

第4章 乾燥収縮ひび割れ供試体における 拘束鋼材のひずみ分布

4.1 はじめに

JIS 原案の乾燥収縮ひび割れ試験方法[4.1]において、ひび割れ発生時期の予測を行おうとした場合、拘束されたコンクリートの応力解析を正確に行い、応力分布を把握することができれば、その可能性は高くなる。応力解析を行うにあたり、まず、乾燥収縮ひび割れ試験において拘束コンクリートに生じる平均応力を算出することが必要となる。この平均応力は、拘束ひび割れ供試体における拘束コンクリートと拘束鋼材の平衡条件から、拘束鋼材に生じる軸方向荷重 P より算出することができるが、これは鋼材のひずみより算出することになるので、拘束鋼材のひずみの測定を正確に行うことが重要となる。今まで行われてきた実験においても、鋼材のひずみは厳密に測定してきたが、使用している拘束鋼材が軽溝形鋼であるために型枠を組み立てる際に、ボルトの締め付けの強弱によっては拘束鋼材のひずみの大きさがかなり異なることも確認されている[4.2]。

拘束鋼材のひずみが一樣に生じていれば、軸方向荷重 P は簡単に求めることができるが、JIS 原案で示された試験方法では、拘束コンクリートは拘束鋼材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るため、鋼材には圧縮と同時に曲げを受けることになる。従って、鋼材にはたわみが生じることになり、ひずみ分布は偏心荷重を受けた状態になる[4.3]が、このたわみ量は小さく、この影響は無視できるものとして取り扱われていることが多い[4.4]。しかしながら、本論文で示す乾燥収縮ひび割れの予測手法においては、拘束コンクリートに負荷される引張力は重要な数値になる。そこで、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より正確に算出することを試みた。

4.2 乾燥収縮ひび割れ試験装置の概要

JIS 原案に準拠して作製した拘束ひび割れ供試体を図 4.2.1 に示す。拘束鋼材は、曲げ変形が小さく、また試験装置の製作を容易にするため軽溝形鋼としている。拘束鋼材へのコンクリート供試体の固定はコンクリートに接する部分にφ9 鋼棒を 3cm 間隔で 5 本溶接し、さらに拘束鋼材のコンクリートへの位置決めをするためにφ12 ボルトによって固定する。コンクリートの形状は、JIS A 1129 に規定されたコンクリートの長さ変化試験用供試体の寸法(10x10x40cm)に対応させるために、中央長さ 30cm 区間の断面を 10x10cm としている。また、固定部の断面を 10x17cm として断面を緩やかに大きくすることにより、ひび割れが中央部に生じ、かつ、応力集中が生じないようにした。

使用した拘束鋼材は JIS G 3350 の軽溝形鋼で 100x50x50x2.3mm および 100x50x50x3.2mm の 2 種類である。表 4.2.1 に拘束鋼材の性質を示す。拘束鋼材比(拘束鋼材の断面積/コンクリートの断面積)はそれぞれ 8.85% および 12.12% となる。コンクリートの性質によってひび割れの発生する材

表 4.2.1 軽溝形鋼の物理的性質(公称値)

軽溝形鋼	寸法 (mm)	重心位置 (cm)		断面 2 次モ ーメント(cm ⁴)		断面積 (cm ²)	ヤング係数 (GPa)
	HxAxBxt	Cx	Cy	Ix	Iy	As	Es
鋼材 A	100x50x50x2.3	0	1.36	69.9	11.1	4.426	205.94
鋼材 B	100x50x50x3.2	0	1.40	93.6	14.9	6.603	

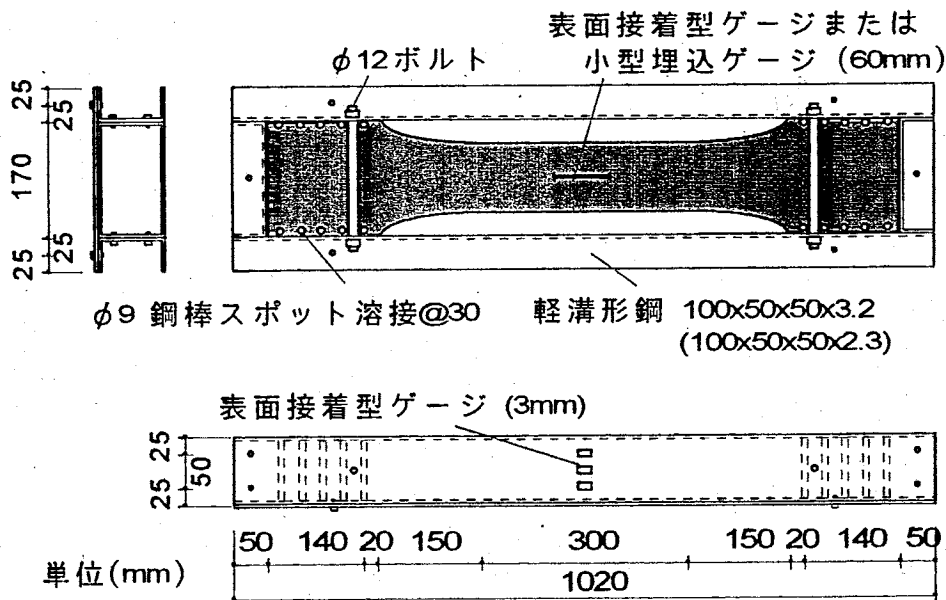


図 4.2.1 拘束ひび割れ供試体

齢が異なるため、拘束鋼材比を変化させることでひび割れ発生材齢をコントロールできるようにした。

コンクリートのひずみの測定は、中央部表裏 2 面に 60mm の表面接着型ポリエステルゲージ(株)東京測器研究所:PL-60-11)を貼付け、または長さ 60mm の小型埋込みゲージをあらかじめ埋込んで行った。この小型埋込みゲージは、新たに開発したもので、詳細については次章で説明する。また、拘束鋼材のひずみは長軸方向中央部の図 4.2.2 に示す位置に、長さ 3mm の表面接着型ポリエステルゲージ(株)東京測器研究所:FLA-3-11)を長期測定に耐え得るように焼付け貼付けをして測定した。測定点数は鋼材 A では 13 点、鋼材 B では 9 点である。なお、拘束鋼材のひずみは供試体によってはウェブ中央 1 点のみしか測定していない場合もある。

4.3 拘束鋼材のひずみ分布の計算式

拘束ひび割れ供試体の拘束部分の状況を図 4.3.1(a)に示すが、前述のように、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 4.3.1(b)に示すような一様なひずみ分布は得られず、

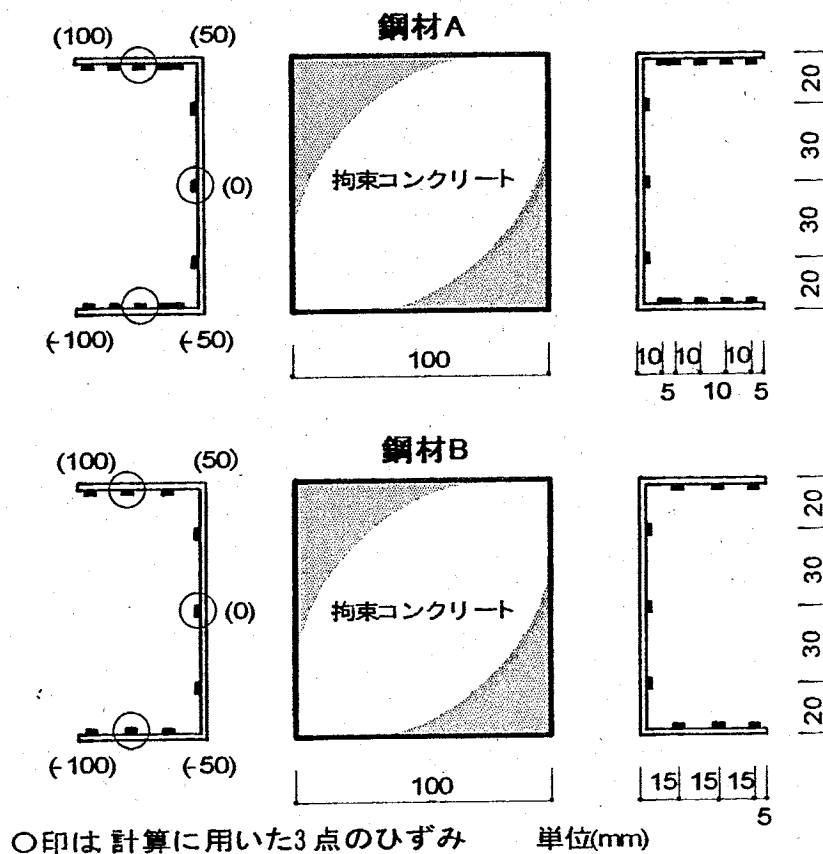


図 4.2.2 拘束鋼材のゲージ貼付け位置

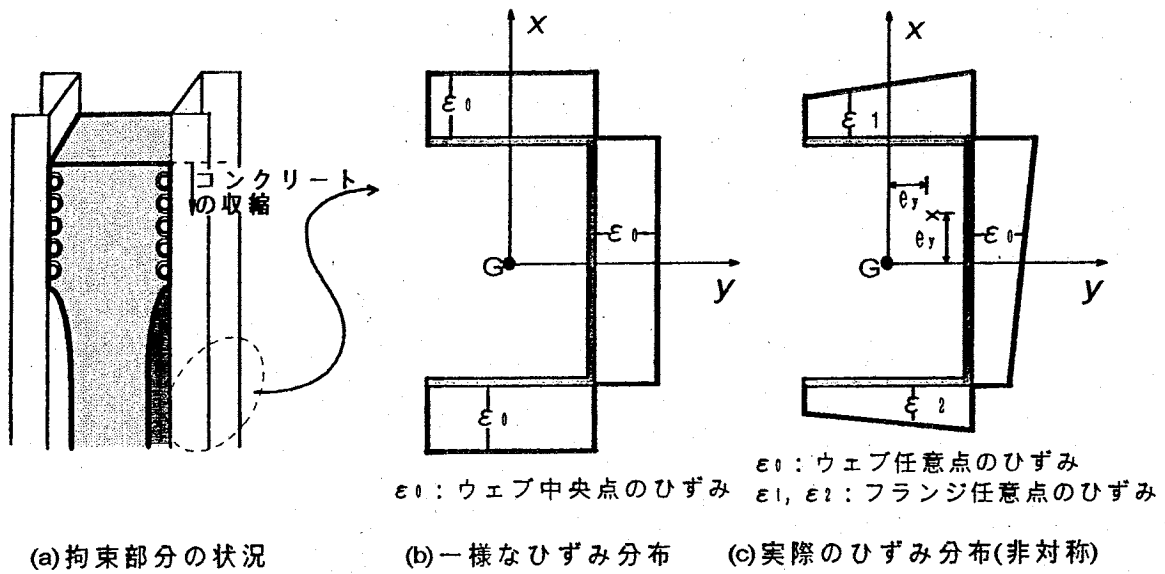


図 4.3.1 拘束鋼材のひずみ分布状態

実際には図 4.3.1(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 $M(=P \cdot e)$ によるひずみの和として表されるものと仮定する。図 4.3.1(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 $\varepsilon(x, y)$ は式(4.3.1)で計算できる。

$$\varepsilon(x, y) = \frac{1}{E} \left(\frac{P}{A} + \frac{P \cdot e_x}{I_y} x + \frac{P \cdot e_y}{I_x} y \right) \quad (4.3.1)$$

ここに、 E : 拘束鋼材のヤング係数 (N/mm^2)

P : 軸方向荷重 (N)

A : 拘束鋼材の断面積 (cm^2)

I_x : x 軸まわりの断面 2 次モーメント (cm^4)

e_x : x 方向の重心位置からの偏心距離 (cm)

I_y : y 軸まわりの断面 2 次モーメント (cm^4)

e_y : y 方向の重心位置からの偏心距離 (cm)

式(4.3.1)より軸方向荷重 P を求めると式(4.3.2)のようになる。

$$P = \frac{E \varepsilon}{\frac{1}{A} + \frac{e_x}{I_y} x + \frac{e_y}{I_x} y} \quad (4.3.2)$$

拘束ひび割れ供試体において拘束鋼材はロードセルの役割を果たす。従って、拘束鋼材に生じるひずみの分布を正確に測定し軸方向荷重を求めれば、拘束コンクリートの引張応力は正確に算出できるが、実験において全ての供試体でひずみ分布を把握するだけのひずみを測定することは測定数が多くなり、供試体数が多くなると物理的に測定は不可能となる。そこで、偏心距離が軸方向荷重の大きさによって変化せず、定数として与えることができれば、式(4.3.2)より1点のひずみの測定値で軸方向荷重 P を求めることができる。しかしながら、すべての供試体において偏心距離が変化せず一定になるとは限らず、変動することも考えられるが1点のひずみしか測定していなければ確認することもできない。このような場合に対応するには拘束鋼材のひずみを3点(ウェブ1点, フランジ2点)測定し、式(4.3.1)に代入すれば P, e_x, e_y は次式より求めることができ、偏心距離を定数として与えることなく、式(4.3.3)より軸方向荷重 P を求めることができる。

$$P = \frac{EA\{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)x_a + 2\varepsilon_0x_b\}}{2(x_a + x_b)} \quad (4.3.3)$$

$$e_x = \frac{I_y}{x_a} \left(\frac{E}{P} \varepsilon_0 - \frac{1}{A} \right) \quad (4.3.4)$$

$$e_y = \frac{EI_x}{2Py_0} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \quad (4.3.5)$$

ここに、 E : 拘束鋼材のヤング係数 (N/mm^2)

P : 軸方向荷重 (N)

A : 拘束鋼材の断面積 (cm^2)

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)

4.4 鋼材の静的曲げ試験

4.4.1 試験方法

拘束ひび割れ供試体では拘束鋼材に曲げモーメントが生じることになるが、鋼材に貼付けたひずみゲージでひずみ分布が正確に測定されることを確認するため、スパン 90cm の場合の 3 等分点荷重載荷試験を行い拘束鋼材のひずみ分布を測定した。

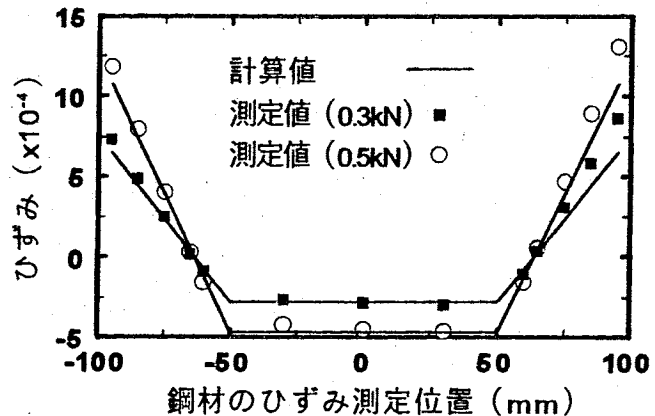


図 4.4.1 鋼材の静的曲げ試験結果

4.4.2 試験結果

図 4.4.1 に静的曲げ試験の結果の一例を示す。x 軸は図 4.2.2 に示した拘束鋼材の測定位置である。0 点が鋼材ウェブの中央点で他の測定点はそこからの距離を示す。これはスパン 90cm, 載荷荷重 0.3kN および 0.5kN の場合のひずみ分布である。測定値と計算値とが若干のずれが生じ、表 4.2.1 に示す使用した公称値と実際の値と若干の差が生じている可能性もあるが、ひずみゲージによりほぼひずみが測定されていると考え、ひび割れ試験を行うことにした。

4.5 静的圧縮載荷試験による拘束鋼材のひずみ分布

4.5.1 実験計画

乾燥収縮ひび割れ試験に先立ち、拘束鋼材のひずみ分布を把握し、拘束鋼材のひずみ分布から拘束コンクリートに生じる応力を算出する方法の妥当性を確認するために、拘束ひび割れ供試体のコンクリート部分に強制的に圧縮荷重を負荷させ、拘束鋼材および拘束コンクリートのひずみを測定することにした。また、コンクリートのヤング係数を求めるために拘束鋼材を取り外し、コンクリート部分のみの圧縮荷重負荷試験も行った。使用した拘束鋼材は鋼材 A で、拘束ひび割れ供試体 2 体について実験を行った。

4.5.2 供試体の作製, 調合および養生

実験で使用したコンクリートは呼び強度 21, スランプ 18 のレディーミクストコンクリートである。コンクリートの打設では、棒状の振動パイププレートを使用し、迅速かつ十分な打ち込みができるように注意を払って行った。また、養生期間中のコンクリートの自己収縮ひずみ量が拘束されることを防ぐために、脱型時に拘束鋼材を取り外すことができるように、丸鋼溶接部分をあらかじめ油粘土で覆ってから打ち込んだ。打設後 4 時間程度でブリーディングが収まってから表面を平滑にし、乾燥を防ぐため

湿布で覆い、実験室内に放置した。材齢 1 日で脱型し、同時に拘束鋼材を取り外し、コンクリートに付着した油粘土を取り除いた。供試体は、コンクリート部分だけを実験室内で約 1 年間気中養生した。

4.5.3 実験方法

コンクリート供試体は試験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 $\phi 12$ ボルトを締め付け、これによって拘束を持たせるようにした。圧縮試験は図 4.5.1 に示すような方法でアムスラー型圧縮試験装置(最大荷重 1000kN)によって行った。使用した拘束鋼材は鋼材 A (100x50x50x2.3mm)であり、片側 13 点ずつひずみを測定した。拘束コンクリートは長さ 60mm の表面接着型ポリエステルゲージを表裏 3 点ずつ CN 接着剤(株東京測器研究所)で貼付け、ひずみを測定した。また、コンクリートのヤング係数を求めるために、載荷試験終了後に拘束ひび割れ供試体の拘束鋼材を取り外し、コンクリート部分のみの圧縮荷重負荷試験を行い、コンクリートのひずみを測定した。

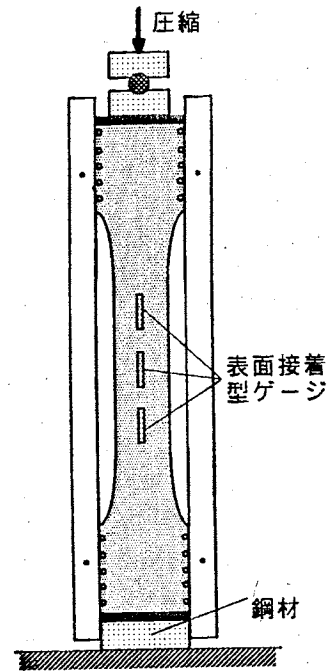


図 4.5.1 静的圧縮載荷試験状況

4.5.4 実験結果および考察

(1) 無拘束コンクリート供試体の圧縮荷重負荷試験

図 4.5.2 に無拘束コンクリート供試体に圧縮荷重を負荷した場合のひずみと応力の関係を示す。圧縮試験は偏心が生じ測定したひずみに差が生じることのないように行った。コンクリートのひずみ

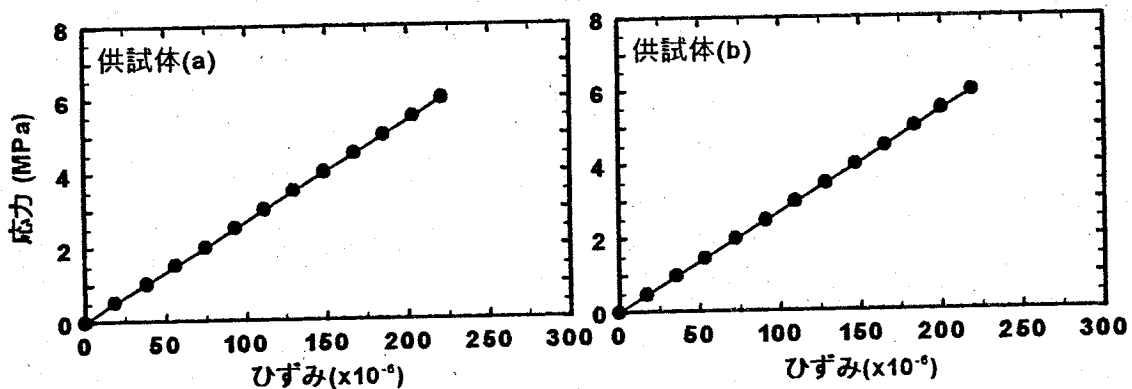


図 4.5.2 無拘束コンクリート供試体の「応力-ひずみ」関係

は2体の供試体とも測定した6点のひずみの平均値を示している。供試体(a), (b)ともに応力とひずみの関係はほぼ直線関係であり、図の勾配より求めたヤング係数は供試体(a), (b)ともに27.0GPaである。

(2) 拘束コンクリート供試体の圧縮荷重負荷試験

図4.5.3に各荷重における拘束鋼材のひずみ分布を示す。x軸は図4.2.2に示す拘束鋼材のひずみ測定位置である。-50~50の位置がウェブ部分で-100~-50および50~100がフランジ部分である。鋼材のひずみ分布はウェブ部分のひずみが大きく、フランジ部分は偏心により外側にいくほど小さくなる。また、荷重が大きくなるにつれひずみも増加している。各荷重における偏心距離を比較するためにウェブ中央のひずみで各測定位置のひずみを無次元化したものが図4.5.4である。これによると、(a), (b)各供試体とも圧縮荷重の大きさによらず、すべて式(4.3.1)より算出した一本の線で表すことができる。(a)の場合、ほぼ左右対称な台形分布で、そのときのx軸方向の偏心距離は0.25cmである。

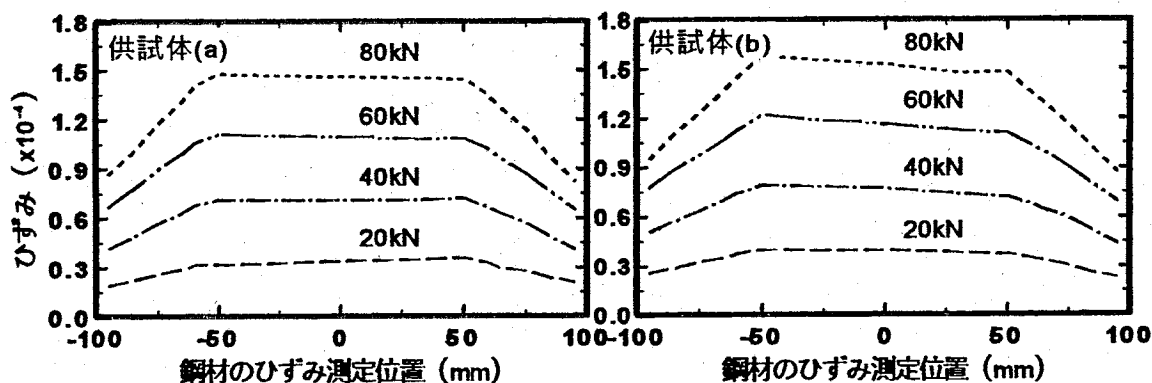


図 4.5.3 拘束鋼材のひずみ分布

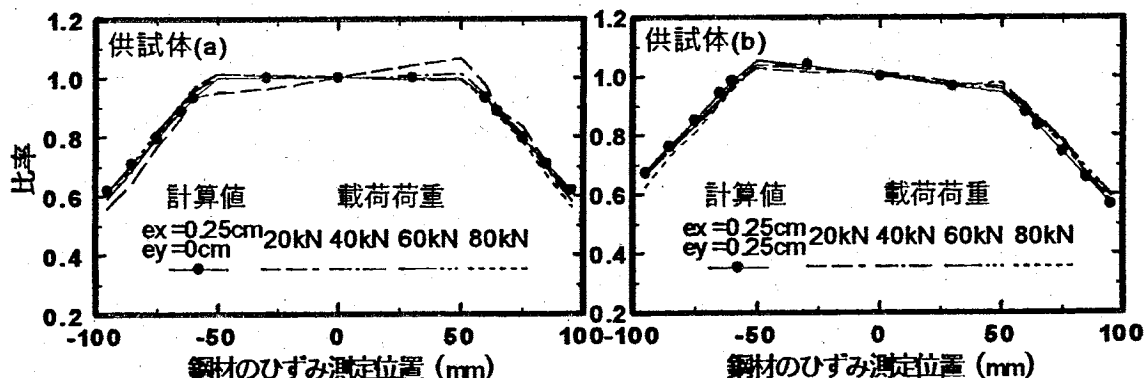


図 4.5.4 拘束鋼材のひずみ分布(無次元化)

る。(b)の場合、 x 軸方向の偏心距離は同じく 0.25cm であるが y 軸方向にも偏心が生じ、その偏心距離は 0.25cm である。ここでの y 軸方向の偏心は荷重を載荷する際に、供試体が垂直でなかったために生じたものである。しかしながら鋼材の負担する力を拘束鋼材ウェブ中央の 1 点のひずみを用いて式(4.3.2)より求める場合、 y 軸方向の偏心距離には影響を受けず、 x 軸方向の偏心距離によって決定できる。したがって、(a)、(b)各供試体とも拘束鋼材ウェブ中央の 1 点のひずみを測定しておけば、同じ計算式より拘束鋼材が負担している軸方向荷重 P を求めることが可

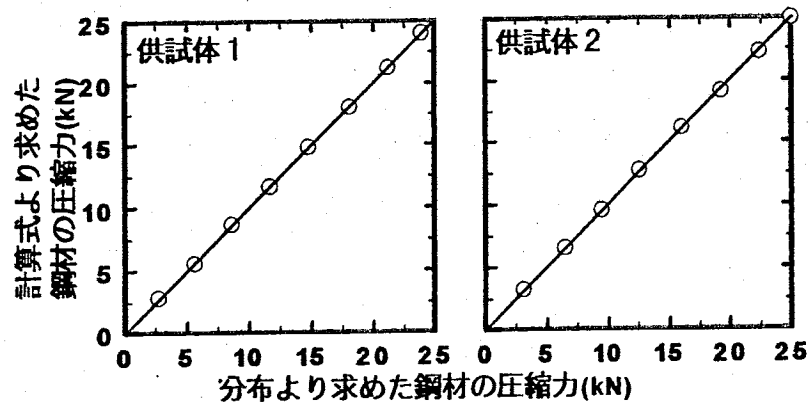


図 4.5.5 拘束鋼材の軸方向荷重の比較

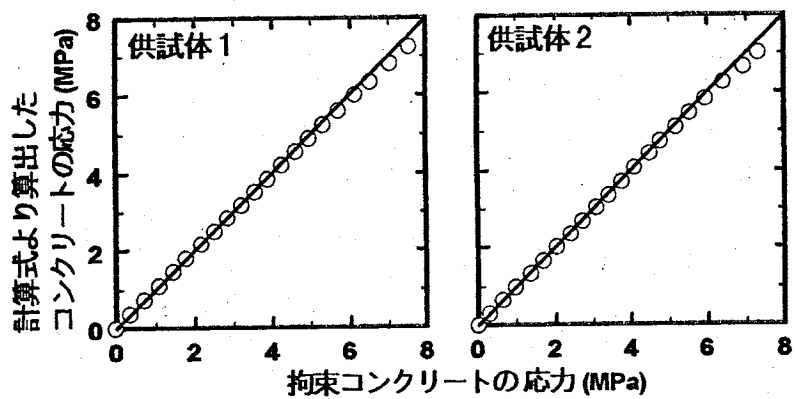


図 4.5.6 拘束コンクリートの応力の比較

能になり、軸方向荷重 P が分かればコンクリートに生じる応力も求めることができる。図 4.5.5 に図 4.5.3 のひずみ分布より算出した軸方向荷重 P と式(4.3.2)を用いて算出した軸方向荷重との比較を示す。横軸は測定したひずみ分布を積分することから求めている。縦軸は式(4.3.2)の計算式においてウェブ中央のひずみを用いて、偏心距離を $e_x=0.25\text{cm}$ として求めたものである。両者には明確な比例関係が認められ、偏心距離を決定することができればウェブ中央 1 点のひずみより軸方向荷重を求めることができることを示している。図 4.5.6 は拘束ひび割れ供試体で測定した拘束コンクリートのひずみより算出した応力と、ウェブ中央 1 点のひずみより算出した軸方向荷重を載荷荷重より差し引くことから求めたコンクリートの応力との比較を示したものである。横軸の拘束コンクリートの応力を算出するためのヤング係数は無拘束供試体の「応力-ひずみ」関係より算出した 27.0GPa を用いている。この場合も両者の間には明確な比例関係があり、このことは拘束鋼材がロードセルの機能を果たし、拘束鋼材の 1 点のひずみからコンクリートに生じる応力を求めることが可能であることを示している。

4.6 乾燥収縮ひび割れ試験による鋼材のひずみ分布

4.6.1 実験計画

静的な強制荷重を受けたコンクリートの場合は、拘束鋼材のひずみ分布において偏心距離を定数として与えることができ、それによって拘束鋼材の1点のひずみから拘束コンクリートに生じる応力を求めることができた。そこで乾燥収縮ひび割れ試験においても同様に拘束鋼材のひずみ分布が乾燥期間によらず偏心距離が一定になり、1点のひずみから拘束コンクリートに生じる力を求めることができるかを確認することにした。調合および拘束鋼材の断面積の違う供試体を用い、シリーズI, II, IIIとして乾燥開始材齢を変化させ実験を行った。実験概要を表4.6.1に示す。

表 4.6.1 実験概要

	シリーズI	シリーズII	シリーズIII
使用コンクリート	レディーミクストコンクリート(18-18-20N)	レディーミクストコンクリート(21-18-20N)	レディーミクストコンクリート(21-18-20N)
拘束鋼材	鋼材A	鋼材B	鋼材AおよびB
コンクリートひずみ測定用ゲージ	表面接着型ゲージ (FLM-60-11)	小型埋込みゲージ	表面接着型ゲージ (FLM-60-11)
乾燥開始材齢	3, 7, 28, 112 日	1, 3, 7, 28 日	440 日
供試体本数	各乾燥開始材齢 1 体	各乾燥開始材齢 1 体	鋼材A, B 2 体ずつ

4.6.2 供試体の作製、調合および養生

シリーズIは呼び強度 18, スランプ 18 のレディーミクストコンクリート(18-18-20N)で、シリーズIIは呼び強度 21, スランプ 18 のレディーミクストコンクリート(21-18-20N), シリーズIIIは呼び強度 21, スランプ 18 のレディーミクストコンクリート(21-18-20N)を用いた。コンクリートの調合を表4.6.2, 使用材料の物理的性質を表4.6.3に示す。拘束ひび割れ供試体の作製方法およびコンクリートの打設は4.5.2に示したものと同様である。すべての供試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)内に密封し、養生室内(温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$)でシール養生とした。

表 4.6.2 コンクリートの調合表

実験	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	AE 減水剤
シリーズI	64.2	47.3	182	284	837	972	1.065
シリーズII	59.1	47.4	178	301	849	949	0.753
シリーズIII	58.3	4.6.1	182	313	805	980	1.174

表 4.6.3 使用材料の物理的性質

	シリーズI, III	シリーズII
セメント	普通ポルトランドセメント (日本セメント製) 比重 3.16	普通ポルトランドセメント (徳山セメント製) 比重 3.16
細骨材	山砂(米良) 最大寸法 5mm 表乾比重 2.63 吸水率 2.12% 粗粒率 2.69	混合砂(大島, 大野) 最大寸法 5mm 絶乾比重 2.53 表乾比重 2.56 吸水率 1.10% 粗粒率 2.83
粗骨材	碎石(米良, 上戸次) 最大寸法 20mm 表乾比重 2.66 吸水率 0.52, 0.45% 実積率 58, 59.3%	碎石(津久見, 米良) 最大寸法 20mm 表乾比重 2.69 吸水率 1.02% 実積率 59.7% 粗粒率 6.58
混和剤	AE 減水剤標準型 I 種 ポゾリス No.70	AE 減水剤標準型 チューポール EX

4. 6. 3 実験方法

実験に使用した拘束ひび割れ供試体は図 4.2.1 に示したものである。拘束鋼材のひずみは図 4.2.2 に示すように、拘束鋼材の長さ方向の中央に拘束鋼材 A はウェブ部分 3 箇所、フランジ部分 10 箇所(計 13 点, 1 体の供試体で 26 点)、拘束鋼材 B はウェブ部分 3 箇所、フランジ部分 6 箇所(計 9 点, 1 体の供試体で 18 点)に貼付けたひずみゲージによって測定し、ひずみ分布を求めるようにした。ひび割れ供試体はシリーズ I, II では各乾燥開始材齢ごとに 2 体ずつ用意し、その内 1 体は鋼材の分布を測定するようにし、もう 1 体はウェブ中央 1 箇所のみひずみを測定した。シリーズ III では、拘束鋼材 A, B ともに 2 体ずつ用意し、すべての供試体でひずみ分布の測定を行った。拘束ひび割れ供試体は、乾燥開始前日にビニール袋から取り出し拘束鋼材を取り付けた。その際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、石膏:セメント:水=1:1:1)を流し込み、φ12 ボルトを締め付け固定し、これによって拘束を持たせるようにした。この作業は、石膏セメントペーストが短時間で硬化する特性を生かし、供試体を乾燥させないよう作業開始から終了までを短時間で行うようにし、乾燥開始まで湿布養生とした。なお、乾燥は恒温恒湿室内(温度 $20 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 5\% \text{R.H.}$)で行った。

4. 6. 4 実験結果および考察

(1) シリーズ I

図 4.6.1 は乾燥開始材齢における拘束鋼材のひずみ分布を示したものである。グラフの x 軸は拘束鋼材のひずみ測定位置を示しており、ウェブ中央の測定点を 0 としてそこからの距離で表している。ひずみの分布は強制的に荷重を負荷した場合と同様に台形分布となっており、拘束鋼材の x 軸方向に偏心が生じ、いずれのグラフも乾燥をするにつれひずみが増加している。また、 y 軸方向も偏心が生じているが、これはコンクリート供試体の打設面と裏面とでの収縮量の違いによるものであると考えられ、供試体によってばらつきがある。拘束コンクリートに生じる応力を求める場合、拘束鋼材のひずみが重要となるが、そのひずみ分布は一樣ではなく偏心状態であることは前述した通りであり、実験結果としても偏心が生じていることが分かった。

各荷重における偏心距離を比較するために図 4.6.1 においてウェブ中央のひずみで各測定位置のひずみを無次元化したものが図 4.6.2 である。これによりひずみの大きさに関係せず拘束鋼材のひずみの分布状況を確認することができる。すべての供試体においてひずみの分布は、乾燥期間によるひずみ量の違いに関係せず、ほぼ同じ分布である。このことは偏心距離がひずみ量の違いによって変化しないことを示しており、式(4.3.1)において e_x を定数として与えることができることを示している。また、 y 軸方向の偏心距離は供試体によってばらつきがあるが、 x 軸方向の偏心距離についてはすべての供試体でほぼ同じ程度となった。偏心距離 e_x を 0.25cm, e_y は乾燥開始材齢 3, 7, 28, 112 日でそれぞれ 0.25, 0.30, 0.10, 0.30cm とした場合に式(4.3.1)より算出したひずみ分布と良く一致した。従って、式(4.3.1)より偏心距離を仮定することにより、ひずみ分布を表すことができる。前述したように中央のひずみを用いて鋼材の軸方向荷重を求める場合、 y 軸方向の偏心距離には影響を受けず、 x 軸方向の偏心距離によって決定するので、供試体の違いによらず、同じ計算式で軸方向荷重を求めることができる。

(2) シリーズ II

図 4.6.3 は乾燥開始材齢 1, 7, 28 日における拘束鋼材のひずみ分布、図 4.6.4 はひずみを無次元化したものを示している。乾燥開始材齢 3 日の供試体は初めからひび割れが生じていたために鋼材のひずみが小さく、ここでは省略した。シリーズ II ではすべての供試体に乾燥開始後 2 週間以内にひび割れが発生したため、ひずみの分布は乾燥期間が短期間のものしか示していない。また、乾燥開始材齢 1 日の場合は偏心距離が小さく、台形分布が得られない結果となった。しかしながら、乾燥開始材齢 7, 28 日の場合はシリーズ I と同様な台形分布が得られ、偏心距離はそれぞれ e_x が 0.15, 0.20cm, e_y は 0.00, 0.15cm としたときに計算値と良く近似できた。

(3) シリーズⅢ

図 4.6.5 に鋼材 A および鋼材 B の拘束鋼材のひずみ分布、図 4.6.6 は各測定位置のひずみを中央のひずみで無次元化したものを示している。乾燥期間 150 日程度ひずみの測定を行ったが、すべての供試体にひび割れは発生しなかった。ひずみの分布をみるとすべての供試体とも台形分布が得られ、拘束鋼材比の小さい鋼材 A (拘束鋼材比 8.85%) の方が、拘束鋼材比の大きい鋼材 B (拘束鋼材比 12.12%) よりものひずみが多いのが分かる。無次元化したひずみはすべての場合でほぼ一定となり、偏心距離は e_x が鋼材の厚さの違いによらずすべて 0.20cm とした場合に良く近似できた。 e_y は供試体によってかなりのばらつきがあり鋼材 A では 0.00, 0.40cm, 鋼材 B では 0.50, 0.20cm となった。

(4) 拘束鋼材の偏心距離

シリーズⅠ,Ⅱ,Ⅲで乾燥収縮ひび割れ試験における拘束鋼材のひずみ分布を測定した結果、多少のばらつきはあるものの乾燥期間によるひずみ量の違いに影響を受けず、無次元化したひずみは、ほぼ同じ分布である。このことは偏心距離がひずみ量の違いによって変化しないことを示しており、式(4.3.1)において e_x を定数として与えることができることになる。 e_y は供試体によってばらつきが大きくなっており、これは打設面と裏面との収縮の差によるものと考えられる。しかしながら、中央のひずみを用いて算出する場合、 e_y の違いは軸方向荷重 P には影響を受けず、 e_x のみによって決まる。実験より得られた e_x, e_y の一覧を表 4.6.4 に示す。 e_x は 0.10~0.25 となっており、シリーズⅠとⅡとの比較では鋼材の種類による e_x の違いがみられるが、シリーズⅢではその違いはみられない。ここでは平均的な値として鋼材 A, B ともに e_x を 0.20cm とした場合にひずみ分布を近似できるものとし軸方向荷重 P を算出するものとする。

表 4.6.4 乾燥収縮ひび割れ試験における偏心距離

拘束鋼材の種類	シリーズⅠ				シリーズⅡ			シリーズⅢ			
	鋼材 A				鋼材 B			鋼材 A		鋼材 B	
乾燥開始材齢(日)	3	7	28	112	1	7	28	440	440	440	440
偏心距離 e_x (cm)	0.25	0.25	0.25	0.25	0.10	0.15	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
偏心距離 e_y (cm)	0.25	0.25	0.00	0.25	0.25	0.00	0.15	0.00	0.40	0.50	0.20

乾燥期間
 1日 3日 7日 14日 21日 28日

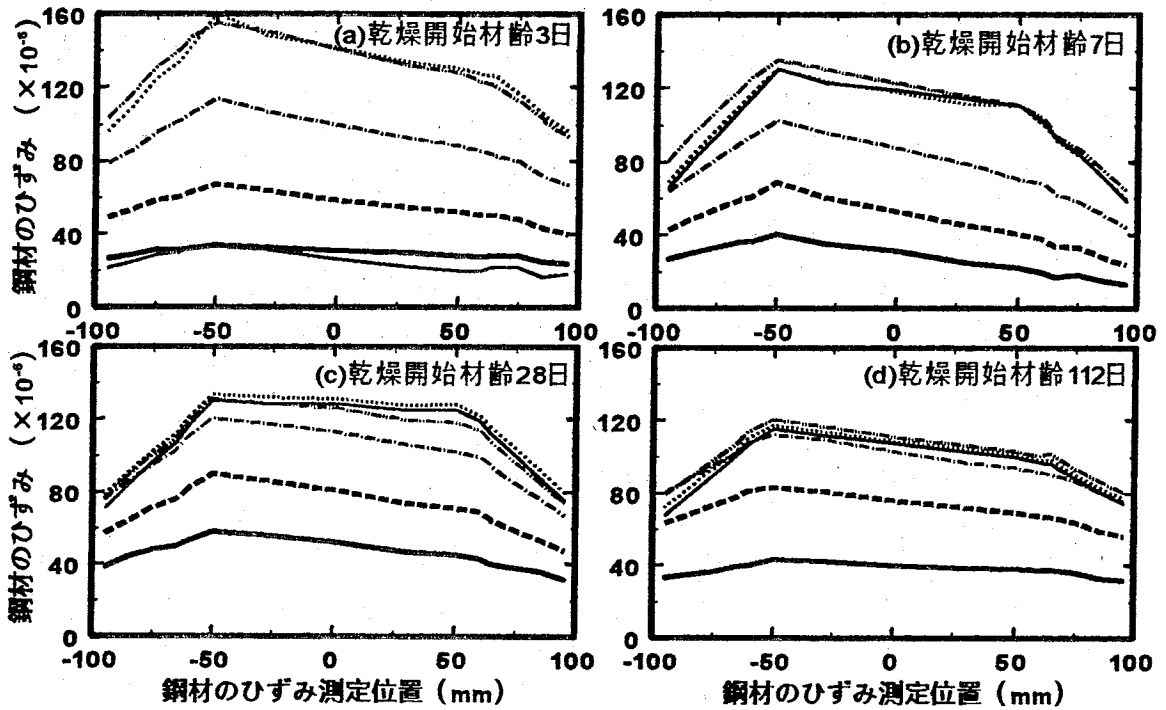


図 4.6.1 拘束鋼材のひずみ分布(シリーズ I)

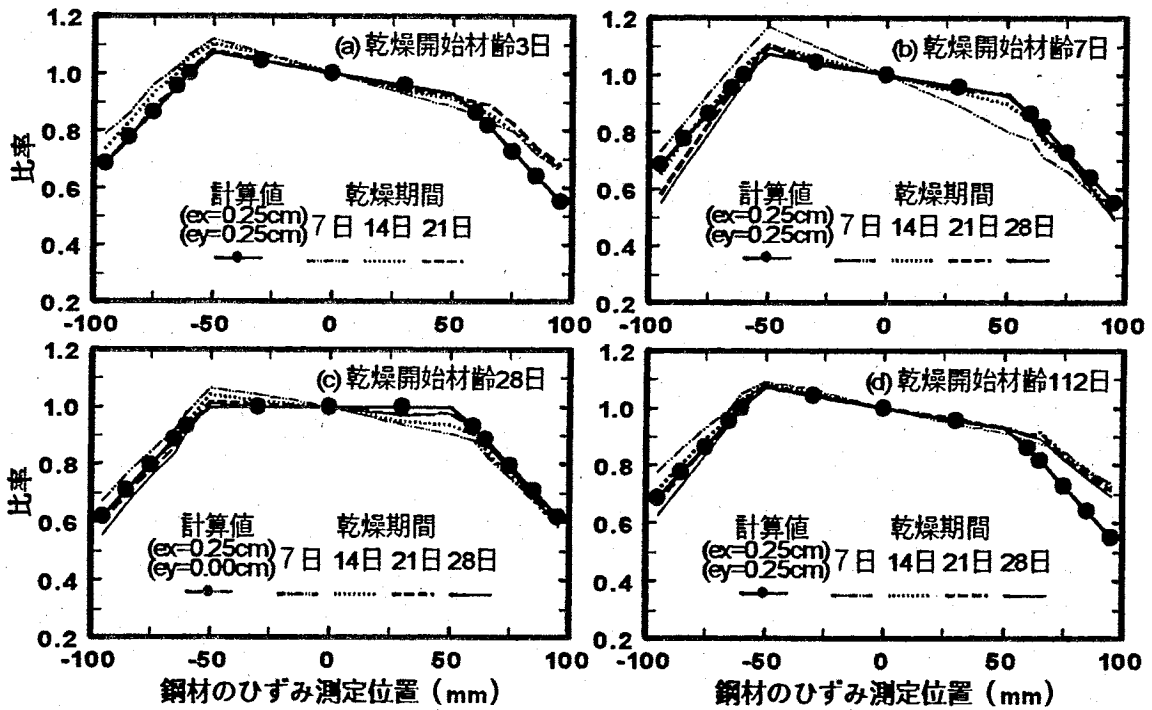


図 4.6.2 拘束鋼材の無次元化したひずみ分布(シリーズ I)

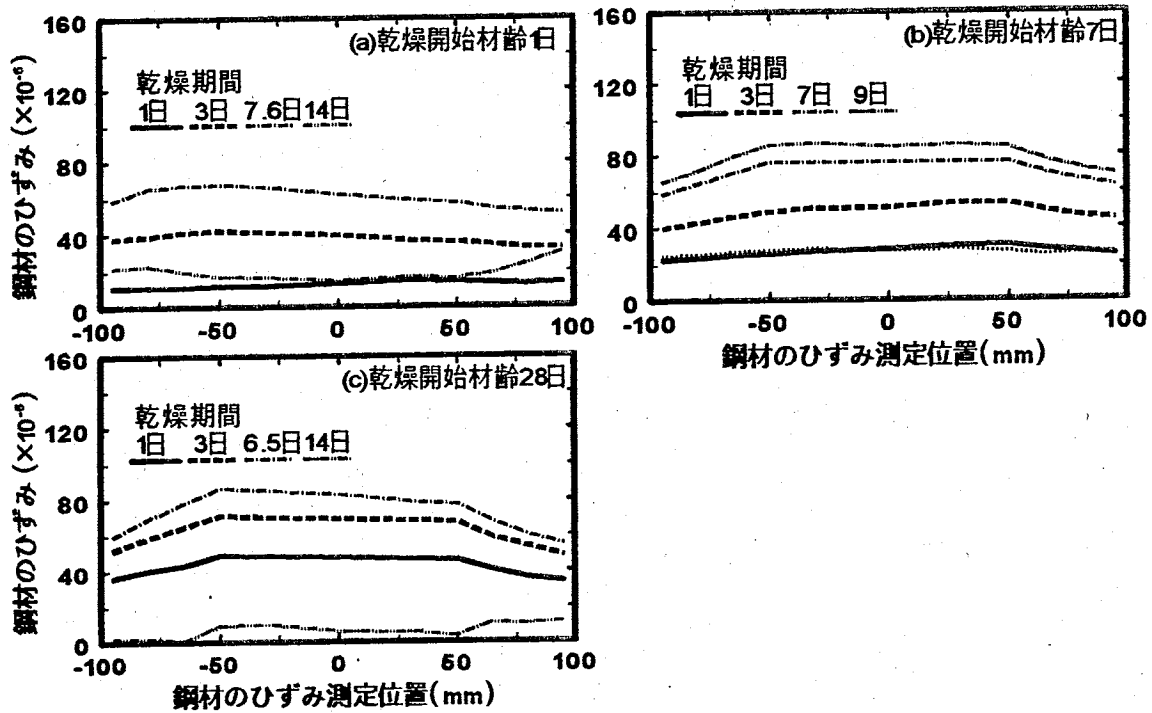


図 4.6.3 拘束鋼材のひずみ分布(シリーズII)

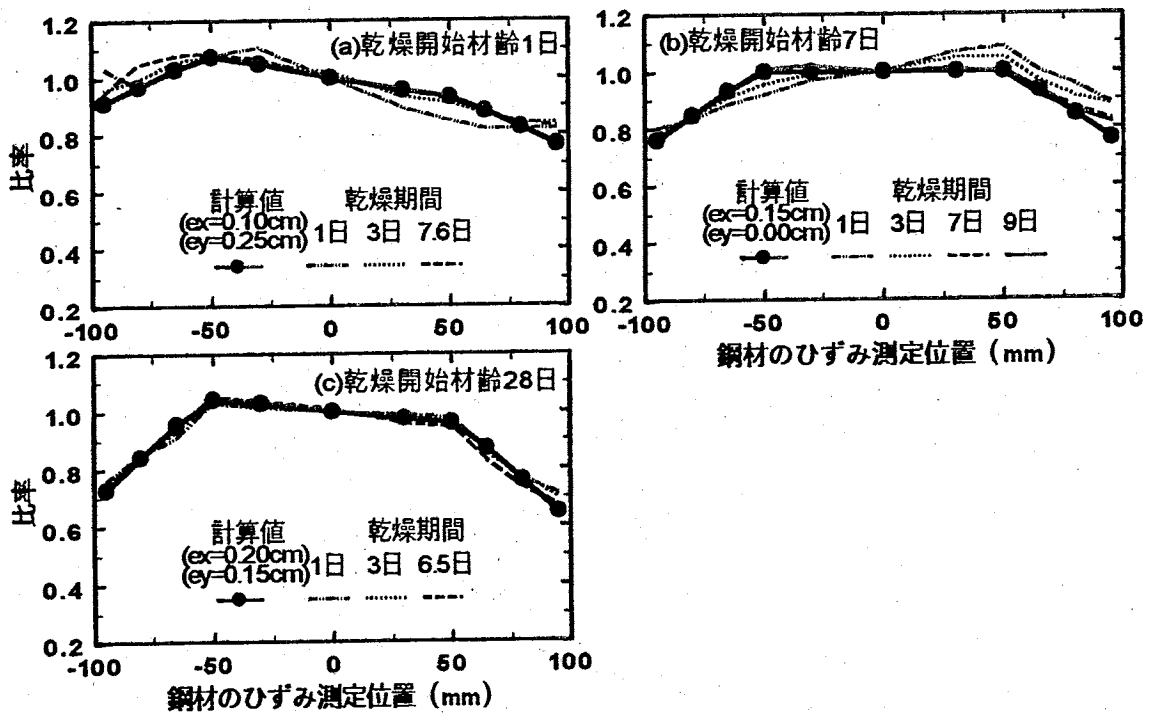


図 4.6.4 拘束鋼材の無次元化したひずみ分布(シリーズII)

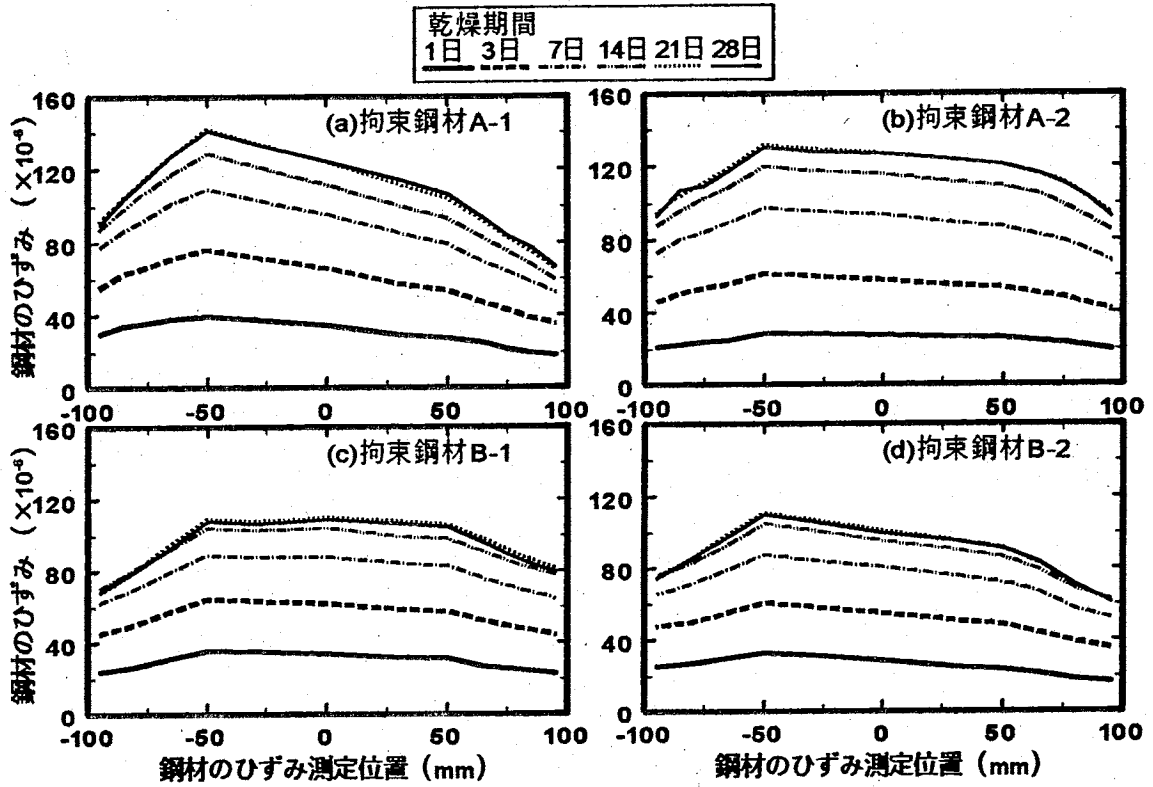


図 4.6.5 拘束鋼材のひずみ分布(シリーズⅢ)

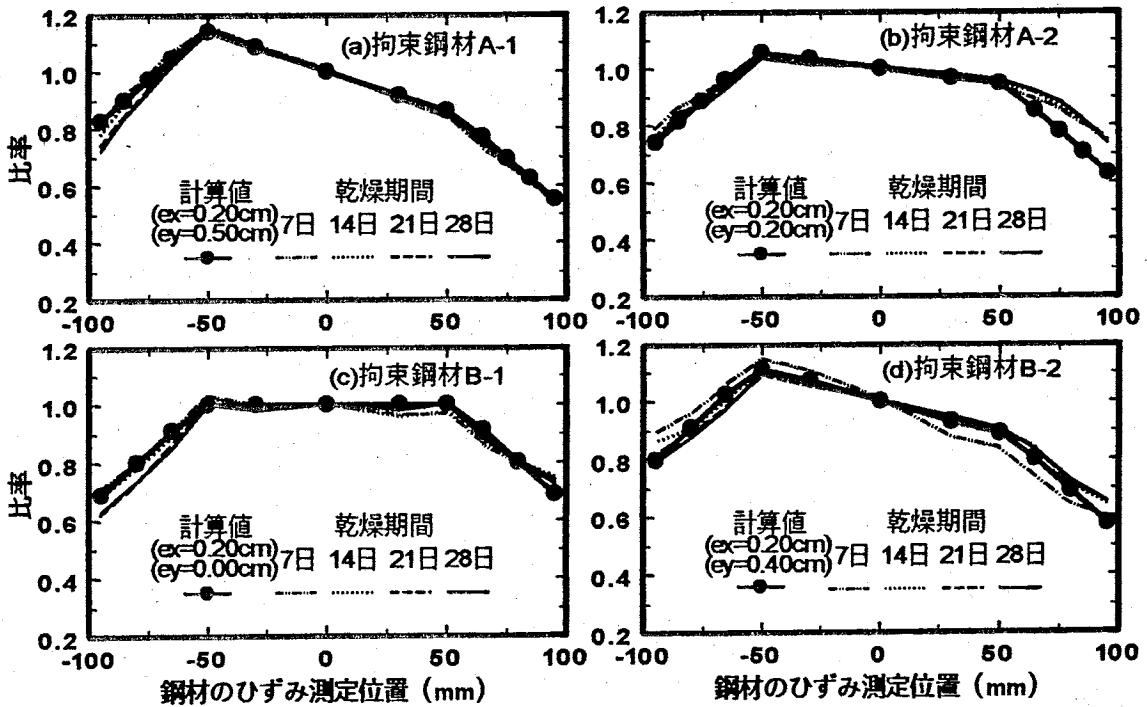


図 4.6.6 拘束鋼材の無次元化したひずみ分布(シリーズⅢ)

4. 6. 5 コンクリート部材に生じる引張応力

図 4.6.7 にシリーズ I, 図 4.6.8 にシリーズ II, 図 4.6.9 にシリーズ III のコンクリートに生じる引張応力を算出した結果を示す。各乾燥開始材齢とも拘束鋼材のひずみ分布を測定した供試体について, 拘束鋼材に生じる軸方向荷重を算出した。式(4.3.1)において $e_x=0.20\text{cm}$ として鋼材ウェブ中央のひずみより鋼材の軸方向荷重を計算し, 拘束コンクリートに生じる引張応力を求めたものである。図中には $e_x=0.00\text{cm}$, すなわち, 拘束鋼材のウェブ中央のひずみが拘束鋼材全体に一様に分布していると仮定した場合, 3 点のひずみを用いて式(4.3.2)より計算した場合, それに拘束鋼材

の実測データのひずみ分布を積分することにより算出した結果も示している。これによると, $e_x=0.00\text{cm}$ と仮定した場合 (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いる。また, $e_x=0.20\text{cm}$ と仮定した場合および 3 点のひずみより求めた値は実測データを用いて計算した結果と近い値になっている。式(4.3.1)によれば, $e_x=0.00\text{cm}$ とした場合の鋼材の軸方向荷重は, $e_x=0.20\text{cm}$ とした場合よりも約 7.5% 大きくなる。表 4.6.5 に実測データを用いて計算した結果に対する比率を示す。シリーズ I, III では乾燥期間 21 日, シリーズ II ではひび割れ発生時において比較している。これによると $e_x=0.00\text{cm}$ とした場合の応力は実測データを用いて計算した結果に対して 1.019~1.142 で, $e_x=0.20\text{cm}$ とした場合は 0.937~1.062 である。偏心距離に供試体による違いがあるが, $e_x=0.20\text{cm}$ と仮定して算出した結果は, 実測データを用いて計算した結果と良く一致している。また, 3 点のひずみより算出した値は 0.992~1.010 となり, 実測データを用いて計算した結果と非常に良く一致している。このことは, 乾燥収縮ひび割れ試験において, 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。

表 4.6.5 コンクリートに生じる応力の比較

シリーズ I				
乾燥開始材齢	3 日	7 日	28 日	112 日
$e_x=0.0\text{cm}$	1.090	1.142	1.131	1.086
$e_x=0.2\text{cm}$	1.015	1.062	1.052	1.010
3 点のひずみ	1.010	1.009	1.007	1.001
シリーズ II				
乾燥開始材齢	1 日	3 日	7 日	28 日
$e_x=0.0\text{cm}$	1.019	—	1.056	1.104
$e_x=0.2\text{cm}$	0.937	—	0.970	1.014
3 点のひずみ	0.999	—	0.992	1.007
シリーズ III				
	A-1	A-2	B-1	B-2
$e_x=0.0\text{cm}$	1.109	1.095	1.117	1.077
$e_x=0.2\text{cm}$	1.020	1.007	1.024	0.988
3 点のひずみ	1.006	0.996	1.006	1.008

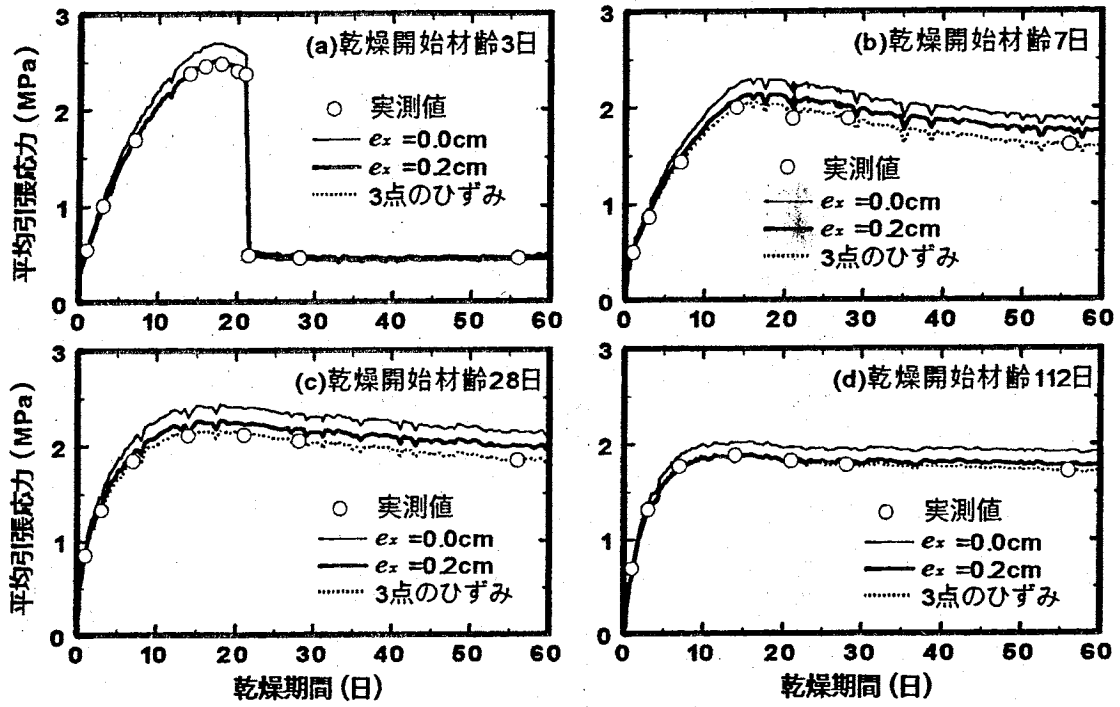


図 4.6.7 拘束コンクリートに生じる引張応力の経時変化(シリーズ I)

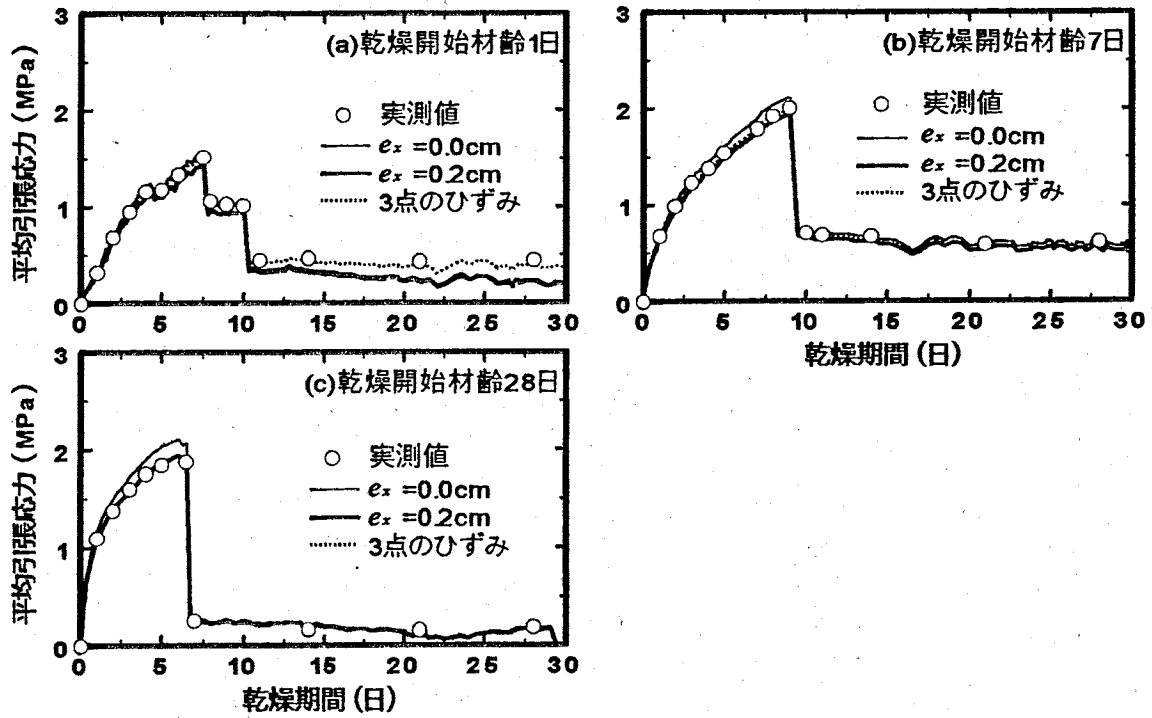


図 4.6.8 拘束コンクリートに生じる引張応力の経時変化(シリーズ II)

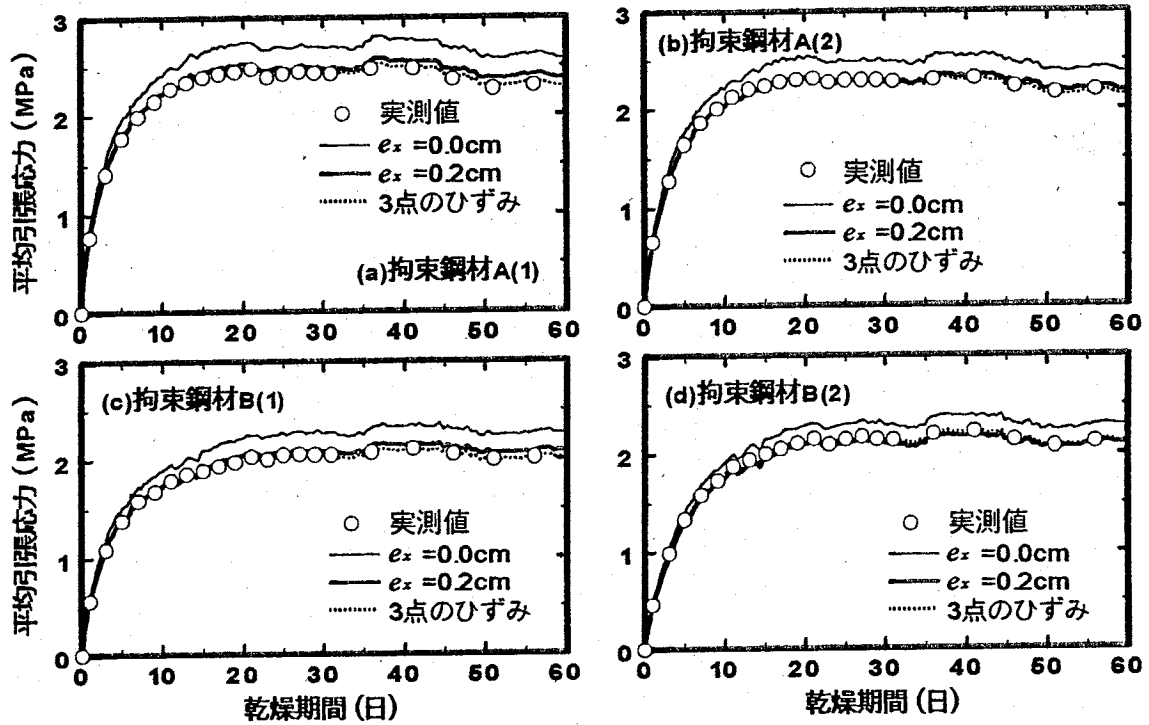


図 4.6.9 拘束コンクリートに生じる引張応力の経時変化(シリーズⅢ)

4.7 第4章のまとめ

第4章では、拘束ひび割れ供試体の拘束コンクリートに生じる引張応力を算出するために、拘束鋼材のひずみ分布を測定し、その分布性状に対して検討を行った。得られた結果を以下に示す。

1. 拘束ひび割れ供試体において、拘束鋼材に生じるひずみは一様でなく、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式(4.3.1)により表すことができる。
2. 拘束コンクリートの乾燥が進行すると収縮が大きくなり、拘束鋼材のひずみも大きくなるが、無次元化したひずみ分布はほぼ同じであり、偏心距離は変化しない。
3. 拘束ひび割れ供試体において、拘束鋼材はロードセルの役割を果たし、式(4.3.2)を用いれば、 x 軸方向の偏心距離を 0.2cm と仮定することによって、拘束鋼材のウェブ中央 1 点のひずみだけで拘束コンクリートに生じる引張応力を求めることができる。
4. 少なくとも3点のひずみ(拘束鋼材のウェブ部分1点、フランジ部分2点)を測定しておけば、ひずみの分布を完全に求めることができ、偏心距離に影響を受けずにより正確な引張応力を算出できる。

【第4章の参考文献】

- [4.1] 仕入豊和・青柳征夫・川瀬清孝:コンクリートのひびわれ試験方法(案)－乾燥収縮ひびわれ・温度ひびわれ－, コンクリート工学, Vol.23, No.3, pp.40-54, 1985.3
- [4.2] 小山宣幸・佐藤嘉昭・永松静也:コンクリート部材の乾燥収縮ひび割れに関する研究－拘束鋼材のひずみ分布－, 日本建築学会九州支部研究報告第32号・1, pp.129-132, 1991.3
- [4.3] 小山宣幸・佐藤嘉昭・永松静也:コンクリート部材の乾燥収縮ひび割れに関する研究－拘束鋼材のひずみ分布(続報)－, 日本建築学会九州支部研究報告第33号・1, pp.37-40, 1992.3
- [4.4] 鈴木計夫・大野義照・太田寛:コンクリートの乾燥収縮ひび割れと拘束の程度との関係について, セメント技術年報 36, pp. 283-286, 1982