論文 多機能人工骨材を用いた RC 梁の構造性能に関する実験的研究

石飛 直樹*1 平野 直人*2 中野 克彦*3 松崎 育弘*4

要旨:火力発電所から排出される産業廃棄物の石炭灰は,地球環境の保護の観点から再生 資源として有効利用することが望まれている。一方,建築業界においては,天然骨材の使 用による資源の枯渇や採取に伴う環境破壊が問題となっている。これらを受け,「石炭灰を 主原料とする多機能人工骨材」を開発している。本稿では,構造用コンクリートへの適用 を可能とするため,多機能人工骨材を用いたコンクリート(以下 JL)梁部材の実験を行い, 構造性能を把握した。また,普通コンクリート(以下 RC)梁部材の実験結果と比較するこ とで RC と同等の靭性能が得られ,従来用いられている評価方法が適用できることを示した。 キーワード:石炭灰,せん断余裕度,付着余裕度,靭性能,限界変形角

1. はじめに

現在,排出される石炭灰のうち約60%はセメ ント等に有効利用されているが,残りは未使用 のまま産業廃棄物として埋め立て処分されて いる。石炭資源は埋蔵量が豊富で、供給安定 性・経済性に優れることから,原子力に次ぐ長 期安定型の発電エネルギー源として位置づけ られている。このため,今後も石炭火力発電所 は増大し,石炭火力発電所から副産する石炭灰 の排出量も増大していくことが確実視される。 これに対し,地球環境保全の観点からこれら産 業廃棄物の積極的な利用が責務になると考え られる。一方,建設業界では,コンクリート天 然骨材の採取に伴う環境破壊が指摘され,天然 骨材に変わる新たな骨材の開発が望まれる。こ のような現状を受け,開発されたのが「石炭灰 を主原料とする多機能人工骨材」である。

本稿ではこの多機能人工骨材を用いた JL 梁 部材の曲げ・せん断実験を行い,構造性能を把 握する。また,既往の実験¹⁾と比較することで 普通コンクリートに用いられているせん断耐 力,付着割裂耐力及び靭性能の評価方法の適応 性を検討することで,構造部材として実用化す

ることを目的としている。

2. 実験概要

2.1 多機能人工骨材の材料特性

使用する骨材は,石炭灰の粗粉と頁岩微粉末 を主原料として造粒・焼成し,粗骨材にのみ使 用した。また,天然骨材(表乾比重 2.58)に 比べ軽量(表乾比重 1.58),頁岩系人工軽量骨 材の2倍の強度(圧縮荷重 1100N 程度)を有し Fc=60(N/mm²)級の高強度コンクリートの製造 が可能,骨材の高吸水性(吸水率 15~16%)に よる保有水を利用した自己湿潤養生(セルフキ ュアリング)効果などの特徴を有している。

2.2 コンクリートの材料特性

表 - 1 にコンクリートの配合及びフレッシュ コンクリートの性質,表 - 2 にコンクリートの 材料試験結果一覧を示す。単位容積重量() は JL の場合,18.1~19.1(kN/m³)と RC の場合 (22.4~22.9)に比べ2割程度小さく,コンクリ ートの軽量化が可能である。図 - 1 に引張割裂 強度(t)と圧縮強度(B)との関係を示す。JL のtとBの関係は,t=0.45 Bとなった。 また,RCと比較するとFc=24(N/mm²)では RC と ほぼ同等となるが,Fc=60(N/mm²)になると骨材 の強度が天然骨材に比べ小さいため高強度に するほど Bに対する,の値が小さくなる

				• = (···
* 1	東京理科大学大学院	工学研究科建築学専」	攻 (正会員)	
* 2	東京理科大学大学院	工学研究科建築学専コ	 	
* 3	東京理科大学助手	工学部建築学科 工学	学(博士)(正会員)	
* 4	東京理科大学教授	工学部建築学科 工	尊 (正会員)	

									1 1		
設計基	水セメ	細骨		単	值位量(kg/m	າ ³)		骨材の	コンクリ	フランプ	穴气景
準強度	ント比	材率	74	オンント	细母共	当日++	ディング	最大径	ート温度	~///	エメリ里
(N/mm^2)	(%)	(%)	小	ビハノト	和月忉	租目的	顺小门	(mm)	()	(cm)	(%)
24	61.0	47.5	175	287	832	567	2.87	10	28.0	18.0	3.7
42	44.0	44.5	178	405	732	562	4.86	10	28.0	15.0	3.8
60	33.0	48.0	170	515	783	523	7 21	10	30.0	20.0	34

表 - 1 コンクリートの配合及びフレッシュコンクリートの性質

傾向がみられる。図 - 2 に RC と JL の圧縮強度 () - 歪み度()関係を示す。JL の材料特性 として,ヤング係数は RC に比べ小さく,高強 度のものでは - 関係は比例的な関係とな っている。図 - 3 にヤング係数と圧縮強度との 関係を示す。同一圧縮強度で比較すると,JL のヤング係数は RC に比べ 3 割程度低い。RC 規 準式²⁾との対応では,RC は実験値が計算値の 1.17~1.37 であるのに対し,JL では 1.11~ 1.36 となり,ほぼ同様の対応関係が見られる。

2.3 試験体

表-3に鉄筋の材料試験結果一覧を示す。降 伏点は上降伏点とし,降伏点の明確でないもの については0.2%オフセット法により降伏強度 を求めた。また,表-4に試験体一覧及び計算 結果一覧を,図-4 に試験体形状及び配筋図, 図-5に試験体断面図を示す。試験体は実大の 1/3 スケールとし,断面 b×D=210×360(mm), せん断スパン比 a/D=2.0(a=720mm)とした。主 筋の配筋は,二段配筋試験体(BS-Type)9体, 一段配筋試験体(BB-Type)9体の総計18体を計 画した。変動要因は,コンクリート強度 Fc=24,42,60(N/mm²)の3水準,せん断補強筋比 pw=0.41,0.68,1.22(%)の3水準とし,これらの 要因を組み合わせることによりせん断余裕度 (Qsu/Qmu曲げ耐力に対するせん断耐力の比)お よび付着余裕度(Qbu/Qmu 曲げ耐力に対する付 着割裂強度より算出した付着耐力の比)を変化



表-3 鉄筋材料試験結果一覧

試験体	使用维密	降伏点強度	ヤング係数	引張強度
Туре	使用欽舠	(N/mm ²)	$\times 10^{5} (N/mm^{2})$	(N/mm^2)
BS(士쫎)	D16(SD390)	464	2.12	602
15(王舠)	D16(SD490)	480	1.95	737
PD(十谾)	D19(SD490)	512	1.76	586
四(土肋)	D19(SHD685)	768	1.91	941
サム版述法院	D6(SD390)	395	1.73	605
已70的111313月初	D6(UB785)	849	1.85	883



	試験体名	<u>איי</u> ר,	十次		せん断補強筋 4-D6		計算値			せん断	付着						
No.		1790-F	土肋				曲げ耐力 ¹⁾	せん断耐力 ²⁾	付着割裂耐力3)	余裕度	余裕度						
		Fc(N/mm ²)	材質	配筋	Pt(%)	材質	配筋	pw(%)	cQmu(kN)	cQsu(kN)	cQbu(kN)	cQsu/cQmu	cQbu/cQmu				
1	JLB-N-BS-41-24		SD390	SD390	SD390	8-D16			4-D6 @150	0.41	275	90	265	0.33	0.97		
2	JLB-N-BS-68-24	24					2.55	SD390	4-D6 @90	0.68	275	132	299	0.48	1.09		
3	JLB-N-BS-122-24						4-D6 @50	1.22	275	238	366	0.87	1.33				
4	JLB-H-BS-41-42						4-D6 @150	0.41	284	170	315	0.60	1.11				
5	JLB-H-BS-68-42	42			8	8-D16	6 2.55	UB785	4-D6 @90	0.68	284	284	355	1.00	1.25		
6	JLB-H-BS-122-42		SD/00				4-D6 @50	1.22	284	327	435	1.15	1.53				
7	JLB-H-BS-41-60		30490	30430				4-D6 @150	0.41	284	170	375	0.60	1.32			
8	JLB-H-BS-68-60	60		8-D16 2.55	2.55	2.55 UB785	4-D6 @90	0.68	284	284	423	1.00	1.49				
9	JLB-H-BS-122-60											4-D6 @50	1.22	284	392	518	1.38
10	JLB-N-BB-41-24		4-D			.71 SD390	4-D6 @150	0.41	235	106	160	0.45	0.68				
11	JLB-N-BB-68-24	24		4-D19	1.71		4-D6 @90	0.68	235	157	180	0.67	0.76				
12	JLB-N-BB-122-24		SD100				4-D6 @50	1.22	235	283	220	1.20	0.94				
13	JLB-H-BB-41-42		30490				4-D6 @150	0.41	235	203	190	0.86	0.81				
14	JLB-H-BB-68-42	42		4-D19	9 1.71	UB785	4-D6 @90	0.68	235	338	213	1.44	0.91				
15	JLB-H-BB-122-42						4-D6 @50	1.22	235	390	261	1.66	1.11				
16	JLB-H-BB-41-60		SHD685 4				4-D6 @150	0.41	353	203	226	0.58	0.64				
17	JLB-H-BB-68-60	60		4-D19	1.71	UB785	4-D6 @90	0.68	353	338	254	0.96	0.72				
18	JLB-H-BB-122-60							4-D6 @50	1.22	353	467	311	1.33	0.88			

表 - 4 試験体一覧及び計算結果一覧

1)RC 略算式 2)終局強度型耐震設計指針 A 法非靭性式 3)終局強度型耐震設計指針による付着割裂強度より算出したせん断力

させた。せん断耐力及び付着割裂強度より算出 した付着割裂耐力は終局強度型耐震設計指針 A 法の非靭性式³⁾,曲げ耐力を RC 規準曲げ略算 式²⁾より求めた。主筋は No.1~3でD16(SD390), No.4~9 で D16(SD490)の二段配筋, No.10~12 でD19(SD490), No.13~18 でD19(SHD685)の一 段配筋とした。せん断補強筋は全て溶接閉鎖型 とし,Fc=24(N/mm²)で4-D6(SD390),Fc=42,60 (N/mm²)で4-D6(UB785)を使用した。

2.4 加力方法

加力装置は図 - 6 に示す大野式逆対称モーメ ント形式の正負交番繰り返し載荷とした。加力 の制御は変位制御とし,加力サイクルは表 - 5 に示す通りとした。



- 3. 実験結果
- 3.1 破壊性状

表 - 6 に実験結果一覧,図 - 7,図 - 8 に破壊 状況の一例として R=1/25(rad.)時における BS-Type,BB-Type の破壊状況写真をそれぞれ 示す。BS-Type では, Fc=24(N/mm²)の普通強度 コンクリートを用いた試験体のうち No.1,2 は 引張主筋上に小さな斜めひび割れ(付着ひび割 れ)が生じ,繰り返し載荷によって主筋沿いに 付着割裂ひび割れが進展した。最後にひび割れ 幅が拡大し,被りコンクリートが剥離して付着 割裂破壊に至った。No.3 では,部材の曲げ降 伏後,梁端より 1.0D 付近に生じたせん断ひび 割れが主筋沿いの付着ひび割れへと進展し,被 リコンクリートが剥離して曲げ降伏後付着割 裂破壊に至った。Fc=42(N/mm²)の試験体のうち No.4 は-4 サイクル最大耐力時に上端二段筋沿 いのひび割れが進展し,付着割裂破壊に至った が, No.5,6 では, ひび割れが分散し, 梁端よ リ 1.0D のせん断ひび割れのひび割れ幅が拡大 し,曲げ降伏後のせん断破壊に至った。また,



試験体 No.8 (破壊モード:FS) 図 - 7 破壊状況(BS-Type)

		υ	び割れ発生荷	Í	或状态分支	最大		
No.	試験体名	曲げ	せん断	付着	中八中四	最大耐力	限界変形角	破壊形式 [*]
		eQmc(kN)	eQsc(kN)	eQbc(kN)	eQmy(kN)	Qmax(kN)	$R(\times 10^{-3} rad.)$	
1	JLB-N-BS-41-24	18.7	77.9	-	-	213	-	В
2	JLB-N-BS-68-24	19.4	82.9	149.9	-	254	-	В
3	JLB-N-BS-122-24	35.7	89.2	158.3	263	278	38.2	FB
4	JLB-H-BS-41-42	27.9	82.2	113.1	-	286	-	В
5	JLB-H-BS-68-42	40.3	102.2	-	298	324	37.6	FS
6	JLB-H-BS-122-42	31.6	107.2	169.4	309	332	45.4	FS
7	JLB-H-BS-41-60	8.4	77.6	134.8	304	325	24.9	FS
8	JLB-H-BS-68-60	40.9	96.0	133.3	300	342	42.2	FS
9	JLB-H-BS-122-60	17.0	125.2	196.1	322	345	44.0	FS
10	JLB-N-BB-41-24	24.6	71.4	120.4	-	179	-	В
11	JLB-N-BB-68-24	21.4	65.7	103.1	-	219	-	В
12	JLB-N-BB-122-24	19.0	70.5	140.3	238	255	38.2	FB
13	JLB-H-BB-41-42	19.0	66.9	96.7	-	245	-	В
14	JLB-H-BB-68-42	31.7	67.4	105.7	239	259	38.3	FB
15	JLB-H-BB-122-42	18.8	96.0	166.4	242	275	45.1	FS
16	JLB-H-BB-41-60	34.9	67.2	113.8	-	349	-	В
17	JLB-H-BB-68-60	26.7	86.1	145.5	366	380	34.8	FB
18	JLB-H-BB-122-60	26.2	92.7	134.9	366	387	41.2	FS

表-6 実験結果一覧

·破壊形式 B∶付着割裂破壊 FB:曲げ降伏後付着割裂破壊 FS:曲げ降伏後せん断破壊

Fc=60(N/mm²)の試験体 No.7,8,9 の試験体も同 様に曲げ降伏後のせん断破壊に至った。この時 のせん断ひび割れは骨材が割れ,割裂面が平滑 であった。BB-Type では,Fc=24(N/mm²)の No.10,11,12,Fc=42(N/mm²)の No.13,14,Fc=60 (N/mm²)の No.16,17 は主筋に沿った付着ひび割 れの進展が顕著であり,No.12,14,17 は部材降 伏したが,主筋に沿った被りコンクリートの剥 落により最終破壊に至った。pw の最も高い No.15,18 は,部材の曲げ降伏後,梁端より1.0D のせん断ひび割れの進展が顕著であり,曲げ降 伏後のせん断破壊に至った。このことから,せ ん断補強量を多くしてコンクリート強度を増 加させることで曲げ降伏先行型に破壊モード が移行することがわかる。

3.2 变形性状

図 - 9 に BS-Type で pw を変動要因とした場 合の No.4(pw=0.41%)の荷重(Q) - 相対変位() 曲線と No.5(pw=0.68%),No.6(pw=1.22%)の Q -

包絡線比較,図-10にBB-Typeでpwを変動 要因とした場合のNo.16(pw=0.41%)のQ- 曲 線とNo.17(pw=0.68%),No.18(pw=1.22%)のQ-

包絡線比較を示す。図 - 9 より BS-Type にお
いて pw の少ない No.4(pw=0.41%)は, R=1/100
(rad.)に向かうサイクルで剛性低下が見られ,
部材降伏することなく R=1/50(rad.)で急激に
耐力低下している。しかし, pw を増加させる



図 - 9 No.4,5,6 Q - 包絡線比較 ことで No.5(pw=0.68%)は R=1/27(rad.)まで, No.6(pw=1.22%)は R=1/22(rad.)まで耐力を維 持している。また,靭性能が向上し,R=1/25 (rad.)まで安定した履歴性状を示すことがわ

かる。BB-Type において pw の少ない No.16(pw= 0.41%)は、R=1/50(rad.)に向かうサイクルで急 激に耐力が低下したのに対し、pw を増加させ ることで No.17(pw=0.68%)は R=1/33(rad.)ま で、No.18(pw=1.22%)は R=1/25(rad.)まで耐力 を維持し、靭性能が向上していることがわかる。

図 - 11 に BS-Type 試験体で pw=0.68(%), Fc=42(N/mm²)のJLのQ- 曲線とRCの包絡線 比較を示す。JL 試験体と RC 試験体はほぼ同様 の履歴性状を示している。しかし, JL 試験体 の初期剛性は RC 試験体に比べて 2 割程度小さ い傾向が見られる。これは, JL のヤング係数 がコンクリートに比べて 3 割程度小さいため だと考えられる。そこで, 一例として, 図-12 に初期剛性,降伏時剛性の計算値4)と実験値の 比較を示す。JL 試験体(pw=0.48%, Fc=42N/mm²) の初期剛性および降伏時剛性は RC 試験体 (pw=0.48%, Fc=42N/mm²)と同様に適合性の良い 結果となっている。(初期剛性は右図に示すよ うな L'=L₀+2 × 0.25D で計算した。) このことか ら JL 梁部材においてコンクリートのヤング係 数を考慮し、部材スパンに L'=L₀+2×0.25D を用 いることで既往の評価式により初期剛性およ び降伏時剛性を評価できる。

4. 既往の耐力式による評価

4.1 曲げ耐力・せん断耐力および付着割裂 耐力の評価

図 - 13 にせん断破壊した JL 試験体と RC 試 験体の最大耐力実験値を曲げ耐力計算値で除 した値(最大荷重比)とせん断余裕度の関係を, 図 - 14 に付着割裂破壊した JL 試験体と RC 試 験体の最大荷重比と付着余裕度の関係を示す。 普通コンクリートに適用されている既往の設 計式において RC 試験体と比較することにより JL 試験体の耐力評価を行った。

図 - 13 に示すように曲げ降伏後にせん断破 壊した試験体(FS)は,実験値が計算値の1.0~ 1.2 程度になる。JL と RC を比較すると同様な



分布を示しており, RC 梁と同様に評価できる ことを示している。図 - 14 について見てみる と,二段配筋試験体(BS-Type)で,Fc=24(N/mm²) で補強筋量がpw=0.41,0.68(%)の試験体は,実 験値が計算値の0.8~1.0程度であり,曲げ降 伏前に付着割裂破壊(B)した。曲げ降伏後に付 着割裂した試験体(FB)は1.0~1.2程度となり, RC 試験体と同様の分布を示している。これら のことから,JL 試験体と RC 試験体は同様に分 布していることが分かる。

4.2 限界変形角と余裕度

図 - 15 に限界変形角(Ru)と余裕度の関係を 示す。限界変形角は曲げ降伏した試験体におい て最大耐力の80%に耐力が低下した時の変形角 とした。図に示すように曲げ降伏した試験体に おいて Ru > 0.02(rad.)となっている。

曲げ降伏後付着割裂破壊した試験体(FB)は, 余裕度の増加に関わらず限界変形角はほぼ一 定であった。RC 試験体と比較すると同じ余裕 度レベルで 1.5 倍程度の限界変形角を有して いることから適切な付着余裕度を設定するこ とにより RC 試験体と同等以上の靭性能を確保 できることがわかる。

曲げ降伏後せん断破壊した試験体(FS)では RC 試験体同様に余裕度の増加に伴い限界変形 角が上昇している。これらのことから,曲げ降 伏後に付着割裂破壊する試験体(FB)の靭性能 評価については今後の検討が必要であるが,曲 げ降伏後にせん断破壊する試験体(FS)につい ては RC 試験体と同様に JL 試験体においても, 靭性能を評価するにあたり,RC に適用されて いる設計式を用いた余裕度が一つの指標にな ることを示した。

5. まとめ

1) JL 梁部材の耐力,変形性能および破壊 モードは,従来の RC 梁部材と同様に制御で きることを実験により確認した。

2) JL 梁部材のひび割れ耐力および剛性は



図 - 15 限界変形角 - 余裕度関係

JL コンクリートの材料特性を考慮すること により既往の評価式を適用できる。

3) JL 梁部材の曲げ耐力, せん断耐力およ び付着割裂耐力は,既往の終局強度算定式を 適用できる。

4) JL 梁部材の靭性能は RC 梁部材と同様に 既往の評価方法が適用できることから, JL 梁部材を構造部材として実用化できる可能 性を示した。

【謝辞】本研究実施にあたり,石炭灰人工多機能骨材 の共同開発に関して常磐共同火力株式会社, 鹿島建設 株式会社,日本メサライト工業株式会社,生活価値創 造住宅開発技術研究組合,鉄筋の供給に高周波熱錬株 式会社にご協力して頂きました。ここに記しまして深 甚の謝意を表します。

【参考文献】1)鈴木麻悠美,石飛直樹,平野直人, 中野克彦,松崎育弘他:高強度せん断補強筋を用いた RC梁部材の構造性能に関する実験的研究,日本建築学 会大会学術講演梗概集,pp253~258,2002.8 2)日 本建築学会:鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 1999 3)日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の 終局強度型耐震設計指針・同解説,1990 4)日本建 築学会:鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料, 1987.9