

最適含水比近傍で練り混ぜたフライアッシュセメント混合物の振動締固め特性に関する研究

福留和人¹・長瀧重義²・坂本守³・鈴木達雄⁴・喜多達夫⁵

¹正会員 株式会社間組 技術研究所 (〒305-0822 茨城県つくば市苅間字西向515-1)

²フェロー会員 工博 新潟大学教授 工学部建設学科 (〒950-2181 新潟県新潟市五十嵐2の町8050番地)

³正会員 工修 株式会社間組 土木本部 技術設計部 (〒107-8658 東京都港区北青山2-5-8)

⁴フェロー会員 工博 株式会社間組 土木本部 港湾海洋統括部 (〒107-8658 東京都港区北青山2-5-8)

⁵フェロー会員 工修 株式会社間組 技術研究所 (〒305-0822 茨城県つくば市苅間字西向515-1)

最適含水比+0~5%程度の低水粉体比で練り混ぜたセメントフライアッシュ混合物に振動を与えると湿気のある粉体から流体状に性状が変化し、締固めが可能となる。本研究では、振動条件、配合、使用材料が振動締固め性状に及ぼす影響を調査し、振動による流体化現象、締固め特性について検討を加えた。

その結果、振動による流体化現象を利用することによって粉体を密に充填できることを明らかとした。また、水粉体混合物の振動による流体化現象は、振動加速度の大きさに影響を受けること、締固めの進行は、振動エネルギーによって評価可能であることがわかった。

Key Words : optimum water content, fly-ash, fly-ash-cement mixtures, fluidized phenomenon, vibrating compactability, vibrating acceleration, vibrating energy

1. はじめに

近年の電力需要の増加に伴い発電所の建設が促進されているが、石油燃料の大量消費の抑制および原子力発電所の建設用地の確保難等から、石炭火力発電所が見直されている。このような状況から、今後石炭火力発電所の建設が増加し、それに伴って石炭灰の発生量が大幅に増加することが予想されている。現在、石炭灰は、セメント原料、コンクリート用混和材、その他で有効利用されているが、依然として浅海域における埋立て処分比率が高いのが現状である。石炭灰の発生量が増加する中で、浅海域の環境保全の観点からも石炭灰の有効利用の拡大が重要な課題となっている。

著者らは、石炭灰の有効利用の開発の一環として、フライアッシュの原粉を多量に用いた硬化体の製造方法を開発し^{1),2)}、これまで主として海洋構造物(人工魚礁や漁場開発を目的とした人工海底山脈のブロックの製造等)への適用を検討してきた。その結果、1992年には水産庁の沿岸漁場整備開発事業施設設計指針に石炭灰コンクリートとして記載されるに至った³⁾。この製造方法を基本として、さらに経済性および品質の向上を目的に検討を進めた結果、新しい

有効な製造方法を提案するに至った。提案する製造方法は、セメントおよびフライアッシュを最適含水比に近い低水粉体比で練り混ぜ、振動の作用で流体化させて締固めを行うことが特徴である^{4),5),6)}。すなわち、最適含水比に近い低水粉体比で練り混ぜると、練り直後は、湿気のある粉体の状態であるが、振動を与えると流体状に性状が変化し、締固めが可能となることを利用している。この現象を利用すれば、フライアッシュを多量に用いた硬化体の製造において、単位水量、セメント量および水粉体比を大幅に低減でき、経済的に品質の高い硬化体の製造が可能となる。この締固め方法は、余剰水の極めて少ない状態で水粉体混合物を密に締固めることが可能であるという点で効果的であり、今後有効な締固め技術に発展する可能性を秘めていると言える。しかしながら、提案する締固め方法は、従来のセメント・コンクリート分野では、採用されておらず、振動による流体化現象、振動による締固め特性については、不明な点が多い。

本研究では、品質の異なる10種類のフライアッシュを用いて、配合条件および振動条件が締固め性状に及ぼす影響を調べ、振動による流体化特性、締固め特性について考察を加えた⁷⁾。

2. 水粉体混合物の振動による流体化現象および振動による液化化現象との相違

(1) 水粉体混合物の振動による流体化現象

セメントおよびフライアッシュの混合粉体を最適含水比+0~5%程度の低水粉体比で練り混ぜると、写真-1のような湿気のある粉体となる。練上り直後は、ばさばさの硬練りの状態であり、流動性は全くない。ここで、最適含水比とは、突固めによる土の締固め試験方法（JIS A 1201-1979）に準じて締め固めたときに乾燥密度が最大となる、すなわち、粉体粒子が最も密に充填される水粉体比である。このような状態の混合物を振動台に固定した型枠内に投入し、振動締固めを行うと数分後には、写真-2に示すように流体状に性状が変化し締固めが可能となる。ここで、振動条件は、振動数50~70Hz程度、振幅は、1.0 mm程度（両振幅）である。



写真-1 練混ぜ直後の性状

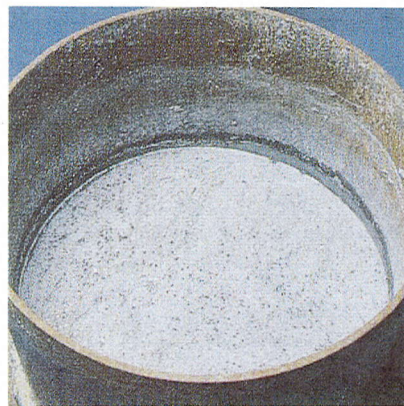


写真-2 流体化後の性状

(2) 液層の存在形態変化に基づく流体化現象の解釈

(1) に示した湿気のある粉体から流体状への性状変化は、粉体粒子間に存在する水の存在形態の変化によるものと考えられる。

水粉体混合物は、粉体粒子間の水の存在状態により、図-1に示す4つの存在状態に区分され、それぞれ、以下のように説明される⁸⁾。

a) ペンジュラー状態 (pendular state)

粒子の接触点でレンズあるいはリング状に存在し、液層は相互に連結関係がない。

b) ファニキュラー状態 (funicular state)

液体量の増加に伴って上記のリングが成長し、粒子の空隙で液層が互いに連結して網状組織をつくっており、空気がその間に点在している。

c) キャピラリー状態 (capillary state)

粒子間のすべての空隙が液体で満たされ粉体層の表面にのみ気液界面が存在する。

d) 浸せき状態 (immersed state)

粒子群が液層中に浸っていて、自由液面が存在する。

最適含水比+0~5%で練り混ぜた状態、すなわち、湿った粉体の状態では、液層は連続しておらず、上記の区分によればペンジュラー状態と考えられる。振動の作用により流体状に性状が変化した状態では、水が三次元的に連続した状態（ファニキュラー状態以降）と考えられる。このような、ペンジュラー状態からファニキュラー状態への変化は、水粉体混合物の電気伝導度（電気抵抗値、銅電極、電極間距離：400 mm）の変化を測定することによって理解することができる（図-2参照）。すなわち、水粉体比が

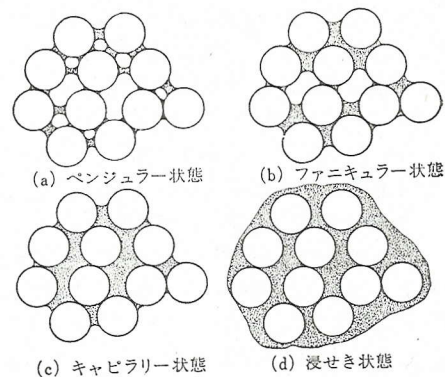


図-1 粒子間における液層の存在形態による区分⁸⁾

最適含水比より低く、性状変化が見られない配合では、電気抵抗値の変化はほとんど見られないが、最適含水比+2.5%の配合では、流体状に性状変化した時に（100秒程度）、電気抵抗値の大幅な低下が見られる。これは、流体化することによって液層が連続したことを示していると考えられる。

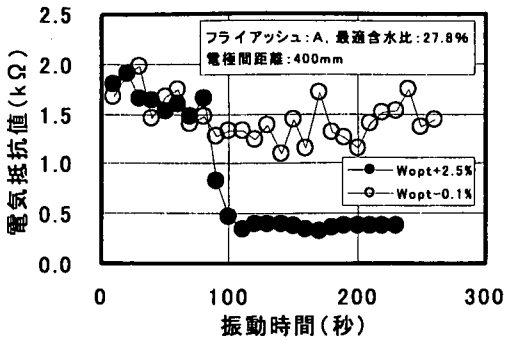


図-2 振動時間と電気抵抗値の関係

(3) 振動による液状化現象との相違

コンクリートに振動を与えると流動性が向上する現象は、従来から知られている性質であり、コンクリートの締固めに有効に利用されている。この現象は、コンクリート中のペーストあるいはモルタルが、振動の作用で液状化するためである。これは、飽和した砂地盤の振動による液状化現象と同様の機構によるものであり、固体粒子のかみ合いが振動の作用で低減することによる間隙水圧の上昇に起因すると説明される³⁾。液層の存在形態の変化の観点から見れば、ファニキュラー状態以降の変化と解釈される。すなわち、粉体間の空隙が水で飽和された状態における変化である。レオロジー学的には、振動による液状化現象は、流体としての性質の変化、すなわち、降伏値および塑性粘度の振動の作用による低下と説明される¹⁰⁾。

一方、2. (2) で述べたように振動による流体状への性状変化は、粉体粒子間の水の存在形態の変化、すなわち、固体から流体への性状変化を伴っていると考えられ、上記の振動による液状化現象と発生機構が異なると考えられる。以下、振動による液状化現象と区別するために、流体状への性状変化(現象)を流体化(現象)と呼ぶこととする。

3. 実験概要

(1) 概要

最適含水比付近で練り混ぜた水粉体混合物の振動による流体化現象および締固め特性を把握することを目的に以下に示す試験を実施した。

a) 突固めによる締固めとの比較試験

水の存在形態の変化は伴わないが、水粉体混合物の不飽和な状態からの締固めは、土の締固めにおいても行われている。そこで、水粉体比(質量比)を変化させて、振動による締固めおよび突固めによる締固め試験を行い、締固め特性(水粉体比と乾燥密

度の関係)の比較を行った。

b) 振動締固め後の気泡組織の把握試験

振動による締固めの進行を評価するために、締固め後の気泡の存在形態を調べた。すなわち、振動時間および水粉体比を変化させて締め固めた硬化体の硬化後の気泡組織の測定を行った

c) 振動条件が締固め特性に及ぼす影響の把握試験

振動条件が流体化特性、締固め特性に及ぼす影響を調べるために、振動数および振動時間を変化させて振動締固め試験を行った。

(2) 使用材料および配合条件

試験に使用したフライアッシュの品質を表-1に示す。使用したフライアッシュは、10カ所の火力発電所から採取した10種類のフライアッシュ原粉であり、一部のフライアッシュは、JIS A 6201-1996の規定に適合しない。ここで、締固め後の気泡組織の把握試験および振動条件が締固め特性に及ぼす影響の把握試験では、10種類の中から、平均的な最適含水比を持つフライアッシュOを選定して試験を行った。

セメントは、普通ポルトランドセメントを用い(密度: 3.16 g/cm^3 , 比表面積: $3,280 \text{ cm}^2/\text{g}$)、硬化促進剤には、食塩(NaCl, 並塩)を用いた。セメント添加率(C/(C+F), 質量比)は、15%と一定とし、硬化促進剤の添加率は、単位水量に対して3.3wt%と一定とした。セメント添加率15%は、材齢28日において 20 N/mm^2 程度の圧縮強度を得るための平均的な添加率である^{4),5),6)}。また、硬化促進剤の添加率は、海水による練混ぜを想定して設定した。ここに、CおよびFは、それぞれ単位セメント量および単位フライアッシュ量(kg/m^3)を示す。

(3) 練混ぜ方法

容量5リットルのモルタルミキサを用い、低速で30秒、高速で150秒、計180秒間練り混ぜた。硬化促進剤は、あらかじめ水に溶解した。

(4) 試験項目および試験方法

a) 突固めによる締固め試験

突固めによる土の締固め試験方法(JIS A 1210-1979)に準じて突固めによる締固めを行った。試験に用いた型枠は、内径100mm、容積1,000mlであり、直径5cm、質量2.5kgのランマーを30cmの高さから3層各25回落下させて締め固めた。締固め後、試料の質量を測定し、示方配合から乾燥密度を算定した。

b) 振動締固め試験

突固めによる締固めと同様の型枠を大型VC試験装置の振動台に固定し、振動による締固めを行った。

表-1 フライアッシュの品質

フライアッシュ	密度 (g/cm ³)	ブレーン比表面積 (cm ² /g)	最適含水比*) (%)	化学成分(%)							
				強熱減量	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	TiO ₂
G	2.37	2,960	15.8	0.6	59.2	18.1	5.02	9.17	1.79	2.2	1.0
H	2.33	3,050	17.0	1.3	56.1	23.2	5.93	6.25	1.56	1.4	1.5
I	2.24	3,520	22.8	2.0	58.7	26.5	5.64	2.61	0.91	0.4	1.7
J	2.20	2,940	22.9	2.4	57.6	28.0	7.66	1.18	0.66	0.2	1.5
K	2.21	2,670	26.0	1.7	49.6	30.3	5.02	6.99	2.50	0.4	1.4
L	2.25	3,820	25.9	6.3	52.0	25.6	6.23	3.43	1.33	0.7	1.4
M	2.29	2,410	14.9	0.5	58.2	16.3	5.80	11.10	1.99	2.2	1.0
N	2.20	3,250	28.0	1.1	43.9	41.1	3.74	6.11	0.43	0.2	1.6
O	2.21	3,180	21.8	1.8	55.8	27.6	3.63	6.50	1.20	0.3	1.1
P	2.20	3,850	29.7	3.4	69.2	18.6	4.06	1.65	0.63	0.6	0.7

*) 突固め試験による。C/(C+F)=15%で混合したときの試験値。

振幅は、1.0 mm (両振幅) で一定とし、振動数および振動時間を変化させた。すなわち、突固めによる締固めとの比較試験では、振動数66.7Hz、振動時間5分とした。締固め後の気泡組織の把握試験では、振動数を66.7Hzと一定とし、振動時間を3、5、7および10分の4水準に変化させた。振動条件が締固め特性に及ぼす影響の把握試験では、振動数を33.3、50.0および66.7Hzの3水準、振動時間を3、5、7および10分の4水準に変化させて締固め試験を行った。ここで、試料は、一層で型枠に投入した。突固めによる締固め試験と同様、締固め後の試料の質量および示方配合から乾燥密度を算定した。

なお、湿気のある粉体から流体状に性状が変化する状況を目視観察し、振動開始から流体化するまでの時間 (以下、流体化時間と呼ぶ) を測定した。

c) 硬化後の気泡組織の測定方法

硬化後、リニアトラバース法 (ASTM C 457 に準拠) により気泡組織を測定した。測定面は、高さ方向の気泡組織の差異を除くために鉛直に切断した面とした。測定面は、100×100mmとし、トラバース長は、1,425mmとした。

4. 実験結果および考察

(1) 突固めと振動締固めの比較

図-3および図-4にそれぞれ突固めおよび振動により締め固めた場合の水粉体質量比 (以下、水粉体比と略) と乾燥密度の関係 (締固め曲線) を示す。

突固めによる締固めの場合、乾燥密度が最大となる水粉体比 (以下、最適含水比) を軸にほぼ左右対称に近い締固め曲線となっている。一方、振動締固めの場合も突固めと同様、最適含水比が存在する。

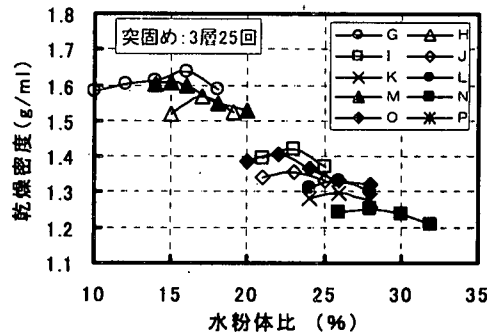


図-3 締固め曲線 (突固めによる締固め)

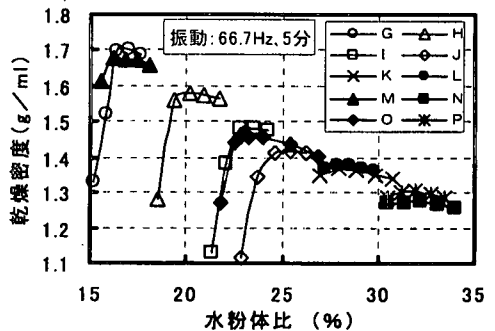


図-4 締固め曲線 (振動締固め)

しかし、突固めの場合と締固め曲線の形状が異なり、最適含水比より低水粉体比側では、ある値より水粉体比が小さくなると急激に乾燥密度が小さくなっている。このように低水粉体比側で乾燥密度が急激に小さくなっているのは、振動時間の間に流体化が生じない場合、あるいは生じても流体化後の時間が短

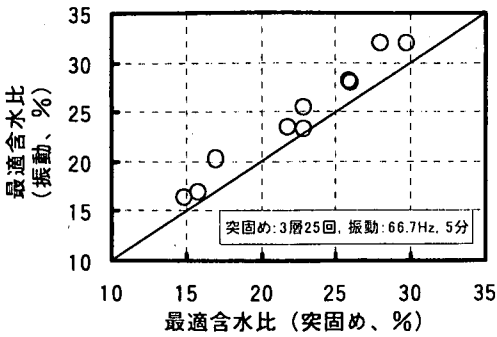


図-5 振動と突固めの最適含水比の比較

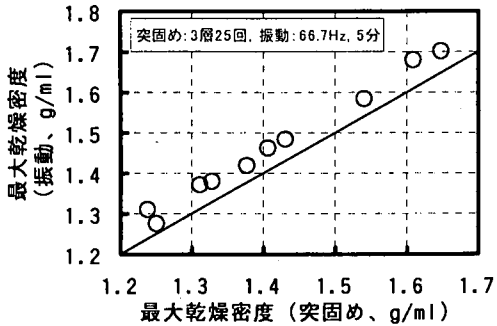


図-6 振動と突固めの最大乾燥密度の比較

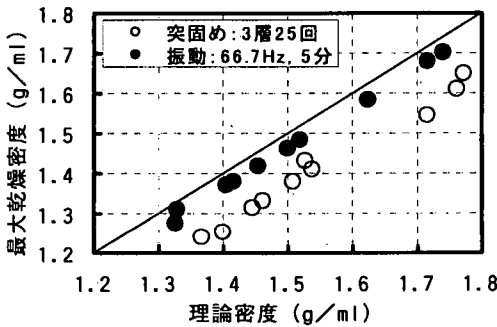


図-7 理論密度と最大乾燥密度の関係

い場合であり、振動締固めでは、流体化するか否かが締固めの程度に大きく影響する。

次に、これらの締固め曲線からフライアッシュ毎に最適含水比および最大乾燥密度を求め、締固め方法による差異を調べた。ここで、乾燥密度の最大値を含む3~4点の測定値を2次関数で回帰し、得られた回帰曲線のピーク位置および高さをそれぞれ最適含水比および最大乾燥密度とした。図-5および図-6にそれぞれの締固め方法における最適含水比および最大乾燥密度の比較結果を示す。最適含水比は、突固めより振動締固めの方が大きくなっているが、最

大乾燥密度は、振動締固めの方が大きくなっている。

以上のように振動締固めの方が最適含水比が高いにも拘わらず、最大乾燥密度が大きいことから、最大乾燥密度と理論密度（空隙を0と仮定したときの示方配合から決まる密度）の差も小さい（図-7参照）。2. (2) で述べたように水粉体混合物が流体的な性質を示すためには、粉体の空隙に水が3次的に連続して存在する必要があると思われる。そのため、流体化した状態では、粉体間の空隙容積に近い容積の水が存在していることになる。このことが振動により流体化させて締め固める場合の方が最適含水比が高くなる理由と考えられる。

振動による締固めの場合も、突固めによる締固めと同様¹¹⁾、振動による作用力で粉体粒子が密な状態へ配置変換することで締固めが進行するものと考えられる。したがって、含水比の多少による粒子間の相互作用の変化が締固め度に関与していると考えられる。ただし、締固め曲線、最適含水比と最大乾燥密度の関係、締固め後の空隙中の水の飽和度等において突固めによる締固めと差異が見られることから、振動および流体化により、粒子間の相互作用に何らかの変化が生じていることが予想される。現状では、振動が粒子間の相互作用に及ぼす影響については、不明な点が多い。これらの作用には、振動による水分子の集合体の変化、すなわち、水の物性の変化も関与している可能性もある¹²⁾。今後、実験による確認方法も含めた理論的な検討が必要である。

今回設定した締固めの条件では、突固めと振動締固めで締固めエネルギーに差があると考えられるため、最大乾燥密度の大小による単純な比較はできないが、振動により流体化させることは、粉体を密に締め固める上で有効であると言える。

(2) 流体化時間と締固め特性の関係

(1) で述べたように、振動締固めの場合、流体化するか否かが締固めの程度に大きく影響を与える。そこで、流体化するまでの時間を一つの指標ととらえ、水粉体比と流体化時間の関係および流体化時間が締固め特性に及ぼす影響を調べた。

図-8に、振動数 66.7Hz、振幅1mmで締め固めたときの水粉体比と流体化時間の関係を示す。また、流体化時間の測定値の変動を調べるために、最適含水比が平均的な値であるフライアッシュOを用いて水粉体比を変化させて2回（No.1, 2）、同一水粉体比で5回（No.1~5）の流体化時間の測定を行った。試験結果を図-9に示す。

水粉体比と流体化時間の関係は、フライアッシュの種類によって大きく異なるが、水粉体比と流体化

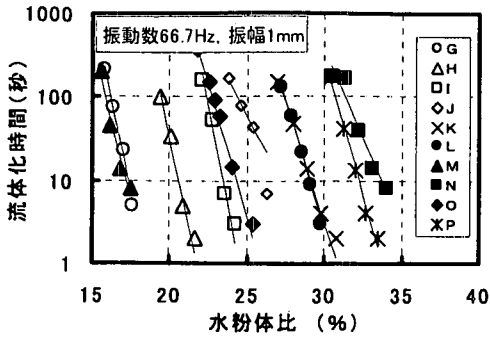


図-8 水粉体比と流体化時間の関係

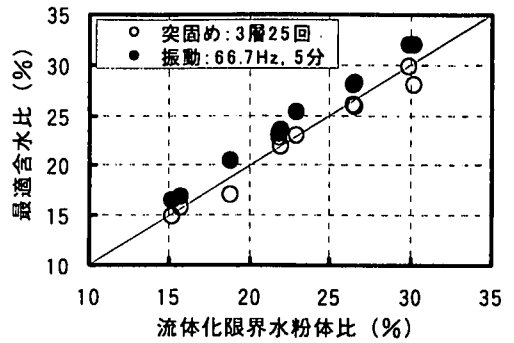


図-11 流体化限界水粉体比と最適含水比の関係

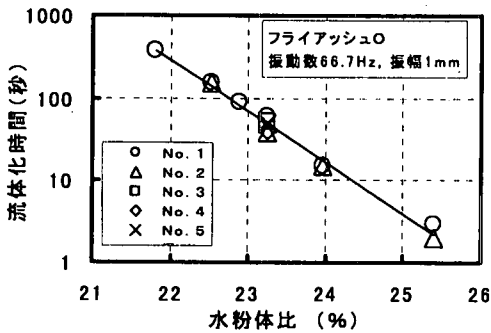


図-9 水粉体比と流体化時間の関係

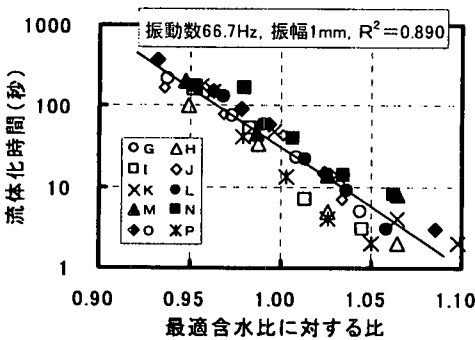


図-10 最適含水比に対する比と流体化時間の関係

時間の対数の関係は、全てのフライアッシュでほぼ線形関係にある。また、5回の試験値の変動係数は、17.0%であり、測定値のばらつきも比較的小さい。

以下、流体化時間と締め固め度の関係について検討を加えた。ここで、フライアッシュの品質の影響を除くために、水粉体比を最適含水比（振動時間5分）で除して無次元化した値（最適含水比に対する比と呼ぶ）と流体化時間の関係を調べた。図-10に最適含水比に対する比と流体化時間の関係を示す。

フライアッシュの種類によって最適含水比は、大きく異なることにも拘わらず、最適含水比に対する比と流体化時間の相関は高い ($R^2=0.890$)。最適

含水比および流体化時間の測定誤差等を考慮すれば、最適含水比に対する比と流体化時間の関係は、フライアッシュの種類にかかわらず一定にあると考えても良い。また、この図から、振動数66.7Hz、振幅1.0mm、振動時間5分の振動条件で締め固める場合、流体化時間は、20～50秒程度が適当であると理解することができる。

以上のように、フライアッシュの種類に拘わらず最適含水比に対する比と流体化時間の関係が一定であること、測定値のばらつきが比較的小さいことから、フライアッシュ硬化体の製造における品質管理試験として流体化時間を有効に利用できると言える。

(3) 流体化限界水粉体比と最適含水比の関係

一定の振動条件下（振動数および振幅）で締め固めた場合、水粉体比の低減とともに流体化時間が大きくなり、ある値以下になると流体化現象が生じなくなる。流体化が生じない限界の水粉体比を厳密に測定することは困難であるが、ここでは、製造上の効率性等を考慮して流体化時間が5分となる水粉体比を流体化限界水粉体比と定義し、水粉体比と流体化時間の対数が線形関係にあること（図-8参照）から各フライアッシュの流体化限界水粉体比を求めた。

図-11に流体化限界水粉体比と最適含水比の関係を示す。振動により締め固めた時の最適含水比と流体化限界水粉体比は、高い相関が見られる。最適含水比と流体化限界水粉体比の比は、1.05～1.08とフライアッシュの種類に拘わらずほぼ一定であり、流体化限界水粉体比から一定の比率で増加した水粉体比が最適含水比となっている。一方、突固めにより締め固めた時の最適含水比と流体化限界水粉体比は、ほぼ一致している。振動条件によって流体化限界水粉体比は異なると考えられること、また、突固めによる最適含水比は、突固めの条件（例えば、突固め回数）によって異なることから、これらの一致は、偶然と言え、物理的な必然性は不明である。

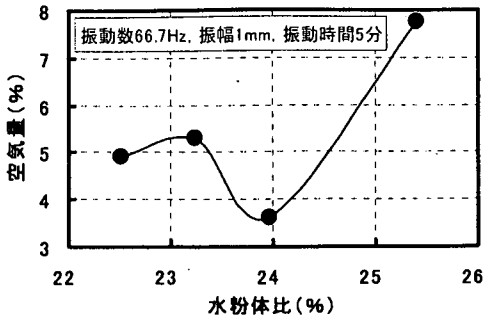


図-12 水粉体比と空気量 (100 μ m以上) の関係

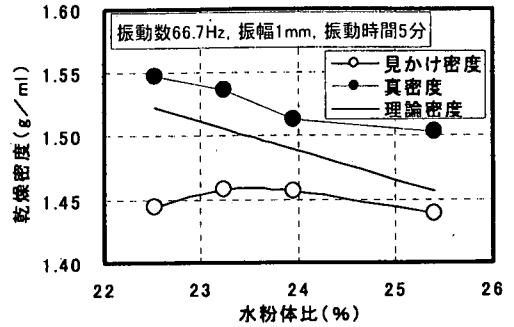


図-14 水粉体比と乾燥密度の関係

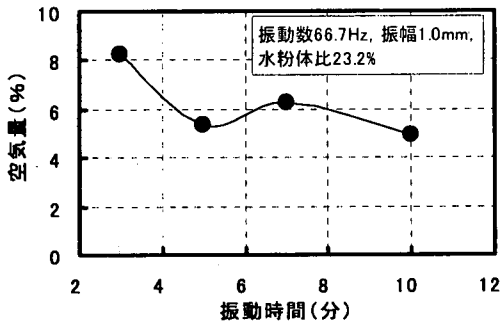


図-13 振動時間と空気量 (100 μ m以上) の関係

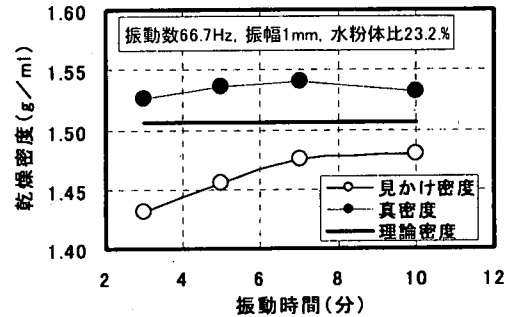


図-15 振動時間と乾燥密度の関係

(4) 振動により締め固めた硬化体の気泡組織

図-7に示すように、振動により締め固めたときの最大乾燥密度は、理論密度より若干小さいことから流体化後も空隙（気泡）が残存していることになる。これらの気泡には、粉体間に存在する微小気泡と粉体径より大きい過大気泡が考えられる。ここで、粉体間に存在する微小気泡は、フライアッシュの粒子径から数 μ m～数十 μ mと予想されるが、未反応フライアッシュの剥落跡との区別が難しく、測定誤差が大きいと考えられる。そこで、フライアッシュ粒子の最大径（100 μ m程度）を考慮して、気泡径100 μ m以上の気泡組織によって評価することとした。

図-12に水粉体比と空気量の関係を、図-13に振動時間と空気量の関係を示す。

締め固め試験で得られる乾燥密度は、これらの残存する過大な気泡を含めたマクロな密度であり、粉体の見かけの充填度を表していると考えられる。過大気泡を除いた硬化体部分の真の密度は、乾燥密度および過大気泡量から算定でき、示方配合から求まる理論密度と比較することによって微視的な粉体の充填度を評価できる。また、このことから締め固め直後の粉体間の水の存在形態も推察することができる。すなわち、締め固め直後は、粉体間に気泡が点在して

いるファニキュラー状態であるのか、粉体間の全ての空隙が水で満たされているキャピラリー状態であるのかを推察することができる。

そこで、乾燥密度および気泡量から硬化体の真の密度を算定し、水粉体比および振動時間との関係を調べた（図-14および図-15参照）なお、図中には、空隙を0と仮定したとき示方配合から求まる理論密度および乾燥密度の実測値（見かけ密度）を併せて示す。

真密度は、水粉体比が小さいほど大きく、振動時間に拘わらず一定の値となっている。また、いずれも理論密度より若干大きい値となっている。

以上のようなことから、流体化した時点で微視的な粉体の充填がほぼ終了した状態に達していること、すなわち、粉体間の空隙が水で飽和された状態となっていることがわかる。粉体間の水の存在形態による区分によれば、ファニキュラー状態を経てキャピラリー状態に達しているものと言える。

以上のことから、流体化後の締め固めの進行、すなわち、乾燥密度の増大は、粉体の微視的な充填度の向上（粉体間に存在する微小気泡の低減）によるものではなく、残存する過大気泡が外部に追い出されることによるものと考えられる。

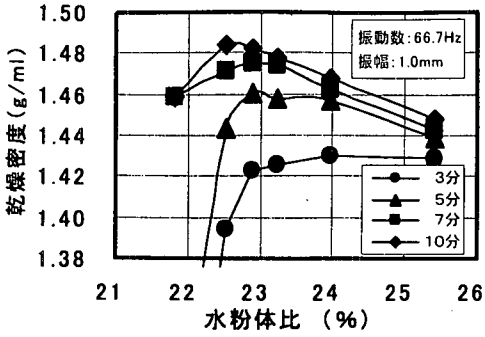


図-16 締固め曲線 (振動数66.7Hz)

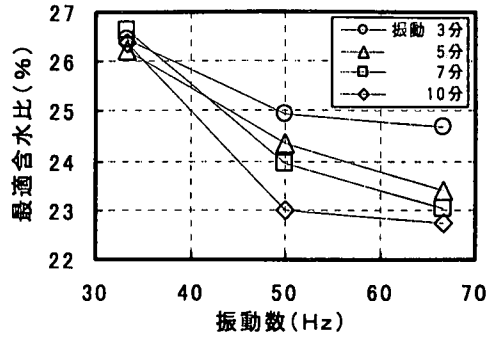


図-19 振動数と最適含水比の関係

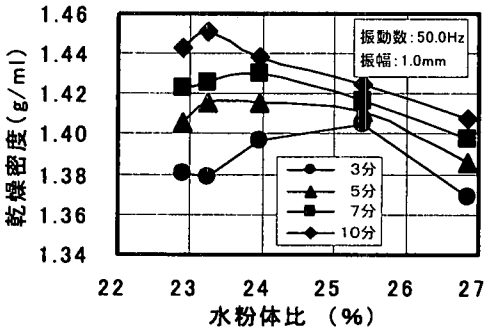


図-17 締固め曲線 (振動数50.0Hz)

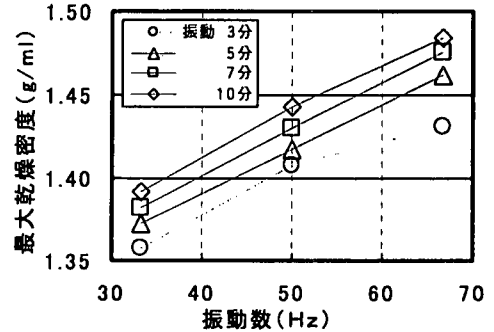


図-20 振動数と最大乾燥密度の関係

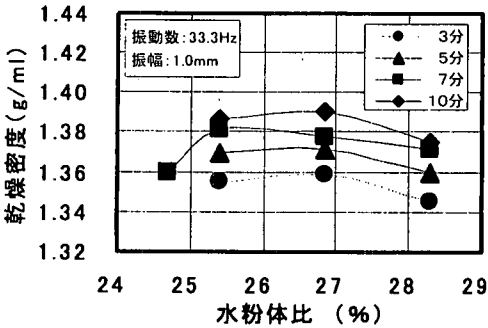


図-18 締固め曲線 (振動数33.3Hz)

(5) 振動条件が締固め特性に及ぼす影響

振動締固め特性は、与える振動条件すなわち振動による外力（振動加速度）および振動エネルギーの大きさに影響を受けることが予想される。そこで、10種類のフライアッシュの中から平均的な最適含水比を持つフライアッシュOを選定し、振動条件が締固め特性に及ぼす影響を調べた。振動数は、33.3、50.0および66.7Hzの3水準、振動時間は、3、5、7および10分の4水準とした。

図-16、図-17および図-18にそれぞれの振動条件における締固め曲線を示す。これらの締固め曲線か

ら最適含水比および最大乾燥密度を算定し、振動数および振動時間との関係を求めた。図-19に振動数と最適含水比の関係を、図-20に振動数と最大乾燥密度の関係を示す。

振動数の増加とともに最適含水比は低減し、それに伴って最大乾燥密度は、増加している。このことから、振動数の増加、すなわち振動による外力および振動エネルギーの増大とともに締固め度が向上することがわかる。一方、振動時間が最適含水比に及ぼす影響は、振動数によって異なっている。すなわち、振動数33.3Hzでは、振動時間による最適含水比の差は小さいが、振動数50.0および66.7Hzでは、振動時間を長くすることによって最適含水比は、大きく低減している。

以上のように、振動数によって振動時間が最適含水比に及ぼす影響が異なるのは、流体化現象が明確に現れる振動数であるかどうかによると考えられる。すなわち、図-16の振動数66.7Hzの締固め曲線に示すように、流体化限界水粉体比近傍（22%程度）では、乾燥密度は、流体化時間に対して振動時間が長いかどうかによって大きく異なる。そのため、流体化が明確に現れる振動数では、振動時間の延長によって締固め曲線は、左上方にシフトし、最大乾燥密度の増大とともに最適含水比も低減することになる。

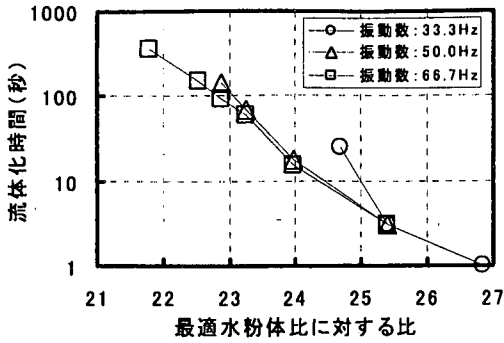


図-21 水粉体比と流体化時間の関係

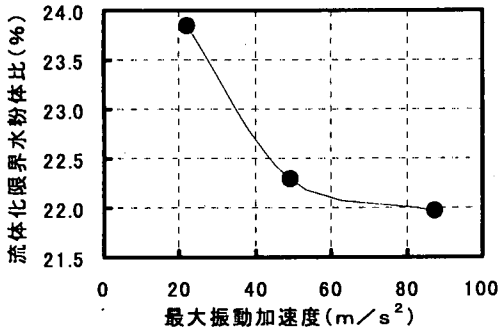


図-22 最大振動加速度と流体化限界水粉体比の関係

一方、図-21の水粉体比と流体化時間の対数の関係からわかるように、振動数33.3Hzでは、水粉体比の低減とともに流体化時間が急激に延長し、湿気の高い水粉体比(24%程度)においても流体化せず、写真-1および写真-2に示すような明確な流体化現象が見られなくなる。そのため、振動数33.3Hzでは、振動は、過大気泡を追い出す効果しかなく、振動時間の延長によって締固め曲線は、上方にのみシフトすることになる。

以上のような振動数による流体化現象の差は、振動で与えられる外力の大きさ、すなわち、振動加速度の大きさに影響を受けるためと考えられる。すなわち、前述のように水粉体混合物が流体に性状変化するには、粉体間の空隙容積が水で飽和される程度にまで粉体の充填度が向上しなければならない。そのためには、粉体間の相互作用力に打ち勝って密な状態への配置変換が可能な作用力を与えることが必要となる。そこで、それぞれの振動数における最大振動加速度を算定し、流体化限界水粉体比との関係を調べた。最大加速度は、振動を正弦波と仮定し、式(1)により算定した。

$$\alpha_{max} = 1/2 \cdot a \cdot (2\pi f)^2 \quad (1)$$

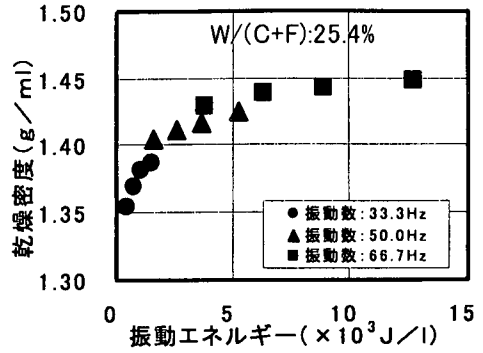


図-23 振動エネルギーと乾燥密度の関係の一例

ここに、 α_{max} :最大加速度 (m/s^2)、 a :振幅 (mm)、 f :振動数 ($1/s$)

図-22に最大振動加速度と流体化限界水粉体比の関係を示す。この図から、振動加速度 $40 (m/s^2)$ 程度が流体化の生じる限界の振動加速度と予想される。今回、振幅一定の条件で振動数のみを変化させたが、今後、振幅、振動数を種々変化させて流体化現象におよぼす影響を調査し、流体化現象に及ぼす振動加速度の影響を把握することが必要と言える。

(6) 振動エネルギーによる締固めの進行評価

超硬練りコンクリートの振動締固めに関する既往の研究において、一定の振動加速度以上で振動締固めを行った場合、振動エネルギーによって締固めの進行を評価できることが明らかとなっている¹³⁾。そこで、振動エネルギーを算定し、(5)で示した締固め試験結果を用いて締固めの進行の評価を試みた。なお、評価に当たって、振動時間内に流体化しなかった試験結果は除外した。

単位容積の試料に与える振動エネルギーは、下式で与えられる¹³⁾。

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

ここに、 E :振動エネルギー (J/l)、 f :振動数 ($1/s$)、 t :振動時間 (s)、 α_{max} :最大加速度 (m/s^2)、 m :試料の密度 (g/ml)

図-23に振動エネルギーと乾燥密度の関係の一例を示す。図に示すように、振動エネルギーと乾燥密度の関係は、振動数によらず一つの曲線で表すことが可能である。また、乾燥密度の増加割合は、締固めが進行するにしたがって徐々に小さくなり、最終的には、ある乾燥密度に漸近する締固めの進行性状を示す。

以上のような締固めの進行性状から、以下の仮定

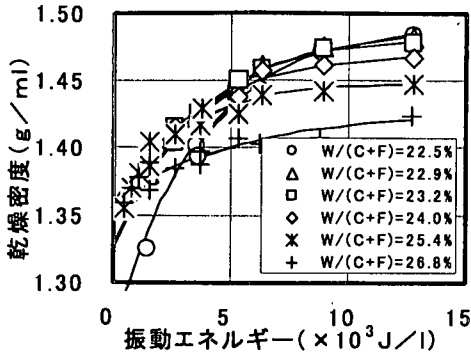


図-24 振動エネルギーと乾燥密度の関係

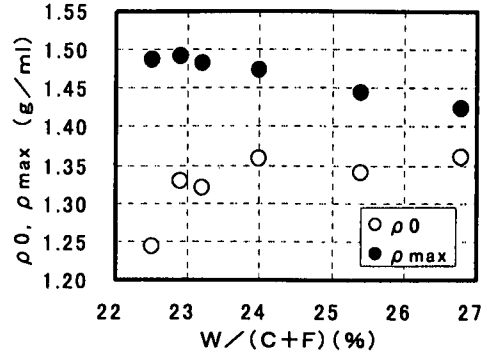


図-25 水粉体比と初期乾燥密度および終局乾燥密度の関係

のもとで、振動エネルギーによる締固めの進行の評価を試みた。すなわち、振動エネルギー無限大における終局乾燥密度が存在し、締固め速度すなわち単位エネルギー当たりの乾燥密度の増加割合は、終局乾燥密度とその時点の乾燥密度の差に比例すると仮定する。このように仮定すると、以下の締固め速度式が得られる。

$$d\rho(E)/dE = k(\rho_{\max} - \rho(E)) \quad (3)$$

ここに、 E ：振動エネルギー (J/l)， $\rho(E)$ ：エネルギー E を与えた時の乾燥密度 (g/ml)， ρ_{\max} ：終局乾燥密度 (g/ml)， k ：締め速度を表す係数 (1/J)

乾燥密度の初期値 (以下、初期乾燥密度) を ρ_0 とおくと、式(3)の解は、以下のようになる。

$$\rho(E) = \rho_0 + (\rho_{\max} - \rho_0) \{1 - \exp(-kE)\} \quad (4)$$

図-16～図-18に示す実験データを用いて、各水粉体比毎に非線形最小自乗法により ρ_0 、 ρ_{\max} および k を実験定数として算定した。

図-24 に各水粉体比における振動エネルギーと乾燥密度の関係を示す。図に示すように、実測値と計算値は、ほぼ一致している。締固め速度が終局乾燥密度との差に比例するという単純な仮定であるが、締固めの進行を表す式として適切であると考えられる。今後、各種フライアッシュを用いた実験を行い、フライアッシュの品質と各係数の関係を把握することが必要と言える。

ここに、図-24 から算定される終局乾燥密度および締固め速度を表す係数 (以下、締固め速度係数) は、粉体の特性および水粉体比によって決まる水粉体混合物の締固め特性を表していると言える。初期乾燥密度は、試料投入時に与えるエネルギーによ

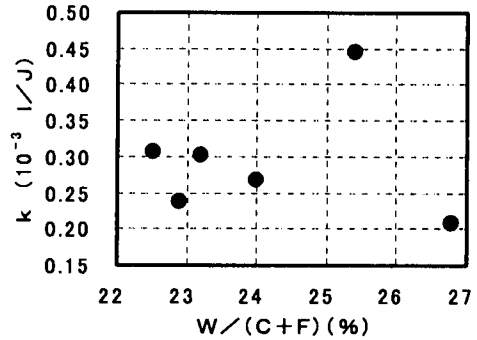


図-26 水粉体比と締固め速度係数 k の関係

て異なると考えられるが、上記の算定値は、振動エネルギーを与えたときの乾燥密度の測定値から予測しており、実際の初期乾燥密度とは一致していない。言い換えれば、初期密度の算定値は、締固め特性を表す係数の一つと考えられる。なお、初期乾燥密度は実測していないが、試料投入時には締固めエネルギーをほとんど与えていないため、実際の初期密度は相当に小さいと考えられる (写真-1参照)。

以下、振動締固め特性に及ぼす水粉体比の影響を調べるために、水粉体比と図-23 から算定した各係数の関係を求めた。図-25 に水粉体比と初期乾燥密度および終局乾燥密度の関係を、図-26 に水粉体比と締固め速度係数の関係を示す。

水粉体比が小さくなるほど、初期乾燥密度は小さく、また、終局乾燥密度は、大きくなっている。このことから、水粉体比が小さいほど終局乾燥密度と初期乾燥密度の差が大きくなり、大きな振動エネルギーを与えることで密に締固めができることが伺える。このように低水粉体比で高い振動エネルギーにより密に締固めが可能となるのは、振動による流体化現象が大きく関与していると考えられる。

締固め速度係数は、水粉体比25%程度でピークが

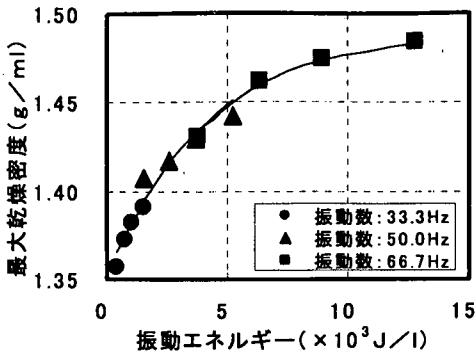


図-27 振動エネルギーと最大乾燥密度の関係

見られる。ピークより低水粉体比側で締固め速度が小さくなるのは、流体化に高いエネルギーが必要なこと(図-21 参照)と、流体化後も高粘性となるため、締固めの進行(空気泡の除去)に高いエネルギーが必要となることによると考えられる。ピーク位置付近では、練上り時に湿気が多く、瞬時に流体化が起これ、小さいエネルギーで締固めが進行するものと考えられる。高水粉体比側で締固め速度が小さくなるのは、練上り直後において流動性を有しており、型枠投入時点での締固め度が大きく、締固めによって締固め度がさほど向上しないことによると考えられる。

(7) 振動エネルギーと最大乾燥密度の関係

(6) に示した締固めの進行を表す式(4)において各係数を以下のように与えて、振動エネルギーと最大乾燥密度の関係の評価を試みた。すなわち、図-20 に示す振動条件と最大乾燥密度の関係において、各振動条件の振動エネルギーを求め、最大乾燥密度との関係の評価した。

ここに、 $\rho(E)$: 振動エネルギー E を与えたときの最大乾燥密度、 ρ_0 : 最大乾燥密度の初期値、 ρ_{∞} : 最大乾燥密度の終局値、 k : 振動エネルギーに対する最大乾燥密度の増加割合を表す係数である。

図-27 に振動エネルギーとそのエネルギーで締固められたときの最大乾燥密度の関係を示す。図中の実線は、式(4)による回帰曲線を示す。

同一水粉体比における締固めの進行と同様、振動エネルギーと最大乾燥密度の関係は、振動数、振動時間に拘わらず一つの曲線上にあり、また、計算値と良好に一致している。ここに、得られた各係数は、粉体の特性によって決まる水粉体混合物の振動締固め特性を表していると考えられる。今後、各係数と粉体の品質との関係を調査することが課題となる。

5. まとめ

突固めによる土の締固め試験方法(JIS A 1210)に準じて締め固めたときの最適含水比に近い低水粉体比で練り混ぜたセメント・フライアッシュ混合物は、練上り直後は、湿気のある粉体の状態であるが、振幅 1.0 mm 程度、振動数 50~70 Hz 程度の振動を与えると湿気のある粉体から流体状に性状が変化し、良好な締固めが可能となる。本研究では、配合条件および振動条件が流体化現象および締固め性状に及ぼす影響を実験的に調査し、振動による流体化特性および締固め特性の検討を行った。本研究で得られた知見をまとめると以下のようになる。

(1) 振動締固めの場合、流体化するか否かが締固めの程度に大きく影響を与える。また、振動数 66.7 Hz、振幅 1mm、振動時間 5分の条件で振動により流体化させて締め固めた場合、突固めによる締固め以上の締固め効果を得ることができる。

(2) 水粉体比と流体化時間の対数は、フライアッシュの種類に関わらず線形関係にあり、また、水粉体比の最適含水比に対する比と流体化時間の対数の関係は、フライアッシュの種類に関わらず一定である。したがって、流体化時間の測定は、フライアッシュ硬化体の製造における品質管理試験として有効に利用できると考えられる。

(3) 硬化後の気泡組織および締固め直後の乾燥密度の測定結果から流体化後の粉体間の空隙は、ほぼ水で飽和されていることが判明した。

(4) ある一定の振動条件下で締め固めた場合、流体化可能な限界の水粉体比が存在する。また、振動数 66.7 Hz、振幅 1mm で締め固めたときの流体化限界水粉体比は、突固めによる土の締固め試験方法(JIS A 1210法)で得られる最適含水比とほぼ一致する。

(5) 突固めによる土の締固め試験方法で得られる最適含水比+0~5%程度の水粉体比で練り混ぜた水粉体混合物の振動締固めによる流体化現象は、与える振動の最大加速度の大きさに影響を受け、振動加速度 $40 (m/s^2)$ 程度が流体化現象の生じる限界の振動加速度である。

(6) 突固めによる土の締固め試験方法で得られる最適含水比+0~5%程度の水粉体比で練り混ぜた水粉体混合物を振動数 33.3~66.7 Hz、振幅 1mm (両振幅)、振動時間 3~10分の振動条件で締め固めた場合、振動エネルギーと乾燥密度の関係は、振動条件に拘わらず一つの曲線で表される。また、振動エネルギー無限大における終局乾燥密度が存在し、締固め速度は、終局乾燥密度との差に比例すると仮定して導いた締固め進行評価式により、締固めの進行を良好

に評価可能である。

謝辞：本研究では、水産庁の補助金により福井県立大学中村充座長のもと、(社)マリノフォーラム21が実施している「マウンド漁場造成システムの開発」における石炭灰硬化体製造実験の結果の一部を利用させて頂いた。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 鈴木達雄, 門馬尚義, 谷口公一: 石炭灰混合体の人工魚礁としての適用性, 間組研究年報, pp. 333-344, 1987.
- 2) 長瀧重義, 大賀宏行, 谷口公一, 染谷健司: フライアッシュを用いた新硬化体の海洋構造物への適用性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 9, No. 1, pp. 211-216, 1987. 6.
- 3) (社)マリノフォーラム21: 石炭灰コンクリート設計・製作マニュアル, MF 21 技術資料, pp. 1-28, 1989.
- 4) 福留和人, 坂本守, 鈴木達雄, 長瀧重義: 石炭灰を多量に用いた新しい硬化体製造方法, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19, No. 1, pp. 223-228, 1997. 6.
- 5) 福留和人, 坂本守, 鈴木達雄, 喜多達夫, 長瀧重義: フライアッシュを多量に用いた硬化体の配合設計手法の検討, 土木学会フライアッシュコンクリートシンポジウム論文報告集, pp. 37-44, 1997. 12.
- 6) 福留和人, 坂本守, 鈴木達雄, 長瀧重義: フライアッシュを多量に用いた硬化体の基本特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No. 2, pp. 91-96, 1998. 7.
- 7) 福留和人, 坂本守, 鈴木達雄, 喜多達夫, 長瀧重義: 最適含水比付近で練混ぜたフライアッシュ・セメント混合物の振動締固め特性, 日本コンクリート工学協会超硬練りコンクリート技術に関するシンポジウム論文集, pp. 43-50, 1998. 6.
- 8) 三輪茂雄: 粉体工学通論, 日刊工業新聞社, pp. 42-43, 1981. 2.
- 9) 吉見吉昭: 砂地盤の液状化, 技報堂出版, pp. 5-8, 1980. 3.
- 10) 田代忠一, 田沢栄一, 笠井芳夫: セメント・コンクリート中の水の挙動, セメント・コンクリート水研究会, pp. 146-151, 1993. 10.
- 11) 土質工学会編: 土の締固めと管理, 土質基礎工学ライブラリー36, pp. 6-19, 1991. 3.
- 12) 田代忠一, 田沢栄一, 笠井芳夫: セメント・コンクリート中の水の挙動, セメント・コンクリート研究会水委員会, pp. 2-3, 1993. 10.
- 13) 国府勝郎, 近藤拓也, 上野敦: R C C P用コンクリートの締固め性試験方法に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No. 46, pp. 964-969, 1992.

(1998. 8. 18 受付)

VIBRATING COMPACTABILITY OF FLY-ASH-CEMENT MIXTURES MIXED WITH OPTIMUM WATER CONTENT

Kazuto FUKUDOME, Shigeyoshi NAGATAKI, Mamoru SAKAMOTO,
Tatsuo SUZUKI and Tatsuo KITA

Fly-Ash-Cement mixtures mixed with optimum water content are only moist powder immediately after mixing. However by vibrating with higher energy these mixtures change into fluid state in few minutes and can be sufficiently compacted. In this study we investigated the influence of vibration level, mixture proportion and properties of materials on the fluidized phenomenon and compactability of Fly-Ash-Cement mixtures.

From the test results it was clarified that fluidized phenomenon of the Fly-Ash-Cement mixtures are influenced by the amplitude of vibrating acceleration and consolidation behavior can be estimated by the vibrating energy.