

論文 シリカフュームを用いたコンクリートの海洋環境下における耐久性

竹田宣典^{*1}・十河茂幸^{*2}・迫田恵三^{*3}

要旨:シリカフュームを用いたコンクリートの海洋環境下における耐久性向上効果を把握するために、シリカフュームを添加した普通コンクリート、高強度軽量コンクリート、水中不分離性コンクリートについて、約10年間の海洋環境下における暴露試験を実施し、圧縮強度、塩化物イオンの浸透および鉄筋腐食の変化について調査した。その結果、シリカフュームの添加により、塩化物イオンの拡散係数は減少し、塩化物イオンの浸透抑制効果が認められたが、鉄筋腐食については、暴露後10年間の範囲では、その進行が抑制される場合と、明確な抑制効果が認められない場合があることが明らかになった。

キーワード:シリカフューム、塩化物イオン、鉄筋腐食、海洋環境、軽量コンクリート

1. はじめに

海洋環境下におかれるコンクリート構造物の耐久性を向上させるためには、塩化物イオンの浸透を抑制することが重要である。構造物の耐久性の向上の観点から、シリカフュームを添加することは、コンクリート中の組織が緻密化し、塩化物イオンの浸透抑制に有効であるとの報告がなされている^{1), 2), 3)}。したがって、良質なシリカフュームを適切に用いれば、鉄筋の防食に効果があり、海洋環境下におけるコンクリート構造物の耐久性向上に有効であると推察される。しかしながら、シリカフュームを用いたコンクリートの実際の海洋環境下における長期的な耐久性については、十分に明らかにされてはない。また、海洋環境下で用いられる高強度軽量コンクリートや水中不分離性コンクリートにシリカフュームを適用した場合の耐久性向上効果についても、明らかにされていない。

本論文では、シリカフュームを用いた各種コンクリートについて、約10年間の海洋暴露試験を行い、圧縮強度、塩化物イオン浸透、鉄筋腐食の進行について調査し、シリカフュームの耐久性向上効果について検討した結果を述べる。

* 1 (株)大林組技術研究所 土木第三研究室

* 2 (株)大林組技術研究所 土木第三研究室

* 3 東海大学海洋学部教授 海洋土木工学科

2. 実験方法

2.1 供試体

海洋環境に暴露した供試体は、図-1に示す様な鉄筋を含む梁状供試体(RC供試体)、無筋の塩化物イオン分析用供試体及び圧縮試験用供試体とした。RC供試体は、断面9×18cm、長さ90cmとし、かぶり2cmの位置に異形棒鋼(JIS G 3112, SD295, D19)を配置し、かぶり部分の面のみから、塩化物イオンが浸透するように、この面以外の表面を厚膜型エポキシ樹脂を用いて塗装した。塩化物イオン分析用供試体は、直径15cm、高さ15cmの円柱とし、同様の理由により、周面を厚膜型エポキシ樹脂を用いて塗装した。

暴露試験を行ったコンクリートは、普通コンクリート(NC)、高強度軽量コンクリート(HLC)、水中不分離性コンクリート(UWC)の3種類とした。それぞれの配合を表-1に示し、暴露前のコンクリートの性質を表-2に示す。セメントは、NCとHLCでは普通ポルトランドセメントを用い、UWCでは高炉セメントB種を用いた。細骨材は、いずれの配合においても、陸砂(表乾密度:2.59~2.62g/cm³、吸水率:1.64~2.14%)を用い、粗骨材は、NC、UWCでは碎石(Gmax:

副主任研究員 工博(正会員)

室長 工博(正会員)

工博(正会員)

15mm, 表乾密度 : 2.66 g/cm³, 吸水率 : 0.79~1.02%), HLC では人工軽量骨材(造粒品, Gmax : 15mm, 絶乾密度 : 1.25 g/cm³, 24 時間吸水率 : 6.00%) を 24 時間吸水させて用いた。混和剤として, AE 減水剤はリグニン系, 高性能減水剤は, NC と HLC ではナフタレン系とリグニン系の共縮合物, UWC ではメラミン系, 水中不分離性混和剤はセルロース系のものをそれぞれ用いた。

また, いずれのコンクリートにおいても, シリカフューム (SF) は, 密度 2.25g/cm³, 平均粒径 0.36 μm の国内産のものを用いた。いずれの配合も, 水結合材比 (W/(C+SF)) を同一として, シリカフュームを用いた場合と用いない場合について実験を行った。NC, UWC では単位結合材量を一定とし, 結合材に対する SF の添加率を 15% および 10% とし, HLC では結合材に対する SF の添加率を 9% とした。

2.2 暴露環境

暴露場所は, 静岡県清水港内の防波堤上 (海上大気中) と防波堤付近の水深11m の海底 (海中) とした。暴露場所の環境条件を表-3 に示す。なお, NC は 1985 年 10 月, HLC は 1984 年 11 月, UWC は 1988 年 9 月に暴露を開始した。

2.3 試験項目・試験方法

測定時期は, 実験の都合上, NC では暴露後 1,3,5,9 年, HLC では暴露後 1,3,6,10 年, UWC では暴露後 2,6,10 年となつたが, 暴露年数により比較することとした。試験項目と試験方法を, 表-4 に示す。圧縮強度試験は, 海洋暴露の他に標準養生を行つたものについても行つた。塩化物イオン量は, 供試体表面から 2cm 毎の深さ

より採取したコンクリート粉末を試料とし, 全塩化物イオン量を定量分析し, コンクリート質量に対する質量百分率で表した。また, 塩化物イオンの浸透分布を, 式 (1) に示す拡散方程式

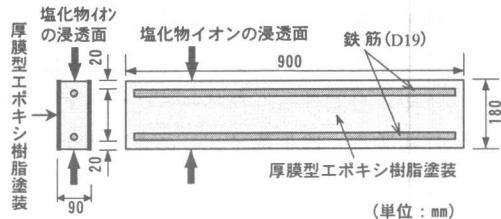


図-1 RC 供試体の形状・寸法

表-2 暴露前のコンクリートの性質

コンクリートの種類		スランプ (スランプ フロー) (cm)	空気 量 (%)	単位体 積質量 (t/m ³)	材齢 28 日 圧縮強度 (N/mm ²)
1	普通	SFなし	10.5	5.1	40.2
2		SFあり	10.0	4.6	46.0
3	高強度	SFなし	13.5	4.3	49.6
4	軽量	SFあり	16.0	5.3	49.5
5	水中不 分離性	SFなし (54x54)	4.2	2.22	34.4
6		SFあり (44x44)	5.3	2.21	34.2

表-3 暴露場所の環境条件

暴露環境	環境条件
海上大気中 (堤防上)	L.W.L.: +5.0m, 強風時に波しぶきを受ける 年間降水量: 2360mm/年, 年平均気温: 16.0°C(以上 清水地方の気象台観測データ)
海 中 (水深 11m)	年平均海水温度: 18.4°C, Cl イオン濃度: 18.4‰, pH: 8.29 溶存酸素量: 7.98ppm (以上, 暴露試験場における測定結果)

表-1 コンクリートの配合

コンクリー トの種類	シリカフ ューム添 加率 (%)	セメント の種類	W/ (C+SF) (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)								
					水 W	セメント C	シリカフ ューム S F	細骨材 S	粗骨材 G	分離低 減剤	AE 減 水剤	高性能 減水剤	流動 化剤
1 普通 (NC)	0	NP	50.0	48.0	166	332	0	844	939	0	0.83	0	0
	15.0				166	282	50	837	931	0	0	6.47	0
3 高強度 4 軽量 (HLC)	0	NP	30.0	37.3	171	563	0	579	470	0	0	8.16	1.13
	9.0				188	563	56	538	437	0	0	9.04	0.62
5 水中不 分離性 (UWC)	0	BB	60.0	40.0	200	333	0	671	1022	2.5	0.83	6.66	0
	10.0				200	300	33	668	1018	2.5	0.83	6.66	0

の解で近似させ、最小二乗法により、式(1)中の表面塩化物イオン量(C_0)と見かけの拡散係数(D_c)を求めた。

$$C = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}} \right) \right\} \quad (1)$$

x : 表面からの深さ(cm), t : 経過時間(s)

C : 深さ x における塩化物イオン量(%)

C_0 : 表面塩化物イオン量($x=0$ における塩化物イオン量(%))

D_c : 見かけの拡散係数(cm^2/s)

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^z e^{-t^2} dt$$

3. 実験結果

3.1 圧縮強度の経年変化

標準養生における圧縮強度の経年変化を図-2に示す。シリカフュームを用いたNCとUWCの材齢約10年までの圧縮強度は、シリカフューム用いない場合に比べて10~15%程度高く推移し、強度の低下はほとんどない。HLCの材齢約10年までの圧縮強度は、シリカフューム添加の有無による差はほとんどないが、暴露後3年以降において、若干の強度低下が見られた。

海洋暴露における圧縮強度の経年変化を図-3に示す。NC, HLCでは、海中暴露の場合は、シリカフューム添加の有無による強度の差は少ないと、海上大気中暴露の場合は、シリカフュームを用いた方が、用いない場合に比べて強度は低い傾向を示した。この理由は、シリカフュームを用いた場合の圧縮強度は、乾燥の影響をより受けたためと考えられる。UWCの強度は、環境条件に関わらず、シリカフュームを用いた方が10~20%程度高い。UWCは水中不分離性混和剤の保水作用による養生効果のために、海上大気中においても強度が増加したと推察される。また、いずれのコンクリートも、暴露後約10年においても、強度低下はほとんどなかった。

3.2 中性化の進行

中性化深さの経年変化を図-4に示す。いず

表-4 試験項目と試験方法

試験項目	試験方法
圧縮強度	円柱供試体($\phi 100 \times \text{長さ } 200\text{mm}$)を暴露終了後付着物を除去し、JIS A 1108に準拠し試験
中性化深さ	円柱供試体($\phi 100$ 、長さ 200mm)の割裂面にフェノールフタレイン溶液を噴霧し、変色域を測定
塩化物イオン量	JCI SC4(塩素イオン選択性電極を用いた電位差滴定法)による全塩化物イオン量の定量分析
鉄筋の腐食状況	RC供試体を解体し、腐食箇所をスケッチし、腐食面積率により評価

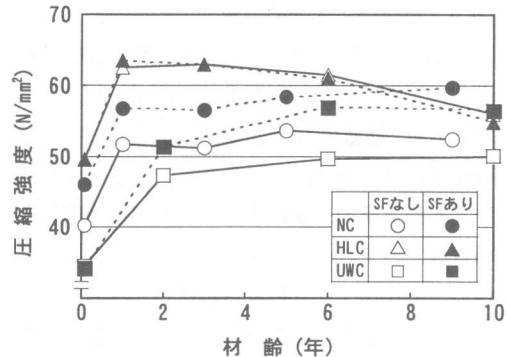


図-2 圧縮強度の経年変化(標準養生)

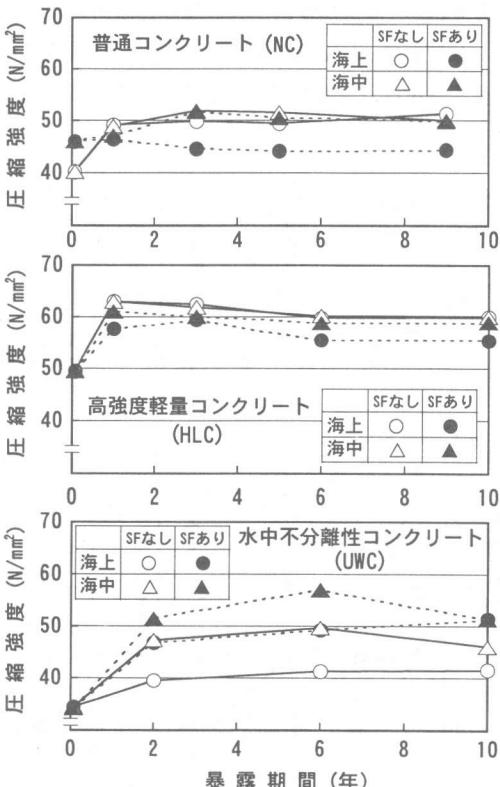


図-3 圧縮強度の経年変化(海洋暴露)

れのコンクリートも、海中においては、中性化はほとんど進行していないが、海上大気中においては、シリカフュームを用いた方が、用いない場合に比べて中性化の進行は速い傾向がある。これは、シリカフュームのポゾラン反応により $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が消費され、アルカリ度が低下するためと考えられる。しかしながら、いずれも中性化深さは 5mm 以下であり、鉄筋の腐食に影響を与える深さまで中性化は進行していない。

3.3 塩化物イオンの浸透

塩化物イオンの浸透量の分布を図-5 に示す。海上大気中に暴露した場合は、いずれのコンクリートも、暴露後 10 年においても塩化物イオンの浸透量は少なく、シリカフューム添加の有無による浸透量の差異は少ない。海中に暴露した場合は、いずれのコンクリートも、暴露期間に伴い、塩化物イオンの浸透量は多くなり、シリカフュームを用いた方が、用いない場合と比べて、暴露の初期から表面部の塩化物イオン量は大きいが、浸透深さは小さい傾向が認められた。

シリカフューム用いたコンクリートの塩化物イオン量は、シリカフュームを用いない場合に

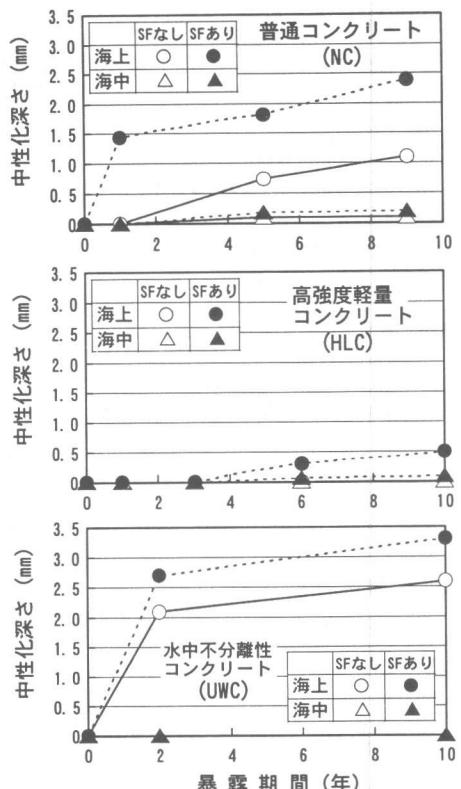


図-4 中性化深さの経年変化

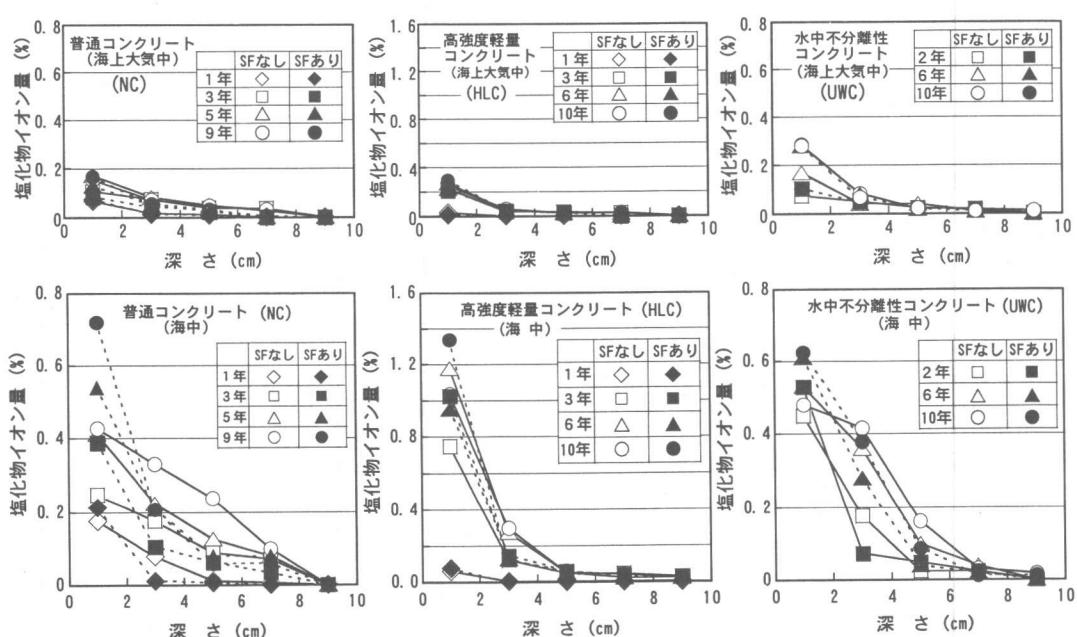


図-5 塩化物イオン量の分布

比べて、深さ 3cm においては、NC では約 60%，HLC では約 50%，UWC では約 90% であり、深さ 7cm においては、NC では約 60%，HLC では約 70%，UWC では約 40% であった。本実験で用いたいずれのコンクリートにおいても、シリカフュームの使用により、塩化物イオンの浸透が抑制されることが認められた。

塩化物イオンの浸透量分布より求めた式(1)における表面塩化物イオン量 (Co) の経年変化を図-6 に示す。Co は、暴露約 10 年の範囲において、いずれのコンクリートも、海上大気中では、シリカフュームの添加の有無による差は小さいが、海中では、シリカフュームを用いた方が大きい傾向にある。Dc は、いずれのコンクリートも、海上大気中、海中のいずれにおいても、シリカフュームを用いた方が小さい傾向にある。また、いずれのコンクリートにおいても、Co は暴露年数に伴い大きくなり、Dc は暴露年数に伴い小さくなる傾向を示すが、Co

と Dc の経年変化に関する傾向は、シリカフュームの添加の有無によって大きな差はない。

暴露後 9 年あるいは 10 年における各コンクリートの Co と Dc の値を表-5 に示す。シリカフュームを結合材の 15% 添加した NC の海中における Dc は、シリカフュームを用いない場合の 20% 程度となった。海中における Dc について、同様な比較を行うと、シリカフュームを結合材の 9% 添加した HLC では、シリカフュームを用いない場合の 50% 程度となり、シリカフュームを結合材の 10% 添加した UWC では、シリカフュームを用いない場合の 60% 程度となった。海上大気中における Dc も、シリカフュームを添加することにより減少した。このように、結合材の約 10% 以上のシリカフュームを添加することにより、見かけの拡散係数はかなり小さくなることから、海洋環境下に暴露した場合においても、組織の緻密化が図られるものと考えられる。

3.4 鉄筋腐食の進行

鉄筋の腐食面積率の経年変化を図-8 に示す。

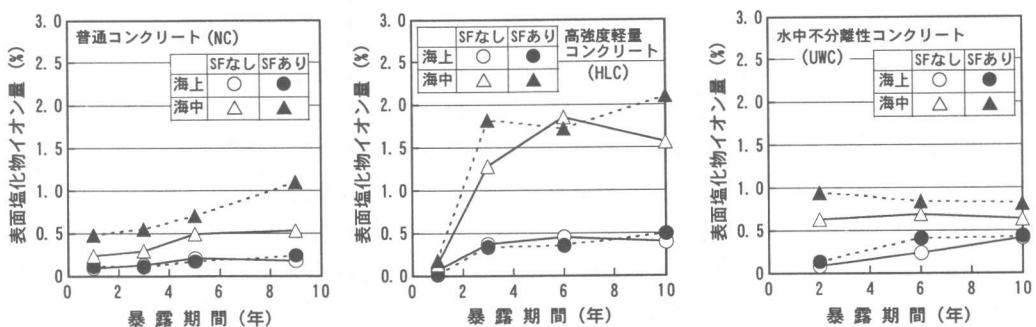


図-6 表面塩化物イオン量 (Co) の経年変化

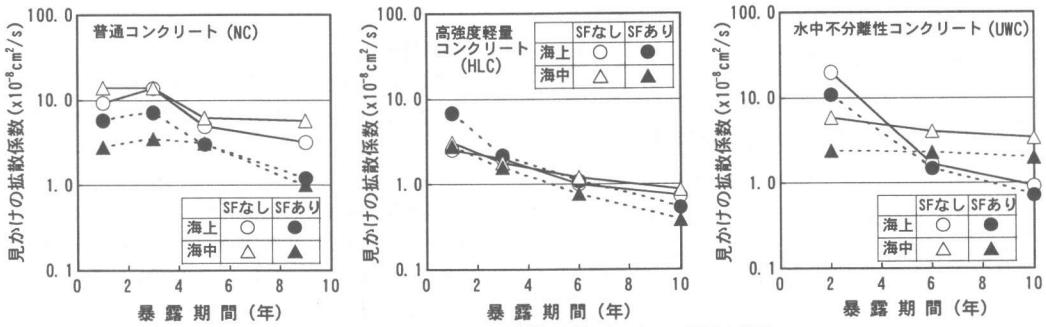


図-7 見かけの拡散係数 (Dc) の経年変化

表-5 表面塩化物イオン量、見かけの拡散係数

コンクリート の種類		表面塩化物イオン 量(暴露後9-10年)		見かけの拡散係数 (暴露後9-10年)	
		Co (%)	Dc ($\times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$)	海上大 気中	海中
1	普通	SFなし	0.18	0.53	3.2
2		SFあり	0.24	1.10	1.2
3	高強度	SFなし	0.39	1.56	0.73
4	軽量	SFあり	0.50	2.60	0.53
5	水中不	SFなし	0.42	0.63	0.92
6	分離性	SFあり	0.44	0.82	0.72
					2.0

いずれの鉄筋の腐食も、表面部のみに発生しており、孔食は認められなかった。NC の鉄筋腐食の進行は、海上大気中ではシリカフューム添加の有無による差は少ないが、海中ではシリカフュームの添加により、腐食開始時期が遅くなり、暴露9年後の腐食面積率は1/2以下に減少した。HLC, UWC の鉄筋腐食の進行は、海上大気中、海中ともに、シリカフュームの添加の有無に関わらず同程度であった。これらのコンクリートでは、腐食の進行が少ないため、暴露10年の範囲では、シリカフュームの添加の有無による防食効果の差異が現れなかったが、長期的には、塩化物イオン浸透量の差異が大きくなると予測されるため、シリカフュームの有無により、腐食の進行に差異が生じる可能性がある。なお、シリカフュームを用いてない NC では、暴露9年の範囲では、海上大気中における塩化物イオン浸透量が、海中に比べてかなり少ないと、鉄筋腐食の進行も小さくなつたと考えられる。

4.まとめ

シリカフュームを用いたコンクリートの海洋暴露試験の結果、以下のことが明らかになった。

(1) シリカフューム(SF)を用いた場合の海中における塩化物イオンの拡散係数は、SFを用いない場合と比べて、SFを15%添加した普通コンクリートでは約20%に、SFを9%添加した高強度軽量コンクリートでは約50%に、SFを10%添加した水中不分離性コンクリートでは約60%になり、シリカフュームの添加による塩化物イ

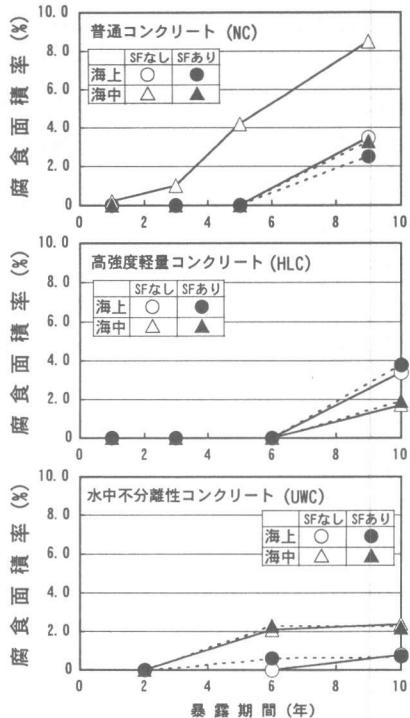


図-8 鉄筋の腐食面積率の経年変化

ON浸透の抑制効果が確認された。

(2) 普通コンクリートにシリカフュームを15%添加した場合、海中における腐食開始時間が遅くなり、また、シリカフュームを用いない場合に比べて、暴露9年後の腐食面積率を1/2以下に抑制することができた。

(3) 暴露10年程度の範囲では、シリカフュームによる防食効果が明確に認められない場合もあるが、塩化物イオンの浸透を抑制するために、シリカフュームを結合材の約10%以上添加することにより、長期的な鉄筋腐食の進行を抑制できる可能性がある。

参考文献

- 添田政司ほか：シリカフュームの使用がモルタルおよびコンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす影響、セメント・コンクリート論文集 No.43, pp.466-471, 1989.12
- 鳥居和之ほか：各種ポゾラン材料を使用したコンクリート中の鉄筋の腐食状況、コンクリート工学年次論文報告集 Vol.12, No.1, pp.489-494, 1990.6
- 長瀧重義：シリカフュームに関する研究の現状、土木学会論文集 No.508/V-26, pp.1-14, 1995.