

論文 フライアッシュコンクリートの中性化, 水密性および遮塩性に関する実験

和田 真平*1・阿部 道彦*2・柳 啓*3・藤田 克己*1

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%代替として用いた水結合材比27, 40, 55%のコンクリートについて、中性化、水密性および遮塩性の促進試験を行った。水結合材比、圧縮強度および水セメント比をそれぞれ同一として通常のコンクリートと比較すると、フライアッシュコンクリートの中性化は同一水セメント比で同程度の性能が得られるのみであった。水密性は同一水セメント比では同等以上、同一強度では同程度であったが、遮塩性に関してはフライアッシュの品質、置換率によらず全ての条件で同等以上の性能が得られる、という結果となった。

キーワード：フライアッシュコンクリート、促進試験、中性化、水密性、遮塩性

1. はじめに

フライアッシュの発生量は今後増大することが予想されており、更なる需要の拡大が望まれている。また、海外炭の使用などによりその品質が多様化していることから、フライアッシュコンクリートの特性についての実験研究が盛んに行われている。しかし、フライアッシュの品質や、大量使用した場合の影響についてはまだ不明な点が多い。本論文は、品質が異なる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%代替として用いた、水結合材比27, 40, 55%のコンクリートと通常のコンクリートについて中性化、水密性、遮塩性の促進試験を行い、フライアッシュコンクリートの性状について検討を行ったものである。

したフライアッシュコンクリートについて試験を行った。また、比較のために通常のコンクリートについても試験を行った。さらに、水粉体比55%、フライアッシュ置換率30%のフライアッシュ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に実験の組み合わせを示す。

表-1 実験の組合せ

フライアッシュ種類 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% (SF=55~60cm)	○	○	-	-	○	-	-

2. 実験概要

2.1 実験計画

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3種類のフライアッシュ(記号H, M, L)で置換したほか、一部15%, 45%を置換

2.2 使用材料

セメント(C)：普通ポルトランドセメント3
銘柄混合、比重3.16、比表面積3320cm²/g
フライアッシュ(FA)：表-2の物性、3銘柄

*1 東海興業(株)技術研究所(正会員)

*2 建設省建築研究所 第2研究部無機材料研究室室長 工博(正会員)

*3 (財)建材試験センター 中央試験所 上級専門職(正会員)

表-2 フライアッシュの物性

品質	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
比重		2.35	2.27	2.07
比表面積(cm ² /g) (プレーン法)		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

* Hは比表面積の大きなもの、Lは強熱減量の大きなもの

水 (W) : 上水道水

細骨材 (S) : 大井川産陸砂, 表乾比重 2.59, 吸水率 1.74%, 粗粒率 2.86

粗骨材 (G) : 岩瀬産硬質砂岩砕石 2005

表乾比重 2.63, 絶乾比重 2.61, 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), ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤 (Ad2), 空気量調整剤, フライアッシュ用空気量調整剤

2.3 コンクリートの調合

コンクリートの調合条件を表-3に示す。

表-3 コンクリートの調合

W/B (%)	W/C (%)	フライアッシュ		単位量(kg/m ³)					Add 種類*	
		種類	置換率 (%)	s/a (%)	W	B		S		G
						C	FA			
55	55	-	-	45	178	324	-	790	970	1
	78.7	M	30	46	163	207	89	824	970	1
		L		43	185	235	101	723	970	1
40	40	-	-	41	185	463	-	658	970	1
	57.2	H	30	41	175	306	131	668	970	1
			45	42	168	231	189	686	970	1
	47	M	15	40	183	389	69	648	970	1
	57.1		30	40	180	315	135	640	970	1
	72.6		45	40	175	241	197	642	970	1
	57.1	L	30	39	185	324	139	601	970	2
27	27	-	-	47	162	600	-	754	860	2
	38.6	H	30	45	162	420	180	702	860	2
		M		45	162	420	180	697	860	2
78.7	78.7	-	-	48	178	226	-	870	970	1

*Add種類:1=AE減水剤, 2=高性能AE減水剤

水結合材比 40%,55%および 78.7%の目標スランプは 18±1.5cm, 目標空気量は 4.5±1%とし, 単位粗骨材かさ容積は 0.62m³/m³とした。単位水量の最大値は 185kg/m³とした。水結合材比

27%の調合の目標スランプは 25±1.5cm (スランプフロー値で 50±5cm 程度), 目標空気量は 3.0±1%とし, 単位粗骨材かさ容積は 0.55m³/m³とした。水結合材比 27%の調合の単位水量は, 162kg/m³で一定とした。

コンクリート用化学混和剤は, 水結合材比 27%の調合と水結合材比 40%のフライアッシュ Lを用いた調合では高性能 AE 減水剤を使用し, その他の調合では AE 減水剤を使用した。高性能 AE 減水剤と空気量調整剤の使用量は, 各実験で目標値が得られるよう調整した。

2.4 試験体の作製と試験方法

コンクリートは, 20±2℃, 湿度 65±5%RH の試験室で容量 100ℓの強制水平練ミキサを用いて, 練混ぜ量 65ℓとして製造した。練混ぜは一括練混ぜ方式とし, 粉体と細骨材を投入し, 10 秒攪拌した後, 粗骨材と水を投入し, 90 秒間 (W/B : 55,78.7%), または 120 秒間 (W/B : 40%) 攪拌した。W/B : 27%の調合の練混ぜは分割練混ぜ方式とし, 粉体と細骨材を投入して 10 秒間攪拌した後, 水を投入し 120 秒間攪拌し, さらに粗骨材を投入して 90 秒間攪拌した。

1) 促進中性化試験 (試験体 : 10×10×40cm)

試験は, 日本建築学会「高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針 (案)・同解説」の「付 1. コンクリートの促進中性化試験方法 (案)」に従った。試験体は各調合 2 本とし, それぞれ別の機関で試験を行い, その平均を試験値として採用した。

2) 水密性 (試験体 : φ15×15cm)

試験体は材齢 4 週まで標準養生した φ15×30cm の試験体の上下部分を切断し, φ15×15cm とし, その後 3 ヶ月間, 温度 20±1℃, 湿度 60±3%RH の室内で保管した。

試験はインプット法による透水試験¹⁾とした。水圧は 0.490N/mm²とし, 試験時間は 24 時間とした。

3) 遮塩性 (試験体 : 10×10×40cm)

笠井らが提示した方法²⁾に準じ, 以下のよう

試験体は材齢 4 週まで標準養生した 10×10×40cm とした。試験面を 1 側面とし、材齢 10 週に試験面を除く 5 面をエポキシ系接着剤でシールした後、ラッピングフィルムで封かんをして材齢 14 週まで保存した後試験を開始した。

試験は、温度 50℃の下で 3%NaCl 溶液に 4 日間浸漬した後、温度 50℃、湿度 60±3%RH の雰囲気中で 3 日間乾燥という行程を 1 サイクルとして 4,8,16 サイクルで割裂し、2%硝酸銀水溶液を噴霧して、塩化物イオンの浸透深さを測定した。

3. 実験結果および考察

フレッシュコンクリートと圧縮強度の試験結果を表-4 に示す。

以下の考察では水結合材比、圧縮強度および水セメント比がそれぞれ同一の条件でフライアッシュコンクリートと通常のコンクリートの性能を比較し、フライアッシュコンクリートの性能評価に適した調合上の指標について検討した。

なお、図中の点線は比較したフライアッシュ置換のない通常のコンクリートを示す。

3.1 促進中性化試験

図-1, 2 に水結合材比 40%における促進試験期間と中性化深さの関係を示す。

表-4 コンクリートの物性

W/B (%)	W/C (%)	フライアッシュ		フレッシュ時試験			硬化物性		
		種類	置換率 (%)	スランブ (cm)	Air (%)	CT (°C)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	
55	78.7	-	-	18.0	5.2	19.0	37.6	27.9	
		M	30	17.0	4.1	19.0	24.1	25.2	
		L	-	16.0	3.9	20.5	27.3	25.3	
40	40	-	-	17.5	5.3	19.0	53.5	30.4	
		H	30	19.5	4.0	21.0	48.8	27.6	
	72.7	-	-	45	17.5	4.0	20.5	37.9	26.3
		H	30	15	18.0	4.9	19.5	49.8	28.5
	57.1	M	30	18.0	4.3	19.5	42.1	27.4	
			45	18.0	5.3	19.5	29.0	24.0	
L			30	19.5	4.3	21.0	42.7	26.9	
27	38.6	-	-	25.0 ^{*1}	2.3	22.0	103.2	37.8	
		H	30	24.5 ^{*2}	2.9	21.5	87.1	35.2	
		M	30	24.5 ^{*3}	2.7	22.0	87.0	35.5	
78.7	78.7	-	-	18.0	4.8	19.0	16.3	23.4	

*1: スランブ フォ-520*520 (mm), 50cm フォ-時間 21.2 (s)
 *2: スランブ フォ-460*445 (mm)
 *3: スランブ フォ-510*495 (mm), 50cm フォ-時間 21.4 (s)

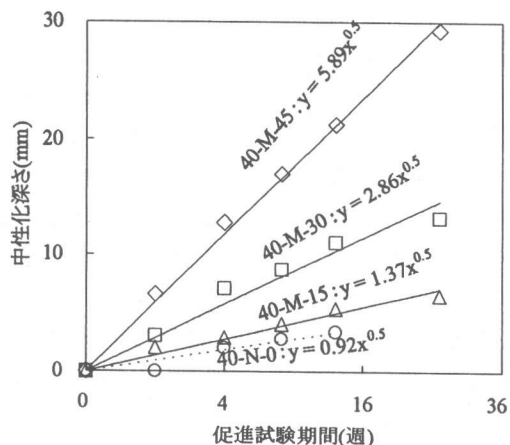


図-1 水結合材比 40%, フライアッシュ M の促進試験期間と中性化深さの関係

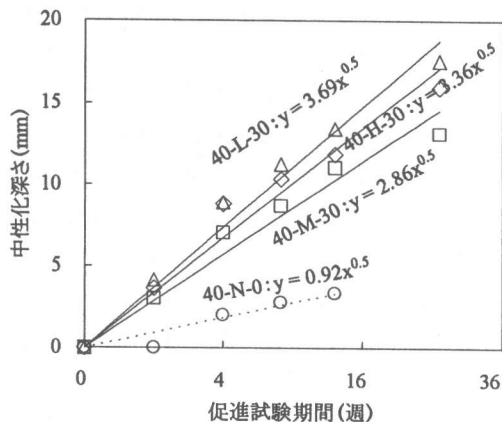


図-2 水結合材比 40%, 置換率 30% の場合の促進試験期間と中性化深さの関係

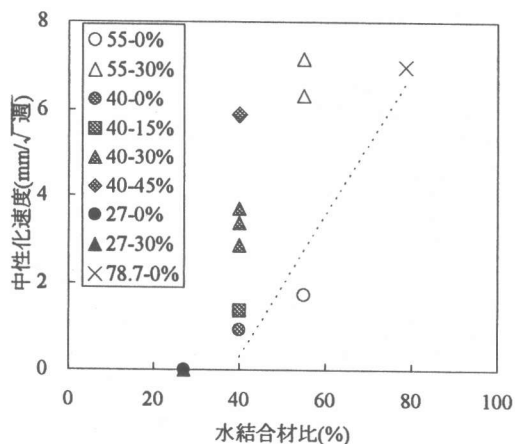


図-3 水結合材比と中性化速度の関係

図-1より同一水結合材比でフライアッシュの種類が同じ場合、置換率の高いほど中性化が大きいことがわかる。図-2によると同一水結合材比でフライアッシュ置換率が同じ場合、L,H,Mの順に中性化が大きくなっていることがわかるが、その差はあまり大きくなく中性化に及ぼすフライアッシュの種類の影響は他の要因に比べて小さいと考えられる。

図-3に示す水結合材比と中性化速度の関係を見ても明らかのように、同一水結合材比では種類、置換率によらず、フライアッシュコンクリートは通常のコンクリートに比べ中性化が大きい。

図-4に $1/\sqrt{\text{圧縮強度}}$ と中性化速度の関係³⁾を示す。通常のコンクリートと同じ圧縮強度であっても、フライアッシュコンクリートの方が中性化が大きくなっていることがわかる。

図-5に水セメント比と中性化速度の関係を示す。実線で示すようにフライアッシュで置換したコンクリートにおいても両者の関係はほぼ直線であるとみなすことができる。点線で示したフライアッシュ置換のない通常のコンクリートと比較すると同一水セメント比では同等であるとみなすことができる。

なお、この点線は水セメント比 38%で中性化速度が0になると仮定して求めた。⁴⁾

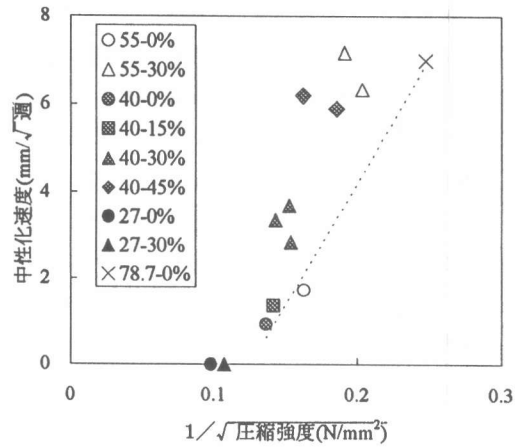


図-4 $1/\sqrt{\text{圧縮強度}}$ と中性化速度の関係

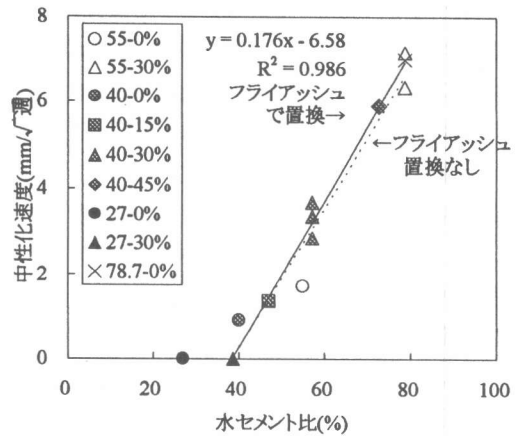


図-5 水セメント比と中性化速度の関係

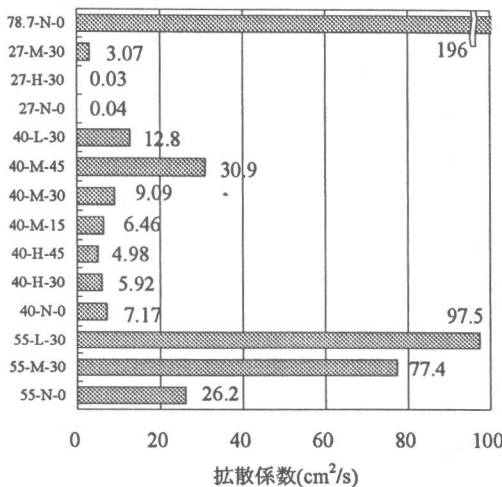


図-6 水密性試験結果

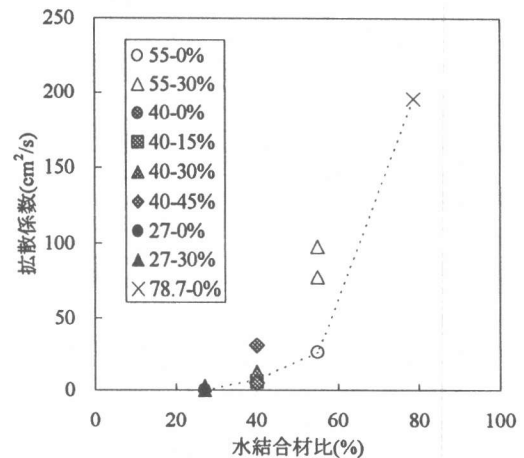


図-7 水結合材比と拡散係数の関係

3.2 水密性試験

図-6に示す試験結果と図-7に示す水結合材比と拡散係数の関係から、同一水結合材比では一部の場合を除き、通常のコンクリートに対して水密性は悪化する。

図-8に圧縮強度と拡散係数の関係を示す。同じ圧縮強度では通常のコンクリートと同程度の水密性である。

図-9に水セメント比と拡散係数の関係を示す。同一水セメント比では通常のコンクリートと比較した場合いずれの場合も改善が見られ、同等以上の水密性が期待できる。

3.3 遮塩性試験

図-10に試験結果を示す。図-11に示す水結合材比と16サイクル時の塩分浸透深さの関係からも、同一水結合材比で比較して、フライアッシュで置換した場合、その種類、置換率によらず遮塩性が向上していることがわかる。

図-12に圧縮強度と16サイクル時の塩分浸透深さの関係、図-13に水セメント比と16サイクル時の塩分浸透深さの関係を示す。いずれの場合も通常のコンクリートと比較し、遮塩性は向上していることがわかる。

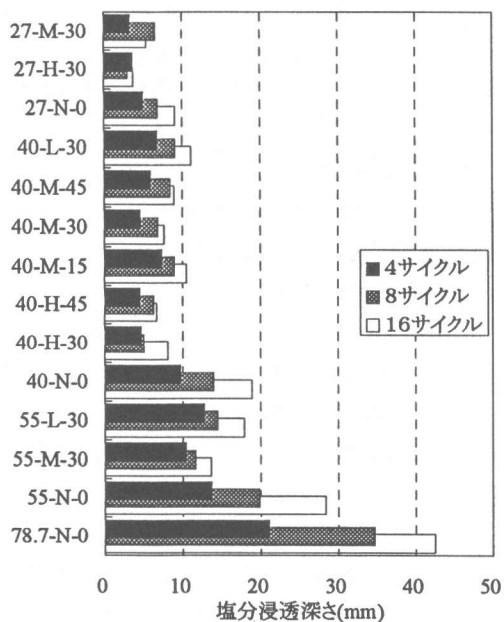


図-10 遮塩性試験結果

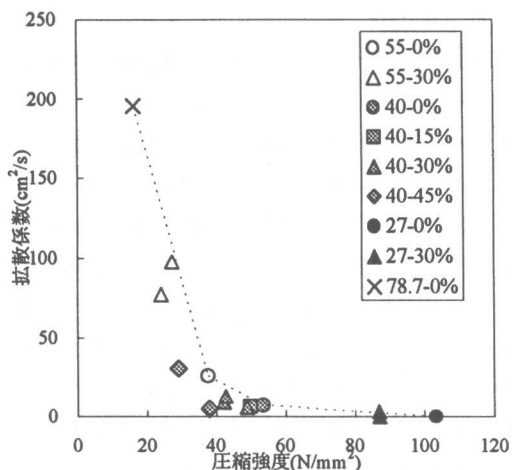


図-8 圧縮強度と拡散係数の関係

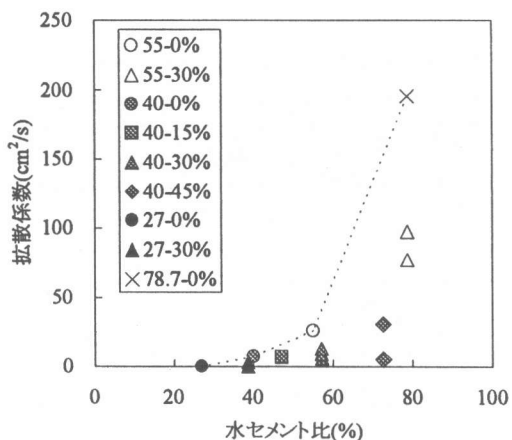


図-9 水セメント比と拡散係数の関係

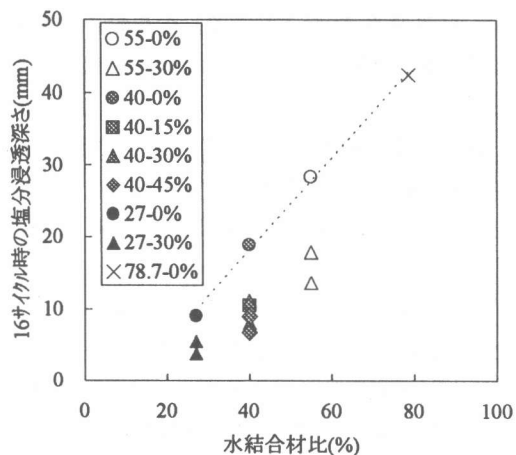


図-11 水結合材比と塩分浸透深さの関係

4. まとめ

品質の異なるフライアッシュを置換率を変えて使用したフライアッシュコンクリートの中性化、水密性および遮塩性について促進試験を行い、通常のコンクリートと比較し、フライアッシュの性能を評価する調査上の条件について検討した結果は表-5のようにまとめられる。

これによると、水密性と遮塩性については水結合材比または圧縮強度で評価可能であるという結果が得られた。また、中性化についても圧縮強度による評価⁵⁾が可能であると思われたが、促進試験ではそのような結果が得られなかった。これについては促進試験の適用の妥当性を含め、今後、検討を要すると考えられる。

表-5 フライアッシュコンクリートの性能評価に用いる調査上の指標の検討結果

性能の項目	評価指標		
	水結合材比	圧縮強度	水セメント比
中性化	×	×	○
水密性	△	○	◎
遮塩性	◎	◎	◎

◎：安全側に評価できる
○：適切に評価できる
△：フライアッシュの種類により異なる
×：危険側の評価となる

なお、本論文は、(社)日本建築学会・フライアッシュコンクリート調査研究小委員会(主査：川瀬清孝 新潟大学教授)の活動の一環として実施した研究の一部を取りまとめたものである。

実験の協力を頂いた、東洋建設 安田氏、青木建設 大下氏、八洋コンクリートコンサルタント 桜井氏に感謝申し上げます。

参考文献

1) 笠井英志 他：高流動コンクリートの力学特性・耐久性に関する研究(その11, 塩化物イオンの浸透性), 日本建築学会大会梗概集(北海道), A-1, pp.301-302, 1995年8月

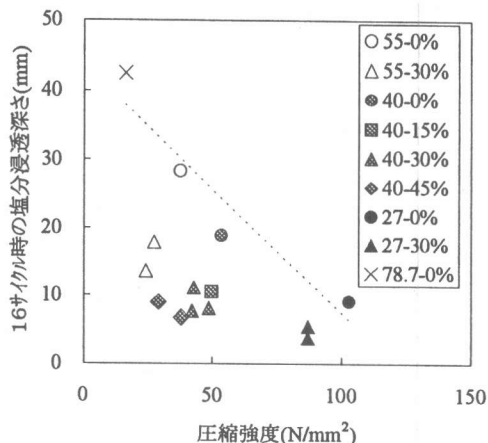


図-12 圧縮強度と塩分浸透深さの関係

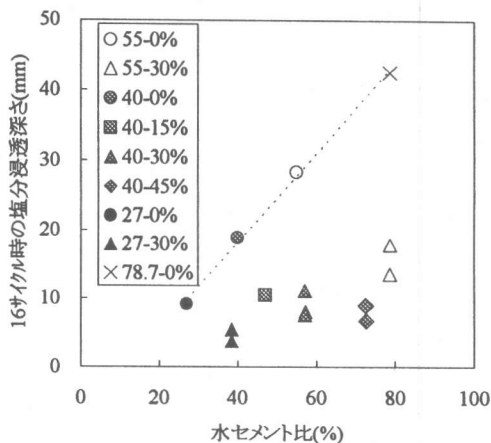


図-13 水セメント比と塩分浸透深さの関係

2) 村田二郎：コンクリートの水密性の研究, 土木学会論文集, 昭和36年11月
3) 馬場明生 他：各種の表面層をもつコンクリートの中性化深さ推定方法, コンクリート工学年次論文報告集, 9-1, pp.333~338, 1987年
4) 岸谷孝一：鉄筋コンクリートの耐久性, 鹿島建設技術研究所出版部, 昭和38年
5) 土木学会コンクリート委員会フライアッシュ研究小委員会編：フライアッシュを混和したコンクリートの中性化と鉄筋の発錆に関する長期研究(最終報告), 土木学会, 昭和63年