

(138) リング組みシールドトンネルの交番ねじり載荷実験

建設省土木研究所	正会員	川島 一彦
○	〃	正会員 杉田 秀樹
	〃	正会員 加納 尚史

1. まえがき

著者らはこれまでに、シールドトンネルが長手方向力を受ける場合の耐震性について実験的検討を行っている¹⁾²⁾。しかし、シールドトンネルが地震により動的に交番するねじり力を受ける場合の変形特性、および、破壊特性について検討された例は少ない。このため、リングを組んだトンネル模型供試体の動的交番ねじり載荷実験を実施したので、その結果を報告する。

2. 実験供試体

載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（シールド工事用標準セグメント（土木学会、下水道協会共編、1982年改訂）に従って製作したものである。図1に示すように、厚さ125mm、長さ900mmのRCセグメント4個をリング状に組み、これをリング継手により長手方向に4リング分だけ連結した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て一体構造としたEタイプ供試体の2種類を各1体ずつ計2体作成した。二次覆工の円周方向にはリング筋としてD13を12本、長手方向には供試体の全長にわたってD13を16本配筋した。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300mm）によってセグメントに定着されている。

3. 載荷方法

図3に示すように、縦にした供試体の両端をそれぞれ反力床、および、載荷板に固定し、載荷板の両端に接続した2台の動的アクチュエーターを逆位相で操作することにより、供試体に純粋なねじりモーメントを載荷した。

4. 実験結果

(1)破壊特性

Dタイプ供試体、および、Eタイプ供試体の最終的な破壊性状を示すと図4の通りである。なお、Eタイプ供試体では載荷装置の制約から、アンカー鉄筋や二次覆工鉄筋の破断が始まる前に載荷を終了している。

Dタイプ供試体では、リング継手、および、リング継ボルトが破断したことによって破壊に至った。また、Eタイプ供試体では、セグメント、および、二次覆工の両方に亀甲状のクラックが発生し、最終的には継手部のコンクリートが剝落して、内部の鉄筋が露出した。以上の結果は、これまでに同じ供試体を用いて行った交番軸力載荷実験において、損傷がリング接合面のみに生じ、これ以外の箇所には何等生じなかったのと大きく異なるものである。

(2)損傷の進展順序

Dタイプ供試体、および、Eタイプ供試体の円周方向変位と、載荷ねじりモーメントとの履歴を示すと図5の通りである。供試体のリング接合面を反力床に近い方からJT1、JT2、JT3とすると、Dタイプ供試体の損傷はねじりモーメントの増加にともない、次の順序で進展した。①リング接合面で滑りが発生（JT3, 2, 1の順）、②供試体外周面にクラックが発生（JT1, 2, 3）、③リング継手のアンカー鉄筋が破断（JT

2)、④リング継ボルトが破断(JT2)。

また、Eタイプ供試体の損傷は次の順序で進展した。①二次覆工に螺旋状のクラックが発生、②供試体の外周面にクラックが発生(JT1, 2, 3)、③セグメントに亀甲状のクラックが発生(JT1, 2, 3)、④セグメント、二次覆工ともにコンクリートの剝落が生じて内部の鉄筋が露出。ここに、リング接合面の滑り、二次覆工の螺旋状のクラック、および、セグメントに生じた亀甲状のクラックはこれまでにを行った軸力載荷実験では認められておらず、シールドトンネルがねじり力を受けて破壊する場合の特徴であると考えられる。

(3)セグメントの挙動特性

Dタイプ供試体、および、Eタイプ供試体で、同一セグメントの同一辺上にある2つのリング継手は異なった変形を生じた。図6に示すように、一方は、向かい合った金具面板がこすれあうように変形し、もう一方は金具面板がボルト位置で引張力を受けて”く”の字状(Eタイプ供試体の場合はボルト孔を中心とした円錐台状)に変形した。また、同一辺上にある2つのセグメント継手でもこれと全く同様の変形が認められた。これらの変形特性は、供試体を構成する個々のセグメントが、載荷にともない回転したことを示すものである。すなわち、ねじり力を受けるシールドトンネルでは、載荷力が小さいうちはリング接合面が滑ることによって、載荷力が大きくなってリング継ボルトがボルト孔にぶつかった後には、個々のセグメントが回転することによってねじり変位を吸収するものと考えられる。ただし、本実験では、供試体長手方向にはねじり載荷板の重量約5tfが作用しているだけであり、地震時にねじり力とともにさらに大きな長手方向力を受ける場合には、セグメントの回転が拘束されることも予想されるため、トンネル長手方向力の大きさがトンネルのねじり変形特性に及ぼす影響については別途検討が必要である。

(4)供試体の耐力、変形能

Dタイプ供試体、および、Eタイプ供試体の耐力、および、変形能を比較して示すと表1のようになる。これによれば、Eタイプ供試体の最大耐力は150.6tfで、Dタイプ供試体の最大耐力76.5tfの2倍に達している。しかし反面、Dタイプ供試体でセグメントにクラックが生じ始めたねじり変位36.9mmにおいては、Eタイプ供試体はセグメント、二次覆工コンクリートともに、すでに大きな損傷を生じている。以上の結果によれば、トンネル内に二次覆工を施した場合には、ねじり耐力は向上するものの、リング接合面での滑りやセグメントの挙動が二次覆工によって拘束されるために、ねじり変形能は著しく低下するものと考えられる。

5. まとめ

本実験から得られた結論をまとめると次のようになる。

- (1)トンネルの損傷は、二次覆工のある・なしに関わらず、リング継手、セグメント継手、セグメントコンクリートおよび二次覆工の各々で生じた。これは、これまで同じ供試体を用いて行った交番軸力載荷実験で、損傷がリング接合面においてのみ生じたのと大きく異なる。
- (2)二次覆工があるトンネルでは、二次覆工がないトンネルに比べて、ねじり耐力は大きく、ねじり変形能は小さい。これは、二次覆工がリング接合面の滑りやセグメントの回転を拘束することにより、トンネルがコンクリート円柱に近い構造となるためである。

6. 参考文献

- 1)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集、昭和62年7月
- 2)川島・杉田・加納:シールドトンネルの耐震性に関する研究(その5)、土木研究所資料第2649号、昭和63年7月

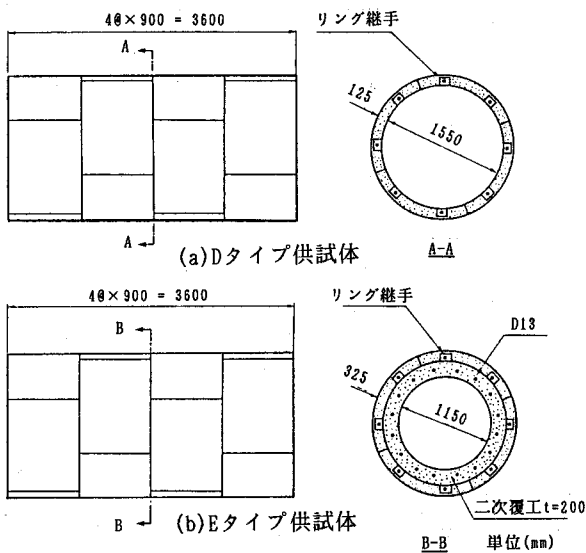


図1 実験供試体

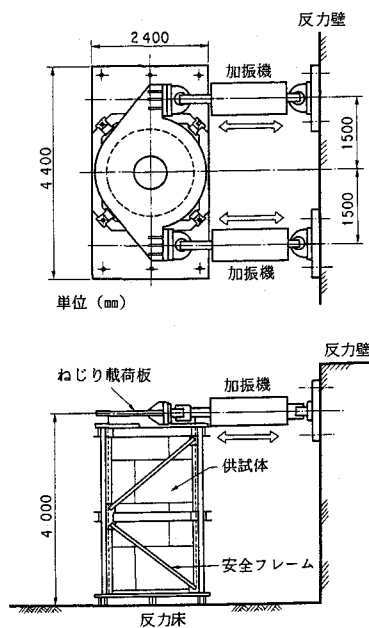


図3 載荷方法

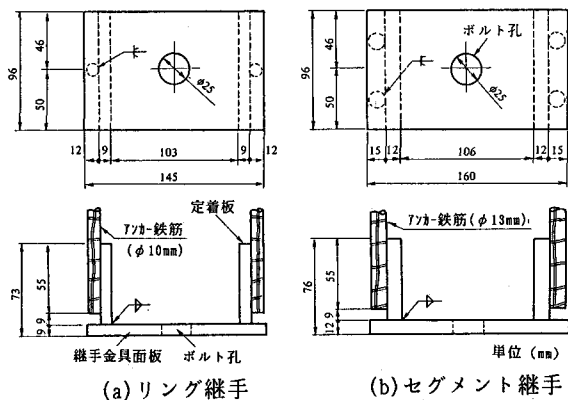


図2 継手の構造

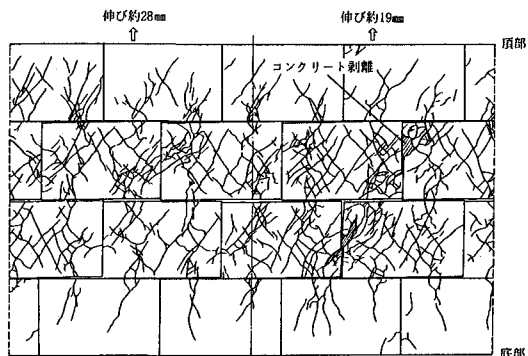
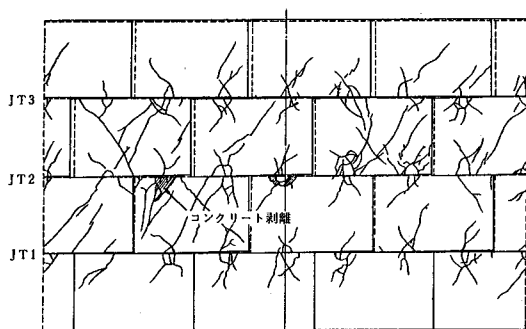
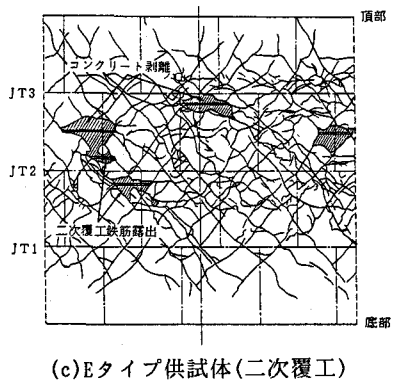
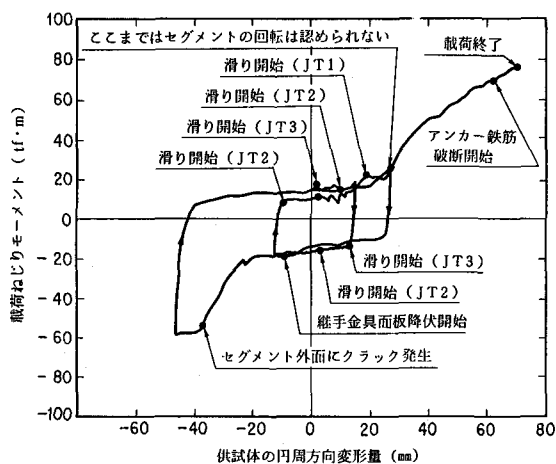
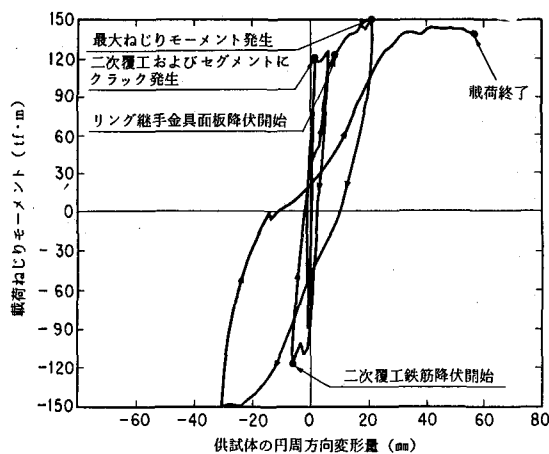


図4 供試体の破壊状況

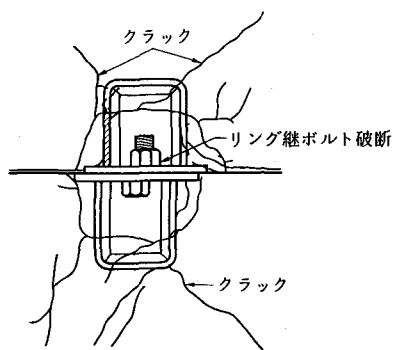


(a)Dタイプ供試体

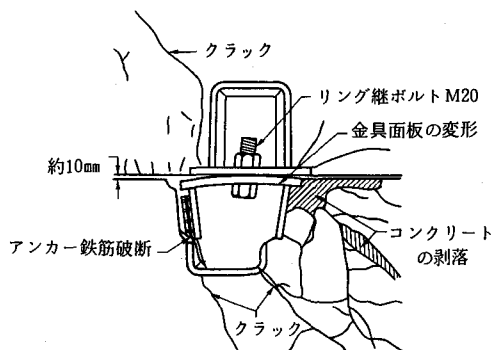


(b)Eタイプ供試体

図5 載荷履歴曲線



(a)Dタイプ供試体



(b)Eタイプ供試体

図6 継手の変形状況

表1 供試体の耐力・変形能

	Dタイプ供試体		Eタイプ供試体	
	円周方向変形量 (mm)	ねじりモーメント (tf)	円周方向変形量 (mm)	ねじりモーメント (tf)
リング接合面で滑り発生	1.9	16.2	—	—
二次覆工に螺旋状のクラックが発生	—	—	2.9	116.8
供試体外周面にクラックが発生	36.9	52.5	2.9	116.8
供試体の内外でコンクリートの剥落が発生	—	—	38.6	140.5
リング継手のアンカー鉄筋が破断	60.8	69.0	—	—
リング継ボルトが破断	70.3	76.5	—	—
最大耐力	70.3	76.5	21.5	150.6