

論文 木炭微粉末を混合したコンクリートによる品質改善及び環境改善の研究

山田 雅裕*1・川幡 栄治*1・今井 洋一*2・前田谷 安文*3

要旨：水セメント比の高いコンクリートはブリーディングが比較的大きくなりやすく、レイトランスの影響等で打継ぎコンクリートとの付着の阻害や構造物の耐久性の低下へと繋がる。前報では木炭微粉末をコンクリートに混合することによってブリーディングの抑制が可能であり、また木炭微粉末がコンクリート中の連行空気を吸着する傾向にあることを明らかにした。本報では AE 剤の主成分を変化させ、木炭微粉末の混合量をさらに多くし、AE 剤使用量の関係を把握するとともに圧縮強度への影響を確認した。また木炭微粉末の使用により空気中のホルムアルデヒドを低減できることが確認された。

キーワード：木炭, AE 剤, 空気量, 圧縮強度, 吸着, ホルムアルデヒド

1. はじめに

近年、資源の有効利用や環境保全の観点からコンクリートのリサイクルの必要性が高まっている。そこでリサイクルの方法の一つとして、炭化した木材を利用したコンクリートを使用して、新たなコンクリートを製造するという方法に着目した。木材の炭化はホルムアルデヒド吸着能力、水質浄化、床下調湿材、植物生育等の土壌改良材など多用途での利用と研究が行われている^{1),2)}。

前報では多孔質な木炭微粉末（微粉末状に加工した木炭）をコンクリートに混合することで、ブリーディングの抑制に効果を発揮し、初期の急激な乾燥が防げることや同様にそれに伴う初期の急激な質量変化も抑えられることがわかった^{3),4)}。このように木炭微粉末をうまく利用すればコンクリートの品質の改善に期待でき、またホルムアルデヒドのような化学物質の低減が可能かどうか検討を加えた。そこで、前報でも課題となった AE 剤の主成分の違いや木炭微粉末の混合量と AE 剤使用量の関係をさらに詳しく調査するとともに、木炭微粉末をコンクリートに混合した場合のホルムアルデヒドの吸着効果について述べる。

2. 実験概要

2.1 実験の種類

実験の種類を表-1に示す。ケース1では AE 剤の主成分や AE 減水剤の違いによるコンクリートのフレッシュ性状や強度発現、ケース2ではコンクリート中に木炭微粉末を混合した供試体を用いて、厚生労働省の VOC 特定物質にも挙げられるホルムアルデヒドをどの程度の割合で吸着できるか把握するための実験を計画した。

表-1 実験の種類

ケース名	実験内容
1	AE 剤の主成分の違いによる連行空気と AE 剤使用量の関係及び強度比較 -1: 木炭微粉末 3kg/m ³ , 6 種類の AE 剤 -2: 木炭微粉末 7kg/m ³ , 10kg/m ³ , 20kg/m ³ , 30kg/m ³ , 2 種類の AE 剤 -3: AE 減水剤 4 種類の組合せ
2	木炭微粉末の特定物質の吸着性

2.2 コンクリートの調合

実験で用いた材料を表-2, 調合を表-3に示す。空気連行程度や AE 剤使用量を把握する目的で主成分の異なる 6 種類ものを用いた。さらにコンクリートの性状（ワーカビリティ等）を再確認する目的で、木炭微粉末の混合量を変化させた調合も設定した。

*1 東亜建設工業(株) 技術研究所 主任研究員（正会員）

*2 日本シーカ(株) 第一事業本部 マーケティングサービスグループ

*3 東亜コンクリート工業(株) 工場長

また、AE 減水剤の違いによる特性を比較する目的で 4 種類の AE 減水剤を組み合わせ、調合の設定も行った。この場合の AE 剤は 1 種類とし、木炭微粉末の混合量を 7kg/m^3 に固定した。その他の材料は、前報と同じものを用いた。

基準としたコンクリートの調合は、水粉体比 65% (水セメント比 65%)、目標スランプ 18cm、目標空気量 4.5% とし、木炭微粉末を混合させたコンクリートの調合は、水粉体比を同一として質量で木炭微粉末をセメントに置き換え、細骨材量で容積の調整を行った。ケース 1-1 においては、木炭微粉末 3kg/m^3 を混合させた調合に 6 種類の AE 剤を変化させ、空気連行性やワーカビリティを比較した。その中で 2 種類の AE 剤に絞り込んだ。ケース 1-2 においては、木炭微粉末の混合量を 7kg/m^3 、 10kg/m^3 、 20kg/m^3 及び 30kg/m^3 に変化させた調合にケース 1-1 で選択した 2 種類の AE 剤を使用し、木炭微粉末の混合量と AE 剤使用量の関係やそのときのワーカビリティや圧縮強度を比較した。

表－2 使用材料

材料	種類・物性等
セメント	C：普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm^3
細骨材	S1：山砂（佐原産） 表乾密度 2.59g/cm^3 ，吸水率 1.94% S2：砕砂（葛生産） 表乾密度 2.64g/cm^3 ，吸水率 1.13%
粗骨材	G：石灰岩質碎石（横瀬産） 表乾密度 2.70g/cm^3 ，吸水率 0.25% 実績率 60.2%
混和材	木炭微粉末（中国産備長炭） 1.65g/cm^3
練混ぜ水	上水道水
混和剤	（AE 減水剤） WAE1：リグニンスルホン酸系標準形 WAE2：リグニンスルホン酸系遅延形 WAE3：ポリカルボン酸系標準形 WAE4：ポリカルボン酸系遅延形 （AE 剤） AE1：ラウリル酸イミダゾリン誘導体 AE2：ポリオキシエチレンアルキル硫酸アミン塩 AE3：ポリオキシエチレンアルキルエーテル硫酸塩 AE4：ポリオキシエチレンアルキル硫酸塩 AE5：ロジンのカリウム塩 AE6：ノニオン系特殊界面活性剤と カルボン酸系活性剤

粗骨材のかさ容積は、前報と同様に練上がりコンクリートの状態をスランプフロー値等で観察しながら適正值を設定し、 $0.595\text{m}^3/\text{m}^3$ （単位水量 181kg/m^3 ）とした。AE 減水剤の使用量は全ての調合で一定量とし、基準となるコンクリートで目標スランプ 18cm を満足できるように定めた。また AE 剤の使用量については、目標空気量 4.5% となるようにその都度調整した。

表－3 調合

ケース	W/P (%)	W/C (%)	単位量 (kg/m^3)				AE 剤	AE 減水剤
			木炭	W	C	S ⁴⁾	G	
1-1 ¹⁾	65.0	65.0	0	181	278	859	967	1 種類
		65.8	3	181	275	857	967	6 種類
1-2 ²⁾	65.0	66.8	7	181	271	854	967	2 種類
		67.5	10	181	268	851	967	
		70.2	20	181	258	844	967	
		73.0	30	181	248	836	967	
1-3 ³⁾	65.0	66.8	7	181	271	854	967	1 種類

1) AE 剤：AE1～AE 6 AE 減水剤：WAE1

2) AE 剤：AE2，AE 5 AE 減水剤：WAE1

3) AE 剤：AE2 AE 減水剤：WAE1～WAE 4

4) S = S1：S2 = 40%：60%

2.3 試験項目及び方法

試験項目及び方法を表－4 に示す。基準のコンクリートに対して、木炭微粉末を混合したコンクリートの練混ぜ状態の観察、フレッシュ性状、AE 剤使用量及び吸着性能を確認した。

表－4 試験項目及び方法

試験項目	試験方法
スランプ	JIS A 1101
空気量	JIS A 1128
圧縮強度	JIS A 1108
吸着性能	ガス検知管による

(1) スランプ及び空気量試験

スランプ及び空気量試験は、それぞれ JIS A 1101 及び JIS A 1128 に準拠し実施した。ケース 1-2 では、木炭微粉末の混合量を最大で 30kg/m^3 （粉体量の約 10%）とし、ワーカビリティがどの程度変化するか確認した。また木炭微粉末の混合量と AE 剤使用量の関係を再確認した。

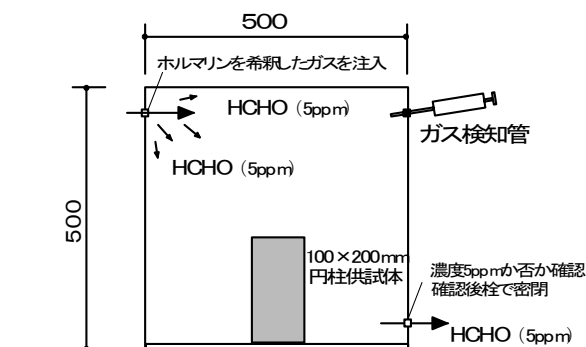
(2) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、JIS A 1108 に準じて $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体を用いて実施した。供試体は作製 48 時間以内に脱型し、強度確認材齢の 7 日及び 28 日まで標準養生とした。

(3) 吸着試験

木炭微粉末をまったく混合していないベースコンクリートで作製した $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 円柱供試体と、比較体として木炭微粉末の混合量を 7kg/m^3 、 10kg/m^3 、 20kg/m^3 及び 30kg/m^3 に変化させた $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 円柱供試体を用いて試験を行った。供試体の保存については、なるべく実際の構造体コンクリートに近い養生状態となるように、材齢 28 日まで封緘養生とし、試験直前に脱型し試験に供した。

試験は、図－1 に示すような密封状態となる 500mm 立方体アクリル容器を用い、その中央に供試体を配置して、ホルムアルデヒドの吸着性を確認する計画とした。容器中のホルムアルデヒド濃度が 5ppm（厚生労働省 VOC 室内濃度指針値 0.08ppm の 63.5 倍の濃度）となるように、ホルマリン（ホルムアルデヒド含有量 35%、メタノール含有量 5～10%の水溶液）を 7000 倍に希釈し、容器内に注入した。注入中は対角側の小孔から濃度を確認し、確認後に栓をして密封状態とした。その後、ガス検知管を用いて容器中のホルムアルデヒド濃度の経時変化を測定した。測定は室温 20℃の環境で実施し、ガス検知管の読み値に変化がなくなるまで続けた。また、容器に何も入れない（ブランク）状態での測定も合わせて実施した。



図－1 吸着試験方法

2.4 コンクリートの練混ぜ

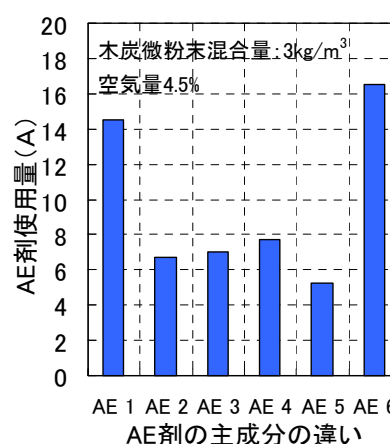
練混ぜには、容量 55L の強制練りパン型ミキサーを使用し、1 バッチあたり 35L を練混ぜ量とした。材料はそれぞれ別々に計量・投入し、木炭微粉末については均一に混ざるように事前にセメントに混ぜ合わせた状態で投入した。練混ぜ時間は、基準となるコンクリート及び木炭微粉末を混合したコンクリートともに材料投入後 90 秒とした。

3. 実験結果

3.1 フレッシュコンクリート

木炭微粉末を 3kg/m^3 混合したコンクリートと比較した AE 剤の主成分の違いと AE 剤使用量の関係を図－2 に示す。AE 剤使用量は、粉体質量の 0.001% を 1A として表示している。

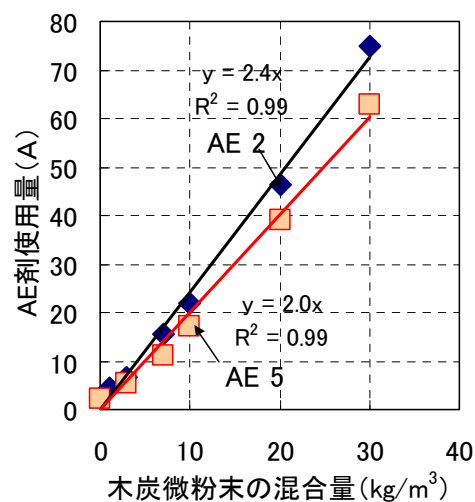
空気量 4.5%を得るための AE 剤使用量は AE 剤の主成分の違いによって差があり、AE1 と AE6 は多くの量を必要とする傾向があった。実際の製造において、AE 剤は主に助剤として扱われ、極端に多い場合には計量設備の限界や品質のばらつきが考えられる。そのため 6 主成分の AE 剤の中でも比較的少量で空気連行が可能で、汎用的と考えられる AE2（ポリオキシエチレンアルキル硫酸アミン塩）もしくは AE5（ロジンのカリウム塩）が適していると判断した。



図－2 AE 剤の主成分の違いと AE 剤使用量

AE2 及び AE5 を用いたコンクリートで比較した木炭微粉末の混合量と AE 剤使用量の関係を図－3、木炭微粉末の混合量を 0kg/m^3 及び

30kg/m³としたスランプ比較を写真－1に示す。木炭微粉末の混合量を増すと、所定の空気が連行しにくくなるとともにやや粘性が高くなり、フローが若干小さくなる傾向にある。しかし、スランプは極端に低下せず、施工性にそれほど支障をきたさない範囲であると考えられ、木炭微粉末の混合量を 30kg/m³としても製造は可能であると考えられる。写真－1から木炭微粉末の混合量が 10kg/m³を超えるとコンクリート色はかなり黒味を増していることがわかる。



図－3 木炭微粉末混合量と AE 剤使用量



写真－1 スランプの比較

このように、コンクリート中に木炭微粉末を混合すると所定の空気量を得るための AE 剤使用量は増加し、フライアッシュを混入したコンクリートのような連行空気の吸着作用のように空気が混入しにくい状態であった。

図－3 から、木炭微粉末の混合量と AE 剤使用量の関係は、AE 剤の主成分の違いに拘わらず、線形な関係が認められた。両者の AE 剤使用量は、木炭微粉末の混合量 1kg/m³につき、に概ね 2.0A～2.4A の範囲と予測できる。しかし、木炭微粉末を 30kg/m³ 混合したコンクリートでは AE2 を用いた場合 75A 程度、AE5 を用いた場合 62A 程度であり、主成分が異なると木炭微粉末の混合量の多い範囲で AE 剤使用量が大きく違うことがわかった。

3.2 圧縮強度

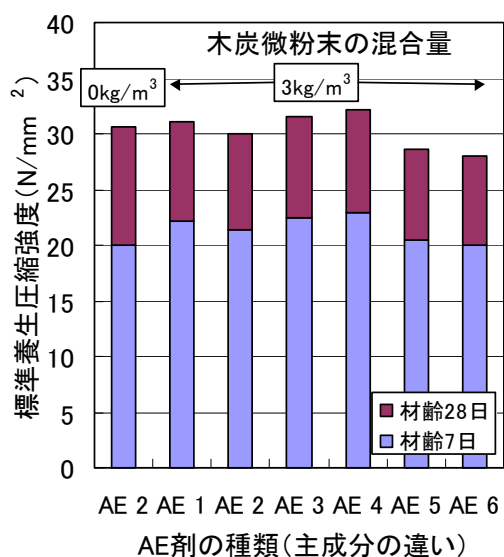
圧縮強度用供試体を作製した際のフレッシュコンクリートの空気量結果を表－5, AE 剤の主成分の違いと圧縮強度の関係を図－4, セメント水比と圧縮強度の関係を図－5, 木炭微粉末の混合量と圧縮強度の関係を図－6 に示す。

圧縮強度は、木炭微粉末を混合していないコンクリート調合を基準に比較した。供試体は目標空気量 4.5%±1.0%を目標に作製したが、実測の空気量は 3.5%～6.0%の範囲となり若干の差が生じた。そのため、コンクリート中の空隙の違いによる強度差を極力無視できるように空気量 4.5%を基準に、実験で得られた強度結果を空気量－1%で強度－5%，空気量＋1%で強度＋5%として補正した値で比較することにした。

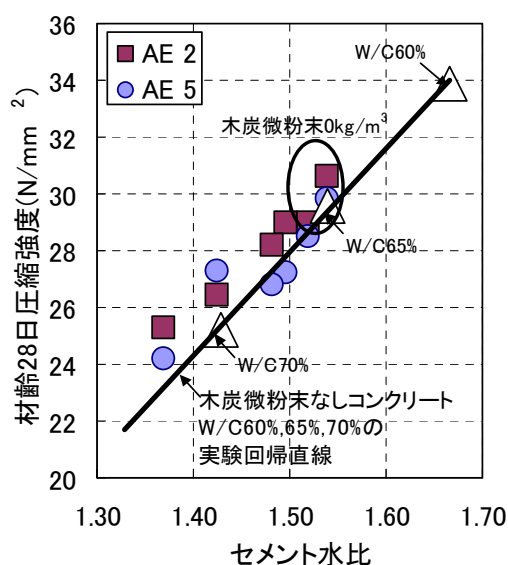
図－4 は木炭微粉末の混合量を 3kg/m³として 6 種類の AE 剤によって圧縮強度の違いを確認

表－5 圧縮強度用供試体の空気量

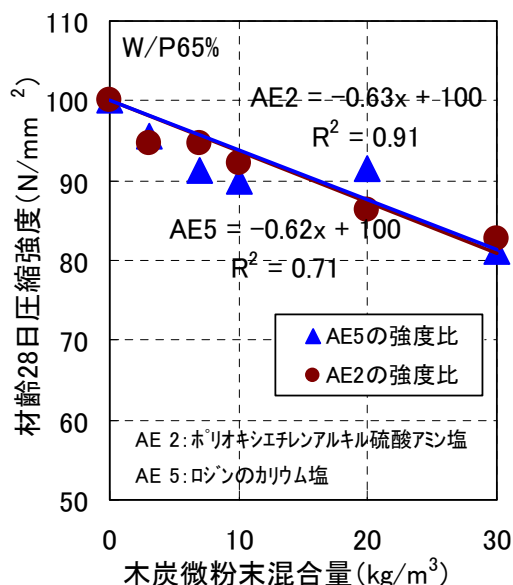
木炭 (kg/m ³)	空気量 (%)	AE 剤 記号	木炭 (kg/m ³)	空気量 (%)	AE 剤 記号
0	4.5	AE2	7	4.7	AE2
3	4.5	AE1	10	3.9	
	5.2	AE2	20	3.5	
	4.4	AE3	30	3.8	
	4.7	AE4	7	5.3	AE5
	5.2	AE5	10	4.5	
	6.0	AE6	20	4.2	
			30	4.0	



図－4 AE 剤主成分の違いと圧縮強度



図－5 セメント水比と圧縮強度



図－6 木炭微粉末の混合量と圧縮強度

した図であるが、AE5 及び AE6 を使用したもの以外は AE2 を用いた基準のコンクリートに比べて、同等以上の強度が得られる結果となり、木炭微粉末の混合量が 3kg/m^3 程度では圧縮強度にあまり影響を及ぼさないと考えられる。

図－5 には W/C60%, 65%及び 70%の基準のコンクリートで得られたセメント水比と圧縮強度の回帰直線⁴⁾をあわせて図示し、基準のコンクリートと木炭微粉末を混合させたコンクリートのセメント水比と圧縮強度の関係を比較した。同一セメント水比で比較すると、木炭微粉末をセメントに置き換えて混合させたコンクリートの方が若干強度が高く、セメント水比の小さい（水セメント比の大きい）貧調合なコンクリートほどその傾向が強かった。この結果から、木炭微粉末は強度に寄与する材料ではないものの水セメント比の大きな調合ではブリーディングを抑制できることも相俟って所定の強度も発揮でき品質改善も期待できる。

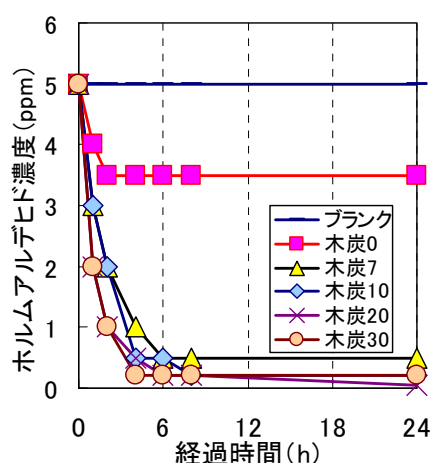
図－6 は、基準のコンクリートにおける標準養生 28 日の圧縮強度を 100 として、水粉体比を同一として木炭微粉末をセメントに置き換えて混合させたコンクリートの強度比を示した図である。AE2 及び AE5 とともに、木炭微粉末の混合量の増加にほぼ反比例して低下する傾向が認められる。圧縮強度比の関係から推測すると、AE2 及び AE5 とともに材齢 28 日の圧縮強度は木炭微粉末の混合量 1kg/m^3 につき 0.6%程度低下する傾向にある。仮に、圧縮強度の低下率を 5%許容し、圧縮強度比の限界を 95 とした場合、木炭微粉末の混合量の上限值は 7kg/m^3 程度である。

3.3 吸着性能

吸着性能試験の結果を図－7 に示す。木炭微粉末を混合したコンクリートは、密封した容器内に存在する初期濃度 5ppm のホルムアルデヒドが 2 時間経過すると約 20%まで低下（80%の吸着量という表現とする）させ、6 時間後には 0.5ppm 以下（ガス検知管の測定限界）となった。供試体は脱型後に底部を除き開放状態（露出表面積 392.5cm^2 ）であり、表層に存在する木炭微

粉末がホルムアルデヒドを吸着し濃度低下させたものと考えられる。しかし、表層からどの範囲までこの働きを有しているか明らかにできず、今後の課題でもある。一方、木炭微粉末を混合していないコンクリートは、容器中の初期濃度 5ppm のホルムアルデヒドが 4 時間経過時に約 70%に低下し、若干の吸着作用が認められるものの、その後に変化はない。コンクリート自体にも若干の吸着作用があり、その分濃度低下に繋がっているものと考えられる。また、木炭微粉末の混合量の違いによる吸着量の差を比較してみると、初期濃度 5ppm での試験では木炭微粉末 7～30kg/m³ の範囲でそれほど大差がない。

これらの吸着の要因は、木炭微粉末（多孔内）にホルムアルデヒドが吸着され酸化作用を受けてギ酸となり、さらに水酸化カルシウムと反応してギ酸カルシウムとなって固定化されているものと推測できる。今回の実験範囲では木炭微粉末がホルムアルデヒドをどの程度分解または中和するか、また供試体表層深さと吸着量の関係が明らかでないが、少なくともホルムアルデヒド濃度を減衰できる効果を持つと考えられる。今回はホルムアルデヒドのみを用いて、木炭微粉末を混合したコンクリートの吸着効果を確認したが、比較的短時間で濃度を減少させる効果を持つことが確認でき、これらの結果より木炭微粉末は室内汚染物質を低減もしくは除去できる材料であることがわかった。今後は表層深さと吸着量の関係などの調査・検討も考えている。



図ー7 吸着性能試験の結果

4. まとめ

- (1) 木炭微粉末の末混合量と AE 剤使用量は、AE 剤の種類により異なる傾向を示したが、その関係は線形であることが確認された。木炭微粉末の混合量に応じて AE 剤使用量の推測が容易であった。
- (2) 材齢 7 日及び材齢 28 日ともに圧縮強度は木炭微粉末の増加に反比例して低下し、それは木炭微粉末の混合量 1kg/m³につき概ね 0.6%の低下であった。また木炭微粉末を混合したコンクリートは、ブリーディングが抑制できるとともに、W/C の大きい範囲で同一 W/C の基準コンクリートに比べ高い強度が得られた。
- (3) 木炭微粉末は室内汚染物質を低減もしくは除去できる材料であると考えられる。

実験にあたり、上陽レミコンの町田善之助氏ならびに伊藤明人氏に多大な協力を得ました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 小林孝一，山羽基：木炭粉を混入したセメント系材料の性状に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.1337-1342，2003
- 2) 森昭憲他：木炭の孔隙特性が硝酸イオンの保持機能に及ぼす影響，日本土壤肥料学雑誌，第 72 巻，第 5 号，pp.642-648，2001
- 3) 山田雅裕，今井洋一他：木炭微粉末を混合したコンクリートの性状に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.1491-1496，2004
- 4) 山田雅裕，川幡栄治他：木炭微粉末を混入したコンクリートの基礎的性状（その 1，その 2），日本建築学会学術講演梗概集（北海道），pp.415-418，2004.8
- 5) 山本隆信他：フライアッシュコンクリートの空気連行性及びブリーディングに影響を及ぼす各種要因，コンクリート工学年次論文集，Vol.20，No.2，pp.97-102，1998