論文　振動締固めによる材料分離がコンクリートの品質に及ぼす影響

中村　敏之[*1]・橋本　紳一郎[*2]・吉村　徹[*3]・市山　大輝[*4]

要旨：コンクリートの有する材料分離抵抗性は使用材料や配合によって異なるが，振動締固めによりコンクリートが鉄筋間を通過して型枠内へ充填されることに関わる性能であり，コンクリートの品質に影響を及ぼす一要因である。本稿では，施工におけるコンクリートの鉄筋間隙通過が品質に与える影響を明らかにするため，間隙通過性試験による鉄筋間隙通過後の試料の品質を評価し，同試験から得られる材料分離抵抗性との関係を実験的に確認した。その結果，材料分離抵抗性の低いコンクリートほど鉄筋間隙通過により，ブリーディングが増加し，圧縮強度および静弾性係数が低下することがわかった。

キーワード：間隙通過性試験，材料分離抵抗性，ブリーディング，圧縮強度，静弾性係数

1.　はじめに

コンクリートの品質はコンクリート構造物の耐久性に大きく影響する。そのため，現在においてはコンクリートの品質を向上させるために耐久性の高い材料を用いるなど様々な技術がある。その一方で，施工時の振動締固めにより，コンクリートが鉄筋間を通過して型枠内へ充填する過程におけるコンクリートの変化は，コンクリートの品質に大きく関係すると考えられ，これにはコンクリートの施工性能のひとつである材料分離抵抗性が大きく関わってくる。材料分離抵抗性の低いコンクリートは鉄筋間隙を経てかぶりに分離したコンクリートが充填されることになり，それによってかぶりコンクリートの品質が低下することが予想される。したがって，コンクリート構造物の品質を確保するためには，間隙通過によるコンクリートの材料分離抵抗性の評価が必要となる。

そのような背景から，「ボックス形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）」[1)]（以下，間隙通過性試験）が 2016 年に制定され，この試験方法により材料分離抵抗性の指標である粗骨材量比率を測定することで，振動条件下の鉄筋間隙通過に対する配合間の相対的な材料分離抵抗性を定量的に評価できるようになった。しかし，現状では，間隙通過性試験はあくまで相対評価であり，何%以上であればコンクリートの品質が確保できるかが明確に判断できない。コンクリートの有する材料分離抵抗性と鉄筋間を通過したコンクリートの品質との関係性が把握できれば，間隙通過性試験を活用して品質を考慮した配合設計が可能となると考えられる。

そこで，本稿では，材料分離抵抗性の異なる 3 配合について，間隙通過性試験による鉄筋間隙通過後の試料を用いてブリーディング特性，圧縮強度，静弾性係数および塩化物イオン浸透深さを測定し，材料分離抵抗性との関係を実験的に確認した。

2.　実験概要

2.1 配合水準および実験の流れ

表－１に配合条件を示す。筆者らのこれまでの実験[2),3)]から間隙通過性試験で得られる一般的なコンクリートの B 室（ボックス形容器において鉄筋間隙通過後に相当す

表－１　配合条件

配合	水セメント比（%）	目標スランプ（cm）	目標空気量（%）	B室の粗骨材量比率（%）
No.1	50	12±1	4.5±0.5	70～80
No.2				80～90
No.3				90～100

表－２　使用材料

水	上水道水	密度（g/cm^3）	1.00
セメント	普通ポルトランドセメント	密度（g/cm^3）	3.16
		比表面積（cm^2/g）	3350
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（%）	1.03
		実積率（%）	55.8
		粗粒率	2.90
		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（%）	0.39
		実積率（%）	61.2
		粗粒率	6.77
混和剤	AE減水剤	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	
	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）

る位置）の粗骨材量比率は，概ね 70～100%の範囲となる。そのため，本実験で用いるコンクリートの配合は，間隙通過性試験の B 室の粗骨材量比率 がそれぞれ 70～80%，80～90%，90～100%の範囲となるような 3 水準に設定した。また，水セメント比は 50%，スランプは 12±1cm，空気量は 4.5±0.5%の一定条件とした。

表－２に使用材料を示す。いずれの配合も同一材料とした。セメントは普通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 AE 減水剤と空気量の調整に AE 剤を使用した。コンクリートの練混ぜは温度 20℃，相対湿度 60%の室内で，100L 強制練りミキサを使用し，各配合で 35L 練り混ぜた。

実験の流れは，最初に**表－１**の条件を満たす配合を決定し，各水準について，練混ぜ後の試料，つまり，間隙通過性試験を実施する前の試料（以下，試料 O）と間隙通過性試験を実施した後の B 室から採取した試料(以下，試料 B）を用いて，後述する試験を実施し，試料 O に対する試料 B の各測定値の変化を評価した。

2.2 測定項目

表－３に測定項目を示す。配合決定時にフレッシュ性状として，スランプ，空気量を測定し，間隙通過性試験から粗骨材量比率と間隙通過速度，土木学会の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[4)]で提案される「フレッシュコンクリートのタンピング試験方法（試案)」（以下，タンピング試験）から単位スランプフロー変化量を測定した。その後，測定項目毎に間隙通過性試験を実施し，試料 O および試料 B を採取して成型した供試体で，ブリーディング，圧縮強度，静弾性係数および塩化物イオン浸透深さを測定した。

2.3 試料の採取方法

図－１に示すように，試料 B は間隙通過性試験後のボックス型容器の B 室上部から 110mm（190～300mm の間隙通過速度の測定範囲）の高さまでの試料（約 3 リットル）とした。採取した試料はパットに移し，軽く切返しをしてから各試験に応じた供試体を作製した(**写真－１**)。また，試料 O は練混ぜ後のコンクリートから採取し，試料 B と同様に供試体を作製した。

2.4 試験方法

(1) スランプ，空気量

試料 O を用いて，JIS A 1101 および JIS A 1118 に準じて，スランプおよび空気量を測定した。

(2) 間隙通過速度，粗骨材量比率

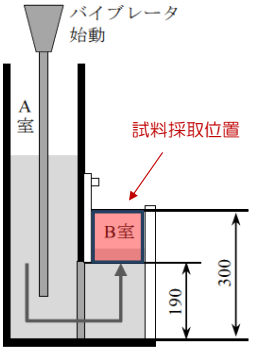
試料 O を用いて，間隙通過性試験に準じて，間隙通過速度および粗骨材量変化率を測定した。

(3) 単位スランプフロー変化量

単位スランプフロー変化量は，試料 O を用いてタンピング試験で測定した。タンピング試験はスランプ試験終了後の試料を用い，質量 1.2kg の木製棒を平板の四隅に順次落下させることでコンクリートへ打撃による振動を与え，タンピング 8 回ごとに 32 回までのスランプフローを測定した．タンピング回数とスランプフローの関係から，単位スランプフロー変化量（mm/回）を算出した。

表－３　測定項目

	測定項目	試験方法
施工性能	粗骨材量変化率	間隙通過性試験 JSCE-F 701
	間隙通過速度	
	単位スランプフロー変化量	タンピング試験
物性	ブリーディング質量	ブリーディング試験を参考
	圧縮強度	圧縮強度試験 JIS A 1108
	静弾性係数	静弾性係数試験 JIS A 1149
耐久性	塩化物イオン浸透深さ	塩分浸漬試験を参考



図－１　B 室試料の採取箇所

写真－１　B 室試料の採取方法

(4) ブリーディング特性

測定方法は JIS A 1123 に準じたが，試料を採取する容器はボックス形容器から採取可能な試料が 3 リットルであることから，φ150×300 の鋼製容器とし，高さ 170mm まで試料を詰めることとした。また，ブリーディング特性の評価については，簡易的にブリーディング質量とした。練混ぜおよび間隙通過性試験は各配合（3 水準）でそれぞれ 3 回実施し，各回から試料 O および試料 B をそれぞれ 1 体採取した。

(5) 圧縮強度，静弾性係数

測定は JIS A1123 に準じたが，採取する試料が 3 リットルであり，かつ，3 本 1 組を 1 回の練混ぜおよび間隙

通過性試験から採取するために，供試体の形状はφ50×100 とした。JIS の規定では，圧縮強度試験に用いる供試体直径は粗骨材の最大寸法（本実験では 20mm）の 3 倍以上としなければならないが，W/C=50%のコンクリートにおいて，φ100×200 と比較して圧縮強度は増加するものの，変動係数は 5%以下であり，単位容積質量の変動係数は 1%以下である，との既往の研究[5]，かつ，本実験の目的は試料 O と試料 B の品質の相対比較であることから，本実験の供試体寸法はφ50×100 を採用した。

練混ぜおよび間隙通過性試験は各配合（3 水準）でそれぞれ 1 回実施し，各回から試料 O および試料 B をそれぞれ 3 体採取した。供試体成型後は標準養生を行い，材齢 28 日に圧縮強度および静弾性係数を測定した。

(6) 塩化物イオン浸透深さ

塩化物イオン浸透深さは塩水浸漬試験により測定した。供試体形状は，採取可能な試料が 3 リットルであることから 100×100×300mm の角柱とした。練混ぜおよび間隙通過性試験は各配合（3 水準）でそれぞれ 3 回実施し，各回から試料 O および試料 B をそれぞれ 1 体採取した。

供試体は材齢 1 週まで 20℃水中養生し，温度 20℃，相対湿度 60%で 12 時間乾燥させてから打込み面，底面および両端面をエポキシ樹脂塗料で被覆した後に，材齢 1 週から温度 20℃，濃度 10%の塩化ナトリウム水溶液中に浸漬し，浸漬開始から 1，4，8 週となった時に供試体を割裂して硝酸銀溶液を噴霧して塩化物イオン浸透深さを測定した。

3. 配合の決定

配合は**表－１**に示すスランプ，空気量および B 室の粗骨材量比率を満足するように，試し練りで決定した。**表－４**にそれらを満足した配合を示す。**図－２**に B 室の粗骨材量比率，間隙通過速度，単位スランプフロー変化量の測定結果を示す。B 室の粗骨材量比率は，No.1 が 78.6%，No.2 が 86.7%，No.3 が 94.5%であり，間隙通過速度と単位スランプフロー変化量も同じ順に値が大きくなった。また，**写真－２**に示すように，スランプ形状とタンピング 32 回により変形した試料の状態は目視評価においても，No.1 はスランプが直立しており，かつ，一部に崩れが見られ，さらにタンピングによって全体的に崩れが生じている。一方，No.2 および No.3 ではスランプ形状はいずれも良好な形状を示しているが，タンピングにより No.2 は割れが生じ，No.3 は良好なフロー性状を示している。このように目視評価においても，No.1，No.2，No.3 の順に材料分離抵抗性が低下していると推定され，粗骨材量比率と同じような傾向であったことから，**表－４**の配合のコンクリートを用いて，以降の試験を実施した。

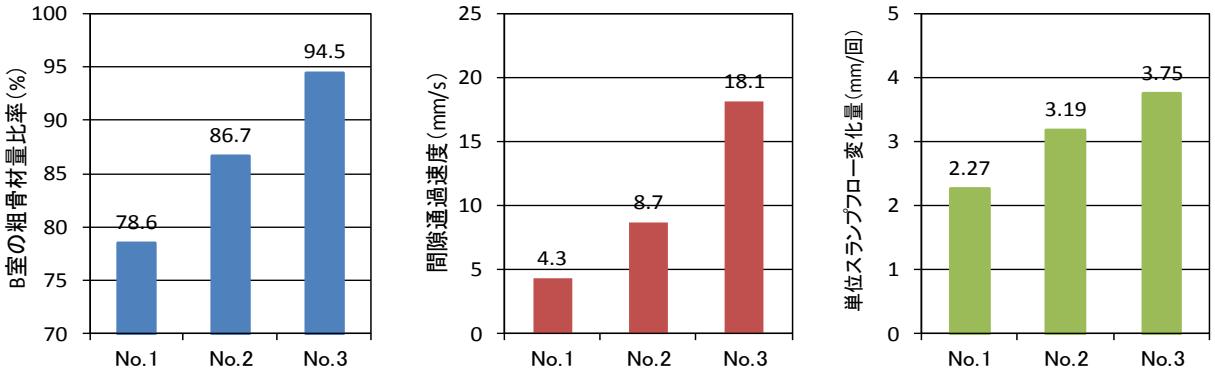
4. 実験結果

4.1 ブリーディング特性

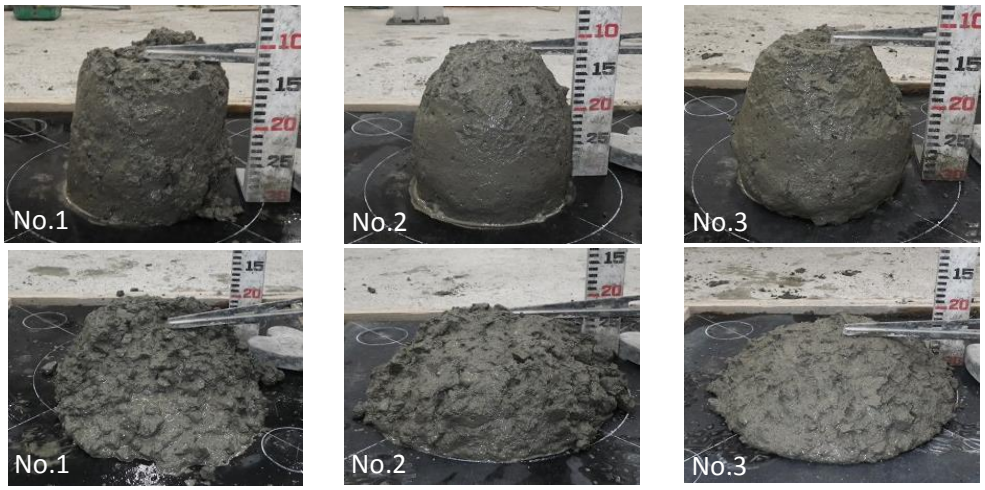
図－３にブリーディング質量の測定結果を示す。No.1 は 3 回（図凡例における 1～3）の試料でばらつきはあるものの，いずれも試料 O に比べて試料 B のブリーディング質量が測定初期から大きくなる傾向が見られた。一方，

表－４　配合およびフレッシュ性状

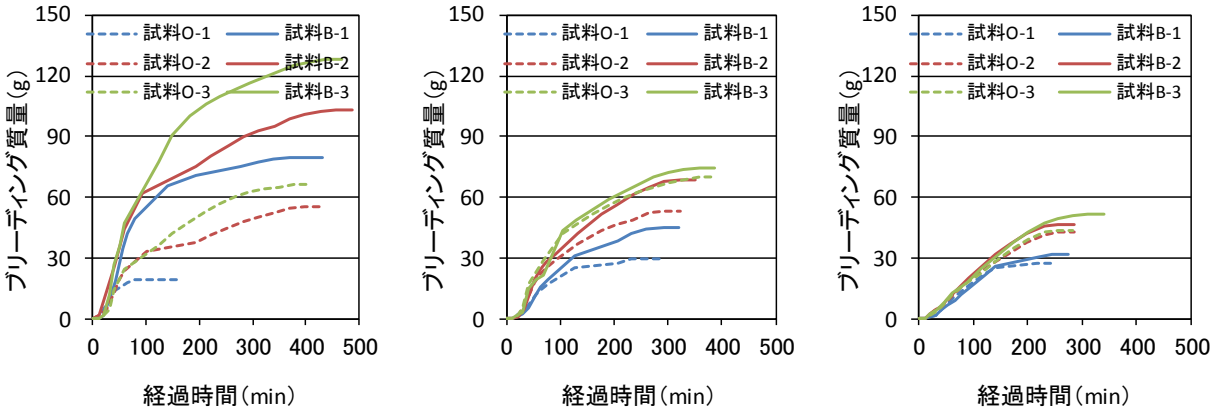
配合	配合								フレッシュ性状		
	水セメント比 W/C	細骨材率 s/a	混和剤添加率	単位量（kg/m³）					スランプ	空気量	練上がり温度
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 Ad			
	%	%	C×mass%	kg	kg	kg	kg	kg	cm	%	℃
No.1	50	40	1.4	155	310	741	1120	4.34	12.0	4.5	22.0
No.2		45	0.9	165	330	814	1003	2.97	12.0	4.2	22.5
No.3		50	0.6	175	350	883	890	2.10	12.5	4.3	23.0



図－２　B 室の粗骨材量変化率，間隙通過速度，単位スランプフロー変化量

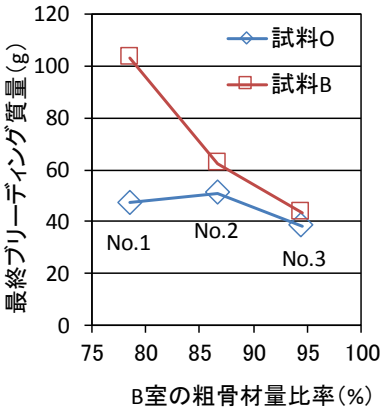


写真－２　スランプ形状（上段）およびタンピングによる変形状態（下段）

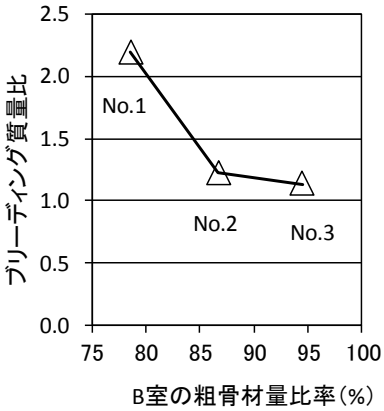


a）配合 No.1　　b）配合 No.2　　c）配合 No.3

図－３　ブリーディング質量の測定結果



図－４　最終ブリーディング質量



図－５　ブリーディング質量比

No.2 および No.3 ではその差が小さかった。**図－４**に最終ブリーディング質量の 3 回平均値を示す。B 室の粗骨材量比率の違いに関わらず，試料 O のブリーディング質量はほぼ同等であるが，試料 B のブリーディング質量は粗骨材量比率が小さいほど大きくなる傾向を示しており，特に粗骨材量比率が 78.6%になるとブリーディング質量は大きな値となった。**図－５**にブリーディング質量比（試料 O に対する試料 B の比）を示す。No.2 および No.3 では試料 B は試料 O に対して 1 に近い比率を示しているが，No.1 では大幅に比率が増加し，2 倍程度のブリーディングが発生したことを示している。これは振動条件下の鉄筋間隙通過による粗骨材の分離のみならず，水の分離も生じていると推測され，かつ，試料 B では単位粗骨材量の減少により，見掛けの単位水量が増加していること（例えば No.1 では試料 O の単位水量 155kg/m^3 に対し，単位粗骨材量のみが 78.6%まで減少していると想定する

と単位水量は 171kg/m³ に相当する）により，試料 B のブリーディングが増加したと考えられる。

このことから，間隙通過性試験で得られる B 室の粗骨材量比率が小さいほどブリーディングが多く生じる可能性があり，本実験の範囲では，特に粗骨材量比率が 86.7% 以下となると急激にブリーディング比が大きくなることから，この変化に品質確保に対する粗骨材量比率の実験結果の定量的判断ができる可能性があると考えられる。

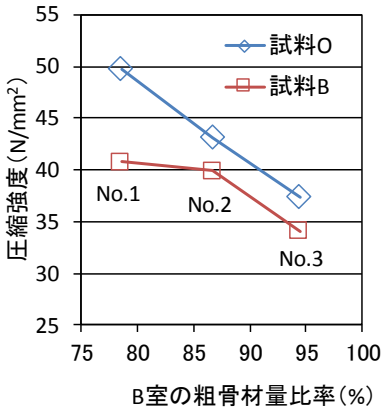
4.2 圧縮強度，静弾性係数

図－６および**図－７**に材齢 28 日における圧縮強度と静弾性係数の測定結果を示す。試料 O では No.1，No.2,No.3 の順に圧縮強度，静弾性係数ともに大きくなったが，既往の研究 [6]による，コンクリートの単位容積に対する骨材の体積比が 0.4～0.8%の間ではこれが大きいほど圧縮強度等は増加する，という事象に起因していると考えられる。本実験の配合では 0.6～0.7 程度の範囲であり，No.1，No.2，No.3 の順に体積比が大きいことから，その順に圧縮強度が大きくなったと推察される。一方，試料 B は試料 O と比較して，圧縮強度が全体的に低下しているものの，ブリーディングの測定結果による傾向と同様に，圧縮強度，静弾性係数のいずれにおいても No.1 が大きく低下している。**図－８**に圧縮強度比，静弾性係数比を示す。No.1 では圧縮強度比および静弾性係数比に大きな低下が見られ，前述のブリーディングの増加がその一要因と考えられる。

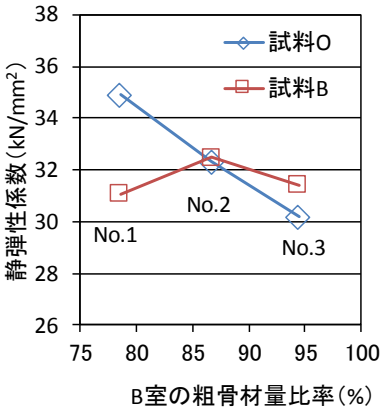
このことから，圧縮強度および静弾性係数においても，ブリーディング特性と同様な材料分離抵抗性との関係性があると考えられる。

4.3 塩化物イオン浸透深さ

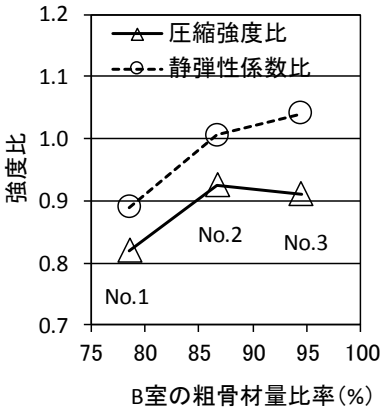
図－９に塩水浸漬期間 8 週までの塩化物イオン浸透深さを示す。既往の研究 [6]では，コンクリートの透過性はセメントペースト硬化体の体積に依存するとされている。B 室の粗骨材量比率の結果から，試料 O に対する試料 B のペースト体積の増加は No.1，No.2，No.3 の順に大きいと推定されるが，浸漬 8 週時の No.2 と No.3 を比較すると，セメントペースト体積の増加が大きい，つまり，粗骨材量比率が小さいほど，塩化物イオン浸透深さが大きくなった。しかし，No.1 ではセメントペーストの体積の増加に加え，ブリーディングが多く生じているにも関わらず，試料 O と試料 B は同等となった。本稿では，浸漬初期の結果であるため，ばらつきなどの理由が考えられるため，今後の長期測定の結果から再度検討したい。



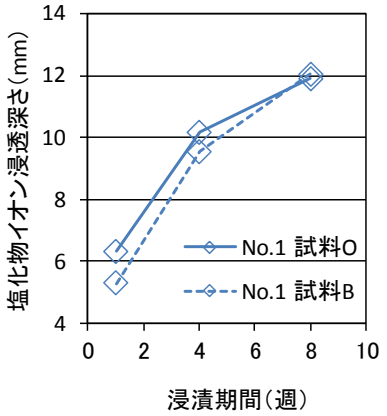
図－６　圧縮強度



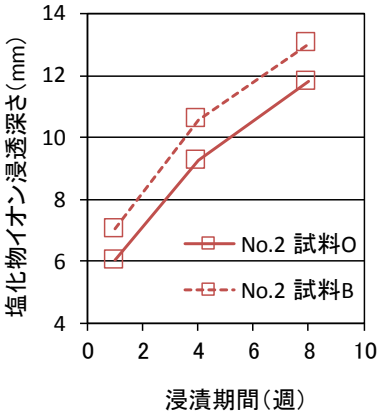
図－７　静弾性係数



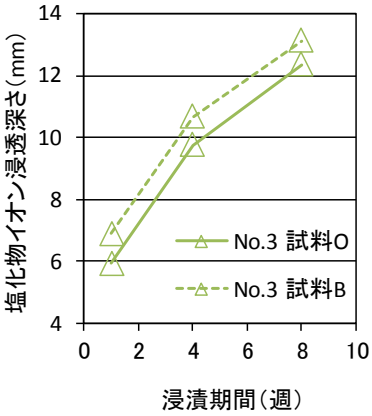
図－８　強度比



a）配合 No.1

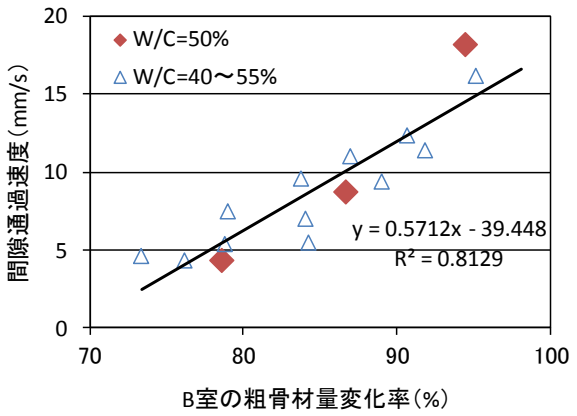


b）配合 No.2

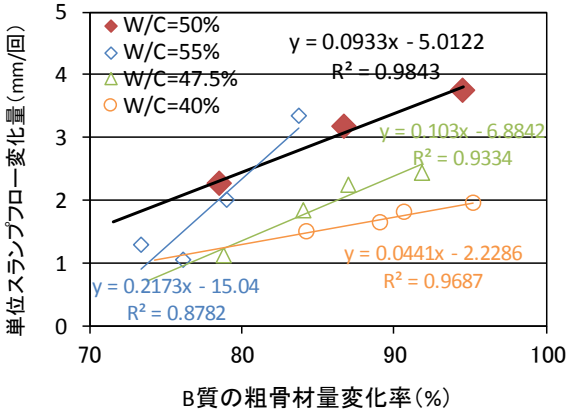


c）配合 No.3

図－９　塩化物イオン浸透深さ



図－１０　Ｂ室の粗骨材量比率と間隙通過速度



図－１１　Ｂ室の粗骨材量比率と単位スランプフロー変化量

5. コンクリートの施工性能と品質の関係

以上から，間隙通過性試験の B 室の粗骨材量比率を指標とする材料分離抵抗性とブリーディング，圧縮強度および静弾性係数については一定の相関があることを示した。その中で，本実験の範囲では，粗骨材量比率が 86.7%以上の場合は，圧縮強度比が 0.9 程度の低下を示すものの，粗骨材量比率がそれ以下となると急激な品質の低下が見られた。このことから，大幅な品質低下のリスクを低減するための粗骨材量比率の閾値が存在すると推察される。今後，さらにこの詳細を検討し，明確な閾値が確立できれば，間隙通過性試験を活用することで，コンクリート構造物の品質や耐久性の確保，あるいは向上が期待できる。

また，過去の実験[2)]では，スランプ 8cm, W/C=40～55%の範囲でＢ室の粗骨材量比率と間隙通過速度との関係，水セメント比が同じであれば，単位スランプフロー変化量との関係は，いずれも概ね直線関係にあり，相関することがわかっている。これらのデータに本実験のデータを加えて，**図－１０**に B 室の粗骨材量比率と間隙通過速度の関係を，**図－１１**にＢ室の粗骨材量比率と単位スランプフロー変化量の関係を示す。単位スランプフロー変化量はスランプが異なるため，変形性の違いから過去のデータより上方にシフトしているが，概ね直線的な関係を示しており，粗骨材量比率を補完する指標値として，間隙通過速度やタンピング試験による単位スランプフロー変化量もリスク低減のための閾値を設定できる可能性があり，品質の確保に向けた活用の拡大がより期待できると考えられる。

6. まとめ

コンクリートの材料分離抵抗性と品質の関係について，間隙通過性試験を用いて実験的に検討した結果，本稿の範囲においては，以下の知見が得られた。

(1) 材料分離抵抗性を示す粗骨材量比率が小さいコンクリートほど振動締固めによる鉄筋間隙通過により，ブリーディングが増加し，圧縮強度および静弾性係数が低下する傾向にある。

(2) 材料分離抵抗性と塩化物イオン浸透深さの関係ではブリーディング等と同様な傾向を見出せなかった。

(3) B 室の粗骨材量比率が 86.7%以下となると急激な品質の低下が見られたことから，大幅な品質低下のリスクを低減するための粗骨材量比率の閾値が存在すると推察される。それが確立できれば，間隙通過性試験を活用することで，配合選定において，コンクリート構造物の品質の確保が期待できると考えられる。

(4) 粗骨材量比率は，間隙通過速度や単位スランプフロー変化量との一定の相関が見られるため，それぞれについても品質低下のリスク低減のための閾値が設定できれば，さらに間隙通過性試験の活用が拡大されると期待できる。

参考文献

1) (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

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) 中村，橋本，吉村，北野：PC 部材を対象としたコンクリートの施工性能評価，日本コンクリート工学会，年次論文集，第 39 巻，pp1207-1212，2017.7

4) (社)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，2013.11

5) 渡邉，玉井，増田，嵩：高強度コンクリートの圧縮強度に及ぼす供試体寸法の影響に関する実験，日本コンクリート工学会，年次論文集，第 28 巻，No.1，pp1175-1180，2006.7

6) A.M.Neville，三浦尚訳：ネビルのコンクリートバイブル，技報堂出版，pp364-366，2004