

III-625

大断面シールドトンネルのリング継ぎボルト削減とリング剛性について

帝都高速度交通営団 正員 藤木育雄 正員 大塚 努
正員 中島 信
早稲田大学 正員 小泉 淳

1. はじめに

わが国でシールドトンネルを建設する場合、一般的にセグメントリングを「千鳥」に組んで、相互リングをリング継ぎボルトでしっかりと締結し、これによって得られる添接効果により、セグメント継手部剛性の低下を補って変形を防いでいる。セグメントリングを締結するリング継ぎボルトは、シールドトンネルの大断面化とともに、その本数が必然的に多くなり、リング組立時間が長くなる傾向にある。

この改善方法の1つとして、リング継ぎボルトの削減を検討し、箱型セグメント（中子型：幅120cm、厚さ55cm）でリング継ぎボルトを半減して組立てる試験施工を行った。本報告は、リング継ぎボルト削減によるリング剛性の低下、自重による変形および曲げモーメントへの影響を把握することを目的として、営団複線シールド（φ9800）における試験施工の計測結果をもとに、予測解析との比較を行ったものである。

2. 検討概要

上述したように、シールドトンネルは、セグメント継手部の弱さを千鳥組による添接効果で補っている。このようなシールドトンネルでリング継ぎボルトが削減されると、トンネル全体としてのリング剛性の低下や、セグメントリング間の力のやりとりへの影響等が問題になってくることが予想される。

トンネルが大断面になるにつれ、セグメントの自重も増加する。シールド機テール内において無支持状態にあるセグメントリングは、リング継ぎボルトの削減により、組立時におけるセグメント自重による変形を起こしやすくなり、大断面になればなるほど、変形および曲げモーメントは大きくなると考えられる。

本報告では、複線シールドトンネル施工現場において、試験施工区間を設け、リング継ぎボルト削減実験を行って実際の影響を確認し、リング継ぎボルトを削減した千鳥組のシールドトンネルを「はりばねモデル」にモデル化する場合にリング間せん断ばねをどのように評価すればよいかを検討する。

現場計測は、図-1に示すように、リング継ぎボルトを半減した試験リング（5リング）で行い、組立時の自重によるリング変形量、シールド機テール内からテール脱出後にかけての目違い量を計測した。さらに、通常本数のリング継ぎボルトで締結された通常リング（5リング）においても同様の計測を行った。リング継ぎボルトの配置は図-2に示すとおりで、各中子に2本あるボルトのうちの1本は締結を行い、もう1本は挿入するだけにして組立て、計測終了後に全リング継ぎボルトを締結した。

3. 解析手法

営団では、シールドトンネルの解析を行う際、「はりばねモデル」のリング間せん断ばね定数は無限大として解析しているが、今回の解析では、リング継ぎボルト削減の影響をリング間せん断ばね定数の変化で評価する。

解析は、図-3に示したように2リングの「はりばねモデル」で行う。また、テール内では無支持状態であるが、解析上、第1リング目のみに架空の地盤バネ（ $K_s=0.001\text{kgf/cm}^3$ ）を設定し計算を行った。

解析モデルの物性値を表-1に示す。

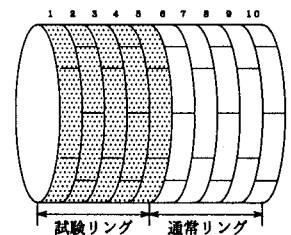


図-1：試験施工の概略図

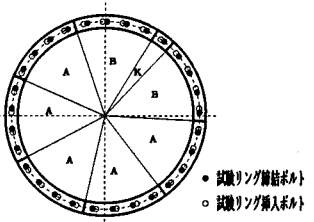


図-2：リング継ぎボルト締結図

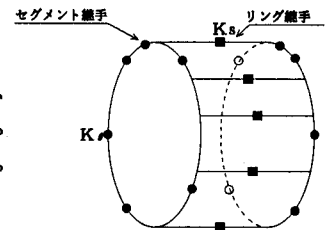


図-3：解析モデル図

4. 計測結果とその考察

①目違い量について

組立時の緩みが、テール内脱出後（3リング掘進後）にリング周囲に行われる裏込め注入により締まる。この傾向は、当然、ボルト本数の少ない試験リングの方が顕著に現れた（図-4、5参照）。

②リング変形量について

試験リングでは、自重による鉛直方向のつぶれがあるが通常リングではつぶれは起きていない（図-6参照）。組立時のリングはシールドジャッキによって支えられていることから、リングの変形が拘束されていると考えられる。

したがって、計測より得られた変形量を、最小変形量とするならば、hongo3またはhongo4が、試験リングの自重による挙動を近似したものと考えられる。

③曲げモーメントについて

試験リングの曲げモーメントは、解析から予測すると、剛性一様リングに近い状態であると考えられる（表-3参照）。最大曲げモーメントは、通常リングより小さくなっている。これは、リング継ぎボルトの削減により添接効果が減少し、セグメント継手部が変形しやすく、セグメントの最大曲げモーメントの増加を抑えているものと考えられる。

しかし、表-3からもわかるとおり、セグメント継手部にはかなり大きな曲げモーメントが作用することになり、構造的には、良好とは言えない。断面が大きくなりリング自重が増加すれば、さらに不利になる。今回は、「リング継ぎボルト半減」という極端な状況を想定したが、構造上からみて必要なリング継ぎボルト本数を検討する必要がある。

5. まとめ

本報告では、リング継ぎボルトを削減した場合の、自重による変形および曲げモーメントへの影響を考えた。解析モデルとして、2リングモデルを用い、リング間せん断ばね定数を 10^4 [tf/m]前後とし、第1リングのみに非常に柔らかい架空の地盤ばねを設定することで、組立時のリング挙動を説明できると考えられる。ただし、ジャッキ圧等の不確定要素を残しているため、これらを含め、より現実に近い解析モデルを検討してゆく必要がある。

また、今回の試験施工実績によれば、リング継ぎボルトの削減による組立時間の短縮効果はあったが、Kセグメントの組立がしにくい、若干の漏水があったという施工上の問題もあった。

今後、これらの検討を進めるとともに、より大きな断面になった場合の自重による曲げモーメントと耐力との関係、完成後に土水圧が作用した場合の検討等、今回取り上げなかったトンネル横断面に関するものや、トンネル軸方向に関する地震時への影響等を総合評価し、リング継ぎボルト本数を検討してゆく。

表-1：解析モデルの継手バネ物性値一覧表

単位[tf, m, rad]

モデル名	セグメント継手バネ	リング継手バネ	モデル名	セグメント継手バネ	リング継手バネ
hongo		∞ 通常リング	hongo4		10 ³ 半減リング
hongo1	$k_g = 5.60 \times 10^3$	∞ 半減リング	hongo5	$k_g = 5.60 \times 10^3$	10 ² 半減リング
hongo2	$k_g = 2.96 \times 10^3$	10 ⁵ 半減リング	hongo6	$k_g = 2.96 \times 10^3$	10 ¹ 半減リング
hongo3		10 ⁴ 半減リング	hongo7		10 ⁰ 半減リング

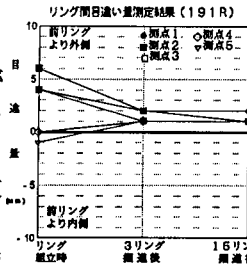
注) 上記の k_g は、理論値。実験値は $1.44 \times 10^3 \sim 5.18 \times 10^3$ である。

図-4：目違い量計測結果（半減リング）

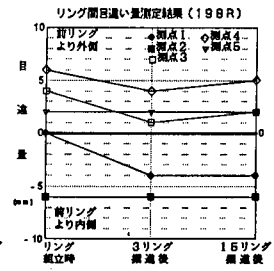


図-5：目違い量計測結果（通常リング）

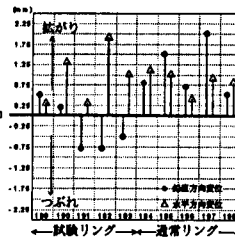


図-6：試験施工リング変形量計測結果

表-2：解析結果と計測値の比較

モデル名	δ_v cm	δ_h cm	リングNo	δ_v cm	δ_h cm
hongo	-0.62	0.24	試 189	0.5	0.3
hongo1	-0.67	0.29	験 190	0.2	1.3
hongo2	-0.63	0.46	リ 191	-0.8	0.3
hongo3	-1.04	0.74	ン 192	-0.8	1.9
hongo4	-1.16	1.03	グ 193	-0.5	1.0
hongo5	-0.67	0.68	運 194	0.8	1.1
hongo6	-0.09	0.10	常 195	1.5	1.0
hongo7	-0.06	0.05	リ 196	0.7	0.4
			ン 197	2.0	0.9
			グ 198	0.5	0.8

(+)つぶれ、(-)張り

表-3：解析で求められた曲げモーメント図

hongo	hongo1	hongo3	hongo4
$+M_{max}: 20.41(\text{tfm})$ $-M_{max}: -23.70(\text{tfm})$	$+M_{max}: 21.56(\text{tfm})$ $-M_{max}: -24.39(\text{tfm})$	$+M_{max}: 14.46(\text{tfm})$ $-M_{max}: -15.97(\text{tfm})$	$+M_{max}: 12.43(\text{tfm})$ $-M_{max}: -10.57(\text{tfm})$