

論文 高水圧下における水中不分離性コンクリートの初期流動性に関する一考察

溝淵利明*1・岸田哲哉*2・平石剛紀*3・高田和法*4

要旨：水中不分離性コンクリートは、水中において材料分離せず、ポンプによる施工が可能であり、高いセルフレベリング性を有しているが、今後建設が予想される大規模橋梁基礎では、水深100mを超える大水深下での建設の可能性があるが、高水圧下でも同様の性状を有しているか把握する必要がある。そこで、大水深下での水中不分離性コンクリートの流動性を把握するために、水圧を変化させることが可能な装置を用いて、水中下でのスランプフロー試験を実施した。検討の結果、水中下でのスランプフローは、水圧及び空気量の影響を受けず、気中でのスランプフローと同程度となることが明らかとなった。

キーワード：水中不分離性コンクリート、高水圧、初期流動、スランプフロー、早期判定

1. はじめに

水中不分離性コンクリートは、大規模橋梁基礎をはじめこれまでに多くの水中構造物に適用されてきている。水中不分離性コンクリートの特徴は、水中においても材料分離せず、ポンプによる施工が可能であり、また、セルフレベリング性の高いところにある。

最近では、立坑底版などの水中鉄筋コンクリートに適用されるようになってきており、従来の水中不分離性コンクリートよりもさらに高い流動性及び自己充填性が求められてきている。さらに、立坑底版や橋梁基礎などは比較的マシな構造物となることから、耐久性の点から初期欠陥である温度応力によるひび割れの抑制対策を検討する必要があると考えられる。また、今後建設が予想される大規模橋梁では明石海峡大橋橋梁基礎（水深約60m）¹⁾よりもさらに大水深下での建設の可能性があるが、高水圧下での性状を把握する必要がある。特に、大水深下でかつ鉄筋コンクリート構造物となった場合には、高水圧下で高い流動性が要求されることとなる。

これまでも水中不分離性コンクリートの水中流動性に関する検討は行われているが^{2),3)}、高水圧下の性状を検討したものはほとんどないのが現状である。

一方、水中不分離性コンクリートは流動性の指標としてスランプフローを用いているが、コンクリート自体の粘性が高く、コンクリートの流動が停止するまでに長い場合には10分以上となることがある。したがって、早期に流動特性を把握することが難しく、品質の安定性などの点から早期に判定する方法が必要である。

本報文では、水中不分離性コンクリートを用いた大水深下での鉄筋コンクリートを対象に、高水圧下での流動性を把握するための第1歩として、水圧を変化させることが可能な装置を用いて、水中下でのスランプフローの流動挙動について行った実験結果を報告するものである。また、水中不分離性コンクリートのスランプフロー試験における初期流動性に着目し、スランプフローの早期判定を行うことの可能性についても併せて報告するものである。

*1 鹿島技術研究所 LCEプロジェクトチーム 工修（正会員）

*2 日本海上工事 工務部 工修（正会員）

*3 鹿島技術研究所 土木技術研究部 材料・施工グループ（正会員）

*4 鹿島建設 東京支店 大井戸工事事務所 工修（正会員）

2. 検討の概要

2.1 実験の要因と水準

水中不分離性コンクリートの初期流動性に関する実験では、表-1に示すようにスランプフロー及び空気量を変化させて行った。また、比較のために明石海峡大橋橋梁基礎に用いた配合¹⁾と同一の配合条件についても実験を行った。

高水圧がスランプフローに及ぼす影響に関する実験では、表-1に示すように空気量及び水圧を変化させて行った。また、スランプフローに関しては60cmとした。空気量を2~8%まで変化させたのは、空気量の増大によって高圧下での流動性が大きく変化するのではないかと予想したためである。

2.2 使用材料及びコンクリート配合

大水深下でかつ鉄筋コンクリート構造物であることを想定した場合、これまでの水中不分離性コンクリートよりも高い流動性が必要となる。一方、これまで水中不分離性コンクリートに適用してきた混和剤（高縮合トリアジンを含む高性能減水剤）は、多量添加した場合水中不分離剤の効果を低減させるだけでなく、硬化遅延を生じさせる原因となる。したがって、高い流動性を確保するためには混和剤の添加率を増加させることが難しく、単位水量を増加させる必要があるが、その場合単位セメント量の増加により温度ひび割れ発生の可能性が高くなるなどの問題が生じることとなる。

そこで、本検討では従来用いられてきた高性能減水剤に変えて、高流動コンクリート等で用

表-1 実験の要因と水準

項目	検討要因	検討水準
スランプフローの初期流動性に関する実験	目標スランプフロー(cm)	40, 50, 60, (52.5)
	空気量(%)	2, 5, 8
高水圧下でのスランプフロー試験	目標スランプフロー(cm)	60
	空気量(%)	2, 5, 8
	水圧(Mpa)	0.1, 0.3, 0.6, 1.0

表-2 使用材料

使用材料	摘要
セメント	低熱ポルトランドセメント(密度3.22g/cm ³ ,比表面積3360cm ² /g)
細骨材	新潟産川砂(表乾密度2.62g/cm ³ ,F.M.2.68)
粗骨材	奥多摩産砕石(表乾密度2.65g/cm ³ ,F.M.6.67)
石灰石微粉末	炭酸カルシウム(密度2.73g/cm ³)
AE減水剤	リグニンスルホン酸化合物(明石の配合に使用)
高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系,高縮合トリアジン(明石の配合に使用)
水中不分離剤	水溶性セルロースエーテル

いられているポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤を用いることとした。ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤は、高い流動性保持能力があり、さらに多量添加しても凝結遅延や硬化不良を生じることが少ない特性を有している⁴⁾。

セメントは、これまでの大規模橋梁基礎などで三成分系セメントを用いられてきたが、各混和材料の品質安定性の確保、混合後の品質管理などを考慮して、三成分系セメントと同等以上の水和熱抑制効果のある低熱ポルトランドセメントを用いることとした。さらに、単位セメント量の増大を抑制するために石灰石微粉末を用いた。本実験で使用した材料を表-2に示す。

コンクリート配合は、水セメント比、単位粗骨材量及び粉体量を一定とした。ただし、本検討では空気量の変化が初期流動性に及ぼす影響に関して実験を行っていることから、空気量の変化に対しては、細骨材量で調整することとした。コンクリート配合を表-3に示す。また、

表-3 コンクリート配合

No.	水セメント比 (%)	S.F* (cm)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				水中不分離剤 (×%)	AE減水剤 (P×%)	高性能減水剤 (P×%)	
					水	セメント	石灰石微粉末	粗骨材				粗骨材
0	69.7	52.5	-	40.0	223	320	-	679	1030	1.00	0.30	1
1	60.0	60.0	2.0	36.3	220	367	116	573	1018	1.15	-	2.0
2			5.0	33.0				417				
3			8.0	25.2				339				
4			2.0	39.5				658				
5	50.0	50.0	5.0	36.5	185	308	175	579	1018	1.15	-	2.0
6			8.0	33.2				500				
7			40.0	2.0				41.2				

*目標スランプフロー

No.0; 明石海峡大橋で用いた配合条件と同等な配合, P:粉体量(セメント+石灰石微粉末)

スランブフローの早期判定において比較のために実施した明石海峡大橋で用いられた配合において、明石海峡大橋ではセメントに三成分系セメントを用いたが、本検討では低熱ポルトランドセメントを用いた。また、配合表に示した空気量は、試験時の目標値を示したものである。

表-3において、スランブフローの初期流動性に関する実験では No.0~7, 高水圧下での実験では No.1~3 までを用いて行った。

2.3 実験方法

(1). スランブフローの初期流動性実験

スランブフローの初期流動性に関する実験では、試験開始直後のスランブフローの広がる速度が重要であると判断し、スランブフロー試験において、スランブコーン引上げ後5分まで30秒間隔でスランブフローを測定した。また、5分以降はスランブフローが停止するまで5分間隔でスランブフローを測定した。ただし、コーン引き上げ後30分以上経過すると、コンクリート表面が乾燥し、流動性が極端に低下する傾向が見られたことから、測定は30分までとした。

(2). 高水圧下でのスランブフロー試験

本実験では、水深100mまでの水圧下でのスランブフローの変化を評価するために、**図-1**及び**写真-1**に示す高圧スランブフロー試験装置(以下試験装置と称す)⁵⁾を作製した。試験装置は、1.0MPa(10気圧)まで加圧可能な鋼製の圧力水槽内に自動昇降可能なスランブコーンを設置し、水中加圧下においてスランブフロー試験を可能にしたものである。コンクリートの流動状況は、水槽上部にある観察窓にビデオカメラを設置し、録画及び観察を行った。

実験手順は、コンクリート練混ぜ後、試験装置内のスランブコーンにコンクリートを充填し、試験装置を

密閉後、水槽内下方の注水弁から試料を乱さないように注水を行った。試験装置内のスランブコーンに試料を投入と同時に、気中試験用のスランブコーンにもコンクリートを投入した。試験装置が満水になったことを確認した後に所定の水圧を加え、水中及び気中で同時にスランブフロー試験を行った。水中スランブフロー試験では、試験開始から5分までビデオによる録画を行い、30秒間隔で水中スランブフローを測定し、流動速度を求めた。その後20分経過時点で除圧、排水を開始し、排水が終了した時点(開始後約30分)でスランブフロー(以下水中最終スランブフローと称す)を測定した。気中スランブフローに関しても水中最終スランブフローの測定と同時刻でスランブフローを測定した。

3. 実験結果

3.1 スランブフローの初期流動性実験⁶⁾

従来の高性能減水剤にAE減水剤を加えた配合(ケース0)とポリカルボン酸系混和剤を用いた配合で目標スランブフロー60cmの場合(ケース1)の試験開始後30分までのスランブフロー変化を**図-2**に示す。ケース0は、試験開始10分以降スランブフローの変化はほとんど見られなかったのに対して、ケース1ではケース0の2倍以上の試験開始後25分でほぼ



写真-1 高圧スランブフロー試験装置

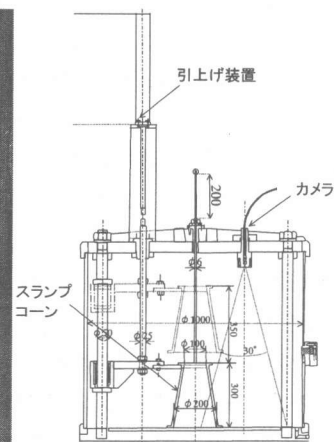


図-1 試験装置の概要

停止する結果となった。これは、比較的長い時間変形性能を有していることを示すものであり、適切な打設速度を選定してやればこれまでよりもさらに充填性に優れたコンクリートになるものと考えられる。

次に、目標スランプフロー別のスランプフロー変化を図-3に示す。各ケースともスランプフロー停止時間は、25~30分であった。試験開始から10分までは、各ケースでスランプフロー速度が異なり、目標スランプフローが大きいほど速い傾向にあった。一方、試験開始10分以降のスランプフロー速度は、各ケースともほぼ同様となる結果であった。目標スランプフロー60cmにおける空気量の違いがスランプフロー変化に及ぼす影響については、図-4に示すように各ケースでほとんど同様な傾向を示す結果となった。

スランプフローの流動速度の時間変化については、図-5に示すように試験開始後60秒までは各ケースで大きく異なるものの、それ以降は徐々に流動速度が小さくなり、開始後10分ではほぼ同様な値を示す結果となった。特に、試験開始後30秒までは各目標スランプフローで大きく異なる結果となった。試験開始30秒までのスランプフロー速度（以下初期流動速度と称す）とスランプフローとの関係を図-6に示す。図-6から、目標空気量2%の範囲においては目標スランプフローに関係なく初期流動速度が大きいほどスランプフローが大きくなる傾向にあり、比較的高い相関関係（相関係数:0.91）がある。これは、スランプフローの早期判定方法として初期流動速度を適用できる可能性があることを示すものである。一方、目標空気量が5%以上になると目標空気量2%と同様な傾向はあるものの比較的ばらつきが大きく、初期流動速度からスランプフローを推定評価することは、今回のデータのみでは難しい結果となった。

3.2 高水圧下でのスランプフロー試験

水圧及び空気量を変化させた場合のスランプフローの試験結果を図-7~9に示す。水圧

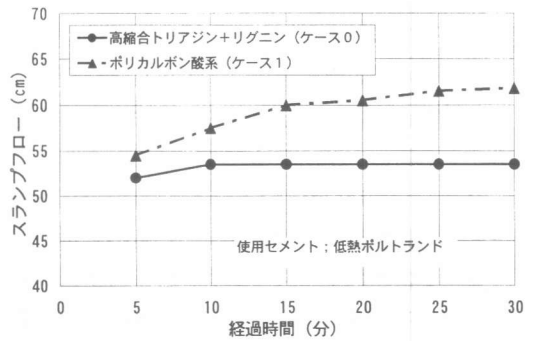


図-2 スランプフローと経過時間との関係

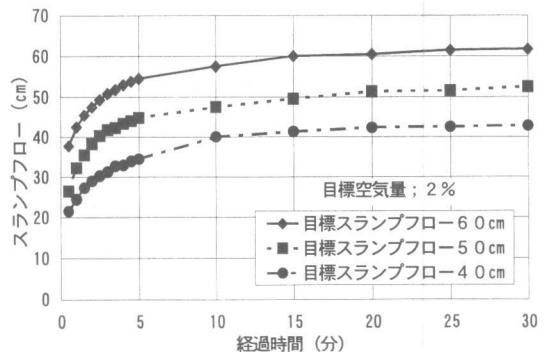


図-3 スランプフローの違いと経過時間

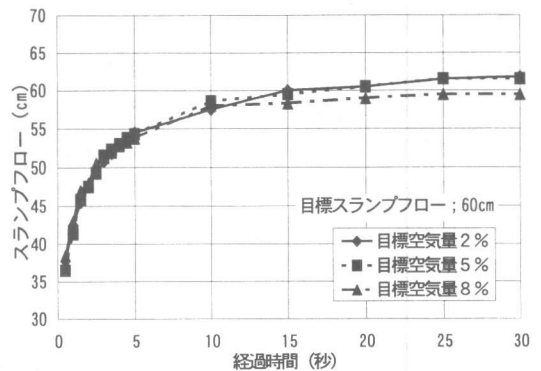


図-4 空気量がスランプフローに及ぼす影響

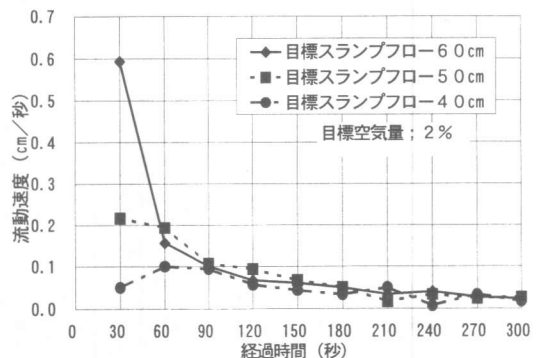


図-5 流動速度と経過時間との関係

の変化に対しては、スランプコン引上げ直後において 1.0MPa のケースを除いて水圧の大きいほどスランプフローが大きくなる傾向が見られたが、時間経過とともに水圧による影響は徐々に小さくなり、5分後には各水圧ともほぼ同じスランプフローを示す結果となった。水圧が 1.0MPa での空気量の変化に対する影響は、空気量 2% の場合極初期におけるスランプフロー変化が他のケースに比べて小さいものの、150 秒以降は各ケースともほぼ変わらないスランプフロー変化を示した。

スランプコン引上げ後 30 分経過した時点でのフローは、図-9 に示すように水圧増加に伴う変化は比較的小さい結果となった。空気量 2、8% の場合、水圧がかかることで気中の値よりも若干大きくなるものの、水圧変化に対する変化はほとんど見られなかった。空気量 5% の場合には、水圧の増加に伴い増加する傾向が見られたものの、その変化は 0.5cm/0.1MPa 程度であった。試験開始から 30 分経過した気中でのスランプフローに対する水中スランプフローの比（以下スランプフロー比と称す）と水圧・空気量との関係は、図-10 に示すように水圧及び空気量の変化に対してスランプフロー比がほぼ 1.0 となり、本実験の配合の範囲では、水中下でのスランプフローが水圧及び空気量に影響されず、気中で測定したスランプフローとほぼ同程度となった。

初期流動速度に関しては、図-11 に示すように水圧 0.1 及び 0.3MPa と比較的小さい範囲で気中と同様に空気量の増加に伴い初期流動速度が速くなる傾向が見られたが、水圧が 0.6 及び 1.0MPa では、明確な傾向は見られなかった。これはコンクリート中の気泡が水圧の上昇に伴い圧縮され、見かけの空気量の差が小さくなったためと考えられる。

初期流動速度とスランプフローとの関係では、図-12 に示すように気中で得られたような傾向は見られず、初期流動速度に関係なく一定のスランプフローになるようである。これに関

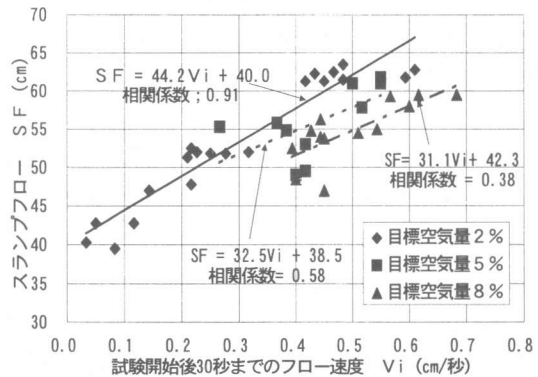


図-6 初期流動速度とフローとの関係

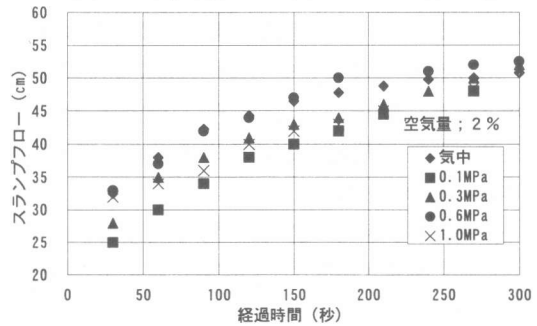


図-7 各水圧でのスランプフローの変化

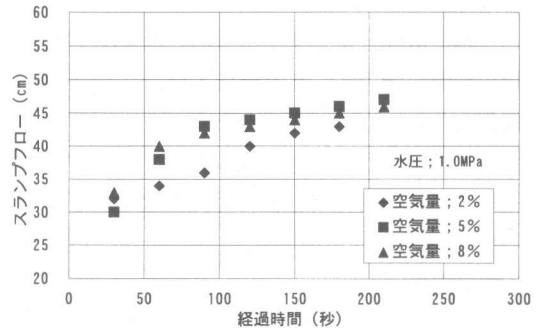


図-8 各空気量でのスランプフローの変化

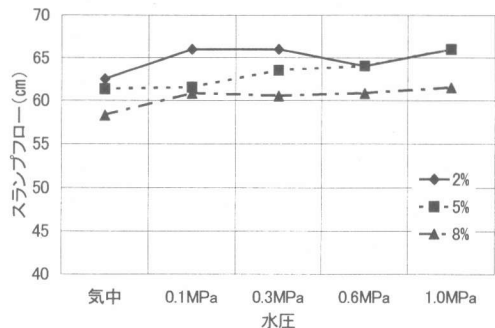


図-9 スランプフローと水圧との関係

しては、本検討が特定の条件下のみであることから、スランプフローを変化させた場合などについてさらに検討していく必要がある。

4. まとめ

水中不分離性コンクリートの初期流動性に関する実験を行った結果、ポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤と低熱ポルトランドセメントを用いることで、気中においてスランプフローの流動時間が従来の配合に比べて長くなること、空気量の変化による影響が小さいことが明らかとなった。また、試験開始 30 秒までの初期流動速度がスランプフローと高い相関関係があったことから、スランプフローの早期判定方法として初期流動速度を適用できる可能性があると考えられる。

空気量及び水圧の違いが水中下でのスランプフローに及ぼす影響については、水中不分離性コンクリートの初期流動速度が 0.3MPa 以下の低水圧下の場合空気量の増加に伴い速くなるが、高水圧下ではその傾向は見られなかったこと、水中最終スランプフローは、水圧及び空気量の影響を受けず、気中最終スランプフローと同程度となることが明らかとなった。

今後はスランプフローなどの配合条件を変えて、同様の検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 岡田凌太, 坂本光重, 井保武寿, 中川良隆: 明石海峡大橋主塔基礎の水中コンクリートの施工, コンクリート工学, vol. 30, No. 12, pp31-42, 1992. 12
- 2) 大友忠典, 溝淵利明ほか: 水中不分離性コンクリートの流動に伴う品質変化について, 鹿島建設技術研究所年報 第 38 号, pp9-16, 1990. 10
- 3) 高橋昇, 保坂鐵矢: 水中不分離性コンクリートを用いた海面下 20m の橋脚基礎の施工 (関西国際空港連絡橋), 水中不分離性コンクリートに関するシンポジウム論文集, pp223-228, 1990. 8
- 4) 土谷正, 大川裕: 水中不分離性コンクリートに対するポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤の適用, 土木

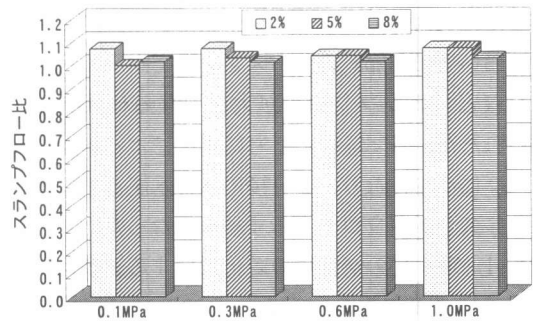


図-10 スランプフロー比と水圧との関係

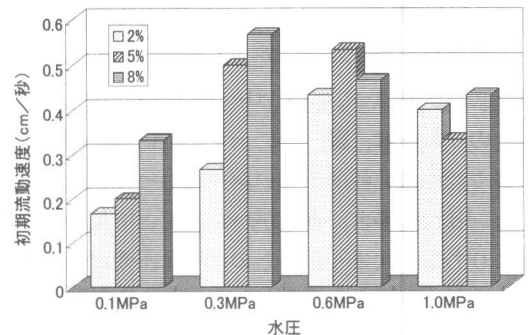


図-11 初期流動速度と水圧との関係

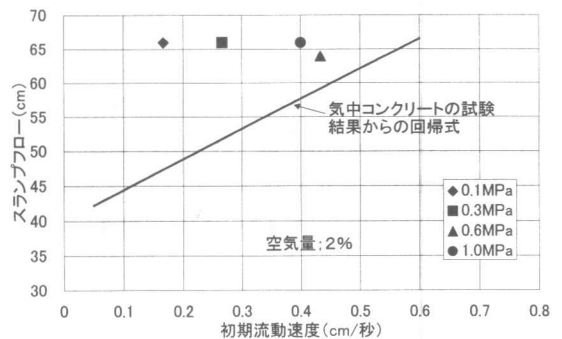


図-12 初期流動速度とスランプフローとの関係 (水中)

学会第 54 回年次学術講演会講演概要集 第 5 部, pp1004-1005, 1999. 9

- 5) 岸田哲哉, 高田和法, 平石剛紀, 溝淵利明, 藤田時男: 高水圧下における水中不分離性コンクリートの流動性に関する一考察, 土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集 第 5 部, pp1006-1007, 1999. 9
- 6) 溝淵利明, 高田和法, 平石剛紀, 岸田哲哉, 藤田時男: 水中不分離性コンクリートの初期流動性に関する一考察, 土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集 第 5 部, pp1008-1009, 1999. 9