

道路シールドトンネルにおけるセグメントの 広幅化に関する検討

Study on extending the segment width of an expressway shield tunnel

寺山 徹¹・津野 和宏²・春日 清志³・団 昭博⁴・今田 徹⁵

Toru Terayama, Kazuhiro Tsuno, Kiyoshi Kasuga, Akihiro Dan and Toru Konda

¹正会員 首都高速道路公団神奈川建設局 建設第一部 (〒221-0013 神奈川県横浜市神奈川区新子安1-2-4)

²正会員 首都高速道路公団神奈川建設局 建設第一部 (〒221-0013 神奈川県横浜市神奈川区新子安1-2-4)

³正会員 首都高速道路公団神奈川建設局 建設第一部 (〒221-0013 神奈川県横浜市神奈川区新子安1-2-4)

⁴正会員 工修 日本シビックコンサルタント株式会社 技術本部技術研究部 (〒116-0013 東京都荒川区西日暮里2-26-2)

⁵正会員 工博 財団法人国土技術研究センター 顧問 (〒105-0001 東京都港区虎ノ門3-12-1)

A road shield tunnel of a large cross section as large as 12 meters in outside diameter generally uses 1.5-meter segments. Since wider segments are considered to effectively reduce segment production costs, an analytical study was conducted on extending the segment width to 2.0 meters.

In the analysis, three-dimensional segment models were used to directly evaluate the effect on segments for the width direction and the applicability of extending the segment width.

Key Words : Expressway shield tunnel, segment width, numerical analysis, stress concentration

1. はじめに

現在、道路シールド用セグメントの幅は、一般的に1.5mを標準としている¹⁾が、固結地盤での施工やトンネル平面線形条件等によっては、工事費の削減を図る手段として、これまでの実績を上回る広幅セグメントを採用することが有効と考えられる。

一方、セグメントの広幅化にともなってリング継手に発生するせん断力が増加し、これによりセグメント本体の曲げ応力がセグメント端部（リング継手周辺）に集中することが懸念される。しかし、セグメントの構造設計として適用されている骨組構造解析手法（はりーばねモデル）では、セグメント幅方向の応力状態を把握することができない。こうした解析手法にもかかわらず、広幅セグメントに骨組構造解析手法を適用すると、土水圧や施工時荷重などの各種荷重が作用することによって、セグメントの損傷など不具合の生じることが懸念される。したがって、セグメント幅方向に発生する応力状態を適切に評価できる解析を実施する必要がある。

こうした背景から、千鳥組により組立てられたセグメントを対象として、三次元でモデル化した数値

解析を実施し、セグメント幅方向に分布する応力状態を比較し、この結果から広幅セグメントの適用性を評価した。

2. 解析条件

(1) セグメント構造

道路シールドトンネルの場合、シールド外径が12m程度と大断面の構造となる。したがって、セグメント製作費の削減、施工性および止水性等の観点から、これまでの実績を上回る広幅セグメントを採用することが有効であると考えられる。今回の検討では、セグメントの製作、運搬および施工（組立）といった一連の過程を考慮して、セグメント幅の上限を2.0mと想定した。また、セグメント厚については、首都圏で広範囲に分布している第三期層をモデル地盤として既往の設計基準²⁾に拠り決定された最小厚を採用した。

なお、セグメント形式については、道路シールドトンネルの実績を考慮して、一般的に採用されているRC平板形セグメント、合成（嵌合方式）セグメン

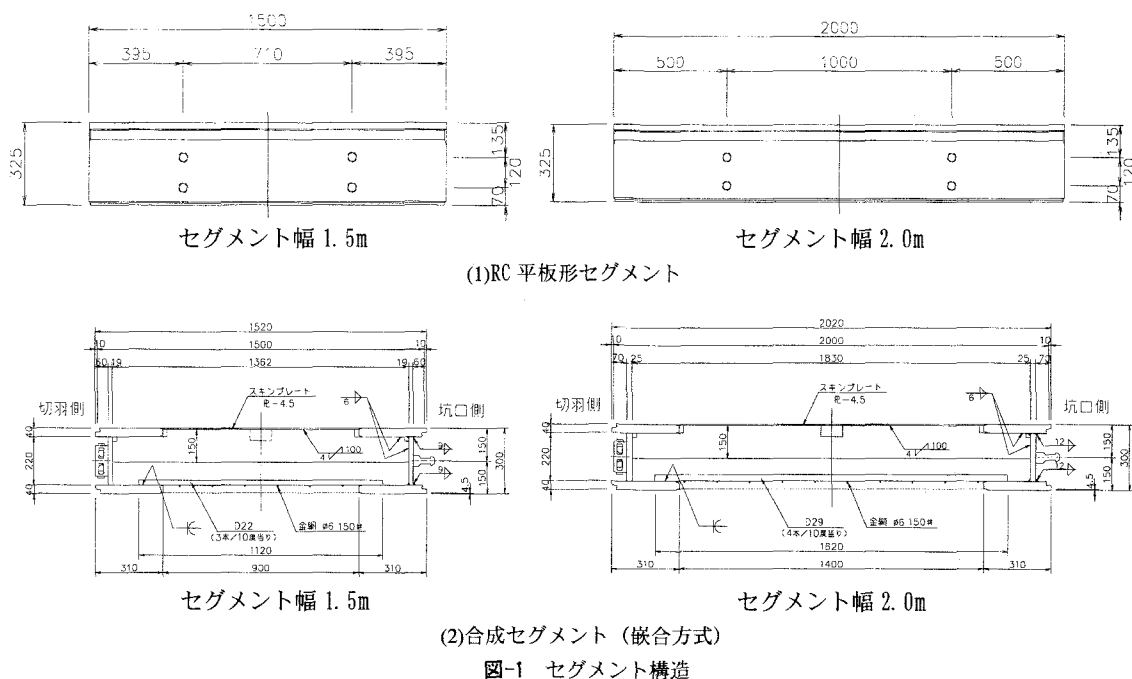


表-1 セグメント構造諸元

形 式	RC平板形	合成
外 径(mm)	11,950	11,950
内 径(mm)	11,300	11,350
厚 さ(mm)	325	300
幅 (mm)	1,500, 2,000	
分 割 数	9等分割	9+K分割
リング継手数	3継手/ピース	2継手/ピース

トを対象とした。ここで合成（嵌合方式）セグメントを対象としたのは、掘削断面の縮小によるコスト削減効果が期待できるからである。本検討に用いるセグメント構造諸元を表-1および図-1に、それぞれ示す。

(2) 解析方法

a) 解析モデル

解析モデルは、図-2に示すように千鳥組により組立てられたセグメントリングに対して、セグメントの広幅化にともなう影響を確認する必要があることから、これらを直接、表現できるように三次元弾性FEM解析を適用し、近年の施工実績を考慮して2リ

ングの千鳥組を想定してモデル化することとした。なお、本構造の場合、中央のリング中心線より対称形となるため1/2モデルを採用した。さらに添接の影響を考慮した添接曲げ試験²⁾を参考にして、図-2に示すようにA型セグメントを1+(1/3)ピース取り出してモデル化した。なお、モデルの境界条件として、モデルの両端はローラ支持としている。

b) 解析定数

各種セグメントの部材定数および継手ばね定数については、既往の実績³⁾に基づいて表-2のとおり設定した。なお、各継手ばね定数について、RC平板形セグメントは締結金具の位置に相当する接点に設定している。これに対し、合成セグメントの場合、セグメント継手ばね（引張、圧縮、せん断）はRC平板形セグメントと同様の考え方に基づいて設定しているが、リング継手の構造が凹凸形状を有しており、せん断力の作用に対して全周で抵抗することを考慮して、全接点に対してリング継手ばねを設定した。

c) 作用荷重

本解析では、セグメントの広幅化にともなってセグメント幅方向に発生する応力状態を定量的に評価することを目的としていることから、単位荷重として $W=100\text{kN/m}^2$ をセグメント背面全体に等分布で載荷させた。

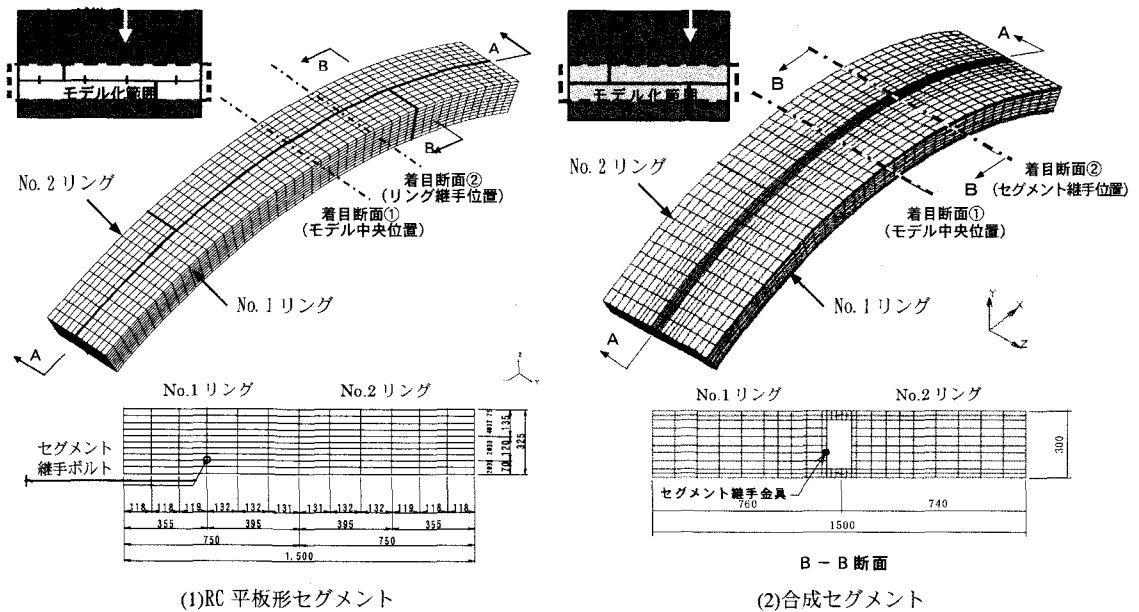


図-2 解析モデル

表-2 セグメント構造解析定数

3. 解析結果

(1) 評価方法

セグメント幅の拡大にともなってリング継手に発生するせん断力が増加し、セグメント本体の曲げ応力がセグメント端部、特にリング継手周辺に集中することが既往の研究により報告⁴⁾されていることから、セグメント端部に発生する円周方向曲げモーメントの集中度に着目して下式により応力集中度 α_1 、 α_2 を算出し、これによりセグメント幅の違いによる影響度合いを評価することとした。

$$\alpha_1 = \frac{M_l}{M_m} \quad (1)$$

$$\alpha_2 = \frac{M_s}{M_m} \quad (2)$$

ここで、

M_l : 各要素の円周方向曲げモーメント最大値

M_s : 各要素の円周方向曲げモーメント最小値

M_m : 各要素の円周方向曲げモーメント平均値

(2) RCセグメント

項 目		RC 平板形	合成
コンクリート	設計基準強度(N/mm ²)	54	54
	弾性係数(kN/mm ²)	45	45
	ポアソン比	0.2	0.2
鋼 材	弾性係数(kN/mm ²)	—	210
	ポアソン比	—	0.3
セグメント 継手	引張ばね(kN/m/箇所)	1,200,000	1,370,000
	圧縮ばね(kN/m/節点)	∞	∞
	せん断ばね(kN/m/節点)	∞	∞
リング継手 せん断ばね	半径方向(kN/m/箇所)	100,000	接触時∞ 離間時 0
	接線方向(kN/m/箇所)	100,000	0

RC 平板形セグメントを対象として、セグメント本体部ならびにリング継手位置におけるセグメント幅方向の曲げモーメント分布を図-3 に、応力集中度の算定結果を表-3 に、それぞれ示す。

図-3(1)に示すモデル中央位置（セグメント本体位置）の曲げモーメント分布をみると、セグメント幅の違いによらず曲げモーメントは 300～310kN・m 程度の範囲に分布し、曲げモーメントより算出した応力集中度は最大でも $\alpha_f=1.01$ であることから、セグメント広幅化による影響をほとんど受けていない。

一方、同図(2)に示すリング継手位置の曲げモー

メント分布をみると、セグメントの幅中央付近からリング継手面に近づくにつれて、添接効果の影響により曲げモーメントは急激に変化する傾向が認められる。この付近での応力集中度は、1.5m 幅が最大で $\alpha_f=1.15$ であるのに対し、2.0m 幅は最大で $\alpha_f=1.26$ と 9% 程度の応力集中度の増加が発生している。

以上、セグメント幅を 1.5m から 2.0m に拡大することによって、セグメント本体部へはほとんど影響を及ぼさないものの、リング継手付近では 9% 程度の応力増加が発生する恐れがある。これを考慮すると、広幅セグメントの適用に際して、主鉄筋は 1.5m 幅のセグメントと同様に配置することで対応可能であるものの、リング継手周りについてはこれまで以上に補強するなどの対策を講じる必要がある。

(3) 合成セグメント

合成セグメントを対象として、セグメント本体部ならびにセグメント継手位置におけるセグメント幅方向の曲げモーメント分布を図-4 に、応力集中度の算定結果を表-4 に、それぞれ示す。ここで、合成セグメントの場合、その構造は鋼主桁とコンクリートにより構成されており、セグメント幅方向に対していずれかの部材が主構造部材となる範囲を明確にできることから、鋼主桁とコンクリートそれぞれの範囲に対して応力集中度を算定し、評価することとした。

図-4(1)に示すセグメント本体位置での曲げモーメント分布に着目すると、リング継手面から 300mm の範囲に設置している鋼材の曲げモーメントは、1.5m 幅が 600kN・m/m 程度に対して 2.0m 幅は 750kN・m/m 程度と大きく、この傾向は、コンクリート部材の範囲でも確認できる。この

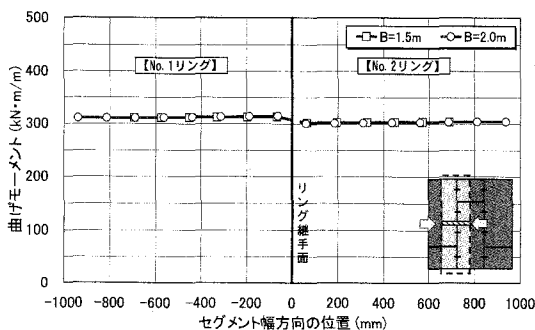
理由として、セグメント幅に関係なく鋼材の構造を同一にしているため、セグメント幅の拡大にともなう鋼材への負担が増加したことによるものと考えられる。一方、応力集中度をみると、1.5m 幅ではコンクリート部が最大で $\alpha_f=1.04$ 、鋼材部は最大で $\alpha_f=1.03$ であるのに対し、2.0m 幅ではコンクリート部が最大で $\alpha_f=1.14$ 、鋼材部は最大で $\alpha_f=1.05$ となり、セグメント幅の拡大にともなう 4~10% 程度の主応力集中度の増加が認められる。

また、同図(2)に示すセグメント継手位置での曲げモーメント分布に着目すると、コンクリート部材の範囲でセグメント幅によらず曲げモーメントはほぼ同値を示しているのに対し、鋼材範囲ではセグメント本体部での傾向と同様に 2.0m 幅のほうが曲げモーメントの発生量は大きいことが確認できる。これは、セグメント継手面に発生する曲げモーメントが添接効果により影響を及ぼしたものと考えられる。一方、応力集中度をみると、1.5m 幅ではコンクリート部が最大で $\alpha_f=1.03$ 、鋼材部は最大で $\alpha_f=1.25$ であるのに対し、2.0m 幅ではコンクリート部が最大で $\alpha_f=1.06$ 、鋼材部は最大で $\alpha_f=1.38$ となり、セグメント幅の拡大にともなう 6~10% 程度の曲げモーメントの増加が認められる。

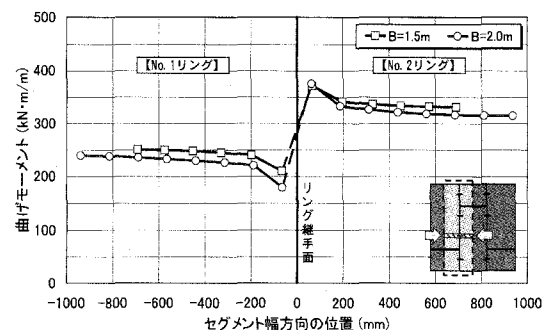
以上、リング継手面付近に鋼材を配置している合成セグメントの場合、鋼材が荷重を負担する特徴の

表-3 RC 平板形セグメントの応力集中度

		本体位置		リング継手位置		応力集中度 変化率 (%)
		1.5m	2.0m	1.5m	2.0m	
No.1 リング	α_1	1.00	1.01	1.04	1.07	2.9
	α_2	1.00	1.00	0.87	0.80	-8.8
No.2 リング	α_1	1.00	1.01	1.09	1.15	5.5
	α_2	1.00	0.99	0.97	0.96	-1.0



(1)着目断面① (セグメント本体位置)



(2)着目断面② (リング継手位置)

図-3 RC 平板形セグメントにおける幅方向の曲げモーメント分布比較

解析結果に明確に現れているが、セグメント幅を1.5m から 2.0m へ拡大することによってコンクリート部では最大で 6%程度、鋼材部では最大で 10%程度の曲げモーメントの増加が発生する恐れがある。これを考慮すると、リング継手部の鋼主桁を補強するとともにセグメント幅中央付近に鋼主桁や周方向鉄筋を別途、配置するなどして、補強対策を実施する必要があると考えられる。

4. まとめ

道路シールドトンネルにおけるセグメントの広幅化による影響について、添接効果を再現した三次元弾性FEM解析により得られた知見をまとめると、以下の通りである。

- ・ RC 平板形セグメントの場合、セグメント幅を1.5m から 2.0m に拡大することによってリング継手付近では 10%程度の曲げモーメントの増加が懸念されることから、リング継手周りを補強するなどの対策を講じる必要がある。
- ・ 合成セグメントの場合、セグメント幅を 1.5m から 2.0m へ拡大することによってコンクリート部では最大で 6%程度、鋼材部では最大で 15%程度の曲げモーメントの増加が懸念されることから、

リング継手部の鋼主桁を補強するとともにセグメント幅中央付近に鋼主桁や周方向鉄筋を別途、配置するなどの補強対策を講じる必要がある。

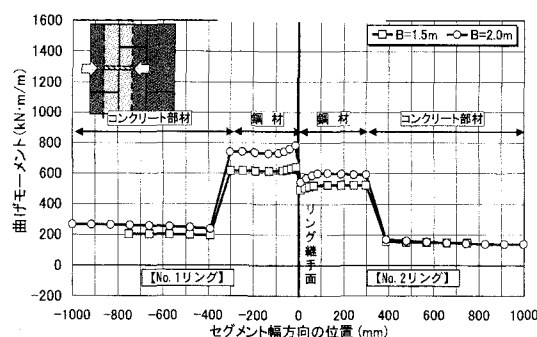
以上、セグメント広幅化による影響を、数値解析により定量的に評価し、広幅セグメントの適用に際して構造上の対策を明確にできた。今後は、広幅セグメントの設計法を確立するなど、広幅セグメントの適用に向けた検討を進めていく。

参考文献

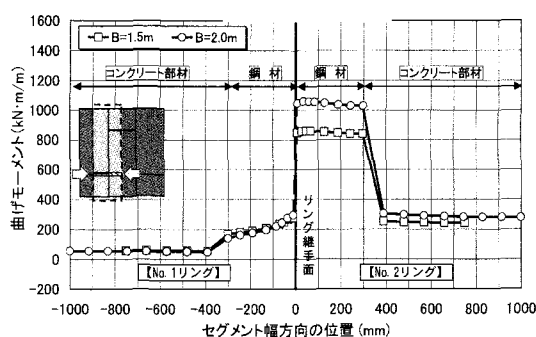
- 1) 首都高速道路公団工務部：トンネル構造物設計要領（シールド工法編），2003.5.
- 2) 例えば、望月，寺澤，城内，清水：幅拡大セグメントの応力分布確認試験，土木学会題55回年次学術講演会講演概要集Ⅲ，2000.9.
- 3) 例えば、SI単位版 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 シールドトンネル，2002.12.
- 4) 例えば、石田智朗，中筋智之ら：RCセグメントのセグメント幅に関する研究，トンネル工学研究発表会論文・報告集，第4巻 pp. 25-32, 1994.

表-4 合成セグメントの応力集中度

			本体位置		セグメント継手位置		応力集中度 変化率 (%)
			1.5m	2.0m	1.5m	2.0m	
No.1 リング	コンクリート	α_1	1.02	1.04	1.02	1.06	3.9
		α_2	0.97	0.93	0.96	0.91	-5.5
	鋼材	α_1	1.03	1.05	1.25	1.38	10.4
		α_2	0.99	0.98	0.76	0.66	-15.2
No.2 リング	コンクリート	α_1	1.04	1.14	1.03	1.06	2.9
		α_2	0.98	0.93	0.98	0.97	-1.0
	鋼材	α_1	1.02	1.03	1.01	1.01	1.0
		α_2	0.96	0.93	0.99	0.98	-3.2



(1)着目断面①（セグメント本体位置）



(2)着目断面②（セグメント継手位置）

図-4 合成セグメントにおける幅方向の曲げモーメント分布比較