論文　水中不分離性コンクリートの流動性に及ぼす水圧の影響

岸田 哲哉*1・高田 和法*2・大野 俊夫*3・田崎 邦男*4

要旨：水中不分離性コンクリートを対象に，水圧をかけた容器の中でスランプフロー試験を行うことのできる特殊装置を用い，高圧水中下でスランプフロー試験を行った。目標スランプフロー値を 50～70 cm，水圧を 0.4～1.0MPa に変化させ，同時に行った常圧水中下（0.1MPa），常圧気中下のスランプフロー値と比較することにより，水圧が水中不分離性コンクリートの水中での流動性に及ぼす影響を評価した。その結果，十分な流動性を有する水中不分離性コンクリートの流動性には水圧の影響はほとんどなく，常圧気中スランプフロー値と同程度となることなどが明らかとなった。

キーワード：水中不分離性コンクリート，高水圧，水中，スランプフロー，流動性

1. はじめに

水中不分離性コンクリートは，水中においても材料分離せず，高いセルフレベリング性を有するコンクリートであり，これまでに多くの使用実績がある[1)]。最近では，高深度の立坑底版や橋脚基礎などの水中鉄筋コンクリートにも使用されており，これまでの水中不分離性に加え，高い流動性と充填性が求められるようになってきている。筆者らはこれまで，水中下のコンクリートと底面の摩擦が流動性に及ぼす影響などについて検討してきている[2)]。水中不分離性コンクリートは，今後さらに大水深下で水中鉄筋コンクリートとして使用されることも考えられ，高圧水中下でのコンクリートの流動性を把握しておくことは重要と考えられる。

これまで水中でのコンクリートの流動性に関する検討はおこなわれているが[3),4)]，水深 100 m程度までの大水深を対象としたコンクリートの流動性に関する検討は少なく，流動性が低下するという報告[5)]や流動性に及ぼす水圧の影響は小さいという報告[6)]など，統一された見解が得られていないのが現状である。

高水圧下ではコンクリート中の空気泡が押しつぶされることによる流動性の変化，浮力の作用や水膜のベアリング効果による下面との摩擦抵抗の変化，水圧と自重のバランスの相違による流動性の変化など，様々な要因が影響していると考えられる。

本報文では，大水深下での水中不分離性コンクリートの流動性状の把握を目的とし，水圧 1.0MPa まで加圧することが可能な，高圧水中スランプフロー試験機を用い，高圧水中下，常圧水中下および常圧気中下でスランプフロー試験を実施し，水圧が水中不分離性コンクリートの水中流動に与える影響を実験的に評価した結果について報告するものである。

2. 実験概要

2.1 試験水準

試験水準を**表－1** に示す。水圧の大きさや目標スランプフローの大きさが水中スランプフローに与える影響を評価するため，水中不分離性

*1　日本海上工事（株）　水工事業部　工務部　技術課　主任　工修　（正会員）
*2　鹿島建設(株)　技術研究所　土木構造グループ　主任研究員　工修　（正会員）
*3　鹿島建設(株)　技術研究所　土木構造グループ　上席研究員　工博　（正会員）
*4　日本海上工事（株）　水工事業部　工務部　部長　（正会員）

コンクリートの目標スランプフローを気中スランプフロー値で50，60および70㎝の3水準とした。なお，目標スランプフローは後述する理由により，スランプコーン引上げから30分後の測定値である。水圧の大きさを 0.1（常圧水中下），0.4，0.7および1.0MPaの4水準に変化させ試験を実施した。

2.2 使用材料およびコンクリートの配合

大水深下での鉄筋コンクリート構造物を想定した場合，これまでの水中不分離性コンクリートよりも，高い流動性と自己充填性が求められる。流動性を向上させるためには混和剤量を増加させる必要があるが，これまで水中不分離性コンクリートに使用されてきた高縮合トリアジン系化合物を過多に増加させると，凝結始発時間の大幅な遅延や硬化不良を起こす原因となる。そのため，高流動コンクリートや高強度コンクリート等で使用されているポリカルボン酸系高性能AE減水剤を使用することとした[7]。また，流動性が向上し流動距離が長くなると，流動先端で材料分離を起こす可能性があり，材料分離を抑制する必要がある。

材料分離抵抗性を向上させるために水粉体容積比を小さくする必要があるが，粉体であるセメント量を増加させることは，温度ひび割れの発生する可能性を高くするため，単位セメント量の増大を抑制する目的で石灰石微粉末を使用した。セメントは水和熱抑制効果のある低発熱セメント，水中不分離性混和剤は水溶性セルロースエーテル系を使用した。使用材料を**表－2**に示す。

試験に供したコンクリートの配合を**表－3** に示す。目標スランプフローは単位水量により調整を行った。空気量 2.0%，単位粗骨材容積を

表－1 試験水準

Case	目標スランプフロー（cm）	水圧（MPa）
50－1	50	0.1（常圧水中下）
50－4		0.4（4気圧）
50－7		0.7（7気圧）
50－10		1.0（10気圧）
60－1	60	0.1（常圧水中下）
60－4		0.4（4気圧）
60－7		0.7（7気圧）
60－10		1.0（10気圧）
70－1	70	0.1（常圧水中下）
70－4		0.4（4気圧）
70－7		0.7（7気圧）
70－10		1.0（10気圧）

表－2 使用材料

材料名	記号	摘　　要	備考
セメント	C	低熱ポルトランドセメント 密度：3.22g/cm^3 比表面積：3,250g/cm^3	温度ひび割れの抑制を考慮
細骨材	S	静岡産山砂　表乾密度：2.62g/cm^3 F.M.：2.87	－
粗骨材	G	奥多摩産砕石　表乾密度：2.65g/cm^3	－
石灰石微粉末	LP	舗装用フィラー　密度：2.73g/cm^3 比表面積：3,300g/cm^{3}程度	材料分離抵抗性を考慮
水中不分離性混和剤	UWB	水溶性セルロースエーテル系	－
高性能AE減水剤	SP	ポリカルボン酸系（標準形）	流動性保持・凝結時間を考慮

表－3 コンクリートの配合

目標ｽﾗﾝﾌﾟﾌﾛｰ（㎝）	W/C（%）	s/a（%）	Air（%）	単位量(上段:kg/m^3，下段:l/m^3)						
				W	C	LP	S	G	UWB	SP
50	60	44.9	2.0	185	308	175	747	928	W×1.15%（2.13kg）	P×2.0%（9.66kg）
					96	64	285	350		
60	60	42.0	2.0	220	367	116	663	928	W×1.15%（2.53kg）	P×2.0%（9.66kg）
					114	43	253	350		
70	60	37.3	2.0	270	450	33	545	928	W×1.15%（3.11kg）	P×2.0%（9.66kg）
					140	12	208	350		

350 l/m^3，単位粉体量を 483kg/m^3，水中不分離性混和剤は単位水量の 1.15%，高性能 AE 減水剤は単位粉体量の 2.0%とした。

ポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤と石灰石微粉末を使用することによって，流動時間が長く，流動距離が長くなっても材料分離を起こしにくい水中不分離性コンクリートとなり，スランプフローは 30 分以上流動し続けることから，目標スランプフローは 30 分後の値とした。

2.3 実験方法

図－1 に本実験のために製作した高圧水中スランプフロー試験装置（以降，高圧試験装置と称す）の概要，**写真－1** に外観を示す。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プコーンを設置し，水中加圧下においてスランプフロー試験を可能にしたものである。

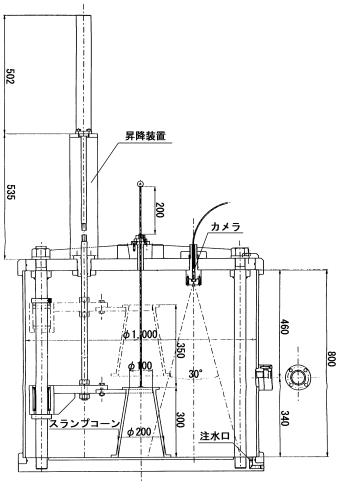
高圧水中下の水中不分離性コンクリートの流動過程は，圧力水槽上部にある観察窓よりビデオカメラにより録画を行い，テレビ画面を通して観察を行った。常圧水中スランプフロー試験は深さ 50cm の水槽内で，スランプコーン上部から 5 cmまで水を溜め，水中下でスランプフロー試験を実施した。常圧気中スランプフロー試験は，通常のスランプフロー試験を行った。試験の模式図を**図－2** に示す。

コンクリートは，強制二軸式ミキサ（容量 100 l，回転数 60rpm）を用い，60 l の容量を練り混ぜた。セメント，石灰石微粉末，細骨材，粗骨材および水中不分離性混和剤を投入し，空練りを 30 秒行った後，高性能 AE 減水剤を含む水を投入し，90 秒練り混ぜて排出した。実験手順は，コンクリート練り混ぜ後，高圧試験装置内のスランプコーンにコンクリートを充填し，高圧試験装置を密閉後，試験装置下方の注水口から注水を行った。また，高圧試験装置内のスランプコーンに試料を充填するのと同時に，常圧水中と常圧気中スランプフロー試験用のスランプコーンにも試料を充填した。常圧水中スランプフロー試験では，試料の充填後にバケツにより水を水槽内に注水した。高圧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，高圧水中，常圧水中および常圧気中のスランプコーンを同時に引き上げスランプフロー試験を開始した。なお，圧力が異なるケース（0.4,0.7,1.0MPa）ではそれぞれコンクリートを練り混ぜ，その都度，常圧水中および常圧気中試験を行った。

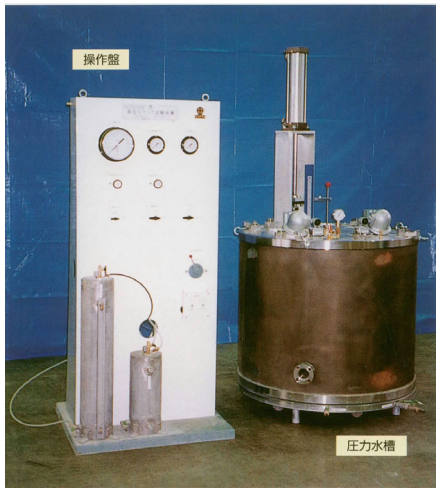
スランプフローの測定は，試験開始から 5 分まで 30 秒間隔，それ以降 30 分まで 5 分間隔で測定し，試験開始 5 分までは各 30 秒間の流動距離を時間（30 秒）で除して流動速度を求めた。

3. 実験結果および考察

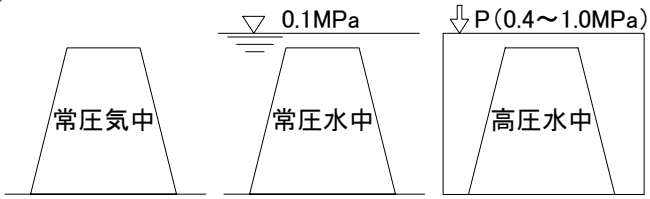
目標スランプフロー別の試験結果を**図－3～5** に示す。なお 0.1MPa（常圧水中），常圧気中試験の結果は，水圧の異なる各ケースで行った試験の平均値である。目標スランプフロー50cm で



図－1 高圧試験装置の概要



写真－1 高圧試験装置の外観



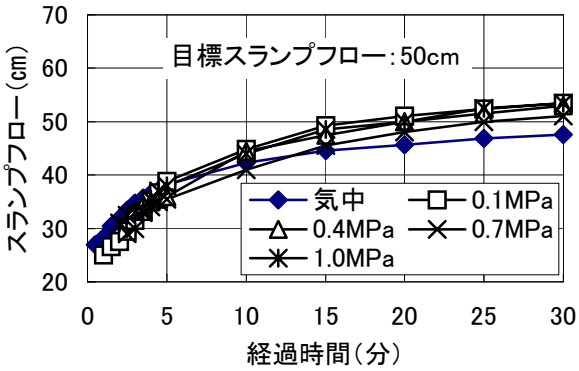
図－2 試験の模式図

は試験開始から 10 分までは常圧気中，常圧水中および高圧水中試験ともに同程度のスランプフロー値であったが，15 分経過したころから，常圧気中試験のスランプフロー値の増加量が少なくなり，30 分経過後において高圧水中，常圧水中試験のスランプフロー値は，常圧気中試験に比べ，5 cm程度大きくなった。これは後述するようにコンクリートの変形性能が小さく，水中下の試験では流動先端にモルタル分の多い箇所ができたためと考えられる。目標スランプフロー60，70cm のコンクリートは高圧水中，常圧水中および常圧気中試験ともにほぼ同様なスランプフローの経過となった。

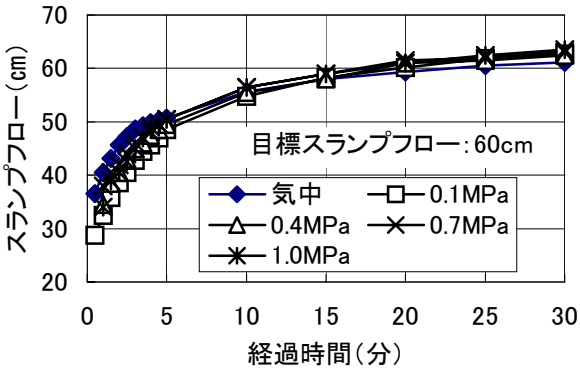
図－6 に各ケースで行った常圧水中スランプフロー値と常圧気中スランプフロー値の関係，**図－7** に常圧気中スランプフロー値を基準とした時の常圧水中スランプフロー値の比（以降，常圧水中/常圧気中比と称す）を示す。目標スランプフロー60，70 cmは常圧水中と常圧気中のスランプフロー値はほぼ同様の値となった（常圧水中/常圧気中比≒1）。これは**図－8** の流動速度の経時変化（目標スランプフロー70 cm）に示すように，良好な流動性を有する水中不分離性コンクリートでは，水圧の差によって初期の流動速度（流動開始から 30 秒までの平均流動速度）[8] に大きな違いも見られず，経過時間 30 秒の時点でスランプフロー値は 39～42cm であり，高圧水中下においても常圧水中，常圧気中とほぼ同様の流動速度でコンクリートが流動して高圧水中，常圧水中および常圧気中で同様の流動性状が得られたためと考えられる。

一方，目標スランプフロー50cm においては常圧水中スランプフロー値が若干大きくなり，常圧水中/常圧気中比が 1.12 となった。これは**図－9** に示すようにコンクリートが水中で流動しようとする時，コンクリート部分から粗骨材が転がり落ち，その後モルタルが粗骨材を覆い込むように流動するという，気中とは異なる現象が見られたことに起因している。

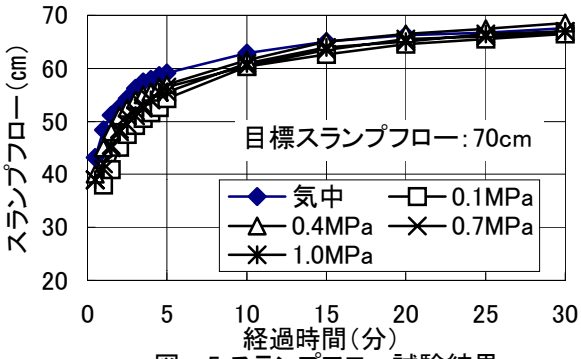
空気に比べ水は粘性抵抗が大きく，コンクリ



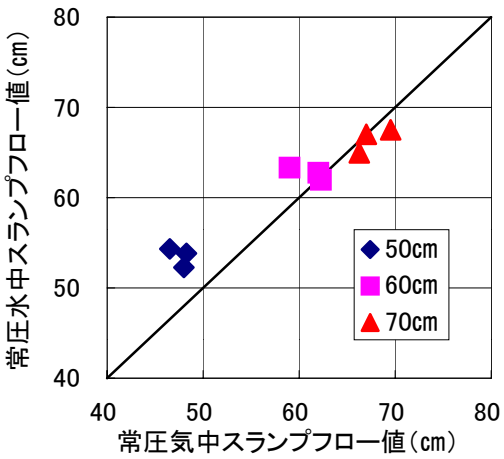
図－3 スランプフロー試験結果



図－4 スランプフロー試験結果



図－5 スランプフロー試験結果

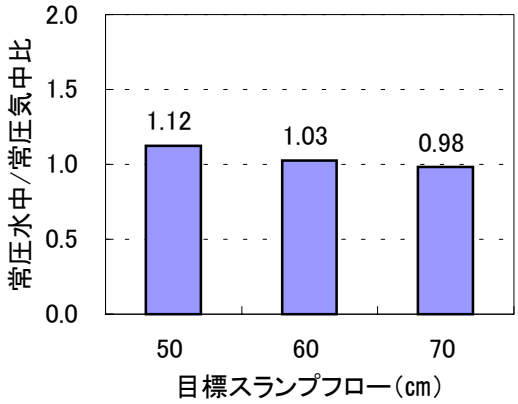


図－6 常圧水中スランプフロー値と
常圧気中スランプフロー値の関係

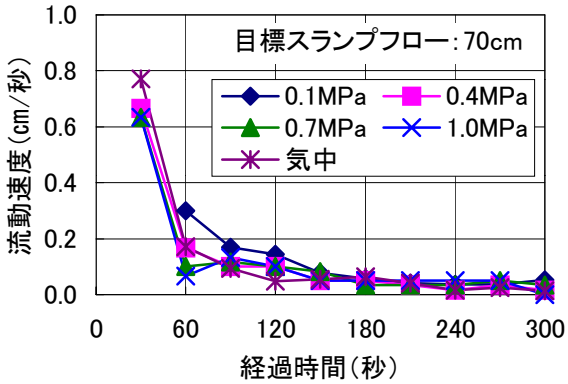
ートが側方へ移動しにくくなるため，モルタルの変形性能が比較的小さいコンクリートでは，粗骨材の移動にモルタルの変形が追随しにくくなり，粗骨材表面を覆っていたモルタルが水に洗われて部分的な分離が生じる。さらに，洗われたモルタル分が流動先端に押しやられることにより，裾野の広いスランプフロー形状になり，気中スランプフロー値よりも水中スランプフロー値の方が大きくなる結果となった。

図－10 に常圧水中スランプフロー値を基準とした時の各水圧下におけるスランプフロー値の比（以降，高圧水中/常圧水中比と称す）を示す。目標スランプフロー60，70 cmでは，どの水圧下においても 30 分経過後の高圧水中/常圧水中比は 1.00～1.01 内にあり，スランプフローに及ぼす水圧の影響はほとんどないことが分かった。目標スランプフロー50cm においても，図－9 に示すような現象により若干のばらつきはあるものの，0.95～1.01 の範囲内にあり，ほとんど水圧の影響は見られなかった。

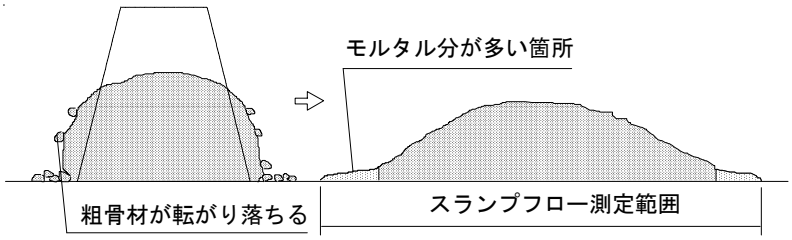
高圧水中下と常圧気中下を比較するため，常圧気中スランプフロー値を基準としたときの各水圧下(常圧水中下，0.1MPa 含む）におけるスランプフロー値の比（以降，高圧水中/常圧気中比と称す）を**図－11** に示す。目標スランプフロー50cm のコンクリートでは，前述の気中下と水中下での変形性能の違いから，高圧水中/常圧気中比が 1.06～1.15 と大きくなった。目標スランプフロー60cm のコンクリートでは 1.00～1.08 となり，水圧 1.0MPa 下において若干大きくなったが，これはこのときの気中スランプフロー値が 59 cmで，他の水圧下での試験の気中スランプフロー値（62～63cm）に比べ小さく，**図－9** のような現象が起こりやすくなったためと考えられた（常圧気中スランプフローが 60cm 未満：常圧気中＜常圧水中≒高圧水中)。目標スランプフロー70 cmにおいては 0.98～1.01 となり，高圧水中下のスランプフロー値は常圧気中下のものとほぼ変らず，気中スランプフローが 60cm を越えるような，十分な流動性を有する水中不分離



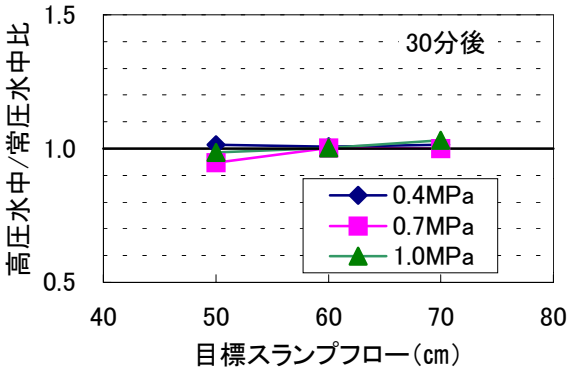
図－7 常圧水中/常圧気中比



図－8 流動速度の経時変化



図－9 水中スランプフローの形状（目標スランプフロー：50cm）



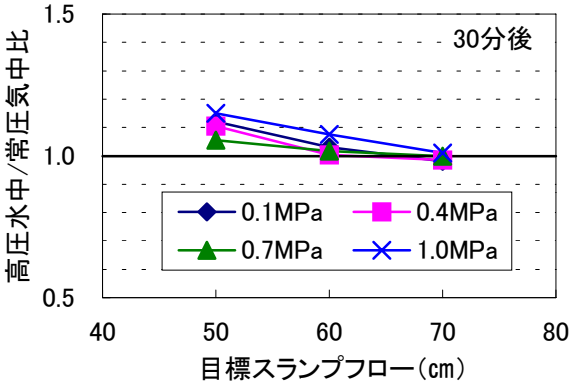
図－10 高圧水中/常圧水中比

性コンクリートは，常圧気中下でのスランプフロー試験で，高圧水中下のコンクリートの流動性能を評価することが可能であることが明らかとなった（常圧気中スランプフローが 60cm 以上：常圧気中≒常圧水中≒高圧水中）。

4. まとめ

大水深下におけるコンクリートの流動性を把握するため，水圧を変化させた高圧水中下，常圧水中下および常圧気中下でスランプフロー試験を実施した。今回試験を行った配合の範囲では，水圧の変化によって水中不分離性コンクリートの流動性には大きな変化は見られず，常圧水中下と同様の流動性状であり，水圧の影響はほとんどないことが確認された。しかし，コンクリートの変形性能の違いから，目標スランプフロー50 cmについては，水中スランプフロー値が気中スランプフロー値より若干大きくなることが確認され，変形性能の小さなコンクリートについては，高圧水中下の流動性状を評価するためには，常圧気中下と常圧水中下のスランプフロー値の相対関係を把握するなどの必要があると考えられる。一方，良好な変形性能を有するスランプフロー60 cm以上の水中不分離性コンクリートについては，両者の間に 1:1 の関係があり，常圧気中下で行うスランプフロー試験値で，高圧水中下のコンクリートの流動性を直接評価することができると考えられた。

高水圧下ではコンクリート中の空気泡が水圧で潰され，流動性が変化する可能性があるが，今回の実験では水圧の影響を評価するため，空気量が少ない水中不分離性コンクリートを対象とした。今後はこれらの影響についても検討を行うことにしている。



図－11 水中高圧/常圧気中比

参考文献

1) 岡田凌太，坂本光重，井保武寿，中川義隆：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, pp.31-42, 1992.12

2) 岸田哲哉，田崎邦男，柳井修司，大野俊夫：水中不分離性コンクリートの水中流動特性に関する一考察，土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集，第 5 部，pp.745-746, 2002.9

3) 山田宇一，内田明：特殊水中コンクリートの大型実験と現場施工，最新の施工技術・4，pp.45-54, 1988.1

4) 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，pp.223-228, 1990.8

5) 東京湾横断道路川崎人工島地中連続壁工事記録

6) 岸田哲哉，高田和法，平石剛紀，溝淵利明，藤田時男：高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，pp.1006-1007, 1999.9

7) 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，土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集，第 5 部，pp.1004-1005, 1999.9

8) 溝渕利明，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，pp.1008-1009, 1999.9