報告　生産性向上に資する安価な締固め不要コンクリートの実現に向けた一実験

松本　修治[*1]・橋本　学[*2]・柳井　修司[*3]・坂井　吾郎[*4]

要旨：コンクリート躯体工の生産性向上における方策として高流動コンクリートの適用が考えられるが，特殊な材料を使用するなどの理由からコストが大幅に高くなるといった課題がある。筆者らは，レディーミクストコンクリート工場において一般的に使用される材料だけを用いて自己充填性を高め，締固めを不要とすることができ，可能な限り低コスト化を図ったコンクリートの実現性について検討を行った。一般的な RC 構造物の壁を模擬した打込み実験を行った結果，従来の高流動コンクリートよりも流動性を小さくし，打込み位置の間隔を 3.0m 程度以下に制限することで，実現の可能性があることを確認した。

キーワード：締固め不要コンクリート，充填性，圧縮強度，静弾性係数，粗骨材面積率，高流動コンクリート

1. はじめに

近年，建設現場の労働人口の減少や熟練技能者の不足等から，建設施工の合理化，省人化とそれらによる生産性の向上が求められている。特に，コンクリート躯体工は，技能者の手作業によって施工される部分が多く，一度に大勢の技能者を必要とするため，省人化技術が強く望まれている。国交省では，i-Construction[1)] の取組みの一環として，流動性の高いコンクリートの積極的な活用を挙げている。また，生産性向上に寄与するレディーミクストコンクリートとしてスランプフロー45 cm，50 cm，55 cm，および 60 cm の種類が JIS A 5308 への導入の検討が進められているなど，流動性が高く施工性に優れるコンクリートの普及が推し進められている。省人化技術としては，従来からハイパフォーマンスコンクリート[2)] やフローイングコンクリート[3)] などが検討・実用化されており，締固めを不要とする高流動コンクリートの適用が最適だと考えられる。しかし，高流動コンクリートは，増粘剤や石灰石微粉末などの特殊な材料の使用や製造設備の占有が必要であること等からコストが大幅に高くなっているのが実情である。そのため，これまでは，高密度な配筋箇所や締固め作業が困難な狭隘部などの特殊な施工条件に限定されており，土木学会「コンクリート標準示方書[施工編][4)]」の施工標準で示される一般的な RC 構造物への省人化・省力化を目的とした普及・展開はほとんど実現していない。

この課題を解決するために，筆者らは，一般的な RC 構造物を対象として，市中のレディーミクストコンクリート工場所有の材料だけを用い，少ない単位セメント量で，安価に締固め不要を実現するコンクリート（以下，締固め不要コンクリートと称す）の検討を行っている。

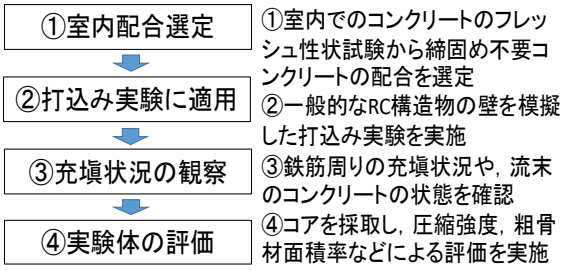
本稿では，締固め不要コンクリートの実現性を検討するために，一般的な RC 構造物の壁を模擬した打込み実験を実施し，実験体を評価した結果について報告する。

2. 締固め不要コンクリートのコンセプト

締固め不要コンクリートの検討にあたっては，一般的な鋼材量の RC 構造物を対象とし，打込み位置の間隔を 3.0m 程度以下に制限することを施工条件の前提とするものとした。これにより，必要となるコンクリートの流動性を抑えるとともに，一般的な高流動コンクリートのような高い材料分離抵抗性を不要にできる。つまり，高性能 AE 減水剤の添加量や単位セメント量を減らすことが可能となり，石灰石微粉末などの特殊な材料の使用や製造設備の占有をなくして市中のレディーミクストコンクリート工場所有の材料だけで製造することができるため，大幅な低コスト化が期待できる。

3. 検討概要

図－1 に検討フローを示す。まず，前述のコンセプトに従って室内で配合を選定し，次に一般的な RC 構造物



図－1　検討フロー

*1 鹿島建設株式会社　技術研究所　土木材料グループ　学士（工学）　研究員　(正会員)
*2 鹿島建設株式会社　技術研究所　土木材料グループ　修士（工学）　主任研究員　(正会員)
*3 鹿島建設株式会社　土木管理本部　土木技術部　修士（工学）　担当部長　(正会員)
*4 鹿島建設株式会社　技術研究所　土木材料グループ長　博士（工学）　(正会員)

の壁を模擬した打込み実験を実施した。コンクリートの充填状況の目視観察や製作した実験体からコアを採取し，各種試験等により評価を行った。

4. 室内配合検討

4.1 検討水準

本検討においては，単位水量と単位セメント量を一定として単位粗骨材絶対容積を調整し，締固めを不要とする流動性と充填性を両立させることとした。また，一般的なRC構造物の鋼材量は100～350 kg/m^{3}程度であるため，自己充填性は土木学会「高流動コンクリートの配合設計・施工指針[5)]」（以下，指針と称す）における自己充填性ランク2とした。

使用材料を**表－1**に示す。骨材には，一般に単位セメント量の少ないコンクリートのフレッシュ性状を改善する[6)] 微粒分を多く含む石灰砕砂と石灰砕石を用いた。

コンクリートの配合を**表－2**に示す。室内配合検討では，同じ材料を用いたスランプ8cmの配合を参考に，単位水量 165 kg/m^3，単位セメント量 300 kg/m^{3}として，単位粗骨材絶対容積（以下，Gvolと記す）だけを変えモルタル容積中の細骨材の容積比[2)]（以下，Vs/Vmと記す）にも着目した3種類の配合で試し練りを行った。その際のスランプフローの形状，U形充填試験における充填状況，およびV漏斗試験における流下状況を比較して，適切だと思われるGvolを選定し，打込み実験で用いる締固め不要コンクリートの配合を決定した。なお，配合設計におけるスランプフローの設定は，50±5cmとし，空気量は，4.5±1.5%の管理とした。水セメント比は，一般的な水密性が期待できる55%とした。混和剤には，増粘成分を含まない一般的なポリカルボン酸系化合物の高性能AE減水剤を用いた。

4.2 試験概要

コンクリートの練混ぜは，公称容量 60L の二軸強制練りミキサを使用し，練混ぜ量は，1 バッチあたり 50L とし，粗骨材，細骨材，セメントを投入後 15 秒間の空練りした後，混和剤を混入した水を投入して，90 秒間練り混ぜた。その後，5 分間静置し，60 秒間練り混ぜた。練上がり後，直ちに**表－3** に示す試験を実施し，性状を評価した。なお，U 形充填試験は，充填障害 R2 で実施した。

4.3 試験結果と選定配合

表－4 に試験結果一覧, **写真－1** に G350 のスランプフローおよびU形充填試験結果を示す。スランプフローは，すべての試験結果において，目標値を満足した。空気量は目標値に対して小さく，1.5～2.8%の範囲であった。

図－2 に Gvol と U 形充填高さの関係を示す。G310,

表－1　使用材料

材料名	記号	適　用
水	W	上水道水
セメント	C	高炉セメント B 種 密度:3.04g/cm^3
細骨材 S1:S2=52:48 混合後の 粗粒率 2.59	S1	山砂　千葉県富津市産 表乾密度:2.62 g/cm^3,粗粒率:1.52
	S2	石灰砕砂　高知県吾川郡産 表乾密度:2.66 g/cm^3,粗粒率:3.75
粗骨材	G	石灰砕石 2005　高知県吾川郡産 表乾密度:2.69 g/cm^3,粗粒率:6.58 実積率:62.9%
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤（標準形（主成分:ポリカルボン酸系化合物）

表－2　コンクリートの配合

名称	目標スランプフロー(cm)	空気量(%)	W/C (%)	Vs/Vm (%)	Gvol (L/m^3)	単位量:(kg/m^3)					SP (C*%)
						W	C	S1	S2	G	
G310	50±5	4.5±1.5	55.0	59.1	310	165	300	519	487	834	0.75
G350			55.0	56.4	350	165	300	464	500	942	0.80
G370			55.0	54.9	370	165	300	438	410	995	0.70

表－3　試験項目

試験項目	試験方法
スランプフロー	JIS A 1150 「コンクリートのスランプフロー試験方法」に準拠
U形充填	JSCE-F 511 「高流動コンクリートの充填試験方法(案)」に準拠(ランク2)
V漏斗	JSCE-F 512 「高流動コンクリートの漏斗を用いた流下試験方法(案)」に準拠(ランク2)
練上がり温度	デジタル温度計
空気量	JIS A 1128 「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法－空気室圧力法」

表－4　試験結果一覧

名称	スランプフロー(cm)		空気量(%)	V 漏斗流下時間(秒)	U 形充填性	
	平均	停止(秒)			高さ(mm)	停止(秒)
G310	50.0	5.0	2.8	3.0	285	5.7
G350	49.5	8.9	1.5	7.0	301	6.5
G370	48.5	6.8	2.5	17.0	221	6.3

G350 および G370 におけるそれぞれの U 形充填高さは，285mm，301mm および 221mm であり，G350 が最も高い値を示した。また，**写真－1** に示すように目視での状態も良好であった。

図－3 に Gvol と V 漏斗流下時間の関係を示す。G310，G350 および G370 におけるそれぞれの V 漏斗流下時間は，3.0 秒，7.0 秒および 17.0 秒であった。G350 のみが，指針で目標値の目安とされる 7～13 秒内であった。

G370 は，粗骨材同士の干渉により充填性と間隙通過性が劣ったことから U 形充填高さが低く，V 漏斗流下時間が長くなったものと判断された。一方，G310 は，粗骨材の干渉は少ないものの，ペースト容積に対する細骨材容積が増加し，細骨材の干渉の影響が出ることで，U 形充填高さは G350 に比べ若干低くなったと考えられた。これらの結果から，打込み実験では，G350 の配合を用いることとした。

5. 打込み実験

5.1 実験概要

本実験では，一般的な RC 構造物の壁を模擬した型枠を製作し，室内配合検討で決定した配合である G350 のコンクリートを打ち込んだ。

(1) 実験ケース

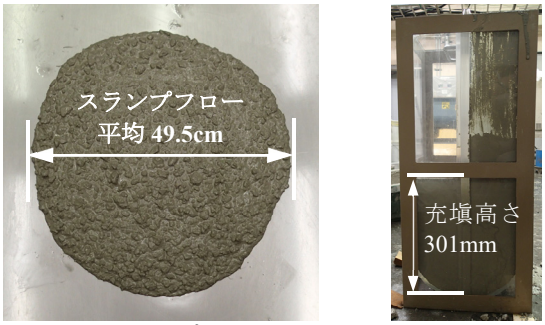
表－5 に実験ケースを示す。一般的な普通コンクリートとしてスランプ 8cm の配合を，締固め不要コンクリートとして G350 の配合を，それぞれ適用した。普通コンクリート（SL8）の目標スランプは 8±2.5cm とし，締固め不要コンクリートの目標スランプフローは，室内検討と同じく 50±5cm のもの（SLF50）と高性能 AE 減水剤の量を増やした 55±5cm（SLF55）の 2 種類とし，空気量は，4.5±1.5%の管理とした。た。構造条件である鉄筋のあきは，SL8/125 では 125mm とし，SLF50/100 と SLF55/100 では，あえて厳しい条件として 100mm とした。なお，コンクリートの使用材料は，**表－1** に示す室内配合検討と同じのものを使用した。

(2) 実験体

写真－2 に実験体の例を示す。一般的な RC 構造物の壁を模擬した実験体の寸法は，幅を 0.8m，打込み位置の間隔を 3m 程度以内に制限することを前提としたことから延長を 3m，高さは，1 層 0.45m の 2 層打ちを想定して 0.9m とした。また，配筋は，鉄筋のあきを 125mm と 100mm とするために，主筋となる D25 の異形鉄筋を，それぞれ 150mm および 125mm の間隔で配置し，D16 の配力筋を，300mm 間隔で配置した。

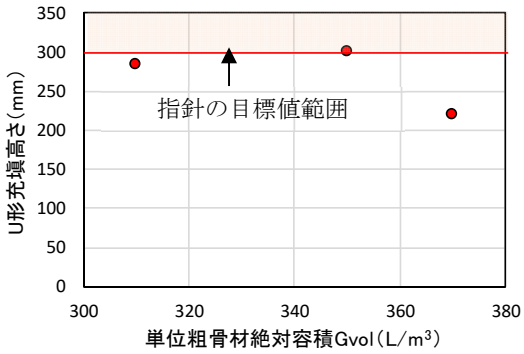
(3) 打込み・締固め

コンクリートの打込みは，実験体の中心（端から 1.5m 位置）で固定して行い，1 層の高さを 0.45m として 2 層

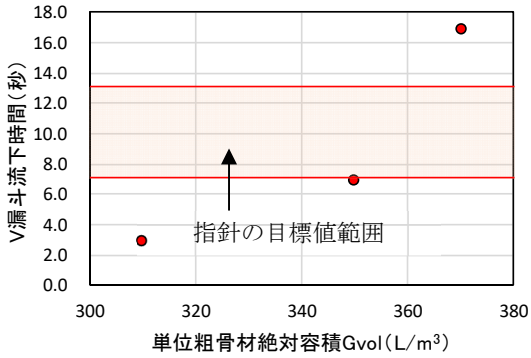


a）スランプフロー　　b）U 形充填性試験

写真－1　G350 スランプフローと U 形充填試験結果



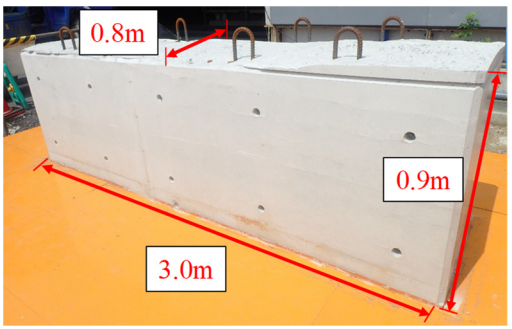
図－2　Gvol と U 形充填高さの関係



図－3　Gvol と V 漏斗流下時間の関係

表－5　実験ケース

名称	W (kg/m³)	C (kg/m³)	Gvol (L/m³)	スランプフロー (cm)	鉄筋あき (mm)
SL8/125	150	300	409	8±2.5	125
SLF50/100	165		350	50±5	100
SLF55/100	165			55±5	100



写真－2　実験体の例

に分けて打ち込んだ。1 層目と 2 層目の打重ね時間間隔は，実際の施工を想定して，30 分程度とした。打込みには，ピストン式コンクリートポンプ車のブームを使用し，30m³/h の速さで圧送した。SL8/125 は，φ50mm の内部振動機 3 本で入念に締固めを行い，SLF50/100 と SLF55/100 は，締固めを一切行わなかった。なお，最終の打上り天端面においては，なるべく平坦になるように打込み位置（筒先）を移動させた。

5.2 測定項目

表－6 に打込み実験の測定項目を示す。フレッシュコンクリートの性状試験は，実験体に打ち込む直前のポンプ車の筒先から採取した試料で実施した。また，1 層打込み完了ごとに流動勾配の測定を行った。

図－4 に，評価対象としたコアの採取位置および部位を示す。硬化コンクリートにおいては，φ100mm のコアを削孔し，粗骨材面積率，圧縮強度，静弾性係数および単位容積質量を測定した。コア採取位置は，各層 0.45m の中間となる高さ 0.225m の位置とした。粗骨材面積率は，採取したコアのかぶり部となる長さ 100mm と，壁の中央部として長さ 200mm に切断し，各層の平均値で評価を行った。粗骨材面積率は，採取したコアに透明シートを巻き付けて寸法 5mm 以上の骨材を黒色に塗り潰すようにスケッチし，そのシートを画像としてスキャンして二値化することで算出した。なお，圧縮強度，静弾性係数および単位容積質量はかぶり部を含まない中央部で採取したコアとφ100 の管理用供試体で材齢 6 か月程度にて測定した。

5.3 実験結果および考察

(1) フレッシュコンクリート

表－7 にフレッシュコンクリートの試験結果を示す。打込み時におけるコンクリートポンプ車の筒先でのスランプ，スランプフローおよび空気量は，目標値を満足する結果となった。

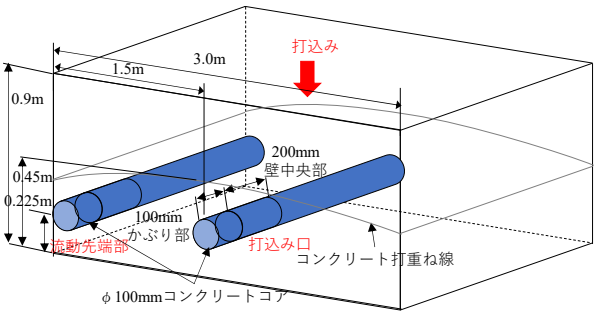
(2) 実験状況

写真－3 に打込み実験の状況，**写真－4，5，6** にそれぞれ SL8/125, SLF50/100 および SLF55/100 のケースにおけるコンクリートの打込みと充填状況を示す。SL8/125 は，打込み口においては，コンクリートが塊となって積み上がるような状況となり，実験体の隅角部においては，締固めをしなければ充填されない状況であった。これに対し，SLF50/100 と SLF55/100 は，いずれも粗骨材が沈降することなく流動先端部まで運ばれる様子や，締固めを行わなくても壁の中央部から鉄筋のあきを通過して粗骨材を運びながら，かぶり部に充填されていく様子が確認できた。

図－5 に SLF50/100 と SLF55/100 の流動勾配を示す。SLF55/100 と比べ，SLF50/100 の方が流動性が低いため，

表－6　打込み実験の測定項目

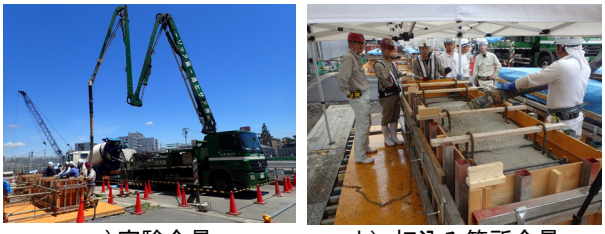
測定項目		試験方法・測定方法
フレッシュ時	流動性	JIS A 1101 スランプ試験
		JIS A 1150 スランプフロー試験
	空気量	JIS A 1128 空気量の圧力による試験
	温度	温度計による測定
	流動勾配	延長方向 1m間隔でスケールにより測定
硬化後	圧縮強度	JIS A 1108 圧縮強度試験
	静弾性係数	JIS A 1149 静弾性係数試験
	骨材分布	実験体から採取したコアの側面をスケッチすることによる粗骨材面積率
	単位容積質量	実験体から採取したコアの気中質量から水中質量を差し引いて算出



図－4　評価対象となるコアの採取位置および部位

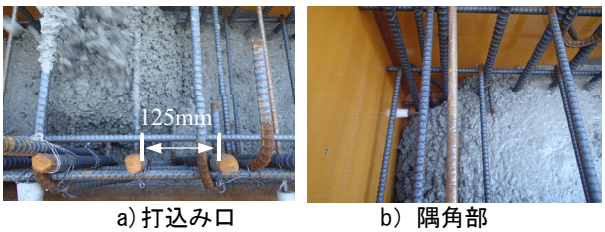
表－7　フレッシュコンクリートの性状試験結果

名称	スランプフロー (cm)	空気量(%)	コンクリート温度(℃)
SL8/125	(9.5)	3.2	26.0
SLF50/100	50.7×47.3	4.5	25.0
SLF55/100	55.5×53.2	3.0	27.0



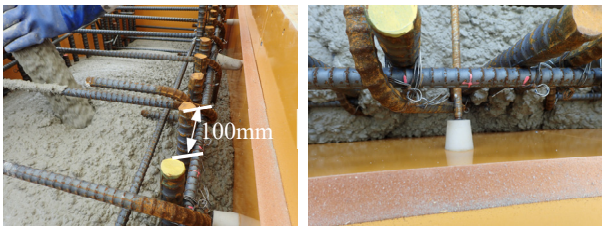
a) 実験全景　　b) 打込み箇所全景

写真－3　打設実験の状況



a) 打込み口　　b) 隅角部

写真－4　SL8/125 打込みと充填状況



a) 打込み口　　b) かぶり部

若干ではあるが流動勾配が大きくなった。しかし，流動距離 1.5m 程度では，どちらの流動勾配も比較的小さい結果であった。

(3) 脱型後の仕上がり

写真－7，8，9 にそれぞれ SL8/125，SLF50/100 および SLF55/100 の脱型後の実験体を示す。表層の目視観察では，SLF50/100 と SLF55/100 のいずれも型枠の隅々までコンクリートが充填されており，表面気泡や打重ね線が目立たない仕上がりであった。ただし，打上り天端面においては，SLF50/100，SLF55/100 ともに，締固めを行った SL8/125 よりも勾配や凹凸が大きい結果であり，実用時には，こてによる均しや押さえが必要になるものと考えられた。

(4) 粗骨材面積率

図－6 に SL8/125 の粗骨材面積率を示す。一般的な普通コンクリートであるスランプ 8cm を入念に締め固めた SL8/125 は，流動先端部における壁の中央部とかぶり部の粗骨材面積率の差がほとんどなく，1.5m程度の横移動や，鉄筋のあき（125mm）を通過する際の材料分離が生じることなく，ほぼ均質な状態であることが確認された。

図－7 に SLF50/100 と SLF55/100 の壁の中央部およびかぶり部の粗骨材面積率の比較を示す。SLF50/100 の粗骨材面積率は，流動先端部において壁の中央部よりかぶり部が 2.4%高い結果であった。同様に，SLF55/100 の粗骨材面積率も，流動先端部において壁の中央部よりかぶり部が 1.7%高い結果であった。これは，それぞれのコンクリートが持つ流動性によって運ばれてきた粗骨材が，流動先端部においても，分離することなく鉄筋のあき（100mm）を通過していることを示していると判断された。また，粗骨材面積率は，打込み口と流動先端部においても最大で 5%以内に収まり，均一な粗骨材分布であることから，材料分離することなく打ち込めたものと考えられた。

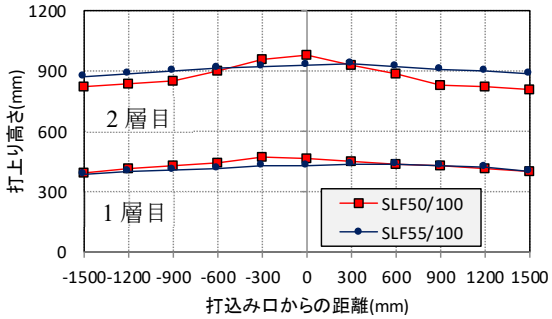
(5) 圧縮強度，静弾性係数および単位容積質量

図－8 に SL8/125 の壁の中央部における圧縮強度および静弾性係数を示す。打込み口に比べ流動先端部は，圧縮強度は 0.7N/mm^2，静弾性係数は 0.7kN/mm^2 低下しているが，有意な差ではないと判断された。**図－9** に SLF50/100 と SLF55/100 の壁の中央部における圧縮強度および静弾性係数を示す。圧縮強度および静弾性係数に大きなばらつきはなく，材料分離することなく，均一に打ち込めたものと考えられた。なお，**表－8** に示す管理用供試体とコアの試験結果に大差がないことから，実験体は締め固められた状態と同等であると考えられた。

表－9 に単位容積質量の算出結果を示す。どのケースも打込み口に対して流動先端部で若干の減少が認められ，その程度は，流動性が高いものほど大きくなる傾向を示

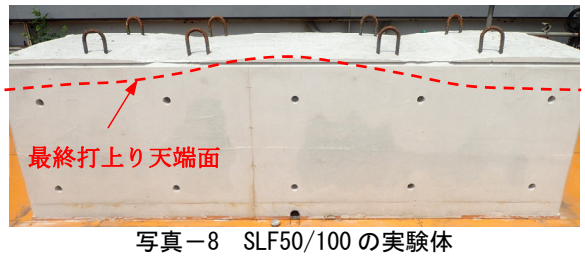
a) 打込み口　　b) かぶり部

写真－6　SLF55/100 打込みと充填状況



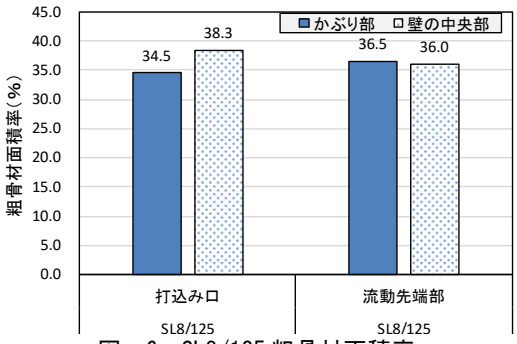
図－5　流動勾配の測定結果

写真－7　SL8/125 の実験体

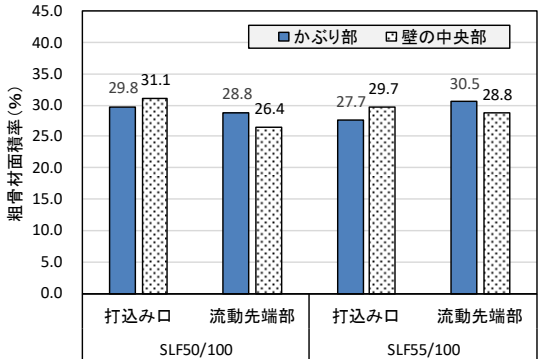


写真－8　SLF50/100 の実験体

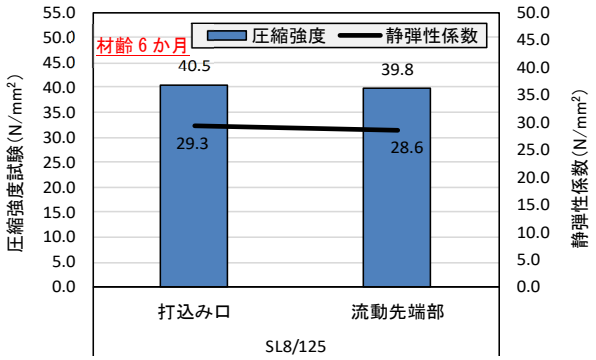
写真－9　SLF55/100 の実験体



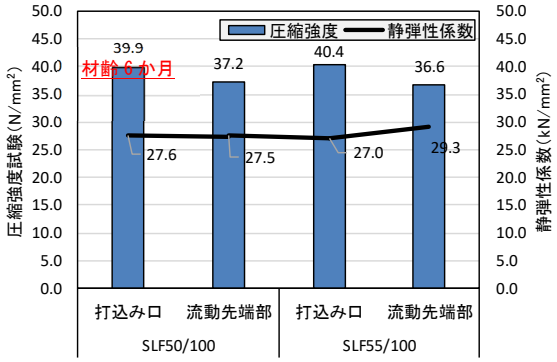
図－6　SL8/125 粗骨材面積率



図－7　SLF50/100 と SLF55/100 の粗骨材面積率比較



図－8　SL8/125 の圧縮強度と静弾性係数



図－9　SLF50/100，SLF55/100 圧縮強度と静弾性係数

表－8　管理用供試体の圧縮強度および静弾性係数

名称	圧縮強度 (N/m²)	静弾性係数 (kN/m²)
SL8/125	33.3	29.1
SLF50/100	37.3	27.9
SLF55/100	38.2	27.9

表－9　単位容積質量の算出結果

名称	単位容積質量（kg/m³）			
	理論	打込み口	流動先端部	供試体
SL8/125	2,335	2,396	2,380	2,400
SLF50/100	2,308	2,362	2,328	2,376
SLF55/100		2,392	2,346	2,382

した。ただし，コアの単位容積質量は，理論値より大きい値を示しており，コンクリート中の余分な空隙は残っていないものと考えられた。また，管理用供試体の値と比較しても大差ないことが確認できた。

以上の結果から，今回の検討範囲内ではあるが，特殊な材料を用いず，単位セメント量 300kg/m³ であっても，配合を適切に選定し，流動距離を制限することで，締固めを行うことなく従来工法と同等の充填性と均質性が得られるものと判断された。

6. まとめ

一般的な RC 構造物において，打込み位置の間隔となる流動距離を制限することにより，安価な締固め不要コンクリートを実現できるか否かについて実験を行った。単位セメント量 300kg/m³，スランプフロー50～55cm，鉄筋のあき 100mm，打込み位置の間隔 3m という本実験の条件において得られた知見を以下に示す。

(1) 打込み状況の目視観察では，粗骨材が分離することなく流動先端部まで運ばれ，かぶり部分や型枠の隅々までまで良好に充填する状況を確認できた。

(2) コンクリートの打上り天端面においては，完全に平坦にならず，均しや押さえが必要であった。

(3) 脱型面の仕上がりは，表面気泡や打重ね線が目立たなかった。

(4) 粗骨材面積率，圧縮強度，静弾性係数および単位容積質量は，打込み位置と流動先端部，鉄筋の内外で大差はなく，全体的に均質な状態であった。

今後，締固め不要コンクリートは，打込みの自動化や無人化の実現に向けて欠かせない技術になると考える。今回の検討で得られた知見を踏まえ，安価で汎用的な締固め不要コンクリートを実現すべく，鋭意検討を進めていく次第である。

参考文献

1) 堂山　修治，竹下　正一，堤　英彰，城澤　道正：i-Construction(建設現場の生産性革命)の推進と建設現場の安全性の向上に向けて，土木学会論文集 F6（安全問題），Vol.73，No.2，I_1-I_6，2017.

2) 岡村　甫，前川　宏一，小澤　一雅：自己充填性ハイパフォーマンスコンクリートの開発，土木学会論文集 No.522/VI-28，23-26，1995.9.

3) 平石　信也，笠井　芳夫，飛内　圭之，長田　浩治：フローイングコンクリートの調合・流動性・強度・耐久性に関する実験研究，日本建築学会構造系論文集，第 467 号，9-18，1995.1.

4) 2012 年制定コンクリート標準示方書［施工編］，土木学会，2012.3.

5) 2012 年版高流動コンクリートの配合設計・施工指針，土木学会，2012.6.

6) 大西　利勝，井上　正一，黒田　保：微粒分が多い石灰石骨材を用いたコンクリートの配合と物性，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，2011