

論文 石炭灰を大量混合した RC 梁の曲げせん断挙動に関する実験的研究

藤永 隆*1・孫 玉平*2・小山 智幸*3・小山田 英弘*4

要旨：本研究は、石炭灰を大量に混合した鉄筋コンクリート部材の終局挙動を調べることを目的として、石炭灰の一種であるフライアッシュをセメントに対して外割で大量混合した鉄筋コンクリート梁の終局曲げせん断性状や変形能について実験的に検討を行った。その結果、単位体積あたりの配合量 455kg/m^3 までの範囲では、フライアッシュの混合量の増加に伴い、梁のせん断耐力および変形能は大きくなること、フライアッシュの大量混合でせん断スパン比 1.0 の短い梁にも十分な変形能をもたらせること、などが明らかになった。

キーワード：フライアッシュ, 鉄筋コンクリート梁, せん断耐力, 変形能

1. はじめに

産業副産物の石炭灰の利活用に関する研究は 1950 年代にさかのぼる。当初から資源としての有効性が着目され、コンクリート用混和材とすることから研究が進められ始めた。以来、多くの研究の成果より、石炭灰はセメント・コンクリート分野を始め、土木分野、建築分野、農林・水産分野など多岐に渡って利活用されるようになってきている¹⁾。とりわけセメント・コンクリート分野での利用は石炭灰の約 9 割をも占めている。しかしながら、昨今建設需要の低迷が続き、セメント製造量が減少してきていることから、セメント製造分野での石炭灰の利用量増加はとて見込めない状況にあることを鑑み、石炭灰の新たな活用方法の開発が望まれる。

松藤らは石炭灰の新しい活用方法として、セメントに対してフライアッシュの外割混合を行う方法を提案し、水セメント比 65% の条件の下で石炭灰の単位混合量が 300l/m^3 の領域までコンクリートの圧縮強度が増加することを明らかにしている²⁾。また小山らは、石炭灰を大量混合した場合に見られたコンクリートの強度増加は、フライアッシュによる細孔空隙構造の細分化に起因することを明らかにしている³⁾。さらに、伊藤らは促進試験ならびに自然暴露の実験結果から、外割割合でフライアッシュを大量に混合したコンクリートは中性化の進行速度が同じ水セメント比でフライアッシュ無しの単味コンクリートのそれより遅いことを明らかにしている⁴⁾。すなわち、フライアッシュを外割で大量混合することによって、水セメント比を 65% と高く維持したまま、高強度かつ耐久性の優れたコンクリートを作ることができる。

一方、フライアッシュを大量に混合したコンクリートを実構造物に活用するには、このようなコンクリートを用いた構造部材の力学的特性（終局曲げ性状やせん断性

状など）を明らかにしたうえで、それらを的確に評価できる手法の確立が望まれる。

本研究は、フライアッシュをセメントに対して外割で大量混合した鉄筋コンクリート造（以下 RC 造と称す）梁の曲げせん断性状を実験的に調べることを目的とする。また、現行計算規準に推奨されている、フライアッシュなしの単味コンクリートを用いた RC 造梁の諸種耐力算定式の、フライアッシュ大量混合した RC 造梁の終局強度予測への適用性に関する検討をも行う。

2. 実験概要

2.1 試験体およびコンクリートの調合

実部材の約 1/2 のスケールに相当する梁を計 8 体製作し、単純支持条件の下で単調曲げせん断載荷実験を計画した。試験体断面は $250\text{mm} \times 400\text{mm}$ の長方形断面を有するもので、実験変数にはコンクリートにおけるフライアッシュの混合量（2 種）、梁のせん断スパン比（3 種）、およびせん断補強筋比（2 種）の三つをとった。一方、梁の引張鉄筋としては、いずれの試験体においても 4 本の D16(SD345) 異型鉄筋を配置しており、引張鉄筋比は約 0.88% となっている。図-1 に試験体の詳細を示す。また、試験体一覧を表-1 に記している。

水セメント比を 65% と一定にして、普通ポルトランドセメントを用いてコンクリートを製作した。フライアッシュは JIS A6201 に規定されている II 種に適合する細粉を、細骨材は標準砂を、粗骨材は安山岩砕石（最大粒径 13mm）をそれぞれ用いた。

単位セメント量と単位水量をそれぞれ 285kg/m^3 、および 185kg/m^3 に固定して、コンクリートを調合した。表-2 にコンクリートの調合を示す。表-2 より分かるように、フライアッシュ混合量の増加分は細骨材の砂の減少分とほぼ等しくなっている。

*1 神戸大学大学院 工学研究科 助教 博士(工学) (正会員)

*2 神戸大学大学院 工学研究科 教授 工博 (正会員)

*3 九州大学大学院 人間環境学研究院 准教授 工博 (正会員)

*4 九州大学大学院 人間環境学研究院 助教 (正会員)

表-1 試験体一覧

試験体	調合	せん断 スパン比	せん断補強筋比 p_w (%)	F_c (N/mm ²)	$Q_{u,exp}$ (kN)	$R_{u,exp}$ (x0.01rad)	Q_{my} (kN)	Q_{su} (kN)	
SSN-0	A	1.0	0.000	38.6	688	0.84	550	555	
SSN-244	B			59.2	809	1.51		759	
SSN-455	C			73.7	883	1.99		902	
SS120-244	B		0.477	73.7	59.2	899		1.86	938
SS120-455	C				875	2.06		1081	
SS60-455					1019	3.04		1155	
SMN-455			1.5		0.000	610		4.72	367
SLN-455	2.0	0.000	437		5.58	275	477		

F_c : 実験時材令のコンクリートシリンダー強度, $Q_{u,exp}$: 最大せん断力の実験結果, $R_{u,exp}$: $Q_{u,exp}$ 時部材角, Q_{my} : 計算曲げ降伏耐力⁵⁾, Q_{su} : 計算終局せん断耐力⁵⁾

表-2 コンクリートの調合

調合	水セメント比 (%)	単位水量 (kg/m ³)	セメント (kg/m ³)	空気量 (%)	混和材/セメント (Vol.%)	単位量 (kg/m ³)			
						混和材 F	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
A	65	185	285	4.5±1.5	0	0	872	947	2.85
B					122	244	583	884	4.23
C					229	455	439	884	5.92

混和材 : JIS A6201 に規定されている II 種に適合する細粉フライアッシュ (密度 : 2.25 g/cm³)

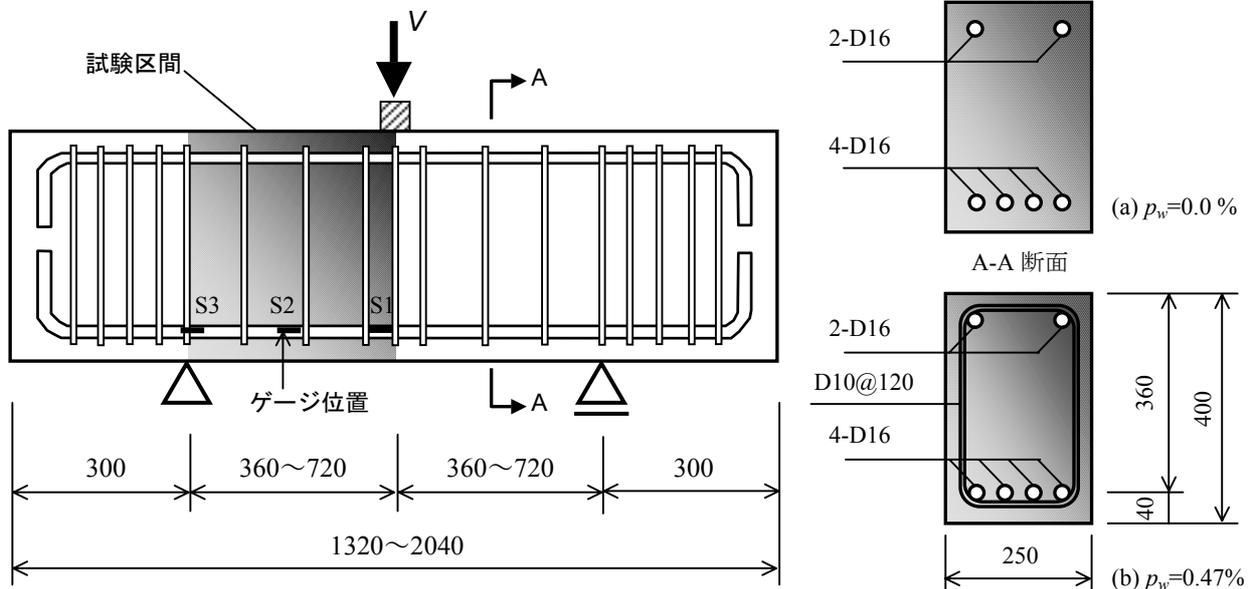


図-1 試験体配筋詳細および寸法 (mm)

計 8 体の試験体のうち 5 体はせん断補強筋なしの梁とし, 残り 3 体にはせん断補強筋として D10(SD345)異型鉄筋を用いている。使用した鋼材の引張応力-ひずみ曲線を図-2 に示す。

なお, 表-1 中の各試験体名称の最後につけている数値(0, 244, 455)は, 各種配合におけるフライアッシュの単位体積あたりの重量(kg)を表している。

2.2 加力と測定方法

図-1 に示すように, 単純支持という境界条件の下で, 試験体中央に集中せん断力を試験体が破壊するまで加えた。

梁中央の鉛直方向変位は 1 本の変位計により測定し, 引張鉄筋のひずみは図-1 に示す位置に貼付した 3 枚のひずみゲージによって測定した。

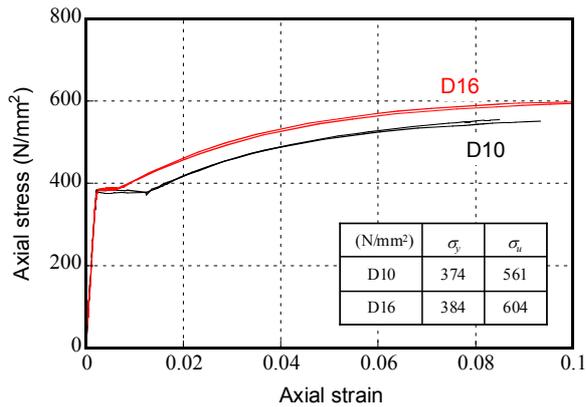


図-2 鋼材の引張応力-ひずみ関係曲線

3. 実験結果と考察

3.1 主な実験結果

実験時材令のコンクリートの圧縮強度を梁の実験耐力および耐力時部材角の結果と合わせて表-1 に示す。梁の部材角はスパン中央の鉛直変位をせん断スパンで除して求めた。

表-1 より分かるように、フライアッシュの混合量の増加に伴い、コンクリートの圧縮強度は最大で約 90%の増加が見られた。また、強度増加に従い、梁のせん断耐力および耐力時部材角も大きくなる傾向にあることが表-1 より伺える。せん断スパン比 1.0 の梁の場合でも、フライアッシュの使用量の増加で最終的にせん断破壊を防ぐことができなかったものの、破壊時部材角は約 0.02rad まで大きく、十分な変形能を示した。せん断スパン比 1.5 以上の梁の場合、調合 C ($F=455\text{kg/m}^3$) の試験体はせん断補強筋無しでも、0.04rad 以上の変形能力を示した。

3.2 せん断力-部材角関係

図-3 に各試験体のせん断力と部材角関係の実験結果と破壊状況を示す。図中の青い一点鎖線はフライアッシュなしの単味 RC 造梁の曲げ降伏耐力の計算値⁵⁾を、緑の実線は大野・荒川式⁵⁾による終局せん断耐力の計算値を表している。後述する式(1)および式(2)によって算定した。

せん断スパン比 1.0 で、フライアッシュ無混合の試験体 SSN-0 は、せん断力が 400kN 前後の時点でせん断ひび割れが観察されはじめ、部材角が 0.0084rad に達する時点で、載荷点と支点を結ぶ方向に沿ってせん断ひび割れが貫通して急激な耐力低下が見られ、典型的なせん断破壊をした。一方、調合 B ($F=244\text{kg/m}^3$) の試験体 SSN-244 は、荷重が 650kN 前後の時点で梁右端の支点からせん断ひび割れが観察され始めたが、その後耐力が徐々に増加していき、部材角が約 0.015rad にて最大耐力に達した。また、調合 C ($F=455\text{kg/m}^3$) の試験体 SSN-455 は、調合 B

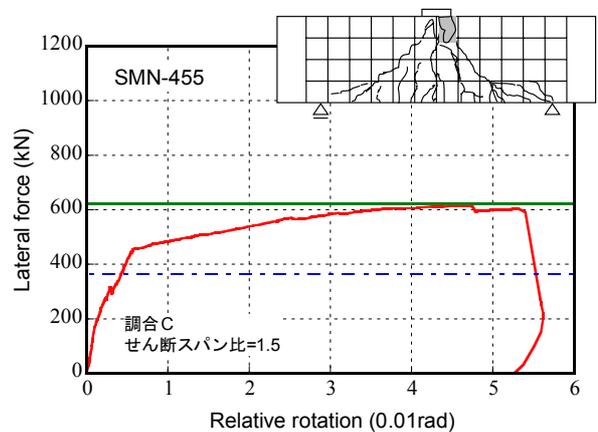
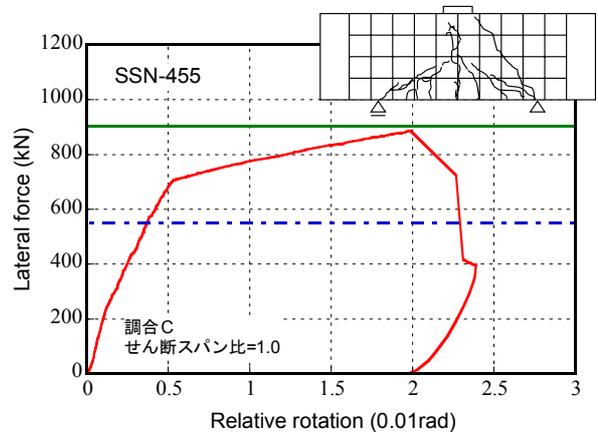
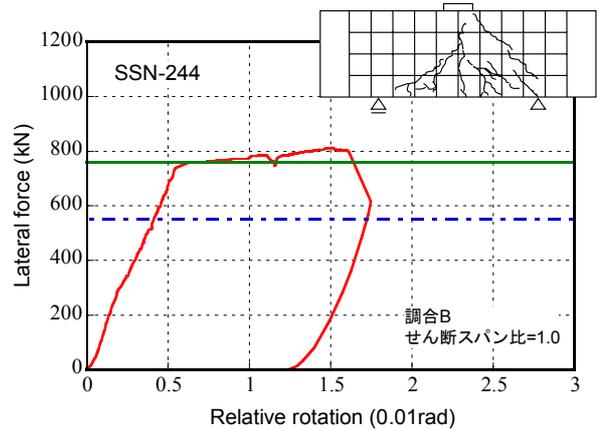
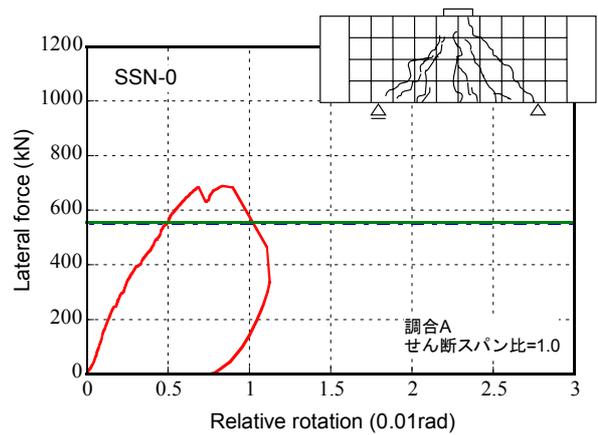


図-3 せん断力-部材角関係の実験結果 (つづく)

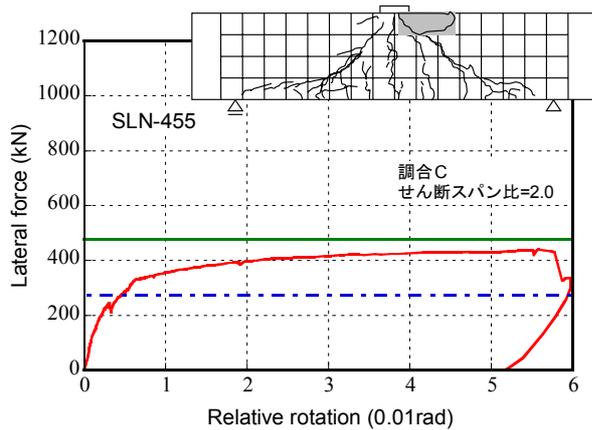


図-3 せん断力-部材角関係の実験結果 (つづき)

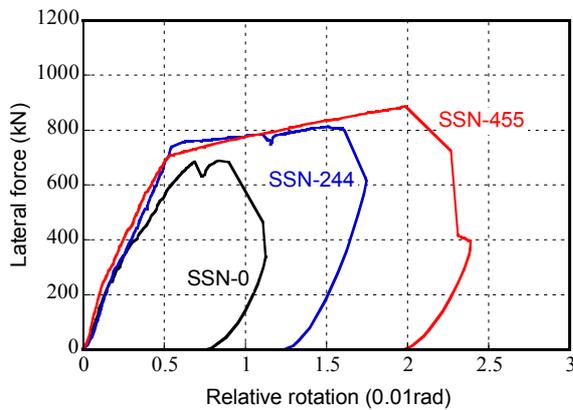


図-4 フライアッシュ混合量の影響

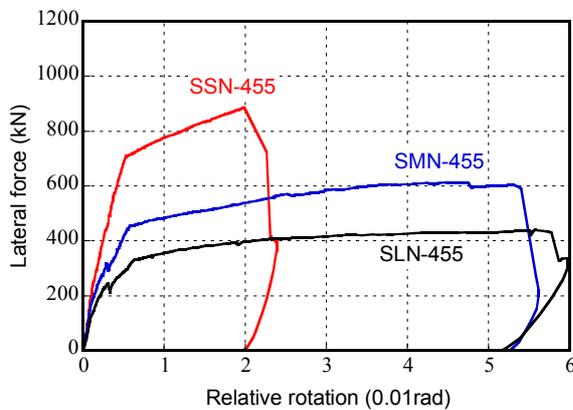


図-5 せん断スパン比の影響

の試験体と同様に、荷重が 650kN 前後の時点で梁右端の支点からせん断ひび割れが観察され始めたが、その後耐力低下することなく、部材角約 0.02rad 近傍で最大耐力 (883kN) に達して、梁左側の支点と荷重点間のせん断ひび割れが貫通しせん断破壊した。せん断耐力時の部材角が 0.02rad にも達したことから、フライアッシュを大量に混合することは、せん断補強筋無しの短い RC 造梁のせん断破壊を防ぐことはできないものの、終局せん断耐力の上昇に伴いせん断余裕度が高くなるため、変形能力

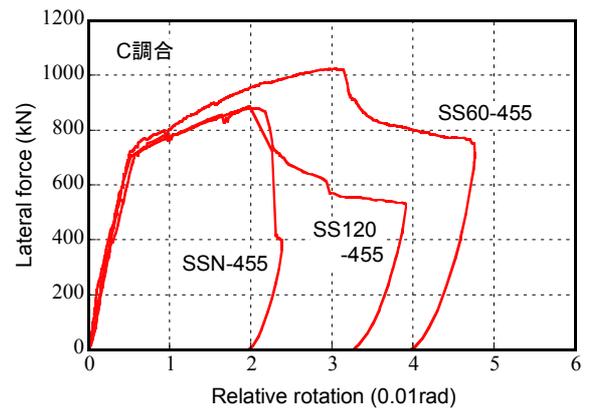
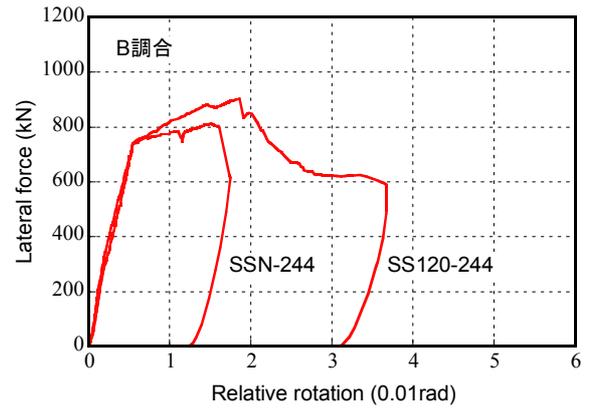


図-6 せん断補強筋量の影響

を大幅に上昇させることができることを示唆している。

一方、せん断スパン比 1.5 以上で C 調合の試験体は、いずれも部材角が 0.0075rad の近傍で曲げ降伏を生じ、その後引張鉄筋のひずみ硬化の影響により耐力が緩やかに上昇し、極めて変形能に富んだ挙動を示した。試験体 SMN-455 と SLN-455 はそれぞれ部材角が 0.047rad と 0.056rad の時点で最大耐力に達し、両試験体とも荷重点近傍におけるコンクリートの圧壊で終局状態に至った。

フライアッシュの混合量が短い梁の曲げせん断性状に及ぼす影響を示したのが図-4 である。図より明らかなように、フライアッシュを多く混合するほど、梁の終局せん断耐力が上昇し、また、耐力時変形角も 2 倍以上に向上させることができる。フライアッシュの混合量に伴うコンクリートの強度上昇が梁のせん断耐力と変形能上昇の主因であると思われる。

図-5 に、異なるせん断スパンを有する試験体の曲げせん断挙動を比較している。比較対象の試験体はいずれも C 調合のコンクリートを用いており、せん断補強筋が施されていないものである。

図-5 より分かるように、せん断スパン比 1.0 の梁と比較して、せん断スパン比 1.5 以上の試験体は、せん断補強筋が配置されていなくても、曲げ降伏後にせん断破壊することなく、粘りが極めて高い曲げ降伏型の破壊性

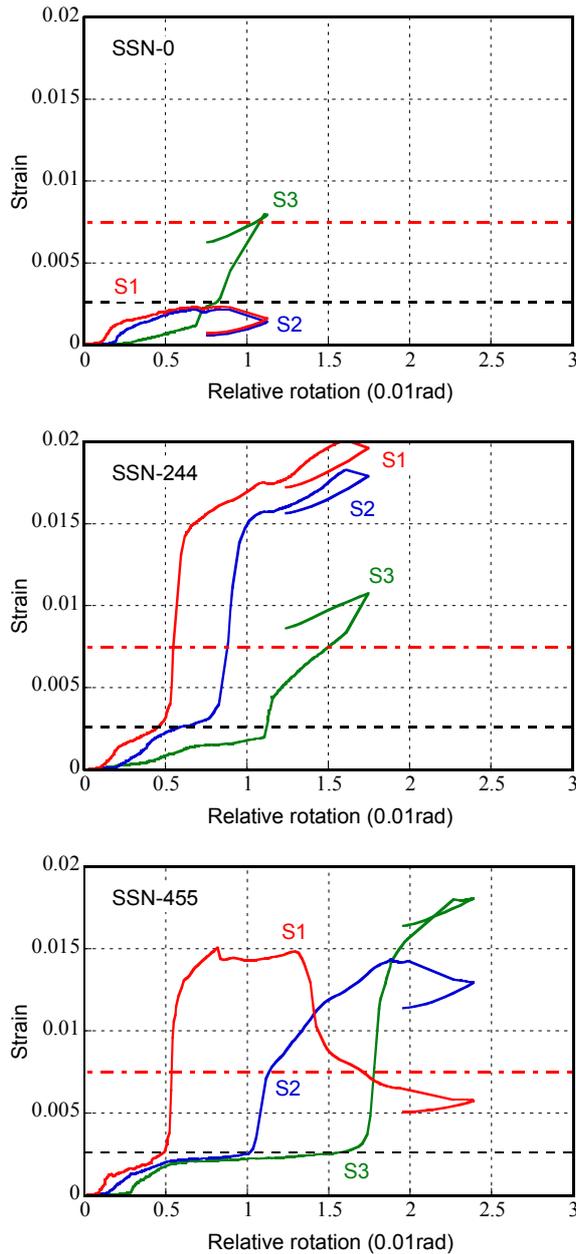


図-7 引張鉄筋のひずみ計測例

状を有している。

せん断補強筋の量がせん断スパン比 1.0 の短い梁の曲げせん断挙動に及ぼす影響をコンクリートの調合別に図-6 に示す。

図-6 より分かるように、B 調合の試験体の場合は、せん断補強筋を用いることによって梁のせん断耐力および耐力時部材角はともに上昇した。C 調合の試験体の場合は、せん断補強筋による耐力および耐力時変形角の上昇効果は、せん断補強筋比 0.47% では殆ど見られなかった。それは、C 調合のコンクリートは最も高い圧縮強度を有し、コンクリート自身のせん断抵抗能力が失われる時点では、少量のせん断補強筋による抵抗力増加分はコンクリートの減少分を補いきれないためと考えられ

る。一方、せん断補強筋比が 0.95% と多く配置された試験体では、梁のせん断耐力および耐力時変形ともに顕著に上昇した。

3.3 引張鉄筋のひずみ

図-7 に引張鉄筋のひずみの計測結果例を示す。図中の黒い破線は鉄筋の引張降伏ひずみを、赤い一点鎖線はひずみ硬化開始時ひずみを表している。また、計測点の S1, S2, および S3 点は、それぞれスパン中央断面、せん断スパン間の中間断面、および支点断面での計測点を表す(図-1 参照)。

図-7 より分かるように、フライアッシュ無混合の試験体では、スパン中央断面における引張鉄筋は終局時まで降伏しなかった。これは当該試験体がせん断破壊をしたことを示唆しており、図-3 に示す結果と一致している。一方、フライアッシュを大量に混合した試験体では、スパン中央断面の引張鉄筋は部材角 0.005rad 前後で降伏した後、部材角の増大に伴い、ひずみ硬化領域に入った。このことは、これらの試験体のせん断力-部材角関係で見られた曲げ降伏後の耐力上昇現象を裏付けている。

以上の考察から、フライアッシュをセメントに対して外割した大量混合はせん断スパン比 1.0 と短い RC 造梁の破壊モードを、変形能に富んだ曲げ降伏先行型にすることが可能であると言える。

4. 梁の耐力評価

フライアッシュ無混合の単味 RC 造部材の曲げ降伏耐力および終局せん断耐力の算定式をフライアッシュを大量混合した梁の耐力評価に適用し、その妥当性を検証する。本論では梁の曲げ降伏耐力 Q_{my} と終局せん断耐力 Q_{su} の算定に、それぞれ日本建築学会 RC 構造計算規準で推奨されている略算式⁵⁾と大野・荒川式⁵⁾を用いた。それらの算定式を以下に記す。

$$Q_{my} = \frac{0.9 \times a_t \times f_{ys} \times d}{a} \quad (1)$$

$$Q_{su} = \left\{ k_u k_p \frac{0.115(F_c + 17.6)}{a/d + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_w f_{yw}} \right\} b j \quad (2)$$

ここで、 a_t は引張鉄筋の断面積、 f_{ys} は主筋の降伏点応力、 d は断面の有効せい (360mm)、 a は梁のせん断スパン、 F_c はコンクリートの圧縮強度、 p_w はせん断補強筋比、 f_{yw} はせん断補強筋の降伏点応力、 b は梁の断面幅、 j は断面の応力中心間距離 (=7/8d) である。なお、係数 k_u および k_p の定義については文献 5 を参照されたい。

式(1)および式(2)によって求められた、各試験体の耐力算定値は表-1 に示されている。

せん断破壊した、フライアッシュ無混合試験体は Q_{my} と Q_{su} の算定値が近く、曲げ耐力以前にせん断耐力に達

する可能性があり、実験結果と矛盾しない。一方、フライアッシュを大量混合した試験体のせん断耐力の実験結果はすべて曲げ降伏耐力を上回った。これは式(1)および(2)からも明らかのように、フライアッシュを大量混合することによるコンクリート強度の増加が梁のせん断耐力上昇に顕著に寄与するが、曲げ耐力への影響は殆どないためである。また、実験耐力がやや高かった試験体 SSN-0 を除けば、曲げ降伏後のせん断破壊または曲げ圧縮破壊を示した試験体の実験耐力はいずれも式(2)による計算せん断耐力で良好に評価されている。このことから、フライアッシュを大量混合した RC 梁の終局せん断耐力は大野・荒川式によって合理的に推定できると言える。

5. 結び

石炭灰の一種であるフライアッシュをセメントに対して外割混合した鉄筋コンクリート造梁の単調曲げせん断性状について実験的に検討した結果、以下のようなことが明らかになった。

- 1) 単位体積あたりの配合量は 455kg/m^3 までの範囲では、フライアッシュの使用量の増加に伴い、梁のせん断耐力および耐力時変形は大きくなっていく傾向にある。
- 2) フライアッシュを大量混合した RC 造梁の実験耐力はいずれも現行規準による降伏曲げ耐力の計算値を上回り、フライアッシュの大量混合によって梁の破壊モードをせん断型から曲げ降伏先行型に変更させることが可能である。
- 3) 単位体積あたりの配合量 455kg/m^3 のフライアッシュを大量混合することにより、せん断余裕度の上昇に伴い、せん断補強筋がなくてもせん断スパン比 1.0 の短い梁に部材角 0.02rad までの高い終局変形能力

をもたらすことができる。

- 4) フライアッシュを大量混合した RC 造梁の終局せん断耐力は、フライアッシュ無しの単味 RC 梁を対象とする大野・荒川式を用いれば合理的に推定可能である。

謝辞

本研究の一部は、財団法人ひょうご科学技術協会平成 19 年度一般学術研究助成の援助を受けて行いました。また、本研究の実施にあたっては、神戸大学大学院工学研究科技術職員の緒方太氏をはじめ、同工学部建設学科卒業生の折田考氏と田中祐二氏から多大な協力をいただきました。また試験体の作成において、(株)作賑コンクリート東浜工場の多大な協力を得ました。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) エネルギー土木委員会：石炭灰有効利用技術について—循環型社会を目指して、土木学会平成 15 年度全国大会研究討論会資料，2003.5
- 2) 松藤泰典ほか：石炭灰を外割大量使用するコンクリートの調合に関する研究，コンクリート工学論文集，Vol.12, No.2, pp.51-60, 2001.5
- 3) 小山智幸ほか：副産物系無機粉体を外割混合したコンクリートの強度発見性状，コンクリート工学年次論文集，Vo29, No.1, pp.231-236, 2007.6
- 4) 伊藤是清ほか：フライアッシュを混合したコンクリートの自然曝露環境下における中性化に関する研究，都市・建築学研究，九州大学大学院人間環境学研究院紀要，Vol.12, pp.115-120, 2007.6
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，1999.11