

P I C フォームを利用したRC合成梁のひびわれ解析

松田 浩*・崎山 毅*・原田 哲夫*
森田 千尋*・鶴田 健**

Crack Analysis of Composite RC Beams
with PIC Form

by

Hiroshi MATSUDA*, Takeshi SAKIYAMA*, Tetsuo HARADA*, Chihiro MORITA*
and Ken TSURUTA**

Polymer Impregnated Concrete (PIC) have a high durability. Form works of concrete structure can be deleted by using PIC as embedded forms. In addition, the planks act as a part of the structure section. However, when PIC planks are used as embedded forms, butt joints are in existence.

In this paper, crack analysis of composite RC beams with PIC form is carried out, in order that PIC planks should be arranged so as no to be generated itself in frequent or quasi-permanent live load.

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⁽¹⁾が、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ポリマー含浸コンクリート（以下PICと称す）あるいはレジンコンクリート（REC）などのポリマーコンクリートパネルを埋設型枠に用いる工法が考案されている⁽²⁾。PICで製作された高耐久性埋設型枠材（PICフォーム）は、図1に示すように板厚15mm～40

mm程度のPIC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。

PICフォームは、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、図1に示すように、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徴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⁽³⁾。

このような特徴をもつPICフォームを梁、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PICフォームで覆っただけではPIC板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1に示すようにPICフォームの適切な箇所ジョイントを設け、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

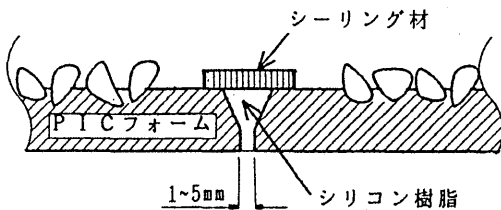


Fig. 1 PIC Form

平成4年9月25日受理

*構造工学科 (Dept. of Structural Engng.)

**小沢コンクリート工業(株) (OZAWA Concrete Industry Co., LTD)

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PICフォーム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、ジョイントの接合剤にシリコン樹脂を使用すれば、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。

ジョイント間隔は、CEB-FIP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を設置すれば良いのだが、施工性などを考慮すると、PICフォーム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、PICフォームを梁、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(参考文献(3))ではPICフォームをジョイント間隔45cmならびに60cmに配置して実験を行っており、ジョイント間隔を60cmとするとPIC自体にひびわれ発生が認められたと報告されている。本文の数値解析では、ジョイント間隔を40cmおよび50cm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50cm間隔とすると、PIC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、以下に解析方法および数値解析結果を報告する。

2. 解析方法

小柳ら⁽⁴⁾はRC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-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PIC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。RC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、解析手法としては変断面梁をも簡単に取り扱うことができる方法⁽⁵⁾を用いた。すなわち、梁理論の基礎式(1)を積分方程式に変換し、積分方程式の数値積分を応用することにより解析的近似解を求め、これに基づく半解析的な手法を用いた。解析手法の詳細は文献(5)を参照されたい。

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

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

$$\gamma = \int_0^h E_c(z - z_G)^2 dz$$

ここに、Qはせん断力、Mは曲げモーメント、 θ はたわみ角、wはたわみ、 z_G は中立軸位置を表す。曲げ剛性の低減は γ で表される。

式(1)の各式を次の無次元量：

$$\Delta Q = -\frac{EI_0}{L^2} X_1, \quad \Delta M = -\frac{EI_0}{L} X_2,$$

$$\Delta \theta = X_3, \quad \Delta w = LX_4,$$

$$x = L\eta, \quad EI_0: \text{基準曲げ剛度}, \quad L: \text{部材長}$$

を用いて無次元化すると、次式(2. a)~(2. d)が得られる。

$$\frac{dX_1}{d\eta} = \bar{q} \quad (2. a) \quad \frac{dX_2}{d\eta} = X_1 \quad (2. b)$$

$$\frac{dX_3}{d\eta} = \bar{I} X_2 \quad (2. b) \quad \frac{dX_4}{d\eta} = X_3 \quad (2. d)$$

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

梁部材軸座標 η 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、図2に示すように、全変域 $[0, 1]$ を任意にm等分して、左側等分点より順に、0, 1, 2, ..., i, ..., 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。

$$X_{1i} = X_{10} + \sum_{k=1}^i \beta_{1k} \bar{q}_k \quad (3. a)$$

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

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

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

式(3)の右辺を $F_i (i=1 \sim 4)$ と置き、マトリックス表示すると、

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\beta_{1i} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\beta_{1i} \bar{I}_i & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -\beta_{1i} & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_{1i} \\ X_{2i} \\ X_{3i} \\ X_{4i} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

$$[\rho_{ip}] \{X_{pi}\} = \{F_i\} \quad (5)$$

$$\{X_{pi}\} = [\rho_{ip}]^{-1} \{F_i\} = \{\gamma_{pi}\} \{F_i\} \quad (6)$$

$$X_{pi} = A_{pi} X_{10} + \sum_{k=0}^{i-1} \beta_{ik} B_{pi} X_{tk}$$

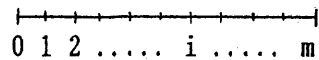


Fig. 2 Discrete points of beam

$$+ \rho_{p1} \sum_{k=0}^{l-1} \beta_{ik} \bar{Q}_p \quad (7)$$

ここに、 $A_{p1} = \rho_{p1}$ $B_{p1} = \rho_{p2}$
 $A_{p2} = \rho_{p2}$ $B_{p2} = \rho_{p3} \bar{1}_k$
 $A_{p3} = \rho_{p3}$ $B_{p3} = \rho_{p4}$
 $A_{p4} = \rho_{p4}$ $B_{p4} = 0$

式(7)を最小領域 $[0, 1]$ から求め、順次、数値積分を適用することにより、次式のように書き表せる。

$$X_{p1} = a_{pid} X_{d0} + Q_{p1} \quad (8)$$

ここに、

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

$$Q_{p1} = A_{pt} Q_{t0} + \sum_{k=0}^{l-1} \beta_{ik} B_{pt} Q_{tk} + \rho_{p1} \sum_{k=0}^{l-1} \beta_{ik} \bar{Q}_k$$

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 α_{ik} の値は表1に示すとおりである。式(8)を用いて、RC梁の曲げ解析を行うことができる。

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した。

②第1ひびわれ発生直後、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。

上記②のように仮定を設けると、第1ひびわれ発生後の引張域コンクリートは、RC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。次のひびわれ箇所は、島ら⁶⁾の方法を用いて解析することができる。本研究では鉄筋のひずみ分布等は文献(6)に従うが、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、

Table 1 α_{ik} values

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	
:										

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⁶⁾。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。

$$L_{tt} = P/2D \tau_{max} \quad (9)$$

- τ_{max} : 最大付着応力 (kg/cm²)
- D : 鉄筋径 (cm)
- P : 引張力
- f_c : コンクリートの圧縮強度 (kg/cm²)
- τ_x : x 位置における付着応力 (kg/cm²)
- L_{cr} : ひびわれ間隔

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

$$\tau_x = \tau_{max} \sin(\pi x / L_{tt}) \quad (10)$$

$$\tau_{max} = 1.29 f_c^{2/3} \quad (11)$$

式(10)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次式のように得られる。

$$\epsilon_x = \frac{P}{E_s A_s} - \frac{4L_{tt}}{\pi E_s D} \tau_{max} (1 - \cos \frac{\pi}{L_{tt}} x) \quad (12)$$

ここに、 ϵ_x : x 位置における鉄筋のひずみ

- E_s : 鉄筋の弾性係数
- A_s : 鉄筋の断面積

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

$$\tau_x = \tau_{max} \sin(\pi x / L_{cr}) \quad (13)$$

$$\tau_{max} = 1.29 f_c^{2/3} \exp\{- (P/P_0 - 1)\} \quad (14)$$

- P_0 : 初期ひびわれ発生引張力

式(13)と付着のつりあい式より、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。

$$\epsilon_x = \frac{P}{E_s A_s} - \frac{2L_{cr}}{\pi E_s D} \tau_{max} (1 - \cos \frac{2\pi}{L_{cr}} x) \quad (15)$$

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。

$$\sigma_{cx} = P/A_c - p E_s \epsilon_x \quad (16)$$

ここに、 σ_{cx} : 任意断面でのコンクリートの応力

- A_c : コンクリートの断面積
- p : 鉄筋比
- E_s : 鉄筋の弾性係数

伝達長が短い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、コンクリートの応力分布を図3(a), (b)に示す。

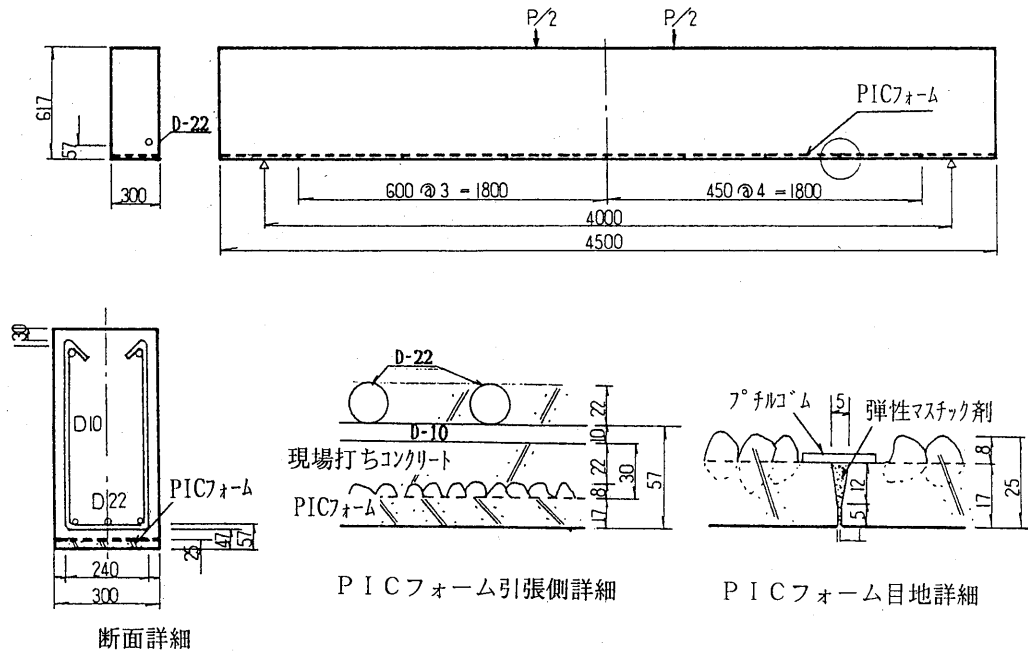


Fig. 4 Sections of PIC composite beam structures

3. 数値解析結果および考察

図4に示すようなPIC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。試験体の諸元および解析に用いた各部材の力学的特性を、各々、表2および図5に示す。

図6は、PIC合成梁（ジョイント間隔40cm）の荷重たわみ曲線を実験結果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。なお、PIC板のジョイント間隔を50cm

として解析した場合、荷重変位曲線には40cm間隔の場合との差異はなかった。

図7(a), (b)は、各々、PIC板のジョイント位置が40cmおよび50cm間隔とした場合のコンクリートおよびPICフォーム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、PICのジョイント間隔が40cmではPIC板にひびわれは発生しないが、50cm間隔にするとPIC板にひびわれが発生することがわかる。実験でもジョイント間隔を60cmとした場合にはPIC板にひびわれが発生している。

CEB-FIP (1978) および角田⁷⁾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

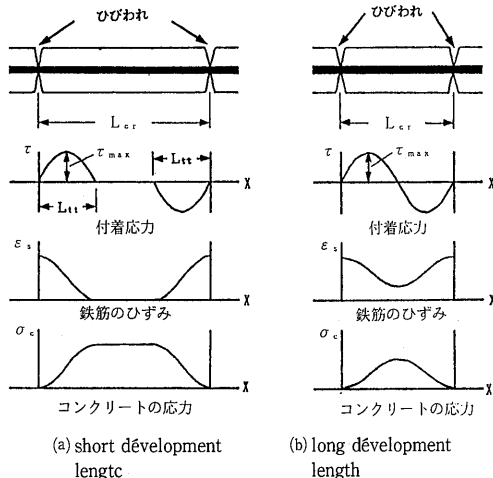


Fig. 3 Bond stress, steel strain and concrete stress

Table 2 Specimen

項目	諸元
主鉄筋のかぶり	57mm
PICフォームの配置方法	図-3参照
PICフォームの厚さ	25mm(コンクリート板17mm, 附着部)
コンクリートの打設方向	PICフォームの附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
荷重スパン	400cm, 試験体全長450cm
荷重条件	静荷重
PICフォームの目地間隔	45cmならびに60cm

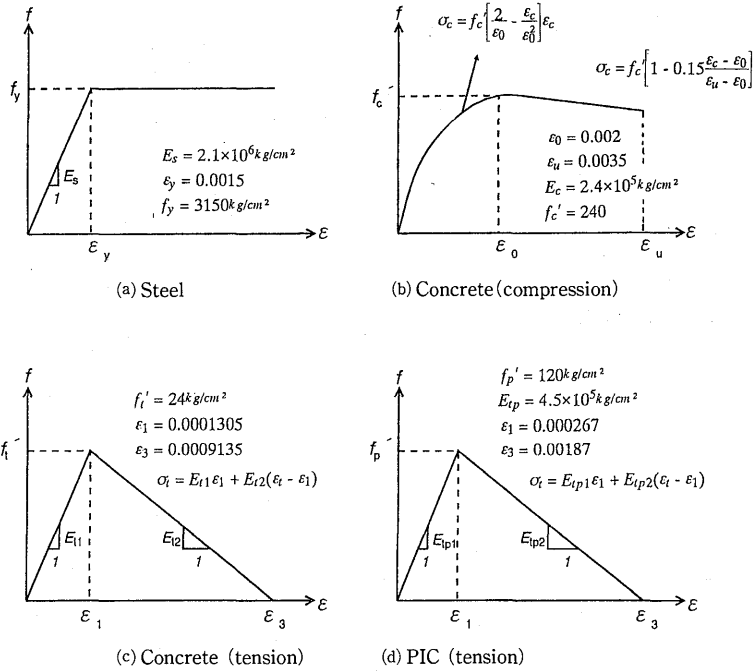


Fig. 5 Mechanical properties of members

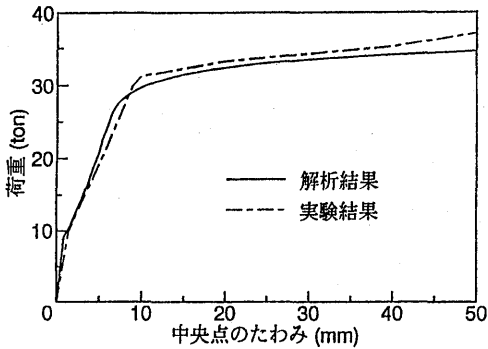


Fig. 6 Load-deflection curve of experimental and numerical results

式を用いて、最大ひびわれ間隔を計算したところ、22 cm および 29 cm となる。この間隔に合わせてジョイント間隔を決めればよいのだが、施工性を考慮すると、P I C 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こと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、ジョイント間隔が 40 cm とすると、ひびわれ誘導目地として最適であることがわかる。

4. あとがき

以上の数値解析結果から、P I C 板にひびわれが発生しないようなジョイント間隔を選定することができ

ることがわかった。本例では P I C パネルを埋設型枠に用いた合成梁の数値解析例を示したが、R E C パネルの場合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などがある仮定のもとで解析を行ったが、コンクリートの伸び能力や付着応力の低下率などの検討も必要と考えている。

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集，建設省土木研究所，pp. 57-70，1991
- 2) 藤田，出光，山崎，渡辺：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
- 3) ポリマー含浸コンクリートによる高耐久性埋設型枠材 P I C フォーム，土木研究センター，1990
- 4) 小柳，六郷，岩瀬：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 R C はりの終局挙動，土木学会論文集，第384号/V-7，pp. 83-92，1987
- 5) 崎山：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
- 6) 篠原，島：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

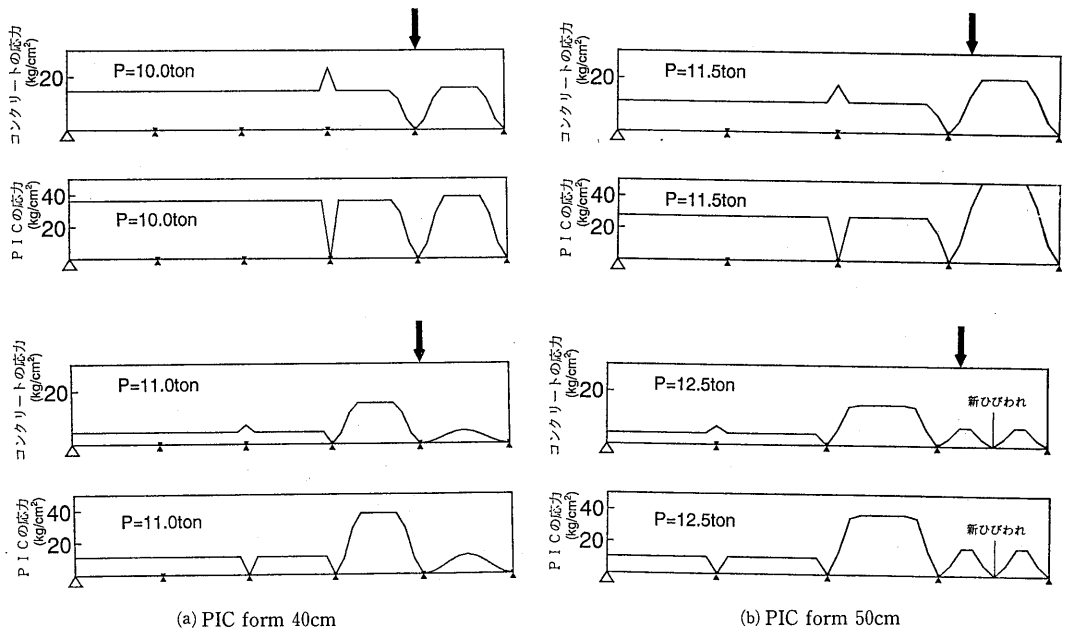


Fig. 7 Crack and stress distribution of concrete and PIC form

リート工学年次論文報告集, 11-2, pp. 159-164,
1989

- 7) 角田：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