

物流倉庫スラブの乾燥収縮ひび割れ制御技術に関する研究

飯田 康介 塩田 博之

概 要

スラブのコンクリートは乾燥によって収縮ひずみを生じ、それが周囲の部材や内部の鉄筋に拘束されるとコンクリートに引張応力を生じさせる。乾燥収縮は長期間にわたり進行し続け、やがて応力がコンクリートの引張強度を超えるとコンクリートにはひび割れが発生する。当社では 2013 年度より、物流倉庫の床スラブを対象とした収縮ひび割れ対策のために、調査、研究を継続しており、この度、石灰石粗骨材および膨張材を使用したコンクリートを適用した実際のデッキスラブと土間スラブについて、ひずみの長期計測を行い、ひび割れ発生の危険性を検討した。また、塗布型収縮低減剤の試験施工を行い、その効果についても確認した。本報は、それらの結果について報告するものである。

Experiment on control technology of drying shrinkage cracks of slabs in distribution warehouse

Abstract

Concrete slabs shrink during drying and this shrinkage is impeded by structural members or internal reinforcing bars, causing tensile stress to be generated in the slab concrete. Drying shrinkage progresses over the long-term, and cracks occur when tensile stress exceeds tensile strength of concrete. FUJITA is continuing research into shrinkage cracks caused by drying in the floor slabs of distribution warehouses built in the 2013 fiscal year. We also examined the risk of cracking for a slab on a steel deck plate and one on a dirt floor slab using concrete with a limestone coarse aggregate and expansive admixture by making long-term measurements. Simultaneously, we confirmed the effect of a coating type shrinkage reducing agent. This paper reports these experimental results.

キーワード: スラブ、石灰石粗骨材、膨張材
乾燥収縮ひずみ、収縮ひび割れ、

§1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の耐震性や美観を長期間に渡って保つためには、コンクリートの劣化の進行を予測し、特にひび割れの発生を抑制、制御することが重要である。近年、物流倉庫のスラブ(=床)に発生するひび割れが問題となっており、当社ではその対策として、2013 年度から現在まで継続して調査・研究を行っている。

コンクリートに生じるひび割れの原因は様々存在するが、スラブにおいては乾燥収縮が主な原因と考えられている。乾燥収縮によってスラブに生じるひずみが、柱や梁などの周囲の部材や、スラブ内部の鉄筋に拘束されると、コンクリートには応力が生じる。収縮が進行するにつれ、引張応力が増加し、引張応力がコンクリートの引張強度を超えるとひび割れが生じる。

今回、石灰石および膨張材を使用したコンクリートを適用した物流倉庫スラブを対象に、実スラブの収縮ひずみおよび温度計測を行った。また、一部の区画において、表面塗布型の収縮低減剤の試験施工を行った。本報告は、その結果について報告するものである。

本検討では、デッキスラブおよび土間スラブを対象とし、ひずみ計測については実スラブの収縮ひずみを測定し、各計測点におけるひずみの経時変化を確認する。また、無拘束状態の試験体を同時に作製し、実スラブの拘束度を把握する。次に、収縮方向における梁などの拘束体のヤング係数からスラブコンクリートに生じる応力を求め、引張強度と比較することで、ひび割れに対する余裕度を推定する。また、膨張材のひび割れ遅延効果について検討を行う。塗布型収縮低減剤の効果確認試験については、収縮抑制のメカニズムが異なる 2 種類の塗布剤を塗布し、表面の目視観察を行う。

§2. 計測概要

2.1 計測計画

A) スラブのひずみ計測

表 1 に計測階、スラブの種類、打設日および設計基準強度を、表 2 に各スラブの厚さ、鉄筋比など、図 1 に計測位置の概要を示す。計測対象の建物は柱が鉄筋コンクリート、梁が鉄骨で構成されており、計測は 1 階の土間スラブおよび 2 階のデッキスラブにて実施した。打設日は両階ともに標準期、両配合とも設計基準強度は Fc24、粗骨材は 100% 石灰石、膨張材入りである。ひずみ計測、収縮低減剤の施工区画について、フォークリフトの走行量の違いによる影響を把握するため、それぞれ 2 区画ずつ実施した。各区画は X・Y 方向とも 10m スパンである。なお、

表1 計測対象部材の概要

計測階	スラブ種別	打設日	設計基準強度 (N/mm ²)	備考
2F	デッキスラブ	2014/10/8	24	膨張材あり 粗骨材は全て石灰石
1F	土間スラブ	2014/11/18	24	膨張材あり 粗骨材は全て石灰石

表2 スラブ諸元

スラブ種類	厚さ (mm)	鉄筋位置	鉄筋径・ピッチ		鉄筋比		備考
			主筋	配筋筋	主筋 (%)	配筋筋 (%)	
デッキスラブ	180	上端	D13 @200	D10 @100	0.754	0.398	主筋はデッキプレートに付帯する鉄筋。デッキプレートにラチス材(φ5mm)でトラス型に溶接固定されたものを使用。配筋筋は上端主筋の上のみ現場配筋。
		下端	D10 @100	-			
土間スラブ	200	上端	D13 @200	D13 @200	0.638	0.638	土間にスタイロフォームを敷設し、その上に配筋。
		下端	D13 @200	D13 @200			

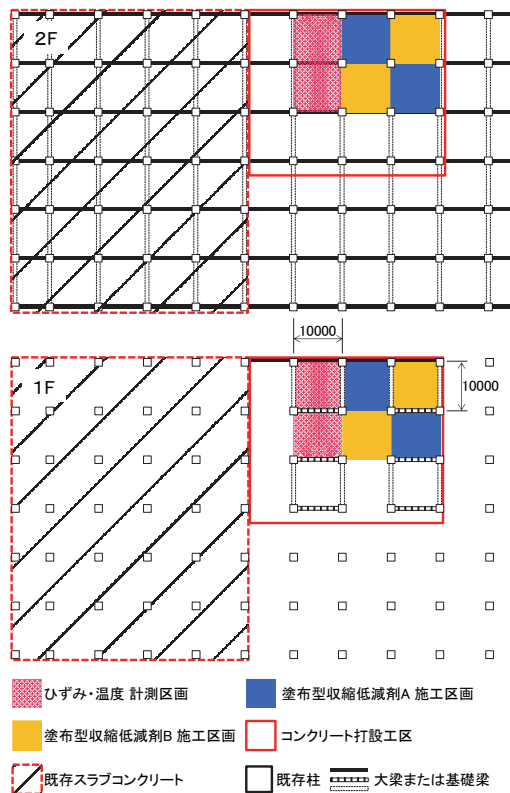


図1 計測区画

両階ともに打設工区の端部の 1 辺には既存スラブが隣接している。デッキスラブについて、スラブ厚さは 180mm、また、主筋をデッキプレートに固定するため、φ5mm のラチス材がトラス状に配されたものを使用している。土間スラブはスタイロフォームを土間に敷き詰め、その上に厚さ 200mm のスラブを構築している。両スラブとも打設翌日にブルーシートを工区全面に敷設し、散水養生を 7 日間行った。

図 2 に各区画におけるひずみ、温度の計測位置を示す。ひずみは箔ひずみゲージを貼付けた長さ 1m・D10 異形鉄筋、低弾性型埋込みひずみ計、温度は熱電対により測

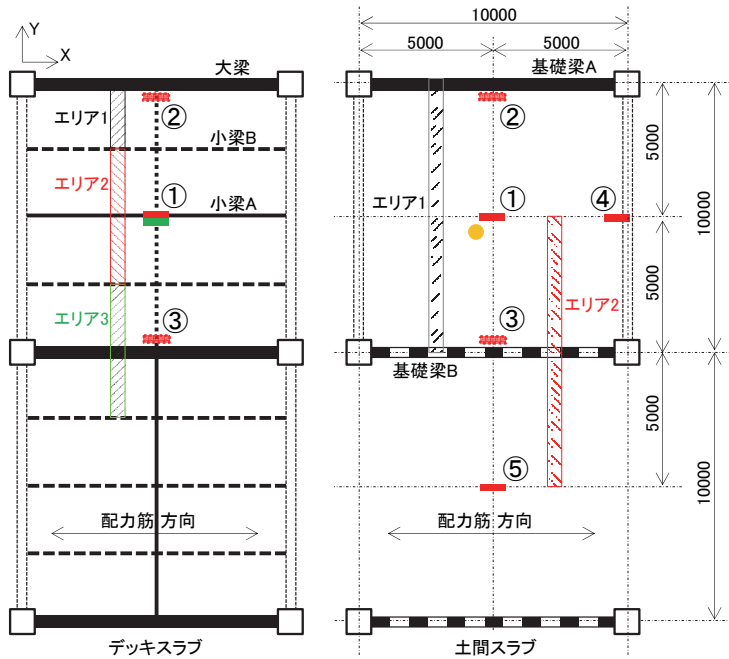


図2 計測位置

■: 鉄筋ひずみゲージ
(上筋および下筋位置の計2本設置)
●: 鉄筋ひずみゲージ
(中心に1本設置)
■: 埋込み型ひずみ計+熱電対
●: 熱電対(中心)

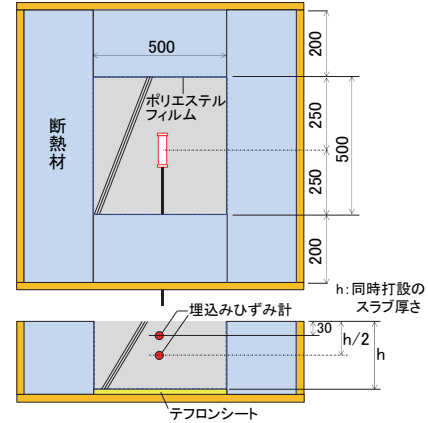


図3 無拘束試験体の概要

定した。計測方向は拘束が強いと考えられる建物長辺方向(=スラブ配力筋方向)とした。ゲージ付き鉄筋については、スラブ表面から 35mm(上端)、下面から 45mm(下端)およびスラブ中心の 3 種類の高さで計測を行った。

B) 自由膨張収縮ひずみ

図 3 に自由ひずみ測定用の試験体概要を示す。幅 500mm の正方形とし、無拘束状態を再現するためコンクリートと型枠はテフロンシートなどで絶縁した。試験体は各スラブについて 1 体ずつ採取し、厚さは同時打設のスラブと同一にした。計測位置は試験体中心および表面から深さ 30mm の 2 箇所とした。打設後はスラブ近傍に静置し脱型は行わず、スラブ同様打設後 7 日間はブルーシートを掛け、散水養生を行った。

C) 拘束膨張収縮ひずみ

デッキスラブのコンクリートのみ、JIS A 6202 附属書記載の B 法により拘束膨張収縮ひずみを測定した。

D) 圧縮強度・割裂引張強度

φ100×200mm の円柱供試体を用いて圧縮強度および割裂引張強度を測定した。割裂引張試験用の供試体は鋼製型枠で採取し、脱型は 1 週間後に行った。封かん養生の供試体は材齢 28 日までスラブ近傍に静置し、その後、当社技術センター(神奈川県厚木市)に移動し、試験材齢まで屋内に静置した。

E) 塗布型収縮低減剤の試験施工

塗布型収縮低減剤の施工区画を図 1 に示す。試験施工にあたり 2 種類の製品を選定し、7 日間の散水養生完了後、表面が乾いたのち、ただちにメーカーの推奨量を水切りワイパーで塗布した。

表3 コンクリートの配合

スラブ種類	水結合材比 (%)	単位量(kg/m ³)						Ad 混入量 (C _x %)	
		W	B		S1	S2	G		Ad
			C	EX					
デッキスラブ	50.1	168	316	20	503	335	979	2.86	0.85
土間スラブ	50.1	165	309	20	857	-	949	3.62	1.10

表4 使用材料一覧

記号	使用材料			密度, 実積率 (配合計画書記載)
	材料	産地, 種類		
W	上水道水	-		-
C	普通ポルトランドセメント	-		密度 3.16g/cm ³
EX	膨張材	石灰系		密度 3.16g/cm ³
S1	陸砂	茨城県潮来市島須産		表乾密度 2.60g/cm ³
S2	砕砂	栃木県佐野市産		表乾密度 2.62g/cm ³
G	石灰石砕石2005	栃木県栃木市鍋山町産		表乾密度 2.72g/cm ³ 実積率 60.0%
Ad	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系(標準形1種)		-

2.2 コンクリートの配合、製造およびフレッシュ試験結果

表 3 にコンクリートの配合、表 4 にコンクリートの使用材料をそれぞれ示す。両配合ともに W/B=50.1%、膨張材には石灰系のをセメントの内割りで 20kg/m³ 混和している。膨張材の不均一な分散を防ぐため、全てのバッチで標準練混ぜ時間より 15 秒長く混練を行った。

表 5 にフレッシュ試験結果を示す。スランプの平均値はデッキスラブのコンクリートが 15.0 cm、土間スラブのコンクリートが 14.5 cm、コンクリート温度の平均値はデッキスラブのコンクリートが 15.0 cm、土間スラブのコンクリートが 14.5 cm、コンクリート温度の平均値はデッキスラブが 25.0 °C、土間スラブが 18.7 °Cであった。

§3. 計測結果

3.1 圧縮強度・割裂引張強度

表 6 に圧縮および割裂引張試験の結果を示す。圧縮強度は材齢 91 日の封かん養生供試体において、デッキスラブが 43.1 N/mm²、土間スラブが 41.6 N/mm²、割裂引張強度はデッキスラブが 3.50 N/mm²、3.30 N/mm²であった。文献 1 より、ひび割れ強度を割裂引張強度の 70%として計算した。

3.2 拘束膨張収縮ひずみ

図 4 にデッキスラブに用いたコンクリートの拘束膨張収縮試験 (JIS・B 法) の結果を示す。膨張ひずみは材齢 7 日において膨張側に 170 μ、材齢 189 日において収縮側に 201 μであった。

3.3 スラブの膨張・収縮ひずみの算定方法

ひずみの検討は温度ひずみを除外した膨張・収縮ひずみで行った。ひずみゲージについて、本計測では自己温度補償型のものを使用しており、計測値は自動的にゲージの線膨張係数に基づいた温度ひずみが省かれた値となる。よって、コンクリートとゲージ自身の線膨張係数の差によって生じる見掛け上の温度ひずみ、また、ゲージ率およびリード線の長さに応じた補正、温度変化に依存するゼロ点移動量の補正を行った。コンクリートの線膨張係数は 10 μ/°C、ひずみゲージの線膨張係数は 11.8 μ/°Cとした。グラフの起点について、本計測においてはひずみの膨張挙動が各計測点で同一でなかったため、計測点ごとに膨張側へ大きく変動し始める時刻 (6 μ/hr.程度)とした。グラフには竣工日を、凡例には計測位置・計測高さ・計測センサーの種類を示した。膨張・収縮ひずみには乾燥収縮ひずみ、自己収縮ひずみ、水和収縮ひずみが含まれるが、本報告ではそれらの内訳に関する検討は行わず、今後の課題とした。

図 5 にスラブ内部の温度および外気の相対湿度を示す。デッキスラブ打設時を起点として整理した。

3.3.1 デッキスラブのひずみ

図 6 に材齢 60 日までのデッキスラブの膨張ひずみ測定例を示す。材齢 7 日から 40 日にかけて計測が途切れた期間が存在するが、打設から 60 日程度までは、降雨の影響等により顕著な収縮の傾向は認められなかった。配力筋方向の膨張ひずみはスラブ中央 (計測点①)。以下、計測点の表記を省略) において 80 から 120 μ程度、建物外周の大梁近傍④において 80 から 86 μ程度であった。

次に、関田らの方法^{2,3)}により、スラブを配力筋方向について一次元部材と仮定し、力の釣合いから膨張によってスラブのコンクリートに導入される圧縮応力を計算した。その際、図 2 に示すように計測区画を 3つのエリアに分割

表5 フレッシュ試験結果

スラブ種類	ロット番号	試験項目					
		スラブ (cm)	スラブフロー (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	外気温 (°C)	塩化物量 (kg/m ³)
デッキスラブ	1-1	15.0	27.0×26.0	4.3	25.0	20.0	0.04
	1-2	14.0	26.0×26.0	3.8	25.0	21.0	-
	1-3	16.5	30.0×29.5	3.8	25.0	22.0	-
土間スラブ	1-1	14.0	25.5×25.0	4.0	18.0	12.0	0.04
	1-2	14.5	25.5×25.0	3.3	18.0	12.0	-
	1-3	15.0	26.5×26.0	3.8	20.0	12.0	-

表6 圧縮・割裂引張試験結果

スラブ種類	養生方法	圧縮強度 試験材齢 (日)			割裂引張強度 試験材齢 (日)	ひび割れ強度 (引張強度の70%)
		7	28	91	91	
デッキスラブ	標準	28.6	38.4	—	—	—
	封かん	28.2	34.1	43.1	3.50	2.45
土間スラブ	標準	31.9	48.4	—	—	—
	封かん	27.6	—	41.6	3.30	2.31

単位: N/mm²

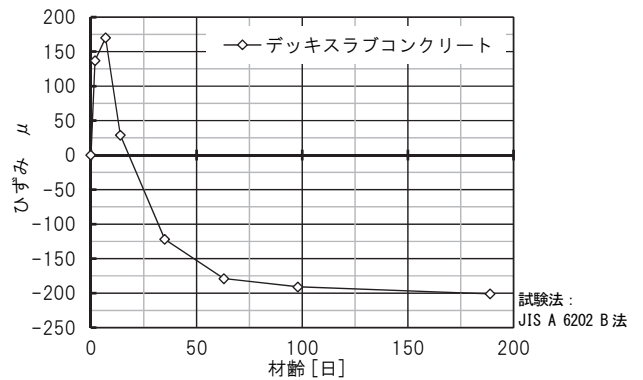


図4 拘束膨張収縮ひずみの経時変化

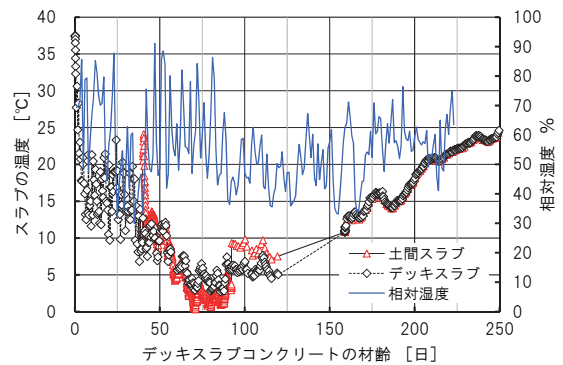


図5 スラブ内部温度および外気湿度

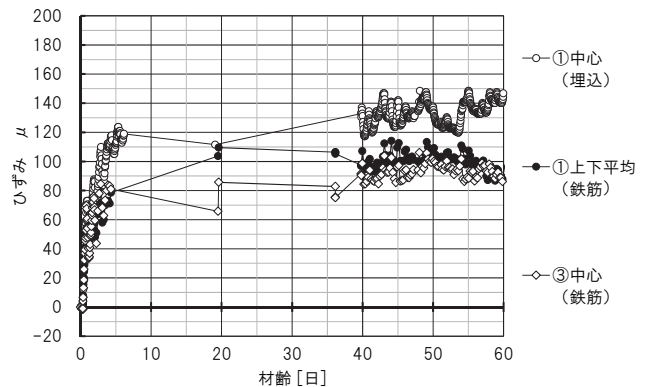


図6 デッキスラブの膨張ひずみ計測例

し、それぞれ応力を求めた。スラブを拘束する拘束体の諸元は表 7 のように設定した。コンクリートに生じる拘束応力 σ_c の計算は式(1)に拠った。

$$\sigma_c A_c + \varepsilon_d A_d E_d + \sum_{i=1}^n \varepsilon_{si} A_{si} E_{si} + \varepsilon_r A_r E_r = 0 \quad (1)$$

[記号] σ_c :スラブコンクリートに生じる応力[N/mm²] ε :配筋方向のひずみ μ A:配筋方向に直交する面の断面積[mm²] E:ヤング係数[N/mm²] n:エリア内に存在する梁の本数
 [添え字] d:デッキプレート s:鉄骨梁または基礎梁 r:鉄筋

本計測では、梁およびデッキプレートのひずみは計測していないため、スラブのひずみを代用し、エリア 1 においては③の結果から 80 μ 、エリア 2 および 3 においては①の結果を平均し 100 μ を採用した。エリアの境に存在する梁については、1/2 の断面積で計算した。結果、エリア 1 においては 1.15 N/mm²、エリア 2 においては 0.92 N/mm²、エリア 3 においては 0.88 N/mm² 程度の圧縮応力が生じたと考える。この値は既往の研究²⁾と比較すると大きく、今後、同様な拘束条件の試験体などで拘束体とコンクリートのひずみにどの程度差が生じるか、確認が必要である。

図 7 に材齢 60 日以降の各計測点における収縮ひずみの例および試験体による自由収縮ひずみの計測結果を示す。材齢 60 日時点におけるひずみを 0 として整理した。また、同図には、竣工日も併せて示した。材齢 300 日において、スラブの実ひずみは 98 から 175 μ 、拘束度²⁾は概ね 0.13 から 0.44 程度であった。

図 8 に σ_c のエリアごとの経時変化およびスラブコンクリートのひび割れ強度を示す。応力は圧縮側を負、引張側を正とした。膨張によるプレストレスは前述した値を用いた。エリア 2 のスラブのひずみは①の上端・下端の鉄筋ひずみおよび中心の埋込みひずみ計の平均値を用いた。本手法によれば、材齢 300 日時点でエリア 1 においては 0.47 N/mm²、エリア 2 においては 0.40 N/mm²、エリア 3 においては 0.11 N/mm² 程度の引張応力が生じていると考えられる。また、膨張材を混和することによって、ひび割れの発生が 150 から 185 日程度遅れたと考える。

3.3.2 土間スラブのひずみ

図 9 に各計測点における材齢 40 日までの土間スラブの膨張ひずみ測定例を示す。打設から 40 日程度までは、デッキスラブ同様、降雨の影響により顕著な収縮の傾向は認められない。配筋方向の膨張ひずみはスラブ中央①において 120 μ 程度、基礎梁近傍の②、③において 90 μ 程度であった。

次に、スラブの配筋方向に導入される圧縮応力を前述の方法で計算した。計算に用いた拘束体の諸元を表 7 に示す。基礎梁コンクリートのヤング係数は Fc30 として

表7 拘束体諸元

スラブ種類	拘束体		断面積 A (mm ²)	ヤング係数 E (N/mm ²)
	部材名	材料		
デッキスラブ	大梁	鉄骨	24696	205000
	小梁A		26414	
	小梁B		6996	
	スラブ配筋	鉄筋	71.33 ^{※1}	
	デッキプレート	-	1000 ^{※2}	
土間スラブ	基礎梁A	コンクリート	581174	17282
		鉄筋	3826.4	205000
	基礎梁B	コンクリート	580217	17282
		鉄筋	4783	205000
	スラブ配筋	鉄筋	126.7 ^{※1}	205000

※1:1本あたりの断面積 ※2:幅1mあたりの断面積

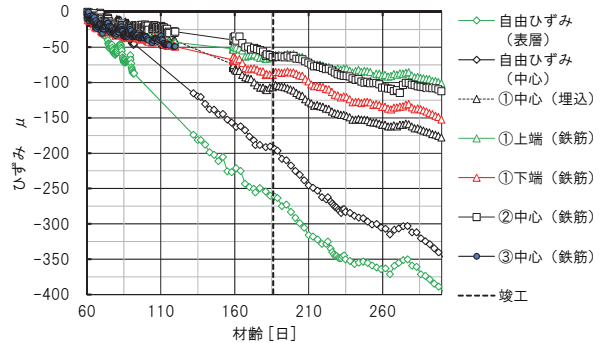


図7 デッキスラブの収縮ひずみ計測例

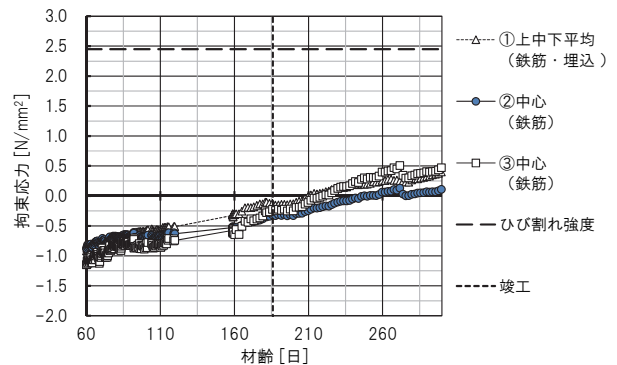


図8 デッキスラブコンクリートの拘束応力の経時変化

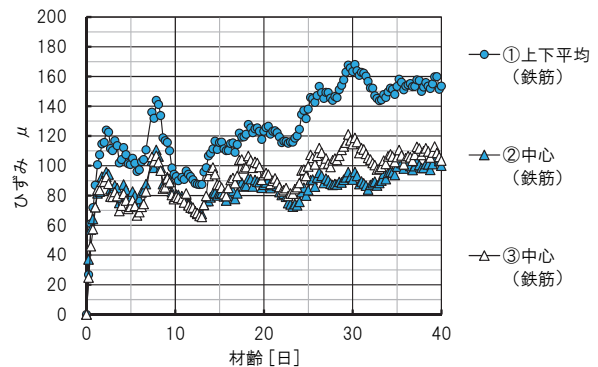


図9 土間スラブの膨張ひずみ計測例

NewRC 式により求め、クリープによる緩和を考慮するため簡易的に 0.65 を乗じた値を採用した。また、基礎梁は高さが 1800mm であり、スラブの収縮に伴う変形時に平面保持が成り立たないと考え、上半分の断面積で計算を行った。スタイロフォームからの拘束力は無いものとした。基礎梁のひずみは計測していないため、エリア 1 およびエリア 2 の両エリアにおいて③のひずみから 90 μ を採用した。

結果、両エリアには0.61 N/mm²程度の圧縮応力が生じたと推定される。

図 10 に材齢 40 日以降の各計測点における収縮ひずみの測定例および試験体による自由収縮ひずみの計測結果を示す。材齢 40 日時点におけるひずみを 0 として整理した。また、同図には、竣工日も併せて示した。材齢 260 日において、スラブ中央は 150 から 200 μ 程度、基礎梁近傍は 80 から 140 μ 程度であった。なお、1 階はフォークリフトの通行量が多く、竣工以降はその影響も含まれている。自由収縮ひずみについて、スラブのひずみに比べ非常に大きな値を示したが、スラブに比べ乾燥が早期に進行した可能性があるため、拘束度は今後、両ひずみが収束した後に得られたデータによって判断したいと考えている。

図 11 に σ_c のエリアごとの経時変化およびコンクリートのひび割れ強度を示す。膨張によるプレストレスは前述した値を用いた。エリア 1 のスラブのひずみは①の上下の鉄筋ひずみの平均値、エリア 2 のスラブのひずみは③の鉄筋ひずみを用いた。本手法によれば、材齢 260 日時点でエリア 1 においては 1.45 N/mm²、エリア 2 においては 0.56 N/mm² 程度の引張応力が生じていると考えられる。また、膨張材を混和することで、ひび割れの発生が 60 から 90 日程度遅れたと考える。

3.4 塗布型収縮低減剤の試験施工

写真 1 に塗布型収縮低減剤施工から約 5 ヶ月間経過後のスラブ表面を示す。両塗布剤ともひび割れ、色むらなどは発生せず、良好な状態を示している。

§4. 結論

膨張材を混和したコンクリートによるデッキスラブ、土間スラブの温度およびひずみを計測し、以下の知見が得られた。

- ① 2 階のデッキスラブのコンクリートについて、膨張材を 20 kg/m³ 混和した場合、0.88 から 1.15 N/mm² 程度の圧縮応力が導入される。ただし、拘束体とのずれが生じた可能性があり、今後確認が必要である。
- ② 収縮ひずみによってデッキスラブのコンクリートに生じる引張応力は、材齢 300 日時点において 0.11 から 0.47 N/mm² 程度と推定される。
- ③ 土間スラブのコンクリートについて、膨張材を 20 kg/m³ 混和した場合、0.61 N/mm² 程度の圧縮応力が導入される。
- ④ 収縮ひずみによって土間スラブのコンクリートに生じる引張応力は、材齢 260 日時点において 0.56 から 1.45 N/mm² 程度と推定される。

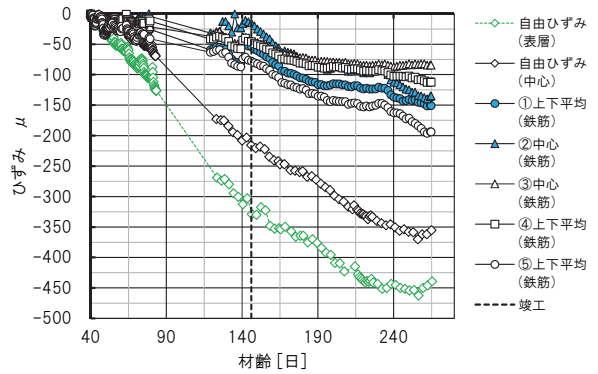


図10 土間スラブの収縮ひずみ計測例

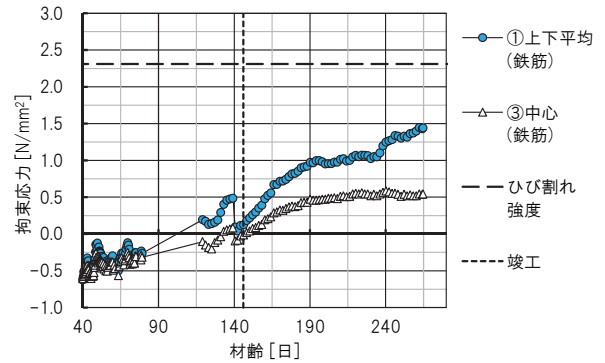


図11 土間スラブコンクリートの拘束応力の経時変化



写真1 塗布型収縮低減剤を塗布したスラブ表面

- ⑤ 石灰石粗骨材、膨張材を併用することで、打設から約 300 日経過時点ではひび割れの発生は見られない。

【謝辞】

本計測を実施するに当たり、作業所長をはじめ関係者各位に多大なるご協力を頂きました。ここに記し、謝意を表します。

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(案)・同解説、2006年
- 2) 関田徹志、百瀬晴基、桜本文敏：膨張材と収縮低減剤を併用したコンクリートによる床スラブのひび割れ低減効果に関する実験的検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.26、No.1、2004.
- 3) 百瀬晴基、関田徹志、三橋博三：実構造物における収縮ひび割れ制御設計に関する研究、日本建築学会構造系論文集、Vol.73、No.624、pp.157-164、2008年2月。



飯田康介

ひとこと

RC部材の性能を保つためには、コンクリートの経時変化を考慮した設計が必要です。お客様の満足のため、開発を進めて参ります。