

論文 常圧蒸気養生で硬化を促進した重量コンクリートの遮水性

小川 洋二^{*1}・横室 隆^{*2}・橘高 義典^{*3}・井川 秀樹^{*4}

要旨: 通常の骨材より密度の大きい細骨材および粗骨材を用いて、コンクリートの単位容積質量を 3.00t/m^3 以上に調整した重量コンクリートを対象とし、常圧蒸気養生で硬化促進した際の遮水性に着目した。実験要因は、コンクリートの単位容積質量、水セメント比、および膨張材とした。コンクリートの表面透水性能は、水セメント比の影響を顕著に受けること、重量骨材を用いることにより接水直後や接水から 10 分経過した時点での透水速度が低下することが示された。また、膨張材を混合すると、顕著に透水速度が低下し遮水性が向上した。本実験の範囲では供試体の水分蒸発量と表面透水速度との間に相関関係が認められた。

キーワード: 重量コンクリート, 表面吸水試験, 物質移動抵抗性, 重量骨材, 膨張材, 遮蔽用コンクリート

1. はじめに

密度 3.5g/cm^3 を超える骨材を用いて製造する重量コンクリートは、普通コンクリートの単位容積質量が約 2.3t/m^3 であるのに対し、 $2.5\sim 3.8\text{t/m}^3$ 程度までの重量化設計が可能である。重量コンクリートは、これまで建設機械などのカウンターウェイトや消波ブロック、防波堤、船舶バラスタ材等に用いられてきた¹⁾。近年では放射線遮蔽性能に特に注目が集まっている。2011 年、福島第一原子力発電所で発生した事故により、放射性物質が国土の広範囲に飛散し土壌や植物を汚染した。現在、その除染作業が急速に進められているが、汚染土や枯葉など放射性物質で汚染された廃棄物の中間貯蔵施設は明確になっていない。このため一時保管の場所の確保が急務となっており、仮置き用の格納容器として重量コンクリートが注目され適用されつつある²⁾。

しかし、重量コンクリートの物性については未だ知見が少なく不明な点が多い。特に放射性汚染物質の格納容器として供用するには、力学特性のみならず長期的な耐久性や、容器外部への漏出に対する安全性を保有することが必須となる。

コンクリートの耐久性としては、中性化や塩害などによる鋼材腐食や、アルカリシリカ反応、凍害などによるコンクリートの劣化が代表的なものでありこれらについて検討する必要がある。いずれの劣化も外部からの劣化因子に対する物質移動抵抗性を把握することが重要である。汚染水等の漏出に対しては、コンクリート内の物質移動抵抗性ととも、コンクリートに微細なひび割れが生じて、ひび割れを閉塞して水の動きを遮断する自己治癒性能を有することがきわめて重要となってくる。

物質移動抵抗性を直接的に評価する方法としては、空気の動きに着目した透気性試験や、水の動きに着目した

透水性試験、吸水性試験などがある³⁾。また、自己治癒性能を評価するには漏水試験や通水試験などが提案されている⁴⁾。

本論文ではまずコンクリート内部の物質移動抵抗性に注目し、水の動きに着目した透水性試験を実施して、常圧蒸気養生をおこなった重量コンクリートの単位容積質量や水セメント比、および膨張材の添加が、表面透水性能におよぼす影響について基礎的な検討をした。

2. 実験概要

2.1 使用材料と配合

本実験に使用した材料を表-1 に、実験水準を表-2 に、コンクリートの配合を表-3 にそれぞれ示す。セメントは普通ポルトランドセメントを用いた。骨材はコンクリートパイルの製造に通常使用している硬質砂岩砕石 2005 と砕砂に加えて、重量細骨材として製鉄所の圧延と表面処理工程で発生する酸化鉄粉を、重量粗骨材として鉄分を多く含むダストと還元スラグを混合熔融し、破碎、粒度調整したものをそれぞれ用いた。いずれも重量コンクリート用骨材として国内で流通しているものである。混和材にはエトリングイト系膨張材を使用した。

コンクリートの水セメント比（以下 W/C と表記する）は高強度製品を想定できるように、35, 45, および 55% の 3 水準とした。目標スランプフローは $50\pm 10\text{cm}$ とした。重量コンクリートでは自重が大きいためスランプが大きくなる傾向があり、普通コンクリートと同程度のスランプであっても作業性は同等以下となることが指摘されている¹⁾。コンクリート製品向けではポンプ圧送性や高い充填性は必ずしも要求されないが、振動台上に型枠を設置できない大型製品では十分な振動成形を与えることができないため、弱い振動締め条件下でも成形でき

*1 日本ヒューム(株) 技術研究所 課長 博士 (工) (正会員)

*2 足利工業大学 工学部建築学科教授 博士 (工) (正会員)

*3 首都大学東京 大学院都市環境科学研究科教授 工博 (正会員)

*4 日本ヒューム(株) 技術研究所 所長 (正会員)

るよう高い充填性が必要となる。予備実験によりスラン
プフロー50cm の配合とすることで、振動締めを 15～
30 秒程度与えることで骨材の材料分離がなく成形でき
ることを確認した。単位水量は全配合で 170kg/m³ に揃え、
スランプフローは高性能減水剤の添加量で調整した。

コンクリートの単位容積質量は、通常の骨材を用いた
場合の 2.4t/m³ に対し、3.1t/m³ と 3.6t/m³ を設定した。
3.1t/m³ の配合は、通常配合の細骨材のみを重量細骨材に
容積置換し、3.6t/m³ 配合は、通常配合の骨材全体を重量
細・粗骨材に置換したものである。細骨材率は W/Cによ
って調整し、骨材種類によらず同一とした。

混和材として既往の研究より物質移動抵抗性と自己
治癒性能とが期待できるエトリンガイト系膨張材を用い
た。膨張材の効果を明確にするためにセメントの外割で
粗骨材に対して容積置換をして混入した。

表－1 使用したコンクリートの材料

材料名	記号	種類および物性値
セメント	C	普通ポルトランドセメント、密度3.16g/cm ³
細骨材	S1	砕砂、表乾密度2.62g/cm ³ 、吸水率1.63%、粗粒率2.87
	S2	酸化鉄粉、表乾密度4.95g/cm ³ 、吸水率1.87%、粗粒率2.94
粗骨材	G1	砕石2005、表乾密度2.66g/cm ³ 、吸水率1.10%、粗粒率6.58
	G2	DSM骨材20-05、表乾密度4.27g/cm ³ 、吸水率0.45%、粗粒率6.52
膨張材	EXP	エトリンガイト系、密度3.01g/cm ³
高性能減水剤	SP	コンクリート製品用ポリカルボン酸系

表－2 実験水準

No.	単位容積質量	スランプフロー	W/C	W	混和材	
	t/m ³		%	kg/m ³		
1	2.4	50	35	170	なし	
2			45			
3			55			
4	3.1		35			膨張材
5			45			
6			55			
7	3.6		35			
8			45			
9			55			
10	3.1		35			
11			45			
12			55			

表－3 コンクリートの配合

配合No.	コンクリートの 単位容積質量	スランプフロー	単位量 (kg/m ³)															
			水セメント比		細骨材率	単位量 (kg/m ³)												
			W/C	s/a		水	セメント	細骨材		粗骨材		膨張材	高性能減水剤					
t/m ³	cm	%	%	W	C	S1	S2	G1	G2	EXP	SP							
1	2.4	50	35	48	170	486	825		908			6.32						
2			45	50		378	904	918		6.43								
3			55	52		309	970	909		6.18								
4	3.1		50	35		48	170	486		1559	908			3.89				
5				45		50		378		1709	918		3.02					
6				55		52		309		1833	909		3.40					
7	3.6			50		35		48	170	486		1559		1457		3.89		
8						45		50		378		1709		1474	3.02			
9						55		52		309		1833		1460	3.09			
10	3.1					50		35		48	170	486		1559	855		60	3.89
11								45		50		378		1709	865		60	3.40
12								55		52		309		1833	856		60	3.71

2.2 供試体の作製と質量変化の測定

供試体は、フレッシュコンクリートの試験を実施した
後に作製した。透水試験用供試体は、□10×10×40cm の
鋼製型枠を用いた。膨張材を混合した水準では JIS A
6202 コンクリート用膨張材附属書 2 (参考) の拘束膨張
試験に準じ、断面中心に PC 鋼棒 (φ11mm、ねじ転造型)
と 2 枚の拘束端板とを用いて一軸拘束状態とした。圧縮
強度試験用は、φ10×L20cm の金属製軽量型枠を用いた。
コンクリートは型枠に一層詰めとし、テーブル振動台 (振
幅 0.8mm、振動数 1500vpm) で 15 秒間締め固めた。

硬化を促進するために常圧蒸気養生を実施した。養生
条件は、前置き 20°C-6h、昇温 20°C/h、最高温度 65°C-
保持 4h とし、降温は実験室温まで徐冷とした。供試体は
打設翌日脱型し、20°C、60%R.H.の恒温室内で材齢 28 日ま
で静置した。気中養生中の供試体の質量変化を、脱型時
から材齢 1 週ごとに 4 週まで継続して測定した。

2.3 表面透水試験方法

コンクリートの表面透水試験は、林らが提案した方法
^{3), 5)}を参考にして材齢 28 日に実施した。コンクリート打
込み面に対し側面側を試験面とし、内径 80mm・幅 10mm
の薄い平ゴム製リングを置き、その上にガラス製漏斗を
のせた。漏斗とコンクリートとの隙間から漏水しないよ
う漏斗をゴムリングに押し当てて固定した (写真－1)。

漏斗の先端には内径 7.6mm のメスピペットを垂直に
設置し、コンクリート表面 (接水面) から水頭が約 400mm
となるように水をすばやく注水し、注水開始から 10 秒後
を測定開始点として以後の水頭の変化をメスピペットの
目盛りから読み取り、透水量として測定した。測定間隔
は開始から 1 分間隔で 10 分まで行い、最大 20 分まで測
定を継続した。表面透水試験は、供試体の材齢や含水率
が大きく影響することが指摘されている⁶⁾。本報告では、
蒸気養生後ただちに脱型し、恒温恒湿下での気中養生を
27 日実施することにより表層の含水率を安定化した。な
お本報では、初期水頭により水圧を与えて物体への透過
性を評価したので透水性として扱った。

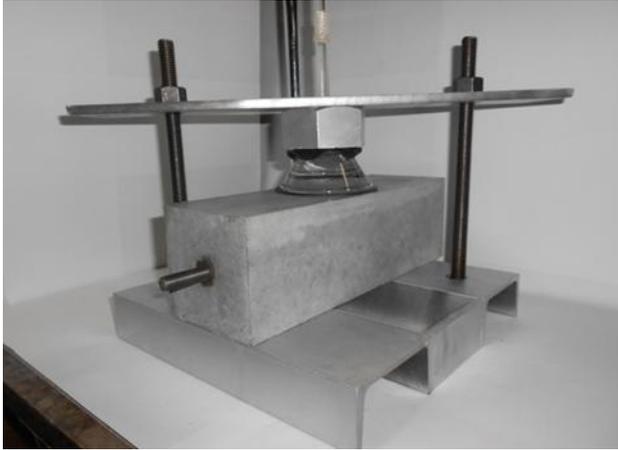


写真-1 表面透水試験装置

3. 実験結果

3.1 フレッシュコンクリート

フレッシュコンクリートの試験結果を表-4に示す。フレッシュ性状の目視観察から、材料分離は生じていないことを確認した。また、単位容積質量の測定結果から、ほぼ設計どおりの密度が得られていることを確認した。重量コンクリートのスランプフローは、混和剤の添加量により容易に調整が可能であったが、連行空気量は設定値(2±1.5%)より大きめの結果となった。この原因は、今回細骨材に使用した酸化鉄粉の表面成分によるものと推察される。酸化鉄粉は、練混ぜ時の起泡性が高い可能性があることが指摘されており¹⁾、今回消泡剤を併用しなかったため連行空気量が大きくなったものと思われる。重量コンクリートは単位容積質量が設計条件となるので、重量骨材の使用にあたって、適した消泡剤を把握しておく必要がある。

表-4 フレッシュコンクリートの結果

配合No.	Con.Temp. °C	SP C×%	SLF (mm×mm)	Air %	単容重 g/cm ³
1	20.7	1.3	555×565	1.2	2.44
2	20.2	1.7	490×480	0.6	2.43
3	20.8	2.0	540×510	0.9	2.42
4	20.8	0.8	630×640	3.7	3.22
5	20.6	0.8	500×455	8.0	3.13
6	20.5	1.1	490×460	6.0	3.27
7	21.8	0.8	500×470	5.8	3.59
8	20.6	0.8	495×515	7.4	3.66
9	20.4	1.0	510×480	6.3	3.74
10	17.6	0.8	540×565	6.5	3.06
11	16.7	0.9	595×540	8.6	3.03
12	16.0	1.2	550×610	6.5	3.18

3.2 硬化コンクリート

硬化コンクリートの試験結果を表-5に示す。膨張材を添加していないコンクリートの圧縮強度(材齢28日)とセメント水比との関係は、図-1に示すように通常コンクリートと同様に直線関係で整理できる。コンクリート密度(g/cm³)の影響は3.1と3.6とで両者にほとんど

差異が見られなかった。密度2.4g/cm³の普通コンクリートとの強度差については連行空気量の影響があるため、A.N.Talbotが提唱したセメント空隙比(c/v+c)⁷⁾を用いて圧縮強度との関係を整理した結果を図-2に示す。図より、コンクリートの密度によらずほぼ同一線上にプロットされることから、コンクリート中の空隙の影響が圧縮強度に対して支配的であることが示され、重量骨材の影響は小さいといえる。

表-5 硬化コンクリートの試験結果

配合No.	コンクリートの密度 g/cm ³	W/C %	材齢28日		
			見かけ密度 kg/m ³	圧縮強度 N/mm ²	静弾性係数 kN/mm ²
1	2.4	35	2380	58.9	30.2
2		45	2330	42.2	25.2
3		55	2310	33.7	23.4
4	3.1	35	3120	46.8	31.8
5		45	3020	27.2	25.1
6		55	3140	21.7	24.7
7	3.6	35	3550	42.1	36.4
8		45	3590	28.4	31.4
9		55	3680	20.4	28.8
10	3.1	35	3040	57.6	34.8
11		45	3040	38.4	29.8
12		55	3180	31.7	30.2

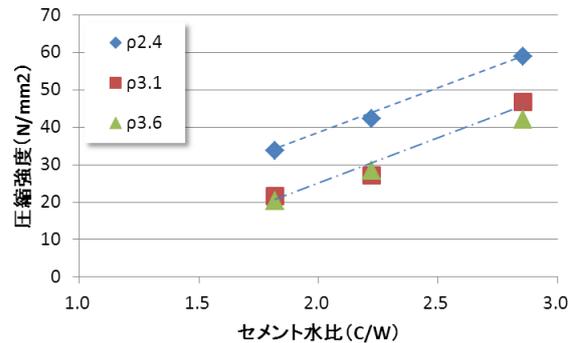


図-1 セメント水比と圧縮強度

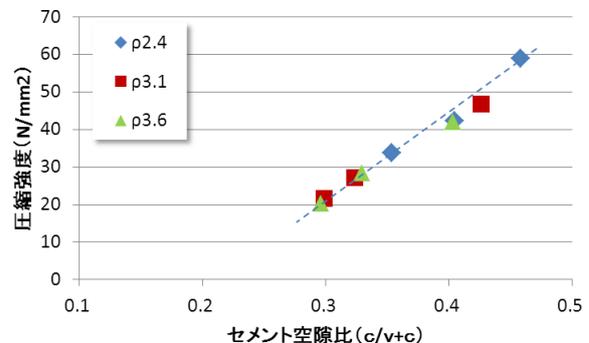


図-2 空隙セメント比と圧縮強度

エトリンガイト系膨張材を添加したコンクリートの圧縮強度は、図-3に示すように膨張材を使用しない配合と比較して同一セメント水比では高く得られた。連行空気量は同程度であり、膨張材をセメント外割で添加し

ていたため、膨張材をセメント量として換算したセメント水比を求めると、膨張材を混合していない同じ密度のコンクリートの線形挙動とほぼ等しくなった。本実験のように膨張材を使用すると、常圧蒸気養生により普通セメントを増量したのと同程度の強度発現性を示したことになる。圧縮強度と静弾性係数の関係を図-4に示す。図より、コンクリートの密度による影響が顕著に見られ、コンクリート密度が大きいほど圧縮強度に対する静弾性係数が高くなった。参考までに密度 2.4t/m^3 、スランプ 8cm で同じ蒸気養生、および標準水中養生を実施した結果もプロットしている。なお、重量骨材である重晶石では通常コンクリートの60%程度に低下したとの報告⁸⁾もあり、重量骨材を用いる場合、静弾性係数が変化することに配慮が必要となる。

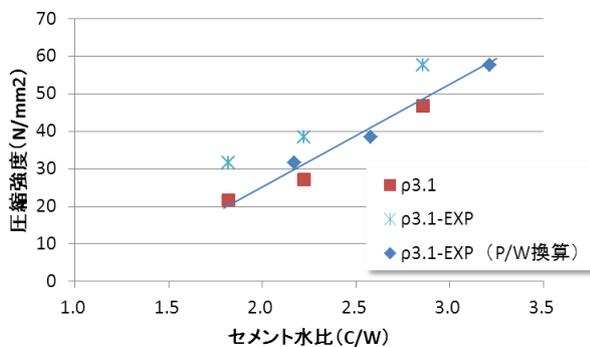


図-3 膨張材の圧縮強度への影響

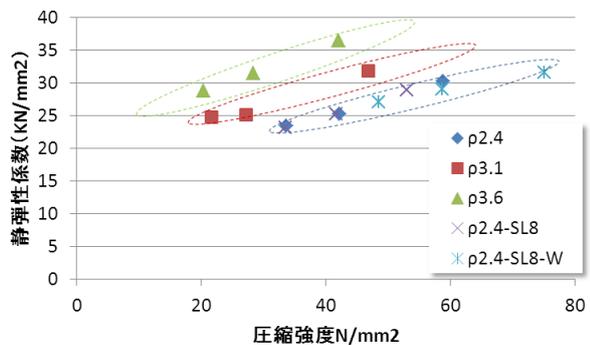


図-4 圧縮強度と静弾性係数

3.3 質量変化

角柱供試体 ($10 \times 10 \times 40\text{ cm}$) の脱型時からの蒸発水分量を比較した。データは供試体3~4本の平均値である。本実験の結果から、供試体からの水分の蒸発は、脱型から7日までの間に急激に生じ、W/Cの影響を強く受けることが明確となった。この傾向はコンクリート密度に拠らず、W/Cが大きいほど7日までの水分蒸発速度は速いが、7日以降の質量変化は緩やかとなりW/Cの影響は小さい。W/Cが45%までは、重量コンクリートと普通コンクリートとで水分蒸発挙動はそれほど変わらなかったが、

図-7に示すようにW/Cが55%の場合は、重量コンクリートの方が通常配合よりも水分蒸発量は小さくなった。圧縮強度では骨材密度の違いによるマトリックスの差異が見られなかったため、細孔空隙構造はほぼ等しいと思われたが、重量骨材とペースト界面の物理特性や、重量骨材自体の密実性の違い等により、特にW/Cが大きい配合には差異が生じたものと思われる。このメカニズムについては、細孔径分布を調査中であり今後の課題とする。膨張材を混合した配合は図-8に示すように、混合しない配合(図-6)より水分蒸発量が顕著に少なくなる事が分かった。

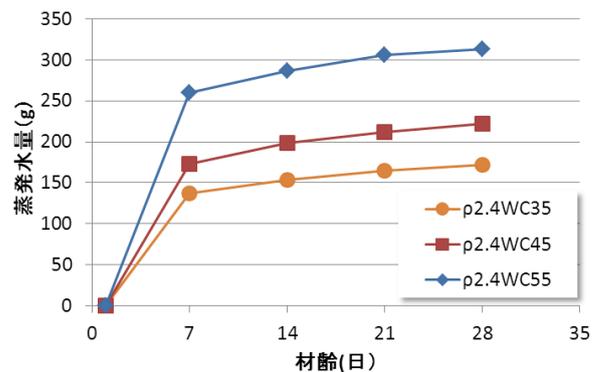


図-5 通常配合(密度2.4)の質量変化

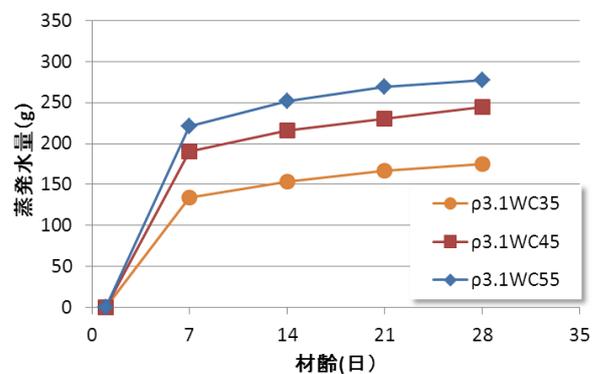


図-6 重量コンクリート(密度3.1)の質量変化

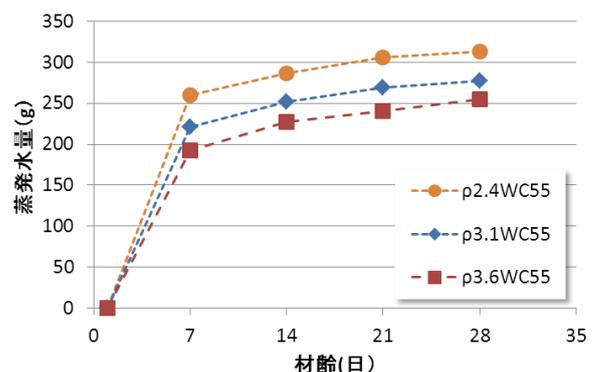


図-7 水セメント比55%での比較

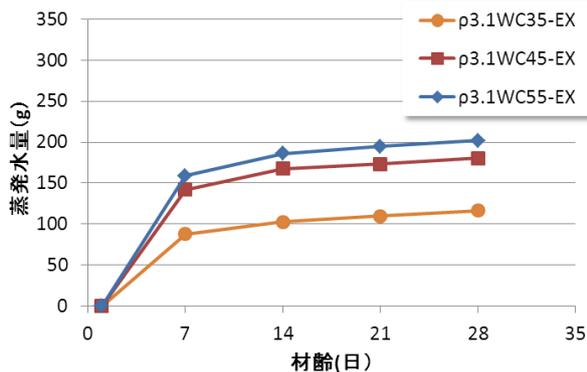


図-8 膨張材の影響

3.4 表面透水性

全試験において、測定開始時（注水から 10 秒後）の供試体の接水面からメスピペットの水位までの高さは、 $390 \pm 5\text{mm}$ となるように制御した。既往の研究³⁾より 100～500mm までは有意な差が生じないことを考慮し、目盛の読みやすい位置とした。この位置における漏斗およびメスピペットの水量と接水面積とから、接水面は約 0.55kPa の圧力を受けた透水試験となる。測定結果をデータ処理し、Levitt の提案式(1)で評価した。

$$p = a t^{-n} \quad (1)$$

ここで、 p ：表面吸水速度 ($\text{ml/m}^2/\text{sec}$)、 a ：ごく初期の吸水速度 ($\text{ml/m}^2/\text{sec}$)、 n ：吸水挙動の変化を表すパラメータである。

図-9 に初期透水速度 a を比較した。本実験で初期とは 1 秒を定義している。図より初期透水速度は W/C の影響を受け、W/C と比例して増加した。通常コンクリートと、密度 $3.1 (\text{g/cm}^3)$ の重量コンクリートは、ほぼ同じ挙動を示したが、密度 $3.6 (\text{g/cm}^3)$ はこれらよりも小さい結果を示した。密度 3.1 は細骨材に酸化鉄粉を用いたものだが、砕砂と同様の結果であった。一方、密度 3.6 では細骨材と粗骨材とに重量骨材を用いており、特に粗骨材の違いが影響したと思われる。重量粗骨材 DSM20-05 は、鉄分を含むダストと還元スラグを混合熔融して製造される鉄鋼二次製品系重量骨材である。実積率は、通常砕石 2005 と比較して大差ないが、表面形状は天然砕石よりも滑らかであり、吸水率は天然砕石よりも小さく密実性は高い。 a はコンクリートのごく表層の品質を表すとの指摘⁶⁾もあり、骨材自体の透過性と界面での遷移帯組織の違いが影響したものと推察される。コンクリートに連行された空気量は、通常コンクリートが 0.6～1.2%、重量コンクリート（密度 3.1g/cm^3 ）は 3.7～8.0% をそれぞれ示し顕著な差異があったが、本結果には明確な影響が示されなかった。微細に独立した気泡はコンクリートの透過性に寄与しない⁹⁾とされ本結果と符合するが、骨材密度の効果と相殺された可能性もあるので、空

気量の影響は消泡剤を用いて今後検証する課題とする。膨張材の影響は、添加により初期透水速度が半減以下となった。膨張材により、コンクリート表層部分が著しく緻密化されることが明確に示され、蒸気養生を行う製品にも有効である。

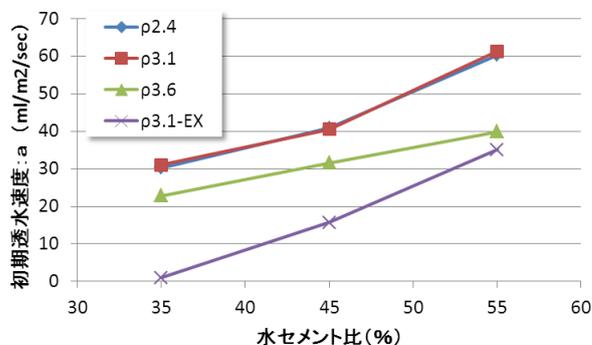


図-9 初期透水速度の比較

図-10 に透水速度の時間変化を表す係数 n の結果を示す。係数 n は W/C やコンクリートの密度による変化は少なく、概ね 0.7～0.9 の範囲にあった。一般的には 0.3～0.7 の範囲を示す⁶⁾とされるが本結果はこれよりもやや大きくなった。一方、膨張材を混入した系では W/C35% を除くと他と同様であったが、W/C35% のとき大きく低下し 0.15 を示した。接水直後から透水量がきわめて小さく、その挙動が継続されていたためである。

図-11 に、注水から 10 分経過までの実測データを指数関数で近似して得た 10 分経過時の透水速度をそれぞれ比較した。コンクリート表層部の物質透過性を評価する際に、この数値を比較することでおおよその傾向を推定することができる。Levitt の提唱する品質評価基準によると、10 分経過時では $0.25 \sim 0.50 \text{ml/m}^2/\text{sec}$ を境界に Low, Average, High の指標が示されている⁶⁾。

図より、W/C の影響は顕著であり、W/C が小さいほど透水速度は小さい。コンクリート密度の影響は W/C が 45% より大きい領域では、普通コンクリートよりも重量コンクリートの方が透水速度は小さい結果を示した。このことは、適切に成形された重量コンクリートではコンクリート内部の物質移動抵抗性が低下することはなく、若干ではあるが普通コンクリートよりも遮水性が向上することを示している。また、膨張材の添加により透水速度は顕著に低下し W/C55% でも Levitt の評価では Low に相当していた。W/C が小さいほど遮水効果が大きかった。

図-12 に透水試験を実施した材齢（28 日）における蒸発水量と、10 分経過時点での透水速度との関係を示す。図より、両者間には相関傾向が認められ、概ね表層部から逸散する水分量が多いものほど透水速度が大きくなることが示された。コンクリート内部での物質移動抵抗性

を大きくするには、水分逸散量を小さくすればよく、膨張材の添加、低 W/C 化、コンクリート密度の重量化の順で有効であることが読み取れる。

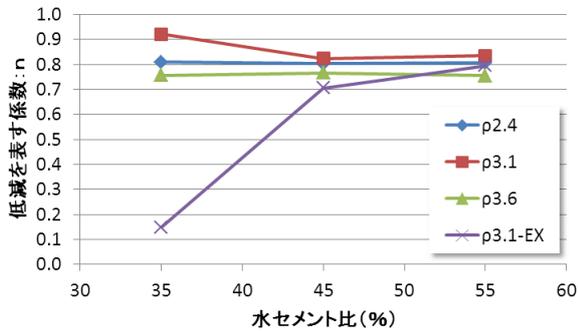


図-10 低減を表す係数 n の比較

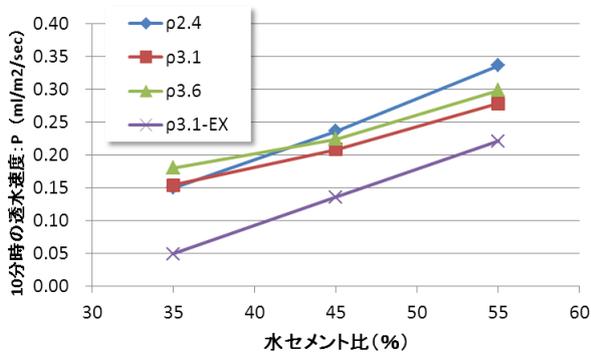


図-11 10分経過時の透水速度の比較

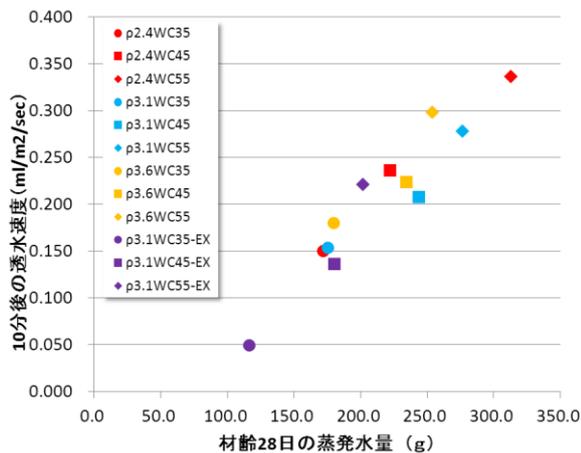


図-12 材齢 28 日の蒸発水量と 10 分経過時の透水速度

4. まとめ

本実験の範囲で得られた主な成果を以下にまとめた。
 (1)重量骨材を用いたコンクリートの圧縮強度は、通常コンクリートと同様にセメント水比と直線式で近似できた。また、圧縮強度は空隙量が支配的であり、重量骨材の影響は小さかった。

(2)重量コンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係は、コンクリートの密度が大きいほど圧縮強度に対する静弾性係数が高くなった。

(3)表面透水試験によりコンクリート表層の物質移動抵抗性は、水セメント比や膨張材の添加により顕著に変化した。重量コンクリートの初期透水速度は、密度 3.6g/cm^3 とした配合では通常配合より低下した。また、10分経過時の透水速度は、水セメント比が 45% より大きい領域では普通コンクリートよりも重量コンクリートの方が小さい結果を示した。このことから、重量コンクリートは通常コンクリートと同等以上の表層部の物質透過抵抗性を示した。

(4)重量コンクリートにエトリンサイト系膨張材を骨材置換で混入すると、圧縮強度や遮水性が顕著に向上した。

(5)角柱供試体の水分蒸発による質量変化と、本試験で求まる透水速度との間には、相関関係が認められた。

参考文献

- 1) 肥後康秀, 吉本稔, 濱田武: 鉄鋼副産物を用いた重量コンクリートについての検討, 太平洋セメント研究報告, 第 154 号, pp.42-48, 2008
- 2) 坂本浩幸: コンクリートによる放射線の遮蔽について, コンクリートテクノ, Vol.31, No.6, pp.63-68, 2012.6
- 3) 林和彦, 細田暁: コンクリート実構造物に適用できる表面吸水試験方法の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1769-1774, 2011
- 4) 五十嵐心一, 細田暁, 人見尚, 今本啓一: セメント系材料の自己治癒技術の体系化研究専門委員会報告, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1-9, 2011
- 5) 林和彦, 細田暁, Usman AKMAL, 藤原麻希子: コンクリートの表面吸水試験における計測方法およびデータ処理方法の提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1804-1809, 2012
- 6) 構造物表層のコンクリート品質と耐久性検証システム研究小委員会 (JSCE335 委員会) 第二期成果報告書およびシンポジウム講演概要集, コンクリート技術シリーズ 97, pp.152-162, 土木学会, 2012.7
- 7) 笠井芳夫編著: コンクリート総覧, p.398, 技術書院, 1998
- 8) 肥後康秀, 吉本稔, 早川隆之: 重晶石を使用した重量コンクリートの諸物性, 土木学会第 66 回年次学術講演会講演概要集, V-578, 2011
- 9) A.M.Neville, 三浦尚訳: ネビルのコンクリートバイブル, 技報堂, 2004.6