セグメントには見られないトンネル軸方向の軸力と斜辺部継手近傍に局部応力が発生している。トンネル軸方向の軸力の最大発生位置はスプリングライン上であり -58.9tf/m であった。ただし、解析に地盤反力を考慮するとこの値は緩和されると思われる。解析結果として $P_h/P_v=0.7$ のときの円周方向モーメントのコンターを図-21に示す。

(4) はりーばねモデルとの比較

DNAを模した2リング1サイクルのはりーばねモデル解析を行い、3次元シェルによる構造解析と比較した。表-3にその検討結果を示す。セグメントの斜辺部に局所的な応力の集中が発生するため、セグメントピース中央部と端部に分けて比較した。表に示すようにせん断力を除いて各断面力の最大値はおおむね一致していることから両者の解析結果はほぼ同様の傾向であることがわかる。セグメントピース中央部でのせん断力の差異はDNAセグメントの螺旋形状に起因していると考えられる。しかし、このセグメントピース端部のせん断力は、通常の配筋で設計されるせん断耐力の範囲内であり問題にならないことを確認している。また、はりーばねモデルは2次元で行ったため、トンネル軸方向の断面力は発生していないが、リング継手部のせん断力の最大値は3次元シェル解析で 5.3tf/本 、はりーばねモデル解析で 5.0tf/本 と同様の値を示した。

これらはDNAセグメントは通常の千鳥組セグメントと同様のリング剛性を有し、はりーばねモデルによる断面力の検討が可能であることを示唆している。

7. まとめ

以上の実験及び解析から得られた知見は以下のとおりである。

- ①添接曲げ実験の結果からDNAセグメントの斜辺部を介して応力の伝達が行われていると考えられる。
- ②3次元シェル解析ではDNAセグメントの斜辺部にトンネル軸方向の軸力およびせん断力が集中することがわかったが、この仮定は①の知見を考慮していない。実施した添接曲げ実験では計算から予想される変位は測定できなかった。このことから、解析結果に表れるDNA特有の現象は実用上は全く問題が無いと考える。
- ③DNAセグメントは通常のセグメントと同様にはりーばねモデルでシミュレートできる。
- ④ANEX継手の実用性、コーンコネクタの調芯性等が確認でき、その組立て性能からDNAセグメントの継手として有効であることがわかった。

参考文献

- 1) 財団法人先端建設技術センター、先端建設技術・技術審査証明報告書「CONEX-SYSTEM」、1998
- 2) 石田修、今井清史ほか；ANEX継手の性能試験、土木学会第53回年次学術講演会第6部-23、1998、10
- 3) 森孝臣、本田和之ほか；コーンコネクタ（セグメント継手）の開発、土木学会第52回年次学術講演会第3部B-138、1997、9

表-3 3次元シェル解析とはりーばね解析結果の比較

解析方法		3次元シェル	はりーばねモデル
セグメント ピース中央部 (最大値)	モーメント [tf m/m]	頂部 18.9 スプリングライン -18.2	頂部 20.3 スプリングライン -20.8
	軸力 [tf/m]	頂部 -30.1 スプリングライン -49.1	頂部 -30.0 スプリングライン -48.8
	せん断力 [tf/m]	最大 ± 5.7	最大 ± 9.7
セグメント ピース端部	モーメント [tf m/m]	頂部 $12.2\sim15.3$ スプリングライン $-10.1\sim-15.4$	頂部 16.9 スプリングライン -16.9
	軸力 [tf/m]	頂部 $-30.1\sim-51.0$ スプリングライン $-31.4\sim-54.6$	頂部 -37.9 スプリングライン -46.5
	せん断力 [tf/m]	最大 ± 16.1	最大 ± 9.4
セグメント継 手部 (最大値)	モーメント [tf m/m]	頂部 16.2 スプリングライン -15.7	頂部 14.0 スプリングライン -14.7
	軸力 [tf/m]	頂部 -43.6 スプリングライン -43.3	頂部 -36.5 スプリングライン -45.5
変位の最大値 [cm]		鉛直 2.1 水平 2.2	鉛直 2.0 水平 2.2