

論文 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

橋田 浩*1・根岸 泰介*2・瀧 啓明*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、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、打込みから約1ヶ月間の初期計測と検討結果について述べる。土間床は、一面乾燥に起因する断面内の収縮ひずみ差が拡大し、その結果生じる反りを抑え込む自重や外力によって引張応力が発生すると考えられること、基礎梁と絶縁した土間床でも地盤の拘束によって、膨張材コンクリートには一程度の圧縮応力の初期導入が見込まれること、などの知見が得られた。

キーワード：土間コンクリート、ひび割れ、乾燥収縮、反り、膨張材

1. はじめに

一般に「土間コンクリート床」は構造躯体ではないため、仕様が安易に考えられがちである。しかし、施設用途や施工条件によって所要の性能が求められており、状況を踏まえずに一律に扱ってしまうと施設機能や耐久性を低下させる有害なひび割れが発生する危険がある。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と考えられる。ひび割れの発生にはこれらの要因が複雑に関係しているが、土間床が構造躯体でないこともあり、いまだにひび割れの発生機構に基づいた合理的な防止策が講じられているとは言い難い。

本研究は、新設工事において土間コンクリート床を実験対象とする機会を得たので、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。ただし、本工事では地耐力は十分に確保されているので、地盤変形の影響については検討から除外している。本報告では、打込みから約1ヶ月間の初期計測とその検討結果について述べる。

2. 実験内容

2.1 土間床の概要

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種類の土間床試験体（以下、単に土間床と称す）を図-1に示す要領で施工した。倉庫は鉄骨平屋建て、敷地場内側は外壁のない開放形式となっている。なお、施工当日は最高気温35°Cを超える猛暑で、受入れ時のコンクリート温度は30°Cであった。

*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

土間床の寸法は7850×5000mm、厚さ150mmであり、基礎梁には接合されておらず、外周コンクリートとも気泡緩衝材で絶縁してある。土間床は床仕様毎にA、Bの2体ずつ設け、土間床A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、短期ならびに長期的なひずみ変化および温度変化を計測する。使用したコンクリートは呼び強度24(N/mm²)であり、スランプ12cm、空気量4.5%が発注値である。また、コンクリートの種類は普通（ポルトランドセメント）コンクリートと膨張材を20kg/m³混和した膨張材コンクリートの2種類である。

2.2 土間床仕様

(1) 土間床①（配筋床）

実務で代表的な仕様と考えられる土間床とした。異形鉄筋D10@200のシングル配筋となっており、配筋位置は部材厚さの中心とした。

(2) 土間床②（目地床）

床中央に、深さ50mm、幅5mmのカッター目地を設けることでひび割れの計画的な発生を期待したものである。土間床①と同様のシングル配筋となっている。カッター目地は、コンクリート打ち込み後材齢3日で設けた。

(3) 土間床③（膨張床）

膨張材を使用することで圧縮応力を初期導入し、ひび割れの抑制を期待した。土間床①、②と同様のシングル配筋となっている。

(4) 土間床④（無筋床）

配筋のない土間床である。実例は少ないと考えられるが、配筋の有無の影響を検討する目的で実施した。

なお、土間床①、②、④は普通コンクリート、土間床③は膨張材コンクリートで、共に使用粗骨材は砂利である。受入れ検査による材齢28日の圧縮強度は、それぞれ32.7N/mm²、30.9N/mm²であった。

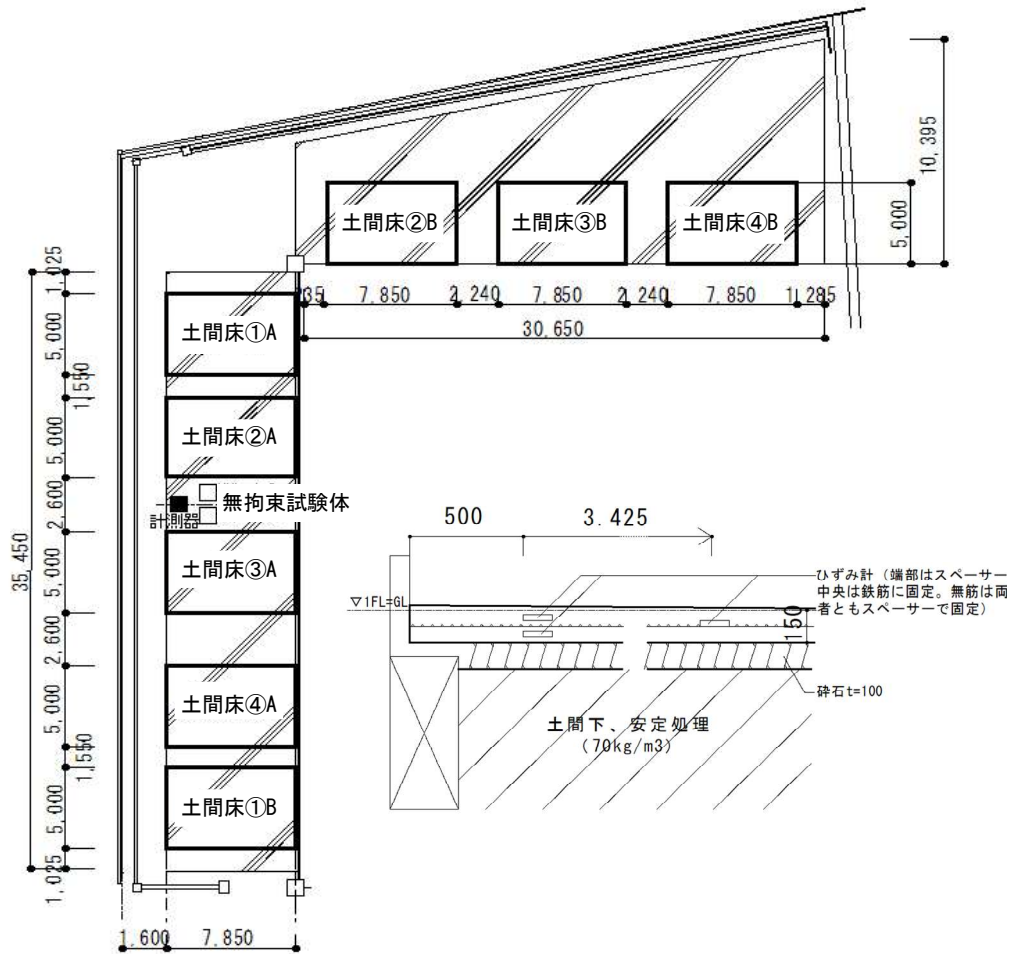


図-1 土間床の配置図およびひずみ計の床断面埋込み図

2.3 各種試験体のひずみ計測

(1) 土間床

土間床 A の埋込型ひずみ計および熱電対は、コンクリート打込み前日に配筋やサポートを利用して固定した。設置場所は、図-1 に示すように、土間床の中央、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数時間で養生仕上げをし、翌朝から散水養生を行った後、材齢 2.5 日で養生を打ち切り、乾燥を開始した。

(2) 無拘束試験体

土間床と同じように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、図-2 に示すような 400×200×150mm の無拘束試験体を普通コンクリート、膨張材コンクリート各 1 体ずつ作製し、同一施設内に設置した。無拘束試験体は、気泡緩衝材を貼り付けた型枠内にコンクリートを打ち込み、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。気泡緩衝材を貼り付けた型枠を使用することで、膨張材コンクリートの膨張ひずみもほぼ無拘束状態で計測されたと考えられる。

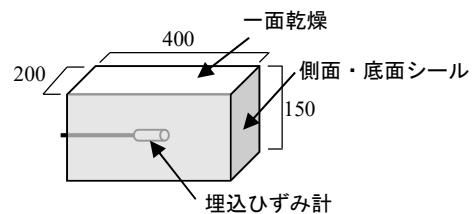


図-2 無拘束試験体

(3) 簡易拘束膨張試験体

膨張材コンクリートの拘束膨張ひずみを計測するため、同一敷地内で、図-3 に示す簡易拘束膨張試験（軽量型枠法）を実施した。軽量鋼製型枠を用いたこの拘束膨張試験は、鉄筋比で約 0.7% の拘束状態での膨張ひずみに相当しており、温度変化によるひずみ変動が小さいため、現場での計測にも有用な試験法である。なお、鋼製型枠には蓋を被せており、コンクリートは封かん養生状態となる。

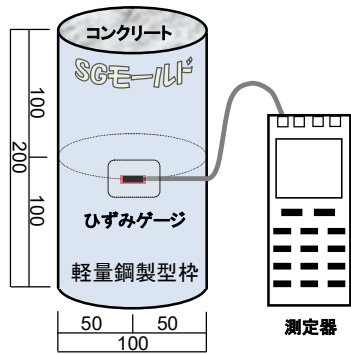


図-3 簡易拘束膨張試験

(4) 標準乾燥収縮試験体

使用したコンクリートの乾燥収縮率を把握するため、施工時に採取した 100×100×400mm の標準試験体で乾燥収縮率を計測した。ひずみ計測にはコンタクトストレインゲージを用い、7日間標準養生後、20℃、60%RHの恒温恒湿室で乾燥させた。

なお、乾燥期間4週までの乾燥収縮ひずみは、普通コンクリートで 370×10^{-6} 、膨張コンクリートで 410×10^{-6} となり、膨張コンクリートの方が若干大きくなった。また、参考文献2)に従うと、粗骨材が砂利の場合、26週後の乾燥収縮率は、4週の乾燥収縮ひずみの約1.8倍と推定されるので、それぞれ 670×10^{-6} 、 740×10^{-6} となる。これらは全国の生コンクリート工場の平均的な値である。

3. ひずみ計測結果および考察

3.1 凝結後のひずみ変化

図-4に凝結終了後からのひずみ変化を示す。ここで凝結終了点は、膨張コンクリートについては、図-5のように、コンクリートの剛性が発現し簡易拘束膨張試験体の計測ひずみが急激に立上がる時点とした。普通コンクリートについては、図-5に準じて、水和による温度上昇が認められてから1時間後を凝結終了点としている。

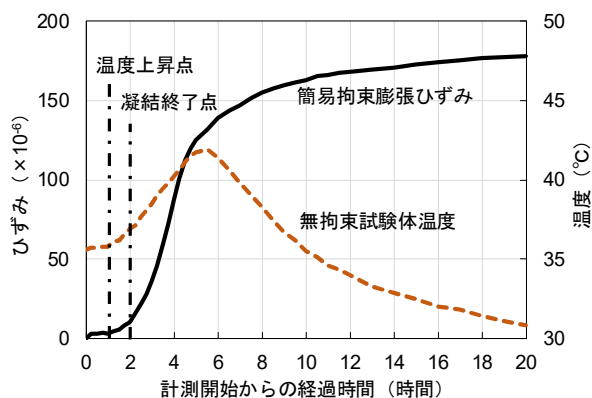


図-5 膨張材コンクリートの凝結終了点の設定

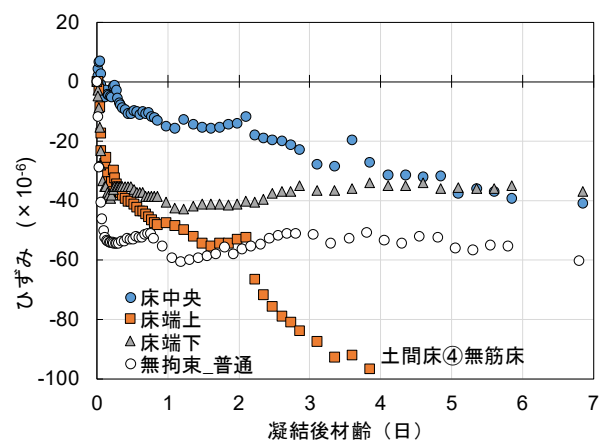
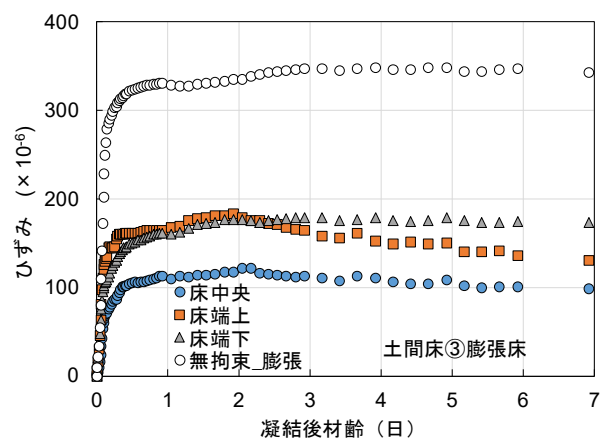
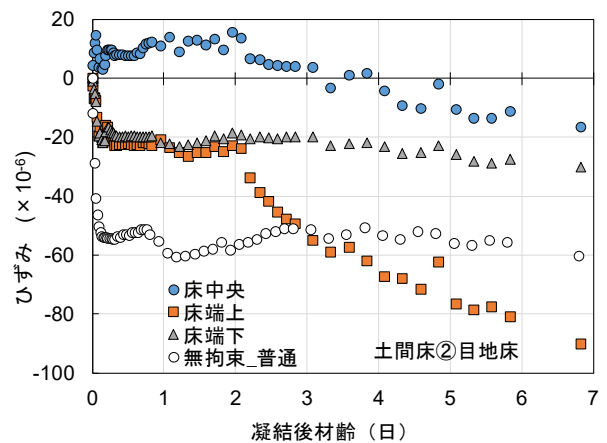
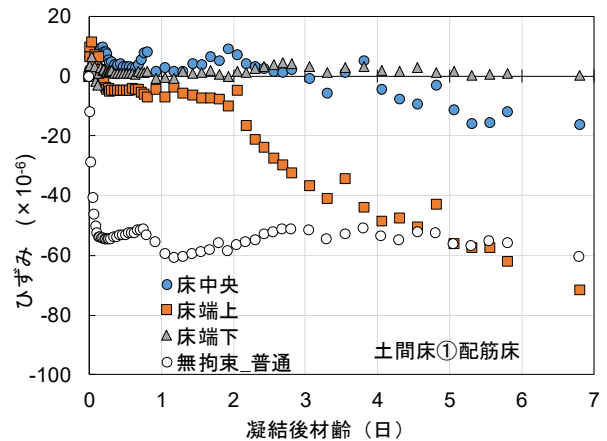


図-4 凝結後からのひずみ変化

土間床は、打込み翌日から散水養生としているが、散水養生を開始するまでに普通コンクリートの無拘束試験体では 60×10^{-6} 程度収縮している。しかし、①配筋床ではいずれの計測箇所でも収縮はほとんど見られない。また、②目地床では床端部（上・下）のみ 20×10^{-6} 程度の僅かな収縮が見られる。一方で、④無筋床では、配筋拘束がなく、地盤の拘束も弱い床端部（上・下）では無拘束試験体に近い収縮が見られる。これらを総合すると、土間床は、配筋および地盤の拘束があると、初期硬化過程でのマクロな収縮は生じ難くいと推察される。

③膨張床は、凝結後材齢1日までに、無拘束試験体で 330×10^{-6} の膨張ひずみが見られる。一方、床端部の上下はいずれも 170×10^{-6} 程度の膨張ひずみに留まっており、後述の図-9 に示すように、拘束鉄筋比 0.7% 相当の簡易拘束膨張試験体のひずみとほぼ同等となっている。したがって、土間床の鉄筋比は 0.24% であるので、 $0.7 - 0.24 = 0.46$ となり、地盤によって鉄筋比で 0.45% 相当の拘束が付加されていると推察される。また、土間床中央においては、膨張ひずみは 110×10^{-6} 程度とさらに小さくなっている。これは、中央が床端部から 4m 内側にあるため、床の長さに応じたコンクリート自重による地盤拘束が大きくなっているためと考えられる。

散水養生が終了し土間床の乾燥が始まると、床端部上の収縮が急速に進み始める。一方で、中央は床厚さで中心部にあるため収縮は緩慢である。床端部下においては、底面近傍にあるため、収縮は当初ほとんど生じないことが分かる。

3.2 乾燥開始後のひずみ変化

図-6 に乾燥開始時点を実験体としてひずみ変化を示す。

4 種類の土間床の中央と無拘束試験体の収縮ひずみについては、乾燥期間1ヶ月までほとんど差が見られない。すなわち、この間における配筋と地盤による拘束はかなり小さかったと考えられる。

一方で、これらの土間床全てにおいて、床端部の上下に顕著な収縮ひずみ差が見られる。これは、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きてい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大きくなるのは、基礎梁や外周部と絶縁され、スリップバー等が設置されていないことに拠るが、逆に、スリップバーが設置されているケースや端部から離れた内部では、このような反り返りを抑え込む外力や自重によって、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引張応力がひび割れ発生に関与していることが十分に考えられる。

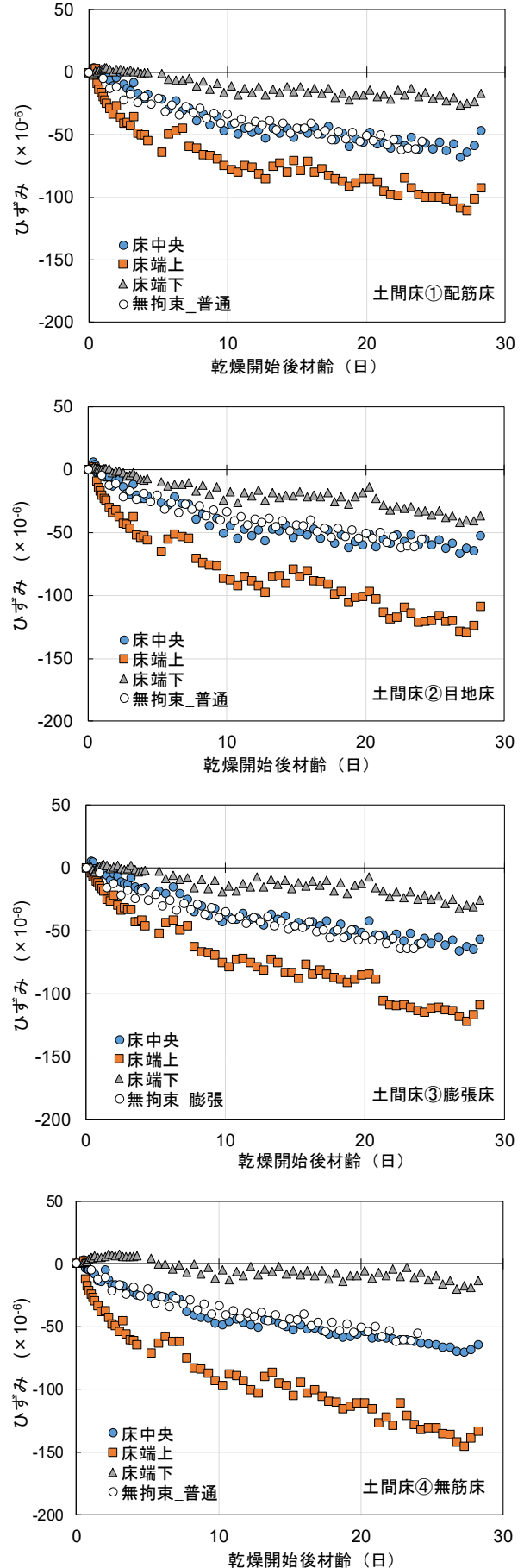


図-6 乾燥開始後からのひずみ変化

膨張床（中央）については、凝結直後は無拘束試験体に対して大きな膨張ひずみ差が見られたが、乾燥開始後は他の土間床と同様に収縮差はほとんど見られない。凝結直後はコンクリートが初期硬化過程にあるため地盤や配筋の拘束が大きいが、乾燥開始後はコンクリートの剛性が高まり、それらの拘束が相対的に弱まるためと考えられる。

後述するように、乾燥過程における土間床の材軸方向の配筋および地盤による拘束率はそれほど大きくはない。このことが、土間床の中央と無拘束試験体の収縮ひずみ差がほとんど見られない要因と思われる。

4. 土間床の地盤拘束についての考察

4.1 数値計算法

ここでは、拘束状態にある膨張材コンクリートの拘束ひずみおよび応力の数値計算の検討結果について述べ、土間床の地盤拘束について考察する。

膨張材コンクリートの数値計算方法は、橋田らが提案している手法³⁾によった。本手法の特徴は、逐次計算（step-by-step）時の拘束応力（圧縮応力）に応じて、入力値としての自由膨張ひずみ増分を式(1)によって低減するモデルを導入している点であり、水和熱による温度変化がある場合においても精度良く、拘束ひずみならびに応力を算定できることを確認している³⁾。

$$r_\varepsilon = \exp(-\alpha\sigma_c) \quad (1)$$

ここに、 r_ε は自由膨張ひずみ増分の低減率、 σ_c は拘束応力（N/mm²）、 α は低減特性を表わす係数で、橋田らは図-7に示すように、 $\alpha=1.0\sim 1.5$ が妥当であることを示している³⁾。この係数は、式(2)のような自由膨張ひずみの近似曲線を設定し、図-8に示すJIS A 6202の拘束膨張試験に準じた三谷らの実測値^{4), 5)}と計算結果が適合するように定められている。仮にこのような自由膨張ひずみ増分を低減するモデルを導入しない（ $\alpha=0$ ）と、膨張材コンクリートの拘束応力を過大評価することになる。

$$\varepsilon_{ex}(t) = \varepsilon_{ex0} [1 - \exp(-\beta t)] \quad (2)$$

ここに、 $\varepsilon_{ex}(t)$ は自由膨張ひずみ、 β はひずみの増進速度を表わす係数、 t は凝結からの有効材齢（日）である。なお、図-8の実測値から分かるように、コンクリート温度が20～60℃と変化しても、同一鋼材比では結果としての拘束応力はそれほど変わらない。

4.2 地盤による拘束割合

図-9に膨張床の初期材齢ひずみの実測値と4.1の方法によって数値計算した初期材齢拘束ひずみと拘束応力を示す。ここで、床端部上下は、図に示すように、簡易拘束膨張試験体のひずみとほぼ同程度だったので、計算での拘束鋼材比は0.7%とした。結果として、約 340×10^{-6} の自由膨張ひずみは、配筋および地盤の拘束によって約 170×10^{-6} となり、その際の拘束応力は 0.24 N/mm^2 となった。配筋そのものの鉄筋比は0.24%であるので、コンクリート自重による地盤拘束は、鋼材比で約0.45%に相当するといえる。床中央においては、地盤の拘束はさらに強まり、配筋の鉄筋比を加えて鋼材比で1.5%（地盤拘束は鋼材比で約1.25%相当）とすることで実測値と計算値がよく合致し、その際の拘束応力は 0.35 N/mm^2 となった。

（この部分は上記の4.2節の内容と重複しているため、ここでは省略し、図-7の解説に重点を置く）

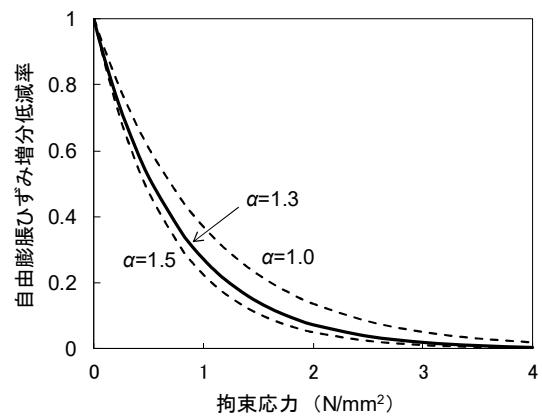


図-7 自由膨張ひずみ増分の低減率

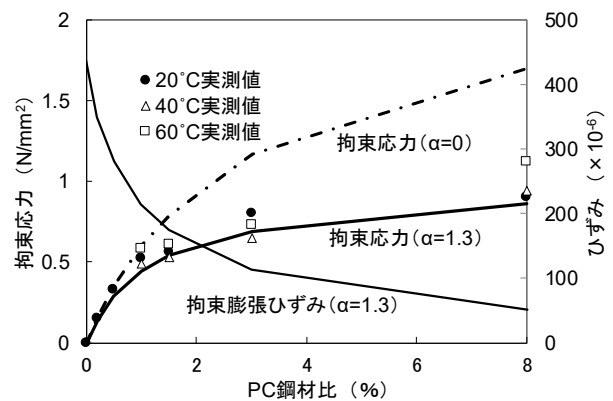


図-8 拘束応力とひずみの計算例（文献3）を基に作成

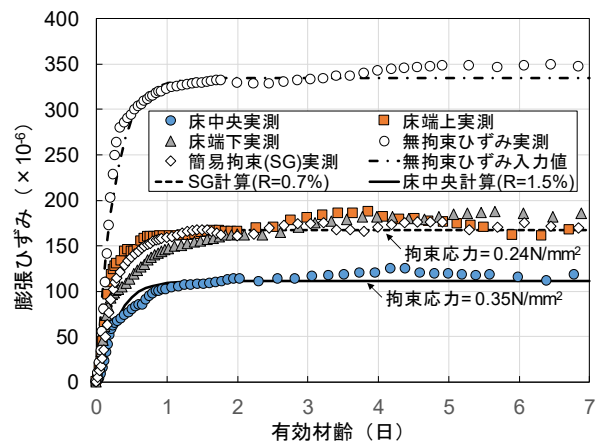


図-9 膨張床のひずみの実測値と計算値の比較

このように、基礎梁に接合されていない土間床であっても、地盤の拘束によって膨張材コンクリートには 0.3 N/mm²程度の圧縮応力が初期導入されると考えられ、この値は日本建築学会の「収縮ひび割れ制御設計・施工指針」に記載されている膨張材の初期導入圧縮応力の提案値と同等であった。

なお、配筋および地盤の拘束が拘束鋼材比で 1.5%相当であることは、柱や梁部材の主筋の拘束程度であり、乾燥開始後のコンクリート床の拘束率はそれほど大きな値とは言えない。そのため、基礎梁に接合されていないような土間コンクリート床では、ひび割れは発生し難いと考えられるが、一方で、3.2 で述べたように、一面乾燥状態による反りを抑えようとする応力が発生するはずであり、この応力との重ね合せによって比較的短期間でひび割れが発生する可能性も指摘できる。これらの検討については今後の課題としたい。

5. まとめ

本研究は、新設工事において、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、打込みから 1 ヶ月間の初期計測とその検討結果から以下の知見が得られた。

- (1) 土間床は、乾燥開始直後から一面乾燥に起因する断面内の収縮ひずみ差が拡大する。その結果生じる反りを抑え込む外力や自重によって、土間床表層には引張応力が発生すると考えられる。

- (2) 一方で、乾燥過程での土間床全体の拘束率は小さく、材軸方向の引張応力は短期的にはそれほど大きくならないと推定される。
- (3) 基礎梁と絶縁した土間床でも地盤の拘束によって、膨張材コンクリートには一程度の圧縮応力の初期導入が期待できる。

参考文献

- 1) 辻埜真人, 橋田 浩: 軽量型枠法 (SG モールド) による膨張コンクリートの拘束膨張試験, セメント・コンクリート, No.78, pp.24-30, 2012.2
- 2) 橋田 浩: コンクリートの乾燥収縮率早期推定精度の改善, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (材料施工), pp.251-252, 2009
- 3) 橋田 浩, 菊地俊文, 辻埜真人: 膨張コンクリートの拘束応力評価法の提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.751-752, 2012
- 4) 三谷裕二, 谷村 充, 松本健一 他: マス養生温度履歴下における膨張コンクリートの応力評価手法, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1295-1300, 2006
- 5) 三谷裕二, 谷村 充, 佐久間隆司 他: 膨張コンクリートのマス養生温度履歴を考慮した膨張応力算定法, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1141-1146, 2005