

論文 フライアッシュと再生骨材を混合したエコセメントコンクリートの超高強度領域までの強度特性

陶山 裕樹*1・高巢 幸二*2・松藤 泰典*3

要旨: 本論文では普通エコセメント, フライアッシュおよび再生骨材 M を使用したコンクリートの強度特性について検討を行った。普通エコセメントを使用したコンクリートにおける強度特性の傾向は, 多くの場合で一般的なコンクリートと同様であった。一方で, 再生骨材 M に起因する強度低下は, 圧縮強度が 60N/mm² 以下の領域で比較的小規模に, 60N/mm² を超える領域で顕著にあらわれた。これは, 両領域でモルタル部分と骨材部分の破壊の順序が逆転するためである。また, フライアッシュを外割混合することで再生骨材 M に起因する強度低下が緩和される場合があること, および静弾性係数と割裂引張強度の特性を明らかにした。

キーワード: 普通エコセメント, 再生骨材 M, フライアッシュ, 外割, 圧縮強度, 弾性係数, 引張強度

1. はじめに

近年, コンクリート業界では資源循環や環境保全の考えが重視されるようになり, 副産物由来の材料を使う機会が増加している。このような社会背景を受けて筆者らは, 普通エコセメント, 再生骨材 M およびフライアッシュを対象とし, これらの材料を組み合わせたコンクリートについて, 建築物の構造体に利用することを前提にした強度特性の検討を行ってきた¹⁾。既報において水セメント比が 65%のコンクリートをベースに実験を行った一方で, 水セメント比の小さい高強度コンクリート以上の領域における強度特性については解明に至らなかった。

本論文では, 普通エコセメント, フライアッシュおよび再生骨材 M を使用したコンクリートの強度特性について, 水セメント比の条件を変化させた各種実験を行うことで, 既報¹⁾で解明に至らなかった超高強度コンクリートの領域における特性までを明らかにした。そのなかで, 同コンクリートに圧縮応力を加えたときに生じたマイクロクラックを観察し, コンクリートが破壊に至るまでの状況を交えた検討を行った。

2. 実験概要

今回の実験で使用した材料の物性を表-1 に示す。セメントには普通エコセメント (JIS R 5214), 骨材には天然骨材と再生骨材を使用した。再生骨材の品質は, 細骨材および粗骨材ともに JIS A 5022 に規定されるコンクリート用再生骨材 M に適合するものであった。フライアッシュには JIS A 6201 の II 種に適合するものを使用した。

調合を表-2 に, 調合記号の説明を図-1 に示す。既報¹⁾において水セメント比を 65%に統一したのに対し,

今回の実験では, 幅広い強度域での強度特性を明らかにする観点から, 水セメント比を 55%, 40%, 25%および 20%に設定した。NN シリーズは海砂と砕石を組み合わせたもの, RN シリーズは海砂と再生粗骨材 M を組み合わせたもの, RR シリーズは再生細骨材 M と再生粗骨材 M を組み合わせたものを意味する。これらの 3 つのシリーズに対して, それぞれフライアッシュ 200kg/m³を細骨材と置換することで外割混合した。

表-1 使用材料

項目/記号	種類	主な物性
セメント/C	普通エコセメント	密度 3.15g/cm ³
水/W	上水道水	—
細骨材/S	海砂 北九州市岩屋沖産	絶乾密度 2.54g/cm ³ 吸水率 1.55% 粗粒率 2.57
	再生細骨材 M	絶乾密度 2.20g/cm ³ 吸水率 4.43% 粗粒率 2.90
粗骨材/G	砕石 岡垣町上畑産	絶乾密度 2.72g/cm ³ 吸水率 1.69% 実積率 62.2% 絶乾密度 2.81g/cm ³ 吸水率 1.06% 実積率 57.62%
	再生粗骨材 M	絶乾密度 2.44g/cm ³ 吸水率 3.64% 実積率 59.4%
混和材/F	フライアッシュ	密度 2.17 g/cm ³ 強熱減量 2.32% 比表面積 3,470cm ² /g 密度 2.21 g/cm ³ 強熱減量 1.40% 比表面積 3,410cm ² /g
化学混和剤 /AD	高性能 AE 減水剤 標準型 I 種	ポリカルボン酸 エーテル系

*1 北九州市立大学 国際環境工学部建築デザイン学科講師 工博 (正会員)

*2 北九州市立大学 国際環境工学部建築デザイン学科准教授 工博 (正会員)

*3 北九州市立大学 国際環境工学部建築デザイン学科特任教授 工博 (正会員)

表-2 調査

記号	W/C (%)	単体量 (kg/m ³)					AD (C+F)%
		W	C	F	S	G	
NN55-55	55	180	327	0	636	1154	0
RN55-55				0	683	971	0
RR55-55				0	601	971	0
NN55-33				200	410	1154	0.4
RN55-33					457	971	0.4
RR55-33					402	971	0.3
NN40-40	40	170	425	0	699	1068	0.3
RN40-40				0	742	898	0.4
RR40-40				0	653	898	0.3
NN40-27				200	472	1068	0.4
RN40-27					516	898	0.5
RR40-27					454	898	0.4
NN25-25	25	165	660	0	596	971	0.8
RN25-25				0	570	869	0.7
RR25-25				0	493	869	0.5
NN25-19				200	366	971	1.5
RN25-19					340	869	1.5
RR25-19					294	869	1.3
NN20-20	20	165	825	0	425	1034	1.4
RN20-20				0	467	869	1.1
RR20-20				0	411	869	0.9
NN20-16				200	198	1034	2.7
RN20-16					241	869	2.5
RR20-16					212	869	2.5

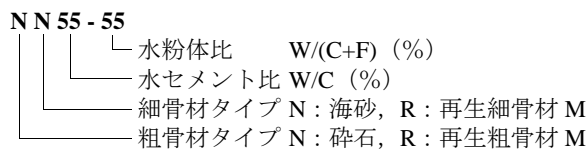


図-1 調査記号

試料の練混ぜには、オムニミキサーを使用した。水セメント比が 55%および 40%の試料は目標スランプを 18.0±2.5cm、水セメント比が 25%および 20%の試料は目標スランプフローを 60±10cm に設定し、両者とも目標空気量を 3.0±1.0%に設定した。試料はφ100×200mm の簡易型枠に打設され、材齢 1 日に脱型、その後試験材齢まで標準養生された。

試験項目は、圧縮強度試験 (JIS A 1108)、割裂引張強度試験 (JIS A 1113) およびマイクロクラックの観察である。圧縮強度試験の際には、検長 100mm コンプレッソメータを使用して圧縮軸の静ひずみを測定し、JIS A 1149 にもとづいて静弾性係数を算出した。マイクロクラックの観察は、文献²⁾を参考に、圧縮強度の 0.3、0.6 および 1.0 倍に相当する応力を加えた後の試料を、コンクリートカッターで 2 等分し、その切断面で目視されたマイクロクラックの長さを記録した。マイクロクラックの観察を容易にするため、切断面に蛍光塗料を散布し、ブラックライトを照らしてマイクロクラックを発光させた。併せて、圧縮応力を加える前の試料に収縮などに起因する潜在的なクラックがなかったことを、予備試料によって確認した。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度

(1) 経時変化

圧縮強度の経時変化を図-2 に示す。すべての試料において材齢の経過にともなう圧縮強度の増進が確認された。その上で、全体的に NN シリーズ、RN シリーズ、RR シリーズの順に圧縮強度が低くなる傾向が確認された。この傾向は、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートに再生骨材を混入した場合の強度特性について報告した多くの論文³⁾、および水セメント比を 65% とした既報¹⁾と同様であった。このことから、普通エコセメントを使用したコンクリートにおいても、水セメント比が 65% から 20% の範囲で、一般的なコンクリートと同様に、再生骨材 M が混入することによって圧縮強度が低下することが示された。

また、フライアッシュを細骨材代替として外割混合した試料は、同水セメント比かつ同じ骨材の組み合わせにおいて、セメント単味の試料より圧縮強度が高くなる傾向が確認された。一般的なコンクリートにおいて、フライアッシュを外割混合することで圧縮強度が増加することが、多くの論文で報告されている⁴⁾。普通エコセメントを使用した今回の実験結果においては、水セメント比が比較的高い 55% でフライアッシュを外割混合することによる強度増加が顕著にあらわれた。特に、普通骨材を使用した NN55-55 より再生骨材 M を使用した RR55-33 の方が高い圧縮強度を示すほどであった。

一方で水セメント比が 20% の場合、フライアッシュを外割混合しても圧縮強度が増加せず、逆にセメント単味の試料より圧縮強度が低くなった。この逆転現象は、コンクリート中の粉体量が過大になったことで生じたと考えられる。今回の実験において単位粉体量が最大となった NN20-16 は、粉体成分が 1,025kg/m³ に達した。今回の実験で使用した高性能 AE 減水剤とミキサーの組み合わせでは、同試料を十分に攪拌できなかったことが考えられる。以下の考察では、NN20-16、RN20-16 および RR20-16 の実験結果を除外した。

(2) セメント水比との関係

材齢 28 日のセメント単味の試料におけるセメント水比と圧縮強度の関係を図-3 に示す。同図には、既報¹⁾の実験結果を加えた上で、エコセメントを使用したコンクリートの圧縮強度を報告した論文^{5),6),7)}において示された近似式を併記している。本論文における NN シリーズの実験結果は、セメント水比が 2.50 以下 (水セメント比 40% 以上) の領域で既往の近似式と良好に対応した。

図-3 のセメント水比を拡大したうえで、フライアッシュを外割混合した試料の実験結果を加えたものを図-4 に示す。RN シリーズおよび RR シリーズの実験結果は、

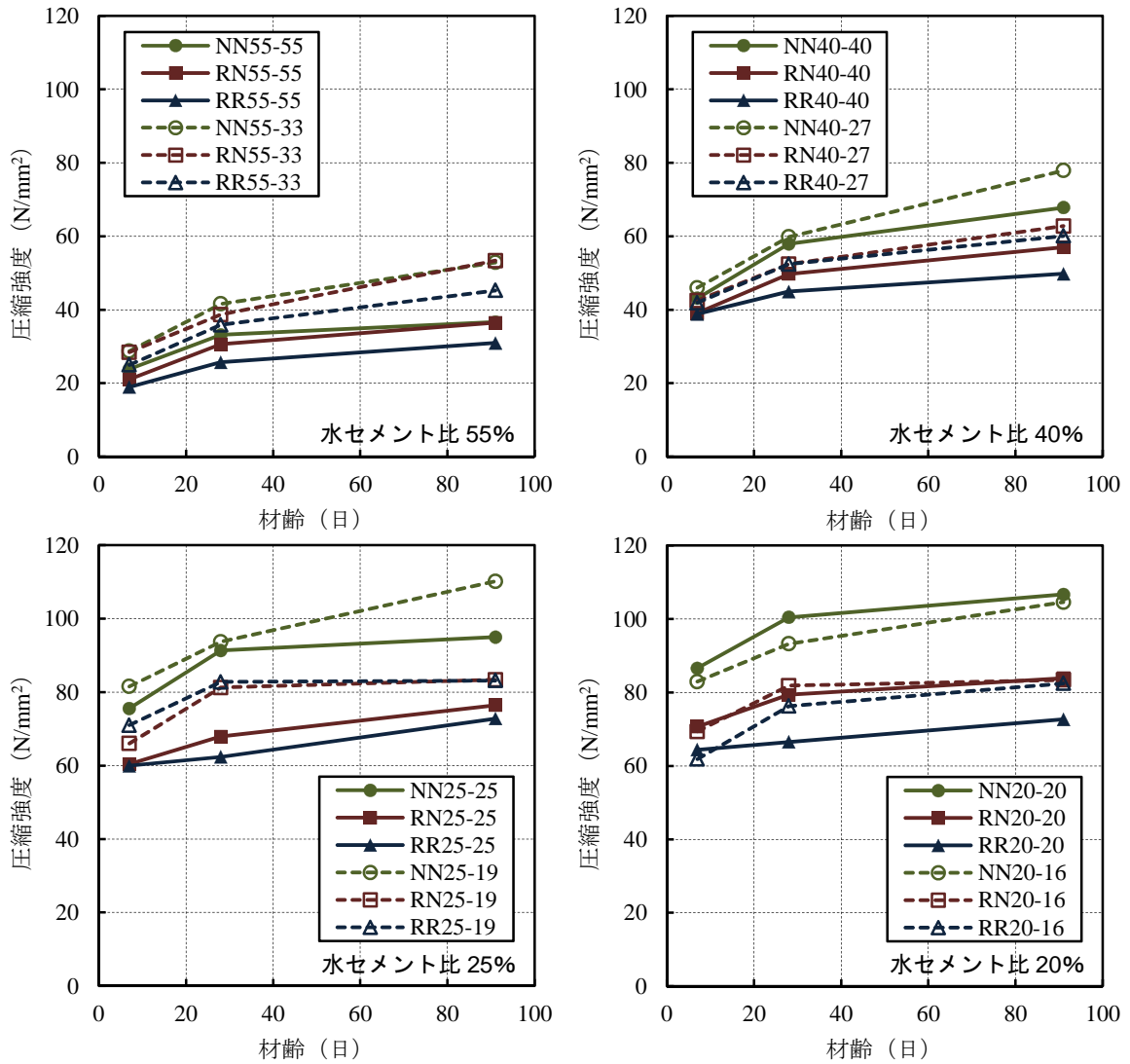


図-2 圧縮強度の経時変化

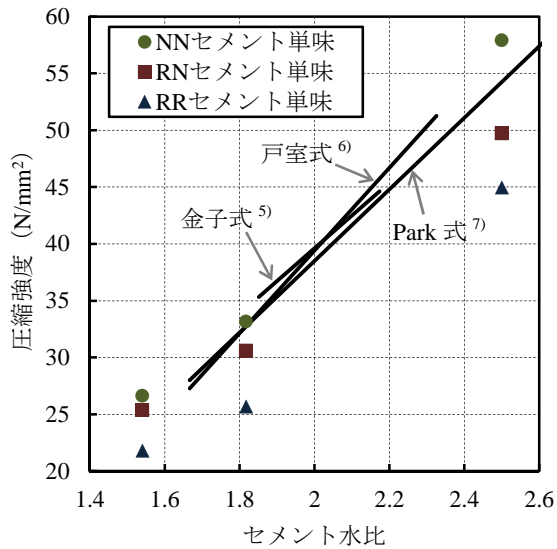


図-3 セメント水比と圧縮強度の関係（普通強度）

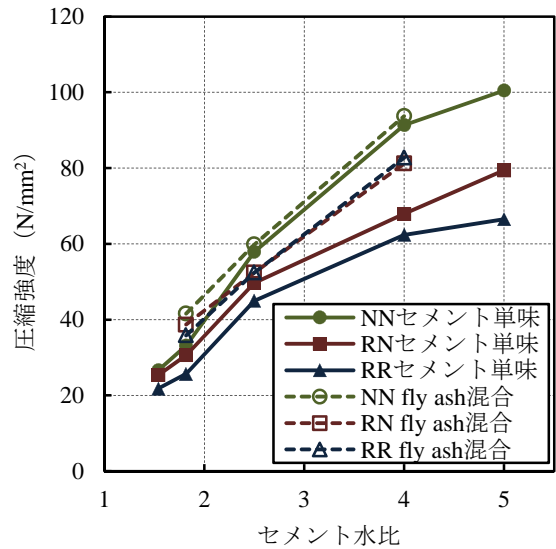


図-4 セメント水比と圧縮強度の関係（超高強度まで）

NN シリーズの圧縮強度が超高強度コンクリートの下限値である 60N/mm²程度を境界にして、それ以下の領域と、それを超える領域で異なる傾向が確認された。例えば、

セメント水比が 2.50 以下の試料は 60N/mm²以下の領域に含まれる。その領域において RR シリーズが NN シリーズから 18%~23%の強度低下を示したのに対し、

60N/mm² を超える領域では強度低下が 32%~34%に増大した。

一方、フライアッシュを外割混合した試料の圧縮強度は、同条件のセメント単味の試料より高くなった。この傾向は、図-2 で示した圧縮強度の経時変化によって確認されたものと同じである。更に図-4 からは、フライアッシュを外割混合したコンクリートで、RN シリーズと RR シリーズに明確な強度差が生じなかった傾向が確認される。フライアッシュを外割混合したコンクリートは、圧縮強度の増加に対して静弾性係数の変化が小さいことが知られている⁸⁾。再生骨材を使用したコンクリートにおいて、付着モルタルと新モルタルの間に剛性のギャップが生じることを強度低下の一因と捉えた場合、フライアッシュを外割混合したコンクリートにおける静弾性係数が高くなりにくい特性が、剛性のギャップを緩衝したと推察される。また、フライアッシュを外割混合することによって、単純に再生細骨材 M の使用量が減少したことも影響したと推察される。これらの推論は今後、更に実験データを蓄積した上で検証する必要がある。

(3) 再生骨材を使用することによる強度低下

RN シリーズの圧縮強度を NN シリーズと比較したものを図-5 に示す。同図における近似式は、セメント単味の試料における関係をあらわしたものである。60N/mm² を境界にして圧縮強度の傾向が異なった前述の実験結果を反映させるため、NN シリーズの強度が 60N/mm² 以下の場合と 60N/mm² を超える場合に分けて近似式を求めた。本論文の実験結果から、原コンクリートの圧縮強度が 60N/mm² を超えると、再生粗骨材 M が混入することによる圧縮強度の低下が増大することが示される。こうした傾向は、セメント単味とフライアッシュを外割混合した試料に共通して確認された。

RR シリーズの圧縮強度を NN シリーズと比較したものを図-6 に示す。同図における近似式も、図-5 と同様に、セメント単味の試料における関係をあらわしたものであり、60N/mm² によって場合分けをしたうえで求められたものである。圧縮強度が 60N/mm² を超える領域で、再生粗骨材 M と再生細骨材 M がコンクリートの圧縮強度に与える負の影響が増大したことが示された。その一方で、フライアッシュを外割混合した RR シリーズは、全体的にセメント単味の近似式の上側に分布した。このことから、再生粗骨材 M と再生細骨材 M を使用することによる圧縮強度の低下が、セメント単味の試料より緩和されたことが示される。この強度低下緩和の傾向は、圧縮強度が高いほど、特に NN シリーズの圧縮強度が 60N/mm² を超える領域において顕著にあらわれた。

(4) 圧縮載荷時のマイクロクラック

材齢 28 日の試料において、圧縮応力の増加にともなっ

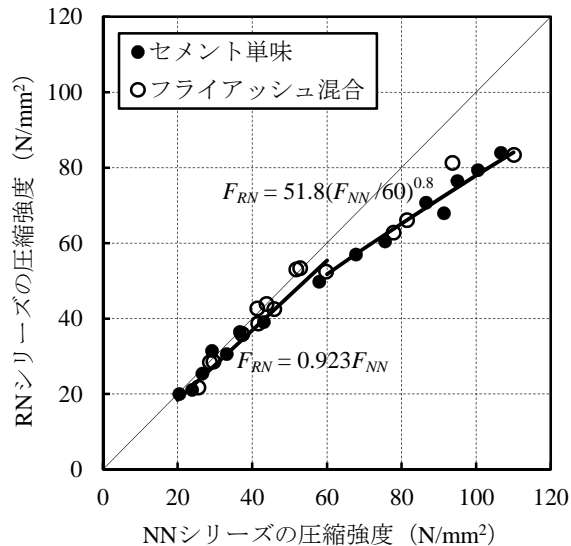


図-5 圧縮強度の比較 (NN-RN)

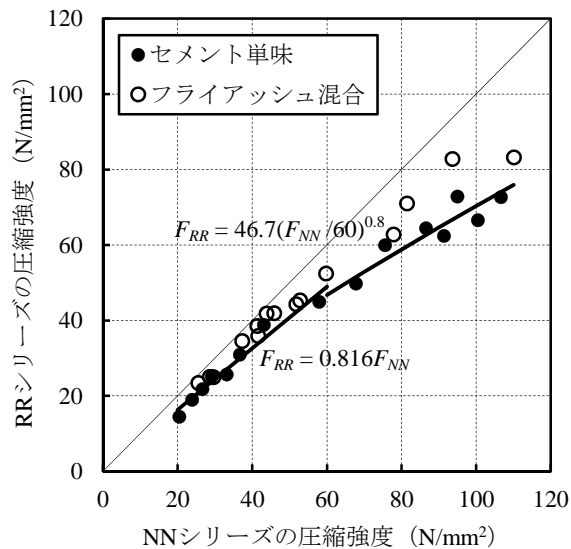


図-6 圧縮強度の比較 (NN-RR)

て発生したマイクロクラックの試料断面積に対する長さの比と、応力の関係を図-7 に示す。天然骨材を使用した NN55-55 および NN20-20 では、水セメント比に関わらず、骨材に生じたクラックとモルタルに生じたクラックが、応力の増加とともに成長して破壊に至る状況が確認された。これに対して RN55-55 および RR55-55 では、最大応力の 0.6 倍に達した時点で、モルタルのクラックが増大する傾向が確認された。モルタル部分の破壊が先行したことから、モルタルの品質が圧縮強度に対して骨材の品質より強い影響を与えることが推察される。一方、RN20-20 および RR20-20 では、最大応力の 0.3 倍に達した時点で骨材のクラックが増大する傾向が確認された。骨材部分の破壊が先行したことから、骨材の品質が圧縮強度に対してモルタルの品質より強い影響を与えることが推察される。こうしたマイクロクラックの発生部分の違いが、再生骨材 M を使用したエコセメントコンクリートで一定強度を境界にして圧縮強度の傾向を変える原因

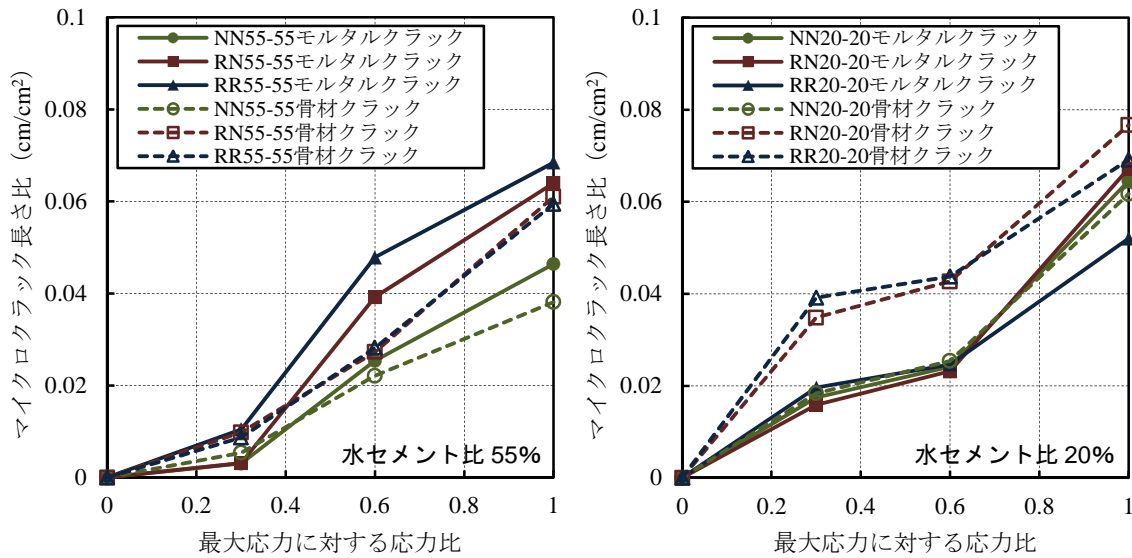


図-7 圧縮載荷時のマイクロクラックの発生状況

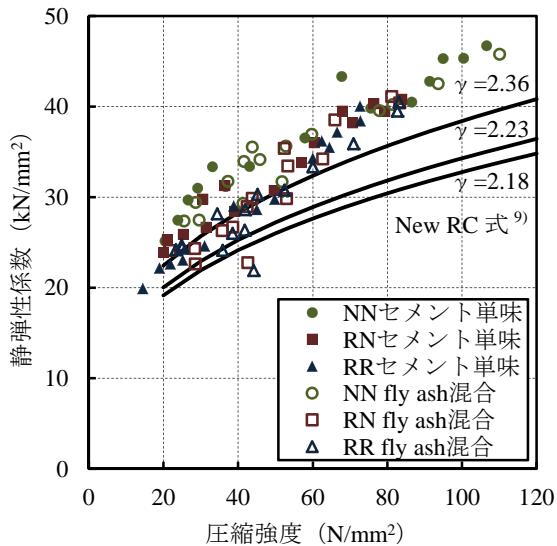


図-8 圧縮強度と静弾性係数の関係

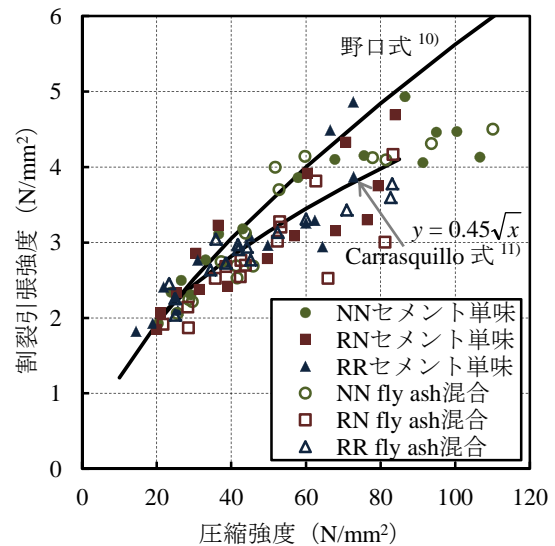


図-9 圧縮強度と割裂弾性係数の関係

になったことが考察される。

3.2 圧縮強度と静弾性係数の関係

圧縮強度と静弾性係数の関係を図-8 に示す。同図に併記された New RC 式⁹⁾におけるコンクリートの単位容積質量 γ の平均は、NN シリーズで 2.36 (t/m^3), RN シリーズで 2.23 (t/m^3), RR シリーズで 2.18 (t/m^3) であった。修正係数 k_1 および k_2 には 1.0 を代入した。今回の実験結果では、ほとんどのプロットが New RC 式より上側に分布し、圧縮強度に対して静弾性係数が卓越する傾向が確認された。この傾向は、全体的に出現したことから、今回の実験で使用した普通エコセメントに起因するものと考えられる。

一方、図-8 において RN シリーズおよび RR シリーズは、圧縮強度が $60N/mm^2$ 以下の領域で NN シリーズより下側に分布したのに対し、圧縮強度が $60N/mm^2$ を超える領域で NN シリーズとほぼ同じ位置に分布した。これ

は、圧縮強度が $60N/mm^2$ を超える領域において、再生骨材を使用することで静弾性係数が低下する以上に圧縮強度が低下したことを意味する。この結果として、RN シリーズおよび RR シリーズの New RC 式からの誤差は、圧縮強度によって不均一なものとなった。このことから、再生骨材 M を使用したエコセメントコンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係を、今回の実験結果においては、単純に New RC 式を用いて表現することができなかった。

また、フライアッシュを外割混合することで、静弾性係数に対して圧縮強度が卓越する傾向が確認できた。しかしながら、その度合いは再生骨材 M を使用することによる両者の関係の変化に比べて小さなものであった。

3.3 圧縮強度と割裂引張強度の関係

圧縮強度と割裂引張強度の関係を図-9 に示す。同図には野口式¹⁰⁾および Carrasquillo 式¹¹⁾を併記している。

圧縮強度と割裂引張強度の関係は、再生骨材 M やフライアッシュを混合しても、どちらかの強度が卓越することがなかった。普通エコセメント、再生骨材 M およびフライアッシュを使用したコンクリートは、今回の実験の範囲において、全体的に回帰係数を 0.45（原典では 0.54）とした Carrasquillo 式と良好に対応した。

4. まとめ

本論文では、普通エコセメント、フライアッシュおよび再生骨材 M を使用したコンクリートの強度特性について検討を行った。実験および考察から得られた知見を要約して以下に示す。

- (1) 水セメント比が 65% から 20% の範囲において普通エコセメントを使用したコンクリートは、一般的なコンクリートと同様に、再生骨材 M を使用することで圧縮強度が低下する。このときの再生骨材 M に起因する強度低下は、元の圧縮強度が 60N/mm^2 以下の領域で比較的小さな規模であらわれ、 60N/mm^2 を超える領域で顕著にあらわれる。
- (2) 圧縮強度が 60N/mm^2 以下の領域ではモルタル部分の破壊が先行し、 60N/mm^2 を超える領域では骨材部分の破壊が先行する。この破壊状況の違いが、再生骨材 M に起因する強度低下が両領域で異なる傾向を示す一因となっている。
- (3) フライアッシュを外割混合することによって、単位粉体量が過大で十分な練混ぜが行えない場合を除き、再生骨材 M を使用することによる強度低下が緩和される。
- (4) 圧縮強度が 60N/mm^2 を超える領域では、再生骨材 M を使用することで、静弾性係数が低下する以上に圧縮強度が低下する。この結果、再生骨材 M を使用したコンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係を、単純に New RC 式を用いて表現できない。
- (5) 圧縮強度と割裂引張強度の関係は、本研究の実験範囲において、全体的に回帰係数を 0.45 とした Carrasquillo 式と良好に対応した。

謝辞

本研究の遂行にあたり、平成 22～24 年度科学研究費補助金若手研究(B)「再生材料を複合混合したコンクリートの強度・耐久特性と高機能化を指向した最適調合」課題番号 22760424（研究代表者 高巢幸二）から支援を頂いた。また、太平洋セメント株式会社から材料提供の協力を頂いた。北九州市立大学 EA 三倉英史氏、同嵩原克佳氏、卒業生松尾一輝氏（現：川崎重工業株式会社）、大学院生田中秀明氏および卒業生菅祐亮氏から実験・解析で

協力を頂いた。末尾ながら謝意を表す。

参考文献

- 1) 石山貴英, 高巢幸二, 松藤泰典: エコセメントとフライアッシュを混合した再生骨材コンクリートの力学性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp1795-1800, 2009.6
- 2) 柴田辰正, 中村正行, 谷川恭雄, 小高茂央: 高強度・超高強度コンクリートの圧縮破壊性状に及ぼす粗骨材品質の影響 その 1 マイクロクラック観察法による検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), A-1, pp.757-758, 1991.9
- 3) 社団法人日本コンクリート工学協会: JCI シンポジウム 再生骨材コンクリートの現状と将来展望, 社団法人日本コンクリート工学協会, pp111-198, 2006
- 4) 例えば, 松藤泰典, 小山智幸, 船本憲治, 伊藤是清: 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, pp51-60, 2001.5
- 5) 金子樹, 守屋健一, 玉井孝幸, 嵩英雄: エコセメントを用いたコンクリートの強度発現性に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, No.615, pp.1-6, 2007.5
- 6) 戸室裕介, 榊田佳寛, 佐藤幸恵: エコセメントを使用したコンクリートの強度発現に及ぼす混和材の影響に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), A-1, pp.85-86, 2005.9
- 7) Park Kwangmin, 坂本英輔, 三島直生, 畑中重光: エコセメントを用いたコンクリートの長期強度特性に関する実験的研究(長期強度特性と細孔構造の関係), 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), A-1, pp.259-260, 2006.9
- 8) 陶山裕樹, 小山智幸, 伊藤是清, 松藤泰典: 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現性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.269-274, 2006.6
- 9) 社団法人日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説, 社団法人日本建築学会, pp.6.50-52, 2010
- 10) 野口貴文, 友澤史紀: 高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学特性との関係, 日本建築学会構造系論文集, No.472, pp11-16, 1995.6
- 11) Ramon L. Carrasquillo, Arthur H. Nilson and Floyd O. Slate: Properties of High Strength Concrete Subject to Short-Term Loads, Journal of ACI, Vol.78, No.3, pp.171-178, May 1981