

平成22年 5月28日現在

研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2006年度～2009年度  
 課題番号：18560447  
 研究課題名（和文） 高流動コンクリートの間隙通過時における圧力損失現象に関する研究  
 研究課題名（英文） Pressure loss mechanism of high fluidity concrete pass through the interspaces of obstacle  
 研究代表者  
 藤原 浩己（FUJIWARA HIROMI）  
 宇都宮大学・大学院工学研究科（教授）  
 研究者番号：30323314

研究成果の概要（和文）：高流動コンクリートが流動・自己充填する際の圧力損失発生メカニズムについて検討した。実際のコンクリートと流動するコンクリート内部を可視化可能なモデルコンクリートを併用し、配合条件や障害の条件を種々に変化させ、圧力損失量との関係を調べ、圧力損失推定方法について検討した結果、閉塞しない条件では、流動障害が1層では良好な精度で指定可能であるが、複数層では圧力損失発生機構は単純ではなく、推定精度向上のためにはさらなる検討が必要であった。

研究成果の概要（英文）：This research is about the pressure loss causing mechanism of high fluidity concrete with self compactability, when it passes through the obstacle. We use actual high fluidity concrete and model concrete with clear model mortar, and change the mix conditions of concrete and obstacle arrangement, we investigated the relationships between pressure loss and these parameters. Results of these investigations, in the case of that coarse aggregate blockage did not cause and the obstacle was single layer, pressure loss could be estimated with extremely precise, but in the case of dual layers of obstacle, the pressure loss cause mechanism was very complicated, then, estimated pressure loss value was estrangement from measured value.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,100,000	0	1,100,000
2007年度	600,000	180,000	780,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,300,000	660,000	3,960,000

研究分野：土木工学，材料工学，コンクリート工学

科研費の分科・細目：5201 土木工学，材料

キーワード：高流動コンクリート，自己充填性，圧力損失，可視化，モデルコンクリート

## 1. 研究開始当初の背景

自己充填性を有する高流動コンクリートの実施適用機会の拡大を目指す場合、施工

された構造物の品質は普通コンクリートの場合以上に、優れていなければならない。また、自己充填性を有すると謳いながら、その

自己充填性には限界があり、現状では如何なる要因が作用してこの限界に達しているのかについて明確な結論は得られていない。代表研究者らはこの問題に取り組み、施工条件により事前に充填状況を予測・把握する手法の確立を目標としている。

本研究では、高流動コンクリートが完全充填できず、充填不良を生じる主要因が鉄筋間隙を通過流動する際に生じる流動圧力の損失であるとし、圧力損失と高流動コンクリートの配合条件・間隙条件との関係を求め、圧力損失が生じるメカニズムを解明することある。

特に、鉄筋間隙を通過流動する高流動コンクリートに生じる粗骨材の滞留・高濃度化と、それに伴う局所的なコンクリートの降伏値の増大など、圧力損失発生に影響を及ぼす現象究明に取り組み、定量的に把握すること、実施工に近い様々な配合・配筋条件や型枠形状と圧力損失の関係についてデータの収集を行い、メカニズムの検証を行うとともに、予測システムの構築を目指す。

## 2. 研究の目的

高流動コンクリートとは振動などによる締め固め作業を行なう事無く、型枠内の隅々まで自己充填することが期待されるコンクリートである。これまでに高流動コンクリートの特性に関し、多数の研究が行われた結果、高流動コンクリートの実施工への適用事例は増加しており、高流動コンクリートの特色を生かした施工が行なわれている。

しかし、高流動コンクリートを実施工に適用する場合に問題視されるのは、材料費や品質管理・施工管理に伴う人件費等のコスト高である。現状においては、施工時における締め固め作業の低減を加味したとしても、総合するとコスト増になるケースも多い。したがって現在、このような状況から、高流動コンクリートは、一般のコンクリートでは施工不可能であるか、極めて困難な部位、例えば、過度に過密な配筋部、型枠狭隘部、締め固め不可能な部位等への適用が多くなっている。コンクリート構造物における、このような部位は構造的に重要な部分であることが多いため、コンクリートの完全な充填が求められ、万が一にも施工不良などが生じると、社会基盤整備における信頼を大きく損ないかねない。

一方、高流動コンクリートは、高い自己充填性を有するものと一般的には認識されているが、水のようなニュートン流体ではなく、降伏値を有するビンガム体としてモデル化されるものである。このため、自ずと自己充填性には限界がある。ゆえに、施工前に十分な検証実験を行わず、過密配筋部分などに高流動コンクリートを施工した場合、重大な

充填不良を招く恐れがある。本研究はこのような状況を鑑み、検証実験を行なう事無く、配筋等の施工条件より事前に充填性を予測する方法を確立することを目的としている。この研究目的を達成するためのこれまでの研究により、高流動コンクリートの充填不良を起こす主たる原因は、高流動コンクリートが鉄筋間等の間隙部を通過する際に生じる流動圧力の損失にあることが明らかとなっている。また、高流動コンクリートの配合条件、配筋条件と圧力損失量との関係もある程度明らかになっている。本研究課題においては、これらの結果を用いて、圧力損失のメカニズムを解明することを目的とした。また、将来的に実施工レベルの充填性予測システムを構築するためのデータベースを作ることとする。

具体的には、高流動コンクリートの間隙部通過の際に起きる粗骨材の滞留、高濃度化とそれに伴う局所的な降伏値の増大など、圧力損失に影響を及ぼしている現象を解き明かし、定量的な把握を行なうことと、実施工に近い、様々な配合条件、配筋条件、型枠形状と圧力損失の関係についてデータの収集を行い、メカニズムの検証を行なうとともに、予測システムのデータベース化を期間内に行なおうとするものである。

## 3. 研究の方法

高流動コンクリートが自重による流動・自己充填するときの、流動障害となる鉄筋間隙を通過する際に生じる充填不良等の原因となる圧力損失現象について、その発生メカニズムの解明を目的とし、次のような仮説を立て、仮説に基づく圧力損失発生・増大メカニズムの解明のため、下記(1)～(5)に示す実験・検討を行った。

【仮説】流動障害間隙部を通過流動するコンクリート内部では、粗骨材分布状態が変化し、障害近傍に滞留し、粗骨材量の増大が顕著となる。その結果、障害近傍のコンクリートは変形しない粗骨材割合が増加し、コンクリート全体では変形抵抗が増大し、見掛けの降伏値が増大すると予想される。この結果流動圧力損失が増大するとした一連の現象で圧力損失発生・増大現象を説明可能としたものである。

### (1) 障害通過時の粗骨材分布の把握に関する実験

流動するコンクリート内部の粗骨材挙動が把握可能となる可視化実験手法により、外部から流動・内部状態を直接把握可能とし、粗骨材分布状態および変化が連続的に把握できるような実験方法を提案し、これに基づく流動障害周辺の粗骨材粒子の分布状態の

変化について検討した。

実験要因は、モデルモルタルのレオロジー特性、粗骨材絶対容積割合 ( $X_v$ )、流動障害のあきとした。

流動挙の把握はビデオ撮影データを画像処理し、粗骨材粒子挙動・分布状態を数値化した。

(2) 粗骨材絶対容積割合分布の変化に伴う降伏値の局所変化の把握に関する実験

コンクリート中の  $X_v$  変化は、コンクリートの見掛けの降伏値に影響すると考えられる。このため、モルタルのレオロジー性状およびコンクリートの  $X_v$  を変化させ、これらとコンクリートの見掛けの降伏値の関係について検討した。

(3) モデルコンクリートによる圧力損失の推定実験

上記(1)、(2)の検討を元に理論的な圧力損失の推定を試み、モデルコンクリートを用いた実測値と比較した。

(4) モルタルのレオロジー性状が圧力損失に及ぼす影響の評価

障害のあきが比較的大きく、通過流動するコンクリート中の粗骨材割合が大きく変化しない条件について、モルタルのレオロジー性状が圧力損失に影響するとし、モデルコンクリートを用いた可視化実験を通じ、本現象について検討した。

(5) 流動方向に複数層の流動障害が存在する場合の圧力損失発生増大機構の検討

実施工では、高流動コンクリートの流動方向に対して複数の流動障害層が設置される状態となる。この場合に生じる圧力損失は、単一の流動障害により生じる圧力損失と異なった現象により生じているか否かについて検討し、圧力損失発生メカニズムの構築を目指し検討した。手始めに、同一のあきとなる流動障害を流動方向に2層配置した。障害層のあき間隔と層間の間隔を変化させ、モデルコンクリートの流動状態の違いについて検討し、これと圧力損失現象との関係について把握するための実験・検討を行った。

#### 4. 研究成果

(1) 障害通過時の粗骨材分布の把握に関する実験

ほぼ同程度のフレッシュ性状（塑性粘度および降伏値）を有する高流動コンクリートを自己充填させた場合の圧力損失量は、流動障害のあきとコンクリートの粗骨材絶対容積割合 ( $X_v$ ) の影響を大きく受けることは概ね把握しており、これらの因子をもとに圧力損失量の推定式を求めた。可視化実験において使用したモデルコンクリートにおいても、適切な材料構成においては、実際の高流動コンクリートと同様の流動状態を示し、また、同程度の流動性を示す条件では、圧力損失量は、

モデルコンクリート用の型枠に設けた流動障害のあきおよびモデルコンクリートにおける  $X_v$  により、概ね説明がつくことを確認した。

また、可視化実験により、流動障害近傍のモデルコンクリートの内部では、粗骨材粒子が局所的に増大する現象が確認できた。この局所的に粗骨材粒子量が増大する現象が確認できた条件では、圧力損失が徐々に増加する傾向を示した。また、条件により、粗骨材粒子が型枠の断面全体で増大する傾向も示す場合があり、この場合、粗骨材粒子は互いに接し、流動による外力では崩壊しないような閉塞部を形成し、このため流動は停止し、圧力損失量が大幅に増大する傾向を示した。

(2) 粗骨材絶対容積割合分布の変化に伴う降伏値の局所変化の把握に関する実験

高流動コンクリートが自己充填する際に圧力損失量が増大する現象について、簡易な力学モデルを提案し、これに基づいた理論的な検討を行った。この際、便宜的に、圧力損失量は、流動障害となる鉄筋の直径およびあきとコンクリートの見かけの降伏値により推定できると仮定した。

一方、高流動コンクリートの見かけの降伏値は、一般的に、スランプフロー値を見ることで概ね評価・推定が可能であるとされている。これは、コンクリートを製造するはじめの配合条件に応じ、主に単位水量・単位粉体量・化学混和材添加量により変化するとされている。一方で、先の実験結果から、型枠内を流動する高流動コンクリートは、流動障害近傍で材料分離に起因する粗骨材量の局所的な変化を生じることが明確になっている。これは、流動するコンクリートにおいて、流動障害を通過する際に、材料の均一性が失われることを意味しており、製造時の初期配合条件との同一性を維持できていないことを示している。このため、高流動コンクリートのフレッシュ性状、特に降伏値については、配合条件に基づく検証のみでは不十分である結論を得た。そこで、コンクリート用の回転粘度計を使用し、高流動コンクリートの配合条件、特に粗骨材絶対容積割合  $X_v$  を変化させた場合について、ツーポイント法による降伏値の測定を試みた。

その結果、ほぼ同程度のフレッシュ性状を有する高流動コンクリートにおいて、 $X_v$  の増大にともない降伏値は増大することがわかった。これは、 $X_v$  の増大により粗骨材粒子間に存在するモルタル量が減少し、粗骨材粒子同士が直接接触し易い状態となり、高流動コンクリート中の外力の作用による変形が容易ではなくなる状態となる。これを粗骨材粒子間の接触摩擦による外力の伝達状態が卓越した状態と定義し、高流動コンクリートが

自己充填する際に、流動障害近傍においてこの状態が頻発するような状態の時に、圧力損失が大きく増大する傾向があることを示した。

### (3) モデルコンクリートによる圧力損失の推定実験

上記(1)および(2)の成果を元に、モデルコンクリートを利用し、圧力損失推定式の検討を行った。

その結果、従来と比較して、推定精度の向上をはかることが出来た。しかし、より高精度な推定を行うために、継続検討が必要であるとした。

### (4) モルタルのレオロジー性状が圧力損失に及ぼす影響の評価

先の(2)において、粗骨材全体容積割合  $X_v$  により、高流動コンクリートの降伏値が変化し、これが圧力損失量の増大に大きく寄与することがわかった。

一方、高流動コンクリートを構成するモルタル部分のレオロジー性状についても、コンクリートとした場合の圧力損失現象への影響が大きいと思われた。よって、モデルコンクリートに使用したモデルモルタルのレオロジー性状の変化が圧力損失現象に及ぼす影響について、モデルモルタルの構成材料の増粘剤添加量を変化させ、モデルモルタルの粘性を数段階に変化させることにより、これらの性状がモデルコンクリートの自己充填時の流動障害通過現象に及ぼす影響について検討した。

その結果、①モデルモルタルの粘性の違いにより、モデルコンクリートとしての降伏値が変化すること、②モデルモルタルの粘度が大きい場合、粗骨材粒子量が多くなっても粗骨材粒子同士が直接接触する頻度が低くなり、自己充填時の流動に要する時間はかかるものの、流動停止時の圧力損失量は小さくなる傾向が認められた。また、障害のあきの違いの影響としては、③あきが粗骨材最大寸法の2倍未満では、モデルモルタルの粘度が低い場合、材料分離を生じ易いため、粗骨材割合が増大し、流動障害を通過することが困難となり、圧力損失は大きくなること、④障害のあきが粗骨材最大寸法の2倍程度になると、粗骨材割合の変化が前者の場合より小さくなり、モルタルの粘度の増大に伴い圧力損失は増大することなどがわかった。

### (5) 流動方向に複数層の流動障害が存在する場合の圧力損失発生増大機構の検討

モデルコンクリートによる圧力損失測定試験の結果、流動障害を2層とした場合の高流動コンクリートの通過流動の挙動については、1層目を通過すれば容易に2層目を通

過するであろうという事前の予想とは異なり、顕著な事例としては、2層目において粗骨材粒子の閉塞現象を生じ、圧力損失が増大する場合がありなど、単純に流動障害が1層の場合の2倍になるというわけではないことが確認できた。

これは、流動障害の1層目の上流側に生じる粗骨材の局所増大現象と、2層目の上流側で生じるそれが必ずしも同じ状態にならず、2層目上流側にて生じる現象が、1層目にて発生する粗骨材の局所増大の状態、障害の流動方向間隔、モデルコンクリートのレオロジー性状等の影響を受けるためと推察された。また、圧力損失は流動が停止した最終状態だけでなく、流動途中で生じている内部摩擦の影響も無視できないことも原因として考えられた。

また、本検討においては、流動障害の層間距離を変化させた場合についても検討した。これについては、モデルコンクリートを利用した可視化実験を実施し、障害周辺の高流動コンクリートの挙動、特に粗骨材粒子の挙動について調べた結果、障害のあきが大きく、障害の流動方向前後間隔が大きくなるほど、流動力の損失が小さくなるため、モデルコンクリートの流動速度は大きく、1層目の障害前における局所的な粗骨材量の増大の割合は小さくなり、圧力損失量が小さくなることがわかった。また、粗骨材量の局所増大について、障害あきおよび前後間隔の違いにより、概ね3つの形態に分類できることを把握した。

さらに、この現象について、実際の高流動コンクリートを使用し、同様の試験を実施することで、流動状況の確認および圧力損失量の測定を行った。また、流動停止状態のまま硬化させ、硬化後のコンクリートを切断し、画像処理により粗骨材分布を測定した。さらに、実験における因子を組み入れた圧力損失量の推定式を提案・改良し、圧力損失量の推定値と実測値について比較・検討した。

その結果、圧力損失量の測定値が大きくなる、障害あきが小さい条件では、圧力損失量の推定値と実測値の乖離が大きく、さらなる検討が必要なことがわかった。これは、元々圧力損失現象のモデル化において想定している現象が実現象と異なる状態であることが原因であると考えている。しかし粗骨材分布についてはモデルコンクリートの場合と同様の傾向を示すことがわかった。

以上に示したように、従来ではブラックボックスとなっていた高流動コンクリートの自己充填時における圧力損失現象について、実際の高流動コンクリートによる実験だけでなく、可視化実験手法を活用し、流動するモデルコンクリート内部に生じる種々の現

象について、直接的に評価および数値化する方法を提案し、この方法に基づいた種々の実験を実施した。

圧力損失量の推定手法については、推定する前提条件として、粗骨材による閉塞現象を生じない状態を対象としていた。この条件においては、比較的良好な精度により概ね推定が可能であるといえる。また、粗骨材の閉塞現象については、流動障害の条件およびコンクリートのフレッシュ性状、特に粘度の影響を大きく受けることが明確になった。このような研究は、国内はもとより海外でもほとんど見られず、国際会議での発表においてもインパクトがあり、大変興味を持たれることが多かった。なお、海外における高流動コンクリートの適用・研究事例については、日本における10数年前の状況とそれほど変わりがないため、何故、本研究のように先進的であり、かつ複雑な研究が必要なのか、理解されにくい状況でもあった。

一方で、実施工を想定し、複数の流動障害を有する型枠内において高流動コンクリートを自己充填させた場合、圧力損失量は流動障害層の数や層間隔の影響だけでなく、流動障害層間を通過流動している時のコンクリート中で生じる内部摩擦の影響が大きいことなどについて把握したが、これら種々の要因を十分に考慮した形での圧力損失推定モデルの構築までには至っておらず、今後の検討課題としたい。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計9件)

- ①大森祐助, 藤原浩已, 丸岡正知, 小倉恵里香, 自己充填コンクリートの多層配筋状態における粗骨材閉塞現象に関する研究, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 31, No. 1, 2009, 1459-1464.
- ②丸岡正知, 藤原浩已, 渡邊暢, 小倉恵里香, 高流動コンクリートの粘性および間隙条件が圧力損失現象に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, 査読有, No. 62, 2008, 435-442.
- ③渡邊暢, 藤原浩已, 丸岡正知, 小倉恵里香, 自己充填コンクリートの多層流動障害通過時における圧力損失現象に関する研究, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 30, No. 2, 2008, 43-48.
- ④丸岡正知, 渡邊暢, 藤原浩已, 自己充填性を有する高流動コンクリートの流動障害間隙通過時における粗骨材粒子挙動と圧力損失現象に関する検討, 土木学会論文集 E, 査読有, No. 63, 007, 640-655
- ⑤丸岡正知, 石崎康暖, 渡邊暢, 藤原浩已, 自己充填コンクリートの圧力損失発生機構とコンクリートのレオロジー特性に関する実験的検討, コンクリート工学年次論

- 文集、査読有, Vol. 29, No. 2, 2007, 67-72.
- ⑥丸岡正知, 渡邊有寿, 藤原了, 藤原浩已, 可視化実験による自己充填コンクリートの間隙部圧力損失現象に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 28, No. 1, 2006, 1133-1138.

〔学会発表〕(計8件)

- ① Masanori Maruoka, Easy evaluation Method of Self-compactability of Self-Compacting Concrete, Durability of Building Materials & Components 11 (dbmc), 14/May/2008, Istanbul, Turkey.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

藤原 浩已 (FUJIWARA HIROMI)  
宇都宮大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：30323314

### (2) 研究分担者

丸岡 正知 (MARUOKA MASANORI)  
宇都宮大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：50323316