

論文 高耐久性埋設型枠接合部をひび割れ誘発目地とした RC はりの 2次元 FEM 解析

鶴田 健*1・松田 浩*2・彦坂 熙*3・山口浩平*4

要旨： ポリマーを含浸したコンクリート薄板 (PIC 版) を埋設型枠として用いることにより、コンクリート工事が合理化でき、コンクリート硬化後は有効断面としての機能することが明らかにされている。しかし PIC 版で単に被覆しただけでは PIC 版自体にひび割れ発生の可能性があり完全な防食効果が期待できない。本論文は目地の設置間隔、PIC 版の設置方法について検討したものである。数値解析結果より、PIC 版にひび割れが発生しない設置長が存在すること、曲げ圧縮側設置により終局耐力が増大すること、さらに PIC 版のサンドイッチ状設置は使用・終局限界状態ともに改善されることが示されている。

キーワード： 高耐久性埋設型枠、ポリマー含浸コンクリート、ひび割れ誘発目地、目地間隔

1. はじめに

近年、日本の海岸地帯においては、塩素の浸入によるコンクリート構造物の早期劣化が問題となっており、コンクリート工事のプレキャスト化、ひび割れ防止、高耐食性化、コンクリート被覆・補修材料が注目されている。ポリマー含浸コンクリート (以下 PIC と略記) 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、高強度で、遮塩・遮水性、化学抵抗性、耐摩耗性、耐凍害性に優れていることは広く知られている。筆者らの一人は、コンクリート構造物の永久型枠として、またコンクリート工事の省力化を図るために、PIC を用いたプレキャスト薄板 (以下 PIC 版と略記) を開発し、施工性、強度特性、現場打ちコンクリートとの一体性、耐久性、景観性に関する研究を行ってきた¹⁾。

鉄筋コンクリート (以下 RC) 構造はひび割れ発生を許容するので、PIC 版でコンクリート表面を連続的に覆うと、PIC 版自体にひび割れ発生の可能性があり、完全な防食効果が期待できなくなる可能性がある。このため、PIC 版の長さを制限し、PIC 版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、その部分をひび割れ誘発目地とすれば、ひび割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割れは、発生間隔が比較的大きくなるので、このひび割れ発生間隔に合わせて PIC 版を設置すれば、ジョイント部を誘発目地としてひび割れ発生を局所化できるものと考えられる。また、ジョイント部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目地部の打設コンクリートにひび割れが発生しても、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することができるものと考えられる。

PIC 版の設置長は、PIC 版自体にひび割れが発生しないように、最大ひび割れ算定式²⁾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よい。しかし、施工性やその後の維持・補修を考慮すると、PIC 版にひび割れが発生しない範囲でジョイント数を少なくする方が望ましいものと考えられる。

本論文は、以上に鑑み、PIC 版のような高強度で高耐久性材料からなる薄板を埋設型枠として使

*1 小沢コンクリート工業 (株) 技術研究所副部長 工修 (正会員)

*2 長崎大学助教授 工学部 構造工学科 工博 (正会員)

*3 九州大学教授 工学部 建設都市工学科 工博 (正会員)

*4 九州大学大学院生 工学研究科 建設都市工学専攻

用するときのジョイントの設置長と設置位置について検討したものである。

曲げひび割れ間隔を理論的に検討するときには、一軸引張部材にモデル化する方法が多く用いられている³⁾。筆者ら⁴⁾もひび割れ発生後の引張り域コンクリートは一軸引張状態にあるものと仮定し、篠原ら⁵⁾の方法を用いてひび割れ解析を行った。その結果、解析的にもPIC版自体にひび割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。

本論文は一軸引張部材にモデル化することなく、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⁶⁾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割れ発生におよぼす影響を解析的に調べ、PIC版をRCはりに使用する場合にPIC版にひび割れが発生しないような設置長を決定することを目的としたものである。さらに、実験結果ではPIC版を曲げ圧縮側に設置すると、終局耐力が増大する結果が得られたので、その点をふまえ、PIC版の最適設置方法についての検討を行った。

2. 曲げ載荷試験の概要および実験結果

2.1 供試体および載荷試験方法

載荷試験で用いた供試体は、PIC版を設置しない通常のRCはり、PIC版を所定の目地間隔で引張側および圧縮側に設置した供試体の計3体で、それぞれCase1, Case2, Case3とする。各供試体の長さは450cmで、スパン長400cm、載荷スパン80cmとして静的載荷試験を行った。主鉄筋のかぶりは40mm(Case1,3)および57mm(Case2)とし、PIC版の厚さは25mm(コンクリート板17mm+付着部8mm)で、図1および表1に示すように配置した。Case2において、PIC版の長さは目地部でひび割れが発生するように制限されており、中央より左半分は60cm間隔で、右半分は45cm間隔で設置した。PIC版引張側詳細を図2に示す。鉄筋には異形鉄筋SD345を用いた。

載荷試験では、コンクリート表面のひずみ、鉄筋ひずみ、たわみ、荷重を測定するとともに、ひび

割れ発生状況を観察した。

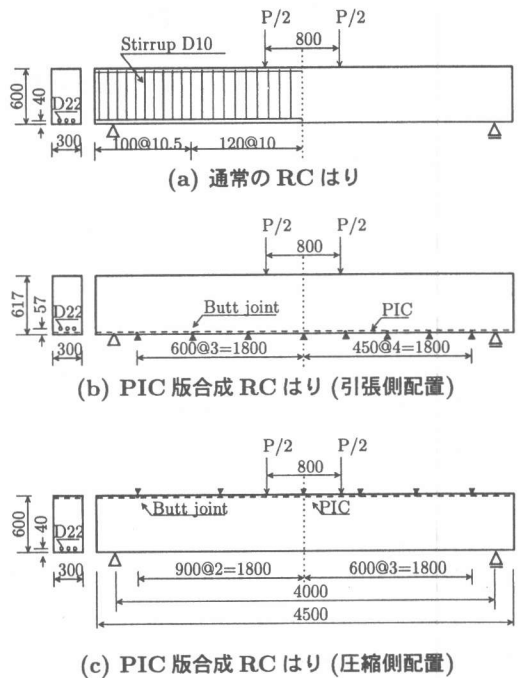


図1 実験供試体

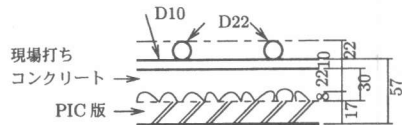


図2 PIC版引張側詳細

表1 供試体の諸元

項目	諸元
主鉄筋のかぶり	Case1, 3 : 40mm Case2 : 57mm
PIC版の厚さ	25mm (17mm+ 付着部 8mm)
鉄筋量	0.7%
供試体の断面形状	h = 60cm, b = 30cm
載荷スパン	400cm, 供試体全長 450cm
PIC版の目地間隔	引張り側 : 45cm, 60cm 圧縮側 : 60cm, 90cm
供試体数 (3体)	
Case1	PIC版なし (比較用供試体)
Case2	PIC版引張側配置
Case3	PIC版圧縮側配置

2.2 実験結果

実験結果は次のようにまとめられる。なお、図3にCase1, 2, 3のひび割れ発生状況を示す。

- (1) 通常のRCはりとはPIC版を下側設置したRCはりの荷重-変位曲線の差異はほとんど認められなかった。
- (2) 打設コンクリートとPIC版の剥離は認められなかった。
- (3) 通常のRCはりでは均等にひび割れが発生するのに対してPIC版を下面設置した供試体ではひび割れが目地部に局所化した。
- (4) PIC版を上側配置すると耐力が増大した。

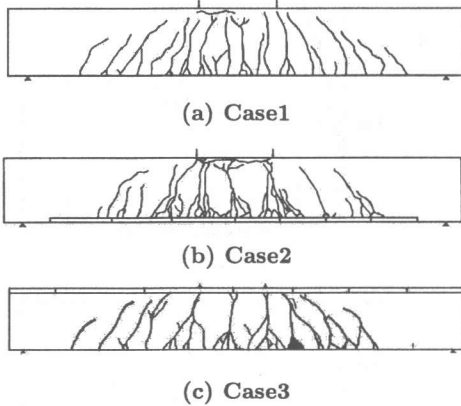


図3 ひび割れ発生状況

3. 数値解析

3.1 解析手法の概要

本解析での要素モデルは、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、鉄筋とコンクリート間の付着にはリンク要素を用いた。リンク要素を用いて非線形付着-すべりを考慮することにより、ひび割れ発生による付着強度低下を考慮できる。

コンクリートの材料モデルは分布ひび割れモデルを用い、コンクリートの一軸応力-ひずみ関係は、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(図4)、引張側ではひびわれ発生までは線形弾性、ひび割れ発生後は指数軟化ひずみ軟化モデル(図5)とし表2に示す数値を用いた。なお、圧縮強度、弾性係

数は実験時に行った試験より求め、引張強度はその1/10と仮定した。また、破壊条件は、二軸圧縮にはKupferの実験に基づく2次限界曲面、引張-圧縮には $\sigma_{1cr} = f_t(1 - \sigma_2/f_c)$ 、二軸引張には $\sigma_{1cr} = f_t$ とした。ここに、 σ_{1cr} はひび割れ強度、 f_t は一軸引張強度である。また、せん断剛性低減係数 β を導入し、せん断弾性係数 G を βG ($0 < \beta < 1$) に低減することでひび割れ面のせん断伝達特性を評価した。

鉄筋の材料モデルはひずみ硬化係数0.01のバイリニアモデルとし、除荷および再載荷剛性は弾性とした。なお、鉄筋の降伏応力は載荷実験での降伏ひずみ(表3)を用いた。鉄筋とコンクリート間の付着モデルにはリンク要素を用いて非線形付着-すべり考慮した。数値解析に用いた付着応力-すべり関係は文献⁶⁾に詳細が示されている。

数値計算では、ひび割れ発生から進展まで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、2次元有限要素法を用い荷重増分解析を行った。PIC版および鉄筋近傍の要素分割メッシュを図6に示す。実験結果よりPIC版とコンクリートの付着は完全で、PIC版の剥離は生じないものとして解析した。

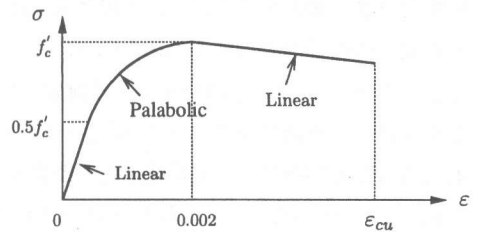


図4 一軸圧縮コンクリートの $\sigma - \epsilon$ 関係

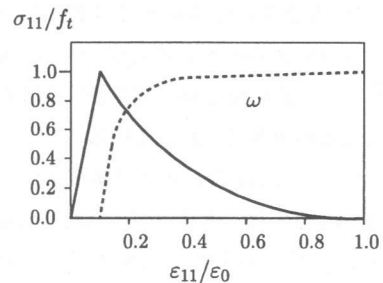


図5 引張軟化曲線と損傷度関数 ω

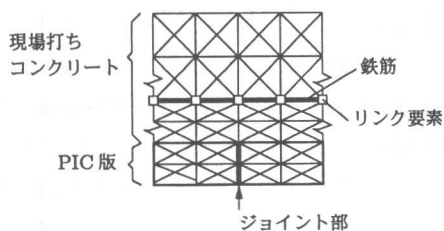


図6 有限要素モデル

表2 現場打ちコンクリートとPICの物性値

	現場打ちコンクリート	PIC
圧縮強度 [MPa]	33.9	184
引張強度 [MPa]	3.39	18.4
弾性係数 [MPa]	2.4×10^4	4.1×10^4
終局圧縮ひずみ	0.0035	0.0045
終局引張りひずみ	0.000914	0.000340

表3 鉄筋の物性値

	Case1	Case2	Case3
降伏強度 [MPa]	407	429	408
弾性係数 [MPa]	2.1×10^5		
ひずみ硬化係数	0.01		

3.2 実験結果とFEM解析結果の比較

表4は実験および解析結果における打設コンクリート部、PIC版のひび割れ発生荷重、および終局耐力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やや低めとなった。これはコンクリートの終局圧縮ひずみを0.0035と仮定して解析したためである。ちなみに、圧縮ひずみを大きくして解析すると実験結果と一致する。

図7(a)～(c)に、それぞれCase1～3の実験、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7(a), (b)より、誘発目を設けてPIC版を曲げ引張り側に設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、ひび割れ発生および鉄筋降伏後挙動は実験値と解析値はほぼ一致していることがわかる。

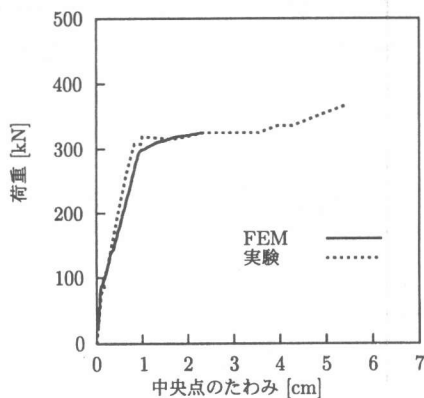
図8(a)は、Case2の目地間隔45cmのPIC版中間点、およびRCはりの同じ位置での荷重-鉄筋ひずみ曲線を示したものである。同様に図8(b)は目地間隔が60cmの場合である。

表4 ひび割れ発生荷重および破壊荷重

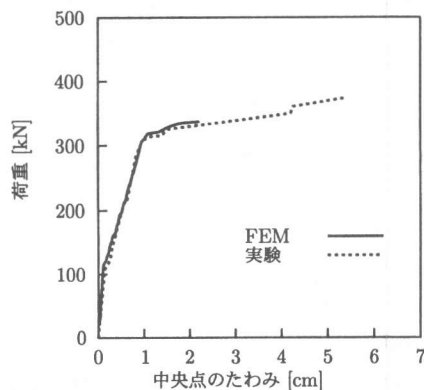
	実験			FEM		
	P_{cr} [kN]		P_u [kN]	P_{cr} [kN]		P_u [kN]
	C	PIC		C	PIC	
Case1	83.3	-	363.6	98.0	-	322
Case2	78.4	186.2	369.5	98.0	176.4	335
Case3	94.1	413.6	420.4	117.6	352.8	343

C: 現場打ちコンクリート, P_{cr} : ひび割れ発生荷重

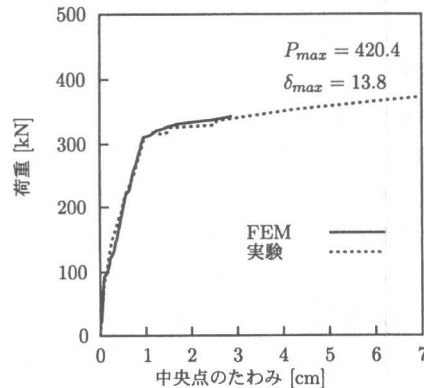
P_u : 終局耐力



(a) Case1

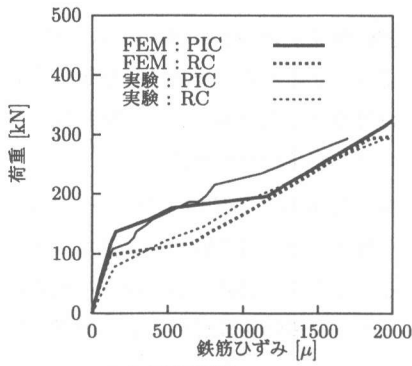


(b) Case2

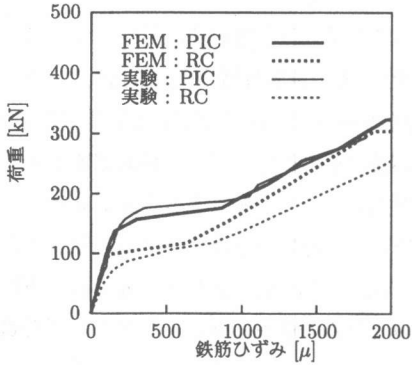


(c) Case3

図7 荷重-たわみ関係



(a) 目地間隔 45cm



(b) 目地間隔 60cm

図8 目地間隔の違いによる荷重－鉄筋ひずみ関係

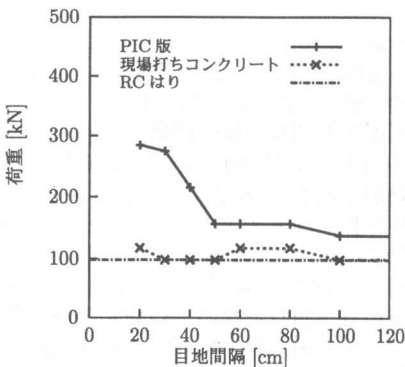


図9 ひび割れ発生荷重とPIC版の設置長の関係

図8より、Case1のRCはりでは実験結果とFEM解析結果との差が大きく、Case2のPIC版を設置したはりでは実験結果とFEM解析結果との差が小さいことがわかる。とくに、目地間隔が60cmでは実験結果とFEM解析結果とはよく一致している。Case1のRCはりは目地がないのでひび割れ発生位置が特定できなく、ひび割れ発生位置によって鉄筋ひずみが大きく変化する。

一方、Case2のPIC版間の目地がある場合はひび割れ発生位置を目地部に誘発することができるので、実験結果とFEM解析結果における鉄筋ひずみがよく一致するものと考えられる。

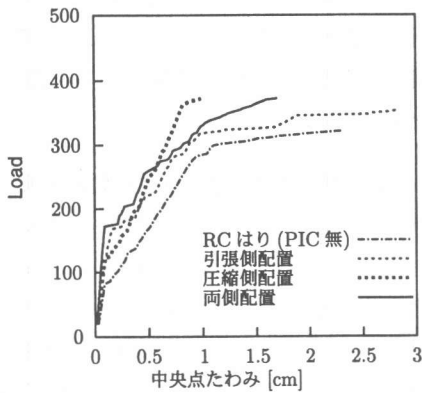
3.3 目地間隔とひび割れ発生荷重の関係

目地間隔によるPIC版のひび割れ発生の影響を調べるため、PIC版の長さを20～100cmと変化させた場合と、目地がない連続設置の場合の解析を行った。図9はPIC版の長さを変化させた場合のPIC版のひび割れ発生荷重を図示したものである。同図よりPIC版の長さを短くすればPIC版のひび割れ発生荷重は大きくなり、PIC版を50cm以上とするとほぼ同じ荷重でPIC版にひび割れが発生することがわかる。また図中には、RC部へのひび割れ発生荷重(点線)とCase1のひび割れ発生荷重(一点鎖線)も示している。PIC版(50cm以上)のひび割れ発生荷重は通常のRCはりの約1.5倍であることがわかる。

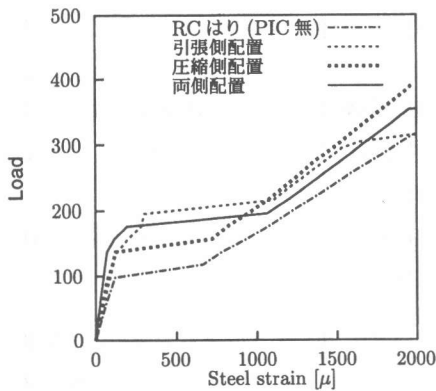
3.4 PIC版の厚さおよび設置位置の影響

PIC版の厚さおよび設置位置の関係を調べるために、PIC版を曲げ引張側および曲げ圧縮側に目地間隔40cmで設置し、図1に示した供試体のPIC版厚を2～10cmと変化させた場合について解析を行ったが、PIC版が厚くなるとどちらに設置してもひびわれ発生荷重および終局耐力は増加する結果となった。

図10は、PIC版を設置しない場合、10cm厚PIC版を下側設置した場合、10cm厚PIC版を上側設置した場合、5cm厚PIC版を上下両側に設置した場合のFEM解析結果におけるはり中央点の(a)荷重－たわみ曲線および(b)荷重－鉄筋ひずみ曲線である。図10より、PIC版を両側に設置した場合は初期剛性が増加し、また終局耐力もPIC版を上側に設置した場合とほぼ同程度に増加することがわかる。このことより、PIC版を上・下側の両側に設置してサンドイッチ構造とすることにより、使用限界状態および終局限界状態の両方において耐久性能および耐力に優れた構造を設計できるものと考えられる。



(a) 荷重-たわみ関係



(b) 荷重-鉄筋ひずみ関係

図 10 PIC 版設置位置の影響

4. まとめ

本論文では載荷実験および2次元FEM解析によって、PIC版を埋設型枠としたRCはりのひび割れ、および終局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. 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版自体のひび割れ発生荷重はPIC版の設置長が長いほど小さくなるのが分かった。しかし、50cmを超えると一定荷重でPIC版自体にひび割れが発生する。
2. 数値解析によるPIC版を下側設置したRCはりのPIC版へのひび割れ発生荷重は通常のRCはりのひび割れ発生荷重の1.5倍程度である。

3. PIC版を曲げ引張り側、曲げ圧縮側に設置することにより、それぞれ使用限界状態におけるひび割れ発生荷重、終局限界状態における終局耐力が増加する。

4. 適切な箇所に適切な目地間隔でPIC版を設置すれば、PIC版にひび割れを生じさせることなく、耐久性および終局耐力に優れたRC構造物を設計することができる。

5. あとがき

本論文では、PIC版を埋設型枠として用いるときのPIC版の設置位置と設置間隔について検討したが、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。

最後に、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解析プログラムの使用に関して数多くのご助言を戴きました。ここに記して感謝申し上げます。

本研究は平成7～9年度文部省科学研究費、基盤研究(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.21-23，1991.9
- 2) 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.1-10，1970.9
- 3) 角田与史雄：曲げを受けるコンクリート部材のひび割れとたわみに関する研究の現状，土木学会論文集，No.384，V-7，pp.21-32，1987.8
- 4) 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
- 5) 篠原賢至・島弘：一軸鉄筋コンクリート部材におけるひび割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.159-164，1989.6
- 6) 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.1357-1367，1994.3