

側壁盛替え工法による開削トンネル の設計と施工

左子 齊¹・三村光太郎²・川又啓介³・長谷川弘明⁴・藤田哲夫⁵・中島 隆⁶

¹正会員 工博 三井住友建設(株) 土木管理本部 土木設計部 (〒164-0011 東京都中野区中央1-38-1)

²工修 三井住友建設(株) 土木管理本部 土木設計部 (〒164-0011 東京都中野区中央1-38-1)

³正会員 工修 三井住友建設(株) 土木管理本部 土木設計部 (〒164-0011 東京都中野区中央1-38-1)

⁴三井住友建設(株) 大阪支店 土木部 (〒541-0051 大阪市中央区北浜四丁目7-28)

⁵阪神高速道路(株) 大阪建設部 工事管理グループ (〒552-0007 大阪市港区弁天1-2-1-1900)

⁶工修 阪神高速道路(株) 神戸管理部 調査設計グループ (〒650-0041 神戸市中央区新港町16-1)

開削トンネルの構築方法の一つである側壁盛替え工法は、切梁反力を施工途中の片持ち梁状態の側壁で受け替えながら、土留め支保工を撤去して躯体を構築する方法である。本工法は、従来多く採用されてきた内梁盛替え工法と比較して、コスト縮減・工期短縮・安全性の向上などが期待できる工法であるが、本工法を用いる際の躯体応力度の評価方法については現在確立されていない。今回、本工法を適用する際の設計手法として、側壁盛替えによる施工時応力がコンクリート特有のクリープ特性により緩和されることに着目し、躯体完成後の長期間経過時における応力を合理的に評価する計算法を確立した。これにより、各種メリットが期待できる側壁盛替え工法の積極的な採用が可能となった。

キーワード：開削トンネル，土留め工，側壁盛替え，残留応力，クリープ，応力緩和

1. はじめに

近年、地表面空間が過密化した都市部を中心に、道路・鉄道等の交通ネットワークの更なる整備を目的とした、地下空間における交通施設の建設が進められている。この際、近接する既設構造物の地盤利用状況に応じて新規構造物が大深度化することが多く、また、既設構造物が近接する条件下での施工となることから、土留め壁の変位量に対して厳しい制限が設けられることが多い。したがって、このような状況下での土留め工事においては、掘削時のみならず、掘削完了後の躯体構築・土留め支保工撤去の過程についても、これまで以上に高度な設計・施工管理が要求されている。

現在、大規模・大深度構造物の構築過程における土留め支保工撤去方法として、“内梁盛替え工法”が多く採用されている。この工法は、既設切梁直下まで本体構造物を構築した後、本体側壁部の土留め壁側に盛替え梁を設け、さらに構造物内空側にも内盛替え梁を設置することにより既設切梁を撤去するものである。ただし、本工法は、内盛替え梁の施工に伴う工費の増大や安全性の低下等、幾つかの問題点を有している。

一方、これらの問題点を含まない支保工撤去方法としては、“側壁盛替え工法”が挙げられる。本工法は、“内梁盛替え工法”と同様に既設切梁撤去前に本体側壁部の土留め壁側に盛替え梁を設置するものの、内空側の内盛替え梁を省略するものである。このため、内盛替え梁の施工に要する工費の削減や狭隘箇所での作業の低減が可能となっている。しかし、側壁盛替え工法は、躯体構築時に側壁に作用する外力や将来に渡って残留する応力の評価など、その躯体設計手法は現在確立されていない。

本論文では、側壁盛替え工法の積極的な適用に向けて確立した、コンクリートのクリープ特性に着目した一連の躯体設計手法について記述する。また、この設計手法を初めて開削トンネルに適用し、側壁盛替え工法により躯体を構築した事例についても記述する。

2. 土留め支保工撤去方法の種類と特徴

図-1 に、開削トンネル躯体構築時の土留め支保工撤去方法を示す。

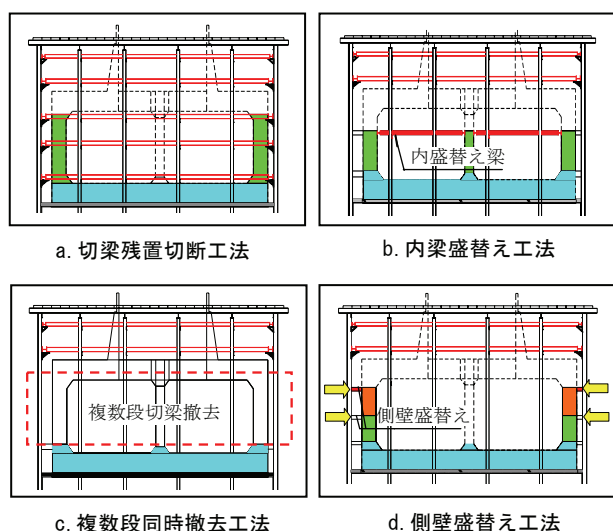


図-1 開削トンネル構築時の土留め支保工撤去方法

(1) 切梁残置切断工法

掘削時に架設した切梁を残置した状態で構造物本体を構築し、本体が完成した後に構造物内空側の切梁を切断・撤去する工法である（図-1a）。

この工法は、本体構造物を構築する際に土留め架構の構造を変化させないため、土留め壁の応力および変形に与える影響は小さい。一方で、①切梁切断時の急激な応力解放により躯体側壁にクラックが生じやすい、②切梁残置部の側壁鉄筋切断箇所が応力上の弱点となる、③防水上の不連続面を作るため止水性に劣る、等の短所がある。

また、本工法は、土留め壁と躯体との離隔が十分に確保される場合（概ね 800mm 程度以上¹⁾）に適用可能な工法である。このため、工事用地の縮小を図り、その離隔を狭くする傾向にある最近の工事では、適用される機会が少なくなっている。

(2) 内梁盛替え工法

既設切梁下まで側壁を構築し、躯体内空側に内盛替え梁を架設した後に、切梁を撤去する工法である（図-1b）。

本工法は、切梁残置切断工法と比較して側壁に貫通材が存在しない分、品質上の弱点は少ない。しかし、内梁の設置撤去工は狭所・高所作業となり安全性に劣るほか、費用が高むうえ、工期も長くなり経済的に不利となる。

また、内梁は側壁を介して設置されるため、①内梁設置時に緩みを完全に取りないと側壁に過度な応力を発生させてしまうこと、②内梁に対して側壁の剛性が大きい場合、設置した内梁が十分に機能しないことが考えられること、等の問題点を有する。

(3) 複数段同時撤去工法

底版打設後、本体構造物の構築に支障となる切梁を複数段同時に撤去する工法である（図-1c）。

本工法は、①作業スペースが十分に確保でき、施工性に優れる、②本体構築時に躯体に外力が作用しない、③躯体の打継ぎ目が少なく止水性に優れた構造物が構築できる、等の長所がある。

ただし、複数段の切梁を同時に撤去するため、土留め壁の応力や変形が大きくなるという問題がある。したがって、過大となる応力・変形量の対処として、土留め仕様のランクアップを伴うことが多い。また、土留め壁の変形に伴う背面地盤の沈下量が他の工法と比較して大きくなることから、背面地盤沈下の制限が厳しい都市部の開削工事への適用には十分な検討を要する。

(4) 側壁盛替え工法

既設切梁下まで側壁を構築し、片持ち梁状態の側壁で盛替えを行い、切梁を撤去する（図-1d）。

本工法は、剛性の高い側壁を利用して既設切梁の撤去を行うため、土留め壁の応力・変形量に与える影響が小さく、また内梁を設置する必要がないことから経済的で作業スペースも広く取れる。

しかし、施工時に本体構造物に外力を作用させることとなり、本体完成後も残留応力として影響を及ぼすため、本工法を採用する場合には、残留応力の影響について適切な評価が必要となる。この残留応力を考慮した躯体の設計手法は、現在確立されていないことから、本工法は一部の限定的な適用に留まっている。

3. 側壁盛替え工法により構築した躯体に残留する応力とその評価手法

(1) 躯体に残留する応力の概念

本体構造物構築過程において外力を作用させる場合に躯体に発生する応力および将来的に残留する応力の概念について述べる。

まず、土留め工法にて所定の深度まで掘削が完了し、その時に土留め壁が土留め支保工にて支保されている状態（図-2a）を考える。

次に、側壁盛替えにより支保工撤去を行う場合、本体構築の段階で底版を固定端とする片持ち梁状態の側壁部に土留め支保工盛替え反力を作用させることとなる。これにより側壁部には、図-2bに示すように応力が発生する。

その後、躯体に応力を発生させた状態のまま、頂

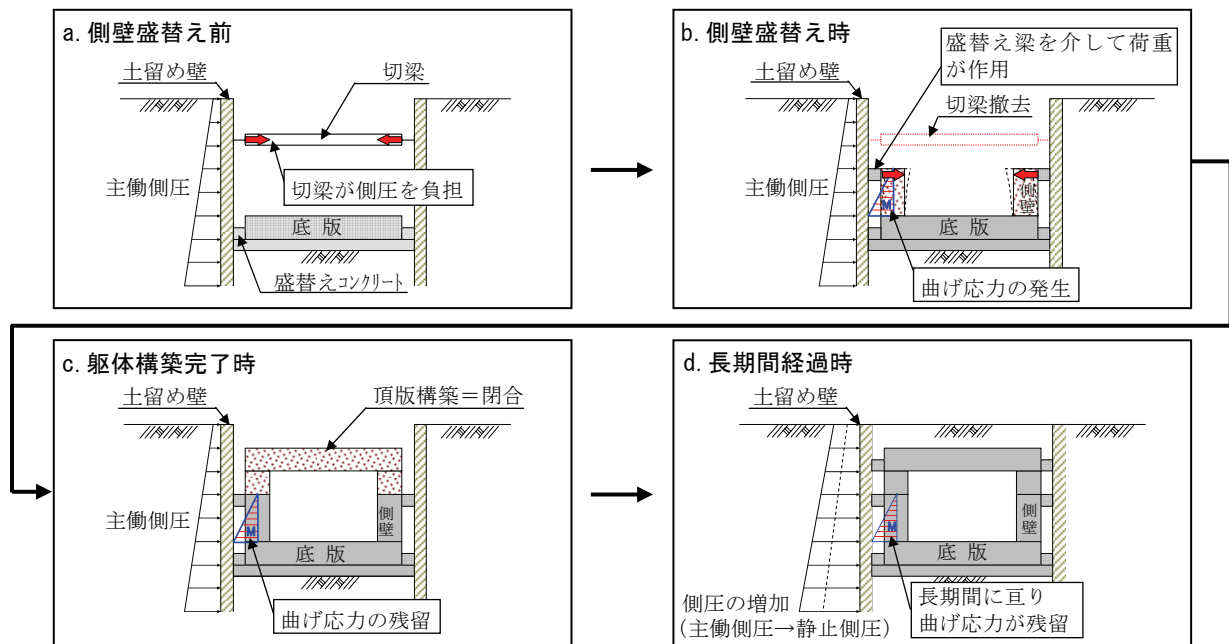


図-2 側壁盛替えにより躯体に残留する応力の概念図

版構築による閉合が行われる。すなわち、図-2cに示すように構造系が完成した後においても施工時に発生させた応力が残留することとなる。

そして、施工時に発生させた盛替え反力による応力は、本体側部および頂版上部の埋戻しを経て、土留め壁を介して作用する主働側圧が静止側圧に移行する長期間に渡って残留することとなる（図-2d）。

以上のように、側壁盛替えにより支保工撤去を行う場合には、構築過程から長期間に渡って構造物に応力を発生させることとなるため、本体構造物の安全性を確認する上で各段階における応力の評価が必要となる。

(2) 残留応力の評価手法

躯体構築の途中段階で生じる応力の評価手法としては、一般に次の3つの方法がある²⁾。

a) 完全分離計算法

施工時、完成後をそれぞれ単独に検討する手法であり、最も簡易な計算手法である。完成後の応力については、施工時の残留応力を考慮しない。この計算法では、施工時に発生する応力が大きく、これによる完成後の残留応力が大きくなる場合については、完成後の応力状態を過小評価することとなる。

b) 逐次的分離計算法

施工時に発生する応力が躯体完成後の長期間に渡って全く低減しないと仮定し、完成後の応力を施工時応力と完成後の増加応力の重ね合わせにより評価する手法である。施工時に発生する応力が将来に渡って低減しないと仮定しているため、完成後の応力

が過大評価となることがある。

c) 逐次計算法

構造系・荷重条件・支持条件の変化を一連の流れで追っていく計算手法である。施工時から完成後までの応力履歴を考慮した最も厳密な計算方法であるが、地中構造物の場合は計算が煩雑であり、必ずしも実用的とは言えず実績も少ない。

(3) 逐次的分離ークリープ応力緩和法

前述の通り、現在一般的に行われている残留応力の評価方法には、計算は簡便であるが完成後の応力を過小あるいは過大評価する、厳密な方法であるが計算が煩雑で実用的でない、等いずれの方法も長所・短所を有している。このため、側壁盛替えを行う場合の新たな評価手法として計算が比較的簡便であり、コンクリート特有のクリープ特性を取り入れることにより、各施工段階における応力変化を忠実に捉えることが可能な“逐次的分離ークリープ応力緩和法”を考案し、その設計を試みることにした。

今回考案した残留応力評価法の概要を図-3に示す。本手法は、構造系完成後の部材のクリープ変形に伴い施工時応力が変化することを考慮した躯体の応力評価手法である。施工時において側壁に作用する盛替え反力は、構造系完成後の長期間に渡って持続的に作用し続けるため、この反力が作用する側壁部ではクリープ変形を生じる。このように、側壁盛替えにより部材にクリープ変形が発生するとき、構造系完成前ではこの変形に伴う応力の変化は生じないが、構造系完成後にはこの変形量に応じて部材の

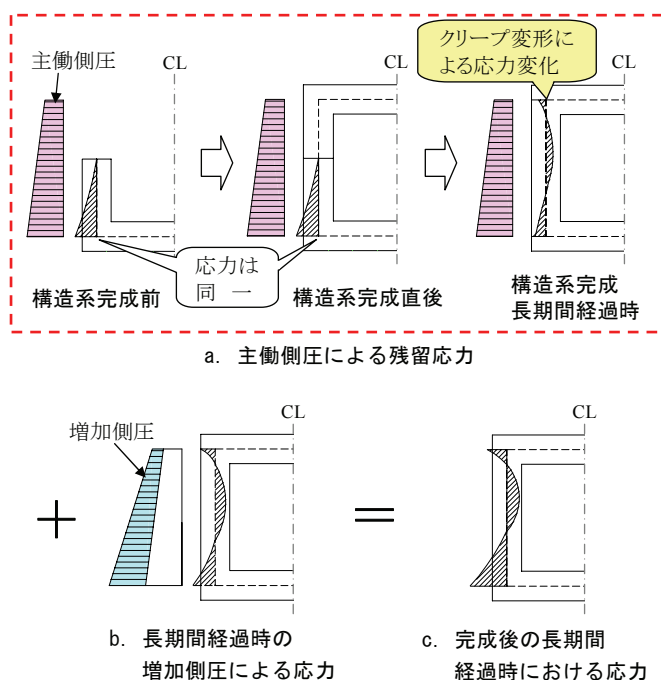


図-3 逐次的分離－クリープ応力緩和法による応力評価

応力分布が変化することとなる^{3),4)}。すなわち、構造系完成前の片持ち梁状態の側壁部に発生した応力は、構造系完成後、クリープ変形の進行に伴い両端固定梁状態の応力分布に近似する形で変化していく（図-3a）。本手法では、完成後の長期間経過時における応力状態（図-3c）の評価は、上記のクリープ変形に伴い変化した主働側圧による残留応力（図-3a）と完成後の増加側圧による応力（図-3b）の重ね合わせにより行う。ここで、完成後の増加側圧とは、施工時に土留め壁を介して作用する主働側圧と将来的に本体構造物に作用する静止側圧との差分の側圧を指す。

以上のように本手法は、施工時の残留応力と完成後の増加応力をそれぞれ別に計算し、構造物完成後の長期間経過時における応力状態をこれらの重ね合わせにより評価する“逐次的分離計算法”の一手法である。しかしながら、その応力評価の手法はコンクリートのクリープ特性を取り入れたものであり、構造物構築過程における応力変化をより忠実に表現しようとするものである。

4. 逐次的分離 - クリープ応力緩和法による躯体の設計

(1) 検討方法

側壁盛替え工法を採用した場合の常時荷重に対する躯体の検討フローを図-4に示す。本体構造物の

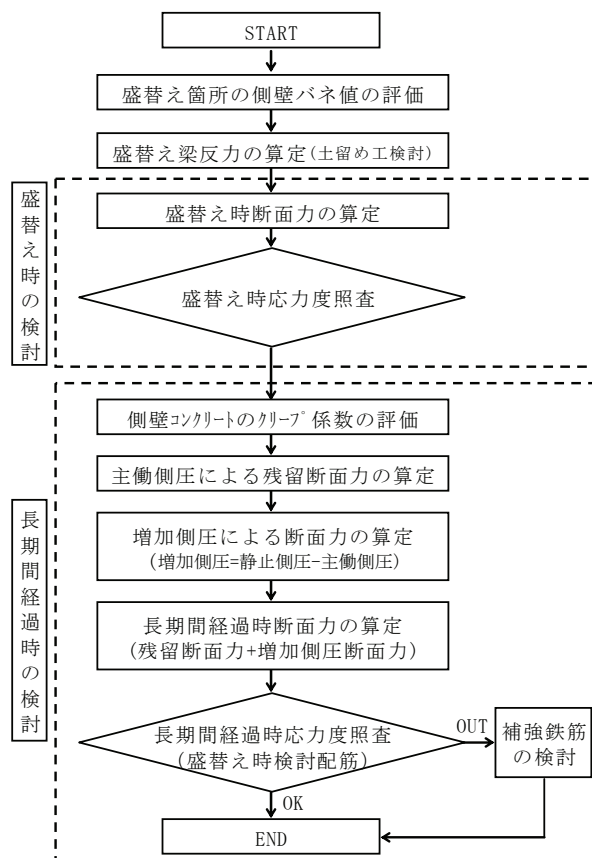


図-4 検討フロー（常時）

照査は、“盛替え時”（片持ち梁状態の側壁で盛替えを行った時点）と“長期間経過時”（構造系が完成し、主働側圧が静止側圧に変化する時点）の2つの時点で行う。

まず、盛替え時の検討では、側壁盛替えを行う際に作用する盛替え梁反力を土留め計算により算出し、この反力を用いて片持ち梁状態の側壁に発生する応力と底版の応力の評価を行う。その後、この応力に基づいて部材の仕様を決定する。

次に、長期間経過時の検討について述べる。長期間経過時の検討では、前章に記述したようにその応力状態を施工時の“主働側圧による残留応力”と完成後の“増加側圧（＝静止側圧－主働側圧）による応力”との和として評価する。

ここで、施工時の残留応力については、側壁コンクリート打設から構造物完成後長期間経過時までの躯体構築履歴、期間および使用するセメントの種類、等に基づいたコンクリートのクリープ特性を評価したうえで算出する。また、完成後の増加側圧による応力については、将来的に作用することとなる静止側圧と施工時から作用している主働側圧の差分の側圧を骨組み構造計算モデルに与えて評価する。このように長期間経過時の検討では、施工時の残留応力と完成後の増加応力を個別に算出し、両者の和によ

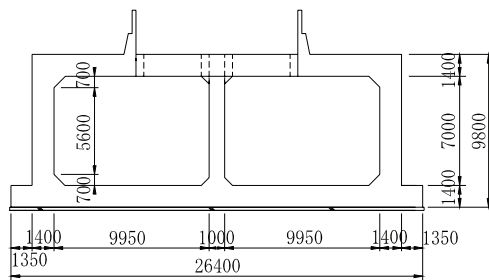


図-5 トンネル構造一般図

表-1 構造物の使用材料

		側 壁 部	底 版 部
コンクリート	セメント種類	低熱ポルトランドセメント	高炉セメントB種
	設計基準強度	$\sigma_{ek}=30 \text{ N/mm}^2$	$\sigma_{ek}=24 \text{ N/mm}^2$
鉄 筋	種 類	SD345	同左
	外側引張鉄筋	D29@125	D25@125
	内側引張鉄筋	D22@125	同左
	せん断補強筋	D16@250	同左

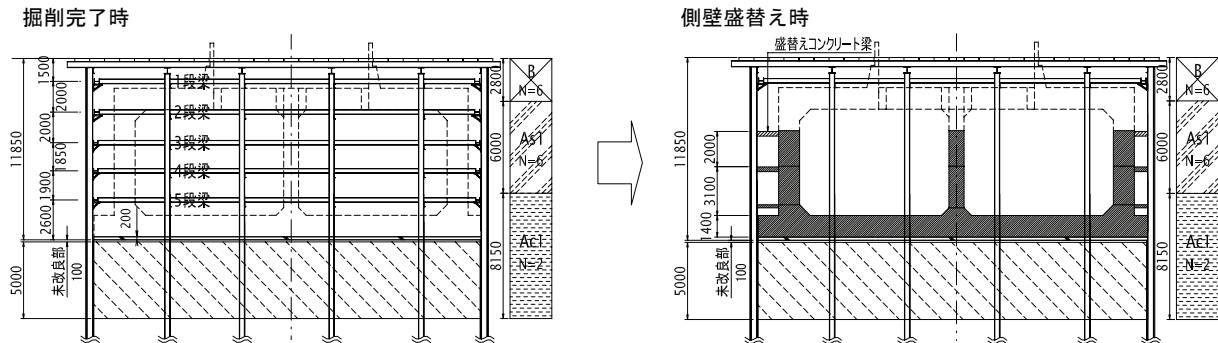


図-6 対象構造物の側壁盛替え位置

り長期間経過時の応力を評価して応力度照査を行う。この応力度照査は、盛替え時の検討で決定した部材仕様に対して行うものとし、発生する応力度が許容値を満足しない場合には補強鉄筋の検討を行う。

一方、地震時についても上記の長期間経過時の検討と同様に、側壁盛替えにより発生させた残留応力の影響を考慮する必要があると考えられる。したがって、地震時については、この残留応力を考慮した初期応力状態の下で地震時荷重を作用させた検討を行うものとする。

次節以降に、本検討方法を実際の道路トンネルに適用し、側壁盛替えを行った結果について述べる。なお、この構造物では、部材仕様が地震時の検討で決定されていないことから、部材仕様決定ケースである常時の検討結果について記述する。

(2) 検討対象構造物の概要

検討は、阪神高速道路淀川左岸線Ⅰ期の島屋第2工区における開削トンネルを対象として行なった。

本工事では、当初、躯体構築方法として内梁盛替え工法が計画されていたが、施工性・経済性の向上を目的として、側壁盛替え工法の適用について検討を行うこととした。以下に、構造物の概要を示す。

構造形式：頂版ストラット型2連ボックス構造
構造物規模：延長255m、幅26.4m、高さ9.8m

(図-5)

掘削深度：11.85m

また、表-1に本構造物の各部位における使用材

料を示す。

本工事では、図-6に示すように、掘削過程で発生した支保工反力を底版・側壁で受け替えながら既設切梁を撤去して躯体を構築する。側壁盛替えは、底版天端から高さ3.1mと5.1mの2箇所盛替えコンクリート梁を設置して行い、検討は側壁および底版に対して行った。

(3) 盛替え時における躯体応力度照査

まず、盛替えを行う片持ち梁状態の側壁に荷重が作用する場合に発生する変位量と荷重との関係に基づき、各盛替え位置における側壁のパネ値を評価する。そして、このパネ値を用いて土留め弾塑性計算法により盛替え梁反力を算出することとした。

側壁の応力は上記盛替え梁反力を片持ち梁モデルに作用させて算出し、底版の応力は底版を梁、地盤を弾性バネとしたモデルに側壁下端で発生する荷重および曲げモーメントを与えて算出した。

盛替え時における応力度照査結果を表-2に示す。照査の結果、側壁盛替えにより発生する側壁および底版の曲げ・せん断応力度は、両者とも原設計の配筋仕様で許容応力度を満足することが確認された。

(4) 長期間経過時における躯体応力度照査

躯体完成後の応力度照査時期は、土留め壁を介して躯体に作用する側圧が主働側圧から静止側圧に変化する時期とする。主働側圧が静止側圧に変化する期間は躯体構築完了後4年～5.5年⁵⁾という報告に基

表-2 盛替え時の応力度照査結果

モデル		【当初設計配筋】側壁:D29@125[外側鉄筋] 底版:D25@125[外側鉄筋]
側壁	曲げモーメント	$M=-1031 \text{ kN}\cdot\text{m}$ $\sigma_c=4.8 < 10.0 \text{ N/mm}^2 \dots \text{OK}$ $\sigma_s=159 < 180 \text{ N/mm}^2 \dots \text{OK}$
	せん断力	$S=322 \text{ kN}$ $\tau_m=0.25 < 0.45 \text{ N/mm}^2 \dots \text{OK}$
底版	曲げモーメント	$M=-1001 \text{ kN}\cdot\text{m}$ $\sigma_c=4.3 < 8.0 \text{ N/mm}^2 \dots \text{OK}$ $\sigma_s=134 < 180 \text{ N/mm}^2 \dots \text{OK}$
	せん断力	$S=166 \text{ kN}$ $\tau_m=0.13 < 0.39 \text{ N/mm}^2 \dots \text{OK}$

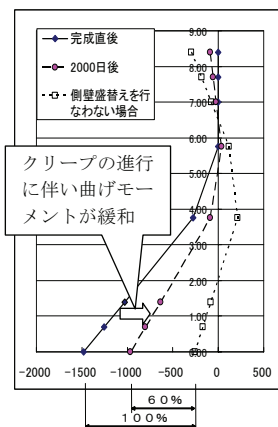
づき、ここではこの応力度照査時期を躯体構築完了後5.5年（2,000日）とした。すなわち、側壁盛替えにより発生した施工時の応力（盛替え時応力）が、主働側圧から静止側圧に移行するまでの期間（5.5年間）においてクリープにより応力緩和される量を算出し、長期間経過時に残留する応力を評価する。ここで、残留応力を算出する際に必要となるクリープ係数の評価には、式(1)および(2)⁶⁾を用いることとした。

$$\phi(t, t_0) = \phi_{d0} \cdot \beta_d(t - t_0) + \phi_{f0} \{ \beta_f(t) - \beta_f(t_0) \} \quad (1)$$

$$t_0 \text{ 又は } t = \alpha \cdot \frac{\sum(T+10) \cdot \Delta t'}{30} \quad (2)$$

ここで、 $\phi(t, t_0)$ ：クリープ係数、 t_0 および t ：荷重載荷時およびクリープ係数算出時の材齢(日)、 ϕ_{d0} ：遅れ弾性ひずみに対するクリープ係数(=0.4)、 $\beta_d(t - t_0)$ ：遅れ弾性ひずみの進行度を表す係数、 ϕ_{f0} ：荷重除荷時に回復しないひずみに対するクリープ係数、 $\beta_f(t)$ ：材齢および部材の仮想厚さに関する係数、 α ：セメント種類に基づく積算温度補正係数、 T ：コンクリートの温度(℃)、 $\Delta t'$ ：コンクリート温度が T (℃)である期間の日数(日)である。

1) 曲げモーメント



2) せん断力

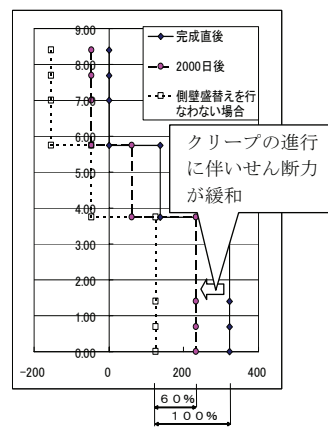


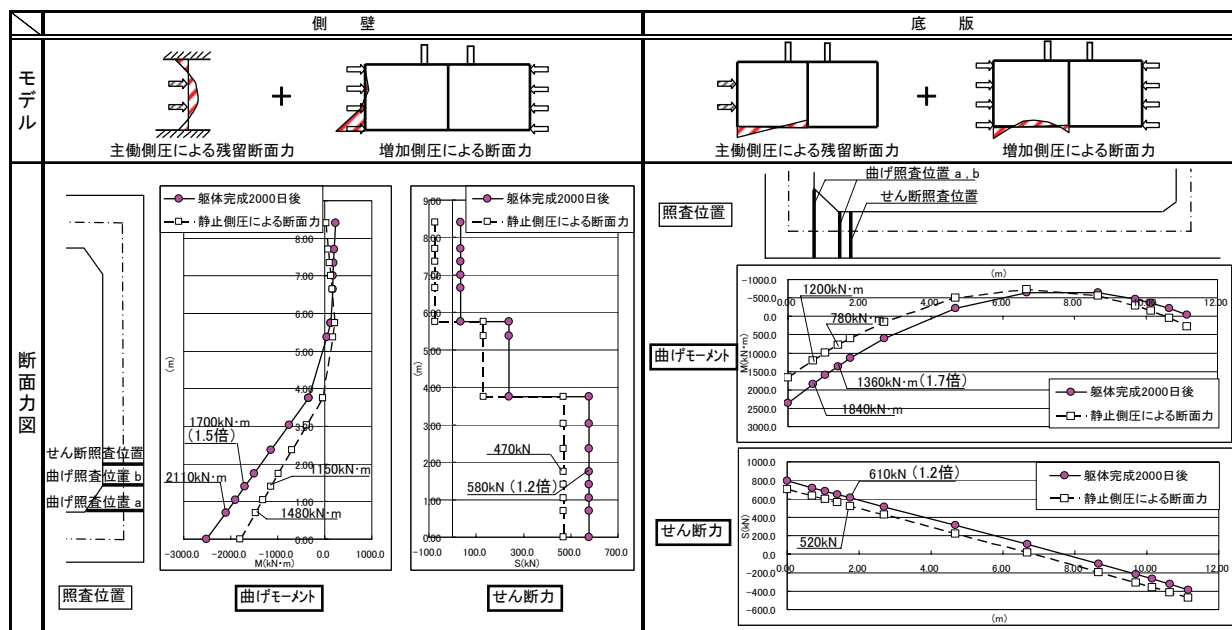
図-7 主働側圧による残留応力のクリープ緩和

クリープによる応力緩和を考慮した主働側圧による側壁の残留応力算出結果を図-7に示す。この結果より、躯体完成直後に発生している側壁の応力は、曲げモーメント・せん断力ともに側壁部材のクリープの進行に伴って減少し、側壁盛替えを行わない場合の応力分布に近似していくことがわかる。すなわち、クリープにより側壁の応力は、曲げモーメント・せん断力ともに主働側圧から静止側圧に移行するまでの期間（躯体完成2,000日後）に約60%まで減少する。

長期間経過時（躯体完成2,000日後）の応力算出結果と応力度照査結果を図-8および表-3に示す。この結果、躯体完成2,000日後の応力は、側壁盛替えを行わない当初設計の応力（静止側圧による応力）と比較して、曲げモーメントは側壁で1.5倍、底版で1.7倍、せん断力は側壁・底版ともに1.2倍に増加していることがわかる。すなわち、この増加量が側壁盛替えにより躯体構築時に外力を作用させた影響であると言える。

次に、表-3に示す応力度照査結果に着目する。応力度照査の結果、表-3の左に示すように、長期間経過時における側壁および底版の鉄筋応力度は、原設計配筋ではそれぞれ許容値を満足しない結果となった。このため、これらの過大な曲げ応力度に対する対処として表-3の右に示すように側壁および底版の鉄筋を補強（側壁：D19@125を2段目配筋として追加、底版：D25@125からD29@125へサイズアップ）することとした。

以上の検討を踏まえて、当初計画されていた内梁盛替え工法と側壁盛替え工法の支保工撤去時における工費について比較した結果を表-4に示す。この結果、側壁盛替え工法では、盛替えの影響による応力の増加分をわずかな補強鉄筋で対処することがで



※ 表中の（ ）は原設計断面力に対する増加比率を示す。

図-8 長期間経過時時の断面力

表-3 長期間経過時（躯体完成 2,000 日後）の応力度照査結果

原設計配筋での応力度照査			鉄筋を補強した場合の応力度照査		
配筋図			配筋図		
側壁	曲げモーメント	曲げ照査箇所 	曲げ照査箇所		$M = -1700 \text{ kN}\cdot\text{m}$ $\sigma_c = 7.2 < 10.0 \text{ N/mm}^2 \dots \text{OK}$ $\sigma_s = 237 > 180 \text{ N/mm}^2 \dots \text{OUT}$
		せん断照査箇所 			
	せん断力	$S = 580 \text{ kN}$ $\tau_m = 0.44 < 0.45 \text{ N/mm}^2 \dots \text{OK}$		せん断照査箇所	$S = 580 \text{ kN}$ $\tau_m = 0.44 < 0.45 \text{ N/mm}^2 \dots \text{OK}$
底板	曲げモーメント	$M = -1360 \text{ kN}\cdot\text{m}$ $\sigma_c = 6.4 < 8.0 \text{ N/mm}^2 \dots \text{OK}$ $\sigma_s = 202 > 180 \text{ N/mm}^2 \dots \text{OUT}$	曲げモーメント	$M = -1360 \text{ kN}\cdot\text{m}$ $\sigma_c = 6.1 < 8.0 \text{ N/mm}^2 \dots \text{OK}$ $\sigma_s = 168 < 180 \text{ N/mm}^2 \dots \text{OK}$	
	せん断力	$S = 610 \text{ kN}$ $A_{\text{req}} = 1.4 < 4.0 \text{ cm}^2 \dots \text{OK}$ (D16 _{ctc} -250 1組)	せん断力	$S = 610 \text{ kN}$ $A_{\text{req}} = 1.4 < 4.0 \text{ cm}^2 \dots \text{OK}$ (D16 _{ctc} -250 1組)	

表-4 内梁盛替え工法と側壁盛替え工法の工費比較

	内梁盛替え工法	側壁盛替え工法
概要図		
工費	内梁設置・撤去工 0.63 1 段目内梁賃料 0.17 2 段目内梁賃料 0.20 合 計 1.00	補強鉄筋(材工) 0.37 合 計 0.37
工期	内梁設置・撤去工 75日	補強鉄筋組立工 20日

※ 上表の工費には、盛替え工以外の工費および設計費は含まない。

きたため、内梁設置・撤去費用、躯体構築費用を含めて経済性に優れることが確認できた。また、側壁盛替え工法の採用により、内梁設置・撤去工を省略できたほか、写真-1に示すように躯体構築時において躯体内部の作業スペースが広く取れたため、躯体構築作業（鉄筋工、型枠支保工等）の施工性および安全性の向上が図れた。これにより、躯体構築に要する期間についても当初計画されていた1年8ヶ月のうち約2ヶ月間短縮することができた。

以上のように、本工事において側壁盛替え工法のコスト・工期および安全性に対する優位性を確認することができた。

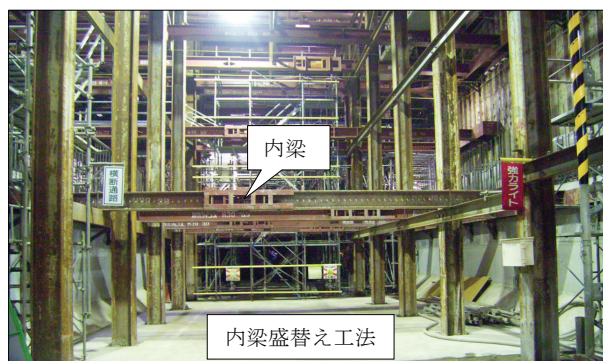


写真-1 躯体構築状況写真

5. おわりに

本論文では、側壁盛替え工法により構築する開削トンネルの躯体設計手法として“逐次的分離ークリープ応力緩和法”を紹介するとともに、実際の開削トンネル工事に適用した事例について記述した。

当工事では、側壁盛替えを行った際の躯体の健全性と長期間経過時における躯体の応力状態の変化を確認することを目的として計測工を実施している。計測の結果、頂版構築までの過程において、躯体応力の設計値と計測値がほぼ一致していることを確認しているが、今後も構造系完成後における増加側圧やクリープによる躯体応力の変化を確認するために、引き続き計測工を継続していく予定である。

今後、開削トンネルをはじめとする各種地下構造物の建設工事において、コスト縮減・工期短縮等を図る手段として側壁盛替え工法の積極的な採用が望まれるが、本論文がその一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 阪神高速道路公団：開削トンネル設計指針，pp. 3-76-3-89, 2005.
- 2) 土木学会：トンネル標準示方書〔開削工法編〕・同解説，pp. 76-79, 1996.
- 3) 佐藤素啓，渡辺実，佐藤昇：変位法によるコンクリート構造物のクリープ・乾燥収縮解析の基礎理論，プレストレストコンクリート，vol.22, No.2, pp. 59-66, 1980.
- 4) 石原重孝：講座 PC斜張橋のクリープ解析の基本（その1），プレストレストコンクリート，vol.27, No.2, pp. 105-108, 1985.
- 5) 福岡正巳：新しい土圧入門－土圧の考え方と実際－，近代図書，pp. 5/2-5/4, 1982.
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編，pp. 30-38, 2002.