

論文 中空ガラスを用いた軽量・高強度モルタルに関する研究

寺崎 豊^{*1}・伊藤 幸広^{*2}・石川 達夫^{*3}・田中 健太^{*4}

要旨：本研究は、中空ガラスを混入した軽量・高強度モルタルの流動性、密度および強度特性について検討を行ったものである。結果として、中空ガラスはフライアッシュと同様に球形であるため、低水結合材比の配合に多量に混入した場合でも、練り混ぜが可能となり高い流動性が得られた。中空ガラスを体積で 47%混入し、密度 1.33 g/cm³、圧縮強度 94.6MPa という軽量・高強度モルタルを製造することができ、また、中空ガラスを体積で 57%混入し、密度 0.90g/cm³、圧縮強度 25.6MPa という超軽量モルタルを製造することができた。

キーワード：軽量、高強度、中空ガラス、モルタル

1. はじめに

近年、建築物の超高層化、高層住宅の増加、土木構造物の長大化および施工の合理化に伴い、コンクリートの軽量化と合わせ高強度化の要求がこれまでも増して高まっている。コンクリートの軽量化を図る方法としては、起泡剤等の使用によって多量の気泡を混入する方法や体積の 5 割以上を占める骨材に密度の小さいものを用いる方法がある。前者の場合は、気泡混入量の増加に伴う強度や弾性係数の低下率が大いこと、透水・透気性が大きくなることから、用途が ALC 製品、断熱材、充填モルタル等に限定されている。一般の構造部材やカーテンウォール等の軽量コンクリートには、軽量骨材が用いられており、最近では上記の要請に応えるため、高強度化、超軽量化を目的とした高性能軽量骨材の開発が盛んに行われている^{1), 2)}。

しかし、軽量骨材においても軽量と高強度という性質は相反するものであり、さらに軽量骨材を用いたコンクリートでは、骨材強度がコンクリート強度の支配的要因となることが多い。従って、軽量・高強度を同時に実現した事例

は見られず、コンクリート密度が 1.3 g/cm³ 以下となると 40MPa 以上の圧縮強度は得られず、また、70MPa 以上の圧縮強度のものでは、密度は 2.0 g/cm³ 以上となるのが現状である。

本研究は、自動車の部品やスポーツ用品等の軽量充填材として利用されている中空ガラスのうち高強度タイプのものに着目し、これをモルタルマトリックスの軽量化材として用いた超軽量・高強度コンクリートを開発することを目的として行ったものである。本報では、各種ペーストの配合に、中空ガラスを骨材として多量に混入したモルタルの流動性、密度および強度特性について述べるものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料

実験で使用した各材料の物理的性質は、表-1 に示す通りである。中空ガラスは、硼珪酸ガラスの微小中空球体であり、本実験では、密度が異なる (0.63g/cm³ および 0.75g/cm³) 2 種類の高強度タイプの中空ガラスを用いた。これらの中空ガラスの殻の厚みは 1.5~3.0μm 程度であり、

*1 佐賀大学 工学系研究科都市工学専攻 (正会員)

*2 佐賀大学助教授 理工学部都市工学科 工博 (正会員)

*3 日本建設技術(株)顧問 工修

*4 日本建設技術(株) 技術研究所研究開発室 工修

70MPa の静水圧中でも粒子の大部分が圧壊しないというものである。粒径範囲は 10～110 μm であり、平均粒径は約 40 μm である。粒子形状は写真-1 に示すように、ほぼ真球に近い形状、寸法である。実験では比較のために、粒子の形状、寸法が近いフライアッシュを使用しており、その粒径範囲は 1～270 μm であり、平均粒径は 29.7 μm である。

2.2 配合

実験は大きく 2 つに別けて行った。第 1 は、中空ガラスを混入したモルタルの流動性、密度、圧縮強度等の基礎的性質を調べることを目的とし、モルタル全体積に対する中空ガラスの体積混入率を 4 段階に変化させた配合および中空ガラスの体積混入率を一定とし水セメント比を 5 段階に変化させた配合について検討を行ったものである。それぞれの配合は、表-2 および表-3 に示す通りであり、使用した中空ガラスは、密度 0.63g/cm³ のものである。なお、表-2 におけるフライアッシュは、中空ガラスと同様に粒子形状が球形であり、ほぼ同等の粒径であることから、流動性、モルタル密度の比較を行うために用いたものである。

第 2 の実験としては、軽量・高強度および超軽量モルタルを製造するために、中空ガラスを多量に混入し、シリカフュームおよび高性能 AE 減水剤を併用した表-4 に示す 8 種類の配合について検討を行ったものである。なお、いずれの配合においても、シリカフュームのセメント置換率を 20%、高性能 AE 減水剤の添加率を結合材の 5.5%と一定とした。

2.3 供試体の作製方法

モルタルの練混ぜにはホバートミキサを用い、2 分間でペーストを先練りした後、中空ガラスを 3 分の 1 ずつ投入し各 1 分間、計 3 分間練り混ぜる方法とした。中空ガラスを混入したモルタルの基礎的性質を調べる実験では、4×4×16cm の 3 連型枠を用い、締固めには突き棒を用いた。また、軽量・高強度および超軽量モルタルの製造に関する実験では、Φ5×10cm の型枠

表-1 使用材料の特性

材料	特性
セメント	T社製、普通ポルトランドセメント 密度:3.16g/cm ³ , 比表面積:3320cm ² /g
シリカフューム	E社製、密度:2.20g/cm ³
中空ガラス	T社製、密度:0.63g/cm ³ , 0.75g/cm ³ 平均粒径:約40 μm
フライアッシュ	K社製、密度:2.34g/cm ³ , 平均粒径:29.7 μm
混和剤	T社製、ポリカルボン酸塩系高性能 AE 減水剤, 密度:1.07g/cm ³ , (固形分30%)

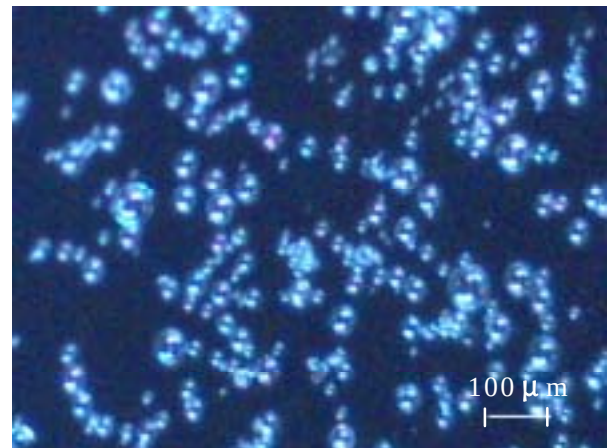


写真-1 中空ガラスの外観

表-2 配合 1

水セメント比 W/C (wt%)	中空ガラス/ フライアッシュ体積混入率 (vol%)	単位量 (kg/m ³)			
		水	セメント	中空ガラス	フライアッシュ
50	0	612	1224	-	-
	20	490	980	126	-
	30	429	857	189	-
	40	368	735	252	-
	20	490	980	-	468
	30	429	857	-	702
	40	367	735	-	936

表-3 配合 2

水セメント比 W/C (wt%)	中空ガラス 体積混入率 (vol%)	単位量 (kg/m ³)		
		水	セメント	中空ガラス
40	30	391	977	189
45		411	913	189
50		429	857	189
55		444	808	189
60		458	764	189

を用い、テーブルバイブレーター上で突き棒を用いて締固めを行った。

2.4 養生方法

養生方法としては、打設から 1 日間恒温恒湿室内で養生を行った後、脱型し 20℃の水中養生

表-4 軽量・高強度および超軽量モルタルの配合

種類	水結合材比 W/ B (wt%)	中空ガラス 体積混入率 (vol%)	中空ガラス の密度 (g/cm ³)	単位量 (k g/m ³)						高性能A E 減水剤 (B×wt%)
				水:W		結合材:B		高性能A E 減水剤中の 固形分	中空 ガラス	
				水道水	高性能A E 減水剤中の 水分	セメント	シリカ フューム			
軽量・ 高強度 タイプ	30	45	0.75	219	32.3	670	168	13.8	338	5.5
		47		211	31.1	646	161	13.3	353	
		49		203	29.9	622	155	12.8	368	
		45	0.63	219	32.3	670	168	13.8	284	
		47		211	31.1	646	161	13.3	296	
		49		203	29.9	621	155	12.8	309	
超軽量 タイプ	40	47	0.63	253	27.0	561	140	11.6	296	5.5
		57		206	21.9	455	114	9.4	359	

を27日間行ったもの（水中養生）と打設から1日間恒温恒湿室内で養生を行った後、脱型し60℃の温水中で3日間養生を行ったもの（温水養生）とを比較した。なお、軽量・高強度および超軽量モルタルの製造に関する実験では、温水養生のみとした。

2.5 試験方法

フロー試験および4×4×16cm 供試体による圧縮強度試験は、JIS R 5201 に準じて行った。Φ5×10cm 供試体による圧縮強度試験は、両端を研磨して行った。モルタル密度の測定においては、表面積に対する供試体の質量が小さく、表面に付着した水分の変動が大きな誤差要因となるため、養生終了後、60℃の乾燥機中で3時間乾燥させた後に質量を測定し密度を求めた。なお、この方法により求めた密度と養生直後の密度の差は0.01g/cm³程度である。

3. 実験結果および考察

3.1 中空ガラスを混入したモルタルの基礎的性質

(1)流動性

図-1 は、中空ガラスおよびフライアッシュを混入したモルタルのフロー値を比較したものである。中空ガラスおよびフライアッシュともに、混入率の増加に伴いフロー値はほぼ同様に減少しているが、フライアッシュの場合、混入率を40%とすると練り混ぜが不可能となった。また、同じ混入率では中空ガラスの方が流動性

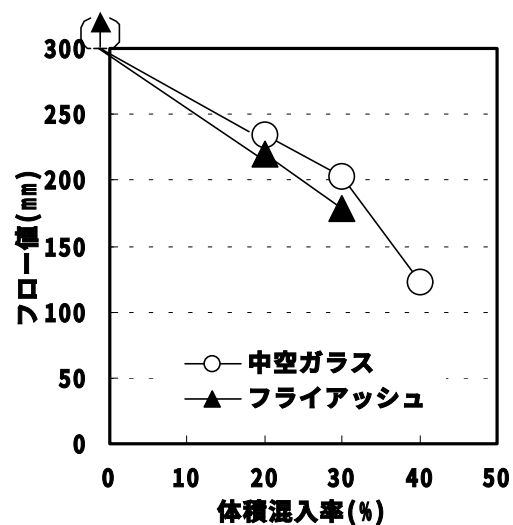


図-1 中空ガラスとフライアッシュの流動性の比較

が若干良いが、これは中空ガラスの粒形が真球に近いこと、表面の粗度がフライアッシュに比べ小さいことが原因として考えられる。

中空ガラスの混入率を30%に一定とし、水セメント比を変化させた場合のフロー値を図-2に示す。水セメント比の低下に伴いフロー値は減少する傾向があるが、混和剤無添加で水セメント比40%であっても流動性が得られている。また、水セメント比60%ではフロー値が228mmとなるが、この場合、若干のブリーディングは見られるものの、中空ガラスが分離し浮き上がり、表層に堆積する現象は見られなかった。なお、予備実験において、配合1に高性能AE減水剤を添加したモルタルを作製したが、中空ガラスが表層に多量に浮き上がる分離現象が見られた。

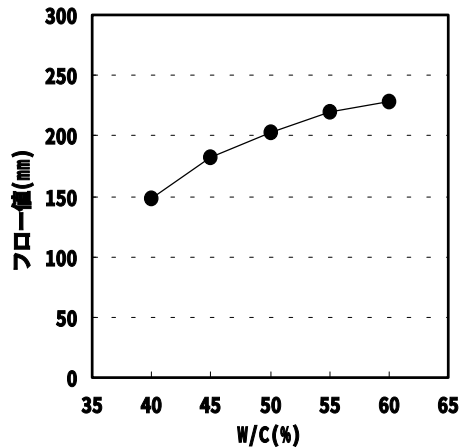


図-2 水セメント比とフロー値の関係

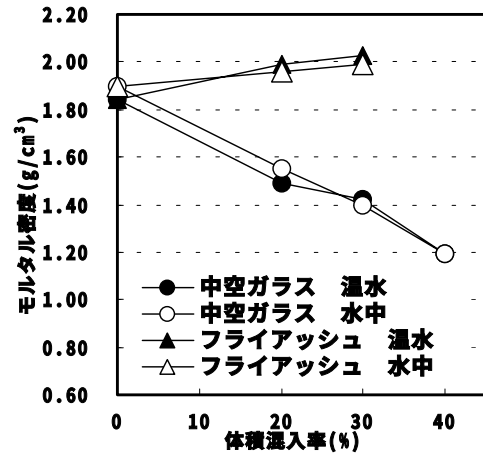


図-3 混入率とモルタル密度の関係

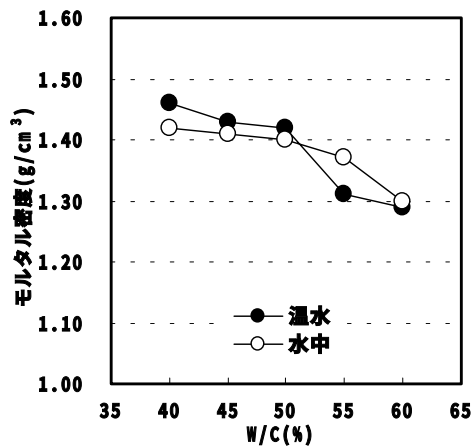


図-4 水セメント比とモルタル密度の関係

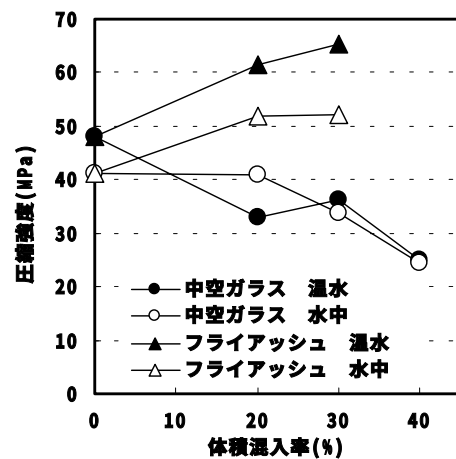


図-5 混入率と圧縮強度の関係

(2) モルタルの密度

図-3 は、中空ガラスおよびフライアッシュの混入率とモルタル密度との関係を示したものである。いずれの場合も養生方法による密度の差異はほとんど無い。中空ガラスを混入したものは、混入率の増加に伴い密度は大幅に低下し、混入率 1% の増加に対して密度は 0.015g/cm^3 低下する。なお、中空ガラス混入率 40% では、密度は 1.19g/cm^3 となった。また、図-4 のように、中空ガラスの混入率を一定とした場合においても、水セメント比の増加により密度は低下するが、その割合は混入率を増加させた場合に比べ小さい。

(3) 圧縮強度

中空ガラスおよびフライアッシュの混入率と圧縮強度の関係を示したものが図-5 である。

粒子の強度が大きくポズラン反応が期待できるフライアッシュを混入した場合には、圧縮強度が増加するのに対し、中空ガラスでは、混入率の増加に伴い圧縮強度が低下する傾向が見られる。水中養生を行ったものでは、水セメント比 50% のペースト（無混入）に対して、中空ガラスを 40% 混入すると、圧縮強度は約 41% 低下し、 24.4MPa であった。中空ガラス混入率の増加に伴う強度低下の原因としては、粒子強度の低さおよびペースト-中空ガラス間の付着の問題が挙げられる。しかし、図-6 に示す中空ガラス混入率一定とした場合のセメント水比と圧縮強度の間には比例関係があり、セメント水比の増加によっても圧縮強度が頭打ちにならないことから、供試体の破壊が中空ガラスの粒子破壊に起

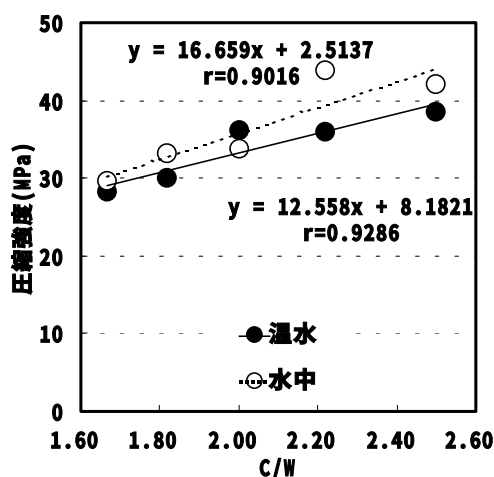


図-6 セメント水比と圧縮強度の関係

因するものではなく、中空ガラスとペースト間の付着破壊によるものと推測される。

(4) モルタル密度と圧縮強度の関係

配合1および配合2の全てのモルタルについて、密度と圧縮強度の関係を示したものが図-7である。中空ガラスを混入したモルタルでは、密度と圧縮強度の間に比例関係が見られ、この内、密度が最小のものは 1.19 g/cm^3 であり、その圧縮強度は 24.4 MPa であった。しかし、これらより求めた比強度は、 20.5 MPa/g/cm^3 であり、同じ中空ガラスで密度が最大となったモルタルの比強度 (26.3 MPa/g/cm^3) に比べ小さくなった。すなわち、中空ガラス混入率の増加により軽量化は図れるものの、それに伴う強度低下の割合が大きいと言える。また、中空ガラスを混入したモルタルの比強度の範囲は、 $20.5 \sim 26.3 \text{ MPa/g/cm}^3$ であるのに対し、フライアッシュを混入したモルタルの比強度は、 $26.2 \sim 32.3 \text{ MPa/g/cm}^3$ と大きくなった。これには、フライアッシュのポゾラン反応による強度増加分が影響しているものと考えられる。

3.2 軽量・高強度および超軽量モルタルの特性

軽量・高強度および超軽量モルタルの配合には、シリカフュームおよび高性能 AE 減水剤を併用したが、これらによって低水結合材比および中空ガラスを多量添加した配合においても練混ぜが可能となり、材料分離も見られなかった。

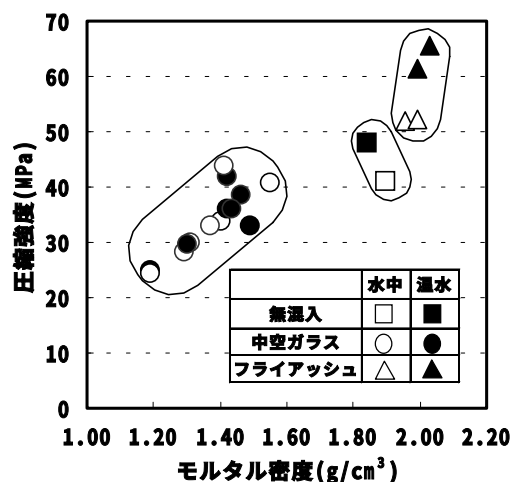


図-7 モルタル密度と圧縮強度の関係

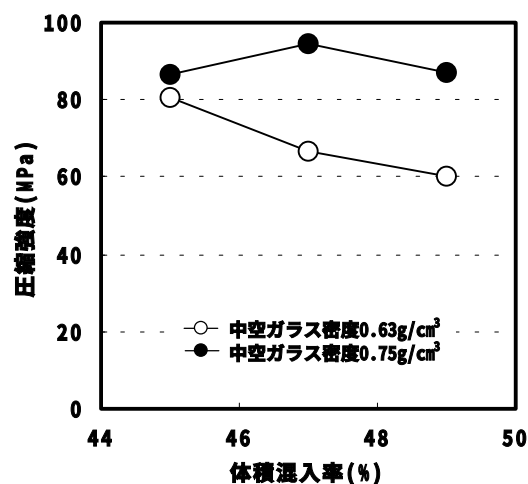


図-8 中空ガラスの密度別の混入率と圧縮強度の関係 (水結合材比 30%)

図-8 は、水結合材比 30% のモルタルについて、中空ガラス混入率と圧縮強度の関係を中空ガラスの密度別に示したものである。密度が 0.75 g/cm^3 の中空ガラスを用いたモルタルでは、混入率に係らず圧縮強度が 85 MPa 以上となっている。これに対し、密度 0.63 g/cm^3 の中空ガラスを用いたモルタルでは、圧縮強度が全体的に小さい。これは、中空ガラス密度が小さい、言い換えれば殻の厚さが薄く、粒子強度が小さいために圧縮強度が小さくなったものと考えられる。すなわち、シリカフュームを混入したことにより、ペースト-中空ガラス間の付着が改善され、付着破壊より中空ガラスの粒子破壊が先行したものと推測される。

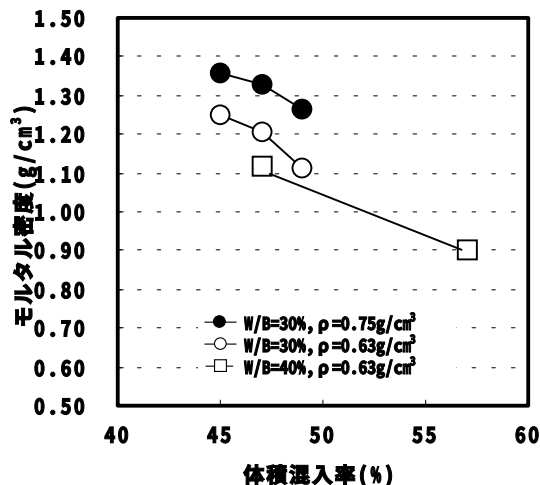


図-9 中空ガラスの密度別の混入率と密度の関係

図-9 は、中空ガラスの混入率とモルタル密度との関係を示したものである。水結合材比30%の配合では、密度 0.75 g/cm^3 の中空ガラスに対し、密度 0.63 g/cm^3 のものを用いると、モルタル密度は約10%小さくなった。また、超軽量タイプで中空ガラスの混入率を57%としたモルタルでは、密度が 0.90 g/cm^3 となった。なお、このモルタルで浮力体を作製し、表面の防水処理等は一切施さずに水槽に6ヶ月間入れているが、吃水が変わることなく浮き続けている。

全ての軽量・高強度および超軽量モルタルについて、モルタル密度と圧縮強度の関係をプロットしたものが図-10である。両者の間には高い相関が見られ、モルタル密度 0.1 g/cm^3 に対する圧縮強度の変化率は約14MPaである。本実験で得られた最高強度のモルタルは、圧縮強度94.6MPaであり、密度 1.33 g/cm^3 であった。また、最軽量のモルタルは、密度 0.90 g/cm^3 であり、圧縮強度25.6MPaであった。

4. まとめ

本研究で得られた結果は以下の通りである。

(1) 中空ガラスは粒形が真球に近いことから、ペースト中に多量に混入しても高い流動性が得られ、また、同じ体積混入率では、フライアッシュよりも流動性が若干良い。

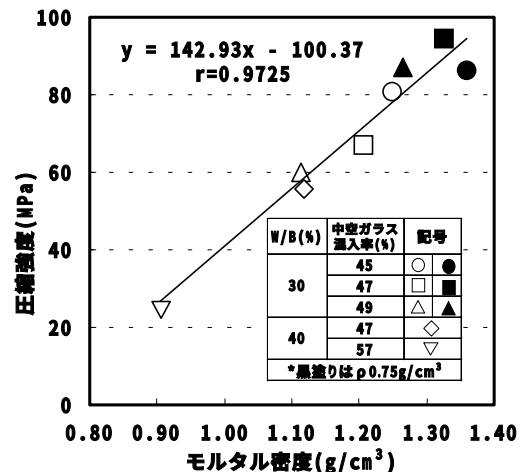


図-10 軽量・高強度および超軽量モルタルの密度と圧縮強度の関係

(2) 中空ガラスは、混入率の増加に伴い圧縮強度が低下する傾向が見られ、水セメント比50%のペーストに対し中空ガラスを40%混入すると、圧縮強度は約45%低下する。

(3) 低水結合材比でシリカフュームおよび高性能AE減水剤を用いた配合において、中空ガラスを47%混入した場合、圧縮強度94.6MPaおよび密度 1.33 g/cm^3 という軽量・高強度モルタルを製造することができた。また、中空ガラスを57%混入した場合には、圧縮強度25MPa以上で密度 0.90 g/cm^3 という超軽量モルタルを製造することができた。

本実験で用いた中空ガラスは比較的単価が高いものであるが、100円/kg以下のものも市販されており、今後は安価な材料を使用し、耐久性等も含めて検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 曾根徳明：石炭灰を主原料とした高強度人工骨材，コンクリート工学，Vol.36，No.12，pp.3 - 10，1998.12
- 2) 岡本享久，石川雄康，榎木隆，笹嶋昌男：高性能軽量コンクリート，コンクリート工学，Vol.37，No.4，pp.12 - 18，1999.4