

施工性および品質を改善したコンクリートの開発と適用

都 築 正 則 神 代 泰 道
酒 井 正 樹

Development and Application of Concrete for Improved Workability and Quality

Masanori Tsuzuki Yasumichi Koshiro
Masaki Sakai

Abstract

Flowing concrete having fluidity and material separation resistance was applied to the construction of a new laboratory at our technical research institute for improved workability, and low drying shrinkage concrete using an expansive additive and reducing shrinkage agent was applied for improved quality. Compared with concrete having a slump of 21 cm, the highly fluid concrete reduced the unit cement content, and the slump loss from the mixing time was small. Moreover, the concrete filled the spaces between the rebars of a heavily reinforced structural member without material separation. For the low drying shrinkage concrete, the drying shrinkage strain was $200\sim 250 \times 10^{-6}$ when the amount of expansion was considered. It prevented cracking of the structural slab.

概 要

躯体の施工性および品質改善を目的に、増粘成分を有する流動化剤を用いた流動化コンクリート、および膨張材と収縮低減剤を用いた低収縮コンクリートを、技術研究所の新実験棟建設に適用した。流動化コンクリートはスランプ21cmのコンクリートと比較して、単位セメント量を低減することが可能であり、練混ぜからのスランプの保持性能は良好であった。実部材では、過密配筋部においてもコンクリートは材料分離を起こすことなく、鉄筋間に充填された。低収縮コンクリートにおいては、拘束膨張量と乾燥収縮ひずみを合わせた収縮ひずみの値が約 $200\sim 250 \times 10^{-6}$ と小さい値であり、構造スラブに適用した結果、ひび割れを防止することが出来た。

1. はじめに

近年、建築物の耐震性向上に伴い、過密配筋となる部材が増加傾向にある。このため、コンクリート工事においては、締め固めが困難になる等、施工上問題となる場合がある。これら施工性を改善する目的として、流動化コンクリートの使用が挙げられる。従来の流動化コンクリートは、材料分離の懸念から「JASS5 (2009) 15節 流動化コンクリート」においては、スランプ増大量は 10cm 程度以下が望ましいとしている。そこで増粘成分を有する流動化剤¹⁾を用いて、従来の流動化コンクリートに比べスランプの増大量を 10cm 以上大きくしても材料分離を生じない高性能な流動化コンクリートを開発し、実構造物に適用した。

また、コンクリートの品質の一つの目安として、ひび割れの有無が挙げられる。特に床スラブ等の薄い部材においては、乾燥収縮によるひび割れが発生しやすく、不具合となる場合が多い。乾燥収縮に起因するひび割れ対策として、コンクリートの材料面では、石灰石砕石、膨張材および収縮低減剤の使用により、コンクリートの乾燥収縮ひずみ自体を小さくすること²⁾が挙げられる。そこでこれら材料を組み合わせた低収縮コンクリートを実構造物に適用した。

本報告では、躯体の施工性を目的に開発した「流動化コンクリート」とおよび品質向上を目的とした「低収縮コンクリート」の基礎性状を紹介し、実構造物への適用事例を述べる。

2. 各種コンクリート性状の確認

2.1 流動化コンクリートの実機試験

2.1.1 試験概要 ここでは、実機試験練りによって、高性能 AE 減水剤を使用したスランプ21cmのコンクリートの性状と、AE 減水剤を使用したスランプ8cmのベースコンクリートに流動化剤を添加することでスランプ21cmとした流動化コンクリートの性状を比較した。

コンクリートは呼び強度27で高性能 AE 減水剤を用いたスランプ21cm(目標値: 21 ± 2 cm)のコンクリート(以下、SL21)、同じ呼び強度の AE 減水剤を用いたスランプ8cm(目標値: 8 ± 2.5 cm)のベースコンクリートに、増粘成分を有する流動化剤を用いてスランプ21cm(目標値: 21 ± 2 cm)にしたコンクリート(以下、FL21)の2種類とした。コンクリートはレディーミクストコンクリート工場で製造し、トラックアジテータで現場へ運搬した。試験は7月に実施した。

調査表を Table 1に示す。使用セメント(C)は中庸熟が

Table 1 流動化コンクリートの調査
Mixture Proportion of Flowing Concrete

記号	W/C (%)	スランブ (cm)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
				W	C	S	G	AE	SP
SL21	51	21	50.7	175	344	897	896	-	1.05
FL21	50	8→21	49.8	165	330	899	932	1.1	-

※FL21における流動化剤の添加率:C×0.89%

ルトランドセメントとし、細骨材(S)および粗骨材(G)は、レディーミクストコンクリート工場が常備しているものとした。AE 減水剤(AE)および高性能 AE 減水剤(SP)は遅延型のものとした。FL21のベースコンクリートの単位粗骨材かさ容積はスランブ18cm 相当の575L/m³とした。FL21は SL21に比べ単位セメント量を14kg/m³低減し、単位水量を10kg/m³低減した調合とした。目標空気量は4.5±1.5%とした。

2.1.2 試験項目 SL21については、練混ぜから30～120分、FL21については、ベースコンクリートの荷卸し後、流動化直後および流動化から30～90分後のフレッシュ性状を確認した。また、コンクリートの各種品質を確認するため、圧縮強度(JIS A 1108)、静弾性係数(JIS A 1149)、凝結試験(JIS A 1147)、ブリーディング試験(JIS A 1123)を行った。

2.1.3 試験結果 荷卸し時および流動化後のコンクリートの試験結果を Table 2に示す。スランブおよび空気量はいずれも許容値以内を示した。圧縮強度および静弾性係数は、コンクリートによらず概ね同等であり、流動化による影響はないと判断できた。圧縮強度は全てのコンクリートで呼び強度を満足する結果となった。

スランブの経時変化を Fig. 1に示す。荷卸し時のコンクリート温度は28℃であったが、経時に伴い上昇し、練混ぜ時間から140分で33℃まで上昇した。SL21は現場到着から60分後にスランブが16cm まで低下した。FL21のスランブは、流動化してから60分後で20cm、90分後で15cm となった。この90分後とは練混ぜから140分後であり、SL21よりも練混ぜからのスランブの保持が良好である。試験的に、スランブが15cm となってから流動化剤をC×0.3%再添加すると、流動性が回復した。

各種コンクリートのブリーディング試験結果を Fig. 2、凝結試験結果を Fig. 3に示す。流動化後の FL21の方が、SL21や FL21のベースコンクリートよりもブリーディング量は小さくなった。また、凝結試験では、FL21のベースコンクリートが最も早く、流動化後では約90分程度遅くなった。SL21と流動化後の FL21を比較すると凝結時間はほぼ同じであった。当該流動化剤による材料分離や凝結遅延は確認できなかった。

2.2 低収縮コンクリートの実機試験

ここでは、粗骨材に石灰石砕石を使用し、膨張材および収縮低減剤を組み合わせた低収縮コンクリートの性状について実機試験練りにより確認した。

Table 2 コンクリート基礎性状
Basic Properties of Concrete

記号	種類	フレッシュ性状				硬化性状 ^{※2}	
		C.T. ^{※1} (°C)	スランブ (cm)	フロー (cm)	Air (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
SL21	—	28.0	21.5	39.0	4.8	35.1	28.3
FL21	ベース	28.0	8.5	22.5	4.5	36.7	28.2
	流動化	29.0	22.0	40.0	4.3	36.5	28.7

※1: C.T.=コンクリート温度

※2: 標準水中養生28日の値

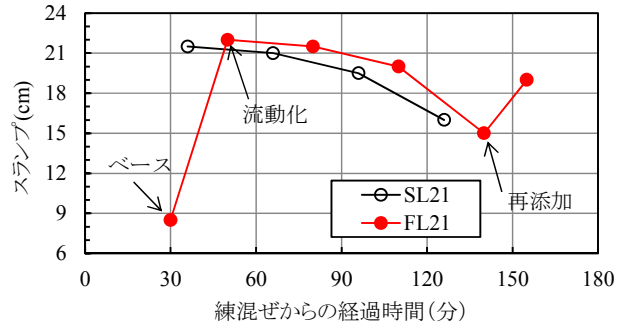


Fig. 1 スランブの経時変化
Change of Slump Value

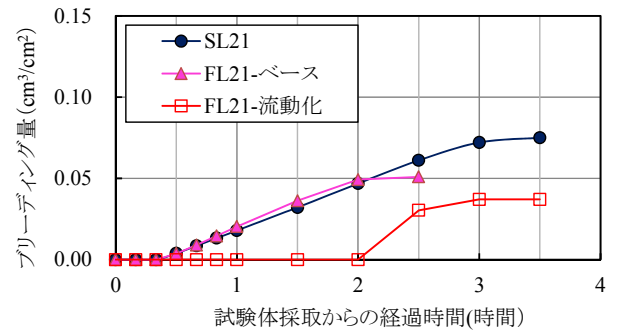


Fig. 2 ブリーディング試験結果
Result of Bleeding Test

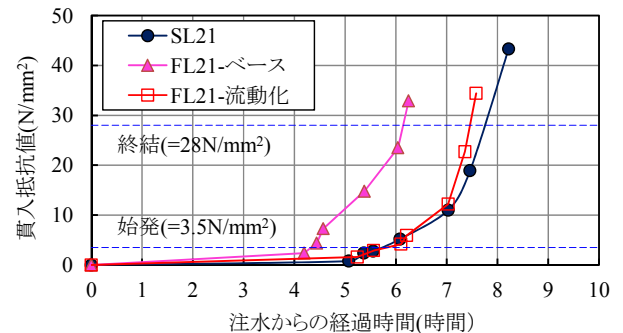


Fig. 3 凝結試験結果
Result of Setting Time Test

2.2.1 実験概要

調査を Table 3に示す。調査は膨張材を単独で25kg/m³使用したもの(以下、EX25)、膨張材20kg/m³と収縮低減剤6kg/m³を併用したもの(以下、EX20-SR6)の2種類とした。コンクリートは呼び強度が27のレディーミクストコンクリートとし、粗骨材(G)に石灰

Table 3 低収縮コンクリートの調合
Mixture Proportion of Low Drying Shrinkage Concrete

調合	W/B (%)	Air (%)	単位量(kg/m ³)							G
			W'		B		S			
			W	SR	C	EX	S1	S2	S3	
EX25	52	4.5	170	-	302	25	296	297	254	969
EX20-SR6			164	6	307	20	297	297	255	

AE減水剤標準使用量: B×1.2%

石砕石を使用している市中工場を選定した。膨張材(EX)は低添加型の石灰系膨張材、収縮低減剤(SR)は主成分がアルコール系のものでした。セメント(C)は普通ポルトランドセメントとした。フレッシュコンクリートの荷卸し時における目標値は、スランプ15±2.5cm、空気量4.5±1.5%とした。

2.2.2 試験項目 試験項目を Table 4に示す。試験項目はフレッシュ性状、圧縮強度、静弾性係数、割裂引張強度、長さ変化率、拘束膨張量および、ひび割れ抵抗性を確認するための拘束ひび割れ試験とした。長さ変化率試験体は、打込み翌日に脱型し、材齢7日まで標準水中養生を行った。その後20±2℃、R.H.60±5%の恒温恒湿室内で気中乾燥とした。

拘束ひび割れ試験体は、1調合につき3体とし、拘束されたコンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法(JIS A 1151)に準じて Fig. 4に示す形状の試験体を使用した。本試験では JIS 規定のものよりも拘束板の断面積を大きくし、ひび割れが発生しやすい条件とした。試験体は材齢7日まで封かん養生とし、以降は拘束板を残して型枠を脱型した。脱型後は上記の恒温恒湿室にて気中乾燥とした。拘束板のひずみは打込み直後から測定を開始し、ひずみの開放(急激に戻る挙動)をひび割れ発生と仮定し、その日時を発生日とした。

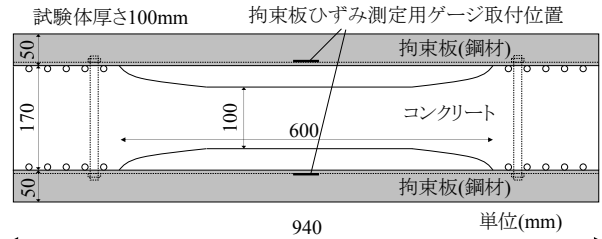
2.2.3 実験結果 フレッシュ性状を Table 5に示す。荷卸し時におけるコンクリート温度は26℃であった。出荷時と比較して、荷卸し時(経過時間30分程度)におけるスランプは3~4cm 低下し、空気量は0.2~1.3%低下したが、いずれも目標値を満足した。

標準水中養生28日における試験体の圧縮強度、静弾性係数、割裂引張強度を Table 6に示す。圧縮強度は35~38N/mm²で呼び強度を満足し、静弾性係数は30kN/mm²程度、割裂引張強度は2.6~3.2N/mm²であり、各調合の違いによる大きな差は見られなかった。

コンクリートの長さ変化測定方法(JIS A 1129)による乾燥期間182日(6ヶ月)の乾燥収縮ひずみは、EX25で450×10⁻⁶程度、EX20-SR6で400×10⁻⁶程度であった。また、膨張コンクリートの拘束膨張及び収縮試験方法(JIS A 6202-附属書2)における A 法(膨張だけを対象とした試験)の拘束膨張量(標準水中養生を行った試験体の材齢7日の膨張量)は250×10⁻⁶程度、EX20-SR6の拘束膨張量は200×10⁻⁶程度であり、膨張材の使用量が多いほど、膨張量が大きくなった。これら膨張量を加味した収縮ひずみを

Table 4 測定項目および方法
Measurement Item and Method

試験項目	試験方法	試験体寸法
フレッシュ性状	各JISによる	—
強度試験	圧縮	JIS A 1108 に準ずる
	静弾性係数	JIS A 1149 に準ずる
	割裂引張	JIS A 1113 に準ずる
長さ変化率試験	JIS A 1129-2 に準ずる	10×10×40cm
拘束膨張量	JIS A 6202の附属書2 A法	10×10×40cm
拘束ひび割れ試験	JIS A 1151 に準ずる	Fig. 9参照



拘束板: 溝形鋼H×B=100×50mm。鋼断面積=11.92cm²/1枚。

Fig. 4 拘束ひび割れ試験体
Schematic of Uni-Axial Restraint Specimen

Table 5 フレッシュ性状
Fresh Properties

調合	採取時期	出荷時			荷卸し時 ^{※2}		
		SL ^{※1} (cm)	Air (%)	C.T. (°C)	SL (cm)	Air (%)	C.T. (°C)
EX25	6月下旬	19.5	5.6	25	15.5	4.3	26
EX20-SR6	6月下旬	19.0	4.3	26	16.0	4.1	26

※1: SL=スランプ, Air=空気量, C.T.=コンクリート温度

※2: 現場はプラントから車で約30分の距離

Table 6 強度性状
Strength Properties

	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)
EX25	36.1	29.9	2.63
EX20-SR6	37.9	30.0	3.19

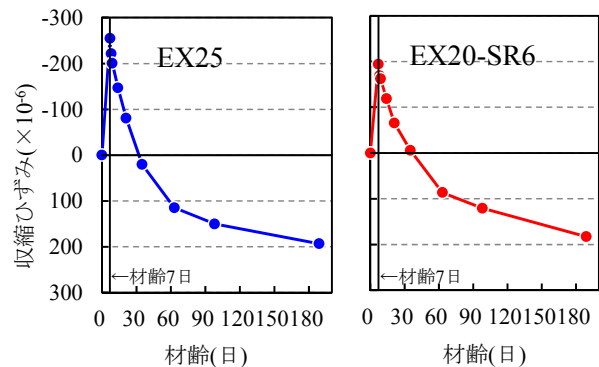


Fig. 5 膨張量を加味した収縮ひずみ
Shrinkage Strain Considered Amount of Expansion

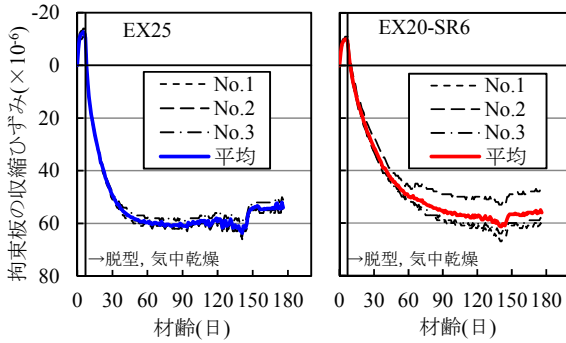


Fig. 6 拘束ひび割れ試験結果
Result of Uniaxial Restraint Test

Fig.5に示す。JIS A 6202による膨張量を加味すると、材齢189日における収縮ひずみは、EX25および EX20-SR6の両者とも 200×10^{-6} 程度となった。

拘束ひび割れ試験体における拘束板の収縮ひずみを Fig. 6 に示す。EX20-SR6 は EX25 に比べて収縮ひずみの進行が小さく、材齢 150 日まで徐々に進行していることが確認できた。材齢約 180 日において、両者の拘束板の収縮ひずみは 60×10^{-6} 程度となった。両者とも材齢 150 日程度で若干のひずみの挙動が確認されるが、これは試験室内の温度変化によるものであり、試験体の目視結果からも、ひび割れ発生でないことを確認している。これらのことより、ひび割れ抵抗性があるコンクリートであることが確認できた。

3. 実部材への適用

大林組技術研究所の新実験棟(Photo 1参照)において、流動化コンクリートおよび低収縮コンクリートを適用した。過密配筋のマスコンクリート部材である構造実験用耐圧盤には流動化コンクリートを適用し、梁および柱で拘束され乾燥収縮ひび割れが懸念される構造スラブには低収縮コンクリートを適用した。本章では、各コンクリートの適用結果を示す。

3.1 流動化コンクリート

3.1.1 適用部位 適用する耐圧盤は幅5m×長さ24m×高さ2mのスラブ状構造物である。配筋状況を Photo 2 に示す。配筋は上筋・下筋とも125mm 間隔の D32が3段に配置されており、非常に過密である。さらに上面には天端に露出するカップラーを定着するための1mのPC鋼棒が500mm 間隔に設置されている。打込みは高さ方向で2層(1層目800mm, 2層目1,200mm)に分割し、それぞれ品質管理データを収集した。

3.1.2 適用結果 コンクリートの運搬時間は平均で30分、現場到着してから流動化剤の添加までの所要時間は9~14分である。スランプ試験結果を Fig. 7に示す。ベースコンクリートのスランプは7~10.5cm(平均9.5cm)であったのに対して、流動化後のスランプは19~23cm(平均21cm)であった。なお、流動化剤の添加率は0.65~



Photo 1 建物の外観
Appearance of New Laboratory

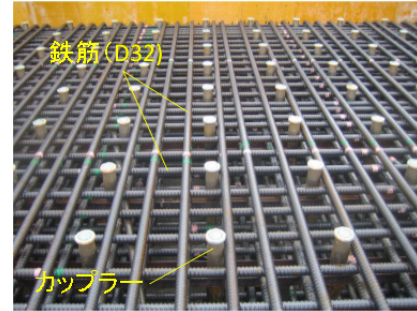


Photo 2 配筋状況
Arrangement of Reinforcement Bar

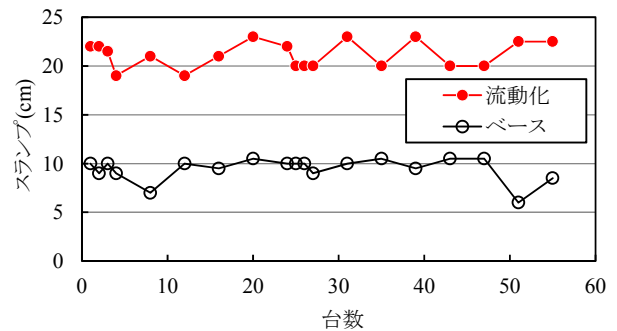


Fig. 7 スランプ試験結果
Results of Slump Test

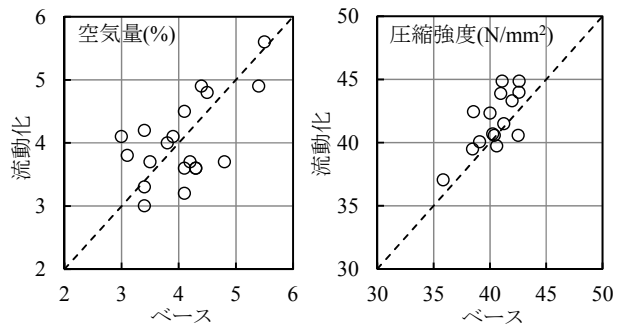


Fig. 8 流動化前後の空気量と圧縮強度
Air Contents and Compressive Strength before and after Adding Fluidity Agent

0.94%(平均0.75%)であった。

Fig. 8に流動化の前後の空気量と圧縮強度を示す。空気量において、流動化前後の平均値はそれぞれ、4.1%および4.0%となり、変化は認められなかった。圧縮強度については、流動化後の方が 1.3N/mm^2 程度高かった。

3.1.3 打込み状況 打込み状況を Photo 3に示す。打込み方法は、1層目はバケット、2層目はポンプ車を用いた。過密配筋部においてもコンクリートは材料分離を起こすことなく、回り込む様子が観察された。



Photo 3 流動化コンクリートの打込み状況
Placing of Flowing Concrete

3.2 低収縮コンクリート

3.2.1 適用部位におけるひび割れ本数の確認 実構造物への適用に先がけ、乾燥収縮ひずみの値を水準として、小柳らが提案した算定式²⁾を用いて、発生するひび割れ本数を検討した。この式は引張限界ひずみ(弾性ひずみ+クリープひずみ)を超えるとひび割れが発生するという仮定に基づいたモデルで、ひび割れ後の鉄筋とコンクリートの付着すべりを考慮し、材齢の経過と共に発生する複数本のひび割れを表現できる。解析対象とした床スラブの断面図を Fig. 9に示す。モデルは1スパンとし、長さ14.7m×幅7.45m×厚さ185mm のコンクリート平版が、4本の鉄骨梁で拘束されたものとした。入力値におけるコンクリートの収縮ひずみはスラブ厚を考慮し、Fig. 10に示すように建築学会の予測式²⁾により体積表面積比(以下、V/S)を変えた値とした。当該スラブはデッキスラブのため、1面からの乾燥(V/S=185mm)であるが、安全側を考慮し上下面2面乾燥(V/S=92.5mm)を想定した。スラブ厚を考慮したコンクリートの乾燥収縮ひずみの入力値を Table 7に示す。また、ひび割れ発生条件となるコンクリートの引張限界ひずみは文献³⁾の 200×10^{-6} よりも安全側を考慮し、今回は 150×10^{-6} とした。算定は6日ピッチとし、期間は1年程度とした。

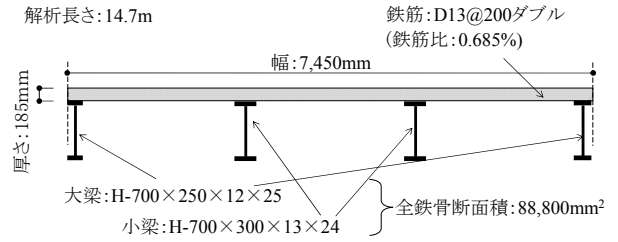


Fig. 9 スラブの断面形状
Cross-Section Shape of Slab

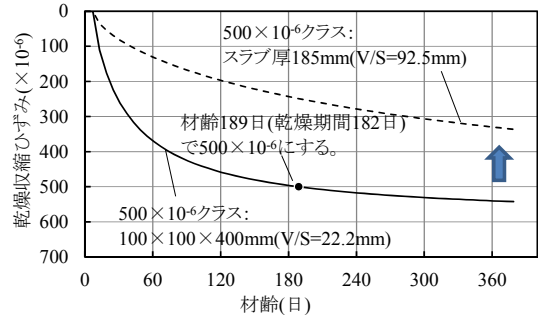


Fig. 10 スラブ厚を考慮した乾燥収縮ひずみの予測
Drying Shrinkage Strain According Slab Thickness

ひび割れ幅の経時変化を Fig. 11に示す。乾燥期間半年(約190日)ではひび割れは発生せず、乾燥期間1年(約380日)において0.2mm程度のひび割れが、 500×10^{-6} では5本、 450×10^{-6} では3本、および 400×10^{-6} では1本入る結果となり、 350×10^{-6} 以下はひび割れが発生しない結果となった。今回の算定方法によると、スラブのひび割れ防止には乾燥収縮ひずみ 350×10^{-6} 以下が望ましいと予想される。膨張材による拘束膨張量を加味すると、EX25およびEX20-SR6とも実機試験の結果では 350×10^{-6} をクリアしており、今回使用する低収縮コンクリートでは、材齢1年以内ではひび割れは発生しないことが予想された。

Table 7 算定式の入力値
Input Data for Analysis

10×10×40cm 試験体のひずみ (V/S=22.2mm)	算定式への入力値				コンクリートの 静弾性 係数	鋼材の 静弾性 係数
	スラブを模擬した ひずみ (V/S=92.5mm)	引張 限界 ひずみ				
(×10 ⁻⁶)	(×10 ⁻⁶)	(×10 ⁻⁶)			(KN/mm ²)	(KN/mm ²)
189日	189日	379日	150	28.3	200	
500	249	336				
450	224	303				
400	199	269				
350	174	235				
300	149	202				

3.2.2 適用部位 仕上げ材の種類によっては、コンクリートの乾燥収縮を低減することが知られている(例えば⁴⁾)。このため、主に樹脂系塗床材が施工され、仕上げ後の乾燥収縮の進行が小さいと予想される2F デッキスラブ(3.2節に述べた解析モデルのもの)には EX25を用い、EX20-SR6は、主に無機系塗床材が施工される1F 構造スラブ、および他のスラブより細長く、ひび割れ発生がより懸念されるブリッジ状の2F デッキスラブに使用した。施工は8月上旬から9月中旬に行った。

3.2.3 適用結果 フレッシュ性状を Table 8に示す。荷卸し時におけるコンクリート温度は31~33℃であった。出荷時と比較して、荷卸し時(経過時間30分程度)におけるスランプは2~3cm 低下し、空気量は0.7~0.9%低下し、

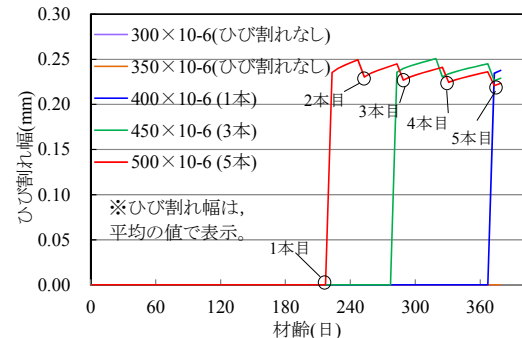


Fig. 11 ひび割れ幅の経時変化
Length Change of Crack Width

概ね実機試験と同程度であった。

標準水中養生28日における試験体の圧縮強度、静弾性係数、割裂引張強度を Table 9に示す。圧縮強度は35～36N/mm²で呼び強度を満足した。また、静弾性係数は30kN/mm²程度、割裂引張強度は2.9～3.2N/mm²であり、実機試験同様、各調合の違いによる大きな差は見られなかった。

膨張材による膨張量の影響を確認するために、実機試験同様、JIS A 6202 の拘束膨張量を加味した収縮ひずみを Fig.12 に示す。実機試験同様、EX25 の膨張量は 250 × 10⁻⁶ 程度、EX20-SR6 の膨張量は 200 × 10⁻⁶ 程度となった。膨張量を加味すると、材齢 189 日における収縮ひずみは、EX25 で 200～250 × 10⁻⁶ 程度、EX20-SR6 で 200 × 10⁻⁶ 程度であり、算定式における材齢 1 年までのひび割れ発生目安である 350 × 10⁻⁶ 以下を満足した。

3.2.4 床スラブの目視結果 Photo 4 に塗床施工前(1月上旬, 材齢約4ヶ月)のブリッジ状の2Fデッキスラブの状況を示す。実際の構造スラブでは、樹脂系塗床材が施される直前でのひび割れは発生していないことを確認した。また、材齢約9ヶ月の確認時でも、低収縮コンクリートを使用した構造スラブのひび割れは発生しておらず、ひび割れを防止することが出来た。

4. まとめ

施工性および品質を改善したコンクリートとして、増粘成分を有する流動化剤を用いた流動化コンクリートと、膨張材および収縮低減剤を用いた低収縮コンクリートを実構造物に適用し、次のことが判った。

- 1) 流動化コンクリートは、スランブ21cmのコンクリートと比較すると、単位セメント量を14kg/m³低減でき、練混ぜからのスランブの保持性能も良好であった。圧縮強度、静弾性係数および凝結時間は、スランブ21cmのコンクリートと同程度で、ブリーディング量は小さくなった。また、実部材での適用では、流動化後のコンクリートの管理結果は良好であり、過密配筋部においてもコンクリートは材料分離を起こすことなく、鉄筋に回り込む様子が観察された。
- 2) 低収縮コンクリートは、荷卸し時におけるフレッシュ性状および材齢28日の圧縮強度は目標値を満足した。収縮性状においては、拘束膨張量を加味すると、その収縮ひずみの値は約200～250 × 10⁻⁶で解析によって事前に検討した目標値を満足した。また、拘束ひび割れ試験体および実際の構造スラブにおいてひび割れを防止することが出来た。

参考文献

- 1) 神代泰道, 並木憲司: 高性能な流動化コンクリートの開発, 大林組技術研究所報, No.77, 2013

Table 8 フレッシュ性状
Fresh Properties

調合	記号	採取時期	出荷時			荷卸し時 ^{※2}		
			SL ^{※1}	Air	C.T.	SL	Air	C.T.
			(cm)	(%)	(°C)	(cm)	(%)	(°C)
EX25	施工1	8月下旬	19.5	4.8	31	16.5	4.0	33
	施工2	8月下旬	19.0	4.6	30	16.0	4.0	33
EX20-SR6	施工3	8月下旬	18.5	4.4	29	15.5	3.5	31
	施工4	9月上旬	18.0	4.4	29	16.0	3.7	31

※1: SL=スランブ, Air=空気量, C.T.=コンクリート温度

※2: 現場はプラントから車で約30分の距離

Table 9 強度性状
Strength Properties

	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)
EX25	36.1	29.9	2.63
EX20-SR6	37.9	30.0	3.19

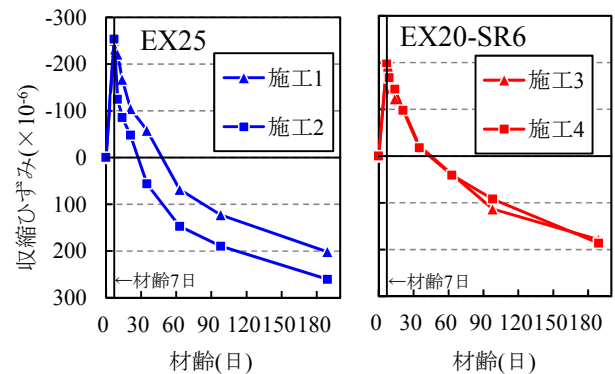


Fig. 12 膨張量を加味した収縮ひずみ
Shrinkage Strain Considered Amount of Expansion



Photo 4 スラブの状況
Slab of Low Drying Shrinkage Concrete

- 2) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計施工指針(案)・同解説, pp.53-124, 2006.2
- 3) 小柳光生, 増田安彦, 中根淳: 乾燥収縮による外壁のひび割れ幅予測に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.2, No.2, pp.59-68, 1991.7
- 4) 今本啓一, 石井寿美江: 下地コンクリートの乾燥収縮性状に及ぼす仕上げ材の影響に関する研究, 日本建築仕上学会論文報告集, 第11巻, pp.1-6, 第1号, 2004.11