

# シールドトンネル模型のねじり変形と破壊特性に関する実験的研究

川島一彦\*・杉田秀樹\*\*・加納尚史\*\*\*

シールドトンネルは、地震時の地盤の変形に伴って様々な地震力を受ける。特に、立坑との取付部や曲線部では、ねじりモーメントの影響が大きくなることが予想される。本文は、シールドトンネルがねじりモーメントを受けて破壊に至るまでのメカニズムを、シールドトンネル模型の正負交番載荷実験により明らかにするものである。

**Key Words** : shield tunnel, seismic design, seismic deformation method, underground structures, torsional moment, failure mechanism

## 1. まえがき

近年、都市部では、大断面のシールドトンネルの建設事例が増えている。我が国においては、シールドトンネルの設計に際して地震の影響を十分に検討しておくことが必要とされる。しかしながら、現在までにシールドトンネルが大規模な地震を経験した事例はなく、地震の影響に関する経験的な知見が十分でないこと等から、シールドトンネルの合理的な耐震設計法はまだ十分に整備されていないのが実状である。

シールドトンネルは、地震時に地盤の変形に伴って様々な強制変位を受ける。トンネル長手方向の変形に寄与する地震力としては軸力が最も重要<sup>1),2)</sup>であるが、曲げモーメント<sup>3)</sup>やねじりモーメントの影響もある。特に、ねじりモーメントについては、1985年のメキシコ地震で下水道シールドトンネルが立坑との取付部で被災した事例<sup>4)</sup>があり、立坑や異種構造物との取付部において影響が大きくなることが予想される。このため、シールドトンネルの耐震性を検討するためには、軸力や曲げモーメントの影響と同時に、ねじりモーメントによるトンネルの変形特性を十分に把握しておくことが重要となる。

シールドトンネルのねじり変形に関する研究は、これまでほとんど行われていない。メキシコ地震では、トンネルと立坑との相対的なずれに伴ってリング継ぎボルトが破断したが、どの程度のねじりモーメントが生じたのか、また、リング継ぎボルトが破断するまでにどの程度のねじり変形を吸収できたのか等は明らかでない。また、被災したシールドトンネルは二次覆工を持たないため、

二次覆工を有する場合にどのような変形特性を示すのかも明らかでない。このため、シールドトンネルを適切に解析モデル化するためには、セグメント、継手、二次覆工が複雑に組み合わされたトンネル覆工のねじり変形と破壊のメカニズムを明らかにしなければならない。

本報告は、上記の観点から、地震時にねじりモーメントを受けた場合にシールドトンネルが破壊に至るまでのメカニズムを実証的に明らかにし、シールドトンネルのねじり剛性の合理的な評価方法を開発することを目的として、シールドトンネル模型の正負交番載荷実験を実施した結果を報告するものである。

## 2. 実験供試体及び載荷方法

### (1) 実験供試体

実験に用いた供試体は、Fig.1に示すように、厚さ125 mm、幅900 mmのRC平板型セグメント4個をリング状に組み、これを4リング分だけ長手方向に連結したDタイプ供試体と、この内側に厚さ200 mmの二次覆工コンクリートを打設して、ジベル筋(D10、セグメント1個あたり12本)により一次覆工と一体になるようにしたEタイプ供試体の2種類である。これらはいずれも外径1.8 mの下水道用標準セグメント<sup>5)</sup>に従って製作したものである。

二次覆工の円周方向にはリング筋としてD13を12本(4リング分、鉄筋比0.22%)、長手方向には供試体の全長にわたってD13を16本(鉄筋比0.32%)を配置した。

リング継手及びセグメント継手の構造としてはFig.2に示す構造を用いた。ともに、面板に溶接されたD10及びD13のアンカー鉄筋(長さ300 mm)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、降伏強度の80%である4.7 tf(46.1 kN)を目標に締め付けた。

\* 正会員 工博 建設省土木研究所企画部地下開発研究官  
(〒305 つくば市大字旭1番地)

\*\* 正会員 建設省土木研究所企画部建設専門官

\*\*\* 正会員 建設省東北地方建設局酒田工事事務所鶴岡国道維持出張所

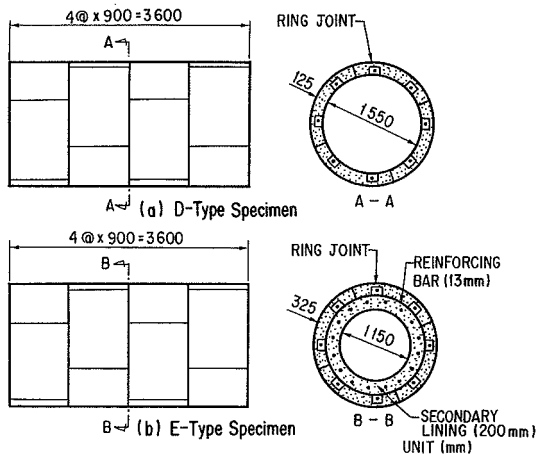


Fig.1 Specimens Adopted for Loading Tests

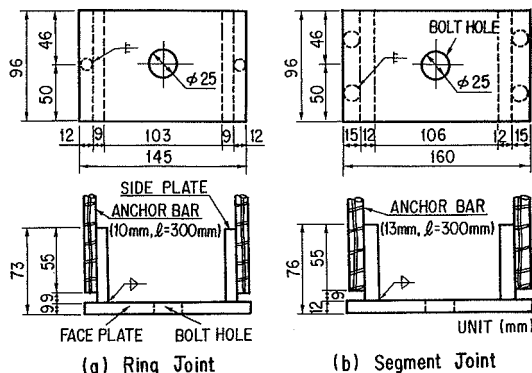


Fig.2 Ring Joint and Segment Joint

Table 1 Average Strength (kgf/cm<sup>2</sup>) of Concrete

SPECIMEN	FOR COMPRESSION	FOR TENSION
D-TYPE (SEGMENT)	580.9 (57.0MPa)	46.9 (4.6MPa)
E-TYPE	SEGMENT	49.6 (4.9MPa)
	SECONDARY LINING	26.2 (2.6MPa)

Table 2 Average Strength (kgf/cm<sup>2</sup>) of Reinforcing Bar

DIAMETER	YIELDING	RUPTURE
10mm	3916 (384.0MPa)	5487 (538.1MPa)
13mm	3552 (348.3MPa)	5625 (551.6MPa)

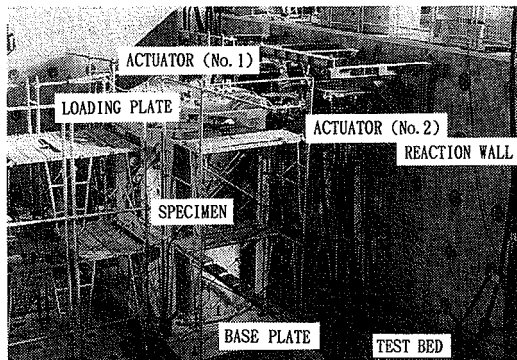


Photo 1 Experimental Set-up

コンクリートの強度を示すと **Table 1** の通りである。すなわち、D タイプ供試体におけるセグメントコンクリートの平均強度は引張、圧縮に対してそれぞれ 46.9 kgf/cm<sup>2</sup> (4.6 MPa), 580.9 kgf/cm<sup>2</sup> (57.0 MPa), また E タイプ供試体におけるセグメントコンクリート及び二次覆工コンクリートの平均強度は引張、圧縮に対してそれぞれ 49.6 kgf/cm<sup>2</sup> (4.9 MPa), 610.8 kgf/cm<sup>2</sup> (59.9 MPa), 及び 26.2 kgf/cm<sup>2</sup> (2.6 MPa), 289.3 kgf/cm<sup>2</sup> (28.4 MPa) である。鉄筋の平均降伏強度は **Table 2** に示すように D 10, D 13 に対してそれぞれ 3916 kgf/cm<sup>2</sup> (384.0 MPa), 3552 kgf/cm<sup>2</sup> (348.3 MPa) である。また、平均破断強度は D 10, D 13 に対してそれぞれ 5487 kgf/cm<sup>2</sup> (538.1 MPa), 5625 kgf/cm<sup>2</sup> (551.6 MPa) である。

(2) 載荷方法

**Photo 1** は載荷方法を示したものである。供試体は架台を介して、一端を反力床に、他端を載荷板に固定した。二次覆工がある E タイプ供試体では、一次覆工と二次覆工の両方を架台及び載荷板に固定し、供試体長手方向に

同一の変形を与えることとした。これは、本供試体のように、覆工間をジベル筋で連結しているシールドトンネルでは、一次覆工と二次覆工はトンネル長手方向に一体として変形すると考えられるためである。

載荷板の両端にはそれぞれ動的加振機を取り付け、2 台の動的加振機をデジタル制御で操作することにより、鉛直軸まわりのねじりモーメントを **Fig. 3** に示すパターンで供試体に作用させた。ねじりモーメントの載荷に際しては、2 台の動的加振機の載荷軸力が、符号が逆で、同一の絶対値となるように調整し、純粋なねじりモーメントのみを載荷するように留意した。ねじりモーメントの正負については、供試体の上方から見て左回りの場合を正のねじりモーメントとし、逆に右回りの場合を負のねじりモーメントと定義した。本文で用いる載荷ループの定義は **Fig. 3** に示す通りであり、ねじりモーメントを 0 から増加させ、再び 0 にもどすまでを 1 ループとしている。

本供試体にはリング接合面 (セグメントリングどうしがリング継手によって接合されている面。これに対して、

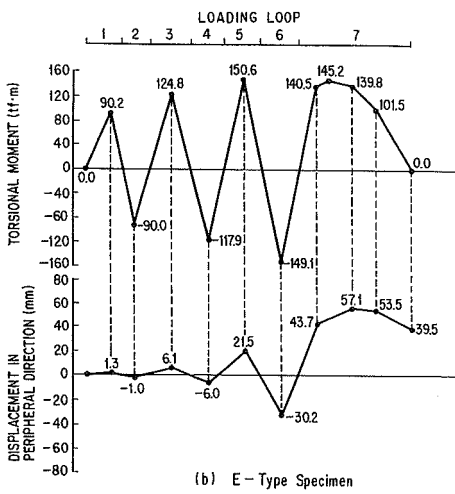
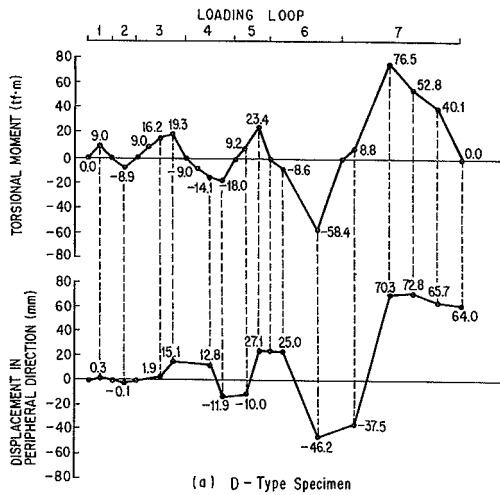


Fig.3 Loading Hysteresis Loop

セグメントどうしがセグメント継手によって接合されている面をセグメント接合面と呼んで区別する)が3箇所あるが、これを反力床に近い方から、それぞれJT1, JT2, JT3と呼ぶこととする。

本実験ではねじりモーメントによる供試体の変形に着目しているが、供試体長手方向にも載荷板の重量約5tf(49.0kN)が軸力として作用している。この軸力によってセグメントに発生する軸応力度は、Dタイプ供試体及びEタイプ供試体に対して、それぞれ、許容応力度の約0.7%及び約0.3%に相当する。

### 3. Dタイプ供試体の変形及び破壊特性

#### (1) 供試体の変形及び破壊状況

Dタイプ供試体の最終的な破壊状況をFig.4に示す。二次覆工のないDタイプ供試体では、リング継手及びセグメント継手を中心としてセグメントの内外面に斜め引張クラックが生じ、最終的にリング継ぎボルト及びリ

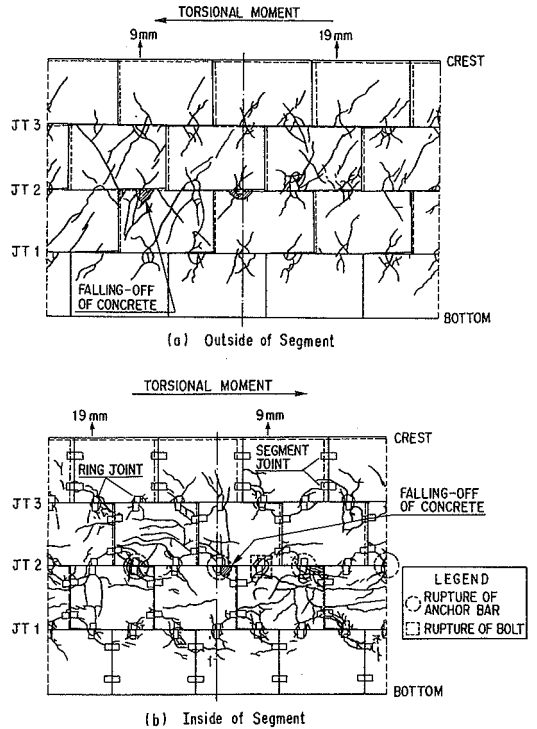


Fig.4 Failure Mode of D-type Specimen

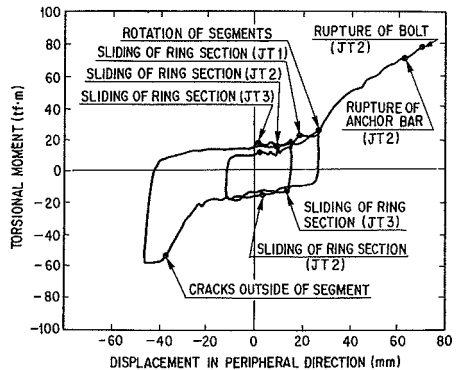


Fig.5 Loading Hysteresis of D-type Specimen

ング継手のアンカー鉄筋が破断することにより破壊に至った。

供試体天端位置における供試体の円周方向変形量と載荷ねじりモーメントの履歴を示すとFig.5の通りである。これによれば、供試体の損傷は概ね次の順番で生じる。

①載荷ねじりモーメントが16.2tf·m(158.9kN·m)、円周方向変形量が1.9mmに達した段階(3ループめ)で、リング接合面JT3でセグメントリング間の滑りが生じた。さらに円周方向変形量が8.9mmに達した段階で、リング接合面JT2でも滑りが生じた。この後、ねじりモーメントを増加しなくてもリング接合面JT2及

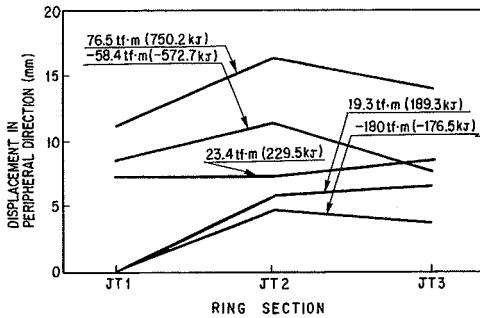


Fig. 6 Displacement in Peripheral Direction Developed at Ring Section (D-type Specimen)

びJT3が滑り続けたが、円周方向変形量が15.1 mmに達すると、ねじりモーメントを19.3 tf·m (189.3 kN·m)まで増加しても滑らなくなった。

② 载荷ねじりモーメントが-14.1 tf·m (-138.3 kN·m)、円周方向変形量が12.8 mmに達した段階(4ループめ)で、リング接合面JT3で滑りが生じた。さらに円周方向変形量が2.4 mmに達した段階で、リング接合面JT2でも滑りが生じた。この後、リング接合面JT2及びJT3が滑り続けたが、円周方向変形量が-11.9 mmになるとねじりモーメントを-18.0 tf·m (-176.5 kN·m)まで増加させても滑らなくなった。

③ 载荷ねじりモーメントが23.0 tf·m (225.6 kN·m)、円周方向変形量が18.4 mmに達した段階(5ループめ)で、リング接合面JT1でも滑りが生じた。ねじりモーメントを増加させると、リング接合面JT2で、リング継手から隣接するセグメント継手に向かう斜め引張クラックが生じた。

④ 载荷ねじりモーメントが-52.5 tf·m (-514.8 kN·m)、円周方向変形量が-36.8 mmに達した段階(6ループめ)で、リング接合面JT2のリング継手位置でセグメントの外周面にクラックが生じた。さらにねじりモーメントを増加させると、リング接合面JT1及びJT3でも、セグメント内面及び外周面のクラックが発生した。

⑤ 载荷ねじりモーメントが69.0 tf·m (676.7 kN·m)、円周方向変形量が61.0 mmに達した段階(7ループめ)で、リング接合面JT2において4箇所のリング継手のアンカー鉄筋が相次いで破断した。さらに、载荷ねじりモーメントが64.6 tf·m (633.5 kN·m)、円周方向変形量が71.5 mmに達した段階で、リング接合面JT2におけるリング継ぎボルトが1箇所破断した。

Fig. 5の横軸は、供試体全長を通じて生じた円周方向変形量であるが、3箇所のリング接合面ごとにどのような円周方向の変形が生じたかを示すとFig. 6の通りである。これによれば、3箇所全てのリング接合面でセグメントリング間の滑りが生じた5ループめ(载荷ねじり

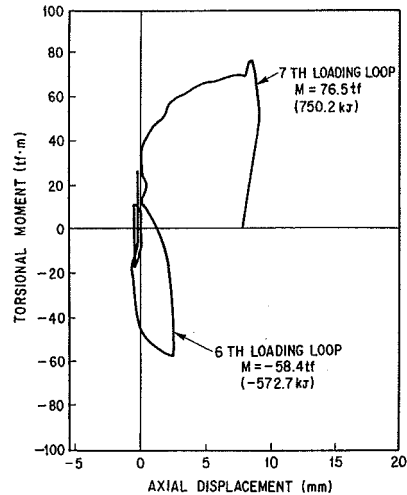


Fig. 7 Hysteresis Loop of Axial Displacement (D-type Specimen)

モーメント  $M=23.4 \text{ tf}\cdot\text{m}$  (229.5 kN·m)までは3箇所ともほぼ同じ変形が生じるが、上記④(6ループめ、 $M=-52.5 \text{ tf}\cdot\text{m}$  (-514.8 kN·m))以降になると、最初にセグメントの外面にクラックを生じたリング接合面JT2で変形量の増加が大きくなる。

また、ねじりモーメントの载荷に伴う供試体長手方向の変形量を示すとFig. 7の通りである。これによれば、供試体長手方向変形量は、リング接合面に滑りが生じた5ループめまではほとんど生じておらず、セグメントの内外面でクラックが生じた6ループめ以降で、急激に増加することがわかる。

以上の結果から、供試体の破壊に関して以下の点が指摘される。

1) 供試体に加えられたねじり変形は、まずリング接合面でセグメントリング間が滑ることにより吸収される。さらに変形が大きくなってリング接合面の滑りだけで吸収できなくなると、セグメントに斜め引張クラックが生じる。これは、個々のセグメントが面内方向に回転しようとしたことを示すものである。すなわち、セグメントはリング継手及びセグメント継手により回転を拘束されているため、せん断変形を強制され、斜め引張クラックが生じることになる。

2) リング継手の破壊は、最初にセグメントの内外面にクラックを生じたリング接合面JT2に集中して発生した。他のリング接合面では、リング継手の周辺でセグメントの内外面にクラックが発生しただけに留まった。このように、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で耐力が減少する程度の損傷が生じると、これを上回る载荷力を受けた場合に、そのリング接合面においてのみ損傷が集中する。このような損傷特性は、正負交番の軸力及び曲げモーメントを受ける

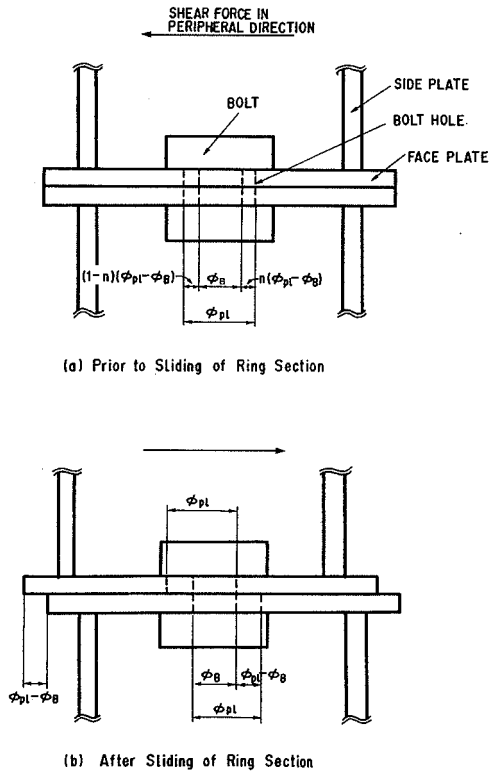


Fig.8 Sliding Developed at Ring Section

シールドトンネルの損傷特性<sup>1)~3)</sup>と一致する。

3) 1 箇所のリング接合面が滑ることにより吸収できる円周方向の変形量  $\delta_{JT}$  は、Fig.8 に示すように、次式で算出することができる。

$$\delta_{JT} = \phi_{p1} - \phi_B \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $\phi_{p1}$  はリング継手金具面板に開けられたボルト孔の直径、 $\phi_B$  はリング継ぎボルトの軸部の直径である。本供試体では、1 箇所のリング接合面が滑ることにより吸収した円周方向変形量は平均約 9 mm であり、式 (1) により計算される  $\delta_{JT} = 7.7$  mm に比べてわずかに大きい。これは、3 箇所のリング接合面で順番に滑りが生じる段階で、継手金具面板のボルト孔に継ぎボルトがわずかにくい込んだためである。

4) リング接合面の滑り摩擦係数  $\mu_{JT}$  は、次式で算出できる。

$$\mu_{JT} = \frac{M_{JT}}{r_B(W + W_0)} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $M_{JT}$  は当該リング接合面で滑りが生じた時の荷重ねじりモーメント、 $r_B$  はボルトサークル半径、 $W$  は当該リング接合面より上部の供試体の重量、 $W_0$  は当該リング接合面に位置するリング継ぎボルトの初期軸力の合計、である。式 (2) により、リング接合面 JT 1, JT 2 及び JT 3 における摩擦係数を算出すると、そ

Table 3 Deformation and Strength of Specimens

(a) D-Type Specimen

PROGRESS OF FAILURE	RING SECTION	TORSIONAL MOMENT (tf-m)	DISPLACEMENT IN PERIPHERAL DIRECTION (mm)	DISPLACEMENT DEVELOPED AT RING SECTION (mm)		
				JT1	JT2	JT3
SLIDING AT RING SECTIONS	JT3	16.2 (158.9kJ)	0.3	0.1	0.0	0.0
	JT2	16.2 (158.9kJ)	8.9	0.3	0.8	6.2
	JT1	23.0 (225.6kJ)	18.4	0.9	7.0	8.7
CRACKS OUTSIDE OF SEGMENT	JT2	-52.5 (-514.8kJ)	-36.9	-9.0	-10.7	-5.6
RUPTURE OF ANCHOR BARS	JT2	69.0 (676.7kJ)	60.8	10.0	16.2	11.9
MAXIMUM TORSIONAL MOMENT	.....	76.5 (750.2kJ)	70.3	11.3	20.1	11.9
FINAL FAILURE	.....	64.6 (633.5kJ)	71.5	11.5	20.3	14.4

(b) E-Type Specimen

PROGRESS OF FAILURE	RING SECTION	TORSIONAL MOMENT (tf-m)	DISPLACEMENT IN PERIPHERAL DIRECTION (mm)	DISPLACEMENT DEVELOPED AT RING SECTION (mm)		
				JT1	JT2	JT3
CRACKS AT SEGMENT AND SECOND LINING	.....	116.8 (1145.4kJ)	2.9	0.4	0.3	0.6
SEPARATION OF SEGMENTS	JT2	128.0 (1255.3kJ)	9.8	1.8	1.4	2.1
MAXIMUM TORSIONAL MOMENT	.....	150.6 (1476.9kJ)	21.5	3.2	3.7	4.3
FINAL FAILURE	.....	140.5 (1377.8kJ)	38.6	4.6	9.0	9.5

れぞれ 0.67, 0.51 及び 0.65 となり、平均的に見ると 0.6 程度の値である。

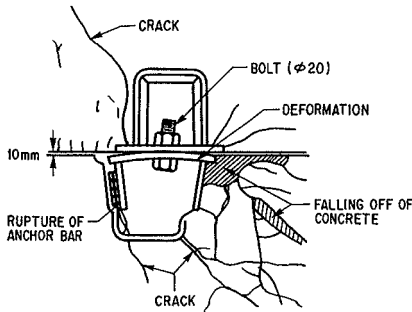
5) 1) に示した理由により、供試体の損傷はリング継手の周辺に留まらず、セグメント本体及びセグメント継手にも生じた。これは、正負交番の軸力あるいは曲げモーメントを受けるシールドトンネルの損傷が、リング接合面においてのみ生じる<sup>2),3)</sup>のと大きく異なる。セグメントの斜め引張クラックを防ぐためには、リング接合面の滑り変形性能を高めることにより、セグメントの回転変形の発生を遅らせることが有効である。

D タイプ供試体の変形性能及び耐力をまとめると Table 3 の通りである。なお、ここには後述する E タイプ供試体の結果も併せて示している。

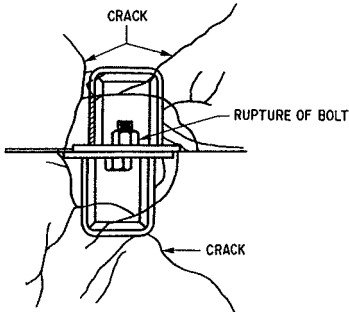
(2) リング継手の変形特性

アンカー鉄筋及び継ぎボルトの破断が生じたリング接合面 JT.2 について、リング継手の損傷状況を示すと Fig.9 の通りである。これによれば、以下の点が指摘される。

1) 継手の変形状況は 2 つのタイプに分類される。1 つめは、Fig.9 (a) に示すように、向かい合った継手金具がせん断変形と引張変形を同時に生じるタイプである。このタイプでは継手金具面板が“く”の字状に変形している。2 つめは、Fig.9 (b) に示すように、向かい合った継手金具がせん断変形だけを生じているタイプである。アンカー鉄筋の破断は全て 1 つめのタイプの継手で、また、継ぎボルトの破断は 2 つめのタイプの継手



(a) Ring Joint Subjected to Shear Force and Axial Force



(b) Ring Joint Subjected to Shear Force

Fig.9 Failure Mode of Ring Joint (D-type Specimen)

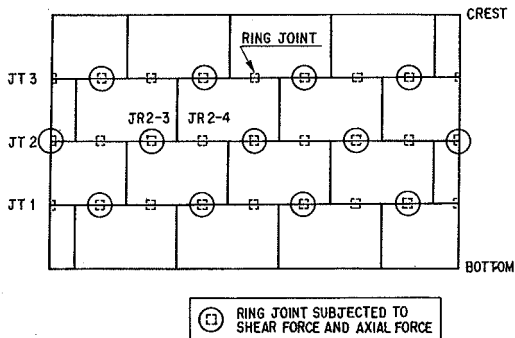
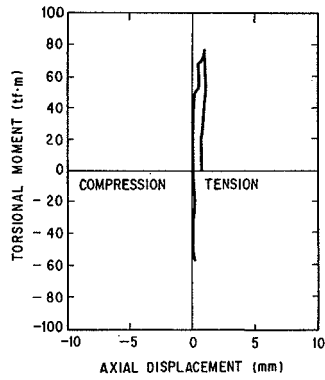


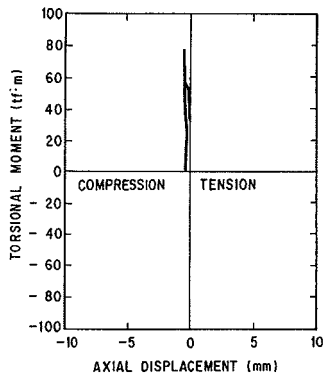
Fig.10 Locations of Ring Joints Subjected to Shear Force and Axial Force

で、それぞれ生じる。

2) 2つのタイプの変形を生じたリング継手は、Fig.10に示すように、同一のリング接合面内では交互に現われる。これは、セグメントの回転変形によるものである。セグメントが回転する方向はねじりモーメントの載荷方向に応じて変化するが、セグメントの同一辺上にある2つのリング継手のうち、向かい合うセグメントに押しつけられる継手にはせん断変形が、また、向かい合うセグメントから離される継手にはせん断変形と引張変形が同時に生じることになる。



(a) Segment Joint subjected to Tension Force



(b) Segment Joint subjected to Compression Force

Fig.11 Axial Displacement Developed at Segment Joint

3) アンカー鉄筋は定着板の端部位置で破断している。これは、継手金具面板が“く”の字状に変形し、定着板がボルトボックス内に折曲げられた結果、アンカー鉄筋には引張力と曲げモーメントが同時に作用したためである。このような継手の破壊特性は、正負交番の軸力及び曲げモーメントを受けるシールドトンネルの損傷特性と一致する<sup>21,3)</sup>。したがって、ねじりモーメントを受ける場合でも、継手金具面板の変形を抑えることが、アンカー鉄筋の破断を遅らせ、トンネルの耐力を向上する上で有効である。

### (3) セグメント継手の変形特性

セグメントの同一辺上に位置する2箇所のセグメント継手に着目して、継手の目開き量と載荷ねじりモーメントの履歴を示すと Fig.11の通りである。これによれば、正のねじりモーメントを載荷した場合に、一方は目開きを生じ、もう一方は向かい合うセグメントに押しつけられる等、セグメントの回転変形の影響が認められる。ただし、セグメント継手ではアンカー鉄筋の本数が4本であること、また、継手金具面板が厚いこと等により、リング継手に比べると目開き量は小さい。

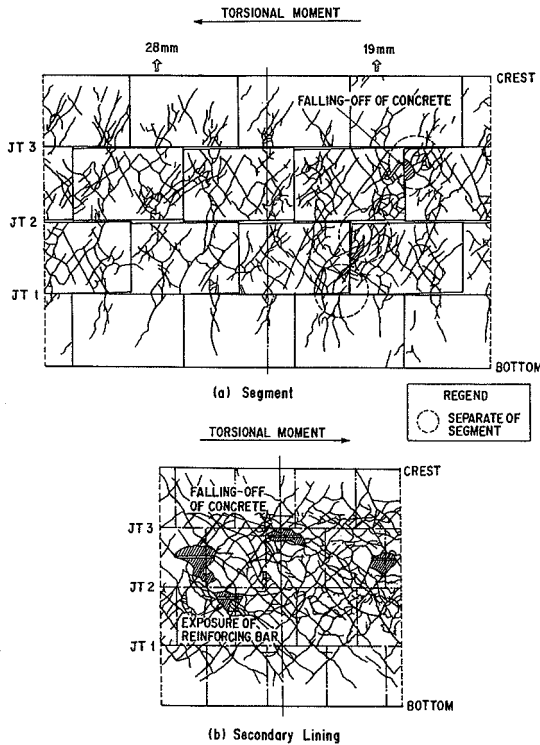


Fig.12 Failure Mode of E-type Specimen

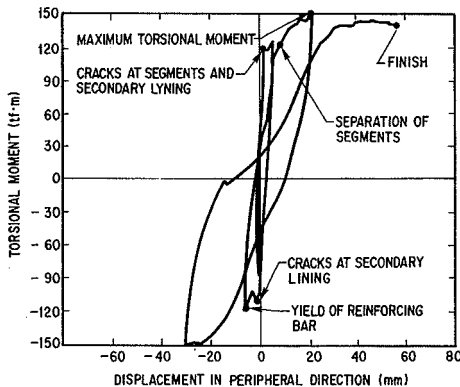


Fig.13 Loading Hysteresis of E-type Specimen

#### 4. Eタイプ供試体の変形及び破壊特性

##### (1) 供試体の変形及び破壊状況

Eタイプ供試体の最終的な破壊状況を示すとFig.12の通りである。二次覆工を有するEタイプ供試体では、セグメント及び二次覆工の両方に、無数の斜め引張クラックが交差するように生じた。特に二次覆工の損傷は著しく、コンクリートが剥落して内部の二次覆工鉄筋が露出した。なお、本供試体では、損傷の進展に伴って供試体の自立性が失われる恐れが生じたため、継手の破壊や二次覆工鉄筋の破断が生じる前に载荷を終了した。

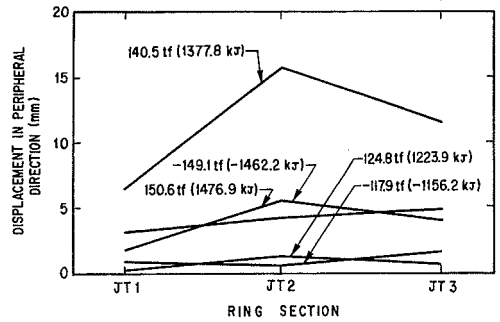


Fig.14 Displacement in Peripheral Direction Developed at Ring Section (E-type Specimen)

供試体天端位置における供試体の円周方向変形量と載荷ねじりモーメントの履歴を示すとFig.13の通りである。これによれば、供試体の損傷は、以下の順番で生じた。

① 載荷ねじりモーメントが116.8 tf·m (1145.4 kN·m)、円周方向変形量が2.9 mmに達した段階(3ループめ)で、2~3リングに跨る二次覆工の斜め引張クラックが生じた。セグメントには、リング継手の定着板の端部からリング接合面に向かうクラックが生じた。

② 載荷ねじりモーメントが-105.2 tf·m (-1031.7 kN·m)、円周方向変形量が-2.8 mmに達した段階(4ループめ)で、①で生じたのと交差する斜め引張クラックが二次覆工に生じた。この段階までに、全てのリング継手で定着板の端部からリング接合面に向かうクラックが生じた。

③ 5ループめの载荷に伴い、各々のセグメントの中央部で亀甲状のクラックが生じた。載荷ねじりモーメントが128.0 tf·m (1255.3 kN·m)、円周方向変形量が9.8 mmとなった段階で、亀甲状のクラックがリング接合面とセグメント接合面に達し、リング接合面JT2に接する箇所ではセグメントの分断が生じた。さらに荷重を増加すると、それぞれリング接合面JT1及びJT3に接する箇所でもセグメントの分断が生じた。

④ 載荷ねじりモーメントが140.5 tf·m (1377.8 kN·m)、円周方向変形量が38.6 mmに達した段階(7ループめ)で、二次覆工コンクリートが剥落して二次覆工鉄筋が露出した。セグメントでも、コンクリートが剥落してセグメント継手のアンカー鉄筋が露出した。

供試体円周方向の変形が、3箇所リング接合面ごとにどのように分布しているかを示すとFig.14の通りである。これによれば、4ループめ(載荷ねじりモーメント  $M = -117.9 \text{ tf}\cdot\text{m} (-1156.2 \text{ kN}\cdot\text{m})$ )までは、円周方向の変形はJT1, JT2, JT3の間で同程度であるが、これ以降の载荷になると最初にセグメントの分断が生じたリング接合面JT2で増加することがわかる。

ねじりモーメントの载荷に伴う供試体長手方向の変形

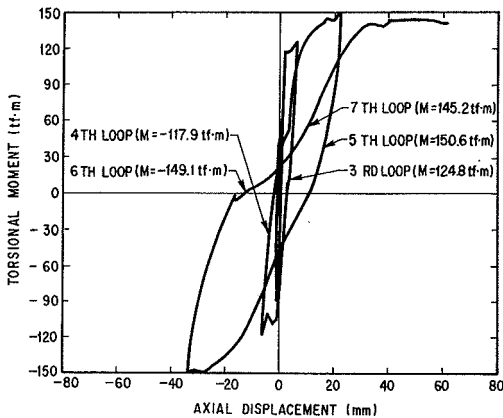


Fig.15 Hysteresis Loop of Axial Displacement (E-type Specimen)

量を示すと Fig.15 の通りである。これによれば、供試体長手方向の変形はすでに载荷の初期段階から生じており、D タイプ供試体ではリング接合面に滑りが生じている間は供試体長手方向変形が全く生じなかったのと大きく異なる。

以上が E タイプ供試体の破壊の進展状況である。これを D タイプ供試体と比較すると、以下の点が指摘される。

1) 二次覆工が打設され、一次覆工と二次覆工がジベル筋で連結されるシールドトンネルでは、一次覆工のみのシールドトンネルのようにリング接合面の滑りは生じない。これは、ジベル筋により、セグメントと二次覆工の変形が互いに拘束されるためである。

2) 供試体の最終的な破壊は、リング継手の破壊や二次覆工鉄筋の破断が生じる前に、セグメント及び二次覆工がせん断破壊することにより生じた。これは、D タイプ供試体において、損傷がリング接合面のみに集中し、セグメントにはほとんど損傷が生じなかったのと大きく異なる。軸力及び曲げモーメントを受けるシールドトンネルやねじりモーメントを受ける一次覆工のみのシールドトンネルでは、リング継手の耐震性を向上することが重要であるが、二次覆工を有するシールドトンネルがねじりモーメントを受ける場合には、セグメント及び二次覆工のせん断耐力を向上することが重要となる。

3) セグメントの分断が生じるまでは、载荷に伴うリング接合面の円周方向変形量は、3箇所のリング接合面ではほぼ均等である。これは、D タイプ供試体において、ある一つのリング接合面でセグメントの外面にクラックが生じた途端に、このリング接合面に損傷が集中したのと大きく異なる。

4) E タイプ供試体の耐力及び変形性能は Table 3 に示した通りである。D タイプ供試体と E タイプ供試体では破壊特性が大きく異なるため、同一の損傷状態に達

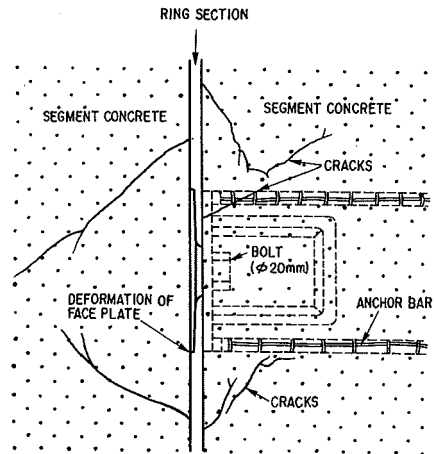


Fig.16 Failure Mode of Ring Joint (E-type Specimen)

する時の供試体の耐力及び変形性能を比較することは難しい。しかし、D タイプ供試体でセグメントの外面にクラックが生じ始めた時の円周方向変形量に着目すると、E タイプ供試体ではすでに、セグメントの分断や二次覆工の斜め引張クラックが著しく進展している。これは、一次覆工のみのシールドトンネルの方が、二次覆工を有するシールドトンネルに比べて、大きなねじり変形性能を有することを示すものである。これは、軸力や曲げモーメントを受けるシールドトンネルで、二次覆工を有する場合の方が一次覆工だけの場合に比べて大きな変形性能を有するのと大きく異なる。

## (2) リング継手の変形特性

E タイプ供試体では二次覆工があるため、継手の変形状況を明らかにすることができない。比較的大きな目開きを生じたリング接合面 JT2 について、リング継手の変形状況をセグメントの外側から観察すると Fig.16 の通りである。これによれば、継手金具面板の変形がボルトボックス内のコンクリートにより拘束される結果、ボルト位置を中心とする円錐台状に変形している。D タイプ供試体のアンカー鉄筋は、定着板がボルトボックス内に折曲げられた結果、引張力に加えて曲げを受けて破断していることを考えれば、たとえ二次覆工を設けない場合でも、ボルトボックス内にコンクリートを充填することが、アンカー鉄筋の破断を遅らせ、トンネルの変形性能を向上する上で有効である。

## 5. 結 論

ねじりモーメントを受けるシールドトンネルの覆工剛性及び変形特性を把握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正負交番のねじり载荷実験を行った。本実験により得られた結果をまとめると、以下の通りである。



(1) 一次覆工のみのDタイプ供試体では、供試体に加えられたねじり変形は、まずリング接合面でセグメントリングどうしが滑ることにより吸収される。さらに変形が大きくなってリング接合面の滑りだけで吸収できなくなると、セグメントが回転変形する。

(2) Dタイプ供試体の最終的な破壊はリング接合面に生じ、セグメントにはリング継手の周辺でクラックが発生するに留まった。このような損傷特性は、軸力及び曲げモーメントを受けるシールドトンネルの損傷特性と一致する。一次覆工のみのシールドトンネルでは、リング接合面の滑り変形性能を高めることが、セグメントの回転変形を遅らせ、トンネルの変形性能を高めるために重要である。

(3) 一次覆工だけのシールドトンネルでは、1箇所リング接合面に耐力が減少する程度の損傷が生じると、それ以上の載荷力を受けた場合には、このリング接合面のみ損傷が集中しやすい。

(4) 二次覆工が打設され、一次覆工と二次覆工がジベル筋で連結されたEタイプ供試体では、ねじり変形を受けてもリング接合面の滑りは生じない。これは、ジベル筋により、一次覆工と二次覆工の変形が相互に拘束されるためである。

(5) Eタイプ供試体では、リング継手や二次覆工鉄筋の破断より先に、セグメント及び二次覆工がせん断破壊することにより最終状況に至った。したがって、二

次覆工を有するシールドトンネルがねじりモーメントを受ける場合には、セグメント及び二次覆工のせん断耐力を向上することが、耐震設計上重要となる。

(6) 一次覆工と二次覆工をジベル筋で連結したシールドトンネルのねじり変形性能は、一次覆工と二次覆工が相互に変形を拘束する結果、一次覆工のみのシールドトンネルに比べて小さくなる。これは、軸力や曲げを受けるシールドトンネルで、二次覆工を設ける方が一次覆工だけの場合に比べて変形性能が大きいのと大きく異なる。

#### 参考文献

- 1) 川島一彦・杉田秀樹・加納尚史・大日方尚巳・志波由紀夫：鉄筋コンクリート製シールドトンネルの耐震設計法に関する研究，土木研究所報告，第188号，1993.5.
- 2) 川島一彦・杉田秀樹・加納尚史：正負交番軸方向荷重を受けるシールドトンネル模型の変形及び破壊特性，土木学会論文集，No. 422/I-14，1990.
- 3) 川島一彦・杉田秀樹・加納尚史：正負交番曲げモーメントを受けるシールドトンネル模型の変形及び破壊特性，土木学会論文集，No. 483/I-26，1994.
- 4) 田村重四郎・伯野元彦・家村浩和・竹内幹雄：1985年メキシコ地震の震害，土木学会誌，Vol. 71，No. 5，pp. 79～85，1986.5.
- 5) 土木学会，日本下水道協会共編：シールド工用標準セグメント，1982年改訂

(1993.10.18 受付)

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON DEFORMATION AND FAILURE MECHANISM OF SHIELD TUNNELS SUBJECTED TO CYCLIC TORSIONAL MOMENT

Kazuhiko KAWASHIMA, Hideki SUGITA and Takashi KANOH

Torsional deformation of shield tunnels is important for seismic design when they are rigidly connected to other structures. Failure mechanism is important for estimating nonlinear hysteretic behavior of shield tunnels subjected to a significant earthquake. There are however few studies on the deformation and failure mechanism of shield tunnels subjected to alternative torsional deformation. A series of loading tests for two shield tunnel specimens subjected to alternative torsional moment was conducted. Presented in this paper are failure mechanism and deformation characteristics of shield tunnels with and without secondary lining.