

覆工コンクリートの急速施工法の開発

一分岐配管を用いた圧入による実大打設実験－

Rapid Construction Method for Lining Concrete

- Full-Scale Construction Experiment of Casting Lining Concrete by Press-Fitting Using Branch Pipes -

齋藤隆弘* 浜田 元* 小野 緑* 張 志セン*

要 旨

山岳トンネルにおける覆工コンクリートの急速施工法として、セントルの長さを延長し、1 日の施工延長を向上させることを考案した。セントルの長大化に伴う日打設量の増大に対応するために、コンクリートポンプを 2 台同時に使用することで時間当たりの打設量を増加させること、さらに側壁から肩部にかけて、分岐配管を用いて左右同時に圧入してコンクリートを打ち込むことにより、配管の切り替え回数を低減することが有効と考えられる。本研究では、要素実験において、分岐配管を用いて左右同時に圧入することにより打ち込む工法の実現可能性と品質への影響を把握した。また、現場における打設実験により、要素実験結果の再現性と品質への影響を確認した。

キーワード：山岳トンネル、覆工コンクリート、急速施工法、分岐配管、圧入、実大打設実験

1. まえがき

山岳トンネルの急速施工を実現するには、掘削工の急速化のみならず、後続の覆工コンクリートも急速施工に対応できる打設方法が求められ、テレスコピックセントルを応用し、覆工の施工を急速化する事例が見られる¹⁾。しかしながら、セントルの移動やセントル同士の接合などにおいて、作業員の高度な熟練技術が必要になり、汎用性に課題がある。

そこで、高度な熟練技術を必要とせず、月進 200m 程度を確保できる工法として、1 施工スパン長を通常の 10.5m から 2 倍程度 (18m~21m) に延長させる技術の開発に取り組んだ。開発に当たっては、施工スパンの延長に伴い 1 回の打設量が通常の倍近くになるため、従来と同程度の時間で打設するには通常よりも単位時間当たりの打設量を増大させる必要がある。その方法として① 2 台のコンクリートポンプ使用による 2 系統からの同時打ち込み、② 左右同時圧入方式による施工の省力化、を取り入れた。

打設時の機械配置を図-1 に、打設方法の概要を図-2 に示す。この方法は、長さ 18m 以上のセントルを用い、図のような機械配置および打設方法により週 3 回打設することで、月進 200m 程度の施工を目指したものである。その際、左右同時に流し込み後に圧入することで、配管の切替回数を低減できる。

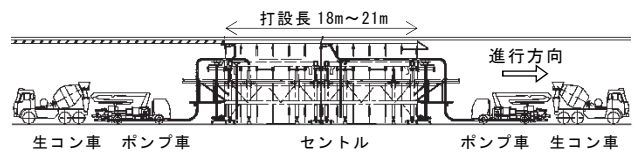
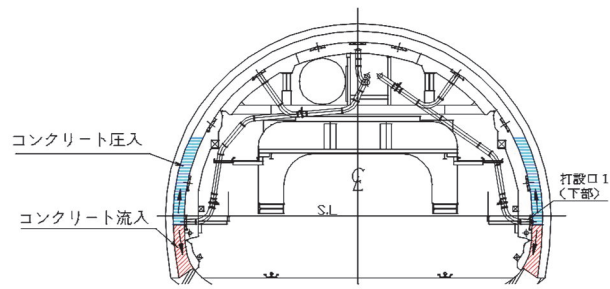
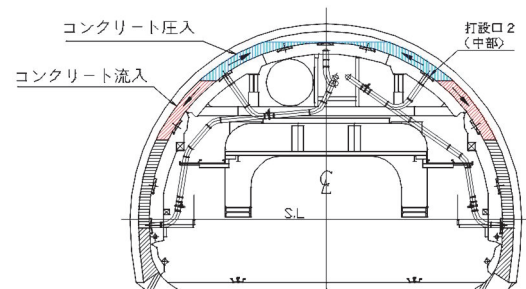


図-1 打設時の機械配置



(1) 側壁圧入口から流し込み後に圧入



(2) 肩部圧入口から天端付近まで圧入

図-2 打設方法の概要

*技術研究所土木研究グループ

本打設方法の適用にあたり、側壁部から圧入することについて、一般構造物に対する研究例²⁾はあるが、トンネル構造物に適用した事例は見られないため、圧入が型枠および品質に及ぼす影響を把握しておく必要がある。そこで、セントルの左右の側壁部を想定し、前述の②の打設方法による要素実験を行った。コンクリートの流動性は、スランプ15cm程度の普通コンクリートからスランプフロー35cm～50cmの中流動コンクリートの範囲とした。また、生コンの打ち上がり速さについては、連続的に圧送するケースだけでなく、通常の打設を想定して1.5m/h程度に調整して打ち込んだケースも行い、圧入が型枠および品質に及ぼす影響について把握した。

さらに、山岳トンネルの覆工コンクリートの施工において左右同時圧入方式による施工実験を行い、実施工における本工法の妥当性を確認した。

2. 側壁部を想定した要素実験

2.1 実験方法

a. 試験体概要

試験体の形状と計測器等の配置を図-3に、実験状況全景と試験体の寸法を写真-1に示す。覆工コンクリートの巻厚を想定し、試験体の厚さを40cmとした。また、圧入打設時の施工事例では、圧入口からの打ち上がり高さが2.5m程度であることから、高さを3.5mとした。また試験体の長さは、打ち上がり速さを調整可能にするための最小の長さとして1.8mとし、セントルの左右の側壁部の打設空間を想定してこの型枠を2基配置した。これにコンクリートポンプにより圧入口から分岐管を用い左右同時にコンクリートを打設できる設備を設けた。

圧入口を設置した面の型枠はセントルの型枠面を想定し、反対側の型枠面は地山側を想定したものである。圧入口を設置した面の型枠には、圧力計を取り付け、打ち込み時の側圧を計測した。コンクリートの打ち上がり高さの測定には、型枠上方に設置したレーザー変位計を用いた。コンクリート配管は、実施工の覆工コンクリートと同様に6インチとし、最大理論吐出能力35m³/hの定置式コンクリートポンプを使用した。

b. 配合

コンクリートの配合表を表-1に示す。コンクリートの配合は、スランプ15±2.5cm、呼び強度21N/mm²の普通コンクリート、スランプ18cm～21cmの流動化コンクリート、中流動コンクリートの3種類を設定した。流動化コンクリートおよび中流動コンクリートは、スランプ15cm、呼び強度27N/mm²のコンクリートに、増粘剤1液型の流動化剤を後添加して製造した。

c. 実験ケース

実験ケースを表-2に示す。打ち込み方法としては、1本の配管を使って、コンクリートポンプから型枠に圧

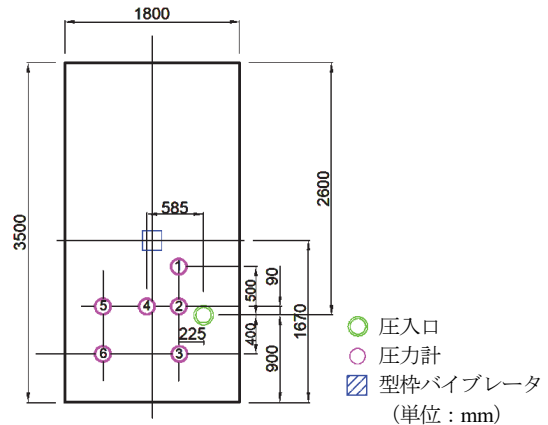
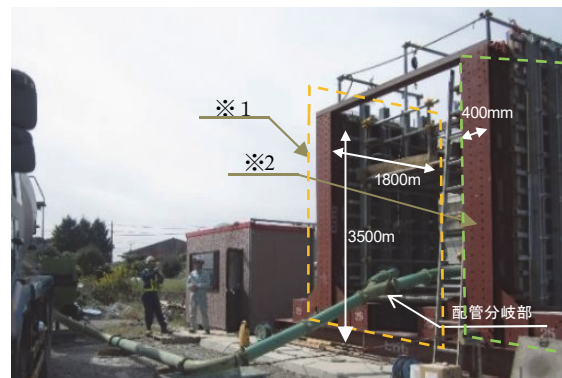


図-3 試験体形状と計測器等の配置



※1 (橙色点線) は、表-2中の case5 から case9 において-1 で示されるケース、※2 (黄緑点線) は-2 で示されるケース

写真-1 実験状況全景と試験体の寸法

表-1 コンクリートの配合表

コンクリート種	呼び強度	W/C	W	C	S	G	CA	スランプ・スランプフロー
	N/mm ²							
普通	21	61	170	279	877	975	2.79	15±2.5
流動化	27	51.5	171	332	820	986	3.32	18～21
中流動	27	51.5	171	332	820	986	3.32	35～50(スランプフロー)

※W: 水 C: 普通ポルトランドセメント S: 細骨材 G: 粗骨材 CA: 流動化剤

表-2 実験ケース

実験ケース	供試体番号	打ち込み方法	打ち上がり速さ	コンクリート種類	圧送量 (m ³ /h)	締固め
case1	同左	単独圧入	調整なし	中流動	16	型枠パイプレータ ※2
case2	同左	単独圧入	調整なし	中流動	32	型枠パイプレータ ※2
case3	同左	単独圧入	調整なし	普通	16	50cm毎 棒パイプレータ
case4	同左	単独圧入	調整なし	流動化	16	50cm毎 棒パイプレータ
case5	case5-1	分岐圧入	調整なし	中流動	8	型枠パイプレータ ※1
	case5-2	分岐圧入	調整なし	中流動	8	型枠パイプレータ ※2
case6	case6-1	分岐圧入	調整なし	中流動	16	型枠パイプレータ ※1
	case6-2	分岐圧入	調整なし	中流動	16	型枠パイプレータ ※2
case7	case7-1	分岐圧入	1.5m/h	普通	16	50cm毎 棒パイプレータ
	case7-2	分岐圧入	1.5m/h	普通	16	50cm毎 棒パイプレータ
case8	case8-1	分岐圧入	1.5m/h	流動化	16	50cm毎 棒パイプレータ
	case8-2	分岐圧入	1.5m/h	流動化	16	50cm毎 棒パイプレータ
case9	case9-1	分岐圧入	1.5m/h	中流動	16	型枠パイプレータ ※1
	case9-2	分岐圧入	1.5m/h	中流動	16	型枠パイプレータ ※2
case10	同左	流し込み	1.5m/h	普通	—	50cm毎 棒パイプレータ
case11	同左	流し込み	1.5m/h	中流動	—	型枠パイプレータ ※1

※1 打設高さが、1.5m、2.5mに達したときに、それぞれ10秒作動、打設終了時に20秒作動
 ※2 型枠パイプレータを打設終了時のみ、20秒作動

入した「単独圧入」、分岐配管を使用し左右の型枠に同時に圧入した「分岐同時圧入」、流し込みによる打設を模擬してコンクリートポンプ車のブームを用いた「流し込み」とした。ここでCase5～Case9は、分岐によりケー

スごとに同時に打ち込んだものである。

圧入による打ち込み時のコンクリートポンプの圧送量は2段階に設定した。また、時間当たりの打ち込み量を実施工に合わせ16m³~32m³程度としたケースと、打ち上がり速さをセントルの設計において想定している1.5m/h程度に調整したケースを設定した。後者については50cm打ち上げるごとに20分打設を中断することで、時間当たりの打ち上がり速さをおおよそ1.5m/hとした。

締固めには、普通コンクリートおよび流動化コンクリートの場合、打ち上がり高さ50cmごとに、棒状バイブレータ（φ40）を、中流動コンクリートでは型枠バイブレータ（高周波振動モータ、出力550kw）を用いた。また中流動コンクリート使用時には、打設終了時のみ型枠バイブレータを20秒作動させたケースと、これに加え打ち上がり高さ1.5m、2.5mの時点でも型枠バイブレータを10秒作動させたケースを設定した。

d. 測定項目

打設時には、コンクリートのスランプ、空気量、温度を測定するとともに、打ち上がり高さ、型枠に作用する側圧を計測した。打設後には、目視観察を行うとともに、コア採取による圧縮強度試験を実施し、標準水中養生による圧縮強度と比較した。

2.2 実験結果

a. 分岐同時圧入打設の左右均等性

分岐管を経由し、左右の圧入口から同時に打ち込む場合、既に打ち込まれたコンクリートの状態により、左右均等に打ち込むことができず、型枠に偏圧が生じる可能性がある。このため「分岐同時圧入」のケースで時間ごとの打ち上がり高さを左右で比較した。図-4に打ち上がり速さを1.5m/hに調整した、中流動コンクリート使用時の打ち上がり高さを示す。左右の打ち上がり高さの差は50mm以内に収まっており、これは普通コンクリートにおいても同様の結果であった。このことから、圧入して打ち込む際には配合によらず、分岐した配管により左右均等に打ち込まれることを確認した。

b. 型枠に作用する側圧

圧入によりコンクリートを打ち込む場合、側圧にはコンクリートポンプによる圧送圧の影響による圧力増が懸念される。このため、側圧は既往の知見³⁾における傾向とは異なる可能性があり、実施工の前にその傾向を把握する必要がある。ここでは、側圧に対する打ち上がり速さ、コンクリートの流動性、打ち込み方法、時間当たりの圧入量が側圧に及ぼす影響を確認した。ここでの側圧の比較対象としてコンクリートを液体として考えた時の側圧を理論圧力値とし、コンクリートの単位重量に、圧力計から打ち上がり面までの高さを乗じた値を用いた。

打ち上がり速さを1.5m/hに調整し、分岐させて普通コンクリートおよび中流動コンクリートを打ち込んだケースの側圧を図-5、および図-6に示す。ここでは圧入

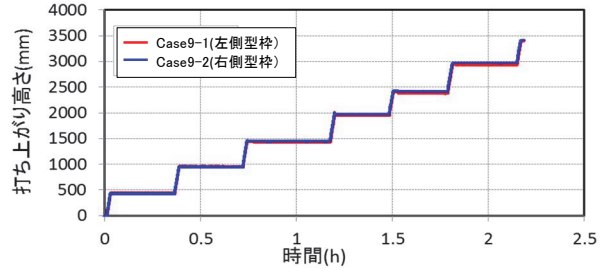


図-4 中流動コンクリート使用時の打ち上がり高さ

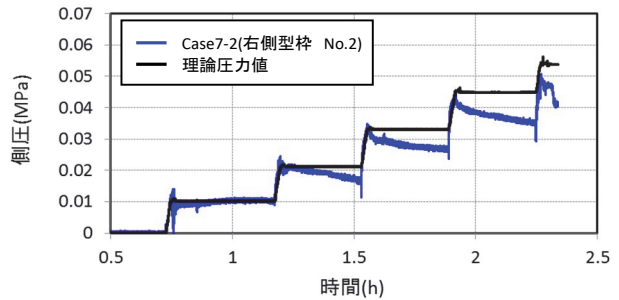


図-5 普通コンクリート使用時の側圧

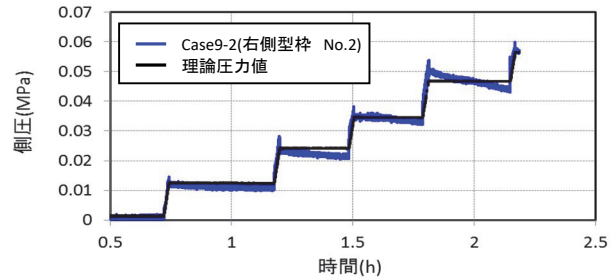


図-6 中流動コンクリート使用時の側圧

による影響が最も大きく現れる圧入口直近のNo.2の側圧を示している。普通コンクリートでは、打ち込み時に側圧が理論圧力値を上回るが、生コンの圧送を中断するとその間に徐々に側圧が低下する傾向が繰り返されている。また、打ち上がり高さが大きくなるにしたがい、側圧の計測値は理論圧力値よりも小さくなる傾向となった。中流動コンクリートでも、打ち込み時における側圧は理論圧力値より1割程度上回るが、中断時間で側圧が低下し理論圧力値を下回るようになった。このことから圧入において打ち上がり速さを1.5m/h程度とした場合では、圧入口近傍の側圧は、コンクリートの流動性により傾向の違いはあるが、打ち上がり高さが圧入口から2.5m程度までの範囲では理論圧力値とあまり差が見られないことを確認した。

図-7に、普通コンクリートを用いた「分岐同時圧入」および「流し込み」のケースの打ち上がり高さ500mmごとの側圧を示す。ここでは、打ち込み中に各打ち上がり高さに最初に達した時点の側圧をピックアップしている。打ち上がり高さ2.5mまでは、「分岐同時圧入」による打ち込みが「流し込み」による打ち込みよりも2割程度高い傾向を示す。この高さ以降は、打ち上がり高さの増大に伴う側圧の上昇が「分岐同時圧入」、「流し込

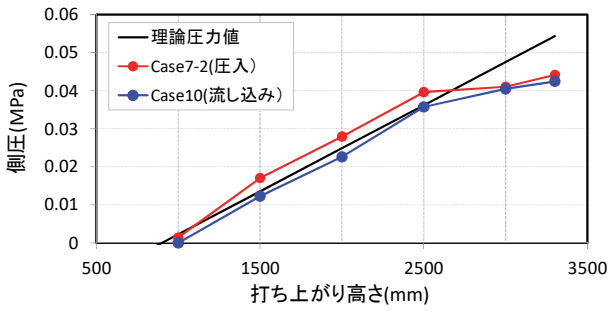


図-7 普通コンクリート使用時の打ち上がり高さ毎の側圧

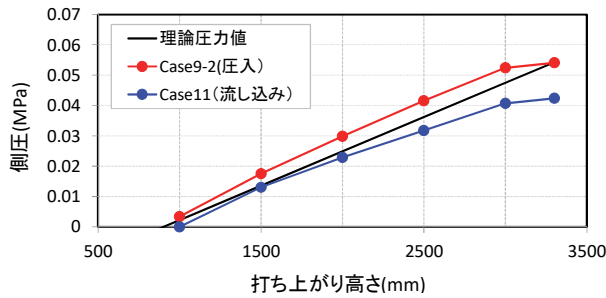


図-8 中流動コンクリート使用時の打ち上がり高さ毎の側圧

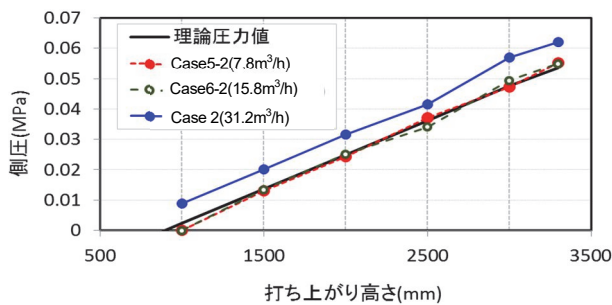


図-9 時間当たりの圧送量を変えた場合の側圧
(中流動コンクリート使用)

み」のケースそれぞれにおいて緩やかになり、両者の差がなくなっている。

図-8に、中流動コンクリートを用いた側圧を示す。打ち上がり高さが大きくなるにしたがい、「分岐同時圧入」のケースが「流し込み」のケースよりも側圧が大きくなっている。いずれの配合でも、圧入口近傍では圧入したケースの方が流し込みを行ったケースよりも2割程度側圧が増大している。圧入したケースでは、20分間流動を休止し、自重で締まったコンクリートに対して再圧入したために、打ち込み時に側圧が増加したと考えられる。このことから、「分岐同時圧入」、「流し込み」のケースのそれぞれにおいて打ち上がり高さが3mを超えると圧力の増加は緩やかになるが、圧力の差は維持されていることが分かった。

図-9に中流動コンクリートを用いて、時間当たりの圧送量を変えた場合の、打ち上がり高さ500mmごとの側圧を示す。圧送量は、コンクリートポンプの吐出量を変えることに加え、分岐により片方の型枠への圧送量を半減させることで7.8m³/h～31.2m³/hまで変化させている。ここで圧送量は打ち上がり速さと型枠の断面積から算出

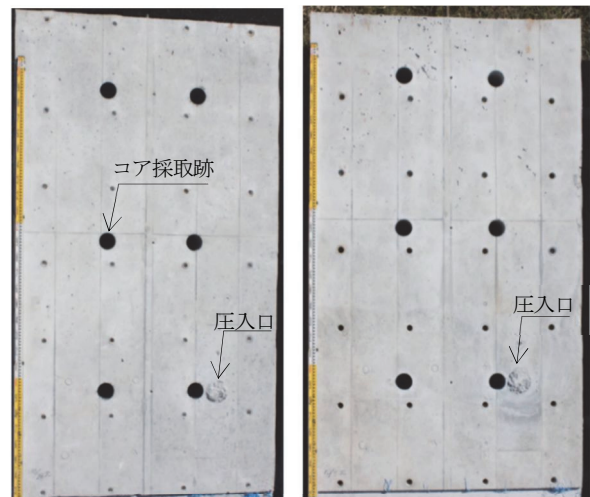


写真-2 普通コンクリート使用時の仕上がり状況



写真-3 中流動コンクリート使用時の仕上がり状況

した。圧力計の位置は図-6と同様である。時間当たり31.2m³の圧送はコンクリートポンプの最大能力であり、実施工の圧送量をはるかに超える条件である。この圧送量でも、理論圧力からの側圧の増加量はいずれの打ち上がり高さでも0.007MPa程度となり、時間当たりの圧送量を16m³/h以下にすると理論圧力値とほぼ一致した側圧となっている。このことから、通常の圧送による型枠への過度な負荷は、圧入口近傍でも発生しないと考えられる。

c. 目視観察結果・コア圧縮強度

写真-2に、普通コンクリートを用いた場合の「流し込み」、「分岐同時圧入」時の仕上がり状況を示す。「流し込み」を行ったケースでは全体的に気泡が確認されるのに対し、「分岐同時圧入」を行ったケースでは、圧入口の直上および供試体の上部に気泡が分布する。また、圧入口より下部から斜め上方にかけて縞が分布している。写真-3に、中流動コンクリートを用いた場合の「流し込み」、「分岐同時圧入」時の仕上がり状況を示す。

表-3 材齢28日におけるコア圧縮強度

供試体番号	打設方法	コンクリート種類	コア圧縮強度(σ_{28})	コア圧縮強度/TP圧縮強度
case1	単独	中流動	35.0	—
case2	単独	中流動	38.6	0.97
case3	単独	普通	43.8	0.93
case4	単独	流動化	40.3	0.96
case5-1	分岐	中流動	35.1	1.06
case5-2	分岐	中流動	36.0	1.08
case6-1	分岐	中流動	41.5	1.01
case6-2	分岐	中流動	41.3	1.00
case7-1	分岐	普通	28.0	1.01
case7-2	分岐	普通	26.9	0.97
case8-1	分岐	流動化	30.6	1.02
case8-2	分岐	流動化	28.9	0.96
case9-1	分岐	中流動	41.0	1.16
case9-2	分岐	中流動	42.0	1.19
case10	流し込み	普通	28.4	1.01
case11	流し込み	中流動	29.4	1.03

※TP：標準水中養生

「流し込み」を行ったケースでは全体的に気泡が確認されるとともに、砂すじが見られる箇所もある。これに対し、「分岐同時圧入」を行ったケースでは気泡などがあまり見られず良好な仕上がりとなった。

表-3に、材齢28日におけるコア圧縮強度を示す。コアは各供試体につき6箇所採取し、その平均値を示している。いずれも呼び強度を上回り、また標準水中養生によるテストピースの強度と比較して差はほとんど見られず、打設方法による強度の有意な差は見られない。

3. 現場における打設実験

3.1 実験概要

実験は、2車線の道路トンネル（掘削断面積80m²、覆工設計厚30cm）で行った。コンクリートの配合は非鋼繊維を用いた中流動コンクリートである。コンクリートの示方配合を表-4に示す。本トンネルにおけるセントルは延長10.5mであり、これを用いて一般的に施工される、「流し込み」による施工（ケース1）と、「分岐同時圧入方式」による施工（ケース2）を実施した。いずれのケースでもコンクリートポンプは1台とし、配管を分岐させることにより、左右の側壁部の覆工に生コンクリートを打ち込んでいる。

本工法による側壁部の打設の妥当性を確認するため、表-5に示す項目を測定した。セントルの側圧とコンクリートの打ち上がり高さは、生コン車1台分を打ち込むごとに記録した。セントルの内空変位はレーザー変位計を用いて計測した。脱型後には、本工法が覆工コンクリート表面の品質に及ぼす影響を検討するため、目視観察および写真撮影による仕上がり確認、透気係数の計測、シュミットハンマーによる圧縮強度の推定を行った。

表-4 コンクリートの配合

単位量(kg/m ³)						
W	C	LS	S	G	AD	繊維
175	340	100	789	898	4.4	3.18

呼び強度24N/mm² 水セメント比：50% 細骨材率47.2%

最大骨材寸法：25mm スランプフロー：35~40cm

W：水 C：普通ポルトランドセメント LS：石灰石微粉末

S：細骨材 G：粗骨材 AD：高性能AE減水剤

表-5 測定項目

打設時	<ul style="list-style-type: none"> ・セントルの圧力 ・セントルの変位 ・各時間における打設高さ
脱型後	<ul style="list-style-type: none"> ・仕上がり状況（ずれ、不具合の有無、模様、気泡の発生、目視観察、写真撮影） ・透気係数測定（トレント法） ・シュミットハンマー



写真-4 配管分岐部

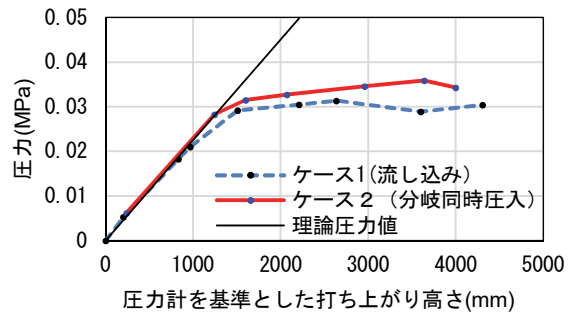


図-10 型枠に作用する圧力

a. 打設状況

配管分岐部の状況を写真-4に示す。側壁から肩部にかけての打設状況から、ケース2（分岐同時圧入）では、圧入口から2.5mの高さまで、左右の圧入口から均等に打ち込み可能であることを確認した。また、本打ち込み方法により1つの圧入口から打ち込むことができる範囲が拡大することで、配管切替回数が低減できることを確認した。

b. セントルの側圧と打ち上がり高さ

図-10に側壁下部の圧入口近傍の側圧と、圧力計を基準としたコンクリート高さとの関係を示す。ここでは、ケース1（流し込み）とケース2（分岐同時圧入）の結果および理論圧力値を併記している。ケース1（流し込み）では、打ち上がり高さが1.2m程度の範囲で、理論圧力値とほぼ同じ勾配で圧力が増加するが、コンクリートが

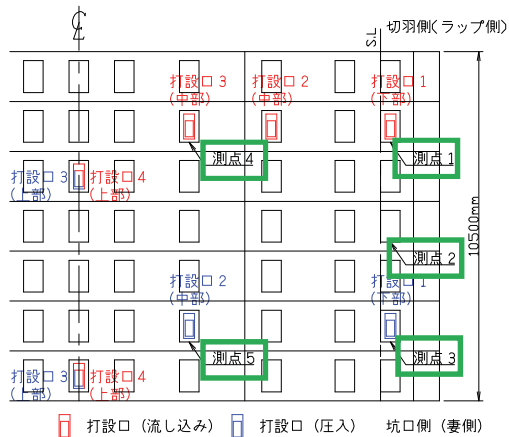


図-11 非破壊試験（透気係数、シュミットハンマー）測定位置

それ以上に打ち上がると、圧力の増加は極めて緩やかになった。ケース2（分岐同時圧入）でも、型枠の圧力と打ち上がり高さの関係にはケース1と大きな差が見られなかった。また、図-10の側圧は、生コン車1台分の打設終了時の値であるが、打ち込み時、打設停止時における圧力の不連続的な挙動は見られていない。このことから、壁厚が30cm~40cmの場合、圧入した場合でもコンクリートポンプによる圧入時の吐出によるセントルの側圧の増加がないことを実施工で実証できたといえる。

c. 仕上がり状況

覆工コンクリート全体の仕上がりとしては、「分岐同時圧入」と「流し込み」で大きな差がないことを確認した。一方、圧入口付近については、圧入による打ち込みを行うことにより、圧入口周囲に縞状の様子が確認され、また圧入口から上部に 5mm 程度の気泡が集中して発生した箇所も見られた。しかしながら、実験を繰り返す中で、圧入が終了し上部配管に切り替える前に十分に締め固めることで、改善できる見通しも得ている。

d. 非破壊試験

図-11 に示すように、1 打設区間ごとに側壁部、肩部において 5 箇所について非破壊試験を実施した。非破壊試験結果を表-6 に示す。透気係数試験では、各測点で 3 回の測定を行い、測定の実平均値を求めた。透気係数はケース 1（流し込み）で 0.24~2.21（ $\times 10^{-16}$ ）、ケース 2（分岐同時圧入）で 0.26~1.11（ $\times 10^{-16}$ ）となり、部分的にばらつきの大きい箇所が見られたが、平均値では「標準」として評価される範囲⁴⁾で、「流し込み」と「分岐同時圧入」で変わらないことを確認した。シュミットハンマー試験から、換算圧縮強度の平均値はケース 1（流し込み）で 29.1N/mm²、ケース 2（分岐同時圧入）で 28.1N/mm²であり、両ケースでほぼ等しい強度で呼び強度も上回っていた。これらの結果から、「分岐同時圧入」と「流し込み」によるコンクリートの打ち込みにおいて、覆工コンクリート表面の品質に有意な違いが生じないことを確認した。

表-6 非破壊試験結果

測点	ケース①（流し込み）		ケース②（圧入）	
	透気係数 ($\times 10^{-16}$, m ²)	換算圧縮 強度 (N/mm ²)	透気係数 ($\times 10^{-16}$, m ²)	換算圧縮 強度 (N/mm ²)
1	0.78	26.6	0.42	28.5
2	2.21	29.1	1.11	26.6
3	0.24	29.1	0.46	26.6
4	0.26	30.4	0.26	30.4
5	1.37	30.4	1.59	28.5
平均値	0.97	29.1	0.77	28.1

4. まとめ

本研究では、覆工コンクリートの急速施工法の要素技術である分岐配管を用いた左右同時圧入方式での打ち込みにおいて、要素実験および実施工への適用を通じ、以下のことを確認した。

- i. 普通コンクリートと中流動コンクリートを使用した場合、コンクリートを圧入して打ち込む際、圧入口から 2.5m 程度の範囲の高さまでは分岐した配管により左右均等に打ち込めることを確認した
- ii. 実施工では、圧入口近傍でも、「流し込み」と「分岐同時圧入」で側圧と打ち上がり高さの間に大きな差異は見られず、圧力計から 1.2m 程度の打ち上がり高さまでは理論圧力とほぼ一致し、それ以降は側圧の増加が極めて緩やかになることを確認した
- iii. 圧入時には、圧入終了時の入念な締め固めによりコンクリートの品質が確保できることを確認した

以上から、本工法が、セントルの特別な補強をすることなく、通常のセントルの設置方法で実施工に適用でき、覆工コンクリートの急速施工に寄与する要素技術として成立することを確認した。

5. あとがき

急速施工法の要素技術である分岐同時圧入方式について、実施工における実現性が確認できた。残る課題である、誘発目地の設置技術などについて開発を進めている。

【参考文献】

- 1) 西岡 和則ほか、「新型テレスコピックセントル工法を用いて66時間型枠を存置する効果について」、トンネル工学論文集、第24巻、I-5、2014.12
- 2) 大池 武ほか、「コンクリートのポンプ圧入工法に関する研究」、大林組技術年報、pp.33-38、1992
- 3) 土木学会、「コンクリート標準示方書 施工編」、pp.142-146、2012
- 4) R.J.Torrent, "A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site", Material and Structures, 25, pp.358-365,1992