

神戸山手線（南伸部）開削トンネルの施工計画概要

神戸第一建設部 設計課	森 喜 仁
	佐々木 一 則
神戸第二建設部 設計課	今 田 康 博
	吉 田 高 之

要 旨

神戸山手線（南伸部）は都市内での開削トンネルであることから、多くの交差物件（平面街路、私鉄、地下鉄、JR、高速道路、地下埋設物等）と、並行する新湊川により平面・縦断線形共に制約を受けた路線である。地質状況は新生代の洪積層で砂質土、礫質土、粘性土の複雑な互層を呈しており、地下水位が高く被圧帯水層も存在する。このような状況下で直面する開削トンネルの設計・施工概要について報告する。

キーワード：開削トンネル、仮設工、近接施工対策・設計・施工

はじめに

神戸山手線（南伸部）は図-1に示すように起点側より湾岸線9期との接続、地下鉄海岸線・国道2号・3号神戸線・JR山陽本線・地下鉄山手線・NTT長田とう道・神戸高速鉄道・平面街路等と交差し、終点部は山手線との接続のため複雑な平面・縦断線形となっている。また、約2kmの短い区間で駒栄・長田出入路での平面街路との接

続、3号神戸線との連絡となり、土被りが浅いトンネルとなるため開削工法を採用している。計画位置の地層は複雑な互層となっており、開削トンネルの施工にあたっては、山留め壁の設計・盤ぶくれ対策等、各工区でそれぞれの対応が必要となる。本稿は、このような種々の状況下での山留め壁の設計・施工、近接構造物への対策等、また併せて函体のマスコンクリート対策、防水工についての試験施工計画も述べるものである。

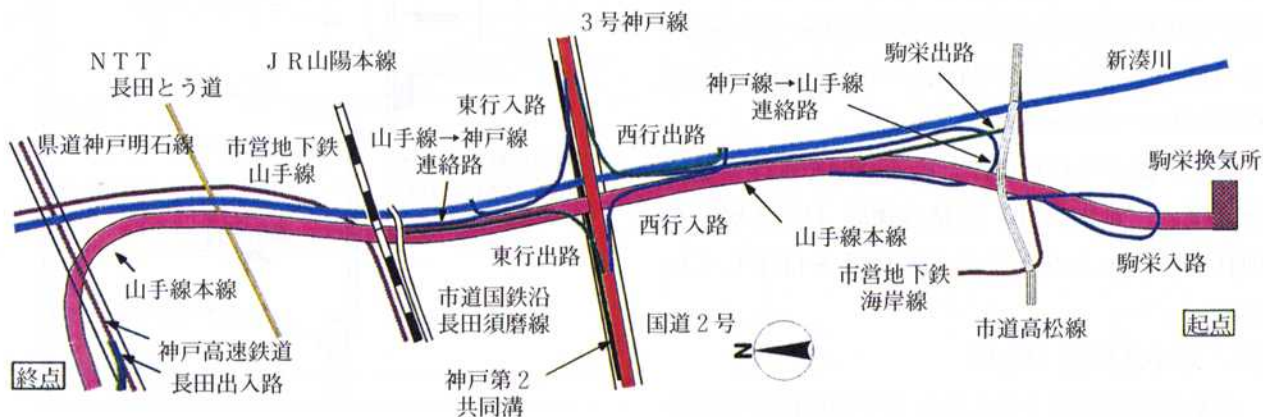


図-1 神戸山手線南伸部平面略図

1. 山留め形式

山留めは地盤条件、開削床付面の深度より地中連続壁を標準として採用し、施工条件により柱列式、壁式の使い分けを行っている。図-2に山手線南伸部の代表的な地層構成を示す。

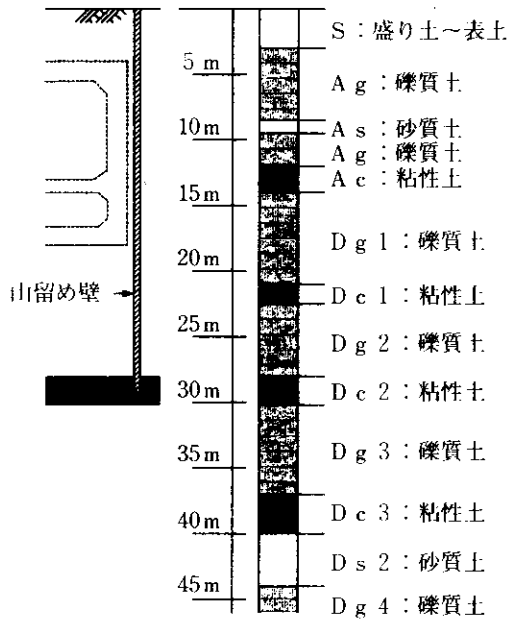


図-2 地層構成図

1-1 一般部の山留め壁

(1) 地中連続壁（柱列式）

当該路線で施工する山留め壁のほとんどが地中連続壁（柱列式）であり、地盤条件・掘削床付面の深度・近接構造物の有無により応力材（H型鋼）の必要断面・長さを決定し、造成深度・使用応力材に見合った径の柱列杭造成を行う。各工区で施工する地中連続壁（柱列式）はφ550mm～φ850mm、応力材サイズH-400×200mm～488×300mm、応力材長22.0m～33.5mとなっている。

また、盤ぶくれ対策のため連続壁を延伸する場合、堅い（N値>50）洪積砂礫層（Dg2層）を削孔することとなるため先行削孔を併用している。

(2) 地中連続壁（壁式）

交差構造物の路下施工となり空頭制限を受ける（H=5.5m～8.4m）箇所での山留め壁は、低空頭

型の機械による地中連続壁造成となるが、柱列式では昼間作業時間内に1サイクルの山留め壁造成が完了しないため、作業中断が可能な壁式を採用することとした。この場合も、柱列式と同様に使用応力材に見合った壁厚としている。

1-2 特殊部の山留め壁

(1) 国道2号新湊川大橋路下部

国道2号新湊川大橋部の函体東側山留め壁は、同大橋の橋台位置とラップするため、上部工を仮受けした後、橋台を撤去しての路下施工となる。

また、3号神戸線の橋脚（直接基礎）と近接するため、この橋脚に変状を来さないような工法を選定する必要がある。このような状況下で施工可能な山留め工法を検討した結果、地中連続壁（壁式）を採用した場合、地下水位が施工基面より高いため水位低下と溝壁安定のための補助工法が必要となる。また、被圧水も存在することより万一の溝壁崩壊も懸念され、その場合、近接橋脚の安定を損なうこととなる。そこで、昼間作業時間内に造成可能な長さの地中連続壁（柱列式）と、盤ぶくれ対策のための不足分は薬液注入による遮水壁を組み合わせた山留め壁を採用することとした。この場合も、地下水位低下は必要となるため補助工法（ウェルポイント）を考えている。

(2) NTTとう道交差部

NTT長田とう道（シールド工法）との交差部

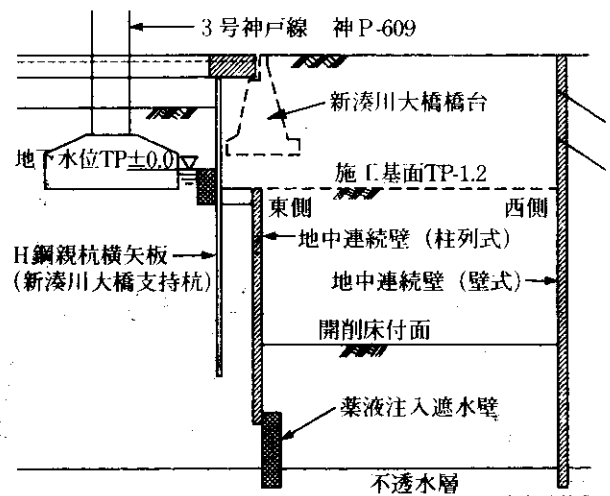


図-3 新湊川大橋路下部山留め壁

(山手線函体が上)では、山手線の縦断線形調整でもとう道及び立坑との抵触を免れないため、函体構築時にとう道を撤去し函体直下にボックス構造で復旧することとなる(図-4参照)。

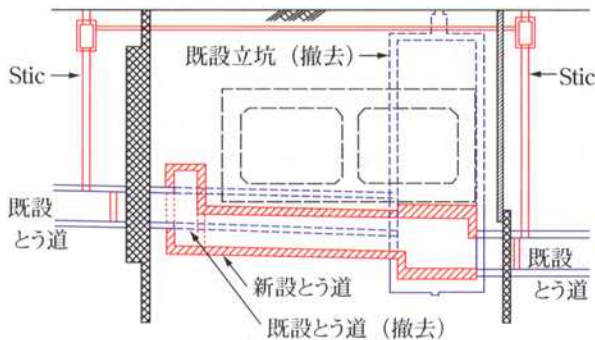


図-4 NTTとう道移設計画図

函体構築のための山留め壁は既設とう道により欠損が生じる。このため、欠損防護工はとう道を貫通してガイドパイプを設置し、超高圧噴射系による地盤改良と補助薬液注入による遮水壁造成を組み合わせ採用することとした(図-5参照)。

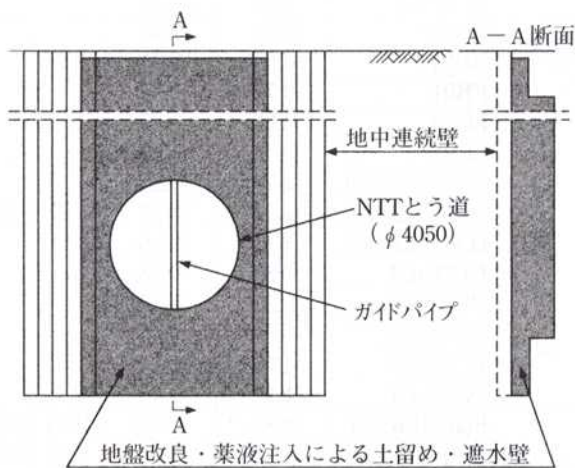


図-5 NTTとう道交差部山留め壁

(3) 地下鉄山手線交差部

地下鉄山手線交差部では地下鉄直上(離隔:約40cm)に函体構築を行うため、開削床付面下に山留め壁の根入れが確保出来ない。このため採用可能な山留め工を検討した結果、経済性より2列のH鋼親杭横矢板による掘削を行い、その間に貧配合コンクリートを打設し山留め壁とする工法を検

討中である。また、盤ぶくれ対策は地下鉄両サイドに縦坑を構築し、薬液注入による遮水壁を造成する計画である。

(4) 地下鉄海岸線交差部

地下鉄海岸線(シールド工法)交差部(山手線函体が上)では、山手線函体構築のための開削時のリバウンドによる地下鉄構造物に対する影響を避けるため、事業者間の調整を行い山手線函体を先行施工することとした。このため、函体施工のための山留め壁は後施工の地下鉄シールド掘進による削孔が容易なように、特殊な応力材を使用した工法(NOMST工法)を採用することとした。

この工法は地中連続壁の応力材を、工場製作によりシールド掘進部はH型鋼から新素材コンクリートに置き換え、炭素繊維を使用したストランドで補強したものであり概要図を図-6に示す。

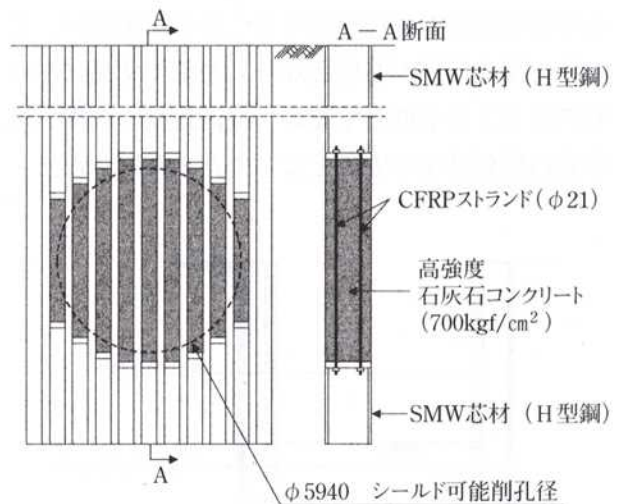


図-6 NOMST工法概要図

2. 盤ぶくれ対策

当該路線の地盤は被圧滞水層が開削床付面下に多層存在し、開削時の盤ぶくれに対する安全率が確保できない。このための対策としては、荷重バランスする深度まで地中連続壁を延伸、ディープウェルの併用、掘削底版改良等が考えられるが、検討の結果、以下の対策を採用することとした。

2-1 地中連続壁延伸

当該路線での標準的な盤ぶくれ対策は、函体床付面に作用する水圧と不透水層までの土塊重量比による安全率1.1を確保できる不透水層まで地中連続壁を延伸する工法を採用している。また、前述のとおり地中交差構造物等で地中連続壁の延伸が不可能な場合は、地盤改良等による遮水壁の造成を併用している。山留め壁内の滞留水は掘削時のドライワークを可能にするため、リリースウェルによる揚水を行うこととしている。

2-2 地中連続壁+ディープウェル

水圧とバランスする不透水層が近傍になく、地中連続壁延伸では遮水壁が長くなりすぎる場合は、ディープウェルによる被圧水位の低下を併用している。当該路線の被圧帯水層には、溶解性鉄分、浮遊物質、溶解性マンガン等を排水基準以上含んでおり直接河川に放流することが出来ない。このため濁水処理が必要となり、設備や薬品にかなりのコストを必要とするが、経済比較の結果、地中連続壁延伸より安価となったため採用した。

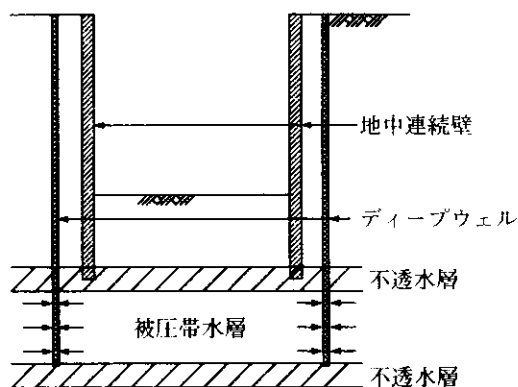


図-7 地中連続壁+ディープウェル

3. マスコンひび割れ対策試験施工

当該路線の函体コンクリートは呼び強度 f'_{ck} 30N/mm²を主に使用し断面も厚いことより、温度応力によるコンクリートのひび割れが懸念される。そこでFEMによる温度応力解析を実施し、ひび割れ発生の予測とその制御対策を検討し試験

施工を実施することとした。

3-1 解析結果と対策

FEM温度応力解析は側壁3ブロック（中床版部・中床版上部・頂版部）については、使用セメント・材令、外気温・打込温度、誘発目地の有無、配力筋の増量等を変化させて実施した。また、中壁については使用セメント、配力筋の増量を変化させて実施した。温度応力によるひび割れ指数・ひび割れ幅について、側壁・中壁の解析結果の抜粋を表-1に示す。

表-1 温度応力・ひび割れ幅解析結果

部位	対策	ひび割れ指数	ひび割れ幅 (mm)	打設時期
側壁① 中床版部	BB28	0.61	0.52	6月中旬
	BB91	0.65	0.49	
	FB91	0.70	0.45	
	LC28	0.82	0.34	
	LC91	1.00	0.33	
	LC91+D22@125	0.99	0.28	
	BB28+CJ	0.77	0.26	
	BB91+CJ	0.80	0.25	
	FB91+CJ	0.87	0.23	
	LC28+CJ	1.06	0.18	
LC91+CJ	1.24	0.17		
側壁② 中床版上部	BB28	0.64	0.44	8月中旬
	BB91	0.67	0.41	
	FB91	0.72	0.37	
	LC28	0.80	0.27	
	LC91	0.98	0.26	
	LC91+D19@250	1.11	0.28	
	LC91+D22@125	1.11	0.23	
	LC91+D22@125	1.11	0.20	
	BB28+CJ	0.80	0.18	
	BB91+CJ	0.82	0.17	
FB91+CJ	0.89	0.15		
LC28+CJ	1.04	0.11		
LC91+CJ	1.22	0.10		
中壁	BB91+D16@250	0.88	0.29	10月下旬
	LC91+D16@250	1.22	0.21	8月下旬
	LC91+D19@125	1.22	0.14	9月下旬
	LC91+D22@125	1.27	0.12	

注1) BB28：高炉セメント (28日材令)

2) BB91：高炉セメント (91日材令)

3) FB91：フライアッシュセメント (91日材令)

4) LC28：低発熱普通ポルトランドセメント (28日材令)

5) LC91：低発熱普通ポルトランドセメント (91日材令)

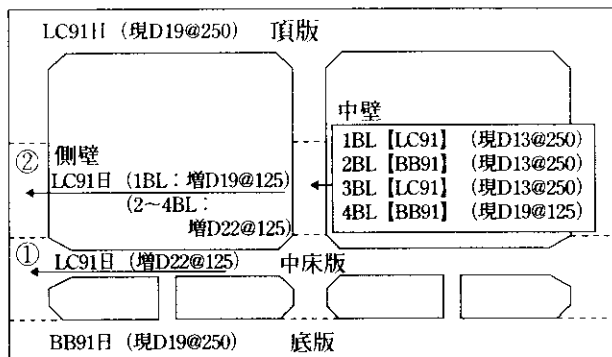
6) D16~22@125, 250：配力筋

7) CJ：誘発目地 5m間隔設置

8) 打設時期は解析上の予定時期である

表-1の結果より、側壁部についてはひび割れ指数1.2以上を満足することは難しいことから、

ひび割れ幅を0.3mm以下に制御可能な対策を試験施工により確認することとした。側壁部で実施した対策は低発熱普通ポルトランドセメント+配力筋増量(D16~19mm@250mm→D19~22mm@125mm)である。また、解析では中壁は側壁に比べて側部拘束が少ないため、ひび割れ幅は小さかったが、鉄筋によるひび割れ制御効果を検証するため高炉セメント+配力筋増量も施工することとした。誘発目地については、温度応力によるひび割れ幅の制御効果は高いが、防水性能等の面より試験施工の対象外とした。



注) 現: 設計計算より決まる配力筋
増: ひび割れ幅制御のため増量した配力筋

図-8 試験施工計画図

3-2 温度ひび割れ対策計測工

今回試験施工する低発熱普通ポルトランドセメントは比較的最近開発されたため、単一あるいは他の制御対策と併用した場合の温度ひび割れ制御効果について、実施に基づき定量的に評価した事例が少ない。このため、試験施工ではコンクリート内部の温度・応力・変位、外気温、打込み温度等を計測しFEMにより再現解析を行うことで、ひび割れ対策の効果を定量的に評価・検証することとした。今回の試験施工で評価する項目を以下に示す。

- 1) 実測ひび割れ指数・ひび割れ幅
- 2) 解析ひび割れ指数・ひび割れ幅
- 3) クリープ応力、緩和率

試験施工での計測器設置場所は、図-9に示す側壁部1箇所、中壁部3箇所とし、いずれも函体

ブロック延長方向の中央部で中床版上部の打設ブロックとした。また、応力計・ひずみ計の設置位置は事前の温度応力解析結果より、コンクリートの温度応力が最大となった打設高さの1/3点と1/2点の2箇所とした。設置する計測器の種類と個数、配置を表-3、図-9に示す。

表-3 計測器の種類と個数

種類	記号	個数(1箇所当)	総個数	
温度計	○	外気温	1	2
		コンクリート内	5	20
有効応力計	◇	"	2	8
亀裂変位計	↔	"	2	8
無応力計	◆	"	2	8
ひずみ計	◊	"	2	8

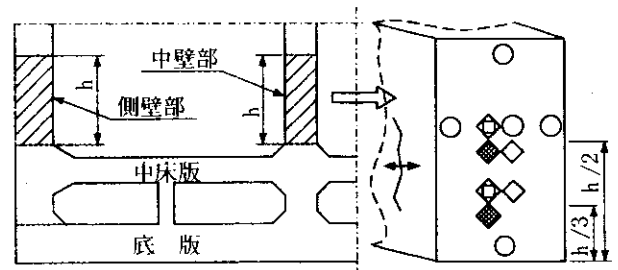


図-9 計測器配置図

4. 防水工試験施工

開削トンネルの防水対策としては現地の制約条件により、先・後防水による防水工が施工されており、種々の材料・施工法がある。特に先防水については函体構築に先立ち施工するため、防水材料継目、函体との密着性が重要となる。そこで、

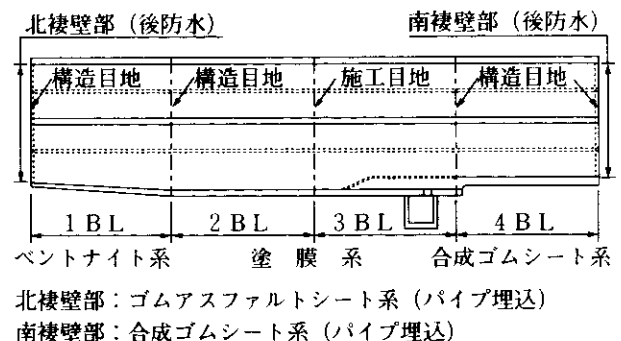


図-10 防水工試験計画図

図-10に示す材料を使用して、施工性・経済性・防水性能について試験施工を実施し比較検討することとした。試験施工は側壁部を先防水、襍壁部については後防水とし、襍壁部は防水材の函体との密着性、防水材継手部の性能を確認するため導水パイプを埋め込むこととした。防水性能の確認は、試験工区に構築する非常階段を利用して追跡調査を実施し、襍壁撤去時には、防水材の経年変化についても確認する予定である。

5. 湊川出入路仮受計画

当該路線と3号神戸線は現湊川出入路を改築し連絡路（山手線南行き→神戸線東行き、神戸線西行き→山手線北行き）を建設する。このため、現出入路は通行止めによる改築が必要となるが、函体構築にあたっては出入路の上部工を仮受け施工することにより、出入路の通行止め期間を可能な限り短縮する工法を採用した。

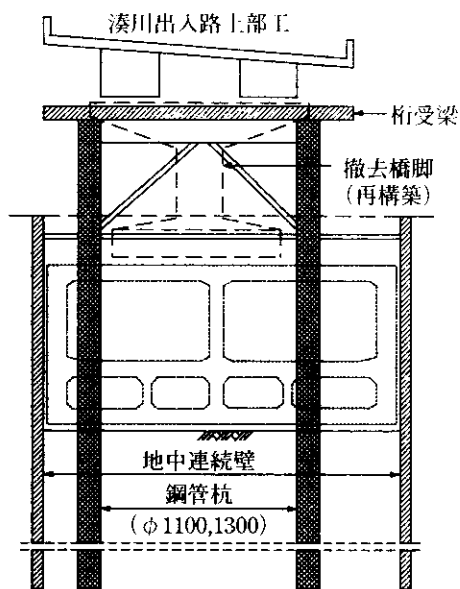


図-11 湊川出入路仮受計画図

6. 近接施工対策

当該路線の開削トンネル施工にあたっては、多くの近接構造物があり、その構造物に悪影響を与えない対策を講じることが必要となる。以下に管

理者との協議により実施する主な近接施工対策について述べる。

6-1 3号神戸線橋脚

路線中間部付近の函体構築にあたっては、3号神戸線本線及び湊川出入路の橋脚が近接構造物となる。このため、先行工区で湊川西行入路橋脚に対する影響解析を行い、施工時の挙動を把握するため計測管理を実施することとした。図-12に代表断面の計測管理計画を示す。なお、他の工区も同様に近接する橋脚については影響検討を行い、必要な対策を実施する予定である。

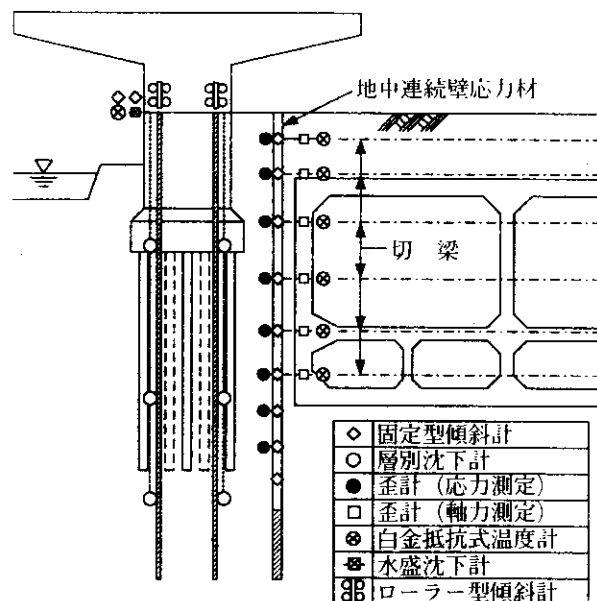


図-12 近接橋脚計測計画図

6-2 国道2号共同溝リバウンド対策

国道2号部では函体直下に共同溝シールドが建設されており事前解析の結果、山手線函体構築時の開削に伴うリバウンド対策が必要となる。この対策についてはシールド建設前に事業者間調整を行い、リバウンド予測解析により想定される影響範囲に対して、シールド側で以下の事前対策を実施することで、山手線函体構築時に必要となる対策の軽減を図った。

- 1) RCセグメントから合成セグメントに変更
- 2) 継手ボルト強度アップ
- 3) 弾性ワッシャーの採用

なお、函体施工にあたっては計測管理等を実施する予定である。

6-3 神戸高速鉄道近接部

県道神戸明石線沿いの函体構築にあたっては、並行して神戸高速鉄道の地下函体が存在するため、近接施工に伴う影響検討を行い、鉄道函体に有害な影響を与えない対策を講じる必要がある。また、工事は営業路線を止めることなく実施しなければならないため、鉄道管理者との近接施工協議により、鉄道函体の許容変位を絶対変位量3mmとして、仮設計画を立案することとした。

近接影響検討は、鉄道函体とその周辺地盤をモデル化し、弾塑性計算により求めた山留め工の変位量を強制変位として入力し鉄道函体の絶対変位量の照査を行った。また、変位により鉄道函体に作用する増分の断面力についても応力照査を行い、函体の安全性を確認した。

函体構築のための山留め壁は、近接施工に伴う影響検討結果より地中連続壁（柱列式）とし、使用する応力材（H型鋼）のサイズは、鉄道函体の許容変位量を満足する断面として、H-700×300×13×24を採用した（図-13参照）。

また、神戸高速鉄道との交差工区に隣接する約20mの区間については、掘削深さが24m程度となり、柱列式の山留め壁では許容変位量を満足する

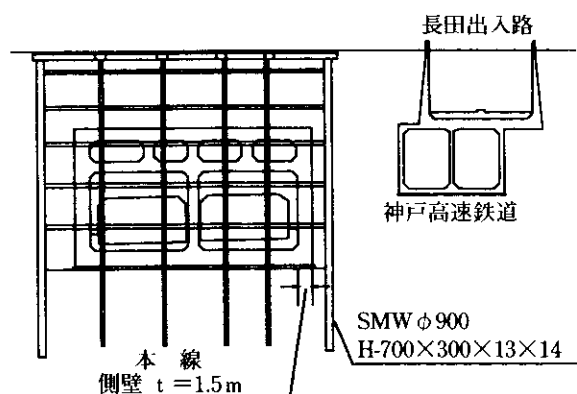


図-13 神戸高速鉄道近接部仮設計画図

ことができないため、地中連続壁（壁式）を採用することとした（図-14参照）。

なお、この区間については、地中連続壁を本体側壁と一体利用することにより工費削減を図っている。

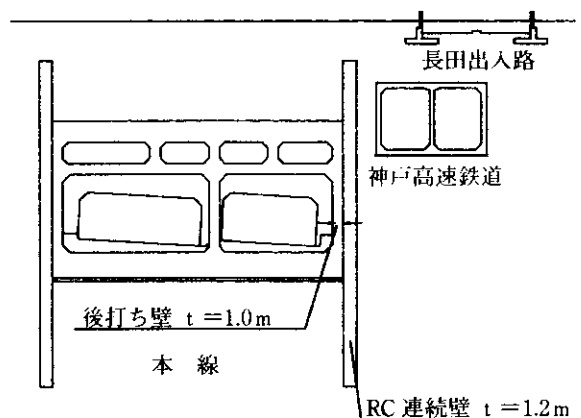


図-14 地中連続壁本体利用部断面図

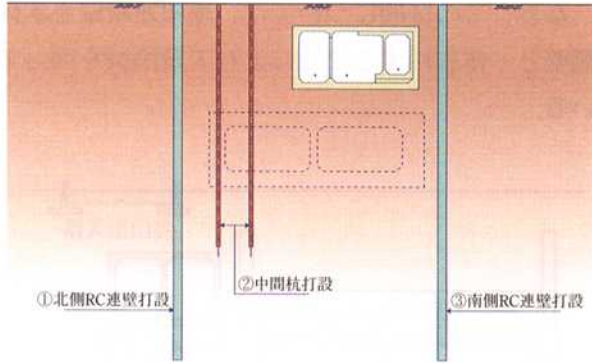
7. 神戸高速鉄道交差部

神戸高速鉄道と交差する区間では、高速道路函体が鉄道函体の下を通過することとなるため、鉄道営業路線を仮受け（アンダーピニング工法）しながら開削トンネルを構築することとした。

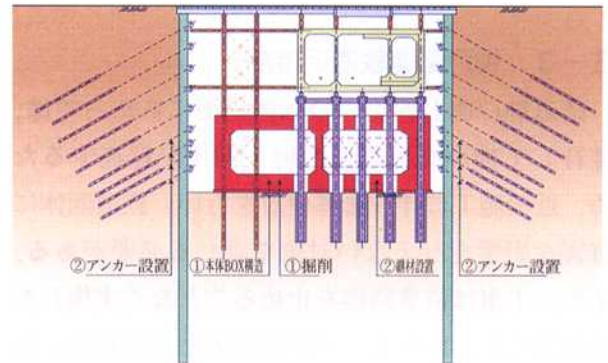
鉄道仮受け工における仮設構造物の基本的な考え方としては、鉄道函体を長期間にわたり直接支持することになるため、安全性をより高める観点から本設構造物扱いとして許容応力度の割増しは行わないものとした。なお、地震時については、本体構造物と同様に割増し係数を1.5としている。鉄道函体の仮受け支持杭は、H鋼杭と鋼管杭を比較し、支持材料としての耐力、経済性の観点から鋼管杭を採用した。また、支持杭の基礎工はメッセル導坑内の狭隘空間で施工を行うこととなるため、TBH工法、深礎工法を比較して、経済性より深礎杭を採用した。

施工順序は図-15に示すとおりである。

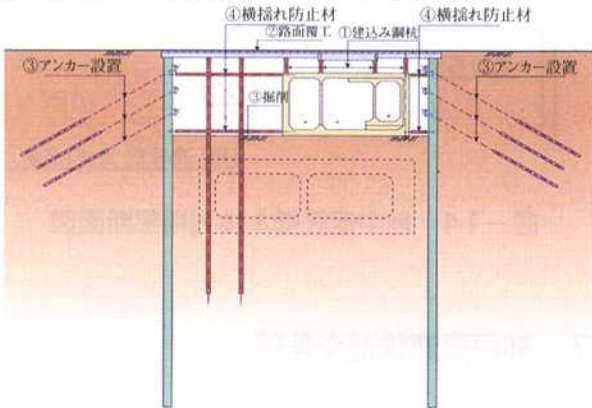
①地中連続壁（壁式）の施工・中間杭の打設



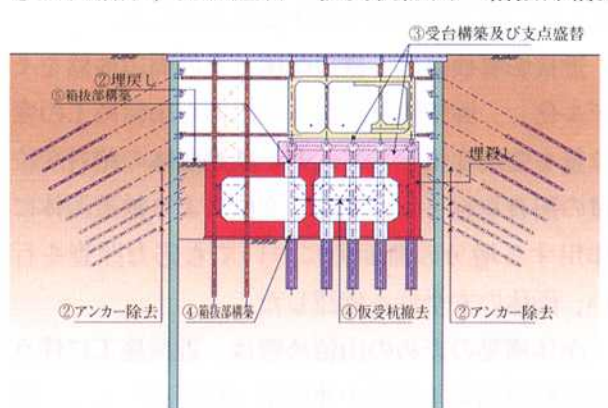
⑤掘削・グラウンドアンカー設置・本体構築



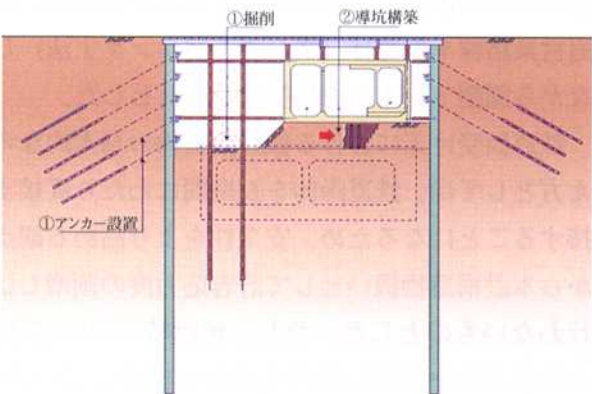
②路面覆工・掘削，グラウンドアンカー設置



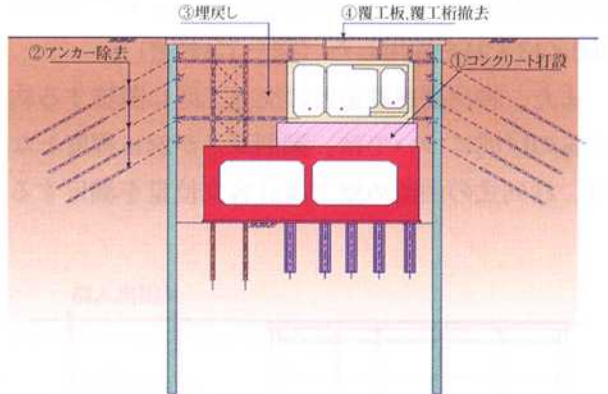
⑥受台構築，支点盛替・仮受杭撤去・箱拔部構築



③仮受支持杭施工用導坑施工



⑦アンカー除去・埋戻し・覆工撤去・完成



④支持杭打設・仮受杭設置

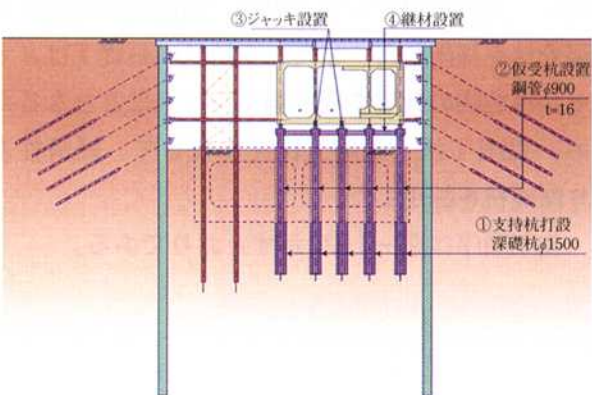


図-15 施工手順

おわりに

都市内開削トンネルの設計・施工にあたっては、前述のとおり交差構造物、近接構造物が多数存在し、また、街路部の施工にあたっては交通切

り替え、地下埋設物の移設・防護等が不可欠となり、その対策・処理にかなりの時間と労力、費用を要する。このことより、設計段階より施工条件を十分考慮した安全で適切な施工方法を慎重に検討し、現場施工に反映することが必要である。

Outline report on execution design of cut and cover tunnel works on Yamate Road in Nanshin.

Yoshihito Mori, Kazunori Sasaki, Yasuhiro Imada, Takayuki Yoshida

Along the city road Yamate Road (in Nanshin) a cut and cover tunnel has been dug through an urban area. This route is very constricted, being in longitudinal alignment with numerous other traffic features (including ground level streets, JR and other private railway tracks, an expressway, and underground utilities, and running parallel with the Shinminatogawa (river)). The local geology has complex strata from the Cenozoic Era consisting of alternating strata of diluvium, sandy soil, gravel, and clay. The groundwater level is high and there is a confined aquifer. Here we report on how cut and cover tunnel works were directly designed and executed in these complex conditions.

Keywords: cut and cover tunnel, temporary works, policy towards adjacent works, design and execution.