

トンネル覆工コンクリートの 全断面連続締固めシステムの開発

Development of Continuous Compaction System for Tunnel Lining Concrete

塚本耕治* 今泉和俊* 浜田 元** 塩貝 悟***

要 旨

トンネルアーチ部への覆工コンクリートの打込みは、一般的にポンプ圧送による吹き上げ方式で行われる。この場合、クラウン部の背面に空隙が残らないように妻型枠部まで確実に充填し、適切に締固めることが重要である。コンクリートの締固めが狭い空間での作業になることから特にアーチ肩部からクラウン部を一様に締固める技術が強く求められている。このようなことから、側壁からアーチ部を經由して妻型枠部までを連続して締固める引抜きパイプレータとコンクリートの圧力管理を特徴とする全断面連続締固めシステムを開発した。本システムによる施工管理手法の確立と締固め性能の確認を目的とした模型実験、および現場実証実験を行い、空隙のない密実な覆工コンクリートの施工が可能であることを確認した。

キーワード：トンネル、覆工コンクリート、締固め、圧力管理

1. まえがき

トンネルの覆工は、道路、鉄道、および水路などの使用目的に適合し、長期耐久性、所要の強度、水密性を有していなければならない。これを実現するための施工方法として、覆工コンクリートの打込みでは材料分離を生じないように、また、型枠内に確実に充填し、空隙が残らないように適切に締固める必要がある。トンネルアーチ部への覆工コンクリートの打込みは、一般的にポンプ圧送による吹き上げ方式で行われる。この場合、コンクリートの締固めは検査窓や妻型枠部から作業員がパイプレータを操作して行うが、狭い空間での作業になることからアーチ肩部からクラウン部のコンクリートを一様に締固めることが覆工コンクリートを高品質化するための重要な課題である。また、鉄筋が配置された場合にはクラウン部だけでなく、側壁部からアーチ部の一様な締固めも同様に重要である。このようなことから、側壁からアーチ部を經由して妻型枠部まで連続して締固める引抜きパイプレータとコンクリートの圧力管理手法を用いた全断面連続締固めシステムを開発した。

今回、本システムにおける最適な施工管理手法の確立、締固め性能の把握を目的とした模型実験、さらに南丹園八1工区農用道1号トンネル工事において現場実証実験を行い、空隙のない密実な覆工コンクリートの施工が可能であることを確認した。本報では全断面連続締固めシステムの概要と模型実験および現場実証実験の結果につ

いて報告する。

2. 全断面連続締固めシステムの概要

2.1 システムの機器構成

全断面連続締固めシステムは、図-1に示すようにパイプレータ（本体部：φ52mm、長さ775mm、ケーブル部：φ37.2mm、長さ約20m）、パイプレータケーブルを牽引して収納する巻き取り装置、アーチ部を經由してパイプレータが型枠内を移動するルートを規定する方向転換器具、コンクリートの打込み時にパイプレータの位置を固定するパイプレータ支持台、コンクリートの圧力を管理する圧力計と圧力表示装置、覆工背面のコンクリート充填状況をモニタリングする充填検知器と充填表示装置から構成される。

2.2 施工手順

本システムによる施工は次の手順で行う。

- i. コンクリートの打込み前、パイプレータケーブルを縦断方向に配置したパイプレータ支持台に通し、方向転換器具に沿って下方に配置する
- ii. センترل側壁部のコンクリート打込み口から打込むコンクリートの上昇にともない、コンクリートを締固めながらパイプレータを牽引して上方に移動する（図-2(a)）
- iii. 側壁部のコンクリートを所定の高さまで打込んだ時点でコンクリートの打込みを一旦停止し、

*技術研究所 **名古屋支店土木部 ***関西支社土木工事第4部

- 打込み口をクラウン部の吹き上げ口に変更する
- iv. 方向転換器具に沿って本体部の向きを水平方向に変え、本体部をバイブレータ支持台に設置する (図-2 (b))
- v. 本体先端部に取り付けた先端ワイヤ(φ3mm)をセントル内空側で固定し、バイブレータケーブルを少し牽引することによりバイブレータに緊張力を導入する
- vi. クラウン部吹き上げ口からのコンクリート打込みによりセントル妻型枠までコンクリートを充填した後、コンクリートの圧力管理範囲内で打込みを継続する
- vii. バイブレータ支持台をセントル内に収納した後、先端ワイヤを解除し、コンクリートを締固めながらバイブレータを引抜く (図-2 (c))
- viii. 再度、圧力管理範囲内でコンクリート打込みを行い、コンクリート充填検知器により覆工背面に空隙がないことを確認して打込みを終了する

3. 模型実験

締固めシステムの作業手順と締固め性能を確認するため、トンネル覆工の一部を模擬した3種類の模型実験を行った。

3.1 模型実験 1

a. 実験概要

模型実験1ではバイブレータ本体部をトンネルの側壁部からクラウン部のバイブレータ支持台に設置するまでの動作に不具合がないかを調べた。バイブレータの移動するルートを規定するため、アーチ部内半径1.5m、側壁部高さ0.9m、長さ1.5mの模擬セントルにバイブレータ支持台と方向転換器具を取り付けた(写真-1)。実験はケーブルを巻き取り装置で牽引し、本体部を側壁部からクラウン部まで移動させてバイブレータ支持台に固定した。

b. 実験結果

側壁部での本体部の上昇、アーチ部での方向転換器具による水平方向への姿勢変更、バイブレータ支持台上への本体部の設置は支障ないことを確認した。

3.2 模型実験 2

a. 実験概要

模型実験2ではバイブレータによるコンクリートの締固め効果を調べた。アーチ部内半径1.5m、覆工厚さ0.3m(外半径1.8m)、長さ6.9mのアーチクラウン部を模擬したセントルを用いた。セントルにはバイブレータ支持台を取り付け、バイブレータを支持台に通し、直線状に配置した(写真-2)。打込み速度は、ポンプ圧送により吹き上げ口から15m³/hで行った。使用したコンクリートは、呼び強度18N/mm²であり、配合を表-1に

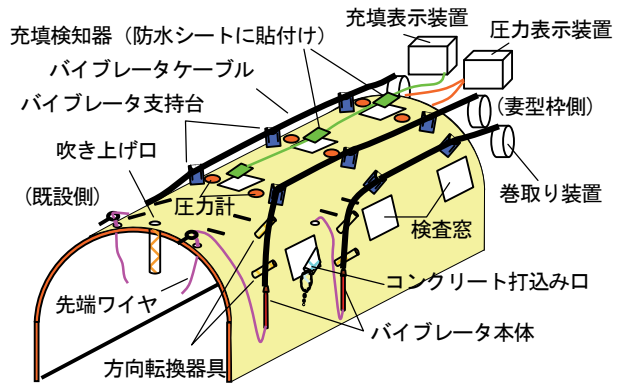
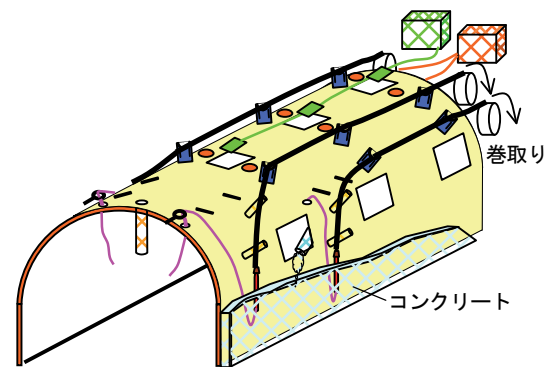
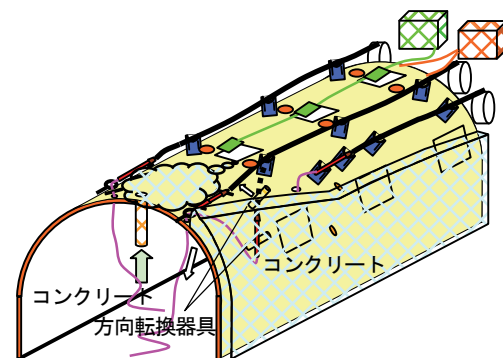


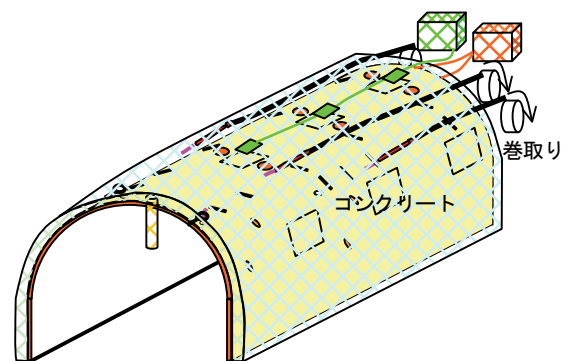
図-1 システムの概要図



(a) 側壁部の締固め



(b) クラウン部への方向転換



(c) クラウン部の締固め

図-2 システムの施工手順

示す。トラブルによるコンクリート打込み作業の中断等を想定して、締固めはコンクリートの打込み完了から約 1 時間経過後に行った。引抜きパイプレータを約 1.75m/min の速度で牽引しながらコンクリートを締固めた。また、締固めの有無による覆工コンクリートの品質の違いを把握するため、ポンプ圧送によるコンクリート充填のみで締固めを行わない場合の実験も行った。コンクリート硬化後にはパイプレータ通過位置の 8ヶ所からコア試料を採取して一軸圧縮試験（材齢 28 日）を行った。また、仕上がり状態については、試験体の表面に 0.2m×0.2m の調査単位領域を 63ヶ所（周方向 9ヶ所×軸方向 7ヶ所）設け、その領域のあばた面積率を用いて評価した。ここで、あばた面積率は単位領域ごとに白色塗料を表面に塗布し、撮影した画像を 2 値化して求めたあばたの面積を単位領域面積で除して百分率表示した。あばた部分の画像は影となって黒くなることから、2 値化では画像解析ソフトにより画像を構成するピクセルの明るさの値 0~255 を閾値 100 で黒と白に減色処理した。黒の面積が 1mm²以上の部分をあばたと判定した。

b. 実験結果

既設側妻部からの距離と一軸圧縮強度の関係を図-3に示す。一軸圧縮強度は吹き上げ口付近で最大となり、締固めの有無に関係なく 37N/mm²程度であった。締固めありの場合の一軸圧縮強度分布は 28~37N/mm²の範囲にあり、妻型枠側に向かって強度の変化は見られない。これに対して、締固めなしの場合は、吹き上げ口から離れるほど一軸圧縮強度が小さくなる傾向が現れた。締固めによって吹き上げ口から離れた位置のコンクリートが密実化され、一軸圧縮強度の低減が防げたと考えられる。

試験体表面のあばた面積率を濃淡表示した結果を図-4に示す。締固めありの場合は締固めなし場合に比べて、あばた面積率が全域で低減した。また、吹き上げ口から 2m 以上離れた範囲では、パイプレータ通過位置で帯状にあばた面積率が 1%以下に低減した。

一軸圧縮強度の分布やあばた面積率の結果から、引抜きパイプレータによる締固めによって、コンクリートの品質のばらつきが小さくなることがわかった。

3.3 模型実験 3

a. 実験概要

模型実験 3 ではコンクリートの打込みからの経過時間とパイプレータの牽引荷重の関係、コンクリート圧力と覆工背面の充填状態の関係を調べた。内空断面が幅 0.5m、覆工厚さ 0.3m、長さ 10.5m の型枠を用いてポンプ圧送によるコンクリートの打込みを行った（写真-3）。既存の巻き取り式パイプレータによる締固めのトラブル事例より、コンクリート打込み時にパイプレータケーブルが流され、蛇行による牽引荷重の増加が予想された。その対策として、実験ではコンクリート打込み前に先端ワイヤをセントルに固定し、巻き取り装置により

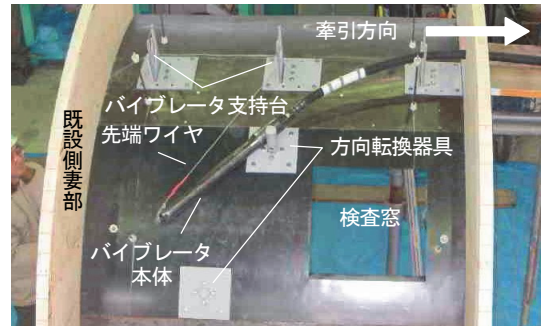


写真-1 方向転換の確認状況 (模型実験 1)

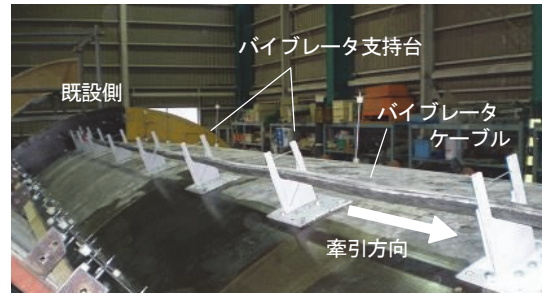


写真-2 パイプレータ支持台およびパイプレータの設置状況 (模型実験 2)

表-1 コンクリートの配合 (模型実験 1~3)

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単用量 (kg/m ³)				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
40	15	66	45.0	160	242	844	1063	2.59

※セメント：普通ポルトランド、混和剤：ポゾリス No.70

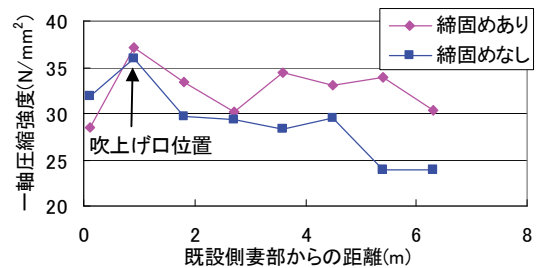


図-3 一軸圧縮強度分布

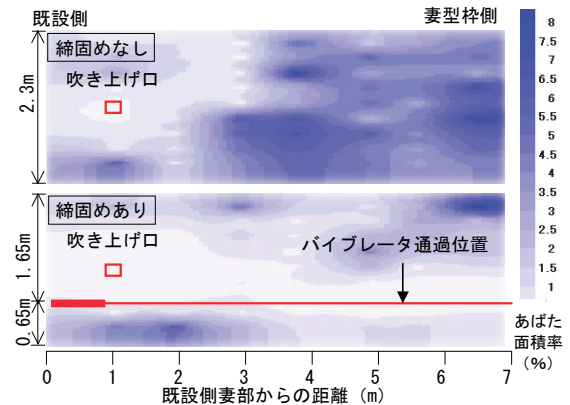


図-4 あばた面積率分布の比較

パイブレータケーブルに 0.5kN の緊張力を与え、パイブレータが直線状の姿勢を維持するようにした。締固め時にはパイブレータの緊張力を取り除いて先端ワイヤを切断した後、パイブレータを牽引して牽引荷重と牽引長を測定した。圧力計は、既設側妻部から 0.375m (圧力計①)、0.375m からは 1.5m おきに 9.375m (圧力計②～⑦) までの 7ヶ所に設置した。なお、コンクリート打込み時から締固め完了後数時間までコンクリート圧力を測定した。コンクリート硬化後には、脱型して背面側のコンクリートの充填状態を目視観察した。

b. 実験結果

コンクリート打込み開始から牽引開始までの時間と最大牽引荷重の関係を図-5に示す。牽引開始までの時間が増すにつれ、牽引荷重が指数関数的に増加する傾向が得られた。締固め時の牽引荷重の変化は、図-6に示すように牽引開始時にパルス的に荷重が発生し (0.5～14.2kN)、その後は妻型枠部まで 0.1～1kN 程度の低荷重であった。これは、牽引開始時にパイブレータとコンクリートの付着を切るために、パルス的に荷重が発生したと考えられる。以上より、時間の経過と共にパイブレータとコンクリートの付着が強くなり、その付着を切るために荷重も大きくなると考えられる。トラブルによる打込みの中断があった場合には、パイブレータの破断強度 (25kN) に対する安全率を 2.5 として、吹き上げ口からの打込み開始から 2 時間 (牽引荷重が 10kN に相当) 後までに引抜くことが適当と考えた (図-5)。

コンクリート圧力の推移を図-7に示す。打込み完了後のコンクリート圧力は徐々に低下し、締固め時に本体部が通過した直後に大きく低下する結果が得られた。打込み完了後の圧力低下は型枠継ぎ目からブリージング水が漏出し、締固め時の大きな圧力低下は、高い圧力状態にあるコンクリートが低い圧力状態の位置に移動したことが加わって発生したものと考えられる。

締固め後のコンクリート圧力と背面側の充填状態との関係を図-8に示す。締固め後のコンクリート圧力が 8.5kPa より大きくなると背面側までコンクリートを確実に充填できることを確認した。覆工厚さが 30cm の場合、コンクリート圧力が自重相当圧力である 7kPa になると背面側まで充填できることになる。また、別に行った圧力計の性能実験でも測定したコンクリート圧力が実際の圧力に対して最大 2kPa 程度のばらつきが見られた。このばらつきは、モルタルの場合よりもコンクリートの場合が大きく、粗骨材が圧力計の受圧面に点接触することによる影響と考えられる。このような結果から最小管理圧力は 10kPa とした。したがって、クラウン部のコンクリート打設ではコンクリートの充填性を確保するための最小管理圧力とセントルの載荷許容圧力を基に設定した最大管理圧力の範囲内でコンクリート圧力を管理する方法を採用した。

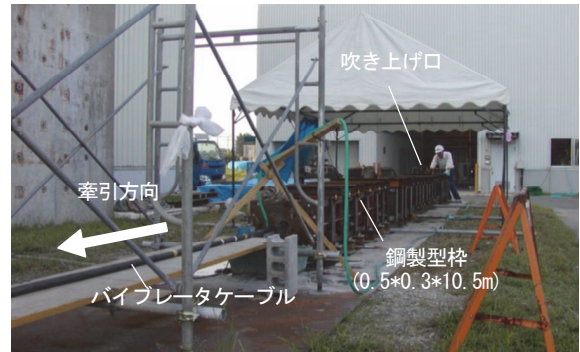


写真-3 牽引荷重の測定準備状況 (模型実験3)

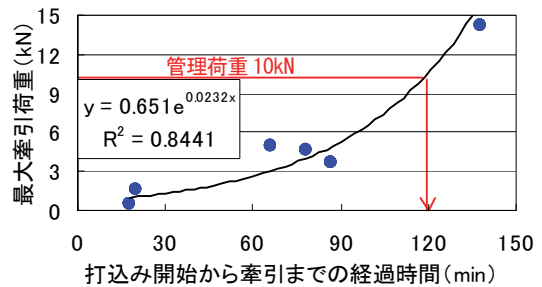


図-5 経過時間と牽引荷重の関係

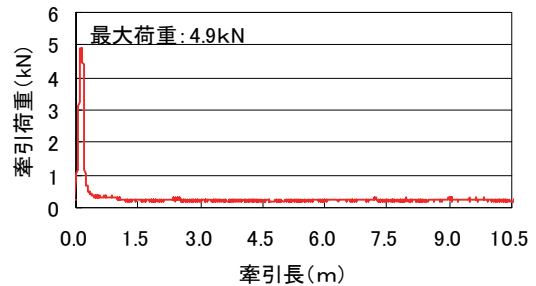


図-6 締固め時の牽引荷重の例

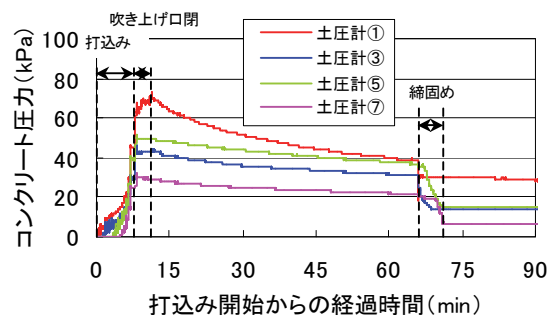


図-7 コンクリート圧力の例

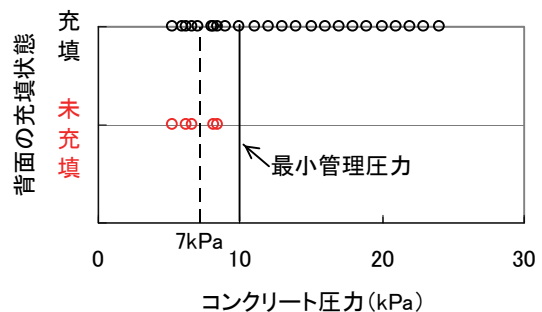


図-8 コンクリート圧力と背面の充填状態

4. 現場実証実験

4.1 実験概要

a. 全断面連続締固めシステムの適用

本システムを南丹園八 1 工区農用道 1 号トンネル工事に適用した。各種器具および装置の配置状況を図-9 に示す。ケーブルのたるみが大きくなるように、バイブレータ支持台の設置間隔は 3m 以下とした。

トンネル坑外において、側壁部のバイブレータを上方に移動し、方向転換器具に沿って水平方向に転換する動作を確認した(写真-4)。また、先端ワイヤをセントルに固定し、バイブレータに緊張力を導入する動作を確認した(写真-5)。

b. コンクリート圧力管理手法

アーチクラウン部のコンクリート圧力管理のため、バイブレータが通過する位置に沿ってセントルの 4ヶ所(既設側妻部から 0.375m、1.875m、4.875m、7.875m)に圧力計を設置した(図-9)。打込みはコンクリート圧力を表示装置で確認しながら、模擬実験の結果から設定した覆工背面の確実な充填を確保するための最小管理値 10kPa と型枠の安全性を確保するための最大管理値 60kPa の範囲で行った。また、クラウン部覆工背面側のコンクリート充填状態を検知するため、防水シートの 5ヶ所(圧力計と同じ位置に加えて既設側妻部から 10.1m の位置)に充填検知器¹⁾を両面テープで接着し、充填状態を測定した。

c. コンクリートの配合

覆工コンクリートの設計基準強度は 18N/mm² であるが、所定の細骨材率を確保できないことから呼び強度 21N/mm²、高炉セメント B 種のコンクリートを使用した。配合を表-2 に示す。

d. 性能確認項目

現場実証実験では、コンクリート圧力管理による覆工背面の充填状態、シュミットハンマー試験による一軸圧縮強度の比較、覆工表面のあばたや色むらの発生状況について本システムの性能を確認する。

4.2 実験結果

a. コンクリート圧力と覆工背面の充填状態

コンクリートの打込みや締固めにともなう変化するコンクリート圧力と充填検知器 2 および充填検知器 4 によるコンクリートの充填状態を時系列で対比した結果を図-10 に示す。コンクリート圧力は打込み経過時間とともに増加し、打込み終了時に最大となる。また、コンクリート圧力は吹き上げ口に近いほど大きく、離れるほど小さい。圧力計 2 では締固め前のコンクリート圧力の最大値が 50kPa と大きく、締固めによって圧力が 32kPa まで低下しても覆工背面には空隙が発生しない。これに対して、吹き上げ口から離れた妻型枠側の圧力計 4 では締固め前のコンクリート圧力の最大値が 17kPa と小さく、

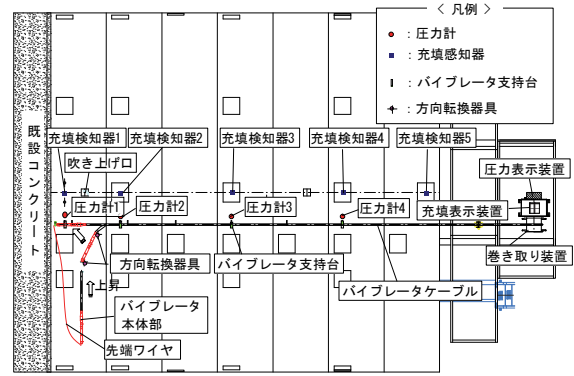


図-9 締固めシステムの配置(平面図)



写真-4 バイブレータの方向転換状況

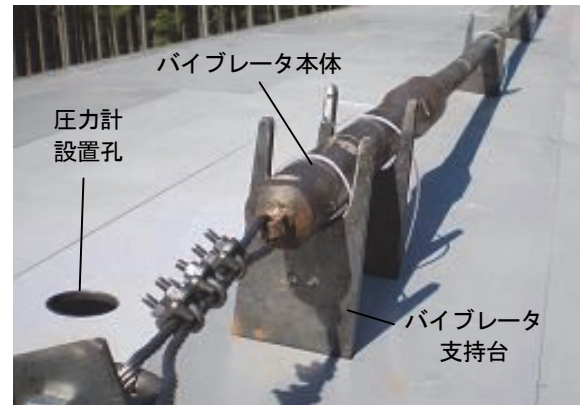


写真-5 バイブレータの固定状況

表-2 コンクリートの配合(現場実証実験)

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
40	15	60	41.9	170	283	742	1081	2.64

※セメント：高炉セメント B 種、混和剤：ポゾリス No. 70

締固めによって圧力が 8 kPa まで低下すると覆工背面には空隙が発生した。しかし、コンクリートの再打込みによって圧力が 10kPa まで回復すると、再びコンクリートで充填された。以上の結果から、提案した圧力管理方法が適切であることを確認した。

b. シュミットハンマー試験

材齢 7 日の覆工コンクリートにシュミットハンマー試験²⁾を適用し、測定した反発度から一軸圧縮強度を換算式により推定した。本システムのバイブレータ通過位置の圧縮強度、これと同様な位置で従来の人力による締固めを行った場合の圧縮強度を比較した結果を図-11 に示す。一軸圧縮強度は本システムで締固めた方が測定位置によるばらつきも少なく、相対的に大きい。締固めと再打込みによってコンクリートが均質かつ密実化したものと考えられる。

c. 画像解析による色むらの評価

仕上がり状態に影響を与えるあばたや色むらの評価に明度の標準偏差³⁾を指標として本システムの効果を定量的に評価することを試みた。この評価手法では、あばたや色むらが少ないほど、明度の標準偏差が小さくなる。本システムを適用した覆工コンクリート表面のバイブレータ通過位置に 51ヶ所の解析対象領域(0.2m×0.2m)を一列に設定し、画像解析により明度の標準偏差を求めた。また、比較のため、従来方法による締固めを行った区間についても同様な位置に解析対象領域を設定し、明度の標準偏差を求めた。それぞれの明度の標準偏差の結果を図-12 に示す。従来方法により締固めた場合の明度の標準偏差は 3.5~13.5 であり、バイブレータによる締固め困難な既設側が相対的に大きくなる。これに対して、本システムのバイブレータが通過した位置における明度の標準偏差は 2.9~7.9 の範囲にあり、位置による違いが見られない。これは、仕上がり状態のばらつきが小さいことを示している。

5. あとがき

トンネル覆工コンクリートの品質向上を目的として、側壁部からアーチ部を経由して妻型枠部までを連続して締固める引抜きバイブレータとコンクリートの圧力管理による全断面連続締固めシステムを提案し、模型実験と現場実証実験を行った。模型実験ではバイブレータによる連続的な締固めを行うことによって、コンクリート硬化後の一軸圧縮強度の分布が様化され、さらに表面のあばたを低減でき、品質が向上することを確認した。また、コンクリートの圧力管理方法を提案し、覆工背面に空隙を発生させない最小管理圧力を見出した。現場実証実験では、本システムを用いることにより覆工背面に空

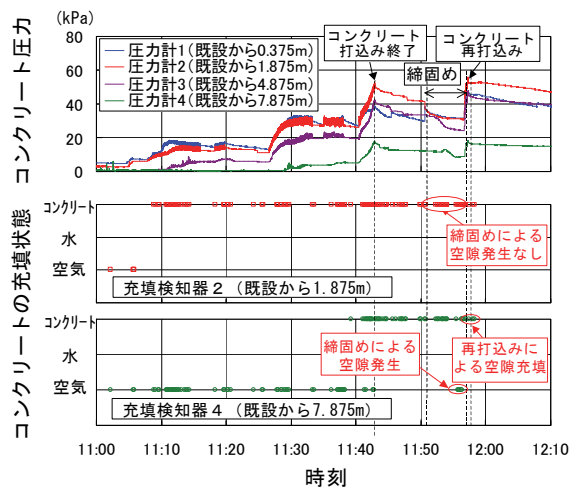


図-10 コンクリート圧力と覆工背面の充填状態

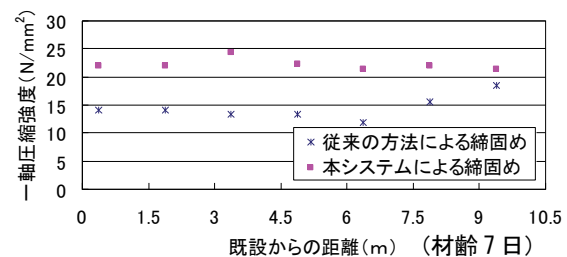


図-11 シュミットハンマー試験による圧縮強度

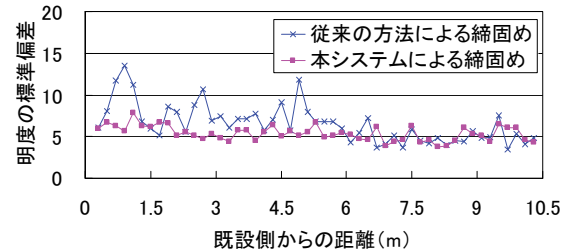


図-12 コンクリート表面画像の明度の標準偏差

隙がなく、圧縮強度および仕上がり状態が向上した覆工コンクリートの施工が可能であることを確認した。

【参考文献】

- 金子 稔、坂井 孝、安田正雪、末岡英二、「振動を利用したコンクリート充填検知システムに関する基礎実験」、コンクリート工学年次論文集、Vol. 24、No. 1、pp. 1527-1532、2002. 6
- 土木学会、「硬化コンクリートのテストハンマー強度の試験方法 (JSCE-G 504-1999)」、コンクリート標準示方書 (規準編)、pp. 243-246、2005
- 岡本 修、大塚秀三、中田善久、藤井和俊、穴澤雅明、末永孝昭、清水五郎、毛見虎雄、「画像解析手法による打放しコンクリートの色むらの評価 (その 1)」、日本建築学会コンクリート工学年次講演集 (関東)、pp. 189-190、2006. 9