

表-7.2 自由水がゼロの時の概念図

Vw/Vp (%)	上段:拘束水/セメント容積(%), 下段:比率				針状結晶		
	化学結合水	表面吸着水	水和生成 層内拘束水	峽間水	長さ (μm)	本数 (本/粒子)	面積占有率 (%)
72.6	11.5 [15.8%]	0.5 [0.6%]	15.9 [21.9%]	44.7 [61.7%]	0.42	573	45.6
88.0	11.5 [13.1%]	0.5 [0.5%]	27.3 [31.0%]	48.7 [55.4%]	0.58	417	33.2
120.0	11.5 [9.6%]	0.5 [0.4%]	50.9 [42.5%]	57.1 [47.6%]	0.87	274	21.8

Danielsson [6] は、セメント 1g あたりの水和発熱量 [cal./g] は、接水から 30 分から 1 時間の時点でも、水セメント比が高い方が水和発熱量が高い結果を示しており、本研究結果と定性的には整合しているが、発熱量の差は非常に小さく、水和初期の水和反応の観点のみからではこの様な現象を説明できない。

7.1.2(2) で自由水がゼロの状態における拘束水から、水和生成層は非常に薄く Aft に代表される針状結晶は非常に短いと述べた。一方で、田澤ら [7] は C_3A に $CaSO_4$ を加えた系の水和反応を顕微鏡観察しており、希薄な溶液ながら接水から数分の時点で数 μm 程度の針状結晶が観察されている。このことから、実際の系に近い水セメント比では、自由水がゼロの状態よりも水和生成が可能な自由な空間が多く存在するため、嵩高い水和生成層が形成されると考えられる。さらに、Danielsson の水和熱の測定結果を考慮すると、水和生成量は水セメント比に依存せずほぼ一定であるが、水セメント比が大きくなるに従ってより嵩高い粗な水和生成層を形成すると考えられ、自由水がゼロの場合の結晶構造とは大きく異なると推察される。

次に、7.1.2(2) と同様の仮定で、自己充填モルタルおよび普通モルタルを想定した $Vw/Vp=88\%$ と 120% における針状結晶の長さ、セメント粒子表面に対する占有率およびその本数について試算した(表-7.2 参照)。その結果、 Vw/Vp が大きくなるに従ってより嵩高い水和生成層が形成され、本数や面積占有率が低下する結果が得られ、上記の仮定の妥当性を示唆する結果となった。水セメント比別の水和生成層内拘束水と峽間水を比較すると、自由水がゼロのときにそれぞれ 15.9%、44.7%であったのに対して $Vw/Vp=88\%$ の場合 27.3%、48.7%、 $Vw/Vp=120\%$ の場合 50.9%、57.1% となり、 Vw/Vp の増加による水和生成層厚の増加は僅かであっても、層内に存在する拘束水および峽間水は著しく増加する可能性は十分にあり得ることが分かる。

また、凝集粒子の観点から Vw/Vp に依存する拘束水を捉えることもできる。後

藤ら [8] は、粒子の分散状態を均一分散と凝集の二つのモデルで仮定し、細孔径や強度との関係から、凝集モデルを用いた方が、実験結果との整合性が高く、水セメント比の増加は、見かけの凝集相当径の増大（凝集量の増加）に繋がると述べている。さらに、凝集体同士に加わるせん断力の観点からも、W/C が高い方が粒子間距離が大きく、よりせん断力が加わりづらいため、相対的に凝集体の径が大きくなると考えるのが妥当である。したがって、水和生成層の増加以外の要因として、水セメント比の増加が、凝集量の増加を招き、十分な充填性が得られない結果、拘束水（特に峽間水）が増加する可能性も考えられる。このことは、これまで球状・同径の粒子の集合体とする概念図で議論してきたが、また、より実際に近い系を考慮した方が理解しやすいかもしれない。

杉山 [9] は、セメント粒子の粒度分布測定結果から、セメント粒子の凝集とは、大径の粒子に小径の粒子が付着する凝集であるとのモデルを提案しているが、セメント粒子は粒度分布を持っており、さらに粒子径と凝集との関係では、粒子径が小さくなるに従って、著しく凝集力が増加する [10] ことを考え合わせると、杉山の凝集モデルは妥当性が高いと考えられる。この様な大径粒子に小径粒子付着するモデルを考えた場合、図-7.3 に示すように、大径粒子の周りに小径粒子が付着する際に、その付着力である凝集体内部摩擦の影響が凝集体粒子の充填率に影響すると考える方が、より実際の系に近い妥当な考察であると考えられる。

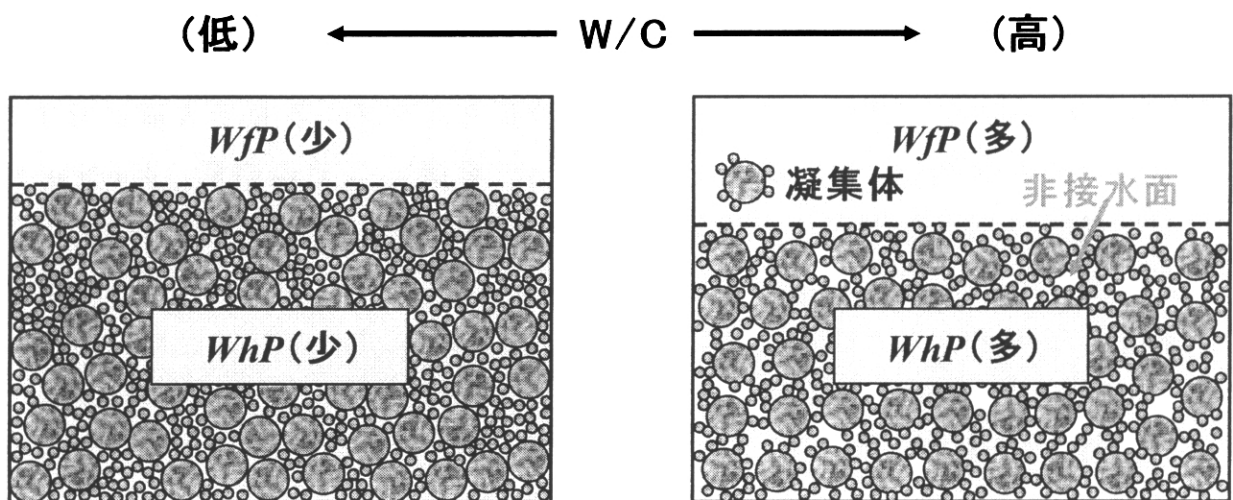


図-7.3 凝集量と峽間水の概念図

7.2 SPの分散効果に関する考察

7.2.1 SPの分散効果

第2章において SP の分散効果を定量的に扱おうとする研究の例として、大内の研究を紹介した。大内 [11] は、自己充填性を有するモルタルにおいて、 V_w/V_p が一定であれば、式 (7.5) のように Γ_m/R_m は SP/C と線形関係にあることから、これを SP の分散効果を示す指標とした。

$$\Gamma_m/R_m = A \cdot SP/C + B \quad (7.5)$$

また、A は粉体の種類によらず V_w/V_p に依存する係数であり、更に、図-7.4 に示すように、係数 A と、X 切片 ($-B/A$) の積が一定であると述べている。本研究における実験結果をこの手法で評価すると、図-7.5 に示すようになる。 V_w/V_p 毎で見ると Γ_m/R_m と SP/C は線形関係にあるものの、この傾きと切片は、 V_w/V_p に依存して変化しており、全ての V_w/V_p における Γ_m/R_m と SP/C の関係は、原点を通る 2 次曲線で良好に近似され、 Γ_m/R_m と SP/C の関係は、式 (7.6) に示す通りとなる。

$$\Gamma_m/R_m = 0.6278 \cdot SP/C^2 + 0.1501 \cdot SP/C \quad (7.6)$$

しかし、この事実が示す物理的な意味については触れていない。

一方で、SP の分散効果は、①粒子表面に吸着した SP による粒子の反発作用と②粒子を分散させることによる凝集体の解消および③自由水の増加作用に分けることができる。①、②は粒子間摩擦に影響を与え、③は粒子の接触頻度に影響を与えられとされる。本研究では、 WfP を定義することによって、接触頻度を定量的に扱うことが可能であるため、粒子間摩擦を定量的に評価することが可能となる。

すなわち、5.2 節において定式化した WfP と Γ_m の関係において、同一の WfP における Γ_m の差 (図-7.6 中の縦方向の差) は、同一の接触頻度における SP の分散効果による Γ_m の増加分であると考えられるため、ある SP 添加量における $WfP - \Gamma_m$ 直線とプレーンモルタルの $WfP - \Gamma_m$ 直線との差は、その SP 添加量における SP の分散効果を示す指標と考えた。

図-7.7 に WfP と SP の分散作用による Γ_m (以下、 $\Gamma_m(SP)$ と称す) の関係を示す。よって、 Γ_m の定式化と同様に $\Gamma_m(SP)$ が WfP と SP/C によって以下のよう定式化される。

$$\Gamma_m(SP) = (0.119 \cdot SP/C^2 + 0.268 \cdot SP/C) \cdot WfP \quad (7.7)$$

式 (7.7) の前項は、 SP/C の 2 次の項である点に関しては、式 (7.6) と同様である。このことは、SP の分散効果が、単に粒子表面に吸着し、粒子反発作用を付

与するだけでなく、凝集体の解消による粒子形状を改善する効果が相乗的に働くことを意味していると推察される。

更に SP の分散効果による流動性状への影響は、 SP 添加量だけでなく、 WfP の影響を受けることがわかる。言い換えれば、 SP の分散効果自体が、粒子間の空間の影響を受けていると考えられる。これは、例えば、粒子間の空間が狭い場合は、粒子間の空間が広い場合よりも、 SP による分散効果が小さくなること示しているが、実用上でも、高強度コンクリートの様な粒子間の空間が極端に狭い場合に、 SP の分散効果が、見かけ上、低下する現象がしばしば見られることから、妥当な結果であると考えられる。以上より、本研究の $\Gamma m(SP)$ を用いることによって、 SP による分散効果における物理的意味に言及することが可能であり、新しい分散効果の評価手法が確立される可能性が示唆される。

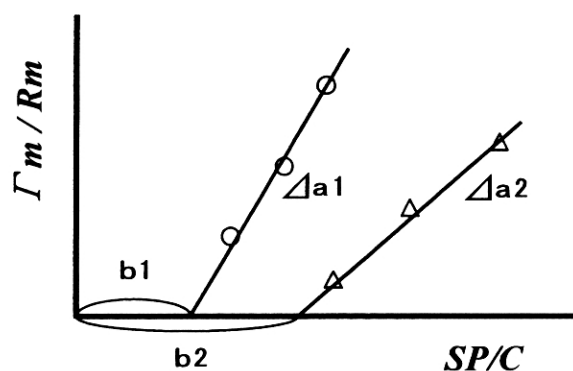


図-7.4 SP/C と $\Gamma m/Rm$ の線形性

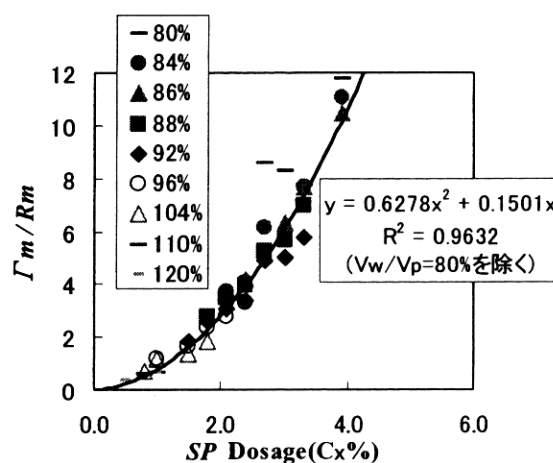


図-7.5 SP/C と $\Gamma m/Rm$ の関係

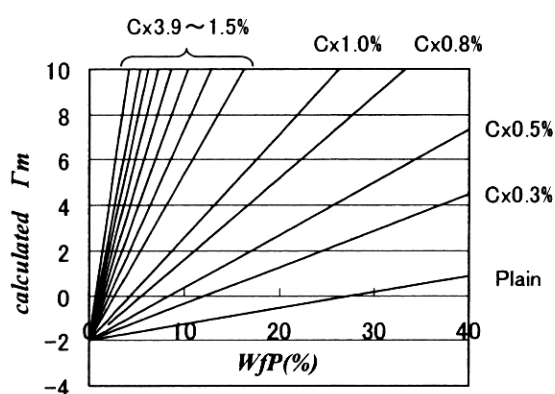


図-7.6 WfP と Γm の算定値の関係

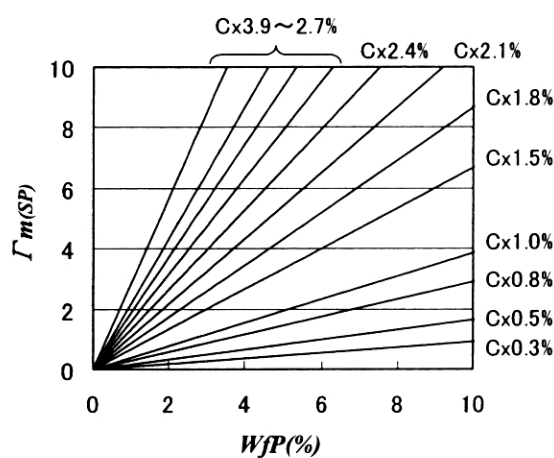


図-7.7 WfP と $\Gamma m(SP)$ の関係

7.2.2 分散剤の種類による影響

WfP および $\Gamma m(SP)$ を使用した分散効果の評価例として、分散剤の種類を変えた場合の検討結果について述べる。

これまで本研究で用いた分散剤は、自己充填性を有するコンクリートに使用される一般的なポリカルボン酸エーテル系の化学混和剤（以下、 CSP と称す）であるが、近年、フレッシュコンクリートに要求される性能が変化し、コンクリートの状態を改善することを特徴とするポリカルボン酸エーテル系の分散剤（以下、 NSP と称す）が新たに登場している。両分散剤の特徴を述べると、同じ水セメント比で、変形性が同じときの比較で示すと、水セメント比によって、傾向が若干異なる。新たな分散剤を使用した場合、水セメント比が大きいときには、 NSP は CSP と同等か SP/C が若干多くなる程度で分散性能に大きな差はない。このときの NSP 使用コンクリートの状態は、 CSP の場合と比べ、“感覚的には、コンクリートの粘性を低減させるような効果”を持っている。また、水セメント比が小さくなるに伴って、 NSP の方が所要の分散性を得るための SP/C が明らかに多くなり、分散性が相対的に低い傾向を示し、コンクリートの粘性低減効果も判断できなくなるほど小さくなる特徴がある。

しかしながら、両者の違いは、人間の感覚では明らかに感じ取れる粘性の違いではあるが、現状では、様々な粘性評価手法を用いても、その差を検知することが困難であり、そのメカニズムなど詳細な検討が行われているとは言えない。そこで、まず従来の評価手法である Γm と Rm の関係から CSP と NSP の分散効果の違いについて述べ、次に WfP および $\Gamma m(SP)$ を用いて両者の分散効果の違いについて述べる。

表-7.3 に示すように配合条件は若干異なるが、その他の実験条件は、これまでと全く同様であり、第4章、第5章で述べた結果とは、分散剤の種類が異なるのみである。

(1) Γm と Rm の関係

図-7.8 に Γm と Rm の関係を示す。なお、点線が CSP を、実線が NSP を使用した場合の流動性状を表しており、 Γm がほぼ一致していると判断されるプロットには WfP の値を付記した。上記の CSP と NSP の分散効果の違いとは、同じ Vw/Vp で同じ Γm のときの粘性の

表-7.3 配合条件

検討項目	温度(℃)	粉体の種類	Vw/Vp (%)	Vs/Vm (%)	SP/C (Cx%)
分散剤の種類の影響	20	OPC	88 ~ 150	40	0.0 ~ 5.0

Vw/Vp : 水粉体容積比 (%)

Vs/Vm : モルタル中の細骨材の容積比 (%)

SP/C : SP のセメント重量に対する添加量 (Cx%)

違いであり、図-7.8 上の縦方向の比較である。

$V_w/V_p=92\%$ の場合には、**CSP** の方が自由水が多く粘性が低い傾向を示した。

また、 $V_w/V_p=100\%$ 以上の場合でも、**CSP** の粘性の方が概ね低い傾向を示したが、 SP/C が低く、 V_w/V_p が高い条件ではラインが交差し、**NSP** の粘性の方が低くなる逆転現象が見られる。一方で**NSP** 使用コンクリートの

状態が“感覚的には、コンクリートの粘性を低減させるような効果”を持つ現象とは、 V_w/V_p が高く、 SP/C が比較的低い標準的な添加量 ($C \times 1.0\%$ 付近) における現象であり、図-7.8 の逆転現象は実現象と整合する。ただし、この領域における自由水と粘性の関係は、 $V_w/V_p=100\%$ の場合に見られるように必ずしも自由水が多い方が粘性が低いとは限らない。このことは第5章でも述べたように、強凝集・遷移領域の粘性が、自由水の影響もさることながら、凝集体内部の摩擦に起因する形状摩擦による影響を大きく受けるためであると考えられる。つまり、この領域における**CSP** と**NSP** の分散効果の違いが現れていると推察され、このことから凝集状態が一定となっておらず凝集解消の余地を残している強凝集領域および遷移領域と、凝集状態が一定となっている分散領域では、流動性状に与える**SP** の分散効果が異なる挙動を示すと考えるべきである。

(2) $WcsP$ と Γ_m の関係

図-7.9 に $WcsP$ と Γ_m の関係を示す。分散剤の種類を変えた場合においても、これまでと同様の傾向を示している。しかし、**NSP** を用いた場合、焦点の位置が大きくプラス側に位置 (3.12, -1.73) していることが特徴的である。

NSP を使用したときの適切な加速度は、906G より明らかに小さく、906G の遠心加速度では、本来 (1G) の凝集構造を反映していないものと推察される。つまり、同じ遠心加速度 (906G) を加えた場合に、**NSP** を使用したときの凝集体の方が内部摩擦が小さく弱い凝集体を形成しているものと考えられる (図-7.10 参

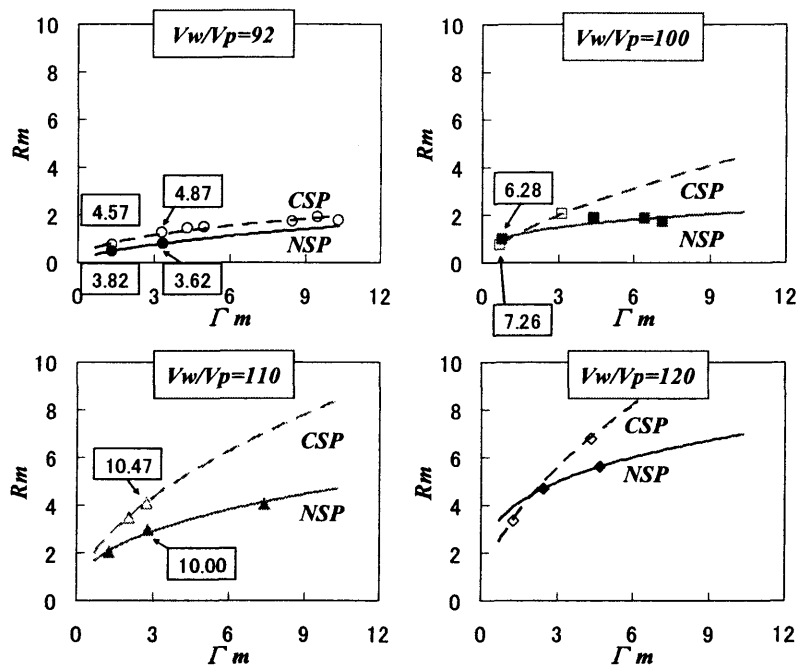


図-7.8 Γ_m と R_m の関係

照)。

以上より、実現象で見られる *NSP* を使用したコンクリートの粘性が低く感じ取られる現象は、*SP/C* が比較的低い強凝集領域、あるいは遷移領域における現象であり、このときの自由水はむしろ少ない結果を示していたこととも整合する(図-7.8 右上参照)。つまり、*NSP* を使用したコンクリートの粘性が低く感じ取れる現象は、粒子間距離や自由水の影響というよりも、凝集体内部摩擦の影響を受けるためと考えられる。

(3) *WfP* と *Rm* の関係

図-7.11 に焦点から引き直した *WfP* と *Rm* の関係を示す。

NSP を使用した場合も *WfP-Rm* 直線は、図の左側にシフトし、やがて収束するといった一連の *SP* による凝集解消作用が認められ、特筆すべきは、このときの収束線が *CSP* の収束線と一致することである。

したがって、*SP* の種類によって、凝集が十分に解消されるための *SP* 添加量は異なるものの、*SP* 添加量を増加させ続けると、最終的には凝集が同程度まで解消されることが分かった。

(4) $\Gamma m(sp)$ を用いた分散効果の評価

図-7.12 に焦点からの *WcsP* で新たに引き直した *WfP* と Γm の関係を示す。また、第4章と同様な処理を行い、 Γm を定式化すると、式(7.8)の通りとなる(図-7.13 参照)。

$$\Gamma m = (0.035 * SP/C^2 + 0.139 * SP/C + 0.147) * WfP - (0.128 * SP/C^2 - 0.540 * SP/C + 2.244) \quad (7.8)$$

このときの式(7.8)による Γm の推定値と実測値はほぼ一致した ($R^2=0.983$)。さらに、焦点(3.12, -1.73)を結ぶと仮定すると、式(7.9)のように簡略化される。

$$\Gamma m = (0.035 * SP/C^2 + 0.139 * SP/C + 0.147) * (WfP - 3.12) + 1.73 \quad (7.9)$$

したがって、*SP* の粒子反発作用を示す $\Gamma m(sp)$ は、式(7.10)となる。

$$\Gamma m(sp) = (0.035 * SP/C^2 + 0.139 * SP/C) * WfP \quad (7.10)$$

また、*CSP* と *NSP* の粒子反発作用の違いは、式(7.6)と式(7.10)のカッコ内の違いのみということになる。両者の粒子反発作用の差は、

$$\Gamma m(csp) - \Gamma m(nsp) = 0.084 * SP/C^2 + 0.129 * SP/C \quad (7.11)$$

で表すことができる(図-7.14 参照)。ちなみに、式(7.11)は常に正であることから、*CSP* は *NSP* より粒子の反発作用が大きく、その差も *SP/C* の増加と共にその差が顕著になることを示している。

(5) *SP* の分散効果に関する詳細

ここで、水と SP が流動性に与える影響について改めて整理したい。水の役割は相対的な粒子間距離を増加させ、粒子の接触頻度を減少させることによって、粘性と変形性を増加させる。一方で、 SP の役割は、粒子表面の反発力を増加させ、凝集体表面摩擦を低減させると同時に、凝集体を解消することによって、凝集体内部摩擦を低減させる。また、この凝集体の解消作用は、強凝集および遷移領域では拘束水を増加させ、分散領域では拘束水を僅かながら減少させる作用も併せ持っていると考えられる。

菅俣 [12] や筆者 [13] は、大内らの $Rm - \Gamma m$ 図による SP の分散効果の評価を、以下のように捉えている。 SP/C が少ない場合には、凝集体が解消され拘束水が解放され易いため Rm の増加が顕著であり、 SP/C を増加させると、次第に凝集体の解消は頭打ちとなり、 SP による粒子反発作用の影響が顕著になってくるため、見かけ上、 Rm と Γm のプロットが累乗の曲線を推移すると説明している。以前筆者も同様に自由水の増加による Rm の増加が、そのメカニズムであると考えてきた。しかしながら、5 章で述べたように強凝集および遷移領域において SP/C との増加に伴って自由水が減少することを考え合わせると、 SP/C が低い領域において、 SP/C を増加させたときの粘性低下のメカニズムは、凝集体内部に拘束された水が解放され、自由水が増加したのではなく、 SP の分散効果によって凝集体内部の摩擦が低下したと考える方が妥当である。このことは 7.2.2(2) で述べた強凝集および遷移領域における CSP と関 NSP の違いにも現れていると考えられる。

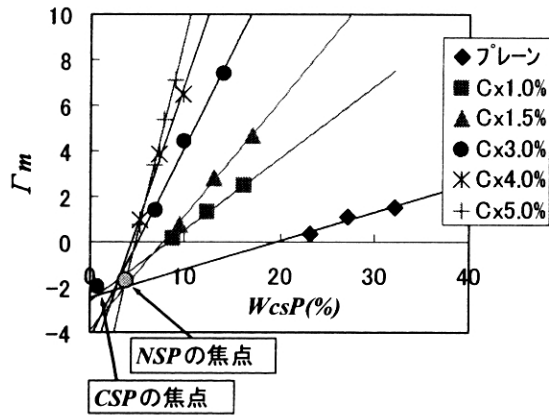


図-7.9 WcsP と Γ_m の関係

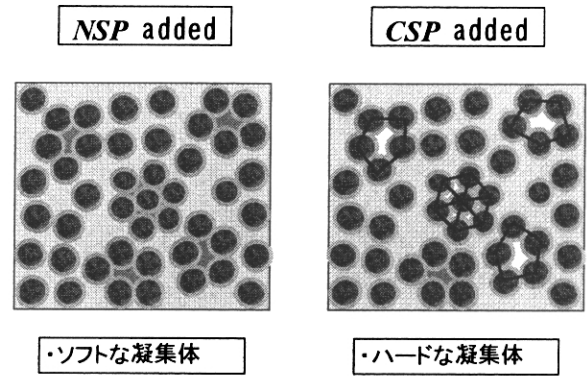


図-7.10 CSP 使用と NSP 使用による凝集構造の違いに関する概念図

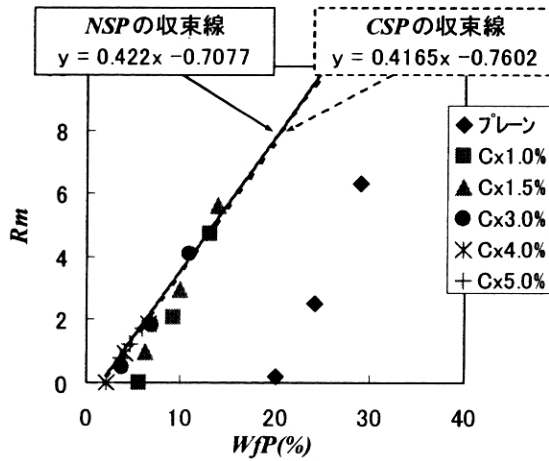


図-7.11 WfP と R_m の関係

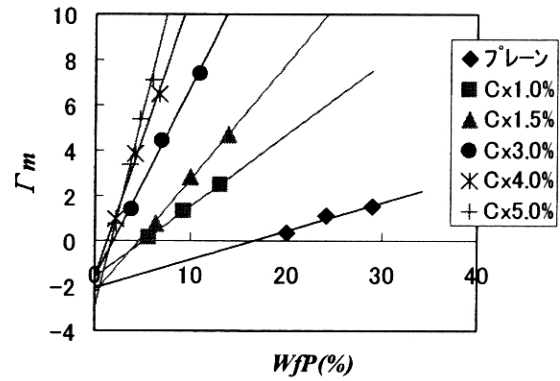


図-7.12 WfP と Γ_m の関係

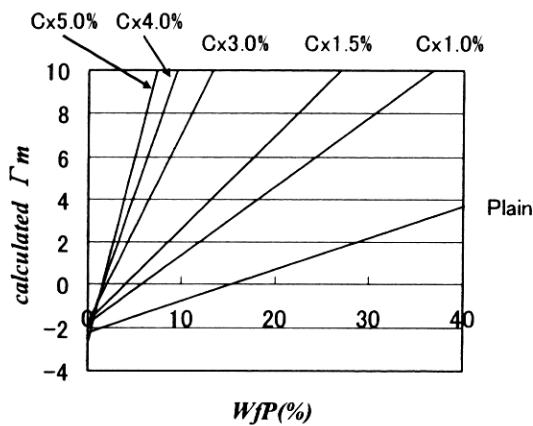


図-7.13 WfP と Γ_m の算定値

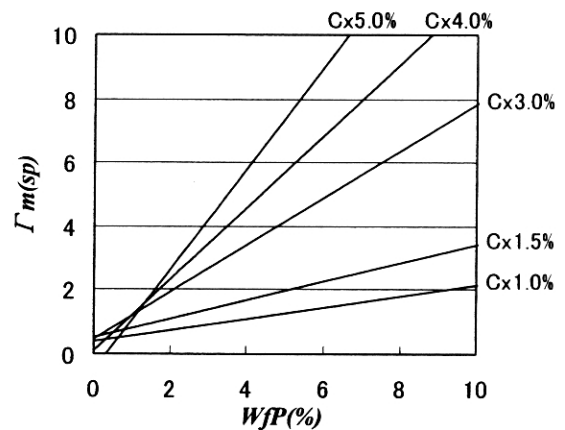


図-7.14 WfP と $\Gamma_m(sp)$ の関係

7.3 V_w/V_p を指標として用いる簡易評価方法

本研究での検討によって、粒子間距離を代表する指標として自由水比 WfP を用いれば、支配機構に基づいて Γm と Rm を定式化できる可能性が示され、 SP による粒子反発作用と凝集解消効果をそれぞれ適切かつ定量的に評価できる目処が立ったと言える。この理論的枠組みは、自己充てんコンクリート用モルタルのみならず、通常のスランプコンクリート用モルタルまでも包含する高い一般性を有するものであるが、 Γm と遠心分離水との規則性から WfP を同定する方法はそれなりに煩雑であり、より簡便な方法で今回の提案手法に準じた検討が行えれば、その利便性は高いと思われる。

幸いにして、強凝集領域を除けば、 WfP は、配合条件である V_w/V_p と極めて高い相関があるため（図-5.9 参照）、少なくとも自己充てんコンクリート用モルタルに限れば、 WfP の代わりに V_w/V_p を用いて Γm と Rm を定式化することも可能と考えられる。そこで、 V_w/V_p - Γm 関係における焦点を同定し、第4章において $WcsP$ - Γm 関係を整理したのと同様の手順により、 Γm を SP/C と V_w/V_p によって定式化し妥当性を検証した。さらに、この V_w/V_p による定式化を検証した上で、より少ないデータ数で流動性予測を行う手法を新たに提案した。

7.3.1 V_w/V_p による Γm の定式化

図-7.15 に V_w/V_p と Γm の関係を示す。 V_w/V_p と Γm の関係は、 SP 添加量毎に高い線形性 ($R^2=0.95$ 以上) を示した。このときの直線の傾きと切片を SP 添加量毎に整理したものが、図-7.16 であり、式(7.12)に示すように Γm が V_w/V_p と SP/C によって定式化される。

$$\Gamma m = (0.049 \cdot SP/C^2 + 0.038 \cdot SP/C + 0.049) \cdot V_w/V_p - (3.377 \cdot SP/C^2 + 3.287 \cdot SP/C + 5.660) \quad (7.12)$$

式(7.12)を用いてこの13本の直線の全ての交点 (x_j, y_j) を求めたところ、その座標は比較的狭い範囲 ($x_j=70.65 \sim 81.76$, $y_j=-3.32 \sim -1.69$) に集中しており、その平均座標 (x_0, y_0) は $(72.73, -2.51)$ であった（図-7.17 参照）。

したがって、 V_w/V_p - Γm 直線群も焦点を結ぶと仮定することは妥当なものと考えられるので、さらに、焦点を結ぶことを前提として、直線群の交点の平均座標 $(72.73, -2.51)$ を焦点と見做して、式(7.12)で表した Γm を再度定式化すると、式(7.13)のように簡略に表すことができる。

$$\Gamma m = (0.049 \cdot SP/C^2 + 0.038 \cdot SP/C + 0.049) \cdot (V_w/V_p - 72.73) - 2.51 \quad (7.13)$$

そして、この式(7.13)を用いて算定した Γm の値を実測値と比較したところ、

図-7.18 に示すように、両者は高い相関 ($R^2=0.976$) を有することが確認され、この定式化の妥当性が裏付けられた。

この定式化は、遠心力による浮き水の取得を行わなくて済むが、実に62点ものデータを測定した上で初めて妥当な焦点の位置が見いだせた結果であり、この高い相関性は、データ数が多い場合に初めて得られるものと考えられる。したがって、次項ではデータ数のより少ない評価手法について検証した。

7.3.2 新たな簡易評価手法の提案

前項で V_w/V_p と SP/C のみによっても Γ_m の定式化が可能であることが確認されたが、焦点位置の同定に課題が残った。そこで、必要なデータ数に関してみれば、 SP 添加量を上下3点、 V_w/V_p を3~5点程度に絞り、 V_w/V_p と SP/C による Γ_m の定式化を試みた。ただし、遠心力による浮き水の取得を行い、 $WcsP$ - Γ_m 関係から妥当な焦点位置を同定する手法を採った。

これまで Γ_m の定式化に SP 添加量を13点使用した場合について述べてきたが、この中から、 $SP/C=C \times 0.0, 0.5, 2.7\%$ のみを抽出して $WcsP$ と Γ_m の関係を図示すると図-7.19 のようになる（以後の定式化は第4章と同様である）。このときの焦点は $(1.09, -1.93)$ であり、式(7.14)に示すように、焦点からの $WcsP$ である Wfp と SP/C によって Γ_m が定式化される。

$$\Gamma_m = (0.160 \cdot SP/C^2 + 0.140 \cdot SP/C + 0.097) \cdot Wfp - 1.93 \quad (7.14)$$

一方で図-7.20 に示す V_w/V_p と Wfp の関係から、分散領域である $C \times 2.7\%$ の直線を収束線とし、式(7.15)を得た。

$$Wfp = 0.346 V_w/V_p - 25.48 \quad (7.15)$$

式(7.14)と式(7.15)から式(7.16)に示すように、 Γ_m が V_w/V_p と SP/C によって定式化される。

$$\Gamma_m = (0.049 \cdot SP/C^2 + 0.038 \cdot SP/C + 0.049) \cdot (0.346 V_w/V_p - 25.48) - 1.93 \quad (7.16)$$

3本の直線の交点から焦点を求めた結果、平均座標 (x_0, y_0) は $(74.24, -2.13)$ であった。したがって再度定式化し直すと、式(7.17)のように簡略に表すことができる。

$$\Gamma_m = (0.064 \cdot SP/C^2 + 0.021 \cdot SP/C + 0.046) \cdot (V_w/V_p - 74.24) - 2.13 \quad (7.17)$$

そして、この式(7.17)を用いて算定した Γ_m の値を実測値と比較したところ、図-7.21 に示すように、両者は高い相関 ($R^2=0.975$) を有することが確認された。

ちなみに、強凝集領域のモルタルでは、水と接触していない乾いた粒子表面が

凝集体内に残存しているために、遷移領域や分散領域のモルタルとは拘束水比が異なっているため、 V_w/V_p と WfP の関係も異なっており、配合条件である V_w/V_p が単純には WfP を代替できないと考えられる。言い換えれば、強凝集領域のモルタルでは、水と接触していない面を内在する強固な凝集体の存在により、相対的に拘束水比が小さく、逆に自由水比が大きくなっており、 $V_w/V_p - \Gamma_m$ 関係における焦点性を崩すと考えられる。これに対して、 $WfP - \Gamma_m$ 関係では、配合条件である V_w/V_p に関わらず、粒子間距離を代表する WfP を指標としているので、強凝集領域までを含めた流動性の規則性が良好に認められるものと考えられる。このことが、遠心分離を行って WfP を同定することの最大の意義であり、強凝集領域までを含めた一般化流動理論の構築における鍵と言える。

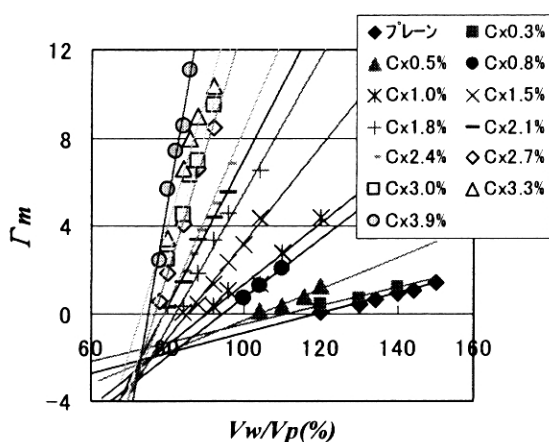


図-7.15 V_w/V_p と Γ_m の関係

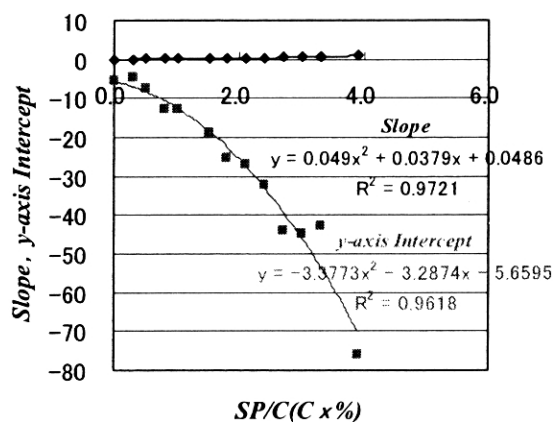


図-7.16 SP添加量と傾き・切片

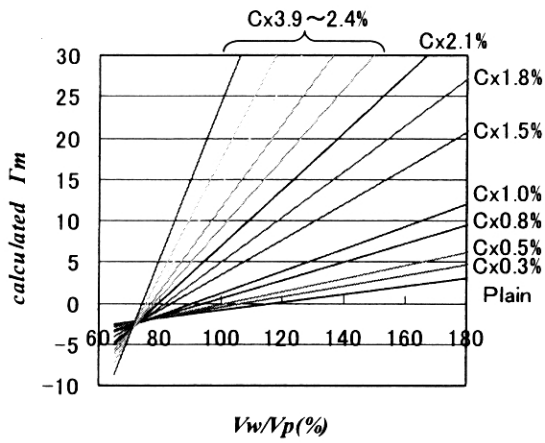


図-7.17 Vw/Vp と Γm の算定値

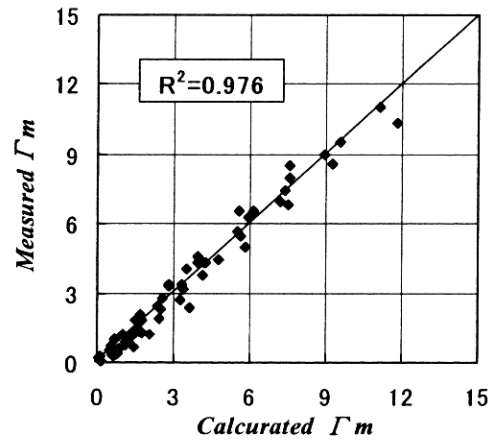


図-7.18 Γm の算定値と実測値

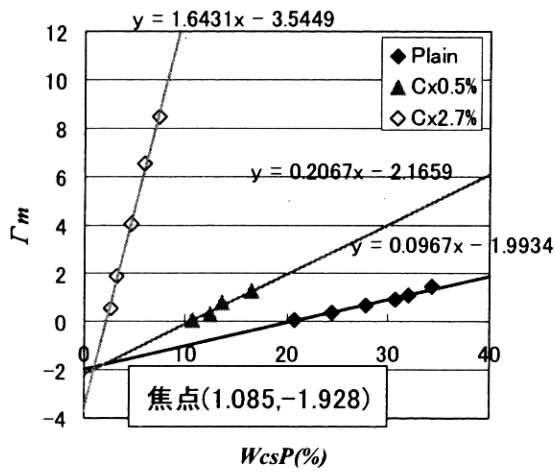


図-7.19 $WcsP$ と Γm の関係

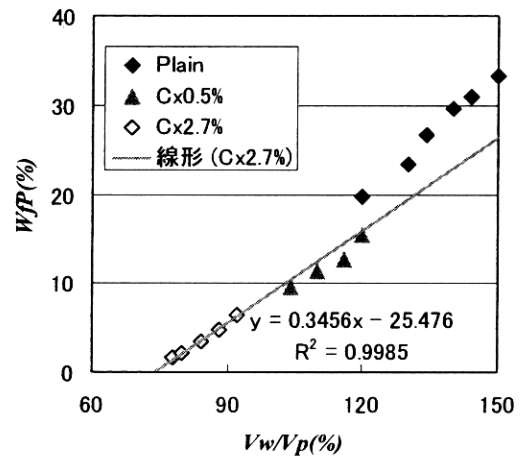


図-7.20 Vw/Vp と WfP の関係

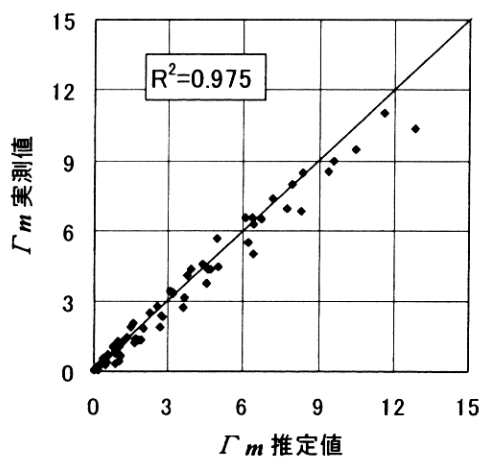


図-7.21 $WcsP$ と Γm の関係

7.4 第7章のまとめ

第7章では、 WfP が同定されたことによって、拘束水や SP が流動性状に与える影響を捉えることが可能となり、更に、この WfP による流動性状の定式化を基に、新たな配合設計手法を提案することが可能であると考えられた。

(1) 拘束水を4つの観点で分類し、化学結合によって消費される拘束水（化学結合水）、固体粒子表面と水の双極子モーメントの相互作用などによって粒子表面に拘束される水（表面吸着水）、水和生成層が形成された際に水和生成層内で水和生成物の間隙に存在する拘束水（水和生成層内拘束水）、固体粒子を最密に充填した場合に粒子間に存在する水（峽間水）の4つに拘束水を分類した。絶対拘束水比を与える自由水がゼロの状態における拘束水を、仮定に基づいて上記の4つの拘束水に分類した結果、拘束水の構成比は、それぞれ 15.8, 0.6, 21.9, 61.7%と算定された。このことから、自由水がゼロの状態における粒子表面の水和と粒子の配列状態は、“水和生成層は非常に薄く、太くて短い結晶がセメント粒子表面の約半分の面積を覆っている”水和モデルとなり、この水和生成層で覆われた粒子がかなり密に配列したモデルとなった。また、 V_w/V_p の増加による拘束水の増加を想定すると、自己充填モルタルおよび、普通モルタルの水和生成層厚は増し、針状結晶に近づくモデルとなった。

(2) WfP が一定の場合において、任意の SP 添加量における Γ_m とプレーンモルタルの Γ_m を比較することによって、 SP の分散効果を定量的に示した。

(3) また、異なる SP を使用したケースにおいて、各々の分散効果や凝集構造の違いを明らかにした。このことは、より分散機構に基づいた分散剤の材料設計が可能となることを示唆している。

(4) この流動機構を支配する WfP による流動性状の定式化を基に、数多くのデータ取得を行わなくとも、簡易的に配合条件から流動性状を求める方法を提案し、実用上、十分な精度が得られることを示した。しかしながら、この配合設計手法の適用範囲については、材料の種類や環境条件のファクターをどのように盛り込むかなどの検討が十分ではなく、今後の課題として残っている。

【参考文献】

- [1] G. Yamaguchi et al : Rate of Hydration of Cement Compounds and Portland Cement Estimated by X-Ray Diffraction Analysis, Proc. of 4th Int' l Symp. on the Chemistry of Cement, Vol. 1, pp. 495-499 (1960)
- [2] セメント協会編：セメント硬化体研究委員会報告書, pp. 190-191, 2001
- [3] 例えば, 太田晃：ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤の吸着特性に着目した作用機構に関する研究, 東京大学学位論文, 2000
- [4] 盛岡実：セメント系膨張材の水和反応と材料設計, 東京工業大学学位論文, 1999. 9
- [5] 深谷泰文ほか：セメントの粒度分布が硬化体組織と強度に及ぼす影響, 第 45 回セメント技術大会講演集, pp. 98-103, 1991
- [6] Ulf Danielsson : Paper IV-S7. Heat of Hydration of Cement as Affected by Water-Cement Ratio, 4th International Symposium on the Chemistry of Cement, Washington, D. C. , 1960
- [7] 田澤栄一ほか：C3A 水和物のモルフォロジーに及ぼす混練水の影響, セメント・コンクリート論文集, No.46, pp. 68-73, 1992
- [8] 後藤孝治, 魚本健人：ポルトランドセメントペースト硬化体の強度発現機構に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol. 5, No.1, pp. 109-117, 1994
- [9] 杉山知己ほか：分散剤を添加したセメントペーストの分散状態と硬化体の空隙構造に関する一考察, 第 58 回セメント技術大会講演要旨, pp. 30-31, 2004
- [10] 鈴木道隆ほか：粒度分布のある多成分粒子ランダム充填層の空間率, 化学工学論文集, 11, 438-443 (1985)
- [11] 大内雅博ほか：自己充填コンクリート用高性能 AE 減水剤の効果の定量評価法, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No. 2, pp. 355-360, 1998
- [12] 菅俣匠ほか：モルタルの変形性と粘性の関係を利用した高性能 AE 減水剤の粒子分散と粒子反発の作用に関する一考察, 第 29 回関東支部技術研究発表会講演概要集, pp. 886-887, 2002
- [13] 永峯秀則, 岸利治：フレッシュコンクリートの粘性に寄与する水に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 25, 2003

第 8 章

総論

第8章 総論

本来、コンクリートは、高い潜在耐久性能を持っているにもかかわらず、建設後、数年で補修を要する構造物が見られる場合があり、その一因として、コンクリートの充填不良が指摘されている。その原因の一端には人的要因も介在するため、非常に複雑な問題であるが、そればかりでなく、フレッシュコンクリートの流動性評価に関する問題点も内在していると考えられる。フレッシュコンクリートの流動性評価には、様々な要因が混在し、簡便で、かつ、正しくこれを評価することは困難である。その背景には、コンクリートに使用される材料の多様性、供用される環境条件の変化やコンクリート自身の経過時間に伴う物理的・化学的变化、あるいは、評価方法の確立が不十分であること等が考えられる。

それに対して、流動機構解明や評価方法の検討に関して様々なアプローチの研究が行われている。例えば、粒子間ポテンシャルから始まり、液相組成、セメント化学、表面化学などからのミクロ的なアプローチであったり、マクロな性状を捉えた各種粘塑性式、固液混相系のレオロジーといったマクロ的なアプローチ等の研究が挙げられる。しかしながら、これらの研究結果が実務に生かされている例はほとんど無いと言え、経験則に基づく旧来的な配合設計や流動性評価が行われているのが現状である。包括的な流動機構の解明や有用性の高い評価方法あるいは配合設計手法の確立が望まれている。

本研究は、マクロ的な特性である流動性状を、固体粒子の接触や接触の際の摩擦というミクロ的な視点で捉えることによって、これまで明らかではなかった粒子の分散・凝集状態や流動機構の本質に迫ることを目的としたものである。その有効な手段として、モルタルに遠心力を加えたときの浮き水量（遠心分離水量）から遠心分離水粉体容積比（ $WcsP$, %）を定義し、この $WcsP$ と流動性状の関係から $WcsP$ の意味を詳細に分析し、流動性に寄与する水を表す指標として、新たに自由水比（ WfP ）を導き出した。同時に、これが粒子の接触頻度に相当する指標であるとの結論に至り、粒子の分散・凝集状態や固体粒子間摩擦を明らかにすることが可能となった。更には、流動性に寄与する水の概念を基に、水や高性能 AE 減水剤（ SP ）が流動性に与える影響を評価する事や、より合理的な流動性の評価手法の確立が可能となった。

以下に、本研究の成果を簡単にまとめ整理する。

＜ $WcsP$ および WfP の意義＞

本研究では、モルタルに遠心力を加えたときの浮き水量を測定し、この浮き水量を遠心分離水量として定義し、粒子の分散・凝集状態を示す指標として遠心分離水量粉体容積比 ($WcsP$, %) を提案した。これは、遠心分離による浮き水量が、粒子間の空間を表す量であり、流動性に対して直接的に影響を与えると考えられるためである。その結果、 $WcsP$ は、変形性や粘性といった流動性状と特徴的な関係を示し、また、配合条件に対しても特徴的な関係を示すことから、 $WcsP$ の持つ意義について考察し、以下の知見が得られた。

(1) $WcsP$ と Γm は直線関係にあり、 SP 添加量 (SP/C) に応じてその傾きと切片が変化し、この直線群は、 Γm が負の領域で焦点を結ぶように位置した。この焦点における Vw/Vp は、 SP/C によらずほぼ一定の値 (70%程度) を示した。このことより、この焦点におけるモルタルの状態は、言うなれば“自由水がゼロ”の状態であり、この焦点を原点とする $WcsP$ こそが、流動性に寄与する自由水を定義するべきものであることを明らかにした。

(2) 同時に、この焦点以下の Vw/Vp では、配合 (Vw/Vp や SP/C) に依存せず流動性が一定であったことから、配合に依存せず一定の流動性に寄与しない拘束水 (絶対拘束水) を見出した。

(3) このときの遠心加速度条件としては、概ね 500~1000G 程度であれば、最適な加速度条件を求めなくとも、本来定義すべき焦点からの $WcsP$ が自由水を示す指標 (WfP) であり、十分に流動性を記述することが可能であることが分かった。

＜粒子の分散・凝集状態および粒子間摩擦＞

粘性や変形性が粒子の接触頻度と粒子間摩擦によって決定づけられる性状であるという観点から、自由水を示す指標である WfP を用いて、粒子の凝集状態や粒子間摩擦について考察した結果、以下の知見が得られた。

(1) 配合と WfP の関係から、 SP の添加による凝集状態の変化について考察し、セメント分散系の凝集状態は SP 添加量に応じて、強凝集領域・遷移領域・分散領域の3つの領域に区分することができることを示した。各領域における凝集状態の違いを簡潔に述べると、強凝集領域では、凝集体が多く存在し、ペンジュラーあるいはファニキュラー状態を残した状態、すなわち凝集体の内部に水と非接触な面を有する凝集体も存在する状態であり、さらに、このときの凝集体は毛管力によって比較的強い凝集力 (凝集体の内部摩擦が大きい) を有していると考えられる。遷移領域では、このような凝集力が大きい凝集体が徐々に減り、かつ、

凝集体の凝集径自体も小さくなると考えられる。分散領域では凝集体内部は完全に濡れた状態で、凝集体の解消も頭打ちとなった定常状態であると考えられた。

(2) この凝集状態の領域区分は、 WfP と Rm の関係からもその妥当性が確認され、 $WfP-Rm$ 関係における $WfP-Rm$ 直線のシフトおよび収束といった特徴的な変化が見られた。この変化は、 SP による凝集体の解消作用であり、粒子間摩擦の変化をもたらしていることを明らかにした。

(3) 粒子間の摩擦は、凝集体表面摩擦と凝集体内部摩擦に区分され、変形性指標である Γm は凝集体表面摩擦に支配され、粘性指標である Rm は凝集体内部摩擦に支配されていることを明らかにした。

<本研究の適用性>

本研究が提案する $WcsP$ による流動性の評価を、ペーストやフライアッシュモルタルに適用した場合や環境温度が異なるセメントモルタルに適用した結果、一部でその傾向が明確ではなかったものの、 $WcsP-\Gamma m$ 関係では、① SP 添加量毎の線形性が認められること② $WcsP-\Gamma m$ 直線は焦点を結ぶように位置すること、また、 $WcsP-Rm$ 関係では、① $WcsP-Rm$ 直線が図の左側にシフトすること②ある一定の SP 添加量以上では、該直線が一つの直線に収束することといった一連のセメントモルタルで見られた4つの傾向を概ね踏襲し、本研究が提案する概念が妥当であることを示した。このことは、本概念が全ての固液混相系の流動機構において、適用可能であることを示唆するものである。また、 $WcsP$ で整理することによって、材料特性や環境条件の違いが、焦点の位置や収束線の位置に反映されることを明らかにした。

<水や SP の役割>

本研究で提案する流動に寄与する水を示す指標 WfP は、拘束水や SP の分散効果に関する知見を与えられられる。

(1) 拘束水を4つの観点で分類し、化学結合によって消費される拘束水（化学結合水）、固体粒子表面と水の双極子モーメントとの相互作用などによって粒子表面に拘束される水（表面吸着水）、水和生成層が形成された際に水和生成層内で水和生成物の間隙に存在する拘束水（水和生成層内拘束水）、固体粒子を最密に充填した場合に粒子間に存在する水（峽間水）の4つに拘束水を分類した。絶対拘束水比を与える自由水がゼロの状態における拘束水を、仮定に基づいて上記の4つの拘束水に分類した結果、拘束水の内訳は、それぞれ 15.8, 0.6, 21.9, 61.7%と算定された。このことから、自由水がゼロの状態における自由水がゼロ

の状態における粒子表面の水和と粒子の配列状態は，“水和生成層は非常に薄く、太くて短い結晶がセメント粒子表面の約半分の面積を覆っている”水和モデルとなり、この水和生成層で覆われた粒子がかなり密に配列したモデルとなった。また、 V_w/V_p の増加による拘束水の増加を想定すると、自己充填モルタルおよび、普通モルタルの水和生成層厚は増し、針状結晶に近づくモデルとなることを示した。

(2) WfP が一定の場合において、ある SP 添加量における Γ_m とプレーンモルタルの Γ_m との差から、 SP の分散効果を定量的に示した。

(3) 異なる SP を使用したケースにおいて、各々の分散効果や凝集構造の違いを明らかにした。このことは、分散機構に基づいた分散剤の材料設計が可能となることを示唆しており、本研究が工学的にも十分に意義があると考えられる。

< 配合設計手法の提案 >

この流動機構を支配する WfP による流動性状の定式化を基に、数多くのデータ取得を行わなくとも、簡易的に配合条件から流動性状を求める方法を提案し、実用上、十分な精度が得られることを示した。しかしながら、この配合設計手法の適用範囲については、材料の種類や環境条件のファクターをどのように盛り込むかなど検討が十分とは言えず、今後の検証が必要であると考えられる。

謝辞

本研究は、著者が平成13年より2年間東京大学工学系研究科社会基盤工学（現 社会基盤学）コンクリート研究室に受託研究員として在籍していた際の研究成果および平成15年より2年間東京大学生産技術研究所物質・生命大部門（現 人間・社会系部門）魚本・岸・加藤研究室に共同研究員として在籍していた際の研究成果を取りまとめたものです。

本論文を審査して頂きました東京大学生産技術研究所 岸利治助教授（主査）、魚本健人教授（副査）、加藤佳孝講師（副査）、東京大学工学系研究科 前川宏一教授（副査）、小澤一雅教授（副査）、東京工業大学大学院理工学研究科 坂井悦郎助教授（副査）に深く感謝致します。

本論文を取りまとめるにあたり数多くの方々から貴重なご助言とご指導を賜りました。ここに記して感謝の意を表します。まずは、終始多大なご指導を頂きました岸助教授に深く感謝の意を表します。当初、本研究は「コンクリートの流動性に関わる温度敏感性と制御に関する研究」を研究テーマとして掲げておりましたが、温度の敏感性だけにとらわれず、より幅広い流動機構の解明に繋がる研究になったものと自負しており、これもひとえに岸利治助教授を始めとする皆様方のご指導無くしては、成し得なかったと存じております。

2年間在籍させて頂いたコンクリート研究室においては、私が思いもよらない本質を突いたご指摘を頂きました前川宏一教授、石田哲也助教授、安 雪暉助教授（現 清華大学水利水電工程系教授）に厚く感謝を申し上げます。また、研究に対する姿勢を明確にお持ちであり、深く感銘を覚えました。半井健一郎助手には土質工学の見地からの有用なご示唆を頂きました。その他、コンクリート研究室在籍中、秘書の田畑和泉氏や浅本晋吾氏を始めとする学生の方々には大変お世話になりました。

魚本・岸・加藤研究室においては、度々しか伺うことができなかつたにもかかわらず、暖かく迎えて頂きましたこと大変感謝しております。技官星野富夫氏には走査型電子顕微鏡を使用させて頂く際にお世話になり、その他分析機器のご相談にも応じて頂きましたこと有り難く存じます。

また、本研究の機会を与えて下さいました（株）エヌエムビー渡辺俊夫代表取締役社長、中央研究所岡澤智所長、太田晃同所長代理には大変感謝しております。また、梅沢健一グループ長（現 混和剤営業技術部部長）、原田健二グループ長、

謝辞

小川秀男次長，矢口稔課長，菅俣匠課長代理，横山賢司氏，木下隆氏，馬場勇介氏，後藤努氏，小泉信一氏，本田亮氏，春日貴行氏，灰塚拓史氏には，仕事上のご負担をおかけ致しました。また，馬場勇介氏には，本実験の一部を手伝って頂きました。太田晃氏，矢口稔氏，菅俣匠氏他皆様方には大変貴重なご指導を頂きました。皆様方のご協力の上で本研究を取りまとめることができましたこと大変感謝しております。

高知工科大学大内雅博助教授，九州大学日比野誠助教授，北海道大学名和豊春教授，首都大学東京上野敦助手，太平洋セメント株式会社山田一夫氏，平尾宙氏，大成建設株式会社大友健氏，電源開発株式会社三宅淳一研究所長，財団法人電力中央研究所藏重勲氏には，研究を進めるにあたり大変貴重なご示唆を頂きました。特に大内雅博助教授には，高性能 AE 減水剤の作用に関する貴重なご示唆を頂きました。

さらに，本研究は自己充填コンクリートの研究開発の際に得られた知見の上に成り立つものと考えております。自己充填コンクリートの研究開発にご尽力された全ての方々にお礼申し上げます。

本研究を取りまとめるにあたり応援してくれた家族，母悦子，兄謙一に感謝致します。

最後に，このように本研究は多くの人々のご支援，ご協力，ご尽力の上に成り立つものと考えております。改めて感謝の意を表します。また，この研究を今後の混和剤開発に生かし，より一層努力することで皆様方のご厚意に答えていこうと考えております。

2006年4月

永峯秀則

付表-1 [20°C, セメントモルタル, CSP, 906G]

No.	Condition		Mix proportion				Flow (mm)	V-funne time (s)	Temp. (°C)	Γ_m	Rm	Im/Rm	W _{csP} (%)	W _{fP} (%)	W _{hP} (%)			
	Temp.	Comp osition	SP	Gravity	V _w /V _p (%)	SP/C (C _x %)										W	C	S
1	20°C	Cement mortar	CSP	906G	120	-	685.7	1800	2179.0	103	-	-	20.87	19.99	100.01			
2					130		742.9		2278.1	118	23.68	23.3	0.39	0.42	24.42	23.54	106.46	
3					134		765.7		2317.7	128	6.63	23.3	0.64	1.51	0.42	27.77	26.89	107.11
4					140		800.0		2377.1	138	3.48	23.2	0.90	2.87	0.31	30.75	29.87	110.13
5					144		822.9		2416.8	144	2.67	23.2	1.07	3.75	0.29	32.00	31.12	112.88
6					150		857.1		2476.2	156	1.91	23.1	1.43	5.24	0.27	34.37	33.49	116.51
7					120	0.3	685.7	1800	2179.0	117	-	24.4	0.37	-	-	19.76	18.88	101.12
8					130		742.9		2278.1	129	8.06	24.5	0.66	1.24	0.54	23.35	22.47	107.53
9					140		800.0		2377.1	149	2.45	24.5	1.22	4.08	0.30	26.47	25.59	114.41
10					104	0.5	594.3	1800	2020.6	104	-	23.0	0.08	-	-	10.70	9.82	94.18
11					110		628.6		2080.0	114	-	24.8	0.30	-	-	12.50	11.62	98.38
12					116		662.9		2139.4	133	10.30	24.4	0.77	0.97	0.79	13.74	12.86	103.14
13					120		685.7		2179.0	150	2.99	23.3	1.25	3.34	0.37	16.59	15.71	104.29
14					100	0.8	571.4	1800	1981.0	131	13.2	24.0	0.72	0.76	0.95	8.14	7.26	92.74
15					104		594.3		2020.6	150	5.52	23.5	1.25	1.81	0.69	9.12	8.24	95.76
16					110		628.6		2080.0	175	2.86	22.8	2.06	3.50	0.59	11.24	10.36	99.64
17					92	1.0	525.7	1800	1901.7	114	-	24.5	0.30	-	-	5.81	4.93	87.07
18					96		548.6		1941.3	143	11.14	23.5	1.04	0.90	1.16	6.63	5.75	90.25
19					104		594.3		2020.6	152	9.07	24.2	1.31	1.10	1.19	7.26	6.38	97.62
20					110		628.6		2080.0	194	2.44	23.7	2.76	4.10	0.67	11.35	10.47	99.53
21					120		685.7		2179.0	231	1.47	23.9	4.34	6.80	0.64	14.41	13.53	106.47
22					84	1.5	480.0	1800	1822.5	102	-	25.5	0.04	-	-	4.20	3.32	80.68
23					88		502.9		1862.1	119	-	24.6	0.42	-	-	4.56	3.68	84.32
24					92		525.7		1901.7	153	13.58	24.4	1.34	0.74	1.82	5.45	4.57	87.43
25					96		548.6		1941.3	182	7.12	24.1	2.31	1.40	1.65	6.59	5.71	90.29
26					100		571.4		1981.0	204	4.93	24.1	3.16	2.03	1.56	7.62	6.74	93.26
27					104		594.3		2020.6	231	3.17	24.2	4.34	3.15	1.37	9.38	8.50	95.50
28					84	1.8	480.0	1800	1822.5	116	-	24.0	0.35	-	-	3.53	2.65	81.35
29					88		502.9		1862.1	168	15.22	24.0	1.82	0.66	2.77	4.78	3.90	84.10
30					92		525.7		1901.7	208	7.88	24.2	3.33	1.27	2.62	5.75	4.87	87.13
31					96		548.6		1941.3	236	5.13	23.7	4.57	1.95	2.34	7.56	6.68	89.32
32					104		594.3		2020.6	274	2.85	23.7	6.51	3.51	1.85	10.54	9.66	94.34

付表-2 [20°C, セメントモルタル, CSP, 906G]

No.	Condition		Mix proportion				Flow (mm)	V-funnel time(s)	Temp. (°C)	Γ_m	Rm	Γ_m/Rm	WcsP (%)	WfP (%)	WhP (%)			
	Temp.	Comp osition	SP	Gravity	Vw/Vp (%)	SP/C (Cx%)										W	C	S
33	20°C	Cement mortar	CSP	906G	80	2.1	457.1	1800	1782.9	111	-	0.23	-	1.98	78.02			
34					84	480.0	1822.5	154	27.26	24.1	1.37	0.37	3.74	4.23	3.35	80.65		
35					88	502.9	1862.1	209	10.27	24.2	3.37	0.97	3.46	5.14	4.26	83.74		
36					92	525.7	1901.7	231	7.03	24.6	4.34	1.42	3.05	6.64	5.76	86.24		
37					96	548.6	1941.3	255	5.03	23.7	5.50	1.99	2.77	7.39	6.51	89.49		
38					84	2.4	480.0	1800	1822.5	170	21.43	25.1	1.89	0.47	4.05	3.83	2.95	81.05
39					86	491.4	1842.3	193	15.36	25.2	2.72	0.65	4.19	4.27	3.39	3.39	82.61	
40					88	502.9	1862.1	218	10.48	24.5	3.75	0.95	3.93	4.88	4.00	4.00	84.00	
41					92	525.7	1901.7	245	6.77	24.5	5.00	1.48	3.39	6.16	5.28	5.28	86.72	
42					96	548.6	1941.3	280	4.8	24.3	6.84	2.08	3.28	7.71	6.83	6.83	89.17	
43					78	2.7	445.7	1800	1763.0	125	-	25.6	0.56	-	-	2.65	1.77	76.23
44					80	457.1	1782.9	169	46.11	24.9	1.86	0.22	8.56	3.20	2.32	2.32	77.68	
45					84	480.0	1822.5	225	15.18	23.7	4.06	0.66	6.17	4.62	3.74	3.74	80.26	
46					88	502.9	1862.1	275	8.01	24.2	6.56	1.25	5.26	5.94	5.06	5.06	82.94	
47					92	525.7	1901.7	308	5.8	23.9	8.49	1.72	4.92	7.48	6.60	6.60	85.40	
48					80	3.0	457.1	1800	1782.9	186	33.74	25.7	2.46	0.30	8.30	3.28	2.40	77.60
49					84	480.0	1822.5	234	12.69	24.5	4.48	0.79	5.68	4.35	3.47	3.47	80.53	
50					86	491.4	1842.3	270	10.08	24.7	6.29	0.99	6.34	4.92	4.04	4.04	81.96	
51					88	502.9	1862.1	282	8.13	24.7	6.95	1.23	5.65	5.47	4.59	4.59	83.41	
52					92	525.7	1901.7	324	5.29	24.3	9.50	1.89	5.02	6.81	5.93	5.93	86.07	
53	80	3.3	457.1	1800	1782.9	210	22.74	26.0	3.41	0.44	7.75	3.29	2.41	77.59				
54	84	480.0	1822.5	275	11.73	24.8	6.56	0.85	7.70	4.42	3.54	3.54	80.46					
55	86	491.4	1842.3	300	9.60	24.5	8.00	1.04	7.68	4.85	3.97	3.97	82.03					
56	88	502.9	1862.1	316	7.76	25.2	8.99	1.29	6.97	5.67	4.79	4.79	83.21					
57	92	525.7	1901.7	337	5.59	25.0	10.36	1.79	5.79	7.44	6.56	6.56	85.44					
58	78	3.9	445.7	1800	1763.0	184	100.7	26.2	2.39	0.10	24.02	2.65	1.77	76.23				
59	80	457.1	1782.9	258	20.78	25.4	5.66	0.48	11.75	3.41	2.53	2.53	77.47					
60	82	468.6	1802.7	290	15.29	25.0	7.41	0.65	11.33	3.79	2.91	2.91	79.09					
61	84	480.0	1822.5	309	12.96	24.5	8.55	0.77	11.08	4.63	3.75	3.75	80.25					
62	86	491.4	1842.3	347	9.47	24.1	11.04	1.06	10.46	5.55	4.67	4.67	81.33					

付表-3 [20°C, セメントモルタル, CSP, 509G]

No.	Condition		Mix proportion					Flow (mm)	V-funne time(s)	Temp. (°C)	Γm	Rm	$\Gamma m/Rm$	WcsP (%)	WfP (%)	WhP (%)		
	Temp.	Comp osition	SP	Gravity	Vw/Vp (%)	SP/C (Cx%)	W										C	S
1	20°C	Cement mortar	CSP	509G	130	—	742.9	1800	2278.1	117	50	23.5	0.37	0.20	1.84	23.19	23.78	106.22
2					140		800.0		2377.1	145	3.98	23.4	1.10	2.51	0.44	27.28	27.87	112.13
3					150		857.1		2476.2	159	1.58	22.8	1.53	6.33	0.24	32.25	32.84	117.16
4					110	0.5	628.6	1800	2080.0	106	—	24.8	0.12	—	—	11.40	11.99	98.01
5					116		662.9		2139.4	124	9.08	24.5	0.54	1.10	0.49	13.27	13.86	102.14
6					120		685.7		2179.0	134	5.15	24.3	0.80	1.94	0.41	14.94	15.53	104.47
7					130		742.9		2278.1	161	1.92	24.1	1.59	5.21	0.31	18.12	18.71	111.29
8					100	1.5	571.4	1800	1981.0	166	7.42	24.2	1.76	1.35	1.30	5.49	6.08	93.92
9					104		594.3		2020.6	227	3.39	23.7	4.15	2.95	1.41	8.34	8.93	95.07
10					110		628.6		2080.0	248	2.37	23.2	5.15	4.22	1.22	10.20	10.79	99.21
11					84	2.7	480.0	1800	1822.5	188	21.48	25.1	2.53	0.47	5.44	3.10	3.69	80.31
12					88		502.9		1862.1	248	9.4	24	5.15	1.06	4.84	4.36	4.95	83.05
13					92		525.7		1901.7	265	6.43	24.4	6.02	1.56	3.87	5.78	6.37	85.63
14					94		537.1		1921.5	280	6.56	24.1	6.84	1.52	4.49	5.60	6.19	87.81

付表-4 [20°C, セメントペースト, CSP, 906G]

No.	Condition		Mix proportion				Flow (mm)	V-funnel time (s)	Temp. (°C)	Γ_m	Rm	Γ_m/Rm	WcsP (%)	WfP (%)	WhP (%)		
	Temp.	Comp. osition	SP	Gravity	V_w/V_p (%)	SP/C (Cx%)										W	C
1	20°C	Cement paste	CSP	506G	110	-	1047.6	3000	128	17.11	22.2	0.64	0.58	1.09	23.39	24.66	85.34
2					116		1104.8		144	2.56	22.0	1.07	3.91	0.27	27.25	28.52	87.48
3					120		1142.9		165	2.12	21.5	1.72	4.72	0.37	30.06	31.33	88.67
4					124		1181.0		174	1.85	21.2	2.03	5.41	0.38	33.01	34.28	89.72
5					130		1238.1		193	1.23	21.2	2.72	8.13	0.34	37.25	38.52	91.48
6					96	0.5	914.3	3000	134	9.48	23.8	0.80	1.05	0.75	11.43	12.70	83.30
7					100		952.4		163	2.73	23.1	1.66	3.66	0.45	13.34	14.61	85.39
8					106		1009.5		204	1.39	22	3.16	7.19	0.44	16.75	18.02	87.98
9					84	1.0	800.0	3000	114	-	24.2	0.30	-	-	5.44	6.71	77.29
10					86		819.0		126	-	24.0	0.59	-	-	6.15	7.42	78.58
11					88		838.1		154	9.09	23.3	1.37	1.10	1.25	7.10	8.37	79.63
12					92		876.2		187	3.00	23.5	2.50	3.33	0.75	8.61	9.88	82.12
13					96		914.3		215	1.77	22.3	3.62	5.65	0.64	10.49	11.76	84.24
14					76	2.0	723.8	3000	112	-	25.1	0.25	-	-	3.42	4.69	71.31
15					80		761.9		186	10.45	24.2	2.46	0.96	2.57	4.49	5.76	74.24
16					84		800.0		225	4.58	23.3	4.06	2.18	1.86	6.07	7.34	76.66
17					88		838.1		234	3.80	23.1	4.48	2.63	1.70	6.48	7.75	80.25
18					92		876.2		282	1.81	23.2	6.95	5.52	1.26	9.48	10.75	81.25
19					74	3.0	704.8	3000	183	29.65	25.1	2.35	0.34	6.96	3.08	4.35	69.65
20					76		723.8		208	12.28	24.4	3.33	0.81	4.08	3.41	4.68	71.32
21					80		761.9		253	5.70	23.6	5.40	1.75	3.08	4.98	6.25	73.75
22					82		781.0		275	3.90	23.5	6.56	2.56	2.56	5.74	7.01	74.99
23					84		800.0		284	3.61	23.4	7.07	2.77	2.55	6.36	7.63	76.37
24					72	4.0	685.7	3000	196	36.18	25.4	2.84	0.28	10.28	2.61	3.88	68.12
25					74		704.8		220	17.02	25.1	3.84	0.59	6.54	2.88	4.15	69.85
26					76		723.8		237	10.9	24.6	4.62	0.92	5.03	3.64	4.91	71.09
27					78		742.9		276	7.43	24.3	6.62	1.35	4.92	4.30	5.57	72.43
28					80		761.9		300	5.89	23.9	8.00	1.70	4.71	5.04	6.31	73.69

付表-5 [20°C, フライアッシュモルタル, CSP, 906G]

No.	Condition			Mix proportion				Flow (mm)	V-funnel time time(s)	Temp. (°C)	Γ_m	Rm	Γ_m/Rm	WcsP (%)	WfP (%)	WhP (%)				
	Temp.	Comp osition	SP	Gravity	Vw/Vp (%)	SP/C (Cx%)	W										C	S		
1	20°C	Fly ash mortar	CSP	906G	0.74	0.6	502.3	1500	2047.1	126	15.38	22.1	0.59	0.65	0.90	10.70				
2					0.78		529.4		2094.1	174	5.84	21.8	2.03	1.71	1.18	1.71	1.18	16.59		
3					0.70	0.80	475.1	1500	2000.0	142	18.39	22.2	1.02	0.54	1.87	1.87	1.87	5.58		
4					0.72		488.7		2023.5	170	11.86	22.1	1.89	0.84	2.24	2.24	2.24	6.63		
5					0.74		502.3		2047.1	213	7.39	22.0	3.54	1.35	2.61	2.61	2.61	8.00		
6					0.78		529.4		2094.1	245	4.52	22.1	5.00	2.21	2.26	2.26	2.26	10.18		
7					0.80		543.0		2117.6	265	3.82	22.0	6.02	2.62	2.30	2.30	2.30	10.46		
8					0.64	1.0	434.4	1500	1929.4	206	28.04	22.2	3.24	0.36	9.10	9.10	9.10	2.20		
9					0.66		448.0		1952.9	235	18.02	22.1	4.52	0.55	8.15	8.15	8.15	2.99		
10					0.70		475.1		2000.0	261	10.63	22.2	5.81	0.94	6.18	6.18	6.18	4.44		
11					0.74		502.3		2047.1	319	5.87	22.1	9.18	1.70	5.39	5.39	5.39	5.48		
12					0.76		515.8		2070.6	332	4.83	22.3	10.02	2.07	4.84	4.84	4.84	6.24		
13					0.62	1.2	420.8	1500	1905.9	230	50.16	22.3	4.29	0.20	21.52	21.52	21.52	1.37		
14					0.64		434.4		1929.4	246	26.21	22.1	5.05	0.38	13.24	13.24	13.24	1.93		
15					0.66		448.0		1952.9	278	18.65	22.2	6.73	0.54	12.55	12.55	12.55	2.43		
16					0.70		475.1		2000.0	309	9.28	22.1	8.55	1.08	7.93	7.93	7.93	3.40		
17					0.74		502.3		2047.1	327	5.25	22.1	9.69	1.90	5.09	5.09	5.09	4.89		
18					0.66	1.4	448.0	1500	1952.9	326	14.26	22.3	9.63	0.70	13.73	13.73	13.73	2.13		
19					0.70		475.1		2000.0	335	8.05	21.9	10.22	1.24	8.23	8.23	8.23	3.60		
20					0.74		502.3		2047.1	343	5.46	21.6	10.76	1.83	5.88	5.88	5.88	4.70		
21					0.66	1.6	448.0	1500	1952.9	333	15.87	22.0	10.09	0.63	16.01	16.01	16.01	2.23		
22					0.70		475.1		2000.0	344	8.54	22.1	10.83	1.17	9.25	9.25	9.25	3.45		

付表-6 [5,30°C, セメントモルタル, CSP, 906G]

No.	Condition		Mix proportion					Flow (mm)	V-funnel time (s)	Temp. (°C)	Γ_m	Rm	Γ_m/Rm	W _{csP} (%)	W _{fP} (%)	W _{hP} (%)			
	Temp.	Comp osition	SP	Gravity	V _w /V _p (%)	SP/C (C _x %)	W										C	S	
1	5°C	Cement mortar	CSP	906G	0.96	1.0	548.6	1800	1941.3	136	19.6	9.5	0.85	0.51	1.67	6.79			
2					1.04		594.3		2020.6	177	6.05	8.5	2.13	1.65	1.29	8.60			
3					1.10		628.6		2080.0	208	3.45	8.5	3.33	2.90	1.15	10.68			
4					1.20		685.7		2179.0	243	1.95	8.3	4.90	5.13	0.96	14.42			
5					0.80	2.4	457.1	1800	1782.9	110	-	10.5	0.21	-	-	3.47			
6					0.84		480.0		1822.5	170	31.22	10.0	1.89	0.32	5.90	3.60			
7					0.88		502.9		1862.1	209	15.06	10.3	3.37	0.66	5.07	4.46			
8					0.96		548.6		1941.3	273	6.53	8.8	6.45	1.53	4.21	6.89			
9					1.00		571.4		1981.0	294	5.04	8.4	7.64	1.98	3.85	8.43			
10	30°C	Cement mortar	906G	1.00	1.0	571.4	1800	1981.0	104	-	35.2	0.08	-	7.89					
11				1.04		594.3		2020.6	120	18.96	33.1	0.44	0.53	0.83	9.19				
12				1.10		628.6		2080.0	150	4.65	32.7	1.25	2.15	0.58	10.54				
13				1.14		651.4		2119.6	171	2.30	32.4	1.92	4.35	0.44	11.56				
14				1.20		685.7		2179.0	185	1.86	32.3	2.42	5.38	0.45	12.84				
15				0.88	2.4	502.9	1800	1862.1	146	47.8	34.7	1.13	0.21	5.41	4.75				
16				0.92		525.7		1901.7	183	11.88	33.2	2.35	0.84	2.79	6.01				
17				0.96		548.6		1941.3	221	6.22	34.7	3.88	1.61	2.42	7.29				
18				1.00		571.4		1981.0	235	4.72	34.9	4.52	2.12	2.13	8.14				
19				1.04		594.3		2020.6	268	2.89	34.7	6.18	3.46	1.79	10.78				

Not
determined

付表-7 [20°C, セメントモルタル, NSP, 506G]

No.	Condition			Mix proportion					Flow (mm)	V-funnel time time(s)	Temp. (°C)	Γ_m	Rm	Γ_m/Rm	W _{csP} (%)	W _{FP} (%)	W _{hP} (%)	
	Temp.	Comp osition	SP	Gravity	V _w /V _p (%)	SP/C (C:x%)	W	C										S
1	20°C	Cement mortar	NSP	906G	130	-	742.9	1800	2278.1	117	50	23.5	0.37	0.20	1.84	23.19	20.07	109.93
2					140		800.0		2377.1	145	3.98	23.4	1.10	2.51	0.44	27.28	24.16	27.28
3					150		857.1		2476.2	159	1.58	22.8	1.53	6.33	0.24	32.25	29.13	32.25
4					100	1.0	571.4	1800	1981.0	106	-	23.6	0.12	-	-	8.76	5.64	8.76
5					110		628.6		2080.0	151	4.89	23.7	1.28	2.04	0.63	12.47	9.35	12.47
6					120		685.7		2179.0	186	2.12	23.8	2.46	4.72	0.52	16.20	13.08	16.20
7					100	1.5	571.4	1800	1981.0	133	10.36	23.5	0.77	0.97	0.80	9.41	6.29	9.41
8					110		628.6		2080.0	195	3.37	23.2	2.80	2.97	0.94	13.12	10.00	13.12
9					120		685.7		2179.0	238	1.78	22.8	4.66	5.62	0.83	17.13	14.01	17.13
10					92	3.0	525.7	1800	1901.7	154	20.62	23.8	1.37	0.48	2.83	6.94	3.82	6.94
11					100		571.4		1981.0	233	5.43	23.8	4.43	1.84	2.40	10.02	6.90	10.02
12					110		628.6		2080.0	290	2.46	23.5	7.41	4.07	1.82	14.05	10.93	14.05
13					88	4.0	502.9	1800	1862.1	140	-	24.4	0.96	-	-	5.35	2.23	5.35
14					94		537.1		1921.5	221	10.77	24.0	3.88	0.93	4.18	7.30	4.18	7.30
15					100		571.4		1981.0	273	5.39	23.8	6.45	1.86	3.48	9.73	6.61	9.73
16					90	5.0	514.3	1800	1881.9	133	-	24.6	0.77	-	-	5.36	2.24	5.36
17					92		525.7		1901.7	209	12.40	24.4	3.37	0.81	4.18	6.74	3.62	6.74
18					96		548.6		1941.3	252	8.02	23.8	5.35	1.25	4.29	7.82	4.70	7.82
19					100		571.4		1981.0	285	5.75	23.8	7.12	1.74	4.10	9.02	5.90	9.02

付表-8 本研究で用いた記号および用語一覧

章番号	記号および用語	解説
2章	V_w/V_p	水粉体容積比(%)
	SP	高性能AE減水剤 [本研究ではポリカルボン酸エーテル系を用いた。]
	SP/C	SP 添加量(C_x %) [SP のセメント重量に対する添加量。 C_x 1.0%などと表記する。]
	R_m	相対漏斗速度比
	Γ_m	相対フロー面積比
4章	V_s/V_m	細骨材モルタル容積比(%)
	W_{csP}	遠心分離水比(%) [遠心分離水量を粉体容積で除した百分率]
	W_{fP}	自由水比(%) 自由水を粉体容積で除した百分率
7章	W_{hP}	拘束水比(%) 拘束水を粉体容積で除した百分率
	CSP	従来の高性能AE減水剤
	NSP	新規な高性能AE減水剤[状態改善タイプ]
	$\Gamma_m(sp)$	SP の分散作用による Γ_m の増分であり、 SP の分散効果を表す指標
4章	遠心分離水	モルタルに遠心力を加えたときの浮き水
	自由水	遠心分離水から定まる流動性に寄与する水
	拘束水	遠心分離水から定まる流動性に寄与しない水
	絶対拘束水	拘束水の中で特に配合に依存しない拘束水
5章	強凝集領域	内部に乾いた面を有する凝集体を多く含む SP/C が少ない領域
	遷移領域	強凝集領域と分散領域の中間領域
	分散領域	内部に乾いた面を有する凝集体を含まない SP/C が多い領域
	凝集体等表面摩擦	凝集体間や凝集体と単体粒子間の摩擦
	凝集体内部摩擦	凝集体内部の摩擦
7章	化学結合水	化学結合によって消費される水[本研究では接水から数分までの化学結合水]
	表面吸着水	固体粒子表面に吸着するバルクの水とは異なる水
	水和生成層内拘束水	セメント粒子表面に生成する水和物の間隙に存在する水
	峽間水	水和生成層を覆われた粒子同士の間隙に存在する水