

論文 高強度フライアッシュ人工骨材を用いたコンクリートの引張軟化特性

渡辺 聡*¹・小坂 陽一郎*²・内田 裕市*³・森本 博昭*⁴

要旨: 高強度フライアッシュ人工骨材を使用したコンクリートを対象として、破壊エネルギー、引張軟化曲線といった引張軟化特性に及ぼす水セメント比、供試体寸法、砕石との混合使用の影響および鋼繊維混入の効果について検討した。その結果、水セメント比が破壊エネルギーに及ぼす影響はほとんどみられなかった。また、破壊エネルギーに寸法効果があること、砕石の混合率に比例して破壊エネルギーが増加することなどが明らかとなった。

キーワード: 高強度フライアッシュ人工骨材, 破壊エネルギー, 引張軟化曲線

1. はじめに

最近、石炭火力発電所から発生するフライアッシュの有効利用の一つとして、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（以下、HFA と記す）が開発された。この骨材は、フライアッシュを造粒・焼成した非発泡型の粗骨材であり、球状粒、軽量（絶乾比重 1.8 程度）、高強度（天然骨材と同等）などの特徴を有している。この種の骨材を用いたコンクリートの物性については、すでに幾つか報告されているが[1]、今回特に破壊エネルギー、引張軟化曲線といった引張軟化特性に及ぼす水セメント比の影響、供試体寸法の影響、砕石と混合使用した場合の影響および鋼繊維混入効果について実験を行ったのでその結果を報告する。

2 実験概要

2.1 コンクリート

水セメント比の影響に関する実験では、水セメント比を 30.0 [供試体名: Th], 48.7 [Tm], 63.4% [Tl] の 3 種類に変化させた。

供試体寸法の影響に関する実験では、供試体

寸法が 100×100×400 (スパン 300) mm [T10] と、断面高さと同スパンを 2 倍とした 100×200×700 (スパン 600) mm [T20] の 2 種類の供試体を作製した。また、比較のために砕石を使用した場合の寸法効果についても検討するため、T10, T20 と同寸法の供試体 (G10, G20) を作製した。

砕石と混合した場合の影響に関する実験では、HFA と砕石の混合比を体積で 7:3 [T7G3], 5:5 [T5G5], 3:7 [T3G7] とした場合のコンクリートを対象とした。

鋼繊維混入効果については鋼繊維混入率を 0.8% としたコンクリート [Tf] を用いた。なお、繊維の混入率は、ベースコンクリートに対してワーカビリティに著しい影響を与えない範囲で最大になるものとして選定した。

切欠き曲げ供試体の寸法は、100×100×400 (スパン 300) mm を基本とした。切欠き曲げ供試体は 1 条件につき 5 体作製し、載荷試験の 1 週間前に供試体中央にはり高さの 1/2 の切欠き (幅 3.5 mm) をコンクリートカッターにより設けた。各シリーズの配合を表-1 に示す。表-2 に粗骨材として使用した HFA の性質を示す。混

* 1 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

* 2 岐阜大学 工学部土木工学科

* 3 岐阜大学助教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)

* 4 岐阜大学教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)

表-1 配合

シリーズ名	混合比	W/C (%)	s/a (%)	繊維混入率 (%)	単位量 (kg/m ³)						
					W	C	S	Gt	Gs	F	Ad
Tl	10 : 0	63.4	45.9	—	161	254	788	669	—	—	2.54
Tm	10 : 0	48.7	43.3	—	168	345	700	660	—	—	3.45
Th	10 : 0	30.0	43.3	—	164	581	639	652	—	—	9.88
T10, T20	10 : 0	48.7	43.3	—	174	357	728	687	0	—	3.57
T7G3	7 : 3	48.7	43.3	—	171	351	738	488	296	—	3.51
T5G5	5 : 5	48.7	43.3	—	172	353	744	351	497	—	3.53
T3G7	3 : 7	48.7	43.3	—	174	357	752	213	703	—	3.57
G10, G20	0 : 10	48.7	43.3	—	169	347	762	0	1018	—	3.47
Tf	10 : 0	48.7	43.3	0.82	176	361	729	688	—	64	3.61

Gt : 高強度フライアッシュ人工骨材, Gs : 砕石

表-2 高強度フライアッシュ人工骨材の性質

最大寸法 (mm)	表乾質量 (g/cm ³)	吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/l)
15	1.83	3.52	1.11

練は、強制パン型ミキサー[容量 0.1m³]により行った。HAF は、打設する 1 週間程前から実験室内に放置しておき空气中乾燥状態とした。打設後 1~2 日間で脱型し、その後載荷試験直前まで水中養生をした。表-3 にフレッシュコンクリートと試験時材齢における硬化コンクリートの諸試験値を示す。なお、弾性係数は圧縮強度試験時にコンプレッソメータを用いて求めた。

2.2 破壊エネルギー試験

破壊エネルギー試験は JCI 破壊特性委員会が

提案する標準試験法(案) [2]に準じて行うこととし、切欠きはりの 3 点曲げ試験により行った。図-1 に載荷試験の概略図を示す。載荷スパンははり高さの 3 倍 (300 mm) とし、水平方向の拘束を取り除くために両支点ともローラー支持とした。計測項目は、荷重および切欠きの肩口開口変位 (CMOD) の 2 項目とした。荷重は、容量 10kN のロードセルをジャッキに取付けて計測し、CMOD の検出には容量 5 mm のクリップゲージ (感度 1/2600 mm) を用いた。ただし、繊維補強コンクリート場合、大変形時の CMOD がクリップゲージでは計測できないので、大変形領域では載荷点変位 (LPD) を計測することによって、 $CMOD = (4/3)LPD$ として CMOD を近似することに

表-3 コンクリートの特性

シリーズ名	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/m ³)	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
Tl	2.8	8.0	2080	40.0	3.34	26.3
Tm	14.1	8.2	2060	53.8	3.81	28.6
Th	565*	3.2	2150	92.6	5.94	33.0
T10, T20	6.4	5.0	2050	58.9	4.07	31.9
T7G3	7.0	4.6	2111	62.5	4.28	31.4
T5G5	6.0	3.8	2220	58.4	3.86	31.2
T3G7	8.1	2.8	2273	60.1	4.03	32.4
G10, G20	4.9	2.7	2380	58.4	4.14	35.2
Tf	6.0	3.8	2132	56.7	4.33	32.6

* : スランプフロー値 (mm)

した。なお、荷重点変位の検出にはストローク 25mm の高感度変位計 (感度 1/500 mm) を用いて供試体中央下面 2 点で計測を行い、その平均値をとった。

荷重は、荷重-CMOD 関係を X-Y レコーダに記録しながら原則として単調荷重で行い、最大荷重点以降急激に破壊が進行する場合には、適時除荷・再荷重の操作を繰り返した。

破壊エネルギーは試験で得られた荷重-CMOD 曲線を荷重-荷重点変位に変換して、JCI 破壊特性が提案する標準試験法 (案) に準じて算定した。また、引張軟化曲線は試験で得られた荷重-CMOD 曲線から多直線近似解析法 [3] により求めた。

3. 実験および考察

3.1 水セメント比の影響

図-2 に切欠きよりの 3 点曲げ試験で計測された 5 体の供試体の荷重-CMOD 曲線の平均曲線を示す。T_m および T_l はほぼ同じ形状の荷重-CMOD 関係になった。一方、水セメント比が最も小さい Th は、T_m および T_l より最終破断時の CMOD が 3 割程度小さくなった。図-3 に荷重-CMOD 関係から求めた破壊エネルギーを示す。水セメント比の違いによる破壊エネルギーの差は

ほとんどみられなかった。図-4 に荷重-CMOD 曲線から多直線近似解析法により推定された引張軟化曲線を示す。T_m および T_l の引張軟化曲線は軟化開始点応力からほぼ同じとなり、顕著な差はみられなかった。一方、Th では軟化開始点応力が T_m および T_l に比べ非常に大きく、引張軟化曲線の全体的な形状はほぼ一直線となっ

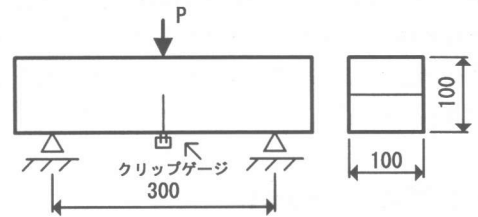


図-1 荷重試験の概略図

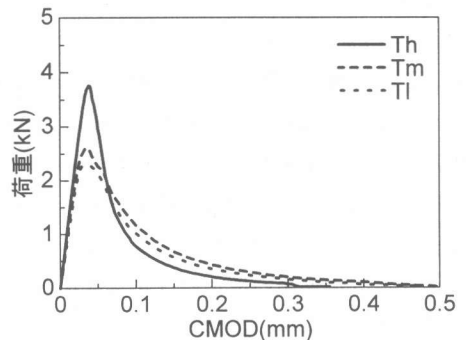


図-2 荷重-CMOD 曲線 (T_l, T_m, Th)

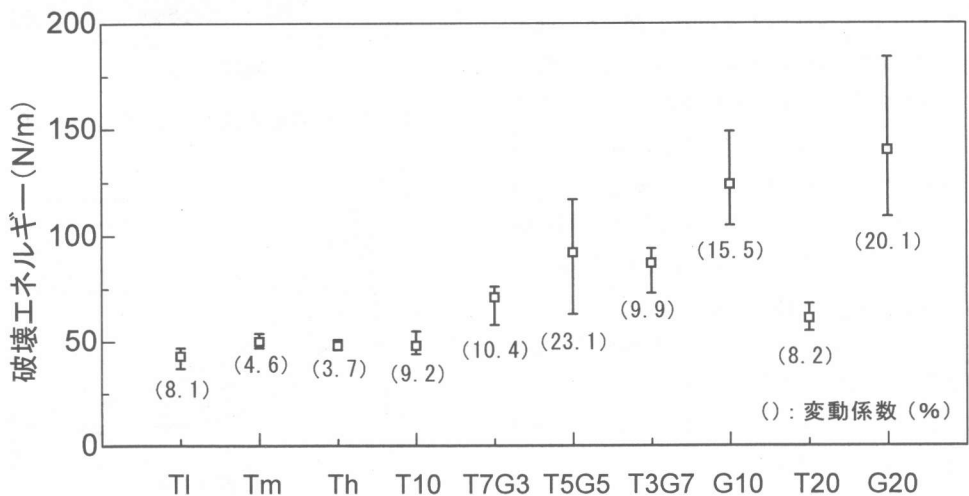


図-3 破壊エネルギー

た。なお、供試体の破断面を観察したところ、Th ではひび割れが人工骨材を貫通して破断面が非常に平滑になっていたが、Tm および Tl は骨材の界面に沿って破断していた。これは、Th の場合、モルタルマトリックスの強度およびモルタルマトリックスと粗骨材との付着強度が高いため、ひび割れが粗骨材を貫通し、最終破断面が Tm, Tl に比べ非常に平滑になり、供試体の損傷領域（フラクチャプロセスゾーン）が最終破断面のごく近傍のみで生じているためと推測されている。

3.2 供試体寸法の影響

図-5 に切欠きはりの 3 点曲げ試験で計測された荷重-CMOD 曲線の平均曲線を示す。荷重-CMOD 曲線の初期勾配は T シリーズの方が G シリーズより 15% 程度小さくなった。

図-3 に荷重-CMOD 関係から求めた破壊エネルギーを示す。T10 の破壊エネルギーは T20 の 80% 程度で、G10 の破壊エネルギーは G20 の 90% 弱であり、両シリーズとも供試体寸法が大きいほど破壊エネルギーが大きくなることがわかった。また、寸法効果の度合いは砕石より HFA の方が若干大きくなった。また、同一の供試体寸法どおしを比較してみると、HFA を用いたコンクリートの破壊エネルギーはいずれも砕石を用いた場合の 40%~50% であった。図-6 に図-5 に示した荷重-CMOD 曲線から多直線近似解析法により推定された引張軟化曲線を示す。引張軟化曲線の形状を比較してみると、両シリーズとも供試体寸法の違いによる引張軟化曲線の顕著な違いはみられず、同図に示したひび割れ幅の範囲では破壊エネルギー（引張曲線下の面積）もほとんど差はみられなかった。また、T シリーズと G シリーズを比較すると、同一ひび割れ幅に対応する応力は軟化開始直後から、T シリーズは G シリーズに比べ応力低下が大きく、0.005 mm 以降では約 1/2 程度となった。

3.3 砕石との混合使用の影響

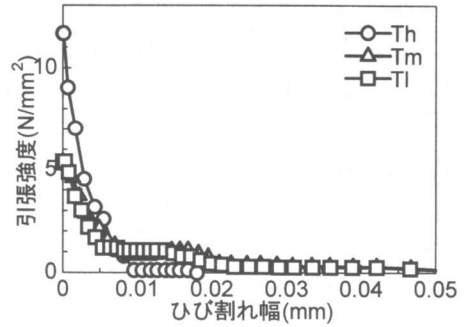


図-4 引張軟化曲線 (Tl, Tm, Th)

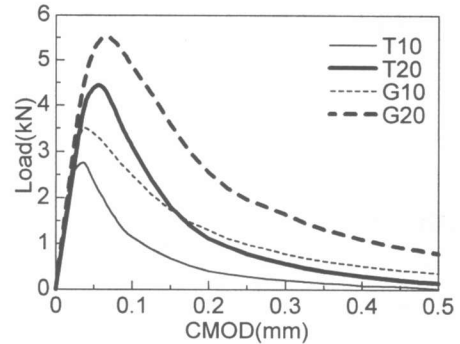


図-5 荷重-CMOD 曲線 (T, G シリーズ)

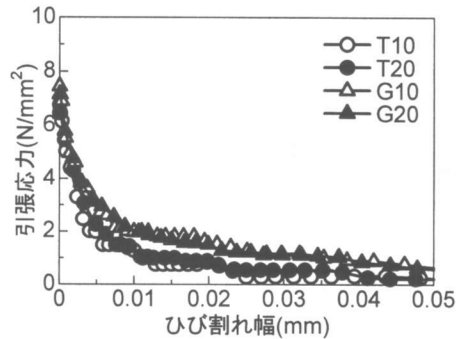


図-6 引張軟化曲線 (T, G シリーズ)

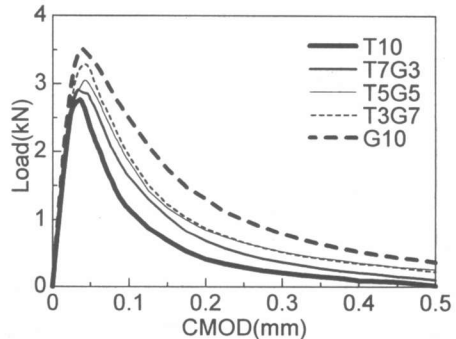


図-7 荷重-CMOD 曲線 (混合)

図-7に切欠きよりの3点曲げ試験で計測された荷重-CMOD曲線の平均曲線を示す。碎石の混合の割合が大きいほど同一のCMODに対する荷重が大きくなった。しかし、荷重-CMOD曲線の概形は混合比を7:3から3:7へ変化させても顕著な差はみられなかった。一方、図-8に示すように碎石の体積混合率($G_s/(G_s+G_t)$)と破壊エネルギーの関係は、ほぼ直線関係であることがわかった。図-9に荷重-CMOD曲線から多直線近似解析法により推定された引張軟化曲線を示す。引張軟化曲線の概形を比較してみると、混合比の影響はほとんどみられなかった。しかしながら、軟化開始直後からは碎石の割合が大きいほど応力低下が緩やかになる傾向がみられ、これは荷重-CMOD曲線において碎石の混合割合が大きいほど荷重が高くなる現象に対応したものである。

3.4 鋼繊維混入効果の影響

図-10に鋼繊維を混入した切欠きよりの3点曲げ試験で計測された荷重-CMOD曲線の平均曲線を示す。

図-11に荷重-CMOD曲線から多直線近似解析法により推定された引張軟化曲線を示す。多直線近似解析法ではひび割れ幅で1.5mm程度までしか推定することができなかった。そのため、大変形時までの引張軟化曲線の概形を求めるのに有効である修正J積分法[4]によっても解析を行った。ただし、修正J積分法ではCTOD(切欠き先端開口変位)を計測する必要があるが、ここでは、 $CTOD=CMOD/2$ として近似した。修正J積分法によって求めた引張軟化曲線を図-11に併記した。今回の実験ではCTODの計測を行っていないこと、ならびに載荷初期の載荷点たわみを精度よく計測できでいなかったため、修正J積分法ではひび割れ幅が0.01mm以下の領域の引張軟化曲線は求められなかった。Tfの引張軟化曲線は軟化開始点応力後ひび割れ幅が0.005mm程度まで、ひび割れ幅の増大に伴い応力は急激に低下するが、その後鋼繊維の補強効果が現

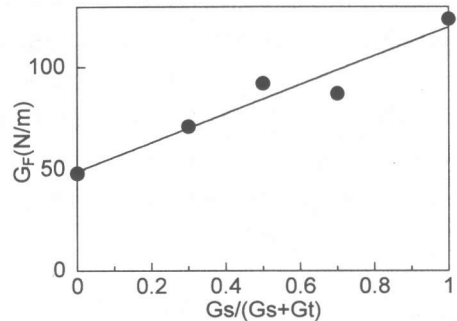


図-8 碎石の混合率と G_f の関係

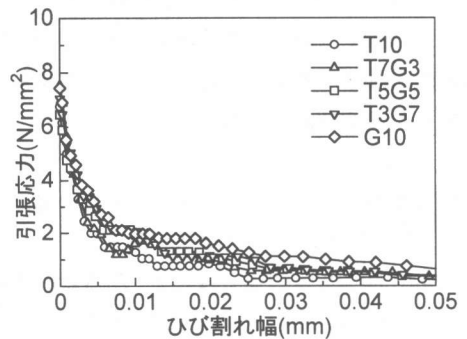
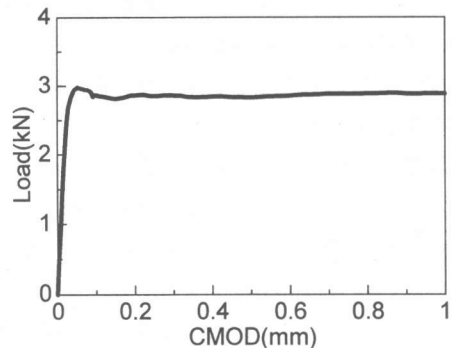
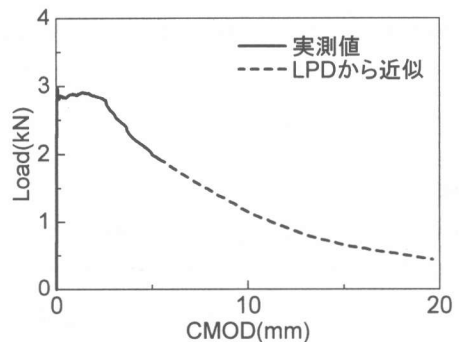


図-9 引張軟化曲線(混合)



(i) 初期



(ii) 全体

図-10 荷重-CMOD曲線(Tf)

れ応力の低下は非常に小さくなり、ひび割れ幅で8 mm程度まで応力伝達がなされるという結果が得られた。なお、軟化開始直後の応力低下の度合いは繊維を混入していないもの(T10, T20)とほぼ同じであり、マトリックスにひび割れが発生した後に繊維による架橋効果が現れることを示しているものと考えられる。

4. まとめ

高強度フライアッシュ人工骨材を用いたコンクリートを対象として破壊エネルギーおよび引張軟化曲線に及ぼす各種要因について実験的検討し、以下の結果を得た。

(1) 破壊エネルギーは、水セメント比の違いによらずほぼ同程度の値となり、砕石コンクリートの40~50%程度の値となった。引張軟化曲線については、水セメント比が30%の場合にはその形状がほぼ一直線となった。

(2) 砕石コンクリートと同様、破壊エネルギーに寸法効果があることがわかった。

(3) 砕石と混合した場合、砕石の混合比にほぼ比例して破壊エネルギーが大きくなった。引張軟化曲線の概形は、混合比の影響はほとんどみられなかった。しかしながら、砕石の割合が大きいほど軟化開始後の応力低下が緩やかになった。

(4) 鋼繊維を混入した場合の引張軟化曲線は、ひび割れ発生直後は無混入ものと同様の挙動を示すが、ひび割れ幅が0.005 mmに達すると鋼繊維の補強効果が現れ応力の低下は小さくなり、ひび割れ幅で8 mm程度まで応力伝達がなされることがわかった。

[謝辞]

HFA は(株)日本ピーエスより提供していただいた。また、本研究に対して土木学会コンクリート委員会「高強度人工骨材コンクリート調査研究小委員会」より援助を受けた。ここに記して感謝の意を表します。

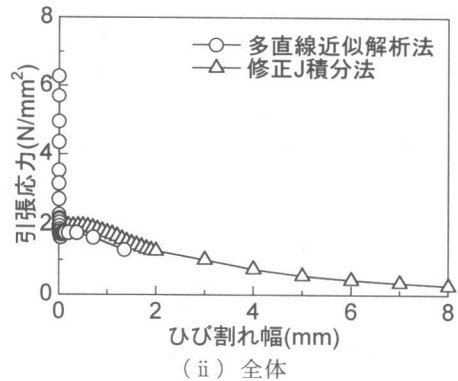
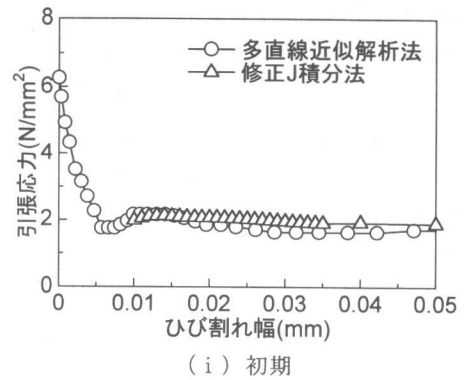


図-11 引張軟化曲線 (Tf)

[参考文献]

- [1] 例えば、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，pp.3-10，1998。
- [2] 日本コンクリート工学協会コンクリートの破壊特性の試験方法に関する調査研究委員会：コンクリートの破壊特性に関する試験方法の標準化のための共通試験，
(<http://c-pc8.civil.musashi-tech.ac.jp/teacher/jci-fm/index.html>)
- [3] 土木学会コンクリート委員会寸法効果小委員会：コンクリートの寸法効果と引張軟化曲線，コンクリート技術シリーズ，土木学会，p.92，1997。
- [4] 内田裕市・六郷恵哲・小柳治：曲げ試験に基づく引張軟化曲線の推定と計測，土木学会論文集，No.426，V-14，pp.203~212，1991.2