

直接切削セグメントによる シールド側面接合の設計と施工

稗田 貢¹・臼田 利之²・藤本 明生³・坂本 岳志⁴・三木 章生⁵

¹大阪市 建設局下水道河川部 (〒559-0034 大阪市住之江区南港北2-1-10)

²大阪市 建設局下水道河川部 (同上)

³正会員 株式会社間組 大阪支店太閤シールド出張所 (〒543-0063 大阪市天王寺区茶臼山町6)

⁴株式会社間組 大阪支店太閤シールド出張所 (同上)

⁵正会員 株式会社間組 土木事業本部技術第一部 (〒105-8479 東京都港区虎ノ門2-2-5)
E-mail:amiki@hazama.co.jp

北浜逢阪貯留管築造工事は、合流式下水道の改善対策施設として、幹線道路下約50mに内径φ6.0m、延長約4.8kmにわたる本線貯留管とこれに接続する2本の連絡渠を泥水式シールド工法にて築造する工事である。連絡渠のうち1本の連絡渠(シールド外径φ4.79m、仕上がり内径φ4.0m)は、土被り48mの大深度・高水圧下で本線へ接続する。接続方法として、シールド機にて直接切削できるFFUセグメントを本線セグメントへ設置し、シールド機を直接本線坑内へ到達させる工法を選定した。直接切削セグメントを用いて直接到達したシールドの施工事例は初めてであり、本稿では、その設計および施工について報告する。

Key Words : Connection to the side of a tunnel, FFU segment, Large depth shield,
Combined Sewer Overflow Control

1. はじめに

大阪市では、市域の下水道のうち約97%が合流式下水道で整備されており降雨が一定量を超えると、汚水混じりの雨水が市内を流れる道頓堀川などへ直接放流されるため、河川の水質悪化の要因のひとつとされている。北浜逢阪貯留管築造工事は、道頓堀川および東横堀川の水質保全のための合流式下水道の改善対策施設として、幹線道路下約50mに内径φ6,000mm、延長約4.8kmにわたる本線貯留管(以下、本線と称す)および、本線へ接続する2本の連絡渠(本町連絡渠、道頓堀連絡渠)を築造する。北浜逢阪貯留管は、豊臣秀吉による大坂城築城の際に原形が造られたと言われる背割り下水(太閤下水)にちなみ「平成の太閤下水」の愛称がつけられている。

本線と連絡渠との側面接合方法は、当初、広範囲な凍結工法を実施したうえで、地山を掘削してセグメントを撤去する方法であった。しかし、土被り約48mの高水圧下において、安全性を確保し短期間で施工するために、本町連絡渠においては、シールド機で直接切削が可能なセグメントを本線へ設置してシールド機を本線の坑内へ

到達する方法へ変更した。

2. 工事概要

(1) 全体工事概要

全体工事概要を下記に、工事全体平面図、縦断面図を図-1に示す。

工事名称：北浜逢阪貯留管築造工事(その1)

工事場所：大阪市北区西天満1丁目

～天王寺区茶臼山町地内

工事内容：

管きょ工(泥水式シールド工法)

北浜逢阪貯留管 路線延長 L=4,804.588m

(仕上がり内径φ6,000mm)

本町工区連絡渠1 路線延長 L=173.983m

(仕上がり内径φ4,000mm)

道頓堀工区連絡渠2 路線延長 L=124.858m

(仕上がり内径φ3,350mm)

特殊マンホール工 材木町会所 1箇所

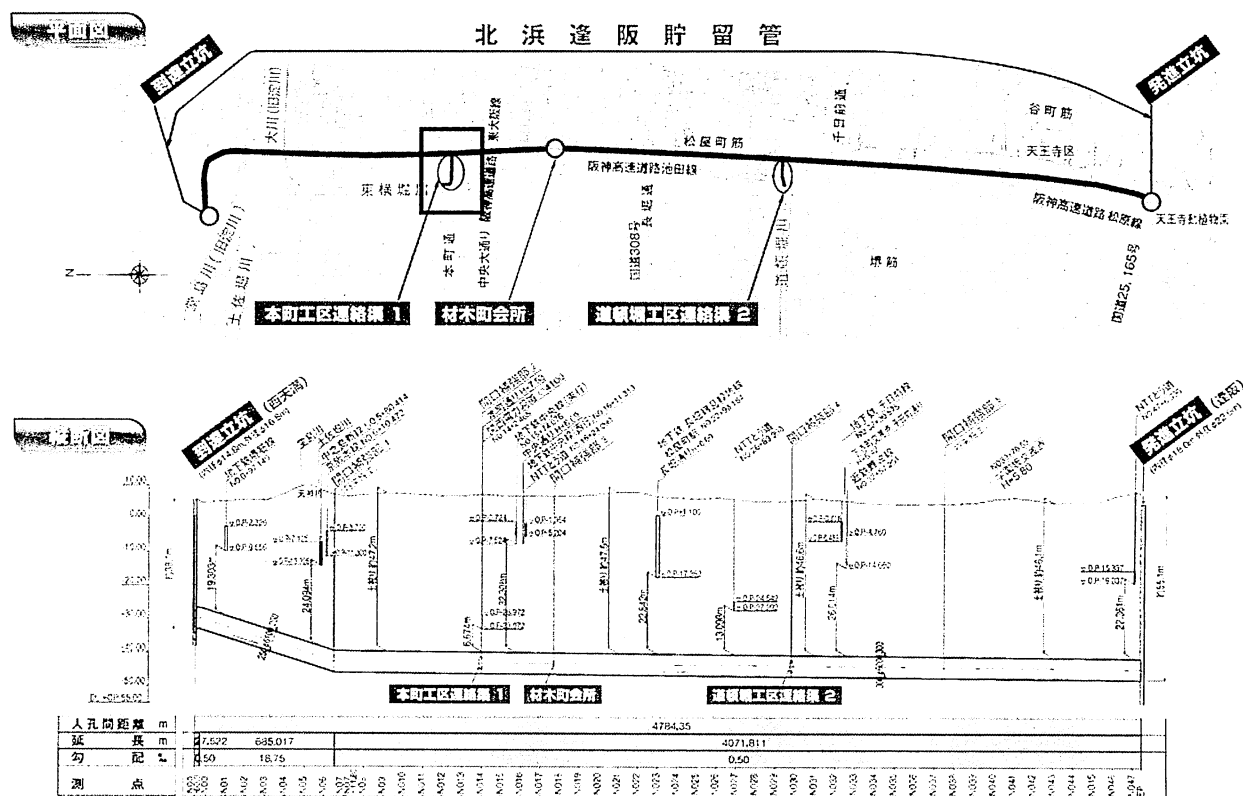


図-1 北浜逢阪貯留管全体平面図，縦断面図

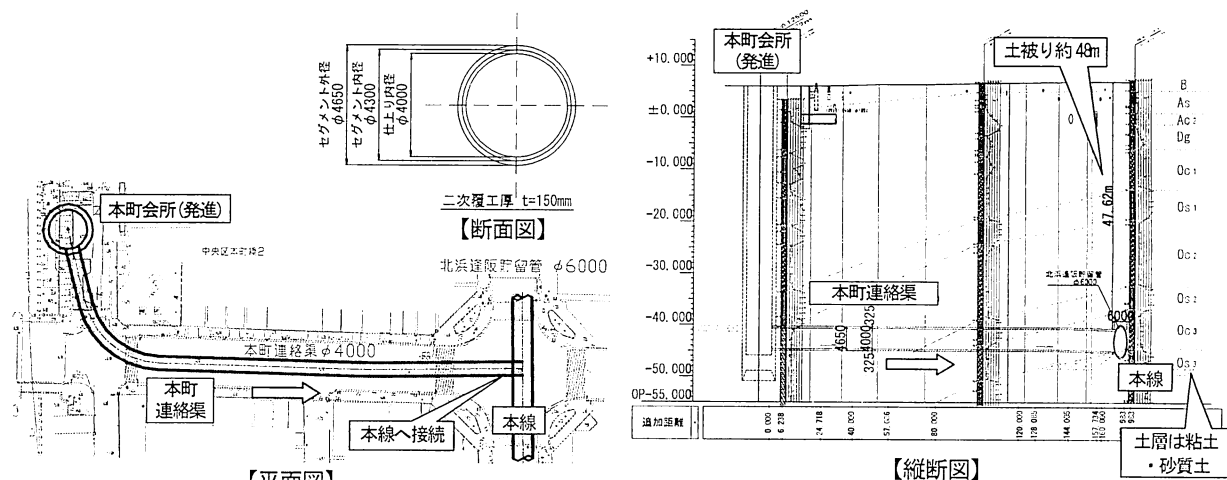


図-2 本町連絡渠平面図，縦断面図

(2) 本町連絡渠の概要

本町連絡渠の平面および縦断面図を図-2に示す。連絡渠と本線との接続部の土質は大阪層群粘性土を主体とするが、下部に砂質土が出現する。また、土被りは約48mの大土被りでの側面接合となる。

3. 側面接合の計画および設計

(1) 側面接合の工法選定

a) 施工条件

連絡渠と本線との接続は、大深度、高水圧下での側面

接合となるため、安全かつ確実な施工方法を選定する必要があった。また、本接続工の後、本線内作業、道頓堀連絡渠、流入会所の接続などの施工が控えており、できるだけ短期間の施工が求められていた。

b) 施工方法の選定

当初計画では、連絡渠シールドを本線手前で停止し、広範囲な凍結工法により地盤改良を実施したうえで、地山を掘削してセグメントを撤去する計画であった。

しかし、地山の露出部が多く、危険を伴う作業となり、工程も長期間を要する。そのため、シールド機にて直接切削できるセグメントを本線へ設置し、本線坑内へ隔壁を設け、その中にシールド機を到達させる工法へと変更

表-1 側面接合の概要

した。直接切削セグメントを用いて、シールド坑内から分岐シールドを直接発進した事例は過去に数例あるが、同セグメントを用いて直接坑内へ到達した事例は今回初めてとなる。なお、直接切削セグメントは、ガラス繊維を主部材としたFFUセグメントを選定した。

表-1に当初計画と今回選定した側面接合計画の概要を示す。

(2) 側面接合における課題

本工事における側面接合は、大深度、高水圧下となることに加え、本線シールドのセグメント外径 $\phi 6,600\text{mm}$ に対して接続する本町連絡渠シールド外径は $\phi 4,790\text{mm}$ であり、開口比率（接続シールド径/本線セグメント外径）が72.6%と大きい。これは、過去の直接切削セグメントによるシールド坑内発進事例と比較して、接続するシールド径、開口比率が最大であり、かつ、土被りも最大となる。側面接合の計画および設計における課題を下記に示す。

- ①開口補強セグメントの設計：シールド切羽圧などが作用する施工時および完成時の構造の安全性と、高水圧下におけるセグメント変形に対応した止水性を確保する必要があった。
- ②シールド到達時の仮設構造：到達時の止水性の確保と接続シールドの切羽圧を受けることができるよう坑口金物や隔壁の構造を検討する必要があった。
- ③到達後の対応：シールド到達後、隔壁撤去時の出水を防止するための対応が必要であった。

(3) 本線貯留管開口補強部の設計

a) 開口補強セグメントの概要

開口補強セグメントは、鋼製セグメントを採用した。桁高は 200mm（補強桁部は桁高 300mm）とし、補強桁内蔵型とした。また、開口部の FFU セグメントの切削可能範囲は、連絡渠シールドの到達誤差等を見込み、シール

ド外径から約 100mm 余裕を見て $\phi 5,000\text{mm}$ とした。開口補強部のセグメント割付を図-3 に示す。

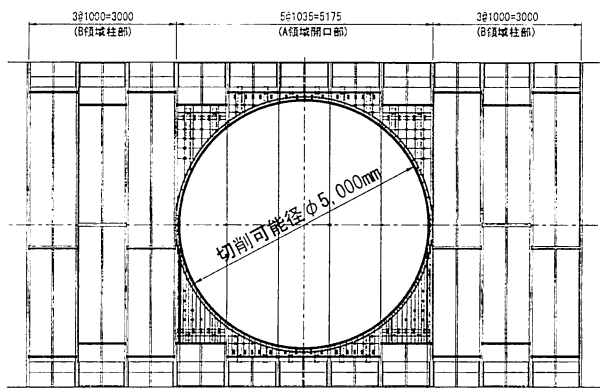


図-3 開口補強セグメント割付

b) 開口補強セグメントの設計

開口補強セグメントは、開口部リングと柱部リングをそれぞれ単独にモデル化する従来の手法に加え、開口時の変形やこれによる影響を考慮するため、「多リングはりばねモデル」(図-4)による検討を実施した。設計荷重は完成時の荷重ケースのほか、施工時の荷重ケースとして連絡渠到達時の推力の影響を考慮して設定した(図-5)。これによる検討の結果により、リング間ボルトのランクアップと増ボルトを行った。図-6に開口補強セグメントの仕様を示す。

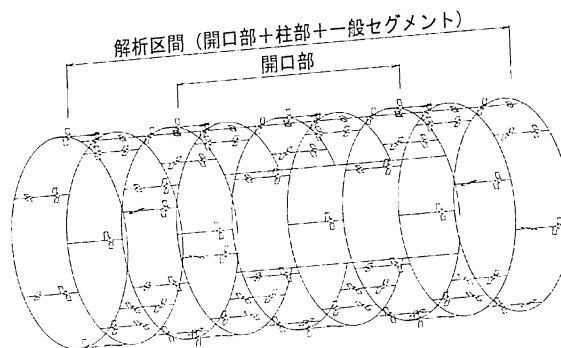


図-4 開口補強部解析モデル (はり-ばねモデル)

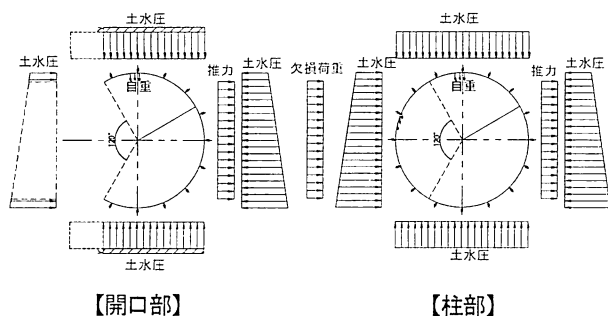
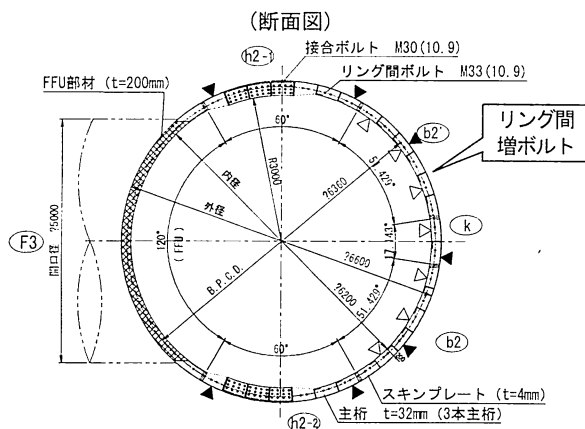


図-5 施工時（開口時）の荷重



	単位	セグメント	補強梁
セグメント外径	mm	6600	—
セグメント内径	mm	6200	—
セグメント幅	mm	1035 (開口部) 1000 (柱部)	—
主桁本数		3	—
鋼材材質		SM490A	SM490A
スキンプレート厚	mm	4	29
セグメント桁高	mm	200	300
主桁高	mm	196	271
主桁厚	mm	32	54
継手板高	mm	196	271
継手板厚	mm	32	54
セグメント間継手		M33×4本 (10.9)	—
リング間継手		M33 (10.9)	M30×36本 (10.9)

図-6 開口補強セグメントの仕様

(4) 到達部隔壁構造

連絡渠シールドの到達時は止水性を確保するため、本線坑内に坑口金物と隔壁を設置し、その中へシールド機を到達させる方法とした。隔壁は構造上有利な円筒形状としたが、坑口部は写真-1に示すように、完全な円筒形とならないため部分的な応力集中の有無や、開口時における本線セグメントの変形による影響などが懸念された。これらの影響を把握するため、3次元シェルモデルによるFEM解析を実施した(図-7,8)。また、隔壁に作用する切羽圧を受けるため、隔壁を支保する鋼製支保工を設置した(写真-1)。

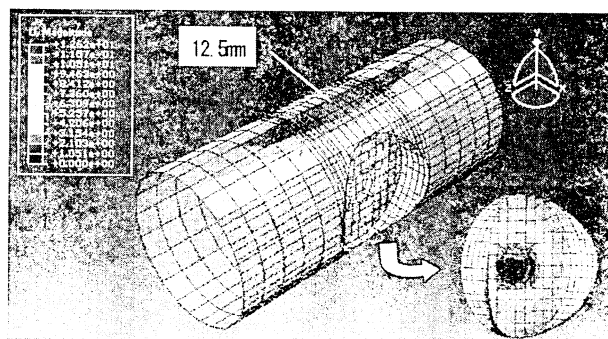


図-7 3次元シェルモデルによる解析結果（変形図）

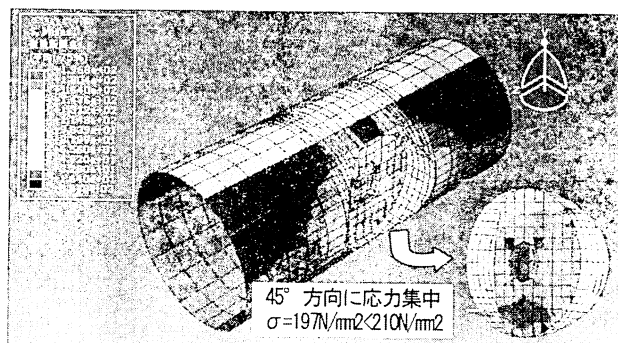


図-8 3次元シェルモデルによる解析結果（応力図）

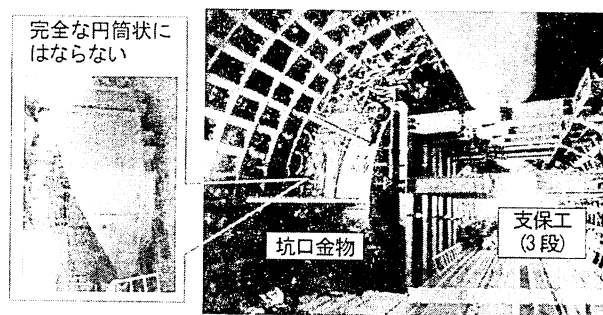


写真-1 到達坑口設置状況（本線坑内）

(5) 隔壁撤去時の凍結工法の計画

シールド到達後、坑口金物・隔壁の撤去および止水鉄板溶接時に、止水を確保するため、マシン周囲への裏込め注入のほか、貼付け凍結管による凍結工法を採用した。凍結管は、本線セグメントおよび連絡渠シールド機に設置するが、シールド機内およびFFUセグメントの一部など到達後に凍結管の設置ができない部分については、シールド機およびセグメント製作時に設置した。

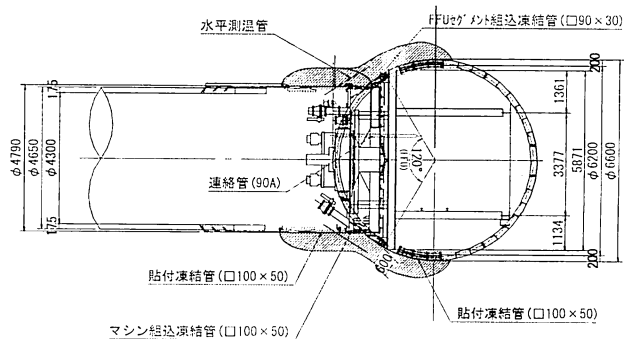
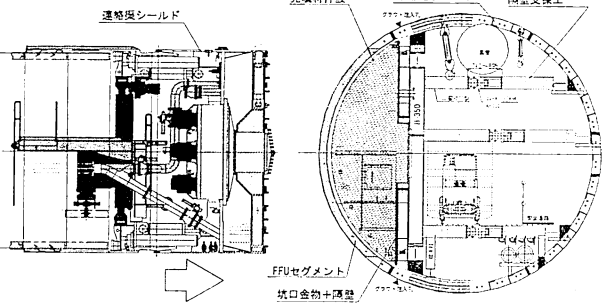
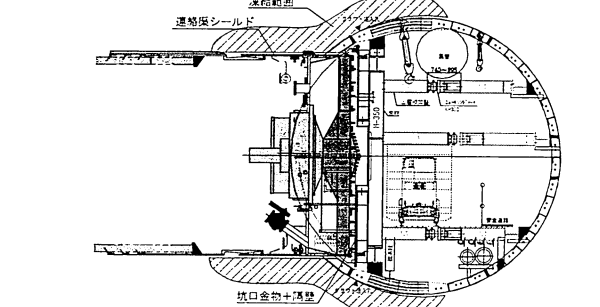
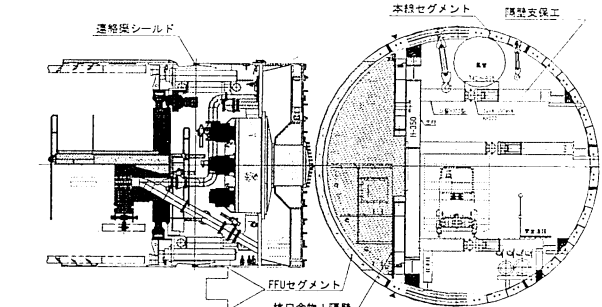
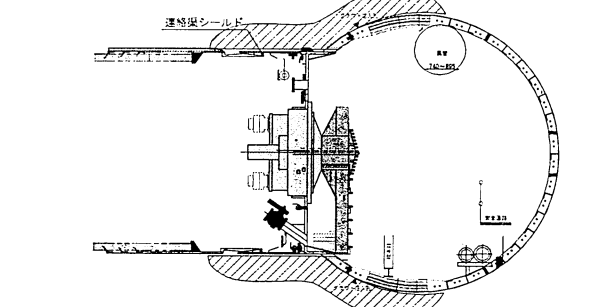
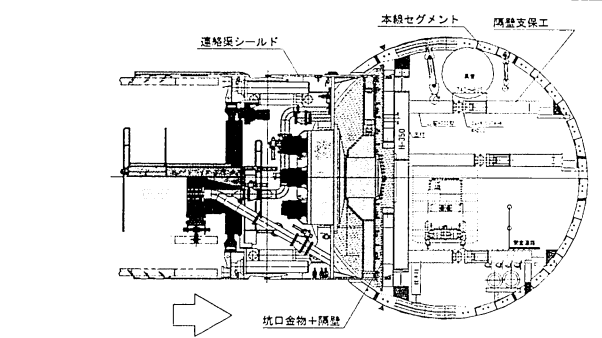
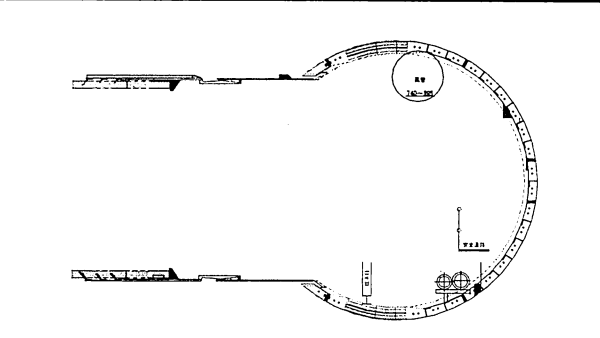


図-9 隔壁撤去時の凍結計画

表-2 側面接合の施工手順

STEP1 FFUセグメント設置(本線セグメント組立て時) 坑口金物、隔壁および支保工設置	STEP4 連絡渠シールド一次解体(エレクター等) 貼付け凍結管による凍結
	
STEP2 FFUセグメント切削開始	STEP5 隔壁撤去、止水鉄板による止水 連絡渠シールド二次解体(カッター・駆動部)
	
STEP3 隔壁内シールド到達	STEP6 シールド機解体完了 凍結解凍、二次覆工
	

4. 側面接合の施工

(1) 施工手順

本計画における施工手順を表-2に示す。

STEP1：本線掘進時にFFUセグメントを設置，連絡渠シールド到達前に隔壁および隔壁支保工を設置した。また，隔壁内は裏込め材を充填した。隔壁設置前のFFUセグメントの設置状況を写真-2に示す。

STEP2～3：シールド機により，FFUセグメントを切削，隔壁内の所定位置まで掘進した。

STEP4：連絡渠シールドを部分解体し，貼付け凍結管により坑口周りの地盤凍結を実施した。

STEP5：隔壁を撤去し，坑口部を止水鉄板により止水

を確保した。その後，シールド機の残り部分を解体，次の連絡渠シールドへ転用させる駆動部は本線内を運搬し本線発進立坑から搬出した。

STEP6：凍結解凍後，二次覆工を施工し完了する。

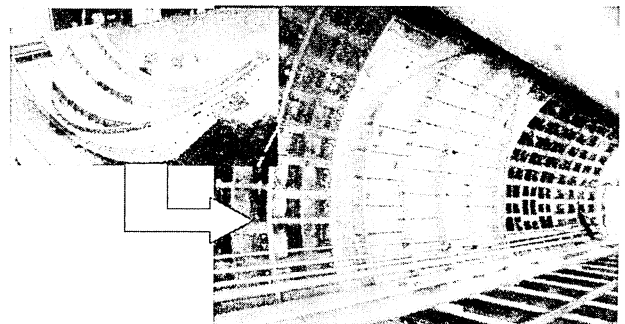


写真-2 FFUセグメント設置状況(本線坑内)

(2) 連絡渠シールドの到達

連絡渠シールド到達時は、FFUセグメントを切削するため、FFU部材の配管閉塞に伴う切羽圧の急激な上昇を生じないよう下記の対策を実施した。

- ① FFUセグメントの大割れ防止のため、切削時の掘進速度は2～5mm/分程度の微速を保持した。
- ② 排泥管やポンプにおける閉塞防止のため、排泥管に礫取り装置を設置し、大きなFFU部材は回収した。
- ③ 切羽圧が設定圧以上になった場合に瞬時に圧力を開放できる破裂板を排泥管に設置し、過剰な泥水圧が作用しないようにした。

FFUセグメントの切削時は掘進速度を微速にし、FFU部材の大割れ防止に配慮したが、切削開始後から排泥管が閉塞し、礫取り装置等の清掃が頻繁に発生した。礫取り箱で回収されたFFU部材の切削くずは、幅は数cm程度、長さ10cm程度～60cm程度のものがほとんどであったが、まれに50～60cm程度のものが回収された（写真-3）。

配管閉塞に伴い、急激な切羽圧の上昇も見られ、排泥管に設置した破裂板は2度にわたり破損したが、その後は切羽圧の制御により目標切羽圧（0.4MPa）以下での掘進を行うことができた（図-10）。

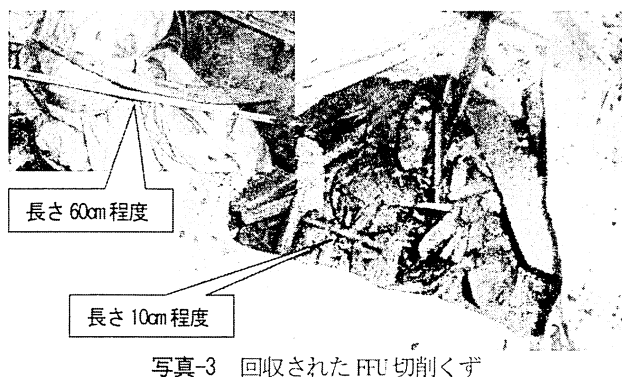


写真-3 回収されたFFU切削くず

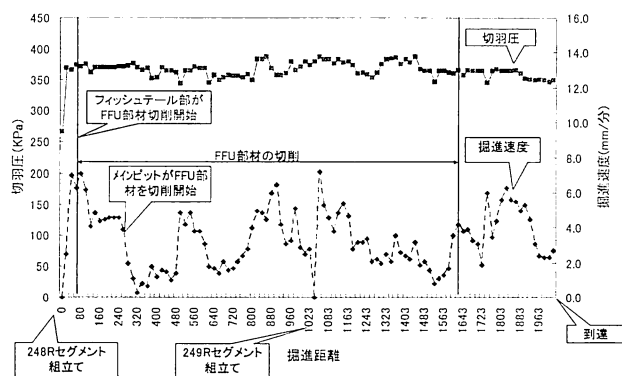


図-10 到達時の掘進速度と切羽圧

FFUセグメントの切削開始から、所定位置までの到達距離はわずか1.6mであったが、FFU部材の閉塞と微速による慎重な施工の結果、4日間（昼夜施工）を要した。

(3) 坑口部の止水処理およびシールド機解体

完成時の止水の確保として、シールド機スキンプレートと開口補強セグメントとの間に止水鉄板（ $t=12\text{mm}$ ）を溶接し、止水処理を行った。

坑口止水処理は、凍土造成後にできるだけ早く施工できるように、隔壁やシールド機の解体を部分的に行った。凍結により漏水もなく坑口処理が実施でき、凍土の解凍後においても漏水がなく止水を確保できた。

シールド機の解体は、凍結の配管等の設置のため、到達後、エレクターや作業デッキなど内部設備を先行して解体した。隔壁撤去後は、駆動部を一体として本線シールド内から搬出することができたため、施工効率が向上した。シールド機の解体状況および坑口処理状況を写真-4および写真-5に示す。

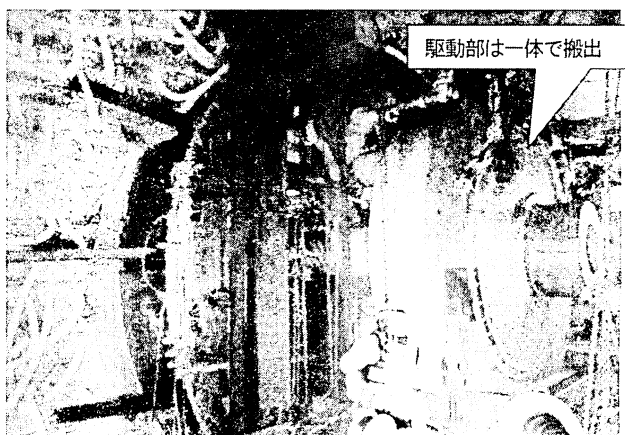


写真-4 シールド機解体状況（駆動部）

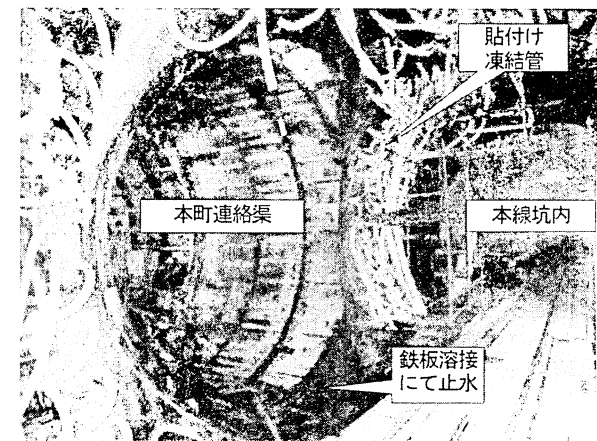


写真-5 坑口止水状況（シールド機解体後）

(4) 施工工程

連絡渠シールドの到達掘進を平成24年3月2日より開始し、到達後、坑口の止水処理が5月14日に完了、シールド機の解体、凍結設備の撤去が5月末までに無事完了した。従来工法での広範囲な凍結工法では、凍土造成だけでも数ヶ月を要するのに対し、約3ヶ月で側面接合の施工を完了できたことは、効率的な施工であったと考えられる。

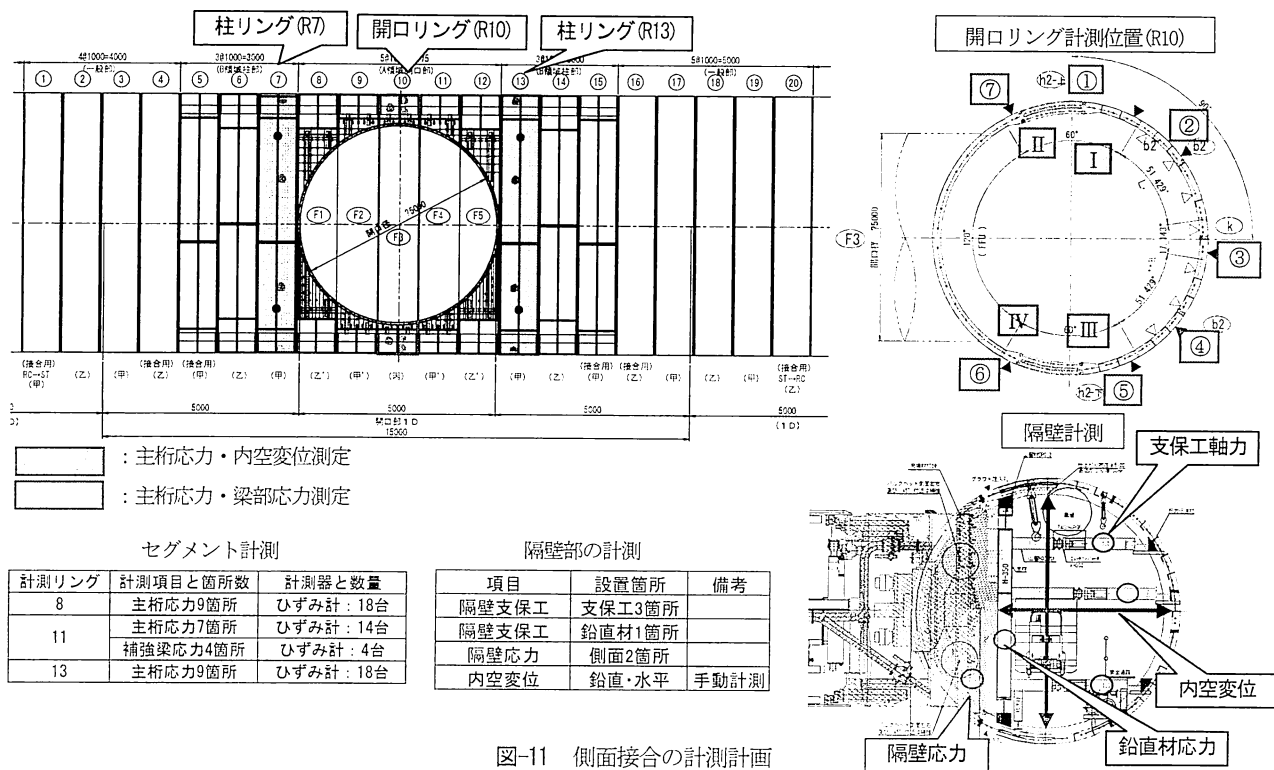


図-11 側面接合の計測計画

5. 側面接合の施工時の計測と計測結果

(1) 計測計画

連絡渠シールド到達時の施工時の安全性の確認のため、本線セグメントや隔壁支保工などに対して各種計測を実施した。

開口補強セグメントは、主桁応力および補強梁応力を柱部および開口部セグメントについて計測、また、隔壁支保工軸力、坑口金物応力について計測した。そのほか、手動でセグメントの変形を測定した。計測項目、計測箇所について図-11に示す。

(2) 計測結果

a) シールド到達時の隔壁計測

連絡渠シールド到達時の隔壁支保工軸力計測結果を図-12に示す。

シールド到達時の隔壁部の支保工軸力は、FFUセグメントの切削に伴い切羽圧が隔壁に作用し支保工軸力が増加した。また、掘進時の切羽圧の変動に連動して支保工軸力の計測値が変動した。

測定された支保工軸力は、計算値に対して、概ね30～50%程度の軸力となった。これは、隔壁支保工の設計圧力0.45MPaに対して、到達掘進時の切羽圧は85%程度と低かったこと、および、隔壁を固定している坑口金物をセグメントと溶接により固定していたため、隔壁支保工への軸力の伝達が減ったものと考えられる。また、計測結果では中段支保工の軸力が上段および下段支保工にくらべ低い値となっているが、別途隣接する支保工に設置した土圧計の値では中段支保工が上下段支保工よりも大きな値を示していたため、隣接する支保工が荷重を負担していたものと考えられる。

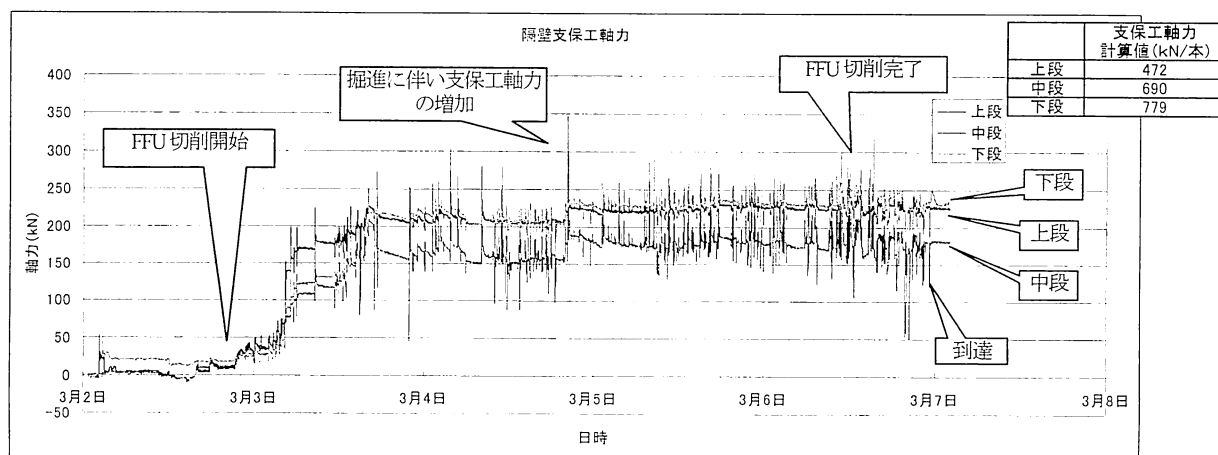


図-12 到達時の隔壁支保工計測結果

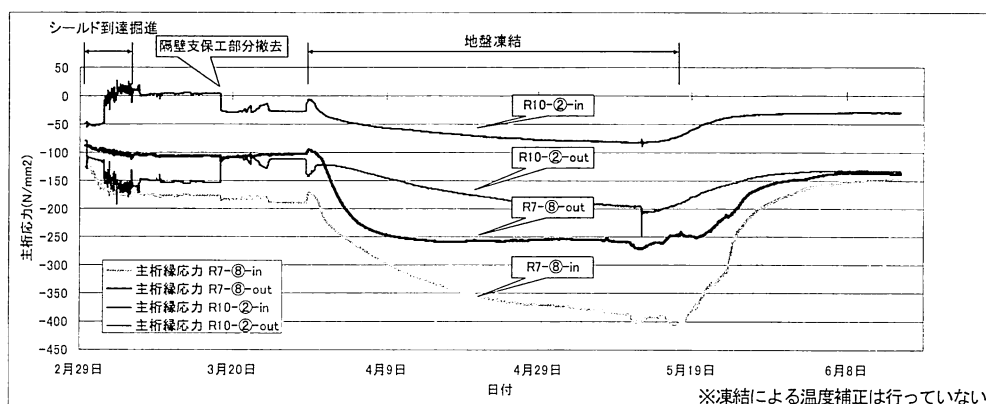


図-13 セグメント主桁応力計測結果

b) セグメント主桁応力計測結果

セグメント主桁応力は、FFUセグメント切削時および地盤凍結時（隔壁撤去時）に応力の変化が見られた。地盤凍結時は、温度の影響により圧縮側に大きく変化が見られるが、解凍後は凍結前と同様の値に戻っている。連絡渠シールド到達時、地盤凍結解凍後の主桁応力は許容値以内となっており安全性が確認された。開口部・柱部の主桁応力最大箇所を抽出して値を比較した結果、おおむね計測値と計算値と近い値となっている（図-14）。

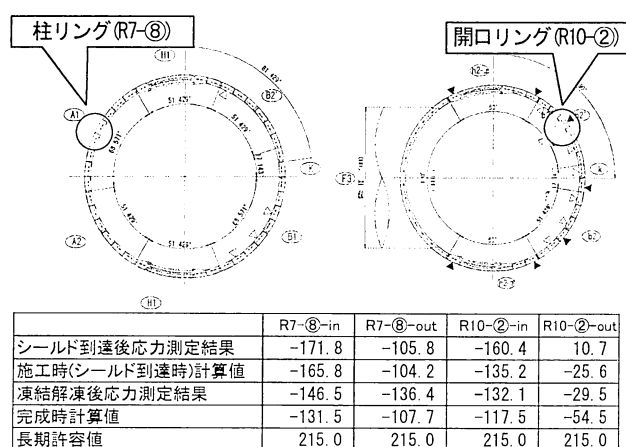


図-14 セグメント応力計算値との比較

6. まとめ

本工事において、初めてとなる直接切削セグメントによるシールド側面接合を採用したが、出水等のトラブルもなく無事施工を完了することができた。

従来の工法では、補助工法を用いて地山部を掘削・セグメントを撤去する方法をとっているが、地山の露出が多く危険を伴う作業となり、工程も長期間を要する。本工事で採用した直接切削セグメントを用いたシールド機による側面接合は、大深度における地中接合において工期や安全性の面で優れる工法であると考えられる。

今後、シールドトンネルの大深度化が進む中、立坑を設けずに地中接合を行う事例が増えると考えられる。本報文が類似の施工に対して参考になれば幸いである。

最後に、本工事を設計、施工するにあたり、ご指導、ご意見をいただいた関係各位の皆様に深く感謝を申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 臼田利之：道頓堀川の水質保全に大きな力を発揮 平成の太閤下水を建設するー北浜逢阪貯留管築造工事，土木施工，pp.36-39，2011 Jul. Vol52 No.7.

(2012.9.3受付)

Design and Construction for the Direct Connecting of a Joining Conduit to the side of the Shield Tunnel Using an Easy Cutting Segment

Mitsugu HIEDA, Toshiyuki USUDA, Akio FUJIMOTO, Takeshi SAKAMOTO and Akio MIKI

Kitahama-Osaka Stormwater Storage pipeline Project is the construction of a main storage pipeline, inner diameter ϕ 6.0m, total length 4.8km, and two joining conduits by slurry shield tunneling method below 50m ground level under trunk roads, to control combined sewer overflows. One joining conduit of the two; outer diameter of the shield machine ϕ 4.79m, is to be connected to the main pipeline at 48m below ground level under high water pressure condition.

We set up the FFU segment at a joint part of the main pipeline, so that the shield machine of the joining conduit can cut it and arrive there directly. The design and construction of the work using an easy cutting segment is the first case, and will be reported here.