

論文 石炭灰による高強度人工骨材を用いた RC 梁に関する実験的研究

山口 浩一郎*¹ 中野 克彦*² 松崎 育弘*³ 石川 嘉崇*⁴

要旨：石炭灰は火力発電所から排出される廃棄物であり、再生資源として有効利用の用途の開発が望まれている。そこで、「石炭灰を主原料とした高強度人工骨材」は、構造用コンクリートへの適用を可能とするため、天然骨材と同等以上の強度特性（高強度）を有すること、かつ軽量性をあわせもつことをねらいとして開発されたものである。本研究では石炭灰による高強度人工骨材を用いた梁部材の構造性能を把握するための実験を実施し、既往の実験結果と比較することで設計式の耐力評価及び靱性能評価を行い、既往の設計式においても評価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、靱性能、限界変形角

§1. はじめに

石炭灰は石炭火力発電所から排出される廃棄物であり、今後の石炭灰の発生量は石炭火力発電所の新設・増設により増大することが予測されている。このような石炭灰の発生量の増大に対して、現在の用途による有効利用量の維持・拡大に加えて、新たな有効利用の用途の開発が望まれている。そこで開発されたのが石炭灰を主原料とした高強度人工骨材（以下、FA 骨材）である。この骨材は、石炭灰を造粒・焼成した非発泡型の粗骨材であり、球形状、軽量（絶対比重 1.8±0.1）、高強度（天然骨材と同等）などの特徴を有している。石炭灰という産業副産物を有効利用するものであることから、効率的か

つ経済的に環境保護に貢献できるという利点もある。

本研究では FA 骨材を用いたコンクリートの梁部材の構造性能を把握するとともに従来用いられている、せん断耐力、付着割裂耐力及び靱性能の評価方法の適用性を検討することを目的としている。

§2. 実験概要

2.1 試験体

表-1 に試験体一覧及び計算結果一覧を、図-1 に試験体形状及び配筋図、図-2 に試験体断面図を示す。試験体は FA 骨材（石炭灰）を用いた RC 梁で、コンクリート設計基準強度を

表-1 試験体一覧及び計算結果一覧

No	試験体名	コンクリート		主筋		せん断補強筋 4-D6(SHD685)		曲げ耐力 ¹⁾ Q _{mu} (kN)	せん断耐力 ²⁾ Q _{su} (kN)	付着割裂耐力 ³⁾ Q _{bu} (kN)	せん断 余裕度 Q _{su} /Q _{mu}	付着 余裕度 Q _{bu} /Q _{mu}
		F _c (MPa)	材質	配筋	Pt(%)	配筋	pw(%)					
1	TL-S-41-60	60	焼き入れ (1000)	8-D16	2.55	@150	0.41	570	160	397	0.28	0.70
2	TL-S-68-60					@90	0.68	570	263	446	0.46	0.78
3	TL-BS-30-60					@200	0.30	288	139	382	0.48	1.33
4	TL-BS-41-60					@150	0.41	288	160	397	0.55	1.38
5	TL-BS-68-60	60	SD490	8-D16	2.55	@90	0.68	288	263	446	0.91	1.55
6	TL-BS-122-60					@50	1.22	288	406	547	1.41	1.90
7	TL-BB-41-36	36	SD685	4-D19	1.71	@150	0.41	338	188	206	0.56	0.61
8	TL-BB-68-36					@90	0.68	338	313	225	0.93	0.67
9	TL-BB-41-60					@150	0.41	338	190	277	0.56	0.82
10	TL-BB-68-60					@90	0.68	338	313	302	0.93	0.90
11	TL-BB-122-60	60	SD685	4-D19	1.71	@50	1.22	338	484	353	1.43	1.05

1)RC規準略算式

2)終局強度型耐震設計指針A法靱性式(R_p=1/50rad)

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

- * 1 東京理科大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)
 * 2 東京理科大学助手 工学部建築学科 (正会員)
 * 3 東京理科大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)
 * 4 電源開発株式会社 茅ヶ崎研究センター (正会員)

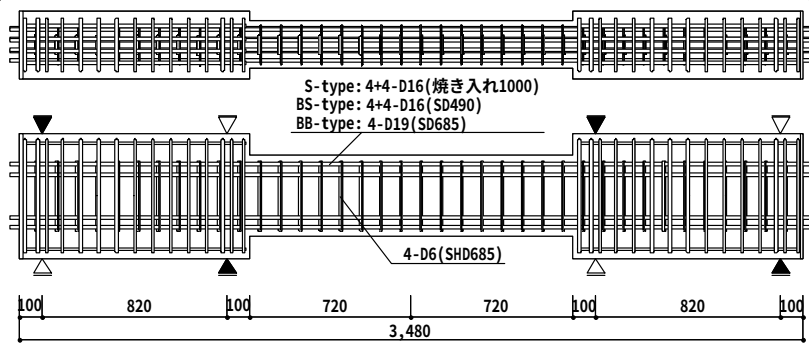


図-1 試験体形状及び配筋図

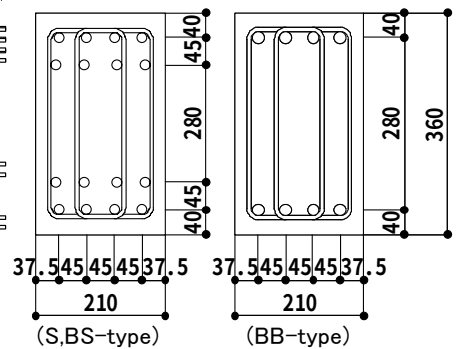


図-2 試験体断面図

表-2 コンクリート調合表

試験体No.	調合名	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³ , l/m ³)				混和剤	
				W:水	C:セメント	S:細骨材	G:粗骨材	減水剤	AE調整剤
7,8	FA-36N	47.4	43.0	175	369	750	730	3.69kg/m ³	—
1~6,9~11	FA-60N	37.5	48.0	170	453	810	645	6.48kg/m ³	5.89g/m ³

表-3 コンクリート材料試験結果

試験体 type	圧縮強度 N/mm ²	圧縮強度時の歪み μ	引張割裂強度 N/mm ²	ヤング係数 kN/mm ²	単位容積質量 kg/l
S,BS	58.6	2536	3.70	31.2	2.0
BB(36)	32.6	1871	2.70	28.1	2.0
BB(60)	58.7	2412	3.92	31.1	2.1

表-4 鉄筋材料試験結果

試験体 type	使用鉄筋	降伏点応力度 N/mm ²	降伏歪み (μ)	ヤング係数 kN/mm ²	破断伸び (%)
S(主筋)	D16(焼入れ 1000)	963	5211	186	15.38
BS(主筋)	D16(490)	487	2731	178	6.17
BB(主筋)	D19(685)	735	4230	182	8.09
全試験体(補強筋)	D6(685)	787	4639	170	7.17

$F_c = 60, 36(\text{N/mm}^2)$ とし、せん断破壊型6体(S(60)-type:2体, BS(60)-type:4体)、付着割裂破壊型5体(BB(36)-type:2体, BB(60)-type:3体)、総計11体を計画した。

試験体断面は、 $b \times D = 210 \times 360(\text{mm})$ で実大の $1/3$ スケール、せん断スパン比は $a/D = 2.0(a = 720\text{mm})$ とした。主筋は、せん断破壊及び曲げ降伏後のせん断破壊想定試験体 No.1,2 (S(60)-type)、No.3~6 (BS(60)-type) で $4+4\text{-D16}(\text{SD490})$ の2段配筋、付着割裂破壊及び曲げ降伏後の付着割裂破壊想定試験体 No.7~11 (BB-type) で 4-D19 の1段配筋とした。なお、せん断補強筋は全試験体で $4\text{-D6}(\text{SHD685})$ を使用した。

主な変動要因は、コンクリート強度(σ_B)、せん断補強筋比(p_w)、主筋材質、主筋配筋形式とし、これらの要因を組み合わせるにより、せん断余裕度(Q_{su}/Q_{mu})及び付着余裕度(Q_{bu}/Q_{mu})を変化させた。これらの余裕度は、表-1中に示してあるが、終局強度型耐震設計指針A法の韌性式($R_p = 1/50\text{rad}$)より求めたせん断終局強度及び付着割裂強度時のせん断強度をRC規準曲げ略算式¹⁾より求めた曲げ強度時のせん断強度で除した値である。

また本研究では比較用の天然骨材を用いたRC梁試験体として文献3の実験結果を用いている。以下、本実験での試験体をTL、文献3

の試験体をRCとする。RC試験体ではTL試験体と同形状で補強筋にSHD(685)、骨材に碎石による天然骨材(以下、NA骨材)を使用している。

2.2 材料特性

表-2にコンクリート調合表、表-3にコンクリートの材料試験結果一覧を示す。圧縮特性はJIS A 1108に準じて求め、FA骨材の試験方法はJSCE-C 101-2001(コンクリート用高強度フライアッシュ人工骨材の品質規格(案))^{参考文献4)}に従った。FA骨材には最大寸法20mmを使用し、表乾密度 $1.85(\text{g/cm}^3)$ 、吸水率2.23(%)である。単位容積質量はRCでは $2.29 \sim 2.4(\text{kg/l})$ であるのに対し、本実験で用いたTLは $2.0(\text{kg/l})$ 程度であり軽量性があることがわかる。

表-4に鉄筋の材料試験結果一覧を示す。鋼材の試験片はJIS Z 2201に基づいて、2号試験片を用い、降伏応力度(N/mm^2)・降伏歪み度(μ)・引張強さ(N/mm^2)・弾性係数(N/mm^2)・破

断伸び(%)を測定した。降伏点は基本的に上降伏点とし、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求めた。歪みは一方方向の歪みゲージを鉄筋の両面2箇所に貼り付けて引張試験を行い、平均値を歪みとした。溶接試験片の引張試験においては、溶接部以外の破断を確認した。

2.3 加力方法

図-3に加力履歴図を示す。加力は大野式逆対称モーメント形式の正負交番繰り返し载荷とした。加力の制御は変位制御とし、加力サイクルは図-3に示す通りである。せん断実験のS-typeは $R=1/100(\text{rad})$ まで繰り返した後に最大耐力を確認した。

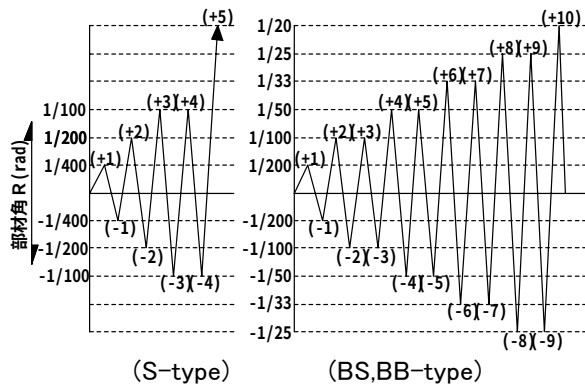


図-3 加力履歴図

§3. 実験結果

3.1 破壊性状

表-5に実験結果一覧、図-4に破壊状況の一例として、各試験体 type の $p_w=0.41$, 0.68% の最終破壊状況写真を示す。

S-type では両試験体共にせん断破壊をしたが、 $p_w=0.41\%$ の No.1 においては付着ひび割れの進展も見られ、主筋に沿ったひび割れが見られた。BS-type では $p_w=0.41\%$ の No.3 において大きなせん断ひび割れが試験体中央部に入り、その後付着ひび割れの進展と共に主筋の被りコンクリートの剥落が見られた。No.4, 5, 6 試験体ではヒンジ区間(危険断面から 1.0D 区間)にひび割れが集中し、最終的には曲げ降伏後のせん断破壊を示した。BB-type では No.7, 8, 9, 10 は付着ひび割れの進展が顕著であり、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。最終破壊形式は No.7, 8, 9 が付着割裂破壊、No.10 が曲げ降伏後の付着割裂破壊を示した。No.11 は付着ひび割れの進展が見られずヒンジ区間のひび割れの集中により曲げ降伏後のせん断破壊を示した。

以上よりせん断補強筋比、コンクリート強度をそれぞれ増加させることにより、せん断破壊

表-5 実験結果一覧

NO	試験体名	荷重 変形角	曲げひび 割れ強度	せん断ひび 割れ強度	付着ひび 割れ強度	部材降 伏時	最大耐 力時	限界変 形角	最終破 壊性状
NO.1	TL-S-41-60	Q (kN)	32	90	-	-	355	-	S
		$R(\times 10^{-3} \text{ rad})$	0.30	1.70	-	-	18.1	-	
NO.2	TL-S-68-60	Q (kN)	27	95	-	-	485	-	S
		$R(\times 10^{-3} \text{ rad})$	0.35	1.94	-	-	23.9	-	
NO.3	TL-BS-30-60	Q (kN)	26	90	-	-	267	-	S
		$R(\times 10^{-3} \text{ rad})$	0.25	1.57	-	-	14.0	-	
NO.4	TL-BS-41-60	Q (kN)	36	80	-	260	302	242	FS
		$R(\times 10^{-3} \text{ rad})$	0.37	1.32	-	9.00	19.5	25.2	
NO.5	TL-BS-68-60	Q (kN)	24	99	-	281	340	272	FS
		$R(\times 10^{-3} \text{ rad})$	0.25	1.97	-	10.0	29.2	40.5	
NO.6	TL-BS-122-60	Q (kN)	35	90	-	260	360	288	FS
		$R(\times 10^{-3} \text{ rad})$	0.30	1.42	-	6.77	30.4	49.3	
NO.7	TL-BB-41-36	Q (kN)	20	70	101	-	212	-	B
		$R(\times 10^{-3} \text{ rad})$	0.16	1.55	2.76	-	10.0	-	
NO.8	TL-BB-68-36	Q (kN)	39	70	81	-	320	-	B
		$R(\times 10^{-3} \text{ rad})$	0.56	1.54	1.86	-	20.1	-	
NO.9	TL-BB-41-60	Q (kN)	44	71	126	-	288	-	B
		$R(\times 10^{-3} \text{ rad})$	0.57	1.40	3.74	-	13.4	-	
NO.10	TL-BB-68-60	Q (kN)	36	86	91	336	374	299	FB
		$R(\times 10^{-3} \text{ rad})$	0.42	1.88	2.05	12.1	20.1	32.7	
NO.11	TL-BB-122-60	Q (kN)	49	91	142	340	397	318	FS
		$R(\times 10^{-3} \text{ rad})$	0.65	1.78	3.50	11.3	40.0	46.2	

S:せん断破壊, B:付着割裂破壊, FS:曲げ降伏後のせん断破壊, FB:曲げ降伏後の付着割裂破壊

Type	No.	pw=0.41%	No.	pw=0.68%
S	1		2	
BS	4		5	
BB (36)	7		8	
BB (60)	9		10	

図-4 最終破壊状況写真

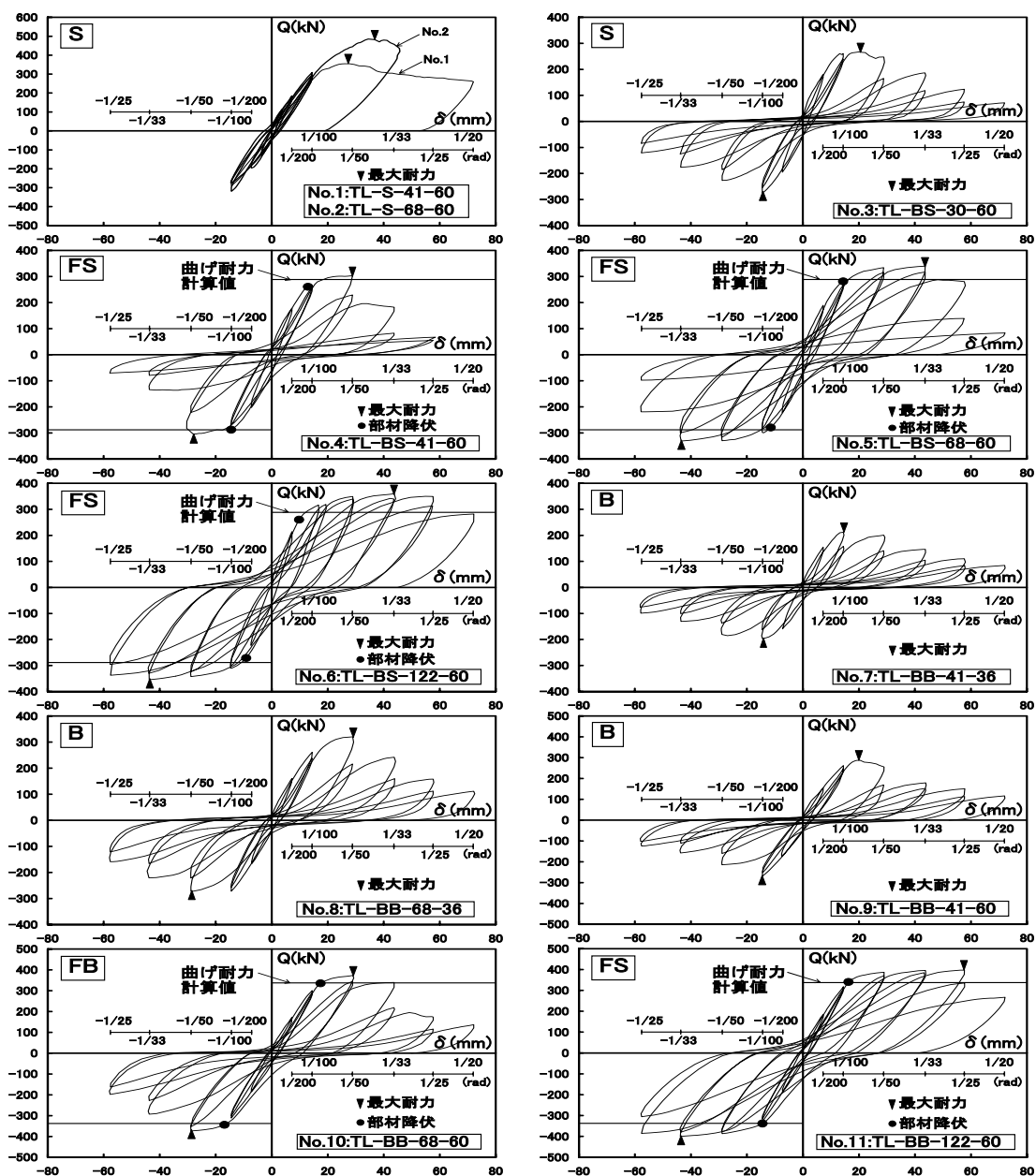


図-5 Q- δ 関係

及び付着割裂破壊は曲げ降伏後のせん断破壊及び付着割裂破壊と移行していることがわかる。

3. 2 履歴性状

図-5 に各試験体の $Q-\delta$ 関係を示す。S-type において No.1 は $R=1/100\text{rad}$. 付近でせん断ひび割れの卓越により剛性が急激に低下し、No.2 では緩やかに耐力が上昇していくが、 $R=1/42\text{rad}$. で急激に耐力の低下が見られた。

BS-type では $R=1/100\text{rad}$. 以降、補強量の少ない No.3 は、 $R=1/50\text{rad}$. に向かうサイクルでせん断ひび割れの卓越により、耐力が低下したが、他の3体は部材として曲げ降伏をしているため、緩やかに耐力が上昇している。 $R=1/50\text{rad}$. 以降、No.4 は補強筋が溶接部で破断したため、急激に耐力が低下した。その後 No.5 は $R=1/33\text{rad}$. まで、No.6 は $R=1/25\text{rad}$. まで耐力を維持した。

BB(36)-type では $R=1/200\text{rad}$. 以降、補強量の少ない No.7 は付着ひび割れが主筋に集中し、 $R=1/50\text{rad}$. に向かうサイクルで耐力が低下したのに対し、No.8 は $R=1/33\text{rad}$. に向かうサイクルまで耐力を維持し、その後、逆S字カーブを描きながら耐力低下の様相を呈した。

BB(60)-type では $R=1/100\text{rad}$. に向かうサイクルでは、No.10, 11 は剛性が低下せずに耐力が上昇しているが、No.9 では、付着ひび割れが進展すると共に剛性が低下した。 $R=1/50\text{rad}$. に向かうサイクルでは、No.10, 11 は部材として曲げ降伏し、緩やかに耐力が上昇していったのに対し、No.9 は、耐力が低下していった。その後、No.10 は $R=1/33\text{rad}$. 以降、急激に耐力が低下し、No.11 は $R=1/25\text{rad}$. まで耐力を維持し、付着ひび割れの進展は見れず、ヒンジ区間でのひび割れ集中により、耐力が低下した。

§4. 検討

4. 1 設計式による評価

図-6 に No.1~No.6 (S,BS-type) のせん断余裕度と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)の関係、図-7 に No.7

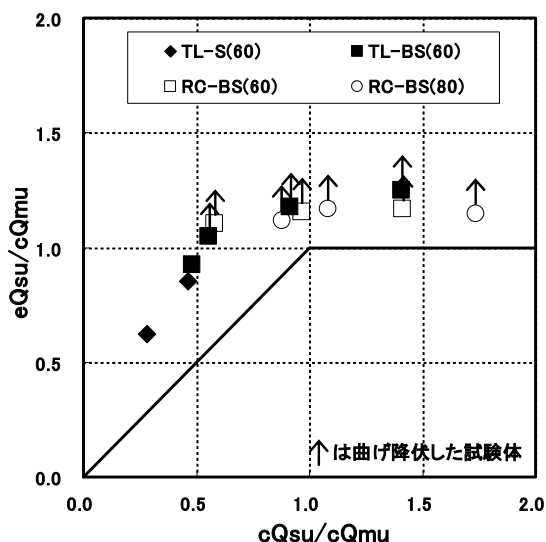


図-6 せん断余裕度-最大荷重比関係

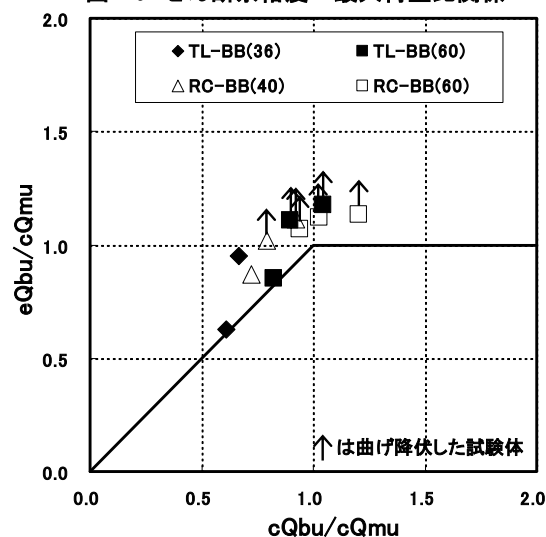


図-7 付着余裕度-最大荷重比関係

~No.11 (BB-type) の付着余裕度と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)の関係を示す。

既往の設計式において RC 試験体と比較することにより、TL 試験体の耐力評価を行った。

図-6 に示すように、せん断破壊先行型試験体において実験値は計算値の 2.0 程度となっており、曲げ降伏後のせん断破壊型試験体においては 1.1~1.3 程度となっている。TL 試験体と RC 試験体は同様な分布となっており、従来の NA 骨材を用いた RC 梁と同様な安全率を有していることを示している。

図-7 に示すように、曲げ降伏先行型の試験体において実験値は計算値の 1.1~1.2 程度となっており、RC 試験体と同様な分布を示している。曲げ降伏前に付着割裂破壊した試験体に

においては計算値とほぼ等しくなっているが、 $p_w=0.41\%(@150\text{mm})$ であり、補強量が十分でないことがわかる。せん断補強筋比を十分に配筋することで付着割裂破壊に対する安全率が上昇すると言える。

4.2 余裕度と破壊形式

図-8 にせん断余裕度、付着余裕度による破壊形式分布を示し、余裕度による破壊形式の評価を行う。図に示すように破壊形式の分布は余裕度によってせん断破壊領域と付着割裂破壊領域に区分される。また、せん断余裕度、付着余裕度共に 1.0 以上であれば曲げ降伏することがわかる。TL 試験体は RC 試験体と同様な破壊形式の分布を示している。このことより TL 試験体は RC 試験体と同様に余裕度による破壊形式の評価ができる。

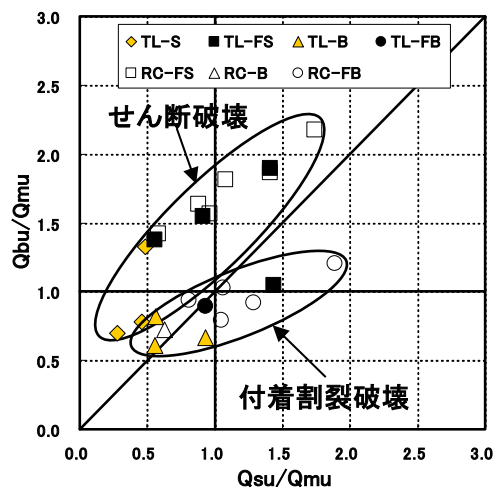


図-8 余裕度による破壊形式分布

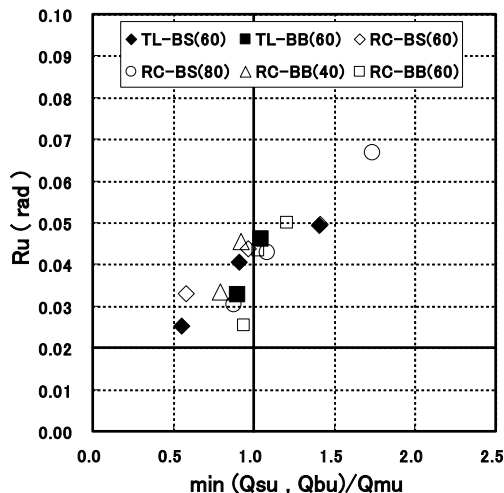


図-9 余裕度-限界変形角関係

4.3 余裕度と限界変形角

図-9 に余裕度と限界変形角の関係を示す。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。TL 試験体の靱性能評価をするために RC 試験体と比較する。曲げ降伏した全試験体において $R_u > 1/50(\text{rad})$ となるような結果となっている。また、せん断余裕度、付着余裕度共に 1.0 以上であれば、限界変形角が $1/25(\text{rad})$ 以上という結果となった。RC 試験体と比較すると同様な分布を示し、余裕度の増加に伴い限界変形角が上昇していく傾向が見られる。

§5. まとめ

- 1) FA 骨材を用いた RC 梁部材のせん断耐力、付着割裂耐力は既往の終局強度算定式を十分に適用できることを示したが、付着割裂破壊においては適切なせん断補強筋量が必要であると考えられる。
- 2) 余裕度による破壊形式の評価は NA 骨材を用いた RC 梁と同様に評価することができる。
- 3) 靱性能は余裕度の増加に伴い NA 骨材を用いた RC 梁と同様に上昇していき、既往の方法が適用できる。

【謝辞】

本研究に際し、FA 骨材を用いたコンクリートを提供していただいた建築構造性能検討委員会の方々に深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 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
- 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) 金子順一，黒川雄介，中野克彦，松崎育弘：高強度材料（コンクリート及びせん断補強筋）を用いた RC 梁部材の構造性能に関する実験研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，p.493，2000
- 4) 土木学会：コンクリート用高強度フライアッシュ人工骨材の品質規格(案)