

# 論文 軽量コンクリートを用いた構造体デッキプレートスラブの温度及び収縮挙動に関する研究

小川 亜希子\*1・今本 啓一\*2・本間 敏明\*3・石川 寛範\*4

**要旨:** 軽量骨材コンクリートを床スラブに用いた現場での実地調査と室内試験（拘束ひび割れ試験）の結果を併せて実構造物における温度・収縮挙動に関する定量的な検討を試みた。現場で計測したひずみデータと、室内試験から算出された、引張クリープなども考慮した有効ヤング係数を用いて現場コンクリートに発生する温度・収縮拘束応力を算出し、室内試験の応力強度比と現場コンクリートの応力強度比の比較から、応力レベルでコンクリートのひび割れ発生リスクを検討した。

**キーワード:** 現場計測, スラブ, 拘束応力, 温度応力, 応力強度比, 有効ヤング係数

## 1. はじめに

RC 構造物におけるコンクリートのひび割れはその耐久性に大きな影響を及ぼす要因の一つである。また構造体において、床スラブはひび割れが生じやすい部材の一つである。床スラブに発生するひび割れのうち、コンクリートの乾燥収縮がその周辺部材から受ける拘束によって生じる乾燥収縮ひび割れはその要因の一つであるが、施工過程において床スラブは多くの環境要因の影響を受けるため、ひび割れ制御方法の確立には多くの障壁があると考えられる<sup>1)</sup>。また、実構造物におけるコンクリートの変形挙動に関する研究は過去にいくつかの報告<sup>2)</sup>があるものの、現場計測のみの場合やコンクリートの発生応力を解析で推測するなど、定量的な挙動解析の研究例はまだ少ない。

一方で、人工軽量骨材を用いた軽量骨材コンクリートはその実用例として、構造物の軽量化を目的とした床スラブでの使用が多い。しかしながら、普通骨材に対して軽量骨材は吸水率が大きいため、耐凍害性やポンプ圧送性に劣るなどその使用に関しては問題も多く残されている。既往の研究<sup>3)</sup>において、人工軽量骨材コンクリート（I種）の拘束ひび割れ試験をひずみ制御型一軸拘束試験機を用いて実施した。その結果、軽量コンクリートは乾燥初期における応力強度比の低下、クリープ特性によってひび割れ発生材齢が延びるという結果が得られ、材料特性としてのひび割れ抵抗性が認められた。

そこで本研究では、実構造物における軽量コンクリートの挙動について、約二ヶ月半にわたる現場コンクリートの実地調査と室内試験とを併せて、応力レベルで検討することを目的とする。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料及び調合

使用材料及び計画調合を表-1及び表-2に示す。フレッシュコンクリートのスランプ及び空気量の目標値はそれぞれ21.0cm及び5.0%となっており、打設時に現場で行われた試験ではいずれも目標範囲内におさまったことが確認されている。

表-1 使用材料

W: 水	回収水
C: セメント	普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm <sup>3</sup> )
S: 細骨材	人工軽量骨材(膨張頁岩系, 表乾密度 1.86g/cm <sup>3</sup> ,吸水率 10.5%)
G: 粗骨材	人工軽量骨材(膨張頁岩系, 表乾密度 1.40g/cm <sup>3</sup> ,吸水率 10.4%)
混和剤	収縮低減型高性能AE減水剤 (ポリカルボン酸系化合物とポリエーテル誘導体)

表-2 計画調合

W/C [%]	s/a [%]	単位量 [kg/m <sup>3</sup> ]				混和剤
		W	C	S	G	
49	52.7	185	378	575	384	4.84

### 2.2 試験項目

#### 2.2.1 現場計測

計測は学校機関の屋上階で実施した。コンクリートの打設は平成22年7月に行われた。建物はRC造3階建であり、屋上階は人工軽量骨材コンクリート（II種）を使用したデッキプレートスラブである。計測対象の平面図及び計測位置を図-1に示す。図に示すようにスラブ中央およびH形鋼梁付近、さらにスラブ中央ではデッキプレート方向に対して垂直・平行方向に埋込式ひずみゲージを予め計3箇所を設置した（写真-1）。屋上スラブの計測期間は防水施工がされるまでの約二ヶ月半とし、2時間ごとにコンクリートのひずみを計測した。

\*1 東京理科大学 工学部 建築学科 補手 修士(工学) (正会員)

\*2 東京理科大学 工学部 建築学科 准教授 博士(工学) (正会員)

\*3 東京理科大学 工学部 建築学科 助教 工修 (正会員)

\*4 人工軽量骨材 (ALA) 協会 (正会員)

また、拘束部材による拘束応力(ひずみ)算出のため、屋上スラブの計測と並行してダミー試験体を作製し、屋上スラブと同時刻でコンクリートのひずみを計測した。試験体の断面図を図-2に示す。デッキプレートは屋上スラブと同じ材質を使用している。試験体は平面を600×1000mmとし、コンクリートの厚みや補強筋位置は屋上スラブと同じになるように打設を行った(写真-2)。ダミー試験体は2体作製した。片方は補強筋を配筋し(ダミー試験体有筋)、もう一方は補強筋を配筋せず、デッキプレートの上にビニールシートを敷くことで考え得る拘束の影響を排除している(ダミー試験体無筋)。

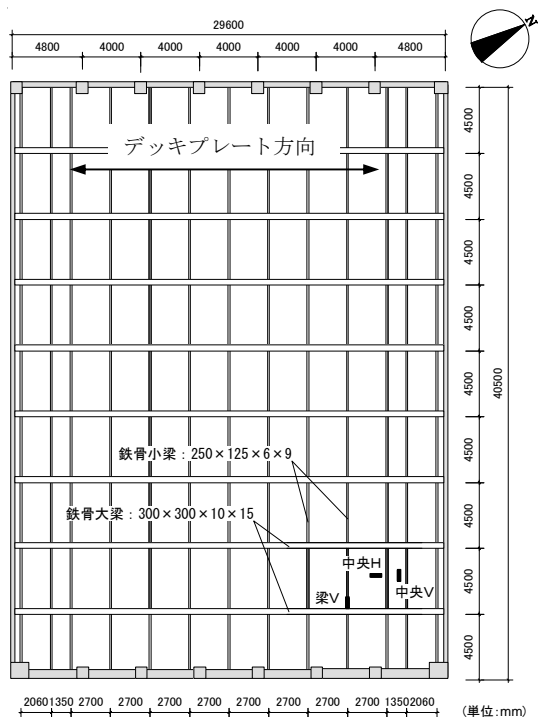


図-1 屋上スラブ平面図及び計測位置

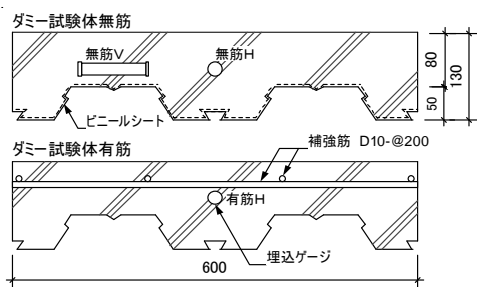


図-2 ダミー試験体断面図



写真-1 ひずみゲージ設置状況



写真-2 ダミー試験体

## 2.2.2 拘束ひび割れ試験(室内実験)

現場計測と並行して室内試験を行った。後述では室内試験結果から算出した、引張クリープなども含めた有効ヤング係数を用いて、現場コンクリートにおける拘束応力を算出し、ひび割れ発生リスクについて検討する。

本研究で使用する拘束ひび割れ試験装置<sup>3)</sup>(図-3)はひずみ制御型であり、設定された任意の拘束率を一定に制御し、その時発生する荷重(拘束応力)をリアルタイムで計測可能である。これにより実構造物に応じた拘束率を再現した材料性能評価が可能となる。本研究では現場における拘束率の幅を考慮して拘束率を80, 50, 20%に設定し、制御間隔を15分(測定間隔は30分)として拘束応力及び実ひずみデータを計測した。

試験体は現場コンクリート打設時に、同じコンクリートをポンプ車から型枠に打設した。打設後は現場建物横の屋外環境にて封緘養生を行い、その後封緘状態のまま東京理科大学に運搬、試験開始材齢である材齢15日まで20℃の実験室内に静置した。

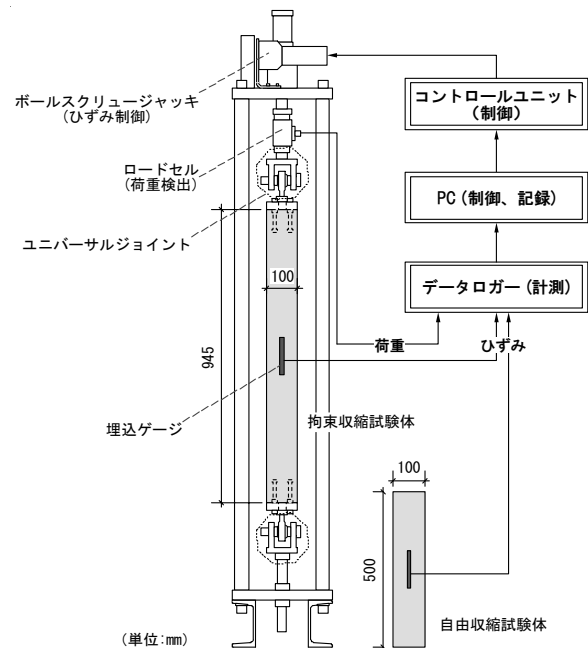


図-3 拘束ひび割れ試験装置

## 2.2.3 圧縮・割裂引張強度試験及びヤング係数試験

圧縮試験方法は、JISにより圧縮強度試験(JIS A 1108)及び圧縮ヤング係数試験(JIS A 1149)にそれぞれ従い行う。割裂引張強度試験(JIS A 1113)も同様に行う。試験体はφ100×200mmのものを各3体ずつ用意し、材齢15, 28, 56, 91日にて試験を行う。

拘束ひび割れ試験と同様に、各強度試験に使用するコンクリートも現場打設したコンクリートと同じものを使用した。養生条件については前述の拘束ひび割れ試験体と同じとする。

### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 現場計測結果

現場計測結果を図-4に示す。上図は現場付近の外気温・降水量の変化を、下図は各直達型ひずみゲージで計測されたひずみ変化をそれぞれ示している。またひずみ変化は、上が構造体コンクリート、下がダミー試験体コンクリートを示している。なお、計測は打設時より開始しているが、硬化開始時を原点としている。

打設及び計測を開始したのは梅雨の雨天が続く時期であった。試験体コンクリートのひずみ変化を見ると、降雨の確認される間はほとんど収縮側に挙動を見せず、梅雨が明けると(材齢30日頃)収縮が始まっているのが分かる。しかし、材齢40日の降雨により再び収縮分が戻っていることから、実構造物の収縮挙動は降雨の影響を強く受けるものと考えられる。

図-5は結果の一部を拡大したものである。コンクリート温度とひずみの挙動を比較すると、温度上昇に伴い試験体コンクリートのひずみは収縮側に変化していることが分かる。コンクリートは温度上昇に伴い膨張するが、ひずみ計測値は収縮挙動を呈した。これについて、屋上コンクリート打設より以前に打設された周囲の柱梁コンクリート、及び屋上スラブのH形鋼などの影響が考えられる。すなわち、周辺部材によって温度上昇によるコンクリートの膨張挙動はほぼ完全に抑えられ、温度

補償タイプの本ゲージによる計測値は収縮側の挙動を示したと思われる。

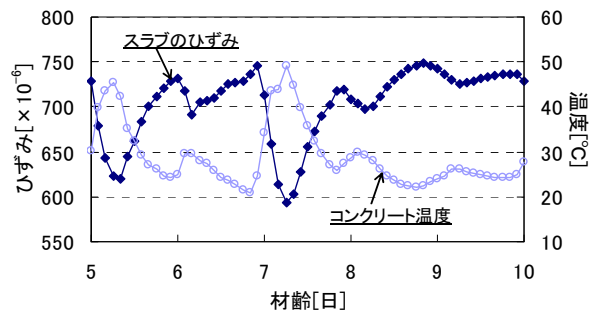


図-5 温度変化とひずみ変化挙動

#### 3.2 強度試験結果

圧縮強度試験結果及び割裂引張強度試験結果を図-6に示す。なお、比較のため2008年度結果<sup>3)</sup>も併せてグラフに載せる。圧縮強度は脱型後、材齢とともに強度が上昇しているのが分かる。骨材による強度の違いを見ると、材齢28日までⅡ種の強度はⅠ種コンクリートを下回っているが、材齢91日ではほぼ同等の値となった。

また、割裂引張強度については脱型後、材齢91日まで強度はあまり変わらなかった。割裂引張強度についても終局値は材齢28日のⅠ種コンクリート強度とほぼ同程度となった。

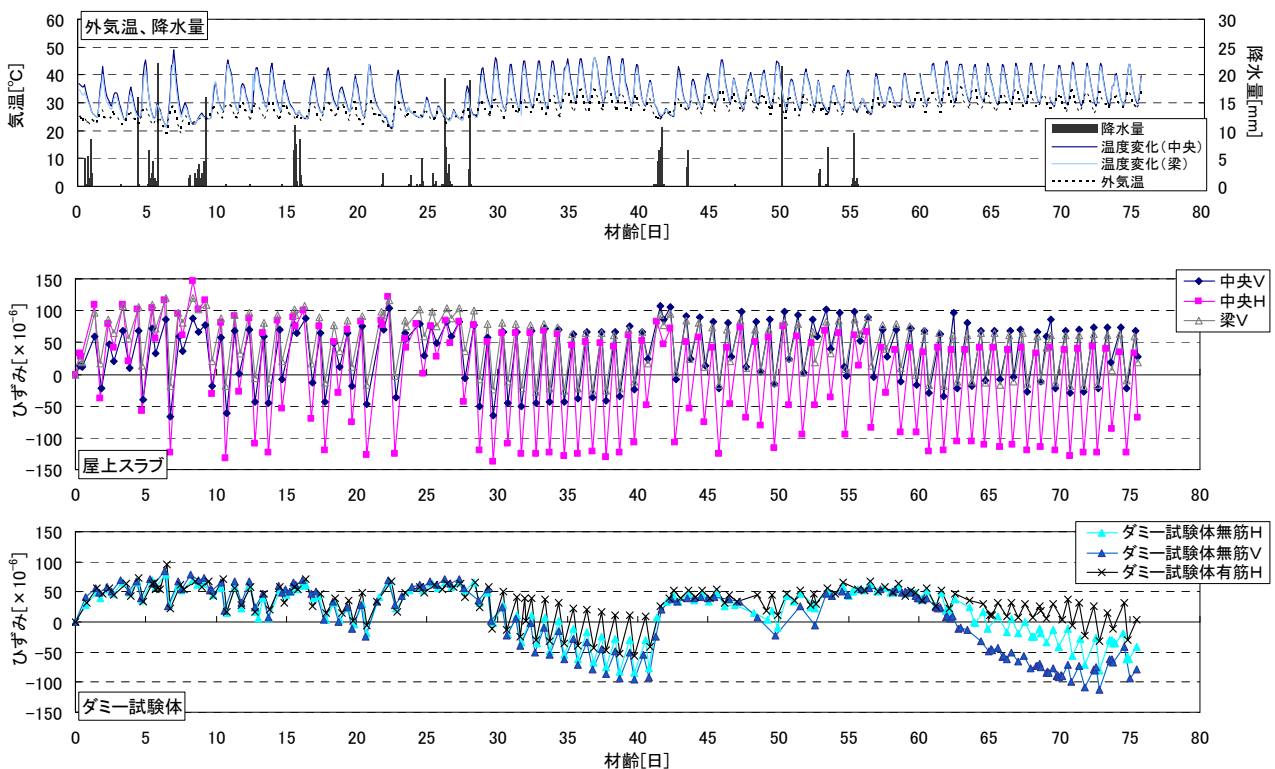


図-4 現場計測結果

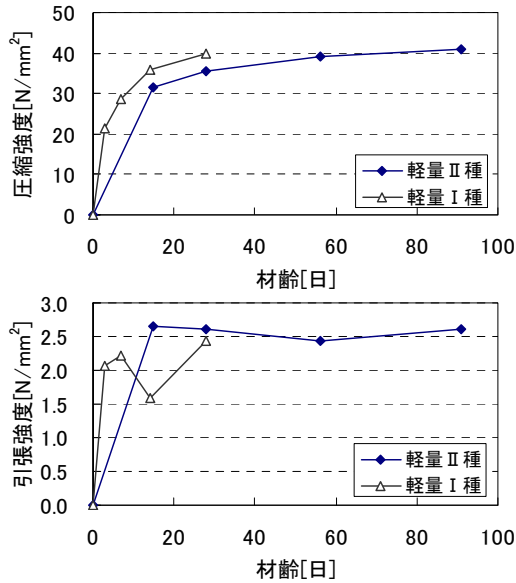


図-6 強度試験結果

### 3.3 ヤング係数

ヤング係数の結果を図-7に示す。3.2と同様に2008年度結果を併せて載せている<sup>3)</sup>。ヤング係数は脱型後材齢91日まで値に大きな変化は見られなかった。また、軽量I種コンクリートの試験結果と比較してもその値はほぼ同程度となった。

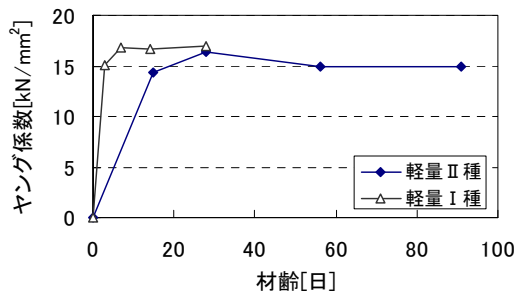


図-7 ヤング係数試験結果

### 3.4 拘束ひび割れ試験結果

#### 3.4.1 自由収縮ひずみ

自由収縮ひずみの変化を図-8に示す。乾燥開始段階からその収縮低減効果が見られる。軽量II種コンクリートは細骨材にも人工軽量骨材が使用されるため、骨材中の水分量がより多く含まれる。さらには今回現場コンクリートの混和剤として収縮低減型高性能 AE 減水剤を使用しており、両者によりコンクリート中に長時間水分が蓄えられ、I種コンクリートと比較して収縮量が抑えられたと考えられる。

全ての拘束試験体が破断した時点での最終的な自由収縮ひずみ量は約  $200 \times 10^{-6}$  程度となった。

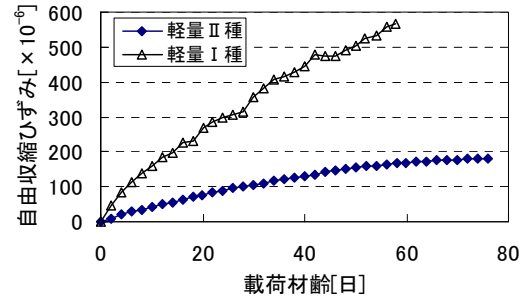


図-8 自由収縮ひずみ変化

#### 3.4.2 収縮拘束応力

拘束ひび割れ試験における拘束応力変化を図-9に示す。拘束率が大きいものほど荷初期から応力が上昇する傾向が見られた。図中には各試験体のひび割れ発生時(または最大応力時)の材齢を示す。図より、拘束率の最も低い20%が破断材齢も一番延びる結果となり、拘束率50%と80%は大きな差は見られなかった。

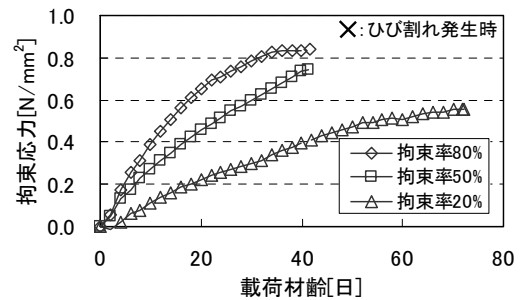


図-9 拘束応力変化

#### 3.4.3 収縮応力強度比

図-10に収縮応力強度比を示す。応力強度比とは、ひび割れ発生時の拘束応力を同材齢における引張強度で除した値である。一般に、コンクリートのひび割れは引張強度よりも低い応力で発生し、応力強度比にして0.7程度とされている。またひび割れ発生材齢が遅くなるほどその値は大きくなる傾向があるとされる<sup>5)</sup>。

図には前年度までの実験結果も併せて示す。

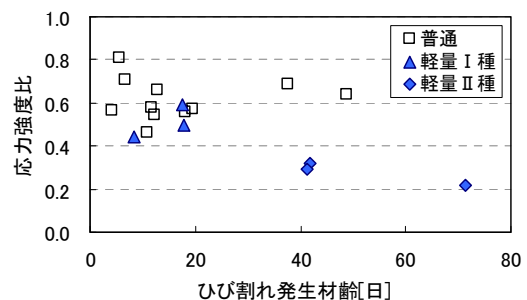


図-10 収縮応力強度比

2008年度の研究結果より、終局的な応力強度比の値は拘束率による大きな変化はみられなかったが、普通コンクリートと比較して軽量コンクリートは値が小さく、0.4～0.6の間に収まる結果となった。今回の結果と比較してみると、応力強度比は軽量I種コンクリートよりもさらに小さく、0.2～0.3で試験体が破断する結果となった。軽量骨材の使用割合が増えるほど、ひび割れ発生材齢は延びるが、応力強度比は小さくなる傾向が認められる。

#### 4. 現場コンクリートのひび割れ評価

##### 4.1 デッキプレートスラブにおける拘束応力

ここでは現場計測結果をもとに、デッキプレートスラブコンクリート（以下、スラブ）に発生する拘束応力を算出することを試みる。なお、本研究ではスラブで計測された全ひずみを、収縮拘束応力及び温度応力の二種類の応力のみによるものと仮定した上で計算を行っている。すなわち、最終的に評価を行う収縮拘束応力の算出は、屋上で計測された全ひずみから計算された全応力と温度変化による温度応力との差分となる。

応力計算にあたり、室内試験結果から算出された有効ヤング係数を用いる。図-11は拘束ひび割れ試験における拘束応力-拘束ひずみ（自由収縮ひずみと拘束収縮ひずみの差）関係を示したものである。図中の曲線の傾きが、微細ひび割れや引張クリープの影響を含めた有効ヤング係数となるが、拘束率による傾きには大差ないことから、今回の考察にあたっては屋上スラブの中で、構造形式によって決まるとされる拘束度に関わらず有効ヤング係数は同一として評価可能とする。また、圧縮側についてはグラフの立ち上がり部の傾きを使用した。

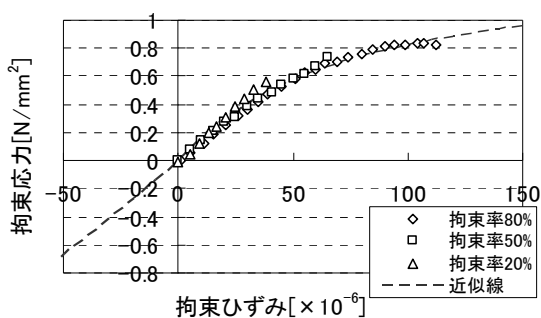


図-11 拘束応力 - 拘束ひずみ関係

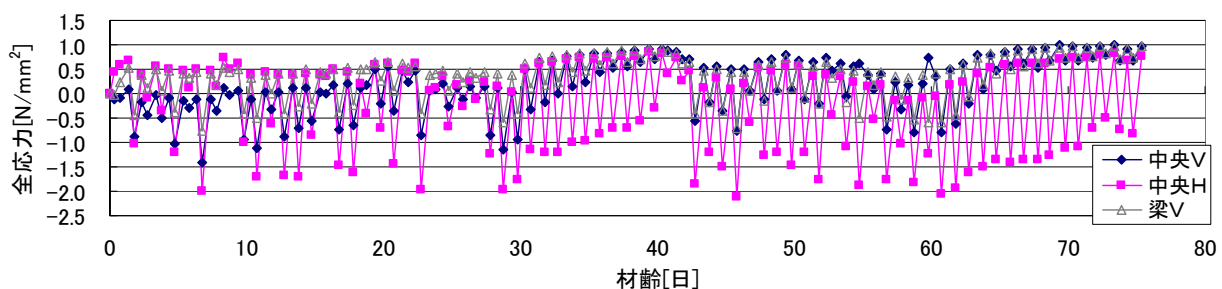


図-12 全応力

拘束応力の計算方法は以下による。なお、式中の線膨張係数に関しては、別件にて採取したコンクリートについて実験的に求めた結果を用いている。

$$\sigma_{total} = (\varepsilon_f - \varepsilon_m) \times E_e \quad (1)$$

$$\sigma_{temp.} = \Delta T \cdot \alpha \times \lambda \times E_e \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{\Delta \varepsilon_m}{\Delta \varepsilon_f} \quad (3)$$

$$\therefore \sigma_s = \sigma_{total} - \sigma_{temp.} \quad (4)$$

ここに、

$\sigma_{total}$  : 全応力 (N/mm<sup>2</sup>)

$\varepsilon_f$  : ダミー試験体の自由収縮ひずみ (×10<sup>-6</sup>)

$\varepsilon_m$  : 屋上スラブの計測ひずみ (×10<sup>-6</sup>)

$\sigma_{temp.}$  : 温度応力 (N/mm<sup>2</sup>)

$\Delta T$  : 外気温変化 (°C)

$\alpha$  : コンクリートの線膨張係数(×10<sup>-6</sup>/°C)

$\lambda$  : 拘束率

$E_e$  : 有効ヤング係数(kN/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_s$  : 収縮拘束応力 (N/mm<sup>2</sup>)

全応力の計算結果を図-12に示す。全応力は収縮側に最大 1.0N/mm<sup>2</sup>、圧縮側に最大 2.0N/mm<sup>2</sup>に変化しながらゆるやかに推移している。次に、現場計測結果において収縮が進んでいる期間（材齢 29～41 日）に着目し、式(2)～(4)によってスラブの応力を分離した。なお、この範囲での拘束率の変動はほぼなく、またひずみの計測方向によって値が決まり、垂直方向では 0.7 程度、平行方向では 1.0 程度（完全拘束）であった。

図-13より、温度応力は温度変化によって 3.0N/mm<sup>2</sup>の振幅をもちながら推移している。また収縮が進むにつれて収縮拘束応力も上昇することが確認された。また、全応力と拘束応力を比較すると、全応力のうち拘束応力の占める割合は小さい。3.1にも記すように、今回の結果では周辺部材による拘束応力よりも降雨や気温変化がコンクリートの挙動に影響する部分が卓越し、収縮応力が抑えられたと考えられる。

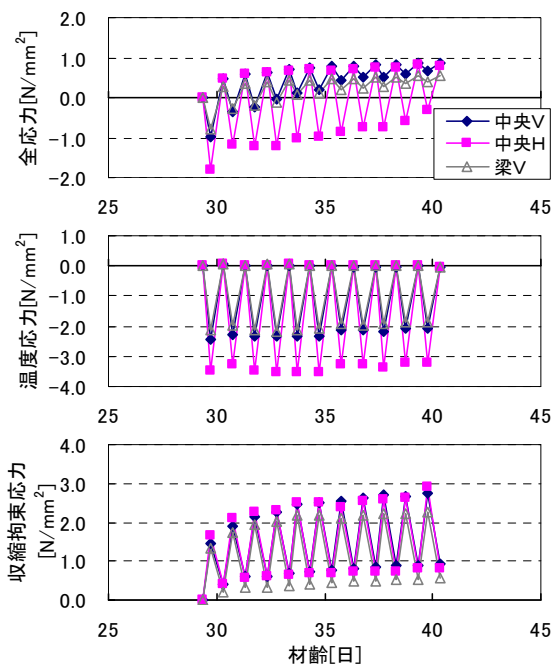


図-13 応力計算結果

ここで、計算された拘束応力の妥当性を確認するため、以下の方法で別途計算を行った。計測データのうち温度範囲を限定し(29.5~30.5℃)抜粋することで温度応力の影響を取り除き、直接拘束応力を計算する。ダミー試験体の自由収縮ひずみに屋上コンクリートのひずみから計算される拘束率を乗じ、さらに有効ヤング係数を乗じて算出した。計算結果(マークなし)と前述の結果を合わせて図-14に示す。計算結果はおよそ、前述の計算結果と比較して、その下限値と同等であり、上限域は図-11の応力-ひずみの範囲外であることから、この域での合致は計算の妥当性を示すものと思われる。

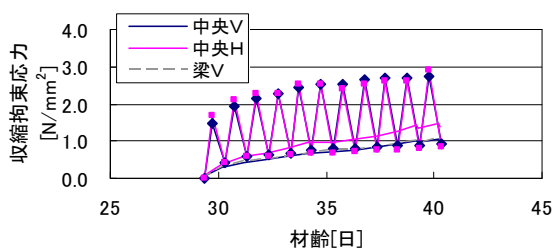


図-14 各収縮拘束応力計算結果の比較

#### 4.2 ひび割れ発生リスクの考察

4.1 を受け、計算された全応力をもとに収縮応力強度比を算出する。図-15には、割裂引張試験結果を直線近似したものをを用いて算出した、応力強度比の経時変化を示す。さらに図中には 3.4.3 で示した実験結果(拘束率 80%)を示す。(収縮が開始する段階で屋上スラブに圧縮応力が生じているため、応力強度比は負の値をとる。)最終的な応力強度比は室内試験での終局応力強度

比を越える程度にまで上昇していることから、現場スラブのひび割れ発生リスクが高いことが推測される。しかしながら今回、防水施工直前まで目視によるひび割れは確認されなかった。収縮拘束応力によりひび割れ発生に向かいつつあるが、夏場の温度上昇による圧縮応力の導入によりひび割れのリスクが回避されたと推察される。

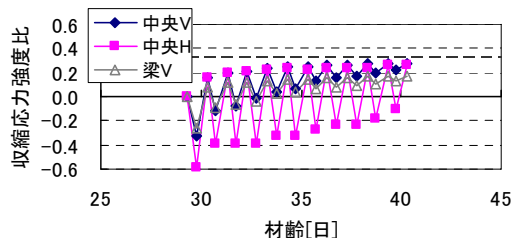


図-15 応力強度比の経時変化

#### 5. まとめ・今後の課題

構造体デッキプレートスラブ温度・収縮挙動に関して、本研究は現場計測と室内実験である拘束ひび割れ試験によってスラブコンクリートに発生する拘束応力を算出し、その収縮ひび割れ発生リスクを応力強度比の変化として定量的に評価した。軽量コンクリートを用いた今回の実験では、コンクリートの収縮ひずみは小さいが、デッキプレートスラブにおいて応力強度比の観点からそのひび割れ発生リスクは必ずしも低くないという知見が得られたが、実際は温度上昇による圧縮応力がコンクリートのひび割れの回避に寄与した部分が大きいと考えられる。しかしながら、外気温度が低下する冬期においてはほぼ同等の温度応力が収縮側に作用してひび割れが不可避であることは、今回の定量評価を踏まえると容易に推測される。

今後もこのような現場計測と室内実験を併せたコンクリートの挙動評価においてデータを集積し、より合理的なひび割れ予測方法の確立が必要であると思われる。

#### 参考文献

- 1) 閑田徹志：施工部位別におけるひび割れ防止対策デッキプレート系スラブ/コンクリート系合成スラブ/土間床スラブ，建築技術 pp.144-147，2006.6
- 2) 例えば、佐竹紳也ほか：合成スラブにおける膨張材のひび割れ低減効果に関する現場試験，日本建築学会関東支部研究報告集，pp.57-60，2004
- 3) 小川亜希子，今本啓一ほか：ひずみ制御型一軸拘束試験機を用いた人工軽量骨材コンクリートの収縮ひび割れ発生性状に関する実験的研究，日本建築学会関東支部研究報告集，pp.105-108，2008
- 4) 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-メカニズムと対策技術の現状-，2003