

大断面都市NATM分岐部の三次元FEM解析と補強設計

THREE DIMENSIONAL FEM ANALYSIS AND SUPPORTING DESIGN FOR LARGE CROSS-SECTIONAL TUNNEL DIVERGENCE IN URBAN AREA

金森和裕¹⁾・中山裕昭¹⁾・春中紘一²⁾・松島博之²⁾・玉井昭雄³⁾

Kazuhiro KANAMORI, Hiroaki NAKAYAMA, Koichi HARUNAKA, Hiroyuki MATSUSHIMA and Akio TAMAI

Higashiyama Tunnel, which passes through under the densely residential area, is a twin tunnel excavated in sandy and clayey ground. Due to the limited area available for the construction of a shaft including two tunnels, one tunnel has to commence the excavation using a large cross-sectional connection tunnel from the shaft. In the divergence section, behaviours of the ground and tunnel support are expected to be complicated during the excavation. A numerical simulation using a 3-dimensional Finite Elemental Analysis had been conducted to predict the phenomena likely to occur in the section. The results have revealed that supplementary support is required in this section to ensure the stability of the ground. This paper describes the ground and support behaviours predicted numerically and the economical tunnel supporting design based on the simulation results.

Key Words: tunnel divergence, supporting design, urban area, 3-dimensional finite elemental analysis

1. はじめに

名古屋高速道路東山トンネルは、名古屋市東部丘陵地を通過する延長 2.6km 片側 2 車線の双設道路トンネルである。トンネルは主に立坑からの発進となり全五工区に分割して施工されるが、このうち今回のテーマとなる東山公園工区では立坑を築造する用地に制約があり、上下 2 本のトンネルのうち上り線については、発進用立坑から連絡坑を施工し、地中で T 型に分岐発進する計画になっている。事前調査や立坑施工時の追加調査結果によれば、掘削の対象地山は未固結の砂礫層と粘土層が互層をなす土砂山であり、また、分岐部の直上は交通量の多い幹線道路であるとともに近隣に民家も多く、分岐部施工時の安定性を確保することが重要であると考えられた。

このような大断面トンネルの分岐部を施工する場合、その挙動は掘削順序に応じて複雑に変化するものと予想される。固結度の低い土砂地山での NATM による大断面 T 型分岐施工は例が少ないため、三次元有限要素法による数値シミュレーションを実施し、各施工段階での支保工・周辺地山の安定性を評価して、分岐部での合理的な補強設計に反映させるものとした。以下ではその概略と分岐部での補強設計に関して得られた知見を示す。

2. 分岐部の概要

2. 1 施工概要と検討への経緯

東山公園工区発進用立坑 (1 号立坑) は、図-1 に示すように、上り線直上に幹線道路が位置するため、上下二

1) 名古屋高速道路公社 建設部

2) 正会員 大林・五洋・アイサワ特定建設工事共同企業体 東山トンネル工事事務所

3) 正会員 (株)大林組 土木技術本部技術第二部

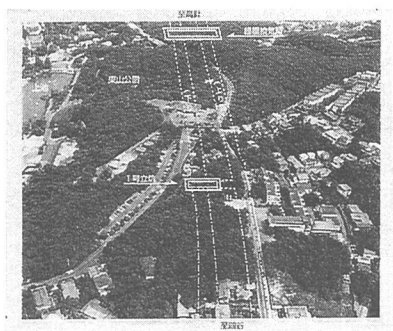
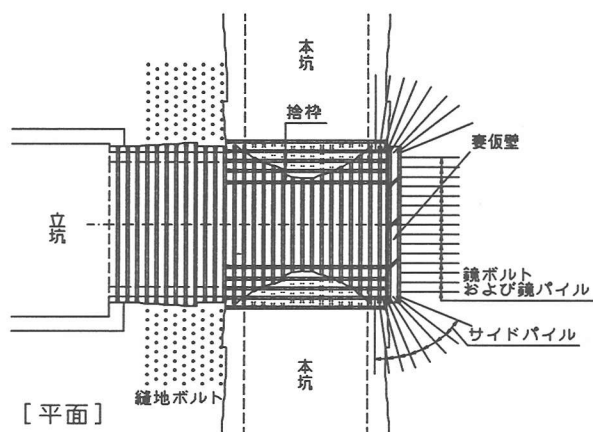


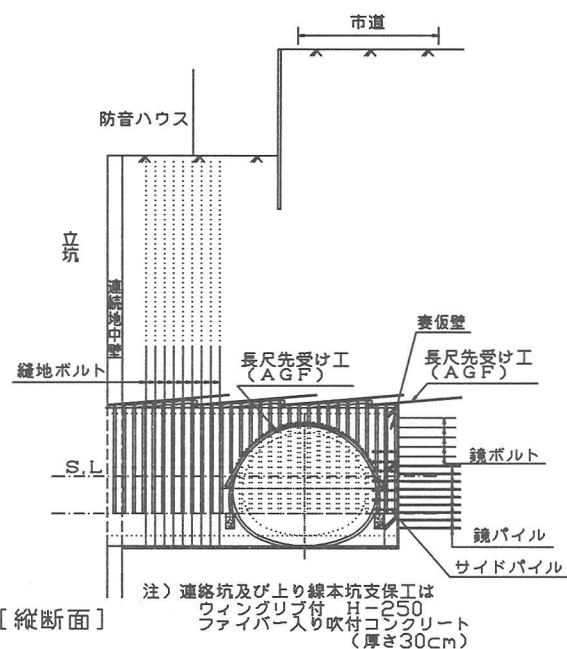
図-1 現場付近状況

本のトンネル断面を包括する立坑面積を確保することが困難であった。このため、二本のトンネルのうち上り線については、発進用立坑から連絡坑(掘削断面 190m^2)を施工し、地中で上り線本坑(掘削断面 130m^2)を連絡坑よりT型に分岐発進(四谷方向および緑橋方向)することとした。

事前検討段階における分岐部の補助工法・補強工は図-2に示す通りであり、本坑施工時には連絡坑内で捨枠設置を行なうことを計画した。しかしながら、分岐部の各施工段階を考慮した場合の支保構造・補強工の妥当性については検討の余地が残されていたため、三次元の数値解析を用いて、分岐部の全体形状およびシェル構造としての効果、連絡坑・本坑の適正な支保工規模、各種補助工法の効果と必要性について総合的に評価し、分岐部の合理的な補強設計を行なうものとした。



[平面]



[縦断面]

図-2 事前検討段階での分岐部補強計画

2.2 地質概要

東山公園工区立坑近傍には、新第三紀鮮新世の矢田川累層と第四紀洪積世の八事・唐山層が分布する。トンネル施工高さの地質は矢田川累層の砂層(Ps層)およびシルト質粘土層(Pc層)が主体であるが、砂礫層も介在する層相の変化の激しい地層である。事前の土質調査結果によれば、砂層、砂礫層、粘土層ともN値30~50、変形係数は30~50MPaであった。立坑・分岐部近傍の簡略化した地質縦断を図-3に示す。

また、トンネル分岐部近傍の地下水位はトンネル天端付近と想定されている。

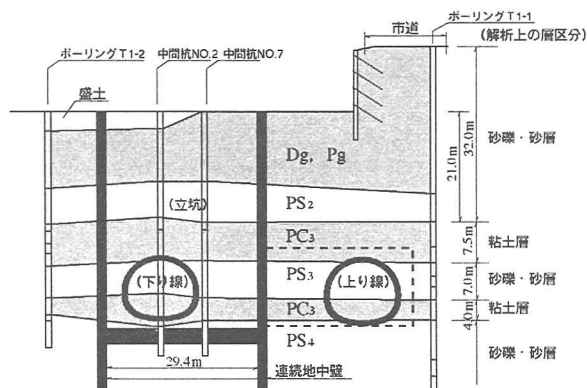


図-3 地質縦断

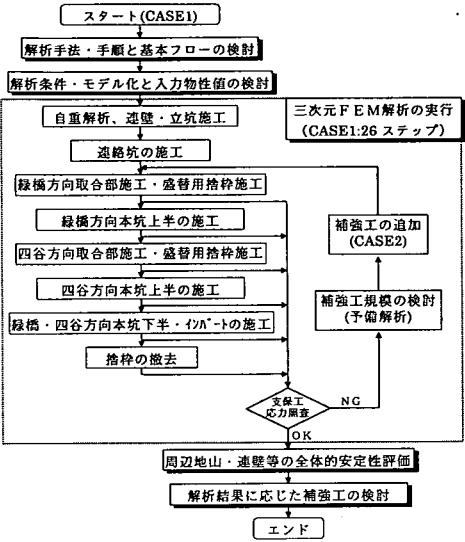
3. 掘削に伴う分岐部の三次元解析

3. 1 解析の目的と解析フロー

前述のように、連絡坑終点側の本坑との分岐部は、交差点としての応力集中や本坑掘削時の連絡坑支保工切断のため、地山および支保構造の安定性が懸念された。したがって、本解析は、連絡坑終点側分岐部のより合理的な補強方法を検討するための資料を得ること、特に分岐部近傍の各施工段階における支保工の応力・周辺地山の安定性に着目し、必要な補強方法を総合的に評価することを目的とした。

解析手法は、詳細な支保構造・掘削ステップが考慮できる三次元有限要素法解析を採用した。今回のような施工環境条件の厳しい低強度・低土被り地山では、地山に破壊領域を発生させ変形・地圧を増大させることは好ましくない。したがって、地山に破壊領域を極力発生させない観点からの地山安定性評価を行なえば十分に解析の目的は達成できると考えた。これより、地山は線形弾性材料としてモデル化し安全率による評価を行なうこととしたが、これは、解析時間の短縮にもつながるものである。

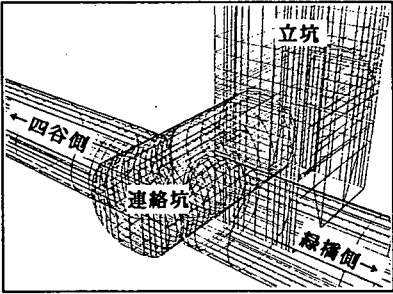
解析は図－4のフローに従って行なった。すなわち、まず CASE1 として事前検討段階での補強計画に基づく解析を行ない、支保工の応力・周辺地山の安定性を評価した。その後、必要に応じた追加補強工を施した解析を CASE2 として実行し、安全性の確認を行なった。



図－4 解析のフロー

3. 2 解析モデルと入力物性値

解析モデルは、立坑・連絡坑・分岐本坑を考慮して作成した。解析領域は、(幅) 300m×(トンネル軸方向長さ) 200m×(深さ) 85～100m とし、地層は既往の調査・試験結果等より、水平な 5 層構造として「砂礫・砂層」と「粘土層」の 2 種類で区分した。総要素数は 24,297 (CASE1 の場合)、総節点数は 19,740 である。図－5 に構造物分岐部近傍の要素分割を示す。



図－5 構造物分岐部の要素分割

解析における地山の入力物性値は、孔内載荷試験・土質試料試験により求められた値を採用した。土砂地山であるため、試験結果の低減は特に行っていない。表－1 に解析における地山の入力値を示す。

また、解析では立坑構造物（連壁・切梁・床盤コンクリート）、トンネルの支保工（鋼製支保工・吹付コンクリート・インバートコンクリート・連絡坑妻仮壁・捨枠支保工）、補助工法（垂直縫地工・長尺先受け工）を考慮し、それぞれの構造に応じたモデル化と入力物性値を設定した。なお、垂直縫地工は地山を補強規模に応じた直交異方性材料として扱い、事前検討段階でのサイドパイル、切羽補強は CASE1 の解析においては考慮していない。

表－1 地山の入力物性値

地盤	土質区分	密度 (kg/m ³)	変形係数 (MPa)	ポアソン比	粘着力 (MPa)	内部摩擦角 (度)	側圧係数
砂礫・砂層	Dg, Pg, Ps2, Ps3, Ps4	1,940	36.3	0.4	0	35	0.67
粘土層	Pc3, Pc4	1,810	42.1	0.4	0.17	0	

3. 3 CASE1 の解析結果と考察

施工完了（捨枠撤去）時における水平面内の地山内鉛直方向応力の集中度を図－6に、四谷方向取合い部施工時の地山内の安全率分布を図－7に示す。

本坑の分岐施工により連絡坑の妻壁側隅角部では1.75 倍まで、立坑側隅角部では1.75 倍を超える応力集中となる。また、1.5 倍を超える応力集中領域は、立坑側では隅角から1/2～3/4D（D＝約15m）の範囲であるのに対し、妻壁側ではごくわずかである。地山の安全率の分布では、本坑取合い部施工時に分岐部近傍地山に低安全率の領域が発生する。ただし、応力集中率・集中領域ともに大きい立坑側隅角部の近傍は、垂直縫地工の効果により低安全率領域は発生せず、また、解析上、サイドパイルを考慮していない妻壁側隅角部でも低安全率の領域は発生していない。

トンネル支保工の応力状態に関しては、捨枠（H-250@1m、取合い部片側4本）には鋼材の許容応力度（SS400 級：206N/mm²）をはるかに越える500N/mm²程度の圧縮応力が作用することになった。また、連絡坑の分岐部近傍の鋼製支保工にも許容値を越える大きな応力が発生し、この応力値は捨枠撤去後にまで継続する。これらの応力は妻壁コンクリートによる変位拘束の影響により立坑側の値が大きい。吹付コンクリ

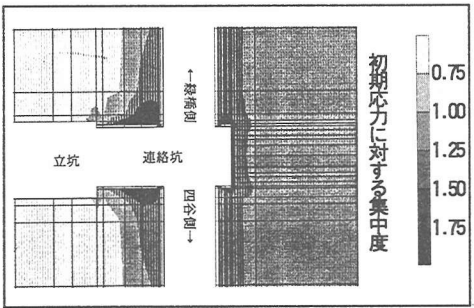
ートの圧縮応力は、最大でも5N/mm²程度とさほど大きくないが、分岐部の本坑接合部天端付近や連絡坑天端付近には最大約5N/mm²の引張応力が作用する解析結果となった。

以上より、トンネル支保工に作用する応力状態からは、分岐部を捨枠支保工のみの補強で施工することは困難であり、何らかの追加補強工により連絡坑分岐部の支保工に作用する応力を軽減することが必要であると判断した。また、分岐部周辺地山は、連絡坑・本坑部のアーチ効果、垂直縫地工による補強、連絡坑妻壁補強等により、不安定となる領域は無補強の場合に比べ減少していると考えられるものの、分岐部の施工段階に応じては、連絡坑妻壁側上半部・底盤近傍、本坑取合い部施工時の切羽面近傍での地山補強（切羽ボルトの施工）が必要であると考えた。ただし、分岐部の妻壁側隅角部に関しては、事前検討段階で予定していた「サイドパイル工」の必要性は少なく、ボルト打設程度の軽微な補強で充分であると判断した。

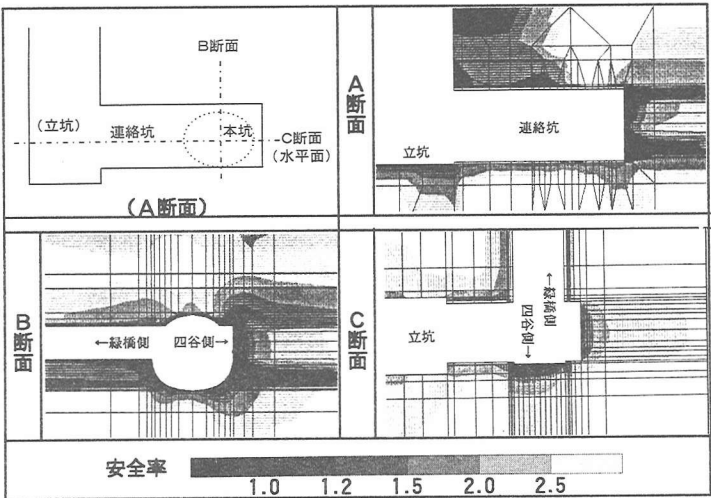
3. 4 必要補強工の規模とCASE2 の解析

CASE1 の解析結果より、分岐部の施工では何らかの追加補強工が必要であると判断した。追加補強工としては各種の工法が考えられるが、ここでは「交差部天端全体を上向きに支持することにより鋼製支保工に作用する荷重を軽減する」補強工を採用した場合の効果について、CASE2 として追加解析を行なうこととした。

CASE2 の解析を行なうにあたり、適正な補強規模の目安を得るため、補強工を上向き荷重として評価した予備解析を行なった。具体的には、CASE1 の解析で鋼製支保工に最大応力が発生した解析ステップにおいて、数ヶ



図－6 鉛直方向の応力集中度



図－7 地山内安全率分布（CASE1、四谷方向取合い部施工時）

スの異なる上向き荷重を作用させ、鋼製支保工に発生する最大応力の変化を検証した。検証結果を図-8に示す。これより、この施工ステップにおいて、天端部に上向き方向に 0.07~0.08N/mm² 程度の荷重が作用していれば、捨枠および連絡坑の鋼製支保工応力は許容値以内に収まるものと推定できた。

したがって、CASE2 の解析では CASE1 の条件に加え、この補強工をばね要素でモデル化した。すなわち、このばねには、連絡坑からの本坑掘削を始める前のステップから鋼製支保工に最大応力が発生するステップにおいて 0.075N/mm² 相当の上向き荷重が作用する剛性を持たせ、発生変位に応じて分岐天端部を支持させるものとした。また、CASE2 では、先述の補強が必要であると考えた切羽面に対し、地山を補強工による直交異方性材料として評価し解析に取り込んだ。

3. 5 CASE2 の解析結果と考察

CASE1 と同様に、四谷方向取合い部施工時の地山内の安全率分布を図-9に示す。

CASE1 において発生していた連絡坑妻壁側の上半部・底盤近傍の低安全率領域は、CASE2 では発生せず、妻壁の補強ボルトが有効に作用した結果であると考えられる。本坑取合い部の天端部、立坑・連絡坑取合い部の天端近傍、さらには本坑取合い部施工時の切羽近傍に低安全率の領域が発生するが、CASE1 の場合と比較するとその領域・程度とも大きく減少している。

捨枠および連絡坑の鋼製支保工に作用する応力は、すべて許容値を満足した結果となり、最大でも 200N/mm² (圧縮応力) であった。また、連絡坑の鋼製支保工は捨枠撤去後も許容値を満足し、追加の補強工によって捨枠・鋼製支保工に作用する荷重は十分に軽減されていることを確認した。

図-10に吹付コンクリートの最小主応力分布を示す。分岐部の本坑接合部付近や連絡坑天端付近には引張応力が作用するが、引張応力の最大値は約 2N/mm² であり、CASE1 の場合の 1/2 以下となっている。

このように CASE2 の解析で追加補強工および追加補助工法 (切羽補強) を導入することにより、解析上は、地山・トンネル支保工の安定性が顕著に向上することを確認した。ただし、地山には一部、不安定領域が発生する可能性が残されており、こうした不安定領域に対しては、先受工施工時の注入材の変更、地山改良のための部分的な補強対策等が必要であると判断した。また、吹付コンクリートに作用する引

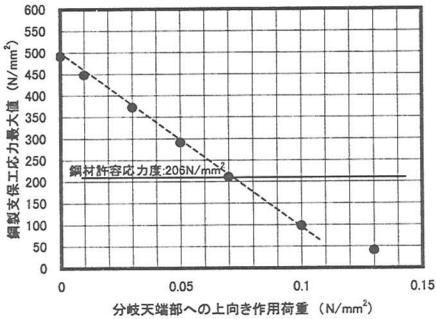


図-8 上向き作用荷重と鋼製支保工応力

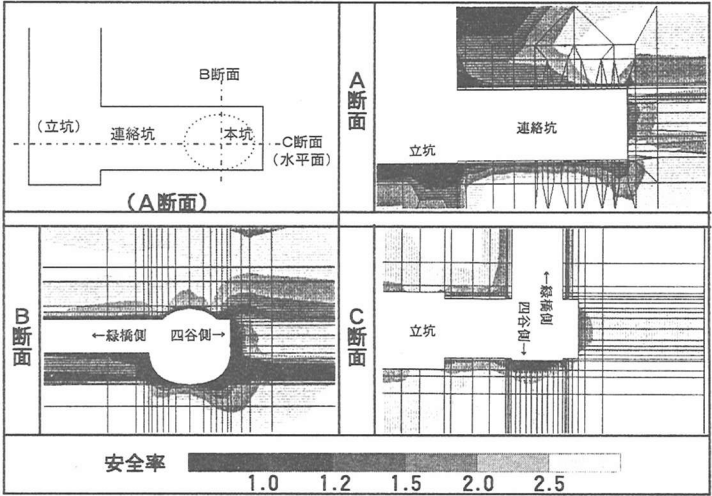


図-9 地山内安全率分布 (CASE2、四谷方向取合い部施工時)

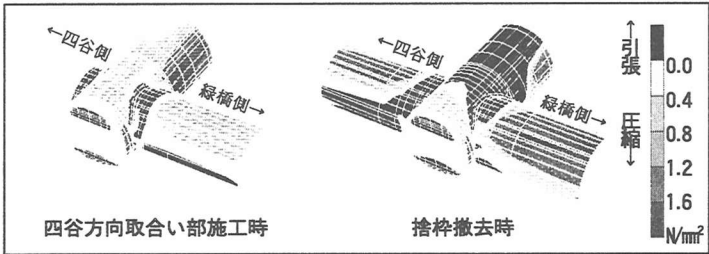


図-10 吹付コンクリートの最小主応力分布

張応力に対しては、スチールファイバー等による補強が必要であると考えた。なお、CASE2 解析時におけるトンネル直上部の地表面沈下量は、最大で 12mm 程度であり、管理上も問題がないものと判断した。

4. 解析結果の設計への反映

掘削に伴う分岐部の三次元解析結果を踏まえて、分岐部での補強計画を図-11 に示すように修正した。なお、分岐部天端の追加補強工としては、工期短縮、効果の信頼性、施工性、経済性等を総合的に判断し、地表面と連絡坑の分岐部天端を繋ぐタイロッド方式案を採用した。

5. おわりに

東山トンネル東山公園工区の T 型分岐部の挙動を三次元解析によってシミュレーションすることにより、以下のようなことが、分岐部での補強設計に関する成果として得られた。

- ①垂直縫地工は分岐部隅角部のひずみ抑制・安全率向上に大きく寄与し、連絡坑妻壁コンクリートは変位の抑制・支保荷重軽減に効果的であることが確認できた。
- ②連絡坑妻壁側隅角部の応力集中度が低いことが確認され、これにより事前検討段階での「サイドパイル工」の必要性は少なく、ロックボルト打設等の軽微な補強で対応できると判断できた。
- ③連絡坑分岐部近傍の支保構造（鋼製支保工 H-250@1m、吹付厚さ 30cm）の妥当性を確認するとともに、吹付コンクリートのスチールファイバー補強の必要性が明確化された。
- ④施工時の地山安定性確保のために「連絡坑妻壁部」「本坑取合い部」の切羽補強の必要性が確認できた。
- ⑤シェルとしての分岐部構造を考慮しても、事前検討段階での支保構造と補強のみでは分岐部の安全な施工は困難であることが確認され、何らかの追加補強工が必要であると判断した。これに対し、分岐部天端において、発生変位に応じ最大 $0.075\text{N}/\text{mm}^2$ 相当の荷重で上向きに支持する工法を追加補強工として採用した場合、鋼製支保工に作用する荷重は許容値以内に収まることが確認できた。

今後は、本工事において計測管理を十分に行ない安全性を確認するとともに、計測結果の評価を中心として本解析に基づく修正設計の妥当性を検証していく予定である。

最後に、本報告にあたりご協力をいただいた関係者の方々に深く感謝の意を表します。

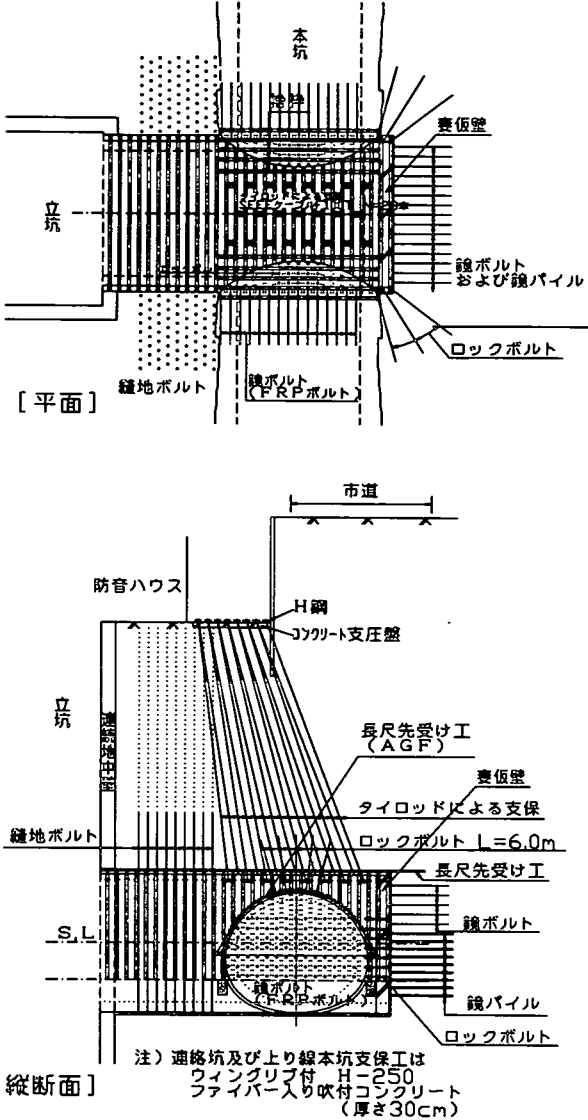


図-11 修正した分岐部補強計画