

# 論文 全視野ひずみ計測を用いた鋼板接着端部の破壊挙動に関する検討

山本 健太\*1・安東 祐樹\*1・西尾 友希\*2・松田 浩\*3

**要旨:** コンクリートに鋼板などの補強材を接着した際、十分な接着長さが得られないと、その端部からはく離が生じて破壊に至ることがある。本研究は、鋼板接着端部のはく離現象について、光学的全視野計測法を用いて接着幅が異なる場合のひずみ分布特性の違いについて検討を行った。検討方法は、両引き試験により鋼板端部の破壊挙動を再現し、接着部を対象としてデジタル画像相関法による非接触全視野ひずみ計測を行った。試験結果より、接着幅により鋼板表面のひずみ分布やひび割れ進展過程が異なることが分かった。

**キーワード:** 鋼板接着, はく離現象, 接着幅, デジタル画像相関法, 非接触全視野ひずみ計測

## 1. はじめに

近年、建築物や土木構造物などが、老朽化、過積載、交通量の増大などの要因により、耐荷力不足となっている。このような中、今ある構造物を有効に活用するために適切な補修・補強に関心が高まっている。

これら補修・補強工法の中で、補強材をコンクリートに接着させて耐荷力向上を図る工法は施工の容易さも相まって、数多く適用されている。しかしながら、接着工法では、時として十分な接着面積が得られない場合、補強材の接着端部引張側のコンクリートからはく離を生じる。

筆者らはこれまで接着幅を中心として、鋼板端部のはく離現象について様々な検討を行ってきた<sup>1)</sup>。しかしながら、解析においては、接着幅が小さくなると試験結果を完全にシミュレートできなかつた。また、接着幅が小さい場合の試験データが少なく、その影響を十分に検討することができなかつた。さらに、鋼板接着された鋼板端部のコンクリートの破壊挙動は、極めて複雑であり、接着部のひび割れ進展やひずみ分布を正確に把握することは極めて困難である。

以上に鑑み、本研究では、接着幅、コンクリート強度をパラメータとした両引き試験を実施し、接着幅の違いが鋼板端部のはく離現象に及ぼす要因について、デジタル画像相関法による非接触全視野ひずみ計測によりひび割れ進展、ひずみ分布の検討を行った。

## 2. デジタル画像相関法

### 2.1 デジタル画像相関法の概要<sup>2)</sup>

本試験に用いたデジタル画像相関法(以下, DCIM)は、光学的計測法の一つで、変形前後の測定対象物表面をデジタルカメラやCCDカメラ等で撮影し、画像処理することで、計測範囲全体表面の変位やひずみ、応力を算出する方法である。

本法は、測定対象物表面にランダムな模様をつけ、測定対象物変形前後の表面を2台のCCDカメラで撮影した画像の輝度分布から、変位を求めることができる(写真-1)。この特長として、他の光学的手法に比べ、測定空間の揺らぎに比較的強く、また、2台のカメラを用いることで、3次元変形量や3次元形状を計測することが可能である。

### 2.2 デジタル画像相関法の原理

計測原理は、最初に、変形前の画像中の任意の点(1画素)を中心とした小さな画像領域(サブセット:  $N \times N$  pixels)を指定し基準とする(図-1(a))。つぎに、この状態で、計測物に変位を与えると、変形後の画像でのサブセットの位置が変化する。この変形前後のサブセットのデジタル情報を比較し、基準サブセットと変形後のサブセットの最も相関がよいものを探し、計測点の変位を決定するものである。(図-1(b))。

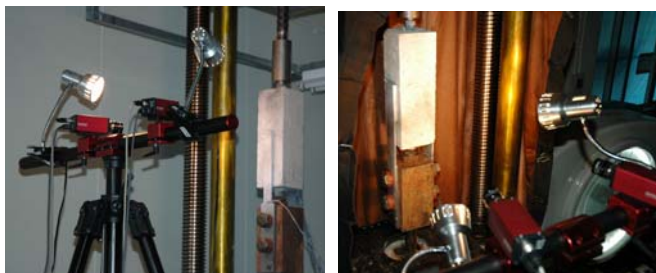
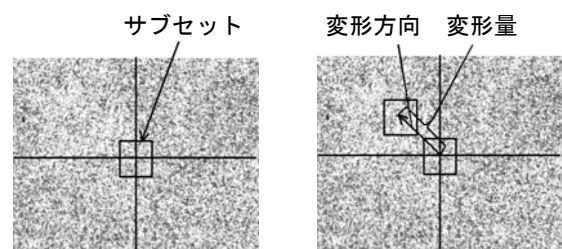


写真-1 試験風景



(a) 変形前 (b) 変形後  
図-1 変形前と変形後のデジタル画像

\*1 長崎大学 大学院 生産科学研究科 (正会員)  
\*2 長崎大学 工学部 構造工学科 (非会員)  
\*3 長崎大学 工学部 構造工学科教授 工博 (正会員)

### 3. 試験概要

本試験は、鋼板接着端部での離れを簡易的に評価するために、図-2に示す両引き試験により鋼板接着端部の破壊試験を実施した。

#### 3.1 供試体概要

使用した供試体を図-3に示す。鋼板接着したRC供試体は、内部に異形鉄筋 D25 を埋め込んだ断面 100mm×100mm、長さ 300mm のコンクリートブロックで、割裂防止のためにφ6mm のスパイラル筋(ピッチ 30mm)による補強を行っている。この供試体の両側に幅 30~100mm、厚さ 4.5mm、長さ 475mm の鋼板を接着長 100mm、隙間 5mm を確保して配置し、その隙間にエポキシ樹脂を流し込んで製作した。板厚 4.5mm、樹脂厚 5.0mm は、現在、鋼板接着工法で一般的に採用されている厚さである。

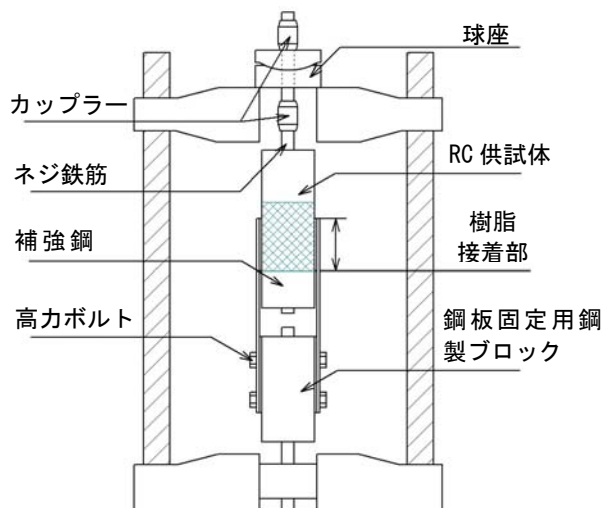


図-2 試験概要図

表-1 コンクリートの物性値

圧縮強度 $f_c$ ( $N/mm^2$ )	引張強度 $f_t$ ( $N/mm^2$ )	弾性係数 $E_c$ ( $N/mm^2$ )	ポアソン比 $\nu_c$
15.7	1.44	$1.40 \times 10^4$	0.17
36.9	2.55	$2.77 \times 10^4$	0.16

#### 3.2 使用材料

今回、使用した材料の物性を表-1~3に示す。

#### 3.3 試験方法

試験は、300kN 型の万能試験機に供試体の両端を固定し、表-4に示す試験パラメータについて供試体が破壊するまで载荷を行い、その破壊挙動について DCIM による非接触の全視野ひずみ計測を行った。なお、計測範囲は、図-2中の網掛け部、および図-3中の鋼板表面とした。さらに、図-3に示す鋼板表面の接着幅の所定の位置に通常のひずみゲージを貼り付け、DCIM による計測値の精度を確認した。

表-2 鋼材の物性値

鋼材	降伏点 $f_y$ ( $N/mm^2$ )	引張強度 $f_u$ ( $N/mm^2$ )	弾性係数 $E_s$ ( $N/mm^2$ )
鉄筋 D25	405	595	$1.93 \times 10^5$
鋼板 $t=4.5mm$	347	443	$1.88 \times 10^5$
スパイラル筋	390	575	$1.90 \times 10^5$

表-3 接着剤(エポキシ樹脂)の物性値

圧縮強度 $f_c$ ( $N/mm^2$ )	引張強度 $f_{cy}$ ( $N/mm^2$ )	引張せん断強度 $\tau_e$ ( $N/mm^2$ )	弾性係数 $E_c$ ( $N/mm^2$ )	ポアソン比 $\nu_c$
78.6	57.9	13.7	2800	0.42

表-4 試験パラメータ

タイプ	接着幅 B (mm)	接着長 L (mm)	圧縮強度 $f_c$ ( $N/mm^2$ )
fc36.9	30,40,50,70,100	100	36.9
fc15.7	30,40,50,70,100		15.7

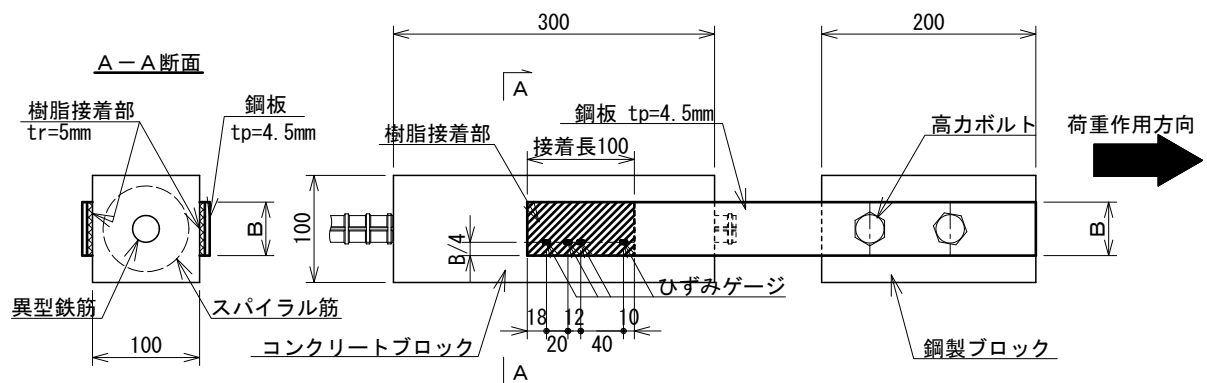


図-3 供試体概要図

### 3.4 解析概要<sup>1)</sup>

試験と併せて、3次元非線形解析により接着幅の違いをFE解析により検討した。モデルは、図-4に示すように3次元の立体要素で構築された両引き試験体モデルである。

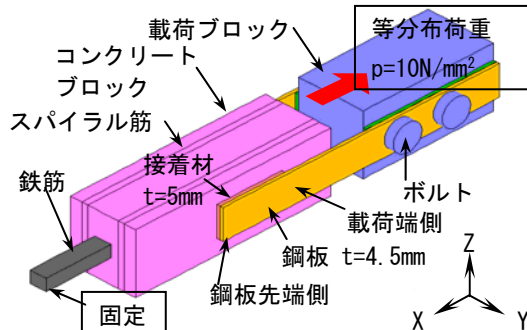


図-4 解析モデル概要図

コンクリートの構成則は、圧縮域を山谷らの破壊エネルギー則<sup>3)</sup>を用い、引張域を最大強度直後に脆性的に破壊させるものとした。鋼材および接着材の構成則は、材料試験の結果を基に決定した(図-5参照)。

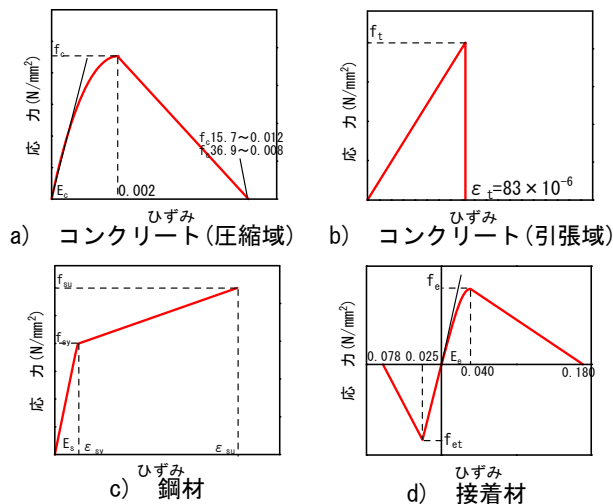


図-5 材料構成則

また、鋼板接着端部のはく離をシミュレートするため、各部材間にクーロン摩擦の接触モデルを用いた。これは、各部材が接触する節点を独立させ、部材間の滑りや接着を考慮するものである。ここで、鋼材間に滑りがある箇所では、荷重直後から滑り摩擦係数( $\mu=0.25$ )にて相対運動させ、鋼板、コンクリートが樹脂で接着される箇所では、接触する部材の節点間の相対運動を規定した応力(以下、限界応力)まで拘束し、その後、節点を開放することとした。ここで、各部材間の限界応力は、コンクリート-接着材では接線・法線ともコンクリート引張強度、鋼板-接着材では、法線方向を接着材の引張強度、接線方向を接着材の引張せん断強度とした。なお、他の部材間では、節点を共有させ完全付着状態とした。

### 4. 試験結果

#### 4.1 接着幅、コンクリート圧縮強度の影響

両引き試験、および解析により得られた接着幅と破壊荷重、平均はく離強度の関係を図-6~7に示す。ここで、平均はく離強度とは、破壊荷重を接着面積で除した値である。これより、圧縮強度が大きくなると、破壊荷重、平均はく離強度は相対的に大きくなった。ここで、接着幅に着目すると、図-6に示すように、試験の破壊荷重は接着幅50mmまでは線形的に大きくなったが、接着幅70mmより大きくなると、破壊荷重は上昇せず、一定の値に近づく傾向にあった。一方、解析では接着幅50~70mmで変曲点が見られるが、破壊荷重は線形的に大きくなっている。つぎに平均はく離強度は、図-7に示すように、試験では接着幅がコンクリート断面幅に近づくにつれ線形的に小さくなったが、解析では接着幅が50mmより小さいと一定で、50mmより大きくなっていくと逆に小さくなっていった。

つぎに、供試体の破壊状況を写真-2, 3に示す。結果より、供試体の圧縮強度に関わらず、接着幅30mm, 50mmでは側面のひび割れが確認されるが、最終的には接着面のコンクリート表面からはく離が生じている。これに対し、接着幅70mm, 100mmでは、側面のひび割れが顕著となって、スパイラル筋から上のかぶりコンクリートで破壊しており、接着幅の違いで破壊形態が異なっていた。

以上より、接着幅がコンクリートの断面幅に近づくと、コンクリートの抵抗断面が不足し、結果、側面のひび割れがスパイラル筋位置に到達した直後に、コンクリートが破壊するため、破壊荷重が上昇しないと考えられる。

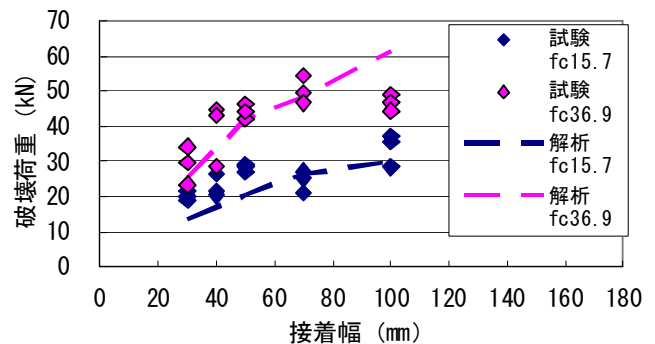


図-6 接着幅と破壊荷重の関係

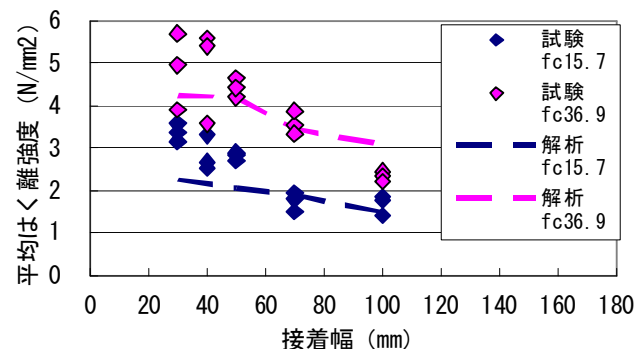


図-7 接着幅と平均はく離強度の関係





(a) 接着幅 B=30mm



(b) 接着幅 B=50mm



(c) 接着幅 B=70mm



(d) 接着幅 B=100mm

写真-2 供試体の破壊状況 ( $f_c$ 15.7 供試体)



(a) 接着幅 B=30mm



(b) 接着幅 B=50mm



(c) 接着幅 B=70mm



(d) 接着幅 B=100mm

写真-3 供試体の破壊状況 ( $f_c$ 36.9 供試体)

#### 4.2 接着部鋼板表面のひずみ分布

DCIM および解析により得られた、 $f_c$ 36.9 供試体の各接着幅における、破壊直前の接着部鋼板表面の鋼板長さ方向(y 方向)のひずみ分布を図-8~11 に示す。図より、接着幅に関わらず鋼板先端側から約 10~20mm 位置で圧縮ひずみ、約 70~90mm 位置で引張ひずみが卓越しており、DCIM、解析結果とも、ほぼ同等のひずみ分布が得られた。また、幅方向の鋼板表面のひずみ分布からは、接着幅の影響はないと考えられる。

つぎに、供試体破壊直前の鋼板表面中央の鋼板長さ方向(y 方向)のひずみ分布を図-12~15 に示す。各試験結果は、図-8~11 と同様に、接着幅に関わらず、鋼板先端側から約 10~20mm 位置で圧縮ひずみ、約 80~90mm 位置で引張ひずみが卓越する分布をしていた。この傾向は、樹脂の特性によるところが大きいと考えられる。樹脂は一般に弾性係数が小さく、引張強度が大きい材料である

ため、荷重が大きくなってもコンクリートからはがれずに追従する。さらに、樹脂の厚みの影響により、樹脂の変形がさらに助長される。これらの影響により、鋼板は曲げ変形し、結果、ひずみのピークが接着部の内側に入り込んだ分布をしたと考えられる<sup>4)</sup>また、DCIM、ひずみゲージの各計測結果を比較すると、ほぼ同等の結果であり、DCIM デジタル相関法の精度が高いことが確認できる。これに対し、接着幅 30mm と 100mm での解析結果とひずみゲージや DCIM の計測結果とは、分布傾向は同じであるが、その値に差異が認められる。これは、図-6 で示したように、解析と試験とで破壊荷重が異なったためであり、解析で用いたコンクリートと樹脂の接着界面内の節点のみではなく離をシミュレートするモデルでは、コンクリートの抵抗断面の影響やひび割れなどの影響を考慮できずに、鋼板端部のはく離現象を正しく評価できないことが分かった。

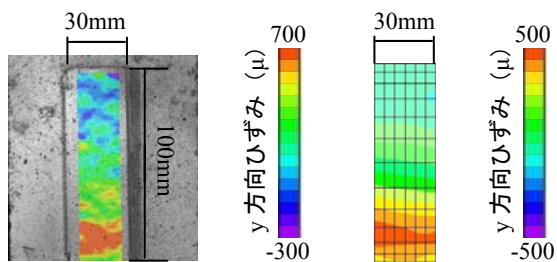


図-8 接着幅 30mm-鋼板表面 y 方向ひずみ分布図

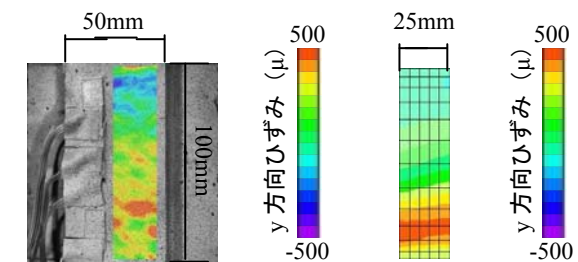


図-9 接着幅 50mm-鋼板表面 y 方向ひずみ分布図

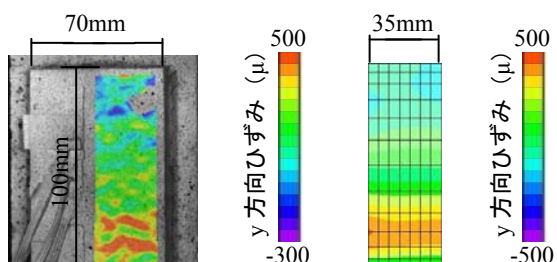


図-10 接着幅 70mm-鋼板表面 y 方向ひずみ分布図

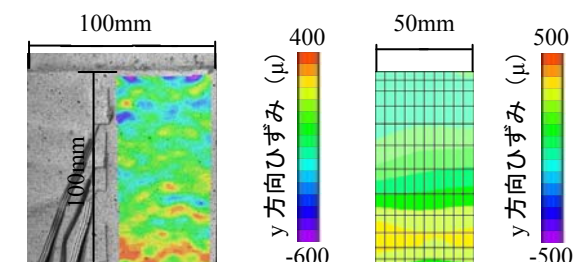


図-11 接着幅 100mm-鋼板表面 y 方向ひずみ分布図

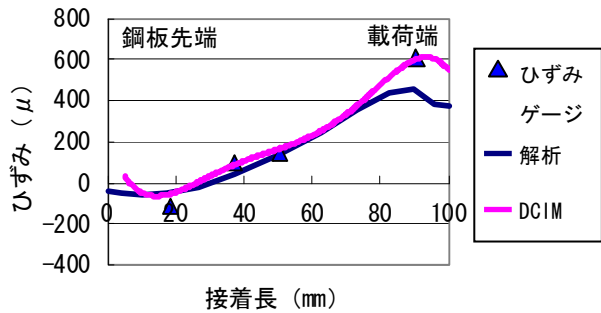


図-12 接着幅 30mm-鋼板表面中央 y 方向ひずみ分布

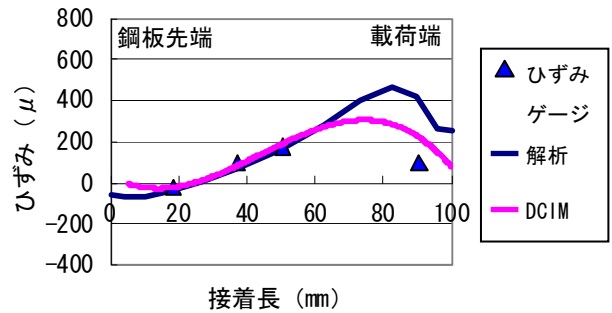


図-13 接着幅 50mm-鋼板表面中央 y 方向ひずみ分布

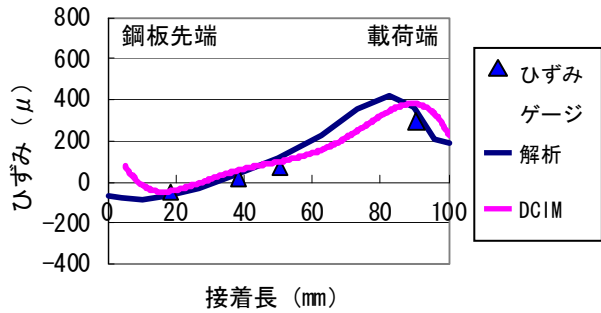


図-14 接着幅 70mm-鋼板表面中央 y 方向ひずみ分布

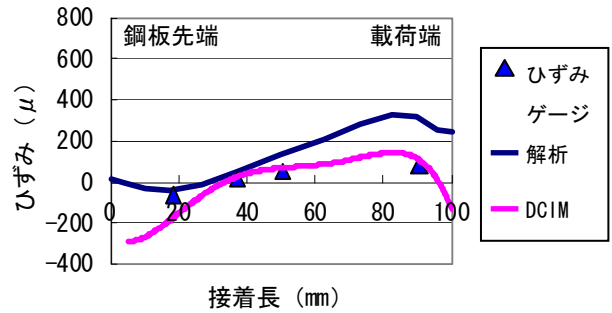


図-15 接着幅 100mm-鋼板表面中央 y 方向ひずみ分布

### 4.3 鋼板周辺コンクリートのひび割れ分布

DCIM および解析により得られた、fc36.9 供試体の各接着幅における、はく離直前の、鋼板接着部近傍のコンクリートひび割れ分布を図-16~19 に示す。これより、B=30mm, 50mm では、DCIM, 解析ともに、鋼板先端側から約 20mm の位置で、コンクリート断面方向のひび割れが進展していた。

これは、鋼板表面の圧縮ひずみが卓越した位置と同じ位置であり、接着幅が小さいと、樹脂の変形の影響を顕著に受けるため、その位置のコンクリートが引っ張られ、ひび割れが卓越したのではないかと考えられる。さらに解析では、鋼板周辺のコンクリート部で荷重方向に沿う

ひび割れが確認でき、接着幅が小さいと、断面方向に加え鋼板周辺のコンクリートも荷重に抵抗していることがわかる。また、B=70mm では DCIM, 解析ともに鋼板先端部のひび割れが顕著となり、そのひび割れに沿う形でコンクリート断面方向にひび割れが進展している。また、解析では、鋼板周辺の荷重方向に沿ったひび割れが小さくなっている。さらに、B=100mm では、鋼板先端部のひび割れの影響が顕著となり、荷重方向のひび割れは発生せず、コンクリート断面方向のみで荷重に抵抗していることがわかる。これらより、はく離強度の低下は、コンクリートの抵抗断面に大きく影響すると考えられる。

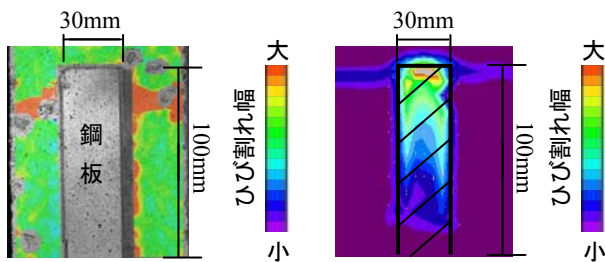


図-16 接着幅 30mm-コンクリートのひび割れ分布

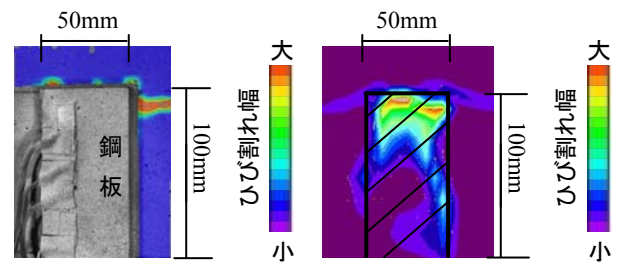


図-17 接着幅 50mm-コンクリートのひび割れ分布

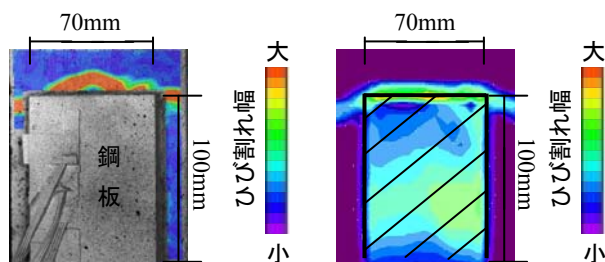


図-18 接着幅 70mm-コンクリートのひび割れ分布

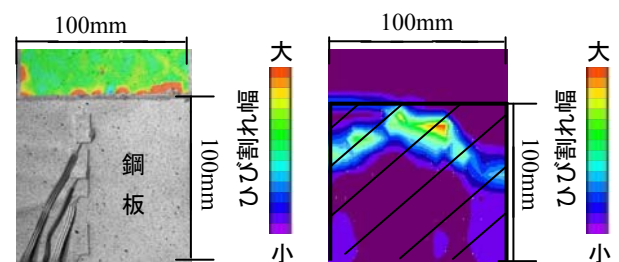
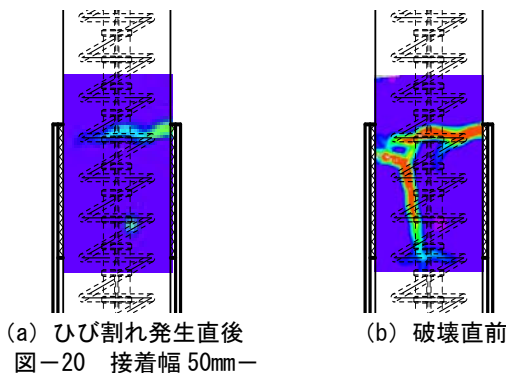


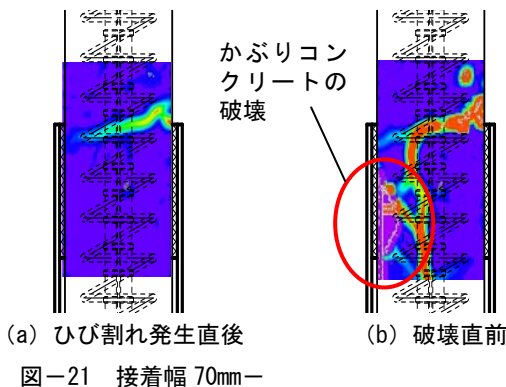
図-19 接着幅 100mm-コンクリートのひび割れ分布

#### 4.4 コンクリート側面のひび割れ進展モード

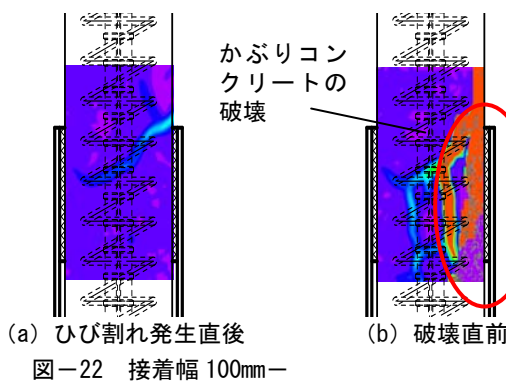
fc36.9 供試体における DCIM によって得られた接着幅毎のコンクリート側面のひび割れ進展図を図-20~22 に示す。これより、接着幅に関わらず、最初にコンクリート断面方向のひび割れが側面に進展している。その後、接着幅 50mm では、それが荷重方向に進展し、終局時には接着部のコンクリートの表層から破壊している。これに対し、接着幅 70mm の時は、接着部の途中からかぶりコンクリートが破壊している。さらに、接着幅 100mm では、断面方向のひび割れがスパイラル筋位置まで進展した後に、接着部全体のかぶりコンクリートが破壊している。これらより、接着幅がコンクリート断面に近づくと、側面のひび割れの進展が顕著となり、鋼板接着端部のはく離現象に相違を生じることが分かった。



コンクリート側面のひび割れ進展図



コンクリート側面のひび割れ進展図



コンクリート側面のひび割れ進展図

#### 5. まとめ

接着幅の異なる鋼板接着端部のはく離現象に関して、鋼板表面のひずみ分布およびひび割れ進展に関する検討の結果、以下の結論が得られた。

- 1) 接着幅がコンクリート断面幅に近づくと、破壊荷重は大きくなるが、平均はく離強度は、逆に低下する。
- 2) 全視野ひずみ計測により、接着幅が異なる場合の鋼板表面のひずみ分布、およびコンクリート側面のひび割れの進展を計測でき、鋼板端部のはく離挙動の違いを明確に観察できた。
- 3) 鋼板表面の長さ方向ひずみ分布は、樹脂の変形の影響を強く受け、鋼板先端側から 20mm 付近で圧縮ひずみ、90mm 付近で引張ひずみが卓越する分布を示す。
- 4) 接着幅に対しコンクリートの断面幅が十分であると接着面ではく離が発生する。しかし、接着幅に対しコンクリートの断面幅が不足すると、接着面ではく離する前にコンクリートが引張強度に達し破壊する。
- 5) はく離現象は、接着幅がコンクリート断面に近づくと、側面のひび割れの進展が顕著となり、鋼板接着端部のはく離現象に相違を生じる。
- 6) コンクリートと樹脂の接着界面の節点のみで、はく離をシミュレートするモデルでは、コンクリートの抵抗幅やひび割れの影響を考慮できず、鋼板端部のはく離現象を正しく評価できないことが分かった。

#### 6. おわりに

本研究は、接着幅が異なる場合の鋼板端部の破壊メカニズムについて全視野ひずみ計測により可視化し、その違いを明らかにすることができたと考える。今後は、この違いをもとに解析モデルを構築し、さらなる検討を行う予定である。なお、本研究は平成 20 年度科学研究費補助金、基盤研究(B)(2)(課題番号：19360205)の一部により行われた。ここに記し謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 安東祐樹, 浦田美生, 山本健太, 松田浩: 鋼板の接着幅が端部ではく離現象に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, pp.1603-1608, 2008.6
- 2) 内野正和: デジタル画像相関法の原理について, JCI-JSEM ジョイントセミナー, 光学的計測法の基礎と応用, pp.21-26, 2005.12
- 3) 山谷敦, 中村光, 檜貝勇: 回転ひび割れモデルによる RC はりのせん断挙動解析, 土木学会論文集, No.620/V-43, pp.187-pp199, 1999.5
- 4) 佐野正, 三浦尚: 鋼板接着によるコンクリート部材の補強設計法に関する研究, 土木学会論文集, No.555/V-33, pp.117-pp129, 1996.11