

各種混和材を用いた超硬練りコンクリートの ワーカビリティに関する研究

藤原浩巳¹・丸岡正知²・下山善秀³・小島 明⁴・国府勝郎⁵

¹正会員 工博 宇都宮大学助教授 工学部建設学科 (〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東7-1-2)

²正会員 工修 宇都宮大学助手 工学部建設学科 (〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東7-1-2)

³正会員 工博 太平洋セメント株式会社中央研究所 (〒285-8655 千葉県佐倉市大作2-4-2)

⁴正会員 太平洋セメント株式会社中央研究所 (〒285-8655 千葉県佐倉市大作2-4-2)

⁵正会員 工博 東京都立大学教授 工学部土木工学科 (〒192-0364 八王子市南大沢1-1)

即脱に用いられる超超硬練りのコンクリートの、充填性や表面仕上り性を改善することを目的に、各種の混和材を用いてそれらの粒子形状およびセメントを含めた結合材の構成について検討を行った。その結果、振動条件下の流動性向上には混和材の粒子形状が真球に近いほど有効であり、また粉体粒度分布を広げることが効果的であることがわかった。また、振動締固め時の諸条件(周波数、加速度および振動時間)がコンクリートのワーカビリティに及ぼす影響について検討を行った。その結果、即脱による変形および充填率に影響を及ぼす主要因は周波数であり、表面仕上り性に影響を及ぼす主要因は加速度であることが分かった。

Key Words : *extremely stiff consistency concrete, admixture, spherical ratio, particle shape, particle size distribution, compacting factor, vibrating condition*

1. はじめに

現在、建築・土木現場における工期短縮および作業合理化へのニーズの高まりは、工事のプレハブ化・プレキャスト化の傾向を強めている。それに伴いコンクリート製品の需要は増加すると考えられ、その重要性は高くなると同時に様々な需要に対応出来るよう多様化も急速に進めなければならない。このような環境下において、超硬練りコンクリートを用いた即時脱型製品はそれの持つ様々な利点から今後さらに利用価値を高めていくと考えられる。このような超硬練りコンクリートの問題点としては、ゼロスランプのコンクリートであることに起因する極めて悪い流動性が挙げられる。このため、即時脱型後の充填性や表面仕上り性に問題が生じやすい。しかし、静的条件下においてゼロスランプであっても、振動締固め時におけるコンクリートの流動性を著しく増加させることができれば、より効果的に締固めを行うことができ、充填性および即時脱型後の表面仕上

り性は向上すると考えられる。そこで本研究は、このようなコンクリートを得ることを目的に、以下の検討を行っている。

①各種混和材料の粉体特性とフレッシュ性状の関係の検討

②締固め時の振動条件が即時脱型後のコンクリートの諸性状に及ぼす影響の検討

これまでに、①についてはモルタルレベルでの粉体特性とフレッシュ性状の関係について明らかとした¹⁾。ここでは、この結果と共にコンクリートレベルでの検討結果および②についての検討結果を報告する。

2. 各種混和材料の粉体特性とフレッシュ性状の関係

(1) 2章の概要

即時脱型製品等に用いられている超硬練りコンク

リートは、単位水量が少量であるために流動性が悪く、即時脱型後に表面仕上り性や充填性等に問題が生じやすい。この問題を解決するには、ゼロスランプの超硬練りコンクリートが振動条件下において高い流動性を有し、振動停止後においてはゼロスランプ状態に戻ることが必要となる。本章は、振動条件下におけるモルタルの流動性を向上させるための材料条件について検討するとともに、それらの効果のコンクリートによる評価を行った結果について述べる。

(2) 実験Ⅰ：混和材の粒子特性が振動条件下のモルタルの流動性に及ぼす影響

a) 目的

各種の混和材の粒子特性が、振動条件下におけるモルタルの流動性に及ぼす影響について検討を行い、流動性向上に効果的な粒子特性について明らかにすることを目的とした。

b) 実験概要

実験に使用した材料を以下に示す。

- ①セメント：普通ポルトランドセメント（比重：3.15，ブレン値： $3530\text{cm}^2/\text{g}$ ）
- ②細骨材：青梅産硬質砂岩系砕砂（比重：2.60，吸水率：1.5%，粗粒率：2.60）
- ③混和剤(SP)：β-ナフタリンスルホン酸塩系高性能減水剤
- ④混和材：セメントに混和することにより、モルタルの流動性を向上させる可能性を有する混和材を、特に粒子形状に着目し選定した²⁾。それら混和材の特性を表-1に示す。高炉スラグ微粉末には粉末度の高い品種を用いているが、これは微粉末を用いることによる影響も調べるためである。また、フライアッシュはII種に相当するものであり、ワラストナイトAおよびBは粉碎の程度の違いが粒形に影響を及ぼすものと考え、粉末度の異なる2種類を実験に用いたものである。

モルタルの配合は表-2に示す一般的な超硬練りコンクリートの配合(インターロッキングブロック)より粗骨材を除いたものとして定めた。なお、表-3に示すように結合材量およびSP添加率は固定とした。また、結合材に含まれる混和材の混和割合は、全結合材容積に対して5、10および30%の3水準とした。

練混ぜは、容量2リットルのホバートミキサを用い、練り量は1リットルとした。練混ぜ手順を図-1に示す。

測定した項目を以下に示す。

①混和材の円度

実験に使用した混和材について、その粒子形状を定量的に把握した。方法は、電子顕微鏡により撮影

表-1 混和材の特性

混和材種類	比重	ブレン値 (cm^2/g)	結晶形	平均粒径 (μm)
珪石微粉末	2.68	3370	六方晶系	14
高炉スラグ微粉末	2.90	7020	非晶質	4
フライアッシュ	2.26	2810	球状	20
炭酸カルシウム	2.70	5920	六方晶系	7
ワラストナイトA	2.91	1760	三斜晶系	21
ワラストナイトB	2.91	5210	三斜晶系	10
カオリン	2.56	17460	三斜晶系,六角板状	4

表-2 一般的な超硬練りコンクリートの配合

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m^3)			
		W	C	S	G
30.0	60.0	120	400	1143	777

表-3 モルタルの配合条件

単位結合材容積 (リットル/ m^3)	184.8
S P添加率 (%)	1.2

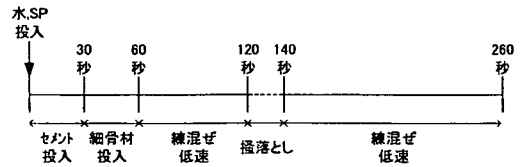


図-1 練混ぜ手順

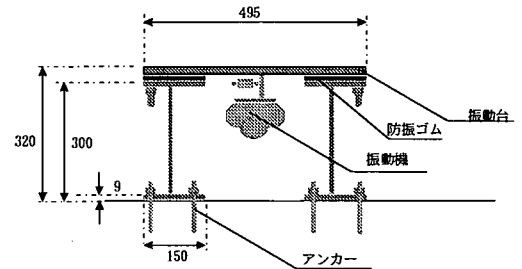


図-2 振動フロー試験機(単位: mm)

した混和材粒子の写真画像処理した後、その粒子の円度について測定を行った。円度は $(4\pi \text{面積}/\text{周長}^2)$ で表され、1に近いほど真球に近づくことを示す。

②モルタルの拘束水量

JIS R 5201に準じた方法で求めた落下運動を加える前のフロー値を0打フローとし、この0打フローが100mmとなる水量を拘束水量として求めた。求め方は4水準の水量におけるモルタルの0打フローの結果より最小二乗法で水量と0打フローとの関係を示す近似式を求め、その式より0打フローが100mmとなる水量を算出したものである³⁾。

表-4 各材料の円度

珪石微粉末	0.71
高炉スラグ微粉末	0.70
フライアッシュ	0.91
炭酸カルシウム	0.69
ワラストナイトA	0.55
ワラストナイトB	0.59
カオリン	0.63

表-5 振動フローに関する重回帰分析結果

要因	偏回帰係数	標準偏回帰係数
混和材粒子の円度	32.506	0.424
混和材混和率	-0.090	-0.117
混和材の粒径	0.091	0.072

③振動フロー

図-2に示す振動フロー試験機を用い、0打フロー100mmのモルタルに周波数91.7Hz(5500rpm)、振動時間5秒間の条件で振動を加え、振動停止後のフローを振動フローとし測定した。

c) 実験結果および考察

各混和材の円度を表-4に示す。この結果、フライアッシュが最も真球に近く、ワラストナイトAが最も円度が小さいことがわかった。図-3~9に各混和材を混和したモルタルの混和率と拘束水量および振動フローとの関係を示す。振動によるモルタルの流動性向上に効果的な混和材の条件として、結合材がセメントのみである場合よりも、混和材を用いることで①拘束水量が少なくなる②振動フローが大きくなることが求められる。これらの観点から、フライアッシュを混和した結合材を用いたモルタルは、その混和率が増加するに伴い拘束水量は減少し、なおかつ振動フローは増加したことより、モルタルの流動性向上に効果的であると推察された。

次に各実験において得られた結果をもとに、拘束水量および振動フローに影響を与えられ考えられる混和材粒子の円度、平均粒径および混和率の要因効果の大小を、定量的に評価するために重回帰分析の手法を取り入れた。すなわち、これらの要因を説明変数、拘束水量および振動フローを目的変数とする重回帰分析を行った。

まず、振動フローに影響を及ぼす要因について重回帰分析の結果より得られた結果を表-5に示す。表中の標準偏回帰係数に着目すると、3つの要因のうち、混和材の円度が振動フローに最も影響を及ぼし、粒子形状の円度が高くなる(粒子が円に近づく)に伴い、振動フローは大きくなる傾向にあることがわかった。なお、混和材混和率および粒径の影響は小さかった。

次に拘束水量に影響を及ぼす要因について重回帰

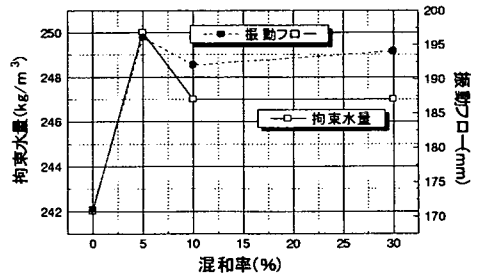


図-3 珪石微粉末を混和した場合

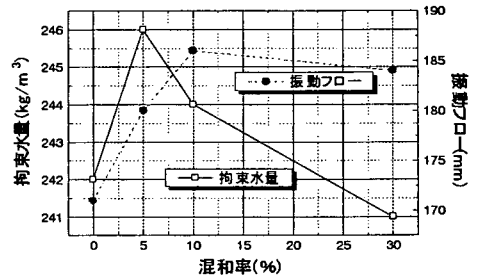


図-4 高炉スラグ微粉末を混和した場合

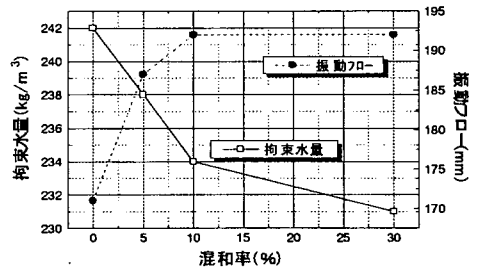


図-5 フライアッシュを混和した場合

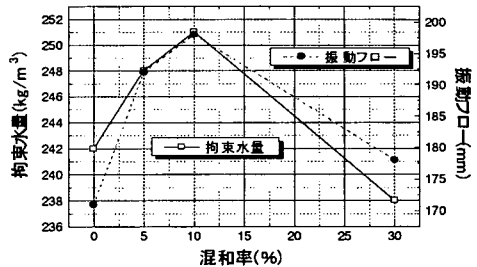


図-6 炭酸カルシウムを混和した場合

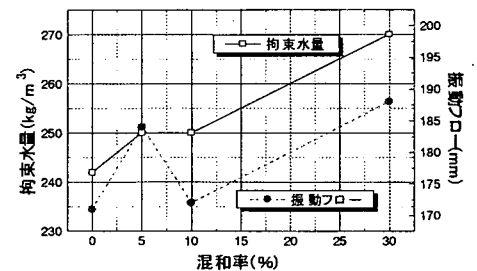


図-7 ワラストナイトAを混和した場合

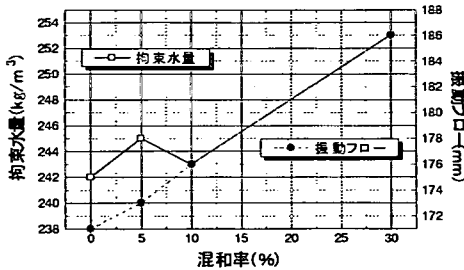


図-8 ワラストナイトBを混和した場合

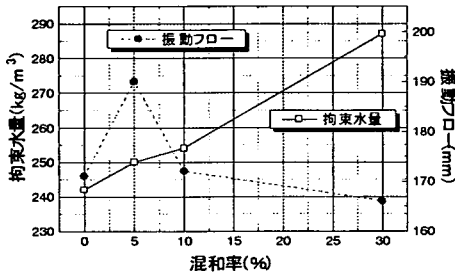


図-9 カオリンを混和した場合

表-6 拘束水量に関する重回帰分析結果

要因	偏回帰係数	標準偏回帰係数
混和材粒子の円度	-60.732	-0.557
混和材混和率	0.247	0.226
混和材の粒径	-0.153	-0.086

表-7 粉体の混合割合

配合	全粉体容積に対する混合割合(%)					タッピング 充填率 (%)
	セメント	高炉 スラグ	シリカ フェーム	珪砂 粉砕品A	珪砂 粉砕品B	
1	80	20	---	---	---	52.4
2	64	16	---	20	---	57.6
3	72	18	---	10	---	54.6
4	60	30	10	---	---	46.3
5	48	24	8	20	---	51.1
6	54	27	9	10	---	48.2
7	64	16	---	---	20	57.3
8	72	18	---	---	10	55.0
9	48	24	8	---	20	51.2
10	54	27	9	---	10	48.7

分析した結果を表-6に示す。表中の標準偏回帰係数に着目すると、3つの要因のうち混和材の円度が拘束水量に最も影響を及ぼし、粒子の円度が高くなるに伴い、拘束水量は少なくなる傾向にあった。

d) 実験 I のまとめ

フライアッシュを混和した結合材を用いたモルタルは、セメントのみを使用したモルタルと比較して、拘束水量は少なく、振動フローは大きくなった。この傾向はその混和率が増加するに伴い顕著であった。混和材の粒子形状と振動によるモルタルの流動性の

変化との関連について解析を行ったが、各材料の粒子の円度が高くなる(粒子が円に近づく)に伴い、振動フローは大きくなり、拘束水量は少なくなる傾向を示した。以上より、振動条件下におけるモルタルの流動性を向上させるには、フライアッシュのような粒子形状が球形の材料を混和するのが効果的であると判断された。

(3) 実験 II : 粉体の粒度構成が振動条件下のモルタルの流動性に及ぼす影響

a) 目的

実験 I で混和材の粒子形状が振動条件下のモルタルの流動性に及ぼす影響について検討を行った。本実験では、セメントを含めた粉体の粒度構成が、振動条件下におけるモルタルの流動性に及ぼす影響について検討を行った。

b) 実験概要

実験に使用した材料を以下に示す。

①セメント

普通ポルトランドセメント(密度:3.15g/cm³, プレーン値:3530cm²/g)

②細骨材

青梅産硬質砂岩系砕砂(比重:2.60, 吸水率:1.55%, 粗粒率:2.60)

③粉体

高炉スラグ微粉末(比重:2.90, プレーン値:7020cm²/g, 平均粒径:4μm)

シリカフェーム(比重:2.21, プレーン値:200000cm²/g, 平均粒径:0.15μm)

珪砂粉砕品A(比重:2.30, プレーン値:1060cm²/g, 平均粒径:71μm)

珪砂粉砕品B(比重:2.30, プレーン値:1550cm²/g, 平均粒径:59μm)

④混和剤: 高性能減水剤 (β-ナフタリンスルホン酸塩系)

粉体の混合割合を表-7に示す。これらの粉体は粒度構成を変化させることを目的に決められたものである。図-10および図-11に各混合粉体の粒度分布を示す。

モルタルの配合条件は、表-2に示した配合より粗骨材を除いたものとし、SP添加率を全粉体重量に対する割合で1.2, 1.5および1.8%の3水準とした。

練混ぜ手順は実験 I と同様とした。

測定項目として、①拘束水量および②振動フローは実験 I と同様の手順で行った。また③各混合粉体のタッピング充填率はパウダーテスターを用いて測定した。これは100ccの鋼製容器に粉体を詰め、高さ1cm, 毎秒1回のペースでタップし、10回のタップ

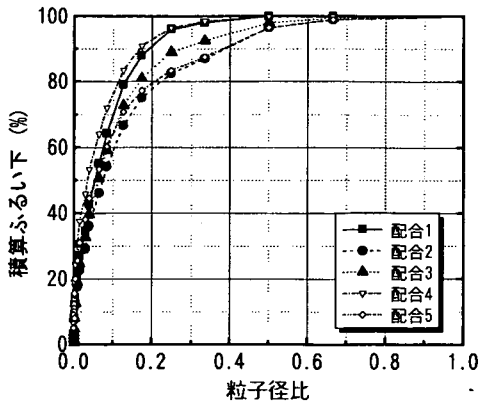


図-10 各混合粉体の粒度分布(配合1~5)

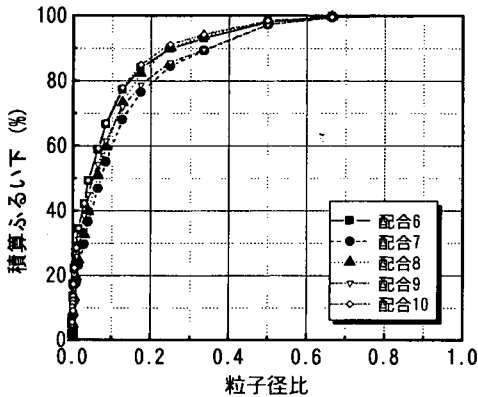


図-11 各混合粉体の粒度分布(配合6~10)

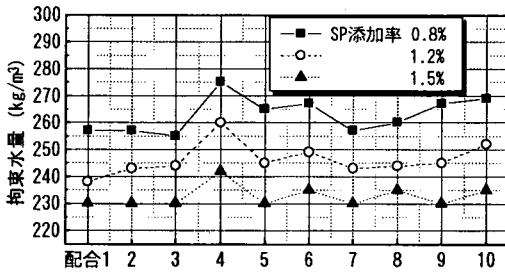


図-12 各混合粉体の拘束水量

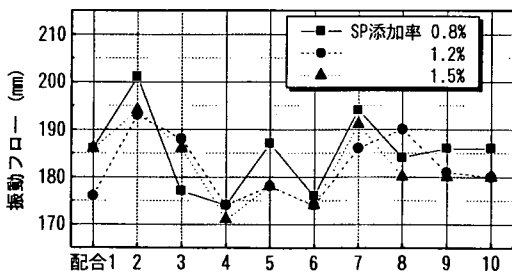


図-13 各混合粉体の振動フロー

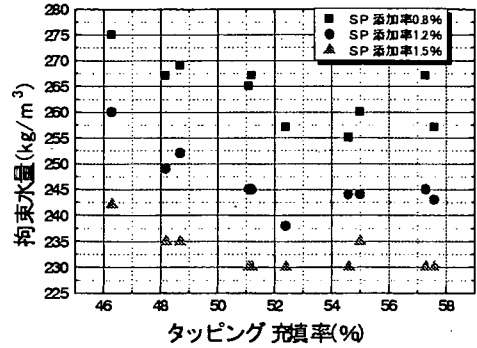


図-14 タッピング充填率と拘束水量との関係

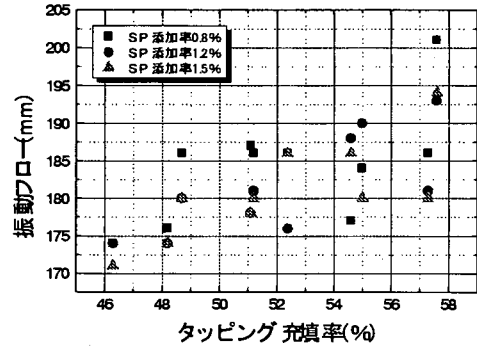


図-15 タッピング充填率と振動フローとの関係

毎に沈降した分粉体を注ぎ足し、容器中の重量が一定となるまで繰り返すもので、今回は全て500回タッピングした結果得られた重量より充填率を求めた。

c) 実験結果

各混合粉体を用いたモルタルの拘束水量を図-12、振動フローを図-13に示す。これら結果より、配合2および7の結合材を用いたモルタルの振動フローは、他配合のモルタルと比較して大きくなり、拘束水量は少なくなる傾向を示した。また、各結合材のタッピング充填率を表-5に併記するとともに、タッピング充填率と拘束水量との関係を図-14、振動フローとの関係を図-15に示す。結合材のタッピング充填率の増加に伴い振動フローは増加し、拘束水量は減少する傾向を示した。また、SP添加率が高いと拘束水量は大きく低減されるが、振動フローには明確な効果は認められず、むしろ小さくなる傾向が見られた。これによりSPの添加率の調整のみでは目標とする性状は得られないことがわかった。

d) 実験Ⅱのまとめ

本実験の結果、結合材のタッピング充填率の増加に伴い拘束水量は減少し、振動フローは増加することが明らかとなり、セメントにブレン値が7000cm²/g程度の高炉スラグ微粉末およびブレン1000cm²/g程度の粗粉材料を組合わせた混合2の結合材が、振動

条件下におけるモルタルの流動性向上に最も効果的であることがわかった。

(4) 実験Ⅲ：最適な材料の組合せおよび粉体混合組成の選定

a) 目的

実験Ⅱの結果の中で、振動条件下のモルタルの流動性向上に最適な組成と選定された混合2の粉体をベースとして、セメントの一部を実験Ⅰで選定された最適粒子形状を持つ混和材料(フライアッシュ)で置換した時の振動条件下におけるモルタルの流動性への影響を確認し、その向上に効果的な最適材料および混合組成を選定した。

b) 実験概要

実験に使用した材料を以下に示す。これらは実験Ⅰ、Ⅱで使用したものと同じである。

①セメント

普通ポルトランドセメント(密度:3.15cm³/g, プレーン値:3530 cm²/g)

②細骨材

青梅産硬質砂岩系砕砂(比重:2.60, 粗粒率:2.60)

③混和材

高炉スラグ微粉末(比重:2.90, プレーン値:7020cm²/g, 平均粒径:4μm)

珪砂粉砕品A(比重:2.30, プレーン値:1060cm²/g, 平均粒径:71μm)

フライアッシュ(比重:2.21, プレーン値:2810cm²/g, 平均粒径:20μm)

④混和剤:高性能減水剤(β-ナフタリンスルホン酸塩系)

粉体の混合割合を表-8に示す。なお、フライアッシュはセメントの内割で置換し、その置換割合は容積で0,5,10,20および30%の5水準とした。

モルタルの配合条件は実験Ⅱと同様とし、SP添加率を粉体重量に対して1.2%とした。練混ぜ手順は実験Ⅰと同様とした。測定項目としては①拘束水量および②振動フローを実験Ⅰと同様の手順で、③粉体のタッピング充填率を実験Ⅱと同様の手順で測定した。

c) 実験結果

表-8に各粉体のタッピング充填率を併記した。また、図-16にフライアッシュ混和率と拘束水量との関係、図-17にフライアッシュ混和率と振動フローとの関係を示す。フライアッシュの混和率が多くなると、振動フローは微少であるが増加し、拘束水量は大幅に減少する傾向にあった。図-18にタッピング充填率と拘束水量との関係、図-19にタッピング充填率と振動フローとの関係を示す。フライアッシュ混和率の

表-8 粉体の混合割合

配合	全粉体容積に対する割合(%)				タッピング 充填率 (%)
	セメント	高炉 スラグ	フライ アッシュ	珪砂 粉砕品	
非置換	64	16	---	20	57.6
5%置換	59	16	5	20	58.2
10%置換	54	16	10	20	58.6
20%置換	44	16	20	20	59.9
30%置換	34	16	30	20	60.9

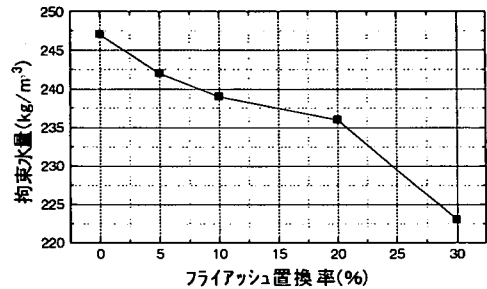


図-16 フライアッシュ置換率と拘束水量との関係

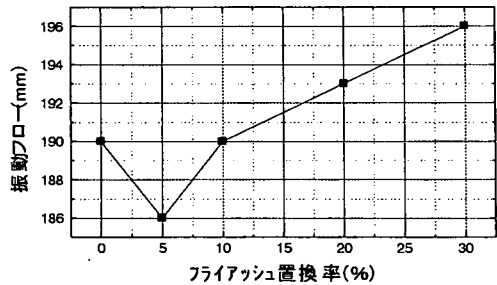


図-17 フライアッシュ置換率と振動フローとの関係

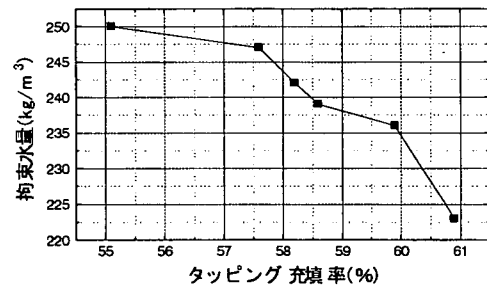


図-18 タッピング充填率と拘束水量の関係

増加に従いタッピング充填率は増加し、それに伴い振動フローは増加し、拘束水量は減少していることがわかった。

d) 実験Ⅲのまとめ

実験Ⅱにおいて選定された、振動条件下におけるモルタルの流動性に効果的な組成を持つ粉体構成(セメント, プレーン7000cm²/g程度の高炉スラグ, プレーン

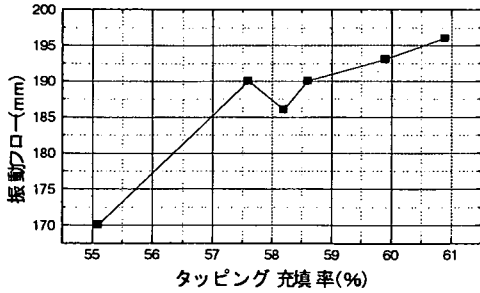


図-19 タッピング充填率と振動フローの関係

ン $1000\text{cm}^2/\text{g}$ 程度の粗粉材料を混合したものに、真円に近い粒子形状の混和材(フライアッシュ)を内割で混合することにより、なお一層の流動性向上が見込まれることが認められた。また、その傾向はフライアッシュの混和率の増加に伴い顕著であることがわかった。

(5) 実験Ⅳ:コンクリートによる確認実験

a) 目的

実験Ⅲにおいて、振動条件下におけるモルタルの流動性向上に効果的な最適材料の選定を行った。本実験は、その効果をコンクリートで評価することを目的とした。

b) 実験概要

実験に使用した材料を以下に示す。

①セメント:普通ポルトランドセメント(密度: $3.15/\text{cm}^3$, プレーン値: $3530\text{cm}^2/\text{g}$)

②細骨材:青梅産硬質砂岩系砕砂(比重:2.60, 粗粒率:2.60)

③粗骨材:青梅産硬質砂岩系砕石(比重:2.64, 粗粒率:7.02)

④混和材

高炉スラグ微粉末(比重:2.90, プレーン値: $7020\text{cm}^2/\text{g}$, 平均粒径: $4\mu\text{m}$)

珪砂粉砕品A(比重:2.30, プレーン値: $1060\text{cm}^2/\text{g}$, 平均粒径: $71\mu\text{m}$)

フライアッシュ(比重:2.21, プレーン値: $2810\text{cm}^2/\text{g}$, 平均粒径: $20\mu\text{m}$)

⑤混和剤:高性能減水剤(β -ナフタリンスルホン酸塩系)

粉体の構成は実験Ⅲ同様表-8に示すものとした。コンクリートの配合条件は、表-2を基に単位粉体容積 $127\text{リットル}/\text{m}^3$ 、細骨材率60%とした。

コンクリートの練混ぜは容量 10リットル のオムニミキサを用い、練り量は 8リットル とした。練混ぜ手順を図-20に示す。

次に測定項目を以下に示す。

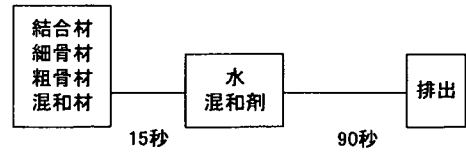


図-20 練混ぜ手順

①コンクリートの拘束水比

モルタルによる実験と同様に、JIS A 1101に準じた方法で求めたスランブ値が 0cm となる水量を拘束水量として求めた。求め方は、4水準の水量におけるコンクリートのスランブ値の結果より、最小二乗法で水量とスランブとの関係を示す近似式を求め、その式よりスランブが 0cm となる水量を算出したものである。

②振動スランブ

前述した振動フロー試験機を用い、スランブ 0cm のコンクリートに周波数 50Hz (6000rpm)、振動時間 5秒間 の条件で振動を加え、振動停止後のスランブ値を振動スランブとし測定した。なお、振動時間が 5秒間 と短い理由は、即時脱型コンクリート製品の生産性の面で振動締め固めにかかる時間は制限されるためであり、ヒヤリングで求めた平均的な時間として 5秒間 としたものである。また、周波数を 50Hz としたのは実際のコンクリート製品工場での条件に、より近いものとするためである。

③振動後の充填率

スランブ 0cm のコンクリートを、テーブルパイプレータ上に設置した寸法 $\phi 15\text{cm} \times 30\text{cm}$ の円柱型枠に振動数 50Hz の振動を加えながら打込み、振動停止後のコンクリートの充填率を測定した。充填率の測定方法は、実際に型枠に打込んだコンクリートの重量および容積を測定することにより得られる単位容積重量を示方配合から得られる単位容積重量の理論値で除することにより充填率を算出した。

c) 実験結果

図-21にフライアッシュ混和率と振動スランブとの関係、図-22にフライアッシュ混和率とコンクリートの充填率との関係を示す。フライアッシュ混和率の増加に伴い、振動スランブおよび充填率は増加する傾向にある。コンクリートの拘束水量は、いずれの混合割合においても $135\text{kg}/\text{m}^3$ と同値となり、差は認められなかった。なお、別途行った結合材がセメントのみの場合は、振動スランブは 2.5cm 、振動後のコンクリートの充填率は 92.0% であったことから、それと比較して本実験で使用した各混合粉体の場合は、コンクリートの振動スランブおよび振動後の充填率は大きいものとなり、その傾向はフライアッシュ混

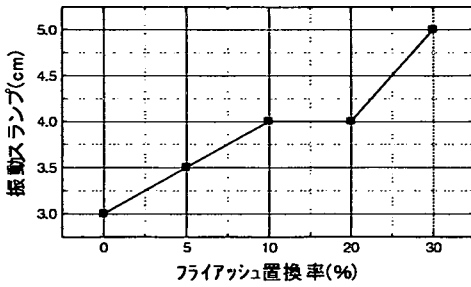


図-21 フライアッシュ混和率と振動スランプとの関係

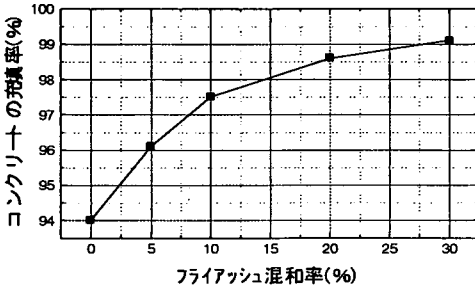


図-22 フライアッシュ混和率と充填率との関係

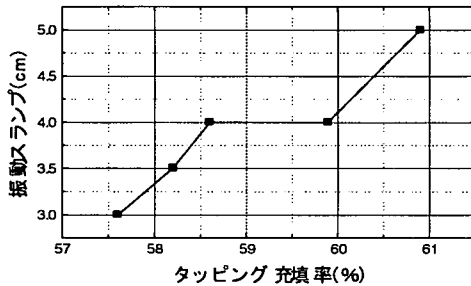


図-23 タッピング充填率と振動スランプとの関係

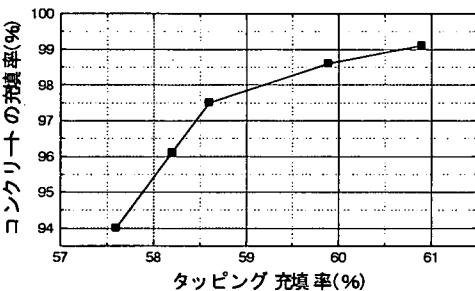


図-24 タッピング充填率とコンクリート充填率との関係

和率が大きくなるほど顕著となった。

次に図-23にタッピング充填率と振動スランプとの関係、図-24にタッピング充填率とコンクリートの充填率との関係を示す。モルタル実験と同様、結合材のタッピング充填率の増加に伴い振動スランプおよび振動後のコンクリートの充填率が増加した。

d) 実験Ⅳのまとめ

本実験で使用した結合材のいずれを用いた場合でも、結合材としてセメントのみを使用した場合と比較して、振動条件下におけるコンクリートの流動性は向上する傾向を示し、その傾向はフライアッシュの混和率の増加に伴い顕著となり、コンクリートにおいてもモルタルによる評価結果と同様となった。

(6) 2章のまとめ

モルタル実験により、粒子形状が真球に近い混和材を混和すること、またセメントにブレン7000cm²/g程度の高炉スラグ微粉末およびブレン1000cm²/g程度の珪石粗粉を組合せた結合材を使用することが振動条件下におけるモルタルの流動性向上に効果的であった。さらに、セメント、高炉スラグ微粉末および珪石粗粉から成る結合材中のセメントの一部を、真球に近い粒子形状を持つフライアッシュで置換することによりさらに流動性向上が見込まれ、コンクリートによる実験においてもその効果を確認することができた。

3. 締固め時の振動条件がコンクリートの諸性状に及ぼす影響

(1) 3章の概要

本章は、振動締固め時の諸条件(加速度、振動数、遠心力および振動時間)がコンクリートの諸性状(即脱による変形率、充填性および表面仕上り性)に及ぼす影響について検討を行った結果について報告する。なお使用する結合材は、セメント単味および2章で選定された最適結合構成を有する粉体の2種類とした。

(2) 実験概要

実験に使用した材料を以下に示す。

①セメント

普通ポルトランドセメント(密度:3.15cm³/g, ブレン値:3530cm²/g, 平均粒径:13μm)

②混和材

高炉スラグ(比重:2.90, ブレン値:7020cm²/g, 平均粒径:4μm)

フライアッシュ(比重:2.21, ブレン値:2810cm²/g, 平均粒径:20μm)

珪砂粉砕品(比重:2.30, ブレン値:1060cm²/g, 平均粒径:71μm)

③細骨材:青梅産硬質砂岩系砕砂(比重:2.60, 吸水率:1.55%, 粗粒率:2.60)

表-9 結合材の混合

全粉体容積に対する混合割合(%)			
セメント	高炉スラグ	フライッシュ	珪砂粉砕品
100	---	---	---
34	16	30	20

表-10 コンクリートの基本配合

練上りスランプ (cm)	細骨材率 (%)	結合材の容積 (リットル/m ³)
0.5	50.0	111.1

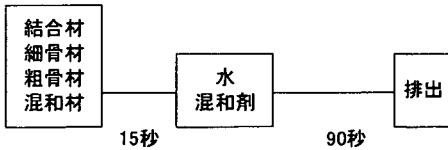


図-25 練混ぜ手順

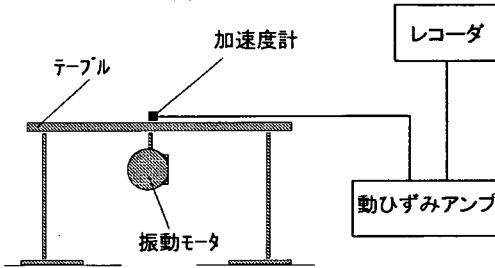


図-26 測定機器

表-11 振動条件

モーターの 振り子角度 (°)	振動数 (Hz)	振動テーブル 上の加速度 (G)	締固め 仕事量 (J)	振動 時間 (秒)
45	120	4.9	0.2	17
	130	7.1		8
	160	23.3		1
	170	25.2		1
67.5	120	3.4		35
	130	5.0		17
	160	17.7		2
	170	22.8		1
135	120	2.3		74
	130	2.3		80
	160	6.7		12
	170	5.7		17

④粗骨材:青梅産硬質砂岩系砕石(比重:2.64,粗粒率:7.02)

⑤混和剤:高性能減水剤(β-ナフタリンスルホン酸塩系)

粉体の混合比を表-9に、コンクリートの配合条件を表-10に示す。この実験においては細骨材率を50%としているが、これは表面仕上り性が重要視されるコンクリートブロックにおける一般的な配合条件から決められたものである。コンクリートの練混ぜは、

パン型強制練りミキサ(容量50リットル)を用い、練り量は20リットルとした。練混ぜ手順を図-25に示す。

実験に先立ち、まず振動テーブルの発生する振動特性の把握を行った。これは振動モーターの振り子角度および周波数を変化させ、振動テーブル上の加速度がどう変化するかを測定したものである。図-26に測定装置を示す。

次に振動締固め時の振動条件(振動時間、周波数および加速度)が、コンクリートの諸特性(充填率、表面仕上り性および即脱による変形率)に及ぼす影響について検討を行った。なお、振動特性把握試験結果をもとに、締固め仕事量がコンクリート1リットル当り0.2 Jで一定となるよう、周波数、加速度および振動条件は表-11に示す12水準とした。

なお、締固め仕事量Eは、次式で表される⁴⁾。

$$E = \frac{m \cdot t \cdot (\alpha_{\max})^2}{f \cdot (2\pi)^2}$$

ここで、

E : 時間tにおける締固め仕事量(J)

m : コンクリートの単位体積重量(kg)

t : 振動時間(秒)

α_{\max} : 最大加速度(m/s²)

f : 振動数(1/s)

振動による締固めを行う場合、どのような状態の振動がコンクリートに加えられたかを正確に測定することは非常に困難である。すなわち締固めに用いられた振動モーターの周波数、加速度等の振動特性値を把握していたとしても形枠に取り付けられた状態ではその特性値は変化し、また形枠にコンクリートが流し込まれた時点より、振動締固めが進むにつれてコンクリートの充填状態が変化し、それに伴っても振動特性値は変化する。更には、減衰等の影響でコンクリートの位置によっても加えられる振動特性値は変化する。したがって、どの振動特性をもってコンクリートに加えられたものとするかの判断は非常に難しいが、本報告においては把握可能な振動特性値の中で、より実際にコンクリートに加えらる値に近いものとして、予め把握した振動テーブルの発生する振動特性を用い、表-11の組合せを条件とした。

各条件で締固められたコンクリートについて、以下の項目について測定を行った。

①即時脱型による変形率

即脱後の変形量は図-27に示す試験装置を用いて測定した。方法は、型枠に一定量のコンクリートを打

込み、振動テーブルで3分間振動を加えて十分に締固め、試験装置にセットする。脱型前に装置の上板からノギスを挿入し、供試体上面までの距離を9ヶ所について測定を行った。その後、型枠を静かに取り外し、同様に供試体上面までの距離を測定した。これら両者の値から以下の式により即脱による変形率を算出した。

$$\text{変形率} = \frac{\left(\text{脱型後の供試体上面までの距離} \right) - \left(\text{脱型前の供試体上面までの距離} \right)}{\text{脱型前の供試体上面までの距離}}$$

②充填率

変形率を測定した後、供試体の単位容積重量を測定し、その値を示方配合より算出した理論上の単位体積重量で除して充填率を求めた。

③表面仕上り性

振動を加えた後のコンクリート表面について、硬化後にレーザ変位計を用いその凹凸度を測定し、表面仕上り性を評価した。測定方法の詳細を以下に示す。

図-28に示す装置を用いて、コンクリート表面の空隙深さおよび表面空隙率(供試体の測定線上に気泡が占める割合)はレーザ変位計にて測定した。供試体はφ15×30cmとし、測定位置は任意の4線とし、その平均値を評価に用いた。

得られた値は重回帰分析により解析を行い、即時脱型後の表面仕上り性に影響を与える主要因を検出した。

(3)実験結果

図-29に振動テーブル上の周波数と加速度との関係を示す。周波数および振り子角度が大きくなるほど、振動テーブル上の加速度は増加し、130~160Hzの範囲内においては共振する傾向にあった。

次に振動条件がコンクリートの諸性状に及ぼす影響について検討した結果について説明する。まず、結合材がセメントのみの場合の測定結果を表-12に示す。また、粉体構成を2章で得られた最適条件とした場合の測定結果を表-13示す。

これらの測定値を用いて、説明変数を振動条件(周波数、加速度および振動時間の3因子)、目的変数をコンクリートの諸性状(即脱による変形率、充填率および表面仕上り性の3項目)とした重回帰分析を行うことにより、それら要因が及ぼす影響について検討を行った。

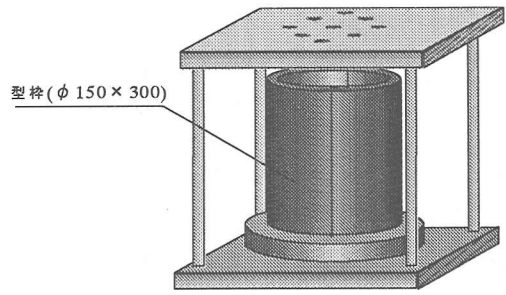


図-27 即脱による変形量測定装置

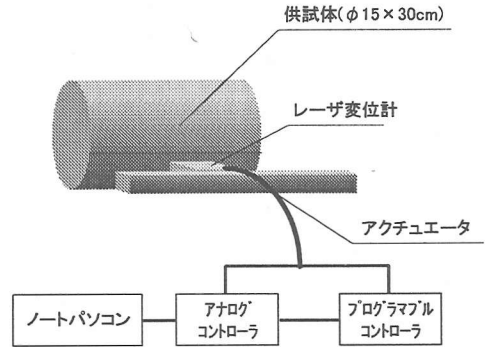


図-28 表面仕上り性評価装置

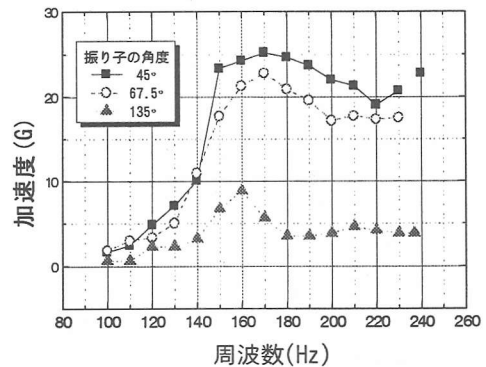


図-29 振動テーブル上の周波数と加速度との関係

表-12 測定結果(粉体がセメントのみ)

締固め時の振動条件 周波数	即脱による		充填率	表面仕上り性		
	加速度	振動時間		空隙深さ	空隙率	
(Hz)	(G)	(sec)	(%)	(%)	(mm)	(%)
120	4.9	17	1.7	97.0	3.740	5.859
	3.4	35	2.1	97.9	3.168	12.878
	2.3	74	0.9	96.0	2.951	19.134
130	7.1	8	2.0	97.2	3.119	11.398
	5.0	17	2.0	96.9	3.949	14.435
	2.3	80	0.7	95.6	3.610	25.421
160	23.3	1	0.6	94.9	2.157	15.532
	17.7	2	0.4	96.4	2.528	15.430
	6.7	12	0.3	93.5	2.530	23.987
170	25.2	1	1.4	94.7	2.865	29.724
	22.8	1	0.0	92.5	3.230	38.208
	5.7	17	0.3	93.6	2.971	26.757

表-13 測定結果(粉体構成が最適条件の場合)

周波数	締固め時の振動条件		即脱による 変形率 (%)	充填率 (%)	表面仕上り性	
	加速度 (G)	振動 時間 (sec)			空隙 深さ (mm)	空隙率 (%)
120	4.9	17	3.5	98.1	2.984	32.989
	3.4	35	2.6	97.9	1.994	14.620
	2.3	74	3.1	97.4	1.957	9.552
130	7.1	8	9.0	92.3	2.238	16.449
	5.0	17	1.4	98.7	2.078	21.515
	2.3	80	2.4	97.5	2.354	25.482
160	23.3	1	2.9	98.2	1.353	14.252
	17.7	2	2.6	98.0	3.518	31.311
	6.7	12	2.6	97.5	2.978	16.388
170	25.2	1	3.2	98.3	2.042	23.743
	22.8	1	2.7	96.9	3.619	40.100
	5.7	17	2.6	97.2	3.303	18.066

a) 即脱による変形率

表-14に分析結果を示す。粉体構成がセメント単味、最適材料のいずれの場合でも、周波数および振動時間の標準偏回帰係数が大きくなっており、即脱による変形率への影響は大きいことがわかった。また、周波数が高くなるほど、加速度が小さくなるほど、振動時間が長くなるほど即脱による変形率は小さくなる傾向にあることがわかった。

b) 充填率

表-15に分析結果を示す。結合材がセメント単身の場合、充填率に影響を与える主要因は周波数であることがわかったが、最適結合材の場合については3因子とも充填率への影響度はほとんど同程度であった。また、結合材がセメント単身である場合は、周波数が低くなるほど、加速度が大きいほど、振動時間が短いほどコンクリートの充填率は高くなる傾向にあることがわかった。最適材料を用いた場合については、周波数が高いほど、加速度が大きいほど、振動時間が長いほどコンクリートの充填率は高くなる傾向にあることがわかった。

c) 表面仕上り性

表-16に分析結果を示す。コンクリート表面の空隙深さに影響する主要因として、セメント単身の場合は周波数、最適材料の場合は周波数および加速度が挙げられた。また、表面空隙率に影響を与える主要因として、セメントのみの場合は周波数および振動時間、最適材料の場合は加速度が挙げられた。セメント単味および最適材料とも周波数が高くなるほど、加速度が小さくなるほど、振動時間が短いほど空隙が深くなる傾向が認められた。表面空隙率については、用いた粉体組成により傾向が異なった。

(4) 3章のまとめ

本章における実験の結果、以下のことが明らかとなった。

①コンクリートの振動条件の中で、即脱による変形性に影響を及ぼす要因は、周波数および振動時間である。

②コンクリートの振動条件の中で、充填性に影響を及ぼす要因は、粉体構成がセメント単味の場合においては周波数であるが、2章で得られた最適材料の場合については3因子とも影響度は同程度であった。

③空隙深さに影響する主要因として、粉体構成がセメント単味の場合は加速度、最適材料の場合は周波数および加速度が挙げられた。また、表面空隙率に影響を与える主要因として、セメント単味の場合は周波数、最適材料の場合は加速度が挙げられた。

表-14 重回帰分析結果(即脱による変形率)

要因	即脱による変形率(%)			
	セメントのみ		最適材料	
	偏回帰 係数	標準 偏回帰係数	偏回帰 係数	標準 偏回帰係数
周波数	-0.040	-1.112	-0.043	-0.485
加速度	0.007	0.080	0.000	0.002
振動時間	0.016	-0.578	-0.032	-0.464
定数	7.047	---	10.092	---

表-15 重回帰分析結果(充填率)

要因	充填率(%)			
	セメントのみ		最適材料	
	偏回帰 係数	標準 偏回帰係数	偏回帰 係数	標準 偏回帰係数
周波数	-0.090	-1.147	0.011	0.147
加速度	0.030	0.156	0.050	0.266
振動時間	-0.022	-0.353	0.021	0.341
定数	108.766	---	94.711	---

表-16 重回帰分析結果(表面仕上り性)

要因	空隙深さ			
	セメントのみ		最適材料	
	偏回帰 係数	標準 偏回帰係数	偏回帰 係数	標準 偏回帰係数
周波数	0.003	0.119	0.025	0.757
加速度	-0.057	-0.755	-0.053	-0.651
振動時間	-0.004	-0.169	-0.006	-0.218
定数	3.300	---	-0.470	---
要因	表面空隙			
	セメントのみ		最適材料	
	偏回帰 係数	標準 偏回帰係数	偏回帰 係数	標準 偏回帰係数
周波数	0.426	0.994	-0.021	-0.050
加速度	0.072	0.064	0.345	0.341
振動時間	0.219	0.683	-0.041	-0.127
定数	-47.650	---	22.353	---

以上から、コンクリートの表面仕上りに影響する要因として、加速度が非常に重要であることがわかった。

4. 結論

即時脱型製品等に用いられている超超硬練りコンクリートは、流動性が極めて悪く、即時脱型後に表面仕上り性や充填性等に問題が生じやすい。そこで超超硬練りコンクリートが振動条件下においては高い流動性を有する材料、配合および振動条件を得ることを目的とした実験を行った。その結果、以下のことがわかった。

(1)フライアッシュを混和した結合材を用いたモルタルおよびコンクリートは、セメントのみを使用した場合と比較して、拘束水量は少なく、振動フローは大きくなる。

(2)混和材粒子の円度が高くなる(粒子が円に近づく)に伴い、振動フローは大きくなり、拘束水量は少なくなる傾向を示す。

(3) 結合材のタッピング充填率の増加に伴い拘束水量は減少し、振動フローは増加する。

(4)セメントにブレン値が7000cm²/g程度の微粉末およびブレン1000cm²/g程度の粗粉材料を組み合わせ

ることが条件下におけるモルタルおよびコンクリートの流動性向上に効果的である。

(5)コンクリートの振動条件の中で、即脱による変形性に影響を及ぼす要因は、周波数および振動時間であり、充填性に影響を及ぼす要因は、主として周波数である。

(6)コンクリートの表面仕上りに影響する要因として、加速度が非常に重要である。

参考文献

- 1) 小島明, 堂園昭人, 藤原浩巳, 富田六郎:各種混和材を用いた硬練りモルタルの振動条件下における流動性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.433~438, 1997.6.
- 2) (社)日本粉体工業技術協会, 粉体工学会:粉体物性図説, 日経技術図書, pp.195-299, 1985.12.
- 3) 岡村甫, 前川宏一, 小澤一雅:ハイパフォーマンスコンクリート, 技報堂出版, pp.172-176, 1993.9.
- 4) 国府勝郎, 上野 敦:締固め仕事量の評価に基づく超超硬練りコンクリートの配合設計, 土木学会論文集, No.532/V-30, pp.109~118, 1996.2.

(2001.2.8 受付)

STUDY ON WORKABILITY OF EXTREMELY STIFF CONSISTENCY CONCRETE USING SOME KINDS OF ADMIXTURES

Hiromi FUJIWARA, Masanori MARUOKA, Yoshihide SHIMOYAMA,
Akira OBATAKE and Katuru KOKUBU

This study aims to improve workability of extremely stiff consistency concrete by using some kinds of admixtures and by arranging vibrating conditions (frequency, vibration period and acceleration).

As the results of this study, it was found that flowability of the concrete under vibrating is improved by using fly ash that has spherical particles and by making the range of particle size distribution wider than that of cement. And it was made clear the relationship between workability of the concrete and the vibrating conditions.