各種混和剤を用いたコンクリートの 振動締固めによる材料分離現象†

加賀谷 誠* 徳田 弘** 川上 洵*

Segregation Phenomena of Concrete with Various Chemical Admixtures Due to Vibrating Compaction

by

Makoto KAGAYA, Hiroshi TOKUDA and Makoto KAWAKAMI

(Mining College, Akita University, Akita)

In this report, one type of air entraining agent, two types of air entraining and water reducing agents and one type of superplasticizer were used as admixtures. The concretes with these admixtures were called A, B, C and D concrete, respectively. In order to compare the segregation properties of these concretes and a plain one P, the bleeding ratio and variation of unit weight of constituent materials in the vertical direction of prismatic test pieces due to compaction by an internal vibrator were measured. The conclusions were as follows;

(1) The vibrating compaction time required for the concretes with admixtures was shorter than that of plain concrete on the condition of a given slump and water cement ratio, that is, P, A, B, D₁ and C concrete in the order of its magnitude, and the time for D₂ concrete with the same slump and lower water cement ratio was the shortest.

(2) The degree of air loss due to vibrating compaction was C, B and A in the order of its magnitude. The larger the magnitude of air loss, the smaller the degree of segregation.

(3) The bleeding ratios of A, B, C and D₁ concretes were nearly equal, and that of P concrete was larger than those up to 90 seconds of vibrating time, but decreased to the same value with prolonged vibrating time. The bleeding ratio of D₂ was equal to zero regardless of change of vibrating time.

(4) The ratio of the subtraction of absolute volume of coarse aggregate in No. 1 layer from that in No. 4 layer concrete to that in the specified mix, $(g_4 - g_1)/g_0$, may be regarded as the segregation characteristic factor. The change of this factor due to vibrating compaction was closely related to the variation of mechanical properties.

(Received July 8, 1982)

キー・ワード：材料分離，混和剤，振動締固め

1 緒 言

コンクリートの材料分離は運搬・打込み・締固め・仕上げなどの作業中に起こるものと、ブリージングのように型わく中に打込んだ後に起こるものとがある。硬化コンクリートを均等質なものとするためには、材料分離ができるだけ少ないことが極めて重要である。

材料分離に関する既往の研究のいくつかを上げると次のようである。Powers¹⁾はブリージング機構について理論的考察を行い、John²⁾は凍結融解作用に対する弱点がブリージングによって形成されることを実証し

た。また、神田³⁾らは打設後の部材断面における水セメント比の分布性状に及ぼす施工要因の影響について検討を加え、十代田⁴⁾は高性能減水剤を用いたコンクリートの材料分離性状を実験的に検討し、加賀谷⁵⁾らは振動締固めによるコンクリートの内部組成と力学的性質の変動について検討を加えた。これらの報告は、材料分離を低減するためにコンクリートの品質を改善しそのコンクリートに適した締固めを行うことが重要であることを教えている。

AE 剤、減水剤などの各種混和剤の使用はコンクリートの品質を改善するための一方法であって、これらを用いたコンクリートの基礎的物性が明らかにされてきた。しかし、各種混和剤を用いたコンクリートの施

† 原稿受理 昭和57年7月8日

* 秋田大学鉱山学部 秋田市手形学園町

** 正 会 員 秋田大学鉱山学部 秋田市手形学園町

Table I. Mix proportions and mechanical properties of concrete.

Kinds of concrete	Maximum size (mm)	Slump (cm)	Air content (%)	Water cement ratio (%)	Sand percentage (%)	Unit weight (kg/m ³)					Compressive strength (kgf/cm ²)	Modulus of elasticity (kgf/cm ²)	Tensile strength (kgf/cm ²)
						W	C	S	G	Admixture			
P	25	10±1	1.5±0.5	50.0	39.3	183	366	694	1050	—	366	2.40×10 ⁶	26.6
A					35.7	161	322	599	1156	C×0.05%	324	2.25	25.3
B					38.0	161	322	641	1117	0.2%	340	2.34	24.4
C					38.0	158	316	645	1124	0.25%	344	2.52	25.7
D ₁			1.5±0.5	30.0	39.3	163	326	702	1137	2%	411	2.60	26.9
D ₂					36.0	154	513	589	1120	2.5%	680	3.13	37.2

工条件が材料分離現象に及ぼす影響およびそれに伴う力学的性質の変化に関しては未解明の点が多いように思われる。

本論文は、使用ひん度の高いと思われる市販の AE 剤 1 種、AE 減水剤 2 種および高性能減水剤 1 種をそれぞれ用いたコンクリートとプレーンコンクリートについて、棒形振動機を用い、振動時間を変えて角柱型わくに打設したときの材料分離特性を調べるために、ブリージング試験ならびに空気量、水セメント比、細骨材率、各材料の単位量、骨材の粒度および力学的性質の高さ方向分布の測定を行い、それらの結果を述べたものであって、さらに、材料分離が力学的性質に及ぼす影響、圧縮強度に基づく適切な振動締め時間の判定などについて検討したものである。

2 実験概要

2・1 使用材料および配合

普通ポルトランドセメント、川砂（比重 2.59、吸水率 2.53%、F.M. 2.45）、川砂利（比重 2.54、吸水率 3.30%、F.M. 6.90、最大寸法 25 mm）を使用した。また、混和剤として、天然樹脂酸塩を主成分とする AE 剤 A、天然樹脂酸塩およびヒドロキシ複合体を主成分とする AE 減水剤 B、リグニンスルホン酸塩を主成分とする AE 減水剤 C および高縮合トリアジン系化合物を主成分とする高性能減水剤 D を用いた。Table I にコンクリートの配合および力学的性質を示す。表中のコンクリート種別 P はプレーンコンクリート、また、A、B、C、D₁ および D₂ は上記混和剤を添加したコンクリートであることを示す。コンクリートのスランプおよび水セメント比は一定としたが、高性能減水剤を用いたコンクリートではその使用目的を考慮して水セメント比が 30% のもの D₂ を作製した。コンクリートの練りまぜには実験室用強制練りミキサを使用した。

2・2 配合推定方法⁶⁾

高さ方向におけるコンクリートの配合の変化を求めるため、組成分析用および空気量測定用の 15×15×30 cm 角柱供試体を各々 2 個作製した。作製方法は、コンクリートを一層で打込み、棒形振動機によって合計振動時間が 15、60、90、120 および 180 秒となるように締め固めを行った。棒形振動機の性能は最大振幅 1.0 mm、振動数 210 Hz、棒径 25 mm であった。ブリージングが終了した組成分析用供試体から Fig. 1 (a) に示すように高さ方向の層厚が約 7.5 cm の試料を 4 個採取した。これらの試料の一部から、5 mm ふりを用いてウェットスクリーニングにより約 40 g のモルタ

(a) Positions of sampling four fresh concrete samples for mix analysis
(b) Positions of cutting off eight prismatic specimens for compressive strength and modulus of elasticity tests.
(c) Positions of loading strips for four tensile strength tests

Fig. 1. Concrete specimens for mix analysis and mechanical properties tests.

ルを採取し、高周波加熱により脱水した後、塩酸溶解および水酸化ナトリウム溶液による滴定試験から水セメント比を測定した。前記コンクリート試料について JIS A 1112 に準じて洗い分析を行い、細骨材および粗骨材重量を測定し、さらに、各骨材のふるい分け試験を行った。つぎに、JIS A 1123 に準ずるブリージング試験が終了した空気量測定用供試体から組成分析を行った時と同じ位置で、形状を乱さないように試料を採取し、これを水で満たしたワシントン型エアメー

タの容器に入れ、あふれ出た水量から供試体の体積を求めた後、ふたをして空気量を測定した。以上の結果から、供試体の各位置におけるコンクリートの配合を求めた。なお、試料採取位置を上部から第1, 2, 3, 4層と呼ぶ。

2・3 力学的性質の測定方法

標準供試体として、 $\phi 10 \times 20$ cm および $\phi 15 \times 30$ cm 供試体を JIS A 1132 に従って各3本ずつ作製した。前者を JIS A 1108 に基づく圧縮強度試験ならびに静弾性係数の測定に、後者を JIS A 1113 に基づく割裂引張強度試験にそれぞれ供した。また、配合推定に用いた供試体と同じ形状寸法の角柱供試体を前節に述べたと同じ方法で作製した。Fig. 1 (b)に示すようにこの供試体をカッターで切断し、各層2個ずつの切断片合計8個の単位容積重量を測定した後圧縮強度および静弾性係数試験を行った。また、割裂引張荷重の測定はFig. 1 (c)に示す各位置において $1 \times 1 \times 15$ cm の鋼製分布板を用いた割裂試験により実施された。なお、引張強度を算出しなかった理由は、算出式が円断面、線荷重を原則としているのに対して、本研究では、 $15 \times 7.5 \times 15$ cm 供試体に分布板を載せて試験を行ったからであって、割裂引張荷重という表現にとどめた。試験材令はすべて28日であって試験材令まで標準水中養生を行った。

3 実験結果と考察

3・1 振動締固めによって生ずる高さ方向の組成分布

Fig. 2 に一例として、P コンクリートを振動時間60秒で締固めた時の各構成成分の高さ方向分布を示す。高さ方向の各位置におけるこれらの値は、コンクリートの種類および振動時間ごとに変動するが分布傾向はすべて等しいものとなった。すなわち、空気量、水セ

メント比、水、セメント、細骨材および細骨材率の分布傾向は下部から上部にかけて増加し、粗骨材、単位容積重量および細粗骨材の各粗粒率の分布傾向は下部から上部にかけて減少することが認められた。Fig. 3 に、一例として、振動時間の経過に伴うP コンクリートの第1層および第4層における空気量、水セメント比および各材料の単位量の変動を示す。振動時間の経

Fig. 3. Variation of composition in No.1 and No.4 layers of P concrete with change of vibrating time V_t .

過に伴い第1層および第4層における空気量は減少する傾向にある。しかし、空気連行性のある混和剤を用いたコンクリートではこれと若干異なる傾向が認められたので、節を改めて考察を加える。一方、振動時間の経過に伴う水セメント比、水、セメントおよび細骨材の各単位量は、第1層において増加し、第4層において減少する傾向が認められたが、粗骨材の単位量は第1層において減少し、第4層において増加する傾向が認められた。これらの中で粗骨材の変化は最も顕著であ

った。これはコンクリート構成材料の中で粗骨材の占める容積割合が最も大きく、かつ粒子寸法が最も大きいからであろう。これらの結果と Fig. 2 に示した細粗骨材の粗粒率の高さ方向の分布傾向から、粗大粒子の上層から下層への沈降および微小粒子の下層から上層への浮上現象が認められる。これらの変動傾向は、各種混和剤を用いたコンクリートの場合も同様であったが、これらの変動程度には、差が認められた。Fig. 4 に各種コンクリートの第1層と第4層における水セメント比、各材料の単位量および細粗骨材の粗粒率の差を示す。図から材料分離程度はおおよそ A, B, C, D_1 あるいはP コンクリートの順に小さくなり、 D_2 コンクリートが最も小さくなる

Fig. 2. Distributions in the vertical direction of air content, water cement ratio W/C , sand percentage s/a , water content w , cement content c , sand content s , gravel content g , unit weight ρ , fineness moduli of sand S.F.M. and of gravel G.F.M. of P concrete vibrated during 60 seconds. Vertical bold lines show the values in specified mix.

Fig. 4. Segregation properties shown by subtractions of compositions and fineness moduli of aggregates in No. 4 layer from those in No. 1 layer concretes vibrated during 15, 60 and 180 seconds.

ことが認められた。このようにPコンクリートよりもAE剤やAE減水剤を用いたコンクリートの材料分離程度が特に大きくなったのは、空気連行により粗骨材とモルタルの比重の差が大きくなり、粗骨材粒子が沈降しやすくなったことによるのであろう。D₂コンクリートは最も粘稠に富むため分離程度が小さくなったと考えられる。

3・2 振動締固めによって生ずる高さ方向の空気量分布

Fig. 5 に、一例として、Aコンクリートの高さ方向における空気量分布を振動時間ごとに示す。振動時間が15秒のとき、示方配合の空気量が4.5%であるのに対して供試体各位置で4.5~6%と大きい値を示しており、60秒では、4.5%をはさんで上部から下部へ向って減少している。また、90秒以上になると第1層が約6%であるが、第2層以下はほぼ一定の値であって、振動時間の増加とともに減少する傾向が認められる。この結果から、振動時間の経過とともに空気泡は下部から上部へと移動消散すると考えられるが、その程度は用いる混和剤の空気連行特性によって異なる。そこで、Fig. 6 に各種コンクリートの第1層および第4層における空気量と振動時間の関係を示す。振動時間が15秒から180秒までの間に、第1層において、Aコンクリートでは約6%とほぼ一定であり、Bコンクリートでは5.5%から4.5%に減少し、また、Cコンクリート

Fig. 5. Distributions in the vertical direction of air content in A concrete with change of vibrating time.

Fig. 6. Relations between vibrating time V_t and air contents in No. 1 and No. 4 layers for all kinds of concretes.

では5%から3%に減少した。第4層においては、それぞれ、4%から2.5%、4%から2%および3.5%から1.5%に減少した。このように、振動による空気泡の散逸が最も少いのはAE剤を添加したAコンクリートである。2種のAE減水剤を比較するとBコンクリートの方がCコンクリートよりも空気泡の散逸が少い。これは、Aコンクリートに用いたAE剤と主成分の等しい補助AE剤をBコンクリートに用いたからであろうと考えられる。一方、Cコンクリートに用いたAE減水剤は、振動締固め程度を過剰にした場合、空气が消散しやすい性質を有すると考えられる。振動による空气の消散程度のこのような違いは、前節のFig. 4で示した材料分離程度がA, B, Cコンクリートの順に減少していることと関連があるのであって、前述のように空气の消散によりモルタルの比重が増加し、それに伴って粗骨材粒子の沈降程度が減少し分離が生じにくくなったのであろうと推察される。一方、空气を連行しないコンクリートでは、PおよびD₁コンクリートよりもD₂コンクリートで若干空気量が少めであり、また、振動時間の増加とともに空気量がわずかに減少する傾向が認められた。

3・3 振動締固めがブリージングに及ぼす影響

Fig. 7 に振動時間と最終ブリージング率の関係を各種コンクリートごとに示す。振動時間90秒までのPコンクリートの最終ブリージング率は、混和剤を用いた

Fig. 7. Relations between vibrating time V_t and bleeding ratio B.R. for all kinds of concrete.

コンクリートのそれよりかなり大きく、120秒以上では、各種混和剤を用いたコンクリートのそれとほぼ等しい値まで減少した。各種混和剤を用いたコンクリートの最終ブリージング率は、A, B, CおよびD₁コンクリートの順にわずかであるが大きく、振動時間の増加に伴って増加した。D₂コンクリートのブリージングは認められなかった。

3・4 振動締固めによって生ずる力学的性質の高さ方向分布

Fig. 8 に、一例として、Pコンクリートの圧縮強度、静弾性係数および割裂引張荷重の高さ方向分布を振動時間ごとに示す。図中の太線は標準供試体から求めた測定値である。角柱供試体の各位置から切り出して作製した供試体と標準供試体から得られた力学的性質の測定結果の間には、コンクリートの打設方向に対する荷重方向の違いにも起因する差があると考えられたが、特にこの点を考慮せず標準供試体の測定値を基準として比較検討を加えた。

Fig. 8. Distributions in the vertical direction of compressive strength σ_c , modulus of elasticity E and splitting tensile load T of P concrete vibrated during 15, 60 and 180 seconds. Vertical bold lines show the values measured from standard cylindrical specimens

圧縮強度は、振動時間15秒において第4層から第1層にかけて減少し、その大部分が標準供試体から求めたものより低い値となった。60秒では第1層から第4層にかけてほぼ等しい値となり、また、180秒では第4層から第1層にかけて増加し、いずれの場合も標準

供試体から求めたものより全体的に高い値となった。静弾性係数は振動時間によらず第4層から第1層にかけて減少傾向を示した。割裂引張荷重は振動時間ごとに、ほぼ圧縮強度と同じ分布傾向を示した。この力学的性質の分布傾向は各種混和剤を用いたコンクリートにおいても同様であった。Fig. 2 に示したように、空気量や水セメント比が上部ほど増加する傾向を示しているにもかかわらず振動時間60秒以上では圧縮強度および割裂引張荷重の上部での低下が認められなかった。これは空気量および水セメント比の増加に伴う強度低減効果よりも粗骨材の沈下に伴うモルタル分の上昇による強度増大効果が上回ったことに起因すると思われる。振動時間15秒では、下部から上昇した比較的大きい気泡が完全に抜けきらないうちに振動を停止したためそれらが上層部に多く集まり強度低下が生じたと思われる。弾性係数は、粗骨材量が大きい部分ほど大きくなる傾向が認められた。Fig. 9 に、一例として、Pコンクリートの振動締固め時間と第1層および第4層における力学的性質の関係を示す。同図から、振動時間の経過に伴う圧縮強度と割裂引張荷重の変化傾向はほぼ同じであって、振動時間60秒程度までは第4層の方が大きく、それ以上では第1層の方が大きくなり、両層ともにほぼ一定値となること、第4層の圧縮強度および割裂引張荷重は第1層のそれよりも変動が小さいこと、第1層の弾性係数は第4層のそれよりも小さく、60秒以上ではその変動程度が小さいことなどが認められた。これらの変動傾向は各種混和剤を用いたコンクリートの場合も同様であったが、その変動程度には相違が認められた。第1層と第4層における力学的性質の差を標準供試体のそれで除した値を力学的性質の変動特性とし、これを振動締固め時間および使用

Fig. 9. Variation of mechanical properties in No. 1 and No. 4 layers of P concrete with change of vibrating time.

Fig. 10. Ratio of difference in mechanical properties between the first layer and the fourth layer concretes vibrated during 15, 60 and 180 seconds to those measured on standard cylindrical specimens.

Fig. 11. Relations between segregation characteristic factor $(g_4 - g_1)/g_0$ and degree of variation of mechanical properties for all kinds of concretes.

混和剤ごとに Fig. 10 に示す。図から、振動時間60秒程度以上の場合、圧縮強度および割裂引張荷重の変動程度は、おおよそ A, B, C, P, D₁ あるいは D₂ コンクリートの順に小さくなること、60秒程度以下では、P, A, B, D₁ あるいは D₂, C コンクリートの順に小さくなること、混和剤種別による弾性係数の変動は小さいことなどが認められる。これらの変動傾向は、Fig. 4 に示した材料分離特性と極めて類似していることが判るのであって、材料分離と力学的性質の変化と

の間には密接な関連があるものと思われる。そこで、材料分離傾向が最も大きい粗骨材に着目し、第4層と第1層における単位粗骨材量の差を示方配合におけるそれで除した値を材料分離特性値と仮定して、これと力学的性質の関係を Fig. 11 に示す。図から、圧縮強度および割裂引張荷重の変動程度は、おおよそ $-0.1 \sim 0.2$ の範囲にあり、材料分離程度が大きいほど大きくなること、弾性係数の変動程度はおおよそ $-0.1 \sim 0$ の範囲にあり、材料分離程度に関係なくほぼ一定であることなどが認められる。

3・5 適切な振動締固め終了時間

Fig. 12 に、一例として、P コンクリートの振動時間と、各層の圧縮強度と標準供試体のそれとの比の関係を示す。この比が 1.0 となる振動時間を圧縮強度に基づいた締固め終了時間と考えて、各位置の終了時間を図中に×印で示した。図から供試体下部ほどその時間が短いのであって、このような傾向は他の種類のコンクリートについても同様に観察された。そこで、最も振動時間を長く必要とする第1層における締固め終了時間に着目し、これを適切な振動締固め終了時間とした。Fig. 13 に各種コンクリートの締固め終了時間を示す。図から、各種混和剤を添加したコンクリートでは、スランプおよび水セメント比が同じプレーンコンクリートより締固めに要する時間は短くなることが判る。Fig. 4 に示したように、空気連行性の混和剤を用いたコンクリートの振動締固めによる材料分離は C, B, A コンクリートの順に生じ易いにもかかわらず、

Fig. 12. Relation between vibrating time V_t and ratio of compressive strength in each layer σ_{e_i} to that measured from standard cylindrical specimen σ_{co}

Fig. 13. Vibrating compaction time V_t required for all kinds of concretes.

締固め終了時間はC, B, Aコンクリートの順に長くなった。一方、高性能減水剤を用いた場合、D₂コンクリートのように水セメント比が小さくても所要の強度を得るための振動時間が短くてよいことが判った。

4 結 論

AE 剤を用いたコンクリート (A), AE 減水剤を用いたコンクリート (BおよびC), 高性能減水剤を用いたコンクリート (D₁ および D₂) ならびにプレーンコンクリート (P) を棒形振動機により振動時間を変えて角柱型わくに打込んだ時の材料分離性状と力学的性質の高さ方向分布を測定し、次のような結果を得た。

(1) 水セメント比, 単位水量, 単位セメント量, 単位細骨材量, 細骨材率の高さ方向分布は上から下に減少傾向, 単位粗骨材量, コンクリートの単位容積重量, 細粗骨材の粗粒率のそれは上から下へ増加傾向を示す。

(2) 空気量の高さ方向分布は下部から上部にかけて増加する傾向にあり, 供試体各位置の空気量は振動時間の増加に伴って減少する傾向が認められた。減少の程度はA, BおよびCコンクリートの順に大きく, この減少程度が大きいコンクリートほど材料分離程度は小さくなることが認められた。

(3) Pコンクリートのブリージング率は振動時間90秒まで各種混和剤を用いたコンクリートのそれより大きい, 振動時間をさらに長くするとA, B, CおよびD₁コンクリートのそれと同程度まで減少した。A, B, CおよびD₁コンクリートのブリージング率の違いはわずかであって振動時間の増加に伴ってわずかに

増加したが, D₂コンクリートのブリージングは認められなかった。

(4) 材料分離程度が最も大きい粗骨材に着目し, この変動程度を分離特性の指標とすると, この指標が大きいほど圧縮強度および割裂引張荷重の変動程度は大きくなることが認められた。

(5) スランプおよび水セメント比が一定のコンクリートでは混和剤を加えることによって最適締固め状態に達する振動時間が短くなる。これはワーカビリティが改善されるからであって, 所要の締固め時間は, P, A, B, D₁, Cコンクリートの順に短くなり, これらと同一のスランプの場合, 低水セメント比のD₂コンクリートのそれが最も短かった。

(昭和57年5月20日 第36回セメント技術大会にて一部講演)

参 考 文 献

- 1) T. C. Powers, "Properties of Fresh Concrete", Chap. 11 (1968) Wiley
- 2) E. A. John, Journal of A. C. I., **69**, 209 (1972).
- 3) 神田 衛, 吉田八郎, セメントコンクリート, No. 332, 24 (1974).
- 4) T. Soshiroda, A. C. I. SP., **68**, 121 (1981).
- 5) M. Kagaya, H. Tokuda and M. Kawakami, Trans. of the J. C. I., **2**, 133 (1980).
- 6) 西田勇二, 田中 満, 加賀谷 誠, 土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, p. 272 (1980).
- 7) 加賀谷 誠, 徳田 弘, 川上 洵, 熊谷雅毅, セメント技術年報, **35**, 353 (1981).