



コンクリートの材料分離限界に関する実験的考察

李 柱国*1・流田靖博*2

1. はじめに

コンクリートの材料分離(ブリーディングと骨材分離)が発生すると、構造体の各部位の性能は不均一になり、全体の性能が低下する恐れがある¹⁾。粗骨材分離程度に着目して切断面の粗骨材面積率の画像を分析する方法が提案されている²⁾が、硬化コンクリートの分離程度の評価方法はまだ確立されていない。また、コンクリートの分離程度と硬化後の性能低下や不均一性との関係についての定量的な考察が少なく、どの程度までの材料分離が容認されるのかはまだ明らかにされていない。分離抵抗性の目標値が設定できず、達成したかどうかを検証する方法がないため、現在のコンクリートの設計・生産には材料分離抵抗性が定量的に考慮されていない。

コンクリートの材料分離が発生すると、各部位の密度は同じではなくなる。本研究では、 γ 線密度計を利用した硬化コンクリートの分離程度の統合・非破壊型評価法を提案する。また、振動時間を変化させて、異なるレベルの材料分離をコンクリート供試体に生じさせて、分離程度と圧縮強度、静弾性係数、乾燥収縮と中性化深さの不均一さとの関係について定量的な考察を行い、硬化コンクリートの性能に過大な悪影響を与えない材料分離の限界について考察する。

2. 分離程度の評価方法

コンクリート供試体の分離程度の評価に用いた試験装置を図1に示す。この装置は、 γ 線密度計(線源, 検出器, γ 線カウンタ計測器), 密度計の昇降台座, 供試体の台座, パルスモーターおよび計測制御システムなどによって構成されている。密度計の仕様を表1に示す。昇降台座に固定された密度計がパルスモーターによって昇降して供試体の打設方向における密度分布を測定する。密度の不均一さによって分離程度の評価を行う。

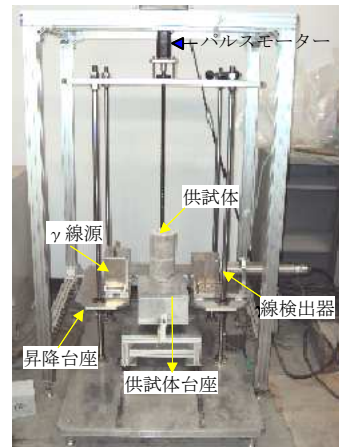


図1 分離程度の評価試験装置

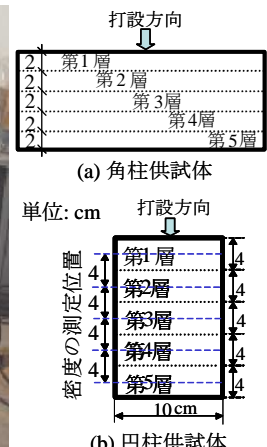


図2 密度の測定位置

直径 10×高さ 20cm の円柱供試体および 10×10×40cm の角柱供試体を図2に示すように5層に分けて、各層を通った γ 線量を測定し、密度を推定する。コンクリートの分離程度は、式(1)に示すように、5層の密度の変動係数で表され、材料分離指数と呼ぶことにする。

$$SI = \frac{1}{\rho_m} \sqrt{\frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 (\rho_i - \rho_m)^2} \times 100\% \quad (1)$$

ここに、SI: コンクリートの材料分離指数, ρ_i : 各層の推定密度 ($i=1, 2, 3, 4, 5$), ρ_m : 5層の平均密度

水, 海砂, 発泡スチロール軽量細骨材, セメントおよび石膏を利用して6種類の材料分離が生じなかった混合物によって円柱供試体を作って較正試験を行った。得られた各層の密度推定式を表2に示す。密度の推定誤差は、層によって異なるが、-1.5~+1.5%の範囲にある。一方、角柱供試体の場合、石膏にそれぞれの厚さをもつ鉄板を組み込んで較正実験を行って密度の推定式を構築した(表3参照)。密度の推定誤差は、-0.3~+0.5%の範囲にある。

表1 γ 線密度計の仕様

品名	特殊 RI 密度計
型式	SRD-SC
検出器	Nal (TI)シンチレーションカウンタ
放射線源	⁶⁰ Co3.7MBq×3
検出窓	高さ 20mm×幅 50mm

*1 山口大学大学院 理工学研究科 情報・デザイン工学系専攻 准教授, 博士(工学)

*2 一般財団法人 建材試験センター 西日本試験所, 博士(工学)

3. 実験概要

3.1 使用材料およびコンクリートの調合

普通ポルトランドセメントおよび減水剤を使用した。力学性能試験Ⅰ，乾燥収縮試験，促進中性化試験および空気量の変化試験では，表4に示す海砂1と砕石1を使用したコンクリートの調合を表5に示す（シリーズ①～⑩）。また，力学性能試験ⅡとⅢでは，表4の海砂2と砕石2を用いたシリーズア～エのコンクリートを使用した。

3.2 供試体の作製

容量100lit.の強制練りパン型ミキサーを用いて，セメントと砂を30秒攪拌した後，水と減水剤を投入して60秒練り混ぜた。次に砕石を投入して60秒練り混ぜた。練混ぜ直後にスランブと空気量を測定した。その結果を表5に示す。

(1) 乾燥収縮供試体と促進中性化供試体 スランブ試験と空気量試験の後，

供試体の長軸を水平にしてコンクリートを打ち込んで，突き棒での締め固めまたは振動締め固めによって，寸法が10×10×40cmの供試体を作製した。材料分離程度を変化させるために，振動時間は0s（突き棒での締め固め），10s, 20s, 35s, 60sの5水準とした。各調合(C1～C8)のコンクリートを用いてそれぞれ10本の供試体を作製し，乾燥収縮試験と中性化試験の供試体は5本ずつとした。スランブ試験用の突き棒を用いて締め固める場合には，コンクリートをほぼ等しい2層に分けて詰め，各層を40回突いた。振動締め固めの場合にはテーブルバイブレーター（振動数：60Hz，振幅：1mm）を用いた。

(2) 力学性能供試体 力学性能試験Ⅰでは，φ10cm×20cmの型枠を用いて，シリーズ①～⑩のコンクリートでそれぞれ18本の円柱供試体を作製した。振動締め固め時間は，0s（突き棒による締め固めのみ），10, 20, 35, 60, 90sの6水準とした。振動時間の水準ごとに，エアメーターで空気量の測定を行った。その結果を図3に示す。振動時間の増加に伴って空気量は減少したことが認められた。

力学性能試験Ⅰでは振動時間を調整して作製した供試体の分離程度および緻密程度が異なった。このため，材料分離と緻密の影響は混在して，材料分離のみの影響を検討しにくくなった。したがって，力学性能試験Ⅱでは，図4に示すように，5層に切り離し可能な内径10cm×高さ100cmの塩ビ管2本にシリーズア～エのコンクリートを充填し，それぞれ30sと120s振動した後に切り離し，調合ごとに

10本の供試体を作製した。このように作製すると，10本の供試体の緻密程度は同じであったが，上下位置によって分離程度は異なった。一方，力学性能試験Ⅲでは，粗骨材の分離のみが発生した場合の力学性能の変化を調べるために，φ10cm×20cmの型枠を3層に分け，上層と下層の粗骨材の体積割合を変え，その変化に応じてモルタルの体積を増減した。表5に示すシリーズア～エの調合でモルタルをまず練り混ぜ，各層のモルタルと砕石を所定の量で計量し，3層のコンクリートを別々に作製し，層

表2 各層の密度推定式(円柱供試体用)

層の範囲(mm)	密度推定式	決定係数(R ²)
① 160~200	$\rho_1=(\ln R_p-2.9742)/-0.2655$	0.996
② 120~160	$\rho_2=(\ln R_p-2.9887)/-0.2663$	0.993
③ 80~120	$\rho_3=(\ln R_p-3.0302)/-0.2870$	0.998
④ 40~80	$\rho_4=(\ln R_p-2.9815)/-0.2618$	0.993
⑤ 0~40	$\rho_5=(\ln R_p-2.9804)/-0.2596$	0.992

注) R_p : γ 線計数率比(単位時間の検収数/線源からのカウント+バックグラウンド γ 線カウント)

表3 密度推定式(角柱供試体用)

層の範囲(mm)	密度推定式	決定係数(R ²)
① 80~100	$\rho_1=(\ln R_p-2.6637)/-0.2565$	0.9990
② 60~80	$\rho_2=(\ln R_p-2.5746)/-0.1898$	0.9998
③ 40~60	$\rho_3=(\ln R_p-2.6078)/-0.1936$	0.9997
④ 20~40	$\rho_4=(\ln R_p-2.5974)/-0.1882$	0.9995
⑤ 0~20	$\rho_5=(\ln R_p-2.4867)/-0.1427$	0.9972

表4 骨材の物理性質

骨材	種類	最大寸法(mm)	実積率(%)	粗粒率	絶/表乾密度(g/cm ³)	吸水率(%)	単位容積質量(kg/m ³)
粗骨材	砕石1	20	57.7	-	2.67/2.69	0.84	1537
	砕石2	20	59.8	-	2.72/2.73	0.47	1620
細骨材	海砂1	5	65.1	2.57	2.55/2.59	1.60	1660
	海砂2	5	64.6	2.61	2.57/2.60	1.04	1660

表5 コンクリートの調合

Series	W/C (%)	s/a (%)	単位質量 (kg/m ³)					スランブ (cm)	空気量 (%)	
			W	C	S(絶乾)	G(絶乾)	S _p (C×%)			
力学性能試験Ⅰ	C1/⑤	65.2	47.3	175	268	851	976	0.50*	21.5	4.7
	C2/③	45.0	44.1	170	377	760	991	0.50**	23.0	5.0
	C3/①	54.7	45.2	170	311	815	991	0.66	19.0	3.7
	C4/④	36.9	36.9	165	447	716	991	1.00	23.0	4.5
	C5/⑧	54.7	46.4	165	292	835	991	0.45	17.0	5.5
	C6/⑦	54.7	47.0	160	292	855	991	0.50	18.5	4.0
耐久性試験	C7/⑨	54.7	44.9	177	324	786	991	0.50	21.0	4.6
	C8	54.7	43.9	185	338	753	991	0.50	23.0	4.7
	②	51.9	45.4	170	327	789	991	0.50	20.5	6.0
	⑥	61.3	46.8	170	277	833	987	0.75*	18.5	5.3
力学性能試験Ⅱ,Ⅲ	⑩	54.7	47.6	155	283	862	991	0.50	17.5	6.3
	ア	56.6	45.3	175	309	794	992	0.75	16.0	4.5
	イ	47.8	44.5	170	356	768	992	0.75	16.0	3.6
	ウ	40.8	42.9	170	417	720	992	1.00	21.5	4.6
エ	32.5	39.7	170	523	632	992	1.50	10.0	3.6	

注) W/C : 水セメント比, s/a : 細骨材率, W, C, S, G, S_p : それぞれ水, セメント, 海砂および砕石, S_p : 混和剤(*標準 AE 減水剤, **標準高性能 AE 減水剤, ほかのシリーズに遅延型高性能 AE 減水剤を用いた)

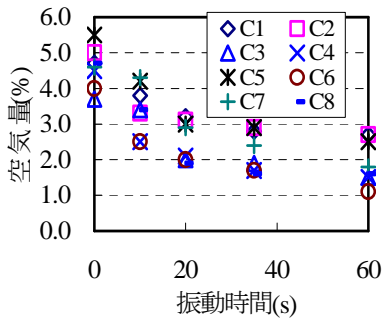


図3 コンクリートの空気量と振動時間の関係



図4 力学性能実験Ⅱの供試体の作製

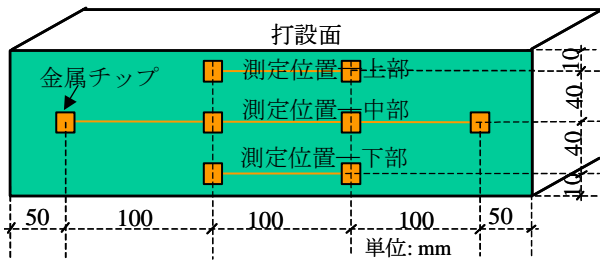


図5 収縮ひずみの測定位置

温度が20℃、CO₂濃度が10%、相対湿度が60%とした。7, 14, 30日後の促進中性化深さをフェノールフタレイン法で測定した。測定位置は、打設面、底面および左右両側面のそれぞれ5箇所とした。図6に測定の一例を示す。

4. 実験結果および考察

4.1 分離指数の測定誤差

図7に円柱供試体と角柱供試体の最上層の密度低下率と供試体の分離指数の関係を示す。同



図6 中性化深さの測定位置

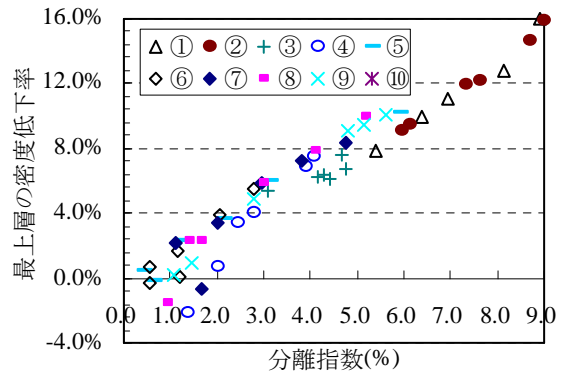
ごとに型枠に充填した。調査ごとに、粗骨材の分布を6つのパターンとし、パターンごとに3本の供試体を作製した。ブリーディングを発生させないように、セルロース系増粘剤を0.5kg/m³添加した。供試体は作製後24時間で脱型し、温度20℃の標準水中養生を行った。

3.3 性能測定方法

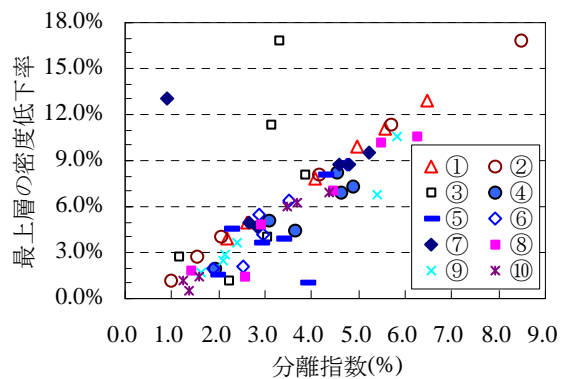
(1) 圧縮強度と静弾性係数試験 円柱供試体を28日間養生した後、加圧面を研磨し、分離指数、圧縮強度および静弾性係数を測定した。静弾性係数の測定には、コンプレッソメータを用いた。分離指数、圧縮強度および静弾性係数はそれぞれ3本の供試体の平均値とした。

(2) 乾燥収縮試験 角柱供試体を温度20℃の水中に材齢7日まで養生をした直後に、分離指数を測定し、図5に示す位置に金属チップを貼り付け、JIS A1129-2のコンタクトゲージ法によって基長を測定し、温度20℃、相対湿度60%の試験室内に保存した。その後、定期的に金属チップの間隔を測定した。材齢1週の長さを基準として収縮ひずみを算出した。なお、これらの測定は26週まで行った。測定位置②は、JIS A 1129-2に準じた乾燥収縮率の測定位置である。測定位置①、③はそれぞれ底面と打設面の近辺とした。

(3) 促進中性化試験 角柱供試体を28日間養生した後、2章に述べた方法で分離指数を評価し、中性化抵抗性を測定した。促進中性化試験の環境条件は、



(a) 円柱供試体の場合



(b) 角柱供試体の場合

図7 供試体の最上層の密度低下率と分離指数の関係

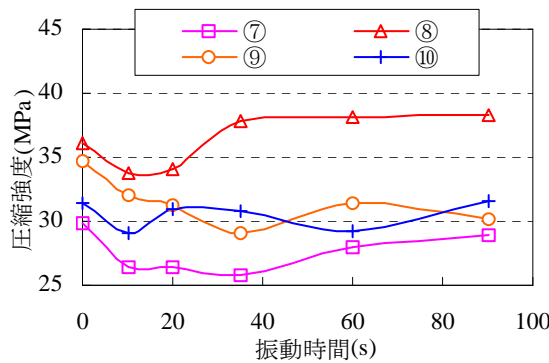
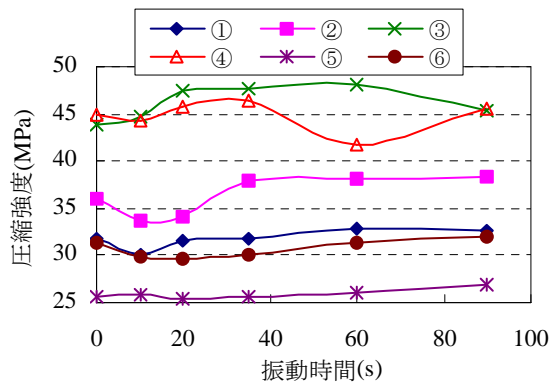


図8 圧縮強度と振動時間の関係(実験Ⅰの結果)

図によって、いずれの種類供試体でも、最上層の密度低下率が1%以下であるときの分離指数の最大値は約1.0%である。つまり、分離指数の測定値は1.0%以内であれば、供試体に材料分離は生じないと考えてもよい。この1.0%の測定値は、密度の推定誤差に起因したものと思われる。

4.2 力学性能に及ぼす材料分離の影響

(1) 分離程度と緻密程度が共に増加した場合(試験Ⅰの結果) 図8に力学性能試験Ⅰで得られた圧縮強度と振動時間の関係を示す。水セメント比の異なるシリーズ①～⑥では、振動時間を10s以上に増加するにつれて最初に強度が増加するが、その後はやや増加または減少する傾向が見られた。また、振動時間が長くなると、水セメント比が大きい場合には圧縮強度がやや増加するが、水セメント比が小さい場合(例えば、シリーズ③)にはやや減少することがわかった。

水セメント比が大きいコンクリートは振動を受けると、多くのブリーディング水が上表面に上昇して水セメント比が小さくなり、内部組織が緻密になるため、緻密化の良い影響が粗骨材分離の悪影響を上回り、強度が増加すると推測している。しかし、水セメント比が小さいコンクリートは、元々の水セメント比が低いため、粗骨材分離の悪影響がブリーディング水の少量排出による緻密化の良い影響を上回り、強度が減少すると考えられる。

一方、単位水量が異なるシリーズ⑦～⑩では水セメント比の異なるシリーズと同様に、圧縮強度は、振動時間とともに、最初に若干増加する傾向が見られるものの、その後は大きな変化がなかった。各コンクリートの流動性によって、安定値する時期が異なった。

フレッシュコンクリートが振動を受けると、気泡と一部のブリーディング水の排出が発生して、硬化コンクリートは緻密になり、力学性能の改善に寄与する。しかし、水の上昇と骨材の沈降によって、水と骨材の分布の不均一性が生じ、力学性能が低下し

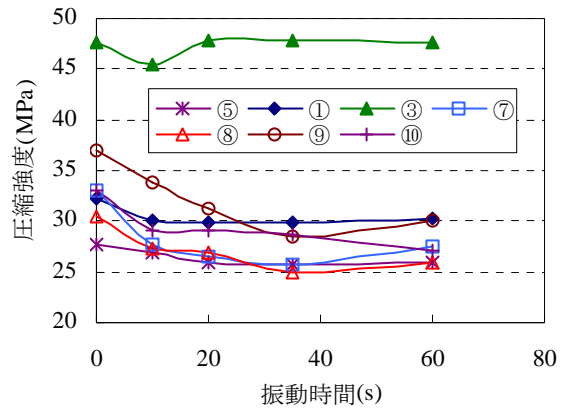


図9 補正した圧縮強度と振動時間の関係(実験Ⅰの結果)

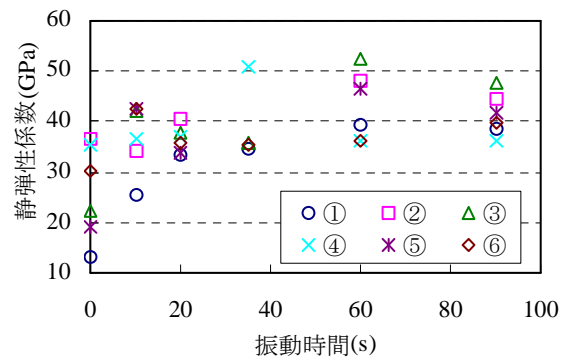


図10 静弾性係数と振動時間の関係(実験Ⅰの結果)

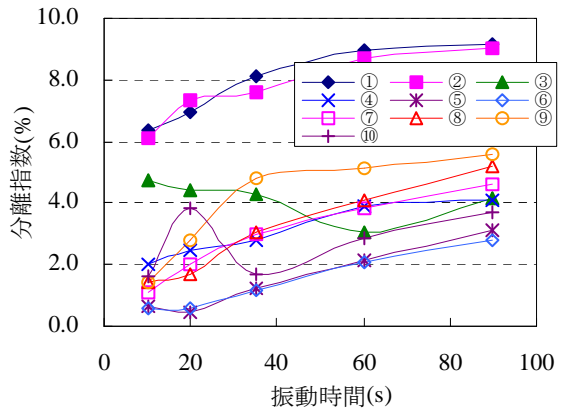


図11 分離指数と振動時間の関係(実験Ⅰの結果)

かねない。材料分離の影響を明らかにするために、空気量の減少による力学性能の向上効果を除外することを試みた。「空気量が1%減少すると、圧縮強度が4%程度増大する」³⁾を目安として、空気量の振動時間に伴う変化量によって圧縮強度を補正した。補正した圧縮強度と振動時間の関係を図9に示す。同図に示すように、振動時間の増加に伴って、圧縮強度が小さくなることが認められた。これは、振動による材料分離が圧縮強度を低下させるためである。

図10にシリーズ①～⑥の静弾性係数と振動時間の関係を示す。振動時間が長くなるにつれ、静弾性係数は最初に増加したが、ある時間以上の振動を加えると、振動時間の増加に伴って静弾性係数は減少する傾向が見られた。これは、材料分離の悪影響が緻密化増加の良い影響を上回ったためであると思われる。

図11は、コンクリートの分離指数と振動時間の関係を示したものである。振動時間が長いほど、分離指数が大きくなることが認められた。

図12と図13に圧縮強度、静弾性係数と分離指数の関係をそれぞれ示す。シリーズ③を除き、分離指数が約2%を超えると、その増大に伴って、圧縮強度と静弾性係数は大きくなる傾向が見られた。これは、前述したように、振動による分離程度が増大すると同時に緻密程度も増加し、緻密の良い影響が分離の悪影響を上回るためである。つまり、分離指数は2%以内であれば、圧縮強度と静弾性係数への影響は少ない。

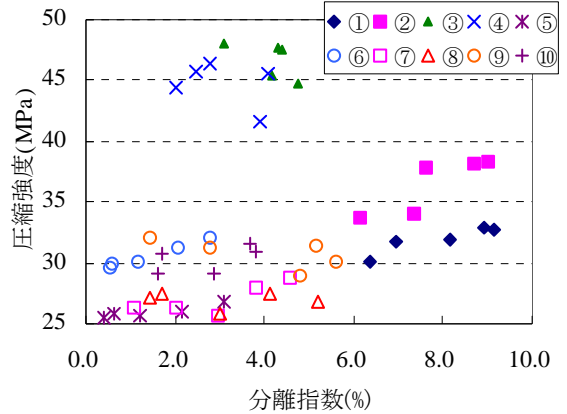


図12 圧縮強度と分離指数の関係(試験Ⅰの結果)

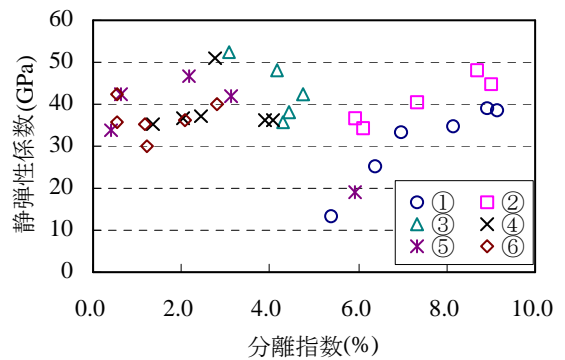


図13 静弾性係数と分離指数の関係(試験Ⅰの結果)

(2) 緻密程度が一定で骨材分離とブリーディングが共に発生した場合(試験Ⅱの結果)

図14と図15に、試験Ⅱより得られた

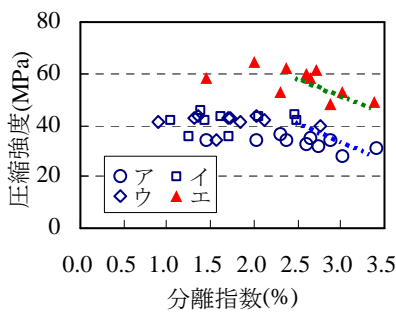


図14 SIと F_c の関係(試験Ⅱ)

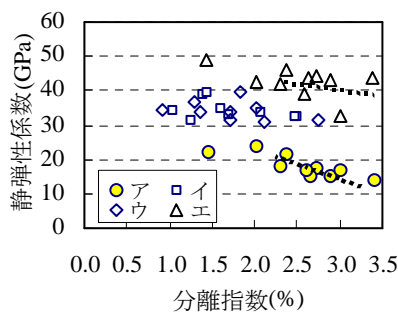


図15 SIとEの関係(試験Ⅱ)

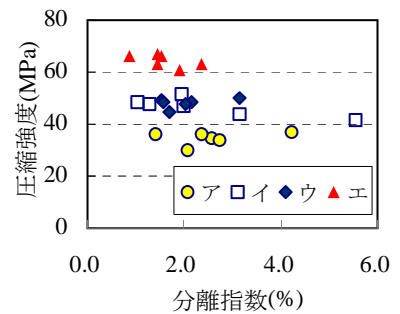


図16 SIと F_c の関係(試験Ⅲ)

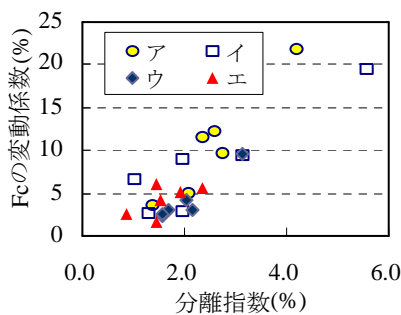


図17 SIと F_c の变动係数の関係(試験Ⅲ)

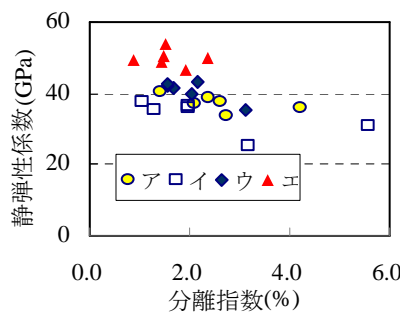


図18 SIとEの関係(試験Ⅲ)

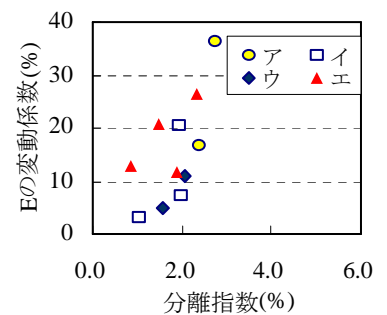


図19 SIとEの变动係数の関係(試験Ⅲ)

コンクリートの分離指数(SI)と圧縮強度(F_c), 静弾性係数(E)の関係をそれぞれ示す。図 14 によって, 分離指数が約 2.0%以上になると, 圧縮強度は低下することが認められた。また, 図 15 に示すように, 分離指数が 2.0%以上であれば, 静弾性係数は, 分離指数の増加に伴って減少した。なお, 強度レベルが低いほど, 分離による静弾性係数の低下は顕著になる傾向が見られた。

(3) 緻密程度が一定で粗骨材分離のみが発生した場合 (試験 III の結果) 図 16~図 19 は, 試験 III より得られたコンクリートの分離指数と圧縮強度, 圧縮強度の変動係数, 静弾性係数, 静弾性係数の変動係数の関係をそれぞれ示したものである。圧縮強度と静弾性係数の変動係数はそれぞれの標準偏差と平均値の比である。粗骨材分離のみが発生した場合, 図 16 に示すように分離指数と圧縮強度の間には一義的な変化傾向は見られなかった。しかし, 分離指数が 2.0%以上で増加すると, 静弾性係数が低下する傾向が見られた (図 18 参照)。また, 分離指数の増加につれて, 圧縮強度と静弾性係数の変動係数は, 図 17 と図 19 に示すように増大することが認められた。

4.3 材料分離が乾燥収縮に及ぼす影響

図 5 に示す方法によって, 異なる振動時間で作製した各シリーズのコンクリート供試体の収縮ひずみを 26 週まで測定した。材料分離が生じると, 打設方向の各部位におけるコンクリートの収縮ひずみは同じではなく, 既報⁴⁾のように上部>中部>下部の順となっている。コンクリートの各部位の乾燥収縮の不均一性を比較するために, 下部測定位置および上部測定位置の収縮ひずみの中部測定位置に対する増減率を算出した。

紙面の都合上, すべての結果を示すことができないが, 建築工事の場合には, 振動機の加振時間は, 1 箇所 5~15 秒の範囲とするのが一般的である⁵⁾ため, 図 20 に 10 秒間の振動締固めによって作製した供試体の上部と下部の中部に対する収縮ひずみの増加率と減少率を示す。増加率と減少率は, 乾燥期間の経過に伴って, やがてある一定の値に収束することがわかった。また, 上部収縮ひずみの増加率の安定値は, 下部の減少率の安定値の絶対値より若干大きくなる傾向が見られた。コンクリートに大きな材料分離が発生しても, 粗骨材の沈降は, 実積率に依存する限界を超えず, 下部と中部の粗骨材量の差は小さくなると考えられる。このため, 上部と中部の収縮ひずみの差に比べ, 下部と中部の収縮ひずみの差は小さくなったと考えられる。上部の

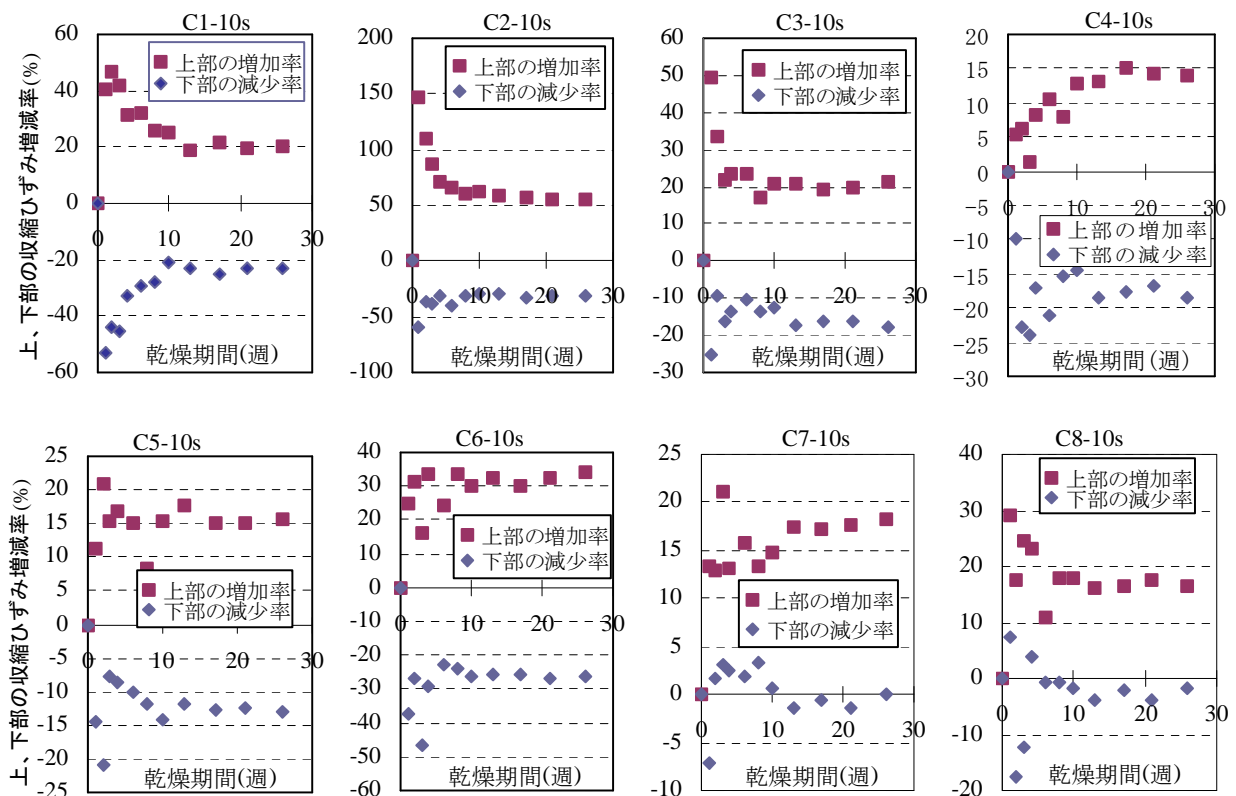


図 20 上部と下部の中部に対する収縮ひずみの増減率 (振動時間 10s の供試体)

増加率と下部の減少率の安定値は、調合によって異なるが、50%と20%以内であった。

図 21 に材齢 26 週時の収縮ひずみの増減率と振動時間の関係を示す。振動時間 0s の供試体と 60s の供試体を比較すると、いずれの供試体も振動時間の増加によって増減率の値が大きくなる傾向が見られる。また、大半の供試体は、振動時間が 20s まで増加すれば、収縮ひずみの増減率が増加するが、35s で一度小さくなって、60s で再度増大する傾向がある。振動時間の増加によって材料分離程度が増加する一方で、長時間の振動によってブリーディング水、内部気泡が排出されコンクリートが緻密化したことが 35s の収縮ひずみの増減率が減少した原因の一つと考えられる。しかし、60s の振動で分離程度がさらに増加し、材料分離の影響が顕著になり、収縮ひずみの増減率が再び増加するものと思われる。

図 22 は、三つの部位の収縮ひずみの変動係数と分離指数の関係を示したものである。同図に示すように、分離程度が増加につれて、収縮ひずみの変動係数は増大することが認められる。分離程度は、約 2.0% を超えると、変動係数の増加率は急激に増大する傾向が見られる。

4.4 材料分離が中性化抵抗性に及ぼす影響

紙面の都合で、1ヶ月の促進中性化結果のみをここに記述する。なお、水セメント比が 36.9% の C4 の促進中性化深さ(D_c)の測定値はゼロに近いので、その結果を示すことができない。

供試体の上下面の D_c の差、断面の四周における D_c の標準偏差(SD_c)と振動時間の関係を図 23 に示す。突き棒で締め固める場合の振動時間を 0s として測定結果を図 23 に併記した。図 23 によって、コンクリートの中性化抵抗性が均一ではなく、打設面では小さくなることがわかった。また、振動時間の増加に伴って、上下面の D_c 差と四面の SD_c は増大したが、振動時間が 20 秒以上になると両者が減少し、さらに 35 秒を超えると再び増大する傾向が見られた。これは、振動による材料分離の悪影響と緻密の良い影響が共存するためであろうと考えられる。

図 24 に、四面の中性化深さの変動係数と分離指数(SI)の関係を示す。水セメント比や単位水量が大きいシリーズ C1 と C8 のデータはばらつきがあるが、他のシリーズのいずれでも、コンクリートの SI が大きいほど、中性化深さの変動係数が大きくなる傾向が見られた。

5. まとめ

本研究では、硬化コンクリートの分離程度の統合・非破壊型評価方法を提案し、材料分離がコンクリートの力学性能、中性化抵抗性および乾燥収縮に与える影響について考察した

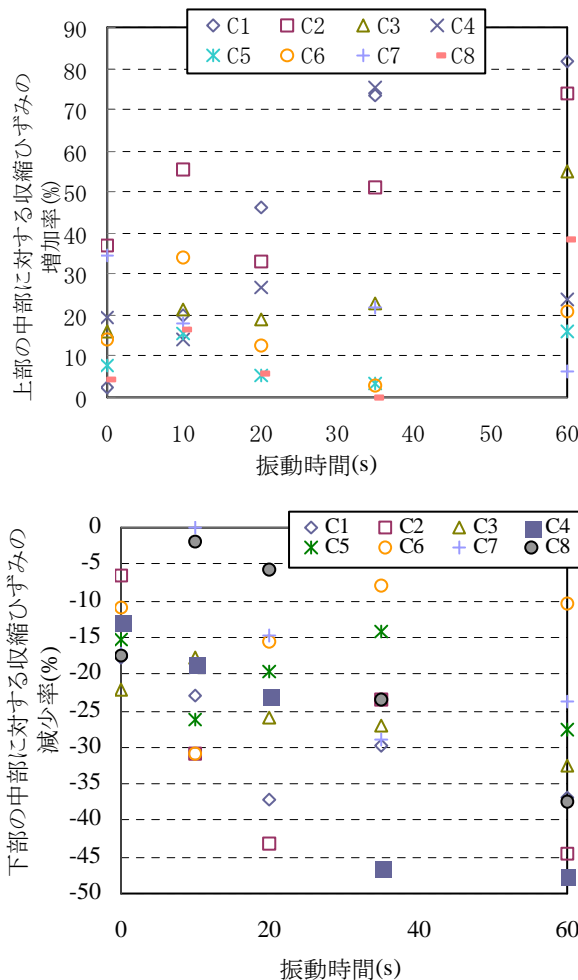


図 21 収縮ひずみの増減率に及ぼす振動時間の影響

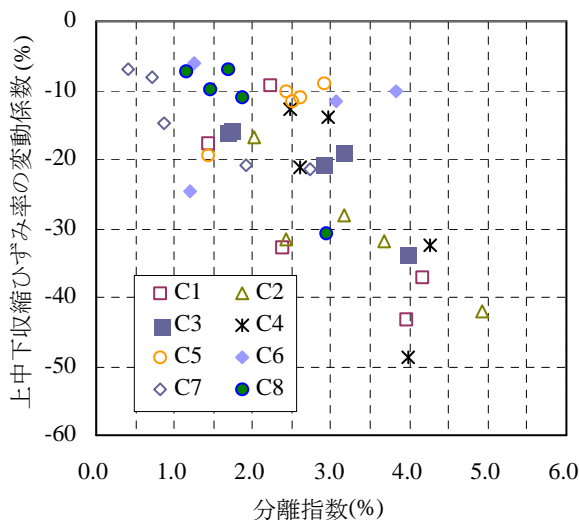


図 22 上中下部の収縮ひずみの変動係数と分離指数の関係

結果、以下の結論が得られた。1) γ線密度計を用いた分離程度の評価試験法は、前報に示すようにブリーディングと骨材分離を同時に評価することができる。また、非破壊試験法であるため、同一の供試体で分離程度評価と他の性能試験が実施できるという利点がある。2) 分離程度が大きいくほど、力学性能は低下し、そのばらつきが大きく、各部位の収縮ひずみの違いは増大し、促進中性化深さの測定位置による変動係数は大きい。3) 硬化コンクリートの性能に顕著な悪影響を与えない分離指数の限界は本研究で提案した分離指数の評価試験法を利用した場合には2.0%である。

[謝辞] 本研究は、科学研究費補助金(基盤研究(B), 課題番号: 22360228, 研究代表者: 李柱国)によるものである。本研究の実験に際して、山口大学工学部卒業生・佐藤駿太君、四枝拓也君ならびに内藤賢哉君の助力を得ました。また、名古屋大学名誉教授・谷川恭雄先生にご助言をいただきました。付記して謝意を表す。

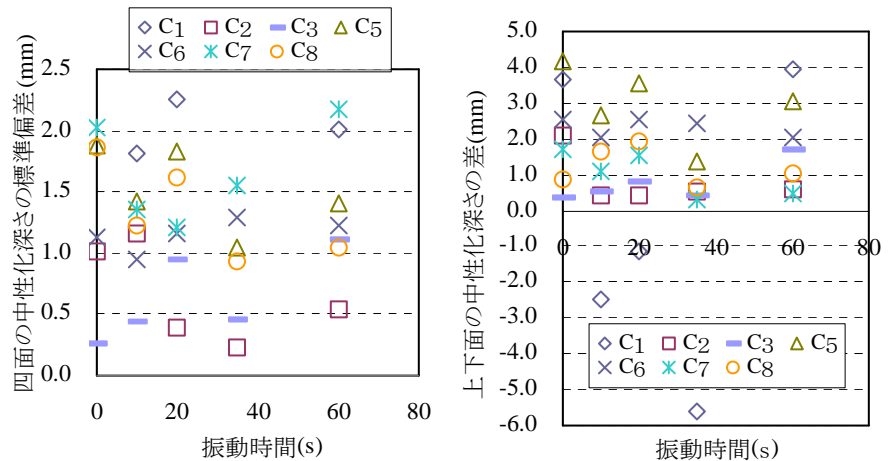


図 23 四面の中性化深さの標準偏差、上下面の中性化深さの差と振動時間の関係

参考文献

- 1) セメント・コンクリート研究会
水委員会: セメント・コンクリート中の水の挙動, pp.167-182, 1993.10
- 2) 岩月洋佑ほか: 振動下におけるコンクリート中の粗骨材分離について, 土木学会第 57 回年次学術講演会, Vol. 718, pp.1435-1436, 2002.9
- 3) 柏野謙二・鎌田英治・柱修: 高強度コンクリートの耐凍害性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.1, pp.691-699, 1990
- 4) 李柱国ほか: 振動打設したコンクリートの乾燥収縮の不均一性に関する考察, コンクリート工学年次論文集, Vol. 34, No.1, pp.472-477, 2012.7
- 5) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説-JASS 5 鉄筋コンクリート工事, p.249, 1997.

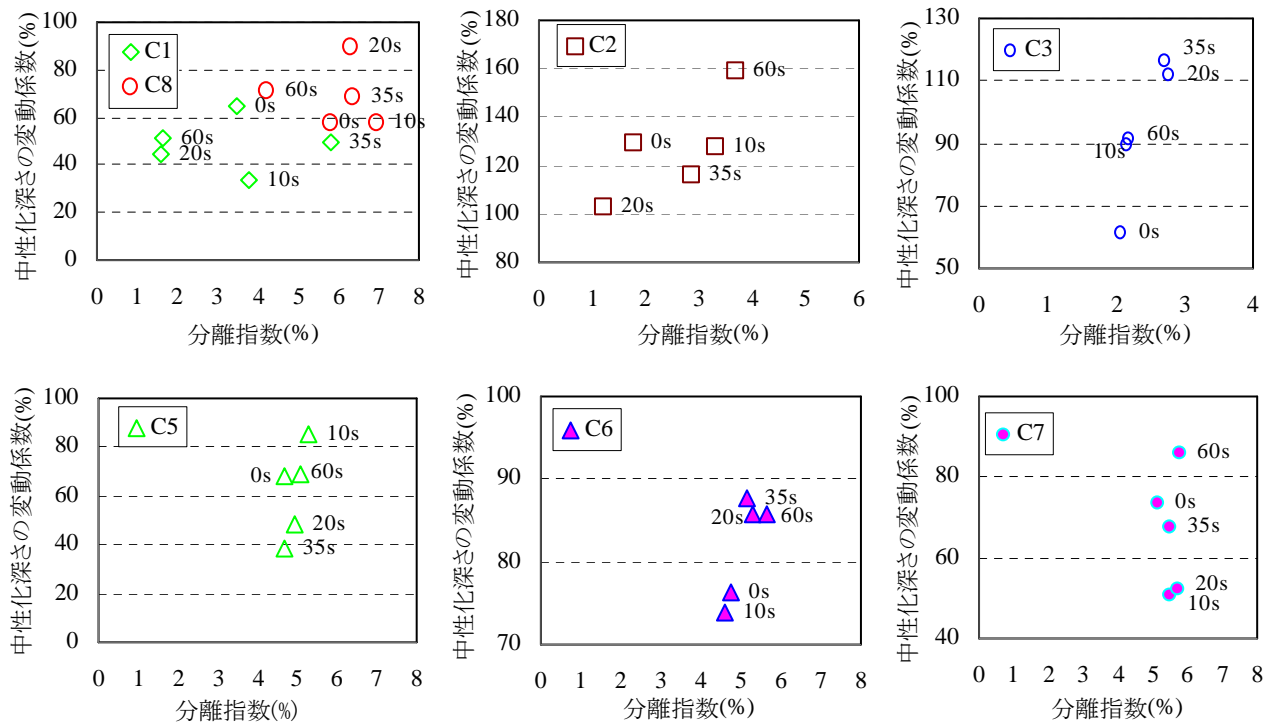


図 24 コンクリート供試体の四面の中性化深さの変動係数と分離指数の関係