

3. ペースト量に関する検討（単位ペースト量による圧縮強度・引張強度への影響）

（1）検討目的と検討方法

CSGは単位セメント量が比較的少ないため、CSG材の粒度変化等によってCSG材の空隙に対しペースト量が不足することも考えられる。そのような場合には、CSGのVC値が大きくなり、締め固めにくくなることはもちろんであるが、それによって硬化CSGの性状が低下し、またばらつきが大きくなり、CSGの強度についてのひし形理論における想定されたばらつき（単位水量およびCSG材の粒度のばらつき）以外のばらつき要因を大きくしてしまう可能性がある。したがって、このようなペースト量の不足により、CSGの性状についてどの程度の性状の低下およびばらつきの増大が生じるかを把握する必要がある。

本検討では、適切なVC値が得られる基本配合から単位ペースト量を徐々に減じていった場合の、CSGのVC値、密度、強度等の各物性値の低下やばらつきの変化について試験を実施した。

（2）使用材料

この試験で用いた骨材は現地発生材ではなく、コンクリート用砕石・砕砂であり、試験に用いたCSGは、それらの骨材によって模擬的に製造したものである。

試験に用いた材料および材料の物性を表3.1.1に示す。また、細骨材の粒径別分布曲線を図3.1.1、粗骨材の粒径別分布曲線を図3.1.2に示す。粗骨材の基本粒度は図3.1.2に示すとおり、示方書ダム編の標準粒度範囲のほぼ中間値になるように設定した。

表 3.1.1 使用材料および物性（ ）

使用材料	種類および物性
セメント	中庸熟ポルトランドセメント (密度 = 3.21g/cm ³ 比表面積 = 3,360 cm ² /g)
混和剤	A E 減水剤 遅延形 (種)
細骨材 (5 ~ 0mm)	岩種：安山岩 (密度 = 2.65, 吸水率 = 1.86%, 粗粒率 = 2.49)
粗骨材 (mm)	岩種：安山岩
150-80	(密度 = 2.74, 吸水率 = 0.31%)
80-40	(密度 = 2.73, 吸水率 = 0.53%)
40-20	(密度 = 2.72, 吸水率 = 0.78%)
20-10	(密度 = 2.72, 吸水率 = 0.97%)
10-5	(密度 = 2.70, 吸水率 = 1.26%)

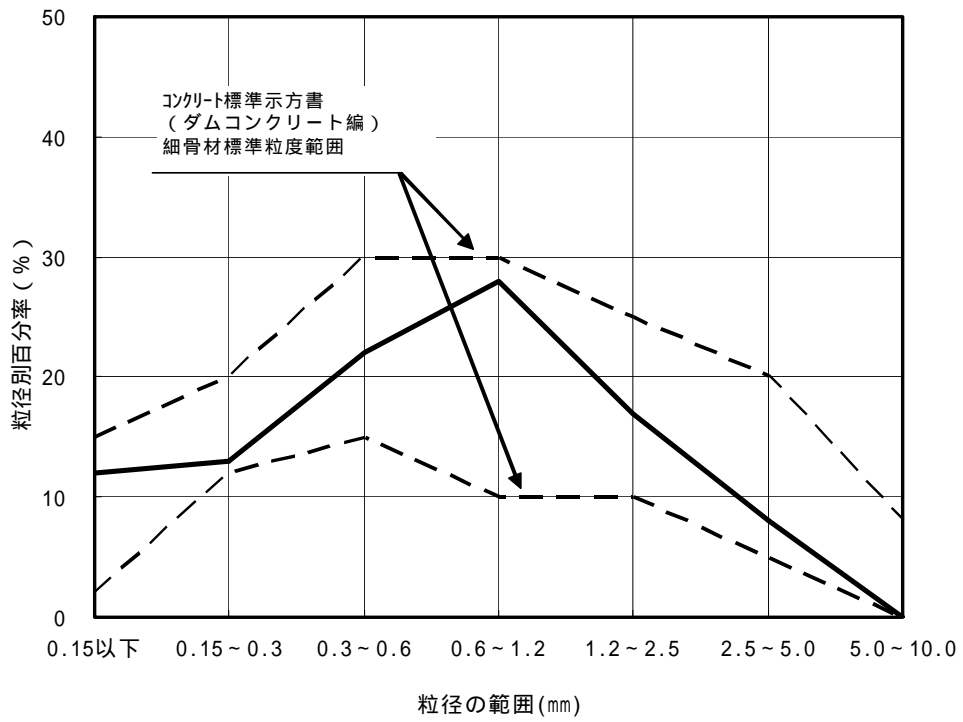


図 3.1.1 細骨材の粒径別分布曲線 ()

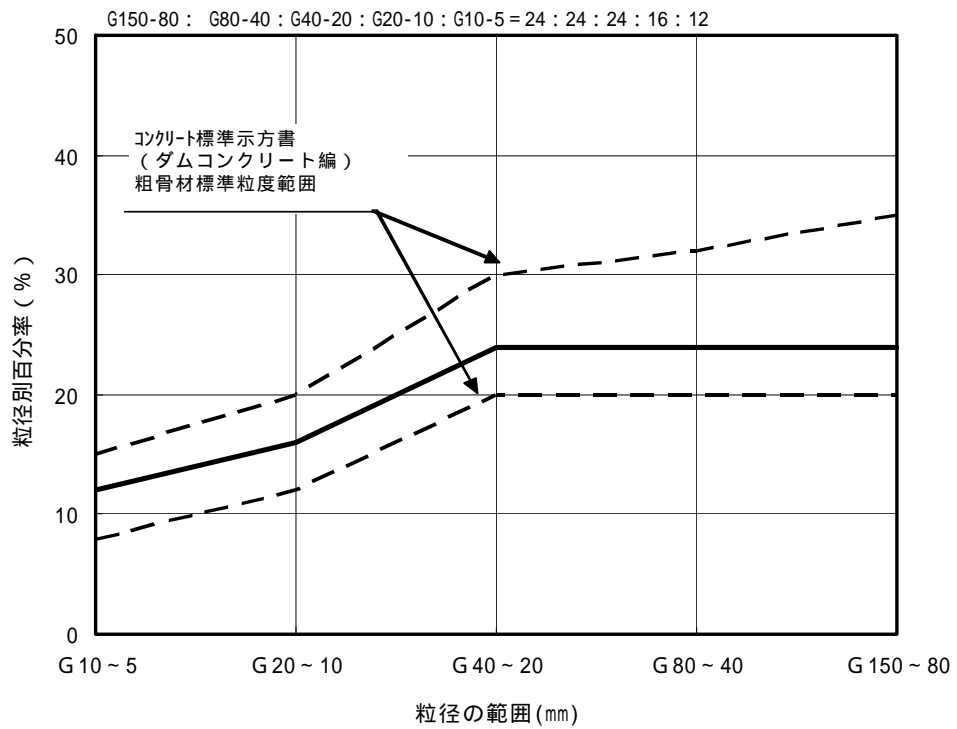


図 3.1.2 粗骨材の粒径別分布曲線 ()

(3) 試験項目および方法

この検討における試験項目および試験方法を以下に示す。

基本配合の選定試験

前章と同様、この試験に使用するCSG材において適切なVC値を確保するための最適な細骨材率および単位ペースト量を定める試験を実施し、基本配合を選定する。この試験では、基本配合としてW/C=98%（ケース1）およびW/C=150%（ケース2）の2つの配合を定める。

単位ペースト量変化試験

上記で定めた2種類の基本配合のそれぞれにおいて、単位ペースト量を徐々に減じたケースを設定してCSGを練り混ぜ、VC試験、標準供q試体試験、大型供試体試験(「1.概要(2)CSGの試験要領」を参照)を実施する。これらの試験により作製した供試体について、VC値、供試体の外観評価、密度比、圧縮強度、引張強度を求め、それらについてどのような傾向(単位ペースト量の減少に伴う性状の低下や試験値のばらつき)が見られるかを検討する。

単位ペースト量変化試験における試験項目および方法を表3.1.2に示す。

表3.1.2 単位ペースト量変化試験における試験項目および方法

試験区分	試験項目	試料サイズ	供試体寸法	作製方法	養生方法
性状試験	標準VC試験	40mm ウェットスクリーング	-	JSCE-F507	-
標準供試体試験	供試体作製	40mm ウェットスクリーング	150×H300mm	標準供試体作製装置による	封緘養生
	圧縮強度試験		"	-	
	引張強度試験		"	-	
大型供試体試験	供試体作製	フルサイズ	500×H450mm	大型供試体試験装置による	封緘養生
	コア外観観察		170×H340mm	コア供試体	
	コア密度		"	"	
	コア圧縮強度		"	"	

(4) 基本配合の選定

細骨材率s/aとVC値の関係を図 3.1.3 に示す。これより、 $C = 100\text{kg/m}^3$ 、 $W = 98\text{kg/m}^3$ (一定)において大型VC値が最小となる細骨材率s/aは30%であった。次に、 $W/C = 98\%$ (ケース1)および $W/C = 150\%$ (ケース2)における単位ペースト量PとVC値の関係を図 3.1.4、図 3.1.5 に示す。これより、 $C = 100\text{kg/m}^3$ 、 $s/a = 30\%$ (一定)とした時の大型VC値が60秒となるような単位ペースト量は、 $P = 198$ 、 165kg/m^3 であった。以上の結果に基づき、基本配合を選定した。基本配合を表 3.1.3 に示す。なお、ケース2における細骨材率は、ケース1と同じく30%としているが、一般に水セメント比が異なる場合には最適細骨材率も異なるのが普通である。ここでは、CSG材における細骨材率が30%であることを想定し、その条件での試験を実施することとした。

表 3.1.3 基本配合表 ()

最大骨材寸法 (mm)	目標大型VC値 (s)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位ペースト量 (kg/m^3)	単位量 (kg/m^3)									混和剤 (AE減水剤)
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G						
									150-80 (mm)	80-40 (mm)	40-20 (mm)	20-10 (mm)	10-5 (mm)		
150	60	1.5 ± 1.0	98	30	198	98	100	680	392	392	392	261	194	0.250	
150	60	1.5 ± 1.0	150	30	165	99	66	688	397	397	397	264	196	0.165	

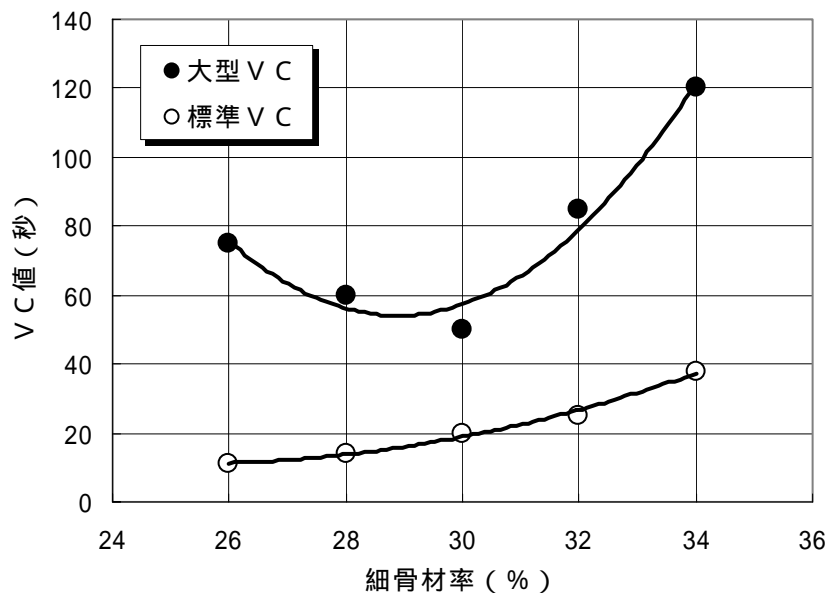


図 3.1.3 細骨材率とVC値 ($C = 100\text{kg/m}^3$ 、 $W = 98\text{kg/m}^3$) ()

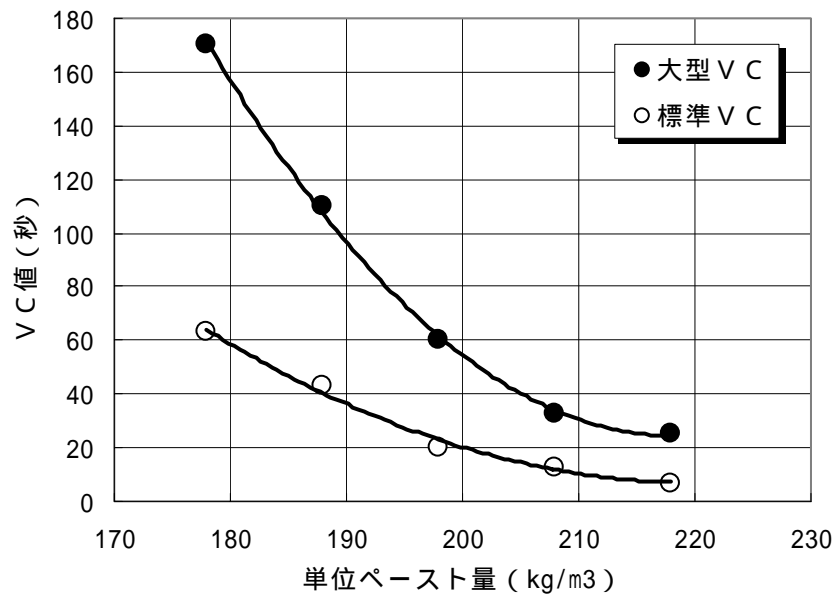


図 3.1.4 単位ペースト量とVC値 (W/C = 9.8%、s/a = 30%) ()

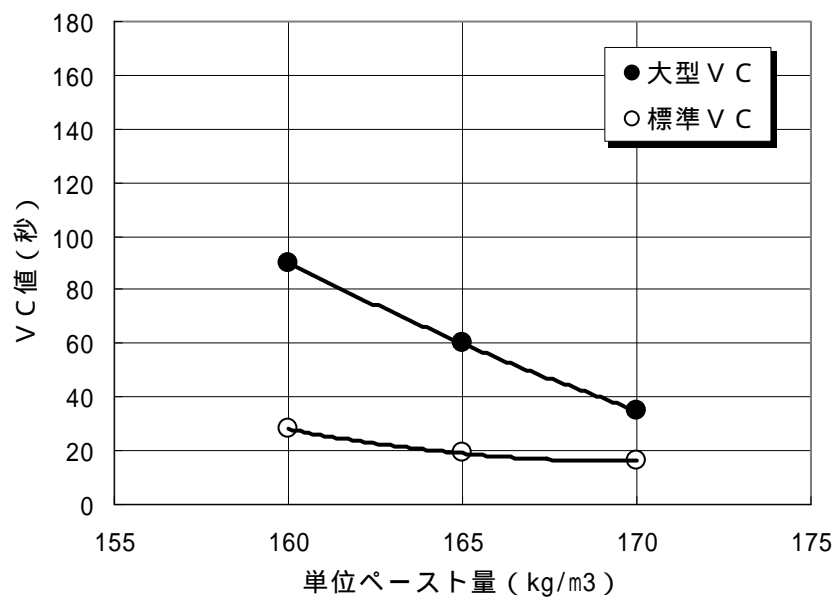


図 3.1.5 単位ペースト量とVC値 (W/C = 150%、s/a = 30%) ()

(5) 試験ケース

単位ペースト量変化試験の試験ケースを表 3.1.4 に示す。基本配合(ケース 1 - 1、2 - 1) は、標準 V C 値 20 秒(大型 V C 値 60 秒) を満足する配合である。ケース 1 では W/C = 98%、ケース 2 では W/C = 150% で固定したまま、供試体が作製可能と考えられる範囲まで単位ペースト量を減じていったものである。

表 3.1.4 試験ケース ()

ケース	水セメント比 W/C (%)	単 位 ペースト量 P (kg/m ³)	単 位 量 (kg/m ³)		強 度 試 験 項 目		
			水 W	セメント C	圧縮強度試験 (標準供試体)	圧縮強度試験 (コアリング 供試体)	引張強度試験 (標準供試体)
1 - 1 (基本配合 1)	98	198	98	100			
1 - 2		183	91	92			
1 - 3		168	83	85			
1 - 4		153	76	77			
1 - 5		138	68	70		-	
1 - 6		108	53	55		-	
1 - 7		78	39	39		-	
2 - 1 (基本配合 2)	150	165	99	66		-	-
2 - 2		152	91	61		-	-
2 - 3		139	83	56		-	-
2 - 4		126	76	50		-	-
2 - 5		113	68	45		-	-

各ケースにおける単位ペースト量とペースト細骨材率空隙比 α の関係を図 3.1.6 に示す。

単位ペースト量の減少に伴い、 α も小さくなる。また、同一ペースト量では、水セメント比の大きい方が α は高くなっている。これは、水の方がセメントよりも密度が小さいため、同一ペースト量であっても、水セメント比の大きい方がペースト容積は大きくなるためである。

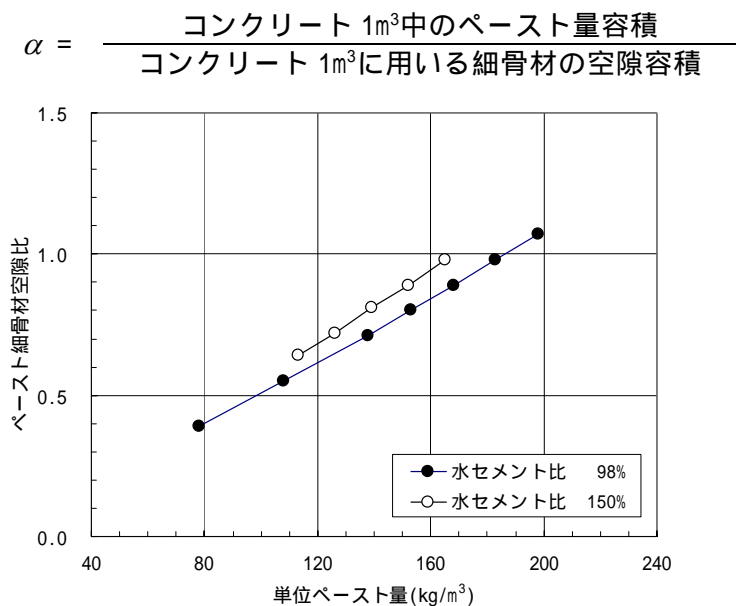


図 3.1.6 単位ペースト量とペースト細骨材空隙比 α ()

(6) 試験結果

1) VC値

単位ペースト量およびペースト細骨材空隙比 α とVC値の関係を図3.1.7、図3.1.8に、単位水量とVC値の関係を図3.1.9に示す。

図3.1.7より、標準VC試験でVC値が測定できたのは、ケース1-1~1-3(P=198~168kg/m³)、ケース2-1~2-2(P=165~152kg/m³)であり、これよりもペースト量が少なくなるとVC値の測定ができなかった。

図3.1.8より、単位ペースト量、すなわちペースト細骨材空隙比 α を小さくするとVC値は極端に大きくなり、計測が不可能となる(本試験結果では $\alpha=0.89$ 未満で計測不可能)。

また、同一単位ペースト量、同一 α においては水セメント比の大きい方がVC値は小さい。これは、図3.1.9からわかるように単位水量はVC値に及ぼす影響が大きく、同一単位ペースト量、同一 α でも水セメント比の大きい方が単位水量は多いためである。

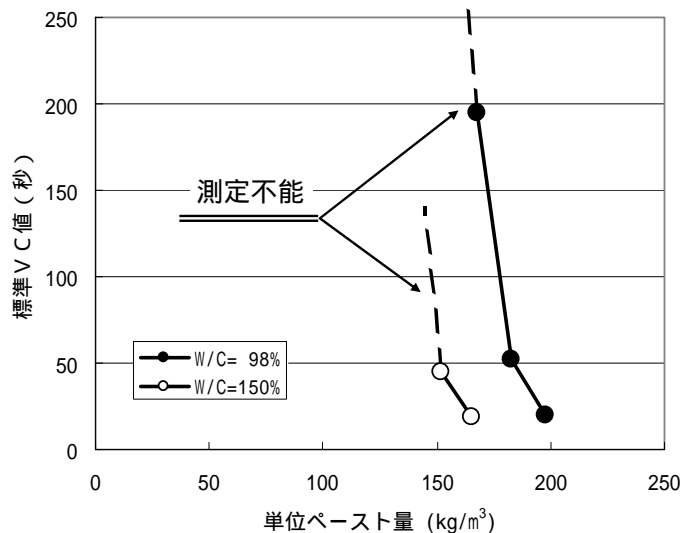


図3.1.7 単位ペースト量とVC値の関係 ()

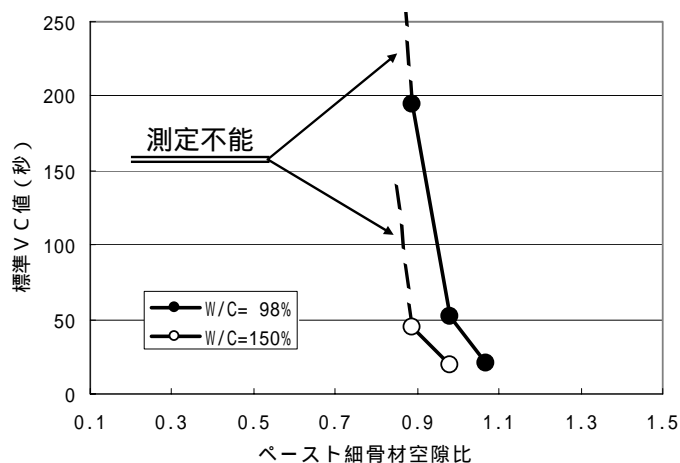


図3.1.8 ペースト細骨材空隙比 α とVC値の関係 ()

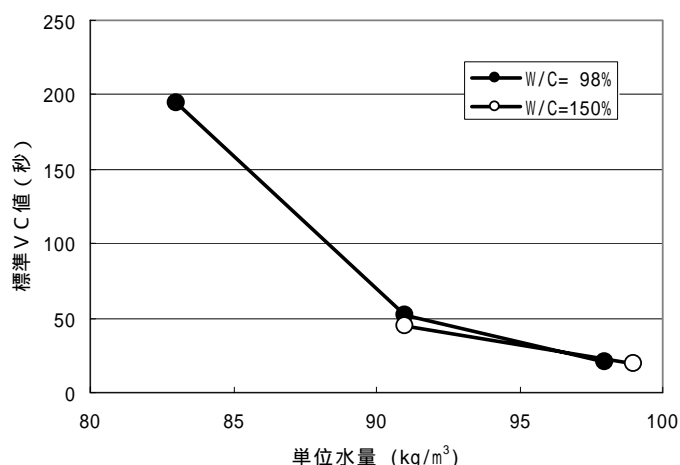


図 3.1.9 単位水量とVC値の関係 ()

2) 単位ペースト量と評価点、密度比、圧縮強度および引張強度

標準供試体

水セメント比を 98% および 150% としたときの標準供試体における単位ペースト量と評価点、密度比および圧縮強度の関係を図 3.1.10 ~ 図 3.1.15 に示す。いずれの図にも、供試体ごとの試験結果 (図中の) と、その平均値 (図中の) を併せて示している。

単位ペースト量と密度比の関係においては、単位ペースト量の減少に伴い、密度比が小さくなることが確認できる。基本配合においては、ケース 1、2 とともに密度比が 95% と大きく、骨材間の空隙がペーストによりほぼ充填されていると考えられる。これに対し、単位ペースト量が減少すると、空隙を十分に満たすだけのペースト量が不足し、密度比が低下している。

圧縮強度および評価点においても、単位ペースト量の減少とともに、強度、評価点が減少する傾向が認められる。

また、標準供試体における単位ペースト量と引張強度の関係を図 3.1.16 に示す。単位ペースト量の減少とともに、引張強度が小さくなる傾向が確認できる。

いずれの試験結果についても、単位ペースト量の低下に伴って供試体間の結果のばらつきの増大は見られない。しかし、同じ標準誤差であっても平均値が小さくなる場合には、変動係数 = (標準誤差 / 平均値) が大きいものとなり、ばらつきとしては大きくなる。この変動係数での評価は後述する。

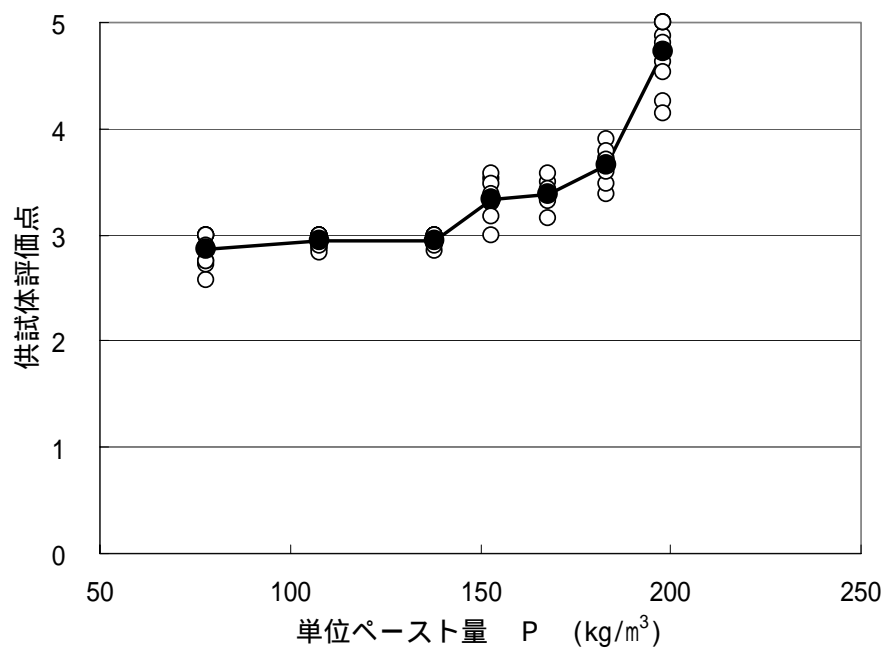


図 3.1.10 単位ペースト量と評価点 (W/C=98%) ()

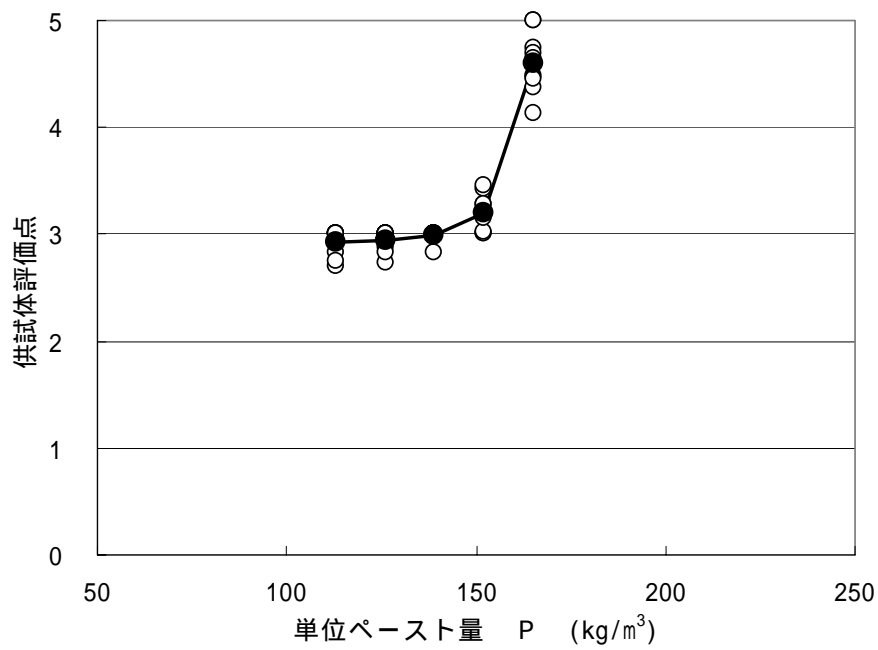


図 3.1.11 単位ペースト量と評価点 (W/C=150%) ()

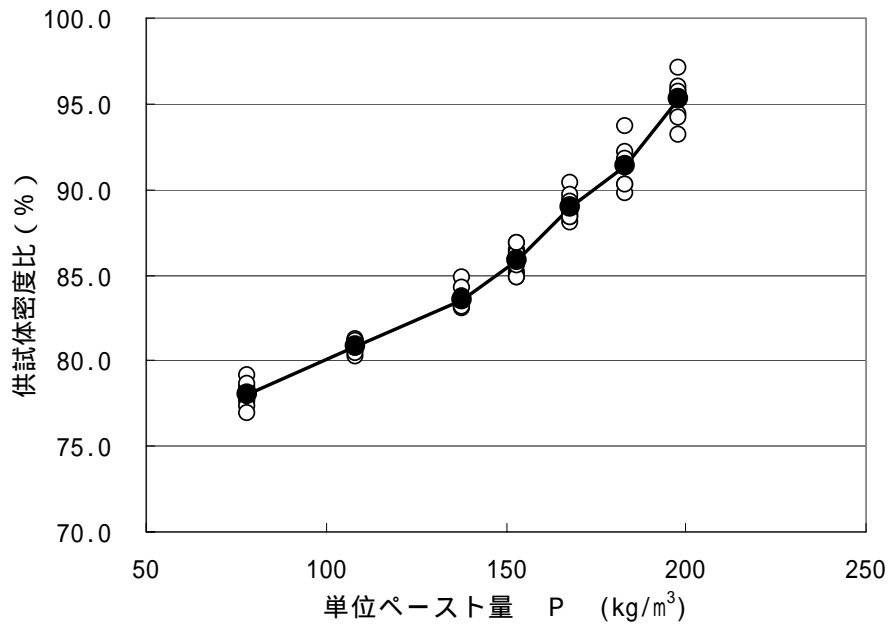


図 3.1.12 単位ペースト量と密度比 (W/C=98%) ()

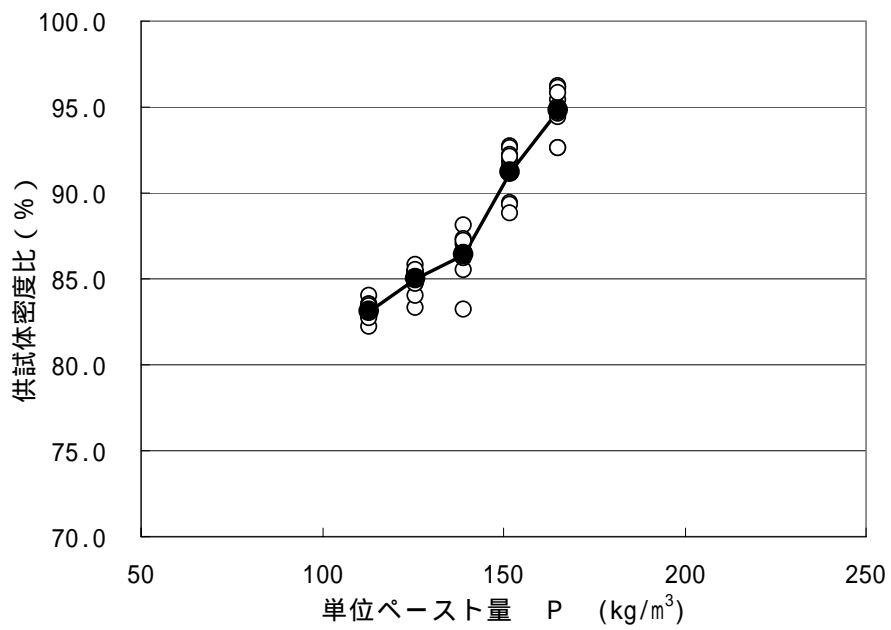


図 3.1.13 単位ペースト量と密度比 (W/C=150%) ()

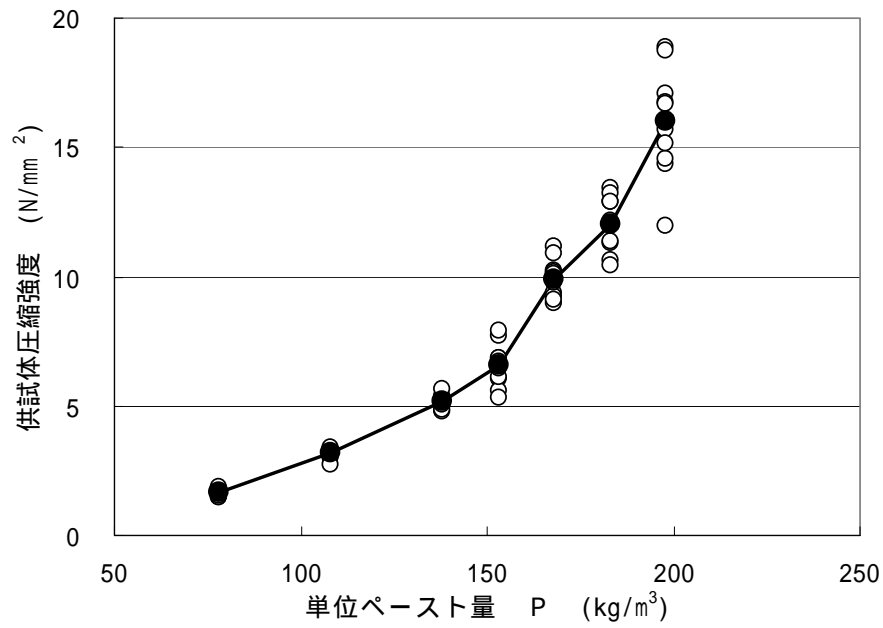


図 3.1.14 単位ペースト量と圧縮強度 (W/C=98%) ()

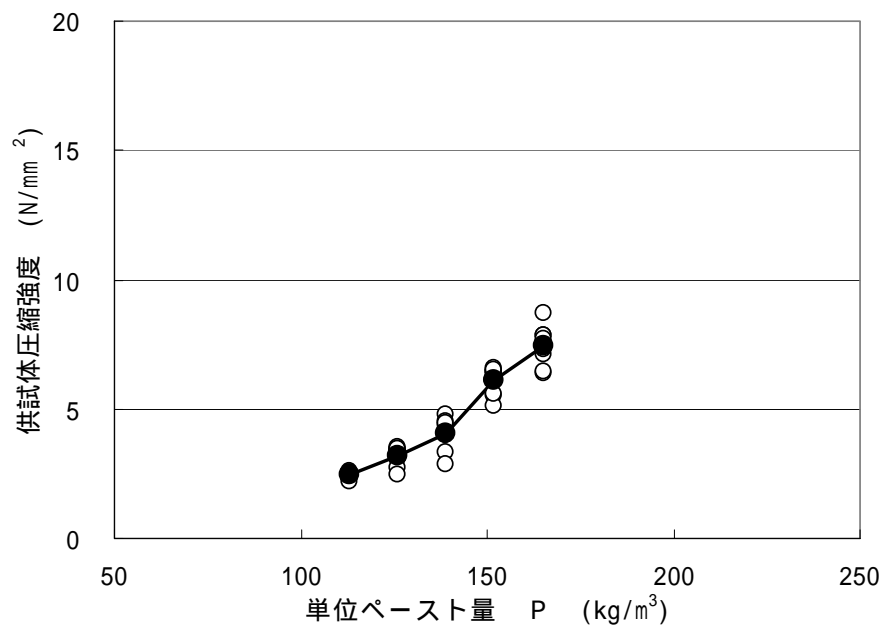


図 3.1.15 単位ペースト量と圧縮強度 (W/C=150%) ()

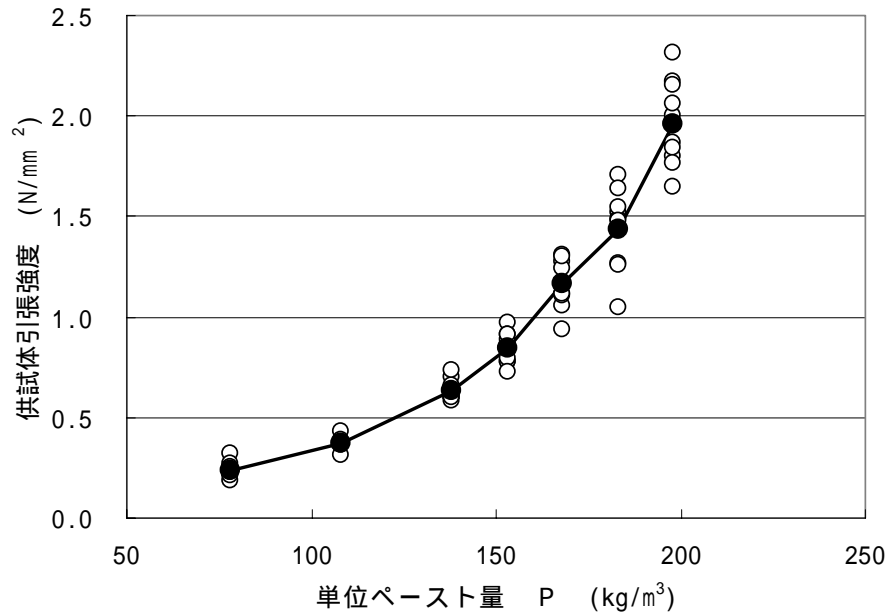


図 3.1.16 単位ペースト量と引張強度 (W/C=98%) ()

大型供試体からのコア供試体

次に、W/C = 98%の大型供試体からの供試体の単位ペースト量とコア評価点、密度比、および圧縮強度の関係を図 3.1.17 ~ 図 3.1.19 に示す。いずれの図にも、供試体ごとの試験結果 (図中の) と、その平均値 (図中の) を併せて示している。

これらの図より、単位ペースト量の減少とともにコア評価点、密度比、および圧縮強度は、いずれも小さくなる傾向があることがわかる。

P = 183kg/m³のコア強度は、基本配合 (標準V C 値 20 秒 : $\alpha = 1.1$) の単位ペースト量 P = 198kg/m³のコア強度とほぼ同程度の値を示しており、単位ペースト量が小さくなるにもかかわらず圧縮強度の低下が見られない。これは、大型供試体試験における締固めエネルギーが大きいことから、単位ペースト量がいくぶん小さくても十分な締固め効果が得られたことによるものと考えられる。このことから、実際の施工においても、CSG材の粒度変化によってCSG材の空隙に対するペースト量の多少の不足が発生したとしても、十分な締固めエネルギーを与えれば圧縮強度の低下は起こらないものと考えられる。

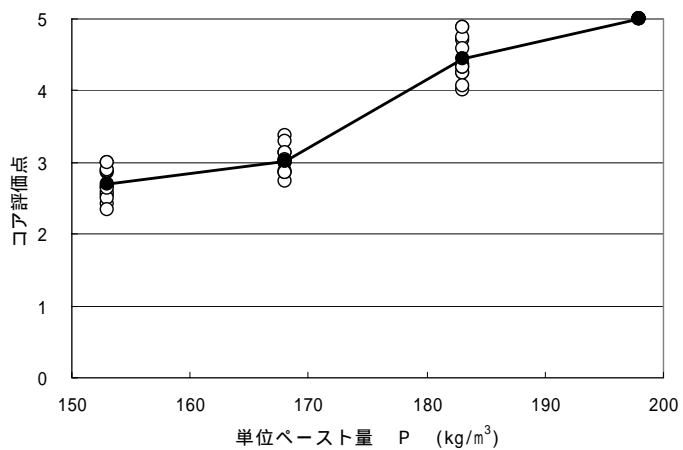


図 3.1.17 単位ペースト量とコア評価点 (W/C=98%) ()

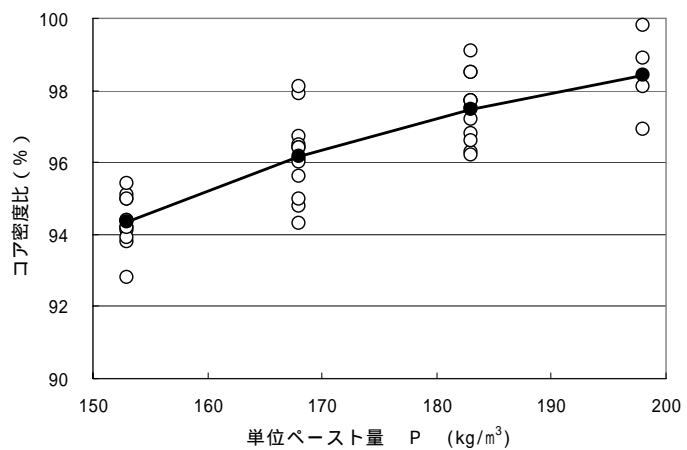


図 3.1.18 単位ペースト量とコア密度比 (W/C=98%) ()

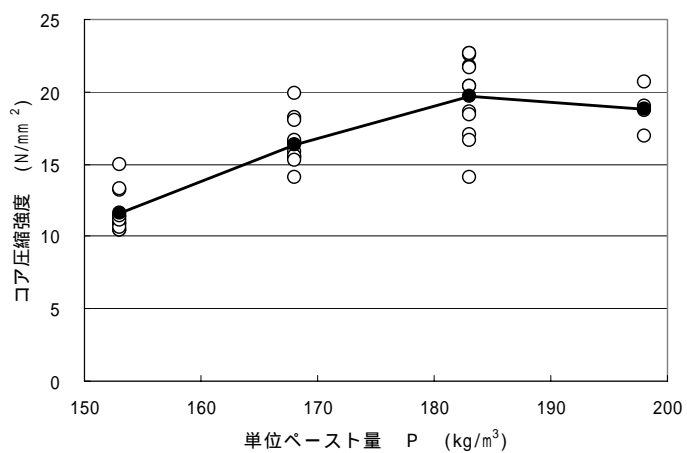


図 3.1.19 単位ペースト量とコア圧縮強度 (W/C=98%) ()

各物性値間の関係

標準供試体の密度比と圧縮強度の関係を図 3.1.20 に、密度比と引張強度の関係を図 3.1.21 に示す。圧縮強度、引張強度ともに、密度比が小さくなると直線的に強度が小さくなる傾向を示しており、密度比と強度には密接な関係が認められる。これより、CSGの締固め密度は、強度管理を行う上での有効な指標になるものと言える。

大型供試体のコア密度比とコア圧縮強度の関係を図 3.1.22 に示す。大型供試体においても標準供試体と同様に、コア密度比が小さくなるとコア圧縮強度も小さくなる傾向が見られる。

図 3.1.20 と図 3.1.22 を比較すると、大型供試体のコアについての試験結果（図 3.1.22）のほうがばらつきは大きい。これは、コアの直径が 150mm で粗骨材の最大寸法と同一であり、コアにおける粗骨材の位置や角度によって圧縮強度の結果が大きく左右されるためである。

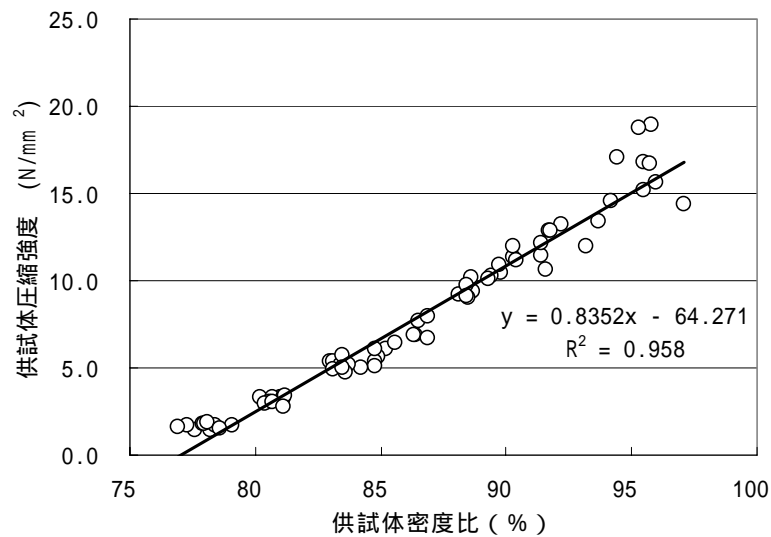


図 3.1.20 標準供試体の密度比と圧縮強度 ()

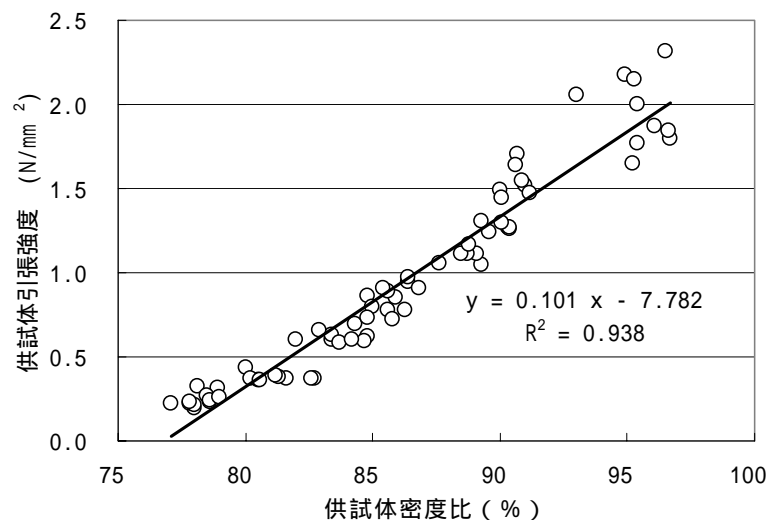


図 3.1.21 標準供試体の密度比と引張強度 ()

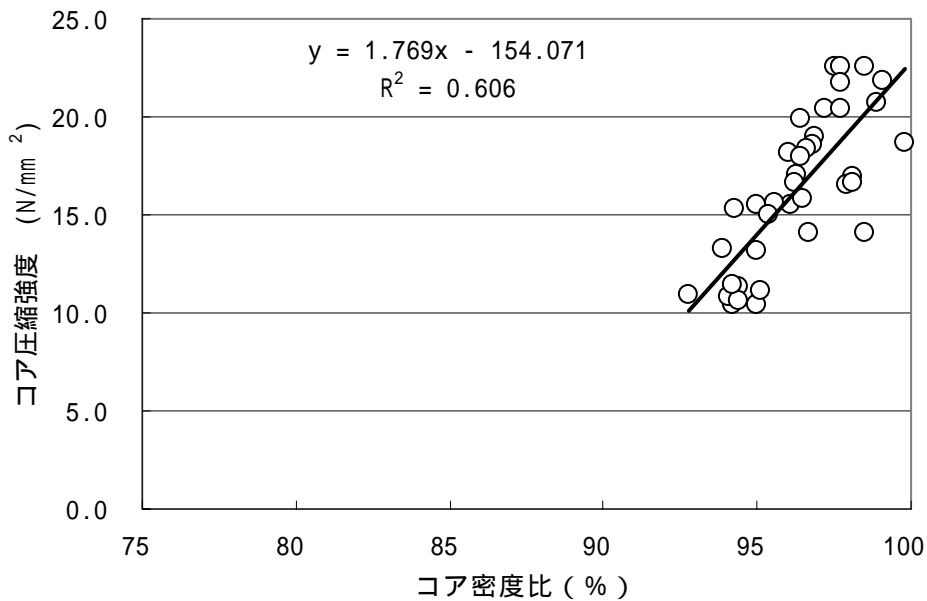


図 3.1.22 コア密度比とコア圧縮強度 ()

次に、各ケースにおける単位ペースト量と圧縮強度および密度比の関係を図 3.1.23、図 3.1.24 に、ペースト細骨材空隙比 α と圧縮強度および密度比の関係を図 3.1.25、図 3.1.26 に示す。

標準供試体 (W/C = 98%、150%) および大型供試体コア (W/C = 98%) の密度比、圧縮強度は、いずれのケースも単位ペースト量、ペースト細骨材空隙比 α の減少とともに小さくなる傾向が確認できる。

W/C = 98% においては、コア供試体の方が標準供試体よりも密度比、圧縮強度とも大きい傾向が見られる。これは、大型供試体作製装置による締固めの方が、標準供試体作製装置 (締固め時間 40 秒) による締固めよりも締固めエネルギーが大きいことによる影響と考えられる (前章「2.2 細骨材粒度の変動によるフレッシュ性状および強度への影響 (6) 試験結果」参照)。

図 3.1.23 と図 3.1.24 より、標準供試体の試験において単位ペースト量が同一である場合、水セメント比の小さい方が強度は大きくなっているがその差は小さい (約 0.5 ~ 2N/mm²)。これは、W/C = 150% の方が 98% に比べて密度比が高い (約 2 ~ 6%) ことによるものである。

図 3.1.25 と図 3.1.26 より、標準供試体の試験においてペースト細骨材空隙比 α が同一である場合、供試体の密度比は、水セメント比による差がほとんど現れない (0 ~ 3%)。そのため、供試体の圧縮強度には水セメント比による差が現れ、W/C = 98% の方が 150% に比べて強度が大きく (約 2 ~ 5N/mm²) なっている。

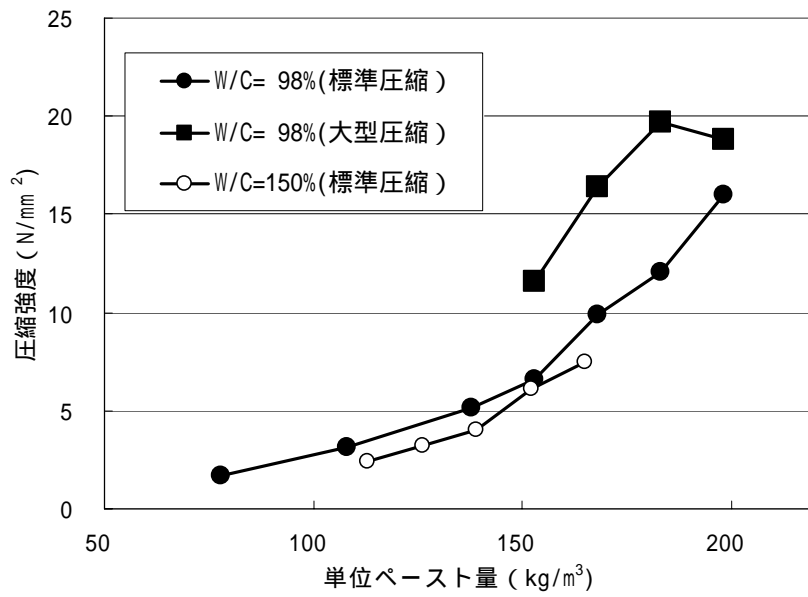


図 3.1.23 単位ペースト量と圧縮強度 ()

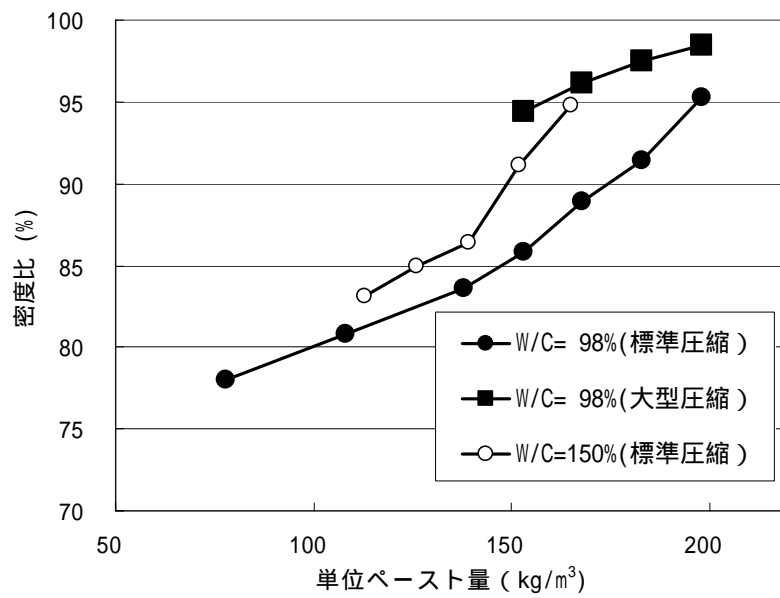


図 3.1.24 単位ペースト量と密度比 ()

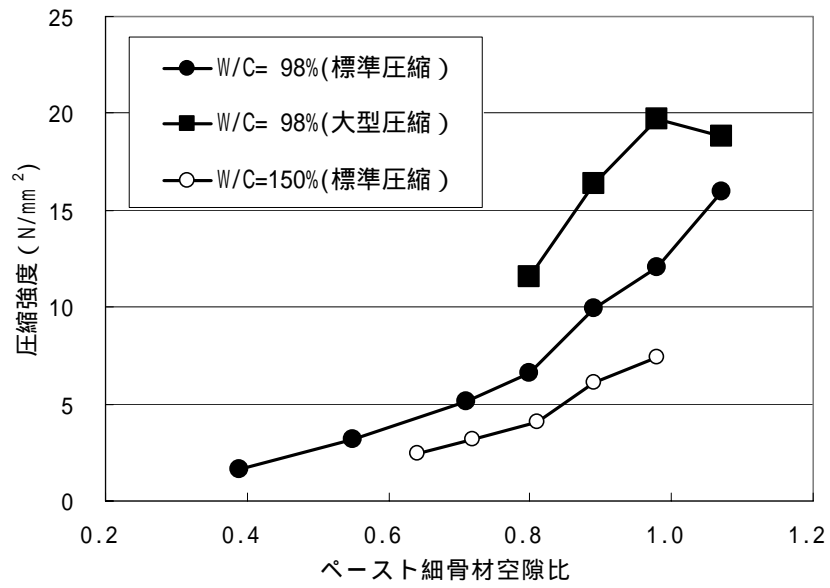


図 3.1.25 ペースト細骨材空隙比 α と圧縮強度 ()

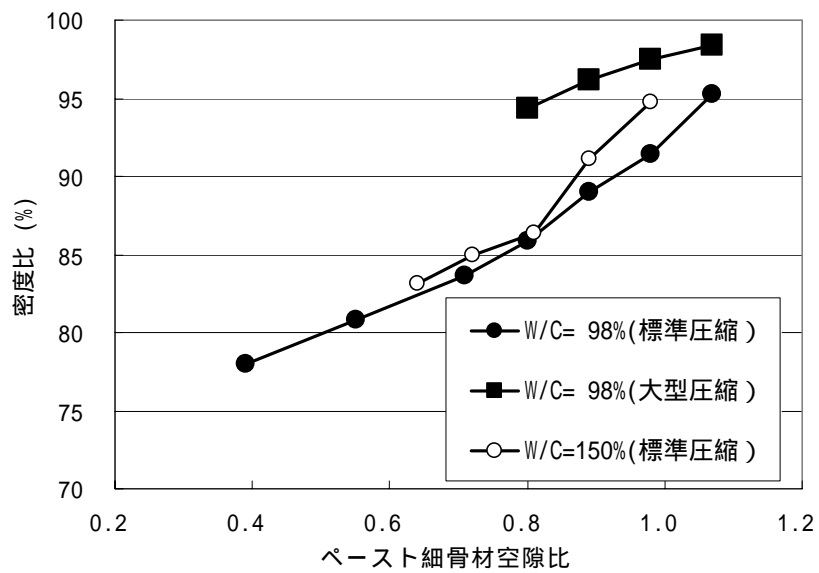


図 3.1.26 ペースト細骨材空隙比 α と密度比 ()

圧縮強度と引張強度の関係を図 3.1.27 に示す。圧縮強度と引張強度との間には、比例関係が確認でき、引張強度は圧縮強度の約 12% (およそ 1/8 程度) である。

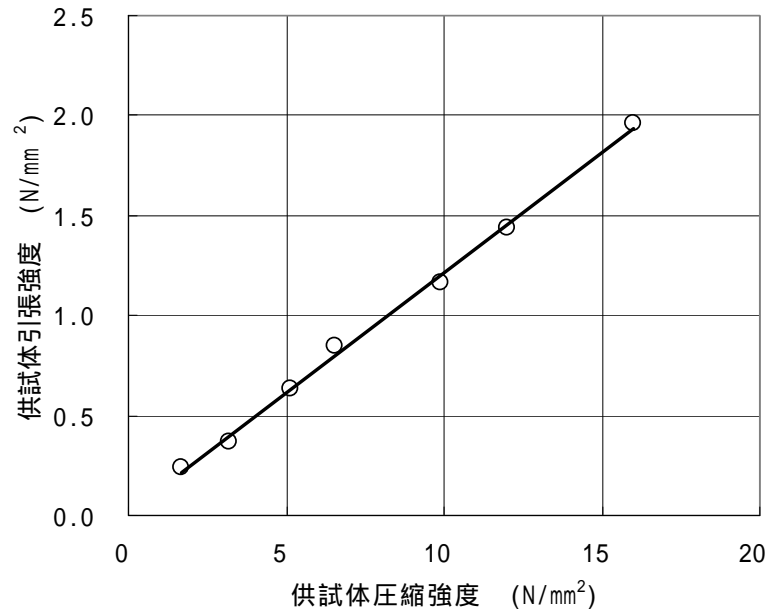


図 3.1.27 圧縮強度と引張強度 ()

3) 変動係数

単位ペースト量の減少に伴い、CSGの物性値のばらつきの増大があるかどうかを見るため、圧縮強度試験の変動係数(標準誤差/平均値)によって評価する。

単位ペースト量と標準供試体および大型供試体圧縮強度の変動係数を図 3.1.28 に示す。

標準供試体のW/C = 98%での変動係数(供試体数N = 10 個のデータ)は、単位ペースト量P = 198 ~ 78kg/m³で約 5 ~ 13%の範囲を示し、W/C = 150%での変動係数(N = 10)は、単位ペースト量P = 165 ~ 113kg/m³で 5 ~ 14%の範囲を示した。

また、大型供試体(W/C = 98%)での変動係数は、P = 198kg/m³(N = 4)で 8%、P = 183 ~ 153kg/m³(N = 12)で 10 ~ 14%の範囲であった。

これより、供試体の作製が可能と考えられる範囲まで単位ペースト量を減じた各供試体の圧縮強度の変動係数は 10%前後で、単位ペースト量の減少に伴う圧縮強度のばらつきの増大は見られなかった。

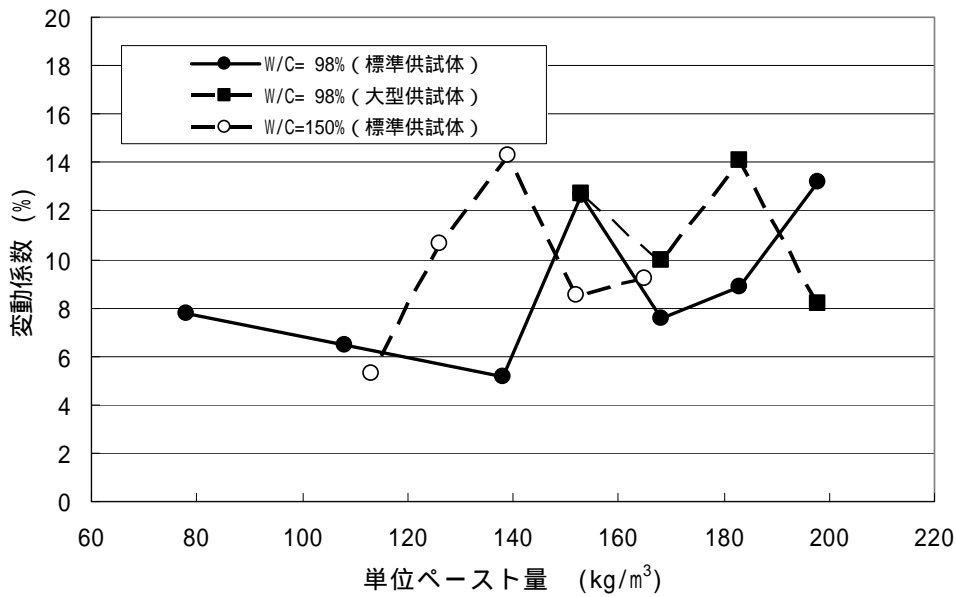


図 3.1.28 単位ペースト量と変動係数の関係 ()

(7) まとめ

CSGにおいて適切なVC値が得られる基本配合から、単位ペースト量を徐々に減じていった場合のCSGのVC値、密度、強度等の各物性値の低下やばらつきの変化について試験を実施した。その結果、以下のことが明らかになった。

単位ペースト量を減じることにより、VC値が大きくなる。この試験では、ペースト細骨材空隙比0.89未満で標準VC値の計測が不可能となった。

単位ペースト量を減じることにより、密度比、圧縮強度、引張強度の値が低下する傾向が確認された。ただし、単位ペースト量が多少小さいもの(この試験では15kg/m³減少)であっても、締固めエネルギーが十分に大きい場合には、その強度は基本配合とあまり変わらなかった。

標準供試体の密度比と圧縮強度には比例関係が認められることから、密度比はCSGの強度管理を行う上での有効な指標になる。

同一単位ペースト量の場合、水セメント比が違ってても、圧縮強度の違いは小さかった。これは、水セメント比が大きいケースではペースト細骨材空隙比 α が大きいため、CSGの充填性が高くなり密度比が高くなるためである。

供試体の作製が可能と考えられる範囲まで単位ペースト量を減じた標準供試体および大型供試体の圧縮強度の変動係数は、いずれの単位ペースト量においても10%前後であり、単位ペースト量の減少に伴う圧縮強度のばらつきの増大は見られなかった。

以上の知見において、特に が重要と考えられる。つまり、CSG材の粒度変化等によって

C S G材の空隙に対してペースト量が理論上不足するような場合であっても、不足するペースト量の程度にもよるが、十分に大きな締固めエネルギーを与えれば、C S Gの強度は基本配合と変わらないということである。このことは、C S G材の粒度のばらつきによる硬化C S Gの強度のばらつきの発生を、強力な締固めによって解消できるということであり、C S Gの強度についてのひし形理論におけるひし形の面積を小さくできることを意味する。また、これにより、実施工におけるC S G材の粒度管理（C S G材のふるい分けによる粒度分布の把握と、それに合わせた単位ペースト量の調整等）の頻度を減らすこと等が可能になるものと考えられる。

これについては、ペースト量が不足しても締固めでカバーできるペースト量の範囲（これを仮に「不足可能ペースト量」という）や、ペースト量が不足してもC S Gの強度が保持できる締固めエネルギー（この締固めエネルギーを仮に「強度保持可能締固めエネルギー」という）についての検討が今後の課題と考えられる。また、不足可能ペースト量や強度保持可能締固めエネルギーは、C S G材の材質によっても異なると考えられ、さまざまな材質のC S Gでの試験および検証が課題であると考えられる。

これらと前章での知見をまとめると、以下のことが言える。

- ・ C S Gのフレッシュ性状をできるだけ一定とするために、 U_c や α を用いて管理するのが有効であるが、何らかの原因で単位ペースト量が不足するようなことがあっても、締固めエネルギーが十分に大きい場合には、強度はそれほど低下せず、強度のばらつきも増大しない。これは例えば、実施工においてC S G材の粒度分布をある間隔で測定し、それに対して十分なフレッシュ性状を確保できる単位ペースト量を設定してC S Gを製造していたとしても、C S G材の粒度分布は常に測定結果と同一であるとは限らないため、場合によってはある時点でのC S G材に対して単位ペースト量が不足することが考えられる。このとき、C S Gの締固めにおいてそのエネルギーが十分に大きい場合には、単位ペースト量がある程度不足したC S Gであっても、単位ペースト量が足りているC S Gと同等の強度が得られるということになる。
- ・ 同一単位ペースト量の場合、水セメント比が違っていても圧縮強度の違いは小さいことから、C S Gの製造において例えば目視等により単位ペースト量の不足が見られるような場合、単位水量を増加することによって単位ペースト量を回復すれば、水セメント比を一定として単位セメント量と単位水量を同時に増加する場合と同様な強度回復が得られるということになる。ただし、図3.1.29に示されるように、本試験は単位ペースト量を基本配合から減じたケースについて実施しているため、このような法則性は「ペースト不足により十分な締固めが行えない範囲」でのみ成り立つものと考えられる。

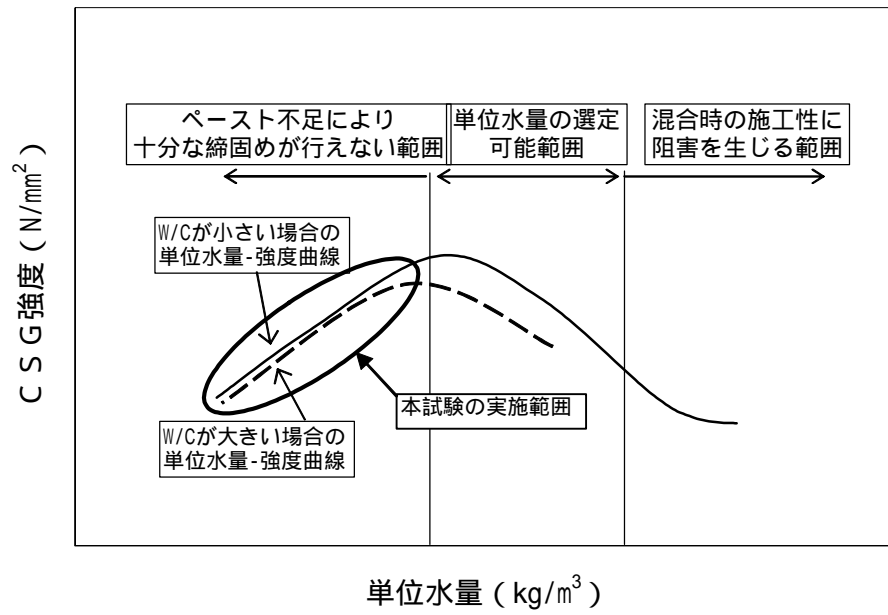


図 3.1.29 水セメント比の大小による単位水量-強度曲線の関係（「技術資料」を参考に作成）