

(139) リング組みシールドトンネルの交番曲げ载荷実験

建設省土木研究所 正員 川島 一彦
建設省土木研究所 正員 杉田 秀樹
建設省土木研究所 正員○加納 尚史

1. はじめに

著者らは、シールドトンネルの長手方向の耐震性を検討するため、シールドセグメントをリングに組んだ供試体を用いて長手方向に正負交番载荷実験を行い、その結果を報告した¹⁾。これに引続き、本文では、同様の供試体を用いて交番曲げ载荷実験を行い、シールドトンネルが曲げを受けた場合のトンネルの変形および破壊特性を検討したので、その結果を報告する。

2. 载荷実験の概要

载荷実験に用いた供試体は、外径1.8mの下水道用標準セグメント（シールド工用標準セグメント（土木学会、下水道協会共編、1982年）、セグメント番号2番）に従って製作したものである。供試体としては、図-1に示すように、厚さ12.5cm、リング長90cmのRC平板型セグメント4体を千鳥組みにし、長手方向に4リング連結したDタイプ供試体、およびこれに厚さ200mmの二次覆工コンクリートを打設したEタイプ供試体、各1体を作製した。なお、二次覆工コンクリート内の円周方向にはリング筋としてD13を12本（30cm間隔、二次覆工コンクリートに対する鉄筋比0.21%）、長手方向には供試体全長にわたってD13を16本（二次覆工コンクリートに対する鉄筋比0.24%）、それぞれ配置した。また、Kセグメントは簡単のため省略している。リング継手およびセグメント継手は図-2に示す構造であり、それぞれD10およびD13のアンカー鉄筋（長さ30cm）によってセグメントに定着されている。継ぎボルトにはM20を用い、軸力4.7tfを目標に締め付けた。

供試体は、図-3に示すように、一端を反力壁

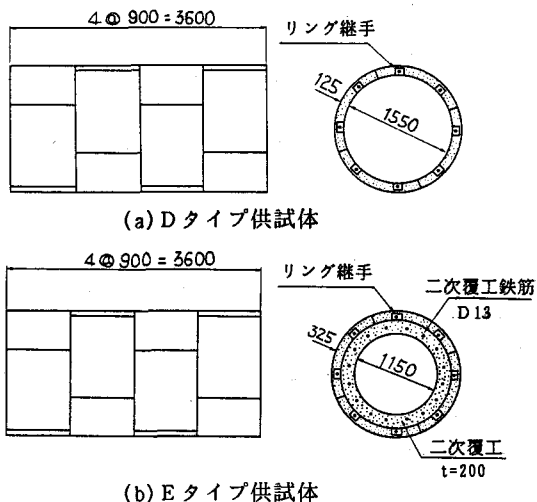


図-1 実験に用いた供試体

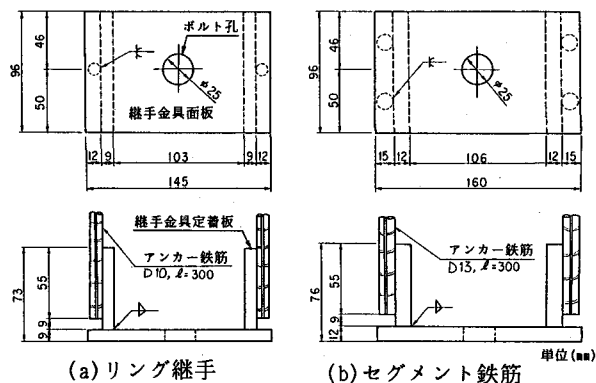


図-2 継手金具の構造

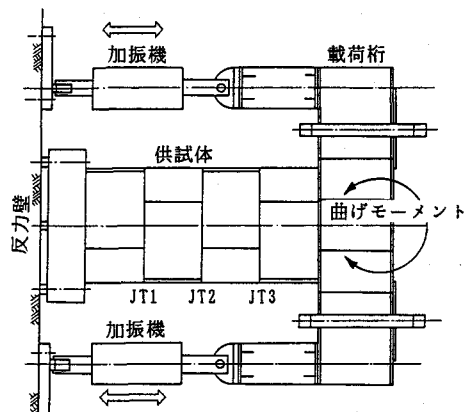


図-3 载荷方法

に、他端を載荷桁に、それぞれ固定し、載荷桁の両端に接続した2台の動的加振機を逆位相で操作することにより、供試体に純粋な曲げモーメントを作用させた。写真－1に載荷実験の状況を示す。

3. 実験結果

3. 1 各タイプ供試体の破壊性状

各タイプ供試体の破壊は、以下のように進展した。

Dタイプ：①いずれのリング接合面においてもリング継手周辺にクラックが発生→②リング継手金具面板の降伏（JT2）→③リング継手のアンカー鉄筋が降伏（JT2）→④供試体外周面にクラック発生（JT1、2、3）→⑤JT1における外周面クラックの進行→⑥JT1におけるリング継手のアンカー鉄筋の破断

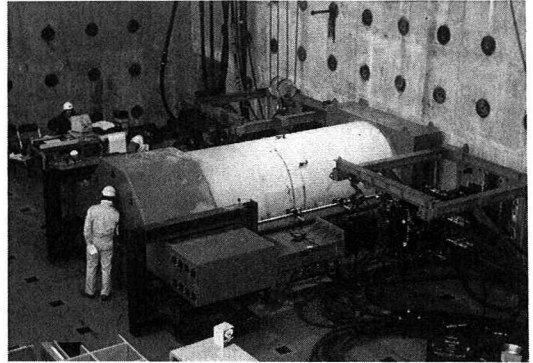
Eタイプ：①各リング接合面付近の二次覆工コンクリートにクラックが発生→②二次覆工鉄筋の降伏（JT1、2、3）→③リング継手金具面板の降伏（JT2）→④供試体外周面にクラックが発生（JT1、2、3）→⑤リング継手のアンカー鉄筋が降伏（JT2）→⑥リング継手のアンカー鉄筋が破断（JT1、2、3）

なお、リング継手の金具面板およびアンカー鉄筋のひずみの計測は、各タイプ供試体ともJT2でのみ行っている。

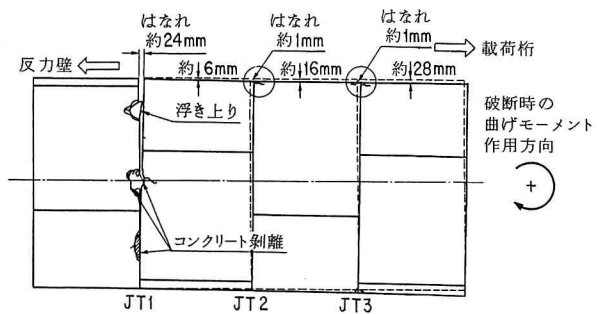
図－4に各タイプ供試体の最終破壊状況を示す。損傷は両タイプ供試体とも、リング接合面付近に集中しており、セグメント本体およびセグメント継手には、損傷は生じなかった。

Dタイプ供試体のリング継手の破壊は、JT1に集中して生じ、他のリング接合面では、外周面にクラックが生じたばかりにとどまった。これに対して、二次覆工のあるEタイプ供試体では、リング継手の破壊は1箇所のリング接合面には集中していない。このことから、一次覆工のみのシールドトンネルでは、ある特定のリング接合面に耐力が減少する程度の損傷が生じると、そのリング接合面のみ損傷が集中しやすいことがわかる。

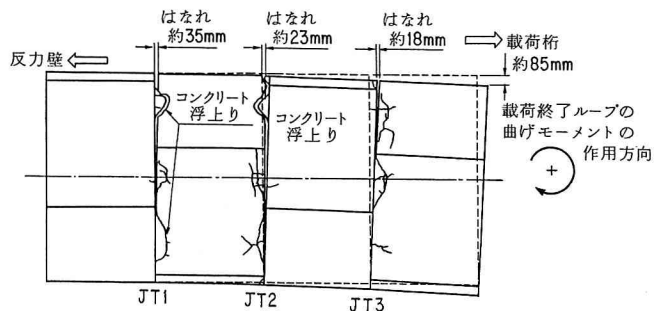
リング継手のアンカー鉄筋は、定着板の端部位置において破断した。Dタイプ供試体では、図－5に示すように、継手金具面板が“く”字型に変形しており、定着板がボルトボックス内に曲げられ、アンカー鉄筋には曲げが生じたことがわ



写真－1 載荷実験の状況

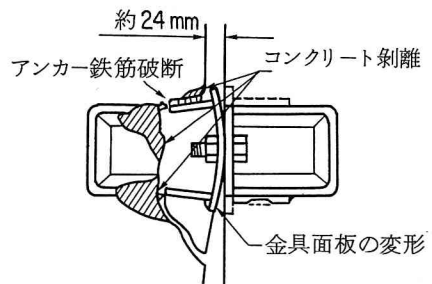


(a) Dタイプ供試体



(b) Eタイプ供試体

図－4 供試体の最終破壊状況



図－5 リング継手の損傷状況（Dタイプ供試体）

かる。これに対して、Eタイプ供試体では、ボルトボックス内が二次覆工コンクリートで充填されているため、これが定着板の変位を抑え、アンカー鉄筋に曲げを生じさせにくい構造となっている。

上述したリング継手の破壊の過程は、既に行った軸方向の交番載荷実験¹⁾結果と同様である。交番曲げ載荷をした場合にも、リング継手の破壊は、結局引張力を作用させた場合と同じであることが重要である。

3. 2 供試体の変形特性

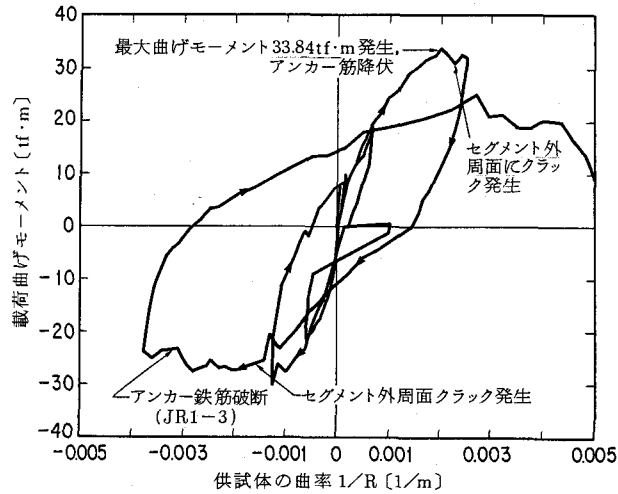
各タイプ供試体の曲げ変形と載荷荷重の関係を供試体の曲率と載荷曲げモーメントとの履歴で示すと図-6のようになる。ここで、供試体の曲率は、供試体の左右両端で引張縁側および圧縮縁側の変位量を計測し、両者の差から供試体全体の中立位置を求めた上で算出した。

Dタイプ供試体の場合には、最大曲げ耐力33.84tf・mが発生した後、供試体の外周面にクラックが生じ、次にアンカー鉄筋が降伏した後、供試体の耐力は徐々に減少していく。その後、曲げモーメントの方向を反転して負にすると、最初の正載荷の場合と同様に、外周面のクラック→アンカー鉄筋の降伏が生じ、耐力の低下が生じる。ただし、この場合には、最大曲げ耐力は-28.2tf・mと、最初の正載荷よりも小さくなっている。最大耐力が減少したのは、正載荷時に引張力を受けて剛性が低下した上面及び下面のリング継手が、中立軸の移動により負載荷に移行しても、依然として引張領域に入っているためである。これに対してEタイプ供試体では、最大曲げ耐力は-116.47tf・mであり、これはDタイプ供試体の約3.4倍に当たる。なお、Eタイプ供試体の最大曲げ耐力の発生は、Dタイプ供試体とは異なり、リング継手のアンカー鉄筋（また、二次覆工鉄筋）の降伏後である。

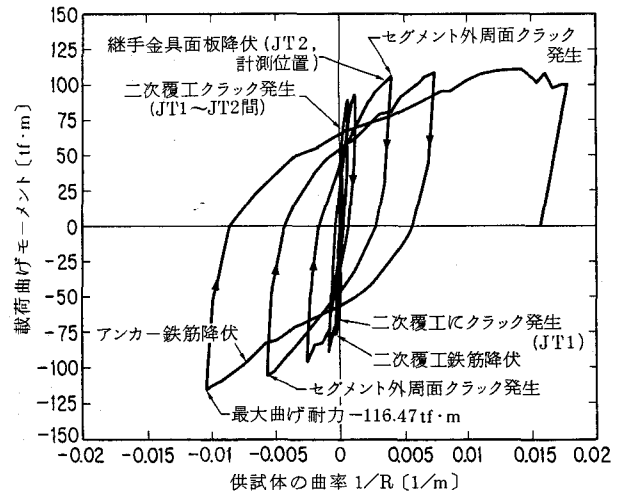
Dタイプ供試体では、載荷終了後の供試体の曲率は0.0055(1/m)であった。これを曲率半径に直すと約180mである。これに対してEタイプ供試体の載荷終了後の供試体の曲率は0.0178(1/m)であり、これを曲率半径に直すと約56mである。ただし、Eタイプ供試体での曲率は、治具と供試体との接触が生じたために載荷を打ち切った時点での曲率であり、実際の終局時の曲率はさらに大きいと考えられる。これによれば、曲率半径にして、Eタイプ供試体の方が少なくとも3倍以上のねばりがあることがわかる。

3. 3 中立軸の移動

図-7は、Dタイプ供試体のリング接合面



(a) Dタイプ供試体



(b) Eタイプ供試体

図-6 曲率と載荷曲げモーメントの履歴

JT2における、各リング継手位置の相対変位の分布を示したものである。ここで図-7は、リング継手金具の降伏が生じていない段階（載荷曲げモーメント19.7tf・m、曲率0.0007(1/m)）と、リング継手金具の降伏を過ぎて、リング継手のアンカー鉄筋が1箇所破断した後の段階（載荷曲げモーメント23.81tf・m、曲率-0.0038(1/m)）の、両者について示したものである。これによると、圧縮の相対変位が生じているリング継手は、リング継手の降伏以前では3箇所であるが、破壊が進展し、アンカー鉄筋が破断し始めた段階では、圧縮の相対変位の生じるリング継手は1箇所に減少している。このことから、供試体の破壊の進展に伴い、供試体の中立軸位置は圧縮縁側に移行していくことがわかる。この現象は、Eタイプ供試体においても同様である。なお、供試体天端のリング継手では、中立軸位置の関係で、正負いずれの曲げモーメントを作用させても、常に引張方向の相対変位が生じることに注意しなければならない。

3. 4 セグメント継手の挙動

図-8にEタイプ供試体のセグメント継ぎボルトと載荷曲げモーメントの履歴の一例を示す。セグメント継ぎボルトの軸力は、全載荷過程において初期締め付け力から変化していない。この傾向は、Dタイプ供試体でも同様であった。このことは、本実験で対象とした覆工構造では、トンネルの曲げ変形による供試体の円周方向への作用力は微小であることを示している。ただし、本実験に用いた供試体は、外径1.8mに対して、覆工の厚さがD、Eタイプ供試体それぞれ12.5cm、32.5cmと比較的厚いものであり、外径に対して覆工の厚さが薄く、面外変形が生じやすいようなトンネル断面の場合には別途検討が必要である。

4. まとめ

シールドトンネルが曲げを受けた場合のトンネルの変形および破壊特性を検討することを目的として、リングを組んだシールドトンネル模型を用いて交番曲げ載荷実験を行った。その結果、供試体の破壊は二次覆工の有無に係わらずリング接合面において生じたが、二次覆工のない供試体では特定のリング接合面に損傷が集中するのに対して、二次覆工のある供試体では損傷はいずれのリング接合面においてほぼ同程度に分散して生じること等がわかった。

〈参考文献〉 1)川島、杉田、加納：リング組みシールドトンネルの交番載荷実験——二次覆工の無い場合——および——二次覆工のある場合——、土木学会第43回年次学術講演回講演概要集第I部門、昭和63年10月。 2)川島、大日方、加納、志波：交番載荷実験に基づくRCシールドセグメントの力学特性、第19回地震工学研究発表会講演概要、昭和62年7月。

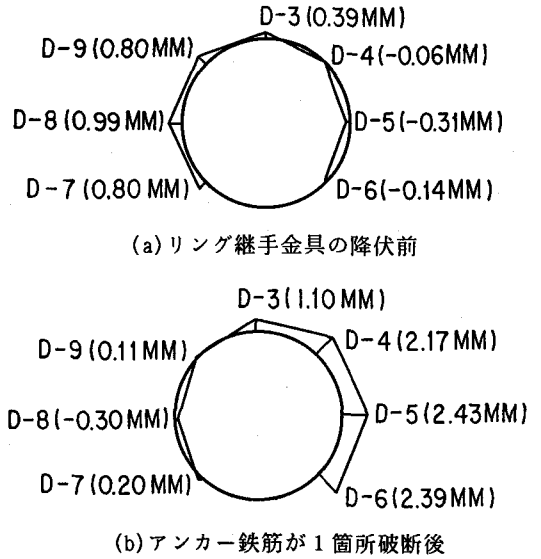


図-7 リング継手位置の相対変位の分布 (Dタイプ供試体、JT2)

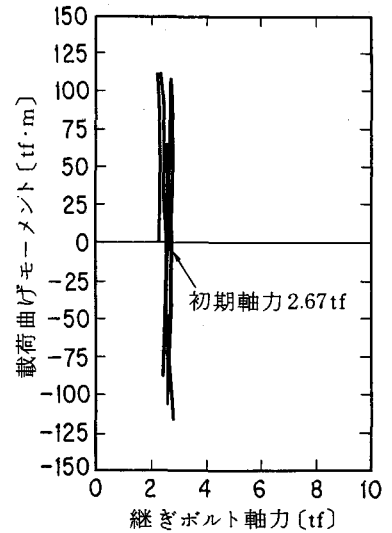


図-8 セグメント継ぎボルトの載荷履歴の一例 (Eタイプ供試体)