

物流倉庫の床スラブを対象としたひび割れ調査

CRACK INVESTIGATION OF THE CONCRETE SLAB FLOOR OF DISTRIBUTION WAREHOUSE

都築正則 — * 1 福田一夫 — * 2
神代泰道 — * 3

Masanori TSUZUKI — * 1 Kazuo FUKUDA — * 2
Yasumichi KOSHIRO — * 3

キーワード：
乾燥収縮, ひび割れ本数, ひび割れ幅, ひび割れ係数, 床スラブ

Keywords:
Drying shrinkage, Number of clacks, Clack width, Crack coefficient, Concrete slab floor

We conducted a crack survey of floor slabs in distribution warehouses up to 5 years old. As a result, the crack coefficient at 5 years of age was about 70×10^{-6} to 100×10^{-6} on the 2nd and 3rd floors, and about 30×10^{-6} on the 4th floor. The reason why the 4th floor is smaller than the other floors is that it is used less frequently than the other floors and is less affected by external forces such as vehicle running, and the slab is less restrained than the other floors.

1. はじめに

近年, 物流倉庫等で, 大面積の床スラブを有するS造建物の施工物件数は増加している。これら建物において, 床スラブのひび割れは, 主に美観上の問題から不具合に繋がる。ひび割れが発生しやすい理由として, 以下の点が考えられる。まず, 床スラブの仕上げとして, 防塵塗装や表面強化剤散布を含むコンクリート素地, もしくは無機系塗床仕上げのため, 表層が乾燥しやすく, 経年による乾燥収縮ひび割れが発生しやすいこと。次に, 長尺シートやOAフロア等の仕上げでないことから, ひび割れが顕在化しやすいこと。また, フォークリフト等の車両走行がある場合, 乾燥収縮ひび割れに角かけが生じ, ひび割れ幅が大きくなることや車両走行の振動がひび割れ発生を助長していることが考えられる。

長期に亘る床スラブのひび割れ進展に関する調査報告は現状少ない¹⁾。今回, これら大型物流倉庫での床スラブに対して, 経過年数に伴うひび割れの進展を把握するため, 竣工後1年, 2年および5年のひび割れ調査(ひび割れ本数, ひび割れ幅の測定)を実施した。

2. 調査対象となる床スラブ

2.1 建物の概要

調査の対象とした建物は鉄骨造4階建ての物流倉庫で, 1層あたりの階高は7m程度である。建物長さはX方向:約135m(柱間隔約10m), Y方向:約100m(柱間隔約12~13m)で, 建築面積は約16,000m²である。床スラブのコンクリート打込みは, 2月中旬~3月下旬で, 建物竣工は6月下旬である。

2.2 コンクリート

使用したコンクリートの調査を表1に示す。コンクリートは, 設計基準強度は24N/mm², 品質基準強度は27N/mm², 呼び強度は30および33である。水結合材比は45%程度, スランプ目標値は15±2.5cm, 空気量目標値は4.5±1.5%であった。全てのコンクリートにはひび割れ低減を目的として石灰系膨張材を20kg/m³使用する調査が採用されている。粗骨材は砕石および砂利を混合して使用している。

表1 コンクリートの調査

工場	呼び名	W/B (%)	s/a (%)	単位使用量(kg/m ³)					Ad	SP
				W	B		S	G		
					C	EX				
A	30-15-25 N	43.0	41.9	175	387	20	699	998	0.8	—
	33-15-25 N	47.5	47.5	164	325	20	763	1014	—	1.0
B	30-15-25 N	44.5	41.6	177	378	20	486	1220	0.9	—
	33-15-25 N	45.5	43.0	160	332	20	527	1557	—	0.9

C: 普通ポルトランドセメント, EX: 低添加型石灰系膨張材

S: 砂および砕砂を混合したもの(工場によって産地が異なる。)

G: 砂利および砕石を混合したもの(工場によって産地が異なる。)

Ad: AE減水剤, SP: 高性能AE減水剤

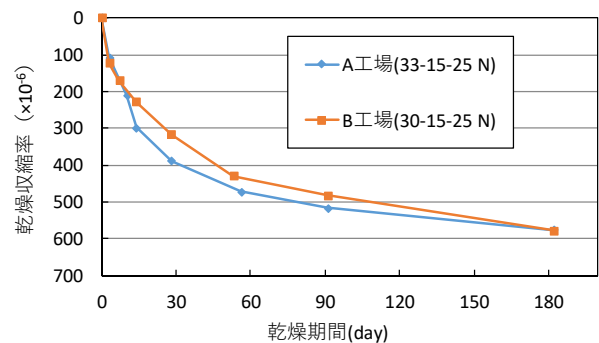


図1 コンクリートの乾燥収縮率

試し練り時に採取したコンクリートの乾燥収縮率を図1に示す。使用するコンクリートの乾燥収縮率は, 単位水量および工場による差は小さく, 乾燥期間26週で 580×10^{-6} 程度であった。

2.3 床スラブの配筋

床スラブの仕様を表2に示す。2~4階は一軸トラス筋付デッキであり, 柱間のスパンは, 12m(または13m)×10mである。鉄筋比は主筋方向で1.05%, 配力筋方向で0.44%である。打込み後の湿潤養生期間は5日間とし, その間は重量物を積載しないようにした。

¹⁾ ㈱大林組技術本部技術研究所生産技術研究部 主任研究員・工修
(〒204-8558 清瀬市下清戸4-640)

²⁾ ㈱大林組大阪本店建築事業部品質管理部 部長

³⁾ ㈱大林組技術本部技術研究所生産技術研究部 首席技師・工博

¹⁾ Research Engineer, Technology Research Institute, Obayashi Corporation, M. Eng.

²⁾ General Manager, Osaka Head Office, Quality Control Dept., Obayashi Corporation

³⁾ Research Engineer Manager, Technology Research Institute, Obayashi Corporation, Dr. Eng.

表2 床スラブの仕様(2階, 3階, 4階)

厚さ (mm)	位置	主筋		配筋筋		備考
		仕様	鉄筋比 (%)	仕様	鉄筋比 (%)	
190	上端筋	D16@200	1.05	D13@150	0.44	一軸トラス筋 付きデッキ
	下端筋	D16@200		—		

表3 鉄筋比の増大(3階の一部)

面積 (m×m)	配筋筋の仕様		
	位置	鉄筋およびピッチ	鉄筋比(%)
10×25	上端筋	D13@150	0.44
		D13@100	0.66
		D13@75	0.88

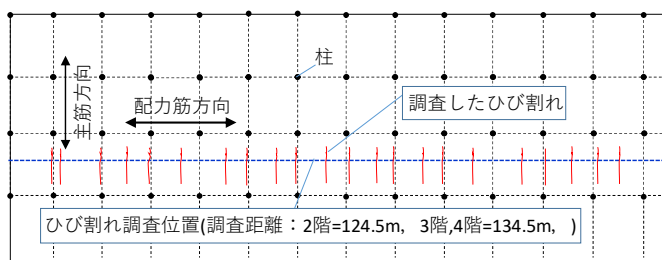


図2 ひび割れ調査方法のイメージ(平面図)

また3階の一部では、表3に示すように、ひび割れ対策として配筋筋を増大させたものを検証した。2 スパン分の面積(10m×25m)を対象に、配筋筋の鉄筋比を通常の0.44%から、1.5倍の0.66%、および2倍の0.88%に増加させたものでひび割れの発生を比較した。

3. 調査結果

3.1 各階のひび割れ発生状況

竣工時(材齢4ヶ月程度)の2~4階においては、ひび割れを確認できなかった。竣工後1年、2年および5年において、ひび割れは大梁および小梁の際もしくは真上で確認され、主に、配筋筋方向と直交方向に発生していた。ひび割れ調査方法の概要を図2に示す。ひび割れ調査は建物の長辺方向134.5m(2階は124.5m)を対象として、上記、配筋筋と直行方向に発生しているひび割れの幅および本数をカウントした。なお、床スラブの打込み工区における打継部についても本数として含めた。また、3階に関しては、ひび割れ調査箇所を2箇所(倉庫一般部と物資搬入用シャッター前)とした。ひび割れの調査時期は各年の7月~8月とした。

また、ひび割れ本数とひび割れ幅の傾向を包括的に確認するため、ひび割れ係数での比較を行った。ひび割れ係数は以下で計算した。

ひび割れ係数(単位: $\times 10^{-6}$)

= ひび割れ幅累計(各ひび割れ本数×平均幅)÷調査した距離*

※調査した距離(2階: 124.5m, 3階および4階: 134.5m)

竣工後1年、2年および5年目における各階の、10m当たりのひび割れ本数、ひび割れ幅の平均値、ひび割れ係数をそれぞれ図3~図

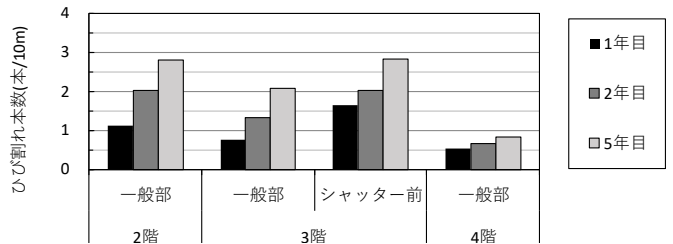


図3 各階のひび割れ本数

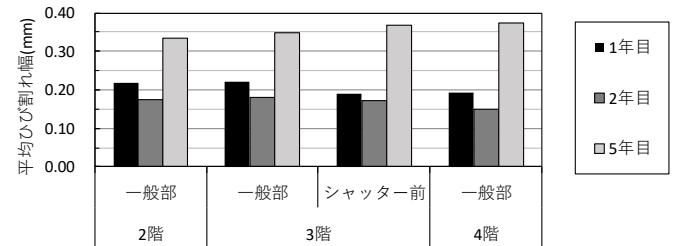


図4 各階のひび割れ幅

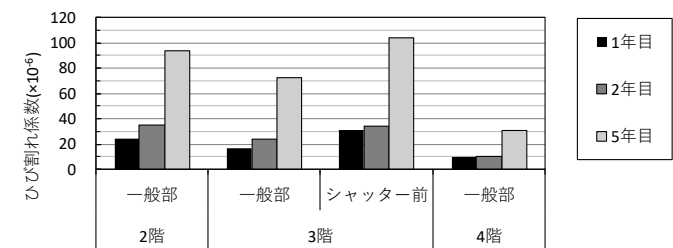


図5 各階のひび割れ係数

5に示す。なお、2年および5年目の調査時において、4階はフォークリフト等の車両走行頻度が2階や3階よりも少ない傾向であった。

図3より、各階の10m当たりのひび割れ本数は、経過年数とともに多くなり、5年目の一般部においては、2階, 3階および4階で、約3本, 2本, 1本程度と上階ほど小さくなる傾向であった。これは、上層階の拘束度が下層階よりも小さいこと²⁾、4階の車両走行頻度が2, 3階よりも少なく、ひび割れが進展しにくいことが理由として考えられる。また、3階ではシャッター前のほうが一般部よりもひび割れ本数は多くなった。これは、荷捌きのための車両走行頻度が一般部よりも多いことが理由として考えられる。

図4より、平均ひび割れ幅は、各階でほぼ同等で、1年目および2年目は0.15~0.2mm程度であり、5年目では0.35mm前後と大きくなる傾向を示した。

図5より、各階のひび割れ係数は、経過年数とともに大きくなり、2階および3階の一般部では、1年目で約 20×10^{-6} 前後、2年目で 30×10^{-6} 、5年目で約 $70 \sim 100 \times 10^{-6}$ 程度であった。4階はその半分程度であり、1年、2年、5年目でそれぞれ、 10×10^{-6} 、 10×10^{-6} 、 30×10^{-6} 程度であった。

3.2 鉄筋比を増大させた箇所のひび割れ

竣工後2年目と5年目調査時における、3階の鉄筋比を増大させた箇所のひび割れ図を図6に示す。2年目では大梁上にひび割れが1本確認されたのみであり、ひび割れ調査を実施した3階一般部およびシャッター前よりもひび割れが少ない結果となった。また、5年

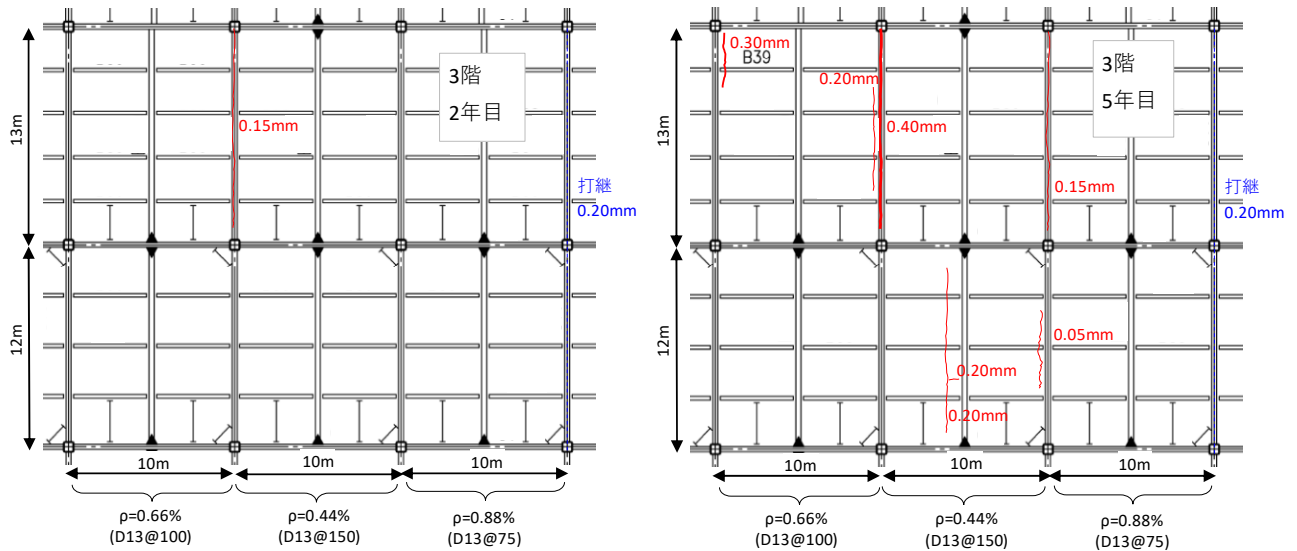


図6 鉄筋比増大の影響(3階, 2年目および5年調査時)

目においては、鉄筋比を増大させた部分(鉄筋比 0.66%および 0.88%)において、大梁の際以外ではひび割れは発生していない結果となった。このことから、鉄筋比の増大は、ひび割れ発生抑制に大きな効果があることが分かった。また鉄筋比 0.44%の部分においても、ひび割れ係数は 25×10^{-6} 程度と3階の他のエリアよりも小さい傾向であった。この理由として、鉄筋比の増大により、周辺エリアの乾燥収縮による寸法変化が抑制されたこと、周辺エリアの曲げ剛性の増加が、鉄筋比 0.44%の床スラブに与えるたわみや振動を低減していることが推察される。

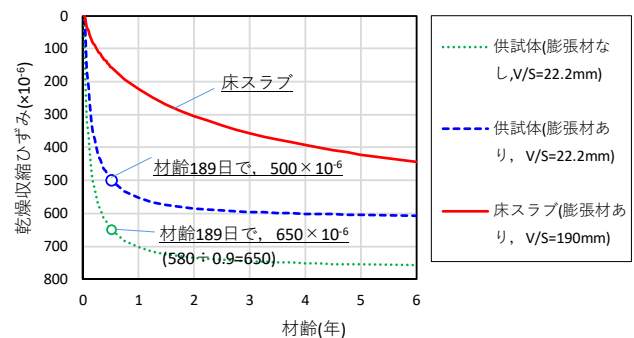


図7 想定した部材の乾燥収縮ひずみ

4. 計算式によるひび割れ係数の算定

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」³⁾(以下、AIJ ひび割れ制御指針)では、外壁を対象に、修正ベース・マレー法によるひび割れ幅および本数を予測する式(以下、SBM式)が提案⁴⁾されている。SBM式は簡易に算定可能なため、床スラブについても適用可能かどうか検討した。

4.1 修正ベース・マレー法への入力値

(1) コンクリートの乾燥収縮ひずみ

事前に確認した供試体の乾燥収縮率は約 580×10^{-6} であった。日本建築学会の「膨張材・収縮低減剤を使用するコンクリートの調査設計・製造・施工指針(案)・同解説」⁵⁾の解説の中では、「膨張材混和コンクリートの乾燥収縮ひずみが無混和コンクリートよりも小さくなる効果を安全側に無視して、膨張材指針(1982)に示された膨張率の最小値 150×10^{-6} を、膨張材による乾燥収縮率の収縮低減量に置き換えて表すことができるとしている」と記述されている。

今回、「膨張材なし」のコンクリートの乾燥収縮率を測定していないこと、また乾燥期間中の「膨張材あり」のコンクリートの乾燥収縮率は、「膨張材なし」よりも1割程度小さくなる⁶⁾と考えられることから、乾燥期間26週(標準水中養生7日も含めると、材齢189日)の「膨張材なし」のコンクリートを 650×10^{-6} と仮定し、さらにそこから 150×10^{-6} を差し引いた値で 500×10^{-6} と設定した。

(2) 部材の乾燥収縮ひずみ

実際の部材は、供試体よりも外気に接する表面積は小さく、乾燥

収縮ひずみの収束は長期に亘る。このことから、材齢5年までの部材の収縮ひずみは、AIJ ひび割れ制御指針における体積比表面積を考慮した収縮ひずみの予測式から算出した。

予測式で算出した床スラブの乾燥収縮ひずみを図7に示す。予測式において供試体($V/S=22.2\text{mm}$, 材齢189日, 乾燥開始材齢7日)で、 650×10^{-6} になるようにフィッティングを行い、その後、膨張材の効果としてそこから 150×10^{-6} を差し引いた値を「膨張材あり」の乾燥収縮率とした。

次に、 $V/S=190\text{mm}$, 乾燥開始材齢を5日として床スラブの乾燥収縮ひずみを算出した。 $V/S=190\text{mm}$ とした理由は、当該床スラブは上面がコンクリート面、下面がデッキであることから、体積表面積比は部材厚となるためである。部材の収縮ひずみは材齢5年で約 420×10^{-6} であった。

(3) 修正ベース・マレー法によるひび割れ幅・本数の算出

SBM式によるひび割れ本数およびひび割れ幅の算出は、配筋筋と直行方向とし、鉄筋比は配筋筋の0.44%とした。また、ひび割れ本数を算出する部材長(L)は、柱スパンである10mとした。コンクリートの圧縮強度は材齢28日で 30N/mm^2 とし、材齢に伴う部材の収縮ひずみは前述のものを入力した。部材の拘束度は0.3~0.5程度であるとの報告⁷⁾から、 $\lambda=0.3, 0.4, 0.5$ の3種類のもので比較した。等価付着損失域の長さやひび割れ幅算出するための係数a,bは外壁と同じ値を使用した。

4.2 計算値と実測値の比較

(1) ひび割れ本数

SBM 式によるひび割れ本数と本調査結果を図 8 に示す。4 階の実測値はほぼ $\lambda=0.3$ 以内に収まるのに対し、3 階(シャッター前)の実測値は材齢によらず $\lambda=0.5$ の計算値よりも大きい値を示した。また 2 階の実測値においても 2 年目以降は、 $\lambda=0.5$ の計算値よりも大きい値を示した。実測値のひび割れ係数が大きくなる理由として、外壁とは異なり、2 階および 3 階(シャッター前)は、コンクリートの乾燥収縮だけでなく、フォークリフトの走行が多く繰返し荷重等の外力の影響を受けているためと考えられる。

(2) ひび割れ幅

SBM 式によるひび割れ幅と本調査結果を図 9 に示す。実測値のひび割れ幅は経年により拡大するのに対し、SBM 式では、コンクリートの圧縮強度増進の計算上、材齢約半年程度でひびわれ幅が 0.3mm 程度となり、以降はほとんど変化していない。

(3) ひび割れ係数

SBM 式によるひび割れ係数と本調査結果を図 10 に示す。2 年目までの調査結果は、 $\lambda=0.4$ とした SBM 式によるひび割れ係数以下に収まるが、5 年目の調査結果では 2 階および 3 階シャッター前で、 $\lambda=0.5$ とした SBM 式によるひび割れ係数よりも大きくなった。

このことから、コンクリートの乾燥収縮だけでなく、車両走行等の繰返し荷重の影響を、ひび割れ本数などに加味することができれば、SBM 式を床スラブのひび割れ進展予測に適用できる可能性があると考えられる。今後の検討課題としたい。

5. まとめ

近年、施工物件が増加している大型物流倉庫の床スラブに対して、経過年数に伴うひび割れの進展を把握するために、竣工後 1, 2, 5 年のひび割れ調査(ひび割れ本数、ひび割れ幅、ひび割れ係数)を実施した。また、修正ベース・マレー法の予測式(SBM 式)による計算値と調査による実測値との比較を行い、以下のことが分かった。

- (1) 実測値において、5 年目の各フロアのひび割れ本数は、竣工 1 年目、2 年目と比較し増加していた。ひび割れ係数は、経過年数とともに大きくなり、2 階、3 階では、1 年目で約 20×10^{-6} 前後、2 年目で 30×10^{-6} 、5 年目で約 $70 \sim 100 \times 10^{-6}$ 程度であった。4 階はその半分程度であり、1 年、2 年、5 年目でそれぞれ、 10×10^{-6} 、 10×10^{-6} 、 30×10^{-6} 程度であった。4 階のひび割れ係数が小さい理由として、上層階の拘束度が下層階よりも小さいことが関係していること、また、フォークリフト等の車両走行頻度が 4 階では 2, 3 階よりも少ないためひび割れが進展し難いことが考えられる。
- (2) 3 階の一部で鉄筋比を増大したエリアでは、3 階の他エリアよりもひび割れが少ない結果となり、鉄筋量増大によるひび割れ低減効果は大きいことが分かった。
- (2) SBM 式による計算値と調査による実測値の比較において、2 年目までの調査結果は、拘束度 $\lambda=0.4$ とした SBM 式によるひび割れ係数以下に収まっているが、5 年目の調査結果では 2 階および 3 階(シャッター前)で、 $\lambda=0.5$ とした SBM 式によるひび割れ係数よりも大きくなるものが確認された。このことから、コンクリートの乾燥収縮だけでなく、車両走行等の繰返し荷重等の外力の影響を加味することができれば、SBM 式を床スラブのひび割れ進展予測

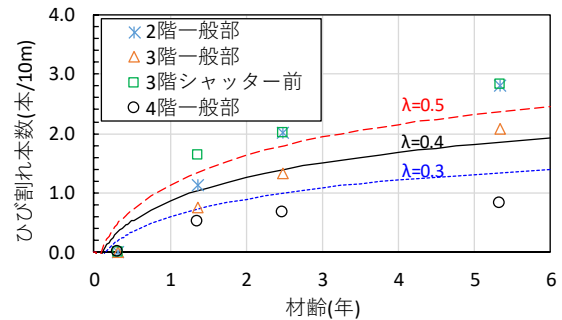


図 8 ひび割れ本数の実測値と算定値の比較

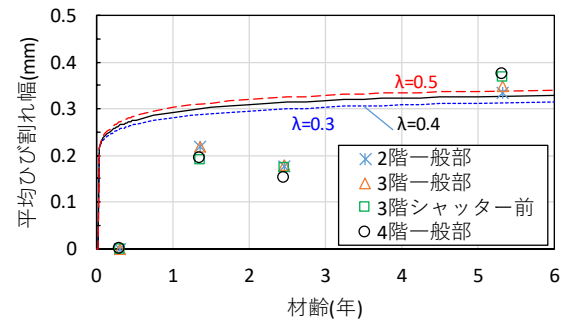


図 9 ひび割れ幅の実測値と算定値の比較

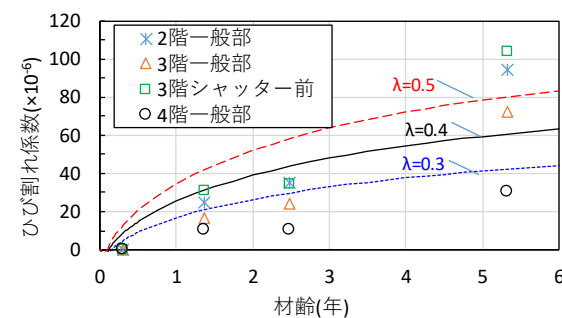


図 10 ひび割れ係数の実測値と算定値の比較

に適用できる可能性があると考えられる。

参考文献

- 1) 佐竹紳也 他：膨張コンクリートを使用した実構造物の長期性状およびひび割れ調査，日本コンクリート工学・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. 433-438，2011. 9
- 2) 鈴木丈夫 他：コンクリートの乾燥収縮ひびわれ発生に関するモデル架構の拘束率：有限要素法解析による推定，日本建築学会近畿支部研究報告集，p. 5-8，1989
- 3) 日本建築学会編著：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，2006. 2
- 4) 橋田浩：鉄筋コンクリート造外壁の収縮ひび割れ幅と本数の簡易推定式の提案，日本建築学会大会学術講演梗概集. A-1，材料施工，pp. 645-646，2005. 9
- 5) 日本建築学会：膨張材・収縮低減剤を使用するコンクリートの調査設計・製造・施工指針(案)・同解説，2017. 2
- 6) 都築正則 他：収縮低減剤を使用したコンクリートの乾燥収縮に関する検討，日本建築学会大会学術講演梗概集. A-1，材料施工，pp. 857-858，2008. 9
- 7) 辻埜真人 他：保水性を有する新収縮低減剤を混和したコンクリートの実用化：その 9，日本建築学会大会学術講演梗概集，材料施工，pp. 705-706，2012. 9

[2020 年 10 月 7 日原稿受理 2020 年 12 月 7 日採用決定]