

二次覆工一体型セグメントとその標準化

"Secondary-Lining-Applied Segment" and its Standardization

松浦将行¹⁾・高久節夫²⁾・斉藤正幸³⁾

Masayuki MATSUURA, Setsuo TAKAKU, Masayuki SAITO

Bureau of Sewerage, Tokyo metropolitan government has a plan to increase the efficiency of constructing sanitary or combined sewer tunnels to reduce the cost of shield tunneling for sewerage systems. Specifically, segments in sanitary or combined sewer tunnels are shop-applied with secondary linings to eliminate secondary lining work at the site. This paper describes the results of a study to standardize the method of designing segments shop-applied with secondary linings, which are referred to as "secondary-lining-applied segments".

Key Words: shield tunnel, segment, design, secondary lining, sewer tunnel

1. はじめに

東京都下水道局では、現在、下水道シールド工事の工事費縮減の一環として、雨水および雨水貯留管等に二次覆工省略の導入を進めている。二次覆工の省略は、二次覆工に係わる工費・工期の削減のみならず、掘削外径の縮小によるコスト縮減（シールド機製作費・発生残土処分費・発生土処理設備費等）のメリットが期待できる。ただし、この二次覆工省略の適用範囲は、使用環境が污水管に比べ良好な雨水管渠等を対象としたものであり、合流管渠および污水管渠に対しては二次覆工の省略を見合わせているのが実状である。

そこで、東京都下水道局では、従来の二次覆工の考え方を整理し、使用環境が腐食性環境と考えられる下水道管渠、すなわち合流管渠および污水管渠に対して、あらかじめ二次覆工を施したセグメント（これを「二次覆工一体型セグメント」と称することとした）の採用を考えた。これによって、1)現場での二次覆工を省略することによる施工の合理化、2)外径の縮小によるコスト縮減を期待するものである。

本研究は、二次覆工一体型セグメントを用いるにあたって、設計・施工上の標準化を図るべく、基本的な考え方、主な構造細目および構造計算方法について整理したものである。

2. 二次覆工の目的と二次覆工一体型セグメントの適用範囲

下水道シールドにおけるこれまでの二次覆工施工の目的は、一次覆工（セグメント）の「蛇行修正」、「内面平滑化」、「防水」、「防食」等の使用目的を補完するものがほとんどである。また、構造計算ではトンネルの構造

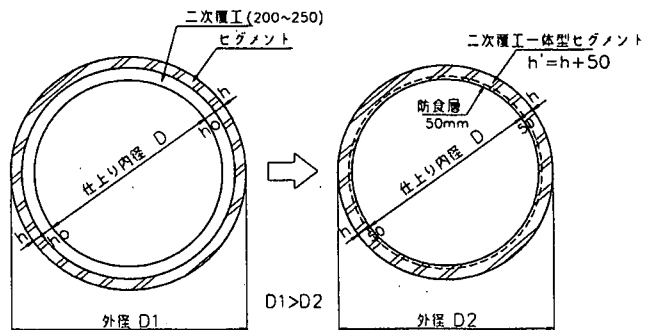


図-1 二次覆工一体型セグメント概要図

- 1) 東京都下水道局建設部 設計調整課課長
- 2) 東京都下水道局建設部 設計調整課事業調査担当係長
- 3) 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

部材として評価しないのが一般的である。現在のシールド技術においては、「蛇行修正」、「内面平滑化」に関しては、施工精度の向上および内面平滑型セグメントの開発によって、一次覆工で下水道の使用目的に対し満足できる状況にある。また、防水についても、既に二次覆工省略の導入を図っており一次覆工のみで実用上問題は生じていない。よって、現状の下水道シールドにおける二次覆工の施工は防食機能の確保が主目的と整理できる。ここで合流管渠および汚水管渠は、腐食性環境下での使用となることから、二次覆工の防食機能が必要と判断される。そこで、これらの管渠に対して製作時にあらかじめセグメント内面に無筋コンクリート層を設けて防食機能を有するセグメント、すなわち「二次覆工一体型セグメント」の適用を考えた。二次覆工一体型セグメントの適用範囲を表-1に示す。

表-1 二次覆工一体型セグメントの適用範囲

3. 基本構造

(1) 基本構造

下水道シールドでは、一般に下水道工用標準セグメントを採用しており、二次覆工一体型セグメントの基本構造は、このセグメントの内面に防

環境条件	適用管渠の種類	備考
一般の環境	1. 雨水管渠(分流式および合流式のピークカット管渠) 2. 処理水放流管渠 3. 雨水貯留管渠(合流式のピークカットによる 暫定貯留管渠)	二次覆工省略型セグメントを 適用対象とする管渠の種類
腐食性環境	合流管渠	二次覆工一体型セグメントを 適用対象とする管渠の種類
	汚水管渠	

食層(50mmの無筋コンクリート層)を付加させたものとした。防食層は、セグメント工場等においてセグメントの製作と同時に、または一連の工程の中でセグメントと一体に成形することとし、防食層のコンクリートには、鉄筋コンクリートセグメントに用いるのと同じ設計基準強度 $f_{ck}=42\text{N/mm}^2$ 以上で、水セメント比が35~40%程度の水密性に優れた高い品質を有するものを用いて、従来の二次覆工を代替する耐久性を確保するものとした。

(2) 防食層

防食層は、主として二次覆工一体型セグメントの耐久性を確保することを目的として設けるものである。現時点では、経年50年を想定したコンクリートの中性化深さの推定値(15mm以下)(表-2)と建設後50年以上を経過した合流管渠の中性化深さ実態調査結果(30mm以下が75%以上)(図-2)を基本として、施工上からの必要厚さを考慮して、防食層の厚さとして50mmを確保するものとした。ただし、硫化水素や化学物質等に対する耐久性については確認できていないのが現状であり、今後の調査研究による確認が必要である。しかし、二次覆工一体型セグメントの防食層が工場等でセグメントと一体に製作されることを前提とすれば、コンクリート強度は現場打ちと比較して十分に高いことから一定の防食性は確保できるものとする。また、ここでは約50年間の供用で最大50mmの劣化を想定したが、万一、硫化水素や化学物質等により想定以上の劣化が発生した場合にも防食層の補修を行うことで対応する考えである。

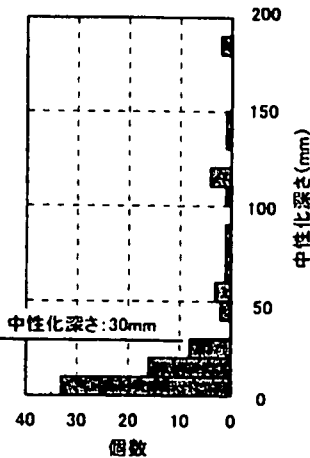


図-2 経年50年の合流管渠の中性化深さ実態調査結果¹⁾

表-2 セグメント用コンクリートの中性化深さの推定値

推定式	50年での中性化深さ推定値(W/C=43%)
1) 土木学会式	5.0mm
2) 岸谷式	5.7mm
3) 灰田式	14.9mm
4) 白山式	5.0mm
5) 依田式	1.1mm

(3) コーキング溝

二次覆工一体型セグメントは内面に無筋コンクリ

ートの防食層を有するため、この部分がセグメント弱点となりやすい。このため、二次覆工一体型のコンクリート系セグメントでは従来20mm程度設けていたコーキング溝を防食層の厚さ50mmと本体部の鉄筋被り約20mmを加えた無筋コンクリート部厚さの50%に相当する35mm以上設けることとした。このコーキング溝によって、ジャッキ推力の偏心や組立時の競りによって生じる外力が無筋コンクリート部の厚さの中心よりセグメント本体側に作用することで損傷を防止の効果を期待する。

4. 構造計算

二次覆工一体型セグメントは防食層を有することから、これに配慮して構造計算を行わなければならない。構造計算においては、防食層を表-3に示すように扱うこととした。これは、防食層が永年の供用中に劣化や摩耗によって浸食される可能性があるが、その定量的な評価は困難なため、安全側の設計となるように配慮したものである。図-3～4および表-4～5に、所定の防食層を有する場合（完成直後の状態）と防食層を有さない場合（将来防食層が劣化して消失した状態を想定）の試設計結果を示す。応力度の照査を防食層を無視して行うことを前提として、防食層を有する場合の構造計算が厳しい断面力を与えることが確認できる。よって、二次覆工一体型セグメントの構造計算は、断面力の算定では防食層を考慮して行い、応力度照査において防食層を無視した断面で行うこととした。

表-3 二次覆工一体型セグメントの構造計算

- 1)断面力の算定は、防食層を考慮して行う（部材剛性，図心半径）
- 2)応力度の算定にあたっては、防食層を考慮しない

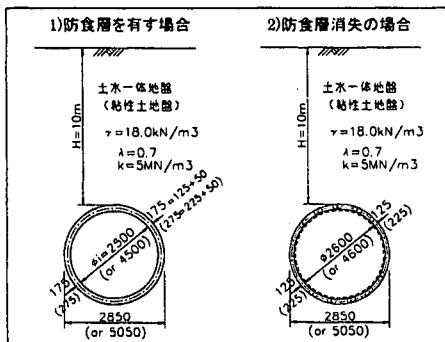


図-3 防食層有無による試設計断面

表-4 各ケースの構造計算諸元

項目	構造計算諸元			
防食層の 取扱い	1)防食層を所定 厚有する場合	2)防食層が消失 した場合	3)防食層を安全 側に扱った場合	
仕上り径 φ2500	ケース名	<case1-1>	<case1-2>	<case1-3>
	外 径 Do(mm)	2850	2850	2850
	セグメント厚 h(mm)	175	125	175(自重,剛性) 125(図心)
	図心半径 Rc(m)	1.3375	1.3625	1.3625
	断面二次モーメント I(m ⁴)	4.661×10 ⁻⁴	1.628×10 ⁻⁴	4.661×10 ⁻⁴
	断 面 積 A(m ²)	0.175	0.125	0.175
	自 重 g(kN/m)	4.55	3.25	4.55
仕上り径 φ4500	ケース名	<case2-1>	<case2-2>	<case2-3>
	外 径 Do(mm)	5050	5050	5050
	セグメント厚 h(mm)	275	225	275(自重,剛性) 225(図心)
	図心半径 Rc(m)	2.3875	2.4125	2.4125
	断面二次モーメント I(m ⁴)	2.080×10 ⁻³	1.391×10 ⁻³	2.080×10 ⁻³
	断 面 積 A(m ²)	0.330	0.270	0.330
	自 重 g(kN/m)	8.58	7.02	8.58

表-5 最大断面力の一覧

(a) $\phi 2500\text{mm}$, $h=175(=125+50)\text{mm}$				
	case1-1	case1-2	case1-3	
曲げモーメント	55.6 (1.0)	42.8 (0.77)	57.0 (1.03)	kNm/R
軸力	320.1 (1.0)	327.8 (1.02)	326.3 (1.02)	kN/R
せん断力	112.2 (1.0)	91.5 (0.82)	113.5 (1.01)	kN/R
(b) $\phi 4500\text{mm}$, $h=275(=225+50)\text{mm}$				
	case2-1	case2-2	case2-3	
曲げモーメント	119.1 (1.0)	95.5 (0.80)	120.0 (1.01)	kNm/R
軸力	632.1 (1.0)	633.8 (1.00)	639.0 (1.01)	kN/R
せん断力	167.0 (1.0)	153.3 (0.92)	168.3 (1.01)	kN/R

※ () は防食層有りのケースの発生断面力を 1.0 とした比率

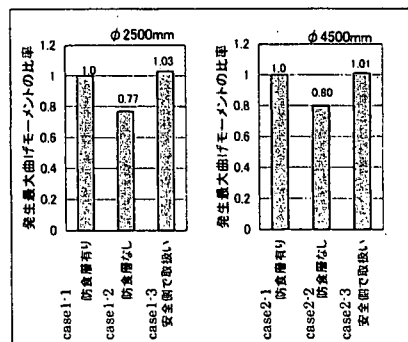


図-4 試設計結果による発生曲げモーメントの比較

5. 構造解析手法の適用範囲の整理

二次覆工一体型セグメントの採用を考えたとき、内面平滑性の確保等から、今後多様なセグメント型式が対象となってくることが考えられる。従来、下水道シールドではセグメントの設計は慣用法が主体として採

用されてきた。現在、多種のセグメント型式が出回るようになって、セグメント型式の構造特性に応じて適宜解析手法を取り扱っている状況である。そこで下水道シールド管渠の規模を対象として、地盤条件とセグメントの構造特性によって、二次覆工一体型セグメントの解析手法の整理を行った。セグメントの構造特性は、セグメント継手の曲げ剛性に着目した。標準化のために、継手曲げ剛性は $k\theta^*$ の無次元化した定数で扱った(式-1)。表-10は、これらを整理した結果である。これを検討するにあたっての試設計の条件および解析結果を表-6～9および図-5～6に示す。

表-6 試設計の地盤条件

地盤の分類	土の工学的分類	λ	k (MN/m ³)	土被り
1	土水分離地盤			
2	非常によく締った砂質土	0.35	50	H=30m
3	締った砂質土	0.45	30	H=20m
4	緩い砂質土	0.55	10	H=10m
5	固結した粘性土	0.35	50	H=10m, 20m, 30m
6	硬い粘性土	0.45	30	H=10m, 20m, 30m
7	中位の粘性土	0.50	10	H=10m, 20m, 30m
8	土水一体地盤			
9	中位の粘性土	0.65	10	H=10m, 20m, 30m
10	軟らかい粘性土	0.70	5	H=10m, 20m, 30m
11	非常に軟らかい粘性土	0.75	0	H=10m, 20m, 30m

※砂質土は地盤条件に相応する土被りに設定した。

表-7 セグメントの構造条件

仕上がり内径 ϕ (mm)	2500	3000	3500	4000	4500
セグメント厚さ h (mm) ^{※1}	175(～300)	200(～325)	225(～350)	250(～375)	275(～400)
セグメント幅 B (mm)	1000	1000	1000	1200	1200
分割数	5	5	6	6	6
リング継手ボルト数	13	13	16	16	16
セグメント継手曲げ剛性	$k\theta^* = \infty, 1.0, 0.05, 0$ の4種				

※セグメント厚さは二次覆工相当厚50mmを含む

※セグメント継手曲げ剛性はパラメタスタディより設定した

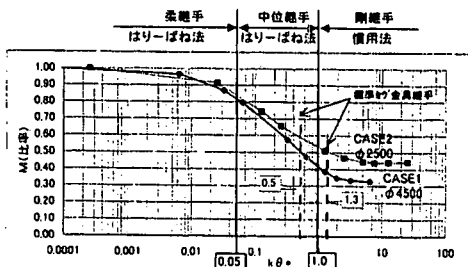


図-5 パラメタスタディによる継手剛性の設定

参考資料:「下水道シールド工事用標準セグメント」

表1-15 側方土圧係数(1)及び地盤反力係数(4)

地盤の分類	土の工学的分類	λ	k (MN/m ³)	土被り H (m)
土水分離地盤	非常によく締った砂質土	0.35～0.45	30～50	30.6N
	締った砂質土	0.45～0.55	10～30	15.5N<30
	緩い砂質土	0.50～0.60	0～10	N<15
	固結した粘性土	0.35～0.45	30～50	25.6N
土水一体地盤	硬い粘性土	0.45～0.55	10～30	8.6N<25
	中位の粘性土	0.55～0.65	5～10	4.6N<8
	軟らかい粘性土	0.65～0.75	0～5	4.6N<8
	非常に軟らかい粘性土	0.75～0.85	0	2.6N<4

無次元化したセグメント継手回転ばね定数^{※1}

$$k\theta^* = \frac{Rc \cdot k\theta}{E \cdot I} \quad \dots (式-1)$$

$k\theta$: セグメント継手の回転ばね定数($kN \cdot m/rad$)

Rc : セグメント図心半径(m)

E : セグメントのヤング係数(kN/m^2)

I : セグメントの断面二次モーメント(m^4)

※出典: 第33回土木学会年次学術講演会Ⅲ-221, 1978

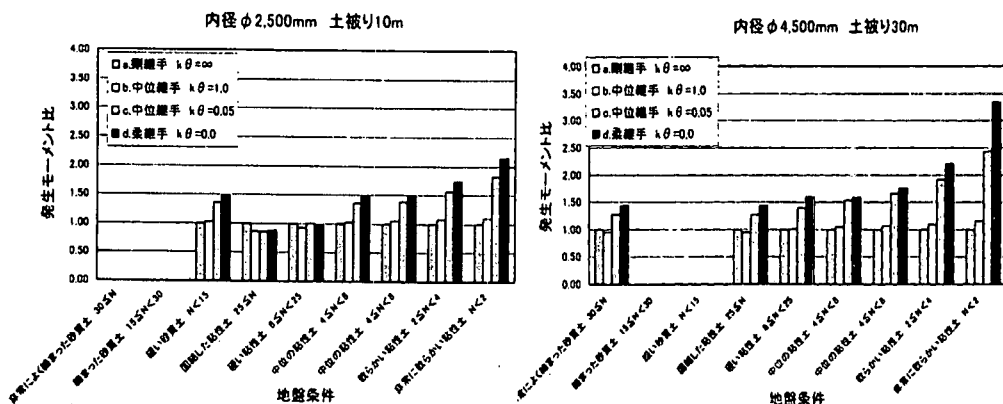


図-6 試設計結果による発生曲げモーメント比較の一例

この選定表を参照すれば、適用地盤条件とセグメントの構造特性によって構造解析手法を選定することができる。ただし、詳細な設計計算はセグメントの設計条件を十分踏まえて適切な設計手法を採用する必要がある。

表-8 試設計ケースにおける慣用法の適用性

		土水分離地盤								土水一体地盤							
		非常によく締まった砂質土	よく締まった砂質土	緩い砂質土	固結した粘性土	硬い粘性土	中位の粘性土	中位の粘性土	軟らかい粘性土	非常に軟らかい粘性土	非常によく締まった砂質土	よく締まった砂質土	緩い砂質土	固結した粘性土	硬い粘性土	中位の粘性土	中位の粘性土
		a, b, c, d	a, b, c, d	a, b, c, d	a, b, c, d	a, b, c, d	a, b, c, d	a, b, c, d	a, b, c, d	a, b, c, d	a, b, c, d	a, b, c, d	a, b, c, d	a, b, c, d	a, b, c, d	a, b, c, d	a, b, c, d
φ2500	H=10m																
	H=20m																
	H=30m																
φ3000	H=10m																
	H=20m																
	H=30m																
φ3500	H=10m																
	H=20m																
	H=30m																
φ4000	H=10m																
	H=20m																
	H=30m																
φ4500	H=10m																
	H=20m																
	H=30m																

【凡 例】 ○：慣用法の適用可能
×：慣用法の適用不適切
(慣用法での設計曲げモーメントの1.05以上)

【備 考】 地盤条件で記号a, b, c, dはセグメント継手の曲げ剛性を示し、それぞれ以下の条件である
a. $K\theta = \infty$ (慣用計算法) b. $K\theta = 1.0$ (はり-ばねモデル) c. $K\theta = 0.05$ (はり-ばねモデル) d. $K\theta = 0.0$ (はり-ばねモデル)

表-9 試設計による慣用法の適用範囲

	土質条件	土水分離地盤								土水一体地盤							
		非常によく締まった砂質土	よく締まった砂質土	緩い砂質土	固結した粘性土	硬い粘性土	中位の粘性土	中位の粘性土	軟らかい粘性土	非常に軟らかい粘性土	非常によく締まった砂質土	よく締まった砂質土	緩い砂質土	固結した粘性土	硬い粘性土	中位の粘性土	中位の粘性土
		a, b, c, d	a, b, c, d	a, b, c, d	a, b, c, d	a, b, c, d	a, b, c, d	a, b, c, d	a, b, c, d	a, b, c, d	a, b, c, d	a, b, c, d	a, b, c, d	a, b, c, d	a, b, c, d	a, b, c, d	a, b, c, d
φ2500	H=10m																
	H=20m																
	H=30m																
φ3000	H=10m																
	H=20m																
	H=30m																
φ3500	H=10m																
	H=20m																
	H=30m																
φ4000	H=10m																
	H=20m																
	H=30m																
φ4500	H=10m																
	H=20m																
	H=30m																

【凡 例】 ○：適用可能
△：要検討のうえ判断する必要あり
×：適用不可

【備 考】 上表適用範囲の判定は、継手剛性の範囲の境界値での試設計結果(表4.1)より以下のように判定した

試設計ケースでの判定	継手剛性の高い側での判定	継手剛性の低い側での判定	その両側の適用性
○	○	○	○
△	△	△	△
×	×	×	×

表-10 構造解析手法の選定表

地 盤 条 件			構造解析手法		
			$k_{\theta} = \infty \sim 1.0$	$k_{\theta} = 1.0 \sim 0.05$	$k_{\theta} = 0.05 \sim 0.0$
土水分離地盤	非常によく締まった砂質土	$30 \leq N$	慣用計算法	慣用計算法	慣用計算法
	よく締まった砂質土	$15 \leq N < 30$	慣用計算法	慣用計算法	慣用計算法
	緩い砂質土	$N < 15$	慣用計算法	はり-ばねモデル計算法 (慣用計算法)*2	はり-ばねモデル計算法
	固結した粘性土	$25 \leq N$	慣用計算法	慣用計算法	慣用計算法
	硬い粘性土	$8 \leq N < 25$	慣用計算法	慣用計算法	慣用計算法
土水一体地盤	中位の粘性土	$4 \leq N < 8$	慣用計算法	慣用計算法	慣用計算法
	軟らかい粘性土	$2 \leq N < 4$	慣用計算法	慣用計算法	慣用計算法
	非常な軟らかい粘性土	$N < 2$	慣用計算法	慣用計算法	慣用計算法
			慣用計算法	慣用計算法	慣用計算法
			慣用計算法	慣用計算法	慣用計算法

【対 象】 仕上がり内径φ2500mm～4500mm

【備 考】 *1.本表はセグメントの構造解析手法の選定の際に参照するものであり、セグメントの設計は施工時荷重の影響や施工面での取り扱い等を併せて十分な検討を行う必要がある

*2.実績等に基づいて慣用計算法とはりばねモデル計算法に差がないことを確認できる場合には慣用計算法を適用することもできる

*3.地盤条件はN値のみで判断することのないよう注意が必要である

*4.継手剛性は実験等を含む十分な検討に基づいて判断するものとする。ただし、過去に多くの実績を有しその評価方法を事例をもって証明できる場合には事前の実験による確認を省略することができる

6. その他の留意点

(1) 内面平滑性

二次覆工一体型セグメントは、現場打ちによる二次覆工を施工しない。このため、下水道シールド管渠に求められる流下能力を確保するため、セグメントそのものの内面平滑性が要求される。これについては、内

面平滑型のセグメントが有利となる場合が多いが、ボルトボックスの穴埋めや鋼製セグメント等ではコンクリート等による中詰めなどによって、セグメント内面の平滑性を確保する必要がある。

(2) 止水性

従来は、セグメントを組み立てた後に現場打ちコンクリートによる二次覆工を施工することで、セグメントが有する止水性と併せて二次覆工にもその補完機能を期待してきたが、二次覆工一体型セグメントでは、現場打ちの二次覆工を施工しないためセグメントで確実な止水性を確保できる構造とする必要がある。このため、セグメントはシール材及びコーキング等を含めて止水性能を十分に確保する構造となるよう十分な検討を行う必要がある。

(3) 曲げひび割れの照査

二次覆工一体型セグメントのうち、コンクリート系セグメントでは耐久性の観点から曲げひび割れの照査を行うこととした。曲げひび割れの照査にあたっては、許容ひび割れ幅はコンクリート標準示方書を参考に、特に厳しい腐食性環境である0.0035c（cはかぶり）とした。ここで、許容ひび割れ幅を算定する際のかぶりcは、防食層と本体構造部の境界位置までのかぶりを基本とした。（図-7）

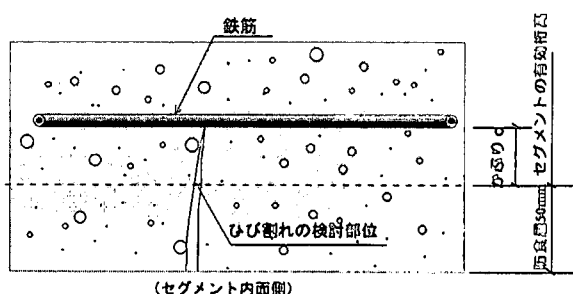


図-7 曲げひび割れの照査

(4) 形状寸法（分割数）

従来の二次覆工を前提としたセグメントの場合は、セグメント高さも小さく、トンネル坑内での取扱は比較的容易であったが、二次覆工一体型セグメントでは二次覆工の施工代がなく、セグメント高さが大きくなるので、トンネル坑内での取扱が困難になる可能性がある。形状寸法は、下水道標準セグメントに準拠することを基本としているが、坑内での取扱いが十分に可能なことを確認する必要がある。

6. おわりに

本研究は、二次覆工一体型セグメントの採用にあたって設計・施工上の基本的な考え方を整理して標準化を目指したものである。この内容は、「二次覆工一体型セグメント設計・施工指針（案）」H14.7として東京都下水道局で整理しているが、現時点で未確認の事項もある。現在、硫化水素等に対する防食層の耐久性、施工時のジャッキ推力に対する防食層の安全性等の確認試験を計画中であり、また試行工事も計画を進めている。今後は、それらの結果を踏まえて随時指針の内容を見直して行き、引き続き二次覆工一体型セグメントの熟成にむけて鋭意努力してゆく所存である。新たに得られた知見等については今後の機会で報告する予定である。

【謝辞】最後に、指針（案）を策定するにあたり多大なる助言・ご指導を賜った各方面の委員の方々に、この場を借りて深く感謝を表します。

7. 参考文献

- 1) 東京都下水道局建設部，シールド工法の新技術に関する設計の手引き，平成12年7月
- 2) (社)日本下水道協会，下水道シールド工事用標準セグメント，平成13年7月
- 3) (社)日本土木学会，トンネル標準示方書〔シールド工法編〕・同解説，平成8年7月
- 4) (社)日本土木学会，コンクリート標準示方書（設計編）（施工編），平成14年3月