

膨張材コンクリートを適用した実大模擬スラブ試験体による収縮ひび割れ実験

飯田 康介 藤下 大知
塚本 康誉 木村 貴裕
塩田 博之※

概 要

本研究では物流倉庫や生産施設の膨張材コンクリートを適用した床スラブにおいて、乾燥収縮に伴い生じるひび割れの幅や本数の予測方法を構築することを目的とし、実大サイズの模擬スラブ試験体を作製し、2年間、ひび割れ状態を観察、測定した。コンクリートの物性も同時に測定した。膨張材コンクリートのJISの試験方法による拘束膨張率と、乾燥期間26週の長さ変化率試験の結果を足し合わせた合成長さ変化率は 524×10^{-6} 、スラブと同じ厚さの無拘束状態のコンクリートの収縮ひずみについては材齢2年時点で、膨張材無混和は収縮側に 660×10^{-6} 、膨張材を 23kg/m^3 使用した試験体は膨張側に 189×10^{-6} であった。模擬スラブ試験体のひび割れ本数は膨張材無混和が35本、膨張材を使用した場合4本程度となり、ひび割れ本数は無混和に対して約88%低減した。

Shrinkage cracking experiments using full-scale mock slab specimens with expansive concrete

Abstract

This study aimed to develop a method for predicting the width and number of cracks caused by drying shrinkage in floor slabs made with expansive additive (EA) concrete in logistics warehouses and production facilities. Full-scale mock slab specimens were constructed, and cracking was observed and measured over two years. The combined length change rate, obtained by adding the restrained expansion strain from the JIS test method and the results of a 26-week drying shrinkage test, was 524×10^{-6} . For unrestrained concrete of the same thickness as the slab, the shrinkage strain at two years of age was 660×10^{-6} on the shrinkage side for the specimen without EA, and 189×10^{-6} on the expansion side for the specimen with 23 kg/m^3 of EA. The number of cracks in the mock slab specimens was 35 for the specimen without EA and approximately 4 for the specimen with EA, representing an about 88% reduction compared to the specimen without EA.

キーワード：収縮ひび割れ、膨張材、実大実験、
ひび割れ本数、実機試験

※ 建築本部建築統括部

§1. はじめに

鉄筋コンクリート造建築物の耐久性や美観、あるいは室の性能を長期に渡って維持するためには、乾燥収縮ひび割れを低減、制御する必要がある。特に、物流倉庫や生産施設などの床スラブ（以下、スラブと表記）は上面が躯体現しになることが多く、ひび割れが露出し品質上の問題が生じやすいため、スラブを対象とした乾燥収縮ひび割れの予測、制御技術に関する研究が多く行われてきた¹⁾。また、乾燥収縮ひび割れ性状を使用材料や施工条件を基に正確に予測できれば、ひび割れ対策に必要な材料を適切に配置することができ、過剰な対策や補修に掛かる資源やエネルギーの削減が期待できる。すなわち、品質の向上に加えて脱炭素化、地球温暖化防止の観点からも有効と考えられる。

乾燥収縮ひび割れの原因である乾燥収縮ひずみを低減するために、日本国内において膨張材が一般的に使用されている。膨張材を使用したスラブのコンクリートにおいて、ひび割れ量が低減することを確認した実

験結果は多くあるものの^{例えば2)}、その効果を加味し、ひび割れ量を定量的に求めることができる計算方法はまだない。本研究では、膨張材を用いたスラブにおけるひび割れ本数、幅を算定する方法を構築することを目的として、実大サイズのスラブ試験体を作製し、ひび割れ性状を確認する。

§2. 予備実験

2.1 実機製造時の拘束膨張率

小林らは実機プラントで製造したコンクリートの拘束膨張率は試験室の結果に対して低下する³⁾と報告している。そのため、はじめに拘束膨張率の確認と原因推定のための予備実験を行った。使用材料を表1、調合や記号を表2に示す。実スラブで使用される調合を参考とし、調合管理強度は30N/mm²、水結合材比は50%とし、膨張材はセメント内割りで20kg/m³置換した。拘束膨張率の測定方法はJISA 6202付属書BのB法に準拠した。ただし、拘束棒は1度使用したものを清掃し、反りなど変形がないことを確認のうえ再利用した。コンクリート採取のタイミングは①実機ミキサー直下でホイールローダーのバケットで荷受けしたもの

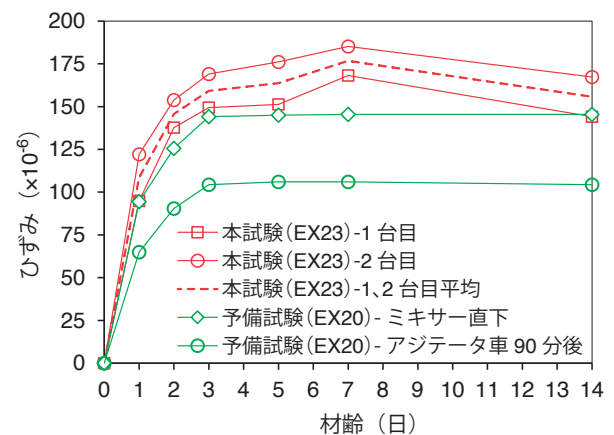


図1 拘束膨張率試験結果

表1 使用材料の一覧

種類	材料	記号	特性・産地等
結合材	セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度 3.16 g/cm ³
	膨張材	Ex	エトリンガイト・石灰複合系、 密度 3.07 g/cm ³
水	地下水	W	神奈川県厚木市
細骨材	砕砂	S1	東京都八王子市美山町産 粗粒率 3.00、表乾密度 2.62 g/cm ³ 混合比率 70%
	砂	S2	千葉県富津市鶴岡産 粗粒率 1.80、表乾密度 2.59 g/cm ³ 混合比率 30%
粗骨材	碎石	G	東京都八王子市美山町産 実積率 59.5%、表乾密度 2.65 g/cm ³
混和剤	AE減水剤	Ad1	リグニンスルホン酸化合物 ・ポリカルボン酸エーテル複合体
	AE減水剤 遅延形	Ad2	リグニンスルホン酸化合物 ・ポリカルボン酸エーテル複合体

表2 調合一覧

記号	コンクリートの呼び方	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						混和剤		試験結果				
				B		W	S1	S2	G	Ad1	Ad2	フレッシュ性状				標準養生 28日 圧縮強度 (N/mm ²)
				C	Ex							試験 実施時	S1※1 (cm)	Air※2 (%)	CT※3 (℃)	
N (本試験)	30-15-20N	50	47	352	—	176	574	246	938	—	1.15	荷卸し	15.0	3.9	28	40.4
EX20 (予備試験)	30-15-20N (膨張材20kg/m ³)		46.9	332	20	176	572	245	938	1.05	—	練り上がり 直後	19.5	4.9	21	—
EX23 (本試験)	30-15-20N (膨張材23kg/m ³)		47	329	23	176	574	246	938	—	1.15	経時90分 荷卸し	14.5	4.6	22	44.1
													15.0	4.5	29	41.7

※1：スランブ ※2：空気量 ※3：コンクリート温度

②アジテータ車にて90分経時後とした。各タイミングでは5 mmのふるいでウェットスクリーニングを行い、粗骨材量を測定し、モルタル量から膨張材量を推定した。

フレッシュ試験結果を表2に、拘束膨張率の測定結果を図1に緑線で示す。材齢7日における拘束膨張率は①ミキサー直下が 145×10^{-6} 、②アジテータ車経時後が 106×10^{-6} であり、どちらも収縮補償用としての基準である 150×10^{-6} を下回った。また、粗骨材量は① 989 kg/m^3 、② 977 kg/m^3 であり、配合計画より40から 50 kg/m^3 程度多かった。この粗骨材量と実測した空気量を使用し推定した膨張材の単位量は① 19.6 kg/m^3 、② 19.7 kg/m^3 程度であり、配合計画より僅かに小さい結果であった。拘束膨張率の低下要因についてはさらなる検証が必要だが、本結果を踏まえると、モルタル量の減少の影響は小さく、実機ミキサーと試験室用ミキサーの性能や機構の違いの影響、それに加え、アジテータ車ドラム内において膨張材粒子に何らかの経時変化が起きている可能性が示唆された。これらを踏まえ、本研究では拘束膨張率 150×10^{-6} 以上のコンクリートでのひび割れ性状を確認することを優先し、膨張材量は 23 kg/m^3 とした。

§3. 実大スラブ実験

3.1 実大試験体の概要

実大試験体のコンクリート打設前の状態を写真1に、概要を図2に示す。試験体は長辺(X)方向が10.38m、短辺(Y)方向が約3 mとし、梁を模擬したH形鋼をロの字型に設置し、高力ボルトにより摩擦接合した。X方向の中央にも梁を設置した。スラブは厚さ150mmとし、埋設式の捨て型枠デッキプレート(デッキPL)を使用した。デッキPLには丸棒のラチス

材にあらかじめ鉄筋が溶接固定されており、各構成材料はJIS Gの規定を満たすものである。1枚の幅が400mmであり、試験体短辺方向に掛け、長辺方向に並べて設置し梁に溶接固定した。各梁の上には頭付きスタッドボルトを設置し、スラブと一体化した。試験体は幅200mmの架台鉄骨の上に設置し、試験体端部の4か所については厚さ2 mmのテフロンシートを2枚挿入し摩擦を低減した。架台鉄骨は平滑な土間上に設置した。設置場所は神奈川県厚木市の、外気温湿度と概ね連動し、風雨、直射日光に曝されない屋内である。試験体の各所には箔ひずみゲージや埋込ひずみ計、熱電対を設置し、ひずみと温度等を測定した。

試験体数は2体とし、調査はそれぞれ表2に示すNおよびEX23である。コンクリートの打込み時期は6月下旬とし、ポンプ車により圧送して行き、 $\phi 30 \text{ mm}$ の内部振動機を2台使用し入念に締固めを行った。上面仕上げは実スラブと同等の方法とし、タンピング、均し、ハンドトロウエル掛けを行い、最終仕上げはフレスノと呼ばれる大型の金鋏(写真2)で仕上げた。



写真2 実スラブでのフレスノ掛けの状況



写真1 実大試験体のコンクリート打込み前状況

表3 実大試験体の各部材の諸元、拘束度などの一覧

部位・部材		寸法、面積、物性等	記号	数値	単位	諸元、算定式	
試験体：スラブ部		長さ：X方向	Lx	1038	cm		
		長さ：Y方向	Ly	300	cm		
		長さ：Z方向（スラブ厚さ）	Lz	15	cm		
		断面積：X軸直交面(YZ面)	Ax	4500	cm ²		
		断面積：Y軸直交面(XZ面)	Ay	15570	cm ²		
コンクリート		断面積:X軸直交面(YZ面)	Acx	4481	cm ²		
		断面積:Y軸直交面(XZ面)	Acy	15430	cm ²		
		圧縮強度(28日)	Fc,28	36.6	N/mm ²	実測値	
		ヤング係数(28日)	Ec,28	31247	N/mm ²	実測値	
		クリープ係数	Φ	1	－	概算のための仮定値 AIJ指針 ¹⁾ を参考に設定した	
		断面剛性：X軸直交面(YZ面)	Rcx	14.1	GN	Acx×Ec,28	
		断面剛性：Y軸直交面(XZ面)	Rcy	48.7	GN	Acy×Ec,28	
	拘束体① ：鉄骨		鉄骨X(1本あたり)	Agx	305.8	cm ²	H900-300-16-28、SS400
		鉄骨Y1(1本あたり)	Agy1	305.8	cm ²	同上	
		鉄骨Y2(1本あたり)	Agy2	187.2	cm ²	H588-300-12-20、SS400	
拘束体② ：鉄筋	配力方向 鉄筋	断面積(1本あたり)	Arx'	1.267	cm ²	D13、SD295	
		本数	－	15	本	配筋ピッチ：200mm	
		合計断面積	Arx	19.01	cm ²	Arx'×15本	
	デッキ 付帯鉄筋 (上端筋)	断面積(1本あたり)	Ary1'	1.27	cm ²	D13、SD295	
		本数	－	52	本	配筋ピッチ：200mm	
		合計断面積	Ary1	65.9	cm ²	Ary1'×52本	
		デッキ 付帯鉄筋 (下端筋)	断面積(1本あたり)	Ary2'	0.713	cm ²	D10、SD295
			本数	－	104	本	配筋ピッチ：100mm
	合計断面積	Ary2	74.18	cm ²	Ary2'×104本		
拘束体③ ：デッキプレート		断面積：X軸直交面(YZ面)	Adx	12.3	cm ²	246cm(デッキ敷設長さ)×0.05cm	
		断面積：Y軸直交面(XZ面)	Ady	48.0	cm ²	厚さ0.5mm、亜鉛メッキ鋼板、480cm(デッキ敷設長さ) ×0.05cm×2	
拘束体 ①+②+③ 合計		断面積：X軸直交面(YZ面)	Asx	643	cm ²	Agx×2本+Arx+Adx	
		断面積：Y軸直交面(XZ面)	Asy	868	cm ²	Agy1+2本×Agy2+Ary1+Ary2+Ady	
		ヤング係数(拘束体共通)	Es	205000	N/mm ²		
		断面剛性：X軸直交方向(YZ面)	Rsx	13.2	GN	Asx×Es	
		断面剛性：Y軸直交方向(XZ面)	Rsy	17.8	GN	Asy×Es	
試験体の特性値		方向、他	記号	数値	単位	算定式	
拘束鋼材面積比		X軸直交面(YZ面)	nx	14.3%	%	Asx/Acx	
		Y軸直交面(XZ面)	ny	5.6%	%	Asy/Acy	
拘束体剛性比		X方向(YZ面)	px	0.94	－	Rsx/Rcx	
		Y方向(XZ面)	py	0.37	－	Rsy/Rcy	
拘束度概算値		X方向(28日)	λ _x	0.48	－	Rsx/(Rsx+Rcx)	
		同上(クリープ考慮)	λ _x '	0.33	－	Rsx/((1+Φ)×Rsx+Rcx)	
		Y方向(28日)	λ _y	0.27	－	Rsy/(Rsy+Rcy)	
		同上(クリープ考慮)	λ _y '	0.21	－	Rsy/((1+Φ)×Rsy+Rcy)	

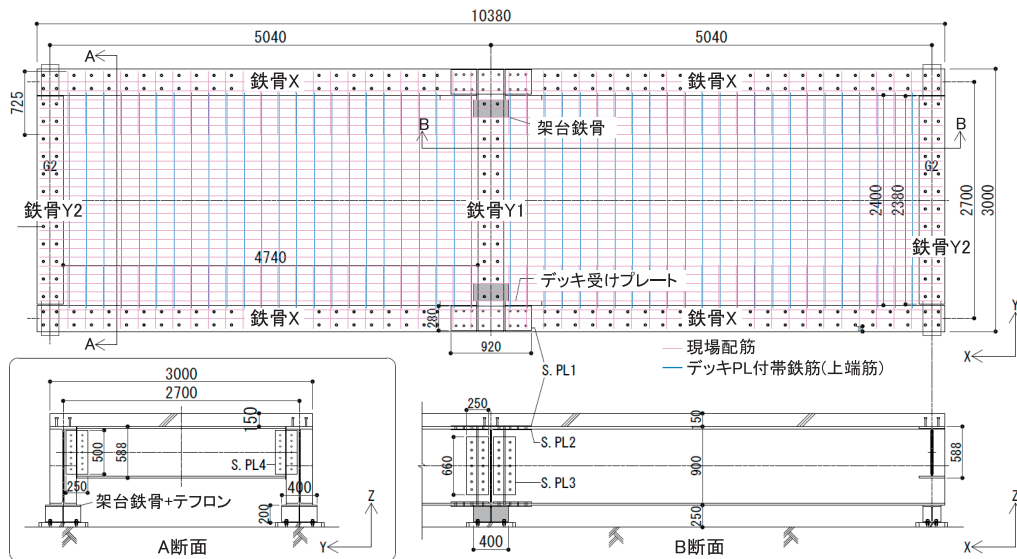


図2 実大試験体の概要

打込み後は5日間上面にビニールシートを掛け散水を行い、湿潤状態を保った。乾燥開始後2年間、各種測定、ひび割れ観察を行った。本報では、ひび割れ状態の測定結果についてのみ報告する。

表3に実大試験体の各部材の諸元や、コンクリートとそれを拘束する拘束体との関係により決まるパラメータを示す。表より、X方向(=X軸直交断面)の拘束鋼材面積比は15.1%であり、拘束度は材齢28日のコンクリートのヤング係数で算定した場合、クリープなし:0.48、クリープ係数を1.0として考慮した場合:0.33程度であった。

3.2 小型試験体の概要

コンクリートの無拘束状態の膨張・収縮ひずみを測定するため、小型のスラブ試験体を作製、測定した。小型試験体の概要を図3に示す。試験体は500mm角、厚さ150mmとし、内部中心には熱電対付き埋込ひずみ計、表層には極低弾性のシリコンゴム製のひずみ計を設置した。底面にはテフロンシートとポリエステルフィルムを挟み摩擦を低減した。養生条件は実大試験体と同じとした。本報では、埋込ひずみ計の結果についてのみ報告する。

3.3 材料試験、その他の試験の概要

材料試験は以下の項目、また試験方法で実施した。

- (1)凝結時間 : 試験用容器の内高以外はJIS A 1147に準拠した。容器は内高140mmの金属製の円筒容器を使用した。N数: 2体、EX23調合のみ。試験環境は実大試験体と同じ環境で実施した。
- (2)圧縮強度 : JIS A 1108に準拠。
- (3)ヤング係数 : JIS A 1149に準拠。
- (4)割裂引張強度: JIS A 1113に準拠。
- (5)拘束膨張率 : JIS A 6202付属書B、B法に準拠。EX23調合のみ。20℃恒温室で実施。
- (6)長さ変化率 : JIS A 1129ダイヤルゲージ方法に準拠。
- (7)環境温湿度 : サーミスタおよび静電容量式湿度計により測定。2台の平均値を求めた。

§ 4. 実験結果

4.1 環境温湿度

図4に試験体周囲の温湿度測定結果を示す。湿度は前後5日間分の移動平均値も併せて示す。環境温度は平均で23.1℃、相対湿度は63%であった。

4.2 凝結時間

図5に凝結試験結果を示す。凝結時間は2体の平均で始発が5:30、終結が6:35であった。コンクリート温度が高く、かつ実大試験体のそばで試験を行ったため周囲の温度が26℃程度であり、通常よりも早まったと考えられる。

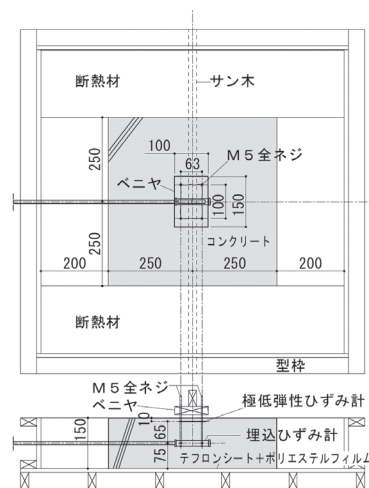


図3 小型試験体の概要

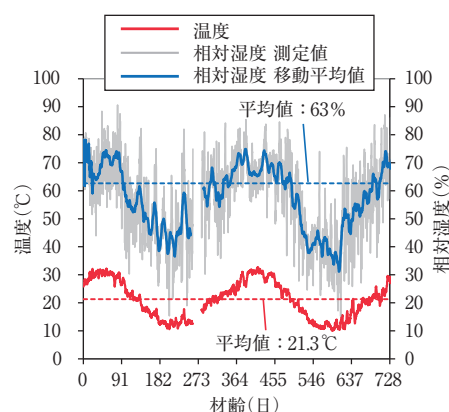


図4 環境温湿度測定結果

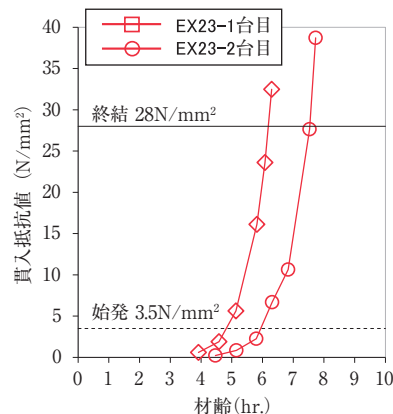


図5 凝結試験結果

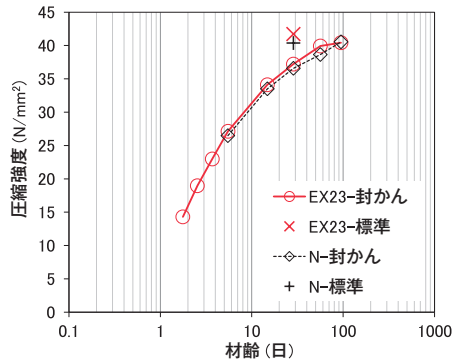


図6 圧縮試験結果

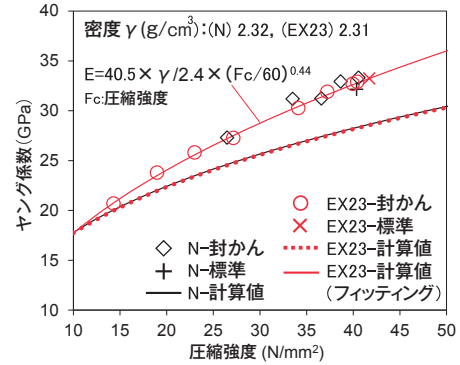


図7 ヤング係数と圧縮強度の関係

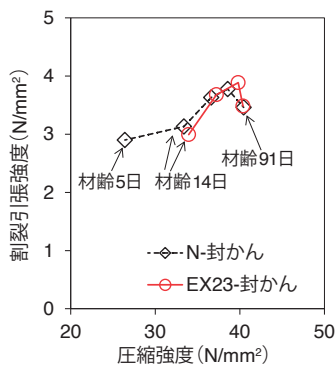


図8 割裂引張強度と圧縮強度の関係

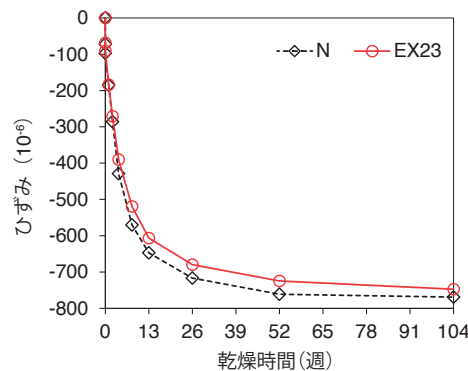


図9 長さ変化率測定結果

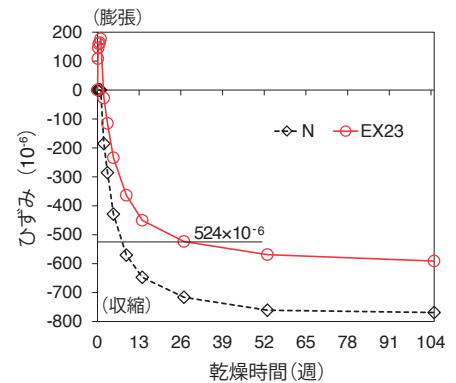


図10 拘束膨張率を合成した長さ変化率

4.3 圧縮強度およびヤング係数

図6に圧縮試験結果、図7にヤング係数と圧縮強度の関係を示す。図7には野口式⁴⁾の計算値、また、野口式の定数を調整し回帰分析により実験値にフィッティングさせた計算値も併せて示す。

4.4 割裂引張強度

図8に圧縮強度と割裂引張強度の関係を示す。ひび割れ発生以前の割裂引張強度は、Nが材齢5日時点で2.9N/mm²、EX23が材齢14日時点で3.0N/mm²であった。

4.5 拘束膨張率

図1に本実験における拘束膨張率測定結果を赤線で示す。材齢7日時点の拘束膨張率は平均で177×10⁻⁶であり、150×10⁻⁶を上回った。

4.6 長さ変化率

図9に長さ変化試験の結果を示す。乾燥時間26週における長さ変化率はNが717×10⁻⁶、EX23が680×10⁻⁶であった。次に、EX23について膨張による効果も含めた簡易評価のため、材齢7日までの拘束膨張率を長

さ変化率測定値に加えた、合成長さ変化率⁵⁾を求めた。結果を図10に示す。EX23の乾燥時間26週における合成長さ変化率は524×10⁻⁶であった。

4.7 小型試験体のひずみ、温度

図11および図12に小型試験体の埋込みひずみ計（試験体中心）の温度およびひずみの測定結果を示す。ひずみ計は自己温度補償型であるが、測定値に含まれる温度変化分を完全に除去するため式（1）により補正を行った。

$$\varepsilon_{sh} = C_{\varepsilon} \cdot \varepsilon_{meas} + dT (C_{\beta} - \gamma_s) \quad (1)$$

ここで、 ε_{sh} ：膨張収縮ひずみ（×10⁻⁶）

C_{ε} ：センサー固有の校正係数

ε_{meas} ：測定値（×10⁻⁶）

dT ：温度変化（℃）。Nは温度変化が急激に上昇を始める時点からの変化分、EX23は始発からの変化分とした。

C_{β} ：センサー固有の温度補正係数（N：10.4、EX23：10.9（×10⁻⁶/℃））

γ_s ：測定対象物の線膨張係数（×10⁻⁶/℃）

線膨張係数 γ_s は、材齢91日から2年までの式（1）で

求まるひずみ ε_{sh} と、 ε_{sh} の直線近似式による計算値の差が最も小さくなる時の値とし、最小二乗法により求めた。その結果 γ_s はNが12.6、EX23が12.0とコンクリートに近い値であり、温度差によるひずみはほとんど生じていなかった。これは周囲からの拘束がほぼないためと考えられる。EX23の最大膨張ひずみは 721×10^{-6} 、材齢2年時点におけるひずみ ε_{sh} はNが収縮側に 660×10^{-6} 、EX23は収縮側に転じておらず、膨張側に 189×10^{-6} であった。

4.8 実大試験体のひび割れ計測結果

図13に乾燥時間35日、77日および322日における実大試験体の幅0.03mm以上のひび割れの発生状況を示す。Nに比べてEX23はひび割れ量が大きく減少していることが分かる。図14および図15にひび割れ本数の経時変化を示す。ひび割れ本数は図13に示す①から⑤の5つの線上に生じたひび割れの数である。なお、長辺方向端部から1m程度の範囲に生じている斜めひび割れは除外した。322日時点での平均ひび割れ本数はNが35本、EX23が4本程度であった。EX23のひび割れ本数はNに対して88%低減した。試験体の長さを平均ひび割れ本数で除して求めた平均ひび割れ間隔はNが298mm、EX23が2471mm程度であった。なお、322

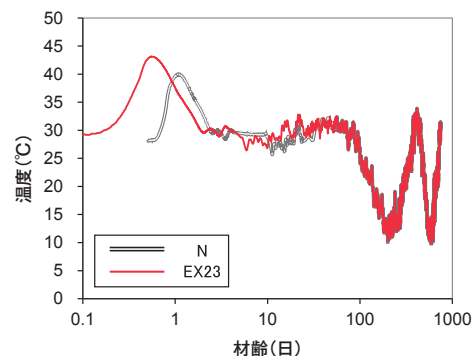


図 11 小型試験体の温度測定結果

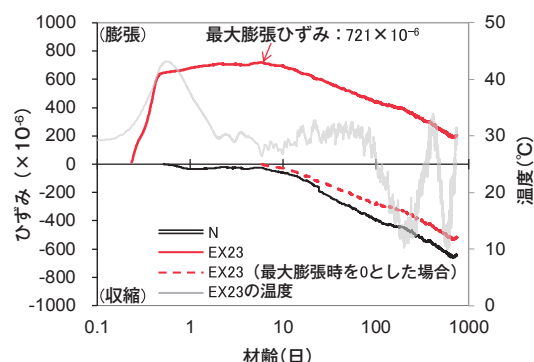


図 12 小型試験体の埋込みひずみ計の測定結果

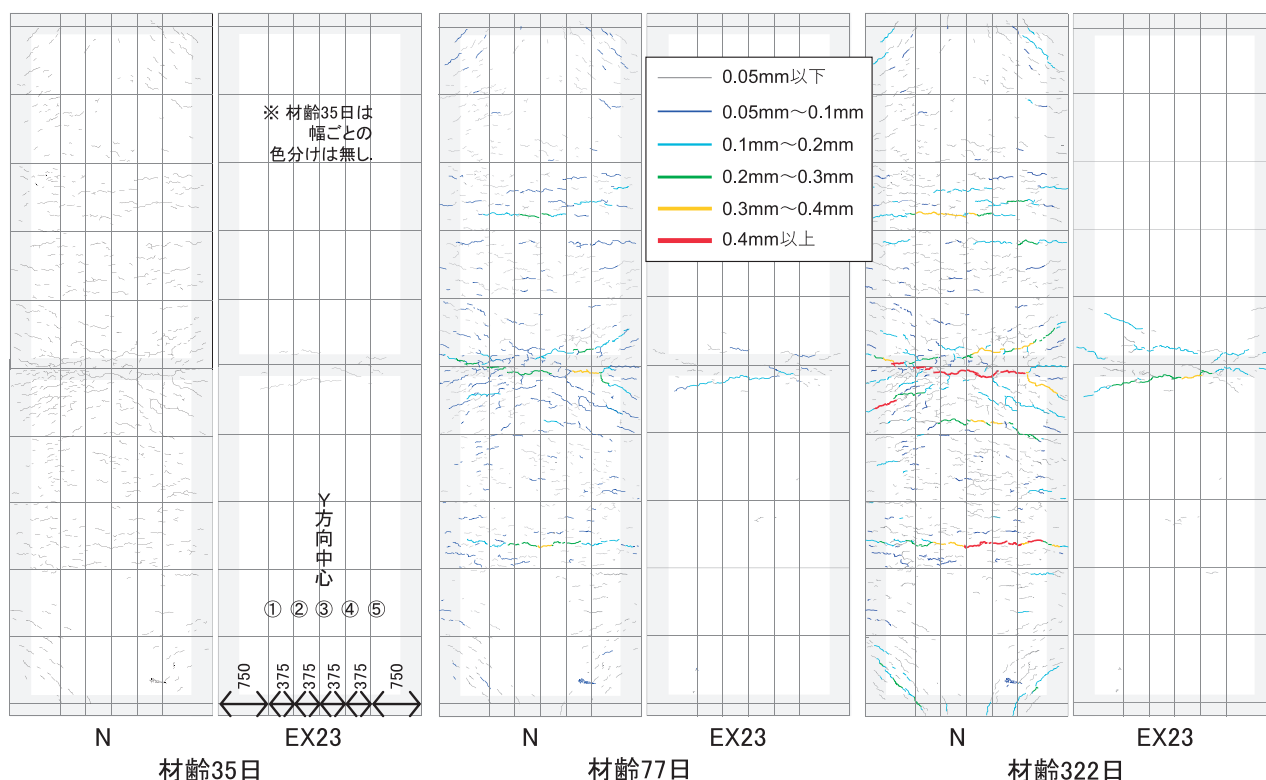


図 13 実大試験体のひび割れ状況

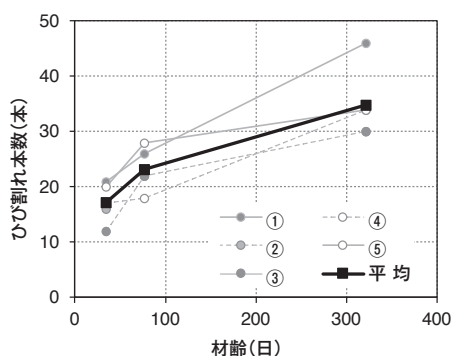


図 14 実大試験体のひび割れ本数の経時変化 (N)

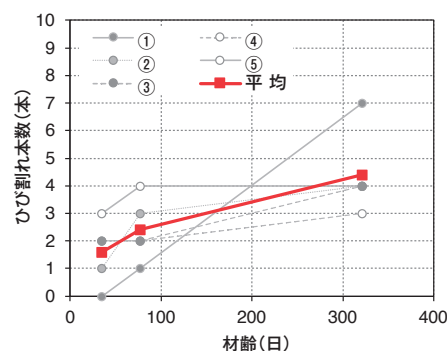


図 15 実大試験体のひび割れ本数の経時変化 (EX23)

日から材齢 2 年まで EX23 のひび割れ本数は変化しており、今後、報告する予定である。

§ 5. 結論

膨張材コンクリートを用いたスラブのひび割れ状態を検証するため、膨張材を 23 kg/m^3 内割り使用したコンクリートを適用した実大模擬試験体を作製し、収縮ひび割れ確認実験を行った。以下に、本実験で得られた知見を示す。

- (1) 実機製造時の拘束膨張率は、既往の研究同様、試験室に比べて低下した。その原因として、ミキサの性能や機構の影響、アジテータ車ドラム内で膨張材に経時変化が生じている可能性が示唆された。
- (2) 膨張材コンクリートの拘束膨張率は 176×10^{-6} 、拘束膨張率を合成した長さ変化率は 524×10^{-6} 程度であった。
- (3) 材齢 2 年における、スラブと同じ厚さとした無拘束状態の小型試験体中心のひずみは、膨張材未使用が収縮側に 660×10^{-6} 、使用した試験体は膨張側に 189×10^{-6} であった。
- (4) 模擬スラブ試験体のひび割れ本数について、膨張材未使用に対して膨張材を使用したものは 88% 低減した。
- (5) 模擬スラブ試験体の平均ひび割れ間隔は、膨張材未使用 298 mm 、使用した試験体は 2471 mm 程度であった。

謝辞

本実験の実施にあたり、山一興産株式会社相模工場様、株式会社デンカ様に様々ご協力をいただきました。ここに記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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・同解説、2023.2
- 2) 飯田康介ほか：乾燥収縮ひずみを制御したコンクリートのひび割れ抑制効果の検証 その 8 実大デッキスラブ試験体の 2 年間のひずみ・応力の経時変化 応力計算方法および試験体 N の結果、その 9 実大デッキスラブ試験体の 2 年間のひずみ・応力の経時変化 試験体 H, L1, L2、日本建築学会大会学術講演梗概集、2018.7
- 3) 小林哲夫・小田部裕一・閑田徹志・金塚美喜男：ひび割れ低減コンクリートの製造に関する検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.26、No.1、2004
- 4) 野口貴文、友澤史紀：高強度コンクリートの圧縮強度とヤング係数の関係、日本建築学会構造系論文集、第 474 号、pp.1-10、1995.8
- 5) 藤下大知・飯田康介・塚本康誉・塩田博之：湿潤養生期間が膨張材を用いたコンクリートの膨張・収縮特性に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文集、Vol. 46、No.1、2024

ひとこと

実大のスラブ試験体で膨張コンクリートの収縮ひび割れを確認した事例は多くありません。今回の知見を基に、ひび割れをより正確に予測できる方法確立し、品質と低炭素化の両立を目指してまいります。



飯田 康介