

論文 タンピング試験による変形性と加振ボックス充てん試験による間隙通過性の相互関係に関する実験的研究

岸上 裕哉^{*1}・橋本 親典^{*2}・渡辺 健^{*3}・石丸 啓輔^{*4}

要旨: フレッシュコンクリートの施工性能を照査検査する試験方法は、スランブ試験に頼らざるを得ないのが現状である。最近、施工性能を照査する試験として加振ボックス充てん試験、検査する試験としてタンピング試験が注目されつつある。本研究は、単位粗骨材量と s/a を変化させた 4 配合のコンクリートをベースに混和剤の添加量によってスランブを 3 水準に変化させ、タンピング試験の変形性と加振ボックス充てん試験の間隙通過性に関する定量的指標を求め、両試験方法の指標の相互関係について検討した。その結果、コンクリートの連続性の観点から、変形性と間隙通過性には相関関係が存在することが明らかになった。

キーワード: タンピング試験, 変形性, ボックス充てん試験, 間隙通過性, 単位粗骨材量

1. はじめに

従来からコンクリートのワーカビリティはスランブ試験により間接的に評価されてきた。しかし近年では、フライアッシュなどの多様化によって同一スランブでも流動性や材料分離抵抗性が異なるコンクリートが多く存在するため、現場での簡易的な照査方法としてスランブ試験に代わり、タンピング試験が提案されている¹⁾。また、ポンプ施工が主流となった近年では、間隙通過性の評価が不可欠であると言える。間隙通過性の評価には加振ボックス充てん試験²⁾が有効であると考えられるが、実際に現場では行い難い。

本研究では、タンピング試験および加振ボックス充てん試験によりコンクリートの変形性および間隙通過性の評価を行い、各試験で得られる情報の相関性について検討する。

2. 実験概要

2.1 使用材料

(1) セメント

セメントは、普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³、比表面積 3250 cm²/g）を使用した。

表-1 使用した骨材の物理的性質

項目	粗骨材		細骨材
	20	13	
最大寸法(mm)	20	13	—
表乾密度(g/cm ³)	2.56	2.55	2.57
吸水率(%)	2.16	2.3	1.77
実積率(%)	60.16	59.52	55.12
粗粒率	7.03	6.63	2.63

(2) 骨材

表-1 に本研究で使用した骨材の物理的性質を示す。細骨材は徳島県阿波市市場町の砕砂、粗骨材は徳島県鳴門市撫養町の砕石を使用した。また、粗骨材は最大寸法が 13mm と 20mm の 2 種類を 1 : 1 の割合で混ぜて使用した。

(3) フライアッシュ

本研究ではⅡ種のフライアッシュを使用した。使用したフライアッシュの物理的性質を表-2 に示す。

表-2 フライアッシュの物理的特性

材料	密度(g/cm ³)	比表面積(cm ² /g)	強熱減量(%)	二酸化けい素(%)
フライアッシュⅡ種	2.30	3842	2.30	62.30

2.2 コンクリートの配合

本研究に用いたコンクリートの配合を表-3 に示す。配合名の記号は、A は単位セメント量 300 kg/m³、B は単位セメント量 400 kg/m³を意味し、43 と 46 は細骨材率を表わし、ス 8、ス 12、ス 18 は目標スランブ 8cm、12cm、18cm を表わして、F はフライアッシュを表わしている。

混和剤の種類は、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のもので、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をを使用した。本研究では、単位粗骨材量約 990 kg/m³ の A43 を基準として、それにフライアッシュをセメント代替 20%置換した AF43、単位セメント量および単位水量を増加させて単位粗骨材量を約 50 kg/m³ 減少させた B43、細骨材率を 46%にすることで単位粗骨材量を約 50 kg/m³ 減少させた A46 の計 4 配合で検

*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 修士前期課程 1 年 (正会員)

*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 専門職員 (正会員)

表-3 配合表

配合	W/C (%)	s/a (%)	Air (%)	単位量					混和剤		
				(kg/m ³)					C×(%)		
				W	C	FA	S	G	AE減水剤	高性能AE減水剤	AE剤
A43 ス8	58.3	43	4.5	175	300	0	757	996	—	—	0.012
A43 ス12									2.0	—	0.01
A43 ス18									3.5	—	0.008
B43 ス8	45.0	43	4.5	180	400	0	717	943	—	—	0.008
B43 ス12									1.0	—	0.009
B43 ス18									2.0	—	0.01
A46 ス8	58.3	46	4.5	175	300	0	810	943	—	—	0.012
A46 ス12									0.4	—	0.008
A46 ス18									—	1.0	0.002
AF43 ス8	72.9	43	4.5	175	240	60	749	985	—	1.4	0.02
AF43 ス12									—	1.6	0.026
AF43 ス18									—	2.0	0.03

討を行い、それぞれで原則としてスランプ 8cm, 12cm, 18cm の3つ作成した。今回の実験では、スランプの調整は混和剤の添加量で行う。

2.3 試験方法

各配合において 60 リットルの二軸強制練りミキサーを使用し練混ぜを行った後、以下に示す試験を行い、各種特性を評価した。

(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-4に示す。配合 A43 ス18の空気量が8%と大きい。これはFA混入のため空気量の調整が難しいためである。フレッシュコンクリートへの影響はと考えると今回は再実験を行わなかった。

表-4 フレッシュ性状

配合	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
A43 ス8	10	5.5	22.5
A43 ス12	13	5.5	17.9
A43 ス18	18.5	6	21.4
B43 ス8	7.5	3.5	22.9
B43 ス12	12.5	4.7	23.4
B43 ス18	17	5.1	23.5
A46 ス8	10	5.5	20.6
A46 ス12	13	6	22.3
A46 ス18	17	3.5	22.6
AF43 ス8	8	6.5	23
AF43 ス12	14	5.7	24.1
AF43 ス18	17.5	8	24.6

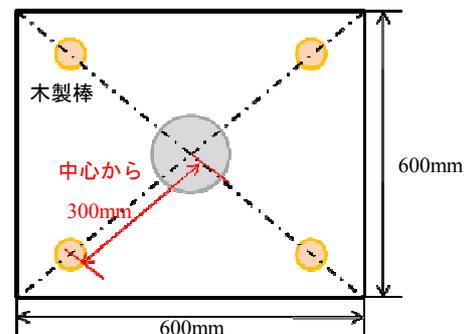
(2) タンピング試験

コンクリートの変形性を評価するため、スランプ試験

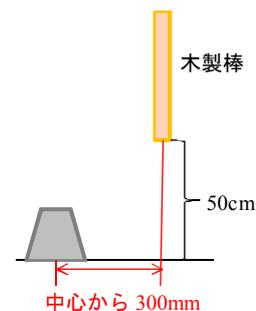
で用いる試験治具および比較的容易に入手できる木製棒(質量1.2kg)を用いたタンピング試験を行った。

試験方法は、地面からの振動を軽減するため、細骨材として使用する砂を1cm程度の厚さで敷き均し、その上にスランプ板を設置した後、JIS A 1101に従ってスランプ試験を行い、図-1のように木製棒を50cmの高さからスランプ板の四隅を順次、指定する回数落下させる。

木製棒を落下させる位置は、スランプの中心位置から300mmのスランプ板四隅とする。指定するタンピング回数は8, 16, 24, 32回, …, のように8回区切りとし、



上から見た図



水平方向から見た図

図-1 タンピング試験の概要図

その際のスランプおよびスランプフローを計測する。スランプフローが 350mm に到達した時点でタンピング試験を終了とする。

(3) 加振ボックス充てん試験

コンクリートの間隙通過性を評価するため、図-2 および写真-1 に示すボックス型容器³⁾およびE社製棒状パイプレータ {全長：1015mm, 直径：28mm, 振動数：220~270Hz, モーター：280W} を用いた試験を行った。

容器は、土木学会規準「高流動コンクリートの充てん装置を用いた間げき通過性試験方法(案) (JSCE-F511-2007)」のボックス型容器と同寸法である。流動障害は、D13 鉄筋を 3 本配置した障害 R2 である。試験方法は、図-2 に示す異形棒鋼 D13 を 3 本柵状に配置した流動障害(R2)を有するボックス型容器の A 室にコンクリートを満たし、棒状パイプレータを挿入する。挿入深さは、棒状パイプレータの先端が容器下端から 10cm のところとし、加振すると同時にシャッターを開け、B 室に高さ 300mm になるまで充てんを行う。その際、加振開始直後から B 室の高さ 190mm と 300mm に充てんするまでの時間を測定し、これをそれぞれ 190mm 充てん時間、300mm 充てん時間とする。流動障害部分をコンクリートが通過するのに要した時間によって、型枠に充てんされるコンクリートの間隙通過性を評価するものである。

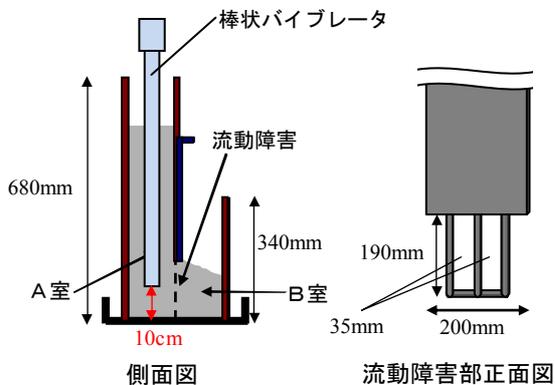


図-2 ボックス型試験装置および障害部分

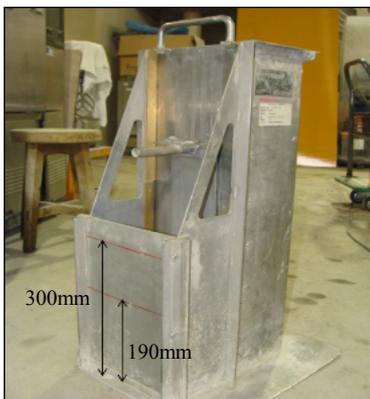


写真-1 ボックス形充てん試験容器

3. 実験結果

3.1 タンピング試験の実験結果

実験結果の一例を図-3 に示す。

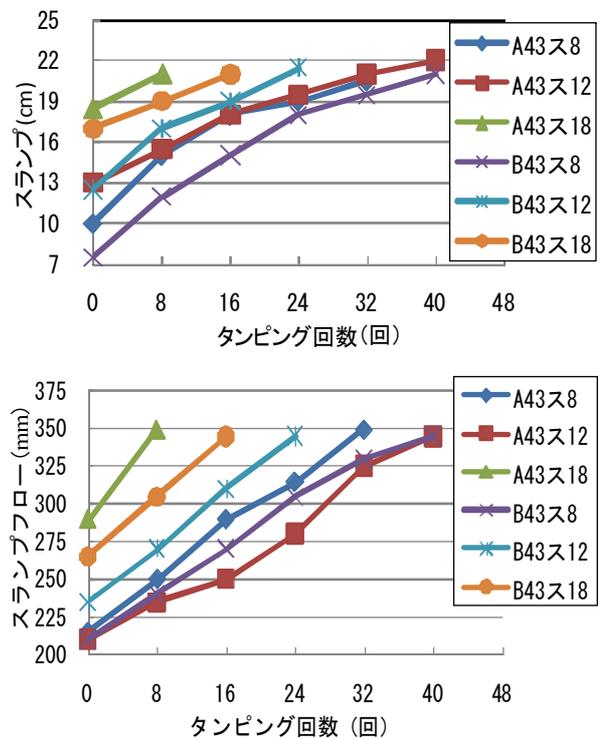


図-3 タンピング試験結果の一例

打撃回数が増えるに従って、スランプおよびスランプフローは増大する。タンピング試験におけるフレッシュコンクリートの変形を目視観察することによって、打撃回数に伴うスランプとスランプフローの変化は、大きく2つのパターンに分類されることが明らかになった。図-4 に、打撃回数に伴うフレッシュコンクリートの変形パターンの概念図を示す。パターン(A)は、スランプが増大するに従って、スランプフローも増大する場合を示す。フレッシュコンクリートを非圧縮性の固液2相系流体と考えると、高さ方向の沈下速度と底面の2次元平面に広がる平面速度は、比例する。

一方、パターン(B)は、スランプが増大するにも関わらず、スランプフローが増大しない場合を示す。フレッシュコンクリートの外力に対する変形は、モルタル相に代表される流体的挙動と粗骨材粒子群に代表される粒状体的挙動から構成される。よって、粒状体的挙動、すなわち、粗骨材粒子群による骨格が強固な場合、高さ方向には沈下しても、底面の2次元平面上には拡大しにくい。そのため、高さ方向の沈下速度と、底面の2次元平面上の平面速度は比例しない。

上述した2つの変形性を定量的に評価することを目的として、本研究では、スランプに関するタンピング曲線からスランプ変形係数 K_{SL} を、スランプフローに関する

るタンピング曲線からスランプフロー変形係数 K_{SF} なる指標を定義することとした。

以下にスランプ変形係数 K_{SL} とスランプフロー変形係数 K_{SF} の算定方法を説明する。 K_{SL} および K_{SF} はそれぞれ、タンピング1回あたりの変形量 (mm) を意味する。

図-5は、スランプに関するタンピング曲線の実験結果の一例を示す。切片をスランプの初期値とした一次直線で近似し、その傾きをスランプ変形係数 K_{SL} とする。

図-6は、スランプフローに関するタンピング曲線の実験結果の一例である。切片をスランプフローの初期値とした一次直線で近似し、その傾きをスランプフロー係数 K_{SF} とする。なお、図-5、図-6の R^2 は相関係数を表わし、 R^2 が0.9より小さく、グラフが曲線的な場合も統一した評価を行うため上述した近似を行った。

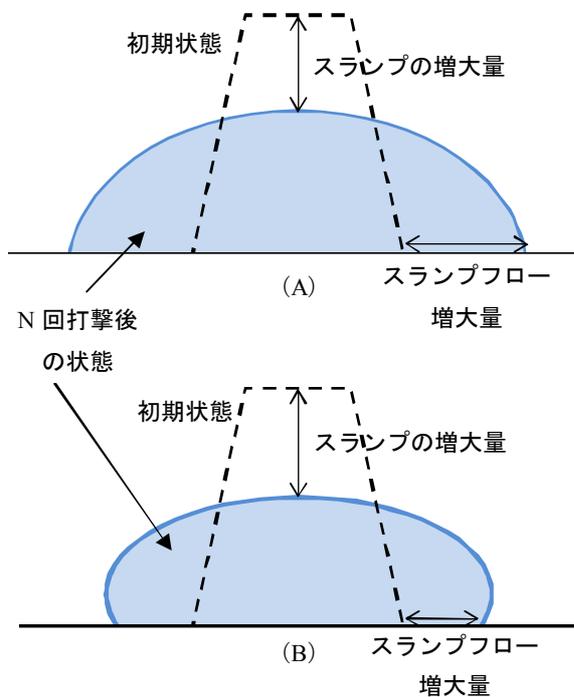


図-4 変形概念図

3.2 加振ボックス充てん試験の実験結果

配合別の実験結果を、図-7に示す。また、190mm 充てん時間と 300mm 充てん時間の関係を、図-8に示す。

バイブレータによってコンクリートが鉄筋障害を連続的に通過する場合は、190mm 充てん時間と 300mm 充てん時間は比例関係にある。しかしながら、必ずしも2つの充てん時間は比例関係にない。ボックス充てん装置のA室にコンクリートを自然落下によって充てんした初期状態において締固めが不十分で、空隙空間の偏りが、各配合要因、特にスランプに依存するためである。

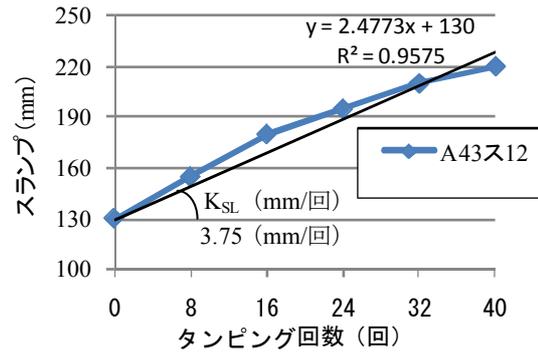


図-5 K_{SL} の算出方法

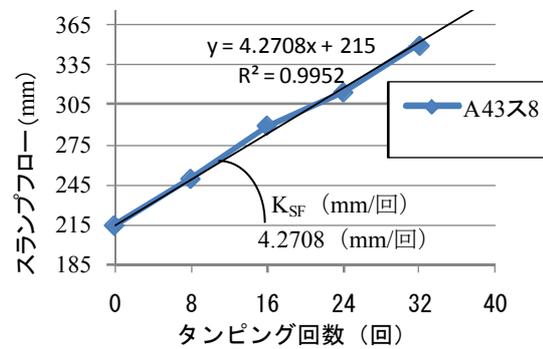


図-6 K_{SF} の算出方法

したがって、本研究では、190mm 充てん時間や 300mm 充てん時間を個別に評価するのではなく、充てん高さ 190mm から 300mm までの充てんする速度を間隙通過速度 V_{PASS} と定義し、この間隙通過速度 V_{PASS} を用いて間隙通過性を評価することとした。

すなわち、間隙通過速度 V_{PASS} とは 1 秒あたりの充てん高さ (mm) を表わしたもので、式 (1) で定義される。

$$V_{PASS} = \frac{110\text{mm}(= 300\text{mm} - 190\text{mm})}{300\text{mm充てん時間} - 190\text{mm充てん時間}} \dots (1)$$

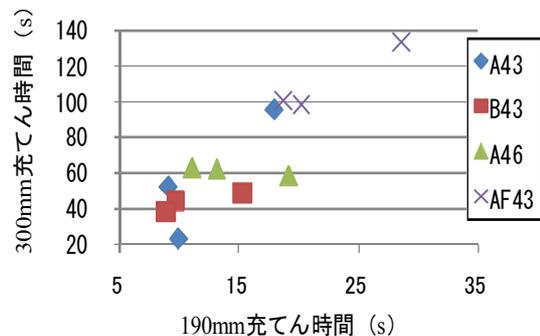


図-8 190mm 充てん時間と 300mm 充てん時間の関係

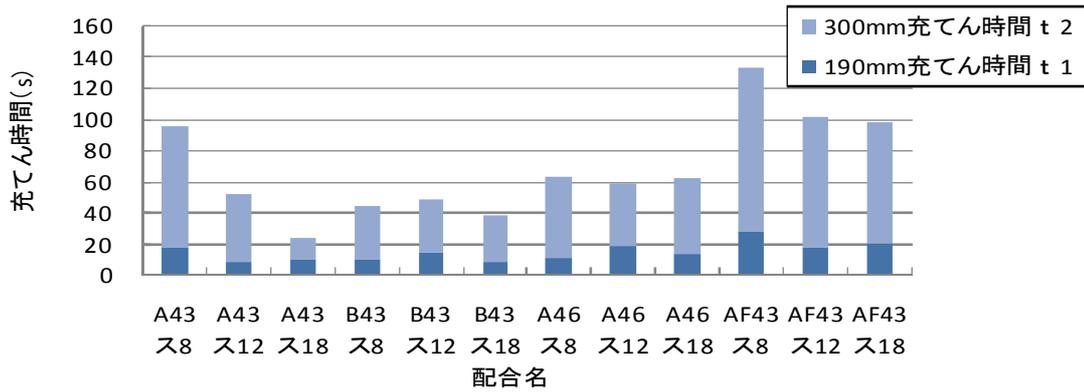


図-7 加振ボックス充電試験結果

4. 考察

4.1 変形性の評価

図-9および図-10は、それぞれ初期のスランプとスランプ変形係数 K_{SL} 、初期のスランプとスランプフロー変形係数 K_{SF} の関係を示す。

単位粗骨材量が少ないB43とA46は、スランプの増加に対してスランプおよびスランプフローがあまり大きく変化しない。このようなスランプに依存しない変形を連続的な変形と定義する。一方、単位粗骨材量が多いA43とAF43は、スランプの増加に対してスランプおよびスランプフローが増加したり減少したりしている。このようなスランプの増加に対して不規則な変形を不連続な変形と定義する。

図-11は、同一初期スランプでのスランプ変形係数 K_{SL} とスランプフロー変形係数 K_{SF} の分布図を示す。

単位粗骨材量が多いA43とAF43は同配合の3点が大きな領域で分布していることから変形量にばらつきがあり、不連続に変形していると考えられる。一方、単位粗骨材量が少ないB43とA46は同配合の3点がA43、AF43に比べ小さな領域で分布していることから、変形量はスランプに依存せず連続的に変形していると考えられる。

以上の考察より、タンピング曲線から得られる2つの変形係数を用いることにより、フレッシュコンクリートの連続性と不連続性に関する変形性を、グラフ形状から評価することが可能であると思われる。

4.2 間隙通過性（間隙通過速度）の評価

図-12は、間隙通過速度 V_{PASS} とスランプの関係を示す。単位粗骨材量が多いA43はスランプが大きくなるほど間隙通過性がよくなる傾向があり、単位粗骨材量が少ないB43、A46は、スランプの大小に無関係であり一定の間隙通過速度で充電する傾向がある。B43、A46は単位粗骨材量が少なく、B43とA46では、約2mm/sほど間隙通過速度に違いがあり、B46の方が、間隙通過速度が大きい。

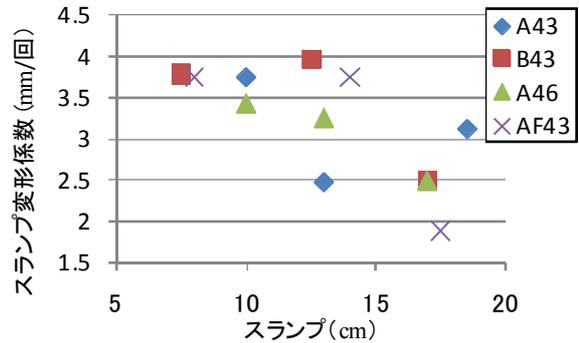


図-9 スランプとスランプ変形係数 K_{SL} の関係

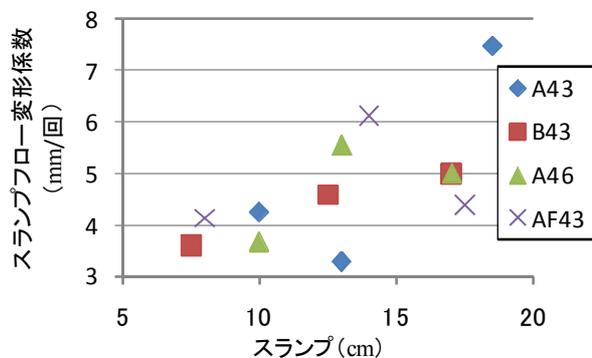


図-10 スランプとスランプフロー変形係数 K_{SF} の関係

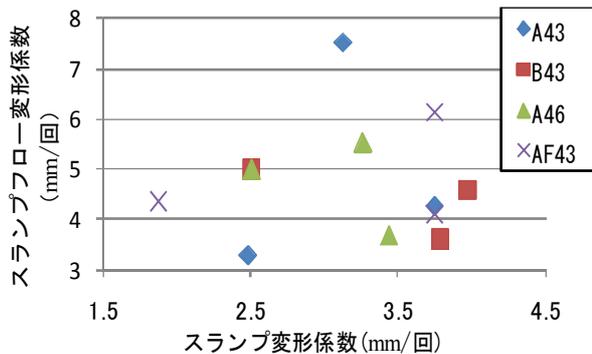


図-11 スランプ変形係数 K_{SL} とスランプフロー変形係数 K_{SF} の関係

一方、単位粗骨材量が多くフライアッシュを20%内割り置換したAF43は、フライアッシュの影響によって、モルタルの粘性が増大し、間隙通過性が著しく低下したと考えられる。この低下は、スランブの大きさに依存しない。

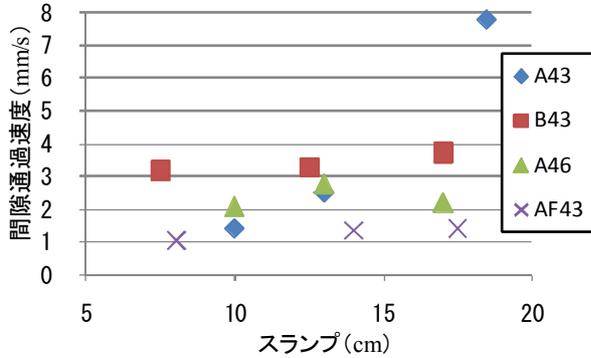


図-12 スランブと間隙通過速度の関係

以上の考察により、今回の配合では、単位粗骨材量が間隙通過性に及ぼす影響は大きく、単位粗骨材量が多い配合ではスランブが大きくなるほど間隙通過性がよくなり、単位粗骨材量が少ない配合では、スランブの大小に関係なく、間隙通過性は一定になるということが明らかになった。

4.3 変形性と間隙通過性の相互関係

タンピング試験の結果と加振ボックス充てん試験の結果を比較すると、タンピング試験で不連続に変形しているA43は、スランブによって間隙通過性が異なり、タンピング試験で連続的に変形しているB43とA46は、間隙通過性がスランブに依存せず一定であるという結果から、間隙通過速度がスランブに依存する配合では変形性が不連続となり、間隙通過速度がスランブに依存しない配合では変形性が連続的になる、という関係を導くことができた。

図-13に間隙通過速度 V_{PASS} とスランブフロー変形係数 K_{SF} の関係を示す。

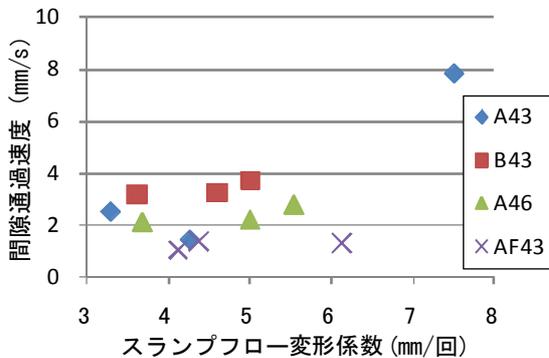


図-13 スランブフロー変形係数 K_{SF} と間隙通過速度 V_{PASS} の関係

フレッシュコンクリートの連続性が卓越する場合 (B43 と A46)、間隙通過性とスランブフロー変形係数は正の相関が認められる。一方、フレッシュコンクリートの粒状体の挙動が卓越する場合 (A43)、間隙通過性とスランブフロー変形係数には、正の相関が認められない。

5. まとめ

本研究は、単位粗骨材量、細骨材率、混和剤添加量を変化させた12配合のコンクリートを用いて、タンピング試験による変形性と加振ボックス充てん試験による間隙通過性に関する定量的指標の相互関係について検討した。本実験の範囲内で明らかになったことを以下にまとめる。

- 1) タンピング試験におけるスランブおよびスランブフローの変形性は、単位粗骨材量が多いと不連続的であり、単位粗骨材量が少ないと連続的な挙動を示す。
- 2) 単位粗骨材量により間隙通過速度が異なり、単位粗骨材量が多いとスランブに依存し、単位粗骨材量が少ないとスランブに依存せず一定になる。
- 3) 間隙通過速度がスランブに依存する配合では変形性が不連続となり、間隙通過速度がスランブに依存しない配合では変形性が連続的になる。その結果、コンクリートの連続性の観点から、変形性と間隙通過性には相関関係が存在する。

謝辞：本研究の一部は、日本学術振興会平成21年度科学研究費補助金の基盤研究(B)(2) (課題番号20360193, 研究代表者：橋本親典)に基づき実施されたものである。ここに付記し、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 上野敦ほか：タンピング試験におけるワーカビリティの簡易試験方法の検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.30，No.2，pp.37-42，2008
- 2) 浦野真次ほか：高密度配筋部におけるコンクリートの充てん性に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.30，No.2，pp.31-36，2008.6
- 3) 土木学会：高流動コンクリートの充てん装置を用いた間げき通過性試験方法 (案)，コンクリート標準示方書 (規準編)，pp.195-197，2007