

論文審査の結果の要旨

氏名：山之内 康一郎

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：中流動および高流動コンクリートのレオロジー評価に基づくポンプ圧送性に関する研究

審査委員：(主査) 教授 鵜澤 正美

(副査) 教授 澤野 利章

教授 秋葉 正一

日本大学教授 梅村 靖弘

レディーミクストコンクリートの施工現場における場内運搬には、多くの場合コンクリートポンプにより圧送され、打設場所まで運ばれている。近年ではコンクリート構造物の耐久性や高品質化の観点から、粉体量を多くし、高性能 AE 減水剤や増粘剤を用いて材料分離抵抗性を付与した高流動コンクリートの使用が増加傾向となっている。また、最近では普通コンクリートと同程度の粉体量で流動性と材料分離抵抗性を付与できる増粘剤一液タイプの高性能 AE 減水剤を用いたコンクリート（本論文では、中流動コンクリートと称す）も使用されるようになってきている。これら中・高流動コンクリートのように多機能・高機能なコンクリートの施工においては過密配筋や複雑な配管経路に圧送する事例もあるが実績も少なくコンクリートの配合やコンシステンシーの試験結果を基に配管条件や圧送条件を適確に定めることができないため、試験圧送を行うなどして、配管径やポンプの能力を選定するなど多くの経営資源を投じている。

これら特殊なコンクリートに対して、管内流動の解析手法を基に大掛かりな試験圧送をすることなくレオロジー定数を測定し、ポンプ能力の選定や圧送の可否を予測することができればポンプによる施工の合理化に寄与する。そこで本研究は、フレッシュコンクリート用管型粘度計（圧送試験装置）を試作し、その性能評価および試験方法により流動性・圧送性を予測するための検討を行っている。

また、コンクリートの管内流動はビンガム体に近似した挙動を示すことから、管内における流量はビンガム式をベースに管壁での滑りを考慮した式を用いているが、コンクリートの管内流動の解析モデルとして、「管壁での液体摩擦状態」に代わって、コンクリートと管壁との界面に薄い水膜が存在し、このコンクリートの壁面における滑りは、水膜部分が圧送圧力によって Newton 流れを生じて、水膜とコンクリートとが接する部分の流速は、コンクリートの滑り速度と等価と考え、管内には薄い水膜とその内側にコンクリートの層の流れが生じていると仮定した新たな管内流動解析手法を提案した。この水の薄層とコンクリートの層流れについては圧送試験と同時に加圧脱水試験を併用することで実験的に明らかにするとともに、中・高流動コンクリートの管壁面に生じる水の膜厚から、当該コンクリートの圧送可能領域の予測について検証した。その結果、配合設計や圧送に先立って「水の薄層とコンクリートの層（2層流れ）」を仮定した流量モデルを活用し、圧送管内の管壁面の水の膜厚と粘性とのデータを把握することで圧送による分離の可能性の領域を予測し、配合修正や品質管理の一助とすることが可能であることを示している。

本論文は、全6章から構成されており、各章の要旨は以下の通りである。

第1章「緒論」では、研究の背景について、コンクリート工事の合理化を実現するためには、流動性・圧送性を簡易に予測することが必要であり、ポンプ施工の合理化の為には、圧送性を評価するシステムの構築が必要となっている。また、ポンプによる圧送性を総括的に評価するためには、コンクリートの管内流動をモデル化し、レオロジー定数（物性値）を把握することが必要であることを詳細に述べ本研究の意義を明確に示している。さらに、本論文の構成を示している。

第2章「既往の研究【管内流動に関わるレオロジー】」では、管内流動に関する概要および圧送性をはじめとするコンクリートの諸性状を定量的に把握する方法としてオーソライズされている回転粘度計を用いてレオロジー定数（塑性粘度及び降伏値）を把握する方法の解説とコンシステンシー試験の測定結果とレオロジー定数との関係性を整理し、中・高流動コンクリートがビンガム体に近似する挙動を示していることを実験的に確認している。

第3章「中・高流動コンクリートのレオロジー測定【管型粘度計】」では、コンクリートの管内流動の基礎理論を述べるとともに、新しいコンシステンシー試験方法として管型粘度計（圧送試験装置）を試作し、

任意の圧送圧力に対応する流量 3 組とスランブフローと付着力との実験式から求めた付着力を求め、ビンガムの流量式に代入して三元連立で解くことにより、未知数である塑性粘度、降伏値および粘性摩擦係数を求めることができ、これを用いて任意の配管における流量の予測を行うことが出来ることを示している。

また、管長を 1.0m 以上とし管型粘度計を用いて推定した塑性粘度および降伏値は、回転粘度計による測定値と比較的良く近似しており、費用も安価ではあり、画像解析のような熟練は特に必要なく、試験に要する時間は回転粘度計に比べ著しく短縮できることを示している。しかし、一般に中・高流動コンクリートのコンシステンシー試験方法として用いられている試験値と回転粘度計によるレオロジー一定数との関係は高い相関関係（相関係数 0.9 以上）を示し、圧送性評価に活用できる可能はあるものの、スランブフローと降伏値との関係を示す実験式において、中流動コンクリートと高流動コンクリートとでは、その傾きも異なっており、同じフロー値であっても、塑性粘度や降伏値は相違しているため、これらの実験式を一律に活用して、レオロジー一定数を推定することはできず、コンクリートの圧送性評価に活用する場合などでは使用材料の物性及び配合が常に一定であることが必要となり、工事現場において納入されるコンクリートに迅速に対応することは困難であり必ずしも有用な方法であるとはいえず課題も見出している。

第 4 章「中・高流動コンクリートの新たな管内流動の模式化【2 層流れ】」では、従来の研究成果では、コンクリートがビンガム体に近似した挙動を示すことから、管内における流量は、ビンガム式をベースに管壁での滑りを考慮した式を用いていることから、管壁における滑り現象は、コンクリートが管壁で液体摩擦状態にあると仮定しているため、コンクリートの流量を予測するには、塑性粘度、降伏値、粘性摩擦係数及び付着力を物性値として、事前に把握することが必要であることを解説し、コンクリートの管内流動の解析モデルとして、「管壁での液体摩擦状態」に代わって、コンクリートと管壁との界面に薄い水膜が存在し、このコンクリートの壁面における滑りは、水膜部分が圧送圧力によって Newton 流れを生じて、水膜とコンクリートとが接する部分の流速は、コンクリートの滑り速度と等価と考え、管内には薄い水膜、その内側にコンクリートの層の流れ（2 層流れ）が生じていると仮定した新たな管内流動解析手法を提案するとともに、この仮定に基づき、水膜の厚さの推定を JSCE-F502 に用いる加圧ブリーディング装置を用いて実験的に検討し、管型粘度計による圧力勾配を 3 水準に変化させた実測流量から水膜部分の流速に伴うコンクリートの移動量（滑り量）及び水膜自体の流量を減じてビンガム流量を求めることを実験的に検討している。また、このようにして求めたビンガム 式を三元連立に解いて塑性粘度と降伏値とを求め、コンクリートの配管計画の基礎となるコンクリートの物性値を求める方法を提案し、回転粘度計による試験結果と比較することで、管型粘度計の試験値の信頼性を照査している。

また、管型粘度計に替わる改良 O 漏斗を用いて試料の量を変化（水頭差）させて流量測定を行い、加圧脱水量に基づく管壁の水膜の厚さを併用する方法により、補正係数を乗じてレオロジー一定数の概略値が簡易に推定できることを示している。

第 5 章「圧送可能領域の予測」では、近年のコンクリート工事においては、自己充填性と分離抵抗性を付与したコンクリートの必要性が高まっており、これら多様な条件に対応するために流動性と材料分離抵抗性を付与した中・高流動コンクリートの採用が増えつつあるが、この種のコンクリートは圧送実績も少なく、圧送量の確保だけでなく材料分離や圧送管内での閉塞の可能性など経験的知見が活用できないことから特殊な経路に圧送する場合のポンプ能力や配管径の選定にあたっては、工事計画に基づき所定の性能や打設量を確保するために事前に実際の配管状態を再現し試験圧送を行うなど多大な労力や費用を費やしている。

これに対し、試験圧送をすることなくポンプ能力を選定でき、且つ圧送の可否を予測することができれば、コンクリートの配合修正の省力化やポンプ施工の合理化に寄与することから、第 4 章で述べた管内流動モデルの「管壁での液体摩擦状態」に代わり、コンクリートと管壁との界面に薄い水膜が存在すると仮定した「水の薄層とコンクリートの層（2 層流れ）」の流動モデルを活用し、レオロジー一定数を推定する方法について、中・高流動コンクリートの管壁面に生じる水の膜厚から、当該コンクリートの圧送可能領域の予測について検証した。その結果、今回実験に用いたコンクリートの性状の範囲については、配合設計や圧送に先立って「2 層流れ」を仮定した流量モデルを活用し、圧送管内の管壁面の水の膜厚と粘性とのデータを蓄積することで圧送による分離の可能性の領域を予測し、配合修正や品質管理の一助とすることが可能であることを示している。

第6章「結論」では、本研究で得られた成果を要約し、本研究の結論を述べるとともに、事例による検証と残された課題を提起している。

以上のように、本論文は中流動および高流動コンクリートの流動性や圧送性を把握することを目的にフレッシュコンクリート用管型粘度計（圧送試験装置）を試作し、レオロジー評価に基づく新たな管内流動のモデルを模式化してその性状を評価する手法を提案するとともに改良 O 漏斗を用いて簡易に圧送可能領域を予測する方法を実験的に実証したものである。特に本研究で仮定したコンクリートの圧送管内に関する流量モデルについて、管内の壁面では水の薄層が存在し、水とコンクリートの層との流れが生じ、その水の膜厚を予測することで、レオロジー定数（塑性粘度や降伏値）が得られるとともに流量予測やポンプ能力の選定が可能となることは、従来の管内流動の概念を一新したものである。

本研究は、流動性を付与したコンクリートの流動性・圧送性の把握に関わる簡易な試験方法の立案並びに試験圧送による労力や費用、環境負荷の軽減など経済性の合理化に寄与し、新たな知見を見出したものであり、この成果は、生産工学、特にコンクリート工学の発展に寄与するものと評価できる。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

令 和 3 年 3 月 4 日