

論文 高強度コンクリート中の構成割合が力学特性に及ぼす影響

田村 裕介^{*1}・中田 善久^{*2}・斉藤 丈士^{*3}・春山 信人^{*4}

要旨:本研究は、高性能AE減水剤を用いる高強度コンクリート中の構成割合の変化が力学特性に及ぼす影響を明らかにするために実験的に検討を行ったものである。その結果、日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」に示される式を用いて求めた静弾性係数の算定値と実測値の関係において、回帰直線の傾きは、セメントペーストと細骨材の構成割合の変化による大きな差は見られなかったが、細骨材と粗骨材の構成割合の変化による回帰直線の傾きの差は顕著に見受けられ、粗骨材が多いほどその傾きは大きくなる傾向を示した。また、回帰直線の傾きは、材齢の経過に伴って概ね大きくなる傾向を示した。

キーワード:高強度コンクリート, 圧縮強度, 静弾性係数, 高性能AE減水剤, 単位水量, 単位粗骨材かさ容積

1. はじめに

高性能AE減水剤¹⁾を用いるコンクリートは、コンクリート中の構成割合を積極的に変化させることなく、高性能AE減水剤の使用量によって比較的容易に流動性を調整することが可能となっている。また、近年、高性能AE減水剤の性能が向上したため、コンクリートにおけるワーカビリティの確保は、混和剤の性能に依存してきた部分が多い。このため、コンクリート中の構成割合の変化によって各種性状を調整する本来の調合設計に関して、高性能AE減水剤を用いるコンクリートの性状は、従来のAE減水剤を用いたコンクリートと比較して不明確な部分が多い。

そこで、本研究は、高性能AE減水剤を用いる高強度コンクリート中の構成割合の変化が、各種性状に及ぼす影響を明らかにするために、実験的に検討を行ったものである。ここでは、高強度コンクリート中の構成割合の変化要因として、セメントペーストと細骨材の構成割合(シリーズ1)および細骨材と粗骨材の構成割合(シリーズ2)の2つの構成割合について検討した。

また、コンクリートには、強度、施工性および耐久性の各性能が求められ、筆者らはこれまで、普通ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメントおよび低熱ポルトランドセメントの各種セメントを用い、構成割合を変化させた高強度コンクリートの施工性に関する検討として、フレッシュコンクリートの性状を比較してきた²⁾³⁾。本報では、各種セメントを用い、高強度コンクリート中の構成割合の変化が力学的特性に及ぼす影響を明らかにするために、硬化コンクリートの品質として圧縮強度および静弾性係数について検討を行った結果を述べる。

2. 実験の概要

2.1 使用材料

使用材料の概要を表-1に示す。セメントは、普通ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメントおよび低熱ポルトランドセメントの3種類を用いた。以降、図表においてセメントの名称は、表-1に示した記号で表す。また、骨材には千葉県君津市産の山砂および最大寸法20mmの埼玉県秩父市産の硬質砂岩砕石を用いた。

2.2 試験項目および方法

試験項目は、フレッシュコンクリートの性状として、スランプまたはスランプフロー、空気量の2項目、硬化コンクリートの性状として圧縮強度、静弾性係数の2項目とした。コンクリートの圧縮強度および静弾性係数は、標準養生した100×200mmの供試体各3本について材齢2, 7, 28, 91日において、それぞれJIS A 1108およびJIS A 1149に準じて行った。また、ひずみ測定は検長100mmのコンプレッションメーターを使用し、単位容積質量は試験時に測定した供試体の寸法および質量から算出した。

表-1 使用材料の概要

材料	種類・品質
セメント	普通ポルトランドセメント(記号:N) (密度3.16g/cm ³ , 比表面積3,300cm ² /g)
	中庸熱ポルトランドセメント(記号:M) (密度3.21g/cm ³ , 比表面積3,190cm ² /g)
	低熱ポルトランドセメント(記号:L) (密度3.22g/cm ³ , 比表面積3,380cm ² /g)
水	千葉県浦安市, 上水道水
細骨材	千葉県君津市産山砂 (表乾密度2.59g/cm ³ , 粗粒率2.64)
粗骨材	埼玉県秩父市産硬質砂岩砕石 (表乾密度2.67g/cm ³ , 粗粒率6.69, 実績率59.0%)
混和剤	ポリカルボン酸系 高性能AE減水剤

*1 日本大学大学院 理工学研究科建築学専攻 (正会員)

*2 日本大学 理工学部建築学科 博士(工学) (正会員)

*3 内山城南コンクリート工業 博士(工学) (正会員)

*4 フジミ工研 (正会員)

2.3 コンクリートの調合条件

コンクリートの調合条件を表 - 2に示す。スランプまたはスランプフローおよび空気量は、練上りにおいて水セメント比ごとに一定になるように、化学混和剤の添加率により調整した。その結果、いずれの調合においてもフレッシュコンクリートの品質は調合条件を満足した。これより、調合における変化要因が本実験の範囲内であれば、練上りのコンクリートの品質は化学混和剤の添加率により調整できると思われる。なお、空気量は全ての調合において設定値±1.0%の範囲にあったことから、空気量が強度性状に及ぼす影響は小さかったと考えられる。

2.4 コンクリートの調合

コンクリートの調合を表 - 3および表 - 4に示す。表 - 3におけるコンクリートの調合(シリーズ1)では、水セメント比および単位粗骨材かさ容積を一定として単位水量を変化要因とし、セメントペーストと細骨材の構成割合を変化させた。水セメント比が25および45%のとき単位水量を170, 185kg/m³の2水準、水セメント比が35%のとき単位水量を170, 180, 185, 200kg/m³の4水準で変化させた。また、表 - 4におけるコンクリートの調合(シリーズ2)では、水セメント比および単位水量を一定として単位粗骨材かさ容積を変化要因とし、細骨材と粗骨材の構成割合を変化させた。水セメント比が35%で単位水量が170kg/m³のとき、単位粗骨材かさ容積を0.25, 0.35, 0.55, 0.65m³/m³の4水準で変化させた。

3. 結果および考察

3.1 セメントペーストと細骨材の構成割合の変化が圧縮強度に及ぼす影響(シリーズ1)

セメントペーストと細骨材の構成割合の変化は、セメントペーストの絶対容積を細骨材の絶対容積で除した値(以降、p/s 称す)で表す。表 - 3の調合について、セメントペーストと細骨材の容積割合(p/s)と圧縮強度および高性能AE減水剤の添加率の関係を図 - 1に示す。

p/sが大きくなるとセメントペーストの量が増加し細骨材の量は減少するため、強度は大きくなると考えられる。しかし、普通ポルトランドセメントを使用した水セメント比が25および35%の材齢28, 91日、中庸熟ポルトランドセメントを使用した水セメント比が25%の材齢91日および水セメント比が35%の材齢28, 91日において、p/sが大きくなると圧縮強度は小さくなる傾向を示した。高性能AE減水剤の添加率が増加するほどセメント粒子が分散し、水和反応が促進され強度が大きくなることから、これは、p/sと高性能AE減水剤の添加率の関係に示すように、p/sが大きくなるに伴いセメントの量に対する高性能AE減水剤の絶対量の減少が影響したと考えられる。また、本実験の比較的長期の試験材齢にあたる、材齢28日以降に

表 - 2 コンクリートの調合条件

セメント	W/C (%)	単位水量 (kg/m ³)	かさ容積* (m ³ /m ³)	調合条件
N	45	170, 185	0.55	スランプ 21 ± 2cm 空気量 4.5 ± 1.5%
L	25	185, 200	0.25, 0.35 0.55, 0.65	スランプ**60 ± 10cm 空気量 3.0 ± 1.5%
		170		

*単位粗骨材かさ容積 **スランプフロー

表 - 3 セメントペーストと細骨材の構成割合を変えたコンクリートの調合(シリーズ1)

セメント	W/C (%)	かさ容積* (m ³ /m ³)	s/a** (%)	p/s***	単位量(kg/m ³)						
					W	C	S	G	Ad		
N	45	0.55	51.2	0.849	170	378	883	866	2.65		
					49.3	0.999	185	411	817	866	1.95
	35	0.55	48.6	1.055	170	486	795	866	5.83		
					47.0	1.191	180	514	745	866	4.88
					46.2	1.266	185	529	721	866	3.97
					43.5	1.525	200	571	647	866	3.14
	25	0.55	44.5	1.480	170	680	674	866	9.52		
					41.1	1.852	185	740	586	866	8.88
	M	45	0.55	51.4	0.839	170	378	888	866	1.89	
						49.4	0.986	185	411	822	866
		35	0.55	48.8	1.039	170	486	801	866	5.10	
						47.2	1.172	180	514	752	866
46.4						1.245	185	529	727	866	3.97
43.8						1.497	200	571	654	866	2.86
25		0.55	44.8	1.448	170	680	683	866	10.20		
					41.5	1.807	185	740	596	866	9.62
L		45	0.55	51.4	0.837	170	378	889	866	1.51	
						49.5	0.984	185	411	823	866
		35	0.55	48.8	1.036	170	486	802	866	4.37	
						47.3	1.168	180	514	753	866
	46.4					1.241	185	529	729	866	3.57
	43.8					1.492	200	571	655	866	3.00
	25	0.55	44.9	1.442	170	680	685	866	8.84		
					41.6	1.798	185	740	597	866	7.77

*単位粗骨材かさ容積 **細骨材率

***p/sセメントペーストと細骨材の容積割合

表 - 4 細骨材と粗骨材の構成割合を変えたコンクリートの調合(シリーズ2)

セメント	W/C (%)	かさ容積* (m ³ /m ³)	s/a** (%)	p/s***	単位量(kg/m ³)				
					W	C	S	G	Ad
N	35	0.25	76.6	0.669	170	486	1253	394	12.64
							1100	551	8.02
							795	866	5.83
							642	1024	4.86
M	35	0.25	76.7	0.661	170	486	1259	394	12.88
							1106	551	6.44
							801	866	5.10
							648	1024	3.40
L	35	0.25	76.7	0.659	170	486	1260	394	13.40
							1108	551	6.08
							802	866	4.37
							649	1024	3.89

*単位粗骨材かさ容積 **細骨材率

***p/sセメントペーストと細骨材の容積割合

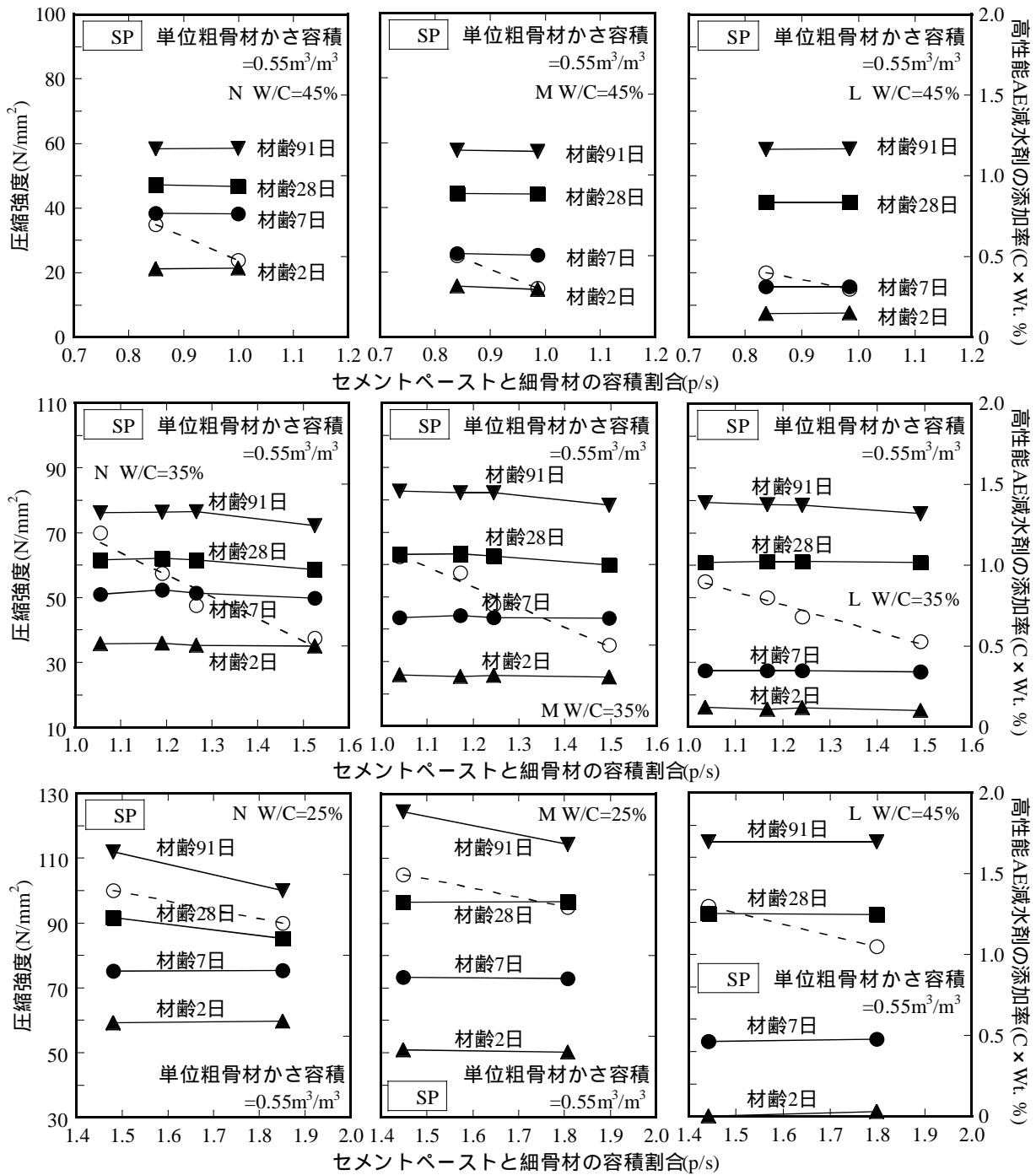


図 - 1 セメントペーストと細骨材の容積割合 (p/s) と圧縮強度および高性能AE減水剤の添加率の関係

において強度の差が見られることから、高性能AE減水剤の添加率の減少は、水和反応の遅いC₂Sに影響を及ぼしたと考えられる。なお、この傾向は低熱ポルトランドセメントではほとんど見られなかった。低熱ポルトランドセメントは、間隙質相に吸着する混和剤の量が少なく、高性能AE減水剤がセメント粒子の分散に有効に作用したため、高性能AE減水剤の添加率の減少による影響が小さかったと考えられる。

また、p/sが大きくなるに伴い高性能AE減水剤の添加率が減少する傾向は、p/sが大きくなることでセメントペー

ストの増加と細骨材の減少が流動性に寄与するセメントペーストの量を変化させ、これによって大きくなったスランプフローを高性能AE減水剤の添加率を減少させることで調整したためと考えられる。

水セメント比が45%の割合においては、p/sの違いによる圧縮強度の差は見られなかった。ここでは、p/sの増加に伴う高性能AE減水剤の添加率の減少による影響とセメントペースト量の増加による影響が、ほぼ相殺する程度であったと考えられる。

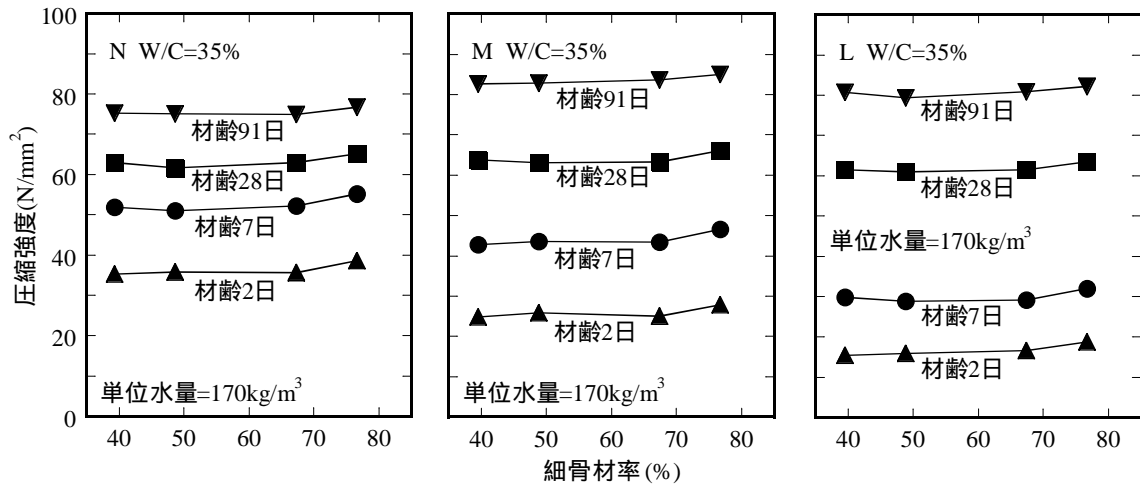


図 - 2 細骨材率と圧縮強度の関係

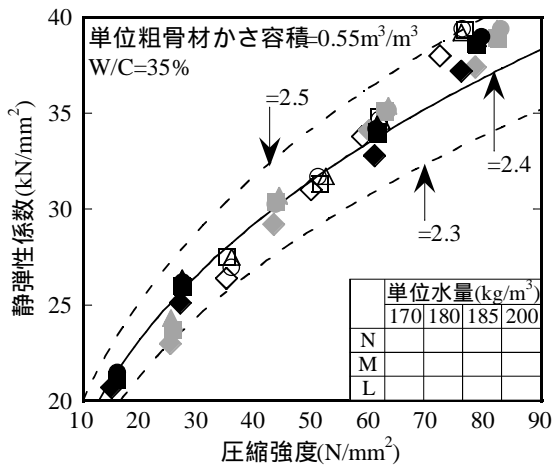


図 - 3 セメントペーストと細骨材の構成割合ごとの圧縮強度と静弾性係数の関係

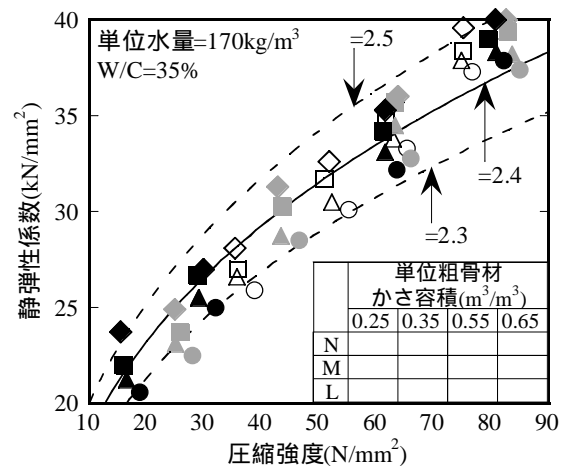


図 - 4 細骨材と粗骨材の構成割合ごとの圧縮強度と静弾性係数の関係

3.2 細骨材と粗骨材の構成割合の変化が圧縮強度に及ぼす影響(シリーズ2)

表 - 4の調査について 細骨材率と圧縮強度の関係を図 - 2に示す。ここで 細骨材と粗骨材の構成割合の変化は、細骨材率で表す。

各材齢の圧縮強度は、いずれのセメントを用いた場合においても、細骨材率が70%以下であればセメントペーストと細骨材の構成割合による差はほとんど見られなかった。しかし、細骨材率が概ね77%の調査で、すなわち単位粗骨材かさ容積が0.25m³/m³の調査で、その他の調査に比べ圧縮強度は若干大きくなる傾向を示した。これは、単位粗骨材かさ容積が小さいほど、セメントペーストと粗骨材の界面が減少するためと考えられる。また、コンクリートと、同じコンクリートから粗骨材を除去したモルタルを比較すると、モルタルのほうが圧縮強度は大きくなる⁴⁾ことから、モルタル部分の調査が同一のとき粗骨材が著しく少なくなるとモルタルに近づき、圧縮強度は大きくなることを示唆していると考えられる。これらの結

果から、水セメント比が35%程度の高強度コンクリートにおいては 粗骨材が著しく少ない場合を除き 細骨材と粗骨材の構成割合の変化が圧縮強度に及ぼす影響は小さいと考えられる。

3.3 圧縮強度と静弾性係数の関係

(1)セメントペーストと細骨材の構成割合の変化が圧縮強度と静弾性係数の関係に及ぼす影響(シリーズ1)

セメントペーストと細骨材の構成割合ごとの圧縮強度と静弾性係数の関係を図 - 3に示す。なお、ここでは、単位粗骨材かさ容積を一定としているため、図中においては、セメントペーストと細骨材の構成割合の変化を単位水量で表している。つまり、単位水量が大きくなるということは、コンクリート中の構成割合としてセメントペーストが増加し細骨材が減少することになる。また、全ての供試体の単位容積質量が2.28から2.50t/m³の間であったため、図中には比較として単位容積質量を2.30, 2.40および2.50t/m³とした日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」⁵⁾に示される式(以下、構造計算規準式と

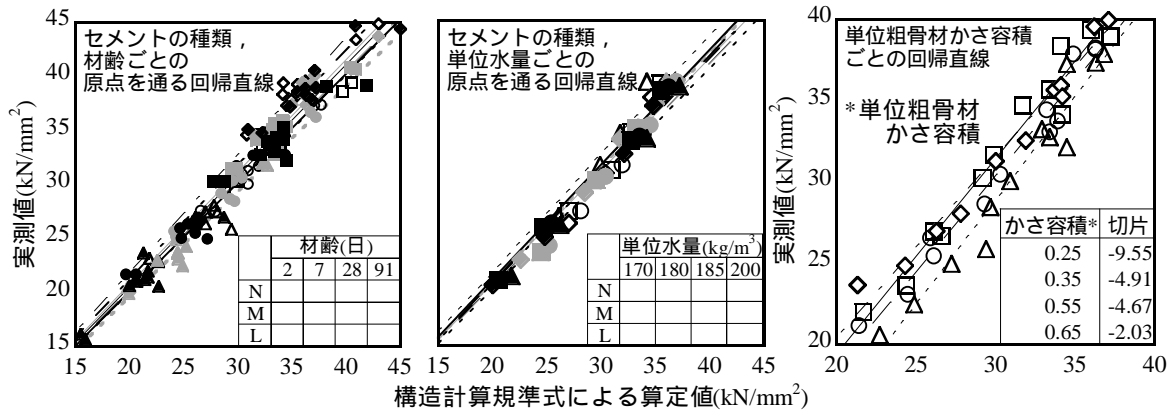


図 - 5 構造計算規準式による静弾性係数の算定値と実測値の関係

表 - 5 構造計算規準式による静弾性係数の算定値と実測値の関係式における傾き

セメント	N				M				L				N				M				L				
	単位水量(kg/m ³)				単位水量(kg/m ³)				単位水量(kg/m ³)				かさ容積*(m ³ /m ³)				かさ容積*(m ³ /m ³)				かさ容積*(m ³ /m ³)				
調査	170	180	185	200	170	180	185	200	170	180	185	200	0.25	0.35	0.55	0.65	0.25	0.35	0.55	0.65	0.25	0.35	0.55	0.65	
材 齢 (日)	2	1.03	0.98	1.02	0.98	0.99	0.96	0.98	1.02	1.02	1.02	0.97	1.03	0.88	1.03	1.04	1.01	0.90	0.94	0.97	1.02	0.91	0.99	1.01	1.11
	7	1.02	0.99	1.00	1.02	1.03	1.01	1.01	1.03	1.04	1.04	1.00	1.01	0.97	1.01	1.06	1.02	0.96	0.98	1.04	1.05	0.92	0.98	1.00	1.03
	28	1.02	1.02	1.01	1.05	1.04	1.03	1.03	1.08	1.03	1.03	0.99	1.03	1.01	1.00	1.09	1.06	0.98	1.04	1.07	1.05	0.93	0.99	1.00	1.03
	91	1.09	1.09	1.08	1.10	1.07	1.07	1.04	1.07	1.09	1.08	1.04	1.07	1.08	1.09	1.13	1.09	1.03	1.05	1.09	1.08	1.03	1.05	1.05	1.09

*単位粗骨材かさ容積

いう)を示した。

圧縮強度と静弾性係数の関係は、概ね構造計算規準式に近似する傾向を示した。また、いずれのセメントを用いた場合においても単位水量が170から185kg/m³の範囲においては、ばらつきで静弾性係数に顕著な差は見られなかった。しかし、単位水量が200kg/m³の場合、同等の圧縮強度に対する静弾性係数は小さくなる傾向を示した。単位粗骨材かさ容積を一定としているため、コンクリート全体に対するモルタルの容積は一定となり、単位水量を大きくすると、モルタル分中のセメントペーストが増加し細骨材が減少する。これは、モルタル分の構成材料において比較的圧縮強度および静弾性係数の大きい骨材の絶対容積が小さくなるため、単位水量が200kg/m³の調査のように、著しくセメントペーストが増加し細骨材が減少した場合、静弾性係数の低いセメントペースト自体の圧縮強度と静弾性係数に近似したと思われる。

(2) 細骨材と粗骨材の構成割合の変化が圧縮強度と静弾性係数の関係に及ぼす影響(シリーズ2)

細骨材と粗骨材の構成割合ごとの圧縮強度と静弾性係数の関係を図 - 4に示す。なお、ここではセメントペースト量を一定としているため、図中において細骨材と粗骨材の構成割合の変化を単位粗骨材かさ容積で表している。

圧縮強度と静弾性係数の関係は、概ね構造計算規準式に近似する傾向にあり、ばらつきはあるもののいずれの

セメントを用いた場合においても、単位粗骨材かさ容積が小さいほど同等の圧縮強度に対する静弾性係数は小さくなる傾向を示した。これは、主に変形に抵抗する粗骨材量が少なくなったことにより、載荷時の変形が大きくなったためと考えられる。また、前述したように単位粗骨材かさ容積が0.25m³/m³の調査においては、その他の調査に比べ圧縮強度は若干大きくなるが、同等の圧縮強度に対する静弾性係数は小さくなる傾向を示している。

(3) 構造計算規準式との関係

構造計算規準式による静弾性係数の算定値と実測値の関係を図 - 5に示す。なお、構造計算規準式から静弾性係数を算出する際、実測の圧縮強度および単位容積質量を用い、骨材および混和剤による係数には、構造計算規準式に示される係数に本実験の条件を当てはめ、いずれも1.0を用いた。また、各種セメント、各材齢および高強度コンクリート中の構成割合を変えた供試体について、原点を通る回帰直線の傾き(以降、傾きと称す)をそれぞれ求め、表 - 5に構造計算規準式による静弾性係数の算定値と実測値の関係式における傾きとして示す。表中には、セメントペーストと細骨材の構成割合を単位水量で、細骨材と粗骨材の構成割合を単位粗骨材かさ容積で示している。

単位水量ごとの原点を通る回帰直線では、セメントペーストと細骨材の構成割合の変化、すなわち単位水量の変化に伴う傾きの差は、ばらつきはあるもののいずれ

のセメントを用いた場合においても比較的小さなものだった。これは、前述した圧縮強度が若干小さくなる調合においてもいえることである。このように、セメントペーストと細骨材の構成割合の変化は、圧縮強度に及ぼす影響はあるものの静弾性係数に直接影響するものではなく、静弾性係数は概ね圧縮強度に依存すると考えられる。また、ばらつきはあるもののセメントペーストと細骨材の構成割合の変化に関わらず、傾きは材齢が長期であるほど大きくなる、すなわち、長期材齢において実測値は構造計算規準式で算出した静弾性係数より大きくなる傾向を示し、またその傾向は、いずれのセメントを用いた場合においても見受けられた。

単位粗骨材かさ容積ごとの回帰直線では、本実験の静弾性係数の範囲における回帰直線の切片を図中に示す。細骨材と粗骨材の構成割合を変化させたコンクリートにおいては、ばらつきはあるもののいずれのセメントを用いた場合も、単位粗骨材かさ容積が大きいほど切片が大きくなる傾向を示した。つまり、コンクリート中の粗骨材が多いほど、実測値は構造計算規準式で算出した静弾性係数より大きくなる傾向を示し、またその傾向は、比較的初期の材齢ほど顕著に表れた。このことから、骨材の構成割合が異なるコンクリートの静弾性係数を圧縮強度から算定する場合には、構造計算規準式を若干補正する必要があると考えられる。また、セメントペーストと細骨材の構成割合を変化させた場合と同様に、細骨材と粗骨材の構成割合を変化させた場合においても、傾きは材齢が長期であるほど大きくなる傾向を示した。

4. まとめ

普通ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメントおよび低熱ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリート中の構成割合の変化が力学特性に及ぼす影響を検討した結果、以下のことが明らかになった。

- (1)セメントペーストと細骨材の構成割合を変化させた高強度コンクリートの圧縮強度は、その構成割合の変化による大きな差は見られなかった。しかし、普通ポルトランドセメントおよび中庸熱ポルトランドセメントを用いた水セメント比が25および35%のとき比較的長期の材齢で、コンクリート中のセメントペーストの割合が増加し細骨材の割合が減少すると圧縮強度は小さくなる傾向を示した。
- (2)細骨材と粗骨材の構成割合を変化させた高強度コンクリートの圧縮強度は、その構成割合の変化による大き

な差は見られなかった。しかし、著しく粗骨材の割合が減少しコンクリート中のモルタルの割合が増加すると、圧縮強度は若干大きくなる傾向を示し、またその傾向はいずれのセメントを用いた場合も見受けられた。

- (3)高強度コンクリートの静弾性係数は、セメントペーストと細骨材の構成割合の変化による大きな差は見られなかったが、細骨材と粗骨材の構成割合の変化による差は顕著に見受けられた。
- (4)構造計算規準式による静弾性係数の算定値と実測値の関係において、回帰直線の傾きは、セメントペーストと細骨材の構成割合の変化による大きな差は見られなかったが、細骨材と粗骨材の構成割合の変化による差は顕著に見受けられ、粗骨材量が多いほど回帰直線の切片は大きくなる傾向を示した。
- (5)構造計算規準式による静弾性係数の算定値と実測値の関係において、回帰直線の傾きは、材齢の経過に伴って概ね大きくなる傾向を示した。

今後は、高強度コンクリート中の構成割合の変化が耐久性に及ぼす影響について検討していく予定である。

参考文献

- 1) 日本工業規格, JIS A 6204, コンクリート用化学混和剤, 2006
- 2) 斉藤丈士ほか: 単位水量の違いが高強度コンクリートの諸性質に及ぼす影響(その1-3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.59-64, 2007.8
- 3) 斉藤丈士ほか: セメントペーストと細骨材の構成割合を変えた高強度コンクリートの性状に関する研究(その1-5), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1017-1026, 2008.9
- 4) 中田善久ほか: 粗骨材とモルタルの構成割合を変えた高流動コンクリートの性状に関する一考察, 日本建築学会技術報告集, 第6号, pp.1-6, 1998.10
- 5) 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, (社)日本建築学会, pp.38-39, 1999.11

謝辞

本研究を行うにあたり、株式会社内山アドバンス中央技術研究所の白鳥秀幸所長、女屋英明課長、關裕司研究員および、ものつくり大学建設技能工芸学科の大塚秀三助教より御指導、御協力を頂きました。ここに付記し、感謝の意を表します。