

ダクティルセグメントの 耐食性と耐久性に関する調査研究

佐藤 宏志¹・渡辺 仁¹・品部 耕二郎²・小泉 淳³

¹正会員 株式会社クボタ 産業機材技術部 (〒103-8310 東京都中央区日本橋室町 3-1-3)

¹正会員 株式会社クボタ 産業機材技術部 (〒103-8310 東京都中央区日本橋室町 3-1-3)

²株式会社クボタ 産業機材技術部 (〒551-0021 大阪市大正区南恩加島 7-1-22)

³正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部社会環境工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

ダクティルセグメントは使用期間が最も長いものでは約 37 年あまりが経過したが、二次覆工が行われな
い場合も多いため、その耐食性、耐久性が問題になると考えられるが、その実態は従来ほとんど明らかに
されていなかった。本論文は、供用中のダクティルセグメントの腐食に関する継続的な調査結果を分析し、
ダクティルセグメントの耐久性を考察するものである。まず、セグメントの肉厚測定の方法およびその信
頼性について述べ、次に調査の内容およびその結果を述べる。この調査結果から、ダクティルセグメント
の主要肉厚は少なくとも 24 年間においてほとんど減少していないことがわかり、ダクティルセグメントは
現在のところ健全性を維持しており、今後も長期間使用できると考えられる。

Key Words: shield tunnel, ductile segment, corrosion resistance, durability,

1. はじめに

ダクティルセグメントはシールド工の一次覆工部材
として用いられる。写真-1 はその形状の一例を示した
ものである。日本でダクティルセグメントが初めてシール
ド工事に使用されたのは 1965 年であり、現在施工後
約 37 年が経過している。2002 年 3 月末現在までのダ
クティルセグメントを用いたシールドトンネルの総延長
距離は約 90Km に及び、その質量は約 54 万トンになる。

シールドトンネルが開発され実用化されたのは 1800
年代であるが¹⁾、ねずみ鑄鉄製のセグメントが鉄道用シ
ールドトンネルに初めて使用されたのは 1850 年頃から
であり²⁾、既に約 150 年を経過したことになる。ダク
ティル鑄鉄が発明されるまでの金属製のセグメントのほと
んどは、このねずみ鑄鉄製セグメントであった。

一方、ダクティルセグメントの材料である球状黒鉛鑄
鉄(以下ダクティル鑄鉄と呼ぶ)は 1948 年頃にアメリ
カおよびイギリスで発明され³⁾、実用化されたもので、
その材料自体も 50 数年の歴史しかない。

ダクティルセグメントが一般的に使用されるようにな
った理由は、ダクティル鑄鉄がねずみ鑄鉄に比べて高強
度かつ、高韌性であることによるが、その大前提は土中

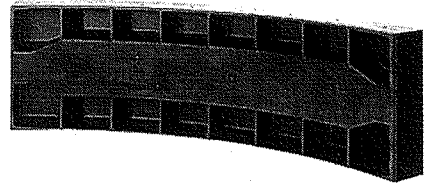


写真-1 ダクティルセグメントの形状例

に埋設される永久構造物としての耐久性が、ねずみ鑄鉄
製セグメントと同様優れていると判断されたためと考え
られる。その背景として、ダクティルセグメントが採用
され始めた時点では、ねずみ鑄鉄製セグメントはすでに
100 年以上使われていたこと、両鑄鉄の耐食性が類似し
ていることおよびトンネル内の腐食環境が外気に曝され
る構造物と比べて厳しくないと考えられることなどが挙
げられる。

このようなダクティルセグメントの採用根拠は、実際
のトンネルで使用されている状態やその経年的変化を把
握することにより裏付けられ、それらの内容によってダ
クティルセグメントの長期耐久性が保証されることが考
えられる。

筆者らは、ダクティルセグメントが使用された比較的
初期の頃からその追跡調査を実施してきている。最も長

いものでは 24 年間にわたって定位置におけるダクティルセグメントの経年的変化を把握している。

本研究は数件のダクティルセグメントの追跡調査結果からその腐食状況の実態を明らかにし、今後の長期耐久性について考察するものである。

2. ダクティルセグメントの特徴と使用例

(1) ダクティルセグメントの構造

ダクティルセグメントの構造は、使用された年代によって異なるが、概ね円弧状の箱型または波型断面をもつもので、円周方向の数枚の主桁とそれをつなぐトンネル軸方向の縦リブおよびスキンプレートによって構成される。図-1 に箱型セグメントの、図-2 に波型（以下コルゲート型と呼ぶ）セグメントの配置図、横断面図および縦断面図を示す。一般的に主桁の肉厚は 15~25mm 程度、スキンプレートの肉厚は 10~20mm 程度である。

ダクティルセグメントの特徴は鋳造により形状を自由に成形できることや一体で成形できることである。特に部材の突き合わせ部にハンチを設けたりコーナーに曲線部を設けて応力集中を緩和させることが簡単にできる。

(2) ダクティルセグメントの材質

「トンネル標準施工方書」⁴⁾に規定されているダクティル鋳鉄、ねずみ鋳鉄および溶接構造用圧延鋼材の機械的性質を表-1 に示す。1980 年頃からダクティル鋳鉄は FCD450 にかわり、FCD500 が多用されることになった。FCD500 は SM490A とほぼ同様の強度がある。

表-2 はダクティル鋳鉄とねずみ鋳鉄の化学成分の例を示したものである。硫黄 (S) を除いて両者の化学成分は類似している。耐食性に関しては土中に埋設された両材料の鉄管の腐食、海水中の両材料の腐食についてはほぼ同様の試験結果が報告されている^{5), 6)}。

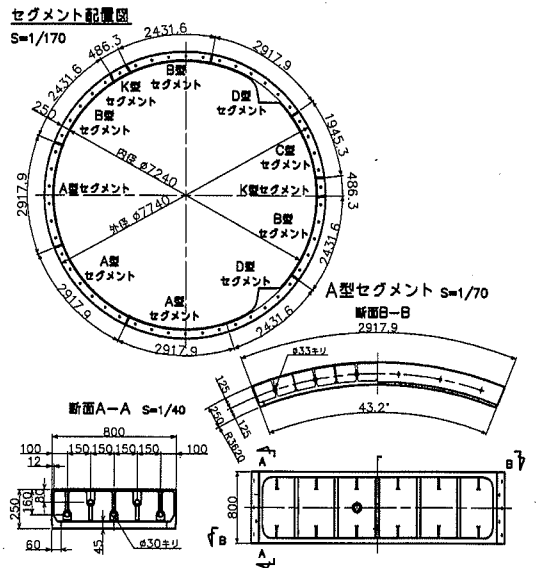


図-1 箱型セグメントの構造

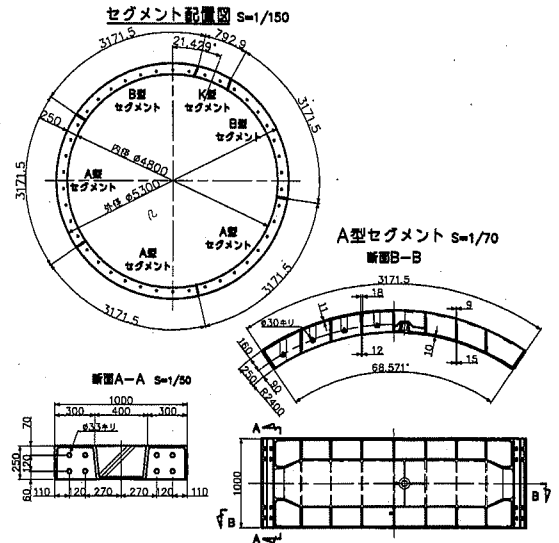


図-2 コルゲート型セグメントの構造

表-1 各種材料の機械的性質

規格		記号	引張強さ (N/mm ²)	耐力 (N/mm ²)	伸び (%)
ダクティル鋳鉄	2 種	FCD450	450 以上	280 以上	10 以上
	3 種	FCD500	500 以上	320 以上	7 以上
ねずみ鋳鉄品		4 種	FC250	250 以上	—
溶接構造用圧延鋼材		SM490A	490~610	325 以上 (板厚 16 以下)	17 以上

表-2 ダクティル鋳鉄とねずみ鋳鉄の化学成分の例

規格	記号	C	Si	Mn	P	S
ダクティル鋳鉄 3 種	FCD500	3.60	2.70	0.50	0.06	0.006
ねずみ鋳鉄品 4 種	FC250	3.60	2.10	0.60	0.06	0.06

単位：重量%

(3) ダクタイトセグメントの使用実績

ダクタイトセグメントは鉄道用シールドトンネルに採用されるケースが約78%と圧倒的に多く、その他は電力、共同溝、下水、地下河川等のシールドトンネルに採用されている。

表-3は、用途別のダクタイトセグメントの使用実績を示したものであり、表-4は二次覆工を省略したダクタイトセグメントの期間ごとの使用実績を示したものである。この二つの表の内容から

- ①使用実績は鉄道用シールドトンネルが多いこと
- ②二次覆工されることも多いが、二次覆工されないケースも多いこと
- ③二次覆工されないケースではダクタイトセグメントの耐久性（腐食）が問題になると考えられることなどがいえる。

そこで、ダクタイトセグメントが従来いわれているように、腐食に強いのか、実態を調査することが必要となる。

3. ダクタイトセグメントの腐食機構

(1) 腐食の概念

図-3は、コルゲート型ダクタイトセグメントのトンネル軸方向縦断面図である。腐食環境を考えると次の3つの部位に腐食現象が考えられる。

- ①スキンプレーットの地山側：地中に埋設された金属体としての腐食。
- ②主桁または継手板：塗装膜を介した金属同志の接触面の腐食。

③セグメントの内面：トンネル内の雰囲気暴露された金属体の腐食。

セグメントの内面はセグメント外面からの漏水、または、空気中の水分の結露による金属面への水分の付着なども現実には多く見られる。

金属体の腐食現象は、電気化学的反応によって金属体が表面から消耗する現象を総括して腐食といい、一般に図-4のように分類される⁷⁾。

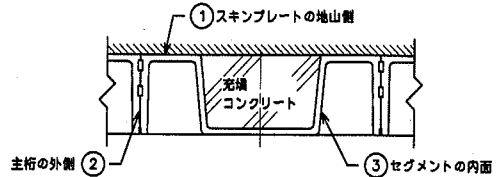


図-3 コルゲート型セグメントの縦断面図

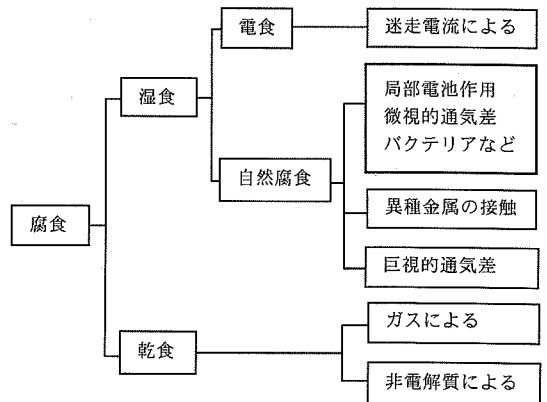


図-4 金属の腐食の分類

表-3 ダクタイトセグメントの用途別使用実績（2002年3月末現在）

期間	全リング数	全延長距離m	全質量 ton	二次覆工省略の延長距離mと割合%
1965～1974年	8,482	7,095	46,320	3,888 54.8%
1975～1984年	17,990	15,868	69,245	8,275 52.1%
1985～1994年	17,628	16,753	109,701	5,312 31.7%
1995～1999年	37,941	36,885	207,672	25,936 70.3%
2000～2002年3月	12,849	13,802	102,633	11,672 84.6%
合計	94,890	90,403	535,571	55,083 60.9%

表-4 二次覆工省略ダクタイトセグメントの期間ごとの使用実績（2002年3月末現在）

	用途						合計
	鉄道	電力・共同溝	上・下水道	地下河川	道路	その他	
リング数	72,079	9,741	5,119	2,798	11	5,142	94,890
総延長距離m	70,161	8,924	4,723	2,755	13	3,827	90,403
同上%	77.61	9.87	5.23	3.05	0.01	4.23	100.0

ダクタイトセグメントの上記3つの部位の腐食現象に腐食分類を当てはめてみると、いずれも乾食ではなく湿食である。そのうちスキンプレートの外側が最も懸念される部位である。

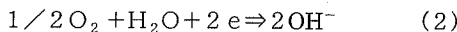
地中に埋設された金属体の代表的なものはガスや水道用の鉄管、電力や通信用のケーブル保護管および工業用の流体原材料の輸送管などであるが、この他に地下タンク、鋼杭、油井ケーシングなどの構造物がある。

地中に埋設されているこれらの金属体は土壌または地下水に接するために腐食を受けると考えるのが一般的で、これは土壌腐食と呼ばれる。その腐食の程度は土壌の種類や性質および金属体の埋設状況によって著しく異なることされる。

(2) 金属の土壌腐食

地中に埋設された金属体の腐食は、地中に含まれる水分の作用に起因するので、本質的には水中の金属腐食と同一として扱える。水中における金属の腐食は電気化学的機構によって起こる金属のイオン化反応であると定義されている⁹⁾。

水中における金属の電気化学的腐食機構は、鉄の腐食が進行する場合を例に示す次のように考えられている⁹⁾。



これは式(1)で示される酸化反応(アノード)と式(2)または(3)で示される還元反応(カソード)であり、その系内で対応して同時に起こる。また式(2)、(3)で示されるように水中の H^+ イオンと溶存酸素が関与する反応であって、水中(地中)の金属腐食は水と酸素が存在しないと起こり得ないと言われる根拠である。

(3) スキンプレートの地山側の腐食

ダクタイトセグメントの各部位のうち、外面スキンプレートの地山側の腐食環境は、地中に埋設された金属体として扱える。それに対してその他の部位のうち主桁はシール材の有無やその性能によって止水状況の違いがあり、また、セグメントの内面側は二次覆工の有無によって腐食環境はまったく異なるなど一様には論じられない。ここでは腐食環境として最も厳しい環境に置かれると考えられるスキンプレートの地山側の挙動について考察する。

地中に埋設された金属体のうち代表的なものとして水道用鉄管があるが、これについて実際の埋設管を調査した結果から得られた管外表面の腐食深さと埋設期間との関係が報告されている¹⁰⁾。図-5はこれを示したものである。この調査は日本国内の5地区、約900ヶ所に埋設されたダクタイト鉄管および高級鉄管に対して行われたもので、沖積平野における一般的な砂、シルト

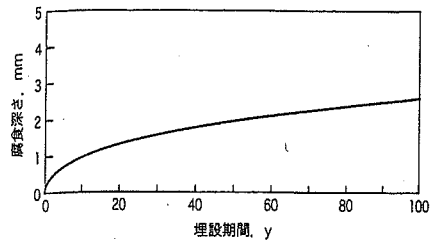
系土壌の場合の管外面に発生する腐食深さの平均的な結果である。これによれば腐食深さは100年間で約2mm強となる。

この結果がセグメントに適用できるか否かを地中に埋設した管路とシールドトンネルについて表-5に示すような各種条件のもとに比較して考察する。

地中に埋設した管とシールドトンネル用セグメントの腐食環境についての大きな違いは以下のとおりと考えられる。

- ①地中の位置はシールドトンネルの方が5~10倍深い
- ②その結果、土中の酸素あるいは地下水中の溶存酸素量はシールドトンネルの外周ではかなり少ないと推定できる。
- ③シールドトンネルはセグメントの組立て後、地山に押し出された直後にモルタル系材料による裏込め注入が行われる。地盤条件や施工方法にもよるが、その外面の一部または全部が裏込め材料で覆われるため、どちらかといえばアルカリ環境に置かれる。
- ④地中に埋設された管は地下水または雨水による乾湿を繰り返す。腐食環境としては比較的悪い。

以上のことから、シールドトンネルの外表面の腐食環境は埋設管と比較して各種の要因において異なり、図-5に示したデータはそのまま適用できないと思われる。



環境条件[地盤:沖積層, 土質:砂・シルト, 比抵抗:25 ≤ ρ < 50 Ω・m, 6.5 ≤ pH, 200 mV ≤ E_n, 硫化物:なし]

図-5 鉄管の腐食深さと埋設期間の関係¹⁰⁾

表-5 地中埋設管とシールドトンネルの比較表

		地中埋設管路	シールドトンネル
材料		FCD400 相当 または 高級鉄管	FCD450 または FCD500
	土被り	2~8m	20~40m
地盤		沖積層	沖積層, 洪積層
土質		砂, シルト	シルト, 砂, 礫
地下水頭		0~3m	10~20m
外表面の状況	外周状況	埋戻し	裏込め注入
	地下水	乾湿を繰り返す	常時浸漬
	酸素量	かなりある	少ない
	保護膜	ターレボキシン塗装	ターレボキシン塗装

4. ダクタイルセグメントの追跡調査

(1) 追跡調査の計画と実績および方法と内容

ダクタイルセグメントの追跡調査は、帝都高速度交通営団（以下営団地下鉄と呼ぶ）、東日本旅客鉄道（株）（以下JR東日本と呼ぶ）、東京都地下高速電車（以下東京都営地下鉄と呼ぶ）および大阪市高速電気軌道（以下大阪市営地下鉄と呼ぶ）とのそれぞれの協議によって長期にわたって継続的に行っている。その調査の概要は表-6に示すとおりである。追跡調査は実際のトンネルに施工されたダクタイルセグメントについて、調査箇所を定め、その箇所の経年的変化を調査することが主目的である。最も長期間の経年変化が把握されているのは、営団地下鉄の2物件であり、22年間または24年間の定位置の肉厚の変化がわかる。これらの物件は、今後20年前後の間、3または5年間隔で同様の追跡調査を継続する予定である。追跡調査で行う一般的な調査項目は以下のとおりとなっている。

- ①トンネルの外観、発錆状況および漏水状況の観察
- ②トンネル内の気温および相対湿度の測定
- ③セグメントの主要部材の超音波厚さ計による肉厚測定
- ④地下水の水質検査

(2) ダクタイルセグメントの肉厚測定

a) 肉厚測定の方法

ダクタイルセグメントの主要部材は主桁とスキムプレートである。追跡調査で行う肉厚測定部位を図-6に示す。肉厚測定を行う箇所は1調査場所について上り線、下り線の各2ヶ所、計4ヶ所を標準として、トンネル横断面のほぼスプリングラインに位置するセグメントについて行う。肉厚測定は写真-2に示すような超音波厚さ計で行うが、初回の測定では、超音波肉厚測定が可能な程度に測定面の局所的な凸部や錆を除去する。測定機器は約10年ごとに更新はしているが、その都度肉厚標準

試験片により測定精度合わせを行い継続性を確保している。

肉厚測定の精度は超音波厚さ計の精度である概ね±0.1mm～0.2mmであり、約10mm以上の鑄放し品の肉厚測定を行う精度としては十分と考えられる。

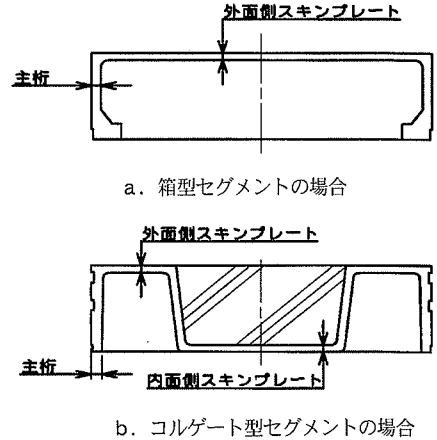


図-6 肉厚測定部位

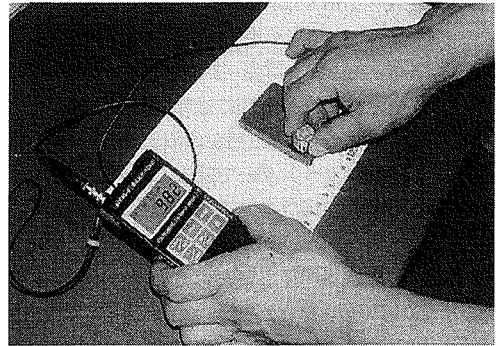


写真-2 肉厚測定用超音波厚さ計

表-6 ダクタイルセグメントの追跡調査の概要一覧表

企業体	営団地下鉄		JR 東日本		東京都営地下鉄		大阪市営地下鉄
	東西線	千代田線	横須賀線	京葉線	大江戸線	大江戸線	長堀鶴見緑地線
調査場所	木場駅	新御茶ノ水駅	新橋駅	八丁堀駅	早宮ボック所	築地市場	京橋駅付近
セグメントの型	2主桁箱型	2主桁箱型	2主桁箱型	コルゲート型	3主桁箱型	コルゲート型	コルゲート型
施工時期・年	1964～67	1966～69	1972～74	1988～90	1990	1997～98	1988～89
施工リング数	470	766	204	658	104	1939	800
第一回調査年	1973年	1974年	1993年	1993年	1994年	2001年	1990年
直近の調査年	1995年	1998年	2002年	2002年	2000年	2001年	2000年
最長調査期間	22年間	24年間	9年間	9年間	6年間	—	10年間
最終調査年	2018年	2018年	2020年	2020年	2024年	2030年	2020年

b) 超音波厚さ計による肉厚測定信頼性

施工後のダクトイルセグメントの肉厚を測定する場合、測定面の反対側は主桁では隣接するリングのリング継手板と接し、スキンプレートでは地山で覆われているので、裏側の実態は観察できない状態である。超音波厚さ計の原理から、裏面に空気、水、土砂、金属等が存在していても、それらは測定肉厚にカウントされないとされているが、実際的な検証が必要と考え、補足的に次のような実験でその信頼性を確認した。

(i) 主桁のように鉄面が接触している場合の肉厚測定

- ① 供試体は厚さ5mmと10mmの市販のブロックゲージを使用した。
- ② 測定方法は図-7に示すように、2枚のブロックゲージを積み重ね、上段の5mm厚のブロックゲージから測定する。
- ③ 測定結果を表-7に示す。
- ④ 測定結果の評価として、表面粗さが1/1000mmオーダーの2枚のブロックゲージを重ね合わせた状態でも、両ブロックゲージの間の空気層を認識し、片側の鉄板の肉厚しか測定しないことを確認した。

(ii) スキンプレートの地山側が仮に腐食し、腐食生成物が固着している場合の肉厚測定の実験室的検証。

- ① 供試体：70×150×10mmのダクトイル鑄鉄板にJIS-Z-2371に基づき塩水噴霧試験を行い、1650時間を経過したもの。写真-3はこの供試体を示したもので、塩水噴霧された側には厚さ約2～5mmの腐食生成物が固着し、反対側は固着した約2mmの腐食生成物をグラインダーで除去したものである。
- ② 測定方法：腐食生成物を除去した面から測定した。
- ③ 測定結果：表-8はその結果を示したものである。
- ④ 評価：どの測定ポイントにおいても塩水噴霧を行う前の供試体の肉厚を0.2～0.3mm下回っており、固着した腐食生成物の厚さは測定されていない。

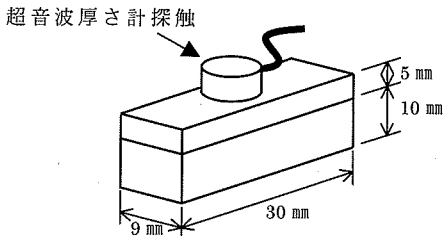


図-7 ブロックゲージの肉厚測定状況

表-7 ブロックゲージの肉厚測定結果

	1回	2回	3回	4回	5回	平均
ブロックゲージ単体	4.99	5.00	5.00	5.01	5.00	5.00
5mm+10mm	5.00	5.01	4.99	5.00	5.01	5.00

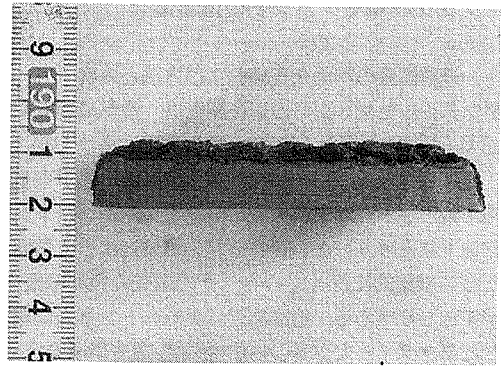
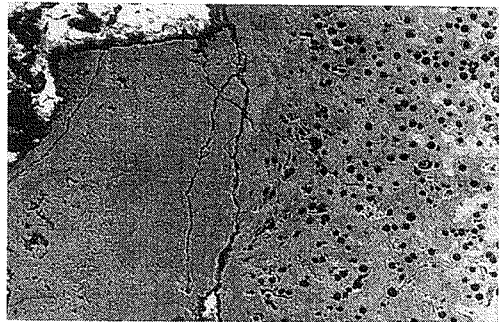


写真-3 塩水噴霧試験後の供試体

表-8 腐食生成物が固着した供試体の測定結果

	A点	B点	C点	D点	E点	平均
腐蝕前	10.2	10.5	10.4	10.2	10.4	10.3
腐蝕後	10.0	10.2	10.1	9.9	10.2	10.1

単位mm



腐食生成物 ← | | → 腐蝕進行部 → | ← 健全全部
空気層

写真-4 腐食生成物と健全部のSEM写真(×100)

写真-4は上記(ii)の場合に用いた供試体の腐食生成物と健全な母材との境界部の電子顕微鏡写真を示したものである。境界部には空気層が存在し、そのため超音波厚さ計では腐食生成物を測定しないことが判る。

(3) 追跡調査結果の詳細

a) 表-6に示した追跡調査を実施中のシールドトンネルの中から4件を選び結果を詳細に述べる。表-9はその4件のシールドトンネルおよびセグメントの諸元の概要を示したものである¹¹⁾。主桁形状とシールド溝の形状やシールド材の材質が時代とともに変化していることがわかる。それらは後述するように特にトンネル内面側のセグメントの腐食に影響がある。

表-9 追跡調査を実施中のシールドトンネルおよびそのセグメントの諸元

企業体	営団地下鉄	J R 東日本	東京都営地下鉄	大阪市営地下鉄
調査場所	千代田線	横須賀線	大江戸線	長堀鶴見緑地線
	新御茶ノ水駅	新橋駅	早宮ポンプ所	京橋駅付近
施工時期	1966～1969年	1972～1974年	1990年	1988～1989年
地質	洪積砂, 洪積粘土	洪積砂	洪積粘性土, 洪積砂質土	沖積粘性土, 洪積砂質土
施工延長	257m×2	85.6, 88.2m	52m×2	512m (グタイル部)
平面線形	直線, 一部 400mR	400mR	355mR	190mR, 250mR
土被り	15～23m	21～22m	24m	17～20m
施工時地下水頭	19m	0m	20m	15～18m
セグメント外径	7,740mm	7,600mm	8,500mm	5,300mm
セグメント桁高	250mm	300mm	250mm	250mm
セグメント幅	800mm	800mm	1,000mm	1,000mm
主桁形状				
シール溝	なし	なし	30mm幅, 2mm深, 2条	25mm幅, 2mm深, 2条
シール材	ブチルゴム	ブチルゴム	水膨張ゴム	水膨張ゴム, ブチルゴム

表-10 調査部位別の肉厚測定点数と初回から直近の調査までの期間

企業体	営団地下鉄	J R 東日本	東京都営地下鉄	大阪市営地下鉄
調査場所	新御茶ノ水駅	新橋駅	早宮ポンプ所	京橋駅付近
外面側スキプレート	10点×4ヶ所=40点	1点×4ヶ所=4点	1点×4ヶ所=4点	1点×4ヶ所=4点
内面側スキプレート	—	—	—	1点×4ヶ所=4点
主桁	—	1点×4ヶ所=4点	1点×4ヶ所=4点	1点×4ヶ所=4点
調査期間	24年間	9年間	6年間	10年間

b) セグメントの肉厚調査結果

(i) 調査部位別の肉厚測定点数と調査期間

表-10 は調査部位別の肉厚測定点数と調査期間を示したものである。セグメント主桁構造の違いと調査開始時点での調査コンセプトの違いから、調査部位と点数について必ずしも統一性はないが、1990年以後の調査については、コルゲート型の場合には外面側スキプレート、内面側スキプレートおよび主桁を標準的な調査部位としている。測定点数は合計で68点になるが、継続的に追跡調査を行っているほかの調査場所も含めると約100点となる。

写真-5 は東京都営地下鉄大江戸線、早宮ポンプ所での肉厚測定状況の写真を示したものである。

(ii) 外面側スキプレートの肉厚の経年変化

外面側スキプレートの肉厚測定のうち代表的なものとして、営団地下鉄新御茶ノ水駅の1ヶ所・10点、大阪市営地下鉄京橋駅付近の4ヶ所・4点の肉厚の経年変化のグラフを図-8に示す。

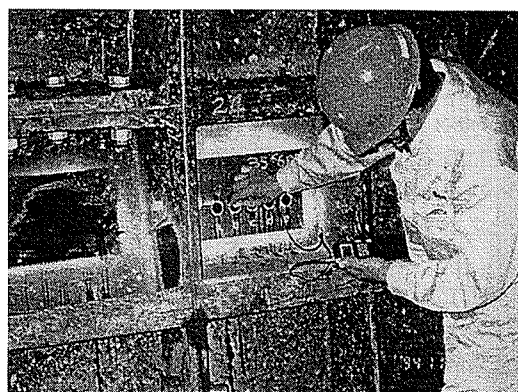


写真-5 セグメントの肉厚測定状況

新御茶ノ水駅では現在継続中の追跡調査のうち最も長期間である24年間の経年変化がわかり、その間外面側スキプレートの肉厚はほとんど変化していない。また、京橋駅付近も10年間で変化は認められない。

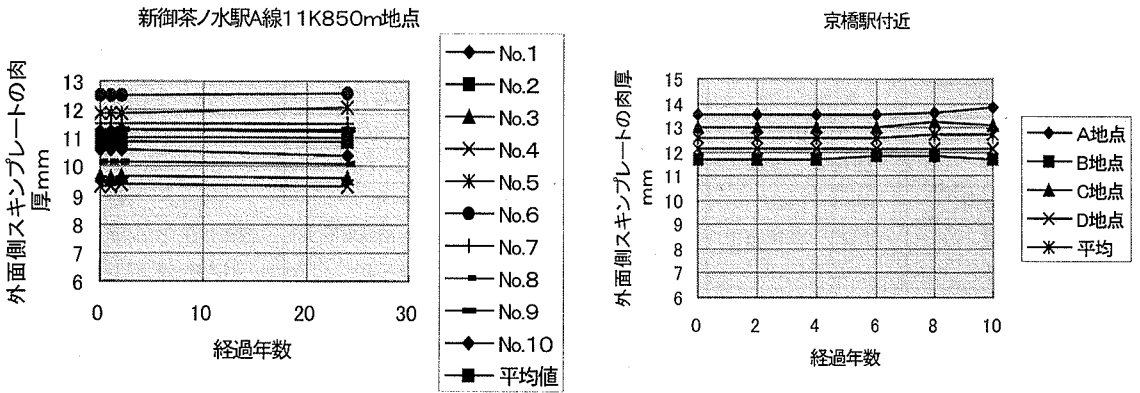


図-8 外面側スキンプレートの肉厚の経年変化例

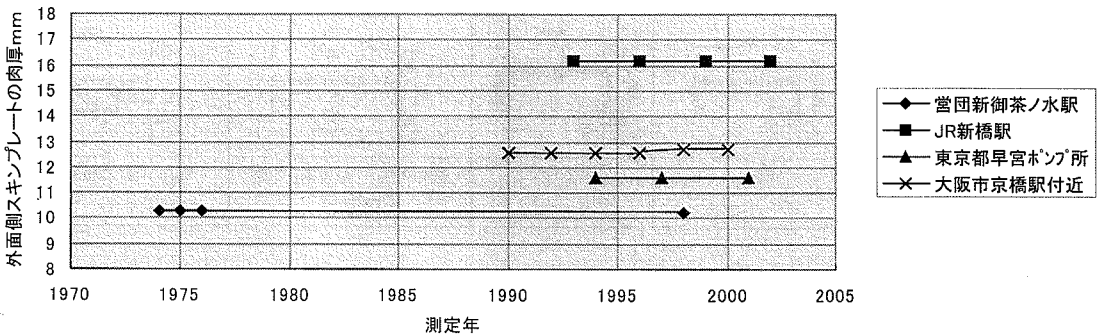


図-9 外面側スキンプレートの平均肉厚の経年変化

また、マクロな捉え方として外面側スキンプレートの肉厚測定値の各調査場所ごとの総平均値を算出した。図-9はその経年変化を示したものである。表-11はこれらの総平均値を算出した測定数、その初期値と直近の値およびその差を示し、また、各測定場所における初期値と直近値との差の最大値を示したものである。総平均値についても経年変化はほとんど認められない。

(iii) セグメント主桁の肉厚の経年変化

主桁の肉厚の経年変化を図-10に示す。主桁の肉厚については、営団地下鉄新御茶ノ水駅では当初から測定を行っていなかったため長期間の経年変化は把握できていない。現在のところ最長となるのは大阪市営地下鉄京橋駅付近であり、10年間で肉厚の変化はないことを示している。

主桁の肉厚測定の意味は次のように考えられる。主桁の外側は隣接するセグメントの主桁（リング継手面）と約50~100 μ mの塗装膜を介してボルトにより締結されている。また、シールドトンネルの初期のものを除いて1ないし2条のシールド材により地山からの地下水を遮断している。したがって、主桁の外側はほとんど密閉された状態であり腐食環境にあるとは考えにくい。一方、主桁の内面側はトンネル内に解放されており、トンネル内

の雰囲気になされている。仮に主桁の外側の腐食による肉厚減量がまったくないとすれば、主桁の肉厚測定は主桁内面側の肉厚変化を測定することになる。測定結果はトンネル内面側の肉厚減量もないことを示している。

表-11 外面側スキンプレートの平均肉厚の推移

	測定数	初期	直近	差	最大差	期間
新御茶ノ水駅	40	10.3	10.2	0.1	0.4	24年
新橋駅	4	16.2	16.2	0	0.2	9年
早宮ボンプ所	4	11.6	11.6	0	0.0	6年
京橋駅付近	4	12.6	12.6	0	0.0	10年

単位 mm

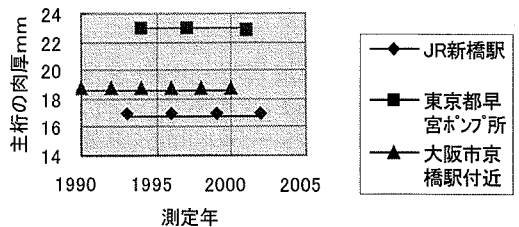


図-10 セグメント主桁肉厚の経年変化

c) トンネル内の環境、状況およびセグメントの外観

トンネル内の環境調査として調査時点の気温と相対湿度を測定している。また、トンネル内の漏水状況やセグメントの発錆状況あるいは補修状況なども観察している。これらの調査結果の概要を表-12に示す。

各調査場所の特徴的なことを以下に述べる。

(i) 営団地下鉄新御茶ノ水駅

24～22年前の調査では気温と湿度の測定は行っていないが、1998年の調査では高い湿度が測定されている。施工後32年目である1998年から大掛かりなりニューアルが行われた。従来、化粧板に覆われていたためセグメントの表面の観察ができなかったが、この化粧板が取り除かれた際に観察を行った状況は以下のようなものであった。

- ①継手面および注入口の十数箇所から軽度の漏水があったが、これらは止水されあるいは導水された結果、1999年の観察では漏水は認められなかった。
- ②トンネル内面のセグメント面には全体の面積の約半分くらいに錆が発生しており、これらは入念にケレン作業で除去された。全体の面積の半分には部分的にはあるが施工当時のセグメントの塗装が残っているところも認められた。
- ③最終的にはセグメント内面を洗浄後、モルタル系の厚膜塗料による吹き付け塗装が行われ、さらに化粧板が取り付けられた。

(ii) JR東日本新橋駅

トンネル内の環境は、気温は比較的低いが湿度が高いことが特長である。

1993年5月の初回調査の記録によればトンネルおよびセグメントの状況は以下のとおりであった。

- ①注入口からの漏水1ヶ所以外は継手面からのにじみが7ヶ所認められた。注入口からの漏水は導水工事が行われた結果セグメント表面に水滴が流れることはなくなり、また、その他の箇所も止水が行われた結果、2002年の調査ではセグメント表面はほぼ乾燥状態であった。
- ②1996年には2回目の再塗装が行われた。再塗装にあたってはセグメント内表面に前処理としてハイドロプラストが行われた。

(iii) 東京都営地下鉄早宮ポンプ所

トンネル内の環境は調査時期が冬であったことにもよるが、気温20～23℃、湿度50%前後であり良好な環境と判断された。トンネルの漏水、セグメントの錆の発生もなく全般的に良好である。

(iv) 大阪市営地下鉄京橋駅付近

トンネル内環境は気温17℃前後、湿度50%前後で極めて良好であり、トンネル全体の雰囲気はカラカラの乾燥状態であった。トンネル内への漏水やセグメントの錆の発生も認められない。

d) トンネル内で採取された水の水質

ダクタイルセグメントの追跡調査にあたってはシールドトンネルを取り巻く地下水の採取およびその水質検査を行うことを心がけている。その目的はセグメントの地山側の腐食環境を評価するばかりではなく、万一トンネル内に漏水した場合のセグメントの内面側の腐食状況を評価するのに不可欠だからである。しかしながら、採取した水が当該シールドトンネルあるいはその附近を取り

表-12 トンネル内の環境とセグメント内面側の外観（気温：℃，相対湿度：％）

調査場所および項目	営団地下鉄 新御茶ノ水駅			JR 東日本 新橋駅			東京都営地下鉄 早宮ポンプ所			大阪市営地下鉄 京橋駅付近				
	測定年	気温	湿度	測定年	気温	湿度	測定年	気温	湿度	測定年	気温	湿度		
	トンネル内の環境	1回目	1974年	—	—	1993年	21	93	1994年	20	49	1990年	15	59
	2回目	1975年	—	—	1999年	20	80	1997年	21	43	1992年	17	52	
	3回目	1976年	—	—	2002年	25	75	2001年	23	56	1994年	16	47	
	4回目	1998年	26	94	—	—	—	—	—	—	1996年	17	49	
	5回目	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1998年	17	50	
	6回目	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2000年	19	54	
	平均	1回	26	94	3回	22	83	3回	21	49	6回	17	52	
トンネル内の状況	調査年	1998年			2002年			2001年			2000年			
	漏水	継手	少しあり			なし			なし			なし		
		注水	少しあり			なし			なし			なし		
	発錆	あり			少しあり			なし			なし			
	セグメントの補修	止水	1998～2001年に実施			実施			実施していない			実施していない		
導水		同上			実施			同上			同上			
塗装		同上			実施			同上			同上			

表-13 トンネル内で採取した水の水質検査結果

企業体		J R 東日本
調査場所		新橋駅
水温		22℃
pH		7.2
比抵抗	$\Omega \text{ cm}$	96
溶存酸素量	mg/L	0.5 以下
全蒸発残留物	mg/L	660
Cl^-	mg/L	38
SO_4^-	mg/L	65
よう素消費量	mg/L	5 以下

巻く地下水であると判断するのは難しい場合があり、そのデータは未だ少ない。2002年に行ったJR 東日本新橋駅の調査では、シールドトンネルに隣接する連壁から滴下する地下水が採取できた。表-13はこの地下水の水質検査結果を示したものであり、概ね以下の結果である。

- ① pHは弱アルカリ性であり、トンネル内の水はコンクリート構造物あるいはセメント系材料に十分接して流れていることが考えられる。
- ② 溶存酸素量は定量分析が不可能な 0.5mg/L以下の結果を示した。地下水中の溶存酸素量が何らかの酸化反応で消費され、その結果このような値を示した場合には、よう素消費量がかかなり多いはずであるが、検査結果からそのようなことは考え難い。土被り 20m を越えるシールドトンネルの外表面を取り巻く地下水中の溶存酸素量がほとんどないとすれば、セグメントの外側側スキンプレーットの腐蝕が発生していないことの裏付けとなる。
- ③ 塩素イオン濃度はこれらのデータでは比較的 low 金属の腐食に大きな影響があるとは思えない。

5. まとめ

本研究は供用中の二次覆工を施工していないダクタイトイルセグメントについて、その外観調査や主要部材の肉厚の測定を行い、その結果からダクタイトイルセグメントの健全度や今後の耐久性について検討するものであるが、本研究によって得られた知見は以下のとおりである。

(1) 施工後 37 年を経た供用中のダクタイトイルセグメントの主要部材、すなわち、地山および地下水に常時接している外面側スキンプレーットおよび隣接する継手板と接している主桁の肉厚は、少なくとも追跡調査で計測した事例では 24 年間の経年的な変化がない。

(2) 施工場所が異なる他の例では、経過年数は少ないが同様にセグメントの主要部材の肉厚の経年的な変化がない。

(3) 通常の鉄道トンネル内の雰囲気では、ダクタイトイルセグメントのトンネル内面側に腐食現象は発生せず、肉厚の減少もない。

(4) しかしながら、ダクタイトイルセグメントのトンネル内表面に水が存在する場合は腐食が進行する。その場合の水はトンネル外から内への漏水によるものがほとんどである。

(5) 地山に接し常時地下水に浸っているダクタイトイルセグメントのトンネル外表面の腐食の進行およびそれによる肉厚減少は発生していないと推定できる。

(6) JR 東日本新橋駅トンネル周辺の地下水と考えられる水の溶存酸素量は水中の飽和溶存酸素量¹²⁾よりかなり少ないという測定結果も得られた。溶存酸素量が少ないことがセグメントの外表面の腐食が発生しにくい要因の一つになっていると断言するためには、さらに正確な多くの測定が必要であると考えられる。

(7) ダクタイトイルセグメントに発生した漏水原因は、セグメントの止水に関する仕様あるいはシールド工事全般の品質が時系列的に変化したことと密接に関係があると考えられる。その要因としては、①セグメントのシールド溝の品質、②セグメント用シールド材の品質、③セグメントの組立て品質、④裏込め注入の品質と信頼性であると考えられる。おおよそ 1985 年代の半ば以後に施工されたトンネルでは、たとえば、それ以前ではシールド溝が無いが鑄造のため、寸法精度が悪いものであったのに対し、機械加工により精度の良いシールド溝を 2 条設けられ、また、水膨張ゴム製のシールド材が使用されることなどのほか、上記の③、④項の向上とあいまって漏水はほとんど発生していないと結論される。

(8) ダクタイトイルセグメントは、施工後最長で 37 年を経過したが、本調査結果からダクタイトイルセグメントは健全性を維持しており、また、今後も現状の状態で推移するものと推測される。

謝辞：本調査研究の基礎であるダクタイトイルセグメントの追跡調査を進めるにあたりご指導、ご協力をいただき、また、本調査研究をまとめるにあたりご指導いただいた帝都高速度交通営団、東日本旅客鉄道株式会社、東京都交通局および大阪市交通局の関係の方々には深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 矢野信太郎：シールド工法，鹿島出版会，p. 12, 1981.
- 2) 矢野信太郎：シールド工法，鹿島出版会，p. 6, 1981.
- 3) 張博，明智清明，堀健三：球状黒鉛鑄鉄，(株)アグネ社，p. 1, 1983.
- 4) 土木学会トンネル工学委員会：トンネル標準示方書「シールド工法編」，土木学会，p. 59, 60, 1996.
- 5),6) 材料特性に関する調査研究委員会：鑄造品のエンジニアリング・データブック，V 鑄物の腐食特性，(財)素形材センター，p. 56, 92, 1984.
- 7) 電気防食研究委員会：電気・土壤腐食ハンドブック，電気学会，p. 4, 1966.
- 8) 電気防食研究委員会：電気・土壤腐食ハンドブック，電気学会，p. 13, 1966.
- 9) 電気防食研究委員会：電気・土壤腐食ハンドブック，電気学会，p. 13, 14, 1966.
- 10) (社)日本鑄造工学会：鑄造工学便覧，(社)日本鑄造工学会，p. 253, 2002.
- 11) 日本国有鉄道：シールド工法による地下駅実施例集，日本国有鉄道，p. 11, 22, 1978.
- 12) 日本規格協会：JIS K0102，工場排水試験方法，(財)日本規格協会，p. 99, 1998.

(2002.2.4 受付)

INVESTIGATIONS AND STUDIES ON CORROSION RESISTANCE AND DURABILITY FOR DUCTILE CAST IRON SEGMENTS

Hiroshi SATO, Hitoshi WATANABE, Kojiro SHINABE and Atsushi KOIZUMI

Ductile segment is primary lining material for shield tunnel. Ductile segments were used from 1965 year. In this paper we report the results that we have investigated thickness of main parts and functions for corrosion of ductile segments. According to the results, thickness of main parts of ductile segments have not decreased at least for 24 years. The cause of the results are follows ; The outer surfaces of ductile segments are not corroded under the ground. Because there are very little oxygen in underground water. The inner surfaces of ductile segment are not also corroded except water leakage from outer of tunnel.