

住宅地域における放水路トンネルの設計・施工

— 設計・施工一括発注方式への対応 —

Design and construction of the floodway tunnel under residential area
(Practical work for Design-Build System)

目 黒 悟^{*1} 内 田 敏 宏^{*2} 中 辻 尚^{*3} 森 田 富 隆^{*4}
Satoru Meguro Toshihiro Uchida Hisashi Nakatsuji Tomitaka Morita
佐々木 郁 夫^{*5} 小 原 勝 巳^{*6} 平 田 嘉 之^{*7}
Ikuko Sasaki Katsumi Obara Yoshiyuki Hirata

【要旨】

設計・施工一括発注方式により発注された大沼川分水路工事は、トンネル掘削区間が全線に亘って低土被りで住宅地域および国道等の直下を通過する厳しい施工条件であり、分流部についても家屋および道路等に囲まれた狭小な用地内での計画という設計施工上、難易度の高い工事であった。本分水路工事に対し、受注側が分担する技術的課題に対するリスクの多くを技術提案により低減し、それらを実施設計に反映することにより、安全かつ低コストでの施工を可能とし、無事に工事を竣工させた。

【キーワード】 NATM, 水路トンネル, 設計・施工一括発注方式, 軟岩, 低土被り, 近接施工,

1. はじめに

日立市を流れる大沼川は、河川幅 2~5m, 勾配 1/100 程度の二級河川である。大沼川改修工事は、この下流域の洪水時の流下能力を確保する目的で計画された分水路トンネルの分流部から合流部までの施設を建設するものであり、延長約 640m のトンネルの上部には土被り 5~6m で住宅、ライフライン、国道等が全線に亘って近接する難易度の高い工事である。

本工事は、地方自治体発注のトンネルとしては前例のほとんどない「設計・施工一括発注方式」が適用され、水路トンネルの実実施設計から施工までの一連のプロセスを当社が工事請負者として実施した。

分水路の基本性能および設計仕様を表-1に示す。

表-1 分水路の主な基本性能および設計仕様

項目	性能・仕様
河川分流比	現河川：16.0m ³ /s 分水路：31.0m ³ /s
トンネル設計流量	41m ³ /s (31.0m ³ /s ×1.3)
トンネル内空隙率	15%以上
計画縦断勾配	1/130 程度 (自然流下)
設計流速	7m/s 以下かつ限界流速以下

2. 工事概要

2.1 地形・地質条件

分水路計画地は、水木段丘（海岸段丘）を大沼川により開析された標高 15m 程度の比較的平坦な谷部に位置

する。トンネルは段丘堆積物の礫質土、浅谷堆積物の粘性土、造成時の盛土が 2~3m で覆う新第三紀鮮新世多賀層群の泥岩および砂岩中を全線に亘り 5~6m の薄土被りで掘削する。トンネル掘削の大半は一軸圧縮強度が 2~3N/mm² の亀裂の少ない安定した泥岩を対象とする。泥岩上面から施工基面までほぼ均質であり目立った風化は見られないが、全体に砂分を多く含み、湿潤密度が 14kN/m³ 程度と小さい特徴がある。砂岩は指圧で崩れる程度に固結度が低く、層厚 4m と 1m 以下のものが 1層ずつ緩やかに上流側に向かって傾斜して分布している。

地下水位は基盤面上に分布する（図-1）。

2.2 施工条件

施工箇所周辺は主に第1種低層住居専用地域に区分される住宅地域であり、分水路トンネルの大半は住宅が面する幅 5~6m の市道直下を通過する（一部は宅地直下）。市道には、ガス管、上下水道管等のライフライン、マンホール、防火水槽等がトンネル上部に密に分布している。また、砂岩層が分布する区間（約 100m）は河川との近接施工となる。さらに、トンネルの合流部付近では、国道 245 号および店舗進入路と広告塔直下を横断するほか、汚水管の本管（φ1500）が僅か 10cm 程度で下方に近接し、これと接続する移設前の汚水管（φ300）が断面内に残置されている。

- 1.九州土木事業部 三軒屋トンネル作業所 2.大阪土木事業部 下津トンネル作業所
3.大阪土木事業部 緑資源黒潮トンネル作業所 4.関東土木事業部 唐沢山トンネル作業所
5.土木事業本部 土木事業部 6.東日本土木支社 企画 G 7.中四国土木事業部 岩国北護岸作業所

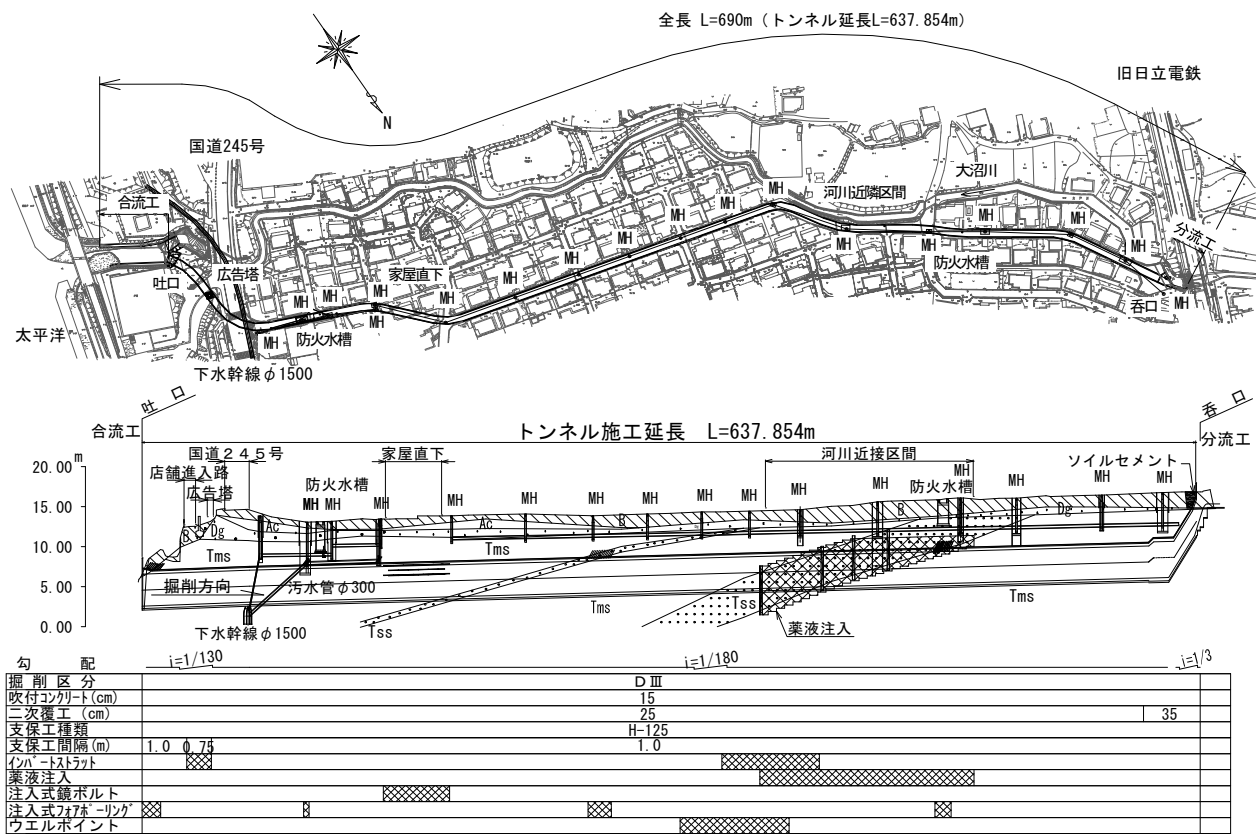


図-1 トンネル平面・縦断面

3. 設計・施工一括発注方式の概要

3.1 落札者の決定方法

設計・施工一括発注方式による入札時の手順は以下の通りである。

- ・入札時に概略設計が開示され、9項目の課題に対する設計・施工両面での具体的な対処方法（施工方法、構造形式、経済性等）の提案が求められた。
- ・学識経験者から構成される技術審査会により技術提案内容が審査され、入札参加の可否の判定が行われた。
- ・入札参加者のうち最低価格提示者が落札者とされた（技術提案価格競争方式）。

3.2 リスク分担について

契約時のリスク分担表には、発注者と受注者のリスク分担が概ね下記のように明記されている。

a) 発注者の主なリスク分担

- ・地震等の自然災害による不可抗力
- ・想定外の地中埋設物
- ・設計基準、法令類の改正に伴う設計変更

b) 受注者の主なリスク分担

- ・設計・施工内容、地盤等の自然条件
- ・施工において生じる環境問題等
- ・施工管理を含む現場のマネジメント対応

c) 主な協議による事項

- ・施工に関わらない近隣住民、関係機関との調整
- ・施工に影響を及ぼす社会条件の変化

4. 実施設計の作成と初期掘削の反映

落札後、実施設計は以下に示す手順により作成した。

- ・技術提案に基づき設計・施工に関する基本的な考え方をまとめた設計方針書を作成し、技術審査会での承認を得た後、実施設計に着手した。
 - ・分合流部を除く水理設計、トンネル設計および施工計画については契約から3ヶ月後に技術審査が行われ、仮設備および坑口より約50mまでのトンネル工事に着手した。
 - ・上記の約50m区間のトンネルの施工状況およびボーリング、埋設管類等の追加調査に基づき、未施工区間の設計を修正し、契約より6ヶ月後に技術審査会において現場状況を踏まえた実施設計の審査が行われた。
 - ・実施設計期間（6ヶ月）終了後の施工段階では、技術審査会による現場視察により、設計の妥当性確認と受注側より提出した改善提案について審査が行われた。
 - ・分流工の設計については、構造選定、水理設計を受注者で実施してJV案を提示後、要求性能を満足することを確認する目的で、発注者より水理模型実験が外部機関（財）土木研究センター）に委託された。この実験結果に基づく幾つかの修正点について、再度、構造設計の修正を行った。
- 設計期間と施工期間のラップは通常行われませんが、これを3ヶ月確保したことにより、以下のメリットが得られた。
- ・設計期間が実質的に短縮できた。

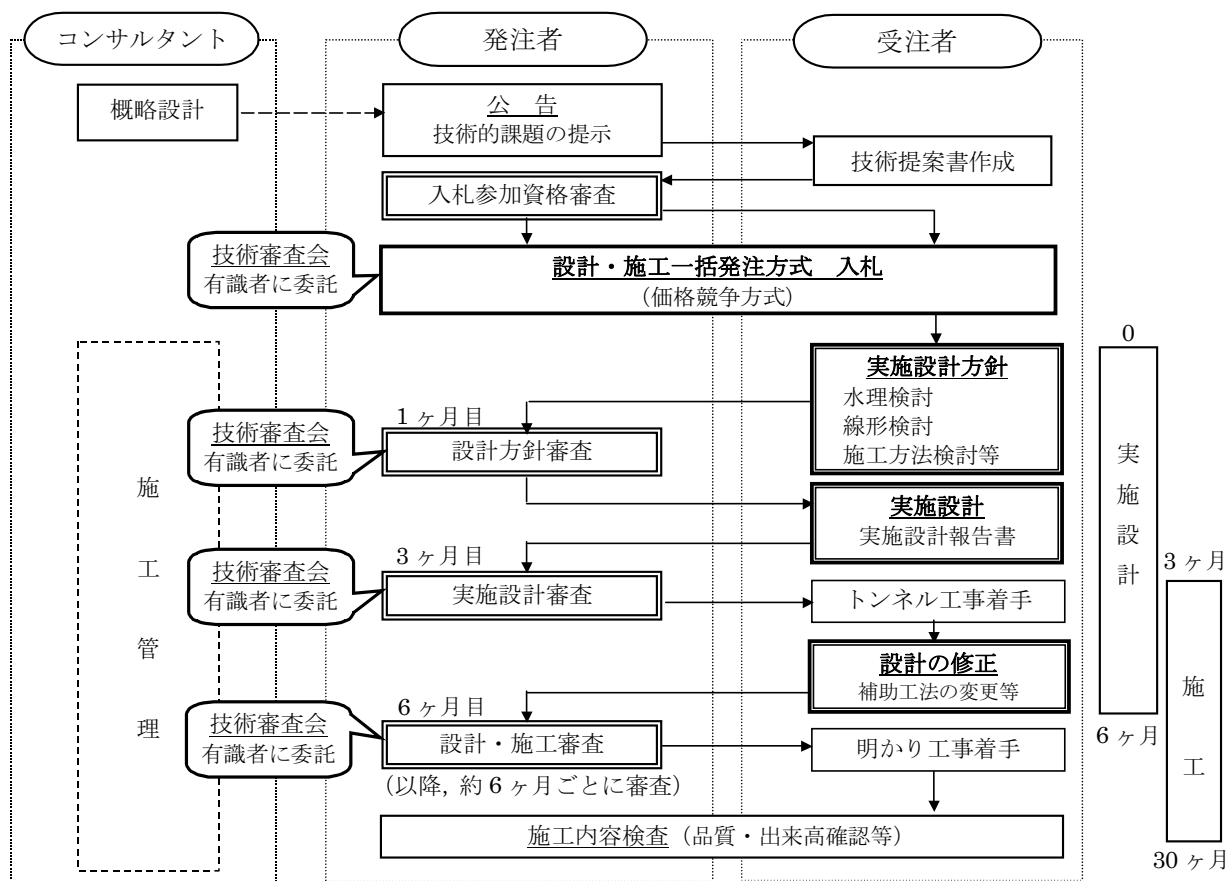


図-2 設計・施工一括発注方式 実施フロー図

- ・目視による切羽安定性の評価と計測結果によるトンネル掘削に伴う周辺への影響評価に基づき、施工の安全性を設計に反映できた。
- ・過大な対策工によるコストの増加を抑止できた。

5. 実施設計によるリスクの軽減

リスク分担の多くは受注側に付加されており、実施設計段階から工事におけるリスクを予測し、リスクの軽減を図る必要がある。特に、施工条件の厳しいトンネル工事については、問題発生の可能性、発生時の被害の規模を主に経験的に予測し、対策方法の選定、対策規模、対策実施区間等を設定した。

5.1 住宅地域での崩落・沈下対策（泥岩区間）

(1) 施工条件

トンネルルート約9割は住宅地域の幅5～6mの市道直下を土被り5～6mで掘削する。沿道の両側に木造2階建ての家屋が連続しているほか、一部に市道直下を外れて木造家屋（2戸）の直下を掘削する区間もある（写真-1）。

市道には下水道のマンホール、防火水槽（40m³）等が埋設されており、一部はトンネル掘削断面に干渉する。

本区間でのトンネル掘削においては、安定した泥岩の被りが不足し上部の砂礫層が流出する、あるいはマンホ

ールの埋戻し土（飽和砂質土）が湧水と共に流出するなどにより、切羽の崩壊、道路の陥没、近接家屋やライフラインの損傷といった問題が予想される。

(2) 対策の選定

対象区間がほぼトンネル全線にわたっており、最も顕在化しやすいリスクのため、以下のリスク軽減を行った。

- ・問題発生時の緊急性を考慮し、対策工選定の自由度が高く切羽の状況変化に対応しやすいタイヤ工法とした。また、掘削断面形状は車両の離合等を考慮し、2R馬蹄形より幌形に変更した（図-3）。
- ・既存ボーリング調査に加えて追加ボーリング、サウンディング、宅地造成前の地形図等により基盤面の高さを調査し、基盤面コンター図を作成した。これにより、泥岩の被り、地下水の集まりやすい箇所等を把握した。

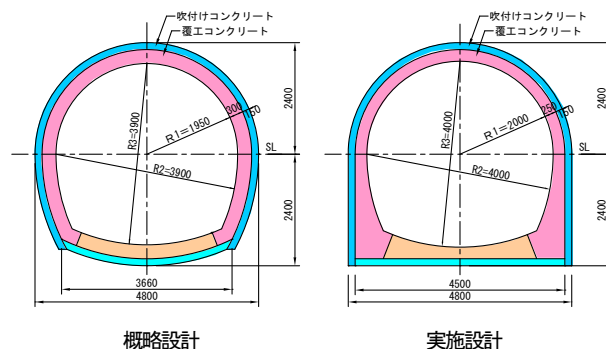


図-3 トンネル断面の変更

- トンネルの縦断勾配を 1/130 から 1/180 に変更し、泥岩の被りを大きくすると共に、トンネル上部の下水管、マンホール、防火水槽等との離隔を拡大した(図-4)。なお、勾配の変更による流量の低下に対し、内空断面を拡大して対処した(上半半径: R=1.95m を R=2.0m に変更)。
- 埋戻し土がトンネル掘削断面内に出現する2箇所のマ

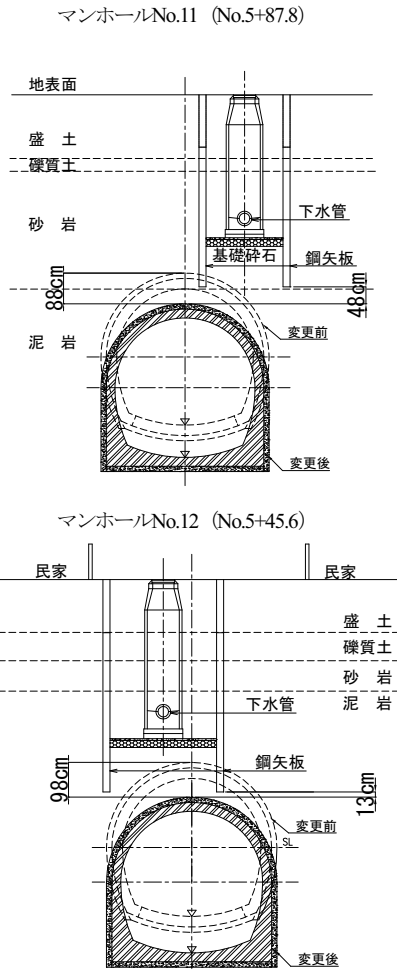


図-4 トンネル縦断の変更による離隔の確保

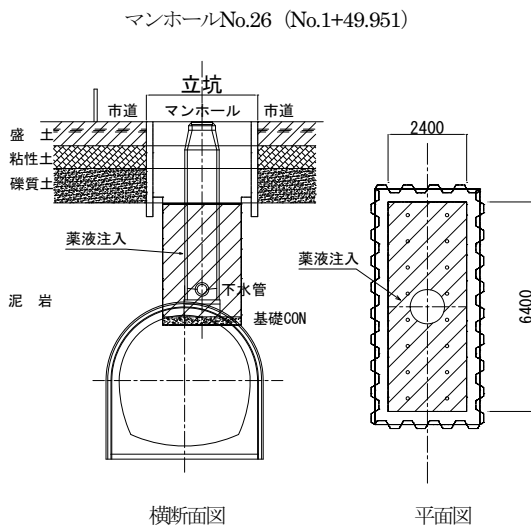


図-5 マンホール埋戻し土の改良

- ンホールについては、地表からの薬液注入により事前に改良を行った(図-5)。
- 泥岩上部の滞水砂礫層から地下水を引込むことを防ぐため、先受け工よりも鏡ボルトを主とした切羽安定対策を実施した。特に住宅直下では、AGFに代えてL=6mの注入式鏡ボルトを3mピッチで計画した(図-6)。
- 防火水槽については、水槽内の水を空にしてから掘削を行うこととした。

5.2 ライフラインの防護

(1) 施工条件

市道には、ガス管、上下水道管、NTT ケーブルが縦横に埋設されており、トンネル掘削によるガスの漏洩による事故の発生、ライフラインの供給停止に対する補償等のリスクが想定される。



写真-1 家屋直下部(土被り約5m)の地表状況

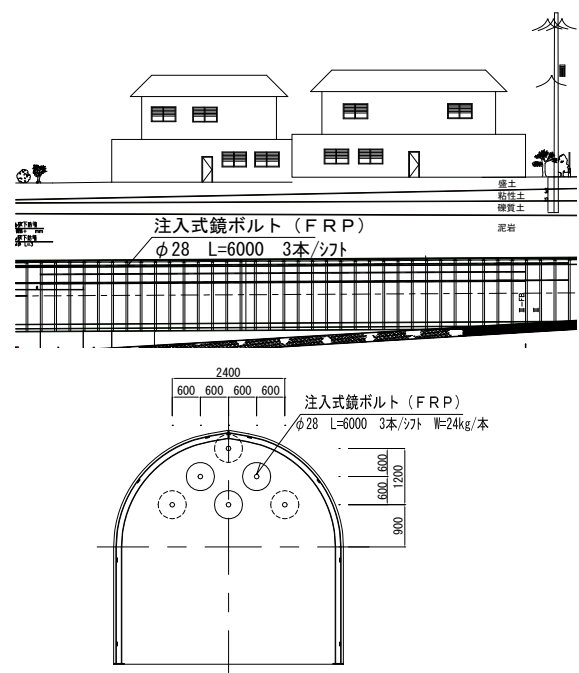


図-6 家屋直下における注入式鏡ボルト

(2) 対策の選定

実施設計開始時に関係機関と協議を行い、埋設管の位置、種類、材質に応じて許容沈下量を設定し、計測管理を行った。

トンネル掘削による沈下量の予測解析および先行掘削区間（約50m）の実績を考慮し、砂岩層区間に分布するガス管については後述する薬液注入時の影響、トンネル掘削による地盤のゆるみの発生等を考慮し、トンネル掘削に先立ちガス管の管種変更を行うなどの追加措置によりリスクを低減した。

- ・ダクタイル管および鋼管の一部を可撓性のあるポリエチレン管に交換した（沈下許容値（保安処置沈下量） $\delta = 15\text{mm} \Rightarrow 50\text{mm}$ ）。
- ・沈下棒の設置による沈下量の測定を行った（横断管は全数設置）。

5.3 河川近接部の切羽安定対策（砂岩区間）

(1) 施工条件

固結度の低い砂岩層（層厚約4m）が分布する約100mの区間において、現河川と最小約5mの近接施工となる（写真-2）。掘削時にパイピング等により河川水を引き込んだ場合、トンネルの安定性が急激に悪化し、崩壊、陥没による道路、家屋への被害の発生とともに、坑内作業員に安全上深刻な被害が生じる可能性がある。



写真-2 河川近接部の地表状況

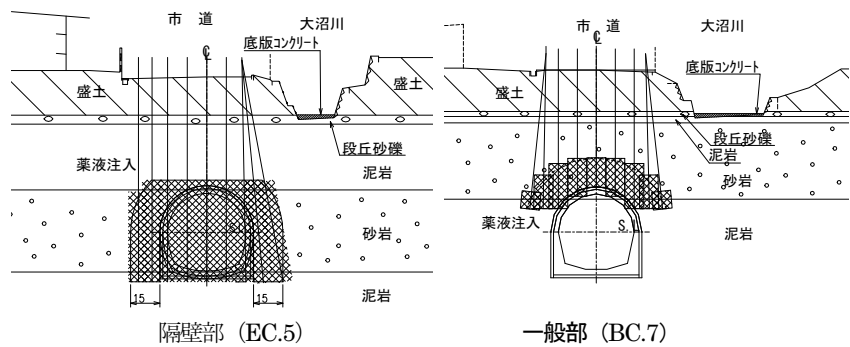


図-7 河川近接部の薬液注入



写真-3 広告塔の外観

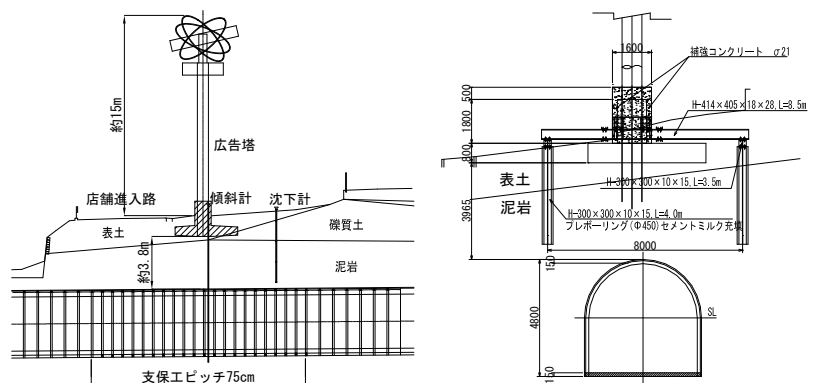


図-8 広告塔補強断面図

(2) 対策の選定

本区間の施工条件に対して以下の対策により、リスクの軽減を行った。

- ・河川水の浸入を防ぎ切羽の安定性を高めることを目的とした薬液注入を砂岩層を対象に実施した（図-7）。
- ・現況河川の底面に底版コンクリートを打設して河川水の砂岩層への浸透を防止した。

5.4 広告塔の防護

(1) 施工条件

坑口から40m付近のトンネル直上に広告塔（高さ約16m）が設置されており、トンネル掘削による支持力低下により転倒が発生した場合、通行者等の被災または店舗の営業補償等のリスクが想定される（写真-3）。

(2) 対策の選定

広告塔が国道側へ転倒した場合の被害規模は甚大であり、以下の方法によりリスクを低減した（図-8）。

- ・H 鋼+補強コンクリートにより基礎部の補強を行い、支持杭によりアンダーピンニングを行った。
- ・広告塔が掘削による影響を受ける範囲のトンネル掘削進長を1mから75cmに短縮し、インバートストラット（H-125）によりトンネル掘削後早期に支保の閉合を行う。

6. 施工時の状況と追加対策

上記 5.1～5.4 に示した実施設計における対策により、想定されたリスクが顕在化することもなく、施工を完了した。ここでは、「切羽の安定」および「近接施工」について、施工時の状況と追加対策を示す。

6.1 切羽の安定

(1) 泥岩部の施工

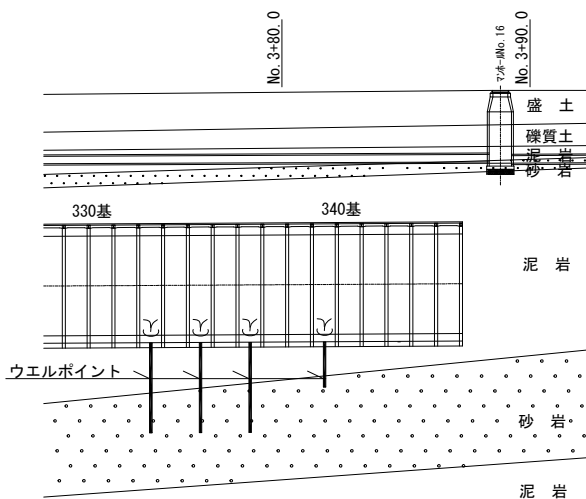
砂岩の薄層を挟む箇所では、湧水の浸透が生じた。また泥岩には僅かではあるが亀裂が存在し、鏡から小塊が剥離する現象が見られた。しかし、いずれの現象についても切羽の安定性に大きな影響は及ぼすことはなく、補助工法を追加せずに掘削が可能であった（写真－4）。

(2) 砂岩部の施工

砂岩層は、事前に地表から薬液注入を実施したことにより、切羽の安定性を確保できた（図－7）が、埋設管調査により、防火水槽、マンホールの他にも地下埋設物が密に埋設されていることが分かり、地表からの注入が困難な箇所については、坑内から補足注入を行うことで



写真－4 泥岩層の掘削状況



図－9 砂岩層へのウエルポイントの施工

対処した。

砂岩層上面がトンネル底盤から接近する区間では、被圧地下水が切羽に噴出すると予想されたため、事前にウエルポイントの設備を準備しておき施工を進めたところ、底盤から 1m 程度まで砂岩層上面が接近した段階で泥岩の亀裂から地下水の湧き出しが発生し始めた。このため、ウエルポイントによる強制排水を行い、支保工脚部の安定を確保しながら以降の掘削を行った（図－9）。

6.2 近接施工

トンネル掘削によって生じる地表面沈下は、事前解析等により数 mm 程度と予想されたが、管理上は 20mm 程度の沈下が生じることを想定し管理レベルを設定した。

実際には、泥岩部で 1～3mm、砂岩部で 2～4mm と地表面沈下量は微小で、理論式（Limanov の式）、FEM 解析の結果とほぼ同等の値に留まり、家屋等の近接構造物への影響は皆無であった。

マンホールの埋戻し土に対する地表面からの薬液注入（図－5）は十分な効果が得られなかったため、坑内からの注入を追加して施工した。これは、周面が不透水層である泥岩に囲まれており、元々存在した地下水が滞留し注入材の浸透が妨げられたためと考えられる。

7. 分流工の設計・施工

分流工及び減勢工は急流部かつ狭小な用地内に設置するため、本設計施工において技術的に最も難しい課題であった。水理計算により決定した JV 当初案に対し、別途委託された(財)土木研究センターによる複数回の水理模型実験により形状等の修正が行われ、これに基づき構造設計を実施した。

7.1 分流工および減勢工の選定

分流部に求められる主要な機能は次の通りである。

- ・洪水流量時の $47\text{m}^3/\text{s}$ に対して、河道 $16\text{m}^3/\text{s}$ 、分水路 $31\text{m}^3/\text{s}$ に分流すること。
- ・常時は河道に維持流量を確保すること。
- ・分水路トンネル内で安定した流況となるように、適切な減勢を行うこと。

(1) 分流工形式の選定

分流工形式は、正面分流、横越流堰、横断堰、クレスト等があるが、立地条件等より、分流後の流れが安定しやすいこと、落水音の発生や落水に伴う振動（低周波音を含む）の発生が少ないこと等が要求される。当初は横越流方式を選定したが、水理模型実験の結果から流速が大きいため所定の分流比を確保することが難しく、かつ分流後の分水路への流入時の乱れが大きいために、背割堤による正面分流方式に変更された。

なお、分流工より上流側では用地不足により十分な減

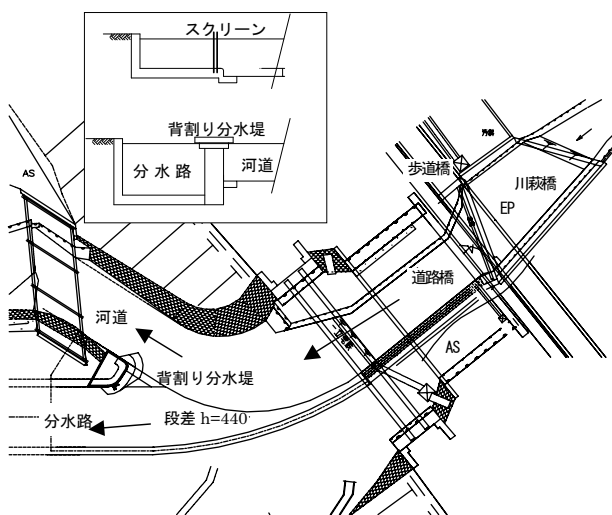


図-10 分流工 平面図



写真-5 水理模型実験(分流工) 流量 47m³/s 時

速区間を設けられないため、射流のまま分流し、分流後に減勢工を設けた。また背割り分水堤先端部には、流速が速いため河道外への越水が生じないように波返しが設置された(写真-5)。

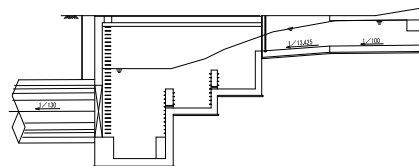
(2) 減勢工の形式の選定

分水路トンネル内に流下する河川水は、減勢工によりトンネル内での流れを安定させる必要がある。

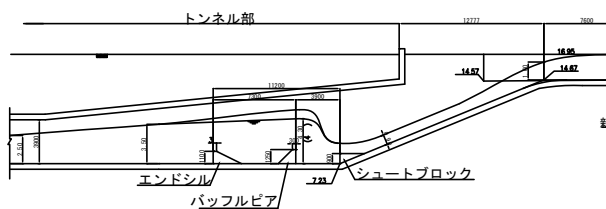
図-11に比較検討を行った減勢工の縦断面図を示す。

- ・落水式減勢工は、トンネルとの接合位置まで開削工事となるため、地表用地の制約により十分な延長を確保できない。このため、減勢効果に乏しく、かつトンネル入り口で満水となる危険性がある。
- ・斜路+副ダム式減勢工は、バップルピア(副ダム)により急激に流速を低下させることで跳水を発生させて減勢する方式である。これは、トンネル内の跳水高が大きく断面が縦長となり、イボ型減勢工と比べて低土被り区間の延長が長くなること、維持管理において斜路部の安全確保が困難であること、より不採用とした。以上から、本工事では1:3の斜路と坑内にイボ型減勢工を設置した「斜路+イボ型減勢工」を採用した。

a. 落水式減勢工



b. 斜路+副ダム式減勢工



c. 斜路+イボ型減勢工(採用)

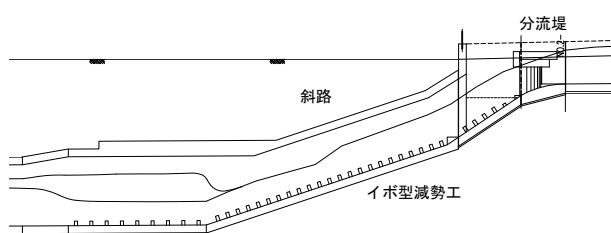


図-11 減勢工形状比較

7.2 水理実験による分流性能の確認

(財)土木研究センターで実施された水理模型実験により最終案における分水路の性能が以下のように確認された(図-12)。

- ・現河川から分水路に分流し始めるのは、全体の流量が4m³/sの時点からとなる。
- ・計画流量47m³/sに対して、所定の分流比31:16が確保されている。
- ・水路トンネルは設計流量に対して30%の余裕を見込んでいるため、実際には41m³/s程度の流量を流下する能力があり、現河道の流下能力が充分であれば、分水前流量約65m³/sまでの河川の氾濫を防止できる。

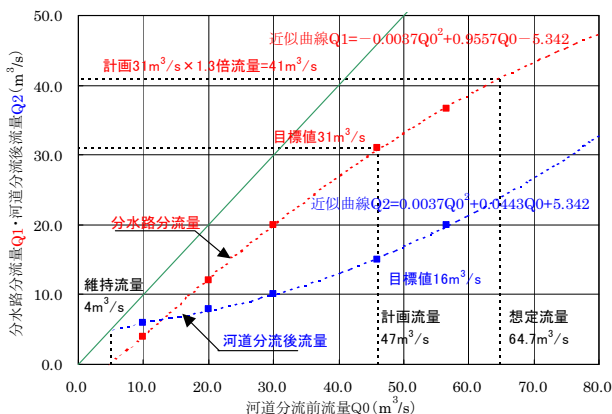


図-12 水理実験の結果による分流工の性能

8. まとめ

前例の少ない「設計・施工一括発注方式」を適用した難易度の高いトンネル工事の施工経過について報告した。本発注方式の適用によって、以下の点が有効であったと思われる。

- ・本工事では、概略設計時に十分な地盤調査と設計的な評価が行われており、契約時において地盤を含めた施工条件に対する具体的な検討を行うことにより、設計施工時のリスクの軽減とコストの縮減を行うことができた。
- ・設計期間と施工期間をラップさせたことにより施工状況を設計に反映できたため、補助工法の必要性などをより精度良く判断できた。
- ・学識経験者による技術審査会が組織され、タイムリーに審査・助言をいただいたことにより、発注側と受注側の間で未施工区間の施工に対する方針を共有できた。

謝辞；本工事の計画から施工までを遂行するにあたり、ご指導をいただいた技術審査会の先生方、分合流部のみならず水理構造物の設計について多くの助言をいただいた(財)土木研究センターの皆様、そして、工事の遂行を円滑に指揮していただいた日立市の皆様に深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 小林潔司：リスク工学と地盤工学，土と基礎，No.52，vol.4,pp.41-50, 2004.
- 2) 国土交通省：設計・施工一括発注方式導入検討委員会報告書，2001.

減勢工部



分流工正面



写真－6 分流工の完成状況

Summary The construction of the Onuma River flood control channel ordered under a design and build contract was carried out under severe design and construction conditions. A tunnel was excavated through the ground with a thin earth cover and under residential areas and a national highway. The point of diversion was in a narrow area surrounded by houses and roads. The technical problems involved in the flood control channel project that the contractor was required to solve were reduced by making technical proposals. Safe low-cost construction was made possible by reflecting the proposals in the final design, and construction was completed without any problem.

Key Words : NATM, waterway tunnel, Design-Build System, soft rock, small overburden, neighboring construction