

乾燥収縮ひずみを制御したコンクリートの材齢5年の品質調査

塚本 康誉 飯田 康介
塩田 博之^{*1}

概 要

鉄筋コンクリート造におけるひび割れは、建築物の耐久性の低下に大きな影響を及ぼす要因である。筆者らは、要因の一つである乾燥収縮を制御することを目的に開発したコンクリートのひび割れ抑制効果を確認するため、実大模擬試験体を作成し暴露試験を実施してきた。

本研究では、乾燥収縮ひずみを制御したコンクリートの材齢5年が経過した実大模擬試験体におけるひび割れ抑制効果、長期強度および耐久性を検証することを目的として、コア試験体による圧縮強度、中性化深さ、実大模擬試験体打設時に採取した試験体の乾燥収縮ひずみの測定、実大模擬試験体の目視によるひび割れの観察を行った。

その結果、全試験体で材齢28日の圧縮強度は増進していることを確認した。中性化深さの測定結果と中性化深さの予測値が同様な傾向であることを確認した。ひび割れ観察結果から、目標乾燥収縮ひずみを抑制したコンクリートのひび割れ抑制効果を確認した。

Quality Investigation of the concrete with Controlled Drying Shrinkage Strain at 5 years of age

Abstract

Cracks in reinforced concrete are one of the major factors that influence deterioration of durability of a structure. We have made actual-sized specimens to confirm the shrinkage crack prevention effect, which was developed for the purpose of controlling drying shrinkage, one of the causes of cracks. In addition, we have conducted an exposure test on the actual-sized specimens.

In this research, we tested to verify the shrinkage crack prevention effect, long-term strength, and durability of concrete with controlled drying shrinkage strain at 5 years of age. The tests were compressive strength test of core specimen, neutralization depth measurement, the drying shrinkage of test pieces, and crack investigation of actual-sized specimens.

As a result, we confirmed that the compressive strength at 28 days of age increased in all the test specimens. It was also confirmed that the measurement results of the neutralization depth and the predicted values tend to be similar. In addition, from the crack investigation results of the actual-sized specimens, the crack prevention effect of concrete with controlled drying shrinkage strain was confirmed.

キーワード: 乾燥収縮、膨張材、収縮低減剤
 実大実験、収縮ひび割れ

*1 建築本部 建築統括部

§1. はじめに

筆者らは、目標性能に応じて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を確認するため、2015年10月7日に茨城県つくば市内のレディーミクストコンクリート工場でコンクリートを製造し、各試験の試験体および実大模擬試験体を作製した。また作製した乾燥収縮ひずみを制御したコンクリートの室内試験および実大模擬試験体により材齢2年までの調査結果を報告した¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾。

本研究では、乾燥収縮ひずみを制御したコンクリートの材齢5年が経過した実大模擬試験体におけるひび割れ抑制効果、長期強度および耐久性を検証することを目的として、コア試験体による圧縮強度、中性化深さ、実大模擬試験体打設時に同時に採取した各種試験体の乾燥収縮ひずみの測定、実大模擬試験体の目視によるひび割れの観察を行った。

§2. 実験概要

2.1 調合および検討対象部材

表1に検討対象部材、表2に使用材料、表3に調合を示す。調合は目標乾燥収縮ひずみが -800×10^{-6} (基準コンクリート、記号:N)、 -400×10^{-6} (高耐久コンクリート、記号:H)–

表1 検討対象部材

調合名	調合記号	目標乾燥収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)	検討対象部材	
			壁	デッキスラブ
基準コンクリート	N	–	○	○
高耐久コンクリート	H	-400	○	○
低収縮コンクリート1	L1	-250	–	○
低収縮コンクリート2	L2	-250	–	○
収縮ゼロコンクリート	Z	0~-100	○	–

250×10^{-6} (低収縮コンクリート、記号:L1、L2)、 $0 \sim -100 \times 10^{-6}$ (収縮ゼロコンクリート、記号:Z)の5種類とした。各使用材料および調合は目標の乾燥収縮ひずみを示すよう、セメントおよび粗骨材の種類、エトリンガイトと石灰複合系の低添加型の膨張材および収縮低減剤の有無を因子とし過去の実験結果を参考に決定した。水結合材比(W/B)は、N、Hでは50%、L1、L2、Zでは45%とした。L1、ZのW/Bを低減した理由は過去の実験結果より、膨張材および収縮低減剤を併用したコンクリートの圧縮強度が、膨張材および収縮低減剤を単独使用したコンクリートより低かったためである。L2のW/Bを低減した理由は過去の実験結果より、膨張材を標準使用量より多く使用したコンクリートの圧縮強度が、膨張材を標準使用量としたコンクリートより低かったためである。

表2 使用材料

材料	記号	種類
セメント	C	N: 普通ポルトランドセメント、 (密度 3.15 g/cm^3)
		M: 中庸熟ポルトランドセメント、 (密度 3.21 g/cm^3)
水	W	地下水
細骨材	S1	行方産陸砂、 (表乾密度 2.58 g/cm^3 、粗粒率2.50)
	S2	佐野産石灰石砕砂、 (表乾密度 2.69 g/cm^3 、粗粒率3.10)
粗骨材	G1	つくば産砕石2005、 (表乾密度 2.69 g/cm^3 、実積率60.0%)
	G2	佐野産石灰石砕石2005、 (表乾密度 2.70 g/cm^3 、実積率60.0%)
膨張材	Ex	エトリンガイト・石灰複合系、低添加型
収縮低減剤	Sr	ポリエーテル誘導体
混和剤	Ad	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤

表3 調合表

調合記号	W/B (%)	s/a (%)	セメント種類	単位量 (kg/m^3)							添加率	添加量
				W	C	S1	S2	G1	G2	EX	($B \times \%$)	(kg/m^3)
N	50	47.2	N	167	334	581	261	968	–	–	0.950	–
H	50	47.1	N	167	314	581	258	–	972	20	1.000	–
L1	45	45.0	N	170	358	539	242	–	986	20	0.900	6
L2	45	45.1	N	170	353	542	242	–	986	25	0.775	–
Z	45	46.0	M	162	340	565	253	–	991	20	0.900	10

※混和剤(Ad)および収縮低減剤(Sr)は、単位水量(W)に含む。

表4 実験計画

測定項目		測定方法	実大模擬試験体	
			壁	デッキスラブ
試験体の測定	乾燥収縮ひずみ	JIS A 1129-3	実大模擬試験体打設時に採取した試験体で実施	
コアによる試験	圧縮強度	JIS A 1107	—	○
	中性化深さ	JIS A 1152	—	○
非破壊試験	ひび割れ	NDIS 3418	○	○
	圧縮強度(小径コア)	文献 ⁸⁾	○	—



写真1 実大模擬壁試験体 (H)



写真2 実大模擬デッキスラブ試験体 (N)

立面図 × 小径コア採取位置

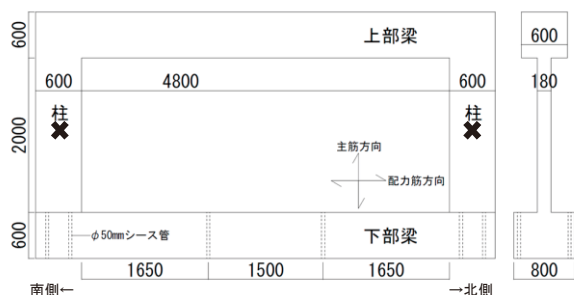


図1 実大模擬壁試験体小径コア採取位置

平面図 ● コア供試体採取位置

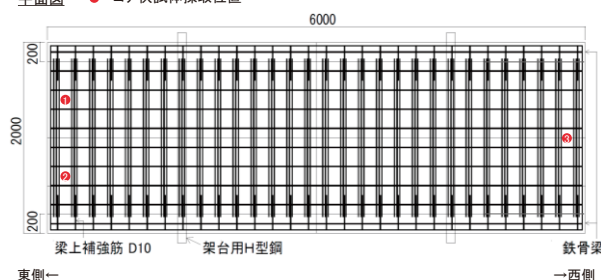


図2 実大模擬デッキスラブ試験体コア採取位置

実大模擬試験体における検討対象部材は壁とデッキスラブとした。実大模擬壁試験体はN、H、Z、実大模擬デッキスラブ試験体はN、H、L1、L2の調合のコンクリートとした。

2.2 実験計画

表4に実験計画、写真1に実大模擬壁試験体（調合H）、写真2に実大模擬デッキスラブ試験体（調合N）、図1に実大模擬壁試験体小径コア採取位置、図2に実大模擬デッキスラブ試験体コア採取位置を示す。実大模擬試験体打設時に採取した $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 400\text{mm}$ の試験体で乾燥収縮ひずみを測定した。実大模擬壁試験体では、ひび割れの観察と、ソフトコアリングC+⁶⁾に準拠し、ひび割れの観察に影響の無い柱部で小径コアを2箇所採取し、圧縮強度の推定および中性化深さの測定を行った。小径コアの直径は $\phi 25\text{mm}$ とし、直径の2倍程度の高さを確保する

ため、小径コアを $\phi 25\text{mm} \times 100\text{mm}$ 程度で採取を行い、中性化深さの測定の後、必要な試験体長さとなる様、試験体表面から切断を行った。実大模擬デッキスラブ試験体では、ひび割れの観察とひび割れの観察に支障のない端部でコア試験体の採取を行い、圧縮強度と中性化深さを測定した。コア試験体寸法は直径の2倍程度の高さを確保するため $\phi 75\text{mm} \times 150\text{mm}$ とした。 $\phi 75\text{mm}$ コアは東側で2箇所、西側で1箇所採取した。コア試験体の圧縮強度試験はコア試験体の両面を研磨した後、試験を行った。小径コア、コア試験体の中性化深さの測定は、コア採取後の側面で、試験体の水気を除去しフェノールフタレイン溶液を噴霧し測定した。ひび割れの観察は材齢2年時までに観察されたひび割れの有無と材齢5年時に新たに観察されたひび割れを観察し、ひび割れ幅をひび割れ幅はクラックスケールにより 0.05mm 間隔で測定した。

§3. 実験結果

3.1 圧縮強度

図3に小径コアとφ75mmコア試験体による圧縮強度試験結果を示す。また比較のため標準養生材齢28日の圧縮強度(以下、材齢28日圧縮強度とする)を併記する。実大模擬壁試験体の調合ごとの大小関係は材齢28日と同様、N<H<Zの順となった。実大模擬デッキスラブ試験体の調合ごとの大小関係はN<H<L1<L2となった。全試験体とも材齢28日の圧縮強度と比較して強度増進しており、実大模擬壁試験体のZでその傾向は顕著となった。

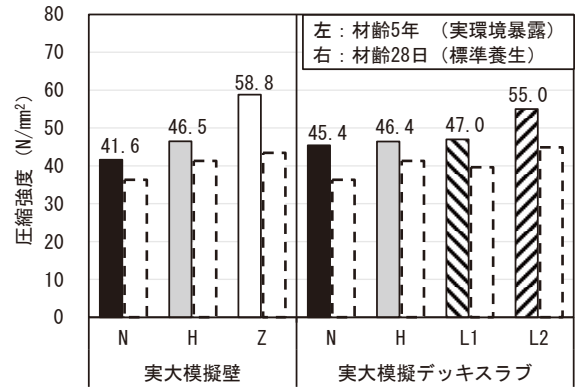


図3 圧縮強度

3.2 中性化深さ

図4に小径コアとφ75mmコア試験体から測定した中性化深さ試験結果を示す。併せて、試験体作成時に実施した促進中性化試験結果から得られる材齢5年の中性化深さの推定値を併記する。促進中性化試験から材齢5年の中性化深さの推定には式(1)を用いた。

$$C = A\sqrt{CO_2/5.0} \times \sqrt{t} \quad (1)$$

ここに、C: 中性化深さ(mm)、A: 中性化速度係数(mm/週)、CO₂: 屋外の二酸化炭素濃度0.05(%)、t: 促進期間(週)

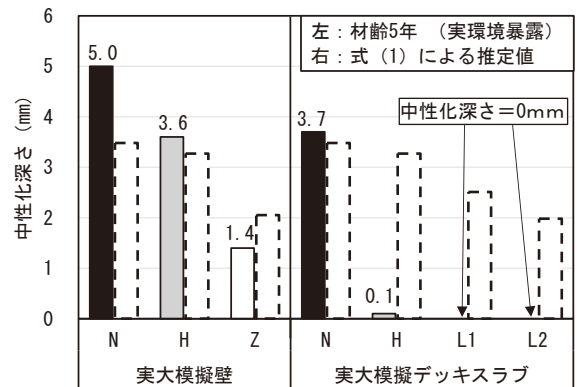


図4 中性化深さ

材齢5年におけるコアによる中性化深さの大小関係は試験体採取時に行った促進中性化試験からの推定値と同様の傾向であった。実大模擬壁試験体のN、H、実大模擬デッキスラブ試験体のNでは促進中性化試験結果から得られる推定値と比較して大きくなった。実大模擬壁試験体のZ、実大デッキスラブ試験体のH、L1、L2では促進中性化試験結果から得られる推定値と比較して小さくなった。実大模擬デッキスラブ試験体では、実大模擬壁試験体と比較して中性化深さが小さくなったが、実大模擬デッキスラブ試験体は乾燥面が1面であることの影響が考えられる。

3.3 乾燥収縮ひずみ

図5に拘束膨張を考慮した乾燥収縮ひずみの測定結果を示す。本研究では、膨張材を使用した場合の乾燥収縮ひずみを、材齢7日の拘束膨張試験による拘束膨張ひずみに長さ変化試験による長さ変化率を足し合わせて評価している。材齢2年時に測定したひずみが全体的にわずかに増加しているが、測定期間内に計測器を交換したことによる誤差が影響したと考えている。

乾燥収縮ひずみの進行は材齢1年時において材齢5年時の88~96%となっており、材齢1年時からほぼ横ばいとなっていることがわかる。材齢5年時の乾燥収縮ひずみは、

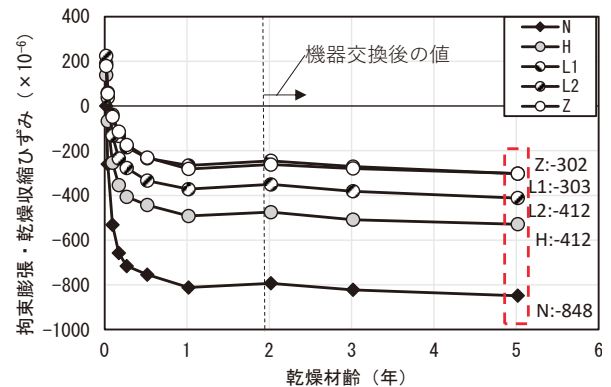


図5 拘束膨張を考慮した乾燥収縮ひずみ

直前に測定した材齢3年時の乾燥収縮ひずみとの差が20~30×10⁻⁶程度であり、いずれの水準においても乾燥収縮ひずみの進行は少ない。

3.4 実大模擬試験体のひび割れ観察結果

(1) 検討概要

ひび割れの定量的な評価を行うため、試験体に生じた全てのひび割れを対象にひび割れ面積比を算出した。ひび割れ面積比の計算には式(2)を用いた。図6にひび割れ面積比を示す。ひび割れ長さはひび割れ観察結果の図を画像編集ソフトに取り込み、線長を測定し、実大長さに換算した。

$$r = \frac{\sum(w \cdot l)}{A} \quad (2)$$

ここにw: ひび割れ幅(mm)、l: ひび割れ長さ(mm)、A: 実大模擬壁または実大模擬デッキスラブのひび割れ測定面の全面積(mm²)

図7に実大模擬壁試験体のひび割れ観察結果、図8に実大模擬デッキスラブ試験体のひび割れ観察結果を示す。既往の報告¹⁾では、乾燥収縮ひび割れを評価することを目的としていたため、0.10mmを下回る微細なひび割れは記載をしなかったが、本報告では経年に伴うひび割れの変化を示すため、0.10mmを下回る微細なひび割れを追記した。また実大模擬デッキスラブ試験体のHは、試験体作製時にコンクリート表面の押さえが遅れたことにより、試験体表面にプラスチック収縮ひび割れが発生したため、本報告では実大デッキスラブ試験体のHのひび割れ面積比およびひび割れ状況について検討対象外とした。ひび割れ観察結果には、材齢2年時に観察され、材齢5年時に観察されたひび割れを黒色、材齢2年時に観察され、材齢5年時に観察されなかったひび割れを青色、材齢5年経過時にあらたに観察されたひび割れを赤色で示した。材齢2年から材齢5年経過時までの代表的なひび割れの変化状況を、図中に記載をした。

(2) 実大模擬壁試験体

乾燥収縮ひずみの制御を行っていないNでは、材齢2年観察時から5年観察時にかけて、中央主筋方向に発生したひび割れが幅0.30mmから幅0.20mmへと縮小したが、幅0.10mm以下の微細なひび割れが若干増加した。微細なひび割れが増えたことより、ひび割れ面積比も増加した。

目標乾燥収縮ひずみを -400×10^{-6} としたHでは、中央主筋方向に発生したひび割れが幅0.15mmから幅0.10mmへと縮小しており、ひび割れ面積比もそれに伴わずかに縮小し、材齢2年観察時からひび割れの進展は認められなかった。NとHにおいて中央のひび割れ幅が縮小したのは、拘束体となる梁に遅れて収縮ひずみが生じたことにより、一度応力解放されたひび割れの幅が縮んだことが要因の1つとして考えられる。

目標乾燥収縮ひずみを $0 \sim -100 \times 10^{-6}$ とした試験体Zについては、材齢5年観察時もひび割れは発生していなかった。

(3) 実大模擬デッキスラブ試験体

乾燥収縮ひずみの制御を行っていないNでは、材齢2年観察時から材齢5年観察時にかけて、中央部のひび割れ

が幅0.10mmから幅0.20mmへと拡大し、主筋方向の幅0.10mm以下の微細なひび割れが増加した。長さ変化試験では、Nについてもひずみの進行がほぼ収束しているのに

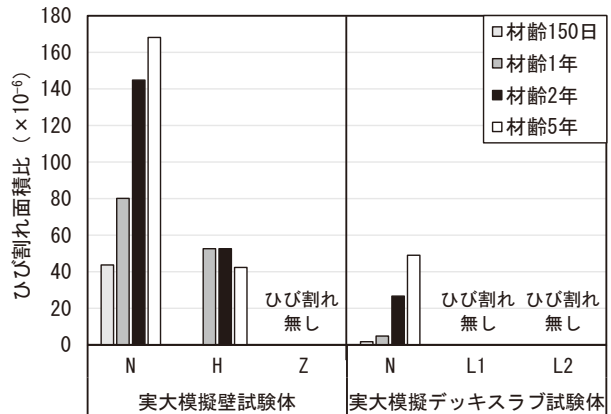


図6 ひび割れ面積比

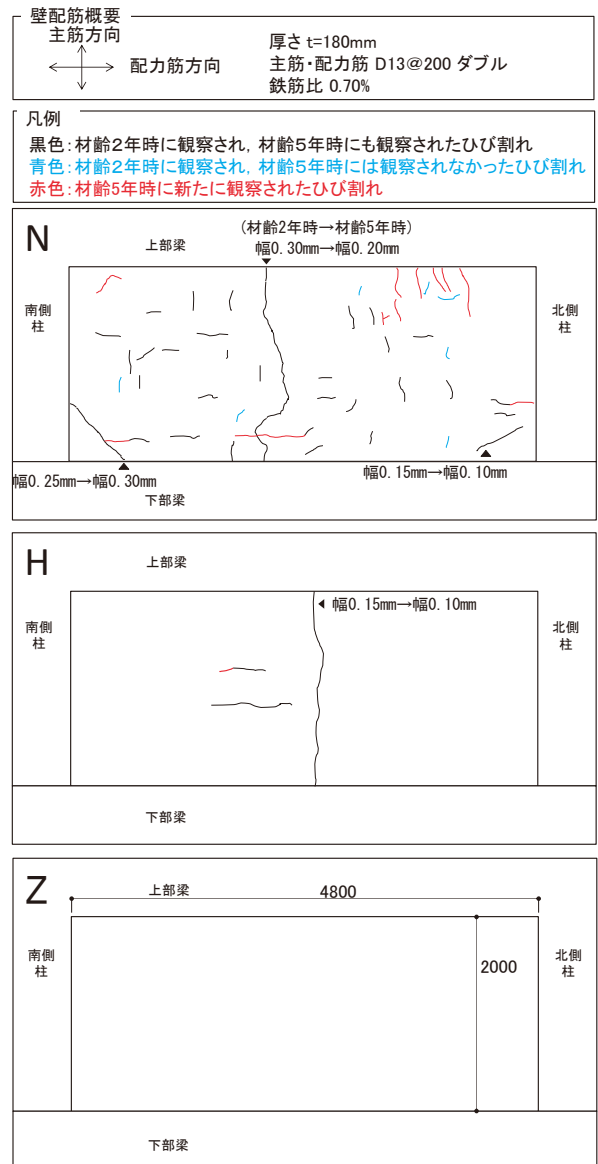


図7 実大模擬壁試験体ひび割れ観察結果

対し、実大模擬デッキスラブ試験体については材齢5年経過後もひび割れの進展がみられた。この理由として①実大模擬デッキスラブ試験体は屋外環境下に置かれているため温湿度の変化や風の影響を受けたこと、②長さ変化試験に供した試験体と実大模擬デッキスラブ試験体の乾燥収縮は長さ変化試験に比べ遅かったこと等が考えられる。

目標乾燥収縮ひずみを $0 \sim 100 \times 10^{-6}$ としたL1、L2では、材齢5年観察時もひび割れは発生しておらず、ひび割れ抑制効果を確認することが出来た。

§4. まとめ

乾燥収縮ひずみを制御したコンクリートの材齢5年の品質調査を行った。得られた知見を以下に示す。なお、本研究は今後も継続して実施する予定である。

- (1) 全試験体とも材齢28日の圧縮強度と比較して強度増進しており、実大模擬壁試験体のZでその傾向は顕著となった。
- (2) 材齢5年時におけるコアによる中性化深さの大小関係は試験体採取時に行った促進中性化試験からの推定値と同様の傾向であった。
- (3) 実大模擬壁試験体に比べて実大模擬デッキスラブ試験体の中性化深さが小さくなった。
- (4) 拘束膨張を考慮した乾燥収縮ひずみの測定結果は、いずれの水準においてもひずみの進行は少なかった。
- (5) 実大模擬壁試験体、実大模擬デッキスラブ試験体のNでは新たなひび割れの発生もしくはひび割れの拡幅が生じた。
- (6) 実大模擬壁試験体のHではひび割れの進展は確認されなかった。
- (7) 実大模擬壁試験体のZ、実大模擬デッキスラブ試験体のL1およびL2ではひび割れが認められず、ひび割れ抑制効果を確認することが出来た。

謝辞 本研究は、7社共同研究(フジタ、安藤ハザマ、熊谷組、佐藤工業、戸田建設、西松建設、前田建設工業)での成果である。本実験を行うに当たり、コンステック(株)にご協力頂きました。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 塩田博之、浦川和也、鈴木好幸、野中英、井戸康浩、木村仁治、宮野和樹:コンクリートの乾燥収縮ひび割れ制御方法に関する実験的研究(その3 実大試験体によるひび割れ抑制効果確認実験の概要)、日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)、pp.147-148、2016.8
- 2) 井戸康浩、安部弘康、野中英、浦川和也、木村仁治、飯田康

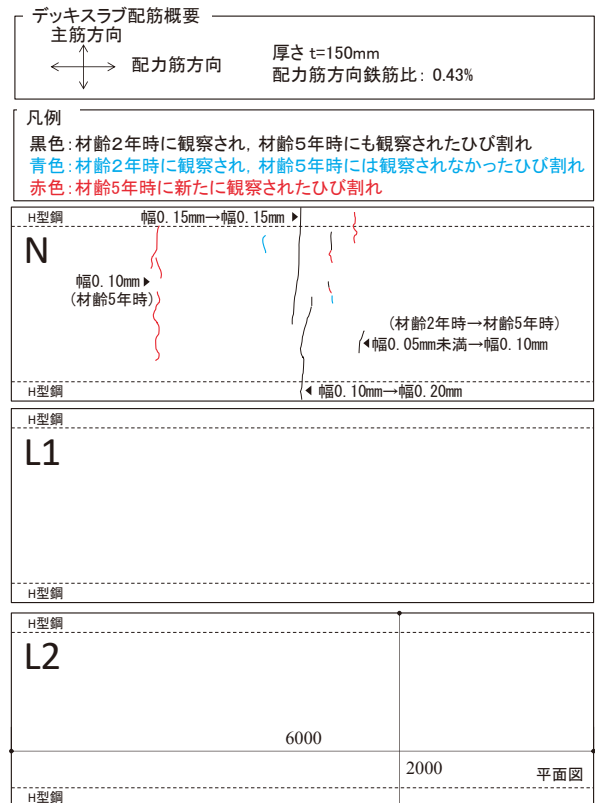


図8 実大模擬デッキスラブ試験体ひび割れ観察結果

- 介、梶田秀幸: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4 実大実験の使用材料・調査・試験項目およびコンクリート試験の結果)、日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)、pp.149-150、2016.8
- 3) 鈴木好幸、野中英、浦川和也、梅本宗宏、木村仁治、塩田博之、宮野和樹: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5 硬化コンクリートの性状およびひび割れ抑制効果の検証)、日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)、pp.151-152、2016.8
 - 4) 飯田康介、安部弘康、鈴木好幸、野中英、浦川和也、梅本宗宏、木村仁治、梶田秀幸、宮野和樹、塩田博之: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6 実大試験体のひずみ・ひび割れ状況)、日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)、pp.227-228、2017.8
 - 5) 浦川和也、鈴木好幸、野中英、梅本宗宏、木村仁治、塩田博之、宮野和樹: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7 材齢2年における使用したコンクリートの強度、耐久性試験結果および実大試験体のひび割れ状況)、日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)、pp.831-832、2018.9
 - 6) 技術審証・第0317号:小径コアによるコンクリートコンクリート構造物の調査診断技術「ソフトコアリングC」
 - 7) 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説、2016.7

ひとこと

乾燥収縮ひずみを抑制したコンクリートの研究で実大レベルのコンクリート試験体暴露試験は貴重なため、今後も観察を進めデータを取得致します。多様な要望に応えられるよう、適用拡大等に尽力してまいります。



塚本 康誉