

論文 フライアッシュ高強度人工軽量骨材を用いた片持梁型試験体による 付着割裂性状

八十島 章^{*1}・金久保 利之^{*2}・石川 嘉崇^{*3}

要旨：フライアッシュ高強度人工軽量骨材を用いた片持梁型試験体による付着割裂実験を行った。コンクリート強度，せん断補強筋比，割裂線長さが付着割裂性状および強度に与える影響は，普通コンクリートと同等であることを確認した。また，局所付着性状に関する検討を行い，横補強筋応力はコンクリート圧縮強度と主筋すべり量で定める直線で表現できることを示した。

キーワード：フライアッシュ，付着割裂，軽量骨材，局所性状，横補強筋応力，すべり量

1. はじめに

石炭灰の有効利用は様々な分野において検討されており，非常に多くの量を使用するという点から構造用コンクリート骨材の原材料としての利用も有効な手段のひとつであると考えられている。フライアッシュを主原料とし，造粒後発泡を抑制して骨材の組織が緻密化されたフライアッシュ高強度人工骨材は，軽量コンクリートの高強度化に対応可能な材料として期待が持てるものである¹⁾。

本研究では，フライアッシュ高強度人工骨材を用いた鉄筋コンクリート部材の特徴と基本的な構造性能を把握するために，急激な耐力低下を伴い，脆性的に破壊する付着割裂破壊に主眼を置き，短期荷重が作用する梁や柱部材の一部をモデル化した片持梁型試験体を使用して，実験的に付着割裂性状を把握することを目的とする。

実験は，サイドスプリット型の付着割裂破壊を想定した片持梁型試験体の主筋を単調に引抜くことにより行い，変動因子が付着割裂性状に与える影響を把握し，普通コンクリートに対して提案されている諸式と比較検討する。また，局所付着性状における付着応力，すべり量，横補強筋応力に関する検討も報告する。

2. 実験概要

2.1 試験体

片持梁型付着割裂実験用の試験体は梁部材の一部をモデル化したもので，主筋に異形鉄筋D13を用い，断面は200×350mm，付着長を300mm（主筋径の23倍）とした。試験体配筋例を図-1に示す。自由端から203mmの部分と荷重端から50mmの部分でそれぞれ主筋外周に塩ビパイプを配して付着を絶縁してある。試験体総数は，コンクリート強度（36MPa，60MPa），主筋本数（3-D13，4-D13），せん断補強筋比（0.00%，0.40%，0.80%）を変動要因とし，サイドスプリット型の付着割裂破壊を想定した合計7体である。試験体上下で順次，引抜試験を行い，一体の試験体から上端筋（TOP），下端筋（BTM）の2つのデータを得ることができる。試験体一覧を表-1に示す。

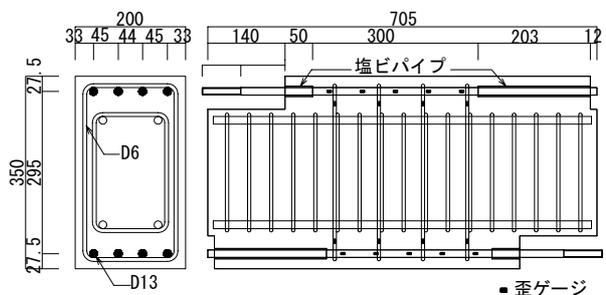


図-1 試験体形状

*1 筑波大学大学院（正会員）

*2 筑波大学講師 機能工学系 博士（工学）（正会員）

*3 電源開発（株） 茅ヶ崎研究センター（正会員）

表-1 試験体一覧

試験体名		コンクリート	主筋 (SD685)	横補強筋 (SD685)	
				配筋	p_w (%)
No.1	TL36S-3	FA 骨材 36MPa (TL36)	3-D13	—	0.00
No.2	TL36S-4		4-D13	—	0.00
No.3	TL36SS40			2-D6@80	0.40
No.4	TL36SS80		2-D6@40	0.80	
No.5	TL60S-3	FA 骨材 60MPa (TL60)	3-D13	—	0.00
No.6	TL60S-4		4-D13	—	0.00
No.7	TL60SS40		4-D13	2-D6@80	0.40

2.2 使用材料

本研究の試験体に使用した鉄筋は、主筋に異形鉄筋 D13 (SD685), 横補強筋に溶接閉鎖型の異形鉄筋 D6 (SD685) である。鉄筋の引張試験結果を表-2 に示す。コンクリートは、フライアッシュ高強度人工軽量骨材 (FA 骨材) を粗骨材に、陸砂および砕砂を細骨材に用い、目標圧縮強度 36MPa および 60MPa の人工軽量骨材コンクリートを使用した。試験体加力時材令の 100φ-200mm テストピース (現場封緘養生) による材料試験結果を表-3 に示す。

表-2 鉄筋材料試験結果

種別	引張強度 (MPa)	降伏強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	伸び (%)
D13 (SD685)	903	710	187	10.4
D6 (SD685)	970	760*	190	13.1

* 0.2% オフセット耐力

表-3 コンクリート材料試験結果

コンクリート	単位容積質量 (kg/l)	圧縮強度 (MPa)	割裂強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
TL36	1.947	33.4	3.42	26.1
TL60	2.063	60.2	4.00	33.1

2.3 加力・計測方法

加力装置を図-2 に示す。加力は片持梁形式の引抜試験方法を採用し、1MN アクチュエーター (変位制御) を用いて、全て一方向単調荷重により破壊させた。この際、加力の初期段階では各主筋の荷重端側付着領域に貼付した歪ゲ-

ジの値をモニターし、全主筋に均等に荷重が分配されるように微調整を加えて荷重を行った。また、上端筋荷重の後、試験体を反転させて下端筋についても同様に荷重を行った。計測項目は、引張荷重値、主筋荷重端および自由端すべり量、図-1 に示す位置における主筋および横補強筋の歪値について行った。

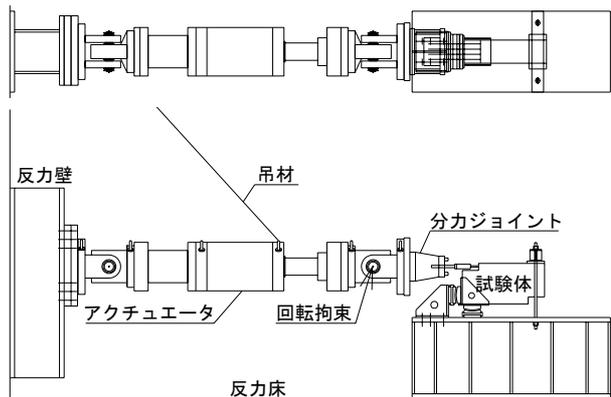


図-2 加力装置

3. 実験結果および検討

3.1 破壊性状

代表的な試験体の最終破壊状況を図-3 に示す。各試験体ともサイドスプリット型の付着割裂により耐力が低下した。横補強のない場合では、試験体上部中央に初期ひび割れが入り、数本のひび割れが発生した後、主筋に沿ったひび割れと共に一気に耐力を低下し、破壊に至った。横補強のある場合では、最大荷重後も多数のひび割れが発生し、徐々に耐力低下し、最終的に主筋に沿ったひび割れが大きく開き破壊に至った。

3.2 上端筋と下端筋の付着割裂強度

主筋位置（上端筋・下端筋）における付着割裂強度と、その比を表-4に示す。36MPaクラスの試験体における付着強度の比の平均値は1.28、60MPaクラスの試験体では1.09、全試験体の平均では1.19である。文献2)によれば普通コンクリートの場合においてもコンクリート強度が増大するほど付着強度の比は1に近づき、本試験体のコンクリート強度の場合であれば、36MPaクラスの計算値は1.20、60MPaクラスの計算値は1.12である。本試験体の範囲では、FA骨材を用いた軽量コンクリートでも、上端筋と下端筋の付着割裂強度の比は普通コンクリートと同様であるといえる。

表-4 上端筋と下端筋の付着強度比較

試験体	付着強度 (MPa)		下端筋 / 上端筋
	上端筋	下端筋	
No.1	3.84	4.57	1.19
No.2	2.77	3.45	1.24
No.3	3.51	4.45	1.27
No.4	3.56	4.98	1.40
No.5	4.83	5.43	1.12
No.6	3.96	3.86	0.97
No.7	4.38	5.08	1.16

3.3 付着応力-荷重端すべり量

試験体 No.1, 3, 6, 7 の上端筋における付着応力-荷重端すべり量関係を図-4に示す。なお、隅筋と中筋の付着応力は試験体付着領域外に貼付した歪ゲージの値より算出した。横補強のない試験体では、隅筋と中筋がほぼ同じ挙動のうちに破壊に至っている。一方、横補強のある試験体では、隅筋と中筋が同時に最大付着応力に達していないことがわかる。また、最大付着応力以降は隅筋が中筋よりも大きく付着応力を負担していることが確認できる。

3.4 付着割裂強度計算値との比較

普通コンクリートについて提案されている付着割裂強度算定式である、藤井・森田式³⁾、角・張式²⁾、前田・小谷式⁴⁾による計算値と、付着割裂強度実験値の比較を図-5に示す。全試験体の実験値の計算値に対する比較値の平均は、藤井・森田式で1.13、角・張式で1.14、前田・小谷式で1.08であり、普通コンクリートについて提案されている付着割裂強度算定式を十分適用可能である。



図-3 最終破壊状況

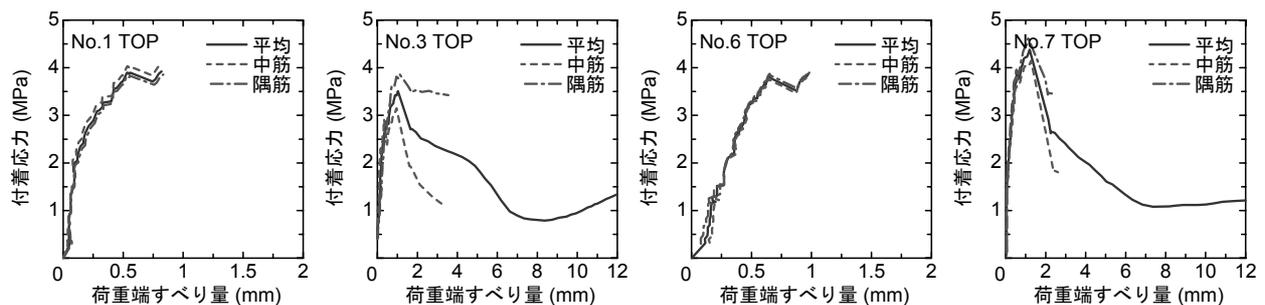


図-4 付着応力-荷重端すべり量関係

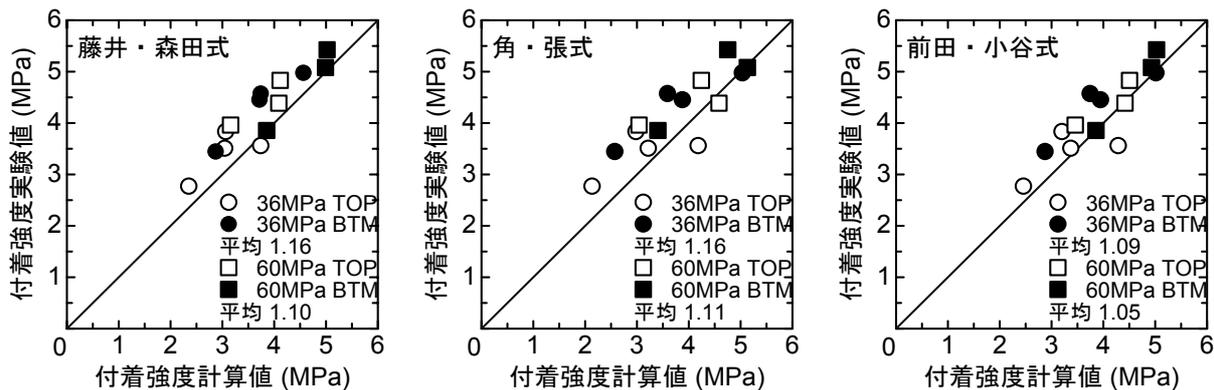


図-5 付着割裂強度の実験値と計算値の比較

4. 局所付着性状

4.1 局所付着応力-すべり量関係

図-1 に示される主筋位置に貼付された隣接する歪ゲージの値から歪測定各区間 (60mm) の局所付着応力および主筋すべり量を算出した。局所付着応力は、隣り合った箇所の歪ゲージの値から主筋引張力の差を算出し、その値をその区間の付着表面積で除した平均付着応力とした。また、主筋すべり量は、コンクリートの変形を無視し、自由端すべり量に自由端から当該区間までの主筋伸び量の和を加えることにより求めた。なお、局所付着区間番号を荷重端側から 1~4 とした。No.2, 4, 5, 7 の上端筋における局所付着応力-すべり量関係を図-6 に示す。

試験体 No.2 および No.5 の図中の破線で示される曲線は、文献 5) による横補強のない場合の局所付着応力-すべり量関係の計算値である。No.5 において、初期勾配から最大応力以降の曲線形状まで実験値と計算値が非常によく対応し

ている。また、No.2 に関してもデータ数が少ないが、初期部分において実験値と計算値の適合性はよい。No.5 の最大応力以降の負勾配では、主筋の沿ったひび割れが、かぶりコンクリートを貫通し、試験体側面および上面まで達して拘束するものがなくなるとともに付着応力の低下を起こした。

一方、横補強のある試験体では、横補強のない場合と異なり最大応力以降の付着応力の低下が緩やかである。これは、横補強筋の拘束効果によるものであると考えられ、割裂ひび割れ発生以降の応力の保持に有効である。また、最大付着応力の以後は、文献 6) に示されるようにすべり量が主筋 D13 の節間隔である 5mm 前後と等しくなったとき (節の位置が 1 個分移動したとき) に付着応力がほぼ 0 になっている。

なお、横補強の有無に関わらず、荷重端近傍では十分に付着応力が発揮されず、早期に付着劣化が起こっていることが確認できる。

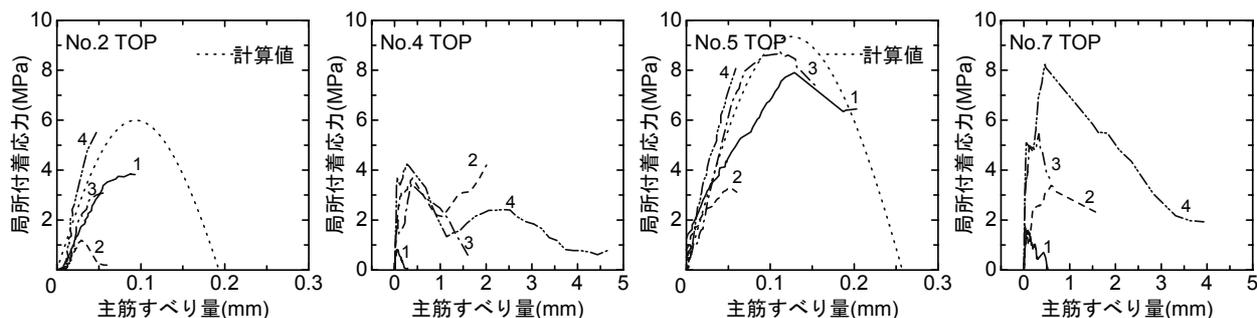


図-6 局所付着応力-すべり量関係

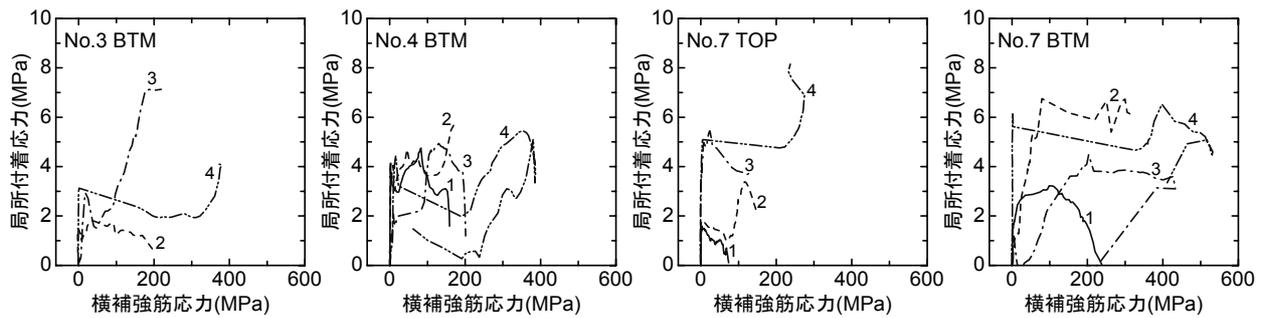


図-7 局所付着応力-横補強筋応力関係

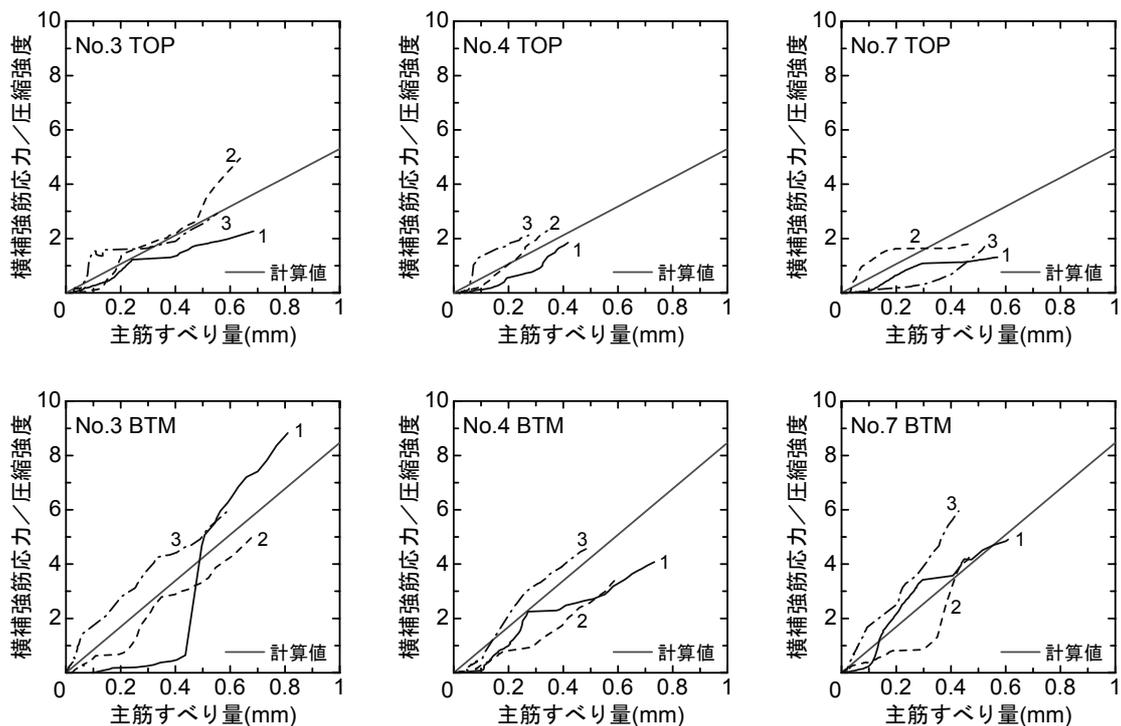


図-8 基準化横補強筋応力-主筋すべり量関係

4.2 局所付着応力-横補強筋応力関係

着目した区間の主筋付着応力とそこに位置する横補強筋における局所付着応力-横補強筋応力関係を図-7に示す。図中の数字は局所付着区間を示し、荷重端側から1~4とした。すべての横補強筋歪は降伏歪に達していないため、横補強筋の応力は、歪ゲージの値に弾性係数を乗じることにより算出した。ある局所付着応力において横補強筋応力が急激に増大しており、その前後で横補強筋の拘束効果が異なることがわかる。付着割裂ひび割れが発生し、主筋すべり量が急増するときに横補強筋の拘束力が働き、主筋のすべりを拘束するものと思われる。また、

コンクリート強度の増大にともない横補強筋応力が急激に変化する局所付着応力も増加する傾向にある。

4.3 横補強筋応力-すべり量関係

横補強筋応力をコンクリート圧縮強度で基準化した基準化横補強筋応力と主筋すべり量の関係を図-8に示す。付着割裂ひび割れが、かぶりコンクリートを貫通して、試験体側面および上面まで至るまでを対象とした。

同図を見ると、上端筋と下端筋で違いが見られるが、横補強筋応力をコンクリート圧縮強度で基準化することで、36MPaクラスの試験体と60MPaクラスの試験体を同様に評価できると

思われる。基準化横補強筋応力と主筋すべり量の関係はほぼ直線で近似できると考えられ、横補強筋の配筋および量に関係なく、一本の直線で表すことができる。

表-5 に基準化横補強筋応力と主筋すべり量の関係を最小二乗法により直線近似した場合の傾きの値を示す。

表-5 基準化横補強筋応力とすべり量の傾き

試験体	傾き (1/mm)	
	上端筋	下端筋
No.3	5.49	8.51
No.4	5.44	7.93
No.7	4.98	8.98

傾きの値は上端筋と下端筋で異なっており、上端筋の傾きの平均値は 5.30、下端筋の傾きの平均値は 8.47 である。下端筋の上端筋に対する傾きの比は 1.60 となり、下端筋が若干大きな値となっている。したがって、横補強筋応力を以下の式で予測することができる。

・上端筋の場合

$$\frac{\sigma_w}{\sigma_B} = 5.30 \cdot s \quad (1)$$

・下端筋の場合

$$\frac{\sigma_w}{\sigma_B} = 8.47 \cdot s \quad (2)$$

ここで、

σ_w : 横補強筋応力 (MPa)

σ_B : コンクリート圧縮強度 (MPa)

s : 主筋すべり量 (mm)

図-8 には、上式による計算値を直線で示した。

5. まとめ

- (1) フライアッシュ高強度人工軽量骨材を用いたコンクリートの付着性状は、普通コンクリートの場合と同様であることが確認された。また、付着割裂強度は普通コンクリートに対する諸算定式により評価可能である。
- (2) 横補強のない場合の局所付着応力とすべり量の関係は、提案されている局所付着応力

すべり量関係と比較的よい対応を示した。

- (3) 局所性状において、横補強筋応力を、コンクリート圧縮強度と主筋すべり量により定める直線により表すことが可能である。

謝辞

本研究は、「高強度人工骨材コンクリート研究会建築構造性能検討委員会」での活動成果をとりまとめたものである。関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 井ノ上 一博, 石川 嘉崇ほか: フライアッシュ高強度人工軽量骨材を用いた RC 部材の構造性能, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2 構造IV, pp.1~12, 2002.8
- 2) 角 徹三, 張 建東, 飯塚信一, 山田 守: 高強度コンクリートレベルをも包含する RC 部材の付着割裂強度算定式の提案, コンクリート工学論文集, Vol.3, No.1, pp.97~108, 1992.1
- 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 1 報 付着割裂破壊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, 第 319 号, pp.47~54, 1982.9
- 4) 小谷俊介, 前田匡樹, 青山博之: 鉄筋コンクリート部材の付着割裂破壊に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C 構造 II, pp.921~924, 1992.8
- 5) 金久保利之, 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 1 : 横補強のない場合の局所付着割裂性状), 日本建築学会構造系論文集, 第 492 号, pp.99~106, 1997.2
- 6) 金久保利之, 酒井貴洋, 米丸啓介, 福山 洋: 横拘束力が補強コンクリートの局所付着割裂性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.3, pp.1201~1206, 2000.6