

振動締固めを行うコンクリートへの流動解析技術の適用に関する研究

横山 卓之*1・西脇 敬一*2

概 要

近年、コンクリート工事では、施工計画段階におけるコンクリートの流動性や打込み方法の選定において、施工実験にかかるコストや時間の削減を目的として流動解析技術の適用が検討されている。しかしながら、振動締固めを行う通常のコンクリートを対象とした流動解析に関する検討例は少ない。そこで、本研究では、振動締固めを行うコンクリートへの流動解析技術の適用性について、実験室および実構造物レベルでの検討を行った。その結果、パイプレータからの距離に応じてコンクリートの流動特性を変化させることで、振動締固めの影響を考慮した流動解析が可能であることが確認された。

キーワード：流動解析，振動締固め，VOF 法，レオロジー定数

A STUDY ON USING FLOW ANALYSIS TECHNOLOGY FOR VIBRATINGLY COMPACTED CONCRETE

Takayuki YOKOYAMA *1, Keiichi NISHIWAKI *2

Abstract

In recent years, for concrete placement work, the technology of concrete flow analysis has been examined with the aim of reducing the cost and time of construction tests when selecting the concrete's flowability and pouring method during the construction planning stage. However, there has been little research on the flow analysis of normal concrete placed under vibration. Therefore, this study looked into the applicability of flow analysis techniques for concrete which is vibrantly compacted, by conducting tests in the lab and on actual structures. As a result, it is confirmed that by changing the flow characteristics of the concrete depending on the distance from the vibrator, it is possible to perform flow analysis that takes into account the effects of vibrating compaction.

Keywords: Flow analysis, Vibrating compaction, VOF method, Rheology constants

*1 Material Group, Research & Development Center

*2 Manager, Material Group, Research & Development Center

振動締固めを行うコンクリートへの流動解析技術の適用に関する研究

横山 卓之*1・西脇 敬一*2

1. はじめに

近年、コンクリート工事では、配筋の過密化や形状の複雑化などが進み、施工計画段階において経験則に基づき充填性を判定することが困難となる事例が増加している。このような場合、施工前に実大規模のモックアップ等による打設実験の実施により、コンクリートの流動性や打込み方法の選定することが多く、多大な時間とコストを要しているのが現状である。

この問題を解決するため、対象とする構造物をモデル化し、コンクリートの流動状況や充填状況をシミュレーションする流動解析技術の適用が検討されている¹⁾。本技術が適用できれば、施工計画段階において、様々な配合や施工条件でシミュレーションを行うことで、最適なコンクリートの流動性や、筒先の位置や打込み速度等の最適な打込み方法を選定することが可能になると考えられる。また、施工前に充填が難しい部位を抽出し、施工時に重点的に管理を行うことで、充填不足のような不具合の発生リスクの低減にも寄与できると考えられる。しかしながら、バイブレータによって振動締固めを行う通常のコンクリートを対象とした流動解析手法については、報告例^{2),3)}が少ないのが実状である。

このような背景のもと、本研究では、連続体モデルの差分法のうち、コンクリートと空気の界面を計算する手法であるVOF (Volume of Fluid) 法を用いて、振動締固めを行うコンクリートへの流動解析技術の適用性を検討した。

具体的には、①振動締固めの影響を考慮する流動解析手法の検討(STEP1) ②実験室レベルでの流動解析手法の検証(STEP2) ③実構造物を対象とした流動解析手法の検討(STEP3) の3段階に

分けて検討を行った。

2. 振動締固めの影響を考慮する流動解析手法の検討(STEP1)

2.1 検討概要

STEP1では、流動解析において、振動締固めによるコンクリートの流動特性や変形特性を表す指標であるレオロジー一定数の変化を考慮する手法を整理することを目的とした。室内実験によって振動締固めの影響範囲などを確認し、流動解析手法の検証を行った。実験は、ボイド管をスランブコーン代わりに使用したスランブ実験(以下、ボイド管実験と称す)とした。

2.2 実験概要

ボイド管実験の状況を写真-1、手順を図-1に示す。ボイド管の寸法は、 $\phi 50\text{cm}$ 、高さ35cmおよび $\phi 60\text{cm}$ 、高さ35cmの2種類とした。実験では、ボイド管に試料を2層に分けて詰め、上面を均した後、自重による変形を確認するため、ボイド管を3秒程度で引き上げコンクリートの高さおよびフローを測定した。その後、振動による変形を確認するため、 $\phi 50\text{mm}$ のバイブレータを中心部に底板から5cmの高さに挿入し、目視でフローの増大がないと判断された8秒間の加振を行った後、改めてコンクリートの高さおよびフローを測定した。ボイド管実験は、各ボイド管寸法で2回行った。実験に供したコンクリートの配合を表-1に示す。なお、実験時のJISA 1101によるスランブは15.0cmであった。

2.3 解析概要

今回の解析では、コンクリートを粘弾塑性の均一流体としてモデル化することとした⁴⁾。振動締固めを行う前、すなわち加振をしていない状態の

*1 建設技術総合センター 研究開発センター 材料グループ

*2 建設技術総合センター 研究開発センター 材料グループ グループリーダー

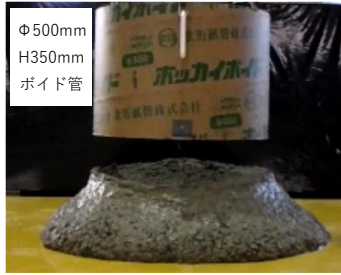
写真-1 ボイド管実験
の実施状況

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
		W	C	S	G	Ad
51.8	48.0	170	328	844	942	3.28

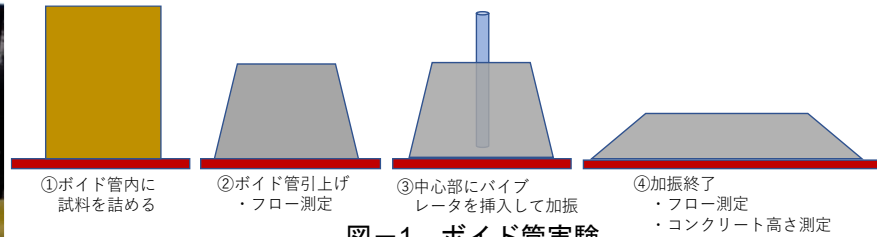
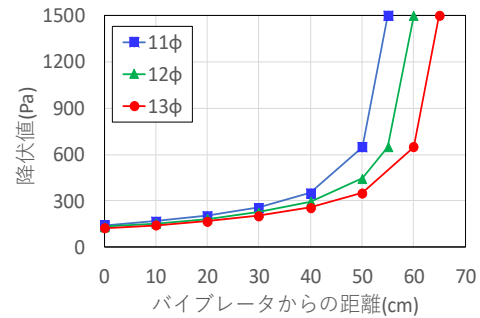


図-1 ボイド管実験

表-2 解析ケース

解析 ケース	ボイド管 (cm)	加振による 影響範囲の設定値
1	φ 50	11 φ (半径55cm)
2		12 φ (半径60cm)
3		13 φ (半径65cm)
4	φ 60	11 φ (半径55cm)
5		12 φ (半径60cm)
6		13 φ (半径65cm)

図-2 バイブレータからの距離に
応じた降伏値の設定値

コンクリートのレオロジー定数は、スランプ試験とその解析結果から、降伏値 1,500Pa、粘度 100Pa・s に設定した。

一方、加振時は、バイブレータの振動による加速度がコンクリートを伝播し液状化して流動する。既往の研究⁵⁾では、この加速度はバイブレータから距離が離れるほど減衰し、式(1)で表されることが報告されている。

$$\alpha_x = \alpha_0 \left(\frac{1}{x} \right)^n \cdot \exp(-\beta x) \quad (1)$$

α_x : 振動機から距離xにおけるコンクリートの応答加速度(G)
 α_0 : 振動機の位置における仮想応答加速度(G)
 x : 振動機からの距離(cm)
 n : 幾何学係数
 β : 材料減衰係数

また、その式から、降伏値が式(1)の加速度に応じて変化すると考え、バイブレータからの距離毎に降伏値を算出するための式(2)が提案されている²⁾。

$$\tau_x = \tau_y \left(\frac{1}{D\varphi - x} \right)^n \cdot \exp(-\beta(D\varphi - x)) \quad (2)$$

τ_x : 振動機から距離x(m)における降伏値(Pa)
 τ_y : 加振をしていない状態での降伏値(Pa)
 D : 加振による影響範囲 (φに対する倍数)
 φ : 振動機の直径(m)

コンクリートが加振によって影響を受ける範囲は、バイブレータから半径でバイブレータ径の10～13倍程度との報告^{2),5)}がある。そこで、今回の検討では、加振による影響として加速度や影響範囲がこれらに従うと考え、バイブレータからの距離に応じてレオロジー定数のうち降伏値を変

化させることで締固めの影響を再現することとした。

解析ケースは表-2に示すように、ボイド管の径2ケースとバイブレータの加振による影響範囲3ケースの計6ケースとした。なお、加振の影響範囲については、バイブレータ径(φ50mm)の11倍、12倍および13倍を設定した。また、バイブレータからの距離に応じた降伏値は、加振による影響範囲の設定値毎に式(2)から算出される図-2に示す値とした。なお、加振による影響範囲外では、降伏値を1,500Pa一定とした。

2.4 解析手法の検証

解析結果の検証は、加振前と加振後の各段階でフローおよびコンクリート高さを比較することで行った。

ボイド管実験の結果を表-3に、解析結果を表-4に示す。加振前のフローは、ボイド管φ50cmで実験値 92.0cm に対して解析値 89.0cm となった。またボイド管φ60cmでは、実験値 98.5cm に対して解析値 97.5cm となり、解析値は実験値と概ね一致する結果であった。さらに図-3に示すように、外観形状も解析と実験ではほぼ一致した。これより、加振をしていない状態でのレオロジー定数は、概ね妥当であると考えられる。

一方、解析における加振後のフローは、影響範

囲の設定値によって異なり、影響範囲の拡大に伴い大きくなることが確認された。今回の設定値の範囲では、解析値のフローは、影響範囲をバイブレータ径の13倍とした場合に実験値に最も近く、実験値に対して±5%の範囲となった。また、加振後のコンクリートの高さについてもバイブレータ径の13倍とした場合とほぼ一致することが確認された。図-4に加振後の外観形状を示す。加

表-3 ボイド実験の結果

ボイド管 (cm)	実験 No.	加振前		加振後			
		フロー (cm)		フロー (cm)		コンクリート 高さ (cm)	
			平均		平均	平均	
φ 50	1回目	95.0	92.0	112.0	111.0	8.0	8.0
	2回目	89.0		110.5		8.0	
φ 60	1回目	101.5	98.5	128.0	130.0	9.0	9.0
	2回目	95.5		132.0		9.0	

表-4 解析結果

ボイド管 (cm)	加振前	加振後			
	フロー (cm)	加振による 影響範囲の 設定値	フロー(cm)		コンクリート 高さ (cm)
			解析値 実験値		
φ 50	89.0	11 φ	105.0	0.95	9.5
		12 φ	111.0	1.00	8.5
		13 φ	116.0	1.05	8.5
φ 60	97.5	11 φ	115.0	0.88	11.5
		12 φ	119.0	0.92	11.0
		13 φ	124.0	0.95	9.5

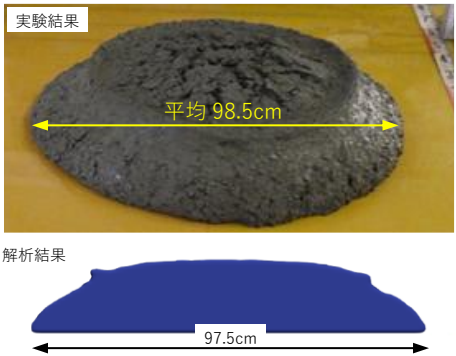


図-3 加振前の外観の一例
(ボイド管φ60cm)

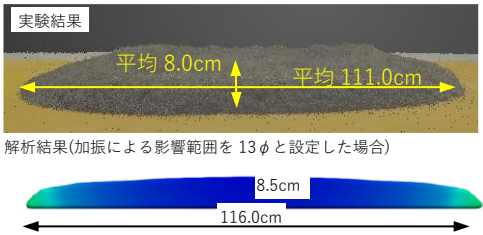


図-4 加振後の外観の一例
(ボイド管φ50cm, 影響範囲13φ)

振後の形状も解析と実験がほぼ一致する結果であった。これらより、当該手法によって振動締固めの影響を流動解析で再現し、考慮できることが確認された。

3. 実験室レベルでの流動解析手法の検証 (STEP2)

3.1 検討概要

STEP2では、鉄筋が配置された小型型枠内に打ち込んだコンクリートを対象として、型枠近傍に配置した鉄筋に対するコンクリートの通過性および充填状況を、自重および振動締固めの条件下で検証することを目的とし、室内実験および流動解析を実施した。

3.2 検討対象

実験方法は、図-5の仕切り板の右側のA室(幅50cm×奥行き50cm×高さ50cm)にコンクリートを2層に分けて詰めた後、仕切り板を4秒間程度で引き上げ、自重によってB室に流動させた。その後、φ50mmのバイブレータ(振動部長さ385mm)を図-5に示す位置に設置し、目視で充填状況に変化がみられないと判断されるまで4秒

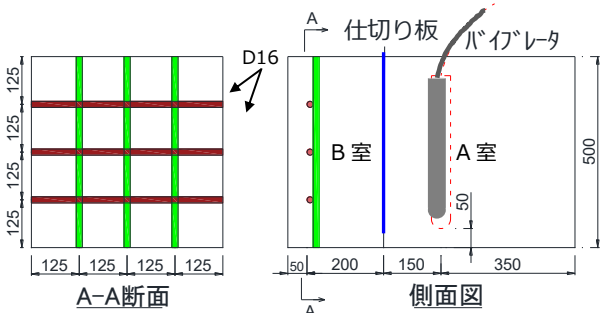


図-5 小型型枠の概要図

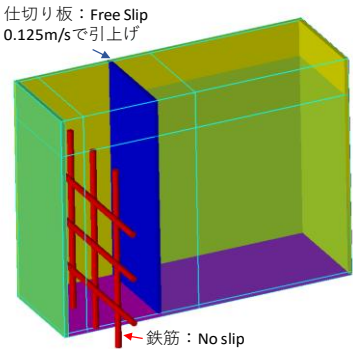


図-6 解析モデルの概要図

間加振を行った。

検討ケースは、スランプを変化させた 2 ケースとした。ケース 1 ではスランプを 20.5cm に設定し、充填実験と流動解析の比較から振動締固めの影響を、また、ケース 2 では、スランプを 15.0cm に設定し、スランプの違いによる流動や充填状況の差異を流動解析で評価可能であることを確認することとし、流動解析のみを実施した。

3.3 解析概要

解析モデルは、図-6 に示すように対称性を考慮して 1/2 モデルとし、鉄筋を円柱状でモデル化した。コンクリートのレオロジー定数は、ケース 1 でスランプ 20.5cm に対応する降伏値 620Pa、ケース 2 でスランプ 15.0cm に対応する降伏値 1,500Pa と設定した。

加振による影響範囲は、STEP1 の検討結果から水平方向にはバイブレータ径の 13 倍まで、鉛直方向にはバイブレータがコンクリート中に入るため、既往の研究⁹⁾を参考として、バイブレータの振動体の上下端からそれぞれ 10cm の範囲とし、図-7 のように設定した。

3.4 解析結果の検証

ケース 1 の仕切り板を引き上げた段階(加振前)でのコンクリートの充填状況を図-8 に示す。コンクリートの充填状況は、解析結果と実験結果で類似していることが確認できた。よって、加振前のコンクリートのレオロジー定数は、概ね妥当であると考えられる。また、図-9 に示すように加振後の充填状況も解析結果と実験結果は、類似していることが確認できた。なお、目視で充填状況に変化がみられなくなるまでの時間は、実験、解析ともに 2~3 秒程度であった。

ケース 2 の解析結果を図-10 に示す。加振前の充填状況は、ケース 1 とケース 2 で差異が見られ、スランプが小さいケース 2 は、ケース 1 に比べて鉄筋の間隙を通過し前面の型枠に到達するコンクリートが少ないことが確認できた。また、いずれのケースも前面の型枠までが加振による影響範囲内となるため、加振後は充填状況に大きな差違は見られず、いずれも完全に充填されているこ

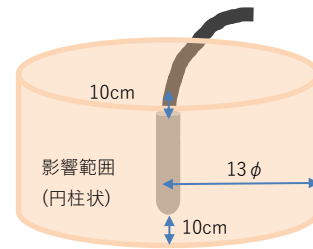


図-7 影響範囲の概要図

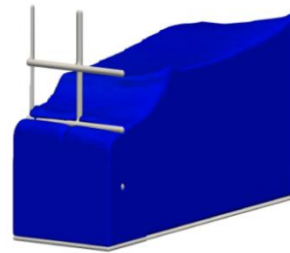


図-8 ケース 1 の加振前の充填状況
(上：解析結果，下：実験結果)

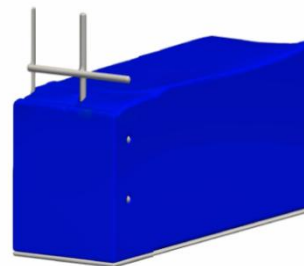


図-9 ケース 1 の加振後の充填状況
(上：解析結果，下：実験結果)

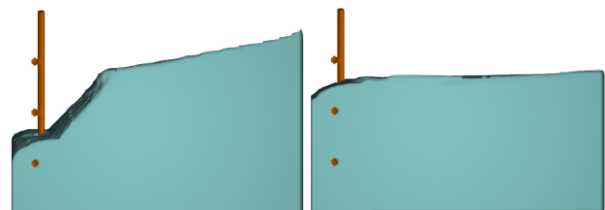


図-10 ケース 2 の解析結果
(左：加振前，右：加振後)

とが確認できた。これらより、スランプの違いで自重による流動や充填状況が異なること、また加振によってコンクリートが流動する状況が概ね再現され、当該手法によって鉄筋が配置された小型型枠内でも振動締固めの影響を考慮可能であることが示された。

4. 実構造物を対象とした流動解析手法の検討 (STEP3)

4.1 検討概要

STEP3 では、STEP1 と STEP2 の結果をもとに、実橋の PC 箱桁橋を対象とした実構造物レベルでの流動解析手法の検証を目的とした。実構造物の打設と同様に、2 層に分けて打込み、締固めを行う場合と、高流動コンクリートを使用した場合を想定して解析を行った。

4.2 検討構造物と対象部位

当該 PC 箱桁橋は、図-11 に示すようにウェブ部の厚さが 350mm と薄く、下方にはφ87mm のシース管が配置されている。このため、ウェブの下方では、充填不良を生じやすく、適切な流動性や締固め方法を選定することが重要となる。そこで、当該部位について、水平方向 1,380mm、奥行

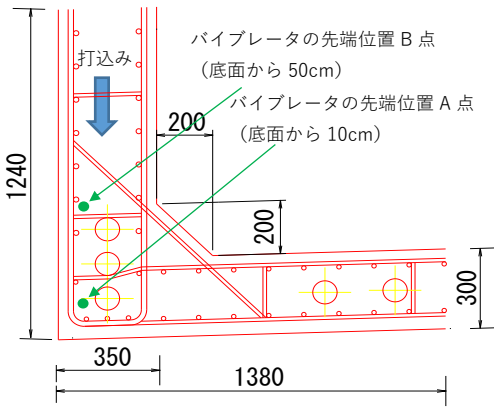


図-11 PC 箱桁道路橋のウェブと下床版の概要

表-5 解析ケース

解析 ケース	流動性	締固めの有無 と締固め位置
ケース1	スランプ15cm	あり、A点
ケース2	スランプ15cm	あり、B点
ケース3	スランプフロー60cm	なし

き方向は、パイプレータの挿入間隔から 500mm を流動解析の対象範囲とした。

4.3 解析概要

鉄筋やシースは、3D の CAD データを元に円柱形状としてモデル化した。

解析ケースは、流動性や締固め方法の違いによる充填状況の差異を確認するため、表-5 に示す 3 ケースとした。コンクリートのレオロジー定数は、STEP1 の結果から、設定した流動性となる場合の降伏値と塑性粘度を算出し表-5 のように設定した。締固めは、φ50mm のパイプレータを使用し、加振による影響範囲は STEP2 と同様に図-7 のように設定した。

打込みは、高さ 50cm の位置から自由落下させる方法で 1 層の打込み量を 0.06m³ として 2 回に分けて行った。締固めは、ケース 1 では、1 層目と 2 層目の各打込み後に図-11 の A 点をパイプレータの先端位置として 10 秒間、ケース 2 では、2 層目の打込み後に B 点で 10 秒間行った。なお、ケース 3 は、スランプフロー60cm で自己充填型の高流動コンクリートを 2 層に分けて打ち込む場合を想定し、締固めは行わない条件とした。

4.4 解析結果の検証

ケース 1 の 1 層目の打込み完了時および A 点での締固め後の解析結果を図-12 に示す。スラン

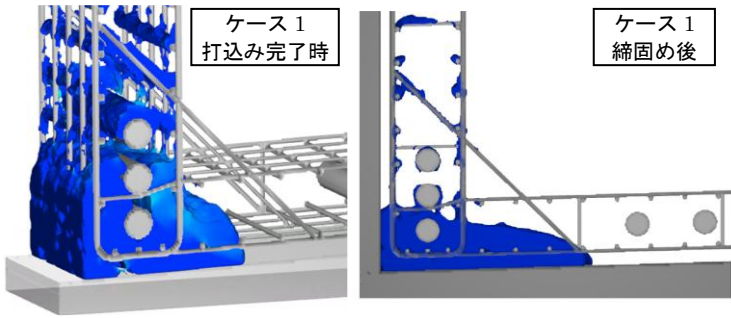


図-12 ケース 1 の 1 回目の打込みおよび締固め後の解析結果

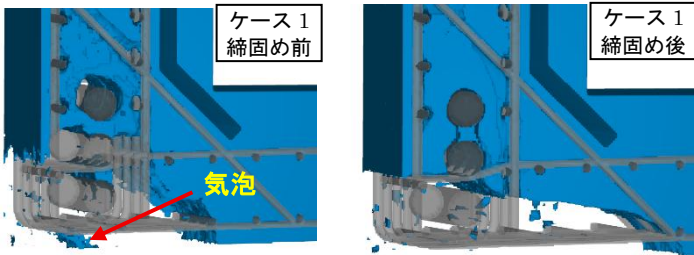


図-13 ケース 1 の締固め前後の内部の空隙 (図-12 の反転図)

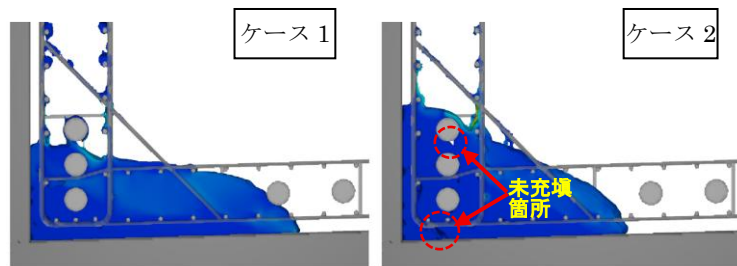


図-14 2層目の打込み、締固め後の解析結果

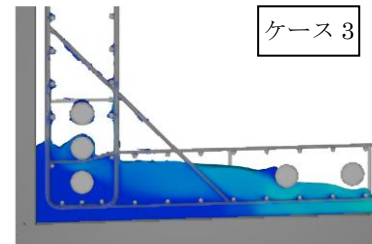


図-15 ケース3の2層目の打込み後の解析結果

プ15cmのケース1は、打込み完了時点では、山状に堆積し、側部の型枠面にも空隙が確認されることがわかった。その後、A点で締固めを行うことで下方向および型枠下面上を流動し充填されることが確認された。また、締固め前後の内部の空隙の変化を図-13に示す。締固め前は、鉄筋下に比較的大きな気泡が存在したが、締固め後は外部に排出されることが確認された。

ケース1とケース2の2層目の打込み、締固め後の解析結果を図-14に示す。ケース1では、1層目の打込み時と同様に下方のA点で締固めを行うことで、シース管の周りや底面部においてコンクリートが確実に充填されることが確認された。一方、ケース2では、上方のB点のみで締固めを行ったため、シース管の周りや底面部の一部に未充填箇所が生じることが確認された。

ケース3の2層目の打込み後の解析結果を図-15に示す。ケース3は、流動性が大きいいため、自重によってシース管や鉄筋の周りに自己充填されることが確認された。また水平方向には対象範囲の先端まで流動することが確認された。

これらの結果から、実構造物においても、当該手法によって、振動締固めを行うコンクリートの型枠内での流動や充填状況について、シミュレーション可能であることが確認された。

5. まとめ

振動締固めによる流動特性（レオロジー定数）の変化に着目して、振動締固めを行うコンクリートへの流動解析技術の適用性を検討した。その結果、実験室レベルの検討では、バイブレータからの距離に応じてレオロジー定数の降伏値を変化

させることで締固めの影響を再現可能であることが確認された。

また、実構造物レベルの検討では、締固め位置の違いによって流動や充填状況に顕著な違いが認められ、振動締固めを行うコンクリートへの流動解析技術の適用が可能であることが示された。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会，コンクリートの確実な施工のためのPDCAサイクル研究委員会報告書，2016.9
- 2) 浦野真次，根本浩史，山田義智，崎原康平：締固めを行うコンクリートの充填性評価への流動解析手法の適用に関する研究，土木学会論文集E2，Vol.73，No.2，pp.179-190,2017
- 3) 今井遥平，長谷川高士，浦野真次，中島航：PC箱桁橋の高密度配筋箇所における充填シミュレーションおよびこわばり低減剤の適用ー東根川橋ー，コンクリート工学，Vol.59，No.4，pp.329-334，2021.4
- 4) 中村知博，西脇敬一，土井至朗：高流動コンクリートの流動シミュレーションに使用する粘弾塑性物性値の推定，土木学会第73回年次学術講演会，V-607，2018.8
- 5) 村田次郎：コンクリート振動機の知識，コンクリート工学，Vol.33，No.8，pp.26-34，1995.8
- 6) 神代泰道，金子智弥：コンクリートの締固め状況の可視化に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.37，No.1，pp.1201-1206，2015.7