

論文 コンクリート部材の乾燥収縮ひび割れ実験における拘束鋼材のひずみ分布

上田賢司*1・佐藤嘉昭*2・清原千鶴*3・永松静也*4

要旨:本論文は、JIS原案で示されている乾燥収縮ひび割れ試験装置を用いて、拘束コンクリートに負荷される引張力を算出するために拘束鋼材に生じるひずみの分布を測定し、その分布形状について検討を加えた。その結果、拘束鋼材に生じるひずみは中心圧縮荷重と曲げモーメントによるひずみの和として表されるものと仮定することで実測データをほぼ近似できることを示した。このひずみ分布から拘束コンクリートの引張力を算出できるが、実測データとして拘束鋼材の3点(ウェブ1点、フランジ3点)のひずみを測定しておけばより正確な引張応力を求めることができることも示した。

キーワード:乾燥収縮ひび割れ試験(JIS原案)、拘束鋼材のひずみ分布、コンクリートの引張力

1. まえがき

筆者らは、コンクリート部材の乾燥収縮ひび割れに関連して、コンクリート部材内に生じる乾燥収縮応力を正確に計算することからひび割れの発生を予測しようとする研究に取り組んできた[1, 2]。その手法は図-1のように整理できるが、この過程において、JIS原案で提案されている乾燥収縮ひび割れ試験方法[3]に準じて実験をおこない、ひび割れ発生に関する基礎データの収集をおこなった。この試験において、拘束鋼材に生じるひずみを測定しておけば拘束コンクリートに負荷される引張荷重(外部拘束力)を求めることができるようになり、コンクリート部材の乾燥収縮ひび割れは、図-1に示されるように、コンクリート部材が極めてゆっくりとした時間で引張られる場合の破壊という問題に置き換えられる。この

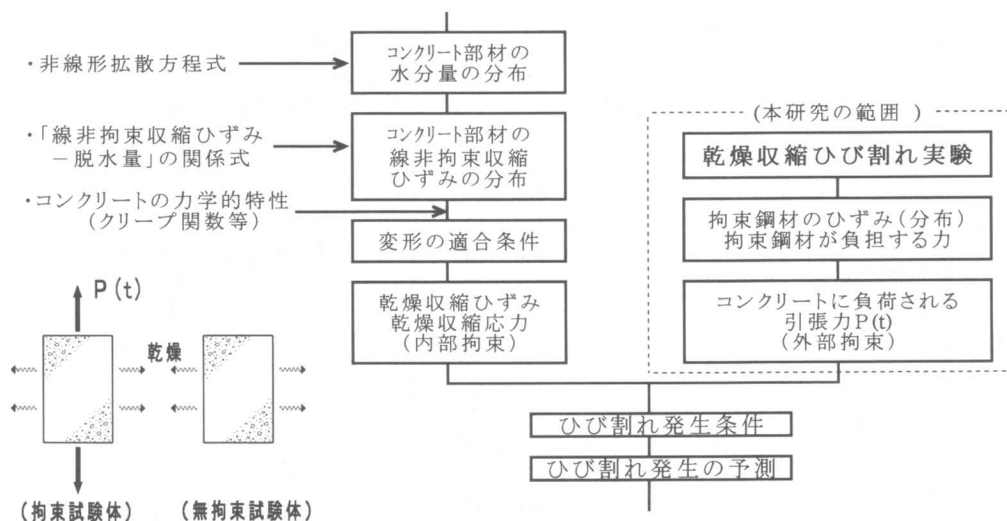


図-1 ひび割れ予測の方法

*1 大分大学大学院 工学研究科環境工学専攻((株)さとうベネック)、工修(正会員)
 *2 大分大学助教授 工学部建設工学科、工博(正会員)
 *3 大分大学助手 工学部建設工学科、工修(正会員)
 *4 大分大学教授 工学部建設工学科、工博(正会員)

段階で有限要素法などによる応力解析をおこない、適切なひび割れ発生条件を導入することができれば乾燥収縮ひび割れ発生予測は可能となるかもしれない。

拘束鋼材のひずみに着目した場合、JIS原案で示された試験方法では、コンクリート部材の拘束は拘束鋼材(軽量溝型鋼)のウェブ部分に溶接された丸鋼がコンクリートの収縮を拘束するというメカニズムによって与えられ、そのために、拘束鋼材には様なひずみが生じないことになる。本研究で示した乾燥収縮ひび割れの予測手法においては、コンクリート部材に負荷される引張力が重要な数値になることは前述したとおりである。そこで、本論文では、拘束鋼材に生じるひずみの分布を測定し、その分布形状について検討を加え、拘束コンクリートに負荷される引張応力を算出することを試みた。以下はその報告である。

2. 拘束鋼材のひずみ分布の計算式

JIS原案で用いられる乾燥収縮ひび割れ試験体の拘束部分の状況を図-2(a)に示すが、上述したように、コンクリートの収縮は拘束鋼材端部のウェブに溶接された丸鋼によって拘束される。図中には拘束鋼材のひずみ分布の状態が示されているが、このような拘束では図-2(b)に示すような様なひずみ分布は得られず、実際には図-2(c)のような状態になっているものと思われる。

コンクリートと拘束鋼材の付着がどの程度のものかを明らかにすることはできないので、ここでは単純なモデル化として、拘束鋼材のひずみは、軸方向荷重 P と曲げモーメント $M(=Pe)$ によるひずみの和として表されるものと仮定する。図-2(c)における X 軸方向の偏心距離を e_x 、 Y 軸方向の偏心距離を e_y とすれば、ひずみ $\varepsilon(x,y)$ は、次式で計算できる。

$$\varepsilon(x,y) = \frac{1}{E} \left(\frac{P}{A} + \frac{P \cdot e_x}{I_y} x + \frac{P \cdot e_y}{I_x} y \right) \quad (1)$$

E : 拘束鋼材のヤング係数(MPa)

I_x : x 軸まわりの断面2次モーメント(cm^4)

I_y : y 軸まわりの断面2次モーメント(cm^4)

A : 拘束鋼材の断面積(cm^2)

e_x : x 方向の重心位置からの偏心距離(cm)

e_y : y 方向の重心位置からの偏心距離(cm)

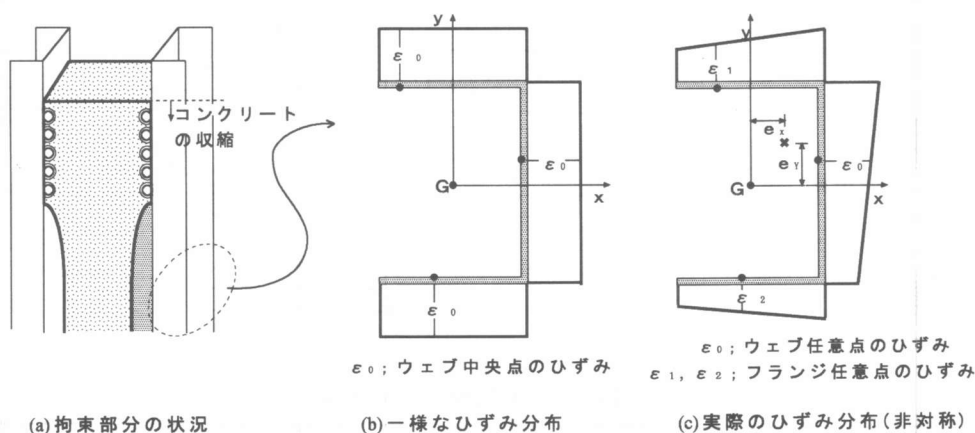


図-2 拘束鋼材のひずみ分布の状態

3. 実験

3.1 実験計画

実験は次の2つからなっている。

実験－Iでは、乾燥収縮ひび割れ試験装置に用いられている拘束鋼材に生じるひずみの分布を、拘束試験体のコンクリート部分に静的圧縮荷重を載荷することによって求め、拘束鋼材の負担する荷重とひずみ分布の関係を明らかにすることにした。

実験－IIでは、3、7、28日の各乾燥開始材齢におけるコンクリート部材のひび割れ実験において、拘束鋼材のひずみ分布を測定し、そのひずみ分布から拘束コンクリートの引張応力を算出することにした。また同時に、ひび割れ試験体と同一の断面形状を持つ試験体を乾燥過程下に置いた場合の直接引張強度の経時変化も測定することにした。

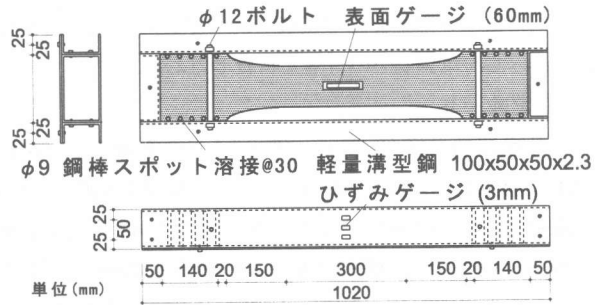
3.2 実験装置

実験に使用した乾燥収縮ひび割れ試験装置を図－3に示す。拘束鋼材(JIS G 3305、軽量溝形鋼[-100×50×50×2.3 mm)のひずみの分布は図－4に示すように、拘束鋼材の長さ方向の中央にウェブ部分3箇所、フランジ部分10箇所(計13点、1体の試験体で26点)に貼付したひずみゲージ(長さ3mm)により測定したが、長期間にわたるひずみ測定を考慮して焼き付け貼付としている。

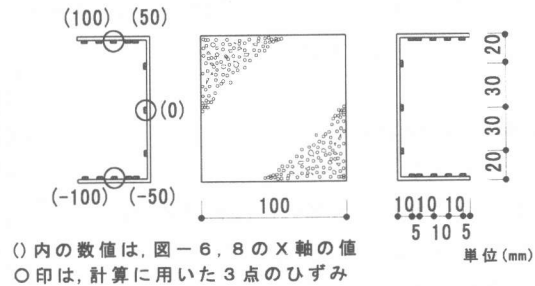
3.3 コンクリートの調合および養生

実験－I、IIに使用したコンクリートは呼び強度21、スランプ18cmのレディーミクストコンクリート(21-18-20N)である。コンクリートの調合および使用材料の性質を表－1に示す。

コンクリートの打設は、拘束鋼材の丸鋼溶接部分をあらかじめ粘土で覆ってから打ち込み、材齢1日で脱型したが、その際に拘束鋼材も取り外してコンクリート部分だけを所定の材齢まで養生するようにした。これは、養生中にコンクリートの自己収縮ひずみ量が拘束され、実験開始前に拘束試験体に引張応力が生じることを防ぐためである。実験－Iで使用する試験体は脱型後そのまま



図－3 乾燥収縮ひび割れ試験装置



図－4 拘束鋼材のゲージ貼付位置

表－1 コンクリートの調合

呼び強度	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位質量 (kg/m ³)				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
21	18	58.3	46.1	182	313	805	980	1.174

セメント;普通ポルトランドセメント(比重:3.15)

細骨材;混合砂(大三島産海砂+米良産川砂)、表乾比重2.59、吸水率1.77% 粗粒率2.64

粗骨材;砕石(津久見産石灰石)、表乾比重2.70、吸水率0.36%、粗粒率6.64

混和剤;AE減水剤標準形I種

実験室内に放置、実験－Ⅱの乾燥収縮ひび割れ試験用の試験体は脱型後水を含ませたスポンジを入れた厚手のビニール袋(厚さ0.5mm)内に完全密封し、養生室内(温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$)でシール養生とした。

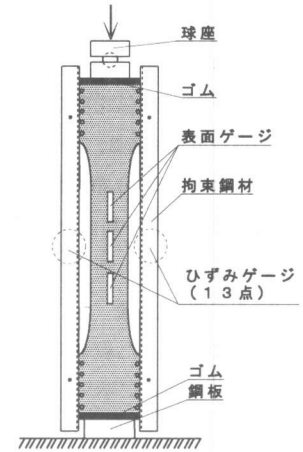
3.4 実験方法

(1) 実験－Ⅰ

図－5に示すように、乾燥収縮ひび割れ試験体と同一形状の試験体を用いてコンクリート部分のみの圧縮荷重載荷試験をおこなった。また、拘束鋼材を取り外し、コンクリート部分だけの試験体の圧縮試験もおこなった。コンクリートのひずみはポリエステルゲージによって表裏3点ずつを測定した。試験体は脱型後約1年間空中養生をおこなったものを使用した。実験開始前日にコンクリートの拘束部分に石膏セメントペースト(質量比で石膏:セメント:水=1:1:1)を流し込み、これによって拘束鋼材との付着を持たせるようにした。

(2) 実験－Ⅱ

各乾燥開始材齢(3、7および28日)での実験では、実験－Ⅰと同じ方法で拘束を与えた乾燥収縮ひび割れ試験体3体(そのうち2体は拘束鋼材のウェブの中央のひずみのみ測定)、直接引張試験用試験体30本($10 \times 10 \times 40\text{cm}$ 角柱試験体、直接引張試験は両端に鋼板をエポキシ系接着剤で貼付る方法で実施、乾燥期間中の強度変化を測定)、圧縮および割裂試験用試験体3本($\phi 10 \times 20\text{cm}$ 円柱試験体)、自己収縮および自由収縮、脱水量試験体3本($10 \times 10 \times 40\text{cm}$ 角柱試験体)を使用した。なお、自己収縮ひずみ測定用の試験体はラップ、銅板を用いて完全密封とした。実験は恒温恒湿室内(温度 $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 5\% \text{RH}$)でおこなった。

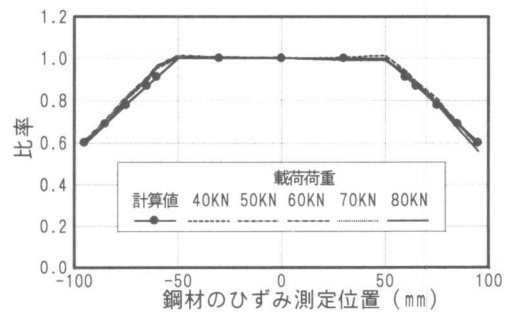


図－5 圧縮荷重載荷試験

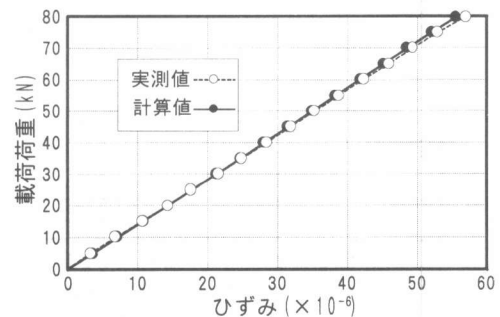
4. 実験結果および考察

4.1 実験－Ⅰ

乾燥収縮ひび割れ試験体の圧縮荷重載荷試験はコンクリートの乾燥収縮によって生じるひずみを強制的に外力として与えることに対応すると考えられるが、図－6に拘束試験体に圧縮荷重を載荷した場合の拘束鋼材のひずみの分布の一例を示す。これは各荷重ごとに鋼材のウェブ部分3点のひずみの平均値で各測定位置のひずみを無次元化したものである。これによると、圧縮荷重の大きさによらずすべて一本の線で表すことができ、ほぼ左右対称な台形分布をしていることがわかる。図中の計算値は式(1)において、 $e_x=0.25\text{cm}$ 、 $e_y=0\text{cm}$ (拘束鋼材の材料定数は、JIS G 3305 によれば、 $A=4.426\text{cm}^2$ 、 $I_y=11.1\text{cm}^4$ 、 $I_x=69.9\text{cm}^4$ 、 $E=2.058 \times 10^5 \text{MPa}$)としたものである。他の試験体のひずみ分布もほぼ同様で、すべて式(1)によって表すことができる。したがっ



図－6 拘束鋼材のひずみ分布



図－7 拘束コンクリートのひずみ

て、拘束鋼材ウェブ側の1点のひずみを測定しておけば、拘束鋼材が負担している荷重Pを求めることが可能になり、荷重Pがわかればコンクリートが負担する荷重も求めることができる。図-7はこの方法で求めたコンクリートのひずみ(コンクリートのヤング係数は無拘束試験体の「応力-ひずみ」関係より算出、 $E_c=2.7 \times 10^4 \text{MPa}$)と実測値の比較を示したものであるが、両者はほぼ一致している。このことは、鋼材のひずみからコンクリートに生じている応力を求めることができることを示している。

4.2 実験-II

(1) 拘束鋼材のひずみ分布

図-8に、乾燥収縮ひび割れ試験体における拘束鋼材のひずみ分布を示す。これは各乾燥期間ごとに拘束鋼材のウェブ部分のひずみの平均値で各測定位置のひずみを無次元化したものである。これによると無次元化されたひずみの分布には差が見られ、その差は、乾燥開始材齢が若い程大きくなっていることがわかる。また、ひずみの分布が対称となっていないが、これは試験体の表面(打設面)と裏側(型枠底面)とではコンクリートの密実さの違いや型枠剥離用にグリースを使用したことの影響などによって、乾燥収縮ひずみ量に差が生じたためであると考えられる。

図中には式(1)によるひずみ分布の計算結果が示されている。静的圧縮試験の場合と異なり、拘束鋼材のひずみ分布が対称となっていないために、偏心距離 e_x のみでなく e_y も考慮した結果であるが、これによると、乾燥開始材齢3日の場合には、差がみられるが、 $e_x=0.35\text{cm}$ 、 $e_y=0.3\text{cm}$ として、すべての乾燥期

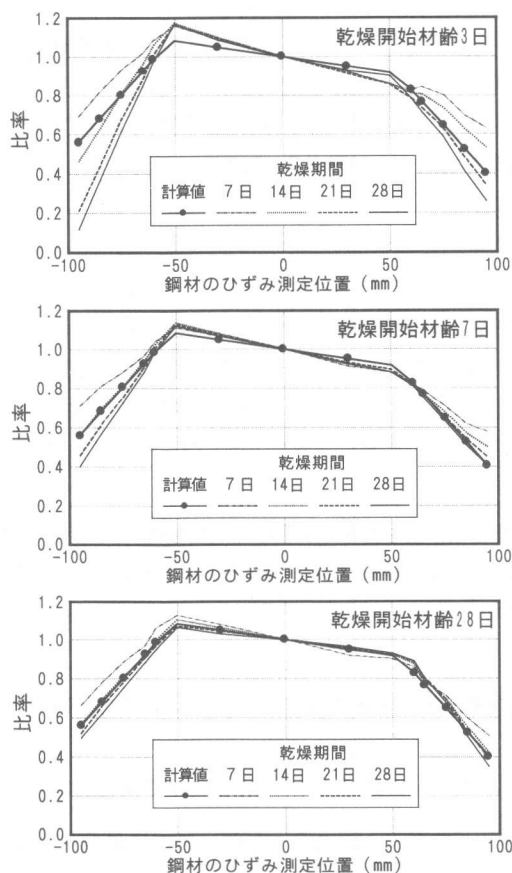


図-8 拘束鋼材のひずみ分布

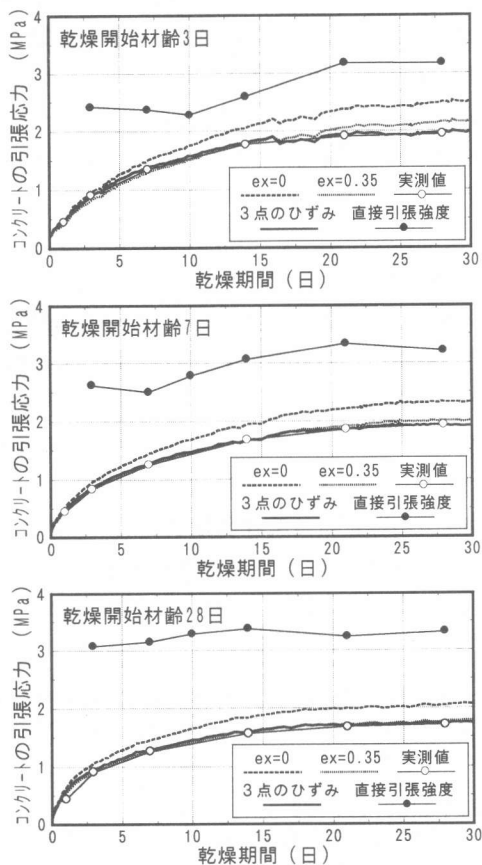


図-9 コンクリートの引張応力の経時変化

間、乾燥開始材齢の場合の実測データをほぼ近似できていることがわかる。 e_x が静的圧縮載荷試験の場合とは異なる数値となったが、これは試験体に荷重を載荷する場合とコンクリートの乾燥収縮ひずみによって拘束鋼材が圧縮される場合との違いが現れたことによるものと思われる。

(2) 拘束コンクリートの引張応力

図-9は図-8の拘束鋼材のひずみ分布の計算結果をもとに拘束鋼材の圧縮力を計算し、コンクリートが負担する引張応力を求めた結果である。図中には $e_x=e_y=0\text{cm}$ 、すなわち、拘束鋼材のウェブの中央のひずみが拘束鋼材全体に一樣に分布していると仮定した場合、それに、拘束鋼材のひずみ分布の実測データより算出した結果も示されている。これによると、 e_x を仮定した場合(e_y は引張応力の計算値には影響しない)は実測データ(ひずみの分布)を用いて計算した結果よりも大きな値となっており、 $e_x=0\text{cm}$ の場合は、実測データよりも18~25%程度大きな値を示している。しかし、 $e_x=0.35\text{cm}$ の場合とでは約2~8%程度の差であり、無次元化したひずみの分布に乾燥期間ごとに差が見られても、その分布が常に一定であるとみなして計算した結果は実測データから算出した結果とほぼ一致し、ひずみの分布に多少の変動があっても求める応力には大きく影響していないことがわかる。図中には、図-4に示したひずみ測定点の内、○印をつけた位置の3点のひずみ値を式(1)に代入して、荷重 P を計算した結果も示されているが、このようにして求めた引張応力は、実測データを用いて計算した結果とよく一致していることがわかる。このことは、乾燥収縮ひび割れ実験において、少なくとも3点のひずみ(ウェブ1点、フランジ2点)を測定すれば、 e_x 、 e_y に影響を受けずにより正確な引張応力を算出できることを意味している。

また、図中にはひび割れ発生を確認することを目的としておこなった各乾燥開始材齢からの直接引張強度の経時変化が示されている。ひび割れはこの強度を超えるときに発生すると考えるのも一つの方法であるが、図に示されているように、コンクリートが負担する引張応力が常に引張強度を下回っており、ひび割れは発生しないことになる。これは、今回の実験ですべての試験体にひび割れが認められなかったことに対応している。

5. あとがき

本研究では、JIS原案で示されている乾燥収縮ひび割れ試験方法において、拘束コンクリートに負荷される引張応力を正確に算出するために拘束鋼材に生じるひずみ分布について検討を加え拘束鋼材のひずみ分布を式(1)で十分に表すことができることを示した。式(1)において偏心距離を仮定すれば、拘束コンクリートに負荷される引張応力を計算できるようになり、実測データによって得られた引張応力との比較は十分に満足できるものであった。

コンクリート部材の乾燥収縮ひび割れの発生を予測することは非常に困難なことであるが、本研究で示した方法によって外部拘束力を算出できるようになり、この状態に内部拘束の影響を加味していけばより正確な乾燥収縮応力の解析が可能になるものと思われる。

【謝辞】

本研究は、平成7、8年度文部省科学研究費補助金(基盤研究(B)(2)、課題番号07455225、研究代表者:永松静也)によっておこなわれたものである。

【参考文献】

- [1] 永松静也、佐藤嘉昭:非線形拡散方程式によるコンクリートの脱水量の分布に関する研究、セメント技術年報35、pp. 162-165、1981.12
- [2] 永松静也、佐藤嘉昭:コンクリートの乾燥収縮ひび割れ実験ならびに応力解析、セメント技術年報37、pp.398-401、1983.12
- [3] 仕入豊和、青柳征夫、川瀬清孝:コンクリートのひび割れ試験方法(案)ー乾燥収縮ひび割れ・温度ひび割れー、コンクリート工学、Vol.23、No.3、pp. 40-54、1985.3