論文　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

小林　孝一[*1]・山羽　基[*2]

要旨：コンクリート製の住居は耐震性，耐火性等に優れているが，高温多湿の我が国においては，密閉された室内の不快指数が高くなるという欠点を有する。そこで本研究では吸放湿特性に優れた木炭微粉末を混和したモルタルの，建材としての適用性を明らかにすることを目的とし，その各種強度および吸放湿性能などの基本的物性を明らかにした。その結果，木炭の混和によって強度は低下するものの，通常のモルタルと比較して優れた吸放湿特性を有することが明らかとなった。

キーワード：木炭微粉末，吸放湿性能，圧縮強度，モルタル

1.　はじめに

近年，空調設備の普及など生活環境が変化することにより，伝統的な日本家屋とは異なる密閉性の高い住宅が増加している。また耐震性の向上のために，密閉度の高いコンクリート布基礎，ベタ基礎工法の採用が増加する傾向にあり，その際には床下の換気が困難となる。これらの場合，高湿度により結露，カビが発生しやすく，また建材として使用された木材の腐朽にもつながる。

一方，木材を熱分解して製造する木炭は，多孔質で比表面積が250～300m^2/gにも達し，吸湿性が極めて高い上に，比較的安価であるため，上記のような状況の下で建材用の材料として有効に利用できる可能性があるものと考えられ，すでに住宅の床下に木炭粉を散布して調湿を行なうことが試みられ，製品化もされている。

そこで本研究では木炭の特性に着目し，木炭を粉砕した微粉末を骨材として用いたモルタルの，建材としての基本的性能を明らかにすることを目的として，強度特性および吸放湿特性について基礎的な検討を行った。

2.　実験概要

2.1　木炭粉の概要

木炭は中国産のならの木を800℃にて加工した白炭を微粉砕したものを用いた。本研究では最大寸法1mmのものと110μmのものの2種類の木炭粉を，ふるいを用いて準備した。

木炭粉は吸水率が極めて大きいために，あらかじめ吸水飽和させていない状態で練混ぜに供すると，多量に練混ぜ水を吸収し，ワーカビリティーが著しく低下する。そこで絶乾状態の木炭粉を水道水に浸せきして十分吸水させた後に，目の細かい不織布に包んで余分な水分を排水し，水と木炭粉の質量の合計が元の絶乾状態の木炭粉の質量の2倍となるよう，すなわち含水率が100%に調整された木炭粉を用いてモルタルの練混ぜを行なうこととした。

また，電気炉にて絶乾状態とした木炭粉を室内環境に放置し，室内湿度の変化と木炭粉の吸放湿による質量変化を調査した。

2.2　モルタルの配合

配合を**表-1**に示す。配合中の記号Caは木炭粉を表し，配合名のCa1，Ca110はそれぞれ最大寸法1mmおよび110μmの木炭粉を使用したことを示す。また配合名の末尾の数字はセメント水比を，記号WRは練混ぜ時にAE減水剤をセメント量の0.26%添加したことを表す。

なお，木炭粉は厳密には骨材と見なせないと考えられるが，本研究中では水，セメント，木炭粉

*1　中部大学講師　工学部土木工学科　博(工)（正会員）
*2　中部大学助教授　工学部建築学科　博(工)

表-1　モルタルの配合条件

配合名	骨材	C/W	Ca/W (or S/W)
Ca1-0.8	炭1mm	0.80	1.0
Ca1-0.8WR			
Ca1-0.9	炭1mm	0.90	1.0
Ca1-0.9WR			
Ca1-1.0	炭1mm	1.00	1.0
Ca1-1.0WR			
Ca1-1.1	炭1mm	1.10	1.0
Ca1-1.1WR			
Ca1-1.2	炭1mm	1.20	1.0
Ca1-1.2WR			
Ca110-1.0	炭110μm	1.00	1.0
S	細骨材	0.64	4.3

を練り混ぜたものをモルタルと呼ぶこととする。

配合Sは骨材として砂を用いた通常のモルタルで，木炭粉を用いた配合のうちの基本配合であるCa1-1.0と圧縮強度がほぼ同程度となるように設計された配合である。

これら配合には，普通ポルトランドセメント（密度3.16g/cm³），ISO標準砂，および上記の木炭粉を用いた。

練混ぜはモルタルミキサにて行なったが，木炭粉を用いた配合はC/W=1.0で，木炭粉の含水率が100%に調節されているため，この吸水させた木炭粉と所定の量のセメントのみをミキサに投入して練り混ぜればよいこととなる。

供試体はいずれも試験時まで水中養生した。

2.3　モルタル質量の測定

材齢7日の時点でφ50×100mmの供試体を養生水から引き上げ，直ちに表面の付着水分をウェスで拭ったうえで，水分飽和状態における質量の測定を行なった。その後，電気炉にて供試体を乾燥させ絶乾質量の測定を行ない，モルタルの吸水率を求めた。

2.4　強度試験

φ50×100mmの供試体の材齢7日，28日，91日における圧縮強度を測定した。

2.5　モルタルの吸放湿試験

図-1に示すようなシステムを26℃，湿度45%の実験室内に2つ設置し，供試体の吸放湿特性を調査した。一つのデシケーターは扉を開放し，内部の湿度が実験室内と同一の45%となるようにした。もう一つのデシケーターは扉を閉めて内部を密閉し，飽和KNO_3水溶液を満たした容器を内部に静置することによって，デシケーター内の湿度が93%となるようにした。

供試体は電気炉で絶乾状態とした後，それぞれのデシケーター内に12時間ずつ交互に収納することにより，24時間で1サイクルの乾湿繰返し環境に置いた。これは昼夜の湿度変動を模した環境に相当する。この間の質量変化を測定することにより吸放湿特性を調べた。

2.6　比表面積測定

モルタル配合S，Ca1-1.0，Ca1-1.0WR，Ca110-1.0を粉砕したのち，N_2ガス吸着による多点BET法により，比表面積を測定した。

3.　結果と考察

3.1　木炭粉の吸放湿特性

空調されていない室内に電気炉にて絶乾状態とした木炭粉を暴露した際の質量変化を**図-2**に示す。ここでは毎日1回測定した結果から，木炭粉の含水率を算出し，その時の室内湿度と併せて表示している。またここでは木炭粉は最大寸法1mmのものを使用した。

暴露を開始した翌日にはすでに，木炭粉は多量

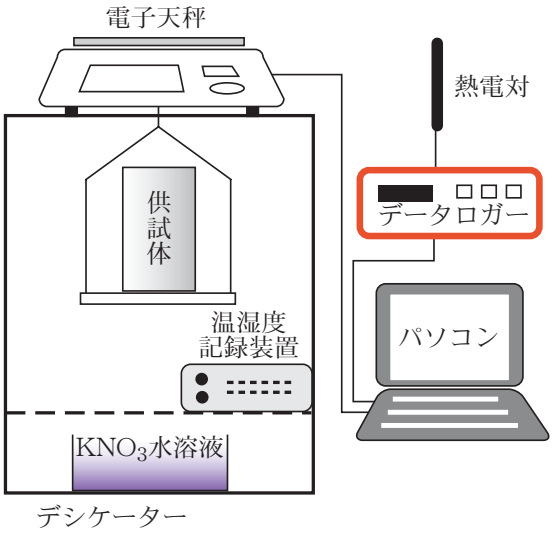


図-1　温湿度・供試体質量測定システム

に吸湿しており，さらにその後も暴露環境の湿度の増加と低下のいずれの方向の変化に対しても，木炭粉の含水率は同一方向の増減を呈している。またここには結果を掲載していないが，室内の温度変化と木炭粉の質量変化の間には明瞭な関係が見られないことから，木炭粉の含水率が環境中の湿度の変化に追従していることは明らかである。

3.2　モルタルの密度，吸水率

図−3に材齢7日時点での各配合の密度を示す。ここでの密度は，養生終了後直ちに測定した質量から算出した，水分飽和密度である。

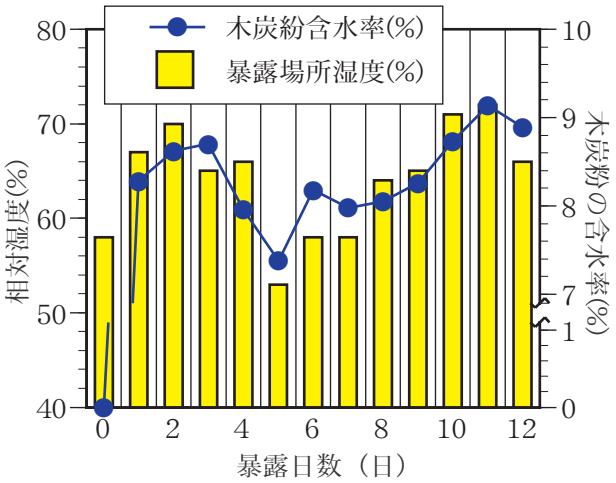
木炭粉を用いたモルタルの密度は，通常のモルタルの3/4程度であり，またその密度はセメント量が多いほど大きくなる傾向にあった。なお，ここには材齢7日での結果しか示していないが，本研究の範囲では材齢7日から91日において，いずれの配合のモルタルの密度も1.55から1.73g/cm³の範囲にあった。

これらの配合のうち，木炭粉を用いたCa1−1.0と砂を用いたSについて，吸水率を測定した。材齢7日の供試体を電気炉にて絶乾状態として質量を計測し，絶乾質量に対する吸水率を算出した結果を**図−4**に示す。木炭粉を用いた配合と砂を用いた配合とでは密度が大きく異なるため，ここでは供試体の質量あたりに換算した吸水率と，単位体積あたりの吸水量の両者を表示した。

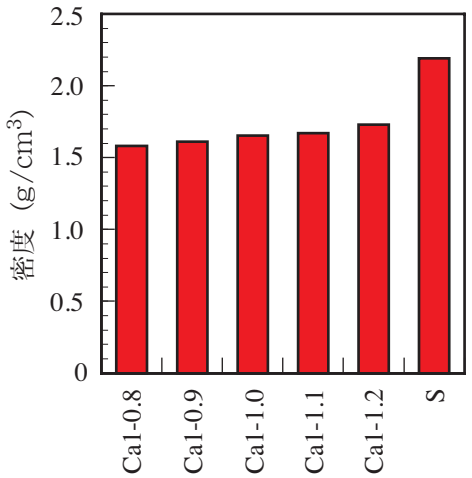
木炭粉を用いたモルタルは吸水量が極めて大きく，絶乾質量に対する吸水率は50%以上となり，砂を用いた通常のモルタルの5倍近かった。また単位体積あたりの吸水量も木炭粉を用いたモルタルは砂を用いたモルタルの3倍弱となった。セメントペースト分が多孔質になっている可能性もあるが，セメントペースト中にあっても，木炭粉の多孔性が保持され，その木炭粉が大量に吸水したためであると考えられる。

なお，ここで得られた吸水率は**図−2**に示した含水率と比較して極めて大きいが，これは気体である水蒸気が木炭粉中の細孔の内壁に吸着される吸湿と，内壁が全て水で満たされる吸水とでは，メカニズムが異なるためであると考えられる。

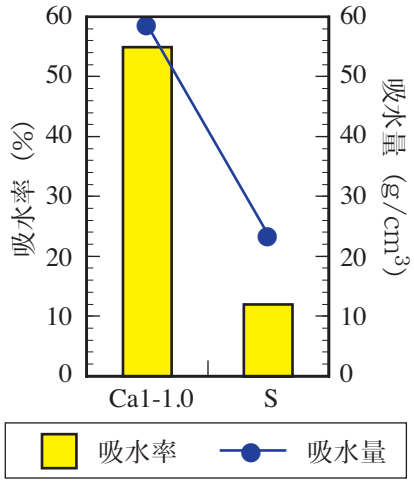
また，各配合の供試体の絶乾密度は，配合Sで1.95g/cm³であったのに対し，Ca1−1.0では1.07g/cm³と極めて小さかった。



図−2　温湿度と木炭粉含水率の推移



図−3　モルタル密度（材齢７日）



図−4　モルタル吸水率（材齢７日）

3.3　圧縮強度

図 -5 に最大寸法 1mm の木炭粉を用いたモルタルの圧縮強度を示す。

いずれの配合においても，材齢 7 日から 28 日にかけては強度の増進が見られるが，材齢 28 日から91日の間の強度の増進はほとんどないため，材齢 28 日の時点でセメントの水和がほぼ終了しているものと考えられる。

また材齢7日の時点では，セメント量が増大するとともに圧縮強度も大きくなっており，この時点では強度は水セメント比に依存していることが分かる。しかし材齢が28日，91日と進むにつれ，セメント量の大きな配合において，セメント量が増加に対する強度の増大が頭打ちになった。

例えば軽量骨材や低品質の骨材を用いた高強度コンクリートの場合には，骨材強度に依存してコンクリート強度の限界が存在するが，本研究の場合にも同様に，骨材として用いた木炭粉の強度等の物理的性質により，モルタルの強度増進が制限されたものと考えられる。

AE減水剤の使用の有無が圧縮強度に与える影響について，**図 -6** に示す。

材齢 7 日の時点では，AE 減水剤の使用により強度が増加した配合と減少した配合があるため，AE減水剤が圧縮強度に与える影響は明らかではない。しかし，AE 減水剤を用いた配合は材齢 7 日から 28 日にかけての強度増進が小さく，材齢28日の時点ではいずれのセメント量の配合においても，AE 減水剤を用いない配合の方が圧縮強度が大きかった。

本研究で用いた配合のうち木炭粉を用いたものは，練混ぜ時に水を添加せず，セメントの水和は木炭粉に吸収されていた水のみによる。したがってワーカビリティーが極めて小さく，打設作業はテーブルバイブレーター上に型枠を設置し，モルタルを型枠に投入した後に，径の大きな金属棒を用いて手で圧力を加えながら振動締固めを行なったが，AE 減水剤を使用した配合では若干ワーカビリティーが改善され，この打設作業が容易であった。しかし，AE 減水剤を使用しない配合では，材齢の経過とともに徐々に木炭粉の細孔中の水が放出されてセメントの水和が進行するのに対し，AE 減水剤を用いた場合には練り混ぜ直後においてセメント粒子が高分散状態となり水和が促進されたため，長期強度の増進が見られなかったものと考えられる。

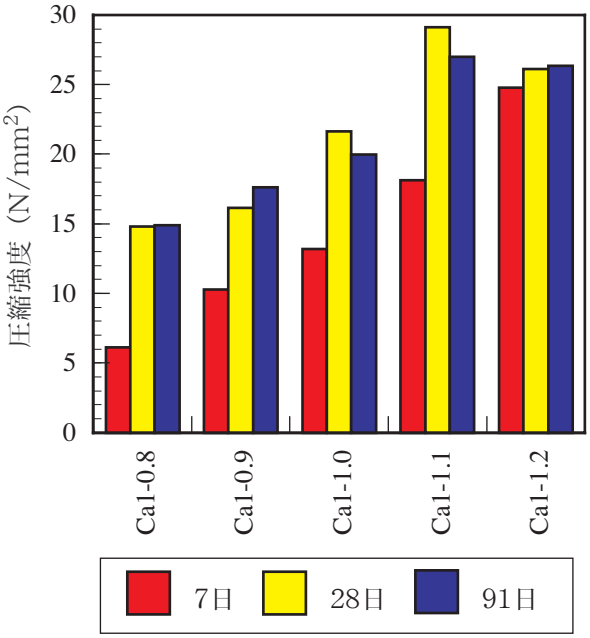


図 -5　圧縮強度試験結果

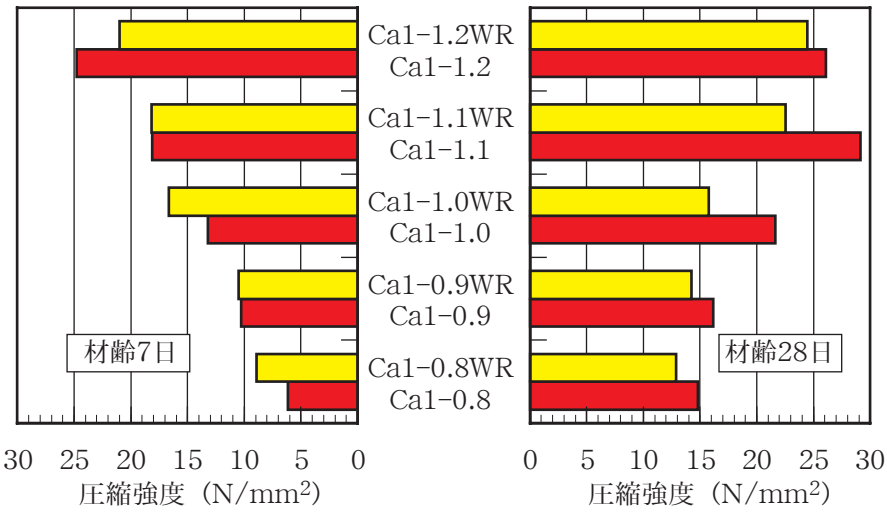


図 -6　AE 減水剤が圧縮強度に与える影響

図−7に最大寸法1mmの木炭粉を用いたCa1−1.0と，同じく110mmのものを用いたCa110−1.0の材齢7日での圧縮強度の比較を示す。図から明らかなように，細かい粒径の木炭粉を用いたCa110−1.0の方が圧縮強度が小さかった。

本研究で用いた木炭粉は，粉砕後，ふるい分けにより粒度調整を行っている。したがって，破砕強度が小さい部分ほど細かい粒径に粉砕されている可能性があり，そのような木炭粉を用いたCa110−1.0の圧縮強度が小さくなったものと考えられる。

図−8に木炭分を用いた配合のうちの基本配合Ca1−1.0と砂を骨材として用いた配合Sの，材齢7日と28日における圧縮強度の比較を示す。

実験概要で述べたように，配合Sは木炭粉を用いた基本配合Ca1−1.0と圧縮強度が同程度となるように配合設計を行った配合であるが，木炭粉を用いた配合の圧縮強度が小さいために，これと同程度の強度を有したモルタルを砂を用いて得るのが困難であり，実際には配合Sの圧縮強度は配合Ca1−1.0の2から3割程度大きな値となった。

しかし圧縮強度をそれぞれの配合のモルタルの密度で除した比強度で比較を行うと，木炭粉を用いたモルタルの密度が小さいために，骨材種類による差は小さくなった。したがって，木炭粉を用いたモルタルは強度が小さいために，構造部材として用いることには不向きな面もあるが，非構造部材として用いるのであれば，自重のみを支えることができればよいために，建材として使用できる可能性もあるものと考えられる。

3.4　モルタルの吸放湿特性

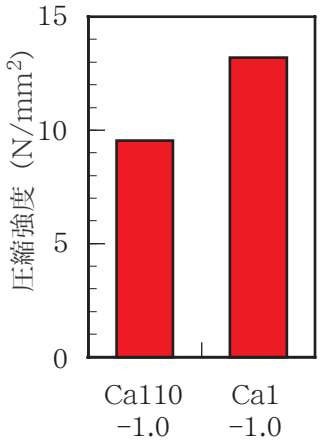
図−9に基本配合Ca1−1.0，および配合Ca110−1.0とSにおける試験期間96時間までの吸放湿量の推移を示す。ここでは栂木材の吸放湿特性も測定した。また**図−10**には最大寸法1mmの木炭粉を用いたモルタルの吸湿量の推移を示す。

図−9から明らかなように，木炭粉を用いた配合はいずれも，砂を骨材として用いた通常のモルタルよりも吸湿量が大きいという結果となり，環境中の湿度変化に対して木材と同等の追従性を有することが明らかとなった。また，最大寸法が1mmの木炭粉を用いた配合の方が，110μmのものを用いた場合よりも吸湿量が大きくなった。

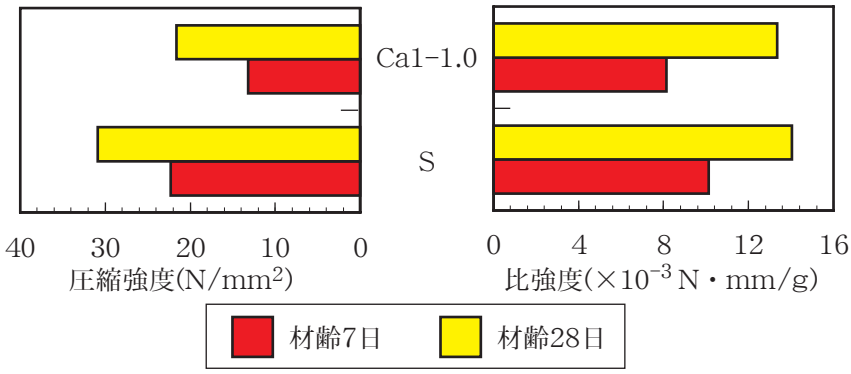
図−11にBET法により測定したモルタルの比表面積を示すが，木炭粉を用いたいずれのモルタルも，砂を用いたものよりも比表面積が大きい。また，最大寸法が1mmの木炭粉を用いた配合の方が，110μmのものを用いた配合よりも比表面積は大きかった。したがって，上記のような各配合のモルタルの吸湿特性の差は，比表面積の差に起因すると考えられる。

また，セメントペースト中にあっても，木炭粉の細孔はセメント水和物の析出等によって閉塞することなく，環境中の水蒸気を吸収できる状態にあると考えられる。

図−10に示すように，セメント水比が小さな配合ほど，吸湿量が大きい傾向にあった。単位体積あたりの木炭粉量が配合により若干異なることも結果に影響を与えた可能性があるものの，硬化セ



図−7　木炭粉径が圧縮強度に与える影響



図−8　モルタルの比強度

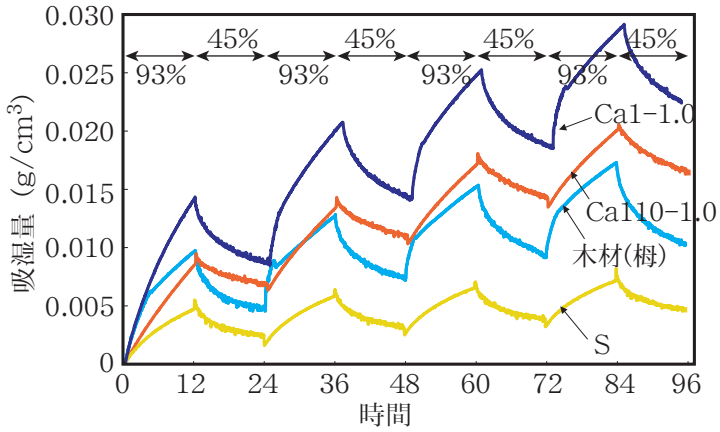


図-9　吸放湿過程（その1）

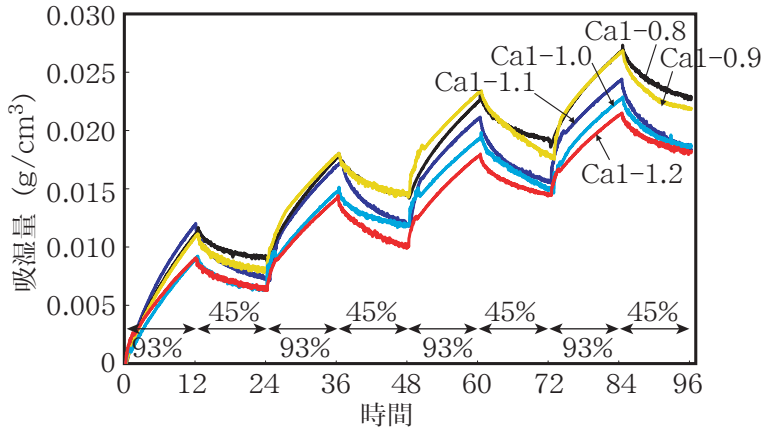


図-10　吸放湿過程（その2）

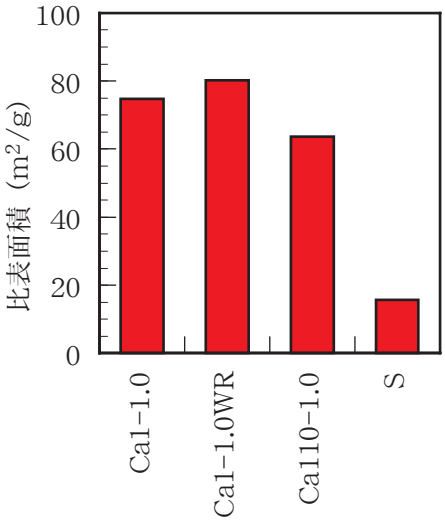


図-11　BET法による比表面積

メントペーストの組織の粗密が結果に影響を与え，セメント量の小さな配合ほど吸湿性能に優れる結果となったと考えられる。ただし前述のように，セメント量の少ない配合は強度が小さいため，適切なセメント量を選定するに当たっては，吸湿性能と強度の両者を勘案する必要がある。

また，本試験を行った96時間以内では，いずれの供試体も吸放湿過程が平衡状態に達しなかった。さらに本研究では供試体を絶乾状態とした後に1日サイクルの乾湿繰返し環境下に置いたが，他の試験条件では異なる結果が得られる可能性もあり，今後検討を行なう必要があるものと考えられる。

4.　まとめ

本研究では木炭微粉末を混入したセメント系材料の建材としての有用性を明らかにすることを目的として，圧縮強度および吸放湿特性について検討を行った。

その結果，以下のような点が明らかとなった。

(1) 木炭粉を用いたモルタルは吸水率が50%以上と極めて大きかった。

(2) セメント水比が大きな配合ほど高い圧縮強度を得ることができたが，そのような配合は長期材齢での強度の伸びが小さい。

(3) AE減水剤の使用によりワーカビリティーは向上したが，圧縮強度は低下した。

(4) 最大寸法が110μmの木炭粉を用いた場合には，1mmのものを用いた場合よりも圧縮強度が若干小さい。

(5) 本研究で試験を行った条件下では，木炭粉を用いたモルタルは通常のモルタル，あるいは木材よりも吸湿特性に優れ，またセメント量が小さな配合ほど吸湿量が大きかった。

謝辞：本研究の実施にあたり，中部大学工学部建築学科の今井秀祥君，小川浩史君，同じく土木工学科の御宿孝之君，山口晃司君の協力を得た。また本研究は株式会社ピュアタックからの委託を受けて実施されたものである。ここに記して謝意を表する。