

高耐久性埋設型枠接合部をひびわれ誘導目地とした RC 構造物のひびわれ解析

CRACK ANALYSIS OF RC BEAMS WITH PIC BOARDS AND OPTIMAL PROVIDING CRACK INDUCING JOINTS

松田 浩*・彦坂 熙**・鶴田 健***・出光 隆****・崎山 毅†・山口浩平‡
Hiroshi MATSUDA, Hiroshi HIKOSAKA, Ken TSURUTA, Takashi IDEMITSU, Takeshi
SAKIYAMA, and Kohei YAMAGUCHI

*正会員 工博 長崎大学助教授 工学部 構造工学科 (〒 8528521 長崎市文教町 1-14)

**正会員 工博 九州大学教授 工学部 建設都市工学科 (〒 8120053 福岡市東区箱崎 1-14)

***正会員 工修 小沢コンクリート工業(株) 技術研究所副部長 (〒 1680074 東京都杉並区上高井戸 1-7-16)

****正会員 工博 九州工業大学教授 工学部 建設社会工学科 (〒 8040015 北九州市仙水町 1-1)

†正会員 工博 長崎大学教授 工学部 構造工学科 (〒 8528521 長崎市文教町 1-14)

‡学生会員 長崎大学大学院生 工学研究科 構造工学専攻 (〒 8528521 長崎市文教町 1-14)

Studies have shown that use of polymer impregnated concrete(PIC) boards, a highly durable construction material, as permanent forms eliminates concrete form work. Studies have also shown that after the concrete has hardened, the PIC boards function as a part of the effective section of the concrete thus placed. Use of PIC boards as concrete formworks requires butt joints. If concrete is covered with a jointless PIC boards, cracks may occur in the PIC board, thereby making complete control of corrosion impossible. It is therefore necessary to arrange PIC boards so as to prevent cracking under service loads. This paper reports the results of analytical and experimental studies carried out to investigate the optimization of the spacing of crack-inducing joints. From the results of numerical analysis, the paper also shows that cracking can be localized by optimizing the length of PIC boards used, and that cracking in PIC boards does not occur if boards length is optimized.

Key Words : crack analysis, high-durability permanent concrete form, optimal spacing of crack-inducing joints, polymer impregnated concrete(PIC)

1. はじめに

コンクリート工事において、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が、これらを満たす工法の一つにポリマーコンクリートを埋設型枠として、コンクリート表面に被覆する工法がある。これは、ポリマー含浸コンクリート(Polymer Impregnated Concrete: 以下 PIC と略記)やレジンコンクリート(Resin Concrete: 以下 REC と略記)などの高強度ポリマーコンクリートパネルを高耐久性埋設型枠として用い、コンクリート構造物の塩害防止と併せて、コンクリート工事の工期短縮・省力化を図る工法である¹⁾²⁾³⁾。

PIC 版や REC 版は、遮塩・遮水性、耐凍害性、耐磨耗性、化学抵抗性に優れており、さらに表面を粗面処理すれば現場打設コンクリートとの付着も十分で、コンクリート構造物の有効断面として考慮できることが、今までの研究でも十分に確認されている⁴⁾。

このような特長をもつ埋設型枠をはり、スラブなどの鉄筋コンクリート(以下 RC と略記)部材として曲げ引

張り側に使用する場合、その表面を単に埋設型枠で覆っただけでは埋設型枠自体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。そのため、埋設型枠と打設コンクリートの付着なしで施工される例もある。しかしながら、付着なしでの施工は耐久性向上の観点から好ましいものではない。埋設型枠の適切な箇所に接合部を設け、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埋設型枠の接合部を設置すれば、接合部にひびわれを発生させることが可能となる。埋設型枠の設置間隔は、土木学会コンクリート標準示方書や CEB-FIP などのひびわれ間隔算定式により求め、それに合わせて接合位置を決定すれば良いのだが、施工性、およびその後の維持、補修などを考慮すると、埋設型枠にひびわれが発生しない範囲で接合部の数を少なくする方が望ましい。

以上に鑑み、PIC 版を設置した RC はりの静的載荷実

験にもとづき、解析的な検討を行った。その結果、PIC版を設置した場合は、PIC版の長さが長くなれば、PIC版自体にひびわれが発生した結果が得られた⁵⁾。

曲げひびわれ間隔を理論的に検討するときには、一軸引張り部材にモデル化する方法が多く用いられている⁶⁾。本研究でも実験結果を解析的に究明するため、ひびわれ発生後の引張り域コンクリートは、一軸引張り状態にあるものと仮定し、島ら⁷⁾の方法を用いてひびわれ解析を行った。その結果、解析的にもPIC版自体にひびわれが発生しないような接合部間隔が存在することがわかった⁵⁾。

しかしながら、来海⁸⁾は、コンクリートの引張り強度が極端に高い場合には一軸引張り部材モデル以外の要因を考慮する必要があるとし、RCはりの引張り縁に発生する引張り応力は、コンクリートに作用する圧縮合力が偏心していることにより発生する引張り応力と、鉄筋との付着作用により伝達される引張り応力を重ね合わせたものであると仮定した、曲げひびわれ間隔の算定方法を提示している。筆者らが先に報告した論文⁵⁾では、高強度埋設型枠の接合部間隔がひびわれ発生間隔に影響をおよぼすことが実験、および解析的に得られたものの、実験試験体の数も1体だけであり、さらに高引張り強度のPIC版を用いているにもかかわらず、解析はより理論と一軸引張りモデルを基本とし、ある前提条件下で解析を行っている。

本論文は、一軸引張り部材モデル、および筆者らの一人によって開発された2次元非線形有限要素法⁹⁾により、高強度材料からなる埋設型枠の接合部間隔が埋設型枠自体のひびわれ発生におよぼす影響を解析的に実証するとともに、PIC版をはり、スラブなどのRC部材に使用する場合の最適設置長を決定することを目的としたものである。FEM解析では、PIC版の長さを20～100[cm]として解析を行った結果、PIC版の長さを長くすると、PIC版自体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。

2. 曲げ載荷試験の概要

2.1 試験体

載荷実験で用いた試験体は、比較のためにPIC版を配置しない通常のRC試験体、PIC版を所定の目地間隔で引張り側に配置した計2体で、それぞれCase-1、Case-2とする。図1(a)、(b)に、それぞれCase-1、Case-2を示す。各供試体の長さは450[cm]、スパン長400[cm]とした。Case-2においてPIC版の長さは、目地部でひびわれが発生するように制限されており、中央より左半分は60[cm]間隔で、右半分は45[cm]間隔で設置している。試験体の諸元を表1に示す。また、実験、および解析に用いた各部材の特性値を表2(a)、(b)に示す。鉄筋はSD345(JIS G3112)を使用し、打設コンクリートはス

表 1 : Detail of Specimen

項目	諸元
主鉄筋のかぶり	57[mm]
PIC版の厚さ	25[mm]
	コンクリート板 17[mm]
	付着部 8[mm]
鉄筋量	0.7[%]
試験体の断面形状	h = 60[cm], b = 30[cm], 矩形断面
載荷スパン	400[cm], 試験体全長 450[cm]
荷重条件	静荷重
PIC版に作用する力	引張り応力
PIC版の目地間隔	引張り側:45[cm], 60[cm]
試験体数	2体
Case-1	PIC版の配置なし(比較用試験体)
Case-2	PIC版の配置(はりの引張り側)

表 2(a) : Mechanical properties of steel

	Case-1	Case-2
Yield strength[MPa]	407	429
Coefficient of elasticity[MPa]	2.1×10^5	
Coefficient of work-hardening	0.01	

表 2(b) : Mechanical properties of cast-in-place concrete and PIC

	cast-in-place concrete	PIC
Compressive strength[MPa]	33.9	184
Tensile strength[MPa]	3.39	18.4
Coefficient of elasticity[MPa]	2.4×10^4	4.1×10^4
Ultimate compressive strain	0.0035	0.0045
Ultimate tensile strain	0.000914	0.000340

表 3 : Cracking load and ultimate strength

	Experiment			FEM		
	P_{cr} [kN]		P_u [kN]	P_{cr} [kN]		P_u [kN]
	C	PIC		C	PIC	
Case-1	83.3	—	363.6	98.0	—	323.4
Case-2	78.4	186.2	369.5	98.0	137.2	362.6

C : cast-in-place concrete, P_{cr} : cracking load
 P_u : ultimate strength

ランプ 8 ± 1 [cm]、設計基準強度 24.5[MPa]を使用した。せん断補強筋は図1(a)に示すとおりである。また、PIC版の目地部の接着材は、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。

2.2 載荷方法

曲げ載荷試験は、スパン長4[m]、せん断スパン比2.7、載荷スパン0.8[m]の2点載荷で行った。荷重条件は、鉄筋応力183.7[MPa](載荷荷重127.4[kN])まで載荷後、除

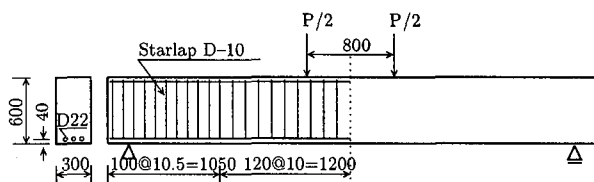


図 1(a) : Reinforced concrete beam
without PIC board

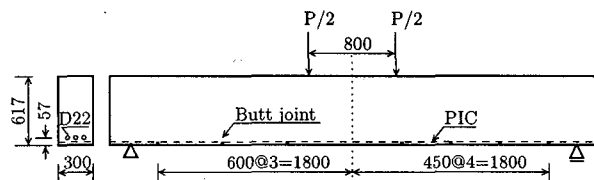


図 1(b) : Reinforced concrete beam with PIC board

荷し、その後破壊まで載荷した。実験に際しては、RC はり試験体の曲げ挙動(たわみ、ひびずみ)、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。

3. 実験、および数値解析結果

3.1 解析手法、および解析モデル

本研究で用いた 2 次元非線形有限要素法は、鉄筋に交叉するひびわれの成長につれて、ひびわれ近傍のコンクリートと鉄筋間の付着特性が連続的に変化する事実にもとづき、付着リンク損傷度を導入して、付着劣化特性をリンク要素の剛性に自動的に組み入れられたものである。本解析プログラムによると、分布ひびわれモデルを用いているにもかかわらず、離散的なひびわれパターンが形成され、ひびわれ間隔、ひびわれ幅、鉄筋ひずみ分布なども実測結果によく一致すること、また等曲げを受ける RC 部材の主鉄筋応力は、破壊時近傍においても一様に分布せず、ひびわれ開口部とひびわれ間で大きな応力差が存在することなどが既に確認されている⁹⁾。

本研究では、この解析プログラムを用いて、コンクリートには定ひずみ三角形平面応力要素、鉄筋には 2 節点トラス要素、コンクリートと鉄筋間にはリンク要素を用いた。コンクリートの材料モデルは、引張り側ではひびわれ発生までは線形弾性、ひびわれ発生後は指数曲線ひずみ軟化モデル、圧縮側では $0 \leq \sigma \leq 0.5f_c$ (f_c : コンクリートの圧縮強度) で線形弾性、 $0.5 \leq \sigma \leq f_c$ で 2 次放物線、 f_c 到達後は指定された終局ひずみ ε_{cu} まで直線軟化の弾塑性モデルとし、また鉄筋の材料モデルはバイリニアモデルを用いて、それらを表 2(a), (b) に示している。また、鉄筋とコンクリートの付着はリンク要素を用いて非線形付着-すべりを考慮し、ひびわれの発生による付着強度低下を考慮している。また、ひびわれ発生

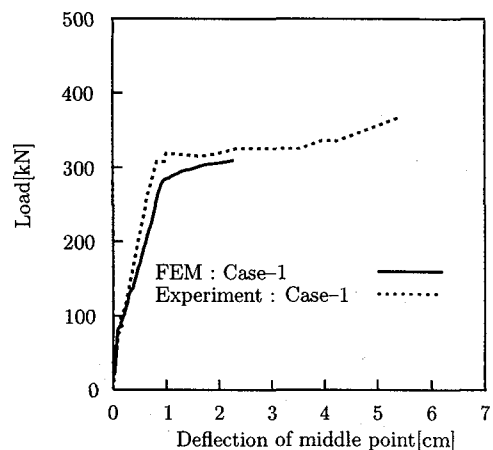


図 2(a) : Load-deflection relationship : Case-1

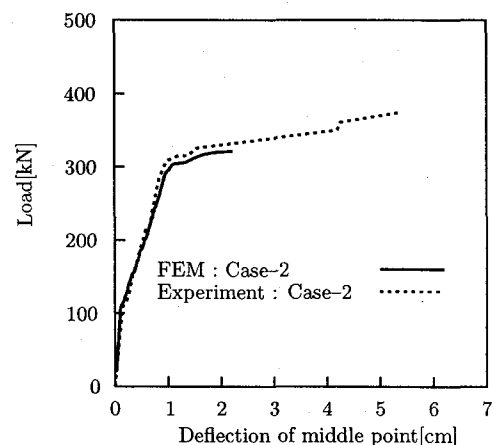


図 2(b) : Load-deflection relationship : Case-2

から進展する過程をシミュレーションできるように、要素分割数:4857、節点数:2543 に細分割してモデル化した。さらに、実験結果より PIC 版とコンクリートの剥離は認められなかったため、付着は完全であるものとして解析した。

3.2 実験、および FEM 解析結果の考察

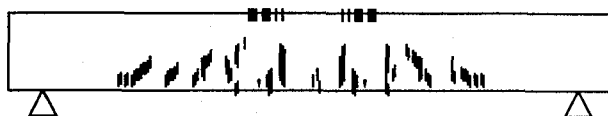
図 2(a), (b) に実験、および解析結果におけるはり中央点の荷重-たわみ曲線を示す。図 2(a) は通常の RC はりである Case-1、図 2(b) は PIC 版を下側に配置した Case-2 の結果である。図 2(a), (b) より、PIC 版を接合部を設けて下縁の引張り側に配置しても、曲げ耐力の低下は認められないことがわかる。また、初期剛性や曲げ破壊耐力の実験値と解析値は、ほぼ一致していることがわかる。

表 3 は、打設コンクリート、および PIC 版のひびわれ発生荷重、および終局耐力の実験結果、および解析結果をまとめたものである。実験結果に比べて解析結果の終局耐力は、いく分低めとなった。

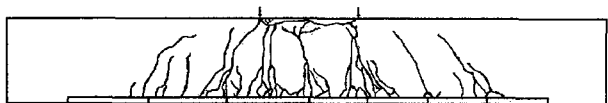
図 3 に Case-1, Case-2 のひびわれ分布を示す。これ



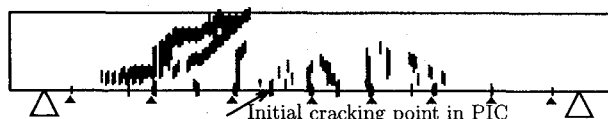
(a) : Experiment : Case-1



(b) : FEM : Case-1



(c) : Experiment : Case-2



(d) : FEM : Case-2

図 3 : Distribution of cracking

より、RC はりである Case-1 は、ひびわれが分散しているのに対して、PIC 版を設置した Case-2 では、ひびわれが局所化していて、45[cm] では目地部にコンクリートはり本体のひびわれが集中しているのに対して、60[cm] では目地中間部、および PIC 版にもひびわれが発生していることが、実験結果、および解析結果の両方からわかる。なお、図 3(d) に PIC 版の初期ひびわれ発生箇所を示す。

図 4(a) は、PIC 版を下面に配置した Case-2 の場合の目地間隔 45[cm] の中間点、および Case-1 の RC はりの同じ位置での荷重－鉄筋ひずみ曲線である。同様に、図 4(b) は目地間隔が 60[cm] の場合である。ひびわれ発生後の実験結果に着目すると、PIC 版の長さが 45[cm]、60[cm] とわずかな差であるにもかかわらず、45[cm] のときは 60[cm] のときに比べて、RC はりと PIC 版を設置したときの荷重－鉄筋ひずみ曲線の差が小さい。すなわち、PIC 版を 60[cm] 間隔で設置したときは、45[cm] 間隔で設置したときよりも PIC 版の荷重分担率が大きいということがわかる。このことより、PIC 版の設置間隔が長いほど RC 部材の有効断面としての効果は大きくなるが、その反面 PIC 版の荷重分担率が大きくなり、

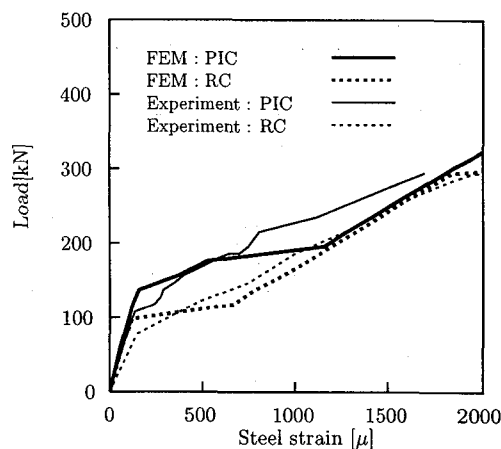


図 4(a) : Butt joint spacing 45[cm]

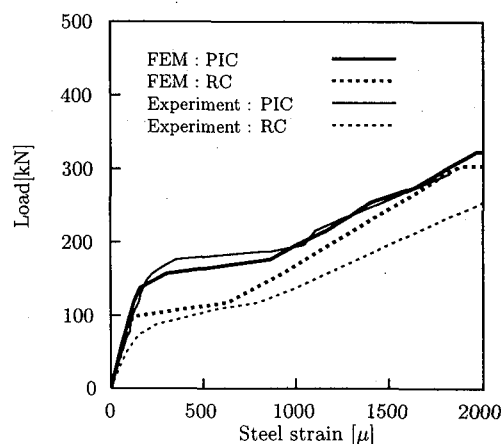


図 4(b) : Butt joint spacing 60[cm]

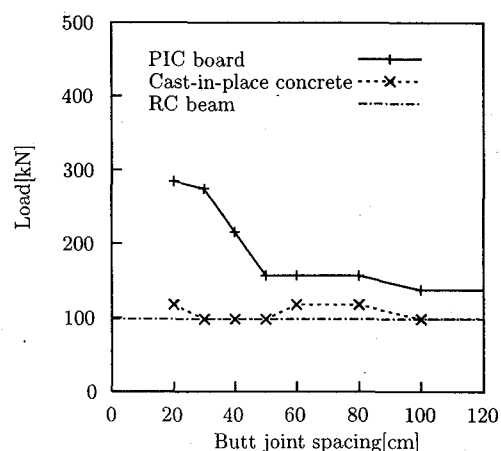


図 5 : Relationship between cracking load and PIC board length

PIC 版自体にひびわれ発生の可能性があることを示唆している。

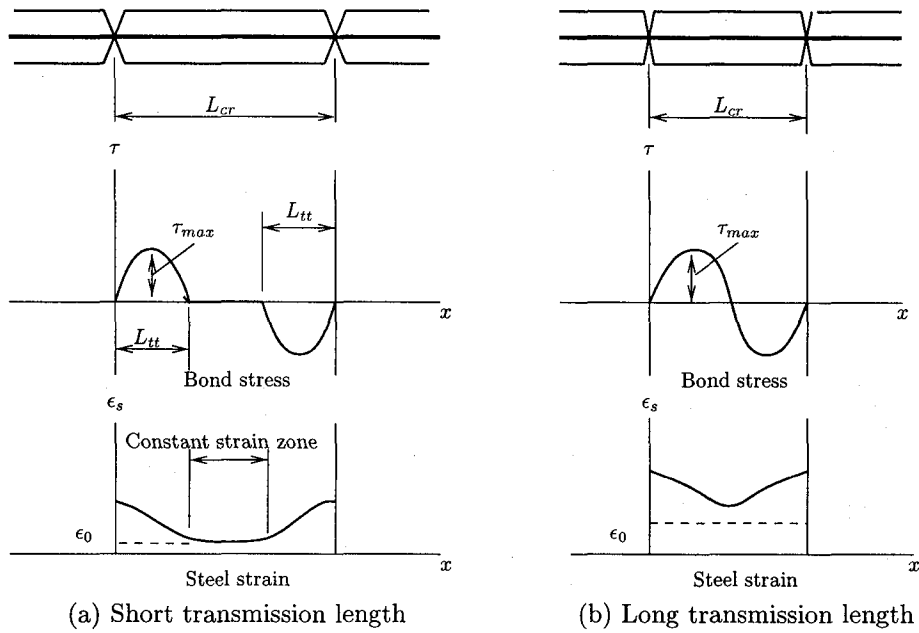


図6：Distribution of bond stress and steel strain

3.3 PIC版の設置長とひびわれ発生荷重の関係

以上の結果を考慮し、PIC版の設置長によりPIC版自体へのひびわれ発生の可能性を確認するため、PIC版の長さを20～100[cm]と変化させた場合と、目地がない連続配置の場合の解析を行った。図5は、PIC版の長さを変化させた場合のPIC版へのひびわれ発生荷重を示したものである。同図より、PIC版の長さを短くすればPIC版へのひびわれ発生荷重は大きくなり、PIC版を50[cm]以上とするとほぼ同じ荷重でPIC版にひびわれが発生することがわかる。また図中には、RC部へのひびわれ発生荷重(点線)と通常のRC部材のひびわれ発生荷重(一点鎖線:Case-1)も示している。PIC版のひびわれ発生荷重は、通常のRC部材のほぼ1.5倍であることがわかる。

3.4 一軸引張り部材モデルにおける解析

曲げを受けるRC部材の最初のひびわれはコンクリートの曲げ応力によって生じる。しかし、ひびわれ間隔がある程度小さくなれば、引張り部のコンクリート応力は曲げ変形の影響よりもひびわれ間の鉄筋との付着作用に支配される。このときのはりの引張り部の応力性状はRC引張り部材の性状と類似するので、RCはりのひびわれ間隔やひびわれ幅を理論的に検討するときには、一軸引張り部材にモデル化する方法が多く用いられている⁶⁾。強度や弾性係数の異なる複合材料からなるRC部材のひびわれ特性を検討する場合においても、一軸引張り部材としてのモデル化の可能性を調べるために、一軸引張りモデルを用いた解析を行った。PIC版などの高強度コンクリートをRC部材の曲げ引張り側に設置するとき、その設置長が設計で問題になる。一軸引張り部材モ

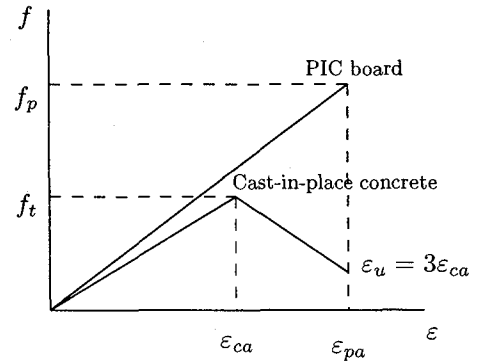


図7：Tension softening of concrete

デルが適用できれば、従来のRC部材のひびわれ特性との関連性ができ、設計に反映できると考えられる。

一軸引張りモデルにおける鉄筋のひずみ分布 $\epsilon_s(x)$ は付着応力 $\tau(x)$ の分布形を仮定することにより得られる。付着応力の分布形は図6に示すように、ひびわれ間隔が十分長い場合には伝達長は短くなり、ひびわれ間隔が短い場合には伝達長が長くなるので2つの場合に分けて考える。

(i) 伝達長が短い場合 ($L_{cr} > 2L_{tt}$)

$$\tau(x) = \tau_{max} \sin \frac{\pi}{L_{tt}} x \quad (1)$$

$$\tau_{max} = 0.6f_c'^{2/3} \quad (2)$$

$$\epsilon_s(x) = \frac{P}{E_s A_s} - \frac{4L_{tt}}{\pi E_s D} \tau_{max} \left(1 - \cos \frac{\pi}{L_{tt}} x\right) \quad (3)$$

(ii) 伝達長が長い場合 ($L_{cr} < 2L_{tt}$)

$$\tau(x) = \tau_{max} \sin \frac{2\pi}{L_{cr}} x \quad (4)$$

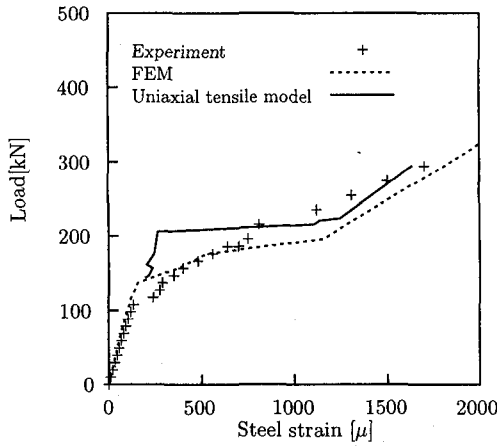


図 8(a) : Butt joint spacing 45[cm]

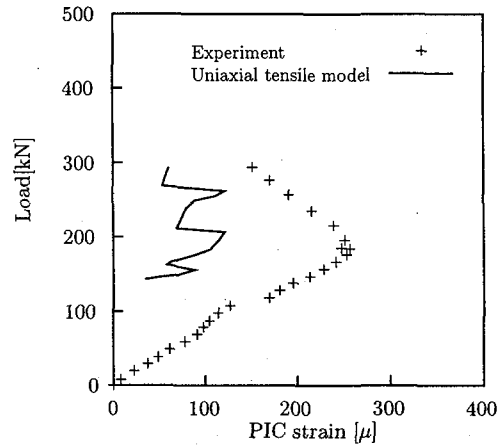


図 9(a) : Butt joint spacing 45[cm]

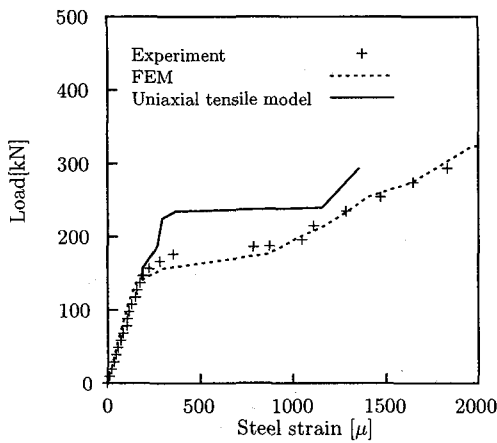


図 8(b) : Butt joint spacing 60[cm]

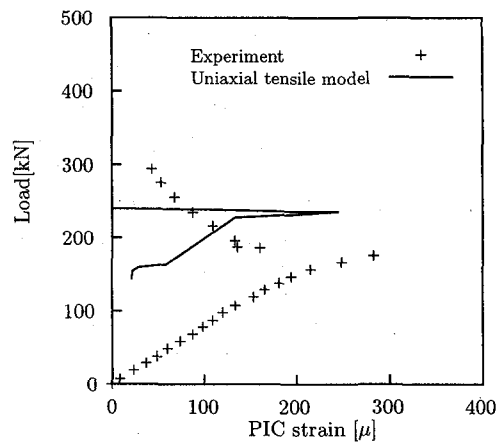


図 9(b) : Butt joint spacing 60[cm]

$$\tau_{max} = 0.6 f'_c{}^{2/3} \exp \left(1 - \frac{P}{P_0} \right) \quad (5)$$

$$\varepsilon_s(x) = \frac{P}{E_s A_s} - \frac{2 L_{cr}}{\pi E_s D} \tau_{max} \left(1 - \cos \frac{2\pi}{L_{cr}} x \right) \quad (6)$$

ここに、 f'_c はコンクリートの圧縮強度、 τ_{max} は最大付着強度、 E_s 、 A_s 、 D は、それぞれ鉄筋の弾性係数、断面積、鉄筋径である。また、全引張り荷重を P 、鉄筋の引張り分担力を P_s とすると、引張り力伝達長は $L_{tt} = (P - P_s) / 2D\tau_{max}$ で表わされる。 P_0 は初期ひびわれ発生荷重である。

一軸引張り状態において、鉄筋、コンクリート、PIC 版の引張り分担力の総和と全引張り荷重 P とはつりあっており、全引張り荷重から鉄筋の引張り力を差し引いた分がコンクリートと PIC 版が負担する引張り力 $Q(x)$ となる。“コンクリートと PIC 版のひずみは等しい”と仮定し、コンクリート、および PIC 版の応力-ひずみ関数をそれぞれ $f_c(\varepsilon)$ 、 $f_p(\varepsilon)$ とすると、式 (7) を満足するひずみが、コンクリートと PIC 版のひずみとなる。

$$Q(x) = A_c f_c(\varepsilon) + A_p f_p(\varepsilon) \quad (7)$$

このひずみが、限界ひずみに達するとコンクリートと

PIC 版にひびわれが発生する。以上のようにして一軸引張りモデルの解析を行うことができる。

本解析では、PIC 版の応力-ひずみ関係は図 7 に示すように許容引張りひずみ ε_{pa} を 0.026[%] とし、線形弾性モデルを用いた。一軸引張り状態では、コンクリートと PIC 版は一体として挙動すると仮定しているの、実際は複合部材としての応力-ひずみ関係のモデル化が必要であるが、本解析ではコンクリートの応力-ひずみ関係と PIC 版の応力-ひずみ関係に、それぞれの断面積を乗じて合計した引張り力-ひずみ関係式 (7) を用いた。PIC 版にひびわれが発生する条件は、コンクリートと PIC 版のひずみが PIC 版の許容引張りひずみ ε_{pa} に達したときとした。コンクリートは、伸び能力の大きな PIC 版と一体化されているため、PIC 版に拘束されコンクリートの許容ひずみに達してもひびわれが発生せず、PIC 版の伸びに追従してひずみがさらに増加するものと仮定し、図 7 に示すようにコンクリートのひずみ軟化域を考慮して、コンクリートの引張り軟化域を一次関数でモデル化した応力-ひずみ関係を用いた。

図 8(a), (b)、および図 9(a), (b) は、それぞれ PIC 版

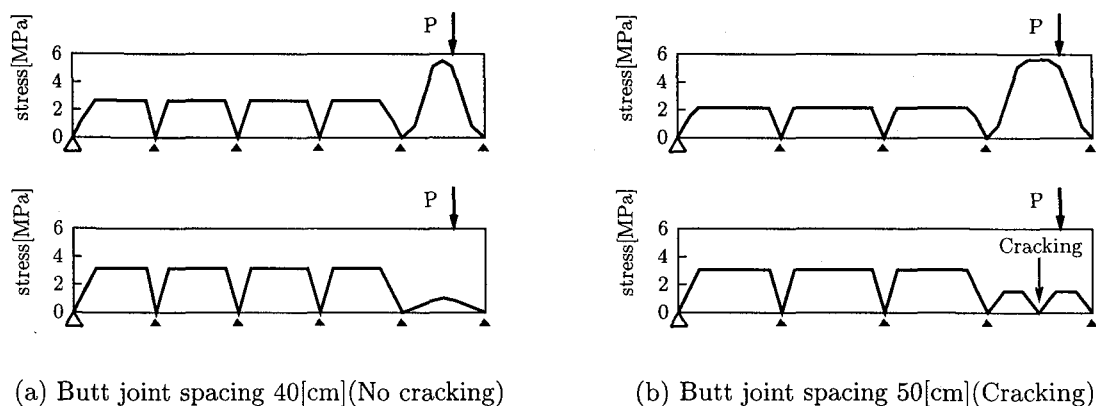


図 10 : Mechanism of cracking in PIC board

を目地間隔 45[cm], 60[cm] で設置した場合の、一軸引張りモデルによる荷重－鉄筋ひずみ曲線、および荷重－PIC 版ひずみ曲線を示したものである。図中には実験値、および FEM 値も図示している。実験、および解析結果において、目地間隔が 45[cm], 60[cm] の場合とも、荷重の増加とともに鉄筋ひずみは増加している。しかし PIC 版のひずみは 60[cm] の場合には、終局ひずみに達した後、急激に小さくなるのに対し、45[cm] の場合には、PIC 版のひずみは 60[cm] ほどには急減しない。これは、コンクリートと鉄筋の付着応力状態が影響しているものと考えられる。

図 10 は PIC 版の応力状態により、PIC 版にひびわれが発生するメカニズムを示したものである。図 10(a) は PIC 版のひずみが許容引張りひずみ ε_{pa} に達する前に、コンクリートと鉄筋の付着応力が付着強度に達しつづける場合であり、図 10(b) は付着応力が付着強度に達する前に PIC 版の許容引張りひずみに達した場合である。

これらの結果は、一軸引張り部材モデルの適用可能性を示唆するものと考えられる。本解析で得られる結果は、コンクリートと PIC 版の複合部材としての応力－ひずみ関係により決まるので、これを精度よくモデル化する必要がある。しかし、コンクリートと PIC 版の一体化の度合など一概に数量化できない因子や、外的に拘束されたコンクリートの引張り応力－ひずみ関係などの不確定因子を多く含んでおり、今後さらに検討する必要がある。

4. まとめ

本論文では、載荷実験、2 次元非線形有限要素解析、および一軸引張り部材モデルによって、PIC 版を埋設型枠とした RC 部材のひびわれ挙動について検討した。実験、および解析結果は以下のようにまとめられる。

1. 実験的、および理論解析でも、曲げ引張り側に PIC 版を配置した場合、PIC 版の設置長により PIC 版

のひびわれ発生荷重が変化することがわかった。

2. PIC 版の長さを変化させて 2 次元 FEM 解析を行ったところ、PIC 版自体のひびわれ発生荷重は PIC 版の設置長が長いほど小さくなることがわかった。しかし、50[cm] を越えると一定荷重で PIC 版自体にひびわれが発生する。
3. PIC 版を設置した RC はりの PIC 版のひびわれ発生荷重は通常の RC はりのひびわれ発生荷重の 2 倍程度である。したがって、PIC 版で被覆することにより使用限界状態における RC 部材の耐久性向上に大きく貢献できるものと考えられる。
4. PIC 版とコンクリートのように、強度や弾性係数の異なる複合材料からなる RC 部材のひびわれ性状を検討する場合においても、一軸引張り部材としてのモデル化が可能である。

5. あとがき

本論文では PIC 版を埋設型枠に用いた RC はりについて検討したが、REC などの高強度コンクリートを用いた場合でも、同じような結果が得られるものと考えられる。また本論文では、PIC 版を曲げ引張り側に配置した場合について、主に解析的な考察を行ったが、曲げ圧縮側に配置した場合の終局耐力が増加する結果も得られているので、これに関しては今後の検討課題としたい。曲げ引張り側に配置する場合は使用限界状態における効用について、また曲げ圧縮側に配置する場合には終局限界状態における効用について、別々に検討すべきであると考えている。

PIC 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、かつコンクリート構造物の有効断面として考慮でき、構造物の耐久性、耐食性を大幅に改善できるものと考えられる。実用化においては、損傷を受けた PIC 版、および接合部の保守などの技術的問題や接着材の劣化問題についても考慮する必要がある。

ある。

本研究を遂行するにあたり、九州大学工学部 Yuqing Liu 先生から 2 次元非線形 FEM 解析プログラムに関してご協力戴きました。ここに記して感謝申し上げます。

なお、本研究は平成 7 ～ 9 年度文部省科学研究費、試験研究 B の補助で行ったことを付記します。

参考文献

- 1) 内藤隆史・松岡康訓・進藤竹文・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
- 2) 渡辺明・小沢俊司・鶴田健：PIC 版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
- 3) 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 RC 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
- 4) 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
- 5) 松田浩・鶴田健・出光隆・崎山毅：PIC 版 RC 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，構造工学論文集，Vol.39A，pp.85-96，1993.3
- 6) 角田与史雄：曲げを受けるコンクリート部材のひびわれとたわみに関する研究の現状，土木学会論文集，No.384，VI-7，pp.21-32，1987.8
- 7) 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，および引張り剛性の解析，コンクリート工学年次論文報告集，11-2，pp.159-164，1989
- 8) 来海豊：曲げを受ける鉄筋コンクリートはりのひびわれ間隔の算定方法に関する研究，土木学会論文集，No.478，V-21，pp.31-40，1993.11
- 9) 彦坂熙・J.BOLANDER Jr.・Y.LIU：鉄筋コンクリート構造物の非線形 FEM 解析における付着すべりモデルの精密化，構造工学論文集，Vol.40A，pp.1357-1367，1994

(1997 年 9 月 26 日 受付)