

(81) RCシールドトンネルの耐震設計に必要な二次覆工の長手方向最小鉄筋量

建設省土木研究所 正員 川島 一彦
" " 〇正員 杉田 秀樹
建設省郡山工事事務所 正員 加納 尚史

1. はじめに

多数のセグメント及び継手から構成されるシールドトンネルは、元来、個々のリング継手が変形を吸収することにより長手方向に大きな伸び性能を有する構造物である。しかし、止水等の目的から、セグメントの内側に二次覆工が設置されると、伸び性能が大きく制約されることになる。特に、二次覆工が無筋であったり、わずかな長手方向鉄筋しか配置されていない場合には、トンネルが長手方向の地震力を受けて1箇所のリング接合面で二次覆工コンクリートにクラックが生じると、長手方向力の増加に伴うトンネルの変形は当該リング接合面に集中することになる。最終的には、当該リング接合面においてリング継手や二次覆工鉄筋が破断して最終的な破壊に至るが、このような破壊形態ではトンネルの伸び性能は非常に小さい。

シールドトンネルがこのような形態で破壊するのを防ぐためには、二次覆工の損傷を複数のリング接合面に分散させることが重要であり、このためには、二次覆工にある程度以上の長手方向鉄筋（最小鉄筋）を配置しておく必要がある。ここでは、二次覆工の長手方向最小鉄筋量の定式化を行なうとともに、これをシールドトンネルの部分模型供試体を用いた正負交番載荷実験により実証的に検討した結果を報告する。

2. 二次覆工の長手方向最小鉄筋量の定式化

長手方向最小鉄筋量は、一次覆工と二次覆工の間の付着の程度により変化する。このため、ジベル筋等により両者の付着が確保されている場合と、防水シート等により両者が分離されている場合について、長手方向最小鉄筋量の定式化を行なうと以下ようになる。

1) ジベル筋等により一次覆工と二次覆工の付着が確保されている場合

シールドトンネル覆工が何等損傷を生じていない状態、及び、1箇所のリング接合面で二次覆工コンクリートにクラックが生じた状態を模式的に示すと、それぞれ、**図1 (a)**及び**(b)**のようになる。リング接合面JT2において二次覆工に生じたクラックが、他のリング接合面(JT1)でも生じるためには、次の関係が成立する必要がある。

(リング接合面JT2の引張耐力) > (リング接合面JT1の引張耐力)

したがって、二次覆工の長手方向最小鉄筋量 A_{LSmin} として、次式が提案される。

$$\{P_{Ar}, P_{Br}\} \min + A_{LSmin} \times \sigma_{LSr} = A_L \times \sigma_L \quad (1)$$

ここに、 P_{Ar} ：アンカー鉄筋の破断耐力、 P_{Br} ：リング継ボルトの破断耐力、 σ_{LSr} ：二次覆工鉄筋の破断強度、 A_L ：二次覆工の断面積、 σ_L ：二次覆工コンクリートの引張強度、である。

2) 防水シート等により一次覆工と二次覆工が分離されている場合

シールドトンネル覆工の1箇所で二次覆工コンクリートにクラックが生じた状態を模式的に示すと**図1 (c)**のようになる。一次覆工と二次覆工は独立に変形するため、二次覆工だけの力の釣り合いから、二次覆工の長手方向最小鉄筋量 A_{LSmin} として次式が提案される。

$$A_{LSmin} \times \sigma_{LSr} = A_L \times \sigma_L \quad (2)$$

3. シールドトンネル部分模型供試体の正負交番軸力載荷実験

1) 実験の方法

実験供試体は、**図2**に示すように、外径4～5m級のシールドトンネル覆工の一部をトンネル長手方向に切り出した形状であり、幅50cm、長さ90cm、厚さ20cmのRC平板型セグメントをリング継手により6リング分連結した上に、厚さ20cmの二次覆工コンクリートを打設してジベル筋により覆工間の付着を確保したAタイプ供試体、及び、一次覆工と二次覆工の間に厚さ約1mmの防水シートを設置して両覆工を分離したBタイプ供試体の2種類を用いた。供試体への正負交番の軸力の載荷は、供試体の両端をそれぞれ反力フレーム及び動的加振機に連結し、動的加振機を変位制御で前後に操作

することにより行なった。載荷実験の様子を写真1に示す。

実験ケースは、表1に示すように二次覆工鉄筋量を変化させて、Aタイプ供試体及びBタイプ供試体のそれぞれについて3ケースずつ、合計6ケースとした。すなわち、Aタイプ供試体及びBタイプ供試体のそれぞれについて、式(1)及び式(2)から算定される最小鉄筋量を配置したケース、これを上回る鉄筋量を配置したケース、及び、これを下回る鉄筋量を配置したケースの3ケースずつを設定した。ただし、これは部材の公称強度に基づいた場合であり、部材試験に基づく実勢強度を用いると、Aタイプ供試体の二次覆工鉄筋量は式(1)により算定される最小鉄筋量の約108、152、176% (ケース1~3)、また、Bタイプ供試体の二次覆工鉄筋量は式(2)により算定される最小鉄筋量の約85、107、143% (ケース4~6) となっている点に注意する必要がある。

2) 二次覆工の長手方向最小鉄筋量

Aタイプ供試体(ケース1~3)、及び、Bタイプ供試体(ケース4~6)の最終的な破壊状況を示すと、それぞれ、図2及び図3の通りである。これによれば、二次覆工の長手方向最小鉄筋量に関して、以下の点が指摘される。

① ジベル筋により一次覆工と二次覆工の付着を確保したAタイプ供試体では、ケース1~3とも二次覆工の損傷が複数のリング接合面に分散して生じた。したがって、一次覆工と二次覆工の付着が確保されている場合には、式(1)に示される最小鉄筋量を上回る鉄筋量を二次覆工の長手方向に配置すれば、二次覆工の損傷を分散できる。ただし、二次覆工鉄筋量をさらにどの程度まで減少させても二次覆工の損傷の分散が期待できるかについては、別途、検討する必要がある。

② 防水シートにより一次覆工と二次覆工を分離したBタイプ供試体では、式(2)に示される最小鉄筋量を上回る鉄筋量を配置したケース5及びケース6では二次覆工の損傷が分散して生じたのに対して、最小鉄筋量を下回る鉄筋量しか配置しなかったケース4では二次覆工の損傷が集中して生じ、他の箇所には何等損傷が生じなかった。したがって、一次覆工と二次覆工が分離されている場合の最小鉄筋量は、式(2)により適切に評価できる。

3) 二次覆工鉄筋量の大小がトンネル長手方向の変形特性に及ぼす影響

Aタイプ供試体(ケース1~3)について、1箇所のリング接合面で二次覆工コンクリートにクラックが生じた瞬間に、他のリング接合面で生じていた供試体長手方向の相対変位を示すと図4の通りである。また、Bタイプ供試体(ケース4、6)について、供試体長手方向変形量の載荷履歴を示すと図5の通りである。これらによれば、シールドトンネル長手方向の変形特性について、以下の点が指摘される。

① 図4によれば、1箇所のリング接合面で二次覆工コンクリートにクラックが生じた瞬間の各リング接合面の相対変位は、ケース1で1.6~9.1mm、ケース2で0.7~3.8mm、ケース3で0.5~3.2mmである。これは、二次覆工鉄筋量が少ないほど二次覆工には新しいクラックが生じにくく、二次覆工の損傷が分散しにくくなることを示すものである。

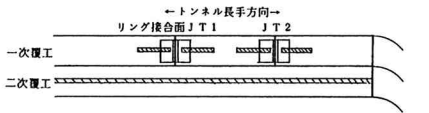
② 図5によれば、最小鉄筋量を下回る鉄筋量しか配置していないケース4では供試体長手方向変形量が51mmに達した段階で二次覆工鉄筋の破断が生じるのに対して、最小鉄筋量を上回る鉄筋量を配置したケース6では供試体長手方向変形量が140mmとしても鉄筋の破断等の最終的な損傷は生じない。したがって、二次覆工に最小鉄筋量を下回る鉄筋量しか配置されない場合には、トンネル長手方向の変形性能は大きく低下する。

4. まとめ

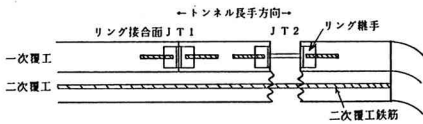
覆工間の付着が完全に確保されている場合と、覆工が完全に分離されている場合について、二次覆工に必要な長手方向最小鉄筋量が明らかにされた。ただし、実際のシールドトンネルで、防水シート等により一次覆工と二次覆工の挙動が完全に独立したものになるかどうかについては、別途検討が必要である。

【参考文献】

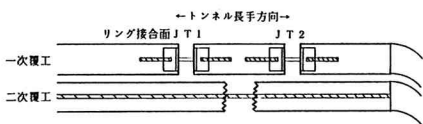
川島・杉田・加納：シールドトンネルの耐震性に関する研究- (その5)、土木研究所資料、第2649号、昭和63年7月



(a) 二次覆工に損傷が生じていない状況



(b) 1箇所リング接合面で二次覆工に損傷が生じた状況（覆工間の付着が確保されている場合）



(c) 二次覆工の1箇所損傷が生じた状況（1次覆工と2次覆工が分離されている場合）

図1 シールドトンネル覆工の模式図

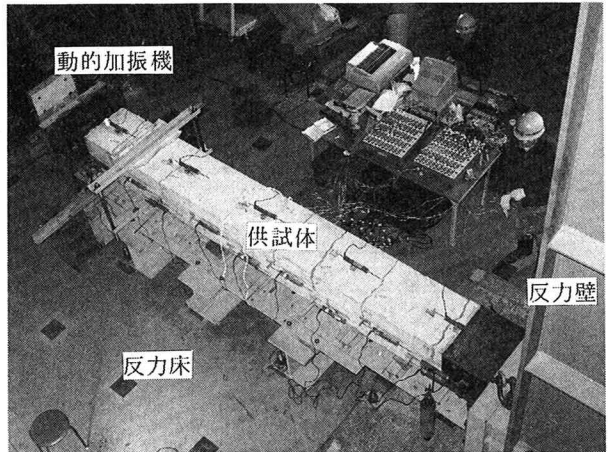


写真1 載荷実験の様子

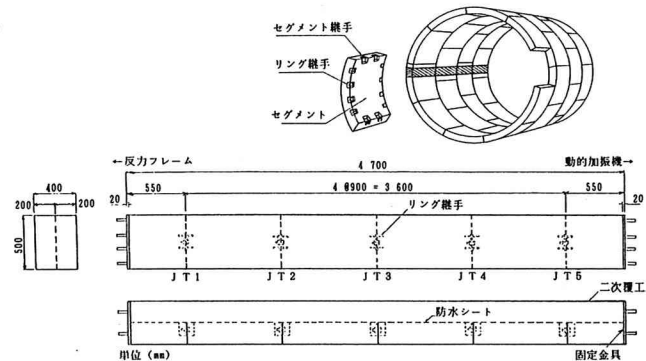


図2 実験供試体

表1 覆工部材の耐力と実験ケース

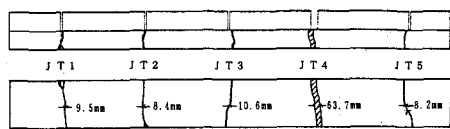
(a) Aタイプ供試体

	一次覆工				二次覆工		
	セグメント	アンカ-鉄筋	リング継手継手	コンクリート	長手方向鉄筋量		
					ケース1	ケース2	ケース3
寸法	200×500cm	D13×2本	M22×1本	200×500cm	D6×3本	D10×3本	D10×4本
断面積 (cm ²)	1000	2.53	3.03	1000	2.85	3.80	5.07
強度規格 (kgf/cm ²)	420	SD35	8.8	240	SD35	SD35	SD35
降伏強度 (kgf/cm ²)		3500	6400		3500	3500	3500
降伏耐力 (tf)		8.86	19.39		3.33	7.49	9.97
破断強度 (kgf/cm ²)	28.0*	5000	8000	19.3*	5000	5000	5000
破断耐力 (tf)	28.0	12.65	24.24	19.9	4.75	10.70	14.25
二次覆工鉄筋の破断耐力					90.2	121.0	139.0
二次覆工コンクリートの破断耐力			× 100 (9%)		(108.0)**	(121.0)**	(139.4)**

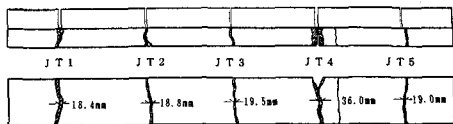
(b) Bタイプ供試体

	一次覆工				二次覆工		
	セグメント	アンカ-鉄筋	リング継手継手	コンクリート	長手方向鉄筋量		
					ケース4	ケース5	ケース6
寸法	200×500cm	D13×2本	M22×1本	200×500cm	D10×4本	D13×3本	D13×4本
断面積 (cm ²)	1000	2.53	3.03	1000	2.85	3.80	5.07
強度規格 (kgf/cm ²)	420	SD35	8.8	240	SD35	SD35	SD35
降伏強度 (kgf/cm ²)		3500	6400		3500	3500	3500
降伏耐力 (tf)		8.86	19.39		9.89	13.30	17.74
破断強度 (kgf/cm ²)	28.0*	5000	8000	19.3*	5000	5000	5000
破断耐力 (tf)	28.0	12.65	24.24	19.9	14.25	19.00	25.35
二次覆工鉄筋の破断耐力					73.8	98.4	131.8
二次覆工コンクリートの破断耐力			× 100 (9%)		(84.9)**	(107.3)**	(143.2)**

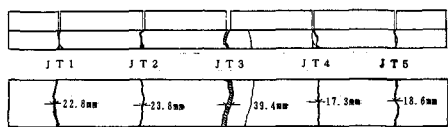
注) *は、コンクリート標準示方書による計算値 (0.5×強度規格)^{2/3})
 **は、実勢強度による計算値



(a) ケース 1 (二次覆工鉄筋量, D6×3本)

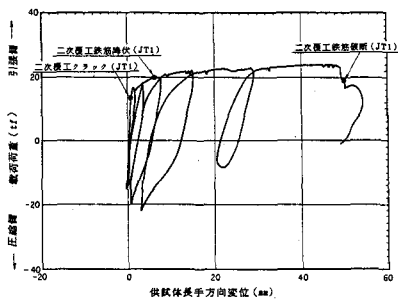


(b) ケース 2 (", D10×3本)

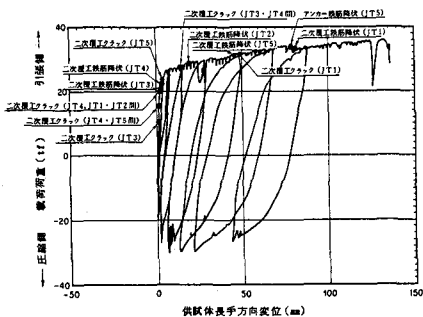


(c) ケース 3 (", D10×4本)

図 2 Aタイプ供試体の最終的な破壊状況

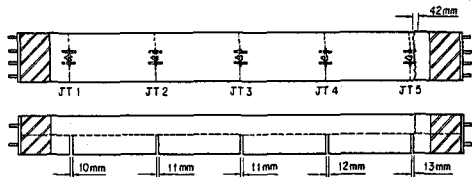


(a) ケース 4 (二次覆工鉄筋量, D10×4本)

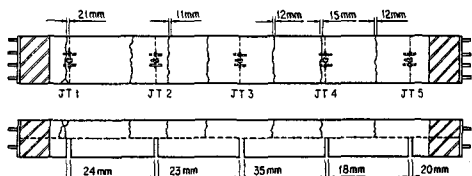


(b) ケース 6 (二次覆工鉄筋量, D13×4本)

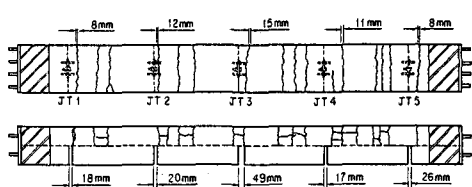
図 5 供試体長手方向変位量の載荷履歴



(a) ケース 4 (二次覆工鉄筋量, D10×4本)



(b) ケース 5 (", D13×3本)



(c) ケース 6 (", D13×4本)

図 3 Bタイプ供試体の最終的な破壊状況

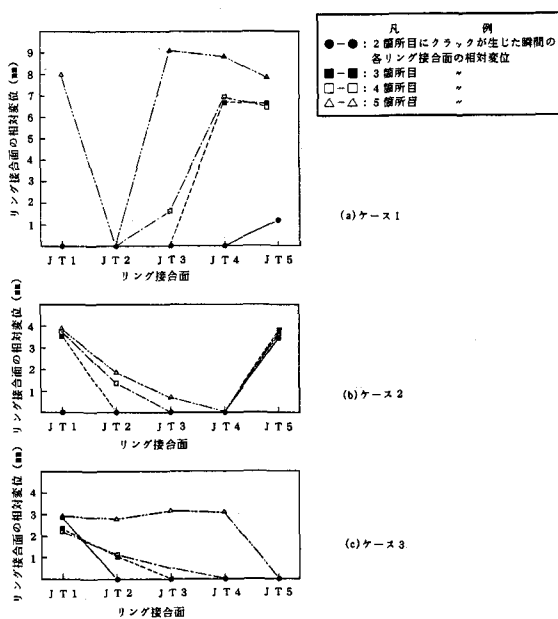


図 4 二次覆工コンクリートにクラックが生じた瞬間の各リング接合面における長手方向相対変位