

# 覆工コンクリートの超音波方式脱枠強度管理システムの開発

## Development of Deforming Strength Management System for Lining Concrete by Ultrasonic method

桃木 昌平<sup>\*1</sup>    平間 昭信<sup>\*1</sup>    筒井 隆規<sup>\*2</sup>    塩満 剛治<sup>\*3</sup>    田畑 壮典<sup>\*4</sup>  
Shouhei Momoki    Akinobu Hirama    Takanori Tsutsui    Gouji Shiomitsu    Sousuke Tabata  
山田 博<sup>\*5</sup>    神田 裕一<sup>\*6</sup>    金子 伸<sup>\*7</sup>    平田 彬直<sup>\*7</sup>  
Hiroshi Yamada    Yuuichi Kanda    Shin Kaneko    Akinao Hirata

### 【要旨】

山岳トンネル工事において覆工コンクリートを施工する際、必要な強度の発現を確認してから脱枠を行うことで、脱枠直後に強度不足に起因するひび割れや欠けなど、耐久性に悪影響を及ぼす不具合の発生を防止できる。この脱枠時に必要な強度の発現を、実際に打込まれた覆工コンクリートにおいて確認する方法として、コンクリートの硬化に対し鋭敏な超音波法の適用を検証し、測定箇所における覆工コンクリートのその時の状態そのものから強度を推定する超音波方式の脱枠強度管理システムを開発した。この方式では任意の時点の強度推定が可能であり、脱枠予定時刻に測定して、必要な強度の発現可否を確認することが可能である。

本稿では、覆工コンクリートの強度発現と超音波の伝播挙動との関係を明らかにした室内実験、および実際に現場において適用した事例を紹介し、当システムの概要および有用性について報告する。

【キーワード】 山岳トンネル    覆工コンクリート    脱枠    強度    超音波

## 1. はじめに

NATM による山岳トンネルの覆工コンクリートの構築では、脱枠時におけるコンクリートの強度は圧縮強度で2~3 N/mm<sup>2</sup>程度を目安としている場合が多い<sup>1)</sup>。この脱枠時の強度の発現を、実際に打込まれた覆工コンクリートにおいて推定する方法として、積算温度方式による強度の推定がある<sup>2)</sup>。

積算温度方式とは、コンクリートの強度を材齢と養生温度の関数として表現する考え方に基づくもので、覆工コンクリートの原位置で測定した養生温度を管理することで、あらかじめ行う試験練りで得られた加水時点からの積算温度との関係式を利用して、覆工コンクリートの圧縮強度を推定するものである。

この積算温度方式により精度よく圧縮強度を推定するためには、「積算」という言葉が示すように、加水時点から脱枠前までの覆工コンクリートの養生温度を的確に測定する必要がある。したがって、加水時点以外で測定を開始する場合や、停電など不意の事態により温度の測定が中断した場合には、積算温度の算出に適切な補正が必要となる。

これに対し、筆者らはコンクリートの硬化に対し鋭敏

な超音波法の適用を検証し、測定箇所における覆工コンクリートそのものから強度を推定する超音波方式の脱枠強度管理システムを開発した。

本稿では、覆工コンクリートの強度発現と超音波の伝播挙動との関係を明らかにすることを目的として行った室内実験と、その実験により新たに見出した超音波方式を用いた実施工での適用事例を紹介し、当システムの有用性について報告する。

## 2. 室内実験概要

覆工コンクリートの強度発現と超音波の伝播挙動との関係を検証するため、実施工での適用を想定した室内実験を実施した<sup>3)</sup>。以下、概要を述べる。

### 2.1 超音波測定システム型枠

写真-1、写真-2に室内実験で使用した型枠を示す。覆工コンクリート天端部で測定することを想定した型枠を製作した。型枠の材料は、覆工コンクリートの型枠(セントル)と同じ鋼材を用いた。寸法は900×900×300 mmとし、覆工コンクリートの表面となる型枠底版に超音波測定のためのセンサ設置が可能な穴を開けている。図一

1.技術研究所 研究開発 G 2.[東北]新幹線ニセコトンネル作業所 3.土木事業本部 プロジェクト統括部 民間プロジェクト G  
4.[東北]宮古磯鶏トンネル作業所 5.[東北]岩井トンネル作業所 6.[東北]新幹線札幌トンネル作業所 7.[東北]梁川トンネル作業所

1に示すように、センサは受信面が型枠面と同じ高さになるように設置し、漏水と型枠への超音波の直接的な伝播を低減するために周囲の隙間にはシリコンボンドを充填した。すなわち、超音波を測定する機能が備わったセンサをイメージしている。

## 2.2 超音波測定および圧縮強度試験

超音波測定には超音波試験機（パンジットlab, プロセク社製）を用いた。図-1に示すように、送信用のセンサによりコンクリートへ励起され、コンクリート中を伝播した超音波を、受信用のセンサを介して波形とで記録する。本実験では、センサ間距離は事前の検討に基づき200 mmとした。なお、超音波測定は5分毎に自動で実施した。対照する圧縮強度試験は、超音波測定システム型枠への打込みと合わせて作製した円柱供試体（φ100×200 mm）を用いて、加水時刻から10, 11, 12, 13, 15, 16, 18, 20, 22, 24時間後、計10材齢において実施した。

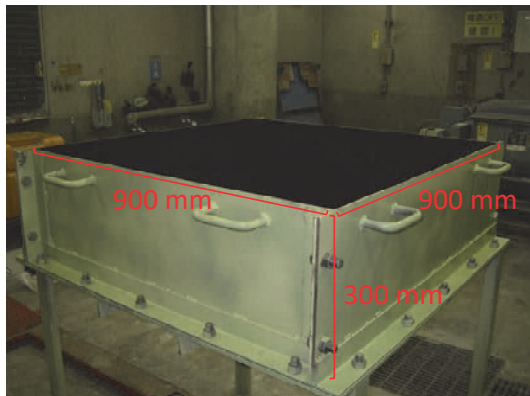


写真-1 型枠全景

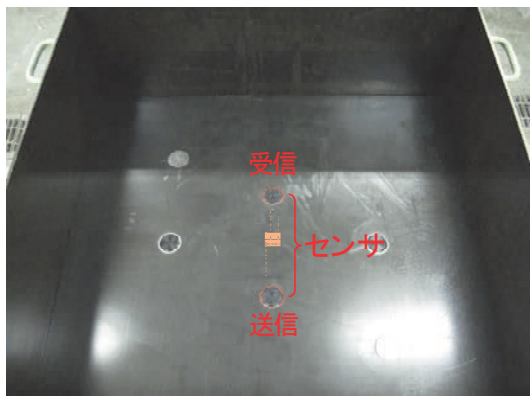


写真-2 センサ設置状況

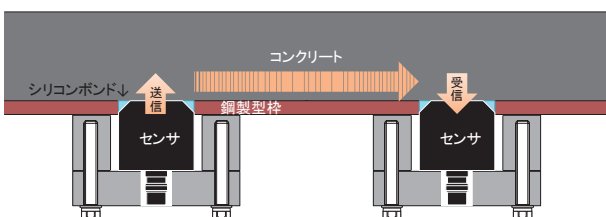


図-1 センサ設置および測定概略

## 2.3 実験結果

### (1) 波形パラメータの選定

超音波法で一般的に評価に用いられるパラメータは伝播速度である。伝播速度は波形の初動の時刻を読み取り、発信時刻との時間差を求め、伝播距離を時間差で除すことで算出される。しかし、図-2に示すように、本実験において記録された波形（12, 18, 24時間後）から読み取られる初動時刻には、材齢に伴う変化を確認することはできなかった。これは、超音波が型枠へ直接的に伝播することを低減したとはいえ、コンクリートが打込まれば、コンクリートがその状態に関わらず型枠への接触媒体として機能するためと考えられる。

一方、図-3は同じく12, 18, 24時間後の波形について、縦軸の振幅を統一して示したものである。同図では、

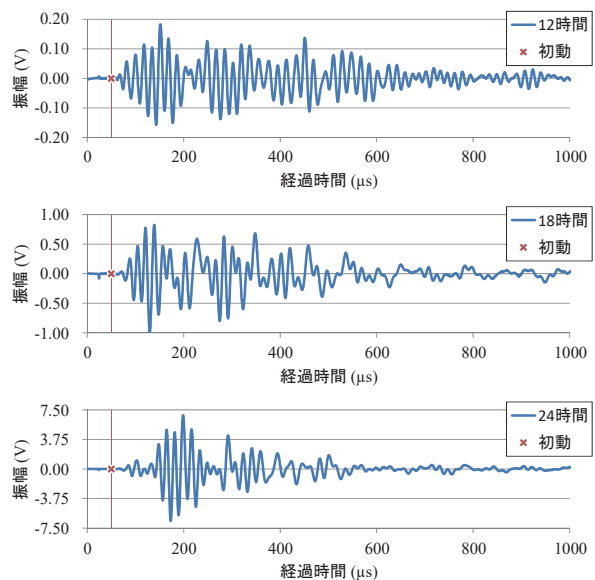


図-2 材齢に伴う初動時刻の変化

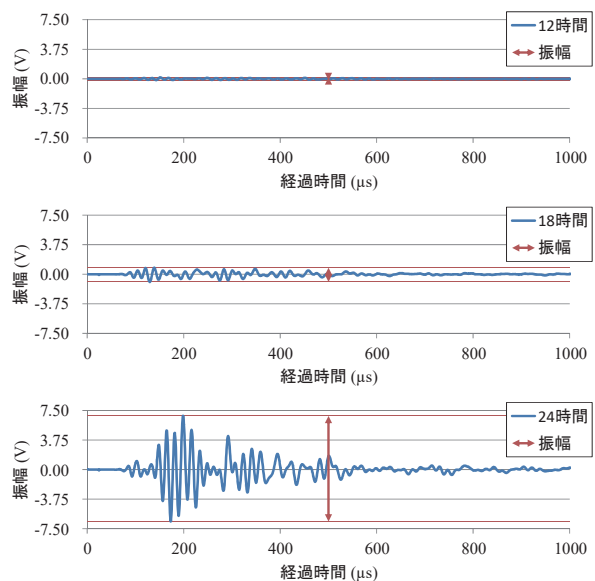


図-3 材齢に伴う最大振幅の変化

材齢に伴う変化が極めて顕著に表れている。型枠自体が波形の振幅に与える影響は、材齢経過に関わらず一定であることから、振幅はコンクリートの硬化を捉えるパラメータとなり得ると考えられる。そこで、本実験では一般的な伝播速度ではなく、波形の最大振幅を用いて圧縮強度との相関を検証することとした。

## (2) 最大振幅と圧縮強度との相関検証

図-4に円柱供試体の圧縮強度と波形の最大振幅の時系列データを示す。圧縮強度は線形増加傾向を示したのに対し、波形の最大振幅は指数増加傾向を示した。波形の振幅は、伝播距離による減衰と、材料の粘性抵抗による減衰が起因して変化する。しかし、本実験では伝播距離が常に一定であることから、この波形の最大振幅の指数増加傾向は、コンクリートの粘性抵抗の減少、すなわち測定面の剛性の増加を示すものと考えられる。そこで、各材齢における最大振幅と円柱供試体で得られた圧縮強度をプロットすると、図-5に示すように、最大振幅と圧縮強度は高い相関を示した。このことから、超音波の最大振幅によって覆工コンクリートの強度増進そのものを捉えることができ、最大振幅と圧縮強度の関係式により、強度発現を確認できる可能性が見出された。

## 3. 超音波方式脱枠強度管理システムの現場検証

室内実験により、超音波の最大振幅を用いることで、覆工コンクリートの強度発現を直接的に確認できる可能性が見出された。そこで、実際の覆工コンクリートの構

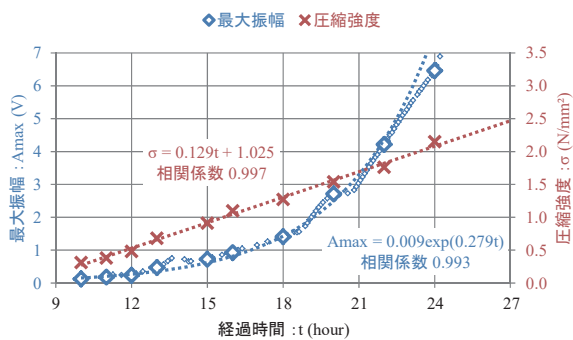


図-4 圧縮強度と最大振幅の時系列データ

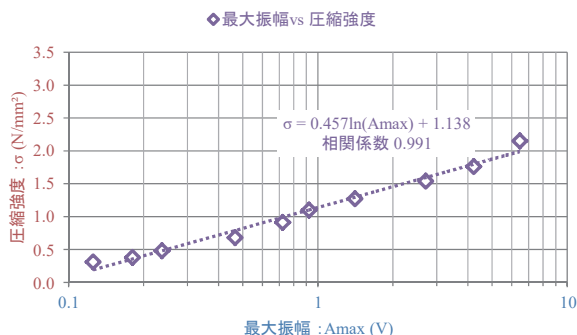


図-5 最大振幅と圧縮強度の関係

築に適用できる現場仕様の検討と、実運用データの取得を目的として、いくつかの現場において検証を実施した。

以下、その一例として、一般国道107号(仮称)梁川トンネル築造工事における現場検証について示す。

### 3.1 検証現場

一般国道107号(仮称)梁川トンネル築造工事(発注者:岩手県)は、岩手県北上市口内町および奥州市江刺区梁川地内を工事場所とする、トンネル工(長さ:1,022m)と道路改良工一式の工事である(図-6)。

この一般国道107号の奥州市江刺区梁川から、北上市口内町の区間は、急カーブや急勾配が連続する隘路となっており、交通事故が多発するなど安全で円滑な通行の支障となっていることから、岩手県が平成25年度から梁川～口内工区の整備を進めている<sup>4)</sup>。

### 3.2 現場仕様の検討

#### (1) 試験練り測定

当工事で使用するコンクリートを対象に、最大振幅と圧縮強度の関係を得ることが必要となる。そこで、工事において通常実施される脱枠時間の目安を得るための試験練りで、最大振幅と圧縮強度の関係を得ることができるように、新たに小型の超音波測定システム型枠(写真-3)を製作した。型枠の寸法は200×400×300mmである。この型枠も室内実験と同様に、実際に使用されるセンチルと同じ鋼材で製作しており、図-1に示したように、センサの受信面が型枠面と同じ高さになるよう設置できる仕組みとなっている。センサ間距離も室内実験



図-6 国道107号(仮称)梁川トンネル築造工事概要

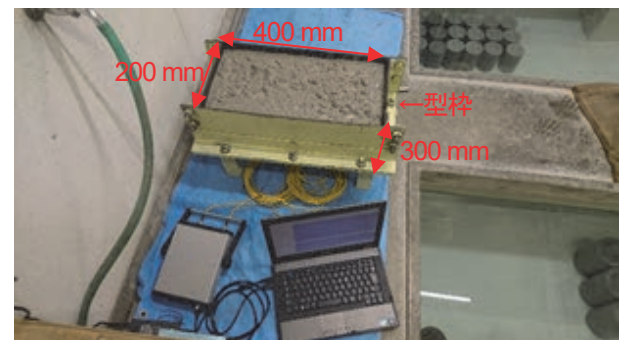


写真-3 小型超音波測定システム型枠

と同様に 200 mm とした。

試験練りでは、圧縮強度供試体用の円柱型枠と超音波測定システム型枠にコンクリートを打込み、直後から超音波測定を開始して、円柱供試体の圧縮強度と同材齢の最大振幅を記録し、最大振幅から強度を推定する関係式を得ることとした。

## (2) セントルへの実装

実施工に使用するセントルへの実装では、写真-4に示すように、センサ設置箇所をあらかじめセントルに設けた。この設置箇所は、超音波測定システム型枠と同様に、センサの受信面が型枠面と同じ高さになるように設計し(写真-5)、試験練り測定で使用したセンサとケーブルを設置した。センサと共にケーブルも試験練り測定で使用したものをセントルへ移設することで、試験練り測定の環境をセントルにおいて再現することとした。したがって、試験練り測定の際は、セントルへの実装を念頭に置いた長さのケーブルを選定することに注意する必要がある。



写真-4 センサ設置箇所（設置前）

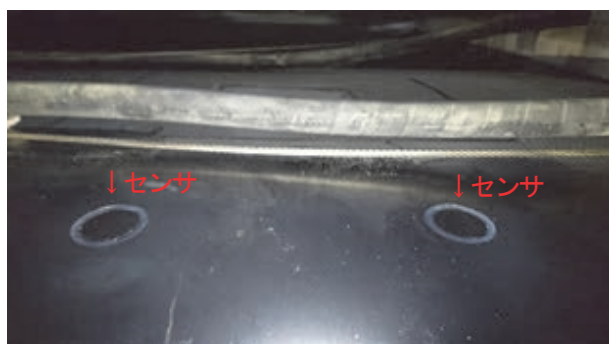


写真-5 セントルへの実装（センサ設置）状況

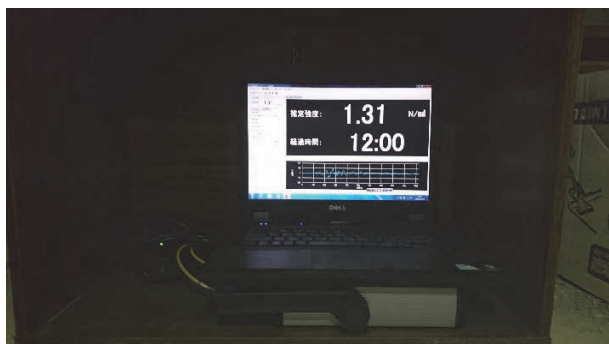


写真-6 脱枠強度管理用パソコン

その他、測定された最大振幅から強度を推定するためのパソコン(写真-6)をセントル内に配置した。以上を現場仕様として、現場検証を行った。

## 3.3 検証結果

### (1) 試験練り測定結果（強度推定式の取得）

表-1および図-7に、(仮称) 梁川トンネル築造工事で使用されているコンクリート(普通 30-15-20BB)の配合および試験練り測定で得られた最大振幅と圧縮強度の関係を示す。円柱供試体による圧縮強度試験は、材齢 12, 14, 16, 18, 20 時間において実施した結果である。現場仕様として用いた小型の超音波測定システム型枠を用いた場合でも、最大振幅と圧縮強度の間に高い相関が確認され、超音波の最大振幅から強度を推定する関係式を得ることができた。

### (2) セントル実装による試験運用結果

試験練り測定で使用したセンサとケーブルをセントルに実装し、試験運用を実施した。期間は 2017 年 10 月から 2018 年 3 月までの間、全部で 22 ブロックの覆工コンクリートの測定データが得られた。(仮称) 梁川トンネル築造工事で使用されるコンクリート(普通 30-15-20BB)は、事前にコンクリートおよび地盤の物性値を基にしたフレーム解析によって検討した結果、脱枠に必要な強度は 1.1 N/mm<sup>2</sup>であった。これを踏まえ、2017 年 10, 11, 12 月に得られた超音波方式の脱枠強度管理結果の一部を、図-8~図-13に示す。

図-8~図-13は、横軸は時刻、縦軸は超音波の最大振幅から、試験練りの際に得た強度推定式により算出された強度である。なお、全てのグラフにおいて、推定強度が最後に急降下するのは、脱枠によりセントルに設置されたセンサが覆工コンクリートから離れたことを示している。現実的に、毎回全く同じ状態のコンクリート

表-1 覆工コンクリート配合(普通 30-15-20BB)

骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和材 Ad
20	49.9	47.8	156	313	874	980	3.13

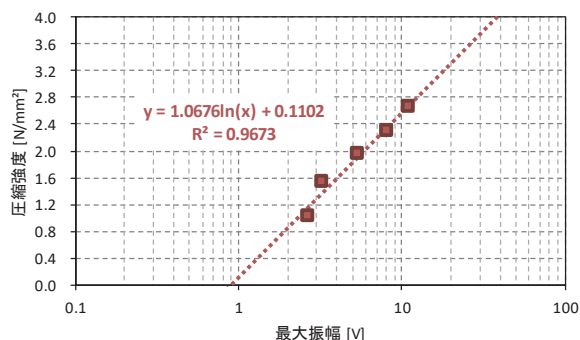


図-7 最大振幅と圧縮強度の関係

が打込まれることは無いことを示すように、測定データは独特の推移を示しつつも、全てのデータにおいて、脱枠に必要な強度である  $1.1 \text{ N/mm}^2$  を十分に超えてから脱枠されたことがわかる。

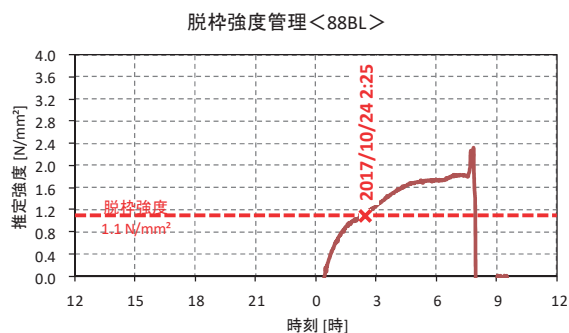
また、脱枠は、全てのブロックで打込み翌日の午前 8 時頃に行われたことがわかる。この超音波方式の脱枠強度管理システムで得られる推定強度は、いずれも任意の時点の振幅測定により強度を推定する。したがって、運用する場合は、このグラフのように連続して測定する必要はなく、脱枠作業に取り掛かる前に、所定の強度に到達しているかを確認すればよい。実際に、全ての測定結果において、午前 8 時頃に推定された強度は、所定の強度を十分に超えており、この時点の測定のみで脱枠の可否を判断することが可能であったことがわかる。

### (3) その他

図一 14 に、今回の現場検証において、脱枠に必要な

強度に到達したと推定された時間帯ごとの、セトル内の平均養生温度を示す。円周外側の数値は時刻、円周内部の数値は、その時間帯で強度が到達したケースにおける、打込みから脱枠までのセトル内温度の平均を示している。

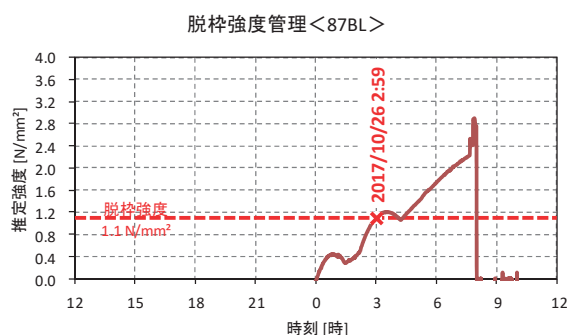
当工事のコンクリート打設は、概ね 13~14 時頃に終了していた。また、コンクリート打込み後から脱枠までの間はセトル内の通風を防ぎ、ヒーターによる加温を行っていることから、養生温度は安定しており大差はないと考えられた。しかしながら、打設当日の 23~24 時までに強度が到達した場合の、セトル内の平均養生温度は  $31.6^\circ\text{C}$ 、これに対し、翌 2~3 時の場合の平均養生温度は  $26.8^\circ\text{C}$  と、養生温度が高いほど早い時間帯に脱枠に必要な強度に到達する傾向が確認された。このことから、打込まれたコンクリートそのものの状態を評価する当方式が、精度よく強度を推定できていることがわかる。



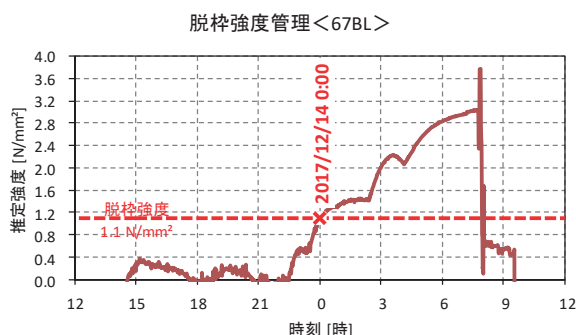
図一 8 覆工 88 BL (打設日: 2017 年 10 月 23 日)



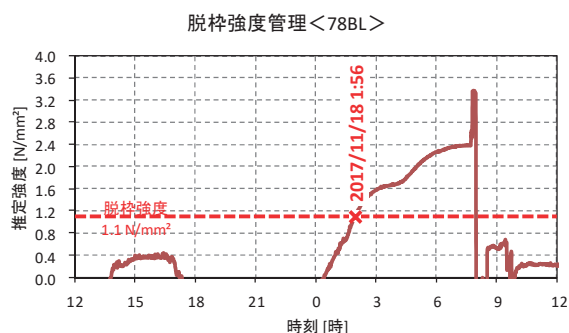
図一 11 覆工 73 BL (打設日: 2017 年 11 月 28 日)



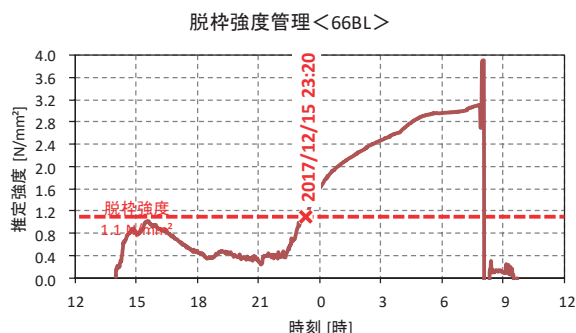
図一 9 覆工 87 BL (打設日: 2017 年 10 月 25 日)



図一 12 覆工 67 BL (打設日: 2017 年 12 月 13 日)



図一 10 覆工 78 BL (打設日: 2017 年 11 月 17 日)



図一 13 覆工 66 BL (打設日: 2017 年 12 月 15 日)

また、写真-7は脱枠後に測定箇所（覆工コンクリートの状態）を接写したものである。この写真からわかるように、コンクリートそのものを測定することで懸念される躯体への影響については、測定による痕跡は極めて軽微であり、セントルの一部として繰り返し使用できることが確認できた。

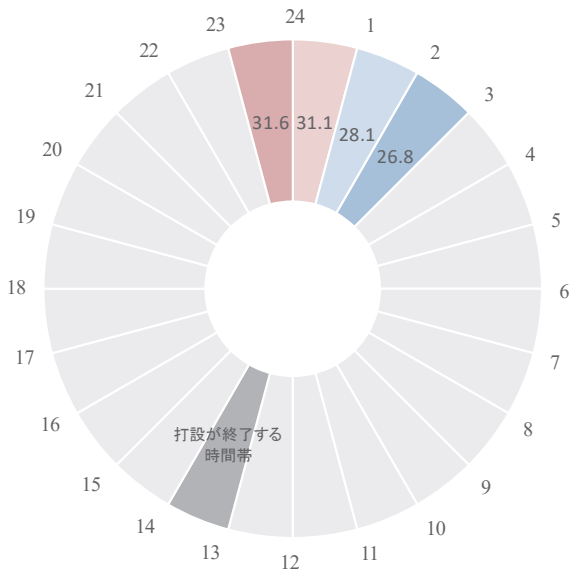


図-1 14 強度到達時間帯ごとの平均養生温度



写真-7 脱枠後の測定箇所（覆工コンクリート）

#### 4. まとめ

本稿では、超音波方式の脱枠強度管理システムの開発における室内実験、現場仕様の検討および現場適用により、有用性が確認されたことを報告した。この超音波方式を採用した“脱枠強度を管理する機能を持ったセントル”が、より安心・安全な山岳トンネルの構築に寄与すれば幸いである。

**謝辞：**本技術開発に際し、ご協力いただいた岩手県南広域振興局土木部をはじめとする国道107号（仮称）梁川トンネル築造工事関係者、大栄工機株式会社、エフティエス株式会社、および全ての関係各位に、感謝の意を表します。

#### 【参考文献】

- 1) 土木学会：2006年制定トンネル標準示方書〔山岳工法〕・同解説, pp.172-173, 2006.
- 2) 京免継彦, 宇野洋志城, 草信元春, 藤原康史：積算温度管理による脱型時期判定（T-JUDG）システムの提案, 土木学会第66回年次学術講演会講演概要集, VI-416, 2011.
- 3) 田畑壮典, 筒井隆規, 菅原健, 熊谷幸樹, 塩満剛治, 平間昭信：超音波法による覆工コンクリートの脱型時強度推定技術の研究, 土木学会第71回年次学術講演会講演概要集, VI-435, 2016.
- 4) 岩手県南広域振興局土木部：一般国道107号梁川～口内工区, 岩手県, [http://www.pref.iwate.jp/dbps\\_data/\\_material/\\_files/000/000/062/010/r107yanagawa-kuchinai.pdf](http://www.pref.iwate.jp/dbps_data/_material/_files/000/000/062/010/r107yanagawa-kuchinai.pdf)

**Summary** In lining concrete construction of mountain tunnel work, cracks or chipping due to insufficient strength which adversely affect durability can be prevented by deforming after checking the required strength development. As a method of checking the deforming strength development in practice, it was verified that the ultrasonic method which is sensitive to the concrete was applied and we have developed deforming strength management system for lining concrete by ultrasonic method that estimates the strength from the state at that time. In this method, it is possible to estimate the strength at an arbitrary point in time, and it is possible to confirm the propriety of the required strength by measuring at the scheduled deforming time. In this paper, we introduce laboratory experiments which clarified the relationship between the strength development and the behavior of ultrasonic waves and the cases applied to the site, and report on the outline and usefulness of our system.

**Key Words :** Mountain Tunnel, Lining Concrete, Deforming Strength, Ultrasonic method