

論文 フライアッシュを添加した再生骨材コンクリートの圧縮破壊特性に関する実験的研究

中畔 大夢*1・伊藤 始*2・谷 拓郎*1・鈴木 祥太*3

要旨: 老朽化したコンクリート構造物の解体の際に、多くのコンクリート塊が発生することが予想され、その利用拡大が必要である。そのコンクリート塊をコンクリート用再生骨材に利用するためには、磨砕等を施す必要があるが、エネルギー面や微粉発生の課題がある。その課題を解決するために、フライアッシュを添加した再生骨材コンクリートに着目し、圧縮強度試験と圧縮破壊実験を行い、圧縮破壊特性を検討した。その結果、再生骨材コンクリートにおいても、フライアッシュ添加による強度増進効果が確認された。また、再生骨材コンクリートの破壊領域について、フライアッシュを添加することで破壊領域の局所化を抑制できる可能性が確認された。

キーワード: 再生骨材, フライアッシュ, 圧縮強度, 破壊領域, 局所ひずみ

1. はじめに

現在、多くの老朽化したコンクリート構造物があり、今後建て替えが予想される。建て替えの際、コンクリート塊が廃棄物として発生するとともに、新たに天然骨材を使用する必要がある。この廃棄物の増加と、天然資源の使用の2つの問題を解決する方法として、コンクリートを再利用する再生骨材コンクリートの技術がある。しかし、現在コンクリート塊の再生骨材コンクリートへの利用はごく一部でしか行われていない¹⁾。これは、コンクリート塊が道路用路盤材として需要があること、天然骨材が確保可能であることが要因である。今後建て替えの増加とともに、コンクリート塊の増加が予想されるため、コンクリート用再生骨材としての利用拡大が必要である²⁾。

一方、石炭火力発電所では、発電の際に産業副産物であるフライアッシュが発生している。フライアッシュを混和材としたコンクリートは、ポゾラン反応により緻密になり、普通セメントのみを用いたコンクリートに比べ、長期的な性能の向上が明らかにされている³⁾。

低品質の再生骨材を用いたコンクリートは、天然の普通骨材を用いたコンクリートに比べ、力学性能が低下する⁴⁾。それに対して、磨砕や分級等の処理を施した高品質のものは、天然骨材を用いたコンクリートと同等の性能のコンクリートを製造することが可能である^{4), 5)}。しかしながら、天然骨材の製造に比べ、エネルギーやコストがかかり、多くの微粉が発生する課題がある。そのため、この課題を解決した効果的な性能改善が求められている。

本研究では、再生骨材コンクリートにフライアッシュを組み合わせることに伴う性能の改善を検討した。研究

では力学性能のうち圧縮破壊に着目し、フライアッシュ添加量を変えた再生骨材コンクリートを作製し、材齢 28 日、56 日、91 日の3回に分けて圧縮強度試験を行った。加えて、材齢 91 日に圧縮破壊実験を行い、局所ひずみの挙動や破壊領域等の圧縮破壊特性を検討した。

2. 実験概要

2.1 再生骨材

(1) 再生骨材の製造

再生骨材を製造するために、まず原コンクリートを製造した。表-1に原コンクリートの配合と材齢 28 日の圧縮強度を示す。原コンクリートの粗骨材には、性状が同程度の2種類の川砂利(G1, G2)を使用した。原コンクリートは打込みの24時間後に脱型し、材齢 28 日まで水中養生(水温 20°C)を行った。養生後、ジョークラッシャーで最大粒径が 25mm となるように破砕した。破砕後に 5mm ふるいをういて 5mm 以下のものを取り除き、粒径範囲 5~25mm の再生粗骨材とした。なお、コンクリートの練り混ぜは原コンクリートの材齢 78 日または 92 日に行い、圧縮強度試験は原コンクリートの材齢 106 日または 120 日に開始した。

(2) 再生骨材の性質

表-2に実験で使用した再生骨材と普通骨材(川砂利)の密度および吸水率を示す。再生骨材は普通骨材と比べて、高い吸水率となった。再生骨材の微粒分量は 0.1%、

表-1 原コンクリートの配合および圧縮強度

W/C (%)	単位量(kg/m ³)						圧縮強度 (N/mm ²)
	C	W	S1	S2	G1	G2	
55.0	284	156	347	520	601	401	37.2

*1 富山県立大学 工学部 環境工学科 (学生会員)

*2 富山県立大学 工学部 環境工学科 准教授 博(工) (正会員)

*3 富山県立大学大学院 工学研究科 環境工学専攻 (学生会員)

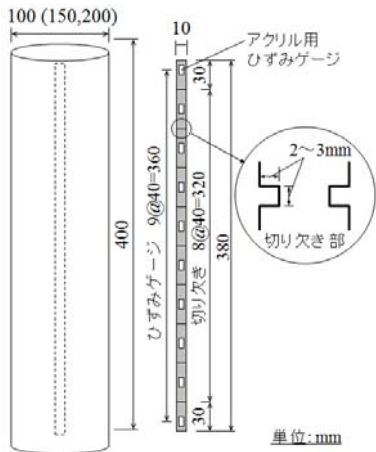


図-1 円柱供試体とアクリル棒

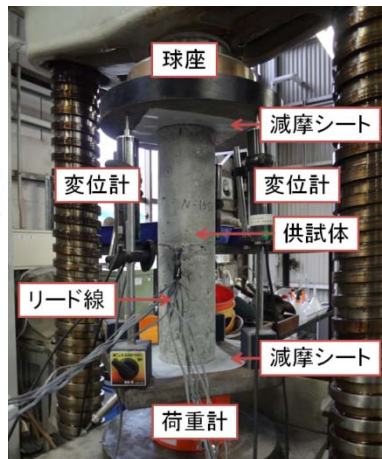


写真-1 荷荷状況

表-2 骨材の密度および吸水率

	再生骨材	普通骨材 (川砂利)
表乾密度(g/cm ³)	2.45	2.63
絶乾密度(g/cm ³)	2.32	2.59
吸水率(%)	5.32	1.59

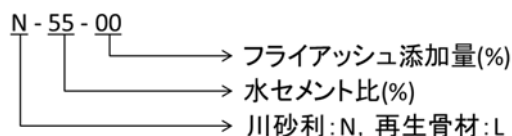
表-3 実験ケースと配合

骨材種類	W/B (%)	FA量 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
				W	C	FA	S	G
普通骨材	55	0	41.5	140	255	0	786	1128
		15		140	217	38	786	1128
		25		140	191	64	786	1128
再生骨材	55	0	49.0	138	250	0	904	860
		15		138	213	38	904	860
		25		138	188	63	904	860
	45	0		178	395	0	826	813
		15		178	336	59	826	813
		25		178	296	99	826	813

実積率は58.6%であった。製造した再生骨材はこれらの試験結果からJIS A 5023 再生骨材Lに相当する。

2.2 実験ケース

表-3 に実験ケースと配合を示す。結合材として、セメントには普通ポルトランドセメントを用い、混和材にはフライアッシュを用いた。粗骨材は川砂利を用いた普通骨材と再生骨材の2種類、水結合材比W/Bは45%と55%の2水準、フライアッシュ(以下、FAとも記す)の添加量は0、15、25%の3水準とし、これらを組み合わせた9ケースで実験を行った。ケース名を骨材種類、W/B、FA添加量から以下のように定めた。



FAはJIS II種相当のものであり、3年間の平均値で強熱減量2.0%、比表面積4742cm²/g、フロー値比107%、活性度指数(材齢28日)91%であった⁶⁾。

コンクリートの配合は、スランプの目標値を8.0cm(範囲±2.5cm)、空気量の目標値を4.5%(範囲±1.5%)として決めた。練り混ぜでは、AE減水剤と空気量調整剤の添加量を調整して、スランプと空気量を目標値に近づけたものの、FAを添加したL-55-25とL-45-25のスランプが目標範囲を上回り、L-45-15とL-45-25の空気量が目標範囲を下回った。これらを除くケースでは、目標値をおおむね満たす値となった。

圧縮強度試験では各ケース9体の円柱供試体を用意し、各材齢(28、56、91日)に3体の試験を実施した。圧縮破壊実験では各ケース2体の円柱供試体を用意し、材齢91日に実験を実施した。ただし、圧縮破壊実験では荷荷の際、急激に破壊し、最大応力点以降のひずみが計測できなかったケースは、軟化域の検討から除くこととした。

2.3 圧縮強度試験

JIS A 1132 に準じて直径100mm、高さ200mmの円柱供試体を作製し、JIS A 1108 に準じて圧縮強度試験を行った⁷⁾。ひずみはコンプレッソメータを用いて計測し、データロガーでデータを記録した。

2.4 圧縮破壊実験

(1) 供試体概要

圧縮破壊挙動の検討を行うために、アクリル棒を埋め込んだ円柱供試体の圧縮破壊実験を行った^{8)、9)}。図-1に円柱供試体の形状寸法を示す。供試体は直径100mm、高さ400mmの円柱型枠の中に、1辺10mm、長さ380mmのアクリル棒を型枠の上端および下端に10mmの空間を設けて型枠中央に固定し、コンクリートを打ち込むことで作製した。アクリル棒には、コンクリートとの付着を確保するために深さ2~3mm、幅2~3mmの切り欠きを40mm間隔で設け、切り欠きの中間にアクリル用のひずみゲージを貼付した。ひずみゲージには貼付後に防水処理を施し、リード線は型枠の鉛直方向の中央部分より外側に取り出した。

(2) 荷荷方法

写真-1に荷荷状況を示す。荷荷は万能試験機を用い、荷荷速度0.005mm/s以下で荷荷を行った。万能試験機の供試体上端部には球座を配置した。また供試体の両端部には、供試体と支圧板の減摩のため、テフロンシートにシリコングリスを挟んだ減摩シートを配置した。

測定は、荷重、供試体の鉛直変位、供試体内部のひずみ(局所ひずみ)について行い、荷荷中にデータロガーで記録した。供試体の鉛直変位は、下部の支圧板に固定した4個の変位計で上部の支圧板の移動量を測定した。局所ひずみは、アクリル棒に貼付したひずみゲージから測定した。

3. 圧縮強度試験の結果

3.1 粗骨材種類の影響

表-4 に各ケースの圧縮強度とヤング係数の試験結果を示す。フライアッシュ添加量が等しいとき、普通骨材より再生骨材の方が高い強度を示した。渡邊らの研究では、吸水率約 5%の再生骨材を用いたコンクリートの強度が砕石を用いた値に比べ約 15%小さくなっており、今回の実験では異なる傾向となった⁴⁾。

粗骨材の形状が粗いと表面積が大きく、骨材とセメントペーストとの界面の付着面積が大きくなる。その結果、水セメント比が同じ場合に圧縮強度が大きくなることが明らかにされている¹⁰⁾。本実験で使用した再生骨材は、原コンクリートに川砂利を用いたものの、破碎することで砕石と同様に表面形状が粗くなった。そのため、川砂利の普通骨材を用いたケースより圧縮強度が高くなり、既往の知見と異なった傾向になったものと考えられる。

3.2 材齢とフライアッシュ量の影響

表-4 の材齢に着目すると、すべてのケースで材齢とともに圧縮強度が増加しており、特に FA を添加したケースの増加量が大きくなった。図-2 に L-45 のケースの FA 添加量と圧縮強度の関係を示す。材齢 28 日から 91 日の強度増加量は、FA を 15% 添加したケースで最も大きく、再生骨材を用いた場合でも、FA による強度増進効果が確認できた。N-55 と L-55 のケースも同様に、FA 添加量 15% のケースの強度増加量が最も大きくなった。また、FA 添加量 25% のケースより、15% のケースの方が高い圧縮強度となったことから、最適な FA 添加量が存在すると思われる。

3.3 結合材水比 B/W の影響

図-3 に材齢 91 日の再生骨材を用いたケースの結合材水比 B/W と圧縮強度の関係を示す。同図には原コンクリートの配合計算に用いた B/W と圧縮強度の関係をあわせて示す。FA を添加したケースの直線の傾きと、配合計算に用いた B/W と圧縮強度の直線の傾きが同様の傾向を示した。そのため、FA を添加した再生骨材コンクリートを用いた場合でも、通常のコンクリートと同様に配合強度から水結合材比 W/B を決定できると考えられる。

FA 添加量 0% のケースにおいて、直線の傾きが比較的小さくなった。再生骨材コンクリートの圧縮強度が大きくなると、結合材水比 B/W を大きくしても強度が増加しない傾向となる既往の知見と一致した²⁾。しかしながら、本実験でフライアッシュを添加することで再生骨材コンクリートが高強度域まで適用できる可能性を示した。

3.4 ヤング係数

図-4 に全材齢のヤング係数と圧縮強度の関係を示す。同図には比較のため、土木学会コンクリート標準示方書・設計編（以下、示方書と記す）で定められたヤング

表-4 圧縮強度試験の結果一覧

ケース名	圧縮強度(N/mm ²)			ヤング率(kN/mm ²)		
	28日	56日	91日	28日	56日	91日
N-55-00	27.8	30.1	34.6	25.7	27.4	28.2
N-55-15	26.7	32.5	36.5	23.8	26.4	27.7
N-55-25	23.0	26.7	30.7	22.3	24.0	26.8
L-55-00	33.0	37.2	41.1	24.1	26.1	26.7
L-55-15	29.0	36.0	40.0	23.4	24.8	27.8
L-55-25	24.7	30.3	33.8	21.2	23.3	26.3
L-45-00	38.5	42.7	46.4	25.3	26.4	28.6
L-45-15	37.0	43.2	50.5	25.1	26.0	29.0
L-45-25	33.3	39.1	43.8	22.6	24.3	27.5

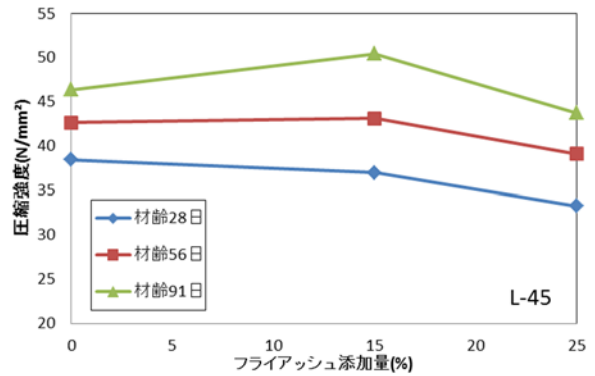


図-2 フライアッシュ添加量と圧縮強度の関係

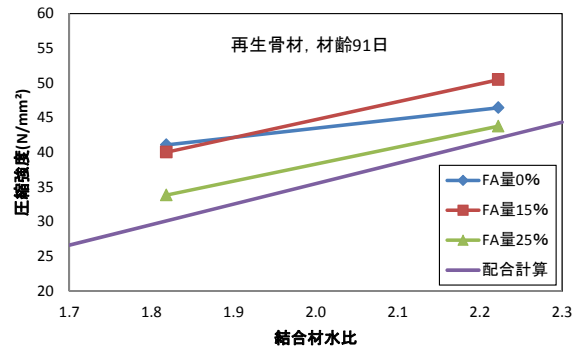


図-3 結合材水比と圧縮強度の関係

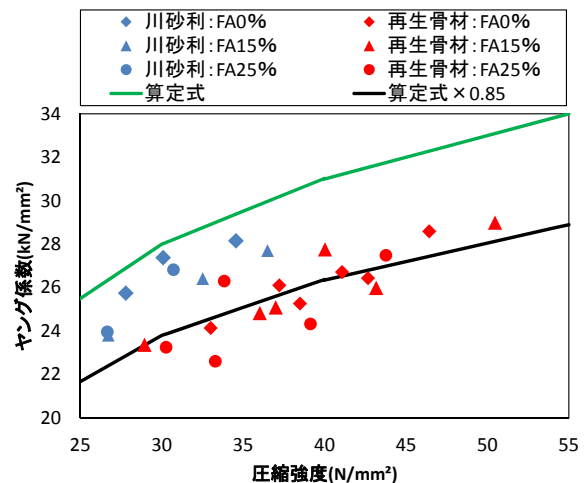


図-4 圧縮強度とヤング係数の関係

係数の算定式（式(1)）によって求めた直線も示した¹⁾。

$$E_c = \left(A + \frac{f'_c - B}{C} \right) \times 10^4 \quad (1)$$

ここに、 E_c : ヤング係数 (N/mm²), f'_c : 圧縮強度 (N/mm²),
 A, B, C : 圧縮強度の範囲に応じた係数

同一の圧縮強度に対する再生骨材ケースのヤング係数は、普通骨材の値に比べ低い傾向が見られた。最小二乗法を用いて式(1)に示す示方書算定式のヤング係数を再生骨材の値に近似させると、図のように示方書算定式の85%となった。普通骨材と再生骨材ともに、FA添加量とヤング係数との関係に相関は見られなかった。

4. 圧縮破壊実験の結果

4.1 応力-平均ひずみ関係

表-5に圧縮破壊実験の結果一覧を示す。最大応力は、φ100-h200mmの円柱供試体から得た圧縮強度と比べ、W/Bが55%のケースでは84~103%、W/Bが45%のケースでは70%~80%の値になった。高い圧縮強度では端面に設置した減摩シートの効果が大きくなり、最大応力が圧縮強度に比べて小さくなったと考えられる。

図-5に圧縮破壊実験から得られた応力と平均ひずみの関係の一例を示す。応力は実験時の荷重を断面積で除した値であり、平均ひずみは変位の平均値を供試体の初期長さ(400mm)で除した値である。なお、同図の曲線は、一方向繰り返し載荷から得られた応力-ひずみ履歴の包絡線を表している。応力が5N/mm²以下では、コンクリートとアクリル棒の付着が不完全になり、局所ひずみが正しく計測されなかったケースがあったことから、最大応力点以降の応力下限値を5N/mm²として整理した。

最大応力点までの範囲において、普通骨材(N-55)と再生骨材(L-55)の履歴は同様の傾向を示した。最大応力点以降に着目すると、N-55の両ケースの応力は平均ひずみの増加とともに最大応力点から15N/mm²程度まで応力が低下した。それに対して、L-55の両ケースの応力は平均ひずみの増加なしに低下し、若干ひずみが減少した。これは、円柱供試体の健全な部分の弾性変形が要因である。FA添加による応力-平均ひずみ関係の差異は明確にはならなかった。

4.2 局所ひずみと破壊域長さ

図-6に局所ひずみと供試体高さの関係を示す。局所ひずみは、最大応力点と応力が最大応力の8割まで低下した点の値である。L-55-00の局所ひずみは供試体高さ260~400mmの長さ140mmで増加していることに対して、N-55-00の局所ひずみは供試体高さ60~220mmの長さ160mmで増加し、L-55-00の方がやや狭くなった。この最大応力時点から最大応力の8割の点までに局所ひずみ

表-5 圧縮破壊実験の結果一覧

ケース名	圧縮強度 (材齢91日) (N/mm ²)	最大応力*1 (N/mm ²)		破壊域長さ (mm)	
		No.1	No.2	No.1	No.2
N-55-00	34.6	30.5	—	163	—
N-55-15	36.5	30.8	—	188	—
N-55-25	30.7	30.5	—	162	—
L-55-00	41.1	41.5	37.2	149	159
L-55-15	40.0	36.9	37.8	147	140
L-55-25	33.8	34.8	33.2	165	165
L-45-00	46.4	35.1	37.2	100	111
L-45-15	50.5	35.6	35.6	133	87
L-45-25	43.8	35.0	—	153	—

*1 (表中-) : 急激な破壊で検討から除いたケース

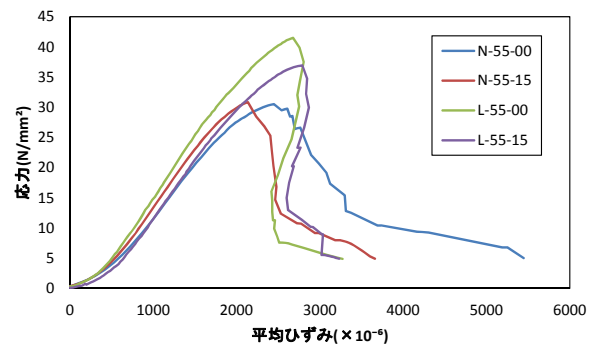
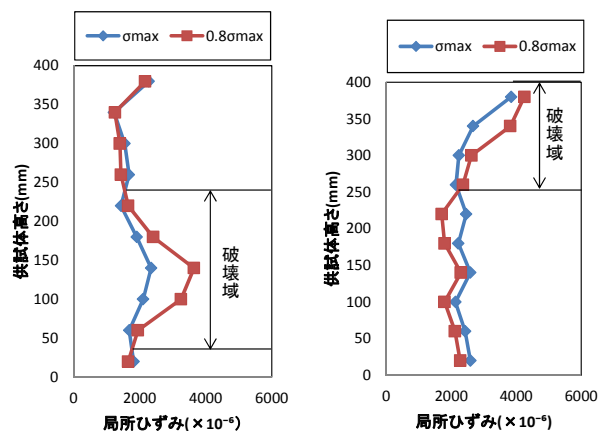


図-5 応力と平均ひずみの関係



(a)N-55-00

(b)L-55-00

図-6 局所ひずみと供試体高さの関係

が増加し続ける部分を「破壊域」と定義し、それ以外の部分を「遷移域・除荷域」と定義した⁹⁾。なお、遷移域とは局所ひずみが最大応力点から一旦減少し、その後増加に転じる部分であり、除荷域とは局所ひずみが最大応力点以降に常に減少する部分である。表-5に示すように、普通骨材を用いた3ケースの破壊域長さ L_p は162~188mmであることに対して、再生骨材を用いた11ケースの破壊域長さは87~165mmであった。

破壊域長さ L_p は、最大応力 σ_{max} に反比例することが明らかにされている⁸⁾。そのため、最大応力による影響を

取り除き、骨材種類と FA 添加量による影響のみを比較するために、破壊域長さ L_p を最大応力 σ_{max} との積 ($L_p \cdot \sigma_{max}$) で表し、図-7 に示した。FA 添加量 0% のとき、N-55 と L-55 の $L_p \cdot \sigma_{max}$ は同等の値を示したのに対し、L-45 の $L_p \cdot \sigma_{max}$ が小さくなった。それに対して、フライアッシュを添加することによって、L-45 の $L_p \cdot \sigma_{max}$ が N-55 と L-55 の値に近づく傾向が見られた。

4.3 ピークひずみ

普通骨材コンクリートと再生骨材コンクリートの応力と最大応力点における破壊域と遷移域・除荷域のひずみ（ピークひずみ）の関係を図-8 と図-9 に示す。再生骨材コンクリートのピークひずみは $2000 \sim 3000 \times 10^{-6}$ に分布し、普通骨材コンクリートのピークひずみは $1500 \sim 2500 \times 10^{-6}$ に分布しており、再生骨材コンクリートのピークひずみが大きくなった。

渡辺らはピークひずみが最大応力の 2/3 乗に比例するとして式(2)を示している¹³⁾。同図に $W/B55\%$ 、FA 添加量 15% の曲線および α の算定値を示す。

$$\varepsilon_{F0} = \alpha \times \sigma_{max}^{2/3} \times 10^{-6} \quad (2)$$

ここに、 ε_{F0} : ピークひずみ (-), σ_{max} : 最大応力 (N/mm²)
 α : 係数

本実験における式(2)の係数 α とフライアッシュ添加量の関係を図-10 に示した。川砂利を用いた既往の研究の α は、破壊域で 265、遷移域・除荷域で 210 であり、本実験でも同程度の値が得られた⁹⁾。骨材種類を比較すると、破壊域と遷移域・除荷域ともに、再生骨材コンクリートの α が普通骨材コンクリートの α に比べて大きくなった。再生骨材の表面には原コンクリートのモルタル分が付着しており、モルタルの硬さが通常の粗骨材に比べ小さいことから、ピークひずみが大きくなったと考えられる¹⁰⁾。

FA 添加量に着目すると、ほとんどのケースで FA 添加量の増加に伴い α が減少する傾向が見られた。この FA 添加によるピークひずみの低減は、最大応力までのコンクリート内部の微細なひび割れがフライアッシュにより抑制されたことが要因と考えられる。

4.4 圧縮破壊エネルギー

FA 添加量と圧縮破壊エネルギーの関係を図-11 に示す。圧縮破壊エネルギーは、破壊域の荷重-局所変位関係に囲まれた面積を破壊領域体積で除した値である。再生骨材を用いた L-45 において、FA を 15% 添加したケースの圧縮破壊エネルギーは FA 添加 0% の値に比べ、増加する傾向が見られた。しかしながら、試験数が少ないことや数値のばらつきが大きいことから、試験数を増やすこと等の今後の課題としたい。

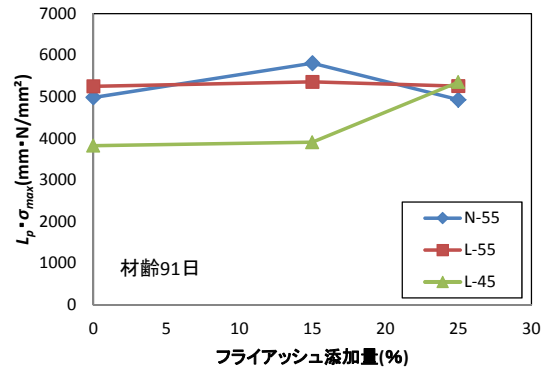


図-7 フライアッシュ添加量と $L_p \cdot \sigma_{max}$ の関係

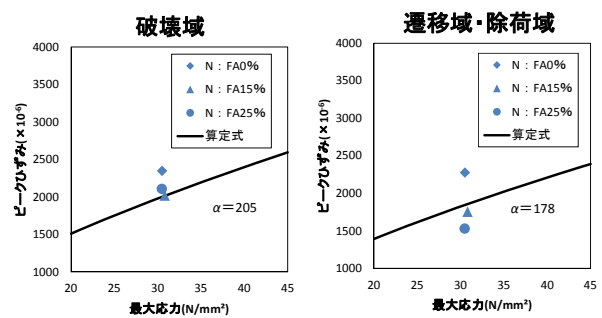


図-8 普通骨材（川砂利）のピークひずみ

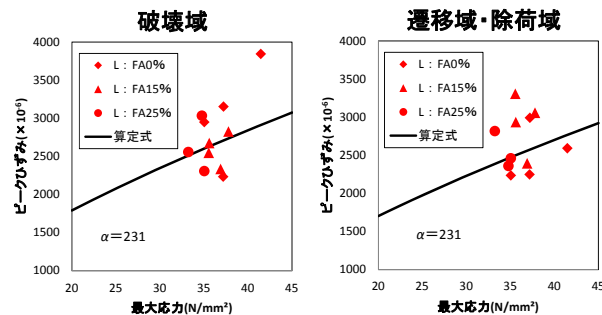


図-9 再生骨材のピークひずみ

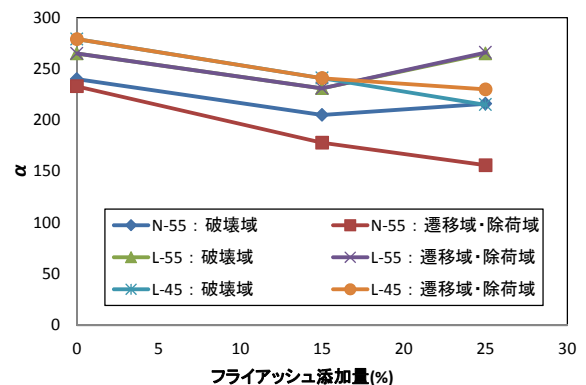


図-10 フライアッシュ添加量と α の関係

5. まとめ

本研究によって得られた知見を以下に示す。

- (1) 圧縮強度試験の結果から、再生骨材コンクリートにおいても、フライアッシュによる長期的な圧縮強度の増進効果が確認できた。また、水結合材比が同じ場合、再生骨材コンクリートの圧縮強度が川砂利を用いたコンクリートの強度に比べ大きくなった。
- (2) フライアッシュを添加した再生骨材コンクリートの圧縮強度は、通常のコンクリートと同様に、結合材水比に比例した。また圧縮強度が 50N/mm^2 までの範囲において、結合材水比に対して強度が増加する傾向が見られ、フライアッシュを添加することで再生骨材コンクリートを高強度域まで適用できる可能性を示した。
- (3) 再生骨材コンクリートのヤング係数は、フライアッシュの添加に係わらず、通常のコンクリートの約 85% の値になった。
- (4) 圧縮破壊実験の結果から、再生骨材コンクリートの W/B 45% における基準化した破壊域長さは、他のケースの値に比べ小さく、破壊が局所化することが確認された。それに対して、L-45 はフライアッシュを添加することで、N-55 と L-55 の値に近づく傾向が見られた。
- (5) 再生骨材を用いた L-45 において、FA を 15% 添加したケースの圧縮破壊エネルギーは FA 添加 0% の値に比べ、増加する傾向が見られた。

謝辞

本研究の一部は、科学技術費補助金（基礎研究（C）25420461）により行った。株式会社あづまコンクリート工業の毛利幸一氏と墨田清太郎氏に、供試体の製作にご協力頂きました。また、北陸電力株式会社のフライアッシュをご提供頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書改訂資料，コンクリートライブラリー138，2013
- 2) 土木学会：電力施設解体コンクリートを用いた再生骨材コンクリートの設計施工指針（案），コンクリートライブラリー120，2005
- 3) 土木学会：循環型社会に適合したフライアッシュコンクリートの最新利用技術，コンクリートライブラリー132，2009
- 4) 渡邊英樹，阿部道彦，嵩英雄，志村重顕：再生粗骨材の品質が再生骨材コンクリートの強度と耐久性

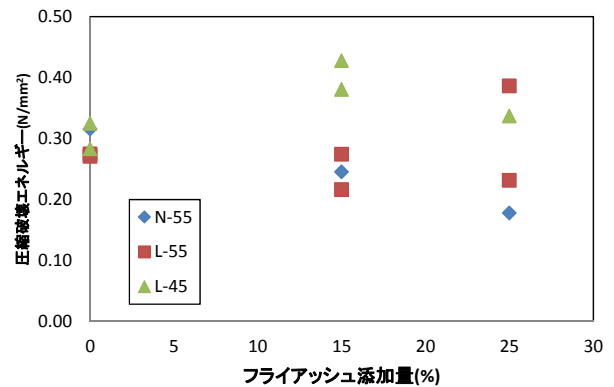


図-11 フライアッシュ添加量と破壊エネルギーの関係

- に及ぼす影響に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，No.1121，pp.241-242，2003
- 5) 佐川泰貴，松下博通，鶴田浩章，古賀隆一：再生骨材の品質がコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.1265-1270，2003
 - 6) 北陸地方におけるコンクリートへのフライアッシュの有効利用促進検討委員会：報告書（富山・石川・福井版），pp.7-13，2013
 - 7) 日本規格協会：JISハンドブック，生コンクリート，2012
 - 8) Nakamura, H and Higai, T. : Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete , Seminar on Post- Peak Behavior of RC Structures Subjected to Seismic Loads , Japan concrete Institute , Vol.2 , pp.259-272, 1999
 - 9) 伊藤始，岩波光保，横田弘，岸添拓，石川靖晃，久保全弘：短繊維補強コンクリートの圧縮破壊性状に関する実験的研究，土木学会論文集，Vol.62，No.2，pp.341-355，2006
 - 10) 戸祭邦之：コンクリートの実像—その性能と性状—，1991
 - 11) 土木学会：コンクリート標準示方書・設計編，2012
 - 12) 松井淳史，伊藤始：低品質再生骨材を用いたコンクリートの圧縮破壊性状に関する基礎的研究，土木学会中部支部研究発表会，V-26，pp.519-520，2010
 - 13) 渡辺健，二羽淳一郎，横田弘，岩波光保：圧縮破壊の局所化を考慮したコンクリートの応力-ひずみ関係の定式化，土木学会論文集，No.725/V-58，pp.197-211，2003