

論文 横拘束力が CFRP 板とコンクリートの局所付着性状に及ぼす影響

松永 健太郎*¹・矢野 努*²・中村 洋行*³・金久保 利之*⁴

要旨: CFRP 板をコンクリートに貼付し、オイルジャッキで直接横拘束力を CFRP 板に与え 1 面せん断付着試験を行った。実験結果から、横拘束のない場合の局所付着応力-すべり量関係に横拘束による付着増分としての局所付着応力-すべり量関係を付加させ、横拘束のある場合の局所付着応力-すべり量関係をモデル化した。また、拘束応力が大きいほど CFRP 板とコンクリート間に生じる剥離するときの水平変位は小さくなると考え回帰した曲線と、具体的な定着を施した場合の拘束応力と水平変位の比例関係から拘束応力の上限值を決定し、構築したモデルで定着強度を数値解析により求めた。

キーワード: CFRP 板, 拘束応力, 横拘束, Popovics 式, 局所付着応力, すべり量, 定着強度

1. はじめに

コンクリート構造物の梁や床スラブの曲げ補強に CFRP 板が用いられている。CFRP 板はコンクリートとの一体性を確保することが重要であり、著者らは CFRP 板を用いて 2 面せん断付着試験を行い、付着特性に関する研究報告をした¹⁾。CFRP 板が付着のみで耐力を確保できない場合は定着部の工夫が必要となる。CFRP 板を種々の方法で定着させ 1 面せん断付着試験を行い、CFRP 板の局所的な定着性状を検討している^{2),3)}。

しかしながら、定着による耐力の増分における横拘束力の影響に関する検討は十分ではなかった。本研究では、コンクリートブロックに貼り付けた CFRP 板に横拘束力を直接作用させ 1 面せん断付着試験を行い、横拘束力が局所付着性状に与える影響を考察し、局所付着応力-すべり量関係をモデル化する。また、モデルを用いて実際に定着を施した場合の定着強度を求める方法を提案することを目的とする。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体形状を図-1 に示す。試験体は L 型コンクリートブロックであり、付着区間長さ（付着長） l_b を CFRP 板自由端部から 100 mm として幅 50 mm の CFRP 板をコンクリートブロックに貼り付けた。CFRP 板の貼り付けには高粘度のモルタルベースのエポキシ系接着樹脂を用いた。変動因子は、コンクリート圧縮強度、CFRP 板の厚さ t_{fp} および弾性係数 E_{fp} 、横拘束力とした。横拘束力は 2, 5, 10, 25 および 50 kN の 5 通りとした。これらの数値は、前述の定着実験により実際に測定された拘束力を参考にして決定している。試験体総数は 27 体である。

2.2 使用材料

コンクリート目標圧縮強度は 13.5, 21, 36 MPa の 3 種類とした。材料試験の結果を表-1 に示す。また、CFRP 板の力学特性を表-2 に示す。CFRP 板の幅 b_{fp} は全て 50 mm であり、厚さと弾性係数の積を板剛性と称する。

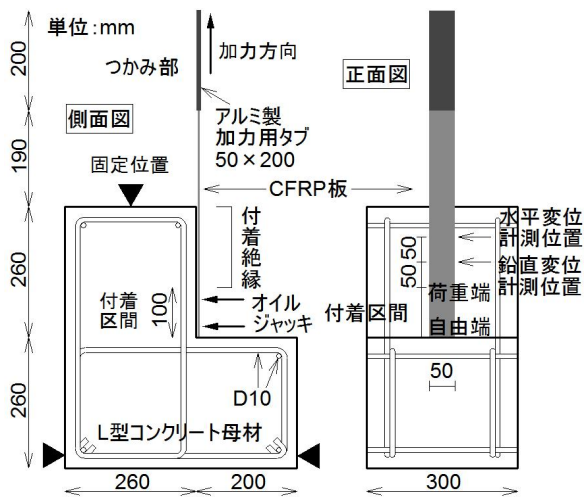


図-1 試験体形状

表-1 コンクリートの力学特性

目標圧縮強度 (MPa)	圧縮強度 σ_B (MPa)	弾性係数 E_c (GPa)	割裂引張強度 σ_t (MPa)
13.5	17.5	20.9	1.85
21	27.8	23.8	2.58
36	40.1	24.6	3.65

表-2 CFRP 板の力学特性

種類	名称	引張強度* (MPa)	弾性係数* E_{fp} (GPa)	厚さ t_{fp} (mm)	板剛性 $t_{fp} \cdot E_{fp}$ (kN/mm)
高強度	G1	3090	173	1.0	173
	G2	2624	173	2.0	346
高剛性	H2	1930	452	2.0	904

* 繊維方向の物性値

*1 筑波大学大学院 システム情報工学研究科構造エネルギー工学専攻 修士 (工学) (正会員)

*2 (株) コンステック 補強技術本部課長 修士 (工学) (正会員)

*3 (株) コンステック 補強技術本部部長 博士 (工学) (正会員)

*4 筑波大学大学院 システム情報工学研究科構造エネルギー工学専攻准教授 博士 (工学) (正会員)

2.3 実験方法

図-2 に示す治具を用いて、付着長 100 mm の領域に縦に並べた 2 個のオイルジャッキにより横拘束力を CFRP 板に直接作用させ、加力中、目標値を一定に保つようにした。鋼板と CFRP 板の間にはテフロンシートを挿入し、CFRP 板の抜出しを拘束しないように配慮した。

加力装置には 2000 kN 万能試験機を使用した。コンクリートブロックを試験機ヘッドに固定し、CFRP 板上部の加力用タブをチャックでつかみ、上向きに引張力を与え、1 面せん断付着試験を行った。計測項目は引張荷重 P 、水平変位 δ_h 、鉛直変位 (2 ヶ所)、オイルジャッキの荷重とした。計測位置を写真-1 に示す。CFRP 板が剥離しようとする方向 (写真-1 の手前側) を水平変位の正、CFRP 板が上部に引張力を受ける方向を鉛直変位の正とした。

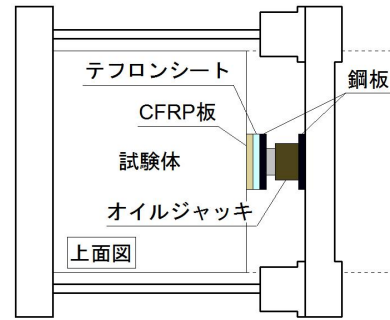


図-2 横拘束力を与える治具

3. 実験結果

3.1 破壊状況

CFRP 板が破断した試験体はなく、破壊形式は全ての試験体において CFRP 板がコンクリートから剥離する付着破壊であった。破壊後の剥離面を写真-2 に示す。1, 2 mm 程度厚のコンクリート表層部が CFRP 板とともに

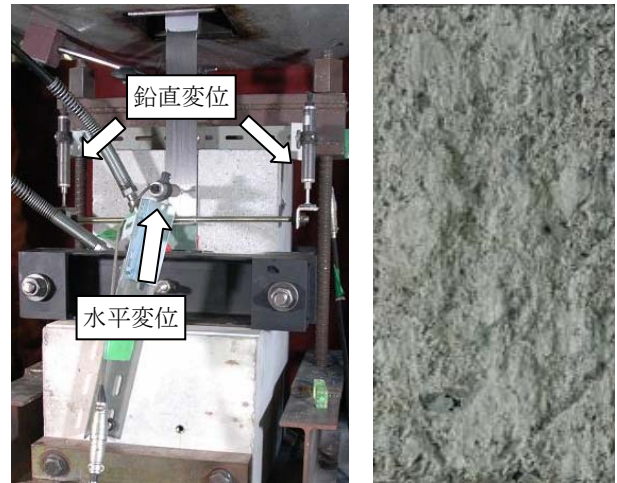


写真-1 計測位置



写真-2 破壊状況

表-3 試験体と実験結果一覧

試験体名*	コンクリート 目標圧縮強度 (MPa)	CFRP 板	横拘束力 (kN)	付着強度 計算値 P_b (kN)	最大荷重時			最大荷重 / 付着強度 計算値
					引張荷重 P_{max} (kN)	水平変位 $\delta_{h,max}$ (mm)	付着応力 $\tau_{bl,max}$ (MPa)	
13-G2-02	13.5	G2	2	20.23	18.64	0.824	3.73	0.92
13-G2-05			5		22.52	1.302	4.50	1.11
13-G2-10			10		26.66	0.964	5.33	1.32
13-G2-25			25		23.22	0.790	4.64	1.15
13-H2-02		H2	2		20.15	0.562	4.03	0.89
13-H2-05			5		23.94	0.974	4.79	1.06
13-H2-10			10		29.09	1.496	5.82	1.29
13-H2-25			25		44.62	1.572	8.92	1.98
13-H2-50			50		49.06	2.274	9.81	2.18
21-G1-02		21	G1		2	18.38	19.24	-0.081
21-G1-10	10			31.06	1.184		6.21	1.69
21-G1-25	25			42.95	0.160		8.59	2.34
21-G2-02	G2		2	24.71	0.110		4.94	1.12
21-G2-05			5	28.74	1.251		5.75	1.30
21-G2-10			10	33.65	0.770		6.73	1.52
21-G2-50			50	47.08	2.010		9.42	2.13
21-H2-02	H2		2	29.50	0.850		5.90	1.19
21-H2-05			5	30.25	1.544		6.05	1.22
21-H2-10			10	38.18	1.889		7.64	1.53
21-H2-25		25	39.20	1.239	7.84	1.57		
21-H2-50		50	46.26	1.533	9.25	1.86		
36-G2-02	36	G2	2	23.62	28.64	0.958	5.73	1.21
36-G2-10			10		40.01	1.750	8.00	1.69
36-G2-25			25		59.89	1.266	11.98	2.54
36-H2-02		H2	2		32.28	1.646	6.46	1.20
36-H2-10			10		43.81	2.034	8.76	1.63
36-H2-25			25		57.08	1.740	11.42	2.12

* コンクリート目標圧縮強度-CFRP 板名称-横拘束力、目標圧縮強度が 13.5 MPa の試験体を名称中では 13 と略記

剥離した。これは、接着樹脂とコンクリート表層部の接着強度が大きく、破壊がコンクリート表層内部で起こったためと考えられる。

3.2 最大付着応力

実験結果一覧を表-3に示す。付着応力は引張荷重をCFRP板の付着面積(5000 mm²)で除した値である。コンクリート圧縮強度 σ_B が大きいと最大付着応力も大きくなる傾向となり、板剛性が大きいと最大付着応力は若干大きくなった。

式(1)~(6)に示す既報告のCFRP板の付着強度算定式¹⁾で計算した付着強度 P_b を表-3に示す。付着強度の計算値に対する最大荷重の比は0.89~2.54であり、ほとんどの試験体において実験値が付着強度計算値を上回った。

$$l_b \geq l_e \text{ のとき, } P_b = k_e \cdot \tau_{b,\max} \cdot b_{fp} \cdot l_e \quad (1)$$

$$l_b < l_e \text{ のとき, } P_b = k \cdot \tau_{b,\max} \cdot b_{fp} \cdot l_b \quad (2)$$

$$k_e = 0.428 \quad (3)$$

$$k = \frac{1 - k_e}{2} \cdot \cos\left(\frac{l_b}{l_e} \pi\right) + \frac{1 + k_e}{2} \quad (4)$$

$$l_e = \sqrt{\frac{2 \cdot t_{fp} \cdot E_{fp} \cdot s_e}{k_e \cdot \tau_{b,\max}}} \quad (5)$$

$$\tau_{b,\max} = 2.5 \cdot \sigma_B^{0.23} \quad (6)$$

ここで、 l_e ：有効付着長、 k ：等価付着ストレスブロックの応力係数(k_e は有効付着長時の k を表す)、 $\tau_{b,\max}$ ：局所最大付着応力、 s_e ：有効付着域の局所すべり量で、0.234 mm、その他の記号は前述、付

着応力が最大付着応力の10%以上となる領域を有効付着域と定義¹⁾

CFRP板にH2を用い、目標圧縮強度が13.5 MPaの試験体の付着応力-すべり量関係を図-3に示す。なお、すべり量 s は付着区間の荷重端側から鉛直変位計測位置までの50 mm区間におけるCFRP板の伸び量を2つの鉛直変位の平均から差し引いて算出した。加力初期段階においてすべり量が負の値となっている部分が見られるが、横拘束力の影響で変位計測用治具が若干回転を起こしたものと考えられる。また、図中には後述する横拘束のない場合の局所付着応力-すべり量関係のモデルも示している。最大付着応力後、応力低下とともにすべり量が増大し、その後、ほぼ一定の付着応力を保ちながらすべり量が増大した。

3.3 最大付着応力と拘束応力の関係

最大付着応力と拘束応力の関係を図-4に示す。拘束応力 σ_l は横拘束力をCFRP板の付着面積(5000 mm²)で除して算出した。拘束応力が大きいほど最大付着応力も大きくなる傾向を示した。

4. 局所付着応力-すべり量関係

本実験の試験体の付着長は100 mmと小さく、実験により得られた付着応力-すべり量関係は局所関係であるとして横拘束の影響を考察する。

4.1 横拘束のない場合

横拘束のない場合の局所付着応力-すべり量関係の

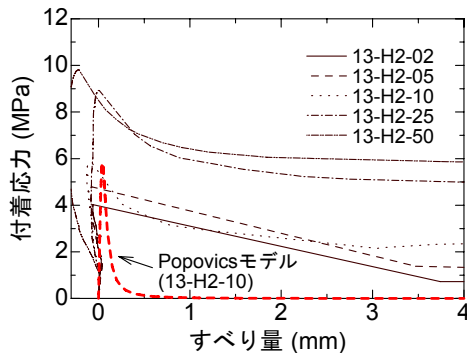


図-3 付着応力-すべり量関係

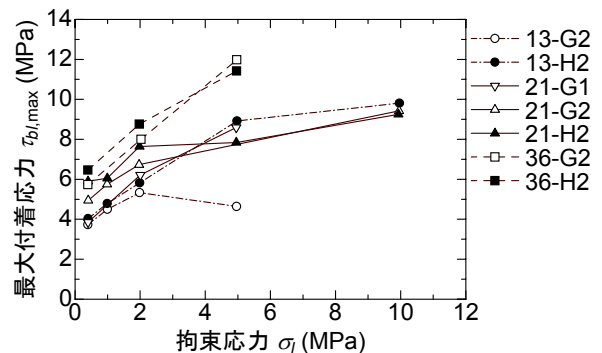


図-4 最大付着応力と拘束応力の関係

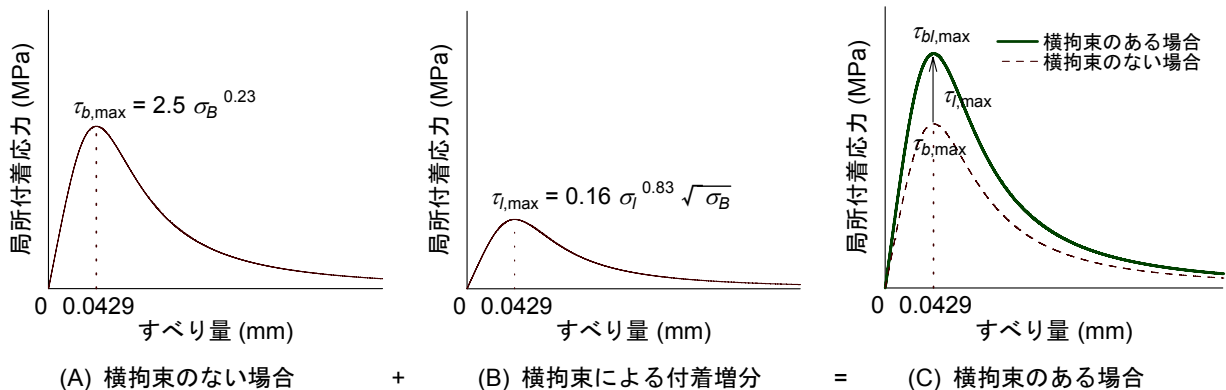


図-5 局所付着応力-すべり量関係のモデル

モデル¹⁾を式(6)~(8)および図-5 (A)に示す。式(7)はコンクリートの圧縮応力-歪関係のモデルとして提案されている Popovics 式であり、局所最大付着応力 $\tau_{b,max}$ はコンクリート圧縮強度の関数、局所最大付着応力時のすべり量 s_{max} は実験値の平均である。

$$\frac{\tau_b}{\tau_{b,max}} = \frac{s}{s_{max}} \cdot \frac{a}{(a-1) + (s/s_{max})^a} \quad (7)$$

$$s_{max} = 0.0429 \text{ mm} \quad (8)$$

ここで、

τ_b : 横拘束のない場合の局所付着応力 (MPa),

a : Popovics 式の定数で 3, その他の記号は前述

4.2 横拘束のある場合

図-3に横拘束のない場合の Popovics モデルを示した。最終的な定着強度算定を安全側に行うとともに評価の簡易さを考慮し、横拘束のある場合の局所付着応力-すべり量関係のモデルも、横拘束のない場合と同様に Popovics 式でモデル化することとした。したがって、図-5に示すように、横拘束による付着増分としての局所付着応力-すべり量関係も Popovics モデルで表現することとする。

実験結果から、板剛性の差異は局所付着性状に大きな影響を及ぼさず、コンクリート圧縮強度および拘束応力が顕著に影響を及ぼすことがわかった。横拘束による付着増分 τ_l は、横拘束のある場合の局所付着応力 τ_{bl} と横拘束のない場合の局所付着応力 τ_b の差とした ($\tau_l = \tau_{bl} - \tau_b$)。横拘束による付着増分の最大値 $\tau_{l,max}$ と拘束応力の関係を図-6に示す。 $\tau_{l,max}$ は $\tau_{bl,max}$ と $\tau_{b,max}$ の差であり、 $\tau_{bl,max}$ は実験結果から、 $\tau_{b,max}$ は既報告の実験結果を活用し式(6)を用いて算出した。また、横拘束による付着増分の最大値はコンクリート圧縮強度の平方根で除した。拘束応力が大きいほど、横拘束による付着増分の最大値は大きくなる。最小二乗法により実験値を回帰し、式(9)を得た。したがって、横拘束のある場合の局所最大付着応力 $\tau_{bl,max}$ は、式(6)および式(9)の和により表現できる。

$$\frac{\tau_{l,max}}{\sqrt{\sigma_B}} = 0.16 \cdot \sigma_l^{0.83} \quad (9)$$

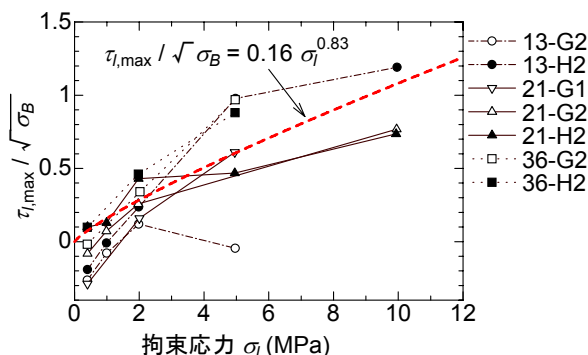


図-6 横拘束による付着増分と拘束応力の関係

横拘束のある場合の局所最大付着応力時のすべり量 s_{max} は変動因子による明確な傾向が見られず、また評価の簡易さを考慮し、横拘束のない場合の局所付着応力-すべり量関係と同じ形状としているため、 s_{max} は 0.0429 mm とした。Popovics 式の曲線形状を表す定数 a の値は、横拘束のない場合のモデルと同様に 3 とした。

以上の検討から、本研究では横拘束のある場合の局所付着応力-すべり量関係を式(10)~(12)および式(6), 式(8)のようにモデル化した。横拘束のある場合の局所付着応力 τ_{bl} は、横拘束のない場合の局所付着応力 τ_b と横拘束による付着増分 τ_l の和である。

$$\frac{\tau_{bl}}{\tau_{bl,max}} = \frac{s}{s_{max}} \cdot \frac{a}{(a-1) + (s/s_{max})^a} \quad (10)$$

$$\tau_{bl,max} = \tau_{b,max} + \tau_{l,max} \quad (11)$$

$$\tau_{l,max} = 0.16 \cdot \sigma_l^{0.83} \cdot \sqrt{\sigma_B} \quad (12)$$

4.3 モデルの適合性

提案した横拘束のある場合の局所付着応力-すべり量関係のモデルの適合性を検討するため、逐次積分法により数値解析を行い、付着強度を計算した。付着強度の実験値と解析値の比較を図-7に示す。実験値の解析値に対する比の平均は 1.12, 変動係数は 19%であり、概ね実験値を安全側に評価している。

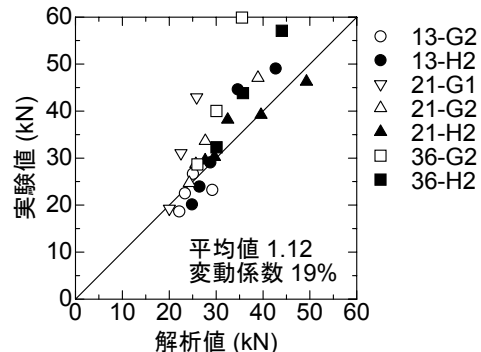


図-7 付着強度の実験値と解析値の比較

5. 横拘束効果

5.1 拘束効果の上限

CFRP 板剥離時の水平変位と板剛性の関係を図-8に示す。剥離時の水平変位は最大荷重時から荷重が減少した時の水平変位とした。なお、最大荷重時の水平変位の方が大きい場合は最大荷重時の水平変位とした。水平変位の計測位置が付着縁領域(加力用タブ端から 250mm の位置)であるため、加力用タブ端から付着区間の荷重端(350mm)の領域において直線的に CFRP 板の水平変位が増加すると考えて、計測値を 350mm/250mm 倍し、付着区間荷重端における水平変位に換算した。板剛性が大きいと水平変位も大きい傾向がある。ばらつきが大きく、どのような関数形で表現するか判断が難しいが、後

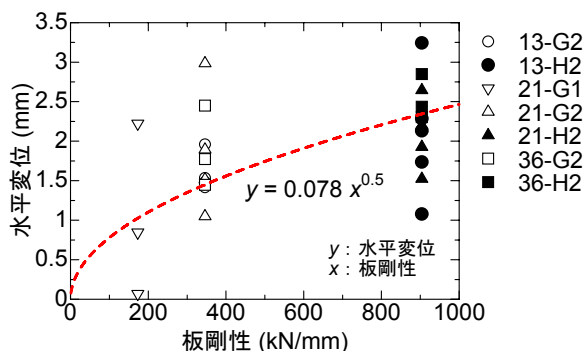


図-8 水平変位と板剛性の関係

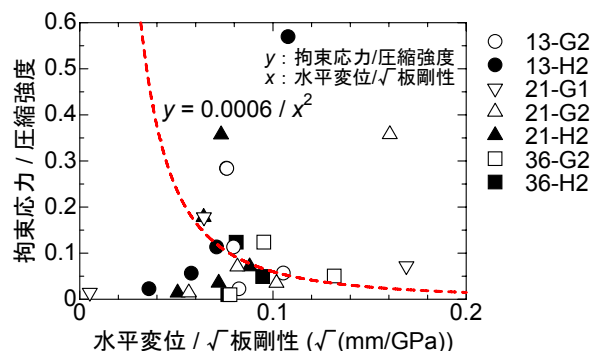


図-9 拘束応力と水平変位の関係

述する拘束応力の上限値（式(20)）を簡易な形で与えられるように、剥離時の水平変位は板剛性の平方根で表現するものとする。

横拘束のある場合の局所付着応力-すべり量関係のモデルは、拘束応力が既知の場合に使用できる。しかしながら、実際にはオイルジャッキではなく、CFRP 板を炭素繊維シート等で定着し拘束力を与えるため、拘束応力の最大値を CFRP 板や炭素繊維シート等の物性値によって表現できれば、局所付着応力-すべり量関係のモデルを用いることができると考えられる。

拘束応力 σ_l と剥離時の水平変位の関係を図-9 に示す。コンクリート圧縮強度および板剛性の違いを除去するために、拘束応力をコンクリート圧縮強度で除して無次元化し、図-8 の結果より水平変位を板剛性の平方根で除した。拘束応力が大きいほど横拘束効果は大きくなるため、剥離時の水平変位は小さくなった。図-9 の関係から簡易性を考えて実験値を回帰し、得られた関係式を式(13)および図中の破線で示した。この関係が、CFRP 板が剥離するときの CFRP 板の水平変位（コンクリート表面からの浮き量）を与えると考えられ、この変位までは拘束力が増大できると考えられる。すなわち、図中の破線が CFRP 板に拘束応力を与えたときの破壊曲線となる。

$$\frac{\sigma_l}{\sigma_B} = \alpha \cdot \left(\frac{\sqrt{t_{fp}} \cdot E_{fp}}{\delta_h} \right)^2 \quad (13)$$

$$\alpha = 0.0006 \text{ mm/GPa}$$

実際に CFRP 板に定着を施し横拘束力を与えたときの拘束応力を水平変位の関数で表すことができれば、式(13)との交点により拘束応力の上限値が決定される。したがって、式(11)が決定し、その定着方法を施した場合の局所付着応力-すべり量関係のモデルが構築される。

5.2 実際に定着を施した場合の定着強度

図-10 に示すように、実際にコンクリート部材を CFRP 板で補強し、モルタルスペーサー（以下、スペーサー）と炭素繊維シート（以下、シート）で定着する場合³⁾、CFRP 板とコンクリートの間に剥離が生じ、すべ

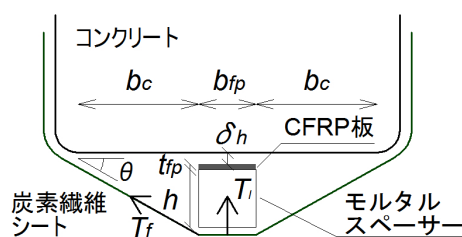


図-10 スペーサーとシート定着

り量が大きくなるにつれて剥離面に対し面外変位、すなわち水平変位が生じる。水平変位により炭素繊維シートに引張応力が発生し、剥離面への拘束力をもたらす。

コンクリートと炭素繊維シートのなす角を θ とすると

$$\tan \theta = \frac{t_{fp} + h}{b_c} \quad (14)$$

h はモルタルスペーサーの厚さ、 b_c は CFRP 板の幅方向の端部から炭素繊維シートとコンクリートの付着部分までの長さであり、面取り部分の長さを考慮した。CFRP 板とコンクリートの間に δ_h だけ水平変位が生じると、炭素繊維シートが伸び、式(15)に示す歪 ε_f が生じる。水平変位の発生による θ の増加分は極小さいものとし無視した。

$$\begin{aligned} \varepsilon_f &= \frac{\delta_h \cdot \sin \theta}{b_c / \cos \theta} = \frac{\delta_h}{b_c} \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \\ &= \frac{t_{fp} + h}{b_c^2 + (t_{fp} + h)^2} \cdot \delta_h \end{aligned} \quad (15)$$

シートに ε_f だけ歪が発生したときのシート引張力 T_f は

$$T_f = b_f \cdot n_f \cdot t_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_f \quad (16)$$

ここで、 b_f 、 n_f 、 t_f および E_f は、シートの幅、層数、厚さおよび弾性係数である。横拘束力 T_l はシートに発生する引張力の CFRP 板の厚さ方向となり、モルタルスペーサーの左右両側のシートから伝わるため、

$$T_l = 2 \cdot T_f \cdot \sin \theta = 2 \cdot T_f \cdot \frac{t_{fp} + h}{\sqrt{b_c^2 + (t_{fp} + h)^2}} \quad (17)$$

となる。また、モルタルスペーサーと炭素繊維シートの付着部分を考えて、拘束応力を σ_l 、CFRP 板の幅を b_{fp} 、炭素繊維シートの幅（スペーサーとシートの付着長さ）を b_f とすると

$$T_l = \sigma_l \cdot b_{fp} \cdot b_f \quad (18)$$

式(17)および式(18)より、スペーサーとシートで図-10のように定着する場合の拘束応力は式(19)のように水平変位 δ_h の比例式で表される。

$$\sigma_l = \frac{2 \cdot n_f \cdot t_{fp} \cdot E_f}{b_{fp}} \cdot \frac{(t_{fp} + h)^2}{\left\{ b_c^2 + (t_{fp} + h)^2 \right\}^{\frac{3}{2}}} \cdot \delta_h \quad (19)$$

$$= C \cdot \delta_h$$

モルタルスペーサーを介さない炭素繊維シート定着²⁾の場合も、 $h=0$ を代入することにより適用可能である。

拘束応力と水平変位の関係を図-11に示す。式(13)と式(19)の交点から σ_l を求める。式(19)を式(13)に代入し σ_l について解くと式(20)のようになり、拘束応力の上限値をCFRP板や炭素繊維シート等の物性値で表現することができる。

$$\sigma_l = \left(\alpha \cdot \sigma_B \cdot t_{fp} \cdot E_{fp} \cdot C^2 \right)^{\frac{1}{3}} \quad (20)$$

$$\alpha = 0.0006 \text{ mm/GPa}$$

ここで、

- σ_l : 拘束応力 (MPa)
- σ_B : コンクリート圧縮強度 (MPa)
- t_{fp} : CFRP板の厚さ (mm)
- E_{fp} : CFRP板の弾性係数 (GPa)
- C : 式(19)における比例定数 (MPa/mm)

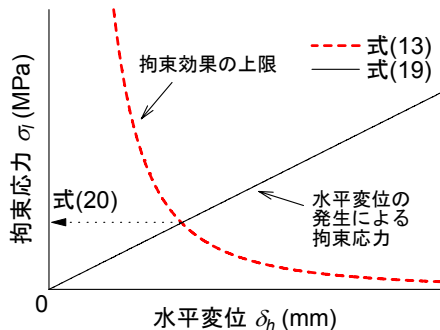


図-11 拘束応力と水平変位の関係

式(20)により求められた拘束応力を式(12)に代入し、炭素繊維シート定着²⁾およびスペーサーとシート定着³⁾の場合の局所付着応力-すべり量関係が構築される。これを用いて逐次積分法により数値解析を行い、定着強度を計算した。二方向炭素繊維シートで定着した試験体では、炭素繊維シートの加力方向の剛性の増加分を考慮した。定着強度の実験値と解析値の比較を図-12に示す。凡例のAは炭素繊維シート定着、Dはスペーサーとシート定着の試験体を表す。スペーサーとシート定着の試験体では若干ばらつきがあったが、解析値と実験値は良好に対応した。実験値の解析値に対する比の平均は1.03、変動

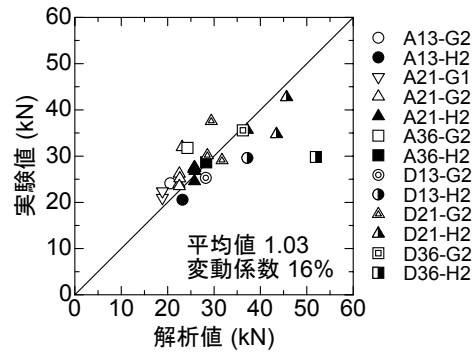


図-12 定着強度の実験値と解析値の比較

係数は16%であり、実験値を概ね精度良く評価できることがわかった。

6. まとめ

コンクリートブロックに貼り付けたCFRP板に横拘束力を直接作用させ1面せん断付着試験を行った。横拘束のない場合の局所付着応力-すべり量関係に横拘束による付着増分としての局所付着応力-すべり量関係を付加させ、横拘束のある場合の局所付着応力-すべり量関係をモデル化した。また、拘束応力が大きいほどCFRP板とコンクリート間に生じる剥離するときの水平変位は小さくなると考え帰した曲線と、具体的な定着を施した場合の拘束応力と水平変位の比例関係から拘束応力の上限値を決定し、構築したモデルを用いて定着強度を数値解析により求めた結果、解析値と実験値は概ね良好に対応した。

謝辞

試験体の作製にあたっては、三菱樹脂(株)の協力を得た。実験の実施においては、筑波大学金久保研究室研究生張偉氏の協力を得た。

参考文献

- 1) 矢野 努ほか：CFRP板とコンクリートの付着性状に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)，C-2 構造IV，pp.113-116，2007.8
- 2) 松永健太郎，矢野 努，中村洋行，金久保利之：CFRP板とコンクリートの定着性状に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.3，pp.1507-1512，2008.7
- 3) 矢野 努，松永健太郎，中村洋行，金久保利之：CFRP板とコンクリートの定着性状に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)，C-2 構造IV，pp.307-310，2008.9