

投稿論文
Paper
(In Japanese)

正負交番軸方向荷重を受けるシールドトンネル模型の 変形および破壊特性

DEFORMATION AND FAILURE CHARACTERISTICS OF SHIELD TUNNEL MODELS SUBJECTED TO ALTERNATIVE AXIAL LOADING

川島一彦*・杉田秀樹**・加納尚史***

By Kazuhiko KAWASHIMA, Hideki SUGITA and Takashi KANO

Construction of shield tunnels (segmented tunnel) is growing in recent years for traffic, water supply, sewerage and common utility ducts in urban area. Because they are extremely important as lifeline facilities, development of seismic design method suitable for shield tunnels is quite important. Stiffness of the tunnel exhibits highly nonlinear behavior, i. e., stiffness of the tunnel in tension depends on the stiffness of the ring-joint, while the stiffness of the tunnel in compression depends on the stiffness of the concrete segment. Furthermore, interaction between the segment and concrete lining generally placed inside the tunnel make the behavior of the tunnel extremely sophisticated. Therefore, to study the deformation and failure pattern of shield tunnels, axial loading tests under alternative tension and compression were conducted. This paper presents a result of the loading test on the deformation and failure pattern of the shield tunnels subjected to alternative axial loading.

Keywords: shield tunnel, seismic resistant design, deformation characteristic, failure mode, stiffness in tunnel axis

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。わが国においては、シールドトンネルの設計に際して地震の影響を十分検討しておくことが要求される。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情である。

現在のところ、シールドトンネルの耐震設計法としては、応変位法が一般に用いられている^{1),2)}。この方法では、シールドトンネル覆工の長手方向の剛性を適切に評価することが必要であるが、多数のセグメント、継手、二次覆工が組み合わされた覆工の剛性を評価するのは容易でない^{3)~8)}。

このため、セグメントの一部を切り出した部分模型供試体を用いて、実験的に覆工剛性、および破壊特性が検討されてきているが^{9)~11)}、実際にリング状にセグメント

を組んだ状態で、耐震設計上の観点から、シールドトンネルの変形および破壊特性を検討した事例は少ない。

本文はこのような観点から、リングを組んだシールドトンネル模型供試体の正負交番載荷実験に基づき、耐震設計上重要なシールドトンネル覆工の軸剛性、および破壊性状を検討した結果をとりまとめたものである。

2. 実験供試体および載荷方法

(1) 実験供試体

実験に用いた供試体は、図-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個当たり12本)により一次覆工と一体となるようにした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¹²⁾に従って製作したものである。なお、供試体番号がDおよびEと途中からついているが、これは現在までに土木研究所が実施してきたシールドトンネルの載荷実験に用いた供試体に対する連番の供試体番号を用いているためである。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

* 正会員 工博 建設省土木研究所耐震研究室長
(〒305 つくば市大字旭1番地)

** 正会員 建設省土木研究所耐震研究室研究員(同上)

*** 正会員 建設省土木研究所耐震研究室(同上)

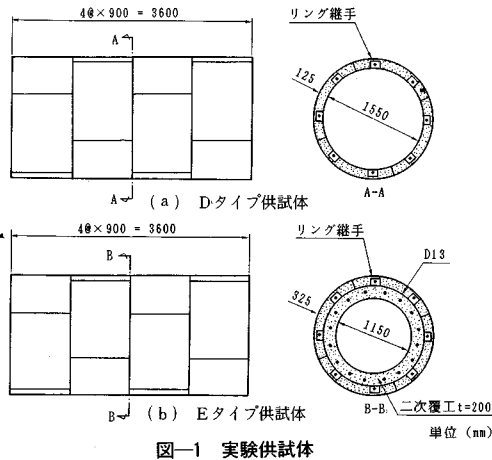


図-1 実験供試体

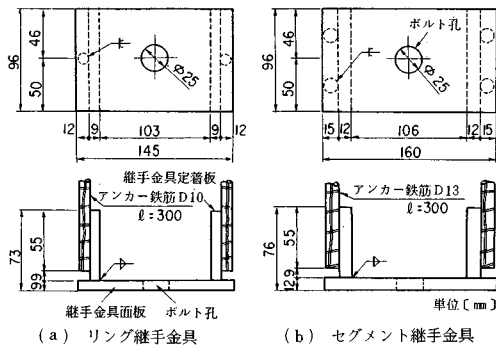


図-2 継手の構造

わたってD13を16本(鉄筋比0.32%)配置した。セグメントリングどうしを連結する金物をリング継手、セグメントピースどうしを連結する金物をセグメント継手とよぶが、リング継手およびセグメント継手の構造としては図-2に示す構造を用いた。ともに、面板に溶接された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。継ぎボルトにはM20を用い、降伏強度の80%である4.7tfを目標に締め付けた。コンクリートの強度を示すと表-1のとおりである。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47.7 kgf/cm²、572.6 kgf/cm²、またEタイプ供試体におけるセグメントコンクリートおよ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48.9、22.1 kgf/cm²、および590.9、276.2 kgf/cm²である。鉄筋の平均降伏強度は表-2に示すようにD10、D13ともに3520 kgf/cm²、また平均破断強度はD10、D13に対してそれぞれ4920 kgf/cm²、5300 kgf/cm²である。

(2) 荷荷方法

写真-1は荷荷方法を示したものである。供試体は固定治具を介して一端を反力壁に、他端を荷荷桁に固定し

表-1 コンクリートの強度

		圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)
Dタイプ供試体	セグメント 一次覆工	580	44.4
		652	53.2
		554	52.1
		536	48.5
		523	48.7
		501	44.1
		平均572.6 (37.3)	平均47.7 (3.6)
Eタイプ供試体	セグメント 一次覆工	623	48.7
		577	46.2
		585	51.7
		575	46.3
		594	47.9
		602	50.8
		平均590.9 (21.5)	平均48.9 (2.2)
二次覆工 コンクリート	二次覆工	264	22.2
		271	21.1
		290	20.3
		274	24.2
		平均276.2 (9.0)	平均22.1 (1.3)

注) ()内は標準偏差

表-2 鉄筋の強度

		降伏強度 (kgf/cm ²)	破断強度 (kgf/cm ²)
D10	1	3430	4910
	2	3560	4910
	3	3560	4950
	平均	3520(61.3)	4920(18.9)
D13	1	3510	5290
	2	3500	5280
	3	3540	5320
	平均	3520(17)	5300(17)

注) 公称断面積 D10:723cm²、D13:1.267 cm²
()内は標準偏差

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反力壁および荷荷桁に固定し、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、覆工間をシ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。また、荷荷桁の両端にはそれぞれ動的アクチュエータを取り付

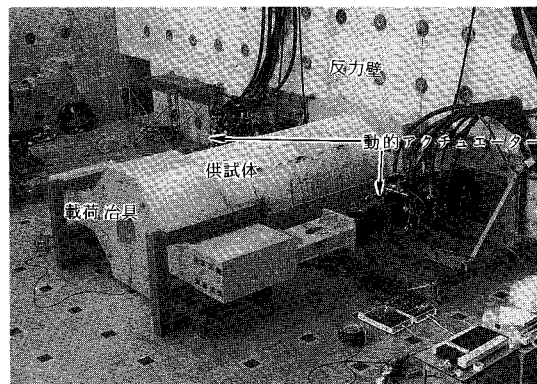


写真-1 荷荷方法

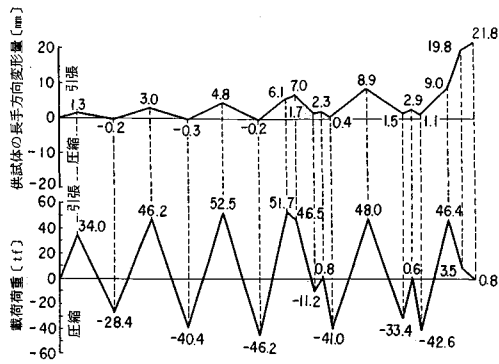


図-3 Dタイプ供試体に用いた荷重パターン

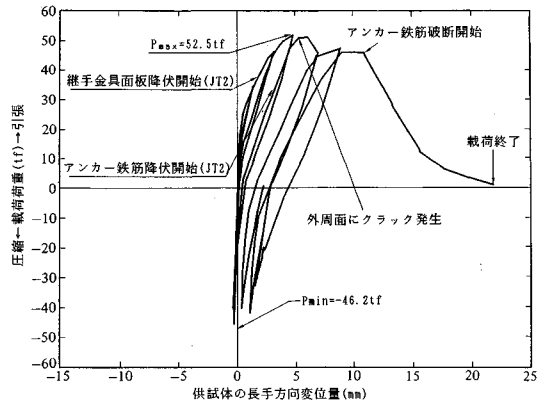


図-5 Dタイプ供試体の荷重履歴曲線

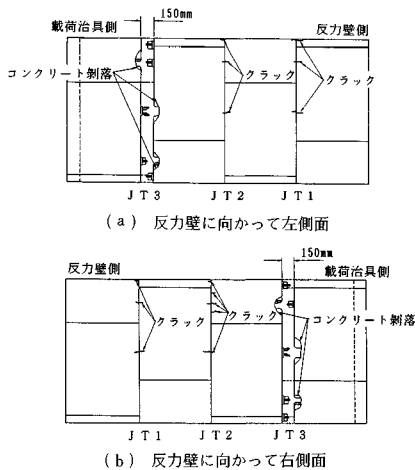


図-4 Dタイプ供試体の破壊状況(側面図)

け、2台の動的アクチュエータをデジタル制御を用いて擬似荷重制御することにより、供試体に軸方向の引張力および圧縮力を交番で作用させた。ここで擬似荷重制御とは、供試体の剛性が低い引張方向の荷重には変位制御を、また、供試体の剛性が高い圧縮方向の荷重には、この直前の引張側の荷重時に生じた最大引張力を目標に荷重制御で荷重する方法である。これにより、供試体には引張側と圧縮側でほぼ同じ荷重が作用することになり、見掛け上、荷重制御によって正負交番荷重を行ったのと同じような効果が得られる。この方法により、Dタイプ供試体に用いた荷重パターンを示すと図-3のとおりである。

3. Dタイプ供試体の変形および破壊性状

(1) 供試体長手方向の変形および破壊性状

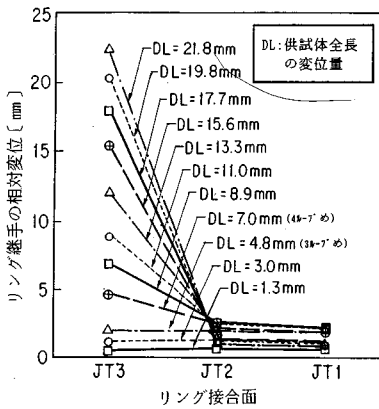
供試体の最終的な破壊状況を示すと図-4のとおりである。二次覆工のないDタイプ供試体では、荷重に伴う破壊はリング接合面(リングどうしがリング継手によって接合されている面、これに対してセグメントどうしが

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よんで、区別する)においてのみ生じ、その他の箇所には損傷は生じなかった。図-4に示したように、3か所のリング接合面を相互に区別するため、反力壁に近い方のリング接合面から、それぞれJT1, JT2, JT3とよぶこととする。供試体長手方向の変位量(供試体の両端面間に生じた変位)と載荷荷重との履歴を示すと図-5のとおりである。ただし、リング継手金具面板およびアンカー鉄筋のひずみはJT2においてのみ計測しているため、アンカー鉄筋の破断のように観察からはつきりわかるものを除けば、JT2における損傷の進行を中心に示している。これによれば、供試体の損傷はおおむね次の順番で生じる。

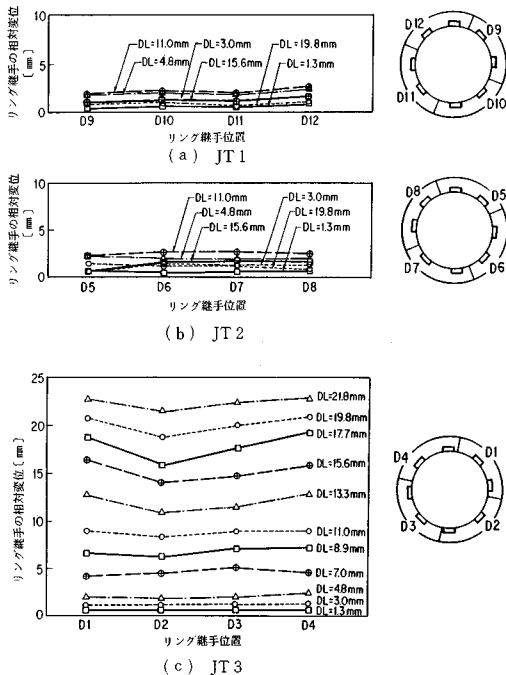
- ① リング継手の周辺にクラックが発生(JT1, JT2, JT3)
- ② リング継手金具面板が降伏(JT2)
- ③ 引張力が最大値をとる
- ④ リング継手のアンカー鉄筋が降伏(JT2)
- ⑤ 供試体外周面にクラックが発生(JT3)
- ⑥ リング継手のアンカー鉄筋が破断(JT3)

図-5の横軸は、供試体全長を通じて生じた変位であるが、3か所のリング接合面でどのように変位が生じているかを示すと図-6のとおりである。これによれば、上記④(3ループ目、供試体全長の変形量 $DL=4.8\text{mm}$)までは3か所のリング接合面にはほぼ同程度の開きが生じるが、⑤(4ループ目、 $DL=7.0\text{mm}$)以降になると最初に供試体の外周面にクラックが生じたリング接合面JT3にのみ開き量の増加が生じることがわかる。

このときに、リング継手ではどのような変位が生じているかを供試体の円周方向に示すと図-7のとおりである。これによれば、リング継手に生じる相対変位は供試体が最終的な破壊に至るまで、円周方向の4か所の間で大きな違いは認められない。



図—6 荷下に伴いリング接合面に生じた長手方向相対変位の分布

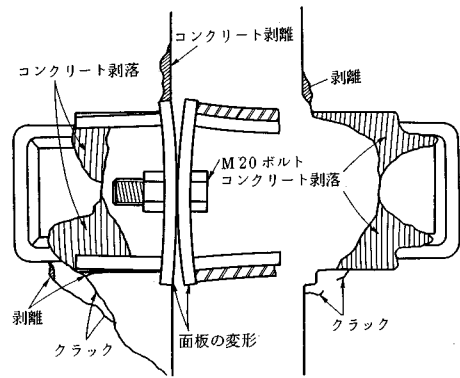


図—7 荷下に伴いリング接合面に生じた円周方向相対変位の分布

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。

a) リング継手の破壊はリング接合面 JT 3 に集中して発生し、他のリング接合面ではリング継手の周辺にクラックが発生しただけにとどまった。このように一次覆工だけ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、これを上回る載荷力を受けた場合に、その接合面においてのみ損傷が進行する。

b) リング継手の破壊状況を示すと図—8 のとおりで



図—8 Dタイプ供試体におけるリング継手の破壊状況

ある。リング継手では、アンカー鉄筋が継手金具定着板(図—2参照)の端部で破断した。これは、リング継ぎボルト位置に作用する引張力により継手金具面板が“く”の字状に変形する際に、継手金具定着板が内側に曲げられる結果、アンカー鉄筋には軸力と同時に曲げモーメントも作用するためと考えられる。したがって、後述するように、基本的には定着板の“く”の字状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させるうえで有効であると考えられる。

Dタイプ供試体の変形と耐力をまとめると表—3のとおりである。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) リング継ぎボルトの軸力

リング継ぎボルトには、リング継手金具面板どうしを接合するために、初期引張軸力が導入されている。この軸力が荷下に伴ってどのように変化するかについては、以前に行った部分模型供試体を用いた載荷実験の結果^{8),10)}から以下の点がわかっている。

a) 載荷荷重が比較的小さい場合には、継手金具面板の圧縮ひずみが弾性回復することにより、継ぎボルトに作用する引張力の増分は載荷力の増分より小さい。

b) 載荷力が大きくなって相隣の2枚の継手金具面板が離れると、弾性回復によって負担されていた荷重の分担がなくなるため、継ぎボルトには載荷力が直接作用する結果、載荷力の増分と継ぎボルトの作用力の増分は等しくなる。

c) 継手金具面板が降伏し、繰返し載荷に伴って残留変形が生じれば、初期状態で導入されていた引張軸力は減少する。

最終的に破断した JT 3 におけるリング継ぎボルトの軸力と載荷荷重との履歴を示すと図—9 のとおりである。なお、図中には、上述した載荷力がすべて継ぎボルトで負担される場合の関係を点線で示している。図—9 によれば以下の点が指摘される。

表-3 Dタイプ供試体の変形と耐力

供試体	発生箇所	荷重 (tf)	リッパ接合面の開き量 (mm)			供試体の長手方向変位
			J T 1	J T 2	J T 3	
円周方向に一周する二次覆工クラック発生	D	—	—	—	—	—
	E	J T 1	127.0	0	0	0
二次覆工鉄筋降伏開始	D	—	—	—	—	—
	E	J T 3	131.0	0.4	0.8	0.2
リング継手金具面板降伏開始	D	J T 2	42.0	0.7	0.8	0.7
	E	J T 2	140.0	0.8	1.2	1.0
アンカー鉄筋降伏開始	D	J T 2	51.4	2.1	2.3	3.0
	E	J T 2	143.0	1.6	2.1	2.2
アンカー鉄筋破断開始	D	J T 3	46.2	2.0	2.2	8.8
	E	J T 1, 2	157.0	10.4	7.8	6.1
二次覆工鉄筋破断開始	D	—	—	—	—	—
	E	J T 1, 2	110.0	20.5	14.7	5.0
最終状況	D*	—	3.5	0.6	0.9	20.0
	E	—	61.9	—	—	100.0
最大引張荷重の発生**	D	—	52.5	1.8	1.9	2.0
	E	—	159.7	5.6	5.8	4.6

* : J T 3 における最後のアンカー鉄筋が破断する直前の値
 ** : Dタイプ供試体ではリング継手金具面板の降伏直後、Eタイプ供試体ではアンカー鉄筋の降伏開始直後に発生

a) 履歴曲線は、荷重が大きくなって継手金具面板が離れるようになると、載荷荷重がすべて継ぎボルトで負担されるとした場合の関係に近づいてくる。ただし、剛性は一致しているが、作用力の絶対値はやや小さい。

b) 継ぎボルトに導入した初期軸力は、載荷に伴って徐々に減少する。継ぎボルトは軸力が約 48 tf になった段階で最終的に破断したが、この直前の段階では軸力は 2.3 tf と、載荷開始前 (平均 4.7 tf) の 49% に減少している。また、ここには示さないが、J T 3 が破断した段階では、継ぎボルト軸力は J T 1 では平均 5.3 tf から 3.3 tf (62.4%) に、J T 2 では平均 4.9 tf から 3.2 tf (65.7%) に減少した。

(3) 供試体円周方向の変形特性

載荷に伴って、供試体が円周方向にどのように変形したかをセグメント継ぎボルトの軸力と載荷荷重との履歴で示すと図-10のとおりである。これによれば、セグメント継ぎボルトの軸力は、すべての載荷過程を通じてほとんど初期軸力から減少していない。これはシールドトンネルのように多数のセグメントを組んだ構造であっても、円環のように供試体の長手方向に軸力を加えた場合に円周方向に生じる変形はほとんどないことを示している。ただし、本実験で用いた供試体は外径 1.8 m に対して、一次覆工の厚さが 125 mm と比較的厚いものであり、外径がさらに大きくなるなど、外径に対して一次覆工の厚さが相対的に薄く、面外変形が生じやすいようなシールドトンネルでは円周方向にもっと大きな変形が生じる可能性もある。このような場合の円周方向の変形特性については別途検討が必要である。

4. Eタイプ供試体の変形および破壊性状

(1) 供試体長手方向の変形および破壊性状

供試体の最終的な破壊状況を示すと図-11のとおり

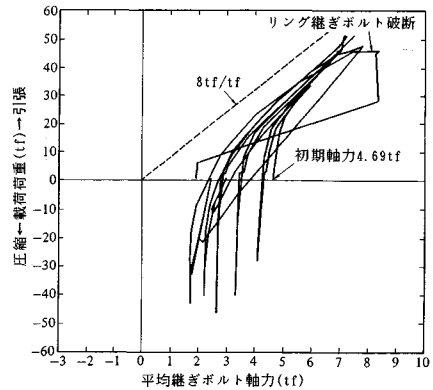


図-9 Dタイプ供試体におけるリング継ぎボルトの軸力の載荷履歴

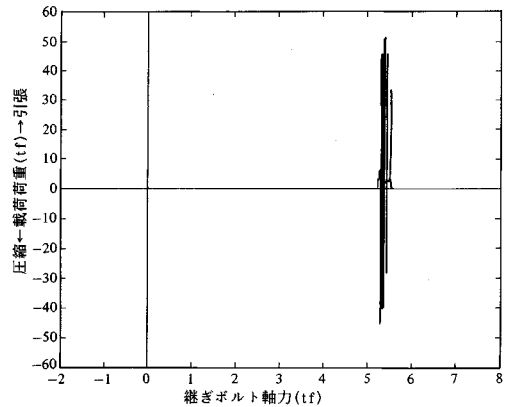


図-10 セグメント継ぎボルトの軸力の載荷履歴

である。なお、本供試体では、載荷ストロークの制約から引張変位が 100 mm に達し、図-11の状態になった段階を最終的な破壊状態としている。したがって、Dタイプ供試体のように完全にリング継手が破断するところまでは載荷していない。

二次覆工を有するEタイプ供試体でも、Dタイプ供試体と同様に、載荷に伴う損傷はリング接合面において生じている。一次覆工にはリング継手位置でクラックが生じ、また、リング継手のアンカー鉄筋が破断したが、その他の箇所には損傷は生じていない。

二次覆工には、乾燥収縮等の影響により、載荷前にすでに図-12(a)に示すような初期クラックが生じていたが、最終状況ではこれが図-12(b)に示すように進展した。二次覆工にはリング接合面位置で円周方向に一周するクラックが生じ、最終的にこの位置で二次覆工鉄筋が破断した。また、リング接合面以外にあった初期クラックには載荷によるクラック幅の進展等は認められなかった。

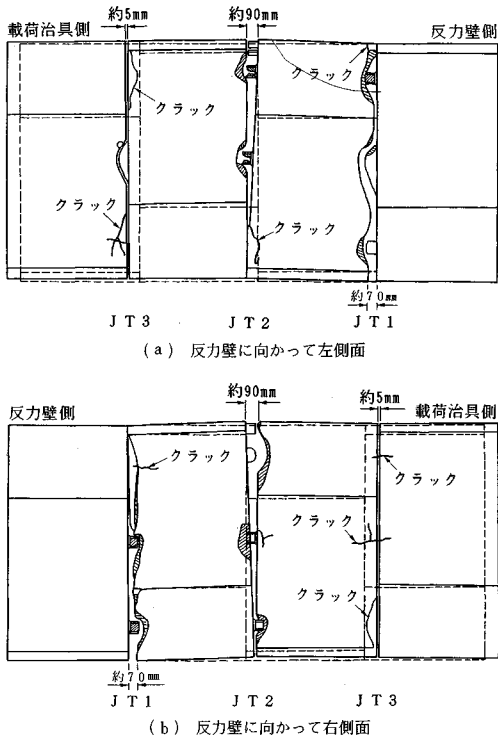


図-11 Eタイプ供試体の破壊状況（側面図）

供試体の長手方向の変形量と載荷荷重との履歴を示すと図-13のとおりである。ただし、本供試体においてもリング継手の金具面板およびアンカー鉄筋の計測はJT2でのみ行っているため、観察からわかる項目以外は、JT2の性状を中心に記述していることに注意していただきたい。図-13によれば、供試体の損傷はおおむね次の順番で生じている。

- ① リング接合面位置で二次覆工にクラックが発生 (JT1, JT2, JT3)
- ② リング接合面位置で二次覆工鉄筋が降伏 (JT1, JT2, JT3)
- ③ リング継手金具面板が降伏 (JT2)
- ④ 供試体外周面にクラックが発生 (JT1, JT2, JT3)
- ⑤ リング継手のアンカー鉄筋が降伏 (JT2)
- ⑥ 引張力が最大値をとる
- ⑦ リング継手のアンカー鉄筋が破断 (JT1, JT2)
- ⑧ リング接合面位置で二次覆工鉄筋が破断 (JT1, JT2)

リング接合面の相対変位が、3か所の接合面でのどのように分布しているかを示すと図-14のとおりである。これによれば、上記⑦（7ループ目、DL=16.1mm）に至るまでは、リング接合面の開きはJT1, JT2, JT

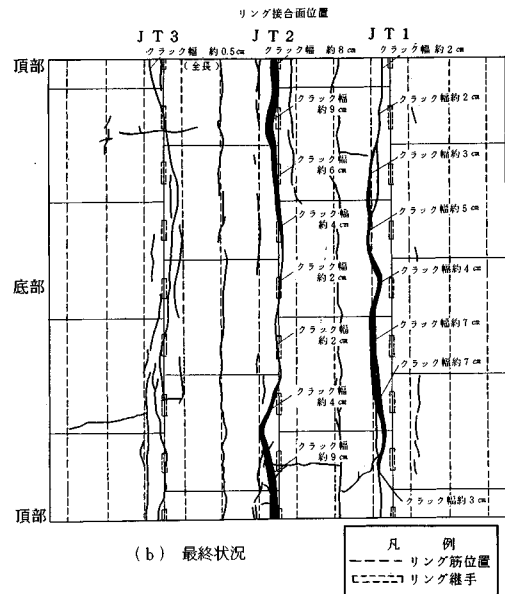
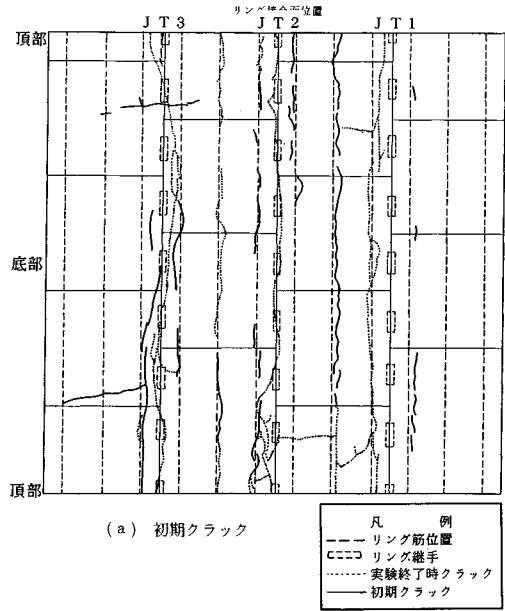
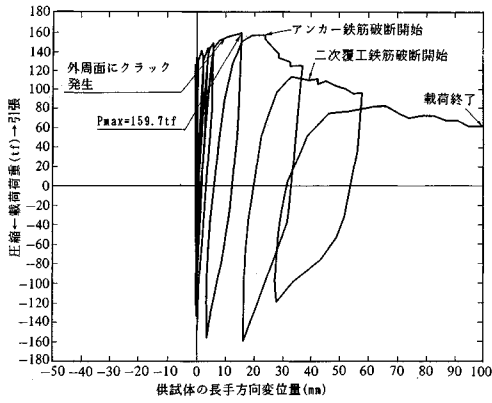
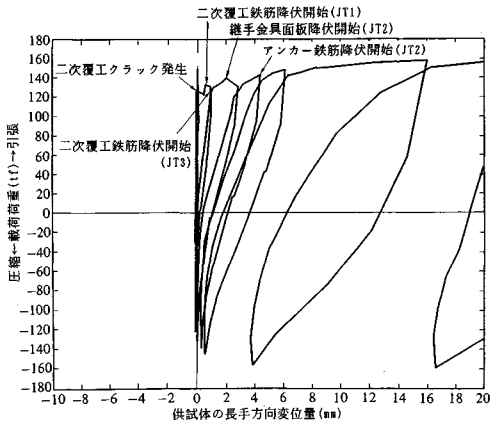


図-12 二次覆工に生じたクラック（展開図）

3の間で同程度であるが、これ以降の載荷になると二次覆工鉄筋の破断が生じたJT1およびJT2で急増することがわかる。また、リング継手の相対変位が円周方向にどのように生じているかを示すと図-15のとおりである。これによれば、アンカー鉄筋の破断が生じた7ループ目（DL=16.1mm）以降は、JT2では供試体の頂部で、JT3では供試体の底部で相対変位が急増している。これは、供試体の軸線と動的アクチュエータの軸線がほんのわずかにずれていたことにより、供試体に曲げが作



(a) 全体図



(b) 拡大図

図-13 Eタイプ供試体の荷重履歴曲線

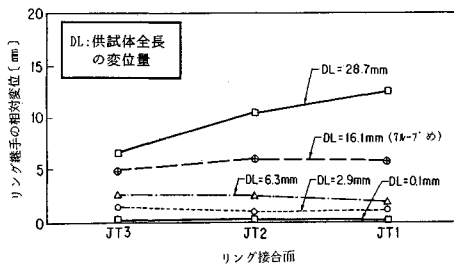
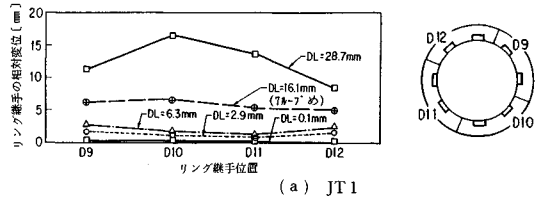


図-14 荷重に伴いリング接合面に生じた長手方向相対変位の分布

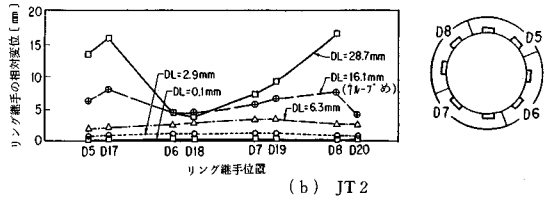
用したためではないかとの見方もあるが、それよりもこの段階になると、リング継手ごとに損傷が同じ割合で進行せず、剛性のアンバランスが顕著になってきたためと考えられる。

以上の結果から、供試体の破壊特性に関して以下の点が指摘される。

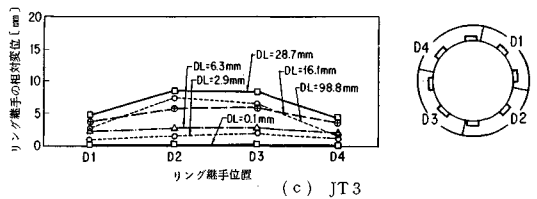
a) アンカー鉄筋が破断するまでは、荷重に伴うリング接合面の開き量は、3か所のリング接合面においてほぼ均等である。これはDタイプ供試体では、ある1つの



(a) JT1



(b) JT2



(c) JT3

図-15 荷重に伴いリング接合面に生じた円周方向相対変位の分布

リング接合面においてアンカー鉄筋の降伏が生じた途端に、そのリング接合面に損傷が集中したと大きく異なっている。

b) 同一のリング接合面におけるリング継手の開き量は、アンカー鉄筋が降伏するまではどの継手においてもほぼ均等であるが、これ以降の荷重になると箇所ごとに異なってくる。したがって、この段階になると、同一のリング接合面におけるリング継手はもはや均等な力を受け、均等に變形するとは限らない。

c) リング継手の破壊状況を示すと図-16のとおりである。リング継手では、Dタイプ供試体と同様に、アンカー鉄筋が継手金具定着板の端部で破断した。二次覆工がないためリング継手のボルトボックス内にコンクリートが充填されていないDタイプ供試体では、リング継手金具面板は“く”の字状に變形した(図-8参照)が、ボルトボックス内にコンクリートが充填されたEタイプ供試体では、継手金具定着板の變形が拘束される結果、最終的にはボルト位置を頂点とする円錐台状に變形した。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、リング継手のボルトボックス内にコンクリート等を充填して定着板の變形を制御することが、アンカー鉄筋の破断を遅らせ、トンネルの耐力を高めるうえで有効と考えられる。

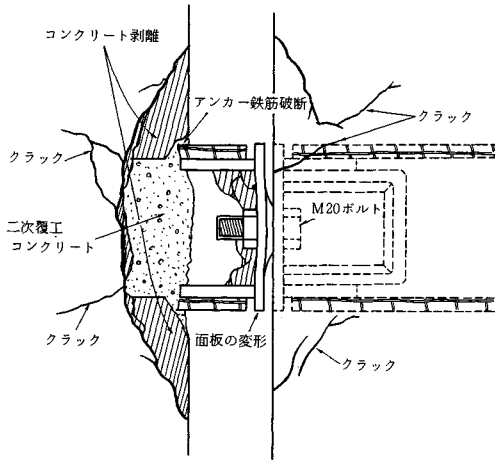


図-16 Eタイプ供試体におけるリング継手の破壊状況

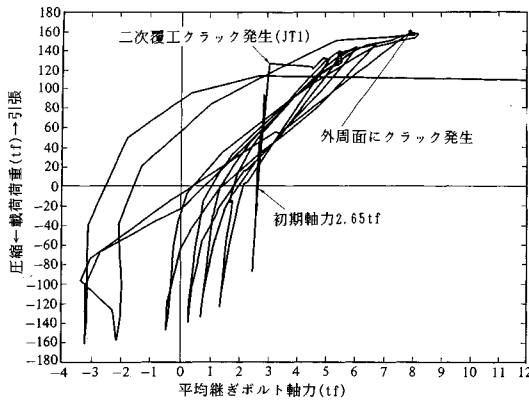


図-17 Eタイプ供試体におけるリング継ぎボルトの軸力の載荷履歴

Eタイプ供試体の変形と耐力は表-3に示したとおりである。前述したDタイプ供試体の場合と比較すると、リング継手金具面板の降伏およびアンカー鉄筋の降伏が始まる際に供試体に生じる長手方向の変位は、Eタイプ供試体でもほとんど同じであるが、これ以上になると同一の損傷状態に達する供試体の長手方向変位は、Eタイプ供試体の方がDタイプ供試体に比較して明らかに大きくなる。たとえば、上述したようにアンカー鉄筋の破断が始まるのは、Dタイプ供試体では10mmであるのに対してDタイプ供試体では24mmである。この分だけ二次覆工のあるEタイプ供試体は、Dタイプ供試体に比較してねばりがあるといえよう。

(2) リング継ぎボルトの軸力

最終的に破壊を生じたリング接合面JT1におけるリング継ぎボルトの軸力と載荷荷重との履歴を示すと図-17のとおりである。この図によれば以下の点が指摘される。

a) 継ぎボルトに導入した初期軸力は、載荷に伴い徐々に減少し、最終的にはわずかながら圧縮力が生じている。初期軸力が減少する理由についてはすでに述べたが、圧縮力が生じる理由は、載荷の繰り返しにより継手金具面板の残留変位が増加するとともに、ボルトボックス内に充填されたコンクリートによりボルトの頭部が押されるためであると考えられる。

b) リング接合面位置で二次覆工にクラックが生じるまでは、ボルトの軸力は初期軸力からほとんど変わっていない。これはリング接合面位置で二次覆工にクラックが生じていない状態では、載荷荷重は大部分二次覆工で負担され、一次覆工にはほとんど力が作用しないことを示すものである。

(3) 二次覆工鉄筋の重要性

上記(1)で示したように、本供試体はアンカー鉄筋の破断が生じるまでは、損傷がある1つのリング接合面に集中せずに複数のリング接合面に分散して生じた。これは二次覆工の長手方向に配置した二次覆工鉄筋の影響によるものと考えられる。ここで、二次覆工が無筋の場合には、ある1つのリング接合面にクラックが生じると、その瞬間に、当該リング接合面はDタイプ供試体と同じ状態になり、このリング接合面に損傷が集中することになる。したがって、これを防止するには、以下に示すように二次覆工コンクリートの引張強度を上回るだけの二次覆工鉄筋量 A_{smin} を長手方向に配置しておくことが有効と考えられる。

$$A_{smin} \cdot \sigma_s \geq A_c \cdot \sigma_c \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 A_{smin} : 二次覆工の最小鉄筋量 (長手方向)

σ_s : 地震時割増しを考慮した鉄筋の許容応力度

A_c : 二次覆工コンクリートの断面積

σ_c : コンクリートの引張強度

(4) 供試体円周方向の変形特性

セグメント継ぎボルトの軸力は、すべての載荷過程を通じて初期軸力から減少しなかった。また、円周方向に配置した二次覆工鉄筋のひずみも最大で120 μ 程度ときわめて小さい。以上のことから、Eタイプ供試体においてもDタイプ供試体と同様に、長手方向の載荷に伴う円周方向の変形はほとんどないと考えられることができる。ただし、前述したように、覆工厚が外径に比較して薄い場合には別途検討が必要と考えられる。

5. 結 論

シールドトンネルの耐震性を検討するうえで重要な、トンネル覆工の軸剛性および破壊性状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軸方向載荷実験を行った。本実験により

得られた結果をまとめると以下のとおりである。

(1) 供試体の最終的な破壊は、DタイプおよびEタイプ供試体ともにリング接合面に生じ、これ以外の部分には損傷が生じなかった。Eタイプ供試体では乾燥収縮等の影響により、すでに実験前から二次覆工に初期クラックが生じていたが、リング接合面以外の箇所では、載荷に伴う初期クラックの進展は生じなかった。したがって、リング接合面における挙動の把握がシールドトンネルの耐震設計上最も重要であると考えられる。

(2) Dタイプ供試体は、ある1つのリング接合面においてリング継手のアンカー鉄筋が破断したことにより終局状態に至った。この段階では、その他のリング接合面ではリング継手の周辺にクラックが発生しただけであった。一次覆工だけ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、それ以上の載荷荷重によって、その接合面においてのみ損傷が進行しやすい。

(3) Eタイプ供試体は、複数のリング接合面においてリング継手のアンカー鉄筋および二次覆工鉄筋が破断した後、終局状態に至った。このような損傷の分散は、供試体長手方向に配置した二次覆工鉄筋によるものである。Dタイプ供試体のように損傷が単一のリング接合面に集中するのを防ぐためには、最小鉄筋量として二次覆工コンクリートの引張強度以上の二次覆工鉄筋を長手方向に配置することが有効と考えられる。

(4) リング継手の破壊は、DタイプおよびEタイプ供試体ともに継手金具定着板の端部でアンカー鉄筋が破断したことにより生じた。ボルトボックス内にコンクリートが充填されていないDタイプ供試体では、定着板がボルトボックス内に折れ曲がることによりアンカー鉄筋には引張と曲げモーメントが同時に作用する結果、早い段階で破断した。これに対して、Eタイプ供試体では定着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ため、アンカー鉄筋には上記のような曲げモーメントはほとんど作用せず、主として引張力のみが作用した結果、アンカー鉄筋の破断を遅らせることができた。したがって、たとえ二次覆工を設けない場合でも、リング継手のボルトボックス内にコンクリート等を充填するなどアンカー鉄筋の破断を遅らせる方策が、トンネルの変形性能を向上させるうえで有効であると考えられる。

(5) セグメント継ぎボルトの軸力は、載荷を繰り返しても初期軸力からほとんど変化せず、また円周方向の二次覆工鉄筋のひずみは微小であった。したがって、今回対象としたシールドトンネルでは長手方向の載荷に伴う円周方向の変形は小さいと考えることができる。ただし、本供試体は外径に対して覆工厚が厚いものであることから、実際に現地で採用される程度に覆工厚が薄い場合については別途検討が必要であろう。

参 考 文 献

- 1) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・同解説 1979年版, pp. 246~255, 1979.
- 2) 川島一彦・大日方尚巳・志波由紀夫・加納尚史：応答変位法によるシールドトンネルの耐震設計法, 土木技術資料, Vol. 28, No. 5, pp. 271~276, 1986.
- 3) 島取孝雄：シールドトンネルの軸方向変形に関する実験, 土木学会第27回年次学術講演会概要集, 第3部門, pp. 457~458, 1972.
- 4) 村上博智・小泉 淳：シールド工用セグメントのセグメント継手の挙動について, 土木学会論文報告集, 第296号, pp. 73~86, 1984.
- 5) 西野健三：シールドトンネルの軸方向挙動に関する研究, 早稲田大学博士論文, 1989.
- 6) 川島一彦・大日方尚巳・志波由紀夫・加納尚史：覆工剛性の非線形性を考慮したシールドトンネルの動的応答解析, 土木技術資料, Vol. 28, No. 10, 1986.
- 7) 志波由紀夫・川島一彦・大日方尚巳・加納尚史：シールドトンネルの耐震解析に用いる長手方向覆工剛性の評価法, 土木学会論文集, No. 398/I-10, 1988.
- 8) 志波由紀夫・川島一彦・大日方尚巳・加納尚史：応答変位法によるシールドトンネルの地震時断面力の算定法, 土木学会論文集, No. 404/I-11, 1989.
- 9) 志波由紀夫・川島一彦・大日方尚巳・加納尚史：シールドトンネルの耐震性に関する研究, 第7回日本地震工学シンポジウム講演集, pp. 1909~1914, 1986.
- 10) 川島一彦・大日方尚巳・志波由紀夫・加納尚史：シールドトンネルの耐震性に関する研究(その3) 鉄筋コンクリートシールドセグメントの載荷実験一, 土木研究所資料, 第2381号, 1986.
- 11) 川島一彦・杉田秀樹・加納尚史：シールドトンネルの耐震性に関する研究(その5) 軸方向正負交番荷重を受けるシールドトンネル模型の載荷実験一, 土木研究所資料, 第2649号, 1988.
- 12) 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.

(1989. 6. 29・受付)