論文 粒状体・流体連成解析によるフレッシュコンクリートの充填評価

原 勝哉^{*1}·橋本 親典^{*2}·渡邊 健^{*3}·石丸 啓輔^{*4}

要旨:近年,各種混和剤(材)の使用により,同一スランプであっても流動特性が大きく異なるフレッシュコ ンクリートが存在する。既往の研究において3次元流動解析技術の1つである粒状体・流体連成解析手法を 用いることで複合材料としてのフレッシュコンクリートの流動性状を表現できる可能性が示唆された。本研 究では加振ボックス充填試験を対象として,粒状体・流体連成解析の解析値と実験値を比較することでその 有用性について検討した。両者を比較した結果として,各種パラメータを考慮することで加振ボックス充填 試験を模擬できる可能性があることがわかった。

キーワード: 粒状体・流体連成解析, フレッシュコンクリート, 加振ボックス充塡試験

1. はじめに

近年,各種混和剤(材)の使用により,同一スランプ値 であっても流動特性が異なるフレッシュコンクリートが 存在する。スランプ試験のみでは流動特性の変化や鉄筋 量の増加など設計施工条件に対する施工性能を評価でき なくなってきた。土木学会 341 委員会 2 期目の活動報告 1から, 粒状体・流体連成解析手法を用いることにより, フレッシュコンクリート特有の問題である材料分離や鉄 筋配置部の閉塞を仮想現実において再現できる可能性が 示唆された。しかしながら,活動報告における解析結果 は実現象との比較が行われておらず、その整合性に関す る検討が行われていない。一方、フレッシュコンクリー トの実施工実験による施工性能評価手法として加振ボッ クス充塡試験が提案²⁾されている。本研究では、加振ボ ックス充塡試験を対象に実施工実験と粒状体・流体連成 解析を行い、実験値と解析値の整合性を検討した。フレ ッシュコンクリートの主なパラメータはモルタルの粘性 と粗骨材とモルタルの容積比(以降, VG/VMと称す。), 骨材の粒度分布である。実施工実験に関しては、加振ボ ックス充塡試験において充塡不良を起こすフレッシュコ ンクリートの配合の鉄筋間の間隙通過速度を計測する。 解析に関しては実験における配合条件から VG/VM と粒 子の個数を設定し解析を行い、両者の結果を比較した。 さらに, 解析結果における加振ボックス充塡試験装置内 部の鉄筋の配筋条件の違いによる流動性状を検証し、粒 状体・流体連成解析手法の有用性について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本研究で使用した材料の物理的性質を表-1,表-2に示

す。粗骨材は徳島県鳴門市撫養町の砕石,細骨材は徳島 県阿波市市場町の砕砂を使用した。また,粗骨材は、最 大寸法が15mmと20mmの骨材を5:5の割合で混ぜて 使用し,FAは、フライアッシュI種を使用した。

2.2 配合

本研究に用いた配合を表-3に示す。目標スランプはす べて8±2cm,空気量4.5±1.5%で一定とした。配合No.1, No.2 は単位水量171kg/m³,単位粉体量300kg/m³で一定 である。配合No.2 は,FAI種を配合No.1のセメントの 内割りで20%体積置換した配合である。配合No.3,No.4 はW/C55%,単位セメント量300kg/m³で一定とし,細骨 材率 s/a を変化させた。配合No.5 は、単位セメント量 350kg/m³とした。また、砕石・砕砂を用いる西日本では、 単位水量が大きくなる傾向があるため高性能AE減水剤 を使用する傾向³にある。本研究では西日本の配合を対 象に実験を行った。高性能AE減水剤は主成分がポリカ ルボン酸エーテル系化合物のもの、AE減水剤は主成分 がリグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテル の複合体を使用した。AE剤は、FAを用いない配合は、

表-1 材料物性值

項目		粗骨材	細骨材
最大寸法 (m	nm)	20	2.5
表乾密度 (g/c	m ³)	2.56	2.57
吸水率	(%)	2.16	1.77
実績率	(%)	60.16	55.12
粗粒率		7.03	2.63
粗粒率		7.03	2.63

表−2	セメン	ト・フライ	「アッシュ	物性値
-----	-----	-------	-------	-----

材料	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	強熱減量 (%)	二酸化ケイ素 (%)
普通ポルトランド セメント	3.16	3250	2.07	-
フライアッシュ I 種	2.40	5520	1.90	53.9

*1 徳島大学大学院 先端技術科学教育部 知的力学システム工学専攻 博士前期課程 (学生会員)
*2 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門教授 工博 (正会員)
*3 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門准教授 博(工) (正会員)
*4 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部総合技術センター技術専門職員 (正会員)

表-3 配合およびフレッシュ性状

			単位水量(kg/m)				高性能AE減	AE減水剤	AE剤	スランプ	СТ	売与旦(⋒)	
記音NO.	W/P(%)	s/a(%)	W	С	FA	S	G	水剤 C×%	C×%	C×%	(cm)	(°C)	오지里(%)
1	52	52	171	330	0	908	835	1.1	-	0.0005	8.0	23.2	4.5
2	54	52	171	264	50	908	835	0.9	I	0.0010	8.3	22.8	3.9
3	55	43	165	300	0	768	1011	0.9	I	0.0010	6.5	18.9	3.5
4	55	50	166	300	0	892	888	0.9	-	0.0020	6.0	18.1	6.0
5	51	52	180	350	0	888	813	-	1.8	0.0007	8.0	22.6	4.5

通常アルキルエーテル系のものを, FA を用いた配合には 専用の AE 剤を使用した。

2.3 試験方法

各配合において、室温 20℃一定の環境下で 60L の二軸 強制練りミキサを使用し練り混ぜを行った後,以下に示 す試験を行った。

1) フレッシュ性状に関する試験

練り上がり直後に、フレッシュコンクリートのスラン プと空気量を、スランプ試験(JIS A 1101)および空気量試 験(JIS A 1128)に従い測定した。本研究で用いた各配合の フレッシュ性状を表-3 に示す。

2) 加振ボックス充塡試験²⁾

図-1 に加振ボックス充填試験装置および棒状バイブ レータ(全長:1015mm, 直径:28mm, 振動数:220~270Hz, モーター: 280W) を示す。A 室と B 室の境界に流動障害 を設けている。流動障害は、D13 鉄筋を 35mm 間隔で柵 状3本配置した流動障害 R2 を用いた。試験方法は、図 -1 に示すボックス型容器の A 室にフレッシュコンクリ ートを3層に分け、1層毎にボックス型容器を水平な方 向へ1往復揺らし満たしていく。満たした後(図-1)棒 状バイブレータを挿入する。挿入位置は A 室の中央で, 挿入深さは棒状バイブレータの先端が容器下端から 100mmの所とし、加振すると同時にゲートを開け、B室 に高さ 300mm になるまで充塡を行う。加振時間が 300 秒 以上となった場合,測定不能とした。加振開始直後から B室の高さ190mmと300mmに充塡するまでの時間を測 定し, それぞれ 190mm 充填時間, 300mm 充填時間と する。0~190mm 区間と 190~300mm 区間の通過速度を 間隙通過速度とし、流動障害部分を通過したコンクリー





トが型枠に充填される際の間隙通過性を評価した。

3. 粒状体·流体連成解析

粒状体流体連成解析は、粒状体挙動解析コードと熱流 動解析コードを連成させた解析手法である。流体解析を 行って流速や圧力分布を求め、求められた流速や圧力分 布などを用いて粒状体解析の個々の粒子に採用する流体 抗力を求めて粒子の運動を解く。粒状体解析で得られた 粒子の分布と流体抗力を流体解析に反映させた上で再度 流体解析を行う。この計算を繰り返し行い、流体解析と 粒状体解析との間で双方向にデータのやり取りを行うた め、粒状体が運動することによって流体が運動するよう な現象を模擬可能となっている。

3.1 解析理論

1) 流体解析基礎式

圧縮性流体の質量保存式は以下のようになる。

$$\frac{d}{dt}\int_{V} \rho_{f}\epsilon \vec{v}dV + \int_{S} \rho_{f}\epsilon \vec{v} \cdot d\dot{s} = 0$$
(1)

ここで、Vは体積、Sは境界表面、sは外向きの表面の法線、 ρ_f は流体密度、vは流速、 ϵ は空隙率である。 圧縮性粘性流体の運動量保存則は次のように表す。

$$\frac{d}{dt}\int_{V} \rho_{f}\epsilon \vec{v}dV + \int_{S} \rho_{f}\epsilon \vec{v}\vec{v}\cdot ds$$

$$= \int_{S} \epsilon T \cdot ds + \int_{V} \vec{f}_{b} dV \tag{2}$$

ここで、Tはコーシー応力テンソル、 f_b は単位体積当たりの物体力である。ストークスの法則を使用して、コーシーテンソルは次のようになる。

$$T = 2\mu \dot{D} - \frac{2}{3}\mu \left(\nabla \cdot (\epsilon \vec{v})\right) I - pI \tag{3}$$

ここで, μは動粘性係数, pは流体圧力, Iは単位テンソル であり, Ďは次のように定義される。

$$\dot{D} = \frac{1}{2} [\nabla \epsilon \vec{v} + (\nabla \epsilon \vec{v})^T]$$
(4)

非圧縮性流体の場合は,密度*p*fは一定である。従って, 連続式(1)は下式のようになる。

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\epsilon \vec{v}) = 0 \tag{5}$$

式(3)にこの関係を代入するとコーシーテンソルは下式 で表される。

$$\Gamma = \mu \nabla \vec{v} - \frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial t}\right) I - pI \tag{6}$$

この式の右辺の第二項は、空隙率変化に起因する流体の 移動に関連した粘性損失を表している。この項は流体解 析の解では無視される。コーシーテンソルのこの形式を 取り入れ、微分項の結果で示し、Navier-Stokes 方程式を 与える。

$$\rho_f \frac{\partial \epsilon \vec{v}}{\partial t} + \rho_f \vec{v} \cdot \nabla(\epsilon \vec{v}) = -\epsilon \nabla p + \mu \nabla^2(\epsilon \vec{v}) + \vec{f}_b \qquad (7)$$

2) 粒状体解析基礎式

粒状体解析の粒子に関する運動方程式は、流体との相 互作用からなるため追加の強制項とともに与えられる。

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = \frac{\vec{f}_{mech} + \vec{f}_{fluid}}{m} + \vec{g}$$
(8)

$$\frac{\partial \vec{\omega}}{\partial t} = \frac{\vec{M}}{I} \tag{9}$$

ここで、 \vec{u} は粒子の速度、mは粒子の質量、 \vec{f}_{fluid} は流体に よって適用された粒子の総力、 \vec{f}_{mech} は粒子に作用する追 加の力の合計(外部応用力と接触力)で、 \vec{g} は重力加速度、 $\vec{\omega}$ は粒子の角速度、Iは慣性モーメント、 \vec{M} は粒子に作用 するモーメントである。流体により適用される力 \vec{f}_{fluid} は けん引力と流体圧力勾配による力の2つの部分から構成 される。粒子に流体が与える抗力は、各粒子に関して個 別に定義され、粒子を含む流体要素内の条件に基づく。 空隙率が計算される方法に応じて、粒子は複数の流体要 素が交差してもよい。この場合、力は粒子と流体要素と の間のわずかな重なりに基づいて分配される。流体に加 わった力は常に粒子の重心に適用され、回転モーメント が粒子に適用されないことに注意する。けん引力 \vec{f}_{drag} は 次のように定義される。

$$\vec{f}_{drag} = \vec{f}_0 \epsilon^{-\chi} \tag{10}$$

ここで、 $\vec{f_0}$ は単一粒子における力、 ϵ は空隙率である。 $\epsilon^{-\chi}$ の項は、局所の空隙率を考慮するための経験的な要因である。この補正項はレイノルズ数の大規模な範囲のための固定床および流動床の両方に適用できる力になる。単一粒子の力は次のように定義されている。

$$\vec{f}_{0} = \left(\frac{1}{2}C_{d}\rho_{f}\pi r^{2}|\vec{u} - \vec{v}|(\vec{u} - \vec{v})\right)$$
(11)

ここで、 C_a は抗力係数、 ρ_f は流体密度、rは粒子半径、 \vec{v} は流体の速度、 \vec{u} は粒子の速度である。抗力係数は次のように定義される。

$$C_d = \left(0.63 + \frac{4.8}{\sqrt{Re_p}}\right)^2$$
(12)

ここで、Repは粒子のレイノルズ数である。経験的な係数 xは次のように定義される。

$$\chi = 3.7 - 0.65 \exp\left(-\frac{\left(1.5 - \log_{10}(Re_p)\right)^2}{2}\right)$$
(13)

粒子のレイノルズ数は次のように定義される。

$$Re_p = \frac{2\rho_p r |\vec{u} - \vec{v}|}{\mu_f} \tag{14}$$

ここで、 μ_f は流体の動粘度である。流体圧力勾配による 力などの、粒子の総流体作用力は、下式であらわされる。

$$\vec{f}_{fluid} = \vec{f}_0 \epsilon^{-x} + \frac{4}{3} \pi r^3 (\nabla p - \rho_f \vec{g})$$
(15)

3) 連成解析基礎式

連成解析は流体解析と粒状体解析間に一連のデータ交換 があり、所定の時間に行われる。各流体要素内の空隙率 ϵ^{i} は、粒状体解析によって決定される。各流体要素内の 単位体積あたりの物体力 \vec{f}_{b} は、粒状体解析によって次の ように決定される。

$$\vec{f}_b^i = \frac{\sum_j \vec{f}_{drag}^j}{v^i} \tag{16}$$

ここで、合計は与えられた流体要素内のすべての粒子で あり、Vⁱは要素の体積である。すべてのけん引力が粒状 体解析で決定され、流体解析における体積によって割る ことに注意する。流体速度*vⁱ*と各要素内の流体の圧力勾 配*Vpⁱ*は流体解析によって決定される。流体解析は各連成 のデータ交換で粒状体解析から受け取った物体力と空隙 率に線形緩和を適用する。例えば、空隙率に対して線形 緩和は次の項をとる。

$$\epsilon_t = R_f \epsilon_t + (1 - R_f) \epsilon_{t-dt} \tag{17}$$

ここで、 R_f は緩和パラメータ (0.5 で固定)、 ϵ_t は最新 (現 在または進行中)の空隙率、 ϵ_{t-dt} は前タイムステップからの空隙率である。

3.2 解析概要

1) 解析対象

本解析では、加振ボックス充填試験を対象とした。本 解析で用いるボックス形充填試験装置モデルおよび流動 障害モデルは既往の研究^{1),3)}を参考とする。解析対象と なるボックス形充填試験装置および流動障害を図-1 に 示す。解析時間は最大 30 秒とし、流動が停止した位置で の充填高さと間隙通過速度を評価した。

2) 材料モデル

本解析において、粒状体と流体の連成解析における、 材料のモデル化は既往の研究 %を参考にした。粗骨材モ デル(密度:2.56g/cm³,ばね定数法線方向:1.0×10⁻⁷N/m, 接線方向:1.0×10⁻⁷N/m)は球形要素、モルタルモデル(密 度:2.00g/cm³)は連続体モデルとして取り扱い、加振ボ ックス充塡試験では常時フレッシュコンクリートに振動 を与えることからニュートン流体と仮定した。

3) 各種パラメータの設定

表-4 に本解析における各種パラメータを示す。パラメ ータの設定に際して,表-3の実験に用いた配合条件を反 映させたモデルである。表-4 における各モデル No.の数

表-4 パラメータ

エデルN。 法動陪実			粘性係数	ふるいのよび	各ふるいにと			
L / //NO.	加到陸吉	VG∕VM	20mm	15mm	10mm	(Pa•s)	寸法(mm)	とまる量(%)
		0.50	400	550	0040	100	25	0.0
		0.52	400	55Z	084Z	100	20	30.3
2	50	0.52	466	552	6842	200	15	14.8
3	KZ (鉄筋3木)	0.70	561	665	8235	100	10	34.5
4		0.57	495	586	7261	100	5	20.3
5]	0.50	454	538	6666	100	2.5	0.2

字は表-3における各配合 No.の数字と対応している。具 体的に、検討したパラメータは流動障害の種類(鉄筋本 数), V_G/V_M, 直径別粒子数, 粘性係数である。

流動障害は D13 鉄筋を3本配置した流動障害 R2 とし た。粘性係数は 100Pa・s を基準とし、FA を用いる配合 は粘性係数 200Pa・s とした。VG/VMの算出法を以下に示 す。まず, 表-3の各配合の単位量(kg/m³)より, ボック ス型試験装置 A 室容積(680×140×200mm³)に占める各 材料質量を求める。その後求めた値を、各材料密度で除 し、各材料がA室に占める容積を算出する。算出した各 値の、粗骨材の容積を粗骨材モデル容積(以降、VGと称 す),水・砂・セメントの容積の合計値をモルタルモデル 容積(以降 VMと称す)とした。両者の割合を VG/VMと した。また、粗骨材モデルにおける粒子直径は 20mm, 15mm, 10mmの3条件とした。直径別の粒子の個数は, 表-5の粗骨材粒度分布を元に決定した。各モデル No.毎 の VGに占める割合を, 直径 20mm の粒子が 30%, 15mm の粒子が15%,10mmの粒子が55%となるように個数を 決定した。

4) 振動条件

フレッシュコンクリートモデルの充塡は,重力加速度と 自重による充填と加振による充填の2条件で解析を行う。 加振の条件の設定は、周波数と振幅により加速度を決定 し、振動条件とする。速度は式(18)、式(19)により決定す る。

$\omega = 2\pi f$	(18)

$$a = A\omega^2 \sin \omega t \tag{19}$$

ここで, ω :角速度(rad/s),f:周波数(Hz),A:振幅 (m), a:加速度(m/s²)



上式の加速度をボックス形試充塡験装置モデル要素全体 に与えて振動させる。周波数を 50Hz,振幅を 0.45mm に 設定し、加速度を44.4m/s²とした。この振動条件の加速 度,周波数は既往の研究 3で使用した条件を参考に設定 した。従って、実験におけるA室に棒バイブレータを挿 入して振動を与える振動条件とは異なり、検討的に設定 した。

4. 結果および考察

4.1 実験結果

図-2に実験値の加振ボックス充塡試験の0~190mmま での間隙通過速度と190~300mmまでの間隙通過速度を 示す。配合 No.3, No.4 は加振時間が 300 秒を超過したた め 300mm までの間隙通過速度は測定不能となった。5 配 合は全てスランプ 8±2cm の範囲である。ほぼ同一スラ ンプ値であるにも関わらず、加振ボックス充塡試験にお いて間隙通過速度は異なることがわかる。また、190~ 300mm までの間隙通過速度と 0~190mm までの間隙通 過速度との間に相関性がみられる。

4.2 解析結果

図-3 に解析結果における各モデルの充填時間と充填 高さの関係を示す。図中の黒線はボックス型試験装置に おける充塡高さ 190mm を示す。全てのモデルにおいて 充填高さ 190mm を通過後 250mm 付近で流動が停止し, 300mm まで充填されなかった。VG/VM が小さいモデルほ ど充填高さは高くなった。モデル No.3 と No.4 において, 充填不良で 300mm まで到達しなかった点に関しては、 実現象(配合 No.3, No.4)を再現できているといえる。 図-4 に解析値の加振ボックス充填試験の0~190mmま



表-5 粗骨材粒度分布

での間隙通過速度と 190mm~流動停止高さまでの間隙 通過速度を示す。解析結果では、充填高さ 190mm 到達以 降、充填高さが 300mm に到達せずに流動が停止したの で、流動停止までに要した時間(30秒)から間隙通過速 度を算出した。実験結果と同様に解析結果においても 190mm~流動停止高さまでの間隙通過速度と 0~190mm までの間隙通過速度との間に相関性がみられる。

4.3 解析結果と実験結果の整合性の検討

図-5 に実験結果と解析結果の充填高さ 0~190mm の 間隙通過速度の関係性を示す。図-6 に実験結果と解析結 果の充填高さ 190mm 以上の間隙通過速度の関係性を示 す。図-6 では、実験結果において配合 No.3, No.4 は充 填不良となり計測できなかったため配合 No.1, No.2, No.5 とモデル No.1, No.2, No.5 の比較を行う。図-5, 図 -6 ともに縦軸に解析結果を、横軸に実験結果を示す。解 析値の間隙通過速度は実験値の間隙通過速度よりも大き くなった。0~190mm 区間では実験値と解析値は1:1に 対応していないが2変数の増減のタイミングが一致した ため相関係数は高くなった。解析値の傾向と実験値の傾 向が似る結果となった。190mm 以上の区間では相関が確 認されなかった。

本研究ではモルタルモデルをニュートン流体と仮定 したこと、ボックス型試験装置の壁面とのすべりを考慮 に入れていないこと、粘性係数の適切な設定、解析で用 いた骨材モデルが全て球形要素であること等が解析値と 実験値の間隙通過速度の差に起因していると考えられる。 解析モデルに関しては検討の余地があり、今後の課題で ある。

5. 粒状体・流体連成解析の有用性

鉄筋の配筋条件の違いが充填性状に与える影響について解析結果を用いて検討する。検討する鉄筋の配筋条件を図-7に示す。鉄筋高さは図-1に示す流動障害 R2と同じ190mm 一定とし, R2に加えて, D10を35mm 間隔で配筋した流動障害 R1, D13を中央に1本配置した流動障害 R3, 鉄筋0本の流動障害 R4の4条件を対象とした。本来の実験では流動障害 R3, R4 は存在しないが,鉄筋本数がフレッシュコンクリートの流動にどのような影響を及ぼすか確認するために仮想で再現した。フレッシュコンクリートモデルは表-4のモデル No.1 とした。

図-8 に充填高さと充填時間の関係性を,図-9 に間隙 通過速度を示す。図-8,図-9 より鉄筋の本数が増えるに 従い,充填高さは減少し,間隙通過速度は低下する傾向 にある。充填高さ,間隙通過速度ともに R4(鉄筋0本), R3(鉄筋1本),R2(鉄筋3本)では大きな差は確認さ れなかった。R1(鉄筋5本)と残りの3条件を比較した 場合,充填不良の発生に顕著な差が見られた。図-10 に





190

配筋条件別の粗骨材モデル解析結果を示す。各粒子は, 黄色が粒径 20mm, 橙色が粒径 15mm, 緑色が粒径 10mm を表す。図-11 に配筋条件別のモルタルモデルの解析結 果を示す。図中の網掛け部はモルタルモデルの自由表面 を表す。粗骨材, モルタルモデルともに充填開始 8 秒後 の結果である。鉄筋の配筋が過密になることによってフ レッシュコンクリートモデルの充填状況が異なる。無筋





のR4の充填性状が最も良い。R1は粗骨材モデル,モル タルモデルともにA室からB室に流入する際,R2,R3, R4と比較して流動性状が悪く,粗骨材モデル,モルタル モデルともにA室側面部への付着停滞が確認できる,B 室に流入する過程において流動障害中央部からの充塡が 主となっている。

粒状体・流体連成解析手法を用いることで,配筋条件 に対応したモデルを仮想的に表現することができ,フレ ッシュコンクリートの内部の充填性状を粗骨材モデルと モルタルモデルの2相系で3次元可視的に捉えることが できる。設計段階において,鉄筋間閉塞による充填不良 の発生が予測される,構造物の局所的な箇所に粒状体・ 流体連成解析手法を用いることで,充填不良を事前に予 測することができる可能性がある。

6. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 加振ボックス充填試験を対象に粒状体・流体連成解 析を行い,解析値と実験値の整合性について検討し た結果,解析値の間隙通過速度は実験値の間隙通過 速度よりも大きくなる傾向となった。
- 2) 粒状体・流体連成解析を用いることで、配筋条件を 反映させた、フレッシュコンクリート内部の充塡性 状を3次元で可視的に捉えることができ、設計施工 における有用性が期待できる。



図-11 配筋条件別モルタルモデル解析結果(8秒)

なお、本研究の範囲では、解析値は実験値の傾向を捉 えることができるが、壁面のすべり条件等の検討の余地 があり、今後の課題としたい。

謝辞:本研究の遂行にあたり,笹田宏紀氏(国際航業㈱ 勤務)の修士論文を参考ならびに技術的支援を受けまし た。ここに付記し御礼の意を表します。

参考文献

- 土木学会:コンクリートの施工性能の照査・検査シ ステム研究小委員会(341 委員会)第2期委員会報 告書第Ⅱ編委員会報告,コンクリート技術シリーズ 102 号, pp.103-115,2013
- 2) 土木学会:コンクリートの施工性能の照査・検査シ ステム研究小委員会(341委員会)第1期委員会報 告書第I編委員会報告,フレッシュコンクリートの 加振ボックス充てん試験方法(案),コンクリート技 術シリーズ94号, pp.143-146,2011
- 3) 土木学会コンクリート委員会編:「資料編 第4章 コンクリート材料の変遷」,施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針(案)コンクリートライブラリー126号, pp.資料-34-43,2007
- 4) 原勝哉ほか: 粒状体・流体連成によるフレッシュコンクリートの流動解析, 土木学会第68回年次学術講演会講演概要集, pp1121-1122, 2013