

論文 高強度フライアッシュ人工骨材を使用した鉄筋コンクリート部材の付着およびひび割れ性状

渡辺浩良*¹・下村 匠*²・滝本邦彦*³・近 信明*⁴

要旨：本文は、フライアッシュを主原料とした高強度フライアッシュ人工骨材を粗骨材として使用したコンクリート部材のひび割れ試験、鉄筋の付着試験を行った結果を報告するものである。ひび割れ試験では、両引き試験とはり試験を行い、かぶりと最大ひび割れ間隔との関係、鉄筋応力度とかぶりとひび割れ幅の関係を求めた。鉄筋の付着試験では、引抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強度試験 (JSCE-G503-1999) と大型供試体を用いた引抜き試験を行い、この骨材を用いたコンクリートと鉄筋の付着挙動を調べた。

キーワード：高強度フライアッシュ人工骨材, ひび割れ間隔, ひび割れ幅, 付着

1. はじめに

近年、石炭火力発電所から発生するフライアッシュを用いた高強度フライアッシュ人工骨材 (以下にHFA骨材と称す) が開発された。この骨材は従来の発泡型と異なり組織を緻密化した造粒型のもので、吸水率が低く、コンクリートの高強度化が可能であるなど利点が多い¹⁾。また、良質な天然骨材の枯渇が懸念されていることと相まって、天然骨材に代わる人工骨材として注目されている。

これまで、この骨材を用いた硬化後のコンクリートの力学的性状について調べた例は少なく、今後の適用に際して課題となっていた。ここでは、この骨材を用いたコンクリート部材を製作し、硬化後のコンクリートのひび割れおよび付着特性に着目して実験を行い、ひび割れ性状と付着性状について明らかにした。また、付着試験は定着長の短い条件における小型供試体を用いた付着試験と、定着長が長い条件における大型供試体を用いた付着試験を行った。

表-1 HFA骨材の物性比較

		HFA 骨材	天然普通骨材
比 重	g/cm ³	1.77	2.83
吸 水 率	%	2.64	0.48
形 状	—	球状	—
表面状態	—	表乾状態	表乾状態

2. ひび割れ試験

2.1 実験概要

HFA骨材を用いた鉄筋コンクリート部材のひび割れ分散性や既往の曲げひび割れ幅算定式への適用性を検討するため両引き試験およびはり試験を行った。

(1) 両引き試験

両引き試験は、断面寸法 80×80~150×150mm、長さ 1000mm および 1500mm のコンクリート部材の中央に鋼材を配置し、その両端を引張ることにより供試体にひび割れを発生させる試験である。供試体は、①コンクリート強度、②鋼材の種類および径、③供試体寸法をパラメータとし 15 体製作した

*1 (株)ピー・エス 本社土木技術部主任研究員 (正会員)

*2 長岡技術科学大学助教授 工学部環境・建設系 博士 (工学) (正会員)

*3 鹿島建設(株) 土木設計本部シールドグループ長

*4 (株)竹中土木 東京本店技術部技術課

(図-1, 表-2)。荷重ステップは 5kN ピッチとし、ひび割れ幅のみが増加し新しいひび割れが生じない定常状態に達するまで荷重した。乾燥収縮の影響をなくするため、供試体は荷重の直前まで湿潤状態とした。摩擦の影響を除去するため、ベアリングを敷き詰めた板の上に供試体を置き荷重した。試験状況を写真

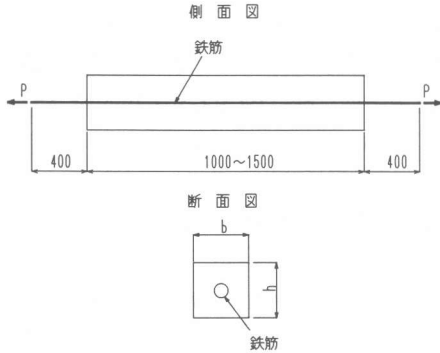


図-1 両引き供試体形状寸法

表-2 両引き供試体の一覧

番号	コンクリート強度 σ_c (N/mm ²)	鉄筋径 ¹⁾ PC鋼材径	断面寸法 b×h (mm)	長さ L (mm)	かぶり t (mm)
1-1	30	D16	80×80	1000	32
1-2		D16	100×100	1000	42
1-3		D16	125×125	1000	55
1-4		D16	150×150	1500	67
1-5	80	D16	125×125	1000	55
2-1	30	D25	80×80	1000	28
2-2		D25	100×100	1000	38
2-3		D25	125×125	1000	50
2-4		D25	150×150	1500	63
2-5	80	D25	150×150	1500	63
3-1	30	1S15.2	80×80	1000	32
3-2	80	1S15.2	125×125	1000	55
3-3	30	1S15.2	125×125	1000	55
4-1	30	1S21.8	100×100	1000	39
4-2		1S21.8	150×150	1500	64

注) 1) D は異形鉄筋, 1S15.2 および 1S21.8 は PC ストランド

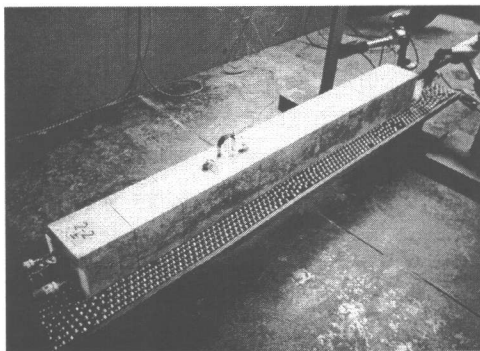


写真-1 両引き試験状況

真-1 に示す。

(2) はり試験

はり供試体形状寸法および一覧をそれぞれ、図-2 および表-3 に示す。供試体は、支間 3m, 断面寸法の高さ 300mm を一定とし、幅をかぶりに合わせて変化させた。引張鉄筋は 1 本のみとし、側面からと底面からの純かぶりが一定となるよう配置した。せん断スパンにはせん断補強鉄筋を配置し、せん断破壊が先行しないよう配慮した。支間中央部にはスリットを設け、ひび割れが発生しやすくした。また、スリット真上の鉄筋にひずみゲージを貼り付けておき、鉄筋の増加応力度とひび割れ幅の関係を調べた。荷重は 2 点集中荷重で、荷重ステップは 10kN~20kN ピッチとし、ひび割れが定常状態になるまで荷重した。乾燥収縮の影響を除去するため、供試体は、荷重の直前まで湿潤状態にしておいた。試験状況を写真-2 に示す。

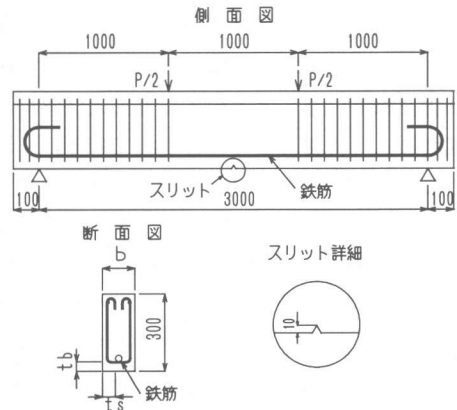


図-2 はり供試体形状寸法

表-3 はり供試体一覧

コンクリート強度 σ_c	はり番号	ウェブ幅 b (mm)	鉄筋	かぶり(mm)	
				側面 t_s	底面 t_b
30N/mm ²	5-1	80	D16	32	32
	5-2	125	D25	50	50
	5-3	150	D25	63	63
80N/mm ²	6-1	80	D16	32	32
	6-2	125	D16	55	55
	6-3	150	D25	63	63

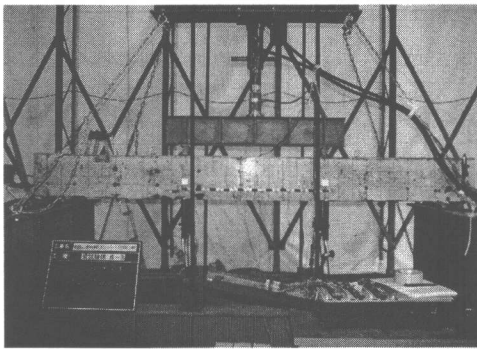


写真-2 はり試験状況

2.2 実験結果

(1) かぶりと最大ひび割れ間隔との関係

両引き試験およびはり試験におけるかぶりと最大ひび割れ間隔との関係を図-3に示す。かぶりと最大ひび割れ間隔との関係はほぼ直線関係であり、その傾きは両引き試験で供試体のコンクリート強度が 30N/mm^2 のものは、異形鉄筋のもので 5.89 程度、PC鋼材のもので 5.28 程度であった。はり試験で供試体のコンクリート強度が 30N/mm^2 のものは 5.60 程度、 80N/mm^2 のものは 4.06 程度であった。コンクリート強度が高くなると付着強度も大きくなるためひび割れ分散性がよくなり最大ひび割れ間隔が小さかった。PC鋼材はより線を使用したため付着性状が良好で、異形鉄筋に比べてもひび割れ分散性がよかった。この傾きは、普通骨材コンクリート（コンクリート強度 35N/mm^2 ）と横ふし型鉄筋を用いた既往の研究²⁾の結果で 5.4 程度あり、本骨材を用いたコンクリート（コンクリート強度 30N/mm^2 ）で異形鉄筋を使用したものの値 5.89 程度（両引き試験）、5.6 程度（はり試験）とほぼ同じとなった。これより普通骨材を使用したコンクリートと本骨材を使用したもののひび割れ分散性は同程度であることがわかった。

(2) 鉄筋応力度とひび割れ幅との関係

図-4および図-5にコンクリート強度が 30N/mm^2 と 80N/mm^2 の供試体のはり試験における鉄筋応力度の増加量とひび割れ幅の関

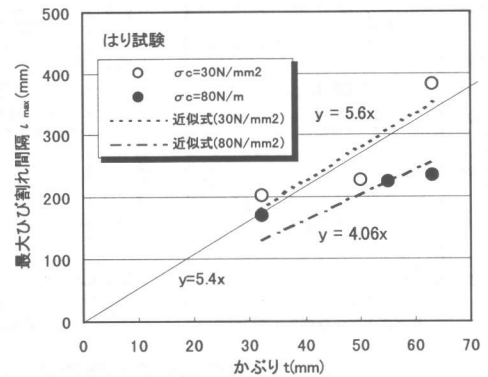
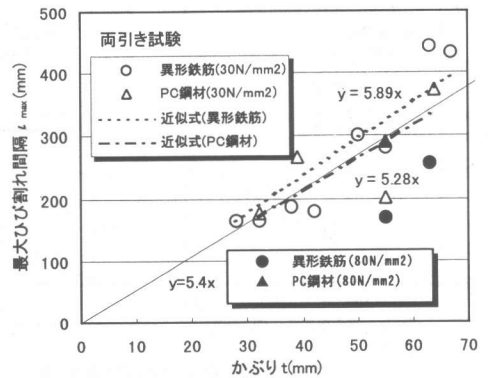


図-3 かぶりと最大ひび割れ間隔との関係

係を示す。設計値は土木学会のひび割れ幅算出式に準じ以下の式により算出した^{2),5)}。

$$w = k \{4t + 0.7(c - \phi)\} \left[\frac{\sigma_s}{E_s} + \varepsilon'cs \right] \quad (1)$$

ここに、

k: 鋼材の付着性状を表す係数 (=1.0)

w: 曲げひび割れ幅(cm)

t: かぶり(cm)

c: 鉄筋間隔(cm)

ϕ : 鉄筋径(cm)

σ_s : 鉄筋応力度の増加量

E_s : ヤング係数

$\varepsilon'cs$: 乾燥収縮によるひずみ

ここで、本試験では乾燥収縮の影響を除去するため載荷直前まで湿潤状態にしておいたため乾燥収縮によるひずみ量を ($\varepsilon'cs=0$) とした。既往の研究²⁾より鉄筋間隔の影響はかぶりの影響に比べて非常に弱く、はり試験で鉄筋が1本の場合 $4t + 0.7(cs - \phi) = 5.4t$

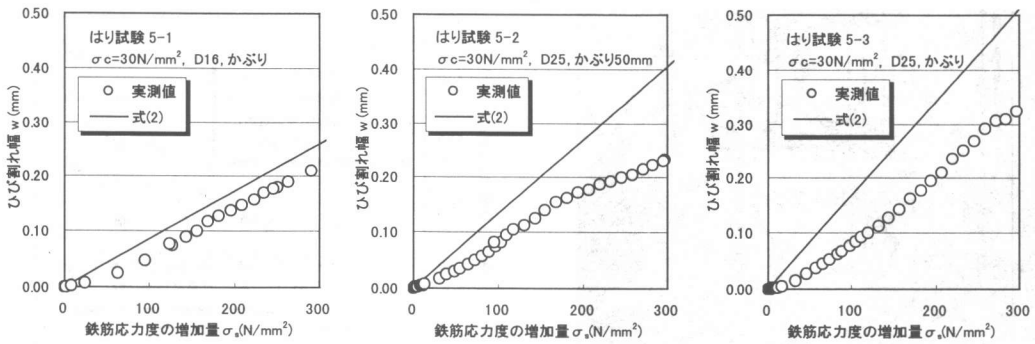


図-4 鉄筋応力度の増加量とひび割れ幅との関係 ($\sigma'_c=30\text{N/mm}^2$)

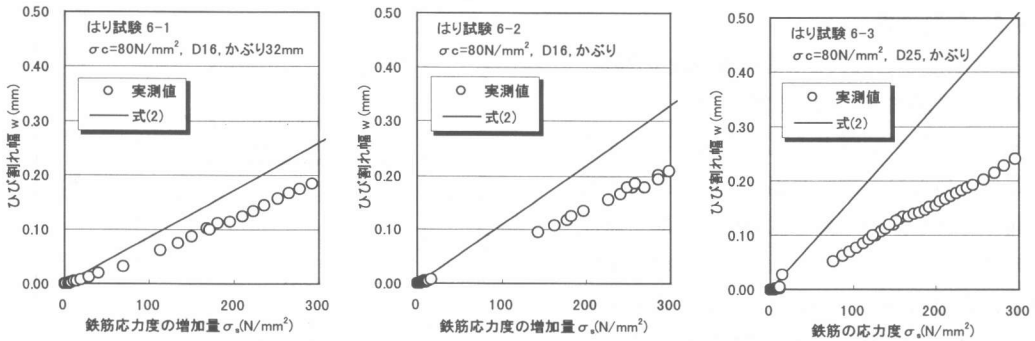


図-5 鉄筋応力度の増加量とひび割れ幅との関係 ($\sigma'_c=80\text{N/mm}^2$)

とすると式(2)が求まる。

$$w = 5.4 t \left[\sigma_s / E_s \right] \quad (2)$$

図-4 および図-5 においてはいずれも鉄筋応力度の増加量に対するひび割れ幅の値が安全側の値となっており、本骨材を用いた鉄筋コンクリート部材のひび割れ幅を求める場合土木学会算定式を適用してもよいことがわかる。

3. 小型供試体を用いた付着試験

3.1 実験概要

HFA骨材、普通骨材（以下NA骨材）および従来の人工軽量骨材（以下LA骨材）を用いたコンクリートと鉄筋の付着強度試験をJSCE-G503の方法で行い比較した。

3.2 実験結果

この試験方法ではコンクリートの割裂破壊が生じやすい場合、図-6 に示すようにいずれの骨材においても最大付着応力度は鉄筋を鉛直に配置した方が水平に配置した場合に比

較して大きい。また水平に配置した場合、HFA骨材コンクリートの最大付着応力度は、NA骨材コンクリートの場合より小さく、LA骨材コンクリートと同程度であると考えられる。なお、コンクリート標準示方書では、LA骨材コンクリートの付着強度はNA骨材コンクリートの場合の70%としてよいと規定されている。

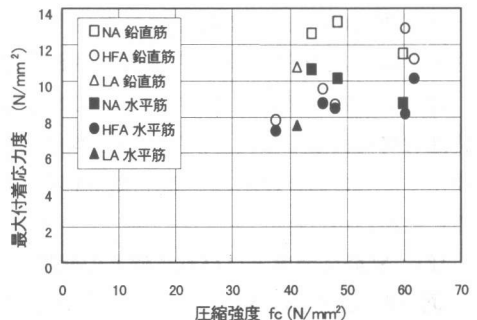


図-6 圧縮強度と最大付着応力度の関係

4. 大型供試体を用いた付着試験

4.1 実験概要

柱とフーチングからなる鉄筋コンクリート構造物のように、鉄筋の周囲がコンクリートで拘束され鉄筋の定着長が長い場合と、定着長の短い場合とでは、付着挙動が異なることが知られている³⁾。ここでは、大型供試体による定着長を長くとした場合の引抜き試験^{3),4)}を行い、NA骨材コンクリートとの付着性状について比較した。

4.2 実験方法および供試体

実験は、写真-3に示すようにセンターホールジャッキにより鉄筋の片側を引き抜くことで行った。

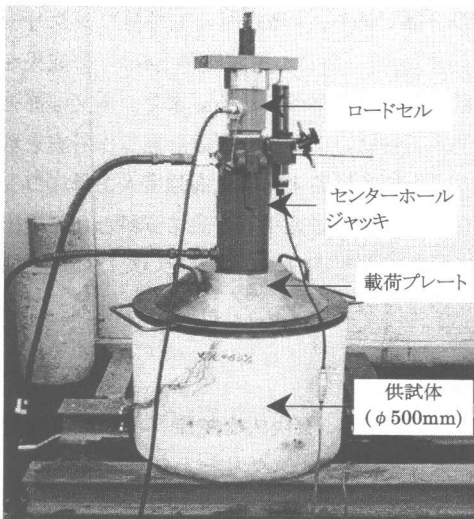


写真-3 実験状況

供試体は表-4に示すように、骨材、コンクリート強度、定着長をパラメータにとった。表-5に実験時の供試体の強度を示す。定着長が20Dにおける供試体概要を図-7に示す。鉄筋の表裏にひずみゲージを貼り、鉄筋のひずみを測定し、自由端に変位計を取り付け、変位量を測定した。また、载荷端より10Dの区間に非定着区間を設けた。

4.3 実験結果

(1) 自由端のすべり性状

表-4 供試体一覧

コンクリート ($\phi 500\text{mm}$)		鉄筋	定着長
骨材	圧縮強度		
HFA 骨材	30 N/mm^2	D19 SD345	10D,20D
	50 N/mm^2		10D,20D
NA 骨材	50 N/mm^2		10D,20D

表-5 供試体強度

骨材	圧縮強度	実験時 圧縮強度 N/mm^2	実験時 割裂強度 N/mm^2
	N/mm^2		
HFA 骨材	30	33.2	3.0
	50	55.1	4.2
NA 骨材	50	49.6	4.2

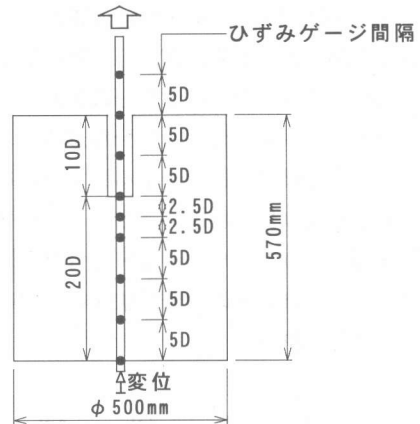


図-7 供試体概要図

荷重と自由端の変位の関係を図-8に示す。図-8より、HFA骨材の定着長が10Dで強度が30,50 N/mm^2 の場合に自由端にすべりが見られたものの、10Dより定着長が長い20Dの供試体の場合、HFA骨材とNA骨材のケース共に、自由端におけるすべりはほとんどなかった。これは定着長が十分長い場合、HFA骨材を用いたコンクリートの付着強度がNA骨材を用いたコンクリートの付着強度より小さくても、付着切れが生じる以前に鉄筋が降伏するため、NA骨材を用いたコンクリートと同様の付着性状を示したと考えられる。

(2) 鉄筋のひずみ分布性状

定着長が20D、コンクリート強度が

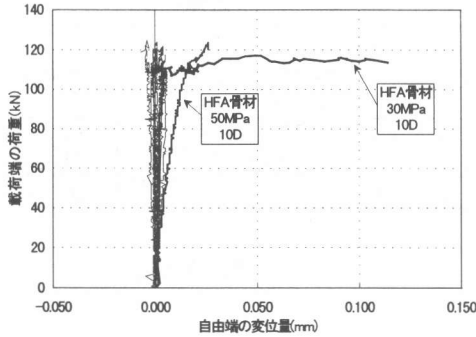


図-8 荷重と自由端変位の関係

50N/mm² の場合における非定着区間の鉄筋ひずみが降伏(約 2000 μ)時の鉄筋のひずみ分布を図-9に示す。図より、定着部上端より20cm(約10D)付近から載荷端方向に向かってひずみが大きくなる分布形状を示している。また骨材の違いによるひずみ分布形状に差はあまり見られないことから、HFA骨材を用いたコンクリートはNA骨材のコンクリートとほぼ同等の付着性状を有しているものと考えられる。

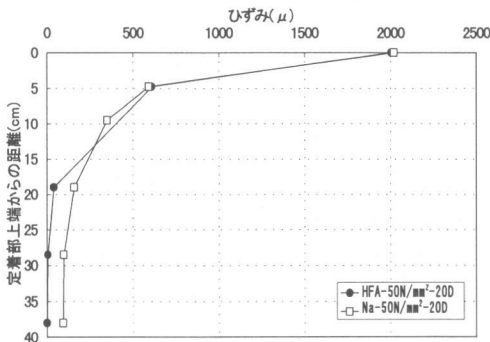


図-9 定着長 20D 時の鉄筋ひずみ分布

5. まとめ

本研究の範囲より以下のことがわかった。

- 1) 本骨材を使用した鉄筋コンクリート部材のかぶりと最大ひび割れ間隔との関係は普通骨材コンクリートの場合と同じくかぶり厚の5.4倍程度に比例し、ひび割れ性状は普通骨材コンクリートのものと同等である。

- 2) ひび割れ幅は、鉄筋応力度の増加量に比例し、土木学会式を用いて算出したひび割れ幅より小さかった。
- 3) 通常の鉄筋付着試験(JSCE-G503)では、本骨材を使用したコンクリートは従来の人工軽量骨材コンクリートと同程度の付着強度を有する。
- 4) 鉄筋の定着長が長く周囲をコンクリートで拘束された場合、本骨材を使用したコンクリートの付着性状は普通骨材コンクリートのものと同等であった。

謝辞

本研究は、(財)石炭利用総合センターの補助事業(被補助者:太平洋セメント(株))の一部であり、「高強度人工骨材コンクリート研究会」(会長:電源開発(株))の成果を取りまとめたものである。また、本文は高強度人工骨材コンクリート設計施工指針案を取りまとめている土木学会高強度人工骨材コンクリート調査研究小委員会に資料として提出された一部であり、ご助言をいただいた皆様に謝意を表します。

参考文献

- 1) 曾根徳明: 石炭灰を主原料とした高強度人工骨材, コンクリート工学, Vol.36, No.12, 1998.12
- 2) 角田与史雄: 鉄筋コンクリートの最大ひび割れ幅, コンクリート・ジャーナル Vol.8, No.9, pp.1~10, 1970.9
- 3) 山尾芳秀, 周礼良, 二羽淳一郎: 付着応力-すべり量に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第343号, pp.219~228, 1984.3
- 4) 横田弘, ほか: 高性能軽量コンクリート港湾構造物への適用に関する基礎的研究, 港湾技研資料, No.967, pp.24~26, 2000.9
- 5) 土木学会: コンクリート標準示方書設計編, 平成8年版, 1996