

論文 構造体コンクリートの品質確保のための受入れ検査に関する検討

水上 翔太*1・西村 次男*2・加藤 佳孝*3・勝木 太*4

要旨: 構造体コンクリートの品質には、施工プロセスが大きく影響を及ぼしており、施工プロセス検査の充実を図る必要がある。本研究では、品質確保のための適切なコンクリートの受入れ検査の確立を目指し、硬化体品質とフレッシュ性状に関する実験的検討を行った。その結果、気温や降雨量等の環境条件が圧縮強度および透気性に及ぼす影響は必ずしも一致せず、配合や環境条件によっては、圧縮強度を耐久性の代替指標として用いることが困難であることが明らかとなった。また、材料分離抵抗性の影響因子である、粗粒率、細骨材率、単位水量を変動させた結果、タンピング試験の有用性が明らかとなった。

キーワード: 受入れ検査, 環境条件, 透気性, 圧縮強度, 材料分離抵抗性, タンピング試験, 円筒貫入試験

1. はじめに

構造体コンクリートの品質が、施工プロセスの影響を大きく受けることは周知の事実であるが、残念ながら、品質欠陥事例が報告されていることもまた事実である^{例え}ば¹⁾。さらに、近年の低入札などによる疎漏工事が増加していることから、品質管理・検査体制の重要性が再認識され、国土交通省では施工プロセス検査の導入による検査体制の強化を図っている¹⁾。

これまでに施工プロセスを評価する方法として、各々のプロセスにおける耐久性への影響因子の整理、チェックリストを作成し、それを用いて評価を行う方法²⁾や、構造物耐久指数および環境指数をポイント換算により算出し、プロセス全体の耐久指数が環境指数を上回るよう耐久設計を行う方法³⁾等が提案されている。このように、耐久性への影響因子を体系的に把握して、検査体制に組み込んでいくことが早急に必要である。

このような現状に対し、現行の土木系検査体制(コンクリート標準示方書⁴⁾)は、影響因子の一部、もしくはそれらを間接的に評価することで成り立っている。しかし、検査精度の誤差が大きいことや、水セメント比を耐久性と関連付け、その絶対値や代替指標として圧縮強度による照査・検査を行っているが、養生不足や充填不良といった問題に対して、表層品質等の耐久性の観点からは不十分といった指摘がされている⁵⁾。

このような現状を鑑み、本研究では構造体コンクリートの品質検査体制の確立を目指し、その基礎検討として、コンクリートの受入れ検査について検討した。

受入れ時に行われる検査には、まず圧縮強度試験が挙げられる。圧縮強度試験は、強度の検査に加えて前述したように、耐久性を評価するための代替指標としても用いられているが、養生方法等の変化によって圧縮強度の

変化に比べ、表層コンクリートの物質移動抵抗性は大きく変化すると報告されている⁵⁾。本研究では、養生環境の変化がコンクリートの平均的な透気性に及ぼす影響を確認し、圧縮強度との比較検討を行うことにより、圧縮強度試験における問題点を、物質移動抵抗性の観点から把握することを目的とした。

次に挙げられるのはフレッシュ試験である。フレッシュコンクリートのワーカビリティは流動性と材料分離抵抗性により評価できる。これに対してスランプは試料の降伏値により支配的な影響を受ける指標であり、材料分離抵抗性はスランプ試験からは定量的に評価することが難しく、各工程におけるコンクリートの挙動を再現したものではない⁶⁾。また、国土交通省より平成 15 年 10 月 2 日付で「レディーミクストコンクリートの品質確保について」が通知され、単位水量の管理値が、 $\pm 15\text{kg/m}^3$ (測定誤差 10kg/m^3 , 許容変動幅 10kg/m^3)となっており、これは一般的なコンクリートの場合、単位水量の 10%程度、水セメント比が 0.05 程度の範囲になり、耐久性を評価する上で大きなバラツキを生じることとなる。よって本研究では、先行研究であるタンピング試験⁷⁾と円筒貫入試験⁸⁾を参考にして、材料分離抵抗性および単位水量を簡便に評価する方法について検討した。

2. 実験概要

2.1 透気試験

表-1 に配合と打設時期別のスランプと空気量を示す。養生環境の変化については、屋外にて養生を行い、かつ打設時期を夏期(7 月)・秋期(9 月)とすることで養生中に気候の変化を受けよう配慮した。使用材料は打設 24 時間前に 20℃に保たれた部屋に準備し、練混ぜ時には気候の影響を受けないう配慮した。なお、供試体寸法は

*1 芝浦工業大学 工学部土木工学科 (学生会員)

*2 東京大学 生産技術研究所 技術専門員 (正会員)

*3 東京大学 生産技術研究所 准教授 博(工) (正会員)

*4 芝浦工業大学 工学部土木工学科 教授 工博 (正会員)

表-1 配合表(透気および圧縮強度試験)

配合記号	W/C (%)	s/a (%)	スラグ置換率 (%)	単位量(kg/m ³)							7月打設：夏期		9月打設：秋期	
				W	C	BS	S	G	AE剤	AE減水剤	スランブ(cm)	Air(%)	スランブ(cm)	Air(%)
OPC	40	41	—	179	448	—	667	986	C*0.01%	C*0.25%	13	6.9	12	7.5
	50	43	—	171	342	—	746	1015			11.5	6.7	14	6.2
	60	45	—	171	285	—	804	1007			12.5	6.5	16	6
BS	40	41	45	179	246	202	661	977	(C+BS)*0.01%	(C+BS)*0.25%	11.5	6	8.5	5.5
	50	43	45	171	188	154	742	1010			13	6	13	5
	60	45	45	171	157	128	799	1002			15	5.7	15	5

表-2 配合表(フレッシュ試験)

配合パターン	s/a (%)	単位量(kg/m ³)							スランブ(cm)		
		W	C	S	G	G:5-13mm	G:10-20mm	AE剤	AE減水剤		
単位水量	45	156	260	827	1046	504	504	0.026	0.163	8.5	
	45	171	285	804	1007	504	504	0.029	0.178	10.0	
	45	186	310	763	964	504	504	0.031	0.194	17.5	
粗粒率	45	171	285	804	1007	806	201	0.029	0.178	11.5	
	45	171	285	804	1007	504	504	0.029	0.178	10.0	
	45	171	285	804	1007	201	806	0.029	0.178	9.0	
細骨材率	40	171	285	714	1099	504	504	0.029	0.178	9.5	
	45	171	285	804	1007	504	504	0.029	0.178	8.5	
	50	171	285	892	916	504	504	0.029	0.178	7.5	

φ 100×200mm である。

養生は図-1 に示す 3 種類とした。全ての養生期間は、気中養生も含め 28 日間とした。湿潤養生は、コンクリート標準示方書[施工編]に基づいて養生期間の日中平均気温によって示される期間養生を行った。養生終了後、供試体中央部分を厚さ 40mm となるよう射水式カッターで切断し、炉乾燥(40℃)にて脱水した。

測定時は成形した試験体をゴムシリンダーにはめ込み、透気セルに設置した。その後透気セルに圧縮空気(20℃)を注入し、試験体内部を透過した空気流量が定常となったことを確認したうえで、メスシリンダーを利用した水上置換法により透気量を測定した。透気係数は測定した透気量の結果から、式(1)より求めた⁹⁾。

$$K = \frac{2rLP_2Q}{A(P_1^2 - P_2^2)} \quad (1)$$

ここに、 K ：透気係数(m/s)、 P_1 ：載荷圧力(N/m²)
 P_2 ：大気圧(N/m²)、 L ：供試体の厚さ(m)
 Q ：透気量(m³/s)、 A ：透気面積(m²)
 r ：空気の単位体積質量(=11.81(N/m³))

また、養生環境が透気性に及ぼす影響度を圧縮強度と比較するために、透気試験用供試体と同じ条件で作製した供試体を用い、圧縮強度も求めた。

表-3 タンピング試験計測項目⁷⁾

測定項目	方法等
スランブフロー	スランブコーン引き上げ時、スランブフロー250, 300, 350, 400, および450mm時で以下の項目について計測を行う。
スランブ	各スランブフロー時のスランブを計測する。
上部円形直径	各スランブフロー時に試料上部の円形の有無を調べる。また、その直径を計測する。
タンピング回数	質量1.2kgの木製の棒を高さ50cmからスランブ板の4隅に順に自由落下させてタンピングを行う。各スランブフローに達するために必要なタンピング数を記録する。



図-1 養生条件

2.2 フレッシュ性能試験

(1) タンピング試験

本試験は石井ら⁷⁾が開発した試験方法で、材料分離抵抗性と流動性を評価する手法として提案されている。ま

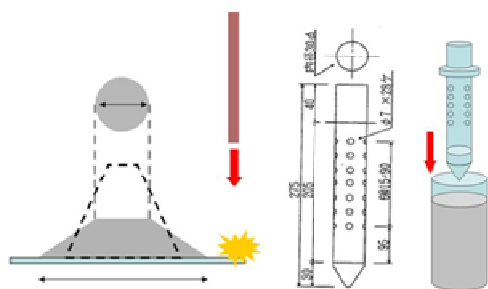


図-2 タンピングおよび円筒貫入試験模式図^{7), 8)}

た、試験自体が簡便であり、現場等で容易に入手できる器具を用いている点から本試験を実施することとした。

配合条件およびスランプを表-2に、計測項目とその方法を表-3⁷⁾に、タンピング試験模式図を図-2⁷⁾に示す。まず材料分離抵抗性の評価を行うために粗骨材の粗粒率に着目した。粗粒率が大きいほど、材料分離抵抗性は高くなる傾向があり、流動性は低下する。よって粗粒率(粒度分布)が変動することによる影響を評価することとした。使用する粗骨材は、粒径範囲が「5-13mm」,「10-20mm」のものを混合し、その混合比率を変動させることで粗粒率を3種類設定した。粗粒率7.07の場合のみ、粗粒率が土木学会の定める推奨範囲を上回っており、材料分離抵抗性は高いと考えられるが、減水能力が低い流動性は低いことが推察できる。同様に、材料分離抵抗性の影響因子として、細骨材率による粘性の変化が及ぼす影響を調べるため、40, 45, 50%の3種類の配合を用意した。

次に、単位水量の変動による影響を把握するため、同じく3種類の配合を準備した。現在行われている測定方法によって算出される単位水量の判定基準は 15kg/m^3 である。よって単位水量を $171 \pm 15\text{kg/m}^3$ の範囲で変動させた配合で影響を把握できるか試験した。

(2) 円筒貫入試験

本試験は松田ら⁸⁾によって開発された試験方法で、本来は高流動コンクリートのコンシステンシーを評価するための手法である。混和剤や粉体の種類によって生じるレオロジー特性の違いを評価でき、かつ現場で簡便に行える試験である。

使用器具の概略図を図-2⁸⁾に示す。筒の側面にモルタル流入用の開口部を設けたものである。容器(軽量モールド缶 $\phi 150 \times 300\text{mm}$)に試料を充填し、棒バイブレータで締固めを行った。その後容器の外側に棒バイブレータを当てながら加振し、その間に試料中へ3秒間で円筒貫入計を挿入、10秒間開口部からの流入を待った後、3秒間で引き抜いて流入モルタル量を測定した。なお、松田らは棒バイブレータによる加振を行っていないが、普通コンクリートを対象として予備実験を行った結果、十分な流入モルタル量が確保できなかった。そのため、本試験

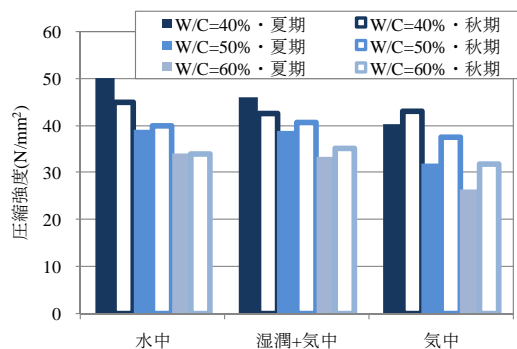


図-3 OPC 圧縮強度

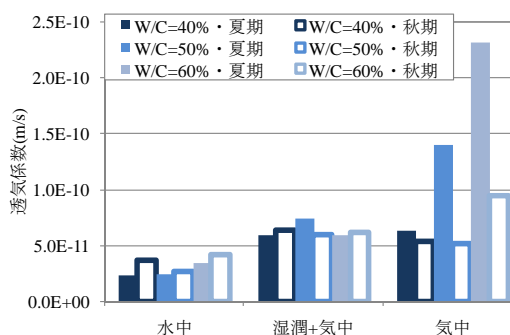


図-4 OPC 透気係数

では加振することで強制的にモルタルの流入量を増やす目的で、以上の工程で行った。配合はタンピング試験時と同じ条件とした。

3. 実験結果

3.1 透気試験結果

(1) 養生環境(気象条件)

気象条件は気象庁ホームページにて公開されている観測結果を参照した。養生場所は東京都目黒区だが、詳細な情報を得られなかったため、東京都大手町における、湿潤養生および全養生期間の気象条件を表-4, 5, 6, 7に示す。湿潤養生期間は日中平均気温および、使用セメントによって定められている⁴⁾。本試験で設定した夏期、秋期では日中平均気温が 15°C 以上のため、OPC(普通ポルトランドセメント)は5日間、BS(高炉セメントB種)は7日間、養生を施した。

(2) 透気係数および圧縮強度の算出

透気係数および圧縮強度は、同一条件の試験体3本を測定し、その平均値を結果として示している。

両使用セメント(OPC・BS)および養生時期別の圧縮強度と透気係数の測定結果を図-3, 4, 5, 6に示す。両使用セメント共に、水セメント比の増加に伴い、圧縮強度は減少傾向にある。また、養生方法が水中、湿潤+気中、気中の順にも減少する傾向が確認できる。これに対して透気係数は、前述した条件に伴い増加する傾向がある。

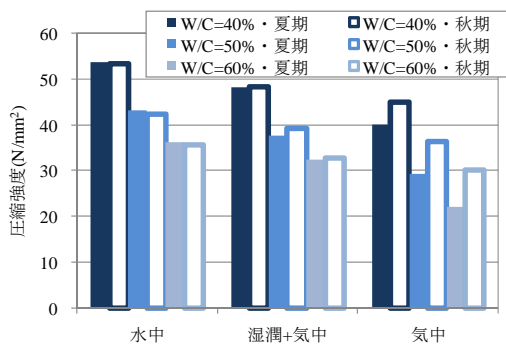


図-5 BS 圧縮強度

表-4 OPC 気象条件(湿潤養生期間)

平均気温: °C		合計降水量: mm		平均湿度: %		日照時間: h	
夏期	秋期	夏期	秋期	夏期	秋期	夏期	秋期
27.9	25.3	0.5	5.5	70.4	68.8	5.0	5.1

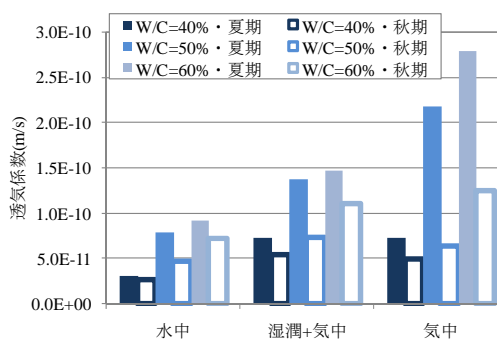


図-6 BS 透気係数

表-5 BS 気象条件(湿潤養生期間)

平均気温: °C		合計降水量: mm		平均湿度: %		日照時間: h	
夏期	秋期	夏期	秋期	夏期	秋期	夏期	秋期
28.7	23.5	11.5	101.0	69.4	74.4	5.8	2.5

表-6 OPC 気象条件(全養生期間)

平均気温: °C		合計降水量: mm		平均湿度: %		日照時間: h	
夏期	秋期	夏期	秋期	夏期	秋期	夏期	秋期
28.5	22.2	168.5	247.0	70.0	69.8	5.5	3.3

表-7 BS 気象条件(全養生期間)

平均気温: °C		合計降水量: mm		平均湿度: %		日照時間: h	
夏期	秋期	夏期	秋期	夏期	秋期	夏期	秋期
28.4	21.0	209.0	246.0	70.1	68.8	5.6	3.1

表-8 OPC 養生方法における試験結果の変動

試験方法	圧縮強度			透気係数		
	水中	湿潤+気中	気中	水中	湿潤+気中	気中
W/C=40%・夏期	1	0.92	0.80	1	2.60	2.80
W/C=50%・夏期	1	0.99	0.81	1	3.09	5.81
W/C=60%・夏期	1	0.98	0.77	1	1.75	6.85
W/C=40%・秋期	1	0.95	0.95	1	1.73	1.46
W/C=50%・秋期	1	1.01	0.94	1	2.21	1.92
W/C=60%・秋期	1	1.04	0.93	1	1.48	2.28

表-9 BS 養生方法における試験結果の変動

試験方法	圧縮強度			透気係数		
	水中	湿潤+気中	気中	水中	湿潤+気中	気中
W/C=40%・夏期	1	0.89	0.74	1	2.32	2.34
W/C=50%・夏期	1	0.87	0.68	1	1.74	2.76
W/C=60%・夏期	1	0.89	0.61	1	1.59	3.02
W/C=40%・秋期	1	0.90	0.84	1	2.01	1.83
W/C=50%・秋期	1	0.92	0.86	1	1.57	1.35
W/C=60%・秋期	1	0.92	0.85	1	1.54	1.74

すなわち、強度とは反比例の関係にある。

次に、両使用セメントおよび養生時期別における、水中養生した場合の圧縮強度および透気係数に対する他の養生条件の結果の比率を表-8, 9 に示す。圧縮強度の変化率に比べ、透気係数の変化率が非常に大きいことが確認できた。また、養生環境条件が圧縮強度と透気係数に及ぼす影響は、必ずしも一致していないことが確認できた。

以上の確認された傾向に対し、岡崎ら¹⁰⁾は以下のように考察している。水セメント比が小さいコンクリートは、養生開始時から全毛細管空隙がわずかであり、かつ空隙が緻密である。すなわち、養生条件によらず供給される水分が内部まで十分に行き渡らないため水和反応が促進されず、養生による組織の差が現れない。これに対して水セメント比が大きい場合には、空隙の構造は粗になるため、各々の養生環境における水分の供給量の影響を受けやすい。また、養生方法により空隙の緻密さが変化し、物質移動抵抗性に影響を及ぼし、その影響度は圧縮強度よりも透気係数の方が非常に高いことを報告している。本研究では、岡崎らが検討した表層コンクリート

の品質ではなく、試験体の平均的な透気性を測定しているが、同様な傾向を確認できた。

(3) 養生環境(気象条件)と試験結果から得られた考察

表-8, 9 より、湿潤養生を行った場合は、養生時期において両試験結果に、BS(W/C=50, 60%)を除いて大きな差は確認できなかった。BS(W/C=50, 60%)の透気係数は秋期に養生した場合の方が、値が低いことが確認できた。更に、湿潤+気中、気中でほとんど変化が確認できなかった。

気中養生を行った場合には、透気係数比が夏期に養生した場合の方が、水セメント比によって異なるが、2~3倍程度高い。これに対し圧縮強度比は、全ての条件に対して当てはまるわけではないが、水中、湿潤+気中、気中の順におおよそ0.1ずつ減少しており、その変化は非常に小さいことが確認できた。すなわち、養生時期が異なることによる養生環境の変化によって、気中養生の場合には圧縮強度比よりも透気係数比の方が傾向を明確に現すことが確認できた。

次に両養生時期における環境条件の変化を整理すると、全養生期間における夏期の日中平均気温は、OPC で

6.3℃, BSで7.4℃, 秋期よりも高かった。秋期の合計降水量は, OPCで79mm, BSで37mm, 夏期よりも多かった。更に湿潤養生期間(OPC 5日間, BS 7日間)における変化は, OPCの気温差が2.6℃に縮まったほか, 降水量が両使用セメントとも秋期の方が約10倍多かった。

よって前述したように, 気中養生において示された傾向は, 夏期には気温が高く, 水和反応の活発な材齢初期において, 供試体内部の水分の蒸発を促進させてしまうためと考えられる。これに対してBS(W/C=50, 60%)の秋期においては, 降雨によって供試体を湿潤に保つことで, 湿潤養生を行わなかったにも関わらず, 材齢初期における水和反応を促進させたために, 湿潤+気中, 気中における透気係数の変化が無かったと考えられる。BSの秋期における湿潤養生期間には, 全7日間で, 5日間降雨があり, 内4日間の日中合計降水量は10mm以上だったことも影響を及ぼしていると考えられる(OPCの秋期における降雨は, 全5日間で2日間で, 日中合計降水量は5mm以下)。

3.2 フレッシュ性能試験結果

(1) タンピング試験

図-7に, 粗骨材の粗粒率を変化させた場合の, スランプフローとタンピング回数との結果を示す。粗粒率7.07の場合には6.82, 6.68の場合に比べ, スランプフロー450mm到達に要したタンピング回数が10回以上多かった。初期スランプは10±1.5cm以内であることから, スランプ試験に比べてタンピング回数測定によって容易に流動性を評価することができるのがわかる。また, 粗粒率7.07の場合では上部円がスランプフロー300mm測定時まで確認可能だったのに対し, 粗粒率6.82は250mm測定時まで, 6.68は測定開始時点で確認できなかった。よって石井ら⁸⁾によって証明された上部円の有無による材料分離抵抗性の評価について, 粗粒率の変動による影響についても, その妥当性が検証されたと考えられる。

細骨材率を変動させた場合でも粗粒率の場合と同様のことが言え(図-8参照), 初期スランプが8.5±1.0cm以内にも関わらずタンピング回数は細骨材率50%が, 45, 40%に比べて10回以上多かった。上部円もスランプフロー300mm測定時まで確認できたのに対して, 細骨材率45%は250mmまで, 40%は測定開始時点で確認できなかった。しかし, 粗粒率変動の場合と異なり試料の変形の仕方に違いが見られた。より明確な判断をするため, スランプ(mm)をスランプフロー(mm)で除した値を「フロー係数」と定義し, 図-9に示す。フロー係数が高く推移しているということは, スランプフローの増加に伴い, スランプも大きく増加していることを表わす。これに対してフロー係数が小さいということは, スランプフローが増加しているにも関わらず, 粘性が高いため試料の上

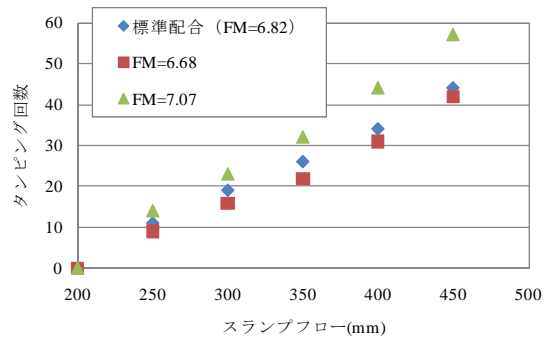


図-7 粗粒率変動パターン(タンピング回数)

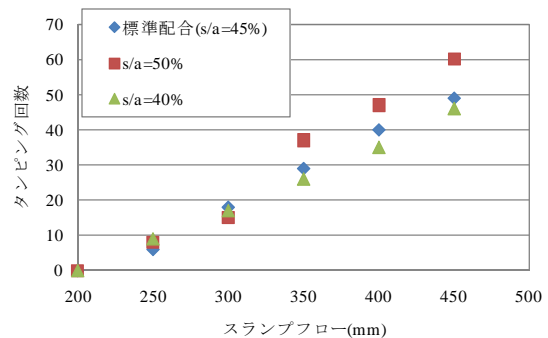


図-8 細骨材率変動パターン(タンピング回数)

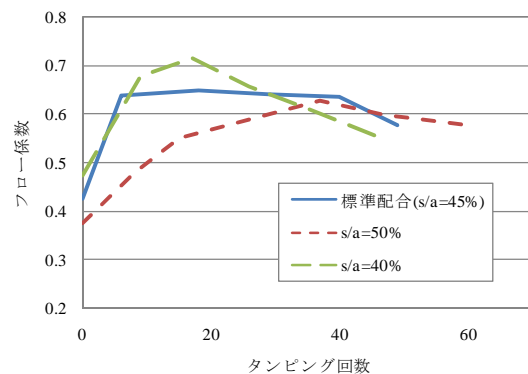


図-9 細骨材率変動パターン(フロー係数)

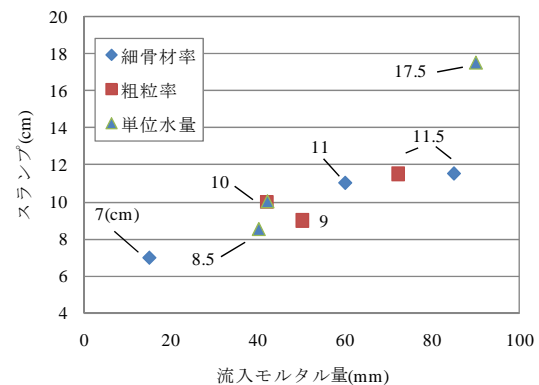


図-10 スランプと流入モルタル量の関係 (図中の数値はスランプ値)

部がその形状を一定期間保つためスランプがあまり増加しない様子を表している。細骨材率 50%では、他の場合に比べフロー係数が一貫して低く推移しており、逆に細骨材率 40%ではタンピング開始 10 回目までにフロー係数が急激に増加しており、粘性が低く材料分離抵抗性が低いために、早期に分離して試料の形状が全体的に崩壊してしまったものと考えられる。以上より、材料分離抵抗性をフロー係数という指標を用いることで、より明確に判断できる可能性が示唆された。単位水量を変動させた場合については、初期スランプと、スランプフロー 450mm 到達に要したタンピング回数との間に非常に強い負の相関が確認できたことから、スランプによる評価で十分に対応できることがわかった。しかし、上部円の確認は単位水量を減らした場合には、試験終了時までその形状が確認でき、それに対して単位水量を増やした場合には初めから確認ができず、材料分離抵抗性については、試料上部の円形の確認によってのみ、確認することができた。

(2) 円筒貫入試験

図 - 10 に、各配合条件におけるスランプと流入モルタル量を示す(図中の数値は各配合時のスランプを示している)。流入モルタル量は、単位水量の増加に伴い増加、細骨材率の減少に伴い増加した。

各配合におけるスランプと流入モルタル量の相関は大きく、各々の相関係数は、単位水量を変動させた場合は 0.99、粗粒率の場合は 0.78、細骨材率の場合は 0.97 である。すなわち、円筒貫入試験によって得られる情報は、スランプ試験とほぼ同じであり、普通コンクリートを対象とした場合、材料分離抵抗性を評価する方法としては、有用性が無いことが確認できた。

4. まとめ

本研究では、構造体コンクリートの品質確保のための適切なコンクリートの受入れ検査の確立を目指し、耐久性の影響因子である物質移動抵抗性と、材料分離抵抗性の評価方法について、実験的に検討した。得られた知見と、今後の検討課題を以下に示す。

1) 透気性は、材齢初期における湿潤養生が行われなかった場合、気温や降水量等によって示される養生環境の変化が大きく影響する。また、養生環境が圧縮強度と透気性に及ぼす影響は必ずしも一致せず、配合や環境条件によっては、圧縮強度を耐久性の代替指標として用いることが困難であることが明らかとなった。

今後、環境条件の変化に伴い、物質移動抵抗性を定量的に把握できるよう、他の時期における養生も実施する必要がある。

2) 材料分離抵抗性を評価するために、スランプ試験時の試料上部円の有無が重要であることが確認できた。また、フロー係数の算出により、材料分離抵抗性の違いによる試料の変形の仕方の違いを定量的に評価できる可能性があることがわかった。

本研究では物理的観点から検討を行ったが、その性状変化を的確に把握するため、既に確立された粘性測定方法による試験を実施し、比較検討したいと考えている。

参考文献

- 1) 山崎啓司, 加藤佳孝: 社会基盤構造物の品質確保を目指した検査システムの提案について, 生産研究, 60 巻 3 号, pp.12-15, 2008
- 2) (社)日本コンクリート工学協会: コンクリート施工基本問題検討委員会報告書(II), pp.26-27, 2002.6
- 3) (社)土木学会: コンクリート構造物の耐久設計指針(案), コンクリートライブラリー82, pp.3-8, 1995.11
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書[施工編], pp.122-124, 2007
- 5) (社)土木学会: 構造物表面のコンクリート品質と耐久性性能検証研究小委員会(335 委員会)成果報告書およびシンポジウム講演概要集, pp.297-309, 2008.4
- 6) (社)土木学会: 施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針(案) コンクリートライブラリー126, pp.1-4, 2007.3
- 7) 石井ほか: タンピング試験におけるワーカビリティの簡易評価方法の検討, コンクリート工学年次論文集, vol30.No.2, pp.37-42, 2008
- 8) 松田ほか: 円筒貫入計による高流動コンクリートのコンシステンシー評価に関する研究, 日本建築学会大会学術講演概要集 材料・施工分冊, pp.511-512, 1994.4
- 9) 氏家勲, 長瀧重義: コンクリートの透気性の定量的評価に関する研究, 土木学会論文集, No.396/V-9, pp.79-87, 1988.8
- 10) 岡崎ほか: 養生が強度と物質移動抵抗性に及ぼす影響感度の相違に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.60, pp.227-234, 2006
- 11) 土木学会 278 委員会: 垂井高架橋の損傷に関する調査研究委員会 最終報告書, 土木学会, 2008.3