

論文 大深度地下へのフレッシュコンクリートのパイプ垂直輸送に関する研究

李 柱国¹・大久保 孝昭²

要旨：本研究は、金属鉱または炭鉱における垂直坑のコンクリート壁工事に対して、パイプでフレッシュコンクリートを輸送する工法を試みたものである。まず、管路におけるフレッシュコンクリートの運動状態を理論的に検討し、垂直管路輸送後の分離と分離後の再混合およびそれらの影響要因について実験的考察を行った。さらに、中流動コンクリートの配合および打設方法を提案した上、深さが1096mまでの実施工によって中流動コンクリートをパイプで垂直に輸送できることを確認した。

キーワード：大深度地下コンクリート工事, 中流動コンクリート, 分離, パイプ垂直輸送性

1. はじめに

金属鉱または炭鉱における垂直坑の工事速度は、爆破された廃棄石の排出速度および坑壁のコンクリートの打設速度に依存するため、施工の合理化のためには、両方の並行作業が必要である。垂直パイプでのフレッシュコンクリートの輸送(以下、VPT工法と略称する)は、工期短縮・省エネに効果があり、並行作業を実現できる輸送方法であると考えられる(図-1参照)¹⁾。

南アフリカ、中国、アメリカおよび旧ソ連などの国では、VPT工法の応用例が多くあるが、コンクリートの管路閉塞および分離による硬化コンクリートの品質低下が生じやすいため、打設される

コンクリートの品質確保に関する検討は鉱坑建設分野における最重要課題の一つである²⁾。

従来、VPT工法に用いたコンクリートは、普通減水剤を使い、スランプ値が12~15cmの普通コンクリートである。単位水量が多く、分離抵抗性が低いため、輸送による分離が生じやすかった。近年、高性能AE減水剤などの開発によって、高流動性・高粘性コンクリートの製造が可能となり、VPT工法によるコンクリートの品質向上を検討する絶好の機会を得た。

本研究では、フレッシュコンクリートの管路における運動状態を理論的に検討し、中国の炭鉱工事現場で実験を行うことによって、VPT工法に適用可能であるフレッシュコンクリートのコンシステンシーを調べた。また、コンクリートの配合および打設方法を提案し、深さが1096mまでの実施工によって、スランプが18cm以上かつスランプフローが50cm以下のコンクリート(以下、中流動コンクリートと呼ぶ)をパイプで垂直に輸送する可能性を確認した。

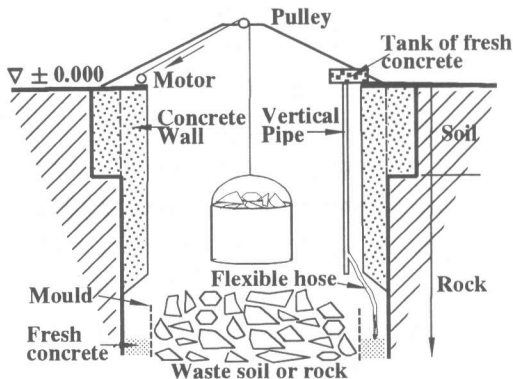


図-1 廃棄石の排出とコンクリートの打設の並行作業

2. フレッシュコンクリートの管路における運動状態

混り練ぜた直後のコンクリートは、直径が159mmの垂直パイプに導入された後、最初に団状

*1 科学技術振興事業団科学技術特別研究員 工博 (正会員)

*2 独立行政法人建築研究所材料・部材グループ 上席研究員 工博 (正会員)

として自重によって落下運動をすると仮定する。この運動過程において、コンクリートは、重力と空気浮力の以外、速度の2乗に比例する空気抵抗および管壁抵抗を受ける^{3,4)}。コンクリートと管壁の接触はランダムであり、管壁との摩擦抵抗および粘性抵抗はまだ定量的に明らかになっていない。本研究では考察の便宜上、管壁抵抗がフレッシュコンクリートの塊の長さ に比例すると仮定すると、パイプに導入された直後のフレッシュコンクリートの運動方程式は式(1)のようになる。

$$\begin{aligned} W - P_b - R_a - R_p &= V_c \rho_c \frac{du_c}{dt} \\ W &= V_c \rho_c g, P_b = V_c \rho_a g \\ R_a &= \frac{1}{2} C_1 \rho_a S_c u_c^2, R_p = \frac{C_2 V_c}{S_c} \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 u_c : コンクリートの運動速度 (m/s), V_c , S_c : それぞれコンクリートの体積(m³)と水平断面積(m²), ρ_a, ρ_c : それぞれ空気とコンクリートの密度(kg/m³), W : 重力 (N), P_b : 空気浮力 (N), R_a, R_p : それぞれ空気および管壁からの運動抵抗(N), C_1, C_2 : 比定数, g : 重力の加速度 (=9.8msec⁻²)

式(1)の微分方程式を解くと、フレッシュコンクリートの運動速度式(2)が得られる。

$$u_c = u_{cm} \frac{\exp(2nt) - 1}{\exp(2nt) + 1} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{ここに、} u_{cm} &= \sqrt{\frac{2(W - P_b - R_p)}{C_1 \rho_a S_c}}, \\ n &= \frac{1}{V_c \rho_c} \sqrt{\frac{1}{2} C_1 \rho_a S_c (W - P_b - R_p)} \end{aligned}$$

式(2)によれば、フレッシュコンクリートの管路における運動速度は、経過時間とともに増加するが、ある時間 t_i のあと、一定値 u_{cm} (以下、終速度と呼ぶ) に漸近する。

上式を積分し、近似計算を行うことによって、終速度に漸近し始める落下運動距離 (H_{ci}) は、式(3)のように近似的に表される。

$$H_{ci} = 20V_c \rho_c / \sqrt{C_1 \rho_a S_c} \quad (3)$$

式(3)によれば、コンクリートの落下速度が終速度に漸近し始める落下運動距離 (H_{ci}) は、その体積

(V_c) に比例し、 V_c が一定の場合には定数となる。

一方、運動中のフレッシュコンクリート中における任意の粒子1個の絶対運動方程式は式(4)で与えられる。

$$\begin{aligned} m_a g - R_c &= m_a \frac{du_a}{dt} \\ m_a &= \frac{1}{6} \pi d^3 \rho_a, R_c = 3\pi d(u_a - u_c) \eta \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 u_a : 粒子の絶対運動速度(m/s), m_a : 粒子の質量 (kg), d : 粒子の直径(m), ρ_a : 粒子の密度 (kg/m³), R_c : コンクリートからの粒子運動抵抗であり、Stokesの法則に従うとする³⁾, η : コンクリートの塑性粘度 (Pa · s)

式(2)を式(4)に代入し、得られた第1階線形微分方程式を解くと、コンクリート中の粒子の絶対運動速度は式(5)のように求められる。

$$\begin{aligned} u_a &= \left(\frac{g}{s} + u_{cm} \right) - \exp(-st) \int \frac{2s u_{cm} \exp(st) dt}{\exp(2nt) + 1} \\ &> \left(\frac{g}{s} + u_{cm} \right) + \frac{2s u_{cm}}{2n - s} \exp(-2nt) \\ &\geq \frac{g}{s} + u_{cm} + \frac{2s u_{cm}}{2n - s} \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、 $s = 18\eta / d^2 \rho_a$

コンクリートとその中の粒子との運動速度差は、式(2)と式(5)によって次式のように表される。

$$\begin{aligned} u_a - u_c &= \left(\frac{g}{s} + u_{cm} \right) - \exp(-st) \int \frac{2s u_{cm} \exp(st) dt}{\exp(2nt) + 1} \\ &\quad - u_{cm} \frac{\exp(2nt) - 1}{\exp(2nt) + 1} \\ &\geq \frac{g d^2 \rho_a}{18\eta} + \frac{2s u_{cm}}{2n - s} > 0 \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)を成立させる粒子(一般に粒径が比較的に大きい粗骨材粒子)は、母体のコンクリートより大きい速度で運動するため、フレッシュコンクリート中で沈降する。従って、粘度が低く、軟らかい試料の場合には、大きい粒子は、沈降速度が速いため、母体から分離する。この分離および管内の上昇気流によって、塑性体のフレッシュコンクリートの塊は先端から末端にかけて分散状態に移行していく(図-2(b-1), (c-1)参照)。

一方、粘度が高い硬練りの試料の場合には、粗骨材の沈降速度が小さく、分離量が少ないが、粗

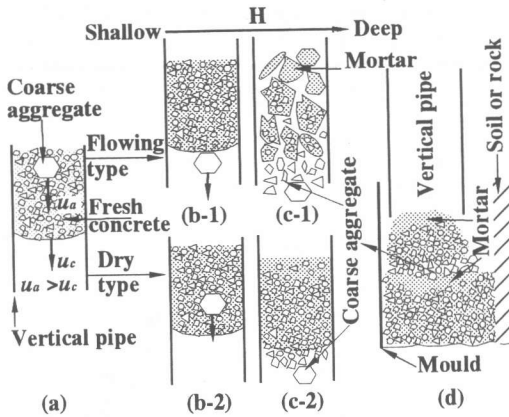


図-2 管路におけるフレッシュコンクリートの運動状態

骨材の分布が均一ではなくなり、大粒の粗骨材が試料の先端に集中して(図-2(b-2), (c-2) 参照)、坑壁の品質が低下する。この解析結果は、従来、VPT工法に流動性が低いコンクリートを使った場合でも、打設されたコンクリートの品質が低かった事実を説明できる。

また、式(2)に示した n 値が非常に小さいため、式(6)中の第2項を無視すると、粒子の寸法が大きいほど分離の傾向が高く、VPT工法に使うコンクリートには最大寸法と粒度がともに小さい粗骨材の使用が重要であることがわかる。

分散状態になった径の比較的大きな粗骨材または粒子グループ(モルタルやモルタルと粗骨材の小粒の集合体)の運動速度は、ランダムな管壁抵抗を無視して、フレッシュコンクリートの運動速度の誘導方法と同じように誘導すると、式(7)のように得られる。

$$u_g = u_{gm} \frac{\exp(2kt) - 1}{\exp(2kt) + 1}$$

$$u_{gm} = \sqrt{\frac{4d_g \rho_g g}{3\rho C_1} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_g}\right)}$$

$$k = \sqrt{\frac{3\rho C_1 g}{4d_g \rho_g} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_g}\right)} \quad (7)$$

ここに、 u_{gm} , d_g , ρ_g : それぞれ径の比較的大きな粗骨材または粒子グループの終速度(m/s), 直径(m)および密度(kg/m^3)

式(7)により、粒子または粒子グループの運動速度は、ある時間後、最終速度に漸近し、粒径または比重が小さいほど最終速度が小さい。これによって、分散粒子および粒子グループの配列順は図2(d)に示すようになり、モルタルまたはペーストは試料の末端にあることが推察できる。

3. 中流動コンクリートの管路輸送による分離および分離後の再混合に関する実験的考察

前節の検討結果によれば、管路におけるフレッシュコンクリートの分離は避けられない。また、劣悪な垂坑環境においては締め作業を適切に行うことは非常に困難であるため、VPT工法によって打設した坑壁コンクリートの品質は、フレッシュコンクリートの輸送による分離の程度、自己充填性および分離した部分が型枠内においては再び混合できる程度に依存すると考えられる。スランプ値が18~24cmの低コストの中流動コンクリートをVPT工法に用いれば、管内閉塞を避けるだけでなく、軽微な振動を加えることにより十分な充填性が得られるため⁹⁾、以下には、その管路輸送による分離の程度および分離後の再混合について検討する。

3.1 実験概要

本研究の実験は中国で行われ、使用材料はすべて現地の材料である。結合材としては、ゼオライト微粉末(プレーン値4530 cm^2/g , 比重2.20)を10%代替した普通ポルトランドセメントを使用した。また、高性能AE減水剤(ナフタリン系)、川砂(比重2.65, 粗粒率2.66)、碎石(比重2.71, 粗粒率7.92, 最大寸法30mm)を用いた。試料の調合およびコンシステシーの実験結果を表-1に示す。そのうち、フローテーブルにおける試料の中心部と外周部の粗骨材分布差(A_a)の計測は、振動フロー試験と粗骨材(>20mm)の洗い試験によって行われた⁹⁾。また、10cm立方体による各調合の試料の基準圧縮強度 F_c と基準静弾性係数 E_c を測定した。

(a) 実験-I : VPT工法を用いて、1990年には中国江蘇省利国鉄鉱の垂坑壁コンクリートの工事現場においては200mの深度まで、また、1991~1994年には張小楼炭鉱の副垂坑の坑壁工事現場において

は深度が200mから1100mまでの輸送試験を行い、輸送深度と試料のコンシステンシーがその運動速度および分離程度などに及ぼす影響を調べた。

実験方法および計測項目としては、適量のモルタル先送りした垂直パイプで、0.5m³のコンクリートを深度が異なる地点に輸送して、平均輸送速度 U_m 、輸送後のスランプ値および輸送終点においては目視判断による分離の量が総輸送量に占める体積割合(分離量割合と呼び、 V_s と記述することに)を測定した。

(b) 実験-II: この実験は実験室で行ったものである。各調合の試料を20mmふるいでウェットスクリーニングし、粗骨材とウェットスクリーニングコンクリートに分離した。図-3に示した型枠では下側半分はウェットスクリーニングコンクリートを打設し、上側半分は粗骨材を充填した。その後、振動台でセメントペーストが最上面に浮き出るまで締め固めた。凝結の始発の前に、図-3に示す型枠における試料の左半分をほぼ等しい3層に分けて取り出した。取り出した試料は、洗い試験によって、単位質量のコンクリート中の粗骨材量(>20mm)を測定し、3層ごとに最小粗骨材量と理論平均値の比 S_a を求めた。また、残りのコンクリートは28日間水中養生し、その後、10cm立方体にカットして圧縮強度および静弾性係数を測定して、これらの最小値 F_{cmin} 、 E_{cmin} と F_c または E_c の比を求めた。

実験-IIによって、分離した粗骨材とマトリックスモルタルとの振動による再混合・充填の可能性およびコンシステンシーの影響について検討した。

3.2 現場実験の結果および考察

(a) 実験-I: 垂直管路輸送による分離の程度

図-4にフレッシュコンクリートの平均運動速度 U_m と輸送深度 H の関係を示す。 U_m は深度 H とともに増加するが、ある深度を超えるとほとんど変化せず、2節の解析結果と一致している傾向が見られた。また、軟らかい試料の終速度が大きくなることが認められた。

図-5は輸送後の分離量割合 V_s と輸送深度の関係を示したものである。この図によって、 V_s は輸送深度に伴って多くなり、ほぼ一定値に収束するこ

表-1 現場実験の試料の調合およびコンシステンシーの実験結果

No.	W/C	W	S_p	FDN/C	Sl.	Sf.	Ad
I-1	45	180	36	1.0	22.0	50.6	2.8
I-2			38		21.0	46.8	3.7
I-3			40		20.0	43.0	2.3
I-4			42		20.0	40.0	1.2
I-5			44		19.0	35.2	0.8
II-1	35	170	36	1.0	18.0	32.4	0.7
II-2		175			19.0	39.0	1.5
II-3		180			21.5	46.4	1.1
II-4		185			22.0	48.4	1.0
II-5		190			23.0	54.1	2.1
III-1	45	180	40	0.7	19.5	39.2	2.1
III-2				1.0	20.0	42.6	2.3
III-3				1.2	22.0	50.2	2.7
III-4				1.5	21.0	48.7	4.2

[Notes] W/C: Water-cement ratio (%), W: Water (kg/m³), S_p : Sand - aggregate ratio (%), FDN/C: High-range water reducing agent - cement ratio (%), Sl.: Slump value (cm), Sf.: Slump flow value (cm), Ad: Difference of volume of coarse aggregate (%).

とがわかる。また、軟らかい試料のほうが V_s は大きくなる傾向が見られる。

図-6にはスランプSl.と輸送深度の関係を示す。Sl.値は輸送深度が大きくなるほど低下することがわかる。

試料のコンシステンシーと輸送深度が800mにおける分離量割合 V_s との関係を図-7に示す。実験データにばらつきはあるが、 V_s は、Sl.値またはSf.値とともに増加する傾向が見られた。また、図-7(c)に示すように、 V_s と粗骨材分布差 A_d の間+に強い相関があり、 A_d 値が大きい、つまり粘度が低いほど V_s が大きかった。

(b) 実験-II: 分離後の再混合の程度

図-8~10にスランプSl., スランプフローSfおよび A_d 値と各試験値の関係を示す。図-8,9によって、粗骨材量比、圧縮強度比および静弾性係数比の最小値は、いずれもSl.値またはSf.値の増加に伴って

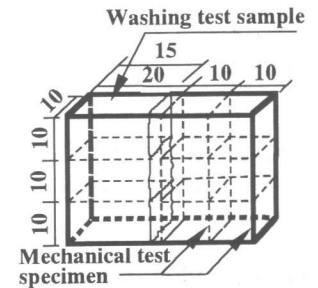


図-3 実験-IIの試料および供試体の採取位置(単位: cm)

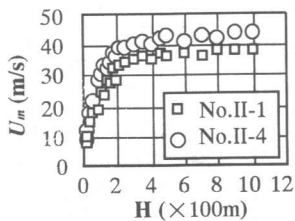


図-4 平均運動速度 U_m と輸送深度 H の関係

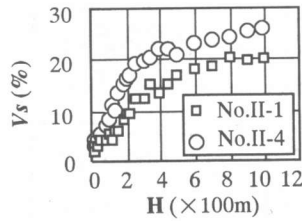


図-5 分離量割合 V_s と輸送深度 H の関係

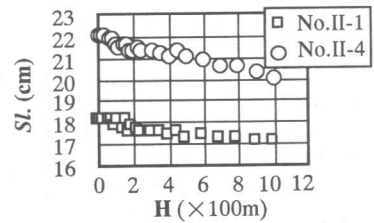
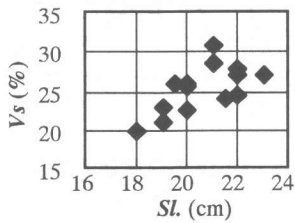
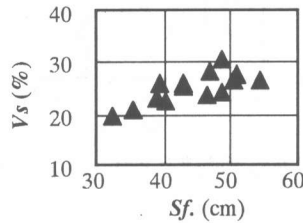


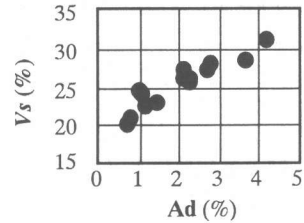
図-6 輸送後のスランプ値 SL と輸送深度 H の野関係



(a) V_s 値と SL 値の関係



(b) V_s 値と Sf 値の関係



(c) V_s 値と Ad 値の関係

図-7 分離量割合に及ぼすコンシテンシーの影響 ($H=800m$)

増加するが、 SL 値が19~23.5cmまたは Sf 値が40~55cmの範囲に達すると、これらの最小値は0.9以上になり、 SL 値または Sf 値との相関性が認められない。また、 Ad 値が大きいシリーズ(I-2, III-4)ではいずれの値も低いことから、試料が軟らかすぎると振動による二次分離が生じるため、品質が逆に低下することがわかった。

一方、図-10によれば、各最小値は、 Ad 値の増加、つまり、分離抵抗性の低下に伴って増加するが、 Ad 値がある限界を超えると逆に減少する傾向が見られた。

実験-IIの結果によれば、分離した粗骨材は、中流動コンクリートのマトリックスモルタルの下方に位置すれば、両者が90%以上程度で衝撃または振動により再混合できる。また、配合強度をより10%大きくして、VPT工法で打設したコンクリートの品質を確保する方法が示唆される。

4. 中流動コンクリートを用いたVPT工法の応用例

以上の考察結果に基づいて、中流動コンクリートを用いたVPT工法が以下の打設方法に従って、張小楼炭鉱の副垂坑の岩石層と花家湖炭鉱の主、副および通風垂坑における坑壁工事に応用された。

(a) 輸送開始するときは、輸送管の内側を水洗

いたあと、適量のセメントペーストまたはモルタルを最初に輸送する。

(b) 1回ごとの分離量を一定とするために、1回ごとの輸送量を一定にする。

(c) 前回の輸送で分離したモルタルを次回に分離した粗骨材と混合するために、フレキシブルホースの先端を垂直に保持し、打設途中で位置の変動を1回行う。

コンクリートの配合および最大輸送深度を表-2に示す。打設した坑壁のコンクリート強度については、深度に沿って約5mごと坑壁の円周から ϕ 100mm \times 100mmのコア供試体4本をランダムに採取して端面処理を行い、材齢28日まで20℃の水中で養生した後、圧縮強度を測定した。全体コア供試体の平均圧縮強度および最小圧縮強度は表-2に示す結果となり、設計基準強度を上回った。なお、実施工では、管路閉塞が生じなかった。これらの応用例によって、中流動コンクリートを垂直パイプで大深度の地下に輸送する可能性が認められた。

5. まとめ

本研究では、大深度地下にフレッシュコンクリートを垂直パイプで輸送する可能性について、理論的考察および実験的検討を行った。得られた結果は以下のようにまとめられる。

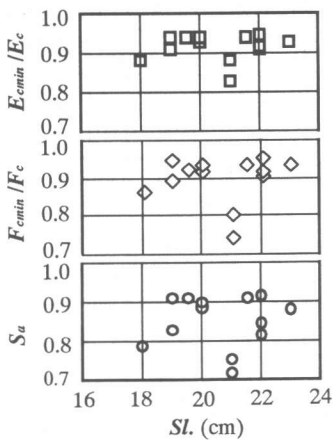


図-8 各試験値とスランプの関係

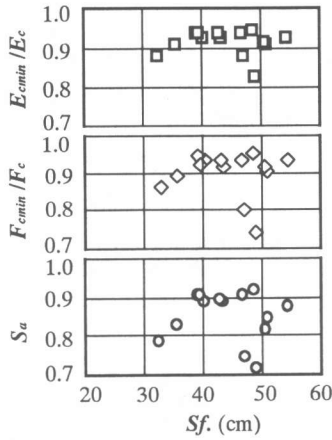


図-9 各試験値とスランプフローの関係

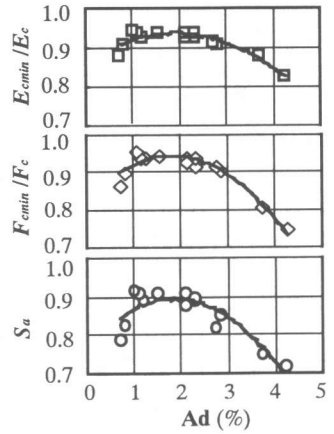


図-10 各試験値とAd値の関係

表-2 中流動コンクリートを用いたVPT工法の応用例

コンクリート工事名	垂直坑の深さ (m)	工事期間	設計基準強度 (Mpa)	コンクリートの調合		Sl.値と Sf.値 (mm)	コア圧縮強度 (Mpa)		工事量 (m ³)
				粗骨材の最大寸法 (mm)	C:W:S:G:A		平均値	最小値	
張小楼炭鉱の副垂坑の坑壁	1096	1991年5月～1993年12月	土層：鉄筋あり、35、 岩石層：鉄筋なし、30	30	1:0.47:2.25:2.80:0.01 (C=375 kg/m ³)	200, 390	40.0	33.9	7900
花家湖炭鉱の主、副および通風垂坑の坑壁	580, 605, 519	1993年9月～1995年6月	土層：鉄筋あり、30、 岩石層：鉄筋なし、25	30	1:0.45:2.09:2.77:0.01 (C=388 kg/m ³)	210, 415	42.2	37.3	8600

- 1) 垂直管路におけるフレッシュコンクリートの運動速度および分離量は、輸送深度とともに増加するが、ある深度を超えると、ほぼ一定値に達する。
- 2) 垂直管路における試料の分離は避けられず、分離した粒子は、粒径が大きいほど輸送される試料の先頭に位置する。また、粗骨材の分離量は、試料が軟らかいほどまた粘度が低いほど多い。
- 3) 中流動コンクリートは振動または衝撃によって自己充填でき、その分離された粗骨材はマトリックスモルタルと90%以上の程度で再混合できる。
- 4) VPT工法は中流動コンクリートの輸送に適用可能である。

参考文献

- 1) 侯純禄：並行作業を用いた炭鉱の垂坑工事に

- 関する研究, 垂坑建設技術, No.1, pp.32-34, 1981
- 2) 劉其興：VPT工法を用いる時のフレッシュコンクリートの分離に関する検討, 中国垂坑建設に関する第8回学術会議, pp.78-84, 1987.7
- 3) 久保輝一郎ほか：粉体理論と応用, 丸善株式会社, pp.544-552, 1962.4
- 4) 村田二郎, 鈴木一雄：セメント系混和物の管内流動のレオロジー解析とその応用, セメント技術年報, Vol.38, pp.210-213, 1984.12
- 5) 渡辺信淳, 渡辺 昌, 玉井康勝：表面および界面, 共立出版株式会社, pp.157-163, 1973.4
- 6) 末岡英二ほか：振動を受けた中流動コンクリートの基礎性状について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.427-432, 1999
- 7) 李柱国ほか：スランプ試験およびフロー試験による中流動コンクリートの分離抵抗性の評価に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), A-1, pp.965-966, 2000.9.