

断層破碎帯部における既設トンネルへの近接施工

京都建設事務所 設計課 西岡 敬 治
京都建設事務所 設計課 石原 洋
計画部 調査課 安田 扶 律

要 旨

京都市道高速道路1号線（新十条通）の稲荷山トンネル（仮称）は、東側坑口より片押しで、上半先進ベンチカット方式の山岳 NATM 工法により施工しており、東側坑口から約 280 m の地点で、トンネル天端より上方約 28 m の離隔で上水用導水路トンネルと交差する。

この導水路トンネルは、昭和 40 年代前半に全断面矢板工法により施工されており、通水量が約 14,000 m³/hr の重要構造物である。しかしトンネル覆工部の老朽化により、地山との恒常的な水の出入が、既往の調査により認められている。

導水路トンネルの影響区間には複数の断層破碎帯が認められており、本トンネルの掘削の進行による、断層破碎帯を介した導水路トンネルからの引水（通水量の減少）、及び交差部影響範囲の掘削に伴うゆるみ領域拡大による、導水路トンネル構造体への影響が懸念された。

そこで、事前に本トンネル掘削に伴う導水路トンネルの通水量への影響を把握し、対策工の必要性を検討するとともに、影響範囲内における情報化施工の基礎資料とするため、3次元非定常浸透流解析により地下水挙動の予測を行った。

また、施工においては、既掘削区間の計測データに基づく導水路トンネルの変状予測解析結果、交差部への先進水平ボーリングによる地質・湧水状況、及び削孔エネルギー検層による先方地山状況等の事前情報に基づく情報化施工により、沈下等の坑内変位に細心の注意を払った近接施工を実施した。

キーワード：山岳 NATM、断層破碎帯、3次元非定常浸透流解析、情報化施工、近接施工

まえがき

京都市道高速道路1号線（新十条通）の稲荷山トンネル（仮称）は、東山連峰稲荷山（標高 233 m）を東西に貫く、延長約 1.5 km、往復 4 車線の双設トンネルで、東側坑口より片押しで、山岳 NATM 工法により施工している。

本トンネルは、東側坑口から 260～300 m の地点で、天端より上方約 28 m の離隔で上水用導水路トンネルと近接交差する。この導水路トンネルは、昭和 40 年代前半に全断面矢板工法により施工されており、現在では京都市の約 30% の上水を賄

う、極めて重要なライフラインであるといえる。しかし、トンネル覆工部の老朽化により、地山との恒常的な水の出入が過去の調査で確認されている。

導水路トンネル影響区間には、複数の断層破碎帯が確認されており、本トンネル掘削に伴う、断層破碎帯を介した導水路トンネルからの引水（通水量の減少）及びゆるみ領域拡大による導水路トンネル構造体の変状が懸念された。

このような状況下において、導水路トンネルに有意な影響を与えることなく、双設トンネルを安全に構築するために、事前に 3次元非定常浸透流

解析を行い、本トンネル掘削に伴う地下水の挙動を把握し、導水路トンネル通水量への影響、対策工の必要性について検討した。

また、施工においては、既掘削データに基づく導水路トンネル変状予測解析結果、交差部への先進水平ボーリングによる地質・湧水状況、及び削孔エネルギー検層による先方地山状況等の情報を次施工にフィードバックさせる情報化施工により、掘削に伴う地山のゆるみを拡大させないことを念頭におき、近接施工を実施した。

本稿では、3次元非定常浸透流解析による影響予測解析結果、及び実掘削データによる検証解析結果、さらに導水路トンネル影響範囲における情報化施工による施工実績を中心に報告する。



図-1 位置図



図-2 交差状況

1. 工事概要

1-1 稲荷山トンネル概要

工 法：山岳 NATM (上半先進ショートベンチカット)
 機械掘削 (東坑口より約 600 m)
 排水型 (覆工部のみ防水シートを設置)
 延 長：約 1,465 m
 縦断勾配：約 1.7%

掘削断面：約 80 m²

1-2 導水路トンネル概要

竣工年月：昭和 40 年代前半
 工 法：全断面矢板工法 (発破方式)
 内空幅約 3 m × 3 m 馬蹄形
 延 長：約 5 km (日ノ岡取水場～新山科浄水場間 図-1 参照)
 通水量：約 9,000~14,000 m³/hr (H 8 調査)

1-3 交差状況

稲荷山トンネルと導水路トンネルの交差状況を図-2に示す(平面図は図-9参照)。

導水路トンネルの影響範囲として、京都市水道局との協議により、45°の影響区間；ゾーンIと、掘削の影響が導水路トンネルに及ぶ可能性の高い60°区間(切羽面から主動崩壊角 $45^\circ + \phi/2$ で立ち上げた地山ゆるみ推定線が導水路トンネルにかかる範囲)；ゾーンIIを設定した。

2. 地質概要

地質想定縦断面図を図-3に示す。

導水路トンネル交差部周辺区間の地層区分は丹波層群の山岳部であり、大部分は頁岩、混在岩、砂岩の互層となっている。またこの互層を北東から南西に縦断する形態で、複数の断層破碎帯が分布する。地層の方向は、北西～東南方向、傾斜は全体的にはやや南傾斜である。

本トンネルは、山裾から山間部にかけて、上記の砂泥互層及び断層破碎帯の掘削を実施したこととなる。

No.2ボーリング孔におけるルジオン試験結果によれば、交差部における透水性は、亀裂の少ない岩盤部での透水係数は、 $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{cm/sec}$ であり、交差部近傍の断層破碎帯での透水係数は、 $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{cm/sec}$ であり高透水性を示した。またボー

リングコアからは、破碎部が2～5mごとに認められ、全体として破碎を受けていることが予測された。地下水位は、導水路トンネル内の水面高に近いGL-60m程度の位置に認められた。

3. 3次元非定常浸透流解析による導水路トンネルの影響予測

3-1 解析手順

図-4に解析手順を示す。3次元非定常浸透流解析を行う前に、導水路トンネルへの影響量(トンネル掘削に伴う導水路トンネルからの引水量)の目安を得るため、断面2次元解析、及び3次元定常解析を予備解析として実施した。

以下に、3次元非定常浸透流解析による導水路トンネルへの事前影響予測結果について報告する。さらに、地山の水利特性を吟味し、今後、導水路トンネル下に続き掘削を進めることとなる三の橋川流域(図-1参照)下における影響予測解析(沢水減水量の予測)に反映させるとともに、導水路トンネルの長期的な影響を評価するため、掘削実績を基に3次元モデルを修正し、検証解析を実施したので、この結果についても述べる。

3-2 影響予測解析

(1) 3次元解析モデルの構築

3次元地質モデルの構築にあたっては、透水性の高い断層破碎帯を介した導水路トンネルからの引水が支配的であると考えられ、地山の岩盤状況

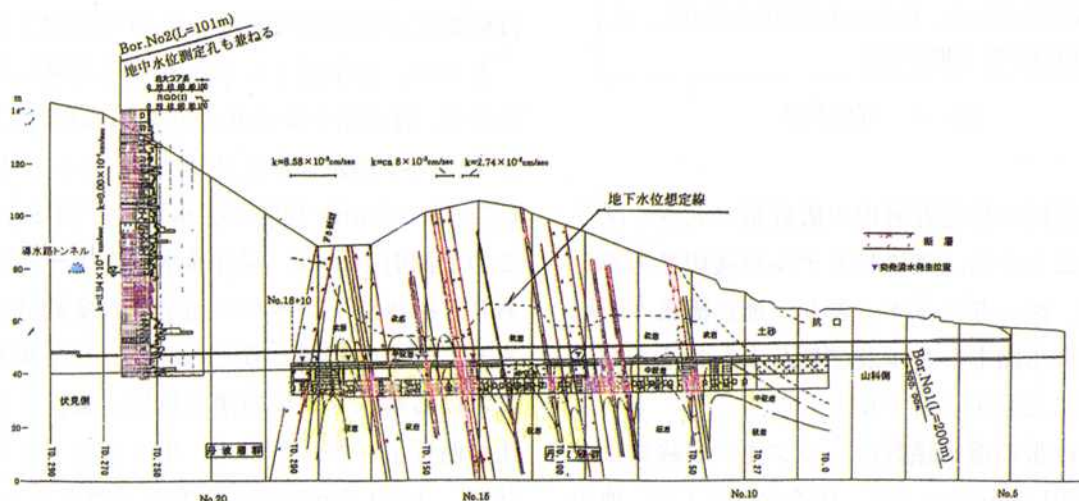


図-3 地質想定縦断面図

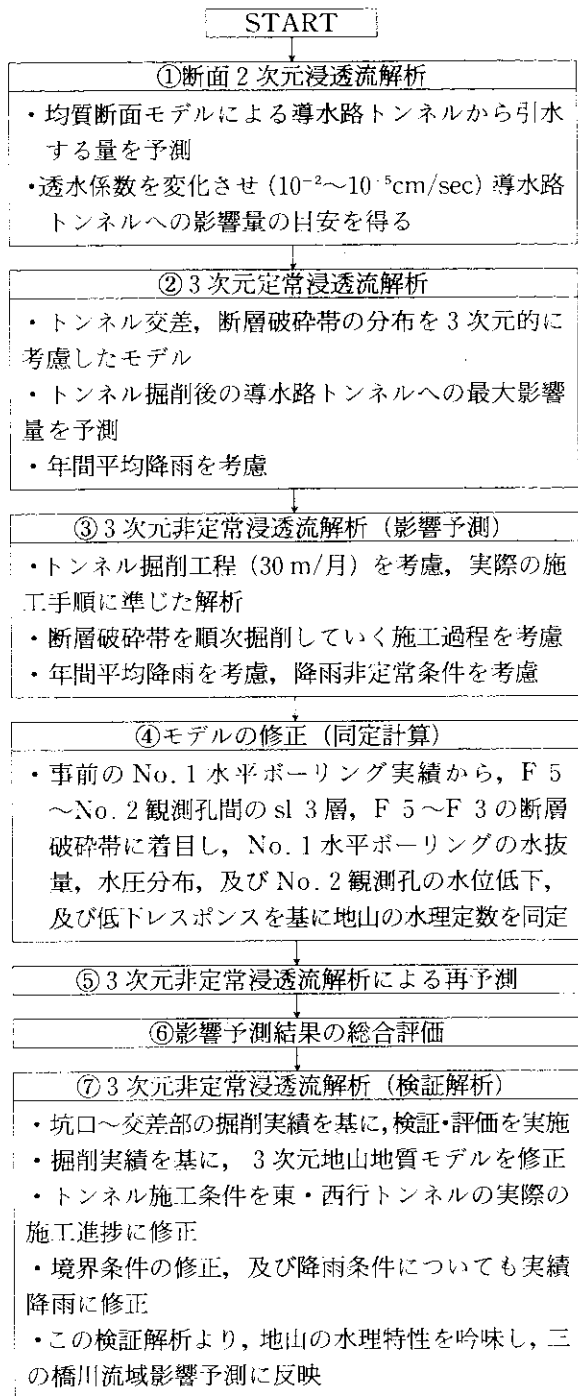


図-4 解析手順

が水理地質的に砂泥互層内の破碎帯に大きく関与していることから, 破碎帯モデルが適切であると判断した。図-5に示すとおり, 地質構成, 断層破碎帯, 導水路トンネル及び稲荷山トンネルが, 3次元的に交差するモデルとした。

断層破碎帯の透水係数は, ルジオン試験結果で得られた 10^{-2}cm/sec とし, 高透水性とした。他の地質の水理定数は図-5中に示すとおりである。

表-1 影響予測解析による導水路トンネル引水量

通常施工の場合				
断層破碎帯名称	断層破碎帯を介した導水路トンネル引水量 (L/min)	本トンネル区間における坑内湧水量 (L/min)		
		東行き	西行き	合計
F 7 + F 8	135	324	632	956
F 5	221	125	336	461
F 4	1157	396	757	1153
F 3	715	634	1298	1932
合計	2228	1479	3023	4502

F 4 ~ F 3 断層破碎帯通過時の F 8 ~ F 3 区間の引水量

施工内容	導水路トンネルの最大引水量 (m^3/min)	導水路トンネルの最大瞬間湧水量 (m^3/hour)	現在の通水量 (m^3/hour)	影響割合 (%)
通常施工	2.228	133.7	9,000	1.49
			14,000	0.96

* 影響割合: 導水路トンネルの引水量/現在の通水量
 現在の通水量: $9,000 \sim 14,000 \text{m}^3/\text{hour}$
 $= 150.0 \sim 233.3 \text{m}^3/\text{min} (2.50 \sim 3.89 \text{m}^3/\text{sec})$

なお, 初期の地下水面は, 沢水流量やボーリング孔における孔内水位を参考にして求めた。

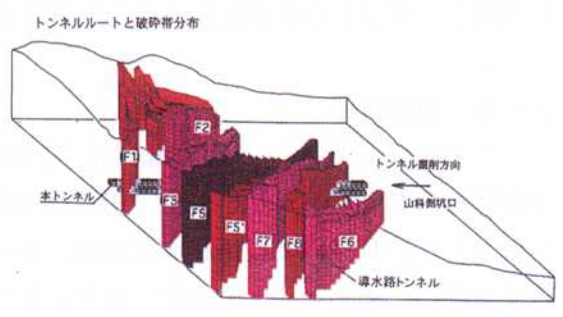
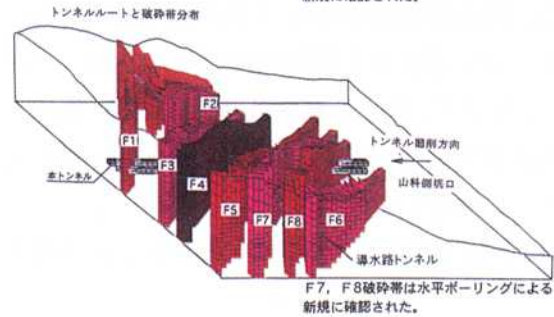
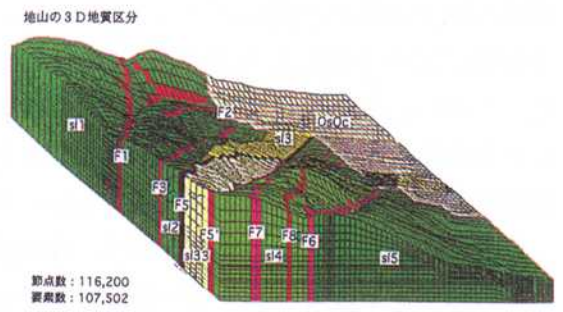
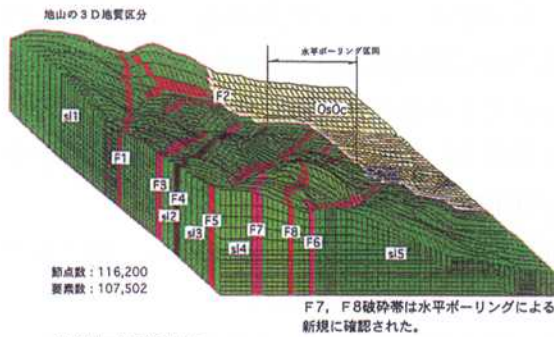
(2) 影響予測結果のまとめ

交差部通過時の導水路トンネルからの引水量の予測を表-1に, トンネル湧水量及び No. 2 観測孔水位の予測を図-6に示す。

解析結果によると, 導水路トンネルの交差部では, 地下水位が稲荷山トンネル付近まで低下し, 導水路トンネル直下では, 不飽和状態となる。導水路トンネルのモデルは完全な素掘条件にも係わらず, 不飽和域の透水性が低下するために, 引水量自体は極端に多量にはならないものと推測された。

さらに, 導水路トンネル直下を通過した時点における, 導水路トンネルからの引水量は, F 5 ~ F 3 の3本の破碎帯を通過したとしても, 合計 $1.7 \sim 2 \text{m}^3/\text{min}$ 程度の引水量と予測されている。この予測引水量は, 現行通水量の $1 \sim 2\%$ 程度であり, 導水路トンネルの通水量の変動量を考慮すると, 誤差の範囲と考えられた。また交差部通過における本トンネルの湧水量は, 東行トンネルに比べ西行トンネルが多く, 東・西行トンネルの合計で, $4 \sim 4.5 \text{m}^3/\text{min}$ 程度と予想された。

また, 西行トンネルの湧水増加により, No. 2 観



・水理定数

記号	地質名	透水係数 (cm/sec)			体積含水率 (%)	比貯留係数 Ss(cm-1)
		X 方向	Y 方向	Z 方向		
sl 1	砂泥互層	1×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-5}	5	0.0001
sl 2	砂泥互層	1×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-5}	5	0.0001
sl 3	砂泥互層	1×10^{-5}	1×10^{-4}	1×10^{-5}	5	0.0001
sl 4	砂泥互層	1×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-5}	5	0.0001
sl 5	砂泥互層	1×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-5}	5	0.0001
F1~F6	断層破砕帯	1×10^{-2}	1×10^{-3}	1×10^{-2}	7	0.0001

・水理定数

記号	地質名	透水係数 (cm/sec)			体積含水率 (%)	比貯留係数 Ss(cm-1)
		X 方向	Y 方向	Z 方向		
sl 1	砂泥互層	1×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-5}	5	0.0001
sl 2	砂泥互層	1×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-5}	5	0.0001
sl 3	砂泥互層	1×10^{-5}	1×10^{-4}	1×10^{-5}	5	0.0001
sl 33	砂泥互層	1×10^{-5}	1×10^{-4}	1×10^{-5}	5	0.0001
sl 4	砂泥互層	1×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-5}	5	0.0001
sl 5	砂泥互層	1×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-5}	5	0.0001
F1~F6	断層破砕帯	1×10^{-3}	1×10^{-3}	1×10^{-2}	7	0.000001
F 5'	断層破砕帯	1×10^{-3}	1×10^{-3}	1×10^{-2}	7	0.000001
Oc~Os	砂礫層	1×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-5}	10	0.0001

- ・降雨強度 : 1.500 mm/year
- ・浸透率 : 0.1
- ・トンネル形状 : 稲荷山トンネル 10m×10m の矩形断面
導水路トンネル 3m×3m の矩形断面
- ・壁面条件 : 両トンネルとも完全漏出節点, 2次覆工CO, 吹付COともに無し

(a) 影響予測解析モデル

修正項目	モデルの修正内容
断層破砕帯	<ul style="list-style-type: none"> ・F4断層は存在しない。 ・F6, F7, F5断層は、断層幅を小さくする。 ・F5断層の走向を実績に合わせる。 ・F5断層手前に、F5'断層を加える。 この断層で西行トンネルは、集中湧水が発生し、No. 2孔の地下水位が急激に低下した。
破砕帯間の砂泥互層	<ul style="list-style-type: none"> ・砂泥互層は、一様に評価できない。 ・F5'~F5断層間の砂泥互層の帯水層区分。 ・F5~F3断層間の砂泥互層の帯水層区分。
境界条件	<ul style="list-style-type: none"> ・モデル周辺の境界条件は、影響予測解析モデルと同様に、導水路トンネル掘削後の周辺境界の初期流量を、境界流量条件とする。 ・導水路トンネルは、影響予測解析モデルと同じ、水位固定条件とする。

(b) 検証解析モデル；影響予測解析モデルを修正

図-5 3次元解析地山モデル

測孔の地下水位が、時期は若干ずれているものの、本解析により予測したとおり、20 m 程度低下した。しかし、この時点までの施工期間中に観測された導水路トンネルの通水量の水収支はほとんど変化はなく、多量の漏水も確認されなかった。

以上より、交差部施工に際しては、導水路トンネルの通水保全に対する止水対策は必要ないものと判断し、後述する情報化施工により対処することとした。

3-3 検証解析

トンネル湧水量及び No. 2 観測孔水位の影響予測解析結果と実績の対比を図-6 に示すが、これによると、① No. 2 観測孔水位低下、集中湧水の発生時期、② トンネル湧水量、③ トンネル湧水量の時間的推移に、予測と実績で差異が認められた。

そこで、坑口～交差部までの掘削実績をもとに、解析モデルを修正し、3次元非常浸透流解析の検証・評価を行った。さらに、この検証解析から地山の水理特性を吟味し、今後の三の橋川流域の影響予測解析に反映させることとした。

解析内容は、図-4 の解析手順に示すとおり、影響予測に用いた3次元モデルの修正等を行い、

表-2 検証解析による導水路トンネル引水量

通常施工の場合				
断層破砕帯名称	断層破砕帯を介した導水路トンネル引水量 (L/min)	本トンネル区間における坑内湧水量 (L/min)		
		東行き	西行き	合計
F 7 + F 8	655	199	213	412
F 5'	946	421	392	813
F 5	1020	436	1412	1848
F 3	244	570	735	1305
合計	2865	1626	2752	4378

F 4～F 3 断層破砕帯通過時の F 8～F 3 区間の引水量				
施工内容	導水路トンネルの最大引水量 (m³/min)	導水路トンネルの最大時間引水量 (m³/hour)	現在の通水量 (m³/hour)	影響割合 (%)
通常施工	2.865	171.9	9,000	1.91
			14,000	1.23

* 影響割合：導水路トンネルの引水量/現在の通水量
 現在の通水量：9,000～14,000 m³/hour
 =150.0～233.3 m³/min (2.50～3.89 m³/sec)

坑口～導水路トンネル交差部付近までの実績、具体には No. 2 観測孔地下水位及び東・西行トンネル湧水量とその推移を再現していくこととした。再現の期間としては、平成 10 年 11 月～平成 11 年 10 月の掘削期間とした。

検証解析に用いる3次元修正モデル、及びモデルの修正内容を図-5 に示す。

また、検証解析後の No. 2 観測孔水位及び東・西行トンネル湧水量と掘削実績の対比を図-6 に示す。これより、No. 2 観測孔水位及び東・西行トンネル湧水量については、掘削実績を概ね再現できたものと判断している。

なお、検証解析における導水路トンネルの引水

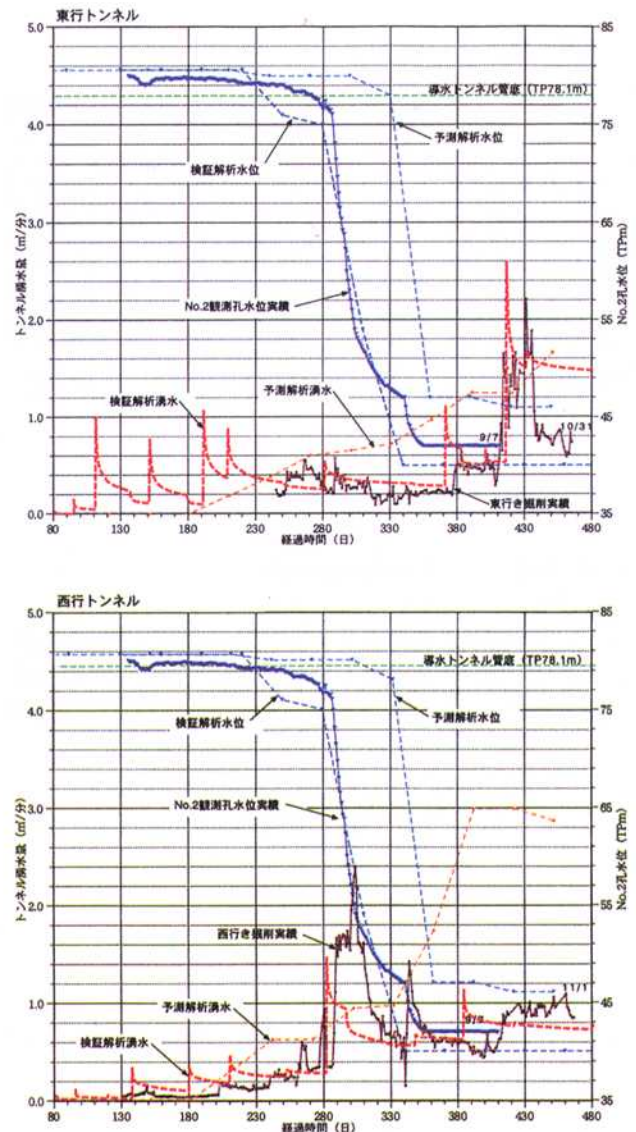


図-6 掘削実績と影響予測解析結果及び検証解析結果の対比 (No. 2 観測孔水位、トンネル湧水)

量を表-2に示す。導水路トンネルの現行通水量に対する引水量の影響割合は2%までとなっており、予測引水量と同様、誤差の範囲内と判断した。

4. 導水路トンネル交差部の施工概要

導水路トンネル交差部の影響範囲の施工に際しては、トンネル湧水に連動した導水路トンネルからの引水、及びトンネル掘削に伴う地山のゆるみ領域の拡大による導水路トンネル構造体の変状が大きな問題であった。

そこで、先進水平ボーリングのデータ、種々の観測値、計測値等の事前情報を次施工にフィードバックする情報化施工により対処する必要があると判断された。

ここでは、情報化施工に際しての導水路トンネルへの影響に対する管理値、管理体制の設定、既掘削区間の計測データによる逆解析結果に基づく事前影響予測の概要及び施工実績について述べる。

4-1 事前情報の内容・利用目的

情報化施工において事前情報となる、調査・計測項目及びその利用目的について表-3に示す。

4-2 管理値・管理体制の設定

導水路トンネル影響範囲内での施工に際しては、トンネル湧水に連動した導水路トンネルからの引水に対する管理体制及び導水路トンネル構造体の変状に対する管理値を設定した。

(1) 導水路トンネルからの引水に対する管理

前述した3次元非定常浸透流解析の結果、トンネル湧水量が、4~4.5 m³/min程度増加しても、引水量は現行通水量の1~2%程度で、通水量の変動の範囲であることから、通水保全上の対策は実施しないこととした。

ただし、情報化施工における引水管理のひとつの指標として、坑内湧水量4.5 m³/minという予測値を取り上げ、管理体制を設定した。表-4の管理体制に基づき、坑内湧水量及び導水路トンネル通水量を計測しながら掘削を実施した。

表-4 導水路トンネル引水管理体制

管理体制	状 況	対 応
準備体制	坑内湧水量が4.5 m ³ /minを超える	導水路トンネル通水量の確認
要注意体制	坑内湧水量が4.5 m ³ /minを超え、通水量も明らかな変化が生じる	導水路トンネル通水量の不確定要因確認
対策体制	上記の状況が数日間経過し、収束しない	掘削作業停止、対策検討

表-3 事前情報一覧

計測・測定項目等	情報内容	目 的
先進コアボーリング	交差部直下ボーリングコア	先山予測、施工方針決定
先進ノンコアボーリング(削孔検層)	トンネル軸方向の岩盤評価値(破壊エネルギー)	先山状況の予測
トンネル内空変位(A計測)	地山毎・支保構造毎の内空変位量、沈下量とその速度	・支保構造の安全性・適合性評価 ・逆解析による地山物性値の推定
支保部材応力・地中変位(B計測)	鋼製支保工及び吹付CONの発生応力、地山のゆるみ範囲	・支保構造の安全性・適合性評価 ・導水路直下での地山ゆるみ確認
先行変位(B計測)	先行変位率	・管理基準値の設定 ・地山変状事前予測解析に適用
地山内地下水位(No. 2, 3観測孔)	地山内地下水位の経時変化	・導水路トンネルからの引水評価 ・施工法立案
坑内湧水量(東行・西行)	トンネル掘削延長毎の湧水量	導水路トンネルからの引水有無確認
導水路トンネル通水量	導水路トンネル入口・出口での連続通水量	導水路トンネルからの引水有無確認

(2) 導水路トンネル構造体の変状に対する管理
 複数の破碎帯が分布する地山において、導水路
 トンネルへの影響を極力抑えて、安全にトンネル
 を構築するために、施工上管理値を定める必要が
 あった。さらにその管理値を基に施工に際しての
 管理体制を設定し、影響範囲内の施工を実施した。

管理値の設定手順を以下に示すが、京都市水道
 局に許容変位量の規定がないこと、導水路トン
 ネル自体を直接計測評価できないことから、計測可
 能なトンネル天端沈下量に対して、管理値を設定
 した。また、支保部材の健全性を評価するため、
 部材応力の管理値も定めた。表-5に管理値を示
 す。

①導水路トンネルは、無筋の線状構造物であるこ
 とから、相対沈下による覆工コンクリートの応
 力度増、ひびわれが問題となると考え、傾斜角
 に注目し、許容傾斜角 θ_{cr} を設定した。

$$\cdot \theta_{cr} = 0.3 \times 10^{-3} \text{rad}$$

建築基礎構造指針（日本建築学会）

「コンクリートブロック造構造の限界変形角」
 の下限値

②トンネル掘削により、導水路トンネルに許容傾
 斜角 θ_{cr} が発生する場合の最大変位量を許容
 変位量 δa と定義し、東・西行両トンネルの掘削
 を考慮した弾性円孔理論解にてトライアルで検
 討した。

$$\cdot \delta a = 18 \text{ mm}$$

③弾性円孔理論解で導水路トンネルが θ_{cr} (つま
 り δa) となる時のトンネル天端沈下量 δo (壁面
 変位) を算定した。

- ・全変位 $\delta o = 70 \text{ mm}$
- ・先行変位率 $\alpha = 50\%$ (安全側に設定)
- ・計測可能変位 $\delta = \alpha \cdot \delta o = 35 \text{ mm}$
 (天端沈下)

④天端沈下量に対する管理値を、許容値の75%と
 設定した。

- ・掘削時管理値 $\delta' = 35 \text{ mm} \times 75\% = 25 \text{ mm}$
 (掘削完了状態での計測可能変位)

- ・その時の導水路トンネルの最大傾斜角
 $\theta' = 0.22 \times 10^{-3} \text{rad}$

4-3 逆解析及び影響予測・評価解析

導水路トンネルの影響範囲内における、地山不
 良個所である TD 251、及び導水路トンネルとの
 離隔が最小かつ土被ふりが最大となる導水路ト
 ネル直下(東行)の TD 294 の2断面(図-9参照)
 が、導水路トンネルに与える影響の大きい箇所と
 考えられたので、既掘削区間の逆解析により得ら
 れた等価弾性係数、側圧係数を用いて2次元
 FEM 解析によりそれぞれ影響予測(順解析)を実
 施した。

また、掘削後の導水路トンネルへの影響を把握
 し、その健全度の評価をするため、導水路トン
 ネル直下の TD 294 断面において、同断面での、逆
 解析結果を基に2次元 FEM 解析により、影響評価
 を実施した。以下に解析の概要を示す。

(1) 逆解析による地山状況の把握

既掘削区間の上半収束値を用いて逆解析を実施
 した。逆解析の結果を表-6に示す。

表-5 管理値

①天端沈下計測値に対する管理値 (単位: mm)				備考
	掘削完了時	上半掘削時	下半掘削時増分	
管理値I	13	9	4	許容天端沈下量の50%
管理値II	19	13	6	許容天端沈下量の75%
管理値III	25	18	7	許容天端沈下量の100%

(注) 上半掘削時と下半掘削時増分の比率は断面積比7:3で按分

②支保工応力の管理値 (単位: N/mm ²)				
計測項目	管理値I	管理値II	管理値III	レベル決定根拠
吹付けコンクリート $\sigma_{ck}=18$	6.0	7.5	9.0	I: 長期許容応力度
鋼製支保工 σ_s	140	175	210	II: (I + II) / 2
(SS 400) σ_s	80	100	120	III: 短期許容応力度

③各変状ランクに対する対応方針

	天端沈下量 δ	対応策(計測断面)	前方類似地山施工への フィードバック
ランク1	$\delta < \text{管理値I}$	・定常観察	・特になし
ランク2	$\text{管理値I} \leq \delta < \text{管理値II}$	・監視強化 ・脚部下盤(クレタシ)の補強	・ウィングリブの導入 ・脚部地山の補強
ランク3	$\text{管理値II} \leq \delta < \text{管理値III}$	・上半部仮閉合 ・下半掘削工法の検討	・早期閉合基本の施 工法の導入
ランク4	$\text{管理値III} \leq \delta$	・掘削中止 ・下半早期掘削、本閉合	・支保構造、施工法 の見直し

表-6 逆解析結果一覧

逆解析断面	等価弾性係数 (N/mm ²)	側圧係数	備考
TD 55~TD 240 (18断面)	1000	1.0	TD 251 断面での影響予測解析に採用
TD 251	550	2.2	TD 294 断面での影響予測解析に採用
TD 294	750	1.2	TD 294 断面での影響評価解析に採用

(2) 影響予測解析

・TD 251 断面

(解析条件)

弾性係数 : $E=500,1000 \text{ N/mm}^2$ (地山不良状態を想定)

側圧係数 : $K=1.0, 2.0$

先行解放率 : $\alpha=35\%$ (TD 240 からの先行変位計測結果)

支保パターン : DIa-i (当初設計支保パターン)

(解析結果)

トンネル天端沈下は側圧係数によっては、管理値IIを上回る場合もあるが、導水路トンネルの沈下・傾斜角は許容値以下であり、当初設計支保構造の健全性を確認した。

トンネル天端沈下量 $\delta_{\max}=13.2 \text{ mm}$

導水路トンネル最大沈下量 $\delta_{\max}=13 \text{ mm}$

導水路トンネル最大傾斜角 $\theta_{\max}=0.21 \times 10^{-3} \text{ rad}$

(いずれも $E=500, K=1.0$ の場合)

・TD 294 断面

(解析条件)

弾性係数 : $E=550 \text{ N/mm}^2$

側圧係数 : $K=2.2$

先行解放率 : $\alpha=35\%$ (TD 240 からの先行変位計測結果)

支保パターン : DIa-i (当初設計支保パターン)

(解析結果)

トンネル天端沈下は、管理値以下となった。

導水路トンネルの沈下・傾斜角は許容値以下であり、当初設計支保構造の健全性を確認した。

トンネル天端沈下量 $\delta_{\max}=11.2 \text{ mm}$

導水路トンネル最大沈下量 $\delta_{\max}=12.5 \text{ mm}$

導水路トンネル最大傾斜角 $\theta_{\max}=0.12 \times 10^{-3} \text{ rad}$

(3) 影響評価解析

・TD 294 断面

(解析条件)

弾性係数 : $E=750 \text{ N/mm}^2$

側圧係数 : $K=1.2$

先行解放率 : $\alpha=35\%$ (TD 240 からの先行変位計測結果)

支保パターン : D_F II (実績支保パターン)

(解析結果)

トンネル天端沈下は、管理値以下となった。

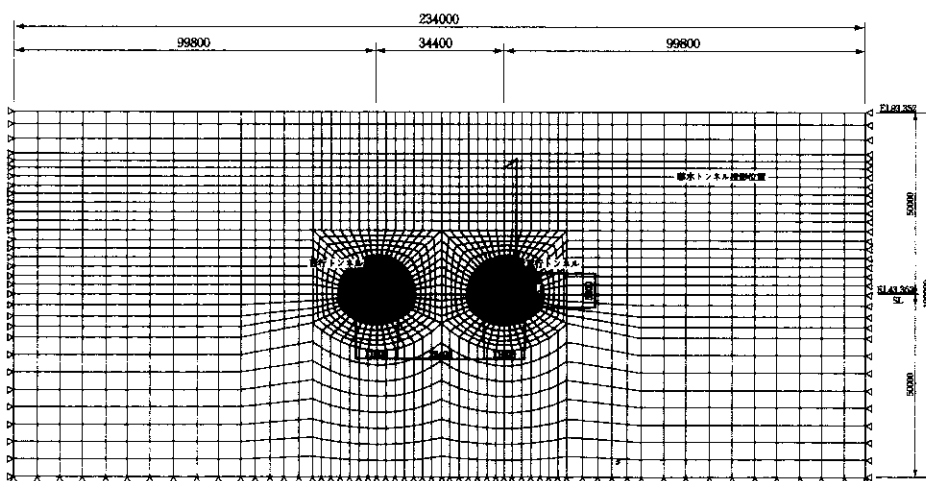
導水路トンネルの沈下・傾斜角は許容値以下であり、D_F II 支保構造の健全性を確認した。

トンネル天端沈下量 $\delta_{\max}=12.8 \text{ mm}$

導水路トンネル最終沈下量 $\delta_{\max}=11.4 \text{ mm}$

導水路トンネル最終傾斜角 $\theta_{\max}=0.16 \times 10^{-3} \text{ rad}$

なお、導水路トンネルの応力度増分については、導水路トンネルの縦断方向を線状にモデル化し、影響評価解析による導水路トンネルの変位量を強制変位としてモデルに作用させ、平面骨組み解析により計算し、その健全度について問題の無いこ



材料名	要素分類
地山	二次元平面要素
鋼製支保工	梁要素
吹付けコンクリート	トラス要素
ロックボルト	FEMでは考慮しない

解析ステップ	トンネル施工工程
STEP1	初期応力解析
STEP2	東行トンネル上半掘削
STEP3	東行トンネル上半支保構築
STEP4	西行トンネル上半掘削
STEP5	西行トンネル上半支保構築
STEP6	東行トンネル下半掘削
STEP7	東行トンネル下半支保構築
STEP8	西行トンネル下半掘削
STEP9	西行トンネル下半支保構築

図-7 解析モデル

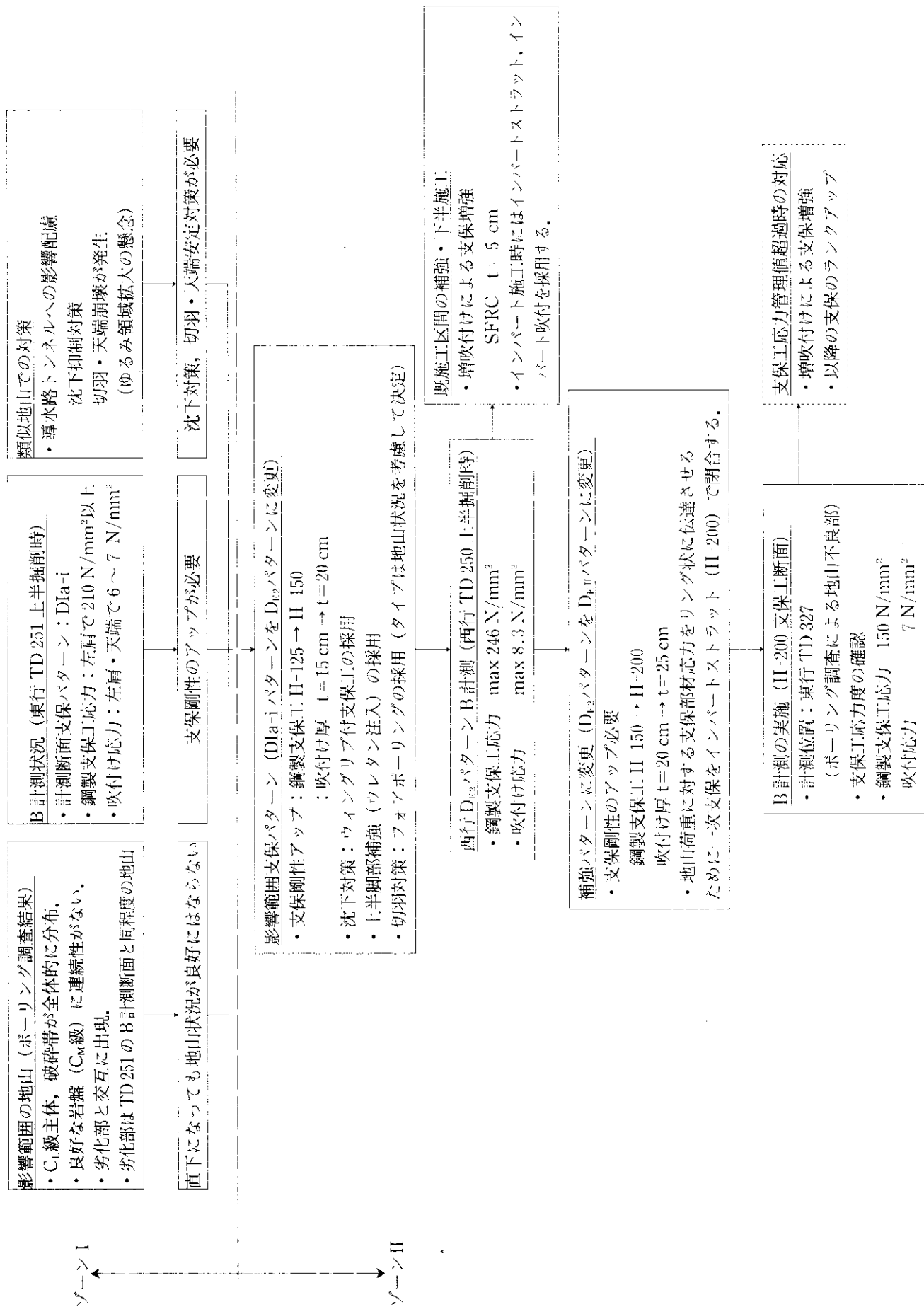
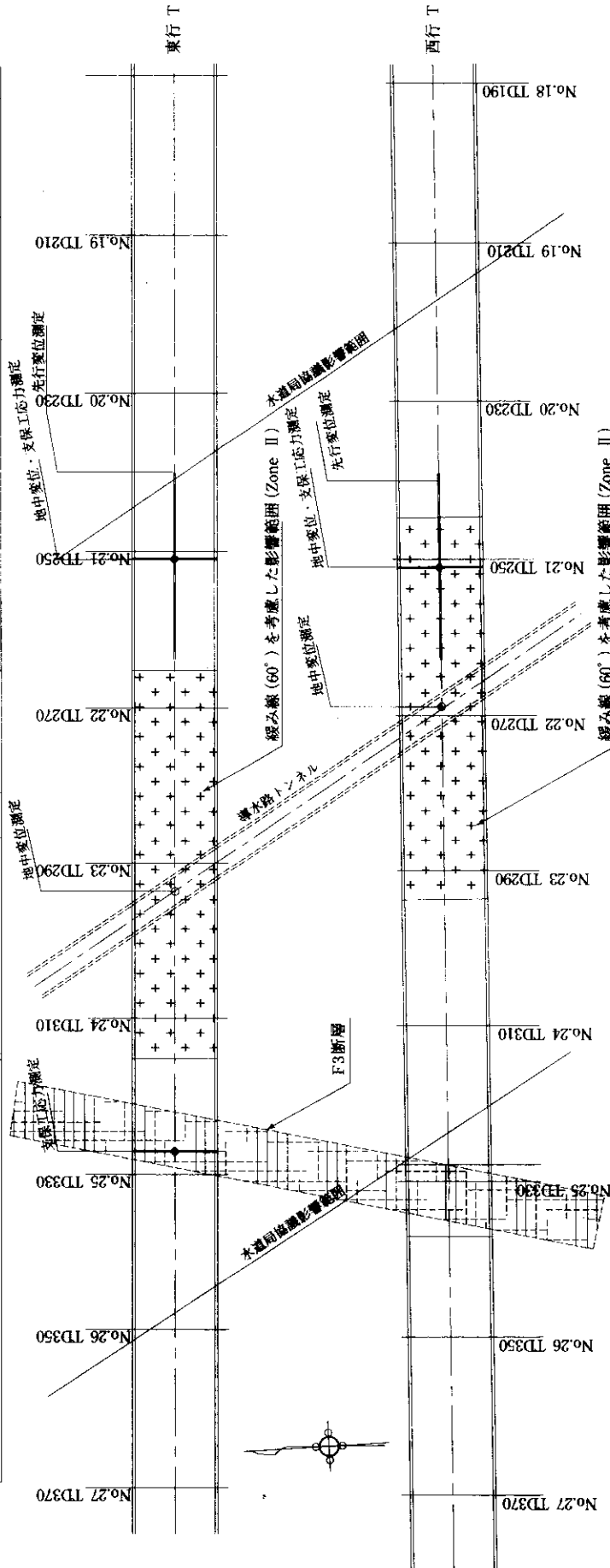


図-8 事前情報に基づく支保構造選定実績

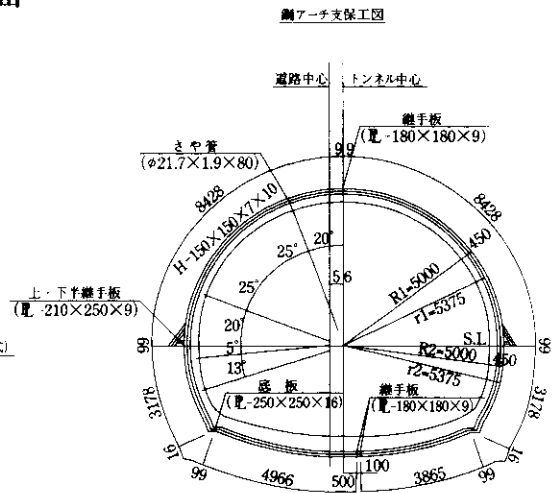
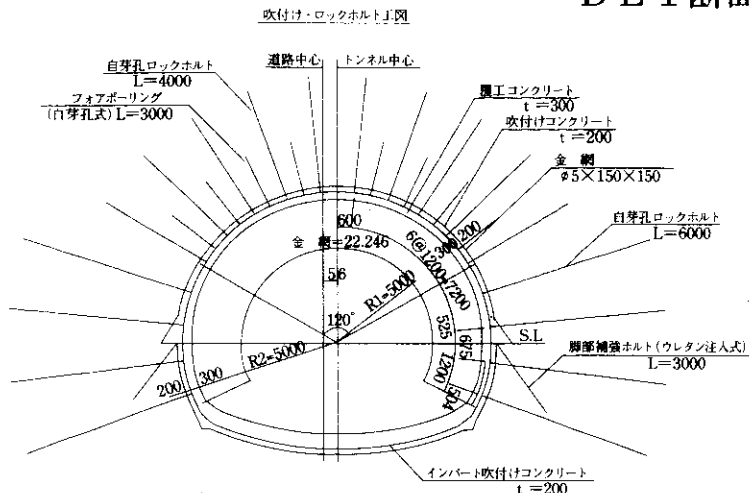
TD951.3	Zone I L=27.6m	TD151	Zone II (環状影響圏) L=49.9m	TD265.2 Zone I L=27.6m	TD237.6	環状トンネル影響範囲
D I-a-i (K)	D II TD340.0	TD312.0	D e I	増し吹付コンクリート (吹付SFRC t=50)		設計支保パターン
	D e II (トンネル内径27.6m×高さ13.7m)			D I-a-i (K)	実施支保パターン	
				TD268.0	増し吹付コンクリート (吹付SFRC t=50)	既施工区間補強対策
				TD265.0	D I-a-i (K)	二次覆工
		TD315.1	シングル鉄筋補強 (アーチ部)	TD265.2	増しボルト根足ボルト	



TD327.0	Zone I L=33.3m	TD293.7	Zone II (環状影響圏) L=49.1m	TD244.6 Zone I L=31.3m	TD213.3	環状トンネル影響範囲
D I-a-i (K)	D II	D e II	D e I	増し吹付コンクリート (吹付SFRC t=50)		設計支保パターン
	TD337.0			TD281.0	D I-a-i (K)	
		TD295.0	増し吹付コンクリート (吹付SFRC t=50)	TD245.0	D I-a-i (K)	既施工区間補強対策
			インポート吹付コンクリート+インポートストラット			二次覆工
		TD295.0	シングル鉄筋 (アーチ部)	TD244.6		

図一 9 湧水路トンネル交差点近傍支保パターン配置実績

DE I断面



DE II断面

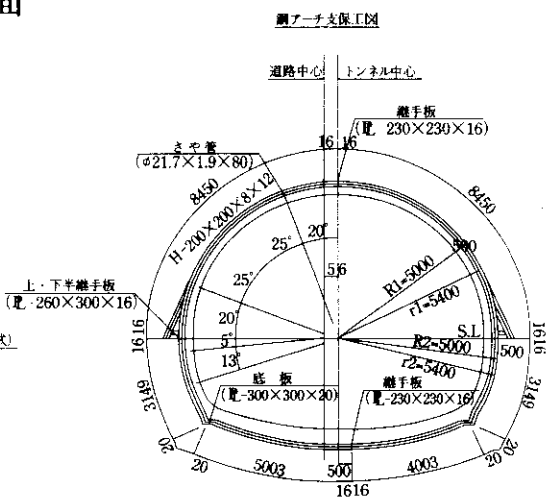
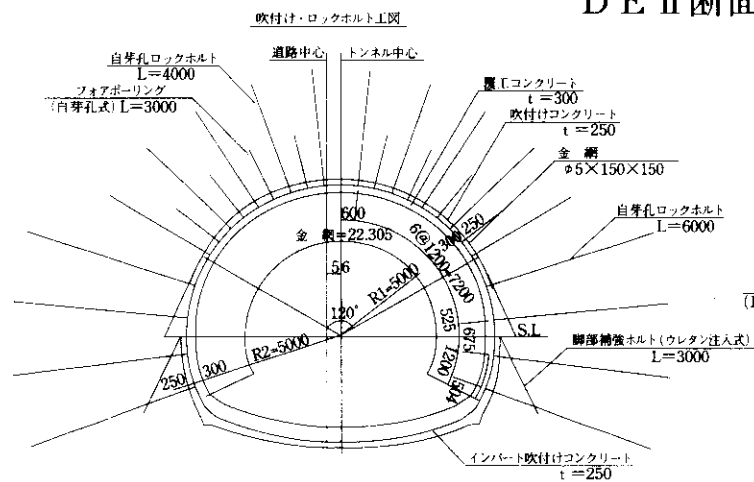


図-10 導水路トンネル交差部 支保パターン断面図

とを確認した。

4-4 施工実績

先進ボーリング調査結果、一連の計測情報・施工情報に基づく、導水路トンネル影響範囲（ゾーンⅠ及びゾーンⅡ）の支保構造選定実績の流れを図-8に示す。また、最終的に導水路トンネル交差部近傍に配置した支保パターンの実績を図-9に、D_EⅠ及びD_EⅡ支保パターン断面を図-10に示す。

4-5 情報化施工まとめ

先進ボーリング調査結果、B計測等の計測情報及び影響予測解析結果等の事前情報を次領域の施工にフィードバックさせる情報化施工により、適切な支保構造及び補助工法の選定ができ、施工上での管理値を設けた天端沈下量に関しては、影響

範囲内全ての区間にわたり管理値内に収束した。

また、支保部材の応力については管理値を上回ることもあったが、その後の施工において支保剛性向上、支保の補強を図り、安定的な施工を可能にした。

一方、導水路トンネルの通水量は、入口（日の岡取水場）と出口（新山科浄水場）において流量を連続観測しており、影響範囲掘削期間中その差分に大きな変化は認められなかった。またトンネル湧水量は、突発湧水もあったが、東行・西行トンネル合わせて概ね2 m³/minで推移しており、管理の指標としていた4.5 m³/minを超えることはなかった。

以上より、当初の目標であった掘削に伴う地山のゆるみを拡大させない施工が達成でき、導水路

トンネルからの引水についても、問題が無かったと判断した。

あしがき

上述のとおり、難関であった導水路トンネル交差部を情報化施工により、構造体、通水量に有意な影響を与えることなく通過することができた。

今後、次なる難関である三の橋川流域に進むこととなるが、今回交差部の掘削実績等を踏まえ、三の橋川流域の影響予測解析等の事前検討及び施工を実施していくこととしたい。