

論文 コンクリートの水分浸透速度に及ぼす養生条件の影響

石塚 浩章*1・猪瀬 亮*2・西 祐宜*3

要旨：蒸気養生を行ったプレキャストコンクリート(W/C=35~53%)を対象とし、標準養生および封緘養生を行ったコンクリート(W/C=53%)との水分浸透速度係数の比較を行った。同水セメント比で比較すると、水分浸透速度係数は標準養生が最も小さい値を示し、蒸気養生の約半分となった。また、蒸気養生の水分浸透速度係数を標準養生および封緘養生と同等にするためには、水セメント比を10%程度小さくする必要があることが確認された。養生条件による水分浸透速度係数の変化を定量化し、水分浸透速度を考慮したプレキャストコンクリートの設計条件を見出した。

キーワード：蒸気養生, プレキャストコンクリート, 水分浸透速度係数, 耐久性

1. はじめに

プレキャストコンクリート製品は計画的な生産性が重要視され、型枠の回転率向上のため、促進養生としてコンクリートに60℃前後の温度履歴を与える蒸気養生が行われる。コンクリートの表層部と内部および養生槽内と外部の温度差から、昇温および降温過程や脱型時にコンクリートから局部的に水分が散逸しやすい。更に、製造後は気中保管となるため、表層部の乾燥は顕著となる。

寺川¹⁾は乾燥に起因した表層の細孔構造の違いを照査しており、蒸気養生後、気中保管したコンクリートはコンクリート表層部における深さ方向での細孔構造の変化は見られず、内部にかけて緻密化している現場打ち模擬コンクリートとは細孔構造が異なることを報告している。久我²⁾は水中養生と初期高温履歴として蒸気養生を行ったセメントペースト供試体の細孔構造の変化を検討しており、普通ポルトランドセメントと高炉セメントB種相当どちらも初期の水和は促進されるが、材齢28日以降の水和は停滞し、粗大な空隙が占める割合が多くなることを報告している。プレキャストコンクリートは現場打ちに比べて水セメント比が低くなること、締固めが十分に行われていること、型枠寸法が正確で配筋についても管理が行きとどいていること等を考慮し、かぶりの最小値は現場打ちコンクリートと比べて小さくて良いと報告³⁾している。プレキャストコンクリート製品は、水セメント比が現場打ちコンクリートよりも低めに設計されるため、一般的には物質移動抵抗性は高くなると考えられる。しかしながら、養生条件等の影響により、組織が緻密化されておらず、かぶり厚さが少ない設計をすることが多いため、鉄筋近傍に水分が供給されやすい環境とも言える。

コンクリートの耐久性として、中性化に伴う鋼材腐食

の照査には、水分浸透速度を把握することが重要であると筆者らは考えている。水分浸透速度係数の試験方法として、「短期の水掛かりを受けるコンクリート中の水分浸透速度係数試験方法(案)JSCE-G 582-2018」が土木学会規準に制定されている。本試験は、試験期間が短く測定自体も簡易であるが、標準養生を行った供試体を対象としたケースがほとんどであり⁴⁾、蒸気養生を行ったプレキャストコンクリートの検討例は蓄積されていないのが実情である。そこで本検討では、蒸気養生を行ったコンクリートを対象とし、標準養生および現場打ちコンクリートを模擬し封緘養生を行ったコンクリートと水分浸透速度係数を比較することで、プレキャストコンクリートの耐久性に関わる表層品質を評価するとともに、設計条件を考察することとした。

2. 試験概要

2.1 使用材料および配(調)合

表-1に使用材料、表-2にコンクリートの配(調)合を示す。スランブは12±2.5cm、空気量は4.5±1.0%を目標とした。温度20±3℃、相対湿度60%以上の環境下にて練混ぜを行った。プレキャストコンクリートは高炉セメ

表-1 使用材料

材料	記号	種類・物性
水	W	つくば市上水道
セメント	N	普通ポルトランドセメント(密度: 3.16g/cm ³)
	BB	高炉セメントB種(密度: 3.05g/cm ³)
細骨材	S	掛川産山砂(表乾密度: 2.59g/cm ³ , F.M.: 2.79)
粗骨材	G	青梅産硬質砂岩碎石 (表乾密度: 2.67g/cm ³ , 実積率: 58.2%)
混和剤	Ad	ポリカルボン酸系化合物
	AE	樹脂酸塩系界面活性剤

*1 (株)上田商会 取締役 (正会員)

*2 フローリック(株) 技術本部コンクリート研究所 修士(工学) (正会員)

*3 フローリック(株) 技術本部コンクリート研究所 所長 博士(工学) (正会員)

表-2 コンクリートの配(調)合

No.	W/C [%]	s/a [%]	単位量 [kg/m ³]				
			W	N	BB	S	G
1	35	43.8	160	457	-	738	975
2	40	45.4		400	-	785	
3		44.9		-	400	772	
4	45	46.5		356	-	821	
5	53	47.8		302	-	865	

表-3 試験項目および試験方法

対象	試験項目	試験方法
フレッシュ コンクリート	スランブ	JIS A 1101
	空気量	JIS A 1128
	コンクリート温度	JIS A 1156
硬化 コンクリート	圧縮強度	JIS A 1108
	水分浸透試験	JSCE-G 582

表-4 検討水準

W/C [%]	セメント 種別	一次養生	二次養生
35	N	蒸気	気中
40	N	蒸気	気中
	BB		
45	N	蒸気	気中
53	N	蒸気	気中
		標準水中	
		封緘	気中

ント B 種を併せて 4 水準、現場打ち模擬コンクリートは 1 水準の水セメント比を設定した。

2.2 試験項目

表-3 に試験項目および試験方法を示す。硬化コンクリート試験に用いる供試体寸法はφ10×20cm とした。水分浸透試験に用いる供試体の事前処理は二次養生が終了した後に行い、気中保管の供試体は乾式切断、標準水中養生の供試体は湿式切断とした。切断後は JSCE-G 582 に記載されている、①温度 20℃±2℃かつ相対湿度 60±5%の恒温恒湿槽内で 91 日間静置、②温度 40℃±2℃かつ相対湿度 30±5%の恒温恒湿槽内で 28 日間静置、2 通りの条件にて乾燥を行い、乾燥方法の違いを検討した。水分浸透深さの測定時期は、浸せき開始から 5、24 および 48 時間後とし、供試体の中央で鉛直方向に割裂し、割裂面に現像剤を噴霧し、赤色に発色した部分を浸透深さとして測定した。

2.3 検討水準および養生条件

表-4 に水分浸透試験を行った検討水準を示す。蒸気養生を行う水準は、20℃環境下で前置き 2 時間行い、昇温速度 20℃/h で 60℃まで昇温、2 時間保持し、5℃/h で

徐冷を行う温度プログラムにて加温し、材齢 24 時間で脱型し、材齢 14 日まで温度 20±2℃、湿度 60±5%の環境下の気中に保管した。温度プログラムと実際の槽内温度および供試体内部温度に差が生じていないか確認を行うため、槽内および供試体中心部に T 熱電対を設置して温度履歴の測定を行った。標準水中養生を行う水準は材齢 24 時間で脱型後、材齢 28 日まで 20±2℃の水中に静置した。現場打ちコンクリートを模擬した封緘養生を行う水準は、材齢 5 日まで封緘した後、材齢 28 日まで温度 20±2℃、湿度 60±5%の環境下の気中に保管した。なお、二次養生終了は一般的に用いられている管理材齢としたため、蒸気養生を行う水準は材齢 14 日、標準水中養生および封緘養生を行う水準は材齢 28 日と日数に差が生じている。また、圧縮強度試験は、各二次養生終了後に測定を行った。

3. 試験結果

3.1 フレッシュコンクリートおよび槽内温度

表-5 にフレッシュコンクリートの試験結果を示す。スランブおよび空気量はすべて目標値を満足した。図-1 に W/C=40%の水準における槽内温度および供試体内部温度の履歴を示す。全ての配(調)合で傾向は同じであり、温度プログラムと槽内温度に差が生じていないことを確認した。供試体内部温度は槽内温度と比較して、昇温時に平均で-2.6℃、ピーク温度保持時に 1.9℃、降温時に 4.1℃の温度差が生じていることを確認した。

表-5 フレッシュコンクリートの試験結果

No.	水準	SL [cm]	SLF [mm]	Air [%]	C.T. [°C]
1	W/C=35%, N	12.8	239	4.3	18
2	W/C=40%, N	12.4	235	4.8	18
3	W/C=40%, BB	12.4	253	5.0	19
4	W/C=45%, N	14.3	251.5	5.0	18
5	W/C=53%, N	11.2	237.5	4.1	18

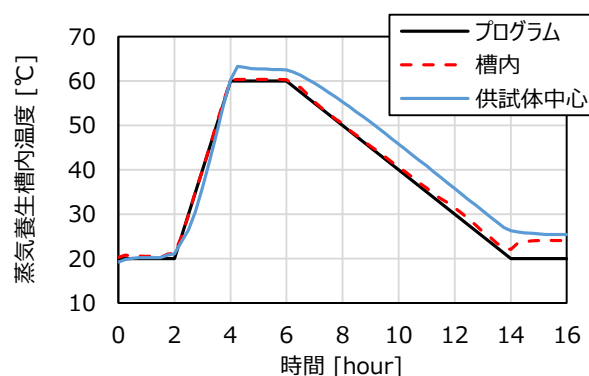


図-1 槽内温度および供試体内部温度

3.2 圧縮強度

図-2にC/Wと圧縮強度の関係を示し、標準偏差を併記する。C/Wと圧縮強度は養生方法に問わず、高い相関性が確認された。特に蒸気養生を行う供試体は、蒸気の当たり具合によって個体差が生じる可能性もあるが、本試験結果より、一樣な条件で試験を実施できたと言える。

蒸気養生(材齢14日)を行った場合、W/C問わず、標準水中養生(材齢28日)と比較して圧縮強度比は約57%であった。W/C=53%において、封緘養生(材齢28日)は標準水中養生と比較して約86%であった。W/C=40%でBBを使用した水準は、W/C=40%でNを使用した水準と比較して、養生方法問わず、約85%となった。また、蒸気養生を行った場合にW/C=53%の封緘養生と同程度の圧縮強度となるのは、直線回帰式から算出するとW/C=39.0%であった。

3.3 乾燥処理

図-3に蒸気養生を行った供試体の40℃乾燥の期間と質量減少率の関係を示す。40℃乾燥では、W/Cが高くなるほど質量減少率は大きくなる傾向を示し、同じW/C=40%におけるNとBBでは差は見られなかった。

図-4に蒸気養生を行った供試体の20℃乾燥の期間と質量減少率の関係を示す。20℃乾燥では、40℃乾燥の傾向とは異なり、W/C=45%の水準はW/C=35%よりも質量減少は小さくなる傾向が確認された。ただし、両者の質量減少率の差は0.05%と微小であること、40℃乾燥ではW/Cが高くなるほど質量減少率は大きくなっていくことを考慮すると、乾燥が進みづらい20℃乾燥では、恒温恒湿槽内における静置時の供試体の位置取りや循環する空気の当たり方によって左右された可能性が高い。また、Nと比較し、BBの質量減少率は小さくなった。蒸気養生を行い、20℃乾燥を実施した水準では、乾燥期間49日以降で質量変化がほとんど変化せず、恒量となることを確認した。

図-5にW/C=53%の各養生方法における乾燥期間と

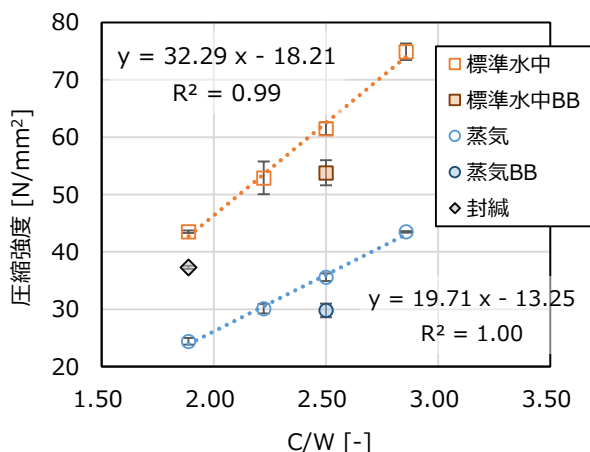


図-2 C/Wと圧縮強度の関係

質量減少率の関係を示す。蒸気および封緘養生は、40℃および20℃乾燥ともに質量減少の履歴は概ね同様であった。乾燥期間28日までの蒸気および封緘養生の40℃乾燥の質量減少の履歴は、標準水中養生の20℃乾燥と同様であった。また、標準水中養生の40℃乾燥は、全水準

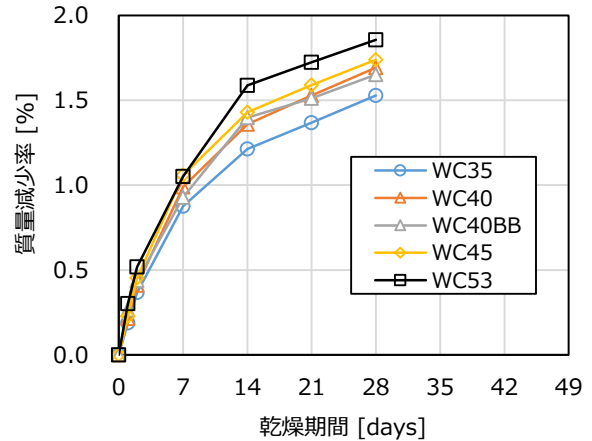


図-3 40℃乾燥の期間と質量減少率の関係

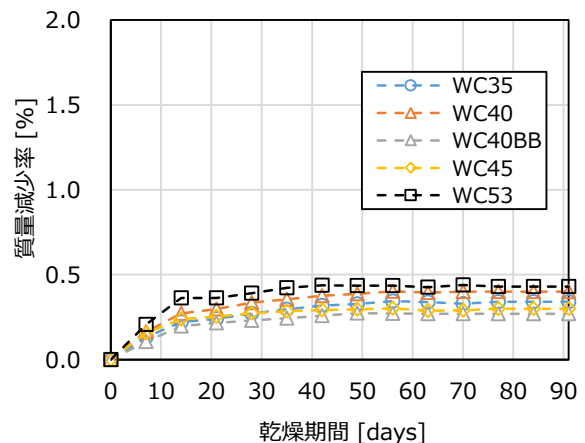


図-4 20℃乾燥の期間と質量減少率の関係

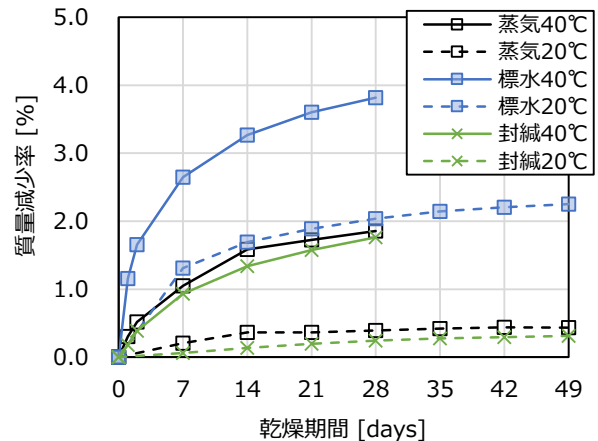


図-5 各養生方法における乾燥期間と質量減少率の関係 (W/C=53%)

の中で最も質量減少率が大きい結果となった。なお、土木学会規準の制定時に実施されたラウンドロビンテスト(W/C=50%で同じ養生および乾燥条件)の質量減少率とほぼ同量の質量減少率であった⁴⁾。

3.4 水分浸透試験

図-6に40℃乾燥を行った供試体の水分浸せき時間と浸透深さ、図-7に20℃乾燥を行った供試体の水分浸せき時間と浸透深さの関係を示す。乾燥温度に関わらず、W/Cが高いと、浸透深さは深くなる傾向が確認された。40℃乾燥の方が浸せき開始から48時間後の浸透深さは深くなるため、20℃乾燥と比較すれば安全側の評価となる試験条件といえる。また、BBを使用した場合は、浸せき開始から24、48時間で水分の浸透は進行していない。加圧透水試験でもNに比べてBBの方が透水係数は小さくなることは報告⁵⁾されており、Nと比べて水分移動に対する抵抗性が高いことが改めて確認された。

図-8にW/C=53%の各養生方法における水分浸せき時間と浸透深さを示す。標準水中および封緘養生の水準では、40℃乾燥の方が20℃乾燥よりも浸せき48時間後の浸透深さは深くなる傾向を示した。蒸気養生の水準も同様の傾向を示すが、40℃乾燥と20℃乾燥との浸透深さの差は他の養生より差が少ない。また、封緘養生と蒸気養生の20℃乾燥における浸透深さを比較すると、質量減少率の履歴が同様(図-5参照)であるにも関わらず、浸透深さは蒸気養生の方が大きい。二次養生における気中保管の日数は封緘養生の方が短いことを考慮すると、少なくとも同じW/Cでは、一次養生で封緘養生よりも蒸気養生を行った方が乾燥していると言える。また、乾燥は水和反応の停滞に繋がり、蒸気養生を行った供試体は後養生によらず粗大な空隙が占める割合が多く²⁾、表層から内部にかけて細孔構造が一樣で緻密にならなかったこととも合わせ、水分が浸透しやすくなったと考えられ、コンクリートの表層品質は、封緘養生よりも蒸気養生の方が劣ると言える。

図-9にC/Wと水分浸透係数の関係を示し、最小二乗法で回帰した際の式と決定係数を表記した。乾燥温度に関わらず、C/Wと水分浸透係数は高い決定係数を示し、C/Wが大きくなると、水分浸透係数は小さくなる傾向が確認された。異なる乾燥温度であっても回帰線の傾きは変化していない。20℃乾燥を行ったW/C=45%の水準において、回帰線からやや乖離した値が存在するが、これは図-4に示すように質量減少率が小さいことに起因していると考えられる。ここで、鋼材腐食深さに対する照査³⁾として、本試験結果を元にした試算をしてみる。鋼材腐食深さの照査には式(1)が用いられ、1.0以下であることが原則となり、鋼材腐食深さの設計値S_dは式(2)および式(3)を用いて算出される。

$$\gamma_i \cdot S_d / S_{lim} \geq 1.0 \quad (1)$$

γ_i : 構造物係数, 1.0~1.1

S_d : 鋼材腐食深さの設計値(mm)

S_{lim} : 鋼材腐食深さの限界値(mm), $3.81 \times 10^{-4} \cdot c$

c : かぶり(mm)

$$S_d = \gamma_w \cdot S_{dy} \cdot t \quad (2)$$

γ_w : S_dのばらつきを考慮した安全係数, 1.15

S_{dy} : 1年あたりの鋼材腐食深さの設計値(mm/年)

t : 耐用年数(年), 100

$$S_{dy} = 1.9 \times 10^{-4} \cdot \exp\{-0.068 \cdot (c - \Delta c_e)^2 / (1.3 \cdot q_k)^2\} \quad (3)$$

Δc_e : かぶりの施工誤差(mm)

q_k : 水分浸透速度係数の特性値(mm/hr^{1/2})

耐久性について考慮する必要があり、振動締固めを行った製品の最小かぶり厚さは20mmとされている³⁾。この点を考慮し、耐用年数100年において式(1)の計算結果が1.0となる時、十分に余裕を見込んだ場合(試算①)と実条件を想定した場合(試算②)の条件および試算結果を表-6に示し、算出された水分浸透係数およびC/Wは図-9に併

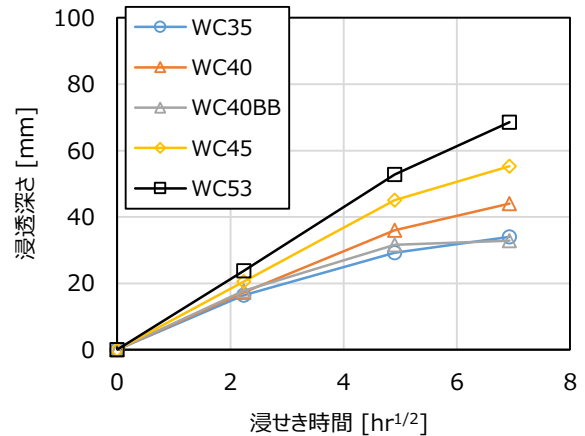


図-6 浸せき時間と浸透深さの関係 (40℃乾燥)

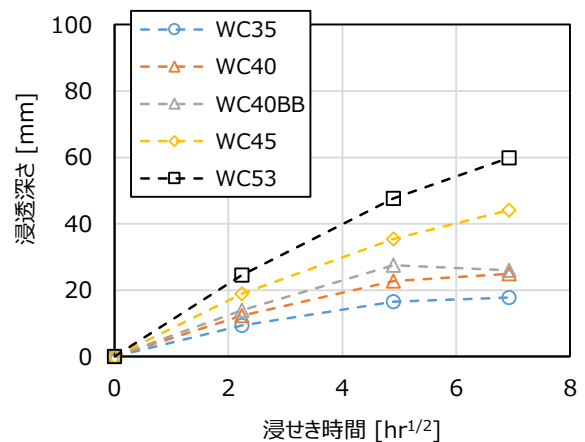


図-7 浸せき時間と浸透深さの関係 (20℃乾燥)

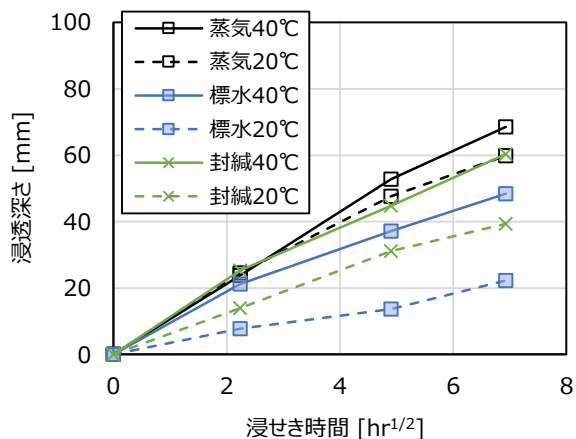


図-8 各養生方法における浸せき時間と浸透深さの関係 (W/C=53%)

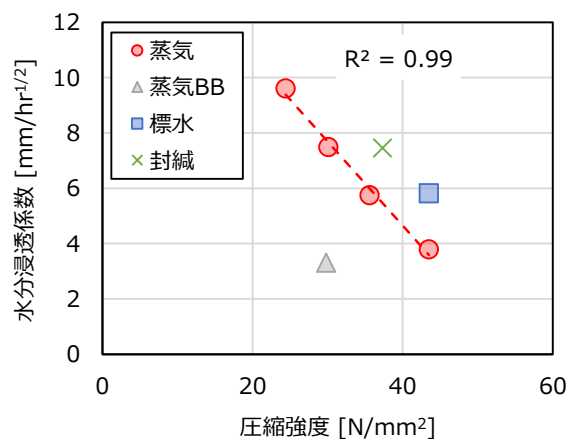


図-10 圧縮強度と水分浸透係数の関係 (40°C乾燥)

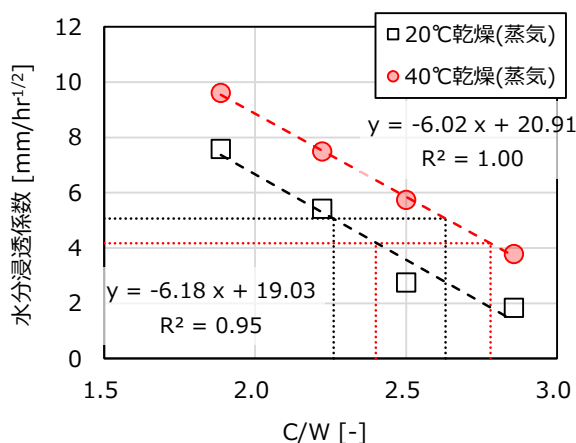


図-9 C/W と水分浸透係数の関係

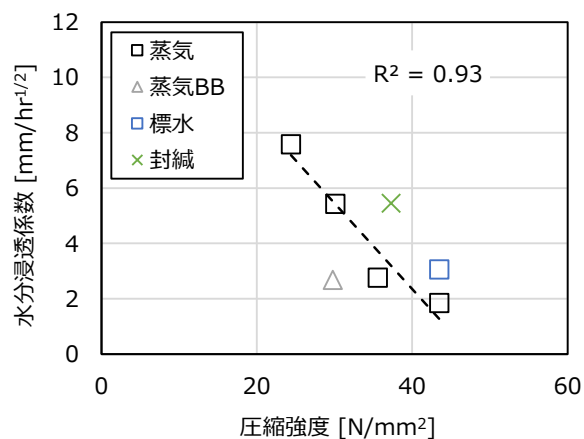


図-11 圧縮強度と水分浸透係数の関係 (20°C乾燥)

表-6 鋼材腐食深さの照査条件および算出結果

	単位	試算①	試算②
γ_i : 構造物係数	[-]	1.10	1.00
c : かぶり厚さ	[mm]	25	
Δc_e : かぶりの施工誤差	[mm]	5	2
q_k : 水分浸透係数	[mm/hr ^{1/2}]	4.17	5.06
C/W (20°C乾燥)	[-]	2.40	2.26
C/W (40°C乾燥)		2.78	2.63

記している。算出結果から、水分浸透係数は 4.17～5.06mm/hr^{1/2}となるが、乾燥温度によって C/W の範囲は大幅に異なる。安全側での評価を行うために 40°C乾燥における試験結果を用いると、少なくとも水分浸透係数が 5mm/hr^{1/2}を下回ることのできる式(1)の値は 1.0 以下となり、蒸気養生を行う場合に封緘養生よりも W/C を 15%より低く設計すれば、鋼材腐食深さに対する照査は満足できる結果となった。

図-10 に圧縮強度と 40°C乾燥における水分浸透係数、

図-11 に圧縮強度と 20°C乾燥における水分浸透係数の関係を示す。同等の圧縮強度であった W/C=40%の蒸気養生と W/C=53%の封緘養生、W/C=30%の蒸気養生と W/C=53%の標準水中養生を比較すると、蒸気養生を行った W/C が低い水準の方が水分浸透係数は小さくなる傾向を示した。プレキャストコンクリートは管理材齢が現場打ちコンクリートと比べて短く設定されるため、目標強度を得るために W/C を低く設計されるのが通例である。本試験で得られた結果の範囲内ではあるが、蒸気養生を行うプレキャストコンクリートでは現場打ちコンクリートを模擬し封緘養生を行ったコンクリートよりも W/C を低くし、同等以上の圧縮強度が発現する設計を行えば、水分は浸透しにくくなることが示唆された。BB を使用した場合、同等の圧縮強度であった N を使用した W/C=45%の蒸気養生を行った水準と比較しても、水分浸透係数は約半分かつ試算①の数値より下回り、水分移動に対する抵抗性は高くなることが確認された。管理強度が満足される場合に、鉄筋近傍への水分供給はされにくくなるため、BB の使用は表層品質を向上させる有効な

手段の一つと考えられる。

4. まとめ

本検討で得られた知見を以下に示す。

- 1) 水分浸透試験を行う前の乾燥処理から、20℃乾燥よりも40℃乾燥の方が質量減少率は大きく、W/Cが高くなるほど質量減少率は大きくなる傾向を示した。また、BBを使用した水準はNを使用した水準よりも質量減少率は小さくなることが確認された。
- 2) 蒸気および封緘養生を行った水準の質量減少の履歴は概ね同じであり、標準水中養生を行った水準は最も質量減少率は大きかった。
- 3) BBを使用した水準は、浸せき開始から24、48時間で水分の浸透は進行しておらず、水分移動に対する抵抗性が高いことが確認された。
- 4) 標準水中および封緘養生の水準では、40℃乾燥の方が20℃乾燥よりも浸せき48時間後の浸透深さは深くなる傾向を示した。蒸気養生の水準でも同様に、40℃乾燥の方が浸透深さは大きかったが、20℃乾燥との差は微小であった。
- 5) 同等の圧縮強度であったW/C=40%の蒸気養生とW/C=53%の封緘養生、W/C=35%の蒸気養生とW/C=53%の標準水中養生を比較すると、蒸気養生を行ったW/Cが小さい水準の方が水分浸透係数は

小さくなる傾向を示した。蒸気養生を行うプレキャストコンクリートでは現場打ちコンクリートを模倣し封緘養生を行ったコンクリートよりもW/Cを15%より小さくし、同等以上の圧縮強度とすることで、水分は浸透しにくくなることが示唆された。

参考文献

- 1) 寺川麻美, 宇治公隆, 上野敦, 大野健太郎: プレキャストコンクリート製品の細孔構造に及ぼす養生条件の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.469-474, 2012
- 2) 久我龍一郎, 森寛晃, 鵜澤正美: 初期高温履歴を受けた高炉スラグ微粉末添加セメントの水和に及ぼす養生条件の影響, 材料 (Journal of the Society of Materials Science, Japan), Vol.60, No.8, pp.693-700, Aug.2011
- 3) コンクリート標準示方書 2017[設計編: 標準]
- 4) 土木学会規準「短期の水掛かりを受けるコンクリート中の水分浸透速度係数試験方法(案) (JSCE-G 582-2018)」の制定, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.74, No.4, pp.256-259, 2018
- 5) Takeshi Iyoda: EFFECT FOR CONCRETE PROPERTIES ON BLENDING RATE OF GROUND GRANULATED BLAST FURNACE SLAG, The 12th SEATUC Symposium (SEATUC 2018), pp.106-111, 2018.3