

PIC 板または鋼板で補強された RC はりの鉄筋の付着領域を考慮した非線形 FEM 解析

Non-linear FE analysis of RC beams reinforced with PIC panels or steel plates by considering of bond effect of reinforcing bar

松田浩^{*1}・崎村陽介^{*2}・安東祐樹^{*3}・鶴田健^{*4}・林山豊^{*5}・森田千尋^{*6}・崎山毅^{*7}

Hiroshi Matsuda, Yosuke Sakimura, Yuki Ando, Ken Tsuruta, Yutaka Hayashiyama, Chihiro Morita and Takeshi Sakiyama

^{*1}正会員 工博 長崎大学 工学部 構造工学科 (〒 852-8521 長崎市文教町 1-14)

^{*2}学生会員 長崎大学大学院生 生産科学研究科 環境システム工学専攻 (〒 852-8521 長崎市文教町 1-14)

^{*3}正会員 ショーボンド建設(株) 補修工学研究所 (〒 305-0003 つくば市桜 1-17)

^{*4}正会員 博士(工学) マテラス(株) 技術部 (〒 168-0074 東京都杉並区上高井戸 1-7-16)

^{*5}正会員 (株) 富士ピー・エス 九州支店・技術部 (〒 810-0073 福岡市中央区舞鶴 2-2-11)

^{*6}正会員 博士(工学) 長崎大学 工学部 構造工学科 (〒 852-8521 長崎市文教町 1-14)

^{*7}正会員 工博 長崎大学 工学部 構造工学科 (〒 852-8521 長崎市文教町 1-14)

In recent year, for repairing and strengthening of deteriorated concrete structures, PIC panels and bonded steel plates reinforcement are often adopted. This paper presents a numerical analysis of nonlinear behavior of RC beams reinforced with PIC panels and bonded steel plates. Taking bond effect of reinforcing bars, the size of the RC effective zone of RC beams reinforced with the different materials, and introducing the contact element in gluing surface between concrete and epoxy resin in FE analysis, it could analyzed non-linear behaviors which included the exfoliation of the steel plates.

Key Words : PIC panels, bonded steel plates, RC effective zone, non-linear FEA, peeling

1. まえがき

コンクリートは従来から鋼に比べ耐久性に優れており、劣化のないメンテナンスフリーな材料といわれている。本来、コンクリート構造物は設計・施工計画が適切な管理下で施工されたものであれば、耐久性を十分に発揮しその機能が失われるものではない。

しかし、この四半世紀の間に海岸付近の塩害によるコンクリートの劣化から始まり、下水道関連施設のコンクリートの劣化、融雪剤によるコンクリート床板の劣化、鉄筋の腐食膨張によるコンクリート片の剥落など、厳しい環境下だけではなく、通常的环境下でのコンクリート構造物の耐久性に対する信頼性が問題視されるようになってきた。さらに、これまでに建設されてきた多くのコンクリート構造物は耐用年数に達し補修の段階を迎えており、その上、昨今の通過交通量や過積載車両の増大に伴って道路橋 RC 床板の劣化・老朽化が急速に進行し、既設道路橋のコンクリート床板を補修・補強する必要に迫られるようになってきた。

そのため、劣化したコンクリート構造物の補修・補強方法として、種々の工法が開発されている。例えば、ポリマー含浸コンクリート (Polymer Impregnated Con-

crete: 以後 PIC と略記) 板を設置して鉄筋の腐食性因子の侵入を防止し、高耐久性を付与することを目的とした PIC 板埋設型工法や、鋼板や連続繊維シートを接着することで不足鉄筋量を外部から補う鋼板接着工法や連続繊維シート接着工法などが考案され実施されている。

これらの補修・補強工法は、主に実験により耐力性能や疲労性能の照査実験が行われており、そのシミュレーション解析も最近実施されるようになってきた。

筆者らも、これまで PIC 製薄板を曲げ引張縁および曲げ圧縮縁に設置した RC はりを製作し、ひび割れ発生から破壊に至るまでの非線形挙動について実験および解析により検討を行ってきた^{1)~4)}。PIC 薄板と RC 部材の接合面は一体性確保を目的として、PIC 板表面を粗面仕上げしており、実験では接合部からはく離は生じなかった。したがって、解析においても完全付着状態と仮定して FEM 解析を実施し、FEM 解析結果は実験結果をよくシミュレートできることを確認している。

一方、鋼板や連続繊維シートを接着した RC はりの載荷実験では、接合面ではく離が生じる場合があり、接合面のはく離により耐力が決定されることが確認されている^{5)~7)}。したがって、はく離挙動を含めた RC はりの非線形挙動について詳細に解明する必要がある。

本研究では、PIC 板あるいは鋼板などの比較的曲げ

[†] Dedicated to the memory of Prof. Michihiro KITAHARA

剛性の大きい材料を補強材として用いた RC はりを対象として、2次元および3次元非線形 FEM 解析によるシミュレーションを実施したものである。鋼板補強 RC はりは、鋼板がはり底面の全幅ではなく部分的に接着されているため、3次元 FEM 解析も実施し、2次元と3次元解析の同一性を確認するためと、部分的に接着された場合の2次元解析への適用性を精確に考慮することを目的として実施した。また、はく離を含めた非線形挙動を統一的な方法で解析するために、いずれの補強 RC はりの場合においても接触面には接触要素を導入して FEM 解析を実施した。さらに、RC 断面中のコンクリートのテンション・スティフニングが、鉄筋の有効付着領域内 (RC zone) とその領域外 (PL zone) とでは異なることが知られている⁸⁾ので、本解析においても、PIC 板あるいは鋼板を補強材として設置した RC はりの鉄筋の有効付着領域の算定法を提案し、汎用 FEM コード (MARC) にて非線形 FEM 解析によるシミュレーションを実施した。

2. 鉄筋の付着領域

RC 部材は鉄筋とコンクリートの付着効果によりひび割れ発生後の挙動が複雑になる。前川・岡村⁹⁾は、RC 部材のひび割れ発生後の非線形挙動を平均応力-平均ひずみを導入した構成則を提示し、さらに、安ら⁸⁾は、その構成則を用いて鉄筋付着領域を考慮した解析モデルを提案している。本論文では、基本的にこれらの構成則と解析モデルを用いて非線形 FEM 解析を実施する。

2.1 RC zone と PL zone の非線形挙動

鉄筋の有効付着領域については、安ら⁸⁾の論文に詳しく掲載されているので、ここでは概要を記載する。

RC はりの引張領域のコンクリートの材料特性は鉄筋位置からの距離に応じて変化し、鉄筋の付着効果によりひび割れ後においても引張力を負担できるコンクリート、すなわち、鉄筋付着領域内 RC zone (Reinforced Concrete zone) のコンクリートと、鉄筋の付着効果の及ばない領域 PL zone (Plain concrete zone) の無筋コンクリートと同様の引張特性を示すコンクリートがある。この RC zone および PL zone では、テンション・スティフニング効果の程度に差があり、特にひび割れ発生後の応力解放量に明確な差があることが確認されている。

図-1 は、ひび割れが生じたコンクリートの FEM モデルである。PL zone の要素にひび割れが生じた場合、ひび割れ発生後の引張軟化勾配が急であるため応力解放量が高くなり、隣接要素もひび割れが生じやすくなる。一方、RC zone の要素にひび割れが生じた場合、引張軟化勾配が緩やかであるため応力解放量は小さくなり、隣接要素にはひび割れが生じにくくなる。した

がって、RC はりの非線形解析を行う場合、そのモデルの RC zone の有効範囲が比較的小さい時は、ひび割れが急速に伝播することとなる。

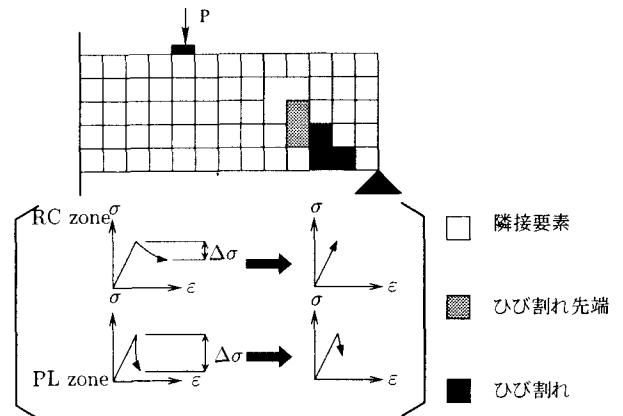


図-1 ひび割れ伝達における引張軟化の影響⁸⁾

2.2 RC zone の決定方法

RC zone の最大有効範囲は、鉄筋の直径、降伏強度、コンクリートの引張強度などによって決定される。安ら⁸⁾は、RC zone の次式 (1) により最大有効範囲を提案している。

$$A_{cmax} = \frac{A_s \cdot f_y}{f_t} \quad (1)$$

A_{cmax} : RC zone の最大面積,

A_s : 鉄筋断面積,

f_y : 鉄筋降伏強度,

f_t : コンクリート引張強度

2次元平面解析に適用する場合には、次式 (2) で RC zone の最大高さは決定される。

$$h_{max} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot d_b \cdot \sqrt{\frac{f_y}{f_t}} \quad (2)$$

h_{max} : RC zone の最大高さ,

d_b : 鉄筋径, f_y : 鉄筋降伏強度,

f_t : コンクリート引張強度,

$$h_{max}^2 = A_{cmax}$$

上式で与えられる RC zone の最大高さ h_{max} は、かぶり厚さが鉄筋の付着効果を十分に発揮できるような状態での算定式である。コンクリートかぶり厚さが小さければ、鉄筋は付着効果を発揮できず、RC zone の有効範囲は小さくなる。そのため、安ら⁸⁾は、次式 (3)

$$K = \left(\frac{t_c - d_b}{5.5 \cdot d_b} \right)^{0.5} \quad (3)$$

t_c : かぶり厚さ, d_b : 鉄筋径,

$$t_c < d_b \rightarrow K = 0, \quad t_c > 6.5d_b \rightarrow K = 1$$

で与えられる補正係数を乗じて、かぶり厚さと鉄筋附着効果についての関係を考慮して、RC zoneの最大高さを次式(4)のように決定している(図-2参照)。

$$(RC\text{zoneの最大高さ}) = K \cdot h_{max} \quad (4)$$

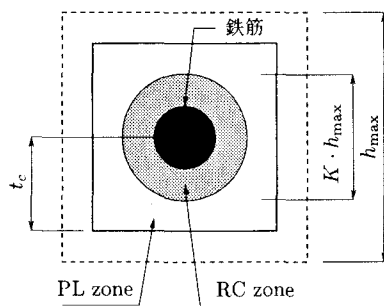


図-2 無補強 RC 断面の RC zone 決定法

2.3 通常の RC はり

図-3に、一般的なRCはり断面におけるRC zoneを示す。RCはりの2次元平面解析を行なう際には、同図(a)のように鉄筋のRC zoneの有効範囲が重複する場合は、単にRC zoneの一部としてみなし、同図(b)のように鉄筋のRC zoneの有効範囲が離れている場合には、RC zoneの有効範囲と等価な断面積となるように次式で表わされる等価高さ h_e を用いる。

$$h_e = \frac{n \cdot (K \cdot h_{max})^2}{b} \quad (5)$$

h_e : RC zoneの等価高さ、

n : 鉄筋本数、 b : RCはりの幅

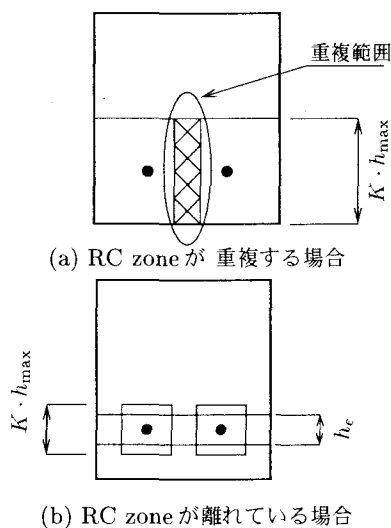


図-3 RC zone の決定方法

2.4 異種材料が設置された RC はり

RCはりに補強材が設置された場合、補強材の補強効果によりRC zoneの有効範囲が変化する。図-4に示すような補強材が設置されているRCはりを対象として、RC zoneの有効範囲の計算例を以下に示す。

なお、以下では、コンクリートの弾性係数を E_c 、引張強度を f_t 、かぶり厚さを t_c 、補強材の弾性係数を E_b 、

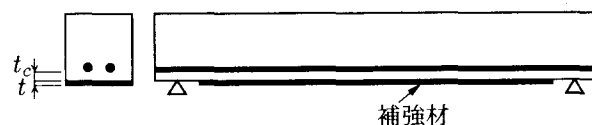


図-4 補強材設置 RC はり形状

引張強度を f_{bt} 、厚さを t 、鉄筋の弾性係数を E_s 、直径を d_b 、降伏強度を f_y とする。

(1) 補強材のコンクリート断面積への換算

補強材をコンクリート断面に換算し、かぶりコンクリートの一部と仮定する。補強材とコンクリートの弾性係数比 $n = E_b/E_c$ を換算係数とする。RC zoneの算定は、引張強度も重要な影響因子となるため、引張強度に関しても換算を行う(引張強度比: n_t 、補強材の接合幅: b')。すなわち、次式(6)のようになる(図-5参照)。

$$t'_c = \frac{t \cdot b' \times n \times n_t}{b} + t_c \quad (6)$$

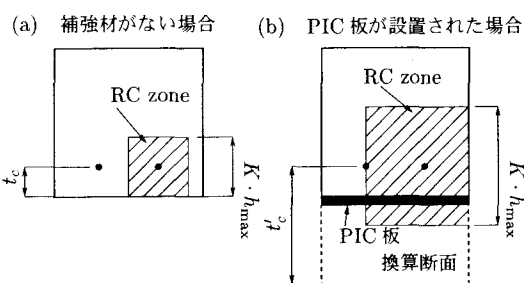


図-5 RC zone の決定方法

(2) RC zone 有効高さの計算

前項で計算したコンクリートかぶり厚さを用いて、RC zoneの有効高さを前式(2),(3)により算出する。以上の手順で、補強材が設置されたRCはりに対して、RC zoneの有効範囲を決定することができる。以下、補強材が設置されたRCはりのRC zoneの決定法は、本節で述べた決定法にしたがって決定するものとする。

2.5 3次元FEM解析での取り扱い

3次元FEM解析を行う際には、図-6に基づき、前と同様な方法でRC zoneの有効範囲を決定する。なお、上図における換算かぶり厚さ t'_c の算定には式(6)を用いる。

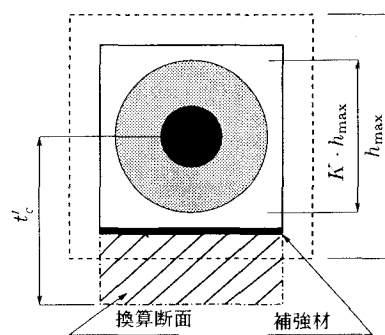


図-6 補強材設置 RC 断面の RC zone

3. 鉄筋の付着領域の確認のための解析

RC はりの非線形挙動を精度良くシミュレートする場合、RC zone の有効範囲の決定が重要となる。したがって、まず、鉄筋の付着領域の確認のための解析を実施した。解析対象は、山梨大学で実施された等曲げ区間を有する RC 単純はりの載荷試験¹⁰⁾である。

3.1 実験の概要

図-7 に示すように、載荷スパン 850mm、有効高さ 150mm、幅 150mm で、せん断スパン比 5.67、引張主鉄筋 D10×2 本 (鉄筋比:0.64%)、圧縮鉄筋は D10×2 本、せん断補強筋 D10 の供試体を対象とした。載荷は幅 80mm、高さ 30mm の鋼板を介して行われ、ピーク荷重後、荷重が十分に小さくなるまで実験が実施された。実験で用いられたコンクリートおよび鉄筋の材料定数を表-1、2 に示す。

表-1 コンクリートの材料定数

供試体名	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
B10-2	34.7	2.8	29400

表-2 鉄筋の材料定数

鉄筋径	弾性係数 (N/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)
D10	1.81×10 ⁵	358

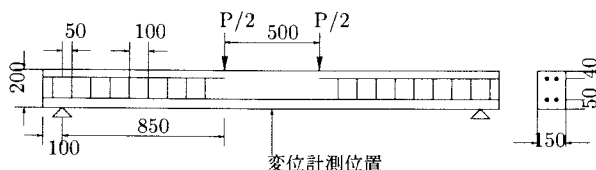


図-7 供試体概要 (単位 mm)

3.2 解析モデルと構成則

解析モデルは一要素のサイズを約 20mm×20mm として作成した。使用した要素は、コンクリートを 4 節点平面ひずみ要素、鉄筋を 4 節点平面ひずみリバー要素を用いた。載荷は、変位制御型の増分荷重を作用させた。材料構成則は以下の決定方法にしたがって作成した。

(1) コンクリート圧縮域

コンクリート圧縮域の構成則に関しては、圧縮破壊エネルギーおよび要素寸法を考慮した軟化モデル¹⁰⁾を採用した。次式 (7) で圧縮破壊エネルギーを算出し、式 (8) で終局ひずみを決定した。なお、本解析では、 l_{eq} を 20mm、 ε_0 を 2000 μ とした。

$$G_{ft} = 8770 \cdot (f_c)^{1/2} \quad (\text{N/m}) \quad (7)$$

$$\varepsilon_m = \frac{G_{fc}/f_c}{l_{eq}} + \frac{\varepsilon_0}{2} \quad (8)$$

G_{ft} : 圧縮破壊エネルギー,

f_c : コンクリート圧縮強度,

ε_m : 終局ひずみ,

l_{eq} : 要素等価長さ,

ε_0 : 圧縮強度時ひずみ

なお、コンクリートの圧縮破壊エネルギーは式 (7)、(8) より、88.5N/m となる。

(2) 鉄筋

鉄筋の構成則には、RC zone の有効範囲を決定した上で、前川¹¹⁾によるひび割れを生じた鉄筋コンクリート部材の一軸引張モデルから得られる構成則算出法に従い、鉄筋とコンクリートの平均応力-平均ひずみ関係を算出して構成則に使用している。平均応力-平均ひずみ関係を算出する際に重要となる RC zone 有効範囲の決定法に関しては、前述したように文献 8) の方法に従い決定した。

(3) コンクリート引張領域の RC zone, PL zone

コンクリート引張領域における RC zone の材料構成則は、鉄筋の構成則を作成する際に用いたコンクリートと鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係から算出した。また、PL zone の材料構成則に関しては、引張破壊エネルギーをほぼ無視できるものとし、PL zone に生ずる引張応力が、コンクリート引張強度に到達後で急激な荷重低下を起こし、脆性的に破壊する構成則とした。なお、コンクリートの引張域の弾性係数は圧縮域の場合と同値とし、引張強度に達するまで線形と仮定した。

(4) コンクリートひび割れ発生後の特性

コンクリートにひび割れが発生した後、ひび割れた要素のせん断保有率が、RC はりのひび割れ進展形状や非線形域における剛性に影響を与える。本解析では、非線形有限要素解析プログラム DIANA が採用している定義式を参考にして、ひび割れひずみの進行によってせん断保有率が変化する特性を定義した。せん断保有率の推移は、次式によって表わされる。

$$\beta = 1 / (1 + 4447\varepsilon_{cr}) \quad (9)$$

β : ひび割れ発生後のせん断保有率

ε_{cr} : ひび割れ発生ひずみ

また、ひび割れ発生後のせん断応力とその時のせん断弾性係数は次式 (10) で計算される。

$$\tau = G' \cdot \gamma \quad (10)$$

$$G' = \beta \cdot G \quad (11)$$

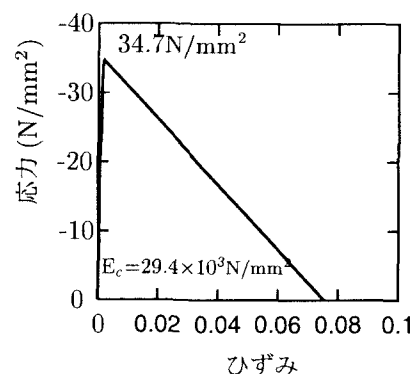
τ : せん断応力,

G : せん断弾性係数,

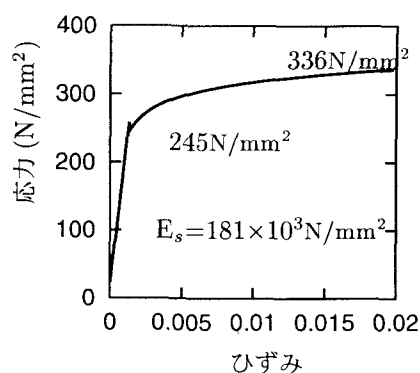
γ : せん断ひずみ,

G' : ひび割れ発生後のせん断弾性係数

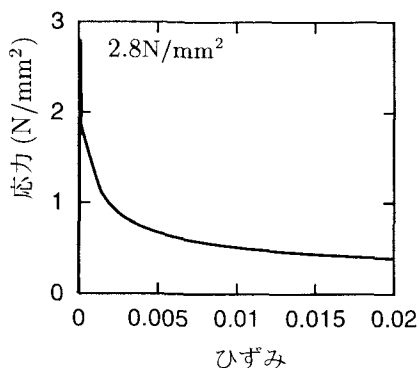
図-8に作成した構成則を示す。



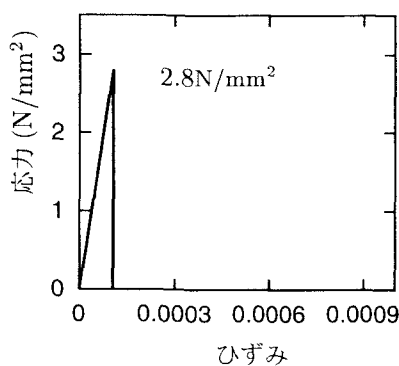
(a) コンクリート圧縮域



(b) 鉄筋



(c) RC zone

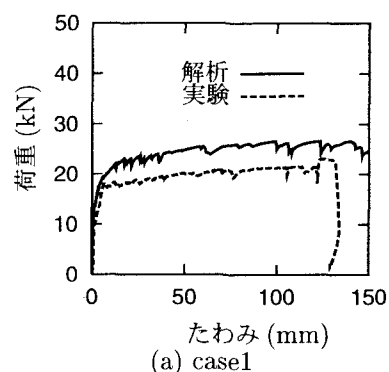


(d) PL zone

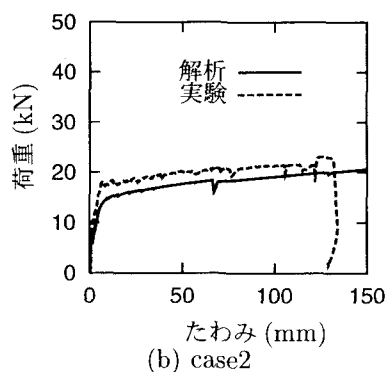
図-8 構成則

3.3 解析結果

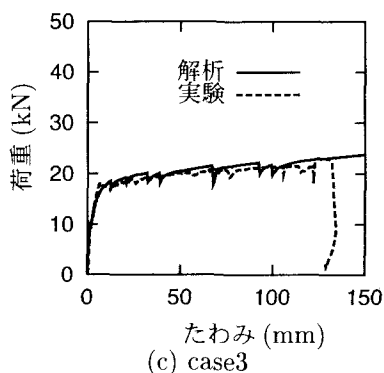
本解析では、RC zone、および、PL zoneの有効範囲を算出し、解析モデルに適用して平面解析を行った。解析は、case1:コンクリート全断面をRC zone、case2:コンクリート全断面をPL zone、case3:RC zoneとPL zoneを精確に算定、の3ケースの非線形FEM解析を行った。図-9に、解析による荷重-たわみ関係を実験結果とともに示す。case3の解析は実験をよくシミュレートしているが、case1, 2に関しては、ひび割れ発生荷重以降において、case1 > 実験結果 > case2 となった。これは、ひび割れ発生荷重以降で、コンクリート断面内の引張破壊エネルギーの差によるものと考えられる。RC zoneの有効範囲を詳細に定めることによって、より精度の高い結果となることが確認できた。



(a) case1



(b) case2



(c) case3

図-9 B10-2 供試体の解析結果

4. PIC板または鋼板を曲げ引張縁に設置したRCはりの曲げ載荷実験

4.1 実験概要

PIC埋設型枠は、高耐久性のコンクリート板を型枠材として配置し、コンクリートを打設して塩分などの外的因子を遮断するために高い耐久性とじん性を確保する工法である。このPIC板は、内部にポリマーを含浸させてコンクリートを密実にし、さらに内部にステンレスの線材を混入してじん性・耐摩耗性を確保している。また、型枠として兼用が可能であるため現場工期の短縮および省力化、建設廃材の抑制が可能となり、非常に有用な工法である。この優位性により、様々な分野で採用されており、実験的検証も多い。鋼板接着工法は、既設のコンクリート構造物の表面にエポキシ樹脂を用いて鋼板を接着し、はり部材断面内の引張側の鉄筋量を外部から補う工法である。鋼板の接着後は、コンクリート構造物と鋼板が一体となって外力に抵抗する合成構造として機能し、構造物の耐荷性能の向上を図ることができる。また、工法の利点として、補強寸法がわずかな増加（+10mm程度）で済み、建築限界や景観に影響の少ない特徴を有する。この工法は、比較的古くから採用されており補修・補強の分野での実績もかなり多く、実験による検証も数多くなされている。ここでは、RCはり下面にPIC板および鋼板接着を施し、静的曲げ載荷試験を行い基本的な性能の確認を行った結果について述べる。各試験体に用いた材料の諸元および材料試験結果を表-3～表-5に示す。また、図-10には各工法を施した試験体の寸法・形状を示す。なお、PIC設置RCはりにおいて300mm間隔で目地部を設けている。

表-3 解析対象供試体

実験	供試体名	補強材	備考
①	P-1	PIC埋設型枠	比較用RCはり
	P-2		PIC板設置RCはり
②	S-1	鋼板	比較用RCはり
	S-2		鋼板設置RCはり

表-4 試験体諸元

試験体の種類	①	②
はりの高さ (mm)	450	250
はりの全長 (mm)	4200	2100
はりの幅 (mm)	300	200
載荷スパン (mm)	4000	1900
等モーメント区間 (mm)	1200	150
目地間隔 (mm)	300	—
断面の有効高さ (mm)	384	215
鉄筋純かぶり (mm)	49	27
主鉄筋径および本数	2-D22	2-D16
鉄筋比 (%)	0.67	1.57
コンクリート設計強度 (N/mm ²)	22.0	38.8
鉄筋種類	SD295	SD295
異種材料の板厚 (mm)	10	4.5
目地材・注入材	シリコン樹脂	エポキシ樹脂

表-5 使用材料物性値 (単位 N/mm²)

実験	材料	弾性係数	圧縮強度	引張強度	降伏強度
①	コンクリート	2.7×10^4	24	2.238	—
	鉄筋 (SD295 D22)	1.9×10^5	—	—	367
	PIC板	4.2×10^4	140	14	—
②	コンクリート	2.3×10^4	38.8	3.14	—
	鉄筋 (SD295 D16)	1.76×10^5	—	—	337
	鋼板 (t=2.3mm)	1.93×10^5	—	—	243

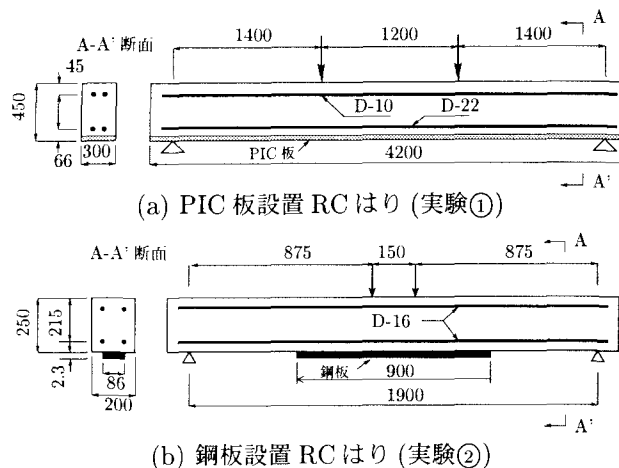


図-10 各工法の供試体寸法・形状図

4.2 実験結果

(1) PIC埋設型枠工法

図-11にRCはり試験体とPIC埋設型枠を施したRCはり試験体の荷重とはり中央部のたわみの関係を示す。載荷直後から鉄筋降伏に至るまで両試験体には差異は見られなかった。しかし、鉄筋の降伏後の挙動では、RCはりが変位40mmでコンクリートの圧縮破壊で試験が終了したのに対し、PIC板を有する試験体では、変位60mmでコンクリートの圧縮破壊で試験が終了した。また、鉄筋降伏以降の両試験体の曲げ剛性の違いも見られた。これらは、PIC板の断面増加による剛性の違いの影響が現れる結果であった。また、ひび割れの発生状況も、PIC板の継目部をスパン中央に配置したためRCはり試験体と大きく異なる結果となった。

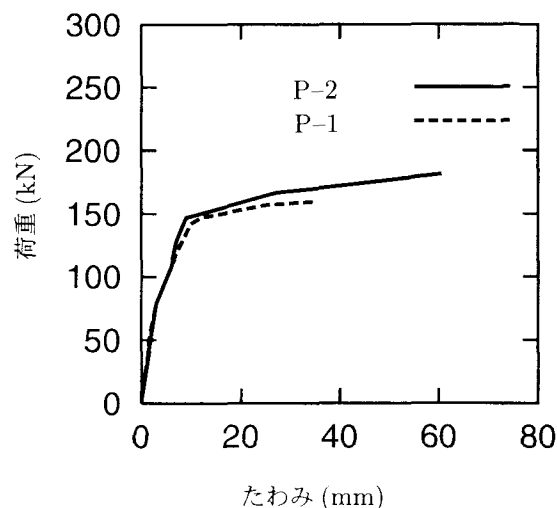


図-11 荷重とはり中央部のたわみの関係 (①)

(2) 鋼板接着工法

図-12にRCはり試験体と鋼板接着を施したRCはり試験体の荷重とはり中央部のたわみの関係を示す。両試験体ともひび割れ発生までは、同様の挙動を示していた。しかし、ひび割れ発生後は、RC試験体の曲げ剛性が低下し、鉄筋降伏後、急激にたわみが増加し始め変位20mmを超えてコンクリートが圧縮破壊し試験を終了した。それに対し、鋼板接着試験体では、鉄筋が降伏するまで曲げ剛性が徐々に低下し、鉄筋降伏と同時に鋼板がはく離して荷重が低下した。その後、変位20mm回りでコンクリートが圧縮破壊し試験を終了した。

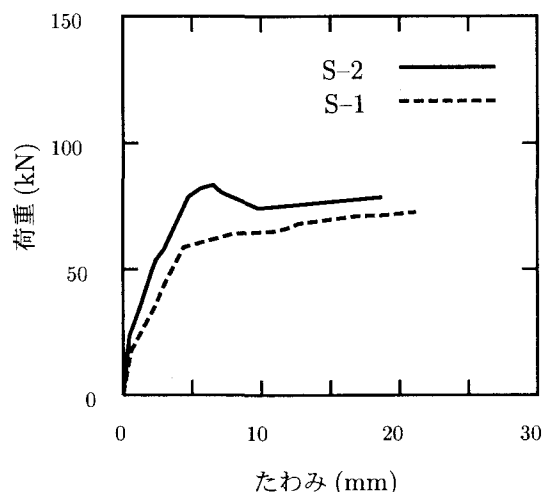


図-12 荷重とはり中央部のたわみの関係 (②)

5. PIC板を配置したRCはりの非線形解析

5.1 解析モデル

本解析モデルは、2次元および3次元モデルの鉄筋をリバーひずみ要素として取り扱ったため、その他の要素も平面ひずみ要素を基本として作成した。ちなみに、2次元では4節点のアイソパラメトリック平面ひずみ要素とし、3次元モデルでは8節点のアイソパラメトリック6面体直方体要素とした。コンクリートの材料特性は、2次元および3次元モデルとも安ら⁸⁾が提案したRC zoneとPL zoneを用いてモデルを作成した。その際に、PIC板を施した場合のRC zoneは、第2章で述べた異種材料が設置された場合の鉄筋の付着領域を考慮したコンクリートの引張特性とした。載荷荷重は、全解析モデルともせん断スパン比を考慮してスパン中央から左右に600mm離れた2箇所に変位制御型の増分荷重を作用させた。

5.2 構成則

本章の試験体に対しては、RCはり下面にPIC板を設置してあるため、RC zoneの算出にはこの影響を考慮する必要がある。そこで、PIC板のような異種材料をコンクリート断面に換算して、コンクリートの一部として想定することとした。図-13に作成した各材料

の構成則を示す。構成則の決定方法は、第2章で述べたものとした。コンクリートの圧縮域においては、要素寸法、および、圧縮破壊エネルギーを考慮した軟化モデル¹⁰⁾、鉄筋、および、RC zone内のコンクリート引張域においては、平均応力-平均ひずみ関係⁹⁾、PIC板は材料試験結果を参考とした。また、PL zone内にあるコンクリート引張域については、破壊エネルギーは無視できるものと仮定した。各試験体のRC zoneは、RCはり(P-1)で14308 mm²、PICを設置したRCはり(P-2)で23236 mm²となった。なお、RC zoneの影響は、鉄筋と引張域コンクリートの構成則に影響し、図-13の(b)と(c)、および(d)と(e)に示すように、P-1とP-2で鉄筋とコンクリートの構成則が異なる。すなわち、RC zoneの有効範囲が増加することにより、コンクリートのテンションステイニング効果が大きくなり、鉄筋の構成則に差異が生じている。また、PICは70MPaで除荷後破断と仮定した。

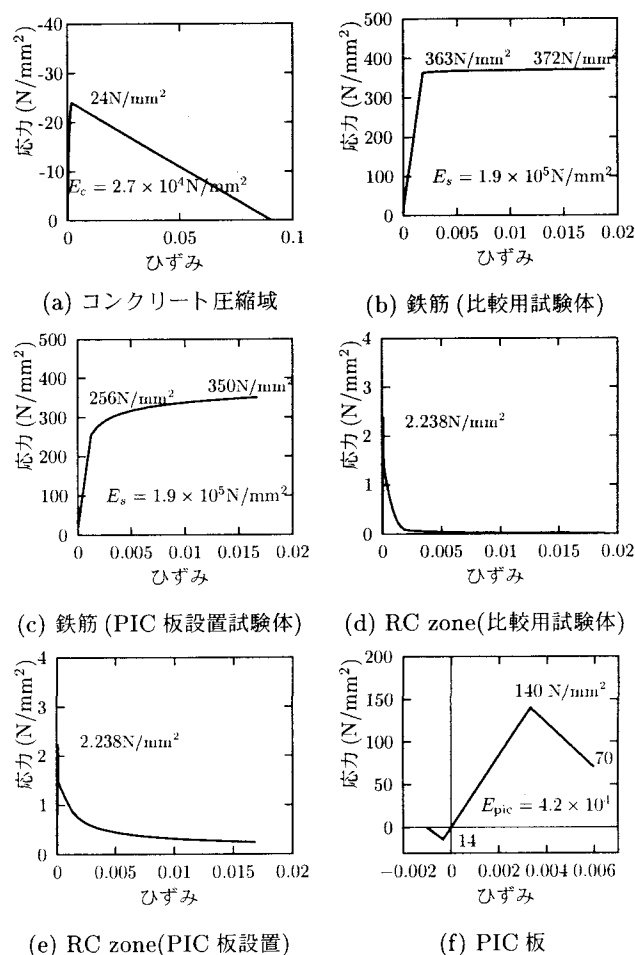


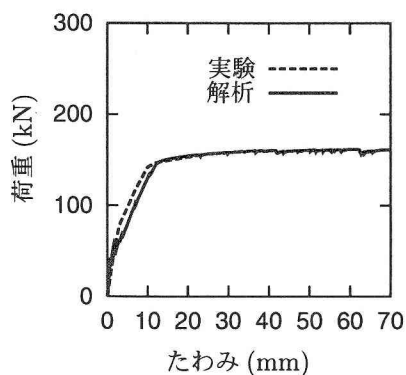
図-13 材料構成則 (P-1)

5.3 解析結果

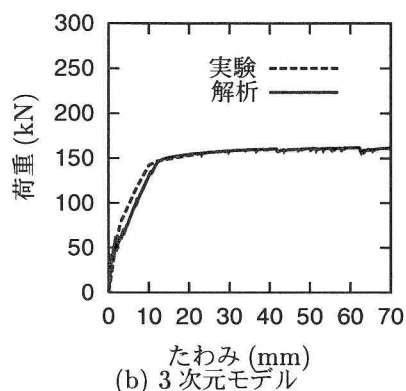
(1) 荷重とたわみの関係

本解析で得られた荷重とたわみの関係を図-14、15に示す。同図を見ると、解析は実験をほぼシミュレートしていることから、本章での試験体のような高剛性の異

種材料を設置した場合においても、本解析方法の妥当性が確認できる。

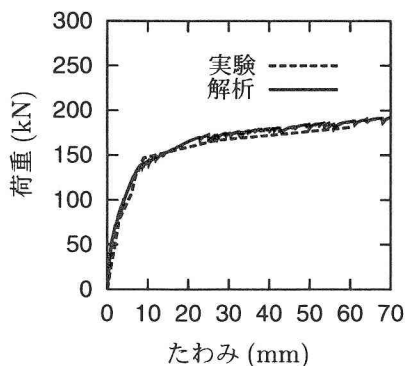


(a) 2次元モデル

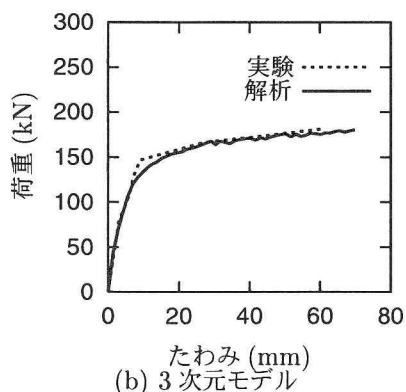


(b) 3次元モデル

図-14 P-1の荷重とたわみの関係



(a) 2次元モデル



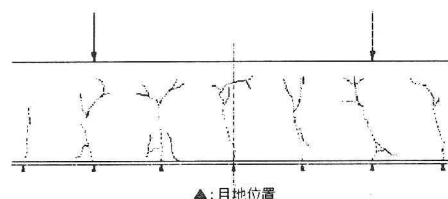
(b) 3次元モデル

図-15 P-2の荷重とたわみの関係

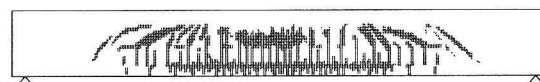
(3) ひび割れ図およびひび割れひずみの分布

図-16に、試験体ひび割れ図、試験体の等モーメン

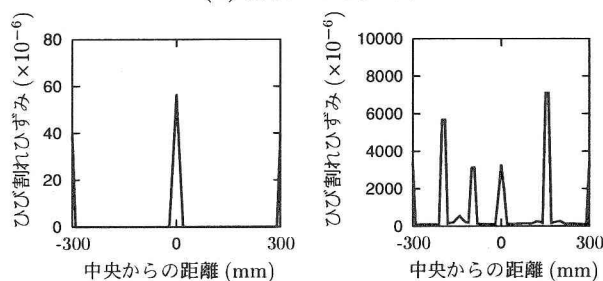
ト区間におけるPIC板との接合面に接するコンクリートの cracking strain の分布を各荷重段階ごとに示す。ここで、cracking strain(ε_{cr})とは、全引張りひずみ(ε_t)とひび割れ発生ひずみ(ε_{tu})の差($\varepsilon_{cr} = \varepsilon_t - \varepsilon_{tu}$)である。同図から、コンクリート部の初期ひび割れ発生はいずれも目地部(-300, 0, 300)において生じており、PIC製埋設型枠に目地部を設置することで、ひび割れ誘導性能を有していることがわかる。cracking strainは、荷重の増加に伴ない、PIC板設置位置にも発生し、ひび割れが進行した。ここで、PIC板に生じているひび割れが対称でないのは、水平拘束条件の影響が考えられる。



(a) 実験ひび割れ図



(b) 解析ひび割れ図



(c) 初期ひび割れ発生時 (d) 鉄筋降伏時

図-16 ひび割れ図、PIC板のひずみ分布(P-2)

6. 鋼板接着したRCはりの非線形解析

6.1 解析モデル

本解析モデルは、2次元モデルでは4節点のアイソパラメトリック平面ひずみ要素とし、3次元モデルでは8節点のアイソパラメトリック6面体直方体要素を基本として作成した。コンクリートの材料特性は、PIC板を用いたはり同様に、2次元および3次元モデルとも安ら⁸⁾が提案したRC zoneとPL zoneを用いてモデルを作成した。その際に、鋼板接着を施した場合のRC zoneは、第2章で述べた異種材料が設置された場合の鉄筋の付着領域を考慮したコンクリートの引張特性とした。また、鋼板接着を施した場合のモデルでは、鋼板とコンクリートの間にエポキシ樹脂が介在する。実験結果では、鋼板端部のはく離にて試験が終了している。そこで、解析でははく離を含めた非線形挙動を統一的な方法で解析するために、コンクリートとエポキシ樹脂の接触面には接着特性を考慮して直接拘束法による接触条件を適用した。この方法は、要素間に接触の可能性がある節点に対

して接触の判定を行い、接触した場合には、接触方向の自由度のみを拘束する方法である。本解析では、その自由度をコンクリートの強度特性値を閾値として拘束し、鋼板のはくり挙動を再現することとした。載荷荷重は、全解析モデルともせん断スパン比を考慮してスパン中央から左右に75mm離れた2箇所に変位制御型の増分荷重を作用させた。

6.2 構成則

本章の試験体に対しては、RCはり下面に鋼板をエポキシ樹脂にて接着してあるため、RC zoneの算出にはこの影響を考慮する必要がある。そこで、鋼板のような異種材料をコンクリート断面に換算して、コンクリートの一部として想定することとした。図-17に作成した各材料の構成則を示す。構成則の決定方法は、第2章で述べたものとした。コンクリートの圧縮域においては、要素寸法、および、圧縮破壊エネルギーを考慮した軟化モデル¹⁰⁾、鉄筋、および、RC zone内のコンクリート引張域においては、平均応力-平均ひずみ関係⁹⁾、鋼板、および、エポキシ樹脂は材料試験結果を参考とした。また、PL zone内コンクリート引張域は破壊エネルギーをほぼ無視できるものとした。各試験体のRC zoneは、RCはり(S-1)で4900 mm²、鋼板を設置したRCはり(S-2)で7744 mm²となった。構成則の差はPIC設置のRCはりの場合と同様である。

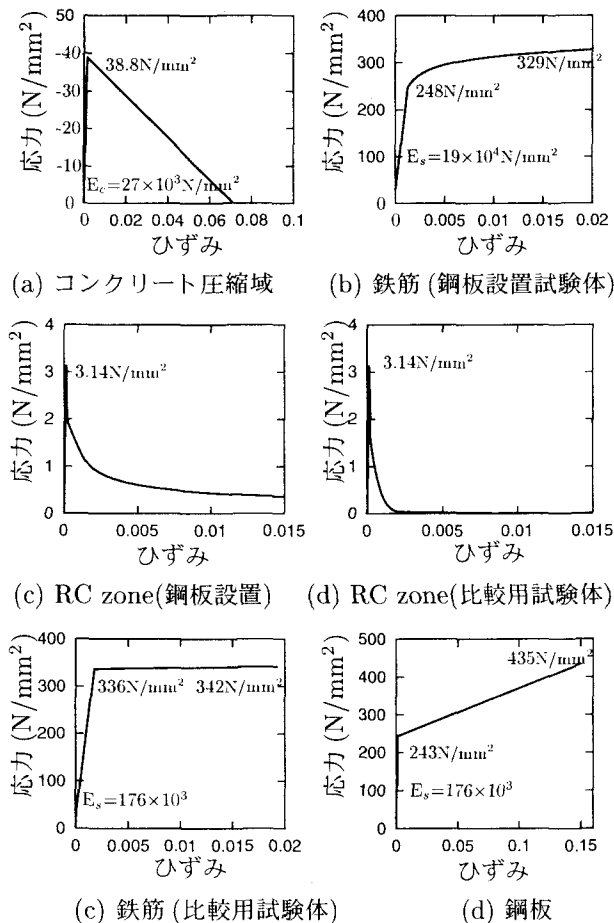


図-17 材料構成則 (S-2)

6.3 解析結果

(1) 荷重とたわみの関係

本解析で得られた2次元および3次元モデルの荷重とたわみの関係を図-18, 19に示す。同図を見ると2次元および3次元モデルとも解析は、実験をほぼシミュレートしていることから本章での試験体のようなエポキシ樹脂で接着された異種材料を配置した場合においても、本解析の妥当性が確認できる。

次に、モデルの次元の違いに着目する。無補強RCの場合では、2次元モデルと3次元モデルには差異はみられなかった。一方、鋼板接着の場合では、2次元モデルでは荷重が低下する前に解析が発散して終了したのに対し、3次元モデルでは、最大荷重以降の荷重の低下途中まで解析が行えた。これは、今回使用した試験に設置した鋼板がはり幅に比べ小さかったため、3次元ではその影響を考慮することができたためと推察される。ただし、3次元では最大荷重を超えた後の挙動が不安定になっている。これは要素の大きさや解析時の残差力、荷重増分ステップ等の影響とも考えられるが、鋼板のはくり離現象自体が非常に不安定な挙動であり、解析にもその影響が現われたと考えられる。この点については今後詳細な検討を行い、その原因を解明する予定である。

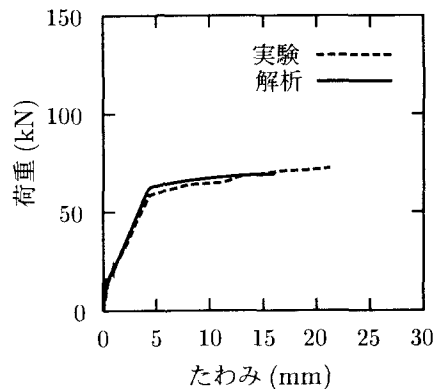
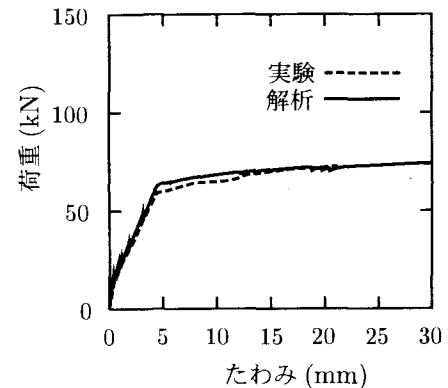
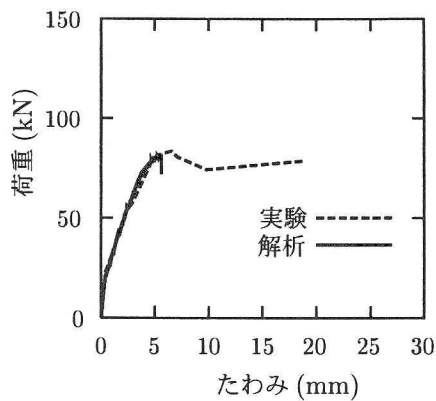
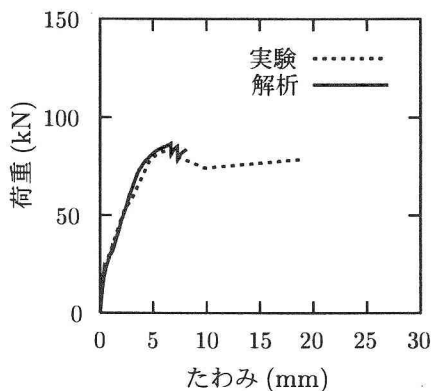


図-18 S-1の荷重とたわみの関係



(a) 2次元モデル

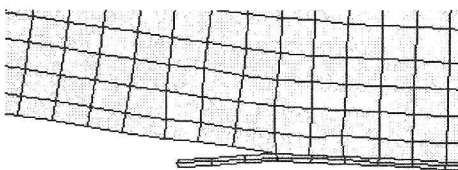


(b) 3次元モデル

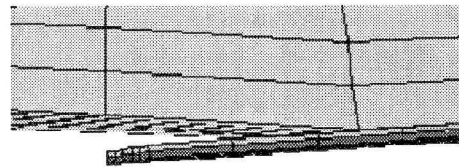
図-19 S-2の荷重とたわみの関係

(2) 鋼板接着試験体の終局時の挙動

実験では、RCはりの鉄筋が降伏すると同時に鋼板のはく離破壊となった。なお、今回の鋼板接着幅(86mm)がはり幅(200mm)に比べ小さかったため、一般に言及されている鋼板のはく離に先立ち、鋼板接着面に沿うひび割れが発生し、かぶりコンクリートとともに鋼板がはく離するという現象とはならなかった。ただし、鋼板接着部のはく離面にはコンクリートが薄く付着していた。今回の解析でも実験と同様に2次元モデル、3次元モデルとも鉄筋降伏とほぼ同時に鋼板がはく離する現象となった。図-20、写真-1に2次元モデル(コンクリート要素長さ約7cm)および3次元モデル(コンクリート要素長さ約20cm)の鋼板のはく離状態、実験時(コンクリート格子長さ約10cm)における鋼板のはく離状態を示す。図より、2次元モデルと3次元モデルのはく離範囲は、ほぼ同様の長さであった。また、3次元モデルでは、断面幅方向の応力分布の違いと思われる鋼板の変形が生じている。このことは、(1)で述べたはり幅方向の影響があったためであると推察される。



(a) 2次元モデル



(b) 3次元モデル

図-20 鋼板はく離状態

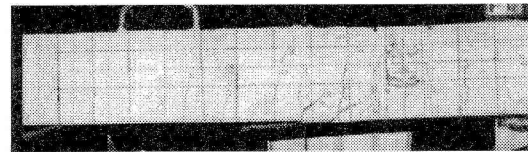


写真-1 実験による鋼板はく離状態

7. まとめ

本研究では、通常のRCはりおよび異種材料で補強されたRCはりの実験を、2次元および3次元FEMによりシミュレーション解析を行った。その結果により得られた知見は以下のようにまとめられる。

1. 鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係の構成則と鉄筋の有効付着領域のモデルを考慮することによって、RCはりのコンクリートのひび割れ後の挙動を精度よくシミュレーションできることを確認した。
2. 有効付着領域モデルを拡張した換算断面を用いることによって、PIC板および鋼板などの異種材料で補強されたRCはりにおいてもコンクリートのひび割れ後の挙動を精度よくシミュレーションできた。
3. 異種材料間に適切な接触要素を用いることによって、鋼板のはく離などの終局時の非線形挙動をシミュレーションすることができた。
4. 2次元および3次元FEM解析においてほぼ一致した結果が得られた。このことより、平面解析モデルに置換できないような場合においても、3次元モデルで解析すれば、RCはりの非線形挙動のシミュレーションが可能であることがわかった。

8. あとがき

本研究では、PIC板および鋼板のように比較的曲げ剛性の大きな材料を接着したRCはりの非線形挙動の実験結果をよくシミュレートできることが示された。現在、炭素繊維やアラミド繊維やガラス繊維などのように、比較的曲げ剛性の小さい変形しやすい連続繊維シートを用いたRC構造物の補強もよく採用されている。今後さらに、このような連続繊維シート補強RCはりへのシミュレーション解析へ拡張していく予定である。

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.
- 2) 鶴田健: ポリマー含浸コンクリート製高耐久性埋設型枠を用いた鉄筋コンクリート部材の力学的特性に関する研究, 九州工業大学学位論文, 2001
- 3) 小沢満三, 鶴田健, 内藤隆史: ポリマー含浸コンクリートによる永久型枠を用いた PC はりの繰返し 載荷試験, 第 7 回コンクリート工学年次講演論文集, pp.119-125, 1985.
- 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.
- 5) 佐野正: 鋼板接着によるコンクリート構造物の補強設計法に関する研究, 東北大学学位論文, 1996.
- 6) 大倉一郎, 福井唯夫, 中村圭吾, 村上泰三: 炭素繊維シートによる鋼板応力の低下とはく離せん断応力, 土木学会論文集, No.689, I-57, pp.239-249, 2001.10
- 7) 岸徳光, 三上浩, 栗橋祐介: FER シート曲げ補強 RC 梁の耐荷性状および破壊形式の予測に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.711, V-56, pp.91-109, 2002.8
- 8) Xuehui AN, Koichi MAEKAWA, Hajime OKAMURA: Numerical Simulation of Size Effect in Shear Strength of RC Beams, CONCRETE LIBRARY OF JSCE NO.31, JUNE 1998
- 9) 岡村甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂, 1991.
- 10) 土木学会編: コンクリート構造物の非線形解析技術研究小委員会成果報告書, コンクリート技術シリーズ, pp.187-199, 2003.1
- 11) H.Salem and K.Maekawa: Spatially averaged tensile mechanics for cracked concrete and reinforcement under highly inelastic range, J.Materials, Conc. Struct., Pavements, JSCE, No.613/V-42, pp.277-293, 1999.

(2004 年 4 月 16 日 受付)