論文　ポーラスコンクリートを用いたヨシの琵琶湖への植栽

武田　宇浦[*1]・田中　周平[*2]・高木　宣章[*3]・児島　孝之[*4]

要旨：本研究は，植物を植栽できるポーラスコンクリートを用いてヨシを植栽する方法の有効性を検討するため，実環境下の琵琶湖において植栽実験を行ったものである。ポーラスコンクリート供試体には箱抜きを 4 箇所設けヨシの子株を植栽し，従来から一般に使用されているヤシマット工法との生育状態を比較した。ポーラスコンクリートにヨシを植栽する方法は，従来工法に劣らないヨシの生育が観察された。ポーラスコンクリートを用いて琵琶湖へヨシを植栽する方法は効果的な方法であると考えられる。

キーワード：ヨシ，ポーラスコンクリート，空隙率，圧縮強度

1.　はじめに

かつて琵琶湖は貧栄養湖であり，北湖では 10m を超える透明度を誇っていた。しかし，様々な汚濁負荷が流れ込むことによって，水質は年々悪化する傾向にある。現在，琵琶湖の水を浄化するための技術の 1 つとして，ヨシなどの水生植物による窒素やリンの吸収効果，土壌の微生物による有機物の分解効果，土壌によるろ過などの作用を含めたヨシ帯全体の生態系による浄化効果の適用が注目されている。しかし，湖岸道路の建設などにより，湖岸状況はヨシ群落が繁茂していたときとは環境条件が大きく変化し，ヨシが活着しにくい状況にある。このため，より広くヨシによる水の浄化技術を導入していくには，より簡易で効果的なヨシの植栽手法の確立が切望されている。

本研究では，ポーラスコンクリート（以下 PoC）が周辺環境へ及ぼす影響，実自然環境下における波浪や水深がヨシの生育状況に及ぼす影響を，従来のヤシマット工法を用いた植栽方法と比較することにより，PoC によるヨシの植栽手法の有効性について実験検討を行った。

2.　実験室内におけるヨシの植栽

2.1　実験概要

2000 年に，実験室内で PoC を用いたヨシの植栽を行った [1)]。コンクリート上に直接植栽可能な緑化コンクリートの力学的特性（圧縮強度，透水係数，空隙率など）に及ぼす配合要因（水結合材比，ペースト粗骨材率，高性能 AE 減水剤使用量，粗骨材粒径など）の影響について，砕石と再生骨材を用いた供試体を用いて比較検討を行った。ヨシの植栽に適していると考えられる配合で供試体を作製し，供試体に設けた箱抜きの中へ，ヨシの子株を植栽して，生育状況の観察を行った。

2.2　植栽結果

2000 年に植栽したヨシは，本年度も順調に生育している。ヨシは，3 年目に芽が出れば完全に根付いたと考えられるので，実験室内レベルでの PoC へのヨシの植栽は成功したといえる。

3.　実環境下におけるヨシの植栽

3.1　実験概要

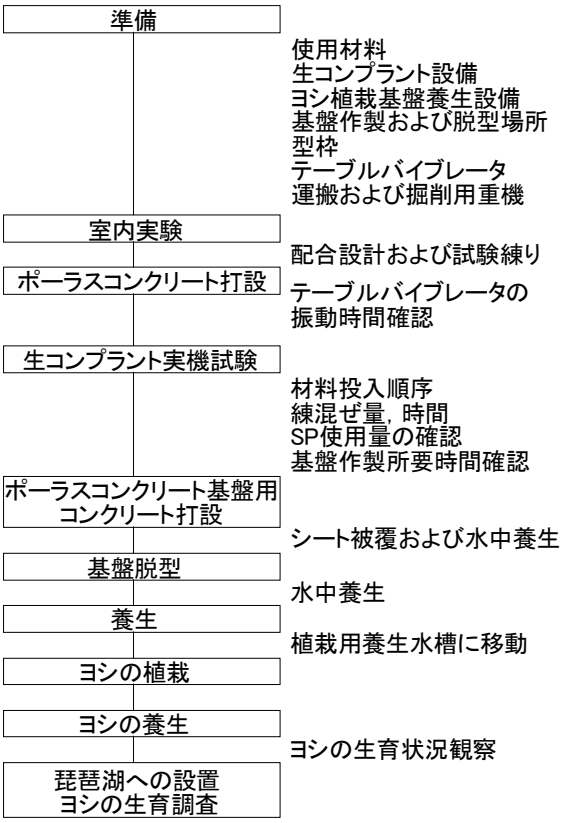
2 節での室内実験結果をふまえ，レディーミクストコンクリート工場の実機ミキサを用いて PoC 供試体を作製し，実環境下の琵琶湖にヨシ

*1 立命館大学大学院　理工学研究科環境社会工学専攻　（正会員）
*2 京都大学大学院　工学研究科付属環境質制御研究センター　工博
*3 立命館大学　理工学部土木工学科教授　工博（正会員）
*4 立命館大学　理工学部土木工学科教授　工博（正会員）

を植栽した。ヨシの生育状況および PoC が環境に与える影響を評価するために，ヨシの生育調査，六価クロム溶出試験および pH 値の測定を行った。また，従来の工法との比較用として，ヤシマット工法による植栽も行った。**図－1** に PoC 植栽実験のフローを示す。

3.2　使用材料

表－1 に使用材料を示す。コンクリート細孔溶液の pH 値低減のために高炉セメント B 種およびシリカフュームを使用した。粗骨材は 5 号砕石を使用し，粗骨材微粒分は空隙率に影響を及ぼすので，5mm ふるい通過分は除去した後，気乾状態（表面水：0.5%程度）で使用した。



図－1 ポーラスコンクリート
植栽実験計画の構成

3.3　予備実験

(1)　ポーラスコンクリートの示方配合

PoC の示方配合を**表－2** に示す。著者らは，2000 年度に行った PoC の力学的特性におよぼす配合要因（ペースト粗骨材容積比，水結合材比，シリカフューム置換率，高性能 AE 減水剤使用量，セメントの種類）の影響に関する試験により，ペースト粗骨材容積比と水結合材比を 22.5%，シリカフューム置換率を 15%とすることにより，空隙率を 35%とかなり大きくしても，圧縮強度 8N/mm^2，曲げ強度 1.3N/mm^2 を有する PoC を製造することができることを明らかにした [1)]。PoC は運搬，据え付け等による損傷防止に必要な適切な強度および供用期間中に波浪により流されない程度の自重を有しておればよく，高い強度は必要としない。締固めにはテーブルバイブレータを使用した。高性能 AE 減水剤使用量が増加するとペーストフロー値が大きくなり，供試体下部にペーストがたまりやすくなるため，ペーストフロー値は 180±30mm になるよう高性能 AE 減水剤使用量を調整した。目標圧縮強度は 8N/mm^2 とした。

(2)　室内試験練り

実機試験に先立ち，実験室にて試験練りを行った。PoC の練混ぜには強制二軸撹拌式ミキサを使用した。結合材（C＋SF）と粗骨材を投入し 30 秒間空練りした後，注水し 60 秒間の本練りを行った。強度試験用供試体作製方法（圧縮強度試験用供試体 φ10×20cm，曲げ強度試験用供試体 10×10×40cm）は日本コンクリート工学協会の方法 [2)]に準拠した。PoC の打込みは 2 層詰めとし，各層のテーブルバイブレータによる

表－1 使用材料

材料（略記）	主要な性質
セメント(C)	高炉セメントB種、密度：3.02g/cm^3、粉末度：3950cm^2/g、高炉スラグ混入量：40～45%
シリカフューム(SF)	ノルウェー産粉体、密度：2.20g/cm^3、SiO_2：93.1% 粉末度：2.0×10^{5}cm^2/g、平均粒径：0.15μm
粗骨材(G)	5号砕石（20～13mm）、表乾密度：2.68g/cm^3、吸水率：0.45%、実績率：57.7%
高性能AE減水剤(SP)	主成分：ポリカルボン酸系、密度：1.05g/cm^3
ヨシ	ヨシ子株　2年生育株（丈50～150cm）
ヤシマット	80×120cm、ヨシ子株を6～9株植栽後2.5年生育したもの
植栽用土壌	バーク堆肥：川砂＝1：4（質量比）

表－2 ポーラスコンクリートの示方配合

ペースト粗骨材率 P/G (%)	水結合材比 W/(C+SF) (%)	シリカフューム置換率 SF/(C+SF) (%)	単位量(kg/m^3)				混和剤	目標空隙率 (%)
			W	C	SF	G	SP※ (%)	
22.5	22.5	15	46.7	177	31.2	1422	1.1	35

注)※:結合材(C+SF)質量に対する百分率

締固め時間は 10 秒あるいは 15 秒とした。圧縮強度試験は JIS A 1108，曲げ強度試験は JIS A 1106 に準拠した。圧縮強度試験用供試体の両面と曲げ強度試験用供試体の載荷点と支点部に焼石膏によるキャッピングを行った後に載荷試験を実施した。**表－3** に試験練り時の強度試験結果を示す。供試体 No.②では、締固め時間の増加に伴いペーストの沈下量が増加したため、強度のばらつきが観察された。締固め時間を 15 秒とすると供試体下面にペースト層ができるため，10 秒で締固めるのが最適であることを確認した。

(3) レディーミクストコンクリート工場実機試験練り

材料投入方法は，試験練りと同様にした。室内実験の試験練りでは，高性能 AE 減水剤量は結合材質量の 1.2%とした。しかし，実機での練混ぜ時には，振動締固め時にペーストが沈下したため，高性能 AE 減水剤使用量を 1.1%とした。供試体は，テーブルバイブレータを用いて 2 層詰めで作製し，1 層の締固め時間を 10 秒とした。空隙率試験，透水試験は日本コンクリート工学協会の方法 [2)]に準拠した。フレッシュコンクリートの連続空隙率は，JIS A 1128 を準用して [3)] コンクリート打設前後 2 回測定した。

3.4 供試体概要

ヨシ植栽用 PoC 供試体概要図を**図－2** に示す。PoC 供試体寸法は 590×600×150mm であり，現場設置のために取手(異形棒鋼 D10)を 2 箇所取り付けた。供試体はヨシの子株を植えることができるようにφ175×150mm の箱抜きを 4 箇所設けた。供試体は 2 日に分けて，21 体づつ，計 42 体作製した。

PoC の練混ぜには，レディーミクストコンクリートプラントの実機ミキサを用いた。材料投入方法は，結合材（C＋SF）と粗骨材を投入し 30 秒間空練りした後，注水し 60 秒間の本練りを行った。1 バッチの練り量は供試体作製時間を考慮して 0.75m^3 とした。シリカフュームは粉体をあらかじめ計量してミキサに直接投入し，高性能 AE 減水剤は使用量が少ないのでメスシリンダーで別計量して水の計量槽に直接投入した。本練り後運搬車（タイヤショベル）に移し，供試体作製場所に搬送した。締固め，物性試験用供試体作製方法，圧縮・曲げ強度試験は試験練り時と同様の方法で行った。

表－3 試験練り時の強度試験結果

供試体No.	①※			②※		
圧縮強度(N/mm^2)	5.61	5.49	5.42	10.9	5.03	6.63
曲げ強度(N/mm^2)	1.92	1.86	1.83	1.53	1.84	1.67

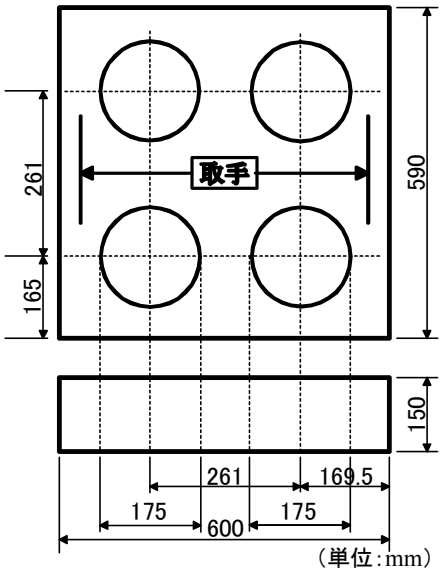
注)※:材齢7日，締固め時間 ①:10秒，②:15秒

3.5 ポーラスコンクリートの物性試験結果および考察

表－4 に実機ミキサにより作製した PoC の物性試験結果を示す。

(1) 空隙率

硬化コンクリートの空隙率は，目標の 35%が



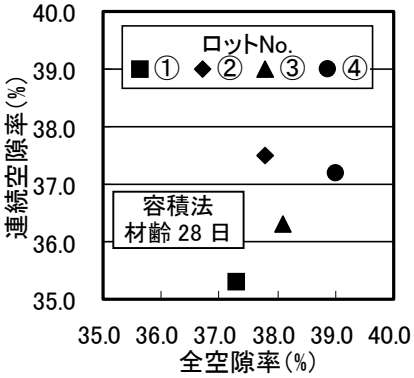
図－2 ポーラスコンクリート供試体概要図

表－4　実機ミキサにより作製したポーラスコンクリートの物性試験結果

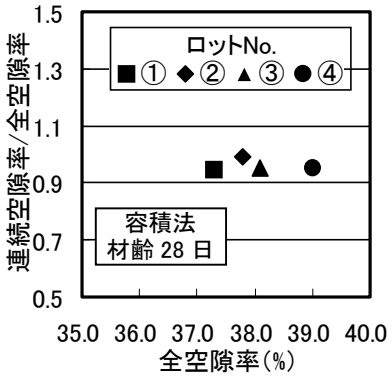
供試体ロットNo.			①		②		③		④	
材齢			7日	28日	7日	28日	7日	28日	7日	28日
空隙率(%)	簡易法		37.4	38.3	29.1	39.2	39.9	39.1	37.2	37.7
	質量法	全空隙率	36.6	36.1	37.8	37.8	37.0	37.0	38.1	38.1
		連続空隙率	35.5	35.3	37.8	37.6	35.6	36.4	37.6	37.4
	容積法	全空隙率	38.0	37.3	37.5	37.8	37.4	38.1	38.4	39.0
		連続空隙率	35.1	35.3	37.5	37.5	36.0	36.3	37.1	37.2
	フレッシュ時	打設直後	28.6		27.6		28.4		28.4	
		打設1時間後	29.4		--------		29.7		27.9	
透水係数(cm/s)	水頭差(cm)	2	13.7	12.0	14.8	13.6	13.6	11.3	14.8	15.5
		7	6.6	5.9	7.2	6.4	6.7	5.5	7.5	8.3
		12	5.1	4.6	5.5	5.1	5.1	4.3	5.8	6.4
圧縮強度(N/mm^2)			5.99	7.42	6.46	6.20	5.84	7.59	5.78	6.49
曲げ強度(N/mm^2)			1.62	1.63	2.57	1.96	2.02	1.91	1.48	1.42

注：空隙率・透水係数・圧縮強度は供試体5本の平均値、曲げ強度は3本の平均値

得られた。フレッシュ時の連続空隙率は，打設前後で1～2%増加した。また，フレッシュ時の空隙率が他の方法で測定した値より小さくなった。これは，供試体あるいは試料の容積が空隙率に影響を及ぼしているためである。そのため，容積が大きいエアメータ（7L）を用いると，小さい供試体（φ10×20cm）より空隙率が小さくなったものと考えられる[4)]。質量法と容積法による空隙率はほぼ同様の値を示し，測定法による著しい相違は観察されなかった。簡易法による空隙率は，一部ばらつきが見られたものの，質量法と容積法による値より幾分大きな値を示した。**図－3** に容積法により測定した連続空隙率と全空隙率の関係を示す。全空隙率が大きいほど連続空隙率も大きくなっており，両者の間には高い相関関係があることが確認できる。**図－4** に全空隙率に対する連続空隙率の比と全空隙率の関係を示す。全ての供試体において，全空隙率に占める連続空隙率の割合の平均値は96%となった。ヨシの生育に十分な連続空隙が形成されていると考えられる。



図－3 連続空隙率と全空隙率の関係



図－4 連続空隙率/全空隙率と全空隙率の関係

(2)　透水係数

図－5 に水頭差 12cm 時の透水係数と材齢の関係を示す。透水係数は，材齢の進行に伴い一例を除き減少する傾向にあるものの著しい差は観察されなかった。これは，材齢 7 日と 28 日で同一の供試体を用いていない（各材齢，各々5本の平均値）ことも影響しているものと考えられる。

(3)　強度試験

図－6 に圧縮強度と材齢の関係を示す。材齢の進行に伴う圧縮強度の増加率は，一例を除き通常のコンクリートと同様の傾向にあるものの，絶対値で示した強度増加量は小さい。PoC は空

隙率が大きく，また供試体ごとの空隙率の変動も大きいため，材齢に伴う大きな強度増加は期待できない。材齢の進行に伴う曲げ強度の増加は観察されなかった。

3.6　実環境下におけるヨシの植栽実験

(1)　実験要因

ヨシの生育状況を評価するために，ヨシの生育調査を行った。また，PoC による水質への影響を検討するために，六価クロムの溶出試験と pH 試験を行った。

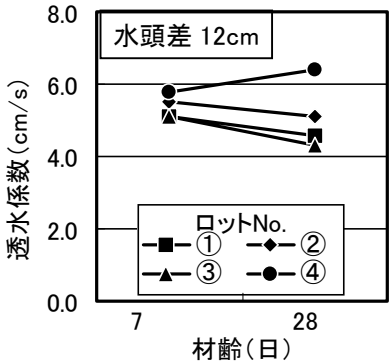
ヨシの生育調査項目は，ヨシ茎個体数，株内最長ヨシ高さ，最長ヨシの茎径とした。ヨシ茎個体数は，全てのヨシ高さを計測することにより算出した。ヨシの生育調査は，PoC への植栽直後，琵琶湖への設置直後，琵琶湖への設置から 2 ヵ月後の計 3 回行った。

六価クロム溶出試験はタンクリーチング試験方法に準じて行った。タンクリーチング試験は，塊状の供試体を溶媒水中（固液比 1：10，試料の乾燥質量の 10 倍体積の溶媒水）に 28 日間浸水し，水中に溶出する六価クロム濃度を吸光光度計により測定するものである。溶出試験用供試体には，材齢 1 日の円柱供試体（φ10×20cm）を，そのまま蒸留水中に浸水したものと，破砕して蒸留水中に浸水した 2 種類で測定を行った。

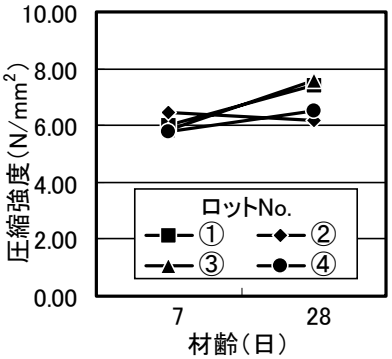
pH 試験は，電極式 pH 試験器を用いて測定した。pH 試験は，六価クロム溶出試験と同様の方法で試料を作製し，浸水直後（材齢 1 日）と浸水 27 日後（材齢 28 日）の溶媒水の pH を測定した。供試体には，円柱供試体（φ10×20cm）を用いた。

(2)　ポーラスコンクリートへのヨシの植栽および現場設置

PoC 打設 2 日後に脱型し，5 週間水中養生後にヨシの植栽を行った。供試体 1 体当たりヨシの子株を 4 株植栽した。使用する土壌は，ヤシマット工法で使用されているものと同様の土壌（バーク堆肥と川砂を質量比で 1:4 の割合で混合したもの）を使用した。土壌上に PoC を設置し，ヨシ株を箱抜き部に植栽した。その後，隙間に土を充填し，更に上面に盛土した。PoC の上面が隠れるまで浸水させ，ヨシを PoC に根づかせるため，植栽後約 8 週間養生した後，実環境下の琵琶湖試験ヤードに設置した。水深は B.S.L.（琵琶湖標準水位）－92cm～－66cm（最大水位 3 月；23cm，最低水位 12 月；－89cm）の範囲とした。**図－7** に供試体配置図を示す。比較試験用として，一般的に使用されているヤシマット工法供試体（80×120cm）と交互に配列した。ヤシマットは，流失を防止するために，1 マットにつき木杭を 4 本打設した後に，盛土した。



図－5 透水係数と材齢の関係

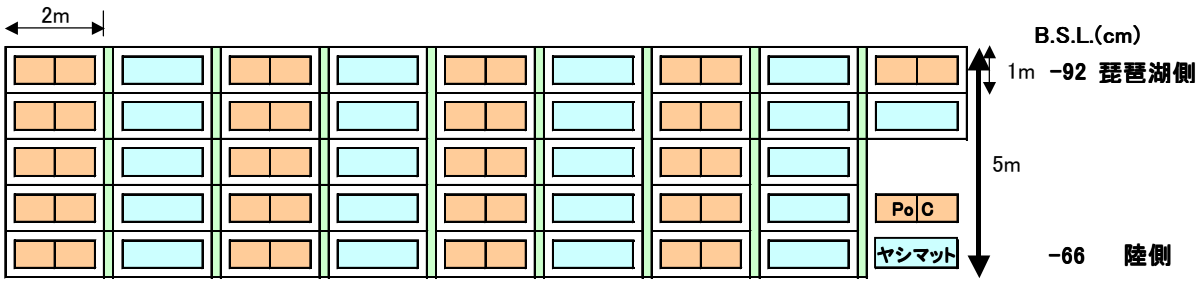


図－6 圧縮強度と材齢の関係

3.7　実験結果および考察

(1)　ヨシの生育調査

表－5 に 7 月から 11 月にかけて行ったヨシの生育調査結果を示す。9 月～11 月にかけてのヨシ茎個体数の増加率が PoC で 49.0%，ヤシマット工法で 54.8%と，個体数は減少した。これは，2002 年の夏期から 2003 年の冬季にかけての琵琶湖の渇水と，11 月に植物が枯れる季節であることが影響したものと考えられる。しかし，その他の項目では，ヤシマット工法より PoC に植



図－7 供試体配置図

栽したヨシの方が増加傾向にあったので，PoC によるヨシの植栽は従来工法に劣らないと考えられる。

(2) 六価クロム溶出試験および pH 試験

吸光光度分析による六価クロム溶出量は，供試体をそのまま浸水した場合で 0.003ppm，破砕して浸水した供試体で 0.005ppm であり，破砕して浸水した方が若干六価クロム溶出量が多かった。

pH 値は，浸水直後（材齢 1 日）で 12.2，浸水 27 日後（材齢 28 日）で 11.0 であった。また，28 日間散水養生した供試体では，蒸留水への浸水直後で 9.3，浸水 28 日後では 8.6 であった。

琵琶湖における六価クロムと pH 値の水質基準は，各々0.05ppm 以下，8.5 以下である。六価クロムは水質基準を十分に満足している。pH 値は，PoC 供試体設置前の散水養生期間を長くすることにより小さくすることが可能であると考えられるため，散水養生期間の再考が必要である。

表－5 ヨシの生育調査結果

		PoC			ヤシマット	
調査＼月		7	9	11	9	11
ヨシ茎個体数（本）		2084	2864	1402	1926	1056
平均値	株内最長ヨシ高さ（cm）	87.8	132.5	137.4	137.1	136.7
	最長ヨシの茎径（mm）	3.2	4.0	4.2	3.9	3.6
	ヨシ高さ（cm）	58.0	86.7	96.8	80.4	81.8
増加率（%）	月※	--------	7～9	9～11	--------	9～11
	ヨシ茎固体数	--------	137.4	49.0	--------	54.8
	株内最長ヨシ高さ	--------	150.9	103.7	--------	99.7
	最長ヨシの茎径	--------	125.4	104.6	--------	92.1
	ヨシ高さの平均	--------	149.6	111.6	--------	101.8

注）※：a～b＝（b 月/a 月）×100

4. まとめ

2002 年の夏期から 2003 年の冬季にかけて渇水が続き，供試体が常に浸水していない状態であったため，水深がヨシに及ぼす影響は観察できなかった。しかし， PoC 供試体を用いル工法は，一般に使用されているヤシマット工法に劣らない植栽効果が得られたものと考えられる。ヤシマット工法は設置までに 2.5 年と長期間の育成が必要であるが，PoC は最大 3 ヵ月の期間で設置可能であることを考えると，PoC を用いて琵琶湖へヨシを植栽する方法は，効果的な方法である。

今後，ヨシの根は PoC の上下左右に成長し，PoC と一体となり，その自重により，ヨシは流失することなく順調に生育していくものと考えられる。また，散水養生期間を長くして pH 値を下げる必要はあるものの，PoC を自然界と共存させることは可能であると考えられる。

参考文献

1) 大島正記，阿佐見雅子，高木宣章，児島孝之：再生骨材を用いたポーラスコンクリートによる琵琶湖へのヨシの植栽，第 45 回日本学術会議材料研究連合講演会講演論文集，pp278-279，2001.9
2) 岡本享久，安田登，増井直樹，佐藤文則：ポーラスコンクリートの製造・物性・試験方法，コンクリート工学，Vol.36，No.3，pp.52-62，1998.3
3) 安藤慎一郎：フレッシュコンクリートの品質管理と試験方法，ポーラスコンクリートの製造とこれからがわかる本，セメントジャーナル社，pp38-41，2001.9
4) 越健，島崎磐，国枝稔，六郷恵哲：ポーラスコンクリートの空隙率と空隙分布の評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol21，No.1，pp259-264，1999