

報告 噴霧養生下で材齢 50 年を経た池原ダムコンクリート供試体の物性

今岡 知武*¹・鷺尾 朝昭*¹・安田 幸弘*²・木下 茂*³

要旨: アーチ式コンクリートダムである池原ダムに使用された中庸熟ポルトランドセメントをベースとしたフライアッシュ置換率 30%のダムコンクリートを、温度 20℃湿度 100%の噴霧養生下で材齢 50 年まで保管し、所定の材齢において強度試験を行った。圧縮強度は材齢 3 年まで顕著に増加しており、材齢 50 年を迎えた現在も漸増している傾向があることが確認された。材齢 50 年の供試体の圧縮強度は 91 日強度と比較して 1.5 倍であった。噴霧養生下においては、Ca(OH)₂の溶脱に起因する中性化はごく表層においても確認されなかった。

キーワード: 圧縮強度, ダムコンクリート, 長期材齢, フライアッシュ, 噴霧養生

1. はじめに

ダムなどの長期間にわたり供用が見込まれる構造物のコンクリートは、コンクリートの設計基準強度である材齢 28 日、91 日強度を満足するだけでなく、長期的に強度が増進することが望ましい。また、ダムのようなマスコンクリートの製造においては、温度応力低減のために水和熱の低い材料を使用することが望ましいことから、ダムコンクリートには中庸熟ポルトランドセメントをベースとして、その一部をフライアッシュで置換したものが用いられることが多い。

アーチ式コンクリートダムは水圧などの荷重をコンクリートの圧縮力を介して基礎岩盤に伝えることにより、その構造を維持しており、ダムの安全性を確保する上でコンクリートには十分な圧縮強度が求められる。そのため、コンクリートの圧縮強度を評価することはダムの維持管理上極めて重要なことである。しかしながら、コンクリートの強度試験をダムの供用期間である数十年単位の長期間にわたり継続的に実施した事例は国内のアーチダム建設の黎明期である 1960 年代においてはほぼなく、現在においても少ない^{1), 2)}。また、1960 年代当時にはフライアッシュコンクリートや AE 剤・減水剤といった化学混和剤を使用したコンクリートの長期強度に関する知見は十分に得られていなかった。以上のことを踏まえて、アーチ式コンクリートダムである池原ダム、坂本ダム建設の際に、供試体によるフライアッシュコンクリートの 100 年間にわたる強度試験が計画され、現在も継続して実施されている。

近年、長期材齢を経たコンクリート構造物に関する調査が行われ、コンクリートの物性が評価されてきているものの、建設当時の資料が保存されていないことなどか

ら、使用材料や配合が不明な場合がある。また、構造物ごとに暴露条件が異なるため、コンクリートの基準強度として取り扱われる標準養生を実施した供試体の性質と直接比較を行うことが困難である。ゆえに、50 年という長期材齢を経た、使用材料の性質及び養生条件が明らかであるコンクリートの性状に関するデータは貴重であると考えられる。

本報告は、池原ダムコンクリートを対象にして実施している長期強度試験の内容、使用材料の性質、材齢 50 年までの試験結果について示すものである。

2. 試験内容

2.1 池原ダムについて

池原ダムは奈良県吉野郡熊野川水系の北山川に位置する揚水発電用のダム堤長 460m、堤高 111m、堤体体積 646,600m³のアーチ式コンクリートダムである。池原ダム全景を写真-1 に示す。

2.2 使用材料

使用材料を表-1 に示す。供試体は 1963 年 10 月 15 日と 1963 年 11 月 12 日の 2 回にわけて作製された。以降、



写真-1 池原ダム全景

*1 電源開発(株) 茅ヶ崎研究所土木技術研究室(正会員)

*2 電源開発(株) 茅ヶ崎研究所土木技術研究室(正会員)

*3 (株) 開発設計コンサルタント 設備保全技術開発センター(正会員)

*4 (株) シーテック

本文中では、1963年10月15日に作製された供試体をNo.1、1963年11月12日に作製された供試体をNo.2と表記する。セメントの物理性状を表-2に、鉱物組成を表-3に、フライアッシュの物理性状を表-4に、セメントとフライアッシュの化学組成を表-5に、骨材品質を表-6に、粒度分布を表-7に示す。各表には参考としてJIS規格値を示している。No.1とNo.2には同種の材料が使用されたが、作製時期の差により使用材料の品質は若干異なり、セメント、フライアッシュの圧縮強度がNo.2の方が数%高いことから、わずかに初期強度が増加しやすい性状であったといえる。

2.3 配合条件

池原ダムコンクリートに発生する最大圧縮応力 7.8N/mm^2 に対して安全率5、変動係数を15%と設定し設計基準強度を 45N/mm^2 とした。配合を表-8に示す。水和熱低減、セメント使用量低減を目的として、フライアッシュが置換率30%で使用されている。池原ダムはアーチダムであるため、外部コンクリート、内部コンクリートによる配合の違いはなく、岩着部などを除き同一の配合で製造されている。池原ダム地点は過酷な凍害環境にないことから、AE剤を用いておらず、単位水量低減を目的として減水剤を使用している。

2.4 製造条件

コンクリートの練り混ぜは、池原ダムのコンクリート

表-1 使用材料

セメント	中庸熟ポルトランドセメント
混和材	国内炭フライアッシュ
混和剤	減水剤
粗骨材	北山川産 天然骨材
細骨材	粗骨材をロッドミルにより粉砕したもの

表-2 セメント物理性状

	No.1	No.2	JISR5210-1960	
比重	3.2	3.2	≥ 3.05	
比表面積 (cm^2/g)	3110	3150	≥ 2700	
強熱減量 (%)	0.8	0.9	≤ 4.0	
凝結	始発 終結	(h-min)		
		3-42	3-48	$\geq 1-0$
圧縮強度 (kgf/cm^2)	3日	116	127	≥ 35
	7日	174	187	≥ 70
	28日	319	348	≥ 150
	91日	490	529	-
水和熱 (cal/g)	7日	62.1	61.2	≤ 70
	28日	77.2	75.3	≤ 80

表-3 セメント鉱物組成

	No.1 (%)	No.2 (%)	JISR5210-1960 (%)
C_3S	42	45	≤ 50
C_2S	36	33	-
C_3A	4	4	≤ 8
C_4AF	12	12	-

製造に使われていたバッチャープラントにより行われた。バッチャープラントより採取したコンクリートを、40mmふるいでウェットスクリーニングし、 $\phi 15 \times 30\text{cm}$ の供試体に成型した。締固めには小型バイブレーターが用いられた。ウェットスクリーニング前の硬化したコンクリートの断面を写真-2に示す。粗骨材に天然骨材を使用しているため、粒径の大小にかかわらず全体的に球形の骨材が多く、ペースト量が少ないことから粗骨材粒子間の間隔が狭いことが分かる。フレッシュ性状の試験結果を表-9に示す。No.1, No.2のどちらの配合もスランプ、空気量、練り上り温度は目標値を満足している。

2.5 養生条件

材齢1年までは、コンクリート打設現場である池原ダム地点において標準養生下で保管した。材齢1年経過後に供試体を神奈川県茅ヶ崎市の試験所(現電源開発茅ヶ崎研究所)に搬送した。試験所内においては、室温 20°C

表-4 フライアッシュ物理性状

	No.1	No.2	JISA6201-1958	
比重	2.12	2.10	≥ 1.95	
44 μm ふるい残分 (%)	16.8	17.3	≥ 25	
比表面積 (cm^2/g)	3260	3270	≥ 2700	
強熱減量 (%)	1.5	1.8	≤ 5.0	
MB吸着量 (%)	0.75	0.70	-	
単位水量比 (%)	96	97	≤ 100	
圧縮強度比 (%)	7日	70	76	≥ 63
	28日	109	112	≥ 80

表-5 セメント・フライアッシュ化学組成

	セメント (%)		JIS R5210-1960	フライアッシュ (%)		JIS A6201-1958
	No.1	No.2		No.1	No.2	
配合	No.1	No.2		No.1	No.2	-
SiO_2	23.8	23.3	-	58.7	58.8	≥ 45.0
Al_2O_3	4.1	4.2	-	27.3	26.8	-
Fe_2O_3	3.9	4.1	-	5.6	5.1	-
CaO	64.1	64.3	-	3.3	3.3	-
MgO	1.3	1.3	≤ 4.0	1.2	1.5	-
SO_3	1.5	1.4	≤ 4.0	0.7	0.8	-

表-6 骨材品質

	粗骨材	細骨材
絶乾密度 (g/cm^3)	2.62	2.56
吸水率 (%)	1.40	2.60
安定性 (%)	5.1	6.4
すりへり減量 (%)	13.5	-

表-7 骨材粒度分布

粗骨材 (%)		細骨材 (%)	
150-80mm	25	5-2.5mm	10
80-40mm	30	2.5-1.2mm	23
40-20mm	20	1.2-0.6mm	27
20-5mm	25	0.6-0.3mm	22
		0.3-0.15mm	13
		$\leq 0.15\text{mm}$	5

表-8 配合表

Gmax (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	FA/(C+FA) (%)	W/(C+FA) (%)	s/a (%)	単体量(kg/m ³)					
							W	C	FA	S	G	減水剤
150	3.5±0.5	1.5±0.5	≤27	30.4	39	24	90	160	70	507	1633	0.46

湿度 100%に保った室内において噴霧養生下で保管している。現在の保管状況を写真-3 に、材齢 50 年の試験に使用した供試体の状況を写真-4 に示す。

2.6 試験概要

(1) 圧縮強度

所定の材齢（28 日，91 日，1，3，5，7，10，15，20，30，40，50 年）を経た供試体の圧縮強度の測定を JIS A 1108 に準じて行った。材齢 20 年までは端面をキャッピングにより成形し，材齢 30 年以降は端面を研磨により成形した。材齢 30 年までは両配合の供試体を 2 体ずつ使用し，材齢 40 年以降はどちらかの配合を 3 体ずつ使用しており，材齢 40 年試験時は No.1 を，材齢 50 年試験時は No.2 の供試体を使用した。

(2) 静弾性係数

静弾性係数は材齢 20 年までは繰り返し载荷によって得られた応力ひずみ関係から，材齢 30 年以降は圧縮強度試験に併せて試験を行い，単純载荷によって得られた応力ひずみ関係から求めた。材齢 40 年以降は JIS A 1149 に準じて測定を行った。供試体の使用本数は，材齢 20 年までは供試体を 1 体使用し，材齢 30 年以降は圧縮強度試験の供試体と併用して 3 体使用した。

(3) 引張強度

引張強度の測定を JIS A 1113 に準じて行った。測定は 1 材齢につき 1 体のみ試験している。材齢 30 年まではφ15×30cm を，材齢 30 年以降は供試体を上下に切断しφ15×15cm に成形した供試体を使用した。

(4) 中性化深さ

中性化深さの測定は JIS A 1152 に準じて，引張強度試験後の破断面に対しフェノールフタレイン溶液を噴霧して測定を行った。

(5) 比抵抗

コンクリート組織の緻密さを電気抵抗で評価することを目的として，比抵抗の測定を JSCE K 562 に準じて行った。印加電圧は 30V，周波数は 70Hz とした。比抵抗値は測定時の供試体の温度及び含水状態により値が変化するため，噴霧養生室より取り出した直後の 20°C 湿潤状態で測定を行った。比抵抗の計測は材齢 50 年の供試体を使用した。

(6) 超音波伝播速度

長期材齢を経た供試体の性状を非破壊で評価することを目的として，超音波伝播速度の測定を行った。超音波

表-9 フレッシュ性状

	No.1	No.2	目標値
スランブ (cm)	3.0	3.5	3.5±0.5
空気量 (%)	1.3	1.2	1.5±0.5
温度 (°C)	20	14	≤27



写真-2 コンクリート断面



写真-3 噴霧養生室内保管状況



写真-4 供試体外観

伝播速度は供試体の端面に超音波の発振子，受振子を当てて測定を行った。測定には周波数 28kHz の機器を用い，試料は材齢 50 年の供試体のみを使用した。

3. 試験結果

3.1 圧縮強度

経年的に測定を実施した圧縮強度，引張強度，静弾性係数の試験結果を表-10 に示す。圧縮強度と材齢の関係

表-10 試験結果一覧

	配合	材齢 (日)		(年)									
		28	91	1	3	5	7	10	15	20	30	40	50
圧縮強度 (N/mm ²)	No.1	27.9	46.3	56.9	61.6	62.1	60.0	60.2	64.5	60.5	65.9	63.4	-
	No.2	30.5	47.5	55.7	60.5	60.4	62.2	65.3	64.9	66.9	67.3	-	73.0
引張強度 (N/mm ²)	No.1	2.35	2.84	3.53	-	-	4.85	5.48	3.28	4.41	4.18	4.94	-
	No.2				-	-	3.86	3.69	4.49	4.40	4.25	-	4.24
静弾性係数 (kN/mm ²)	No.1	-	-	38.9	50.5	42.3	41.1	39.9	38.9	37.5	41.7	42.4	-
	No.2	-	-	36.3	43.9	43.1	40.0	36.3	38.7	38.8	41.8	-	42.8

を図-1 に示す。試験日数が長期に及ぶことから、材齢を対数で表示している。圧縮強度は材齢 91 日以降も着実に増加していることが確認され、材齢 3 年までは圧縮強度が明確に増加していることが確認された。材齢 3 年以降は材齢によって若干の強度低下が確認されるものの、ばらつきによるものと考えられ、材齢 50 年までの試験結果からは漸増の傾向が確認されている。材齢 50 年強度 (73N/mm²) は 91 日強度 (48N/mm²) の約 1.5 倍となった。No.1 と No.2 の供試体の強度比からは、28 日、91 日の初期材齢においては、若干 No.2 の圧縮強度が高くなる傾向が見られたが、材齢の経過とともに、その影響は小さくなり、使用材料の性質の違いによる強度差はほぼ見られなくなった。

材齢 50 年の圧縮強度は 70N/mm² 以上と高強度領域にあり、圧縮強度試験時において供試体は 3 体ともに脆性的に破壊が生じ、内 2 体は爆裂により破壊が生じた。破壊後の供試体の状態を写真-5 に示す。強度試験後の供試体の観察結果からは、骨材とモルタルマトリックスの界面のずれが拡大することにより供試体が破壊に至った部分と、写真-6 に示すようなひび割れが粗骨材を貫通して、骨材が割れることにより破壊に至った部分が確認された。このことから、モルタルマトリックス強度が骨材強度に近づき、コンクリート強度が骨材強度に依存していることが推定された。

佐藤ら³⁾ が池原ダムから採取した材齢 34 年時のコアを対象にして行った分析結果によると、ペースト中の Ca(OH)₂ はほとんど存在していないことが明らかとなっている。そのため、材齢 34 年以降のポズラン反応の進行によるモルタルマトリックスの強度増加はわずかであると考えられる。モルタルマトリックスの強度が骨材強度に近づき、コンクリート強度が骨材強度に依存しつつあること、およびペースト内に Ca(OH)₂ がほぼ存在せずポズラン反応による強度の増加も僅かにしか進行しないであろうことを考慮すると、池原ダム供試体の材齢 50 年以降の経年に伴う圧縮強度の増加はほぼ期待できず、現在の強度がピークであるものと考えられる。

3.2 静弾性係数・引張強度

静弾性係数試験結果を図-2 に示す。材齢 28、91 日時点では静弾性係数の試験を行っておらず、材齢 1 年以降



写真-5 供試体破壊状況



写真-6 骨材に発生したひび割れ

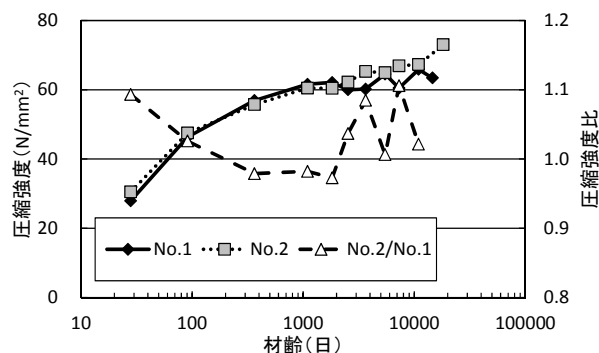


図-1 圧縮強度 経時変化

の結果を示している。No.1 の材齢 3 年の試験結果が高いことを除き、材齢 1 年以降の静弾性係数の増加は確認されず、材齢によらずほぼ一定の値を示していた。材齢 1 年 (36.3kN/mm²) と 50 年 (42.8kN/mm²) の値を比較すると、約 1.2 倍の値を示していた。

引張強度試験結果を図-3 に示す。No.1 の試験結果は材齢によってばらついており、長期的な強度の増減傾向の判別ができない。No.2 の試験結果からは材齢 15 年ごろからほぼ一定の値を示しており、現在強度の増加は確認されない。材齢 50 年強度 (4.2N/mm²) は 91 日強度

(2.8N/mm^2) の約 1.5 倍の値を示していた。

図-4 に圧縮強度と引張強度、静弾性係数の関係及び、コンクリート標準示方書⁴⁾の推定式を示している。静弾性係数は供試体の圧縮強度によらず推定式よりも高い値を示した。引張強度は若材齢時には概ね推定式と一致しているが、圧縮強度が 50N/mm^2 程度以上となつてからは、推定式よりも高い値を示した。

3.3 中性化深さ

中性化深さ試験結果を写真-7 に示す。供試体が常時湿润環境で保管されていたため、気中からの二酸化炭素の浸透がなく、中性化は発生していないことが確認された。

45年間水中養生したコンクリートにおいては、表層から数 mm の部分において $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の溶脱に起因する中性化が生じていることが確認されている⁵⁾ が、池原ダムコンクリート供試体は、表層部についても溶脱に起因する中性化は生じていないことが確認された。これは、噴霧養生が水中養生よりも $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の溶脱速度が遅い条件であるためと推察される。

溶脱に起因する中性化は生じていないことを確認したが、表層部において軽微な変質は発生している可能性があるため、今後詳細調査により評価する。

3.4 比抵抗

材齢 50 年の比抵抗測定結果を図-5 に示す。筆者らは、比抵抗がコンクリートの耐久性評価に対して有効であると考えて、コンクリートの暴露試験において比抵抗の測定を実施している^{6) 7)}。暴露試験結果のうち、寒冷地域（北海道本別町）、温暖地域（神奈川県茅ヶ崎市）、亜熱帯地域（沖縄県うるま市）に暴露したフライアッシュ置換率 30%、水セメント比 55% の供試体の材齢 3 年までの比抵抗測定結果を併せて示す。

既往の研究⁸⁾により、比抵抗は配合などに影響を受け、水結合材比が低いほど、また材齢を経て水和反応、ポズラン反応が進むほどに比抵抗が増進することが知られている。しかしながら、今回の試験結果からは、水結合材比が 10% 以上低く、40 年以上材齢を経た池原ダムコンクリート供試体の比抵抗は、亜熱帯地域に暴露した供試体と同程度の値となった。

3.5 超音波伝播速度

材齢 50 年の超音波伝播速度と圧縮強度、静弾性係数の関係および文献⁹⁾より得られた推定式を図-6 に示す。測定数は少ないが圧縮強度、静弾性係数ともに概ね推定値と一致しており、長期材齢を経たフライアッシュコンクリートにおいても、超音波伝播速度を用いてコンクリートの物性を推定できることが確認された。

4. まとめ

池原ダムに使用されたフライアッシュ置換率 30% の中庸熟ポルトランドセメントを用いたダムコンクリートを、

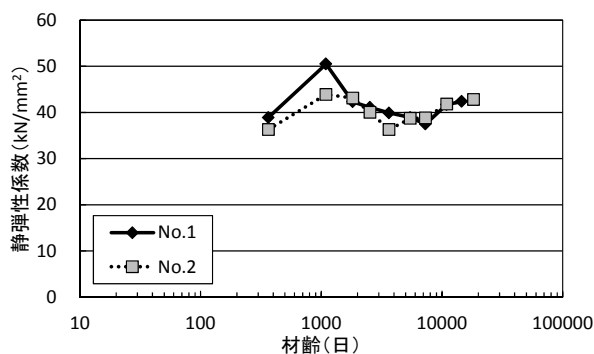


図-2 静弾性係数 経時変化

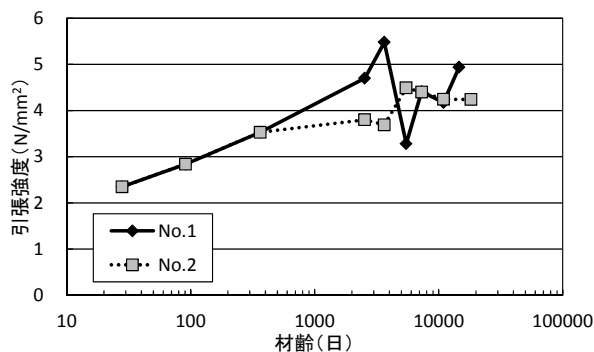


図-3 引張強度 経時変化

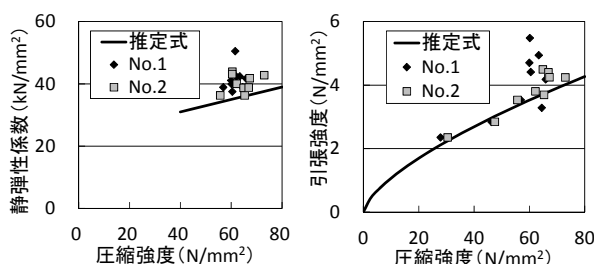


図-4 圧縮強度と引張強度・静弾性係数の関係



写真-7 中性化深さ試験結果（左：全体図 右：拡大図）

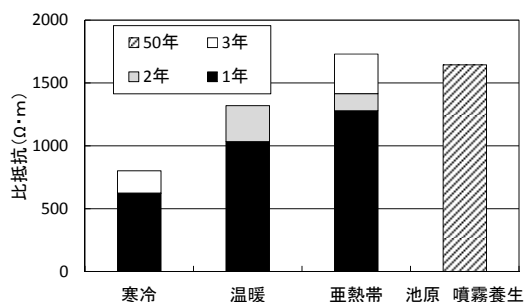


図-5 比抵抗測定結果

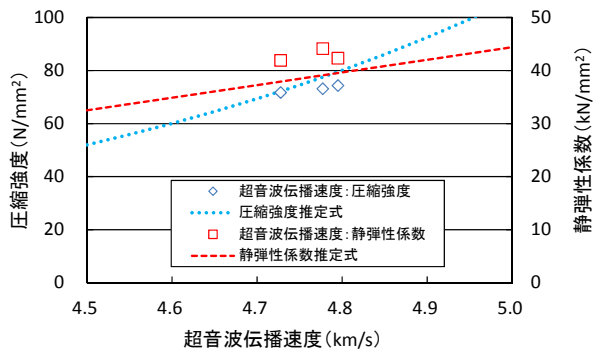


図-6 超音波伝播速度測定結果

材齢 50 年まで噴霧養生下で保管し、所定の材齢において強度試験を実施した。本試験で得られた知見は以下の通りである。

- (1) 材齢 3 年まで圧縮強度の増進が明確に見られた。材齢 3 年以降は材齢によって、一部強度の低下が確認されたが、材齢 50 年まで強度は漸増の傾向が見られる。
- (2) 材齢 50 年の圧縮強度はダムコンクリートの設計基準強度である材齢 91 日強度と比較して約 1.5 倍であった。
- (3) 圧縮強度試験後の供試体の観察結果から、骨材に割れが生じており、モルタル部の強度が骨材の強度に近づいていることが確認された。セメントペースト中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の残存量も少ないため、今後の強度の増進はほぼないものと考えられる。
- (4) 噴霧養生条件下においては、気中からの二酸化炭素の浸透がなく中性化は発生していなかった。また、噴霧養生下では $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の溶脱に起因する中性化も発生していなかった。

池原ダムコンクリート供試体の強度試験は材齢 100 年まで 10 年ごとに強度試験を実施する予定となっている。圧縮強度は、前述の理由により強度のピークを迎えているものと考えられるが、材齢 50 年以上の長期にわたってコンクリートの強度試験を実施した例は少ないため、今後も継続して試験を実施する。

謝辞

ダムの安全性評価のために長期にわたる強度試験を計画し、継続的に試験を実施して貴重なデータを引き継いで下さった関係者の方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 小林茂敏, 柴田辰正, 矢ヶ崎憲治: 小川内ダム大型コンクリート供試体の材齢 50 年までの強度試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.529-534, 2009
- 2) 中村秀三: 各種セメントを用いた永年材齢試験 50 年材齢, 太平洋セメント研究報告, 第 151 号, pp.26-49, 2006
- 3) 佐藤道生, 小早川真, 小津博: 材齢 34 年を経た中庸熟フライアッシュダムコンクリートの硬化体組織と物性, コンクリート工学年次論文集, Vol.21, No.2, pp.877-882, 1999
- 4) (社)土木学会: 2012 年制定コンクリート標準示方書設計編, 2012
- 5) 植木康知, 大塚勇介, 平本真也, 檀康弘: 45 年経過した混合セメントコンクリートの長期強度発現性について, コンクリート工学論文集, Vol.23, No.2, pp.71-79, 2012
- 6) 佐藤道生, 酒井隆行, 皆川博, 久田真: 比抵抗に着目したコンクリートの長期耐久性モニタリング, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.785-790, 2011
- 7) 有菌大樹, 佐藤道生, 安田幸弘, 木下茂: フライアッシュを混和したコンクリートの暴露試験による長期耐久性モニタリング, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.700-705, 2012
- 8) 鹿島孝之, 河野広隆, 渡辺博志, 田中良樹: コンクリートの電気抵抗による耐久性評価の基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.21, No.2, pp.895-900, 1999
- 9) 木村芳幹, 谷川恭雄: 超音波伝播速度法による高強度コンクリート構造体の品質の推定, コンクリート工学論文集, Vol.23, No.1, pp.577-582, 2001