

高品質トンネル覆工締固めシステムの開発

Development of New Vibrated Compaction System for High-Quality Tunnel Concrete Lining

原 秀利¹⁾・石松 栄治²⁾・松山 正之³⁾・井上 博之⁴⁾・稲川 雪久⁵⁾

Hidetoshi HARA, Eiji ISHIMATSU, Masayuki MATUYAMA, Hiroyuki INOUE, Yukihisa INAGAWA

The tunnel located in urban area, and so, is desired to have a capacity of water tight.

It is expected to construct the tunnel, which have high durability and the superior resistance against the leakage of water. So, we develop new vibrated compaction system for high-quality tunnel lining, which can satisfy these needs. Properties of the new system was tested under consutraction and twas successfully carried out. So we report the system and the result.

Key Words: new vibrating system, compaction, tunnel, water tight, high quality lining

1. はじめに

近年、山岳トンネルの覆工コンクリートの剥落事故が相次ぎ、その原因として施工時の品質管理のずさんさや施工方法のまずさがあげられることが多かった。そのため新設工事においては、打設するコンクリートの品質や施工方法が厳しく管理されるようになってきている。

施工者としても、覆工は最後に提供する構造物であり、高品質なものを作り上げることは自社の技術力を提示することであるので重要と考えていた。

そのような状況下で、今回施工する福岡市高速鉄道3号線梅林工区建設工事はウォータータイトトンネルであり、漏水のない水密性の高い覆工コンクリートを築造することが、一般のトンネルに比べ強く求められていた。

そこで、それらの要求を満足するために高品質の覆工コンクリートを施工できる締固めシステムを開発し、当工区に採用して良好な結果を得た。今回開発した締め固めシステム並びに施工結果について報告する。

2. 覆工の品質

トンネル標準示方書では、覆工一般として「覆工はトンネル使用目的に適合し、安全で長く使用に耐えるものではない。」とされ、また、覆工コンクリートの品質および、役割として「覆工コンクリートは、使用目的に適合し、所要の強度、水密性、耐久性を有してなければならない。」とされている。

覆工コンクリート打設において、水密性の高い密実なコンクリートを施工するためには、覆工範囲全体をバイブレーター（内部振動機）による締固めをする必要がある。

-
- | | | | |
|----|---------------|----------|----------------|
| 1) | 前田建設工業（株） | 地下鉄梅林作業所 | 所長 |
| 2) | 前田建設工業（株） | 地下鉄梅林作業所 | 土木主任 |
| 3) | 前田建設工業（株） | 土木部 | トンネル技術グループ 部長 |
| 4) | 正会員 前田建設工業（株） | 技術研究所 | 技術開発土木グループ 副部長 |
| 5) | 正会員 岐阜工業（株） | 技術部長 | |

しかし、当トンネルは単線断面であるため、トンネル覆工作業は非常に狭い空間での作業であり、さらに、覆工巻厚 40cm の複鉄筋コンクリートなので、クラウン部だけでなく、アーチ部および、施工打ち継ぎ目（ラップ側）でも従来の施工方法では、バイブレーターによる覆工範囲全体の締固めは難しいと考えた。

また、クラウン部コンクリートについて、「将来的には、クラウン部コンクリートに適用可能な締固め装置の開発が望まれる。」とされており、従来工法ではクラウン部のバイブレーターによる締固めがおこなわれていないのが現状である。

そこで今回は、

- 1) 複鉄筋区間でのアーチ部の締固め
 - 2) クラウン部の締固め、
 - 3) 施工打ち継ぎ目の締固め
- について取り上げ、覆工範囲全域をバイブレーターで締固めることができるシステムの開発をおこなった。

表-1 各種材料の電気抵抗値

材 料	抵 抗 値	センサー感知
空 気	99K Ω	X センサー感知しません
木 材	99K Ω	X センサー感知しません
水	2K Ω	X センサー感知しません
剥 離 材	99K Ω	X センサー感知しません
コンクリート	420~500 Ω	○ センサー感知します
ペースト	160~190 Ω	○ センサー感知します
モルタル	330~380 Ω	○ センサー感知します

3. 考案工法

1) 複鉄筋区間でのアーチ部の締固め

現在、同様な工法としては、無筋コンクリート用の浮きバイブレーターシステムが開発されているが、鉄筋区間では浮子（ $\phi 200$ ）が支障になり使用できない。しかし、バイブレーター自体でコンクリートの上昇を感知し、且つバイブレーターを自動的に巻き上げられれば、鉄筋区間でも十分に使用できると考えた。

そこで、コンクリート、モルタル等は、水、空気などに対し、電気抵抗値が非常に低い（表-1 参照）特性を利用し、ある値以下の抵抗値のみに反応する特殊センサー付きバイブレーターを開発した（図-1 参照）。この特殊センサーで感知された電気信号でバイブレーターの稼働、停止および巻き上げリールによる巻き上げをおこない、締固めを自動的におこなう。（図-2 参照）

また、バイブレーターはセントルのクラウン部の検査窓へ巻き上げるようにすることで、より高い位置まで締固めがおこなえる構造となるよう工夫した。

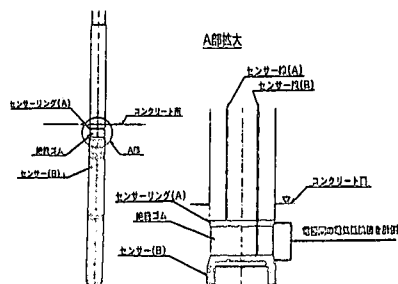


図-1 センサー付きバイブレーター概要図

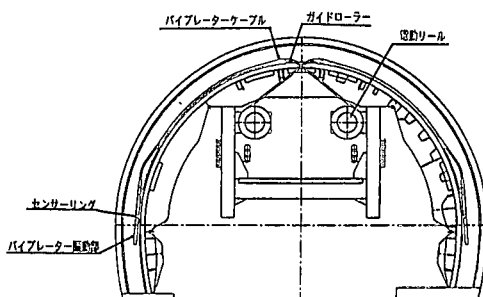


図-2 センサー付きバイブレーターを配置したセントル断面図

2) クラウン部の締固め

従来工法では覆工クラウン部のコンクリートの打設は、すべての検査窓を閉じた後、吹き上げ口から妻部へ流し込むだけであり、締固めはほとんどされていなかった。そこで、長尺バイブレーターを事前に妻部から打ち継ぎ部までセントル全長にわたって設置しておき、妻部までコンクリートが充填後、長尺バイブレーターを稼働させながら妻部まで引き抜くことができれば、締固めをおこなえると考え装置を開発した。

（図-3 参照）

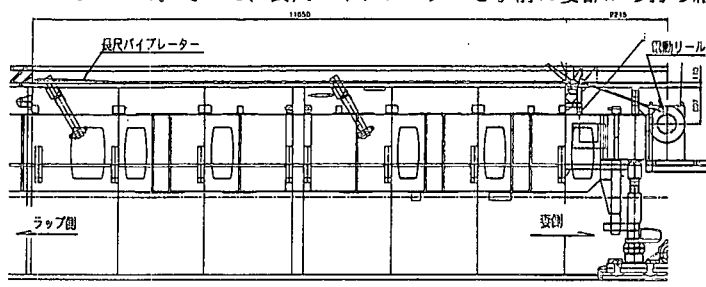


図-3 長尺バイブレーターを配置したセントル縦断面図

3) 施工打ち継ぎ目の締固め

従来、施工打ち継ぎ目は吹き上げ口の直下に位置するため、吹き上げ口から打設が開始されると、バイブレーターによる締固めは非常に困難であった。そこでセントルに特殊なバイブレーター挿入窓を設け、バイブレーターにより締固めがおこなえるようにした。

(図-4 参照)

上記1) 2) 3) のシステムによる覆工打設手順概要を図-5に示す。

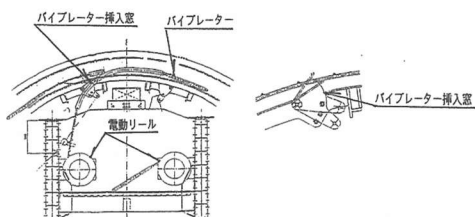


図-4 施工打ち継ぎ目バイブレーター挿入窓
およびバイブレーター配置図

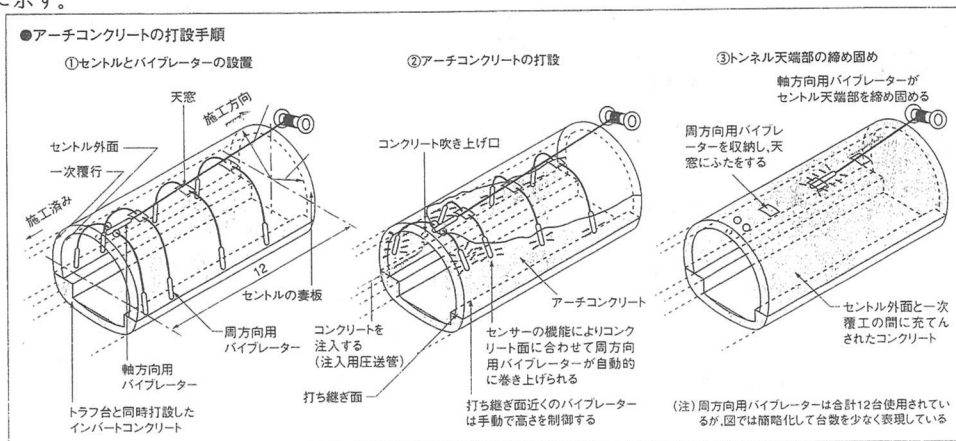


図-5 覆工コンクリート施工手順概要図(「日経コンストラクション」2002年7月26日号 p26から転載)

4. 基礎試験および実証実験

1) センサー付きバイブレーターと巻き上げリールの実証実験

感知センサーの実験として、アルカリ水（セメント水）と中性水での反応試験をおこなったところ、中性水では反応しないが、アルカリ水には反応し満足いく結果となった。これを受けて実証実験をおこなった。結果はバイブレーターのセンサーによる稼働状況および、巻き上げは良好であり、かつ、覆工の仕上がり状況は、写真-1でわかるように、その他の部分と比べ白くなっており十分に締固められていると判断できる状態であった。（その他の部分は人力によるバイブレーター の締固め）



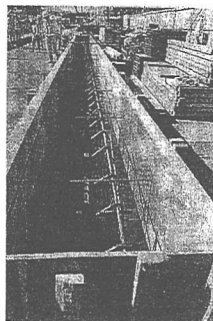
写真-1 実証実験、覆工仕上がり状況

2) クラウン部バイブレーター引き抜き試験

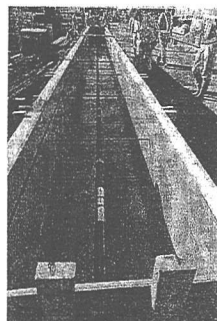
クラウン部長尺バイブレーターを開発する際に問題になったのは、a) コンクリートが打ち込まれた後でバイブレーターが引き抜けるのか、またその力は何の程度必要か、b) 締め固めたときに当然コンクリートはブリーディングにより沈下するがその量はどの程度か、などであった。

そこで、上記の2点を確認するために、覆工クラウン部に見立てた鉄筋モデル、および無筋モデルの実規模モデル（写真-2 参照）を作成し、引き抜き試験をおこなった。この試験において、バイブレーターを引き抜く力は、鉄筋、無筋に関係なく引き抜き長さに関係（図-6 参照）していて、バイブレーターを 12 m 引き抜くために

は 3000N 以上の力が必要であることがわかった。この試験において、バイブレーターによる締固めで発生するブリーディングによるコンクリートの沈下量は約 2 % であることが確認された。また、モデルを断面方向に切断し、断面の仕上がり状況を確認したところ非常に密実な状態であり、切断面からコアを採取し一軸圧縮強度を調べたところ、締固めをおこなわないコンクリートより（締め固めをおこなっていないコンクリートモデルも作成）締め固めたコンクリートのほうが約 10 % 程圧縮強度が高いことが判明し、強度という品質に及ぼす締固めの重要性が再度確認することができた。



鉄筋有り



鉄筋無し

写真-2 クラウン部実規模モデル状況

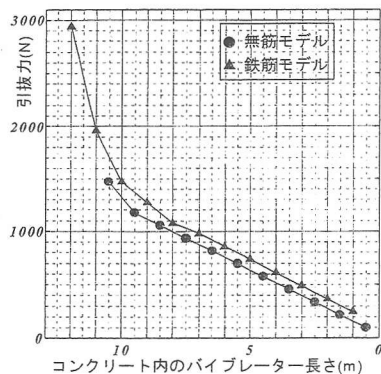


図-6 バイブレーターの長さ引き抜き力の関係グラフ

3) コンクリート密充填試験と実施工での覆工コンクリート充填圧測定

クラウン部長尺バイブレーターによる締固め時に発生するブリーディングによって、コンクリートは約 2 % 沈下することがバイブレーター引き抜き試験から判ったため、クラウン部に空隙が発生するのではないか、という疑問が生じた。しかしながら、実際には、覆工クラウン部のコンクリートは、過圧入され密充填の状態（過圧状態）となっており、クラウン部長尺バイブレーターによる締固めをおこなっても、コンクリートは密充填で過圧状態であるためブリーディングによる空隙は発生しないと予測した。

そこで、それを検証することと、本システムおよび当施工方法での覆工コンクリートの充填性を確認するために、(1) コンクリートの密充填試験、(2) 覆工コンクリート充填圧力測定をおこなった。

(1) コンクリート密充填試験

変形の少ない特殊な型枠を製作し、これに図-7の方法でコンクリートが型枠内に充填された状態からさらに過圧入したときの圧力と、過圧入されたコンクリート量を測定した。その結果、充填圧力と過圧入されたコンクリート量の関係は図-8に示す結果となり、一定の容積内（型枠内）に高い圧力でコンクリートを圧入することで、より多くコンクリートを圧入できることがわかった。

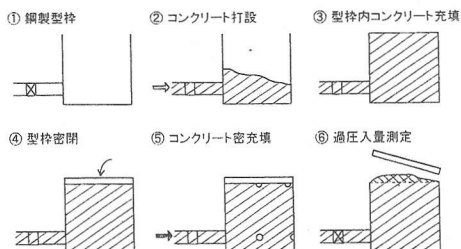


図-7 コンクリート密充填試験方法概念図

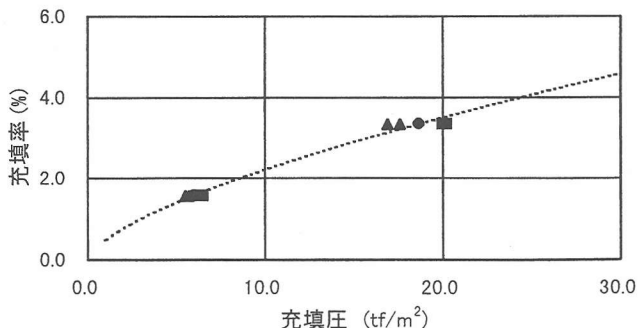


図-8 充填圧と充填率との関係グラフ

(2) 覆エコンクリート充填圧力測定

実施工での打設時のコンクリートの圧力と充填性を確認するために図-9のように圧力センサーを配置し打設時および、打設完了からクラウン部長尺バイブレーター引き抜き後までのコンクリートの圧力の変化を測定した。

圧力センサーは図-10のように配置した。また、コンクリートが防水シートまで充填されたら圧力センサーが反応するように、覆エアーチ部の防水シート表面に圧力センサーを設置し(図-11)おこなった。(圧力センサー位置でコンクリートが充填されなければ、センサーは反応しない)

結果は、打設完了までにすべての圧力センサーが反応を示し、かつ、クラウン部長尺バイブレーター引き抜き後も圧力が残っていることから、覆エコンクリートは全体に完全に充填され、クラウン部長尺バイブレーター引き抜き後も空隙は発生していないことがわかった。(図-12, 図-13参照)

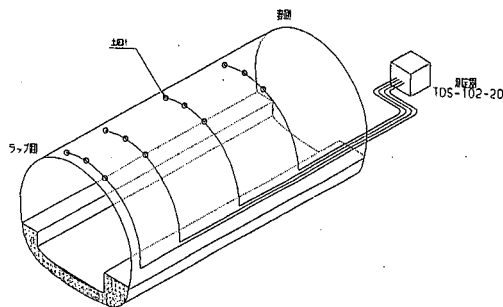


図-9 覆エコンクリート充填圧力測定概略図

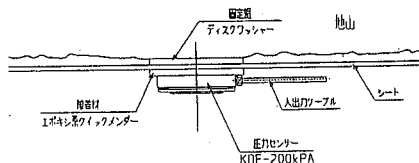


図-11 圧力センサー設置詳細図

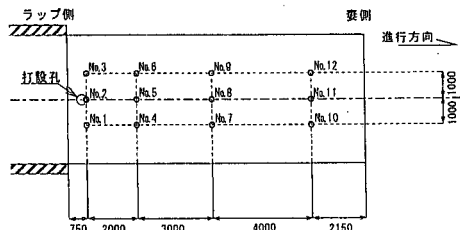


図-10 圧力センサー配置図

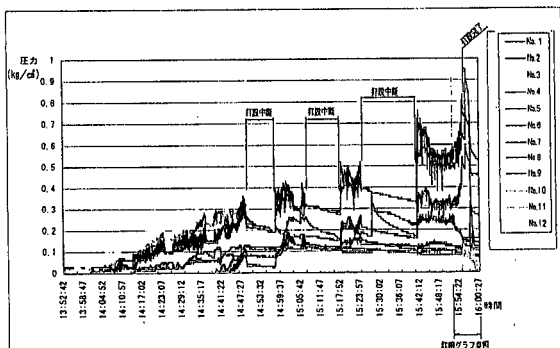


図-12 覆エコンクリート充填圧力変化グラフ

覆エクラウン部のコンクリートは高い圧力を保持して(特に吹き上げ口付近)、コンクリートは過充填されている状態となっており、この結果、クラウン部長尺バイブレーター稼働でのブリーディングは、空隙発生までは至らないと判断できる。

また、セントル脱型後確認したところ、妻部は完全に充填されていた。

さらに、図-14に示すように、コンクリート完了時(クラウン部引長尺バイブレーター稼働前)ではコンクリートは偏った圧力の分布であったが、クラウン部長尺バイブレーターを稼働させることで圧力が平均化される傾向にあり、均質な応力状態にする効果もあることがわかった。

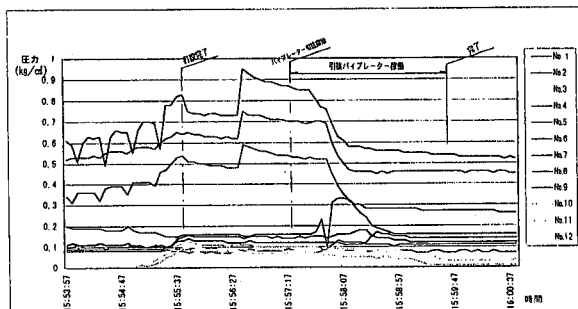


図-13 覆エコンクリート充填圧力変化グラフ
(打設完了時詳細)

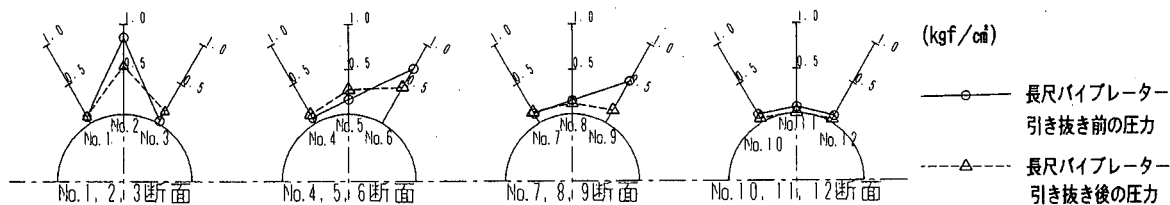


図-14 長尺バイブレーター引き抜き前・引き抜き後のコンクリートの圧力変化図

5. 施工結果

今回、本システムで、102回打設（延長約1200m）をおこなったが、システム、施工、共にトラブルもなく良好な状態で施工がおこなえた。

以下、1）覆工表面の美観、2）妻部、検測ピンでのコンクリート充填状況、3）クラック発生状況および漏水発生状況、4）施工性（施工状況）について記述する。

1）覆工表面の美観について

覆工コンクリート表面は、全打設箇所通じて、ジャンカ、コールドジョイントおよび、おおきな縞模様等の発生はなく、良好でかつ非常にきれいな仕上がりであった。

（写真－3参照）



写真-3 覆工完了全景

2）妻部、検測ピンでのコンクリート充填状況

コンクリートの充填状況の確認として、全体で検測ピン325本および、妻部でのコンクリート充填状況の確認全102回おこなったが、すべての箇所ですべての箇所まで防水シートまでコンクリートが充填されており、空隙の発生はなかった。

3）クラック発生状況および漏水発生状況

覆工完了後、現在（平成14年9月1日現在）までの覆工表面のクラックの発生状況は、表－15に示すようにクラック発生箇所は非常に少なく、クラックの幅は0.1mm～0.4mmと比較的小さい。発生しているクラックはすべてトンネル断面方向へ発生しており、覆工コンクリートの乾燥収縮によるものであると考えている。また、地下水位は完全に覆水はしていないが（しかし、トンネル上部まではほとんど覆水）、施工継ぎ目、覆工表面のクラックからの漏水はない状態である。

表-2 クラックおよび湧水発生状況

覆工打設回数	102回			
覆工打設延長	1191.9m			
クラック発生状況	18箇所 延長 92.5m			
	内	幅0.1mm未満	幅0.1mm～0.2mm	幅0.2mm～0.4mm
	訳	6箇所 延長 17.0m	6箇所 延長 36.5m	6箇所 延長 39.0m
漏水発生箇所	なし			

4）施工性（施工状況）

センサー付きパイプレーターを電動リールで自動的に巻き上げることで、従来のようにパイプレーターをもって移動することがなくなったため、オペレーターの作業がかなり楽になり施工性も向上した。

6. まとめ

今回のシステムは、記述した通り、機械並びに施工性、共に問題がないことが確認できた。また、省力化、自動化によって作業環境の改善にもなった。

今後の課題としては、大断面覆工への展開と併行して、トンネル覆工の締め固めの有無による、耐久性の検証と、空隙のできない理想的なトンネル覆工方法の確立がある。

最後に適切な助言をいただいた福岡市交通局並びに関係各位に感謝の意を称します。