

# 論文 高靱性セメント系複合材料を用いた梁部材の主筋の付着割裂破壊性状に関する研究

KIM VA<sup>\*1</sup>・勝亦一成<sup>\*2</sup>・前田匡樹<sup>\*3</sup>・永井覚<sup>\*4</sup>

要旨：高靱性セメント系複合材料を用いた梁部材の主筋の付着割裂破壊性状を把握するために、単純梁型試験体単調載荷実験を行った。その結果、HPFRCCを使用することにより1)付着割裂ひび割れは分散し、ひび割れ幅が抑制される、2)付着割裂強度は普通コンクリートより上昇し、付着長さの増加による強度低下もない、3)ピーク以後の付着抵抗の低下が少ないことなどが明らかになった、さらに、既往の付着割裂強度式による評価を行った。

キーワード：普通コンクリート，HPFRCC，付着割裂強度，横補強筋比，付着長さ

## 1. 背景・目的

近年数パーセントの引張ひずみ度に耐えることができ、ひずみ硬化型引張挙動を示す短繊維補強セメント材料である Engineering Cementitious Composite (ECC と通称されるが、以下 HPFRCC と呼ぶ)に関する開発研究が行われ実現されている<sup>1)</sup>。RC 梁・柱部材の脆性的破壊の1つである付着割裂破壊は、主筋の異形節とコンクリートの噛み合い作用によりかぶりコンクリートが割裂されることで生じる、コンクリートの引張系の破壊である。従って、高い引張靱性を有する HPFRCC を使用することにより、ひび割れの拡大を抑制することができ、付着割裂強度を飛躍的に改善することが期待できる。そこで、本研究では、HPFRCC を用い、付着割裂破壊性状を把握するため研究を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

試験体 6 体は文献<sup>2)</sup>に基づいて計画し、単純梁型の試験体とした。試験体の側面図、断面図をそれぞれ図 - 1, 図 - 2 に示す。各試験体に上端・下端主筋それぞれの左右に合計 4 試験区間

を有する。各試験区間端部は、支点反力による拘束を受けないように、主筋にスチールパイプを被せることにより付着をなくす。付着をなくしたアンボンド区間のコンクリートが、試験区間の付着強度に影響しないように、両区間の境目に主筋中心までかぶりコンクリートに切り欠きを設けた。試験体が、付着割裂破壊する以前に曲げ降伏及びせん断破壊することを防ぐ目的で、2 段筋を配し横補強筋も掛けた。試験区間の横補強筋については、上端側が破壊した後、下端側を試験する際に横補強筋が伸びプレストレスを受けた状態を避けるため、上端側と下端側の横補強筋をそれぞれ反対側の 2 段筋に掛けることとした。試験体一覧を表 - 1 に示し、全ての試験体の断面形状は 300mm × 500mm とほぼ実大とした。実験変数は以下の通りである。

- ・コンクリートの種類 (NC, HPFRCC)
- ・主筋の配筋 (3-D25, 4-D25)
- ・主筋の位置 (上端筋, 下端筋)
- ・横補強筋比 ( $p_w=0, 0.32, 0.63\%$ )
- ・横補強筋の配筋 (中子筋なし, あり)
- ・付着長さ ( $12d_b(300\text{mm}), 24d_b(600\text{mm})$ )

\*1 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 (正会員)

\*2 東北大学 工学部建築学科 (正会員)

\*3 東北大学助教授 工学研究科 都市・建築学専攻 工博 (正会員)

\*4 鹿島建設(株) 建築技術研究部構造耐震グループ (正会員)

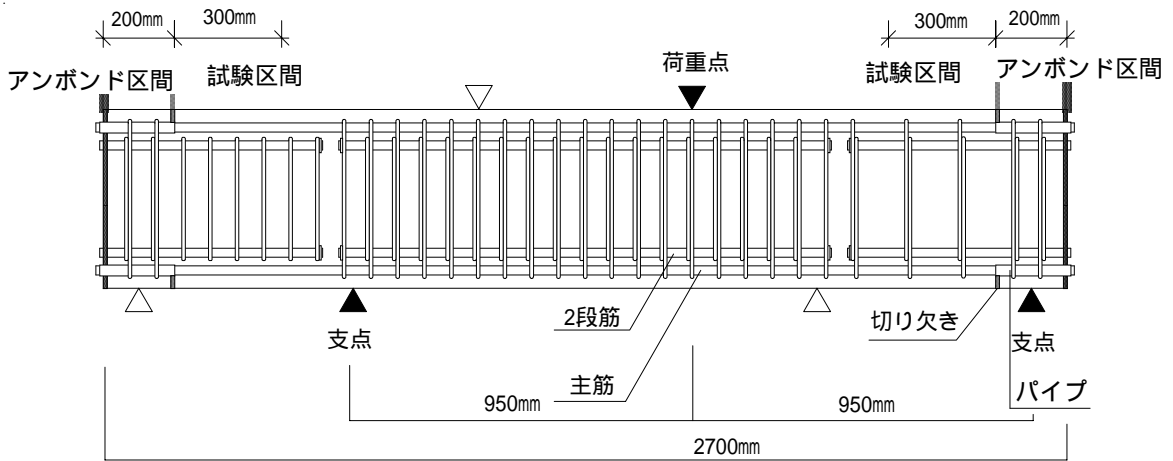


図 - 1 試験体の側面図

表 - 1 試験体一覧表及び実験結果

試験区間名	種類	主筋		横補強筋			実験結果		
		本数	位置	付着長さ	横補強筋	$p_w(\%)$	maxl	maxl	maxav
FC00-3	HPRFRC	3-D25	下端	300mm	なし	0.00	6.48, 7.11	7.18	6.92
FC32-3					2-D10@150	0.32	7.96, 8.46	7.48	7.97
FC63-3					2-D10@75	0.63	10.08, 8.14	8.61	8.94
FC48s-3					3-D10@150	0.48	8.32, 8.80	9.71	8.94
FC00-T		4-D25	上端	300mm	なし	0.00	3.91, 4.16	4.81, 5.19	4.52
FC32-T					2-D10@150	0.32	7.41, 6.40	7.11, 6.41	6.83
FC63-T					2-D10@75	0.63	8.28, 7.30	7.67, 7.08	7.58
FC63s-T					4-D10@150		9.96, 6.75	7.04, 7.51	7.81
FC00		4-D25	下端	600mm	なし	0.00	5.28, 4.38	4.84, 5.25	4.94
FC32					2-D10@150	0.32	5.75, 5.74	5.85, 6.46	5.95
FC63					2-D10@75	0.63	8.55, 7.71	6.73, 7.38	7.59
FC63s					4-D10@150		6.27, 6.50	7.04, 8.20	7.00
FC00-L		NC	4-D25	600mm	なし	0.00	5.43, 5.34	5.30, 4.57	5.41
FC32-L					2-D10@150	0.32	6.38, 5.96	6.18, 5.71	6.06
FC63-L					2-D10@75	0.63	7.72*, 7.17	7.04, 7.39	7.33
FC63s-L					4-D10@150		7.72*, 7.07	7.72*, 7.72*	7.56
NC00-3	NC	3-D25	300mm	なし	0.00	4.73, 5.48	5.58	5.26	
NC63-3				2-D10@75	0.63	9.56, 9.34	4.56	8.82	
NC00		4-D25	300mm	なし	0.00	3.70**, 3.90**	4.00**, 4.00**	3.90**	
NC32				2-D10@150	0.32	5.24, 5.29	4.69, 4.14	4.84	
NC63				2-D10@75	0.63	8.50, 7.26	5.95, 6.61	7.82	
NC63s				4-D10@150		8.21, 8.04	7.62, 7.67	7.88	
NC00-L				600mm	なし	0.00	2.80, 3.45	3.49, 3.46	3.30
NC63-L					2-D10@75	0.63	4.50, 6.38	6.00, 5.62	5.62

$\tau_{max1}$  : 隅主筋の最大応力度 ( $N/mm^2$ )  
 $\tau_{max2}$  : 中主筋の最大応力度 ( $N/mm^2$ )  
 $\tau_{maxav}$  : 全主筋の平均最大付着応力度 ( $N/mm^2$ )  
 \* : 主筋降伏後の付着破壊  
 \*\* : 参考値(データ計測ミスのため)

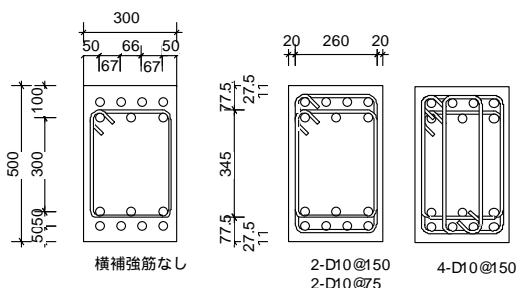


図 - 2 断面図(単位 mm)

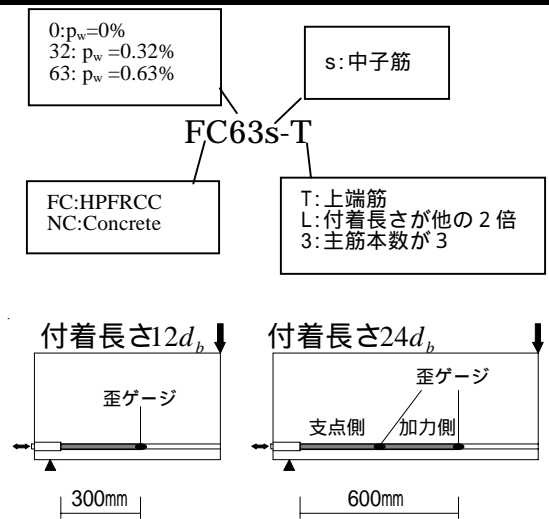


図 - 3 自由端すべり及びひずみの測定

## 2.2 測定

図 - 3 に示すように、主筋の自由端すべりはパイプを通して露出させた主筋端部の変位を測定することにより計測した。付着長さ  $12d_b$  (300mm)の標準試験体はひずみゲージを1カ所、付着長さ  $24d_b$  (600mm)の試験体では2カ所貼り付けた。試験区間の主筋に貼り付けたひずみゲージにより得たひずみ度から、試験区間の平均付着応力度  $\tau$  を式(1)により求めた。

$$\tau = \frac{\varepsilon \cdot E_s \cdot A_s}{\phi \cdot l_b} \quad (1)$$

ここで、  
 $E_s$ : 主筋のヤング係数  
 $A_s$ : 主筋の断面積  
 $\phi$ : 主筋の周長  
 $l_b$ : 主筋の付着長さ

## 2.3 材料特性

HPFRCC は、ビニロン繊維を用いたビニロン繊維補強モルタルである。また、鉄筋、NC 及び HPFRCC の力学特性を表 - 2 及び表 - 3 に示す。ここで、NC の引張強度は割裂引張試験、HPFRCC の引張強度は厚さ 12mm、幅 30mm の板状試験体の直接引張試験によるものである。HPFRCC の圧縮及び引張の応力 - ひずみ関係を図 - 4 に示す。圧縮性状について、両者の圧縮強度はほぼ同じだが、HPFRCC のヤング係数はコンクリートの場合よ

表 - 2 鉄筋の力学特性

種類	降伏応力 (N/mm <sup>2</sup> )	破断応力 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (10 <sup>6</sup> N/mm <sup>2</sup> )
D10	998.5	1165.3	0.186
D25	731.4	932.0	0.196

表 - 3 NC・HPFRCC の材料特性

試験区間	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup> )
FC00-3, FC63-3	60.3	5.27	1.69
FC32-3, FC48s	58.1	5.32	1.63
FC00-T, FC63s-T	59.1	5.46	1.65
FC32-T, FC32	57.9	5.19	1.62
FC63-T, FC63	63.9	5.87	1.75
FC63s-T, FC63	59.5	5.43	1.67
FC00-L, FC63-L	56.7	6.04	1.65
FC32-L, FC63s-L	60.8	5.42	1.71
コンクリート	64.8	4.73	3.64

り小さく約半分程度である。引張性状については、引張応力度約 4N/mm<sup>2</sup> でひび割れが発生した後もひずみ度 3%程度まで引張応力度が上昇するという高い靱性を有することに特徴がある。

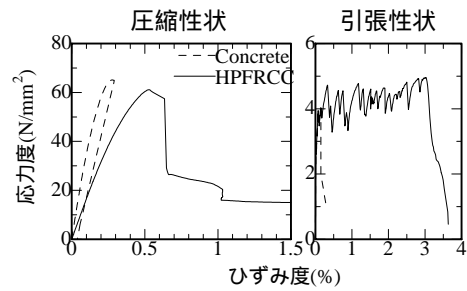


図 - 4 HPFRCC の応力 - ひずみ関係

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 破壊性状

NC を用いた試験体は、加力開始前、初期ひび割れがほぼ発生しなかったのに対し、HPFRCC を用いた試験体は、乾燥収縮によると思われる数多くの初期ひび割れが観察された。破壊モードは全ての試験区間ともサイドスプリット型付着割裂破壊であった。写真 - 1 に、横補強筋比  $p_w=0\%$  の場合の試験体 NC00-3 と FC00-3 の最終破壊性状の比較を示す。HPFRCC の場合、ひび割れ分散効果により、NC と比較するとひび割れ幅はあまり拡大せず、多数発生した。ひび割れは、NC の試験体よりも、比較的短く、直線的であることが観察された。NC・HPFRCC とともに、最大付着応力度に達するまでは最大割裂ひび割れ幅は 0.5mm 程度以下にとどまる。NC は、最大付着応力度に達すると多数の割裂ひび割れが 1 本に貫通して急激にひび割れ幅が拡大すると同時に、付着応力度が低下し自由端すべりが急速に増加して破壊に至った。これに対して HPFRCC は最大付着応力度に達した後も、割裂ひび割れはあまり拡大しなかった。

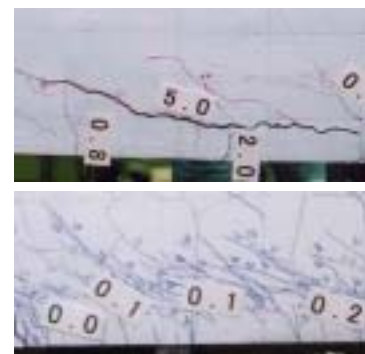


写真 - 1 最終破壊性状の比較

### 3.2 付着応力度 - 自由端すべり関係

図 - 5 に、付着応力度 - 自由端すべり関係の例を示す。横補強筋  $p_w=0\%$  のとき、NC の NC00-3 は、ほとんど自由端すべりが生じていない時点で最大付着応力度に達し、ピーク以後急激に付着抵抗を失うのに対し、HPFRCC の FC00-3 は、自由端すべりが生じた後もある程度付着応力度が上昇し、ピーク以後の付着応力度の低下が比較的少ないことがわかる。横補強筋  $p_w=0.63\%$  のとき、NC・HPFRCC とともに 1.00mm 前後の自由端すべりで最大付着応力度に達し、ピーク以後の付着応力度の低下率にも大差が見られず、両者はほぼ同じ付着応力度 - 自由端すべり曲線を描いた。

このように、横補強筋がない、あるいは、少ない場合には、HPFRCC を使用することにより、最大付着応力度、及び、ピーク以後の低下の程度が改善される傾向が見られたが、横補強筋が大きくなるほどその効果は小さくなった。

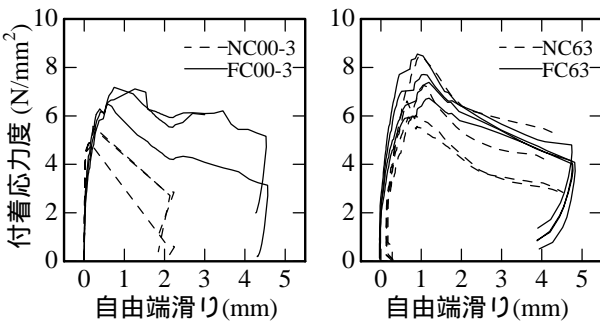


図 - 5 付着応力度 - すべり関係

### 3.3 最大付着応力度

図 - 6(a) に、主筋が 4-D25 で付着長さ  $12d_b$  の場合の横補強筋比  $p_w$  と最大付着応力度の関係を示す。これより、NC・HPFRCC とともに横補強筋比の増加に伴って、最大付着応力度が増加する傾向がみられる。

図 - 6(b) に、横補強筋比  $p_w$  と、他のパラメータが同一の NC 試験体に対する HPFRCC 試験体の最大付着応力度の比の関係を示す。ここでの最大付着応力度は、試験区間内の全主筋の最大付着応力度の平均値  $\max_{\text{max}}$  とした。これより横

補強筋比  $p_w=0\%$  の場合、付着長さ  $12d_b(300\text{mm})$  では、HPFRCC の最大付着応力度は NC の 1.27 倍 (4-D25) ~ 1.32 倍 (3-D25)，付着長さ  $24d_b(600\text{mm})$  の試験体では 1.64 倍 (4-D25) と高い値を示す。これに対して、横補強筋比  $p_w=0.63\%$  の場合は、 $12d_b(300\text{mm})$  で 1.02 倍 (4-D25) ~ 1.07 倍 (3-D25)， $24d_b(600\text{mm})$  で 1.3 倍と、 $p_w=0\%$  の場合よりは小さいものの、HPFRCC 試験体の最大付着応力度は、NC 試験体を上回り、全体として HPFRCC を使用することにより、付着割裂強度が上昇することが確認できた。

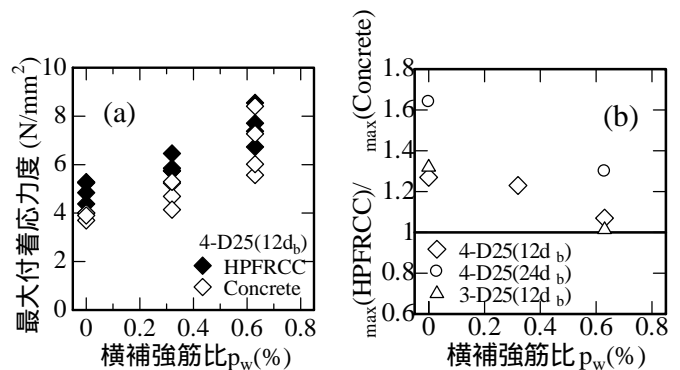


図 - 6 横補強筋の影響

### 3.4 付着長さの影響

図 - 7 に、NC 及び HPFRCC の最大付着応力度  $\max$  と付着長さの関係を示す。NC の場合は、これまでの実験研究でも指摘されているように、付着長さの増大とともに最大付着応力度が減少する傾向がある。これに対して、HPFRCC の場合では付着長さの増大しても、最大付着応力度がほとんど減少せず付着長さにはほとんど依存しないことがわかる。

図 - 8 に、付着長さ  $24d_b(600\text{mm})$  で  $p_w=0\%$  の試験体の局所付着応力度 - すべり関係を示す。ここで、局所付着応力度は図 3 に示したように試験区間端部と中央部の 2 カ所のひずみゲージのひずみ度から、支点側、加力点側の区間ごとの付着応力度を求めた。NC の試験体は、加力点側の付着応力度が最大に達すると急激に応力度が低下し、その区間が全く付着応力を負担しなくなった後にも、支点側の付着応力度が上昇して最大に達する、つまり、加力点側から付着

破壊が進行している。一方、HPFRCC の試験体は、加力点側が先に最大付着応力度に達するが、その後すべりが増加しても付着応力度はあまり低下せず支点側が最大に達するまで付着応力を保持し続けている。そのため、図 8 に示したように、HPFRCC を用いた試験体では付着長さが増加しても全付着長さに対する最大付着応力度は低下しないものと考えられる。実際の柱・梁部材では一般に、本実験の範囲 ( $24d_b$ ) よりも主筋の付着長さは長いと考えられるのでこの性質は、実際の部材ではより有利に働くと思われる。

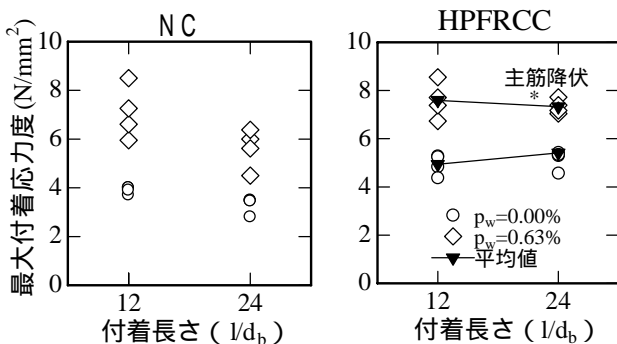


図 - 7 付着長さの影響

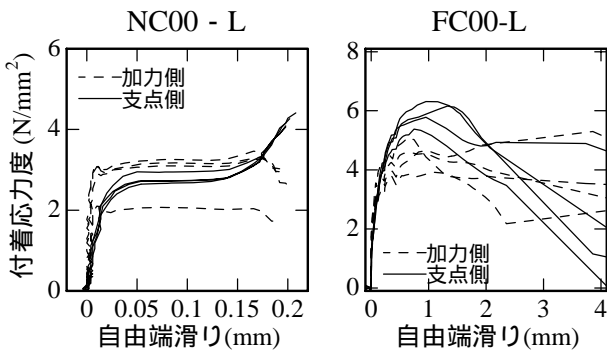


図 - 8 局所付着応力度 すべり関係

### 3.5 主筋位置の影響

図 - 9 に、HPFRCC の試験体の上端筋と下端筋の最大付着応力度の比較を示す。ばらつきがあるものの、平均的には両者の比は 1 程度で本研究で使用した HPFRCC ではブリージングによる上端筋の付着強度の低下は見られなかった。

### 3.6 既往の付着割裂強度算定式との比較

HPFRCC の試験体について、藤井・森田式<sup>3)</sup>、建築学会の靱性保証型耐震設計指針の付着割裂強度算定式<sup>4)</sup>(以下靱性保証指針式と称す)によ

る計算値と実験値の比較を行った。各式による計算値と実験値の比較を図 - 11 に示す。これより HPFRCC の実験値は藤井・森田式では 1.7 倍、靱性保証指針式では 2.1 倍程度で、既往の付着割裂強度式はかなり過小評価となる。

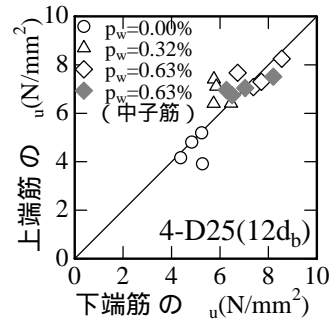


図 - 9 主筋位置の影響

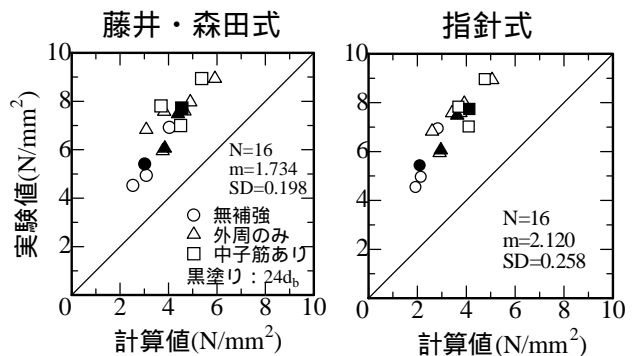


図 - 10 付着割裂強度算定式との比較

### 3.7 厚肉円筒モデルによる応力解析

HPFRCC の高い引張靱性による付着割裂強度の上昇効果を検討するために、Tepfers の厚肉円筒モデル<sup>5)</sup>による応力解析を行った。図 - 11 に、主筋 3-D25 と 4-D25 の試験区間の解析モデルを示す。図に示すように、試験体断面を主筋 1 本分に分割し、主筋と周囲のコンクリートとを取り出した時のものを厚肉円筒モデルとみなした。

図 - 12 に示すように鉄筋の異形節とコンクリートの噛み合い作用により、付着応力度  $\sigma_b$  に直交する放射状の応力  $\sigma_r$  が生じる。 $\sigma_b$  との関係は式(2)で与えられる。

$$\sigma_r = \tau_b \tan \theta \quad (2)$$

ここで、 $\theta$  : 節前面の支圧力と材軸のなす角度 Tepfers<sup>5)</sup>は、 $\sigma_r$  を図 - 13 の厚肉円筒に作用する内圧とみなして、図 - 13 のように (1) 弾性状態、(2) 部分的にひび割れた弾性状態、(3)

塑性状態のようにモデル化し，式(2)で $\theta = 45^\circ$ と仮定することで，(1)～(3)の3つの状態に対する付着強度をそれぞれ式(3)～(5)で定式化した。

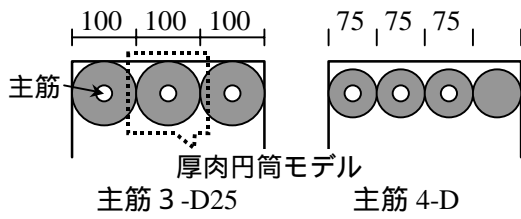


図 - 11 解析モデル (単位 mm)

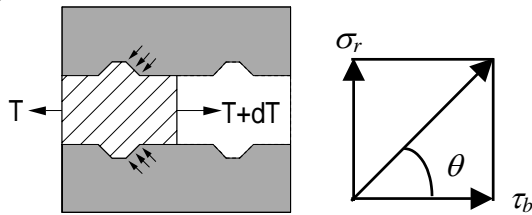


図 - 12 付着力の伝達

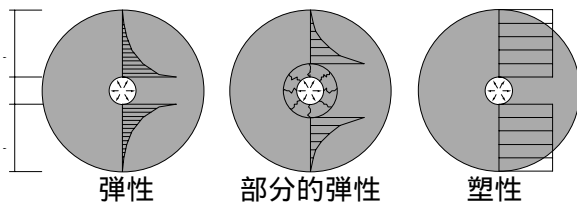


図 - 13 円周方向の引張応力度分布モデル

式(3)～式(5)による計算値と，本研究の横補強筋比  $p_w=0\%$  の場合の実験値を図 - 14 に示す。Tepfers<sup>5)</sup>によれば，NC の場合の実験値は，概ね部分的弾性解と塑性解の中間に分布することが示されているが，本実験の結果はほぼ部分的弾性解になった。HPFRCC を用いた試験体は，ひび割れが発生しても数パーセントのひずみ度まで引張応力度を負担する HPFRCC の性質のため，ほぼ塑性解に近い付着割裂強度を発揮することを期待したが，NC より高いものの，塑性解には達していなかった。このメカニズムについては，今後さらに検討が必要と思われる。

$$\tau_{\max} = f_t \frac{(C_y + d/2)^2 - (d/2)^2}{(C_y + d/2)^2 + (d/2)^2} \quad (3)$$

$$\tau_{\max} = f_t \frac{C_y + d/2}{1.664d} \quad (4)$$

$$\tau_{\max} = f_t \frac{2C_y}{d} \quad (5)$$

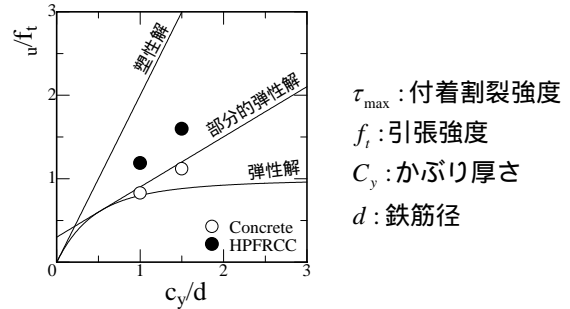


図 - 14 厚肉円筒モデルによる応力解析

$\tau_{\max}$  : 付着割裂強度  
 $f_t$  : 引張強度  
 $C_y$  : かぶり厚さ  
 $d$  : 鉄筋径

#### 4. まとめ

HPFRCC を用いた単純梁型試験体単調載荷実験を行った結果，HPFRCC を用いることで

1. 割裂ひび割れが分散効果を示し，ひび割れ幅が抑制された。
2. 付着割裂強度が上昇し，付着長さの増加による強度低下がない，ピーク以降の付着抵抗の低下が少ない，等の効果が見られた。
3. 2.に示した付着性状の改善効果は，横補強筋少ない部材ほど顕著であった。
4. HPFRCC を用いた部材の付着割裂強度は既往の付着割裂強度算定式の計算値より平均的に 1.7～2.1 倍程度高かった。

#### 謝辞

本研究で使用した HPFRCC の設計，調合，打設および材料試験の実施には，鹿島建設技術研究所の閑田徹志博士の全面的なご協力を得た。また，試験体作成，実験実施には，元東北大学大学院修士課程・佐藤涼氏，東北大学大学院修士課程 1 年富田崇史氏にも協力頂いた。ここに記して謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 閑田徹志；「高性能繊維補強セメント材料の設計技術の現状」，コンクリート工学，pp.9～16，Vol.38，No.6，2000.6
- 2) 前田匡樹，小谷俊介，青山博之；「RC 部材の付着割裂強度に関する実験研究」，コンクリート工学年次論文報告集，pp.145～150，Vol.13，No.2，1991.6
- 3) 藤井栄，森田司郎；「異形鉄筋の付着割裂強度に関する研究 第一報：付着割裂強度を支配する要因についての実験結果」，日本建築学会論文報告集，pp.44～54，1982年9月
- 4) 日本建築学会；「鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解析」，1999
- 5) Tepfers, R. "Cracking of Concrete Cover along Anchored Deformed Reinforced Bars." Magazine of Concrete Research, Vol. 31, No.106, Cement and Concrete Association. Wexham Springs, Slough, England, Mar., 1977, pp3-12