

論文 石灰石骨材および膨張材を使用したコンクリートにおける一軸拘束ひび割れ試験

都築 正則*1・酒井 正樹*1・一瀬 賢一*2・平田 隆祥*2

要旨：乾燥収縮ひび割れを低減するとされる石灰石骨材と膨張材を使用したコンクリートにおいて、拘束ひび割れ試験を行い、ひび割れ発生時期およびひび割れ本数の確認を行った。その結果、膨張材、または石灰石骨材を使用したコンクリートは、硬質砂岩骨材を使用したものに比べ収縮ひび割れは小さく、ひび割れ発生材齢は遅くなり、ひび割れ本数は少なくなった。また、コンクリートの拘束条件が大きい場合、膨張材のひび割れ抑制効果は大きく、収縮ひび割れが一番小さい石灰石骨材を使用したコンクリートに比べ、硬質砂岩を使用したものであっても、膨張材の使用によりひび割れ発生材齢は遅くなり、ひび割れ本数は少なくなった。

キーワード：拘束ひび割れ試験, 乾燥収縮, 膨張材, 石灰石骨材, ひび割れ本数

1. はじめに

コンクリートの乾燥収縮ひび割れに対する対策として、設計段階の適切なひび割れ誘発目地の設置や、施工段階の材齢初期におけるコンクリートの十分な養生等が重要事項に挙げられる。また、コンクリート自体では、JASS 5-2009¹⁾に長期、超長期供用コンクリートの乾燥収縮ひび割れの規定値(8×10⁻⁴以下)が記述され、材料選定の段階から客先の要求が強まっている。このような中、乾燥収縮ひび割れを低減するとされる石灰石骨材²⁾、膨張材を使用したコンクリート³⁾の需要が高まる一方、それらコンクリートの乾燥収縮ひび割れの値だけでなく、ひび割れ抑制効果の評価手法^{例えは4)}が望まれている。

本研究では、膨張材または石灰石骨材を使用したコンクリートのひび割れ抑制効果の評価方法の検討として、実寸大レベルの鉄筋を内部に配置した一軸拘束試験体⁵⁾に着目し、それらコンクリートのひび割れ発生時期およびひび割れ本数の確認を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および調査

使用材料を表-1に示す。粗骨材の異なるコンクリートに対して、収縮ひび割れ試験を実施するため、硬質砂岩砕石を使用しているプラント(以下、A工場)および石灰石砕石を使用しているプラント(以下、B工場)におけるレディーミクストコンクリートを使用した。セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材および粗骨材は、生コン出荷プラントが通常使用しているもので、各種産地が異なる。膨張材は低添加型の石灰系膨張材を使用した。

調査表を表-2に示す。使用するコンクリートは各プラントにおける「呼び強度24」のコンクリートとした。A工場およびB工場において、水結合材比(以下、W/B比)は

それぞれ、60.1%および58.0%であり、単位水量は、182kg/m³および180kg/m³である。粗骨材に硬質砂岩を使用しているA工場においては、膨張材を混入したコンクリートにおいても検討し、使用量はセメントの重量置換でメーカー推奨量である20kg/m³とした。目標空気量は4.5±1.5%、目標スランプは18±2.5cmとした。

2.2 試験項目

試験項目を表-3に、試験体の養生方法を表-4に示す。各JISに準じる圧縮強度、最大圧縮応力の1/3静弾性係数

表-1 使用材料

記号	仕様および工場	
C	普通ポルトランドセメント, 密度:3.16g/cm ³	
S	S1	青梅市産硬質砂岩砕砂, 表乾密度:2.63g/cm ³
	S2	富津市産山砂, 表乾密度:2.60g/cm ³
	S3	秩父郡産石灰石砕砂, 表乾密度:2.67g/cm ³
	S4	鍋山町産石灰石砕砂, 表乾密度:2.66g/cm ³
	S5	成田市産山砂, 表乾密度:2.59g/cm ³
G	G1	青梅市産硬質砂岩砕石, 表乾密度2.66g/cm ³
	G2	横瀬町産石灰石砕石2005, 表乾密度2.70g/cm ³
	G3	鍋山町産石灰石砕石2005, 表乾密度2.70g/cm ³
EX	低添加型石灰系膨張材, 密度3.16g/cm ³	

表-2 調査表

出荷工場	調査記号	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)							
				W	B		S1 (S4)	S2 (S5)	S3	G1 (G2)	G3
					C	EX					
A工場	SG 2SG	60.1	50.4	182	303	-	450	180	270	894	-
	SGEX 2SGEX	60.1	50.4	182	283	20	450	180	270	894	-
B工場	LG 2LG	58.0	49.5	180	311	-	(622)	(262)	-	(462)	(462)

0内数値は、それぞれ、S4, S5, G2, G3に対応
SG, SGEX, LGは3月打設, 2SG, 2SGEX, 2LGは4月打設(調査は同一)

*1 (株)大林組 技術研究所 生産技術研究部 工修 (正会員)

*2 (株)大林組 技術研究所 生産技術研究部 工博 (正会員)

表—3 試験項目

試験項目	試験方法	備考
圧縮強度	JIS A 1108	
静弾性係数(圧縮)	JIS A 1149	寸法: $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 養生方法: SCおよびS7D
割裂引張強度	JIS A 1113	
長さ変化率(収縮ひずみ)	JIS A 1129-2	寸法: $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ 養生方法: S7DおよびW7D
拘束ひび割れ試験	JIS A 1151	形状: 図1を参照。 養生方法: 材齢7日に脱型, 以降気中乾燥
門形フレームひび割れ試験	ひび割れ観察およびコンタクトゲージ法による長さ変化の測定	形状: 図2を参照。 養生方法: 材齢7日に脱型, 以降気中乾燥
ダミー試験体長さ変化率	鉄筋貼付ゲージによる。	形状: 図3を参照。 養生方法: 材齢7日に脱型, 以降気中乾燥

表—4 試験体の養生方法

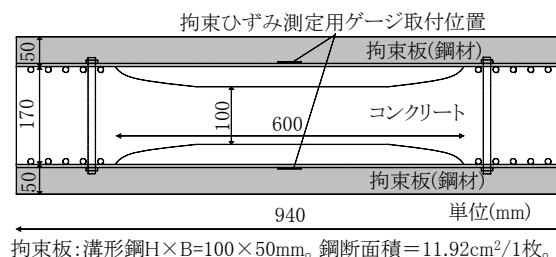
記号	養生方法
SC	封かん(20°C) 材齢1日 → 材齢189日
S7D	封かん(20°C) → 気中乾燥(20°C, 65%RH) 材齢1日 → 材齢7日 → 材齢189日
W7D	水中(20°C) → 気中乾燥(20°C, 65%RH) 材齢1日 → 材齢7日 → 材齢189日

○: 打設 △: 脱型 ■: 乾燥開始

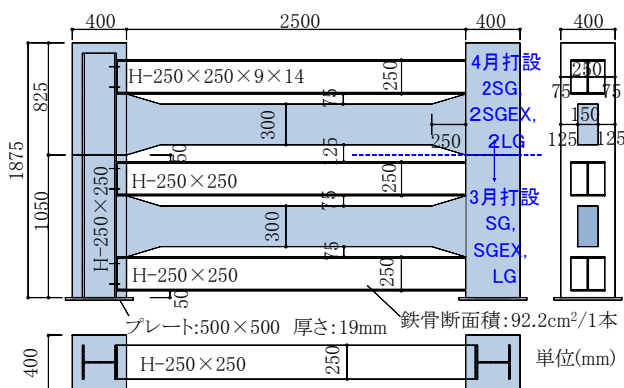
および割裂引張強度試験用の試験体の養生方法は、封かん養生(養生SC)および、材齢1週まで封かん養生の後、気中乾燥(養生S7D)の2種類とした。長さ変化率試験体は、養生S7Dおよび脱型後、材齢1週まで標準水中養生の後、気中乾燥(養生W7D)の2種類とした。また、膨張材の効果を確認するため、打設翌日にコンタクトゲージを貼り付け、基準長さを測定し、各養生の長さ変化を測定した。

拘束ひび割れ試験体は、1調合につき2体とし、JIS A 1151に準じて図—1に示す形状の試験体を使用した。なお、試験体を拘束する鋼材(以下、拘束板と称す。)は、JISでは、 $7.27\text{cm}^2 \times 2$ 枚としているが、本試験では、試験期間の都合から、全ての調合の試験体で早期にひび割れを発生させるため、 $11.92\text{cm}^2 \times 2$ 枚(コンクリート断面積に対する鋼材比は24%)と、JIS規定より拘束板の断面積を大きくした。拘束板中央部には、歪ゲージを貼り付け、打設直後からひずみを測定し、ひずみが開放される材齢をひび割れ発生材齢とした。養生方法は、養生S7Dとした。ただし、拘束板を除く型枠の脱型は、材齢7日に実施し、その後気中乾燥を行っている。

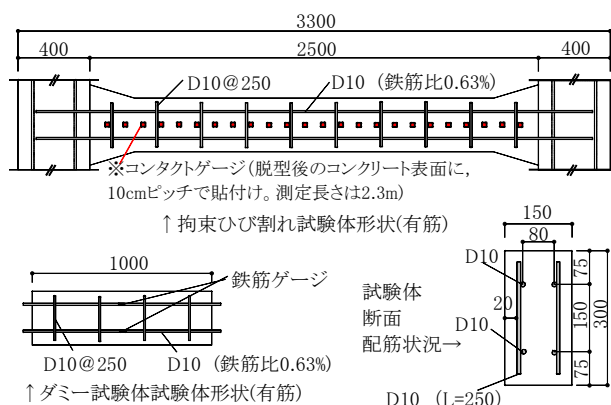
ひび割れ本数の検討を行うため、鉄筋を内部に組み、鉄骨部材により拘束する試験体(以下、門形フレーム試験体と称す。)を作製した。門形フレーム試験体の概要を図—2に示し、配筋図を図—3に示す。形状は、武田らの報告⁵⁾によるものを模擬し、試験体の鉄筋比は報告中にある通常の壁部材と同程度の0.63%に合わせた。拘束には



図—1 拘束ひび割れ試験体形状(無筋)



図—2 門形フレーム拘束試験体形状



図—3 試験体の配筋状況

水平フレーム(H型鋼 $250 \times 250 \times 9 \times 14\text{mm}$, 断面 92.2cm^2)と鉛直フレーム(断面積は水平フレームと同一)を使用し、これらをボルトによって緊結するよう組み立てた後、ひび割れ観察を行う試験体(長さ=2.5m)と一体となるよう柱内のコンクリートを同時に打設した。この時、コンクリート断面積に対する鋼材比は、 $92.2 \times 2 \div 450 = 41\%$ であり、コンクリート試験体の拘束条件を大きくしている。試験体は1調合につき上下の2体とし、上部試験体の打設は、下部試験体打設から約1ヶ月後とした。

ひび割れの測定方法は、クラックスケールを用いた目視によるひび割れスケッチおよび、試験体片面にコンタクトゲージを貼り付けひび割れを含む長さ変化を測定した。測定長さは、10cm間隔で、2.3mとし、長さ変化の基準となる基長測定は、材齢7日の脱型日を基準とした。

また、門形フレーム試験体と同断面積および同鉄筋比の長さ1mの試験体(以下、ダミー試験体と称す。)を作製し、鉄筋ひずみゲージにより収縮ひずみを測定した。

表—5 コンクリートの基礎性状

打設日	調合	フレッシュ性状				圧縮強度 (N/mm ²)		
		CT (°C)	スラン プ (cm)	Air (%)	単位 容積 質量 (kg/m ³)	標準水中養生 材齢(日)		
						28	91	182
3月中旬	SG	12.0	19.0	5.5	2319	33.0	36.5	37.6
	SGEX	15.7	18.5	4.0	2344	31.0	36.1	38.0
	LG	14.8	19.0	3.5	2382	35.5	41.8	43.6
4月中旬	2SG	15.7	20.5	4.6	2323	30.2	33.3	35.7
	2SGEX	18.6	20.5	4.0	2317	27.6	31.4	33.7
	2LG	19.7	19.5	4.0	2373	39.4	44.7	46.3

ダミー試験体の収縮ひずみは、打設直後から測定した。全試験体の作製および養生は、外気温の変動を受けないよう、20±2℃、65%±5%RHの恒温恒湿室内で実施した。

3. 実験結果

3.1 基礎性状

コンクリートの基礎性状として、フレッシュ性状および標準水中養生圧縮強度試験結果を表—5に示す。空気量は3.5%～4.6%、スランプは18.5cm～20.5cmを示し、目標値を全て満足した。圧縮強度は、SGシリーズおよびSGEXシリーズが材齢28日で30N/mm²前後の強度に対し、LGシリーズは35～40N/mm²程度と強度が高い結果となった。これは、同じ呼び強度でもプラントによりW/B比の設定値が異なり、LGのW/Bが他2調合に比べて小さいためと考える。

3.2 乾燥下における力学的性状

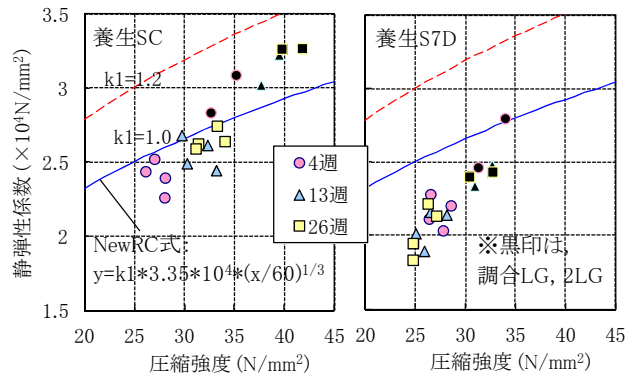
乾燥下における力学的性状として、養生SC(封かん養生)および養生S7D試験体における圧縮強度と、静弾性係数および割裂引張強度試験の関係を、図—4および図—5に示す。

1週から乾燥を開始した養生S7Dにおける静弾性係数および割裂引張強度と圧縮強度の関係は、養生SCと比較して、JASS5による提案式および野口らの式⁶⁾よりも下回る結果となり、乾燥に伴う強度発現性の低下よりも静弾性係数や割裂引張強度の低下が大きかった。

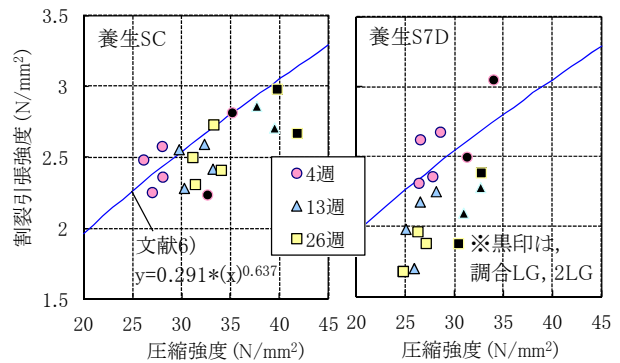
上記の実験は、寸法φ10×20cmの試験体を対象としたものであり、乾燥条件が通常の部材よりも厳しいと考える。試験体の乾燥条件が厳しい場合、力学的性質が低下する可能性が認められた。

3.3 脱型時からの収縮ひずみ試験結果

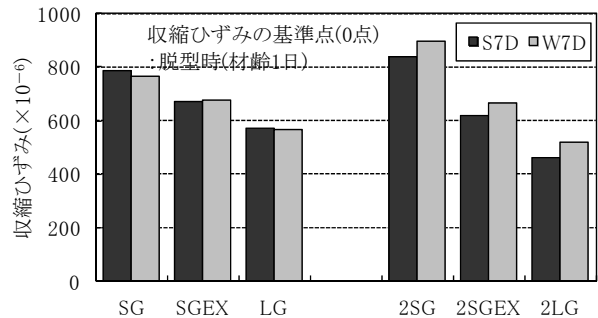
通常、コンクリートの乾燥収縮ひずみの値は、材齢1週までの標準水中養生後に基長を測定し、乾燥期間6ヶ月後の長さ変化率の測定値としている。そのため、膨張材などの乾燥開始前の養生時に膨張する材料を使用した場合、コンクリートの膨張量の測定が不可能のため、その効果を十分に考慮できないことが懸念される。また、W/B



図—4 圧縮強度と静弾性係数



図—5 圧縮強度と割裂引張強度

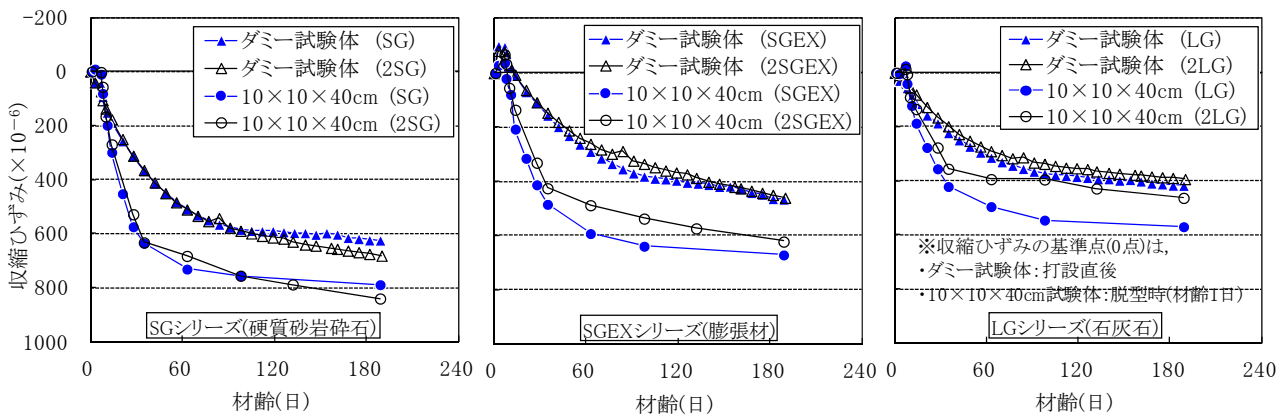


図—6 脱型時からの収縮ひずみ

が低い場合、材齢1週までの自己収縮ひずみの増大も懸念されるため、本試験では脱型時を基長とし、材齢1週までの長さ変化も加味した収縮ひずみ量(以下、脱型時からの収縮ひずみと称す。)で比較した。

収縮ひずみにおよぼす乾燥開始前の養生方法の影響を見るため、材齢189日(乾燥期間182日)における養生S7Dと養生W7Dにおける脱型時からの収縮ひずみの比較を図—6に示す。全体として、どちらの養生も概ね同等の収縮ひずみを示した。

調合別に確認すると、硬質砂岩を使用したコンクリートSGシリーズは800×10⁻⁶前後、膨張材を使用したコンクリートSGEXシリーズは、650×10⁻⁶前後、石灰石砕石を使用したLGシリーズは、500×10⁻⁶前後を示した。本試験の測定範囲内では膨張材の使用により約150×10⁻⁶の収縮を低減する結果となった。また、石灰石砕石を使用したコンクリートは硬質砂岩のものより収縮が小さく、



図—7 ダミー試験体の収縮ひずみ(養生S7D)

従来の乾燥収縮低減効果⁷⁾と同様の傾向が認められた。

3.4 ダミー試験体の収縮ひずみ

養生S7Dにおけるダミー試験体と10×10×40cm試験体の収縮ひずみの比較を図-7に示す。コンクリート種類によらず、ダミー試験体の収縮ひずみが小さくなる傾向を示した。これは、ダミー試験体のほうが、体積表面積比=V/Sが2倍程度と大きくなることにより収縮の進行が遅いこと、鉄筋の付着によりコンクリートが拘束されていることが原因として考えられる。材齢6ヶ月における、ダミー試験体の収縮ひずみは、SGシリーズで 650×10^{-6} 程度、SGEXで 450×10^{-6} 程度、LGシリーズで 400×10^{-6} 程度であり、10×10×40cm試験体の約7~8割程度の値を示した。

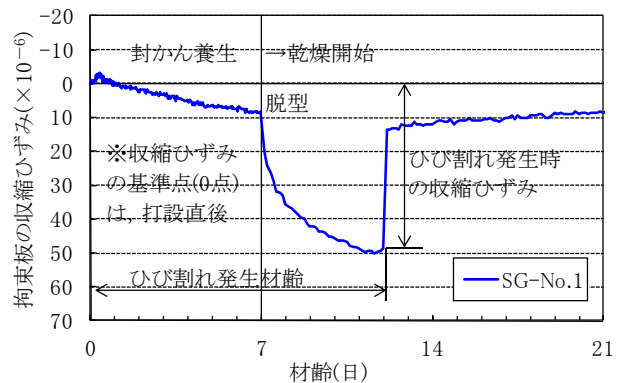
3.5 拘束ひび割れ試験結果

拘束ひび割れ試験結果の一例として、試験体SGのひび割れ発生時の拘束板の収縮ひずみと材齢の関係を、図-8に示す。収縮ひずみが開放された時点をひび割れ発生材齢とした。拘束板の収縮ひずみは、封かん養生時においても若干増え、乾燥開始直後から大きく増加した。

各試験体のひび割れ発生材齢およびひび割れ発生時における拘束板の収縮ひずみを表-6に示す。ひび割れ発生材齢において、試験体LGの2試験体にばらつきが認められたものの、2試験体の平均においては、同じ調合のコンクリートは、打設日にかかわらず、ほぼ同程度の値を示す結果となった。ひび割れ発生日は、それぞれ、SGシリーズでは12日前後、SGEXシリーズでは30日前後、LGシリーズでは20日前後となり、膨張材を使用したコンクリートのひび割れの発生が遅れた。また、ひび割れ直前の拘束板のひずみは、 $50 \sim 60 \times 10^{-6}$ 程度を示した。

3.6 ひび割れ本数確認試験結果

門形フレーム試験体に発生したひび割れ部における長さ変化を図-9に示す。ひび割れ部以外のコンタクトゲージ間の長さ変化は、概ね $-0.05 \sim 0\text{mm}$ 以内であり、図に示した以外の貫通ひび割れは発生していないと考えられる。 0.05mm 以上の長さ変化を生じた時点を、貫通ひび割れ発



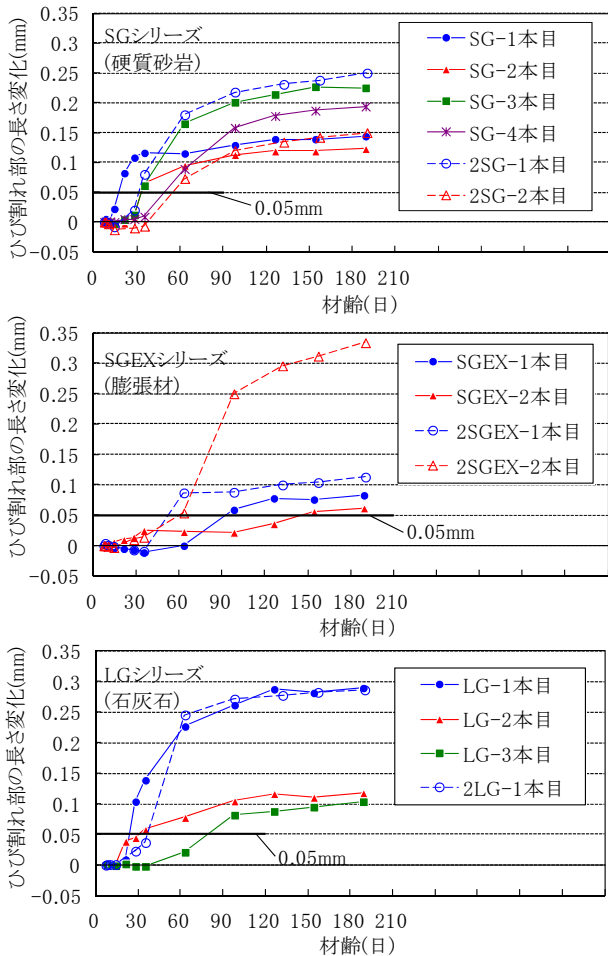
図—8 拘束ひび割れ試験例

表—6 拘束ひび割れ試験結果一覧

	ひび割れ発生材齢 (日)			ひび割れ発生時の収縮ひずみ($\times 10^{-6}$)		
	No.1	No.2	平均	No.1	No.2	平均
SG	12.0	11.1	11.6	48.8	52.1	50.5
2SG	12.9	12.3	12.6	62.1	51.2	56.6
SGEX	27.4	28.2	27.8	62.1	58.3	60.2
2SGEX	32.3	31.6	31.9	64.5	63.5	64.0
LG	18.7	28.5	23.6	46.9	60.2	53.6
2LG	20.9	22.9	21.9	45.5	54.0	49.8

生時期と仮定すると、1本目のひび割れが発生する時期は、SGシリーズとLGシリーズが、材齢30日以内とほぼ同じであった。膨張材を使用したSGEXシリーズは45~90日以内であった。2本目以降のひび割れ発生時期は、概ね、SGEXシリーズ、LGシリーズ、SGシリーズの順であった。

材齢180日程度における門形フレーム試験体のひび割れ状況を図-10に示す。図には、コンタクトゲージによる長さ変化から、貫通ひび割れと推定したものを太線で示し、その値をひび割れ幅として記載した。2SG(上段の試験体)においては、柱部材との境界である両端に 0.1mm 以上のひび割れが、クラックスケールにより確認されたため、併記している。また、確認できる 0.05mm 未満のひび割れ(以下、ヘアークラック)は細線で示した。貫通ひび割れは、同調合においてひび割れ本数のバラツキが上段・下段で見られるものの、 0.05 未満のヘアークラック



図—9 ひび割れ部の長さ変化

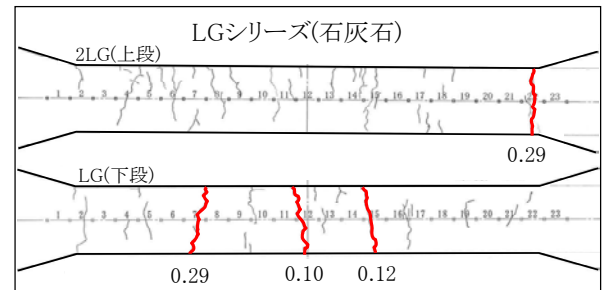
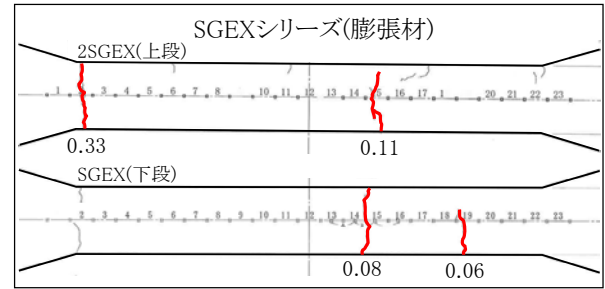
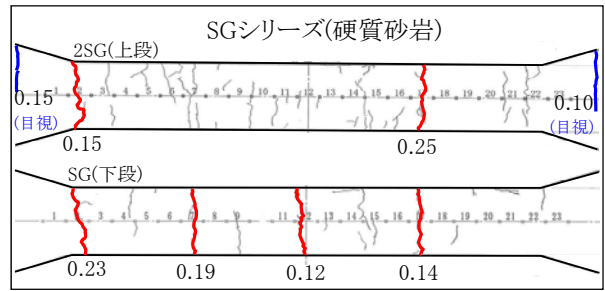
も含むひび割れ本数としては、SGシリーズ>LGシリーズ>SGEXシリーズの順であった。特に膨張材を使用したコンクリートであるSGEXシリーズは、SGと比較するとひび割れを大きく低減することが出来た。また、LGシリーズおよびSGEXシリーズにおいて、ひび割れ本数が低減された一方、ひび割れ幅が0.3mm程度と比較的大きいひび割れが確認された。

また、石灰石砕石を使用したLGシリーズは、膨張材を使用したSGEXシリーズと貫通ひび割れ本数はほぼ同等であるものの、ヘアクラックの量が多いことが確認された。本試験内では、脱型時からの収縮ひずみが一番小さい石灰石砕石を使用したLGシリーズよりも、膨張材を使用したEXシリーズのほうが貫通ひび割れ発生時期は遅くなり、ひび割れ本数は小さい傾向を示した。

このことから、本試験内のように、コンクリートの拘束条件が大きい一軸拘束試験体の場合、膨張材のひび割れ抑制は、石灰石砕石よりも大きいことを確認した。

3.7 付着解析モデルによるひび割れ本数

ここでは、小柳らが提案した⁸⁾、「コンクリートと鉄筋の付着特性を非線形モデル化し、収縮によって発生するひび割れ幅の動きを逐次的に追跡するための算定式」により、ひび割れ本数を解析する。この式は、引張強度と

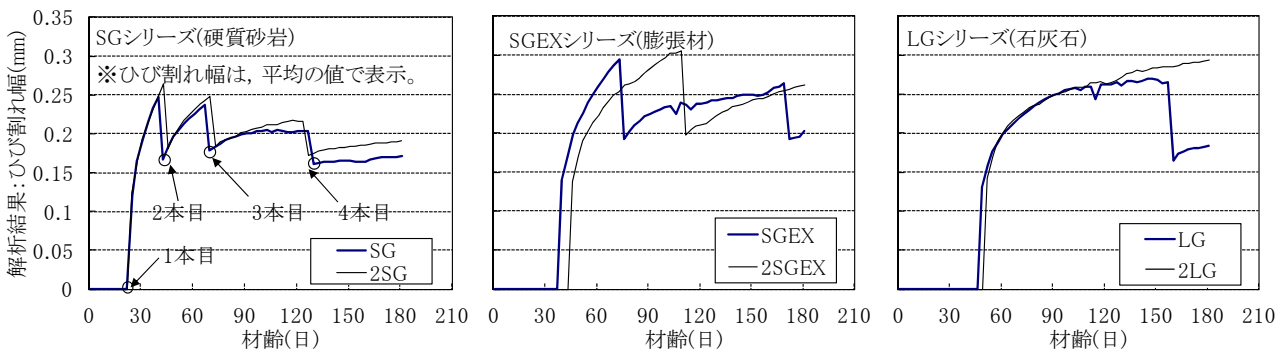


図—10 ひび割れ発生状況(門形フレーム試験体)

引張応力の関係ではなく、引張限界ひずみ(弾性+クリープ)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あり、増分法を基本として、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、複数本のひび割れの発生を示すことが可能である。

解析にあたり、本試験結果から、ダミー試験体の収縮ひずみ、養生S7Dにおける28日の静弾性係数、試験体長さ、試験体断面積、鉄筋比および拘束部材断面積(1試験体あたり、鉄骨の断面積×2とした。)を入力した。また、ひび割れが発生するコンクリート引張限界ひずみ(弾性+クリープ)は、文献8)と同様に、 200×10^{-6} (引張弾性ひずみを 100×10^{-6} 、クリープ係数を1.0と仮定)とした。

解析結果として、材齢に伴うひび割れ幅の挙動を図-11に示す。1本目のひび割れ発生時期は、SGシリーズ>SGEXシリーズ≒LGシリーズであり、石灰石を用いたLGシリーズは、実測値のほうが、解析値よりもひび割れ発生時期が早まる傾向を示した。貫通ひび割れ本数は、ダミー試験体の収縮ひずみと同様、SG>SGEX>LGの順であった。2本目以降、次のひび割れが発生する直前のひび割れ幅が以前のものより小さくなるのは、ひび割れ発生条件を引張限界ひずみの値で仮定しているため、クリープひずみが大きくなることにより弾性ひずみが小さくて



図—11 ひび割れ幅の経時変化(解析値)

表—7 ひび割れ本数の比較(解析値と実測値)

試験体位置	解析(入力値)				解析(出力値)				実測値				
	28日静弾性係数実測値($\times 10^4 \text{N/mm}^2$)	ダミー試験体の収縮ひずみ実測値($\times 10^{-6}$)			ひび割れ本数			平均ひび割れ幅(mm)	コンタクトゲージによるひび割れ本数			平均ひび割れ幅(mm)	
		1ヶ月	3ヶ月	6ヶ月	1ヶ月	3ヶ月	6ヶ月	6ヶ月	1ヶ月	3ヶ月	6ヶ月	6ヶ月	
SG	下段	2.03	312	576	622	1	3	4	0.17	1	4	4	0.17
2SG	上段	2.11	312	578	674	1	3	4	0.19	0	2+2**	2+2**	0.10**
SGEX	下段	2.20	109	368	461	0	2	3	0.20	0	1	2	0.07
2SGEX	上段	2.28	108	323	449	0	1	2	0.26	0	2	2	0.22
LG	下段	2.46	186	364	414	0	1	2	0.18	1	3	3	0.17
2LG	上段	2.80	165	332	390	0	1	1	0.29	0	1	1	0.29

※対象試験体と柱部材の境界である両端に0.1mmおよび0.15mmのひび割れが計2本観察されたため、実測値に加味している。

もひび割れが発生するためである。

解析値と実測値の比較を表—7に示す。実測値において、2SGの両端に0.1mm以上ひび割れが入っていることを考慮すれば、解析値と実測値との、ひび割れ本数および平均のひび割れ幅は、SGEX(下段)を除いて、概ね等しいことが確認された。ただし、本解析方法においては、材齢初期の膨張ひずみによる圧縮応力導入が、クリープひずみに及ぼす影響等を、計算モデルに十分に考慮されていないので今後の検討課題としたい。

4. まとめ

乾燥収縮ひずみの低減効果が期待される膨張材または石灰石砕石を使用したコンクリートについて、ひび割れ発生時期およびひび割れ本数の測定を行い、結果、本試験範囲内で以下のことを確認した。

- (1) 膨張材または石灰石砕石を使用したコンクリートは硬質砂岩砕石を使用したものに比べ、収縮ひずみは小さくなり、結果、ひび割れ発生材齢は遅く、ひび割れ本数は少なくなった。
- (2) 収縮ひずみが一番小さい石灰石砕石を使用したコンクリートに比べ、膨張材を使用したコンクリートは、ひび割れ発生材齢が遅くなり、ひび割れ本数も少なかった。コンクリートの拘束条件が大きい場合、膨張材のひび割れ抑制効果が大きい結果となった。
- (3) 付着解析モデルによる解析値と実測値を比較した結果、膨張材を用いたものを除き概ね等しい。膨張材の圧縮応力導入の影響については検討課題としたい。

謝辞：本報告全般において、小柳光生氏に多々なるご指導を頂きました。ここに感謝の念を記します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説5 鉄筋コンクリート工事，pp.185-190，2009
- 2) 大塩明ほか：石灰石砕石骨材を用いたコンクリートの基礎的諸物性，セメント技術年報，No.41，pp.106-109，1987
- 3) 富田六郎：超低収縮コンクリート，コンクリート工学，Vol.32，No.7，pp.105-109，1994
- 4) 三谷裕二ほか：膨張コンクリートの収縮ひび割れ性状に関する検討，高性能膨張コンクリートの性能評価とひび割れ制御システムに関する研究委員会報告書，pp.439-444，2011
- 5) 武田寿一ほか：鉄筋コンクリート外壁のひび割れに関する研究(その1)，乾燥収縮拘束ひびわれ実験，大林組技術研究所報，No.36，1986
- 6) 野口貴文ほか：高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学特性との関係，日本建築学会構造系論文集，No.472，pp.11-16，1995
- 7) 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.119-123，2006
- 8) 小柳光生ほか：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.59-68，1994