

論文 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

李 柱国*1・流田靖博*2・王志堅*3・谷川恭雄*4

要旨: 本研究では、振動打設したコンクリート角柱供試体の横側面の高さ方向において、3か所の乾燥収縮量を測定することによって、材料分離による乾燥収縮の不均一性を検証したとともに、それに及ぼす乾燥期間、振動時間およびコンクリートの調合の影響を考察した。結果として、1) 乾燥収縮量は、上部が中部より、中部が下部より大きい。2) 乾燥収縮の不均一性は、振動時間の増加につれて顕著になる。3) 乾燥期間の増加に伴って、上、中、下位置の乾燥収縮量の差は増加するが、中部位置に対する上、下位置の収縮量の増減率は小さくなる。4) JIS法による乾燥収縮量の測定値に与える振動時間の影響が見られない。5) 振動時間が同じであれば、コンクリートの分離抵抗性は高いほど、振動打設したコンクリートの乾燥収縮の不均一性は低い。

キーワード: コンクリート, 乾燥収縮, 振動打設, 不均一性, 材料分離

1. はじめに

コンクリート構造物に発生するひび割れは、その力学性能、耐久性および美観を低下させる原因となる。コンクリート構造物の安全性と長寿命化を実現するために、ひび割れを抑制または制御する必要性が生じる。コンクリートの乾燥収縮は、ひび割れ発生の主要因の一つとして知られている。日本建築学会が刊行した「鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説」では、設計基準強度 36N/mm²以下の使用されるコンクリートの乾燥収縮ひずみを 800×10⁻⁶以下と規定している¹⁾。

打込んだコンクリートに材料分離が発生すると、コンクリートの上下部位における骨材量と水セメント比は同じではなくなる。このため、打設したコンクリート部材の乾燥収縮量は、材料分離によって鉛直方向に不均一になりかねない。しかし、構造コンクリートの乾燥収縮の不均一性に及ぼす振動時間、乾燥期間および調合などの影響はまだ明らかになっていない。

一方、コンクリートの乾燥収縮の影響要因については、数多くの研究は報告されている。単位水量やスランプは大きいほど、乾燥収縮は大きい、粗骨材量の増加に伴って、乾燥収縮は小さくなることなどが明らかにされている^{2),3)}。また、養生方法、温度・湿度、部材の形状・寸法、乾燥面数などの調合以外の要因の影響も解明されつつある^{4)~8)}。しかし、供試体を製作する際の振動時間が試験結果に与える影響はまだ解明されていない。

本研究では、振動打設したコンクリートの乾燥収縮の不均一性および乾燥収縮の試験結果に及ぼす振動時間の影響を解明するために、振動締めめで作製した 10×10×40cm の供試体の上、中、下部の収縮ひずみを測定し、収

縮ひずみの測定位置、振動時間による違いおよびそれらに及ぼす乾燥期間、コンクリート調合の影響を考察する。

2. 実験概要

2.1 使用材料およびコンクリートの調合

使用した骨材の性能を表-1に示す。細骨材と粗骨材はそれぞれ海砂と碎石であった。また、普通ポルトランドセメントを用いた。シリーズ C1-1 のコンクリートに標準型 AE 減水剤を添加したが、ほかのシリーズのコンクリートに遅延型ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤を使った。コンクリートの調合を表-2に示す。シリーズ C1-1~C3-4 の水セメントが異なり、シリーズ C4-5~C6-8 の単位水量を変化させた。

表-1 骨材の物理性質

骨材	種類	最大寸法 (mm)	実積率 (%)	粗粒率	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/m ³)
粗骨材	碎石	19	57.7	-	2.69	0.84	1537
細骨材	海砂	5	65.1	2.57	2.59	1.60	1660

表-2 コンクリートの調合表

Series	W/C (%)	s/a (%)	単位質量 (kg/m ³)					Sl (cm)	空気量 (%)
			W	C	S	G	S _p (C×%)		
C1-1	65.2	47.3	175	268	851	984	0.50*	21.5	4.7
C2-3	54.7	45.2	170	311	815	1000	0.66	19.0	3.7
C3-4	36.9	36.9	165	447	716	1000	1.00	23.0	4.5
C4-5	54.7	47.0	160	292	856	1000	0.50	17.0	5.5
C5-7	54.7	44.9	177	324	786	1000	0.50	21.0	4.6
C6-8	54.7	43.7	185	338	753	1000	0.50	23.0	4.7

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(表乾), 碎石(表乾), AE 減水剤(*C1に標準 AE 減水剤を使ったが、ほかのシリーズに遅延型高性能 AE 減水剤を用いた), Sl: スランプ

*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) (正会員)

*2 (財) 建材試験センター 西日本試験所 (正会員)

*3 山口大学大学院 理工学研究科 情報・デザイン工学系専攻 大学院生 (正会員)

*4 名古屋大学 名誉教授 工学博士 (正会員)

2.2 実験方法

いずれのコンクリートも、容量 100l の強制練りパン型ミキサを用いて、セメントと細骨材を 30 秒攪拌した後、水と混和剤を投入して 60 秒練混ぜた。次に、碎石を投入して、さらに 90 秒練り混ぜた。練上り直後にスランブ試験と空気量試験を行った後、供試体の長軸を水平にしてコンクリートを打ち込んで、突き棒での締固めまたは振動締固めによって、寸法が 10×10×40cm の供試体を作製した。同じ調合のコンクリートを用いて、締固め方法と振動時間の違いによって、5 本の供試体を作製した。突き棒を用いた場合には、スランブ試験用の突き棒を用い、コンクリートをほぼ相等しい 2 層に分け詰め、各層を 40 回突いた。振動締固めの場合には、テーブルバイブレーター（振動数：60Hz（1750vpm）、振幅：1m 出力：100W）を用いた。振動時間はそれぞれ 10s、20s、35s、60s とした。

供試体は作製後、24 時間で脱型し、温度 20℃ の水中養生を材齢 7 日まで行った。材齢 7 日にて供試体を水中から取り出した直後に、所定の位置に金属チップを貼り付け、基長を測定し、測定後は温度 20℃、相対湿度 60% の試験室内に保存し、その間、コンパレータ法によって定期的に長さ変化を測定した。また、質量減少率を感量が 0.1g の秤によって測定した。さらに、材齢 1 週の長さ と質量を基準として、長さ と質量 の変化率を算出した。なお、これらの測定は 17 週まで行った。

長さ変化の測定位置は、図-1 に示すように供試体の横側面にあった。測定位置②は、JIS A 1129-1 に準じた乾燥収縮率の測定位置である。測定位置①と測定位置③は、それぞれ供試体の底面と打設面に近かった。

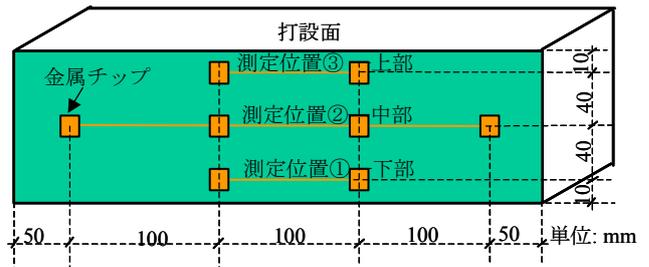


図-1 収縮ひずみの測定位置

3. 実験結果および考察

各シリーズのコンクリートのスランブと空気量を表-2 に示す。測定位置①、②および③の収縮ひずみの差で、乾燥収縮の不均一性を表すことにし、各コンクリートの不均一性を比較するために、測定位置②(中部)に対する測定位置①(下部)、③(上部)の収縮ひずみの増減率を使って乾燥収縮の不均一性に及ぼす振動時間、乾燥期間および調合の影響を考察した。

上部収縮ひずみの増加率 = (上部収縮ひずみ - 中部収縮ひずみ) / 中部収縮ひずみ × 100%

下部収縮ひずみの減少率 = (下部収縮ひずみ - 中部収縮ひずみ) / 中部収縮ひずみ × 100%

3.1 コンクリートの収縮ひずみ

6 つの調合で作った 30 本の供試体の乾燥収縮ひずみを 17 週まで測定した。紙面の都合ですべての結果をここにグラフで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 か所 5~15 秒の範囲とするのが一般的である⁹⁾ため、図-2 に 10 秒間の振動締固めによって作製した供試体の収縮ひずみを示す。

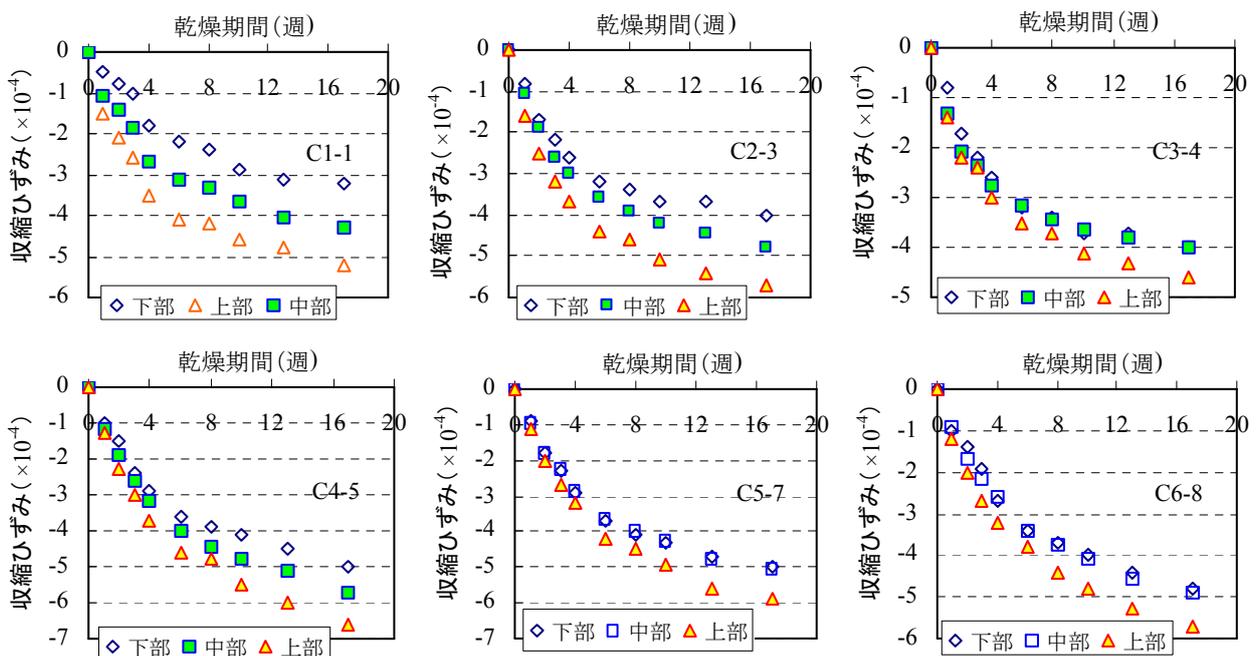


図-2 10 秒間の振動締固めによって作製した供試体の収縮ひずみ

図-2 示すように、収縮ひずみは、乾燥期間の増加に伴って大きくなり、上部収縮ひずみは、それぞれ下部と中部より大きかった。また、中部収縮ひずみは、下部より大きかったまたはほぼ同じであった。シリーズ C4-5 の中部収縮ひずみは、 8×10^{-4} を超えないが、上部収縮ひずみは、 8×10^{-4} を超えないおそれがある（現在、26 週まで測定しつつある）。前に述べたように、これは、コンクリートの材料分離に起因するためであると考えられる。ブリーディングは発生すると、上部コンクリートの水セメント比は増大するが、下部の水セメント比は小さ

くなる。また、粗骨材の沈降分離によって、下方の粗骨材量は増える。これらの材料分布変化は、乾燥収縮の不均一性をもたらす。他の試験体の実験結果を示さないが、図-2 と同じ傾向が見られた。

3.2 乾燥期間に伴う収縮の不均一性の変化

図-3 に 10 秒の振動締固めによって作製した供試体の上、中、下部の収縮ひずみの差を示す。同図によって、シリーズ C5-7 の中-下部の収縮ひずみの差を除き、ほかのシリーズの上-下部、中-下部および上-中部の収

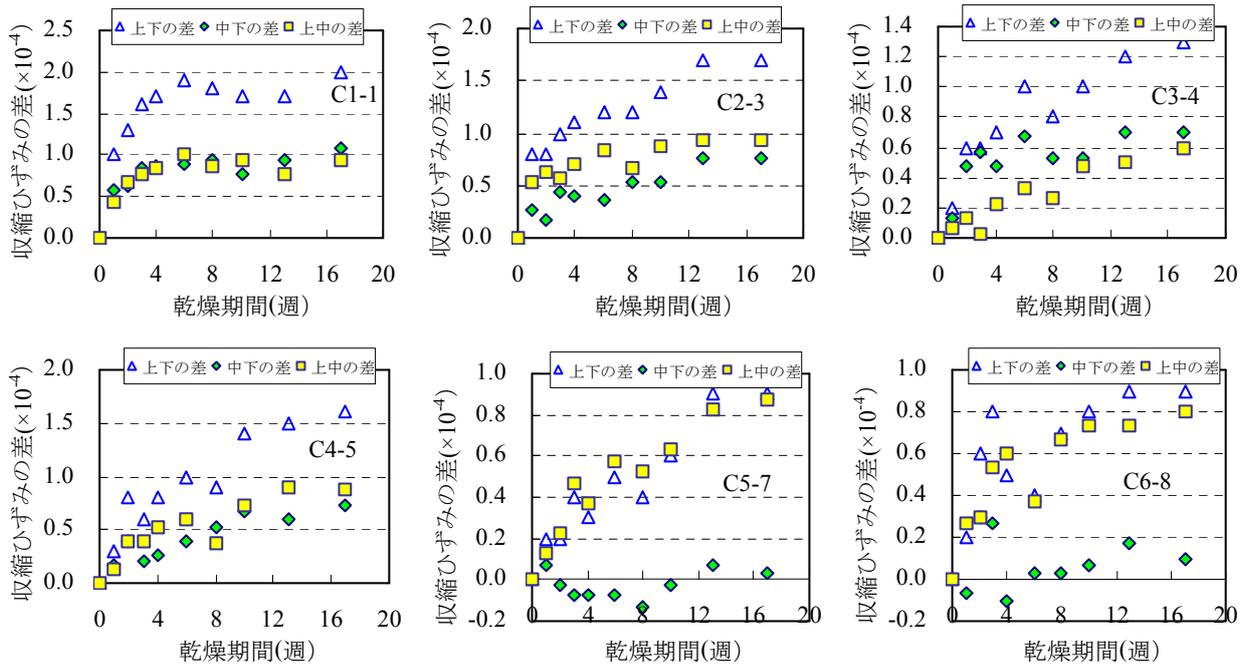


図-3 10 秒間の振動締固めによって作製した供試体の上、中、下部の収縮ひずみの差

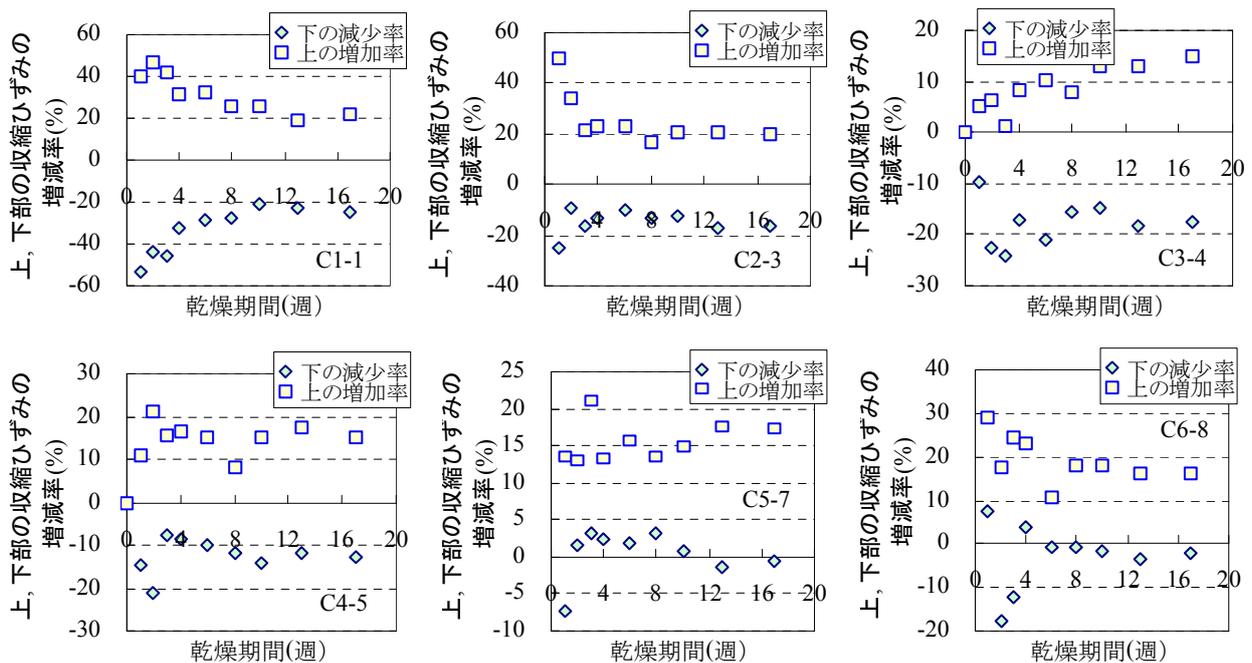


図-4 10 秒間の振動締固めによる供試体の上、下部の収縮ひずみが中部に対する増減率

縮ひずみの差は、材齢と共に増大する傾向が見られた。紙面の都合で、10秒の振動締固めの場合における上、中、下部の収縮ひずみの差のみを示したが、他の振動時間の場合にも、同様な傾向が見られた。

しかし、図-4に示すように、上部と下部が中部に対する収縮ひずみの増加率と減少率は、乾燥の初期には大きかったが、乾燥期間の増加につれて、減少していき、やがてある値に近づいたことがわかった（シリーズ C3-4の上部の増加率を除き）。

また、上部収縮ひずみの増加率の安定値は、下部の減

同図に記した。図-5から、収縮ひずみと振動締固め時間の間には、はっきりした相関性が見られなかった。振動締固めによって、ブリーディング水と骨材沈降を含んだ材料分離は発生する。発生した分離程度によって、中部の水量と骨材量は不変（下部水の上昇と上部骨材の沈降のため）または減少する（単位粗骨材量が小さく、かつ大きく分離した場合）。中部の収縮ひずみは、その部位の水量と骨材量に依存する。水量と骨材量の減少は、乾燥収縮に相反した影響を与える。したがって、乾燥収縮と振動時間の間に一義的な関係が見出されない。

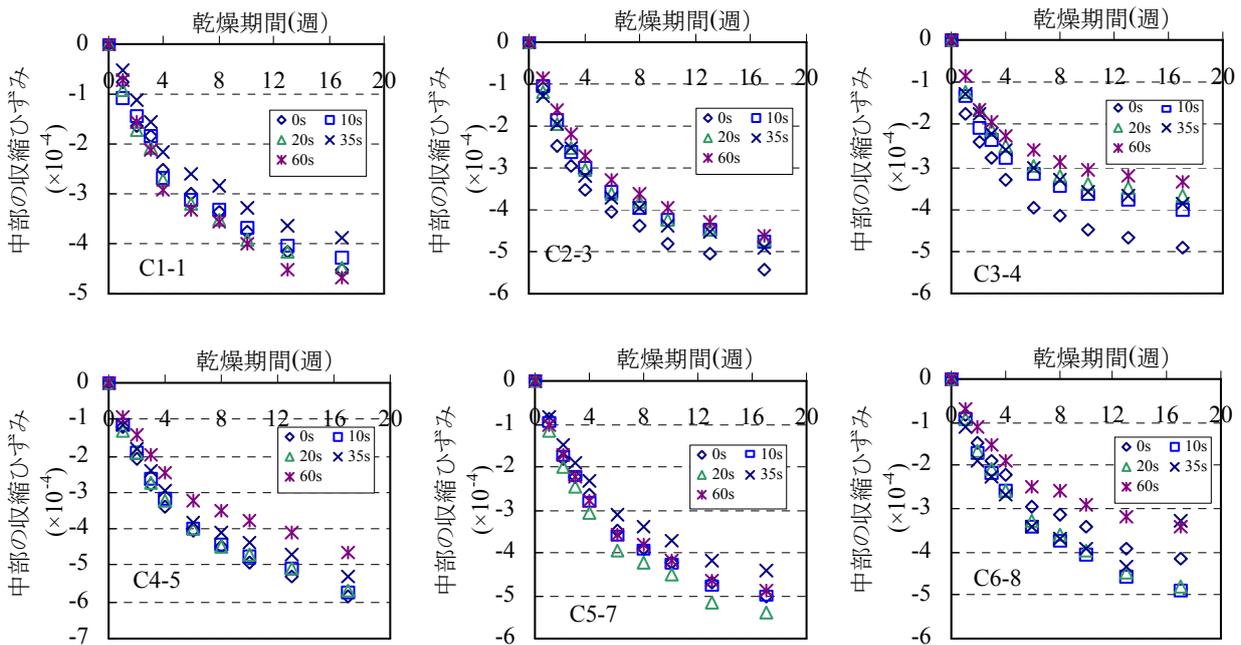


図-5 各供試体の中部の収縮ひずみ (JIS 法による測定値) に及ぼす振動時間の影響

少率の安定値の絶対値より若干大きい傾向が見られた。コンクリートの材料分離が大きく発生しても、粗骨材の沈降は、実積率に依存する限界を超えなく、下部と中部の粗骨材量の差は小さいと考えられる。そこで、上部と中部の収縮ひずみの差に比べ、下部と中部の差は小さかった。ばらつきがあるが、上部の増加率と下部の減少率の安定値は、それぞれ約 20%と 20%以内であった。

シリーズ C5-7 と C6-8 の場合には、単位水量は大きく、コンクリートの材料分離抵抗性は低かった。そのため、振動時間が 10 秒であっても、粗骨材の分離が大きく生じ、下部と中部の粗骨材量の差はあまりなく、両部位の収縮ひずみはほぼ同じであったと推測している。

3.3 収縮ひずみとその不均一性に及ぼす振動時間の影響

図-5に、各シリーズコンクリート供試体の中部収縮ひずみを示す。これらの収縮ひずみは、JIS A 1129-1に準じた測定値である。また、突き棒での締固めによって作製した供試体の収縮ひずみを振動時間 0sの結果として

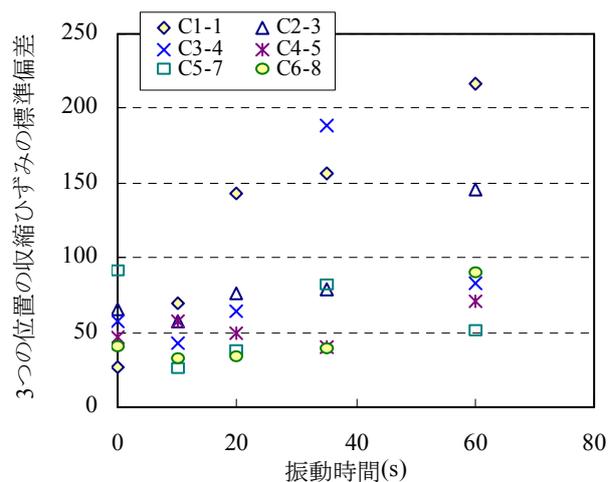


図-6 収縮ひずみの標準偏差に及ぼす振動時間の影響 (乾燥期間: 10 週間)

しかし、C1-1を除き、振動時間 60sの収縮ひずみは小さい傾向が見られた。振動時間が 60sの場合には、ブリーディング水が他の振動時間に比べ、多く生じるため、

供試体中の水量が多く減少したと考える。したがって、60s の場合の収縮ひずみの減少は顕著であった。また、C2-3、C3-4、C4-5 の水セメント比や単位水量は小さいため、コンクリートの粘度が相対的に高く、突き棒での締固めによって作製した供試体のブリーディング水量は振動の場合より少ないと思われる。このため、乾燥期間の収縮ひずみは、振動で作製した試験体より大きかった。

図-6 に、10 週間の 3 つの位置の収縮ひずみの標準偏差と振動時間の関係を示す。振動時間の増加に伴って、収縮ひずみの標準偏差は増大することが認められた。

また、図-7 に、10 週間の中部に対する上、下部収縮ひずみの増減率を示す。ばらつきがあるが、振動時間が長いほど、上下部の収縮ひずみの増減率は大きくなる傾向が見られた。

3.4 乾燥収縮の不均一性に及ぼす調合の影響

10 秒間の振動締固めによって作製した各シリーズのコンクリートの上下部が中部に対する収縮ひずみの増減率を図-8 に示す。同図によって、上部収縮ひずみの増加率の順番（大→小）は、C1-1、C2-3、C5-7、C6-8、C4-5、C3-4 である。上部収縮ひずみの増加率は、水セメント比が大きい C1-1 は最も大きく、水セメント比と単位水量が小さい C3-4 は最も小さかった。C5-7 と C6-8 上部収縮ひずみの増加率は、C2-3 より少ないのは、この 2 シリーズの単位水量が多いが、試験体の作製段階におけるブリーディング量が大量に発生したためであろうと考えている。これらの結果によって、フレッシュコンクリートの分離抵抗性が上部収縮ひずみの増加率に影響を与えるが認められた。

また、下部収縮ひずみの減少率の順番（大→小）は、C1-1、C3-4、C2-3、C4-5、C6-8、C5-7 である。下部コンクリートの収縮ひずみは減少する主要因は、沈降分離による

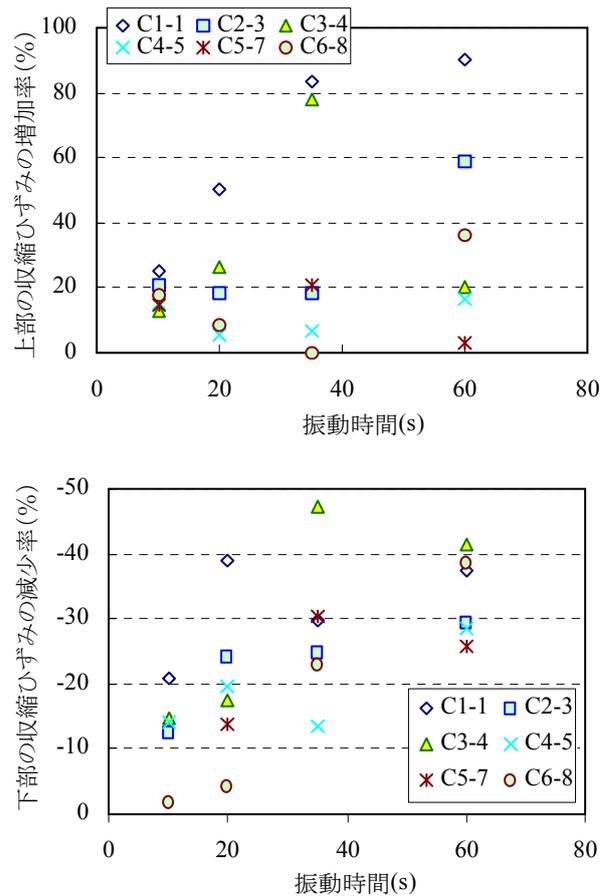


図-7 上下部の収縮ひずみの増減率に及ぼす振動時間の影響 (乾燥期間:10 週間)

骨材量の増加であると思われる。通常、マトリックスモルタルの粘度が低いまたはスランブが大きいコンクリート(内部摩擦が小さい)では、粗骨材の沈降分離が発生しやすいと考えられる。したがって、下部収縮ひずみの減少率の順番（大→小）: C1-1、C3-4、C2-3、C4-5 との実験結果は合理的である。

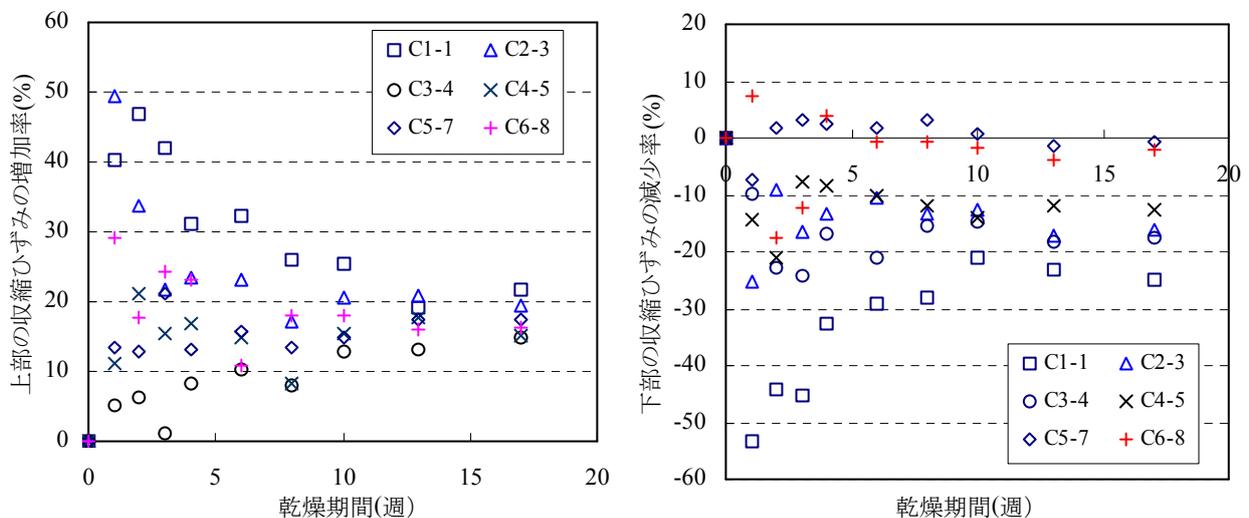


図-8 上下部の収縮ひずみの増減率に及ぼす調合の影響 (振動時間 10s)

シリーズ C6-8, C5-7 は、水セメント比と単位水量が大きく、スランプが高かった。そのため、分離抵抗性は低く、10 秒間加振しても大きくの粗骨材が上部から沈降して中部に滞積したと考えている。そこで、中部と下部における粗骨材量の違いはあまりなく、両シリーズの下部収縮ひずみの減少率は小さかった。

4. まとめ

本研究では、振動打設したコンクリートの上、中、下部の乾燥収縮ひずみを測定し、乾燥収縮の不均一性を考察した。また、乾燥収縮の不均一性の影響要因について検討を行った。得られた結果をまとめると、以下のとおりである。

- 1) 振動打設したコンクリートの乾燥収縮量は、鉛直方向においては部位によって異なった。部位別の大小順は、上部>中部>下部であった。
- 2) 上下位置の乾燥収縮ひずみの差は、乾燥期間の増加につれて大きくなったが、中部に対する上下部の収縮ひずみの増減率は、乾燥期間の増加につれて減少していき、やがて一定値に近づいた。
- 3) 上部収縮ひずみの増加率の安定値は、約 20%であるが、下部収縮ひずみの減少率の安定値は、割合によって異なり、20%以内であった。
- 4) 乾燥収縮ひずみに与える振動時間の影響が見られなかったが、各部位の乾燥収縮ひずみの標準偏差および上下部位の収縮ひずみの増減率は、振動時間の増加に伴って増大した。
- 5) 振動打設したコンクリートの乾燥収縮量は、硬化前のブリーディング量の影響を受ける。乾燥収縮の不均一程度は、材料分離に起因して、コンクリートの分離抵抗性に左右される。

乾燥収縮の不均一性に与える材料分離の影響に関する上記の検討結果を検証するために、今後、供試体の分離程度を測定した上で、分離程度と上下部収縮ひずみの増減率の関係について定量的な検討を行う予定である。

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。また、実験の遂行にあたり、山口大学工学部学部生・内藤賢哉君ならびに（財）日本建材試験センター西日本試験所・杉原大祐氏から多大な助力を頂いた。ここに、謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針（案）・同解説，2006
- 2) 藤原司ほか：コンクリートの乾燥収縮に及ぼす割合の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.11，No.1，pp.205-210，1989
- 3) 黒岩秀介・並木哲・飯島真人：コンクリートの乾燥収縮ひび割れ対策に関する検討，大成建設技術センター報，No.42，pp.05-1~8，2009
- 4) 綾野克紀・阪田憲次：実環境下におけるコンクリートの乾燥収縮ひずみの予測，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.1，pp.709-714，1997
- 5) 大野俊夫・魚本健人：乾燥収縮ひび割れ発生に及ぼす拘束の形態，乾燥面数の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.2，pp.649-654，1998
- 6) 井上和政・三井健郎・大野定俊・岩清水隆：乾燥収縮量が異なるコンクリートの乾燥収縮量に及ぼす部材厚の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp. 453-458，2002
- 7) 半坂 昌広・寺西 浩司：部材寸法・形状および相対湿度がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp. 481-486，2005
- 8) 伊代田岳史ほか：養生とその後の環境による内部湿度の相違が乾燥収縮に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp. 425-430，2010
- 9) 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。