

(株) タナカコンサルタント 技師長 正会員 関 口 光 永

1. はじめに

大都市圏では高度に地下空間を利用するために、円形断面のほかにも自由断面シールドの開発や三連シールド工事の実施などが年々進められている。それに関連してRCセグメントが使用されているが、従来の工法ではその円周方向のセグメント継ぎ手に曲げ剛性不足による弱点があった。筆者はこの個所の金物を工夫して、単体からの力を最大限強力に伝達できるようにこの継ぎ手金物を単純化し、かつ、その曲げ剛性に対して強い構造とし、施工性や経済性も良くなるように改善した。工事全体から見ると局部的な金物に過ぎないが、RCセグメント構造物の安定性向上のためにはこの継ぎ手の重要性は軽視出来ない。そこで、実物大の強度テストは後日のこととし、過去の諸実験値による設計強度資料によって概略の計算を行い、それにより作図し、この部分の試作品を中小トンネル(径約3-5m)用として製作した。それによりこの考え方や組立て具合などのテストを行ったので、その略図と写真を添付してその概要を報告する。

2. 開発の経緯と基本的な考え方

最近誌上に報告されているボゾ付きセグメントは、リング継ぎ手のせん断力に大きくウエイトをおいた工法である。この工法では、型枠本体の接合面の加工が大変であり、その製作費の大きいのに加えて、継ぎ手ボルトの他にも多くの付属品が必要となっている。又、ハニカムセグメントも連続施工可能や仕上がり内面の良いことなどあるが、地質不良や外圧の異常性に対する断面力に関しては慎重を期さねばならない。

これらに対して、従来工法における矩形型のセグメントは形状が簡単であり接合面の加工が容易である。しかし、セグメント継ぎ手の平鋼板とアンカー鋼棒の組み合わせでは剛性が不足のため、これを鋳鋼製(高剛性)としその両側には締付け用空所を挟んでアンカー鋼棒を取り付けて本体内に埋設し、鋳鋼製品の中央にはボルト用の孔を設けている。これが接合面で相対しており、その中央孔にボルトを通してナットで締付けている。セグメント単体からの曲げによって伝わる作用力は中央の締付けボルトに働くので、この作用力線はアンカー鋼棒との間に偏心が生ずる。この為継ぎ手曲げ試験の報告によると、ボルトの降伏点で破壊しているが、鋳鋼製品の変形が載荷の直後から大きくなっている。この他、この作用力線を同一とした案もあるが、使用する部品が複雑であったり、部品数が多いために一般には実用の段階には至っていない。

上記のような不都合なことに対して、本工法での単体の型枠は普通の矩形型であり、その接合面は単純な形状で、継ぎ手個所の連結孔付近を別加工するだけのものである。

(1) 単体から伝わる曲げ剛性による引張力は、その作用力線の偏心を0とするような継ぎ手金物の使用により、前記のような鋳鋼製品を経由しないで、作用力線を中心とし

て直接に伝達する工法なので、強力な力となって、圧縮側のコンクリートにかかる圧縮力と共働して、この継ぎ手に働く曲げ剛性を大きく高めることができる。

(2) それに使う継ぎ手金物は出来るだけ単純な形状とし、部品数も最小限として、かつ、ネジとネジの組み合わせによるものとする事により、締付け時の引張力線が全ての継ぎ手金物の中心に働くようになる。このうえに、その作業性を高めるために必要な余裕をもたせて施工性をよくして、総合的な経済性をはかる。

3. 具体的な工法とその継ぎ手金物

作用力線の偏心を0とするような工法は、従来工法における中央孔に用いる締付け用ボルト自体を高強度のアンカー鋼棒の働きを直々できるような異形鋼棒とし、強度上必要な直径と長さ(計算や実験で決める)として、締付け用空所の中心線上に、その先端のネジが空所中央に露出するように埋設ボルトとしてセットする。この位置については、図-1と後記の図-4の断面A-Aに図示されている。図-1は型枠から脱型された状態を示す。相対するように並べてあるが、工場では置き場に整然と積み重ねられる。セグメントを組立てる時は、シールド機内のエレクターによってこのネジが接合面で相対すようになる。現場においては下記の継ぎ手金物を坑外で予め埋設ボルト先端のネジに取り付けておく。その金物とは、円筒形と六角形の継ぎ手金物の2個(後者には所要の厚さの底板を残して円筒形の内空部を設け、その中にこれを回転可能な状態で係止させるためのナットを入れて、埋設ボルト先端のネジに固定させる。・・・このナットは締付けるときの友回りを防止する。)だけの単純な部品である。この略図は図-2に示し、写真-1のとおりである。

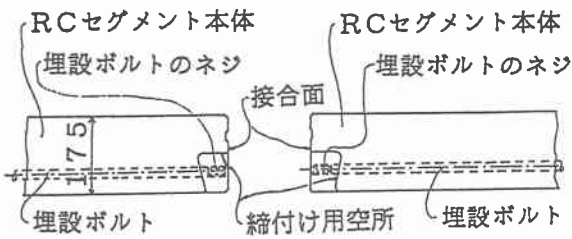


図-1 RCセグメントが工場で作型された状態(曲線形状を直線的に図示した。)

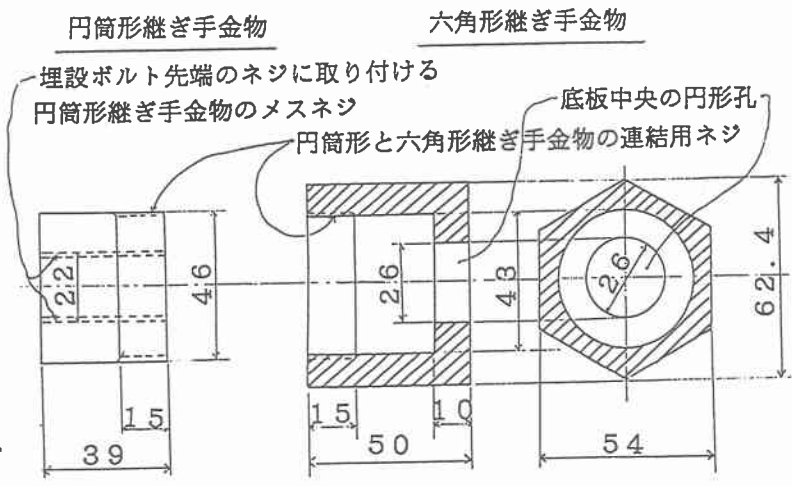


図-2 円筒形と六角形継ぎ手金物の略図

坑内ではエレクターによって締付け用空所が相対して接するように組み合わせられる

ので、この2個の継ぎ手金物は別に連結用のネジを設けてあるので、坑内夫の手とスパナによって締付けられる。このエレクターによって組立てるときには、坑外で取り付けた継ぎ手金物のすべてが締付け用空所内におさまるので、接合面からの凸部はない。（図-3参照）従って、単体の組立て時の挿入も可能であり施工が容易である。

以上の図-1、2や写真-1のように、何れも引き出し線によって説明を付してあり、以下も同様に説明するので図と写真の順を追うて見るだけでその概要が解ると思う。ただそれだけでは不足と思われる点を文章で補足することとする。

今回の試作品の埋設ボルトは、直径22mmで先端のネジの長さは40mmとした。これは、本体製作時の型枠内でのコンクリート打設時のボルトの正確なセットのための必要性からである。（さらに、埋設ボルトの先端は配力筋で補強する。）図-2の円筒形継ぎ手金物の長さはそれに対応させてある。また、埋設ボルト径22mmに対して図-2では六角形継ぎ手金物の底板中央孔径は26mmとし、かつ、写真-2のように六角形継ぎ手金物の内空部の円形ナットは、ネジ合わせ時の施工上の余裕を設け、円形ナットは埋設ボルトに固定されているので、六角形継ぎ手金物がこのナットの回りを上下左右（360°方向）に移動可能な状態としており、相手方の円筒形継ぎ手金物に設けてあるオスネジにそのメスネジが噛み合わされる。これらの埋設ボルトに取り付ける一連の継ぎ手金物の組み合わせの状況は写真-3（次頁）の通りである。

ここで使用する継ぎ手金物は、いろいろなトンネルの径と形状や外力による断面力に対応した埋設ボルトの径に関連させて、一連の金物の断面が、リング継ぎ手を含めて総合的に決めることとなる。

円筒形と六角形継ぎ手金物の連結用ネジ

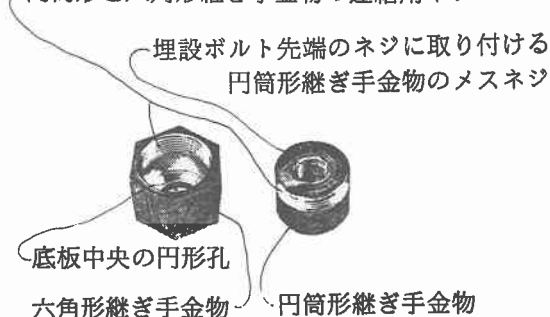


写真-1 六角形継ぎ手金物と円筒形継ぎ手金物（試作品）



写真-2 六角形継ぎ手金物内空部の円形ナットとの関係

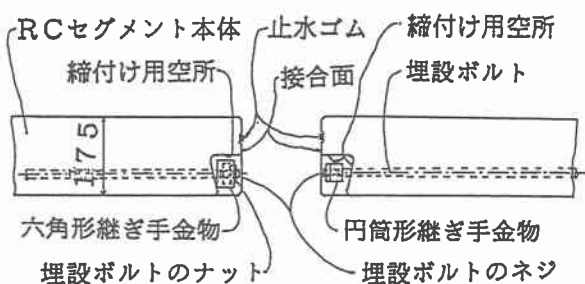


図-3 現場の坑外における継ぎ手金物や止水ゴムのセットの状況

さて、坑内におけるRCセグメントの組み合わせと締付けの作業となるが、前記のようにエレクターによって、その接合面で各々の締付け用空所が相対することとなる。一方の六角形継ぎ手金物は他方の円筒形継ぎ手金物の双方のネジ合わせとスパナによる締付けを行う。このとき、六角形の底板内面がその中に固定された円形ナットの一面とすり合せながら埋設ボルト先端を、相手側の先端側に引き寄せることとなり接合面は互いに相接することとなる。

上記の底板内面と円形ナットの一面とのすり合せ面の間には、滑りをより良くするために、ある種の薄いリング形板状の滑材の挿入を考えている。締付け終了時の状態は図-4であり、そのA-A断面は締付け用空所を接合面側から見たものであり、空所の側面がハの字形状となっている。

写真-4は埋設ボルトの埋設部分を同色の紙で覆って見せた状態である。

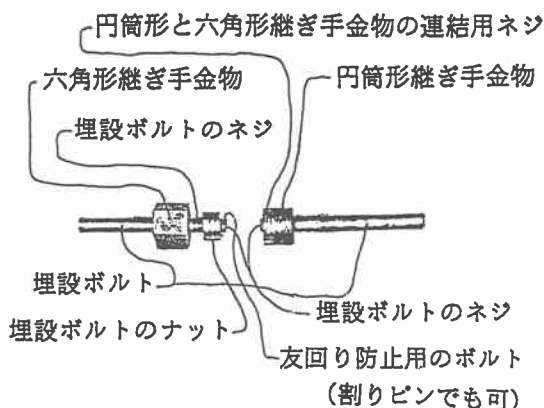


写真-3 埋設ボルト先端のネジに取り付ける一連の継ぎ手金物の状況

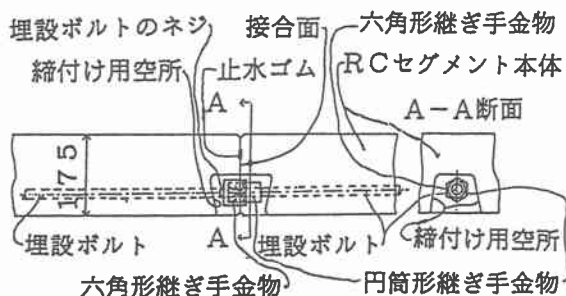


図-4 円筒形継ぎ手金物に六角形継ぎ手金物がスパナで締付けられた状態

4. 継ぎ手の強度試験

このセグメント継ぎ手の曲げ試験方法は、「土木学会、下水道協会 共編のシールド工事用標準セグメント」に定められている。これによると、図-5（次頁）に示すように下部の両支点がローラー支持のため中央からの荷重に対して非常に過酷な条件となっている。しかし、試験時の接合面の状態は写真-5に示すように、止水ゴムを付けずに接合面は正

確に相接している。このため、上部の圧縮側となるコンクリートの圧縮力は強力である。

一方 下部の埋設ボルトと円筒形と六角形の継ぎ手金物も、必要にして十分な長さや断面を持ち、かつ、埋設ボルトの中心軸を中心とし、余裕のある2つのネジによって偏心がなく連結されているので、2項で述べた鋳鋼製品の変形とは異なって、埋設ボルトの引張力による伸びと、それに伴う埋設部分の付着力離脱をあわせて直線形に近いゆるやかな曲線状な変形（伸長）をしながら、最後には 埋設ボルトが切断するか あるいは

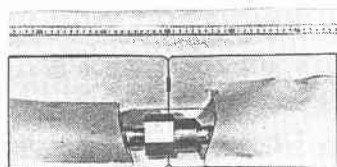


写真-4 接合面の締付けが終わった状況（埋設部分は紙で覆ってある）

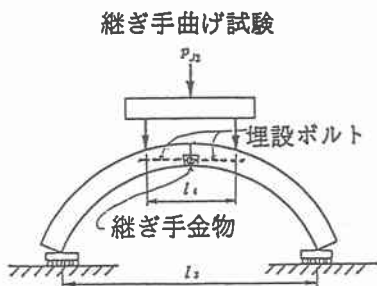


図-5 強度試験の载荷要領

引き抜かれるまで引張力としては働く。

(計算で得られた値に近い力まで。) 従って、圧縮力と引張力は互いに競合して曲げモーメントに抵抗するので、破壊までの過程は継ぎ手があることによる弱点

はあるものの、+モーメントに限っては単体のとき供試体の下面にクラックを発生しながら破壊したときに近い状況となりながら、大体は継ぎ手金物の個所も最後まで抵抗しながらそれも計算値に近い曲げ剛性を発揮して破壊するものと推定できる。

このことに関しては、実物大のものによる実証実験が必要であるので、近くにこれを実施して報告することとする。

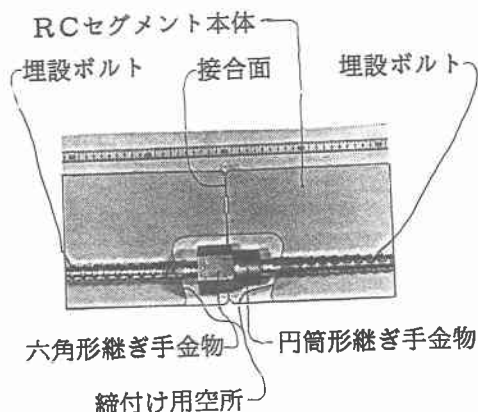


写真-5 継ぎ手の強度試験を行うときの接合状況

5. リング継ぎ手

この項に関してはいろいろな計算方法があって論議されている。それが、土木学会のトンネル標準示方書〔シールド工法編〕・同解説(平成8年版)の第50条 断面力の算定の項を中心に それに関連した荷重の設定、地盤反力その他一連の内外力の考え方などがまとめられている。ここではその中から引用して、修正慣用計算法によって断面力を考えることとする。(セグメントに関して馴染まれない方々がおられるのと、この項を説明するために第50条の中からその一部を引用することとする。)

セグメントリングは、通常、いくつかのセグメントをボルト等で結合することによって組立てられるため、セグメント主断面と同じ剛性をもつ剛性一様なリングと比べて変形しやすい。これはセグメントの継ぎ手部分の剛性(特に曲げ剛性)が、セグメント主断面の剛性に比べて低下していることに起因している。この継ぎ手部分の曲げ剛性の低下を、リング全体の曲げ剛性の低下として評価し、セグメントリングを ηEI (曲げ剛性の有効率 $\eta \leq 1$)なる曲げ剛性一様なリング(平均剛性一様なリング)と考える。さらに千鳥組による継ぎ手部の(せん断力による)曲げモーメントの配分を考慮して、 ηEI なる一様な曲げ剛性をもつリングから算定された断面力のうち、曲げモーメント M を ξ (曲げモーメントの割増し率 $\xi \leq 1$)だけ増減して、 $(1 + \xi)M$ を主断面の設計用曲げモーメント、 $(1 - \xi)M$ をセグメント継ぎ手の設計用曲げモーメントとする方法とする。

上記の考え方から、円周方向のセグメント継ぎ手の強度が大きくなって $\eta \rightarrow 1$ となれば、 $\zeta \rightarrow 0$ で良いこととなる。しかし、このセグメント継ぎ手を強くしたとしても、

その存在による曲げ剛性を含めた断面力の低下は安全側に考えざるを得ない。ここで曲げモーメントの全てがセグメント継ぎ手を通じて伝達されず、その一部はこの項でのリング継ぎ手のせん断抵抗により千鳥に組まれた隣接セグメントに伝達される。

曲げモーメントの割増し率 ζ は、図一6に示すように継ぎ手に隣接するセグメントに伝達される曲げモーメント M_2 と $\eta \cdot EI$ になる曲げ剛性一様リングに発生する曲げモーメント M との比 M_2 / M である。この値は η と同様に実験結果等を基に、経験的に定めている。

曲げ剛性の有効率 η と曲げモーメントの割増し率 ζ とは、互いに逆比例的な関連を持っている。円周方向に継ぎ手が無ければ $\eta = 1$ となり $\zeta \rightarrow 0$ となってリング継ぎ手は簡単なもので良いこととなる。

地質的に特に問題の少ないトンネルであるときは、本稿（前記のこの項以前に述べた内容）のようなセグメント継ぎ手を採用すれば、実物実験によって確認する必要があるものの、セグメントの外側がグラウトなどによって固められるので、 η の値を大きく考える事が出来る。従って、リング継ぎ手に関連のある ζ の値が小さくても良いこととなる。この事から、工事の経済性からリング継ぎ手の軽度化が従来よりも考えられる。

- (1) 埋設ボルトがセグメント継ぎ手と同径としても、その長さを $1/2$ 位いとす。
- (2) 上記に対して、埋設ボルトの径を 16 mm 位とし、継ぎ手金物の大きさをそれに準じて小型化し、他のトンネルの径にも共用使用することとする。

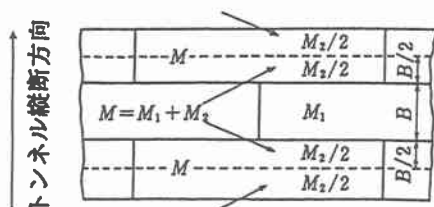
このことによって、それぞれの部品の大量製作による経済性をはかる。又、リング継ぎ手の数を減少することも考えられる。

この事とは逆に、工事の重要性や地震対策などを考慮するときには、現在工事中の東京湾横断道路の例を参考として、埋設ボルトの径は(2)と同じとしても、リング継ぎ手毎に単体巾内に1本をトンネル方向に通して埋設し、その両端には前記と同様のネジを設けて同じ継ぎ手金物で連結する。・本工法によれば工場製作や施工上からも容易なことである。

このリング継ぎ手におけるせん断力の伝達は、接合面で継ぎ手金物の部分となるが、これが、当初は空所内に露出状態である。この空所をセグメント本体のコンクリート程度の強度モルタルを入念に充填して仕上げるほかに、よりの確にせん断力を伝えるような補助的な金物の挿入を考えている。

6. おわりに

このほかに、締付け用空所の形状とその利点、負の曲げモーメント対策などがあるが紙数の都合で省略する。本工法における継ぎ手金物は大量生産によって非常に安価となるので、更なる研究によって改良してさらに発展することを期待している。



図一6 継ぎ手による曲げモーメントの伝達
(土木学会。トンネル標準示方書〔シールド編〕同解説・平成8年版・第50条
図一2. 14から引用)