

# 負曲げを受ける合成桁の ひび割れ挙動に関する研究

谷口 望<sup>1</sup>・依田照彦<sup>2</sup>

<sup>1</sup>学生会員 工修 早稲田大学大学院理工学研究科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

<sup>2</sup>フェロー会員 工博 早稲田大学理工学部土木工学科教授 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

コンクリート床版と鋼桁よりなる合成構造を用いた連続桁は、橋梁に多く用いられつつある。その中間支点部においては、負曲げが生じるため、ひび割れに対する検討が必要である。ひび割れに対する検討は、従来よりコンクリートを無視した鉄筋と鋼桁のみの断面で設計計算を行ってきたが、ひび割れ発生後の挙動に及ぼす、ひび割れが生じる以前の挙動の影響(テンションスティフニングなど)については、あまり注目されて来なかった。EUROCODE 4では、ひび割れ発生以前の状態と発生後の状態を、床版に作用する引張軸力で関連付けている。本研究では、日本で従来より用いられているひび割れ間隔を示す式と合わせて、新しいひび割れ幅制御の計算手法を提案する。提案した手法は、合成桁の負曲げ実験と比較し、妥当性を検討した。

**Key Words :** limitation of crack width, composite girder, negative bending moment

## 1. まえがき

近年、連続合成桁は、経済性や施工の行い易さの点で注目されている<sup>1),2)</sup>。しかしながら、連続桁であるために、中間支点部で負曲げが生じ、コンクリートのひび割れに対する検討が必要不可欠である。コンクリートのひび割れに対する研究は古くから行われており<sup>3)</sup>、現在土木学会コンクリート標準示方書<sup>5)</sup>で示されている曲げひび割れ算定式の原案は、角田<sup>4)</sup>によって1970年に報告されたものである。この算定式は、軸引張実験結果とRC曲げ載荷実験結果により得られたもので、最大ひび割れ間隔と鉄筋のひずみを、積分する意味で掛け合わせて、最大ひび割れ幅を算定するものである。また、EUROCODE 4のひび割れ制御手法は、DIN(ドイツ規格統一協会)やCEB/FIP-90の設計概念と、Hanswilleらのプレストレスしない連続桁の研究<sup>6),7)</sup>をまとめたものであり、合成桁のひび割れ制御の設計手法として、近年日本での評価が高まりつつある。この手法の内容としては、以下のような点にまとめられる。

- 鉄筋の軸方向に平均的なひずみと、ひび割れ部の最大値となるひずみを、分けて考えている。
- 鋼桁部とコンクリート床版部を分担断面力法で考えているため、ひび割れ発生前後での挙動の連続性が保たれている。
- b)の結果、平均的な鉄筋のひずみは、鉄筋と鋼桁

のみの断面で想定したひずみよりも、コンクリートの負担する分、小さくなることが示されている(テンションスティフニング)。

ひび割れ幅については、ひび割れ間隔と鉄筋のひずみを掛け合わせて求めるという手法を、EUROCODE 4においても基本的には踏襲しているが、定められている最大ひび割れ間隔 $2L_{es}$ には、鉄筋の応力 $\sigma_s$ だけでなく、ひび割れ幅 $w$ が含まれている。文献<sup>6)</sup>に示されている式を具体的に示せば、

$$L_{es} = \frac{\sigma_s \cdot ds}{4\tau_{sm}} \frac{1}{1+n \cdot \rho_s} \quad (1)$$

$$\tau_{sm} = \frac{e}{1+\delta \cdot b} \left( \frac{w}{2} \right)^\delta \quad (2)$$

ここに、 $\sigma_s$ : 鉄筋の応力、

$ds$ : 鉄筋径、

$n$ : 鉄筋とコンクリートのヤング係数比、  
( $=E_s/E_c$ )、

$\rho_s$ : 鉄筋比( $=A_s/A_c$ )、

$\tau_{sm}$ : 平均せん断力

$e, b, \delta$ : 付着に関するパラメータ。

したがって、ひび割れ間隔は、鉄筋の応力が増加するとともに変化し、また、応力を得る式中にひび割れ幅が入っている点で理論的な意味を理解することは難しく、ばらつきの生じやすいコンクリートひび割れ性状に理論がどこまで適用できるか疑問で

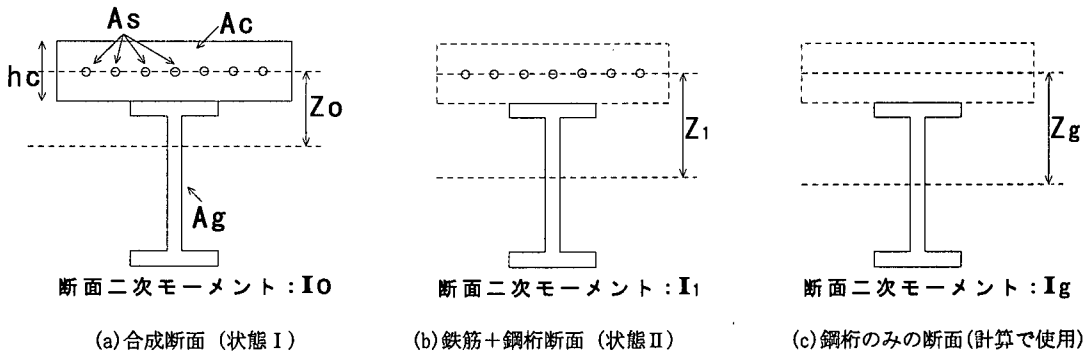


図-1 断面の仮定および定数

ある。一方、角田らの式は、EUROCODE 4 とは異なり、比較的簡易にひび割れ間隔が実験的に定められる<sup>4)</sup>。これらのことから、本研究では、ひび割れ間隔の計算に RC 構造に対して用いられる角田らの提案式を用いることとした。しかし、合成桁の床版に用いる場合には、テンションスティフニングの影響により、鉄筋のひずみに関しては、これを考慮している EUROCODE 4 などの手法を用いなければならないと言える。そこで本研究では、ひび割れ間隔には従来の角田らの式、鉄筋のひずみに関しては先述の EUROCODE 4 を改良して用いる方法を提案することとした。本計算手法における EUROCODE 4 の改良点としては、初期ひび割れ発生時の鉄筋のひずみの計算手法を加えた点にある。

角田らのひび割れ間隔算定式は、先にも述べたように、鉄筋比1%程度の RC 構造物に対する実験式であるため、図-1のような鉄筋比2%程度でかつ、鋼桁とずれ止めを介して合成される構造に適用できるかどうかについては慎重な検討が必要である。この式が示されているコンクリート標準示方書<sup>5)</sup>にもこの点については特に触れられていない。その一方で、角田らの式が、図-1のような構造に適用できると考えて設計を行う例もある<sup>6)</sup>。本研究では、鉄筋比2%の合成構造が、鉄筋比が1%の構造よりもひび割れを分散させる効果があり、少なくとも最大ひび割れ間隔は角田らの式より大きくならないものと判断し、この式を用いることとした。本研究では、簡易性を重視し、この式を用いるが、本来は I 型合成桁に対応するひび割れ間隔式を用いるべきと考えられる。したがって角田らの式程度の簡易さで、一般の I 型合成桁に対応する、新たなひび割れ間隔実験式の構築が待たれる。

本研究で用いる Hanswille らの研究は、プレストレスしない連続合成桁を対象としているが、本研究では一部、この設計手法が応用できるプレストレス

トとして、膨張コンクリートによるケミカルプレストレストコンクリート合成桁<sup>9), 10)</sup>を選び、これについても計算を試み、実験結果と比較した。

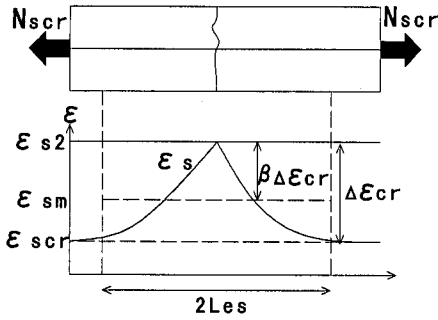
## 2. 荷重—ひずみ関係計算手法

合成桁の負曲げ挙動については、先にも述べた通り、EUROCODE4を基礎におくこととする。この手法の概要を一言で言えば、床版のみの軸引張実験結果を、合成断面の曲げ挙動に拡張するという手法である。以下に改良点を分かりやすくするために、軸力—ひずみ関係をモーメント—曲率関係または曲げ荷重—ひずみ関係に拡張する方法を順を追って示す。合成断面に用いる断面の仮定は図-1に示すような、状態 I (合成断面) と状態 II (鉄筋と鋼桁のみの断面、コンクリート無し。) を考える。また、図-1中の  $Z$  は、各断面における中立軸の位置と、床版の中央の位置との距離を示している。

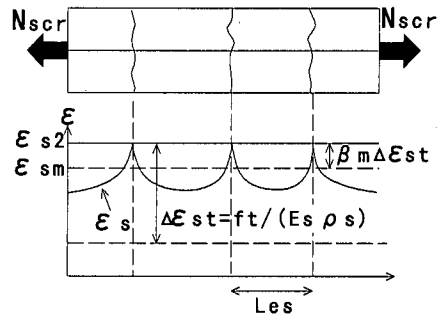
### (1) 床版の軸引張挙動のモデル化 ( $N_s - \epsilon$ 関係)

合成桁断面の床版部のみを取り出したモデルを考え、これの軸引張状態 (図-2) を考える。図-2における  $\beta$ ,  $\beta_{ml}$  は、それぞれ付着の程度を表す定数、また、各ひずみの “cr” は初期ひび割れ時、“st” は定常ひび割れ時を示している。このときの鉄筋の軸力—ひずみ関係は、実験的に図-3のようになる。ここに、図-3における  $\epsilon_{scr}$  は、ひび割れ発生時の鉄筋のひずみを示している。注目すべき点は以下のようにならめられる<sup>6), 7)</sup>。

- a) 軸力は、最初のひび割れが発生してからしばらく、ある程度の数のひび割れが出るまでは、ほぼ一定の値をとり、その最大値はひび割れ発生軸力  $N_{scr}$  となる。これを初期ひび割れ状態 (single crack formation) と言う。



(a) 初期ひび割れ時(single crack)



(b) 安定ひび割れ時(stabilised crack)

図-2 床版の軸引張モデル

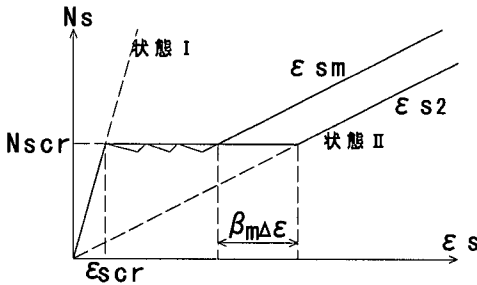


図-3 鉄筋の軸力-ひずみモデル

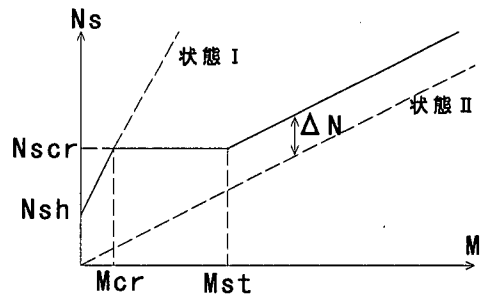


図-4 軸力-モーメントモデル

b) ある程度のひび割れが出そうと、再び軸力は増加し、その軸力-ひずみ関係の勾配は鉄筋だけの断面剛性(状態II)に等しくなる。これを、安定ひび割れ状態(stabilised crack formation)と呼ぶ。

EUROCODEより以前に作られ、このの原型ともなっているCEB/FIP-90<sup>11)</sup>では、図-2のひび割れ付近でとがった分布ではなく、丸みをおびた分布としているが、ここでは文献6)に示されているような分布を用いた。この分布に関しては、日本における研究でも図-2のような分布形状を考えるもの<sup>4), 12)</sup>と、丸みをおびた分布を仮定しているもの<sup>13)</sup>に分かれており、この点に関しては今後検討を要する。しかし、今回の計算手法では、後に示すようにひずみの最大値と平均値のみを考えるものであり、実験的に平均値を求める係数 $\beta$ 、 $\beta_m$ を仮定しているの、この分布の厳密な形状についての検討は行わないものとした。図-2、図-3中の安定ひび割れ時の鉄筋ひずみについては、実験的に次のような式が用いられている<sup>6), 11)</sup>。

$$\varepsilon_{sm} \doteq \varepsilon_{s2} - \beta_m \frac{f_t}{E_s \cdot \rho_s} \quad (3)$$

ここに、 $\beta_m$  : 係数 ( $\beta_m \doteq 0.4$ )、

$f_t$  : コンクリートの引張強度 ( $\geq 0$ )、

$E_s$  : 鉄筋のヤング係数。

また、 $Les$ については、ひび割れ間隔の限界値である。

上記の仮定は、係数の $\beta_m$ を用いることによって簡単に平均的なひずみを求めているところに、大きな特徴がある。

#### (2) 軸力-モーメント関係の計算( $N_s - M$ 関係)

軸力-ひずみ関係の平均ひずみを利用して、安定ひび割れ時の軸力-モーメント関係を算出する。ただし、合成桁のモーメントは、一次元的なものを示しており、つまり、平均ひずみにおいて平面保持を仮定するものである。

算出に用いる式は以下の2式である。

・平均ひずみの仮定

$$\begin{aligned} \varepsilon_{sm} &= \varepsilon_{s2} - \beta_m \frac{f_t}{E_s \cdot \rho_s} \\ &= \frac{N_s}{E_s \cdot A_s} - \beta_m \frac{f_t}{E_s \cdot \rho_s} \end{aligned} \quad (4)$$

・状態IIでの断面内の適合式

$$\varepsilon_{sm} + \frac{N_s}{E_s \cdot A_g} + \frac{N_s}{E_s \cdot I_g} Z_g^2 = \frac{M}{E_s \cdot I_g} Z_g \quad (5)$$

ここに、 $E_s$  : 鋼桁、鉄筋のヤング係数、

$A_s, A_g$  : 鉄筋、鋼桁の断面積。

また、状態Ⅱでの断面内の適合式は、合成桁を床版と鋼桁にわけて計算されたもので、ひび割れが生じた断面では床版内に生じるモーメントを無視できるとし、床版部は軸力のみを考慮している<sup>6)</sup>。式(4)、式(5)より安定ひび割れ時のモーメントと軸力の関係式が、以下のように求まる。

$$N_s = M \frac{A_s \cdot Z_1}{I_1} + \beta_m \frac{A_s \cdot f_t}{\rho_s \cdot \alpha} = M \frac{A_s \cdot Z_1}{I_1} + \Delta N \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{A_1 \cdot I_1}{A_g \cdot I_g} \quad (7)$$

ここに、 $A_1$ ：状態Ⅱの断面積(=As+Ag)。

式(6)および図-4によると、安定ひび割れ時の軸力は状態Ⅱよりも $\Delta N$ だけ大きくなるのが分かる。これをテンションスティフニングと呼んでおり、コンクリート床版を考慮したことによる軸力負担分の増加を表している。図-4中のMcrは、ひび割れ発生時の桁のモーメントを示している。

ひび割れ発生時の軸力Nscrは、断面内のひずみ勾配を考慮して、以下の式で示される<sup>6),7)</sup>。

$$N_{scr} = (f_t - \sigma_{sh}) \cdot kco \cdot Ac(1 + n \cdot \rho_s) + N_{sh} \quad (8a)$$

$$\approx f_t \cdot kc \cdot Ac \cdot (1 + n \cdot \rho_s) \quad (8b)$$

$$kco = \frac{1}{1 + hc/(2Zo)}, \quad kc = kco + ksh \leq 1.0 \quad (9a, b)$$

ここに、

$N_{sh}$ ：乾燥収縮によって生じる固有応力状態で、床版に生じる軸力(≥0)。

$\sigma_{sh}$ ：乾燥収縮によるコンクリート引張強度の低下量(≥0)。

hc：床版の厚さ、

ksh：kcoの補正量(プレストレスのない、一般の連続桁では、ksh=0.3)。

式(6)に、式(8)で得られたNscrを用いれば、安定ひび割れ状態の開始点のモーメントMstが算出できる。式(8a)においては、乾燥収縮による影響をある程度厳密に考慮している。また、式(8b)は、簡易的にその影響を含めるためのものである。しかし、この2式を比べるとNscrは、式(8b)の近似式の方が大きくなるように設定されている。(数値は、後述の実験結果との比較を見れば、明らかである。)安定ひび割れ状態は、複数のひび割れがある程度のひび割れ間隔で存在していないと生じ得ない状態である(図-2)。したがって、連続合成桁などの負曲げ挙動

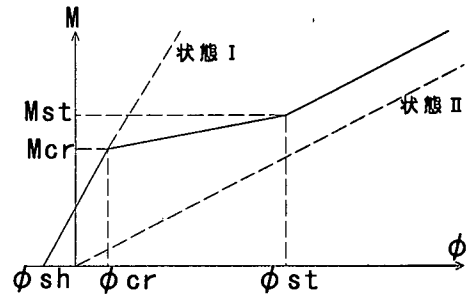


図-5 モーメント-曲率モデル

においては、モーメントが一定となる区間が短く、最初に生じたひび割れの周辺に複数のひび割れが生じる前に、その部分のモーメントがMstに達してしまう。よって最初にひび割れが生じる部分で安定ひび割れ状態に達したときには、式(8a)より求まる本来のNscrよりも大きな軸力が生じてしまうことを考慮するために、kshを使用していると考えられる。したがって式(9b)中の係数の増加補正分ksh=0.3は、乾燥収縮による影響に加えて、軸引張挙動を曲げ挙動に拡張する際の実験的な補正量も含まれていると見た方がよいと思われる。ただし、これらの理由より、等曲げ区間が長くなる場合や、プレストレスコンクリートのように、Mstとひび割れ発生時のモーメントMcrとの比、(Mst/Mcr)が大きくなる場合には、増加補正分kshは、不必要または小さめにすべきと考えられる。

### (3) モーメント-曲率関係の計算 (M-φ関係)

モーメント-曲率関係(図-5)は、以下の式で求めることができる<sup>6),7)</sup>。

$$M_{cr} = n \cdot (f_t - \sigma_{sh}) \cdot I_o \cdot kco / Zo \quad (10)$$

$$\phi_{cr} = \frac{M_{cr}}{E_s \cdot I_o} + \phi_{sh} \quad (11)$$

$$M_{st} = (N_{scr} - \beta_m \frac{f_t \cdot A_s}{\rho_s \cdot \alpha}) \frac{I_1}{A_s \cdot Z_1} \quad (12)$$

$$\phi_{st} = \frac{M_{st} - N_{scr} \cdot Z_g}{E_s \cdot I_g} \quad (13)$$

式(12)、式(13)は、合成桁を床版と鋼桁とに分け、計算を行った結果である。また、 $\phi_{sh} (\leq 0)$ は、乾燥収縮による初期残留曲率である。

### (4) 曲げ荷重-ひずみ関係の計算 (P-ε関係)

曲げ荷重-ひずみ関係は、桁のモデル化手法によって異なる。連続桁のモデルは、図-6(b)のようなモデルを考えるが、簡易的に桁の負曲げが生じる部

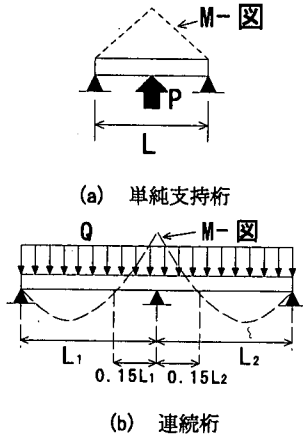


図-6 桁のモデル化

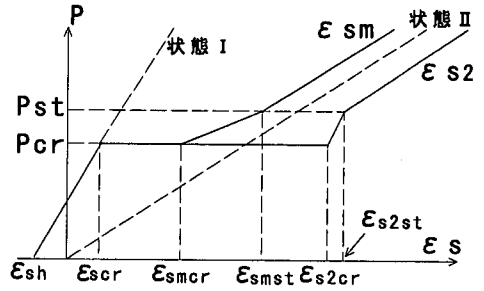
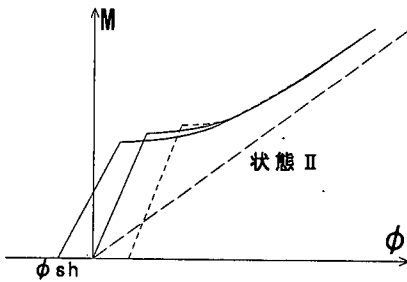
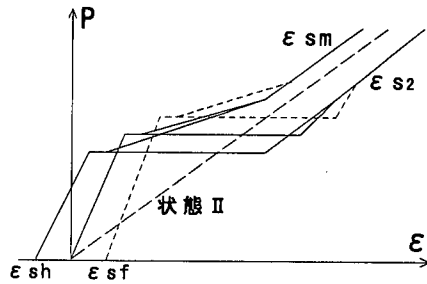


図-7 曲げ荷重-ひずみモデル



(a) 乾燥収縮の影響 (M-φ)



(b) 乾燥収縮のモデル化 (P-ε)

図-8 乾燥収縮の影響

分を取り出すという意味で、図-6(a)のモデルを取り扱うことが多く、実験についても図-6(a)のモデルで行われることが多い<sup>1),9)</sup>。

図-6(a)のモデルについてP-ε関係を示すと、図-7のようになる。ここで、 $\epsilon_{sm}$ は鉄筋のひずみの平均値、 $\epsilon_{s2}$ はひび割れ部の鉄筋の最大ひずみ値を示している。また、図-7では簡易モデル化のため $\epsilon_{smcr}$ と $\epsilon_{smst}$ を直線で結び、曲げ荷重用とした。このようなモデルにおいては、モーメントと荷重は比例関係にあるから、

$$P_{cr} = \frac{4M_{cr}}{L}, \quad P_{st} = \frac{4M_{st}}{L} \quad (14a, b)$$

また、弾性域内であることよりひび割れ発生ひずみ $\epsilon_{scr}$ は、

$$\epsilon_{scr} = \frac{M_{cr}}{E_s \cdot I_o} Z_o + \epsilon_{sh} \quad (15)$$

となる。ここに、 $\epsilon_{sh}$ は乾燥収縮の影響による原点のシフト量であり、乾燥収縮であるから圧縮ひずみ

( $\epsilon_{sh} \leq 0$ )である。乾燥収縮の影響については後述の(5)で説明する。

安定ひび割れ開始時のひび割れ部のひずみ(最大値) $\epsilon_{s2st}$ は、

$$\epsilon_{s2st} = \frac{N_{scr}}{E_s \cdot A_s} = \frac{M_{st}}{E_s \cdot I_1} Z_1 + \beta_m \frac{f_t}{\rho_s \cdot \alpha \cdot E_s} \quad (16)$$

そのときの、平均ひずみは、式(4)より、

$$\epsilon_{smst} = \epsilon_{s2st} - \beta_m \frac{f_t}{\rho_s \cdot E_s} \quad (17)$$

となる。初期ひび割れ発生時のひび割れ部のひずみ $\epsilon_{s2cr}$ は、ひび割れ部の床版内モーメントを無視できるものとして、

$$\epsilon_{s2cr} = \frac{N_{scro}}{E_s \cdot A_s} + \epsilon_{sh} \quad (18)$$

$$N_{scro} = (f_t - \sigma_{sh}) \cdot kco \cdot Ac(1 + n \cdot \rho_s) + N_{sh} \quad (19)$$

$$N_{sh} = \sigma_{sh} \cdot Ac + \epsilon_{sh} \cdot Es \cdot As \quad (20)$$

となる。式(19)は、式(8a)で示した、補正前の軸力の計算値である。したがって、本計算では初期ひび割れ発生時の床版軸力を $N_{scro}$ (式(19))、安定ひび割れ発生時の床版軸力を $N_{scr}$ (式(8b))を区別して用いることとする。また後に示す実験でも、 $\epsilon_{s2cr} \neq \epsilon_{s2st}$ となるために、曲げ挙動では、ひび割れ発生時から安定ひび割れ時までで、軸力が変化していると言え、図-4のモデル化とは実際には異なることとなる。よって、ここでも前述の補正量 $ksh$ が大きめに設定されていることが説明できる。式(18)～式(20)は、本計算手法で新たに提案する部分であり、式(20)中の $\sigma_{sh}$ 、 $\epsilon_{sh}$ は、前述のように乾燥収縮によって生じるコンクリートの引張応力と、鉄筋の圧縮ひずみである。

図-7に示されている、初期ひび割れ発生時の平均ひずみ $\epsilon_{smcr}$ は、図-2より、

$$\epsilon_{smcr} = \epsilon_{scr} + \beta(\epsilon_{s2cr} - \epsilon_{scr}) \quad (21)$$

ここに、 $\beta$ は、初期ひび割れ時の2Ls区間内における平均ひずみを表すための係数であり、実験的に $\beta \approx 0.6$ とされている<sup>6), 11)</sup>。ここで $\epsilon_{smcr}$ を用いることによって、厳密には図-5のM- $\phi$ モデルとは異なる仮定をしていることになる。しかし、実際にはM- $\phi$ 関係も図-8(a)に示すようにひび割れ発生後曲線となるはずであるが、ひび割れ計算時にはひび割れ間隔内での平均ひずみが重要となるので、より厳密に計算するために $\epsilon_{smcr}$ を用いる。

### (5) 乾燥収縮の影響

乾燥収縮によって、コンクリートの実質上の引張強度が低下することは、今までの研究でもよく知られている。しかし、ひび割れが生じた後についての影響は、あまり知られていない。Hanswilleらの研究では、乾燥収縮の影響が図-8(a)のようになることが示されている<sup>6), 7)</sup>。ここで $\phi_{sh}$ は、乾燥収縮によって生じた断面の曲率であり、その分だけ原点をシフトさせていることが分かる。また、ひび割れ発生後では、乾燥収縮の影響が小さくなり、安定ひび割れ状態では、その影響がほとんど見られなくなると言える。このことより、前に示した式(3)のコンクリート引張強度 $f_t$ において、ひび割れ発生部に乾燥収縮などによる強度の変化を考慮しなくても良いことが理解できる。設計でのモデル化では、図-8(b)に示すように仮定した。また、安定ひび割れ状態の開始点では、乾燥収縮の影響はなくなるものとしている。なお、図-8(a)、(b)に示した乾燥収縮とは反対の影響を示している点線は、後に示す比較実験で用いて

いる膨張コンクリートの影響を示すためのものである。

## 3. 実験概要

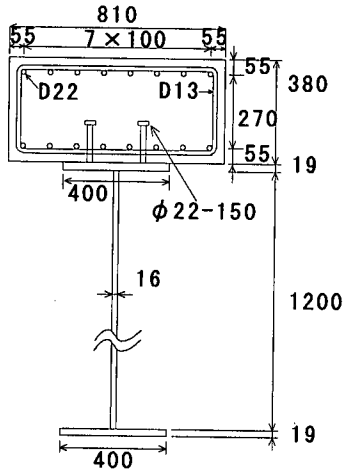
実験供試体は、図-9に示すようなI形鋼桁とコンクリート床版よりなる合成桁であり、両者の接合部にはスタッド( $\phi$  22-150, 2本配列, 250mm間隔)を用いている。コンクリート床版の鉄筋比は2%であり、鉄筋のかぶり厚は各面ともに55(mm)である。供試体の種類は、プレストレスの導入量によってA体、B体、C体の3種類を用意した。A体は、プレストレス導入のない供試体である。ただし、この供試体にも乾燥収縮を防止する分の膨張材を用いている。B体は、JISA6202に示された拘束膨張試験(鉄筋比0.954%)において、膨張率が600( $\mu$ )となる膨張コンクリートを用いている。また、C体はB体と同様な膨張コンクリートを用いた上に、桁中央部においてジャッキUP・DOWN操作を行って、B体よりも大きなプレストレスを与えた供試体である。なお、実質的なジャッキUP力<sup>10)</sup>は、コンクリート打設前で3.6(kN)となるようにしている。載荷実験は、28日間の養生後、3回の除荷を含む静的載荷により破壊まで行った(図-11)。また、各供試体ともに最大ひび割れ間隔は、スタッド間隔と等しい250(mm)(図-10)であった。これは、最大ひび割れ間隔<sup>9)</sup>とひび割れの誘発要因の1つであるスタッドの間隔が、この供試体の場合一致したためと考えられる。

各実験桁の膨張量と乾燥収縮量は、P- $\epsilon$ 関係の計算との比較のための重要な値となるので、以下に示す。

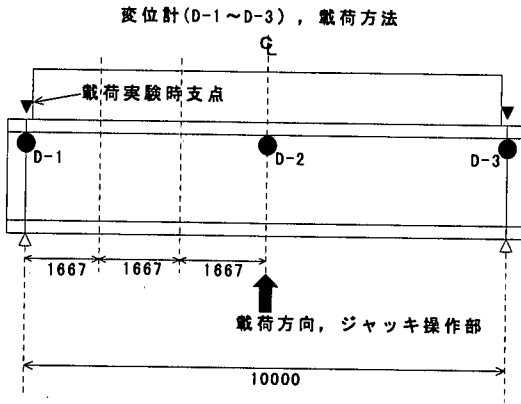
### (1) プレストレス導入量(膨張量)

実験供試体における、養生時の床版上縁でのひずみの変化量を、図-12に示す。膨張量に着目すると、B体、C体は、設計計算<sup>9)</sup>通りに300~400( $\mu$ )の膨張ひずみが確認できる。また、C体の7日目に見られるひずみの急変は、ジャッキ操作を行ったために生じている。A体についても、100( $\mu$ )の膨張が確認できたが、これは乾燥収縮防止分の膨張材の作用と考えられる。ここで、B体、C体に導入されるプレストレス量と、鉄筋・鋼桁の初期ひずみ(応力)について計算を行う。膨張コンクリートについては、鉄筋比0.954%と2%の間に、単位体積あたりの膨張エネルギーUの一定則が成り立つとする<sup>9), 10)</sup>。

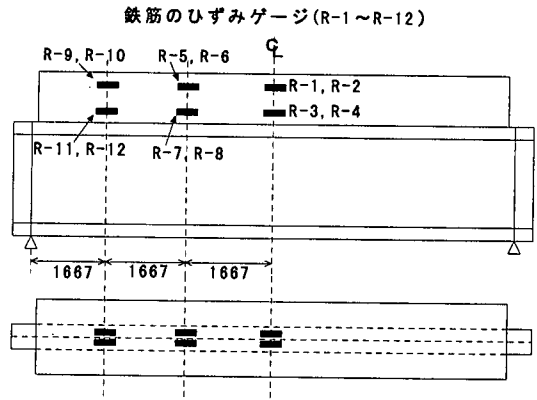
$$U = -\frac{1}{2} \sigma_{cp} \cdot \epsilon_{cp} = \frac{1}{2} \rho_s \cdot Es \cdot \epsilon_{cp}^2 \quad (22)$$



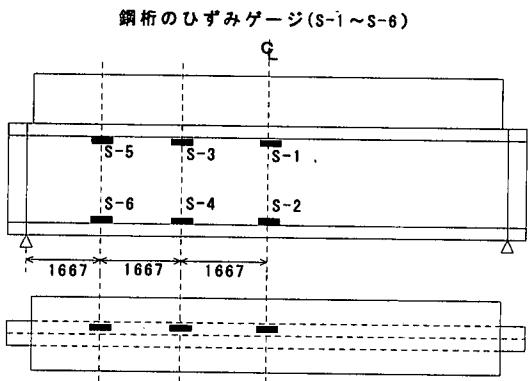
(a) 断面図, 配筋図



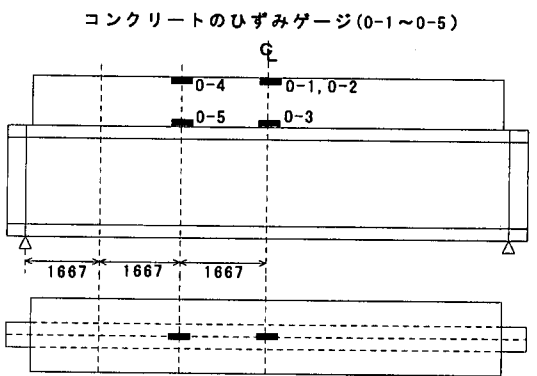
(b) 側面図, 変位計配置図



(c) 鉄筋のひずみゲージ配置図

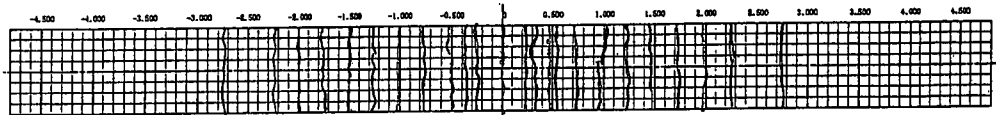


(d) 鋼筋のひずみゲージ配置図

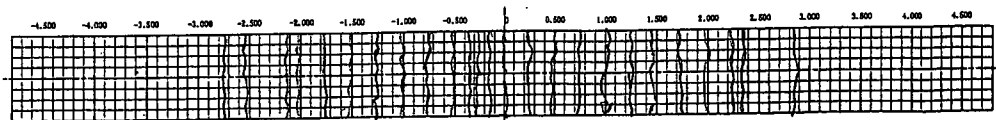


(e) コンクリートのひずみゲージ配置図

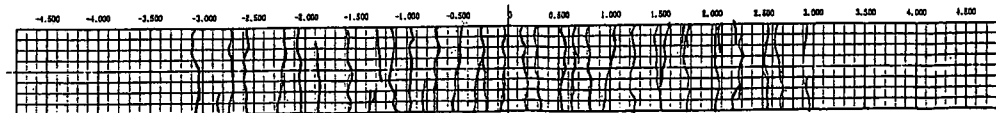
図-9 実験供試体概要 (単位:mm)



(a) A体



(b) B体



(c) C体

図-10 実験供試体の載荷実験後のひび割れ図(床版上面)

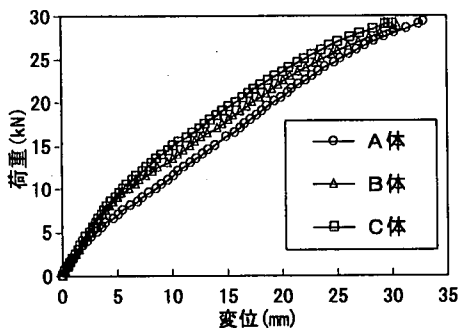


図-11 荷重-変位関係(断面a, 繰り返し部分無し.)

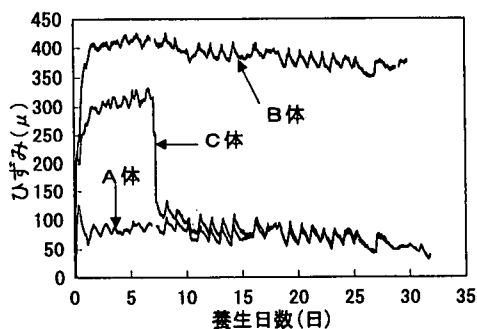


図-12 養生時の床版上縁のひずみ変化  
(引張を正とする)

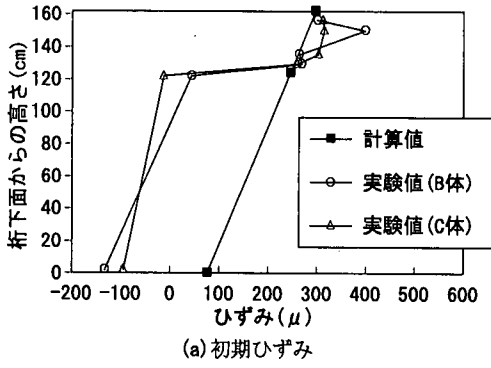
ここに、 $\sigma_{cp}$  : コンクリートの導入プレストレス ( $\leq 0$ ),

$\varepsilon_{cp}$  : コンクリートの膨張ひずみ ( $\geq 0$ ).

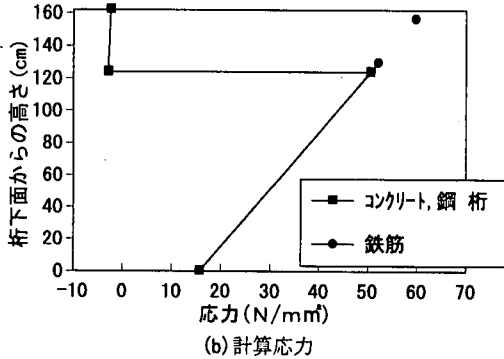
さらに、鋼桁との合成効果を考慮するために、平面保持と内力のつり合い、桁断面内のエネルギー最小条件を用いて、導入プレストレスと初期残留ひずみ(応力)を計算する。計算結果を図-13に実験値とともに示す。実験値は、B体(材令7日)とともにC体のケミカルプレストレス分(材令7日)について示した。また、ジャッキ操作によるプレストレスは、初等理論とエネルギー最小条件を用いて計算することができる。ジャッキDOWN時のひずみの変化をC体の実験値とともに図-14に示す。

図-13(a)では、床版内については計算値と実験値が一致しているものの、鋼桁部についてはずれが見られる。鋼桁部の実験結果には、用いたひずみゲージの温度補正が行われていないため、鋼桁部の実験結果の精度に問題がある。また、不完全合成桁のような挙動となっていることから考えれば、膨張性コンクリートが凝固する時に、スタッドを含めた鋼フランジとの付着が少なく、コンクリートの膨張についていかなかったとも考えられる。しかし、その場合、コンクリート中の鉄筋にもそのようなずれが見られるはずである。鉄筋のひずみに着目すると、鋼桁とは逆に引張ひずみがコンクリートのひずみ





(a) 初期ひずみ



(b) 計算応力

図-13 ケミカルプレストレスによる初期ひずみ, 応力(材令7日, 断面 a)

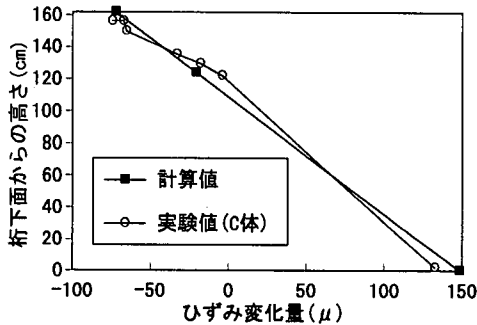


図-14 ジャッキDOWN時のひずみの変化(断面 a)

表-1 初期残留ひずみの計算予測値(引張を正とする)

	膨張ひずみ ( $\mu$ )	乾燥収縮ひずみ, ( $\mu$ )	合計 ( $\mu$ )	
A体	床版上縁	102	-52	50
	床版下縁			
	鋼桁上面	86	-43	43
	鋼桁下面	33	-17	16
B体	床版上縁	289	-52	237
	床版下縁	243	-43	200
C体	床版上縁	225	-101	124
	床版下縁	225	-86	139

より大きめとなっており、鋼桁部の挙動とは逆となっているため、実験結果のような鋼桁とのずれは考えにくい。鉄筋の引張ひずみが大きくなった理由としては、水和熱の影響が考えられる。つまり、水和熱の影響によって、鉄筋が熱膨張したままコンクリートが固化したものと見られる。したがって、水和熱によって鋼桁部や鉄筋に影響を与えると考えられるため、この点に関してはより精度の高い養生計測を行うべきである。今回の計算では、鋼桁部での直線の傾き(曲率)は一致しているため、計算値の結果を用いるものとした。図-13(b)は、応力の計算値を示している。なおB体のコンクリートに作用しているプレストレスは、計算では $-2.4(N/mm^2)$ (上面) $\sim -2.8(N/mm^2)$ (下面)である。図-14では、計算値と実験値は、ほぼ一致していると言える。この結果から、C体の合計プレストレスは、 $-4.5(N/mm^2)$ (上面) $\sim -3.4(N/mm^2)$ (下面)と推定できる。

## (2) 乾燥収縮量

乾燥収縮ひずみについては、膨張コンクリートの正負反対の挙動としてとらえることができると仮定した。したがって、前述の膨張コンクリートの計算手法を利用して推測できる。ただし、収縮エネルギーについては、図-12の床版上縁でのひずみ収縮量の実験値より推測計算し、また、B体、C体に生じるクリープは、養生日数が少ないため無視できるものとした。各供試体の載荷実験直前の、膨張ひずみと乾燥収縮ひずみの計算値を表-1に示す。ここで乾燥収縮量は、図-12の養生時のひずみの減少量より桁全体のひずみ変化を計算した。

## 4. 実験値と計算結果との比較

上記実験と、計算より求めた荷重ひずみ関係とを比較検討する。実験供試体と計算モデルとでは、床版内の鉄筋の配列が、2段と1段で異なるが、実験供試体の鉄筋を床版中央で1列配置として換算しても、実際の供試体と、断面二次モーメント、中立軸の位置がほとんど違いがないことから、本計算モデルで計算可能であると考えた。ただし、床版中の鉄筋のひずみを計算する際に、初期ひび割れ発生時には、鉄筋のひずみ  $\epsilon_{scr}$ 、 $\epsilon_{scr}$  に  $R_1$ 、 $R_2$  を乗じるとして換算した。

$$R_1 = \frac{Z_1 + hc/2 - c}{Z_1}, \quad R_2 = \frac{Z_1 - hc/2 + c}{Z_1} \quad (23a, b)$$

ここに、 $R_1$ は上側の鉄筋を換算する場合の係数で、 $R_2$ は下側の鉄筋を換算する係数、またcは床版の

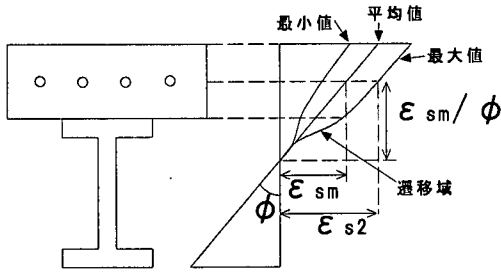


図-15 断面内の最大ひずみと平均ひずみ

上下面に対する鉄筋のかぶりである。この $R_1, R_2$ は、日野ら研究<sup>12)</sup>と同様な考え方である。安定ひび割れ状態では、図-15に示すような中立軸を、安定ひび割れ状態開始点について、曲率と平均ひび割れを用いて計算し、鉄筋の位置での最大、平均ひずみを計算するものとした。

膨潤や膨張コンクリートの挙動に関しては、辻らの研究<sup>14), 15)</sup>より、図-8(a)の点線で示したように乾燥収縮の正負反対の挙動になることが、実験的に証明されているため、荷重一ひずみに関しても収縮の逆側に原点をシフトさせることにした。シフトの影響を考慮するのは、 $\epsilon_{scr}, \epsilon_{s2cr}$ とした。

B体・C体のケミカルプレストレスの考慮方法は、基本的には、式(8a)、式(10)中の乾燥収縮による応力 $\sigma_{sh}(\geq 0)$ を、プレストレス力 $\sigma_{cp}(\leq 0)$ に置き換えて計算するが、式(8b)については、プレストレスのない場合での実験的に仮定された式であり、前述の通り式(8a)とも異なる意味を持つので、用いることができないと考えられ、

$$N_{scr} = (f_t - \sigma_{cp}) \cdot kc' \cdot Ac \cdot (1 + n \cdot \rho_s) \quad (24)$$

とした。ここに、 $kc'$ はコンクリートの見かけ上の強度上昇によって、 $(M_{st}/M_{cr})$ が大きくなることによる補正量の修正を行ったもので、

$$kc' = kco + ksh', \quad ksh' = 0.15 \quad (25a, b)$$

とした。 $Ksh'$ は、 $ksh$ と同様、実験結果より推定した値である。また初期ひび割れ時の挙動については、次の式が得られる。

$$\epsilon_{s2cr} = \frac{N_{scr}}{E_s \cdot A_s} + \epsilon_{sf} \quad (26)$$

$$N_{scr} = (f_t - \sigma_{sh} - \sigma_{cp}) \cdot kco \cdot Ac(1 + n \cdot \rho_s) + N_{sh} + N_{cp} \quad (27)$$

$$N_{cp} = \sigma_{cp} \cdot Ac + \epsilon_{cp} \cdot E_s \cdot A_s \quad (28)$$

ここに、 $\epsilon_{sf}$ : 膨張コンクリートを考慮するための原点のシフト量に相当するひずみ ( $\epsilon_{sf} \geq 0$ , 図-8)。

各供試体の、荷重一ひずみ関係の実験値と計算値の比較を、図-16~図-18に示す。実験値は、鉄筋の降

伏する前までを目安に、 $P=20$ (kN)までを、除荷部再載荷部を除いて示した。各図凡例の実験値①・②は、同断面、同一高さでの異なる鉄筋の位置でのひずみを示している。本計算値は、式(14)~式(21)を用いた( $\beta_m=0.4, \beta=0.6$ )。また、A体については、文献6)により計算された最大値も示した。他のB体、C体については、 $ksh$ の設定などの点から、文献6)の計算手法の適用外であるため、示していない。

図-16(A体)では、(a)、(d)で良い一致が見られる。(b)の下側鉄筋では、図-15に示すように、最大ひずみ $\epsilon_{s2}$ が鋼桁部に移るにつれ、平均ひずみ $\epsilon_{sm}$ に近づいていくような遷移域にあたるため、実験値は、 $\epsilon_{s2}$ と $\epsilon_{sm}$ との間に位置している。(c)の鋼桁上フランジにおいても同様な理由で、平均ひずみよりもやや大きくなる傾向を示している。文献6)による手法との比較では、本計算手法のように $N_{scro}$ を考慮して、 $\epsilon_{s2cr}$ を用いた方が実験結果と近い傾向が示せることが分かる。ここで、図-16の $\epsilon_{sm}$ は、図-7の $\epsilon_{smcr}$ とは位置が異なるため、 $\epsilon_{smcr} - \epsilon_{smst}$ 間の傾きが図-7と異なる傾向を示しているが、これはA体には乾燥収縮分の原点のシフトがほとんどないと仮定しているためである。図-17(B体)でも、A体と似たような挙動となっている。図-17(b)においても、図-16(b)と同様な傾向が見られ、理由も同様であると考えられる。図-18(C体)は、A体、B体とは異なり、ひび割れ発生でのひずみの飛び移りが小さく、また、ひび割れ発生時 $\epsilon_{scr}$ 付近も荷重一ひずみ関係が丸みをおびている。これは、C体においては、ひび割れ位置が断面aから多少ずれてしまった可能性も考えられるが、鋼桁の上フランジがジャッキ操作の曲げによって引張力が導入され、緊張材として機能したためと思われる。EUROCODE 4でも、緊張材を用いた場合の鉄筋の応力の計算式が、本研究で示した式とは別に設定されているが、C体の場合、緊張材として働くスタッド付き鋼フランジの付着強度係数の挙動がEUROCODE 4の設定とは大きく異なると考えられ、現段階での計算は困難であり、スタッドを用いた鋼板についての付着強度係数の研究が必要である。

今回の3種すべての供試体において、 $\epsilon_{s2cr} < \epsilon_{s2st}$ となったが、これはすなわち $N_{scro}$ と $N_{scr}$ の差を示すから、式(8a)と式(8b)との比較で述べた $ksh$ の設定に関する数値例となると言える。

## 5. ひび割れ幅の検討

ひび割れ幅については、先述のように、ひび割れ間隔と鉄筋のひずみを掛け合わせて求める。

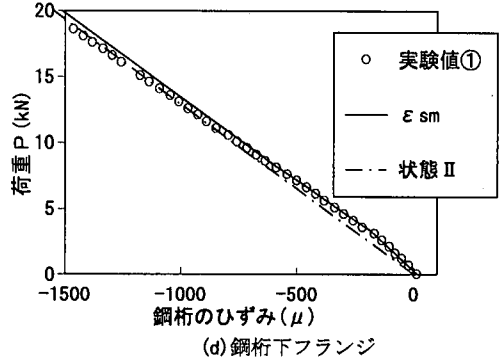
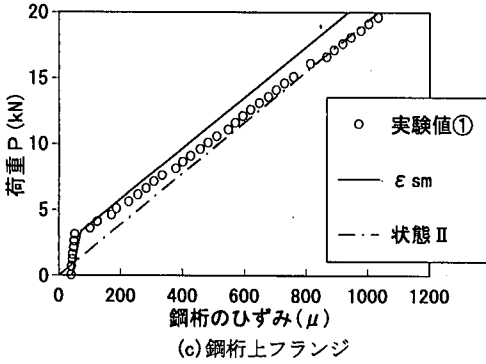
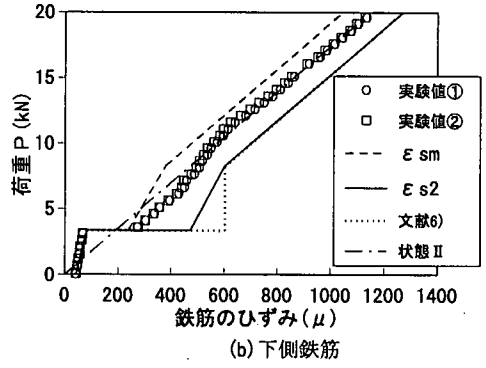
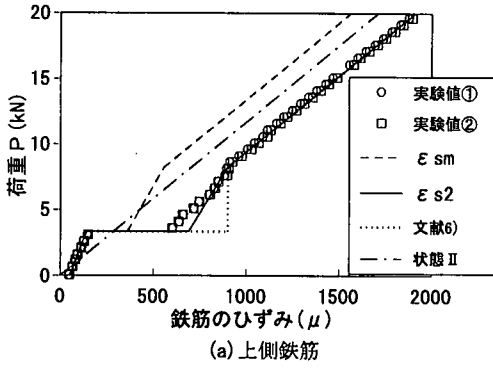


図-16 A体断面aの荷重-ひずみ関係

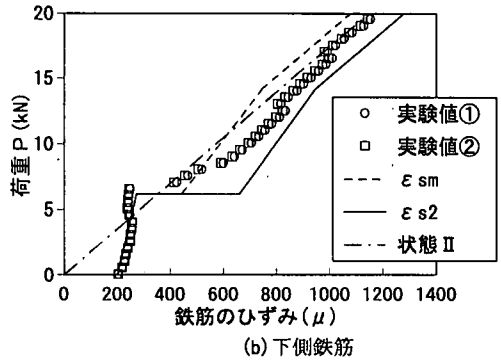
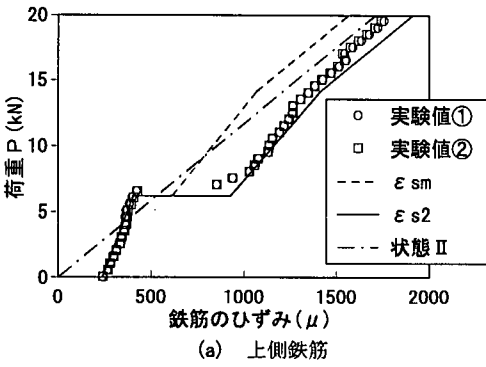


図-17 B体断面aの荷重-ひずみ関係

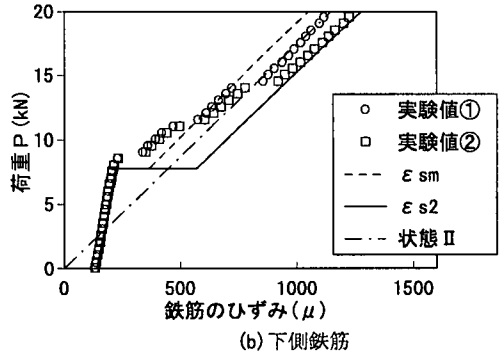
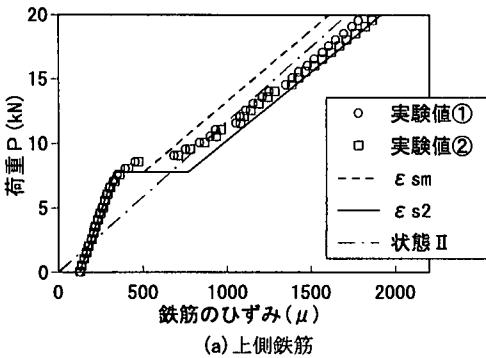


図-18 C体断面aの荷重-ひずみ関係

ひび割れ間隔には角田らの式、鉄筋のひずみ $\epsilon_s$ については前項のEUROCODE 4を改良した手法を用いる。よって、ひび割れ幅 $w$ は、以下の式とした。

$$w = LcrMAX \cdot (\epsilon_s - \epsilon_{csd} - \epsilon_{cp}) \quad (29)$$

$$LcrMAX = k(4c + 0.7(Cs - ds)) \quad (30)$$

ここに、 $LcrMAX$ ：最大ひび割れ間隔、

$\epsilon_s$ ：鉄筋のひずみ( $\epsilon_{s2}$ または $\epsilon_{sm}$ )、

$\epsilon_{csd}$ ：補正量(通常の場合 $-150\mu$ (圧縮)、今回の計算では実験値とした。)、

$\epsilon_{cp}$ ：ケミカルプレストレスによるひずみ、

$k$ ：付着による係数(異形鉄筋の時1.0)、

$c$ ：鉄筋のかぶり、

$Cs$ ：鉄筋間隔、

$ds$ ：鉄筋径。

EUROCODE 4では、式(29)でコンクリートの平均ひずみがさらに引かれるが、ここではこれを微小と考慮無視した。

今回の実験供試体において最大ひび割れ間隔を計算すると、 $LcrMAX=274$ (mm)となり、実測値とほぼ一致した。上式では、膨張コンクリートを考慮するために、 $\epsilon_{cp}$ を追加している点が通常と異なり、各 $\epsilon_{cp}$ の値は、表-1の値と同等である。実験値との比較を図-19に示す。この図では、鉄筋のひずみについては上側鉄筋の平均値 $\epsilon_{sm}$ と最大値 $\epsilon_{s2}$ の両方について計算し、付着を表す定数 $\beta$ 、 $\beta_m$ については、先述の通り $\beta=0.6$ 、 $\beta_m=0.4$ を用いた。各図について、鉄筋のひずみに状態IIのひずみを用いたものも示したが、これについても各供試体の $\epsilon_{csd}$ 、 $\epsilon_{cp}$ を考慮したために、この直線は必ずしも原点を通らない。

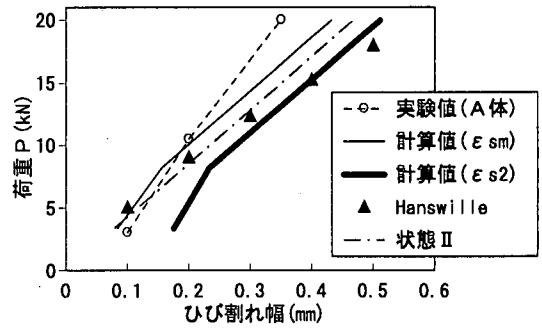
A体については、Hanswilleらの提案している手法(EUROCODE 4)も合わせて示した。Hanswilleらの手法では、文献6)に示されている以下の式(31)と式(2)を用いる。

$$w = \frac{\sigma_s \cdot ds (1 - \beta)}{2\tau_{sm} (1 + n\rho_s)} \left( \frac{\sigma_s}{E_s} - \epsilon_{cs,eff} \right) \quad (31)$$

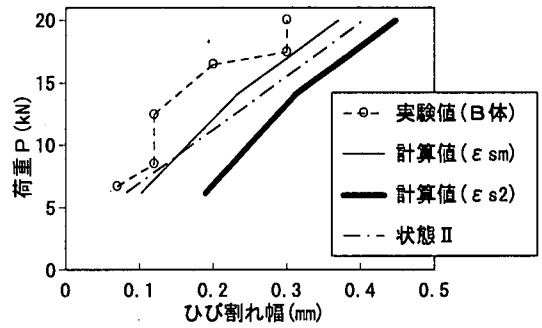
ここに、 $w$ ：ひび割れ幅、

$\epsilon_{cs,eff}$ ：有効乾燥収縮ひずみ。

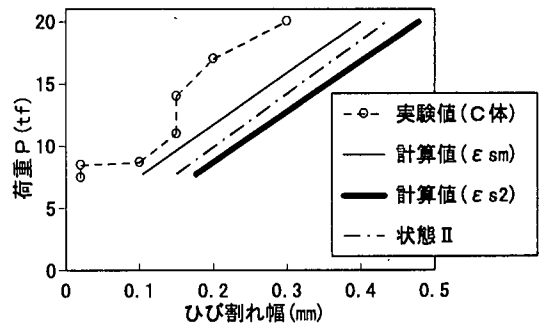
また、式(2)の付着に関するパラメータについては、文献6)と同様に計算し、 $e=0.3(f_{ck}+8)$ 、 $\delta=0.3$ 、 $b=2.0$ 、 $\beta=0.6$ とした。ここに $f_{ck}$ はコンクリートの圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)である。今回の計算では、あるひび割れ幅 $w$ における鉄筋径 $ds$ と鉄筋の応力 $\sigma_s$ の関係曲線(図-21(b))と、式(16)にヤング係数乗じ応力化し、また、モーメントを荷重との関数に置き換えたものを使用した。図-21と同様な図は、文献6)にも示されている。図-19(a)、(b)、(c)によると、初期ひび割れ時ではひび割れ幅が平均値 $\epsilon_{sm}$ を用いたものとほぼ一致した。しかし、安定ひび割れに



(a) A体



(b) B体



(c) C体

図-19 ひび割れ幅の比較(断面a)

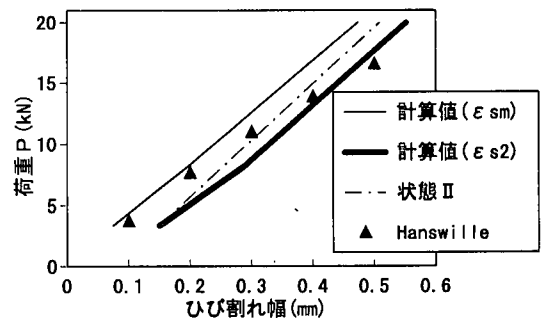


図-20 各理論における長期材令時のひび割れ幅の予測値(A体、断面a)

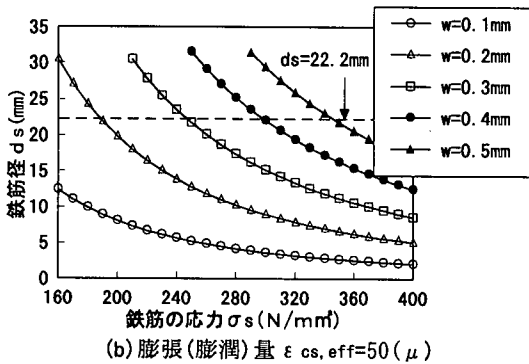
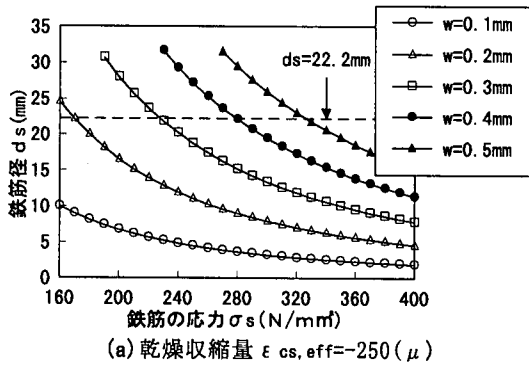


図-21 EUROCODE 4 の  $d_s - \sigma_s$  関係曲線<sup>6)</sup> ( $\rho_s = 0.02$ )

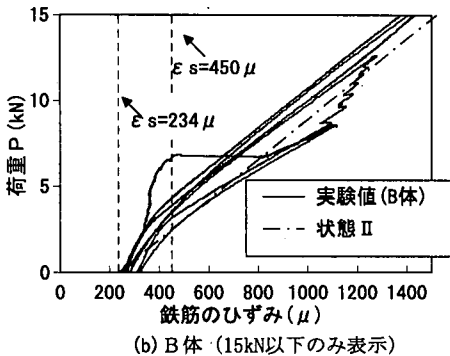
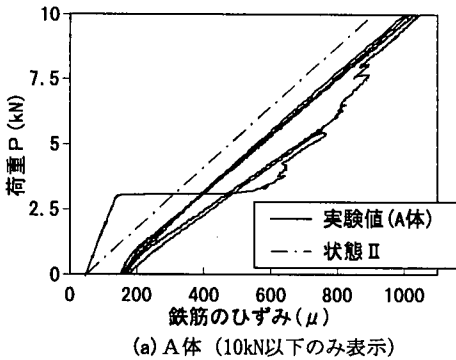


図-22 除荷、再載荷を含めた荷重-ひずみ関係

違すると、ひび割れ幅は、予想した計算値のどれよりも小さくなるのが分かる。また、Hanswilleらの手法に着目すると、初期ひび割れ時には本計算手法において平均値を用いた方に、安定ひび割れ時には最大値を用いた方と近い値を示している。よって、全く着目点の異なる二手法は、通常用いる一般断面においては、ほぼ近い値となるように設定されていることが推測できる。

図-20には、長期材令時の乾燥収縮を想定した場合の、ひび割れ幅の計算値を示した。本計算手法では  $\epsilon_{csd} = -150 (\mu)$ 、Hanswilleらの手法では乾燥収縮を示す補正量  $\epsilon_{cs,eff} = -250 (\mu)$  (図-21(a))を用いて計算したが、両手法の計算結果の関係は、図-19(a)とあまり変化がない。しかし、本計算手法に着目すると、初期ひび割れ時にひび割れ幅が大きくなる傾向が見られないことが分かる。これは、荷重-ひずみ関係の計算で、乾燥収縮分の原点を負の方向に乾燥収縮分 ( $150 (\mu)$ ) シフトさせているために、初期ひび割れ時の  $\epsilon_{smcr}$  と  $\epsilon_{s2cr}$  が、見かけ上大きくならないことより生じている。Hanswilleらの手法では、初期ひび割れ時の鉄筋のひずみ  $\epsilon_{smcr}$ 、 $\epsilon_{s2cr}$  は計算せずに、安定ひび割れ時の鉄筋のひずみ関係(式(14))を初期ひび割れを含めたひび割れ発生後に用いている。長期材令時に限定すれば、その手法も妥当であることがこのことより理解できる。

繰り返し載荷時の供試体の挙動を図-21に示す。A体、B体より、初期ひび割れ後に載荷を繰り返すと、鉄筋の付着力の低下から、ひび割れ部のひずみの極大値を平均化し、安定ひび割れ状態の発現を早める効果があるのではないかとと思われる。したがって、繰り返し載荷状態では、低い荷重レベルにおいても安定ひび割れ状態が生じると推測できる。B体に着目すると、除荷時の  $450 (\mu)$  付近で初期剛性に戻っていることから、ここですでにひび割れが閉じていることが分かる。したがって、式(29)の  $\epsilon_{cp}$  で予測したひび割れの閉合効果より、実際は大きな効果が得られたと言える。これは、膨張コンクリートの鉄筋等による拘束が解放されることにより、瞬間的な膨張<sup>16)</sup>が生じたためである。しかし、繰り返し時にその値が小さくなるような傾向が見られるため、回数の多い載荷では、この効果が小さくなるものと考えられる。

多回数の繰り返し載荷時の挙動においては、一般にひび割れ幅が大きくなることが報告されているため<sup>4)</sup>、今後この計算手法での適用例、特に付着係数  $\beta$ 、 $\beta_m$  についての検討が待たれる。

## 6. まとめ

本研究は、EUROCODE 4における荷重一ひずみ関係算定方法を改良し、日本で用いられてきた最大ひび割れ間隔の算定式と融合させることにより、より実験結果と適合する、分かりやすいひび割れ制御を行う手法を示したものである。EUROCODE 4を改良した点とは、Nscrに加えてNscroを考慮する点と、ケミカルプレストレス供試体を用いた場合の乾燥収縮補正量 $ksh'$ の設定方法である。

得られた結果を以下にまとめる。

- a) EUROCODE 4を修正した本計算手法により、負曲げを受ける単純支持桁の荷重一ひずみ関係を、高精度でかつ簡易に予測することができた。
- b) 本研究で用いた部分のEUROCODE 4は、プレストレスをしない合成桁についての設計計算法であるが、ケミカルプレストレスを用いた合成桁の計算にも、拡張して利用できる。
- c) 初期ひびわれ状態において、ひび割れ幅は、最大ひび割れ間隔と鉄筋の平均ひずみとの積とほぼ一致し、最大ひずみとの積よりは小さい。
- d) 安定ひび割れ状態では、ひび割れ幅が、最大ひび割れ間隔と平均ひずみの積よりも小さくなる。これは、最大ひび割れ間隔が新たなひび割れで、消滅したためと考えられる。
- e) ケミカルプレストレスは、膨張が確保されている状態ではひび割れ幅を狭くする効果があると言える。ただし、繰り返し載荷によっては、短い期間でもその効果が小さくなる可能性がある。

本研究の検討課題としては、多サイクルでの繰り返し載荷時のより詳しいひび割れ挙動の予測についてと、EUROCODE 4のジャッキ操作によるプレストレスを導入した合成桁への適用方法の研究である。

謝辞：本研究の実施にあたって、多大なる協力を頂いた、駒井鉄工（株）の細見雅生氏と岡田幸治氏に、深く謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 三輪寛, 依田照彦, 熊谷洋司, 相場充: 軸方向にプレストレスされた床版を有する連続合成桁中間支点部の挙動に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.584/ I -42, pp.255-265, 1998.
- 2) 中島章典, 植木雅雄, 土岐浩之, 斉木功, 平正和: 負曲げ領域を鋼床版とした連続合成桁の力学性状に関する実験的研究, 第4回複合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, pp.87-92, 1999.
- 3) 橋善雄, 向山寿考, 湊勝比古: プレストレスしない連続合成桁の静的実験, 土木学会誌, 53-10, pp.55-61, 1968.
- 4) 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.1-9, 1970.
- 5) 土木学会コンクリート委員会編: コンクリート標準示方書, 設計編, 1996.
- 6) Hanswille, G.: Cracking of concrete mechanical models of the design rules in EUROCODE4, *Conf.Report, Composite construction in Steel and Concrete III, ASCE*, pp.420-433, 1997.
- 7) Roik, K., Hanswille, G.(著), 伊藤紘一, 平城弘一(訳): 合成桁におけるひび割れ幅の制限, 橋梁と基礎, 93-2, pp.33-40, 1993.
- 8) 中菌明広, 稲葉尚文: P C床版鋼連続合成2主桁橋の設計, エステック, No.54, Vol.14, (財)高速道路技術センター, pp.39-41, 2000.
- 9) 岡田幸治, 細見雅生, 依田照彦, 佐久間隆司: 連続合成桁へのケミカルプレストレスの適用, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.1673-1682, 2000.
- 10) 谷口望, 依田照彦, 岡田幸治, 細見雅生: ケミカルプレストレスを用いた合成桁に関する基礎的研究, 土木学会年次講演会概要集, cs-3, 2000.
- 11) CEB: CEB-FIP MODEL CODE 1990, *Bulletin D'Information, N.213/214*, 1993.
- 12) 日野伸一, 山田岳史, 太田俊昭, 太田貞次: 鋼・コンクリート連続合成床版の中間支点部でのひび割れ特性, 土木学会論文集, No.612/ I -46, pp.153-163, 1999.
- 13) 前川宏一, 土屋智史, 福浦尚之: 鉄筋コンクリートの非線形解析の現況と耐震性能照査法の構築に向けた今後の取り組み, 第2回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集, pp.1-16, 1998.
- 14) 岡村甫, 辻幸和: ケミカルプレストレスを導入したコンクリート部材の力学的特性, 土木学会論文報告集, 第225号, pp.101-108, 1974.
- 15) 辻幸和: コンクリートにおけるケミカルプレストレスの利用に関する基礎研究, 土木学会論文報告集, 第235号, pp.111-124, 1975.
- 16) 岡田清, 平沢征夫, 陳哲光: 膨張セメントコンクリートのセルフプレストレスおよびクリープに関する一実験, 土木学会論文報告集, 第223号, pp.65-71, 1974.

(2000.6.7 受付)

# STUDY ON A CRACK FORMATION FOR COMPOSITE GIRDERS WITH NEGATIVE BENDING

Nozomu TANIGUCHI and Teruhiko YODA

The continuous composite girders are mainly used for bridges. Cracking of concrete slab plays an important role near the intermediate supports where the negative bending moment occurs. Crack width is calculated by using strain of reinforcement and crack interval. In EUROCODE 4, the shaft tension model is developed for the analysis of negative bending behavior, and the crack width is calculated from the model. In this study, a new calculation technique for the estimation of crack width is proposed with the help of crack interval given by Japanese specification and strain of reinforcement determined by EC 4. The proposed technique is validated by comparison with experiments of girders with the negative bending moment.