

報告 現場で流動化剤を後添加して製造する締固めを必要とする高流動コンクリートの実構造物への適用

香島和輝*1・松本修治*2・大塚達也*3・沢谷和仁*4

要旨：建設工事における生産性向上および品質確保の方策の一つとして、締固めを必要とする高流動コンクリートの活用が挙げられる。筆者らは、スランプで管理するコンクリートに粉末の流動化剤を後添加することで締固めを必要とする高流動コンクリートを製造する技術を開発しており、鉄筋が高密度に配置される箇所を有する鉄道構造物へ打ち込んだ。その結果、軽微な締固めにより材料分離することなくコンクリートが充填され、良好な施工性と出来形が得られることを確認した。

キーワード：締固めを必要とする高流動コンクリート、流動化剤、間隙通過速度、粗骨材量比率

1. はじめに

近年の建設工事では、技能労働者の高齢化、離職および働き方改革に伴う労働力不足に対応するため、生産性の向上が求められている。1995年の阪神・淡路大震災以降、鉄筋コンクリート構造物は、耐震性能の向上を目的に鉄筋が高密度に配置されるようになった。この当時、建築工事ではスランプの大きいコンクリートが広く使用されるようになっていたが、土木工事では依然としてスランプ 8 cm のコンクリートが一般的に使用され、コンクリートの充填不足による品質低下が散見されるようになった。また、締固め作業が増えることから、現場打ちコンクリートの生産性の低下が顕在化されるようになった。こうした背景を踏まえ、2017年に国土交通省より「流動性を高めた現場打ちコンクリートの活用に関するガイドライン」¹⁾が示され、土木工事で一般的に使用されるコンクリートのスランプは 12 cm が標準となり、コンクリートの流動性を高める方向性が示された。また、2019年の JIS A 5308 の改正においては、生産性向上に寄与するレディーミクストコンクリートの種類として、スランプフロー45、55および60 cm が設定された。そして、2023年には土木学会から「締固めを必要とする高流動コンクリートの配合設計・施工指針(案)」²⁾(以降、指針と記す)が刊行され、2023年制定コンクリート標準示方書[施工編]³⁾の目的別コンクリートに新しく追加されるなど、流動性の高いコンクリートが普及するための環境が整ってきた。

締固めを必要とする高流動コンクリートは、スランプで管理するコンクリートに比べて流動性が高いことから、不具合の発生するリスクを抑えつつ、作業効率を高めることが可能である²⁾。このコンクリートが全ての地域で

適切に使用されることが理想ではあるが、地域によってはレディーミクストコンクリート工場(以降、生コン工場と記す)の製造や品質管理の体制が整っていない場合がある。これに対応するために、スランプで管理するコンクリート(以降、ベースコンクリートと記す)を生コン工場から出荷し、現場で混和剤を後添加することで高流動コンクリートを製造(以降、後添加製造と記す)する技術が検討され、その多くは流動化剤と増粘剤が用いられている⁴⁾。ここで、増粘剤の使用は、材料コストが増加してしまうこと、製造設備やトラックアジテータなどの洗い手間が増えてしまうことに課題がある。これに対し、筆者らは増粘剤を用いず、粉末の流動化剤のみを使用し、比較的安価に高流動コンクリートを製造する技術を検討してきた⁶⁾。

本稿では、流動化剤の後添加による締固めを必要とする高流動コンクリートについて、指針²⁾に準拠した配合検討を行い、鉄筋が高密度に配置され、かつ締固め作業が困難な鉄道構造物へ適用した事例について報告する。

2. 適用構造物の概要と高流動コンクリートの種類

構造物の一般図と桁の配筋図を図-1に示す。本構造物は、北海道新幹線の昆布トンネルと宮田トンネルを繋ぐ鉄道橋梁の上部工であり、幅 1.0 m、梁せい 2.8 m、長さ 20.0 m の桁とスラブを組み合わせた閉床式 RC 単純 4 主桁構造である。桁底面から高さ 500 mm までの桁下部には、D32 の鉄筋が 74 mm 間隔で 3 段配置されており、鋼材の最小あきは 32 mm、鋼材量は 366 kg/m³(底面から高さ 500 mm の範囲)の高密度な配筋となっている。技能者が締固め作業を行うために桁内部へ入ることが難しく、スラブ上から目視で充填状況を確認することも困難

*1 鹿島建設株式会社 技術研究所 土木材料グループ 研究員(正会員)

*2 鹿島建設株式会社 技術研究所 土木材料グループ 主任研究員(正会員)

*3 鹿島建設株式会社 北海道支店 新幹線昆布トンネルJV工事事務所 課長

*4 鹿島建設株式会社 北海道支店 新幹線昆布トンネルJV工事事務所 所長

ここに、 V_{pass} ：間隙通過速度 (mm/s), t_{300} ：300 mm 到達時間 (s), t_{190} ：190 mm 到達時間 (s) を表す。

間隙通過速度の目標値は、指針²⁾におけるタイプ 2 の目標値に準拠し、40 mm/s 以上とした。

材料分離抵抗性は、図-3 に示す JSCE-F 702-2022 「加振を行ったコンクリート中の粗骨材量試験方法 (案)」²⁾ に準拠し、粗骨材量比率によって評価した。なお、粗骨材量比率は式(2)から算出した。

$$\delta = G/G_0 \times 100 \quad (2)$$

ここに、 δ ：加振後に採取した試料の粗骨材量比率 (%), G ：加振後に採取した試料の単位粗骨材量 (kg/m^3), G_0 ：配合における単位粗骨材量 (kg/m^3) を表す。

粗骨材量比率の目標値は、指針²⁾におけるタイプ 2 の目標値に準拠し、40%以上とした。

4. 室内試し練りによるコンクリートの配合検討

4.1 検討概要

コンクリートの使用材料を表-3 に示す。流動化剤を除く各材料は、生コン工場で通常使用しているものである。流動化剤は、粘性を付与できるリグニン誘導体を主成分とする粉末状のもので、少量で高い流動性が得られるように分子構造を変更したものである⁷⁾。

コンクリートの配合を表-4 に示す。単位粗骨材絶対容積は指針の標準値²⁾が $0.30 \sim 0.33 \text{ m}^3/\text{m}^3$ であることから、中心値として $0.315 \text{ m}^3/\text{m}^3$ とした。単位水量および単位セメント量は、指針の実績²⁾を参考に、それぞれ $175 \text{ kg}/\text{m}^3$ および $400 \sim 450 \text{ kg}/\text{m}^3$ 程度とした。セメント種類は、普通ポルトランドセメントに加え、アルカリシリカ反応の抑制対策として高炉セメント B 種も対象とした。細骨材 S1 と S2 の容積比率は、生コン工場の標準的な混合割合である 40:60 とした。混和剤は、ベースコンクリートにおいて、スランプおよび空気量が目標の範囲となるように添加率を調整した。なお、後述する後添加製造

後の高流動コンクリートは、目標値の範囲内となるように流動化剤の添加量の調整を試みたが、目標値を外れるケースがあった。しかし、流動化後の性状は良好であると判断し、各種試験を実施した。

コンクリートの練混ぜには、強制二軸ミキサーを使用し、1 バッチあたりの練混ぜ量を 45 L とした。粗骨材、細骨材、セメントを投入して空練りを 15 秒行った後、混和剤と水を投入し、90 秒間練り混ぜた。排出後、表-5 に示す試験のうち、ベースコンクリートのスランプ、空気量およびコンクリート温度を測定し、ミキサーに試料を戻した。その後、流動化剤を投入し、30 秒間練り混ぜてから、コンクリートを排出し、表-5 に示す試験を行った。

4.2 検討結果

(1) コンクリートの配合検討

スランプ、スランプフロー、空気量およびコンクリート温度の試験結果を表-6 に示す。ベースコンクリートのスランプと空気量は目標値を満足した。しかし、後添加後のスランプフローは No.2 において目標値よりも大きい結果であった。また、空気量は No.1 において目標値よりも大きい結果であった。これは、ベースコンクリ

表-3 使用材料

材料	記号	摘要
水	W	地下水
セメント	N	普通ポルトランドセメント, 密度: $3.15 \text{ g}/\text{cm}^3$
	BB	高炉セメント B 種, 密度: $3.05 \text{ g}/\text{cm}^3$
細骨材	S1	陸砂, 北海道共和町リヤムナイ産 表乾密度: $2.58 \text{ g}/\text{cm}^3$, 吸水率: 2.75%, 粗粒率: 1.60, アルカリシリカ反応性: 無害
	S2	陸砂, 北海道白老町北吉原産 表乾密度: $2.64 \text{ g}/\text{cm}^3$, 吸水率: 2.38%, 粗粒率: 2.77, アルカリシリカ反応性: 無害
粗骨材	G	碎石 2005, 北海道喜茂別町川上産 表乾密度: $2.66 \text{ g}/\text{cm}^3$, 粗粒率: 6.72, 実積率: 60.0%, アルカリシリカ反応性: 無害でない
混和剤	Ad1	AE 減水剤 高機能タイプ, リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体
	Ad2	AE 剤, 変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤
	AD-P	流動化剤, リグニン誘導体

表-4 コンクリートの配合

No.	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)								AD-P (kg/m^3)	アルカリ総量 (kg/m^3)
			W	N	BB	S1	S2	G	Ad1	Ad2		
1	40.7	50.3	175	430	-	330	504	838	5.81	1.72	0.30	2.42
2	38.9	49.8	175	450	-	323	496	838	6.75	1.80	0.36	2.54
3	39.3	49.6	175	-	445	320	491	838	4.00	2.67	0.31	2.15

表-5 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法	目標値
スランプ	JIS A 1101	$18 \pm 2.5 \text{ cm}$
スランプフロー	JIS A 1150	$550 \pm 75 \text{ mm}$
空気量	JIS A 1128	$5.5 \pm 1.5\%$
コンクリート温度	JIS A 1156	20°C 程度
間隙通過速度	JSCE-F701-2022 附属書 1	40 mm/s 以上
粗骨材量比率	JSCE-F702-2022	40%以上

表-6 試験結果

No.	ベースコンクリート			高流動コンクリート		
	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 ($^\circ\text{C}$)	スランプフロー (mm)	空気量 (%)	コンクリート温度 ($^\circ\text{C}$)
1	20.0	6.8	18.8	545	7.2	18.9
2	20.5	5.5	20.5	640	4.5	20.6
3	17.0	5.0	23.5	545	5.5	23.7

トの空気量が大きかったことに加え、流動化剤を投入した後に空気を巻き込んだことによるものと考えられる。スランプフローと空気量は目標値を外れるケースがあったものの、目視観察では材料分離が生じておらず、良好な状態であったため、間隙通過速度と粗骨材量比率の測定を行うこととした。

各ケースにおける粗骨材量比率および間隙通過速度を図-4に示す。ケース No.1には、「セメントの種類 単位セメント量」を付記した。粗骨材量比率は、すべて目標値40%以上を満足した。間隙通過速度は、高炉セメントB種を用いたNo.3において目標値40 mm/s以上となり、普通ポルトランドセメントを用いたNo.1とNo.2では目標値40 mm/s未満であった。一般に、高炉セメントB種を用いたコンクリートでは、所定のスランプ、スランプフローを得るのに必要な単位水量は、普通ポルトランドセメントを用いたものよりも小さいとされている⁸⁾。本配合は、単位水量を175 kg/m³と一定にしているため、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートに比べ自由水量が増えたことに加え、単位ペースト容積が増加したことから、加振時の変形性が大きくなり、結果として間隙通過速度が速くなったと推察される。アルカリシリカ反応をより確実に抑制できることも踏まえて、粗骨材量比率と間隙通過速度の目標値を満足し、高炉セメントB種を用いたNo.3をコンクリートの暫定配合とした。

(2) スランプフローの許容範囲の確認

指針²⁾に準拠し、暫定配合にて所定の間隙通過性と材料分離抵抗性を満足するスランプフローの許容範囲を定める検討を行った。本検討では、流動化剤の添加量を増減することでスランプフローを調整することとした。スランプフローの許容範囲に関するフレッシュ性状試験の結果を表-7に示す。なお、表-7に示すNo.3-2と、表-6に示すNo.3は同じ試験結果である。ベースコンクリートのスランプはいずれも目標値の範囲内であったが、No.3-1の空気量は3.7%であり、5.5±1.5%の目標値を外れた。しかし、後添加製造した高流動コンクリートの空気量は目標値を満足したため、間隙通過速度と粗骨材量比率の測定を行った。その結果、スランプフローの最小値が453 mm、最大値が630 mmの場合においても、間隙通過速度と粗骨材量比率が表-1に示す目標値を満足することを確認した。本検討より、実施工ではスランプフローを550±75 mm(最小値は475 mm, 最大値は625 mm)

として管理することで、間隙通過性と材料分離抵抗性を確保できるものと考えられた。

5. 実施工模擬実験

5.1 実験概要

4章で選定した表-4に示すNo.3のコンクリートを用いて、実構造物の高密度な配筋となる箇所を模擬した型枠への充填実験を行い、打込み後の脱型状況を目視で確認した。

(1) 型枠の寸法および鉄筋の配置

型枠の寸法は、幅1.0 m、延長10 m、高さ0.5 mとした。桁下部に配置されるD32の鉄筋は、外径32 mmの塩ビ管で代用し、図-1の桁下部を写真-1に示すように模擬した。

(2) 締固めを必要とする高流動コンクリートの製造

表-4に示すNo.3のベースコンクリート4 m³を生コン工場で作製し、現場まで約20分かけてトラックアジテータで運搬した後、荷卸しのスランプおよび空気量試験をした。試験終了後、トラックアジテータのホップから流動化剤を0.37 kg/m³投入し、5分間高速攪拌⁹⁾(10~15 r.p.m 程度)することで高流動コンクリートを製造した。攪拌終了後、スランプフローと空気量の試験を実施した。なお、流動化剤の添加量は、トラックアジテータの練混ぜ効率やコンクリート温度を考慮し、室内試し練りの結果よりも多くすることとした。

(3) 打込み・締固め

コンクリートポンプのブームを用いてコンクリートを圧送し、実施工と同じ条件になるように、先端ホースからの自由落下高さを0.8 mとした。はじめに、流動勾

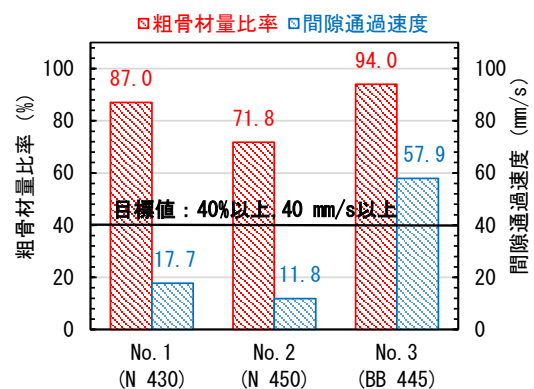


図-4 各ケースの粗骨材量比率および間隙通過速度

表-7 スランプフローの許容範囲に関する試験結果

No.	ベースコンクリート				高流動コンクリート				
	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	AD-P 添加量 (kg/m ³)	スランプフロー (mm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	間隙通過速度 (mm/s)	粗骨材量比率 (%)
3-1(フロー上限)	20.5	3.7	23	0.27	630	4.7	23.2	57.9	54.5
3-2(前出 No.3)	17.0	5.0	24	0.31	545	5.5	23.7	57.9	94.0
3-3(フロー下限)	18.5	5.4	24	0.13	453	6.2	24.3	64.7	86.2

配を確認するため、打込み位置の打上がり高さが 0.5 m になるまで締固めを行わずにコンクリートを打ち込んだ。打込み完了後、流動勾配を確認し、棒状バイブレータを用いて締固めを行った。棒状バイブレータは、振動体の呼び径が 40 mm、振動数が 240 Hz のものとし、挿入間隔を 40～50 cm とした。締固め時間は、指針 2) における標準的な施工方法を参考に 5 秒程度とした。

5.2 実験結果

受入検査において、ベースコンクリートのスランプは 20.5 cm、空気量は 5.7%、コンクリート温度は 19℃であった。後添加製造後のスランプフローは 508 mm、空気量は 5.5%、コンクリート温度は 20℃であった。コンクリートを打ち込み、締め固める前に測定した流動距離は 3.5～5.0 m であり、流動勾配は 1/7～1/10 程度であった。これは、指針 2) で示されている流動距離の目安と同程度であった。その後、締固めを行うことで模擬鉄筋のあきを円滑に通過し、かぶりまで確実にコンクリートが充填されることを確認した。写真-2 と写真-3 に脱型後の試験体状況を示す。型枠の側面と底面どちらにも未充填は確認されず、軽微な締固めを併用することで型枠の隅々までコンクリートが充填されていることを確認した。

6. 実施工

1 台目の受入検査において、ベースコンクリートのスランプは 20.5 cm、空気量は 6.0%、コンクリート温度は 16℃であった。後添加製造において流動化剤を 0.30 kg/m³ 投入した結果、スランプフローは 575 mm、空気量は 6.7%、コンクリート温度は 16℃であった。スランプフローと空気量がいずれも目標値を満足したことを確認し、コンクリートの打込みを開始した。実施工では、3 回の品質管理試験を実施したが、スランプフローの管理値が 550±75 mm に対し、実測値が 550±30 mm の範囲に収まったことから、後添加製造における品質が安定していることを確認した。実施工の状況を写真-4 に、コンクリートの打込み状況を写真-5 に示す。コンクリートの打込み、締固めは、実施工実験の結果を踏まえ、打込み位置の間隔を 5 m 程度、自由落下高さを 0.8 m 以下、棒状バイブレータの挿入間隔を 40～50 cm、1 箇所あたりの振動締固め時間は 5 秒程度とした。その結果、コンクリートは、軽微な締固めにより鉄筋が高密度に配置された箇所へ、材料分離することなく確実に充填することを確認した。

脱型後の桁の状況を写真-6 に、施工完了後の構造物

の全景を写真-7 に示す。脱型後の外観を調査したところ、充填不良は生じておらず、良好な仕上がりであることを確認した。

締固めを必要とする高流動コンクリートの適用効果を表-8 に示す。なお、比較対象であるスランプコンクリートは、本施工におけるスラブの実績である。本施工では、後添加製造による締固めを必要とする高流動コンクリートを導入することにより、スランプで管理するコンクリートよりも打込み位置を減らすこと、締固め時間を減らすことができたため、品質を確保しながら、省力化にも寄与することができた。

7. まとめ

指針 2) に準拠して選定した後添加製造による締固めを必要とする高流動コンクリートを鉄筋が高密度に配置さ



写真-1 塩ビ管の配置状況



写真-2 試験体側面の状況



写真-3 反転させた試験体底面の状況

表-8 締固めを必要とする高流動コンクリートの適用効果

項目	スランプ コンクリート	高流動 コンクリート	高流動コンクリートの適用効果
人員	8名	8名	確実にコンクリートを充填させるため、人員は減らさなかった。
打込み間隔	2.5 m	5 m	筒先の移動回数や移動に伴う時間・労力を減らすことができた。
締固め時間	5～15 秒	5 秒程度	バイブレータの締固めによる苦渋作業を減らすことができた。

れた構造物へ適用した。配合選定から実構造物への適用を通して得られた知見を以下に示す。

- (1) 今回の検討においては、高炉セメント B 種を用いた配合は、普通ポルトランドセメントを用いた配合よりも間隙通過速度が速くなり、指針²⁾に示す目標値を満足することを確認した。また、粗骨材量比率はいずれの配合においても目標値を満足した。
- (2) 実施工を模擬した実験では、締固めを行うことで模擬鉄筋が高密度に配置された箇所へコンクリートを確実に充填できた。流動距離は 3.5～5.0 m であり、指針²⁾で示されている流動距離の目安と同程度であった。また、指針²⁾で示されている標準的な施工方法において、問題なくコンクリートの打込み・締固めができた。
- (3) 本コンクリートを用いることで、鉄筋が高密度に配置された構造物のコンクリート工事を円滑に行うことができた。

謝辞

独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 北海道新幹線建設局 後志建設事務所の方々には、本報告に関して、多大なご協力を頂きました。ここに、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 流動性を高めた現場打ちコンクリートの活用に関するガイドライン, 流動性を高めたコンクリートの活用検討委員会, 平成 29 年 3 月
- 2) コンクリートライブラリー161, 締固めを必要とする高流動コンクリートの配合設計・施工指針(案), 土木学会, 2023.2
- 3) 2023 年制定コンクリート標準示方書[施工編], 土木学会, 2023.9
- 4) 太田貴士, 黒岩秀介, 野田泰史, 篠原明: 粉末の流動化剤および増粘剤を用いた後添加型中流動コンクリートの実用化検討, コンクリート工学会年次論文集, Vol40, No.1, pp1173-1178, 2018
- 5) 吉井浩人, 松本真樹, 松寄達弘, 牛島栄: あと添加による高流動コンクリートの工事施工性に関する研究, コンクリート工学会年次論文集, Vol44, No.1, pp802-807, 2022
- 6) 松本修治, 荒川遥, 渡邊賢三, 橋本紳一郎: 生産性向上に資する締固め不要コンクリートの実構造物への適用, コンクリート工学会年次論文集, Vol.46, No.1, pp931-936, 2024
- 7) 松本修治, 橋本学, 渡邊賢三, 橋本紳一郎: 汎用締固め不要コンクリートにおける新規の粉末分散剤と新たな充填性評価手法に関する検討, コンクリー



写真-4 実施工の状況



写真-5 コンクリートの打込み状況

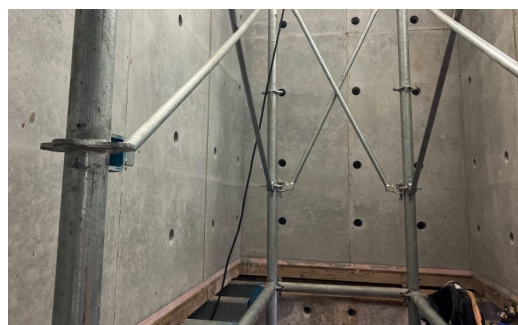


写真-6 桁の状況

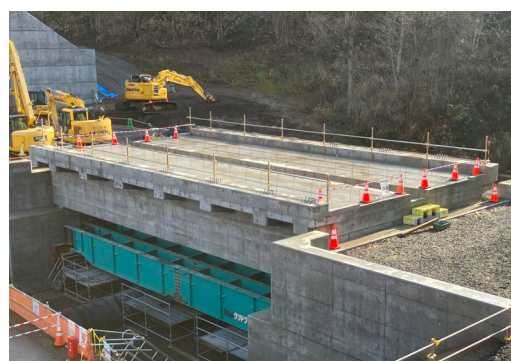


写真-7 施工完了後の構造物の全景

- 8) ト工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.820-825, 2022
- 9) コンクリートライブラリー151, 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計・施工指針, 土木学会, 2018.9
- 河野政典: 周辺環境に配慮した現場後添加型高流動コンクリートの実用化, 日本建設機械施工協会誌, vol.70, No.4, pp.26-32, 2018