

## 論文 地下連続壁のコンクリートの充てん予測に関する基礎的研究

吉岡靖司\*1・浦野真次\*2・橋本親典\*3・辻 幸和\*4

**要旨:** 高い流動性と高度の施工管理が必要である地下連続壁のコンクリートの充てん状況を予測する解析方法を検討するために、フレッシュコンクリートの物性を6種類に変化させた溝壁内のコンクリートの充てん状況に関する可視化実験の結果を、名古屋大学の谷川・森らが開発した粘塑性空間要素法(VDEM法)を用いた動的2次元解析によってシミュレーションし、VDEM法の適用性を検討した。その結果、VDEM法によるトレミーからのコンクリートの流入速度、コンクリートのせん断粘性および降伏値を入力データとして適切に与えることにより、地下連続壁に打ち込まれるモデルコンクリートの充てん性状の経時変化を再現することができることが明らかになった。

**キーワード:** 地下連続壁, 可視化モデル, 粘塑性空間要素法, せん断粘性, 降伏値

### 1. はじめに

土木技術の進歩により、地下構造物の大型化・大深度化に伴い、掘削深度が100m以上の地下連続壁が施工されるようになり、高強度化あるいは高流動化など、コンクリートに対する要求品質も多様化している。地下連続壁に用いられるコンクリートは、一般にトレミー工法により打ち込まれ、締固めを行うことなく溝壁内まで充てんするための高い能力が必要とされる。また、トレミーの配置は既に打ち込まれたコンクリートへのトレミーの挿入深さが、コンクリート硬化後の品質に大きく影響すると考えられるため、地下連続壁のコンクリートに関しては一般に高度の施工管理が必要となる。しかしながら、地下連続壁の建設では、地上の構造物と異なり、溝壁内コンクリートの充てん状況を管理することが非常に困難であり、現場の熟練作業員の経験に頼らざるを得ないのが現状である。

フレッシュコンクリートの流動性や施工要因が地下連続壁の充てん状況に与える影響について定量的に評価するための一手法として、数値

解析によるシミュレーション<sup>1)</sup>やモデルによる可視化実験<sup>2)</sup>がある。

本研究では、地下連続壁に打ち込まれるフレッシュコンクリートの施工性の予測技術に関する基礎的研究として、試作した地下連続壁モデル型枠を用いたフレッシュコンクリートの可視化実験を行い、コンクリートの流動性や施工要因が充てん性に及ぼす影響と、名古屋大学の谷川・森らが開発した粘塑性空間要素法(Viscoplastic Divided Space Element Method<sup>1)</sup>、以下VDEM法と称す)を用いた動的2次元解析を試みた。フレッシュコンクリートの物性を変化させて、溝壁内のコンクリートの充てん状況に及ぼす影響を検討するために行った可視化実験の結果をVDEM法を用いた動的2次元解析によってシミュレーションし、VDEM法の適用性について検討した。

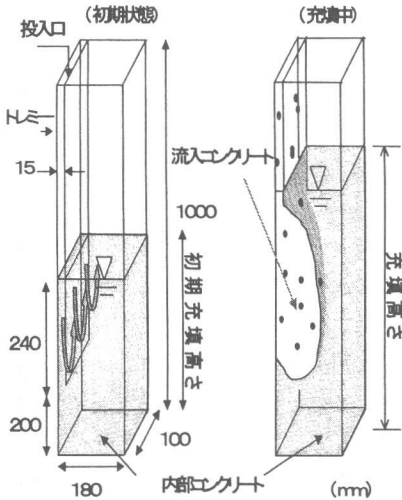
### 2. 実験概要

本可視化実験の詳細については参考文献<sup>1)</sup>に記載されているので、本論文では簡潔に記述する。

- \*1 徳島大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)
- \*2 清水建設(株) 技術研究所建設技術部 工修(正会員)
- \*3 徳島大学助教授 工学部建設工学科 工博(正会員)
- \*4 群馬大学教授 工学部建設工学科 工博(正会員)

## 2.1 地下連続壁モデル型枠流動実験装置

本研究で用いた可視化実験の地下連続壁モデル型枠における流動実験装置を図一1に示す。実験装置は、実際の1本のトレミーが受け持つ掘削溝の横幅3.0mの半分である横幅1.5mの溝壁内空間を縮尺3/25モデルとして高さ1000mm×横幅180mm×厚さ100mmの透明なアクリル樹脂の型枠である。



図一1 地下連続壁モデル型枠の寸法形状

## 2.2 モデル高流動コンクリート

各流動実験に用いたモデルコンクリートの高分子樹脂と増粘剤の添加量を表一1に示す。モデルコンクリートのコンシステンシーは、縮尺がJIS A 1101に規定するスランプコーンの1/2のスランプコーンを用いたミニスランプフローと、試作したK漏斗による流下時間によって評価した<sup>2)</sup>。河井らの研究から、実際のモルタル

表一1 モデルコンクリートの配合

No	コンクリートの種類	高分子添加量(g/l)	増粘剤添加量(g/l)
M-1	流入	3.0	2.0
	内部	3.4	2.0
M-2	流入	3.0	1.0
	内部	3.4	1.0
M-3	流入	3.5	0
	内部	4.0	0
M-4	流入	3.0	0
	内部	3.4	0
M-5	流入	2.7	2.0
	内部	2.9	2.0
M-6	流入	2.7	0
	内部	2.9	0

では、ミニスランプフローは降伏値と強い相関性があり、K漏斗流下時間にはせん断粘性と強い相関性があることが報告されており、両指標はその物理的意味が明確であると考えられる。各流動実験で用いたモデルコンクリートのコンシステンシーを表二に示す。

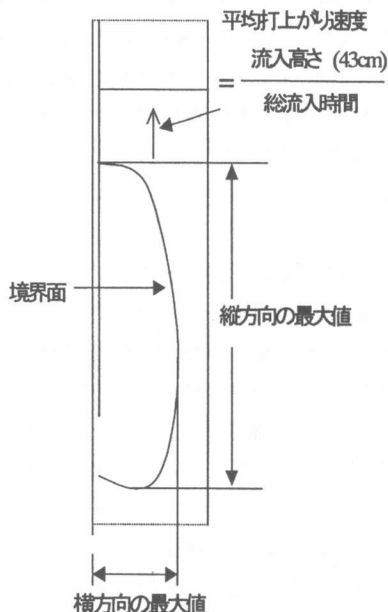
## 2.3 実験方法

トレミーの筒先位置を型枠装置底面から200mmの位置に設置し、ビデオの撮影位置を固定する。黒色化された溝壁内コンクリートをトレミーの筒先位置から240mmの位置までトレミーより型枠槽内に投入する。次に、流入コンクリートを自然落下でトレミー上部の投入口より投入する。溝壁内コンクリートが動き始めた瞬間を流動開始とし、所定の充てん高さ870mm(トレミーの挿入深さ670mm)の位置に溝壁内コンクリート上面が達した時点を実験終了時刻とする。ビデオの画像データから充てん状況

表二 モデルコンクリートのコンシステンシーおよび最終充てん形状の特性値

No	K漏斗値(s)	ミニスランプフロー(mm)	平均打上がり速度(mm/s)	縦方向の最大値(mm)	横方向の最大値(mm)
M-1	5.83	225	1.8	580	145
M-2	3.86	235	2.4	585	149
M-3	5.79	185	3.0	286	160
M-4	2.08	225	4.4	552	180
M-5	2.09	290	4.9	552	141
M-6	1.35	265	26.9	535	164

の可視化情報として、溝壁内コンクリート上面の打上がり速度および流入コンクリートと溝壁内コンクリートの経過時間に伴う境界面の形状を求めた。各流動実験で得られた最終充てん形状の物性値を表一2 に示す。なお、溝壁内に流入したコンクリートの最終形状の各特性値を図一2 に示す。



図一2 最終充てん形状の各特性値

### 3. 解析手法および解析条件

#### 3.1 解析手法

名古屋大学の谷川・森らにより開発されたVDEM法のプログラム<sup>1)</sup>を用いた。VDEM法

は、取り扱う空間を要素分割し、この空間に流入し、流動する粘塑性材料の挙動を時間前進で計算する解析手法である。本手法では、接点座標および要素の幾何学的構成は不変であり、接点に関する変位、速度、加速度の情報から、その要素内に存在する仮想の浮子であるマーカーを移動させ、フレッシュコンクリートの大変形（流動）を表現することができる。マーカーは、接点位置について解かれる流動速度による仮想の場の変形にしたがって要素間を移動する。別の要素に流入した場合には、その要素にビンガム流体の性質や材料の質量が与えられ、マーカーの存在する要素だけがコンクリートの属性を持つ。このようなステップを繰り返し、空間内にコンクリートが流入する様子が再現される。

#### 3.2 解析条件

解析は、実物大スケールで流動を再現することが可能であるが、本実験ではモデルコンクリートの可視化実験で用いた型枠を想定したものである。解析入力データとしては、トレミーからの流入速度、せん断粘性、降伏値であり、初期充てん高さ 430mm、節点数 216、要素数 368、体積弾性係数 4000(N/mm<sup>2</sup>)、体積粘性 0.0(N/mm<sup>2</sup>・sec)、密度 2.3(kg/l)は一定としている。表一3 に、各流動実験の解析に用いた入力データならびに解析によるコンクリートの充てん形状に各特性値を示す。地下連続壁モデル型枠による可視化実験の結果から得られたコンクリートの充てん状況を解析により再現した。図一3 に解析に用いたメッシュを示す。

表一3 解析入力データ及び物性値

No	せん断粘性 (N/mm <sup>2</sup> ・s)	降伏値 (N/mm <sup>2</sup> )	トレミー管内 の流速(mm/s)	縦方向の最 大値(mm)	横方向の最 大値(mm)	平均打上がり 速度(mm/s)
A-1	0.0003	0.0003	50	706	135	1.8
A-2	0.0006	0.0005	70	651	141	2.4
A-3	0.007	0.01	220	642	160	3.1
A-4	0.006	0.008	300	639	165	4.3
A-5	0.0003	0.0002	140	742	138	4.8
A-6	0.0007	0.0007	750	601	149	21.5

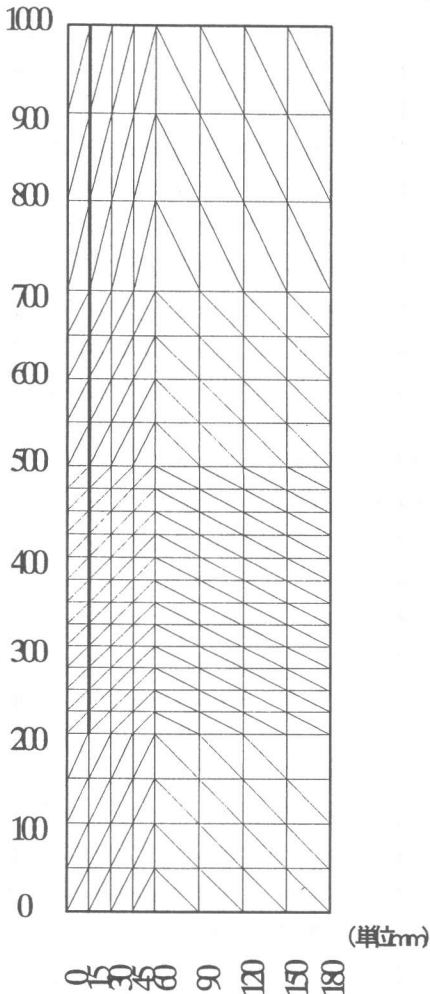


図-3 解析メッシュ

#### 4. 実験結果

各実験条件における、流入コンクリートと溝壁内コンクリートの境界面の形成状況の経時変化をそれぞれの解析結果と合わせて図-4 に示

す。いずれのケースにおいても T の線で示す境界面が実験終了時（所定の充填高さ 870mm 到達時）の形状であり、それ以外は、総流動時間を 5 等分した時間間隔ごとに得られた境界面を示したものである。

いずれの結果においても、新しく打ち込まれたコンクリートと既に打ち込まれたコンクリートは複雑に混合せず、トレミー筒先と同じ高さあるいはそれより下の位置において、新しく打ち込まれたコンクリートは最も側面方向に押し出されており、既に打ち込まれたコンクリートを側面および上下方向に押しやる状況となっている。

#### 5. 解析結果および考察

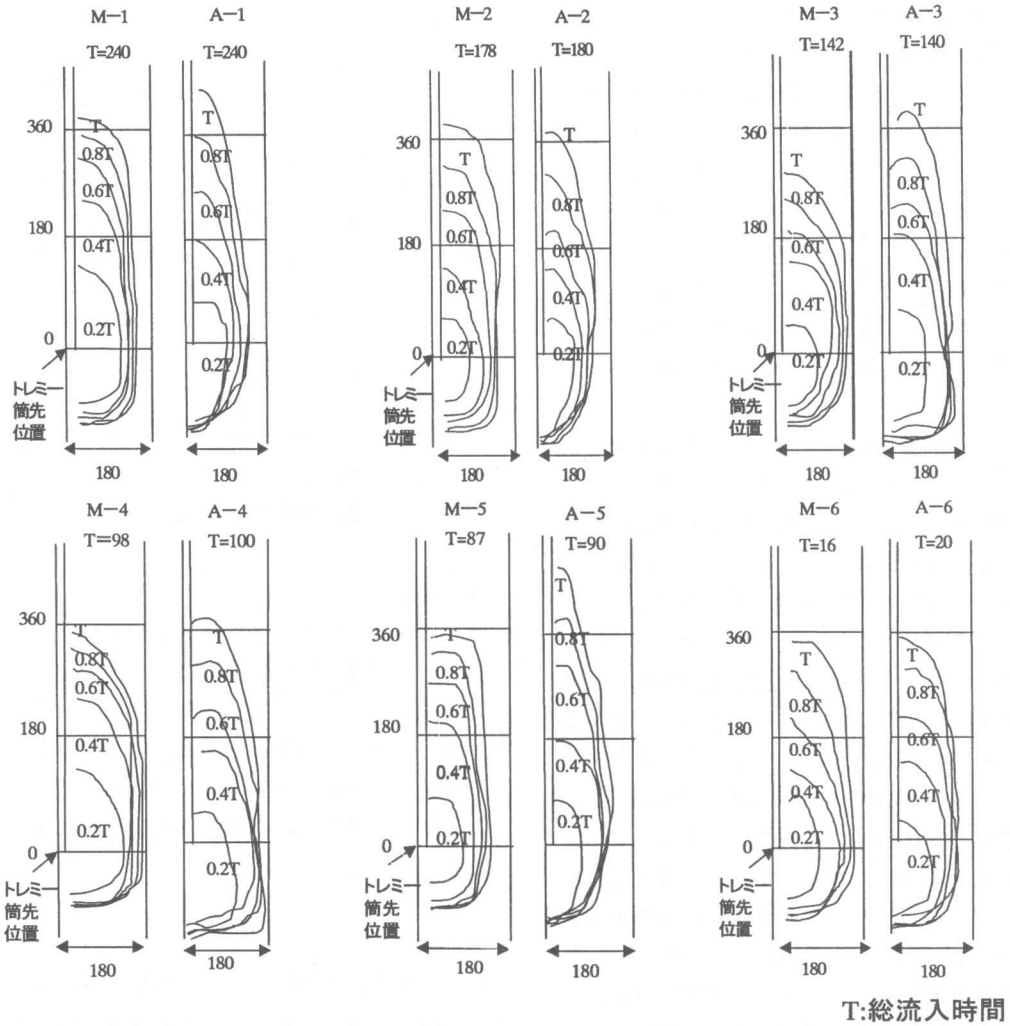
##### 5.1 コンクリートの充てん形状

図-4 に、充てん形状の経時変化に関する解析結果を、それぞれの実験結果と合わせて示す。M はモデル実験結果を示し、A は解析結果を示す。両者を比較すると、比較的精度良く一致している。

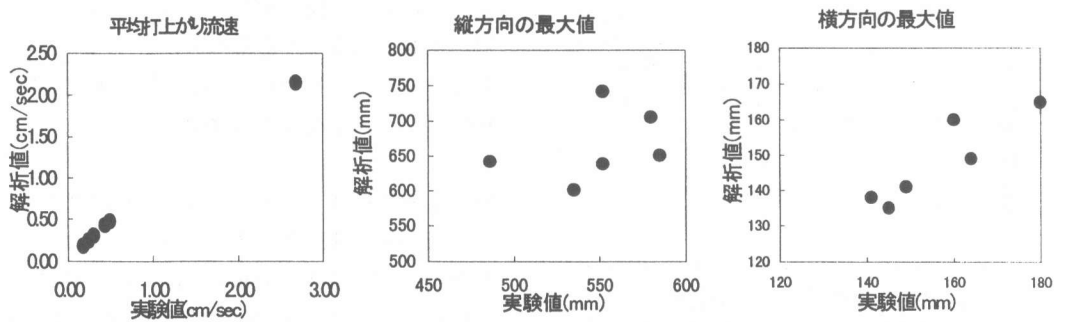
また、図-5 は、溝壁内のコンクリートの平均打上り速度と、最終時の流入コンクリートの充てん形状に関する縦方向の最大値と横方向の最大値について実験値と解析値を比較する。3つの特性値ともに実験値と解析値はほぼ 1 対 1 に対応しており、その充てん形状の経時変化とともに実験値に対して解析結果は良好な適合性を示す。

したがって、VDEM 法による地下連続壁モデル型枠の可視化実験におけるフレッシュコンクリートの流動解析方法はトレミーからの流入コンクリートの速度、せん断粘性および降伏値を適切に設定することにより、比較的精度良く流入コンクリートの充てん状況を再現することが可能である。

誌面の都合で、図-4、図-5 は次項にまとめて掲載する。



図—4 充てん形状の比較



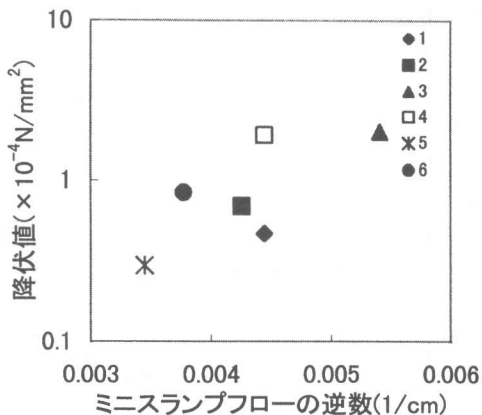
図—5 充てん形状の各特性値の実験と解析との比較

## 5.2 入力データの整合性

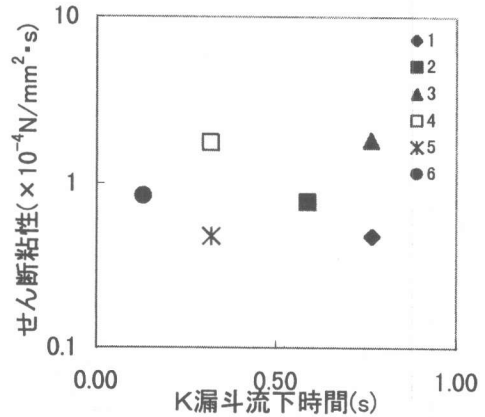
本解析方法は、コンクリートの流動状況を既知量として、充てん状況が実験と解析で一致するように入力データを決定するというある意味で、入力データの同定問題として取り扱ったものである。解析入力データのうち、せん断粘性と降伏値に関して、モデルコンクリートのせん断粘性と相関性があるK漏斗流下時間と、モデルコンクリートの降伏値と相関性があるミニスランプフローの逆数との整合性について検討する。

図一6は、解析の入力データである降伏値とモデルコンクリートのミニスランプフローの逆数の関係を示す。また、図一7は、解析の入力データであるせん断粘性とモデルコンクリートのK漏斗流下時間の関係を示す。モデルコンクリートの各特性値に対して、解析の入力データは対数表示であるため、各特性値の実験値と解析値の間に直線関係があるとは言いがたいが、少なくとも正の相関性が存在することは明らかである。一方、解析モデルにおいて定義されるせん断粘性と降伏値は、モデルコンクリートのせん断粘性と降伏値に対応していると考えられる。

よって、本モデルコンクリートの流動実験の範囲内で、VDEM法で定義されたせん断粘性と降伏値はモデルコンクリートの塑性粘度と降伏値と、ある程度の整合性を示すと判断される。



図一6 ミニスランプフローの逆数と解析に用いた降伏値との関係



図一7 K漏斗流下時間と解析に用いたせん断粘性との関係

## 6. 結論

トレミーからのコンクリートの流入速度、コンクリートのせん断粘性及び降伏値を適切に入力データとして適切な値を設定することにより、谷川・森らが開発した粘塑性空間要素法によるフレッシュコンクリートの流動解析方法はコンクリートの充てん状況の経時変化を再現することが可能である。

## 参考文献

- 1) 浦野真次, 北大路洋, 谷川恭雄, 森博嗣: 地下連続壁コンクリートの充てん状況に関する解析的研究, 土木学会高流動コンクリートシンポジウム論文集, pp.31-36, 1996
- 2) 浦野真次, 橋本親典, 加古慎, 辻幸和: 可視化実験による地下連続壁のコンクリートの充てんの評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.439-444, 1997

謝辞: 本研究の一部は、平成9年度文部省科学研究費補助金・奨励研究(A)(代表者: 橋本親典, 課題番号: 09750534)の補助により行われたものである。記して感謝の意を表す。