

## 論文 高流動コンクリートの縮小モデル実験に関する検討

浦野 真次\*1・佐久間 清文\*2・栗田 守朗\*3・小川 晃\*4

**要旨:** 高流動コンクリートを対象とした縮小モデル実験に関する基礎的研究として、実大スケールと 1/2 サイズとした場合の充てん時の流動勾配に着目し、相似性を有するモデル高流動コンクリートの配合の選定を行った。その結果、サイズを縮小しても高流動コンクリートのフロー状態を再現でき、実際の高流動コンクリートの配筋型枠内での流動勾配と相似形となるモデル高流動コンクリートの配合およびミニスランプフローの値を示した。さらに実際の構造物を模擬した型枠を用いて、ミニスランプフローの大きさが異なる場合、型枠内での充てん性に変化し、スランプフローが小さい場合には未充てん箇所を生じさせる結果を示した。

**キーワード:** 施工性能, 高流動コンクリート, 縮小モデル, 充てん性, スランプフロー

### 1. はじめに

コンクリート構造物が設計時に要求された所要の性能を満足するためには、施工時にコンクリートが構造物の隅々まで確実に充てんされることが大前提となる。現在、高品質なコンクリート構造物を実現する配合設計、製造、施工方法に関する指針として、通常のスランプのコンクリートを対象として土木学会編「コンクリートライブラリー126 施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針(案)」<sup>1)</sup> が取りまとめられ、2007年制定コンクリート標準示方書[施工編]<sup>2)</sup> にも取り入れられた。一方、高流動コンクリートを選定し、施工を行う場合には、打込み対象となる構造物の形状、寸法、配筋状態を考慮して自己充てん性のランクを定め、これに適合する配合を選定することとなる。ただし、設定したランクの自己充てん性を満足する配合であっても、施工条件、配筋状況、閉鎖空間の有無などによっては事前の充てん性の照査が必要となる場合がある。このとき、実大規模の施工実験を行いその施工性能を確認すれば確実な充てん性の照査が行える一方、その実施には、時間や費用などの点において、また多くの実験ケースができないなどの点において不利な面がある。理想的な施工性能照査方法としては、様々な条件下でのパラメータスタディーが可能な流動解析を行うことが望ましい。しかしながら、現段階では照査方法として適用可能な流動解析手法が提案されているとはいいがたい状況である。

このような現状の中、著者らは、現実的なコンクリートの施工性能照査手法として、コンクリートの施工性能を実構造物のすべてあるいはその一部をモデル化した型枠および配筋等を用いて、実験室内規模の施工実験を行う方法を提案し報告している<sup>3)~7)</sup>。モデル施工性実験による施工性能照査手法が確立すれば、実際のコンクリ

ートをモデル材料で模擬し、直接流動挙動を観察することにより得られる情報に基づき、要求性能を満足する配合や施工方法などを合理的、経済的に選定することができると考えられる。

縮小モデル実験の実施に際しては、例えば鉄筋コンクリート構造物を対象として、構造物あるいは部材の一部を幾何学的に縮小してモデル化し、配筋条件、コンクリートの配合条件および施工条件などを要因とした実験を行うこととなる。このとき、縮小モデル実験を施工性能照査方法として適用するためには、フレッシュコンクリートのモデルの流動挙動が実際のコンクリートの挙動に適合する材料であるか否かについて検討する必要がある。そこで、高流動コンクリートを対象として、実大スケールとその1/2サイズの縮小モデルでの充てん時の流動勾配に着目し、相似性を有するモデル高流動コンクリートの配合の選定を行い、モデルコンクリートの性状の相違が1/2サイズ型枠内での充てん性に及ぼす影響について検討した結果を報告するものである。

### 2. モデル高流動コンクリートの配合の選定

#### 2.1 縮小モデル実験における相似性

これまで、縮小モデル実験は、フレッシュコンクリートの可視化実験において行われている<sup>8)</sup>。橋本らは、フレッシュコンクリートのレオロジー定数（塑性粘度、降伏値）に基づく相似則の検討を行っている。フレッシュコンクリートをビンガム流体と仮定した場合、実験の長さの縮小サイズに応じて、使用する材料を選定して塑性粘度の相似比や降伏値の相似比を設定することとなる。しかしながら、実機と模型で同一の水を使用する水理構造物の模型実験の場合に成立するフルード数もしくはレイノルズ数といった指標を用いる相似則と異なり、フ

\*1 清水建設(株) 技術研究所 安全安心技術センター 博(工) (正会員)

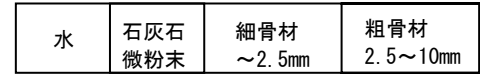
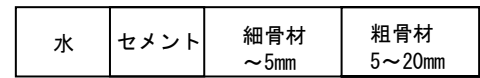
\*2 清水建設(株) 土木技術本部 設計第二部 生産施設グループ 工修

\*3 清水建設(株) 技術研究所 安全安心技術センターグループ長 博(工) (正会員)

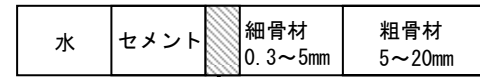
\*4 清水建設(株) 土木技術本部 設計第一部 基盤設計グループ 主査

粉体	石灰石微粉末 密度 2.71g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 4300cm <sup>2</sup> /g
細骨材	~2.5mm 表乾密度 2.62g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 1.51%
粗骨材	2.5~10mm表乾密度 2.66g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.66%
混和剤	ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤 増粘剤 (セルロース系)

配合の種類	単体量 (上段 : kg/m <sup>3</sup> , 下段 : m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )				
	水	粉体	細骨材	粗骨材	増粘剤
実際の高流動 コンクリート		セメント	~5mm	5~20mm	
	175	525	875	745	0.2
	175	166	334	280	-



(a) 各材料同体積で 1/2 とする場合



(b) 細骨材の 0.3mm 以下をペーストとして配分する場合

図一 1/2 モデルにおける配合構成比率の概念図

フレッシュコンクリートの場合、レオロジー一定数に基づく相似則を成立させるのは困難であると考えられる。これは、縮小モデル実験でサイズが小さくなるほど、水を除く各材料の寸法、すなわちコンクリートの骨材、セメントなどの寸法も小さくする必要があり、個々の材料の特性が流動挙動に影響を及ぼし、塑性粘度や降伏値が現実的に製造不可能なものとなって相似性を満足する材料が見出せない可能性があるためである。

そこで、本実験では、型枠内に充てんされた高流動コンクリートが実施工とモデルで相似形となる材料・配合を実験的検討から見出すことにより、縮小モデル実験の施工性照査手法として適用性を高めることとした。

## 2.2 使用材料・配合

### (1) 使用材料

本実験で使用した粉体材料は、実験中の流動性の経時変化の影響を除くための材料として化学的に不活性でセメントと比表面積が同程度の石灰石微粉末 (Lp) を用いた。

粉体以外の材料については、1/2 サイズのモデル化を行うことから、細骨材は通常の細骨材の 2.5mm 以下のものを細骨材として使用し、粗骨材は通常の粗骨材の 5~10mm の部分と細骨材の 2.5~5mm の部分を併せて粗骨材として使用した。これ以外の高性能 AE 減水剤および増粘剤は、通常高流動コンクリートに適用されるものを使用した。

### (2) 配合選定方法

基本となる実際の高流動コンクリートの配合例を表一 2 に示す。水粉体容積比 1.05, 単位粗骨材容積 0.28m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> とした併用系高流動コンクリートの配合の例である。これをモデル高流動コンクリートの配合とするためには、1/2 サイズの縮小モデルとして、図一 1 (a) に示すように、そのまま材料の体積構成比率を変化させずに各材料寸

法を小さくする方法が考えられる。しかし、その概念に基づき試し練りを行ったところ、高性能AE減水剤を使用したとしてもスランブ 0cmの状態のモデルコンクリートとなることが事前の実験により明らかとなった。粉体をセメントから石灰石微粉末に変更することにより流動性が確保できることは、既往の実験<sup>7)</sup>により確認している。したがって流動性を確保できない主な理由としては、サイズの縮小により骨材の粒度の構成が小径側に偏ったことで 2.5mm以下の細骨材の体積中の微粒分量が増大したためと考えられる。枝松らは、フレッシュコンクリートが変形・流動する際、骨材に含まれる 0.15mm以下の微粒分は骨材としてではなく粉体と同様の働きをすることを報告している<sup>9)</sup>。図一 1 (a) に示すような材料の体積構成比率を変化させない状態では、0.15mm以下の微粒分量が増大することとなり、流動性に必要な練混ぜ水を拘束することになるものと考えられる。また、山室らは細骨材中の 0.15mm以下の微粒分がポリカルボン酸系高性能AE減水剤の分散作用に影響を及ぼし、ポリカルボン酸系高性能AE減水剤は砂表面に吸着し、細骨材に含まれている微粒分がフレッシュコンクリートの流動性に悪影響を及ぼすこと報告している<sup>10)</sup>。以上のようなことが影響し、図一 1 (a) に示すような材料の体積構成比率では、所要の流動性が得られなかったものと考えられる。

各材料の体積構成比率を変化させずに各材料寸法を小さくすると、高流動コンクリートの流動性を再現できないことが明らかとなったため、1/2 サイズの縮小モデルの細骨材中の 0.15mm 以下の微粒分量が著しく増大しないように、図一 1 (b) に示すように実際のコンクリートの細骨材における 0.15mm の倍の寸法に相当する 0.3mm 以下の微粒分量に相当する体積をペースト分として置換することとした。置換する際には、間隙通過時などにおいて重要な要因となる粗骨材の体積を一定とし、さら

に実際の高流動コンクリートの水粉体容積比 (=1.05) と同一の水粉体容積比となるように、水と石灰石微粉末に振り分けた。以上の考えに基づくモデル高流動コンクリートの配合を表-3に示す。粗骨材の体積は表-2における体積と同一としているため、粗骨材とモルタルの体積比率は実際のコンクリートと同一である。しかし、高流動コンクリートの流動性を再現することを優先したため、モルタル部分における各材料の体積構成比率が異なる配合となっている。このモルタル部分の相違が流動勾配や型枠内での充てん性に及ぼす影響についての検討は、今後の課題である。

表-3に示す配合に対して、高性能 AE 減水剤の添加量を調整することで高流動コンクリートのフロー状態を再現し、この配合を用いて実際の高流動コンクリートを型枠内に打ち込んで生じる流動勾配と同一の流動勾配を有するモデル高流動コンクリートを見出すこととした。

### 3. 実大と1/2モデルにおける流動勾配の整合性に関する検討

#### 3.1 実験方法

模擬型枠内での充てんされるときの充てん形状が実施工と同一となるモデル高流動コンクリートを見出すことを目的として、本研究では型枠内で高流動コンクリートが充てんされた簡易な壁状の配筋型枠内での流動勾配を比較検討することとした。

高流動コンクリートが自重で流動するとき、流動停止時の流動勾配は主にスランプフローに依存すると考えられる。すなわち、実際の高流動コンクリートがスランプフロー600mmであった場合、2次元断面では1/2サイズとしたときのスランプフローは300mmとなればよい。しかし、実際には型枠面との摩擦や鉄筋などの障害、断面形状、流動距離、および打込み速度などの施工条件によって、型枠内での流動勾配が異なる可能性がある。そこで、断面形状が比較的複雑でなく、実際の流動距離が数m以内程度の型枠という限定した施工条件の範囲内で生じる流動勾配を測定するため、図-2に示すような壁状の型枠を作製した。実際の高流動コンクリートに対しては、1500×150×h600mmの型枠にD19の鉄筋を150mm間隔で格子状に配置した。1/2モデルは( )内に示す寸法とし、750×75×h300mmの型枠にD10の鉄筋を75mm間隔で格子状に配置した。

型枠内に高流動コンクリートを図に示すように片方の端部から充てんし、充てん箇所コンクリートが型枠天端に達した段階で充てんを終了した。投入速度は、ポンプの筒先から流出するような大きな圧力をかけずに、投

表-3 モデル高流動コンクリートの配合

配合の種類	単位量 (上段: kg/m <sup>3</sup> , 下段: m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )				
	水	粉体	細骨材	粗骨材	増粘剤
モデル高流動コンクリート		石灰石微粉末	-2.5mm	2.5-10mm	
	228	587	604	739	0.16
	228	216	231	280	

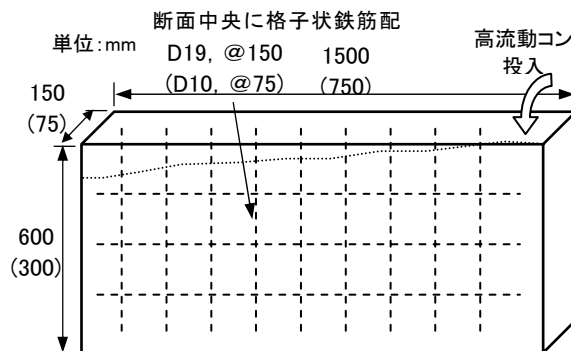


図-2 流動勾配測定用型枠の概要

入箇所自重によってコンクリートが流動する程度の量

表-4 配筋型枠内での流動勾配測定結果

配合の種類	スランプフロー・ミニスランプフロー	流動勾配 (%)
実際の高流動コンクリート	650×640	5.4
1/2モデル高流動コンクリート	240×240	8.0
	290×290	5.1
	315×310	4.3

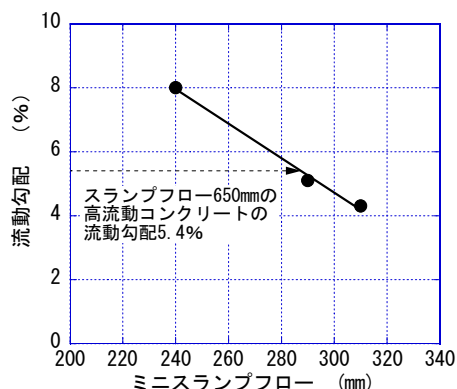


図-3 ミニスランプフローと1/2モデルにおける流動勾配の関係

とするため、実際のコンクリートで40L/分、モデルコンクリートで20L/分程度とした。流動が完全に停止した段階で投入位置と反対の端部のコンクリートの充てん高さを測定し、流動勾配を算出した。

#### 3.2 実験結果

実際の高流動コンクリートは表-2に示す配合により、また1/2サイズのモデル高流動コンクリートは表-3に示す配合により製造し、それぞれの流動勾配を測定

した。実験結果を、表-4に示す。ここで、モデル高流動コンクリートのスランブフローの各ケースは、高性能AE減水剤添加率を調整して任意のフローのものを製造したものであり、JIS A 1101に規定されるスランブコーンを1/2としたミニスランブコーンにより測定した結果を示している。当然のことながら、モデル高流動コンクリートのミニスランブフローが小さくなるほど、流動勾配が大きくなることは、実際の高流動コンクリートと同様である。

ミニスランブフローと1/2モデルにおける流動勾配の関係を図-3に示す。図より、実際のスランブフロー650mm程度の高流動コンクリートが図-2で示す型枠内で生じる流動勾配は、1/2モデルのミニスランブフロー290mm程度のものを充てんしたときの流動勾配に相当することが分かった。流動勾配が相似形となるミニスランブフロー290mmは、スランブフロー650mmの単純に半分とした325mmと比較して90%程度のフローである。これは、コンクリートと型枠面との摩擦や鉄筋などの流動障害によって影響されるためと推測されるが、詳細なメカニズムは不明である。

以上の結果から、本実験では、スランブフロー500~750mm程度の範囲において、実際の高流動コンクリートの流動勾配と1/2モデルとしたときにフローの半分の90%程度としたものが対応すると仮定した(表-5参照)。この仮定は、本実験条件におけるものであり、使用材料、配合および施工条件が変化したときに変化する可能性があり、異なる条件下での妥当性については別途検討を行う予定である。

次章では、これらのスランブフローの違いが充てん挙動に及ぼす影響について、高架橋の閉鎖空間のスラブ部という構造物の1例を挙げて、1/2サイズのモデル実験による検討を行った結果について報告する。

#### 4. 高架橋閉鎖空間スラブに施工する高流動コンクリートの充てん性に関するモデル実験

##### 4.1 実験概要

###### (1) 構造物の概要

某高架橋の工事では、図-4に示すように、既設高架橋に新設の高架橋を一体化させ、路線を増設する計画である。新設のスラブの部分では、既設高架橋張出しスラブ下へのコンクリート打込みとなるため、既設のスラブ、梁および型枠とで囲まれた閉鎖空間となり、鉄筋もあるため通常のスランブのコンクリート打込みおよび締固めは困難である。したがって、断面が非常に小さいことから、自己充てん性のランク1の高流動コンクリートを適用することとなった。充てんは、施工制約条件から新

表-5 実大と1/2モデルにおけるフローの対応

実際の高流動コンクリート (mm)	1/2モデル高流動コンクリート (mm)
600	270
650	290
700	315

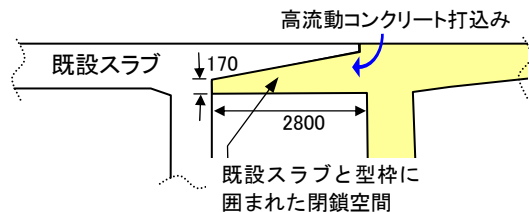


図-4 高架橋の新旧一体化のスラブ部概念図

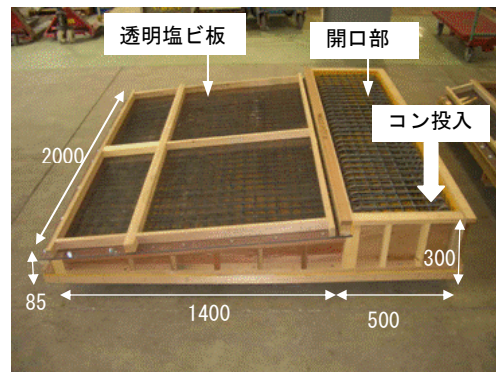


写真-1 高架橋のスラブ1/2モデル型枠の外観

表-6 高架橋1/2モデルにおける実験ケース

実験ケース	ミニスランブフロー (mm)	(参考)実際の高流動コンクリートのフロー(mm)
1	目標値:270 実測値:264×263	600
2	目標値:315 実測値:315×313	700

設スラブ開口部からの流し込みする方法により行い、3m程度既設スラブ方向へ流動させ、最小170mm程度の断面内に確実に充てんする必要があった。

モデル型枠は、写真-1に示すようなスラブ形状、配筋を1/2としたものを作製した。型枠内には、実構造物の配筋を模擬して、鉄筋径を約1/2(D10)として型枠面と平行に上下2段に62.5mm間隔で配置した。上面は、実際には既設スラブであるが、コンクリートの流動を観察するための透明塩ビ板とした。この型枠を用いて、スランブフローの大きさが充てん性に及ぼす影響について検討した。

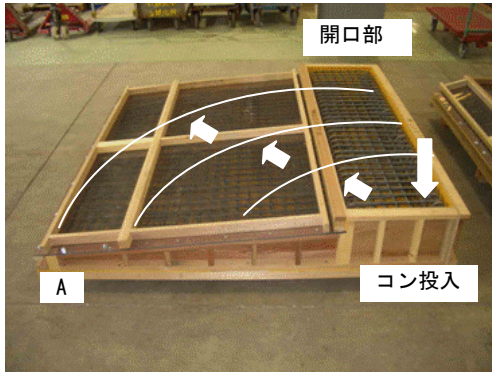


写真-2 充てん状況の模式図

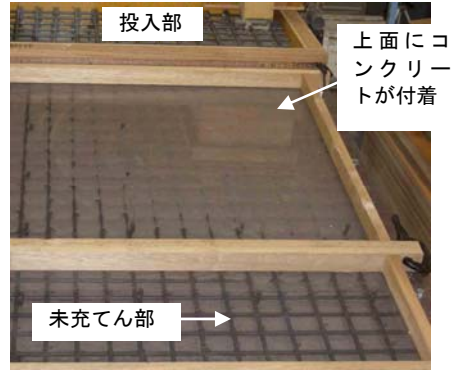
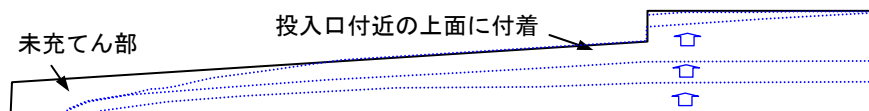


写真-3 ケース1 (フロー270mm) での充てん状況

[実験ケース1 (ミニスランプフロー270mm)]



[実験ケース2 (ミニスランプフロー315mm)]

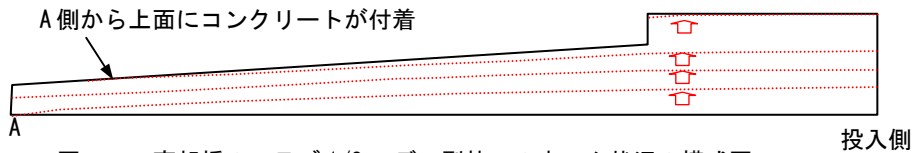


図-5 高架橋のスラブ1/2モデル型枠への充てん状況の模式図

## (2) 実験方法

自己充てん性のランク1を満足する高流動コンクリートは、2007年制定コンクリート標準示方書[施工編]によれば、スランプフローの目標値を粉体系で600~700mm、併用系で650~750mm、増粘剤系で550~700mmとしている。どのタイプの高流動コンクリートを選定するかにより、スランプフロー550~750mmまで幅がある。図-4に示すような断面への充てんでは、自己充てん性のランク1を満足する配合であっても、スランプフローの大きさが影響することが考えられる。そこで、表-6に示すように、実際の高流動コンクリートの600および700mmのスランプフローに相当するモデルとして、表-5で仮定したとおり、ミニスランプフロー270および315mmの2種類を実験することとした。モデル高流動コンクリートは、表-3に示す配合により高性能AE減水剤の添加量を調整してフローを変化させて製造した。

写真-1に示す型枠開口部の片隅からモデル高流動コンクリートを流出口φ62.5mm(5B配管の1/2)とした漏斗から投入し、開口部まで充てんされるモデルコンクリートの量を4等分して、1回約150リットルごと投入し、各々ごとの流動停止時の充てん形状を観察した。投入速度は、本実験においてもポンプの筒先から流出するような大きな圧力をかけずに、投入箇所です重によってコンクリートが流動する程度の量とするため、20L/分程度とした。

## (3) 実験結果

開口部より投入したモデルコンクリートは、写真-2に示すようにいずれの実験ケースにおいても、スランプフロー試験時のフローする状況と同様に、投入部分より同心円状に拡がり充てんされた。しかし、各実験ケースのミニスランプフローの相違により、充てん性に違いが生じる結果となった。

図-5に、各実験ケースでのコンクリート投入箇所から写真-2中のA点までの充てん状況を示す。ケース1のミニスランプフローの小さい270mmの場合、最初の150リットル投入時、投入箇所から流動の先端が既設側の端面A点に到達しない段階で流動が停止した。次の150リットルでは、その流動先端を押し流すことなく上側に充てんされ、このときの流動勾配は8.2%程度であった。その後開口部から充てんすると、投入口に最も近いアクリル上面にコンクリートが付着し、そこから付着面が拡がるように充てんした。しかし、その後コンクリートを充てんしても、開口部分には充てんされるもののコンクリートの自重が閉鎖空間内部へと伝達されない状態となり、A側付近は充てんされなかった。

一方、ケース2のミニスランプフローの大きい315mmの場合、最初の150リットル投入で流動の先端は既設側の端面A点まで到達した。さらにコンクリートを充てんすると、7%程度の流動勾配はあるもののA点まで順次流動しA点側のコンクリートが先にアクリル上面に付着

する結果となった。投入口から最も遠い対角線側では充てんに時間を要しアクリル上面への付着は遅かったものの、未充てん箇所を作ることなく全箇所充てんされる結果となった。

以上のように、ミニスランプフローの大きさが異なることにより、型枠内での流動状況が異なり、充てん性が変化し、スランプフローが小さい場合には未充てん箇所を生じさせることが明らかとなった。コンクリートの自重によってのみ充てん性を確保するため、このようなスランプフローの相違による未充てん箇所の有無に関する情報は、きわめて重要な情報である。実施工において、配合選定段階における高流動コンクリートのスランプフローの目標値は、目標値700mm程度のもので施工する必要があると考えられる。

## 5. まとめ

本報では高流動コンクリートを対象とした縮小モデル実験に関する基礎的研究として、実大スケールとその1/2サイズの縮小モデルを用いて、充てん時の流動勾配に着目し、相似性を有するモデル高流動コンクリートの配合の選定を行ったうえで、モデルコンクリートの性状の相違が1/2サイズ型枠内での充てん性に及ぼす影響について検討した。その結果、本研究の範囲内において、以下のことが明らかとなった。

- (1) 1/2サイズの縮小モデルとした場合、そのまま材料の体積構成比率を変化させずに各材料寸法を小さくする方法によると、高流動コンクリートの流動性を再現できない。本実験での使用材料および配合条件では、使用する細骨材の微粒分量に相当する体積をペースト分として置換することで高流動コンクリートのフロー状態を再現できた。
- (2) 断面形状が比較的複雑でなく、実際の流動距離が数m以内程度の型枠という限定した施工条件の範囲内では、自重によって流動するスランプフロー500～750mm程度の実際の高流動コンクリートの流動勾配と、1/2モデルとしたときのモデルコンクリートの流動勾配は、実際の配合のスランプフローの半分の90%程度としたミニスランプフローとした場合において相似形となった。
- (3) 既設高架橋張出しスラブ下へのコンクリート打込みを模擬したモデル実験において、実際の高流動コンクリートのスランプフローの目標値600および700mmという、共に自己充てん性のランク1を満足する配合であっても、そのスランプフローに相当するモデ

ルの充てん性には相違が生じることを把握することができた。

今後さらに、実施工の状況との整合性を検証して本実験の妥当性を検討し、縮小モデル実験による事前の適切な配合選定の方法および施工性評価技術を構築する予定である。

## 参考文献

- 1) 土木学会編：コンクリートライブラリー126 施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針(案)，2007.3
- 2) 土木学会編：2007年制定 コンクリート標準示方書[施工編]，2008.3
- 3) 栗田守朗，木村克彦，浦野真次：縮小モデルを用いたコンクリートの充てん性に関する検討，土木学会第55回年次学術講演会講演概要集，V-88，2000.9
- 4) 木村克彦，栗田守朗，田中博一，浦野真次：コンクリートの充てん性に及ぼす鉄筋間隔およびコンシステンシーの影響，土木学会第57回年次学術講演会講演概要集，V-707，pp.1413-1414，2002.9
- 5) 栗田守朗，木村克彦，浦野真次，田中博一：コンクリートの流動性状に関する縮小モデルを用いた検討，土木学会第57回年次学術講演会講演概要集，V-708，pp.1415-1416，2002.9
- 6) 浦野真次，木村克彦，田中博一，栗田守朗：縮小モデルにおけるコンクリートの流動性評価に関する基礎的検討，フレッシュコンクリートのコンシステンシー評価に関する技術の現状と課題(II)シンポジウム論文集，pp.Ⅱ-17-Ⅱ-22，2003.7
- 7) 浦野真次，栗田守朗，江渡正満：高密度配筋部におけるコンクリートの充てん性に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.30，No.2，pp.31-36，2008.6
- 8) 橋本親典，吉田正宏，安積淳一，辻幸和：フレッシュコンクリートの可視化実験手法に関する相似則の検討，コンクリート工学年次論文報告集，13-1，pp.89-94，1991
- 9) 枝松良展，山口昇三，岡村甫：モルタルの変形性を表す細骨材の材料特性の定量化，土木学会論文集，No.538/V-31，pp.37-46，1996.5
- 10) 山室徳高，代田協一，水野渉：細骨材がモルタルの流動性保持に及ぼす影響，自己充填コンクリートセミナー論文報告集，コンクリート技術シリーズ，No.19，土木学会，pp.55-58，1997.5