

## (6) 負曲げを受ける合成桁の RC 床版における 鉄筋ひずみ挙動に着目した実験研究

坂口淳一<sup>1</sup>・中島章典<sup>2</sup>・鈴木康夫<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 宇都宮大学大学院 工学研究科情報制御システム科学専攻 (〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2)

Email: mt063713@cc.utsunomiya-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 宇都宮大学大学院教授 工学研究科情報制御システム科学専攻 (〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2)

Email: akinorin@cc.utsunomiya-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 宇都宮大学助教 工学部建設学科建設工学講座 (〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2)

Email: yasuo-s@cc.utsunomiya-u.ac.jp

合成桁が負曲げを受けた場合、RC 床版に引張軸力が作用し、コンクリートにひび割れが生じる。このとき、ひび割れたコンクリートもある程度は引張軸力を負担することが知られている。ひび割れたコンクリートはどの程度の力を負担するか、すなわち、コンクリートの引張剛性(テンションスティフニング)の大きさを理解するためには、それと密接な関係のある鉄筋のひずみ挙動を正確に把握することが有効である。

そこで本研究では、合成桁模型試験体の単純支持・静的負曲げ載荷試験を行い、コンクリートのひび割れ進展に伴う RC 床版内の鉄筋のひずみ挙動を詳細に測定した。そして、得られた鉄筋ひずみのデータに基づき、ひび割れが生じたコンクリートの引張剛性の性状について、床版のひび割れ間隔や作用応力などと関連させて検討を行った。また、設計に用いられているコンクリートの引張剛性を考慮した鉄筋の平均応力の算定手法による算定値と、実験から得られた鉄筋の平均応力の性状について比較を行った。

**Key Words :** composite girder, negative bending, RC slab, strain behavior of reinforcement, tension stiffening

### 1. はじめに

合成桁が負曲げを受けた場合、RC 床版に引張力が作用し、これがコンクリートにひび割れを発生させる原因となる。近年、負曲げ領域の RC 床版の設計において、施工の省力化やコスト削減の観点でひび割れ制御設計の考え方が取り入れられつつある。ひび割れ制御設計とは、発生するひび割れの幅を算定し、これが鋼材の腐食に対する許容ひび割れ幅を超えないように設計することで、床版の耐久性を保證する設計手法である。このような背景から、合成桁 RC 床版のためのより正確なひび割れ幅の算定手法が求められている。

ひび割れ幅の算定手法の中で主流となっているのが、ひび割れたコンクリートが負担する応力の効果をも考慮する、テンションスティフニング理論を基礎としたひび割れ幅算定手法であり、それに関連した模型実験<sup>1),2)</sup>や理論的な検討<sup>3),4)</sup>が数多く行われている。

テンションスティフニング理論において、ひび割れたコンクリートが分担する軸力の影響は、鉄筋の平均ひずみを減ずることによって考慮される。その際に、コンクリートの寄与による鉄筋ひずみの低減量を適切に評価して鉄筋の平均ひずみを算定するためには、ひび割れ間での鉄筋のひずみ挙動を詳細に把握する必要がある。

そこで本研究では、合成桁模型試験体の単純支持・静的負曲げ載荷試験を行い、RC 床版のひび割れの進展に伴う鉄筋のひずみ挙動に関する詳細なデータを収集した。そして、得られた結果から、ひび割れの進展に伴う鉄筋のひずみ分布の変化を示し、ひずみ挙動に影響を及ぼす要因について検討した。これに加えて、ひび割れ制御設計において重要となる鉄筋の平均ひずみについて、ひび割れの発生間隔や鉄筋の作用応力と関連させて検討した。また、それを設計に用いられている鉄筋の平均ひずみ算定式から算出される値と比較した。

### 2. ひび割れ幅の算定に関する理論

#### (1) ひび割れ幅の算定

合成桁の RC 床版に引張軸力が作用することで生じるひび割れの幅  $w$  は、RC 構造に用いられる理論<sup>5)</sup>と同様に、鉄筋のひずみとコンクリートのひずみの差を、軸力作用方向にひび割れ間隔  $L$  の領域で積分した値として考えられている。すなわち、図-1に示すような一軸引張を受け間隔  $L$  でひび割れが生じた RC 部材を考えると、図中で着目したひび割れの幅  $w$  は、鉄筋とコンクリートのひずみ分布図のハッチで示した部分の面積として考えられる。

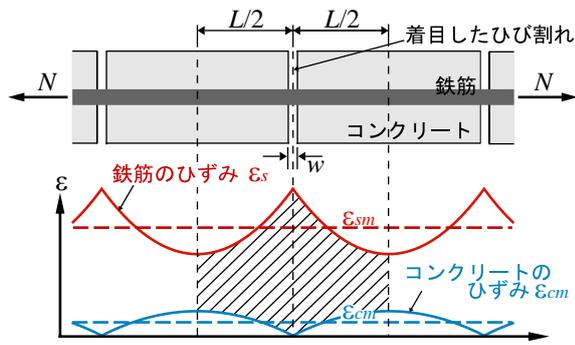


図-1 引張軸力が作用するひび割れを生じた RC 部材の鉄筋とコンクリートのひずみ分布

設計に用いられているひび割れ幅の算定式では、これを簡単にするために、鉄筋とコンクリートのひずみはそれぞれの平均値を用いて表されている。このとき、鉄筋とコンクリートの平均ひずみの差にコンクリートの体積収縮やクリープなどの影響を考慮するためのひずみ量  $\varepsilon'_{csd}$  を加えたひずみに、ひび割れ間隔  $L$  を掛け合わせることでひび割れ幅  $w$  は算出され、次式のように書き表される。

$$w = L(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} + \varepsilon'_{csd}) \quad (1)$$

ここで、コンクリート表面の平均ひずみ  $\varepsilon_{cm}$  は、鉄筋の平均ひずみに比べて小さく、ひび割れ幅への影響が極めて小さいことから<sup>5)</sup>、一般に無視されている。また、 $\varepsilon'_{csd}$  は、コンクリート標準示方書<sup>6)</sup>の中で  $150\mu$  と与えられている。

## (2) 鉄筋のひずみ分布と平均ひずみの算定

引張軸力作用下のひび割れが発生した RC 部材の鉄筋のひずみ分布は、図-1に示したように、ひび割れ位置では鉄筋のみが軸力を負担する。これに対して、2つのひび割れに挟まれた区間(以後、ひび割れ間と呼ぶ)では、鉄筋とコンクリート間の付着作用により、鉄筋とコンクリートが共同して軸力を負担することとなる。ひび割れ幅の算定において、コンクリートの軸力分担による影響は、鉄筋の平均ひずみ  $\varepsilon_{sm}$  に反映させることで考慮されている。安定ひび割れ状態(ひび割れが充分狭い間隔で発生し、床版に作用する引張軸力が増加しても新たなひび割れが発生せずひび割れ幅が広がる状態<sup>4)</sup>)を仮定すれば、鉄筋の平均ひずみ  $\varepsilon_{sm}$  は、コンクリートの引張剛性の程度を表す係数  $\beta$  を用いて次式で表される<sup>7)</sup>。

$$\varepsilon_{sm} = \frac{M}{I_{st}E_s}y_{st} + \beta \frac{f_{ct}}{\alpha_{st}\rho_s E_s} - \beta \frac{f_{ct}}{\rho_s E_s} \quad (2)$$

ここに、

$E_s$  : 鋼の弾性係数

$M$  : 断面に作用する曲げモーメント

$y_{st}$  : 状態 II の中立軸から鉄筋までの距離

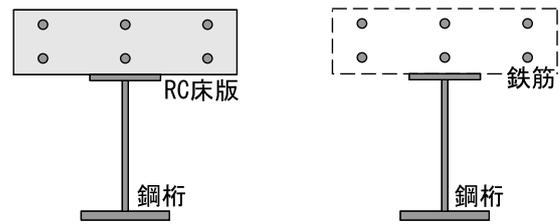


図-2-a 状態 I (全断面)

図-2-b 状態 II (鋼断面)

図-2 断面状態の定義

$I_{st}$  : 状態 II の断面二次モーメント

$f_{ct}$  : コンクリートの引張強度

$\rho_s$  : 鉄筋比

$\alpha_{st} : (A_{st}I_{st}) / (A_{sb}I_{sb}) \quad (\alpha_{st} > 1.0)$

$A_{st}, I_{st}$  : 状態 II の断面積と断面二次モーメント

$A_{sb}, I_{sb}$  : 鋼桁のみの断面積と断面二次モーメント

ここで、状態 II とは、合成桁の理論において用いられる2つの断面状態の1つであり、鋼材料、すなわち鉄筋と鋼桁のみを考慮した断面である。一方、状態 I とはコンクリートも含めた全断面の完全合成状態を仮定した断面として定義される(図-2)。なお、コンクリートの引張剛性の程度を表す係数  $\beta$  の値は設計基準や設計マニュアル<sup>8),9)</sup>によって異なる値が採用されているのが現状である。

式(2)の鉄筋の平均ひずみの算定式は、ひび割れ位置で発生する局所的な最大ひずみから、コンクリートの軸力分担によって低減される鉄筋のひずみを差し引く形で記述されている。式(2)右辺の第1項は、状態 II を仮定した断面に曲げモーメント  $M$  が作用したときの鉄筋に生じるひずみである。これに、コンクリートの剛性によって生じる床版の作用軸力の増加分を考慮するのが第2項である。したがって、第1項と第2項の合計が鉄筋に生じる最大ひずみ、すなわち、図-1で鉄筋のひずみ  $\varepsilon_s$  が最大となっているひび割れ位置での鉄筋のひずみを意味する。一方で、コンクリートの応力分担効果によって低減される鉄筋のひずみは第3項のように表されるため、これを最大ひずみから差し引くことによって鉄筋の平均ひずみが算出される。

また、式(2)の第2項と第3項は、コンクリートのテンションスティフニングの程度を表す係数  $\beta$ 、断面形状及びコンクリートの引張強度が定めれば、ひび割れの発生間隔や床版に作用する引張軸力の大きさに関係なく一定値として算出される。しかし実際には、ひび割れが発生したコンクリートによって分担される軸力は、ひび割れ間隔や作用軸力によって変化すると考えられる。第4節の中で、実験から得られた鉄筋のひずみ挙動をもとに、これらの要因と関連させてコンクリートの寄与による鉄筋のひずみの低減量について検討を行う。

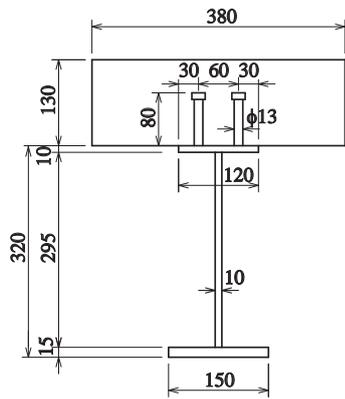


図-3 断面図 (単位 mm)

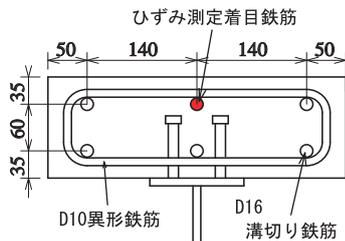


図-4 断面配筋図 (単位 mm)

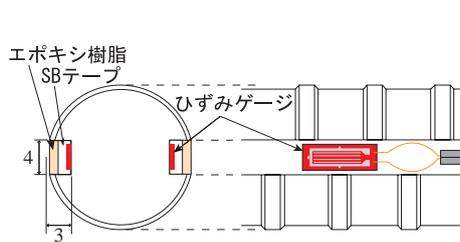


図-6 溝切り鉄筋 (単位 mm)

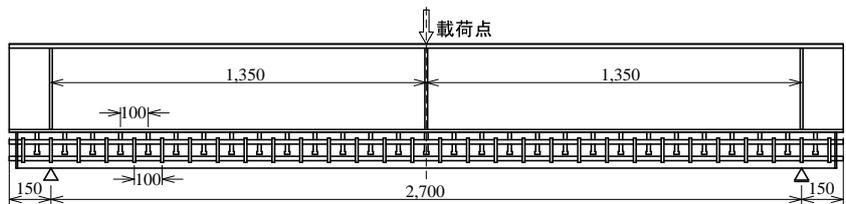


図-5-a 試験体 Type1

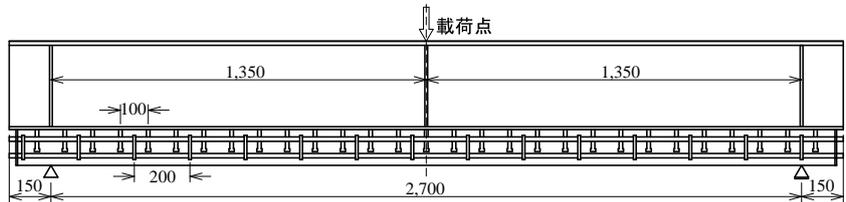


図-5-b 試験体 Type2

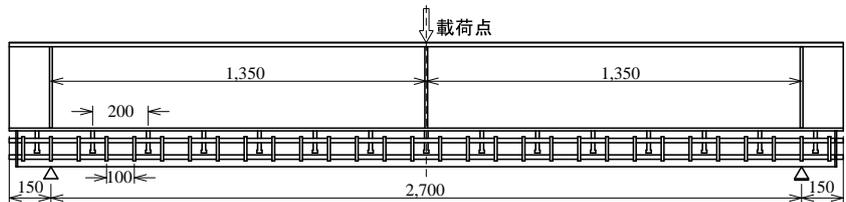


図-5-c 試験体 Type3

図-5 試験体側面図 (単位 mm)

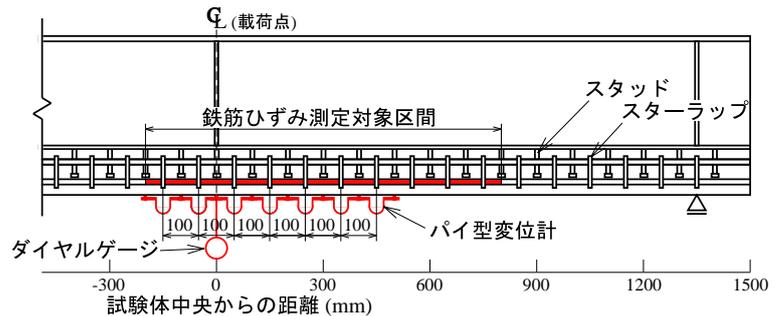


図-7 測定項目 (単位 mm)

### 3. 実験概要

本研究で用いた試験体は、図-3に示す断面形状をもつ全長3mの合成桁である。試験体の鋼桁とRC床版は、鋼桁の上フランジに2列に配置された軸径13mm、全高80mmの頭付きスタッドによって結合されている。試験体の種類は、表-1に示すように、スタッド及びスターラップの配置間隔の異なる3種類であり、これら3種類の試験体を1体ずつ製作した。

試験体配筋図を図-4に示す。橋軸方向鉄筋として、ひずみゲージを密な間隔で貼り付けるために図-6に示すようにD16異形鉄筋のリブを切削加工した溝切り鉄筋を使用し、これを2段3列に計6本配置した。なお、RC床版断面の鉄筋比は2.0%である。スターラップはD10の異形鉄筋を用いて製作した。

荷重試験時の支点位置及び荷重点位置を図-5に示す。図に示すように、試験体を上下反転させた後、支点

表-1 各試験体のスタッド・スターラップ配置間隔

試験体名	スタッド	スターラップ	側面図
Type1	100mm	100mm	図-5-a
Type2	100mm	200mm	図-5-b
Type3	200mm	100mm	図-5-c

間距離が2.7mとなるようRC床版に支点を設けて単純支持し、鋼桁下フランジの試験体中央部に静的荷重を載荷した。荷重方法は漸増繰返し荷重とし、それぞれのサイクルのピーク荷重を20kN、50kN、100kN、300kNとして荷重除荷(以後、それぞれをCycle1~4と呼ぶ)を繰返した後、試験体中央たわみが30mmに到達するまで荷重を増加させた(以後、Cycle5と呼ぶ)。

荷重試験では、橋軸方向鉄筋のひずみ、RC床版表面

のひび割れ幅，試験体中央たわみなどを測定した．橋軸方向鉄筋のひずみは，上段の中央の鉄筋(図-4)に着目して詳細に測定を行った．その測定対象区間は，図-7の試験体中央を基準に左側を-側，右側を+側と定義すると，-200mmから+800mmまでの計1000mm区間であり，その測定対象区間にひずみゲージを25mm間隔で鉄筋上下面に貼り付けた．ひび割れ幅は，試験体中央を基準に-200mmから+500mmの計700mm区間に図-7のようにその中心がスターラップの位置と一致するように設置した標点距離100mmのダイヤル型変位計で測定した．また，試験体中央のたわみは，ダイヤルゲージ型変位計を床版表面側に設置して測定を行った．

なお，使用材料の主な特性値を挙げると，橋軸方向鉄筋の弾性係数は $201\text{kN/mm}^2$ ，載荷試験実施期間のコンクリートの圧縮強度，引張強度，静弾性係数はそれぞれ $39.2\text{N/mm}^2$ ， $3.1\text{N/mm}^2$ ， $30.5\text{kN/mm}^2$ であった．

#### 4. 実験結果

ここでは，実験から得られた，たわみ，ひび割れ，鉄筋のひずみの測定結果を示す．また，鉄筋ひずみ挙動に影響を及ぼす要因や鉄筋の平均ひずみ挙動について考察を行う．

##### (1) 荷重-たわみ関係

各試験体の荷重と試験体中央で測定されたたわみの関係を図-8に示す．図から，各試験体の荷重-たわみ関係はほぼ一致していることがわかる．たわみ挙動の傾向として，載荷開始から荷重約350kNまではほぼ直線的に増加した．ただし，この範囲においても，コンクリートのひび割れによる断面剛性の低下により，わずかながらたわみの増分が荷重の増加に伴い大きくなっている．そして，荷重350kNを超えたあたりから鉄筋の降伏が始まり，それ以降，たわみは急激に増加した．

##### (2) RC床版表面のひび割れ発生状況

図-9に，鉄筋が降伏する直前である荷重300kN時の床版表面のひび割れ発生状況を示す．ひび割れ図は，コンクリート表面のひび割れの進展状況の目視による記録をもとに作成した．図中の横軸の座標は，橋軸方向への試験体中央からの距離を示している．参考に，床版内の鉄筋の配置位置を青線で示した．

各試験体に共通する傾向として，ひび割れはスターラップの近傍で橋軸直角方向に床版断面を横断して発生した．この傾向は，他の実験的研究でも報告されている<sup>1)</sup>．また，ひび割れはスターラップの近傍に発生したため，ひび割れの発生間隔はスターラップの配置間隔の影響を受け，図に示した荷重300kNの時点では100mm間隔か200mm間隔がほとんどであり，断面に作用する

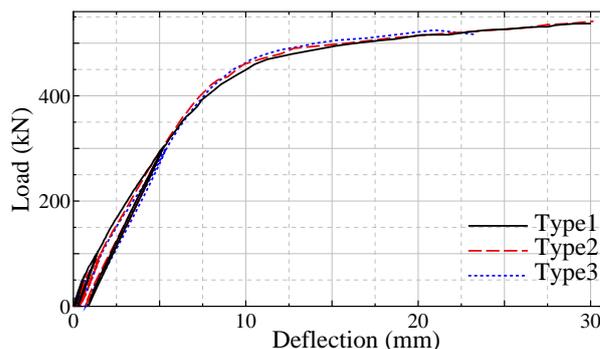


図-8 荷重-たわみ関係

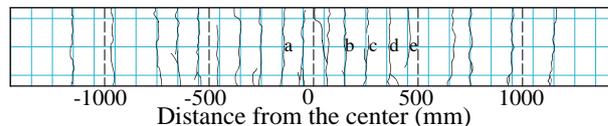


図-9-a Type1

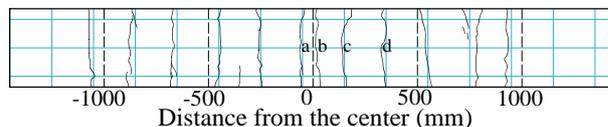


図-9-b Type2

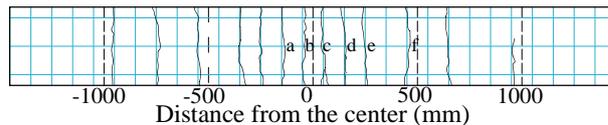


図-9-c Type3

図-9 床版表面のひび割れ発生状況(300kN時)

曲げモーメントの大きな載荷点近傍ほどひび割れ間隔は狭い傾向がみられた．

試験体ごとのひび割れ発生状況を比較をすると，試験体 Type2 と Type3 は，Type1 に比べてひび割れの発生間隔は広く，その数も少ないことがわかる．このことは，試験体のパラメータとしたスターラップ及びスタッドの配置間隔の違いが影響したものと考えられる．スターラップの配置位置では，コンクリート断面の欠損が生じるため，スターラップの配置されていない断面に比べて相対的に小さな作用軸力でコンクリートにひび割れが発生する．そのため，他と比べてスターラップの配置間隔が広い試験体 Type2 で，ひび割れ間隔は広くなったと考えられる．橋軸直角方向に配された鉄筋によるコンクリートの断面欠損の影響は実橋においても存在し，ひび割れの発生間隔は床版の主筋(床版に橋軸直角方向に配置される鉄筋)の間隔に対応していることが指摘されている<sup>10)</sup>．また，一般に知られているように，スタッドの配置間隔が広がると床版と鋼桁の接触面のせん断方向のずれ剛性が小さくなるため，床版に作用する軸力は小さくなる．このことが試験体 Type3 でひび割れ間隔が広がった1つの要因として考えられる．

### (3) 鉄筋のひずみ分布と床版のひび割れ

図-10に、載荷開始から鉄筋の一部に降伏がみられるまでの鉄筋のひずみ分布を荷重 10kN ごとに描いた。分布曲線は荷重 50kN ごとに黒の実線で、それ以外はグレーの実線で描いた。図中で、縦軸は鉄筋の伸びひずみを、横軸はひずみの測定点の位置を試験体中央からの距離によって表しており、参考に、スターラップの配置位置を青の実線で示した。

各試験体の鉄筋のひずみ分布に共通して、コンクリートにひび割れが発生した位置で、鉄筋のひずみは極大値を示している。このことは先に述べたように、ひび割れ断面においては床版に作用する引張軸力は鉄筋のみで負担されるためである。したがって、新たにひび割れが発生すると、そのひび割れ周辺の鉄筋のひずみは急激に増加し、ひび割れ位置に新たな極大値を示す。そして、ひび割れが床版を貫通、すなわち、ひび割れ位置の断面の状態が図-2に示した状態Ⅰから状態Ⅱへ遷移し終わると、荷重の増加に対するひずみ増分は再び一定となる。

次に、各試験体の鉄筋ひずみ分布の傾向をみると、ひび割れ間隔の広い試験体 Type2 では、付着作用によってより多くの軸力がコンクリートに伝達されるため、ひび割れ間で鉄筋のひずみ分布は深くたわんでいる。その一方で、試験体 Type1 は荷重の増加に伴い狭い間隔でひび割れが発生したため、鉄筋のひずみ分布は細かく波を打っている。試験体 Type3 のひずみ分布は、試験体載荷点周辺である -200mm から 300mm の範囲に限定して、同じ荷重段階で比べると他の試験体よりも小さい値となっていることがわかる。その影響として、鉄筋の降伏が初めて確認できる荷重をみると試験体 Type1 と Type2 がそれぞれ 350kN、360kN であるのに対して、Type3 は 400kN を超えている。この現象の要因については、次で、ひび割れ間隔とスタッドの配置間隔の関係をもとに考察する。

### (4) スタッドの配置間隔とひび割れ間隔の関係が鉄筋ひずみに及ぼす影響

先に述べたように、試験体 Type3 のスパン中央部周辺では他の試験体に比べて鉄筋のひずみが小さい傾向がみられた。ここでは、この現象の原因をスタッドの配置間隔とひび割れ間隔の関係を基に考察する。

図-11に、試験体 Type1 と Type3 の、本実験で行った繰返し載荷の Cycle4 及び Cycle5 の荷重 150kN 時の鉄筋ひずみ分布を示した。ここで Cycle4 はピーク荷重 300kN としたサイクルで、このサイクルで初めて試験体に荷重 150kN が載荷されている。一方、Cycle5 は前のサイクル (Cycle4) で最大 300kN まで荷重を載荷した後のサイクルであり、荷重 150kN 時を比べると、Cycle4 よりも新たなひび割れが多数発生している。

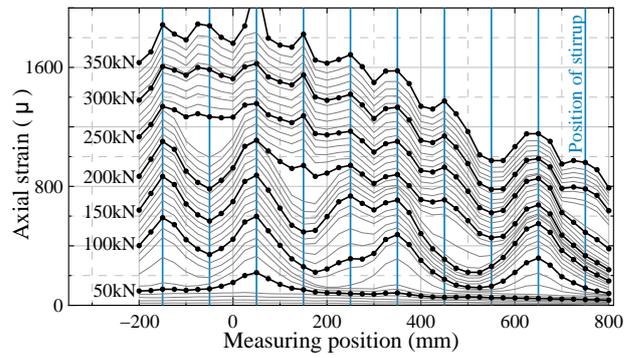


図-10-a Type1

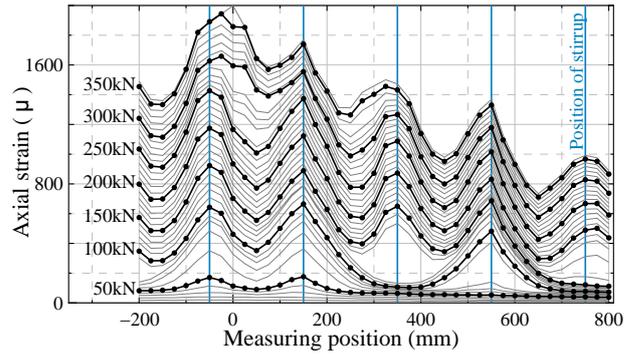


図-10-b Type2

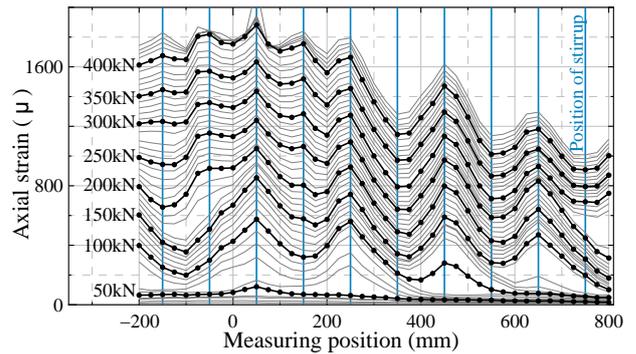


図-10-c Type3

図-10 橋軸方向鉄筋のひずみ分布

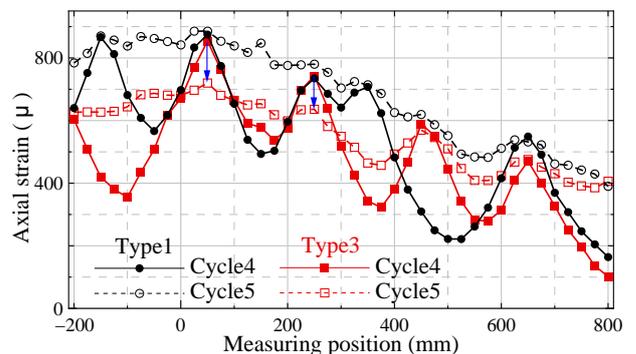


図-11 橋軸方向鉄筋のひずみ分布 (150kN 時)

それぞれの試験体の両サイクルのひずみ分布を比較すると、試験体 Type1 では Cycle4 と Cycle5 で共通して発生しているひび割れ位置での鉄筋ひずみはほぼ一致している。これに対して、試験体 Type3 では、試験体

中央を基準に -200mm から 250mm の範囲、すなわち、Cycle5 で約 100mm 間隔でひび割れが発生していた範囲では、Cycle4 に比べてひび割れ位置のひずみが大きく低下していることがわかる。試験体 Type3 はスタッドが 200mm 間隔で配置されているため、100mm 間隔でひび割れが発生した場合スタッドの配置間隔よりもひび割れ間隔が小さくなり、隣接するスタッド間に 2 本のひび割れが発生することとなる。このとき、スタッドによって鋼桁と結合されていない、重ね梁のような断面が断続的に成立することとなる。そのため橋軸方向には、重ね梁と合成断面が交互に現れる領域が現れることとなり、その影響として、この領域で RC 床版に作用する軸力が低下し、ひび割れ位置も含めて鉄筋のひずみが小さくなったと考えられる。

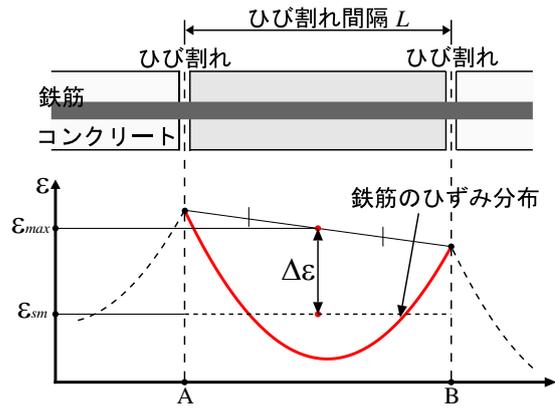


図-12 隣接する 2 つのひび割れ間の鉄筋のひずみ分布と鉄筋の最大ひずみ  $\varepsilon_{max}$ 、平均ひずみ  $\varepsilon_{sm}$

### (5) コンクリートの寄与による鉄筋ひずみの低減量

RC 床版のひび割れ間では、付着作用によって鉄筋からコンクリートへ応力が伝達される。このコンクリートによって分担される軸力の影響は、式(2)に示した鉄筋の平均ひずみの算定式においては、ひび割れ位置で発生する最大ひずみから、コンクリートの分担によって低減されるひずみを差し引くことで考慮されている。ここでは、コンクリートの寄与によって低減されるひずみについて、実験から得られたひずみ分布をもとに、鉄筋の作用応力やひび割れの発生間隔と関連させて検討する。

2 つの隣接したひび割れ間において、鉄筋のひずみ分布は図-12に示すように下に凸の形状を描く。そこで、図-10に示した実験から得られたひずみ分布で隣接する 2 つの極大値によって形成される区間ごとに、鉄筋の平均ひずみ  $\varepsilon_{sm}$  と最大ひずみ  $\varepsilon_{max}$  を算出した。このとき、本実験の荷重方法は 3 点曲げであり曲げモーメント分布は勾配を持っていることを考慮するために、鉄筋の最大ひずみ  $\varepsilon_{max}$  は図-12に示すように、その対象区間の両端(図中の A 点と B 点)のひずみ測定値の平均とした。また、平均ひずみ  $\varepsilon_{sm}$  はその区間内にある全ての測定点の値の平均値とした。

このようにして求められる最大ひずみ  $\varepsilon_{max}$  と平均ひずみ  $\varepsilon_{sm}$  の差として定義される、コンクリートの寄与による鉄筋ひずみの低減量  $\Delta\varepsilon(=\varepsilon_{max} - \varepsilon_{sm})$  の性状を検討するために、ひずみ低減量  $\Delta\varepsilon$  と鉄筋の最大ひずみ  $\varepsilon_{max}$  の関係を図-13に示した。この図で、縦軸に示した最大ひずみが大きくなるほど、鉄筋に作用する軸力が大きく、したがって床版に作用する軸力が大きいことを意味する。図中に描かれたそれぞれの  $\varepsilon_{max}$ - $\Delta\varepsilon$  曲線は、ひび割れの発生によって 1 つの区間が成立してから、その区間内に新たなひび割れが発生することで分断されるか、あるいは鉄筋に降伏がみられるまでを描いた。また、関係曲線はひび割れ間隔に対応させて、4 つの範囲に分類して 4 色で描いた。

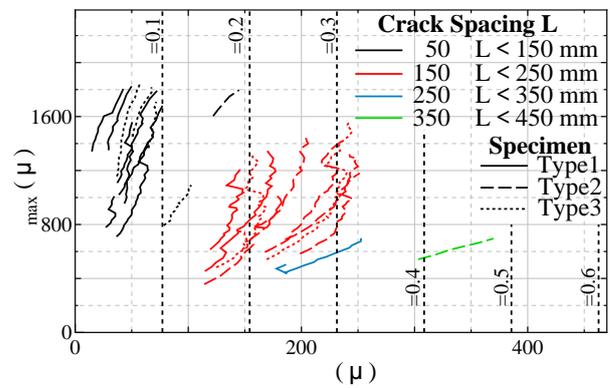


図-13 最大ひずみ  $\varepsilon_{max}$  とひずみの低減量  $\Delta\varepsilon$  の関係

$\varepsilon_{max}$ - $\Delta\varepsilon$  関係に共通する傾向としては、ひび割れ間隔が同じであれば試験体によらず  $\Delta\varepsilon$  は同程度の値となっており、かつ、ひび割れの発生間隔が狭いほど小さい。このことは、コンクリートの寄与による鉄筋のひずみの低減量は、ひび割れ間隔に大きく依存することを意味する。ただし、ひずみの低減量はひび割れ間隔に依存するものの比例関係にあるわけではなく特に、ひび割れ間隔が 100mm 前後(黒線)から 200mm 前後(赤線)にかけては大きな増加が見られた。

次に、作用応力の大きさによる影響を考える。 $\varepsilon_{max}$ - $\Delta\varepsilon$  関係は、ひび割れ間隔に関わらず、縦軸として示した最大ひずみ  $\varepsilon_{max}$  が大きくなるにつれて、ひずみの低減量  $\Delta\varepsilon$  は増加する傾向にある。また、その増分はひび割れ間隔の広い場合ほど大きい。したがって、任意のひび割れ間隔に対して、鉄筋に作用する応力が大きいほどコンクリートの軸力分担は大きくなると言える。このことは、床版に作用する軸力が大きいほど、コンクリートの軸力分担が大きくなることを意味する。

次に、この関係曲線を鉄筋の平均ひずみの算定式(式(2))から算出される値と比較する。式(2)の中で、コンクリートの寄与によって低減される鉄筋のひずみは第 3

項として表されている．つまり  $\Delta\varepsilon$  は，

$$\Delta\varepsilon = \beta \frac{f_{ct}}{\rho_s E_s} \quad (3)$$

上式に，材料試験から得られたコンクリートの引張強度  $f_{ct}=3.1\text{N/mm}^2$  と鉄筋の弾性係数  $E_s=201\text{kN/mm}^2$ ，さらに鉄筋比  $\rho_s=2.0\%$  を代入したうえで， $\beta$  を 0.1 から 0.6 の範囲で算出される値を図-13に記した．図からわかるように，式(3) から求められる値は定数となるため，鉄筋の最大ひずみ  $\varepsilon_{max}$  によらず一定値となる．

図に描かれた  $\varepsilon_{max}-\Delta\varepsilon$  曲線と式(3) から算出された値を比べると，ひび割れ間隔約 200mm 前後の場合で，現在設計に採用される  $\beta$  の値として主流になりつつある 0.2 の場合の算定値を超えることがわかる．一方，ひびわれ間隔が 100mm 前後の場合は，ほとんどコンクリートの引張剛性に期待ができず， $\beta=0.1$  を下回っている．また，鉄筋の最大ひずみが増加すると，低減ひずみ  $\Delta\varepsilon$  が増加する傾向にあることを先に述べたが， $\beta$  に換算すると 0.1 近く増加することがわかる．

ただし，ここで用いた実験から得られたひずみ分布に基づく鉄筋の最大ひずみ  $\varepsilon_{max}$  の評価手法では，鉄筋の極大値の測定位置とひび割れの位置が必ずしも一致していないことにより，実際よりも小さく評価している可能性がある．このことにより， $\varepsilon_{max}-\varepsilon_{sm}$  として評価される  $\Delta\varepsilon$  も実際よりも小さく算出されることを考えると，実際の  $\Delta\varepsilon$  は，図-13に描かれたものよりも若干大きく，関係曲線は右にシフトするものと考えられる．

#### (6) 曲げモーメントとひび割れ幅の関係

図-14に曲げモーメント-ひび割れ幅関係を示す．ここで，縦軸の曲げモーメントは，ひび割れ位置断面に作用するモーメントであり，ひび割れの位置と載荷荷重をもとに計算した．図中にアルファベットで記述した凡例は図-9のひび割れ図と関連づけられている．また，凡例の括弧内の数字はひび割れの発生位置を試験体中央からの距離で示したものである．

図からわかる通り，曲げモーメント-ひび割れ幅関係は次のような典型的な挙動を示している．まず，ひび割れの発生によってひび割れ幅は急激に増加し，その後は，曲げモーメントの増加に伴い線形的に徐々にひび割れ幅は増加する．やがて，曲げモーメントが 230kNm あたりまで到達すると，鉄筋の降伏によってひび割れ幅は再び急激に増加し始める．

先に述べたようにひび割れ幅  $w$  は理論上，鉄筋とコンクリート表面のひずみの差異にコンクリートの体積収縮の影響を考慮したひずみに，ひび割れ間隔を掛け合わせることで式(1)のように表される．このことを踏まえて実験結果について試験体ごとの傾向をみると，試験体 Type1 と Type2 の曲げモーメント-ひび割れ幅関係で，線形関係の傾きはそれぞれの試験体で同等であ

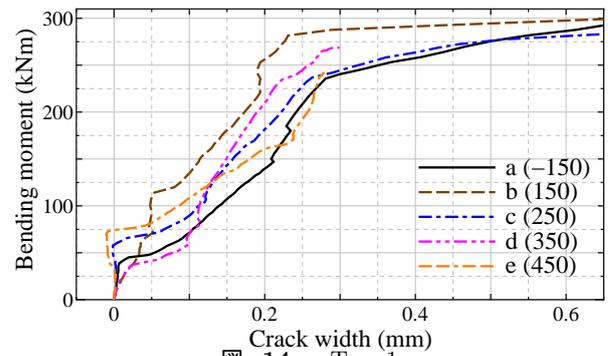


図-14-a Type1

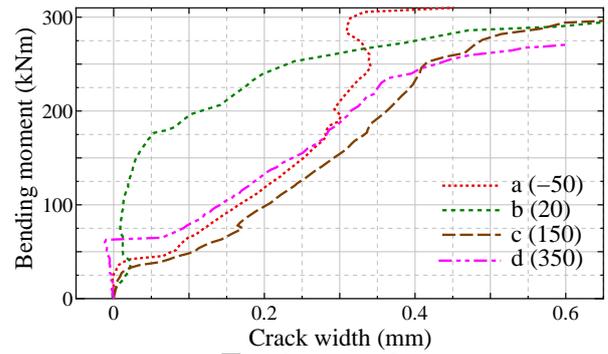


図-14-b Type2

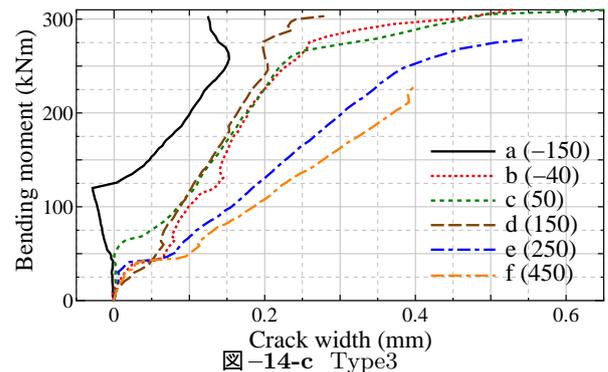


図-14-c Type3

図-14 曲げモーメント-ひび割れ幅関係

り，また，Type1 に比べて Type2 でひび割れ幅の増分は大きい．このことは，ひび割れ間隔が試験体 Type1 で 100mm 間隔，Type2 で 200mm 間隔のものがほとんどであったことによる．同様に，試験体 Type3 では，ひび割れ間隔が載荷点周辺で 100mm 間隔，支点側で 200mm となる傾向があったことにひび割れ幅の挙動は対応しており，載荷点周辺に発生したひび割れのほうが，ひび割れ幅が狭い傾向にある．このことから，理論通りひび割れ幅はひび割れ間隔に依存すると言える．ただし，ひび割れ幅はひび割れ間隔と比例関係にあるわけではなく，例えば，ひびわれ間隔 100mm と 200mm の場合の，荷重の増加に対してひび割れ幅が線形的に徐々に増加している領域を比較すると，ひび割れ間隔が 2 倍となってもひび割れ幅は 1.5 倍程度となっている．この原因は，ひび割れ間隔が広い場合にはより多くの軸力がコンクリートに分担されるために鉄筋の平均ひずみが小さくなるためと考えられる．

## 5. まとめ

本研究では、コンクリートにひび割れが生じたRC床版内の鉄筋のひずみ挙動を詳細に調べるために、単純支持した合成桁の静的負曲げ載荷試験を行った。実験では、鉄筋のひずみに加えてひび割れ挙動についても確認した。実験から得られた結果を以下にまとめる。

1. 床版のひび割れは、スターラップ近傍で橋軸直角方向に横断して発生し、その発生間隔はスターラップの配置間隔に対応する傾向が見られた。
2. RC床版と鋼桁に間に配されたずれ止めの配置間隔と比較すると、ずれ止めの間隔が広い試験体で、ひび割れの発生間隔が広くなる傾向がみられた。
3. RC床版のひび割れ位置では床版に作用する軸力は鉄筋のみによって負担されるため、橋軸方向の鉄筋ひずみ分布は、ひび割れ位置で極大値をとるように分布する。
4. 隣接するスタッド間に複数本のひび割れが発生することで、鋼桁とRC床版が結合されていない重ね梁のような断面が断続的に生じた場合、鉄筋のひずみに低下がみられた。
5. コンクリートの軸力分担によって低減される鉄筋のひずみは、ひび割れの発生間隔に大きく依存し、ひび割れ間隔が広いほど大きいことが確認された。また、床版の作用軸力が大きくなるほど、コンクリートの軸力分担は大きくなることが確認された。
6. ひび割れ位置に作用する曲げモーメントとひび割れ幅の関係はひび割れ間隔に依存し、ひび割れ間隔が狭いほど、ひび割れ幅が狭くなる傾向にあった。

## 参考文献

- 1) 中本啓介, 長井正嗣, 奥井義昭, 岩崎英治, 細見雅生: 負曲げを受ける合成桁のひび割れ挙動に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.49A, pp.1143-1152, 2003.3.
- 2) 神谷崇, 谷口望, 碓山晴久, 依田照彦: 繰り返し荷重を受ける連続合成桁中間支点部のひび割れ挙動に関する実験的研究, 土木学会論文集 A, Vol.63 No.1, pp.25-34, 2007.1
- 3) 長井正嗣, 奥井義昭, 岩崎英治: 連続合成桁の各種ひび割れ幅算定法とその相違に関する一提案, 土木学会論文集, No.710/I-60, pp.427-437, 2002.7
- 4) 長井正嗣, 奥井義昭, 岩崎英治: 連続合成桁の初期ひび割れ状態を考慮したひび割れ幅, 鉄筋応力算定法の一提案, 土木学会論文集, No.759/I-67, pp.283-292, 2004.4
- 5) 角田与史雄: 鉄筋コンクリートの最大ひび割れ幅, コンクリートジャーナル, Vol.8, No.9, pp.1-10, 1970
- 6) 土木学会: コンクリート標準示方書 [構造性能照査編], pp.100-102, 2002.
- 7) 土木学会: 鋼・合成構造標準示方書 [設計編], pp.266-267, 2007.
- 8) Hanswille, G.: Cracking of concrete, Mechanical model of the design rules in EUROCODE4, Conf.Report, Composite Construction in Steel and Concrete III. ASCE, pp.420-433, 1997.
- 9) (財) 高速道路技術センター: PC床版連続合成2主桁橋の設計, 施工マニュアル, 2002.
- 10) 長井正嗣, 家村剛: Hanswille教授に聞く (インタビュー), 橋梁と基礎, Vol.34, No.11, pp.33-39, 2000.

## EXPERIMENTAL STUDY ON STRAIN BEHAVIOR OF REINFORCEMENT IN RC SLAB OF COMPOSITE GIRDER UNDER NEGATIVE BENDING

Junichi SAKAGUCHI, Akinori NAKAJIMA and Yasuo SUZUKI

In the negative moment region of the continuous composite girder, cracks are caused by the tensile axial force acting on the RC slabs. Then, accurate evaluation method of a crack width of the RC slab is required to control the cracking behavior of the RC slab, and many researches dealt with this problem. In this research, the static tests of the simple-supported composite beams under the negative moment were conducted to observe in detail the strain behavior of the reinforcement and the cracking behavior in the RC slab. As a result, the strain behavior of the longitudinal reinforcement and the cracking behavior of the slab are measured successfully, and the cracking behavior of the RC slab is investigated through comparison and discussion with experimental data.