

JCMA 報告

平成 26 年度 一般社団法人日本建設機械施工協会会長賞 受賞業績（その 2）



会長賞



山岳トンネル施工の安全性向上に貢献する「ロングブーム吹付け機」の開発

清水建設(株), 古河ロックドリル(株)

概要

1. 技術の概要

山岳トンネルの掘削工事においては、切羽の過度の応力解放の抑制と崩壊リスクの低減は、施工の安全、地山の安定およびトンネルの品質の観点から重要課題である。特に、軟弱地山の掘削時において、掘削直後に応力解放された状態である切羽面に早期にコンクリート吹付けを行い、地山の過度の緩みを抑制し、切羽面を安定化することは非常に有効である。しかしながら、掘削作業直後は切羽付近に大量のずりが堆積しているために、従来は、切羽まで吹付け機を近づけることが困難であり、ずり出し後に吹付け作業を実施することが一般的であった。その結果、ずり出し中に切羽近傍の地山の緩みが進行し、安全性、安定性が低下することがあった。

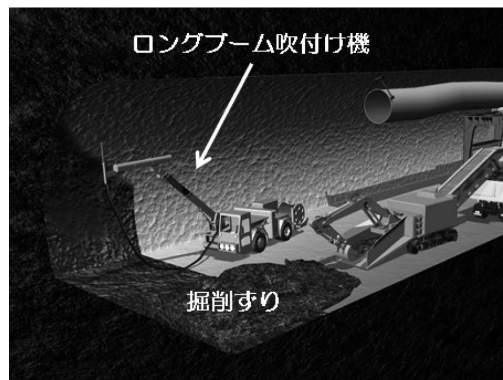
申請者らは、発想を転換し、ずり出し前に吹付け作業を行うことを目的に、従来に比べ大幅に吹付け可能範囲を拡大した「ロングブーム吹付け機」を業界で初めて開発した。

2. 技術の特徴

本技術は、従来に比べて最大 1.4 倍もの吹付け範囲をカバーする伸縮可能なブームを持つ吹付け機である（写真—1）。

この結果、1 次吹付け作業をずり出し前にずりの頭越しに行うことが可能となり、地山の緩みを大幅に抑制するとともに、従来に比べ作業員が切羽から離れて作業できるため肌落ち災害等のリスクを大幅に低減する。

またサイクルタイムの短縮も可能となる。従来は、トンネル断面の中央に吹付け機を設置し、トンネル全周の吹付けを実施していた。ロングブーム吹付け機は、片側の壁面



図—1 吹付けとずりだしの同時施工のイメージ

付近に配置してもブームを伸長して全周を吹付けできる。その結果、横並びで吹付け作業と他の切羽作業を同時に施工可能である（図—1）。

3. 効果

- (1) 地山の開放時間を 1 時間程度（ずりだし所要時間）短縮できるため、地山の過度の緩みを抑制し、切羽面を安定化できる。⇒施工の安全、地山の安定およびトンネルの品質が大幅に向上
- (2) ずり出し後に吹付けを行う場合（従来）の切羽崩壊発生時の復旧費（注入等の地盤改良等の追加補助工法）が不要。⇒施工費が大幅に低減（試算事例により当社比 14%コストダウン）
- (3) 従来より吹付け機を切羽から離して配置することができるので、落石等により作業員や機械が被災する可能性を低減することができる。⇒施工の安全性が向上

業務内容

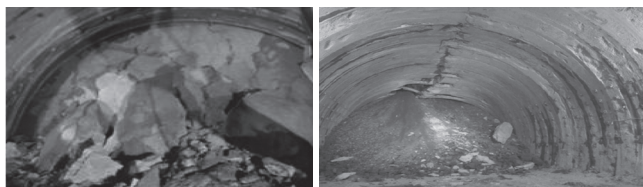
1. 背景

山岳トンネルの掘削工事においては、地山の崩壊は安全性の低下だけでなく、復旧は、工程の遅延やコストの増加の大きな原因となっている（写真—2）。

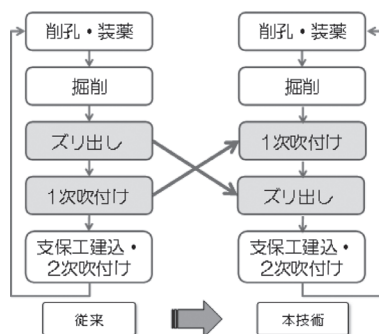
近年、鉄道や道路などの山岳トンネルのプロジェクトは増加しており、高土被りや弱層部が存在する長大の山岳トンネルの建設も計画されている。特に、軟弱地山での施工は安全面だけでなく工程面、コスト面においても課題が大きく、安全で早期にトンネルを施工できる技術は喫緊の課



写真—1 開発したロングブーム吹付け機



写真一2 切羽崩壊の例



図一2 本技術を用いた場合の施工サイクル

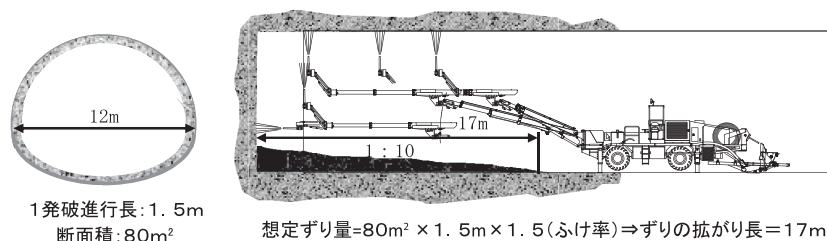
題である。

2. 技術の説明

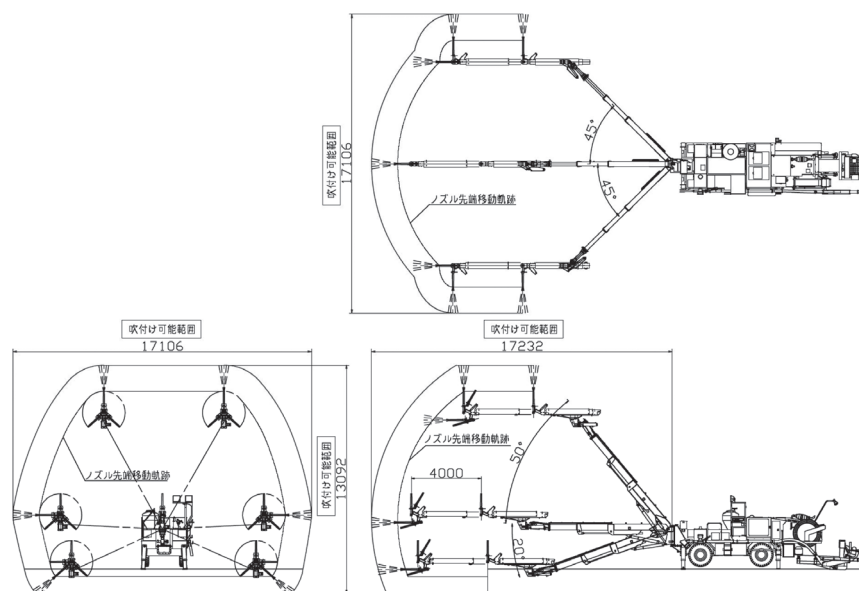
従来は、掘削後、ずり出しを終えてから吹付けを実施していた。申請者は、切羽への吹付けタイミングに関して発想を転換し、1次吹付け作業をずり出し前にずりの頭越しに行うことを可能とする「ロングブーム吹付け機」を開発・実用化した(図一2)。

本技術を用いることにより、地山の過度の緩みを抑制できる。本技術は、山梨県で施工中の宮狩トンネルに導入し、現在、稼働中である。

本技術の概要を図一4、写真一3および表一1に示す。本技術は、従来に比べて大幅に長い、伸縮可能なブームを装備している。必要なブーム長の設定に際しては、想定した掘削ずり量および勾配から、ずりは水平方向で概ね17m堆積する(図一3)とした。その結果より、本吹付



図一3 想定ずり量の設定



図一4 ロングブーム吹付け機の吹付け可能範囲



写真一3 ロングブーム吹付け機と従来機の比較

表—1 吹付け可能範囲の比較

吹付可能範囲 (m)	ロングブーム吹付機	従来の吹付機
奥行	17.2	12.5
幅	17.1	13.3
高さ	13.1	12.0

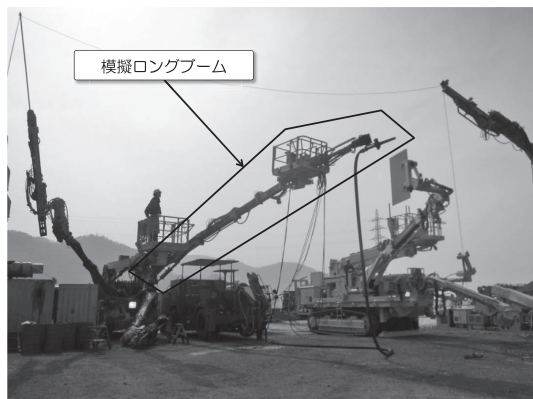
け機の奥行方向（水平）の吹付け可能範囲を最大 17.2 m とした。

開発にあたり事前に想定される課題を設定し、実スケールの要素実験や解析を行い、課題を解決した。

課題（1）吹付けノズルの振動

従来より大幅に長いブームの採用により、先端のノズル部の振動が大きくなり、オペレータの吹付け機の操作が不安定になるとともに、ブームの強度の低下の可能性が懸念された。事前検証を行うため、ロングブームを模擬した実スケールの試験機を製作し（写真—4）、吹付け実験（水使用）を行った（写真—5）。実験時のオペレータは日頃から吹付け機の操作を行っているオペレータであり、実施工のノズルワークを忠実に再現し、課題の抽出を行った。

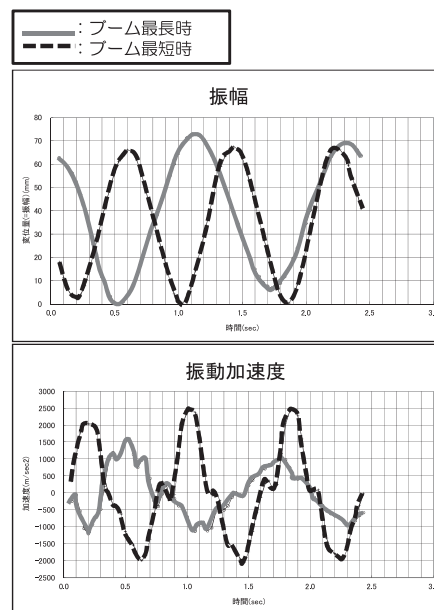
ノズルの振動計測はハイスピードカメラ（最速 10,000 フレーム／秒撮影可能）を用いて数値評価した。振幅については、ブーム最長時と最短時では、ほぼ同じ値であった。振動加速度の最大値については、ブームを最も縮めた場合が



写真—4 実スケールの試験機



写真—5 模擬ロングブームを用いた吹付け試験状況



図—5 ノズルの振動計測結果

最長時に比べて 1.6 ～ 2.5 倍になることが判明した（図—5）。

解析の結果、伸縮によって変化するブームの固有振動数と、ノズルの上下動作による振動数が重なるときに共振現象が発生し、適切なノズルのコントロールが出来なくなることが分かった。本設計では、取得データをもとに、吹付け操作の安定性の向上および強度の確保の観点から、稼働範囲全長において共振現象が起こらないように固有振動数をずらすべくブームの剛性を高めた。

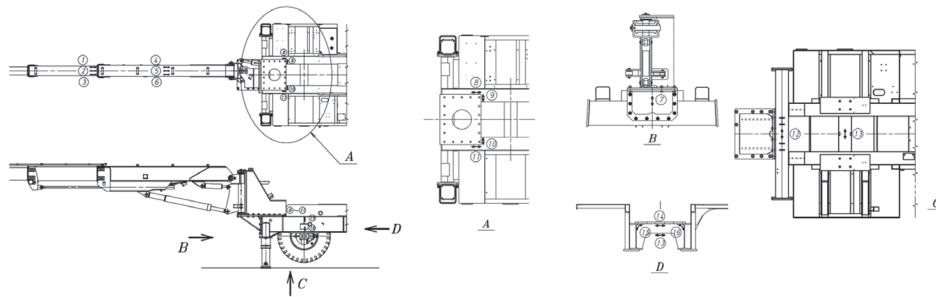
課題（2）ブームの疲労破壊

従来より大幅に長いブームにおいて長期間の使用による疲労破壊が懸念された。したがって、疲労破壊に対する耐久性を確認するために実規模の疲労試験を実施した。試験はブームとその接合部分付近のフレームの 16 箇所にひずみゲージを取付けて各点に発生する応力を測定した（写真—6、図—6）。

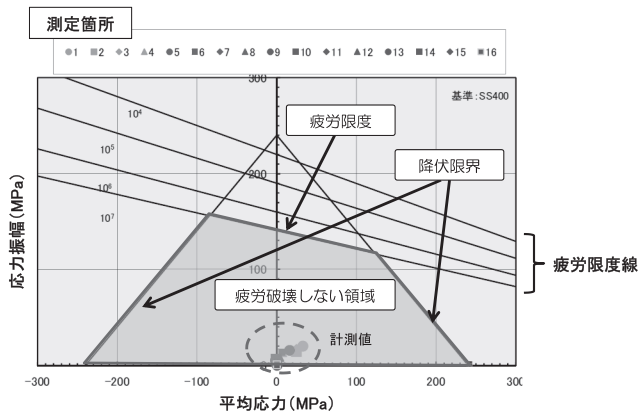
ブームを振動させることによる繰返し荷重を載荷し、測定位置各所の平均応力と応力振幅を算出し、疲労破壊に対する評価を行った。その結果、試験機から取得した計測データより、すべての測定位置において疲労破壊しない領域に十分に収まった（図—7）。これにより実施工における厳しい使用条件下でも十分な耐久性を有することが確認できた。



写真—6 ひずみゲージ取付状況



図—6 試験時の応力測定位置



図—7 ロングブームの疲労試験結果

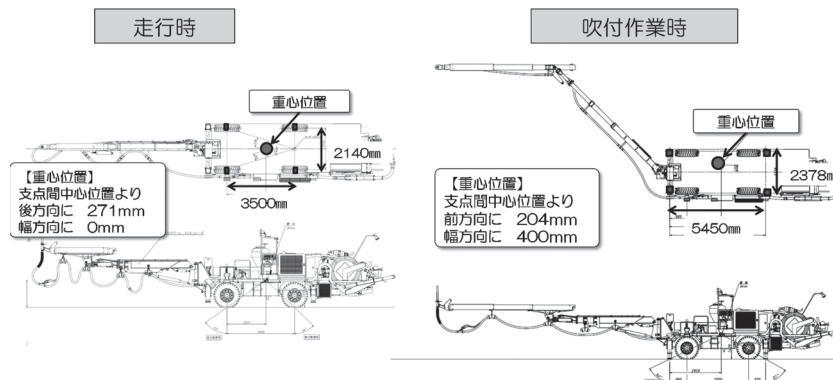
課題 (3) 機体の安定性

ロングブーム吹付け機は従来機に比べ大きくブームが前に張り出す姿勢となるため、安定性の低下が懸念された。設計において、走行時を含めた様々な作業姿勢において、

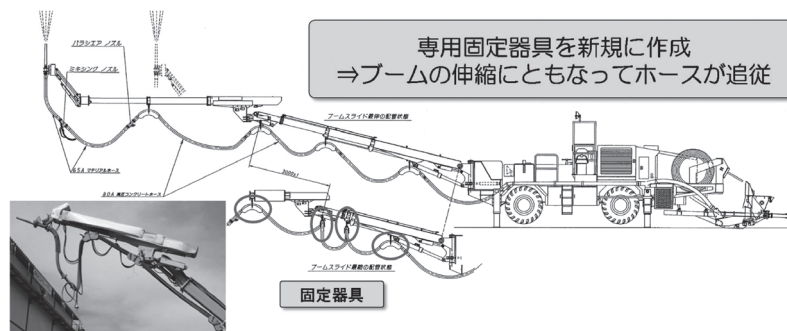
剛性を増加したブームを持つ機体の安定性を検討した。最も不安定な作業姿勢における重心位置を部材重量等から算出した結果、重心位置はアウトリガを転倒支点とした前後左右の支点間内に十分収まっており（図—8）、ロングブーム仕様においても機体が十分な安定度を有していることを確認した。

課題 (4) コンクリートホースの閉塞

従来の吹付け機は、圧送ホースを地面に這わせる方式を用いていたが、この方式ではホースの長尺化により施工中のホース捻れが発生しやすくなるため、ホース内でのコンクリートの閉塞が懸念された。対策として、地面を這わせていたホースを、新規製作した固定器具を用いてブームに固定することにより、ブームの伸縮にホースが滑らかに追従するようにした（図—9）。



図—8 ロングブーム吹付け機の重心位置



図—9 圧送ホースの閉塞対策

3. 技術的效果

中部横断自動車道の宮狩トンネル（発注者：中日本高速道路株）において「ロングブーム吹付け機」を導入した。地質は、泥岩と玄武岩質火砕岩が主体である。トンネル南坑口は第三紀の強風化～弱風化泥岩から構成され、比較的軟質であり地すべり指定地となっている。本吹付け機の実使用を通して、以下の効果が確認された。

(1) 安全性向上

①坑口部の切羽安定

採用した宮狩トンネル現場の坑口部の地質は、非常に脆弱であった。当初は、従来のサイクルタイム通りに、掘削後にずり出しを行い、吹付け・支保工設置を行っていたが、切羽の崩壊が連続して発生した（写真―7）。そこで、「ロングブーム吹付け機」を導入してサイクルタイムを変更し、掘削直後のずり出し前に、ずりの頭越しに吹付け作業を実施した（写真―8）。その結果、地山の安定が図れ、切羽の崩壊の発生を抑止することができた。



写真―7 崩壊した坑口部の切羽



写真―8 本技術による坑口部の吹付け

②トンネル部の切羽安定

トンネル線上には、複数の小断層が出現、および予測されている。弱層部の地山で切羽の崩壊が予想されたため、掘削直後に堆積ずりの後方に吹付け機を設置し、ずり出し前に吹付け作業を実施した（写真―9）。

その結果、切羽の崩壊が抑止でき、地山の安定を図れて



写真―9 坑内でのずり越しの吹付け

いる。

ブームを伸縮するだけで、軟弱地山や一般地山に容易に対応できるため、実用性が高いことが確認されているとともに、作業員からの評価は非常に高い。

③作業員の安全性向上

従来に比較して、吹付け機を切羽から離して配置することができるので、作業中の切羽に対する視角が大きい。したがって、オペレータは従来より切羽から離れて（従来8m⇒今回15m）作業でき、落石等により作業員や機械が被災する可能性が低減する。特に崩壊性の地山においては、この効果は非常に大きい。

(2) 施工性向上

①吹付け作業の施工性

ブーム伸長時においては通常の配合の吹付けコンクリートによる圧送ホースの閉塞は発生していない。また、狭隘なトンネル坑内での移動時においては、ブームを収縮できるため、従来の吹付け機と同様に運転でき施工性は確保されている。

②サイクルタイムの短縮

宮狩トンネルでは、2次吹付けと同時に、次工程である支保工に付着した吹付けコンクリートの清掃作業を実施し（写真―10）1サイクルにつき約10分のサイクルタイム短縮を定常的に実現している。

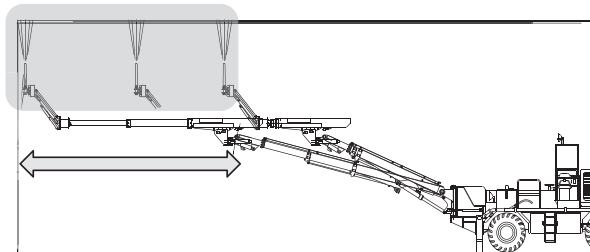
また長孔発破や、大断面トンネルなどにおいて所要吹付



写真―10 吹付けと支保工清掃の同時作業

け範囲が広がった場合、従来機では吹付け機の配置移動が必要となるが、ロングブーム吹付け機では移動せず広範囲の吹付けが可能となり（図—10）、サイクルタイム短縮を図ることが出来る。

長尺発破時の所要吹付け範囲



スライド長さ 最大4m（従来2m）
⇒スライド動作のみで奥行方向へのノズル操作が可能

図—10 長尺発破時の吹付け動作例

4. 施工実績：1 件

工事名：中部横断自動車道 宮狩トンネル工事

（中部横断自動車道の1区間）

発注者：中日本高速道路㈱東京支社

工 期：自）平成24年3月7日 至）平成28年4月14日

- a) トンネル延長 2,893 m
- b) 掘削断面積 標準部 80 m²（非常駐車帯部 100 m²）
- c) 掘削方式 機械掘削・爆破掘削

地質は、泥岩と玄武岩質火砕岩が主体。トンネル南坑口は第三紀の強風化～弱風化泥岩から構成され、比較的軟質であり地すべり指定地となっている。

5. 波及効果

吹付け可能範囲の拡大により、トンネル内の吹付けだけでなく、明かり工事における吹付け作業にも適用が可能であり、波及効果は大きい。事例として、発進基地ヤード仮設法面吹付け作業において、従来の吹付け機では届かなかった高所（写真—11）や、障害物の裏などの狭所（写



写真—11 ロングブーム機による高所吹付け事例



写真—12 掘削土砂越しの狭所吹付け事例

真—12) に対して、ロングブーム吹付け機が適用され、従来の人力での吹付け作業が軽減された。

この結果、高所作業時の墜落や飛来落下、狭所での挟まれ等の重大災害リスクの低減に貢献することが期待できる。

藤吉 卓也

清水建設㈱ 土木技術本部 機械技術部

長谷部 健司

古河ロックドリル㈱ 営業本部特機部

お断り

このJCMA 報告は、会長賞を受賞した原文とは一部異なる表現をしてあります。



3D モデルを用いた非開削拡幅セグメントの設計施工システムの開発

(株)安藤・間, 首都高速道路(株), (株)横河技術情報, カヤバシステムマシナリー(株)

概要

本システムは、並走する2本のシールドトンネルをアーチ型の鋼製セグメントで接合する工事において、既存施工トンネルの出来形に基いて3Dモデルを作成し、アーチ部のセグメントの基本形状からアーチ部の弧長とピースのローリング角の調整を自動的にフィット処理して、製作するアーチセグメントの形状を決定するシステムと、拡幅部上半の狭隘な空間でアーチセグメントを組立てるための装置の開発である。

業務内容

1. 背景

開発の経緯

本システムは首都高速道路(株)発注「中央環状品川線大橋連絡路工事」の大橋ジャンクションにおいて、中央環状品川線の本線トンネルと分合流部ランプトンネル（連絡路）の2本のトンネルを連絡するために考え出された工法である。

本線分合流部は、施工に伴う交通渋滞や沿道環境への影響を少なくするために、非開削工法により品川線本線シールドトンネルと大橋連絡路シールドトンネルを地中で掘って鋼製のアーチ型セグメントで接合する覆工構造が採用された（図-1、2）

2本のシールドトンネルは拡幅連絡工事に先立って別々に施工されるため、セグメント距離、ローリング、ピッチングなど3次元の施工誤差が生じ現地の出来形に合わせたアーチセグメントの設計が必要となった。

アーチセグメントの1ピースの最大重量は約3.8tと重く、狭隘な空間でセグメントを組立てる必要があり専用の組立装置が必要となった（図-2）。

2. 詳細説明

本システムの開発は「3Dモデルを用いたアーチセグメ



図-1 大橋連絡路トンネル分合流部概念図

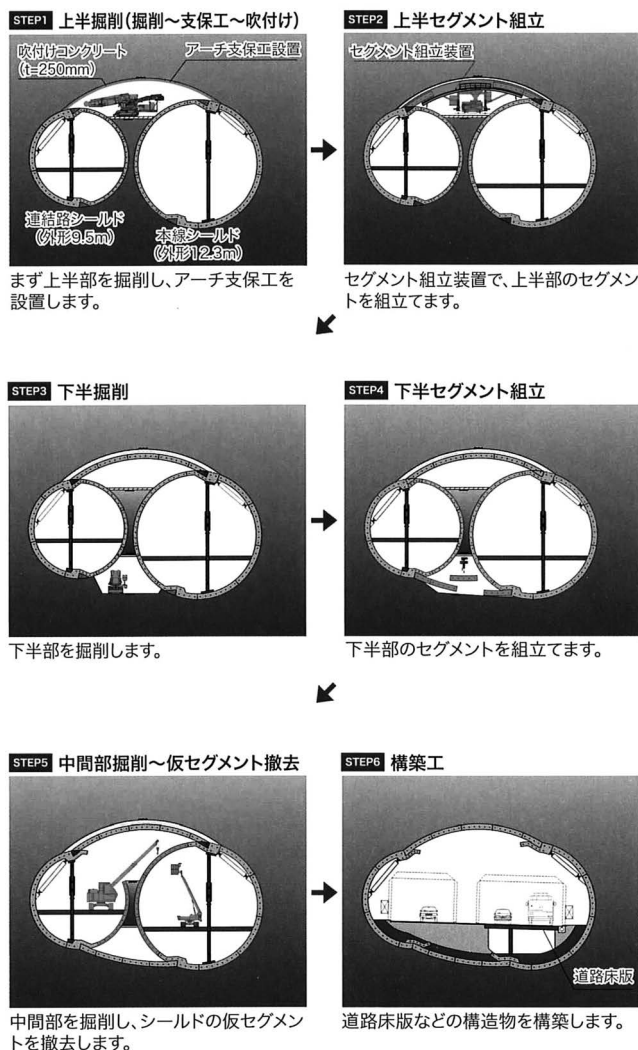


図-2 非開削切上げ工法の施工フロー

ントの設計システムの開発（図-3～5）」と「アーチセグメント組立装置の開発」からなる。

(1) 3Dモデルを用いたアーチセグメントの設計システムの開発

手順として、既設の2本のトンネル（中央環状品川線本線と連絡路）の坑内からの出来形測量①（図-6）を行う。そのデータを基に3Dモデルを作成する（図-7）。後に行う移動やフィット処理、距離の算定に使用する情報を節点に入力する。本線シールドを基準としてアーチ形状（弧長、面向き）を仮決定する。

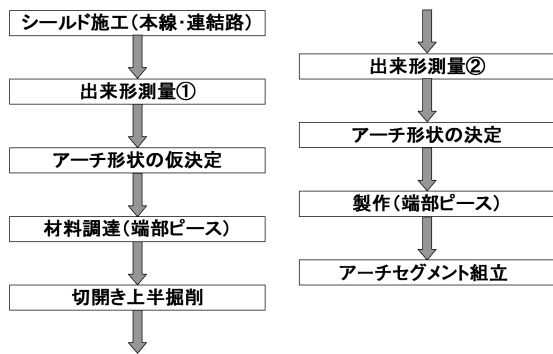


図-3 アーチセグメント設計システムフロー

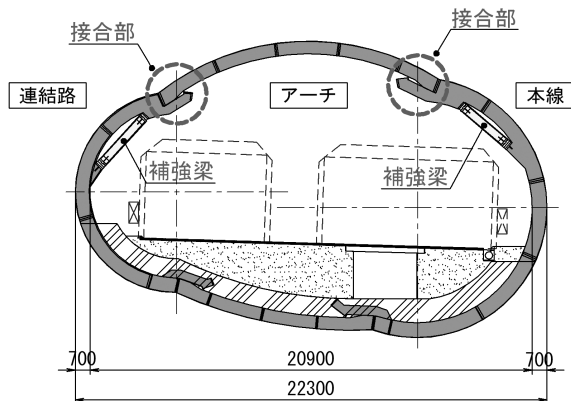
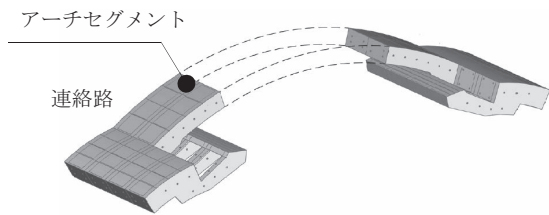


図-4 覆工構造図

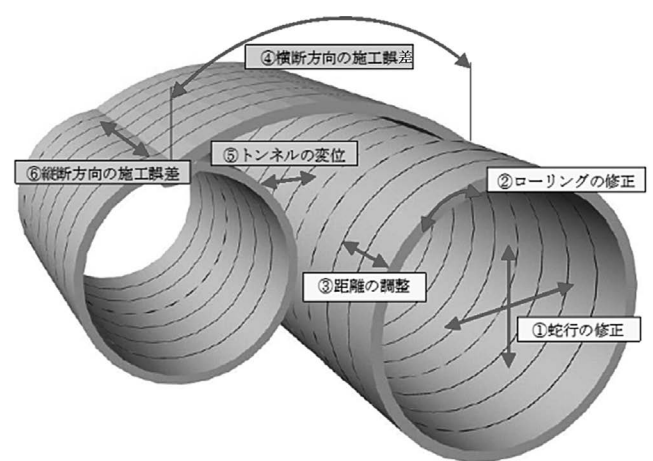


図-5 セグメント測定概念図

1. 切り開き前

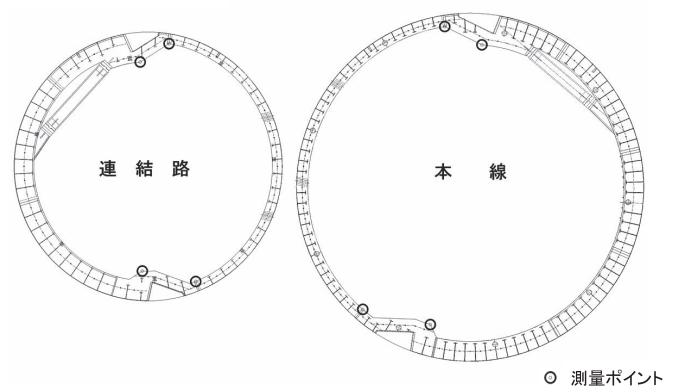


図-6 既設トンネル出来形測量①測点

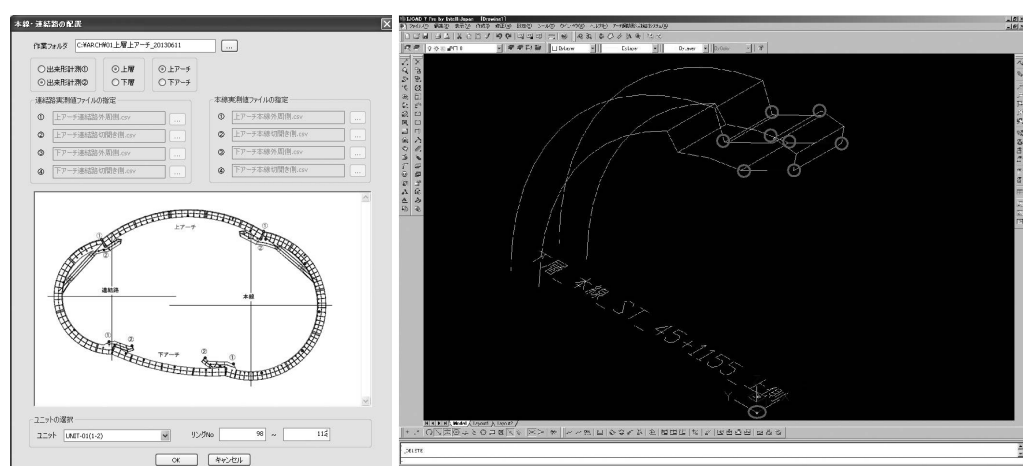


図-7 測量データによる 3D モデル作成画面

上半のアーチセグメントの端部ピース以外の中間ピース (図-8) は、仮アーチ形状で製作を開始 (上半掘削中に)、端部ピースの材料も手配する。

切り開き上半掘削後、2本の既設トンネル外側の接続部

の出来形測量②を行う (図-9)。そのデータを元にシミュレーション、フィット処理 (図-10) を自動的に行いアーチ形状の決定と端部ピースの形状を設計し原寸用図面を出力する (図-11, 12)。

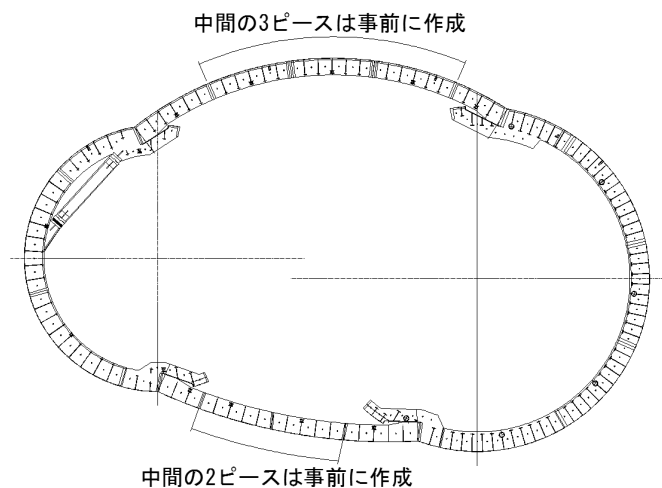


図-8 アーチセグメントの分割ピース

2. 切開き後

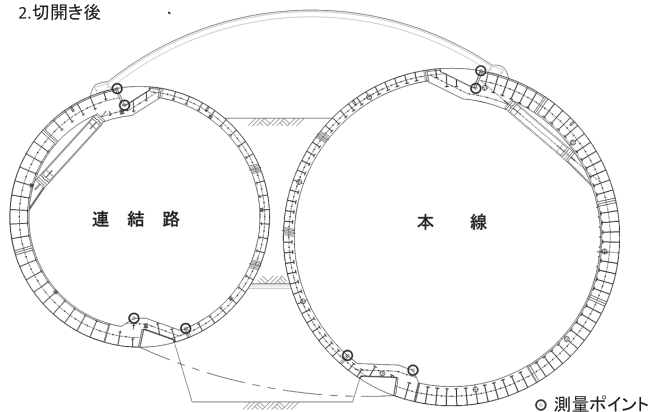


図-9 既設トンネル出来形測量②測点

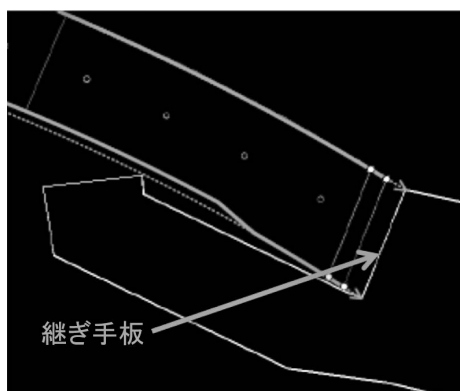


図-10 フィット処理

*フィット処理とはアーチセグメントの位置を本線または連結路の継手板の面向き合わせと、隣接するセグメントに接触しないか確認し、最適な位置に収まる様に形状を決定する機能(図-10)。

(2) アーチセグメント組立装置の開発

セグメント組立装置は、トンネル上半部の狭隘な空間でトンネル切掘り部の形状に合わせたアーチセグメントを組立てる装置である(写真-1)。

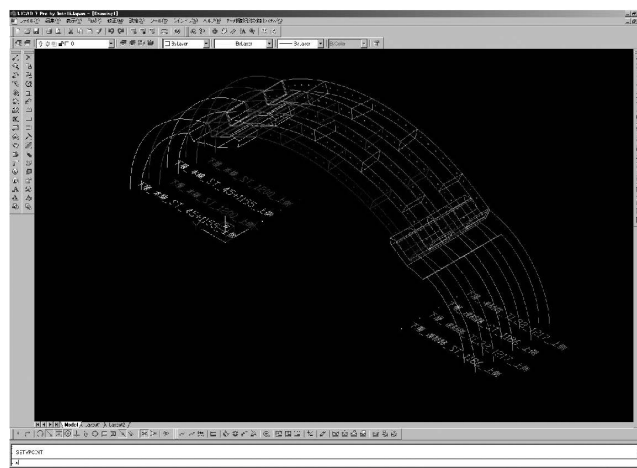


図-11 アーチセグメント配置画面

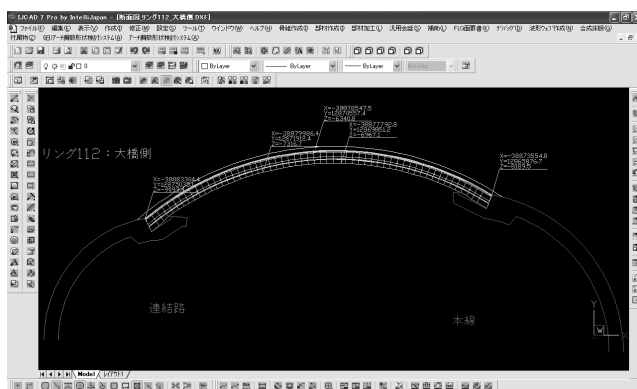


図-12 フィット処理後の原寸用データ出力画面

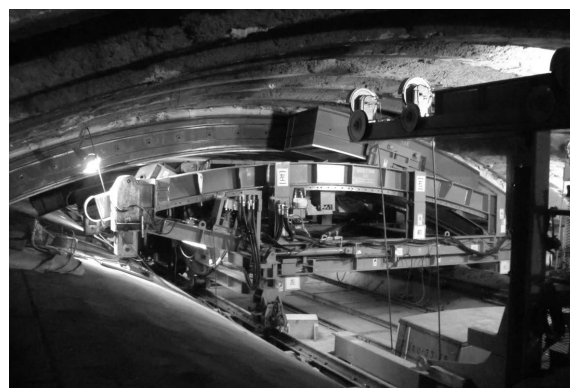


写真-1 アーチセグメント組立装置

アーチセグメント組立装置はトラバサ、吊上げ架台、エレクター装置、セグメント保持架台から構成される(図-13)。

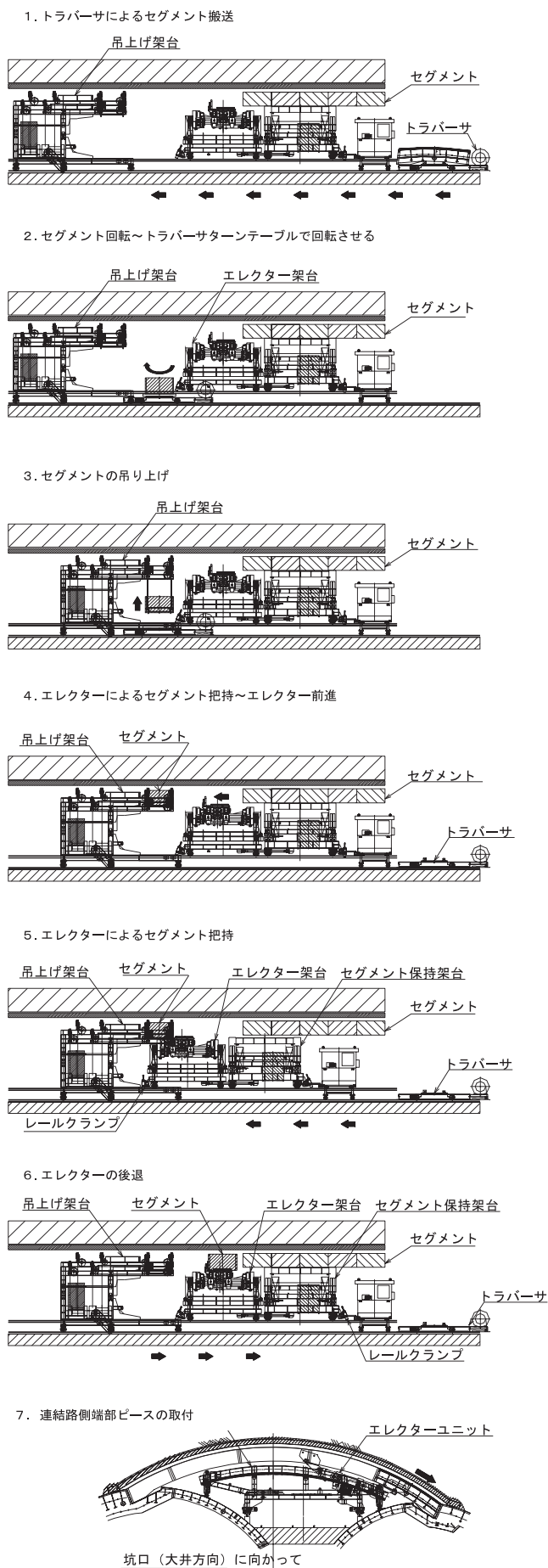
①トラバサ

アーチセグメントを載せて吊り上げ架台まで運搬し回転させるターnteーブルを搭載した台車(写真-2)。

②吊上げ架台

トラバサで運搬されたセグメントを吊り上げエレクターの把持装置に渡す装置(図-14)。

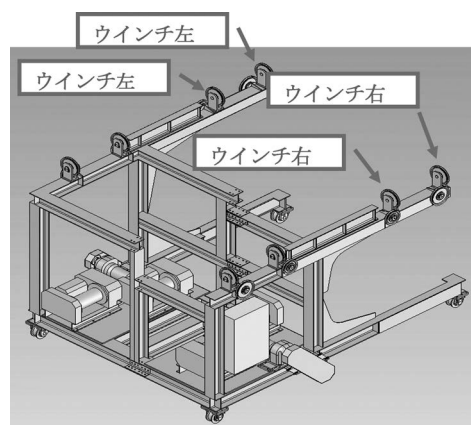
安全装置として、過巻き防止装置と吊荷状態での走行禁止装置を取り付けてある。



図—13 組立フロー図



写真—2 トラバーサ



図—14 吊上げ架台

③エレクター装置

トンネル形状に合わせて製作したガイドレールを有し、ガイドレール上を把持装置が移動し、所定の位置にセグメントを押し当てセグメントを組立てる装置（図—15）安全装置として、

- ・作動油が設定流量を超えた場合自動的に回路を遮断する緊急遮断弁を設置している。
- ・はさまれ防止として、旋回モーターと回転灯と警報を連動させている。
- ・ボルト固定を行う際、切掘り坑内と既設シールドトンネルに分かれて作業を行うため、無線の通信装置（スピーカーとマイク）を設置してある。

④形状保持装置

組立て後のアーチセグメントを油圧シリンダーで押し上げ、アーチセグメントの形状を維持し次のセグメントの組立精度を向上させる装置（写真—3）。

3. 効果

(1) 技術的效果

本システムにより設計されたアーチセグメントはすべて設置された（写真—4）。

1リング毎の測量と概ね10リング毎に幅を縮小した調整リングを設けて計画的に隙間を作り、施工誤差を吸収し、

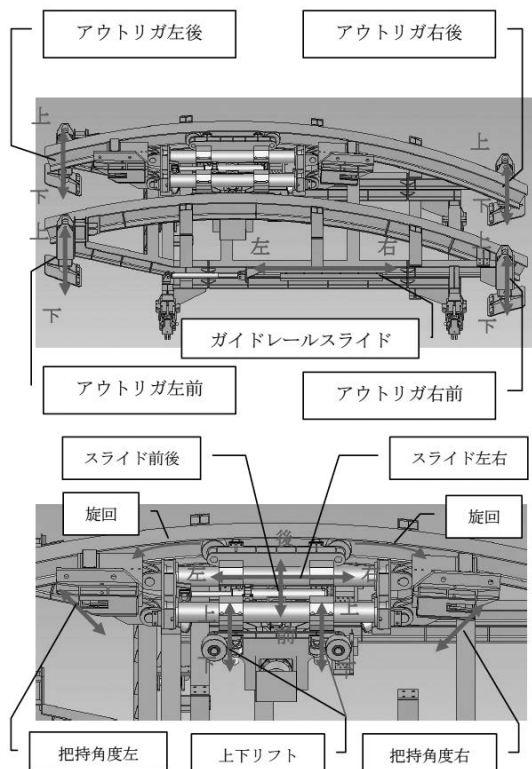


図-15 エレクター作動図



写真-3 形状保持装置

調整リング毎に組み立て位置を測量し、3Dのシミュレーション結果と対比、その後の組立に反映したことにより許容範囲内で施工を行うことが出来た。



写真-4 上部アーチセグメント設置完了

(2) 経済的効果

本システムにより、シールドトンネル内の計測結果から上半拡幅部の掘削前にアーチセグメントの中央ピースの製作を開始することにより、拡幅部掘削後アーチ形状が決定してから端部2ピースのみを製作するため、掘削後の製作期間が短縮できた。

接続部の測量後データ整理含め48日で出荷可能となった。

セグメントの組立は平均3.2リング／方の施工であった。

4. 施工実績

アーチセグメントの設計システム：1件

「中央環状品川線大橋連結路工事」

セグメント組立装置：2台

「中央環状品川線大橋連結路工事」上層部，下層部

佐々木 順一

(株)安藤・間 関東土木支店 大橋出張所

鈴木 和夫

首都高速道路(株) 東京建設局 大橋工事事務所

中川 真介

(株)横河技術情報

システム部 第2グループ

鈴木 康雅

カヤバシステムマシナリー(株)

営業第3部 建機製品担当

お断り

このJCMA報告は、会長賞を受賞した原文とは一部異なる表現をしてあります。