

# 論文 底面が湿潤状態の土間コンクリート床の乾燥収縮と拘束応力

橋田 浩\*1・瀧 啓明\*2・平井 裕太\*2

**要旨：**本研究は、ひび割れ低減工法を加えた複数仕様の土間コンクリート床試験体を施工し、コンクリート打込み直後から長期に亘るひずみ計測を行うことで、土間床の収縮ひび割れに係わる各種要因とその発生機構を明らかにすることを目的としている。本報では、施工後1年3ヶ月に亘る長期計測結果とその数値シミュレーション結果について述べる。土間床は、基礎梁などの既設構造体と絶縁された状態でも、配筋と地盤抵抗によって鋼材比相当で1.5%程度の拘束を受けること、拘束度だけではなく、コンクリートの施工時期、土間床底面の湿分条件によって乾燥収縮ひずみやひび割れの発生のしやすさが大きく変わることを示した。

**キーワード：**土間コンクリート、ひび割れ、乾燥収縮、温度収縮、地盤拘束

## 1. はじめに

土間床のひび割れは、コンクリートの乾燥収縮や部材の拘束条件、地盤条件、さらには水和熱、外気温、室温などの温度変化に左右される。本研究は、ひび割れ低減工法を加えた複数仕様の土間床試験体を施工し、コンクリート打込み直後から長期に亘るひずみ計測を行い、ひび割れに係わる各種要因とその発生機構を明らかにすることを目的としている。既報<sup>1)</sup>では、打込みから約1ヶ月間の初期計測結果を述べたが、本報告では、施工後1年3ヶ月に亘る計測とその数値シミュレーションによって得られた新たな知見について述べる。

## 2. 土間床の概要と既報の知見

### 2.1 土間床の概要

計測対象とした土間床試験体（以下、単に土間床と称す）は、2018年7月25日に、資材倉庫の新設工事を利用し、代表的な仕様を含めた4種類施工した<sup>1)</sup>。土間床の寸法は7850×5000mm、厚さ150mmであり、基礎梁には結合されておらず、外周コンクリートとも気泡緩衝材で絶縁してある（図-1）。土間床は床仕様毎に2体ずつ設け、そのうちの1体のコンクリートには埋込型のひずみ計と熱電対を設置し、コンクリート打込み直後からひずみ変化および温度変化を計測している。埋込型ひずみ計および熱電対の設置場所は、図-1に示すように、土間床の中央部、ならびに端部の上下（端から500mm、床表面、底面から各30mmの位置）の3箇所とした。土間床は、コンクリート打込み後の翌朝から散水養生を行い、材齢2.5日で養生を打ち切り、乾燥を開始した。

使用したコンクリートは市中のレディミクストコンクリートであり、水セメント比58.0%の普通-24-12-25-N（以下、普通コンクリートと呼ぶ）と同一呼び方で膨張

材20kg/m<sup>3</sup>を細骨材と置換したもの（以下、膨張コンクリートと呼ぶ）2種類である。受入れ試験における強度は、それぞれ32.7N/mm<sup>2</sup>、30.9N/mm<sup>2</sup>であった。

### 2.2 土間床仕様

土間床の仕様は、表-1に示す①配筋床、②目地床、③膨張床、④無筋床の4種類とした。なお、対象とした土間床はいずれも、1年3ヶ月経過後も表層の微細ひび割れ（幅0.04mm程度以下）を除き、目立ったひび割れは発生していない。

表-1 土間床の仕様

仕様項目	配筋床	目地床	膨張床	無筋床
コンクリート	普通	普通	膨張	普通
配筋	異形 D10@200 シングル	異形 D10@200 シングル	異形 D10@200 シングル	無筋
床中央のカッター目地	無し	有り	無し	無し

### 2.3 土間床の地盤拘束について

本研究では、土間床と同様に一面乾燥状態とした400×200×150mmの無拘束試験体によるひずみも計測している（図-1）。既報<sup>1)</sup>では、凝結直後からの膨張コンクリートの無拘束膨張ひずみと膨張床の実ひずみの関係から、床下の地盤抵抗と配筋（鉄筋比0.24%）によって、膨張床の中央部では鋼材比相当で1.5%の拘束があることが示された。したがって、その後の乾燥期間においては、いずれの土間床でも配筋による拘束（無筋床は除く）の他、同等の地盤拘束を受けると考えられた。

### 2.4 土間床の反りと微細ひび割れについて

後述するように、乾燥開始後はすべての土間床において床端部の上下に顕著な収縮ひずみ差が見られる。これ

\*1 中部大学 工学部建築学科 教授 工博（正会員）

\*2 株式会社 伊藤工務店 設計本部

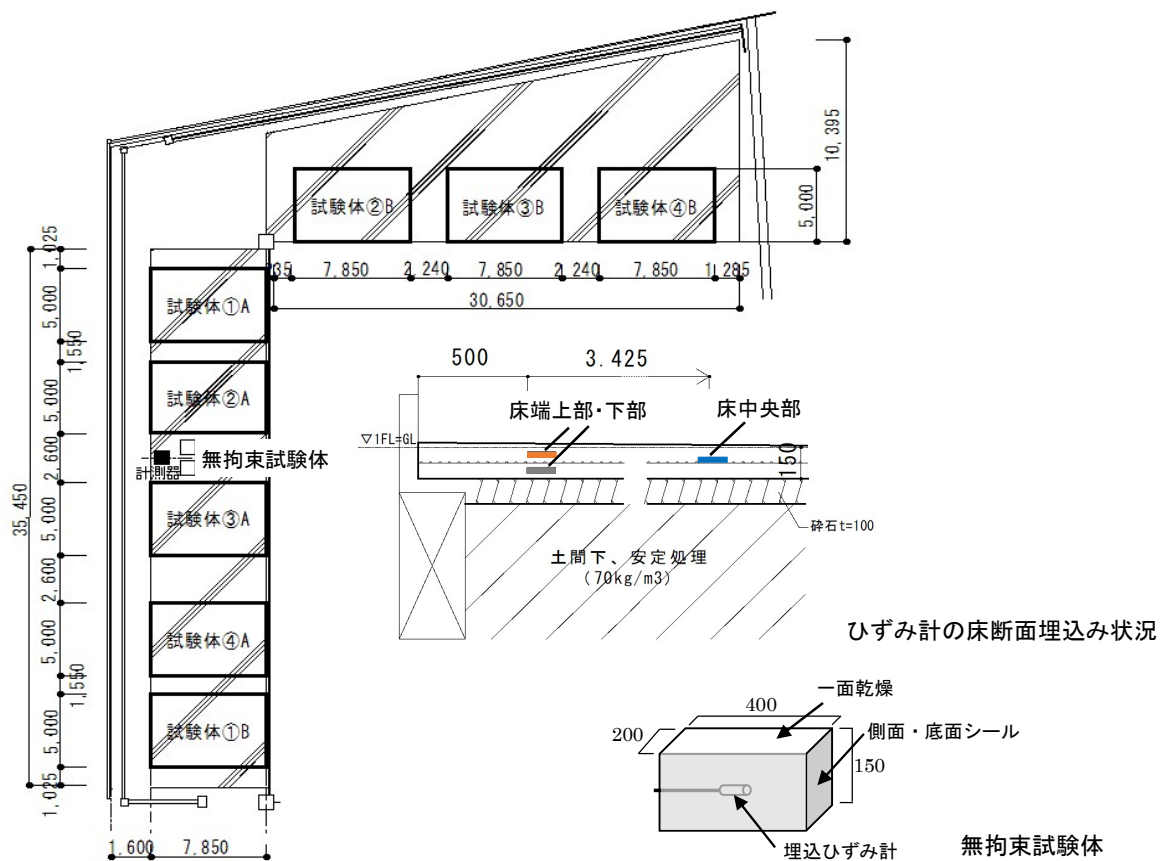


図-1 土間床の配置図, ひずみ計の床断面埋込み状況, 無拘束試験体

は、図-2 に示すように、乾燥面側が底部に比べて収縮が大きいことから、土間床の端部が乾燥面側に反ってくることを示している。乾燥が進むにつれてこのような反りが生じるのは、基礎梁や外周部と絶縁され、スリッパ等も設置されていないことに拠るが、端部から離れた中央部では、このような反りを抑え込むコンクリートの自重によって、乾燥面側に引張応力が発生することになる。したがって、土間床のような一面乾燥状態では、材軸方向の応力だけでなく、表層と内部との乾燥収縮ひずみの差に起因する内部拘束応力がひび割れ発生に関与していることになる。

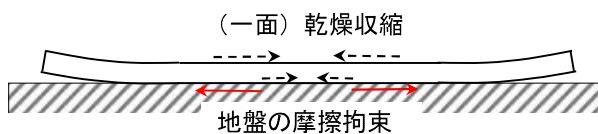


図-2 土間床の乾燥収縮のイメージ

ただし、微細ひび割れの発生によって表層応力はある程度解放されること、土間床の軸方向外力に対しては床断面の平均応力で抵抗すると見なせることから、既設躯体から絶縁された土間床で断面を貫通するようなひび割れが生じるとすれば、その主要因は地盤の外部拘束であると判断して、以降の検討を進めることとする。

## 2.5 無拘束試験体における問題点

本研究では、土間床と同様の一面乾燥状態での自由膨張、自由収縮ひずみを計測するため、無拘束試験体を普通コンクリート、膨張コンクリート各1体ずつ作製し、同一施設内に設置している。

無拘束試験体は、土間床と同様の養生を行った後、材齢7日で脱型して側面および底面をエポキシ樹脂でコーティングし、さらにアルミ箔粘着テープでシールした。この無拘束試験体は、土間床の乾燥状態を再現する計画であったが、長期に亘る乾燥に対しては問題点があることが見出された。今回計測対象とした土間床は、防湿シートが敷設されていないためコンクリート底面からの水分供給を無視できず、実際の乾燥状態を再現できていない可能性が高い。

例えば、図-3 は今回の無拘束試験体と同じように、底面および側面からの乾燥がないφ300mm 容器に打ち込んだ厚さ150mmのコンクリートの内部湿度分布の変化を測定した結果<sup>2)</sup>である。このような断湿状態で、環境湿度80%RHで一面乾燥したケースでは、乾燥1ヶ月以降に最深部の内部湿度が100%RHを切るようになり、乾燥3ヶ月からは最深部でも乾燥が進んでいることがわかる。中央部(75mm)の湿度とコンクリートの乾燥収縮ひずみが凡そ対応すると仮定すると、地盤からの湿分供給で底面が常時飽和状態の場合、乾燥3ヶ月以降は明らかに収縮ひずみの進行が停滞するようになり、内部湿度分布が線形となる最終収縮ひずみについては、断湿状態での乾燥6ヶ月の値よりは大きいものの、乾燥1年の値よりは小さいものと推測される。そのため、このような無拘束試験体の問題点も加味して以降の検討を行う。

### 3. 長期に亘る土間床のひずみと拘束応力

#### 3.1 1年3カ月に亘る計測結果

図-4 に乾燥開始後からの土間床の収縮ひずみの変化を示す。4種類の土間床の各測定値は、全体的にはほぼ同じような変化を示している。土間床の床端上下部でひずみが大きく異なるのは一面乾燥の影響であり、床端部のコンクリートが反っていることがわかる。ただし、土間床のいずれの測定値も材齢9ヶ月以降の変化は少ない。なお、無筋床の床端上部の収縮ひずみは他の土間床よりやや大きい、これは配筋による反りの反力がないためと推察される。

土間床中央部のひずみに絞ってその変化を詳細に見ると、収縮ひずみは、施工した夏季から秋季にかけて停滞し、冬季にかけて反転し膨張するような変化を示している。このような現象は、土間床と地盤の年間を通じての温度差に起因すると考えることができる<sup>3)</sup>。

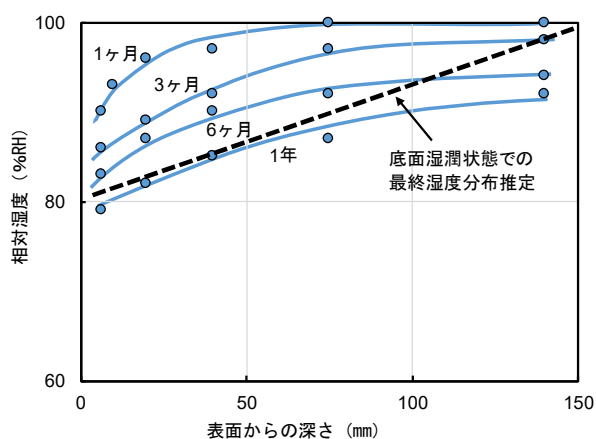


図-3 一面乾燥試験体の湿度分布実測例<sup>2)</sup>

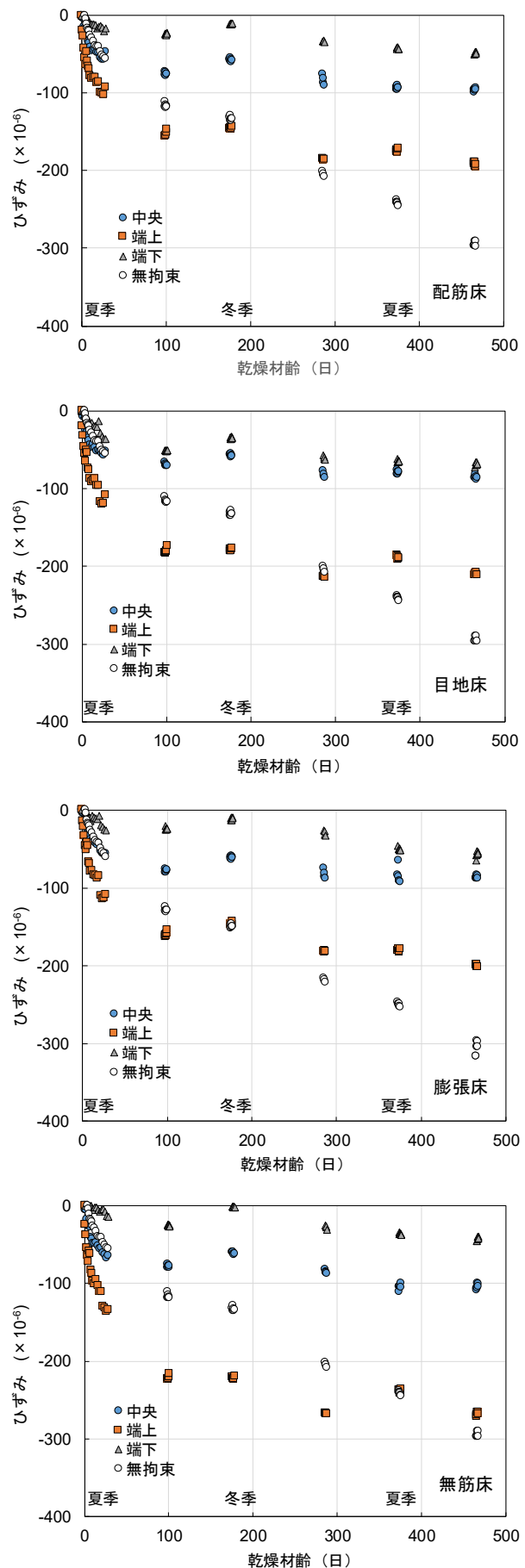


図-4 乾燥開始後からの実測ひずみ変化

イメージを図-5に示す。冬季には土間床の温度が拘束体となる地盤領域の温度より低くなり、温度低下による収縮ひずみが地盤によって拘束されるため、温度ひずみを除外している図-4の実測ひずみでは、膨張しているような変化となって表れる。そのため、冬季から再度夏季に向かう期間においては、収縮ひずみが付加される結果となっており、温度差を考慮した地盤拘束に基づいて、土間床のひずみを説明することが可能と思われる。

### 3.2 土間床の実ひずみの数値計算

本報での数値計算方法は、コンクリートの自由ひずみ（乾燥収縮ひずみ+温度ひずみ）と鋼材相当の拘束材の釣合いを、一軸の逐次計算（step-by-step）で実ひずみ（乾燥収縮ひずみ+温度ひずみ+拘束ひずみ）として求めるものである<sup>1) 4)</sup>。配筋と地盤による拘束は、2.3で述べたように鋼材比相当で1.5%としている。また、配筋（鉄筋比0.24%）による拘束は、鉄筋とコンクリートの温度変化が同一と見なせることからコンクリートの乾燥収縮ひずみのみであるのに対し、地盤拘束は、コンクリートの温度ひずみも拘束するように計算している。

なお、本検討では図-5に示すように、拘束地盤の温度は年間を通じて一定として見なした簡易計算とした。また、入力値としての乾燥収縮ひずみは、図-6に破線で示す実測値の近似曲線で、普通コンクリートと膨張コンクリートで共通としている。近似曲線は以下の実験式に基づいている<sup>5)</sup>。

$$s(t, t_0) = s_{\infty} \left( \frac{t - t_0}{a + t - t_0} \right)^{0.8} \quad (1)$$

ここに、 $s(t, t_0)$ : 乾燥開始有効材齢  $t_0$  日における有効材齢  $t$  日の乾燥収縮ひずみ、 $s_{\infty}$ : 最終乾燥収縮ひずみ、 $a$ : 乾燥収縮ひずみの進行度を表す係数である。

図-7に、土間床中央部の実ひずみの実測値と計算値を比較して示す。温度ひずみを除外した値は図-4に示す実測ひずみに当たる。乾燥開始後3ヶ月までは実測値と計算値はよく合致しているが、その後は計算値が過大な収縮となっている。これは、仮に無拘束試験体の乾燥収縮ひずみが実際の土間床を正しく再現しているのであれば、乾燥開始後3ヶ月以降に何らかの拘束が付加されたことになり、非現実的である。したがって、2.5で指摘したように、無拘束試験体の乾燥収縮ひずみが土間床の実状を再現していないと考えるが妥当と思われる。

そこで、2.5の考察に従って、土間床底面を湿潤と仮定した時の最終乾燥収縮ひずみを、底面が断湿状態にある無拘束試験体の乾燥材齢6ヶ月と1年の中間値（ $180 \times 10^6$ ）とした。これを式(1)に代入し、さらに乾燥材齢3ヶ月以降の進行が停滞するような修正曲線を図-6に実線で示す。このように、底面湿潤条件では土間床の乾燥収縮ひずみは  $200 \times 10^6$  未満に収束することになる。

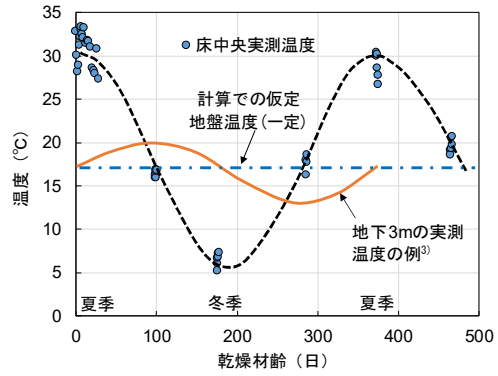


図-5 土間床と地盤（地下）の温度変化イメージ

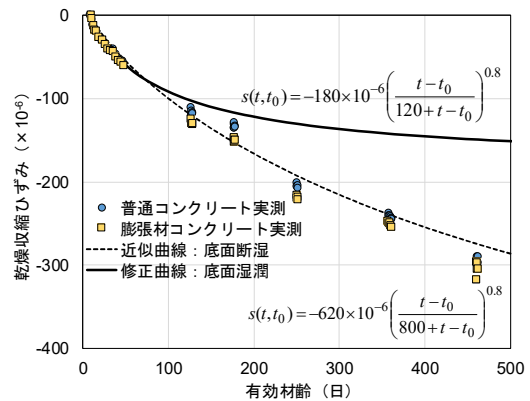


図-6 無拘束試験体の乾燥収縮ひずみと計算入力曲線

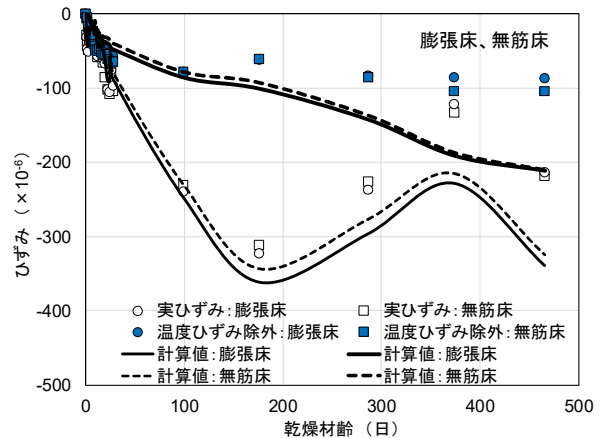
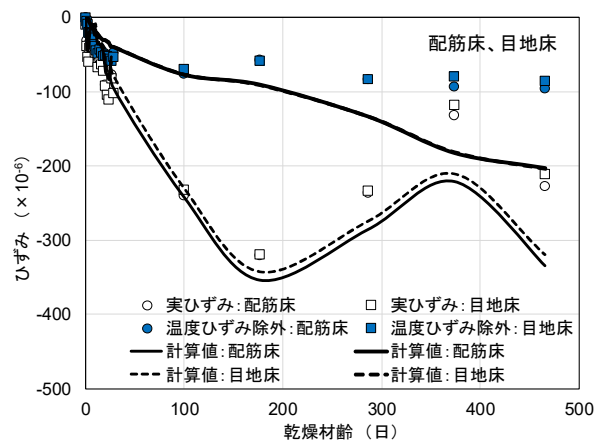


図-7 土間床ひずみの実測値と計算値：修正前  
（上：配筋床、目地床 下：膨張床、無筋床）

この修正曲線を入力値として再計算した実ひずみが図-8である。季節変化による上下動も含め、1年3ヶ月に亘る長期の土間床の実ひずみを非常に良く再現できている。以上の検討結果から、土間床の地盤による拘束の大きさ、さらに土間床と地盤の年間を通じての温度差による温度ひずみの拘束の考え方は妥当と判断される。

### 3.3 土間床の拘束応力の数値計算

図-9に3.2の計算で同時に得られる土間床の拘束応力の結果を示す。代表的な配筋床と膨張床について示しているが、目地床、無筋床の拘束応力は配筋床とほぼ同等である。なお、拘束応力の初期値で、配筋床は引張応力として約  $0.15\text{N/mm}^2$ 、膨張床は圧縮応力として約  $0.25\text{N/mm}^2$  が導入されている。これらは、それぞれ養生中の収縮および膨張ひずみの拘束結果を反映させており、膨張床は配筋床より約  $0.4\text{N/mm}^2$  引張応力が小さい。

土間床の拘束応力は、地盤による温度ひずみの拘束によって、1年を通じて応力の増減を繰り返すことになる。そして、入力値である乾燥収縮ひずみの修正前の土間床の拘束応力は、乾燥収縮が継続していることになるため、同一季節では年々上昇する結果となる。一方、修正後の底面が湿潤状態にあると推定される実際の土間床の拘束応力は、1年目の冬季以降は季節による増減を繰り返すものの、それ以上の増大はほとんどない結果となる。

土間床にひび割れが発生するのは、この拘束応力がひび割れ発生強度に達する時点となる。ひび割れ発生強度  $f_{cr}$  は、実験的にも大きなバラツキはあるが、建築学会指針<sup>6)</sup>では、確率的にはほぼひび割れが発生しない値として、コンクリートの引張強度  $f_t$  の0.5倍が示されており、圧縮強度  $f_c$  との関係から次式で求められる。

$$f_{cr} = f_t \times 0.5 = 0.291 \cdot f_c^{0.637} \times 0.5 \quad (2)$$

修正計算された配筋床、膨張床の最大応力 ( $0.97\text{N/mm}^2$ 、 $0.61\text{N/mm}^2$ ) は、式(2)によるひび割れ発生強度 (約  $1.3\text{N/mm}^2$ ) より小さい。環境条件に大きな変化がなければ計測対象としている土間床には断面を貫通するようなひび割れは今後も発生しないと予測される。

### 4. 各種条件における土間床・スラブの拘束応力

3章までの検討結果から、土間床の拘束応力には土間床底面の湿分条件やコンクリートの施工時期が大きく影響していることがわかる。今回計測対象とした土間床は、外部拘束が地盤のみで、かつ底面が湿潤状態と推定されることから、通常の土間床や構造スラブよりも拘束応力はかなり小さいと考えられる。

そこで、拘束の大きさ、施工時期、コンクリート底面の湿分条件をパラメータにして、各種の床・スラブの乾燥収縮と年間の温度変化に拠る拘束応力を算定した。

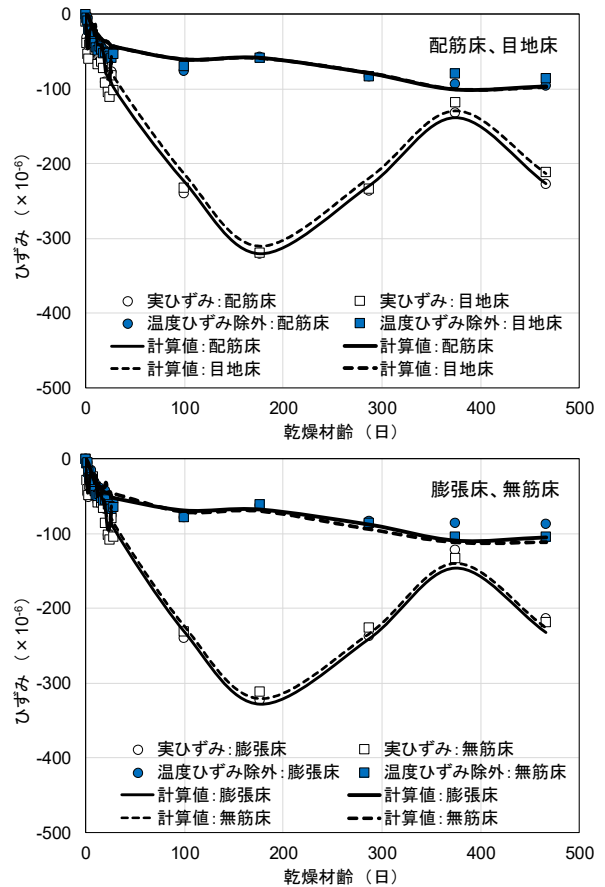


図-8 土間床ひずみの実測値と計算値：修正後 (上：配筋床、目地床 下：膨張床、無筋床)

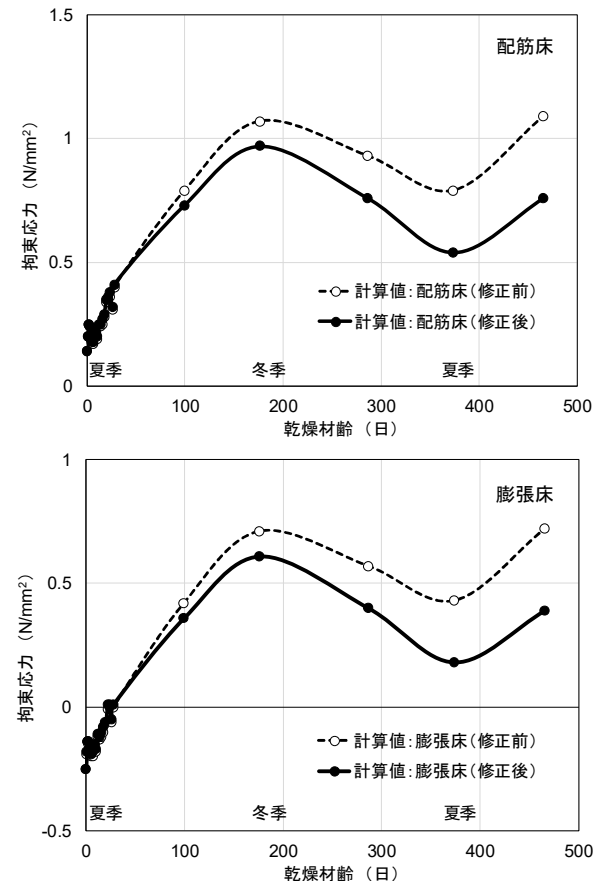


図-9 土間床の応力計算値 (上：配筋床 下：膨張床)



算定条件として、拘束の大きさについては、今回対象とした土間床のような外部拘束が地盤のみ場合、鋼材比で1.26%とし、その計算上の拘束度（拘束ひずみ/自由収縮ひずみ）は約0.25となる。基礎梁に剛結された構造スラブの場合、スラブと梁の断面形状から、一般的な拘束度は0.5程度と考えられるので、0.5に相当する鋼材比3.8%で計算することとした。コンクリート底面の湿分条件は、湿潤および断湿とした。断湿は、完全な防湿シートが敷設されている場合やデッキプレート上のコンクリート床を想定している。年間の温度変化は、2018年の名古屋市の気象庁データから、1月（冬季）、4月、7月（夏季）、10月の日平均気温を採用した。ただし、地盤や基礎梁（地中梁）は年間を通じて一定温度と仮定する。

拘束応力の計算結果を図-10に示す。床底面が湿潤条件では、拘束が大きくても（鋼材比3.8%）施工時期が冬季の場合にはひび割れを抑制できる可能性がある。一方、床底面が断湿条件では、拘束が小さくても（鋼材比1.26%）夏季施工の場合や、冬季施工でも拘束が大きい場合には、1、2年後の冬季にひび割れが発生することになる。夏季施工で拘束が大きい（鋼材比3.8%）場合は、底面の湿分条件に係わらず厳しい条件となり、施工後数ヶ月でひび割れが発生することになる。

このように、土間床やスラブは、その拘束度だけでなく、施工時期、コンクリート底面の湿分条件でひび割れ発生の有無が全く異なることに留意すべきといえる。

## 5. まとめ

本研究は、土間コンクリート床の試験体を施工し、コンクリート打込み直後から長期に亘るひずみ計測を行い、収縮ひび割れに係わる各種要因とその発生機構を明らかにすることを目的としている。本報では、1年3ヶ月に亘る計測とその数値シミュレーション結果から以下の知見が得られた。

- (1) 計測対象とした土間床は、基礎梁などの既設構造体と絶縁された状態でも、配筋と地盤抵抗によって鋼材比相当で1.5%程度の拘束を受ける。
- (2) 土間床は、年間を通じての地盤との温度差によって、温度ひずみの拘束も受ける。
- (3) 計測対象とした土間床は、地盤からの湿分供給によって乾燥収縮ひずみは $200 \times 10^{-6}$ 未満に収まり、今後も断面を貫通するようなひび割れは発生しないと予測される。
- (4) 土間床やスラブは、拘束度だけではなく、コンクリートの施工時期、コンクリート底面の湿分条件によって乾燥収縮ひずみやひび割れの発生のしやすさが大きく変わる。

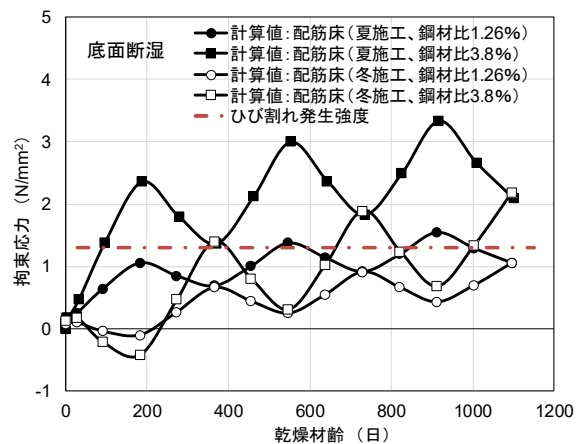
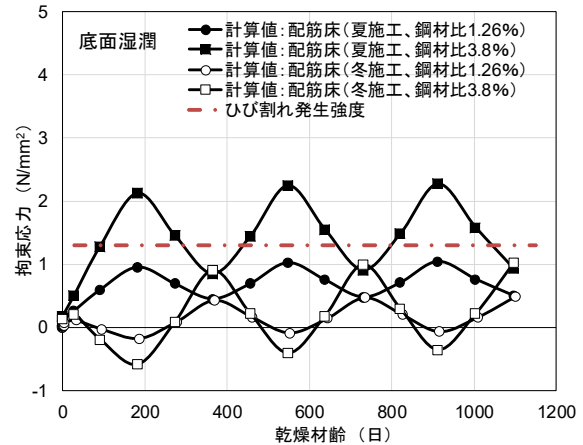


図-10 土間床・スラブの応力計算例  
(上：底面湿潤 下：底面断湿)

## 参考文献

- 1) 橋田 浩, 根岸泰介, 瀧 啓明: 土間コンクリート床の収縮ひび割れ発生機構に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.413-418, 2019
- 2) 橋田 浩, 田中享二, 小池迪夫: 打設直後からの乾燥途中におけるコンクリートの含水状態, 仕上げ材下地としてのコンクリートの含水状態 その1, 日本建築学会構造系論文報告集, 第412号, pp.1-8, 1990.6
- 3) 橋田 浩: 忘れてはならないRC工事の勘所/コンクリート工事, 鉄筋コンクリートひび割れ抑制方法, 建築技術, pp. 158-161, 2018.2
- 4) 橋田 浩, 菊地俊文, 持田泰秀, 平井吉彦: 膨張材を使用したコンクリート造建築部材のひずみ挙動と発生応力評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp. 557-562, 2011
- 5) 大野拓也, 野口貴文 他: 体積表面積比の影響を考慮した乾燥収縮ひずみ予測式の提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 385-386, 2019.9
- 6) 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)・解説, 日本建築学会, p. 74, 2006.2