

論文 マグネシウムセメントとまさ土, 竹チップを混合した吹付け用モルタルの強度および乾燥収縮

高山俊一*1・山根宜薫*2・成富 勝*3

要旨:マグネシウムセメントにまさ土, 竹チップを混合したマグネシウムモルタルの強度試験および乾燥収縮試験を行った。その結果, 次のことが分かった。(1)打設直後のマグネシウムモルタルの含水比は, マグネシウムセメント量が多いほど小さくなった。(2) マグネシウムモルタルの強度は, マグネシウムセメントおよび竹チップの各混合量が多いほど大きくなった。(3)養生条件の違いに因るマグネシウムモルタルの強度の相違は, 湿潤養生の場合に比べ, 気乾養生の場合が大きくなった。(4) マグネシウムモルタルの乾燥収縮ひずみは $300\sim500\mu$ であり, 普通セメント使用モルタルの場合の約 $1/3$ であり, 著しく小さくなった。

キーワード: マグネシウムセメント, 竹チップ, 吹付け, のり面保護材, 乾燥収縮

1. まえがき

マグネシウムセメントは海水から抽出, 製造されたもので, 苦土肥料として認可されている。そのため, マグネシウムセメントは植物を含む全ての自然環境に無害な物質である。マグネシウムセメントモルタル(以下, マグネシウムモルタルと略す)は吹付け後の初期には, 雨水によるのり面の浸食防止, さらに防草用ののり面保護材として開発されたものである。長期経過後, 最終的には肥料として植物に吸収される。マグネシウムモルタルはマグネシウムセメントを固化材とし, まさ土と竹チップを混合し, のり面吹付け用ののり面保護材として利用するものである。実験に使用した竹チップは, 孟宗竹を破砕, 加工し, 吹き付け表面のひびわれ防止として使用するものである。孟宗竹は春の筍として珍重されるが, 繁茂力が旺盛のため, 我が国固有の広葉樹の生育地帯が狭められつつある。そのため, 孟宗竹の栽培面積を縮小するため伐採し, 加工して再利用するものである。マグネシウムモルタルの配合, 養生条件を変えた供試体の曲げ強度および圧縮強度を調べた。さらに, マグネシウムモルタルの乾燥収縮試験を実施した。マグネシウムモルタルの諸性質を検討するため, 普通ポルトランドセメントを使用したモルタルについて同様の実験を行った。

2. 目的および目標

実験の目的は, マグネシウムセメントを使用し, のり面保護材として吹付けを実施する場合の適当な配合を求めることである。そのための具体的な目標は, 次のとおりである。

(1) マグネシウムセメントとまさ土の 2 者を混合したモルタルの圧縮強度が, 2N/mm^2 および 3N/mm^2 を得

る配合を求める。

(2) マグネシウムセメントとまさ土, 竹チップの 3 者を混合したモルタルの圧縮強度が, 2N/mm^2 および 3N/mm^2 を得る配合を求める。

(3) マグネシウムモルタルの乾燥収縮ひずみの性状ならびに大きさを測定する。マグネシウムモルタルの収縮ひずみは普通ポルトランドセメントモルタル(以下, 普通セメントモルタルと略す)の場合に比較してどの程度かを調べる。

3. 実験概要

3.1 使用材料

実験に使用したマグネシウムセメント, まさ土および竹チップの物理的性質を表-1 に示す。マグネシウムセメントは微粉末で, 白色である。マグネシウムセメントの粉末 X 線回析による分析結果, 未水和のセメントの主成分は酸化マグネシウム(MgO)が 95%以上であり, わずかに硫酸カルシウム(CaSO_4)が含まれる。水和物は水酸化マグネシウム($\text{Mg}(\text{OH})_2$)が大部分であった。まさ土は $0.075\sim0.425\text{mm}$ の細粒分が 34%, $0.005\sim0.075\text{mm}$ のシルト分が約 20%および 0.005mm 以下の粘土分が約 8%であった。まさ土の均等係数 U_c は 40.2, 曲率係数

表-1 材料の物理的性質

材料名	密度、含水比
マグネシウムセメント	密度 3.46 g/cm^3 主成分 $\text{MgO}95\%$ 以上
まさ土	密度 2.63 g/cm^3 , 含水比 1.4%
竹チップ	密度 0.80 g/cm^3 , 吸水量 18.3%

* 1 九州共立大学 工学部環境土木工学科 工博(正会員)

* 2 成長建設(株)

* 3 九州共立大学 工学部環境サイエンス学科 工博

Uc'が1.73であった。したがって、まさ土は小さい粒径が多い土である。まさ土の含水比は1.4%である。竹チップは長さ2~5mm、幅0.05~0.3mmの微細な短繊維状で「しゅろの毛」のようにパサパサした状態である。竹チップの密度は0.80g/cm³、吸水量は18.3%である¹⁾。

3.2 配合ならびに供試体の作製

表-2に配合、供試体寸法および実験項目を示す。実験は室内(ミキサーを使用)で行った。マグネシウムセメント混合量はまさ土に対する比率(質量)である。マグネシウムセメント混合量は10%、13%および16%の3種類とした。竹チップはモルタル容積に対して外割りとして計算した。硬化材、まさ土および竹チップを混合、攪拌し、水を添加して強制練りミキサーで練り混ぜ、モルタルを作製した。モルタルはばさばさの状態のため、突き固めランマーおよび木づちで締固めを行った。強度試験は曲げ強度および圧縮強度を行った。同表に示す様に供試体は円柱(φ10×12.7cm)および角柱(4×4×16cm, 10×10×40cm)を作製した。養生は恒温室(20±2℃)で、気乾・湿潤の両養生で行った。乾燥収縮の測定は、角柱(4×4×16cm, 10×10×40cm)での埋め込みゲージ(KM-100B)および表面に貼付したストレングージ(PL-60, PL-20)を利用して行った。乾燥収縮試験に用いた配合は、表-2の下方に示す様に各セメント混合量は13%とした。単位水量は385g/lおよび420g/lの2種類とし、竹チップは80gおよび160gとした。マグネシウムモルタルは3種類の配合とした。マグネシウムモルタルの諸性質と比較するため、普通セメントモルタル(セメント混合量13%)を使用した供試体も作製した。また、マグネシウムおよび普通の両セメントモルタルの性質を比較するため、単位水量は350~420g/lと同程度とした。

表-2 配合ならびに実験項目

種類	混合量 (%)	単位量 (g/l)		竹チップ (g)	供試体の種類、寸法	実験項目
		水量	まさ土			
マグネシウムセメント	10	350	1589	0 80 160	4×4×16 Φ10×12.7 10×10×40	曲げ 圧縮 強度
	13		1556			
	16		1524			
普通セメント	10	80				
13						
16						
マグネシウム	13	385	1492	80		乾燥 収縮
		420	1308	160		
普通セメント	13	385	1459	80		

4. 結果および考察

4.1 モルタルの打設直後の含水比

図-1はモルタルの打設直後の含水比を示す。水量は350g/l(表-2)と一定である。含水比は供試体作製時に試料採取し、110℃の乾燥器に投入して次の日に乾燥質量を測定して求めた。同図によると、マグネシウムモルタルの含水比は、セメントの混合比が大きいほど減少傾向を示している。さらに、竹チップの混合量が多いほど含水比は大きくなっている。マグネシウムセメントの水和反応は著しく速く、しかもセメント量が多い16%の配合では、水が水酸化マグネシウム(Mg(OH)₂)の結合水として多く使用されるため、含水比が小さくなったものと考ええる。一方、普通セメントモルタルの含水比は18~19%となり、マグネシウムモルタルのそれに比べて2~3%高くなった。普通セメントの水和反応は比較的緩やかに進行するため、マグネシウムセメントの場合に比べて水と反応に用いられた水量が多く残ったため、含水比が若干大きくなったものと考ええる。

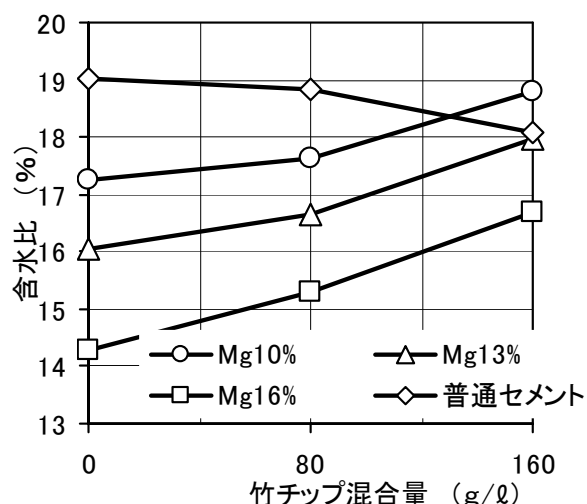


図-1 打設時のモルタルの含水比

4.2 強度と竹チップ混合量

図-2はφ10×12.7cmの供試体を使用した圧縮強度と竹チップ混合量の関係を示す。同図によると、気乾養生での強度は同一材齢で湿潤養生のそれに比べて大きくなっている。材齢が7日から28日と増加しても湿潤養生での強度の伸びはほとんど認められない。他方、気乾養生での強度は、7日から28日で約0.7~1.0N/mm²増大している²⁾。これは気乾状態の進行によって、まさ土自体の固結が強くなっているため、モルタルの強度が増大したものと考ええる。逆に、湿潤状態での供試体は、水酸化マグネシウムの強度の伸びは若干生じる可能性があるが、まさ土自体は膨潤作用によってぜい弱になっていることが考えられるため、モルタルとしての強度の伸びがほとんど認められなかったものと考ええる。竹チップ

混合量が多いほど、強度は増加傾向を示している。特に、気乾状態の圧縮強度は、竹チップ量が 0g/l の場合が 1.5N/mm² に達しており、竹チップ量 80g/l の場合には約 2 倍となり、さらに竹チップ量 160g/l の場合には約 2.3 倍の 3.4N/mm² にも達している。これは竹チップは乾燥しているため、モルタル中の水を竹チップ自体が吸収することが考えられる(図-1)。そのためまき土の水の吸収量が相対的に減少したことで、まき土自体の強度が増大したことに因るものと考ええる。

図-3 は 10×10×40cm 供試体による曲げ強度と竹チップ量の関係を示す。曲げ強度は図-2 の圧縮強度の場合と類似した傾向を示している。すなわち、湿潤養生での曲げ強度は材齢が 28 日になっても材齢 7 日の場合とほぼ同程度に過ぎない。他方、気乾養生の場合の曲げ強度は、材齢 7 日から 28 日で 0.3~0.4N/mm² の大きな伸びを示した。このことから、まき土を多量に含んだモルタルの養生では、気乾養生の場合が強度の大きな伸びが期待できるものと考ええる。

4.3 マグネシウムセメントの混合量と強度

図-4 および図-5 は 4×4×16cm 供試体によるマグ

ネシウムセメント混合量を変えた場合の曲げ強度および圧縮強度を示す。図-4 では湿潤養生の場合の曲げ強度に比べ、気乾養生での強度が全ての配合で大きくなった。気乾養生での曲げ強度は、マグネシウムセメント量が 13%で 1.2~2.4N/mm²、16%で 1.7~2.7N/mm² と湿潤養生の場合に比べて 0.5~1.0N/mm² も大きくなっている。また、図-2 および図-3 で示されている事と同様に、気乾養生では竹チップ混合量が多いほど曲げ強度も大きくなっていることが分かる。図-5 の圧縮強度は図-4 の曲げ強度の場合とほぼ同様な傾向を示している。気乾養生での圧縮強度はマグネシウムセメント混合量が多いほど大きく比例関係を示している。目標としている圧縮強度 2 N/mm² および 3 N/mm² が得られる場合は、気乾養生でマグネシウムセメント混合量 13%(△印)および 10%(○印)では竹チップ混合量が 80g/l 以上である。

4.4 マグネシウムモルタルおよび普通セメンモルタルの両強度の比較

図-6 および図-7 はマグネシウムモルタルおよび普通ポルトモルタルの両強度とセメント混合量の関係を

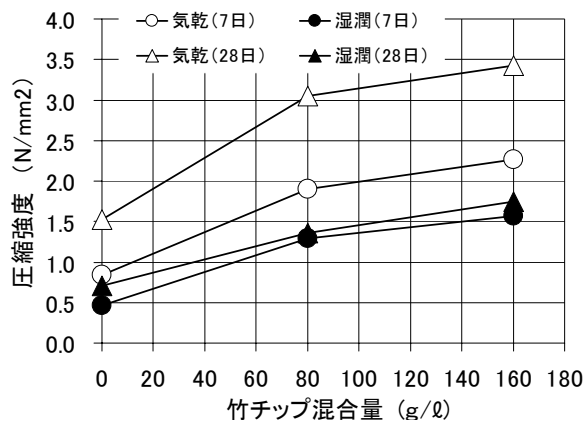


図-2 竹チップ混合量と圧縮強度
(Mg13%混合 Φ10×12.7 cm)

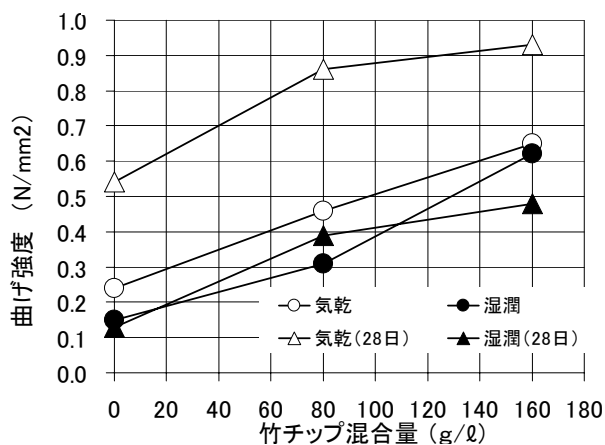


図-3 竹チップ混合量と曲げ強度
(Mg13%混合 10×10×40 cm)

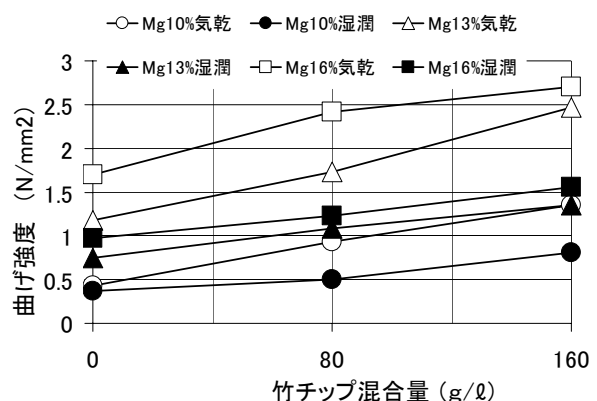


図-4 マグネシウム混合量と曲げ強度
(4×4×16cm 28日)

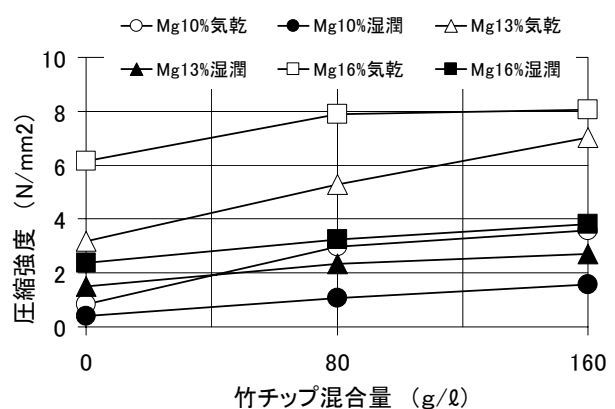


図-5 マグネシウム混合量と圧縮強度
(4×4×16 cm 28日)

示す。図-6 で曲げ強度が大きいものは、マグネシウムモルタルの 28 日で気乾養生、普通セメントモルタルの 28 日で気乾および湿潤の両養生の場合である。普通セメントモルタルでは、マグネシウムモルタルの場合と最も異なる点は湿潤養生の強度である。図-2～図-5 のマグネシウムモルタルの強度は、湿潤養生での強度に比べ、気乾養生での強度が明らかに大きくなっていた。しかしながら、図-6 では普通セメントモルタルの湿潤養生で 28 日の強度は、セメント混合比 10%および 13%の場合に最大値を示し、16%で約 2N/mm^2 となり、マグネシウムモルタルでの気乾養生の場合と同程度の強度を示した。以上のように、材齢 28 日で湿潤養生の場合に高い曲げ強度を示した理由としては、セメントの化学成分が大きく影響しているものと考ええる。普通セメントの水和反応は、 CaO および SiO_2 の化合物が水の存在のもとで緩やかに生じる。そのため普通セメントでは、気乾養生ではなく湿潤養生の場合での強度が最大値を示したと言える。また、気乾養生ではまさ土中に水が多く含まれているため、普通セメントの水和反応が順調に進行することが可能になり、セメント混合量が 10%(▲印)で 1.1N/mm^2 、13%で 1.8N/mm^2 および 16%で 2.0N/mm^2

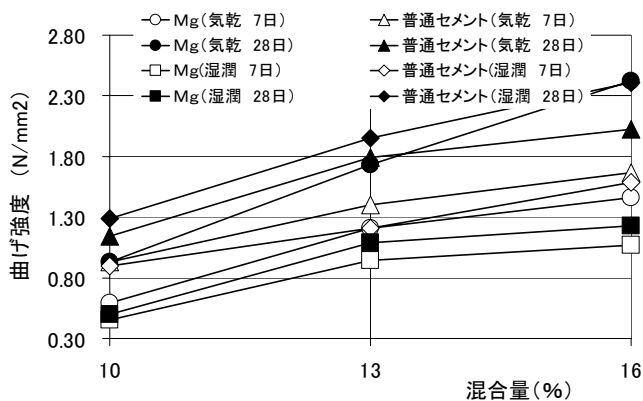


図-6 養生条件による曲げ強度
(竹チップ 80 混合 $4 \times 4 \times 16\text{cm}$)

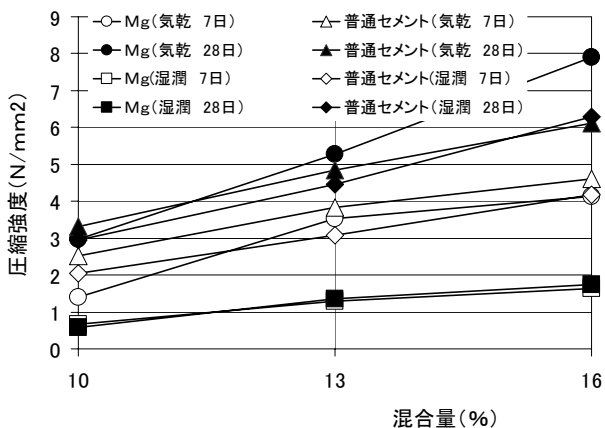


図-7 養生条件による圧縮強度
(竹チップ 80 混合 $4 \times 4 \times 16\text{cm}$)

の大きな強度を示したものとする。

4.5 強度に影響する諸要因

図-8 および図-9 は気乾養生と湿潤養生の違いによる強度の関係を示す。図-8 および図-9 は $4 \times 4 \times 16\text{cm}$ 供試体による曲げ強度および圧縮強度を示す。両図とも測定値は 45 度の斜線より上方にあり、同一配合における強度は気乾養生の場合が湿潤養生のそれに比べて大きくなっている。両図の回帰直線の相関係数は両者とも $R=0.98$ であり、両養生での強度の相関が極めて高いことが分かる。このことから、両養生による曲げおよび圧縮の両強度とも、信頼できる値であると考ええる。湿潤養生での曲げ強度が 1.0N/mm^2 とすると、回帰直線より気乾養生では 1.7N/mm^2 となる。図-9 の圧縮強度は湿潤養生の場合が 2.0N/mm^2 とすると、回帰直線から気乾養生では 4.7N/mm^2 となる。

図-10 は気乾養生による供試体寸法の違いによる曲げ強度の関係を示す。測定値は 45 度の斜線より下方にあり、寸法が小さい供試体 ($4 \times 4 \times 16\text{cm}$) による強度の方が大きくなっている。回帰直線の相関係数は $R=0.92$ であり、著しく高い相関を示している。x 軸の曲げ強度が 2N/mm^2 とすると、縦軸の強度は約 0.96N/mm^2 であった。このことから、小さい供試体 ($4 \times 4 \times 16\text{cm}$) の強度は、

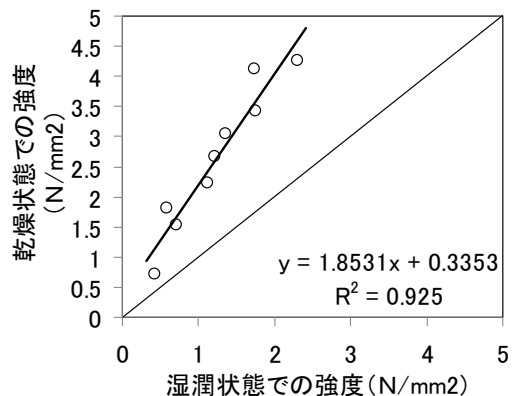


図-8 養生条件による曲げ強度の相違
(材齢 28 日 $10 \times 10 \times 40\text{cm}$)

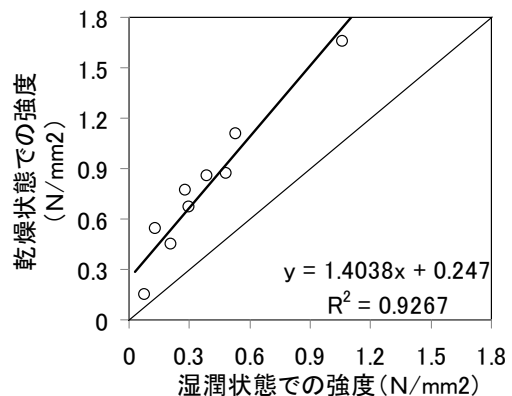


図-9 養生条件による圧縮強度の相違
(材齢 28 日 $\Phi 10 \times 12.7\text{cm}$)

大きな供試体の強度の約2倍となっている。一般に小さい供試体では強度が大きく成りやすいが、本研究でも同様な結果になった。両供試体の比表面積(供試体の表面積(cm^2)/供試体の体積(cm^3))を比べると、小供試体($4 \times 4 \times 16\text{cm}$)は $0.875 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$ 、大供試体($10 \times 10 \times 40\text{cm}$)が $0.35 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$ であり、小供試体での比表面積が2.5倍であり、乾燥しやすいことを示している。したがってマグネシウムモルタルの小さい供試体では、大きい供試体に比べて乾燥が早期に供試体内部近くまで達していることが考えられる。そのため、マグネシウムセメント硬化体ならびにまさ土の固結が強度に大きく影響しているものとする。

5. 乾燥収縮ひずみに関する検討

図-11は埋込みゲージによる乾燥収縮ひずみ($10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の供試体)の変化を示す。同図によると、普通セメントモルタルの乾燥収縮ひずみは測定182日で約 1600μ と極めて大きい。マグネシウムモルタルの収縮ひずみは $300 \sim 500 \mu$ に過ぎない。マグネシウムモルタルの収縮ひずみが $300 \sim 500 \mu$ の極めて小さいことに驚かされる。しかも収縮ひずみは約80日以降でほとんど変化していない。マグネシウムモルタルの収縮ひずみは、比較的早期に一定に達するものと推察される。図中の四角印($\square$)の測定は、三角印($\triangle$)に比べて水量を 35 g/l 増加した場合であるが、収縮ひずみはほぼ同程度である。これは混合した竹チップが増加した水量を吸収したため、収縮ひずみに大きな違いがみられなかったものと考えられる。普通セメントモルタルの収縮ひずみは経過日数がわずかに30日で、約 1200μ にも達している。これは普通セメントの水和反応とまさ土自体の乾燥によって収縮ひずみが 1200μ と大きくなったものと考えられる。

図-12は $4 \times 4 \times 16\text{cm}$ の小さい供試体に貼付したストレングージによる乾燥収縮ひずみの変化を示す。同図によると、マグネシウムモルタルの収縮ひずみは経過日数約10日で $200 \sim 450 \mu$ のほぼ急激なひずみ低下を生じている。マグネシウムモルタルは35~40日間ほどでほぼ一定の収縮ひずみとなっている。普通セメントモルタルの収縮ひずみは10日で約 1000μ を生じ、以後80日間ほどで約 200μ のひずみを生じている。マグネシウムモルタルの収縮ひずみは、普通セメントモルタルのその1/3~1/4であり、著しく小さいと言える。

図-13はマグネシウムモルタルでの供試体寸法と収縮ひずみ(ストレングージによる測定)の関係を示す。同図によると、大供試体($10 \times 10 \times 40\text{cm}$)の収縮ひずみは100日で約 640μ であるが、小供試体($4 \times 4 \times 16\text{cm}$)の収縮ひずみは約 400μ となっている。小供試体の場合には約30日で 400μ に達した、以後収縮ひずみがほぼ一定を示し

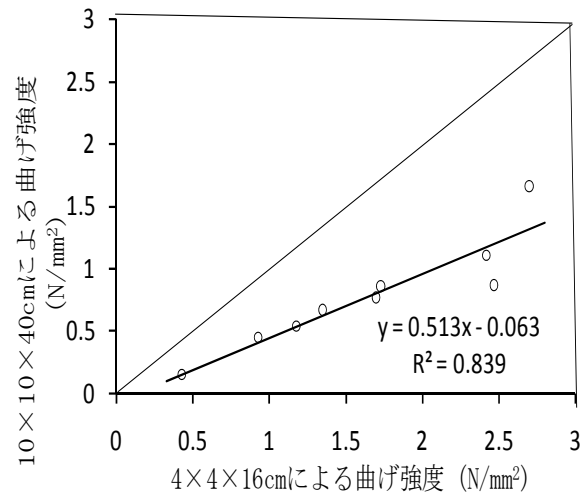


図-10 供試体寸法による曲げ強度の相違
(材齢28日 気乾養生)

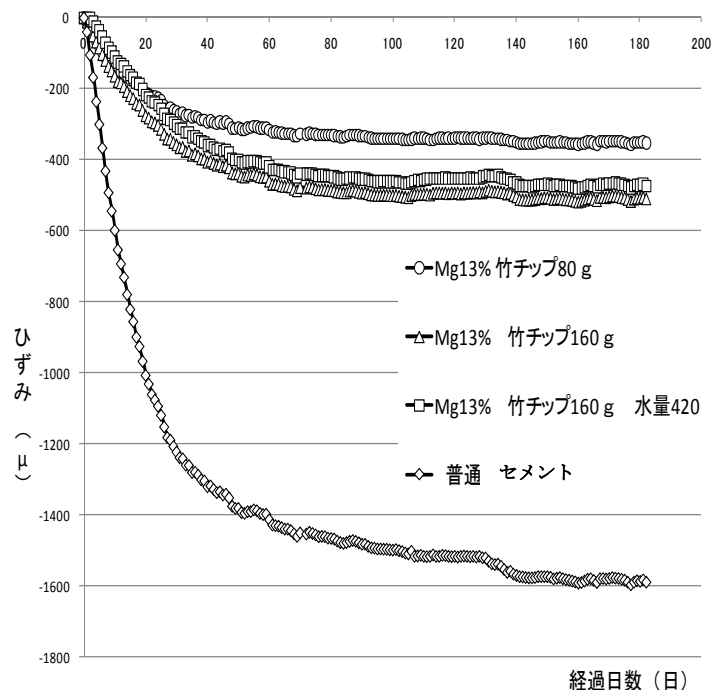


図-11 埋込みゲージによる乾燥収縮ひずみ

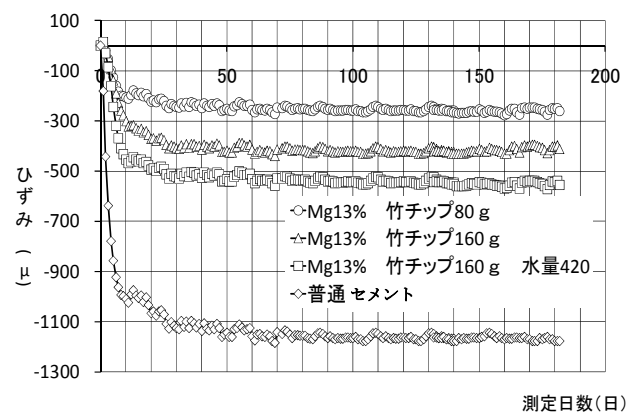


図-12 ストレングージによる乾燥収縮ひずみ
($4 \times 4 \times 16\text{cm}$ 供試体)

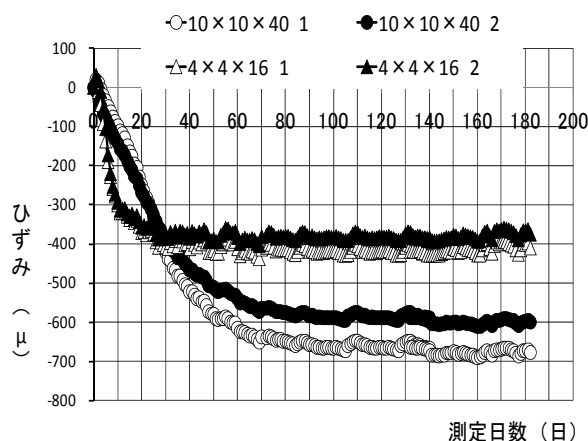


図-13 供試体寸法による乾燥収縮ひずみの違い
(マグネシウム13% 竹チップ160g)

ていることが顕著である。他方、大供試体による収縮ひずみはほぼ100日で一定ひずみに落ち着いたものと考えられる。これは供試体の乾燥面積(乾燥する面積/供試体の体積×100)比が、小供試体(4×4×16cm)で75%、断面

10×10cmの供試体で30%と小供試体での乾燥面積割合が2.5倍と著しく大きかったため、供試体の乾燥が速かったものと考ええる。当初、マグネシウムモルタルでは膨張することも予想されたが、測定初期の1～3日に膨張が若干測定された。図-14はマグネシウムモルタルでの埋込みゲージおよびストレングージによる両者の収縮ひずみ量を比べるために示した。埋込みゲージとストレングージの両収縮ひずみが同一程度であれば、測定された値(点)は45度の斜線上に有ることになるが、実際には点は斜線より下方に示されている。これは埋込みゲージによる収縮ひずみはストレングージでの測定値に比べて約125μ小さくなっているためである。これは供試体中に粗骨材を含まないモルタルであるため、乾燥収縮が供試体表面から徐々に内部へ進んでいるためだと考えられる。

6. まとめ

本実験で得られたことをまとめて記す。

- (1) モルタルの含水比から、マグネシウムセメントの水和反応は普通セメントのそれに比べて短時間に大部分が終了したものと推察される。
- (2) まさ土を含むマグネシウムモルタルの養生は、気乾養生を行えば強度が大きくなることが分かった。これはモルタル中の約60%を占めるまさ土自体が乾燥により固化するためであると考ええる。他方、普通セ

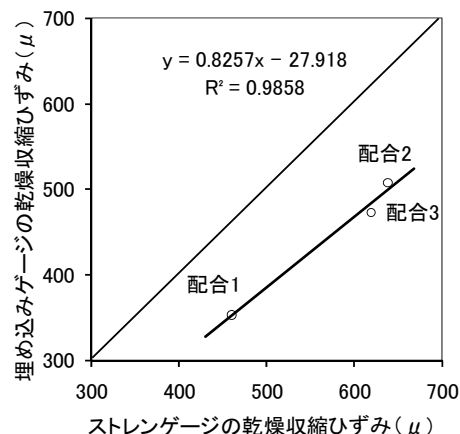


図-14 埋込みゲージおよびストレングージによる乾燥収縮の違い (182日)

- メントモルタルでは、主成分がCaO, SiO₂であった
- (3) め水の存在のもとに水和反応が進行して強度発現を発揮するため、湿潤養生での強度が、気乾養生のそれと同程度まで大きくなった。
 - (4) 圧縮強度が2N/mm²および3N/mm²が得られる配合は、気乾養生でマグネシウムセメント混合量13%および10%では竹チップ混合量が80g/l以上である。
 - (5) マグネシウムモルタルの乾燥収縮は約500μで、普通セメントモルタルの場合の約1/3に過ぎず、著しく小さい。またマグネシウムモルタルの乾燥収縮は約90日経過すれば、ほぼ収束に近いものになるものと考ええる。
 - (6) 小供試体(4×4×16cm)による乾燥収縮ひずみは、大供試体(10×10×40cm)のそれに比べ、収縮ひずみ曲線から判断して収縮ひずみが短期間で一定になるものと考ええる。

謝辞: 実験にご協力を戴いた日本乾溜工業(株)浜嶋博昭, 栄和建设(株)金沢勝利および(株)グリーン有機資材・杉本晃の3氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) 高山俊一, 成富勝, 波多将輝: 海水系マグネシウム土壌硬化材と竹チップを混合した固化体に関する基礎的研究, 第62回セメント技術大会講演要旨2008, pp.8~9, 2008.5
- 2) 高山俊一, 成富勝, 国澤洋平: マグネシウム土壌硬化材にまさ土, 竹チップを混合した固化体の強度, 土木学会第64回年次学術講演会講演概要集, 第5部門, V-341, pp.679~680, 2009.9