論文　40℃気中環境下におけるフライアッシュ外割混合コンクリートの強度性状

高巣　幸二[*1]・松藤　泰典[*2]

要旨：普通コンクリート領域の単位セメント量と高強度コンクリート領域の単位セメント量の２水準において，フライアッシュを外割大量混合したコンクリートについて40℃気中養生というコンクリートには厳しい環境下での強度発現性状に関する実験を行い，標準養生の場合と比較検討した。40℃気中養生条件下では，単位セメント量600kg/m^{3}以上のフライアッシュ無混合コンクリートでは標準養生と同程度の圧縮強度を確保できないが，フライアッシュを200kg/m^{3}程度外割混合したコンクリートでは標準養生と同程度の圧縮強度（本実験では110N/mm^{2}程度）を発現することができた。

キーワード：40℃気中養生，フライアッシュ，外割混合，圧縮強度，割裂引張強度，静弾性係数，細孔容積

1. はじめに

筆者らはフライアッシュをセメント代替ではなく，砂代替として調合する外割調合則を確立させ[1)]，フライアッシュ外割混合コンクリートが無混合のコンクリートより高い強度発現性及び高耐久性を示すことを明らかにしている。さらに，一般的に強度低下を生じやすい再生骨材を使用したフライアッシュ外割混合コンクリートでも強度が改善することを示している[2)]。また，単位セメント量を確保したまま高粉体系のフライアッシュを大量に外割混合しているので，細孔空隙構造が細分化し硬化組織体が緻密になっているという報告[3)]がなされている。フライアッシュ外割混合コンクリートは水粉体比は小さいが，水セメント比を一定以上確保しており，セメントにとっては水和反応を継続するに十分な水を保有している。フライアッシュ外割混合コンクリートは気温 35℃を超えるような環境においてもその保有する十分な水を使って強度発現を持続できる可能性がある。一種の保水養生であるが，打ち込み後の湿潤養生期間や型枠の存続期間に与える影響は大きいと考えられる。

本研究は，普通コンクリート領域の単位セメント量と高強度コンクリート領域の単位セメント量の２水準において，フライアッシュを外割大量混合したコンクリートについて 40℃気中養生というコンクリートには厳しい環境下での強度発現性状に関する実験を行い，標準養生の場合と比較検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表－1 に使用材料を示す。フライアッシュはJIS A 6201「コンクリート用フライアッシュ」に規定されるⅡ種に適合するものを用いた。

2.2 調合

表－2 に調合を示す。シリーズⅠの調合は，単位水量を JASS5 規定の最大値 185kg/m^3，単位セメント量をJASS5 規定最小値 285kg/m^3，水セメント比 65%で一定とし，単位フライアッシュ量を，無混合，244 kg/m^3（W/B=35%），455kg/m^3（W/B=25%）の割合で混合した計３調合とした。N65-65 及び N65-35 の調合では目標スランプを 18±2.5cm とし，N65-25 の調合は高流動タイプとし目標スランプフローは，65cm±15cm とした。目標空気量は 4.5±1.5%とした。シリーズⅡの調合は，単位水量を高強度コンクリートの上限推奨値である165kg/m^3，単位粗骨材かさ容積を高流動コンクリートの推奨値である 0.525m^3/m^{3}として粗骨材量を決めた。予備実験により総粉体量が 1100kg/m^3 で混練可能な限界値に達することを確認した。そこで，シリーズⅡでは単位フライアッシュ量の上限値を 400kg/m^3 に規定し，単位セメント量を 631kg/m^3 で一定とした。単位フライアッシュ量は，無混合，100 kg/m^3，200 kg/m^3，300kg/m^3，400kg/m^{3}の割合で混合し，計５調合とした。シリーズⅡの全ての調合で，練り上がり時において目標空気量３±1.0%，目標スランプフロー65cm±15cm とした。

2.3 供試体の作成方法

シリーズⅠの混練は 50ℓ強制攪拌型ミキサを使用し，シリーズⅡの混練は 100ℓオムニミキサを使用した。混練時間はシリーズⅠ，シリーズⅡ共に 3～16 分の範囲で適正なフレッシュ性状が得られる時間とした。強度試験用の供試体の作製は，φ100×200mm のプラスチック製円柱型枠を使用し，打設後直ちに各養生室に搬送し，材齢１日で脱型した後，所定材齢まで各養生条件を適用した。養生方法は，標準養生，40℃気中養生の 2 養生とした。40℃気中養生は，温度 40±1℃，湿度 60%±RH に保つ

*1 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)
*2 北九州市立大学　国際環境工学部建築デザイン学科　教授　工博　(正会員)

恒温室の中で所定材齢まで養生した。標準養生は，脱型後，所定材齢まで20℃の水中で養生した。

2.4 測定項目及び測定方法

圧縮強度試験は，JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」，静弾性係数測定は，JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」，割裂引張強度試験は，JIS A 1113「コンクリートの割裂引張強度試験方法」に準拠して行なった。圧縮強度試験の試験材齢は，3 日，7 日，28 日，91 日とし，割裂引張強度試験は，7 日，28 日，91 日とした。

材齢 3 日，7 日の圧縮強度供試体は，累積細孔容積を測定した。圧縮強度試験後に供試体を破砕し，粗骨材を除いた部分から 2.5～5mm の粒を測定用試料として採取した。試料は前処理として 105℃乾燥法を用い，アセトンで自由水を抽出し，105℃に調整した電気炉で 24 時間強熱した後にデシケーター中で放冷した。気体（窒素）吸着法 [4]により高精度ガス吸着装置を用いて測定し，シリカの標準等温線を使用して BJH 法により計算し，細孔直径 2.5～200nm の累積細孔容積を測定した。

3. 実験結果及び考察

3.1 圧縮強度

図－1 に各養生条件における圧縮強度の経時変化を示す。シリーズⅠ，シリーズⅡのどちらともフライアッシュを外割混合すると標準養生において材齢とともに強度が増進した。単位セメント量が少ないシリーズⅠの方がフライアッシュ外割混合に伴う材齢による強度増加率が高かった。40℃気中養生においてシリーズⅡの高強度タイプの調合は材齢初期の 3 日，及び 7 日で同調合の標準養生より高い圧縮強度を示した。これは，温度が高いことにより初期から水和反応が活発になり強度発現に影響したと考えられる。また，材齢初期におけるシリーズⅠの調合でフライアッシュを外割混合したものは標準養生より高い圧縮強度を示したが，セメント単身の調合は標準養生と同等の値を示した。40℃気中養生のセメント単身の調合は両シリーズとも材齢による強度増進がほとんど認められず，シリーズⅠでは強度低下を生じていた。40℃気中養生のフライアッシュを外割混合したものは，全ての調合で材齢による強度増進が認められた。

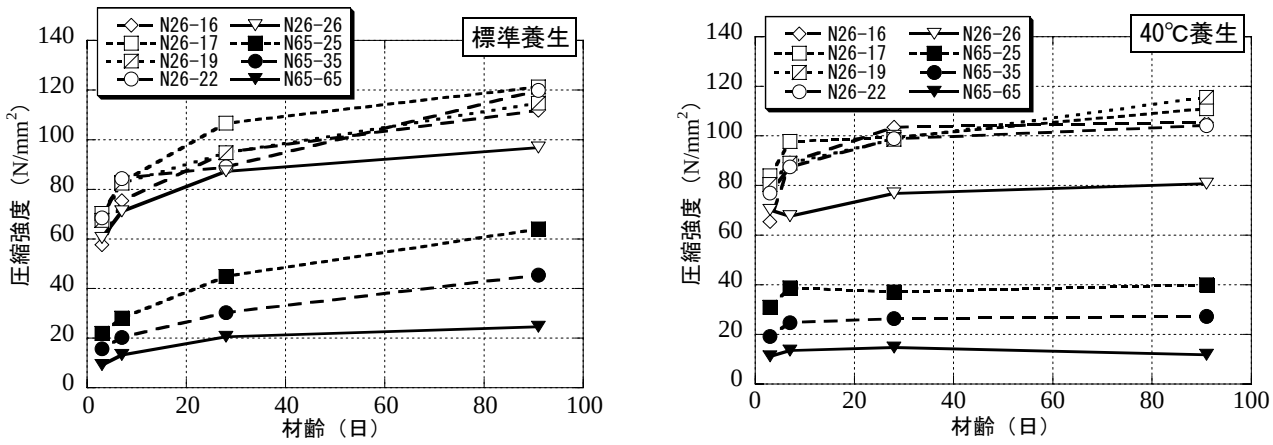
図－2 に圧縮強度と単位フライアッシュ量の関係を示す。シリーズⅠの標準養生は，材齢 91 日までの範囲内において単位フライアッシュ量が増加すると圧縮強度が増加した。特に材齢 91 日での増加率が顕著であった。シリーズⅠの標準養生では単位フライアッシュ量と圧縮強度の関係は線形関係にあることがうかがえた。シリーズⅡの標準養生は，単位フライアッシュ量の増加に伴う圧縮強度の増加がシリーズⅠほど顕著に表れなかった。フライアッシュを混合するとセメント単身のものより圧縮強度は増加したが，材齢 91 日までの範囲において単位フライアッシュ量 100kg/m^3，200kg/m^3，300kg/m^3 の違いによる圧縮強度の変化が認められなかった。特に本実験の範囲内において単位フライアッシュ量を 400kg/m^3 混合したものは 300kg/m^3 混合したものより強度低下を生じた。これはセメントとフライアッシュを多量に用いたことによって，総紛体量が大きくなりすぎた為であると推測される。シリーズⅡのように単位セメント量が多い場合，フライアッシュの混合量を増加しすぎると圧縮強度に悪影響を及ぼすことが明らかになった。

表－1　使用材料

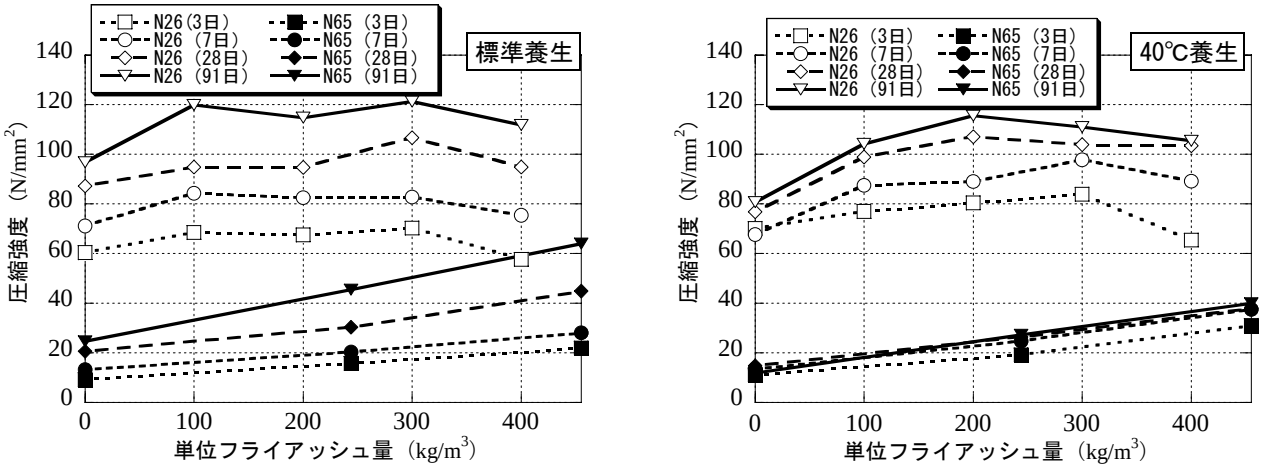
項目	種類	物性	記号
セメント	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ	密度　3.16g/cm^3	C
水	上水道	－	W
細骨材	海砂 （北九州市岩屋沖産）	絶乾密度　2.54g/cm^3 吸水率　1.55% 実積率　60.3% 粗粒率　2.7	S
粗骨材	砕石 （福岡県岡垣町上畑産）	絶乾密度　2.81g/cm^3 吸水率　0.79% 実積率　59.4% 粗粒率　6.6	G
混和材	フライアッシュ （JIS Ⅱ種適合品）	密度　2.25g/cm^3 強熱減量　2.22% 比表面積　3410cm^2/g 湿分　0.07%	FA
混和剤	高性能減水剤　標準形	ﾎﾟﾘｶﾙﾎﾞﾝ酸ｴｰﾃﾙ系 密度　1.06g/cm^3	AD1
	AE剤	アルキルｴｰﾃﾙ系 密度　1.03g/cm^3	AD2
	空気量調整剤	ﾎﾟﾘｱﾙｷﾚﾝｸﾞﾘｺｰﾙ誘導体 密度　1.00g/cm^3	AD3

表－2　調合

	調合記号	W/C (%)	W/B (%)	単位質量(kg/m^3)					混和剤 (C+FA)×%		
				W	C	FA	S	G	AD1	AD2	AD3
シリーズⅠ	N65-65	65	65	185	285	0	837	974	0.35	0.005	-
	N65-35		35			244	566		0.5	0.025	-
	N65-25		25			455	331		1.5	0.05	-
シリーズⅡ	N26-26	26	26	165	631	0	737	868	0.8	-	0.007
	N26-22		22			100	626		1.1	-	0.01
	N26-19		19			200	515		1.75	-	0.02
	N26-17		17			300	403		1.9	-	0.02
	N26-16		16			400	292		3.5	-	0.2



図－1　圧縮強度の経時変化



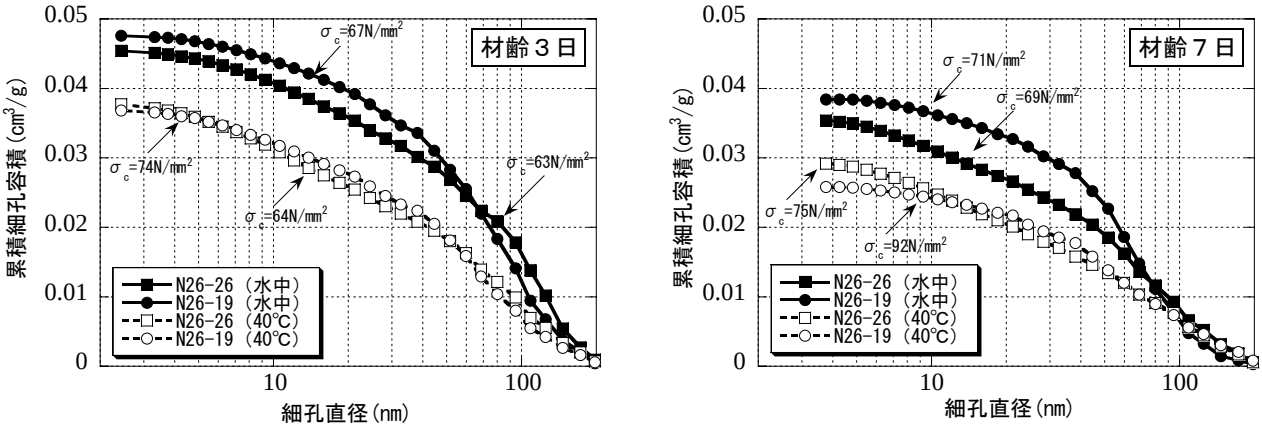
図－2　圧縮強度と単位フライアッシュ量の関係

標準養生における単位セメント量 600kg/m^3 以上の時のフライアッシュ混合量は 100kg/m^3 程度混合したときが圧縮強度の発現には最適であり，それ以上混合しても効果は少ない。これまで水結合材比 20%が練り混ぜの限界値とされており，その範囲で単位フライアッシュを増加させると圧縮強度を増進できることが示されている [1)]。混和剤の技術発展により水結合材比20%以下の調合も混練可能となったが，本実験においてこの領域では圧縮強度発現に影響するセメントとフライアッシュの最適混合量が存在することが示された。

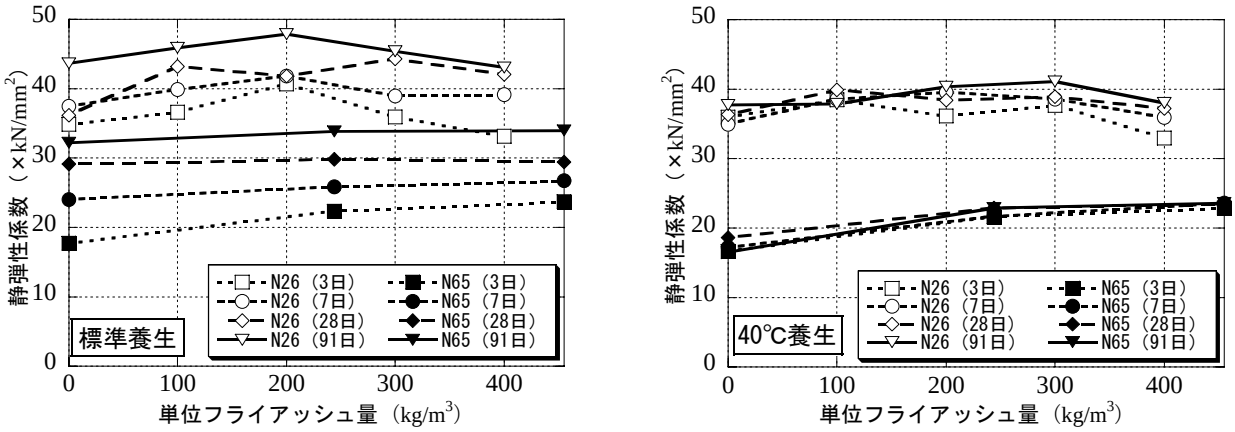
シリーズⅠの 40℃気中養生は材齢 91 日までの範囲において単位フライアッシュ量の増加とともに直線的に圧縮強度が増加したが，標準養生の時に比べると増加率が低くなった。シリーズⅡでは圧縮強度と単位フライアッシュ量の関係には顕著な強度増加が確認された。特に，若材齢よりも材齢が経過した方が，フライアッシュの圧縮強度に影響を与える効果が高い。40℃気中養生でも単位フライアッシュ量を 400kg/m^3 混合したものは，200kg/m^3，300kg/m^3 混合したものより圧縮強度が低くなった。40℃気中養生における単位セメント量 600kg/m^3 以上の時のフライアッシュ混合量は 200kg/m^3 程度混合したときが圧縮強度の実現には最適であり，それ以上混合しても効果は少ない。セメント単身において標準養生では 100N/mm^2 程度の圧縮強度を発現していたものが，40℃気中養生というコンクリートにとって厳しい条件下では 80N/mm^2 程度の圧縮強度に低下した。フライアッシュを外割混合すると単位フライアッシュ量 200kg/m^3 程度までなら 40℃気中養生でも標準養生と同程度の圧縮強度（110N/mm^2 以上）を発現することができた。これは，はじめにで述べたようにフライアッシュを外割混合すると硬化組織体が密実になり，水和反応に必要な水を逸散することなく保水養生が可能であることを示している。従って，単位結合材量 931kg/m^3 以下の範囲においてフライアッシュを外割混合することは比較的劣悪な養生条件でも，そのコンクリートが本来有している水和反応を実現することができる。

3.2 細孔構造

図－3 にシリーズⅡの材齢 3 日及び 7 日における累積細孔容積を示す。一般的にコンクリートの細孔容積は水銀圧入法により測定されることが多いが，測定に水銀を使用するので環境影響上好ましくない。そこで，細孔直径 2.5～200nm までの限定された範囲しか測定できない



図－3　累積細孔容積



図－4　静弾性係数と単位フライアッシュ量の関係

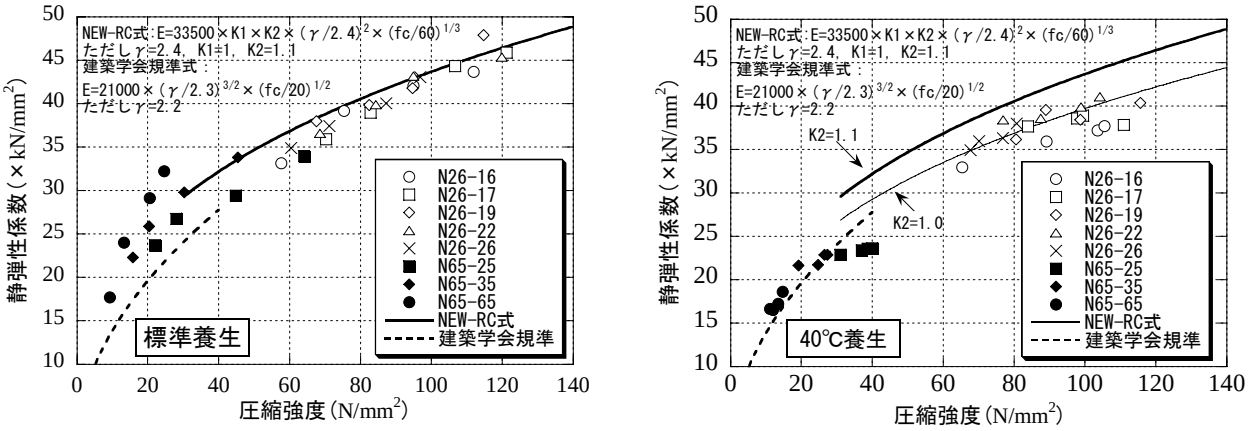
が，水銀を使用しないので環境負荷が少ない気体吸着法により累積細孔容積を測定した。40℃気中養生では材齢初期において標準養生より圧縮強度が高くなっていたので材齢初期の細孔容積を測定した。材齢 3 日，7 日どちらとも 40℃気中養生における細孔直径 2.5～200nm までの累積細孔容積は標準養生より小さくなった。一般的に同養生条件では水銀圧入法で得られた累積細孔容積が小さいコンクリートの方が大きな圧縮強度になると報告されている [5)]。気体吸着法による累積細孔容積はメソポア領域に限定されているが，本実験の範囲内で水銀圧入法の測定結果と同様に圧縮強度と細孔直径 2.5～200nm までの累積細孔容積の関係は反比例の関係にあることがうかがえた。材齢 3 日，7 日のどちらとも 40℃気中養生の圧縮強度の方が標準養生より大きいので，高温下に曝されることにより水和反応が進行し，累積細孔容積が減少して硬化体組織が緻密化したものと考えられる。今回の実験では材齢 7 日までにおいてフライアッシュ混合の有無と累積細孔容積の関係に明確な変化は認められなかった。今後，単位セメント量が少ない供試体，及び長期材齢の供試体の細孔構造を調べ，高温環境下におけるフライアッシュ外割混合コンクリートの強度発現メカニズムを解明していく予定である。

3.3 静弾性係数

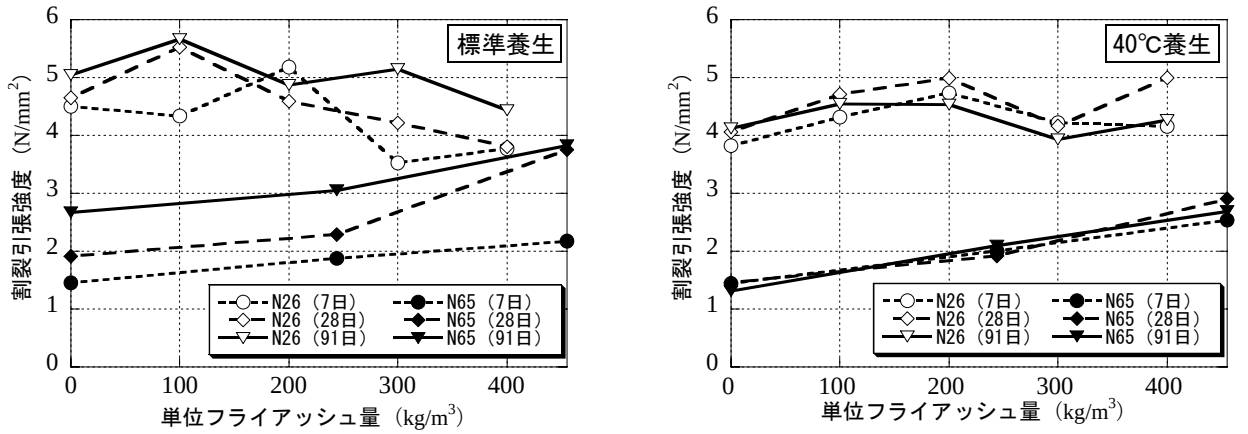
図－4 に静弾性係数と単位フライアッシュ量の関係を示す。標準養生ではシリーズⅠ，シリーズⅡ共に材齢の経過により静弾性係数が増加した。標準養生の静弾性係数は単位フライアッシュ量の変化に関係せず，シリーズⅠ，シリーズⅡそれぞれでほとんど一定値になった。40℃養生ではシリーズⅠ，シリーズⅡ共に材齢が経過しても静弾性係数は増加せずほとんど一定値になった。シリーズⅠではフライアッシュを外割混合した方がセメント単身の静弾性係数より増加したが，シリーズⅡでは単位フライアッシュ量を大きくしても静弾性係数はほとんど変化しなかった。

3.4 圧縮強度と静弾性係数の関係

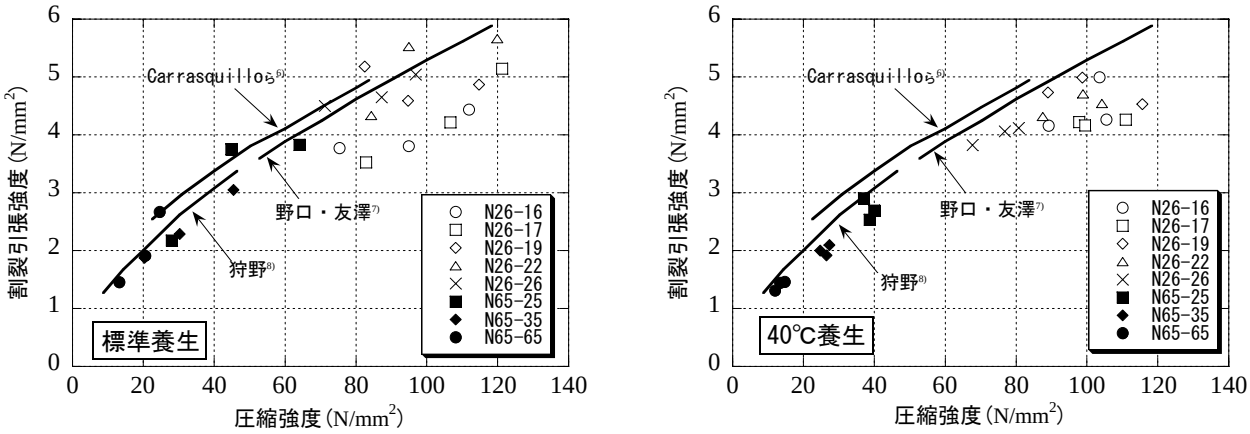
図－5 に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。図中の回帰式は γ=2.4（シリーズⅡのコンクリートの単位容積重量），K_1=1.0（骨材による影響），K_2=1.1（混和材による影響）とした時の NEW-RC 式（36N/mm² 以上），γ=2.2（シリーズⅠのコンクリートの単位容積重量）とした時の建築学会規準式（36N/mm² 以下）である。標準養生の圧縮強度と静弾性係数の関係は，シリーズⅠの N65-65（セメント単身）のみ回帰式より安全側に分布しているが，フライアッシュ外割コンクリートは２つの回帰式近



図－5　圧縮強度と静弾性係数の関係



図－6　割裂引張強度と単位フライアッシュ量の関係



図－7　圧縮強度と割裂引張強度の関係

傍に分布している。従ってフライアッシュ外割混合コンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係は標準養生において NEW-RC 式及び建築学会規準式で表すことができる。40℃気中養生での関係においてシリーズⅠは建築学会規準式近傍に分布している。シリーズⅡは NEW-RC 式の下側に分布している。ここで，回帰式の混和材による影響係数である K_2 に，フライアッシュを使用しない場合の係数 1.0 を代入して表すと回帰式近傍に分布する。従って，40℃気中環境下でのフライアッシュ外割混合コンクリートは，混和材の影響を無視した NEW-RC 式の回帰式で表すと圧縮強度と静弾性係数の関係を適切に評価できる。

3.5 割裂引張強度

図－6 に割裂引張強度と単位フライアッシュ量の関係を示す。標準養生のシリーズⅠでは，全ての調合で材齢とともに割裂引張強度が増加し，単位フライアッシュ量を大きくすると強度が増進した。標準養生のシリーズⅡでは，概ね材齢とともに割裂引張強度は増加した。しかし単位フライアッシュ量を増加しても割裂引張強度は増加せず，フライアッシュを 100kg/m³ 以上混合すると無

混合より低下した。単位セメント量を多くした調合では，単位フライアッシュ量を増加しても割裂引張強度の増進は見込めない。40℃気中養生のシリーズⅠでは，材齢91 日までにおいて単位フライアッシュ量を増加すると割裂引張強度が増加するが，同調合における材齢による割裂引張強度の増進は見込めない。40℃気中養生のシリーズⅡでは，シリーズⅠ同様，材齢による割裂引張強度の増進は見込めない。フライアッシュを 200kg/m^3 程度まで混合すれば割裂引張強度の増進に繋がるが，それ以上混合しても強度増進の効果はない。

フライアッシュ外割混合コンクリートの割裂引張強度の経時変化は，養生条件の影響を受けることが明らかになった。

3.6 圧縮強度と割裂引張強度の関係

図－7 に圧縮強度と割裂引張強度の関係を示す。標準養生，40℃気中養生共にシリーズⅠでは既往の研究による回帰式[6)7)8)]上に分布した。シリーズⅡでは両養生とも概ね回帰式の下側に分布した。特に標準養生の方が回帰式からのばらつきが大きい。シリーズⅡの割裂引張強度は圧縮強度に対して若干小さな値を示したことが確認された。

4. まとめ

フライアッシュを外割大量混合したコンクリートについて 40℃気中養生というコンクリートには厳しい環境下での強度発現性状に関する実験を行った。以下に得られて知見を要約して示す。

(1) 40℃気中養生においてシリーズⅡの高強度タイプの調合は材齢初期の 3 日，及び 7 日で同調合の標準養生より高い圧縮強度を示した。これは，温度が高いことにより初期から水和反応が活発になり強度発現に影響したと考えられる。40℃気中養生の初期材齢においてフライアッシュを外割混合したコンクリートの細孔直径 2.5～200nm までの累積細孔容積は標準養生のものより小さくなり，圧縮強度の方が標準養生より大きいので，硬化体組織が緻密化したものと考えられる。

(2) 単位セメント量が大きい場合，フライアッシュの混合量を増加しすぎると圧縮強度に悪影響を及ぼすことが明らかになった。標準養生における単位セメント量が大きい時のフライアッシュ混合量は 100kg/m^3 程度混合したときが圧縮強度の発現には最適であり，それ以上混合しても効果は少ない。単位セメント量 600kg/m^3 以上の時のセメント単身のコンクリートにおいて標準養生では 100N/mm^2 程度の圧縮強度を発現していたものが，40℃気中養生というコンクリートにとって厳しい条件下では 80N/mm^2 程度の圧縮強度に低下した。フライアッシュを外割混合すると単位フライアッシュ量 200kg/m^3 程度までなら 40℃気中養生でも標準養生と同程度の圧縮強度（本実験では 110N/mm^2 程度）を発現することができた。

(3) フライアッシュ外割混合コンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係は標準養生において NEW-RC 式及び建築学会規準式で表すことができる。40℃気中環境下でのフライアッシュ外割混合コンクリートは，混和材の影響を無視した NEW-RC 式の回帰式で表すと圧縮強度と静弾性係数の関係を適切に評価できる。フライアッシュ外割混合コンクリートの割裂引張強度は標準養生，40℃気中養生共にシリーズⅠでは既往の研究による回帰式と同等な値を示した。シリーズⅡでは両養生とも概ね回帰式の下側に分布した。

謝辞

本研究は，平成 2006～2007 年度，文部科学省　研究費補助金　基盤研究(C)「フライアッシュをセメント外割混合するコンクリートの養生則」課題番号18560558(研究代表者 松藤泰典)の支援を受けて行った。実験に際して，本学 EA・三島剛氏，データ整理に関して本学大学院生・北村利英君，山内信英君，同卒論生・末次栄智君から協力を得た。末尾に記して謝意を表す。

参考文献

1) 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
2) 高巣幸二ほか：再生骨材を使用したフライアッシュ外割混合コンクリートの強度性状，コンクリート工学年次論文報告集 Vol.29，No.2，pp.379-384，2007
3) 陶山裕樹ほか：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報告集 Vol.29, No.1, pp.231-236, 2007
4) コンクリートの長期耐久性に関する研究委員会：コンクリートの試験・分析マニュアル，社団法人日本コンクリート工学協会，p.129，2000.5
5) 日本コンクリート工学協会：反応モデル解析研究委員会報告書(Ⅰ)，pp.115-117，1996
6) Carrasquillo, et. al : Properties of High Strength Concrete Subject to Short-Term Load，Journal of ACI，Vol.78，No.3，pp.171-178，1981
7) 野口貴文ほか：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，pp.11-16，1995.6
8) 狩野春一：コンクリートの引張に関する研究，日本建築学会論文集，No. 4，pp.1-6，1940