

トンネルの更新技術に関する 共同研究報告書

— LCR-Speed 工法 設計・施工マニュアル(案) —

令和4年6月

国立研究開発法人土木研究所
鉄建建設株式会社

トンネルの更新技術に関する 共同研究報告書

— LCR-Speed 工法¹⁾ 設計・施工マニュアル(案) —

国立研究開発法人土木研究所

道路技術研究グループ トンネルチーム

上席研究員	日下 敦
主任研究員	巽 義知
専門研究員	石村 利明
前上席研究員	砂金 伸治
前主任研究員	小出 孝明
前専門研究員	長谷川義彦

鉄建建設株式会社

土木本部

副本部長 宇田 誠

土木本部 トンネル技術部

部長 須志田藤雄

課長 舟橋 孝仁

畑生 浩司

リニューアル推進部 担当部長

加古 昌之

札幌支店 ニッ森トンネル作業所 所長

杉田 崇

大阪支店 和泉トンネル作業所 所長

植村 義幸

鉄建建設株式会社 研究開発センター

材料グループ リーダー

主幹研究員 岩城 圭介

主幹研究員 西脇 敬一

研究員 福岡瑛莉奈

1) Lining Concrete Renewal - Speed Method

要 旨

供用後、長期間経過したトンネルでは、材質劣化や漏水などによる覆工コンクリートへの変状の発生や断面の狭隘化等が課題となっている。このようなトンネルでは供用しながら覆工の打替え等の更新工事が実施されつつあり、今後においても同様の対応が必要となるケースの増加が見込まれる。

一方、現行の更新工事においては、施工中における利用者の安全の確保、合理的な施工法が未確立、施工費が高い、工期が長いなど多くの課題を抱えている。このため、国立研究開発法人土木研究所および鉄建建設株式会社により平成 29 年 6 月から令和 4 年 3 月までの間に実施した共同研究により、トンネルの合理的な更新に資する技術の研究・開発・改良および技術の根幹となる支保構造に求められる力学的特性の研究を行ってきた。

本共同研究報告書は、共同研究成果のうち、新たに開発したトンネル更新工法について「LCR-Speed 工法 設計・施工マニュアル (案)」としてまとめたものである。

キーワード：トンネル更新，設計・施工マニュアル

目 次

1. 工法概要	1
2. 工法の特徴	5
3. 適用条件	6
3. 1 適用条件	6
3. 2 適用にあたっての留意事項	7
4. トンネル更新工法の開発	9
4. 1 概要	9
4. 2 開発項目	11
4. 3 切削機の開発	13
4. 4 架台付き養生バルーンの開発	17
4. 5 打直し覆工コンクリートの開発	21
4. 5. 1 打直し覆工コンクリートに要求される性能と配合例	21
4. 5. 2 コンクリートの基本配合	23
4. 5. 3 夏期施工対策	29
4. 5. 4 冬期施工対策	34
4. 5. 5 ひび割れ抵抗性	37
4. 5. 6 模擬型枠によるコンクリートの打込み・充填性	39
4. 5. 7 実施工レベルにおけるコンクリートの打込み・充填性	44
4. 5. 8 初期強度発現性	56
4. 5. 9 まとめ	58
4. 6 分離型セントルの開発	59
5. 施工	64
5. 1 施工フロー	64
5. 2 施工手順	65
5. 3 施工サイクル	67
5. 4 使用機械	69
5. 5 仮設備	69
5. 6 交通規制	70
6. 適用にあたっての留意点	71
参考資料	
1. サイクルタイム試算例	75
1. 1 基本条件	75

1. 2	サイクルタイム試算条件	76
1. 3	サイクルタイム	77
2.	トンネル更新工事試算例	86
3.	特許出願	92
4.	検討資料	93
【資料①-1】	トンネル切削機検討 仕様書	94
【資料①-2】	自動掘削システム搭載の自由断面切削機 仕様書	107
【資料②-1】	架台付き養生バルーン 構造計算書	117
【資料②-2】	架台付き養生バルーン 落石に対する耐力検討書	136
【資料③-1】	分離型セントル 構造計算書	146
【資料③-2】	分離型セントル スキンプレート（オール付き）耐力検討書	165

1. 工法概要

LCR-Speed 工法 (Lining Concrete Renewal-Speed Method) は、国立研究開発法人土木研究所および鉄建建設株式会社により平成 29 年 6 月から令和 4 年 3 月までの間に実施した共同研究により開発した、専用の覆工切削機と切削箇所架台付き養生バルーン (防水シート施工部含む) および分離型セントルを組み合わせた工法で、老朽化した矢板工法で施工されたトンネルの覆工コンクリートを 20cm 程度切削・養生し、切削箇所に高強度コンクリートを打ち直すことで、トンネル再生を安全かつ急速な施工を可能にする。

対象トンネルは、延長 1,000m までの矢板工法 (巻厚 60cm 以上) で施工された道路トンネルとする。また、更新工事期間中の一般車の通行は、夜間通行止めとする。

図-1.1.1 に本工法の施工概要図を示す。

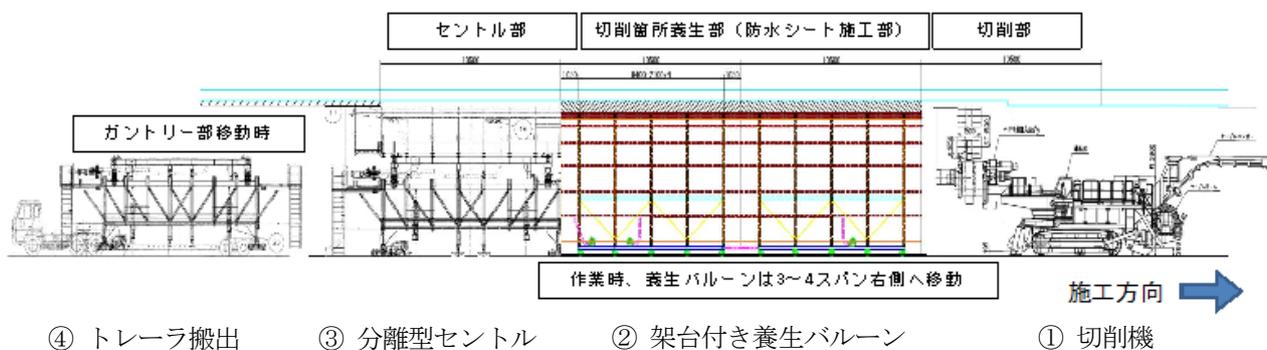


図-1.1.1 トンネル更新工法 施工概要図 (縦断図)

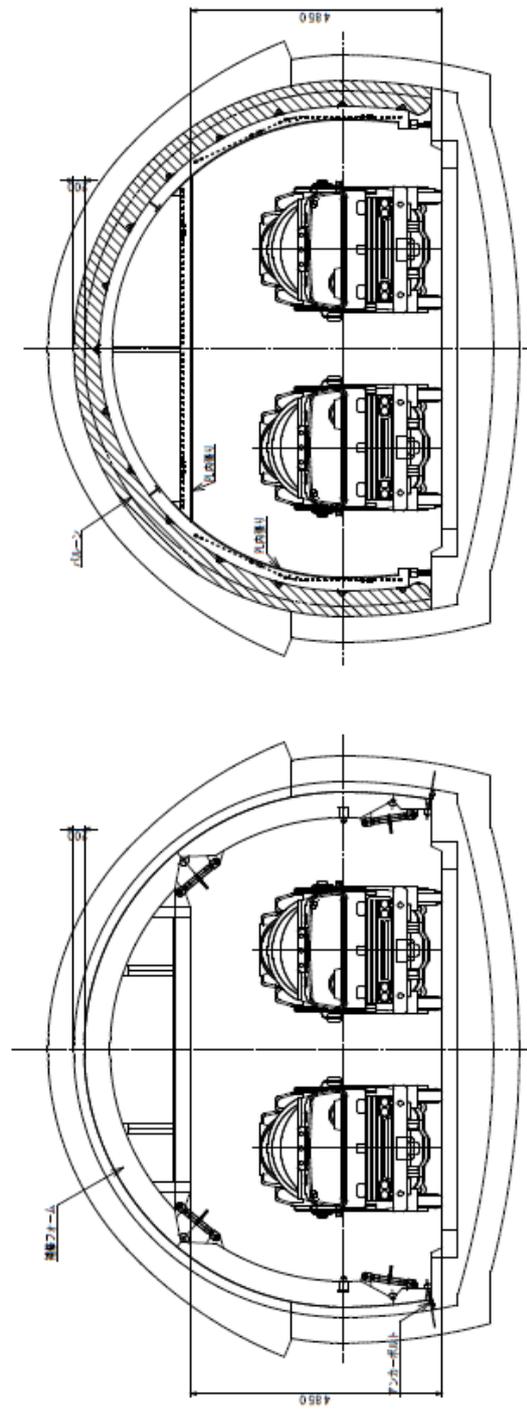
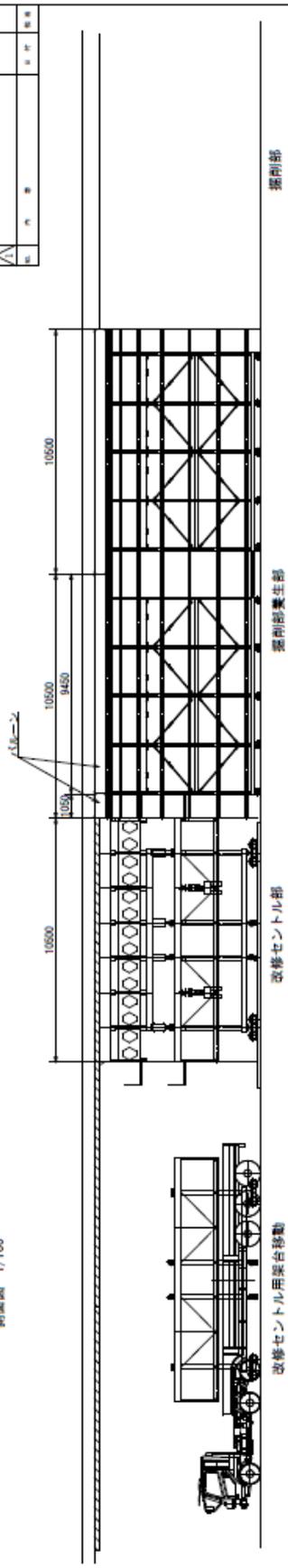
本工法は、自由断面掘削機をベースとした専用のコンクリート切削機 (上図①) を使用し、カッターを覆工コンクリート面に直角に押し当てて切削を行う。切削は、覆工コンクリートの全面またはアーチ区間を対象とし、切削したコンクリートガラは、バックホウ (0.45m³級) によりダンプトラック (10t) に積み込み坑外へ搬出する。覆工コンクリート切削終了区間は、架台付き養生バルーン (上図②) により養生を行い、夜間閉鎖開放後の一般車の防護を行う。

切削箇所に防水シートを設置後、分離型セントル (上図③) をセットし、コンクリートポンプ車を使用して打直し覆工コンクリート (高強度コンクリート) を打設する。コンクリート打設し、所定強度 (自重に耐える強度) 発現後、分離型セントルの型枠部 (以下、スキンプレート部と言う) から支保工部 (以下、ガントリー部と言う) を取り外し、トレーラにより坑外へ搬出 (上図④) して、一般車の通行開放を行う。

コンクリート切削機 (図-1.1.2)、架台付き養生バルーン (図-1.1.3) および分離型セントル (図-1.1.4) の開発概要図を次頁以降に示す。

コンクリート切削箇所バルーン養生 開発概要図

側面図 1/100



図名	図番	備考
トンネル掘削センター部断面図		
掘削部		
縮尺	1/60, 1/60	
図番	20170924	
図名	20170924-2	

図-1.1.3 コンクリート切削箇所バルーン養生 開発概要図

分離型セントル 開発概要図

側面図 1/100

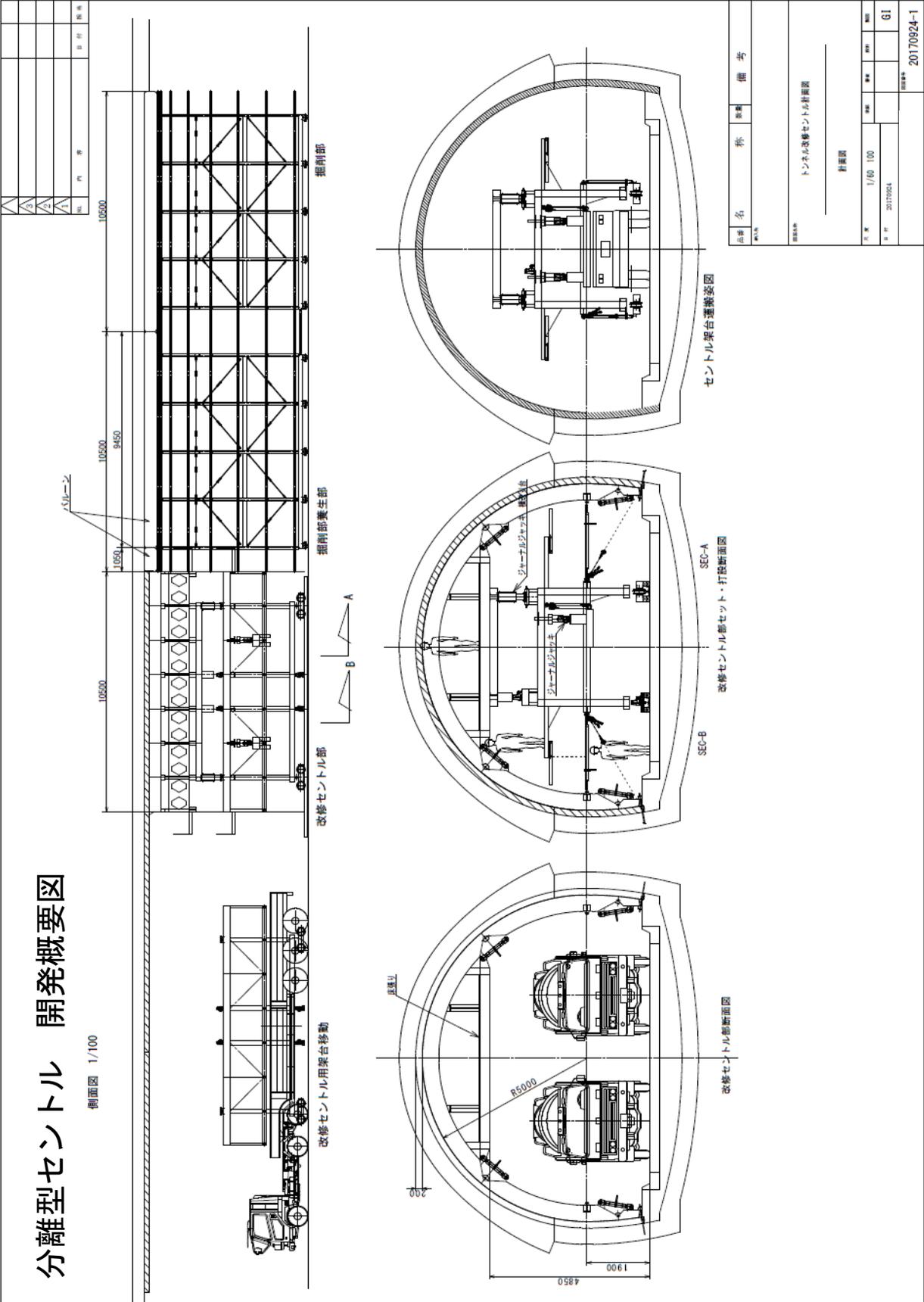


図-1.1.4 分離型セントル 開発概要図

2. 工法の特徴

本工法の特徴を表-2.1.1 に示す。

表-2.1.1 工法の特徴

項目	特徴
対象トンネル	<ul style="list-style-type: none"> ・ 比較的延長が短い（延長が概ね 1,000m）矢板工法（巻厚 60cm 以上）で施工された道路トンネル
施工システム	<ul style="list-style-type: none"> ・ 劣化した無筋の覆工コンクリートを専用機で切削して覆工コンクリートの更新を図る一連のシステムである
交通規制	<ul style="list-style-type: none"> ・ 夜間通行止め（緊急車両は通行可能）、昼間は全面開放
施工方法	<ul style="list-style-type: none"> ・ 覆工コンクリート 1 スパン（10.5m）毎、専用の切削機を使用して厚さ 20cm 程度切削する（切削範囲は覆工全面またはアーチ部） ・ ずり出しは、バックホウとダンプトラックで行う ・ 切削した区間に防水シート設置後、分離型セントルで高強度コンクリートを打設し、所定強度発現後、ガントリー部を分離し搬出する
切削機械	<ul style="list-style-type: none"> ・ 汎用機械である自由断面掘削機（300kW 級）をベースとした専用の覆工切削機（切削能力：10m³/h 程度）を開発する ・ カッターヘッドが覆工面に直交して切削するため、余掘りが少なく高精度な切削が可能である
打直し覆工コンクリート	<ul style="list-style-type: none"> ・ 設計基準強度 36N/mm² 以上の高強度コンクリートを使用する ・ 打設後約 3 時間で 2N/mm² 以上（自重に耐えうる強度）の強度発現を有する ・ 薄肉（巻厚 t=20cm）対応のコンクリートである
施工中の安全対策	<ul style="list-style-type: none"> ・ 覆工切削部に架台付き養生バルーンを設置し、コンクリート片等の落下から一般通行車両の安全を確保する※1 ・ 覆工コンクリート打設後、分離型セントルのスキンプレート部を存置し、コンクリートが硬化し自立するまでの間、一般通行車両の安全を確保する※2
コスト縮減	<ul style="list-style-type: none"> ・ 機械、設備が転用可能なため、従来工法※3 に比較してコスト縮減が可能である ・ 試算結果では、開発費を含めた経済比較で従来工法と同程度である※4
工期短縮	<ul style="list-style-type: none"> ・ 従来工法※3（夜間片側通行）と比較して、高速施工が可能である ・ 試算結果では、工期は従来工法に比べ 1/4 に短縮できる※4
安全性の確保	<ul style="list-style-type: none"> ・ 覆工切削箇所は架台付き養生バルーンを設置して養生するため安全性が高い
埋設物の移設	<ul style="list-style-type: none"> ・ 工事施工前に、既設トンネルの付属設備等を撤去切回す必要がある
廃棄物の処理	<ul style="list-style-type: none"> ・ 切削したコンクリートガラは、産業廃棄物として処理する必要がある

※1 参考資料 4. 【②-2】 落石に対する耐力検討書 ※2 参考資料 4. 【③-2】 スキンプレート（オール付き）耐力検討書

※3 従来工法（内巻工：高強度薄肉補強工） ※4 参考資料 2. トンネル更新工事試算例

3. 適用条件

適用の対象となる既設トンネルの条件や現場条件を以下に示す。

3. 1 適用条件

(1) 既設トンネルの種類・規模

本工法は、劣化した覆工コンクリートを専用機で 20cm 程度切削し、高強度のコンクリートを打ち直して覆工コンクリートを再生する工法である。切削後の一時的な構造の安定にある程度の既設覆工の厚さが必要となるため、対象とするトンネルは、矢板工法（巻厚 60cm 以上）で施工された道路トンネルとする。

また、本工法は、自由断面掘削機（300kW 級）をベースとした専用の覆工切削機を使用するため、既設トンネルの規模は、大型の切削機が入る内空断面が必要である。

既設トンネルの大きさとしては、図-3.1.1 に示すように、幅 7~11m 程度の断面が適用可能である。

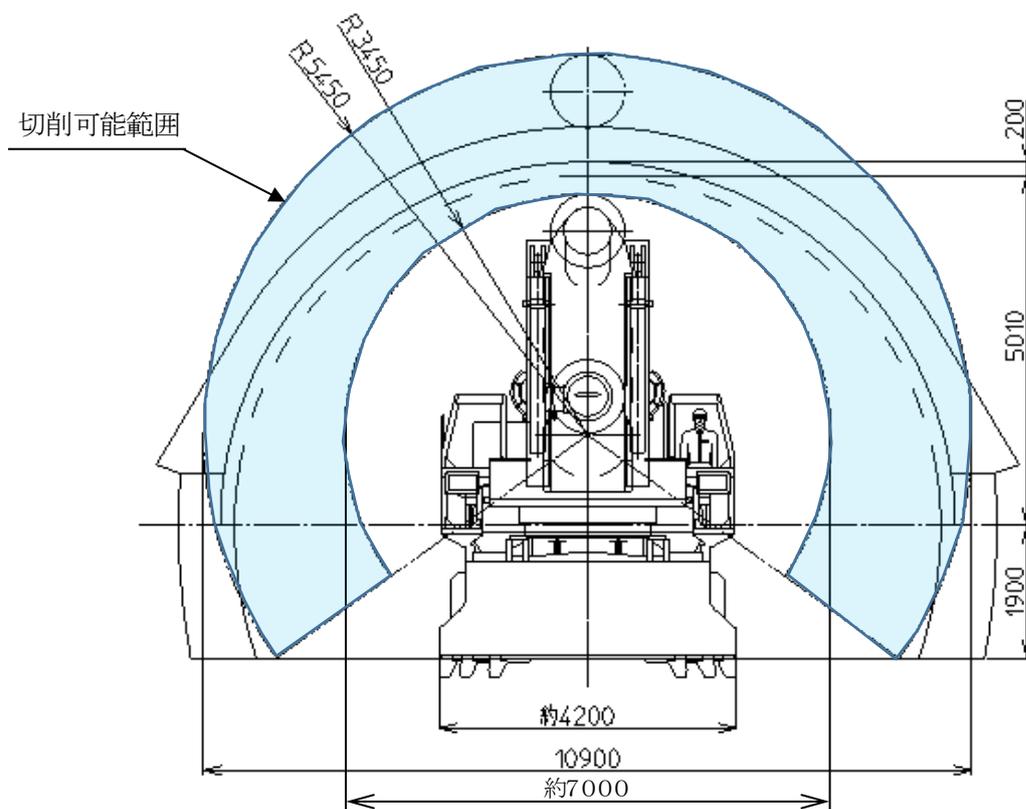


図-3.1.1 検討トンネル断面形状

(2) トンネル延長

本工法は、大型切削機のトンネル内移動に時間を要することから、比較的延長の短いトンネルに適した工法である。延長 1,000m を超す長大トンネルの場合は、別途移動方法を検討する必要がある。更新区間が短いトンネルの場合は、専用の機械設備を使用するためコストアップとなるが、施工は可能である。また、トンネル線形に対しては、切削において制限はなく、打直し覆工コンクリートにおいても、1回の打設の長さを調節することにより、曲率が小さいトンネルでも対応可能である。

(3) 更新対象区間

本工法は、トンネル全線のうち覆工コンクリートが劣化し、打ち直しが必要な箇所（スパン毎）を更新対象とする。その他の劣化箇所については、別途補修・補強工事として対応する。

3. 2 適用にあたっての留意事項

(1) 事前補強

①事前ロックボルト

- ・ 本工法では、既設覆工コンクリートを 20cm 程度切削した後、残った覆工を支保部材として利用する。覆工コンクリートに閉合クラックがある場合や、薄い部分がある場合、覆工がはく落する恐れがあり、そのため、はく落防止対策としてロックボルトを事前に打設する。
- ・ ロックボルトは、FRPロックボルトを使用し、覆工切削時において容易に切断できるようにする。
- ・ 矢板工法で施工されたトンネルでは、覆工コンクリートの背面の矢板や鋼アーチ支保工等が穿孔の支障となる場合があり、それらの位置や間隔について竣工図等により確認しておく必要がある。

②裏込め注入

- ・ 本工法では、既設覆工を一部切削した後、残った覆工を支保部材として利用するため、既設覆工背面に空洞がある場合には、トンネル支保構造の長期的な安定性に影響を及ぼす可能性がある。このため、事前に既設覆工背面の空洞充填を行うものとする。

(2) 打直し覆工コンクリート（高強度コンクリート）および分離型セントルに関する事項

本工法の適用にあたって、高強度コンクリートおよび分離型セントルを採用することから、下記の事項に関する検討が必要である。

①高強度コンクリート

- ・ コンクリート打設後、分離型セントルのガントリー部を早期に撤去するため、打設後3時間程度で $2\text{N}/\text{mm}^2$ 以上（自重に耐えうる強度）の強度発現を有するコンクリートを採用する必要がある。
- ・ 覆工厚が 20cm と薄くコンクリートの打設や締固めに厳しい条件となることから、コンクリートの欠陥が生じないように流動性の高いコンクリートを採用する必要がある。
- ・ トンネル内のため、火災時の爆裂防止性能を有するコンクリートとする必要がある。
- ・ 覆工コンクリートは夜間作業となることから、生コンプラントの選定にあたっては、生コンの供給日や時間等を事前に確認する必要がある。

②分離型セントル設備

- ・ 分離型セントルの型枠形状は既設トンネルの標準断面より決定するが、既設トンネルが変状、変形している可能性があるため、事前に断面形状を測定把握しておく必要がある。
- ・ 流動性の高いコンクリートを採用することから、分離型セントルは、フレッシュコンクリートの側圧を割り増す等、コンクリート打ち込み時の荷重に対して十分な強度と安全性を考慮する必要がある。

- ・ 分離型セントルは、繰り返して使用できるように移動性がよく、組立て、取外しが容易で堅固な構造とする必要がある。
- ・ 坑内に存置するスキンプレート部は、一般車両が安全に通行できる構造とする必要がある。

4. トンネル更新工法の開発

4. 1 概要

従来のトンネル更新工法では経済性や施工時の制約への対応等に課題があるため、従来工法に比べコスト削減および工期短縮が図られ、車線規制期間が極めて短くできる施工方法の開発を行った。今回開発を行った工法は、既設覆工の一部を切削し打ち直すことでNATM覆工と同程度の耐力を有することができるトンネル更新工法である。

(1) トンネル断面規模・覆工厚

対象とするトンネルは、矢板工法（巻厚 60cm 以上）で施工された道路トンネルとする。今回検討するトンネルの断面規模は、2 車線規模を想定し上半 $R=5,010\text{mm}$ 、路面から SL までの高さ $H=1,900\text{mm}$ とした。検討するトンネル断面の形状を図-4.1.1 に示す。

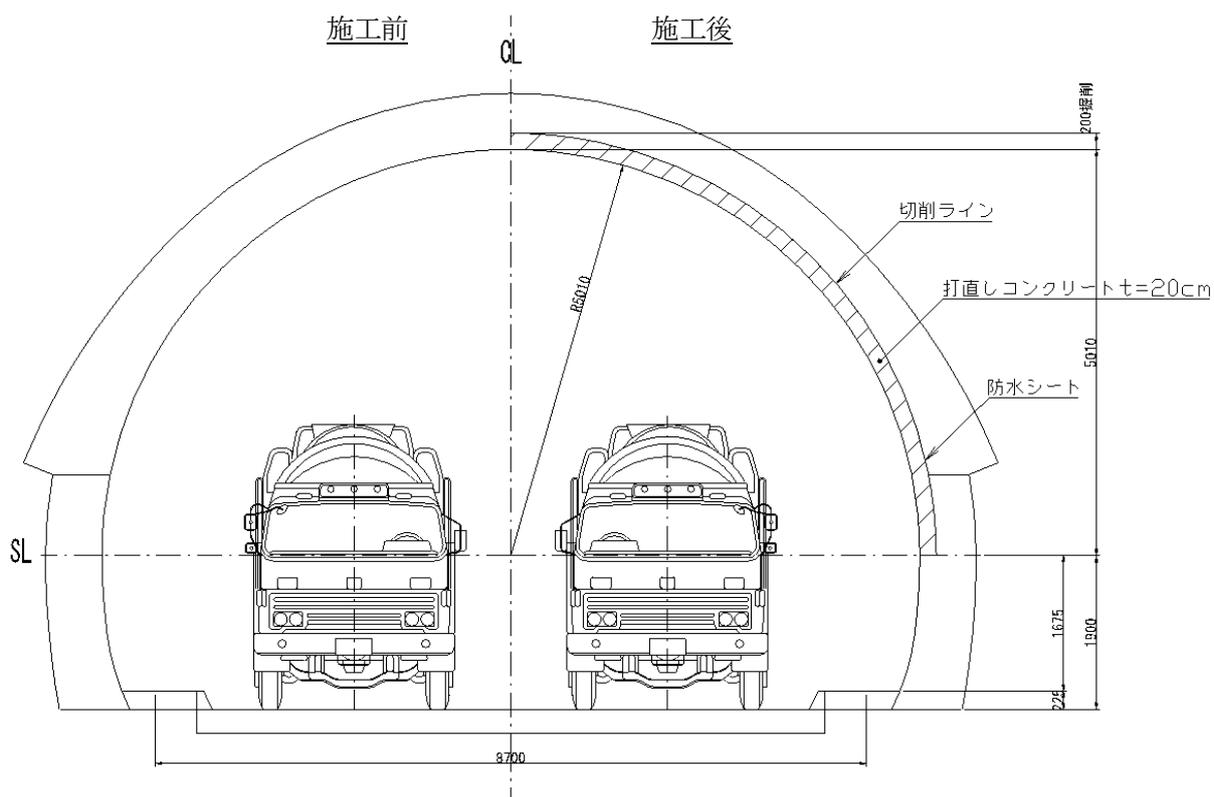


図-4.1.1 検討トンネル断面形状

トンネル更新工法の開発にあたり、トンネルの適用条件ならびに開発項目を表-4.1.1に示す。

表-4.1.1 トンネル更新工法の開発

項目	対象	詳細	特徴
対象トンネル	山岳トンネル	概ね延長 1,000m まで	・ 長大トンネルになると重機・車両の移動に時間が掛かる
	矢板工法	巻厚 60cm 程度を想定	・ NATMでは、20cm 切削すると 10cm しか残らず自立が難しい
	道路トンネル	2 車線道路	・ 県道等の通常のトンネル断面を想定（トンネル R = 5,010mm）
	他工法との比較	補修・補強工事優先	・ 補修・補強工事でトンネルが維持できないと判断された場合に採用
施工時間	夜間施工	600 分/60 分=10 時間の施工	・ 8 時間施工を目指すが、余裕時間の 2 時間を考慮した通常トンネル工事の 10 時間/方を採用
	昼間開放	24 時間-10 時間=14 時間の開放	・ 6 時~20 時まで開放、20 時~6 時までの 10 時間を通行止め。土・日・祝日は、終日開放
開発項目	切削機	水路トンネル用切削機をベースに開発	・ 既製品のブームヘッダーRH-10J をベースに使うことで開発費用を削減
			・ t=20cm 切削で、10m ³ /h を目指す（既設覆工コンクリート強度は 30N/mm ² に設定する）
			・ ブームヘッダーのカッター面を覆工面に直角に向けて平滑に切削（切削は自動制御を目標）
			・ 施工前に坑外ヤードから自走にて搬入し、施工後自走にて搬出（トンネル延長は 1,000m までを対象）
			・ 切削動力の電気はトラックに載せた発電機で対応し、走行は油圧駆動クローラ式
	架台付き養生バルーン	切削箇所全面を覆い、崩落することも考慮に入れて開発	・ 掘削面の欠片等ももれなく防護するバルーンタイプの養生台車
			・ 掘削面からの荷重（コンクリート等の崩落）に抵抗するために、鋼製移動式架台を設ける
	打直し覆工コンクリート	20cm の空隙を充填する流動性があり、打設後直ぐに脱枠できる硬化促進型高強度コンクリートの開発	・ 20cm の隙間に打設出来る流動性
			・ 養生時間 3 時間程度で脱枠強度 2N/mm ² （自重に耐えうる強度）の強度発現（急硬材を添加）
			・ 環境温度、練り上がり温度を変えて検討（夏期、冬期を想定）
分離型セントル	夜間閉鎖・昼間開放の条件を満たすセントルの開発	・ 夜間閉鎖時に覆工コンクリート打設完了後、昼間開放時にセントル内 2 車線確保	
		・ 支保部材をスキンプレート部から分離・移動することが出来る分離型セントルを開発	
		・ 支保部材移動時はトレーラを使用	

4. 2 開発項目

更新するトンネルは、矢板工法で施工され築 50 年以上経過し、覆工コンクリートの打ち直しが必要な老朽化した道路トンネルを想定する。設定したトンネルは、覆工の設計巻厚が 60cm 以上有り、このうち 20cm 程度切削し、硬化促進型の高強度コンクリートを打ち直すことにより、覆工コンクリートを再生する。

ここでは、道路トンネルの覆工コンクリートを効率よく切削できる機械を開発し、これを主とした覆工の更新技術を一連のシステム（トンネル更新工法）として確立することにより、従来のトンネル更新工事に比べコストの縮減、工期短縮が図られ、車線規制期間が極めて短くできるようにする。

今回、研究開発を行う検討項目を以下に示す。なお、本工法は、大型の覆工切削機を使用するため、夜間通行止めを実施して施工を行う。

（1）覆工コンクリートを急速に切削できる機械の検討

覆工コンクリートを切削する専用機の仕様とコストを検討する。施工コストを低減する 1 つの手法として、トンネル掘削に用いられている汎用機械を使用することを前提に、施工方法および制御手法について検討を行う。具体的には、適切な機械の選定と掘削性能を検討し、施工コストを算定する。

（2）切削箇所の覆工コンクリートの養生対策

夜間通行止め後、一般車の通行開放時の安全対策として、切削箇所の覆工コンクリートを養生する方法を開発し、昼間の一般車通行を確保する。

（3）打直し覆工コンクリートの開発

巻厚 20cm のセントル型枠において、コンクリートの打設ならびに充填が可能であり、打設後、早期に型枠支保工を撤去し、一般交通への影響を最小限とすることを目的に、急硬材を混入した硬化促進型高強度コンクリートの開発を行う。また、火災時の爆裂防止対策として、繊維を混入した配合で検討を行う。

（4）覆工セントル箇所のコンクリート養生対策

夜間通行止め後、一般車の通行開放時の安全対策として、分離型セントルのスキンプレート部を存置し、一般車がガントリー一部を移動できる覆工セントルを開発して、昼間の一般車通行を確保する。

以上、今回開発する項目と開発目標を以下に示す。

① 切削機の開発

- ・ 正確で均一な覆工厚 $t=20\text{cm}$ の切削、切削能力 $10\text{m}^3/\text{h}$ (5 時間/1 スパン)
- ・ 自動切削システム付き

② 架台付き養生バルーンの開発

- ・ 切削箇所を一般車が安全に走行できる構造
- ・ 落石に耐えられる構造

③ 打直し覆工コンクリート（硬化促進型高強度コンクリート）の開発

- ・ 高強度、薄肉コンクリート、打設後 3 時間程度で $2\text{N}/\text{mm}^2$ 程度（自重に耐えうる強度）の強度発現
- ・ 夏期、冬期対応別
- ・ ひび割れ抵抗性
- ・ コンクリートの打込み・充填性
- ・ 爆裂防止対策

④ 分離型セントルの開発

- ・ スキンプレート部とガントリー部を分離できる構造
- ・ ガントリー部の搬出方法

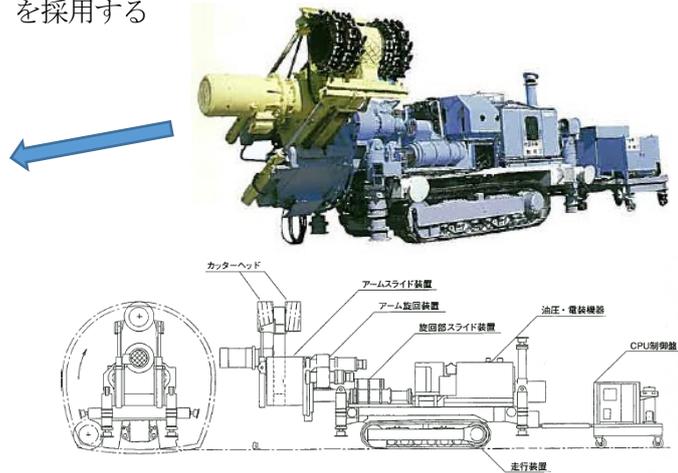
4. 3 切削機の開発

(1) 開発イメージ

切削機の開発イメージを以下に示す。

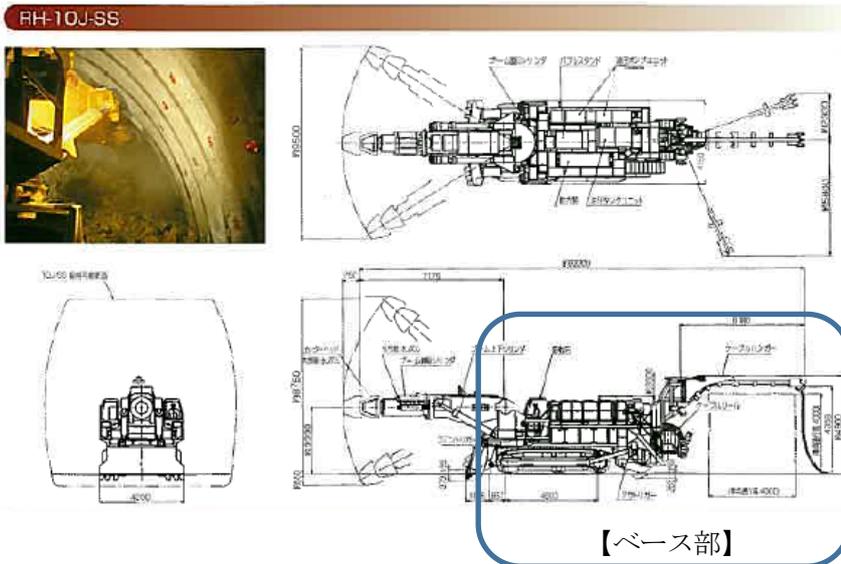
① 鉄建建設開発 水路用覆工コンクリート切削機¹⁾の適用

- ・ 特徴である、『壁面にカッターヘッドを垂直に付けて、平滑な仕上がり面を作成する技術』を採用
- ・ この機械に採用した『自動制御方式』を採用する



② カヤバシステムマシナリーのRH-10Jをベースマシンに改良

- ・ 総重量 120t、掘削高約 9m、中硬岩・硬岩を切削できる機械であり、走行速度も MAX14.4m/分と速い
- ・ この標準機でも覆工コンクリートの切削は可能であるが、カッターヘッドがはつり面に直角にならないため切削面がクサビ状になり、薄肉の掘削には適さない



③ 道路用切削機の開発

鉄建建設開発の水路用覆工コンクリート切削機のアームと先端の構造 + RH-10J のマシンをベース
 = 道路トンネル用覆工コンクリート切削機を開発

(2) 切削機の仕様

切削機は、2 車線道路トンネルの覆工コンクリートを急速かつ高精度に切削でき、施工コストを削減できることを要求性能とする。

切削機の仕様を以下に示す。

- ・ 切削部は、覆工コンクリート切削に実績のある鉄建建設開発の水路用覆工コンクリート切削機をベースとし、覆工断面形状に沿って旋回して切削する構造とする
 - ・ 切削能力 10m³/h (覆工コンクリート強度 30N/mm²、覆工厚 t=20cm 切削時) を満足するため、160kW のカッターブームを装着する
 - ・ ベース車両は、坑内に設置後、機械の移動なしで側壁～天端まで切削できる寸法として、300kW 級の自由断面掘削機 (RH-10J) を使用する
 - ・ 切削の高精度化のため、自動切削システムを搭載する
 - ・ 切削機は、施工前に坑外仮設ヤードから自走で搬入し、施工後自走にて搬出する
 - ・ 切削動力の電源は、トラック搭載の発電機 (400kVA) で対応し、走行は油圧駆動のモータを使用する
- 今回開発した切削機のイメージ図を図-4.3.1 に示す。

また、切削機の仕様・全体図を図-4.3.2、自動切削システム概要を図-4.3.3 に示す。

参考資料 4. に「【資料①-1】 トンネル切削機検討仕様書」、「【資料①-2】 自動掘削システム搭載の自由断面切削機仕様書」を資料として添付する。

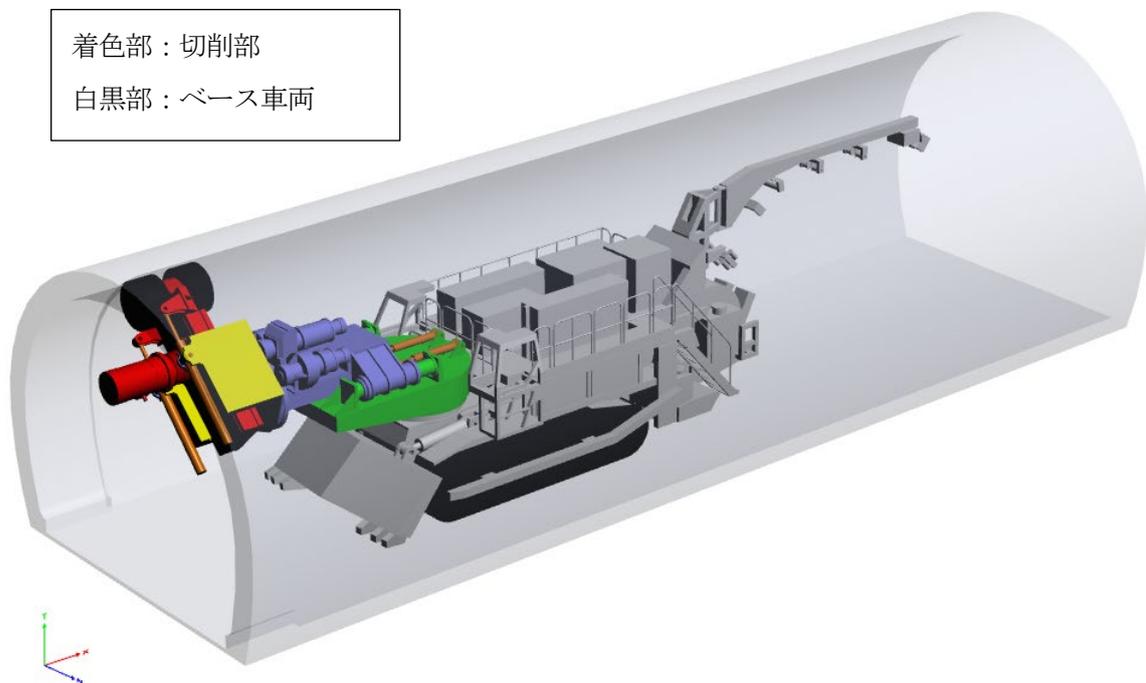


図-4.3.1 切削機のイメージ図

自動切削システム搭載トンネル切削機

切削自動化システム

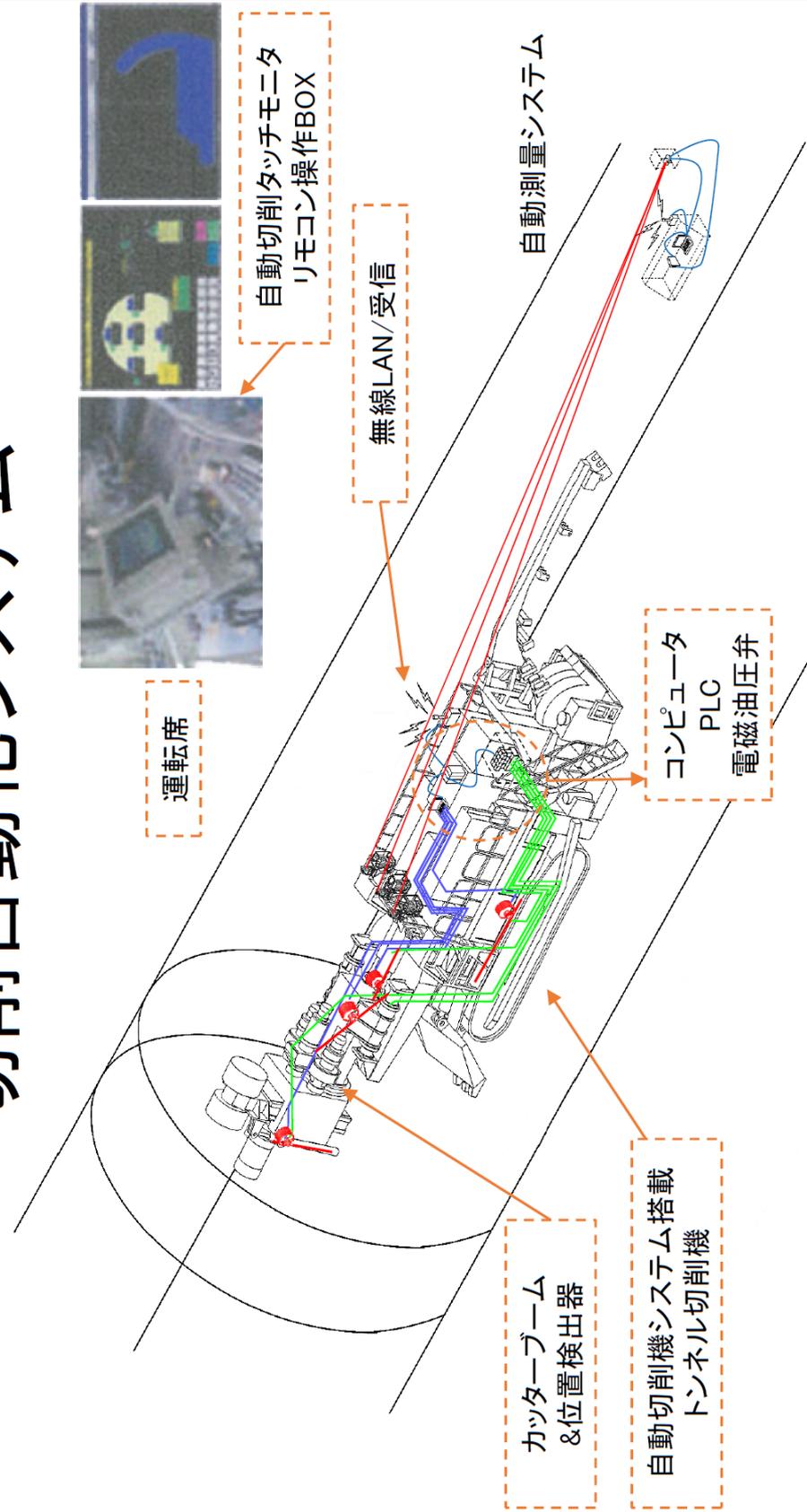


図-4.3.3 自動切削システム概要

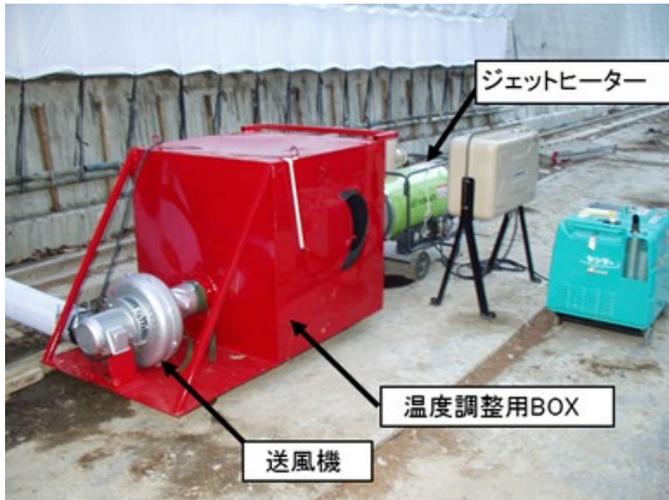
4. 4 架台付き養生バルーンの開発

(1) 開発イメージ

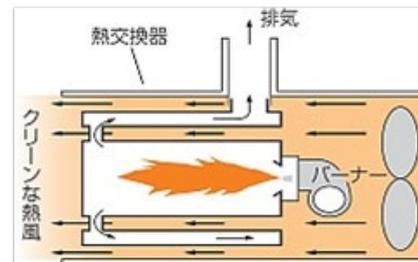
鉄建建設が現場打ちのアーチカルバートボックスの外側養生用に開発した『明り巻き覆工コンクリート養生バルーン』(特許取得済み、図-4.4.1～図-4.4.2)の特徴を生かして、道路用はつり箇所の『架台付き養生バルーン』を開発する。

最初に特許取得済の『明り巻き覆工コンクリート養生バルーン』の使用手順を示す。

- ① 養生バルーンの端部に送風機を取り付け、温風を養生バルーンに供給する
- ② 温風により浮力が生じた養生バルーンを覆工コンクリートに押し付ける(以前開発したバルーンは、この浮力をゴムバンドで固定した。今回は、この浮力を利用して、支保を軽減する)
- ③ 温風の温度を維持するために、温風をバルーン端部から入れて、バルーン内を巡回させた後に末端部から冷えた空気を排気しバルーン内の温度を保つ
- ④ ジェットヒーターには、安全な熱風式間接形を使用する



↓ 温風



熱風式間接形の原理

図-4.4.1 明り巻き覆工コンクリート養生バルーン説明図(その1)

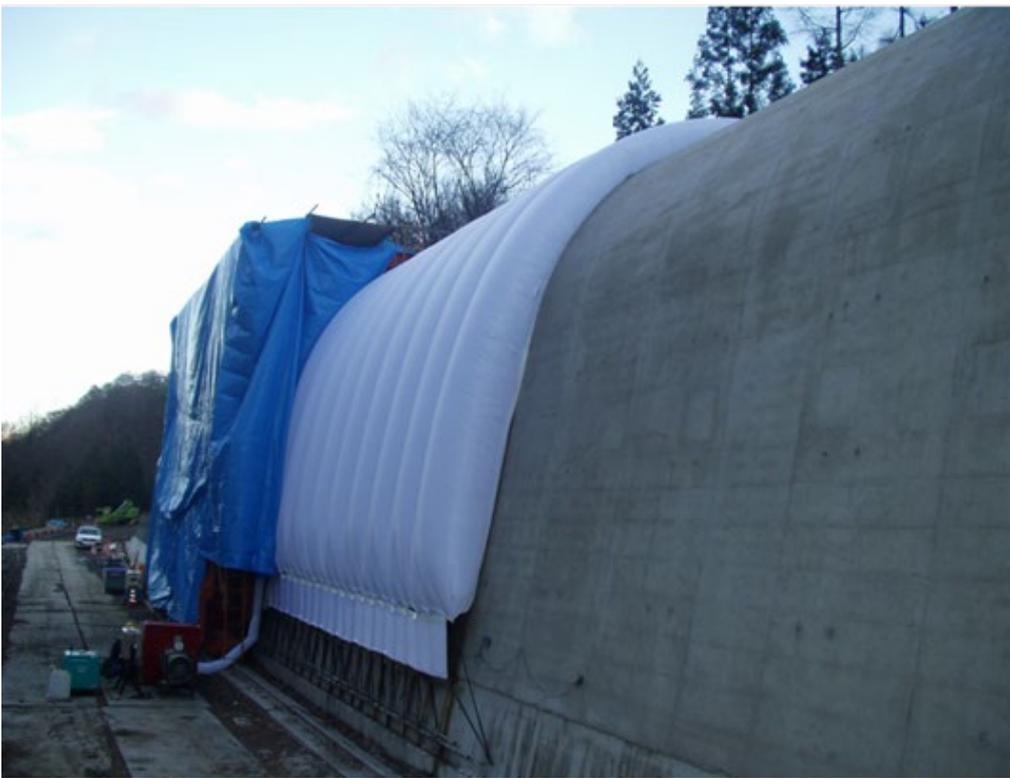


図-4.4.2 明り巻き覆工コンクリート養生バルーン説明図（その2）

(2) 架台付き養生バルーンの仕様

養生バルーンは、覆工コンクリート切削箇所を一般車が安全に走行でき、また、落石に対しても耐久性のある構造を有することを要求性能とする。

架台付き養生バルーンの仕様を以下に示す。

- ・ 切削した覆工面は、空気送風方式のバルーンにより密着させて養生を行う方式とする
- ・ 架台の形状は、支保部材を極力少なくしたアーチ型とし、アーチ状にバルーンを配置する
- ・ 架台は、トンネル内を容易に移動ができるレール式とする
- ・ 架台は、46cm 角の落石に耐えられる H200 のアーチ部材を使用する

今回開発した架台付き養生バルーンの断面図を図-4.4.3、全体図を図-4.4.4 に示す。なお、架台付き養生バルーンは、適用するトンネル断面に応じて製作する。

参考資料4. に「【資料②-1】 架台付き養生バルーン 構造計算書」、「【資料②-2】 架台付き養生バルーン 落石に対する耐力検討書」を資料として添付する。

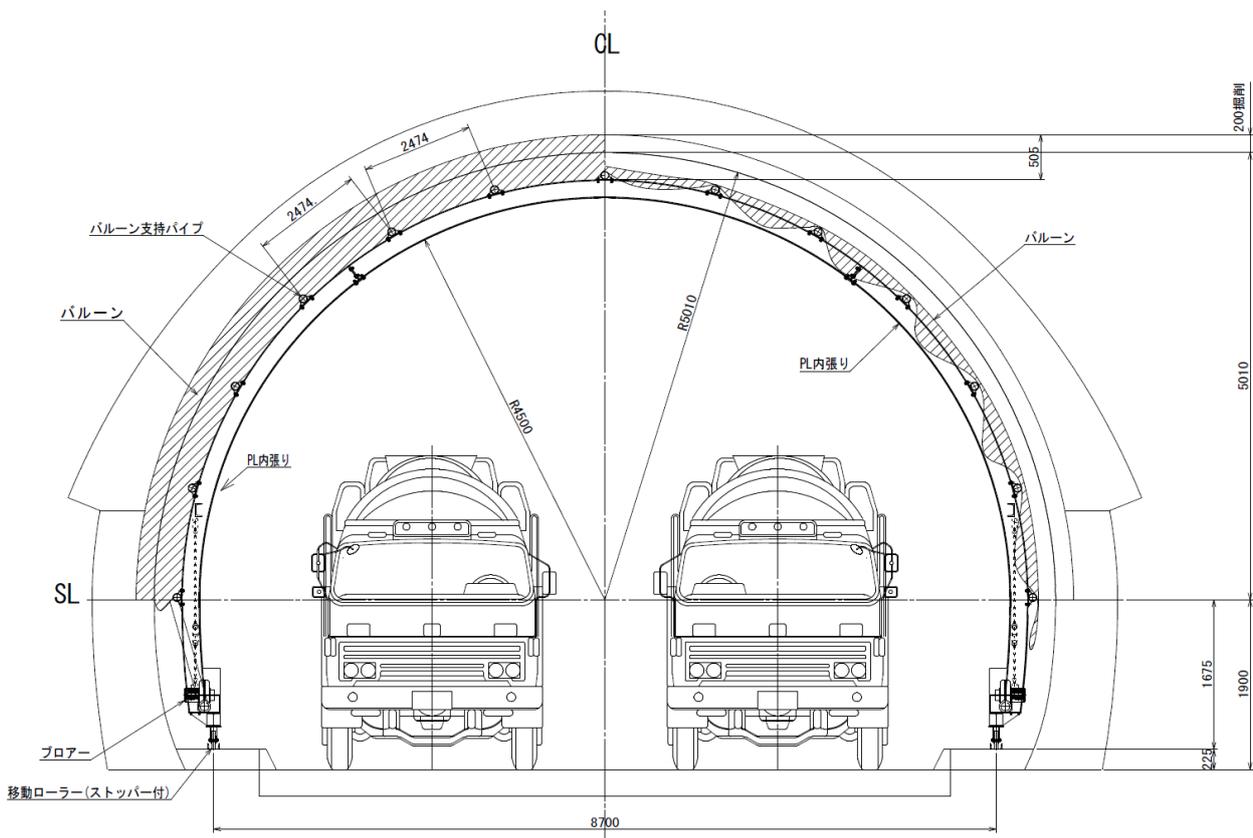


図-4.4.3 架台付き養生バルーン断面図

4. 5 打直し覆工コンクリートの開発

4. 5. 1 打直し覆工コンクリートに要求される性能と配合例

打直し覆工コンクリート打設後、早期に型枠支保工を撤去し、一般交通への影響を最小限とすることを目的に急硬材を混入した硬化促進型高強度コンクリート（以下、急硬コンクリートと言う）の開発を行った。

急硬コンクリートに要求される性能としては、下記が考えられる。

- ・ 優れた充填性を有すること
- ・ 高い強度を有すること
- ・ 打設後、数時間でトンネルの安全性が担保できる強度（打設後 3 時間程度で $2\text{N}/\text{mm}^2$ 、自重に耐えうる強度）を有すること
- ・ ひび割れ抵抗性が高いこと
- ・ 長期的に耐久性を有すること
- ・ 夏期、冬期対応のタイプがあること
- ・ 爆裂防止性能を有すること

上記要求性能を満足するための各性能の最初の目標項目、目標値を表-4.5.1 に示す。なお、設計基準強度は $60\text{N}/\text{mm}^2$ と設定した。これは、図-4.5.1 に示す M-N 線図（ひび割れ考慮しない場合）の関係から、曲げ引張り破壊により構造耐力が決まる場合を除くほとんどの条件下で急硬コンクリート（設計基準強度 $60\text{N}/\text{mm}^2$ 、厚さ 20cm）の耐力が既設の覆工コンクリート（設計基準強度 $18\text{N}/\text{mm}^2$ 、厚さ 30cm）を上回るためである。ただし、耐力が既設覆工コンクリートを下回る条件下となる場合は、急硬コンクリートの厚さを増大させるなどの対策が必要である。

これらの性能を満足するコンクリートの配合を試し練りや打設実験によって選定を行った。選定された配合例を表-4.5.2 に示す。また、火災時の爆裂防止対策を講じた急硬コンクリートの配合例を表-4.5.3 に示す。当該配合は、実施工を想定して、レディーミクストコンクリート工場からベースコンクリート 1m^3 を納入して、現場でトラックアジテータ車に急硬材他を添加し、急硬コンクリートを製造する場合の配合例を示している。

表-4.5.1 急硬コンクリートの必要性能

必要と想定される性能				目標値
施工時に 求められる性能	① ワークビリティ	①-1 充填性	①-1-1 流動性	打込み時の最小スランプフロー50cm程度 (練上がり時のスランプフロー $65\pm 10\text{cm}$ 程度)
			①-1-2 材料分離抵抗性	分離を生じないこと
		①-2 圧送性	水平20m、鉛直8m程度の圧送可能であること	
	①-3 凝結特性	打込み完了後 3時間程度で $2\text{N}/\text{mm}^2$		
② 強度発現性				
硬化後に 求められる性能	① 強度	$60\text{N}/\text{mm}^2$ (材齢28日)		
	② 耐久性	②-1 コンクリートの 耐久性	②-1-1 耐凍害性	耐凍害性を有すること
			②-1-2 耐アルカリ骨材反応	アルカリ骨材反応を起こさないこと
	③ ひび割れ抵抗性	③-1 収縮	③-1-1 温度	$5\sim 35^\circ\text{C}$
③-1-2 乾燥(自己含む)			収縮ひずみ 800μ 程度低下	

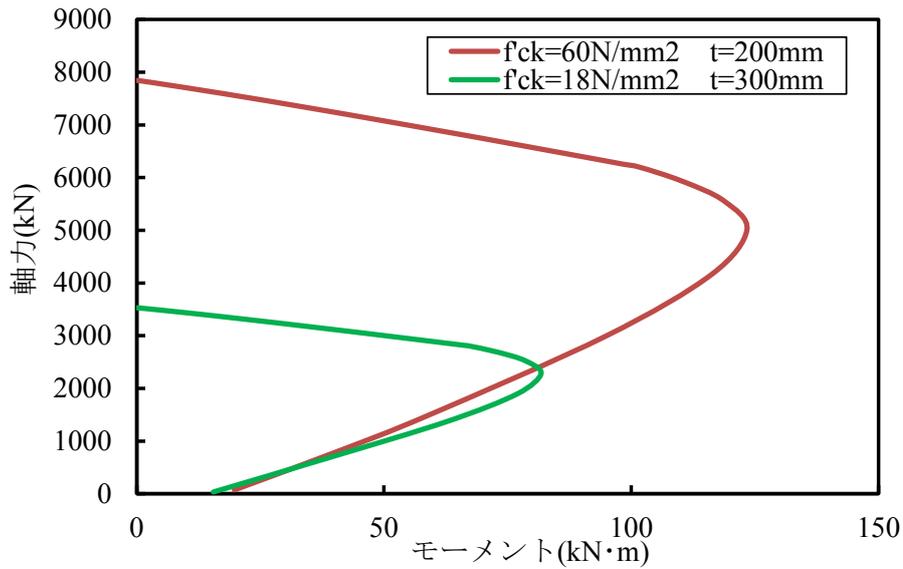


図-4.5.1 急硬コンクリートと通常の覆工コンクリートのM-N線図

表-4.5.2 急硬コンクリートの配合例

水結合材比 W/B (%)	急硬材のセメント置換率 (%)	細骨材率 s/a (%)	空気量 Air (%)	単位量(kg/m³)								
				水		結合材		細骨材	粗骨材	混和剤		
				水1 W1	水2 W2	セメント C	急硬材 fac			AE減水剤 Ad	遅延剤 Re	高性能減水剤 SP
32.5	30	45.4	4.5	165	10	377	161	711	875	5.38	3.23	2.69

表-4.5.3 急硬コンクリートの配合例 (爆裂防止対策)

(左：ベースコンクリート 右：ベースコン 1m³あたりの繊維混入急硬コンクリートの添加量)

水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	空気量 Air (%)	単位量(kg/m³)								
			水 W	セメント C	細骨材S			粗骨材G			AE減水剤 Ad
					S1	S2	計	G1	G2	計	
43.7	48.0	4.5	171	391	577	255	832	454	464	918	2.74

水 (遅延剤溶解用) W2	急硬材 fac	遅延剤 Re	高性能減水剤 SP	繊維 F
15	168	10.07	8.94	1.05

4. 5. 2 コンクリートの基本配合

(1) 目的

本試し練りでは、第一段階として必要性能の中でワーカビリティ（充填性、凝結特性）、強度発現性および強度を有する急硬コンクリートが製造可能であるかの確認を目的とした。

(2) 必要性能の設定

急硬コンクリートに必要と想定される性能としては、表-4.5.1 が考えられる。本試験では、これらの中で充填性、強度発現性および強度を設定した。なお、充填性は、適切な流動性と材料分離抵抗性を有し、自重により充填される性能として、土木学会の高流動コンクリートに準じて自己充填性のランク 3 と設定した。

(3) 使用材料およびコンクリートの配合

使用材料を表-4.5.4 に、コンクリートの初期配合を表-4.5.5 に示す。なお、配合表中の「水 2」は、遅延剤を溶解させた水で、ベースコンクリートの練混ぜ後、遅延剤と一緒に添加を行った。

表-4.5.4 使用材料

材料名	記号	物性値他	産地または製造業者	
セメント	普通ポルトランド	C	密度3.16g/cm ³	太平洋セメント製
細骨材	陸砂	S	表乾密度2.59g/cm ³	茨城県行方市麻生産
粗骨材	碎石	G	表乾密度2.65g/cm ³	茨城県笠間市片庭産
混和剤	AE減水剤	Ad	リグニンスルホン酸系	BASFジャパン製
	粉末高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸系	太平洋マテリアル製
	遅延剤	Re	クエン酸系	太平洋マテリアル製
混和材	急硬材	fac	特殊カルシウムアルミネート、密度2.93g/cm ³	太平洋マテリアル製

表-4.5.5 打直し覆工コンクリートの初期配合（急硬材添加後）

水結合材 比 W/B (%)	急硬材の セメント置換率 (%)	細骨材 率 s/a (%)	空気 量 Air (%)	単位量(kg/m ³)								
				水		結合材		細骨材	粗骨材	混和剤		
				水1 W1	水2 W2	セメント C	急硬材 fac			AE 減水剤 Ad	遅延剤 Re	高性能 減水剤 SP
32.5	30	45.4	4.5	165	10	377	161	711	875	5.38	3.23	2.69

(4) 練混ぜ方法

練混ぜ方法を図-4.5.2 に示す。



図-4.5.2 練混ぜ方法

(5) 試験項目および試験方法

試験項目および試験方法を表-4.5.6 に示す。なお、充填性の確認では、自己充填性（ランク 3）を確認するため、U 形充填高さ（障害なし）の測定を行った。

表-4.5.6 コンクリートの試験項目および試験方法

試験項目	試験頻度	試験方法
スランプフロー	ベース,急硬材添加後,	JIS A 1150
50cmフロー到達時間	急硬材添加後30分、60分、90分、120分	
空気量	急硬材添加後	JIS A 1128
U形充填高さ	急硬材添加後30分、60分、90分、120分	JSCE-F511
凝結試験(始発、終結)	急硬材添加後	JIS A 6204
圧縮強度	終結後、20分程度の間隔	JIS A 1108

(6) 試験結果

①スランプフロー、50cm フロー到達時間および空気量

ベースコンクリートおよび急硬コンクリートのフレッシュ試験結果を表-4.5.7、写真-4.5.1 および写真-4.5.2 に示す。ベースコンクリートは、スランプ 19.5cm、空気量 6.1%であった。急硬コンクリートは、スランプフロー57.0cm で設定した流動性を有する結果となった。空気量は、急硬材の添加によって大幅に減少して 1.4%となったが、これは急硬材の中に消泡剤が混入されていることに起因すると考えられる。空気量の減少が与える影響としては、耐凍害性の低下が考えられるが、当該コンクリートは設計基準強度 60N/mm² の高強度コンクリートであり、十分な耐凍害性を有すると考えられる。

スランプフローの経時変化を図-4.5.3 に示す。なお、経時変化に関する試験は、各試験時に練り舟内で練り返した試料で行った。ここでの経過時間は、ベースコンクリートに急硬材を添加してからの時間を示している。スランプフローは、時間の経過に伴って減少する傾向が見られたが、急硬材添加 90 分後も 50cm 以上を有しており、著しい低下傾向は見られなかった。

50cm フロー到達時間は、図-4.5.4 に示すように急硬材添加直後が 6.6 秒、30 分後が 7.9 秒、90 分後が 12.6 秒となり、時間の経過に伴って粘度が増大することが確認された。一般的な自己充填性ランク 3 の 50cm フロー到達時間は 3~15 秒であることより、急硬材の添加後 90 分程度のコンクリートは、粘度が比較的高い状態といえる。

表-4.5.7 ベースコンクリートおよび急硬材添加後のフレッシュ試験結果

	スランプまたは スランプフロー (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
ベースコンクリート	19.5	6.1	
急硬コンクリート	58.0×56.0	1.4	18

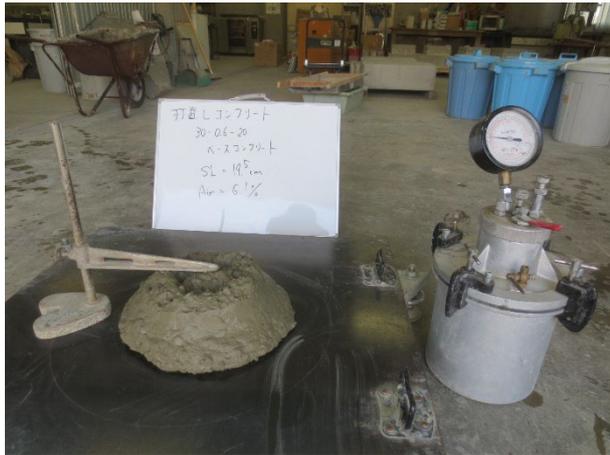


写真-4.5.1 ベースコンクリートの
フレッシュ試験結果

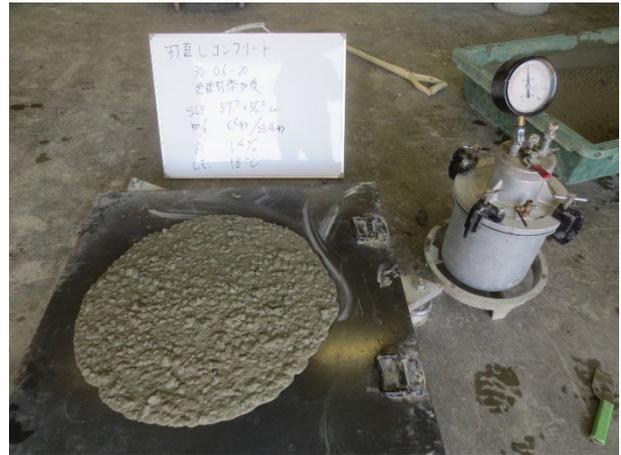


写真-4.5.2 急硬コンクリートの
フレッシュ試験結果

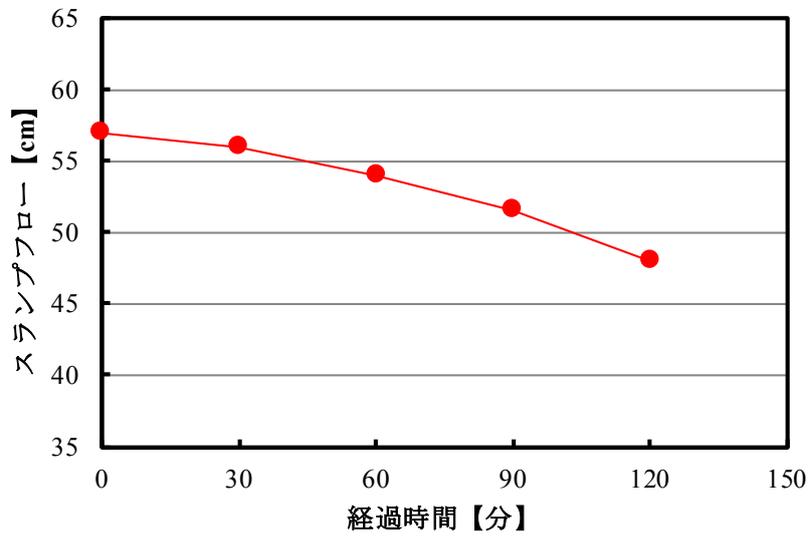


図-4.5.3 スランプフローの経時変化

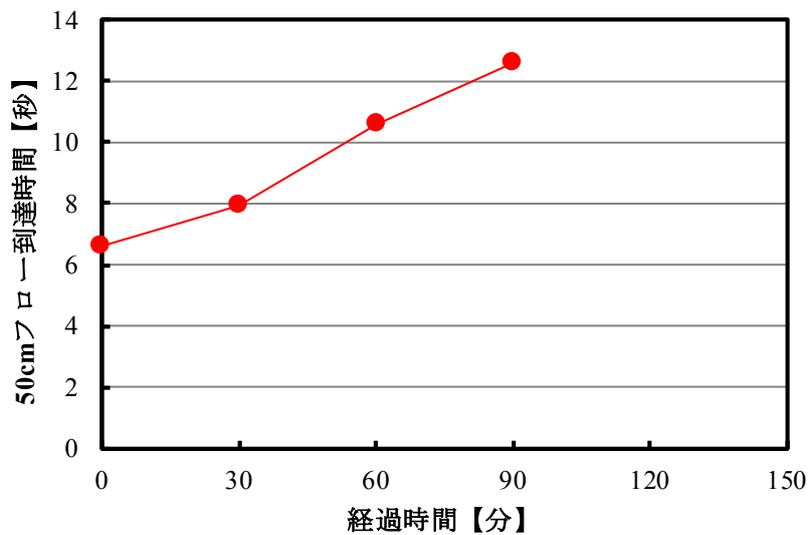


図-4.5.4 50cmフロー到達時間の経時変化

②U形充填高さ

U形充填高さ（障害なし）の経時変化を図-4.5.5に示す。U形充填高さは、急硬材添加120分後も340mm以上となった。これより、前述のように急硬材添加90分程度以後は、粘度が比較的高い状態であるが、自己充填性は、急硬材添加後120分でも土木学会で示されるランク3の性能を有していることが確認された。

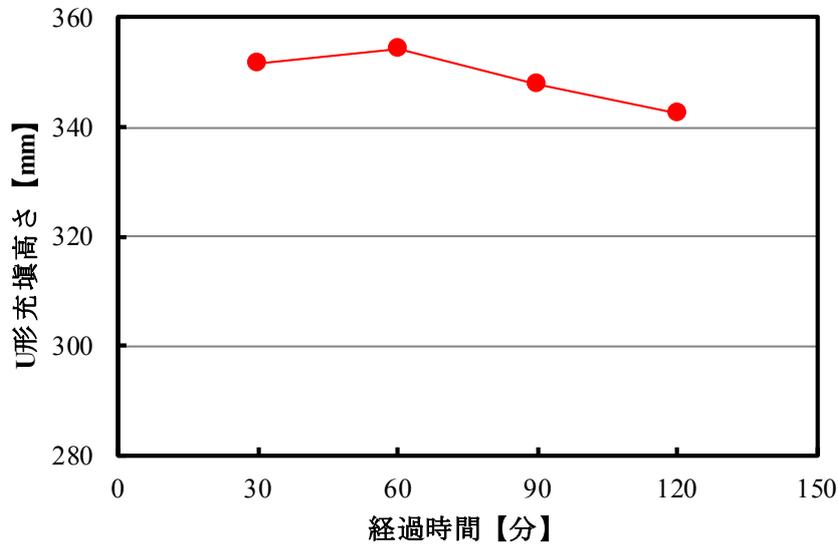


図-4.5.5 U形充填高さの経時変化

③凝結時間

凝結試験の結果を図-4.5.6に示す。試験の試料は、急硬材添加後、直ちにウェットスクリーニングによりモルタルを採取し容器に詰めて静置した状態とした。

凝結時間は、始発が140分程度、終結が155分程度となった。

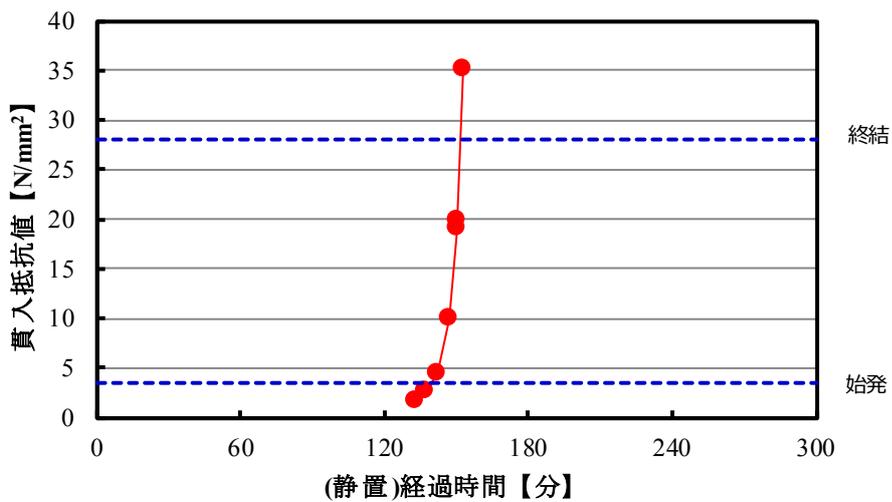


図-4.5.6 凝結試験結果

④圧縮強度

若材齢の圧縮強度の試験結果を図-4.5.7 に示す。供試体は、練上がった段階で直ちに型枠に詰めて静置した状態とした。

圧縮強度 2N/mm^2 は 160 分程度で得られた。また、材齢 28 日の圧縮強度は、写真-4.5.3 に示すように 20°C の封緘養生の供試体で 72.3N/mm^2 であり、概ね想定した配合強度が得られた。

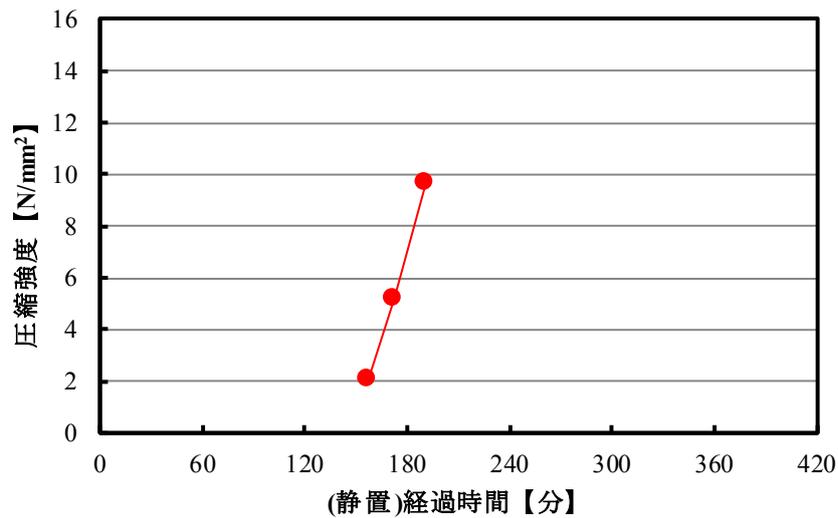


図-4.5.7 若材齢の圧縮強度の試験結果



写真-4.5.3 材齢 28 日の圧縮強度試験の結果

(7) まとめ

- スランプフローは、時間の経過に伴って減少する傾向が見られたが、急硬材添加 90 分後も 50cm 以上を有しており、著しい低下傾向は見られなかった。ただし、急硬材添加後 90 分程度になると、粘度は、比較的高い状態となった。
- 空気量は、急硬材の中に消泡剤が混和されているため、急硬材添加後に大幅に減少する結果となった。
- 自己充填性は、急硬材添加後 120 分でも土木学会で示されるランク 3 の性能を有した。
- 凝結時間は、始発が 140 分程度、終結が 155 分程度であった。
- 強度発現性および圧縮強度は、急硬材添加後 160 分程度で 2N/mm^2 、材齢 28 日には 20°C の封緘養生で 72.3N/mm^2 となり、概ね想定した結果が得られた。
- 以上の結果より、遅延剤および粉末高性能減水剤の添加量を調整することでワーカビリティ（充填性、凝結特性）および強度発現性を有する急硬コンクリートが製造可能であることが確認された。

4. 5. 3 夏期施工対策

(1) 目的

本試し練りは、夏期の施工を想定し、環境温度および練上がり温度が30℃程度となった場合の急硬コンクリートの流動性の経時変化や強度発現性の確認を目的とした。

(2) 使用材料およびコンクリートの配合

使用材料を表-4.5.8に、コンクリートの配合を表-4.5.9に示す。本試し練りでは、レディーミクストコンクリート工場からベースとなるコンクリートを納入し、現場で急硬コンクリートを製造することを想定し、表-4.5.9の左表のベースコンクリートを練り混ぜ、その後、右表の急硬材、遅延剤および高性能減水剤等を添加する方法で行った。なお、本試し練りでは、火災時の爆裂防止対策としてポリプロピレン繊維を混入した配合で検討を行った。

表-4.5.8 夏期施工対策での使用材料

材料名	記号	物性値他	産地または製造業者	
セメント	普通ポルトランド	C	密度3.16g/cm ³	太平洋セメント製
細骨材	陸砂	S1	表乾密度2.60g/cm ³	茨城県鹿嶋市産
	砕砂	S2	表乾密度2.68g/cm ³	栃木県佐野市産
粗骨材	砕石	G1	表乾密度2.65g/cm ³	茨城県笠間市産
	砕石	G2	表乾密度2.70g/cm ³	栃木県佐野市産
混和剤	AE減水剤	Ad	リグニンスルホン酸系	フローリック製
	粉末高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸系	BASFジャパン製
	遅延剤	Re	クエン酸系	太平洋マテリアル製
混和材	急硬材	Fac	特殊カルシウムアルミネート、密度2.93g/cm ³	太平洋マテリアル製
繊維	ポリプロピレン繊維	F	繊維長2mm、維度2tex	ダイワボウ製

表-4.5.9 夏期施工対策の試し練りの配合

(左：ベースコンクリート 右：ベースコン 1m³あたりの繊維混入急硬コンクリートの添加量)

水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	空気量 Air (%)	単位量(kg/m ³)									水 (遅延剤溶解用) W2	急硬材 fac	遅延剤 Re	高性能減水剤 SP	繊維 F
			水 W	セメント C	細骨材S			粗骨材G			AE減水剤 Ad					
					S1	S2	計	G1	G2	計						
43.7	48.0	4.5	171	391	577	255	832	454	464	918	2.74	15	168	11.46	11.18	1.05

(3) 試験項目および試験方法

試験項目および試験方法を表-4.5.10に示す。なお、急硬コンクリートは、凝結試験の終結後、直ちに圧縮強度試験が可能となる強度発現性を有することが確認されたため、ここでは、強度発現性の確認を圧縮強度試験のみで行った。

表-4.5.10 試験項目および試験方法

試験項目	試験頻度	試験方法
スランブまたはスランブフロー	ベース、繊維混入後、 繊維混入後30、60分	JIS A 1150
50cmフロー到達時間	(参考値) ベース、繊維混入直後	JIS A 1128
空気量	繊維混入直後、繊維混入後30、60分	JSCE-F511
U形充填高さ (R3)	終結後30分程度の間隔で2N/mm ² を超えるまで	JIS A 1108

(4) 試験結果

①スランプフロー、50cm フロー到達時間および空気量

フレッシュ試験結果を表-4.5.11 および写真-4.5.4 に示す。急硬材添加直後のスランプフローは、若干大きく平均で 74.0cm となったが、スランプフローの先端部でモルタルの先走りなど材料分離は認められなかった。また、U形充填高さは、363mm で自己充填性のランク 3 を有することが確認された。

スランプフローの経時変化を図-4.5.8 に 50cm フロー到達時間の経時変化を図-4.5.9 に示す、なお、経時変化に関する試験は、各試験時に練り舟内で練り返した試料で行った。ここでの経過時間は、ベースコンクリートに急硬材を添加してからの時間を示している。

スランプフローは、時間の経過に伴う変化は小さく、急硬材添加 60 分後も平均で 70.5cm を有していた。

50cm フロー到達時間は、急硬材添加直後が 6.6 秒、30 分後が 8.9 秒、60 分後が 11.5 秒となり、時間の経過に伴って粘度が増大することが確認された。

表-4.5.11 試験項目および試験方法

		スランプまたは スランプフロー (cm)	50cmフロー 到達時間 (秒)	空気量 (%)	コンクリート温度 (℃)	U形充填高さ (mm)
ベースコンクリート		4.5	—	3.3	30	
急硬コンクリート	直後	76.7×71.7	6.8	1.4	30	363
	30分後	74.7×74.7	8.9	—	28	365
	60分後	71.5×70.0	11.5	—	26	361



写真-4.5.4 急硬コンクリートのフレッシュ試験結果

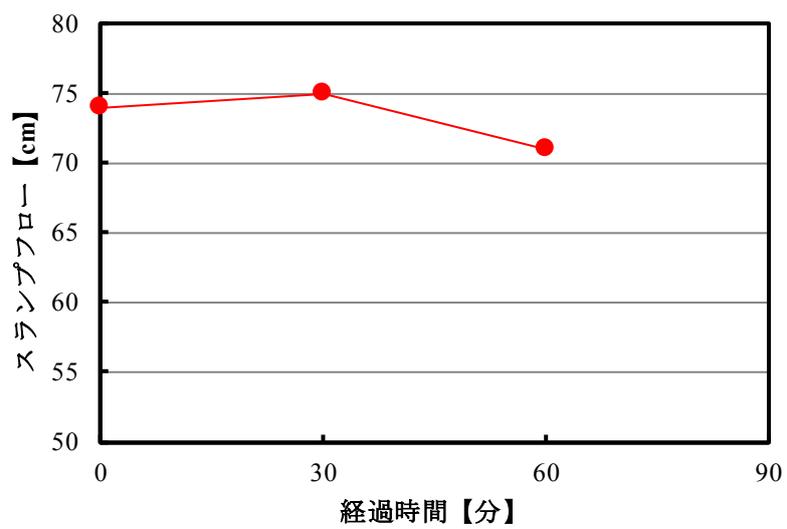


図-4.5.8 スランプフローの経時変化

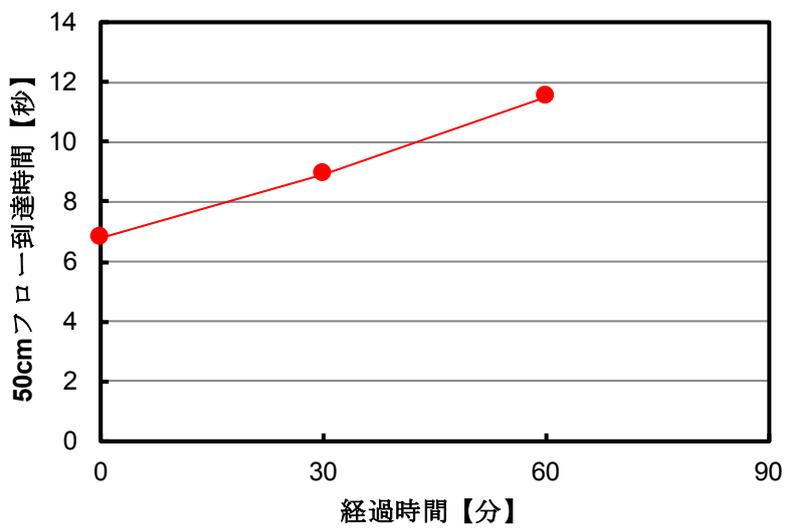


図-4.5.9 50cmフロー到達時間の経時変化

②U形充填高さ

U形充填高さ（障害なし）の経時変化を図-4.5.10に示す。U形充填高さは、急硬材添加60分後も360mm以上となった。これより、前述のように急硬材添加60分程度以後は、粘度が高くなるが、自己充填性は、土木学会で示されるランク3の性能を有していることが確認された。

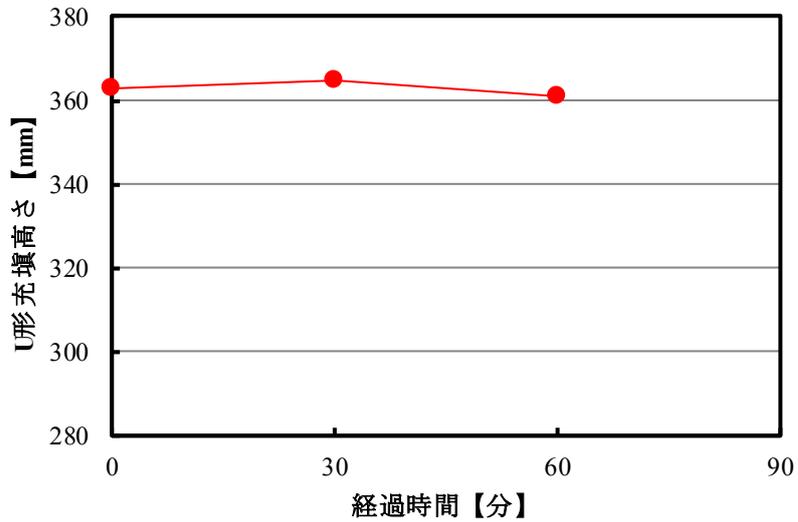


図-4.5.10 U形充填高さの経時変化

③強度発現性

強度発現性である若材齢の圧縮強度試験の結果を図-4.5.11に示す。圧縮強度 2N/mm^2 は、220分程度で得られた。

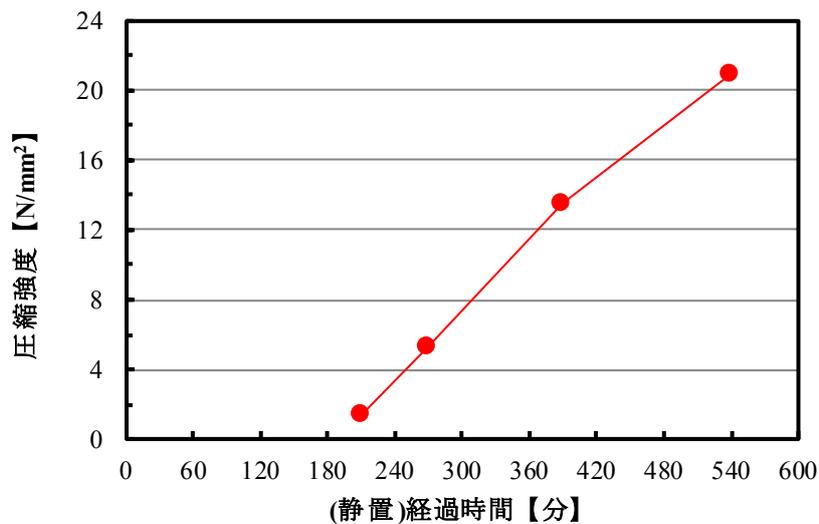


図-4.5.11 若材齢の圧縮強度試験結果

(7) まとめ

- スランプフローは、時間の経過に伴って減少する傾向が見られたが、急硬材添加 60 分後も 70cm 以上を有した。ただし、粘度は、急硬材添加後 60 分程度になると比較的高い状態となった。
- 自己充填性は、急硬材添加 60 分後も土木学会で示されるランク 3 の性能を有した。
- 圧縮強度 2N/mm^2 は、遅延剤の添加率 2.05% の場合、急硬材添加後 220 分程度で得られた。
- 練上がり温度が 30°C の場合も、遅延剤および粉末高性能減水剤の添加量を調整することで所要の性能を有する急硬コンクリートの製造が可能であることが確認された。

4. 5. 4 冬期施工対策

(1) 目的

本試し練りは、冬期の施工を想定し、環境温度および練上がり温度が10℃程度となった場合の急硬コンクリートの流動性の経時変化および強度発現性の確認を目的とした。

(2) 試験ケース

本試験では、遅延剤の添加率（以下、「遅延剤添加率」と称す）をパラメータとし、結合材×0.3%、0.35%および0.4%とした。

(3) モルタルの配合

基本計画検討の試し練り時に、コンクリートと当該コンクリートから粗骨材を除いたモルタルで検討を行った結果、凝結時間や強度発現性等がコンクリートとモルタルで同様の傾向を示したことより、今回の試し練りは、表-4.5.12 に示すコンクリートの配合から粗骨材を除いたモルタルで行った。使用材料は、表-4.5.4 に示すものを用いた。なお、遅延剤は、前述の添加率を添加し、粉末高性能減水剤は、急硬材添加後にモルタルフローが250~300mm程度となるように適宜調整して添加した。

表-4.5.12 コンクリートの配合

水結合材 比 W/B (%)	急硬材の セメント置換率 (%)	細骨材 率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
			水		結合材		細骨材	粗骨材
			水1	水2	セメント	急硬材		
			W1	W2	C	fac	S	G
32.5	30	45.4	165	10	377	161	711	875

(4) 試験項目および試験方法

試験項目および試験方法を表-4.5.13 に示す。試験では、モルタルフロー、凝結時間および若材齢の圧縮強度を測定した。

表-4.5.13 モルタルの試験項目および試験方法

試験項目	試験頻度	試験方法
モルタルフロー	ベース、急硬材添加後、 急硬材添加後30分間隔程度	JIS R 5201
凝結時間(始発、終結)	急硬材添加後	JIS A 6204
圧縮強度(若材齢)	終結後、15~30分程度の間隔	JIS A 1108

(5) 試験結果

モルタルフローの経時変化を図-4.5.12、経過時間と貫入抵抗値の関係を図-4.5.13 および経過時間と圧縮強度の関係を図-4.5.14 に示す。モルタルフローの経時変化は、遅延剤の添加率に関わらず小さく、練上がりから90分後でも十分な流動性を有することが確認された。

凝結時間および強度発現性は、遅延剤の添加率が多いほど遅延する傾向がみられた。圧縮強度2N/mm²が得られる材齢を図-4.5.15 に示す。練上がり温度が10℃の場合も、遅延剤の添加率を調整することで所要の強

度発現性が得られることが確認された。

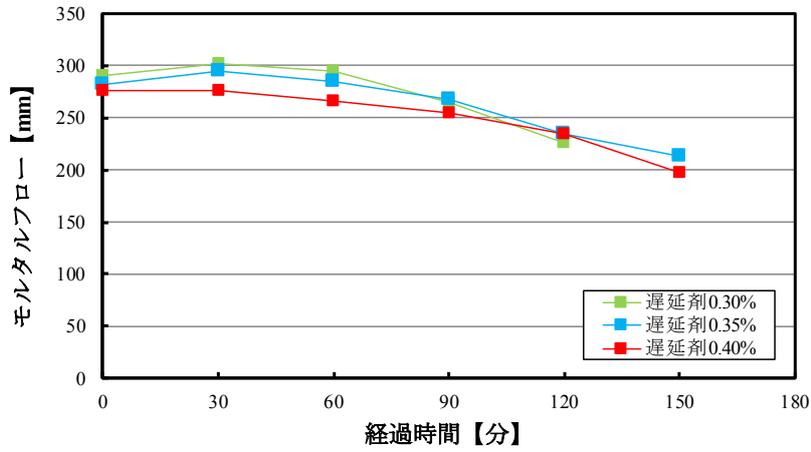


図-4.5.12 モルタルフローの経時変化

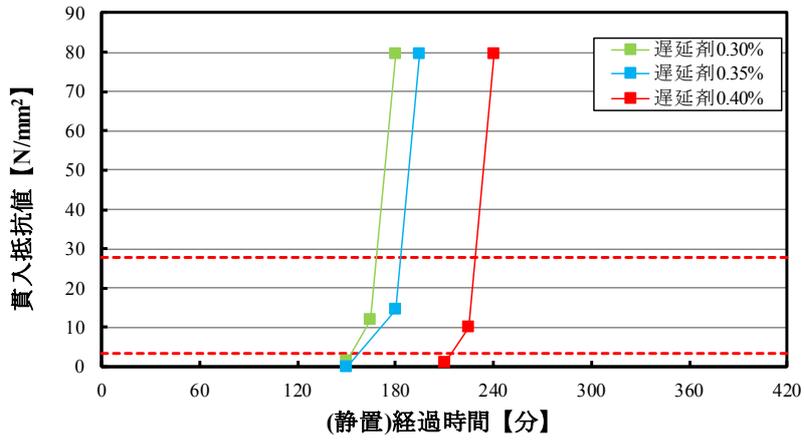


図-4.5.13 経過時間と貫入抵抗値の関係

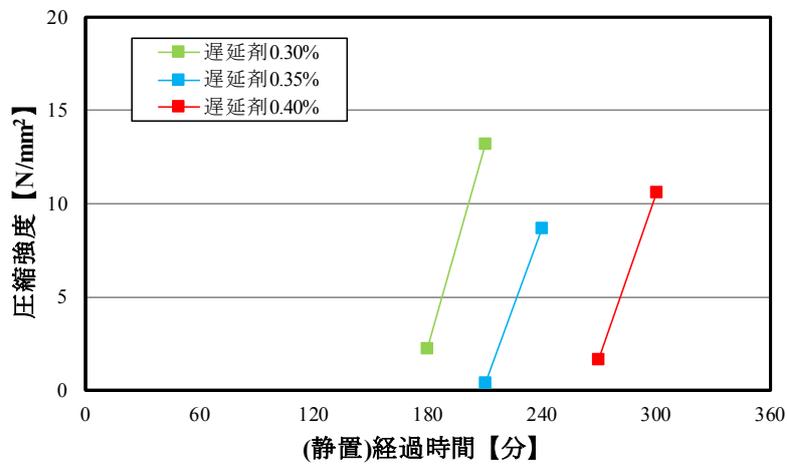


図-4.5.14 経過時間と圧縮強度の関係

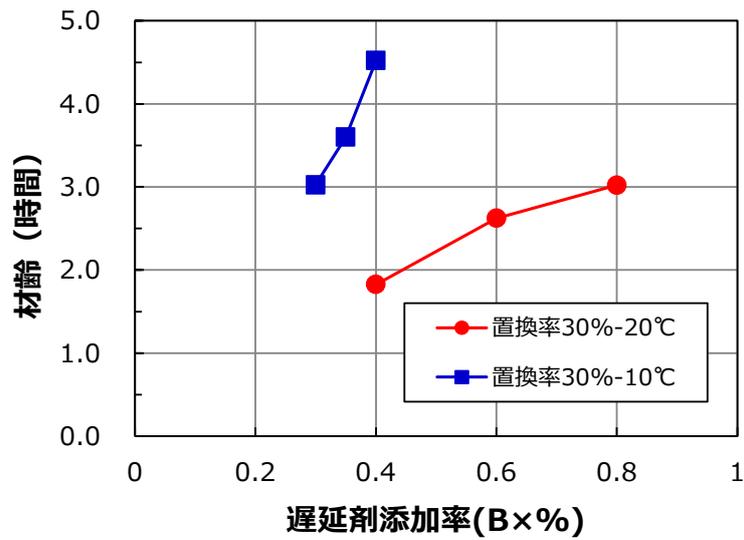


図-4.5.15 遅延剤添加率と圧縮強度 2N/mm² が得られる材齢の関係

(6) まとめ

- ・ モルタルフローは練上がりから 90 分後も 250mm 程度以上となり、練上がり温度が 10°C の場合も必要な流動性を有した。
- ・ 圧縮強度 2N/mm² は、遅延剤の添加率 0.3% の場合に 180 分程度で得られた。
- ・ 練上がり温度が 10°C の場合も、遅延剤および粉末高性能減水剤の添加量を調整することで所要の性能を有する急硬コンクリートの製造が可能であることが確認された。

4. 5. 5 ひび割れ抵抗性

(1) 目的

本試験は、急硬コンクリートの材料レベルでのひび割れ抵抗性を確認することを目的とした。

(2) 試験ケースおよびコンクリートの配合

試験ケースは、急硬材の添加の有無の2ケースとした。コンクリートの配合を表-4.5.14に示す。使用材料は、表-4.5.4に示すものを用いた。遅延剤、粉末高性能減水剤は、所要の性能が得られるように調整して添加した。

表-4.5.14 ひび割れ抵抗性の確認に用いたコンクリート配合

急硬材の有無	急硬材のセメント置換率 (%)	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
				水		結合材		細骨材 S	粗骨材 G
				水1 W1	水2 W2	セメント C	急硬材 fac		
あり	30	32.5	45.4	165	10	377	161	711	875
なし	0					538	—	717	882

(3) 試験結果

供試体は、材齢1日で脱型し材齢7日までラップとビニール袋で覆って封緘状態とし、材齢7日から20℃、相対湿度60%の恒温恒湿室で乾燥状態とした。

ひずみの測定状況を写真-4.5.5と写真-4.5.6に示す。材齢とひずみの関係を図-4.5.16に、材齢と全ひずみの関係を図-4.5.17に示す。なお、図-4.5.17における材齢70日付近のひずみの変化は、停電の発生により恒温恒湿室が停止したことに起因するものである。



写真-4.5.5 ひずみの測定状況 (材齢7日まで)



写真-4.5.6 ひずみの測定状況 (材齢7日以降)

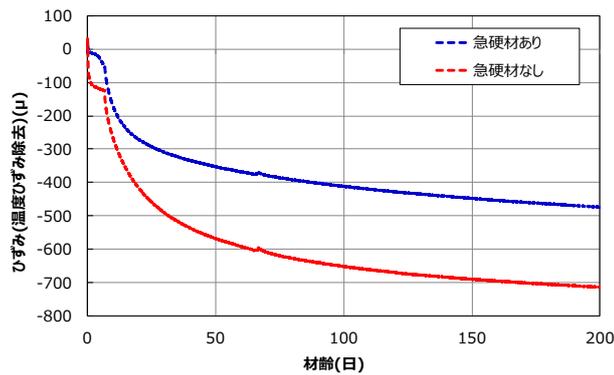


図-4.5.16 材齢とひずみの関係

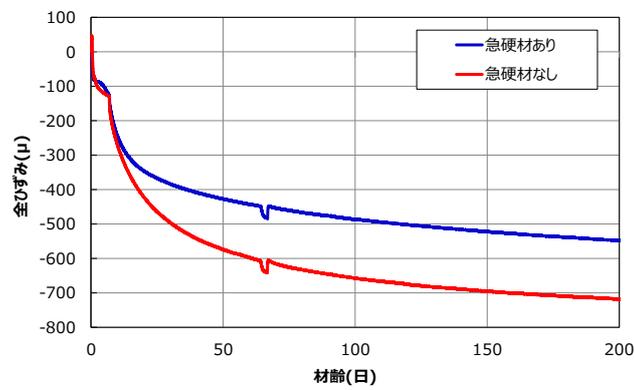


図-4.5.17 材齢と全ひずみの関係（硬化時の温度変化による影響を考慮したひずみ）

収縮ひずみは、材齢 200 日で急硬コンクリートが 480μ 程度、急硬材を添加していない通常のコンクリートが 710μ 程度となり、急硬コンクリートの収縮ひずみは、通常のコンクリートの 68%程度となった。1990 年代後半に日本建築学会が調査した全国のコンクリートの乾燥収縮ひずみは、平均で 800μ 程度と報告されている。これより、今回使用した材料は、一般的なものであると考えられ、急硬コンクリートの収縮ひずみは、通常のコンクリートに比べて小さくなることが確認された。また、硬化時の温度変化による影響を考慮した全ひずみは、材齢 200 日で急硬コンクリートが 550μ 程度、通常コンクリートが 720μ 程度であり、急硬コンクリートのひずみは、通常のコンクリートの 76%程度と小さくなった。

(4) まとめ

- 急硬コンクリートは、通常のコンクリートと比較して収縮ひずみが小さく、乾燥収縮等に対するひび割れ抵抗性が高いことが確認された。

4. 5. 6 模擬型枠によるコンクリートの打込み・充填性

(1) 目的

本実験は、急硬コンクリートを室内のミキサを使用して製造し、SL下を模擬した型枠に打ち込み、充填状況、強度発現性および硬化後の表面状態等を試験室レベルで確認することを目的とした。

(2) 模擬部材概要

模擬部材は、厳しい施工条件を考え、あばた等が生じやすい部位である SL 下を模擬した。模擬部材の概要を図-4.5.18 および写真-4.5.7 に示す。型枠は、SL 下を模擬し土台を配置して約 30°傾斜させた状態とした。型枠材は、表面のみ充填状況を確認するため透明な塩ビ板とし、それ以外の面はメタルフォームとした。なお、メタルフォームの内側は、急硬コンクリートの硬化時の発熱状態を模擬するために、写真-4.5.7 に示すように発泡スチロールを配置し、中央位置には温度変化を測定するための熱電対を設置した。

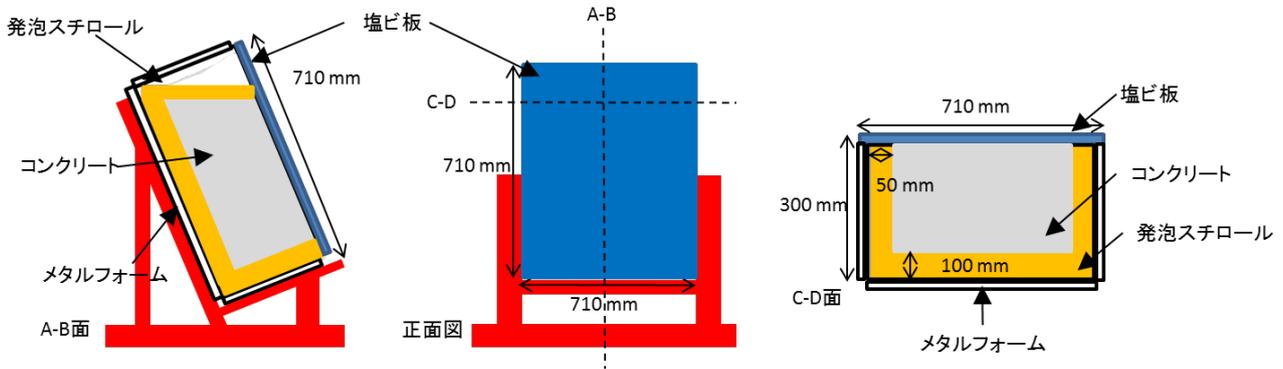


図-4.5.18 模擬部材概要

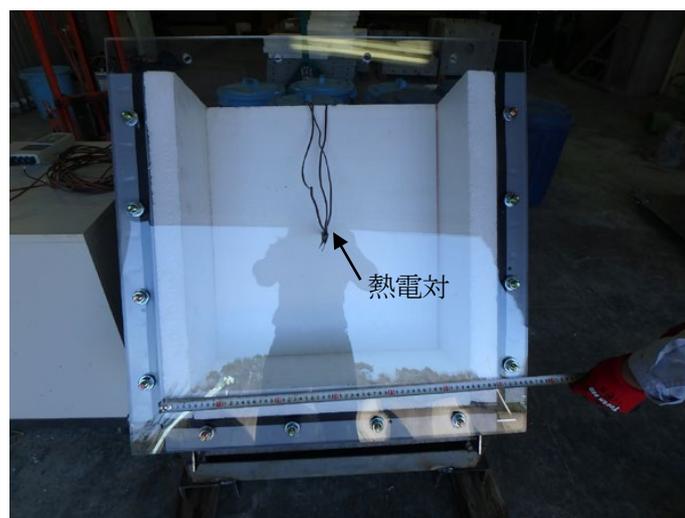


写真-4.5.7 模擬部材外観

(3) コンクリートの配合および使用材料

配合を表-4.5.15 に示す。使用材料は、表-4.5.4 に示すものを用いた。設計基準強度は、材齢 28 日で 60N/mm² とした。

表-4.5.15 コンクリートの配合

水結合材 比 W/B (%)	急硬材の セメント置換率 (%)	細骨材 率 s/a (%)	空気 量 Air (%)	単用量(kg/m ³)								
				水		結合材		細骨材	粗骨材	混和剤		
				水1 W1	水2 W2	セメント C	急硬材 fac			AE 減水剤 Ad	遅延剤 Re	高性能 減水剤 SP
32.5	30	48.0	1.5	165	10	377	161	788	875	5.32	5.11	2.26

(4) 練混ぜ方法

練混ぜは、実施工でのトラックアジテータを使用した製造方法を模擬するために、傾胴式ミキサを用いて図-4.5.19 に示す方法で行った。練混ぜ量は、100L とした。

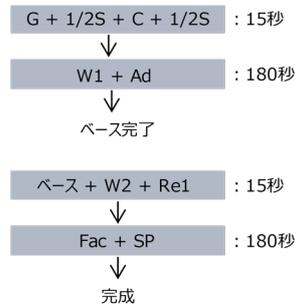


図-4.5.19 コンクリートの練混ぜ方法

(5) 打込み方法

打込みは、打上り速度が実施工と同等となる速度 (2m/時間) で写真-4.5.8 に示すようにジョッキで行った。締固めは、行わず自重による自己充填とした。

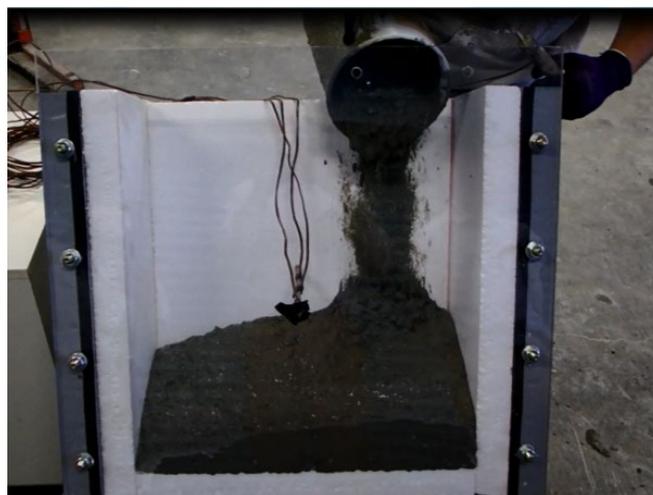


写真-4.5.8 打込み方法

(6) 試験項目および試験方法

試験項目および試験方法を表-4.5.16 に示す。急硬コンクリートは、凝結試験の終結後、直ちに圧縮強度試験が可能となる強度発現性を有することが確認されたため、ここでは、強度発現性の確認を圧縮強度試験のみで行った。表-4.5.16 の他に、打込み中のコンクリートの充填状況および硬化後の表面状態を目視で確認した。また、中央位置において、コンクリートの温度変化を熱電対で測定した。

表-4.5.16 試験項目および試験方法

試験項目	試験頻度	試験方法
スランプまたはスランプフロー	ベース,急硬材添加後, 急硬材添加後30分、60分	JIS A 1150
50cmフロー到達時間		
空気量	急硬材添加後	JIS A 1128
圧縮強度	2N/mm ² 以上が得られるまで	JIS A 1108

(7) 試験結果

フレッシュ試験の結果を表-4.5.17 と写真-4.5.9 に示す。スランプフローは、平均 68.0cm で所要の流動性を有していた。また、30 分後および 60 分後もスランプフローは、70cm 以上で高い流動性を有することが確認された。ただし、60 分後には 50cm フロー到達時間が 13.2 秒と粘度が比較的高くなり、施工性が低下することが確認された。なお、空気量は、前述までと同様に急硬材の添加によって減少し 1.4%となった。

表-4.5.17 フレッシュ試験の結果

	スランプまたはスランプフロー (cm)	50cmフロー到達時間 (秒)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
ベースコンクリート	6.0	—	4.1	21
急硬コンクリート	直後	69.1×66.5	1.4	22
	30分後	75.3×75.0	—	21
	60分後	72.0×69.5	13.2	—

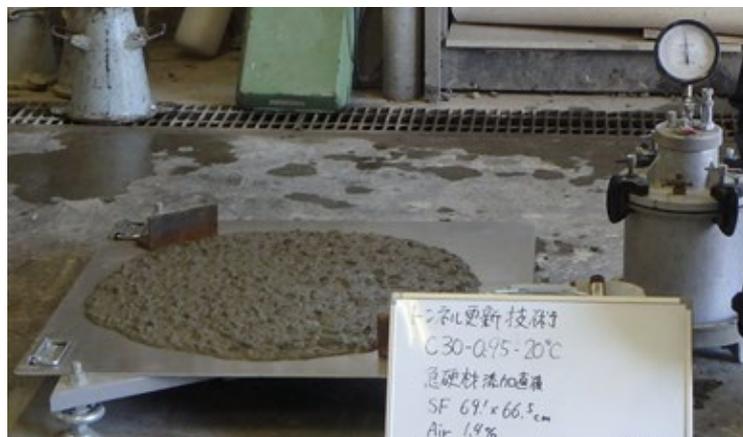


写真-4.5.9 フレッシュ試験の結果

打込み状況を写真-4.5.10に示す。急硬コンクリートは、締固めを行うことなしに型枠の端部まで流動して、打上がり面もほぼ水平に充填されることが確認された。

参考として、打込み完了後に表面の塩ビ板を木槌で叩きを行った。その結果、内部の気泡が型枠面を伝って上昇することが確認された。しかしながら、叩き後の表面状態は、写真-4.5.10に示すように気泡が上昇した跡が残る結果となったため、当該コンクリートでは、過度な叩き作業に留意する必要があるといえる。

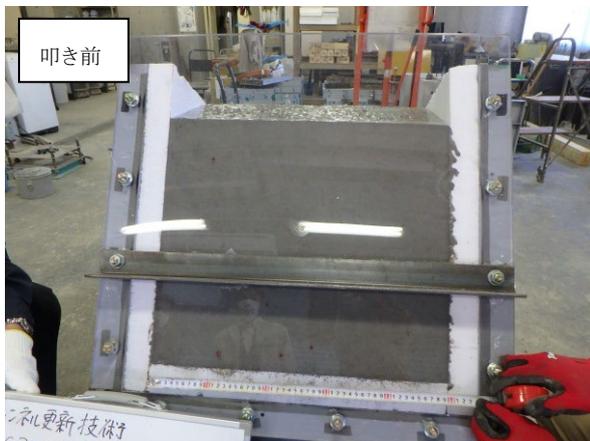


写真-4.5.10 打込み状況

中央位置でのコンクリートの温度変化を図-4.5.20 に示す。コンクリート温度は、材齢 0.25 日（6 時間）程度で最大となり、練上がりから 30°C 程度上昇することが確認された。

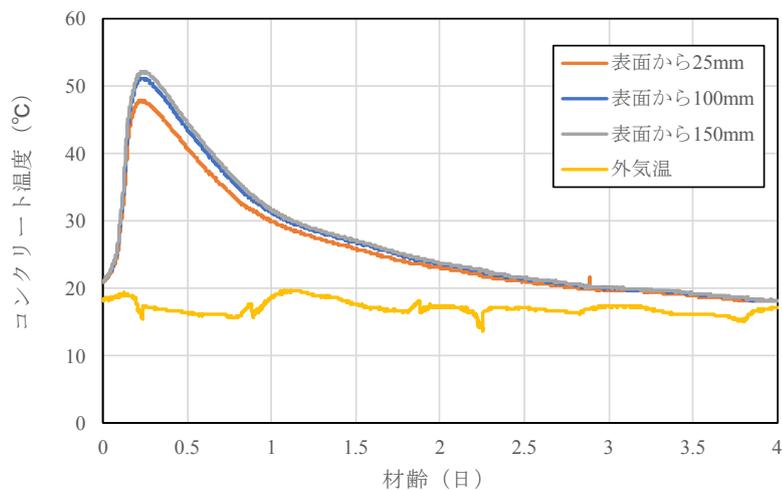


図-4.5.20 材齢とコンクリート温度の関係

圧縮強度は、写真-4.5.11 に示すように打込み完了後3時間で3.68N/mm²、打込み完了後3.5時間で7.47N/mm²となり、所要の強度発現性を有することが確認された。

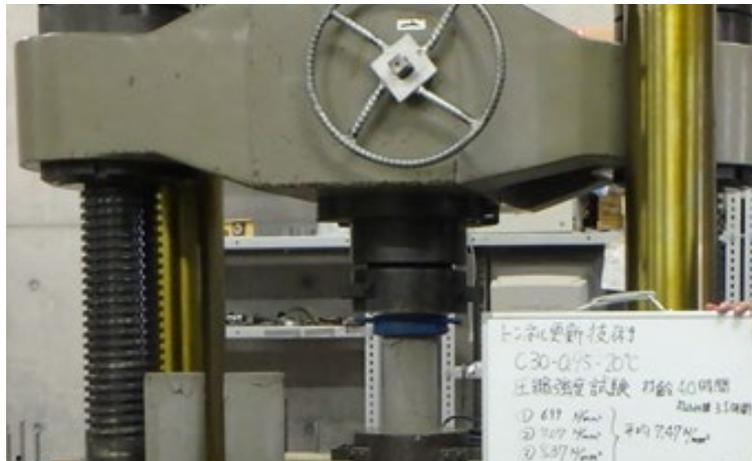


写真-4.5.11 打込み後3時間での圧縮強度

(8) まとめ

- ・ 急硬コンクリートは、傾胴型のミキサによって製造可能であった。
- ・ 急硬コンクリートは、締固めを行うことなしに型枠の端部まで流動して、打上がり面もほぼ水平に充填された。
- ・ 傾胴型のミキサを使用した急硬コンクリートは、所要の強度発現性を有することが確認された。
- ・ 過度な叩き作業は、表面に気泡が上昇した跡を残すため留意が必要であることが確認された。

4. 5. 7 実施工レベルにおけるコンクリートの打込み・充填性

(1) 目的

S L下模擬部材打設試験では、トラックアジテータを使用した実際の急硬コンクリートに近い状態での製造性を確認するために、室内の傾胴ミキサ（容量 100L）を用いて試し練りを行った。また、練り上がった急硬コンクリートを模擬型枠（B 500×H 600×T 200mm、30 度の傾斜付き）へ打ち込み、急硬コンクリートの強度発現性や硬化後の表面状態等の確認を行った。その結果、傾胴ミキサによる製造性および硬化後の品質に問題がないことが確認された。しかしながら、トラックアジテータやポンプを使用した実施工レベルでの急硬コンクリートの製造性および施工性は明確でない。また、実際のトンネルでは、急硬コンクリートの性能として火災時の爆裂防止性能が必要と考えられる。

そこで、今回は、爆裂防止対策を施した急硬コンクリート（以下、繊維混入急硬コンクリートと称す）について、実施工レベルでの製造性や施工性を確認し実施工への適用性を検討することを目的として、打設実験等を行った。

(2) 実験フロー

実験は、実機練り試験および模擬部材打設実験の 2 段階に分けて行った。

実機練り試験では、実施工を想定し、トラックアジテータを使用して繊維混入急硬コンクリートを練り混ぜ製造性の確認を行った。また、模擬部材打設実験では、施工場所でトラックアジテータによって繊維混入急硬コンクリートを製造し、ポンプによって模擬部材の型枠内に打ち込み、繊維混入急硬コンクリートの施工性の確認を行った。

(3) 使用材料

使用材料を表-4.5.18 に示す。急硬材を添加する前のベースとなるコンクリートの材料は、市中の生コン工場（千葉県佐倉市 佐倉 SOC）に既存しているものを用いた。また、爆裂防止対策のポリプロピレン繊維（以下：PP 繊維）は、ダイワボウ製とした。

表-4.5.18 使用材料

材料名	記号	物性値他	産地または製造業者	
セメント	普通ポルトランド	C	密度 3.16g/cm ³	太平洋セメント製
細骨材	陸砂	S1	表乾密度 2.60g/cm ³	茨城県鹿嶋市産
	砕砂	S2	表乾密度 2.68g/cm ³	栃木県佐野市産
粗骨材	砕石	G1	表乾密度 2.65g/cm ³	茨城県笠間市産
	砕石	G2	表乾密度 2.70g/cm ³	栃木県佐野市産
混和剤	AE減水剤	Ad	リグニンスルホン酸系	フローリック製
	粉末高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸系	BASFジャパン製
	遅延剤	Re	クエン酸系	太平洋マテリアル製
混和材	急硬材	Fac	特殊カルシウムアルミネート、密度 2.93g/cm ³	太平洋マテリアル製
繊維	ポリプロピレン繊維	F	繊維長 2mm、維度 2dtex	ダイワボウ製

(4) 繊維混入急硬コンクリートの目標性能

繊維混入急硬コンクリートの目標性能は、表-4.5.19 とした。なお、爆裂防止性能は、当社保有技術のFPC工法（高強度コンクリートの火災時爆裂抑制工法）に準じてPP 繊維を 1kg/m³ 混入することで確保した。

表-4.5.19 繊維混入急硬コンクリートの目標性能

試験項目	試験頻度	試験方法
スランプフロー	繊維混入後65±10cm程度	JIS A 1150
U形充填高さ (R3)	急硬材添加後60分まで300mm以上	JSCE-F511
空気量	参考値 (繊維混入後1.5%程度)	JIS A 1128
圧縮強度	材齢3~4時間程度で2N/mm ² 材齢28日で60N/mm ²	JIS A 1108

(5) コンクリートの配合

ベースコンクリートは、表-4.5.20 に示す配合で、呼び強度 40N/mm²、スランプ 12±2.5cm、空気量 4.5±1.5%の通常のコンクリートとした。

表-4.5.20 ベースコンクリートの配合

水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	空気量 Air (%)	単位量(kg/m ³)								
			水 W	セメント C	細骨材S			粗骨材G			AE 減水剤 Ad
					S1	S2	計	G1	G2	計	
43.7	48.0	4.5	171	391	577	255	832	454	464	918	2.74

(6) 製造方法

繊維混入急硬コンクリートの製造は、生コン工場から表-4.5.20 に示したベースコンクリート 2m³をトラックアジテータ (10t 車) で運搬し、到着後、図-4.5.21 に示す手順でトラックアジテータに遅延剤、急硬材+粉末高性能減水剤および繊維を順に添加する方法で行った。

なお、模擬部材打設実験では、後述するように攪拌時における摩擦熱によるコンクリート温度の上昇および製造時間を短縮するため、繊維を急硬材+粉末高性能減水剤と同時に添加する方法とした。

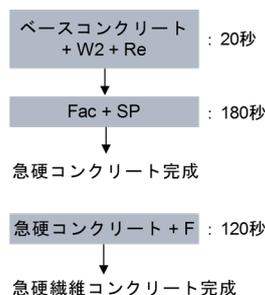


図-4.5.21 製造方法 (実機試験)

(7) 実機練り試験

実機練り試験の試験項目および試験方法を表-4.5.21 に示す。凝結試験の試料は繊維混入直後に、圧縮強度試験の試料は練上がり 30 分後に採取した。

表-4.5.21 試験項目および試験方法

試験項目	試験頻度	試験方法
スランプまたはスランプフロー	ベース,繊維混入後, 以降30分間隔程度	JIS A 1150
50cmフロー到達時間		
空気量	(参考値) ベース、繊維混入直後	JIS A 1128
U形充填高さ (R3)	繊維混入直後、以降30分程度の間隔	JSCE-F511
凝結試験	繊維混入後に試料採取	JIS A 6204
圧縮強度	終結後30分程度の間隔で $2\text{N}/\text{mm}^2$ を超えるまで、 材齢7、28日	JIS A 1108

(8) 模擬部材打設実験

模擬部材打設実験の概要図を図-4.5.22 に、実験手順を以下に示す。

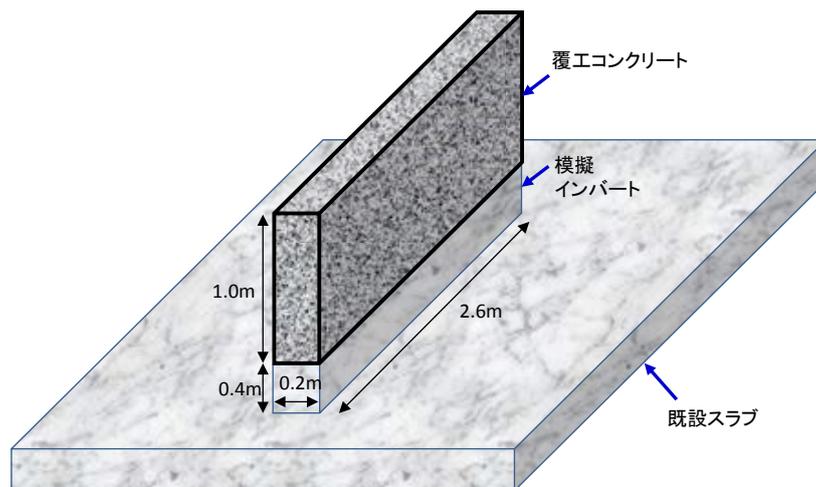


図-4.5.22 試験体の概要図

- ① 模擬インバート部分のコンクリート打込み
- ② 型枠脱型・打継ぎ処理

打継ぎ処理は、打込み終了後に表面に打継ぎ処理剤を塗布し、写真-4.5.12 に示すように翌日に高圧水で洗い出して目粗しを行った。



写真-4.5.12 打継ぎ部の外観状況

③ 覆工コンクリート部分の型枠組立て

打込み時におけるコンクリートの充填状況の確認を行うため、写真-4.5.13 に示すように一部分の型枠に透明型枠を使用した。



写真-4.5.13 模擬型枠

④ 繊維混入急硬コンクリートの製造および品質管理

製造は、前述のようにトラックアジテータを使用して行った。製造状況を写真-4.5.14 に示す。

コンクリートの品質管理試験は、実機試験と同様に表-4.5.21 に示す試験項目、試験頻度および試験方法で行った。



写真-4.5.14 繊維混入急硬コンクリートの製造状況

⑤ コンクリート打込み

打込みは、フレッシュ性状を確認した後、写真-4.5.15 に示すようにポンプ車を使用して行った。打込み速度は、実施工における時間当たりのコンクリートの打上がり高さを考慮して $2\text{m}^3/\text{時間}$ とした。



写真-4.5.15 繊維混入急硬コンクリートの打込み状況

⑥ 材齢1日で型枠脱型

⑦ 充填状況や表面状態を観察

(9) 試験結果

① 実機練り試験

実機試験での繊維混入急硬コンクリートの配合を表-4.5.22 に示す。遅延剤および高性能減水剤の添加量は、事前に行ったモルタルの試し練りの結果および当日のベースコンクリートのスランプをもとに設定した。なお、1m³のベースコンクリートに急硬材等を添加した後の繊維混入急硬コンクリートの体積は、約 1.05m³ となる。繊維混入急硬コンクリートの製造状況を写真-4.5.14 に、フレッシュ試験の結果を表-4.5.23 と写真-4.5.16 に示す。

ベースコンクリートおよび繊維混入急硬コンクリートの練上がり直後は、スランプフローやU形充填高さなど目標としたすべての性能を有することが確認された。しかしながら、30分後の試験では、スランプフローが急激に低下し、コンクリートが凝結を始める傾向が確認された。このため、この時点で試験を終了して、トラックアジテータ内のコンクリートを廃棄した。事前の室内の試し練りでは、急硬コンクリートの凝結時間が練上がり温度の影響を受け、2°C高くなると30分程度早くなることが確認されていた。今回は、練上がり温度を21°Cと想定して遅延剤の添加量を設定したが、繊維混入急硬コンクリートの練上がり温度が23°Cと高くなったことが原因と考えられる。また、一般に遅延剤は、練上がりから添加までの時間が長くなるほど遅延効果が低下する傾向がある。今回は、室内試験時に比べて遅延剤の添加が遅く、練上がりから80分後となったことも原因と推察される。

以上より、繊維混入急硬コンクリートは、トラックアジテータによって製造可能であることが確認されたが、練上がり温度によって遅延剤等の添加量の詳細な調整が必要であることが分かった。

表-4.5.22 実機試し練りの配合

(左：ベースコンクリート 右：ベースコン 1m³あたりの繊維混入急硬コンクリートの添加量)

水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	空気量 Air (%)	単位量(kg/m ³)								
			水 W	セメント C	細骨材S			粗骨材G			AE 減水剤 Ad
					S1	S2	計 S	G1	G2	計 G	
43.7	48.0	4.5	171	391	577	255	832	454	464	918	2.74

水 (遅延剤溶解用) W2	急硬材 fac	遅延剤 Re	高性能 減水剤 SP	繊維 F
10	168	6.71	5.87	1.05

表-4.5.23 フレッシュ試験および凝結試験の結果

時系列	時刻	出荷基準	繊維混入急硬 コンクリート 練上り基準	スランブ (フロー) (cm)	50cmフロー 到達時間 (s)	フロー 停止時間 (s)	空気量 (%)	コンクリート 温度 (°C)	U形充填 平均高さ (cm)
出荷	12:15	0:00							
ベースコンクリート試験	13:05	0:50	—	11.5	—	—	2.5	20	—
遅延剤・急硬材混入完了	13:35	1:20	—						
急硬コンクリート試験	13:45	1:30	—	69.7×68.7	3.3	47.8	—	23	—
繊維混入急硬コンクリート試験	13:55	1:40	0:00	60.8×58.8	5.4	44.9	1.4	23	35.2
繊維混入後30分後	14:25	2:10	0:30	54.5×51.8	10.0	43.1	—	27	29.0
凝結試験 終結	15:00	2:45	1:05						

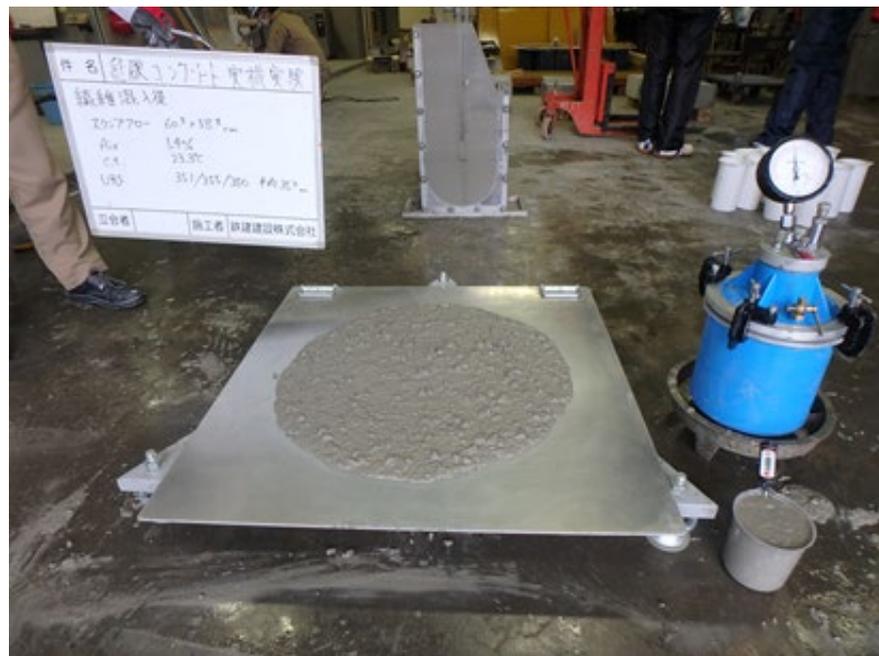
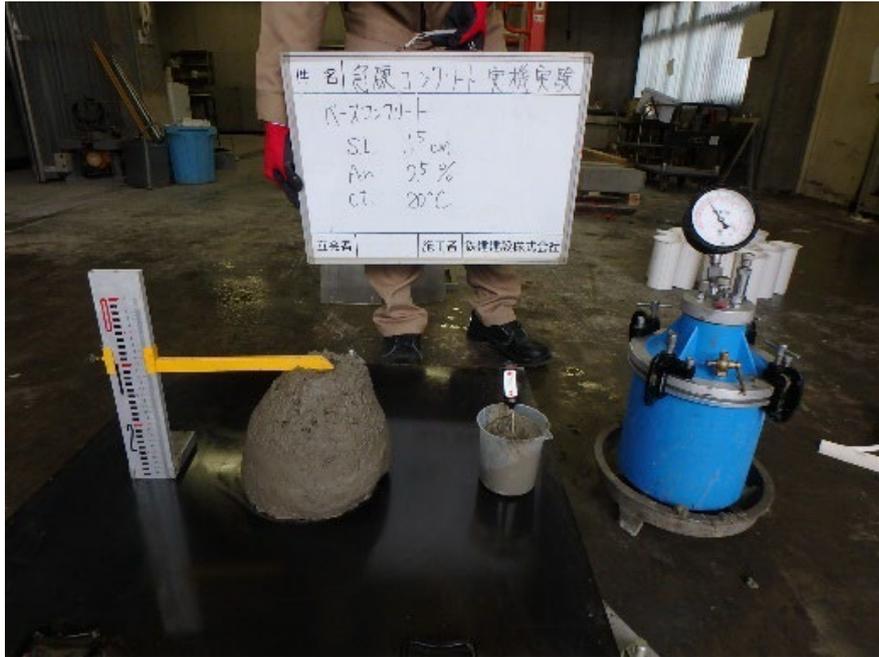


写真-4.5.16 フレッシュ試験の結果

(上：ベースコンクリート、下：繊維混入急硬コンクリート)

② 模擬部材打設実験

模擬部材打設実験に使用した配合を表-4.5.24 に示す。繊維の添加は、攪拌時における摩擦熱によるコンクリート温度の上昇および製造時間を短縮するため急硬剤と同時にを行った。なお、遅延剤の添加量は、練上がり温度を 22°C と想定して設定した。

フレッシュ時の各種試験および凝結試験の結果を表-4.5.25 および図-4.5.23 に示す。フレッシュ時の試験では、繊維混入急硬コンクリートで練上がり直後にスランプフローが目標性能を少し超えて 76.5cm となった。これは、練上がり温度が高くなることが想定されたため、実機練り試験時に比べ遅延剤量を多くする必要があり、この遅延剤を溶解させるために使用した水量が多くなったことに起因すると考えられる。具体的には、本実験で使用した遅延剤は、7kg の溶解に 10kg 程度の水が必要となるため、今回の模擬部材打設実験では、溶解水を実機試験時の 10kg から 20kg に増量させて行った。このため、練上がった繊維混入急硬コンクリートは、実機練り試験時と比較して単位水量が 10kg/m³ 程度増大したと想定される。

表-4.5.24 模擬部材打設実験の配合

(左：ベースコンクリート 右：ベースコン 1m³あたりの繊維混入急硬コンクリートの添加量)

水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	空気量 Air (%)	単位量(kg/m ³)									水 (遅延剤溶解用) W2	急硬材 fac	遅延剤 Re	高性能減水剤 SP	繊維 F
			水 W	セメント C	細骨材S			粗骨材G			AE 減水剤 Ad					
					S1	S2	計 S	G1	G2	計 G						
43.7	48.0	4.5	171	391	577	255	832	454	464	918	2.74	20	168	10.07	8.94	1.05

表-4.5.25 フレッシュ試験および凝結試験の結果

時系列	時刻	出荷基準	繊維混入急硬コンクリート練上り基準	スランプ(フロー)(cm)	50cmフロー到達時間(s)	フロー停止時間(s)	空気量(%)	コンクリート温度(°C)	U形充填平均高さ(cm)
出荷	12:45	0:00							
ベースコンクリート試験	13:30	0:45	—	12.5	—	—	2.4	19	—
遅延剤・急硬材・繊維混入完了	13:40	0:55	—						
繊維混入急硬コンクリート試験	13:45	1:00	0:00	77.0×75.6	4.1	88.6	1.0	22	364
模擬部材打設 開始	14:05	1:20		0:20					
模擬部材打設 終了	14:20	1:35		0:35					
繊維混入完了50分後	14:35	1:50	0:50	66.5×66.0	5.7	68.8	—	21	359
繊維混入完了80分後	15:05	2:20	1:20	63.2×61.5	7.5	82.4	—	19	357
繊維混入完了110分後	15:35	2:50	1:50	63.5×61.7	8.5	71.4	—	18	359
繊維混入完了140分後	16:05	3:20	2:20	66.0×63.0	9.7	82.4	—	18	—
繊維混入完了170分後	16:35	3:50	2:50	65.8×63.1	16.4	123.5	—	17	—
模擬部材 硬化	16:45	4:00	3:00						
凝結試験 始発	17:15	4:30	3:30						
凝結試験 終結	17:50	5:05	4:05						
圧縮強度試験 2.0N/mm ² 発現	18:50	6:05	5:05						

圧縮強度試験の結果を図-4.5.24、図-4.5.25 に示す。模擬部材は、表面状態の目視観察および触感では、繊維混入急硬コンクリートの練上がりから 180 分の時点で硬化しており、所要の圧縮強度を有していると考えられた。しかしながら、円柱供試体による圧縮強度試験で圧縮強度が 2.0N/mm^2 を超えたのは、練上がりから 305 分であり、模擬部材と円柱供試体の強度発現性に大きな差違が生じた。これは、円柱供試体を試験室内で製作し、そのまま試験室内に存置していたため、円柱供試体の養生温度が模擬部材に比べて低かったことに起因すると思われる。

ただし、その後の材齢の圧縮強度は、材齢 7 日で 54.8N/mm^2 、材齢 28 日で 69.3N/mm^2 となり目標性能を満足していることを確認した。

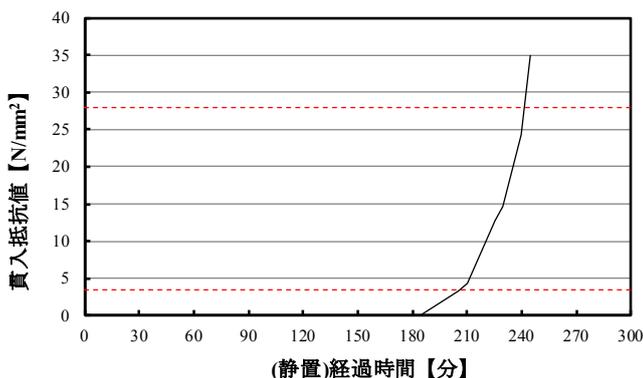


図-4.5.23 凝結試験の結果

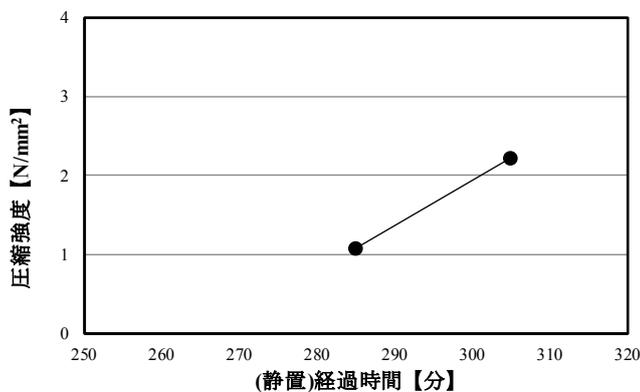


図-4.5.24 圧縮強度試験の結果 (若材齢)

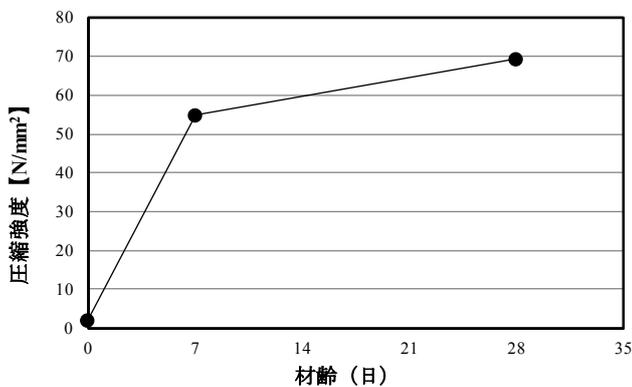


図-4.5.25 圧縮強度試験の結果

模擬部材打設実験における打込み時の状況を写真-4.5.17に、流動先端の状況を写真-4.5.18に示す。練上がり時のスランプフローは、70cmを超えていたが、流動の先端部でも粗骨材の材料分離は認められなかった。

実験で使用した透明型枠を写真-4.5.19に示す。透明型枠には、コンクリートの1分ごとの打上がり高さを記入したが、コンクリートは水平に流動して、打上がり高さはほとんど一定であることが確認できた。また、目視では、圧送に伴う性状の変化は見られず、圧送後も性状は良好であった。コンクリートの打込みは、約10分程度で終了した。

脱型後の外観は、写真-4.5.20に示すように到達側にわずかに表面気泡が確認されたが、ジャンカなどの不具合はみられず良好であった。また、ひび割れは、材齢の経過後も観察されなかった。



写真-4.5.17 模擬部材打設実験における打込み時の状況



写真-4.5.18 流動先端の状況

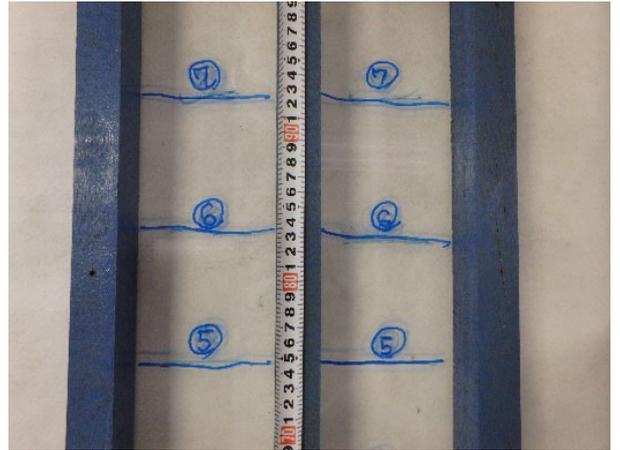


写真-4.5.19 透明型枠と1分毎の打上がり高さ

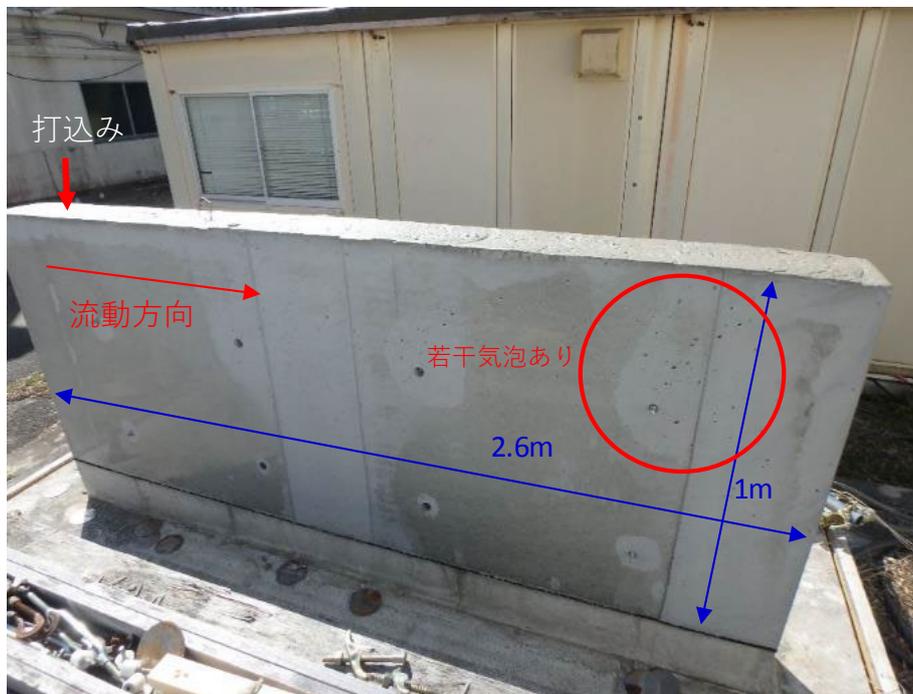


写真-4.5.20 脱型後の外観

(10) まとめ

今回、トラックアジテータやポンプ車を使用して実際の繊維混入急硬コンクリートの製造性や施工性の確認を行った結果、以下の知見が得られた。

- 繊維混入急硬コンクリートは、トラックアジテータを使用して製造が可能であった。
- 繊維混入急硬コンクリートのポンプ圧送性は良好であった。
- 硬化後の外観から充填性についても問題ないことが確認された。また、材齢の経過後もひび割れは発生しなかった。
- 繊維混入急硬コンクリートは、練上がり温度の数°Cの違いによって所要の性能を得るための遅延剤の添加量が異なること、また、養生温度が数°C異なることで強度発現性も大きく異なることが確認された。このため、実施工に向けては、コンクリートの練上がり温度や養生温度の厳密な管理方法あるいは練上がり温度の制御方法等について今後、検討を進める必要があると考えられる。

4. 5. 8 初期強度発現性

(1) 目的

本試験は、繊維混入急硬コンクリートの初期材齢での強度発現性の確認を目的とした。

(2) コンクリートの配合

コンクリートの配合を表-4.5.26 に示す。使用材料は、表-4.5.18 に示すものを用いた。遅延剤、粉末高性能減水剤は、所要の性能が得られるように調整して添加した。

表-4.5.26 コンクリートの配合

(左：ベースコンクリート 右：ベースコン 1m³あたりの繊維混入急硬コンクリートの添加量)

水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	空気量 Air (%)	単位量(kg/m ³)									水 (遅延剤溶解用) W2	急硬材 fac	遅延剤 Re	高性能減水剤 SP	繊維 F
			水 W	セメント C	細骨材S			粗骨材G			AE 減水剤 Ad					
					S1	S2	計	G1	G2	計						
43.7	48.0	4.5	171	391	577	255	832	454	464	918	2.74	15	168	6.15	4.47	1.05

(3) 試験結果

練上がり温度は、ベースコンクリートが 20℃、急硬コンクリートが 22℃であった。圧縮強度用の円柱供試体は、作製後、直ちに恒温恒湿室内（温度 20℃、相対湿度 60%）に存置した。

材齢と圧縮強度の関係を図-4.5.26 に示す。繊維混入急硬コンクリートの圧縮強度は、終結後、材齢 10 時間程度までは急激に増大し、その後は増大傾向が小さくなることが確認された。覆工コンクリートの一般的な設計基準強度 18N/mm² は、材齢 7 時間程度で得られることが確認された。スキンプレート部の取外し時期である材齢 3 日の圧縮強度は、材齢 1 日で 36.0N/mm²、模擬部材打設実験で材齢 7 日が 54.8N/mm² であったことより、直線回帰して算出すると 42N/mm² 程度と推定された。

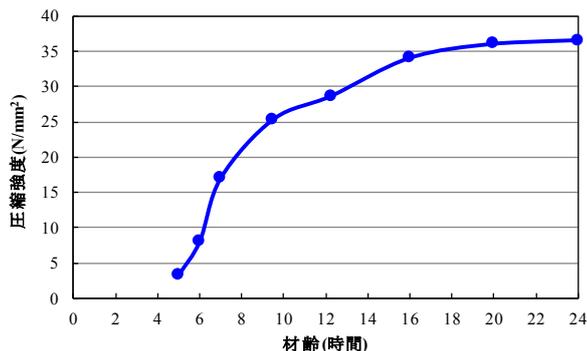


図-4.5.26 材齢と圧縮強度の関係

(4) まとめ

- 繊維混入急硬コンクリートの圧縮強度は、終結後、材齢 10 時間程度まで急激に増大する傾向がみられた。

- 一般的な覆工コンクリートの設計基準強度 18N/mm^2 は、材齢 7 時間程度で得られた。
- スキンプレート部の取外し時期である材齢 3 日の圧縮強度は、 40N/mm^2 程度以上であることが確認された。

4. 5. 9 まとめ

今回、トンネル覆工コンクリートの更新技術として、覆工コンクリート打設後、早期に型枠支保工を撤去し、一般交通への影響を最小限とすることを目的とした繊維混入急硬コンクリートを考え、必要となる性能を整理し、試し練りや打設実験等によって適用性を検討した。

その結果、本検討条件下において以下の知見が確認された。

- ・ 遅延剤および粉末高性能減水剤の添加量を調整して添加することで、必要なワーカビリティや強度発現性を有する繊維混入急硬コンクリートの製造が可能である。
- ・ 夏期（30℃程度）や冬期（10℃程度）を想定した条件下でも所要の性能を有する繊維混入急硬コンクリートの製造が可能である。
- ・ 繊維混入急硬コンクリートは、市中のレディーミクストコンクリート工場よりベースコンクリートを運搬し、現場でトラックアジテータに急硬材等を添加して製造することが可能である。
- ・ 繊維混入急硬コンクリートは、ポンプ圧送性が良好である。
- ・ 繊維混入急硬コンクリートは、収縮ひずみが小さく、また強度発現が早いいため、ひび割れ抵抗性が高い。
- ・ 実施工を模擬した打設実験では、繊維混入急硬コンクリートは、良好な施工性を示した。ただし、繊維混入急硬コンクリートは、所要の性能を得るための遅延剤の添加量が練上がり温度の数℃の違いによって異なることが明らかとなった。また、養生温度が数℃異なることで強度発現性も大きく異なることが確認された。このため、実施工に向けては、コンクリートの練上がり温度や養生温度の厳密な管理方法あるいは練上がり温度の制御方法等について今後、検討を進める必要があると考えられる。
- ・ 爆裂防止対策として繊維を混入したが、結果は良好であった。
- ・ ゆえに、トンネル覆工の更新技術に採用する覆工コンクリートは、繊維混入した急硬材入りの高強度コンクリートとする。

4. 6 分離型セントルの開発

(1) 分離型セントルに要求される性能

本工法は、夜間通行止めの間、セントルを使用して打直し覆工コンクリートを打設し、昼間にはコンクリートを養生しながら交通を全面開放する。そのためセントルの構造は、ガントリー部を分離して2車線を確保できる分離型セントルとする必要がある。また、存置するスキンプレート部は、若材齢のコンクリートを養生し、かつ、一般車が安全に通行できる構造が必要である。

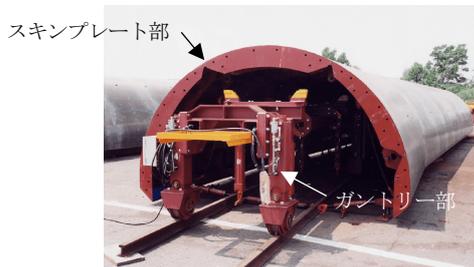
今回開発する分離型セントルは、覆工コンクリート打設後、一般車が安全に走行でき、繰り返して使用できるように移動性がよく、組立て、取外しが容易で堅固な構造を有することを要求性能とする。このため、分離型セントルは、上記の性能を有し、山岳トンネルの覆工コンクリート構築に施工実績がある、テレスコピック型セントルの構造を採用する。

(2) 開発イメージ

分離型セントルの開発イメージを以下に示す。

① テレスコピック型セントルの構造を採用

- ・ 特徴である、『スキンプレート部とガントリー部を分離できる構造』を採用
- ・ 分離後、スキンプレート部は自立し、若材齢のコンクリートを養生する



【セントル全体図】

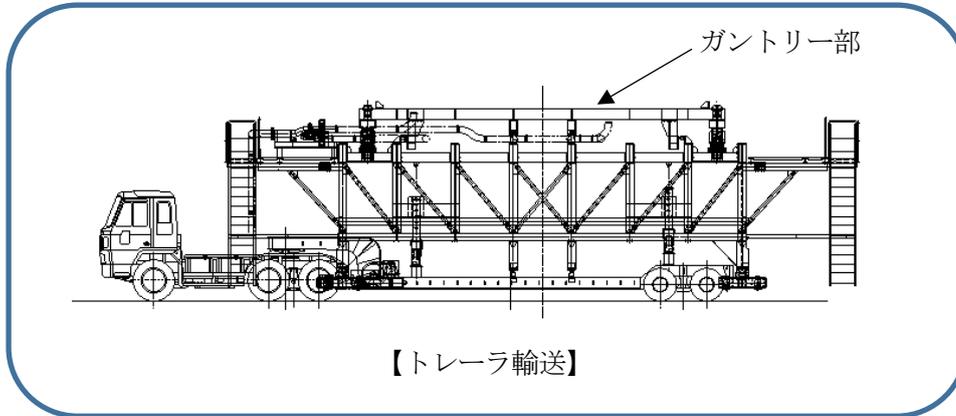


【分離後のスキンプレート部】

テレスコピック型セントルの例²⁾

② 分離したガントリー部をトレーラで輸送

- ・ ガントリーの坑内移動は電動モータで行うが、走行速度は遅い
- ・ そのため、分離したガントリー部は、『トレーラ輸送』(坑内⇒坑外、坑外⇒坑内)を行う



③ 分離型セントルの開発

テレスコピック型セントルの構造 + ガントリー部をトレーラ輸送
= 分離型セントルの開発

(3) 分離型セントルの仕様

覆工セントルは、薄肉の覆工コンクリートを打設でき、昼間の一般車の通行を確保するために夜間にガントリー部が移動できる構造とする。

覆工セントルの仕様を以下に示す。

- ・ 流動性の高いコンクリートを使用するため、セントルは、型枠に側圧として液圧が作用する構造とする
- ・ セントルは、スキンプレート部とガントリー部を分離できる構造とする
- ・ 分離したガントリー部は、トレーラで搬出・搬入ができる構造とする

今回開発した分離型セントルの分離移動状況を図-4.6.1に示す。

また、分離型セントルの全体図を図-4.6.2、分離型セントルのジョイント部概略図を図-4.6.3に示す。

参考資料4.に「【資料③-1】 分離型セントル構造計算書」、「【資料③-2】 分離型セントル スキンプレート（オール付き）耐力検討書」を資料として添付する。

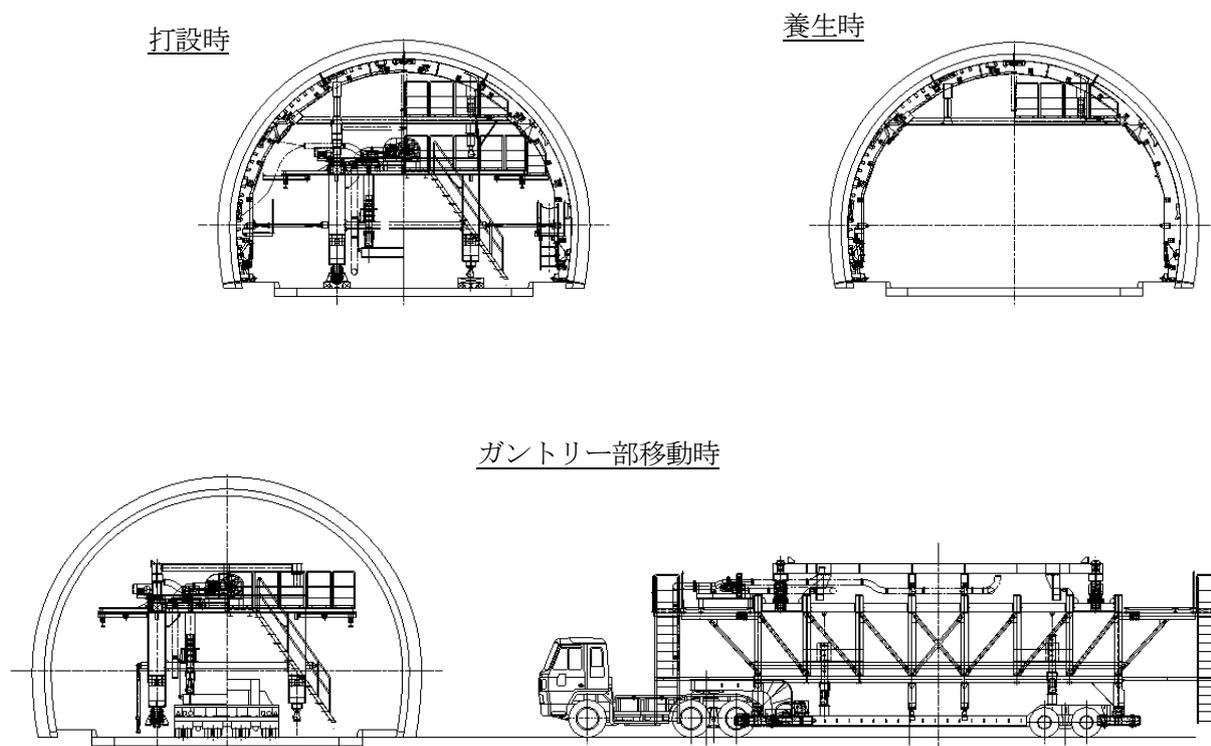
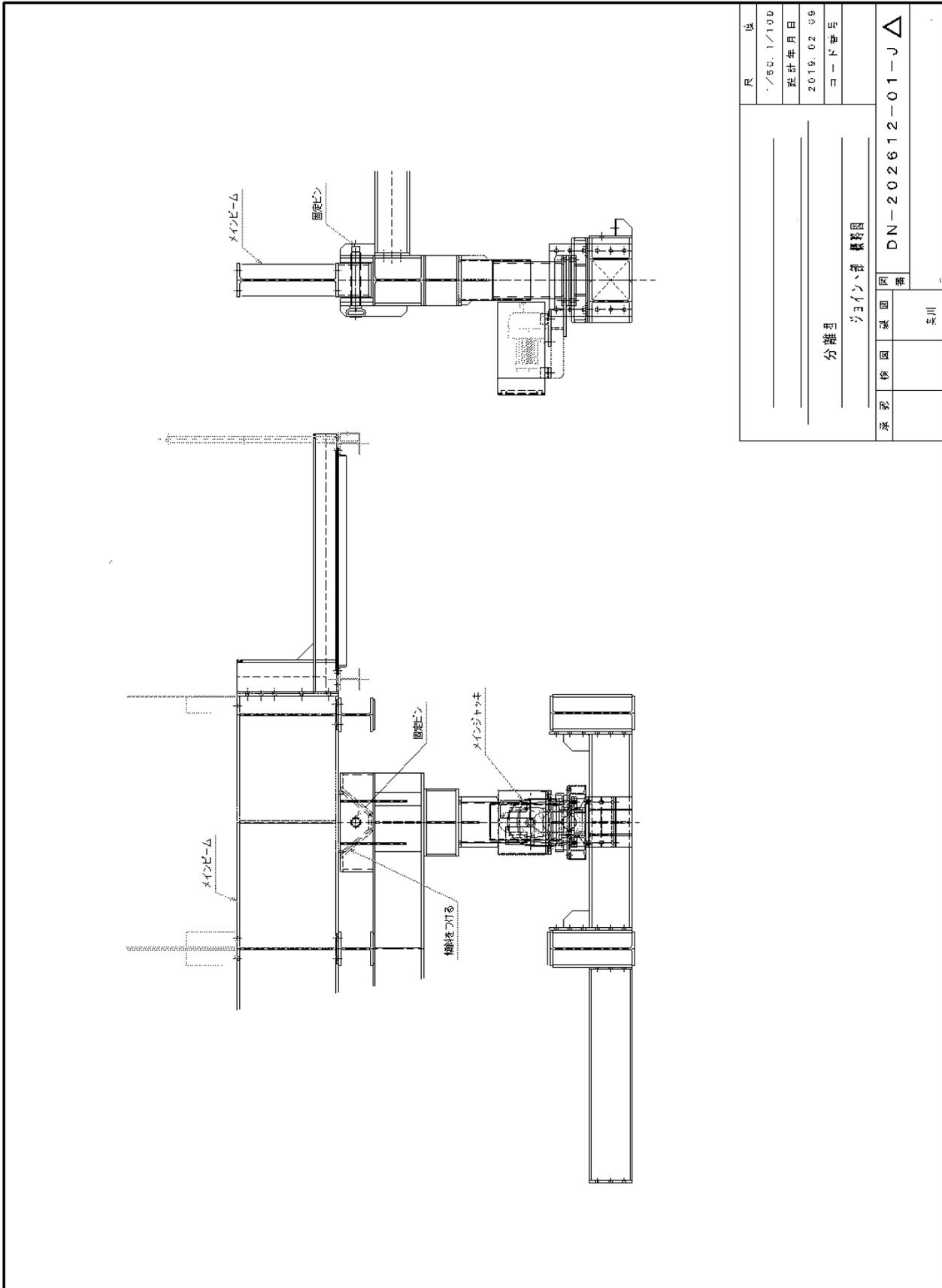


図-4.6.1 分離型セントル 分離移動状況



氏名		氏名
設計年月日		2019.02.09
コード番号		DN-202612-01-J Δ
分離型 ジョイント部 概略図		
承認	検図	区 番
		区 番
		区 番

図-4.6.3 分離型セントル ジョイント部概略図

5. 施工

5.1 施工フロー

本工法は、覆工コンクリートの一部を切削し、繊維混入急硬コンクリートを打ち直して更新するため、基本的には図-5.1.1のフローに従って施工を進めていくものとする。

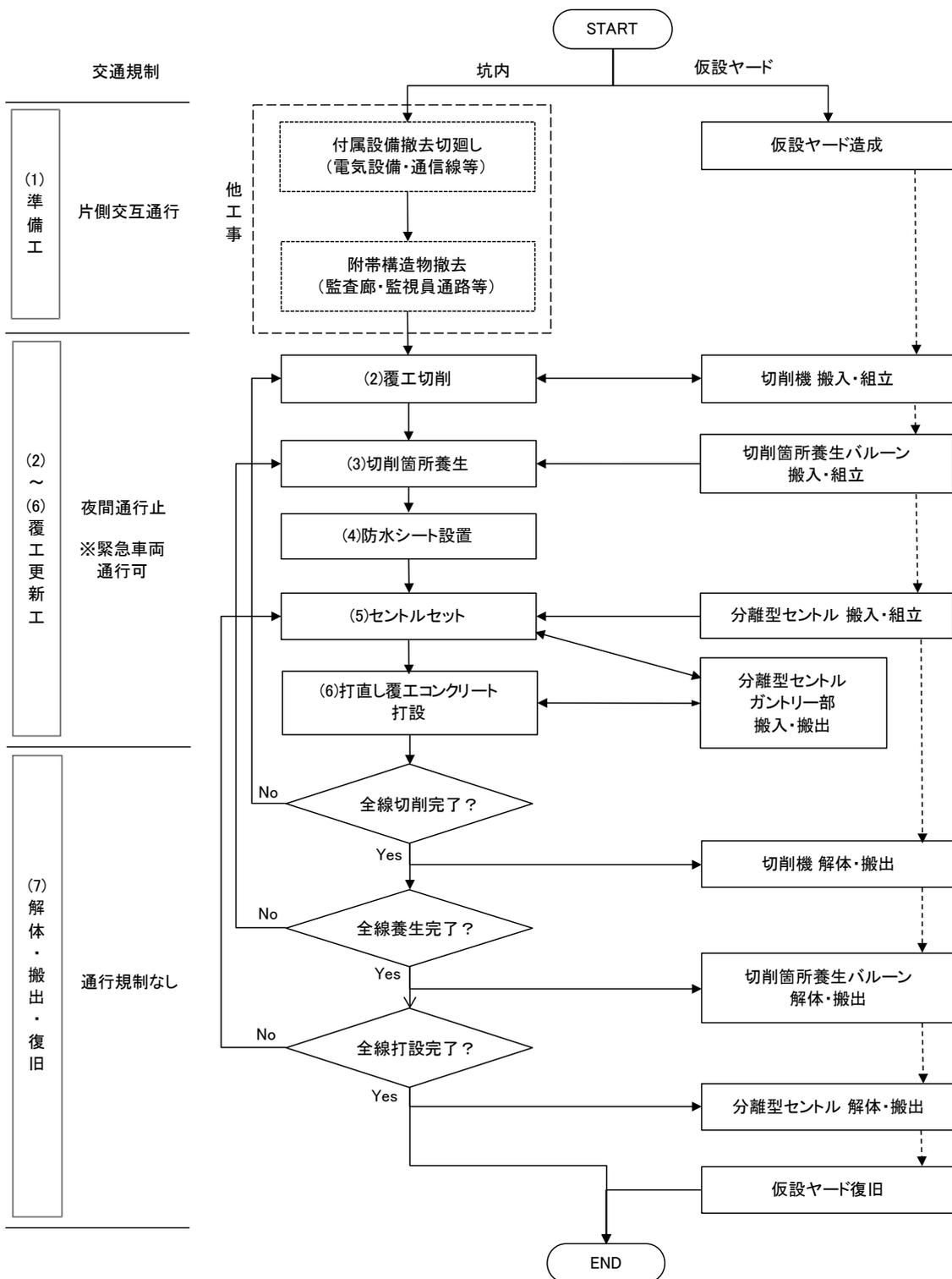


図-5.1.1 更新工法施工フロー図

5. 2 施工手順

施工手順と各手順における交通規制の形態を図-5.2.1 に示す。

(1) 準備工

トンネル坑内の電気設備や通信設備等の付属設備の撤去および切回しを行う。また、必要に応じて、トンネルの監査廊や監視員通路等の付帯設備の撤去を行う。

(2) 覆工切削

覆工コンクリートの切削は、自由断面掘削機をベースとした専用の切削機を使用して1スパン(10.5m)行う。切削機をトンネル中央部に据付け、カッタードラムを覆工コンクリート面に直角に押し当ててトンネル断面形状に沿って旋回しながら壁面を切削する。1旋回切削終了後、ブームを延長し、次の切削箇所にかッタードラムを移動し、上記と同様の作業を繰り返す。切削終了後、切削ずりは、バックホウ(0.45m³級×1台)を使用してダンプトラック(10t×2台)に積み込み、坑外へ搬出する。ずり出し完了後、切削機や重機類は坑外へ搬出する。

(3) 切削箇所養生

覆工コンクリートの切削完了後、切削箇所に架台付き養生バルーン(L=10.5m)を設置し、切削した覆工面をバルーンで養生する。切削箇所養生後、一般車の開放を行う。

(4) 防水シート設置

防水シートは、架台付き養生バルーンを取外し移動後、高所作業車を使用して切削した覆工面に展張施工する。防水シート施工後、架台付き養生バルーンを設置し、防水シート箇所を養生する。防水シート設置箇所の養生後、一般車の開放を行う。

(5) セントルセット

防水シート設置箇所の架台付き養生バルーンを移動後、スキンプレート部とガントリー部を切り離すことができる分離型セントルをセットする。セントルセット後、分離型セントルのスキンプレート部からガントリー部を取り外して坑外へ搬出し一般車の開放を行う。

(6) 打直し覆工コンクリート打設

ガントリー部を坑内に搬入し分離型セントルのスキンプレート部に取り付ける。覆工コンクリートは、コンクリートポンプ車を使用して繊維混入急硬コンクリートを打設する。コンクリートの脱型強度の発現確認後、分離型セントルのスキンプレート部からガントリー部を取り外して坑外へ搬出し、一般車の開放を行う。

時間・交通規制 夜間 ・(1) 準備工 :片側交互通行 ・(2)~(6) :通行止め ・(7) 解体・搬出 ・復旧 :交通規制なし	時間・交通規制	(2) 覆工切削	(3) 切削箇所養生	(4) 防水シート設置	(5) セントルセット	(6) 打直し覆工コンクリート打設	(5)・(6) ガントリ一部搬入・搬出
	断面図	断面図	断面図	断面図	断面図	断面図	断面図
夜間 (緊急車両通行時) ・緊急車両通行可	施工手順	縦断面図 平面図	縦断面図 平面図	縦断面図 平面図	縦断面図 平面図	縦断面図 平面図	縦断面図 平面図
	施工手順	施工手順	施工手順	施工手順	施工手順	施工手順	施工手順
昼間 ・交通規制なし	時間・交通規制	(5) セントルセット	(6) 打直し覆工コンクリート打設	(5)・(6) ガントリ一部搬入・搬出	(5) セントルセット	(6) 打直し覆工コンクリート打設	(5)・(6) ガントリ一部搬入・搬出
	断面図	断面図	断面図	断面図	断面図	断面図	断面図
施工手順	施工手順	施工手順	施工手順	施工手順	施工手順	施工手順	施工手順

図-5.2.1 施工手順図

5. 3 施工サイクル

本工法の施工サイクル例を表-5.3.1に示す。また、施工ステップを図-5.3.1～図-5.3.2に示す。本図は、覆工No.1の覆工を切削した後、サイクル1日目（覆工No.2 覆工切削）からの施工ステップを示している。

表-5.3.1 施工サイクル例（4日1サイクル）

覆工No.	1	2	3
サイクル1日目	切削養生	覆工切削	凡 例 網掛け部：作業終了後、養生バルーンを設置するスパン 赤字：当日の作業内容
サイクル2日目	防水シート	切削養生	
サイクル3日目	セントルセット	切削養生	
サイクル4日目	覆工打設	切削養生	
サイクル1日目	覆工養生	切削養生	覆工切削

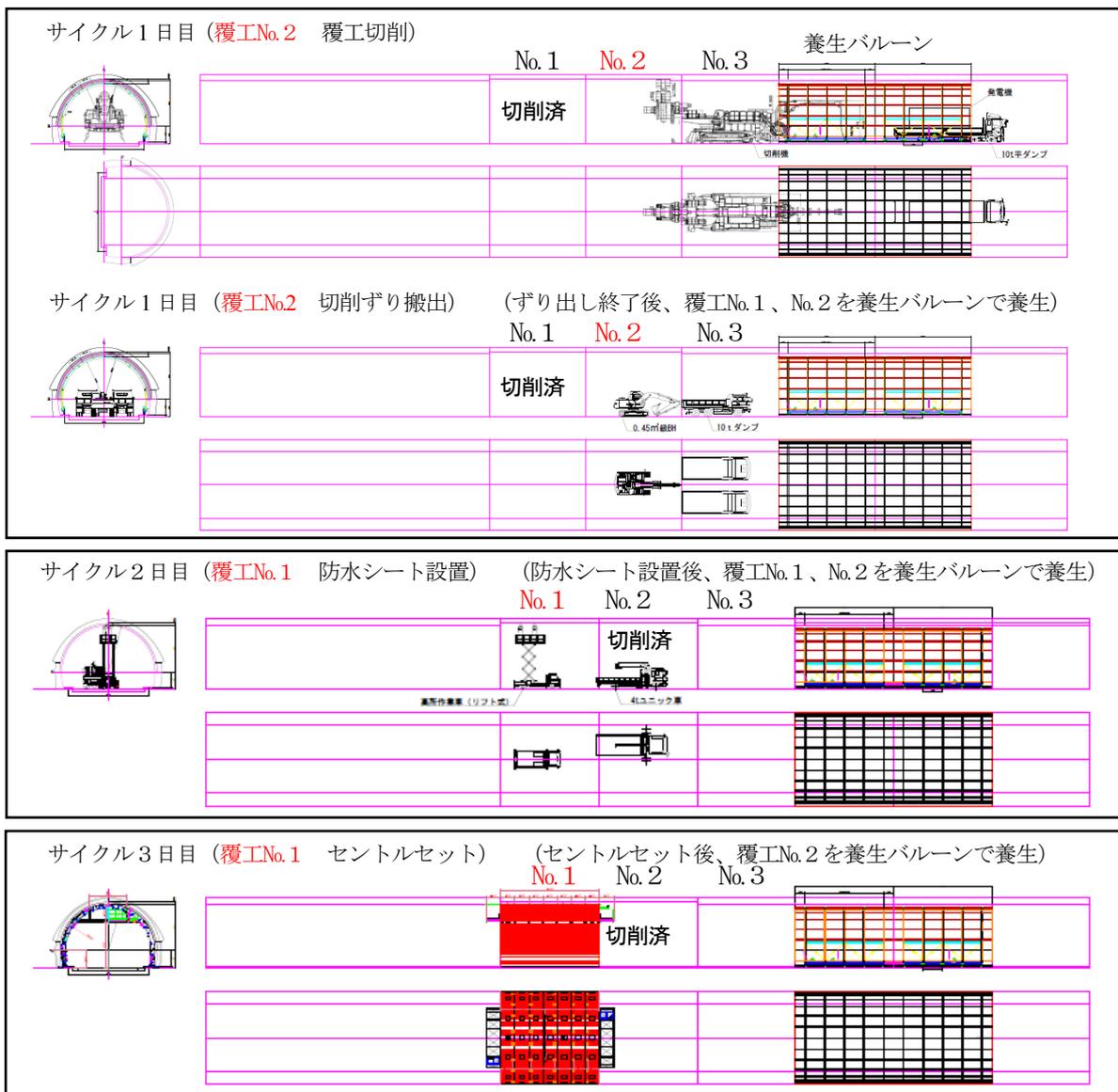


図-5.3.1 施工ステップ（その1）

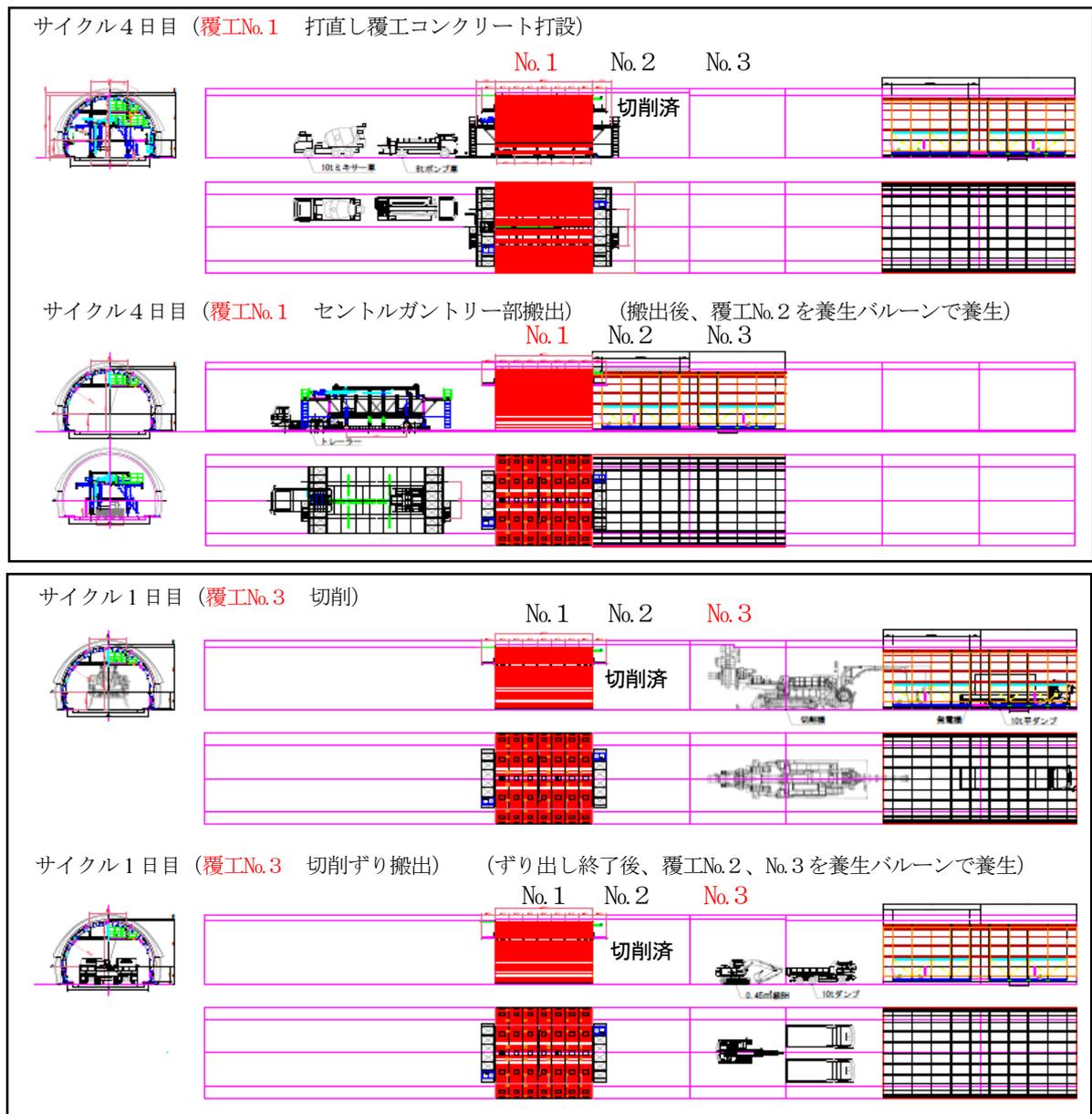


図-5.3.2 施工ステップ (その2)

本工法のサイクルタイムを表-5.3.2に示す。

表-5.3.2 サイクルタイム

日毎に作業交代:4日で1スパン(10.5m)完了			
サイクル1日目	サイクル2日目	サイクル3日目	サイクル4日目
覆工切削(目標) ・機械移動、セット 60分 ・切削 300分 ・ずり出し(機械搬出) 60分 ・切削箇所養生 60分 ・検査、確認 60分 ・休憩 60分 600分	防水シート設置(目標) ・高所作業車搬入 60分 ・防水シート施工 300分 ・片付け(機械搬出) 60分 ・防水シート区間養生 60分 ・検査、確認 60分 ・休憩 60分 600分	セントルセット(目標) ・ガントリー一部搬入 60分 ・スキンプレート部と合体 60分 ・セントルセット 180分 ・妻板設置・打設段取り 120分 ・巻厚検査等 60分 ・ガントリー一部搬出、片付け 60分 ・休憩 60分 600分	打直し覆工コンクリート打設(目標) ・ガントリー一部搬入 60分 ・スキンプレート部と合体 60分 ・コンクリート打設 180分 ・養生 180分 ・ガントリー一部搬出、片付け 60分 ・休憩 60分 600分

- ・ 本更新工法月進 : 10.5m/4日 × 20日 = 52.5m
- ・ 従来工法月進 : 10m/16.5日 × 20日 = 12.1m (2パーティ)

5. 4 使用機械

本工法で使用する主要使用機械を表-5.4.1 に示す。

表-5.4.1 主要使用機械

名称	仕様	数量	摘要
切削機	切削能力 10m ³ /h	1 台	(切削ドラムは新開発)
積込機	バックホウ (0.45m ³ 級)	1 台	切削ずり積込
ずり運搬車	ダンプトラック (10t)	2 台	切削ずり運搬
架台付き養生バルーン	L=10.5m	2 台	切削面防護、防水シート防護 (新開発)
高所作業車	リフト式	1 台	防水シート張り付け用
ユニック車	4t	1 台	防水シート運搬用
分離型セントル	L=10.5m	1 基	スキンプレート部とガントリー部の分離型 (新開発)
トレーラ		1 台	ガントリー部運搬用 (新開発)
コンクリートポンプ車	8t	1 台	

5. 5 仮設備

坑外仮設備計画に当たって、一般車両の通行の安全を確保し、一次通行止めなどの交通規制を極力少なくなるような坑外設備の配置を計画する。本工法で使用する専用の覆工切削機は、自由断面掘削機をベースとしており、総重量は 130t にも達することから、この専用機を安全に搬入し組立・解体する仮設ヤードや新設トンネルで使用する仮設備を配置するヤードが必要となる。

ここでは、既設トンネル始点側と終点側両坑口に 30m×50m (1,500m²) 程度の広さの仮設ヤードを用意する。これは、始点側ヤードで機械設備の組立を行い、終点側ヤードで機械設備の解体を行うほか、施工中、切削機や分離型セントルのガントリー部を仮置きするためである。

主な坑外仮設備の一覧表を表-5.5.1 に示す。

表-5.5.1 主な仮設備一覧

機械名	規格・性能	数量	摘要
換気用ファン	1,000m ³ /min 程度	1 台	切削時
集じん機	1,500m ³ /min 程度	1 台	切削時
電気設備	発電機 (400kVA)	1 台	切削時
濁水処理設備	30m ³ /h 程度	1 式	
給水設備		1 式	
ずり仮置き場		1 カ所	始点側

5. 6 交通規制

本更新工法は、工事期間中、夜間通行止めの交通規制が必要である。昼間は一般通行車両が従来と変わらず通行可能であるが、一般車両がトンネル更新工事施工箇所を通行する際、更新設備により一部通行空間が狭くなっていることから、車両運転手への心理的な配慮が必要である。このため、工事期間中の交通規制の期間は極力短くすることが必要であり、また、工事施工箇所については、視覚的に注意を促す表示や通行中の注意喚起設備が必要となる。本工法における一般車両への交通規制の内容は、以下のとおりである。

(1) 準備工

- ・ 交通規制：片側1車線交互通行

既設トンネルの支障物の撤去・移設等は、基本的に片側1車線規制による交互通行となる。

(2) 更新工事施工時

- ・ 交通規制：夜間通行止め10時間（午後8時～午前6時）

覆工切削・養生、防水シート設置、セントルセット、コンクリート打設の作業は、夜間通行止めの10時間に行う。

夜間通行止めの間、緊急車両が通行する場合は、各作業時において以下の対応を行う。

①覆工切削時

切削機を次スパンへ移動し側壁側に寄せ、緊急車両が通行できる車線を確保する。通行車線に散在するコンクリートガラは、バックホウを使用して取り除き車線を確保する。その後、切削部へ養生バルーンを移動設置し、通行の安全を確保した後、緊急車両を通過させる。

②防水シート設置時

貼り付け作業中の防水シートは仮止めを行い、高所作業車を撤去する。防水シート貼り付け部へ養生バルーンを移動設置し、通行の安全を確保した後、緊急車両を通過させる。

③セントルセット時

作業を一次中止し、車両が通過するガントリー一部の安全を確保した後、緊急車両を通過させる。

④覆工コンクリート打設時

コンクリート打設作業を一次中断し、車両が通過するガントリー一部の安全を確保した後、緊急車両を通過させる。

(3) 更新工事休止時

- ・ 交通規制解除：14時間（午前6時～午後8時）

更新工事期間中は、養生バルーン架台2台、分離型セントル（スキンプレート部）1基がトンネル内に存置される。安全設備として、一般的な警告標識や工事案内看板、照明、非常用電話等を設置する。

(4) 坑内機械設備の解体・搬出および仮設ヤード

- ・ 交通規制：通行規制なし

切削機、養生バルーン、分離型セントル等の機械設備は、夜間通行止め時に坑内から坑外の仮設ヤードへ搬出し、仮設ヤード内で解体・搬出を行うため、交通規制は行わない。

6. 適用に当たっての留意点

本工法は、矢板工法で施工された比較的延長の短い（延長が概ね 1,000m）トンネルの更新工事を高速施工で実施できるように開発したものである。実現場に適用する場合は、以下に示す点に留意する必要がある。

（1） 既設覆工の健全度評価

本工法は矢板工法で施工された無筋の覆工コンクリート（巻厚 60cm 以上）のトンネルを更新する工法であり、既設覆工の健全度評価の結果次第では、事前の補修・補強の内容及び大きさが大きく変化する。そのため、実施工に当たり既設トンネルの設計・施工資料や既設覆工の健全度を十分照査する必要がある。

（2） 切削機的能力確認

本工法に使用する切削機は、自由断面掘削機をベースとして覆工コンクリートはつき機を搭載した機械であり、道路トンネル断面に適用するためには、事前に切削能力等の確認が必要である。

（3） トンネル延長と施工方法

本工法のトンネルへの適用延長は、比較的延長の短い（延長が概ね 1,000m）としている。それ以上の延長のトンネルで適用する場合には、切削機等の移動に時間を要しサイクルタイムへの影響が懸念されるため、別途移動方法の検討や自走機械のスピードアップ、退避場所の確保等の検討が必要である。

（4） 打直し覆工コンクリート

本工法で使用する打直し覆工コンクリートは、繊維混入急硬コンクリートである。このコンクリートは、遅延剤の添加量が練上がり温度により増減することが確認されている。そのため、実施工の際は、コンクリートの練上がり温度の厳密な管理方法や練上がり温度の制御方法について検討する必要がある。

（5） 仮設ヤードの確保

本工法に使用する切削機、養生バルーン架台、分離型セントルの組立、および施工時における切削機、分離型セントルガントリー部の退避場所等として、既設トンネルの両坑口部に 30m×50m（1,500m²）程度の仮設ヤードが必要である。

参考文献

- 1) 仲里純勇他：覆工薄肉打ち替えによる急速補修 福地ダム～安波ダム間調整水路トンネル、トンネルと地下、2002年4月
- 2) 岐阜工業株式会社ホームページ： <https://www.gifukogyo.co.jp>

LCR-Speed 工法

—専用切削機・設備を用いたトンネル覆工更新工法—

参 考 資 料

1. サイクルタイム試算例

1. 1 基本条件

本更新工法の試算対象とするトンネルとして、以下の条件を設定する。

- ① 図-1.1.1 に示す既設トンネル断面で試算を検討する。
- ② 切削機の切削能力は $10\text{m}^3/\text{h}$ とする。
- ③ 既設覆工の切削厚は 20cm とし、切削箇所は架台付き養生バルーンで保護する。
- ④ 覆工コンクリートの厚さは 20cm とし、繊維混入急硬コンクリートを使用する。
- ⑤ 切削後、湧水対策として、覆工全面に防水シートを施工する。
- ⑥ 交通規制は、 20 時～ 6 時まで夜間通行止めとし、 6 時～ 20 時は全面開放する。
- ⑦ 1 日の作業時間は、残業 2 時間を含む 10 時間（ 600 分）とする。
- ⑧ 作業順序は、**切削・養生**→**防水シート**→**覆工セントルセット**→**覆工コンクリート打設**とする。

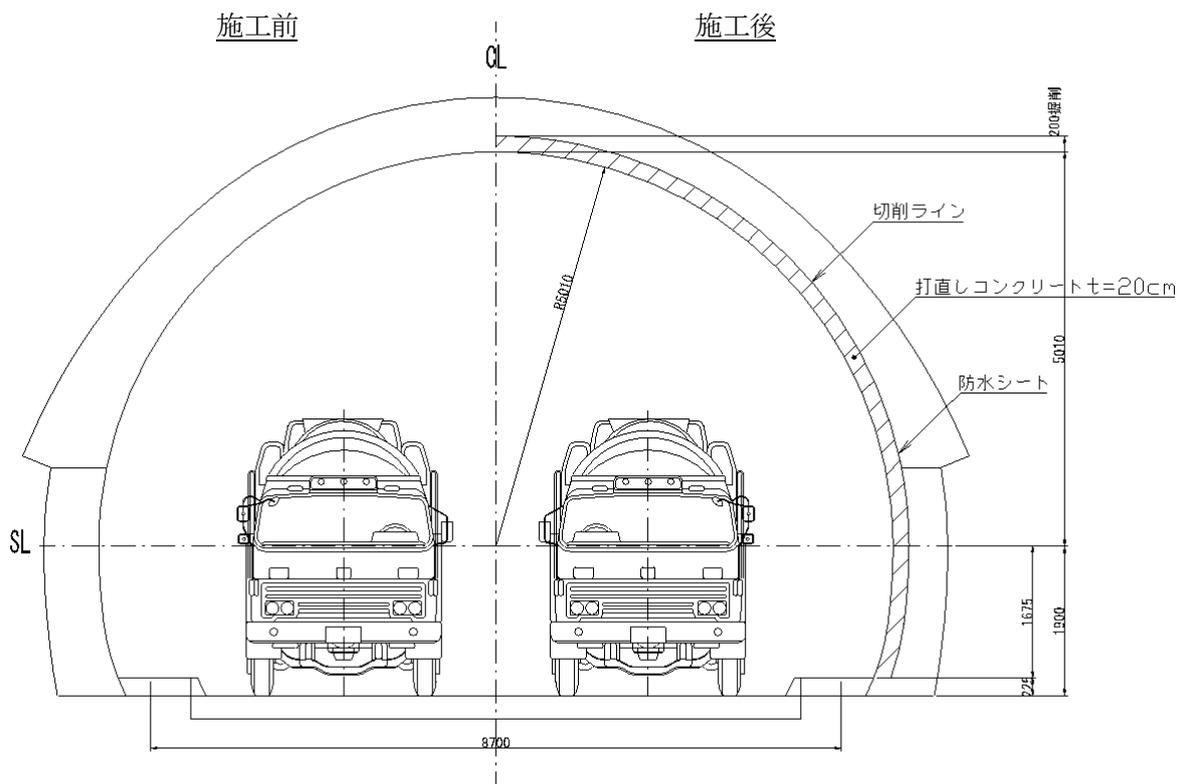


図-1.1.1 検討トンネル断面形状

1. 2 サイクルタイム試算条件

試算に当たっての施工機械設備および詳細条件を以下に示す。

(1) 主要施工機械設備

本更新工法で使用する主要機械設備を表に示す。

表-1.2.1 主要機械設備

名 称	仕 様	数 量	摘 要
切削機	切削能力 10m ³ /h	1 台	(切削ドラムは新開発)
積込機	バックホウ (0.45m ³ 級)	1 台	切削ずり積込
ずり運搬車	ダンプトラック (10t)	2 台	切削ずり運搬
養生バルーン架台	L=10.5m	2 台	切削面防護、防水シート防護 (新開発)
高所作業車	リフト式	1 台	防水シート張り付け用
ユニック車	4t	1 台	防水シート運搬用
分離型セントル	L=10.5m	1 基	スキンプレートとガントリー分離 (新開発)
トレーラ		1 台	ガントリー運搬用 (新開発)
コンクリートポンプ車	8t	1 台	

(2) サイクルタイム算定条件

① 切削・養生

- 切削時間=10.5m×20m×0.2m÷10m³/h=4.2時間≒5時間 (300分)
(1スパン長 10.5m、覆工周長 20m、切削厚 0.2m、切削能力 10m³/h)
- コンクリートガラ積込運搬 60分
- 養生バルーンによる切削面養生 60分

② 防水シート・補修工

- 防水シート施工 300分

③ 覆工セントルセット

- ガントリー搬入 60分
- スキンプレート+ガントリー合体 60分
- セントルセット 180分
- 妻型枠設置、打設段取り 120分

④ 覆工コンクリート打設

- コンクリート打設 180分
- コンクリート養生 180分
- ガントリー坑外搬出 60分

1. 3 サイクルタイム

本更新工法におけるサイクルタイム算出例を表-1.3.1 に示す。

表-1.3.1 サイクルタイム表

日毎に作業交代:4日で1スパン(10.5m)完了			
サイクル1日目	サイクル2日目	サイクル3日目	サイクル4日目
覆工切削(目標)	防水シート設置(目標)	セントルセット(目標)	打直し覆工コンクリート打設(目標)
・機械移動、セット 60分	・高所作業車搬入 60分	・ガントリー部搬入 60分	・ガントリー部搬入 60分
・切削 300分	・防水シート施工 300分	・スキンプレート部と合体 60分	・スキンプレート部と合体 60分
・ずり出し(機械搬出) 60分	・片付け(機械搬出) 60分	・セントルセット 180分	・コンクリート打設 180分
・切削箇所養生 60分	・防水シート区間養生 60分	・妻板設置・打設段取り 120分	・養生 180分
・検査、確認 60分	・検査、確認 60分	・巻厚検査等 60分	・ガントリー部搬出、片付け 60分
・休憩 60分	・休憩 60分	・ガントリー部搬出、片付け 60分	・休憩 60分
600分	600分	600分	600分

本更新工法月進=10.5m/4日×20日=52.5m

従来工法（内巻工：高強度薄肉補強工）のサイクルタイム算出例を表-1.3.2 に示す。交通規制は、夜間片側通行で施工し、昼間は全面開放する。

表-1.3.2 サイクルタイム表

2パーティ:16.5日で1区間(10m)完了						
作業	妻枠ベースプレート取付※	中間部ベースプレート取付※	妻型枠取付	ボード設置	モルタル注入	計
日数	(0.7日)	(2.9日)	2日	10.9日	3.6日	16.5日

※平行作業

(参考資料2. トンネル更新工事試算例 在来工法見積書参照)

従来工法月進=10.0m/16.5日×20日=12.1m

本更新工法月進/従来工法月進=52.5m/12.1m=4.3倍

以上より、本更新工法は、従来工法と比べ4.3倍の施工スピードでトンネル更新を行うことが可能である。

次頁以降に

資料①「施工ステップ」

資料②「タイムスケジュール案」

を資料として添付する。

資料① 施工ステップ

1回/4日打設サイクルでの施工(10スパン施工の場合)

覆工No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1日目	切削									
2日目	切削済	切削								
3日目	防水シート	切削済								
4日目	セントルセット	切削済								
5日目	覆工打設	切削済								
6日目	覆工養生	切削済	切削							
7日目	覆工養生	防水シート	切削済							
8日目	脱型	セントルセット	切削済							
9日目		覆工打設	切削済							
10日目		覆工養生	切削済	切削						
11日目		覆工養生	防水シート	切削済						
12日目		脱型	セントルセット	切削済						
13日目			覆工打設	切削済						
14日目			覆工養生	切削済	切削					
15日目			覆工養生	防水シート	切削済					
16日目			脱型	セントルセット	切削済					
17日目				覆工打設	切削済					
18日目				覆工養生	切削済	切削				
19日目				覆工養生	防水シート	切削済				
20日目				脱型	セントルセット	切削済				
21日目					覆工打設	切削済				
22日目					覆工養生	切削済	切削			
23日目					覆工養生	防水シート	切削済			
24日目					脱型	セントルセット	切削済			
25日目						覆工打設	切削済			
26日目						覆工養生	切削済	切削		
27日目						覆工養生	防水シート	切削済		
28日目						脱型	セントルセット	切削済		
29日目							覆工打設	切削済		
30日目							覆工養生	切削済	切削	
31日目							覆工養生	防水シート	切削済	
32日目							脱型	セントルセット	切削済	
33日目								覆工打設	切削済	
34日目								覆工養生	切削済	切削
35日目								覆工養生	防水シート	切削済
36日目								脱型	セントルセット	切削済
37日目									覆工打設	切削済
38日目									覆工養生	防水シート
39日目									脱型	セントルセット
40日目										覆工打設
41日目										脱型(搬出)

凡例
網掛け部：作業終了後、養生バルーンを設置するスパン
赤字：当日の作業内容

※附帯設備、附帯構造物の移設、撤去、復旧は別途作業

41作業日で10スパン(105m)=105m/(41日×7.5/30.4)=105m/1.9ヶ月≒55m/月(土、日休工)

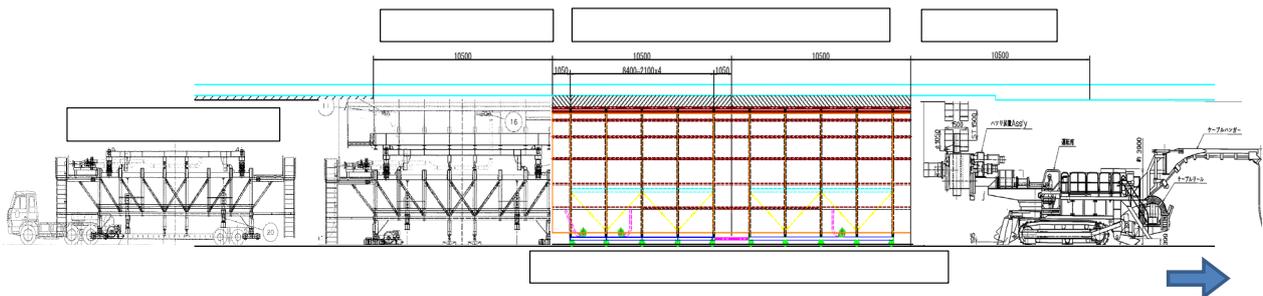
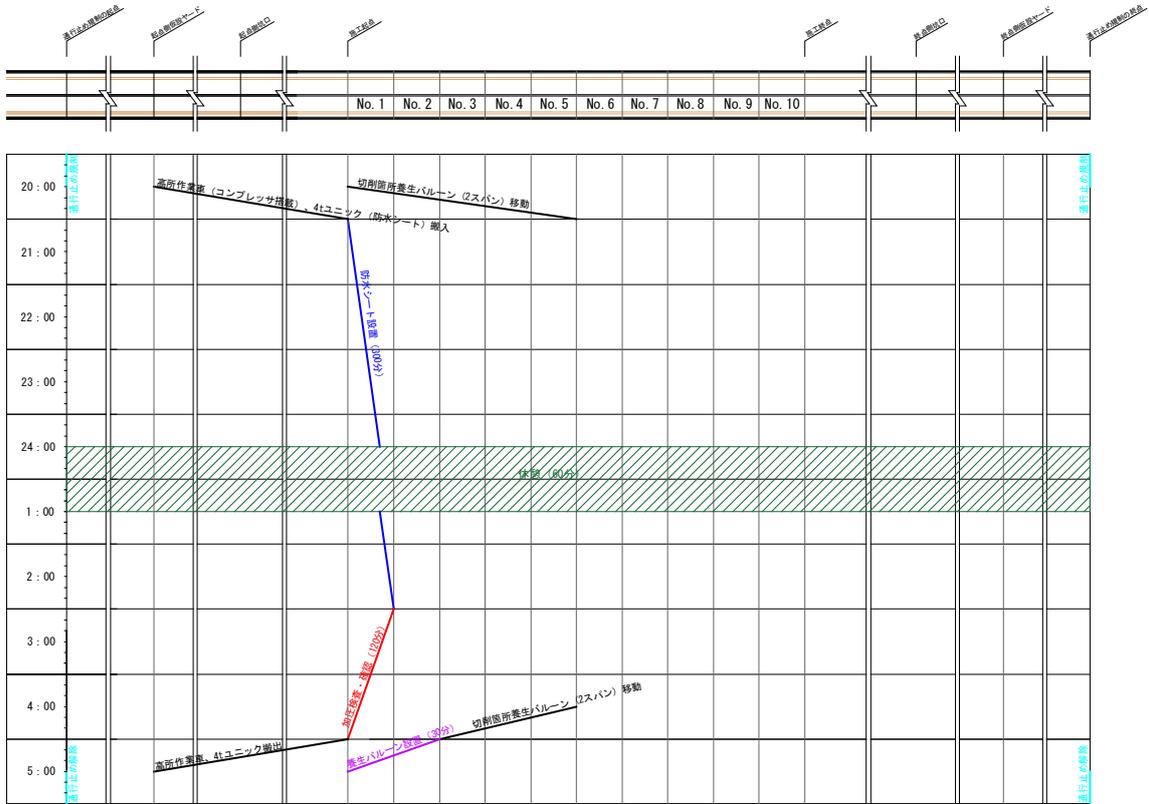
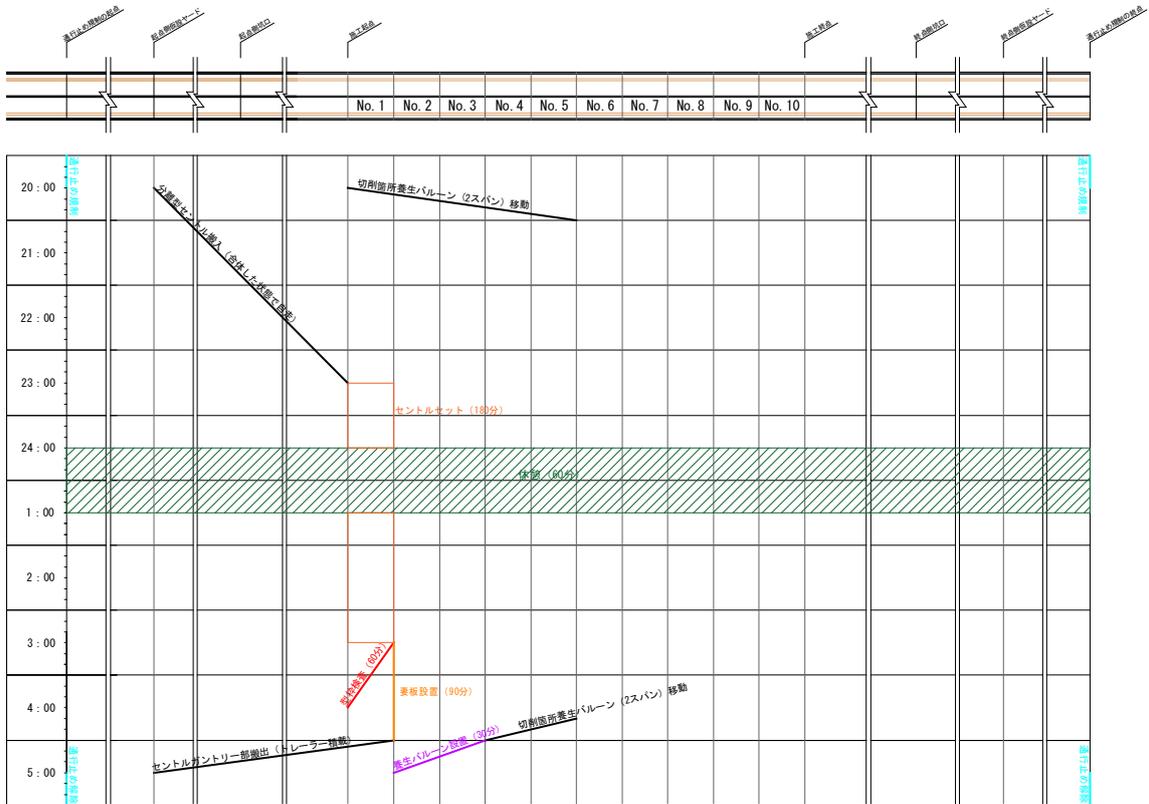


図-1 施工時縦断面図

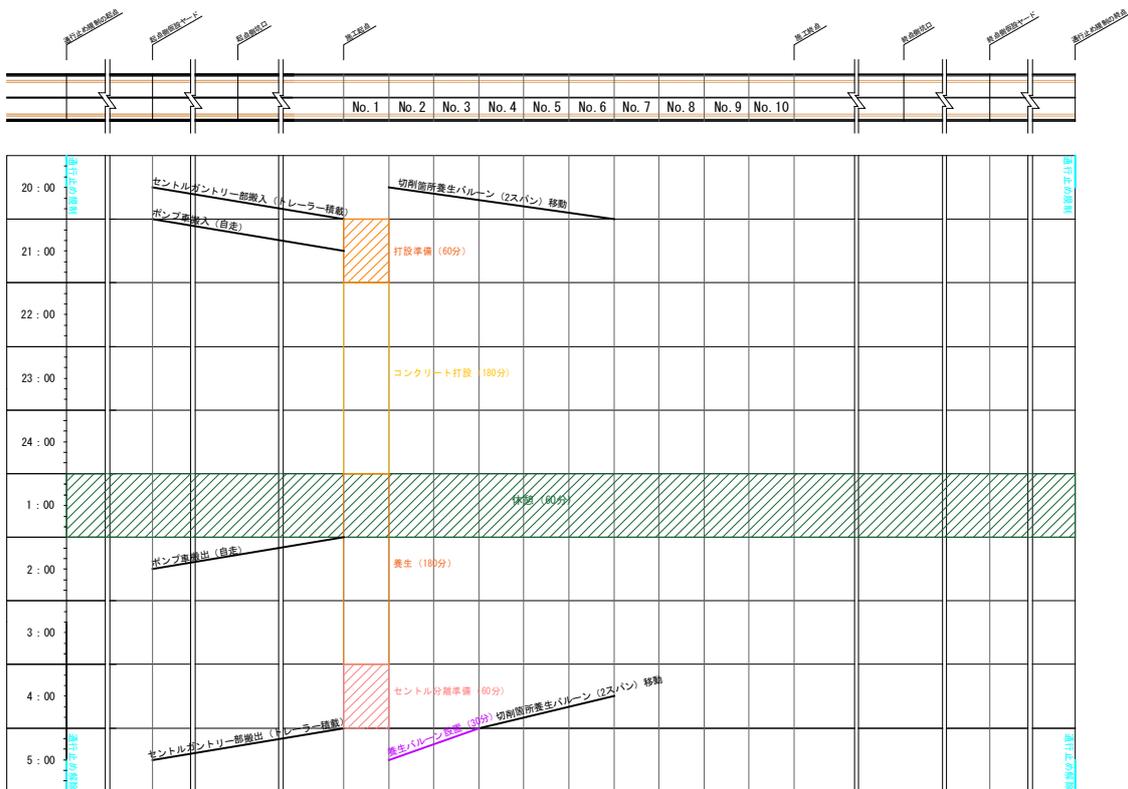
3日目 (1スパン目 防水シート設置)



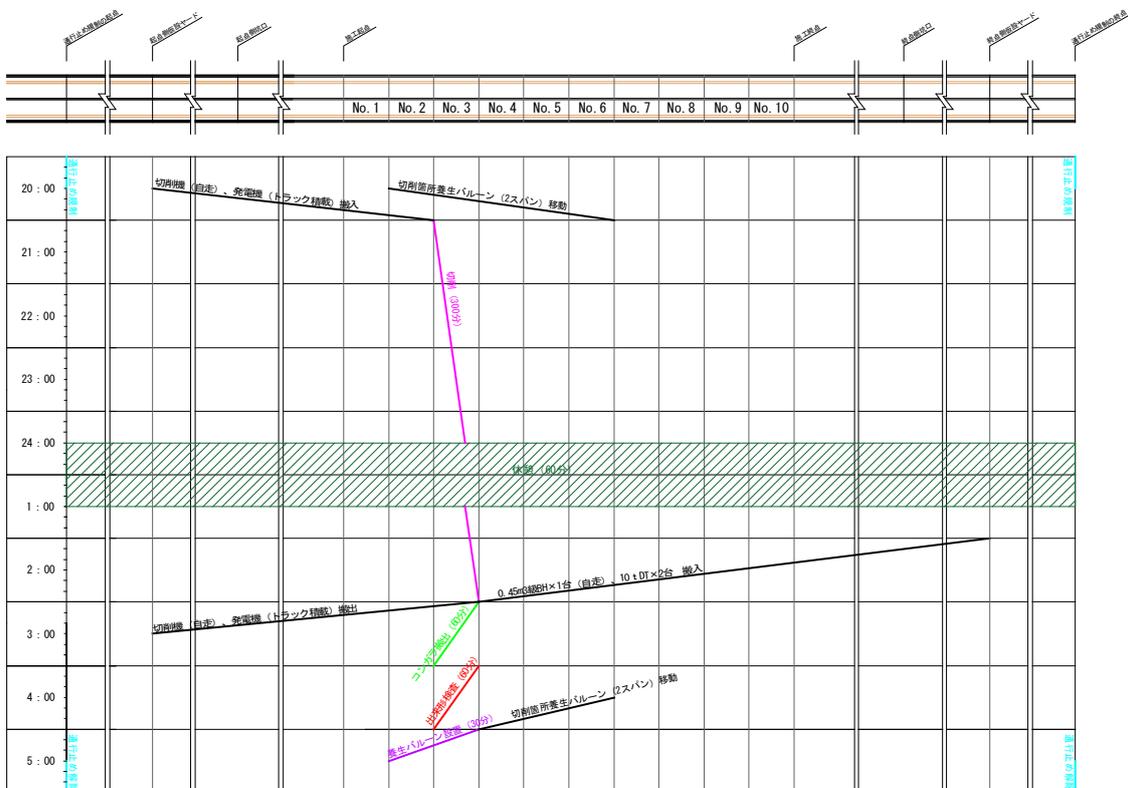
4日目 (1スパン目 センترلセット)



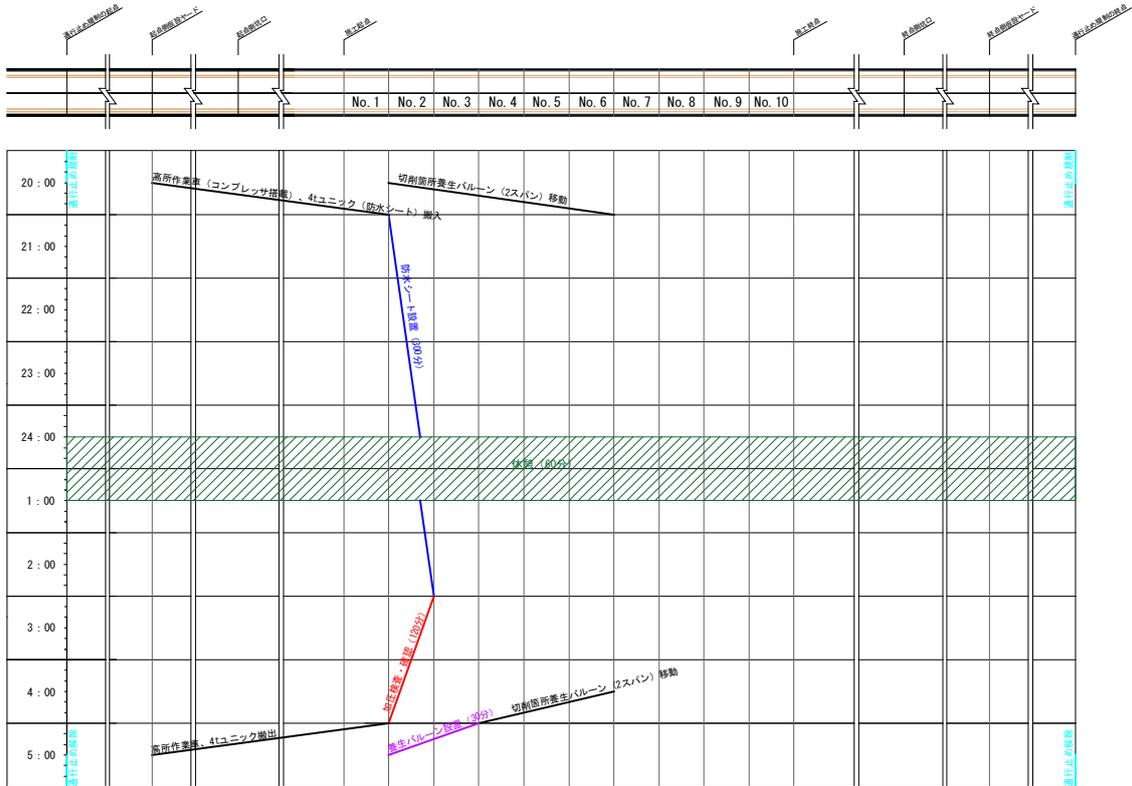
5日目 (1スパン目 打直し覆エコンクリート打設)



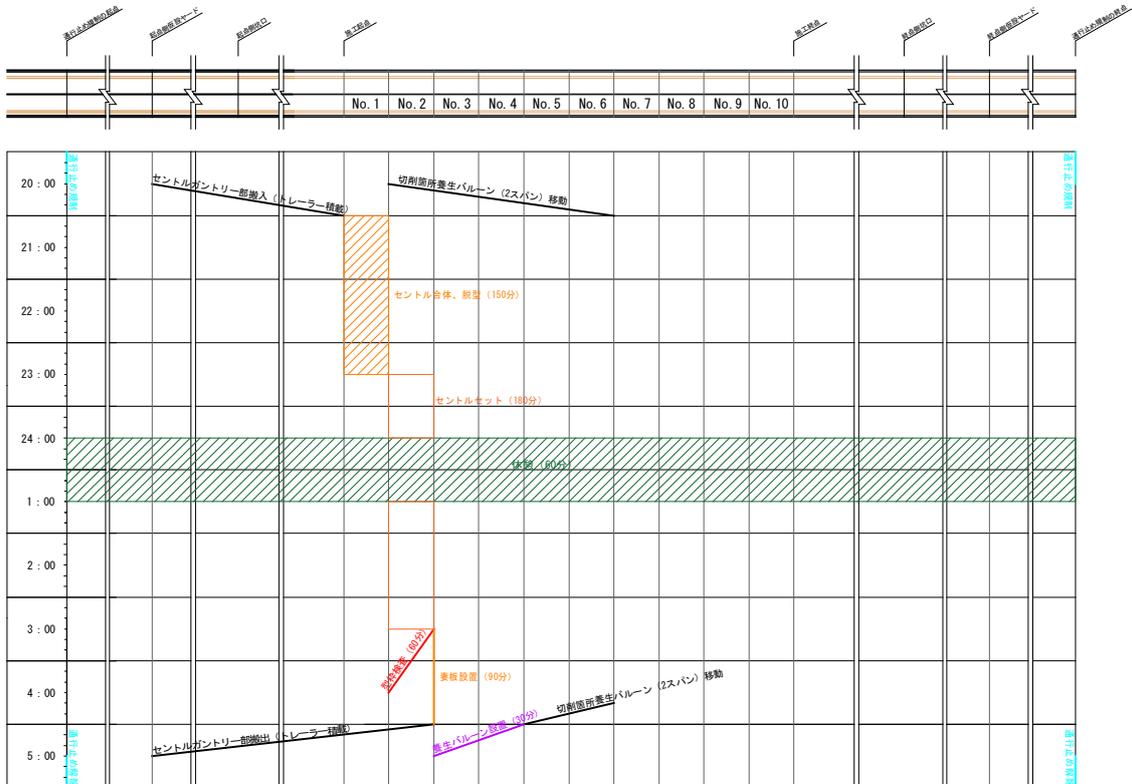
6日目 (3スパン目 覆エ切削)



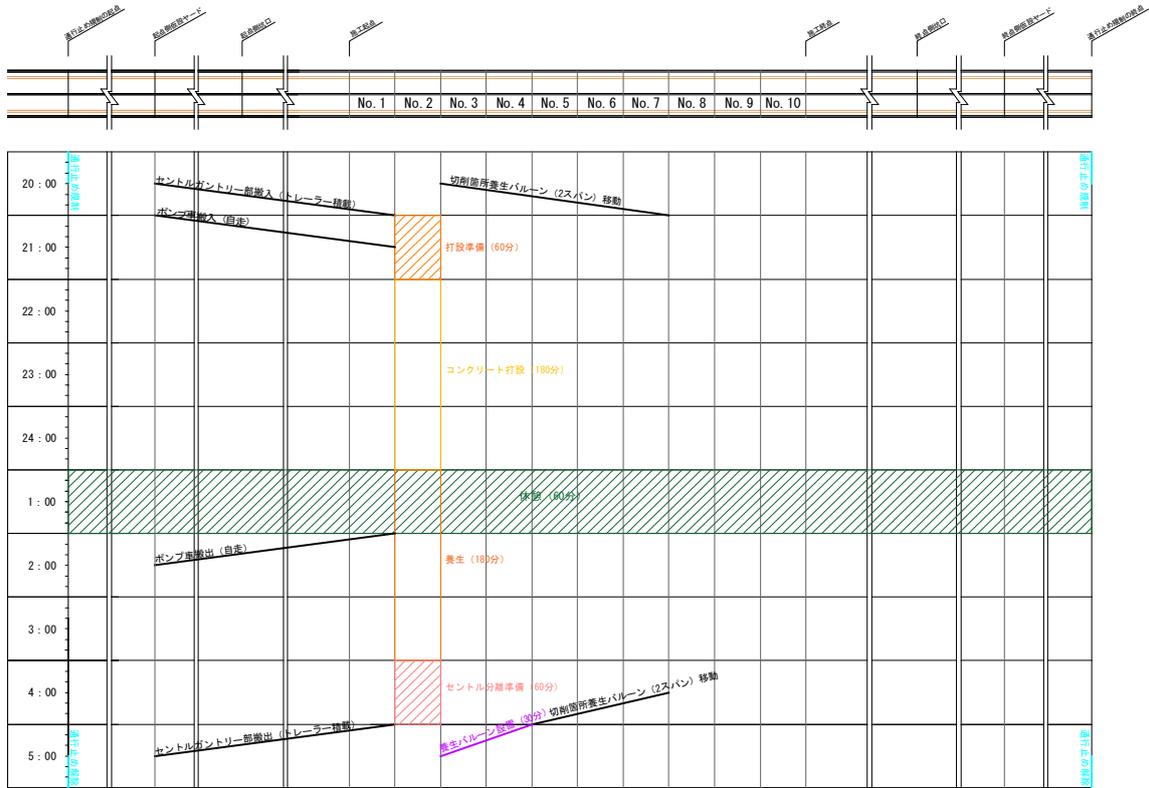
7日目 (2スパン目 防水シート設置)



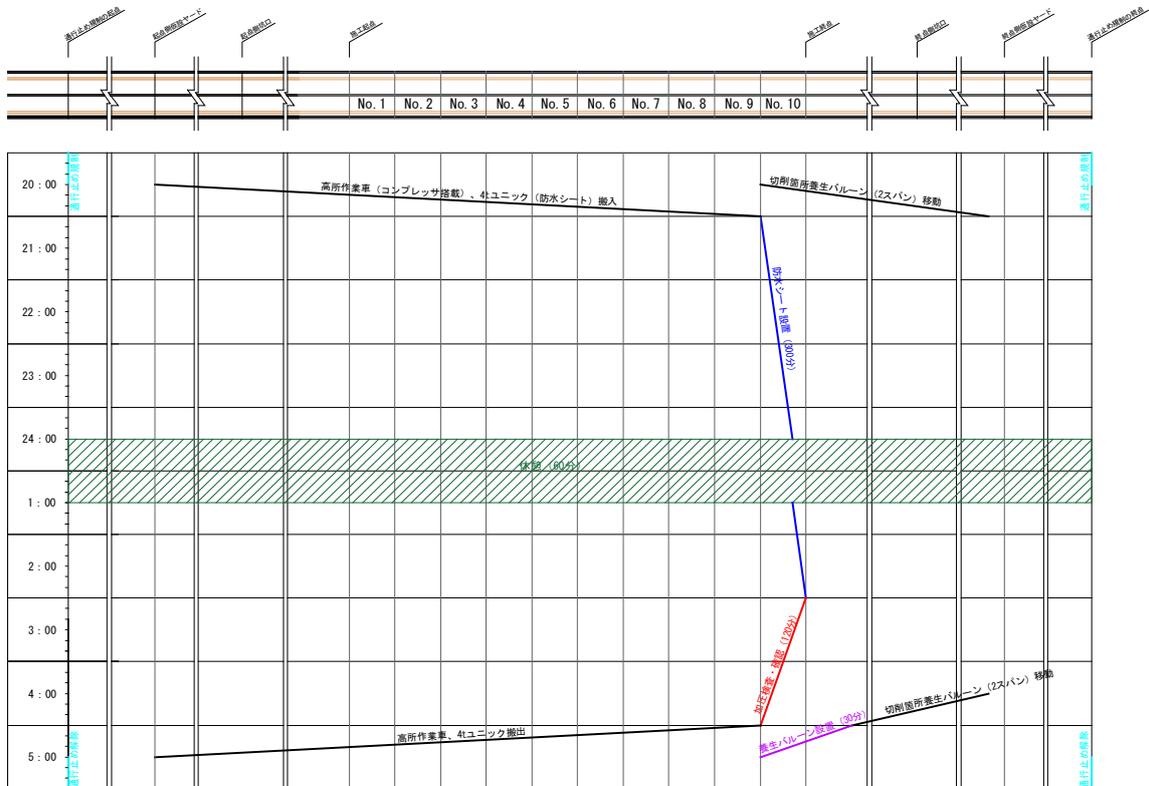
8日目 (1スパン目 脱型 2スパン目 セントルセット)



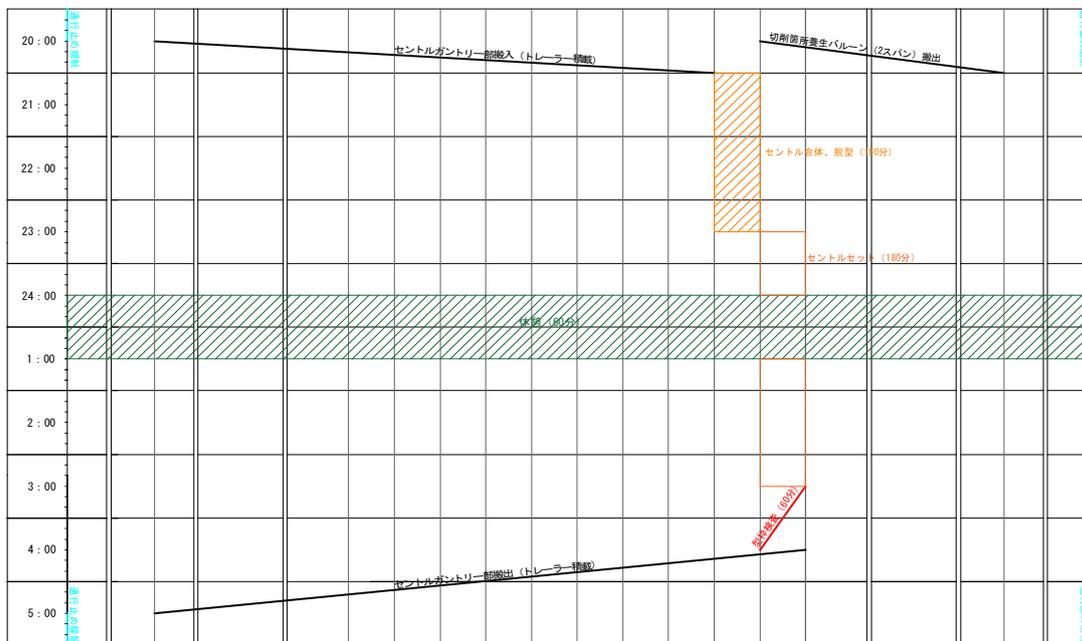
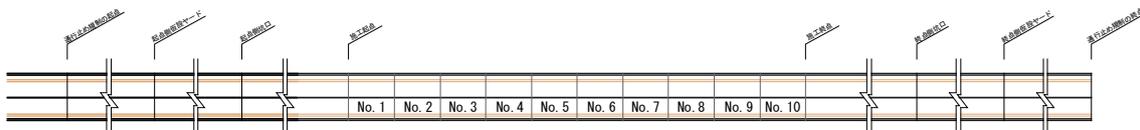
9日目 (2スパン目 打直し覆エコンクリート打設)



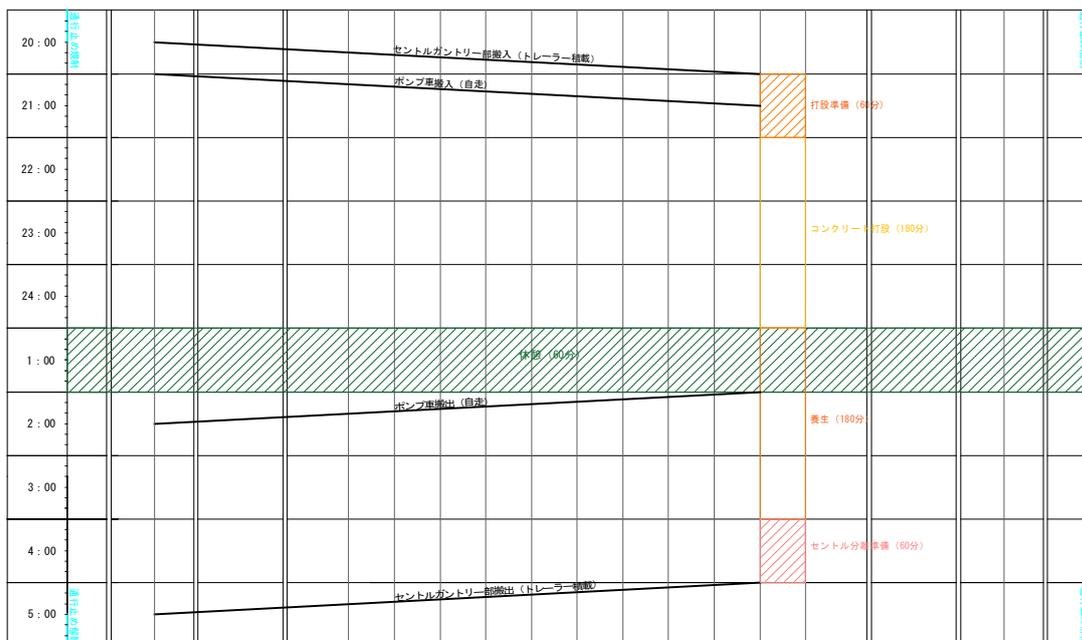
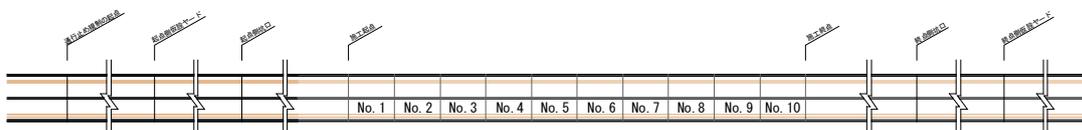
10日目～37日目 (6日目～9日目の作業を繰り返し 10スパン目の覆工切削、9スパン目の打設まで完了)
38日目 (10スパン目 防水シート設置)



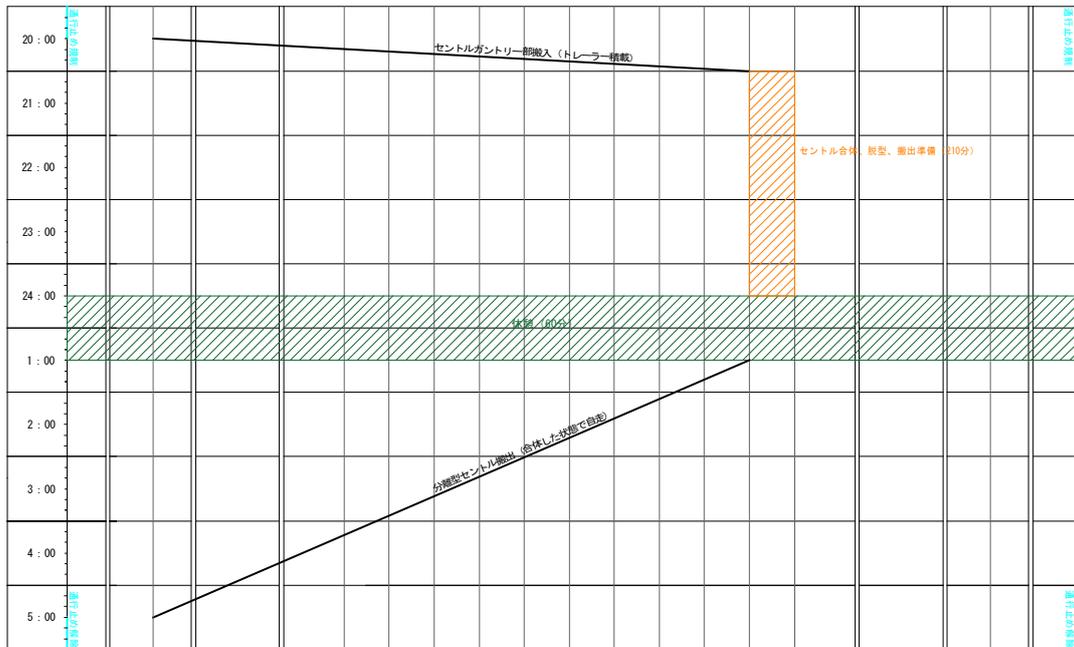
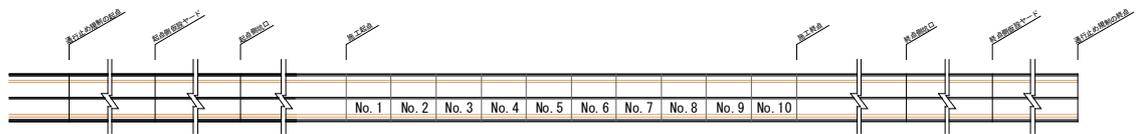
39日目 (9スパン目 脱型 10スパン目 セントルセット)



40日目 (10スパン目 打直し覆エコンクリート打設)



41日目 (10スパン目 脱型)



2. トンネル更新工事試算例

(1) はじめに

ここでは、下記2種類の工法で試算した概算を提示し、比較する。

対象は、Aトンネルの補修工事

- ・ 試算例1. 従来工法 トンネル覆工補強（内巻）工で対応した場合
- ・ 試算例2. 更新工法（共同研究で開発した機材）で対応した場合

(2) 試算条件

- ・ 説明図

図-2.1.1 Aトンネル断面図

〔トンネル延長 1510m〕のうち、Aブロック(L=240m)、Bブロック(L= 100m)、Cブロック(L=100m)の補修工事

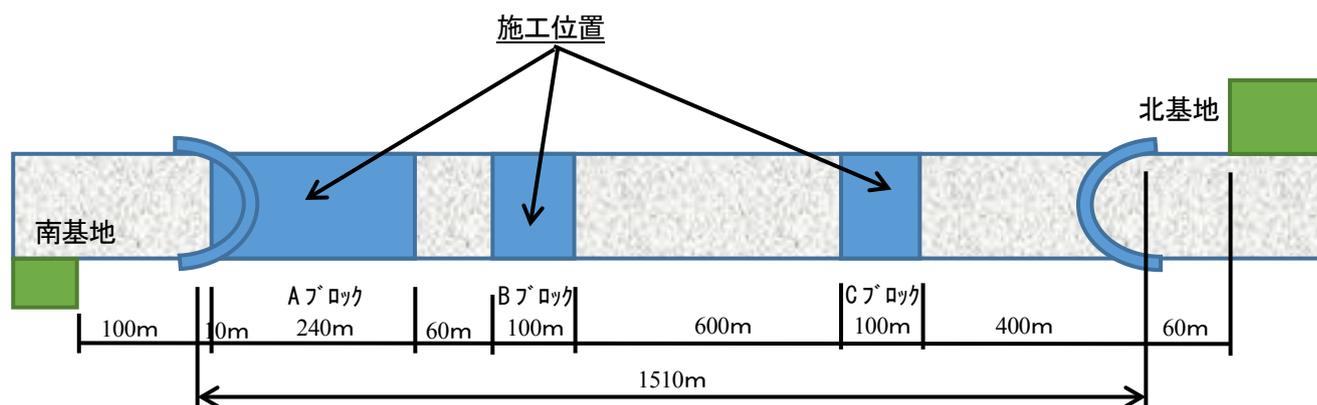


図-2.1.2 施工位置図

- ・ 補修箇所：スプリングラインより上部を補修
試算条件1. 従来工法 $t=75\text{mm}$ の高強度薄肉ライニングによる補修工事
試算条件2. 更新工法 覆工コンクリートの $t=200\text{mm}$ をハツリ、 $t=200\text{mm}$ の高強度コンクリート（共同開発）で更新する工事

- 規制条件
 - 試算条件1. 従来工法 夜間片側交互通行、昼間開放
 - 試算条件2. 更新工法 夜間全面通行止め、昼間開放

・ 施工概要と数量

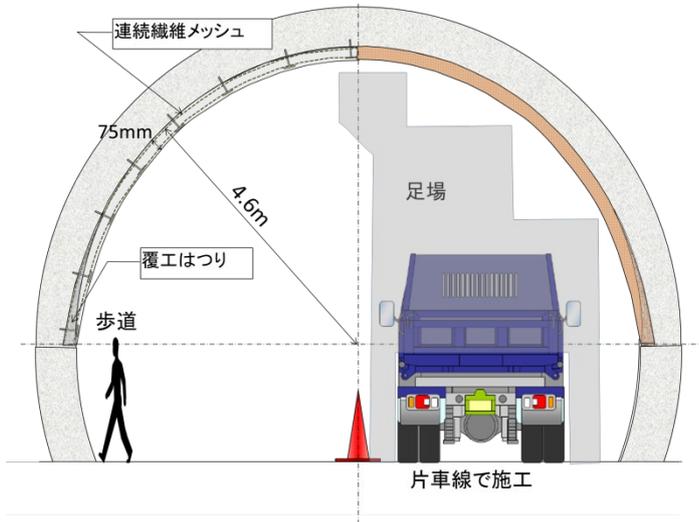


図-2.1.3 在来工法の施工図



更新工法の場合は、図-2.1.3の施工箇所を
t=200mm ハツリ、t=200mmの覆工を施工する

従来工法 施工数量

- ・ L=440m、周長=14.45m
- ・ A=6358m² t=75mm V=476.9m³
- ・ はつり 1601.6m²(144m³)
- ・ 1 スパン 10mとする。
- ・ 施工目地 5mピッチ
- ・ 妻枠 49+21+21=91 列
- ・ 受けプレート 192+80+80=352 列

更新工法 施工数量

- ・ L=440m、周長=14.45m
- ・ A=6358m² t=200mm ハツリ
- ・ 覆工 t=200mm 1271.6m³
(1 スパン 10.5m)
- ・ 開発機材
 1. 切削機械
 2. 掘削養生バルーン
 3. 分離型セントル
 4. 高強度コンクリート

(3) 試算結果

種別		単位	数量	金額	m単価	工期(通期)	備考	
試算1.	従来工法	高強度薄肉補強工 (埋込型枠)	m	440	¥889,000,000	¥2,020,455	998日	・夜間片側通行、昼間開放 ・鉄建建設が持つ従来の技術
試算2.	更新工法	新開発技術による新工法	m	440	¥890,000,000	¥2,022,727	242日	・夜間通行止め、昼間開放 ・共同研究による開発機材を使用する
更新工事のメリット (赤字はデメリット)			-	-	-	1/4に工期短縮	・共同開発した機械は、再利用できる 1. 切削機 2. 掘削養生バルーン 3. 分離型セントル	
・諸経費、消費税を含まず								

(4) おわりに

Aトンネルの補修について従来工法と更新工法を比較した結果、概算金額は同程度であるが、更新工法の工期が、従来工法に比べ1/4に短縮できることがわかった。また、概算金額においても、今後の機械・設備の再利用を考慮すれば、更新工法のメリットは有ると考えられる。

・従来工法 試算例

Aトンネル覆工補強(内巻き工)の施工費及び材料費

【試算条件】

- 1 本試算はトンネル内巻き補強工法（高強度薄肉補強工法）を採用した場合の概算である。
- 2 作業時間は、夜作業とし昼間解放する条件で試算計上している。
- 3 指定配合可能なプラントが近傍にあるものとする。
- 4 付帯設備（照明、換気、通信線など）の撤去・移設、復旧については計上していない。
- 5 施工時は日々、足場移動が可能な移動足場製作を検討している。
- 6 下地については断面修復や漏水処理が終了し、ある程度の平滑な面になっているものとする。
- 7 作業照明設備、換気設備、これに伴う受電設備等は今回計上していない。
- 8 作業帯設置撤去作業、ガードレール等の保安設備費用、交通誘導員は別途計上とする。
- 9 トンネル坑口近傍に、多少の資材仮置き場があるものとする。
- 10 歩道脇の施工を避けるため、補強工範囲はスプリングライン付近までとしているが、既設覆工のはつり込みが必要である。よって、はつり込みが可能な覆工コンクリートであることが前提となる。
- 11 交通誘導員、それに伴う規制車両、看板等は含まれていない。
- 12 試算には諸経費、消費税を含まない。

Aトンネル内巻き補強工程(夜間施工・昼間解放・2班)

998日

998日

440m当たり作業日数/2班	66	132	198	264	330	396	462	528	594	660	726	792	858	924	990
脚部覆工カッター工															
脚部覆工はつり工															
下地覆工面清掃工															
妻枠ベースプレート取付工															
中間部ベースプレート取付工															
妻型枠取付工															
ボード設置工															
モルタル注入工															
作業足場工															

* 上記は作業日数(暦日工程ではない)

トンネル内巻き工(高強度薄肉補強)

名 称		数量	単位	単価	計	備 考	日数 (2班編制)
Aトンネル内面補強工							
	高強度薄肉補強工(埋込型枠)					特許料は別途	997.8
1	妻枠ベースプレート取付工	91.0	箇所	331,339	30,151,849	5mピッチ	31.8
2	中間部ベースプレート取付工	352.0	箇所	306,521	107,895,392		128.7
3	妻型枠取付工	91.0	箇所	608,454	55,369,314		86.6
4	ボード設置工	6,358.0	m ²	59,154	376,101,132		480.8
5	モルタル注入工	476.0	m ³	375,663	178,815,588	t=75mm	159
6	作業足場工	1.0	式	84,914,448	84,914,448	日々坑外運送含む	—
7	脚部覆工はつり工	144.1	m ³	162,049	23,357,742		53.4
8	脚部覆工カッター工	2,091.2	m	8,719	18,233,521		28.5
9	下地覆工面清掃工	6,358.0	m ²	2,251	14,311,858		29
	端数調整				-150,844		
	合計	6,358.0	m ²	139,824	889,000,000		
				(逆算単価)			

・更新工法 試算例

Aトンネル覆工更新工事

【試算条件】

- ・トンネル延長 1510m 両坑口に施工ヤード基地有り
- ・更新施工箇所
 - Aブロック L=240m (南坑口・南ヤードより100m)
 - Bブロック L=100m (南坑口・南ヤードより400m)
 - Cブロック L=100m (北坑口より400m、北ヤードより460m)
- ・施工数量 L=440m 施工周長 (スプリングラインまで) =14.45m
 - カッター t=5cm 延長=440*2=880m
 - 切削 t=20cm 掘削量=14.45*0.2*440=1,271.6m³
 - 覆工コンクリート t=20cm コンクリート=1,271.6m³ → 共同研究で、開発したコンクリートを使用する
 - 切削機械 1台 RH10Jの改良型 → 共同研究で、開発した切削機を使用する
 - 養生台車 2台 掘削養生バルーン → 共同研究で、開発した掘削養生バルーンを使用する
 - 覆工セントル 1台 分離型セントル → 共同研究で、開発した分離型セントルを使用する

・在来工法のトンネル
・既存覆工の巻厚が設計巻厚 (60cm) 以上ある

- 1 本試算は開発更新技術を採用した場合の概算である。
- 2 作業時間は、夜作業とし昼間解放する条件で試算計上している。
- 3 指定配合可能なプラントが近傍にあるものとする。
- 4 付帯設備 (照明、換気、通信線など) の撤去・移設、復旧については計上していない。
- 5 施工時は、共同開発更新技術が完成したのものとして検討している。
- 6 作業照明設備、換気設備、これに伴う受電設備等は今回計上していない。
- 7 作業帯設置撤去作業、ガードレール等の保安設備費用、交通誘導員は別途計上とする。
- 8 トンネル両坑口近傍に、仮設ヤードがあるものとする。
- 9 更新工事は、補強 (内巻工) との施工日時、費用等を比較するために、スプリングライン付近までとする。
- 10 試算には諸経費、消費税を含まない。

Aトンネル更新工事工程表

				242日											
番号	工程	必要日数	累計日数	30	60	90	120	150	180	210	240	270			
1	段取り	式	1	23											
2	カッター入れ	m	880	9	32										
3	掘削養生台車組立て	基	2	10	42										
4	掘削養生台車移動	基	2	10	52										
5	セントル組立て	基	1	10	62										
6	セントル移動	基	1	3	65										
7	切削準備	式	1	3	68										
8	覆工準備	日	3	71											
9	切削	m	440	42	113										
10	覆工	m	440	84	197										
11	掘削養生台車組移動	基	2	10	207										
12	掘削養生台車解体	基	2	4	211										
13	セントル移動	基	1	3	214										
14	セントル解体	基	1	5	219										
15	片付け	式	1	23	242										

* 上記は作業日数(暦日工程ではない)

Aトンネル覆工更新工事

		数量	単位	単価	計	備考
切削+覆工(20cm)、夜間通行止め、昼開放		440	m			特許料は別途
1	段取り	440.0	m	45,628	20,076,320	
2	脚部覆工カッター工	440.0	m	5,600	2,464,000	
3	掘削養生台車組立て	440.0	m	144,331	63,505,640	
4	掘削養生台車移動	440.0	m	10,594	4,661,360	
5	セントル組立て	440.0	m	8,247	3,628,680	
6	セントル移動	440.0	m	2,804	1,233,760	
7	切削準備	440.0	m	7,008	3,083,520	
8	覆工準備	440.0	m	2,039	897,160	
9	切削	440.0	m	1,316,428	579,228,320	
10	覆工	440.0	m	449,420	197,744,800	
11	掘削養生台車組移動	440.0	m	10,594	4,661,360	
12	掘削養生台車解体	440.0	m	3,648	1,605,120	
13	セントル移動	440.0	m	3,178	1,398,320	
14	セントル解体	440.0	m	4,629	2,036,760	
15	片付け	440.0	m	9,634	4,238,960	
	端数調整				-464,080	
	合計	440.0		2,022,727	890,000,000	

3. 出願特許

申請特許名	出願人	発明者	申請年月日 (出願番号)	公開年月日 (公開番号)
トンネル改修 工法	国立研究開発法人 土木研究所 鉄建建設株式会社	宇田誠、須志田藤雄 植村義幸、杉田崇 西脇敬一	2018.10. 1 (特願 2018-186820) 2019.11.29 (共同出願)	2020.4.9 (特開 2020-56201)

4. 検討資料

今回、開発を行った下記に示す①～③の項目について、各々の検討資料を次頁以降に添付する。

①切削機の開発

【資料①-1】 トンネル切削機（ベース車両 RH-10J）検討仕様書

【資料①-2】 自動掘削システム搭載の自由断面切削機

（自由断面切削機の切削作業を自動化した技術）仕様書

②架台付き養生バルーンの開発

【資料②-1】 架台付き養生バルーン 構造計算書

【資料②-2】 架台付き養生バルーン 落石に対する耐力検討書

③分離型セントルの開発

【資料③-1】 分離型セントル 構造計算書

【資料③-2】 分離型セントル スキンプレート（オール付き）耐力検討書

【資料①-1】

トンネル切削機（ベース車両 RH-10J）

検討仕様書

1. 使用条件

本装置検討時における使用条件は、次のように設定してあります。

(1) 仕 向 地 国 内 () 国 外 ()

(2) 運用場所 屋 内 () 屋 外 ()

(3) 使用環境

気 温 最 高 (40) °C 最 低 (-10) °C

湿 度 80%以下 80%以上

粉 塵 有 無

塩 害 有 無

防 爆 有 無

その他の条件 ()

(4) 始動時温度 油圧作動油 約 (20) °C (タンク油温)

(5) 運転時温度 油圧作動油 (20~60) °C (タンク油温)

(6) 圧 力 最高使用圧力 (20.6) MPa, 常用 (~20.6) MPa

(7) 作 動 油 鉱物油系 植物油系 難燃性作動油 ()
 規格品 (M I L等) その他 ()

(8) 電 源

動 力 A C (400/440) V (50/60) Hz (3) φ
(一次電源)

制 御 A C (200/220) V (50/60) Hz (3) φ

電 磁 弁 D C, A C (200/220) V (50/60) Hz (1) φ

(注 記 : 周波数変動率 ± 5 %, 電圧変動率 ± 1 0 %)

2. 適用単位、規格、準拠すべき法規、及び騒音値

(1) 単 位 S I

(2) 規 格 J I S J E C J E M J C S
 ボルトナットは原則として I S O

3. 銘板の種類と材質

種 類 機器銘板 名称銘板 社銘板 製造銘板

回路銘板 操作銘板 注意銘板

材 質 アルミ板 ステンレス板 銅板 アクリル板

(注意銘板は原則シール貼付)

4. 仕様

検討案による仕様となります。掘削断面、要求掘削能力、掘削対象物、現場状況などの諸条件により、仕様の見直しが必要となります。

4.1 構成、及び機能

4.1.1 構成

本機の構成は次の様になります。

- ・切削部
- ・本体
 - ① ターレット
 - ② アウトリガー
 - ③ ケーブルリール架台
- ・ドーザー
- ・走行部
- ・油圧ユニット及び操作バルブスタンド
- ・制御盤及び操作盤, 他電装品
- ・高圧水ジェット装置
- ・ケーブルリール

4.1.2 機能

(1) 切削部

160kW のカッターブームを、トンネル断面形状に沿って旋回させ、劣化トンネルの壁面及び底面を切削出来る構造で、スライド機構にて前後進させることで、0.5m ピッチの掘削が可能。また、機体設置誤差を吸収するため、左右旋回機能を装備しています。カッターヘッドのピックは、岩石の種類や岩質に応じ、または摩耗したら容易に交換出来るものとなっています。

(2) 本体について

本体は、各機能部の連結ベースになっている他、下記の装置が装備されています。

- ① ターレット
カッターブームを支持し、前後スライド・旋回させる為のベースです。
- ② アウトリガー
掘削時、地面に押付ける事により機体を安定させるものです。
- ③ ケーブルリール架台
ケーブルリールを搭載するものです。

(3) ドーザー

本体走行部の前側に搭載、前進時ズリの排除を行います。

(4) 走行部

本体の左右に取付けられ、クローラタイプで駆動は減速機付きオイルモーターでコンパクトにまとめ、低速・高速の走行切替機能を装備しています。クローラの緊張はグリースジャッキで行ないます。

(5) 油圧ユニット及びバルブスタンド

本機のオイルモーター及びシリンダー等を作動させる油圧源及び制御操作弁を含むもので、タンクユニット・ポンプユニットと操作スタンドを別個にまとめ、モジュール化されたバルブを使用しています。

(6) 制御盤及び操作箱、他電装品

制御盤に切削機の電動機や油圧ポンプの駆動源を制御する装置を格納し、操作箱にて操作スイッチを入れることにより、機械が作動します。操作は簡単で、全ての操作が操作箱にて可能です。また、操作箱以外でも機体各所に配置された非常釦を押すことにより、全ユニットが停止しますので、緊急時にも対応可能です。

他の電装品として高圧水ポンプやケーブルリール等も搭載しています。

(7) 高圧水ジェット装置

圧力最大 20.6 MPa の高圧水をピック先端へ噴出させ、粉塵の抑制、ピックの冷却を行ないます。ポンプユニット、水タンクは機体側面後方部に設置してあります。

(8) ケーブルリール

一次側電源ケーブルを、走行に合わせ自動的に巻き取り、繰り出しを行なうことが可能です。

4.2 主仕様

(1) 掘削仕様

・掘削対象コンクリート強度	30MPa
・掘削深さ	200 mm
・掘削幅	1000 mm (500 mm+500 mm)
・掘削能力	9.0m ³ /hr
・掘削速度	2.7m/min

(2) 機体寸法

・機長	約 21.4m
・機体高	約 5.7m
・機体幅	約 4.2m (本体)

(3) 切削寸法

・高さ	約 7.2m
・幅	約 9.1m
・床下切削深さ	約 0.8m

(4) 一般諸元

・カッター用モーター出力	160kW
・油圧ユニットモーター出力	55kW×2台
・高圧水ポンプユニット用モーター出力	15kW×2台
・接地圧	0.12MPa
・総質量	130t

※カッター出力に関しては詳細設計の段階で変更となる可能性があります。

(5) 切削部

・搭載方式	ターレット式
・切削用電動機	160kW×4P×400V/440V (50/60Hz)
・カッターヘッド回転数	43min ⁻¹ (50Hz)、52min ⁻¹ (60Hz)
・減速機	遊星歯車
・押込みストローク	1500mm
・ピック	ラウンド型
・カッターヘッド径	φ1050mm

(6) 走行部	
・形式	油圧駆動クローラ式
・速度	12.0/15.0m/min ⁻¹ (50/60Hz)
・登坂能力	14 度 max
・接地長	4600mm
・左右中心間隔	2550 mm
・クローラシュー幅	900 mm
・自動駐留ブレーキ装置付	

4.3 油圧装置仕様

(1) ポンプユニット

・電動機	55kW×4P×400V/440V (50/60 Hz) ×2 台
・油圧ポンプ	20.6 MPa×99/122 L/min
	20.6 MPa×108/130 L/min
	20.6 MPa×47/56 L/min
	20.6 MPa×59/71 L/min
	20.6 MPa×108/130 L/min
	20.6 MPa×20/24 L/min
	20.6 MPa×14/17 L/min

(2) タンクユニット

・タンク容量	1245 L
--------	--------

(3) オイルクーラ

・換熱容量	16000 kcal/Hr
・電動機	0.75kW×4P×400V/440V (50/60 Hz)

4.4 高圧水ジェット装置仕様

(1) 高圧水仕様

・最高吐出圧力	20.6 MPa
・吐出流量	38 L/min

(2) ポンプユニット

・電動機 (減速機付)	15kW×4P×400V/440V (50/60 Hz) ×2 台
・高圧水ポンプ	形式：3連プランジャー型×2 台

- | | |
|--------------|-------------|
| (3) 水タンクユニット | |
| ・水タンク容量 | 370 L |
| ・供給水圧力 | 0.98 MPa 以下 |
| ・供給水流量 | 50 L/min 以上 |

4.5 ケーブルリール仕様

- | | |
|----------|----------------------------------|
| (1) ケーブル | 2PNCT-150mm ² -4C×2 本 |
| (2) 巻 長 | 100 m |
| (3) 有効長 | 90 m |
| (4) 駆動方式 | 油圧モーター |

4.6 主電気仕様

- | | |
|-----------------|-------------------------------|
| (1) 受給電源 | 三相 4 線、400V/50Hz 又は 440V/60Hz |
| (2) 負 荷 | |
| ・切削機用電動機 | 160kW×400V/440V |
| ・油圧ユニット用電動機 | 55kW×400V/440V×2 台 |
| ・高圧水ユニット用電動機 | 15kW×400V/440V×2 台 |
| ・オイルクーラ用電動機 | 0.75kW×400V/440V |
| ・制御用、及び照明用 | 5kW×100V 及び DC24V |
| (3) 制御盤 | |
| | 下記のもので内蔵されます。 |
| ・漏電遮断装置 | |
| ・電磁接触器 | |
| ・ノーヒューズブレーカ | |
| ・積算時間計 (切削機用) | |
| ・サーマルリレー | |
| ・カレントセンサ (切削機用) | |
| ・異常表示灯 | |
| ・電圧計 | |
| ・電流計 | |

(4) リモコン操作箱

下記のもので装備されています。

- | | |
|--------------|--------|
| ・切削機用電動機 | 起動・停止釦 |
| ・油圧ユニット | 起動・停止釦 |
| ・高圧水ユニット | 起動・停止釦 |
| ・その他各操作用スイッチ | |

(5) 非常停止スイッチ

6 式

(6) ベル

1 式

(切削機用電動機の起動合図、及び機体後退時の警報用)

(7) 前照灯

120W-100V LED 灯×2 式

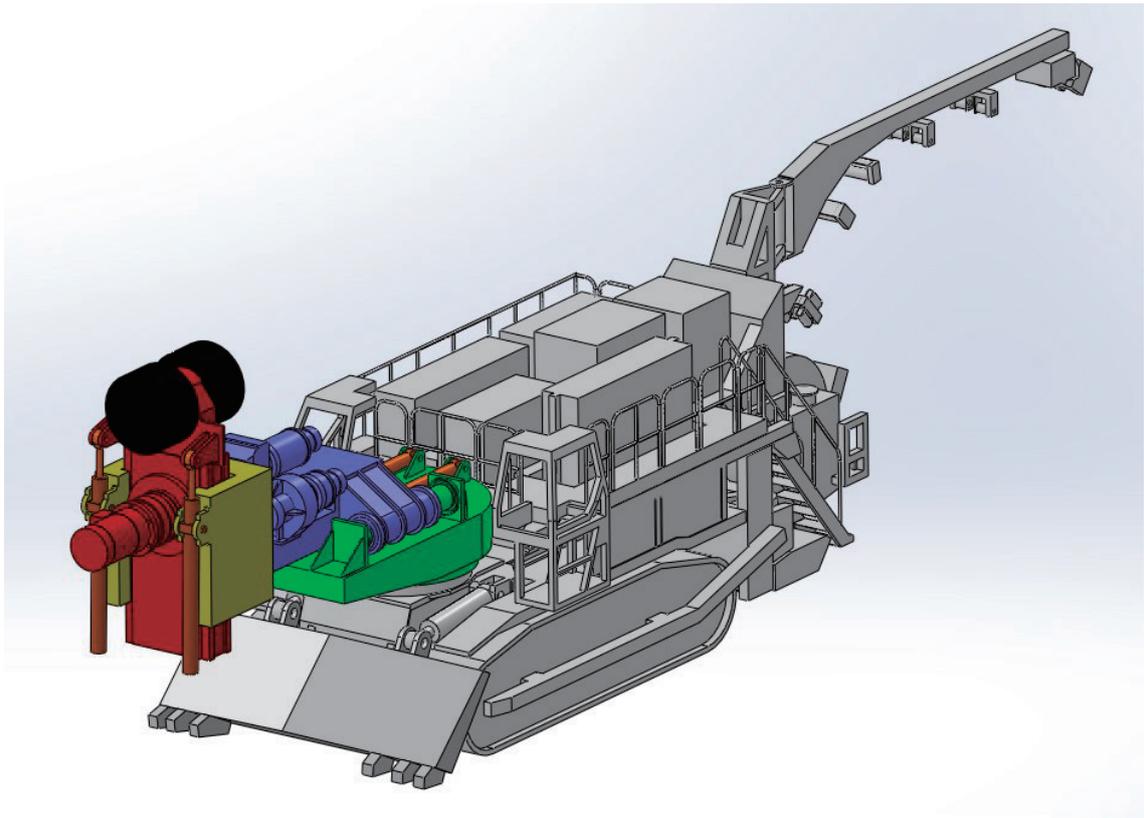


図-1 トンネル切削機（全体構想図）

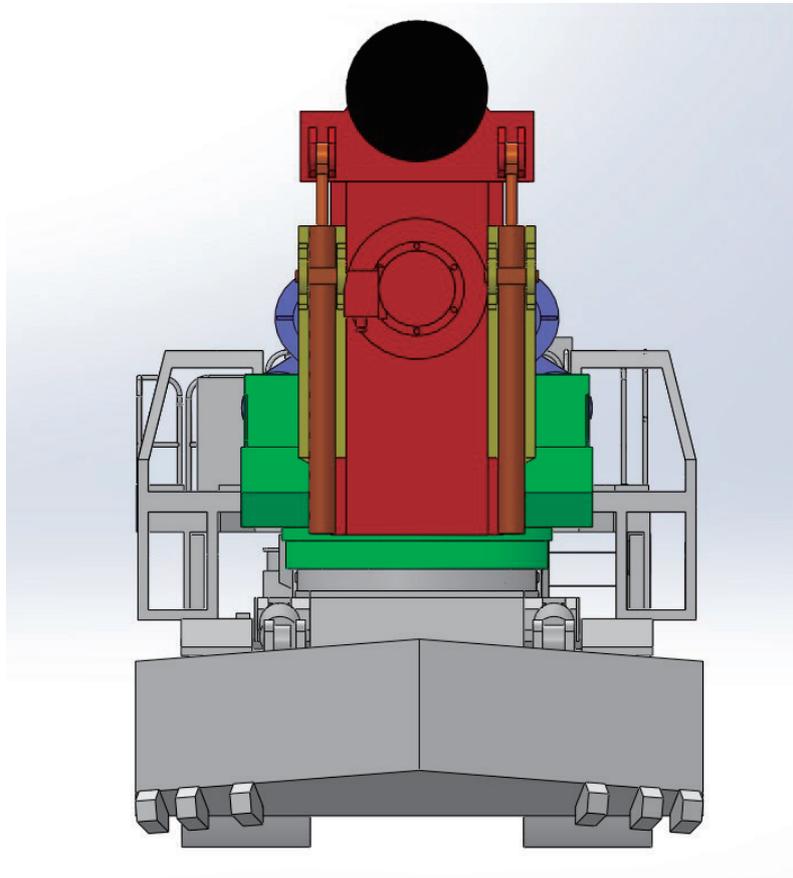


図-2 トンネル切削機（正面図）

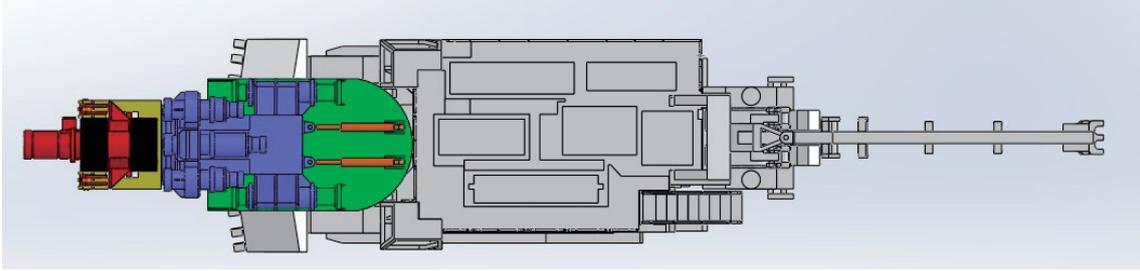


図-3 トンネル切削機（平面図）

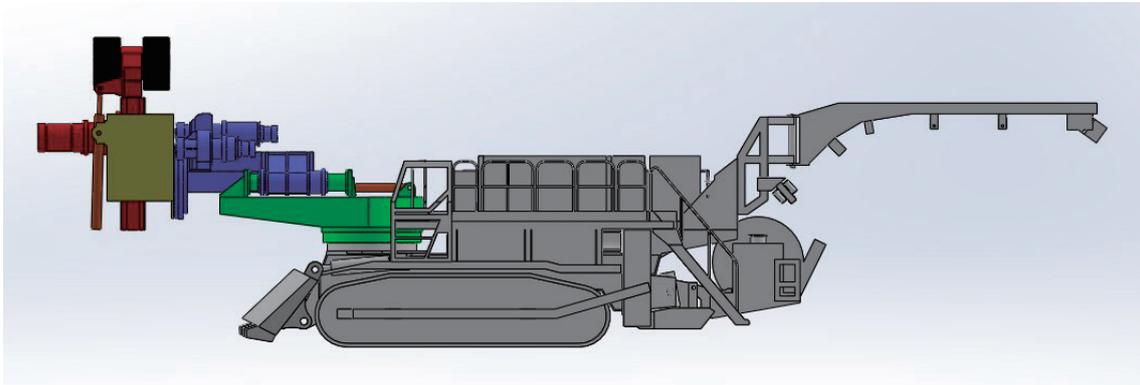


図-4 トンネル切削機（側面図）

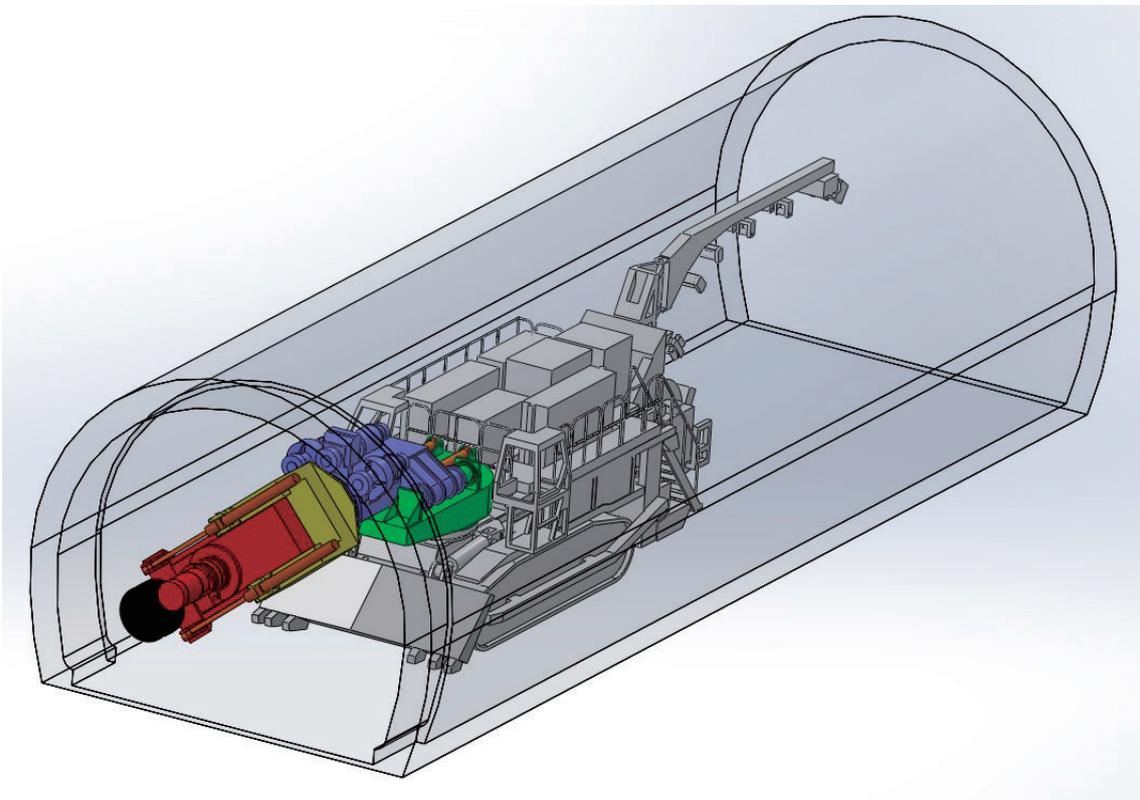


図-5 切削状況図（切削開始）

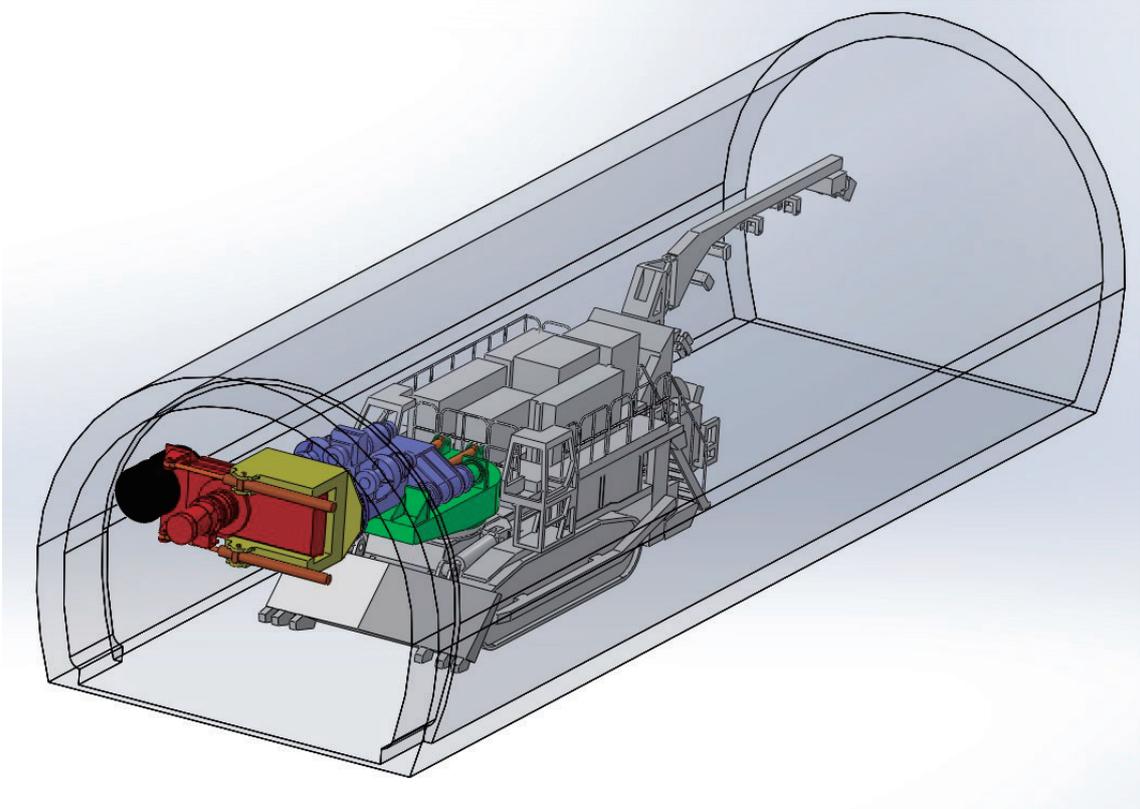


图-6 切削状况图（右侧壁部）

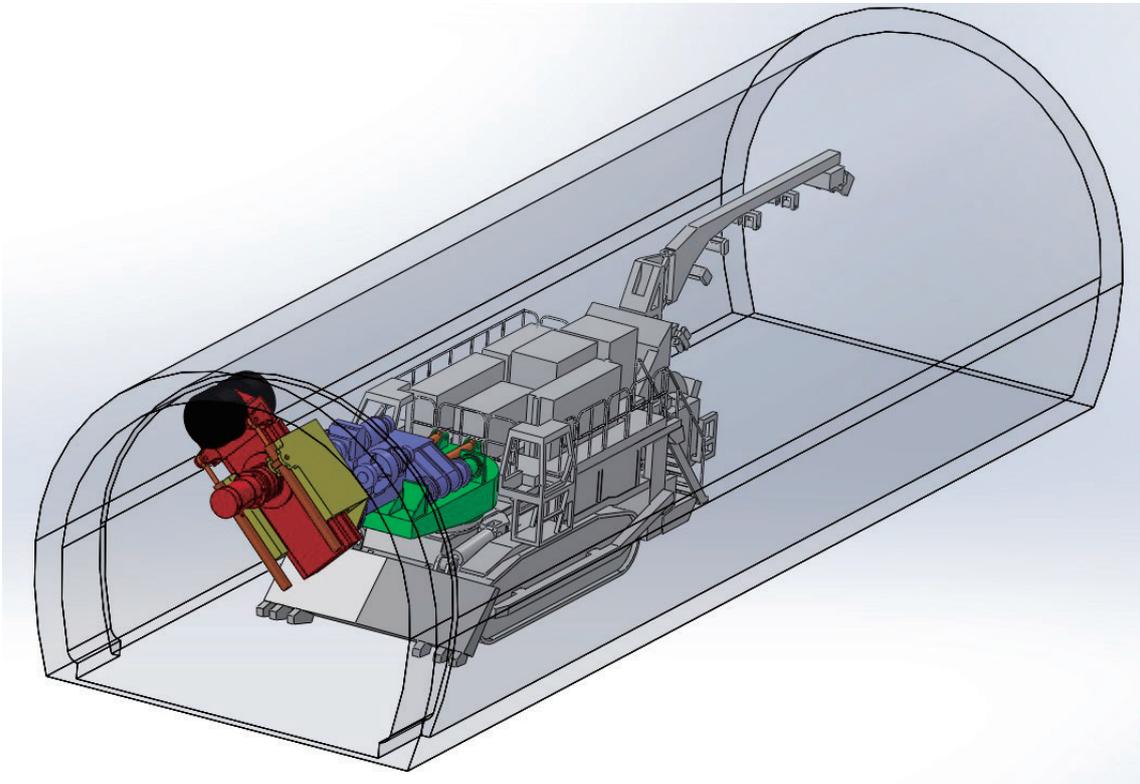


图-7 切削状况图（右肩部）

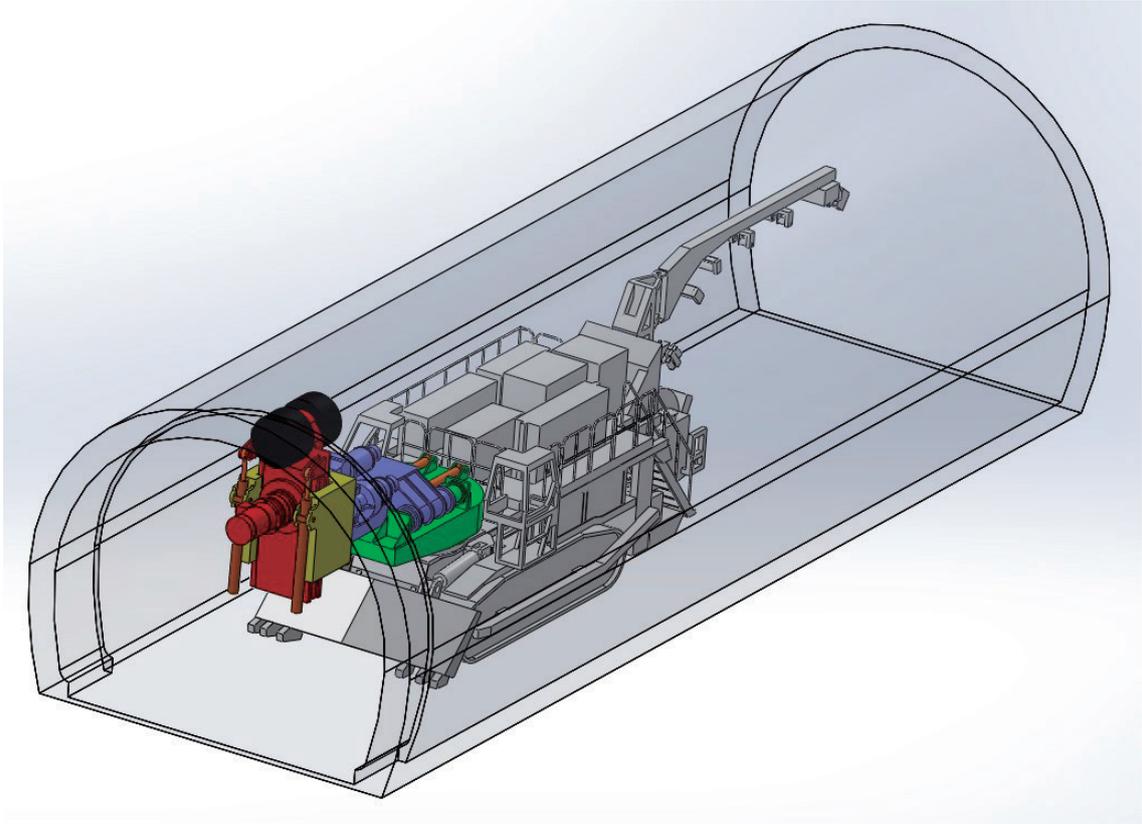


图-8 切削状况图（天端部）

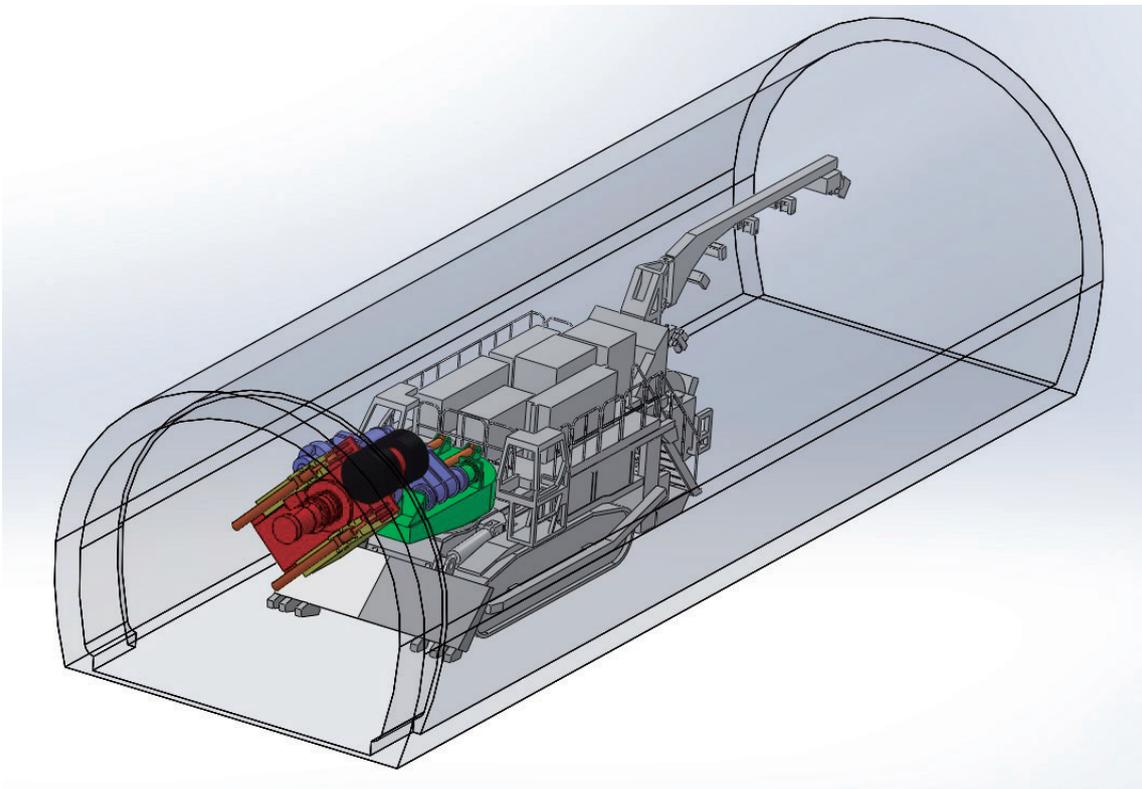


图-9 切削状况图（左肩部）

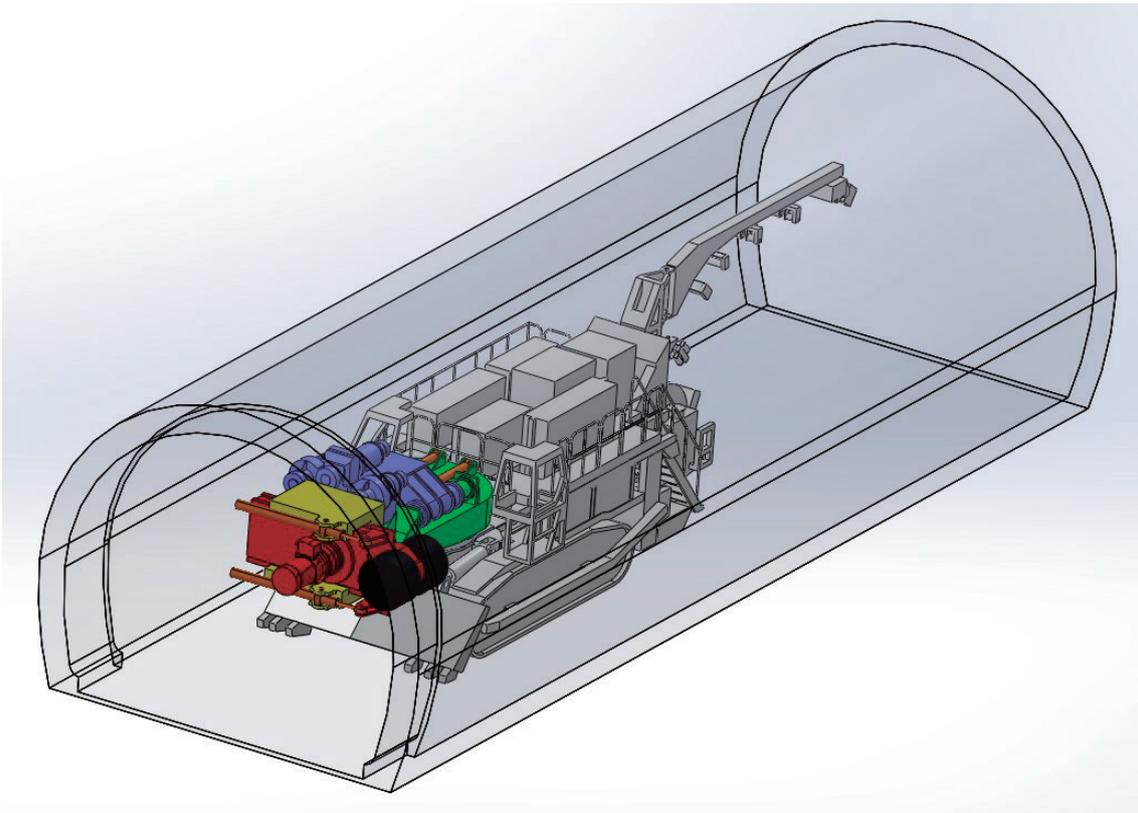


图-10 切削状况图（左侧侧壁部）

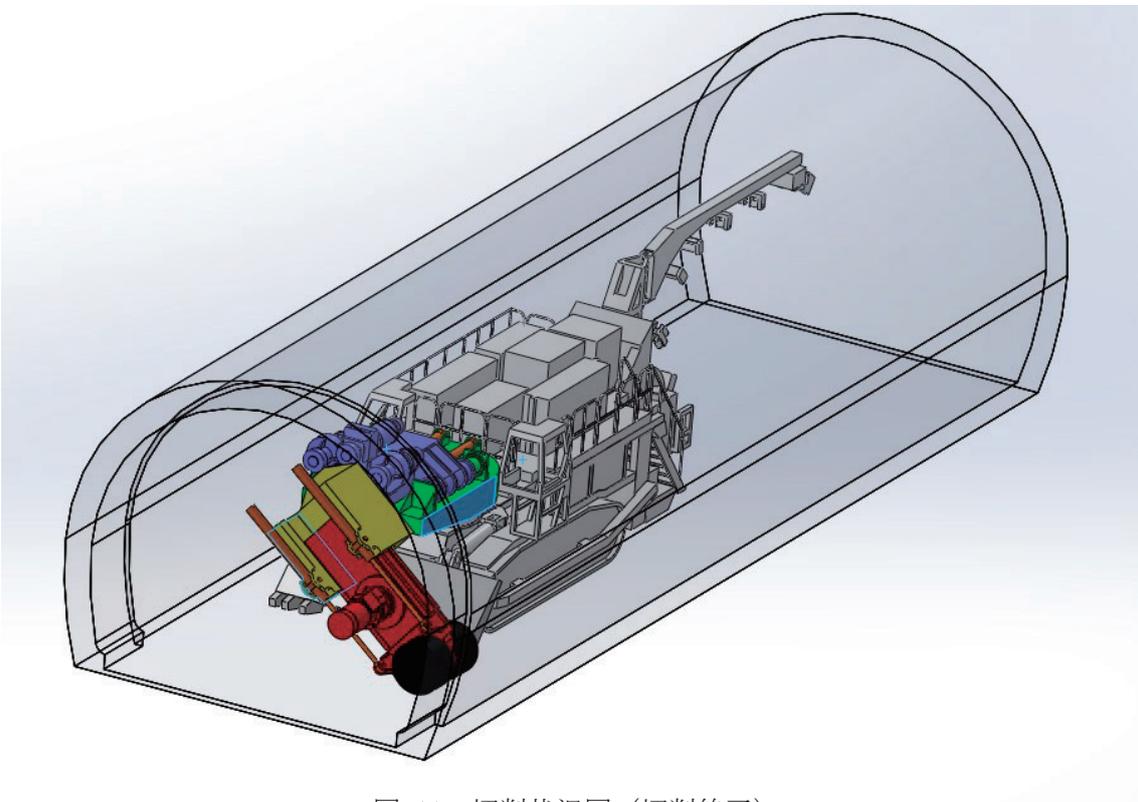


图-11 切削状况图（切削終了）

【資料①-2】

自動掘削システム搭載の自由断面切削機

(自由断面切削機の切削作業を自動化した技術)

仕様書

目 次

- (1) まえがき
- (2) 自動化に要求される条件
- (3) 自動切削装置の各部の説明
 - 1) 自動位置制御システム
 - 2) CCDカメラによる姿勢計測システム
 - 3) 自動切削制御システム
 - 4) カッターブーム検知器
 - 5) 制御機器
 - ① コンピュータ
 - ② 操作箱
 - a. 右回りの自動切削 (ON)
 - b. 左回りの自動切削 (ON)
 - c. 自動切削停止 (OFF)
 - d. 半自動切削
 - e. 手動切削
 - ③ タッチパネルの表示選択
- (4) 技術の概要
 - 1) 機体の自動測量システム
 - 2) 切削の自動化システム
 - 3) 自動切削システム搭載自由断面トンネル切削機
- (5) 添付資料
 - 1) トンネル切削機全体図
 - 2) 自動化システム概念
 - 3) 自動切削システム全体配置
 - 4) 自動測量システム
 - 5) 切削の自動化システム

自動切削システム搭載の自由断面切削機の概要

(自由断面切削機の切削作業を自動化した技術)

(1) まえがき

今回の計画は既設トンネルの劣化部分を切削し、新規にコンクリートを打設する為、切削後は浮石が無く、新規のコンクリートと密着できる様に精度良く切削作業を行うことを求められる。

新規山岳トンネルの掘削目的の自由断面掘削機の自動化システム技術は既に実用化されている。この自動化システムを応用し、切削機に搭載して、スムーズに精度良く、切削作業ができるように開発・提案するものである。

切削作業の高精度化の為、自動測量システムは自動トータルステーションを使用して、機械位置を把握し更に、切削部分を事前に取得した3Dスキャナ等のデータにより現状を把握する測量システムと連携している。

(2) 自動化に要求される条件

既設トンネルの切削作業としては、以下が求められる。

- 1) 幅 10m前後～以上の中・大断面トンネルでは、台車に搭載した切削機の作業は、左右に切削位置を変える必要があるが、今回は中央部付近に設置し、切削可能な範囲で検討する。
- 2) ブーム型の切削機はカッターヘッドが円弧を描き旋回する。その結果、切削した箇所（軌跡）はオーバーハングしたドーム状になる。これを避ける為、垂直に近い切削を行う必要がある。よって、ブーム型の切削機はテレスコピックブームを頻繁に伸縮しながら切削を行う。
- 3) 切削機は切削中に、発生する振動、或いは反力により、機械の位置が移動（ズレる）することが有る。
- 4) 切削機本体はトンネル中心軸方向に対して、常に平行とはならず、ある程度の角度で斜交していることが多い。
- 5) 曲線施工の場合でも、信号レーザーはターゲットに到達しなければならない。

*自動装置は、これらの動き、条件に対してリアルタイムで追従し、刻々と正しい切削位置をカッターヘッドに指示しなければならない。

(3) 自動掘削装置の各部の説明

1) 自動位置測量システム

CCDカメラ内蔵の自動追尾式トータルステーションと切削機本体上のプリズムにより切削機のトンネルに対する位置が自動的に測定される。これは切削機本体の位置と切削部との位置関係および、切削部についての情報を切削機上の制御ユニットに自動的に送る。

2) CCDカメラによる姿勢計測システム

掘削反力により常時、切削機姿勢が変化する為、その変化量をリアルタイムに自動計測する。また、その情報は常時自動的に切削機制御部ユニットに送信する。常時動く切削機本体の姿勢を測定する原理は切削機上に固定した3箇所のLEDターゲットをトータルステーションに付けたCCDカメラで撮影し、それを瞬時に画像処理演算することにより可能とした。

3) 自動切削制御システム

切削機の各旋回部およびスライド部には各々角度センサー・ストロークセンサーが装備され、またそれらにより制御される油圧シリンダは油圧サーボ弁を通して作動する。センサー、バルブは制御ユニットに連結しているため、切削個所のデータ、命令信号により切削を可能とする。

4) カッターブーム検知器

3箇所の検知器により、切削機ブームの旋回、上下角度及びテレスコストロークを検知する。

5) 制御機器

① コンピュータ

計画切削断面の座標軸を得る為、タッチパネルにより、トンネルの掘削半径、余掘量、レーザー設定位置 (X, Y, Z)、カーブ量と勾配量をコンピュータに入力する。

② 操作箱

操作箱には密封式押ボタンが設置され、オペレーター席の前面に置かれている。

押ボタンはそれぞれ、次の操作を行う。

- a. 右回りの自動切削 (ON)
- b. 左回りの自動切削 (ON)
- c. 自動切削停止 (OFF)

自動のボタンを押し、カッターヘッドが所定の掘削円周上に達すると、トンネル円周に沿って時計回りの方向に切削しながら移動する。反時計回りの場合は、“左回り鉞”を押す。指定範囲を切削すると、次のスパンの切削のためにブームが自動で伸縮し切削を行う。

d. 半自動切削

カッターヘッドはジョイスティックによる手動操作で移動させることが出来る。ただし、カッターヘッドは、設定した円周に達するとインターロックが働き移動を停止。指定の円周外の切削は、不可能になっている。

f. 手動掘削

カッターヘッドは、自動切削装置の制御をうけずに、任意の切削を行う。

③タッチパネルの表示選択

選択ボタン押すと、以下の表示がされる。

- a. 数値ディスプレイ（入力データ、コマンド、ステートメント）
- b. グラフィックディスプレイ（切削中のカッターの軌跡：軌跡は手動、半自動、自動に関わらず表示。カッターの座標も同時に表示）
- c. エラーダイバグの等インフォメーション

（4）技術の概要

1) 機体の自動測量システム

- ①事前にスキャナにより 3D モデル化されたデータを使用する。
- ②トータルステーションで切削機を自動追尾し常時補足する。
- ③機体の位置姿勢を算出し切削機へリアルタイムで送信する。

2) 切削の自動化システム

- ①電磁油圧制御によるカッターブームコントロール
- ②トンネル断面の外周の高精度自動制御リアルタイムフィードバック

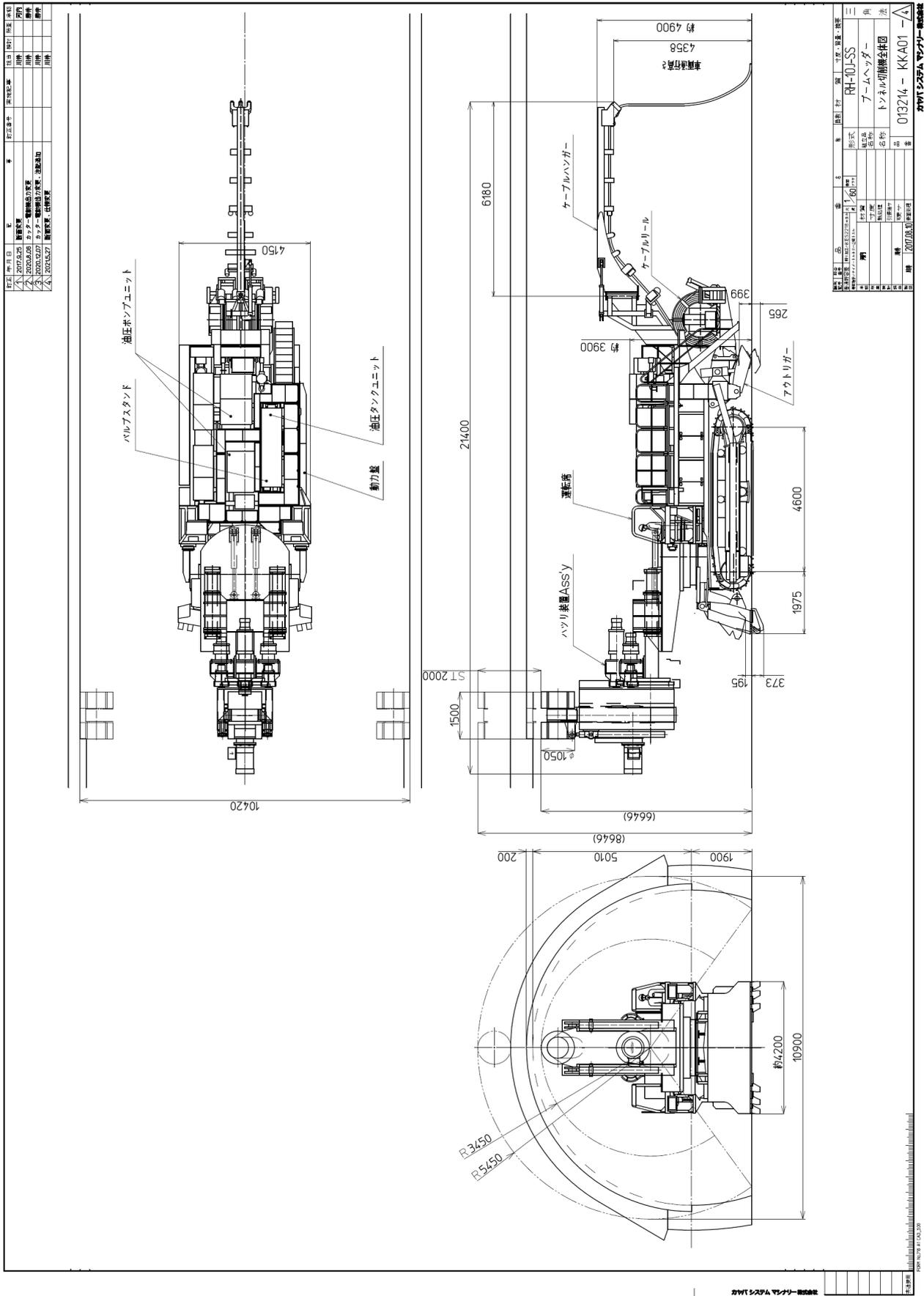
3) 自動切削システム搭載自由断面トンネル切削機

- ①マシン上部に自動追尾用プリズムとLEDターゲットを搭載
- ②マシン中央部にはカッターブーム制御用コンピュータ油圧装置、検出器を搭載
- ③事前に切削部を3Dスキャナでモデル化したデータと上記の①、②を利用して位置修正しながら自動切削する。

（5）添付資料

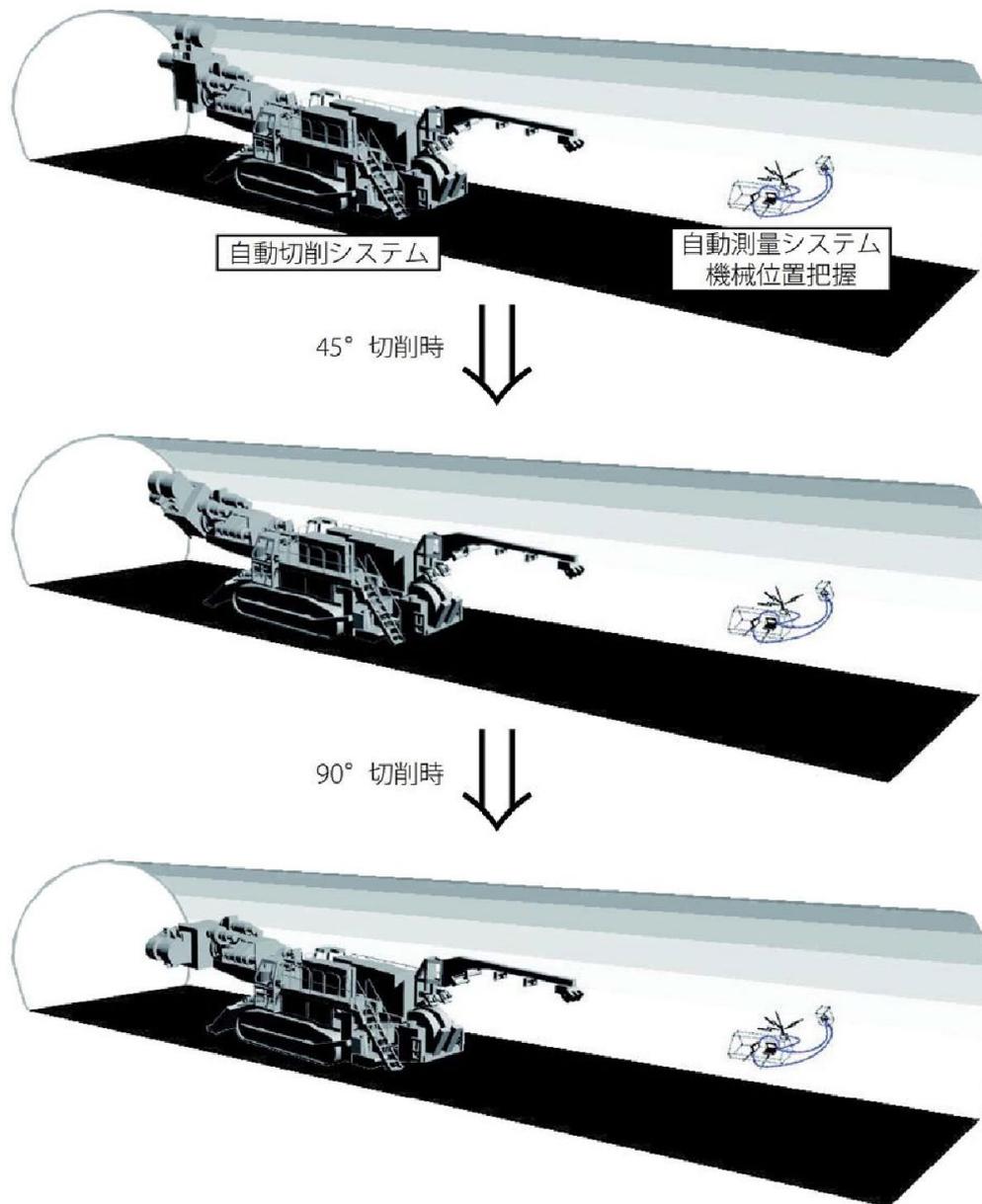
- 1) トンネル切削機全体図
- 2) 自動化システム概念
- 3) 自動切削システム全体配置
- 4) 自動測量システム
- 5) 切削の自動化システム

1) トンネル切削機全体図



2) 自動化システム概念

- ・事前に3Dスキャナにて対象トンネルを3Dモデル化、モデルデータを自動制御システムへ
- ・機械後方の自動測量システムにて機械位置を把握、位置データを自動制御システムへ
- ・各種データをもった自動制御システムにて、設定された切削量を自動で切削



自動測量システム（機械位置把握）

自動切削システム

周辺状況の事前把握

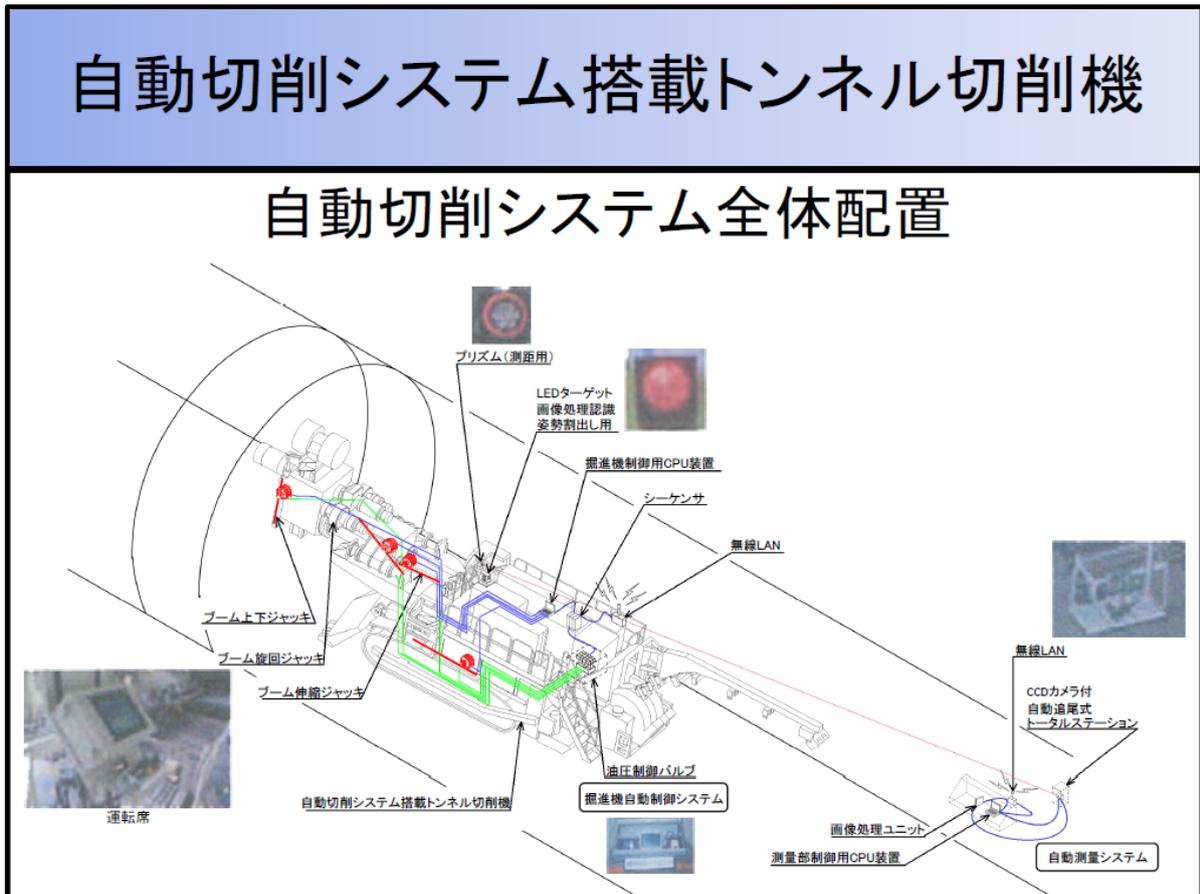
T Sを使用し、各機器の絶対値を算出

各関節、アクチュエータへセンサーを設置、機械状態を把握

モーションコントロール等を使用し事前測定した3Dモデルを基に設置量を自動で切削する

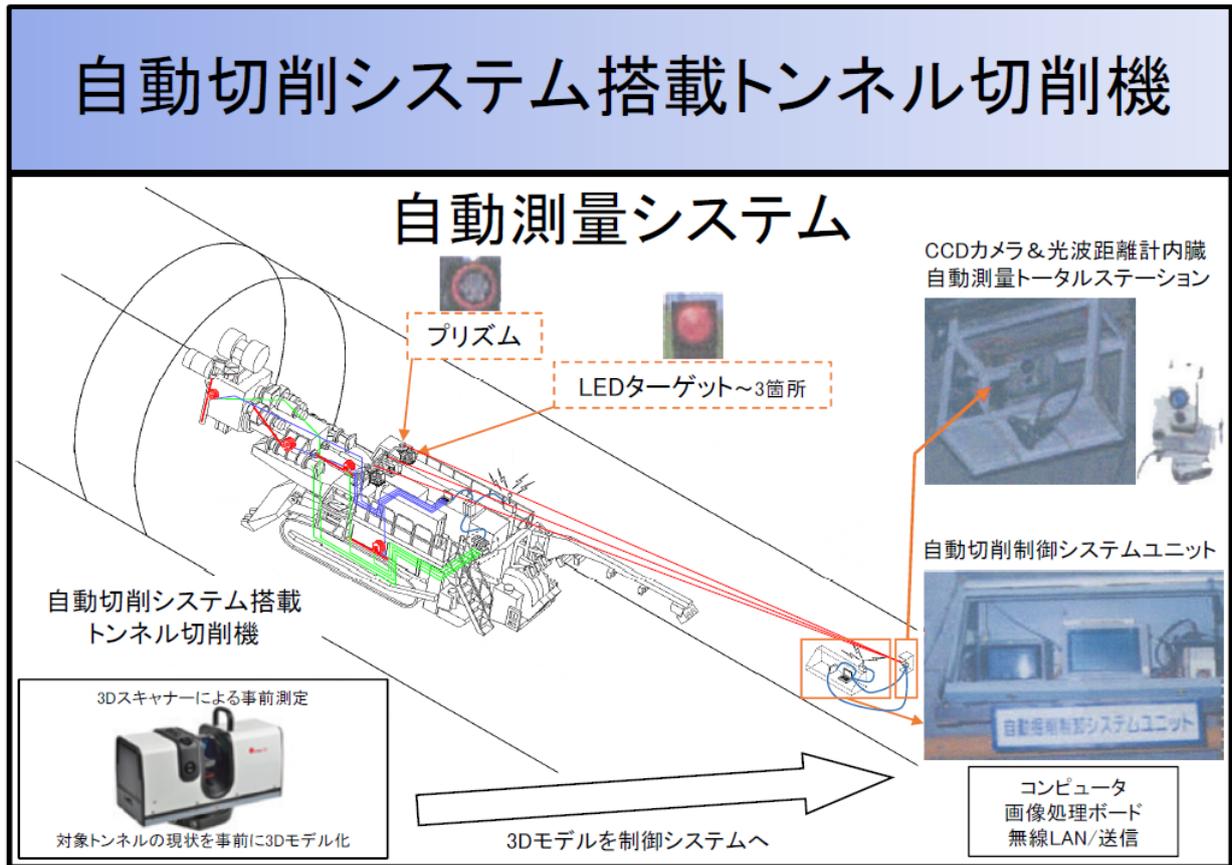
3Dスキャナにて対象トンネルを事前測定、3Dモデル化

3) 自動切削システム全体配置



自動切削システム全体配置です。
自動断面切削機の制御システムと後方の自動測量システムからなります。

4) 自動測量システム

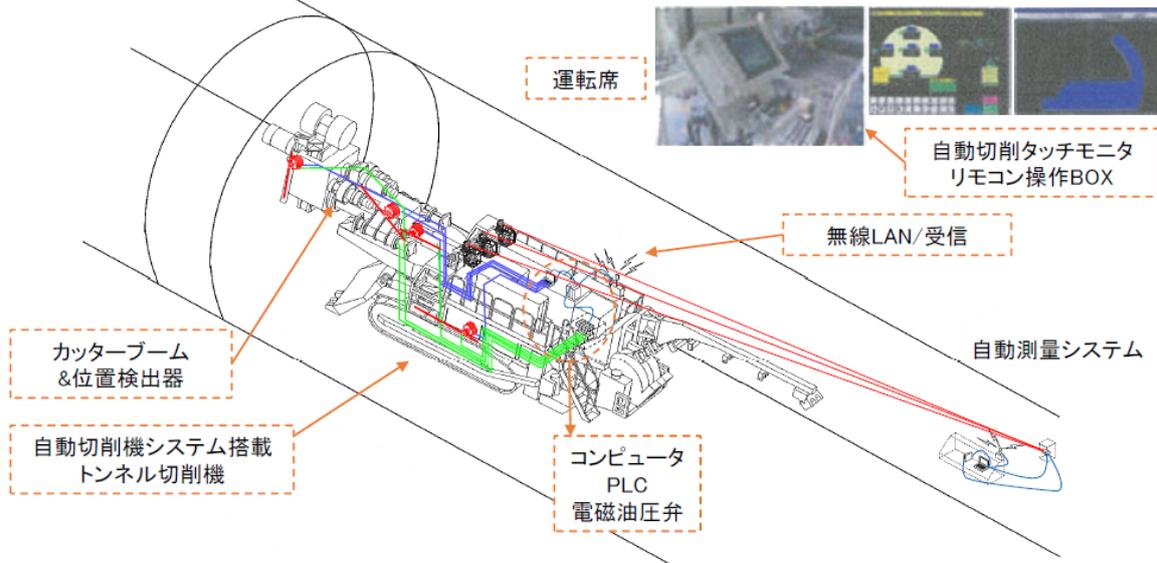


自動測量システムはトンネル後方の50m~200mに設置してあります。
その構成はトンネル上方に設置したCCDカメラ内蔵自動追尾式トータルステーションとトンネル側壁に設置したコンピュータ、画像処理ユニット、無線LAN装置からなります。
また、自動断面トンネル切削機上には位置・姿勢検出用プリズムとLEDターゲットが搭載されています。

5) 切削の自動化システム

自動切削システム搭載トンネル切削機

切削自動化システム



切削の自動化システムは自由断面トンネル切削機に搭載した可動部の位置検出器、コンピュータ、PLC、電磁比例油圧弁、および無線LAN装置からなります。

運転席には自動運転用タッチモニターとカッターブーム用リモコン操作BOXがあり、簡単な操作で自動運転が可能です。

【資料②-1】

架台付き養生バルーン

構造計算書

目次

1 基本事項

鋼材の許容応力

1-1使用鋼材

1-2鋼材の許容応力

1-3鋼材の許容座屈応力

2 掘削養生部移動架台断面図

3 アーチ部入力データ

■基本データ

■計算オプション

■構造図

■材質データ

■断面データ

■格点データ

■部材データ

■面内支点データ

■面内荷重データ

◆荷重ケース番号：[1]

荷重タイトル：[バルーン圧力]

◆荷重ケース番号：[2]

荷重タイトル：[自重]

■面内組み合わせデータ

4 アーチ部出力データ

■面内断面力

■面内変位

■面内反力

1.基本事項

鋼材の許容応力

1-1使用鋼材

単位(N/mm²)

種類	引張強さ
JIS G 3101 一般構造用圧延鋼材 SS400	400~510

定数

材料	ヤング係数	せん断弾性係数	ポアソン比	線膨張係数
	(N/mm ²)	(N/mm ²)		(1/°C)
鋼・鋳鋼・鍛鋼	200000	77000	0.3	0.000012

1-2鋼材の許容応力

長期

単位(N/mm²)

種類	鋼材の厚さ	引張	圧縮	曲げ	せん断	支圧	降伏点又は耐力
SS400	16mm以下	161.7	161.7	93.1	93.1	269.5	245 以上
	16mmを超え40mm以下						235 以上

短期

単位(N/mm²)

種類	鋼材の厚さ	引張	圧縮	曲げ	せん断	支圧
SS400	16mm以下	245	245	137.2	137.2	401.8

許容応力度

$$\text{許容引張応力度} \quad f_t = 161.7 \text{ N/mm}^2 = 1650 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{許容圧縮応力度} \quad f_c = 161.7 \text{ N/mm}^2 = 1650 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{許容曲げ応力度} \quad f_b = 161.7 \text{ N/mm}^2 = 1650 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{許容せん断応力度} \quad f_s = 80 \text{ N/mm}^2 = 816 \text{ kg/cm}^2$$

1-3鋼材の許容座屈応力

細長比 $\lambda = \ell / i$

ω 座屈係数表より求める。

ここに、

ℓ : 支柱の長さ

i : 支柱の最小断面二次半径

応力

$$\text{圧縮応力度 (座屈係数を見込む)} \quad \sigma_c = \omega N / A \leq f_c$$

$$\text{曲げ応力度} \quad \sigma_b = M / Z \leq f_b$$

座屈係数

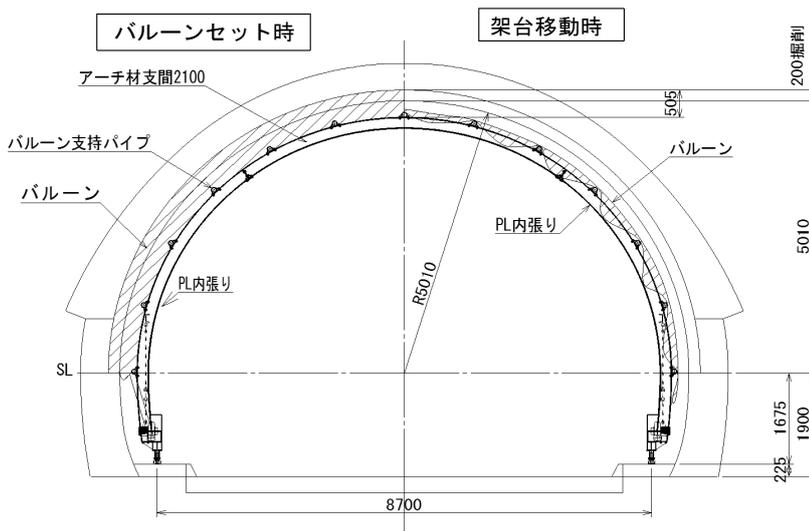
$$\omega = f_c / f_k \quad (\text{圧縮材は、座屈係数を見込み計算を行う。})$$

座屈係数表 $\omega = f_c/f_k$ (SS400 降伏点 $F=245 \text{ N/mm}^2$)

λ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	λ
20	1	1.016	1.018	1.021	1.024	1.027	1.030	1.033	1.036	1.040	<20
30	1.043	1.047	1.051	1.055	1.059	1.063	1.067	1.072	1.077	1.081	30
40	1.086	1.092	1.097	1.102	1.108	1.114	1.120	1.126	1.132	1.138	40
50	1.145	1.152	1.159	1.166	1.173	1.181	1.188	1.196	1.205	1.213	50
60	1.221	1.230	1.239	1.248	1.258	1.267	1.277	1.287	1.298	1.308	60
70	1.319	1.330	1.342	1.353	1.365	1.378	1.390	1.403	1.416	1.430	70
80	1.444	1.458	1.472	1.487	1.502	1.518	1.534	1.550	1.567	1.585	80
90	1.602	1.620	1.639	1.658	1.678	1.698	1.718	1.740	1.761	1.784	90
100	1.807	1.830	1.854	1.879	1.905	1.931	1.958	1.986	2.015	2.044	100
110	2.074	2.106	2.138	2.171	2.205	2.241	2.277	2.315	2.355	2.395	110
120	2.436	2.476	2.517	2.559	2.601	2.643	2.685	2.728	2.771	2.815	120
130	2.858	2.903	2.947	2.992	3.037	3.082	3.128	3.174	3.221	3.268	130
140	3.315	3.363	3.410	3.459	3.507	3.556	3.605	3.655	3.705	3.755	140
150	3.806	3.856	3.908	3.959	4.011	4.063	4.116	4.169	4.222	4.276	150
160	4.330	4.384	4.439	4.494	4.549	4.605	4.661	4.717	4.774	4.831	160
170	4.888	4.946	5.004	5.062	5.121	5.180	5.239	5.299	5.359	5.419	170
180	5.480	5.541	5.602	5.664	5.726	5.789	5.851	5.914	5.978	6.042	180
190	6.106	6.170	6.235	6.300	6.366	6.431	6.497	6.564	6.631	6.698	190
200	6.765	6.833	6.901	6.970	7.039	7.108	7.177	7.247	7.317	7.388	200
210	7.459	7.530	7.602	7.673	7.746	7.818	7.891	7.964	8.038	8.112	210
220	8.186	8.261	8.336	8.411	8.486	8.562	8.639	8.715	8.792	8.870	220
230	8.947	9.025	9.103	9.182	9.261	9.340	9.420	9.500	9.580	9.661	230
240	9.742	9.823	9.905	9.987	10.070	10.152	10.235	10.319	10.402	10.486	240
250	10.571	-	-	-	-	-	-	-	-	-	250

2. 掘削養生部移動架台断面図

バルーンをH200×100×5.5/8アーチ材にて支間2100ピッチにて支持



バルーンによる圧力 400 kgf/m^2

ブロー最大静圧 $1.9 \text{ kPa} = 0.019 \text{ kgf/cm}^2$

アーチに加わる単位荷重 $0.019 \text{ kgf/cm}^2 \times 100 \text{ cm} \times 100 \text{ cm} \times 2.1 \text{ m} = 399 \text{ kgf/m}$
にて 400 kgf/m とする。

以下、アーチ材 断面力の計算は(株)フォーラムエイト社製 F O R U M 8 計算ソフトにて算出する。

3.アーチ部入力データ

■基本データ

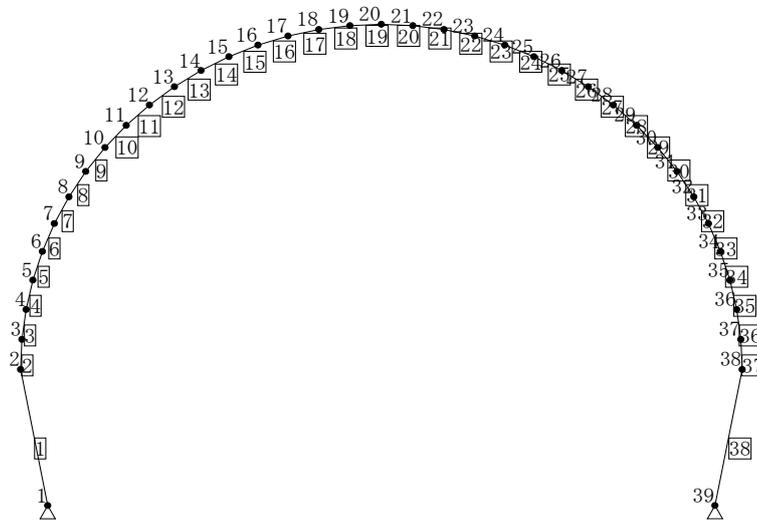
タイトル .トンネル改修 掘側養生部架台

単 位 系	従来単位		面内
格 点 数	39	支 点 ケ ー ス 数	1
部 材 数	38	分 布 バ ネ ケ ー ス 数	0
二 重 格 点 数	0	荷 重 ケ ー ス 数	2
		組 み 合 わ せ ケ ー ス 数	1
		最 大 抽 出 ケ ー ス 数	0

■計算オプション

格点番号のリナンバ	する
部材間Mmaxの計算	する
荷重点での着目点自動追加	する
組み合わせ荷重時の全体割増係数	断面力・反力・変位
プレストレスによる応力算出	2次力
剛域の計算	する

■構造図



■材質データ

材質番号	ヤング係数	線膨張係数	単位体積重量
	E (tf/m ²)	α (/°C)	γ (tf/m ³)
1	2.10E+07	1.20E-05	7.85E+00

■断面データ

断面番号	断面積	断面2次モーメント	断面ID
	A (m ²)	I z (m ⁴)	
1	1.00E+00	1.00E+00	-----

■格点データ

格点番号	X座標 (m)	Y座標 (m)	格点番号	X座標 (m)	Y座標 (m)
1	0	0	21	4.7603	6.5421
2	-0.3548	1.855	22	5.1672	6.4885
3	-0.3369	2.2651	23	5.568	6.3997
4	-0.2833	2.672	24	5.9594	6.2763
5	-0.1945	3.0727	25	6.3386	6.1192
6	-0.071	3.4642	26	6.7027	5.9296
7	0.086	3.8434	27	7.0489	5.7091
8	0.2756	4.2075	28	7.3745	5.4592
9	0.4961	4.5537	29	7.6772	5.1819
10	0.746	4.8793	30	7.9545	4.8793
11	1.0233	5.1819	31	8.2043	4.5537
12	1.3259	5.4592	32	8.4249	4.2075

13	1.6515	5.7091	33	8.6144	3.8434
14	1.9977	5.9296	34	8.7715	3.4642
15	2.3618	6.1192	35	8.8949	3.0727
16	2.741	6.2763	36	8.9837	2.672
17	3.1325	6.3997	37	9.0373	2.2651
18	3.5332	6.4885	38	9.0552	1.855
19	3.9402	6.5421	39	8.7	0
20	4.3502	6.56			

■ 部材データ

部材番号	格点番号		部材長 (m)	使用断面		材質番号	面内 結合条件	
	i 端	j 端		i 端	j 端		i 端	j 端
1	1	2	1.8886	1	1	1	0	0
2	2	3	0.4105	1	1	1	0	0
3	3	4	0.4105	1	1	1	0	0
4	4	5	0.4105	1	1	1	0	0
5	5	6	0.4105	1	1	1	0	0
6	6	7	0.4105	1	1	1	0	0
7	7	8	0.4105	1	1	1	0	0
8	8	9	0.4105	1	1	1	0	0
9	9	10	0.4105	1	1	1	0	0
10	10	11	0.4105	1	1	1	0	0
11	11	12	0.4105	1	1	1	0	0
12	12	13	0.4105	1	1	1	0	0
13	13	14	0.4105	1	1	1	0	0
14	14	15	0.4105	1	1	1	0	0
15	15	16	0.4105	1	1	1	0	0
16	16	17	0.4105	1	1	1	0	0
17	17	18	0.4105	1	1	1	0	0
18	18	19	0.4105	1	1	1	0	0
19	19	20	0.4105	1	1	1	0	0
20	20	21	0.4105	1	1	1	0	0
21	21	22	0.4105	1	1	1	0	0
22	22	23	0.4105	1	1	1	0	0
23	23	24	0.4105	1	1	1	0	0
24	24	25	0.4105	1	1	1	0	0
25	25	26	0.4105	1	1	1	0	0
26	26	27	0.4105	1	1	1	0	0
27	27	28	0.4105	1	1	1	0	0
28	28	29	0.4105	1	1	1	0	0
29	29	30	0.4105	1	1	1	0	0
30	30	31	0.4105	1	1	1	0	0
31	31	32	0.4105	1	1	1	0	0
32	32	33	0.4105	1	1	1	0	0
33	33	34	0.4105	1	1	1	0	0
34	34	35	0.4105	1	1	1	0	0
35	35	36	0.4105	1	1	1	0	0
36	36	37	0.4105	1	1	1	0	0
37	37	38	0.4105	1	1	1	0	0
38	38	39	1.8887	1	1	1	0	0

※) 面内結合条件：【0】剛結合 【1】ピン結合

■面内支点データ

◆支点ケース番号：[1]

支点タイトル：[]

(-1 = 固定, 0 = 自由, 0 < バネ値)

格点番号	支 点 コー ド	K x (tf/m)	K y (tf/m)	K m (tf · m/rad)
1	1 (ピン支点)	-1	-1	0
39	2 (ピン · 水平ローラー支点)	0	-1	0

■面内荷重データ

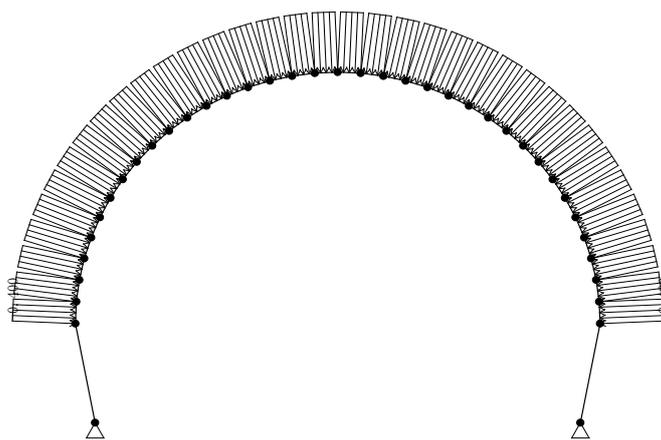
◆荷重ケース番号：[1]

荷重タイトル：[バルーン圧力]

支点ケース番号：[1]

支点タイトル：[]

分布バネケース番号：[0]



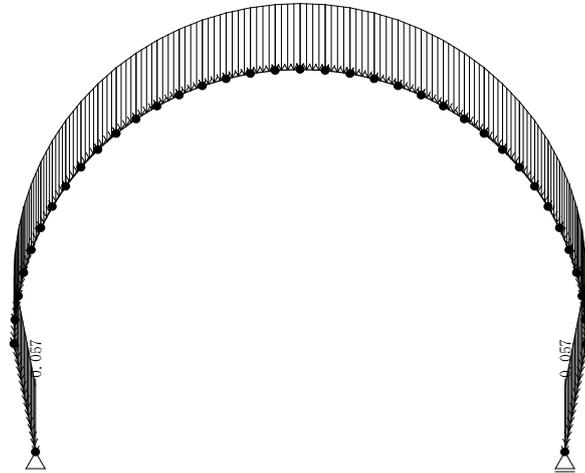
【部材分布荷重】

開始部材 番 号	終了部材 番 号	荷重 コ-ド	i 端側荷重	j 端側荷重	i 端からの 距離 (m)	j 端からの 距離 (m)	載 荷 長 (m)
			(tf/m,tf · m/m)	(tf/m,tf · m/m)			
2	37	12	-0.4	-0.4	0	0	14.777
荷重小計			$\Sigma P_x = 0.000$	$\Sigma P_y = -3.764$			

【荷重コード解説】 12：部材軸直角方向荷重

◆ 荷重値合計： $\Sigma P_x = 0.000$: $\Sigma P_y = -3.764$ ◆

◆荷重ケース番号：[2]
 荷重タイトル：[自重]
 支点ケース番号：[1]
 支点タイトル：[]
 分布バネケース番号：[0]



【部材分布荷重】

開始部材 番 号	終了部材 番 号	荷重 コード	i 端側荷重	j 端側荷重	i 端からの	j 端からの	載 荷 長 (m)
			(tf/m,tf・m/m)	(tf/m,tf・m/m)	距離 (m)	距離 (m)	
1	38	14	-0.057	-0.057	0	0	18.554
荷重小計 $\Sigma P_x =$			0.000		$\Sigma P_y =$		-1.063

【荷重コード解説】

12：部材軸直角方向荷重

◆荷重値合計： $\Sigma P_x = 0.000$: $\Sigma P_y = -1.063$ ◆

■面内組み合わせデータ

◆組み合わせケース番号：[1]

組み合わせタイトル：[]

全体割増係数：[1.0000]

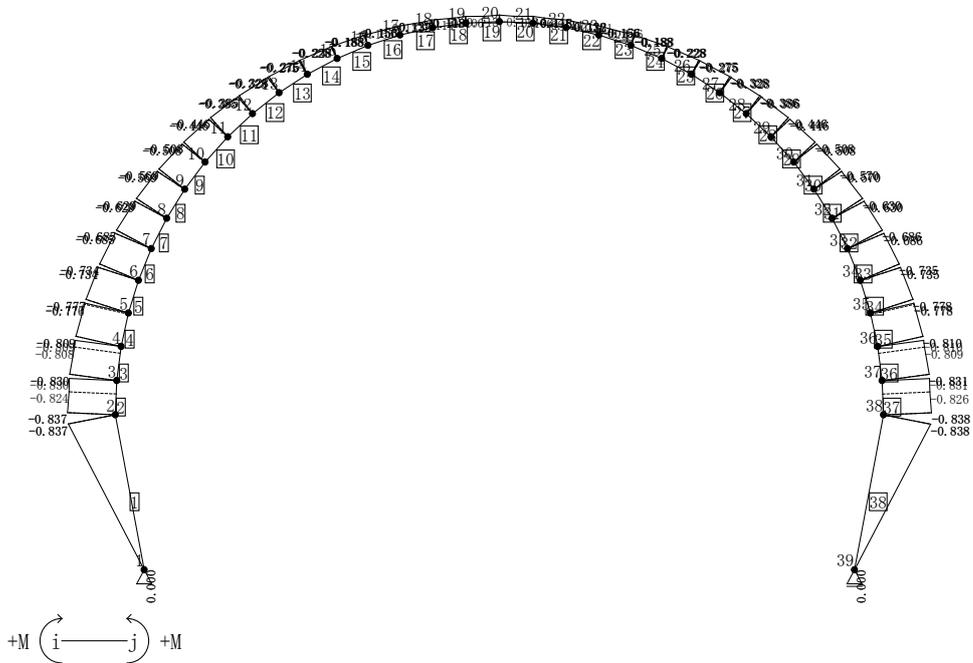
荷重ケース 番 号	荷 重 タ イ ト ル	部分割増係数
1	バルーン圧力	1
2	自重	1

4.アーチ部出力データ

■ 面内断面力

◆ 組み合わせ荷重ケース 1: バルーン圧+自重

断面力Mz図



部材番号 1 (1 - 2)

着目点	距離 (m)	曲げモーメント Mz(tf・m)	せん断力 Sy(tf)	軸力 Nx(tf)	たわみ δ (mm)
i	0	0	-0.453	-2.370	0
j	1.889	-0.837	-0.433	-2.264	0
MAX	0	0	-0.453	-2.370	---
MIN	1.889	-0.837	-0.433	-2.264	---

部材番号 2 (2 - 3)

着目点	距離 (m)	曲げモーメント Mz(tf・m)	せん断力 Sy(tf)	軸力 Nx(tf)	たわみ δ (mm)
i	0	-0.837	0.101	-2.303	0
j	0.410	-0.830	-0.065	-2.280	0
MAX	0.250	-0.824	0	-2.289	---
MIN	0	-0.837	0.101	-2.303	---

部材番号 3 (3 - 4)

着目点	距離 (m)	曲げモーメント Mz(tf・m)	せん断力 Sy(tf)	軸力 Nx(tf)	たわみ δ (mm)
i	0	-0.830	0.134	-2.276	0
j	0.410	-0.809	-0.033	-2.253	0
MAX	0.329	-0.808	0	-2.258	---
MIN	0	-0.830	0.134	-2.276	---

部材番号 4 (4 - 5)

着目点	距離 (m)	曲げモーメント Mz(tf・m)	せん断力 Sy(tf)	軸力 Nx(tf)	たわみ δ (mm)
i	0	-0.809	0.164	-2.247	0
j	0.410	-0.777	-0.006	-2.225	0
MAX	0.396	-0.776	0	-2.225	---
MIN	0	-0.809	0.164	-2.247	---

部材番号 5 (5 - 6)

着目点	距離 (m)	曲げモーメント Mz(tf・m)	せん断力 Sy(tf)	軸力 Nx(tf)	たわみ δ (mm)
i	0	-0.777	0.188	-2.217	0
j	0.410	-0.734	0.017	-2.194	0
MAX	0.410	-0.734	0.017	-2.194	---
MIN	0	-0.777	0.188	-2.217	---

部材番号 6 (6 - 7)

着目点	距離 (m)	曲げモーメント Mz(tf・m)	せん断力 Sy(tf)	軸力 Nx(tf)	たわみ δ (mm)
i	0	-0.734	0.208	-2.184	0
j	0.410	-0.685	0.035	-2.163	0
MAX	0.410	-0.685	0.035	-2.163	---
MIN	0	-0.734	0.208	-2.184	---

部材番号 7 (7 - 8)

着目点	距離 (m)	曲げモーメント Mz(tf・m)	せん断力 Sy(tf)	軸力 Nx(tf)	たわみ δ (mm)
i	0	-0.685	0.223	-2.151	0
j	0.410	-0.629	0.048	-2.130	0
MAX	0.410	-0.629	0.048	-2.130	---
MIN	0	-0.685	0.223	-2.151	---

部材番号 8 (8 - 9)

着目点	距離 (m)	曲げモーメント Mz(tf・m)	せん断力 Sy(tf)	軸力 Nx(tf)	たわみ δ (mm)
i	0	-0.629	0.234	-2.118	0
j	0.410	-0.569	0.057	-2.098	0
MAX	0.410	-0.569	0.057	-2.098	---
MIN	0	-0.629	0.234	-2.118	---

部材番号 9 (9 - 10)

着目点	距離 (m)	曲げモーメント Mz(tf・m)	せん断力 Sy(tf)	軸力 Nx(tf)	たわみ δ (mm)
i	0	-0.569	0.240	-2.085	0
j	0.410	-0.508	0.061	-2.067	0
MAX	0.410	-0.508	0.061	-2.067	---
MIN	0	-0.569	0.240	-2.085	---

部材番号 10 (10 - 11)

着目点	距離 (m)	曲げモーメント Mz(tf・m)	せん断力 Sy(tf)	軸力 Nx(tf)	たわみ δ (mm)
i	0	-0.508	0.241	-2.054	0
j	0.410	-0.446	0.061	-2.036	0
MAX	0.410	-0.446	0.061	-2.036	---
MIN	0	-0.508	0.241	-2.054	---

部材番号 11 (11 - 12)

着目点	距離 (m)	曲げモーメント Mz(tf・m)	せん断力 Sy(tf)	軸力 Nx(tf)	たわみ δ (mm)
i	0	-0.446	0.238	-2.023	0
j	0.410	-0.385	0.057	-2.007	0
MAX	0.410	-0.385	0.057	-2.007	---
MIN	0	-0.446	0.238	-2.023	---

部材番号 12 (12 - 13)

着目点	距離 (m)	曲げモーメント Mz(tf・m)	せん断力 Sy(tf)	軸力 Nx(tf)	たわみ δ (mm)
i	0	-0.385	0.231	-1.995	0
j	0.410	-0.328	0.048	-1.980	0
MAX	0.410	-0.328	0.048	-1.980	---
MIN	0	-0.385	0.231	-1.995	---

部材番号 13 (13 - 14)

着目点	距離 (m)	曲げモーメント Mz(tf・m)	せん断力 Sy(tf)	軸力 Nx(tf)	たわみ δ (mm)
i	0	-0.328	0.221	-1.969	0
j	0.410	-0.275	0.037	-1.956	0
MAX	0.410	-0.275	0.037	-1.956	---
MIN	0	-0.328	0.221	-1.969	---

部材番号 14 (14 - 15)

着目点	距離 (m)	曲げモーメント Mz(tf・m)	せん断力 Sy(tf)	軸力 Nx(tf)	たわみ δ (mm)
i	0	-0.275	0.207	-1.945	0
j	0.410	-0.228	0.022	-1.934	0
MAX	0.410	-0.228	0.022	-1.934	---
MIN	0	-0.275	0.207	-1.945	---

部材番号 15 (15 - 16)

着目点	距離 (m)	曲げモーメント Mz(tf・m)	せん断力 Sy(tf)	軸力 Nx(tf)	たわみ δ (mm)
i	0	-0.228	0.191	-1.925	0
j	0.410	-0.188	0.005	-1.916	0
MAX	0.410	-0.188	0.005	-1.916	---
MIN	0	-0.228	0.191	-1.925	---

部材番号 16 (16 - 17)

着目点	距離 (m)	曲げモーメント Mz(tf・m)	せん断力 Sy(tf)	軸力 Nx(tf)	たわみ δ (mm)
i	0	-0.188	0.172	-1.908	0
j	0.410	-0.156	-0.015	-1.901	0
MAX	0.378	-0.155	0	-1.902	---
MIN	0	-0.188	0.172	-1.908	---

部材番号 17 (17 - 18)

着目点	距離 (m)	曲げモーメント Mz(tf・m)	せん断力 Sy(tf)	軸力 Nx(tf)	たわみ δ (mm)
i	0	-0.156	0.151	-1.895	0
j	0.410	-0.132	-0.036	-1.890	0
MAX	0.331	-0.131	0	-1.891	---
MIN	0	-0.156	0.151	-1.895	---

部材番号 18 (18 - 19)

着目点	距離 (m)	曲げモーメント Mz(tf・m)	せん断力 Sy(tf)	軸力 Nx(tf)	たわみ δ (mm)
i	0	-0.132	0.129	-1.886	0
j	0.410	-0.118	-0.059	-1.883	0
MAX	0.282	-0.114	0	-1.884	---
MIN	0	-0.132	0.129	-1.886	---

部材番号 19 (19 - 20)

着目点	距離 (m)	曲げモーメント Mz(tf・m)	せん断力 Sy(tf)	軸力 Nx(tf)	たわみ δ (mm)
i	0	-0.118	0.105	-1.881	0
j	0.410	-0.113	-0.082	-1.880	0
MAX	0.231	-0.106	0	-1.881	---
MIN	0	-0.118	0.105	-1.881	---

部材番号 20 (20 - 21)

着目点	距離 (m)	曲げモーメント Mz(tf・m)	せん断力 Sy(tf)	軸力 Nx(tf)	たわみ δ (mm)
i	0	-0.113	0.082	-1.880	0
j	0.410	-0.118	-0.106	-1.881	0
MAX	0.179	-0.106	0	-1.881	---
MIN	0.410	-0.118	-0.106	-1.881	---

部材番号 21 (21 - 22)

着目点	距離 (m)	曲げモーメント Mz(tf・m)	せん断力 Sy(tf)	軸力 Nx(tf)	たわみ δ (mm)
i	0	-0.118	0.059	-1.883	0
j	0.410	-0.132	-0.129	-1.886	0
MAX	0.128	-0.114	0	-1.884	---
MIN	0.410	-0.132	-0.129	-1.886	---

部材番号 22 (22 - 23)

着目点	距離 (m)	曲げモーメント Mz(tf・m)	せん断力 Sy(tf)	軸力 Nx(tf)	たわみ δ (mm)
i	0	-0.132	0.036	-1.890	0
j	0.410	-0.156	-0.151	-1.896	0
MAX	0.079	-0.131	0	-1.891	---
MIN	0.410	-0.156	-0.151	-1.896	---

部材番号 23 (23 - 24)

着目点	距離 (m)	曲げモーメント Mz(tf・m)	せん断力 Sy(tf)	軸力 Nx(tf)	たわみ δ (mm)
i	0	-0.156	0.015	-1.901	0
j	0.410	-0.188	-0.172	-1.909	0
MAX	0.032	-0.156	0	-1.902	---
MIN	0.410	-0.188	-0.172	-1.909	---

部材番号 24 (24 - 25)

着目点	距離 (m)	曲げモーメント Mz(tf・m)	せん断力 Sy(tf)	軸力 Nx(tf)	たわみ δ (mm)
i	0	-0.188	-0.005	-1.916	0
j	0.410	-0.228	-0.191	-1.925	0
MAX	0	-0.188	-0.005	-1.916	---
MIN	0.410	-0.228	-0.191	-1.925	---

部材番号 25 (25 - 26)

着目点	距離 (m)	曲げモーメント Mz(tf・m)	せん断力 Sy(tf)	軸力 Nx(tf)	たわみ δ (mm)
i	0	-0.228	-0.022	-1.935	0
j	0.410	-0.275	-0.207	-1.945	0
MAX	0	-0.228	-0.022	-1.935	---
MIN	0.410	-0.275	-0.207	-1.945	---

部材番号 26 (26 - 27)

着目点	距離 (m)	曲げモーメント Mz(tf・m)	せん断力 Sy(tf)	軸力 Nx(tf)	たわみ δ (mm)
i	0	-0.275	-0.037	-1.956	0
j	0.410	-0.328	-0.221	-1.969	0
MAX	0	-0.275	-0.037	-1.956	---
MIN	0.410	-0.328	-0.221	-1.969	---

部材番号 27 (27 - 28)

着目点	距離 (m)	曲げモーメント Mz(tf・m)	せん断力 Sy(tf)	軸力 Nx(tf)	たわみ δ (mm)
i	0	-0.328	-0.049	-1.981	0
j	0.410	-0.386	-0.231	-1.995	0
MAX	0	-0.328	-0.049	-1.981	---
MIN	0.410	-0.386	-0.231	-1.995	---

部材番号 28 (28 - 29)

着目点	距離 (m)	曲げモーメント Mz(tf・m)	せん断力 Sy(tf)	軸力 Nx(tf)	たわみ δ (mm)
i	0	-0.386	-0.057	-2.007	0
j	0.410	-0.446	-0.238	-2.023	0
MAX	0	-0.386	-0.057	-2.007	---
MIN	0.410	-0.446	-0.238	-2.023	---

部材番号 29 (29 - 30)

着目点	距離 (m)	曲げモーメント Mz(tf・m)	せん断力 Sy(tf)	軸力 Nx(tf)	たわみ δ (mm)
i	0	-0.446	-0.061	-2.036	0
j	0.410	-0.508	-0.241	-2.054	0
MAX	0	-0.446	-0.061	-2.036	---
MIN	0.410	-0.508	-0.241	-2.054	---

部材番号 30 (30 - 31)

着目点	距離 (m)	曲げモーメント Mz(tf・m)	せん断力 Sy(tf)	軸力 Nx(tf)	たわみ δ (mm)
i	0	-0.508	-0.061	-2.067	0
j	0.410	-0.570	-0.240	-2.086	0
MAX	0	-0.508	-0.061	-2.067	---
MIN	0.410	-0.570	-0.240	-2.086	---

部材番号 31 (31 - 32)

着目点	距離 (m)	曲げモーメント Mz(tf・m)	せん断力 Sy(tf)	軸力 Nx(tf)	たわみ δ (mm)
i	0	-0.570	-0.057	-2.099	0
j	0.410	-0.630	-0.234	-2.118	0
MAX	0	-0.570	-0.057	-2.099	---
MIN	0.410	-0.630	-0.234	-2.118	---

部材番号 32 (32 - 33)

着目点	距離 (m)	曲げモーメント Mz(tf・m)	せん断力 Sy(tf)	軸力 Nx(tf)	たわみ δ (mm)
i	0	-0.630	-0.048	-2.131	0
j	0.410	-0.686	-0.223	-2.152	0
MAX	0	-0.630	-0.048	-2.131	---
MIN	0.410	-0.686	-0.223	-2.152	---

部材番号 33 (33 - 34)

着目点	距離 (m)	曲げモーメント Mz(tf・m)	せん断力 Sy(tf)	軸力 Nx(tf)	たわみ δ (mm)
i	0	-0.686	-0.035	-2.163	0
j	0.410	-0.735	-0.208	-2.185	0
MAX	0	-0.686	-0.035	-2.163	---
MIN	0.410	-0.735	-0.208	-2.185	---

部材番号 34 (34 - 35)

着目点	距離 (m)	曲げモーメント Mz(tf・m)	せん断力 Sy(tf)	軸力 Nx(tf)	たわみ δ (mm)
i	0	-0.735	-0.017	-2.194	0
j	0.410	-0.778	-0.188	-2.217	0
MAX	0	-0.735	-0.017	-2.194	---
MIN	0.410	-0.778	-0.188	-2.217	---

部材番号 35 (35 - 36)

着目点	距離 (m)	曲げモーメント Mz(tf・m)	せん断力 Sy(tf)	軸力 Nx(tf)	たわみ δ (mm)
i	0	-0.778	0.006	-2.225	0
j	0.410	-0.81	-0.164	-2.248	0
MAX	0.014	-0.778	0	-2.226	---
MIN	0.410	-0.81	-0.164	-2.248	---

部材番号 36 (36 - 37)

着目点	距離 (m)	曲げモーメント Mz(tf・m)	せん断力 Sy(tf)	軸力 Nx(tf)	たわみ δ (mm)
i	0	-0.810	0.033	-2.253	0
j	0.410	-0.831	-0.134	-2.277	0
MAX	0.081	-0.809	0	-2.258	---
MIN	0.410	-0.831	-0.134	-2.277	---

部材番号 37 (37 - 38)

着目点	距離 (m)	曲げモーメント Mz(tf・m)	せん断力 Sy(tf)	軸力 Nx(tf)	たわみ δ (mm)
i	0	-0.831	0.065	-2.280	0
j	0.410	-0.838	-0.101	-2.303	0
MAX	0.161	-0.826	0	-2.289	---
MIN	0.410	-0.838	-0.101	-2.303	---

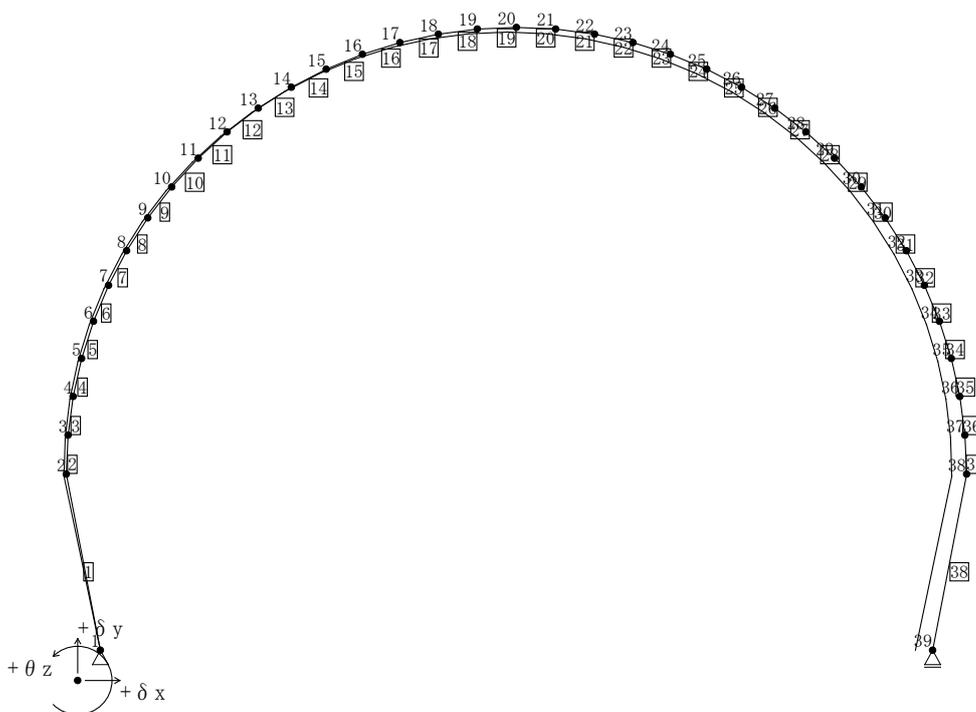
部材番号 38 (38 - 39)

着目点	距離 (m)	曲げモーメント Mz(tf・m)	せん断力 Sy(tf)	軸力 Nx(tf)	たわみ δ (mm)
i	0	-0.838	0.434	-2.264	0
j	1.889	0	0.454	-2.371	0
MAX	1.889	0	0.454	-2.371	---
MIN	0	-0.838	0.434	-2.264	---

■面内変位

◆組み合わせ荷重ケース 1 :

変位図



格点番号	水平変位 $\delta x(\text{mm})$	鉛直変位 $\delta y(\text{mm})$	回轉變位 $\theta z(\text{mrad})$	格点番号	水平変位 $\delta x(\text{mm})$	鉛直変位 $\delta y(\text{mm})$	回轉變位 $\theta z(\text{mrad})$
1	0	0	0.0002				
2	-0.0003	-0.00027	0.00016	21	-0.00114	-0.00059	0
3	-0.00037	-0.00031	0.00014	22	-0.00117	-0.00059	0
4	-0.00043	-0.00035	0.00013	23	-0.00121	-0.00059	-0.00001
5	-0.00049	-0.00038	0.00011	24	-0.00125	-0.00058	-0.00001
6	-0.00054	-0.00041	0.0001	25	-0.00128	-0.00057	-0.00001
7	-0.00059	-0.00043	0.00008	26	-0.00132	-0.00056	-0.00002
8	-0.00064	-0.00046	0.00007	27	-0.00136	-0.00054	-0.00002
9	-0.00068	-0.00048	0.00006	28	-0.00139	-0.00053	-0.00003
10	-0.00072	-0.0005	0.00005	29	-0.00143	-0.00051	-0.00004
11	-0.00076	-0.00051	0.00004	30	-0.00147	-0.0005	-0.00005
12	-0.00080	-0.00053	0.00003	31	-0.00152	-0.00048	-0.00006
13	-0.00084	-0.00054	0.00002	32	-0.00156	-0.00046	-0.00007
14	-0.00088	-0.00056	0.00002	33	-0.00161	-0.00043	-0.00008
15	-0.00092	-0.00057	0.00001	34	-0.00166	-0.00041	-0.00010
16	-0.00095	-0.00058	0.00001	35	-0.00171	-0.00038	-0.00011
17	-0.00099	-0.00059	0.00001	36	-0.00177	-0.00035	-0.00013
18	-0.00103	-0.00059	0	37	-0.00183	-0.00031	-0.00014
19	-0.00106	-0.00059	0	38	-0.0019	-0.00027	-0.00016
20	-0.00110	-0.00060	0	39	-0.0022	0	-0.00020

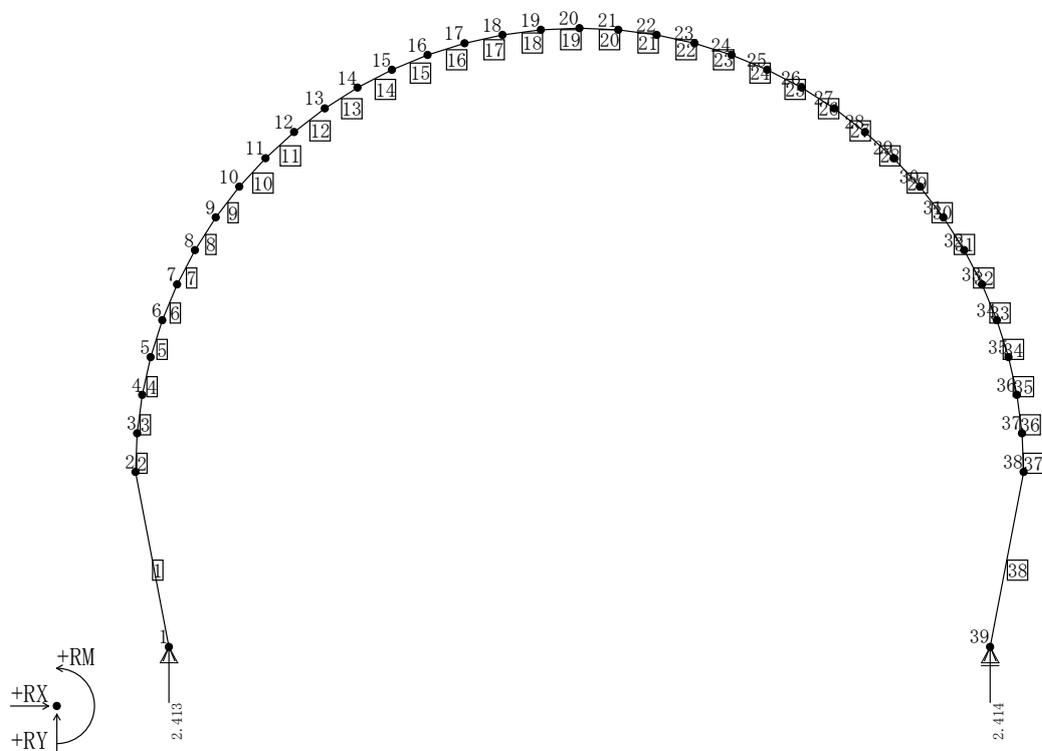
バルーン圧力で養生のときの架台の変位は

最大変位 X=0.0022mm Y=0.0006mm

■面内反力

◆組み合わせ荷重ケース 1 :

反力図



格点番号	水平反力 RX(tf)	鉛直反力 RY(tf)	回転反力 RM(tf・m)
1	0	2.413	0
39	0	2.414	0

【資料②-2】

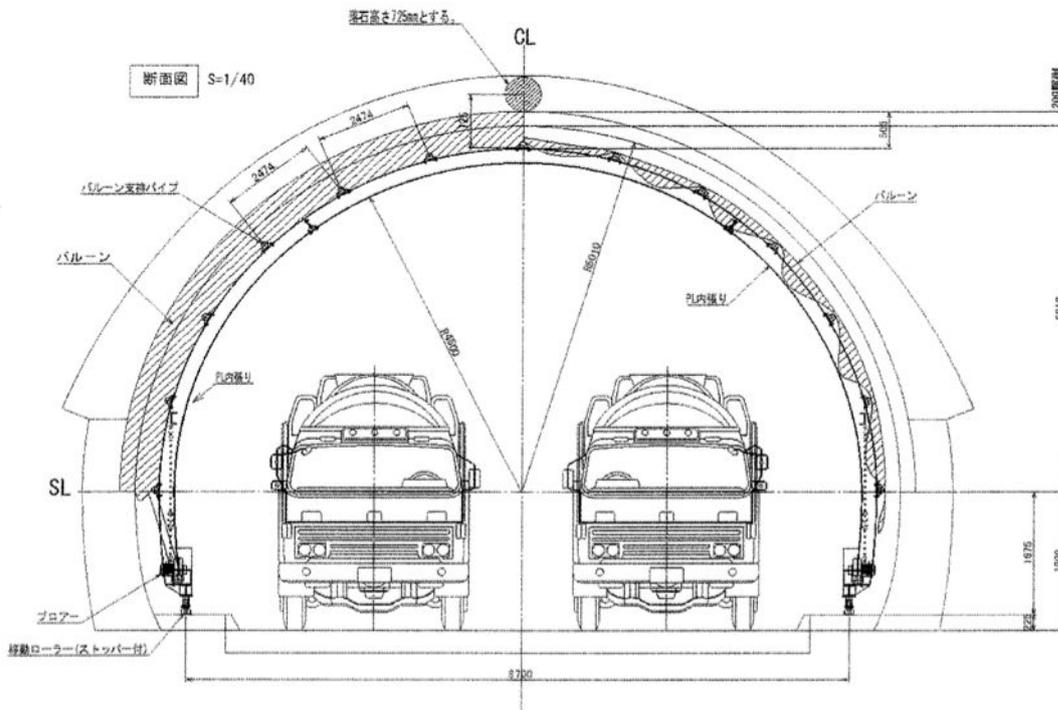
架台付き養生バルーン

落石に対する耐力検討書

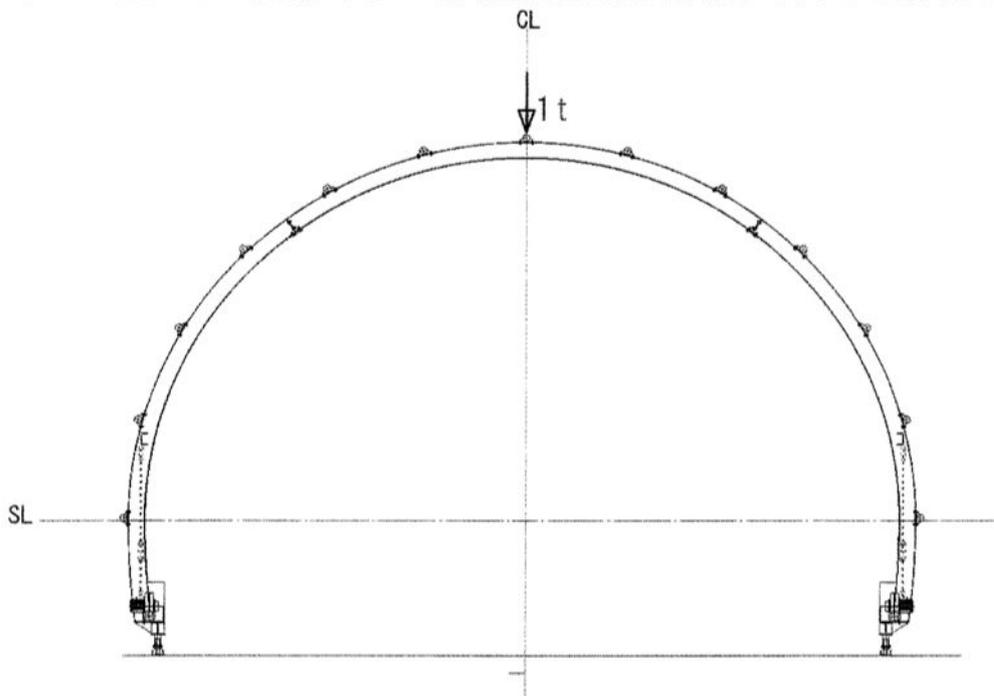
1. 養生架台の落石強度検討の条件

下図のよう落石高さ725mmから架台アーチ中央に落石した場合の条件にて検討する。

アーチ材はH200×100×5.5/8



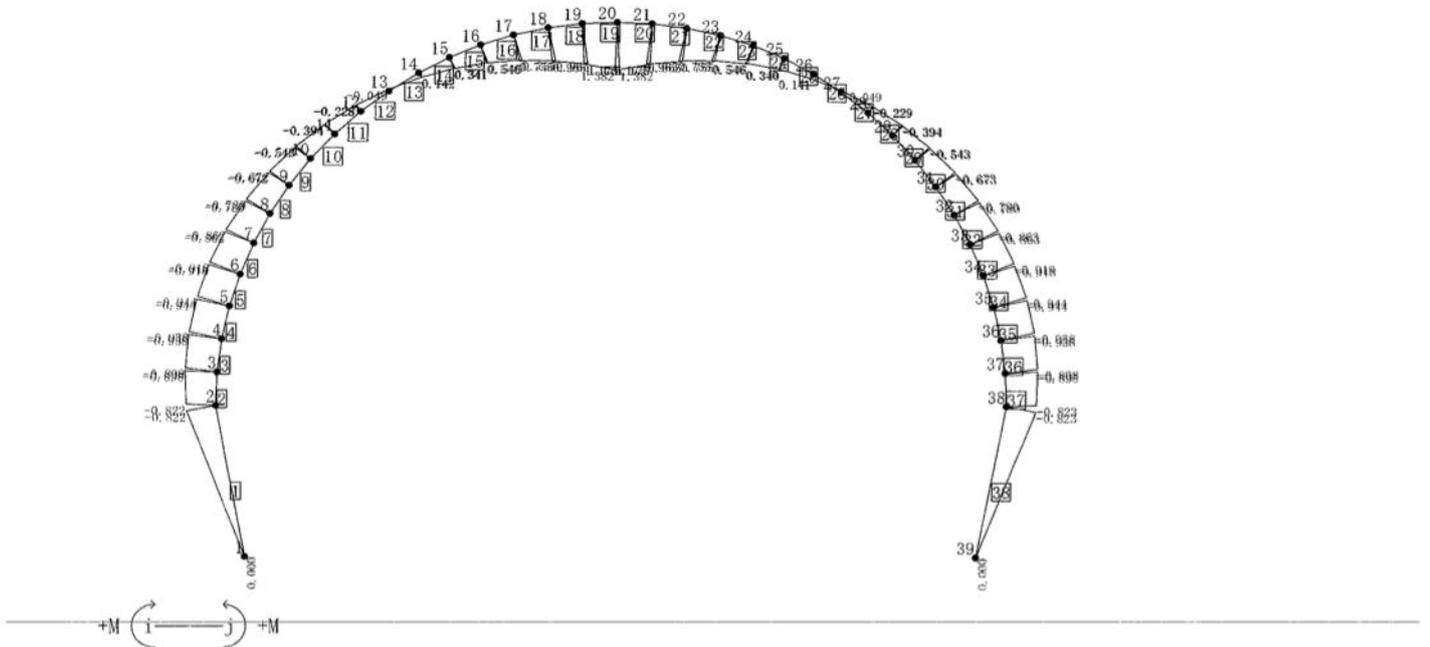
まずはアーチ中央に1tの荷重を负荷した場合を計算ソフト FORUM8社 面内計算ソフトにて入力しその応力値をもとに許容落石荷重及び落石塊の大きさを算出する。



2.計算ソフト 出力データ

◆組み合わせ荷重ケース 1：自重+1t

断面力Mz図



部材番号 20 (20 - 21)

着目点	距離 (m)	曲げモーメント Mz(tf・m)	せん断力 Sy(tf)	軸力 Nx(tf)	たわみ δ (mm)
i	0	1.382	-0.49	-0.252	0
j	0.41	1.175	-0.52	-0.253	0
MAX	0	1.382	-0.49	-0.252	---
MIN	0.41	1.175	-0.52	-0.253	---

3.荷重1tの場合のアーチ応力

最大モーメントの発生する部材

部材番号20 にて検討する。

使用鋼材H200x100x5.5/8

$$\begin{aligned}
 \text{曲げモーメント } M &= 1.382 \quad \text{tf/m} \\
 \text{断面係数 } Z_x &= 181 \quad \text{cm}^3 \\
 \text{曲げ応力 } \sigma_1 &= 1.382 \times 100000 / 181 = 763.5 \quad \text{kgf/cm}^2 \\
 &= 7482.7 \quad \text{N/cm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{軸力} &= 0.253 \quad \text{tf} \\
 \text{縦材断面積} &= 26.67 \quad \text{cm}^2
 \end{aligned}$$

支間距離		1.267	m				
断面二次半径		2.24	cm				
細長比 $\lambda 1 =$		57					
座屈係数		1.196	座屈表より				
圧縮応力 $\sigma 2 =$	1.2 ×	0.253	× 1000 /	26.67	=	11.3	kgf/cm ²
					=	111.2	N/cm ²
合成応力 $\Sigma =$		7482.7	+	111.2	=	7593.8	N/cm ²

4. アーチ材の許容できる荷重の算出

鋼材の基準強度 = 23500 N/mm² にて比率にて許容できる荷重を算出

許容荷重

$$\frac{23500}{7593.8} \times 1000 \text{ kgF} = 3094 \text{ kgF}$$

5. 落石重量の算出

落石衝撃力 = $(W/g) \cdot a$ 落石対策便覧より

W = 落石重量

g = 重力加速度 9.8 m/s²

a = 衝突加速度 = $(4h_0 + 10) \cdot g$

h₀ = 0.725 m

$$3094 = (W/9.8) \times (4 \times 0.725 + 10) \times 9.8$$

$$W = 240 \text{ kgF}$$

岩石の比重 2.4

したがって落石体積は $240/2400 = 0.1 \text{ m}^3$

$3\sqrt{0.1} = 0.46 \times 0.46 \times 0.46 \text{ m}$ 塊までは許容できる

参照 計算ソフトへのアーチ部入力データ

■基本データ

タイトル .トンネル改修 掘側養生部架台

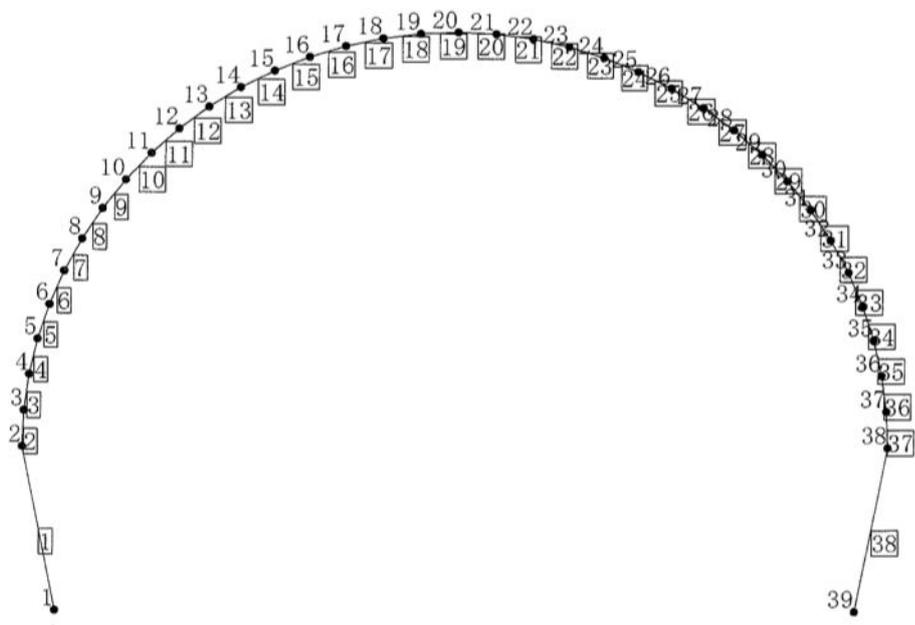
単位系	従来単位
格点数	39
部材数	38
二重格点数	0

	面内
支点ケース数	1
分布バネケース数	0
荷重ケース数	2
組み合わせケース数	1
最大抽出ケース数	0

■計算オプション

格点番号のリナンバ	する
部材間Mmaxの計算	する
荷重点での着目点自動追加	する
組み合わせ荷重時の全体割増係数	断面力・反力・変位
プレストレスによる応力算出	2次力
剛域の計算	する

■構造図



■ 材質データ

材質番号	ヤング係数	線膨張係数	単位体積重量
	E (tf/m ²)	α (/°C)	γ (tf/m ³)
1	2.10E+07	1.20E-05	7.85E+00

■ 断面データ

断面番号	断面積	断面 2 次モーメント	断面ID
	A (m ²)	I z (m ⁴)	
1	2.67E-03	1.81E-05	-----

■ 格点データ

格点番号	X 座標 (m)	Y 座標 (m)	格点番号	X 座標 (m)	Y 座標 (m)
1	0	0	21	4.7603	6.5421
2	-0.3548	1.855	22	5.1672	6.4885
3	-0.3369	2.2651	23	5.568	6.3997
4	-0.2833	2.672	24	5.9594	6.2763
5	-0.1945	3.0727	25	6.3386	6.1192
6	-0.071	3.4642	26	6.7027	5.9296
7	0.086	3.8434	27	7.0489	5.7091
8	0.2756	4.2075	28	7.3745	5.4592
9	0.4961	4.5537	29	7.6772	5.1819
10	0.746	4.8793	30	7.9545	4.8793
11	1.0233	5.1819	31	8.2043	4.5537
12	1.3259	5.4592	32	8.4249	4.2075
13	1.6515	5.7091	33	8.6144	3.8434
14	1.9977	5.9296	34	8.7715	3.4642
15	2.3618	6.1192	35	8.8949	3.0727
16	2.741	6.2763	36	8.9837	2.672
17	3.1325	6.3997	37	9.0373	2.2651
18	3.5332	6.4885	38	9.0552	1.855
19	3.9402	6.5421	39	8.7	0
20	4.3502	6.56			

■部材データ

部材番号	格点番号		部材長 (m)	使用断面		材質番号	面内 結合条件	
	i 端	j 端		i 端	j 端		i 端	j 端
1	1	2	1.8886	1	1	1	0	0
2	2	3	0.4105	1	1	1	0	0
3	3	4	0.4105	1	1	1	0	0
4	4	5	0.4105	1	1	1	0	0
5	5	6	0.4105	1	1	1	0	0
6	6	7	0.4105	1	1	1	0	0
7	7	8	0.4105	1	1	1	0	0
8	8	9	0.4105	1	1	1	0	0
9	9	10	0.4105	1	1	1	0	0
10	10	11	0.4105	1	1	1	0	0
11	11	12	0.4105	1	1	1	0	0
12	12	13	0.4105	1	1	1	0	0
13	13	14	0.4105	1	1	1	0	0
14	14	15	0.4105	1	1	1	0	0
15	15	16	0.4105	1	1	1	0	0
16	16	17	0.4105	1	1	1	0	0
17	17	18	0.4105	1	1	1	0	0
18	18	19	0.4105	1	1	1	0	0
19	19	20	0.4105	1	1	1	0	0
20	20	21	0.4105	1	1	1	0	0
21	21	22	0.4105	1	1	1	0	0
22	22	23	0.4105	1	1	1	0	0
23	23	24	0.4105	1	1	1	0	0
24	24	25	0.4105	1	1	1	0	0
25	25	26	0.4105	1	1	1	0	0
26	26	27	0.4105	1	1	1	0	0
27	27	28	0.4105	1	1	1	0	0
28	28	29	0.4105	1	1	1	0	0
29	29	30	0.4105	1	1	1	0	0
30	30	31	0.4105	1	1	1	0	0
31	31	32	0.4105	1	1	1	0	0
32	32	33	0.4105	1	1	1	0	0
33	33	34	0.4105	1	1	1	0	0
34	34	35	0.4105	1	1	1	0	0
35	35	36	0.4105	1	1	1	0	0

36	36	37	0.4105	1	1	1	0	0
37	37	38	0.4105	1	1	1	0	0
38	38	39	1.8887	1	1	1	0	0

※) 面内結合条件: 【0】剛結合 【1】ピン結合

■面内支点データ

◆支点ケース番号: [1]

支点タイトル: []

(-1 = 固定, 0 = 自由, 0 < バネ値)

格点番号	支点コード	K x (tf/m)	K y (tf/m)	K m (tf・m/rad)
1	1 (ピン支点)	-1	-1	0
39	1 (ピン支点)	-1	-1	0

■面内荷重データ

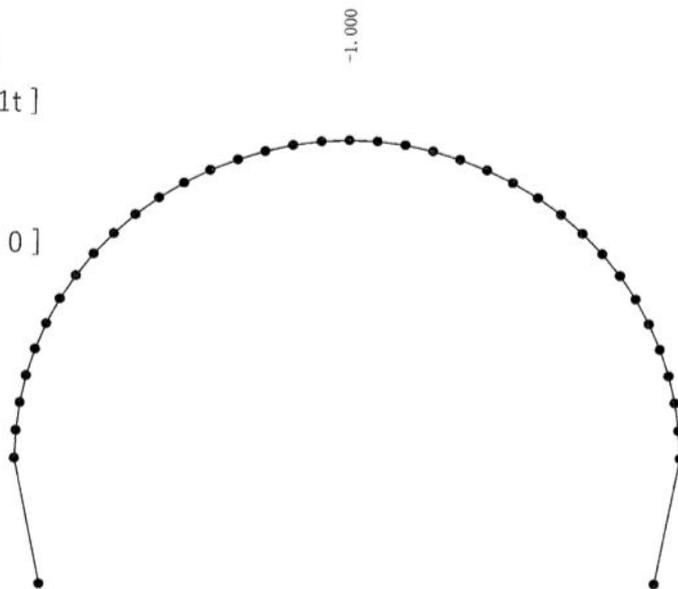
◆荷重ケース番号: [1]

荷重タイトル: [中央 1t]

支点ケース番号: [1]

支点タイトル: []

分布バネケース番号: [0]



【部材集中荷重】

部材番号	荷重コード	荷重強度 (tf, tf・m)	i 端からの 距離 (m)
20	24	-1	0
荷重小計 $\Sigma P_x =$		0.000	$\Sigma P_y =$ -1.000

【荷重コード解説】 24: 全体座標系 Y 方向荷重

【部材分布荷重】

開始部材 番号	終了部材 番号	荷重 コード	i 端側荷重	j 端側荷重	i 端からの	j 端からの	載荷長 (m)
			(tf/m,tf・m/m)	(tf/m,tf・m/m)	距離 (m)	距離 (m)	
2	37	12	-0.4	-0.4	0	0	14.777
荷重小計			$\Sigma P_x = 0.000$	$\Sigma P_y = -3.764$			

【荷重コード解説】 12：部材軸直角方向荷重

◆ 荷重値合計： $\Sigma P_x = 0.000$: $\Sigma P_y = -3.764$ ◆

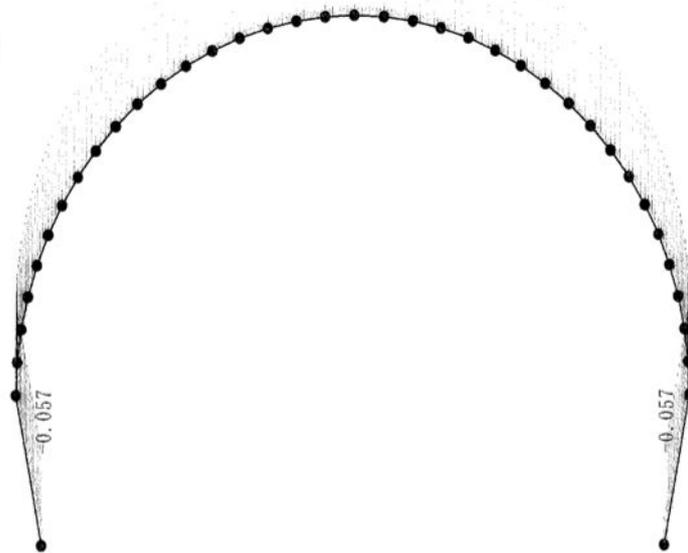
◆ 荷重ケース番号：[2]

荷重タイトル：[自重]

支点ケース番号：[1]

支点タイトル：[]

分布バネケース番号：[0]



【部材分布荷重】

開始部材 番号	終了部材 番号	荷重 コード	i 端側荷	j 端側荷	i 端から	j 端から	載荷長 (m)
			(tf/m,tf・	(tf/m,tf・	距離 (m)	距離 (m)	
1	38	14	-0.074	-0.074	0	0	18.554
荷重小計			$\Sigma P_x = 0.000$	$\Sigma P_y = -1.369$			

【荷重コード解説】

14：全体座標系 Y 方向荷重

◆ 荷重値合計： $\Sigma P_x = 0.000$: $\Sigma P_y = -1.369$ ◆

■面内組み合わせデータ

◆組み合わせケース番号：[1]

組み合わせタイトル：[]

全体割増係数：[1.0000]

荷重ケー 番 号	荷	部分割増係数
1	中央 1t	1
2	自重	1

【資料③-1】

分離型セントル

構造計算書

1. 設計条件

1. 1 打設条件

生コンクリート単位重量	23.5kN/m ³
〃 打設温度	15℃
〃 立ち上り速度	1.5m/hour
〃 打設時間	5.0hour

1. 2 寸法、諸元

寸法、元は DN-202612 に明記の通り。

型枠自重	1200kN(120000kg)
施工断面	全断面打設
計算巻厚	200mm

1. 3 使用材料、許容応力度

使用材料	JIS G 3101 の SS400 または相当品
許容応力度	許容曲げ応力度
	〃 圧縮 〃
	〃 引張り 〃
	〃 剪断 〃
降伏点	$\sigma = 235\text{N/mm}^2$

1. 4 判定式

曲げ応力度	$\sigma_b = M/Z$
圧縮（引張り）応力度	$\sigma_c(t) = N/A$
剪断応力度	$\sigma_s = Q/A_w$
合成応力度	
曲げと引張り	$\sigma_b + \sigma_t \leq 160\text{N/mm}^2$
曲げと圧縮	$(\sigma_b / \sigma_{ba}) + (\sigma_c / \sigma_{ca}) \leq 1.0$
曲げ、剪断応力度が共に 45%を超える場合	$(\sigma_b / \sigma_{ba})^2 + (\sigma_s / \sigma_{sa})^2 \leq 1.2$

1. 5 適応規準

側圧	2017年制定コンクリート標準示方書[施工編] (社)土木学会 P.147~149
許容応力度	2016年制定トンネル標準示方書[シールド工法]・同解説 (社)土木学会 P.78~81

2. 設計荷重

2. 1 側圧

高流動コンクリートの場合、側圧は液圧で計算する。

型枠に作用するコンクリートの側圧は、

$$p = \gamma \cdot H$$

p : 側圧(N/mm²)

γ : コンクリート単位重量

23.5kN/m³ (2400kgf/m³)

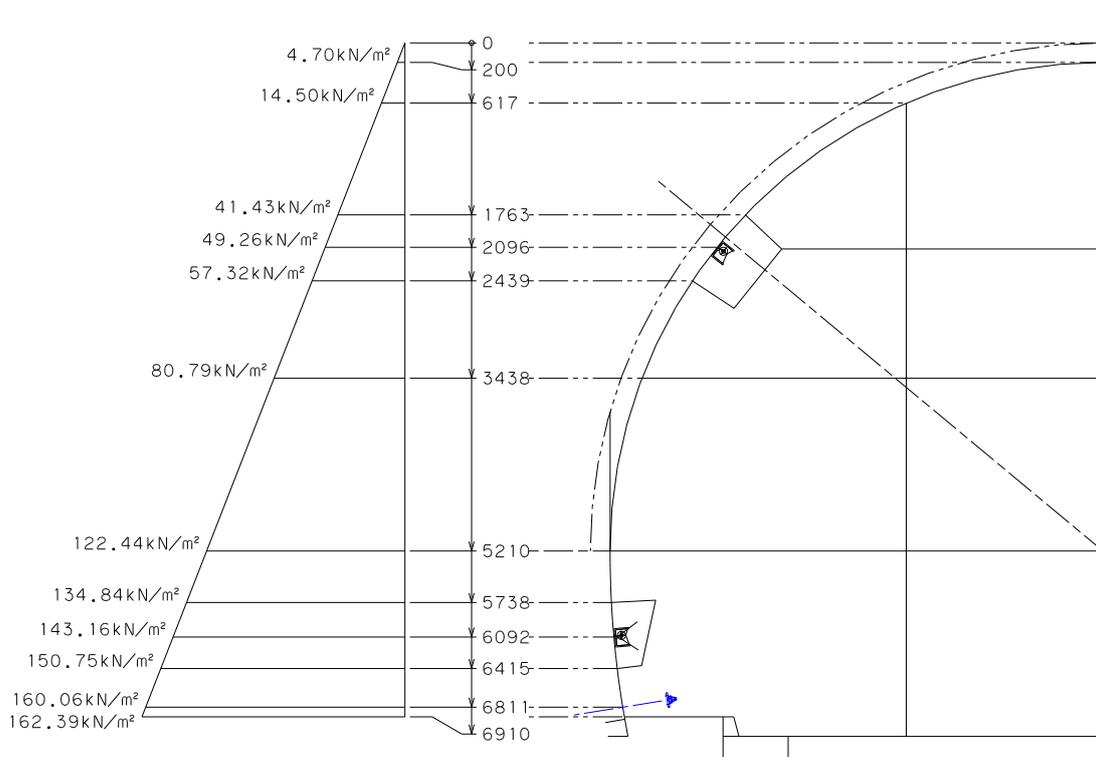
H : コンクリート任意高さ

m

$$P_{max} = 23.5 \times 6.91$$

$$= 162.39 \text{ kN/m}^2$$

側圧の分布は下図になる。



2. 2 鉛直圧

鉛直圧も側圧同様液圧で計算する。

型枠に作用するコンクリートの鉛直圧は、

$$p = \gamma \cdot H$$

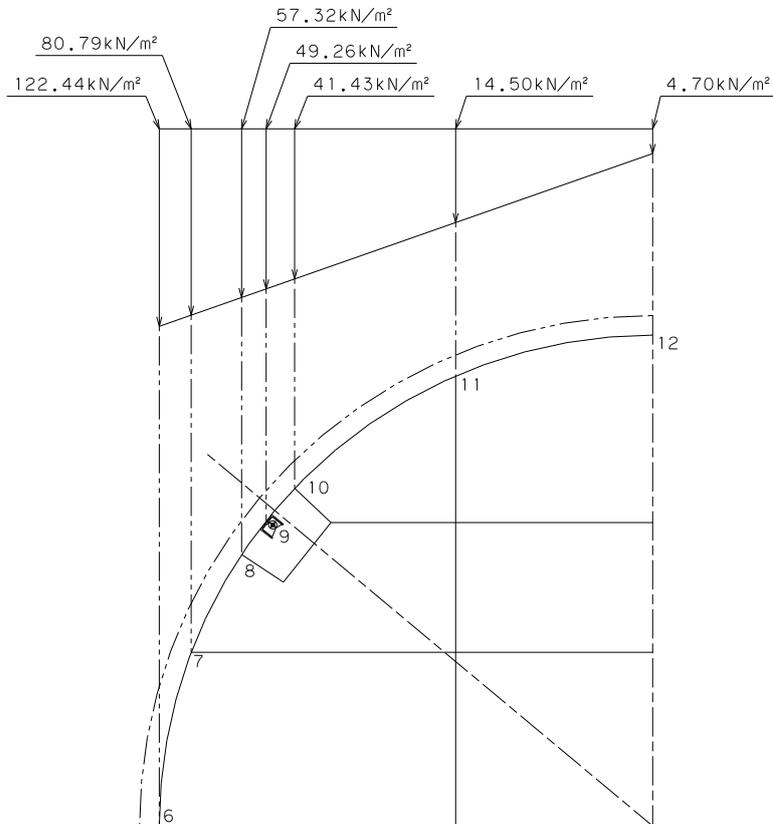
p : 側圧(N/mm²)

γ : コンクリート単位重量 23.5kN/m^3 (2400kgf/m³)

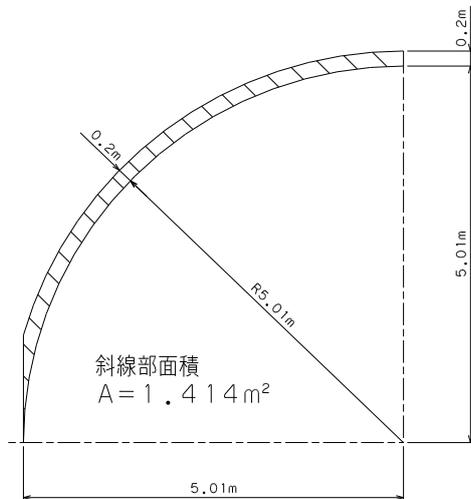
H : コンクリート任意高さ m

$$\begin{aligned} P_{\max} &= 23.5 \times 5.21 \\ &= 122.44\text{kN/m}^2 \end{aligned}$$

鉛直圧の分布は下図になる。



2. 3 コンクリート上載荷重



$$W_c = A \times \gamma \times B$$

諸元 A : 斜線部の面積 1.414 m²
 γ : コンクリート単位重量 23.5kN/m³ (2400kgf/m³)
 B : フォーム組幅 1.5m

$$W_c = 1.414 \times 23.5 \text{ kN} \times 1.5 = 49.84 \text{ kN} / \text{片側 1.5m}$$

2. 4 型枠自重

$$\Sigma W_s = 1200 \text{ kN} \quad (120000 \text{ kgf})$$

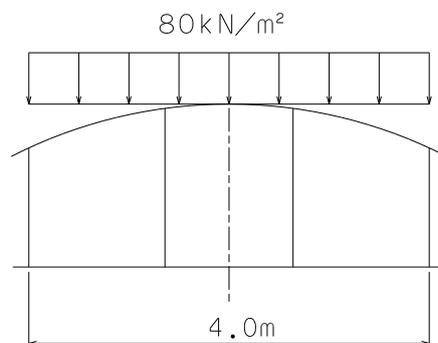
$$\text{フォーム部 } W_f = 600 \text{ kN} \quad (60000 \text{ kgf})$$

$$\text{架台部 } W_g = 600 \text{ kN} \quad (60000 \text{ kgf})$$

$$W_{f1} = 600 \text{ kN} / 10.5 \times 1.5 / 2 = 42.86 \text{ kN} / \text{片側 1.5m}$$

2. 5 打設荷重

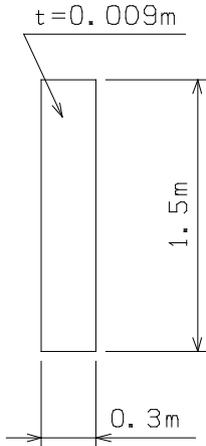
コンクリート打設時における注入圧による圧送荷重 80kN/m²を付加する。短期荷重としてクラウンフォームの解析のみに用いる。



3. フォーム材の設計

3. 1 スキンプレートの設計

等分布荷重を受ける4辺固定板として解析する。



1) 応力度

$$\sigma_b = -6 \times k \times P \times a^2 / t^2$$

諸元 設計圧 : $P = 162385 \text{ N/m}^2$ 3-2-1 より
 スチフナーピッチ : $a = 0.3 \text{ m}$
 スチフナーズパン : $b = 1.5 \text{ m}$
 スキンプレート厚 : $t = 0.009 \text{ m}$
 下表より : k

$$b/a = 1.5/0.3 = 5.0 \rightarrow \infty$$

$$\therefore k = -0.0833$$

等分布荷重を受ける4辺完全固定板の M ($\nu = 0.3$)

b/a	(M _x) _{X=a/2,y=0}	(M _y) _{X=0,y=b/2}	(M _x) _{X=0,y=0}	(M _y) _{X=0,y=0}
1	-0.0513Pa ²	-0.0513Pa ²	-0.0231Pa ²	-0.0231Pa ²
1.1	-0.0581Pa ²	-0.0538Pa ²	-0.0264Pa ²	-0.0231Pa ²
1.2	-0.0639Pa ²	-0.0554Pa ²	-0.0299Pa ²	-0.0228Pa ²
1.3	-0.0687Pa ²	-0.0563Pa ²	-0.0327Pa ²	-0.0222Pa ²
1.4	-0.0726Pa ²	-0.0568Pa ²	-0.0349Pa ²	-0.0212Pa ²
1.5	-0.0757Pa ²	-0.0570Pa ²	-0.0368Pa ²	-0.0203Pa ²
1.6	-0.0780Pa ²	-0.0571Pa ²	-0.0381Pa ²	-0.0193Pa ²
1.7	-0.0799Pa ²	-0.0571Pa ²	-0.0392Pa ²	-0.0182Pa ²
1.8	-0.0812Pa ²	-0.0571Pa ²	-0.0401Pa ²	-0.0174Pa ²
1.9	-0.0822Pa ²	-0.0571Pa ²	-0.0407Pa ²	-0.0165Pa ²
2	-0.0829Pa ²	-0.0571Pa ²	-0.0412Pa ²	-0.0158Pa ²
∞	-0.0833Pa ²	-0.0571Pa ²	-0.0417Pa ²	-0.0125Pa ²

$$\sigma_b = -6 \times -0.0833 \times 162385 \times 0.3^2 / 0.009^2$$

$$= 90177803 \text{ N/m}^2 \rightarrow 90.18 \text{ N/mm}^2$$

$$\leq 160 \text{ N/mm}^2 \quad \text{O.K}$$

2) たわみ

$$\delta = 0.0284 \times P \times a^4 / (E \times t^3)$$

諸元 設計圧力 : $P = 162385 \text{ N/m}^2$
 スチフナーピッチ : $a = 0.3 \text{ m}$
 縦弾性係数 : $E = 2.1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
 スキンプレート厚さ : $t = 0.009 \text{ m}$

$$= 0.0284 \times 162385 \times 0.3^4 / (2.1 \times 10^{11} \times 0.009^3)$$

$$= 0.244 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\leq 1.0 \times 10^{-3} \text{ m} \quad \text{O.K}$$

3. 2 スチーフナーの設計

単純梁で解析する。

1) 天端部の検討

$$M = P \times a \times b^2 / 8$$

鉛直圧が最大になるポイント 6 の値で計算する。

$$P_6 = 5.21 \times 23.5 = 122.44 \text{ kN/m}^2$$

諸元 設計圧力 : $P = 122.44 \text{ kN/m}^2$

スチーフナーピッチ : $a = 0.3 \text{ m}$

スチーフナーズパン : $b = 1.5 \text{ m}$

$$M = 122.44 \times 0.3 \times 1.5^2 / 8 = 10.33 \text{ N.m}$$

プレートの有効幅 $24 \times t$

Flg 9×216

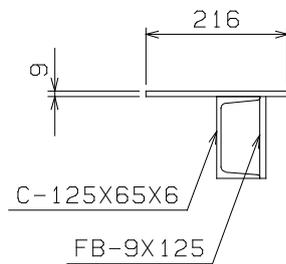
C-125×65×6 Built-up

FB-9×125 Built-up

$Z = 112.1 \times 10^3 \text{ mm}^3$

$$\sigma_b = M/Z = 92.1 \text{ N/mm}^2 \leq 160 \text{ N/mm}^2$$

OK



2) 側壁部の検討

$$M = P \times a \times b^2 / 8$$

側圧が最大になるポイント 1 の値で計算する。

$$P_1 (\text{側圧}) = 6.91 \times 23.5 = 162.39 \text{ kN/m}^2$$

諸元 設計圧力 : $P = 162.39 \text{ kN/m}^2$

スチーフナーピッチ : $a = 0.3 \text{ m}$

スチーフナーズパン : $b = 1.5 \text{ m}$

$$M = 162.39 \times 0.3 \times 1.5^2 / 8 = 13.70 \text{ N.m}$$

プレートの有効幅 $24 \times t$

Flg 9×216

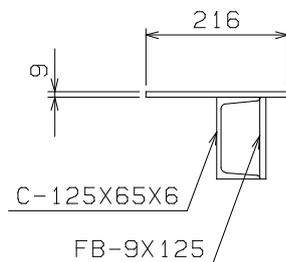
C-125×65×6 Built-up

FB-9×125 Built-up

$Z = 112.1 \times 10^3 \text{ mm}^3$

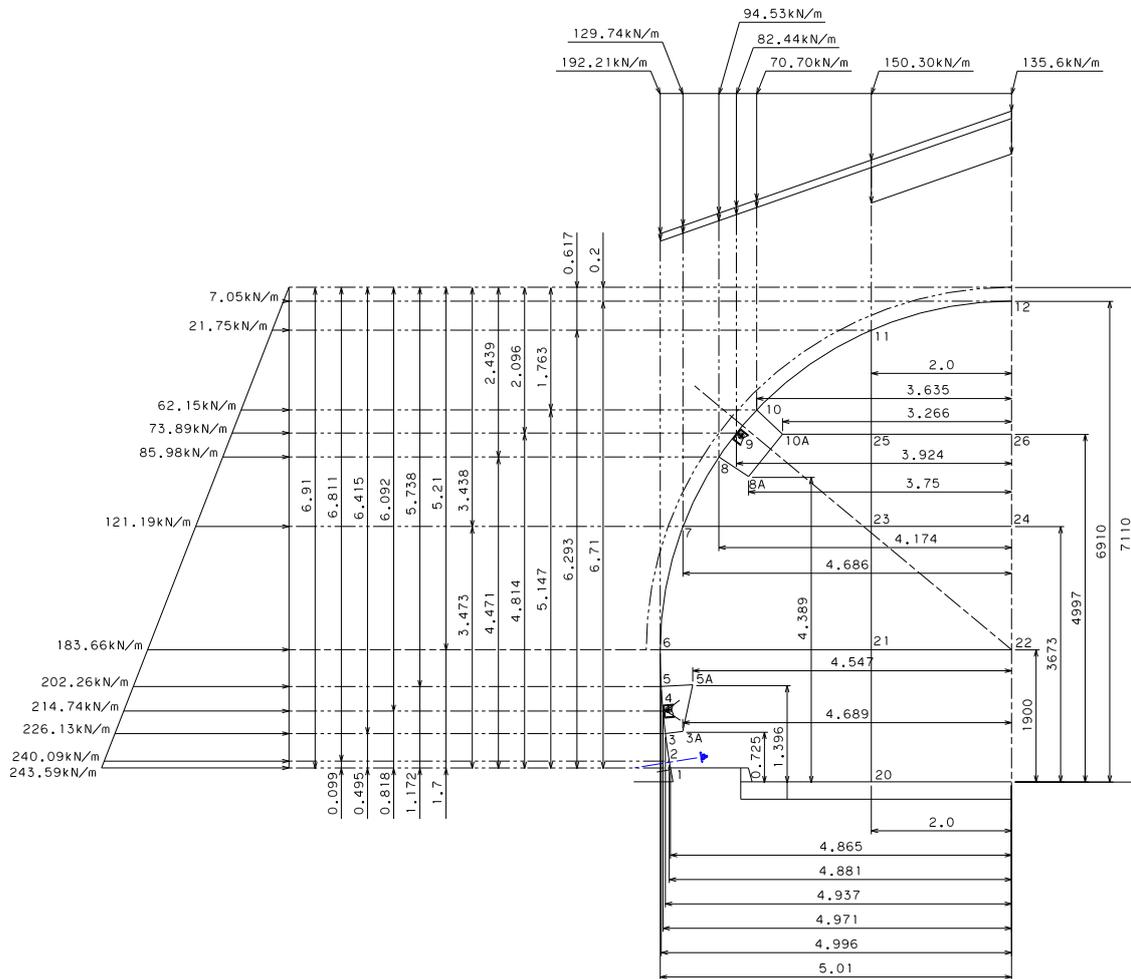
$$\sigma_b = M/Z = 122.2 \text{ N/mm}^2 \leq 160 \text{ N/mm}^2$$

OK



4. フレーム材の設計

フレーム構造 (打設時)



鉛直荷重

$$W_v6 = 5.210 \times 23.5 \times 1.5 + 42.86 / 5.01 = 192.21 \text{ kN/m}$$

$$W_v7 = 3.438 \times 23.5 \times 1.5 + 42.86 / 5.01 = 129.74 \text{ kN/m}$$

$$W_v8 = 2.439 \times 23.5 \times 1.5 + 42.86 / 5.01 = 94.53 \text{ kN/m}$$

$$W_v9 = 2.096 \times 23.5 \times 1.5 + 42.86 / 5.01 = 82.44 \text{ kN/m}$$

$$W_v10 = 1.763 \times 23.5 \times 1.5 + 42.86 / 5.01 = 70.70 \text{ kN/m}$$

$$W_v11 = 0.617 \times 23.5 \times 1.5 + 42.86 / 5.01 + 80 \times 1.5 = 150.30 \text{ kN/m}$$

$$W_v12 = 0.200 \times 23.5 \times 1.5 + 42.86 / 5.01 + 80 \times 1.5 = 135.60 \text{ kN/m}$$

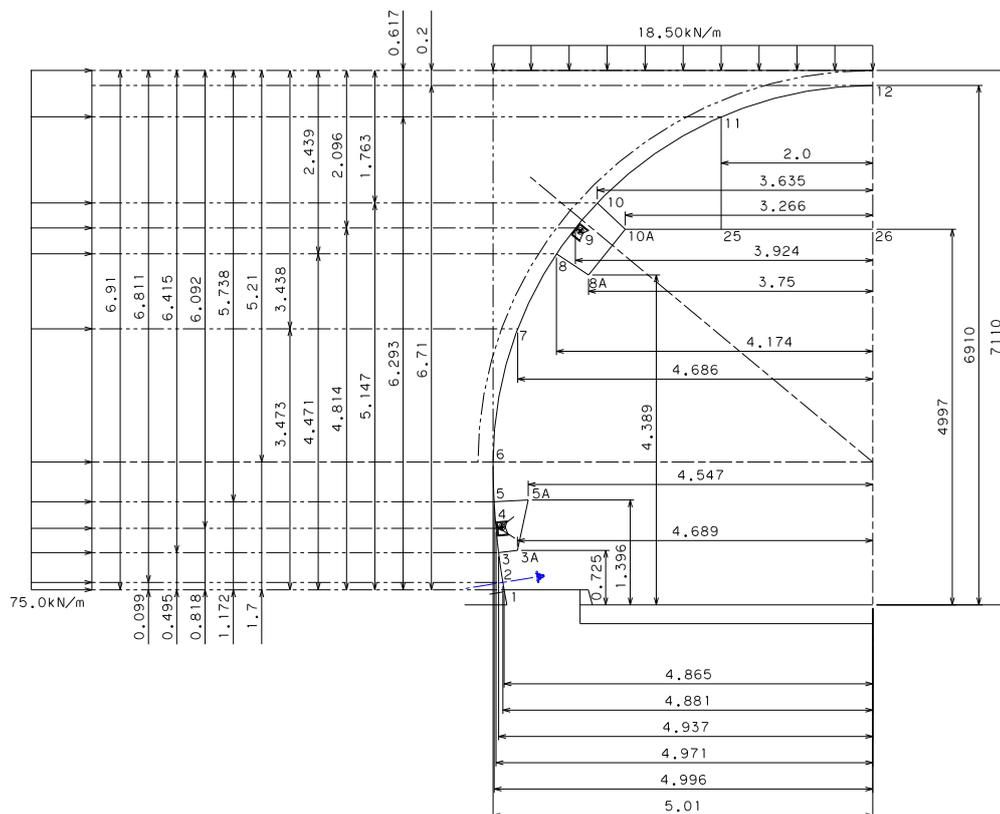
側圧線荷重

$$W1 = 6.910 \times 23.5 \times 1.5 = 243.59 \text{ kN/m}$$

$$W2 = 6.811 \times 23.5 \times 1.5 = 240.09 \text{ kN/m}$$

$$\begin{aligned}
 W3 &= 6.415 \times 23.5 \times 1.5 = 226.13 \text{ kN/m} \\
 W4 &= 6.092 \times 23.5 \times 1.5 = 214.74 \text{ kN/m} \\
 W5 &= 5.738 \times 23.5 \times 1.5 = 202.26 \text{ kN/m} \\
 W6 &= 5.210 \times 23.5 \times 1.5 = 183.66 \text{ kN/m} \\
 W7 &= 3.438 \times 23.5 \times 1.5 = 121.19 \text{ kN/m} \\
 W8 &= 2.439 \times 23.5 \times 1.5 = 85.98 \text{ kN/m} \\
 W9 &= 2.096 \times 23.5 \times 1.5 = 73.89 \text{ kN/m} \\
 W10 &= 1.763 \times 23.5 \times 1.5 = 62.15 \text{ kN/m} \\
 W11 &= 0.617 \times 23.5 \times 1.5 = 21.75 \text{ kN/m} \\
 W12 &= 0.200 \times 23.5 \times 1.5 = 7.05 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

フレーム構造（打設後架台撤去時）



鉛直荷重

$$W_{v1} = (49.84 + 42.86) / 5.01 = 18.50 \text{ kN/m}$$

側圧線荷重

$$W1 \sim W12 = 50.0 \text{ kN} \times 1.5 = 75.0 \text{ kN/m}$$

4. 1 フレーム各部材の設計

設計断面

クラウンアーチ部 9-12、サイドアーチ部 4-9

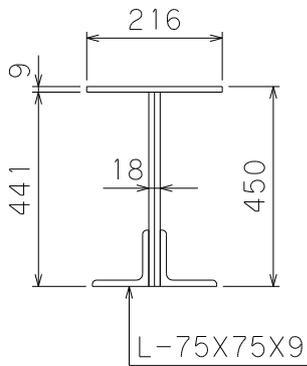


Plate の有効幅 $24 \times t$

Flg 9×216

2Web 9×441

2L-75 $\times 75 \times 9$

$Z = 1398 \times 10^3 \text{ mm}^3$

$A = 124.20 \times 10^2 \text{ mm}^2$

$A_w = 94.50 \times 10^2 \text{ mm}^2$

インバートアーチ部 1-4

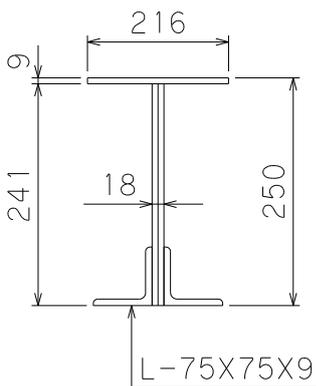


Plate の有効幅 $24 \times t$

Flg 9×216

2Web 9×241

2L-75 $\times 75 \times 9$

$Z = 594 \times 10^3 \text{ mm}^3$

$A = 88.20 \times 10^2 \text{ mm}^2$

$A_w = 58.50 \times 10^2 \text{ mm}^2$

台梁材 10A-25-26

H-294 $\times 200 \times 8/12$

$Z = 756 \times 10^3 \text{ mm}^3$

$A = 71.05 \times 10^2 \text{ mm}^2$

$A_w = 23.52 \times 10^2 \text{ mm}^2$

$i = 47.5 \text{ mm}$

$L = 4000 \text{ mm}$

$\lambda = L/i = 84$

$\sigma_{ca} = 160 - 0.91 (\lambda - 9) = 92 \text{ N/mm}^2$

ガントリー柱部 20-21-23

H-500 $\times 200 \times 10/16$

$Z = 1870 \times 10^3 \text{ mm}^3$

$A = 112.20 \times 10^2 \text{ mm}^2$

$A_w = 50.00 \times 10^2 \text{ mm}^2$

ガントリー横梁 23-24

H-500×200×10/16

$$Z=1870 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

$$A=112.20 \times 10^2 \text{ mm}^2$$

$$A_w=50.00 \times 10^2 \text{ mm}^2$$

ガントリー胴梁 21-22

H-200×200×8/12

$$Z=472 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

$$A=63.53 \times 10^2 \text{ mm}^2$$

$$A_w=16.00 \times 10^2 \text{ mm}^2$$

5. 1 解析結果

打設時

はり、柱部材応力

解析は（株）構造システムの FAP-3 を用いて行う。

部材	Ni (kN)	Qi (kN)	Mi (kN.m)	Nj (kN)	Qj (kN)	Mj (kN.m)	Mc (kN.m)
1-2	0	0	0	3.82	-23.64	-1.19	-0.3
2-3	477.16	-134.73	1.19	-464.23	43.33	34.42	21.19
3-3A	-45.88	-117.75	29.58	45.88	117.75	0	-14.79
3-4	582.49	-20.5	-4.84	-575.04	-50.31	0	5.3
4-5	576.43	30.52	0	-571.23	-104.14	-23.89	-8.68
5-5A	33.1	121.96	-54.84	-33.1	-121.96	0	27.42
5-6	452.45	49.11	-30.94	-449.75	-150.96	-21.89	11.25
6-7	433	153.76	-21.89	-430.27	121.46	-7.21	-54.66
7-8	447.02	8.11	7.21	-443.12	110.08	49.99	4.82
8-8A	12.08	141.13	-71.87	-12.08	-141.13	0	35.93
8-9	313.31	-33.96	21.88	-311.58	69.15	0	-12.81
9-10	316.32	-42.46	0	-314.46	74.08	25.69	11.1
10-10A	38.23	-66.62	6.44	-38.23	66.62	27.44	10.5
10-11	380.71	55.04	-32.14	-316.38	120.51	97.5	21.01
11-12	383.61	245.96	-122.11	-355.87	38.61	-86.46	-53.73
20-21	166.82	0	0	-166.82	0	0	0
21-23	166.82	-5.63	0.95	-166.82	5.63	9.02	4.03
23-24	6.87	0	-6.09	-6.87	0	6.09	6.09
21-22	206.77	0	-0.95	-206.77	0	0.95	0.95
23-25	166.82	1.24	-2.93	-166.82	-1.24	1.29	2.11
10A-25	70.11	36.18	-27.44	-70.11	-36.18	-18.36	4.54
25-26	42.27	0	1.9	-42.27	0	-1.9	-1.9
25-11	203	-26.6	15.18	-203	26.6	24.61	4.72

3A-5A	-126.37	0	0	126.37	0	0	0
6-21	212.4	0	0	-212.4	0	0	0
8A-10A	141.65	0	0	-141.65	0	0	0

支点反力

節点名	Px (kN)	Pz (kN)	M (kN.m)
2	-224.16	453.59	0
12	-357.96	0	-86.46
20	0	166.82	0
22	-206.77	0	0.95
24	-6.87	0	6.09
26	-42.27	0	-1.9

打設後架台撤去時

はり、柱部材応力

解析は（株）構造システムの FAP-3 を用いて行う。

部材	Ni (kN)	Qi (kN)	Mi (kN.m)	Nj (kN)	Qj (kN)	Mj (kN.m)	Mc (kN.m)
1-2	0	0	0	1.18	-7.33	-0.37	-0.09
2-3	110.71	-120.89	0.37	-106.55	91.48	42.1	22.34
3-3A	-74.86	-192.14	48.27	74.86	192.14	0	-24.13
3-4	299.19	-31.04	6.17	-296.66	6.94	0	-2.11
4-5	296.24	-17.13	0	-294.37	-9.35	1.38	1.87
5-5A	54.01	199.01	-89.48	-54.01	-199.01	0	44.74
5-6	94.11	-52.25	-90.86	-93.06	12.66	108.01	102.05
6-7	88.46	31.54	108.01	-106.46	100.35	-46	-106.72
7-8	130.92	-65.29	46	-156.67	136.21	67.01	0.56
8-8A	19.29	225.28	-114.72	-19.29	-225.28	0	57.36
8-9	-49.99	-100.64	47.71	38.58	124.15	0	-25.1
9-10	-27.91	-126.98	0	15.58	149.35	60.92	29.23
10-10A	202.92	-22.07	-11.1	-202.92	22.07	22.32	16.71
10-11	2.28	54.58	-49.82	-55.31	19.52	14.82	13.83
11-12	67.01	29.94	-19.86	-79.2	8.59	-1.62	-0.57
10A-25	272.86	21.24	-22.32	-272.86	-21.24	-4.57	8.88
25-26	265.97	0	-0.71	-265.97	0	0.71	0.71
25-11	21.24	-6.89	5.27	-21.24	6.89	5.04	-0.12
3A-5A	-206.21	0	0	206.21	0	0	0
8A-10A	226.1	0	0	-226.1	0	0	0

支点反力

節点名	Px (kN)	Pz (kN)	M (kN.m)
2	-142.62	92.69	0
12	-79.66	0	-1.62
26	-265.97	0	0.71

5.2 判定

5.1 の結果から、各部材における最大値を下記に示す。

(判定値は P1.1.4 判定式による。)

打設時

5.2.1 インバートアーチ部 1-4

Flg 9×216

$$Z=594 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

2Web9×241

$$A=88.20 \times 10^2 \text{ mm}^2$$

2L-75×75×9

$$Aw=58.50 \times 10^2 \text{ mm}^2$$

$$M=34.42 \text{ kN.m}$$

$$N=464.23 \text{ kN}$$

$$Q=43.33 \text{ kN}$$

$$\sigma_b = M/Z = 57.9 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_c = N/A = 52.6 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_s = Q/Aw = 7.4 \text{ N/mm}^2$$

$$(\sigma_b / \sigma_{ba}) + (\sigma_c / \sigma_{ca}) = 0.69$$

< 1.0 O.K

5.3.2 サイドアーチ部 4-9

Flg 9×216

$$Z=1398 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

2Web9×441

$$A=124.20 \times 10^2 \text{ mm}^2$$

2L-75×75×9

$$Aw=94.50 \times 10^2 \text{ mm}^2$$

$$M=49.99 \text{ kN.m}$$

$$N=443.12 \text{ kN}$$

$$Q=110.08 \text{ kN}$$

$$\sigma_b = M/Z = 35.8 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_c = N/A = 35.7 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_s = Q/Aw = 11.6 \text{ N/mm}^2$$

$$(\sigma_b / \sigma_{ba}) + (\sigma_c / \sigma_{ca}) = 0.45$$

< 1.0 O.K

5.3.3 クラウンアーチ部 9-12

Flg 9×216	$Z=1398 \times 10^3 \text{ mm}^3$		
2Web9×441	$A=124.20 \times 10^2 \text{ mm}^2$		
2L-75×75×9	$A_w=94.50 \times 10^2 \text{ mm}^2$		
M=122.11kN.m			
N=383.61kN			
Q=245.96kN			
$\sigma_b=M/Z=87.3\text{N/mm}^2$			
$\sigma_c=N/A=30.9\text{N/mm}^2$			
$\sigma_s=Q/A_w=26.0\text{N/mm}^2$			
$(\sigma_b / \sigma_{ba}) + (\sigma_c / \sigma_{ca}) = 0.74$		< 1.0	O.K

5.2.4 台梁材 10A-25-26

H-294×200×8/12	$Z=756 \times 10^3 \text{ mm}^3$		
	$A=71.05 \times 10^2 \text{ mm}^2$		
	$A_w=23.52 \times 10^2 \text{ mm}^2$		
M=27.44kN.m			
N=70.11kN			
Q=36.18kN			
$\sigma_b=M/Z=36.3\text{N/mm}^2$			
$\sigma_c=N/A=9.9\text{N/mm}^2$			
$\sigma_s=Q/A_w=15.4\text{N/mm}^2$			
$(\sigma_b / \sigma_{ba}) + (\sigma_c / \sigma_{ca}) = 0.33$		< 1.0	O.K

5.2.5 ガントリー柱部 20-21-23

H-500×200×10/16	$Z=1870 \times 10^3 \text{ mm}^3$		
	$A=112.20 \times 10^2 \text{ mm}^2$		
	$A_w=50.00 \times 10^2 \text{ mm}^2$		
M=9.02kN.m			
N=166.82kN			
Q=5.63kN			
$\sigma_b=M/Z=4.8\text{N/mm}^2$			
$\sigma_c=N/A=14.9\text{N/mm}^2$			
$\sigma_s=Q/A_w=1.1\text{N/mm}^2$			
$(\sigma_b / \sigma_{ba}) + (\sigma_c / \sigma_{ca}) = 0.12$		< 1.0	O.K

5.2.6 ガントリー横梁 23-24

H-500×200×10/16

$$Z=1870 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

$$A=112.20 \times 10^2 \text{ mm}^2$$

$$A_w=50.00 \times 10^2 \text{ mm}^2$$

$$M=6.09 \text{ kN.m}$$

$$N=6.87 \text{ kN}$$

$$\sigma_b = M/Z = 3.3 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_c = N/A = 0.6 \text{ N/mm}^2$$

$$(\sigma_b / \sigma_{ba}) + (\sigma_c / \sigma_{ca}) = 0.02$$

< 1.0 O.K

5.2.7 ガントリー胴梁 21-22

H-200×200×8/12

$$Z=472 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

$$A=63.53 \times 10^2 \text{ mm}^2$$

$$A_w=16.00 \times 10^2 \text{ mm}^2$$

$$M=0.95 \text{ kN.m}$$

$$N=206.77 \text{ kN}$$

$$\sigma_b = M/Z = 2.0 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_c = N/A = 32.5 \text{ N/mm}^2$$

$$(\sigma_b / \sigma_{ba}) + (\sigma_c / \sigma_{ca}) = 0.22$$

< 1.0 O.K

打設後架台撤去時

5.2.8 インバートアーチ部 1-4

Flg 9×216

$$Z=594 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

2Web9×241

$$A=88.20 \times 10^2 \text{ mm}^2$$

2L-75×75×9

$$A_w=58.50 \times 10^2 \text{ mm}^2$$

$$M=48.27 \text{ kN.m}$$

$$N=74.86 \text{ kN}$$

$$Q=192.14 \text{ kN}$$

$$\sigma_b = M/Z = 81.3 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_c = N/A = 8.5 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_s = Q/A_w = 32.8 \text{ N/mm}^2$$

$$(\sigma_b / \sigma_{ba}) + (\sigma_c / \sigma_{ca}) = 0.56$$

< 1.0 O.K

5.3.9 サイドアーチ部 4-9

Flg 9×216	$Z=1398 \times 10^3 \text{ mm}^3$	
2Web9×441	$A=124.20 \times 10^2 \text{ mm}^2$	
2L-75×75×9	$A_w=94.50 \times 10^2 \text{ mm}^2$	
M=108.01kN.m		
N=93.06kN		
Q=12.66kN		
$\sigma_b = M/Z = 77.3 \text{ N/mm}^2$		
$\sigma_c = N/A = 7.5 \text{ N/mm}^2$		
$\sigma_s = Q/A_w = 1.3 \text{ N/mm}^2$		
$(\sigma_b / \sigma_{ba}) + (\sigma_c / \sigma_{ca}) = 0.53$	< 1.0	O.K

5.3.10 クラウンアーチ部 9-12

Flg 9×216	$Z=1398 \times 10^3 \text{ mm}^3$	
2Web9×441	$A=124.20 \times 10^2 \text{ mm}^2$	
2L-75×75×9	$A_w=94.50 \times 10^2 \text{ mm}^2$	
M=60.92kN.m		
N=15.58kN		
Q=149.35kN		
$\sigma_b = M/Z = 43.6 \text{ N/mm}^2$		
$\sigma_c = N/A = 1.3 \text{ N/mm}^2$		
$\sigma_s = Q/A_w = 15.8 \text{ N/mm}^2$		
$(\sigma_b / \sigma_{ba}) + (\sigma_c / \sigma_{ca}) = 0.28$	< 1.0	O.K

5.2.11 台梁材 10A-25-26

H-294×200×8/12	$Z=756 \times 10^3 \text{ mm}^3$	
	$A=71.05 \times 10^2 \text{ mm}^2$	
	$A_w=23.52 \times 10^2 \text{ mm}^2$	
M=22.32kN.m		
N=272.86kN		
Q=21.24kN		
$\sigma_b = M/Z = 29.5 \text{ N/mm}^2$		
$\sigma_c = N/A = 38.4 \text{ N/mm}^2$		
$\sigma_s = Q/A_w = 9.0 \text{ N/mm}^2$		
$(\sigma_b / \sigma_{ba}) + (\sigma_c / \sigma_{ca}) = 0.60$	< 1.0	O.K

5. 主桁の設計

$$H-600 \times 200 \times 11 / 17$$

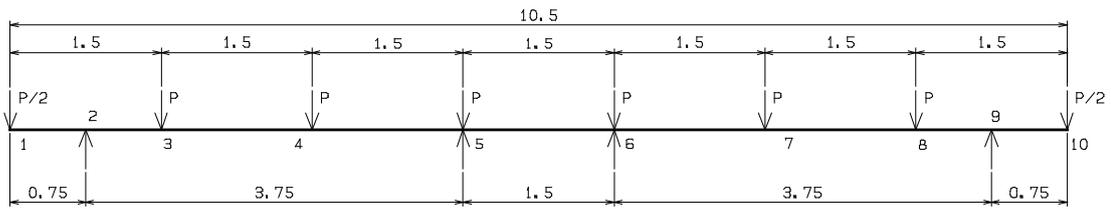
$$Z = 2590 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

$$A = 134.4 \times 10^2 \text{ mm}^2$$

$$A_w = 66 \times 10^2 \text{ mm}^2$$

5.1 打設時 (コンクリート上載荷重+フォーム自重)

$$P = 49.84 \text{ kN} + 42.86 \text{ kN} = 92.7 \text{ kN}$$



部材応力

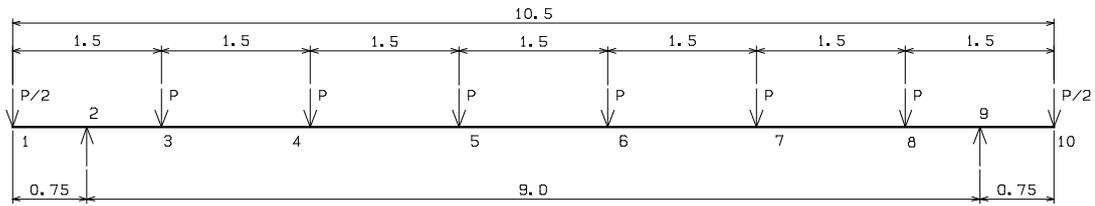
部材	N _i (kN)	Q _i (kN)	M _i (kN.m)	N _j (kN)	Q _j (kN)	M _j (kN.m)	M _c (kN.m)
1-2	0	-46.35	0	0	46.35	34.76	17.38
2-3	0	106.89	-34.76	0	-106.89	-45.41	-5.32
3-4	0	14.19	45.41	0	-14.19	-66.7	-56.05
4-5	0	-78.51	66.7	0	78.51	51.06	-7.82
5-6	0	0	-51.06	0	0	51.06	51.06
6-7	0	78.51	-51.06	0	-78.51	-66.7	-7.82
7-8	0	-14.19	66.7	0	14.19	-45.41	-56.05
8-9	0	-106.89	45.41	0	106.89	34.76	-5.32
9-10	0	46.35	-34.76	0	-46.35	0	17.38

支点反力

節点名	P _x (kN)	P _z (kN)	M (kN.m)
2	0	153.24	0
5	0	171.21	0
6	0	171.21	0
9	0	153.24	0

5.2 移動時

P=42.86kN (フォーム自重)



部材応力

部材	Ni (KN)	Qi (KN)	Mi (KN.m)	Nj (KN)	Qj (KN)	Mj (KN.m)	Mc (KN.m)
1-2	0	-21.43	0	0	21.43	16.07	8.04
2-3	0	128.58	-16.07	0	-128.58	-80.36	-32.15
3-4	0	85.72	80.36	0	-85.72	-208.94	-144.65
4-5	0	42.86	208.94	0	-42.86	-273.23	-241.09
5-6	0	0	273.23	0	0	-273.23	-273.23
6-7	0	-42.86	273.23	0	42.86	-208.94	-241.09
7-8	0	-85.72	208.94	0	85.72	-80.36	-144.65
8-9	0	-128.58	80.36	0	128.58	16.07	-32.15
9-10	0	21.43	-16.07	0	-21.43	0	8.04

支点反力

節点名	Px (KN)	Pz (KN)	M (KN.m)
2	0	150.01	0
9	0	150.01	0

5.3 判定

H-600×200×11/17

Z=2590×10³ mm³

A=134.4×10² mm²

Aw=66×10² mm²

打設時

M=66.70kN.m

Q=78.51kN

$\sigma_b = M/Z = 25.6 \text{ N/mm}^2$

$\sigma_s = Q/A_w = 11.9 \text{ N/mm}^2$

$(\sigma_b / \sigma_{ba}) = 0.16$

< 1.0 O.K

移動時 $M=273.23\text{kN}\cdot\text{m}$

$Q=42.86\text{kN}$

$\sigma_b = M/Z = 105.5\text{N}/\text{mm}^2$

$\sigma_s = Q/A_w = 6.5\text{N}/\text{mm}^2$

$(\sigma_b / \sigma_{ba}) = 0.66$

< 1.0

O.K

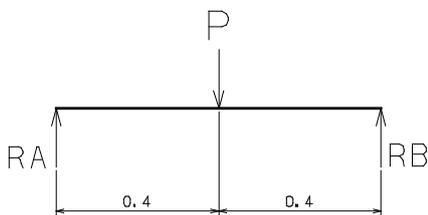
6. サドル材の設計

$2[-250 \times 90 \times 9] \quad Z = 670.00 \times 10^3 \times \text{mm}^3$

$A = 88.14 \times 10^2 \times \text{mm}^2$

$A_w = 45 \times 10^2 \times \text{mm}^2$

$I = 8360 \times 10^4 \times \text{mm}^4$



打設時

$P = 153.24\text{kN} + 600\text{kN} / 8 = 228.24\text{kN}$

$RA, RB = 228.24\text{kN} / 2 = 114.12\text{kN}$

$M = 114.12\text{kN} \times 0.4 = 45.65\text{kN}\cdot\text{m}$

$\sigma_b = M/Z = 68.1\text{N}/\text{mm}^2$

$(\sigma_b / \sigma_{ba}) = 0.43$

< 1.0

O.K

7. ターンバックルの設計 6-21

サイドターンバックル $P=212.40\text{kN}$

$L=2000\text{mm}$

外径 100ϕ 内径 80ϕ

$A=28.27 \times 10^2 \times \text{mm}^2$

$i=32.0\text{mm}$

$\lambda = L/i = 63$

$\sigma_{ca} = 160 - 0.91(\lambda - 9) = 111.0\text{N}/\text{mm}^2$

$\sigma_c = 212.40\text{kN} / 28.27 \times 10^2 = 75.1\text{N}/\text{mm}^2$

$(\sigma_c / \sigma_{ca}) = 0.68$

< 1.0

OK

以上

【資料③-2】

分離型セントル

スキンプレート（オール付き）耐力検討書

1. 設計条件

1. 1 寸法、諸元

寸法、諸元は DN-202612 に明記の通り。

型枠自重	1200kN(120000kg)
施工断面	全断面打設
計算巻厚	200mm

1. 2 使用材料、許容応力度

使用材料	JISG3101 の SS400 または相当品	
許容応力度	許容曲げ応力度	$\sigma_{ba} = 160\text{N/mm}^2$
	〃 圧縮 〃	$\sigma_{ca} = 160\text{N/mm}^2$
	〃 引張り 〃	$\sigma_{ta} = 160\text{N/mm}^2$
	〃 剪断 〃	$\sigma_{sa} = 90\text{N/mm}^2$
降伏点		$\sigma = 235\text{N/mm}^2$

1. 3 判定式

曲げ応力度	$\sigma_b = M/Z$
圧縮（引張り）応力度	$\sigma_c(t) = N/A$
剪断応力度	$\sigma_s = Q/A_w$
合成応力度	
曲げと引張り	$\sigma_b + \sigma_t \leq 160\text{N/mm}^2$
曲げと圧縮	$(\sigma_b / \sigma_{ba}) + (\sigma_c / \sigma_{ca}) \leq 1.0$
曲げ、剪断応力度が共に 45% を超える場合	$(\sigma_b / \sigma_{ba})^2 + (\sigma_s / \sigma_{sa})^2 \leq 1.2$

1. 4 適応規準

側圧 2017 年制定コンクリート標準示方書[施工編] (社)土木学会 P.147~149

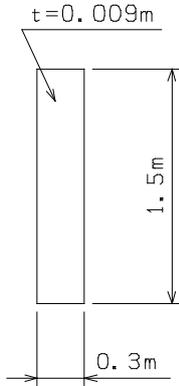
許容応力度

2016 年制定トンネル標準示方書[シールド工法]・同解説 (社)土木学会 P.78~81

2. フォーム材の設計

2. 1 スキンプレートの設計

等分布荷重を受ける4辺固定板として解析する。



1) 応力度

$$\sigma_b = -6 \times k \times P \times a^2 / t^2$$

- 諸元 許容荷重 : P_{\max}
 スチフナーピッチ : $a=0.3\text{m}$
 スチフナーズパン : $b=1.5\text{m}$
 スキンプレート厚 : $t=0.009\text{m}$
 下表より : k

$$b/a = 1.5/0.3 = 5.0 \rightarrow \infty$$

$$\therefore k = -0.0833$$

等分布荷重を受ける4辺完全固定板の M ($\nu = 0.3$)

b/a	(M _x) _{X=a/2,y=0}	(M _y) _{X=0,y=b/2}	(M _x) _{X=0,y=0}	(M _y) _{X=0,y=0}
1	-0.0513Pa ²	-0.0513Pa ²	-0.0231Pa ²	-0.0231Pa ²
1.1	-0.0581Pa ²	-0.0538Pa ²	-0.0264Pa ²	-0.0231Pa ²
1.2	-0.0639Pa ²	-0.0554Pa ²	-0.0299Pa ²	-0.0228Pa ²
1.3	-0.0687Pa ²	-0.0563Pa ²	-0.0327Pa ²	-0.0222Pa ²
1.4	-0.0726Pa ²	-0.0568Pa ²	-0.0349Pa ²	-0.0212Pa ²
1.5	-0.0757Pa ²	-0.0570Pa ²	-0.0368Pa ²	-0.0203Pa ²
1.6	-0.0780Pa ²	-0.0571Pa ²	-0.0381Pa ²	-0.0193Pa ²
1.7	-0.0799Pa ²	-0.0571Pa ²	-0.0392Pa ²	-0.0182Pa ²
1.8	-0.0812Pa ²	-0.0571Pa ²	-0.0401Pa ²	-0.0174Pa ²
1.9	-0.0822Pa ²	-0.0571Pa ²	-0.0407Pa ²	-0.0165Pa ²
2	-0.0829Pa ²	-0.0571Pa ²	-0.0412Pa ²	-0.0158Pa ²
∞	-0.0833Pa ²	-0.0571Pa ²	-0.0417Pa ²	-0.0125Pa ²

許容応力度 $\sigma_b = 160\text{N/mm}^2$

$$\begin{aligned} \text{許容荷重 } P_{\max} &= 160 / (-6 \times -0.0833 \times 0.3^2) \times 0.009^2 \\ &= 288115\text{N/m}^2 = 288.12\text{kN/m}^2 \end{aligned}$$

2) たわみ

$$\delta = 0.0284 \times P \times a^4 / (E \times t^3)$$

- 諸元 許容荷重 : P_{\max}
 スチフナーピッチ : $a = 0.3\text{m}$
 縦弾性係数 : $E = 2.1 \times 10^{11}\text{N/m}^2$
 スキンプレート厚さ : $t = 0.009\text{m}$

許容たわみ量 = 1.0^{-3}m

$$\begin{aligned} \text{許容荷重 } P_{\max} &= 1.0^{-3} / (0.0284 \times 0.3^4) \times (2.1 \times 10^{11} \times 0.009^3) \\ &= 665493\text{N/m}^2 = 665.49\text{kN/m}^2 \end{aligned}$$

2. 2 スチーフナーの設計

単純梁で解析する。

1) 天端部の検討

$$M = P \times a \times b^2 / 8$$

諸元

許容荷重 : Pmax

スチーフナーピッチ : a = 0.3m

スチーフナーズパン : b = 1.5m

プレートの有効幅 24 × t

F lg 9 × 216

C-125 × 65 × 6 Built-up

FB-9 × 125 Built-up

Z = 112.1 × 10³ mm³

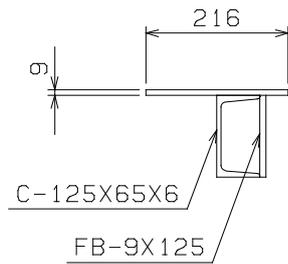
許容応力度 $\sigma_b = M / Z = 160 \text{ N} / \text{mm}^2$

$$M = 160 \times 112.1$$

$$= 17.93 \text{ N} / \text{m}$$

$$\text{許容荷重 } P_{\text{max}} = 17.93 / 0.3 / 1.5^2 \times 8$$

$$= 212.5 \text{ kN} / \text{m}^2$$

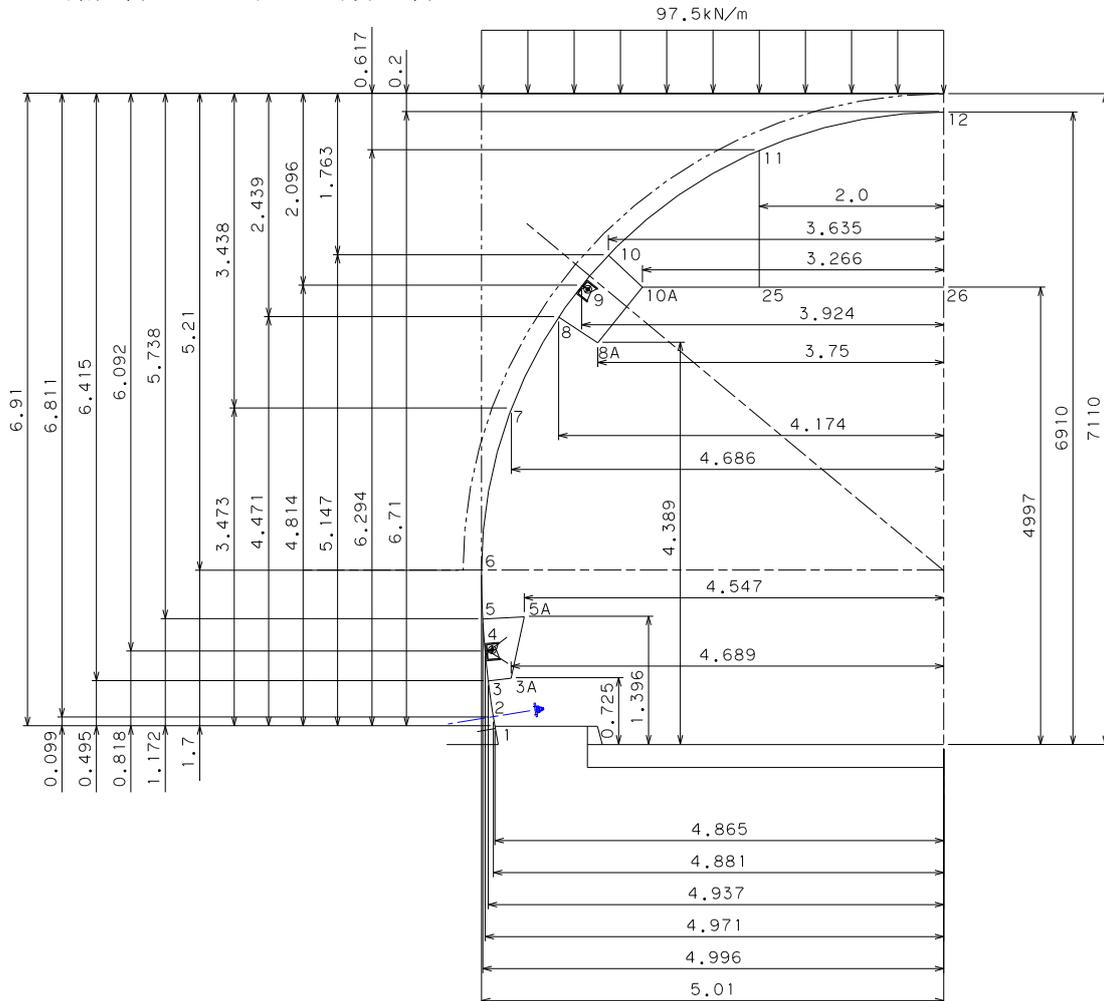


3. フレーム材の設計

フレーム構造(フォーム組幅 1.5m)

鉛直荷重のみを考慮して許容荷重の計算を行う。

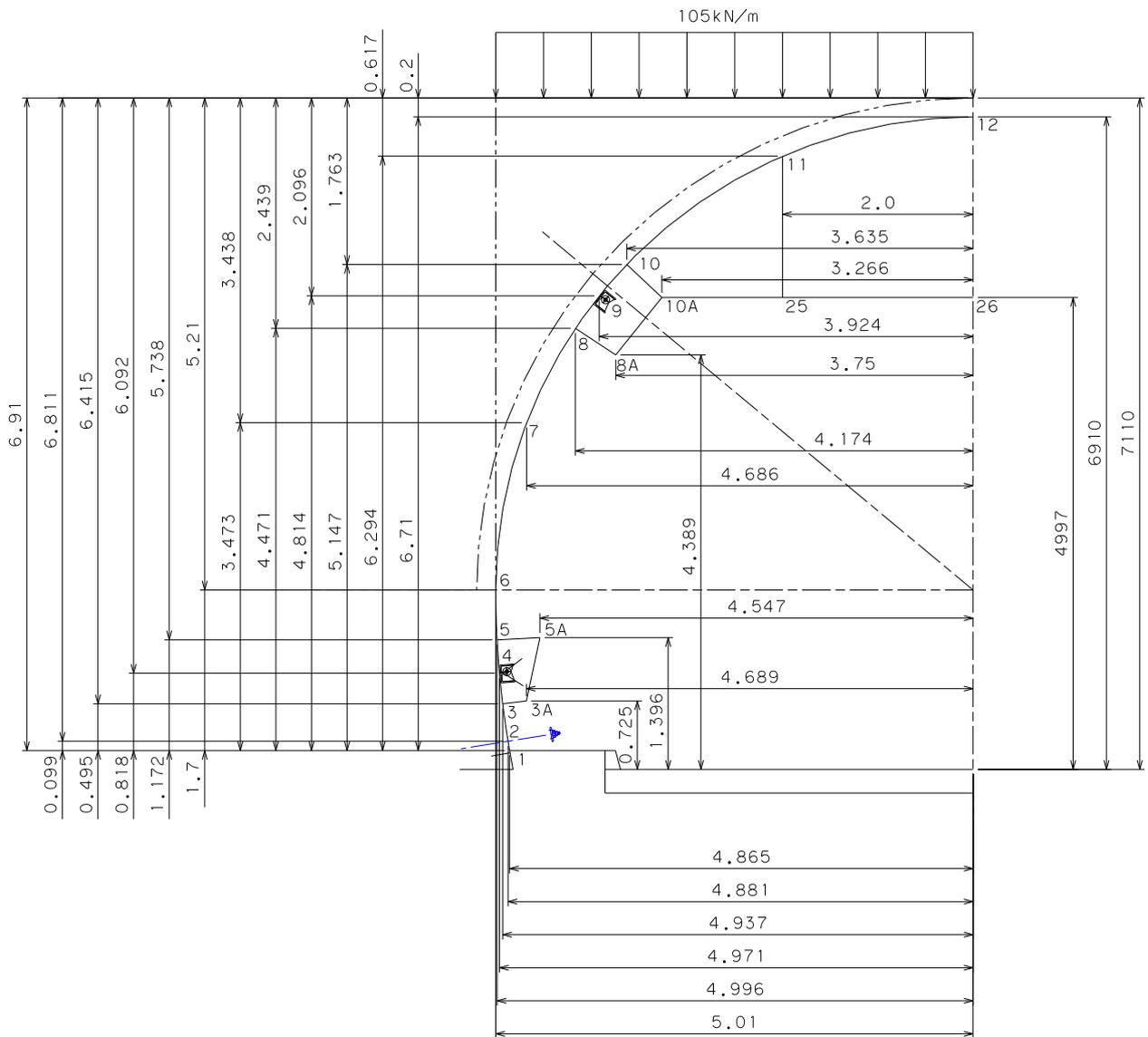
3. 1 鉛直荷重 65kN/m²等分布荷重時



鉛直荷重

$$Wv6\sim 12=65\times 1.5=97.5\text{kN/m}$$

3. 1 鉛直荷重 70kN/m²等分布荷重時



鉛直荷重

$$Wv6 \sim 12 = 70 \times 1.5 = 105 \text{ kN/m}$$

4. 1 フレーム各部材の設計

設計断面

クラウンアーチ部 9-12、サイドアーチ部 4-9

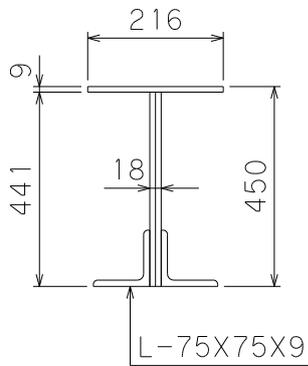


Plate の有効幅 $24 \times t$

Flg 9×216

2Web 9×441

2L-75 \times 75 \times 9

$Z = 1398 \times 10^3 \text{ mm}^3$

$A = 124.20 \times 10^2 \text{ mm}^2$

$A_w = 94.50 \times 10^2 \text{ mm}^2$

インバートアーチ部 1-4

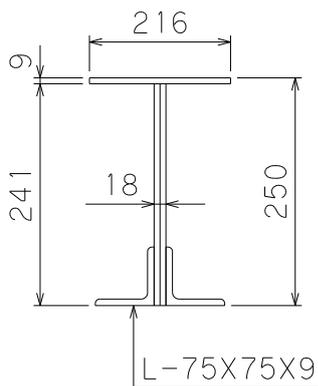


Plate の有効幅 $24 \times t$

Flg 9×216

2Web 9×241

2L-75 \times 75 \times 9

$Z = 594 \times 10^3 \text{ mm}^3$

$A = 88.20 \times 10^2 \text{ mm}^2$

$A_w = 58.50 \times 10^2 \text{ mm}^2$

台梁材 10A-25-26

H-294 \times 200 \times 8/12

$Z = 756 \times 10^3 \text{ mm}^3$

$A = 71.05 \times 10^2 \text{ mm}^2$

$A_w = 23.52 \times 10^2 \text{ mm}^2$

$i = 47.5 \text{ mm}$

$L = 4000 \text{ mm}$

$\lambda = L/i = 84$

$\sigma_{ca} = 160 - 0.91 (\lambda - 9) = 92 \text{ N/mm}^2$

5. 解析結果

はり、柱部材応力

解析は（株）構造システムの FAP-3 を用いて行う。

5. 1 鉛直荷重 65kN/m²時

部材	Ni	Qi	Mi	Nj	Qj	Mj
	(kN)	(kN)	(kN.m)	(kN)	(kN)	(kN.m)
1-2	0	0	0	0	0	0
2-3	475.07	129.15	0	-475.07	-129.15	-51.65
3-3A	95.41	244.87	-61.51	-95.41	-244.87	0
3-4	229.62	30.36	-9.86	-229.62	-30.36	0
4-5	230.52	22.45	0	-230.52	-22.45	-7.97
5-5A	-68.83	-253.63	114.04	68.83	253.63	0
5-6	486.68	74.28	122.01	-486.68	-74.28	-161.24
6-7	491.55	27.45	-161.24	-460.46	-21.77	116.88
7-8	434.51	153.96	-116.88	-390.1	-131.17	-43.03
8-8A	-19.6	-228.85	116.54	19.6	228.85	0
8-9	594.5	180.37	-73.51	-574.8	-166.01	0
9-10	558.64	214.17	0	-537.36	-195.7	-90.36
10-10A	-318.29	-55.54	41.7	318.29	55.54	-13.45
10-11	591.75	19.19	48.67	-500.26	111.35	43.33
11-12	500.24	141.87	-50.87	-479.21	51.99	-39.53
10A-25	-412.2	-0.95	13.45	412.2	0.95	-12.24
25-26	-420.67	0	7.12	420.67	0	-7.12
25-11	-0.95	-8.46	5.12	0.95	8.46	7.54
3A-5A	262.8	0	0	-262.8	0	0
8A-10A	-229.69	0	0	229.69	0	0

支点反力

節点名	Px	Pz	M
	(kN)	(kN)	(kN.m)
2	61.36	488.47	0
12	-482.02	0	-39.53
26	420.67	0	-7.12

5. 2 鉛直荷重 70kN/m²時

部材	Ni	Qi	Mi	Nj	Qj	Mj
	(kN)	(kN)	(kN.m)	(kN)	(kN)	(kN.m)
1-2	0	0	0	0	0	0
2-3	511.63	139.09	0	-511.63	-139.09	-55.63
3-3A	102.75	263.71	-66.25	-102.75	-263.71	0
3-4	247.29	32.7	-10.62	-247.29	-32.7	0
4-5	248.27	24.18	0	-248.27	-24.18	-8.58
5-5A	-74.13	-273.14	122.82	74.13	273.14	0
5-6	524.13	80	131.4	-524.13	-80	-173.65
6-7	529.37	29.57	-173.65	-495.9	-23.45	125.87
7-8	467.94	165.8	-125.87	-420.11	-141.26	-46.34
8-8A	-21.1	-246.46	125.5	21.1	246.46	0
8-9	640.24	194.24	-79.16	-619.02	-178.78	0
9-10	601.62	230.65	0	-578.71	-210.76	-97.31
10-10A	-342.78	-59.81	44.9	342.78	59.81	-14.49
10-11	637.28	20.67	52.41	-538.75	119.91	46.67
11-12	538.74	152.78	-54.79	-516.08	56	-42.57
10A-25	-443.92	-1.03	14.49	443.92	1.03	-13.19
25-26	-453.04	0	7.67	453.04	0	-7.67
25-11	-1.03	-9.12	5.52	1.03	9.12	8.12
3A-5A	283.02	0	0	-283.02	0	0
8A-10A	-247.36	0	0	247.36	0	0

支点反力

節点名	Px	Pz	M
	(kN)	(kN)	(kN.m)
2	66.08	526.06	0
12	-519.11	0	-42.57
26	453.04	0	-7.67

5.2 判定

5.1,5.2 の結果から、各部材における最大値を下記に示す。
(判定値は P1.1.4 判定式による。)

5.2.1 インバートアーチ部 1-4

Flg 9×216	$Z=594 \times 10^3 \text{ mm}^3$
2Web9×241	$A=88.20 \times 10^2 \text{ mm}^2$
2L-75×75×9	$A_w=58.50 \times 10^2 \text{ mm}^2$

鉛直荷重 65kN/m²時

M=51.65kN.m

N=475.07kN

Q=129.15kN

$$\sigma_b = M/Z = 87.0 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_c = N/A = 53.9 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_s = Q/A_w = 22.1 \text{ N/mm}^2$$

$$(\sigma_b / \sigma_{ba}) + (\sigma_c / \sigma_{ca}) = 0.88$$

< 1.0 O.K

鉛直荷重 70kN/m²時

M=55.63kN.m

N=511.63kN

Q=139.09kN

$$\sigma_b = M/Z = 93.7 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_c = N/A = 58.0 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_s = Q/A_w = 23.8 \text{ N/mm}^2$$

$$(\sigma_b / \sigma_{ba}) + (\sigma_c / \sigma_{ca}) = 0.95$$

< 1.0 O.K

5.2.2 サイドアーチ部 4-9

Flg 9×216	$Z=1398 \times 10^3 \text{ mm}^3$
2Web9×441	$A=124.20 \times 10^2 \text{ mm}^2$
2L-75×75×9	$A_w=94.50 \times 10^2 \text{ mm}^2$

鉛直荷重 65kN/m²時

M=161.24kN.m

N=491.55kN

Q=27.45kN

$$\sigma_b = M/Z = 115.3 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_c = N/A = 39.6 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_s = Q/A_w = 2.9 \text{ N/mm}^2$$

$$(\sigma_b / \sigma_{ba}) + (\sigma_c / \sigma_{ca}) = 0.97$$

< 1.0 O.K

鉛直荷重 70kN/m²時

M=173.65kN.m

N=529.37kN

Q=29.57kN

$$\sigma_b = M/Z = 124.2 \text{N/mm}^2$$

$$\sigma_c = N/A = 42.6 \text{N/mm}^2$$

$$\sigma_s = Q/A_w = 3.1 \text{N/mm}^2$$

$$\frac{(\sigma_b / \sigma_{ba}) + (\sigma_c / \sigma_{ca})}{\dots} = 1.04 > 1.0 \quad \text{N.G}$$

5.2.3 クラウンアーチ部 9-12

Flg 9×216

$$Z = 1398 \times 10^3 \text{mm}^3$$

2Web9×441

$$A = 124.20 \times 10^2 \text{mm}^2$$

2L-75×75×9

$$A_w = 94.50 \times 10^2 \text{mm}^2$$

鉛直荷重 65kN/m²時

M=90.36kN.m

N=537.36kN

Q=195.7kN

$$\sigma_b = M/Z = 64.6 \text{N/mm}^2$$

$$\sigma_c = N/A = 43.3 \text{N/mm}^2$$

$$\sigma_s = Q/A_w = 20.7 \text{N/mm}^2$$

$$\frac{(\sigma_b / \sigma_{ba}) + (\sigma_c / \sigma_{ca})}{\dots} = 0.67 < 1.0 \quad \text{O.K}$$

鉛直荷重 70kN/m²時

M=97.31kN.m

N=578.71kN

Q=210.76kN

$$\sigma_b = M/Z = 69.6 \text{N/mm}^2$$

$$\sigma_c = N/A = 46.6 \text{N/mm}^2$$

$$\sigma_s = Q/A_w = 22.3 \text{N/mm}^2$$

$$\frac{(\sigma_b / \sigma_{ba}) + (\sigma_c / \sigma_{ca})}{\dots} = 0.73 < 1.0 \quad \text{O.K}$$

5.2.4 台梁材 10A-25-26

H-294×200×8/12

$$Z=756 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

$$A=71.05 \times 10^2 \text{ mm}^2$$

$$A_w=23.52 \times 10^2 \text{ mm}^2$$

鉛直荷重 65kN/m²時

$$M=13.45 \text{ kN.m}$$

$$N=412.2 \text{ kN}$$

$$Q=0.95 \text{ kN}$$

$$\sigma_b = M/Z = 17.8 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_c = N/A = 58.0 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_s = Q/A_w = 0.4 \text{ N/mm}^2$$

$$(\sigma_b / \sigma_{ba}) + (\sigma_c / \sigma_{ca}) = 0.74$$

$$< 1.0 \quad \text{O.K}$$

鉛直荷重 70kN/m²時

$$M=14.49 \text{ kN.m}$$

$$N=443.92 \text{ kN}$$

$$Q=1.03 \text{ kN}$$

$$\sigma_b = M/Z = 19.2 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_c = N/A = 62.5 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_s = Q/A_w = 0.4 \text{ N/mm}^2$$

$$(\sigma_b / \sigma_{ba}) + (\sigma_c / \sigma_{ca}) = 0.8$$

$$< 1.0 \quad \text{O.K}$$

上記結果 5.2.2 サイドアーチ部の判定結果より鉛直荷重 70kN/m²時に許容応力度を超える応力が発生するため、許容荷重は約 65kN/m²となります。そのうちアーチ材の自重が 600kN、1m²あたりのアーチ材自重が 11.4kN のため、アーチ材自重を差し引いた約 53kN/m²が許容荷重となります。

20cm 巻厚のコンクリート重量が全断面で 1930kN、1m²あたりのコンクリート重量が 18.34kN のため、安全率は 53/18.34=2.89 となります。

以上

共同研究報告書
Cooperative Research Report of PWRI
No.560 June 2022

編集・発行 ©国立研究開発法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

国立研究開発法人土木研究所 企画部 業務課
〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 電話029-879-6754