

細骨材の水と空気による界面状態がコンクリート およびモルタルに及ぼす影響に関する研究

STUDY ON CONCRETE AND MORTAR CONCERNING INFLUENCE OF SURFACE CONDITION OF FINE AGGREGATE AS DETERMINED WITH WATER AND AIR

伊 東 靖 郎*

By Yasuro ITO

1. 序 論

本論文は、細骨材の界面に存在している表面水と空気泡による表面状態が、コンクリートおよびモルタルの品質に及ぼす影響について述べたものである。

従来、コンクリートの製造に関しては、セメント、細骨材、粗骨材および水等の材料の投入順序について、数多くの研究成果が報告されているが¹⁾、現在では全材料をほぼ同時に均等にミキサに投入して練り混ぜる方法が、一般に採用されている。そして、土木学会のコンクリート標準示方書にも、この方法を原則とすることが規定されている²⁾。

また、実験室内でコンクリートを造る場合、細骨材は、表面乾燥飽水状態に近い状態に含水量を調整し、表面水率を補正して用いることが多い。さらに、実際のコンクリートの製造においては、骨材の表面水量を勘案し、投入する水量を補正していれば、特に問題はないものと考えられてきた。しかしながら、コンクリートを構成する諸材料は、材質、比重、形状、寸法等が大幅に異なるため、同じ配合で製造しても、所定の品質を再現するには困難な場合が多く、技術者の経験や勘に依存せざるを得ないことが多かった。

著者らは、プレパックドコンクリートのモルタルの性状を研究している段階において、細骨材にセメントを投入して空練りをした後に水を加えてモルタルを造る場合、細骨材の表面水量が異なれば、投入水量を調整して単位水量を等量としても、得られるモルタルのブリーディングおよび流動性その他の諸性状には大きな相違のあることを見出した³⁾。しかも、これらの変動値は、細骨材の表面水量の影響を受け、表面水率との間に法則性のある

ことも明らかになった⁴⁾。すなわち、細骨材の種類および、配合等によって異なるが、細骨材の表面水量がセメントの重量に対して 20% から 25% 程度のときに、ブリーディング等の材料分離が少なく、強度も高く、また、ワーカブルなモルタルが得られることが確かめられた⁵⁾。これらにより細骨材の表面水量を最適に加水補正し、次に、セメントを投入して練り混ぜる、分割練り混ぜ方法によるコンクリートおよびモルタルの製造方法を考案した。この結果、ブリーディング等材料分離が小さく、ばらつきの少ない均質性に富んだ高品質のコンクリートが製造できるようになった⁶⁾。

次に、セメントペーストを練り混ぜる際、水を1次水 (W_1) と2次水 (W_2) に分割して投入し、それぞれの過程で練り混ぜを行う分割練り混ぜ方法によると、1次水の量により、ブリーディング等の練り上がり性状が大きく異なる。すなわち、1次水投入後の練り混ぜ時における混合トルクが最大となる W_1/C は、21%~23% 付近のキャピラリー域^{7)注1)}であり、ブリーディングが最小点となる W_1/C 域とほぼ一致していること、また、練り上がりペーストの性状は、セメントダマがなく、セメント粒子がよく分散して、ブリーディング等に有効に働いていることを報告した^{8),9)}。また、コンクリートを分割練り混ぜによって製造することに関しては、各方面において研究が開始され、その貴重な成果が逐次公表されつつある¹⁰⁾⁻¹⁷⁾。

以上の研究の考察から、分割練り混ぜにより知見された現象の原因として、細骨材の界面には、骨材表面に拘

注 1) 7) 中の「粉体のレオロジー」にてキャピラリー域とは、「粉体-流体系の粒子の充填構造の一種で、流体と粒子の混合物は可塑性を示し、粒子は接触せず不連続で、空気も存在せず、液体は粒子表面の活性によってその表面に液膜を形成し、この液膜によって隔てられ不連続となった状態」としている。

したがって、以下本論文も同定義を踏襲する。

* 正会員 工博 リブコンエンジニアリング(株)代表取締役社長

束されている細骨材固有の表面吸着水および表面水と空気泡等による履歴が存在し、練り混ぜた後のコンクリートおよびモルタルの品質に、従来知見されていなかった変動要因として影響を及ぼし、このような現象を生ぜしめているものと考えられた。本論文においては、これらの現象をコンクリートの主要構成要素であるモルタルにより実証し、さらに主要材料である細骨材の、これらの界面物理現象を新たな考え方による細骨材の試験方法によって確かめるとともに、その評価方法についてもこれを取り上げた。

2. 練り混ぜ方法および細骨材の表面状態がまだ固まらないモルタルの性状に及ぼす影響

(1) 練り混ぜ方法を変化させたモルタルの性状

モルタルを造る場合に一般に次の3種類の練り混ぜ方法が考えられる。① および ② の方法がいわゆる分割練り混ぜ方法であり、③ の方法が従来より一般的に用いられている練り混ぜ方法である。

① キャピラリー域のセメントペーストをまず造り、これに細骨材と残りの2次水を加えて練り混ぜるセメントペーストの分割練り混ぜ方法。

② 細骨材に1次水およびセメントを加え練り混ぜた後に、残りの2次水を加えて練り混ぜるモルタルの分割練り混ぜ方法。

③ セメント、水および細骨材を一度に練り混ぜる従来の練り混ぜ方法。

以上のように3種類の方法で練り混ぜて造ったモルタルの性状を表-1に示す。

この表より、同じキャピラリー域の練り混ぜを経たセメントペーストでも、同一表面水をもった細骨材を使用した場合、組合せ方法により出来上がったモルタルの性状が異なることが認められる。すなわち、先述の①の

ペーストの分割練り混ぜ方法に比べて②の細骨材との界面の W_1/C が一番小さいモルタルの分割練り混ぜ方法を用いた方が、ブリージングの少ない、強度の高い高品質のモルタルを造ることができた。この要因で明らかなのは、最初に形成される細骨材とセメントペーストの界面の W/C の大きさと、2次水の変化の関係のみであり、3. で述べる細骨材表面に拘束されている表面吸着水の存在とそれらによる界面改善効果が考えられた。また、従来の練り混ぜ方法③より、①、②の分割練り混ぜ方法により造ったモルタルの方が高品質なことも明らかとなった。

(2) 細骨材の表面水率および空気泡を変化させたモルタルの性状

分割練り混ぜによりモルタルを製造する場合、1次投入調整水により W_1/C を一定にしても、細骨材が保有している初期表面水量および空気泡の状態が異なれば、練り混ぜたモルタルの物性も異なった状態を示すことが観察される。

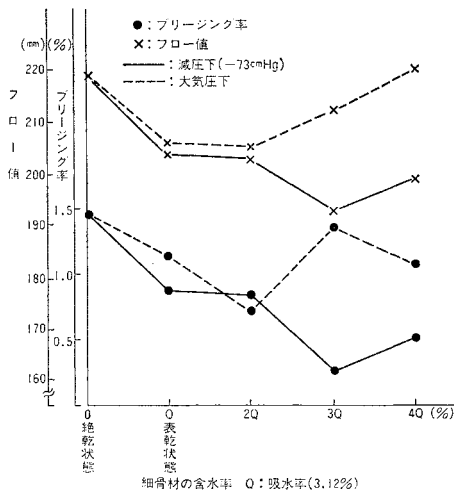
細骨材表面の空気泡に関しては、JIS A 1109「細骨材の比重および吸水量試験」において、24時間吸水と泡の追出し方法が明示されているように、その存在が認められている。これらの空気泡はとれやすい細骨材間の空気泡、細骨材の内部間隙空気泡および細骨材の表面に付着している表面空気泡に大別して考えることができるため、細骨材を水中に投入した後に、容器内を減圧して空気泡を発生させる実験を行った。

すなわち、絶乾状態の細骨材を-73 cmHgに減圧し、次に、10%の含水率に相当する水を投入して練り混ぜた後、大気圧に復元し、細骨材の内部間隙に十分水を吸水させる操作を3回繰り返したA試料、および絶乾状態の細骨材によるB試料、それぞれを約200gずつ三角フラスコに入れ、注水した後に十分攪拌し、とれやすい細骨材間空気泡を取り除いた。次に、三角フラスコの空気

表-1 練り混ぜ方法を変化したモルタルの実験

砂の種類	W/C	S/C	A _d	W _i /C	練り混ぜ方法	テーブルフロー(mm)	ブリージング率(%)	圧縮強度 (kg/cm ²)	
								7日	28日
大井川産川砂 FM=2.82 初期表面水率=4.6%	55	3	0.6	25	① C+W ₁ $\xrightarrow{120 \text{ 秒}}$ +S+W ₂ +A _d $\xrightarrow{90 \text{ 秒}}$	240	1.6	261	444
					② S+W ₁ +C $\xrightarrow{120 \text{ 秒}}$ W ₂ ·A _d $\xrightarrow{90 \text{ 秒}}$	213	1.0	327	504
					③ S+C+W+A _d $\xrightarrow{90 \text{ 秒}}$	227	1.8	243	427
	65	3	-	25	① C+W ₁ $\xrightarrow{120 \text{ 秒}}$ +S+W ₂ +A _d $\xrightarrow{90 \text{ 秒}}$	249	5.7	194	380
					② S+W ₁ +C $\xrightarrow{120 \text{ 秒}}$ W ₂ ·A _d $\xrightarrow{90 \text{ 秒}}$	227	1.8	204	388
					③ S+C+W+A _d $\xrightarrow{90 \text{ 秒}}$	250	6.1	175	375

C:セメント, W₁:1次調整水, S:細骨材, W₂:2次調整水, A_d:高性能減水剤, →:練り混ぜ時間



図一 細骨材の含水率が分割練りませを行ったモルタルの性状に及ぼす影響

部分を -73 cmHg に減圧したところ、A 試料は約 2 分間、B 試料では約 5 分間空気泡が発生した後に気泡の発生が止まり安定したことが観察された。以上のことから、内部空隙に十分吸水された A 試料でも減圧すれば気泡が発生し、細骨材表面には大気圧下では取れにくい表面空気泡が存在していることが目視確認された。

図一は、含水率を絶乾状態から吸水率 (Q) の 4 倍まで変えた細骨材を用いて、 W_1/C を 28.6%、 W/C を 65%、また、 S/C を 2.5 と一定にして、同じ練りませ方法で造ったモルタルのフリージング率およびフロー値をまとめて示した例である。細骨材の表面水率を真空ミキサの中で -73 cmHg の減圧下で調整したものを実線で、また、大気圧下で調整したものを破線で示している。

-73 cmHg の減圧下で含水率を調整した細骨材を用いたモルタルは、含水率の多い方がフリージング率が小さくなるとともに、フロー値も減少することが認められる。

また、大気圧下で含水率を調整した細骨材を用いたモルタルでは含水率が少ないとき、同様の傾向を示すが、含水率が多くなると、フロー値が大きくなるとともに、フリージング率も増加する傾向がみられる。また、含水率が吸水率の 2 倍以上の細骨材を用い、減圧下と大気圧下において調整したモルタルの比較では、フリージング率とフロー値の相違が著しくなり、空気存在が大きく影響を及ぼしていることが認められた。

以上のように、所定の 1 次水とセメントの重量比 W_1/C の設定のために、細骨材に調整水を加えて混合する際、その時点における細骨材の表面水率および表面空気泡の状態が異なると、その後の練りませ方法を一定にしても、モルタルの品質が異なることが確認された。以

後、投入水を投入する以前に受けた細骨材の水分と空気泡等の変化の過程を細骨材の履歴と称することにする。

3. 表面吸着水の概念

セメントペーストの分割練りませ方法において、キャピラリー域における 1 次練りませが、いわゆるセメントダマを消滅させてセメント粒子の分散をもたらす、フリージングが最少になることを、序論で述べた。このペースト系に表面乾燥飽水状態の細骨材を順次増加させて、分割練りませによりモルタルを造る場合に、 W_1/C が一定にもかかわらず細骨材表面に付着したペーストが水量不足で、乾燥したように観察された。また、このような変化は設定した W_1/C の値、細骨材の種類、吸水率および粗粒率などが異なっても生ずる。従来までは、 W_1/C をコンクリートの配合および細骨材の状態により、15% から 30% 程度の範囲内で試し練りにより決定して、コンクリートまたはモルタルを造ってきた。

この原因としては、細骨材の表面には JIS A 1109「細骨材の比重及び吸水率試験方法」に設定する表面乾燥飽水状態の場合より多量の水分が、吸着その他により拘束されているものと考えられる。すなわち、細骨材界面の表面水を蒸発させず流動させると、水に表面張力等がある限り表面水は零とはなりにくく、ある有限の時間において、細骨材の表面には細骨材界面に拘束されているある固有の量の表面水が存在するものと考えられる。これをその細骨材固有の表面吸着水ということにする。したがって、セメントペーストに使用されるものと予定している水の一部は、細骨材の表面吸着水として細骨材界面に拘束され、モルタルやコンクリートの品質を変動させる要因となることが予想された。

このような細骨材の表面吸着水は、細骨材の材質、実績率、比表面積および形状だけでなく、表面の空気泡の状態等によっても異なることが、前章でも知見された。以下に述べる実験により、表面吸着水に関する評価方法の検討を行う。

4. 表面吸着水に関する各種の試験

本章では細骨材の表面水が吸着水となって細骨材に拘束されている状態を検出するための試験方法について検討し、適切な試験方法および吸着水の評価方法を考察する。

また、試料の細骨材は 110°C の乾燥器中に 24 時間セットし、絶乾状態としたものを徐冷した後、 -73 cmHg の減圧下の真空ミキサ中にて所定の含水率となるよう加水混合したものを使用した。これは細骨材と水を混合す

表-2 細骨材の物理的性質

砂の種類 (産地)	水砕砂A (広島産)	山砂P	F砂 (大井川産)	水砕砂B (名古屋産)	E砂 (大井川産)	砕砂	北米産砂	海砂S	砕砂	C砂 (大井川産)	川砂 (相模川産)
吸水率 Q (%)	0.64	1.20	1.20	1.29	1.39	1.48	1.51	1.91	2.30	2.84	3.12
粗粒率 FM	2.57	2.51	2.32	2.30	3.23	2.86	2.70	2.49	2.94	1.40	3.01
表乾比重 (kg/l)	2.84	2.65	2.63	2.71	2.60	2.59	2.63	2.57	2.60	2.53	2.60
空隙率 ε (%)	34.3	32.1	32.8	40.8	29.9	36.4	33.8	37.7	32.8	39.7	33.0

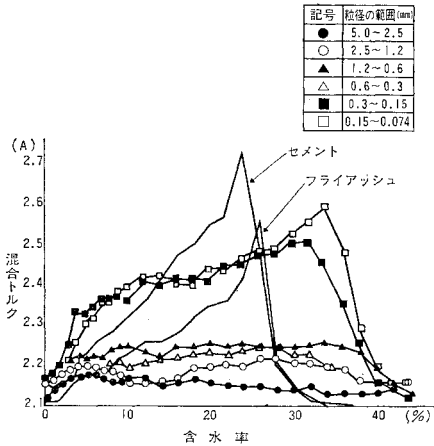


図-2 珪砂の含水率と混合トルクの関係

る場合に、細骨材表面に付着している空気を十分に除去し、表面水の付着状態を一定にするためである。また、本実験に使用する細骨材の種類と物性は表-2に示す。

(1) 混合トルクによる試験

各種の粒度をもつ絶対乾燥状態の珪砂 10 kg を、容量が 25 l の真空ミキサに入れ、-73 cmHg の減圧下で所定の含水率をもつよう加水混合した場合の混合トルクを電流計で測定してプロットしたのが図-2 である。また、図-2 には、大気圧中での普通ポルトランドセメントおよびフライアッシュについての混合トルクも示している。

粒度の細かい珪砂 7 号および 8 号は、含水率が 32% から 34% でピークを示し、セメントやフライアッシュとほぼ同様な性状を示すのに対して、粒径が大きな珪砂では、2% から 4% の範囲で混合トルクが上昇するが、含水率がそれ以上増加して 35% 程度まではほとんどトルクの変化がなく、2. で述べたセメントやフライアッシュのようにピーク点のないことが認められ、混合トルクの変化により細骨材の表面吸着水を検出することは困難であるものと考えられた。

(2) バルキングの試験

絶対乾燥状態にした大井川産の C 砂および E 砂と砕砂を、-73 cmHg の減圧下で、それぞれ水と混合して所定の含水率となるように試料を作製し、次の方法でバルキ

ング試験を行った¹⁸⁾。3 種類の砂の物理的性質は表-2 に示している。

試料は、容積が 2 l の細骨材の単位容積重量の測定用容器上に同じ直径と高さをもつアクリル製のパイプを取り付け、ハンスコップで少量ずつ振動を加えないように砂を充填し、表面をならした後、モルタルのフロー試験器のテーブルの上に静かに置き、15 回上下させて締め固める。その後、アクリル製のパイプを静かに取り除き、測定容器に残った砂の表面をならして重量を測定した後、砂の含水率と空隙率(絶対乾燥状態)を求めた。

3 種類の砂における含水率と空隙率を示したのが図-3 である。3 種類の砂とも含水率により空隙率は異なり、粒度の粗い砕砂では含水率が 3% から 5% 範囲で、また、粒度の細かい大井川産の C 砂では、7% から 12% 程度の含水率で空隙率が最大となり、バルキング現象が認められる。また、図-3 には JIS A 1109 で定義される表面乾燥飽水状態に対応する含水率である吸水率もそれぞれ示している。これらの点における空隙率は、絶対乾燥状態に比べてそれぞれ数パーセント大きく、容積増加を示している。表面乾燥飽水状態では砂の表面に水分の

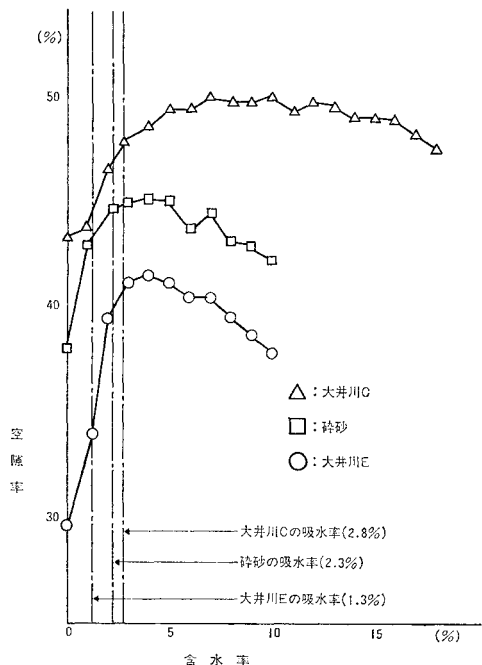


図-3 含水率と空隙率の関係

存在しないことを定義しているが JIS A 1109 に示すフローコーンによる表乾状態は、砂の表面に実際には水分が存在しているため、バルキングを生じているものと考えられた。そして、このような表面乾燥飽水状態において骨材表面に存在する水はその砂に固有のもので、一種の表面吸着水と考えられる。

(3) ふるい分けした細骨材に関する吸水率の試験

表-2 に示す大井川産 E 砂および砕砂をふるい分け、それぞれ各ふるいの範囲の粒度ごとに、JIS A 1109 により吸水率の実験を行った結果を図-4 に示している。この図より、同種類の砂でもその比表面積の大きい粒径の小さい砂ほど、吸水率が大きくなっていることがわかった。すなわち、フローコーンで定めた表乾状態では、同種類の砂でも粒径が小さくなるほど比表面積が大きくなり、吸水率も大きくなって砂に表面水のあることを示している。

(4) 重力による表面水の流下試験

含水率の異なる砂を円筒管に詰め、水分の蒸発がないように密封し、温度が $20 \pm 3^\circ\text{C}$ の恒温室に置いた場合の円筒管各位置における砂の含水率の時間的変化を試験した。試験容器は、長さが 100 cm、直径が 5 cm の塩化ビニル製の円筒管を、図-5 に示すように 5 等分割できるように各ユニットに切断して組み立てたものである。

試料は、大井川産の C 砂・E 砂および砕砂と海砂の 4 種類である。

次に、初期の含水率を 2 種類に調整した各砂を試料として、3 日、7 日、14 日および 28 日経過した時点で、各ユニットの円筒管中の砂の含水率を JIS A 1125 に準じて測定した。

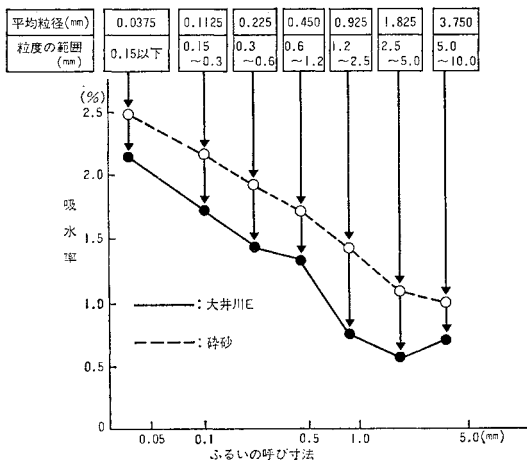


図-4 細骨材の吸水率に及ぼす粒径の影響

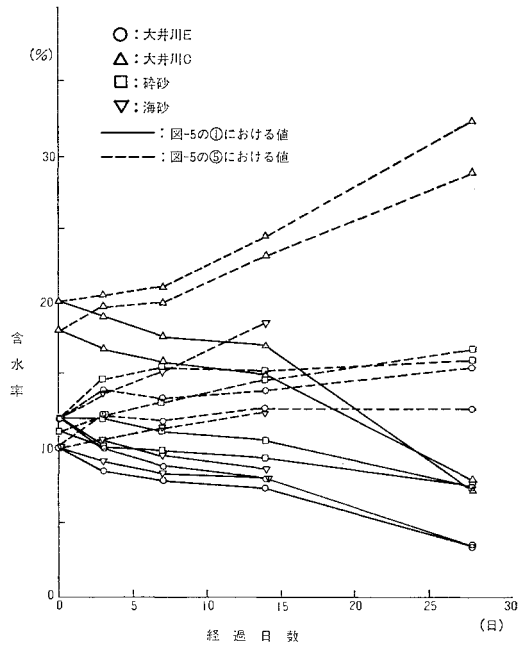


図-6 砂の含水率の時間的变化

図-6 は 図-5 に示す一番上段の ① および一番下段の ⑤ のユニットのそれぞれの含水率の経時変化を示した例である。いずれの砂とも、時間の経過とともに水分が下方に移動して、最上段における砂の含水率は減少していくが、含水率が一定になる経過時間は、初期に設置した含水率が大きいほど長くなっている。そして、28日間経過してもまだ含水率の減少が継続している場合がある。また、各砂とも初期含水率が大きいほど含水率の減少程度が著しくなり、初期含水率の大きい場合の方が最終的に小さい含水率となっていることも認められる。本実験では、重力下で砂の微粒子が水分とともに流下し、初期含水率が大きいものほど微粒子の流下量が多いためと考えられた。

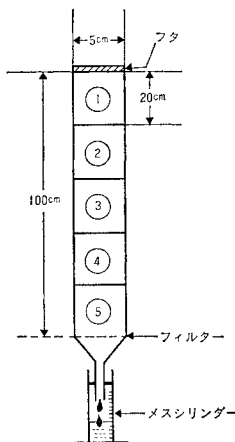


図-5 表面水の流下実験装置

図-5 に示す一番下段の ⑤ のユニットの含水率の経時変化を示した例を図-6 に破線で示している。最上段の位置とは反対に、上部より流下した水分のため、含水率は時間とともに大きくなり、その増加量は 28 日間経ても継続している場合がある。また、含水率の増加量は、初期含水率が大きいほど著しくなる例もあるが、顕著でない例も認められる。その原因として水はフィルターを通過して円筒管の外へ流出するための影響と

考えられた。

図-7 は、大井川産の粗いE砂について円筒管中の各位置における含水率の分布を示したものである。経過日数をパラメーターにとって示した例で、反対に下段は大きな含水率になっており、この傾向は時間とともに著しくなっている。

図-8 は、大井川産の細かいC砂および粗いE砂について経過日数 28 日における含水率の分布の例である。初期含水率をそれぞれ 2 種類に変化している例を示したもので、細かいC砂では、わずか 80 cm の高さの相違により、含水率が約 25% も異なり、また、粗いE砂でも 10% 以上の相違が認められた。

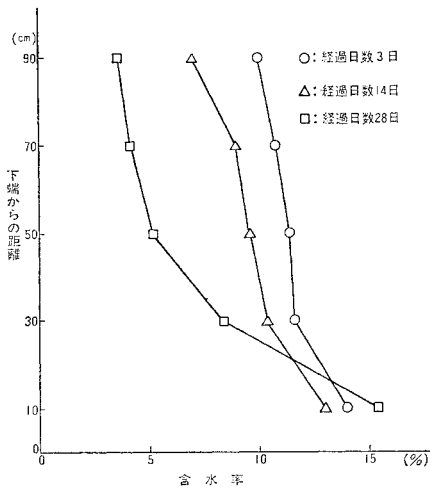


図-7 大井川E砂の含水率の高さ方向の分布 (初期含水率 12%)

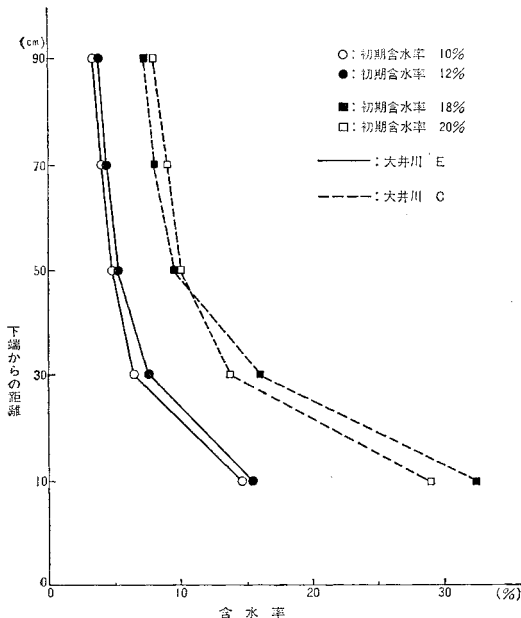


図-8 含水率の高さ方向の分布 (経過日数 28日)

以上、4.(4) の実験により、蒸発しない条件下での表面水の重力による流下は、時間に正比例するものと考えられていたが、十分時間をかければ異なった含水率のものも合流することがわかり、この関係から合流点を変化点としてとらえ、最大表面吸着水として評価できる可能性がでてきた。

5. 遠心力による細骨材の表面吸着水の試験

細骨材の表面水を重力下で流下させる試験の時間短縮と、多数の試料を効率よく実験を行うことを目的に、JIS A 1207「土の遠心含水当量試験方法」に規定する遠心分離機を用いて砂の表面水に遠心力をかける方法を試験した。

試験の容器は、内径が 5 cm で高さが 10 cm の塩化ビニール製の円筒を用いた。上面にはアクリル製の円盤を、また、下面には濾紙等による濾過部を設けて砂の水分が排出できるようにした。その下に容器と同じ内径で、高さが 5 cm の塩化ビニール製の円筒の下面に円盤を接着した排水水を取納する容器を設けた。

試料の細骨材はまず 110°C の乾燥器中に 24 時間置いて絶対乾燥状態にして徐冷した後、空気が付着しないように真空ミキサ中で -73 cmHg に減圧した砂を使用し、JIS A 1109 による吸水率 Q の 3 倍に含水率なるように水分を加えて 5 分間混合した後大気圧に復元して含水率を調整した。次に、減圧による効果を検討するため、一部の試料は大気圧下で含水率を調整した。また、初期含水率の及ぼす影響を検討するため、Q から 10Q まで変化させた試料もある。

以上のように調整した砂、約 200 g を上述の容器に詰め、アクリル製の蓋をして塩化ビニールテープにより水分が蒸発しないように密封した後に遠心分離機にセットして 1500 rpm まで回転数を上げ、この値になった時点から 30 分、60 分、90 分および 120 分間遠心力を作用させた。なお、作用時間の影響を検討するため、5 分および 15 分間作用させた試料もある。所定の作用時間を経過した試料を取り出し、重量 W を測定した後に、110°C の乾燥器にて 24 時間乾燥した後に重量 W_D を測定し、次式により求めたものを砂の含水率 Z(%) とした。

$$\text{含水率 } Z = \frac{W - W_D}{W_D} \times 100 (\%)$$

なお、細骨材試料に作用する遠心力を下式により求めると、本実験の場合、r=18 cm, n=1500 rpm (25 rps) であるから、S=453 g となった。

$$S = \frac{4r\pi^2n^2}{g}$$

ここに、S: 遠心力重力加速度に対する g の比, r: 回

転半径 (cm), n : rps (回転数/秒), g : 980 cm/s^2

図-9 は、表-2 に示す試料のうち、JIS A 1109 より求まる吸水率 Q に対応する初期含水率に調整した場合の作用時間と含水率をプロットしたものであり、最小の 1.20% から最大の 3.12% の 5 種類の細骨材である。

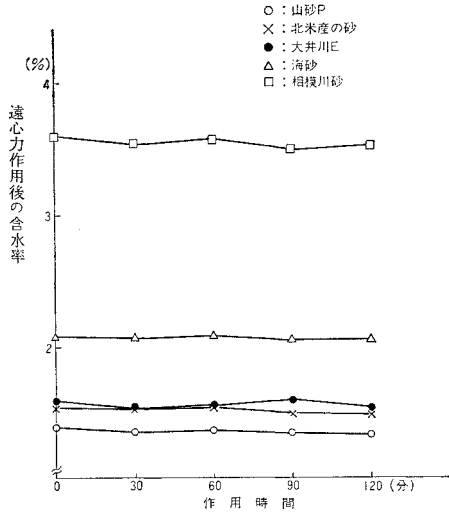


図-9 表乾状態の細骨材の含水率と遠心力作用時間

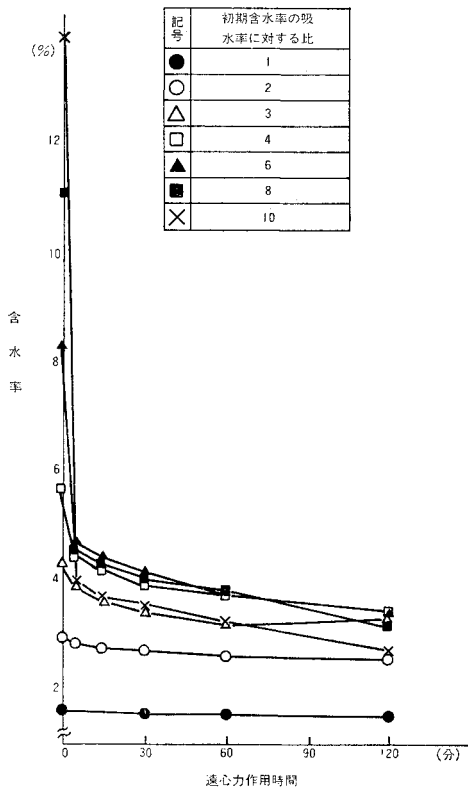


図-10 初期含水率を変化させた場合の含水率と遠心力作用時間との関係

少しばらつきがあるが、5 種類の細骨材は 2 時間遠心力を作用させても、表乾状態のものであれば、その含水率はほとんど変化がないことが認められる。この結果、JIS A 1109 のフローコーンによる試験における吸水率は、最も安定した状態の表面吸着水と考えられる。

図-10 は、含水率と遠心力の作用時間との関係を示す大井川産の粗い E 砂の例であるが、初期含水率を吸水率 Q の 1 倍から 10 倍まで変化させたもので、初期含水率が吸水率 Q の 1 倍から 3 倍においては、遠心力の作用による含水率の減少が小さく、初期含水率の相違が 2 時間遠心力を作用させても、ほぼそのまま継続していることが認められる。

初期含水率を上記の値以上に増加させると、最初の 5 分間の遠心力の作用により急激に含水率が減少しており、この減少程度は、初期含水率が大きいほど顕著となっている。また、遠心力の作用時間が 60 分あるいは 120 分における含水率の差も非常に小さく初期含水率が $3Q$ の場合とほとんど等しい値を示している。そして、初期含水率が $8Q$ あるいは $10Q$ と多量の含水率を含んでいた場合には、 $3Q$ の場合よりむしろ小さい含水率となっており、前述したような重力による表面水の流下試験結果とほぼ同様な現象を示している。これらを明らかにするため、横軸に初期含水率をとり、遠心力作用時間をパラメーターとして図-11 の実線により表示した。試料は相模川砂で初期含水率を $5Q$ まで変化させ

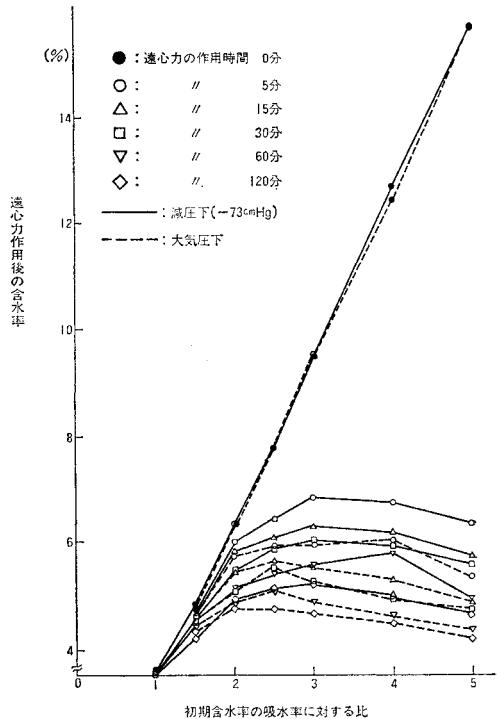


図-11 遠心力作用後の含水率に及ぼす初期含水率の影響

ている。

以上の実験結果より細骨材表面の空気泡の影響をなくした初期含水率の変化が相当大きい細骨材は、長時間遠心力を作用させても容易に含水率は一定にならず、453gの遠心力を2時間作用させても吸水率以上の水分を含む細骨材では、最初の含水率の相違が最後まで残っていることを明瞭に示し、細骨材の初期含水の履歴が遠心力作用後の含水率に影響を及ぼしていることを示している。

次に、図-11の破線は、同一試料である相模川砂を大気圧中でそれぞれ所定の水量にて練り混ぜたものを示している。

すなわち、初期含水率がほぼ同じでも、大気圧中で混合した試料の遠心力作用後の含水率は、各作用時間とも減圧下で混合したものに比べて小さくなっている。そして、減圧下と大気圧中で混合した差は、遠心力の作用時間が長く、初期含水率が少ないほど、小さくなる傾向がある。

このように減圧下と大気圧下で水分を混合させた細骨材に遠心力を作用させて水分を分離させたときに、含水率に差が生じる原因としては、減圧下で加水練り混ぜて大気圧復元することにより細骨材内部間隙へ水分が浸透し、この水分が遠心力の作用では細骨材と分離しにくいこと、および、細骨材表面に付着している空気泡が除去されるため、水分が細骨材に広い面積で吸着している結果、遠心力の作用によって分離する水分の量が少なくなることによるものと推定された。

前記の現象に及ぼすこのような原因の影響程度を定量化することはできないが、このような現象は、表面吸着水が以前細骨材の受けたところの含水率および空気泡の変化の過程、すなわち、細骨材の「履歴」によって異なってくることを明瞭に示し、細骨材には水等による履歴現象が存在していることが認められた。したがって、細骨材の表面吸着水を試験する場合には、このような細骨材の履歴をできるだけ一定に保つように考慮を払わないと試験結果のばらつきが大きくなるものと認められた。

次に、表-2に示す11種類の細骨材に遠心力を作用させた後の含水率と吸水率 Q の関係を示したのが図-12である。横軸に吸水率 Q をとり、縦軸には遠心力作用後の含水率を5個ずつとっているが、最上段のものがミキサ内で混合した水量であって、それより作用時間30分、60分、90分および120分後のものをそれぞれ示している。最上段のものは吸水率 Q の3倍を目標にしたが、ミキサ内で混合した後測定した含水率は、 $3Q$ より少しばらついている。相模川産砂および北米産砂を除けば、120分間遠心力で分離した後も吸水率 Q との間にはほぼ直線関係が成り立つことも認められる。そしてこの直線関係は、表-2から明らかなように、細骨材の粗粒率の相違の影響をほとんど受けていないようである。

以上の結果から、従来の細骨材の試験方法で判明しなかった細骨材の表面には固有の表面吸着水といえるものが存在し、この吸着水率は、細骨材の寸法形状を表示する指標の1つである粗粒率よりは、JISによる吸水率とより相関性のあることが認められた。

次に、ポルトランドセメントおよびフライアッシュによる遠心力実験を行った結果を、図-13に示す。セメントペーストは、 W/C 28~36%のものが453g、5分で W/C 19~21% となり、60分では約14%、120分では約13% となり、 W/C 20% 付近が変曲点となり、普

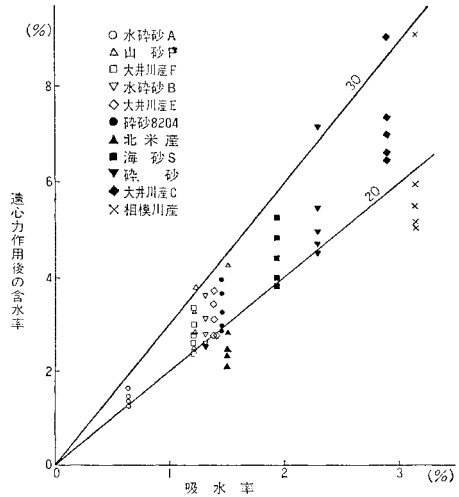


図-12 遠心力作用後の含水率と吸水率との関係

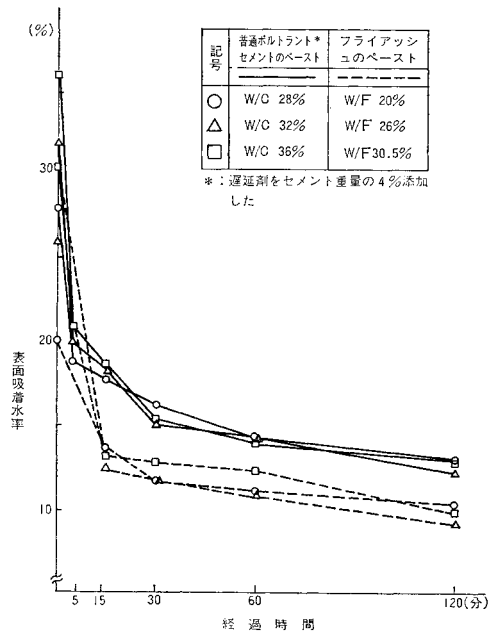


図-13 セメントペーストとフライアッシュペーストの遠心作用後の含水率

通ポルトランドセメントの表面吸着水の何らかの変化点を示しているものと考えられた。同様にフライアッシュも W/F 15~37% のものは 453 g 15 分の点が, W/F 12% 付近で初期の変曲点となり, フライアッシュの表面吸着水に関する変化点を示しているものと思われた。

6. 限界表面吸着水および最大表面吸着水

細骨材の表面吸着水に関し前述のような実験を行った結果, ニュートン流体の水がある限界条件下または有限の時間の範囲内では, 付着している物質の性質により特異な変化点を示すことが明らかとなった。このような特異現象をバルキングおよび混合トルクの実験のように含水率が大幅な範囲を示すものは物理定数として取り扱うことが困難であるため, JIS A 1109 の細骨材の吸水率試験方法, 重力による流下試験および遠心力による分離試験のように, 特異点の幅の小さい点としてとらえられる試験方法による値を定数として採用することにする。

前述のように, JIS A 1109 のフローコーンにより定義する細骨材の表面乾燥飽水状態においては, その吸水率が図-4のように細骨材の種類別粒径により法的に異なること, および, 図-3 の表乾状態のバルキング現象より, 表乾状態においても細骨材表面に吸着されている水のあることが判明した。このような JIS における表乾状態の吸水量を細骨材固有の表面吸着水の限界値と考え, 限界表面吸着水と称することにする。そして, これを細骨材の重量で除したものを限界表面吸着水率 β_{lim} と称する。したがって, 一般的な細骨材の場合, β_{lim} は JIS の吸水率 Q にほぼ一致する。

遠心力による分離試験において, 図-12 に示したように, 履歴を一定にさせた細骨材がある遠心力作用時間後に残る含水率も, 細骨材に固有の表面吸着水であると考え, これを最大表面吸着水と称する。そしてこれを細骨材の重量で除したものを最大表面吸着率 β_{max} と称する。最大表面吸着水率として, 前述の重力による流下試験において, ほぼ一定となる含水率あるいは異なる初期含水率に調整した細骨材がある流下経過時間にほぼ交差する点等に含水率をとることもできるが, 試験時間が長時間となるため, 上述のように遠心力による分離試験の結果を利用することにした。

また, 図-14 は, 図-12 のデータを遠心力の作用時間別にプロットしなおしたもので, 遠心力作用後の含水率と細骨材の吸水率の直線関係を示す勾配は, 30 分間で 2.5, 60 分間で 2.3, 120 分間で 2.0 と, 作用時間が長くなるほど小さくなっており, 本章では, 遠心力の作用時間と含水率の変化を示す 図-10 から, 作用時間が 30 分までは含水率の変化が急減する場合があるが,

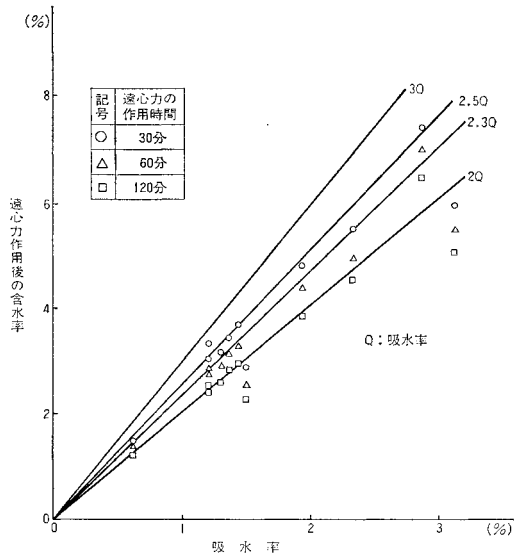


図-14 最大表面吸着水率と吸水率の関係

それ以上経過すると含水率の変化も少ないため, 試験時間の短縮を考慮して, 作用時間が 30 分間のときの含水率を最大表面吸着水率 β_{max} とおくことにする。このように定義すると, 大多数の細骨材の限界表面吸着水率 β_{lim} と最大表面吸着水率 β_{max} との間は, 式 (1) のような直線関係によって表わされる。

$$\beta_{max} \approx 2.5 \beta_{lim} \approx 2.5 Q \dots\dots\dots (1)$$

ここに, Q は JIS A 1109 による吸水率

しかしながら, 図-14 で示されるように, この直線からはずれる細骨材も数種類みられ, 全部の細骨材が $\beta_{lim} \approx Q$ の関係にはない。したがって, 一般的には式 (2) のように表わされる。

$$\beta_{max} = A \cdot \beta_{lim} = A(Q - Q_0) \dots\dots\dots (2)$$

$$\beta_{lim} = Q - Q_0 \dots\dots\dots (3)$$

ここに, A : 最大表面吸着水率を定める実験定数

Q_0 : 表乾状態における限界表面吸着水率以外の含水率で実験によって求める。

以上, 従来細骨材の含水状態の基準としていた表乾状態における吸水率 Q は, 細骨材表面に拘束されている限界表面吸着水率 (β_{lim}) とそれ以外の含水率 (Q_0) から成り立っていることがわかった。したがって, 今後数多くの細骨材について検証し, A および β_{lim} , Q_0 を定める必要がある。

7. 結 論

練りませ方法等各種のモルタルの実験および細骨材に関する各種の実験結果より, 従来解明されていなかった細骨材界面の状態に関して, 次のことが明らかとなった。

(1) 細骨材には表面吸着水が存在し, この表面水は

細骨材に拘束されている。

(2) JIS A 1109「細骨材の比重及び吸水率試験方法」より求まる吸水率に相当する水は、本試験に使用した試料の場合、大部分の細骨材においては安定した表面吸着水であり、限界表面吸着水と考えられたが、それ以外の水を含水している細骨材もある。

(3) 表面吸着水の最大値を最大表面吸着水と称し、これを求める方法は種々考えられるが、水分の蒸発を防いだ JIS A 1207「土の遠心含水当量試験方法」に準じる遠心力を利用する試験方法が有用と考えられる。そして、最大表面吸着水率は、一般的な細骨材の場合、限界表面吸着水率に比例し、数倍程度と考えられる。なお、粗粒率、吸水率あるいは実績率等に大きな変化がなくても、最大表面吸着水率が大きく異なる細骨材もある。

(4) 細骨材には、細骨材表面が以前受けた水分と空気泡等の変化の過程、すなわち、「履歴」が存在し、この履歴が異なると、コンクリートまたはモルタルのブリージングおよび流動性等に影響を及ぼす。したがって、コンクリートまたはモルタルを製造する場合、細骨材の履歴を標準化する必要があると思われる。

(5) 細骨材表面の空気泡は、表面吸着水のばらつきの原因となり、その後付着した表面水を離脱させやすくしているものと思われる。

(6) コンクリートあるいはモルタルの再現性およびばらつきの原因に、従来細骨材の最大表面吸着水および履歴の要因は考慮されていなかったが、本実験の結果、無視できない要因であることが明らかとなった。

(7) 最適 W_1/C にて分割練りませ方法によりコンクリートおよびモルタルを製造すると、1次練りませにより細骨材の表面吸着水とセメントの表面吸着水とが共有となり、骨材表面にセメント粒子が強固に吸着し、 W_2 を投入して2次練りませを行っても細骨材表面にはセメント粒子の一部が付着残留するとともに、残りのセメント粒子もよく分散するために、材料の分離、ブリージングおよびワーカビリティ、強度等、諸品質が向上しているものと考えられた。

本研究の結果、コンクリートおよびモルタルを形成している主要材料であるセメント粉体、細骨材等、粉粒体の固体界面には、固体表面に拘束されている表面吸着水および表面水と空気泡等の変化の過程、すなわち、「履歴」等まだ知見されなかった物理現象が存在し、練りませた後のコンクリートおよびモルタルの品質に未知の変動要因を与えて影響を及ぼしていることが確認された。

本論文は、東京大学に提出した学位論文「骨材の表面状態がコンクリートに及ぼす影響に関する研究」の一部であります。

謝 辞：本研究を遂行するにあたり、ご懇切なるご

指導、ご教示をいただきました当時東京大学（現・東京理科大学教授）主査 樋口芳朗教授、東京大学 岸谷孝一教授、小林一輔教授、岡村 甫教授、魚本健人助教授、ほか、諸先生、ならびに本研究を推進するのにご協力いただきました大成建設（株）技術研究所の方々に厚く御礼を申し上げ、心より感謝の意を表する次第であります。

参 考 文 献

- 1) たとえば、吉田徳次郎：混泥土材料を混合機に投入すべき順序について、九州大学工学叢版 3-6, pp. 274~284, 昭和4年。
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書（昭和55年度版）109条。
- 3) たとえば、加賀秀治・山本康弘・伊東靖郎：減圧注入工法によるプレバッドコンクリートに関する一連の研究その1・序論、日本建築学会学術講演梗概集, pp. 85~86, 昭和52年10月。
- 4) 特公開 53-71859：骨材の計量方法及び混練水量決定方法並びにそれらの装置、伊東靖郎ほか。
- 5) 原島龍一・剣持三平・伊東靖郎：高強度スラリーモルタルの特性について、土木学会第33回年次学術講演会講演梗概集第5部, pp. 223~224, 昭和53年9月。
- 6) たとえば、伊東靖郎・辻 正哲・加賀秀治・山本康弘：SECコンクリートの特性と展望、セメント協会、セメント・コンクリート, No. 410, 4月号, pp. 20~29, 1981。
- 7) 岡 小天：レオロジー入門、工業調査会, pp. 396~399, 昭和45年。
- 8) 山本康弘・丸嶋紀夫・早川光敬・伊東靖郎：SECコンクリートの基礎的性状に関する研究、第4回コンクリート工学年次講演会講演論文集, pp. 121~124, 1982。
- 9) 田沢栄一・松岡康訓・金子誠二・伊東靖郎：ダブルミキシングで作製したセメントペーストの諸性質について、第4回コンクリート工学年次講演会講演論文集, pp. 125~128, 1982。
- 10) Higuchi, Y.: Coated-Sand Technique Produces High-Strength Concrete, Concrete International (ACI), May.
- 11) 持田 豊：青函トンネルにおける新しい吹付コンクリート工法、コンクリート工学, pp. 29~34, 1980年9月。
- 12) 魚本健人・小林一輔・星野富夫・西村次男：コンクリートの練り混ぜ方法に関する基礎的研究①~⑥、生産研究, 第33巻, 第8号~第34巻, 第5号, 昭和56年8月~昭和57年5月。
- 13) 山本康弘・黒羽健嗣・丸嶋紀夫・石井貴和・早川光敬：S.E.C.コンクリートの基礎理論と物性、大成建設株式会社研究所所報, 第14号, pp. 9~19, 昭和56年12月。
- 14) 奥村忠彦・伊勢寿一・黒崎富士美：新しい練りませ方法によるモルタルを用いたPIPぐい、セメント・コンクリート, No. 418, 12月, pp. 35~40, 1981。
- 15) 宮下 洋・林 俊彦・高津行彦・佐藤大作：S.E.C.工法によるコンクリートの諸性質と混和剤の性質と混和剤の性能効果、日曹マスタービルダーズ研究所所報, No. 4, pp. 43~53, 1981。
- 16) 氏家 勲・長滝重義・戸矢栄一：分割混練したコンクリートに関する基礎研究、土木学会第37回年次学術講演会講演梗概集第5部, pp. 197~198, 昭和57年10月。
- 17) 十代田知三・山本康弘・黒崎喜嗣・服部高重：造殻混練コンクリートに関する実大実験、日本建築学会学術講演梗概集, pp. 323~328, 昭和57年10月。
- 18) 浜田 稔：建築材料学, 第2章 骨材, コンクリート用, 丸善（株）, pp. 39~42, 昭和39年11月。

(1983.6.17・受付)