

論文 セメントモルタルの強度性状に及ぼす混和材・骨材種の影響

伊藤 憲雄^{*1}・三橋 博三^{*2}・中村 裕^{*3}・吉田 久嗣^{*4}

要旨: 本研究ではコンクリートと硬化セメントペーストの中間にあるモルタルの水結合材比を30、40、50%の3種類について、それぞれ混和材と細骨材の組合せを変化させた実験的研究を行った。その結果、シリカフュームと石灰石碎砂を使用したモルタルの圧縮強度が最も高くなることと細孔量では高炉スラグ微粉末を混入した場合に他と比べて比較的少くなり、細骨材が混入されると、それが更に減少することが分かった。さらに実験の範囲では材齢28日の圧縮強度と細孔量との相関性は硬化セメントペーストとモルタルとでは同一に評価できないことが明らかとなった。

キーワード: 圧縮強度、引張強度、弾性係数、細孔量、混和材、細骨材種、モルタル

1. はじめに

近年、従来のものとは大きく異なる性能を有するコンクリートが求められている今日、従来行われてきた経験則に加えて、論理的に材料構成を設計することが重要と成ってきている。とりわけ、コンクリートの強度性状に及ぼす影響をセメントペーストの微細構造レベルから考察[1]することが、今後のより優れた性能を有するコンクリートを開発する上で重要な資料になると考えられる。セメントが水和生成物を生成する過程で、セメントの成分のうちビーライトが強度発現に影響しており、また、セメントに混和材としてシリカフューム、高炉スラグ微粉末、フライアッシュなどを加えることによって、それらが水和物生成に寄与して、コンクリートの特性としてのワーカビリティや強度性状を改善することはよく知られている。特に、内川[2]は骨材周りに形成される遷移帯がコンクリートの強度特性に影響を及ぼしているとし、遷移帯の制御が最も重要であると述べている。また、内川ら[3]は空隙分布の差から遷移帯の空隙量を算出し、その厚さを推定する方法を提案した。一方、森本ら[4]はセメント硬化体の圧縮強度が細孔半径10nm以上の細孔量で説明できるとしている。さらに吉野ら[5]はコンクリート強度を空隙構造指標の関数として表す強度式を誘導した。

本研究では、コンクリートの強度性状に影響を及ぼす微細構造との関連性を明確にするため、コンクリートとセメントペーストの中間的なレベルにあるモルタルを用い、その構成材料として、シリカフューム、高炉スラグ微粉末、フライアッシュなどの混和材や標準砂、石灰石碎砂、石英片岩碎砂、山砂などの細骨材をとりあげた。水結合材比を30、40、50%の3段階に変化させ、それぞれ作製したモルタルの圧縮強度、引張強度、弾性係数及び微細構造として細孔量の測定を行い、材齢28日のモルタル強度性状に対して混和材と細骨材が及ぼす影響をその微細構造と関連づけて

2. 研究計画

2. 1 使用材料と調合

*1 宮城工業高等専門学校 建築学科、(正会員)

*2 東北大学教授 工学部建築学科、工博(正会員)

*3 東北大学大学院 工学研究科建築学専攻

*4 三菱マテリアル(株)セメント研究所、(正会員)

使用材料は普通ポルトランドセメント（比重：3.16、 σ_{28} = 42.2 MPa）、混和材はシリカフューム（比重：2.20、比表面積：200,000cm²/g）、高炉スラグ微粉末（比重：2.89、比表面積：4000cm²/g）、フライアッシュ（比重：2.33、比表面積：2740cm²/g）、細骨材は豊浦産標準砂（粗粒率：1.00、表乾比重：2.64、絶乾比重：2.56）、秩父産石灰石碎砂（粗粒率：2.63、表乾比重：2.69、絶乾比重：2.66、吸水率：0.96%）、段戸産石英片岩碎砂（粗粒率：4.52、表乾比重：2.61、絶乾比重：2.58、吸水率：0.99%）、木更津産山砂（粗粒率：2.51、表乾比重：2.64、絶乾比重：2.60、吸水率：1.55%）、そしてコンクリート用AE減水剤（比重：1.07）を使用する。

各混和材は普通ポルトランドセメントとの重量比とし、その割合及び記号は普通ポルトランドセメント 100 % (PC)、普通ポルトランドセメント 90 % +シリカフューム 10 % (PS)、普通ポルトランドセメント 50 % + 高炉スラグ微粉末 50 % (PB)、普通ポルトランドセメント 80 % + フライアッシュ 20 % (PF) とする。

細骨材は予め80°Cの温風乾燥機で絶乾状態として使用する。作製するモルタルの水結合材比は30、40、50%とする。なお、練り混ぜ時のフロー値は210mmを目標とし試験練りを行い調合を決める。モルタル調合の種類は水結合材比3水準、混和材4水準（混和材なしを含む）、細骨材4水準の組合せで構成されている。なお使用混和材のうち、高炉スラグ微粉末とフライアッシュ混入モルタルへの細骨材は、未混入及び標準砂のみとする。それらのモルタルの調合は表1のとおりである。

2. 2 試験体とその養生

試験体は1材齢・1種類のモルタルごとに円柱試験体（φ 50mm×100mm）が6本並びに角柱試験体（40×40×160mm）が3本とする。試験体作製では、円柱試験体は3層、角柱試験体は2層に分けて打込み、それぞれ突き棒で突いた後に、締め固めが良くなる様に円柱試験体の場合は型枠への振動を小槌で加え、また角柱試験体では所定の突き数に加えジッキングを行い、型枠中にモルタルが充分充填されるように配慮する。

養生は試験体作製後、試験材齢まで標準養生とする。なお、円柱試験体は試験材齢直前に研磨機で打込み面と底面を研磨して平滑にする一方、角柱試験体はセッティング後に型枠上端まで削り取り、打ち込み面を平滑にする。

2. 3 試験項目及び測定方法と試験材齢

試験及び測定項目は、試験体寸法、表乾重量、共鳴振動数、圧縮強度、割裂による引張強度、細孔分布である。強度試験は円柱試験体を用い、全種類のモルタルで実施する。微細構造の検討用としては、水銀圧入法による細孔分布を測定する。測定用試料は角柱試験体の一部を材軸方向に対して直角にダイヤモンドカッターで輪切りにしたものを用いる。その厚さは約5mm程度とし、直ちにアセトンに3時間浸漬した後、アスピレータで30分間脱気して、最後に温度50°Cの乾燥機で16時間保持し、絶乾状態とした試料を用いる。細孔量は2回の平均値を用いる。試験材齢は28日とする。

3. 結果及び考察

3. 1 強度性状に及ぼす混和材の影響

最も基本となる硬化セメントペーストの圧縮強度は、72.4～44.3 MPaの範囲であった。当然のことながら、水結合材比が小さい程、得られた圧縮強度は高くなる傾向を示した。表2は各モルタルの圧縮強度、引張強度、動弾性係数の結果[6]を示す。

表1 セメントモルタルの調合 注1)

混和材種類	細骨材種類	水結合材比(%)	水(gr/L)	セメント(gr/L)	混和材(gr/L)	細骨材(gr/L)	混和剤(gr/L)	S/C	flow(mm)
混和材無混入	細骨材無混入	30	449	1628	-	-	38	-	234
		40	558	1396	-	-	-	-	268
		50	612	1225	-	-	-	-	-
	豊浦産標準砂	30	269	996	-	996	29	1.0	153
		40	285	769	-	1154	22	1.5	175
		50	357	713	-	1070	-	1.5	240
	秩父産碎砂	30	229	849	-	1274	25	1.5	160
		40	312	781	-	1172	-	1.5	231
		50	362	724	-	1087	-	1.5	-
	段戸産碎砂	30	226	837	-	1255	24	1.5	178
		40	308	771	-	1156	-	1.5	223
		50	358	715	-	1073	-	1.5	268
	木更津産山砂	30	227	840	-	1260	24	1.5	148
		40	309	773	-	1160	-	1.5	222
		50	359	718	-	1077	-	1.5	276
シリカフューム混入	細骨材無混入	30	430	1434	159	-	46	-	166
		40	548	1232	137	-	-	-	189
		50	602	1084	120	-	-	-	242
	豊浦産標準砂	30	265	884	98	982	29	1.0	144
		40	282	685	76	1142	22	1.5	164
		50	353	635	71	1059	-	1.5	178
	秩父産碎石	30	227	755	84	1259	24	1.5	142
		40	303	682	76	1137	20	1.5	200
		50	359	646	72	1076	-	1.5	196
	段戸産碎石	30	223	744	83	1241	24	1.5	145
		40	299	672	75	1120	22	1.5	192
		50	354	638	71	1063	-	1.5	195
	木更津産山砂	30	224	747	83	1245	24	1.5	136
		40	300	674	75	1124	22	1.5	190
		50	355	640	71	1066	-	1.5	192
高炉スラグ微粉末混入	細骨材無混入	30	475	792	792	-	-	-	198
		40	547	684	684	-	-	-	243
		50	602	602	602	-	-	-	-
	豊浦産標準砂	30	265	491	491	981	29	1.0	165
		40	281	380	380	1141	22	1.5	196
		50	353	353	353	1058	-	1.5	235
フライアッシュ混入	細骨材無混入	30	454	1254	313	-	15	-	214
		40	541	1082	271	-	-	-	280
		50	596	954	238	-	-	-	-
	豊浦産標準砂	30	263	779	195	974	28	1.0	178
		40	280	605	151	1134	22	1.5	188
		50	351	561	140	1053	-	1.5	238

注1) 調合表は1L当たりの計量値を示す。

混和材混入モルタルの圧縮強度に及ぼす影響は、相対的にシリカフューム混入(PS)、高炉スラグ微粉末混入(PB)、フライアッシュ混入(PF)の順で、混和材無混入のモルタルより混和材を混入した方が強度に寄与し緻密となるため高い強度を示している。特に、微粒なシリカフュームを混入したPSが110.7~42.3 MPaの範囲にあり、最大値では混和材無混入の同一水結合材比で約1.4倍の強さを示した。最も低い強度はPFで、比表面積が小さいため混和材無混入の場合の約0.7~1.2倍となり、その強さは31.6~88.3 MPaであった。

引張強度は、圧縮強度と異なり試験体の状態によって敏感に外力に反応する。硬化セメントペーストとの強度比で表すと、最も高い割合のものでも、PFで1.2~1.8倍、強度が4.46~2.98 MPaであった。モルタルの引張強度が、混和材の混入によって増大するというケースは、圧縮強度の場合と比べて少ない。非破壊試験方法として定評のある動弾性係数に及ぼす混和材の影響は、増大よりはむしろ低減する傾向にある。しかし、PSの一部で、水結合材比が小さいモルタルでは混和材無混入の硬化セメントペーストよりも若干高い割合を示している。

3. 2 強度性状に及ぼす骨材の影響

コンクリート中の骨材は、その使用岩種や水分によって、強度性状に影響を及ぼす遷移帯が骨材周りに形成され易く、岩種としては石灰岩系が遷移帯の形成制御によいとされている[2]。本実験では混和材無混入モルタル(PC)の圧縮強度を硬化セメントペースト(N)との強度比で表すと、石灰石碎砂モルタル(S)で0.8~1.2、標準砂モルタル(H)で0.8~1.1、石英片岩碎砂モルタル(D)で0.9~1.3、山砂モルタル(K)の場合で0.8~0.9であった。最も高い強度比は水セメント比30%で石英片岩碎砂を使用したモルタルの場合で92.1 MPaであった。しかし、混和材が混入されると無混入の場合と異なり水結合材比の大きいモルタルの比率が大きくなることが認めたれており骨材が強度に寄与していることが分かった。PSでは、標準砂モルタルで1.1~1.4、石灰石碎砂モルタルで0.9~1.6、石英片岩碎砂モルタルで1.1~1.4、山砂モルタルで0.9~1.2を示した。PBとPFの標準砂では前者が0.8~1.0、後者が0.7~1.2となっている。即ち、

表2 材齢28日の強度性状と細孔量の一覧表

混和材 種類	細骨材 種類	W/B (%)	S/C	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	動弾性係数 (GPa)	細孔量 (mL/mL)
無混入	無混入	30	-	72.4	3.6	27.4	0.126
		40	-	64.7	2.5	23.3	0.062
		50	-	44.3	2.2	19.1	0.253
	標準砂	30	1.0	80.7	5.5	39.0	0.055
		40	1.5	53.1	3.9	34.0	0.023
		50	1.5	47.3	4.1	33.1	0.065
	秩父産 碎石	30	1.5	83.2	5.7	41.8	0.040
		40	1.5	52.7	4.1	36.7	0.025
		50	1.5	46.6	4.1	31.9	0.059
	段戸産 碎石	30	1.5	92.1	5.3	37.9	0.040
		40	1.5	60.3	3.9	34.9	0.039
		50	1.5	42.5	3.1	30.0	0.070
	木更津 山砂	30	1.5	62.5	4.9	41.5	0.026
		40	1.5	53.1	4.4	36.1	0.060
		50	1.5	38.1	3.4	32.6	0.064
シリカ フューム	無混入	30	-	77.7	4.1	34.2	0.128
		40	-	66.6	3.2	23.3	0.082
		50	-	42.3	1.6	16.8	0.270
	標準砂	30	1.0	87.0	6.9	39.6	0.016
		40	1.5	77.0	4.7	35.8	0.019
		50	1.5	57.8	3.1	31.7	0.050
	秩父産 碎石	30	1.5	66.7	4.7	42.6	0.008
		40	1.5	84.1	4.1	35.6	0.021
		50	1.5	66.5	3.9	31.0	0.061
	段戸産 碎石	30	1.5	110.7	6.7	37.8	0.008
		40	1.5	71.7	3.2	32.4	0.022
		50	1.5	58.1	3.0	28.1	0.046
	木更津 山砂	30	1.5	74.2	4.4	42.6	0.013
		40	1.5	57.3	3.7	35.3	0.027
		50	1.5	50.1	3.2	30.4	0.052
高炉スラグ 微粉末	無混入	30	-	91.7	4.1	27.1	0.050
		40	-	61.4	3.4	19.2	0.066
		50	-	47.0	1.8	14.9	0.156
	標準砂	30	1.0	83.1	6.7	38.3	0.022
		40	1.5	51.4	4.5	32.1	0.021
		50	1.5	49.2	3.5	29.0	0.051
	フライ アッシュ	30	-	88.3	4.5	27.3	0.185
		40	-	48.8	4.4	20.9	0.147
		50	-	31.6	3.0	16.8	0.301
	標準砂	30	1.0	61.2	4.7	34.6	0.035
		40	1.5	45.9	3.4	32.0	0.046
		50	1.5	37.0	3.6	30.5	0.075

細骨材の種類が及ぼすモルタル圧縮強度への影響は、石灰石碎砂、標準砂、石英片岩碎砂、山砂の順であった。各引張強度を硬化セメントペーストとの強度比では、PCの場合には標準砂モルタルで1.5~1.8、石灰石碎砂モルタルで1.6~1.8、石英片岩碎砂モルタルで1.4~1.6、山砂モルタルで1.4~1.8が得られた。PSでは石灰石碎砂モルタルで1.2~2.5、標準砂モルタルで1.5~2.0、山砂モルタルで1.1~2.1、石英片岩碎砂モルタルで1.0~1.9であった。PBとPFの標準砂モルタルでは、前者が1.3~1.9、後者が0.8~1.2の値を得た。したがって、石灰石碎砂が、各混和材使用的モルタルの強度増大に最も寄与していることが確認された。また低い強度比は山砂を使用したモルタルの場合で、使用細骨材の吸水率が1.55%と他の細骨材に比べて大きいことが強度の低下に影響したものと考えられる。硬化セメントペーストに対する引張強度比は圧縮強度比よりも高い割合を示す場合が多く、このことは両者の試験体内に存在している特異点などの違いがあることを示唆している。なお、動弾性係数への細骨材の影響は、引張強度の場合と傾向が類似している。動弾性係数と圧縮強度及び引張強度との関連性を図1-2に示す。

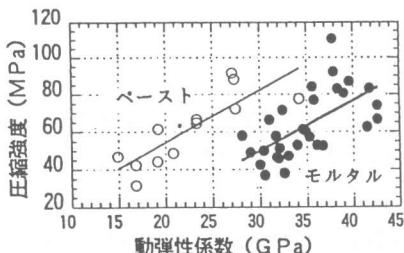


図1 モルタルの動弾性係数と圧縮強度

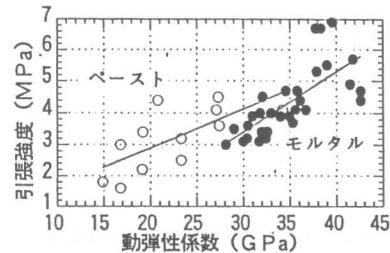


図2 モルタルの動弾性係数と引張強度

3.3 モルタルの微細構造の特徴

測定された範囲では、細骨材が無混入のモルタルで相対的に細孔量が多く、特に水セメント比が大きい程、細孔量が多くなる傾向が見られた。しかし、細骨材の混入によって総細孔量が減少し、単一粒径の豊浦産標準砂よりもある粒度分布を有する細骨材が更に総細孔量を少なくしている。内川によれば、硬化セメントペーストでは、6 nm~2 μm、モルタルでは50nm~2 μmの範囲が強度に影響を及ぼす[2]。そこで、統計的分析により、硬化セメントペーストの6nm~2 μmの細孔量と圧縮強度との偏相関係数は $r=-0.67$ であり、総細孔量へは6 nm~2 μm、30 μm以上、6nm以下の順で寄与していることが分かった。また、各モルタルでは50nm~2 μmが影響している。引張強度への細孔径の範囲が及ぼす影響は、圧縮強度ほど明確な結果が得られなかった。しかし、総細孔量との関連性は前者同様の傾向が得られた。従って、硬化セメントペーストの場合には、その総細孔量と比べて、ある特定の範囲の細孔径で測定された細孔量はほぼ同じと云えるが、モルタルの場合には、測定範囲を限定することによって細孔量が顕著に減少する傾向を認めることができる。総細孔量に対する上述の限定された範囲のみの細孔量について見ると、硬化セメントペーストでは0.062~0.301mL/mL、標準砂混入モルタルでは0.016~0.075mL/mL、その他のモルタルでは0.067~0.225mL/mLを占めている。混和材の混入によって、これらの割合は変化する。即ち、硬化セメントペーストではPBで0.050~0.156mL/mL、PSで0.08~0.270mL/mL、PFで0.147~0.801mL/mLであった。また標準砂混入モルタルでは、PSで0.016~0.050mL/mL、PBで0.025~0.051mL/mL、PFで0.035~0.075mL/mLであった。

3.4 強度性状と微細構造との関連性

微細構造が圧縮強度に及ぼす影響は、硬化セメントペーストで細孔径が6nm～2μmの範囲で測定された細孔量との相関係数は $r = -0.67$ と求められた。一方、モルタルでは細孔径が50nm～2μmの範囲で測定された細孔量が最も圧縮強度に影響を及ぼしている。例えば、豊浦産標準砂の混入のモルタルの相関係数は $r = -0.62$ 、そのうち標準砂を混入したモルタルを除いた場合でもほぼ同値の $r = -0.64$ が算出された。なお、標準砂を混入したモルタルのみの相関係数は $r = -0.59$ であった。図3は硬化セメントペースト（○印）と骨材混入モルタル（●印）の圧縮強度に及ぼす各細孔径の範囲での細孔量を圧縮強度との関係で示した。図中、硬化セメントペーストの相関係数は $r = -0.67$ で、細骨材混入のモルタルの相関係数は $r = -0.62$ が得られた。

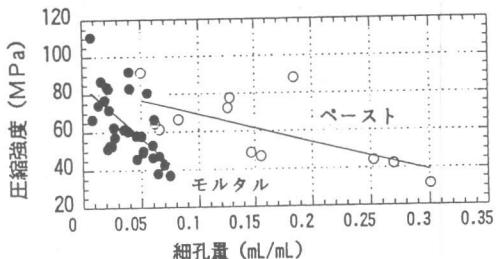


図3 材齢28日の影響細孔量と圧縮強度

4. まとめ

本研究の範囲から次の結論を得た。

- 1) 圧縮強度への混和材の影響は、シリカフューム、高炉スラグ微粉末、フライアッシュの順で大きい。特に、シリカフューム混入の場合は最大値が 110.7 MPaで、硬化セメントペーストの約1.4倍であった。
- 2) 引張強度及び動弾性係数への混和材の影響は、類似した傾向にあり圧縮強度の場合ほど明確な傾向が得られなかった。
- 3) 強度性状に及ぼす細骨材の影響は、概ね段戸産石英片岩碎砂、秩父産石灰石碎砂、豊浦産標準砂の順に変化するが、混和材との組合せでシリカフュームを混和材とした場合に顕著となった。
- 4) 圧縮強度と細孔量との相関性には、材料の微細構造が大きく影響することが分かった。硬化セメントペーストでは細孔径が6nm～2μmの範囲で最も強い相関が得られ、その時の相関係数は $r = -0.67$ であった。一方、細骨材が混入すると細孔径50nm～2μmの範囲で最も良い相関が得られ、同係数が $r = -0.62$ であることが確認できた。

謝 辞

本研究の実施にあたり、東北電力（株）研究開発センター 土木研究室 藤野隆司氏、成田健氏、三菱マテリアル（株）セメント研究所 古賀康男氏に大変お世話になりました。また、東北大学大学院都市・建築学専攻 安立直也氏には実験をお手伝い頂きました。ここに、記して謝意を表します。

参考文献

- [1] F.H.Wittmann:Fracture Mechanics of Concrete, Elsevier, p44, 1983
- [2] 内川 浩：セメントペーストと骨材の界面の構造・組織がコンクリートの品質に及ぼす影響、コンクリート工学、Vol.33、No.9、pp.5-17、1995
- [3] 内川浩、羽原俊祐、沢木大介：硬化モルタル及びコンクリート中の遷移帶厚さの評価並びに遷移帶厚さと強度との関係の検討、コンクリート工学論文集、第4巻第2号、pp.1-8、1993
- [4] 森本丈太郎、魚本健入：初期高温養生したポルトランドセメントの細孔構造に関する研究、コンクリート工学論文集、第7巻第1号、pp.153-159、1996
- [5] 吉野利幸、鎌田英治、桂 修；空隙指標で表したコンクリート強度式の提案とその検証、コンクリート工学論文集、第7巻第2号、pp.65-77、1996
- [6] 安立直也、伊藤憲雄、中村 裕、三橋博三：コンクリートの微細構造が強度に及ぼす影響に関する基礎的研究、東北大学建築学報、第35号、pp.87-97、1996.3