

混和剤が高流動コンクリートの流動特性に及ぼす効果

四国職業能力開発大学校 宮本 欣明

Study on the Effect of Admixtures on the Rheological Characteristics of High-Fluidity Concrete

Yoshiaki MIYAMOTO

要約 水セメント比が50%の高流動コンクリートについて、コンクリート用混和剤である高性能 AE 減水剤および分離低減剤の添加量が流動特性に及ぼす影響について検討した。流動特性は、J型フロー試験により算出するレオロジー定数（塑性粘度および降伏値）にて定量的に評価した。なお、スランブフロー試験もあわせて行い、スランブフロー値およびスランブフロー速度とレオロジー定数の関係について検討した。また、スランブフロー試験終了後にフロー中央部と外周部の試料中の粗骨材含有比を求め分離抵抗性を評価し、レオロジー定数との関係について検討した。また、Lフロー試験によりコンクリートの充填性を評価し、その結果とレオロジー定数との関係についても検討した。

その結果、高流動コンクリートの塑性粘度は分離低減剤量に支配され、降伏値は高性能 AE 減水剤量に支配されることが明らかになった。また、高流動コンクリートの充填性および材料分離抵抗性はJ型フロー試験で算出するレオロジー定数によって管理できることが分かった。

はじめに

近年、スランブが25cmを超え、スランブフローが60から70cmと非常に高い流動性を持ち、かつ優れた分離抵抗性を併せ持つ高流動コンクリートの実用化が進められている。高流動コンクリートは、打込みに際して締固めを必要としないことから、施工の省力化が図れ、また鉄筋の周囲や型枠の隅々まで密実に充填できることから、高品質化につながるものと期待されている。今日、高流動コンクリートは、施工現場における品質管理の難しさや製造コスト高などの問題点を有しながらも、締固めが不可能なコンクリート充填鋼管構造、高品質化を目的とした化粧打放しコンクリートあるいは逆打ち工法による地下外周壁などへの使用実績も増えつつある。

しかしながら、高流動コンクリートのフレッシュ時に要求される性能は、従来の普通コンクリートと異な

り、流動性、材料分離抵抗性、充填性および間隙通過性と多岐にわたっており、各種の評価試験方法^{例えは1)2)}が提案されているものの、いまだに適切な評価方法が見出されていないのが現状である。日本建築学会では、流動性に関してはスランブフロー値で軟度を、スランブフロー速度で粘度を管理することとしているが²⁾、これら工学量では高流動コンクリートのレオロジー特性値を物理量として適切に評価するのは難しく、高流動コンクリートの試験方法を確立するために様々な試みが続けられている^{例えは3)4)}。

先般、山本らにより高流動コンクリートの流動性評価試験として提案されたJ型フロー試験⁵⁾は、簡易な試験器にて高流動コンクリートのレオロジー定数（塑性粘度および降伏値）を正確かつ定量的に評価することができる試験方法として報告されている。本研究では、このJ型フロー試験により高流動コンクリートのレオロジー定数の評価を行い、コンクリート用混和剤

A 1104 骨材の単位容積質量及び実積率試験方法に準じて充填する最密充填試験を実施し、骨材が最密充填となる細骨材率を求めた。その結果は、図1に示すとおりであり、細骨材率は充填かさ高さが最小値を示す場合、すなわち骨材が最大密度となる50%とした。細骨材セメント比はモルタルの流動性試験結果⁽⁶⁾より、混和剤の添加量が少ない条件で適切な塑性粘度および降伏値が得られる2.5とした。調合の要因は、高性能AE減水剤量および分離低減剤量とし、分離低減剤添加量を0.2、0.3、0.4、0.5および0.6kg/m³（単位水量の0.11%~0.34%）の5水準とし、それぞれの水準に対し、高性能AE減水剤添加量を2.0~4.5%の範囲で3~4水準に設定した。

2 コンクリートの練混ぜ

コンクリートの練混ぜは容量50リットルの強制攪拌ミキサーを使用し、練混ぜ量は30リットルとした。練混ぜ方法は、図2に示す分割練りとした。

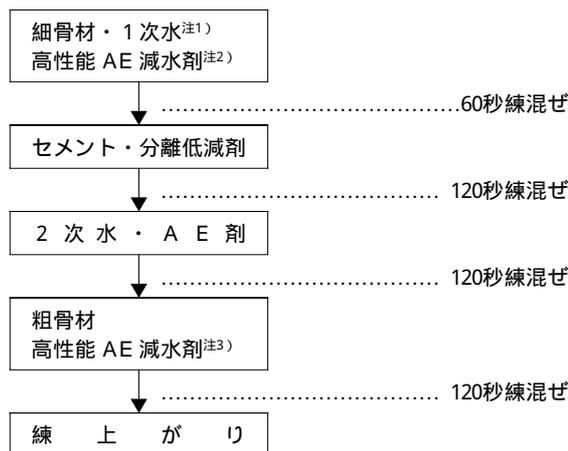
3 流動性試験

フレッシュコンクリートの流動性試験項目は、スランブフロー試験、Lフロー試験およびJ型フロー試験とした。

(1)スランブフロー試験：JASS5T 503 コンクリートのスランブフロー試験方法に準じて行った。また、スランブフロー試験終了後にフロー外周部（直径50cm以外）と中央部（直径30cm以内）それぞれのコンクリートの粗骨材比を求め、両者の比を外内粗骨材比とし、分離抵抗性評価の指標とした。

(2)Lフロー試験：図3に示すLフロー試験器によりLフロー値の測定を行い、到達距離の最大値75cmに到達したコンクリートを充填率100%とし、充填率を算出し充填性評価の指標とした。

(3)J型フロー試験：J型フロー試験器は図4に示したとおりであり、導管の内径は10.6cmとし、上下口の高低差は75cmとした。試験は、流出口に蓋をし、コンクリートを充填した後蓋を取り、圧力差によりコンクリートヘッドが5cm下がるごとに要した時間を測定し、コンクリートの圧力差と流出速度の関係を5cm区間ごとに算出した。また、流出終了時の流出口とコンクリートヘッドとの高低差を測定した。そして、実験結果をもとに既往の研究⁽⁵⁾で示された理論式(1)および(2)より、区間*i*ごとにせん断応力 P_i およびせん断速度 V_i を算出した。J型フロー試験により求めたせん断応力 P とせん断速度



注1) 細骨材の表面水量 = セメント質量 × 22% となるよう1次水を調整
 注2) セメント質量 × 0.5%
 注3) セメント質量 × (設計添加率 - 0.5%)

図2 練混ぜフロー図

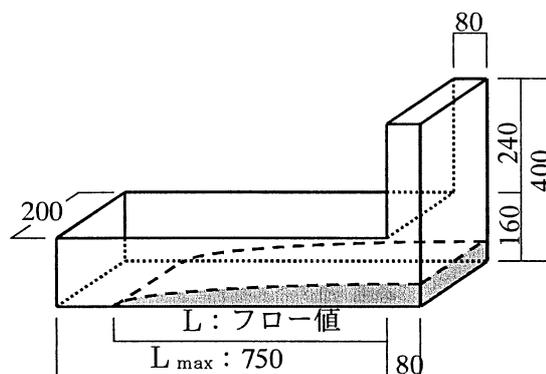


図3 Lフロー試験器

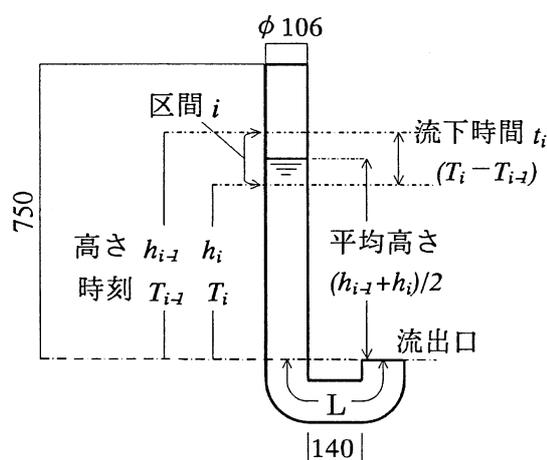


図4 J型フロー試験器

V の実験結果の一例を図5に示す。次に、フレッシュコンクリートをビンガム流体とみなした場合には、せん断応力 P とせん断速度 V との間に(3)式が

成立し⁽⁷⁾、(3)式はせん断応力 P 降伏値 τ では(4)式で表せ、せん断速度 V が 0 に近づくと(5)式のようになる。以上より、図中の回帰直線の傾きの逆数を塑性粘度 λ として算定し、横軸切片の3/4を降伏値 τ として算定した。

$$P = \frac{\Delta PR}{2l} = \frac{\rho(h_{i-1} + h_i)/2}{L + (h_{i-1} + h_i)/2} \cdot \frac{R}{2} \dots\dots(1)$$

$$V = 4Q/\pi R^3 = 4(h_{i-1} - h)/(t_i \cdot R) \dots\dots(2)$$

$$P = V\lambda + \frac{4}{3}\tau - \frac{1}{3}\left(\frac{\tau}{P}\right) \dots\dots(3)$$

$$P = V\lambda + \frac{4}{3}\tau \dots\dots(4)$$

$$P = V\lambda + \tau \dots\dots(5)$$

P : せん断応力 (Pa)、 V : せん断速度 (l/sec)
 ΔP : 圧力差 (Pa) Q : 流量 (cm³/sec)
 λ : 塑性粘度 (Pa · s) τ : 降伏値 (Pa)
 R : 導管半径 (cm) l : 導管の長さ (cm)
 ρ : コンクリート密度 (g/cm³)
 h_i : コンクリートの高さ (cm)
 t_i : コンクリートの流下時間 (sec)

混和剤が流動特性に及ぼす効果について

各調査に対する流動性試験結果を表 2 に示す。調査要因である高性能 AE 減水剤および分離低減剤が流動特性に及ぼす影響に関して検討した。

1 高性能 AE 減水剤の影響

高性能 AE 減水剤の添加量と塑性粘度の関係を分離低減剤量ごとに図 6 に示す。塑性粘度は高性能 AE 減水剤の添加量の増加に伴い、ほぼ 2 次曲線的に緩やかに減少し、分離低減剤量が 0.11~0.28% (0.2~0.5kg/m³) では、高性能 AE 減水剤の添加量が 3.5% で極小値をとる傾向を示した。また、分離低減剤量の増加に伴い近似曲線の接線の傾きは大きくなっており、分離低減剤量が多いほど高性能 AE 減水剤の添加量の変化が塑性粘度に及ぼす影響は大きくなると言える。

高性能 AE 減水剤の添加量と降伏値の関係を分離低減剤量ごとに図 7 に示す。分離低減剤量が 0.11~0.28% (0.2~0.5kg/m³) において、降伏値は高性能 AE 減水剤の添加量が 2.0~2.5% の間で大きく低下し、3.5% で極小値をとる傾向を示した。

以上のように、塑性粘度は高性能 AE 減水剤の添加量の影響が比較的小さく、所定の添加量以上になると明瞭な変化は見られない。一方、降伏値は高性能 AE 減水剤の添加量に大きく支配され、所定の添加量で極

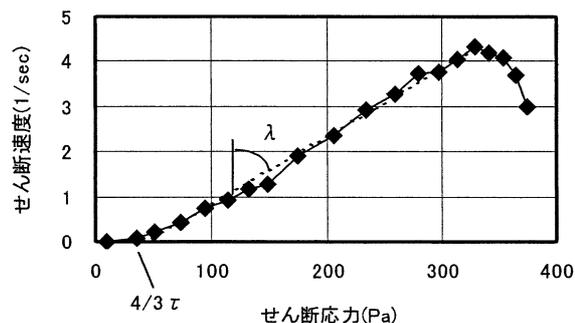


図 5 せん断応力とせん断速度との関係(一例)

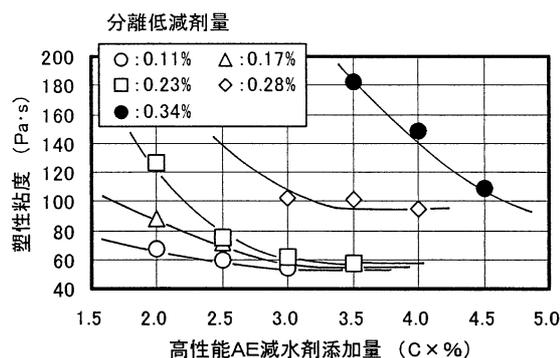


図 6 高性能 AE 減水剤量と塑性粘度

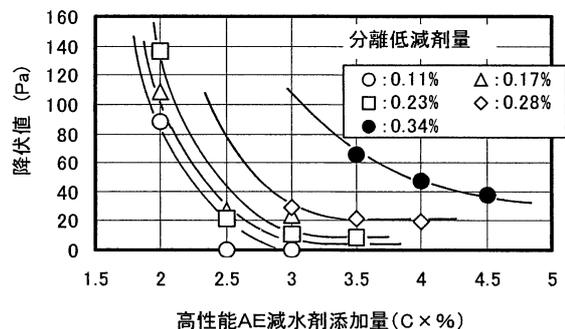


図 7 高性能 AE 減水剤量と降伏値

小値をとることが確認された。これは、高性能 AE 減水剤を増加していくとセメント粒子の分散は進み、コンクリートを構成するモルタルの降伏値は急激に低下するが、塑性粘度は緩やかに低下する⁽⁸⁾ことによるものと考えられる。

2 分離低減剤の影響

図 8 は分離低減剤の添加量と塑性粘度の関係を高性能 AE 減水剤量ごとに示したものである。塑性粘度は所定の分離低減剤の添加量を超えると 2 次曲線的に大きく増加している。今回の実験において、塑性粘度が 60Pa·s 以下で分離傾向がみられ、120Pa·s 付近で過剰な粘性となった。

分離低減剤の添加量と降伏値の関係を高性能 AE 減水剤量ごとに図9に示す。分離低減剤の添加量の増加に伴い、降伏値は緩やかに増加する傾向を示している。高性能 AE 減水剤量が3.0%のコンクリートでは、分離低減剤の添加量を0.23%から0.28%へと0.05%増加すると、塑性粘度は40Pa・s大きくなり、降伏値は10Paの微増となり、分離低減剤は降伏値よりも塑性粘度に及ぼす影響が大きい。

以上より、分離低減剤の添加量を増すと、塑性粘度は2次曲線的に大きくなり、降伏値は微増する。よって、分離低減剤の添加量を調整することにより、降伏値をそれほど大きくすることなく適切な粘性が得られることが確認された。

3 混和剤の添加量とスランプフロー値の関係

図10に高性能 AE 減水剤の添加量とスランプフロー値の関係を分離低減剤量ごとに示す。分離低減剤量の増加に伴い、所要のスランプフロー値を得るために必要な高性能 AE 減水剤の添加量は増加し、特に分離低減剤量が0.23% (0.4kg/m³)を超えると顕著である。分離低減剤量が0.11% (0.2kg/m³)では、高性能 AE 減水剤の添加量が2.5%で分離傾向を示し、分離低減剤量が0.17% (0.3kg/m³)および0.23% (0.4kg/m³)では、高性能 AE 減水剤の添加量が3.5%でスランプフロー値は、最大値65cmに収束する傾向を示した。

レオロジー定数とスランプフロー値・フロー速度、充填性および外内粗骨材比の関係

1 レオロジー定数とスランプフロー値・フロー速度

図11に示すように降伏値とスランプフロー値との間には強い負の相関があり、降伏値が40Pa以下では、スランプフロー値は55cm以上と良好な流動性を示し

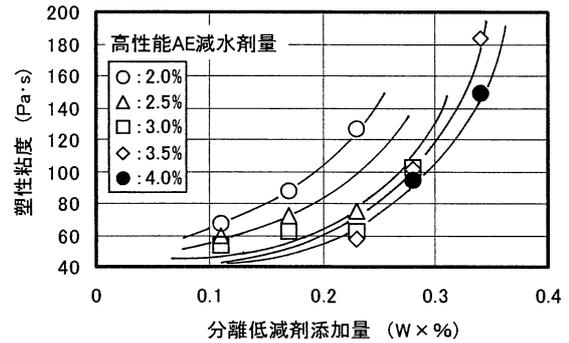


図8 分離低減剤量と塑性粘度

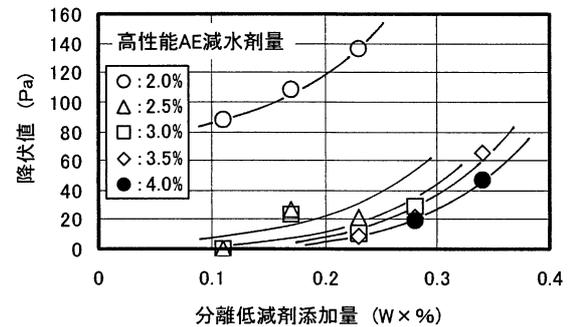


図9 分離低減剤量と降伏値

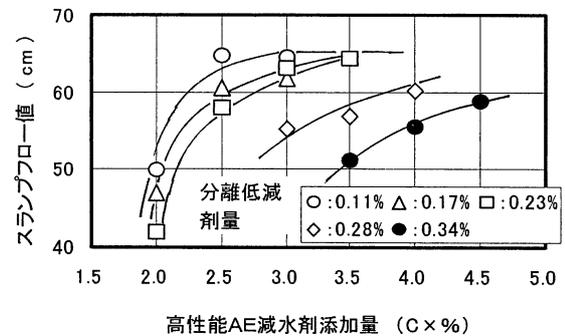


図10 高性能 AE 減水剤量とスランプフロー値

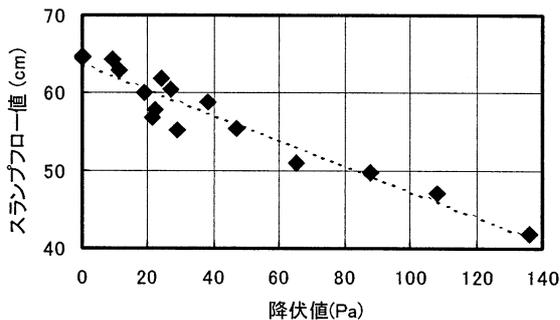


図11 降伏値とスランプフロー値

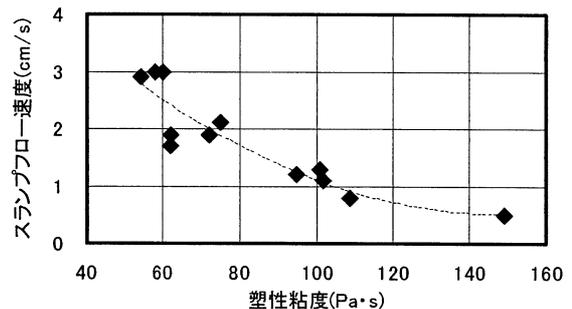


図12 塑性粘度とスランプフロー速度

た。図12にスランプフロー値が55cm以上のコンクリートについて、塑性粘度とスランプフロー速度の関係を示した。両者の間には強い負の相関があり、塑性粘度が小さくなるに従い、スランプフロー速度は速くなる傾向を示した。

以上の結果より、降伏値とスランプフロー値、塑性粘度とスランプフロー速度の間には強い負の相関があることが分かった。

2 レオロジー定数と充填性の関係

充填性はLフロー試験結果より求める充填率で評価した。図13および図14に塑性粘度および降伏値と充填率の関係を示す。充填率は塑性粘度の低下に伴い高くなる傾向が見られるが、両者の相関は弱い。一方、降伏値と充填率の間には強い負の相関があり、降伏値が40Pa以下で70%以上の高い充填率を示した。

以上より、高流動コンクリートの充填性は降伏値に左右され、塑性粘度の影響は小さいことが分かった。

3 レオロジー定数と外内粗骨材比の関係

塑性粘度と外内粗骨材比の関係を図15に示す。塑性粘度と外内粗骨材比の間には相関が認められ、塑性粘度が約100Pa・sより小さくなると、外内粗骨材比も減少する傾向にある。また、塑性粘度が60Pa・s付近で、外内粗骨材比は0.9前後と小さくなっており、分離抵抗性の低下が確認された。降伏値と外内粗骨材比の関係を図16に示す。降伏値の低下とともに外内粗骨材比は小さくなる傾向が見られ、降伏値が30Pa以下で外内粗骨材比が0.9以下となる割合が高くなっている。なお、図15と16を比較すると、塑性粘度は、降伏値よりも外内粗骨材比、すなわち材料分離抵抗性に及ぼす影響が大きいと言える。

以上より、材料分離を生じさせないためには、高流動コンクリートの塑性粘度は60Pa・s程度以上、そして降伏値は30Pa程度以上必要であると言える。

まとめ

J型フロー試験により、高流動コンクリートのレオロジー定数を評価し、コンクリート用混和剤である高性能 AE 減水剤および分離低減剤がレオロジー定数に及ぼす影響について検討を行った。その結果、本実験の範囲内で以下のことが明らかになった。

- 1) 塑性粘度は高性能 AE 減水剤の添加量を増すと、緩やかに減少し、所定の添加量において最小値を

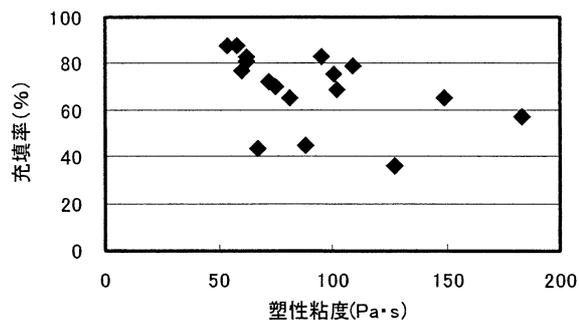


図13 塑性粘度と充填率

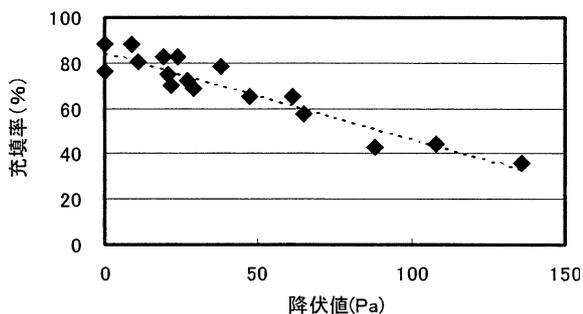


図14 降伏値と充填率

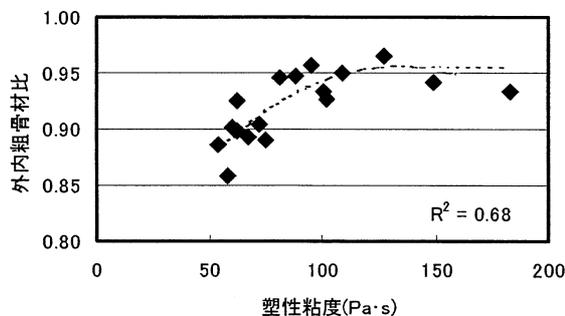


図15 塑性粘度と外内粗骨材比

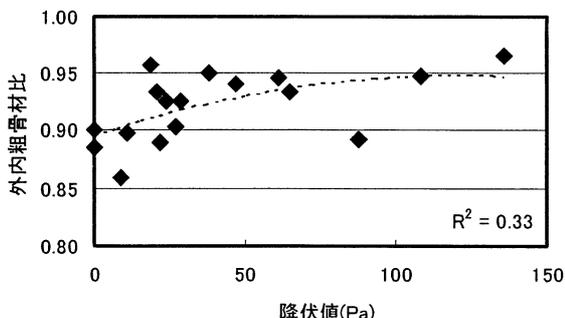


図16 降伏値と外内粗骨材比

- 示す。また、その減少割合は分離低減剤量が少ないほど小さい。
- 2) 塑性粘度は分離低減剤の添加量を増すと、所定の添加量を超えてから2次曲線的に急激に大きくなる。
 - 3) 降伏値は高性能 AE 減水剤の添加量の増大に伴い2次曲線的に大きく低下し、所定の添加量において最小値を示す。
 - 4) 降伏値は分離低減剤の添加量を増すと緩やかに大きくなる。
 - 5) 降伏値とフロー値、塑性粘度とフロー速度の間には強い負の相関がある。
 - 6) コンクリートの充填性は降伏値が小さくなるに従い向上し、約40Pa以下で良好な充填性が得られる。しかし、塑性粘度との明確な相関は認められない。
 - 7) 塑性粘度が約60Pa・s以上、降伏値が約30Pa以上で分離による粗骨材の偏在が小さいコンクリートが得られる。

[参考文献]

- (1) 超流動コンクリート研究委員会報告書()、日本コンクリート工学協会、1993 5
- (2) 高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針(案)・同解説、日本建築学会、1997 .1
- (3) 佐藤賢、須藤由美子、カンザディ・モスタファ、千歩修、鎌田英治：高流動コンクリートの流動性・分離抵抗性に及ぼすレオロジー特性の影響、日本建築学会構造系論文集、第505号、1998 3、pp 9 14
- (4) 寺西浩司、谷川恭雄、森博嗣、黒川善幸：高流動コンクリートの間隙通過性の評価方法に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第467号、1995 .1、pp .19 26
- (5) 山本康弘、本間礼人、橋高義典：高流動コンクリートの流動特性の試験方法(J型フロー試験)に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第489号、1996 .11、pp 9 16
- (6) 宮本欣明：高流動コンクリートの調合設計に関する研究(モルタルの流動性評価)、職業能力開発大学校紀要、第28号A、1999 3、pp .115 122
- (7) 山本康弘、小野山貫造、本間礼人、許啓文：高流動コンクリートの流動特性と充填性およびコンクリートの品質に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第523号、1999 9、pp 25 31

- (8) 宮本欣明、山本康弘：高流動コンクリートの流動特性に関する研究(その1 調合要因がモルタルの流動特性に及ぼす影響)、日本建築学会大会梗概集、2000 9、pp 977 978

註 本論文は、四国職業能力開発大学校紀要、第13号、2001 9、pp .13 18に発表した内容に加筆したものである。