

ハーモニカ工法の止水技術の開発

大深度地下へのハーモニカ工法(推進式)の適用

川北 潤^{*1}・伊賀崎 圭^{*1}・高倉 克彦^{*1}・新宅 建夫^{*2}・関谷 誠之^{*3}

*Keywords : method of constructing large tunnels by combining smaller size shield tunnels , deep underground, water-proof
大断面分割トンネル工法, 大深度, 止水*

1. はじめに

都市部において、アンダーパス等の構造物を施工する場合、周辺環境に与える影響を低減するために、従来は外殻先行工法や全断面シールド工法などの非開削工法が用いられていたが、外殻先行工法では曲線施工が困難、かつ施工延長が100mを超える場合には中間立坑を設ける必要があるといった課題が、また全断面シールド工法では機械設備が高額になるといった課題が生じていた。

ハーモニカ工法（大断面分割トンネル工法）は、小断面のトンネルを積み上げて大断面のトンネルを構築する非開削工法であり、曲線施工ならびに200m程度までの連続掘進を可能にし、機械設備費を全断面シールドに比べて大幅に低減可能である。このような利点について発注者に広く理解頂き、ハーモニカ工法の実績は着実に増加してきている。

一方、大都市部では今後、大深度地下の利用が本格化することは必至であり、大深度地下空間構築技術の開発が活発に行われている。

本開発では、浅深度での実績を有する推進式のハーモニカ工法を大深度地下空間構築に適する技術に高めることを目標として技術開発を行ってきた。克服すべき課題は、大深度の高水圧下において、積み上げた小断面トンネルを接続して本体構造物を作る際に求められる函体間の止水技術である。

本編では、本開発で考案した止水構造と、その止水効果を実験で確認した結果、および、考案した止水構造を実現するための施工上の技術について述べる。

図-1にハーモニカ工法の各部名称を示す。

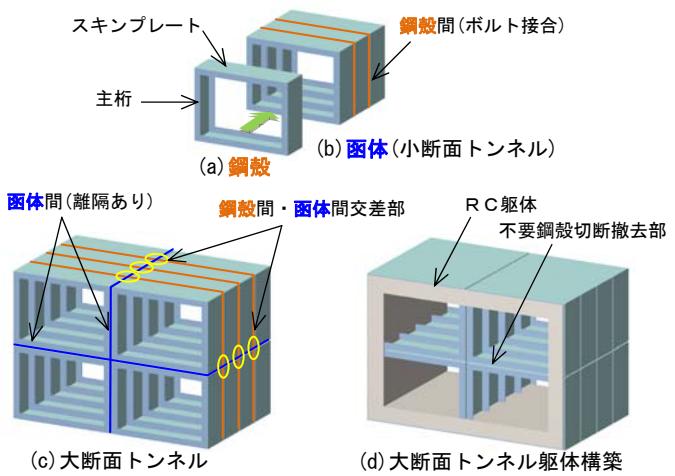


図-1 ハーモニカ工法各部名称

Fig.1 Part names at "Harmonica" shield tunneling method

弊社では、中部電力泥江（ひじえ）洞道において世界で初めて矩形シールドを施工（1983）して以来、小田井山田共同溝（1998）において異形断面シールド工法、川崎縦貫線の換気洞道工事および本線工事（1995）においてMMST工法の施工を行い、矩形トンネル構築技術を蓄積してきた。そして、浅深度の矩形推進式のハーモニカ工法によって東京ミッドタウン外苑東通り地下通路工事（2006）を施工、現在7現場8件の施工実績と2件を計画中である。

今般、大深度においてハーモニカ工法の適用が可能になることを受けて、弊社の矩形シールド工法ならびに矩形推進工法を複数併設して大断面トンネルを構築する工法を、総称してハーモニカ工法と位置づけるものとする。

2. 止水構造と確認実験

2.1 鋼殼間止水構造

鋼殼間の止水構造は通常のシールドトンネルと同様

* 1 技術センター土木技術開発部地下空間開発室

* 2 東京支店京王東府中立体作業所

* 3 六菱ゴム㈱

に、ボルト接合される主桁間に設置する水膨張シールによるものとする。これは、水膨張シールがシールド工法において大深度における止水の実績を数多く有しているためである。

2.2 函体間止水構造

ハーモニカ工法では、隣接する函体を接するように配置するが、滑材を充填する隙間として数センチ程度の離隔が函体間に発生する。大断面トンネル内部の鋼殻はRC軸体構築後に切断撤去されるため、その前までに函体間の止水を行う必要がある。

浅深度でのハーモニカ工法では、地下水の影響を受ける場合には、函体間掘進精度の確保を目的として函体軸方向に設けたガイド材（メス金物とオス金物）の間に、図-2に示すようにグラウトを注入し、止水ゾーンを設けて止水を行った。この方法では、ワイヤ等による止水ゾーン洗浄が必要で、高水圧下に適用する場合、洗浄時の地下水流入の可能性、グラウト材と金物間の付着力の確保といった点で、リスクが高い。

図-3に大深度における函体間の止水構造の概要図を示す。これは、回転シャフトの軸受け部のシールに用いられるリップシールを函体間止水に応用したものであり、後行の函体に設置して推進し、先行函体にリップシールの突出部を連続的に押し付ける。地盤側か

ら水圧が作用した場合には、リップシールの自己止水性による止水効果を発揮する（以下、ハーモニカ工法に用いるリップシールを「HLシール」と呼ぶ）。

2.3 鋼殻間・函体間交差部の止水構造

鋼殻間・函体間交差部については、特に止水構造上の注意個所となる（図-4）。

個々の函体掘進時には、鋼殻間止水構造である水膨張シールの機能によって個々の函体内への地下水の浸透は発生しない。しかし、軸体構築を行うために大断面トンネル内部の鋼殻を切断撤去する時点で、水膨張シールとHLシール間に止水機能が求められる。図-4の止水対象箇所に対して、次の2つの工夫を行うことにより対処した（図-5）。

① ゴムブロック

HLシールに対向する位置の先行函体に、掘進方向全長にわたり連続的にゴムブロックを配置する。これは、鋼殻間段差（目違い）の吸収ならびにゴムブロックとHLシール接触部に介在する可能性のある土粒子の封じ込めを行い、HLシールが隣接函体と隙間なく接することを期待して配置されたものである。

② 縁端水膨張シール

鋼殻間止水構造である水膨張シールとHLシールならびにゴムブロック間に水膨張シールを配置する。これによって、当該部分の空隙を埋め、鋼殻間・函体間交差部の止水効果が確保される。

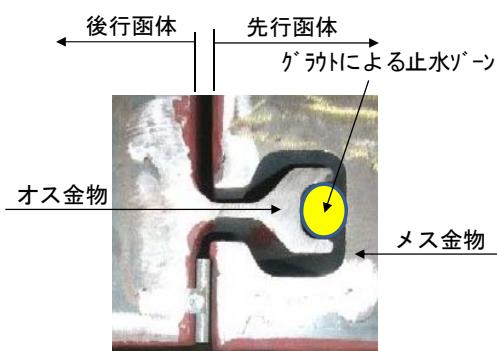


図-2 函体間止水構造（浅深度）

Fig.2 Water-proof method between adjacent tunnels
(in shallow underground cases)

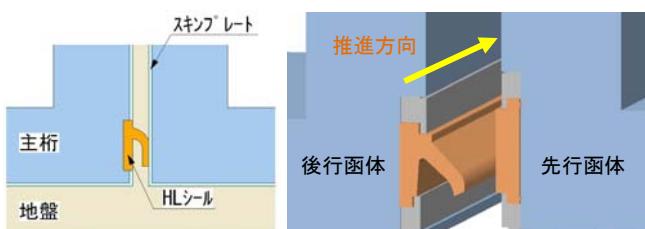


図-3 函体間止水構造（大深度）

Fig.3 Water-roof method between adjacent tunnels
(in deep underground cases)

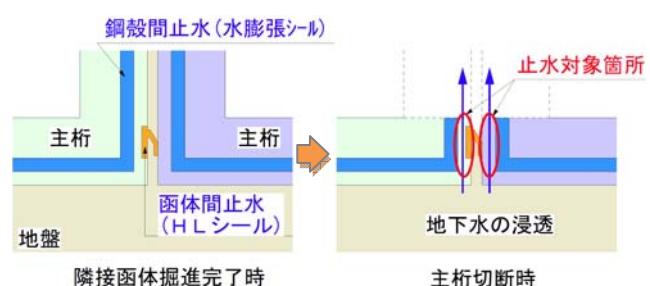


図-4 鋼殻間・函体間交差部の止水対象箇所

Fig.4 Water-proof points at the cross section of segments and tunnels

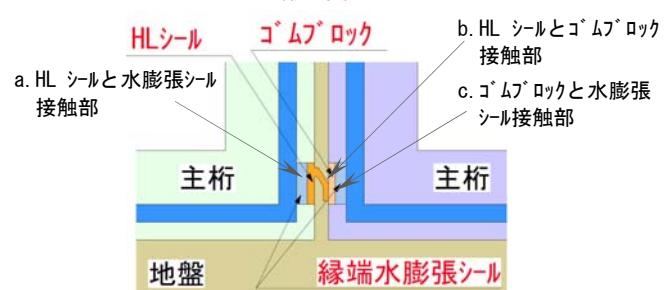


図-5 鋼殻間・函体間交差部の止水構造

Fig.5 Water-proof methods at the cross section of segments and tunnels

2.4 止水実験

鋼殻間・函体間交差部の高水圧下での止水性を実験により確認した。

2.4.1 止水着目部

前述のように鋼殻間・函体間交差部にHLシール、ゴムブロックならびに水膨張シールを接触させて配置しており、この接触面での止水性を確認する必要がある。すなわち、a. HLシールと水膨張シール接触部、b. HLシールとゴムブロック接触部、ならびにc. ゴムブロックと水膨張シール接触部である（図-5）。

なお、鋼殻間の止水構造として用いる水膨張シールと上記の追加して配置する水膨張シール接触部での止水性については、通常のシールド工事において実績のある止水方法であり、今回の止水実験では着目部とはしない。

2.4.2 実験装置

高水圧に耐えうる実験装置とするために、オーバル型の実験装置とした（図-6）。

架台上にHLシールを、上蓋側にゴムブロックをオ

ーバル状に閉合して配置し、HLシールとゴムブロックが対向して接觸するように上蓋を架台に被せて、オーバル内側に水圧を掛ける構造としている。架台と上蓋が、隣接する後行函体と先行函体を模擬しており、さらに上蓋は2分割されていて、鋼殻間の接合部を模擬している。

上蓋の接合部のゴムブロックの背面側には前述の縁端水膨張シールを模擬する水膨張シールを配置して鋼殻間の止水構造を再現した。

2.4.3 実験確認項目

実験では、鋼殻間の接合精度（接合部の段差）、函体の掘進精度（函体間の離隔）、先行して配置されるゴムブロックに付着する砂粒の有無、ならびにゴムブロックの硬度を変化させ、各状態での止水性を確認した。

上蓋接合部の段差（3mm）の状況を図-7に示す。

また、砂粒のゴムブロックへの塗布については、海砂のみもしくは海砂と4号珪砂を7:3に混合した砂をでんぶん糊によってゴムブロックに塗布し、硬化を待たずに実験を行った。砂付け状況を図-8に示す。

表-1 止水実験の条件

Table 1 The factors of water-proof test

パラメーター	値	選定理由
上蓋接合部段差	0mm/3mm	鋼殻間接合ボルト孔の余裕代(1.5mm)分の目違ひを想定
HLシール圧縮量	10mm/45mm	函体の掘進精度の最大・最小値
砂粒介在の有無	有/無	先行函体掘進後にゴムブロックに付着している土粒子の模擬
ゴムブロック硬度	CR50/CR70	硬度CR70のHLシールに対するゴムブロック硬度の相性確認

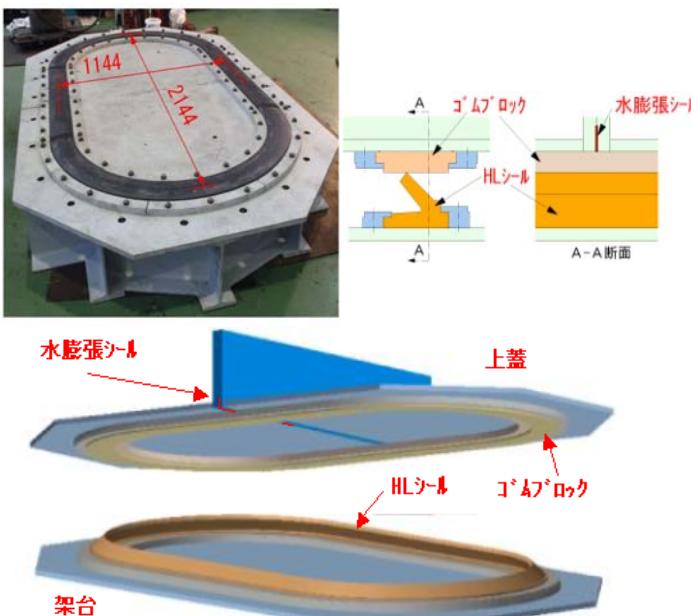


図-6 止水実験装置図
Fig.6 Device of Water-proof test



図-7 上蓋接合部段差(3mm)設定状況

Fig.7 Difference in joint of upper plates



図-8 ゴムブロックへの砂付け状況
Fig.8 Pasting sand with starch glue on the rubber block

2.4.4 止水実験結果

表-2に実験結果一覧表を示す。ゴムブロック硬度C R 5 0について、全てのケースにおいて水圧0.8MPaの止水性を確認した。ゴムブロック硬度C R 7 0については、段差有りの場合に漏水が発生したため、ゴムブロック硬度をC R 5 0とする。

図-9にゴムブロック硬度C R 5 0、HLシール圧縮量10mm、鋼殻間の段差3mm、砂付け有りの場合の水圧1.0MPaにおける止水状況を示す。高水圧によって、ゴムブロックが大きく変形しているが、漏水は発生していない。

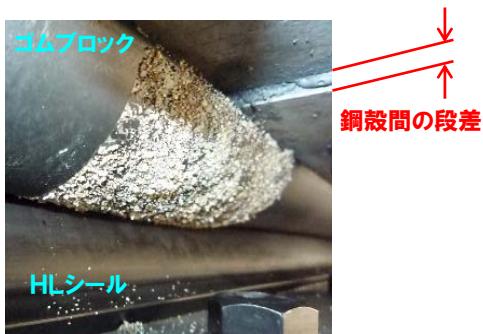


図-9 止水実験状況（水圧1.0MPa）
Fig.9 Water-proof test at 1.0 MPa pressure

表-2 止水実験結果一覧表
Table 2 The result of water-proof tests

段差	条件			0.8 MPa 止水性	1.0 MPa 止水性
	ゴム硬度	HLシール圧縮量(mm)	砂粒		
無し	50	10	なし	合格	(合格)※
		45		合格	(合格)※
	10	海砂	合格	合格	
		混合	合格	合格	
	70	45	海砂	合格	合格
		10	なし	合格	合格
		45		合格	合格
		45	海砂	合格	合格
あり(3mm)	50	10(7)	なし	合格	合格
		45(42)		合格	合格
	10(7)	混合	合格	合格	
		45(42)		合格	合格
	70	10(7)	なし	×	-

- ※の2ケースは実施しなかったが砂粒ありで止水性を確認できているため止水性能を満足していると判断した
- HLシール圧縮量のカッコ内の値は段差を与えた側の値を示す

3. 施工上の技術

3.1 発進エントランスの開発

3.1.1 HLシール用発進エントランス

推進工法やシールド工法において、地下水位下で発

進立坑からマシンを発進させる際には、エントランスパッキンによるマシン外周の止水が必要となる。

ハーモニカ工法においても同様な発進エントランスが必要となるが、ハーモニカ工法に使用する鋼殻にはHLシールやガイド材が取り付けられており、鋼殻外周面が平滑でないため、特殊なエントランス構造が必要となる。

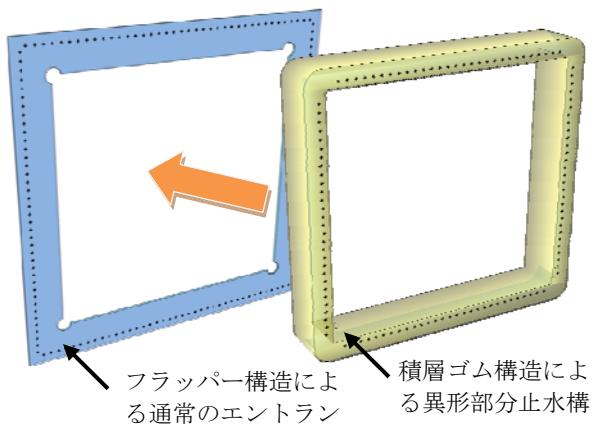


図-10 二重エントランスのイメージ
Fig.10 Image of double entrance seal

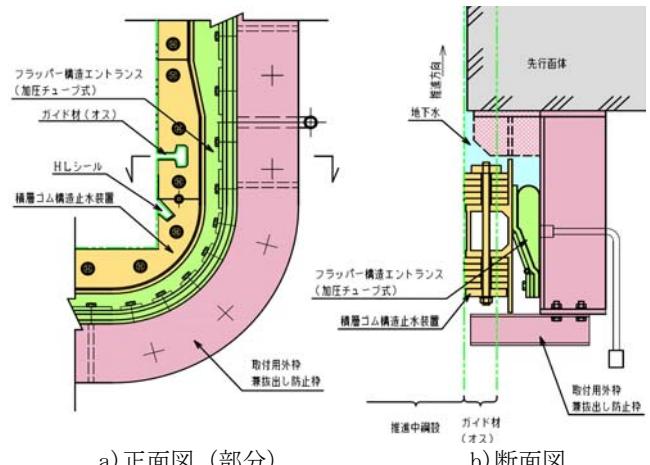


図-11 積層ゴム構造の異形部分止水装置
Fig.11 Layered rubber entrance seal for irregular parts

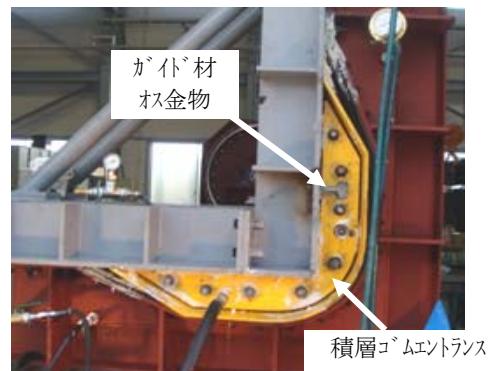


図-12 積層ゴムエントラスの止水実験(P=0.8MPa)
Fig.12 Water-proof test for layered rubber entrance seal

本開発では、積層ゴム構造による異形部分止水機能と通常使用されるフラッパー構造による蛇行吸収機能を併せ持つ二重エントランスにより止水する工法を開発した（図-10, 11）。

3.1.2 止水性能確認実験

二重エントランス構造のうち、外側のフラッパー構造部分については十分な施工実績があり、高水圧下での止水性については確認されている。そのため、本開発では、異形部分に対する積層ゴム構造の止水装置の高水圧下での性能を確認する実験を行った。その結果、HLシール、ガイド材（オス金物・メス金物）のいずれの箇所についても0.8MPaの止水性能が確保できることが確認された（図-12）。

3.2 スクレーパーの開発

3.2.1 スクレーパーの必要性と構造

前章で述べたとおり、函体間にゴム製部材（HLシールおよびゴムブロック）を密着させることにより鋼殻切断時の止水が可能となり、実験室レベルでは1.0MPa相当の水圧に耐えること、および、HLシールとゴムブロックとの間に多少の砂粒子が残存した状態でも止水効果が劣ることがないことが確認された。

ただし、実際の函体推進時には先行して設置された函体の表面には土砂が大量に付着していると考えられるため、それを、止水実験で確認したレベルまで切削できる機構を設けておくことが必要となる。

上記の対策として、HLシールの切羽側に、先行函体に付着した土砂を切削する機能を備えた「スクレーパー」を配置することとした（図-13）。

スクレーパーは、先行して設置された函体の表面に大量に付着している土砂をHLシールが止水可能なレベルまで切削するための機構である。鋼殻内（または

マシン内）からバネによる伸縮が可能な構造となっており、函体間の距離が蛇行などにより変化しても先行函体表面に常に当接できるような押付け力を与えている。

3.2.2 切削性能確認実験

以下の各項目について、製作したスクレーパーが十分な切削機能を持つことを実験により確認した。

- ・耐圧実験時以上の土砂切削能力があることの確認
- ・鋼殻間の目違いを模擬した段差に対する切削能力の確認
- ・上記の能力を可能にするための押付力の確認
- ・2種類の先端材質のどちらの切削性が良いかの確認

実験は、砂、モルタル（未固結状態）、粘土、裏込め材（固結後）をゴムブロックの上に20mmの厚さに盛って行い、いずれの場合においても十分な切削能力が確認された（表-3）。全ケースについて牽引部分の一部に鋼殻間の目違いを模擬した段差（3mm）を設けた

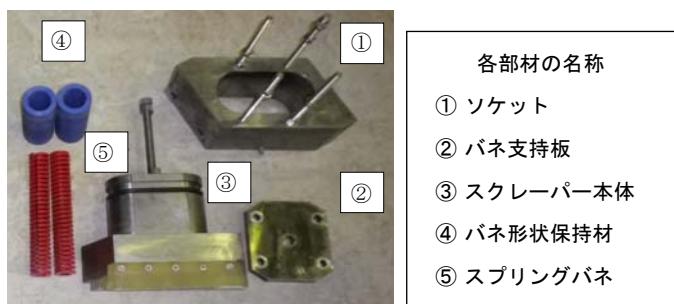


図-14 スクレーパーの各部材

Fig.14 Each parts of the scraper



図-15 スクレーパー全景（左：地山側、右：坑内側）

Fig.15 Whole view of the scraper
(left pic. : outside , right pic. : inside)



図-16 切削試験状況

Fig.16 Scrape test

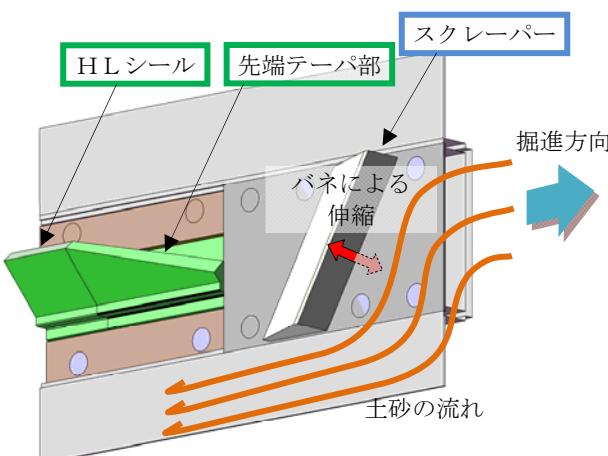


図-13 スクレーパーのイメージ

Fig.13 Image of Scraper

が、この部分で、裏込め材のケースで最大で $w=0.033g/cm^2$ の削り残しが見られたが、この量は2章で述べた耐水圧実験にてシール間に挟んだ砂の量 $w_a=0.0375g/cm^2$ 未満であり、止水性能上問題ないと判断できる。

また、押付力については、初期値として $P=69kg$ を与えた。このケースで十分な切削性能が確認されたため、掘進時の推力や掘進方向管理に影響を与えないよう、あまり強すぎない力で押し付けるのが良いという判断から、押付力についてはこの値を採用することとした。

スクレーパー先端の材質は、金属製・樹脂製とも有意な差は見られなかつたため、受け側のゴムブロックを不必要に劣化させないため、樹脂製部材を採用することとした。

表-3 切削試験結果

Table 3 Result of scrape test

実験 ケース	土質	先端 材質	押付力	単位付着量 (g/cm^2)	合否判定
Case-A	モルタル	金属製	$P=69kg$	0.020	合格
Case-B	モルタル			0.010	合格
Case-C	裏込め材			0.033	合格
Case-D	海砂+珪砂			0.002	合格
Case-E	粘土			0.015	合格
Case-F	海砂+珪砂			$P=230kg$	0.001

3.3 現場接続用圧着機の開発

実施工においては、HLシールを現場に納入する際に掘進全長分のHLシールを接続して持ち込むことが困難な場合が想定される。そのため、現場においてH



図-17 現場接続用圧着機(左)および性能確認試験(右)

Fig.17 Joint tool (left pic.) and Handling test (right pic.)

Lシールの接続を行うための機材の開発およびその手順の確立が必要となる。本開発では、同様のゴム部材を製作工場で接続する機械を小型化・軽量化した現場接続用圧着機を開発し(図-17)，工場外の施工環境においても施工可能な手順を確立した(図-18)。これにより、掘進全長分のHLシールを一括納入できないような狭隘施工スペースの案件や施工延長の長い案件においても適用が可能となる。



図-18 現場接続手順書(抜粋)

Fig.18 Handling manual (an extract)

4. おわりに

本開発では、地下水圧下での函体間の止水を可能とするHLシールの開発を行い、0.8MPaの耐水性能を確認した。さらに実用化を視野に入れ、鋼殻間段差への対応方法や、シール内に砂が咬んだ場合の止水性の確認、特殊形状対応のエントランスの開発、スクレーパーや現場接続用圧着機の開発を行った。

今回開発したHLシールが実用化されることにより、ハーモニカ工法は地下水位の高い施工条件においても適用が可能となり、幅広い案件への提案が期待される。

なお、今回開発したHLシールの実施工への適応性を確認するため、現在ハーモニカ工法を施工中の作業所において、実際に施工するハーモニカ函体の一部にHLシールを設置して推進工を行い、HLシールの施工性を確認する実験が進行中である。