

論文 自己充填性を有するおよび締固めを必要とする高流動コンクリートの実大寸法部材内での品質の分布性状について

柴田 章弘*1・氏家 勲*2・河合 慶有*3・下野 聖也*4

要旨：本研究は実大寸法のボックスカルバートの側壁部を、自己充填性を有する高流動コンクリートおよび締固めを必要とする高流動コンクリートを用いて製作し、硬化後の品質分布を測定して、高流動コンクリートの均一性について検討を行った。自己充填性を有するコンクリートでは他のコンクリートよりテストハンマー強度の変動係数がやや大きく、部材の下部になるにつれて大きくなる傾向がみられた。しかしながら、透気係数の分布状況より判断して、自己充填性を有する高流動コンクリートは均一性が高く、締固めを必要とする高流動コンクリートは自己充填性を有するコンクリートと同程度の均一性を有していなかった。

キーワード：自己充填性高流動コンクリート、締固めを必要とする高流動コンクリート、硬化後の品質分布

1. はじめに

締固めを必要とする高流動コンクリートでは増粘成分を有する高性能 AE 減水剤を使用することで、従来の一般的なコンクリートの配合と比較して粉体量を必要以上に増加させなくても、材料分離抵抗性を有し、流動性を高めたコンクリートである。そのため、自己充填性を有する高流動コンクリートに比べ材料コストを低減できるなどの利点を有する¹⁾。

締固めを必要とする高流動コンクリートでは締固めの作業を行うことにより鉄筋に対しての間隙通過性を付与しているが、締固めの作業に対して材料分離抵抗性を担保することが特に重要となる。そのため既往の報告において²⁾、粗骨材の沈下量評価試験および触感による評価試験の両者が締固めを必要とする高流動コンクリートの材料分離抵抗性を評価する有効な試験方法となること、また、U型充填試験も加振による材料分離を考慮した間隙通過性を評価する可能性があることを示唆すると取りまとめられている。これらの試験はフレッシュコンクリートでの品質評価であり、締固めを必要とする高流動コンクリートでは、一般のスランブで管理するコンクリート同様に施工（締固め）の影響を受けるため、構造物において硬化後のコンクリートの性能に関係する品質を確認する必要がある。しかしながら、締固めを必要とする高流動コンクリートにおいて、自己充填性を有する高流動コンクリートのように硬化後のコンクリート品質の均一性に関して高い信頼性を有しているかについてはほとんど検討されていない。

著者らは既往の研究において、高さ 90cm のコンクリート壁部材内の各種の硬化後の品質分布に関して、スラ

ンプ 12cm のコンクリートを用いた場合に比べて締固めを必要とする高流動コンクリートを用いた場合の方が、上下方向で有意な差がなく、均一性が高いことが明らかとなった³⁾。また、高さ 2700mm の実大寸法の桁部材の実験では、締固めを必要とする高流動コンクリートは各高さ位置で透気係数のバラツキが小さいことが分かった⁴⁾。しかしながら、これらの結果はスランブ 12cm のコンクリートと比較したもので、自己充填性を有する高流動コンクリートとの比較検討は行われていない。

そこで本研究は実大寸法のボックスカルバートの側壁部材を、自己充填性を有する高流動コンクリート、締固めを必要とする高流動コンクリートおよびスランブで管理する一般的なコンクリートを用いて製造し、部材全体のテストハンマー試験と透気試験による品質分布および高さ方向で 3 か所の水平方向の品質分布を測定して、締固めを必要とする高流動コンクリートの均一性について検討することを目的としている。

2. 実験概要

2.1 コンクリートの配合

本研究ではプレキャスト製品を対象とした設計基準強度 50N/mm² の 3 配合のコンクリートを使用した。まずスランブで管理する通常のコンクリートは早強ポルトランドセメントを用い、水セメント比が 36% で、目標スランブを 12±2.5cm とした（以下、SL12NC と呼ぶ）。一方、締固めを必要とする高流動コンクリートには早強ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末 6000 を 30% 置換した粉体系のものを用いた。水結合材は 34% で目標スランブフローは 450±75mm とした（以下、HFCwC と呼ぶ）。

*1 愛媛大学大学院 理工学研究科（博士前期課程）生産環境工学専攻（学生会員）

*2 愛媛大学大学院 理工学研究科教授 博士（工学）（正会員）

*3 愛媛大学大学院 理工学研究科准教授 Ph.D.（正会員）

*4 極東興和株式会社 技術本部技術企画部開発課

表-1 コンクリート配合

配合	スランプ [°] (cm) スランプフロー (mm)	空気量 (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						
					水	セメント	高炉スラグ 微粉末	細骨材	粗骨材	高性能 減水剤	AE 剤
SL12NC	12±2.5	4.5±1.5	36	44.0	160	421	---	768	992	2.63	0.253
HFCwC	450±75	4.5±1.5	34	45.4	160	330	141	769	939	3.77	0.353
SCHFC	600±100	4.5±1.5	34	51.5	170	350	150	845	809	4.63	0.375

実測値：SL12NC スランプ[°] 14.0cm, 空気量 3.1% HFCwC スランプ[°] フロー 490mm, 空気量 3.8% SCHFC スランプ[°] フロー 570mm, 空気量 5.0%

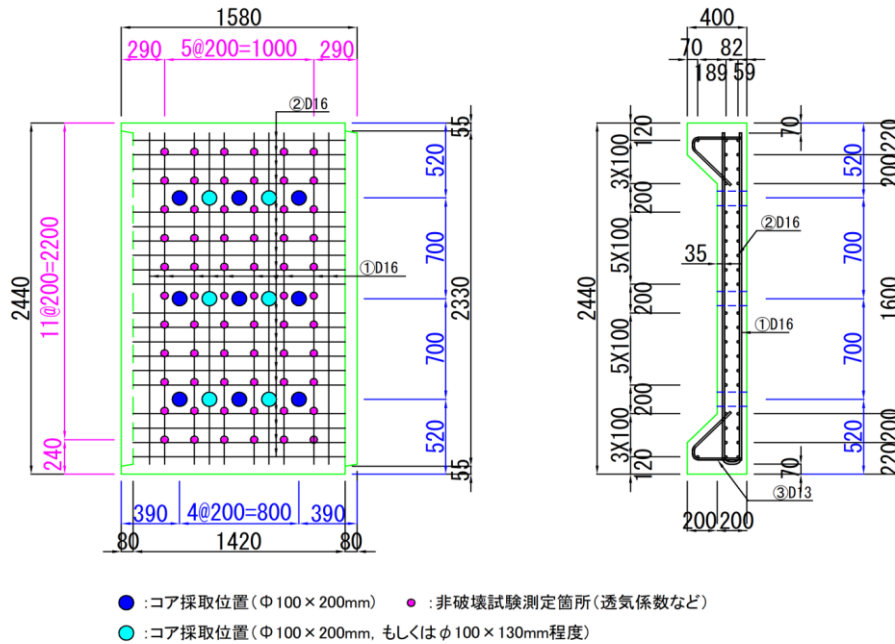


図-1 供試体 (ボックスカルバート側壁部材)

さらに、自己充填性を有する高流動コンクリートも高炉スラグ微粉末を30%置換し、目標スランプフローは600±100mmとした(以下、SCHFCと呼ぶ)。表-1にコンクリートの配合を示す。高性能減水剤にはポリカルボン酸系化合物のものを用いた。

2.2 供試体

実験に用いた供試体はボックスカルバートの側壁部の型枠を利用して作製したRC部材で、供試体の概要を図-1に示す。部材幅は1580mm、部材高さは2440mmで、上下の420mm除いた部分の部材圧さは200mmである。

SL12NC および HFCwC はバケツで型枠の上部からコンクリートを5層に分けて投入し、各層において4箇所をφ50mmのバイブレータで締め固めた。各層の高さおよびバイブレータの位置は図-2に示すとおりである。1箇所あたりの締め固め時間はSL12NCで15秒とし、HFCwCは既往の研究³⁾を参考にして5秒とした。SCHFCは自己充填性を保有しているため、振動は与えず、供試体の端から約500mmのあたりから2回に分けて型枠に流し込んだ。打込み終了後は材齢1日で脱型し、横転させて計測面が上になるにした後、材齢3日まで散水しシートで覆い屋内に静置した。SL12NCの翌々日に

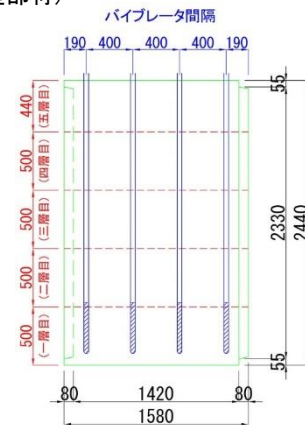


図-2 締め固め時のバイブレータの位置

HFCwCを、さらにその翌々日にSCHFCを製造した。

2.3 測定項目

本研究では、供試体の打設日が異なるため、SL12NCでは材齢50日、HFCwCでは材齢48日、SCHFCでは材齢46日で非破壊試験を実施し、非破壊試験の翌日に図-1に示す15箇所からコアを採取した。

φ100mmのコアはボックスカルバート側壁部材の表面から長さ100mmおよび70mmの2つに切り分けた。切り分けた2つのコアは側壁部材の表面部以外を防水テ

ープでシールし、10 wt%のNaCl水溶液に浸漬した。所定の日数経過後に割裂して硝酸銀水溶液を噴霧して塩化物イオン浸透深さを測定した。

非破壊試験は図-1に示すように部材端部から290mmの位置から200mm間隔で6測線で、1測線は下縁から240mmの位置から200mm間隔で、1測線11箇所合計66箇所において、透気係数とテストハンマー強度の測定を行った。

(1) 透気係数

透気試験はダブルチャンバー法を採用した。ダブルチャンバー法では外径φ100mmのチャンバー(内部にφ50mmのチャンバー)をコンクリート表面に押し当てて測定する。なお、透気試験の前に高周波容量法による水分計を用いて透気試験実施の確認のための含水率を測定した。透気係数は次式より算出した。

$$k_T = \left(\frac{V_C}{A}\right)^2 \frac{\mu}{2\varepsilon P_a} \left(\frac{\ln \frac{P_a + \Delta P_{ieff}(t_f)}{P_a - \Delta P_{ieff}(t_f)}}{\sqrt{t_f} - \sqrt{t_0}}\right)^2 \quad (1)$$

ここで、 k_T :透気係数(m²)、 V_C :内部セルの容積(m³)、 A :内部セルの断面積(m²)、 μ :空気の粘性係数(=2.0×10⁻⁵N·s/m²)、 ε :コンクリートの空隙量(=0.15)、 P_a :大気圧(N/m²)、 ΔP_{ieff} :試験終了時内部セルの有効圧力上昇(N/m²)、 t_f :試験終了時時間(s)、 t_0 :試験開始時間(s)(=60s)である。

なお、本測定では内外のチャンバー内の圧力を調整する装置がチャンバーと一体となっているアクティブセル型透気試験機を使用した。なお、既往の文献とのデータの比較のために非アクティブセル型透気試験機も使用した。

(2) テストハンマー強度

テストハンマー強度はリバウンドハンマーを用いて、

壁部材表面で反発度を測定した。測定位置は透気試験のチャンバーを押し当てた付近で、9箇所測定し、反発度の平均値からその位置のテストハンマー強度を求めた。テストハンマー強度(F)は基準反発度(R_0)を用い、高強度領域においても精度の良い強度推定が可能である既往の研究の次式から算出した⁵⁾。

$$F(\text{N/mm}^2) = 0.561R_0 / (1.0 - 0.0135R_0) \quad (2)$$

なお、テストハンマーの打撃角度は地面に対して垂直であるが、既往の研究では打撃角度の補正に関して言及していないことと、日本材料学会の反発度の補正では反発度は60までで本実験では60を超えていたため、補正値は加えず、測定反発度の平均値を基準反発度とした。

3. 実験結果および考察

3.1 テストハンマー強度

表-2は各供試体の66箇所測定したテストハンマー強度の平均値と標準偏差を示す。表中の圧縮強度は供試体の近くに静置した円柱供試体を用いて非破壊試験時に測定した値である。円柱供試体による圧縮強度はSCHFC > HFCwC > SL12NCの順である。一方、テストハンマー強度ではSL12NC > SCHFC > HFCwCの順になっているが、その差はほとんどない。また、テストハンマー強度

表-2 テストハンマー強度

供試体	テストハンマー強度 (N/mm ²)		変動係数 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)
	平均値	標準偏差		
SL12NC	78.3	3.43	4.38	77.6
HFCwC	76.3	3.52	4.62	81.3
SCHFC	77.7	5.95	7.66	85.3

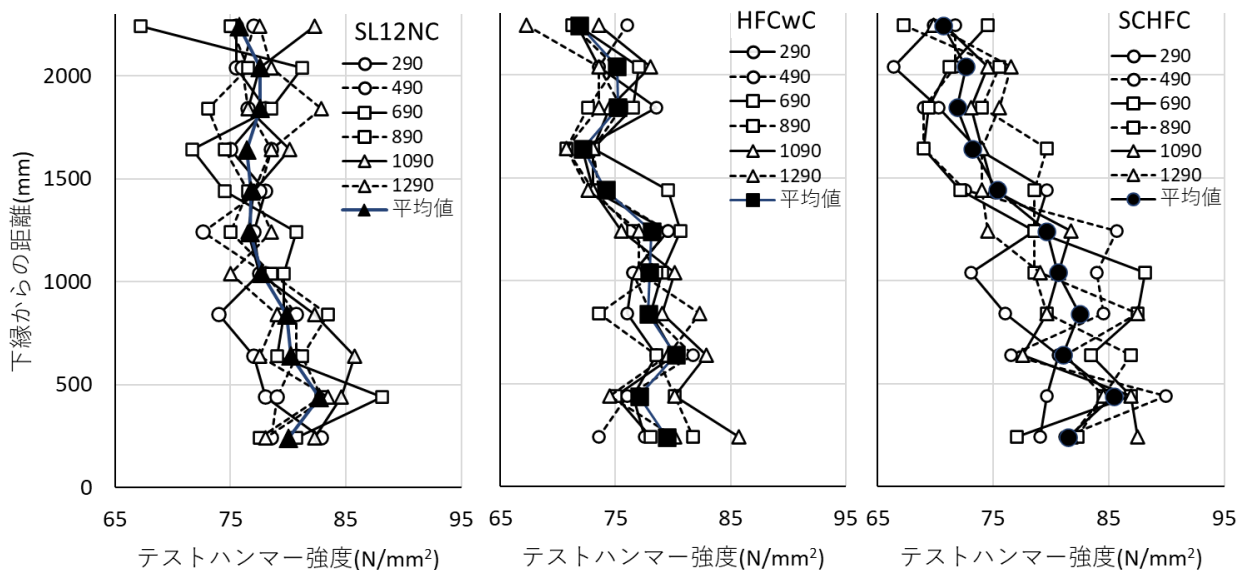


図-3 テストハンマー強度の高さ方向の分布

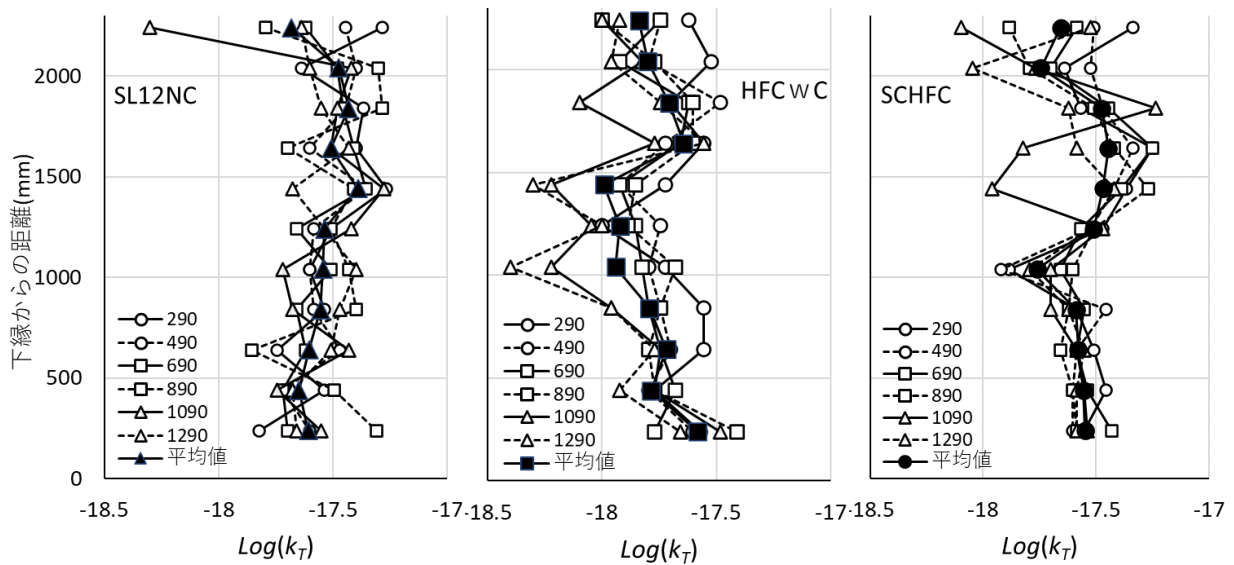


図-4 透気係数の高さ方向の分布

の標準偏差は SL12NC が小さく、SCHFC が最も大きくなっている。既往の研究においても³⁾⁴⁾、HFCwC と SL12NC に対応するテストハンマー強度の変動係数は 5%程度で本実験結果もほぼ同程度であった。

図-3 はテストハンマー強度の高さ方向の分布を示す。図の凡例の数値は供試体端部からの水平距離(mm)を表し、平均値は各位置 6 箇所を平均した値である。図からわかるように、SCHFC では下縁からの各位置での 6 箇所のテストハンマー強度のバラツキが SL12NC と HFCwC に比べて大きくなっている。このように、変動係数としては低い値であるが、テストハンマー強度に関しては締固めを必要とする高流動コンクリート (HFCwC) は自己充填性を有する高流動コンクリート (SCHFC) より均一性が高い。ただし、図-3 平均値の高さ方向の分布から、全ての供試体において供試体上部から下部にかけてテストハンマー強度が大きくなっており、本実験では SCHFC がその程度が大きい。供試体を上部と下部に分けて、テストハンマー強度に関して *t* 検定を行うと、全ての供試体において、上部と下部でのテストハンマー強度に関して有意な差があると判定された。

3.2 透気係数

コンクリートの透気係数はコンクリート部材内で正規分布しないが、対数を取ることによって正規分布(対数正規分布)することが既に報告されていることから⁶⁾、表-3 は透気係数(k_T)の常用対数を取った値(以下、 $\text{Log}(k_T)$ と表す)の平均値、透気係数、標準偏差、変動係数の一覧を示す。部材全体の平均の透気係数で比較すると各供試体において大きな差はないが、 $\text{HFCwC} < \text{SCHFC} < \text{SL12NC}$ の順となっている。しかしながら、既往の同程度のテストハンマー強度を有するコンクリート部材の透気係数とは³⁾、ほぼ同じ値であるが、変動係数が全ての

表-3 透気係数

供試体	透気係数		標準偏差	変動係数 (%)
	平均値 $\text{Log}(k_T)$	k_T ($\times 10^{-16} \text{m}^2$)		
SL12NC	-17.54	0.031	0.171	39.3
HFCwC	-17.79	0.018	0.194	44.7
SCHFC	-17.58	0.029	0.176	40.5

供試体で小さくなっている。

図-4 は透気係数の常用対数を取った $\text{Log}(k_T)$ の高さ方向の分布を示す。SL12NC は下縁から 2240mm の 1 点を除いて、上部から下部において $\text{Log}(k_T)$ で約 0.40 の範囲内で分布している。HFCwC では、全体として表-3 の変動係数と同じように SL12NC よりバラツキがやや大きく、 $\text{Log}(k_T)$ で約 0.42 の範囲でバラついている。一方、SCHFC では、供試体全体の $\text{Log}(k_T)$ の標準偏差は SL12NC とほぼ同じであるが、下縁からの各高さ位置でのバラツキでは下部のほうが上部より小さく、特に下縁から 1240mm 以下では $\text{Log}(k_T)$ で約 0.19 の範囲と SL12NC の半分以下となっている。しかしながら、SCHFC の上部のバラツキは $\text{Log}(k_T)$ で約 0.58 の範囲と HFCwC のバラツキより大きい。

また、図-4 の $\text{Log}(k_T)$ の平均値の高さ方向の分布から、SL12NC では上部から下部に向かって $\text{Log}(k_T)$ 、すなわち透気係数が小さくなる傾向がある。反対に、HFCwC では 1440mm 以下で、SCHFC では 1040mm 以下で透気係数が大きくなる傾向が観察される。既往の研究において締固めを必要とする高流動コンクリートを用いた実寸法部材の下縁近傍で透気係数が小さくなる傾向が観察され⁴⁾、フレッシュ時にコンクリートがほぼ液圧で作用することの影響が考えられたが、SCHFC の下部においてはそのよ

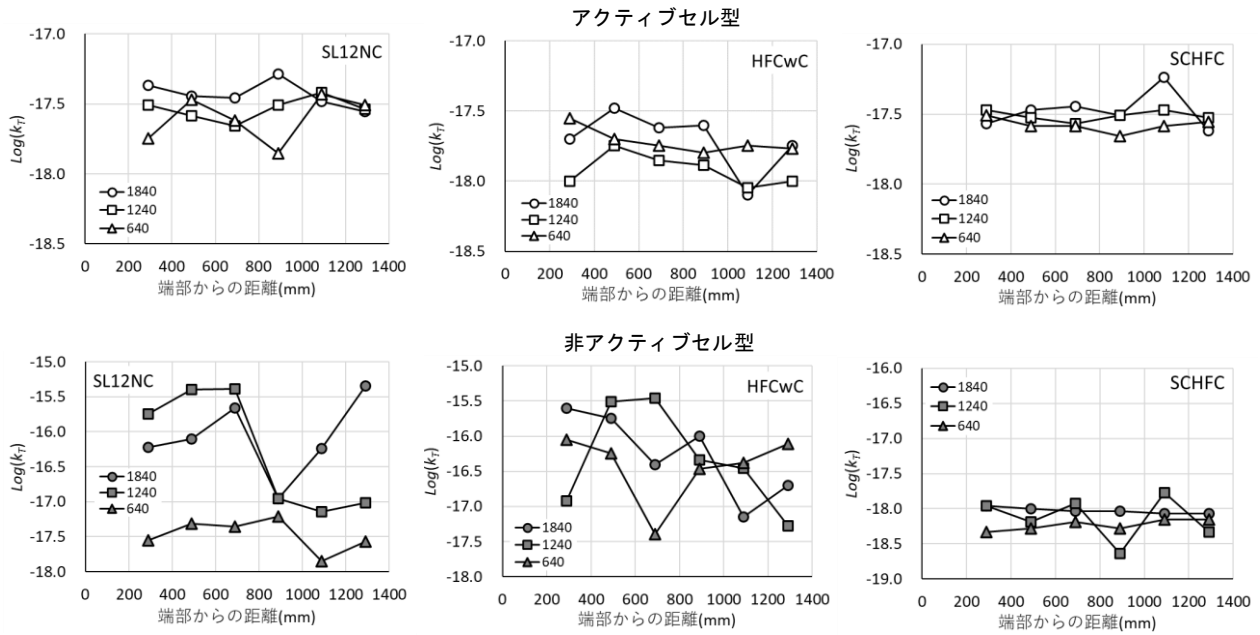


図-5 2つのタイプの透気試験機で測定された透気係数の分布状況

うな傾向が観察されていない。なお、供試体を上部と下部に分けて、 $\text{Log}(k_r)$ に関して t 検定を行うと、全ての供試体において上部と下部の透気係数に関して有意な差がないと判定された。

表-3 に示すように本実験で測定された透気係数の変動係数、特に SL12NC に関しては著者らがこれまで測定したものに比べて非常に小さくなっている。著者らの既往の研究では非アクティブセル型のダブルチャンバー透気試験機を用いて測定しており、図-4 に示すデータはアクティブセル型の透気試験機である。そこで、下縁から 640mm、1240mm および 1840mm の 3 箇所 2 種類の透気試験機で測定した透気係数を図-5 に示す。図の上側がアクティブセル型、下側が非アクティブセル型の透気試験機によるものである。また、表-4 は各供試体の 18 個のデータに関して求めた $\text{Log}(k_r)$ の平均値、透気係数、標準偏差および変動係数を示す。アクティブセル型透気試験機で測定した結果において、SCHFC は図-4 の中央と下部のバラツキが少ない位置でのデータなので、SL12NC お

表-4 透気係数

透気試験機	供試体	透気係数		標準偏差	変動係数 (%)
		平均値 $\text{Log}(k_r)$	k_r ($\times 10^{16} \text{m}^2$)		
アクティブセル型	SL12NC	-17.52	0.030	0.135	31.0
	HFCwC	-17.78	0.017	0.172	39.5
	SCHFC	-17.52	0.030	0.091	21.0
非アクティブセル型	SL12NC	-16.61	0.244	0.847	195.1
	HFCwC	-16.34	0.452	0.583	134.3
	SCHFC	-18.13	0.007	0.198	45.7

よび HFCwC と比べて均一性が高く、表-4 に示す変動係数も小さな値となっている。なお、各供試体の透気係数の平均値は表-3 に示す値とほぼ同じである。一方、非アクティブセル型の透気試験機で測定した透気係数に関して、SCHFC はアクティブセル型透気試験の結果と同様に、変動係数が最も小さく、透気係数の値はアクティブセル型透気試験の結果より小さくなっている。反対に、

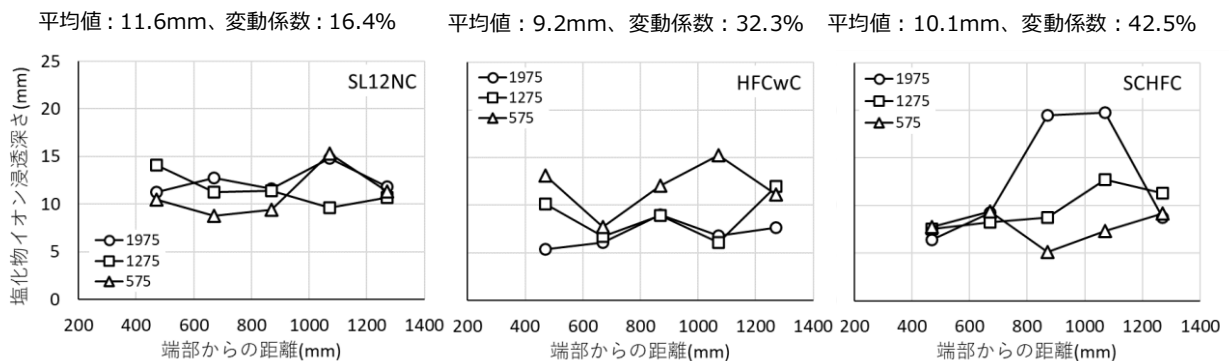


図-6 塩化物イオンの浸透深さ

SL12NC および HFCwC では、非アクティブセル型による透気係数の平均値と変動係数はアクティブセル型による透気係数の平均値および変動係数よりも大きな値となっている。さらに、図-5 に示す SL12NC において非アクティブセル型で測定された下縁から 640mm の下部の透気係数は上部および中央より小さくなっている。

以上のことから、透気係数の部材内での分布状況から、自己充填性を有する高流動コンクリートの均一性が高く、締固めを必要とする高流動コンクリートは自己充填性を有する高流動コンクリートに比べてその均一性がやや劣ると判断できる。

3.3 塩化物イオン浸透性

図-6 は塩水浸漬期間 3 カ月のコア供試体から測定した塩化物イオンの侵入深さを示す。15 か所の平均値と比較すると塩化物イオン浸透深さは SL12NC が最も大きな値となっているが、変動係数からでは最もバラツキが少ない。HFCwC と SCHFC を比較すると、HFCwC のほうが SCHFC より塩化物イオン浸透深さは小さく、変動係数も小さくなっている。ただ、SCHFC の下縁から 1975mm で、端部から 870mm と 1070mm で採取したコア供試体の塩化物イオンが、他の位置より深く浸透している。コア供試体の塩水浸透面および硝酸銀を噴霧した割裂面において、塩化物イオン浸透深さを大きくする欠陥などは観察されず原因は不明である。この 2 点を含めた SCHFC の塩化物イオン浸透深さおよび変動係数は HFCwC より大きくなっている。図-6 の結果からは自己充填性を有する高流動コンクリートは締固めを必要とする高流動コンクリートより塩化物イオンの浸透性の観点からは均一性が同等かやや劣ると考えられる。ただし、さらに塩水浸漬期間が長い結果を含めて検討する必要がある。

4. まとめ

本研究は実大寸法のボックスカルバートの側壁部材を用いて、自己充填性を有する高流動コンクリートおよび締固めを必要とする高流動コンクリートの硬化後の品質分布の均一性をテストハンマー強度、透気係数および塩化物イオン浸透性を用いて検討した。本研究の範囲で得られたことをまとめると以下のとおりである。

(1) テストハンマー強度において、自己充填性を有するおよび締固めを必要とする高流動コンクリート、どちらも平均値はほぼ同じであったが、変動係数は締固めを必要とする高流動コンクリートのほうが小さかった。さらに、高さ方向の各位置のテストハンマー強度でも自己充填性を有する高流動コンクリートのほうがバラついており、自己充填性を有する高流動コンクリートにおいても部材下部なるほどテストハ

ンマー強度が大きくなった。

- (2) 透気係数の部材内での分布状況において、自己充填性を有する高流動コンクリートは締固めを必要とする高流動コンクリートよりも変動係数が小さく、特に部材の下半分において、高い均一性を示した。締固めを必要とする高流動コンクリートは自己充填性を有する高流動コンクリートより透気係数のバラツキが大きい。
- (3) 自己充填性を有するおよび締固めを必要とする高流動コンクリートにおいて塩化物イオン浸透深さに大きな差はなかったが、その変動係数から締固めを必要とする高流動コンクリートは自己充填性を有する高流動コンクリートより均一性が同等かやや劣ると考えられる。

謝辞

ボックスカルバート側壁部材の作製および測定などでは元極東興和(株)河金甲様、データの計測および整理には愛媛大学工学部学部生の中川陽登君の協力を得ました。ここに謹んで謝意を表し、厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 桜井邦昭, 近松竜一: 中流動コンクリートの合理的な配合設計方法に関する一提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1225-1230, 2013.7
- 2) 締固めを必要とする高流動コンクリートの配合設計・施工技術研究小委員会: 締固めを必要とする高流動コンクリートの配合設計・施工技術研究委員会 (358 委員会)委員会報告書, 土木学会, コンクリート技術シリーズ No.123, 2020.5
- 3) 氏家勲, 河金甲, 河合慶有, 蔦川昌希: 自由落下高さが異なる締固めを必要とする高流動コンクリートの硬化後の品質に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.1, pp.808-813, 2021.7
- 4) 氏家勲, 河金甲, 河合慶有: 締固めを必要とする高流動コンクリートの実大寸法 PC 桁内での硬化後の品質について, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.784-789, 2022.7
- 5) 渡邊聡, 中根博, 川幡栄治, 河上浩司: 高強度コンクリートへのリバウンドハンマーの適用と強度推定式の提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1827-1832, 2004.7
- 6) 山川莉希, 氏家勲, 河合慶有, 山田純平: コンクリート面部材における透気係数の分布性状に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, pp.1510-1515, 2020