

論文 フレッシュコンクリートの自己充填性に及ぼす細骨材特性の影響

永元直樹*1・小沢一雅*2

要旨：コンクリートの自己充填性に及ぼす細骨材特性の影響を明らかにするために、5種類の細骨材を用いて実験的検討を行った。モルタルを用いたフロー試験、ロート試験を行った結果、細骨材中の0.09mm以下の微粒子を粉体として扱うことが合理的である事が確認された。更に、モルタル中に占める0.09mm以上の細骨材容積比率を40%程度とすると、モルタルの相対フロー面積比=5.0、相対ロート速度比=1.25に調整し、相対粗骨材容積比を50%とすることで充填性の高いコンクリートが得られることが示された。

キーワード：自己充填コンクリート、細骨材容積比、細骨材特性、モルタル特性

1.はじめに

自己充填性を有するハイパフォーマンスコンクリートはコンクリート構造物の信頼性向上を目的として開発された[1]。コンクリート構造物の大型化や構造の複雑化が進むとともに高い重要度を持つコンクリート構造物も増加している反面、作業員不足が深刻化しつつある昨今、施工の合理化に有効な自己充填コンクリートの必要性は増し、適用例は数を着実に増やしている。このような社会的背景の中、自己充填コンクリートの一般的な配合設計手法の確立が望まれている[2]。自己充填性の実現には適切なモルタルを実現することが重要であり、細骨材の諸特性、混入量はモルタル性状に大きな影響を与える。そこで本研究では細骨材に着目し、自己充填コンクリートの充填性に及ぼす細骨材特性の影響を明らかにすることを目的とし、実験的に評価することを試みた。

2.使用材料

実験に使用したセメントは中庸熟ポルトランドセメント、粗骨材は美山産硬質砂岩碎石、混和剤はポリカルボン酸系の高性能AE減水剤である。また、使用した細骨材量は富士川産川砂、相馬産珪砂の粒度分布を調整した4種類の計5種類である。表-1に使用材料の特性値を、

表-1 材料特性表

<セメント>		中庸熟ポルトランドセメント, 比重: 3.20 比表面積: 3100cm ² /g β _p : 0.984 Ep: 0.092											
<細骨材>	絶乾比重	表乾比重	吸水率 ^{注)} (%)	実績率(%)	粗粒率	残留質量百分率(%)							
						5.0	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	0.09	0.063
富士川産川砂	2.69	2.58	7.26	59.7	2.91	0	9	34	67	87	94	96.5	98.5
相馬産珪砂①	2.64	2.57	4.29	62.9	2.74	0	0	34	55	86	99	100	100
相馬産珪砂②	2.64	2.57	4.70		2.49	0	0	27	51	80	91	97	98.5
相馬産珪砂③	2.64	2.54	6.30		2.03	0	0	11	35	66	91	98	99
相馬産珪砂④	2.64	2.58	3.64		3.11	0	0	49	74	90	98	99.5	100
<粗骨材>		絶乾比重	表乾比重	吸水率(%)	実績率(%)	粗粒率	残留質量百分率(%)						
美山産碎石	2.64						2.66	0.73	59.8	6.71	0	3	16

注) ここでいう吸水率は、充分ぬれた試料に1000Gの遠心力を20分間かけた後に試料に残留している水の、試料の絶乾容積に対する比率のことをいう。

- * 1 住友建設(株)技術研究所、元東京大学工学部受託研究員 (正会員)
- * 2 東京大学助教授 工学部土木工学科、工博 (正会員)

図-1に細骨材の粒度分布図を示す。

相馬産珪砂①は粒度分布がJIS A 5308 (レテ-ミストコンクリ-ト) の細骨材の規格の中央値となるように珪砂の3,4,5号をそれぞれ35:28:37の割合で混合したものであり、相馬産珪砂②は相馬産珪砂①に8号珪砂を加え0.15(mm)以下の微粒分を約10%混入したものである。また、相馬産珪砂③、④は、粒度分布がJIS A 5308 (レテ-ミストコンクリ-ト) の細骨材の規格の上限値、および下限値になるように混合したものである。

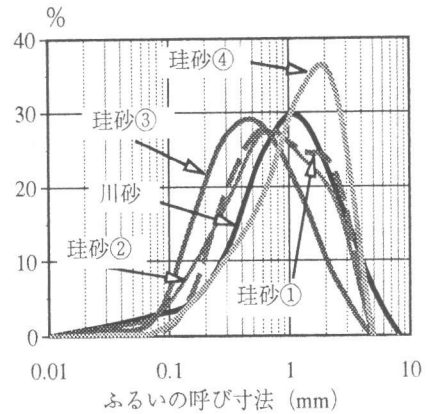


図-1 細骨材の粒度分布

3. 細骨材中の微粒分の検討

3.1 検討項目

コンクリート中の固体粒子は、その粒度によって働きが異なる。また、プレーンモルタルのフロー試験の結果においては、細骨材中の0.09mm以下の微粒子はセメントなどの粉体と同様の取り扱いをすると合理的に説明できることが明らかになっている[3]。そこで、微粒分量の違う2種類の細骨材、相馬産珪砂①、②を用いたモルタル実験、コンクリート実験を行い、性状の違いについて検討した。ここで、0.09mm以下の微粒子を除いた細骨材の、モルタル中に占める容積割合を粗粒細骨材容積比 (Sc/M) とする。

3.2 モルタル実験

まず各細骨材について2水準の細骨材量のモルタル実験を行い、フロー試験、ロート試験[4]によって得られる、モルタルの特性に対する細骨材量、水セメント比、混和剤量の影響を調べた。

同一細骨材量、水セメント容積比を持つモルタルの相対フロー面積比 Γ_m と相対ロート速度比 R_m [5] の関係は図-2の様に $R_m = A \times \Gamma_m^{0.2}$ で近似でき、水セメント容積比が大きくなると係数Aが大きくなる[5]。この知見を元に、モルタル試験結果について回帰分析を行い、水粉体容積比 (粉体=セメント+細骨材の微粒子Sf) と係数Aの関係を求めた。その際、珪砂②では細骨材の取り扱いとして、『(a)全てを細骨材とする。(b)粒径で0.06mm以上のみを細骨材とする。(c)粒径で0.09mm以上のみを細骨材とする。(d)粒径で0.15mm以上のみを細骨材とする。』の4種類を検討した。したがって、(a)~(d)の実験では、それぞれ総細骨材量 (S/M) が異なることになる。その結果、(c)の換算法が、微粒分を全く含まない珪砂①の挙動に近いことがわかる(図-3)。微粒分以外の細骨材特性が等しいことを考えると、モルタル中の0.09mm以下の微粒子を粉体として取り扱うことが合理的であることが、高性能AE減水剤を用いたモルタル試験からも確認されたといえる。

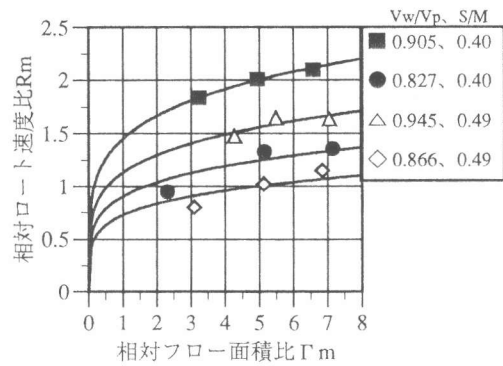


図-2 珪砂①のモルタル試験結果

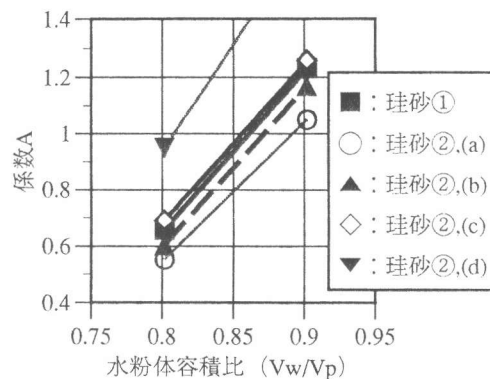


図-3 微粒分換算の比較

3.3 コンクリート実験

粗骨材量を一定（相対粗骨材容積比[6]で50%）とし、モルタルの相対フロー面積比 $\Gamma m=5.0$ 、相対ロート速度比 $Rm=1.25$ となる水セメント容積比で、相馬産珪砂①と0.15mm以下の微粒分を増加させた相馬産珪砂②を用いてコンクリートの充填性の違いについて検討した。なお、コンクリートのスランプフローは高性能AE減水剤の添加量で 65 ± 2 cmに調節した。また、前項のモルタル試験において0.09mm以上の粒子を細骨材として扱うことが合理的であることが示されたので、細骨材の取り扱いはこちらに準じた。

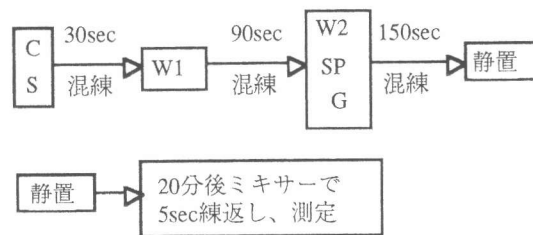


図-4 コンクリート混練方法

$Sc/M=0.40$ において、図-4に示される方法で練混ぜたコンクリートを20分間静置し、Vロート、高密度配筋部充填性試験[6]をそれぞれ行った。その結果、充填性においては両者には違いはみられなかった（図-5）。また、Vロート試験結果は、相馬産珪砂①において、相対ロート速度比 $Rc=0.717$ 、相馬産珪砂②において $Rc=0.695$ と、両者に違いはみられなかった。

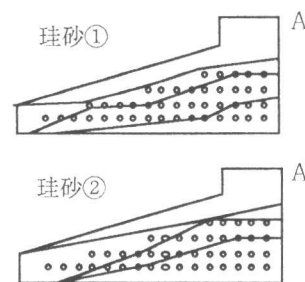


図-5 珪砂の充填性結果

つまり、 $Sc/M=0.40$ においては、0.09mm以下の微粒子を粉体として取り扱い、モルタルの相対フロー面積比 $\Gamma m=5.0$ 、相対ロート速度比 $Rm=1.25$ となる水セメント容積比と組み合わせることで、細骨材の微粒分量に関係なく良好な充填性を持つコンクリートが得られることがわかった。

4. 細骨材の粒形の影響

4.1 実験概要

顕微鏡による目視観察の結果、立方体に近い粒形を持つと思われる相馬産珪砂①（実績率62.9%）と、比較的偏平な粒形を持つ富士川産川砂（実績率59.7%）を用いてコンクリートの充填性の違いを調べた。

4.2 結果および考察

上記の各細骨材を用いて粗骨材量一定（相対粗骨材容積比で50%）、細骨材量一定（ $Sc/M=0.40$ ）、モルタルの相対フロー面積比 $\Gamma m=5.0$ 、相対ロート速度比 $Rm=1.25$ となる水セメント容積比での、コンクリートの高密度配筋部充填性試験を行った。なお、コンクリートのスランプフローは高性能減水剤の添加量で 65 ± 2 cmに調整した。

その結果、 $Sc/M=0.40$ においては両者に明確な差異は見られず、良好な充填性を示した（図-7）。次に、細骨材量を $Sc/M=0.46$ として実験を行った。その結果、珪砂①を用いたコンクリートの充填性は $Sc/M=0.40$ の場合と変化がなかったのに比べ、川砂の充填性試験では充填性低下のきざしが伺えた。そこで、珪砂①では $Sc/M=0.52$ において試験を行い、川砂では $Sc/M=0.49$ の条件で試験を行った。この結果、珪砂①の $Sc/M=0.52$ の結果と川砂の $Sc/M=0.49$ の結果がほぼ同等であった。このことから、珪砂①を用いて $Sc/M=0.49$ の試験を行えば、川砂の $Sc/M=0.49$ の結果より良好な結果が得られる可能性が伺える。同時に行ったVロート試験結果においては、 $Sc/M=0.46$ の結果が明らかに異なり（図-8）、細骨材の粒形の違いが、細骨材が比較的

多い範囲では顕著になることを伺わせる。

コンクリート中の固体粒子は、流動途上に衝突や接触摩擦により相互干渉を引き起こし、特に狭い間隙を通過する場合には、充填性状に影響を与える[7]。粗骨材量一定の場合、細骨材量の増加は、この粒子相互の干渉の程度を増大させることが予想できる。コンクリートの間隙通過能力を評価すると考えられるVロート試験[8]の結果からも、細骨材の種類によっては細骨材量の増加に伴う相対ロート速度比の低下

がみられ、粗骨材量が一定の場合、自己充填性実現のためには、細骨材量をある程度制限する必要があると判断される[9]。しかし、 $Sc/M=0.40$ 近傍では細骨材の粒形に関係なく、良好な充填性を持つコンクリートが得られる可能性が大きい。すなわち、モルタル中に占める 0.09mm 以上の細骨材の割合を40%とすることは、良好な充填性を得るためには十分安全側であるといえる。充填性の良好な範囲がどこまでかは、粒形の影響を受け、これを定量化するにはさらに研究が必要である。

5. 細骨材の粒度分布の影響

5.1 実験概要

粒度分布の違いを表わす手法として、粗粒率 (F.M.) がある。ここで、前章までに用いた相馬産珪砂①を中心に、JIS A 5308(レディーミクストコンクリート)の細骨材の規定内にある粒度分布の下限値および上限値にはほぼ等しい、相馬産珪砂③、④を用いてモルタル試験、コンクリート試験を行い、細骨材の粒度分布の影響を検討した。

5.2 結果および考察

モルタル試験において、 $Sc/M=0.40$ で比較すると、同一フロー、ロートの値を取るための水セメント容積比は珪砂③が一番大きくなり、高性能AE減水剤量も珪砂③が一番多くなった(表-2)。これは、細骨材の粒度分布が変化することによって細骨材の比表面積が変わり(粗粒率の小さい珪砂③が大きくなる)、細骨材表面に拘束する水の量、および吸着する高性能AE減水剤の量が変わることに起因しているものと思われる。

それぞれの細骨材のモルタル試験結果をもとに、モルタルの相対フロー面積比 $\Gamma_m=5.0$ と相対ロート速度比 $R_m=1.25$ を満足する水セメント容積比で、粗骨材量を一定(相対粗骨材容積比で50%)としたコンクリート試験において、自己充填性を比較した結果、 $Sc/M=0.40$ においてはそれぞれに顕著な差異は認めら

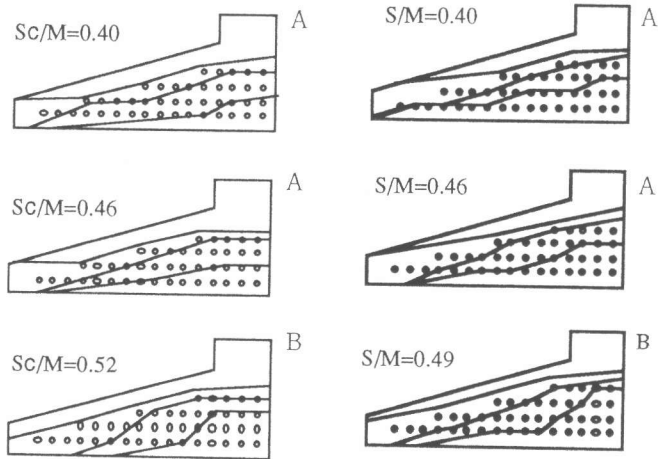


図-6 珪砂①充填性結果

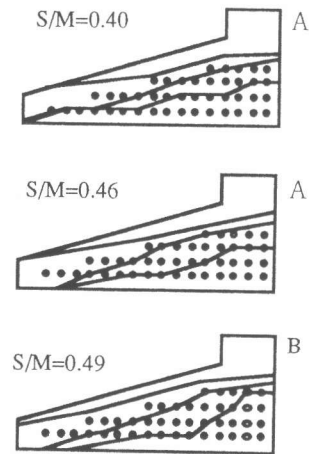


図-7 川砂充填性結果

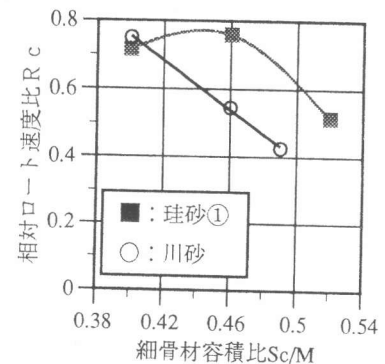


図-8 Vロート流下速度の違い

表-2 (Γ_m, R_m) = (5.0, 1.25) の時の水セメント比と減水剤量

細骨材の種類	V_w/V_p	SP(C×%)
珪砂①	0.800	1.680
珪砂③	0.823	1.908
珪砂④	0.788	1.784

れなかった（図-9）。 $Sc/M=0.40$ ではモルタルの相対フロー面積比 $\Gamma_m=5.0$ と相対ロート速度比 $R_m=1.25$ を満足するように水セメント容積比を決定する手法を取れば、細骨材の粒度分布が異なる場合にも、所定の自己充填性を持つコンクリートが得られる可能性が高いといえる。

6.モルタル特性の影響

コンクリート実験において同一のスランブフロー及びロート流下速度を得るためのモルタル特性は、粗骨材量が同一であっても細骨材量が異なれば変化する場合がある[10]。モルタル実験においては、細骨材の種類が変わると、同一相対フロー面積比 Γ_m 、相対ロート速度比 R_m を得るための水粉体容積比、高性能減水剤添加量は変わる。また、細骨材の種類は等しくても細骨材量が変わった場合も、同様に変わる[10]。つまり、細骨材の種類または細骨材量が違うモルタルにおいて、フロー試験、ロート試験から得られるモルタル特性が等しくても、そのモルタルを構成しているペースト部分は必ずしも等しくない（図-10、11）。

モルタルの相対フロー面積比 Γ_m と相対ロート速度比 R_m から、水粉体容積比を決め、高性能AE減水剤の添加量によって、スランブフローを調整する手法を用いた場合、一定のスランブフローを得るためのモルタルの相対フロー面積比 Γ_m を考えると、粗粒細骨材容積比（ Sc/M ）が0.40近傍では、細骨材の種類にかかわらずほぼ一定（4.5前後）の相対フロー面積比 Γ_m でよいことがわかった。しかし、粗粒細骨材容積比が大きくなると、細骨材の種類により相対フロー面積比の変化が異なる（図-12）。すなわち、モルタルの相対フロー面積比 Γ_m を一定とした場合、粗粒細骨材容積比（ Sc/M ）が0.40近傍では細骨材の種類に関係なくスランブフローは65cm前後となり、細骨材量が増えるにしたがって、細骨材の種類の差が顕著になる。したがって、コンクリートの充填性を考える場合、細骨材量が比較的少なく粒子相互の接触摩擦が小さい場合には0.09mm以上の量でその効果を同一に扱うことが可能であるが、細骨材量が増加した場合には、絶対量だけではその効果を評価することが困難であることが示唆される。

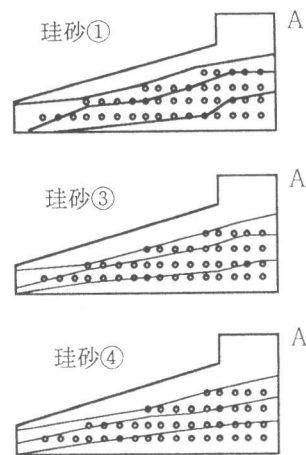


図-9 珪砂①③④充填性結果

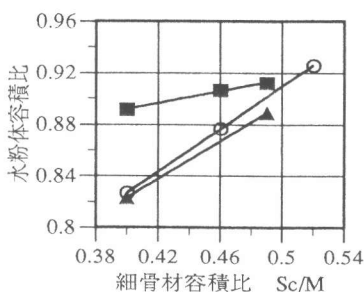


図-10 細骨材容積比と水粉体比 ($\Gamma_m=5.0, R_m=1.25$)

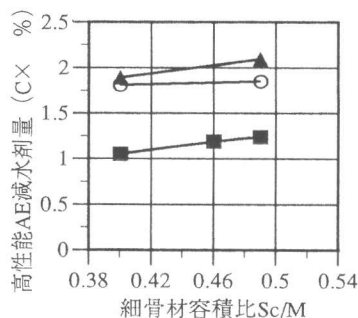


図-11 細骨材容積比と減水剤量 ($\Gamma_m=5.0, R_m=1.25$)

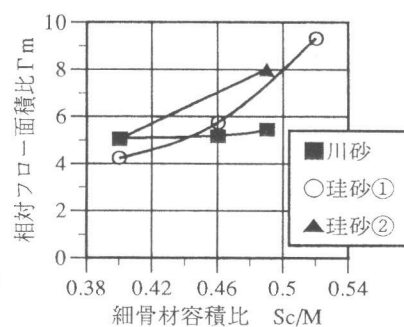


図-12 モルタル性状の違い (スランブフロー=65cm)

7.結論および今後の課題

本研究では、5種類の細骨材を使用し、細骨材がフレッシュコンクリートの充填性に及ぼす影響を調べることを目的に実験的検討を行った。その結果、以下のことがわかった。

(1) 高性能AE減水剤を用いたモルタルにおいて、そのフロー面積比およびロート流下速度を考慮する場合に、0.09mm以下の微粒子は粉体として取り扱う事が合理的だといえる。さらに、コンクリートにおいても、 $Sc/M=0.40$ 近傍では、同様に扱うことがフレッシュ性状、特に充填性を考える場合、有効であるといえる。

(2) モルタル中に占める0.09mm以上の細骨材の割合を40%とすれば、細骨材の粒形の異なる場合でも、相対粗骨材容積比で50%の粗骨材と、モルタルの相対フロー面積比 $\Gamma m=5.0$ 、相対ロート速度比 $Rm=1.25$ となるペーストとを組み合わせることによって、高い自己充填性をもつコンクリートが得られた。

(3) $Sc/M=0.40$ ではモルタルの相対フロー面積比 $\Gamma m=5.0$ と相対ロート速度比 $Rm=1.25$ を満足するように水セメント容積比を決定する手法を取れば、細骨材の粒度分布の異なる場合にも、所定の自己充填性を持つコンクリートが得られた。

謝辞

末筆になりましたが、この研究をすすめるにあたって、総合的見地からご助言いただきました東京大学工学部土木工学科 岡村 甫教授に深く感謝の意を表します。また、実験、解析等に御助力いただきました東京大学工学部土木工学科、コンクリート研究室の皆様をはじめとする関係者各位に深謝いたします。

参考文献

- [1] 岡村 甫、前川宏一、小沢一雅：ハイパフォーマンスコンクリート、技報堂出版、1993
- [2] 岡村 甫、小沢一雅：自己充填コンクリートの配合設計法の現状と課題、土木学会論文集、No.496/V-24、pp.1-8、1994.8
- [3] 山口昇三、枝松良展、岡村 甫：モルタルフロー値に及ぼす細骨材特性の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16、No.1、pp.83-88、1994.6
- [4] 小沢一雅、遠藤秀紀、枝松良展、山口昇三：ハイパフォーマンスコンクリート用セメントのフレッシュ性状に関する品質試験方法、セメント・コンクリート論文集、No.47、pp.82-87、1993.12
- [5] 小澤一雅、松尾茂美、下川浩児、岡村 甫：モルタル試験による自己充填コンクリートに用いる高性能減水剤の評価、セメント・コンクリート論文集、No.48、pp.346-351、1994.12
- [6] 松尾茂美、小沢一雅：自己充填コンクリートの充填性に及ぼす粗骨材特性の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16、No.1、pp.165-170、1994.6
- [7] Anura S.M.NANAYAKKARA, Kazumasa OZAWA, and Koichi MAEKAWA : DEFORTIONAL RESISTANCE OF FRESH CONCRETE THROUGH BENT AND TAPERED PIPES, JSCE No.466/V-19, pp.97-107, May. 1993
- [8] 坂田 昇、伊藤孔一、若松 岳、小澤一雅、岡村 甫：フレッシュコンクリートの充填性評価のためのロート試験、土木学会第47回年次学術講演会概要集第5部、pp.566-567、1992.9
- [9] Kazumasa Ozawa, Koichi Maekawa and Hajime Okamura : Development of High Performance Concrete, JOURNAL OF THE FACULTY OF ENGINEERING, THE UNIVERSITY OF TOKYO Vol, XII, No.3, 1992
- [10] 小澤一雅、永元直樹：モルタル特性とコンクリートの自己充填性、第49回セメント・コンクリート論文集、No.49、pp.832-837、1995.12