

高流動コンクリートの水中打設実験に関する流動解析の検討

東洋建設(株) 正会員 ○高淵 稔貴, 森田 浩史, 竹中 寛, 酒井 大樹, 増田 和輝
東洋建設(株) 岸本 豪太

1. はじめに

近年、コンクリート施工において、労働人口減少等の観点から生産性向上が求められている。コンクリートの流動解析を行い、施工時の流動特性を事前に把握することは、大規模な施工実験の省略や構造物に生じる瑕疵低減に有効である。また、水中部に打ち込むコンクリートなど、施工状況の目視確認が困難な場合での活用が期待できる。コンクリートの流動解析は、コンクリートのスランプ試験等の結果を解析的に同定した事例¹⁾もあるが、水中部の打ち込みを検討した事例²⁾は少ない。本検討では、スランプフロー（以下、SLF）試験を解析的に同定して得られたコンクリートのレオロジー定数を用いて高流動コンクリートの水中部での適用を指向した打設実験の三次元数値流体解析（以下、流動解析と称する場合がある）を行った。打設実験の実測値と解析の結果（以下、解析値）を比較し、その結果について述べる。

2. 実験の概要

コンクリートの使用材料および配合を表-1, 2 に示す。打設実験に使用した型枠は延長 L:5.0m×幅 B:0.6m×高さ H: 0.9m の箱状とし、型枠内は上水道で満たし、水中下での打込みを模擬した。また、打込みはコンクリートポンプ車にて行い 20m³/h 程度の速度で型枠端部から片押しで圧送した。筒先位置は水中落下しない高さで固定し、打設高さの計測を 5 ストロークごとに行い、ポンプ車のストローク回数で 15 回に到達した時点で終了した。コンクリートの仕様および計測項目をおよびコンクリートの受入れ試験の結果を表-3, 4 に示す。

3. 流動解析の概要

流動解析は、三次元数値流体解析ソフト(Ansys Fluent 2023 R1)を用いた。流動に関する基礎方程式は Navier-Stokes 方程式であり、粘性項は、非ニュートン流体（ビンガム流体）に用いられる Hershel-Bulkley モデルに流動状態と不動状態の境界に当たる臨界せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}_c$ をパラメータとして与えた式(1), (2)を用いた。式(1)は、 $\dot{\gamma} > \dot{\gamma}_c$ の場合にべき乗則流体として流れ、式(2)は、 $\dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_c$ の場合に剛体物質として非常に粘性の強い流体に近い挙動を示す。

$$\eta = \frac{\tau_y}{\dot{\gamma}} + k\dot{\gamma}^{n-1} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{\tau_y(2 - \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_c})}{\dot{\gamma}_c} + k(\dot{\gamma}_c)^{n-1} \left[(2-n) + (n-1) \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_c} \right] \quad (2)$$

ここに、 μ : 粘度 (Pa・s), $\dot{\gamma}$: セン断ひずみ速度 (1/s), τ : セン断応力 (Pa), k : 粘稠度指数, n : ベキ乗則指数 ($n=1$), $\dot{\gamma}_c$: 臨界セン断ひずみ速度 (1/s)

また、自由表面流れはVOF法を用いた。解析に入力した主なパラメータを表-5に、解析モデルの条件を表-6に示す。解析に使用したPCのCPUは、intel corei9 10940X(14コア)であり、並列計算を12コアで実施した。

解析モデルの概要を図-1, 図-2 に示す. SLF 試験のモデルは, スランプコーンの引き抜きを再現せず, 計算開始直後にモルタ

表-1 コンクリートの使用材料

使用材料	種類	備考
セメント:C	普通ポルトランドセメント	密度 3.15g/cm^3
細骨材 :S1	陸砂	茨城県神栖市産，表乾密度 2.59g/cm^3 粗粒率2.30
細骨材 :S2	砕砂	栃木県佐野市産，表乾密度 2.63g/cm^3 粗粒率3.30
粗骨材 :G	砕石2005	茨城県土浦市産，表乾密度 2.68g/cm^3 実積率58.0%
混和剤 :Ad	増粘剤含有 高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物と 増粘性高分子化合物の複合体

表-2 コンクリートの配合

	W/C (%)	s/a (%)	單位量(kg/m ³)					
			W	C	S1	S2	G	Ad
VSP50	45.0	49.8	175	389	594	258	885	4.28

表-3 コンクリートの仕様・計測項目

計測項目	仕様	試験・計測方法
スランプフロー	50±7.5cm	JIS A 1150
空気量	4.5±1.5%	JIS A 1128
コンクリート温度	-	JIS A 1156
打設高さ	-	メジャーにより1mm単位で 流動距離0.5mごとに計測

表-4 コンクリートの受入れ試験の結果

	SLF (cm)	SLF50cm 到達時 (sec)	SLF 停止時間 (sec)	空気 量 (%)	コンクリート 温度 (℃)
VSP50	54.0	3.36	7.78	3.8	23

表-5 解析に用いたパラメータ

項目			単位	入力値
コンクリートの密度			kg/m ³	2301
コンクリートの 粘性パラ メータ	降伏値	τ_0	Pa	解析により 同定
	塑性粘度	k	Pa・s	
	臨界せん断ひずみ速度	$\dot{\gamma}_c$	1/s	
SLF試験モデル	空気 の 密度		kg/m ³	1.225
	空気 の 粘度		Pa・s	1.7894×10^{-5}
	解析対象時間		s	8
打設実験モデル	水 の 密度(20℃)		kg/m ³	997.8
	水 の 粘度(20℃)		Pa・s	1.053×10^{-3}
	解析対象時間		s	2040

表-6 解析モデルの条件

項目	SLF試験モデル	打設実験モデル
勾配の計算スキーム	Least Square Cell Based	
圧力の補間	Body Force weighted	
運動量の風上差分	Second Order Upwind	
圧力と速度の連成	PISO法	
時間積分	1 次精度オイラー法	
最大時間刻み幅(s)	0.1	1.0
最小時間刻み幅(s)	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}
格子間隔	5mm	20mm(打設点から1mまで) 50mm(打設点から1m以降)
要素数	2,415,112	271,920
節点数	2,466,027	294,683

キーワード 流動解析, ビンガム流体, スランプフロー試験, レオロジー特性, 高流動コンクリート
連絡先 〒300-0424 茨城県稲敷郡美浦村受領 1033-1 東洋建設(株) 美浦研究所 TEL 029-885-7511

ルの流動が開始するダンプレイク方式としてパラメトリック解析を行った。また、解析の終了はフロー停止時間が7.78秒であることを参考に流動開始から8秒後に設定した。打設実験のモデルは、幅方向を1/2とした面対象のモデルとし、水中打設を模擬した。また、図中に示すとおり、ポンプ圧送の筒先をモデル化することで、筒先からの打設を再現した。後述するSLF試験のモデルで同定して得られたレオロジー定数を入力した。なお、両モデルともに解析における壁面の境界条件は非すべり条件とした。

4. 結果および考察

SLF試験のモデルで同定して得られたレオロジー定数を表-7に、SLFの試験の実測値と解析値の比較を図-3に示す。図より、流動初期(0.5秒~4秒)の間は実測値よりも解析値の方がやや大きくなる傾向を示すが、4秒以降は実測値と解析値が概ね同等となることを確認した。打設実験の実測値と解析値の比較を図-4に示す。各ストローク時点での線形近似により求めた流動勾配を表-8に示す。図表より両者ともに水平方向の到達位置および打設高さは概ね同等となることが認められ、解析により各ストローク時におけるコンクリートの流動形状をよく捉えていることが分かる。また、解析値の流動勾配は、実測値の流動勾配よりも、5、10ストロークではやや緩やかとなる傾向を示すが、15ストロークでは徐々に実測値の流動勾配に近づく傾向となった。

以上のことから、パラメトリック解析で同定した得られたレオロジー定数を打設実験モデルに入力することで、水中下における高流動コンクリートの流動状況をおおよそ再現できることを確認した。しかしながら、表-9に示す実測値と解析値の差(以下、絶対誤差)から、各ストローク回数におけるは一樣ではなく、流動距離0mと流動した先端部分での絶対誤差が大きい傾向であり、最大で±6cm程度の絶対誤差を含む解析であったことが分かる。これの要因として、解析でのコンクリートは均質な流体として見なされているのに対し、実際のコンクリートは骨材同士の物理的接触およびセメントの水和や凝集による時間的な変化によってレオロジー定数そのものが一定ではないためと推察される。また、本検討で用いたレオロジー定数はパラメトリック解析により同定した見かけの値であるため、回転粘度計等の測定手法で得られたレオロジー定数と比較検討することにより、コンクリートの流動状況をさらに精度良く再現することが可能となると考えられる。

5. まとめ

コンクリートの三次元数値流体解析について、パラメトリック解析により同定したレオロジー定数により水中下の高流動コンクリートの流動状況をおおよそ再現できた。一方で、骨材同士の物理的接触およびセメントの水和や凝集による時間的な変化によるレオロジー定数の経時変化や解析により同定したレオロジー定数の精度の検証については今後精度向上を図る必要がある。

参考文献

1) 浦野真次, 根本浩史, 崎原康平: 高流動コンクリートの充てん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, Vol68, No.1, pp.38-48, 2012.

2) 森田浩史, 清水幸三, 泉田城史, 小沼健人, 竹中寛, 水谷征治, 猿橋正晃: 海底設置型フラップゲート式可動防波堤に用いたコンクリートの長距離圧送試験と水中流動性, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol77, No.2, I_529-I_534, 2021.

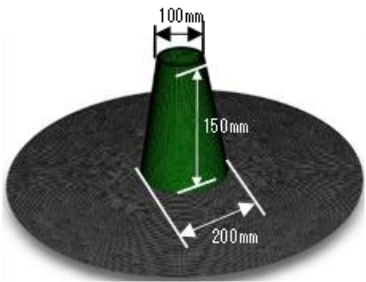


図-1 SLF試験のモデルの概要

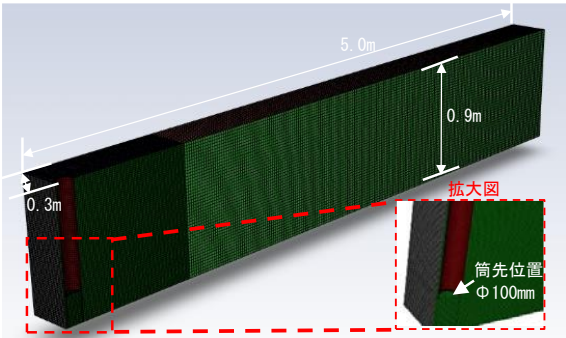


図-2 打設実験のモデルの概要

表-7 同定した粘性パラメータ

	記号	単位	同定した値
降伏値	τ_0	Pa	80
塑性粘度	k	Pa・s	20
臨界せん断ひずみ速度	$\dot{\gamma}_c$	1/s	0.2

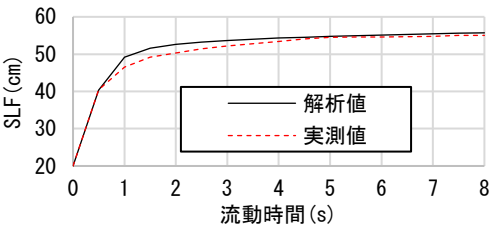


図-3 SLF試験の実測値と解析値の比較

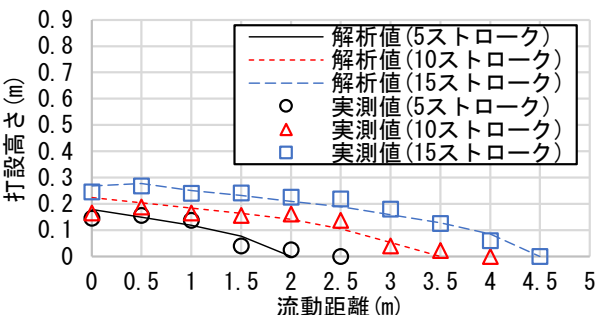


図-4 施工実験の実測値と解析値の比較

表-8 各ストローク時における流動勾配

	流動勾配	
	解析値	実測値
5ストローク時	-0.0857	-0.0693
10ストローク時	-0.0615	-0.0474
15ストローク時	-0.0558	-0.0536

表-9 各流動距離における絶対誤差

打設点からの流動距離	絶対誤差(cm)										
	0m	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m	2.5m	3.0m	3.5m	4.0m	4.5m	5.0m
5ストローク時	3.3	-0.6	-1.9	3.7	-2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10ストローク時	5.9	1.6	1.8	0.9	-2.0	-3.3	1.3	-2.3	0.0	0.0	0.0
15ストローク時	2.2	1.0	1.1	-0.8	-1.6	-2.9	-2.1	0.3	2.5	0.0	0.0
平均値	2.9	0.5	0.3	1.0	-1.5	-1.6	-0.2	-0.5	0.6	0.0	0.0