

筑波大学大学院博士課程

システム情報工学研究科修士論文

CFRP 板とコンクリートの
定着性状に関する研究

松永 健太郎

(構造エネルギー工学専攻)

指導教員 金久保 利之

2009 年 3 月

目 次

第1章 序論	1
1.1 連続繊維補強材	1
1.2 CFRP板の利点	1
1.3 CFRP板とコンクリートの付着性状	2
1.4 横拘束のない場合の付着強度算定式	3
1.5 研究目的と論文概要	4
第2章 CFRP板とコンクリートの定着性状	5
2.1 はじめに	5
2.2 実験概要	5
2.2.1 試験体	5
2.2.2 使用材料	11
2.2.3 施工方法	13
2.2.4 実験方法	14
2.3 付着強度の計算とロゼット解析	15
2.4 炭素繊維シート定着試験体の実験結果	16
2.4.1 破壊状況	16
2.4.2 最大荷重と水平変位	17
2.4.3 付着応力とすべり量	18
2.4.4 炭素繊維シートの歪	19
2.5 増し貼り定着試験体の実験結果	20
2.5.1 破壊状況	20
2.5.2 最大荷重と水平変位	20
2.5.3 付着応力とすべり量	21
2.6 鋼板定着試験体の実験結果	22
2.6.1 破壊状況	22
2.6.2 最大荷重と水平変位	22
2.6.3 付着応力とすべり量	24

2.7	スペーサーとシート定着試験体の実験結果	25
2.7.1	破壊状況	25
2.7.2	最大荷重と水平変位	25
2.7.3	付着応力とすべり量	26
2.7.4	炭素繊維シートの歪	27
2.7.5	拘束力	27
2.8	増し貼りとシート定着試験体の実験結果	29
2.8.1	破壊状況	29
2.8.2	最大荷重	29
2.8.3	付着応力とすべり量	31
2.8.4	炭素繊維シートの歪	31
2.8.5	力の分散率	32
2.9	数値解析	33
2.9.1	付着の局所付着応力-すべり量関係	33
2.9.2	解析方法	34
2.9.3	炭素繊維シート定着およびスペーサーとシート定着	35
2.9.4	増し貼り定着	39
2.9.5	増し貼りとシート定着	40
2.10	まとめ	42
	 第3章 横拘束力が局所付着性状に及ぼす影響	 43
3.1	はじめに	43
3.2	実験概要	43
3.2.1	試験体	43
3.2.2	使用材料	44
3.2.3	施工方法と実験方法	45
3.3	実験結果	46
3.3.1	破壊状況	46
3.3.2	最大付着応力と変位	47
3.3.3	最大付着応力と拘束応力の関係	49
3.4	局所付着応力-すべり量関係	50
3.4.1	横拘束のない場合	50
3.4.2	横拘束のある場合	51
3.4.3	モデルの適合性	53
3.4.4	付着長が付着性状に及ぼす影響	54

3.5 横拘束のある場合の付着強度算定式	55
3.5.1 付着の基礎微分方程式	55
3.5.2 Popovics 式の囲む面積	56
3.5.3 付着長が大きい場合	57
3.5.4 付着長が小さい場合	58
3.5.5 付着強度算定式	59
3.5.6 付着強度算定式の適合性	60
3.6 横拘束効果	61
3.6.1 拘束効果の上限	61
3.6.2 実際に定着を施した場合の定着強度	63
3.7 まとめ	65
第 4 章 結 論	67
参考文献	68
謝辞	69
付録	

第1章 序 論

1.1 連続繊維補強材

既存コンクリート系構造物の補強用材料として軽量、高強度、高耐久性、高剛性等優れた構造性能を有する連続繊維補強材が多く使用されている。連続繊維補強材の形状として、シート状や板状、棒状のものがある。また連続繊維の種類として、炭素やアラミド、ガラス繊維等がある。連続繊維補強材の応力ー歪関係を図 1-1 に示す。3 種類の繊維の主な差異として弾性係数が挙げられ、炭素、アラミド、ガラス繊維の順で弾性係数が大きい。また、アラミド繊維は電気絶縁性を有する。

連続繊維補強材で補強する利点として、施工性の良さが挙げられる。アンカーボルトなどを用いた補強では、コンクリート側に孔をあけなければならないが、シート状および板状の連続繊維を用いた補強ではコンクリートに孔をあける必要はなく接着樹脂のみで施工できるため、騒音や粉塵が発生することなく施工ができる。

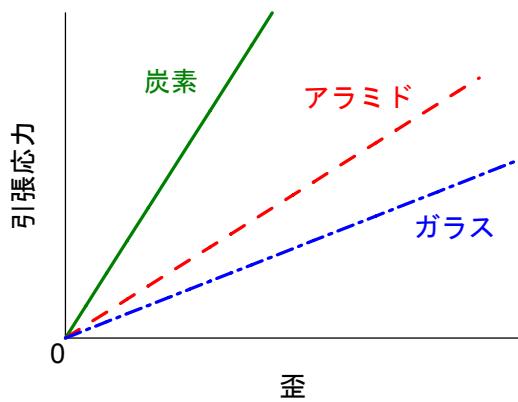


図 1-1 連続繊維の応力ー歪関係

1.2 CFRP 板の利点

現在までに連続繊維シートに関する研究が盛んに行われ、一応の成果が挙げられたと考えられるが、CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) 板に関してはまだまだ研究段階にある。CFRP 板は炭素繊維を引抜き成形方法で板状に加工した炭素繊維強化プラスチックである。従来の炭素繊維シートと比較して単位幅当たりの補強量が大幅に向上し、材厚が大きいため剛性が高く、シートよりも施工に手間がかからない等の施工性の利点も有しております、梁や床スラブの曲げ補強等に使用されている。炭素繊維シートの施工は、プライマー、パテ、接着樹脂の下塗り、上塗りと手間がかかり養生期間も長くなる。また、梁やスラブの下面に貼り付けて補強するため、上向き作業となり樹脂垂れの問題点が挙げられる。しかしながら、CFRP 板はプライマー、パテを必要とせず、接着樹脂（下塗り）のみで施工でき、かつ炭素繊維シートのように構造物全面に幾層も貼り付ける必要がないため、作業量、補強材量ともに大幅に減少し、工期を短くすることができる。また、粘性の高い接着樹脂を使用するため、樹脂垂れが少なく施工しやすい。

1.3 CFRP 板とコンクリートの付着性状

連続繊維補強材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、筆者は CFRP 板を用いて 2 面せん断付着試験を行いコンクリートとの付着特性に関する研究報告をした¹⁾。実験の概要および研究から得られた知見を以下に示す。

試験体形状を図 1-2 に示す。150×150×800 mm と 150×150×1000 mm の 2 種類の直方体コンクリートブロックに CFRP 板を貼り付けた試験体を用いて、断面中心部に配した異形鉄筋 D25 に引張力を与えることにより 2 面せん断付着試験を行った。異形鉄筋は試験体ノッチ部で切断されている。変動因子は、コンクリート圧縮強度、試験部分の付着長さ、CFRP 板の厚さおよび弾性係数である。試験体は各試験水準 3 体ずつ、計 33 体である。

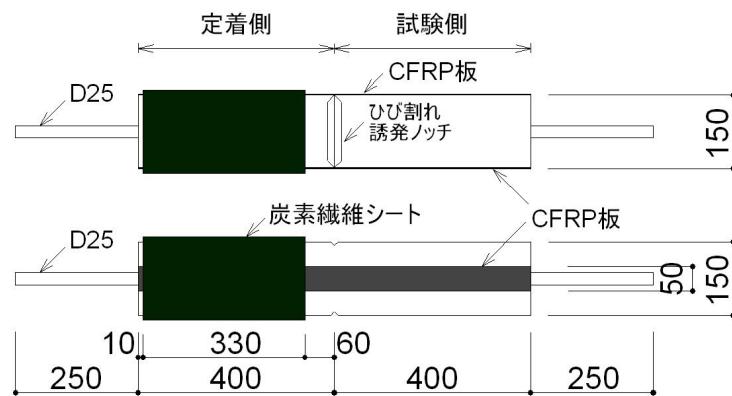


図 1-2 試験体形状

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。連続繊維シートとコンクリートの付着挙動における検討・提案が CFRP 板の付着挙動においても有効に適用できるかを検討した。既往の連続繊維シート付着強度算定式²⁾で計算した値と実験値を比較すると、計算値に対する実験値の比が 1 よりも小さく危険側の評価をしていたため、新たに CFRP 板の付着挙動に対する検討を行った。実験結果から Popovics 式を用いて局所付着応力一すべり量関係をモデル化した。このモデルは、CFRP 板が接着樹脂のみでコンクリートに付着し、横拘束のない場合の局所付着応力一すべり量関係である。以下の式(1.3.1)～(1.3.4)および図 1-3 にそのモデルの概要を示す。式(1.3.1)はコンクリート自体の圧縮応力一歪関係のモデルとして提案されている Popovics 式であり、局所最大付着応力は実験結果から最小二乗法によって回帰した近似曲線である。また、局所最大付着応力時のすべり量は実験値の平均である。実験結果から求めた付着応力一すべり量関係との対応から定数 a の値を決定した。

$$\frac{\tau_b}{\tau_{b,\max}} = \frac{s}{s_{\max}} \cdot \frac{a}{(a-1) + (s/s_{\max})^a} \quad (1.3.1)$$

$$\tau_{b,\max} = 2.5 \cdot \sigma_B^{0.23} \quad (1.3.2)$$

$$s_{\max} = 0.0429 \quad (1.3.3)$$

$$a = 3 \quad (1.3.4)$$

ここで、

- τ_b : 横拘束のない場合の局所付着応力 (MPa)
- $\tau_{b,\max}$: 横拘束のない場合の局所最大付着応力 (MPa)
- s : すべり量 (mm)
- s_{\max} : 局所最大付着応力時のすべり量 (mm)
- a : Popovics 式の定数
- σ_B : コンクリート圧縮強度 (MPa)

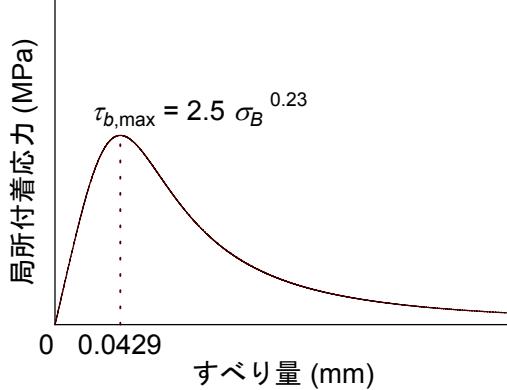


図 1-3 横拘束のない場合の局所付着応力ーすべり量関係のモデル

1.4 横拘束のない場合の付着強度算定式

横拘束のない場合の局所付着応力ーすべり量関係のモデル（図 1-3）の囲む面積に着目し、付着応力を一定とした場合の CFRP 板有効付着域でのすべり量に対し等価付着ストレスブロック (Equivalent Bond Stress Block, 以下 EBSB) を定義し、横拘束のない場合の付着強度算定式を構築した¹⁾。概略を以下に示す。この式は CFRP 板が接着樹脂のみで付着耐力を確保している場合に成り立つ式である。また、有効付着長 l_e は付着応力が最大付着応力の 10%以上となるときの軸方向の付着区間長さとした。本算定式を用いて計算した結果と実験結果は概ね良好に対応しており、安全側に評価していた。

$$l_b \geq l_e のとき, \quad P_b = k_e \cdot \tau_{b,\max} \cdot b_{fp} \cdot l_e \quad (1.4.1)$$

$$l_b < l_e のとき, \quad P_b = k \cdot \tau_{b,\max} \cdot b_{fp} \cdot l_b \quad (1.4.2)$$

ここで、

$$k_e = 0.428 \quad (1.4.3)$$

$$k = \frac{1 - k_e}{2} \cdot \cos\left(\frac{l_b}{l_e} \pi\right) + \frac{1 + k_e}{2} \quad (1.4.4)$$

$$\tau_{b,\max} = 2.5 \cdot \sigma_B^{0.23} \quad (1.4.5)$$

$$l_e = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_{fp} \cdot s_e}{k_e}} \quad (1.4.6)$$

$$\lambda_{fp} = \frac{t_{fp} \cdot E_{fp}}{\tau_{b,\max}} \quad (1.4.7)$$

l_b	: 付着長 (mm)
l_e	: 有効付着長 (mm)
P_b	: 付着強度 (N)
k	: EBSB 応力係数
k_e	: 有効付着長時の EBSB 応力係数
b_{fp}	: CFRP 板の幅 (mm)
t_{fp}	: CFRP 板の厚さ (mm)
E_{fp}	: CFRP 板の弾性係数 (MPa)
$\tau_{b,\max}$: 局所最大付着応力 (MPa)
σ_B	: コンクリート圧縮強度 (MPa)
λ_{fp}	: 付着指標 (mm)
s_e	: 有効付着域の局所すべり量で、0.234 mm

1.5 研究目的と論文概要

以上の 1.3 節および 1.4 節より、CFRP 板が接着樹脂のみでコンクリートに付着している場合の付着特性を把握した。しかしながら、CFRP 板が付着のみで耐力を確保できない場合は、何らかの定着機構を設け付着耐力を上げる必要がある。CFRP 板の付着耐力を上げる方法として、連続繊維シートを貼る、CFRP 板を増し貼りする、鋼板とアンカーボルトなどを用いる等の定着方法がある。

第 2 章では、CFRP 板を接着樹脂でコンクリートに接着し、さらに種々の方法で定着を施し 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する。定着方法は、①炭素繊維シートを CFRP 板の軸方向と直交方向に貼る方法、②CFRP 板を増し貼りする方法、③CFRP 板の上から鋼板とアンカーボルトを用いて定着する方法、④モルタルスペーサーを CFRP 板に貼り付け、さらにその上から CFRP 板の軸方向と直交方向に炭素繊維シートを貼る方法、⑤CFRP 板の両脇に CFRP 板を貼り付け、さらに 3 つの CFRP 板の上から二方向炭素繊維シートを貼る方法の 5 種類とする。実験結果から局所付着応力-すべり量関係をモデル化し、逐次積分法による数値解析により定着強度を求め、付着長が大きい場合の定着強度を推定する。

第 3 章では、CFRP 板に直接オイルジャッキにより横拘束力を与え、第 2 章と同様の 1 面せん断付着試験を行い、CFRP 板とコンクリートの局所付着性状に横拘束力が及ぼす影響を検討する。実験結果から、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する。また、等価付着ストレスブロック EBSB を用いて横拘束のある場合の付着強度算定式を構築する。実験では横拘束力をオイルジャッキにより与えているが、実際に定着する場合は炭素繊維シート等を用いるため、拘束応力を CFRP 板や炭素繊維シート等の物性値により表すことが必要になる。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、具体的な定着方法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、定着強度を数値解析と付着強度算定式により求める。

第2章 CFRP 板とコンクリートの定着性状

2.1 はじめに

筆者は 1.3 節と 1.4 節に示すように、CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) 板を用いて 2 面せん断付着試験を行い、要素レベルでの付着特性に関する研究報告をした¹⁾。しかしながら、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。定着の方法として、連続繊維シートを貼る方法、CFRP 板を増し貼りする方法、鋼板とアンカーボルトなどで定着させる方法等がある。本章では、CFRP 板を接着樹脂でコンクリートに接着し、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する。実験で得られた局所付着応力-すべり量関係をモデル化し、逐次積分法によって数値解析を行い、定着強度解析値の算出を試みる。

2.2 実験概要

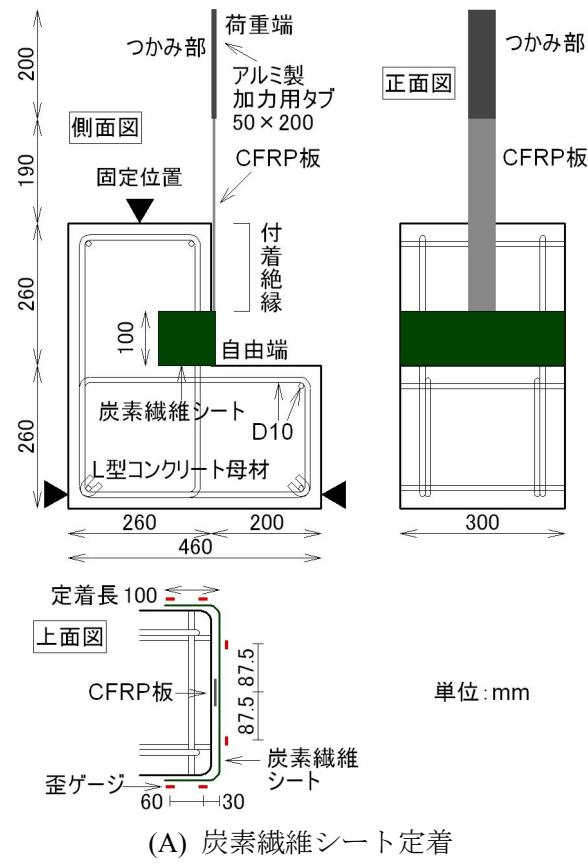
2.2.1 試験体

試験体形状を図 2-1 に示す。それぞれの左上の図が試験体の側面図、右側の図が正面図、左下の図が上面図である。試験体は L 型のコンクリートブロックであり、異形鉄筋 D10 が図 2-1 のように配筋されている。幅 50 mm の CFRP 板を高粘度のモルタルベースのエポキシ系接着樹脂を用いてコンクリートブロックに貼付し、図 2-1 (A)～(E) の 5 種類の方法で定着させる。

試験体一覧を表 2-1 に示す。定着方法は、炭素繊維シート定着、増し貼り定着、鋼板定着、スペーサーとシート定着、増し貼りとシート定着の 5 種類とした。試験体名の最初のアルファベットは定着方法を表し、A は炭素繊維シート定着、B は増し貼り定着、C は鋼板定着、D はスペーサーとシート定着、E は増し貼りとシート定着とした。コンクリート目標圧縮強度が 13.5 MPa の試験体を試験体名中では 13 と略記した。試験体総数は 52 体とした。

(A) 炭素繊維シート定着

図 2-1 (A) は、CFRP 板の長さ（軸）方向と直交する方向に幅 100 mm の炭素繊維シートを CFRP 板自由端部に貼付する方法である。コンクリートブロックの側面にさらに 100 mm 区間のシート定着部を設けた方法（定着長 100 mm）と、ブロック側面の定着部を設けないもの（定着長 0 mm）の 2 通りとし、0 mm の場合は炭素繊維シートを 3 層、100 mm の場合は 1 層貼付した。なお、定着長 100 mm の場合は、シート貼付部のコンクリートブロックには面取りを施した。定着長 100 mm の試験体は梁底での曲げ補強を、定着長 0 mm の試験体は床スラブの補強を想定している。



(A) 炭素繊維シート定着

図 2-1 試験体形状

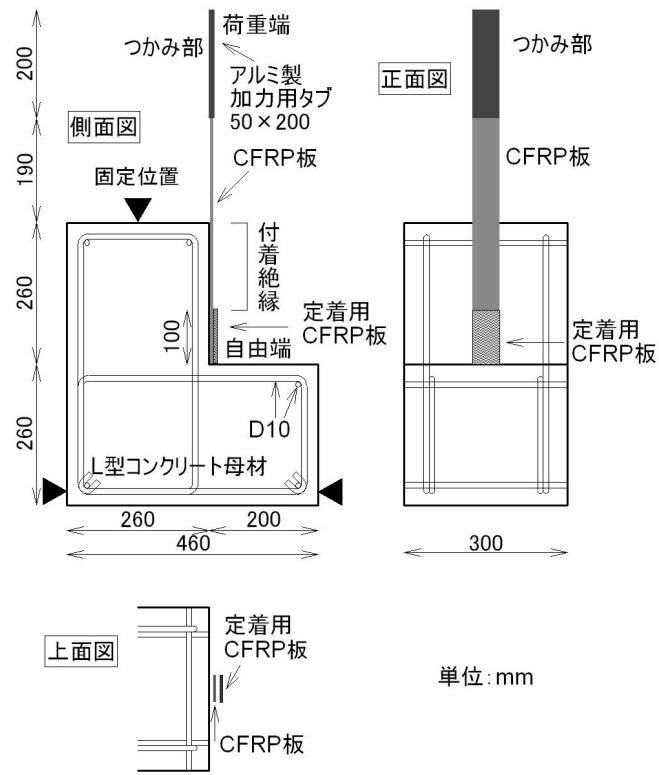
表 2-1 (A) 炭素繊維シート定着の試験体一覧

No.	試験体名*	コンクリート 目標圧縮強度 (MPa)	CFRP板	炭素繊維シート			
				規格弾性係数 E_f (GPa)	定着長 (mm)	繊維 方向	層数 (層)
1	A13-G2-230-100-1	13.5	G2	230	100	1	1
2	A13-H2-230-100-1		H2				
3	A21-G1-230-100-1	21	G1	230	100	1	1
4	A21-G1-390-100-1			390			
5	A21-G2-230-0-1	21	G2	230	0	1	3
6	A21-G2-230-0-2				2		
7	A21-G2-230-100-1			100	1	2	1
8	A21-G2-230-100-2		H2	390	100	1	1
9	A21-G2-390-100-1				0	1	3
10	A21-H2-230-0-1	36	H2	230	2		
11	A21-H2-230-0-2				100	1	2
12	A21-H2-230-100-1				2		
13	A21-H2-230-100-2		G2	390	100	1	1
14	A21-H2-390-100-1				0	1	3
15	A36-G2-230-100-1			230	100	1	1
16	A36-H2-230-100-1		H2				

* A コンクリート目標圧縮強度-CFRP板-炭素繊維シートの規格弾性係数-定着長-繊維方向

(B) 増し貼り定着

図 2-1 (B)は、CFRP板の自由端部にCFRP板の長さ（軸）方向と同じ繊維方向のCFRP板を増し貼りし定着させる方法である。CFRP板と定着用CFRP板を同一の種類、厚さとし、長さ（付着長）100mmとする。定着用CFRP板の枚数を1枚または2枚とした。



(B) 増し貼り定着

図 2-1 試験体形状

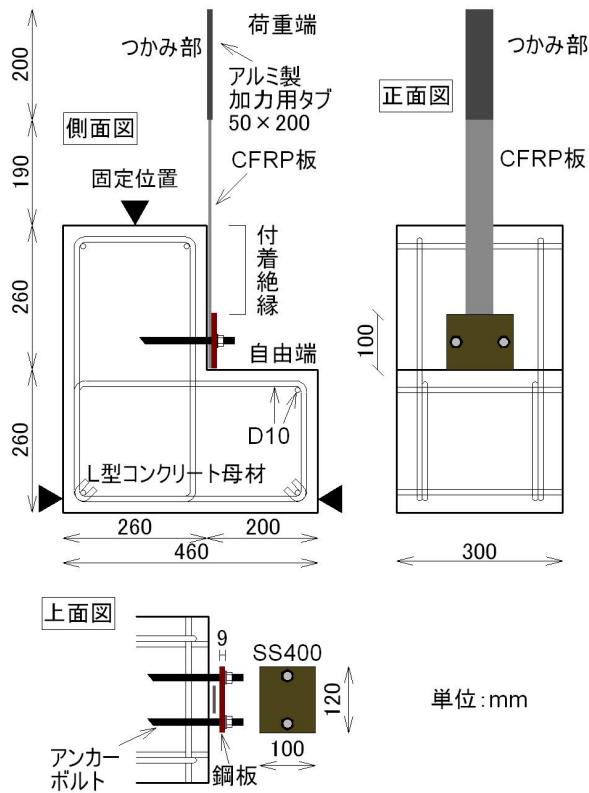
表 2-1 (B) 増し貼り定着の試験体一覧

No.	試験体名*	コンクリート 目標圧縮強度 (MPa)	CFRP板	定着用 CFRP板	定着枚数 (枚)
17	B21-G1-G1-1	21	G1	G1	1
18	B21-G2-G2-1		G2	G2	1
19	B21-G2-G2-2				2
20	B21-H2-H2-1		H2	H2	1

* B コンクリート目標圧縮強度-CFRP板-定着用CFRP板-定着枚数

(C) 鋼板定着

図2-1 (C)は、長方形鋼板によりアンカーボルトで定着させる方法である。アンカーボルトの埋込長は全て $10d$ (d はアンカーボルトの径)とした。鋼板の定着位置は定着方法(A), (B)と同様に CFRP板自由端部とした。



(C) 鋼板定着

図 2-1 試験体形状

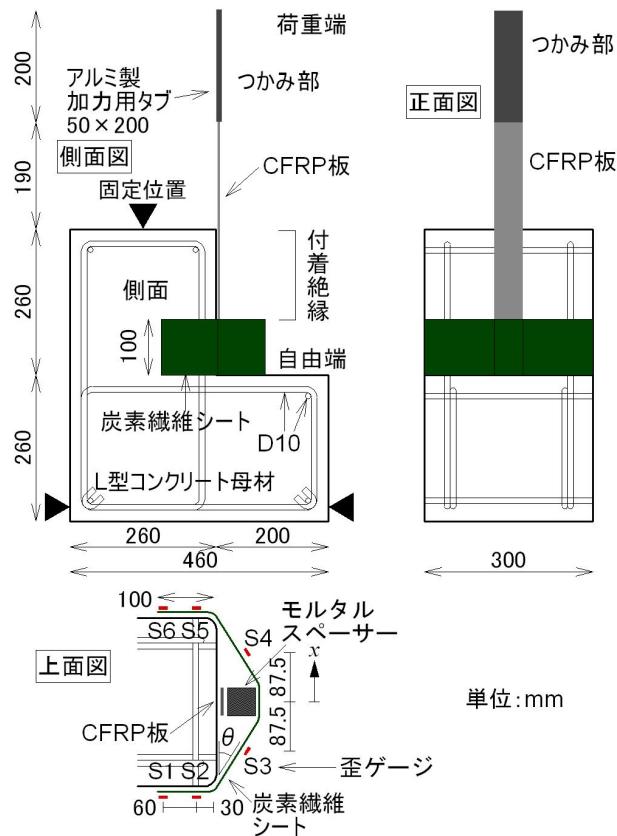
表 2-1 (C) 鋼板定着の試験体一覧

No.	試験体名*	コンクリート 目標圧縮強度 (MPa)	CFRP板	アンカーボルト	
				径 d (mm)	本数 (本)
21	C13-H2-M12-2	13.5	H2	M12	2
22	C13-H2-M16-2			M16	
23	C21-G1-M12-2	21	G1	M12	2
24	C21-G1-M16-2			M16	2
25	C21-G2-M12-2		G2	M12	2
26	C21-G2-M12-4			M16	4
27	C21-G2-M16-2			M16	2
28	C21-H2-M12-2	36	H2	M12	2
29	C21-H2-M12-4			M16	4
30	C21-H2-M16-2			M16	2
31	C36-H2-M12-2		H2	M12	2
32	C36-H2-M16-2			M16	

* C コンクリート目標圧縮強度-CFRP板-アンカーボルトの径-本数

(D) スペーサーとシート定着

図 2-1 (D)は、CFRP板自由端部に直方体のモルタルスペーサーをエポキシ樹脂で接着させ、その上から幅100 mmの炭素繊維シートを1層貼付し、コンクリートブロック側面にさらに100 mm区間のシート定着部を設けた方法（定着長100 mm）である。なお、シート貼付部のコンクリートブロックには面取りを施した。炭素繊維シートの繊維方向は一方向と二方向であり、一方向の場合はCFRP板の長さ（軸）方向と直交方向を繊維方向として貼付した。



(D) スペーサーとシート定着

図 2-1 試験体形状

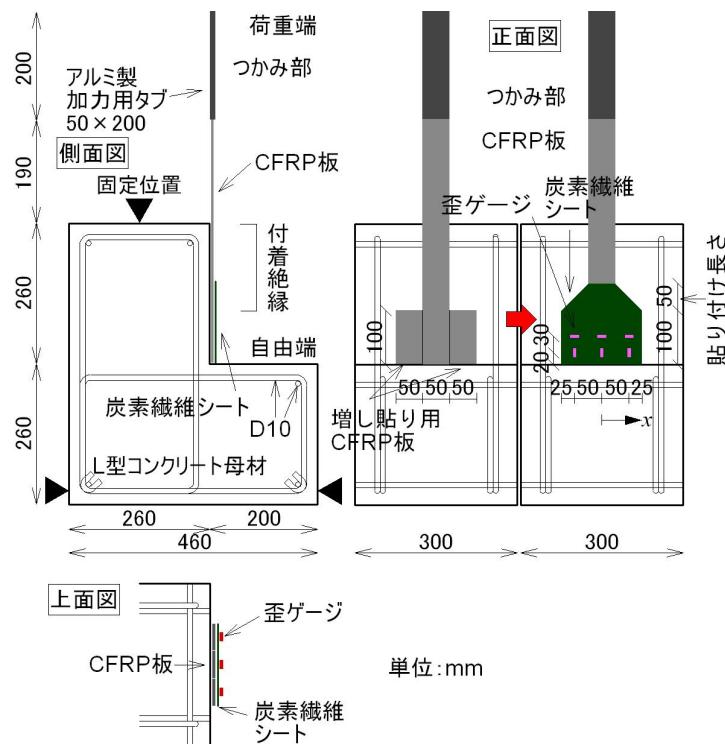
表 2-1 (D) スペーサーとシート定着の試験体一覧

No.	試験体名*	コンクリート目標圧縮強度(MPa)	CFRP板	モルタルスペーサーの厚さ(mm)	炭素繊維シートの繊維方向
33	D13-G2- 80-1	13.5	G2	80	1
34	D13-H2- 80-1		H2		
35	D21-G2- 40-1	21	G2	40	1
36	D21-G2- 80-1			80	1
37	D21-G2- 80-2			80	2
38	D21-H2- 40-1	21	H2	40	
39	D21-H2- 80-1			80	1
40	D21-H2-120-1			120	
41	D36-G2- 80-1	36	G2	80	1
42	D36-H2- 80-1		H2		

* D コンクリート目標圧縮強度-CFRP板-モルタルスペーサーの厚さ-繊維方向

(E) 増し貼りとシート定着

図 2-1 (E)は、CFRP 板の自由端部の両脇に幅 50×100 mm で CFRP 板の長さ（軸）方向と同じ繊維方向の CFRP 板を増し貼りし、その上から二方向炭素繊維シートを貼付する方法である。炭素繊維シートの形状は図 2-1 のような線対称の六角形である。炭素繊維シートの層数は 1～3 とし、貼り付け長さを 50 mm または 100 mm とした。CFRP 板と増し貼り用 CFRP 板は同一のものとした。



(E) 増し貼りとシート定着

図 2-1 試験体形状

表 2-1 (E) 増し貼りとシート定着の試験体一覧

No.	試験体名*	コンクリート 目標圧縮強度 (MPa)	CFRP 板	炭素繊維シート	
				層数 (層)	貼り付け長さ (mm)
43	E21-G1-3- 50	21	G1	3	50
44	E21-G1-3-100				100
45	E21-G2-1-100		G2	1	100
46	E21-G2-2-100			2	100
47	E21-G2-3- 50			3	50
48	E21-G2-3-100				100
49	E21-H2-1-100	H2	H2	1	100
50	E21-H2-2-100			2	100
51	E21-H2-3- 50		H2	3	50
52	E21-H2-3-100				100

* E コンクリート目標圧縮強度-CFRP 板-炭素繊維シートの層数-貼り付け長さ

2.2.2 使用材料

(1) コンクリート

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。粗骨材には最大寸法 20 mm の碎石を用いた。定着方法 A, B, C 試験体における材料試験結果の力学特性を表 2-2 に、定着方法 D, E 試験体における材料試験結果の力学特性を表 2-3 に示す。弾性係数 E_c は 1/3 割線係数とした。

表 2-2 コンクリートの力学特性（定着方法 A, B, C）

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	15.6	21.2	1.42
21	24.6	26.4	2.06
36	37.6	31.2	3.07

表 2-3 コンクリートの力学特性（定着方法 D, E）

目標圧縮強度 (MPa)	圧縮強度 σ_B (MPa)	弾性係数 E_c (GPa)
13.5	18.6	26.6
21	27.4	28.0
36	42.2	31.0

(2) CFRP 板

CFRP 板の力学特性を表 2-4 に示す。CFRP 板の種類は高強度タイプと高剛性タイプの 2 種類であり、幅 b_{fp} は全て 50 mm である。また、厚さ t_{fp} と弾性係数 E_{fp} の積 $t_{fp} \cdot E_{fp}$ を板剛性と称する。

表 2-4 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 タイプ	G1	2970	175	1.0	175
	G2	3520	165	2.0	330
高剛性 タイプ	H2	1620	480	2.0	960

* 繊維方向の物性値

(3) 炭素繊維シート

炭素繊維シートの力学特性を表 2-5 に示す。規格目付量は 300 g/m^2 である。シート幅は 100 mm とした。炭素繊維シート定着（定着方法 A）試験体では、定着長が 100 mm の場合は炭素繊維シートを 1 層、 0 mm の場合は 3 層貼り付けた。

表 2-5 炭素繊維シートの力学特性

繊維方向	種類	設計厚 t_f (mm)	引張強度* (MPa)	規格弾性係数 (GPa)	弾性係数* E_f (GPa)	目付量 (g/m ²)	使用した 定着方法
1	高強度	0.167	4510	230	233	313	A
			4810			309	D
	中弹性		3964	390	384	309	A
2	高強度	0.0833 (縦横とも)	4040	230	229	302	A, D, E

* 繊維方向の物性値

(4) 鋼板とアンカーボルト

幅 $120 \times 100 \text{ mm}$, 厚さ 9 mm の長方形鋼板 (SS400) を使用した。アンカーボルトのための孔を 2 ケ所または 4 ケ所開けた。アンカーボルト (F10T) の径 d は M12, M16 の 2 種類とし, 全ネジボルトを用いた。本数は 2 または 4 本とした。埋め込む先端を 45° 度に切断した。アンカーボルトの設置は実際の補強作業と同様に CFRP 板施工時に行い, エポキシ系接着剤を用いた接着系アンカーとした。

(5) モルタル

プレミックスのグラウト材のモルタルを用いて直方体のモルタルスペーサーを作製し, 幅 50 mm で長さ 100 mm (付着面積 5000 mm^2), 厚さを $40, 80, 120 \text{ mm}$ の 3 種類とした。圧縮試験結果の力学特性を表 2-6 に示す。各値は加力前後の試験結果の平均値である。弾性係数は 1/3 割線係数とした。

表 2-6 モルタルの力学特性

圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
50.9	25.4

2.2.3 施工方法

コンクリート表面をケレンし、CFRP 板を貼り付けた。増し貼り定着の場合も同様とした。炭素繊維シート定着の場合、プライマー、パテ材を塗布し、コンクリート表面と CFRP 板の段差をなくすようにテープを設けた。下塗樹脂を塗布し炭素繊維シートを貼り付け上塗りした。鋼板定着の場合、コンクリートにアンカーボルトを埋め込む位置に孔を設け、その中にカプセル状接着樹脂を入れアンカーボルトを埋め込み、接着樹脂を硬化させた。鋼板の貼り付け側とコンクリート側にパテ材を塗布し接着させ、ナットで仮締めし、パテ材が硬化した後、トルクレンチにより本締めを行った。トルクの値は既往のシート定着に関する文献³⁾を参考にして、M12 の場合は $84 \text{ N}\cdot\text{m}$ ($8.6 \text{ kgf}\cdot\text{m}$)、M16 の場合は $137 \text{ N}\cdot\text{m}$ ($14.0 \text{ kgf}\cdot\text{m}$) とした。スペーサーとシート定着の場合、モルタルスペーサーを CFRP 板の自由端部にエポキシ樹脂で貼付し、コンクリートブロックの側面およびモルタルスペーサーにプライマー、パテ材、下塗樹脂を塗布し炭素繊維シートを貼り付け上塗りした。増し貼りとシート定着の場合、前述の要領に準じて増し貼り用 CFRP 板と炭素繊維シートを貼付した。

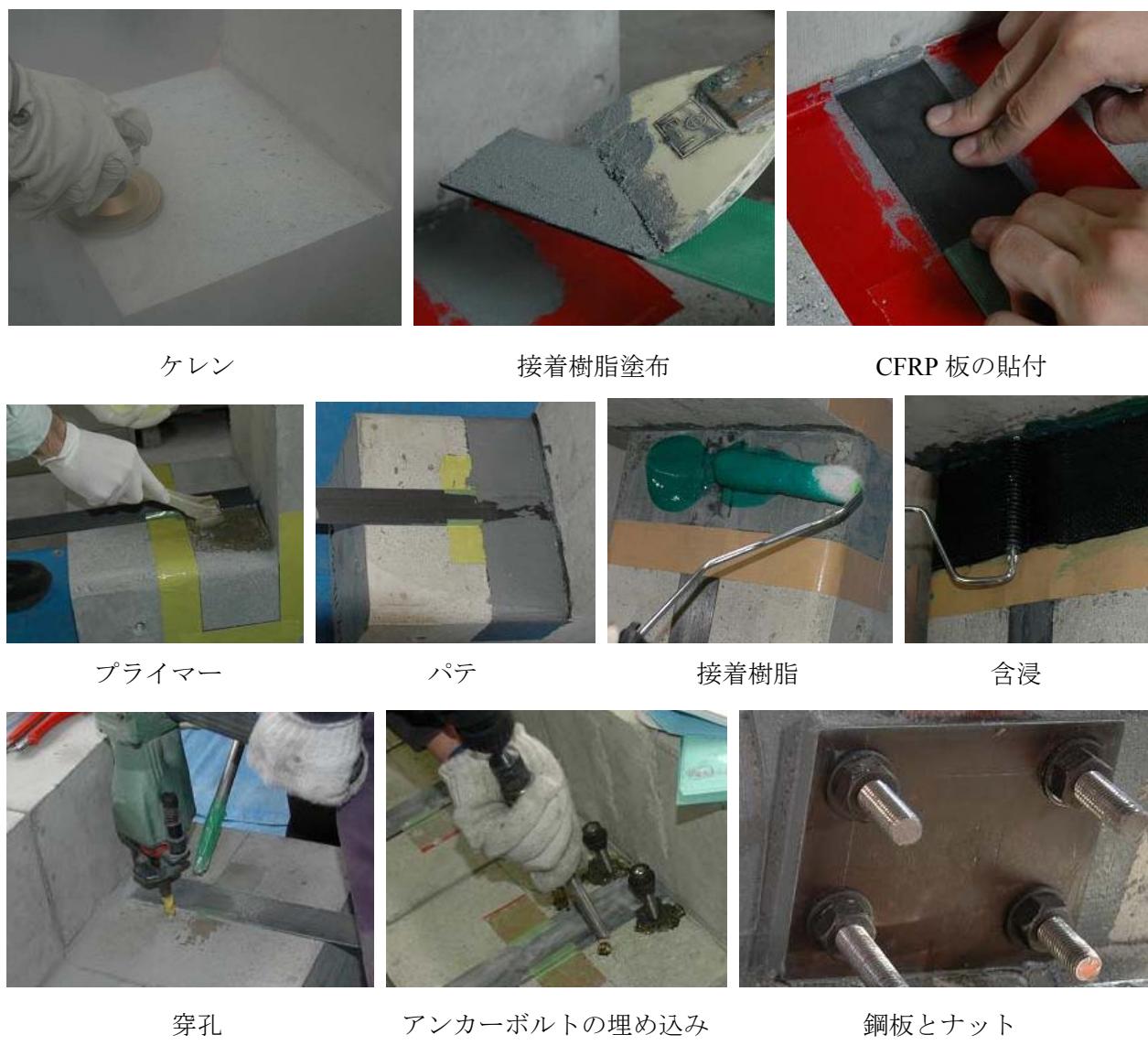


写真 2-1 施工方法

2.2.4 実験方法

CFRP板上部両面に $50 \times 200\text{ mm}$ のアルミ製の加力用タブを接着剤で取り付けた。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る。加力スピードは 0.5 mm/min とした。

計測項目は引張荷重 P 、試験機ヘッドの変位、水平変位 δ_h 、鉛直変位（2ヶ所） δ_v 、炭素繊維シートに貼付した歪ゲージの歪測定値 ε_f とした。計測位置を写真 2-2 に示す。水平変位は CFRP 板自由端部から 150 mm の位置で測定し、鉛直変位は CFRP 板自由端部から 100 mm の位置で測定した。

一方向の炭素繊維シートの場合には一軸の歪ゲージを用い、二方向の炭素繊維シートの場合には三軸の歪ゲージを用いた。ただし、増し貼りとシート定着では一軸の歪ゲージを用いた。三軸の歪ゲージの場合、炭素繊維シートの水平歪 ε_h 、鉛直歪 ε_v および斜め歪 ε_d を計測する。斜め歪は CFRP 板の荷重端部と貼付位置とを結ぶ直線方向の歪を測定できるよう斜め 45 度方向に貼付した。定着長 0 mm の試験体には 2 枚、定着長 100 mm の試験体には 6 枚貼付した。増し貼りとシート定着では図 2-1 (E) に示すように、鉛直方向と水平方向に 3 枚ずつ計 6 枚貼付した。

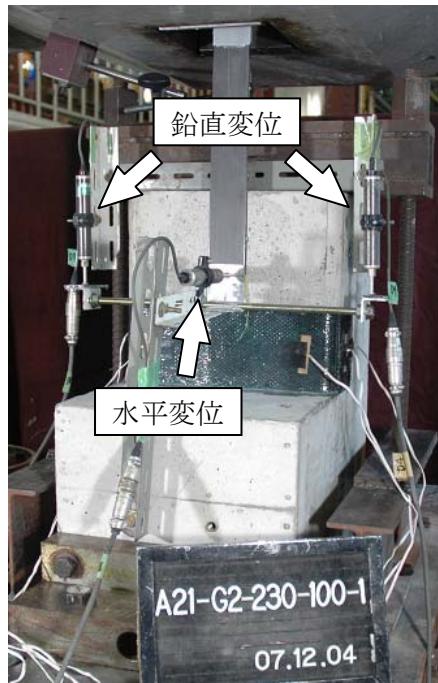


写真 2-2 計測位置

2.3 付着強度の計算とロゼット解析

実験により得られた最大荷重と、接着樹脂のみで CFRP 板がコンクリートに接着しているときの付着強度を比較するため、既報告の横拘束のない場合の付着強度算定式¹⁾により付着長 100 mm の場合における付着強度を計算する。横拘束のない場合の付着強度算定式は 1.4 節を参照されたい。付着強度計算値を有効付着長と併せて表 2-7 に示す。どの場合でも有効付着長 l_e が付着長 $l_b = 100 \text{ mm}$ よりも大きくなるため、付着力を担う区間は付着域全体となる。

表 2-7 既報告の付着強度算定式による付着強度計算値

定着方法 A, B, C				定着方法 D, E			
コンクリート 圧縮強度 σ_B (MPa)	CFRP 板	有効付着長 l_e (mm)	付着強度 P_b (kN)	コンクリート 圧縮強度 σ_B (MPa)	CFRP 板	有効付着長 l_e (mm)	付着強度 P_b (kN)
15.6	G2	277	19.63	18.6	G2	272	20.30
	H2	473	22.08		H2	463	22.93
24.6	G1	191	18.12	27.4	G1	189	18.42
	G2	263	21.38		G2	260	21.81
	H2	448	24.35		H2	443	24.92
37.6	G2	250	23.11	42.2	G2	247	23.60
	H2	427	26.66		H2	421	27.32

次節以降の実験結果を示す際、付着応力とすべり量で表現するため、それらの計算方法を以下に示す。実験で計測した引張荷重 P により、式(2.3.1)を用いて付着応力 τ_b を算出する。

$$\tau_b = \frac{P}{b_{fp} \cdot l_b} \quad (2.3.1)$$

ここで、

b_{fp} : CFRP 板の幅で、50 mm

l_b : 付着長で、100 mm

実験で計測した 2 ヶ所の鉛直変位 δ_{v1} , δ_{v2} を用いて式(2.3.2)を用いてすべり量 s を算出する。また、終局時のすべり量 s_u は付着応力が最大付着応力の 10% 未満になる直前のすべり量と定義した。

$$s = \frac{\delta_{v1} + \delta_{v2}}{2} \quad (2.3.2)$$

三軸の歪ゲージを貼り付けた試験体では、以下のロゼット解析の式を用いて最大主歪 ε_{max} および主歪の方向 ϕ を求めた。

$$\varepsilon_{max} = \frac{1}{2} \left[\varepsilon_h + \varepsilon_v + \sqrt{2 \left\{ (\varepsilon_h - \varepsilon_d)^2 + (\varepsilon_d - \varepsilon_v)^2 \right\}} \right] \quad (2.3.3)$$

$$\phi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2\varepsilon_d - \varepsilon_h - \varepsilon_v}{\varepsilon_h - \varepsilon_v} \right) \quad (2.3.4)$$

ここで、

ε_h : 水平歪

ε_v : 鉛直歪

ε_d : 斜め歪

2.4 炭素繊維シート定着試験体の実験結果

2.4.1 破壊状況

破壊状況を写真 2-3 に示す。CFRP 板が破断した試験体ではなく、全ての試験体において最大荷重時に CFRP 板がコンクリートから剥離した（付着破壊）。コンクリート表層部が CFRP 板とともに剥離し、CFRP 板に数 mm 程度の厚さのモルタル分が付着長 100 mm 全長に渡り残っていた。これは、接着樹脂とコンクリート表面の接着強度が大きく、破壊がコンクリート表層内部で起きるためと推察される。最大荷重に達した後引張荷重が急激に減少し、CFRP 板近傍の炭素繊維シートにしわが寄り、鉛直変位が増大するに伴い炭素繊維シートがコンクリートから徐々に剥離した（写真 2-3 (a)）。しわが発生し炭素繊維シートがコンクリートから剥離した範囲は概ね CFRP 板から両側に幅 50 mm 程度であった。鉛直変位がさらに増大すると炭素繊維シートが繊維方向に裂けていった（写真 2-3 (b)）。最終的に、CFRP 板が炭素繊維シートから剥離し終局に至った。

試験体 No.1 (A13-G2-230-100-1 の試験体) は、CFRP 板がコンクリートから剥離するとほぼ同時に炭素繊維シートがコンクリートから剥離した。また、試験体 No.3, 7, 8, 13 および 14 (A21-G1-230-100-1, A21-G2-230-100-1, A21-G2-230-100-2, A21-H2-230-100-2 および A21-H2-390-100-1) の 5 体においては炭素繊維シートが裂けなかった。試験体 No.16 (A36-H2-230-100-1 試験体) においては、最大荷重時に CFRP 板がコンクリートから剥離した直後、荷重が約 1.5 kN まで急激に減少し、その低い荷重状態のまましわが寄ることなく CFRP 板が徐々に抜け出した（写真 2-3 (c)）。炭素繊維シートが二方向の試験体では、シートのしわはほとんど観察されなかった（写真 2-3 (d)）。

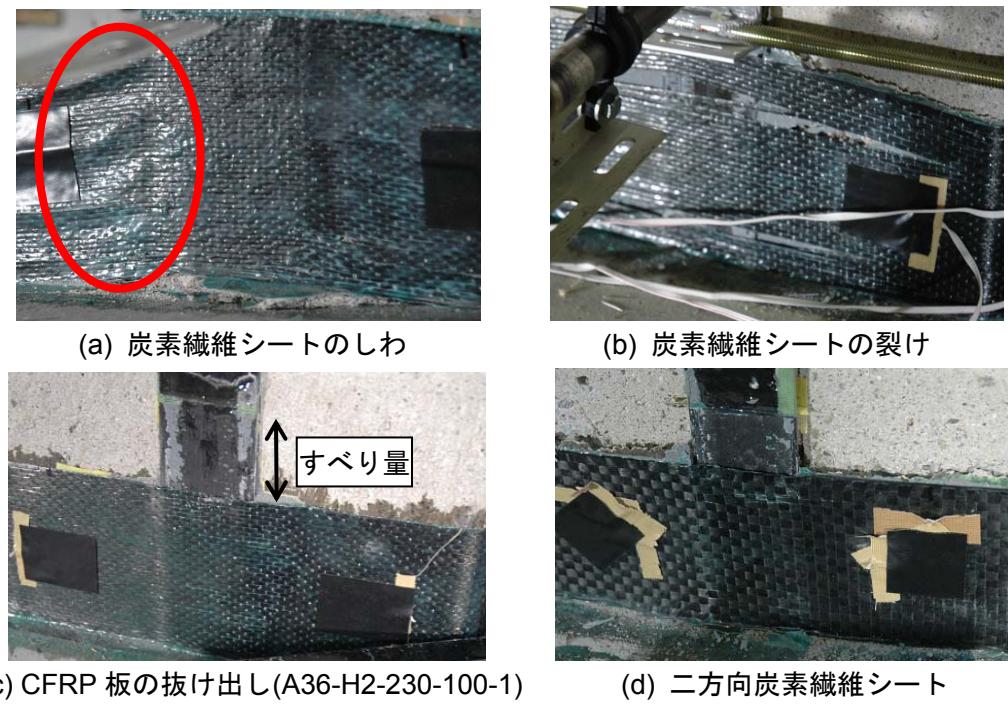


写真 2-3 破壊状況

2.4.2 最大荷重と水平変位

炭素繊維シート定着試験体の実験結果の一覧を表 2-8 に示す。コンクリート圧縮強度および板剛性が大きいと最大荷重も大きくなる傾向がある。炭素繊維シートの弾性係数は最大荷重に影響しないと考えられる。高強度タイプの CFRP 板 (G1 または G2) に補強する場合は、繊維方向が一方向より二方向の炭素繊維シートを用いた試験体の方が最大荷重も大きくなる傾向が見られるが、高剛性タイプの CFRP 板 (H2) に補強する場合はその傾向が見られなかった。定着長 0 mm の試験体と定着長 100 mm の試験体は同程度の最大荷重を示した。最大荷重の付着強度の計算値に対する比は 0.93~1.50 (平均 1.16) 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り、CFRP 板に定着を施すことによって付着耐力が上昇した。

表 2-8 実験結果一覧

No.	試験体名	最大荷重時		最大荷重 /付着強度 計算値	最大付着応力時		終局時	破壊形式*
		引張 荷重 P_{max} (kN)	水平 変位 $\delta_{h,max}$ (mm)		付着 応力 $\tau_{b,max}$ (MPa)	すべ り量 s_{max} (mm)		
1	A13-G2-230-100-1	24.10	0.260	1.23	4.82	0.138	12.036	BF(SE)→SC→PS
2	A13-H2-230-100-1	20.57	0.214	0.93	4.11	0.008	15.749	BF→WSE→SC→PS
3	A21-G1-230-100-1	20.96	0.004	1.16	4.19	0.187	16.859	BF→WSE→PS
4	A21-G1-390-100-1	22.40	-0.328	1.24	4.48	0.302	10.328	BF→WSE→SC→PS
5	A21-G2-230- 0-1	26.20	0.474	1.23	5.24	0.097	1.641	BF(SE)
6	A21-G2-230- 0-2	31.96	0.084	1.50	6.39	0.195	1.452	BF(SE)
7	A21-G2-230-100-1	24.00	-0.276	1.12	4.80	0.199	19.391	BF→WSE→PS
8	A21-G2-230-100-2	25.18	0.408	1.18	5.04	0.108	8.583	BF→SE→PS
9	A21-G2-390-100-1	23.51	0.228	1.10	4.70	0.105	7.588	BF→WSE→SC→PS
10	A21-H2-230- 0-1	27.50	0.164	1.13	5.50	0.399	1.773	BF(SE)
11	A21-H2-230- 0-2	24.59	-0.162	1.01	4.92	0.106	0.840	BF(SE)
12	A21-H2-230-100-1	27.58	-0.120	1.13	5.52	0.077	17.375	BF→WSE→SC→PS
13	A21-H2-230-100-2	27.23	0.236	1.12	5.45	0.065	12.090	BF→SE→PS
14	A21-H2-390-100-1	26.77	0.236	1.10	5.35	0.005	12.021	BF→WSE→PS
15	A36-G2-230-100-1	31.75	0.306	1.37	6.35	0.162	18.555	BF→WSE→SC→PS
16	A36-H2-230-100-1	28.64	0.206	1.07	5.73	0.037	1.892	BF→PSL

* BF は付着破壊 (CFRP 板がコンクリートから剥離), SE は炭素繊維シートがコンクリートから剥離

SC は炭素繊維シートの裂け, PS は CFRP 板が炭素繊維シートから剥離, ()はほぼ同時に起こることを表す

WSE は炭素繊維シートにしわができるで炭素繊維シートがコンクリートから剥離, PSL は CFRP 板の抜け出し

CFRP板にG2またはH2を用い、一方方向の高強度シートを定着長100mmで定着した試験体の引張荷重－水平変位関係を図2-2に示す。図2-2の凡例ではコンクリート目標圧縮強度13.5MPaを13と略記する。また、破線がG2、実線がH2のCFRP板を用いた試験体であることを示す。最大荷重に達すると同時に水平変位が大きくなり始める傾向が見られる。付着破壊がコンクリート表層内部で起こり、CFRP板のすべりが生じる時にコンクリート表面より浮き上がるものと考えられる。

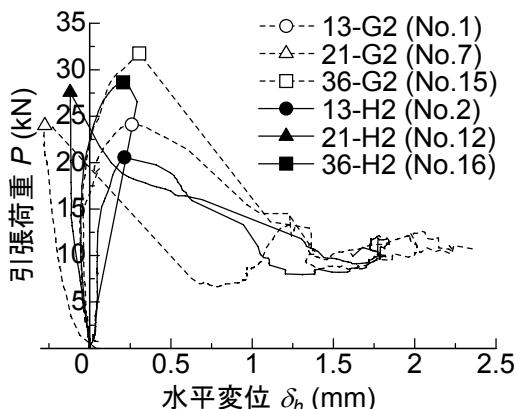


図2-2 引張荷重－水平変位関係

2.4.3 付着応力とすべり量

CFRP板にG2またはH2を用い、一方方向の高強度シートを定着長100mmで定着した試験体およびコンクリート目標圧縮強度が21MPaで二方向の高強度シートで定着した試験体の付着応力とすべり量の関係を図2-3に示す。最大付着応力後の応力低下がすべり量2mm程度で終了し、その後すべり量の増大とともに付着応力が微増する。この間、炭素繊維シートとコンクリートとの間に付着応力が発生し、CFRP板の剥離を抑制していると考えられる。

最大付着応力 $\tau_{b,max}$ およびその時のすべり量 s_{max} を表2-8に示す。最大付着応力は4.11～6.39MPaであり、コンクリート圧縮強度が増大すると最大付着応力も大きくなる傾向がある。

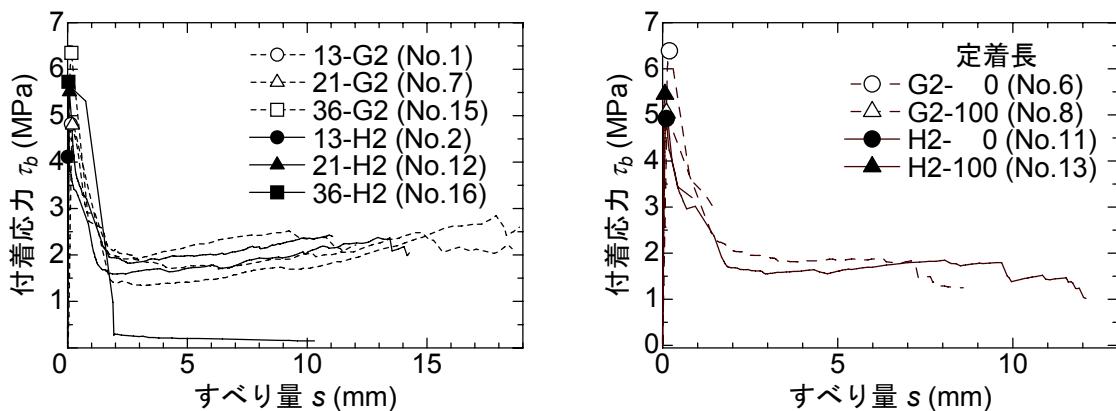


図2-3 付着応力－すべり量関係

2.4.4 炭素繊維シートの歪

炭素繊維シートの水平歪を図 2-4 に、最大主歪分布を図 2-5 に示す。なお、図中にはすべり量増大時の歪として、最大荷重時と終局時の中間のステップにおける歪も併せて示す。

一方向炭素繊維シート定着試験体における水平歪分布においては、最大荷重時の歪がほとんど発生していないため、最大荷重時までは炭素繊維シートからの面外拘束力（CFRP 板を押さえつける力）がほとんど作用していないと考えられる。中間のステップでは CFRP 板貼付面の水平歪が 1000～3000 μ 程度発生したが、定着長 100 mm の位置にはほとんど水平歪が発生しなかった。終局時には CFRP 板貼付面に 5000～8000 μ 程度の水平歪が発生し、CFRP 板の中心から 180 mm の位置で 1000 μ を超える水平歪が発生した。炭素繊維シートの両端には水平歪がほとんど発生しなかった。以上より、一方向炭素繊維シート定着試験体において有効な定着長は 50 mm 程度と考えられる。

二方向炭素繊維シート定着試験体における最大主歪分布において、定着長 0 mm の試験体では最大荷重時および中間のステップではほとんど歪が発生しなかったが、終局時には 5000～8000 μ 程度の最大主歪が発生し、定着効果を得ることができた。定着長 100 mm の試験体でも最大荷重時にはほとんど歪が発生しなかった。中間のステップでは CFRP 板貼付面に 13000 μ 程度、終局時には 22000～27000 μ 程度の歪が発生していたが、定着長 100 mm の位置ではほとんど発生していなかった。以上より、炭素繊維シートの層数は異なるが定着長を大きくすると CFRP 板貼付面の歪は増大した。

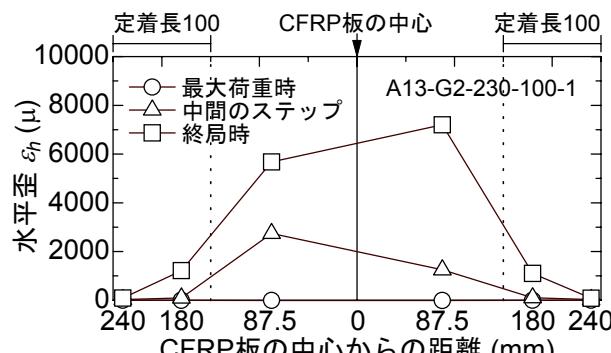


図 2-4 水平歪分布

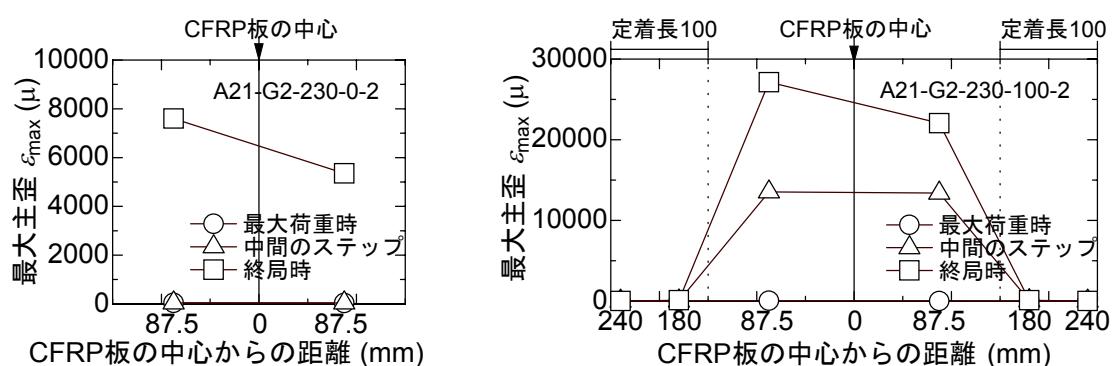


図 2-5 最大主歪分布

2.5 増し貼り定着試験体の実験結果

2.5.1 破壊状況

破壊状況の例として、試験体 No.18 (B21-G2-G2-1 試験体) の破壊後の CFRP 板剥離面を写真 2-4 に示す。CFRP 板が破断した試験体ではなく、破壊形式は 4 体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。コンクリート表層部が CFRP 板とともに剥離し、CFRP 板に数 mm 程度の厚さのコンクリートが付着長 100 mm 全長に渡り残っていた (写真 2-4)。これは、接着樹脂とコンクリート表面の接着強度が大きく、破壊がコンクリート表層内部で起きるためと考えられる。



写真 2-4 破壊状況

2.5.2 最大荷重と水平変位

増し貼り定着試験体の実験結果の一覧を表 2-9 に示す。CFRP 板の厚さが大きくなる (試験体 No.17 と 18) と最大荷重が 4.49 kN 増加し、定着枚数が増す (試験体 No.18 と 19) と最大荷重は 0.98 kN 増加するが、CFRP 板の弾性係数 E_{fp} が大きいと最大荷重は減少した。最大荷重の付着強度計算値に対する比は 0.73～0.94 (平均 0.85) であり、局所的な付着強度に対する増し貼りの効果はない。

引張荷重一水平変位関係を図 2-6 に示す。最大荷重が大きいほど最大荷重時の水平変位は小さくなる傾向がある。

表 2-9 実験結果一覧

No.	試験体名	最大荷重時		最大荷重 / 付着強度 計算値	最大付着応力時	
		引張荷重 P_{max} (kN)	水平変位 $\delta_{h,max}$ (mm)		付着応力 $\tau_{b,max}$ (MPa)	すべり量 s_{max} (mm)
17	B21-G1-G1-1	14.71	0.806	0.81	2.94	0.100
18	B21-G2-G2-1	19.20	0.516	0.90	3.84	0.101
19	B21-G2-G2-2	20.18	0.274	0.94	4.04	0.074
20	B21-H2-H2-1	17.78	0.688	0.73	3.56	0.037

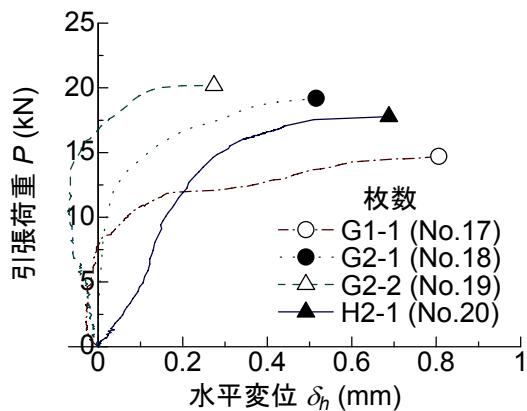


図 2-6 引張荷重－水平変位の関係

2.5.3 付着応力とすべり量

付着応力とすべり量の関係を図 2-7 に示す。板剛性が大きいと最大付着応力時のすべり量が小さくなる傾向が見られる。最大付着応力近傍ではすべり量が急激に大きくなつた。

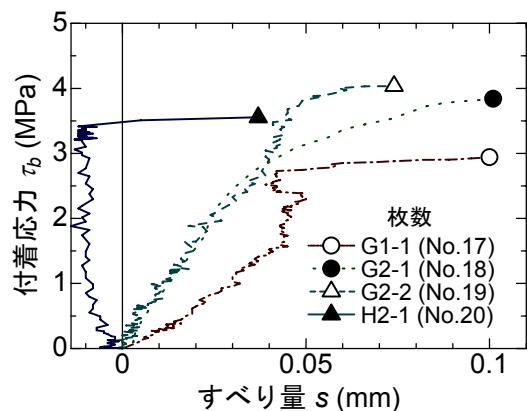


図 2-7 付着応力－すべり量関係

2.6 鋼板定着試験体の実験結果

2.6.1 破壊状況

破壊状況を写真 2-5 に示す。最大荷重に達する前に、鋼板の周辺部のコンクリートにひび割れが発生した。その後、試験体によって CFRP 板の抜け出し、CFRP 板の破断、コンクリート母材全体の破壊が見られた。CFRP 板が抜け出した場合は、試験後、鋼板にモルタル分が付着していなかった。



C36-H2-M16-2

C21-G1-M12-2

C21-G2-M12-2

写真 2-5 破壊状況

2.6.2 最大荷重と水平変位

鋼板定着試験体の実験結果の一覧を表 2-10 に示す。なお、試験体 No.28 (C21-H2-M12-2) は実験データを正確に測定することができなかった。最大荷重と板剛性の関係、最大荷重とアンカーボルトの総断面積の関係を図 2-8 に示す。コンクリート圧縮強度、板剛性が大きいと最大荷重も大きくなる傾向がある。また、アンカーボルトの総断面積が大きいと、総じて最大荷重も増大している。最大荷重の付着強度の計算値に対する比は 3.65～5.66 (平均 4.35) であり、鋼板で定着を施すことにより付着耐力が大幅に上昇した。

アンカーボルトに M12 を用い、本数を 2 本とした試験体の引張荷重－水平変位関係を図 2-9 に示す。最大荷重時の水平変位 $\delta_{h,max}$ には明確な傾向が見られない。

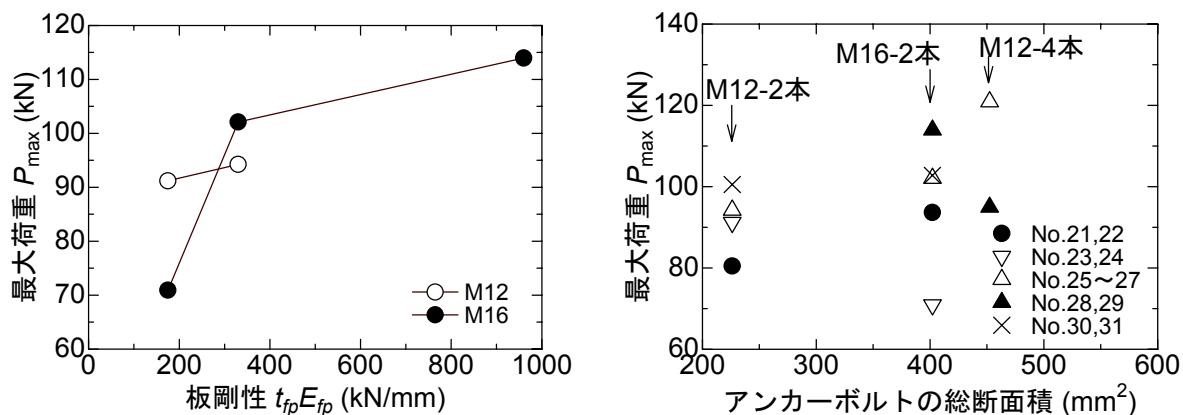


図 2-8 最大荷重と各変動因子の関係

表 2-10 実験結果一覧

No.	試験体名	最大荷重時		最大荷重 / 付着強度 計算値	最大付着応力時		破壊形式
		引張荷重 P_{\max} (kN)	水平変位 $\delta_{h,\max}$ (mm)		付着応力 $\tau_{b,\max}$ (MPa)	すべり量 s_{\max} (mm)	
21	C13-H2-M12-2	80.51	0.684	3.65	16.10	1.578	CFRP 板の抜け出し→破断
22	C13-H2-M16-2	93.67	0.802	4.24	18.73	1.916	CFRP 板の抜け出し→破断
23	C21-G1-M12-2	91.20	0.508	5.03	18.24	1.494	CFRP 板の抜け出し→破断
24	C21-G1-M16-2	70.92	0.850	3.91	14.18	0.776	CFRP 板の抜け出し
25	C21-G2-M12-2	94.25	1.208	4.41	18.85	0.965	コンクリート母材全体の破壊
26	C21-G2-M12-4	120.91	0.696	5.66	24.18	0.951	CFRP 板の抜け出し
27	C21-G2-M16-2	102.10	0.832	4.78	20.42	1.160	CFRP 板の抜け出し
28	C21-H2-M12-2	-	-	-	-	-	CFRP 板の抜け出し
29	C21-H2-M12-4	94.99	0.730	3.90	19.00	0.188	CFRP 板の抜け出し
30	C21-H2-M16-2	113.97	0.778	4.68	22.79	0.956	CFRP 板の抜け出し
31	C36-H2-M12-2	100.55	0.916	3.77	20.11	0.863	鋼板と CFRP 板が剥離
32	C36-H2-M16-2	102.78	0.856	3.86	20.56	2.659	CFRP 板の抜け出し

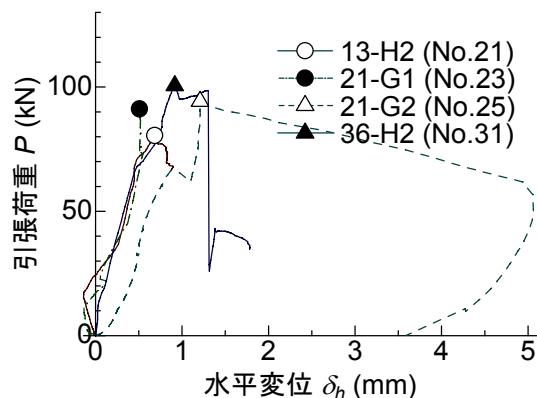


図 2-9 引張荷重－水平変位関係

2.6.3 付着応力とすべり量

アンカーボルトにM12を用い、本数を2本とした試験体の付着応力-すべり量関係を図2-10に示す。コンクリート圧縮強度、板剛性、アンカーボルトの径および本数が大きいと最大付着応力も大きくなるが、最大付着応力時のすべり量には明確な傾向が見られない。

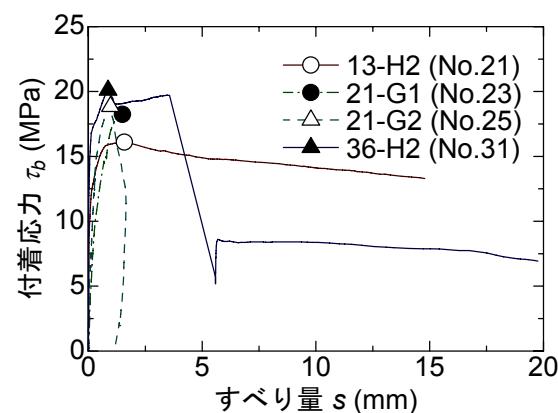


図 2-10 付着応力-すべり量関係

2.7 スペーサーとシート定着試験体の実験結果

2.7.1 破壊状況

D13-G2-80-1 試験体 (No.33) の破壊状況を写真 2-6 に示す。最大荷重後、①炭素繊維シートが浮き、②モルタルスペーサーとシートが付着している位置のシートが水平方向に裂け、③S3, S4 の歪ゲージ付近のシートが裂け、④モルタルスペーサーが傾き、⑤最終的にシートが破断した。

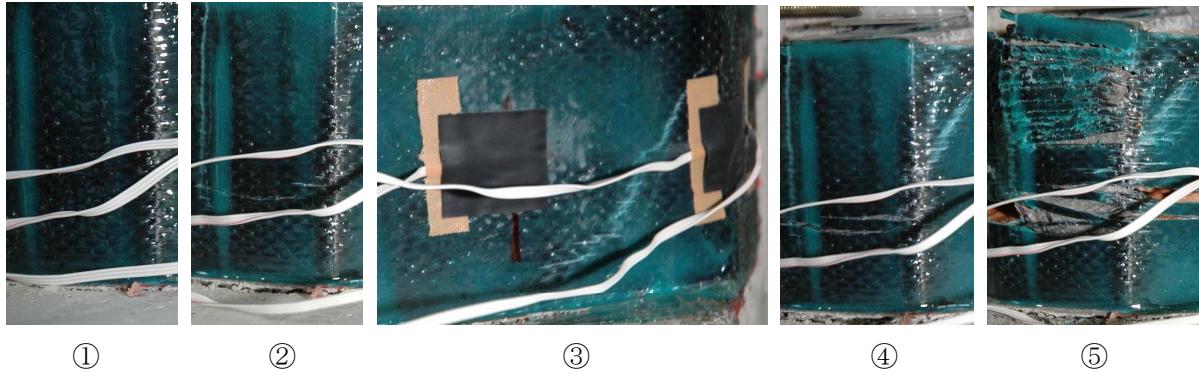


写真 2-6 破壊状況

2.7.2 最大荷重と水平変位

スペーサーとシート定着試験体の実験結果の一覧を表 2-11 に示す。最大荷重とコンクリート強度の関係および最大荷重と板剛性の関係を図 2-11 に示す。CFRP 板が G2 の場合、コンクリート強度と最大荷重はほぼ直線状の関係を示し増大したが、CFRP 板が H2 の場合その傾向は見られず、目標圧縮強度が 36 MPa のとき減少した。また、目標圧縮強度が 13.5 MPa および 21 MPa の場合、板剛性が大きいと最大荷重も増大した。モルタルスペーサーの厚さが 40 mm および 80 mm の試験体では最大荷重に差異は見られなかったが、120 mm の場合は最大荷重が増大した。炭素繊維シートの繊維方向が一方向 (No.36) より二方向 (No.37) の方が最大荷重が増大した。最大荷重の付着強度の計算値に対する比は 1.09~1.72 (平均 1.41) であり、全ての試験体において実験値が付着強度計算値を上回り、付着耐力が上昇した。

引張荷重-水平変位関係を図 2-11 に示す。最大荷重に達すると付着破壊がコンクリート表層内部で起こり、CFRP 板のすべりが生じる時にコンクリート表面より浮き上がり、水平変位が生じるものと考えられる。

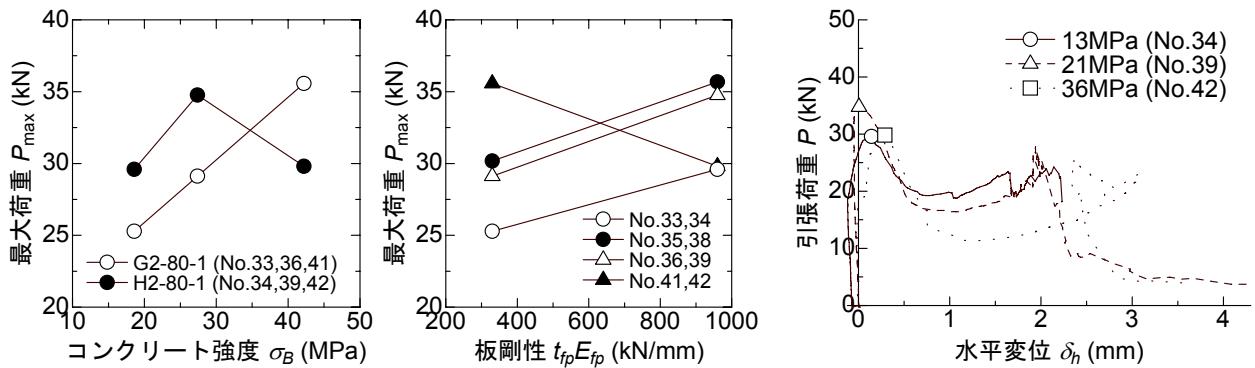


図 2-11 最大荷重と各変動因子の関係および引張荷重-水平変位関係

表 2-11 実験結果一覧

No.	試験体名	最大荷重時		最大荷重 / 付着強度 計算値	最大付着応力時		終局時 すべり量 s_u (mm)
		引張荷重 P_{max} (kN)	水平変位 $\delta_{h,max}$ (mm)		付着応力 $\tau_{b,max}$ (MPa)	すべり量 s_{max} (mm)	
33	D13-G2- 80-1	25.28	0.550	1.25	5.06	0.365	21.377
34	D13-H2- 80-1	29.59	0.144	1.29	5.92	0.156	21.694
35	D21-G2- 40-1	30.17	0.402	1.38	6.03	0.101	18.755
36	D21-G2- 80-1	29.12	0.272	1.34	5.82	0.143	18.453
37	D21-G2- 80-2	37.59	0.154	1.72	7.52	0.242	4.897
38	D21-H2- 40-1	35.68	0.334	1.43	7.14	0.053	18.152
39	D21-H2- 80-1	34.76	0.006	1.39	6.95	0.098	20.367
40	D21-H2-120-1	42.73	0.430	1.71	8.55	0.129	22.698
41	D36-G2- 80-1	35.57	0.580	1.51	7.11	0.225	13.852
42	D36-H2- 80-1	29.81	0.290	1.09	5.96	0.045	21.525

2.7.3 付着応力とすべり量

付着応力ーすべり量関係を図 2-12 に示す。最大付着応力に達した後、すべり量が 1.5 mm 程度で付着応力が最大付着応力の約半分まで減少し、すべり量の増大とともに付着応力が最大付着応力の 6 割程度から 9 割以上まで再び上昇した。この間、モルタルスペーサーから炭素繊維シートに引張力が伝わり、炭素繊維シートからコンクリートブロックの側面に付着応力が発生し、CFRP 板の剥離を抑制していると考えられる。一方向シートの試験体に比べて、二方向シートの試験体（No.37）は大きなすべり量が生じる前に終局に至った。

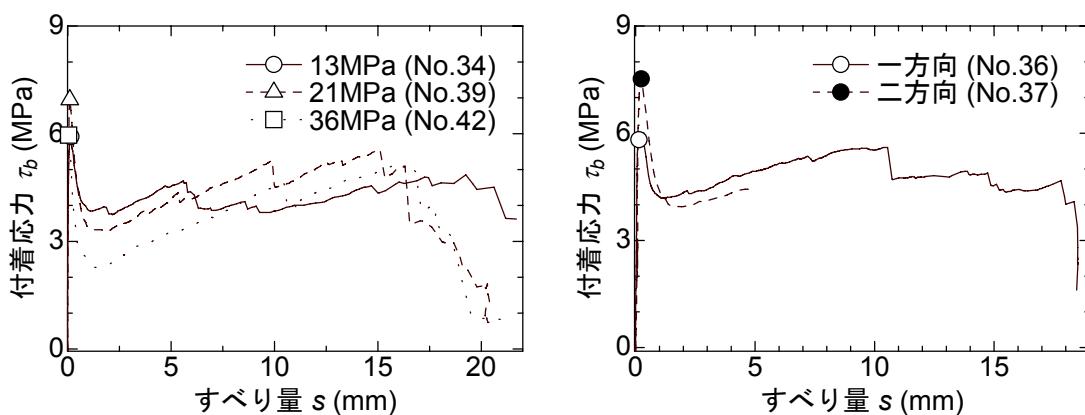


図 2-12 付着応力ーすべり量関係

2.7.4 炭素繊維シートの歪

炭素繊維シートの水平歪および最大主歪分布を図 2-13 に示す。なお、図中にはすべり量増大時の歪として、最大荷重時と終局時の中間のステップにおける歪も併せて示す。CFRP 板貼付面のシート歪 (S3, S4) が最大荷重時に 400 μ 程度発生した。終局に至る前に S3, S4 の歪が 7000 μ 程度、S2, S5 の歪が 1000 μ 程度で最大となり、終局時はシートの裂けや破断により歪が小さくなったり圧縮歪になる試験体もあった。S1, S6 の歪は終局時にもほとんど発生しなかった。以上より、スペーサーとシート定着試験体において、シートは定着長 100 mm 全域が有効に働いているわけではなく、有効な定着長は 50 mm 程度と推察される。

二方向シートにおける主歪の方向 ϕ は、最大荷重時はほぼ水平であり、すべり量が増大するにつれ水平方向と CFRP 板が引張を受ける方向とのなす角が増大し、終局時には 30° ~ 40° 程度であった。

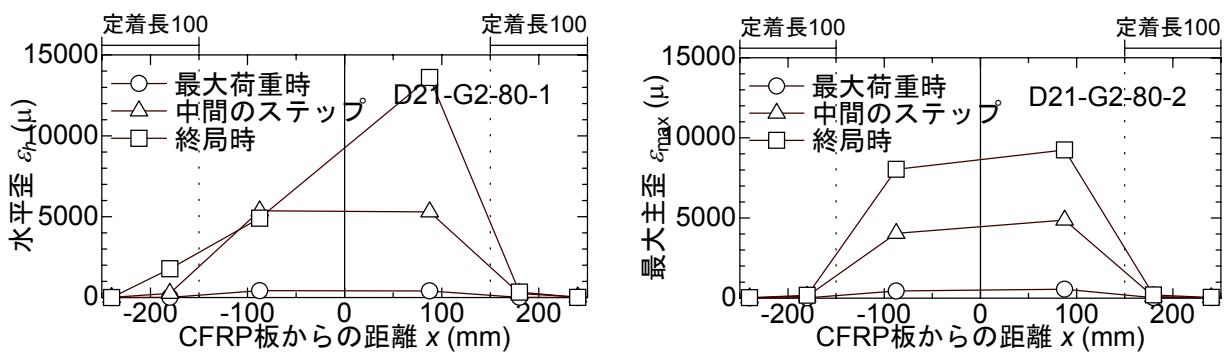


図 2-13 歪分布

2.7.5 拘束力

炭素繊維シートの CFRP 板貼付面に貼り付けた歪ゲージ (S3, S4) の歪測定値 ε_3 , ε_4 により、二つの平均値 ε_f を式(2.7.1)により算出する。

$$\varepsilon_f = \frac{\varepsilon_{f3} + \varepsilon_{f4}}{2} \quad (2.7.1)$$

シートがコンクリート母材と付着している（定着）部分を除いたシートに一様に発生する歪と考える。このとき、シートに発生する引張応力 σ_f は、

$$\sigma_f = E_f \cdot \varepsilon_f \quad (2.7.2)$$

で与えられ、シートに発生する引張力 T_f は、

$$T_f = \sigma_f \cdot A_f = b_f \cdot t_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_f \quad (2.7.3)$$

となる。ここで、 A_f , t_f および b_f は、シートの断面積、厚さおよび幅である。図 2-14 に示すように、拘束力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、 $2T_f \sin \theta$ となる。試験体 No.33 (D13-G2-80-1 試験体) の拘束力とすべり量の関係を図 2-15 に示す。また、最大荷重時の拘束力、最大拘束力を表 2-12 に示す。最大荷重時にはシートからの拘束力が 2 kN (約 200 kgf) 程度であり、最大荷重 (付着耐力) の上昇に寄与すると考えられる。しかしながら、最大荷重時のシート拘束力の上昇に伴い最大荷重も上昇するわけではなかった。最大荷重に達した後引張荷重が急激に減少してからシート拘束力が大きくなつた。板剛性が小さいほど、またモルタルスペーサーの厚さが大きいほど最大荷重時のシート拘束力は大きくなつたが、

最大拘束力には明確な関係が見られなかった。二方向炭素繊維シートで定着した試験体 No.37 (D21-G2-80-2 試験体) の最大拘束力は他の試験体に比べ小さかった。

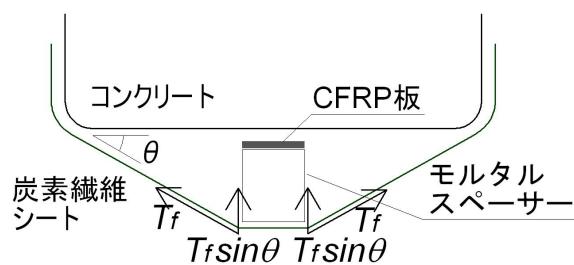


図 2-14 シートからの拘束力

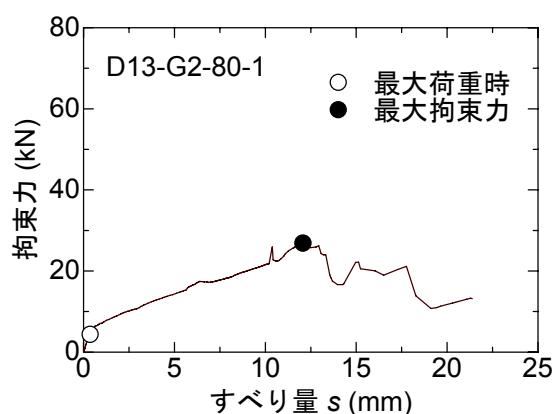


図 2-15 拘束力とすべり量の関係

表 2-12 シート拘束力

No.	試験体名	最大荷重時		最大拘束力 (kN)
		引張荷重 P_{\max} (kN)	シート拘束力 (kN)	
33	D13-G2- 80-1	25.28	4.37	26.87
34	D13-H2- 80-1	29.59	2.07	32.97
35	D21-G2- 40-1	30.17	0.80	32.38
36	D21-G2- 80-1	29.12	2.02	75.61
37	D21-G2- 80-2	37.59	1.06	6.79
38	D21-H2- 40-1	35.68	0.60	11.98
39	D21-H2- 80-1	34.76	1.13	25.16
40	D21-H2-120-1	42.73	2.21	19.11
41	D36-G2- 80-1	35.57	3.31	11.86
42	D36-H2- 80-1	29.81	1.33	26.09

2.8 増し貼りとシート定着試験体の実験結果

2.8.1 破壊状況

破壊状況を写真 2-7 に示す。最大荷重時に CFRP 板が増し貼り用 CFRP 板と炭素繊維シートとともにコンクリートから剥離した（試験体 No.43, 47, 48, 51）。増し貼り用 CFRP 板は剥離せず、CFRP 板と炭素繊維シート間で剥離した試験体もあった（試験体 No.45, 49, 50, 52）。試験体 No.44 (E21-G1-3-100) は、最大荷重時に CFRP 板が剥離し、アルミ製タブが CFRP 板から片面だけ剥離した。試験体 No.46 (E21-G2-2-100) は CFRP 板が抜け出した。



E21-G2-3-50



E21-G2-1-100



E21-G1-3-100



E21-G2-2-100

写真 2-7 破壊状況

2.8.2 最大荷重

増し貼りとシート定着試験体の実験結果の一覧を表 2-13 に示す。最大荷重と各変動因子の関係を図 2-16 に示す。CFRP 板の厚さが大きいと最大荷重も大きくなつたが、弾性係数は最大荷重に影響しないと考えられる。また、炭素繊維シートの層数および貼り付け長さが大きいと最大荷重も増大した。最大荷重の付着強度の計算値に対する比は 1.52～2.38（平均 1.87）であり、全ての試験体において実験値が付着強度計算値を上回り付着耐力が上昇した。

表 2-13 実験結果一覧

No.	試験体名	最大荷重時		最大荷重 / 付着強度 計算値	最大付着応力時		破壊状況
		引張荷重 P_{max} (kN)	水平変位 $\delta_{h,max}$ (mm)		付着応力 $\tau_{b,max}$ (MPa)	すべり量 s_{max} (mm)	
43	E21-G1-3- 50	35.36	0.274	1.92	7.07	0.265	全面剥離
44	E21-G1-3-100	37.85	0.018	2.05	7.57	0.145	CFRP板剥離
45	E21-G2-1-100	38.73	0.002	1.78	7.75	0.232	左側 CFRP板付着*
46	E21-G2-2-100	43.17	-0.004	1.98	8.63	0.182	CFRP板抜け出し
47	E21-G2-3- 50	41.62	0.138	1.91	8.32	0.179	全面剥離
48	E21-G2-3-100	51.92	0.052	2.38	10.38	0.229	全面剥離
49	E21-H2-1-100	37.80	-0.016	1.52	7.56	0.144	左側 CFRP板付着
50	E21-H2-2-100	40.21	0.038	1.61	8.04	0.223	左側 CFRP板付着
51	E21-H2-3- 50	38.62	0.100	1.55	7.72	0.122	全面剥離
52	E21-H2-3-100	50.21	-0.020	2.01	10.04	0.202	右側 CFRP板付着

* 左側の増し貼り用 CFRP板がコンクリートに付着したまま終局に至った

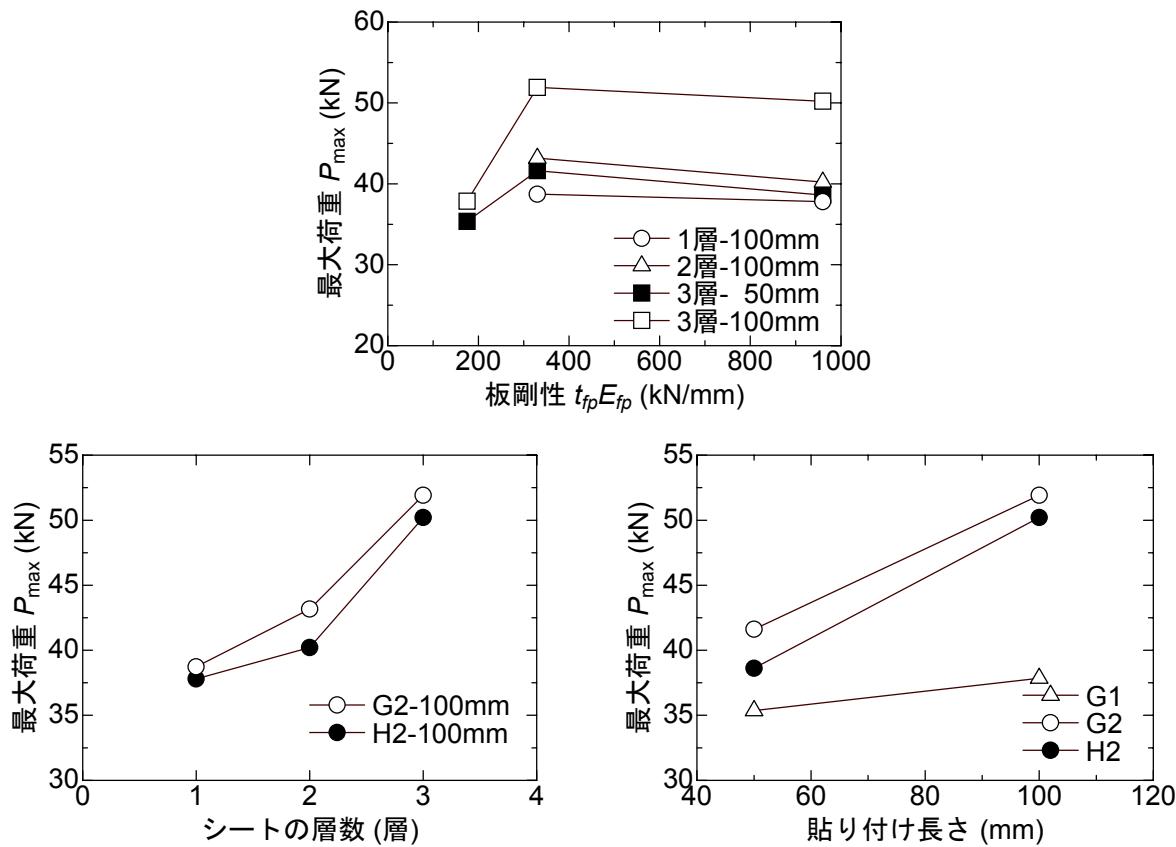


図 2-16 最大荷重と各変動因子の関係

2.8.3 付着応力とすべり量

付着応力ーすべり量関係を図 2-17 に示す。最大付着応力近傍ではすべり量が急激に増大した。E21-H2-1-100 試験体 (No.49) では、最大付着応力以降すべり量が 2 mm 以上まで増大しながら付着応力が徐々に減少した。

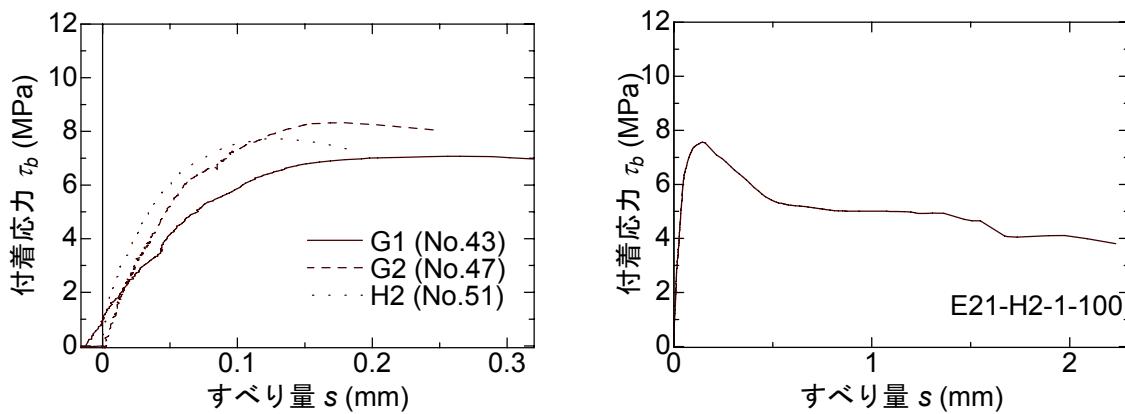


図 2-17 付着応力ーすべり量関係

2.8.4 炭素繊維シートの歪

最大荷重時の炭素繊維シートの歪分布を図 2-18 に示す。鉛直歪、水平歪とともに CFRP 板の位置での歪は 1000μ 程度発生し、増し貼りした CFRP 板の位置での鉛直歪は 100μ 程度発生した。

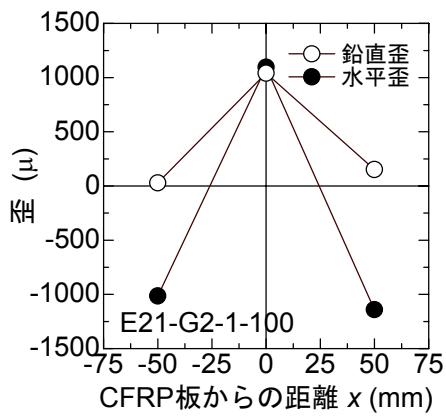


図 2-18 歪分布

2.8.5 力の分散率

最大荷重に達したときに CFRP 板からシートを介して両脇の増し貼り用 CFRP 板に分散される力の割合を、シートに貼り付けた鉛直方向の歪測定値から求めた結果を表 2-14 に示す。働く力の 7~9 割は中央の CFRP 板に働き、残りの 1~3 割は両脇の CFRP 板に分散した。分散率から考えたときの CFRP 板が負担する付着強度 P_p は、最大荷重と中央の CFRP 板に働く力の分散率の積で計算し、中央の CFRP 板が受け持つ力、すなわち定着を施していないときの付着強度を表している。 P_p の付着強度計算値 P_b に対する比は 0.93~1.56 (平均 1.20) であり、増大した分の定着力はほぼ両脇の CFRP 板に伝達されている。

表 2-14 最大荷重時にシートに働く力の分散率

No.	試験体名	力の分散率 (%)			CFRP 板の負担する付着強度 P_p (kN)	P_p / P_b
		左	中央	右		
43	E21-G1-3- 50	6.2	70.0	23.8	17.70	0.96
44	E21-G1-3-100	9.3	77.1	13.6	22.81	1.24
45	E21-G2-1-100	2.4	85.2	12.4	25.70	1.18
46	E21-G2-2-100	5.9	86.0	8.1	25.04	1.15
47	E21-G2-3- 50	5.7	78.5	15.8	29.51	1.35
48	E21-G2-3-100	-	-	-	-	-
49	E21-H2-1-100	2.3	73.6	24.1	25.58	1.03
50	E21-H2-2-100	0*	90.9	9.1	38.84	1.56
51	E21-H2-3- 50	0*	84.7	15.3	30.13	1.21
52	E21-H2-3-100	6.2	91.1	2.7	27.16	1.09
平均		5.4	80.7	13.9	-	1.20

* 値が負になったため、0 とした。

2.9 数値解析

2.9.1 付着の局所付着応力ーすべり量関係

CFRP 板が接着樹脂のみでコンクリートに付着しており、横拘束のない場合の局所付着応力ーすべり量関係のモデルを式(2.9.1)～(2.9.4)および図 2-19 に示す¹⁾。式(2.9.1)はコンクリートの圧縮応力ー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 σ_B 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。

$$\frac{\tau_b}{\tau_{b,\max}} = \frac{s}{s_{\max}} \cdot \frac{a}{(a-1) + (s/s_{\max})^a} \quad (2.9.1)$$

$$\tau_{b,\max} = 2.5 \cdot \sigma_B^{0.23} \quad (2.9.2)$$

$$s_{\max} = 0.0429 \quad (2.9.3)$$

$$a = 3 \quad (2.9.4)$$

ここで、

τ_b : 局所付着応力 (MPa)

$\tau_{b,\max}$: 局所最大付着応力 (MPa)

s : すべり量 (mm)

s_{\max} : 局所最大付着応力時のすべり量 (mm)

a : Popovics 式の定数

σ_B : コンクリート圧縮強度 (MPa)

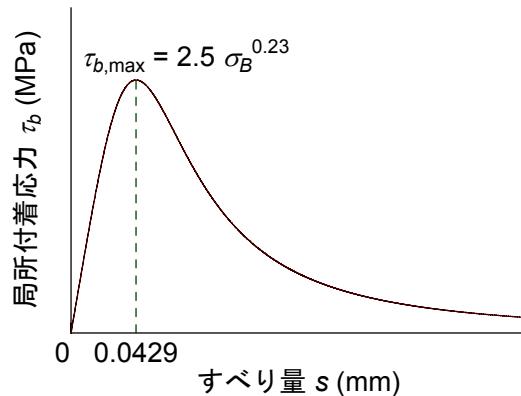


図 2-19 付着の局所付着応力ーすべり量関係のモデル

2.9.2 解析方法

CFRP板とコンクリートの付着に関して以下の付着の基礎微分方程式が成り立つ。

$$\frac{d^2 s_x}{dx^2} = \frac{1}{t_{fp} \cdot E_{fp}} \cdot \tau_{b,x} \quad (2.9.5)$$

ここで、

s_x : すべり量

$\tau_{b,x}$: 付着応力

x は試験体の自由端部からの距離とする。式(2.9.1)から得られる局所付着応力を式(2.9.5)に代入しても、数学的には解けないので数値解析に頼ることになる。その数値解析の方法として、逐次積分法⁴⁾を用いた。以下に示す方法で逐次計算を行うこととする。微小区間の釣り合いを図 2-20 に示す。

[1] CFRP板の任意の位置において、 i 番目の微小区間 dx を考え、その片側に任意のすべり量 s_{i-1} および任意の主筋引張力 $P_{fp,i-1}$ を与える。

[2] この区間での付着応力 $\tau_{b,i-1}$ を局所付着応力－すべり量関係より求める。

[3] dx が十分小さければその区間では付着応力を一定であるとみなせるので、その区間での CFRP板引張力の変化量 $dP_{fp,i}$ および CFRP板の伸び量 ds_i を次式により求める。

$$dP_{fp,i} = \tau_{b,i-1} \cdot b_{fp} \cdot dx \quad (2.9.6)$$

$$ds_i = \frac{dx}{b_{fp} \cdot t_{fp} \cdot E_{fp}} \left(\sum_{k=0}^{i-1} dP_{fp,k} + \frac{dP_{fp,i}}{2} \right) \quad (2.9.7)$$

[4] その区間終端でのすべり量 s_i および CFRP板引張力 $P_{fp,i}$ を次式で求める。

$$s_i = s_{i-1} + ds_i \quad (2.9.8)$$

$$P_{fp,i} = \sum_{k=0}^i dP_{fp,k} \quad (2.9.9)$$

[5] 次の区間について[2]に戻り、同様の計算を行う。

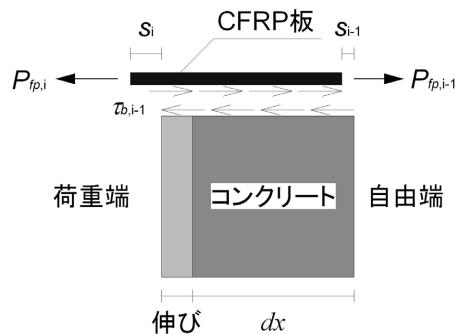


図 2-20 微小区間の釣り合い

2.9.3 炭素繊維シート定着およびスペーサーとシート定着

(1) 局所付着応力-すべり量関係のモデル化

付着の局所付着応力-すべり量関係のモデルを用いて逐次積分法により数値計算した付着強度解析値を表 2-15 に示す。解析方法は 2.9.2 に示す逐次積分法⁴⁾とした。付着長 l_b は 100 mm としている。また、最大荷重（実験値）を付着強度解析値で除した値 β を同表に示す。

炭素繊維シート定着およびスペーサーとシート定着のときの $\tau_{b,\max}$ を、式(2.9.2)を β 倍した式とし、式(2.9.10)～(2.9.13)をこれらの定着方法の場合の局所付着応力-すべり量関係のモデルとし、図 2-21 に実線で示す。

$$\frac{\tau_b}{\tau_{b,\max}} = \frac{s}{s_{\max}} \cdot \frac{a}{(a-1) + (s/s_{\max})^a} \quad (2.9.10)$$

$$\tau_{b,\max} = 2.5 \cdot \beta \cdot \sigma_B^{0.23} \quad (2.9.11)$$

$$s_{\max} = 0.0429 \text{ mm} \quad (2.9.12)$$

$$a = 3 \quad (2.9.13)$$

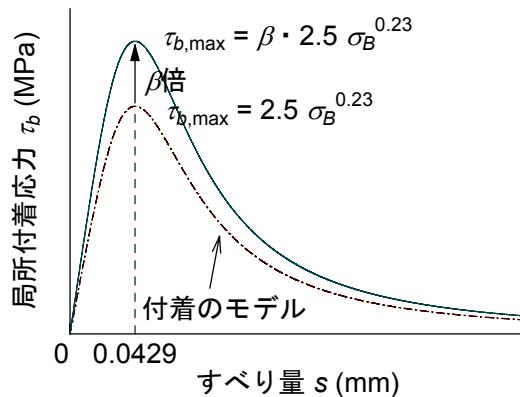


図 2-21 局所付着応力-すべり量関係

表 2-15 数値解析結果（炭素繊維シート定着およびスペーサーとシート定着）

試験体名	最大荷重 (kN)	付着強度 解析値 (kN)	β^{*1}	定着強度解析値 (kN)			最大荷重 / 定着強度解析値 ^{*2}
				$l_b = 100\text{ mm}$	$l_b = 250\text{ mm}$	$l_b = 400\text{ mm}$	
A13-G2-230-100-1	24.10	20.42	1.18	23.29	30.79	32.16	1.03
A13-H2-230-100-1	20.57	22.91	0.90	20.71	39.03	44.45	0.99
A21-G1-230-100-1	20.96	18.79	1.12	20.29	23.83	24.44	1.03
A21-G1-390-100-1	22.40		1.19	21.13	24.62	25.23	1.06
A21-G2-230- 0-1	26.20	22.21	1.18	25.25	32.66	33.99	1.04
A21-G2-230- 0-2	31.96		1.44	30.53	39.18	40.72	1.05
A21-G2-230-100-1	24.00		1.08	23.59	31.07	32.43	1.02
A21-G2-230-100-2	25.18		1.13	24.74	32.67	34.11	1.02
A21-G2-390-100-1	23.51		1.06	23.25	30.75	32.11	1.01
A21-H2-230- 0-1	27.50	25.31	1.09	27.45	47.68	52.81	1.00
A21-H2-230- 0-2	24.59		0.97	24.66	44.97	50.60	1.00
A21-H2-230-100-1	27.58		1.09	27.45	47.68	52.81	1.00
A21-H2-230-100-2	27.23		1.08	27.24	47.71	52.98	1.00
A21-H2-390-100-1	26.77		1.06	26.74	46.82	51.97	1.00
A36-G2-230-100-1	31.75	23.97	1.32	29.52	36.70	37.96	1.08
A36-H2-230-100-1	28.64	27.74	1.03	28.52	48.98	54.06	1.00
D13-G2- 80-1	25.28	21.10	1.20	24.35	31.80	33.15	1.04
D13-H2- 80-1	29.59	23.81	1.24	29.16	49.74	54.79	1.01
D21-G2- 40-1	30.17	22.64	1.33	28.14	35.40	36.68	1.07
D21-G2- 80-1	29.12		1.29	27.51	34.81	36.10	1.06
D21-G2- 80-2	37.59		1.66	33.55	41.02	42.32	1.12
D21-H2- 40-1	35.68	25.91	1.38	34.92	56.35	61.19	1.02
D21-H2- 80-1	34.76		1.34	34.00	55.32	60.19	1.02
D21-H2-120-1	42.73		1.65	40.99	62.92	67.55	1.04
D36-G2- 80-1	35.57	24.46	1.45	32.18	39.21	40.43	1.11
D36-H2- 80-1	29.81	28.44	1.05	29.76	50.45	55.48	1.00

*1 最大荷重/付着強度解析値,

*2 付着長 $l_b = 100\text{ mm}$ のときの定着強度解析値

(2) 定着強度の数値解析

炭素繊維シート定着およびスペーサーとシート定着の局所付着応力-すべり量関係のモデル（図2-21）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。付着長 l_b が 100 mm, 250 mm および 400 mm の 3 通りの定着強度の解析結果を表 2-15 に示す。 β は各試験体の値を用いた。また、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のみを考慮した。

実験値の解析値に対する比の平均は 1.03 であり、解析結果と実験結果は良好に対応していた。高剛性タイプで厚さ 2 mm の CFRP 板 (H2) を用いた試験体では、特に良好に対応していた。付着長が大きくなると定着強度も増大したが、高強度タイプで厚さ 1 mm および 2 mm の CFRP 板 (G1 および G2) を用いた試験体では付着長が 250 mm と 400 mm の定着強度にはほとんど差異はなかった。

定着強度解析値の付着強度解析値に対する比と付着長の関係を図 2-22 に示す。 β の値が 1 よりも大きい試験体では、付着長が大きいと定着強度解析値の付着強度解析値に対する比は減少したが、 β の値が 1 よりも小さい試験体では増加した。 β の値が大きい試験体ほど付着長を大きくするにつれて減少率は大きくなかった。 β の値が 1.1 程度までの場合は付着長を変化させてもほとんど変わらなかった。

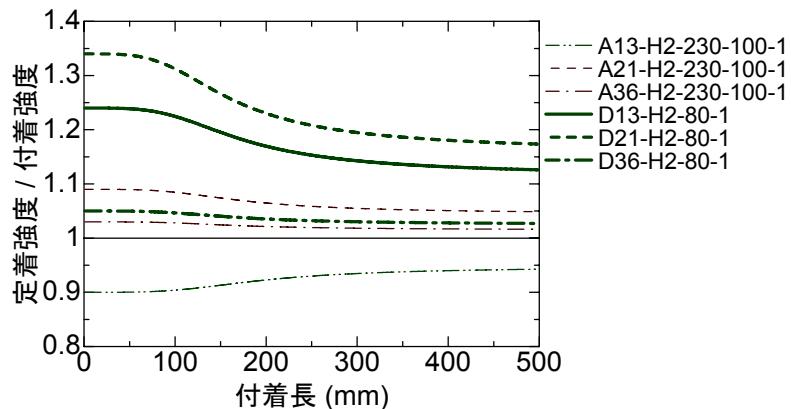


図 2-22 解析値の比率と付着長の関係

(3) モデルの適合性

炭素繊維シート定着の場合、規格弾性係数が 230 GPa の一方向シートを定着長 100 mm で貼り付けた試験体の β の平均値から 1.10 を得た。また、スペーサーとシート定着の場合、モルタルスペーサーの厚さが 40 mm と 80 mm の試験体では同程度の最大荷重を示したためそれらの平均値 1.34 を、120 mm の場合は 1.65 を得た。シートとコンクリートのなす角 θ (図 2-1 参照) に対する β の値を表 2-16 に示す。なお、炭素繊維シート定着の場合 $\theta = 0^\circ$ とした。また、モルタルスペーサーの厚さが 40, 80, 120 mm の場合、 θ はそれぞれ約 22° , 38° , 49° とした。これは、接着樹脂等の厚さを考慮せず、CFRP 板の厚さおよびコンクリート母材の面取り部を考慮した角度である。

表 2-16 β の値

θ	0°	22° , 38°	49°
β	1.10	1.34	1.65

設定した β の値 (表 2-16) を用いて数値計算を行った。定着強度の実験値と解析値の比較を図 2-23 に示す。同図より実験値の解析値に対する比の平均は 1.03、変動係数は 12% であり、実験値と解析値が良好に対応しているため、表 2-16 で定めた β の値を用いて計算すると、実験値を概ね精度良く評価できることがわかった。

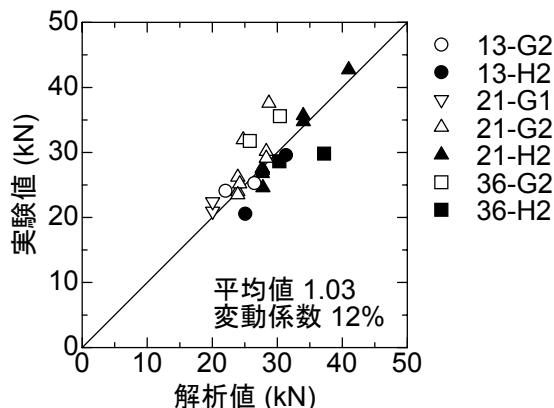


図 2-23 定着強度の実験値と解析値の比較

2.9.4 増し貼り定着

増し貼り定着の場合、局所付着応力一すべり量関係のモデルを新たに構築せず、増し貼りした分の CFRP 板の剛性の増加のみを考慮し、式(2.9.1)～(2.9.4)の付着のモデルを用いて逐次積分法により数値解析を行った。付着長 l_b が 100 mm, 250 mm および 400 mm の 3 通りの定着強度の解析結果を表 2-17 に示す。佐藤ら⁵⁾の実験でも示されているが、増し貼りした場合、CFRP 板同士は一体となって挙動せず、各 CFRP 板は別々の挙動を示すため、解析結果が実験値を過大評価したと考えられる。解析では一体として計算している。付着長が大きいほど定着強度も大きく、高剛性タイプの CFRP 板 (H2) を用いた場合に顕著であった。定着強度解析値の付着強度解析値に対する比と付着長の関係を図 2-24 に示す。どの試験体も付着長が大きくなると定着強度解析値の付着強度解析値に対する比は増大し、定着効果が上がった。付着長が小さい場合に定着の効果を得るために、高強度タイプの CFRP 板 (G1 または G2) を用いると良いことがわかった。

表 2-17 数値解析結果（増し貼り定着）

試験体名	最大荷重 (kN)	付着強度 解析値 (kN)	最大荷重 / 付着強度解析値	定着強度解析値 (kN)			最大荷重 / 定着強度解析値 ^{*1}
				$l_b = 100 \text{ mm}$	$l_b = 250 \text{ mm}$	$l_b = 400 \text{ mm}$	
B21-G1-G1-1	14.71	18.79	0.78	22.47	30.51	32.00	0.65
B21-G2-G2-1	19.20	22.21	0.86	24.62	39.42	42.72	0.78
B21-G2-G2-2	20.18		0.91	25.35	45.50	50.92	0.80
B21-H2-H2-1	17.78	25.31	0.70	25.87	54.68	66.13	0.69

*1 付着長 $l_b = 100 \text{ mm}$ のときの定着強度解析値

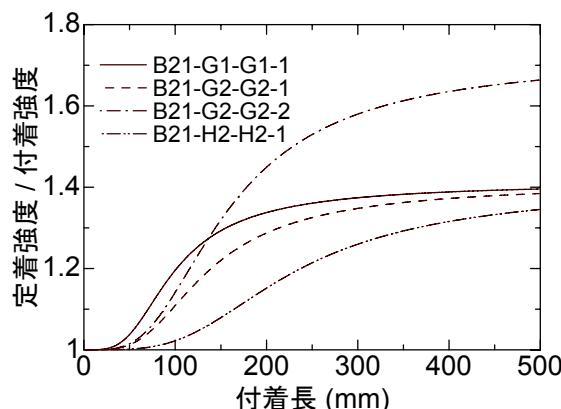


図 2-24 解析値の比率と付着長の関係

2.9.5 増し貼りとシート定着

(1) 局所付着応力-すべり量関係のモデル化

付着の局所付着応力-すべり量関係のモデルを用いて逐次積分法により計算した付着強度解析値を表 2-18 に示す。付着長 l_b は 100 mm としている。この付着強度解析値は二方向炭素繊維シートの加力方向の剛性の增加分を考慮した。また、最大荷重（実験値）を付着強度解析値で除した値を同表に示す。この値から中央の CFRP 板が受け持つ付着耐力分を除いた値、つまり 1 を差し引いた値が、両脇の CFRP 板に分配される割合と考える。両脇に 2 枚の CFRP 板があるため、さらに 2 で除す。この値を分配係数と称し γ と表すと、両脇の CFRP 板の局所最大付着応力を γ の値に応じて付着のみの場合の局所最大付着応力を低減させる（式(2.9.16)）。式(2.9.14), (2.9.16), (2.9.17)および(2.9.18)を増し貼りとシート定着のときの両脇の CFRP 板の局所付着応力-すべり量関係のモデルとし、図 2-25 に示す。また、中央の CFRP 板の局所付着応力-すべり量関係は式(2.9.2)と同一とした。

$$\frac{\tau_b}{\tau_{b,\max}} = \frac{s}{s_{\max}} \cdot \frac{a}{(a-1) + (s/s_{\max})^a} \quad (2.9.14)$$

$$\tau_{b,\max} = 2.5 \cdot \sigma_B^{0.23} \quad (\text{中央の CFRP 板}) \quad (2.9.15)$$

$$\tau_{b,\max} = 2.5 \cdot \gamma \cdot \sigma_B^{0.23} \quad (\text{両脇の CFRP 板}) \quad (2.9.16)$$

$$s_{\max} = 0.0429 \text{ mm} \quad (2.9.17)$$

$$\gamma = 3 \quad (2.9.18)$$

表 2-18 数値解析結果（増し貼りとシート定着）

試験体名	最大荷重 (kN)	付着強度解析値 (kN)	最大荷重 / 付着強度解析値	分配係数 γ^{*1}	定着強度解析値 (kN)			最大荷重 / 定着強度解析値 ^{*2}
					$l_b = 100 \text{ mm}$	$l_b = 250 \text{ mm}$	$l_b = 400 \text{ mm}$	
E21-G1-3- 50	35.36	20.79	1.70	0.350	38.42	53.92	57.12	0.92
E21-G1-3-100	37.85		1.82	0.410	41.09	56.78	59.89	0.92
E21-G2-1-100	38.73	22.91	1.69	0.345	40.84	63.06	68.36	0.95
E21-G2-2-100	43.17	23.15	1.86	0.430	45.28	69.48	74.95	0.95
E21-G2-3- 50	41.62	23.37	1.78	0.390	43.62	68.42	74.33	0.95
E21-G2-3-100	51.92	23.37	2.22	0.610	53.97	80.42	85.92	0.96
E21-H2-1-100	37.80	25.93	1.46	0.230	38.21	75.15	91.05	0.99
E21-H2-2-100	40.21	25.96	1.55	0.275	40.63	80.55	97.27	0.99
E21-H2-3- 50	38.62	25.99	1.49	0.245	39.06	77.56	94.21	0.99
E21-H2-3-100	50.21	25.99	1.93	0.465	50.69	99.99	117.71	0.99

*1 分配係数 $\gamma = (\text{最大荷重}/\text{付着強度解析値} - 1)/2$,

*2 付着長 $l_b = 100 \text{ mm}$ のときの定着強度解析値

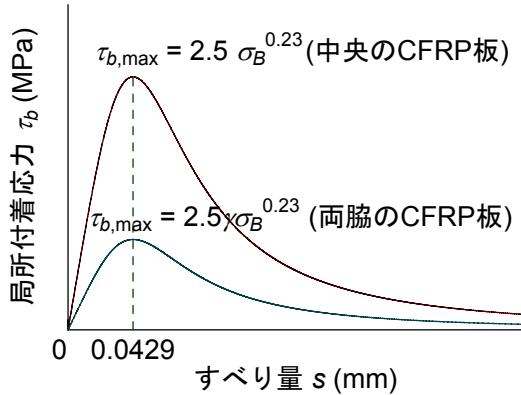


図 2-25 局所付着応力ーすべり量関係

(2) 定着強度の数値解析

増し貼りとシート定着の局所付着応力ーすべり量関係のモデルを用いて逐次積分法により数値解析を行った。中央の CFRP 板の付着強度と両脇の CFRP 板の付着強度の和を定着強度解析値とし、表 2-18 に示す。分配係数 γ は各試験体の値を用いた。二方向炭素繊維シートの加力方向の剛性の増加分は考慮した。同表には付着長が 250 mm と 400 mm の場合の定着強度の解析値も示した。全ての試験体で定着強度解析値が最大荷重（実験値）を若干上回った。高強度タイプの CFRP 板（G1 または G2）を用いた試験体では、付着長が 250 mm と 400 mm の場合で差異は大きくなかったが、高剛性タイプの CFRP 板（H2）を用いた試験体では、付着長が大きいと定着強度も増大した。

定着強度解析値の付着強度解析値に対する比と付着長の関係を図 2-26 に示す。どの試験体も付着長を大きくすると定着強度解析値の付着強度解析値に対する比は増大し、定着効果が上がった。

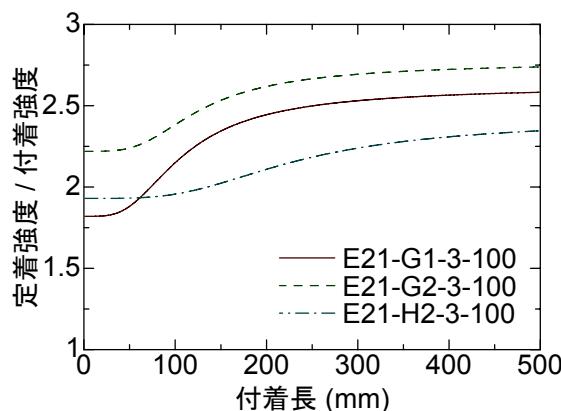


図 2-26 解析値の比率と付着長の関係

2.10 まとめ

CFRP板とコンクリートの局所的な定着性状を検討するため、5種類の定着を施し1面せん断付着試験を行い、以下の知見を得た。

- (1) 炭素繊維シート定着試験体では、定着効果を無視したCFRP板の付着耐力の計算値の0.93～1.50倍の最大荷重を示した。定着の効果が大きく見られたのは最大荷重に達し荷重が減少した後であり、すべり量の増大とともに炭素繊維シートの歪も大きくなり、面外拘束力が作用しCFRP板の剥離および耐力低下を抑制した。
- (2) 一方向炭素繊維シート定着試験体における炭素繊維シートの有効な定着長は約50mmであった。
- (3) 増し貼り定着では、局所的な付着強度に対する定着効果はないと考えられるが、解析結果より付着長を長くすると定着効果が得られると考えられる。
- (4) 鋼板定着試験体では、定着効果を無視したCFRP板の付着耐力の計算値の3.65倍以上の最大荷重を示し、鋼板で定着を施すことにより付着耐力が大幅に上昇した。
- (5) スペーサーとシート定着試験体では、定着効果を無視した付着耐力よりも増大し定着効果を得た。付着応力が一度低下した後も再び最大付着応力の6～9割程度まで付着応力が増大した。炭素繊維シートの有効な定着長は約50mmであった。
- (6) 増し貼りにより付着面積を増大させ、シートで引張力を配分させることにより付着耐力が上昇した。
- (7) Popovics式を基本として局所付着応力-すべり量関係をモデル化した。炭素繊維シート定着およびスペーサーとシート定着の場合、付着のモデルの局所最大付着応力を β 倍することにより局所付着応力-すべり量関係をモデル化した。増し貼り定着の場合、付着のモデルと同一とした。増し貼りとシート定着の場合、中央のCFRP板は付着のモデルと同一とし、両脇のCFRP板は付着モデルの局所最大付着応力を γ (<1)倍することにより局所付着応力-すべり量関係をモデル化した。
- (8) モデル化した局所付着応力-すべり量関係を用いて逐次積分法により数値解析を行い、付着長を大きくした場合の定着強度および定着の効果も検討した。

第3章 横拘束力が局所付着性状に及ぼす影響

3.1 はじめに

前章では、具体的な定着を施した場合の1面せん断付着試験による定着性状を検討した。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。本章では、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。

3.2 実験概要

3.2.1 試験体

試験体形状を図3-1に示す。試験体形状はL型コンクリートブロックであり、異形鉄筋D10が図3-1のように配筋されている。付着区間長さ（付着長）をCFRP板自由端部から100mmとしてCFRP板をコンクリートブロックに貼り付けた。変動因子は、コンクリート圧縮強度、CFRP板の厚さおよび弾性係数、横拘束力とした。横拘束力は、2, 5, 10, 25および50kNの5通りとした。これらの数値は、2.7節の定着実験により実際に測定された拘束力（表2-12参照）を参考にして決定している。試験体総数は29体である。

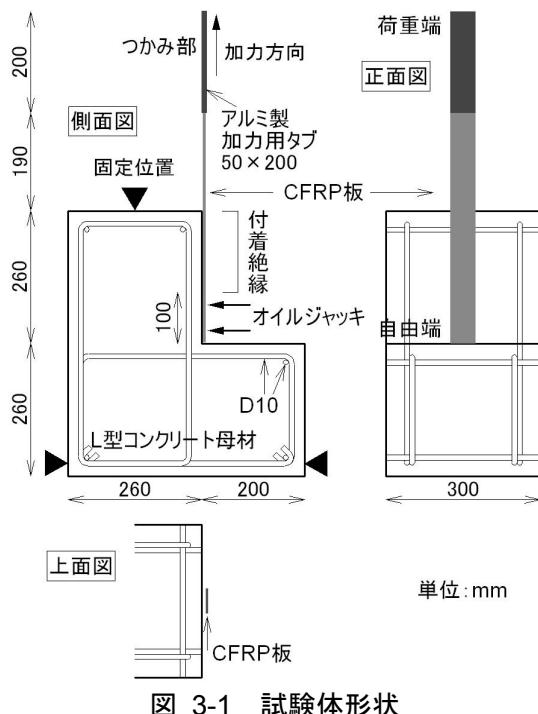


図3-1 試験体形状

3.2.2 使用材料

(1) コンクリート

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。粗骨材には最大寸法 20 mm の碎石を用いた。圧縮試験結果および割裂引張試験結果を表 3-1 に示す。弾性係数 E_c は 1/3 割線係数とした。

表 3-1 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

(2) CFRP 板

CFRP 板の力学特性を表 3-2 に示す。CFRP 板の纖維方向は長さ方向の一方向であり、高強度タイプと高剛性タイプの 2 種類とし、幅は全て 50 mm である。厚さは 1.0, 2.0 mm の 2 通りである。

表 3-2 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

3.2.3 施工方法と実験方法

コンクリート表面をケレンし、CFRP板を貼り付けた。接着樹脂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。CFRP板上部両面に50×200 mmのアルミ製の加力用タブを取り付けた。

試験体の上面図と横拘束力を与える治具を図3-2に示す。図3-2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制御した。鋼板とCFRP板にはテフロンシートを挿入し、CFRP板の抜け出しを拘束しないように配慮した。

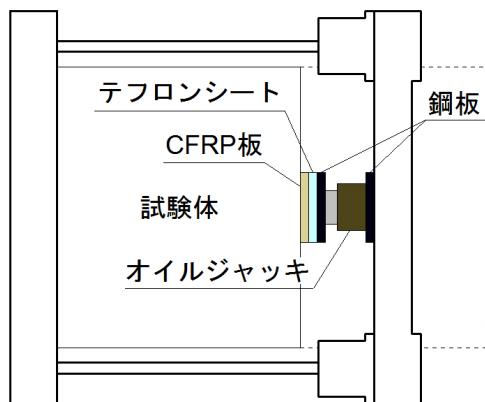


図3-2 横拘束力を与える治具

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 、試験機ヘッドの変位、水平変位 δ_h 、鉛直変位 δ_v (2ヶ所)、オイルジャッキの荷重とした。計測位置を写真3-1に示す。水平および鉛直変位はCFRP板自由端部から200 mmおよび150 mmの位置でそれぞれ計測した。CFRP板が剥離しようとする方向(写真3-1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。

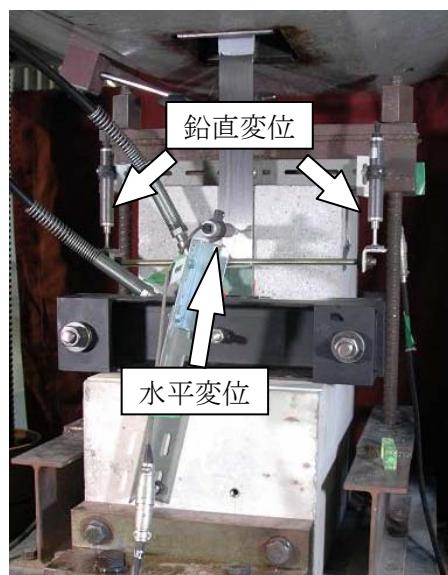
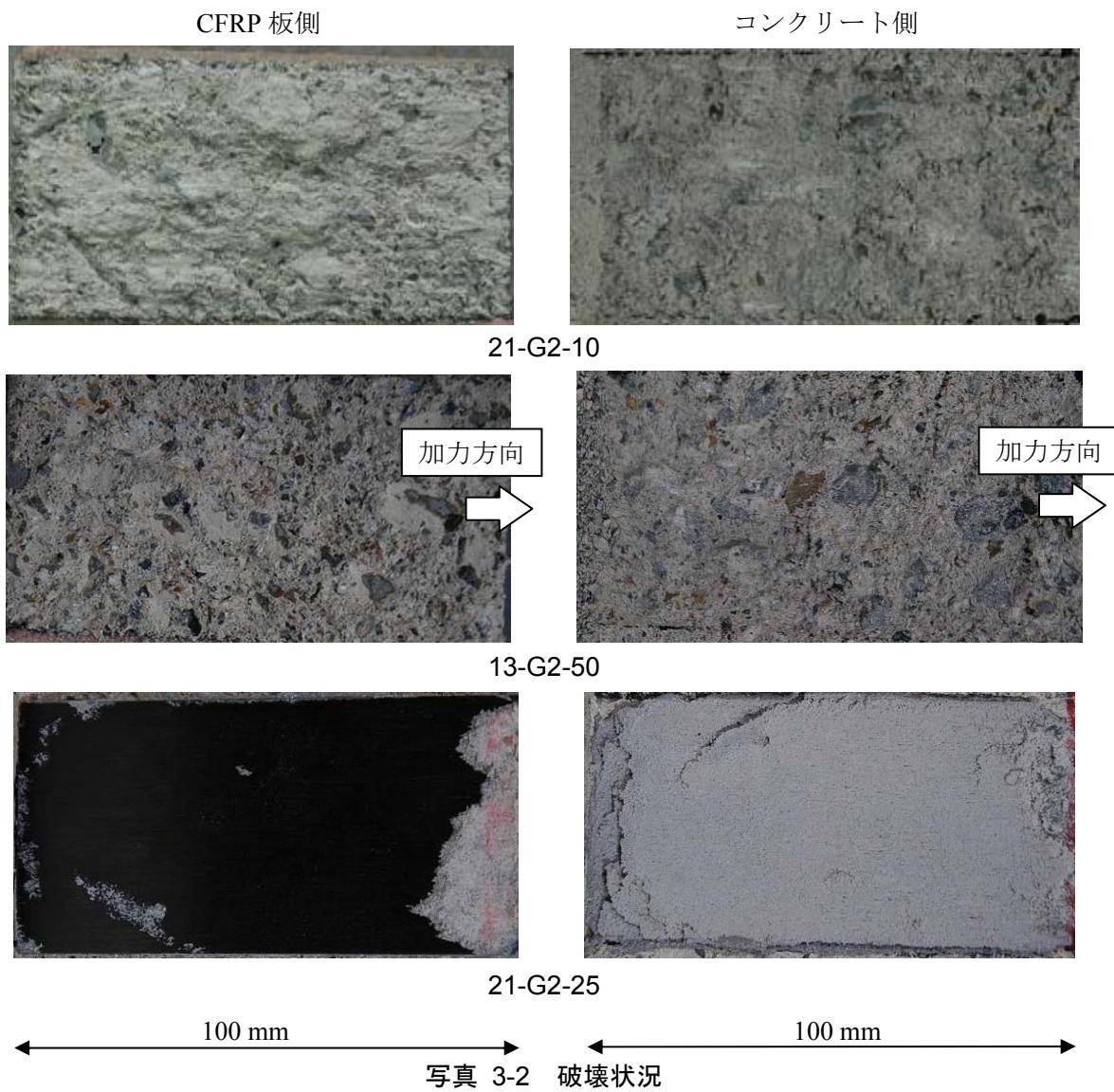


写真3-1 計測位置

3.3 実験結果

3.3.1 破壊状況

破壊後の剥離面を写真3-2に示す。左の写真がCFRP板の剥離面、右の写真がコンクリート母材側の剥離面である。CFRP板が破断した試験体ではなく、ほとんどの試験体が21-G2-10試験体のようにCFRP板がコンクリートから剥離する付着破壊であり、1, 2 mm程度厚のコンクリート表層部がCFRP板とともに剥離した。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。また、CFRP板側、コンクリート母材側ともに、剥離面には引きずったような跡が見られた。13-G2-50試験体の剥離面には引きずったような跡は見られなかった。これは、試験時に横拘束力50 kNが正常に作用しなかった可能性があると考えられる。また、21-G2-25試験体は加力直前に一度剥離し、試験期間中に貼り直したため、接着樹脂の養生期間が1週間と短く、CFRP板と接着樹脂の界面で剥離したと考えられる。



3.3.2 最大付着応力と変位

試験体と実験結果一覧を表 3-3 に示す。付着応力は引張荷重を CFRP 板の付着面積 (5000 mm^2) で除して算出した。第 2 章では CFRP 板自由端部から 100 mm の位置で鉛直変位を計測したため、2 つの鉛直変位の平均値をすべり量としたが、第 3 章では 150 mm の位置で計測するため、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すべり量を算出した。最大付着応力と変動因子の関係を図 3-3 に示す。左図の凡例は CFRP 板名称-横拘束力、右図の凡例はコンクリート圧縮強度-横拘束力である。図 3-3 より、コンクリート圧縮強度が大きいと最大付着応力も大きくなる傾向があったが、板剛性の差異は最大付着応力にほとんど影響せず、板剛性が大きくなても最大付着応力はほとんど変わらなかった。既報告の横拘束のない場合の付着強度算定式¹⁾で計算した付着強度 P_b を表 3-3 に示す。付着強度の計算値に対する最大荷重の比は $0.80\sim2.54$ 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。

表 3-3 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		最大付着応力時		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)	すべり量 s_{\max} (mm)	
13-G2-02	13.5	G2	2	20.23	18.64	0.824	3.73	0.048	0.92
13-G2-05			5		22.52	1.302	4.50	-0.012	1.11
13-G2-10			10		26.66	0.964	5.33	0.132	1.32
13-G2-25			25		23.22	0.790	4.64	0.090	1.15
13-G2-50			50		16.25	0.536	3.25	0.045	0.80
13-H2-02		H2	2	22.55	20.15	0.562	4.03	-0.062	0.89
13-H2-05			5		23.94	0.974	4.79	-0.074	1.06
13-H2-10			10		29.09	1.496	5.82	-0.100	1.29
13-H2-25			25		44.62	1.572	8.92	0.008	1.98
13-H2-50			50		49.06	2.274	9.81	-0.215	2.18
21-G1-02	21	G1	2	18.38	19.24	-0.081	3.85	0.205	1.05
21-G1-10			10		31.06	1.184	6.21	0.293	1.69
21-G1-25			25		42.95	0.160	8.59	0.714	2.34
21-G2-02		G2	2	22.07	24.71	0.110	4.94	0.166	1.12
21-G2-05			5		28.74	1.251	5.75	-0.041	1.30
21-G2-10			10		33.65	0.770	6.73	0.112	1.52
21-G2-25			25		27.31	1.238	5.46	1.176	1.24
21-G2-50			50		47.08	2.010	9.42	0.110	2.13
21-H2-02		H2	2	24.89	29.50	0.850	5.90	-0.128	1.19
21-H2-05			5		30.25	1.544	6.05	-0.129	1.22
21-H2-10			10		38.18	1.889	7.64	-0.157	1.53
21-H2-25			25		39.20	1.239	7.84	-0.010	1.57
21-H2-50			50		46.26	1.533	9.25	-0.187	1.86
36-G2-02	36	G2	2	23.62	28.64	0.958	5.73	0.125	1.21
36-G2-10			10		40.01	1.750	8.00	0.660	1.69
36-G2-25			25		59.89	1.266	11.98	0.303	2.54
36-H2-02		H2	2	26.90	32.28	1.646	6.46	-0.140	1.20
36-H2-10			10		43.81	2.034	8.76	-0.251	1.63
36-H2-25			25		57.08	1.740	11.42	-0.110	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 の場合は 13 と略記する

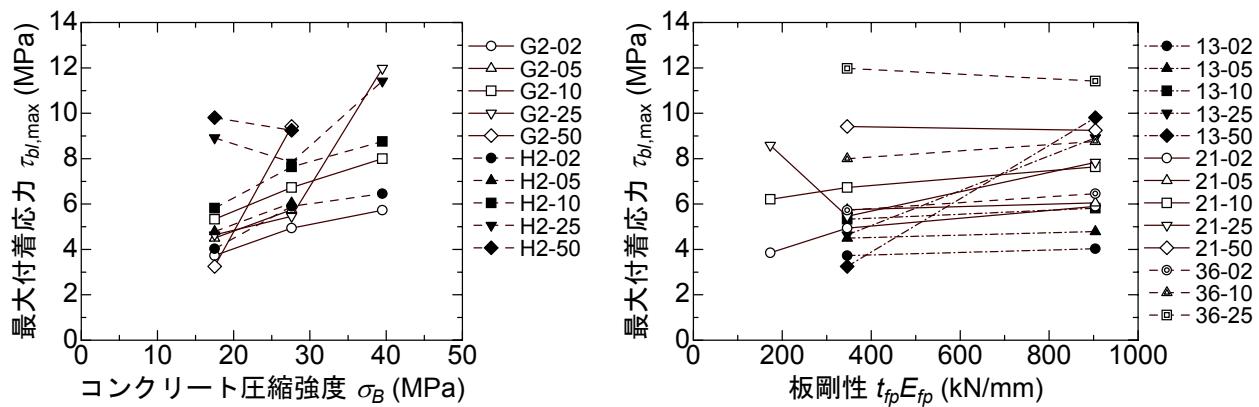


図 3-3 最大付着応力と変動因子の関係

CFRP 板に H2 を用い、コンクリート目標圧縮強度が 13.5 および 36 MPa の試験体の引張荷重一水平変位関係を図 3-4 に示す。最大荷重に達すると荷重が急激に減少し、横拘束力が 50 kN の試験体以外は横拘束力とほぼ同程度の荷重まで減少し、その後引張荷重が一定となった。

CFRP 板に H2 を用い、コンクリート目標圧縮強度が 13.5 および 36 MPa の試験体の付着応力一すべり量関係を図 3-5 に示す。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。

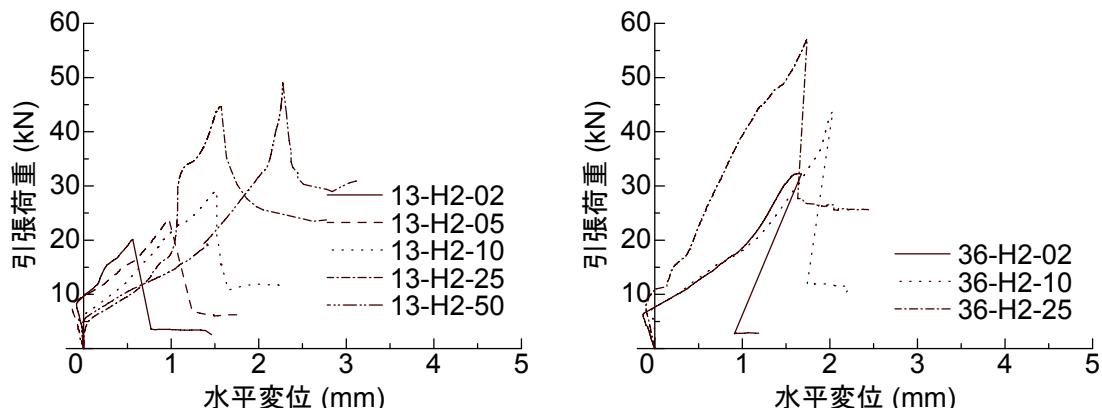


図 3-4 引張荷重一水平変位関係

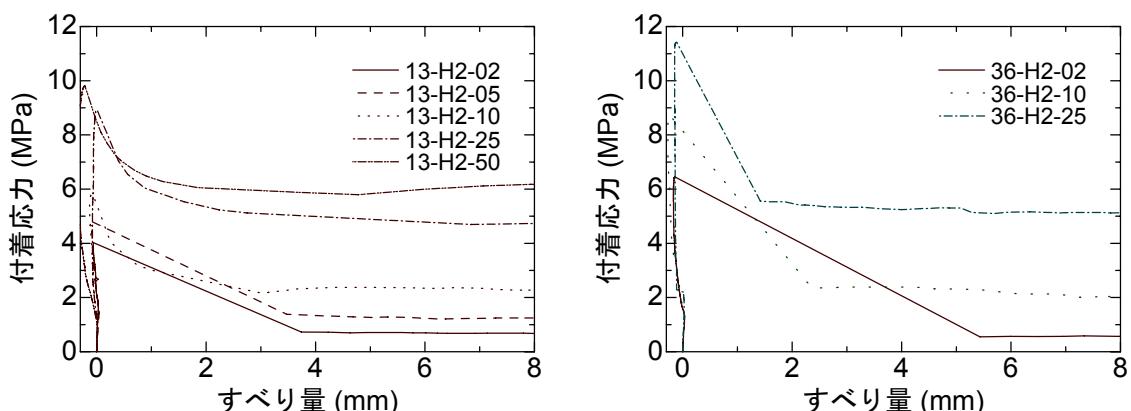


図 3-5 付着応力一すべり量関係

3.3.3 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 3-6 に示す。拘束応力 σ_l は横拘束力を CFRP 板の付着面積 (5000 mm^2) で除して算出した。コンクリート目標圧縮強度が 13.5 MPa で CFRP 板に G2 を用いたときには拘束応力が約 2 MPa を境に最大付着応力が減少し始めた。拘束応力が大きいほど最大付着応力も大きくなつたが、破壊状況でも示したように、13-G2-50 試験体は横拘束力が 50 kN 作用していなかった可能性があり、21-G2-25 試験体は CFRP 板と接着樹脂の界面で剥離したため、最大付着応力も小さくなつたと考えられる。

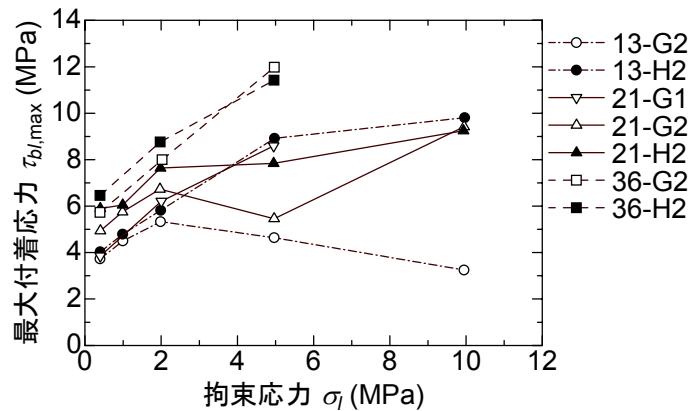


図 3-6 最大付着応力と拘束応力の関係

3.4 局所付着応力-すべり量関係

3.4.1 横拘束のない場合

CFRP板が接着樹脂のみでコンクリートに付着しており、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を式(3.4.1)～(3.4.4)および図3-7に再掲する¹⁾。

$$\frac{\tau_b}{\tau_{b,\max}} = \frac{s}{s_{\max}} \cdot \frac{a}{(a-1) + (s/s_{\max})^a} \quad (3.4.1)$$

$$\tau_{b,\max} = 2.5 \cdot \sigma_B^{0.23} \quad (3.4.2)$$

$$s_{\max} = 0.0429 \quad (3.4.3)$$

$$a = 3 \quad (3.4.4)$$

ここで、

τ_b : 横拘束のない場合の局所付着応力 (MPa)

$\tau_{b,\max}$: 横拘束のない場合の局所最大付着応力 (MPa)

s : すべり量 (mm)

s_{\max} : 局所最大付着応力時のすべり量 (mm)

a : Popovics式の定数

σ_B : コンクリート圧縮強度 (MPa)

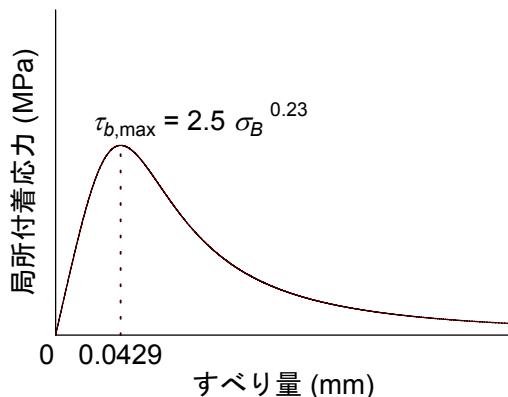


図 3-7 横拘束のない場合の局所付着応力-すべり量関係のモデル

3.4.2 横拘束のある場合

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を基本として、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を構築する。Popovics 式でモデル化するにあたって、局所最大付着応力、その時のすべり量、曲線形状を表す定数 a の値を決定しなければならない。横拘束のある場合の局所付着性状は、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ることで表現できると考える。

実験結果から、板剛性の差異は横拘束のある場合の局所付着性状に影響を及ぼさず、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 3-8 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、 $\tau_{b,max}$ は式(3.4.2)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。CFRP 板が付着破壊しなかった 13-G2-50 と 21-G2-25 試験体を除いた。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。27 体の試験体のデータを用いて最小二乗法により実験値を回帰し、式(3.4.5)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(3.4.2)および式(3.4.5)の和により表現できる。

$$\frac{\tau_{l,max}}{\sqrt{\sigma_B}} = 0.16 \cdot \sigma_l^{0.83} \quad (3.4.5)$$

ここで、

$\tau_{l,max}$: 横拘束による付着増分の最大値 ($\tau_{bl,max}$ と $\tau_{b,max}$ の差) (MPa)

σ_B : コンクリート圧縮強度 (MPa)

σ_l : 拘束応力 (MPa)

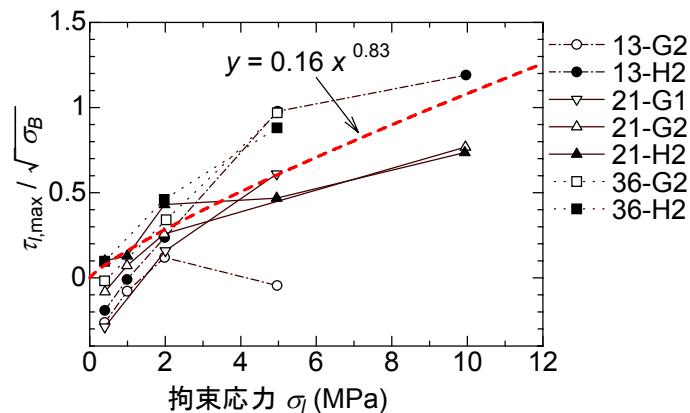


図 3-8 横拘束による付着増分と拘束応力の関係

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、また横拘束のない場合の局所付着応力－すべり量関係を基本としているため、 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(3.4.6)～(3.4.11)のようにモデル化した。横拘束のない場合、横拘束による付着増分、横拘束のある場合の 3 つの局所付着応力－すべり量関係のモデルを図 3-9 に示す。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。

$$\frac{\tau_{bl}}{\tau_{bl,\max}} = \frac{s}{s_{\max}} \cdot \frac{a}{(a-1) + (s/s_{\max})^a} \quad (3.4.6)$$

$$\tau_{bl,\max} = \tau_{b,\max} + \tau_{l,\max} \quad (3.4.7)$$

$$\tau_{b,\max} = 2.5 \cdot \sigma_B^{0.23} \quad (3.4.8)$$

$$\tau_{l,\max} = 0.16 \cdot \sigma_l^{0.83} \cdot \sqrt{\sigma_B} \quad (3.4.9)$$

$$s_{\max} = 0.0429 \quad (3.4.10)$$

$$a = 3 \quad (3.4.11)$$

ここで、

τ_{bl} : 横拘束のある場合の局所付着応力 (MPa) ($= \tau_b + \tau_l$)

$\tau_{bl,\max}$: 横拘束のある場合の局所最大付着応力 (MPa)

s : すべり量 (mm)

s_{\max} : 局所最大付着応力時のすべり量 (mm)

a : Popovics 式の定数

$\tau_{b,\max}$: 横拘束のない場合の局所最大付着応力 (MPa)

$\tau_{l,\max}$: 横拘束による付着増分の最大値 (MPa)

σ_B : コンクリート圧縮強度 (MPa)

σ_l : 拘束応力 (MPa)

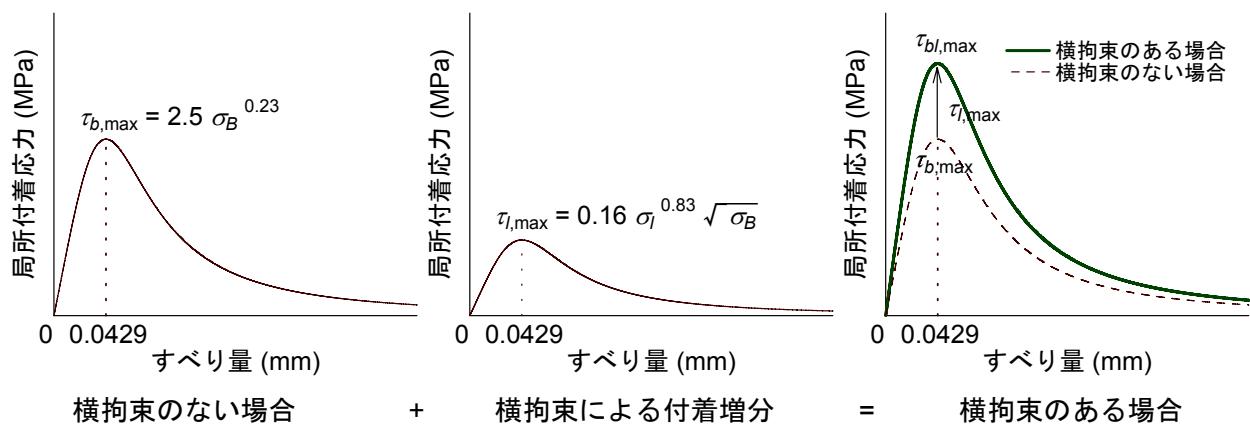


図 3-9 局所付着応力－すべり量関係のモデル

3.4.3 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、モデルを用いて逐次積分法により数値解析を行い付着強度を計算した。逐次積分法は 2.9.2 の解析方法と同様のプロセスにより行った。付着強度の実験値と解析値の比較を図 3-10 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、実験値が大きいと解析値が実験値を過小評価しており安全側になる傾向を示したが、解析結果と実験結果は概ね良好に対応しており、実験値を概ね精度良く評価できることがわかった。

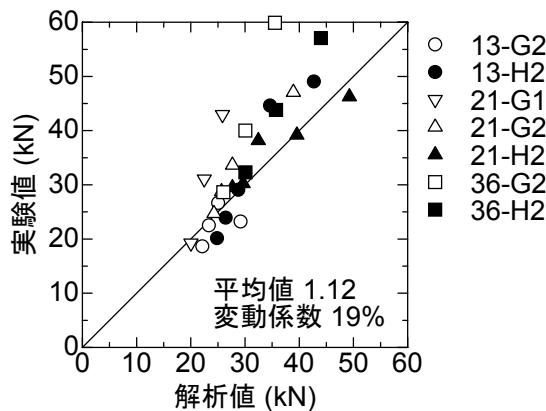


図 3-10 付着強度の実験値と解析値の比較

3.4.4 付着長が付着性状に及ぼす影響

提案した横拘束のある場合の局所付着応力ーすべり量関係のモデルを用いて、逐次積分法を利用した数値解析により付着長が付着性状に及ぼす影響について検討する。モデルを用いて数値解析した付着強度解析値と付着長の関係を図3-11に示す。図3-11の左図は横拘束のある場合とない場合の付着強度解析値およびその差分と付着長の関係であり、実線が横拘束のある場合、破線が横拘束のない場合、一点鎖線が横拘束による増分を表す。横拘束のない場合の局所付着応力ーすべり量関係には、3.4.1のモデルを用いた。横拘束のある場合もない場合も付着長が大きいほど付着強度解析値は大きくなるが、ある付着長に達すると付着強度はほぼ頭打ちになる。横拘束のない場合よりもある場合の方が先に頭打ちになり、横拘束力を与えることにより有効付着長が短くなると考えられる。また、横拘束による増分が付着長150 mmあたりで極値をとり、付着長が400 mmあたりからはほぼ一定となった。図3-11の右図は横拘束のある場合とない場合の付着強度解析値の比と付着長の関係を示す。横拘束のある場合とない場合の付着強度解析値の比は、付着長が大きいほど小さくなり、付着長が400 mmあたりからは一定となった。また、付着長が50 mm程度までの小さい範囲では横拘束のある場合とない場合の比がほぼ一定であった。

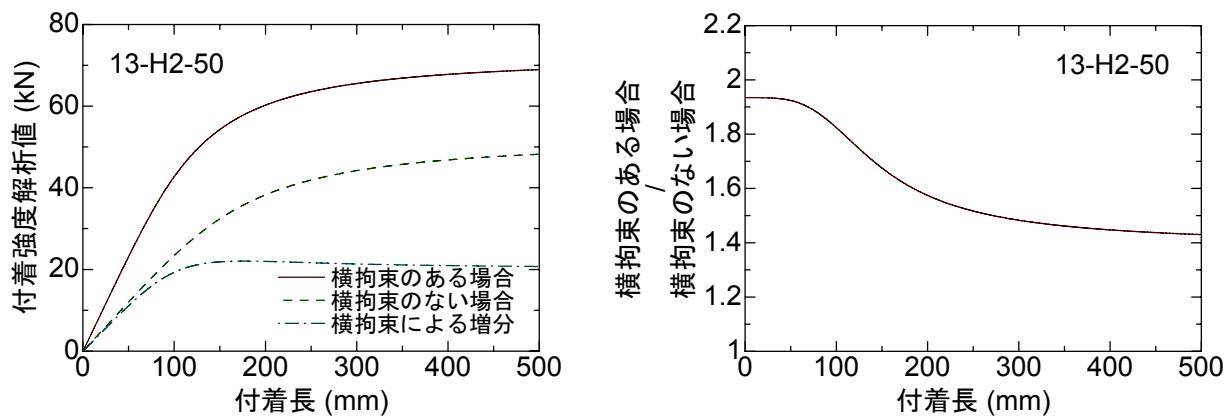


図 3-11 付着強度解析値と付着長の関係

3.5 横拘束のある場合の付着強度算定式

局所付着応力-すべり量関係と等価な面積を有する付着ストレスブロック (Equivalent Bond Stress Block, 以下 EBSB) を考えることにより、横拘束のある場合の CFRP 板とコンクリートの付着強度を求める。本研究では横拘束のある場合の局所付着応力-すべり量関係の囲む面積に着目し、付着応力を一定とした場合の CFRP 板の有効付着域でのすべり量に対し、EBSB を定義し横拘束のある場合の付着強度を求める。連続繊維シートの付着強度算定式²⁾と同様のプロセスにより構築していく。

3.5.1 付着の基礎微分方程式

鋼とコンクリートの付着⁶⁾の場合と同様に、CFRP 板とコンクリートの付着に関しても以下の微分方程式が成り立つ。これを付着の基礎微分方程式と呼ぶ。

$$\frac{d^2s}{dx^2} = \left(\frac{1}{b_{fp} \cdot t_{fp} \cdot E_{fp}} + \frac{1}{A_m \cdot E_m} \right) \cdot b_{fp} \cdot \tau_b \quad (3.5.1)$$

ここで、

- s : すべり量
- x : 試験体の軸方向の距離
- b_{fp} : CFRP 板の幅
- t_{fp} : CFRP 板の厚さ
- E_{fp} : CFRP 板の弾性係数
- A_m : 等価断面の断面積
- E_m : 等価断面の弾性係数
- $A_m \cdot E_m$: 等価断面の剛性
- τ_b : 付着応力

等価断面とはコンクリート、樹脂層の断面である。本研究では等価断面の変形が強度に与える影響はほとんどないものと考え、等価断面の剛性を非常に大きいとすると、付着の基礎微分方程式(3.5.1)は以下のように書き直せる。

$$\frac{d^2s}{dx^2} = \frac{1}{t_{fp} \cdot E_{fp}} \cdot \tau_b \quad (3.5.2)$$

式(3.5.2)は一般に数学的に解くことは困難であるため、付着応力を一定、すなわち

$$\tau_b = k \cdot \tau_{b,max} \quad (3.5.3)$$

ここで、

- k : 定数
- $\tau_{b,max}$: 局所最大付着応力

とすると式(3.5.2)は、

$$\frac{d^2s}{dx^2} = k \cdot \frac{\tau_{b,max}}{t_{fp} \cdot E_{fp}} \quad (3.5.4)$$

となる。ここで、

$$\lambda_{fp} = \frac{t_{fp} \cdot E_{fp}}{\tau_{b,max}} \quad (3.5.5)$$

と置換すると式(3.5.4)は、

$$\frac{d^2s}{dx^2} = \frac{k}{\lambda_{fp}} \quad (3.5.6)$$

となる。 k を応力係数、 λ_{fp} を付着指標と称する。付着指標 λ_{fp} の次元は[長さ]である。この式を解くと、

$$\frac{ds}{dx} = \frac{k}{\lambda_{fp}} \cdot x + C_1 = \varepsilon_f \quad (3.5.7)$$

$$s = \frac{k}{2 \cdot \lambda_{fp}} \cdot x^2 + C_1 \cdot x + C_2 \quad (3.5.8)$$

となる。 C_1, C_2 は任意定数、 ε_f はCFRP板の歪である。CFRP板の軸方向(繊維方向)に x 軸をとり、試験体の自由端($x=0$)における歪は0であるから、 $C_1=0$ を得る。 $C_2=s_f$ とすると式(3.5.8)は、

$$s = \frac{k}{2 \cdot \lambda_{fp}} \cdot x^2 + s_f \quad (3.5.9)$$

$x=0$ のとき、 $s=s_f$ であるから、 s_f は試験体の自由端におけるすべり量である。試験体荷重端におけるすべり量 s_l は、付着長を l_b とすると、

$$s_l = \frac{k}{2 \cdot \lambda_{fp}} \cdot l_b^2 + s_f \quad (3.5.10)$$

これより、試験体の荷重端と自由端のすべり量の差 Δs は、

$$\Delta s = s_l - s_f = \frac{k}{2 \cdot \lambda_{fp}} \cdot l_b^2 \quad (3.5.11)$$

また、付着区間長さ l_b の中央部(s_f と s_l の中間部)でのすべり量 s_c は、 $x=l_b/2$ として、

$$s_c = \frac{k}{8 \cdot \lambda_{fp}} \cdot l_b^2 + s_f \quad (3.5.12)$$

となる。

3.5.2 Popovics式の囲む面積

Popovics式

$$\frac{\tau_{bl}}{\tau_{bl,max}} = \frac{s}{s_{max}} \cdot \frac{a}{(a-1) + (s/s_{max})^a} \quad (3.5.13)$$

の右辺を $p(s)$ とおき、 $a=3$ を代入して s で積分すると、Popovics式のモデルの囲む面積 $P(s)$ は、

$$\begin{aligned} P(s) &= \int p(s) ds = \int \frac{s}{s_{max}} \cdot \frac{3}{2 + (s/s_{max})^3} ds \\ &= \frac{\sqrt{3}}{\sqrt[3]{2}} \cdot s_{max} \cdot \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt[3]{2^2} \cdot s - s_{max}}{\sqrt{3} \cdot s_{max}} \right) - \frac{1}{\sqrt[3]{2}} \cdot s_{max} \cdot \log \left(\sqrt[3]{2^2} \cdot s + 2 \cdot s_{max} \right) \\ &\quad + \frac{1}{2 \cdot \sqrt[3]{2}} \cdot s_{max} \cdot \log \left(\sqrt[3]{2} \cdot s^2 - \sqrt[3]{2^2} \cdot s \cdot s_{max} + 2 \cdot s_{max}^2 \right) + C_3 \end{aligned} \quad (3.5.14)$$

と表すことができる。 C_3 は任意定数である。

3.5.3 付着長が大きい場合

付着長が大きい場合、付着応力を担う区間は限られた範囲になる。本研究では、付着応力が最大付着応力の 10% ($\tau_{bl} / \tau_{bl,max} = 0.1$) 以上となる CFRP 板の軸方向の区間を有効付着長としているため、 $a = 3$ のとき、

$$p(s_e) = \frac{s_e}{s_{max}} \cdot \frac{3}{2 + (s_e / s_{max})^3} = 0.1 \quad (3.5.15)$$

$$\frac{s_e}{s_{max}} = 0.067, 5.444 \quad (3.5.16)$$

$$s_e = 0.003, 0.234 \text{ mm} \quad (3.5.17)$$

ここで、 s_e は有効付着域におけるすべり量であり、局所最大付着応力 $\tau_{bl,max}$ の 10% となるときのすべり量である。また、 s_{max} はモデルと同様に 0.0429 mm とした。 $s_e = 0.003$ は非常に小さいため 0 とみなし、 $s_e = 0.234$ mm を用いる。よって、有効付着域は $s_e = 0 \sim 0.234$ mm となり、横拘束のない場合と等しい。この範囲で Popovics モデルの面積を求めるとき、式(3.5.14)より、

$$P(s_e) - P(0) = 0.1 \quad (3.5.18)$$

次に、EBSB 応力係数 k を求めるため、Popovics 式より、

$$k = \frac{\tau_{bl}}{\tau_{bl,max}} = \frac{s}{s_{max}} \cdot \frac{a}{(a-1) + (s/s_{max})^a} = p(s) \quad (3.5.19)$$

となり、 s で積分すると、

$$\int p(s)ds = \int kds \quad (3.5.20)$$

$$P(s) = k \cdot s + C_4 \quad (3.5.21)$$

C_4 は任意定数である。よって、付着長が大きい場合の EBSB 応力係数 k_e は、

$$k_e = \frac{P(s_e) - P(0)}{s_e - 0} = \frac{0.1}{0.234} = 0.428 \quad (3.5.22)$$

となる。試験体の付着長 l_b が有効付着長 l_e と等しい場合、試験体自由端でのすべり量が $s_f = 0$ のとき、試験体荷重端でのすべり量 s_l は s_e と等しくなる。したがって、式(3.5.10)より、

$$s_e = \frac{k_e}{2 \cdot \lambda_{fp}} \cdot l_e^2 \quad (3.5.23)$$

よって、有効付着長 l_e は次式で求まる。

$$l_e = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_{fp} \cdot s_e}{k_e}} \quad (3.5.24)$$

試験体荷重端における CFRP 板引張力、すなわち付着強度 P_{bl} は、

$$P_{bl} = k_e \cdot \tau_{bl,max} \cdot b_{fp} \cdot l_e \quad (3.5.25)$$

これは、有効付着領域内の付着応力 ($k_e \cdot \tau_{bl,max}$) と付着表面積 ($b_{fp} \cdot l_e$) の積で CFRP 板引張力を表している。式(3.5.25)の $\tau_{bl,max}$ を横拘束のない場合の局所最大付着応力 $\tau_{bl,max}$ と横拘束による付着増分の最大値 $\tau_{l,max}$ の和 (式(3.4.7)) で表すと、

$$\begin{aligned} P_{bl} &= k_e \cdot (\tau_{bl,max} + \tau_{l,max}) \cdot b_{fp} \cdot l_e \\ &= k_e \cdot \tau_{bl,max} \cdot b_{fp} \cdot l_e + k_e \cdot \tau_{l,max} \cdot b_{fp} \cdot l_e \\ &= P_b + P_l \end{aligned} \quad (3.5.26)$$

となり、横拘束のある場合の付着強度 P_{bl} は横拘束のない場合の付着強度 P_b と横拘束による増分 P_l の単純な和で表すことができる。

3.5.4 付着長が小さい場合

付着長が小さい場合、付着応力を担う区間は付着域全体であり、EBSB の付着応力は試験体の付着長により変化する。Popovics モデルの付着応力分布が最大付着応力点に関して線対称に近くなることを利用すると、付着区間中央部 ($l_b / 2$) のすべり量 s_c は

$$s_c = s_{\max} \quad (3.5.27)$$

式(3.5.27)となるときの試験体自由端におけるすべり量を $s_{f,c}$ とすると、式(3.5.12)より

$$s_{\max} = \frac{k}{8 \cdot \lambda_{fp}} \cdot l_b^2 + s_f \quad (3.5.28)$$

$$s_{f,c} = s_{\max} - \frac{k}{8 \cdot \lambda_{fp}} \cdot l_b^2 \quad (3.5.29)$$

また、式(3.5.27)となる場合の試験体荷重端におけるすべり量を $s_{l,c}$ とすると、式(3.5.10)より

$$\begin{aligned} s_{l,c} &= \frac{k}{2 \cdot \lambda_{fp}} \cdot l_b^2 + s_{f,c} \\ &= \frac{k}{2 \cdot \lambda_{fp}} \cdot l_b^2 + s_{\max} - \frac{k}{8 \cdot \lambda_{fp}} \cdot l_b^2 \\ &= s_{\max} + \frac{3 \cdot k}{8 \cdot \lambda_{fp}} \cdot l_b^2 \end{aligned} \quad (3.5.30)$$

よって、付着長が小さい場合の EBSB 応力係数 k は、式(3.5.22)と同様の考え方により、

$$k = \frac{P(s_{l,c}) - P(s_{f,c})}{\Delta s} \quad (3.5.31)$$

となる。この式に式(3.5.11)を代入すると、

$$k^2 = \frac{2 \cdot \lambda_{fp} \cdot \{P(s_{l,c}) - P(s_{f,c})\}}{l_b^2} \quad (3.5.32)$$

式(3.5.32)は数学的に解くことは出来ず、数値計算により

$$k = \frac{1 - k_e}{2} \cdot \cos\left(\frac{l_b}{l_e} \cdot \pi\right) + \frac{1 + k_e}{2} \quad (3.5.33)$$

と近似できる。ただし、

$$0 < l_b < l_e \quad (3.5.34)$$

である。試験体荷重端における CFRP 板引張力、すなわち付着強度 P_{bl} は、

$$P_{bl} = k \cdot \tau_{bl,\max} \cdot b_{fp} \cdot l_b \quad (3.5.35)$$

付着長が有効付着長より大きい場合と同様に、

$$\begin{aligned} P_{bl} &= k \cdot (\tau_{b,\max} + \tau_{l,\max}) \cdot b_{fp} \cdot l_b \\ &= k \cdot \tau_{b,\max} \cdot b_{fp} \cdot l_b + k \cdot \tau_{l,\max} \cdot b_{fp} \cdot l_b \\ &= P_b + P_l \end{aligned} \quad (3.5.36)$$

となり、横拘束のある場合の付着強度 P_{bl} は横拘束のない場合の付着強度 P_b と横拘束による増分 P_l の単純な和で表すことができる。

3.5.5 付着強度算定式

以上の検討より、横拘束のある場合（横拘束力既知）の付着強度算定式を以下のように提案する。

$$l_b \geq l_e のとき, \quad P_{bl} = k_e \cdot \tau_{bl,\max} \cdot b_{fp} \cdot l_e \quad (3.5.37)$$

$$l_b < l_e のとき, \quad P_{bl} = k \cdot \tau_{bl,\max} \cdot b_{fp} \cdot l_b \quad (3.5.38)$$

ここで、

$$k_e = 0.428 \quad (3.5.39)$$

$$k = \frac{1 - k_e}{2} \cdot \cos\left(\frac{l_b}{l_e} \pi\right) + \frac{1 + k_e}{2} \quad (3.5.40)$$

$$\tau_{bl,\max} = \tau_{b,\max} + \tau_{l,\max} \quad (3.5.41)$$

$$\tau_{b,\max} = 2.5 \cdot \sigma_B^{0.23} \quad (3.5.42)$$

$$\tau_{l,\max} = 0.16 \cdot \sigma_l^{0.83} \cdot \sqrt{\sigma_B} \quad (3.5.43)$$

$$l_e = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_{fp} \cdot s_e}{k_e}} \quad (3.5.44)$$

$$\lambda_{fp} = \frac{t_{fp} \cdot E_{fp}}{\tau_{bl,\max}} \quad (3.5.45)$$

l_b : 付着長 (mm)

l_e : 有効付着長 (mm)

P_{bl} : 横拘束のある場合の付着強度 (N)

k_e : 有効付着長時のEBSB応力係数

k : EBSB応力係数

$\tau_{bl,\max}$: 横拘束のある場合の局所最大付着応力 (MPa)

$\tau_{b,\max}$: 横拘束のない場合の局所最大付着応力 (MPa)

$\tau_{l,\max}$: 横拘束による付着増分の最大値 (MPa)

b_{fp} : CFRP板の幅 (mm)

t_{fp} : CFRP板の厚さ (mm)

E_{fp} : CFRP板の弾性係数 (MPa)

σ_B : コンクリート圧縮強度 (MPa)

σ_l : 拘束応力 (MPa)

λ_{fp} : 付着指標 (mm)

s_e : 有効付着域の局所すべり量で、0.234 mm

3.5.6 付着強度算定式の適合性

前節で構築した横拘束のある場合の付着強度算定式の適合性を検証する。しかしながら、本実験における付着長は 100 mm であり、全ての試験体において有効付着長よりも小さくなるため、式(3.5.38)を用いることになる。付着強度の実験値と計算値の比較を図 3-12 に示す。実験値の計算値に対する比の平均は 1.17、変動係数は 20% であり、EBSB による付着強度算定式を用いると、数値解析による付着強度（精算解）と変動係数はほとんど変化せず、数値解析より安全側に評価できることがわかった。

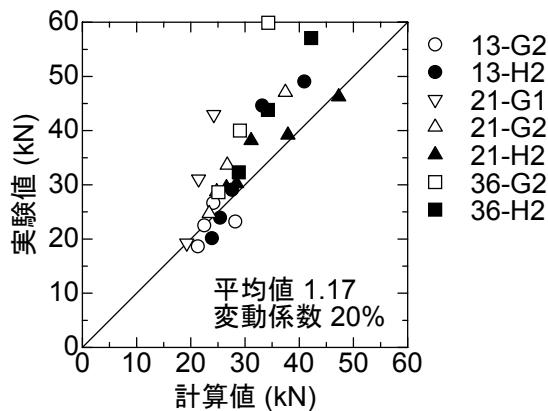


図 3-12 付着強度の実験値と計算値の比較

3.6 横拘束効果

3.6.1 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 3-13 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。最小二乗法により回帰した曲線を図 3-13 に破線で示す。ばらつきは大きいが、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。

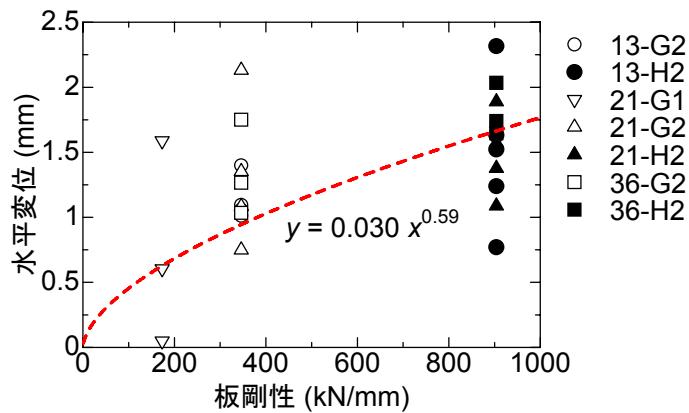


図 3-13 水平変位と板剛性の関係

横拘束のある場合の局所付着応力ーすべり量関係のモデルや付着強度算定式は、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、局所付着応力ーすべり量関係のモデルや付着強度算定式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 3-14 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、水平変位を板剛性で除した。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つた。図 3-14 の関係から実験値を回帰し、得られた関係式を式(3.6.1)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。

$$\frac{\sigma_l}{\sigma_B} = \alpha \cdot \left(\frac{\sqrt{t_{fp} \cdot E_{fp}}}{\delta_h} \right)^2 \quad (3.6.1)$$

$$\alpha = 0.0003$$

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)
- δ_h : 水平変位 (mm)

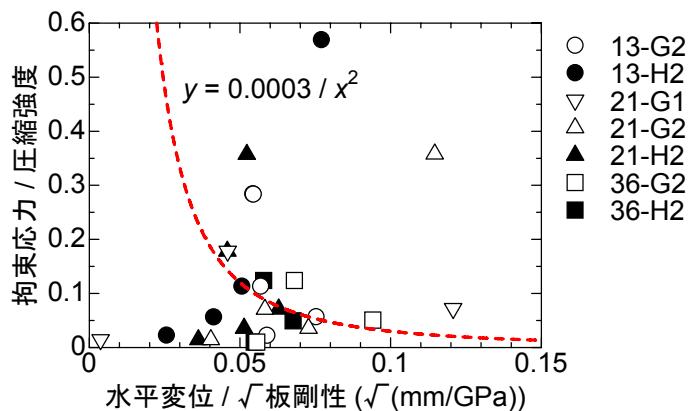


図 3-14 拘束応力と水平変位の関係

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(3.6.1)との交点により拘束応力の上限値が決定される。したがつて、式(3.4.9)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。

3.6.2 実際に定着を施した場合の定着強度

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と炭素繊維シートで定着する場合（スペーサーとシート定着）、CFRP 板とコンクリートの間に剥離が生じ、すべ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。スペーサーとシート定着における定着部を図 3-15 に示す。

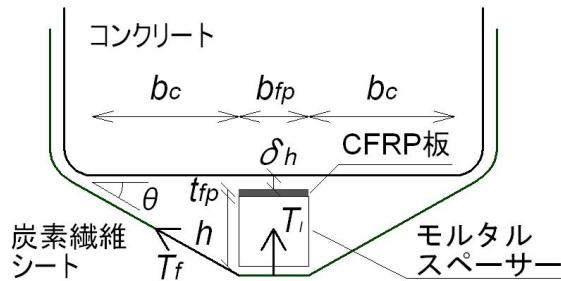


図 3-15 スペーサーとシート定着

コンクリートと炭素繊維シートのなす角を θ とすると

$$\tan \theta = \frac{t_{fp} + h}{b_c} \quad (3.6.2)$$

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(3.6.3)に示す歪 ε_f が生じる。水平変位の発生による θ の增加分は極小さいものとし無視した。

$$\begin{aligned} \varepsilon_f &= \frac{\delta_h \cdot \sin \theta}{b_c / \cos \theta} = \frac{\delta_h}{b_c} \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \\ &= \frac{t_{fp} + h}{b_c^2 + (t_{fp} + h)^2} \cdot \delta_h \end{aligned} \quad (3.6.3)$$

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

$$T_f = b_f \cdot n_f \cdot t_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_f \quad (3.6.4)$$

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、

$$T_l = 2 \cdot T_f \cdot \sin \theta = 2 \cdot T_f \cdot \frac{t_{fp} + h}{\sqrt{b_c^2 + (t_{fp} + h)^2}} \quad (3.6.5)$$

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ると、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

$$T_l = \sigma_l \cdot b_{fp} \cdot b_f \quad (3.6.6)$$

式(3.6.5)および式(3.6.6)より、スペーサーとシートで図3-15のように定着する場合の拘束応力は式(3.6.7)のように水平変位 δ_h の比例式で表される。

$$\begin{aligned} \sigma_l &= \frac{2 \cdot n_f \cdot t_f \cdot E_f}{b_{fp}} \cdot \frac{(t_{fp} + h)^2}{\{b_c^2 + (t_{fp} + h)^2\}^{3/2}} \cdot \delta_h \\ &= C \cdot \delta_h \end{aligned} \quad (3.6.7)$$

モルタルスペーサーを介さない炭素繊維シート定着の場合も、式(3.6.7)に $h = 0$ 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3-16に示す。式(3.6.1)と式(3.6.7)の交点から σ_l を求める。式(3.6.7)を式(3.6.1)に代入し σ_l について解くと式(3.6.8)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。

$$\sigma_l = (\alpha \cdot \sigma_B \cdot t_{fp} \cdot E_{fp} \cdot C^2)^{1/3} \quad (3.6.8)$$

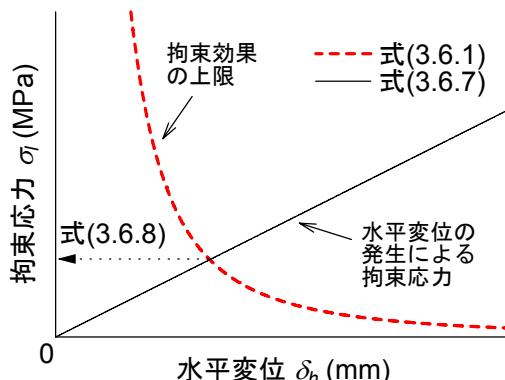


図3-16 拘束応力と水平変位の関係

式(3.6.8)により求められた拘束応力を式(3.4.9)に代入し、炭素繊維シート定着およびスペーサーとシート定着の場合の局所付着応力一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 3-17 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 1.05、変動係数は 15%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。また、式(3.6.8)により求められた拘束応力を用いて横拘束のある場合の付着強度算定式で計算した。この場合も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。実験値と計算値の比較を図 3-17 に示す。実験値の計算値に対する比の平均は 1.09、変動係数は 15%であり、変動係数は数値解析の場合とほとんど変わらず、数値解析より安全側に評価できることがわかった。

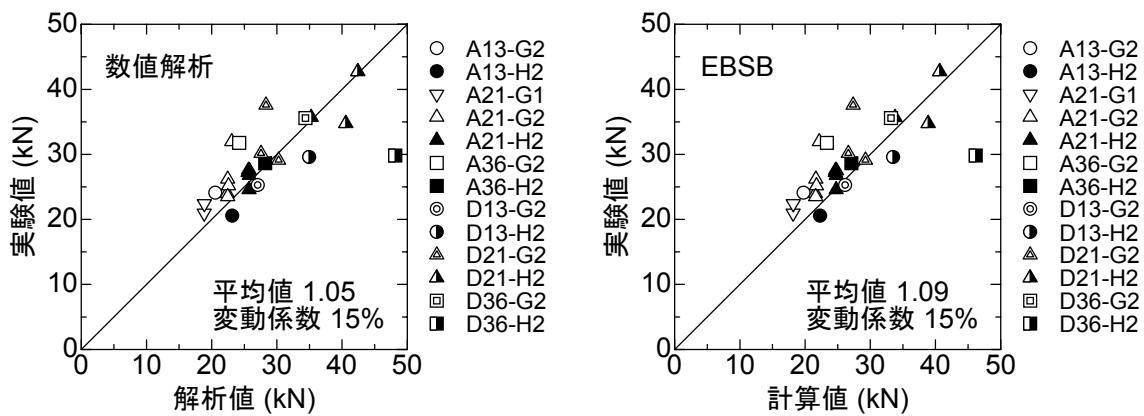


図 3-17 実験値と解析値または計算値の比較

3.7 まとめ

コンクリートブロックに貼り付けた CFRP 板にオイルジャッキにより横拘束力を直接作用させ 1 面せん断付着試験を行い、以下の知見を得た。

- 1) 横拘束のない場合の局所付着応力一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一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一すべり量関係をモデル化した。
- 2) 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、具体的な定着方法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た。
- 3) 求めた拘束応力の上限値を用いて、横拘束のある場合の局所付着応力一すべり量関係で数値解析により定着強度を求めた結果、解析値と実験値は概ね良好に対応した。
- 4) 求めた拘束応力の上限値を用いて、横拘束のある場合の付着強度算定式により求めた定着強度計算値も実験値と概ね良好に対応した。

第4章 結論

連続繊維補強材はコンクリートとの一体性を確保することが重要である。筆者は、軽量かつ高強度、高剛性の CFRP 板を用いてコンクリートとの付着性状を検討し、研究報告した¹⁾。CFRP 板が接着樹脂のみでコンクリートに付着し、横拘束のない場合の局所付着応力-すべり量関係を Popovics 式でモデル化し、さらに、等価付着ストレスブロックにより簡易な付着強度算定式を構築した。局所最大付着応力はコンクリート圧縮強度の関数として表した。

第 2 章では、CFRP 板とコンクリートの定着性状を検討した。CFRP 板が付着（接着樹脂）のみで耐力を確保できない場合には定着部の工夫が必要となる。コンクリートブロックに CFRP 板を貼り付けた。炭素繊維シートで定着する方法、増し貼りする方法、鋼板とアンカーボルトで定着する方法、モルタルスペーサーと炭素繊維シートで定着する方法、CFRP 板の両脇に CFRP 板を増し貼りし、さらに上から炭素繊維シートで定着する方法の 5 種類の方法を施し、各定着方法における定着性状を把握した。炭素繊維シート定着試験体では、コンクリート圧縮強度が局所付着応力に影響を及ぼし、炭素繊維シートの弾性係数は影響を及ぼさなかった。定着の効果が大きく見られたのは最大荷重に達し、荷重が減少した後であった。増し貼り定着試験体では、局所的な付着強度に対する定着効果はなかった。鋼板定着試験体では付着耐力が大幅に上昇した。スペーサーとシート定着試験体では、付着応力が一度低下した後も再び最大付着応力の 6~9 割程度まで付着応力が増大した。増し貼りとシート定着では、増し貼りにより付着面積を増大させ、シートで引張力を配分させることにより付着耐力が上昇した。

第 3 章では、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を行った。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回帰した曲線と、具体的な定着方法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。また、横拘束のある場合の付着強度算定式を等価付着ストレスブロックにより構築し、求めた拘束応力の上限値を代入して求めた定着強度計算値も実験値と概ね良好に対応した。

参 考 文 献

- 1) 矢野努, 伊澤清治, 寺島辰郁, 中尾貞治, 金久保利之, 松永健太郎, 久部修弘, 石川敏彦 : 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) 金久保利之, 古田智基, 福山洋 : 等価付着ストレスブロックによる連続繊維シートとコンクリートの付着強度算定式, コンクリート工学論文集, 第 12 卷, 第 3 号, pp.27-37, 2001.9
- 3) 松浦恒久, 角一行, 林田則光, 飯塚信一, 加藤広宣 : 炭素繊維シートによる既存 RC 部材の耐震補強に関する研究(その 3) T 型梁補強実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), C-2 構造IV, pp.269-270, 1998.9
- 4) 金久保利之, 小島浩一, 米丸啓介, 福山洋 : 補強コンクリート部材の付着割裂性状に関する研究 その 2 横補強のない場合の性状に与える構造因子の影響, 日本建築学会構造系論文集, No.506, pp.163-169, 1998.4
- 5) 佐藤靖彦, 小林朗, 高橋義裕 : 炭素繊維プレートにより補強された RC はりの破壊挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.1519-1524, 2008.7
- 6) 六車熙, 森田司郎, 富田幸次郎 : 鋼とコンクリートの付着に関する基礎的研究(I 付着応力分布について) - (I), 日本建築学会論文報告集, Vol.131, pp.1-8, 1967.1