

山 崎 寛 司*

要 旨 コンクリートに用いられる鉱物質微粉末をその品質によって分類し、物理的・化学的性質がそれぞれのグループを代表するような数種の微粉末を選び、これらの微粉末がコンクリートの強度におよぼす効果について研究した。その結果、セメントペースト中で化学反応をおこさないと考えられる微粉末でも、コンクリートの強度にかなりいちじるしい影響をおよぼすことを確かめた。

その原因を調らべるために、まず、微粉末を用いないモルタルおよびコンクリート中のペースト部分の性質と強度との関係について試験を行なって研究し、空気量・打ち込み後の体積変化などを考慮に入れた純空げきセメント比およびペースト部分単位容積中の固相容積（単位固相容積）と強度との関係について、実験結果とよく一致する関係を提案した。

ついで、微粉末を用いた場合のペースト部分の結合水量、単位固相容積を試験し、また、コンクリートの硬化熱の試験も行なってペースト中で化学反応をおこさない微粉末でも、これを用いることによってセメントの水和の程度を増加させることを確かめ、その理由について考察した。

鉱物質微粉末がコンクリートの強度におよぼす効果は、微粉末の使用による単位水量、空気量、体積変化の影響、微粉末によるセメントの水和の程度の増加の影響、ポゾランの場合にはポゾラン反応の影響などによるもので、一般的にいて微粉末の使用によるペースト部分の単位固相容積の変化によるものであるといえると思われる。

1. 諸 論

コンクリートに用いられ鉱物質微粉末はその種類が非常に多く、その品質、使用の目的、使用方法なども多岐にわたっている。ポゾランは微粉末混和材料を代表するものであって、非常に古くから使用されており、多くの研究がなされている^{1)~4)}。特に近年ポゾランとしての火力発電所のフライアッシュの利用に関する研究が進み、フライアッシュの利点が認められて多くの構造物に用いられている。フライアッシュに関する研究も非常に多く、最近10年間のフライアッシュに関する研究論文は、国内だけでも200編以上におよんでいる^{5)~7)}。

これら多くの研究はいずれも貴重な資料となっている

が、ポゾランがコンクリートの強度におよぼす影響については、主としてポゾラン反応の面から研究が進められていて、ポゾラン反応以外の作用によってもコンクリートの強度が改善されるという点についてはほとんど研究されていない。

セメントペースト中でほとんど化学反応をおこさないと考えられる岩石の微粉末でも、骨材の品質が適当でない場合に骨材の一部とおきかえて用いると有効な場合がある⁷⁾。また、骨材として砕石や砕砂の使用が増加するにしたがって、これら破碎骨材の中にふくまれる岩石の微粉部分がコンクリートの諸性質におよぼす影響や、製砂の際に洗滌廃棄される岩石微粉末の利用などが問題とされるにいたっている⁸⁾。しかし、このような岩石微粉末がコンクリートの強度におよぼす影響についての研究はあまり行なわれていない。

ポゾラン、岩石粉末などがコンクリートの強度におよぼす影響について研究を進めているうちに、セメントペースト中でほとんど化学反応をおこさないと考えられる微粉末（以下簡単に安定な微粉末と呼ぶ）でも、コンクリートの強度にかなりいちじるしい影響をおよぼすことが認められ、その原因として従来の研究によって述べられていることでは十分な説明ができず、鉱物質微粉末を有効に用いるためにはポゾラン反応などの化学反応以外の微粉末の作用について基礎的に研究することが必要と考えられた。このような、コンクリートの強度におよぼす微粉末の影響を詳細に検討するには、従来の水セメント比法則などでは不十分であって、空気量、打ち込み後の体積変化、セメントの水和反応の程度などを考慮に入れて、コンクリート中のペースト部分の性状と強度との関係を明らかにし、その結果によって、微粉末の効果を検討する必要があると考えられた。

本文は、以上の必要性にもとづいて行なった鉱物質微粉末がコンクリートの強度におよぼす効果に関する基礎研究の結果をとりまとめたものである。

試験には、一般に混和材料として用いられる微粉末、あるいは破碎した骨材中に混入している岩石粉末で、物理的・化学的性状において代表的な性質を持つと考えられる数種を選んで用いた。すなわち、ポゾランとして数種のフライアッシュを、安定な微粉末（岩石粉末）として硬砂岩、石灰石およびケイ砂をそれぞれ所要の粉末度に粉砕したものをを用いたのである。また、比較のために、セメントペースト中で化学的活性のいちじるしいもの

* 正員 工博 日本セメントKK研究所

として高炉スラグの粉末を用いた。

まず、これら数種の微粉末がコンクリートの強度におよぼす影響について試験を行ない、安定な微粉末でもコンクリートの強度にかなりの影響をおよぼすことを確かめた。この理由としては、微粉末の使用による単位セメント量、単位水量、空気量などの変化による影響もあるが、そのほかに既往の研究によって説明できないほかの原因による影響があることが認められた。

この点について、基礎的にその原因を解明するには、コンクリート中のペースト部分の性質と強度との関係を明らかにする必要がある、まず、微粉末を用いないコンクリートについて、その中のペースト部分の空げきセメント比、セメントの結合水量および水和の程度、ペースト単位容積中の固相部分の容積（単位固相容積）などについて試験を行ない、これらの値と強度との関係について検討した。その結果、純空げきセメント比および単位固相容積と強度との関係について、実験結果とよく一致する考え方を提案することができた。

ついで、上記の結果を応用して、微粉末を用いた場合の結合水量、単位固相容積、硬化熱などの試験を行ない、その結果と強度との関係を検討し、安定な微粉末でもこれを用いることによってセメントの初期の水和の程度が増加することを確かめた。すなわち、微粉末がコンクリートの強度におよぼす影響には、微粉末の使用による単位セメント量、単位水量、空気量およびコンクリートを打ち込んでからの体積変化などの影響、安定な微粉末でもセメントの初期の水和の程度を増加させることの影響、ポゾランの場合にはポゾラン反応などの化学反応による影響などがあることを明らかにすることができた。さらにこれらの点について電子顕微鏡による観察などによって一応の説明を加えることができた。

本研究を行なうにあたっては、東京大学 国分正胤教授より終始ご懇篤なご指導を賜わった。研究の実施にあたっては日本セメントKK 細井潤三研究所長はじめ各位のご指導をいただき、長期間の試験において、同研究所員 山内、北条、塚山、斉藤、前川、江口、森井等の各氏にそれぞれの試験を担当していただいた。ここに謹んで厚く御礼申し上げる。

2. 使用材料

(1) 鉱物質微粉末

試験に用いた鉱物質微粉末は、フライ アッシュ、スラグ粉末、硬砂岩粉末、石灰石粉末およびケイ砂粉末である。

コンクリートに用いられる微粉末は非常に種類が多くその品質はそれぞれにおいてかなりの相違があり、また、破碎骨材中にふくまれる岩石微粉末も母岩の性質や破碎の方法などによってその品質はいちじるしく異なる。

試験に用いた5種の微粉末は、これら各種微粉末を粒子形状、化学的性質などについて分類し、それぞれの品質を代表するものとして選んだのである。すなわち、これら5種の微粉末は、特殊な用途に対して特別な目的に使用されているものではなくて、混和材料としてきわめて一般的に用いられているもの、または破碎骨材中に普通に存在すると考えられる岩石の微粉部分に相当するものであって、それらを代表するように選んだのである。したがって、これら微粉末を用いたモルタルまたはコンクリートの試験結果から、微粉末がコンクリートにおよぼす効果を一般的に論ずることができると考えられる。

微粉末の粉末度は、実際に用いられる微粉末の粉末度の範囲で、ブレン比表面積 $2500 \text{ cm}^2/\text{g}$ ないし $6500 \text{ cm}^2/\text{g}$ とした。

試験の期間が長期にわたったため、全期間を通じて同じ品質の微粉末を用いることができず、それぞれの試験に用いた微粉末の品質は相違したが、一シリーズの試験には一定の微粉末を用いているので、試験の目的に対しては支障ないものとする。試験に用いた微粉末の物理的性質および化学成分を一括して表示すると、それぞれ表-1 および表-2 のようである。

試験に用いた微粉末のそれぞれについて簡単に説明するとつぎのようである。

a) フライ アッシュ 試験に用いたフライ アッシュは、わが国で最も一般に用いられているものの中から数

表-1 試験に用いた微粉末の物理的性質

名 称	記号	比重	粉 末 度			粒 度 分 布					
			ブレン比表面積 cm^2/g	0.088mmふるい 残分%	0.044mmふるい 残分%	アンドレアーゼン ピケットによるもの %*					
						50 μ	40 μ	30 μ	20 μ	10 μ	5 μ
フライ アッシュ	F-32	2.08	3 340	4.4	17.8	81.1	74.3	65.2	48.5	27.6	12.1
	F-35	2.17	3 600	2.1	11.2	—	78.6	69.0	46.2	20.6	6.9
	F-36	2.18	3 620	2.1	11.1	87.9	80.6	66.4	45.5	20.3	9.0
	F-37	2.11	2 910	4.7	18.2	83.9	72.2	61.6	42.4	20.1	7.8
	F-38	2.41	3 390	1.0	14.6	—	92.9	86.4	66.4	36.9	17.5
スラグ粉末	SI-1	2.91	3 880	1.2	9.5	—	83.7	68.2	51.5	28.9	11.5
硬砂岩粉末	K-1	2.67	3 640	21.4	43.5	—	51.9	44.2	33.9	20.7	12.6
石灰石粉末	L-1	2.72	3 430	3.4	17.0	—	80.5	66.0	44.9	24.5	11.4
フライ アッシュ	F-1	2.09	2 970		2.1	風ふるいによるもの%**					
	F-2	2.01	3 680		16.3						
	F-3	2.05	3 810		13.0						
	F-4	2.15	3 330		2.0						
						15 μ	20 μ	30 μ	40 μ		
ケイ砂粉末	S-11	2.65	2 310	9.1	39.8	81.1	75.8	64.9	55.1		
	S-12	"	3 460	0.8	14.1	72.1	64.5	49.3	42.0		
	S-13	"	4 310	0.3	5.6	65.1	56.8	39.6	26.1		
	S-14	"	6 570	0.4	0.5	52.1	39.8	19.4	5.9		
石灰石粉末	L-11	2.72	2 610	28.9	41.6	70.5	58.7	49.7	47.5		
	L-12	"	3 250	12.6	28.2	65.3	50.2	38.9	33.3		
	L-13	"	4 190	3.4	17.4	58.7	40.5	28.9	23.2		
	L-14	"	6 240	2.4	9.8	55.7	40.9	18.7	13.7		

* その寸法よりも小さい粒子の%

** その寸法よりも大きい粒子の%

表-2 試験に用いた微粉末の化学成分(%)

名 称	記 号	強熱減量	シリカ SiO ₂	アルミナ Al ₂ O ₃	酸化鉄第2鉄 Fe ₂ O ₃	酸化カルシウム CaO	マグネシア MgO	無水硫酸 SO ₃	湿分	計
フライ アッシュ	F-32	0.90	59.66	25.86	5.82	3.30	1.09	0.05	(0.17)	96.68
"	F-35	4.00	59.62	24.66	4.94	5.04	1.78	0.56	(0.31)	97.60
"	F-36	2.63	55.42	25.08	6.16	5.77	1.88	0.60	(0.29)	97.54
"	F-37	2.15	58.14	25.11	6.09	3.89	1.75	0.37	(0.37)	97.50
"	F-38	2.22	52.64	25.35	9.51	4.90	1.81	0.45	(0.24)	96.88
スラグ粉	S1-1	0.30	31.53	16.97	0.69	40.72	5.88	0.75	(0.03)	97.14
硬 砂 岩	K-1	4.25	63.62	16.02	5.30	3.29	2.15	—	(0.65)	94.63
石 灰 石	L-1	43.30	0.74	0.64	0.20	54.83	0.35	—	(0.16)	100.06
フライ アッシュ	F-1	0.13	60.90	26.47	3.19	4.72	1.41	0.12	(0.03)	96.94
"	F-2	1.28	61.96	27.33	3.99	1.95	0.88	0.05	(0.14)	97.44
"	F-3	1.06	60.82	27.42	4.48	2.26	1.14	0.17	(0.10)	97.35
"	F-4	1.04	55.88	27.44	5.56	4.84	1.77	0.85	(0.18)	97.38

種を選んだものである。

フライ アッシュ F-32, F-35, F-36, F-37 および F-38 の 5 種は、主として 4. の微粉末がコンクリートの強度におよぼす影響を一般的に検討するための試験に用いたものである。5 種について品質を比較すると、比重で 2.08~2.41, プレーン比表面積で 2910~3620 cm²/g, 44μ ふるい残分で 4.6~18.2% と相互にかなりの差がある。また、化学成分では SiO₂ の最大が F-32 の 59.6%, 最小が F-38 の 52.6% で若干の差があるが, Al₂O₃ はいずれも約 25% で大差はない。これら 5 種のフライ アッシュの可溶分析の結果は 表-3 のようであって、可溶シリカでは 25.7 ~31.5%, 可溶アルミナ

表-3 フライ アッシュの可溶成分

フライ アッシュ	可 溶 成 分 %	
	SiO ₂	Al ₂ O ₃
F-32	31.5	13.0
F-35	29.0	14.8
F-36	26.4	17.7
F-37	25.7	11.7
F-38	26.5	17.4

では 11.7~17.7% で、それぞれかなりの差がある。

フライ アッシュ F-1, F-2, F-3 および F-4 は主として 6. の結合水量, 単位固相容積などの測定のための基礎実験に用いたものである。比重は 2.01~2.15, プレーン比表面積 2970~3810 cm²/g, 44μ ふるい残分 2.0~16.3%, SiO₂ 55.8~61.9% で、相互にかなりの品質の差がある。

b) スラグ粉末 試験に用いたスラグ粉末は、高炉セ

メントとするために、セメント工場においてスラグのみを粉砕したものの一部を試料として採取したものである。ここでは、高炉セメントとしての特性を調べるのが目的ではなく、スラグ粉末がセメントペースト中で化学的活性が高くて、材令の初期から化学反応による効果が明瞭に示されることが明らかなので、ほかのポゾランや岩石粉末などの効果と比較するために用いたのである。

c) 岩石粉末 岩石粉末は石灰石粉末、硬砂岩粉末およびケイ砂粉末を用いた。いずれもセメントペースト中ではほとんど化学反

応をおこさないと考えられる。

石灰石粉末は、いずれも奥多摩産の石灰石を試験用ボールミルで粉砕し、所要の粉末度としたもので、L-1 は主として 4. の試験に、L-11~L-14 は主として 6. の試験に用いた。

硬砂岩粉末 K-1 は小河内ダムの工事に用いられた硬砂岩の砕砂をボールミルで粉砕したもので主として 4. の試験に用いた。

ケイ砂粉末 S-11~S-14 は相馬産ケイ砂をボールミルで粉砕して所要の粉末度としたもので、主として 6. の試験に用いた。

本文はこれら微粉末がコンクリートの強度におよぼす影響を述べたものであって、そのためにはこれら微粉末がコンクリートのウォーカビリティーにおよぼす影響についても述べる必要があるが、同種の微粉末を用いて行なった“微粉末がコンクリートのウォーカビリティーにおよぼす効果に関する基礎研究”はすでに報告した⁸⁾ので本文では省略する。

(2) セメント

試験に用いたセメントは、主として普通ポルトランドセメントであり、一部の試験には中層熱ポルトランドセメントおよび早強ポルトランドセメントを用いた。これらのセメントはいずれも、きわめて普通の工事に用いられているものの中から任意に試験用として採取したも

表-4 セメントの試験成績

種 別	記号	比重	粉 末 度		凝 結			フロー mm	強 さ kg/cm ²							
			プレーン cm ² /g	88μ ふるい残 分 %	水 量 %	始 発 時 分	終 結 時 分		曲 げ				圧 縮			
									1 日	3 日	7 日	28日	1 日	3 日	7 日	28日
普通セメント	1 702	3.16	2 970	4.8	26.3	3-25	5-30	228	20.3 30.3	25.7	36.8	63.6		97	159	342
〃	1 755	3.16	3 120	2.5	28.5	3-00	4-35	243		30.8	46.0	70.9		117	213	426
中庸熱セメント	5 139	3.21	3 190	1.5	25.8	2-28	3-55	263		24.9	39.6	72.2		82	147	364
普通セメント	NA	3.16	2 990	2.6	25.8	2-42	3-58	236		24.1	39.4	66.4		96	178	395
〃	NB	3.17	3 360	3.5	26.0	2-07	3-27	237		30.8	47.1	68.4		126	232	445
〃	NC	3.15	2 970	3.4	25.8	2-47	4-06	233		27.3	42.0	64.0		108	203	401
早強セメント	VD	3.13	4 200	1.1	27.8	2-57	4-18	242		48.1	60.3	77.7	77	205	322	477
〃	VE	3.15	4 070	0.7	29.5	2-25	4-00	228		50.0	60.4	83.5	118	242	353	523
中庸熱セメント	MF	3.20	3 230	0.6	27.5	2-26	3-51	260	26.3	34.1	71.0		106	154	399	
〃	MG	3.19	3 040	1.3	27.5	2-41	4-01	248	27.1	37.8	68.9		110	157	385	

表-5 セメントの化学成分

種 別	記号	Loss	Insol	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	計
普通セメント	1702	0.90	0.30	22.62	4.86	3.10	64.97	1.12	1.41	99.28
"	1755	0.64	0.24	22.96	5.09	2.99	64.57	0.97	1.79	99.25
中庸熟セメント	5139	0.61	0.35	23.79	4.43	4.14	64.14	0.88	1.29	99.68
普通セメント	NA	0.74	0.46	22.90	5.19	2.93	64.28	1.41	1.45	99.36
"	NB	0.60	0.44	22.94	5.18	3.02	64.09	1.45	1.58	99.30
"	NC	0.42	0.49	22.51	5.25	2.95	64.25	1.53	1.53	99.16
早強セメント	VD	1.22	0.51	21.75	4.64	2.74	64.94	1.28	2.32	99.40
"	VE	0.76	0.51	21.49	4.69	2.69	65.13	1.22	2.73	99.22
中庸熟セメント	MF	0.43	0.40	23.28	4.17	3.97	64.33	1.02	1.99	99.59
"	MG	0.75	0.45	23.15	4.17	3.87	64.08	1.10	2.01	99.58

のである。試験の期間が長期にわたったため、それぞれの試験によって用いるセメントの品質がわずかず異なっていたが、一シリーズの試験には同一のセメントを用いたので、試験の目的に対しては支障ないものとする。

これらのセメントの JIS による試験の結果および化学成分はそれぞれ表-4 および表-5 のようである。

(3) 骨 材

コンクリートの試験に用いた骨材は、主として相模川産の砂利および砂であり、一部の試験には安倍川産の砂利も用いた。また、硬化熱の試験は小河内ダムの工事に用いられた硬砂岩の碎石および砕砂を用いて行なった。試験が長期間にわたったため、一定の骨材を全期間を通じて用いることができず、試験によってその品質が異なっていたが、これらの骨材は一般の工事に用いられている良質のものであり、一シリーズの試験には一定の骨材を用いているので、これらを用いた試験の結果から一般的なことを論ずることができると考えられる。コンクリート試験に用いた骨材の JIS による試験の結果は、表-6 お

表-6 粗骨材の物理的性質

種 別	産 地	記 号	比重	吸水量 %	単位容 積重量 kg/m³	ふるい分け試験						
						網ふるい(mm) の通過分 %					粗粒率	
						40	30	20	10	5		
川砂利	相模川	G ₁	2.68	1.29	1 732	100	100	60	20	0	7.20	
"	"	G ₂	2.68	1.30	1 797			57	16	0	7.27	
"	安倍川	G ₃	2.65	1.12	1 711			100	85	23	0	6.92

表-7 細骨材の物理的性質

種別	産地	記号	比重	吸水量 %	洗い 試験 %	単位容 積重量 kg/m ³	ふるい分け試験							
							網ふるい(mm)の通過分						粗粒率	
							5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15		
川砂	相模川	S ₁	2.60	2.70	0.86	1 677	100	91	74	42	15	1	2.74	
"	"	S ₂	2.60	3.00	0.80	1 704	100	86	67	46	15	2	2.88	
"	"	S ₃	2.64	2.41	0.77	1 701	100	86	67	44	18	3	2.82	

表-8 モルタル試験用ケイ砂のふるい分け試験

種 別	網ふるい (μ) の通過分 %					
	1 190 以上	1 190 ~840	840~590	590~297	297~105	105 以下
A 相馬砂	0	43	52	5	0	0
B 豊浦砂	0	29	35	0	98	2
A : B = 2 : 1 (混合)	0	29	35	3	32	1

よび表-7 のようである。

粗細骨材はそれぞれ3種にふるい分け、表面乾燥飽和状態として貯蔵したものを用いた。

セメントペースト部分の結合水量や単位固相容積などの基礎実験はモルタルについて行なったが、モルタルには豊浦産標準砂1に対し相馬ケイ砂2の割合で混合したものを用いた。これらの砂はセメントの試験用としてその安定性が十分

に吟味されているものである。それぞれの砂および混合砂のふるい分け試験結果は表-8 のようである。

3. 試験の方法

(1) コンクリート

4. で述べる微粉末がコンクリートの強度におよぼす効果を一般的に検討するための試験には、普通ポルトランドセメント 1755、粗骨材 G₁ および細骨材 S₁ を用い、中庸の気候の土地につくられる普通の構造物およびダムコンクリートをめやすとして配合を選んだ。すなわち、微粉末を用いないコンクリート（以下基本コンクリートと呼ぶ）の水セメント比は、普通の構造物および重力ダムの外部コンクリートをめやすとして 55%、ダム内部のコンクリートのめやすとして 70% とした。

基本コンクリートは、スランプ 7 cm、リモール ジング数（リング間隔 70 mm）32 となるように配合を決め、各種微粉末を用いる場合は、微粉末を用いたコンクリートのスランプおよびリモール ジング数が基本コンクリートと等しくなるように配合を決めた。

コンクリートに微粉末を用いる方法はいろいろあるが、4. の試験では、ボゾランの一般的な使用方法を対象として微粉末を単位セメント量の一部とおきかえて用いる方法と、微粉末を骨材の粒度調整のために用いたり、破砕した骨材中に岩石粉末が混入している場合を対象として、骨材の一部を微粉末でおきかえる方法を選んだ。

コンクリートの強度について基礎的に研究する目的で行なった試験では、水セメント比を 40~70% まで変え、スランプも 2~12 cm まで変えた。一部 AE 剤や分散剤を用いた試験も行なった。

コンクリートは 25 l 練り試験用ミキサを用い、全材料を投入したのち 3 分間練り混ぜた。練り終わったコンクリートは JIS によってスランプ、空気量、ブリージング水量などの試験を行なうとともに圧縮強度試験用の供試体をつくった。供試体は材令 1 日で型わくを取りはずし、20°C の水中で養生して所要の材令で圧縮強度を試験した。圧縮強度は 3 個の供試体の平均値をとった。

(2) モルタル

強度に関して基礎的に研究するために、標準砂を用いたモルタルについて、強度、結合水量、単位固相容積などを試験した。モルタルの配合はコンクリート中のモルタル部分とできるだけ対応させるようにしたが、強度に関して基礎的に研究するためにはかなり広範囲の配合について検討する必要がある、水セメント比 40~70%、フロー 120~220 mm の各種の組合せを選び、AE 剤、分散剤、塩化カルシウムなどを用いたものもあり、もちろん微粉末を用いた場合もあって、種類が多い。配合の詳細は省略する。

微粉末の影響を試験するための、微粉末を用いない基本となるモルタルは、水セメント比を 55% および 70% とし、フローは 185 mm となるように定めた。微粉末を用いる場合は、その微粉末を基本モルタルの砂の一部とおきかえた。ただしこの場合水量を変えることはしなかった。

モルタルは ASTM C 305-58 T に示されている方法によって、試験用モルタル ミキサを用いて練り混ぜた。

強度試験用モルタル供試体は JIS R 5201 に示されている 4 cm×4 cm×16 cm のはりである。

試験したモルタルの大部分はフロー値が 200 mm 以下であって、JIS の方法では均一な供試体をつくるのがむずかしい。それで、JIS の規定による突き棒を相対する両辺から 7.5 mm ずつ切り取って、20 mm×35 mm の表面をもつ突き棒をつくらせて用いた。モルタルは 2 層に分けて詰め、各層を突き棒の先端がモルタルに約 4 mm 入る程度に 20 回ずつ突いた。打ち込んだらただちに定規で型わく上面に合わせて表面を仕上げ、型わくを含めて精密に重量を測定し、型わく重量を差し引いて重量法によって空気量を求めた。供試体は打ち込んでから 24 時間湿室中で保存したのち、型わくを取りはずし 20°C の水中に浸して養生した。所要材令に達した供試体は、JIS R 5201 にしたがって強度試験を行なった。

別に同じ配合のモルタルを練り混ぜて、ASTM C 343-54 T によってブリージング水量を試験した。

(3) モルタルおよびコンクリート中のペースト部分の結合水量、ゲル水量および単位固相容積の試験

微粉末がコンクリートの強度におよぼす影響を基礎的に研究するために、主としてモルタルについて、そのペースト部分の結合水量、ゲル水量、単位固相容積などを試験した。

a) 硬化モルタル中の水量、セメント量および砂量の測定

① 硬化モルタル中の水量：硬化モルタルの単位容積重量は、所定材令の強度試験を行なうまへのモルタル供試体について、水中重量と、供試体を表面乾燥飽和状態としたときの空気中重量とを精ひょうして、両者の差か

ら求めた。

② 強熱試験のための試料の採取：強度試験を終わったモルタル供試体の半折片 3 個をとり、小型ジョークラッシュャーをとおして 1.2 mm ふるいを全部とおるように粉碎し、試料分取器で分割して、15~20 g の試料を磁製ルツボに採った。試料の取り扱い手早く行ない、重量の測定が終るまでは、湿布で入念に包んで水分の蒸発を防いだ。

③ 強熱試験：採取した試料は精ひょうしたのち、まず 105°C の定温乾燥器に入れて約 24 時間乾燥し、ついで 250°C の電気炉に移し、約 3 時間かかって徐々に温度をあげて 800°C とし、800°C となってから 30 分間その温度に保ち、これをデシケータに移して常温まで冷却し、加熱前後の重量差を測った。

105°C で予備乾燥を行なったのは、多量の自由水をふくむ試料を高温の電気炉に入れると、水分の急激な蒸発によって試料が散送するので、これを防ぐためと、105°C 乾燥の試料と強熱後の試料の重量差から、セメントの結合水量を求め、のちに述べる過塩素酸マグネシウムによる常温真空乾燥法で求めた結合水の試験結果をチェックするためである。

④ 各材料の計算：強熱した試料の中にセメント、砂および微粉末が最初に配合した割合に正確にふくまれていると仮定し、セメント、砂および微粉末の強熱減量試験の値を考慮して、試料中の各材料の量を計算によって求めた。また、モルタル試料の強熱減量および原材料の強熱減量とから、試料中の全水量を計算した。このようにして求めた各材料の割合およびモルタルの単位容積重量から、モルタル単位容積中の各材料およびペースト部分の量、ペースト部分単位容積中のセメント量および水量を計算した。

b) 結合水量の測定 前項と同様の方法で採取したモルタル試料 15~20 g をひょう量ビンに入れ、これを過塩素酸マグネシウム ($\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) を入れたデシケータに入れ、真空として定重量となるまで乾燥した。乾燥によって失なわれる水量と強熱試験による減量との差をとって、セメントの結合水量とした。硬化したセメントペースト中で、化学的に水和物と結合し、水和物の一部となっている水分が結合水である。セメント水和物は非常に複雑な多くの成分よりなり、結合水の結合状態も水和物の種類によって様々ではない。したがって、結合水をほかの状態の水と分離することは困難であって、結合水の試験方法として多くの方法が考えられているが、いずれの方法によっても結合水量の多少を示すめやすが得られるにすぎない。また、したがって、試験方法によって結合水の試験値も相違する。この試験で過塩素酸マグネシウムを用いた常温真空乾燥法をとったのは、この試験方法が既往の多くの研究に用いられており、試験

方法としても検討を経ていることによる^{9),10)}。105°Cで加熱乾燥したのち、強熱試験を行なって、その重量差から求められる結合水量は、過塩素酸マグネシウムによる真空乾燥法の場合の結合水量とほぼ等しい値を示す。本試験では乾燥した試料を用いて、のちに述べるゲル水（吸着水）および単位固相容積の試験をしたので、加熱によって水和物の状態が変化することをおそれ、常温真空乾燥法をとり、その試験値を正とした。なお、過塩素酸マグネシウムは、吸水によって結晶水が2分子から4分子、6分子と増加し、その増加にしたがってデシケータ内部の蒸気圧が増し、試料の乾燥状態が変化する¹⁰⁾。それで、105°C乾燥による結合水量の試験値を副として、常温真空乾燥による試験値をチェックした。

c) ゲル水量の測定 セメント水和物は非常に微細なゲル構造を持ち、物理的な表面力によって、水和物と固く結合している水量は無視できない量である。この表面力によって結合している水をゲル水と呼ぶ。水和物とゲル水との結合は強固で、化学的に結合しているのではないが、水分子はほとんど固相と考えられ、したがって硬化したセメントペーストの強度その他の性質と深い関係がある。しかし、このような状態の水分を、結合水または自由水と区分することは容易でない。Powers氏⁹⁾やCopeland氏¹¹⁾は、比較的水セメント比の小さな十分水和の進んだセメントペーストでは、未水和セメント、水和物およびゲル水だけからなり、自由水をふくまないと仮定し、材令2年以上のペーストの水分を試験してゲル水量を求めている。そして、別に行なった水蒸気吸着試験の結果求めた単分子層吸着水量の試験結果と関連させて、ゲル水を単分子層吸着水量の倍数で示し、Powers氏は4倍、Copeland氏は2.38倍であるとしている。単分子層吸着水量は、常温で乾燥したセメントペースト試料に、0~100% R.H.の間の適当な温度で順次水蒸気を吸着させ、図-1のような等温吸着曲線を求め、この吸着曲線の30% R.H.以下の部分にB.E.T.のガス吸着理論を適用して、計算によって求められる^{11),12)}。しかし、セメントペーストにおいて、B.E.T.の吸着理論が成り立つのは、40% R.H.以下の低湿度の範囲であって、単分子層吸着水量の2.38倍、または4倍であるとされているゲル水の吸着が、ほぼ80% R.H.前後であることを考えると、ゲルの吸着理論によって求められる単分子層吸着水量の倍数（ゲル水と考えられる水分の吸着層数）をとってゲル水と定義するのは適当ではないと考えられる。80% R.H.付近における水分の吸着は一般に毛細管に対する水分の凝縮として考えられており¹⁰⁾、ゲル水の量も、セメントペースト中の毛細管中の水として考えた方が妥当であると考えられる。

硬化セメントペースト中で水で埋められている間げきは、水和物のゲルの特性にもとづく間げき（かりにゲ

ル間げきと呼ぶ）と、最初セメント粒子相互の間げきとして相当広い空間であったものが、水和物の析出によって逐次せめられてきた間げき（かりに毛細管間げきと呼ぶ）とにわけることができよう。ゲル間げきは、ゲルの特性による間げきできわめて微細なものであり、毛細管間げきはゲル間げきにくらべて大きな間げきであると考えられる。

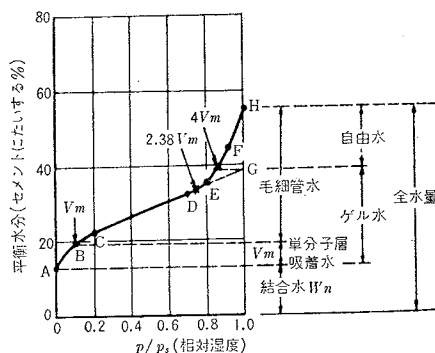
図-1はセメントペーストの等温吸着曲線を図解したものであるが、ほとんどの吸着曲線において、20(C点)~70% R.H.(D点)付近までは、吸着量は相対湿度の増加にしたがって直線的に増加し、70% R.H.をこすと吸着量は徐々に増加してついに飽和(H点)に達している。

さきに述べたゲル水の限度とみなされる単分子層吸着水量の2.38倍あるいは4倍の各点がすべてD-H間にあることは、C-D間の吸着がすべてゲル間げきに対する水分の凝縮によっておこっていることを示すもので、C-D間の吸着曲線の変化がゲル間げきの特性を示していると考えられる。D-H間で急激に吸着水が増加するのは、この間の水の凝縮が主として毛細管間げきに対する凝縮であることを示すものと考えられる。

Powers氏⁹⁾や近藤氏¹⁰⁾はセメントペーストの等温吸着曲線について詳細に発表しているが、これらの試験結果によると、C-D間はほぼ直線とみなされ、このことは、ゲル間げきがある一定の寸法分布を持つことを示していると考えられる。この寸法分布の特性はD点をこしても保たれることが推定され、したがって、ゲル間げきに対する水の凝縮の限界はC-Dを延長して、相対湿度100%の線と交わるG点とするのが最も妥当であると考えられる。G点の吸着水量、すなわちゲル間げきに対する吸着水量をゲル水とし、G-H間の毛細管間げきを埋めている水量を自由水と考える方が、さきに述べたゲル水を単分子層吸着水量の倍数（吸着層数）で表わすにくらべて、セメントペーストの場合には、より妥当であると考えられる。

実際の試験において、G点の位置を求めることは、非

図-1 セメントペーストの等温吸着曲線の図解



常な手数と時間を要する。そこで、既往の多くの等温吸着試験の結果から、G点の位置を求めるとその大部分が図-1におけるA-H線上の80% R.H. 付近にあって、ゲル水の近似値として80% R.H. における吸着水量をとって実用的にいちじるしい差はないと考えられる。

以上の考察にもとづき、この試験では、常温真空乾燥した試料を80% R.H. で保った場合に吸着する水量をゲル水とみなした。80% R.H. を得るには、デシケータ中に硫酸亜鉛の飽和水溶液を入れて密閉した。

なお、80% R.H. において平衡となる毛細管中の水面の曲率半径は、毛細管凝縮理論によって計算すると 0.005μ となる。

d) 単位固相容積の測定 未水和セメント、水和物およびゲル水をふくめて固相と考え、セメントペースト単位容積中の固相部分の容積を単位固相容積と名づけた。

前項の試験によってゲル水を吸着させた試料について、水を媒体としてピクノメータによってその容積を求め、その結果と、1項の試験によって求めた各材料の配合割合とから、単位固相容積を計算した。ピクノメータの媒体として水を用いたのは、ほかの媒体を用いて真空とすることにより、吸着させたゲル水が蒸発することをおそれたためである。

(4) 断熱温度上昇試験方法

セメントの水和の進む程度をコンクリートによって、断熱熱量計を用いて試験した。試験の装置はコンクリートの温度上昇にしたがって自動的に供試体周囲の温度を高め、常にコンクリート温度とその周囲の温度とを等しく保つことによって、断熱状態のコンクリートの温度上昇を試験できるようにしたものである。コンクリートの初期温度は 20°C とし、実験の都合上、温度の測定は材令7日で打ち切った。

4. 鉱物質微粉末がコンクリートの強度におよぼす影響

(1) 微粉末の化学的活性がコンクリートの強度におよぼす影響

鉱物質微粉末がコンクリートの強度におよぼす影響には、微粉末がセメントペースト中で化学反応をおこして水和物をつくるための影響、微粉末の使用によるコンクリートのウォーカビリティおよび空気量の変化の影響などが考えられるが、化学的活性の影響が最もいちじるしいと考えられるので、化学的活性の異なる数種の微粉末を用いたコンクリートの圧縮強度および引張強さ係数を試験して比較検討した。

試験に用いた微粉末は、スラグ粉末、フライアッシュ、石灰石粉末および硬砂岩粉末である。すなわち、それ自身潜在水硬性を持つものとしてスラグ粉末を、ポゾ

ラン活性を持つものとしてフライアッシュを、またセメントペースト中で化学反応をおこさない(安定)と考えられるものとして石灰石粉末および硬砂岩粉末を選んだのである。

まず、粗骨材最大寸法30mm、スランプ7cm、リモールジング数32となるように、微粉末を用いないコンクリート(基本コンクリート)の配合を決め、そのセメントの一部または骨材の一部をそれぞれの微粉末でおきかえて、スランプおよびリモールジング数が基本コンクリートと等しくなるように、試験によって配合を決めた。これらコンクリートの配合、水量、ブリージング試験などのまだ固まらない場合の試験については、すでに報告した⁹⁾。

供試体は直径10cm、高さ20cmの円柱形で、標準養生を行なって、圧縮強度、および引張強さ係数を試験した。

単位セメント量291kg、水セメント比55%の基本

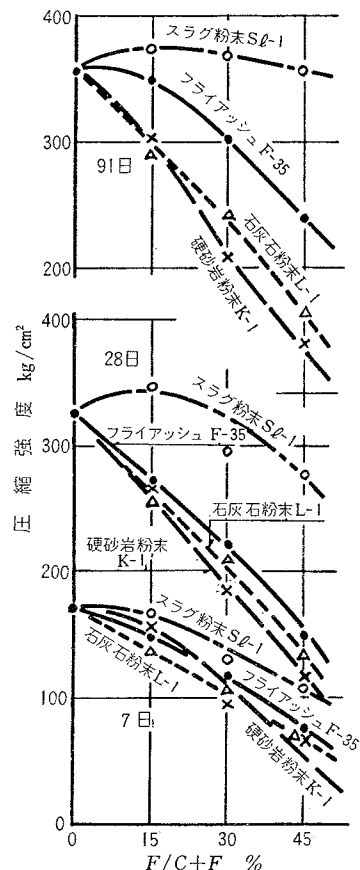
コンクリートのセメントの一部を4種の微粉末でそれぞれおきかえた場合の圧縮強度試験結果は、図-2のようである。

単位セメント量243kg、 $w/c=70\%$ の基本コンクリートについて同様の試験を行なった結果およびこれらの試験に対応する引張強さ係数試験の結果も、図-2とまったく同様な傾向が示された。図-2に示されるように、材令7日の圧縮強度はどの微粉末を用いた場合もおきかえ率の増加とともに、ほぼ直

線的に低下するが、材令にともなう圧縮強度の増加の傾向は微粉末の種類によっていちじるしく異なる。

スラグ粉末を用いた場合は、材令7日では、おきかえ

図-2 セメントの一部を微粉末でおきかえたコンクリートの圧縮強度(単位セメント微粉末量291kg)



率が増すにしたがって圧縮強度がほぼ直線的に低下するが、材令7日以後の圧縮強度の増加はほかの3種の微粉末にくらべて最もいちじるしい。たとえば、セメント30%をスラグ粉末でおきかえた場合の圧縮強度の基本コンクリートの圧縮強度に対する比率（以下単に圧縮強度比率と呼ぶ）は、材令7日では68~75%であるが、材令28日では91~99%、材令91日では104~105%、材令182日では97~102%となって、材令91日以降では基本コンクリートと等しいかあるいはわずかに高い強度を示した。また、材令7日の圧縮強度も、ほかの3種の微粉末の場合とくらべると最も高い値を示している。このような試験の結果はスラグ粉末がセメントペースト中で高い化学的活性を持っており、しかもその作用が材令の比較的短いうちから行なわれることを示すものである。この試験では、高炉セメントとして用いたのではないが、試験結果は高炉セメントに関する多くの既往の研究結果と同様な傾向を示している。

フライアッシュを用いた場合の圧縮強度は、材令7日および28日では、岩石粉末を用いた場合と同様であって、おきかえ率が増すにしたがって低下するが、材令28日以後の材令にともなう増加がいちじるしく、使用量によっては、材令91日以降は基本コンクリートとほぼ等しいかあるいは高い強度を示す。たとえば、単位セメント量291kgの基本コンクリートのセメントの15%を

フライアッシュでおきかえた場合の強度比率は、材令7日で86%、28日で84%であるが、91日で98%、182日で99%となって、長期材令ではほとんど基本コンクリートと等しい圧縮強度が得られた。

このような、フライアッシュを用いたコンクリートの材令28日以後の強度の増加がいちじるしいことは、フライアッシュが長い期間にわたって、セメントペースト中で徐々に反応して水和物をつくる、いわゆるポズラン反応の行なわれていることを示すものである。おきかえ率の等しい場合、材令7日でも28日でも、ほぼ等しい圧縮強度比率を示したことは、標準養生では試験に用いたフライアッシュF-35が、材令28日まででは、ほとんどポズラン反応をおこしていないことを示すものと考えられる。フライアッシュを用いた場合の材令7日および28日の圧縮強度が、おきかえ率の等しいほかの2種の岩石粉末を用いた場合の圧縮強度にくらべてわずかに高い強度を示したのは、主としてフライアッシュを用いた場合の単位水量が、ほかの2種の岩石粉を用いた場合よりも少なくなったためと考えられる。

石灰石粉末および硬砂岩粉末をセメントの一部とおきかえて用いた場合は、おきかえ率の増加にともなうほぼ直線的に圧縮強度が低下し、それぞれの場合の圧縮強度比率は、材令が経過してもほとんど変化しない。すなわち、これら岩石を破碎した微粉末は、セメントペースト中ではほとんど安定であることを示すものと考えられる。

微粉末をセメントの一部とおきかえて用いる方法は主としてポズランについてであり、ポズランとしてわが国で最も一般に用いられているフライアッシュ5種について、前記と同様な方法で試験して、その効果について検討した。圧縮強度の試験結果は表-9のようである。また、引張強さ係数の試験結果も、圧縮強度の場合と同様な傾向が得られた。

5種のフライアッシュは、いずれもセメントの一部とおきかえた場合、材令7日および28日の試験では、強度はおきかえ率にしたがって低下するが、材令91日の強度は、基本コンクリートの強度に近づくか、一部のものは基本コンクリートよりも高い強度を示し、ポズランとして有効であることを示している。

たとえばおきかえ率30%の場

表-9 フライアッシュを用いたコンクリートの圧縮強度

フライ アッシ ュ	単 セ メン ト 量 kg	位 置 率 %	単 セ メン ト 量 kg	位 置 率 %	単 セ メン ト 量 kg	位 置 率 %	W C+F %	絶 対 対 比 率 %	圧 縮 強 度					
									圧 縮 強 度 Kg/cm ²			強 度 比 率 %		
									7日	28日	91日	7日	28日	91日
なし	284	0	284	0	156	55.0	43.0	128	290	364	100	100	100	100
F-32	284	15	241	43	153	53.9	43.2	109	241	351	85	83	96	96
F-35	284	15	241	43	154	54.2	43.2	109	262	389	85	90	107	107
F-36	284	15	241	43	155	54.6	43.0	107	244	362	84	84	99	99
F-37	284	15	241	43	155	54.6	43.3	99	231	361	77	80	99	99
F-38	284	15	241	43	154	54.2	43.1	95	229	310	74	79	85	85
F-32	284	30	199	85	146	51.4	43.4	79	192	319	62	66	88	88
F-35	284	30	199	85	150	52.8	43.6	79	170	317	62	59	87	87
F-36	284	30	199	85	157	53.2	43.5	76	180	306	59	64	84	84
F-37	284	30	199	85	150	52.8	43.6	66	164	296	52	57	81	81
F-38	284	30	199	85	149	52.5	43.5	79	174	281	62	60	77	77
なし	234	0	234	0	164	70.0	45.5	56	143	211	100	100	100	100
F-32	234	15	199	35	161	68.8	45.7	46	115	200	82	80	95	95
F-35	234	15	199	35	162	69.2	45.8	47	119	210	84	83	100	100
F-36	234	15	199	35	163	69.7	45.5	49	121	204	88	85	97	97
F-37	234	15	199	35	163	69.7	45.6	47	127	222	84	89	105	105
F-38	234	15	199	35	160	68.4	45.5	51	124	191	91	87	91	91
F-32	234	30	164	70	156	66.4	46.0	34	86	167	61	60	79	79
F-35	234	30	164	70	158	67.5	46.1	36	89	178	64	62	84	84
F-36	234	30	164	70	160	68.4	46.0	38	88	194	68	62	92	92
F-37	234	30	164	70	158	67.5	46.1	37	90	186	66	63	88	88
F-38	234	30	164	70	155	66.2	45.8	38	90	149	68	63	71	71

- 注 1. 粗骨材最大寸法 30 mm, スランプ 7.0 cm, リモールジング数 32
 2. 強度比率はフライアッシュを用いない場合を100とする
 3. 21°C 水中養生

合の圧縮強度比率は、7 日で 52~68%, 28 日で 57~66% であるが、材令 91 日では 71~92% となって、どのフライ アッシュを用いた場合でも材令 7 日および 28 日の強度比率にくらべて、材令 91 日の強度比率が大きくなっている。しかし、材令 91 日の圧縮強度についてみると、たとえばおきかえ率 15% の場合、F-32 ないし F-37 の強度比率は 95~107% であるのに対し、F-38 は 85~91% ではほかの 4 種にくらべて最も低い強度を示した。このように、どのおきかえ率の場合も、材令 91 日の圧縮強度および引張強さ係数とも、F-38 を用いたコンクリートが最も低い値を示している。F-38 はほかの 4 種とくらべ粉末度も高く微細粒子が多くて、しかも球形粒子の割合も多く、これを用いてコンクリートの単位水量を最も多く減らすことができたにもかかわらず、材令 91 日の強度がほかの 4 種とくらべて比較的低い値を示し、フライ アッシュの品質によってポズラン反応の程度が異なることが認められる。

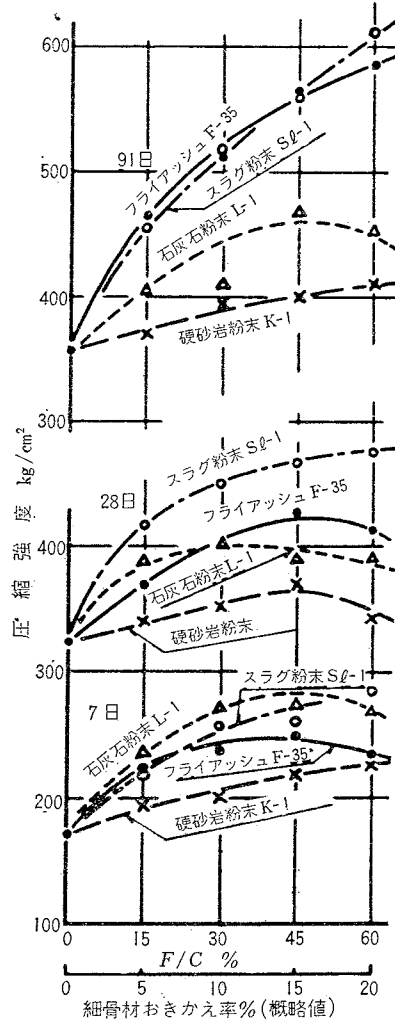
フライ アッシュの化学成分がコンクリートの強度におよぼす影響に関する研究としては、R.E. Davis など⁽¹²⁾、L.J. Minnick⁽¹³⁾、R.H. Brink など⁽¹⁴⁾をはじめ多くの研究があるが、いずれも化学成分と強度との間に一様な関係がないことを報告している。また、フライ アッシュのポズラン活性に関して発表された研究はきわめて少ない。今後フライ アッシュのポズラン活性に関する基礎研究が必要と思われる。

つぎに単位セメント量を一定に保ちながら微粉末を骨材の一部とおきかえて用いた場合に、微粉末がコンクリートの強度におよぼす影響を確かめるために、前記試験に用いたと同じ 4 種の微粉末をそれぞれ基本コンクリートの骨材の一部とおきかえたコンクリートについて、強度試験を行なって検討した。

微粉末の使用量と圧縮強度との関係は図-3 のようである。同時につくった供試体について行なった引張強さ係数試験結果も、図-3 とほとんど同様な傾向を示した。これらの試験結果に示されるように微粉末を骨材の一部とおきかえて用いると、微粉末の種類によって差はあるが、各材令において 4 種の微粉末を用いた場合とも共通して、圧縮強度および引張強さ係数は増加し、強度比率は微粉末の使用量の増加にしたがって増加する。

スラグ粉末およびフライ アッシュを用いた場合はこれらを用いて単位水量が減少すること、およびこれらの化学的性質から考えて、これら微粉末を骨材の一部とおきかえたコンクリートの強度が基本コンクリートに比較して高い値を示すことは当然と考えられるが、石灰石粉末を用いた場合、単位水量の減少がわずかであり、また硬砂岩粉末を用いた場合は単位水量が増加して、水セメント比が増加しているにもかかわらず、圧縮強度および引張強さ係数が増加したことは、安定な微粉末でも、コ

図-3 骨材の一部を微粉末でおきかえたコンクリートの圧縮強度
 (単位セメント量(微粉末をふくまず) 291 kg)



ンクリートの強度にかなりいちじるしく影響をおよぼすことを示すものである。

たとえば、水セメント比 55%, 単位セメント量 291 kg の基本コンクリートの細骨材の約 5%, 10%, 15% および 20% を硬砂岩粉末でおきかえた場合、単位水量比率はそれぞれ 101%, 102%, 103% および 108% で、おきかえ率の増加にともなって増し、したがって水セメント比も増しているのに、圧縮強度比率は材令 28 日でそれぞれ 105%, 110%, 115% および 106% となって、いずれの場合も圧縮強度比率の増加が認められる。

しかし、石灰石粉末や硬砂岩粉末を用いた場合の強度比率は、初期材令において高く、材令の経過にしたがって低下する。たとえば、セメントの 30% の石灰石粉末を骨材の一部とおきかえて用いた場合、7 日、28 日、91 日および 182 日のそれぞれの材令に対して、単位セメント量 291 kg では 160%, 124%, 116% および 117

% であり、単位セメント量 243 kg では、それぞれ 178 %, 144%, 142% および 138% となった。

このように、安定な岩石粉末を骨材の一部とおきかえた場合の影響は、ボゾランなどを用いた場合とその傾向が異なるが、用いる微粉末の品質が適当であって、これを用いて単位水量がいちじるしく増加するようなことがなければ、単位セメント量の 50% 程度まで用いても、強度に対して有害な影響はなく、むしろコンクリートの初期の強度を増加させる効果がある。すなわち、骨材の粒度が適当でない場合に、フライ アッシュ、岩石粉末などを骨材の一部とおきかえて用いること、破碎骨材中に適当な品質の適当量の岩石粉がふくまれることが、コンクリートのウォーカビリティーを改善するのに有効であることが明らかにされているが^{(8), (15)}、このような使用方法は、コンクリートの強度に対しても好影響をおよぼすことが示された。

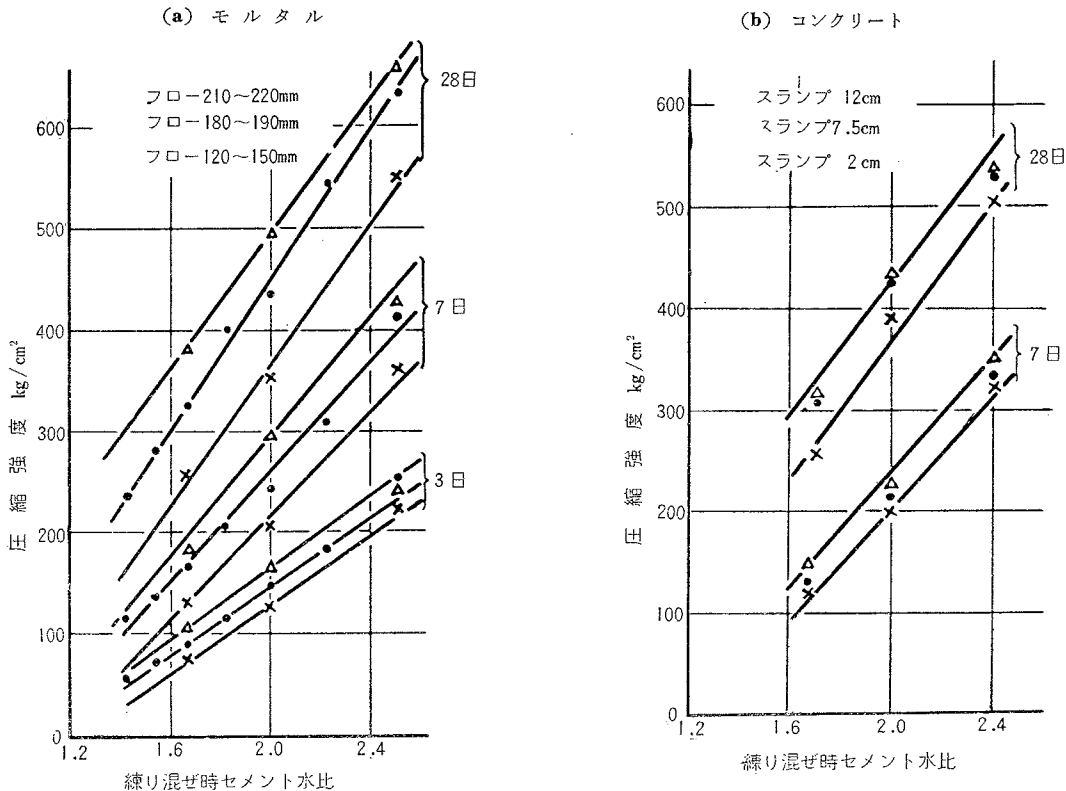
(2) セメントペースト中のセメントの濃さがモルタルおよびコンクリートの強度におよぼす影響

(1) で述べたような試験の方法では微粉末を用いた場合、コンクリートの単位水量、空気量、ブリージング水量などのコンクリートの強度に関係すると考えられる要因が変化するので、各種の微粉末がコンクリートの強度におよぼす影響を概括的に知ることはできるが、その影響が微粉末の化学的活性によるものか、単位水量、空気

量、ブリージングなどの変化によるものかについて、詳細に知ることはできない。それで、微粉末がコンクリートの強度におよぼす影響を詳細に検討するために、まず微粉末を用いないモルタルおよびコンクリートについて、そのうちのペースト部分の濃さが強度におよぼす影響について、基礎的に試験を行なった。

ペーストの濃さは、一般には練り混ぜたときの水セメント比または空げきセメント比で表わされる。水セメント比または空げきセメント比と強度との関係は、R. Feret, D.A. Abrams, O. Graf, I. Lyse, A.N. Talbot などの各氏によって、種々の形式であらわされているが、これらはいずれも、プラスチックなコンクリートを入念に締固めてつくったコンクリートの強度が、ある一定の施工条件のもとにおいてはペースト部分のセメントの濃さに支配されることを示したものである。標準砂(相馬砂および豊浦砂)を用いてつくった水セメント比およびフロー値の相違するモルタルについて、練り混ぜ時のセメント水比と圧縮強度との関係を示すと 図-4 (a) のようである。また、水セメント比およびスランプの相違するコンクリートについて、同様にセメント水比と強度との関係を求めると 図-4 (b) のようである。図-4 に示されるように、プラスチックなモルタルおよびコンクリートでは、そのコンシステンシーがほぼ等しい場合、練り混ぜ時のセメント水比と圧縮強度は、この試験

図-4 練り混ぜたときのセメント水比と圧縮強度との関係



のセメント水比の範囲で、各材令において直線で表わされる関係がある。しかし、コンシステンシーが相違する場合は練り混ぜたときのセメント水比が等しくても強度は相違する。モルタルの曲げ強度試験結果でも同様の傾向が示された。

たとえば、セメント水比2（水セメント比 50%）のモルタルについてみると、材令 28 日でフロー 209 mm, 182 mm, および 141 mm のそれぞれに対して、圧縮強度は 499 kg/cm², 434 kg/cm² および 348 kg/cm² で、フローが小さくなるにしたがって強度が低くなることが認められる。

以上のように、モルタルのフローまたはコンクリートのスランプが異なる場合、セメント水比と強度との関係が同じ直線とならない理由として、打込み方法を同じにしたために、コンシステンシーの相違によって、エントラップト エアが多くなったことが当然考えられる。

また別の原因として、水セメント比が練り混ぜ直後から沈下を終るまでの間において変化することが考えられる。したがって、ペーストの濃さと強度との関係を正確に求めるには、コンクリートの沈下終了時におけるペーストの濃さを求めることが必要と思われる。沈下終了時のコンクリート中のペースト部分のセメントの濃さを正確に求めることは容易でないが、まだ固まらないコンクリートについて試験した空気量が、そのまま硬化した供試体中にふくまれていると仮定し、また、ブリージング水量に相当する沈下があったと仮定すると、空気量試験およびブリージング試験の結果から、沈下終了時のコンクリート中のセメントの濃さを近似的に求めることができる。モルタルまたはコンクリートは、その沈下終了時以後でも、セメントの硬化にともなう収縮があり、また養生中の水の出入による体積変化が考えられるが、まだ固まらない間におこる沈下による体積変化が最も大きく、水中養生を行なえば、体積変化はきわめて少なく、ペーストの濃さに影響する程度はきわめて少ないと考えられる。

すなわち、上記のようにして求めた空げきセメント比は、かなり正確に硬化したコンクリート中のペーストのセメントの濃さを示すものと考えられる。以下、このようにして求めた空げきセメント比を純空げきセメント比と呼ぶ。試験の一部について純空げきセメント比を求め、これを水セメント比または空げきセメント比と比較した例を示すと表-10 のようである。表-10 に示されるように、モルタルおよびコンクリートでは練り混ぜおよび打込み方法を等しくすると、練り混ぜたときの水セメント比が等しくてもコンシステンシーの程度によってたとえばそれが AE 剤を用いた場合でなくても、空気量が相当大巾に変化して、空げきセメント比が変化し、また貧配合であるほど、単位水量が多いほど、ブリージ

表-10 コンクリートの水セメント比、空げきセメント比および純空げきセメント比

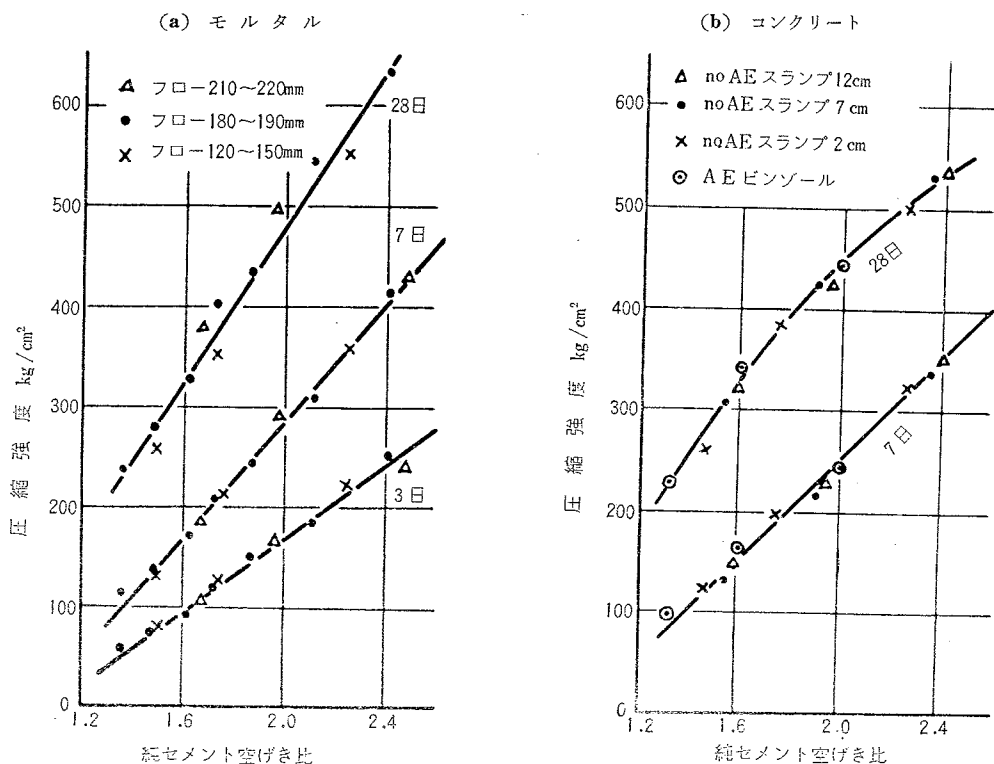
セメント 種別	練り混ぜ 時セメン ト比	スランプ cm	空気量 %	空 げ き セ メン ト 比	ブリージ ング率 %	純空げき セメント 比	純セメン ト空げき 比
NC	0.40	12.0	1.21	0.430	3.15	0.418	2.392
		7.5	1.41	0.437	3.08	0.425	2.353
		2.0	1.77	0.453	2.07	0.445	2.247
	0.50	12.0	1.26	0.538	4.47	0.516	1.938
		7.5	1.56	0.550	4.45	0.528	1.894
		2.0	2.35	0.584	2.95	0.570	1.754
	0.60	12.0	1.55	0.656	4.65	0.628	1.592
		7.5	1.89	0.672	4.62	0.644	1.553
		2.0	2.49	0.703	3.63	0.682	1.466
NB	0.50	7.5	1.80	0.561	2.87	0.545	1.835
VE	0.50	7.0	1.73	0.555	2.47	0.545	1.835
MG	0.50	7.5	1.60	0.552	2.35	0.541	1.848
NC ピンゾール	0.50	7.5	4.10	0.648	3.55	0.631	1.585
NC ボゾリス	0.50	7.5	4.49	0.665	2.60	0.655	1.531

ング水量が増して、体積変化が大きくなり純空げきセメント比が変化する。たとえば、練り混ぜ時水セメント比 50%、スランプ 2 cm のコンクリートでは、水セメント比と純空げきセメント比との差が7% あるが、水セメント 60%、スランプ 12 cm の場合、その差は3% にすぎない。図-5 の試験結果および、同じ材料を用いた AE コンクリートの試験結果をもふくめて、純空げきセメント比と圧縮強度との関係を求めると 図-5 のようである。

セメント水比と圧縮強度との関係ではセメント水比が等しくても、コンシステンシーによって圧縮強度または曲げ強度が異なることが認められたが、図-5 のように純セメント空げき比と強度との関係で示すと、コンシステンシーの異なるモルタルまたはコンクリートの試験値の示す各点は、すべてほぼ同一直線上に分布し、純セメント空げき比の等しい場合、コンシステンシーによって強度に差が生ずることは認められない。このような試験結果は 図-4 に示されるような、水セメント比を等しくすると硬練りの場合ほど低い強度を示すことが、主として供試体の打込み方法を等しくしたことによって、硬練りの場合ほど供試体中のエントラップト エアが多くなったため、および単位水量が多いほどブリージング水量が多くなって、ペーストが濃くなったためであることを示すものである。上述のような関係が、セメントの水和の程度がほぼ同様に進んでいる場合にのみ成り立つことはもちろんであって、分散剤によってセメントの水和の程度が異なったり、硬化促進剤やそのほかの混和材料を用いた場合に適用できないことは当然である。

以上の試験結果は、一定の材料を用いたプラスチックなモルタルまたはコンクリートを入念に締固めた場合に、ある養生条件のもとで、混和材料などの作用によって水和の速度が変化することがなければ、その強度は大体において練り混ぜ時のセメント水比に比例し、工事現

図-5 純セメント空けき比と圧縮強度との関係



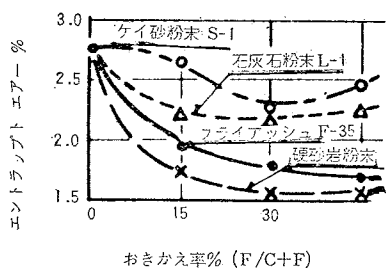
場における実用の目的に対しては十分であるといえるが、さらに空気量およびコンクリートの沈下およびブリージングを考慮に入れて、純セメント空けき比を求めて整理すれば、いっそう合理的に論ずることができることを示すものである。

(3) 微粉末を用いたコンクリートの空気量および純空けきセメント比と強度との関係

(2) で述べた純空けきセメント比と強度との関係から、微粉末を用いた場合、コンクリートの空気量およびブリージング水量が変化して、これらの影響によって、強度の変化がおこることは当然考えられる。微粉末がコンクリートのブリージングにおよぼす影響については、すでに報告した⁹⁾。

微粉末がコンクリートのエントラップドエアーの量におよぼす影響を確かめるために、強度試験の供試体を

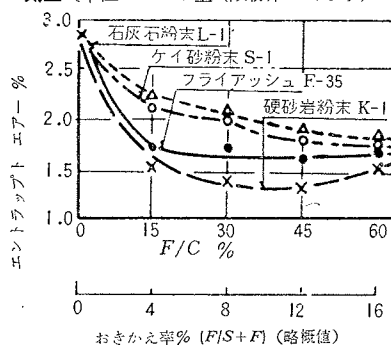
図-6 セメントの一部を微粉末でおきかえたコンクリートの空気量 (単位セメント・微粉末量 243 kg)



つくと同時に、容積方法によって空気量を測定した結果は図-6および図-7のようである。図-6および図-7に示されるように、AE剤を用いなければ、微粉末をセメントの一部とおきかえても、また、骨材の一部とおきかえても、微粉末の使用量が増すにしたがってコンクリートのエントラップドエアーの量が減少する。

たとえば、水セメント比 70%, 単位セメント量 243 kg の基本コンクリートの空気量は 2.81% であるが、セメントの一部をフライアッシュ F-35 でおきかえると、おきかえ率 15%, 30% および 45% のそれぞれに対して、空気量は 1.96%, 1.82% および 1.70% となって、フライアッシュを用いることによってエントラップドエアーは 30~40% 減少した。ほかの破碎によ

図-7 骨材の一部を微粉末でおきかえたコンクリートの空気量 (単位セメント量 (微粉末ふくまず) 243 kg)



って得た微粉末を用いた場合でも同様である。

また、この試験の範囲では、基本コンクリートが貧配合であるほど微粉末の使用によるエントラップトエアの減少はいちじるしく、また、コンクリートの単位水量を減らすことのできるような微粉末ほど、エントラップトエアの減少を示した。コンクリートのエントラップトエアの量は、用いるセメントや骨材の品質、コンクリートの配合などによって相違するから、常に本実験のように微粉末による空気量の明瞭な変化がおこるとは限らないと考えられるが、微粉末の使用による空気量の変化が強度に影響を持つことは確かであると考えられる。

以上の微粉末の使用による単位水量、エントラップトエアおよびブリージング水量の変化を考慮に入れて、(1)の試験結果を純セメント空げき比と強度との関係で整理し検討した。

一例として、セメントの 30% を微粉末でおきかえた場合の純空げきセメント比と圧縮強度との関係を示すと図-8 のようである。また、微粉末を骨材の一部とおきかえた場合の純セメント空げき比と圧縮強度との関係を示すと図-9 のようである。スラグ粉末は、それ自身の潜在水硬性によって材令の初期から強度にかなりの影響をおよぼすことが明らかにされているので、図ではフライアッシュ、硬砂岩粉末および石灰石粉末の 3 種だけについて示した。図-8 および図-9 に見られるように、これら 3 種の微粉末を用いた場合、セメントと微粉

図-8 セメントの 30% を微粉末でおきかえたコンクリートの純セメント空げき比と圧縮強度との関係

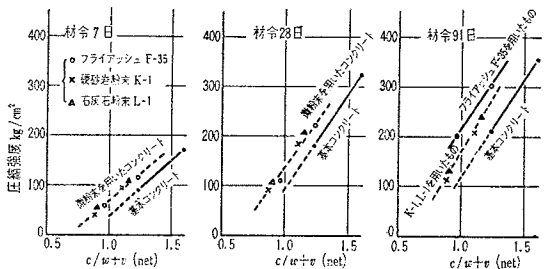
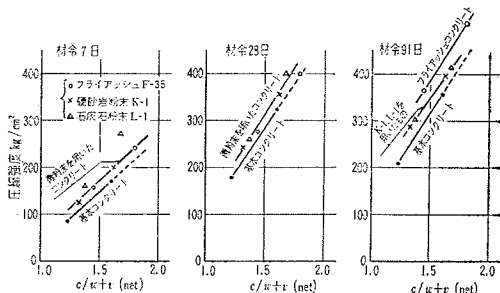


図-9 セメント重量の 30% の微粉末を骨材の一部とおきかえたコンクリートの純セメント空げき比と圧縮強度との関係



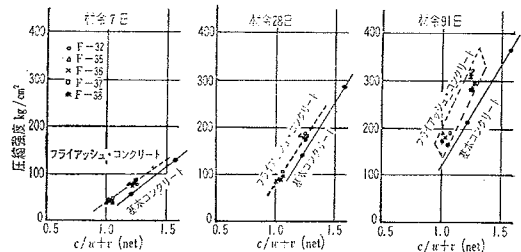
末との割合が等しければ、材令 28 日までは、いずれの微粉末でも、純セメント空げき比と強度との関係はほぼ一つの直線で表わされ、微粉末の種別によつての差は認められない。

すなわち、これらの微粉末を用いたコンクリートではセメントと微粉末との割合が一定ならば、用いる微粉末による強度の相違は主としてそれぞれの微粉末を用いたときの単位水量、空気量および沈下量の差によることを示していると考えられる。

材令 91 日では石灰石および硬砂岩粉末の場合の各点はほぼ一つの直線上にあるが、フライアッシュの場合は明らかに高い強度を示し、材令 28 日以後のポゾラン反応の効果を明らかに示している。

また、セメントの 30% を 5 種のフライアッシュでそれぞれおきかえたコンクリートの純セメント空げき比と圧縮強度との関係を示すと、図-10 のようである。材令 28 日までは 5 種のフライアッシュの各点は、ほぼ一直線上にあって、これらフライアッシュによる材令 28 日までの強度差が、主としてフライアッシュによるコンクリートの単位水量、空気量および沈下量の相違に原因していることがわかる。しかし、材令 91 日では、フライアッシュの品質によって、各点はかなりの範囲にばらついていて、材令 28 日以降のポゾラン反応の効果がフライアッシュの品質によって相違することが示された。

図-10 セメントの 30% をフライアッシュでおきかえたコンクリートの純空げきセメント比と圧縮強度との関係



以上のように、微粉末とセメントとの比率が等しい場合、微粉末とセメントとの化学反応がおこななければ微粉末の品質に差があっても、純セメント空げき比と強度との関係は直線で示されるが、この直線は基本コンクリートの直線とは一致しない。微粉末とセメントとの化学反応が考えられない場合でも、微粉末を用いたコンクリートでは、それと純セメント空げき比の等しい微粉末を用いないコンクリートよりも常に高い強度を示し、その影響は微粉末が増すほどいちじるしい。これらの結果は図-3 に示されるような単位セメント量を一定に保ちながら骨材の一部を微粉末でおきかえた場合、安定な微粉末でもコンクリートの強度を増加させることが、単位水量、空気量および沈下量などの変化の影響以外に、別の原因によってもおこっていることを示すものである。

5. モルタルおよびコンクリート中のセメントペースト部分の結合水量および単位固相容積と強度との関係

(1) 試験の概要

4. で述べたように、セメントペースト中で安定と考えられる岩石の微粉末を用いたコンクリートの強度を純空げきセメント比によって整理した結果、純セメント空げき比を等しくすると微粉末を用いないコンクリートにくらべて微粉末を用いたコンクリートの強度が高いことが示された。すなわち、微粉末の化学的活性の影響、微粉末の使用による単位水量、空気量および沈下量などの変化の影響以外に、安定な微粉末にもコンクリートの強度をある程度まで増加させる影響のあることが明らかになった。

McMillan¹⁷⁾, Powers^{15), 18)}, Meissner¹⁹⁾ などの各氏は、安定な岩石粉末でも、単位セメント量を一定に保ちながらこれを骨材の一部とおきかえて用いた場合に、コンクリートの強度が増加することを報告し、その理由には微粉末を用いることによって、コンクリートのブリージングが少なくなり、その結果、コンクリートが均斉となり骨材下面にできる水げきが小さくなって、骨材とペーストとの付着が増すためであると述べている。しかし、ブリージングと強度との関係についての研究はきわめてわずかであって^{18), 20)}、この説を実証するには不十分であると思われる。また、A Eコンクリートはブリージングがきわめて少ないが、その強度を純セメント空げき比で整理すると、4. (2) で述べたように、A E剤を用いない場合の関係とほとんど同様である場合が多い。

硬練りになるほど、すなわち単位水量が減少するほどブリージング水量は減少し、また、A Eコンクリートとすることによって、ブリージング水量はいちじるしく減少するが、ブリージング水量の多少にかかわらず、純セメント空げき比と強度との関係で整理すると、わずかのばらつきはあるが、すべての試験値がほぼ一つの直線で示される。このような試験の結果はプラスチックなモルタルまたはコンクリートを入念に締固めてつくった供試体の試験の範囲では、ブリージングによるコンクリート内部組織の相違が強度におよぼす影響はきわめて少ないことを示すものと思われる。

安定な微粉末がコンクリートの強度を増加させる原因としては、安定な微粉末がセメントペースト部分の性質に影響をおよぼし、コンクリートの強度を増加させることが考えられ、この点に関して基礎的に研究する必要があると認められた。微粉末がペースト部分の性質におよぼす影響、およびペースト部分の性質がコンクリートの強度におよぼす影響を確かめるためには、まず、微粉末を用いないコンクリートについて、そのセメントペースト

部分の性質が強度におよぼす影響を明らかにする必要がある。硬化したセメントペーストの性質については、吉田徳次郎氏²¹⁾、篠原氏²²⁾、近藤氏¹⁰⁾および D. Werner, および S. Giertz-Hedström²³⁾, F.M. Lea および F.E. Jones²⁴⁾, R.H. Bogue, および W. Lerch²⁵⁾, T.C. Powers, および T.L. Brownyard⁹⁾, W. Czeryhin²⁶⁾, J.H. Taplin²⁷⁾ の各氏の研究をはじめ多くの研究がある。

これらは貴重な研究ではあるが、主として硬化したセメントペーストに関する基礎研究であり、微粉末がコンクリートの強度におよぼす影響を解明するには不十分であると考えられる。そこでまず、微粉末を用いないモルタルおよびコンクリート中のペースト部分の結合水量、単位固相容積などを試験し、これらと強度との関係について検討したのである。

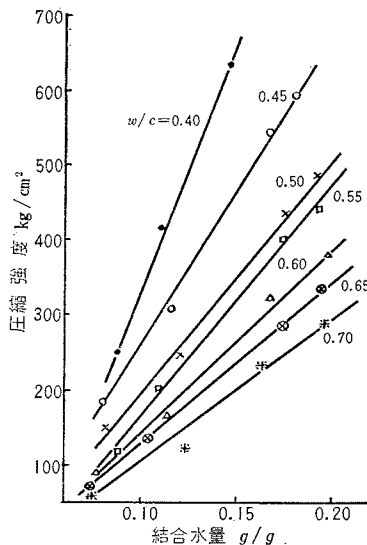
試験を行なったモルタルおよびコンクリートは、4. (2) で純空げきセメント比と強度との関係などについて試験した各種の配合のものである。また、普通ポルトランドセメントのほか、早強ポルトランドセメントおよび中熱ポルトランドセメントを用いた場合や、一部 A E 剤、分散剤および硬化促進剤を用いた場合についても試験を行なった。

また、セメント粒子のフロキュレーションの状態がモルタルおよびコンクリートの強度におよぼす影響を確かめるために、練り混ぜ方法の異なるモルタルについても、結合水量、単位固相容積を試験し、強度との関係を検討した。

(2) 結合水量および結合水量と強度との関係

セメントペーストの硬化がセメントの水和によるものであり、結合水量が水和反応の程度を示す一つの尺度

図-11 モルタル中のセメントの結合水量と圧縮強度との関係



であることからセメントペーストの強度が結合水量と密接な関係をもっていることは多くの研究によって明らかにされている^{9), 22) ~ 27)}。

試験の結果から混和材料を用いないモルタルについて、モルタル中のセメントの結合水量と圧縮強度との関係を示すと図-11 のようであ

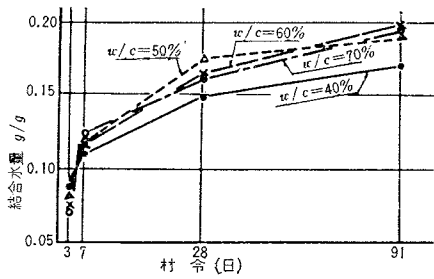
図-12 水セメント比の異なる場合の材令と結合水量との関係
普通ポルトランドセメント NA


図-11に示されるように、モルタルの強度はそのモルタル中のセメントの材令にともなう結合水量の増加にしたがって、それぞれ直線的に増加する。ほかのシリーズの試験結果からも図-11とまったく同様な傾向が示された。セメントの水和の程度、すなわちセメントに対する結合水の割合が等しくても、ペーストの濃さが相違すれば強度が相違することは当然である。図-11の試験結果は配合が等しければ強度は結合水量の関数として表わされ、強度について基礎的に研究する場合に、結合水量を試験することが有効であることを示すものである。

図-11の試験結果の一部について、材令と結合水量との関係を示すと図-12のようである。図-12に示されるように、水セメント比 50% 以上のモルタル中のセメントの結合水量は材令 91 日までの範囲で、同一材令では水セメント比が異なってもほぼ等しく、この範囲ではセメントの水和は水セメント比と無関係に進むことが認められる。しかし、ペーストが濃くなって水セメント比が 40% 程度以下となると、結合水量は水セメント比 50% 以上の場合より常に少なく、その差は材令とともに大きくなる。このことは、ペーストが濃くなると、セメント粒子間の間げきがすみやかに水和物で埋められ、部分的にすみやかに水和の限界に達してしまうためと考えられる。筆者などは水セメント比 35~50% のコンクリートについて詳細に水セメント比と圧縮強度および曲げ強度との関係を調べ、水セメント比 40% 以下では水セメント比を小さくしても、材令 28 日以降の強度はあまり大きくなりなことを報告した²⁸⁾。このことは水セメント比 40% 以下のペーストの水和が、水セメント比の大きな場合の水和にくらべて、材令 28 日以降おそくなることを示すもので、図-12の結果と対応するものと考えられる。図-12の試験結果は、水セメント比が 50% 以上ならば、水セメント比の異なる場合でも結合水量を相互に比較して検討してよいことを示すものであって、微粉末の使用によってペースト部分の濃さが変化しても、水セメント比が 50% 以上ならば、ペーストの濃さの変化による結合水量の変化はほとんどないといつてよいことを示すものと考えられる。

(3) 結合水—スペース比と強度との関係

ペーストの濃さが一定ならば、モルタルまたはコンクリートの強度はペースト中のセメントの結合水量の増加にともなってほぼ直線的に増加するが、ペーストの濃さが異なると結合水量が等しくとも強度が相違することは、(2)で述べたとおりである。セメントペーストが硬化して応力に耐えるのは、水和反応によってできる水和物が、当初セメント粒子を引きはなしていた水げきを埋めて、相互に結合するためであり、したがって、ペーストの強度は、当初水げきであった部分に析出された水和物の緻密さの程度に支配されると考えられる。既往の多くの研究では、このような立場から水和物の緻密さの程度を結合水—初期水量比、単分子吸着水—初期水量比、ゲルススペース比などで表わして、これらとペーストの強度との関係について論じている^{9), 10), 26), 27)}。

硬化したセメントペーストのある一時期における容積構成を模型的に図示すると図-13のようである(以下の説明には図-13の記号を用いることにする)。

図-13 硬化セメントペーストの容積構成

ca_0		空気げき	ca_0
cw_0	沈下終了時 水量	自由水	cw_f
		ゲル水 (物理的結合)	cr_2w_g
		結合水 (化学的結合)	cr_1w_n
$\frac{c}{\rho_c}$	沈下終了時 セメント	水和セメント	$\frac{c\alpha}{\rho_c}$
		未水和セメント	$\frac{c(1-\alpha)}{\rho_c}$

c : 単位容積中のセメント重量
 a_0 : セメント 1g 当り空気容積
 w_0 : セメント 1g 当り沈下終了時水量
 w_f : 同上 自由水
 w_g : 同上 ゲル水
 w_n : セメント 1g 当り結合水
 α : セメントの水和の程度
 ρ_c : セメントの比重
 r_1 : 結合水の比容積
 r_2 : ゲル水の比容積

Powers 氏および Brownyard 氏は、多くのセメントペーストおよびモルタルについて、その基礎的な諸性質を詳細に研究し、セメントペーストの強度は、初期水げきであった部分 cw_0 にできたセメント水和物の容積割合の関数として表わすことができるとした。すなわち、ゲル水 w_g は単分子吸着水量 V_m の倍数であり、単分子吸着水量と結合水量との比 V_m/w_n はセメントが一定ならば材令そのほかにかかわらず一定であることから、強度は

$$X = \frac{c(r_1w_n + r_2w_g)}{cw_0} = \frac{r_1w_n + r_2kV_m}{w_0} = \frac{Kw_n}{w_0} = \frac{K'V_m}{w_0}$$

の関数として表わされることを示している⁹⁾。

近藤 実氏はセメントペーストについて研究を進めた結果、 V_m/w_0 は養生温度が変わると強度との間に一定の関係がなくなるが、 w_n/w_0 はその場合でも強度と一定の関係を保つことを示している¹⁰⁾。これらの既往の研究結果が、モルタルおよびコンクリートに適用でき、微粉末を用いた場合の強度の検討に適用できるかどうかを確

かめるため試験を行なった。

空気量は水げきと異なり、そこが空気で満たされている間は水和物が空げきを埋めることは少ないと考えられるが、4. (2) で述べたように純空げきセメント比と強度との関係で整理すると、空気量にかかわらず、両者が一定の関係を保つことから考えると、ゲル・スペース比または結合水・初期水量比を強度と関連して論ずる場合、空気げきは水げきと同様に取り扱うことが妥当であると考えられる。

そこで、水げきおよび空気げきの和 $w_0 + a_0$ をとってこれをスペースと名づけ、結合水量 w_n とスペースとの比 $w_n/(w_0 + a_0)$ をとって、これを結合水スペース比と名づけ、それと強度との関係を検討した。

スペースは強度試験直前のモルタル中にふくまれるセメントペースト部分 1cc 中のセメント重量を c 、セメントの比容積を v_c とすると、 $w_0 + a_0 = (1 - cv_c)/c$ として求めることができる。

フロー値がほぼ一定で水セメント比および材令の異なるモルタルについて試験した結果から、結合水、スペース比と圧縮強度との関係を示すと図-14 のようである。

図-14 結合水・スペース比 $w_n/(w_0 + a_0)$ と圧縮強度との関係

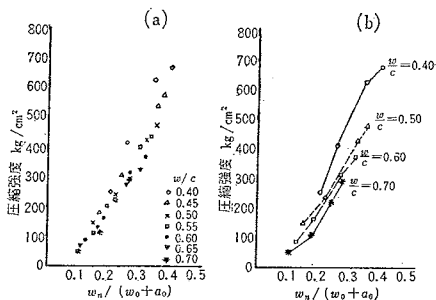


図-14(a) に示されるように、 $w_n/(w_0 + a_0)$ とモルタルの圧縮強度との間には、ある程度の相関関係が見られる。しかし、図の各点を詳細に調べると各点のばらつきは任意のものではなくて、モルタルの水セメント比によって別々の傾向を持っていることがわかる。

図-14(b) は、図-14(a) の中から水セメント比 40%、50%、60% および 70% のモルタルだけを抽出して、 $w_n/(w_0 + a_0)$ と強度との関係を示したものであって、それぞれの曲線は水セメント比別にほぼ一定の傾斜を持って平行して描かれ、水セメント比の小さいものの曲線は上方に位置する。

試験値の中から $w_n/(w_0 + a_0)$ の値の近似した部分の強度を抽出してみると、 $w/c = 40\%$ 、材令 7 日で $w_n/(w_0 + a_0) = 0.261$ 、圧縮強度 414 kg/cm^2 に対し、 $w/c = 60\%$ 、材令 28 日で $w_n/(w_0 + a_0) = 0.270$ 、圧縮強度 322 kg/cm^2 であって、結合水・スペース比がほぼ等しいにもかかわらず、圧縮強度は明らかに相当の差を示している。

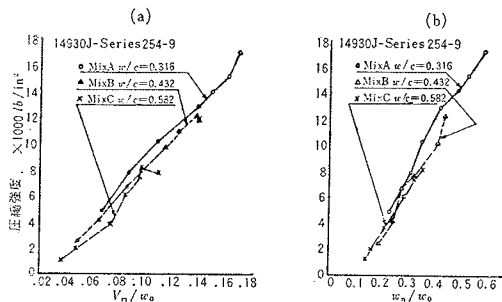
る。モルタルの曲げ強度についても同様な傾向が示された。また、このような傾向は早強セメントまたは中熟セメントを用いた場合や、AE 剤、分散剤、塩化カルシウムなどを用いた場合にも認められる。

このように、ペースト部分の濃さによって、結合水・スペース比と強度との関係が相違する原因について、Powers 氏は、水セメント比が異なると、ブリージングに相違が生じ、モルタル内部の構造に差ができるためであると説明している。そして、Powers 氏は、モルタル試験において、大きな水セメント比のモルタルをつくる場合にはセメントと同程度の粉末度をもったケイ砂粉末を用いて、ブリージングによるモルタルの内部組織を同程度としたモルタルについて、強度を試験して検討している¹¹⁾。

このようにして行なわれた Powers 氏の試験でも、その試験結果の一部について整理すると図-15 のようであって単分子層吸着水量・初期水量比 V_n/w_0 と圧縮強度との関係も、結合水・初期水量比 w_n/w_0 と圧縮強度との関係とともに、水セメント比の小さいモルタルによって得られた曲線が水セメント比の大きな場合の曲線の上方に位置し、曲線の位置が水セメント比によって異なることは図-14 の場合とまったく同様である。また、セメントペーストのみの供試体について行なった近藤氏¹⁰⁾の研究の結果も水セメント比別に整理すると、図-14 とまったく同様な傾向が認められる。

これらの結果は、ゲル・スペース比または結合水・スペース比と圧縮強度との関係が、ペースト部分の濃さによって相違する原因がペースト部分の濃さの相違によるブリージングの相違によるものではないことを示すものと考えられる。すなわち、ゲル・スペース比または結合水・スペース比と強度との間には、かなり高度の相関関係があるのであるが、モルタルおよびコンクリートの強度はペースト部分の結合水・スペース比すなわち水和物の緻密さの程度だけの関数ではなく、ほかの要素によっても影響を受けていることが認められた。微粉末がコンクリートの強度におよぼす影響を詳細に検討するには、結合水・スペース比だけでは不十分と考えられる。

図-15 V_n/w_0 および w_n/w_0 と圧縮強度との関係 (Powers and Brownyard)



(4) 単位固相容積と強度との関係

セメントペーストの硬化の過程を考えた場合、未水とセメント粒子は砂粒子や混和された微粉末などとは異なった状態で存在することが想像される。すなわち、セメントの水和は未水とセメント粒子を中心として次第に広がってゆくものと考えられるから、水和過程のある一時期をとってみると、水和物の一団はその中心に未水とセメント粒子をしっかりと抱き込み、水和物の密度は中心の未水とセメント粒子に近づくほど緻密となっていて、外部からの応力に対しては、水和物と未水とセメント粒子とは一体となって働くものと考えられる。したがって、未水とセメント部分も強度に関係するものと考えられる。

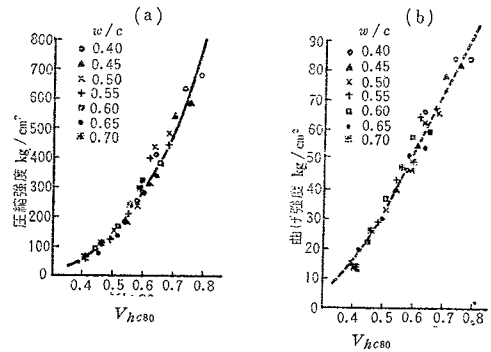
未水とセメントの部分もふくめたセメントペースト全体としての緻密さの程度と強度との関係については、Werner氏など²³⁾、篠原氏²²⁾、高野氏³⁰⁾などの研究がある。Werner氏などは105°Cで乾燥した場合に蒸発しない結合水量と cv_c すなわちセメントの絶対容積の算術和をとって固相容積とし、単位固相容積と強度との間に一定の関係があると指摘した。篠原氏は同様の研究を行ない、Werner氏などのように整理すると固相の緻密さの程度と強度とは必ずしも一定の関係にならないことを指摘し、さらに研究を進めてペーストの強度はペーストの単位容積あたりのセメントの絶対容積およびセメントの水和の程度の両者の関数として表わされるとした。しかし、上記の両者とも、固相部分の容積を実測によって求めている点、ゲル水を固相部分と考えていない点、などで改めて検討する必要があると思われる。高野氏は固相部分を実測しているが、試験した水セメント比が1種である点、ゲル水を固相にふくませていない点などで、本研究にただちに適用することはむずかしい。すでに述べたようにゲル水はかなり大きなエネルギーで物理的に水和物表面に吸着して、ほとんど固相と考えられ、Powers氏なども強度に関して水和物の緻密さを考える場合ゲル水をふくめている点などから考えて、ペースト中の固相として未水とセメント、セメント水と物およびゲル水をふくめるのが妥当であると考えられる。

未水とセメント、セメント水と物およびゲル水をふくめて固相とし、ペーストの緻密さの程度と強度との関係を研究したものがあたらなないので、実験を行なって検討した。

以下簡単にするために、単位固相容積を $V_{hc, 80\%}$ 、R.H.における吸着水をゲル水とみなした場合の試験によって求めた単位固相容積を V_{hc80} と呼ぶ。

水セメント比40~70%のモルタルの試験結果から、 V_{hc80} と圧縮強度および曲げ強度との関係を図示するとそれぞれ図-16のようである。図-16によって、本実験の方法で求めた単位固相容積と強度との間に水セメン

図-16 モルタル中のペースト部分の V_{hc80} と強度との関係 (材令3日~91日)



ト比や材令にかかわらず、一定の関係があることが認められる。図-17の関係を両対数方眼紙に描くと直線関係となるので、相関関係を計算するとつぎのような関係式が得られる。

圧縮強度について、

$$\sigma_c = 2280(V_{hc80})^{3.98} \div 2280(V_{hc80})^4 \dots\dots(1)$$

曲げ強度について、

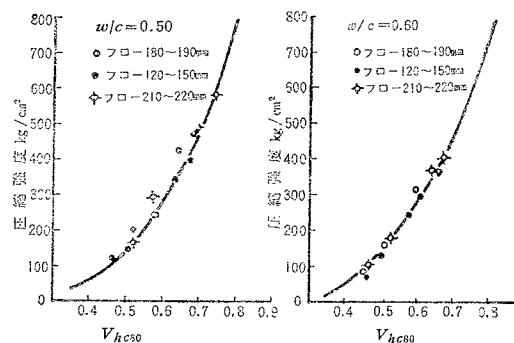
$$\sigma_b = 213(V_{hc80})^{2.77} \dots\dots(2)$$

$\log \sigma_c$ と $\log V_{hc80}$ との相関係数は0.998、 $\log \sigma_b$ と $\log V_{hc80}$ との相関係数は0.994であって、いずれも高度の相関性を持っていることが認められる。求められた曲線を中心とする各点のばらつきからみて、水セメント比や材令による特定の傾向はこの試験の範囲では認められない。

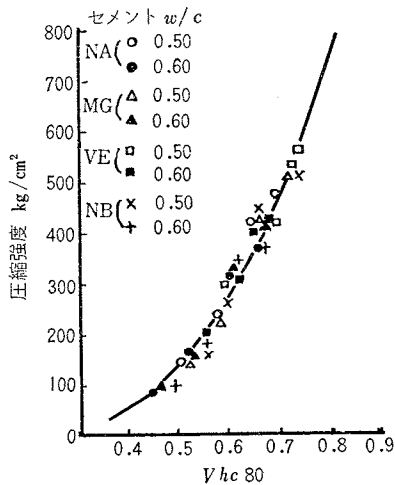
フロー値の相違するモルタルについて行なった試験の結果を同様に整理すると図-17のようである。各点は図-16(a)の試験で求めた曲線を中心として分布し、モルタルのコンシステンシー、単位水量、空気量、ブリージングなどによる特定の傾向は認められない。

早強セメント、中庸熱セメントおよび品質の若干相違する2種の普通セメントを用いたモルタルについて行なった試験結果は図-18のようである。この場合も、各点は図-16の試験で求めた曲線を中心として分布し、セメントの種別による特定の傾向は認められない。

図-17 V_{hc80} と圧縮強度との関係(コンシステンシーの異なるモルタルの場合)



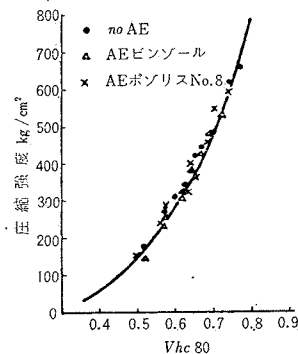
図一18 V_{hc80} と圧縮強度との関係 (セメントの種類の相違する場合)



A E 剤としてピンゾール, 分散剤としてポゾリス No. 8 を用いたモルタルの試験結果は 図一19 のようである。

この場合も, 各点は式 (1) で示される曲線を中心として狭い範囲に分布しており, 塩化カルシウムを用いた場合も同様であって相当多量の空気泡がふくまれる場合や, 混和剤によってセメントの水和の状態に相違がある場合でも, V_{hc80} と圧縮強度とは一定の関係を保つことが確かめられる。

図一19 V_{hc80} と圧縮強度との関係 (混和剤を用いた場合の例)



以上の試験の範囲で, 試験結果を要約するとつぎのようである。モルタル供試体の圧縮強度は, セメントの種類, モルタルの単位水量および単位ペースト量, 水セメント比, A E 剤, 分散剤, 硬化促進剤などの使用の有無にかかわらず一般に単位固相容積 (V_{hc}) の関数として表わすことができる。すなわち

$$\sigma = A(V_{hc})^n \quad \dots\dots\dots (3)$$

V_{hc} は, 未水和セメント, セメント水和物およびゲル水をふくめた部分の容積である。ゲル水は近似的には 80% R.H. における吸着水とみなされ, 試験によって求めることができ, この試験の範囲でモルタルのはり折片の圧縮強度は, $\sigma_c = 2280 (V_{hc80})^4$ で表わすことができる。

単位固相容積と曲げ強度との関係については試験結果にある程度のばらつきが認められたが, 圧縮強度の場合と同様に, 式 (2) の関係が成り立つものと考えられる。

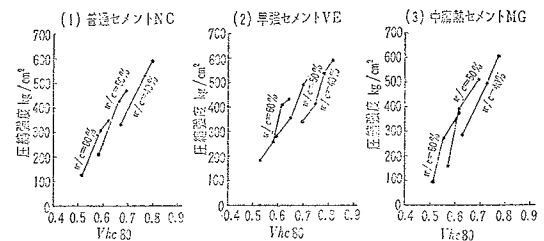
(5) コンクリート中のペースト部分の結合水量および単位固相容積について

(1)~(4) で述べた結合水量, 単位固相容積およびこれらと強度との関係はすべてモルタル供試体の試験結果によるものであるが, このようなセメントの水和の全過程を通じて適用できるペースト部分の性質と強度との関係がコンクリートにおいても適用できれば, 混和材料がコンクリートの強度におよぼす影響を基礎的に検討することができると考えられる。

しかし, コンクリート供試体中のペースト部分の結合水量および単位固相容積を正確に求めることは, 現在のところ困難である。そこでかりに, コンクリート中のセメントペースト部分の水和がモルタル中のペースト部分の水和とまったく同様に進行するとし, モルタル試験によって求められたセメント 1g あたりの固相容積を, これに対応するコンクリート中のペースト部分の単位容積中のセメントの重量に乗じて, ペースト部分の単位固相容積とし, コンクリートの強度との関係を検討した。

一例として, 普通セメント, 中熱セメントおよび早強セメントを用い, 3 種の水セメント比のコンクリートをつくって, 図一18 のモルタル試験と対応するようなコンクリート試験を行なった結果から, 前述の仮定によって求めたコンクリート中のペーストの単位固相容積 V_{hc80} と圧縮強度との関係を求めると, 図一20 のようである。 V_{hc80} と圧縮強度との関係を示す各点は, かなりの範囲のばらつきを示し, 両者の関係が水セメント比, セメントの種類, 材令などによって明らかに相違することが認められる。

図一20 V_{hc80} とコンクリートの圧縮強度との関係 (V_{hc80} はモルタル試験結果から計算によって求めた)



モルタルにおいて, V_{hc80} と圧縮強度とは高い相関関係が求められたのに, コンクリートにおいて 図一20 のような関係が示されたのは, 用いた V_{hc80} が実際の硬化したコンクリート中のペースト部分の単位固相容積を示すものでないためであると考えられる。

すなわち, モルタルとコンクリートとでペースト部分の状態が異なり, そのためにセメントの水和反応速度が相違することが考えられる。

モルタルとコンクリートとで, ペースト部分の性質と関連して最もいちじるしい差のあるのは, 練り混ぜ方法

表—11 練り混ぜ方法の異なるモルタルの材令 28 日における強度、結合水量および単位固相容積

モルタルの配合	練り混ぜ方法			圧縮強度		曲げ強度		結合水量		単位固相容積	
	記号	練り混ぜ	時間(分)	kg/cm ²	比率(%)	kg/cm ²	比率(%)	g/g	比率(%)	cc/cc	比率(%)
$w/c=40\%$ 1 バッチ 当り(g) C 623 W 249 S 1399	(a)	手練り	1.5	560	89	83.8	91	0.168	90	0.709	96
	(b)	〃	3	589	94	83.5	91	0.176	94	0.723	98
	(c)	〃	5	575	92	87.9	96	0.179	96	0.729	98
	(d)	ホバート ミキサ	1.5	587	94	84.5	92	0.179	96	0.729	98
	(e)	〃	4	628	100	91.8	100	0.187	100	0.741	100
	(f)	コンクリート ミキサ	3	529	84	78.7	86	0.165	88	0.714	96
$w/c=50\%$ 1 バッチ 当り(g) C 500 W 250 S 1500	(a)	手練り	1.5	412	95	67.6	96	0.174	93	0.620	96
	(b)	〃	3	398	92	67.6	96	0.170	90	0.629	98
	(c)	〃	5	406	93	70.0	99	0.177	94	0.636	99
	(d)	ホバート ミキサ	1.5	441	101	70.0	99	0.182	97	0.628	97
	(e)	〃	4	435	100	70.5	100	0.188	100	0.645	100
	(f)	コンクリート ミキサ	3	394	91	63.0	89	0.166	88	0.628	97
$w/c=60\%$ 1 バッチ 当り(g) C 427 W 256 S 1545	(a)	手練り	1.5	269	83	53.9	90	0.171	88	0.555	95
	(b)	〃	3	286	88	58.7	98	0.173	89	0.554	95
	(c)	〃	5	309	95	58.4	97	0.181	93	0.549	94
	(d)	ホバート ミキサ	1.5	311	96	59.3	99	0.184	95	0.562	96
	(e)	〃	4	325	100	60.1	100	0.194	100	0.586	100
	(f)	コンクリート ミキサ	3	278	86	52.9	88	0.168	87	0.554	95

の相違であると考えられる。そこでコンクリートとモルタルとのペースト部分の性質の相違を確かめ、その相違が強度におよぼす影響を確かめるために、練り混ぜ方法の異なる数種のモルタルについて、強度、結合水量および単位固相容積を試験して検討した。

試験の結果から、一例として材令 28 日の場合について示すと表—11 のようである。材令 7 日の試験結果も表—11 とまったく同様の傾向が認められた。表—11 から、練り混ぜ方法によって、強度、結合水量、単位固相容積がかなり相違することが認められる。たとえば、圧縮強度ではホバート ミキサによって 4 分間もかかって入念にしかも激しく練り混ぜた場合にくらべると、コンクリート ミキサを用いた場合の圧縮強度はその 84~91% であって、9~16% も低い値を示している。

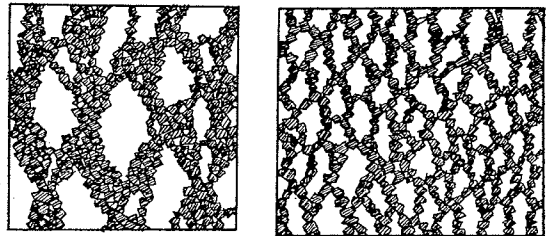
結合水量、吸着水量および単位固相容積についても、圧縮強度の場合とまったく同様の傾向を示し、たとえば結合水量についてみると、ホバート ミキサを用いた 4 分練りの場合に対する比率は、コンクリート ミキサを用いた場合 87~88%、手練り 3 分の場合 89~94% である。このように練り混ぜ方法によって強度が異なり、強度の相違が結合水量および単位固相容積と同様の傾向を示すことは、練り混ぜ方法の相違による強度差の原因が、主としてセメントのプロキュレーションの相違にともなう水和反応の進み方の差によるものであることを示すものと考えられる。このことについて簡単に考察するとつぎのようである。

練り混ぜ方法がペースト中の粒子のプロキュレーションの状態に影響をおよぼすことは、微粉末がウォーカビリチーにおよぼす効果についての研究としてすでに報告した⁸⁾。

セメントは乾燥した状態では、それぞれの粒子が互いに引き合ってフロックをつくっているの
で、この試験の手練り、またはコンクリート ミキサを用いた場合のように練り混ぜが十分でない
と、図—21(a) のように多くのセメント粒子の集団によってフロックが形成されると考えられる。
このような場合にはフロックの内部がすみやかに水和の物理的限界に達してしまっ
て、その後の水和の速度はおそくなるもの
と考えられる。

この試験のホバート ミキサを用いた場合のように、強制的に激しく練り混ぜると、沈下を終ったあとにおけるフロキュレーションの状態は図—21(b) のようになるものと考えられ、このような場合には、セメント粒子の周囲に水和物を析出できる十分のスペースがあって、個々の粒子は自由に水和し、水和の速度は速められると考えられる。

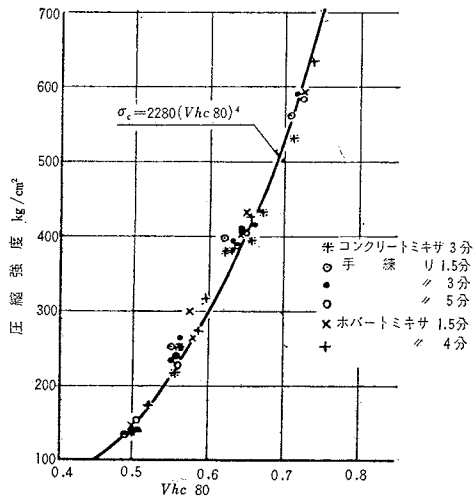
図—21 ペースト中の粒子のプロキュレーションの状態
(a) 練り混ぜ不十分な場合 (b) よく練り混ぜられた場合



練り混ぜ方法の相違によって強度の相違する別の原因として、フロキュレーションの状態によって、図—21(a)と図—21(b)のように、沈下終了時のセメントペーストの内部構造が相違するためであることが考えられる。そのような影響を確かめるために、試験結果から V_{hc80} と圧縮強度との関係を求め、これと前節までの試験結果から求められた V_{hc80} の圧縮強度との関係とを比較すると、図—22 のようである。

練り混ぜ方法の異なる場合の V_{hc80} とモルタルの圧縮強度との関係を示す各点は、すべて式(1)の曲線を中心として狭い範囲に分布している。各点のばらつきの状態から見て、練り混ぜ方法によって V_{hc80} と圧縮強度との関係が異なることは認められない。すなわち図—22 は、

図-22 練り混ぜ方法の異なるモルタルの V_{hc80} と圧縮強度との関係



フロキュレーションの相違によるペースト内部組織の相違が、強度におよぼす影響がほとんどないことを示すものと考えられる。すなわちペースト部分のフロキュレーションの状態が異なっても、モルタルにおける V_{hc} と圧縮強度との関係は変化することなく、式(1)の関係を保持することを示すものである。

以上の試験によって、モルタルにおいて V_{hc} と圧縮強度とが高度の相関関係を示したのに、コンクリートにおいて図-21のような関係が示された原因が、主としてモルタル試験によって求めた V_{hc80} をコンクリートに適用したためであって、用いた V_{hc80} が実際に硬化したコンクリート中のペースト部分の単位固相容積を示すものでなかったことによることが確かめられた。コンクリート中のペースト部分の単位固相容積をなんらかの方法で求めることができれば、モルタルの場合と同様に式(1)または式(2)のような一定の関係が成り立つものと考えられ、この点に関してさらに研究を続ける予定である。

また、鉱物質微粉末を用いることによってペースト部分のフロキュレーションの状態が変化すると考えられるが、以上述べた試験の結果は微粉末を用いたモルタルの試験結果にも、(3)および(4)で述べた結合水量および単位固相容積と強度との関係が適用できることを示すものである。

6. 鉱物質微粉末を用いたモルタル中のペースト部分の結合水量、単位固相容積および単位固相容積、結合水・スペース比と強度との関係

(1) 微粉末を用いたモルタルの強度、結合水量、および単位固相容積

a) 微粉末を用いたモルタルの強度 5. において、モルタルおよびコンクリート中のペースト部分の性質と強

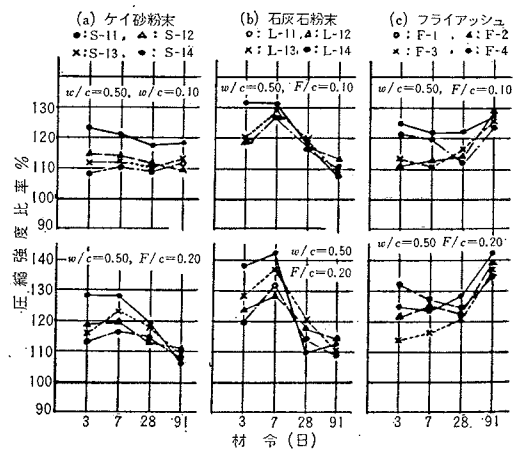
度との関係を確かめた。5. の試験に引き続いて微粉末を用いたモルタルおよびコンクリートの強度を基礎的に研究するために、5. とまったく同様な試験の方法で、微粉末を用いたモルタル中のペースト部分の結合水量および単位固相容積を試験し、それらの値について検討するとともにそれらの値と強度との関係を検討した。

試験に用いたセメントは、5. の試験に用いたと同じ普通ポルトランドセメント NA である。試験に用いた微粉末は、粉末度の異なるケイ砂粉末4種 (S-11, S-12, S-13, S-14)、石灰石粉末4種 (L-11, L-12, L-13, L-14)、および品質の異なるフライアッシュ4種 (F-1, F-2, F-3, F-4) である。

基本となるモルタルの水セメント比は50%および60%とし、微粉末はすべて砂の一部とおきかえた。結合水量、単位固相容積などで強度を検討する場合、モルタルのコンシステンシーや、ブリージングは直接関係がないことを5. の実験によって確かめているので、微粉末を用いた場合に、単位水量を調節してコンシステンシーを一定とすることは行なわず、したがって、微粉末を用いた場合のフロー値は180~200 mmの範囲に変化した。

強度試験結果の一例として、水セメント比50%の基本モルタルの砂の一部を微粉末でおきかえた場合の圧縮強度試験結果を基本モルタルの強度に対する百分率で示すと図-23のようである。3種の微粉末ともこれを用いることによって、各材令において100%以上の強度比率を示している。また、強度比率は、ケイ砂粉末および石灰石粉末では、材令が短いほど大きく、材令が長くなるにしたがって低下する。また、各材令において、微粉末の使用量が多いほど大きな値を示している。フライアッシュの場合も、材令3日ないし28日ではケイ砂粉末および石灰石粉末の場合と同様の傾向を示すが、材令28日から91日の間の強度比率の増加がいちじるしい。モルタルの曲げ強度比率および水セメント比60%の基本

図-23 微粉末を砂の一部とおきかえたモルタルの強度比率



モルタルについて行なった同様の試験でも、図-23とはほぼ同様の傾向が得られた。このような傾向はモルタルの配合の決め方がコンクリートの場合と相違している点を考慮に入れば、すでに 4. で述べた石灰石粉末、硬砂岩粉末およびフライ アッシュを用いた コンクリート 試験の結果とまったく同様である。

ケイ砂粉末 S-11 ないし S-14 はブレン値で $2310 \text{ cm}^2/\text{g}$ ないし $6570 \text{ cm}^2/\text{g}$ 、また、石灰石粉末 L-11 ないし L-14 はブレン値で $2610 \text{ cm}^2/\text{g}$ ないし $6240 \text{ cm}^2/\text{g}$ である。この試験の範囲では、微粉末の粉末度と強度との関係を明らかにすることはできないが、材令 3 日および 7 日の短期材令で、粉末度が高くなるにしたがって強度がわずかながら増加する傾向が認められる。しかし、粉末度による強度差は、ブレン値が $6000 \text{ cm}^2/\text{g}$ をこえている S-14 または L-14 において明瞭に認められるだけで、ブレン値 $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 以下の S-11~S-13 や L-11~L-13 では強度差はきわめて少ない。すなわち、ブレン値 $2500 \sim 5000 \text{ cm}^2/\text{g}$ の範囲では、微粉末の粉末度がモルタル強度におよぼす影響は比較的少ないものであると思われる。

b) 微粉末を用いたモルタル中のペーストの結合水量および単位固相容積 a) で述べた微粉末を用いたモルタルについて、その中のセメントの結合水量およびペースト部分の単位固相容積を試験した。一例として、図-23 の強度試験に対応する部分について、基本モルタルの結合水量に対する微粉末を用いたモルタルの結合水量を求めて図示すると、図-24 のようである。図-24 に見られるように微粉末を用いたモルタル中のセメントの結合水量は、同材令の基本モルタル中のセメントの結合水量に比較して常に大きな値を示し、微粉末を用いることによってその微粉末がペースト中で安定であっても、セメントの水和の程度が増加することが認められる。しかも結合水量比率は材令の初期ほど大きく、また、微粉末の使用量が多いほど大きいことなど、図-23 の強度比率とまったく対応した結果が示された。図-24 は水セメント比 50% の場合であるが、水セメント比 60% の場合でも同様であり、また単位固相容積比率をとってみても

図-24 微粉末を用いたモルタル中のセメントの結合水量比率

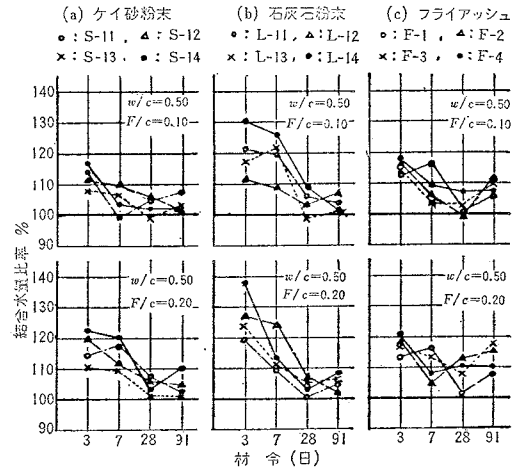


図-24 と同様な傾向が得られた。試験の結果は、ケイ砂粉末および石灰石粉末の粉末度およびフライ アッシュの品質によってわずかながら相違するが、その差は比較的少ないので全般的な傾向を知るためにケイ砂粉末、石灰石粉末およびフライ アッシュの各 4 種ごとの平均値をとってみると表-12 のようである。ケイ砂粉末を用いたモルタルの圧縮強度比率は 3 日で 115~125% であるが、材令の経過とともに漸次小さくなり、材令 91 日で 105~115% となっており、曲げ強度比率も同様の傾向を示している。これらの強度試験結果は、結合水量比率が 3 日で 111~125% であり、91 日で 101~106% となっていることにそれぞれ対応するものである。石灰石粉末を用いた場合もケイ砂粉末の場合と同様である。ここで、ケイ砂粉末の場合と石灰石粉末の場合とは、単位水量および単位固相容積の比率がほぼ近似しているのに強度比率が石灰石粉末添加の場合、目だって大きいことは、主として石灰石粉末を用いた場合のモルタルのエントラップト エアーの減少が特にいちじるしかったためと考えられる。以上述べた試験の結果によって、セメントペースト中で安定と考えられる微粉末でも、これを用いることによってセメントの結合水量および単位固相

表-12 強度 w_n および V_{hc80} の基本モルタルに対する比率、(平均値)

微 粉 末	モルタルの水セメント比	粉 末 使用量 F/C	圧 縮 強 度				曲 げ 強 度				w_n				V_{hc80}			
			3 日	7 日	28 日	91 日	3 日	7 日	28 日	91 日	3 日	7 日	28 日	91 日	3 日	7 日	28 日	91 日
ケ イ 砂 粉 末	0.50	0.10	115	117	112	115	110	111	109	109	111	102	101	102	102	103	106	105
	0.60	0.10	118	115	114	105	119	102	96	102	123	115	115	106	106	108	103	100
	0.50	0.20	118	122	116	109	114	111	109	110	116	115	103	101	107	108	111	107
	0.60	0.20	125	122	120	110	121	106	99	108	125	115	114	103	106	109	109	104
石 灰 石 粉 末	0.50	0.10	122	130	117	111	116	114	114	120	117	118	101	103	108	106	106	107
	0.60	0.10	133	135	116	115	121	108	104	103	129	114	101	109	105	108	104	102
	0.50	0.20	128	137	119	116	118	118	116	120	123	108	99	103	108	106	108	107
	0.60	0.20	140	143	119	118	127	114	106	118	126	112	101	107	99	120	107	100
フ ラ イ ア ッ シ ュ	0.50	0.10	115	116	117	128	115	114	117	125	114	105	96	110	106	102	113	110
	0.50	0.20	122	124	126	141	120	124	123	131	117	109	104	113	108	104	113	112

容積が増加し、微粉末の使用によってセメントの水和の程度が増加することが確かめられた。すなわち、微粉末を用いることによる強度増加の原因の一つとしてセメントの水和量の増加があることが確かめられた。

これらの安定な微粉末では微粉末とセメント成分との化学反応がほとんど考えられないことから、微粉末の使用によるセメントの水和の程度の増加は物理的な関係からおこったものと考えられる。

フライ アッシュを用いた場合、圧縮強度比率は 3 日で 115~122%, 91 日で 125~131% で材令とともに増加している。フライ アッシュを用いた場合、結合水量比率は 3 日で 114~117%, 7 日で 105~109%, 28 日で 96~104% であって、初期材令で大きな値を示し、材令 28 日までは材令とともに比率が減少することはケイ砂粉末の場合と同様であるが、材令 91 日で 110~113% と比率が増加していて、安定なケイ砂粉末や石灰石粉末と異なり、材令 91 日以後でポゾラン反応による結合水の増加が認められる。ポゾラン反応のおこる場合は、ポゾラン反応による水和物の増加およびそれともなうゲル水の増加のほかに、ポゾラン反応をおこしたポゾラン粒子の未反応部分が水和物と固く結びついて、未水和セメント部分と同様、強度に関係する水和物の一部となることが考えられる。用いた微粉末のブレン比表面積が $2500 \sim 4500 \text{ cm}^2/\text{g}$ 程度の範囲では、粉末度が変わっても結合水量にはいちじるしい影響はないようである。粉末度が $6000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 以上のものは、わずかではあるが、初期材令におけるセメントの結合水量を高めるように思われる。

材令 3 日ないし 7 日の試験結果では微粉末量がセメントの 10% の場合よりも 20% の場合が高い結合水量を示し、粉末使用量が多いほど微粉末が結合水量におよぼす効果は大きい。材令の経過にしたがってその差は明らかでなくなった。また、材令 3 日ないし 7 日の試験では、微粉末を用いて結合水量の増加する割合は貧配合の場合ほど大きいことが認められるが、材令の経過にしたがってその差は少なくなった。これらの試験結果も、a) で述べた強度試験結果とほとんど対応している。

c) 微粉末を用いた場合におけるセメントの水和の程度の増加に関する考察 b) においてケイ砂粉末、石灰石粉末のような安定な岩石粉末でもこれを用いることによって、セメントの水和の程度が増加することが明らかになった。このような微粉末の作用は微粉末を用いたセメントペースト中の粒子のフロキュレーションと、セメントの水和反応の進行する状態とを関連させて考察することによって説明できると思われる。

ポルトランドセメントの水和の機構については、まだ十分明らかにされていない点が多いが、水和がセメント粒子の表面から始まり水和物はセメント粒子を中心と

して漸次発達してゆくことは、顕微鏡による観察などで明らかにされている。すなわち、セメント粒子から離れたところに独立して水和物の生成する割合はきわめて少ないと考えられる^{31), 32)}。このような水和の進み方を、ペースト中でのセメント粒子のフロックと関連させて考えるとつぎのようである。ペーストがよく練り混ぜられ、図-21(b)のようなフロックの構造となっている場合を考え、セメント粒子の連鎖の一部での水和物のでき方を模型的に図示すると図-25 のようになると思われる。沈下終了直後では、(a) のようにセメント粒子はきわめて薄い水和物の膜を介して相互に接触していると考えられる。水和反応が進むにしたがって、(b) から (c) の状態に移行し、粒子相互の接触点付近では水和物を析出する余地がなくなって水和の限界に達し、水和反応は粒子が連鎖している方向には進まなくなると考えられる。このようなフロック中に安定な微粉末の粒子がはさまった場合を考えると、図-26 のような状態になると考えられる。

セメント粒子からは材令の経過にしたがって水和物ができてくるが、微粉末粒子からはまったく水和物ができないから、図-26(b), (c) のように、粉末粒子に接して

図-25 フロックにおけるセメント粒子の水和の進み方
(セメントのみの場合)

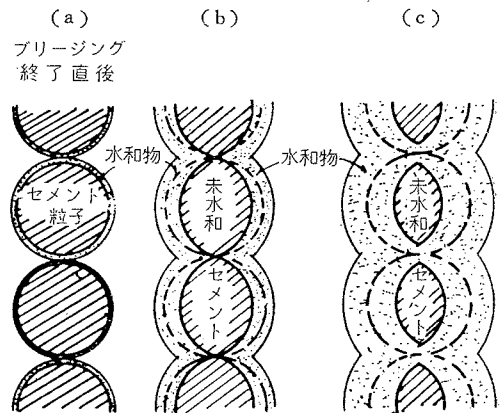
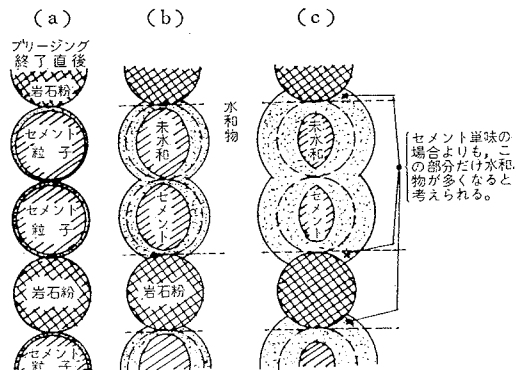
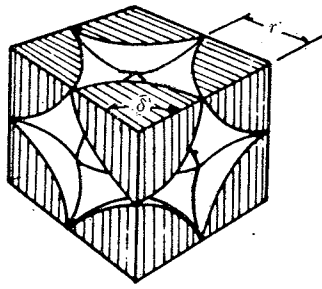


図-26 フロックにおけるセメント粒子の水和の進み方
(微粉末を用いた場合)



いる部分のセメント粒子の水和反応はセメント粒子が相互に接している場合よりも、同じ材令で多くの水和物を析出することができると考えられる。

図-27 セメント粒子のフロックの模型



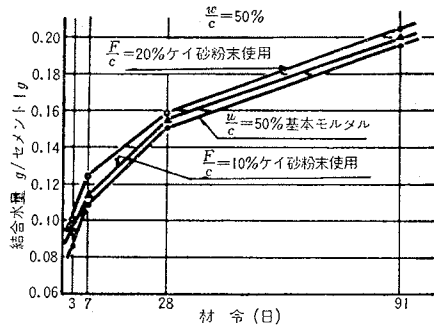
練り混ざが十分にでなかったり、フロキュレーションの作用が強くて粒子の集団が積み重なってフロックをつくる 図-21 (a) のような場合には、つぎのようなことが考えられる。この場合セメント粒子は相互に接触して 図-27 のような粒子間の間げきをつくっている。粒子を直径の等しい球と考えると、その間げき率は 26~48% となる。セメントの粒子形状などから考えて、フロックの内部にある間げきも大体 40~50% であろうと考えられる。セメントが水和した場合、水和物の容積は Powers 氏⁹⁾によれば、原セメント容積の 2.06 倍、Taplin 氏²⁷⁾によれば 2.16 または 2.11 倍である。

今、かりに水和物の容積を原セメント容積の 2.10 倍とすると、フロック中の間げき率 40% を埋めるには、セメント粒子の 36% が水和することが必要である。篠原氏²²⁾の計算にしたがって普通セメントの理論水和水量を約 35% とすると、セメントの 36% が水和した場合の水和水量は 12.6% であって、本試験の試験方法による結合水量が水和水量に相当するとしても、普通セメントの場合材令 7 日の水和の程度に相当する。本試験のような試料乾燥方法をとった場合には、化学的結合水の一部も脱水するので、完全水和のさいの結合水量を別に試験によって求めてみると 24.3% となり、セメントの 36% が水和したときの結合水量は 9% であって、この試験の普通ポルトランドセメントでは材令 3 日の結合水量に相当する。すなわち、フロック中の間げきはきわめて短い期間に水和物で占められ、間げきの内部には水和物を析出する余地がなくなり、水和の限界に達するものと考えられる。材令が経過するとセメント水和物はフロックの外側にだけ析出するようになると思われる。図-27 の模型でフロックの間げきを形成する 8 個のセメント粒子の 1 個が安定な微粉末でおきえられた場合は、このフロック内部の間げきは 7 個のセメント粒子からの水和物で埋められることになる。すなわち、図-27 の模型のような場合、8 個のセメント粒子の 1 個を安定な粉末でおきかえることはセメント個々の粉子から見れば、水和物を析出するスペースが $8/7=1.14$ 倍だけ増したことに相当し、フロック内部の間げきを埋めるまでにセメント単味の場合より多くの水和物をつくることで

きると考えられる。フロックの内部が水和の限界に達したのち、フロックの外側で行なわれる水和の進行の程度は微粉末を用いた場合も、セメントのみの場合もいじりしい差はないものと考えられる。

ケイ砂粉末 $S_{11} \sim S_{14}$ を用いた場合の結合水量の平均値をとって、それと材令との関係を基本モルタルの場合と比較すると 図-28 のようである。図-28 に示されるように、微粉末を用いた場合の材令と結合水量との関係を示す曲線は、基本モルタルの材令と結合水量との関係を示す曲線と平行して示され、材令 3 日以後では、微粉末を用いた場合もセメントのみの場合も、水和の進み方はほぼ同程度であることが認められる。すなわち、微粉末が安定な場合、これを用いたことによる結合水量の増加はフロック内部が水和物で満たされると考えられる材令 3 日までの間におこり、それ以後の結合水量の増加の傾向は微粉末を用いない場合とまったく同様であることを示すものと考えられる。このように材令 3 日以後、微粉末を用いた場合と用いない場合との結合水量の差の絶対値はほぼ一定であり、材令とともに結合水量や強度は増すから、結合水量比率や強度比率が材令とともに小さくなることは当然と考えられ、本節 a) および b) の材令と強度比率および結合水量比率との関係を示した試験の結果を裏づけるものである。

図-28 ケイ砂粉末を用いた場合の材令と結合水量との関係



(2) 微粉末がコンクリートの硬化熱におよぼす影響

(1) の試験によって、セメントペースト中で安定な微粉末でも、これを用いることによってセメントの水和の程度が増加することが認められた。水和の程度が増加すればセメントの水和による発熱量が多くなるから、微粉末を用いることによってコンクリートの硬化熱も増加するものと考えられ、ダムマスコンクリートなどにおいて内部の温度上昇が増加することが考えられる。そこで微粉末がコンクリートの硬化熱におよぼす影響を調べるために、断熱熱量計を用いて、微粉末を用いたマスコンクリートの断熱状態における温度上昇を試験した。

試験に用いた微粉末は、4.の(1)で試験に用いたと同

表—13 断熱温度上昇試験に用いたコンクリートの配合

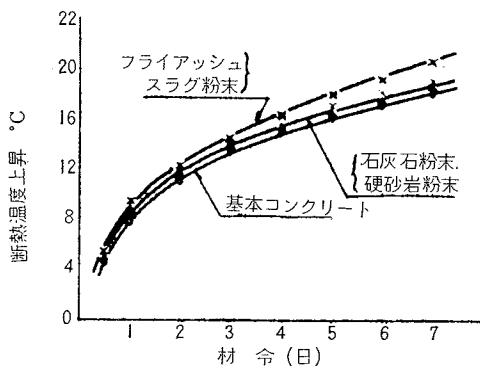
微 粉 末 使用方法	微 粉 末 種 別	微粉末比 F/C+F %	セメント 微粉末比 F/C %	水セメント 比 w/c %	水セメント 微 粉 末 比 W/(C+F) %	単 位 量 kg				絶対細 骨材率 %	スランプ cm	空気量 %
						セメント	微粉末	水	ビンジール (g)			
基本 コ ン ク リ ー リ		0	0	70.0	70.0	157	0	110	25	26.5	5.5	4.59
セメントの 一部とおき かえ	フライ アッシュ F-35	15		80.5	68.2	133	24	107	65	27.0	5.5	4.85
		30		94.5	66.2	110	47	104	105	27.0	5.0	4.85
		45		117.4	64.3	86	71	101	150	26.5	5.5	4.25
骨材の一部 とおきかえ	フライ アッシュ F-35		30	63.0	48.5	157	47	99	138	24.0	5.5	4.37
	ス ラ グ 粉 末		30			157	47	100	32	26.0	5.5	4.18
	硬 砂 岩 粉 末		30			157	47	107	32	26.0	5.0	4.35
	石 灰 石 粉 末		30			157	47	100	32	26.0	5.5	4.64

じフライ アッシュ、スラグ粉末、石灰石粉末および硬砂岩粉末の4種である。コンクリートの配合は重力ダムの内部に用いられるコンクリートを想定し、粗骨材最大寸法を120 mmとして、表—13のように定めた。

基本コンクリートの骨材の一部は4種の微粉末でおきかえた場合の断熱温度上昇の試験結果は、図—29のようである。この場合、単位セメント量が一定に保たれているので、スラグ粉末またはフライ アッシュのようにセメントと化学反応がなければ温度上昇は基本コンクリートと等しくならなければならない。しかし、硬砂岩粉末や石灰石粉末のようなセメントペースト中で安定と考えられる岩石粉末でも、これを用いることによってコンクリートの温度上昇度が大きくなりその影響は材令の短い場合ほどいちじるしい。たとえば、岩石粉末を用いた場合の温度上昇度の基本コンクリートに対する比率は、12時間で108%、24時間で105%、3日で102%であり、その後は102%でほぼ一定である。

このような試験の結果は、(1)で述べた微粉末を用いたモルタルの強度、結合水量および単位固相容積の示す傾向とまったく同様であって、セメントペースト中で安定と思われる微粉末でも、これを用いるとセメントの水和の程度の増加があり、その影響は材令の初期ほどいちじるしいことを示すものであって、(1)の考察を裏づけるものである。以上のように、岩石粉末はこれを骨材の一部とおきかえて用いることによってコンクリートの

図—29 細骨材の約8%(F/C=30%)を微粉末でおきかえたコンクリートの断熱温度上昇
(単位セメント量(微粉末をふくまず)157 kg)

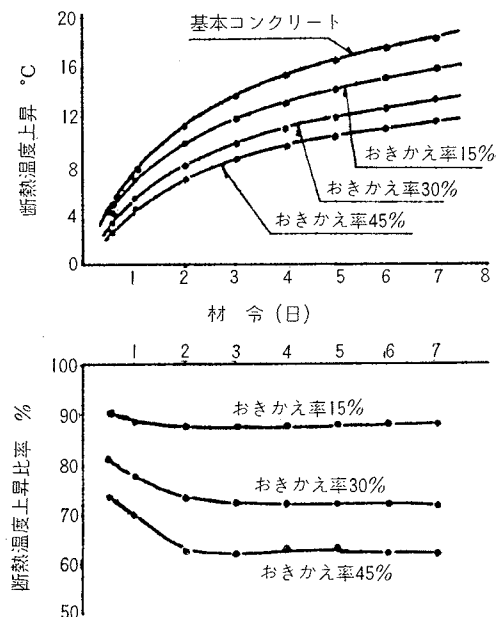


硬化熱を増すが、その増加の程度はわずかであって、たとえば、細骨材の約8%の岩石粉末を用いた場合でも材令3日以上断熱温度上昇の増加は、基本コンクリートに対してわずか2%にすぎない。

破砕骨材中に適当な品質の適当量の岩石粉末がふくまれることは、コンクリートのウォーカビリチーを改善し強度を増すことはすでに述べたとおりであるが、この場合、岩石粉末がコンクリートの温度上昇におよぼす影響の程度はきわめて少なく、ダムのマスコンクリートなどにおいて施工上考慮するほどの値とはならない。

セメントの一部をフライ アッシュでおきかえた場合は図—30のようであって、単位セメント量が減少し、また試験した材令7日の範囲では、たとえ温度上昇があってもフライ アッシュのボゾラン反応は、きわめてわずかと考えられるから、コンクリートの温度上昇が少なくなるのは当然である。しかし、この場合、温度上昇の比率をとってみると温度上昇比率の減少する割合

図—30 セメントの一部をフライ アッシュでおきかえたコンクリートの断熱温度上昇
(単位セメントフライ アッシュ量 157 kg)



は、おきかえ率よりは小さい。たとえば、材令 7 日の温度上昇の減少率はおきかえ率 15%、30% および 45% に対して、それぞれ 12%、28% および 38% となった。このような、セメントの一部をフライ アッシュでおきかえたコンクリートの断熱温度上昇の試験結果は、吉越氏⁶⁾の研究においても報告されており、試験の結果、材令 7 日における硬化熱の減少率は、フライ アッシュのおきかえ率の 80~90% であることが述べられている。

セメントの一部をフライ アッシュでおきかえることによって温度上昇が減少すれば、当然セメントの水和反応速度もおそくなると考えられるから、フライ アッシュのポズラン反応がなければ、温度上昇の減少する割合はおきかえ率よりも大きくなるのが当然と考えられる。しかるに、ポズラン反応がきわめて少ないと考えられる初期材令でも、温度上昇の減少する割合がおきかえ率よりも小さくなったことは、(1) で述べたようにフライ アッシュがセメント粒子のフロックの一部に入ることによる水和の程度の増加があったことを示すものと考えられる。また、図-30 の下図に示されるように、温度上昇比率は材令の短い場合ほど大きく、材令 3 日までに漸次減少し、材令 3 日以後はほとんど一定値を示していて、安定な微粉末による水和の程度の増加が、材令 3 日でほとんど終了するという(1)の考察を裏づけるものと考えられる。

すでに述べたように、フライ アッシュは、材令が長くなるにしたがって、徐々にポズラン反応をおこし、これをセメントの一部とおきかえて用いた場合でも長期において、フライ アッシュを用いないコンクリートと等しいか、あるいは高い強度を示し、また単位水量を少なくするなどほかの利点も多く、これをダムのマス コンクリートに用いることはきわめて有効であると考えられる。

(3) 微粉末を用いたモルタルにおける単位固相容積と強度との関係

(1) および (2) の試験によってペースト中で安定な微粉末でも、これを用いてモルタルまたはコンクリート中のペースト部分の水和の程度の増加があることが確かめられた。そこで、微粉末を用いた場合のペースト部分の性質と強度との関係を確かめるために、(1) で述べた微粉末を用いたモルタルの試験結果によって、単位固相容積と強度との関係を検討するとつぎのようである。

基本モルタルのセメント重量の 20% に相当する粉末度の異なるケイ砂粉末 (S-11~S-4) および石灰石粉末 (L-11~L-14) をそれぞれ砂の一部とおきかえたモルタルの単位固相容積 V_{hc80} と圧縮強度との関係について一例を示すと、それぞれ 図-31 および 図-32 のようである。この場合、用いた微粉末は単位固相容積の計算にふくめなかった。すなわち、用いた微粉末を砂の部分と

図-31 ケイ砂粉末を用いたモルタルの V_{hc80} と圧縮強度との関係
(曲線は基本モルタルから求めたもの)

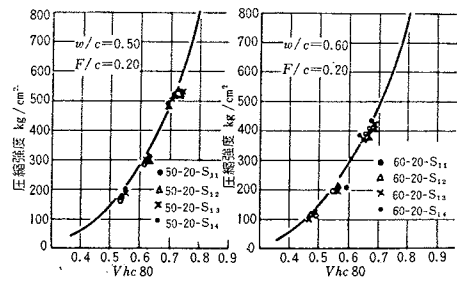
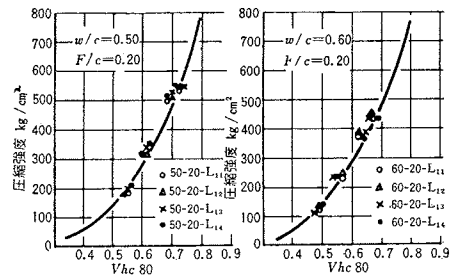


図-32 石灰石粉末を用いたモルタルの V_{hc80} と圧縮強度との関係
(曲線は基本モルタルから求めたもの)



様に取り扱って、単位固相容積を求めたのである。

図-31 および 図-32 の実線で示した曲線は、(1) で述べた微粉末を用いないモルタルの試験の結果求めた V_{hc80} と圧縮強度との関係を示すものである。これらの図に示されるように、ケイ砂粉末および石灰石粉末を用いたモルタルの単位固相容積と圧縮強度との関係を示す各点は、これらを用いないモルタルの試験から求めた曲線を中心として狭い範囲に分布している。すなわち、これらの微粉末を用いた場合、単位固相容積の中に微粉末をふくめずに整理すると、単位固相容積と強度との関係は、微粉末を用いないモルタルの試験とよく一致する。用いた微粉末を単位固相容積にふくめると、各点はすべて右に移動し、微粉末の使用量ごとに、それぞれ異なった相関関係を示し、共通の関係が見られなくなる。

単位固相容積と強度との関係を論ずる場合、用いた微粉末は砂の一部と考えて整理し、単位固相容積の計算にふくめない方がよいと考えられる。

微粉末を砂の一部と考えて整理して、微粉末を用いたモルタルの各点が、基本モルタルの試験結果から求めた曲線とよく一致することは、微粉末を用いた場合でも、ペースト部分の単位固相容積と圧縮強度との関係は、微粉末を用いない場合と同様に一定の関係を持つことを示すものである。また微粉末がモルタルの強度におよぼす影響が、微粉末の使用によるモルタル中のペースト部分の単位固相容積の変化によるものであることを示すもの

である。微粉末を用いると、単位セメント量、単位水量、空気量、純空げきセメント比などが変化すること、また、ペースト中で安定な微粉末でもセメントの水和の程度を物理的に増加させること、などについては前節までに詳述したとおりである。これらの影響は、それぞれ単位固相容積を変化させる要素であって、結局これらを総合して、微粉末がモルタルまたはコンクリートの強度におよぼす影響は、微粉末の使用によってモルタルまたはコンクリート中のペースト部分の単位固相容積が変化することによるものであることが結論できる。

4種の品質の異なるフライ アッシュ (F-1, F-2, F-3, F-4) を用いたモルタルの V_{hc80} と圧縮強度との関係は、図-33 のようである。ケイ砂粉末および石灰石粉末を用いた場合と同様に、各点は基本モルタルの試験から求めた曲線を中心として分布している。この場合も、フライ アッシュはペーストの単位固相容積の計算にフライ アッシュをふくめると、各点はすべて基本モルタルの示す曲線の右方に移動する。ただ、フライ アッシュを用いた場合は材令 91 日の各点が、基本モルタルの曲線のわずかに上方に位置し、材令 91 日以降はフライ アッシュの一部を単位固相容積の中にふくめて考えなければ、基本モルタルの曲線と一致しなくなる。

フライ アッシュのポゾラン 反応によって水和物ができる場合は、フライ アッシュからできる水和物およびポゾラン 反応によって水和物と強固に結合するフライ アッシュの未反応部分を強度に関係する単位固相容積にふくめる必要があると考えられる。

以上の試験によって微粉末を用いたモルタル中のペースト部分の単位固相容積と強度との関係を論ずるには、微粉末部分をペーストの固相部分にふくめないで整理することによって、基本モルタルの試験の結果とよく一致することが示された。その理由として、用いた微粉末とセメント水和物との結合状態が、未水和セメント部分とセメント水和物との結合状態とくらべて、本質的に異なっていることが考えられる。

セメント ペースト中では材令の経過にともなう、セメント粒子の表面から水和反応が進み、未水和セメン

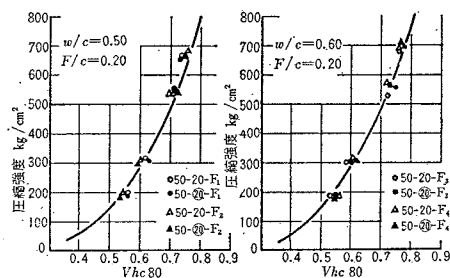
ト部分は減ってセメント水和物が増し、最初水で占められていた部分は逐次、水和物によって埋められてゆく。

この場合、未水和セメント粒子は周囲を完全にセメント水和物によってとりまかれ、しかも中心の未水和セメントに近いほど、水和物の密度は大きいと考えられるので、周囲のセメント水和物と強く結合した状態であって外部の応力に対しても未水和セメント、セメント水和物は一体となって働くものと考えられる。しかるに、混和した微粉末はペースト中で化学反応がなければ終始その容積を変えることなく、四周は最初水のみで占められており、材令の経過とともにセメント水和物が成長してきて、微粉末の表面と接触する。材令の経過にともなう微粉末の周囲がほとんど水和物で占められた場合でも、微粉末粒子の外側にはまだいくらかのスペースの存在が考えられ、付着状態も未水和セメントと水和物または水和物相互の間のように十分緊密なものとはならないことが考えられる。

このような水和物と微粉末との付着の状態を調べるために、電子顕微鏡によって微粉末を用いたセメントペーストの硬化したのちの破断面を観察した。この試験に用いたフィルムレプリカ法による観察はセメント硬化体の組織を定性的に観察しようとする場合に有効な方法であって、佐治氏によってその詳細が報告されている³³⁾。この方法は、まず、観察したい物体表面に溶媒に浸したアセチル セルローズ膜の薄片をはりつけ、数分以内にいいねいにはがして、物体表面の凹凸を膜面に移しとり、この膜面にクロームおよび炭素を真空蒸着し、アセチル セルローズ膜を溶かして、蒸着膜によるレプリカ(模写膜)を電子顕微鏡によって観察するのである。

写真-1 は、フライ アッシュを混和したペーストの材令 28 日、42 日、140 日および 15 カ月における断面の写真の一例である。写真において、上段はフライ アッシュ粒子の表面およびその周囲のセメント水和物の状態を示すもので、下段は、フライ アッシュが接していたセメント水和物の面を示すものである。フライ アッシュ表面も、それに接している水和物の面も、材料の経過にしたがって漸次複雑になり、フライ アッシュとセメント水和物との間にポゾラン反応の進んでいることが認められる。しかし、材令 140 日以前ではフライ アッシュの表面が比較的単純であるのに、これに接する水和物側の凹面が複雑であって、両者の間に対称性がほとんど認められない。このことは、短期材令ではフライ アッシュ粒子と水和物との間に境界層があって、その境界層の中でポゾラン反応が行われ、ポゾラン反応の進行にしたがって境界層が反応生成物で埋められることを示すものと考えられる。また、上段の写真に見られるように、水和物とフライ アッシュ粒子との境界は明瞭に区別できる。極端な例を示すと写真-2 のようである。写真-2

図-33 フライ アッシュを用いたモルタルにおける V_{hc80} と圧縮強度との関係



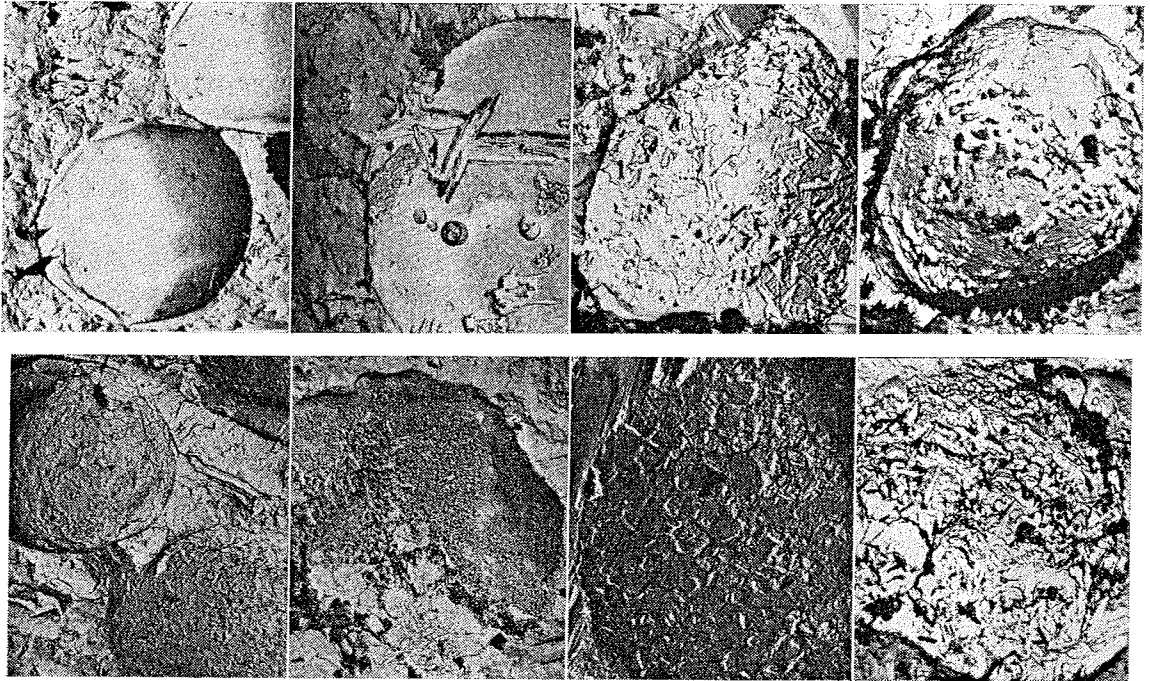
写真—1 フライ アッシュを用いたペースト硬化体破面の電子顕微鏡写真

材令 28 日

材令 42 日

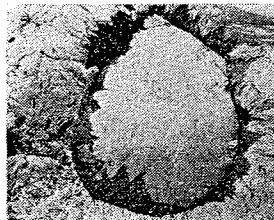
材令 140 日

材令 15 カ月

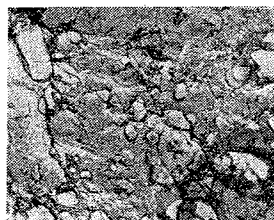


のフライ アッシュ 粒子の周囲に花卉状の黒い部分が見られるが、これは圧着したアセチル セルローズがフライ アッシュと水和物との境界に圧入され、膜をはぎとるときに抜けて出た部分と考えられる。硬化体破面のほかの部分にこのような状態が見えず、フライ アッシュ粒子周囲のみこのような状態が見られるのは、フライ アッシュと水和物との間に無視することのできない間げきのあることを示すものと考えられる。写真—3 は石灰石粉末を混和したペーストの破断面であるが、石灰石粒子とセメント水和物との境界は比較的明瞭であり、一部にはその境界層に圧入された膜の痕跡も認められる。このように、混和した微粉末と水和物との間に明らかな境界層が認められることは、微粉末と水和物との付着が水和物相互間または水和物と未水和セメントとの間の付着とはまったく異なった状態であることを示すものである。フライ アッシュの

写真—2 フライ アッシュを用いたペースト硬化体破面
材令 100 日



写真—3 石灰石粉末を用いたペースト硬化体破面
材令 28 日



場合、写真—1 に示すように、材令が長くなるにしたがって、境界層が埋められ、フライ アッシュ表面と水和物凹側のくぼみとの対称性がでてくることから考えて、材令の経過とともに未反応フライ アッシュも水和物と緊密に結合するようになると考えられる。

さきに述べたように、岩石粉末またはフライ アッシュを用いたモルタルの単位固相容積と強度との関係が、用いた微粉末を単位固相容積の固相の一部にふくませない場合に、微粉末を用いないモルタルにおける両者の関係とよく一致し、微粉末を単位固相容積の一部として計算すると、基本モルタルの場合とまったく異なった関係が示されたことは、微粉末とセメント水和物との付着が、水和物相互間または未水和セメント粒子と水和物との付着とはまったく異なった状態になっているためであると考えられる。すなわち、微粉末と水和物との付着の状態は、砂粒子と水和物との付着の状態とほとんど同様と考えられ、モルタル中のペースト部分の単位固相容積と強度との関係を論ずる場合には、微粉末を単位固相容積の一部にふくめることができず、砂と同様に取り扱うのがよいことを示すものである。

スラグ粉末やフライ アッシュのように、ペースト中で化学反応をおこし、水和物をつくるような微粉末では、化学反応をおこさない微粉末と異なり、材令の経過にしたがって未反応粒子もセメントの未反応部分と同様に、水和物と密接に付着して、モルタルの強度を支配する固相の一部となることが考えられる。

本章の試験および観察の結果、鉱物質微粉末がコンクリートの強度におよぼす影響には、微粉末の使用によるコンクリートの単位水量、単位セメント量および空気量の変化、練り混ぜてからの体積変化による純セメント空げき比の変化、物理的な作用によるセメントの水和の程度の増加、微粉末の化学反応による水和物の増加、および化学反応による未反応の微粉末粒子と水和物との強固な結合などの諸因子があることが明らかになった。これらはいずれもコンクリート中のペースト部分の単位固相容積に影響をおよぼすものであって、これらを総括すると「微粉末がコンクリートの強度におよぼす影響は、主として微粉末によるコンクリート中のペースト部分の単位固相容積の変化によるものである」ということができる。

7. 結 論

コンクリートに用いられる鉱物質微粉末をその品質によって分類し、物理的、化学的性質がそれぞれのグループを代表するような数種の微粉末を選び、これらの微粉末がコンクリートの強度におよぼす効果について研究した。

その結果セメントペースト中で化学反応をおこさないと考えられる岩石微粉末でも、コンクリートの強度にかなりいちじるしい影響をおよぼすことが確かめられ、その原因について基礎的に研究を進める必要が生じた。そこで、まず微粉末を用いない場合について、コンクリート中のペースト部分の性質と強度との関係を基礎的に調べ、その結果を応用して、微粉末がコンクリートの強度におよぼす主として物理的な影響を研究した。また研究結果を裏づけるために、電子顕微鏡による観察やコンクリートの硬化熱の測定も行なった。

コンクリートに用いられる鉱物質微粉末は、その品質に大差があり、その使用の目的や使用の方法も多岐にわたっていて、一様な結論を下すことはむずかしいが、本研究の範囲でつぎのことがいえると思われる。

① 微粉末をセメントの一部とおきかえて用い、等しいスランプのコンクリートをつくった場合、コンクリートの強度は初期材令では、いずれの微粉末の場合も、おきかえ率の増加にともなってほぼ直線的に低下する。材令にともなう強度増加の程度は、微粉末の化学的性質によっていちじるしく異なる。たとえば、セメントの30%を微粉末でおきかえてつくったコンクリートを、21°Cの水中で養生した場合、材令7日では基本コンクリートに対する圧縮強度比率は、単位水量の増減によって差はあるが、52~75%で一様に低い値が示された。しかし、材令91日では、スラグ粉末を用いた場合104%で、基本コンクリートとほぼ等しい強度が得られ、フライアッシュを用いた場合は71~92%で、いずれのフライアッシュを用いても基本コンクリートの強度に近づいた

が、岩石粉末を用いた場合は55~70%で、その比率は材令が経過してもほとんど変化しなかった。フライアッシュは、これを用いた場合の材令にともなう強度の増加程度が、その品質によってかなり相違するから、その選定にあたってはこの点について考慮する必要がある。

② 単位セメント量を一定に保ちながら、微粉末を骨材の一部とおきかえて用いると、一定のスランプを得るに必要な単位水量がいちじるしく増加しない範囲では、一般にコンクリートの強度が増加する。その増加の割合は、コンクリートの配合、微粉末の品質などによって異なるが、単位細骨材量の15%程度までは、微粉末の使用量が増すにしたがって増加する。セメントペースト中で化学反応をおこさないと考えられる微粉末でも、これを骨材の一部とおきかえて用いるとコンクリートの強度は増加し、その増加の割合は材令の初期ほどいちじるしい。たとえば、単位セメント量の30%(単位細骨材量の8~10%に相当する)の微粉末を骨材の一部とおきかえたコンクリートの材令28日における強度比率は、フライアッシュを用いた場合120~150%、石灰石粉末および硬砂岩粉末の場合110~144%となった。

骨材の粒度が適当でない場合の貧配合コンクリートにおいて、骨材の一部を適当な品質の適当量の岩石粉末でおきかえ用いること、破碎骨材中に適当な品質の適当量の岩石粉末がふくまれていることは、コンクリートのウォカビリチーを改善するために有利であるばかりでなく、コンクリートの強度を高める点でも有効である。

③ 材料および養生条件を一定とした場合、コンクリートの強度は主としてペーストの濃さに支配される。コンクリート中におけるペーストの濃さは、打込んでからのちのコンクリートの体積変化によって変化する。この体積変化の最も大きな部分は、ブリージングによっておこる。打込んだのち、沈下終了までに、ブリージング水量だけの体積変化があったとすると、空気量およびブリージング水量の試験結果から、沈下終了時におけるペーストの濃さを近似的に求めることができる。このようにして求めたペーストの濃さをセメント空げき比で表わし、これを純空げきセメント比と名づけた。

従来からコンクリートのセメント空げき比と強度との間にはある程度直線的な関係があるといわれていたが、試験の結果を通覧すると、コンシステンシーや空気量が相違する場合には必ずしも同じ直線とはならないことが認められた。しかし、このような場合、純セメント空げき比で整理すると一致した直線となることが実証された。これは、コンクリートの強度が沈下終了時のペースト部分の濃さに支配されることを示すものであって、セメント空げき比を用いるよりも、純セメント空げき比を用いる方が合理的であることを立証するものである。

純セメント空げき比によって、微粉末を用いたコンク

リートの試験結果を整理すると、セメントペースト中で化学反応をおこさないと考えられる微粉末でも、これを用いたコンクリートの強度は、それと等しい純セメント空けき比の微粉末を用いないコンクリートの強度にくらべると常に高い値を示し、微粉末がコンクリートの強度におよぼす影響として、微粉末による単位水量、空気量、ブリージング水量、沈下量などの変化のほか、微粉末の特性にもとづくほかの物理的原因があることが認められた。

④ 一定の骨材を用いたプラスチックなモルタルを注意に締固めた場合の強度は、セメントの種類、単位水量および単位セメント量、空気量、AE剤・分散剤・硬化促進剤などの使用、材令などにかかわらず、一般に単位固相容積のみの関数として、つぎのような関係で表わすことができる。

$$\sigma = A(V_{hc}) \dots \dots \dots (4)$$

ここに σ : モルタルの強度

V_{hc} : 単位固相容積

A, n : 定数

ここに、単位固相容積 V_{hc} とは、空気量もふくめたモルタル中のペースト部分単位容積中の固相部分の容積である。固相部分としては、未水和セメント、セメント水和物（水和したセメントおよび結合水）およびゲル水がふくまれる。たとえば、一定の砂を用いた各種モルタルのはり折片の圧縮強度と単位固相容積との関係を求めた結果は、配合、材令、混和剤の使用などに関係なく、つぎのような関係が求められた。

$$\sigma_c = 2280(V_{hc80})^4 \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 V_{hc80} は、ゲル水の近似値として相対湿度 80% における吸着水量をとった場合の実測によって求めた単位固相容積である。

また、練り混ぜ方法の異なる場合および分散剤を用いた場合の試験結果も、式(5)の関係が適用でき、セメント粒子のフロキュレーションの状態が相違して、ペースト内部の構造に相違が考えられる場合でも、式(5)の関係が適用できることが認められた。

以上はモルタルについての試験結果であって、コンクリート中のペースト部分について単位固相容積を求めることは困難であり、正確に結論することはできないが、以上の試験結果は、モルタルおよびコンクリートの強度が、単位固相容積すなわちペースト部分の密度に支配され、固相にはゲル水をもふくめるのが妥当であるという考え方が正しいことを示唆するものと思われる。

⑤ 微粉末を用いたモルタル中のペースト部分について、結合水量、および単位固相容積を試験した結果、各材令において、結合水量および単位固相容積が、微粉末を用いない場合にくらべて大きいことが認められた。たとえば、セメント量の 10% ないし 20% に相当する各種

粉末度のケイ砂粉末および石灰石粉末を骨材の一部とおこえたモルタル中のセメントの結合水量は、基本モルタルの結合水量を 100% とした場合、材令 3 日で 111~129% であり、この比率は材令の経過にともなって減少するが、材令 91 日でも 101~109% であった。

すなわち、鉱物質微粉末を用いると、たとえその微粉末がセメントペースト中で化学反応をおこさないものであっても、モルタルまたはコンクリート中のセメントの水和の程度が増加する。このことは、コンクリートの断熱温度上昇を試験した結果でも認められ、ポゾラン反応をおこさない岩石粉末でもコンクリートの初期の硬化熱を増加させることから実証された。ペースト中で化学反応をおこさないと考えられる微粉末によるセメントの水和の程度の増加は、セメントおよび微粉末粒子のフロキュレーションと、水和の進行にともなう水和物の析出状態とを関連させて考えることによって説明できる。すなわち、セメント粒子の連鎖または集団よりなるフロックの一部に微粉末粒子が入り込むことによって、セメント粒子周辺における水和物を析出できるスペースが広くなり、粒子周辺が水和物で満たされて物理的な水和の限界に達するまでの時間が遅くなり、等しい材令でも多くの水和物を析出することができるために、水和の程度が増加するものと考えられるのである。

この種の微粉末でも、コンクリートの強度を増加させる作用があることは③で述べたが、その一つの原因として上記のことがあげられると思われる。ポゾランの場合は、上記の影響のほかにポゾラン反応が加わって、長期材令における強度の増加に寄与するのである。

⑥ ポゾラン活性を持たない岩石微粉末を用いたモルタルの単位固相容積と強度との関係は、単位固相容積に微粉末をふくませると、基本モルタルの関係といちじるしく異なった関係を示し、単位固相容積に微粉末をふくませないで整理すると基本モルタルの関係とよく一致する。電子顕微鏡によって微粉末を用いたペースト硬化体の破面を観察した結果、この種の微粉末とセメント水和物との間には明らかな境界層が認められ、微粉末と水和物との付着は、水和物相互間の付着にくらべると弱く、微粉末を強度に関係するペースト中の固相にふくませることが適当でないことが立証された。

ポゾラン反応がおこる場合は、ポゾラン反応の程度を知ることはできないが、微粉末の一部を単位固相容積にふくませて整理することが必要である。電子顕微鏡による観察でも、ポゾラン粒子と水和物との間の境界層は、材令の経過にしたがってポゾラン反応による水和物によって埋められ、水和物との付着も増加することが認められ、ポゾラン反応によって水和物との付着の増加した未反応ポゾラン粒子は、強度に関係する固相にふくませるのが適当と思われる。すなわち、単位固相容積とモルタ

ルあるいはコンクリートの強度との関係を論ずる場合には、セメントペースト中で化学反応をおこさない微粉末は単位固相容積にふくめないで整理し、ポゾラン反応がおこる場合には、ポゾラン反応をおこしていると考えられる部分だけをふくめて整理するのが適当であると考えられる。

参考文献

- 1) Lea, F.M.: The Chemistry of Pozzolana, Proc. of the Symposium on the Chemistry of Cement (Stockholm) (1938)
- 2) Symposium on the Use of Pozzolanic Materials in Mortars and Concretes, ASTM Special Tech. Publ. No. 99 (1954)
- 3) Proc. of the 6th. International Congress on Large Dams. (New York) (1958)
- 4) Malquori, G.: Portland Pozzolana Cement, 4th. International Symposium on the Chemistry of Cement, (1960)
- 5) 国分正胤: フライ アッシュについて, 新材料と新工法, 土木学会刊 (1954)
- 6) 吉越盛次: 泥和材としてのフライ アッシュに関する研究, 土木学会論文集第 31 号 (1955)
- 7) Powers, T.C.: Use of Admixtures for Correction of Aggregate Gradations, ACI Proceeding, Vol. 47 (1950)
- 8) 山崎寛司: 鉱物質微粉末がコンクリートのウォーカビリティにおよぼす効果に関する基礎研究, 土木学会論文集第 84 号 (1962)
- 9) Powers, T.C., Brownyard, T.L.: Studies of Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste, ACI Proceeding Vol. 43 (1947)
- 10) 近藤 実: 硬化セメントペーストの水の形態と水分の拡散を考慮した乾燥収縮の関係, セメント技術年報(1958)
- 11) Copeland, L.E., Hayes, J.C.: Porosity of Hardened Portland Cement Pastes, ACI Proceeding, Vol. 52 (1956)
- 12) Davis, R.E., Carlson, R.W., Kelly, J.W., Davis, H.E.: Properties of Cement and Concrete Containing Fly Ash, ACI Proceeding, Vol. 43 (1937)
- 13) Minnick, L.J.: Investigations Relating to the Use of Fly Ash as a Pozzolanic Material and as an Admixture in Portland Cement Concrete, 1954 Preprint ASTM (1954)
- 14) Brink, R.H.: Studies Relating to the Testing of Fly Ash for Use of Concrete, Public Roads Vol. 29 No. 4 (1957)
- 15) Powers, T.C.: Use of Admixtures for Correction of Aggregate Gradation, ACI Proceeding Vol. 47 (1950)
- 16) 国分正胤: 各種 AE 剤の使用方法に関する研究, 土木学会論文集第 23 号 (1955)
- 17) McMillan, F.R., Powers, T.C.: A Method of Evaluating Admixtures, ACI Proceeding, Vol.30 (1934)
- 18) Powers, T.C.: The Bleeding of Portland Cement Paste, Mortar and Concrete, PCA Research Bull. No. 2 (1939)
- 19) Meissner, H.S.: Significance of Test and Properties of Mineral Admixtures, Paper of Annual Meeting of ASTM. (1954)
- 20) 吉田徳次郎: 新しいコンクリートにおける材料分離について, 土木学会誌 18 巻 8 号 (1932)
- 21) 吉田徳次郎: セメント糊の研究, 九州帝国大学工学彙報第 13 巻 1 号 (1938)
- 22) 篠原謹爾: セメント糊の強度に関する基礎研究, 九州帝国大学工学部紀要. 第 10 冊 2 号 (1947)
- 23) Werner, D., Giertz-Hedström, S.: Die Abhängigkeit der technisch wichtigen Eigenschaften des Betons von dem physikalisch-chemischen Eigenschaften, Zement Vol. 20 (1931)
- 24) Lea, F.M., Jones, F.E.: The Rate of Hydration of Portland Cement and Its Relation to the Rate of Development of Strength, Soc. Chem. Ind Vol. 54 (1935)
- 25) Bogue, R.H., Lerch, W.: Hydration of Portland Cement Compounds, Ind. Eng. Chem. Vol. 26(1934)
- 26) Czernin, W.: Über die physikalische Beschaffenheit des erhärteten Zements, Betonstein-Zeitung 9. (1959)
- 27) Taplin, J.H.: A Method of Following the Hydration Reaction in Portland Cement Paste. Australian Journal of Applied Science Vol. 10 (1959)
- 28) 左右田・山崎・江口: 道路舗装を対象としたコンクリートの曲げ強度試験, セメント技術年報 XIII (1959)
- 29) Powers, T.C.: The Physical Structure and Engineering Properties of Concrete, PCA Research Bull. No. 90 (1956)
- 30) 高野俊介: 打込み温度がマッサ コンクリートの強度におよぼす影響の研究, 土木学会論文集第 26 号 (1955)
- 31) Strassen, H. zur: The Problem on the Non-Selective Hydration of Cement Minerals, Zement und Beton No. 16 (1959)
- 32) Taplin, J.H.: The Temperature Coefficient of the Rate of Hydration of β Dicalcium Silicate, 4th. International Symposium on the Cement Chemistry. (1960)
- 33) 佐治健治郎: 電子顕微鏡によるセメントペースト硬化体の研究, セメント技術年報 (1959)

FUNDAMENTAL STUDIES OF THE EFFECTS OF MINERAL FINES ON THE STRENGTH OF CONCRETE

By Dr. Eng., Kanji Yamazaki, C.E. Member

This paper describes the results of fundamental studies on the physical effects of mineral fines on the strength of concrete.

Mineral fines used in this test is fines of siliceous sand, lime stone and gray wacke ground to various fineness as inert fines in cement paste, five samples of fly ash selected from the typical kinds most widely used as pozzolan in Japan, and fines of blast furnace slag as reactive fines in cement paste. It is natural that the chemical reaction of pozzolan and slag in cement paste has a marked influence on the strength of concrete. While the variation of the water content, the air content, the amount of bleeding water and the amount of settling of concrete produced by the admixed fines have also considerable influence on the strength of concrete.

The fines such as rock fines which is inert in cement paste increases the strength of concrete, when a part of aggregate is replaced by it without reducing the unit cement content. For example, in case 8~10% of the fine aggregate is replaced by fines, compressive strength at 28 days increased 20~50% for fly ash and 10~44% increased for rock fines (lime stone fines or gray wacke fines).

This increase of strength also depends on the variation of the water content, the air content and the settling volume by use of fines. On the other hand, the literature has shown that the alteration of inner structure of concrete due to the decrease of bleeding water by use of fines also causes the increase of strength. But this increase of strength can not be completely explained with the above reasons. So further investigation of the problem of strength has been performed.

When the fines is added, the strength of concrete and mortar can not be explained by the usual theories such as the water cement ratio theory, the voidcement ratio theory or the gel-

space ratio theory.

Therefore, observations were conducted on the fundamental relations between the strength of mortar and concrete and the properties of the cement paste part in the mortar and concrete. Results of these investigations are as follows.

In general, there is a definite relationship between the strength of mortar and concrete and the net-void cement ratio, which is calculated from the volume change due to settling of concrete. This relationship holds irrespective of air content, water content, volume of bleeding water, if the rate of hydration of cement is constant.

Further, if the aggregate and testing methods are constant, regardless of the quality of cement and admixtures (air entraining agent, dispersing agent, accelerator, retarder, etc.), the unit water content, the unit cement content, the air content and age, the strength of mortar and concrete can be expressed by a function of the form,

$$\sigma = K(V_{hc})^n$$

where σ = strength

V_{hc} = unit solid volume in cement paste part of the mortar or concrete.

K, n = constant

A unit solid volume is the total volume of unhydrated cement, hydration product and gel water in a unit volume of cement paste part in the mortar or concrete.

If the approximate volume of gel water is considered to be equivalent to the absorbed water at 80% relative humidity, the following relationship is obtained between a unit solid volume (V_{hc80}) and the compressive strength of modified cube of mortar (σ_c).

$$\sigma_c = 2280(V_{hc80})^4$$

Then the observations were conducted on the measurement of the combined water of cement and the unit solid volume (V_{hc80}) of cement paste part in mortars admixed various fines.

Test results show that even inert fines such as rock fines, increases the combined water of cement, the unit solid volume and the heat of hydration of cement. For example, a part of sand in mortar replaced by rock fines which is equivalent weight to the 10~20% of cement content, combined water of cement increased 11~29% at age 3 days, and increased 1~9% at age 91 days.

As described above, the strength of concrete develops if a part of aggregate is replaced by fines. Author points out as the reason for this strength development that fines helps the rate of hydration of cement, in addition to the usual theories.

The hydration will develop because of the increase of the space for hydration products in flocks of cement particles. This increase of

space takes place when fines gets into the flocks of cement particles.

On this occasion, if fines is inert, the fines can not be considered to be a part of the unit solid volume which affects strength. From the observation by an electron microscope, the distinct boundary layer is observed between hydration products of cement and fines which has not reacted yet. They are each other in a quite different way from the adherence between hydration product and unhydrated cement or hydration product each other. However, a part of unreacted pozzolans which produce a part of pozzolanic reaction, is expected to be a part of solid phase which affects strength, as far as pozzolans have strongly combined by pozzolanic action.

土木学会論文集編集委員

委員長	丸安	安芸	隆周	和一	副委員長	山倉	川田	尚典	委員	立松	俊彦	委員	松尾	新一郎
委員	安芸	浅川	周美	利一	委員	倉西	田茂	進茂	委員	玉野	治光	委員	村田	二郎
*	飯田	隆一	飯田	隆一	*	小池	圭司	力司	*	土屋	昭彦	*	室町	忠彦
*	石橋	金一郎	石橋	金一郎	*	後藤	圭司	胤雄	*	西尾	元充	*	八木	功
*	色部	誠一郎	色部	誠一郎	*	佐川	嘉正	雄二	*	西片	守道	*	山根	孟治
*	内田	功一	内田	功一	*	佐武	昭二	彦	*	林正	啓祐	*	箭内	寛
*	岡内	賢一	岡内	賢一	*	佐藤	吉彦	行忠	*	久武	健一郎	*	山本	敏
*	川島	英夫	川島	英夫	*	佐藤	宏信	信	*	堀井	清司	*	吉田	威
*	北川	秀夫	北川	秀夫	*	多田	高瀬	信	*	堀川	重臣	幹事	西脇	威夫
*	吉川	秀夫	吉川	秀夫	*	高瀬	信	信	*	増田	重臣			

昭和 37 年 9 月 15 日 印刷
昭和 37 年 9 月 20 日 発行

土木学会論文集 第 85 号

定価 150 円 (〒 20 円)

編集兼発行者 東京都新宿区四谷一丁目
印刷者 東京都港区赤坂溜池 5

社団法人 土木学会 末 森 猛 雄
株式会社 技 報 堂 大 沼 正 吉

発行所 社団法人 土 木 学 会 振替東京 16828 番
東京都新宿郵便局区内 新宿区四谷一丁目 電話 (351) 代表 5138 番