

論文 フライアッシュを外割混合したコンクリートの圧縮応力 ひずみ関係のモデル化

小山 智幸^{*1}・孫 玉平^{*2}・小山田英弘^{*3}・藤永 隆^{*4}

要旨：本研究は、フライアッシュを外割混合した鉄筋コンクリート部材の終局曲げ性状およびせん断性状を評価するのに必要不可欠な、コンクリートの圧縮応力 - ひずみ関係のモデル化を行うことを目的とする。単位セメント量および単位水量一定の条件下では、フライアッシュ外割混合量の増加に伴い、コンクリートの圧縮強度および圧縮強度時ひずみは大きくなる傾向が見られた。また、フライアッシュを外割混合したコンクリートの応力 - ひずみ関係の定式化を行い、実験結果との比較を通じて、提案式は実験結果を精度よく評価できることを明らかにした。

キーワード：フライアッシュ, コンクリート, 圧縮強度, 圧縮強度時ひずみ, 応力 - ひずみ関係

1. はじめに

フライアッシュは、主に石炭火力発電所から発生するほか、一般産業からも発生する。平成 17 年度における全産業からの発生量は、石炭灰として 1,115 万トンに達している¹⁾。一方、石炭灰の有効利用率は年々上昇し、平成 16 年度には 90%を超え、様々な分野で活用されているのに対して、毎年 100 万トン前後は埋め立て処分されている。今後も電力会社などによる大型石炭火力発電所の増設が続き、石炭灰の発生量の増加が見込まれているなか、環境保全の観点から、また大規模な灰捨て場の確保が困難になってきていること等の状況を考えると、早急な利用技術の開発や活用方法の拡大を図る必要があることは言うまでもない。

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、セメント・コンクリート分野をはじめ、土木分野、建築分野、農林・水産分野など多岐にわたって利活用されるようになってきている²⁾。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、セメント生産量が減少してきていることから、セメント製造分野への石炭灰の飛躍的な供給増加は難しい状況にあること¹⁾を鑑み、石炭灰の新たな活用方法の開発が望まれる。

松藤らはフライアッシュ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を外割で混合する方法を提案し、水セメント比 65%の条件の下で、セメント単味のコンクリートと比較して、フライアッシュの単位混合量が約 300 /m³の領域までコンクリートの圧縮強度が

向上することを明らかにしている³⁾。また、小山らはこのような圧縮強度の向上は、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⁴⁾。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単位セメント量および単位水量でフライアッシュ無混合の単味コンクリートより遅いことを明らかにしている⁵⁾。すなわち、フライアッシュを外割混合することで、水セメント比 65%と高く維持したまま、高強度かつ耐久性に優れたコンクリートを作ることが可能である。

一方、フライアッシュを大量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終局曲げ性状やせん断性状などの力学的特性を明らかにし、それらを的確に評価できる手法を確立することが望まれる。

本研究は、フライアッシュを外割混合したコンクリートを用いた鉄筋コンクリート部材の終局曲げ性状およびせん断性状を評価するのに必要不可欠な、コンクリートの圧縮応力 - ひずみ関係のモデル化を行うことを目的とする。なお、本研究は、上記コンクリートを用いた RC 構造部材の実用化研究の第一歩として位置づけ、先の文献 3, 4 の研究成果を踏まえながら、孫らが提案した応力 - ひずみ関係モデルを適用し、その妥当性ならびに精度を検証したものである。

2. 実験概要

2.1 材料, 調査, および試験体

表 - 1 に使用した諸元を示す。セメントは普通ポルトランドセメントを、フライアッシュは JIS A6201(コンク

*1 九州大学 大学院人間環境学研究院 准教授 工博 (正会員)

*2 神戸大学 大学院大学院工学研究科 教授 工博 (正会員)

*3 九州大学 大学院人間環境学研究院 助教 (正会員)

*4 神戸大学 大学院大学院工学研究科 助教 工博 (正会員)

表 - 1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント 密度：3.15g/cm ³ ，比表面積：3,280cm ² /g
水	上水道水
混和材	フライアッシュ（細粉） 密度：2.25g/cm ³ ，比表面積：3,640cm ² /g 強熱減量：1.4%
細骨材	長崎県杵岐産海砂 表乾密度：2.58 g/cm ³ ，吸水率：0.95% 粗粒率：2.45
粗骨材	福岡県古賀産結晶片岩（角閃岩） 表乾密度：2.77 g/cm ³ ，吸水率：0.50% 粗粒率：6.71
化学混和剤	高性能 AE 減水剤 標準型（1種），ポリカルボン酸系 補助 AE 剤 （1種），変性アルキルカルボン酸系 空気量調整剤

リート用フライアッシュ)に規定されているII種に適合するものを使用した。

表 - 2 にコンクリートの調合を示す。単位水量と単位セメント量をそれぞれ 185kg/m³，および 285kg/m³で固定して，単位フライアッシュ量を変化させた。調合 A はスランプ 18±2.5cm，空気量 4.5±1.5%，調合 B はスランプ 23±1.5cmかつスランプフロー40±5cm，空気量 4.5±1.5%，調合 C はスランプフロー60±10cm，空気量 3.0±1.5%を目標とした。これらの調整は，細骨材率および化学混和剤で行った⁶⁾。

試験体は 100×h200mm の円柱供試体とし，荷重実験実施まで実験室内で封かん養生を行った。なお本実験と並行して，同じコンクリートを用いた RC 梁の曲げせん断実験を行った関係上，円柱供試体の荷重は梁試験体のそれと同時期に行うこととし，材齢3ヶ月と1年で行った。試験体数は材齢と調合別に3体ずつ計18体である。

2.2 加力と測定方法

荷重実験では最大秤量 1000kN の万能試験機を用いて，試験体に単調中心圧縮力を加えた。試験体端面の初期不



図 1 測定方法

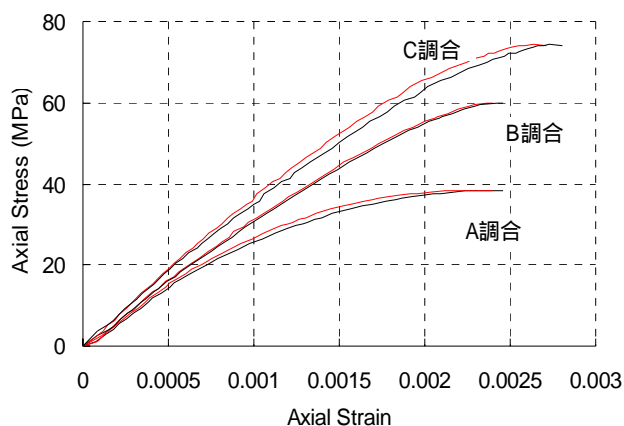


図 - 2 軸方向ひずみの測定差異の検討例

整による影響を取り除くために，弾性段階において3回ほど繰り返し荷重を行ってから，試験体が破壊するまで単調荷重を続けた。

試験体の軸方向ひずみは，試験体中央に検長 70mm のひずみゲージ2枚とコンプレッソメータ（検長 100mm）を用いて測定した（図 - 1 を参照）。図 - 2 に，ひずみゲージによる測定結果（図中，黒い線）とコンプレッソメータによる計測結果（赤い線）との比較例を示す。同図より明らかなように，二種類の計測方法による計測結果の差は非常に小さかった。このことを踏まえ，本実験では，試験体の軸方向ひずみとして，ひずみゲージによる値とコンプレッソメータによる測定値の平均を用いることにした。

また，軸圧縮力の増加に伴う横方向の変形性状を調べるために，試験体中央部分に検長 70mm のひずみゲージ2枚を貼付して試験体の周方向ひずみを計測し，両者の平均値を周方向ひずみの実験結果とした。

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 (L/m ³)	空気量 (%)	混和材 / セメント (Vol. %)	単位量 (L/m ³)			
						混合材 F	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A(kg/m ³)
A	65	185	90	4.5±1.5	0	0	338	342	2.85
B				4.5±1.5	122	110	266	319	4.23
C				3.0±1.5	229	206	170	319	5.92

3. 実験結果と考察

3.1 応力ひずみ関係

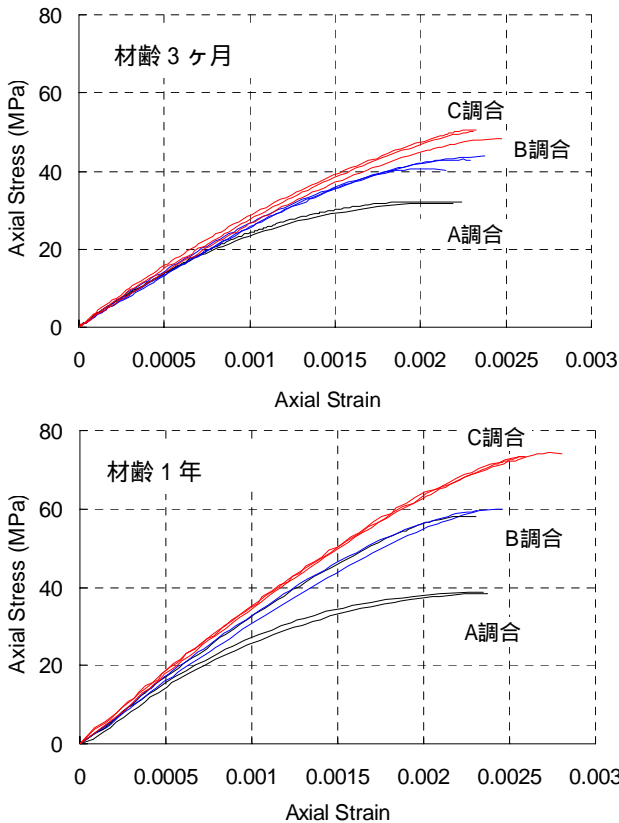


図 - 3 応力 軸ひずみ関係の測定結果

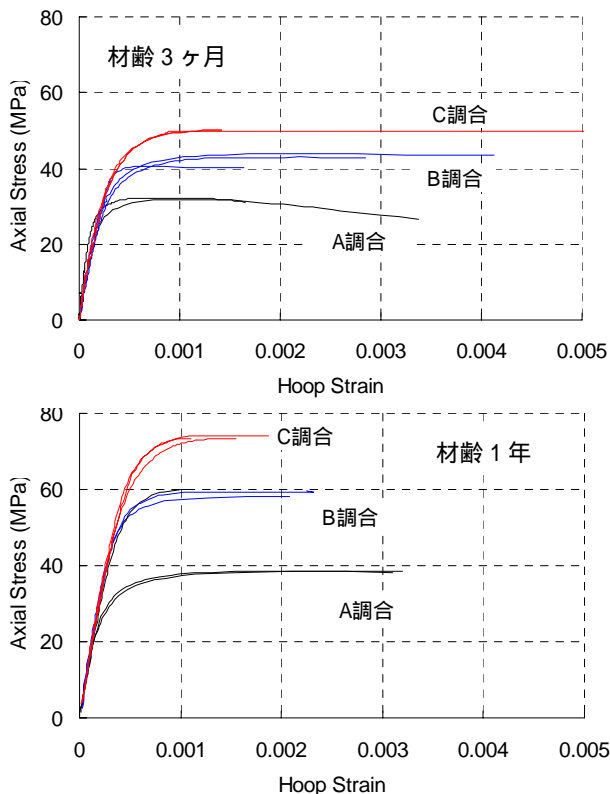


図 - 4 応力 周方向ひずみ関係の測定結果

図 - 3 に、圧縮応力 - 軸ひずみ関係の測定結果を、材齢 3 ヶ月および 1 年の場合についてそれぞれ示す。図中における黒い実線は調合 A ($F=0$), 青い実線は調合 B ($F=110 \text{ L/m}^3$), 赤い実線は調合 C ($F=206 \text{ L/m}^3$) の試験体の結果を示している。同図よりわかるように、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および圧縮強度時ひずみは大きくなっている。また、フライアッシュの外割混合による圧縮強度および圧縮強度時ひずみの増加は長期材齢におけるほど顕著となっている。これは調合 B, C に用いたフライアッシュのポゾラン反応性によるものと思われる。

つぎに、軸応力と、これに直交する横筋の度合いを測る指標である周方向ひずみとの関係を図 - 4 に示す。コンクリートの周方向ひずみは軸応力があるレベルに達するまで軸応力にはほぼ比例していることが図 - 4 より伺える。フライアッシュ無混合の試験体では、応力が 20 N/mm^2 前後の時点から周方向ひずみは応力との比例関係からはずれ急増し始めたのに対して、フライアッシュを混合した試験体では、混和材の増加に従い、周方向ひずみは応力との比例関係をより高い応力レベルまで維持していた。

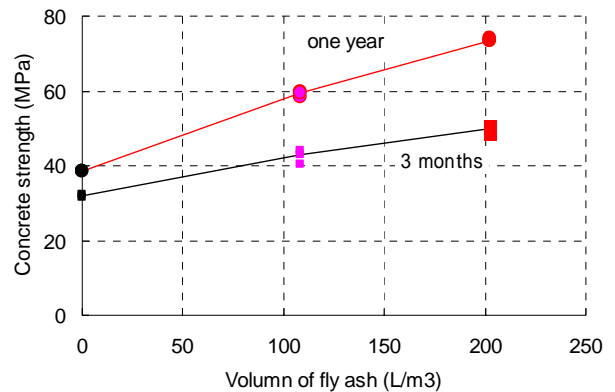


図 - 5 単位フライアッシュ量と圧縮強度

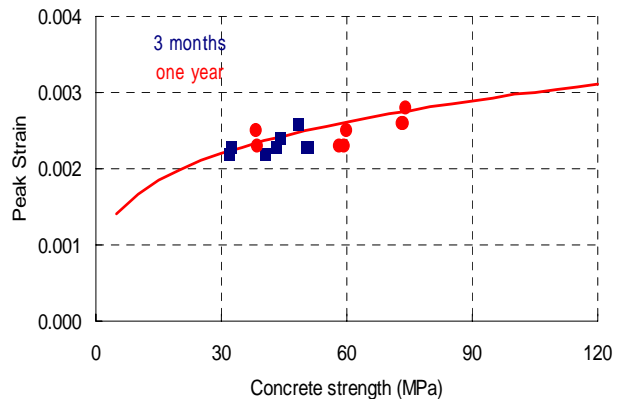


図 - 6 圧縮強度と圧縮強度時ひずみ

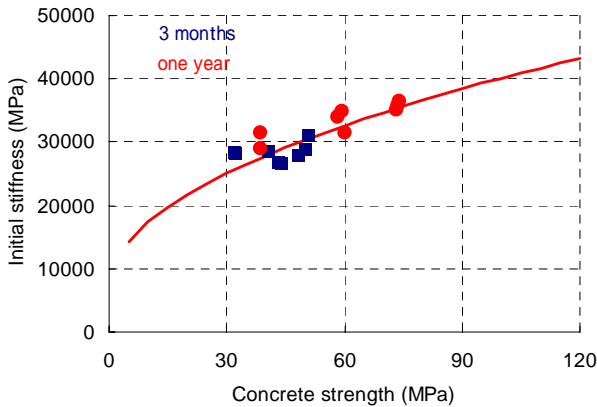


図 - 7 圧縮強度と初期剛性

3.2 圧縮強度と圧縮強度時ひずみおよび初期剛性

図 - 5 に、圧縮強度と単位フライアッシュ量との関係を示す。図より明らかなように、フライアッシュの混合量の増加に伴い、圧縮強度は増加する傾向にある。また、材齢が長期になるほど、フライアッシュ混合による圧縮強度の増加は顕著となっている。

図 - 6 に、圧縮強度と圧縮強度時ひずみの関係を示す。図中の青点と赤点はそれぞれ材齢 3 ヶ月と 1 年における結果を示している。また、図中の赤い実線は、次節で述べる、圧縮強度時の軸ひずみを評価する式(2)を表す。同図より、フライアッシュを大量混合したコンクリートの圧縮強度時ひずみは圧縮強度の増加に伴い緩やかに大きくなる傾向が見られる。

図 - 7 は、圧縮強度と初期剛性の関係を示す。初期剛性は圧縮強度の 3 分の 1 の応力と原点での割線剛性をもって評価している。図中の赤い実線は、次節で述べる、普通コンクリートの初期剛性を評価するための式(5)を示している。初期剛性は圧縮強度の増加に従い大きくなるのが図 - 7 より伺える。

4. 応力 ひずみ関係モデル

4.1 モデルの概要

鉄筋コンクリート部材の終局曲げおよびせん断性状の評価に必要な、コンクリートの応力 - ひずみ関係のモデルとしては、Parkらのモデル⁷⁾を始め、Shahらのモデル⁸⁾、六車らのモデル⁹⁾、鈴木らのモデル¹⁰⁾、Manderらのモデル¹¹⁾などを挙げられる。また孫らは、コンクリートの高強度化が急速に進んでいることに対応し、圧縮強度が 130MPaまでの超高強度コンクリートに適用できる応力 - ひずみ関係を提案している¹²⁾。

本論では、材料強度における適用範囲が広い、文献 12 で提案されている軸応力 - ひずみ関係モデルを、フライアッシュを大量混合したコンクリートへ適用し、その妥当性と精度を検証する。

文献 12 によれば、任意の軸圧縮ひずみ ε_c に対応するコンクリートの軸応力 f_c は式(1)によって求められる。

$$f_c = f_c' \frac{aX + (b-1)X^2}{1 + (a-2)X + bX^2} \quad (1)$$

ここで、 f_c' は円柱供試体を用いた載荷実験により得られたコンクリートの圧縮強度、 X は圧縮強度時ひずみ ε_o によって無次元化された軸ひずみである。

式(1)より明らかなように、式(1)でフライアッシュを大量混合したコンクリートの応力 - ひずみ関係を定義するには、3 つのパラメーターを決める必要がある。それらは円柱供試体を用いた載荷実験により得られたコンクリートの圧縮強度時ひずみ ε_o 、および応力 - ひずみ関係の形状を制御する係数 a と b である。文献 12 に従えば、それらのパラメーターは次のように求めることができる。

$$\varepsilon_o = 0.94(f_c')^{1/4} \cdot 10^{-3} \quad (2)$$

$$a = \frac{E_c}{E_{sec}} = \frac{E_c \varepsilon_o}{f_c'} \quad (3)$$

$$b = 1.5 - 0.0168 f_c' \quad (4)$$

ここで、 E_c はコンクリートの初期剛性で、式(5)によって与えられる。

$$E_c = \left(0.69 + 0.332 \sqrt{f_c'} \right) \times 10^4 \quad (\text{in MPa}) \quad (5)$$

式(2)~式(5)よりわかるように、本論で用いる文献 12 のモデルは、コンクリートの圧縮強度さえわかれば、応力 - ひずみ関係が完全に決められるという特徴を有している。

4.2 実験結果との比較

まず、先の図 - 6、図 - 7 に示したように、フライアッシュを混入したコンクリートの圧縮強度時ひずみおよび初期剛性は普通ポルトランドセメント単味のコンクリートを対象として導いたそれぞれの算定式によって適切に評価されていることが明らかである。

式(1)に示す応力 - ひずみ関係モデルの妥当性を検証するために、各試験体の応力 - 軸ひずみ関係の計算結果と実験結果との比較を行い、比較の結果を材齢別に図 - 8 に示す。図中の黒い実線は実験結果を、赤い実線は式(1)による計算結果を表す。さらに、応力 - ひずみ関係モデルの予測精度検証指標として考えられる、試験体が破壊するまでのひずみエネルギー（応力 - ひずみ関係曲線が囲んだ面積）の比較を図 - 9 に示す。図 - 8 および図

- 9より明らかなように,文献12で提案した応力 - ひずみ関係式は,フライアッシュを大量混合したコンクリートの圧縮載荷時の性状を非常に高い精度で評価できる。

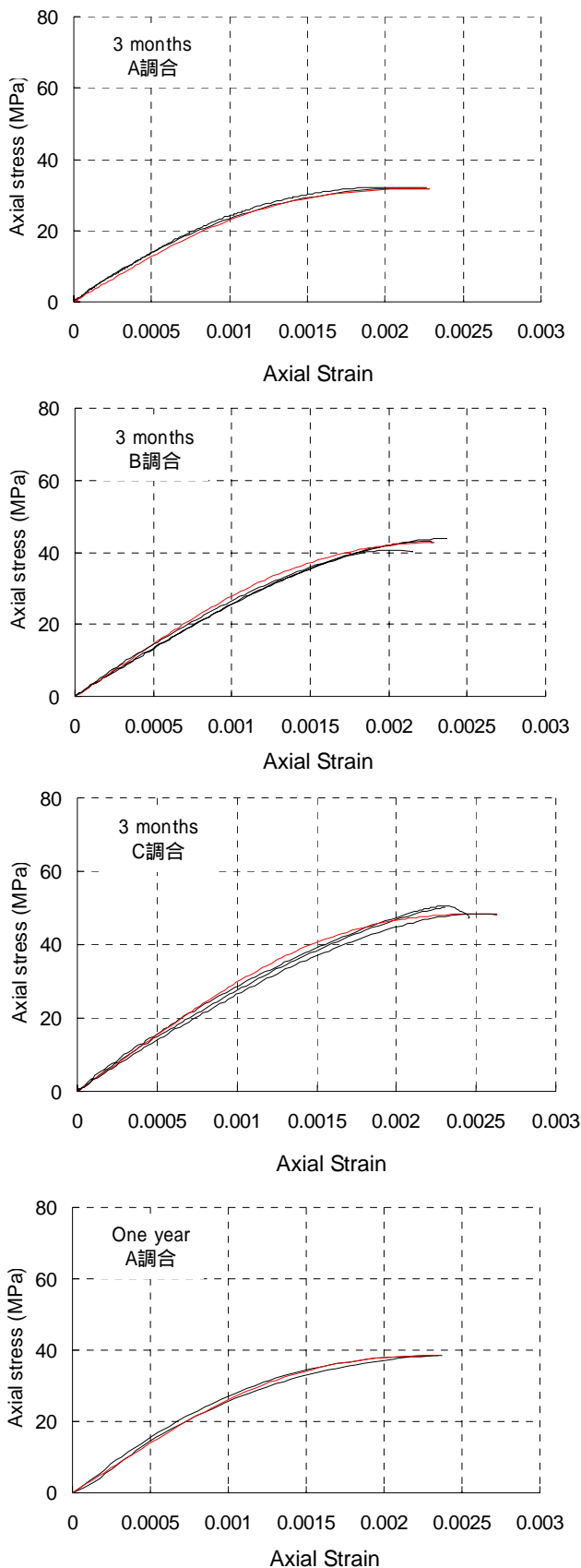


図 - 8 応力 - ひずみ関係の比較

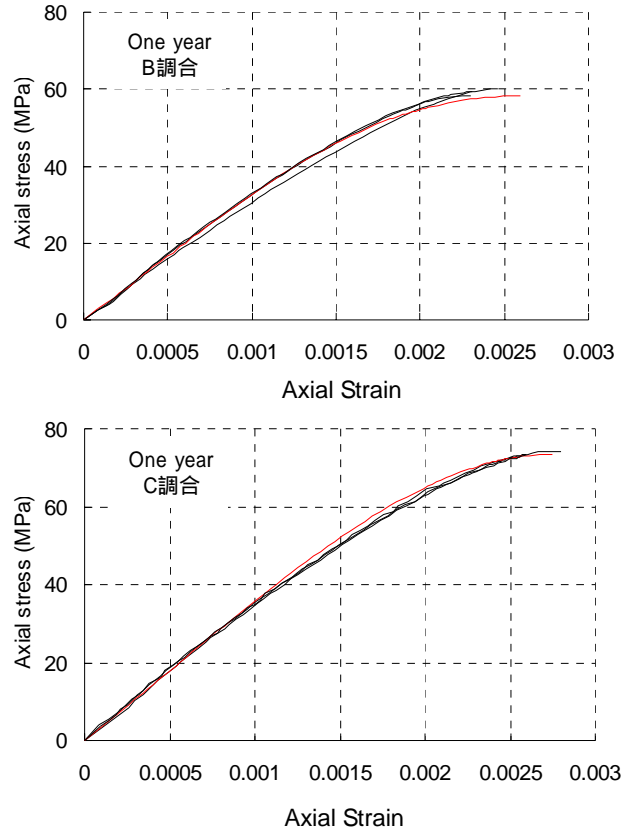


図 - 8 つづき

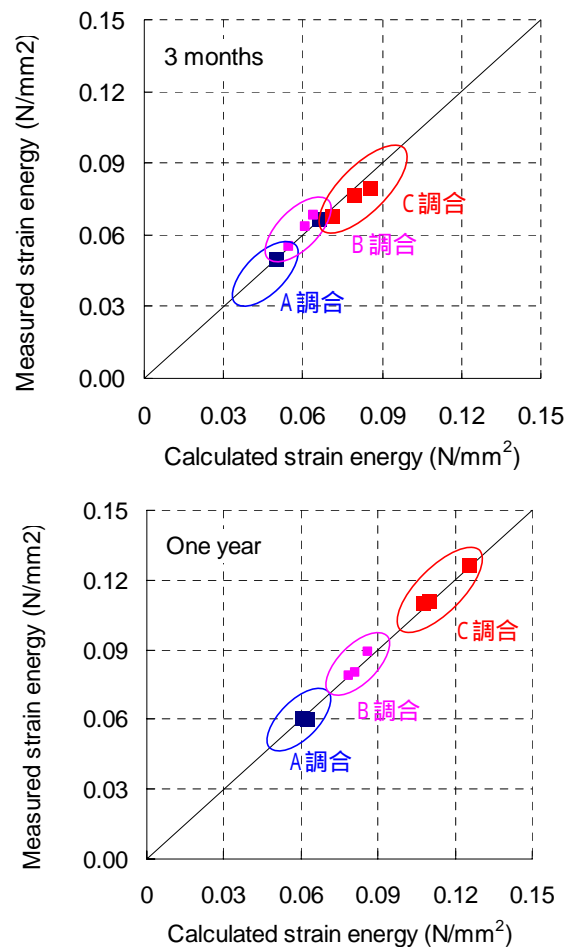


図 - 9 ひずみエネルギーの比較

なお、文献 12 のモデルを用いる際に、コンクリートの強度としては、材齢と調合別の試験体（3 体）の平均実験強度を用いた。

5. むすび

フライアッシュを外割混合した鉄筋コンクリート部材の終局曲げ性状およびせん断性状を評価するのに必要不可欠な、コンクリートの圧縮応力 ひずみ関係のモデル化を行うことを目的として、円柱供試体を用いた圧縮載荷時の性状について検討した結果、以下のようなことが明らかになった。

- 1) 単位フライアッシュ量が 206L までの範囲では、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、圧縮強度時ひずみ、および初期剛性はともに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コンクリートの圧縮強度時ひずみおよび初期剛性は、普通ポルトランドセメント単味のコンクリートを対象として導いた式(2)と式(5)で精度よく評価できる。
- 3) 本論で提案した応力 ひずみ関係モデルを用いれば、フライアッシュを大量混合したコンクリートの圧縮応力 ひずみ関係は高い精度で評価することができる。

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、同工学部建築学科卒業年度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)作販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) 日本建築学会：フライアッシュを使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説，2007.10
- 2) 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

- 3) 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，pp.51-60，2001.5
- 4) 陶山裕樹，小山智幸，小山田英弘，松藤泰典：無機粉体を外割混合したコンクリートの力学性状に及ぼす細孔空隙構造の影響，コンクリート工学年次論文集，Vo29, No.1，pp.231-236，2007.6
- 5) 伊藤是清，小山智幸，小山田英弘，船本憲治，松藤泰典：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
- 6) 橋本英二ほか：実機プラントで製造したフライアッシュ外割混合したコンクリートの長期強度並びに中性化，日本建築学会年次大会論文梗概集，A-1 材料施工，pp. 211-212, 2006.9
- 7) Kent D.C. and Park R.: Flexural Member with Confined Concrete, Proceedings of ASCE, Vol. 97, ST 7, pp.1969-1990, July 1971
- 8) Ahmad S.H. and Shah S.P.: Stress-Strain Curve of Concrete Confined by Spiral Reinforcement, ACI Journal, Vol. 79, No. 46, pp.484-490, Nov.Dec. 1982
- 9) 六車熙，渡辺史夫，勝田庄二，田中仁史：横拘束コンクリートの応力 - ひずみ曲線のモデル化，セメント技術年報，pp. 429-432, 1980
- 10) 鈴木計夫ほか：コンファインドコンクリートの強度・変形特性と曲げ靱性のためのコンファインド補強について，日本建築学会年次大会論文梗概集，pp. 929-934，Oct. 1989
- 11) Mander, J. B. et al.: Theoretical Stress-Strain Curve Model for Confined Concrete, Proceedings of ASCE, Vol. 114, ST 8, pp.1804-1820, August 1988
- 12) Sakino K. and Sun Y., 'Stress-Strain Curve of Concrete Confined by Rectilinear Hoop', *J. of Struct. Constr. Eng.*, AIJ, No. 461, July 1994, pp. 95-104.(in Japanese)