

論文 10年屋外暴露したフライアッシュを使用したコンクリートの性状

安田 正雪^{*1}・阿部 道彦^{*2}・千歩 修^{*3}・小山 智幸^{*4}

要旨:品質の異なる3種類のフライアッシュを普通ポルトランドセメントの15,30,45%置換して用いた水結合材比27,40,55%のコンクリート供試体をつくば、北海道および九州地域にそれぞれ屋外暴露した。材齢10年では、フライアッシュ使用の有無にかかわらずマイクロクラックの発生などが一部認められたものの、地域間による圧縮強度の差はほとんど認められなかった。フライアッシュを使用したコンクリートの強度増進は材齢1年までが大きく、その後の増進は小さかった。中性化は水結合材比が40%以上のコンクリートで材齢とともに進行し、中性化速度は水セメント比と強い相関があった。

キーワード:フライアッシュ, 屋外暴露, 圧縮強度, 中性化, 水セメント比

1. はじめに

コンクリート用フライアッシュのJIS規格が1999年に改正され、コンクリートに使用できるフライアッシュの種類が多くなり、その使用方法が日本建築学会および土木学会の指針に示された。その後、構造物の耐久設計では各種劣化現象に対する性能を検証することの必要性が高まった。しかし、多様化したフライアッシュを用いた場合や置換率を多くした場合のコンクリートの長期強度および中性化性状についてはまだ不明な点が多い¹⁾。

本報は、品質の異なる3種類のフライアッシュを普通ポルトランドセメントの一部に置換して用いた3水準の水結合材比のコンクリート供試体を材齢4週まで標準養生した後、引続き標準養生を継続したもの、屋内に保存したもの、つくば、北海道および九州地域にそれぞれ屋外暴露したものについて、既報²⁾の材齢1年および3年に加えて10年において強度試験や中性化試験などを実施し、フライアッシュを使用したコンクリートの長期性状に関する試験結果をとりまとめたものである。

2. 実験概要

2.1 実験計画

表-1に実験に用いたコンクリートの組合せを示す。コンクリートの水結合材比は27,40,55%の3水準とし、普通ポルトランドセメントの30%を品質の異なる**表-2**に示す3種類のフライアッシュで置換したほか、一部15%,45%を置換した場合のコンクリートについて試験を行った。また、比較のためにフライアッシュを用いていない通常のコンクリート(記号:N)についても試験を行った。さらに、水結合材比55%,フライアッシュ置換率30%の場合のコンクリートの水セメント比にあわせ、水セメント比78.7%の通常のコンクリートについても試験を行った。

表-1 コンクリートの組合せ

フライアッシュ記号 置換率(%)	なし	H		M			L
		30	45	15	30	45	30
W/B=78.7% (SL=18cm)	○	—	—	—	—	—	—
W/B=55% (SL=18cm)	○	—	—	—	○	—	○
W/B=40% (SL=18cm)	○	○	○	○	○	○	○
W/B=27% (SL=25cm)	○	○	—	—	○	—	—

*1 東洋建設(株)技術本部美浦研究所 主任研究員 (正会員)

*2 工学院大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

*3 北海道大学 大学院工学研究科 空間性能システム専攻 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授 工博 (正会員)

2.2 使用材料

使用材料を表－２に示す。使用したフライアッシュの物性を表－３に示す。

2.3 コンクリートの調合

表－４にコンクリートの調合を示す。コンクリートの目標スランプおよび空気量は、水結合材比 40%と 55%がそれぞれ $18 \pm 1.5\text{cm}$, $4.5 \pm 1.0\%$, 水結合材比 27%がそれぞれ $25 \pm 1.5\text{cm}$, $3.0 \pm 1.0\%$ とした。単位水量は 185kg/m^3 を最大とし、№1～№9と№14の調合ではAE減水剤を、№10～№13の調合では高性能AE減水剤を使用した。

2.4 供試体の作製方法と試験方法

コンクリートの練混ぜは 100 ℓ パン型強制練りミキサを用いて行い、1回の練混ぜ量を 65 ℓとした。練混ぜ方法は、W/B=55%, 40%では一括練混ぜ方式とし、結合材と細骨材をミキサに投入し 10 秒間混合した後、粗骨材、水および混和剤を投入し 90 秒間練混ぜ後、容器に排出した。W/B=27%では分割練混ぜ方式とし、結合材、細骨材、水および混和剤を投入し 120 秒間練り混ぜて予めモルタルを製造し、さらに粗骨材を投入して 90 秒間練混ぜ後、容器に排出した。これをそれぞれ2回繰り返して、混合したものをコンクリート試料とした。

供試体の作製は、試験室（温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ）で軽量型枠（ブリキ製）を用いて行った（平成8年10月29日、30日）。供試体の寸法と形状は直径

表－２ 使用材料の品質

種類	銘柄、品質
セメント (C)	普通ポルトランドセメント 3 銘柄等量混合 密度 3.16g/cm^3 , 比表面積 $3320\text{cm}^2/\text{g}$
水 (W)	上水道水
細骨材 (S)	大井川産陸砂, 表乾密度 2.59g/cm^3 , 吸水率 1.74%, 粗粒率 2.86
粗骨材 (G)	岩瀬産硬質砂岩碎石 2005, 表乾密度 2.63g/cm^3 , 吸水率 0.80%, 粗粒率 6.64, 実積率 59.5%
混和剤	リグニンスルホン酸系AE減水剤 (Ad1), ポリカルボキシル系高性能AE減水剤 (Ad2), フライアッシュ用AE剤 (FA用AE剤)

表－３ フライアッシュの物性

項目	種類	I 種	II 種	III 種
	記号	H	M	L
二酸化けい素 (%)		69.2	55.8	61.5
湿分 (%)		0.1	0.0	0.3
強熱減量 (%)		2.3	0.9	8.0
密度 (g/cm^3)		2.35	2.27	2.07
比表面積 (cm^2/g) (ブレン方法)		6510	3890	3410
フロー値比 (%)		110	110	90
活性度 指数 (%)	材齢 28 日	98	90	80
	材齢 91 日	103	103	92

10cm, 高さ 20cm の円柱形であり、各調合毎に 66 体作製した。型枠の脱型は材齢 2 日とし、材齢 4 週まで標準養生 ($20 \pm 2^\circ\text{C}$ の水中) を施し、1 週間屋内 (温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$) で保存した後、各暴露地へ発送し、材齢 6 週から暴露を開始した。暴露地は、①つくば地域（東洋建設(株)美浦研究所）②北海道地域（北海道大学）③九州地域（九州大学）の 3 ヶ所とした。供試体は各 3 本 1 組とし、各地域に暴露した供試体の本数は合計 168 本（3 本 $\times$ 14 種類 $\times$ 4 材齢）である。暴露方法

表－４ コンクリートの調合とフレッシュコンクリートの性質

№	調合 記号	W/B (%)	W/C (%)	FA		s/a (%)	単位量(kg/m ³)								フレッシュコンクリートの性質				
				記 号	置換率 (%)		W	B		S	G	Ad1 (Cx%)	Ad2 (Cx%)	FA 用 AE 剤 (Cx%)	スランプ ^o (cm)	スランプ ^o フロー (mm)	空気量 (%)	温度 (℃)	
								C	FA										
1	N55	55	55	—	—	45.3	178	324	—	790	970	0.25	—	0.007	19.0	—	4.5	19.5	
2	M55—30		78.7	M	30	46.3	163	207	89	824	970	0.25	—	0.020	17.0	—	4.2	19.5	
3	L55—30			L	30	43.1	185	235	101	723	970	0.25	—	0.006	16.5	—	5.2	19.5	
4	N40	40	40	—	—	40.8	185	463	—	658	970	0.25	—	0.010	17.0	—	5.0	20.0	
5	H40—30		57.2	H	30	41.2	175	306	131	668	970	0.25	—	0.050	19.5	—	4.5	21.0	
6	H40—45				72.7	45	41.8	168	231	189	686	970	0.25	—	0.070	19.0	—	4.7	20.5
7	M40—15		47.0	M	15	40.4	183	389	69	648	970	0.25	—	0.020	19.5	—	4.8	20.0	
8	M40—30				57.1	30	40.1	180	315	135	640	970	0.25	—	0.030	18.0	—	4.8	20.0
9	M40—45				72.6	45	40.2	175	241	197	642	970	0.25	—	0.060	17.5	—	5.5	20.0
10	L40—30		57.1	L	30	38.6	185	324	139	601	970	—	1.00	0.070	17.0	—	5.4	21.0	
11	N27	27	27	—	—	47.1	162	600	—	754	860	—	2.00	0.0010	25.0	550x540	2.6	21.5	
12	H27—30		38.6	H	30	45.3	162	420	180	702	860	—	1.00	0.0015	24.5	480x475	2.9	21.0	
13	M27—30			M	30	45.1	162	420	180	697	860	—	1.45	0.0010	24.0	495x490	2.3	21.5	
14	N78	78.7	78.7	—	—	47.7	178	226	—	870	970	0.25	—	0.0015	18.5	—	5.3	19.5	

表－５ 試験手順

- 1) 試験材齢の約1週前に暴露地から美浦へ発送する。
- 2) 外観を目視観察し、ひび割れやスケーリング等の劣化の有無を写真などで記録する。その後、端面を処理して、試験前までの2日間、 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ の水中に保存する（屋内保存を除く）。
- 3) 圧縮強度試験直前に質量と寸法を測定し、密度を算出する。
- 4) 圧縮強度試験は最大荷重 3000kN の圧縮試験機で行なう。同時にコンプレッソメータを用いて応力とひずみを測定し、ヤング係数を算定する。
- 5) 中性化深さは、圧縮強度試験を終了した供試体を割裂し、割裂面の片側を5箇所計10箇所測定し平均する。ただし、爆裂供試体は破壊面で測定する。

はブロック上に型枠用塗装合板を載せ、プラスチック製のレールまたはアングル上に、打込み面を下側に向けて暴露した。外周部の供試体は劣化を受けやすいため、外周部にはダミーの供試体を置いた。屋外暴露と屋内保存の試験材齢は、1年、3年、10年（9年8ヶ月で実施）および20年（予定）である。標準養生の試験材齢は4週、13週、1年、3年、10年（9年8ヶ月で実施）、20年（予定）である。表－５に試験手順を示す。試験項目は、外観観察、圧縮強度、ヤング係数および中性化深さなどである。

3.実験結果と考察

3.1 屋外暴露供試体の外観観察

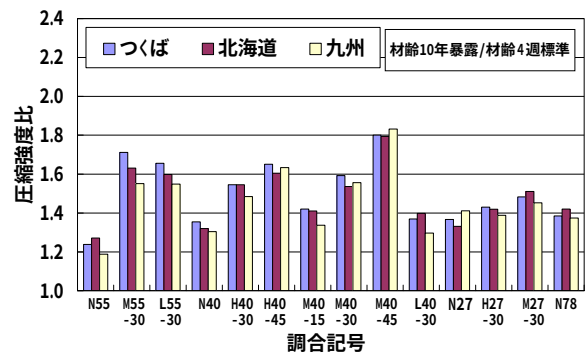
供試体側面の外観観察結果では、つくばに暴露した供試体の方がやや劣化が進行している傾向が認められ、N78、N55、L55-30、M40-45の供試体でマイクロクラックやスケーリングの発生が認められた。供試体底面（暴露時上面）では、地域に関係なく水結合材比78.7%、55%の多くの供試体でスケーリングが一部発生し、水結合材比40%では発生が認められなかった。なお、九州に暴露した供試体は汚れが顕著であった。

3.2 各種条件の強度性状について

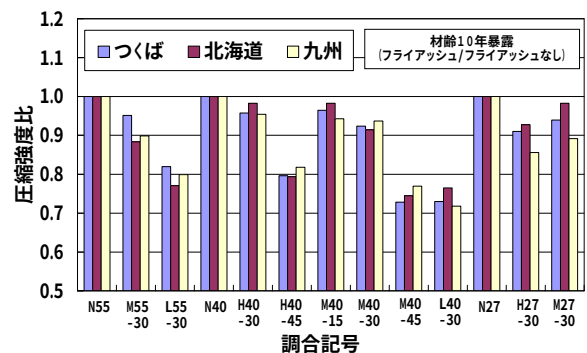
圧縮強度試験結果を表－６に示す。図－１に、標準養生した材齢4週圧縮強度に対する各地域に暴露した材齢10年の強度比を示す。3地域を比較すると、強度比は水結合材比が40%および

表－６ 圧縮強度試験結果（単位：N/mm²）

№	調合 記号	標準養生		屋内 (20℃, 60%)	屋外暴露		
					つくば	北海道	九州
		材齢 4 週	材齢 10年	材齢 10年	材齢 10年	材齢 10年	材齢 10年
1	N55	39.8	51.6	42.8	49.3	50.6	47.3
2	M55-30	27.4	56.5	39.7	46.9	44.7	42.5
3	L55-30	24.4	47.6	34.4	40.4	39.0	37.8
4	N40	52.2	75.5	57.2	70.7	68.9	68.1
5	H40-30	43.8	82.4	56.6	67.7	67.7	65.0
6	H40-45	34.1	75.5	48.1	56.3	54.7	55.7
7	M40-15	48.0	72.6	58.1	68.1	67.7	64.2
8	M40-30	41.0	74.3	51.9	65.3	63.0	63.8
9	M40-45	28.6	67.9	42.6	51.5	51.3	52.4
10	L40-30	37.7	58.4	43.9	51.5	52.7	48.9
11	N27	95.4	128.7	113.7	130.4	127.0	134.6
12	H27-30	83.0	123.4	105.5	118.7	117.8	115.2
13	M27-30	82.6	134.2	102.8	122.5	124.8	120.0
14	N78	19.5	30.0	26.1	27.0	27.7	26.8



図－１ 4週強度に対する10年暴露強度比



図－２ 同一水結合材比のフライアッシュなしに対する強度比（暴露各地）

55%で九州地域のものがやや小さい傾向がある。しかし、それぞれの地域における同一水結合材比のフライアッシュを使用しないコンクリートに対する強度比で示すと図－２となり、九州地域のフライアッシュを使用したコンクリートの強度比は他の地域と大きく変わることはない。

今後も強度変化の推移をみる必要があるが、現在のところ、フライアッシュを使用しないコンクリート強度の地域差がないとすると、図-1に示した地域による差はばらつきの範囲内であると思われる。

図-3に各種環境条件下の材齢10年までの圧縮強度の経時変化を示す。屋外暴露については前述の理由から大差はないものとし、3地域の平均値で示した（以降も同じ）。標準養生した供試体は材齢10年にかけて強度増進があるのに対し、屋外暴露したものは材齢4週から材齢1年まで強度増進は大きい、その後の強度増進はやや頭打ち傾向となった。一方、屋内保存した供試体はフライアッシュの使用の有無にかかわらず、材齢

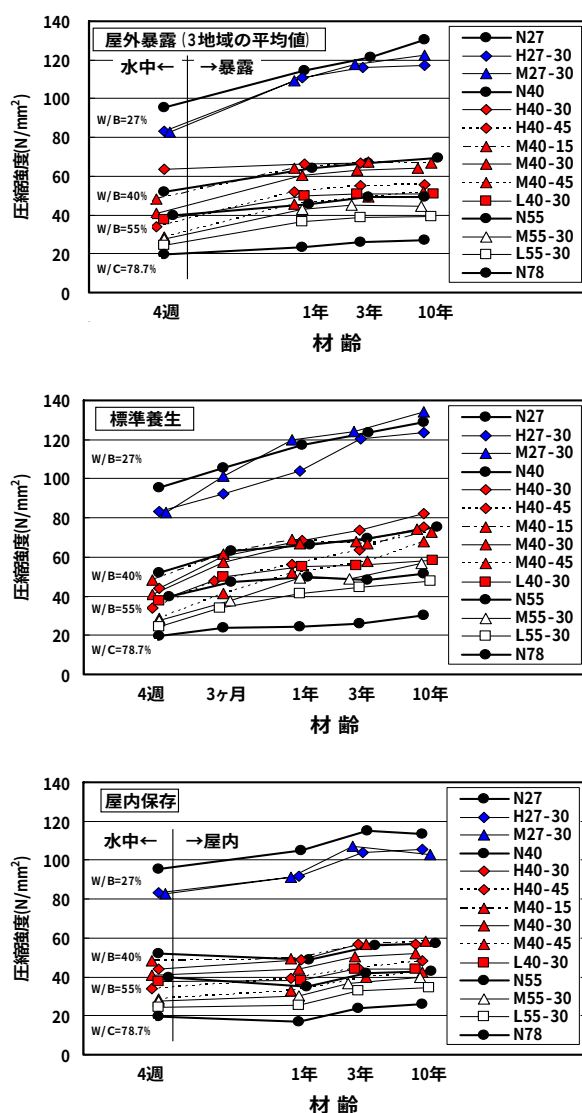


図-3 各種環境条件下の圧縮強度の経時変化

4週以降の強度増進は鈍く、この理由としては、長期の乾燥にともなう水和反応の停止などが考えられる。

次に、環境条件別のフライアッシュの種類や置換率の影響を調べるため、同一水結合材比のフライアッシュを使用しないコンクリートに対する強度比について図-4に示す。

いずれのフライアッシュを使用したコンクリートも使用しないものに対して、強度比は置換率が大きいほど小さくなった。標準養生材齢4週強度に対する、各種環境条件別の10年の強度比を図-5に示す。フライアッシュの使用による強度増進は大きく、強度比は環境条件やフライアッシュの種類にかかわらず、水結合材比が大きい割合ほど大きく、また、フライアッシュの置換率が大きい割合ほど大きい。フライアッシュの種類で比較すると、強熱減量が大きいL(Ⅲ種)のフライアッシュを用いた場合は、H(Ⅰ種)やM(Ⅱ種)のものを用いた場合と比較して強度比が小さいといえる。

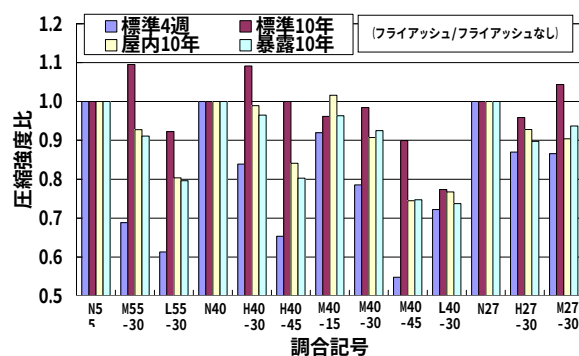


図-4 同一水結合材比のフライアッシュなしに対する強度比（環境条件別）

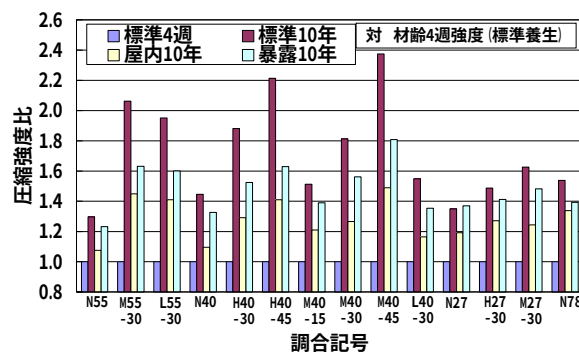


図-5 材齢4週強度に対する強度比

3.3 ヤング係数

材齢 10 年における環境条件別の圧縮強度とヤング係数の関係を図-6 に示す。標準養生、屋内保存および屋外暴露した供試体の試験時における平均密度は、それぞれ 2.329g/cm^3 (範囲 $2.270\sim 2.431\text{g/cm}^3$)、 2.253g/cm^3 (範囲 $2.164\sim 2.403\text{g/cm}^3$)、 2.275g/cm^3 (範囲 $2.182\sim 2.420\text{g/cm}^3$) であった。ヤング係数は標準養生、屋外暴露、屋内保存の順で小さくなったが、圧縮強度が 100N/mm^2 以上の領域では環境条件の影響はあまり認められなかった。また、New RC 式では係数 k_2 を 1.1 としている³⁾が、圧縮強度 100N/mm^2 以上では必ずしも実験結果との対応はよくなかった。

図-7 に材齢 10 年における水結合材比 40% のコンクリートのヤング係数を示す。屋外暴露のヤング係数は地域による大差が認められず、その値は標準養生と屋内保存の中間にある。なお、L (Ⅲ種) 以外はいずれも材齢 4 週のヤング係数以上であった。

3.4 コンクリートの中性化

コンクリートの中性化は水結合材比が 40% 以上の調合で材齢とともに進行した。図-8 に材齢 10 年における地域別の中性化深さを示す。屋内 (試験室) の炭酸ガス濃度は 0.05% 程度であった。屋外暴露した供試体の中性化深さは地域による大差がなく、屋内のものより小さい。中性化深さは同一のフライアッシュの場合、フライアッシュの置換率が高いものほど大きいといえる。なお、フライアッシュの種類や微細なマイクロクラックなどが中性化に及ぼす影響は現時点では明らかでない。

図-9 に水セメント比および材齢 4 週圧縮強度の平方根の逆数と中性化速度の関係を示す。ここでの中性化速度は、材齢 1 年、材齢 3 年および材齢 10 年の中性化深さ測定結果から $\sqrt{t}$ 則に基づき算出した値で示した。ただし、屋外暴露の中性化速度は、3 地域の平均値で示した。屋外暴露の中性化速度は材齢 4 週圧縮強度の平方根の逆数よりも水セメント比

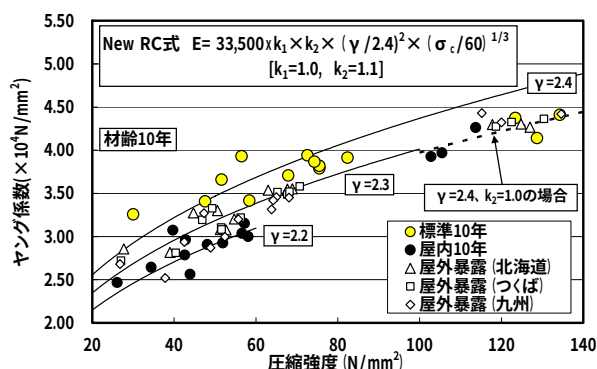


図-6 圧縮強度とヤング係数の関係

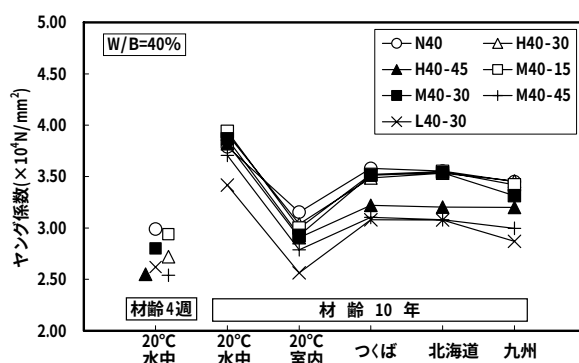


図-7 ヤング係数 (水結合材比40%)

との相関が強く、屋内保存の中性化速度は材齢 4 週圧縮強度の平方根の逆数の方が相関が強いといえる。同一の水セメント比の場合にはフライアッシュを使用したコンクリートの中性化速度は遅くなり、長期にわたるポゾラン反応によるためと考えられる。品質の良い H (Ⅰ種) を使うと圧縮強度が大きくなり、同一強度に対して中性化速度が大きくなった。なお、屋外暴露と屋内保存の中性化速度をそれぞれ材齢 10 年圧縮強度の平方根の逆数であらわすと、両者には強い相関は認められなかった。

図-10 に中性化速度について、本実験と同一のフライアッシュを用いた同一調合のコンクリートによる炭酸ガス濃度 $5\pm 0.5\%$ の条件下における促進中性化試験結果⁴⁾をあわせて示す。この結果、促進中性化試験による中性化速度は、屋外暴露の約 15 倍、屋内保存の約 10 倍であった。コンクリートの中性化の進行を材齢および炭酸ガス濃度の平方根に比例するとして計算した場合、屋外 (CO_2 濃度 0.03%) 12.9 倍、

屋内（CO₂濃度0.05%）10倍となり，屋内についてほぼ一致した。屋外の倍率の相違は降雨の影響によるものと思われる。

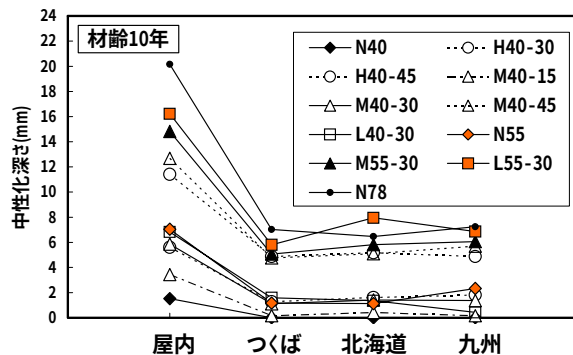


図-8 中性化深さ（材齢10年，地域別）

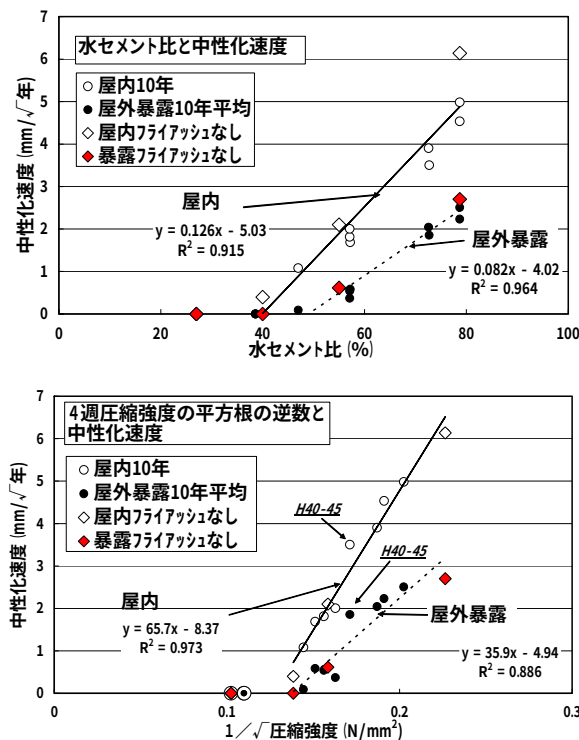


図-9 水セメント比，材齢4週圧縮強度と中性化速度の関係

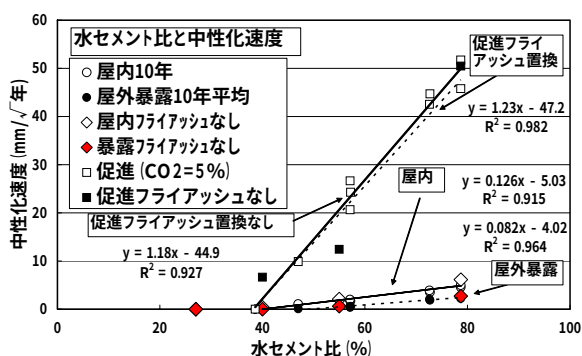


図-10 促進中性化試験との関係

4. まとめ

フライアッシュを使用したコンクリートの10年までの試験結果は以下のとおりである。

- (1) 屋外暴露した供試体には一部マイクロクラックなどが認められたが，圧縮強度の地域差はほとんど認められなかった。
- (2) 強度増進はフライアッシュの置換率が大きく，水結合材比が大きいものほど大きい，Ⅲ種のフライアッシュを用いたものはやや小さかった。
- (3) ヤング係数は，Ⅲ種以外いずれの環境条件でも材齢4週時の値以上であった。
- (4) 中性化は水結合材比が40%以上の割合で材齢とともに進行し，中性化速度は，屋外暴露では水セメント比と，また，屋内保存では4週圧縮強度の平方根の逆数と相関が強かった。

謝辞

本実験は日本建築学会フライアッシュ調査研究小委員会の活動の一環として実施したものである。材齢10年の実験実施にあたり，工学院大学並木氏，平原氏，岡野氏，島崎氏，築地氏の御協力を得ました。

参考文献

- 1) 土木学会コンクリートライブラリー第64号，フライアッシュを混和したコンクリートの中性化と発錆に関する長期研究，1988.3
- 2) 安田他：フライアッシュを使用したコンクリートの屋外暴露試験，コンクリート工学年次論文集報告集 Vo.22, No.2, pp.85～90
- 3) 建設省：総合技術開発プロジェクト「鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発」報告書，1993.10
- 4) 和田他：フライアッシュの中性化，水密性および遮塩性に関する実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.20, No.2, 1998, pp.121～126