

論文 コンクリートの施工性能評価手法に関する一考察

坂井 吾郎^{*1}・坂田 昇^{*2}・新藤 竹文^{*3}・前川 宏一^{*4}

要旨：高品質かつ高耐久なコンクリート構造物の構築には、構造・施工条件に適した施工性能を有するコンクリートを選定し、施工に起因する初期欠陥の発生をできるだけ抑えることが重要である。著者らは、事前に構造・施工条件とコンクリート配合の組合せの適否を判断するための施工性能評価手法について考察を行い、実施工データに基づいて得られる性能関数とスランプのばらつきとの関係から求めた不具合事象の発生確率でコンクリートの運搬性能および打設性能を評価する手法を考案した。また、評価手法の検証を行って、実施工への適用性について検討した。

キーワード：初期欠陥, 施工性能, 評価手法, 運搬性能, 打設性能, 性能関数

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性への社会的関心が高まる中、ジャンカやコールドジョイント、ひび割れなど施工に起因する初期欠陥の多発が問題視されている。その背景には熟練作業員の不足や良質な骨材の枯渇など、種々の要因が考えられるが、その一つとして耐震基準の見直し等による高密度配筋化やコンクリートポンプによる長距離圧送化などにより、施工そのものが難しくなっていることが挙げられる。

また、現状では対象構造物の構造条件や施工条件に適したポンプ圧送性や打込みのしやすさなどといったコンクリートの施工性能について、事前に検討するための具体的な方法が十分には提供されておらず、設計・施工計画段階において考慮されることが少ない。そのため、特に土木工事においては、施工の諸条件によらず、設計段階で一律的にスランプ 8cm 程度の硬練りコンクリートが指定され、そのまま施工が行われることが多いのが実状となっている。

この施工条件の難度上昇とコンクリートの施工性能の乖離が初期欠陥多発の一因になってい

るものと考えられる。

本論では、こうした背景を踏まえ、設計・施工計画の段階で施工条件に適した施工性能を有するコンクリートを適切に選定することが、初期欠陥の発生を未然に防ぎ、コンクリート構造物の品質を確保するための根幹事項であるとの考えの下に、適切なコンクリート配合の検討・選定を可能とするコンクリートの施工性能評価手法について考察を行った結果を述べる。

2. コンクリート施工の問題点

現状のコンクリート施工には、様々な問題点が考えられる¹⁾が、施工性能の評価を考える上で特に以下の3つの点が挙げられる。

(1) スランプの変化

図-1は、コンクリートが製造されてから打込まれるまでのスランプの変化を実際の施工現場で測定した事例である。このようにコンクリートのスランプが時間経過やポンプ圧送の影響により変化することは良く知られていることであるが、実際の配合設計や施工計画においてこのことが反映されることはほとんどないのが現

*1 鹿島建設 (株) 技術研究所土木構造・材料グループ 主任研究員 (正会員)

*2 鹿島建設 (株) 技術研究所土木構造・材料グループ チーフ兼首席研究員 博(工) (正会員)

*3 大成建設 (株) 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室 チームリーダー兼首席研究員 博(工) (正会員)

*4 東京大学 大学院工学系研究科社会基盤学専攻 教授 工博 (正会員)

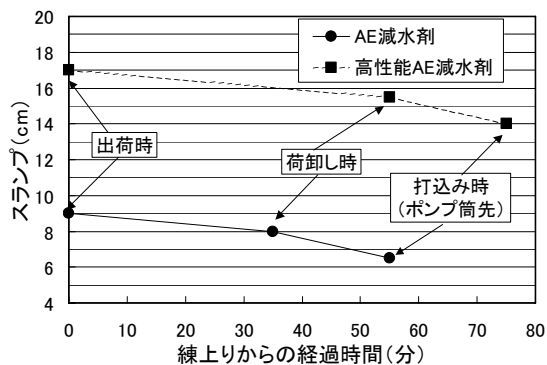


図-1 スランプの変化の測定例

状である。また、コンクリート標準示方書で示されるスランプの標準値は「打込み時」のもの、JIS A 5308「レディーミクストコンクリート」で規定されるスランプは「荷卸し時」のものであるにも拘わらず、実際には同じものとして取り扱われている場合が大多数である。このことは、バケット打設では荷卸し時と打込み時でスランプの変化がほとんどないために問題とならないが、現在の主流であるポンプ打設では前述のように圧送によるスランプロスが生じるため、これら両者の違いを無視することができない場合が多い。

したがって、施工性能評価手法を考える上では、施工の各段階でスランプが変化することを想定し、製造時、荷卸し時および打込み時の各段階におけるスランプを明確に区別して取扱うことが重要であると考えられる。

(2) スランプのばらつき

同一の製造環境で練り混ぜられたコンクリートであっても、その品質には使用材料の品質変動や環境温度の変化などの影響によってばらつきを生じる。このため、硬化コンクリートの圧縮強度については、ばらつきが生じても所定の品質が確保されるように確率論に基づいた配合強度が設定される。一方、フレッシュコンクリートにおいてもスランプには所定の許容幅が設けられているが、これは品質のばらつきや試験誤差などの観点から品質管理の運用上定められたものであり、施工性能については考慮されていない。一般に施工性能はスランプの目標値(中央値)で規定されているが、管理幅の上下限値

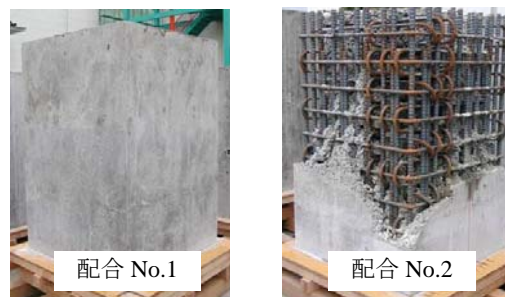


写真-1 コンクリート打設状況の比較

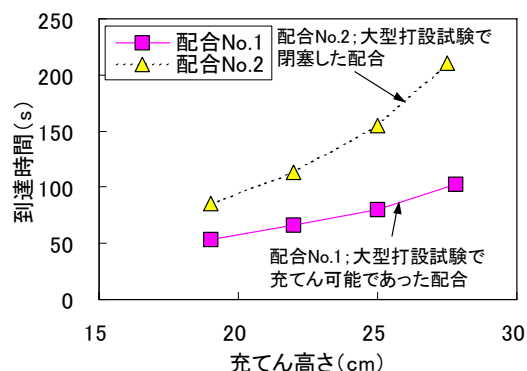


図-2 加振充てん性試験結果

(例えば、目標スランプ 8cm における 5.5cm と 10.5cm) において施工性能が異なることは明白である²⁾。

コンクリートの施工性能評価においては、スランプにも圧縮強度と同様に、製造のばらつきを考慮した管理が導入されるべきであろう。また、施工条件に適した性能を付与するためには、管理上の下限値となった場合においても一定の確率で品質が満足されるよう、目標値が設定される必要があると考えられる。

(3) 施工性能の指標

現状のコンクリートのワーカビリティに関する評価指標は、変形性・流動性を表すスランプ値のみである。スランプ試験はその簡便性に大きな利点があるが、スランプ値のみではコンクリートの施工性能を十分に評価できない。

写真-1 に、スランプ値を 8cm と同一にして単位水量、単位セメント量および細骨材率を変化させた 2 種類の配合のコンクリートを、密に配筋された大型打設試験体にそれぞれ打設した状況を示す³⁾。配合 No.1 では完全に充てんすることができたが、細骨材率が小さくペースト量の少ない配合 No.2 ではコンクリートが鉄筋間を

通過せず途中で閉塞する結果となった。また、同コンクリートについて、振動装置を設置したU型充てん性試験器³⁾を用いてコンクリートに振動を与えた状態で充てん性試験を実施した結果を図-2に示す。両コンクリートが同一の充てん高さに到達するまでの時間は明らかに異なり、前述の大型打設試験体において打設不可能であったコンクリートの施工性能は確かに低いことが確認された。

このように、同一のスランプ値であっても施工性能が同一であるとは限らない。施工性能を正しく評価するためには、変形性・流動性を表すスランプとともに、内部振動機のエネルギー伝播に影響する粘性と間隙通過性に影響する粗骨材量や材料分離抵抗性を考慮する必要があるものと考えられる。

3. 施工性能評価手法の考察

3.1 評価の概要

前章で述べた課題を踏まえ、施工性能評価手法について考察を行った。施工性能の評価手法については室内試験レベルでは石丸らの研究⁴⁾など、コンクリートの締固め性能や圧送性能に関して数多くの検討が行われている。これらの研究は施工性能を検討する上での原点であり、極めて重要な研究であるが、実験の規模や条件の制約などから施工の良否と直接的に関係付けることが難しい。そこで、著者らは実際の現場で得られた施工データから対象構造物の構造条件や施工条件とコンクリートの施工性能の関係を求め、これを基に施工の適否を不具合の発生する確率で評価する手法を考えた。

図-3に評価のフローを示す。本評価手法では、設定された条件に基づいてコンクリートの運搬性能と打設性能を評価することとしている。ここで、運搬性能とは、レディーミクストコンクリート工場から構造物を構築する現場までのアジテータ車やポンプ圧送による場内外運搬におけるコンクリートの性能を意味し、運搬性能評価は製造から打込みに至るまでのスランプの

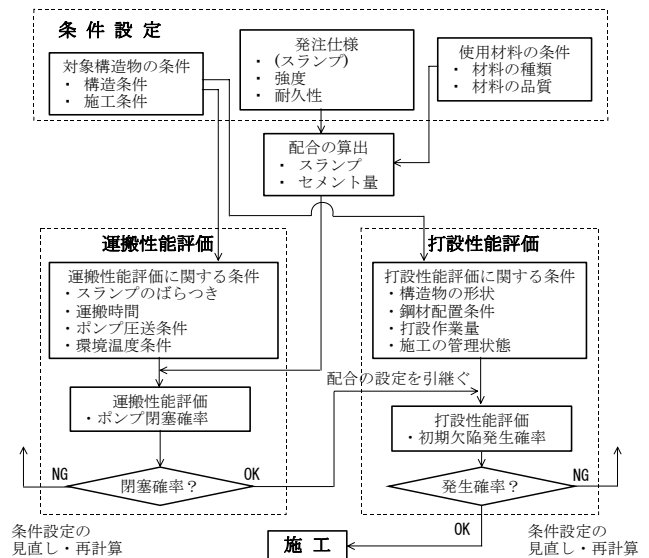


図-3 評価フロー

変化の推定と、ポンプ圧送における配管閉塞の危険性について、その発生確率を算出することにより照査を行うものである。打設性能とは、密実な打込みを実現するために必要となるコンクリートの変形性や材料分離抵抗性、間隙通過性などに関する性能であり、施工の難易度に関する条件、すなわち構造物の形状、鉄筋間隔や配筋位置などの配筋状況、打設箇所との関係、打設の作業量などに影響される。打設性能評価の対象となる構造物の初期欠陥としては、ジャンカや豆板などの未充てん、コールドジョイント、ひび割れ、砂縞や色むらなどが挙げられるが、ここでは構造物の構造性能および耐久性能に大きく影響する未充てん部の発生を取り挙げることにし、所定の施工方法のもとで未充てん部が生じる確率を算出することにより照査することとした。

3.2 運搬性能評価

図-4は、施工を担当している技術者にアンケート調査を行って得られたポンプ圧送の可否（配管閉塞の有無）に関する施工データについて、コンクリートの施工性能は変形性と粘性（材料分離抵抗性）で表現されるという考えに基づいて、それぞれの指標にスランプと単位セメント量を用いて整理したものである。各データの粗骨材最大寸法は20~25mm、圧送条件として、配管径100~125mm、水平換算距離80~200mの

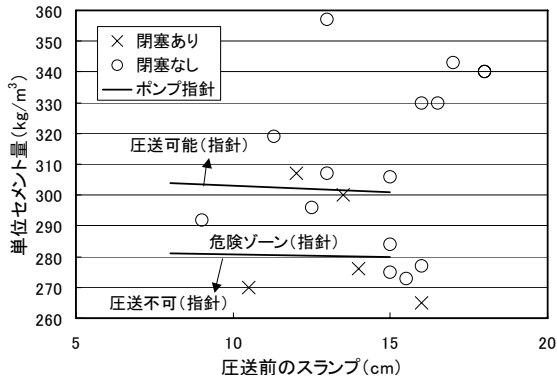


図-4 圧送の可否に関する施工データ

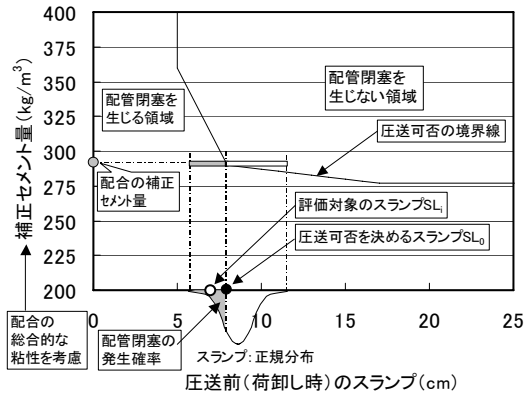


図-5 ポンプ閉塞確率算定の基本概念図

ものである。

この施工データをコンクリートのポンプ施工指針⁵⁾に示される砕砂コンクリートのスランブと単位セメント量の関係と比較すると、圧送の可否の範囲が概ね一致する結果となっている。このように、一般の施工条件下でのポンプ圧送性は圧送前のスランブ値と単位セメント量で判定可能であり、さらに施工データを蓄積することによって、広範な施工条件毎に圧送の可否の境界線を見出すことができるものと考えられる。

本評価手法では、この実施工データから得られる圧送可否の境界線を基にして、配管閉塞が生じる確率を算出することを考えている。図-5に示すように、評価対象となるコンクリートの荷卸し時のスランブ SL_i と実施工データに基づいてポンプ圧送の可否を決めるスランブ SL_0 の差を性能関数 $g(x)$ と定義する。前章で述べたとおり、コンクリートのスランブは各種要因の影響によって変化し、連続的に製造されたコンクリートであっても、ある範囲のばらつきを有する。よって、この性能関数においてコンクリ

ート荷卸し時のスランブ SL_i のばらつきを考慮し、そのばらつきが正規分布すると仮定すると、(1)式より配管閉塞を生じる確率 P_f を求めることができる。

$$\begin{aligned}
 P_f &= P(g(x_i) \leq 0) \\
 &= P(SL_i - SL_0 \leq 0) \\
 &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I(g(x_i) \leq 0) \quad (1)
 \end{aligned}$$

ここで、 $I(g(x_i) \leq 0)$ は $g(x_i) \leq 0$ の場合に 1 を取り、 $g(x_i) > 0$ の場合は 0 の値をとる関数である。

本評価手法では、コンクリートの粘性を表す指標として配合上の単位セメント量ではなく、「補正セメント量」という考え方を導入した。これは、単位セメント量に加え、細骨材微粒分や水セメント比など、そのコンクリートの総合的な粘性を判定するにあたって不可欠と考えられる配合因子の影響を考慮したものである。具体的には、室内実験等により各配合因子の影響をセメントの等価量として評価し、これを単位セメント量に加算することが考えられ、現在これについて検討を行っている。なお、後述する評価ソフトでは、暫定的に細骨材微粒分の影響のみを補正することとし、細骨材の粒度分布と単位量から算出した 0.15mm 以下の微粒分量を単位セメント量に加算している。

運搬性能評価のもう 1 つの項目である製造から打込みに至るまでのスランブの変化の推定については、図-1で示したような現場測定データを蓄積・整理することにより可能になるものと考えられる。

3.3 打設性能評価

打設性能を考える上で重要なことは、対象となる部材の種類毎に評価を行う必要があるということである。部材の断面寸法が比較的小さく高さ方向の寸法が大きい壁や柱部材、鉄筋や埋設物が錯綜する PC 定着部などでは締固めの状況が確認しづらく、未充てん部を生じ易いと考

えられ、逆にスラブや梁部材などのように高さ（厚さ）の小さい部材では、多少鋼材量が多くとも未充てん部は生じにくい。前述のアンケート調査の結果においても、未充てん部を生じたと回答が得られた事例のうちの約 60%が壁もしくは柱部材であった。

図-6 および図-7 は、アンケート調査で得られた施工データのうち、壁および柱部材を対象に未充てんの有無を打込み時のスランプ値と単位セメント量で整理したものであり、図-6 は鉄筋の最小あき間隔が 100~150mm のもの、図-7 は 40~80mm のものである。また、アンケートでは未充てんの有無のほかに「結果として未充てんは生じなかったが、事前にその可能性が懸念された」ものについても回答を得ており、それらのデータについても表記している。

未充てんの有無についても、ポンプ圧送における閉塞の有無と同様に、データの分布から未充てんの有無の境界線を見出すことが可能であるものと考えられる（図-6、7）。「可能性あり」は施工担当者の経験的な判断ではあるが、概ね「未充てん有」と「無」が隣り合う付近にプロットされており、未充てんの有無の境界を表しているものと推定される。

図-6 と図-7 を比較すると、未充てんの有無の境界線が異なっていることから、打設性能評価の基となる境界線は、鉄筋の最小あき間隔毎に設定されるべきであると考えられる。また、図-7 ではスランプ値が 18cm と大きい場合であっても未充てん部を生じる結果となっている。これは、スランプ値の大きさに対して材料分離抵抗性が不足しており、高密度に配置された鋼材位置で粗骨材がロッキングを生じた結果であると推察される。したがって、スランプ値の大きい領域における未充てんの有無を表す境界線は、スランプ値の大きさに適した材料分離抵抗性（粘性）を確保できるように、スランプ値の増大に伴って補正セメント量が増加する右肩上がりの線になるものと考えられる。

これらに加えて、図中に示したように鋼材配

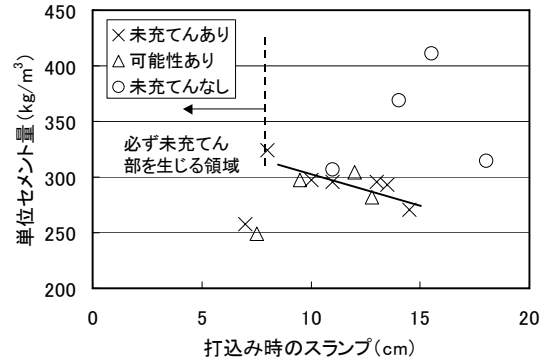


図-6 未充てんの有無に関する施工データ（鉄筋の最小あき間隔:100~150mm）

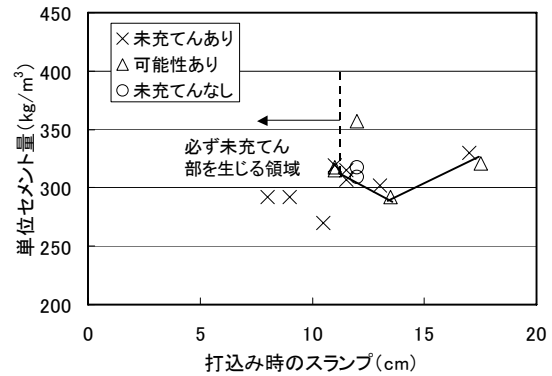


図-7 未充てんの有無に関する施工データ（鉄筋の最小あき間隔:40~80mm）

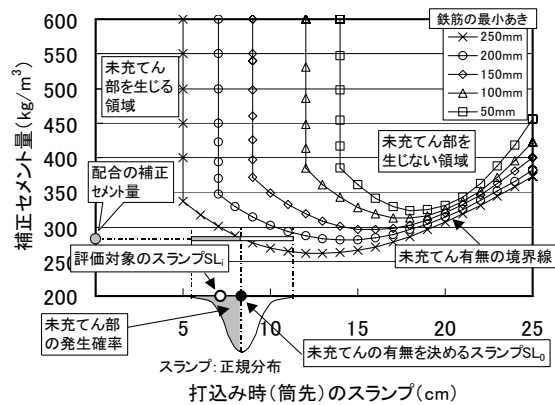


図-8 未充てん部発生確率算定の基本概念図

置条件毎に必ず未充てんを生じるスランプ値が存在することを考えると、打設性能評価における未充てん有無の境界線は図-8のように設定できるものと考えられる。そして、これを基に評価対象となるコンクリートの打込み時のスランプ SL_i と実施工データに基づいて未充てんの有無を決めるスランプ SL_0 の差を性能関数 $g(x)$ と定義し、 SL_i のばらつきを考慮することで、運搬性能評価と同様に未充てん部を生じる確率を算出できるものと考えられる。

4. 施工性能評価手法の検証

前章で述べた評価手法に基づいて PC 用評価ソフトを作成し、未充てん部の発生の危険度について実際の施工で得られたデータを統計処理して評価手法の検証を試みた。本評価ソフトでは、評価の対象とするスランプの分布として正規分布を仮定し、平均に打込み時のスランプを用い、標準偏差を品質管理上の許容幅である±2.5cmを考慮した設定として、モンテカルロシミュレーションにより未充てん部の発生確率を求めた。図-9に計算結果の出力画面を、表-1に試算結果を示す。

実際に未充てん部を生じたケース1の発生確率は74.4%、生じなかったケース2では17.1%の計算結果が得られており、本評価手法により両者の差を明確に表現できることが確認できた。

ケース2の値は実際に未充てん部を生じなかったものとしてはやや大きいと思われるが、今後、施工データの蓄積を行うとともに、施工条件として極めて重要な要件である締固め作業の質や量を考慮することなどによって、より現実的な確率を算定することができるようになるものと考えられる。また、本評価手法はコンクリート構造物の品質向上を目指したものであり、コンクリートを軟練り化する方向へ誘導することを意図したものではない。したがって、構造・施工条件に応じた適切な評価結果が得られるものにするとともに、硬化コンクリートの耐久性確保の観点からも従来からの考え方に矛盾しないものとする仕組みが必要であると考えられる。

5. まとめ

本論では、構造・施工条件に適したコンクリートの選定を行うための施工性能評価手法について考察を行い、考案した施工性の適否を確率で算定する評価手法について述べた。また、実データに基づく検証を行って、その適用の可能性について確認した。

今後は、施工データの蓄積による評価精度の向上を図り、実用的な手法としての完成を目指

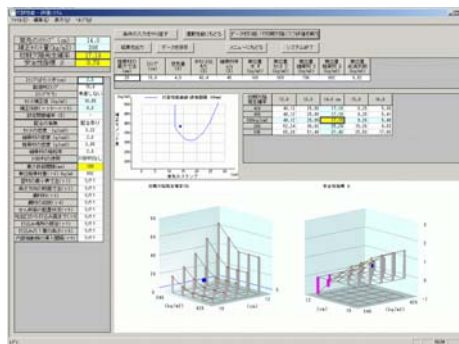


図-9 計算結果の出力画面

表-1 試算結果

構造・施工条件		ケース1	ケース2
構造条件	構造物の種類	水路	ボックスカルバート
	部材の種類	壁	壁
	部材の断面寸法 h (m)	3.6	3.5
	鋼材量 (kg/m ³)	110	260
	最小あき間隔 (mm)	40	125
配合条件	配合記号	24-12-20BB	30-15-20L
	水セメント比 (%)	55.0	46.1
	単位水量 (kg/m ³)	173	160
	単位セメント量 (kg/m ³)	315	369
	打設時のコンクリート温度 (°C)	13.0	20.0
施工条件	打込み時スランプ (cm)	11.5	14.0
	打設量 (m ³)	215	450
	時間当り打設量 (m ³ /hr)	30.7	40.9
	打込み高さ (m)	1.0	1.5
	打込みの層厚 (cm)	70	50
	パイプレータの挿入間隔 (cm)	50	50
実際の未充てんの有無		あり	なし
未充てん部の面積比 [*] (%)		1.0	—
プログラムによる発生確率の算定結果 (%)		74.4	17.1

*) 部材総表面積に対する未充てん部の面積比

して検討を進める予定である。

最後に、本研究が大成建設株式会社、鹿島建設株式会社が実施した2社共同研究の成果の一部であることを付記する。

参考文献

- 1) 新藤竹文, 坂田昇, 前川宏一: 初期欠陥を未然に防ぐコンクリート施工性能評価技術について, コンクリート工学, Vol.43, No.2, pp.27-34, 2005.2
- 2) 芦澤良一, 坂井吾郎, 新藤竹文, 坂田昇: 各種要因がコンクリートのスランプへ及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, pp.1009-1014, 2005.6
- 3) 府川徹, 大友健, 坂田昇, 新藤竹文: 高周波振動を受けたコンクリートのワーカビリティに関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, pp.1015-1020, 2005.6
- 4) 石丸啓輔, 橋本親典, 渡辺健, 水口裕之: 加振BARフロー試験によるコンシステンシー評価試験方法の検討, 第56回セメント技術大会講演要旨, pp.128-129, 2002
- 5) 土木学会: コンクリートのポンプ施工指針【平成12年版】, p.34, 2000