

III-21

ピン構造継手セグメントの開発経緯と施工上の諸問題

国鉄東京支工工務局 正員 植野利之

I まえかき

平板型RCセグメントは、種々の特長を有しながら、適合する継手構造が見出せない。国の内外を問わず使用実績は少ない。国鉄では、この平板型RCセグメントの特性に捨て難い魅力を感じ、その実用化を図るため、過去数年間にわたって実物大により、ピン構造開発をすべく基礎的試験 および東海道、総武線のシールドトンネルで、試用改良を繰り返しながら、実験を進めてきた。ここでその開発経緯と力学的特性、および今後に残された施工上の諸問題について述べる。

2. 平板型RCセグメントの開発の経緯

2-1) ボルト継手系

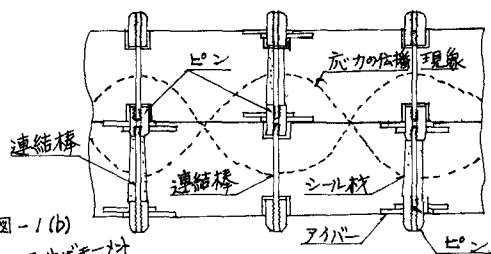
平板型RCセグメント用継手として、箱板直ボルト、曲リボルト、ピン構造の3種類を考え、比較試験を行なってきたが、前2者のボルト継手セグメントは、次の様な欠陥を有していた。

- ・ 継手のために、有効断面の欠損を伴い配筋も有効に断面を活用できない。
- ・ 継手部の異常拘束により、大きな局部応力が、随所に発生する。
- ・ リング間継手部の剛生度低いため、たわみの原因となり施行性が良くない。

2-2) ピン構造継手

平板型セグメントの有効利用の最大の目的は、断面を有効に活用して、空面で重荷重に耐えるRCセグメントの設計製作である。そのためには、継手をセグメント側面中心軸上にセットし、配筋上の弊害を極力少なくすることである。このためには、従来のボルト系継手では不可能であり、リング間継手のせん断抵抗を増大させ、多数リングの共同作用で外力に耐える構造が最も望ましい。このため、以下に述べるようにピン構造継手の開発を進めて来た。

(a) 平面詳細図



(b) 側面詳細図

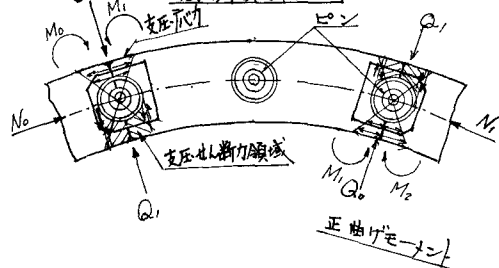


図-1 ピン構造継手図(I型)

① ボース継手をヒンジ化すること、(にべしセグメントの変形を少なくするために平島組みにして隣接セグメントのスプライス効果に期待する) 図-1(a)

② ボース間の継手部の剛性を高めるために、ピンをナツアルに結合させ継手効率を考慮する

③ リング間の継手のせん断抵抗と拘束力を増大させる。図-1(b)

④ 組立時間の短縮による工費の節減 (すべて機械化により施行する)

⑤ 止水性の改良 (継手部に裏込注入を活用する装置の開発を計る)

2-3) ピン構造の設計

セグメントの慣用されている計算では、セグメントリングを曲げ剛性一様なリングと仮定して断面力を算定している。しかしボース継手部をピン構造とすると継手の曲げ剛性がセグメント本体の曲げ剛性よりも劣るために、継手効

率=0とすれば、千鳥組にした隣接セグメントで分担させなければならない。その応力の伝播現象は図-1(a)に示す。曲げモーメント分担率を求め解析することは、非常に難しく、早大の村上教授は第24回年次学術講演会で継ぎの分担する曲げモーメントの算定式を提案されているが、継ぎ剛性と変形量によるリングの計算法はまだ未解決である。そこでピン構造の設置にあたって、セグメントピースを単体強部と考え、端部をヒンジにしてピンとボゾでリングを形成し、単体ピースの両端をヒンジと考え、ピンとボゾのせん断力を隣接させると、リング間に作用する付加せん断力のために、曲げモーメントの割増し抵抗応力が生ずる。これに対応させるために、補強鉄筋を中央ピン付近に配筋するものである。断面計算については、リング剛性の低下による曲げモーメントの減少量と付下曲げモーメント量を仮定して慣用計算法で計算した結果の差があまり生じないので、現在使用されている剛性一律なリングと仮定して断面力を算定した。

2-4) 強度確認試験

まず最初に図-1のE型セグメントの平板型ピン継ぎ構造セグメントを試作し、下記の比較試験を行なった。

- ① セグメント単体曲げ試験：荷重とセグメントのたわみ、ひずみの関係を調べた結果 $E_c = 0.5 \times 10^4$ であった。
- ② 継ぎ剛性試験：セグメントを2個連結して軸力と曲げを与えると、実験値は剛とヒンジの理論値の中間であった。
- ③ セグメント単体圧縮試験：シールド推進反力方向に荷重200tを加えても亀裂は生じない。

以上から、フラット型セグメントは理論値と実験値は良く合い、強いことが判明したので、更に下記の試験を行なった。

- ④ 野外におけるシールド機械による組立て試験：I型セグメントを用いて施行した結果、次の様な問題点があった。

- イ 通しボルトの連結が困難であること
- ロ ピース継ぎアイバー結合後、シースの挿入が困難であった。
- ハ ピンが円筒型であるために取付けが難しい。
- ニ アイバーの存在により、各ピースが異型になるほか、型式が複雑となり、挿入のために両面の空隙部箇所が多い。

⑤ 相対試験(図-2に示すように、水平に組んだリングに両側から集中荷重をかける)。3リング十息に組んだ場合とえぼりの効果が大きく、測定されたリングのたわみと応力から剛結合、ヒンジ結合の両理論のような差は認められず、継ぎ剛性理論と同様に、いずれも剛とヒンジの中間的な値を示した。また曲げ剛性の有効率は、 $\gamma = 0.5$ の値を示した。

⑥ 人工砂地盤中の載荷試験(図-3に示すように、円型ピット内に組んだリングのまわりに砂を詰め、上から英から載荷して実際の地中での荷重状態に近しいと思われる状態で試験する)。荷重を増すにつれて、セグメントに生ずる応力も大きくなるが、最終的には設計荷重の約3倍の載荷荷重を加えても、破壊には至らなかった。またリング頂部(図-3のA点)のたわみは15cmになったにもかかわらず、継ぎ部の破壊は生じなかった。これは(図-1の(b))のようにピン結合端面に支圧応力を抵抗させることのできる構造と考える。砂地盤の測定された地盤反力(直応力)の鉛直方向成分は

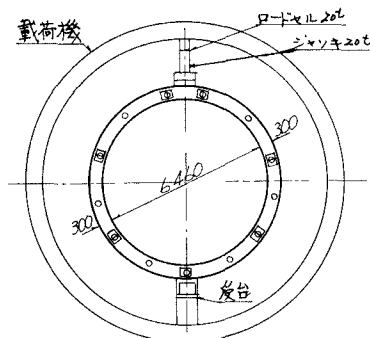


図-2 相対試験装置略図

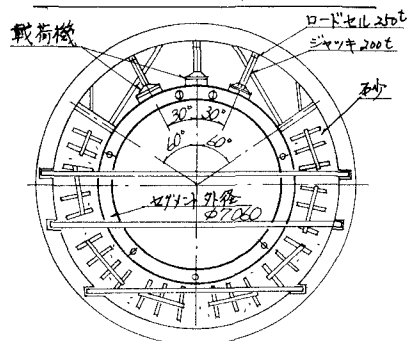


図-3 人工砂地盤試験装置略図

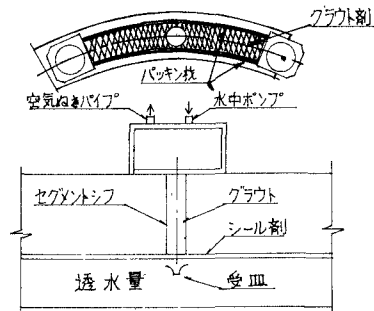


図-4 防水試験略図

載荷荷重の鉛直成分よりかなり小さい。すなわちセグメントと砂の摩擦をとおして、砂のせん断抵抗が切線方向にかなり効いていると思われる。

⑦ 防水試験 (図-5に示すように、組立てられたセグメント継ぎ目に試験装置をセットを取り付け試験する)：水と混合して膨張性のあるウレタン材を注入 (注入圧 10 kg/cm^2) した後、水圧 0.5 kg/cm^2 段階に60分の間隔で 0.1 kg/cm^2 まで行なった結果、漏水は認められず、今回の一段階の注入試験に於ては、或る程度の見通しを得ることができた。

3. 現地の施行性による応力の挙動とその改良策

3-1) 組立施行性

① 室町工区試験：最初に野外で組立てたI型セグメントは、シール挿入後ピンをねじで締め込んだために施行性が悪く問題があったのでつきのようにII型(図-6組立図)に改善した。

a. シースをナックルパイプに変更して、半端面にパイプを取り付け凸型とし、リング隣接セグメントのピンを挿入させるようにした残りの半端面は凹型とし、側面にアイバーを取り付けピンに挿入させながらナックルパイプと結合させることにした。

b. セグメントは6分割とし、K型セグメントはB型セグメントの $1/3$ 分割としてある。ピンと受パイプのあきあきはわみ至少なくするために小さくした。これはにわみが少ないなどの長所もあったが、アイバーがピンに挿入するときに強度不足のため屈折し、施工性が悪く無理して組立てるため時間がかり、B型セグメントがリングの拘束力のために割れにりした。(鉛直にわみ 45 mm 組立時間106分)

② 柳橋工区試験：II型の端面のナックルパイプを無くし、組立施行性を良くするために、つぎのようにIII型に改善した。(図-6組立図)

a. セグメントのピース間継ぎはとくに設けずコンクリートで端面を凸凹型にし、リング間継ぎでセグメント相互間の回転を起さないようにする。

b. セグメントは7等分割とし、継ぎはセグメント端部の他は中央部に1つだけにする。すなわちセグメント端部両側面に半割円形ピンを、側面中央部はパイプでピン受けになっている。あきあきは少し大きくした。

組立施工の結果、組立は容易であったがあきあきを大きくしたために、にわみが大きくなりリングの結合が悪く目開きが発生した。(鉛直にわみ 75 mm 組立時間54分)

③ 浜松町工区試験：上記の試験は、施行性の改善、価格の低下を目指したものであるが、浜松町工区では継ぎ部でピース間の曲げ抵抗、せん断抵抗がほとんどゼロであると考えればりとして、勿く両脇のセグメントに、剛性継ぎの場合の2倍近い曲げモーメントとせん断力を受けるように設計した。この工区は鉛直荷重が 70 t であるために、厚みが 60 cm の制限では鉄筋応力が不足するので、断面中央に鉄帯を設け、鉄帯と鉄帯ピンで結合し、漆塗り効果も高めようとするものである。(図-6組立図)さらに施行性を良くするために、最後に組立てるK型セグメントは、(図-5)のように、まず隣接セグメントの方向に半割ピン①をシールド方向に内筒ナックル②を左右の中央鉄帯半割ピン③に結合させる。組立時においては既に組立られているB型セグメントの半割ピン①にK型の半割ピン①を結合させると同時にB型中央の半割ピン③にK型半割ピン③を接合しながらK型の内筒②が嵌合する。改良した真は、K型セグメントを押し上げる際施行性を良くするために中央の半割ピンに④のストッパーを考案して、K型セグメントを頭上に押し上げるとBとKのストッパー④と④が接合し、リング方向にシールドジャッキで押込みながら容易に組み立てられる。(鉛直にわみ 20 mm 組立時間60分)

3-2) 応力の挙動

一般的傾向は、組み立てがウーデル脱出までの変化が著しく、この段階で許容応力に近い応力を生ずる。しかし、裏込注入を境に応力は安定し、

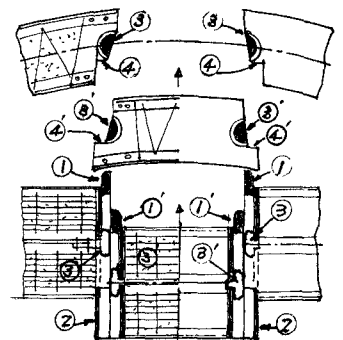


図-5 K型セグメント詳細図

ほぼ一定を保つようになるが、土圧応力は浅積の室町・柳橋工区では、設計やみ荷重に近しい値を示し、沖積粘土層の浜松町工区では、全土被り荷重よりやや低い値を示した。また継ぎ応力については、ボルト継ぎではピース間の応力が著しくリング間には小さい。一ネピン構造継ぎとは逆にリング間に大きな応力が発生している(図-6)

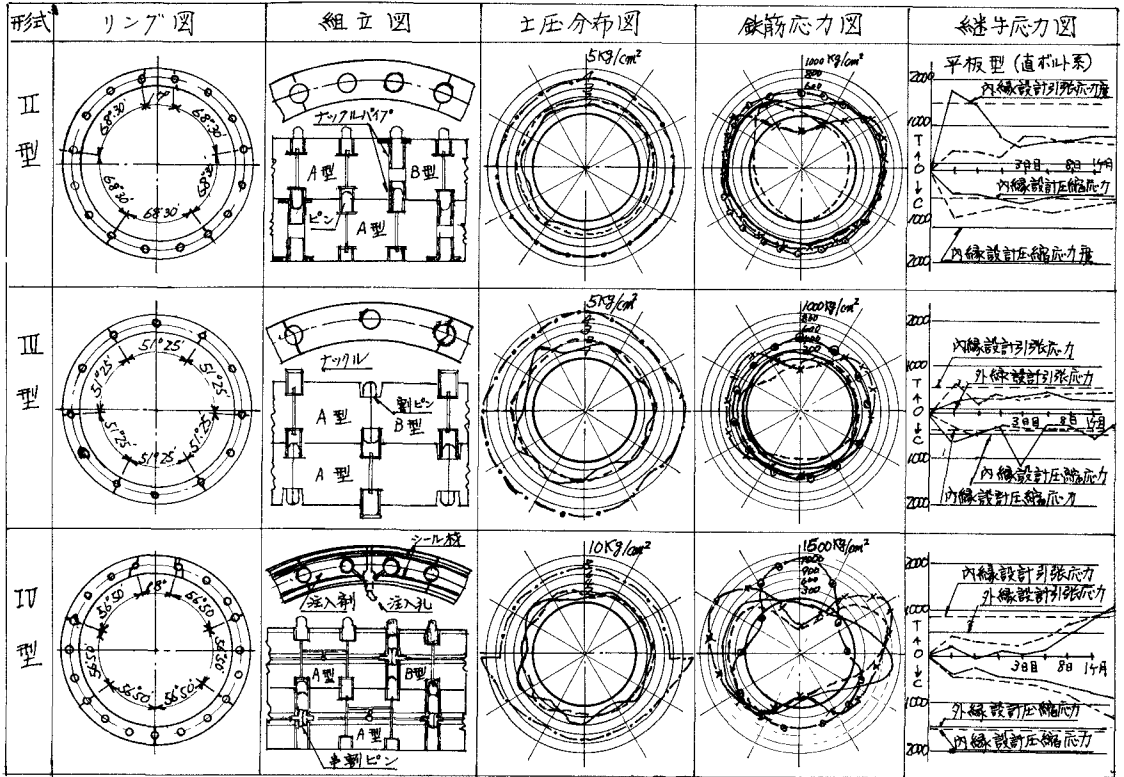


図-6 ピン構造セグメント略図と応力の挙動図

3-3) 防水処理の試験

① 室町工区：セグメント注入試験手法を活用し、II型で被圧水トンネル内外に流水防止効果を二重シール材で行ない、残ってウレタン系の注入材を注入した結果漏水は認められず良好であった。しかし注入圧が $10 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ と云う高さのため、接合部から注入時にかなり内外へ流出することになり経済的に問題となった。

② 柳橋工区：II型に注入剤及止水防止を考慮し、二重シール材を挿入できる構造とした。また注入材も流動性がよく膨張性のある芝罘 $5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ で施行した結果、セグメントに目開が生じ目的を達し得なかった。

③ 浜松町工区：II型に注入圧が低くても注入高率の良い開発を行った。(図-6) また注入材が円骨に導入できる注入溝を二重シール材の中央につくり、注入材に裏込注入を使用し注入孔からピン受パイプに配管し、圧力 $2 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ で円周、継ぎ部に注入する。さらに市販されている二重シール材4種類のパッキン材の試験を各6リングずつ行ない、そのなかで単泡スポンジパッキンが注入材に通っており、注入防水に良い成績を収めることができた。

4 ピン構造セグメントの開発と今後の問題点

試験を通じて、ピン構造の開発は一応成功したものと思われる。しかしながら一般的シールド工事が急激に発展しているにもかかわらず、山岳トンネルの歴史に比較して、アーストンネルは、実施例も少なく基礎的研究のなすおくれが大きい。この実験によって得られた下記のことから、今後とも研究する必要がある。

- 1) 土圧荷重は、設計荷重より低く、安全側にとられている。地質調査の重要性と地盤反力係数の究明。
- 2) 継ぎ部自体の力学的要素を取り入れたリング解析法の具体的な手法は未だない。ピン継ぎの考え方について種々の議論があると思うが、継ぎの効率と桁梁としての強度に関する経済的な計算手法の究明。