

論文 鋼板の接着幅が端部ではく離現象に及ぼす影響

安東 祐樹^{*1}・浦田 美生^{*2}・山本 健太^{*3}・松田 浩^{*4}

要旨: コンクリート部材に鋼板などの補強材を接着して補強した際に、十分な接着幅および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、補強材のはく離現象に及ぼす接着幅方向の影響を3次元非線形有限要素解析および両引き試験により検討したものである。検討の結果、クーロン摩擦モデルの接着条件を用いて界面の相対変形をコンクリートの引張強度まで拘束すれば、鋼板のはく離現象をシミュレートできることが分かった。また、接着幅が躯体幅と等価になると鋼板先端のひび割れが顕著となり躯体自体の曲げ変形と相まって、鋼板のはく離強度を低下させることが分かった。

キーワード: 鋼板接着, はく離現象, 接着幅, 3次元有限要素解析

1. はじめに

わが国の高度経済成長期に建設された建築物や土木構造物などが更新時期を迎え、年々、増加傾向にある。しかしながら、限られた予算および期間の中でこれらの構造物を更新することは困難であり、新しい補修・補強技術への期待が以前にも増して高まりつつある。このような状況の中、コンクリート構造物では、数多くの工法が研究・開発され、実用化に至っている。特に、補強材（鋼板、炭素繊維、アラミド繊維など）をコンクリート表面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、これらの接着工法では、時として、十分な接着面積が得られないと補強材の接着端部からはく離を生じる場合がある。そのため、現在では、実験的・解析的知見から様々な研究^{1)~3)}が行われているが、これらの研究の大半は、繊維系補強材や接着長さを中心に行われており、鋼板や接着幅方向に着目した検討事例は多くない。

そこで、新たな試みとして、鋼板の接着幅と躯体幅の関係が鋼板のはく離現象に及ぼす影響について解析および実験により検討を行った。

2. 鋼板接着端部のはく離現象

鋼板接着工法は、コンクリート部材の引張最外縁に鋼板を接着している性質上、その接着範囲が十分に確保できないと、鋼板の接着端部から剥がれて破壊に至り、所定の補強効果が期待できない恐れがある。

このはく離現象は、接着材として用いている樹脂の弾性係数が被着体である鋼板やコンクリートに比べ小さいため、引張力が大きく作用する箇所では樹脂の変形が大きくなってしまふ。その結果、この変形に被着体が追従できずに接着端部ではく離に至る。さらに、この変形

により被着体にひび割れが発生すると、変形が過大となって曲げが作用し、はく離を助長することとなる⁴⁾。そのため、必要な定着長さの提案および終局時の破壊挙動に関する研究^{5), 6)}が行われ、適切な定着長さの提案が行われている。

しかしながら、補強材の接着幅と躯体幅とが異なる場合、予期せぬ破壊を生じたり、解析の終局時までシミュレーションが正確に行えなかったりすることがある。

そこで、接着幅が異なった場合の局所接着特性を把握するため、両引き試験を解析的、実験的に検討を行った。

3. 非線形FEMによるはく離挙動解析

鋼板接着端部のはく離現象について、汎用コードMSC Marcを用いて接着幅、圧縮強度に関するパラメトリック解析を実施し、はく離荷重との相関を見出すこととした。

なお、既往の研究⁵⁾では、ひび割れを模擬した離散的2次元線形解析であったが、本解析では、材料非線形性とひび割れの進展を考慮した3次元非線形モデルとした。

3.1 解析モデル

モデルは、図1に示すように文献⁵⁾で用いられた試験体を構成する部材全てを3次元の8節点アイソパラメトリック要素でモデル化を行った。要素分割数は、断面幅方向を5mm、載荷方向を5mm~20mm、断面高さ方向を15mm~25mmにて分割を行い、総節点数18975~22375節点のモデルとした。また、コンクリートブロックには、スパイラル筋を埋込み要素にて構築している。さらに、接着材は、コンクリートや鋼板に比べ弾性係数が低くポアソン比が大きな材料であるため、せん断変形の影響を強く受ける。そのため、鋼材のはく離現象を適正に評価できなくなる可能性が高かったため、厚み方向を文献⁵⁾にならい2層とした。

*1 長崎大学 大学院 生産科学研究科 (正会員)

*2 長崎大学 大学院 生産科学研究科

*3 長崎大学 工学部 構造工学科

*4 長崎大学 工学部 構造工学科教授 工博 (正会員)

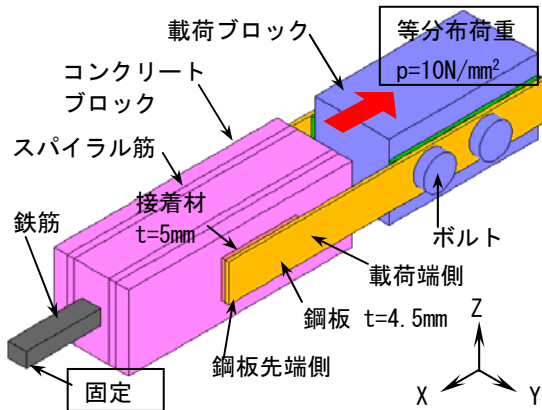


図-1 解析モデル概要図

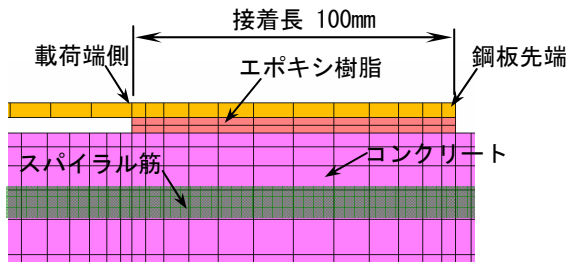


図-2 エポキシ樹脂のメッシュ分割状況

また、要素の形状特性としては、モデルを8節点アイソパラメトリック要素にて構成していたため、ひずみが全体を通じて一定となり、変形挙動が緩慢になる恐れがあった。そこで、解析では、要素全体に想定ひずみ法⁷⁾を用いることによって変形特性の改善を図っている。

境界条件は、断面中心の鉄筋先端の変位を完全固定とし、荷重は、荷重ブロック(100mm×100mm)側面のコンクリートブロック側に等分布荷重($p=10\text{N/mm}^2$)を全200ステップ($100\text{kN}/200\text{step}=0.5\text{kN}/\text{step}$)の単調増分とした。

つぎに、今回の解析では、鋼板接着端部のはく離をシミュレートする必要があったため、各部材間のすべりや付着特性などの接触条件を考慮したモデルとしている。この接触条件の定義にあたっては、以下の通りである。

まず、接着部の鋼板およびコンクリート界面では、節点をそれぞれ独立させ、その節点間に接着条件を定義し、はく離をシミュレートすることとした。また、荷重ブロックとスペーサーについても、同様に節点を独立させて、その節点間に接触滑り条件を定義し、鋼材間のすべりを再現した。なお、鋼材間の滑り摩擦係数は0.25とした。これに対し、鉄筋とコンクリートでは、文献⁵⁾で鉄筋の抜け出し等が確認されなかったことから、節点を共有させ完全結合とした。

解析は、接着長100mm一定とし、鋼板幅(30mm～100mmの20mmピッチ)とコンクリート強度(18N/mm²～40N/mm²)をパラメータとして接着幅の影響をシミュレートすることとした。

3.2 材料物性および構成則

鋼板接着端部のはく離では、コンクリートのひび割れの進展や接着部の破壊など非線形性が強くなる。

そこで、各材料の物性および構成則は以下の仮定に基づき決定した。

(1) コンクリート

コンクリートの物性は、道路橋示方書⁸⁾に基づき、表-1に示すものを用いた。

表-1 コンクリートの物性

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 μ_c
18	1.58	2.20×10^4	0.167
21	1.75	2.35×10^4	
30	2.22	2.80×10^4	
40	2.69	3.10×10^4	

※引張強度 f_t は $0.23 \cdot f_c'^{2/3}$ より算出

はく離現象は、コンクリートの一部破壊をともなった現象であるため、軟化域に破壊エネルギー則を考慮した。

まず、圧縮軟化域には、山谷・中村・楢貝⁹⁾が示した構成則を参考にして式(1)、(2)に基づき終局ひずみを算出した。なお、最大圧縮強度時のひずみは、 2000×10^{-6} と仮定し¹⁰⁾、計算に用いた要素平均寸法はコンクリートの骨材寸法25mmとした。

$$G_{fc} = 8770 \cdot \sqrt{f_c'} \quad (1)$$

$$\varepsilon_u = \frac{G_{fc}/f_c' + \varepsilon_c}{l_{eq}} + \frac{\varepsilon_c}{2} \quad (2)$$

G_{fc} : 圧縮破壊エネルギー [N/m]
 f_c' : 圧縮強度 [N/mm²]
 ε_c : 圧縮強度時のひずみ (2000×10^{-6} と仮定)
 ε_u : 終局ひずみ
 l_{eq} : 要素の等価長さ [mm]

つぎに、引張軟化域は、鉄筋の影響を考慮せず、最大強度に達した時点で脆性的に破壊を生じるものとした。

これらの構成則を図-3および表-2に示す。

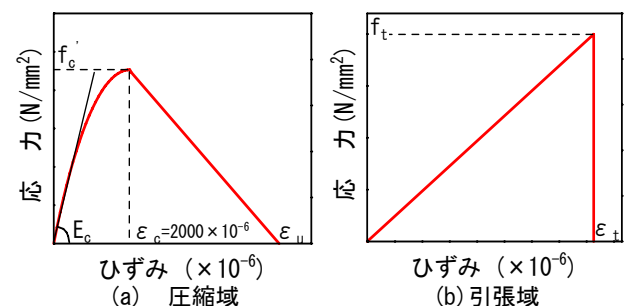


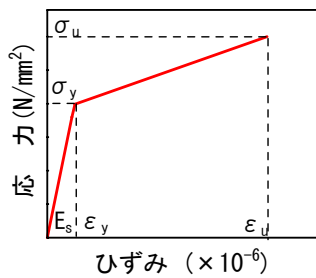
図-3 コンクリートの構成則

表－2 コンクリートの破壊時のひずみ

圧縮強度 f'_c (N/mm ²)	引張強度 f_t (N/mm ²)	圧縮ひずみ		引張 ひずみ ϵ_t ($\times 10^{-6}$)
		最大時 ϵ_c ($\times 10^{-6}$)	終局時 ϵ_u ($\times 10^{-6}$)	
18	1.58	2000	83000	70
21	1.75		77000	75
30	2.22		65000	80
40	2.69		56000	85

(2) 鉄筋, スパイラル筋および鋼板 (t=4.5mm)

鉄筋, スパイラル筋, 鋼板の構成則は, 材料試験の結果を基に図－4, 表－3のように決定した。



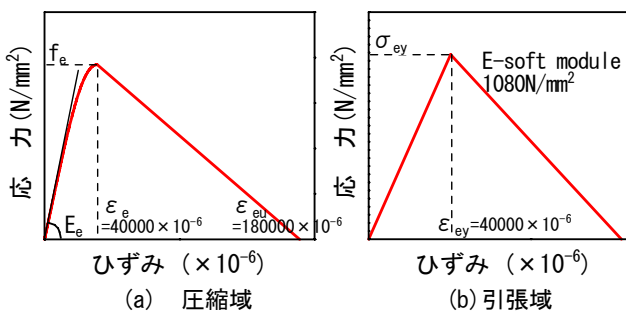
図－4 補強材の構成則

表－3 鉄筋・スパイラル筋の物性

鋼材	降伏点 σ_y (N/mm ²)	引張強度 σ_u (N/mm ²)	弾性係数 E_s (N/mm ²)
鉄筋 D25	345	520	1.90×10^5
スパイラル筋	235	350	1.90×10^5
鋼板 t=4.5mm	235	350	1.90×10^5

(3) 接着材 (エポキシ樹脂)

接着材の構成則は, 圧縮軟化域では, コンクリート同様に, 式(1), (2)により決定した。引張軟化域は, 材料試験結果から軟化直線を算出した。これらの構成則および物性を図－5, 表－4に示す。



図－5 接着材 (エポキシ樹脂) の構成則

表－4 接着材 (エポキシ樹脂) の物性 (材齢 7 日)

圧縮強度 f_e (N/mm ²)	引張強度 σ_{ey} (N/mm ²)	引張せん断 強度 τ_e (N/mm ²)	弾性係数 E_e (N/mm ²)	ポアソン 比 μ_e
70	50	10	2250	0.40

(4) その他鋼材

載荷ブロックや取付けボルトおよびスペーサーについては, 降伏基準を設けず, 弾性係数 2.0×10^6 , ポアソン比 0.3 とした。

3.3 接着部のモデル化

今回, 接着部の鋼板およびコンクリートの界面には, はく離現象を再現するため, 接着条件を定義している。この条件は, 式(3)に基づくクーロン摩擦のモデルである。

$$\sigma_{fr} \leq -\mu \sigma_n \cdot t \quad \dots (3)$$

σ_n : 法線方向応力
 σ_{fr} : 接線方向応力
 μ : 摩擦係数
 t : 滑り速度の法線方向単位ベクトル
 なお, $t = \frac{V_r}{|V_r|}$ V_r : 相対滑り速度

しかしながら, このモデルをそのまま数値解析上に用いた場合, 中立線が存在するため, ある接触面を境に摩擦力が正負反転し, 物体が逆方向に移動する現象が発生してしまう。このように接線方向応力が不連続な変化をすると数値計算が困難となる。そこで, 本解析では, 式(3)を修正した式(4)のモデルを採用することとした⁷⁾。なお, ここで相対滑り速度 C とは, 滑り-固着をシミュレートするための相対滑り速度であり, 一般的に代表的な相対速度 V_r の 1%~10%内にするのが良いとされている。そこで, 今回は中間値の 5%に設定した。

$$\sigma_{fr} \leq -\mu \sigma_n \frac{2}{\pi} \arctan\left(\frac{V_r}{C}\right) \cdot t \quad \dots (4)$$

C : 滑り-固着をシミュレートするための相対滑り速度

さらに, 本解析では, 接着部のはく離をシミュレートすることを目的としているため, 規定した限界応力まで要素間の相対運動が発生することは好ましくない。そこで, はく離が発生するまで接着界面の相対運動が生じないように接線・法線方向の拘束を行い, 限界応力に達した時点で全ての応力成分を開放 (応力負担ゼロ) した状態をはく離と定義し, その時の荷重をはく離荷重とした。

また, このときの限界応力は, コンクリート-接着材間では, 法線・接線方向ともコンクリートの引張強度とし, 補強鋼板-接着材間では法線方向を接着材の引張強度, 接線方向を接着剤の引張せん断強度とした。

3.4 接着幅のパラメータ解析結果

(1) 接着幅とはく離荷重、平均はく離強度の関係

接着幅をパラメータとしたコンクリート強度ごとの解析結果を図-6, 7に示す。なお、図-7の平均はく離強度とは、はく離荷重を接着面積で除した値である。

図-6より、はく離荷重は、圧縮強度にかかわらず接着幅が躯体幅と等しくなるにつれ、大きくなる傾向にある。ただし、接着幅が2倍になっても、はく離荷重は1.5倍程度であった。これに対し平均はく離強度は、接着幅が躯体幅と等価になるにつれ、小さくなる傾向にあった。これは、接着幅とそれに抵抗するコンクリートの断面幅とに相関があると考えられる。ただし、いずれの場合も、圧縮強度とは、ほぼ比例関係にあり、鋼板のはく離がコンクリートの物性に依存していると言える。

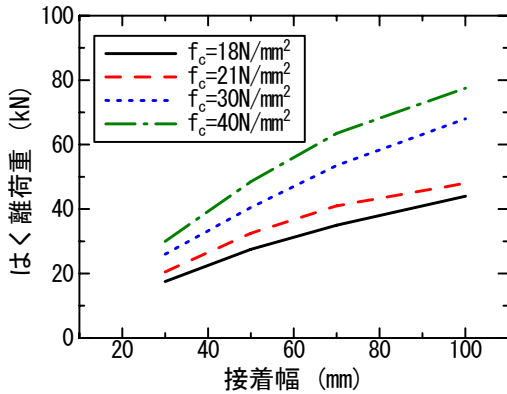


図-6 接着幅とはく離荷重の関係

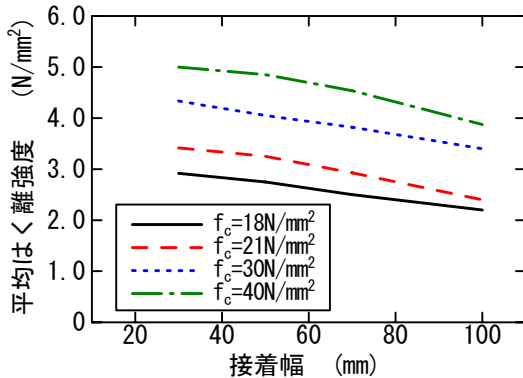


図-7 接着幅と平均はく離強度の関係

(2) ひずみ分布

上鋼板接着断面中央のひずみ分布を図-8に示す。結果より、いずれの接着幅でも、鋼板先端部から20mmの位置で圧縮ひずみがピークとなり、荷重端側の接着端部から20mmほど内側の位置で引張りひずみがピークとなる分布となった。また、接着幅30mmと50mmでは荷重端側のひずみのピークが同値であり、70mmと100mmとが同じであった。これは、躯体幅に対し接着幅が小さいと、樹脂の変形によって鋼板のみに曲げが生じたと考え

られる。これに対し、接着幅が躯体幅に近づくと、図-9に示すように、鋼板先端に発生したひび割れが顕著となり、躯体本体に曲げが生じ、荷重端側のピークが低下するものと考えられる。

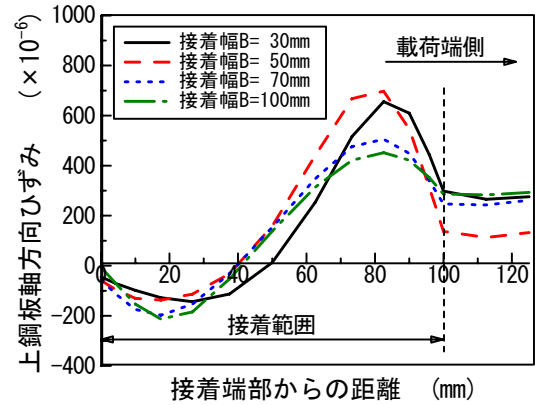


図-8 上鋼板軸方向のひずみ分布 ($f_c=30\text{N/mm}^2$)

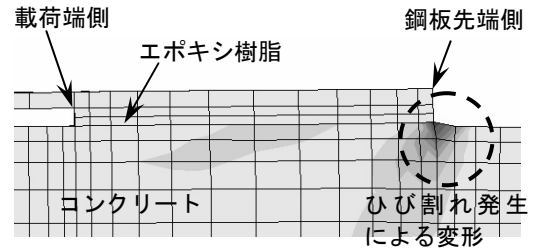


図-9 接着幅が躯体幅と等価な場合の変形図

4. 鋼板接着端部のはく離試験

4.1 試験概要

鋼板先端側ではく離現象を簡易的に評価するため、文献⁵⁾にならい、図-10に示す両引き試験により鋼板接着端部のはく離を再現する試験を行うこととした。試験は、300kN型の引張試験機に供試体の両端を固定し、試験体が破壊するまで荷重を行うこととした。

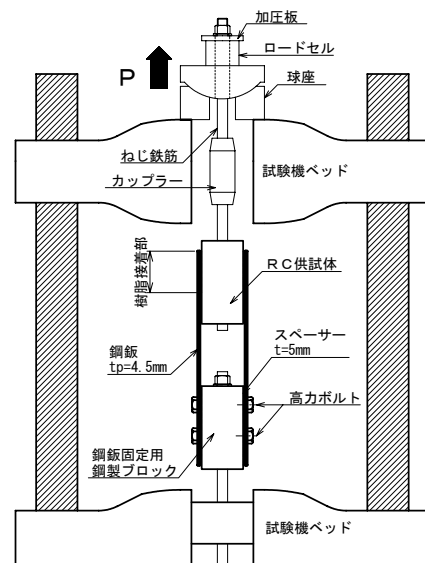


図-10 実験概要図

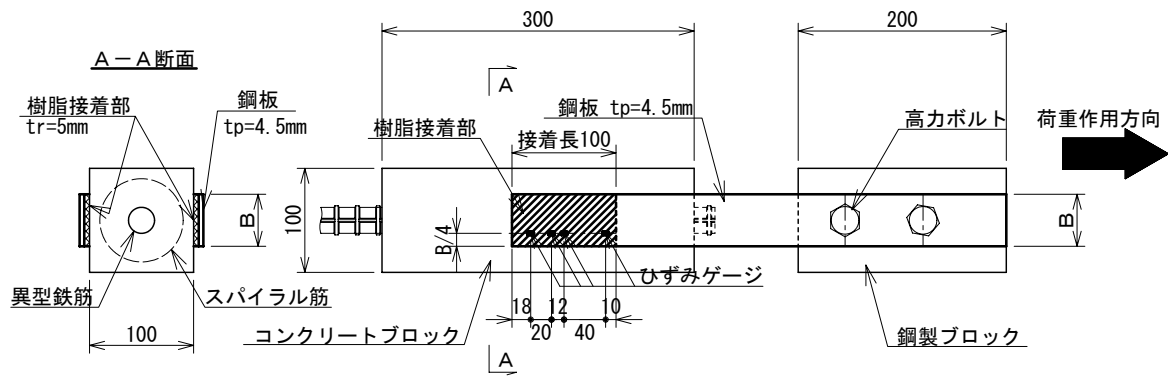


図-1-1 供試体概要図 (単位 mm)

4.3 試験体概要

試験体は、図-1-1に示すように、コンクリートブロックに鋼板（幅 B:50mm, 100mm）をエポキシ樹脂にて両側に接着を行い、反対側をボルトで固定したものを作製した。

4.2 使用材料

使用した材料の物性を表-6～8に示す。

表-6 コンクリートの物性

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 μ_c
15.7	1.44	1.40×10^4	0.17
22.2	1.82	2.22×10^4	0.19
32.5	2.34	2.50×10^4	0.18
36.9	2.55	2.77×10^4	0.16

※ 引張強度 f_t は $0.23 \cdot f_c'^{2/3}$ より算出

表-7 鋼材の物性

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

表-8 接着材（エポキシ樹脂）の物性（材齢 7 日）

圧縮強度 f_c (N/mm ²)	引張強度 σ_{ey} (N/mm ²)	引張せん断強度 τ_e (N/mm ²)	弾性係数 E_e (N/mm ²)	ポアソン比 μ_e
71.5	53.0	12.6	2260	0.38
78.6	57.9	13.7	2800	0.42

4.4 試験結果

試験結果を、表-9に示す。結果より、解析と同様にコンクリートの強度に関わらず、接着幅が大きくなると、はく離荷重は大きくなるが、平均はく離強度が小さくなる傾向にあった。また、この時の試験値と解析値を比較するとほぼ同値であった。ただし、接着幅 100mm ではコンクリートの圧縮強度が 30N/mm² 以上になると相関が悪くなっている。この要因は、コンクリートの構成則なし、スパイラル筋の影響と思われる。特に、今回の解析では、スパイラル筋を埋込み要素としており、その付着特性を十分考慮できなかったためと考えられる。しかし、これらの付着特性を考慮するには、現段階では研究成果が少なく、今後の検討を要する。

つぎに、 $f_c=36.9\text{N/mm}^2$ のときの接着端部からの上鋼板軸方向のひずみ分布を図-1-2に示す。図より、各接着幅とも両接着端部からおよそ 20mm の位置にピークが見

表-9 実験結果一覧

試験体 No.	定着長 L (mm)	コンクリート圧縮強度 f_c' (N/mm ²)	接着幅 B (mm)	エポキシ樹脂圧縮強度 f_c (N/mm ²)	はく離荷重 P_{pr} (kN)		平均はく離強度 τ_p (N/mm ²)	
					実験	解析値	実験	解析値
1	100	15.7	50	78.6	28.0	25.0	2.80	2.50
2			100		31.9	36.0	1.60	1.80
3		22.2	50	71.5	27.0	28.5	2.70	2.85
4			100		47.5	47.5	2.35	2.38
5		32.5	50	71.5	34.0	35.5	3.40	3.55
6			100		46.5	65.0	2.33	3.25
7		36.9	50	78.6	40.8	42.5	4.08	4.25
8			100		48.0	63.0	2.40	3.15

られ解析と一致する分布傾向を示していた。ただし、いずれの結果も解析の方が高い傾向を示していた。特に、荷端側の接着端部では、解析と実験とが大きくかい離している。

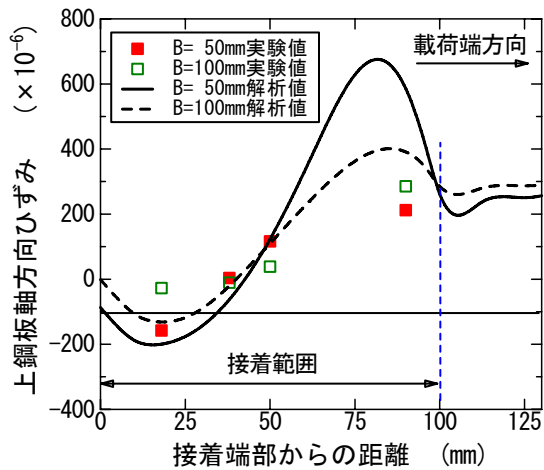


図-12 上鋼板軸方向のひずみ分布 ($f_c=36.9\text{N/mm}^2$)

5. まとめ

今回、鋼板接着端部に発生するはく離現象に関して解析および実験による検討の結果、以下の結論が得られた。

- (1) 接着界面にクーロン摩擦モデルを適用し、界面の接線・法線の相対変形をコンクリートの引張強度まで拘束すれば、補強材のはく離現象をある程度シミュレートできる。
- (2) 接着幅が躯体幅と等しくなると、はく離荷重は大きくなる傾向にあるが、平均はく離強度は、逆に低下する。これは、接着材の変形に加え、接着部の鋼板先端側に発生したひび割れの拡大が顕著となって躯体本体に曲げ変形が加わったことが一因である。
- (3) 圧縮強度が大きくなるにつれ、はく離荷重および平均はく離強度とも大きくなる。その相関は、ほぼ直線関係にある。
- (4) 接着部のひずみ分布は、両接着端部から 10~20mm ほど内側に入った位置をピークとした分布を示し、接着幅が小さい方が、接着材の変形の影響を強く受け、そのピークが顕著である。逆に接着幅が躯体幅と等しくなると、鋼板先端側に発生したひび割れの

拡大ともなうて躯体本体の曲げ変形が過大となってピークが低下する傾向にある。

6. おわりに

今回、鋼板端部のはく離現象について 3 次元の非線形有限要素解析および鋼板の両引き試験により、接着体の幅と躯体の断面幅の関係についてある程度の相関を見出すことができた。今後は、コンクリート部の構成則の見直しや全視野ひずみ計測による接着幅方向ひずみ分布の把握を行い、これらの課題についてさらなる検討を実施して行く予定である。

参考文献

- 1) 岸徳光, 三上浩, 張広鋒: FRP シート曲げ補強 RC 梁に関するシート剥離解析, 土木学会論文集 No.725/V-58, pp255-272, 2003.2
- 2) 袁鴻, 吳智深, 吉沢広之: 外面接着された鋼板/連続繊維シートとコンクリートの界面せん断伝達に関する解析的検討, 土木学会論文集 No.675/I-55, pp27-pp39, 2001.4
- 3) コンクリート構造物の補修技術研究委員会報告書, (社)日本コンクリート工学協会, 2003.7
- 4) 宮入裕夫ほか: 先端接着接合技術, NGT, 2000.10
- 5) 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, pp117-pp129, 1996.11
- 6) MSC Marc 2003 日本語マニュアル A 編, エムエスシーソフトウェア, 2003
- 7) 古賀掲維, 松田浩, 林山豊, 佐川貴光: 鋼板・CF シートで補強された RC 梁の非線形挙動解析, コンクリート工学年次論文集, No.20, pp.109-114, 日本コンクリート工学協会, 2003.7
- 8) 道路橋示方書 III コンクリート橋編, (社)日本道路協会, 2002.3
- 9) 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, pp187-pp199, 1999.5
- 10) コンクリート標準仕方書 [構造性能照査編], (社)土木学会, 2002.3