

(91) 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

建設省土木研究所 正員 川 島 一 彦
 建設省関東地建 正員 大日方 尚 巳
 建設省土木研究所 正員 加 納 尚 史
 ○ 大成建設 (株) 正員 志 波 由紀夫

1. はじめに

シールドトンネルの長手方向の耐震性を検討する上では、多数のセグメントと継手で組立てられた覆工構造の破壊性状を把握しておく必要がある。また、耐震計算を行う際には、覆工構造の長手方向剛性の評価方法が重要な検討課題となる。¹⁾

著者らは、このような観点から、RCシールドセグメントを用いた覆工構造を対象として、各種の模型型載荷実験を実施し、それらの力学特性を調べている。²⁾ 本文では、一連の実験結果から、覆工が長手方向の荷重によって破壊に至るまでの挙動について報告する。

2. 実験方法の概要

実験に用いた供試体は、図-1に示す3種類である。これらは、シールドトンネルの覆工構造の一部をトンネル長手方向に細長く切り出した状況を模したものである。供試体の形状・寸法等については、シールド工用標準コンクリート系セグメント (日本下水道協会規格) のうち、外径4~5m級のものを参考とした。

Aタイプは、2リング分のセグメントの一部を、リング継手 (セグメント間をトンネル長手方向に接合する継手) で連結したものである。Bタイプは、2次覆工の有る構造を想定し、Aタイプの上部に厚さ20cmのコンクリートを打設したものである。この2次覆工には、トンネル長手方向鉄筋として、D13を3本配筋した。Cタイプは、セグメント4リングと荷重伝達用のセグメント2ピースを連結した後に、Bタイプと同様の2次覆工を施したもので、5ヶ所の継手部をもつ。Cタイプ供試体の載荷実験は、Bタイプと同様の覆工構造がトンネル長手

方向に連続する実際の場合には、破壊がどのように進行するのかを調べることを目的としたものである。

リング継手は図-2に示す構造であり、長さ30cmのアンカー鉄筋 (D13) 2本でセグメントに定着されている。継ぎボルトにはM22を用い、軸力6tfを目標に締め付けた。なお、ひずみゲージを用いてボルト張力を計測する関係から、ボルトの有効断面積は通常

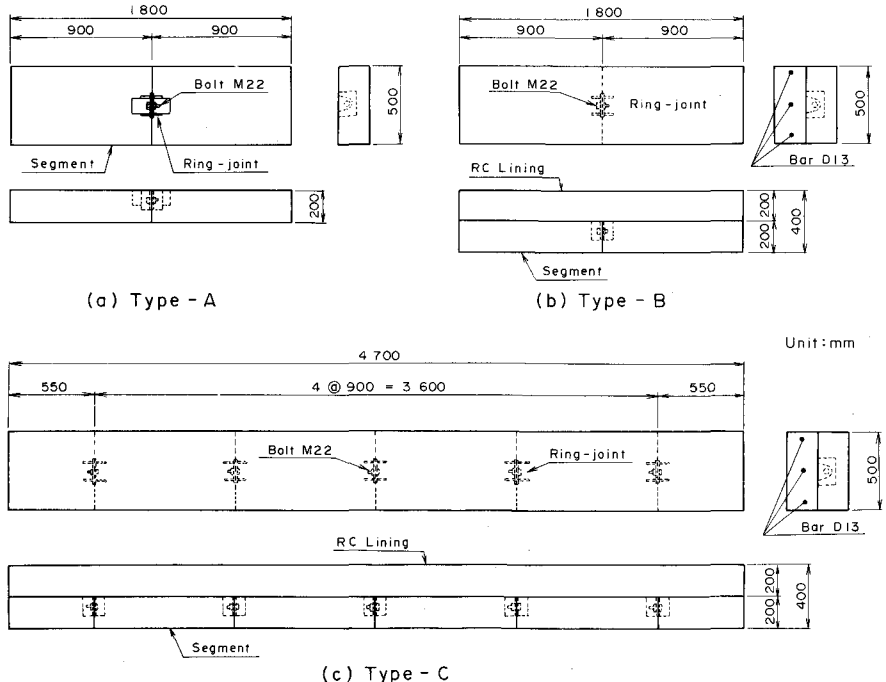


図-1 実験供試体の概要

の約70%に減少している。

供試体への载荷は、供試体の一端を固定し、他端を加振機に連結して、変位制御方式により軸方向力を加えた。载荷ケースは、表-1に示した7ケースである。

ただし、Cタイプの正負交番载荷実験では、载荷装置の破損のため、最終的な破壊までには至らなかった。

各供試体のコンクリート強度は表-1に示す通りである。また、2次覆工鉄筋およびアンカー鉄筋（材質：S D30）の降伏強度、破断強度は、強度試験の結果、それぞれ、 36.7kgf/mm^2 、 51.9kgf/mm^2 であった。

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。

Aタイプ：リング継手周辺にクラック発生→継手金具の変形→リング継手破断（A-1, 2とも）

Bタイプ：継手上部の2次覆工にクラック発生→2次覆工鉄筋の降伏→継手部の開き（クラック幅）拡大→2次覆工鉄筋破断→リング継手破断（B-1, 2, 3とも）

Cタイプ（C-1）：J-1継手部の2次覆工にクラック発生→各継手部の2次覆工でクラック発生・鉄筋降伏→全ての継手部で2次覆工にクラック→全ての継手部で2次覆工鉄筋降伏→各継手部の開きが拡大→J-1継手部で2次覆工鉄筋破断→J-1継手部のみの開きが拡大→J-1継手破断

Cタイプ（C-2）：各継手部の2次覆工に相次いでクラック発生→各継手部の2次覆工鉄筋が相次いで降伏→各継手部の開きが拡大

Cタイプでは、概ね、全継手部で2次覆工鉄筋が降伏した状態からこれが破断するまでの間は、継手部の

表-1 载荷ケースおよび供試体のコンクリート強度

供試体のタイプ	Aタイプ		Bタイプ			Cタイプ	
供試体の名称	A-1	A-2	B-1	B-2	B-3	C-1	C-2
载荷方法	単調引張	正負交番	単調引張	正負交番	単調引張	単調引張	正負交番
セグメント (kgf/cm ²)	圧縮強度	475	571	482	492	507	525
	引張強度	37.3	46.0	38.4	38.2	37.8	43.8
2次覆工 (kgf/cm ²)	圧縮強度	—	—	256	310	315	323
	引張強度	—	—	22.0	24.1	33.2	29.4

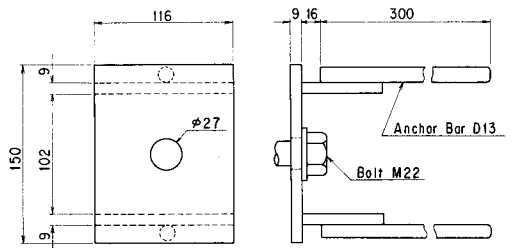


図-2 リング継手の構造

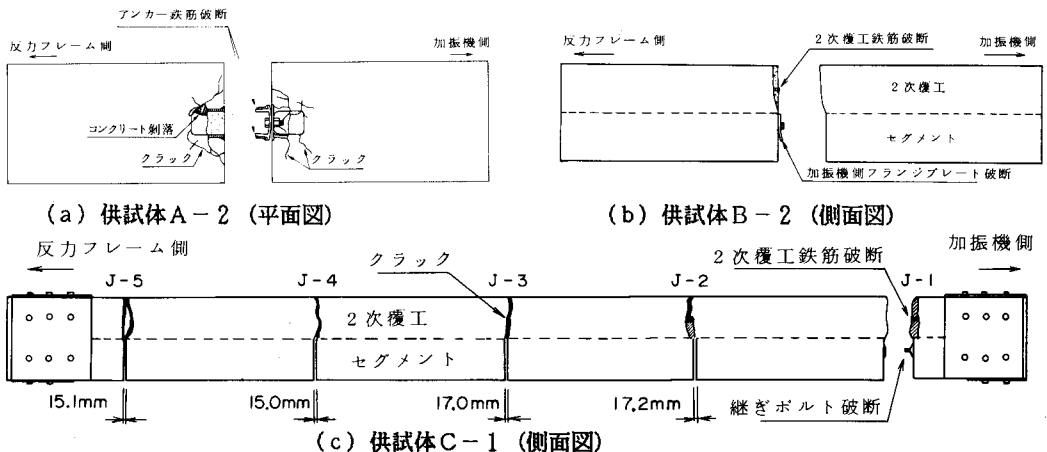


図-3 各タイプ供試体の最終破壊状況

変形は1ヶ所に集中するのではなく、各継手部ではば均等に生じた。

図-3に各タイプ供試体の最終破壊状況を示す。これらの破壊状況は、リング継手の破断形態を除けば、交番载荷と単調引張载荷とで違いはなかった。リング継手の破断形態は、表-2に示すように、供試体のタイプおよび载荷方法によって異なっている。継手が破断する直前には、フランジプレートの変形がかなり大きくなり、その形状は、ボルト孔を中心として、Aタイプでは「く」の字形、BタイプおよびCタイプでは円錐台形に近いものであった。

3. 2 载荷履歴

図-4に各タイプ供試体の载荷履歴を示す。これらの図では、横軸に継手部の開き量をとっているが、継手部以外の変形量は極めて小さいため、供試体全体の伸縮量と見ることができる。各タイプについて交番载荷と単調引張载荷とを比較すると、変形性能については後者の方が大きい。交番载荷の履歴曲線の包絡線に着目すると、载荷初期から最大荷重に達するまでの間は、単調引張载荷の場合と概ね一致した履歴をたどっている。

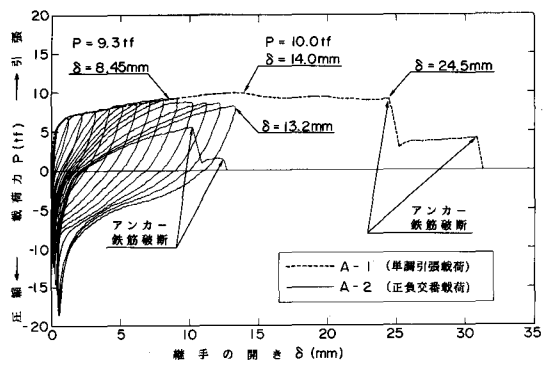
3. 3 供試体の耐力および変形性能

各供試体の耐力、変形性能等を、表-2にまとめた。
AタイプおよびBタイプの供試体について交番载荷と単調引張载荷の結果を比較すると、

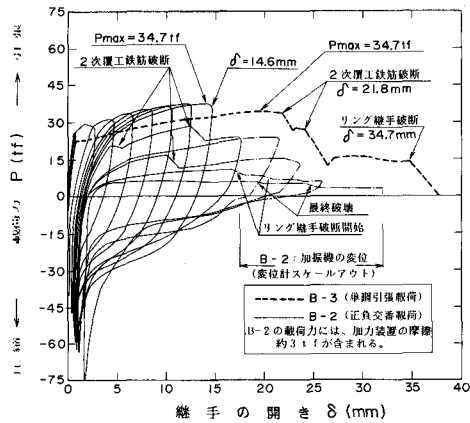
- ①降伏耐力、降伏変位、および終局耐力については、両载荷で同等、もしくは単調引張载荷の方がやや大きい。
- ②リング継手破断までの終局変位は、交番载荷の場合には単調引張载荷の場合に対し、Aタイプで54%、Bタイプで56~68%に低下している。

ここで、RCの2次覆工が有るBタイプと2次覆工の無いAタイプとで耐力等を比較すると、

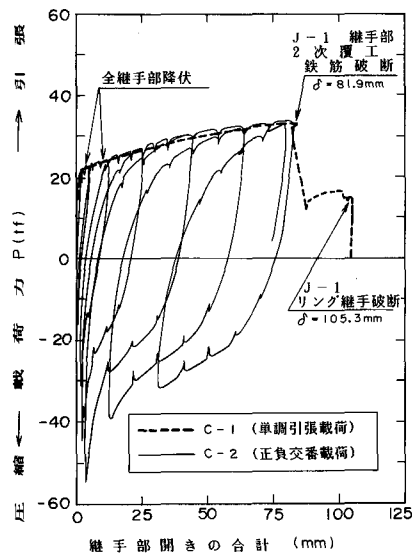
- ③Bタイプの降伏耐力、終局耐力は、Aタイプの、それぞれ約3倍、約3.7倍である。
- ④リング継手破断までの終局変位は、载荷方法によらずBタイプの方が1.4~1.8倍大きい。Bタイプにおいて、2次覆工鉄筋が破断しセグメント接合部材がリング継手のみとなった状態以後の耐力、変形性能をAタイプと比較しても、Bタイプの方が大きい。これは、Aタイプには継手金具の内側にボルトボックスとしての空間があり、アンカー鉄筋には張力の他に、フランジプレートの「く」の字形の変形にともなう、ボルトボックス内へ変位させようとする2次的な応力が付加されるのに対し、Bタイプでは、ボルトボックスが2次覆工



(a) Aタイプ供試体



(b) Bタイプ供試体



(c) Cタイプ供試体

図-4 各タイプ供試体の载荷履歴図

コンクリートで充填されているため、このような変形が拘束されることが大きな理由と考えられる。次に、Bタイプと、Bタイプの連続構造であるCタイプについて、単調引張載荷の結果を比較すると、

⑤降伏耐力はBタイプとCタイプとではほぼ等しく、終局耐力はCタイプがやや小さい。

⑥供試体全体としてのCタイプの降伏変位および終局変位は、当然、Bタイプよりも大きい。最終的に破壊したJ-1継手部1ヶ所に注目すれば、Bタイプとはほぼ一致している（表-2参照）。また、前述したように、2次覆工鉄筋が破断するまでの間は、変形が5ヶ所の継手部でほぼ均等に生じた。

したがって、Cタイプの耐力および変形性能は、単純に、Bタイプ5個を直列に連結した構造の耐力および変形性能と近似的に等しい、と考えることができる。

3. 4 各供試体の剛性

各供試体の引張剛性を表-2に示す。これらの値は、図-4に示した荷重～変位の載荷履歴曲線（交番載荷の場合は、引張側の包絡線）の平均的な勾配として求めたものであり、実際には、載荷力の増加または供試体変形の進展にともなって変化している。BタイプおよびCタイプについては、2次覆工にクラックが発生した後の引張剛性を示した。

降伏前のAタイプの引張剛性は、フランジプレートの曲げ剛性（たわみ性）に近いもので、継ぎボルトの軸剛性よりも1オーダー余り小さい。²⁾ Cタイプの引張剛性は、全継手部で2次覆工鉄筋が降伏した直後からそれが破断するまでの間は、Bタイプを5個直列に連結した構造系の剛性、すなわち、Bタイプの1/5と考えられる。

4. まとめ

シールドトンネルの長手方向の耐震性を検討することを目的として、覆工構造の部分模型を対象とした載荷実験を実施した。この結果、2次覆工の有る場合と無い場合について、覆工の破壊性状、耐力、剛性等の基礎的な資料が得られた。今後、覆工構造全体系を対象とした載荷実験も行い、今回の部分模型実験の結果と合わせて、シールドトンネルの耐震性を検討して行く予定である。

表-2 各供試体の耐力、変形性能および引張剛性

供試体の名称		A-1	A-2	B-1	B-2	B-3	C-1 : J-1	C-2
載 荷 方 法		単調引張	正負交番	単調引張	正負交番	単調引張	単調引張	正負交番
2次覆工クラック (tf)		—	—	14.8	15.7	7.9	17.9 (22.2) : 17.9	13.2 (19.1)
降伏耐力 (tf)		7.1	6.9	22.7	22.3	22.0	21.5 (24.2) : 21.8	21.2 (23.0)
降伏変位 (mm)		1.4	1.1	0.8	0.7	0.8	1.2 (10.1) : 0.8	2.5 (3.8)
終局耐力 (tf)	鉄筋破断前	—	—	37.2	34.7	34.7	33.0 : 33.0	33.9以上
	継手破断前	10.0	9.3	17.3	12.1	16.1	16.8 : 16.8	—
終局変位 (mm)	鉄筋の破断	—	—	22.5	14.6	21.8	83.5 : 19.2	79.5以上
	継手の破断	24.5	13.2	41.9	23.5	34.7	105.3 : 41.1	—
引張剛性 (tf/mm)	降伏前	3~30	6~30	30	30	20	25 : 25	13
	降伏後	0.27	0.30	0.9	1.1	1.0	0.1~0.2 : 0.5~1	0.1~0.2
リング継手の破断部材		アンカー	アンカー	アンカー	プレート	ボルト	ボルト : ボルト	—

() 内は、全継手部に生じた時点での値。

参 考 文 献

- 1) 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, 第28巻, 第5号, PP. 45~50, 1986-5
- 2) 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——, 土木研究所資料, 第2381号, 1986-4