

構造体コンクリートの品質確保のためのコンクリート受入れ検査に関する基礎的検討

芝浦工業大学 学生会員 ○水上翔太 東京大学生産技術研究所 正会員 西村次男
東京大学生産技術研究所 正会員 加藤佳孝 芝浦工業大学 正会員 勝木太

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り、耐久性への影響因子を体系的に把握し、施工プロセス検査の充実を図ることが早急に必要である¹⁾。

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²⁾。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実験的に検討した。

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試験は単に試料の降伏値を表したものであり、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い²⁾。また、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³⁾を参考にして、材料分離抵抗性及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るよう配慮した。使用材料は打設 24 時間前に 20℃ に保たれた部屋に準備し、練混ぜ時には影響が出ないよう配慮した。なお供試体寸法は $\phi 100 \times 200\text{mm}$ である。

養生は、水中、湿潤+気中、気中の 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]⁴⁾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⁵⁾。

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

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。

2.2 タンピング試験

本試験は石井ら³⁾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。

配合条件を表-2 に、計測項目とその方法を表-3 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が、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、最大粒径が「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。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

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

連絡先 〒135-8548 東京都江東区豊洲 3-7-5 研究棟 9F L-32 コンクリート構造研究室 Tell 03-5859-8359

表－1 配合表(透気及び圧縮試験)

配合 記号	W/C (%)	s/a (%)	スラグ 置換率 (%)	単位量(kg/m³)						7月打設：夏期		9月打設：秋期		
				W	OPC	BS	S	G	AE剤	AE減水 剤	スラン プ(cm)	Air(%)	スラン プ(cm)	Air(%)
OPC	40	41		179	448		667	986	0.045	1.120	13	6.9	12	7.5
	50	43		171	342		746	1015	0.034	0.855	11.5	6.7	14	6.2
	60	45		171	285		804	1007	0.029	0.713	12.5	6.5	16	6
BS	40	41	45	179	246	202	661	977	0.045	1.120	11.5	6	8.5	5.5
	50	43	45	171	188	154	742	1010	0.034	0.855	13	6	13	5
	60	45	45	171	157	128	799	1002	0.029	0.713	15	5.7	15	5

表－2 配合表(フレッシュ試験)

配合記号	s/a (%)	単位量(kg/m ³)							
		W	C	S	G	G:[5-13mm]	G:[10-20mm]	AE剤	AE減水剤
OPC (W/C=60%)	45	171	285	804	1007	504	504	0.029	0.178
	45	186	310	763	964	504	504	0.031	0.194
	45	156	260	827	1046	504	504	0.026	0.163
	45	171	285	804	1007	806	201	0.029	0.178
	45	171	285	804	1007	201	806	0.029	0.178
	50	171	285	892	916	504	504	0.029	0.178
	40	171	285	714	1099	504	504	0.029	0.178

調べるため、3種類用意した。

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/m³である。よって単位水量を±15kg/m³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。

3. 実験結果

3.1 透気試験結果

(1) 透気係数及び圧縮強度の算出

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。

両材料及び養生時期別の圧縮強度と透気係数の測定結果を図－1, 2に示す。両材料共に、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。すなわち、強度とは反比例の関係にある。

次に、両材料及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－6, 7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⁶⁾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、かつ空隙が緻密である。すなわち、

表－3 タンピング試験計測項目及び方法

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。

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。

(2) 養生環境(気象条件)と試験結果から得られた考察

東京都大手町における、湿潤養生及び全養生期間の気象条件を表－4, 5に示す。

表-4 OPC 気象条件(上段：夏期，下段：秋期)

平均気温：℃		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
平均		合計		平均		平均	
28.5	22.2	168.5	247.0	70.0	69.8	5.5	3.3
27.9	25.3	0.5	5.5	70.4	68.8	5.0	5.1

表-5 BS 気象条件(上段：夏期，下段：秋期)

平均気温：℃		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
平均		合計		平均		平均	
28.4	21.0	209.0	246.0	70.1	68.8	5.6	3.1
28.7	23.5	11.5	101.0	69.4	59.4	5.8	2.5

表-6 OPC 養生方法による試験結果の変動

試験方法	圧縮強度			透気係数		
水セメント比	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-7 BS 養生方法による試験結果の変動

試験方法	圧縮強度			透気係数		
水セメント比	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-6, 7 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は，水中，湿潤+気中，気中の順に，各々0.1 程度ずつ減少していることが確認できた。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よりも透気係数の方が大きな変化を示すことが確認できた。

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

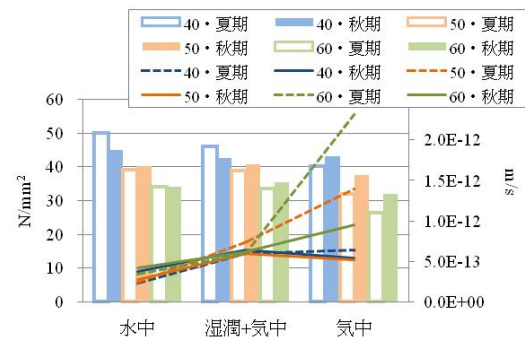


図-1(OPC 圧縮強度：棒グラフ，透気係数：折線)

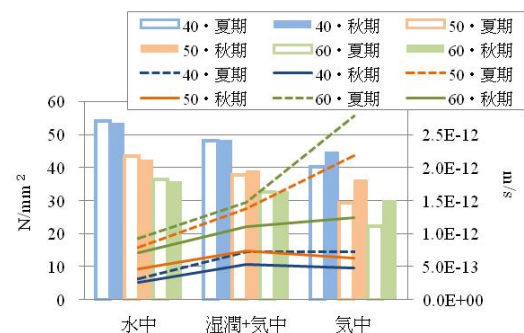


図-2(BS 圧縮強度：棒グラフ，透気係数：折線)

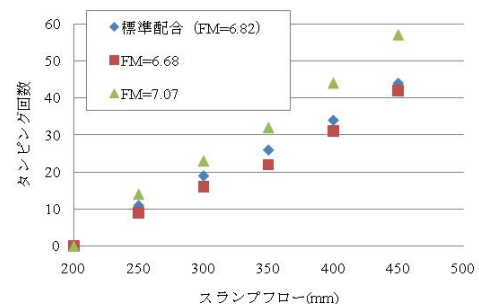


図-3 粗粒率変動(タンピング回数)

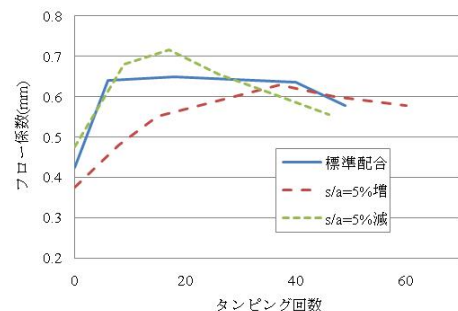


図-4 細骨材率変動(フロー係数)

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 タンピング試験結果

図-3 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，

スランブフロー450mm 到達に要したタンピング回数が 10 回以上多かった。初期スランブは±2.5cm 以内であることから、スランブ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ことがわかる。また、粗粒率 7.07 の場合では上部円がスランブフロー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⁵⁾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、初期スランブが±2.0cm 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。上部円もスランブフロー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、スランブフロー(mm)をスランブ(mm)で除した値を「フロー係数」と定義し、図-4 に示す。フロー係数が高く推移しているということは、スランブフローの増加に伴い、スランブ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、スランブ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部がその形状を一定期間保つためスランブ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、初期スランブと、スランブフロー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、スランブ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では、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で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。

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、スランブ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)土木学会：構造物表面のコンクリート品質と耐久性能検証研究小委員会（335 委員会）成果報告書及びシンポジウム講演概要集，pp.297-309，2008.4
- 3) 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
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書[施工編]，pp.122-124，2007
- 5) 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
- 6) 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，N60，pp.227-234，2006