

論文 フェロニッケルスラグ微粉末を用いた高流動コンクリートの硬化後の性質

吉野 公*¹・井上 正一*²・黒田 保*³

要旨：本研究では、粉体系高流動コンクリートの粉体材料として、フェロニッケルスラグ細骨材を製造する過程で排出されるフェロニッケルスラグ微粉末を用いた高流動コンクリートの充てん性および耐久性を含めた硬化後の性質について、従来から用いられている高炉スラグ微粉末あるいは石灰石微粉末を用いた高流動コンクリートと比較検討した。その結果、自己充てん性を満足する高流動コンクリートが得られること、硬化後の気泡発生率はやや大きくなるが、凍結融解に対する抵抗性や乾燥収縮は他の粉体を用いた高流動コンクリートと同等であることが明らかとなった。

キーワード：フェロニッケルスラグ，高流動コンクリート，耐久性，収縮，充てん性

1. はじめに

高流動コンクリートの中で、粉体系高流動コンクリートは、粉体量の増加によって適正な材料分離抵抗性を付与したものである。粉体系高流動コンクリートに用いられている粉体材料は多岐にわたっており、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、石灰石微粉末など種々の粉体を用いて研究が行われてきた。一方、近年環境問題やリサイクルの聲が高まり、産業副産物の有効利用の観点から砕石微分などが高流動コンクリートの粉体材料として提案され、研究されている。本研究で対象としたフェロニッケルスラグ微粉末もフェロニッケルスラグ細骨材を製造する過程で必然的に排出される産業副産物であり、有効利用が望まれている粉体のひとつである。また、フェロニッケルスラグ微粉末は石灰石微粉末と同様に不活性で水和熱や過強度の問題に対処できる粉体である。

そこで、フェロニッケルスラグ微粉末の有効利用という観点から、フェロニッケルスラグ微粉末を粉体材料として用いた高流動コンクリートの実用化を目指し、フェロニッケルスラグ微粉末が高流動コンクリートの充てん性、耐久性を含む硬化後の性質に

及ぼす影響について従来より用いられている高炉スラグ微粉末、石灰石微粉末を用いた高流動コンクリートのそれと比較検討した。

2. 実験概要

本研究で使用した粉体の物理的性質を表-1に示す。フェロニッケルスラグ細骨材を製造する過程で排出されるフェロニッケルスラグ微粉末（以下 FNS 微粉末と記す）は粉末度 $2,700\text{cm}^2/\text{g}$ 程度の粉体であり、比較的粗いものである。これを加工して粉末度を大きくすることは可能であるが、加工をあまり行わない FNS 微粉末が高流動コンクリートの分離抵抗性の付与および製造エネルギーの面から有利であることが明らかになっており¹⁾、本研究では粉末度の比較的大きい2種類の FNS 微粉末を用いた。骨材としては、粗骨材には砕石（最大寸法 20mm、密度 $2.69\text{g}/\text{cm}^3$ 、吸水率 0.80%、F.M. 6.51、実積率 61.0%）、細骨材には砕砂と陸砂を混合したもの（密度 $2.67\text{g}/\text{cm}^3$ 、吸水率 1.40%、F.M. 2.72）を用いた。化学混和剤はポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤（以下 SP と記す）と空気量調整のための消泡剤を使用した。

*1 鳥取大学助教授 工学部土木工学科 博士(工学) (正会員)

*2 鳥取大学教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)

*3 鳥取大学助手 工学部土木工学科 工修 (正会員)

粉体の性質を把握するために各粉体をセメントと30%置換した混合粉体に対して、粉体の拘束水比および変形係数²⁾、実積率を測定した。なお、粉体の実積率はブレン空気通過装置のセルとプランジャーを用いて行う方法³⁾によった。また、粉体の形状を見るため、走査型顕微鏡による写真撮影を行った。

高流動コンクリートの配合条件を表-2に示す。水粉体比を0.30, 0.35の2水準、粉体の置換率を30%, 50% (なお、置換率50%はFNS微粉末のみ) とし、スランプフロー650~700mm, 空気量 $4.5 \pm 1.5\%$ となるように高性能AE減水剤および消泡剤の添加量を決定した。コンクリートの練り混ぜは、容量50リットルのパン型強制練りミキサを用い以下の手順で行った。まず、粉体と細骨材をミキサに入れ30秒空練りを行い、水、高性能AE減水剤および消泡剤を投入して60秒間の一時練りを行った後、粗骨材を入れて120秒間の二次練りを行った。

フレッシュ状態における高流動コンクリートの測定項目は、スランプフロー、空気量のほかに、ボックス充てん装置(流動障害R2)による充てん高さおよび球引き上げ粘度計(球の直径:31.4mm, 容器:φ150×300mm)によるウェットスクリーニングモルタルのレオロジー定数(塑性粘度と降伏値)である。

硬化後の測定項目は、材齢28日における圧縮強度および静弾性係数、水中凍結融解試験による相対動弾性係数および質量減少率の変化、温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度 $50 \pm 5\%$ における長さ変化、硬化後の表面気泡である。なお、表面気泡の評価は、型枠に塗布する剥離剤として鉱物油を使用し、土木学会高流動コンクリート研究小委員会性能評価分科会が提案した方法⁴⁾に準拠して気泡発生率を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 粉体材料の性質

写真-1~写真-4に粉体の粒子形状を示す。FNS微粉末は高炉スラグ微粉末や石灰石微粉末

表-1 粉体の性質

| 粉体の種類 | 密度 (g/cm ³) | 粉末度 (cm ² /g) | 記号 |
|----------|-------------------------|--------------------------|-------|
| セメント | 3.15 | 3,380 | C |
| FNS 微粉末 | 3.12 | 2,710 | FNS27 |
| | | 3,500 | FNS35 |
| 高炉スラグ微粉末 | 2.86 | 6,020 | BFS |
| 石灰石微粉末 | 2.73 | 5,010 | LS |

表-2 配合条件

| | |
|---|---------------|
| 水粉体比 | 0.30, 0.35 |
| スランプフロー (mm) | 650~700 |
| 空気量 (%) | 4.5 ± 1.5 |
| 単位粗骨材絶対容積 (m ³ /m ³) | 0.317 |
| 単位水量 (kg/m ³) | 165 |

に比べ、鋭角的な部分が多く、表面の段差も多く見られる。また、FNS27とFNS35では、FNS27の方が鋭角的な部分が多い。これは、FNS35がFNS27をロッドミルで加工し細かくしたものであるため摩滅作用が生じFNS27に比べて丸みを帯びたと考えられる。

各粉体の変形係数と拘束水比を表-3に示す。変形係数はペーストが変形する際の変形のしやすさの程度を表したものであり、拘束水比はペーストが変形し始めるときの水粉体容積比である。これらの値が小さいほど、所定のフロー面積を得るための水量は小さくなり、粉体の特性が良好であることを意味しているといわれている²⁾。表-3より、FNS微粉末を置換した粉体は、拘束水比が他の粉体を置換したものよりも大きな値を示している。一方、変形係数は高炉スラグ微粉末を置換したものが大きな値を示しているが、他の粉体はほぼ同様な値を示している。また、実積率は、石灰石微粉末を置換した粉体がかつとも大きく、FNS微粉末を置換したものが小さな値を示している。

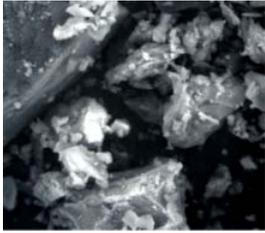


写真-1 FNS27

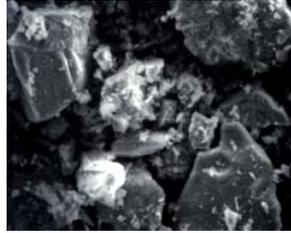


写真-2 FNS35



写真-3 BFS



写真-4 LS

表-3 混合粉体の変形係数と拘束水比

| 粉体の種類 | 変形係数 | 拘束水比 | 実積率(%) |
|-------|-------|-------|--------|
| C | 0.086 | 0.991 | 52.4 |
| FNS27 | 0.086 | 0.983 | 51.7 |
| FNS35 | 0.076 | 0.886 | 52.3 |
| BFS | 0.159 | 0.993 | 52.8 |
| LS | 0.071 | 0.690 | 55.7 |

3.2 高流動コンクリートの充てん性

図-1, 2に粉体の置換率 30%における充てん高さ, モルタルのレオロジー定数および所定のスランプフローを得るために要した高性能 AE 減水剤の添加率を示す。

本研究では, 自己充てん性のレベル 2 を想定して障害 R2 での充てん性試験を行った。この試験で, 充てん高さが 300mm を超えるものは充てん性が良好と判断される。図より, 石灰石微粉末を置換したものと水粉体比 0.35 で高炉スラグを置換したもので良好な充てん性を示さなかったが, その他のものに関してはすべて充てん高さが 300 mm 以上で充てん性は良好であった。高流動コンクリートが良好な充てん性を示さない原因はコンクリートが鉄筋間の空隙で閉塞を起こすためであり, 閉塞の主原因は鉄筋間での粗骨材の架橋によるものと考えられている。粗骨材の架橋形成に影響する要因は, 主として鉄筋間隔と粗骨材量であるが, モルタルのレオロジー定数もコンクリートの空隙通過性に影響することが明らかにされている⁵⁾。モルタルのレオロジー定数の特に塑性粘度に着目すると, FNS 微粉末を置換したものは, 高炉スラグ微粉末あるいは石灰石微粉末を置換したものより高い値を示しており, このことが材料分離抵抗性を増し, 充てん性を良好にしたものと考えられる。したがって, 材料分離抵抗性の面からは, FNS 微粉末の使用は有効であるといえる。

一方, 所定のスランプフローを得るために要した高性能 AE 減水剤添加率 (SP 添加率) は, FNS 微粉末を置換したものが他のものより多くなった。

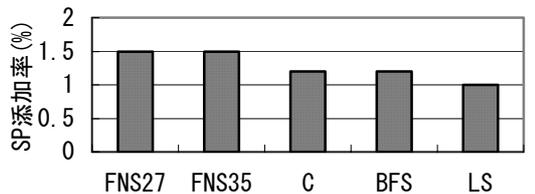
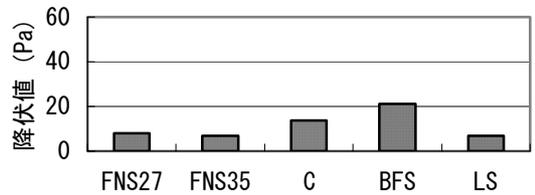
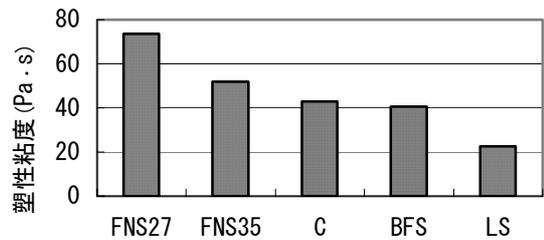
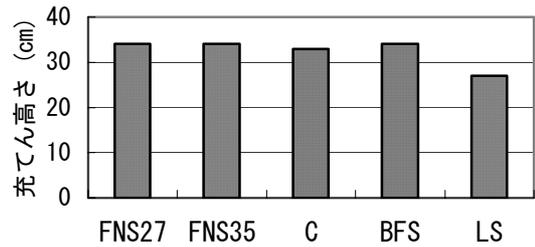


図-1 フレッシュ性状 (W/P=0.30)

抗性を増し, 充てん性を良好にしたものと考えられる。したがって, 材料分離抵抗性の面からは, FNS 微粉末の使用は有効であるといえる。

一方, 所定のスランプフローを得るために要した高性能 AE 減水剤添加率 (SP 添加率) は, FNS 微粉末を置換したものが他のものより多くなった。

FNS 微粉末を用いた高流動コンクリートは、SP 添加率が大きくなり、また、モルタルの塑性粘度も大きくなることが明らかになった。これに関し、各粉体を置換した混合粉体の性質との関係を検討した。ペーストが変形し始める時の水粉体容積比である拘束水比が FNS 微粉末を置換した粉体は大きいことから、所定のスランプフローを得るための SP 添加率が大きくなったと考えられる。また、実積率の大きい粉体ほど、ペーストの塑性粘度が小さくなる傾向にあること⁶⁾から、FNS 微粉末を用いたモルタルの塑性粘度が大きくなったものと考えられる。

3.3 硬化後の諸性質

図-3 に結合材水比 (C/W) と圧縮強度の関係を示す。石灰石微粉末と FNS 微粉末は不活性であるとし、結合材量には含めていない。図には参考のためスランプ 8cm の AE コンクリート (使用骨材は同じ) の強度(AE)も載せている。石灰石微粉末を置換したものを除き、圧縮強度は結合材水比と比例関係を示し、同一直線上にある。FNS 微粉末は水硬性を持たないため圧縮強度に影響を及ぼすのは粉体量にかかわらずセメント水比だけであるといえる。

図-4 は圧縮強度と静弾性係数との関係を示したものである。なお、図中の曲線は土木学会コンクリート標準示方書「構造性能照査編」に示された圧縮強度とヤング係数の関係である。FNS27 を置換した高流動コンクリートは同一圧縮強度に対して静弾性係数がやや小さくなる傾

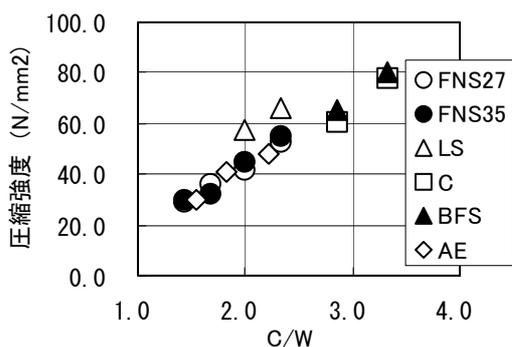


図-3 結合材水比と圧縮強度との関係

向にあるが、その他は実測した静弾性係数は土木学会に非常に近似した値を示した。

図-5 に用いた粉体の種類が高流動コンクリートの収縮ひずみの経時変化に及ぼす影響を示す。なお、JIS では温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 3\%$ の室内で乾燥を行うと規定されているが、本研

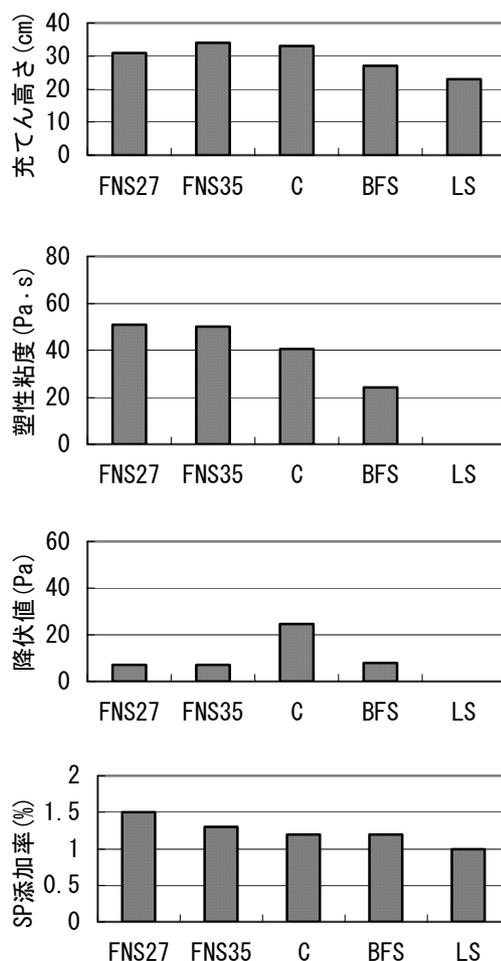


図-2 フレッシュ性状 (W/P=0.35)

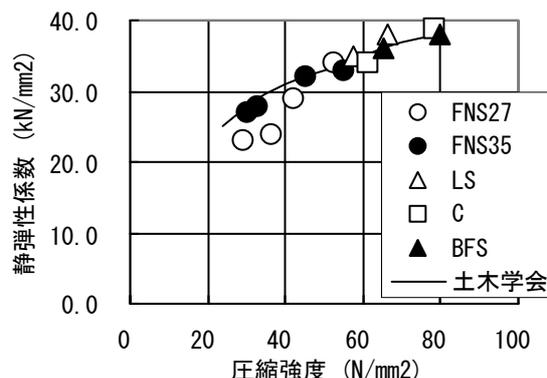


図-4 圧縮強度と静弾性係数との関係

究においては、温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ であるが、湿度は 45~55% の範囲で変動した。また、FNS 微粉末は FNS27 を 30% 置換したコンクリートの結果である。

図より、乾燥初期材齢においては収縮ひずみに差は見られないが、材齢が長くなるほどに収縮ひずみ量に差が生じ FNS 微粉末を用いた高流動コンクリートが最も収縮ひずみ量が大きく、高炉スラグ微粉末を用いたものが最も収縮ひずみ量が小さくなった。また、100 日以降においては、各コンクリートとも収縮ひずみ量に変化がみられず、収縮が収束したものと考えられる。FNS 微粉末を用いた高流動コンクリートは他のものに比べて収縮ひずみが大きくなったが、石灰石微粉末を置換した高流動コンクリートの材齢 26 週における乾燥収縮ひずみの概略値は $600 \sim 800 \times 10^{-6}$ との報告⁷⁾があり、問題はないといえる。

図-6 に凍結融解サイクル数と相対動弾性係数との関係を、図-7 に凍結融解サイクルと質量減少率との関係を示す。FNS 微粉末は FNS27 を 30% 置換したコンクリートの結果である。また、FNS 微粉末は水硬性を持たないことから、水粉体比 0.30 および 0.35 に対し水結合材比はそれぞれ 0.43 および 0.50 となる。相対動弾性係数についてはどのコンクリートもサイクル数に伴う減少はほとんど見られず、300 サイクルまで良好な耐凍害性を示した。また、質量減少率についても、FNS 微粉末を用いたコンクリートがセメント単味および高炉スラグ微粉末を用いたものより大きくなっているが、最大値で 1% にも満たないことから、十分な耐凍害性がうかがえる。したがって、空気量 4.5% 程度有していれば、FNS 微粉末を用いた高流動コンクリートの凍結融解作用に対する耐久性は問題ないといえる。

図-8 は硬化したコンクリートの表面気泡率を示したものである。高流動コンクリートは材料分離抵抗性を付与するため粘性の高いコンクリートとなっており、打設時に巻き込んだ気泡

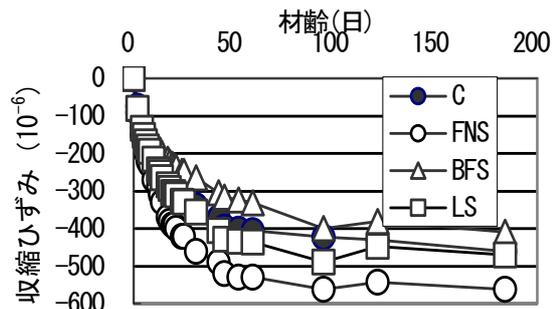


図-5 粉体の種類が収縮ひずみに及ぼす影響

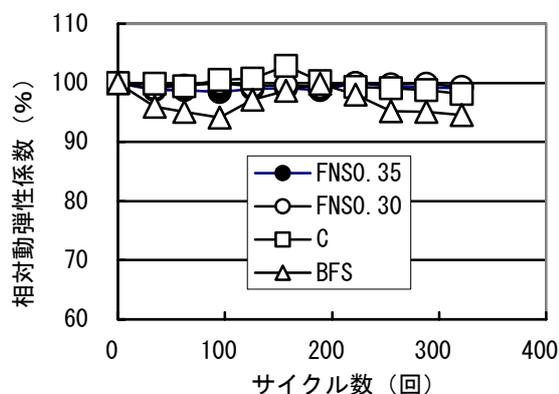


図-6 凍結融解試験結果（相対動弾性係数）

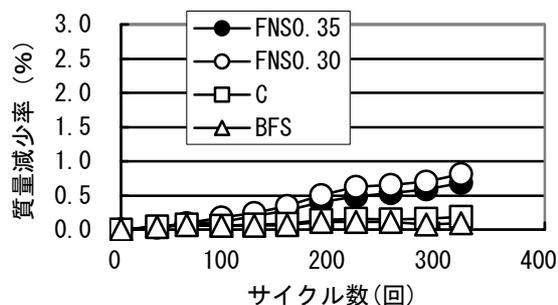


図-7 凍結融解試験結果（質量減少率）

が抜けにくく、硬化後に型枠との接触面に気泡が発生しやすい。このような気泡は、美観を損ない、特にコンクリート 2 次製品では問題となる。

図より、FNS 微粉末を用いたコンクリートは表面気泡発生率が高く、特に FNS27 の方が発生率が高くなった。表面気泡の発生はモルタルの塑性粘度と相関があり、塑性粘度が小さいほど

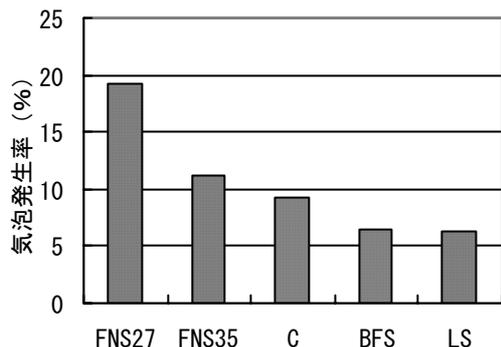


図-8 粉体の種類が気泡発生率に及ぼす影響

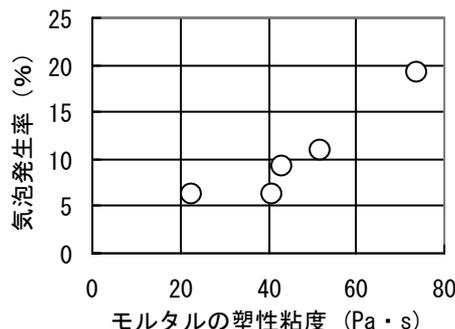


図-9 塑性粘度と気泡発生率との関係

表面気泡が少ないことが報告されている⁸⁾。図-9はモルタルの塑性粘度と気泡発生率との関係を示したものであるが、本研究でも同様の結果が得られている。したがって、充てん性を満足する範囲であればモルタルの塑性粘度は小さい方が表面気泡発生を少なくする上では有利である。表面気泡の面からは、粉末度の大きいFNS微粉末が有効であるといえる。

4. まとめ

本研究は、FNS微粉末の有効利用という観点から、これを粉体材料とした高流動コンクリートの充てん性、耐久性を含む硬化後の性質に及ぼす影響について検討した。以下に得られた主な結果を示す。

- 1) FNS微粉末を用いた高流動コンクリートは、スランプフロー65~70cmで十分な充てん性を有している。
- 2) FNS微粉末を用いると高炉スラグ微粉末、石灰石微粉末を用いた場合よりモルタルの塑性粘度が高くなる。
- 3) FNS微粉末を用いた高流動コンクリートの圧縮強度は結合材水比と比例関係を示し、セメント単身および高炉スラグ微粉末を用いたものと同一直線となる。
- 4) FNS微粉末を用いた高流動コンクリートの乾燥収縮および耐凍害性は高炉スラグ微粉末を用いた場合とほぼ同等であり、問題はない。
- 5) 表面気泡はFNS微粉末を用いた高流動コンクリートが発生しやすい。また、粉末度の小

い方がより発生しやすい。表面気泡の面からは、粉末度の大きいFNS微粉末が有効である。

参考文献

- 1) 吉野 公ほか：フェロニッケルスラグ微粉末を用いた高流動コンクリートの性質，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.883-888，2000.6
- 2) 枝松良展，山口昇三，岡村 甫：モルタルの変形性を表す細骨材の材料特性の定量化，土木学会論文集，No.538，pp.37-46，1996.5
- 3) 村田二郎，菊川浩治：ポルトランドセメントペーストの粘度式に関する研究，土木学会論文集，No.354，pp.109-118，1985.2
- 4) 土木学会：高流動コンクリートの性能評価方法および各種高流動コンクリートの評価結果，高流動コンクリートシンポジウム論文報告集，pp.215-245，1996.3
- 5) 藤原浩巳ほか：高流動コンクリートの間隙通過性に関する研究，土木学会論文集，No.550，pp.23-32，1996.11
- 6) 吉野 公ほか：結合材の性質がペーストの塑性粘度に及ぼす影響，材料，Vol.43，No.491，pp.930-935，1994.8
- 7) 土木学会：高流動コンクリート施工指針，pp.40-41，1998.7
- 8) 一宮一夫ほか：高流動コンクリートの表面気泡性状に及ぼすモルタルの流動性および型枠界面の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.937-942，2000.6