

## P I C 版 R C 部材の力学的性状と 高耐久性埋設型枠の設置間隔に関する研究

BEHAVIOUR OF RC BEAMS WITH PIC PANELS AND ARRANGEMENT OF PIC PANELS WITH BUTT JOINTS

松田 浩\* 鶴田 健\*\* 出光 隆\*\*\* 崎山 毅\*\*\*\*

By H. Matsuda, K. Tsuruta, T. Idemitsu, and T. Sakiyama

Polymer Impregnated Concrete (PIC) panels are durable. Formworks of concrete structures can be deleted by using PIC panel as embedded forms. In addition, the panels act as a part of the structure section. However, when PIC panels are used as embedded forms, butt-joints are necessary. PIC panels should be so arranged that crack appear only in joints at frequent or quasipermanent live load level.

In this paper, experimental studies were carried out and crack analysis of PIC panels of composite RC beams is presented.

### 1. まえがき

近年、コンクリート工事のプレキャスト化、ひびわれ防止、高耐食性化、コンクリートの被覆・補修材料、などに注目が注がれている<sup>1,2</sup>。そもそも、コンクリート系材料の大きな欠点は、引張りに弱く、変形能力に欠けるために、乾燥収縮や硬化熱等によってひびわれが生じ易いことである。また、製造上避けられない内部空隙の存在により、水密性を損ない、雨水や海水の浸透、あるいは、炭酸ガスの浸入によって、コンクリート内部の鋼材の腐食、コンクリート自体の中性化等を促し、コンクリート構造物全体の耐久性を低下させる結果となる。とくに最近では、塩害によるコンクリート構造物の早期劣化が大きな問題となっており、また、硫酸塩土壌や酸性河川、温泉水などによるコンクリート構造物の劣化の被害も発生していることなどから、コンクリートの耐久性向上技術の開発が強く要求されるようになった。

ポリマー含浸コンクリート (Polymer Impregnated Concrete: 以下 P I C) は、コンクリート構造物の耐久性向上技術として期待され、これまで、現場で構造物の表層にポリマーを含浸する工法を主体とした研究が数多くなされてきた。しかしながら、経済性や安全性、さらには、目標とする品質を確実に得ることの困

- 
- \* 工博 長崎大学助教授      工学部構造工学科      (〒852 長崎市文教町1-14)
  - \*\* 工修 小沢コンクリート工業㈱ 技術研究所 副部長      (〒168 東京都杉並区上高井戸1-7-16)
  - \*\*\* 工博 九州工業大学助教授 工学部設計生産工学科建設工学教室 (〒804 北九州市戸畑区仙水町1)
  - \*\*\*\* 工博 長崎大学教授      工学部構造工学科      (〒852 長崎市文教町1-14)

難さ等の理由により、実構造物への適用はほとんどなされていなかった<sup>2)</sup>。

以上の状況に鑑み、海洋コンクリート構造物の塩害防止と併せて工期短縮・省力化を目的として、P I C やレジンコンクリートなどのポリマーコンクリートパネル<sup>3)4)</sup>あるいはガラス繊維補強セメント<sup>5)</sup>を高耐久性埋設型枠として用いる工法が考案されている。P I C で製作された高耐久性埋設型枠材(P I C 版)は、図-1に示すように板厚15mm~40mm程度のP I C の板を用いており、コンクリート構造物に高耐久性を付与するための埋設型枠である。P I C 版は、コンクリートの微細な空隙までポリマーで含浸されているため、遮塩・遮水性、耐凍害性、耐摩耗性、化学抵抗性に優れており、さらに、表面を粗面処理していることから、現場打ちコンクリートとの付着性にも優れており、コンクリート構造物の有効断面として考慮できる特長を有していることは、今までの研究でも十分に確認されている<sup>6)-8)</sup>。したがって、上記の被害からコンクリート構造物を防護し、かつ、その耐久性を向上させるために、構造物の表層部に、腐食因子に対する遮蔽能力に優れ、また、物理的強度にも優れたP I C を配置することは、非常に有効な手段であると考えられる。

このような特長をもつP I C 版を梁、スラブなどの鉄筋コンクリート(RC)部材として曲げ引張側に使用する場合、その表面を単にP I C 版で覆っただけではP I C 版自身にひびわれ発生の可能性があり、完全な防食効果を期待することはできない。図-2に示すようにP I C 版の適切な箇所にジョイントを設け、弾性シーリング材によって接合し、その部分をひびわれ誘導目地とすれば、ひびわれコントロール設計ができるものと考えられる。使用限界状態においてRC部材に許容される曲げひびわれは、発生間隔が比較的大きくなると考えられ、このひびわれ発生間隔に合わせてP I C 版のジョイントを設置すれば、このジョイント部にひびわれを発生させることが可能となる。さらに、ジョイントの接合材にシリコン樹脂などの弾性シーリング材を使用すれば、使用限界状態においてひびわれが発生してもジョイント部の遮水性は確保され、防食性能の低下を少なくできる。

P I C 版の設置間隔は、C E B - F I P などの最大ひびわれ間隔算定式により求め、それに合わせてジョイント位置を決定すれば良いのだが、施工性を考慮すると、P I C 版にひびわれが入らない範囲でジョイント数を少なくする方が望ましい。本研究は、数値解析を行って、P I C 版を梁、スラブなどのRC部材に使用する場合の最適ジョイント位置を決定することを目的としたものである。実験では、P I C 版をジョイント間隔を45cmならびに60cmに配置して行い、ジョイント間隔を60cmとするとP I C 版自体にひびわれ発生が認められた。数値解析では、ジョイント間隔を40cm~60cm間隔として計算を実行した。数値解析結果より、ジョイント間隔を大きくすると、P I C 自身にひびわれ発生が生ずるようなシミュレート結果が得られたので、以下に実験結果ならびに数値解析結果を報告する。

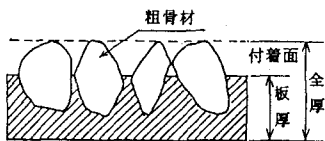


図-1 P I C 版の形状

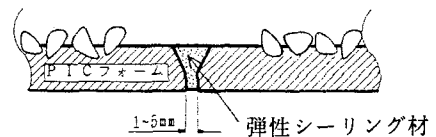


図-2 弾性シーリング材によるジョイントの接合

## 2. 曲げ荷重試験

P I C 版を用いたRC梁が曲げ荷重を受けたとき、P I C 版と現場打ちコンクリート部分が一体として、すなわち、有効断面として機能することを確認するために、曲げ荷重試験を行った。

### 2. 1 試験体

荷重実験で用いた試験体は図-3に示すとおりで、P I C 版を所定の目地間隔で圧縮側、あるいは引張り

側にそれぞれ配置した試験体と、比較のためにP I C版を配置しない試験体の計3体を作製した。試験体の諸元を表-1に示す。

鉄筋はSD-35を使用し、打設コンクリートはスランプ8±1cm、設計基準強度240kgf/cm<sup>2</sup>を使用した。また、P I C版の目地部の接着材は、圧縮側にはエポキシ樹脂、引張り側には弾性シーリング材（シリコン樹脂）を使用した。なお、試験体の配合を表-2に、また、実験時における各部材の強度を表-3に示す。

2.2 荷重方法

曲げ荷重試験は、荷重スパン4mとし、せん断スパン比2.7、スパン中央において曲げモーメントスパン0.8mの2点荷重で行い、P I C版およびR C合成梁の挙動を測定した。荷重条件は、鉄筋応力1800kgf/cm<sup>2</sup>（荷重荷重13tf）まで荷重後、除荷し、その後破壊まで荷重した。

実験に際しては、R Cはり試験体の曲げ挙動（たわみ、維ひずみ）、ひびわれ発生荷重および破壊荷重を測定し、また、破壊性状（ひびわれ）の観察を行った。

表-1 試験体の諸元

| 項 目             | 諸 元                                   |
|-----------------|---------------------------------------|
| 主鉄筋のかぶり         | 57mm                                  |
| P I Cフォームの配置方法  | 図-3 参照                                |
| P I Cフォームの厚さ    | 25mm（37リット板17mm、付着部8mm）               |
| コンクリートの打設方向     | P I Cフォームの付着面に向かって打設                  |
| 鉄筋量             | 0.7%                                  |
| 試験体の断面形状        | h=60cm、b=30cm、矩形断面                    |
| 載荷スパン           | 400cm、試験体全長450cm                      |
| 荷重条件            | 静荷重                                   |
| P I Cフォームに作用する力 | 引張り応力および圧縮応力                          |
| P I Cフォームの目地間隔  | 圧縮側：60cmならびに90cm<br>引張り側：45cmならびに60cm |
| 試験体数            | 3体                                    |
| （内訳） ケース 1      | P I Cフォームの配置なし（比較用試験体）                |
| ケース 2           | P I Cフォームの配置（はりの圧縮側）                  |
| ケース 3           | P I Cフォームの配置（はりの引張り側）                 |

表-2 試験体の配合

| 材料種別     | Gmax<br>(mm) | 使用<br>セメント | 水セメント比<br>W/C (%) | 単位体積重量<br>C (kg/m <sup>3</sup> ) | 空気含有率<br>(%) |
|----------|--------------|------------|-------------------|----------------------------------|--------------|
| P I C7-4 | 10           | 早 強        | 38                | 500                              | 5.2          |
| 打設コンクリート | 10           | 早 強        | 53                | 298                              | —            |

表-3 各部材の試験時の強度

| 材料種別     | 材令<br>(日) | 養生条件  | 圧縮強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 曲げ強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 弾性係数<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) |
|----------|-----------|-------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| P I C版   | 30        | 蒸気養生* | 1802                           | 337                            | 4.0×10 <sup>5</sup>            |
| 打設コンクリート | 14        | 湿 潤   | 332                            | 52                             | 2.4×10 <sup>5</sup>            |

\* P I C版は蒸気養生後、含浸処理

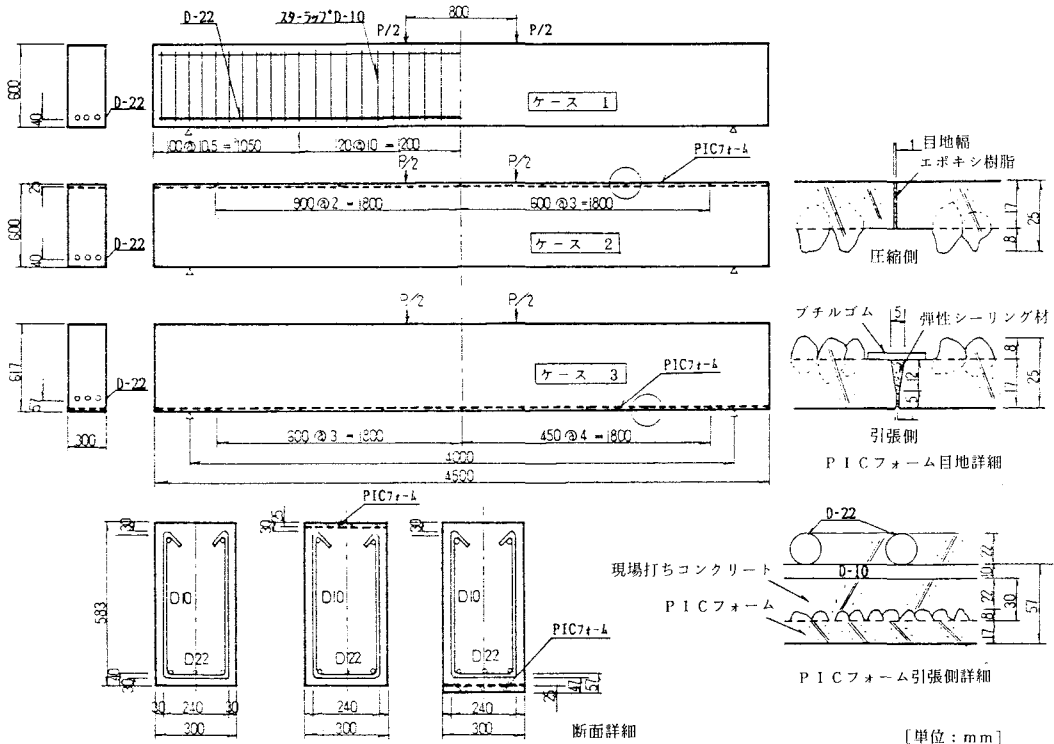


図-3 試験体形状

### 3. 実験結果および考察

表-4 に曲げ載荷試験結果を示し、図-4 にはり中央部のたわみと荷重の関係を示す。これらの結果より P I C 版を配置することによる曲げ耐力の低下は認められないことがわかる。また、図-5 にひびわれ分布を示すが構造上有害となるようなひびわれは見られなかった。なお、ケース3 では試験体の引張り側に 45 cm 間隔、および 60 cm 間隔に P I C 版を配置して実験を行ったが、60 cm 間隔では P I C 自身にひびわれが発生した。

試験体中央部の縦ひずみ分布と荷重の関係を図-6 に示す。P I C 版を圧縮側に配置した試験体においてもひずみ分布は終局に至るまではほぼ直線を保っているが、P I C 版を配置していない試験体に比べ中立軸位置は 2 割程度上縁側に移動し、曲げ破壊耐力も増加している。これは P I C 版自体の圧縮強度が大きいことによるものと考えられる。

表-4 R C 梁の曲げ載荷試験結果

| ケース<br>NO. | P I C フォーム<br>の位置 | ひびわれ<br>発生荷重<br>(ton) | 曲げ破壊<br>荷重<br>(ton) | P I C フォーム<br>ひびわれ発生荷重<br>(ton) |
|------------|-------------------|-----------------------|---------------------|---------------------------------|
| 1          | —                 | 8.5                   | 37.1                | —                               |
| 2          | 圧縮応力側             | 9.6                   | 42.9                | 42.2                            |
| 3          | 引張り応力側            | 8.0                   | 37.7                | 19.0                            |

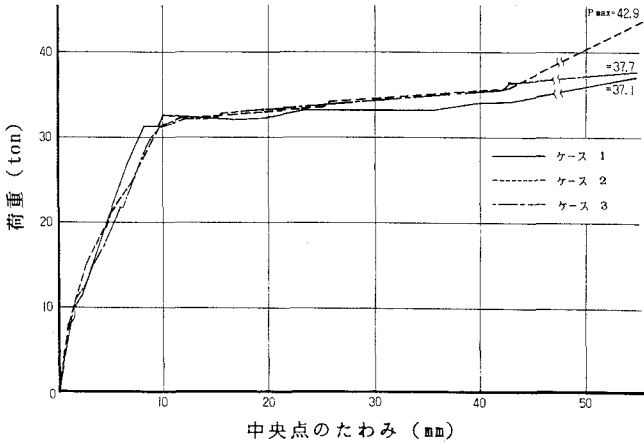


図-4 荷重とはり中央部のたわみの関係

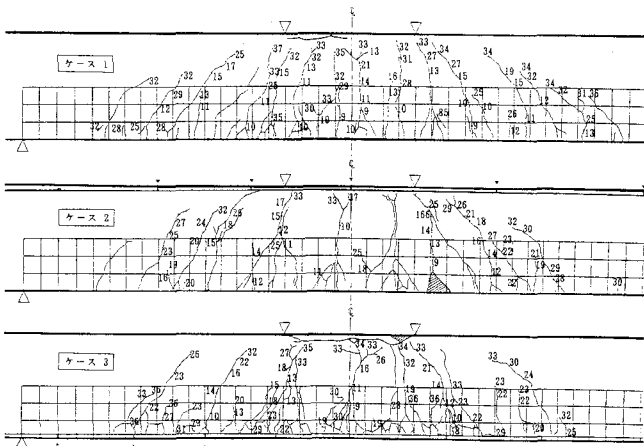


図-5 ひびわれ分布図

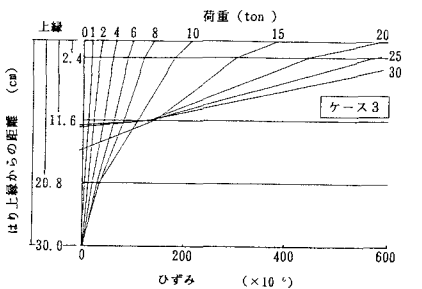
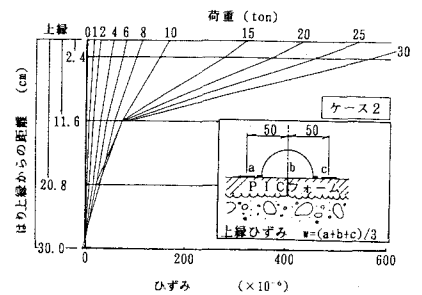
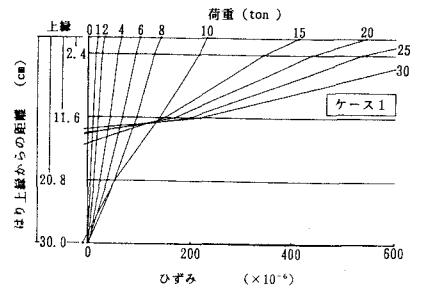


図-6 荷重と縦ひずみの関係

## 4. P I C版の配置間隔

### 4. 1 解析方法

小柳ら<sup>9)</sup>は R C 梁の荷重変位曲線を算定するのに断面細分割法を用いて、ひずみの平面保持と力のつりあい条件より、断面のモーメントー曲率関係を求め、弾性荷重法により荷重変位曲線を求めている。本報告でも、小柳らの方法と同様にコンクリートと P I C と鉄筋の応力ひずみ曲線をもとにし、断面細分割法（断面の分割数は全断面を一様に100分割とした）を用いた。R C 梁はひびわれ発生とともにその剛性が刻々変化し、変断面梁の解析に帰着されるので、解析手法としては筆者らが従来から取り扱っている手法、すなわち、変断面梁をも簡単に扱うことができる方法<sup>10)</sup>を用いた。

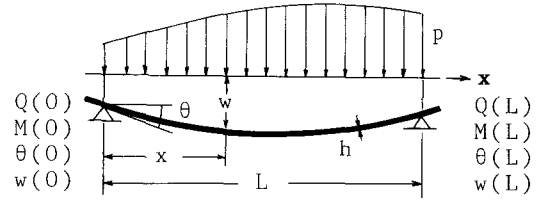


図-7 はりの変位と断面力

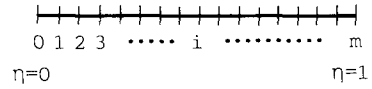


図-8 はりの離散点

なお、数値計算においては、以下の仮定のもとに解析を進める。

- ① ひびわれ発生後、ひびわれ発生箇所より中央部分のコンクリートは、ひびわれ箇所のひびわれ深さだけ曲げ剛性には寄与しないものとする。
- ② ひびわれが鉄筋の位置まで進行すると、ひびわれ間の引張域コンクリートの引張ひずみは解放され、ひびわれ発生位置における鉄筋が引張力を負担するものとする。
- ③ また、ひびわれが鉄筋の位置まで進行したとき、引張域のコンクリートは、R C 部材が一軸引張り状態にあるものとみなすことができるものとする。

いま、図-7 に示すように、せん断力を  $Q$ 、曲げモーメントを  $M$ 、たわみ角を  $\theta$ 、たわみを  $w$  とすれば、微小荷重増分  $\Delta q$  が作用する場合の支配方程式は次式となる。

$$\frac{d \Delta Q}{d x} = -q \quad (1. a)$$

$$\frac{d \Delta M}{d x} = \Delta Q \quad (1. b)$$

$$\frac{d \Delta \theta}{d x} = \frac{\Delta M}{\gamma} \quad (1. c)$$

$$\frac{d \Delta w}{d x} = \Delta \theta \quad (1. d)$$

$$\gamma = \int_0^h E_t (z - z_G)^2 d z$$

ここに、 $h$  は断面高、 $z_G$  は中立軸位置、 $E_t$  は各断面における P I C、コンクリート、および、鉄筋の接線弾性係数を表し、曲げ剛性の低減は  $\gamma$  で表される。なお、集中荷重の場合は、式(1. a)の右辺の  $\Delta q$  を  $\Delta P \cdot \delta(x-a)$  ( $\delta$ : クロネッカのデルタ) で置き換えればよい。

式(1)の各式を次の無次元量：

$$\Delta Q = - \frac{E I_0}{L^2} X_1, \quad \Delta M = - \frac{E I_0}{L} X_2, \quad \Delta \theta = X_3, \quad \Delta w = L X_4,$$

$$x = L \eta, \quad E I_0: \text{基準曲げ剛度}, \quad L: \text{部材長}$$

を用いて無次元化すると、次式(2. a)～(2. d)が得られる。

$$\frac{d X_1}{d \eta} = -q \quad (2. a)$$

$$\frac{d X_2}{d \eta} = X_1 \quad (2. b)$$

$$\frac{d X_3}{d \eta} = \frac{1}{I} X_2 \quad (2. c)$$

$$\frac{d X_4}{d \eta} = X_3 \quad (2. d)$$

$$\overline{q} = \frac{L^3}{EI_0} q \quad \overline{I} = \frac{EI_0}{\gamma}$$

次に、図-8に示すように、梁部材軸座標 $\eta$ の原点を部材左端にとり、基礎微分方程式(2. a)～(2. d)を、変域 $[0, \eta]$ で積分して、積分方程式に変換する。次に、全変域を任意に $m$ 等分して、左側等分点より順に、 $0, 1, 2, \dots, i, \dots, m$ なる番号を付け、任意点 $i$ における諸量に添字 $i$ を付与することとすれば、積分方程式に等間隔の数値積分を適用することにより、式(2. a)～(2. d)は次式(3)のように書き換えられる。

$$X_{1i} = X_{10} + \sum_{k=0}^i \beta_{ik} Q_k \quad (3. a)$$

$$X_{2i} - \beta_{ik} X_{1i} = X_{20} + \sum_{k=0}^{i-1} \beta_{ik} X_{1k} \quad (3. b)$$

$$X_{3i} - \beta_{ik} \overline{I}_k X_{2i} = X_{30} + \sum_{k=0}^{i-1} \beta_{ik} \overline{I}_k X_{2k} \quad (3. c)$$

$$X_{4i} - \beta_{ik} X_{3i} = X_{40} + \sum_{k=0}^{i-1} \beta_{ik} X_{3k} \quad (3. d)$$

式(3)の右边を $F_t$  ( $t=1\sim 4$ )と置き、マトリックス表示すると

$$[\rho_{tp}] \{X_{pi}\} = \{F_t\} \quad (4)$$

$$\{X_{pi}\} = [\rho_{tp}]^{-1} \{F_t\} = [\rho_{pt}] \{F_t\} \quad (5)$$

$$X_{pi} = A_{pt} X_{t0} + \sum_{k=0}^{i-1} \beta_{ik} B_{pt} X_{tk} + \rho_{p1} \sum_{k=0}^{i-1} \beta_{ik} Q_k \quad (6)$$

ここに、

$$\begin{aligned} A_{p1} &= \rho_{p1} & B_{p1} &= \rho_{p2} \\ A_{p2} &= \rho_{p2} & B_{p2} &= \rho_{p3} \overline{I}_k \\ A_{p3} &= \rho_{p3} & B_{p3} &= \rho_{p4} \\ A_{p4} &= \rho_{p4} & B_{p4} &= 0 \end{aligned}$$

式(6)を最小領域 $[0, 1]$ から求め、順次、 $[0, 2]$ 、 $[0, 3]$ 、...と領域を拡大してゆけば、任意点 $i$ の諸量は左端の諸量を用いて次式のように書き表せる。

$$X_{pi} = a_{pid} X_{d0} + q_{pi} \quad (7)$$

ここに、

$$a_{pid} = A_{pt} a_{t0d} + \sum_{k=0}^{i-1} \beta_{ik} B_{pt} a_{tkd}$$

$$q_{pi} = A_{pt} Q_{t0} + \sum_{k=0}^{i-1} \beta_{ik} B_{pt} Q_{tk} + \rho_{p1} \sum_{k=0}^{i-1} \beta_{ik} Q_k$$

式中 $\beta_{ik}$  ( $\beta_{ik} = \alpha_{ik}/24m$ )は数値積分の重み係数で、Simpson公式を用いた場合の $\alpha_{ik}$ の値は表-5に示すとおりである。式(7)を用いて、RC梁の曲げ解析を行うことができる。

前述した仮定②および③のような仮定を設けると、次のひびわれ箇所は、島ら<sup>11)</sup>の方法を用いて解析することができる。すなわち、RC部材の引張剛性は、鉄筋の剛性にコンクリートの剛性を重ね合わせることにより評価できるとした、一軸鉄筋コンクリート部材におけるひびわれ発生過程と同様な方法を用いて解析する。本研究では文献(11)と同様に、鉄筋のひずみ分

表-5 数値積分の重み係数 $\alpha_{ik}$

| i   | k  |    |    |    |    |    |    |    |   |     |
|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|-----|
|     | 0  | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8 | ... |
| 1   | 12 | 12 |    |    |    |    |    |    |   |     |
| 2   | 8  | 32 | 8  |    |    |    |    |    |   |     |
| 3   | 9  | 27 | 27 | 9  |    |    |    |    |   |     |
| 4   | 8  | 32 | 16 | 32 | 8  |    |    |    |   |     |
| 5   | 9  | 27 | 27 | 17 | 32 | 8  |    |    |   |     |
| 6   | 8  | 32 | 16 | 32 | 16 | 32 | 8  |    |   |     |
| 7   | 9  | 27 | 27 | 17 | 32 | 16 | 32 | 8  |   |     |
| 8   | 8  | 32 | 16 | 32 | 16 | 32 | 16 | 32 | 8 |     |
| ... |    |    |    |    |    |    |    |    |   |     |

布は付着応力の分布形を仮定することにより求めるが、文献(11)にあるようなコンクリートの引張強度のばらつきは考慮していない。なお、鉄筋から伝達される引張力を受けることができるコンクリートの有効断面は、引張鉄筋の重心と同じところを重心とするコンクリートの断面とした。以下に、ひびわれが発生したRC部材の鉄筋のひずみ分布、コンクリートの応力分布について簡単に記す。

鉄筋のひずみ分布は付着応力の分布形を仮定することにより求められるが、付着応力の分布形はひびわれ間隔が十分長い場合と短い場合とでは異なるので両者を分けて考える<sup>11)</sup>。本解析では、ひびわれ間隔が十分長い場合を伝達長が短い場合とし、ひびわれ間隔が短い場合を伝達長が長い場合とした。

引張力伝達長 $L_{tt}$ は次式で表される。

$$L_{tt} = P / 2 D \tau_{max} \quad (8)$$

ここに、 $L_{tt}$ ： 引張力伝達長 (cm)

$\tau_{max}$ ： 最大付着応力 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$D$ ： 鉄筋径 (cm)

$P$ ： 引張力 (kgf)

伝達長が短い場合 ( $L_{cr} > 2 L_{tt}$ ) の付着応力分布、および最大付着応力を次式で仮定する。

$$\tau_x = \tau_{max} \sin (\pi x / L_{tt}) \quad (9)$$

$$\tau_{max} = 1.29 f_c^{2/3} \quad (10)$$

ここに、 $f_c$ ： コンクリートの圧縮強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$\tau_x$ ：  $x$  位置における付着応力 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$L_{cr}$ ： ひびわれ間隔 (cm)

式(9)と付着のつりあい式より、伝達長が短い場合の鉄筋のひずみ分布式が得られる。

図-9において、いま、ひびわれ位置の鉄筋応力を $\sigma_s$ とおけば、

$$\sigma_s = P / A_s \quad (11)$$

一方、ひびわれ中間部においては鉄筋とコンクリートとの間の付着作用によって鉄筋の力の一部がコンクリートへ伝達される。すなわち、ひびわれから $x$ なる距離の位置の付着応力を $\tau_x$ (式(9))、鉄筋応力を $\sigma_{sx}$ 、鉄筋周長を $u$ とすれば、

$$\sigma_{sx} = E_s \varepsilon_x = \sigma_s - \frac{u}{A_s} \int_0^x \tau_x dx \quad (12)$$

これより、

$$\varepsilon_x = \frac{P}{E_s A_s} - \frac{4 L_{tt}}{\pi E_s D} \tau_{max} \left(1 - \cos \frac{\pi}{L_{tt}} x\right) \quad (13)$$

ここに、 $\varepsilon_x$ ：  $x$  位置における鉄筋のひずみ

$E_s$ ： 鉄筋の弾性係数 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$A_s$ ： 鉄筋の断面積 (cm<sup>2</sup>)

伝達長が長い場合 ( $L_{cr} < 2 L_{tt}$ ) の付着応力分布、および最大付着応力は次式で仮定する。

$$\tau_x = \tau_{max} \sin (\pi x / L_{cr}) \quad (14)$$

$$\tau_{max} = 1.29 f_c^{2/3} \exp [-(P/P_0 - 1)] \quad (15)$$

ここに、 $P_0$ は初期ひびわれ発生引張力で、数値解析においては最初に鉄筋位置のコンクリートの引張応力が許容引張応力度に達した時の鉄筋の引張力を $P_0$ とする。

式(13)を得たのと同様に、伝達長が長い場合の鉄筋のひずみ分布式が次式のように得られる。

$$\varepsilon_x = \frac{P}{E_s A_s} - \frac{2 L_{cr}}{\pi E_s D} \tau_{max} \left(1 - \cos \frac{2 \pi}{L_{cr}} x\right) \quad (16)$$

コンクリートの応力分布は、引張力から鉄筋が負担している力を差し引いてコンクリート断面積で除した

ものであり、次式を用いて求めることができる。

$$\sigma_{cx} = P / A_c - p E_s \varepsilon_x \quad (17)$$

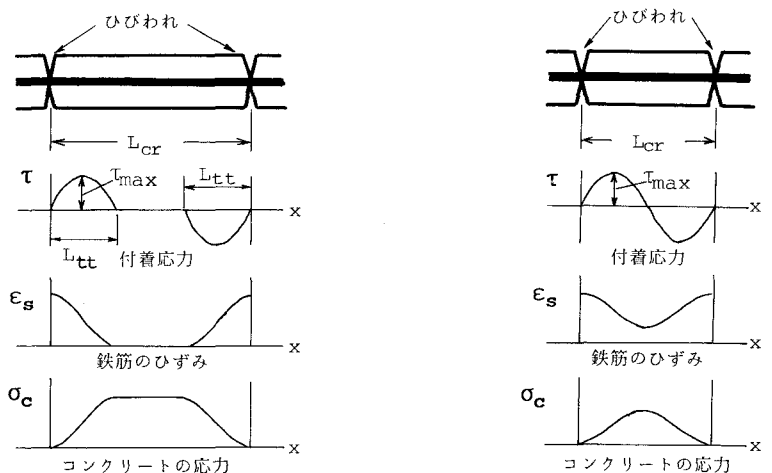
ここに、 $\sigma_{cx}$  : 任意断面でのコンクリートの応力 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$A_c$  : コンクリートの断面積 (cm<sup>2</sup>)

$p$  : 鉄筋比

$E_s$  : 鉄筋の弾性係数 (kgf/cm<sup>2</sup>)

伝達長が短い場合、および、伝達長が長い場合の付着応力分布、鉄筋のひずみ分布、およびコンクリートの応力分布の概略図を図-9 (a), (b) に示す。



(a) 伝達長が短い場合

(b) 伝達長が長い場合

図-9 付着応力、鉄筋のひずみ分布、コンクリートの応力分布<sup>11)</sup>

#### 4.2 数値解析結果および考察

図-3のケース3に示すようなP I C合成梁が2点荷重を受ける場合について数値解析を行った。解析に用いた各部材の力学的特性を図-10に示す。

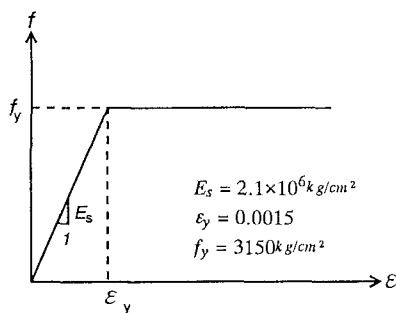
図-11はP I C合成梁(ジョイント間隔40 cm)の数値計算結果の荷重と中央点のたわみの関係を実験結果(ケース3)とともに示したものである。本法による解析結果は実験値とほぼ一致しているものとみなせる。

図-12(a), (b)は、各々、P I C版のジョイント位置が40 cmおよび50 cm間隔とした場合のコンクリートおよびP I C版の引張応力分布および2次ひびわれ発生状況を示したものである。この図より、P I C版のジョイント間隔が40 cmではP I C版にひびわれは発生しないが、50 cm間隔にするとP I C版にひびわれが発生することがわかる。載荷試験においてもジョイント間隔を60 cmとした場合にはP I C版にひびわれが発生している。

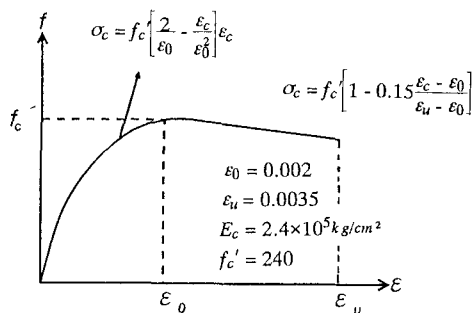
実験結果においては、P I C版へのひびわれ発生荷重は表-4に示すように1.9 tfであったが、数値解析においては1.25 tfとなった。これは、①打設コンクリートのひびわれ発生をコンクリートの引張ひずみが図-8(c)の $\varepsilon_1 = 130 \mu$ としたこと、および、②鉄筋から伝達される引張力を受けもつことができるコンクリートの有効断面を引張鉄筋の重心と同じところを重心とするコンクリートの断面と仮定したこと、さらには、③ひびわれ発生後のコンクリートの伸び能力や付着応力の低下率を、文献(11)にあるようにある仮定の下で解析したことなどによるものと考えられる。

そこで、打設コンクリートのひびわれ発生をコンクリートの引張ひずみを $\varepsilon = 200\mu$ として解析すると、ジョイント間隔を50cmとしてもP I C版にはひびわれは発生せず、ジョイント間隔を60cmとした場合に $P = 1.5\text{tf}$ でひびわれが発生するような解析結果が得られた。実験結果の1.9tfと比較すると小さめの値であるが、設計荷重が約1.3tfであることを考慮すると、使用限界状態ではひびわれがP I C版に生じないような配置ができるものと考えられる。

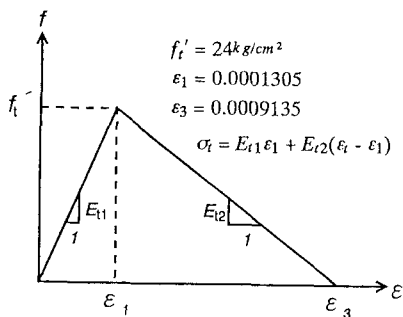
C E B - F I P (1978)および角田<sup>12)</sup>により与えられている曲げ部材の最大ひびわれ間隔 $L_{\max}$ の計算式を用いて、最大ひびわれ間隔を計算したところ、22cmおよび29cmとなる。この間隔に合わせてジョイ



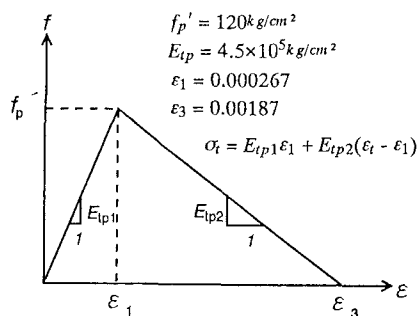
(a) 鉄筋



(b) コンクリート (圧縮)



(c) コンクリート (引張り)



(d) P I C (引張り)

図-10 各部材の力学的特性値

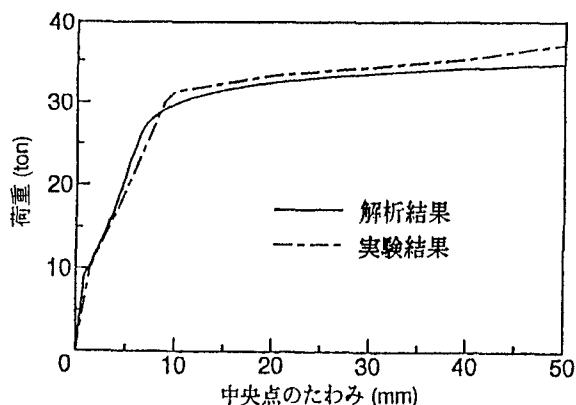


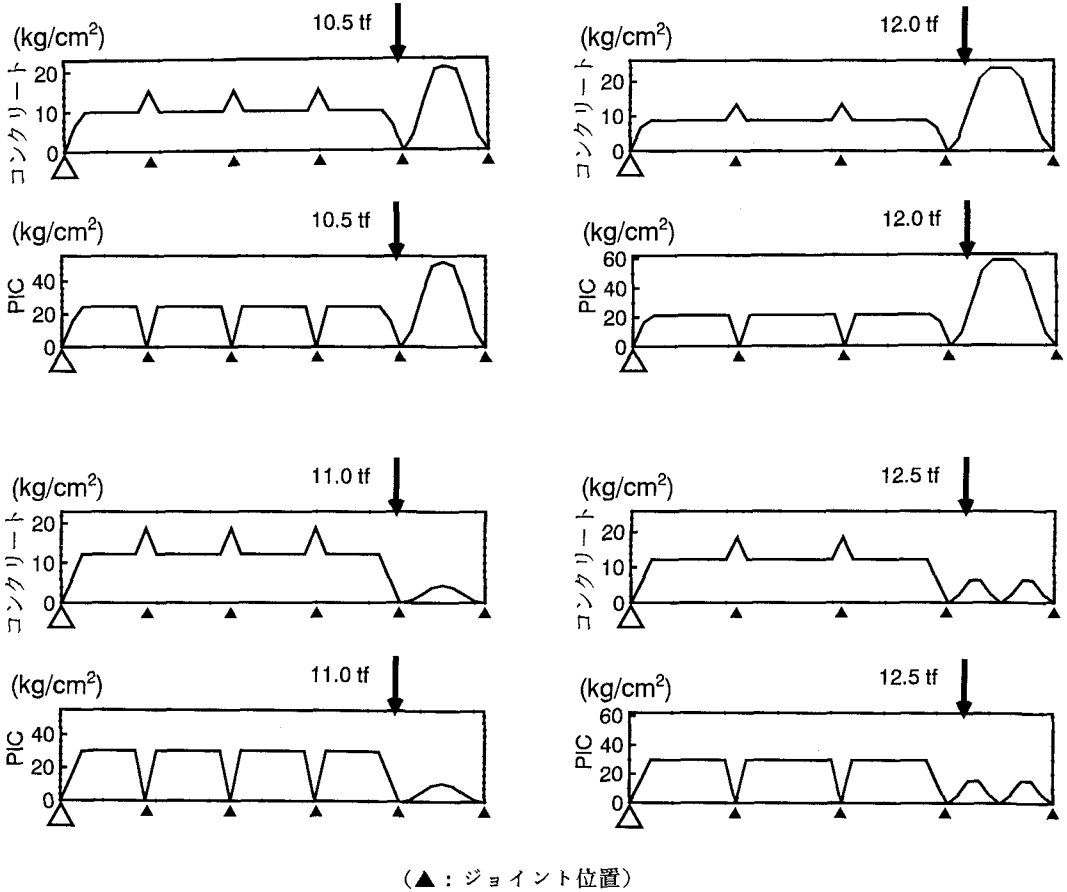
図-11 荷重と中央点のたわみの関係

ント間隔を決めればよいのだが、施工性等を考慮すると、P I C版にひびわれが入らない範囲でできるだけ間隔を大きく取る方が望ましいものと考えられる。本解析結果および実験結果より、本例で取り上げた試験体の場合には、最大ひびわれ間隔の計算式よりもジョイント間隔を大きく設定できることがわかる。

## 5. まとめ

曲げ載荷試験結果および数値解析結果は以下のようにまとめられる。

- ① P I C版をR C梁の圧縮応力側（上面），および，引張応力側（下面）に，それぞれ，配置して曲げ載荷試験を行った結果，終局時に至るまでP I C版の剝離や構造上有害なひびわれおよび曲げ耐力の低下は認められなかった。
- ② 載荷試験においては，P I C版をR C梁の圧縮応力側に配置した場合，曲げ破壊耐力が増加した。また，R C梁の引張応力側に45 cmおよび60 cmのP I C版を配置した場合，60 cmのP I C版にひびわれ発生が認められた。
- ③ 本論文で提示したような解析方法により，使用限界状態においてP I C版自体にひびわれが発生しないようなジョイント間隔を40～50 cm程度と選定することができる。



(a) ジョイント間隔40 cm

(b) ジョイント間隔50 cm

図-12 コンクリート，P I Cのひびわれ発生および引張応力分布

## 6. あとがき

本例では、P I C版を埋設型枠に用いた合成梁の数値解析例を示したが、レジンコンクリート等の高耐久性埋設型枠材を用いた場合でも同様に最適ジョイント間隔を選定できる。数値解析では、ひびわれ発生後のコンクリートの伸び能力や付着応力の低下率、および、鉄筋から伝達される引張り力を受けもつことができるコンクリートの有効断面などがある仮定のもとで解析を行なったが、今後さらにこれらについての検討も必要と考えている。

P I Cプレキャスト版を永久型枠としてコンクリート構造物表面に使用し、そのままフレッシュコンクリートを打設すれば、工期の短縮・省力化が図れ、かつ、構造物の耐久性、耐食性を大幅に改善できる。さらに、表面を粗面処理すれば、現場打ちコンクリートとの付着性にも優れ、コンクリート構造物の有効断面として考慮できる特長を有している。このようなP I C版を埋設型枠として用いる場合、必ずジョイント部ができる。ジョイントを設けることは、構造的には局部欠陥を作ることになり好ましくはない。しかしながら、ジョイントを設けない施工はほとんど不可能に近いので、本論文で用いたような手法により埋設型枠自体にひびわれが入らないようなジョイント間隔を決定できるものと考えられる。また、実用化においては損傷を受けたP I C版およびジョイント部の保守などの技術的問題や接着材の劣化問題などについても考慮する必要があるものと思われる。

## 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、長崎大学工学部構造工学科原田哲夫先生、九州産業大学工学部土木工学科宮川邦彦先生に貴重な御助言を戴きました。また、北海道大学工学部土木工学科角田與史雄先生には質問に対して御丁寧な回答を戴きました。さらには、長崎大学小林康晃君には解析ならびにデータ整理を協力して戴きました。ここに記して感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 小林茂敏：コンクリート系新材料の開発について－1990年代に期待される建設材料の展望－，平成2年度土木研究所講演会講演集，建設省土木研究所，pp.57-70，1991
- 2) 内藤隆史・松岡康訓・新藤竹文・小沢満三・鶴田健：ポリマー含浸コンクリートによる高耐久性埋設型枠の開発，土木学会論文集，No.435／VI-15，pp.21-23
- 3) 渡辺明，小沢俊司，鶴田健：P I C板埋設型枠利用によるコンクリート合成部材の力学的性状，第41回土木学会年次学術講演会講演概要集，pp.283-284，1986
- 4) 藤田浩二，出光隆，山崎竹博，渡辺明：ポリマーコンクリート埋設型枠で被覆したR C供試体の海岸暴露試験，土木学会西部支部研究発表会，pp.826-827，1992
- 5) 武若耕司，松本進，浜崎智洋，橋口隆：塩害対策を目指したG R C埋設型枠工法の開発に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14，No.1，pp.143-148，1992
- 6) 藤原稔，箕作光一，佐野正：高強度コンクリート版を用いたコンクリート橋の補強工法に関する実験的検討，第43回土木学会年次学術講演会講演概要集，pp.224-225，1988

- 7) K.Tsuruta, M.Ozawa and T.Naito : Bond Behavior of Polymer Impregnated Concrete Permanent Forms for Prestressed Concrete Beams, ISAP Technical Committee 52, Adhesion between Polymers and Concrete, 1986
- 8) Y.Itoh, T.Shindo and K.Tsuruta : Study on Application of Polymer Impregnated Concrete Panel (PIC Board) to Actual Structures, SEMINAR ON PRECAST CONCRETE CONSTRUCTION IN SEISMIC ZONES, pp.275-290, 1986
- 9) 小柳治, 六郷恵哲, 岩瀬裕之 : コンクリート中の鉄筋の応力ひずみ関係と曲げを受けるRCはりの終局挙動, 土木学会論文集, 第384号/V-7, pp.83-92, 1987
- 10) 崎山毅 : 変断面任意形アーチの面内複合非線形解析, 土木学会論文報告集, pp.11-20, 1981
- 11) 篠原賢至, 島弘 : 一軸鉄筋コンクリート部材におけるひびわれ発生過程および引張剛性の解析, コンクリート工学年次論文報告集, 11-2, pp.159-164, 1989.
- 12) 角田與史雄 : 鉄筋コンクリートの最大ひびわれ幅, コンクリート・ジャーナル, Vol.8, No.9, pp.1-10, 1970

(1992年9月21日受付)