

論文 可視化実験による地下連続壁のコンクリートの充てん状況の評価

浦野真次*1・橋本親典*2・加古慎*3・辻幸和*4

要旨：地下連続壁内に打ち込まれるフレッシュコンクリートの充てん状況の可視化に関する新しい実験手法を提案し、フレッシュコンクリートの変形性が充てん状況に与える影響について検討した。その結果、打上がり速度とコンクリートの粘性が関係あることを確認し、コンクリートの性状により打ち込まれるコンクリートの充てん形状が影響を受けることなどを把握した。また、本実験の結果は従来の経験的な知見と一致しており、本実験方法が有効であることを確認した。

キーワード：可視化実験，地下連続壁，充てん状況，K漏斗，ミニスランプフロー

1. はじめに

トレミー工法により施工される地下連続壁用コンクリートは、締固めを行うことなく溝壁内隅々まで充てんするための流動性が要求される。また、LNG地下タンクをはじめとする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。この種のコンクリートの施工にあたっては、施工性の良否および硬化後の品質保証の観点から、充てん性状の評価が非常に重要である。一般に、地下連続壁においてはコンクリートの充てん状況を直接観察することは不可能であり、実大実験による定量的評価も簡易に行うことはできないため、各種コンシステンシー試験の組み合わせにより評価されているのが現状である。しかし、コンクリートの変形性や施工要因が充てん性に及ぼす影響については不明な点も多く、合理的に評価されているとは言い難い。

フレッシュコンクリートの変形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[1]やモデルによる可視化実験がある。本研究では、地下連続壁内に打ち込まれるコンクリートの充てん性の予測技術の確立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て[2]、フレッシュコンクリートの可視化実験手法を適用し、溝壁内に既に打ち込まれたコンクリートの中にトレミーによって流入するコンクリートの充てん状況の可視化を試みる。

2. 実験概要

2.1 地下連続壁のモデル型枠実験装置

本実験で用いた地下連続壁のモデル型枠による流動実験装置を図-1に示す。本実験装置は、図-2に示すような実際の1本のトレミーが受け持つ掘削溝の横幅（以下、エレメントサイズと称す）について、トレミー中心軸において左右対称とした半分を取り出しモデル化したものである。モデル型枠は、エレメントサイズ3.0mの半分である1.5mの溝壁内空間を3/25モデルとした高さ1000mm×

*1 清水建設(株)技術研究所建設技術研究部, 工修(正会員)

*2 徳島大学助教授 工学部建設工学科, 工博(正会員)

*3 鉄建建設(株), 工修(正会員)

*4 群馬大学教授 工学部建設工学科, 工博(正会員)

横幅180mm×高さ100mmの透明なアクリル樹脂製（A型枠と称す）である。横幅方向の縮尺のみに着目した理由は、1エレメント内のトレミー筒先周辺の空間のコンクリートの充てん状況の可視化を対象としたためである。実際の1エレメントの高さすなわち掘削深度は、数10m～100m程度にも達する

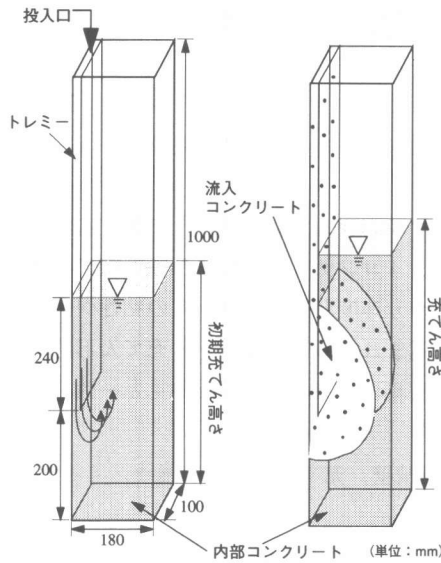


図-1 地下連続壁モデル型枠の形状・寸法

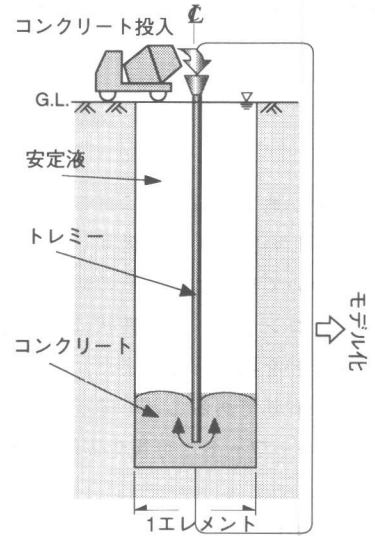


図-2 地下連続壁施工概念図

が、本実験装置では、横幅の5倍程度として1000mm（実機では8.33mに相当）とした。また、地下連続壁内に充てんされるコンクリートは、厚さ方向よりも横幅方向と高さ方向の2次元の挙動が卓越すると考え、厚さ方向は無視した。トレミーの縮尺に関しては、実際の円管のトレミーの半径を125mmとし、3/25モデルとして幅15mm×高さ100mmの矩形断面とし、やはり厚さ方向は無視した。トレミーの筒先位置は、型枠底面から200mmの位置とした。また、比較用としてエレメントサイズのみを3倍の9.0mとした高さ1000mm×横幅540mm×高さ100mmの型枠（B型枠と称す）も作製し、実験を行った。横幅と高さ方向に関する2次元的な単純なモデルとするため、鉄筋かごについては無視した。

2.2 フレッシュコンクリートの可視化モデル

フレッシュコンクリートの可視化モデルとして、増粘剤を添加した高吸水性高分子樹脂水溶液による無色透明な1相系粘性流体（比重1.0）を用いた。粗骨材粒子は混入していない。これは、実際のコンクリートの粗骨材の最大寸法25mmを、モデル型枠の縮尺である3/25とすると3mmとなるため、粗骨材粒子のモデル化は無視した。

本実験では、トレミーが既に打ち込まれたコンクリート（以下、内部コンクリートと称す）にある長さ貫入しており、そこに新たにコンクリート（以下、流入コンクリートと称す）が打ち込まれる状況を模擬している。そのため、内部コンクリートと流入コンクリートの境界面あるいは混合の様子

表-1 モデルコンクリートの配合

No.	コンクリート	高分子添加量(g/l)	増粘剤*1添加量(g/l)	ミクスラブ7ロー(mm)	K漏斗流下時間(sec)	総流入時間(sec)
A-1	流入	3.0	0	225	1.84	98
	内部	3.4	0	220	2.32	
A-2	流入	2.7	0	260	1.38	16
	内部	2.9	0	265	1.31	
A-3	流入	3.5	0	190	4.48	142
	内部	4.0	0	180	7.10	
A-4	流入	3.0	1.0	245	2.76	178
	内部	3.4	1.0	225	4.86	
A-5	流入	3.0	2.0	240	4.26	240
	内部	3.4	2.0	240	7.40	
A-6	流入	2.7	2.0	295	2.22	87
	内部	2.9	2.0	285	1.95	
B-1	流入	3.0	0	215	3.98	595
	内部	3.4	0	230	2.43	

*1: メチルセルロース系

が明確に可視化できるように、内部コンクリートは黒色に着色し、流入コンクリートには発泡スチロール粒子を混入した。

モデル型枠による充てん実験に用いたモデルコンクリートは、表-1に示すように、高吸水性高分子樹脂と増粘剤の添加率量によりコンシステンシーを変化させ、B型枠用も含めて合計7種類とした。モデルコンクリートの変形性は、図-3に示すミニスランプコーンを用いたミニスランプフローとK漏斗による流下時間により評価した。河井らによれば、実モルタルの場合、ミニスランプフローは降伏値と強い相関が、またK漏斗流下時間は塑性粘度と強い相関があることが報告されている[3]。したがって、両指標をモデルコンクリートの変形性である降伏値および粘性を示す指標として有効であると考え、コンシステンシー試験として用いることとした。なお、同一実験条件では、流入コンクリートと内部コンクリートの変形性を同程度とし、高分子樹脂の添加量を調節したため、黒色化した内部コンクリートの高分子樹脂添加量が流入コンクリートよりも多い。

一般に、コンクリートが打ち込まれていない溝壁内には、安定液が存在する。安定液の比重が1.1程度でコンクリートの比重が2.3程度であるとすると、安定液中におけるコンクリートに作用する浮力を考慮すれば、見かけのコンクリートの比重は1.2程度となり、モデルコンクリートの比重とほぼ一致するため、安定液中での浮力は無視することとした。

2.3 実験方法

本実験では、新しく打ち込むコンクリートを任意の時間に打ち込む段階として考え、トレミーの内部コンクリートへの挿入深さ（以下、貫入長と称す）を土木学会コンクリート標準示方書（解説[4]）に示された下限値である2.0mとするため、モデルでは240mmとした。したがって、内部コンクリートの初期充てん高さは、440mm（実機では3.67m）で一定とした（図-1参照）。

黒色化された内部コンクリートを底面から440mmの位置までトレミーより型枠内に投入・充てんする。次に、発泡スチロール粒子を混入した流入コンクリートをトレミー上部の投入口より投入する。このときの打込み速度（トレミーからの吐出速度）は、実際の打込みと同様に重力による速度とした。

流入コンクリートを投入し、内部コンクリートが動き始めた瞬間に充てん開始とし、トレミー内に常に流入コンクリートを満たした状態で所定の充てん高さ870mm（トレミー貫入長670mm）の位置にコンクリート上面が達した時点を終了時刻とする。これを6配合につき行い、充てん開始から終了時刻までの総流入時間を表-1に示した。ビデオの画像データより、コンクリート上面の打上がり速度と流入コンクリートと内部コンクリートの境界面の形状を求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 平均打上がり速度

写真-1に、実験結果の一例を示す。すべての実験について、横幅方向の2次元の挙動は、内部コンクリートを側方向および上方向に押しやるような状態でトレミーに近い位置に沿って流入コンクリートが上昇し、実験終了時では写真に示すように流入コンクリートが釣がね型の形状に充てんされ、内部コンクリートと流入コンクリートが、複雑に混合するような状況は観察されなかった。内

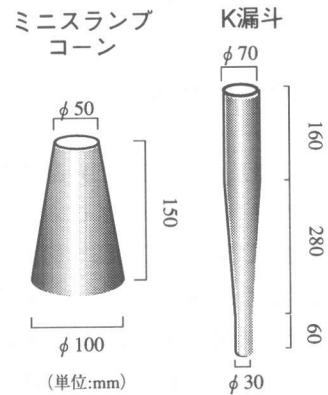


図-3 ミニスランプ・K漏斗の形状・寸法

部コンクリートと流入コンクリートのコンシステンシーが同程度であれば、表-1に示すように総流入時間が変化しても、トレミーの貫入長を240mm（実機で2.0m）とすることで、上面にコンクリートが噴出することはない。

コンクリート上面の上昇速度である平均打上がり速度と流入コンクリートのコンシステンシー試験結果との関係を、図-4および図-5に示す。ミニスランプフローと平均打上がり速度の関係を示した図-4では、明確な関連性は認められない。一方、K漏斗流下時間と平均打上がり速度では、K漏斗流下時間が増加すると平均打上がり速度が減少する傾向にあり、コンクリートの粘性が地下連続壁のコンクリートの打上がり速度に与える影響は、降伏値よりも大きいと考えられる。本実験では、トレミー部分が矩形をしているが、打上がり速度が漏斗流下時間で示される粘性で評価できるとした実施工時の既往の研究結果[5]と一致しており、粘性がトレミーによる施工速度に及ぼす影響が大きいことが確認された。

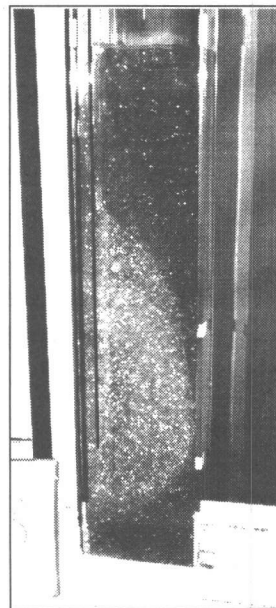


写真-1 実験状況の一例

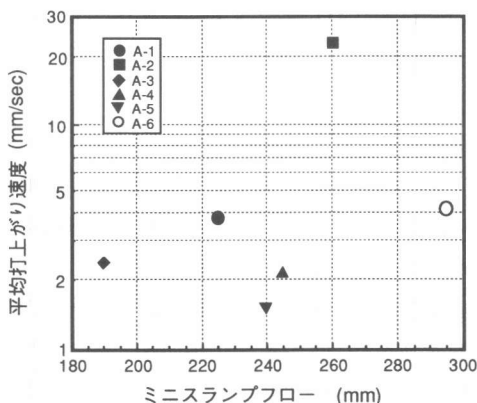


図-4 ミニスランプフローと平均打上がり速度の関係

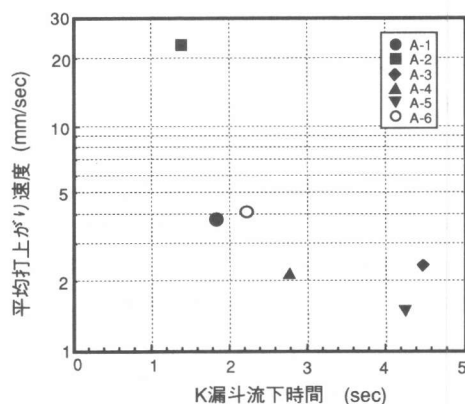


図-5 K漏斗流下時間と平均打上がり速度の関係

3.2 充てん形状

図-6は、No.A-1～A-6の各モデルコンクリートにおける、流入コンクリートと内部コンクリートの境界面の形成状況の経時変化を示す。最も外側の境界面が実験終了時の最終形状であり、それより内側は、総流入時間を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。いずれのケースにおいても、トレミー先端から下方向に流入したコンクリートは、ある程度以上は下方向に流動せず、内部コンクリートを側方向および上方向に押しやるような状態でトレミーに近い位置に沿って上昇し、釣がね型の境界面とを形成し充てんしていくことが確認された。境界面の下端はほぼ同じ位置にあるものの、その形成状況は、各配合により特徴を有している。No.A-1をはじめA-3までの各境界面は、トレミー先端位置付近の高さにおいて最も側方向に流動しており、上昇するほど流入コンクリートの断面が細くなっている。一方、No.A-4～A-6の各境界面は、比較的側方向には流動せず、高い位置までその断面を保ったまま上昇しており、高さ方向に大きく流動している。

No. B-1における，流入コンクリートと内部コンクリートの境界面の形成状況の経時変化を，図-7に示す．A型枠と同様，トレミー先端から下方向に流入したコンクリートは，内部コンクリートを側方向および上方向に押しやるような状態でトレミーに近い位置に沿って上昇し，釣がね型の境界面となって充てんしていく．しかし，横幅方向について3倍とした影響により，流入コンクリートもトレミー先端位置付近で大きく側方向に充てんしている．したがって，1本当りのトレミーの受持ち面積を大きくした場合，流入コンクリートだけでなく内部コンクリートも流動距離が大きくなる可能性がある．

境界面の形成状況の相違を評価するために，図-8に示すように高さ方向の最大長をH，横幅方向の長さをBとして長短度(=H/B)を求めた．図-9および図-10に，A型枠での境界面の長短度と流入および内部コンクリートのコンシステンシー試験結果との関係を示す．長短度H/Bは，K漏斗流下時間ではなく比較的ミニスランプフローと有意な関係がある．すなわち，降伏値が小さいほど長短度が大きくなり，高さ方向への流動が卓越すると考えられる．コンクリートの物性の経時変化を考慮すれば，既に打ち込まれたコンクリートを多量に上方向へ押し上げるような充てん状況は望ましくなく，噴出しない範囲で新しいコンクリートが上昇するNo. A-6などが良好な充てん状況であると考えられる．

3.3 フレッシュコンクリートの変形性と施工性の良否

打上がり速度および充てん形状の双方の結果から，トレ

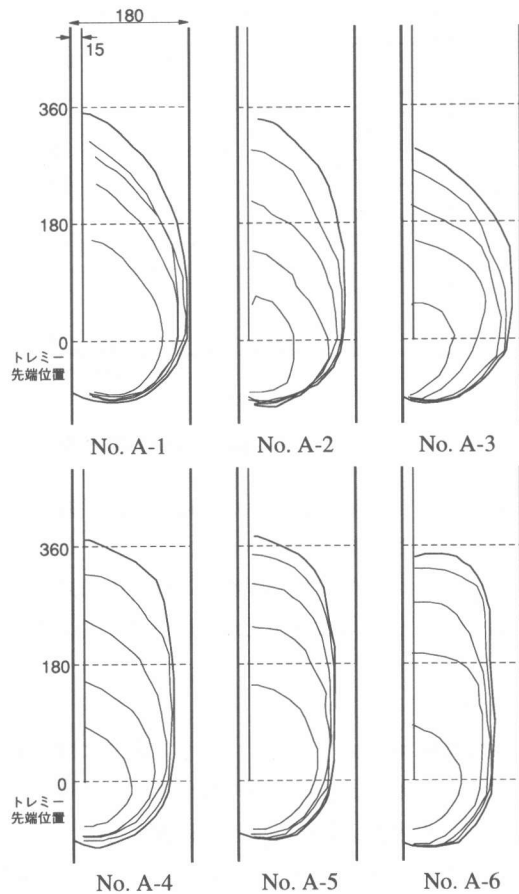


図-6 A型枠の流入コンクリートと内部コンクリートの境界面の経時変化

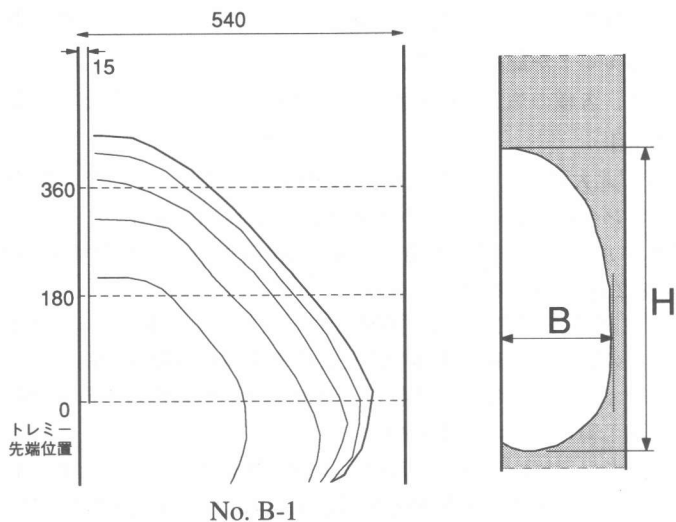


図-7 B型枠の流入コンクリートと内部コンクリートの境界面の経時変化

図-8 境界面の長短度

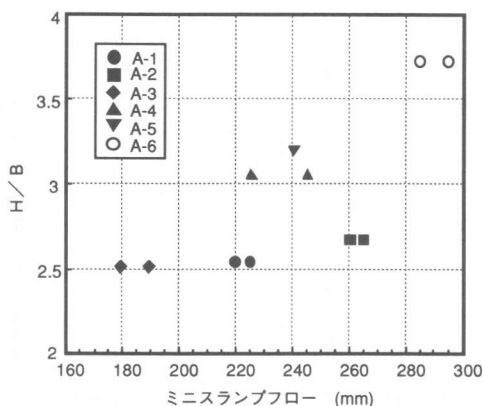


図-9 ミニスランプフローとH/Bの関係

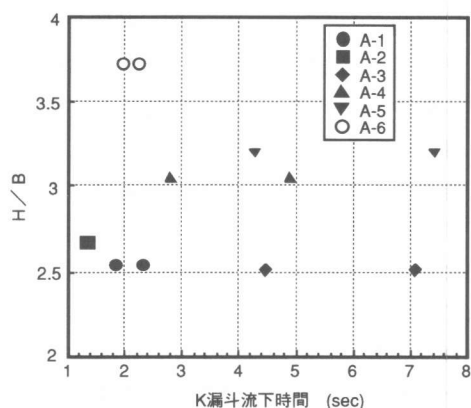


図-10 K漏斗流下時間とH/Bの関係

ミーによる施工速度を低下させずに、良好であると考えられる充てん状況となる配合は、No. A-6 であると判断される。No. A-6は、ミニスランプフローが大きくK漏斗流下時間が比較的小さな変形性のよいコンクリートである。これらの知見は、実際の施工状況から得られた結果と一致していると考えられ[6]、本実験方法の有効性が示された。

4. 結論

地下連続壁のコンクリートの充てん状況に関して、地下連続壁モデル型枠およびフレッシュコンクリートモデルによる新しい可視化実験を提案し、コンクリートの変形性と充てん状況との関係を検討した。本実験により、以下の結論を得た。

- (1) コンクリートの変形性とトレミーによる施工速度および充てん状況との関係は、従来の経験的な知見と一致しており、本実験方法の有効性が示された。
- (2) トレミーの貫入長を実機で2.0m程度とした場合、上面にコンクリートが噴出することはない。また、コンクリートの粘性が増加するほど打上がり速度は低下する。
- (3) 流入コンクリートの充てん形状は、コンクリートの変形性に影響を受けること、特に降伏値と関係があることが認められた。

今後は、各種の施工要因を変化させ実験を行い、実現象との適合性を検討する予定である。

[参考文献]

- [1] 浦野・北大路・谷川・森：地下連続壁の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] 橋本・加古・辻・浦野：地下連続壁のコンクリートの充填状況の可視化，可視化情報，Vol.16, suppl.No2, pp.121-124, 1996
- [3] 河井・橋田・黒田・井上：高流動コンクリートのレオロジー特性に関する実験的研究（その1：モルタルの特性），日本建築学会大会学術講演梗概集，A, pp.1117-1118, 1993
- [4] 土木学会：24.4 場所打ち杭および地下連続壁に使用する水中コンクリート，コンクリート標準示方書施工編，pp.246-251, 1996
- [5] 三浦・青木・神代・河村：超高強度・低発熱連壁コンクリートの配合選定と実施工時のフレッシュ性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18, No.1, pp.267-272, 1996
- [6] 水野・永島・牧野・岡田：地下連続壁トレミーの閉塞防止対策，コンクリート工学論文集，Vol.8, No.1, pp.251-265, 1997