

論文 PC部材を対象としたコンクリートの施工性能評価

中村 敏之*1・橋本 紳一郎*2・吉村 徹*3・北野 潤一*4

要旨: 水セメント比 38%のプレストレストコンクリート (以下, PC) 部材を対象としたコンクリートに関して, 配合条件を要因とした施工性能の評価を行った。その結果, 単位セメント量が多いことに起因して, 材料分離抵抗性や間隙通過性は概ね良好となることがわかり, 単位セメント量や単位粗骨材量によってその性能が変化することがわかった。また, 本稿の範囲ではスランブ 8~18cm の領域で施工性と品質の両者に対してスランブ 12cm が最適であることを示した。さらに, 試験により求められる間隙通過速度と実際の施工における充填性との相関の可能性を示し, 間隙通過速度が大きいほど充填性が良好となることがわかった。

キーワード: プレストレストコンクリート, 振動締固め, 間隙通過性, 材料分離抵抗性

1. はじめに

コンクリート工事における初期欠陥などの不具合のリスクを低減させるためには, 使用するフレッシュコンクリートが対象の打込み箇所に対して適切な材料分離抵抗性や間隙通過性を有する必要がある。しかし, コンクリート標準示方書施工編¹⁾ (以下, コ示施工編) の施工標準に示されるパイプレータを用いた実際の打込みに対する振動条件下の施工性能をスランブ試験で評価することは難しい。そのため, これまでに筆者らは, 土木学会規準「ボックス容器を用いた加振時のコンクリートの間隙通過性試験方法 (案) (JSCE-F 701-2016)」 (以下, 間隙通過性試験) に従って, 振動条件下におけるコンクリートの材料分離抵抗性や間隙通過性などの施工性能を定量的に評価してきた。その結果, 同一スランブのコンクリートにおいても, 水セメント比や細骨材率が異なることで充填性が変化し, 水セメント比が小さいほど十分に単位セメント量が確保されていることに起因して施工性能が良好となる傾向を示した²⁾。そのことから PC 部材を対象としたコンクリートのように単位セメント量が多い場合は施工性能が優位となり, より経済的な配合設計の自由度が高いと推測されるが, これらのコンクリートは特に強度や耐久性などを重視することが多く, 施工性能を考慮した配合設計に関する知見が少ない。

そこで本稿では, PC 部材を対象とした水セメント比 38%のコンクリートに関して, 単位セメント量および単位粗骨材量, スランブなどの配合条件が振動条件下における材料分離抵抗性や間隙通過性などの施工性能に及ぼす影響を実験的に評価した。また, 間隙通過性試験から得られる指標値と実際の施工を想定した模擬型枠の充填性の関係を確認するための実験を行った。

2. 間隙通過性試験による施工性能の評価

2.1 配合条件および使用材料

土木学会「施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針」³⁾ (以下, 施工性能指針) によれば, 材料分離抵抗性や間隙通過性は単位セメント量, スランブおよび細骨材率あるいは単位粗骨材量に影響されている。そこで, 本稿では, ①単位セメント量および単位粗骨材量, ②スランブ, の2種類の要因に着目して, それぞれについて間隙通過性試験を実施した。

表-1 に使用材料を示す。セメントは早強ポルトランドセメント, 細骨材は砕砂, 粗骨材は砕石を使用した。混和剤はポリカルボン酸エーテル系高性能 AE 減水剤, 空気量調整にアルキルエーテル系 AE 剤を使用した。

2.2 単位セメント量および単位粗骨材量の影響

(1) 配合水準

表-2 に水準 A, 表-3 に水準 B の配合とスランブお

表-1 使用材料

水	上水道水	密度 (g/cm ³)	1.00
		比表面積 (cm ² /g)	4500
セメント	早強ポルトランドセメント	密度 (g/cm ³)	3.14
		比表面積 (cm ² /g)	4500
細骨材	砕砂 (茨城県桜川産硬質砂岩)	表乾密度 (g/cm ³)	2.64
		吸水率 (%)	0.84
		実積率 (%)	55.5
		粗粒率	2.85
		微粒分量 (%)	2.3
粗骨材	砕石 (茨城県桜川産硬質砂岩)	最大寸法 (mm)	20
		表乾密度 (g/cm ³)	2.66
		吸水率 (%)	0.41
		実積率 (%)	61.2
		粗粒率	6.76
混和剤	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物	
	AE剤	アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤	

*1 オリエンタル白石 (株) 技術研究所 (正会員)

*2 福岡大学 工学部社会デザイン工学科助教 博士 (工学) (正会員)

*3 オリエンタル白石 (株) 福岡支店技術部 博士 (工学) (正会員)

*4 福岡大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (学生会員)

表-2 配合 (水準 A)

配合No.	配 合								フレッシュ性状		
	水セメント比 W/C	細骨材率 s/a	混和剤 添加率	単位量 (kg/m ³)					スランブ	空気量	練上がり 温度
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 SP			
%	%	C×mass%	kg	kg	kg	kg	kg	cm	%	℃	
A-1	38.0	46.0	1.50	132	347	864	1024	5.21	11.0	5.0	23.5
A-2		44.5	1.15	142	374	816		4.30	11.0	4.7	23.5
A-3		43.0	0.90	152	400	767		3.60	11.0	4.8	24.0
A-4		41.4	0.70	162	426	719		2.98	11.0	4.5	23.5
A-5		39.7	0.55	172	453	670		2.49	11.5	4.5	23.5
A-6		38.0	0.50	182	479	622		2.39	11.5	4.0	23.5

表-3 配合 (水準 B)

配合No.	配 合								フレッシュ性状		
	水セメント比 W/C	細骨材率 s/a	混和剤 添加率	単位量 (kg/m ³)					スランブ	空気量	練上がり 温度
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 SP			
%	%	C×mass%	kg	kg	kg	kg	kg	cm	%	℃	
B-1	38.0	38.0	0.85	152	400	678	1114	3.40	12.0	4.5	24.0
B-2		43.0	0.90			767	1024	3.60	11.0	4.5	24.0
B-3		48.0	1.05			856	935	4.20	12.0	4.0	24.0
B-4		53.0	1.40			945	845	5.60	11.0	4.6	23.0

よび空気量の測定結果を示す。水準 A は単位粗骨材量を一定とし、単位水量および単位セメント量と単位細骨材量の配分を変えて、単位セメント量の違いによる 6 水準の配合とした。水準 B は単位水量および単位セメント量を一定とし、単位細骨材量と単位粗骨材量の配分、つまり細骨材率を変えて、単位粗骨材量の違いによる 4 水準の配合とした。いずれもスランブが 12±1cm、空気量が 4.5±0.5%となるように高性能 AE 減水剤および空気量調整剤の添加率で調整した。

(2) 試験方法

試験は温度 20℃、相対湿度 60%の室内で行った。コンクリートの練混ぜは 100L 強制練りミキサーを使用し、各配合で 60L 練り混ぜた。スランブは JIS A 1101 に、空気量は JIS A 1128 に従って測定した。

間隙通過性試験はコンクリートをボックス形容器の A 室に詰め、A 室に挿入した棒パイプ（直径 28mm、振動数 220Hz）で流動障害 R2 を介してコンクリートを B 室に流動させて、B 室の一定距離を流動する時間と流動後の B 室の単位粗骨材量を測定した。得られた値から間隙通過速度と B 室の粗骨材量を算出し、それぞれを間隙通過性、材料分離抵抗性の指標値として評価した。

(3) 試験結果および考察

図-1 に単位セメント量と B 室における粗骨材量比率の関係 (水準 A) を、図-2 に単位粗骨材量と B 室における粗骨材量比率の関係 (水準 B) を示す。筆者らの過去の実験²⁾における単位セメント量 350kg/m³程度以下の

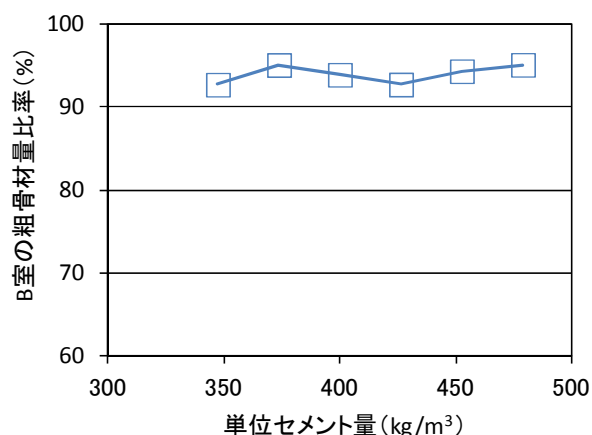


図-1 単位セメント量と粗骨材量比率の関係

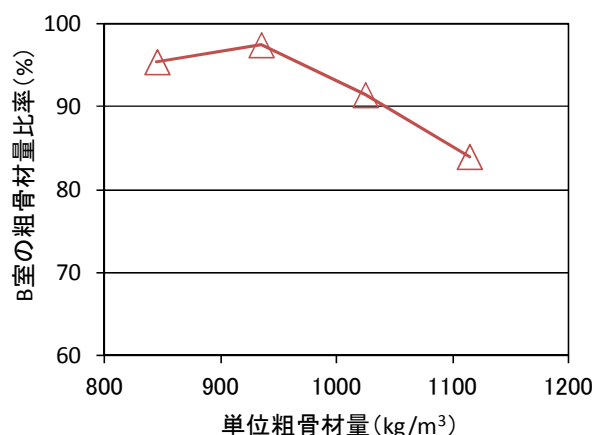


図-2 単位粗骨材量と粗骨材量比率の関係

コンクリートでは粗骨材量比率が73～91%であったことに対し、本試験ではいずれの水準も粗骨材量比率が83～97%と比較して高い材料分離抵抗性を示した。また、図-1に示すように、粗骨材量比率は単位セメント量の変化に対して大きな変化は見られないが、図-2に示すように、単位粗骨材量が多い領域では粗骨材量比率は若干減少する傾向が見られた。

図-3に単位セメント量と間隙通過速度の関係（水準A）を、図-4に単位粗骨材量と間隙通過速度の関係（水準B）を示す。前述の過去の実験²⁾では、間隙通過速度が4～11mm/s程度であったことに対し、本実験ではいずれの水準も8～22mm/sと比較して高い間隙通過性を示した。また、図-3に示すように、単位セメント量が概ね350～450kg/m³の領域ではその増加にともない間隙通過速度が増加する傾向を示したが、単位セメント量が479kg/m³と過大となると低下が見られた。施工性能指針では、単位セメント量が増加するとコンクリートの粘性が高くなり、それが過大となると振動締固めの容易さが低下するとしている。本結果はそれにより間隙通過性が低下したものと考えられる。また、図-4に示すように、単位粗骨材量の増加にともない間隙通過速度は減少する傾向を示したが、単位セメント量の影響ほど大きな変化は見られなかった。

以上から、PC部材を対象としたコンクリートのように単位セメント量が多い配合の場合は、材料分離抵抗性や間隙通過性はいずれも高い傾向となることがわかった。材料分離抵抗性は一般には単位セメント量により影響されると言われるが、本試験の範囲では、単位セメント量が十分に確保されていることにより材料分離抵抗性が高い領域にあったため、単位セメント量に変化しても大きな影響を受けなかったと考えられる。また、単位粗骨材

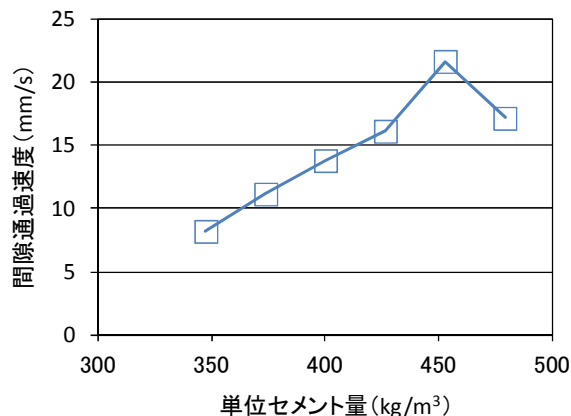


図-3 単位セメント量と間隙通過速度の関係

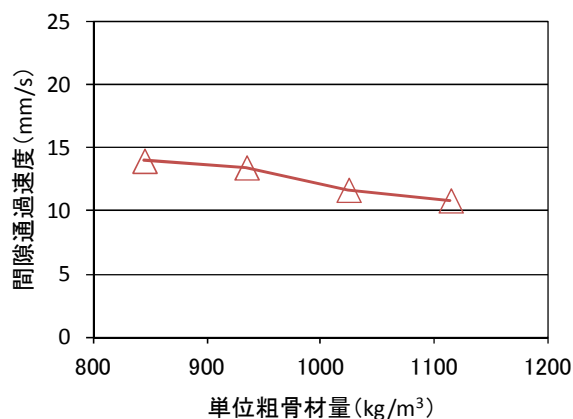


図-4 単位粗骨材量と間隙通過速度の関係

量が多い場合には材料分離抵抗性が低下する傾向ではあるが、それが高い領域であることがわかった。間隙通過性は単位粗骨材量による材料分離抵抗性の変化にともなう影響は見られるものの、その影響は小さい。一方で、単位セメント量に対して顕著な変化が見られるため、主に単位セメント量に影響されるものと考えられる。

表-4 配合（水準C,D,E）

配合No.	配 合								フレッシュ性状		
	水セメント比 W/C	細骨材率 s/a	混和剤 添加率	単位量 (kg/m ³)					スランブ	空気量	練上がり 温度
				水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤			
				W	C	S	G	SP			
%	%	C×mass%	kg	kg	kg	kg	kg	cm	%	℃	
C-1	38.0	43.0	0.75	152	400	767	1024	3.00	8.5	4.6	23.0
C-2			0.90					3.60			
C-3			0.95					3.80			
C-4			1.05					4.20			
D-1	38.0	43.0	0.75	152	400	767	1024	3.00	8.0	4.1	23.0
D-2				160	421	750	1002	3.16	12.0	4.5	23.0
D-3				166	437	738	985	3.28	15.5	4.6	23.0
D-4				168	442	734	980	3.32	18.0	4.3	23.5
E-1	38.0	43.0	0.60	160	421	750	1002	3.16	7.5	4.5	23.0
E-2				166	437	738	985	3.28	11.0	4.8	23.0
E-3				169	445	731	977	3.34	15.0	4.6	23.5
E-4				175	461	719	960	3.45	17.0	4.9	23.5

2.3 スランプの影響

(1) 配合水準

表-4 に配合とスランプおよび空気量の測定結果を示す。スランプの調整方法の異なる水準 (C,D,E) ごとに、目標スランプを 8,12,15,18±1cm の 4 水準とした。空気量は 4.5±0.5% となるようにした。いずれも細骨材率は 43% 一定とし、水準 C は単位水量を一定として高性能 AE 減水剤の添加率で、水準 D は高性能 AE 減水剤の添加率を一定として単位水量でスランプを調整した。水準 E は水準 D に対し、高性能 AE 減水剤の添加率を減じた上で一定として単位水量でスランプを調整した。試験条件、試験方法および評価方法は前述の水準 A および水準 B と同じとした。

(2) 試験結果および考察

図-5 にスランプと B 室における粗骨材量比率の関係を示す。いずれも概ね 90% 以上で良好な傾向を示した。施工性能指針では、材料分離抵抗性を確保するために打込み対象の構造条件に応じた打込みのスランプに対する単位セメント量の下限值および上限値を設定した確認図を提案しており、下限値よりも単位セメント量が大いほど材料分離抵抗性が良好となるとしている。図-6 に PC 部材を対象とした確認図と本試験のスランプと単位

セメント量の関係を示す。いずれの水準も材料分離抵抗性を確保するために十分な単位セメント量であり、本試験ではその理由によって良好な材料分離抵抗性を示す粗骨材量比率の結果が得られたと考えられる。

図-7 にスランプと間隙通過速度の関係を示す。いずれの水準もスランプ 8cm から 12cm への増加にともない間隙通過速度が大幅に増加している。しかし、12~18cm では明らかな増加の傾向は見られず、同等な間隙通過速度を示した。コシ施工編では、充填性を流動性と材料分離抵抗性から定めるものとし、流動性はスランプ、材料分離抵抗性は単位セメント量によって設定することとしている。図-8 に充填性に対する流動性と材料分離抵抗性の関係を示すが、充填性を間隙通過性と同義と考えると、低スランプ領域では流動性の不足により、高スランプ領域では材料分離抵抗性の不足により間隙通過性が低下するというを示している。本試験における水準 D および水準 E の配合では、スランプ値の設定が大きくなることにともない単位セメント量を増加させ、単位粗骨材量を減少させているため、水準 A および水準 B の結果から、高スランプの領域では材料分離抵抗性の曲線が引き上げられることとなる。それを考慮すると、図-7 のスランプと間隙通過速度の関係と同じ傾向を示している

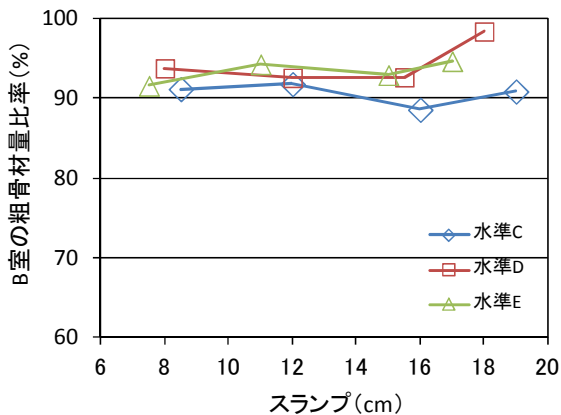


図-5 スランプと粗骨材量比率の関係

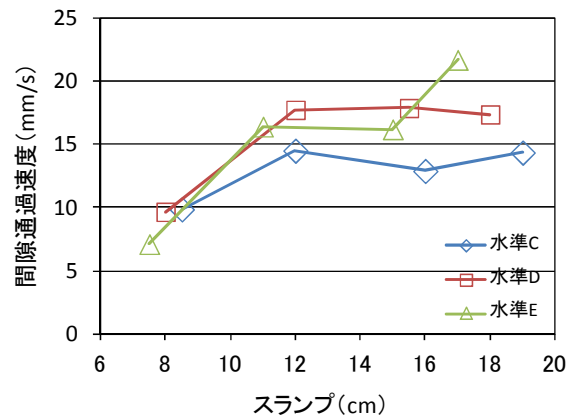


図-7 スランプと間隙通過速度の関係

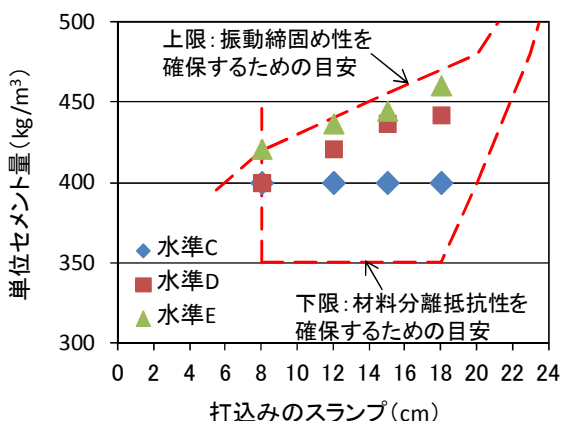


図-6 スランプと単位セメント量の関係

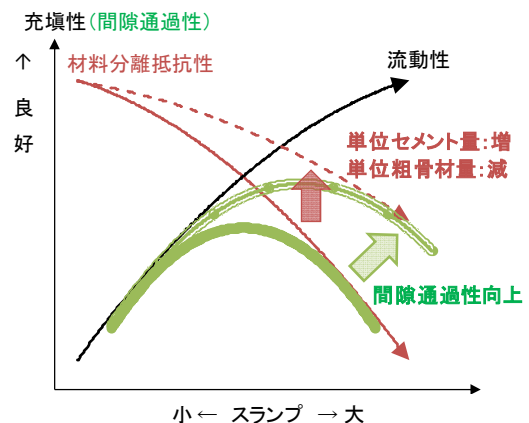


図-8 流動性と材料分離抵抗性の関係

と言え、本試験で得られた間隙通過速度は図-8を裏付ける結果となっていると考えられる。しかし、水準Cはスランプの増加に対して単位セメント量、単位粗骨材量ともに一定であるが、間隙通過速度は水準Dおよび水準Eと比較して小さいものの、向上している。図-5の結果から単位セメント量が確保されていることに起因して材料分離抵抗性は高いことを考慮すると、図-8に示す材料分離抵抗性の曲線が元々高い領域にあり、スランプが増加しても間隙通過性に低下が見られなかったと推測される。その一方で、低スランプの領域では、単位セメント量や単位粗骨材量は流動性の曲線とは直接的に関連していないため、主にスランプによって間隙通過速度が決定されたものと考えられる。言い換えれば、スランプ8cmのコンクリートはそれ以外の配合条件によって間隙通過性を向上させにくいと考えられる。

2.4 PC 部材の配合に関する一考察

コンクリートは硬化特性や耐久性などの品質と施工性能の両者を満足したものを選択する必要がある。一般にPC部材を対象としたコンクリートは単位セメント量に起因した温度ひび割れや収縮量などの品質が懸念されるため、できるだけ少ない単位セメント量であることが望ましい。一方、施工性能に関しては、本稿の範囲では、単位セメント量350kg/m³程度以上のPC部材を対象としたコンクリートは材料分離抵抗性や間隙通過性などの施工性能が良好であることがわかった。したがって、PC部材を対象としたコンクリートは施工性能を確保した上で単位セメント量をできるだけ少なくすることが可能であると考えられ、より配合選定の自由度が高いと考えられる。また、スランプ8~18cmの比較において、8cmは流動性不足により間隙通過性は低く、12cm以上では大きな差がないため、単位セメント量の少ない12cmを選定することが施工性、品質および経済性のいずれに対して最適な配合になると考えられる。

3. 間隙通過速度と実物大模擬型枠の充填性

3.1 実験概要

間隙通過性試験で得られる間隙通過速度と実際の施工

における充填性との関係を確認するため、ポストテンションT桁のスパン中央における下縁部の一部を切り出した形状の模擬型枠を用いて打込み試験を行った。表-5に配合とスランプ、空気量および間隙通過速度の測定結果を示す。配合水準は、水準Aと同様に単位粗骨材量を一定とし単位セメント量を変化させた4水準とした。写真-1に模擬型枠の外観を、図-9に模擬型枠の形状寸法を示す。シースはφ70(外径73mm)とし、4本配置した。鉄筋は引張鉄筋D22を3本、スターラップD13を300mm間隔で配置した。模擬型枠は長さ750mm、高さ650mmとした。写真-2に実験状況を示す。締固め後に500mm程度の高さになる量115Lのコンクリートを製造し、模擬型枠にシュート(パイロンの先端口径100mmとしたもの)で高さ1.5mからすべて打込み、打込み完了後、φ50棒状バイブレータを用いて、図-9に示す2



写真-1 模擬型枠の外観

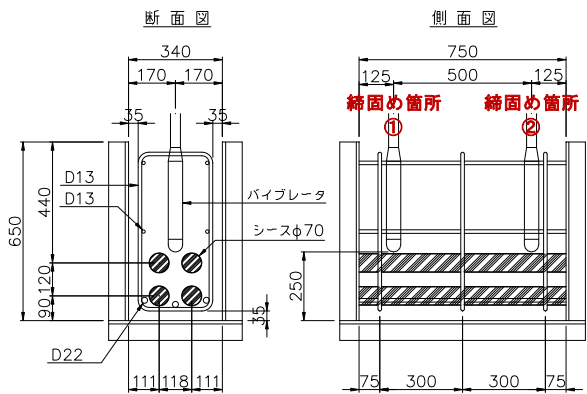


図-9 模擬型枠の形状寸法

表-5 配合

配合No.	配 合								フレッシュ性状			間隙通過速度
	水セメント比 W/C	細骨材率 s/a	混和剤 添加率	単位量 (kg/m ³)					スランプ	空気量	練上がり 温度	
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 SP				
P-1	38.0	45.2	1.30	137	360	840	1024	0.00	11.0	4.0	22.5	4.2
P-2		43.0	0.90	152	400	767		0.00	11.0	4.0	23.5	6.1
P-3		40.5	0.55	167	440	693		0.00	11.0	4.2	23.5	11.4
P-4		37.8	0.35	182	480	619		0.00	11.5	4.1	22.5	10.8



写真-2 打込みおよび締固め状況

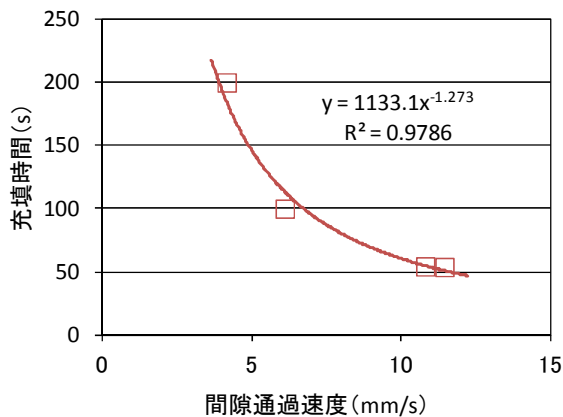


図-10 間隙通過速度と充填時間の関係

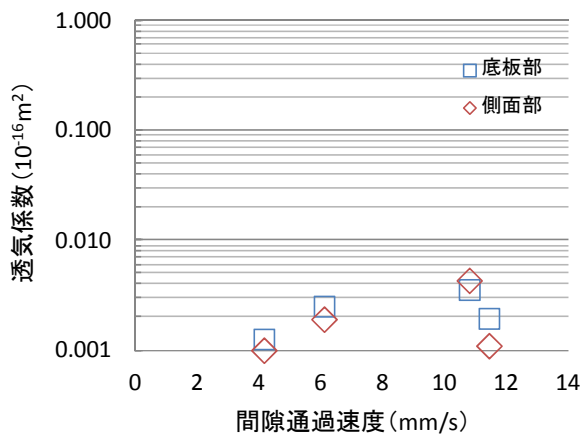


図-11 間隙通過速度と透気係数の関係

箇所の締固め箇所を交互に 10 秒間締固め、充填が完了するまで行うものとした。なお、パイプレータはシースに接触しない高さ（底板から 250mm）まで挿入した。充填完了に要した時間を測定した。また、硬化後の試験体の底板部および側面部のそれぞれ 3 箇所における表面透気係数を測定した。

3.2 実験結果および考察

図-10 に間隙通過性試験における間隙通過速度と実物大模擬型枠の充填時間の関係を示す。間隙通過速度と

充填時間は高い相関を示し、間隙通過速度が大きいほど充填時間が短くなった。図-11 に間隙通過速度と表面（底板部および側面部）透気係数の関係を示す。間隙通過速度と透気係数に相関は見られないが、いずれも透気係数が $0.01 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 以下であり、Torrent 法におけるグレーディングの“非常に良い”に分類される品質であった。このことは、水セメント比が小さいことに起因し、また、前述のように材料分離抵抗性が高いことから、充填に時間を要した場合でも品質を確保することができたと考えられる。

4. まとめ

本稿の範囲における PC 部材を対象とした水セメント比 38% のコンクリートに関して、配合条件が振動条件下における施工性能に及ぼす影響を評価した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 単位セメント量が確保されていることから材料分離抵抗性が高い領域にあるため、材料分離抵抗性は単位セメント量により大きな影響を受けないが、単位粗骨材量による影響は受ける。
- (2) 材料分離抵抗性が高いことから、間隙通過性は単位粗骨材量の影響は小さいが、単位セメント量の影響は大きく受ける。
- (3) 十分に材料分離抵抗性が確保されていることから、スランブ 8~18cm の範囲において、流動性の良い高いスランブの領域では間隙通過性が低下しないが、流動性の劣る低いスランブの領域では間隙通過性は低下する。温度ひび割れ等の品質を考慮すると、スランブ 12cm が最適な配合となる。
- (4) 単位セメント量に起因し施工性能が十分に確保されているため、温度ひび割れや収縮などの品質を考慮して、単位セメント量をできるだけ少なくすることが可能である。
- (5) 間隙通過性試験により求められる間隙通過速度と実際の施工を想定した模擬型枠の充填性は相関しており、間隙通過速度が大きいほど充填性が良好となる。

参考文献

- 1) (社)土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書 [施工編]，2013.3
- 2) 中村，橋本，佐伯，北野：水セメント比および細骨材率が振動条件下におけるコンクリートの充填性に及ぼす影響，日本コンクリート工学会，年次論文集，第 38 巻，pp1383-1388，2016.7
- 3) (社)土木学会：施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針，2016.6