

論文

[1144] マスコンクリートの耐久性に関する検討

守分敦郎\*1・福手 勤\*2・堀口浩司\*3

1. はじめに

近年、大規模なコンクリート構造物が数多く施工されてきている。このような構造物のコンクリートは、若材齢において水和熱による厳しい温度履歴を受けることとなる。筆者らは、モルタルにマスコンクリートが受ける水和熱と同様な温度履歴を与え、モルタルの強度特性や耐久性が標準養生供試体に比較して大きく異なることを確認した[1]。ここでは、モルタルを用いてさらに詳細な実験を実施すると共に、1辺が1.0mのコンクリートブロックを作製し、温度履歴がコンクリートの力学特性や塩化物イオン浸透性に与える影響について検討を行った。

2. 実験方法

2.1 モルタルによる実験

使用したセメントは、普通ポルトランドセメント、高炉セメントB種と、マスコンクリート用のセメントとして近年注目されている低発熱型高炉セメントB種の3種類である。これらのセメントの物理試験結果を表-1に示す。この表からも明らかな様に、低発熱型高炉セメントB種の初期強度は他のセメントに比較して小さいが、長期強度は同程度の値を示している。また、水和熱は他のセメントに比較して、60%程度あるいはそれ以下の値を示している。

モルタルは、富士川産川砂(比重2.61, FM2.84)を用いて表-2に示す配合により実験を行った。温度履歴は、プログラム制御式環境試験機により、練り混ぜ後1時間30分~2時間静置した後、図-1に示す履歴により行った。最高温度を3日間保持した後、20℃まで温度を下げ、供試体の表面を

表-1 モルタルに使用したセメントの物理試験結果

	比重	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	圧縮強さ(Kgf/cm <sup>2</sup> )				水和熱(cal/g)		
			3日	7日	28日	91日	7日	28日	91日
普通ポルトランドセメント	3.15	3350	178	272	412	459	80.3	92.3	98.2
高炉セメントB種	3.02	4090	124	205	404	480	72.0	84.3	90.5
低発熱型高炉セメントB種	3.05	4580	57	109	307	470	38.0	46.2	56.6

表-2 モルタルの配合

セメントの種類	W/C	Kg/m <sup>3</sup>					モルタルの性状	
		セメント	水	細骨材	AE減水剤	空気調整剤	空気量	70-値
普通ポルトランドセメント	45	544	232	1345	8.07	5.44	7.0%	17.6cm
	55	442	233	1462	6.56	4.42		
	65	373	233	1516	5.51	3.73		
高炉セメントB種	45	540	230	1334	8.01	5.40	8.6%	17.3cm
	55	439	232	1453	6.52	4.39		
	65	371	232	1508	5.48	3.71		
低発熱型高炉セメントB種	45	541	231	1337	8.02	5.41	7.4%	17.0cm
	55	440	232	1455	6.53	4.40		
	65	371	232	1510	5.49	3.71		

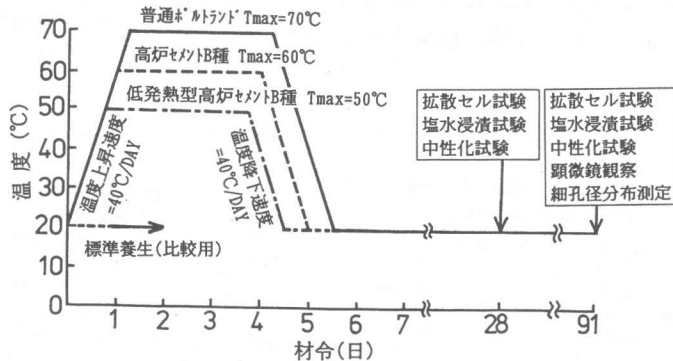


図-1 モルタルに与えた温度履歴

\*1 東亜建設工業(株) 技術研究所 材料構造研究室主任研究員(正会員)

\*2 運輸省港湾技術研究所 構造部 材料研究室室長、工博(正会員)

\*3 住友セメント(株) 中央研究所・セメントコンクリート研究室、工修(正会員)

シール材により封をして20℃の恒温室内にて封かん養生した。検討項目は、「圧縮強度」「塩水浸漬による塩化物イオン浸透深さ」「拡散セルによる拡散係数測定」「細孔径分布」「電子顕微鏡による水和物の観察」などである。

## 2.2 ブロックによる実験

コンクリートに与える温度履歴の影響を評価するために、図-2に示す様に、打設面を除くすべての面を断熱材で覆った1辺が1.0mのコンクリートブロックを作製した。使用したセメントは、普通ポルトランドセメントと高炉セメントB種の2種類であり、そのセメントの物理試験結果を表-3に示す。さらに、コンクリートの配合を表-4に示す。使用した骨材は、細骨材については君津産陸砂(比重2.60、FM2.65)、粗骨材は八戸産碎石(比重2.70、FM6.66)である。供試体は、打設後5日間表面を養生シートで覆い散水を行った。なお、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートにおいては、ブロック中央と同様な温度変化を与えた水槽で供試体を養生し(以下、高温養生供試体と呼ぶ)、力学特性等を比較検討した。計測された、ブロック内の温度履歴を図-3、図-4に示す。普通ポルトランドセメントの場合、打設面から10cmの位置における温度上昇量は19℃程度であるが、供試体中央では38℃の温度上昇が見られた。高炉セメントB種においては、計測された温度上昇量は小さく、打設面から10cm位置の温度上昇量は8℃

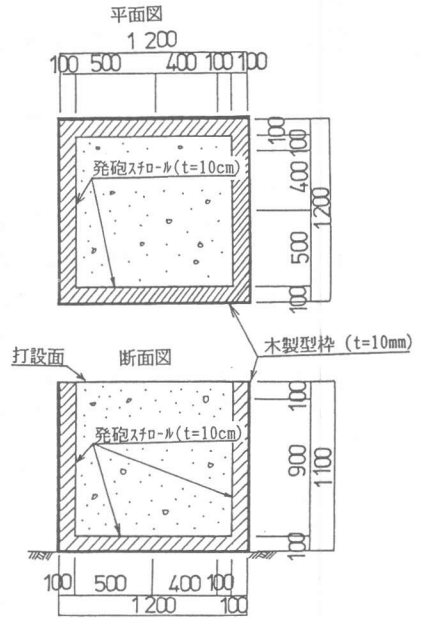


図-2 ブロックの形状

表-3 ブロックに使用したセメントの物理試験結果

	比重	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	圧縮強さ(Kgf/cm <sup>2</sup> )		
			3日	7日	28日
普通ポルトランドセメント	3.16	3270	154	235	420
高炉セメントB種	3.05	3710	126	215	433

表-4 ブロックに使用したコンクリートの配合

セメントの種類	W/C	Kg/m <sup>3</sup>					コンクリートの性状		
		セメント	水	細骨材	粗骨材	AE減水剤	スラング	空気量	温度
普通セメント	55	280	154	799	1107	2.80	9.0cm	4.6%	26℃
高炉セメント	55	269	148	767	1159	2.69	5.5cm	3.2%	31℃

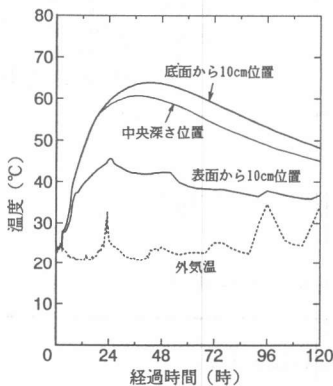


図-3 普通ポルトランドセメントを使用したブロックの温度履歴

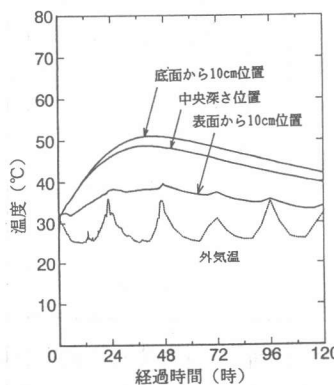


図-4 高炉セメントB種を使用したブロックの温度履歴

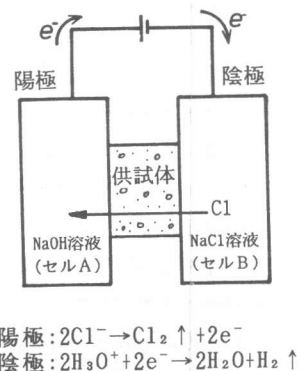


図-5 塩化物イオン促進浸透試験

程度であり、中央付近においても 21°C 程度であった。

コンクリートの塩化物イオン浸透性の評価は塩水浸漬試験の他に、AASHTO DESIGNATION T277-83に規定された方法[2]に従い、図-5 に示す装置により検討を行った。試験体は、採取したφ10cmのコアあるいは標準養生供試体を5cm厚さに切断し、真空中で3時間乾燥し、その後真空状態の容器に水を加えてさらに1時間脱気して絶縁空隙を水で満たした。実験は、その試験体をさらに18時間水中浸漬した後に行ない、電位差60Vを与えて6時間の間に流れた電気量からCl<sup>-</sup>イオンの浸透性について相対的な評価を行なった。

### 3. 実験結果

#### 3.1 モルタルおよびコンクリートの圧縮強度

温度履歴を受けたモルタルの強度発現の特徴を示す例として、高炉セメントB種の場合を図-6 に示す。温度履歴を受けたモルタルの圧縮強度は、いずれの水セメント比においても同様な傾向を示しており、材齢1週までは標準養生に比較して高い値を示しているが、その後の強度増加が小さく、材齢13週の強度は標準養生供試体より小さい値となっている。

温度履歴を受けた供試体の標準養生供試体に対する強度比で評価すると、図-7 に示される様に、いずれのセメントも、材齢1週では強度比が「1.0」を上回っているが、材齢4週では「1.0」に近く、さらに材齢13週では「0.5~0.8」程度と低い値となっている。

一方、コンクリートブロックの場合、打設面から20cmまでのコア(以下、表面のコア)、および打設面から50~70cmの範囲のコア(以下、中央のコア)の強度を、標準養生供試体と比較して図-8 に示す。いずれのセメントにおいても、ブロックから採取したコア強度は、材齢4週で標準養生供試体と同程度の値であるがその後の強度増加が小さく、材齢26

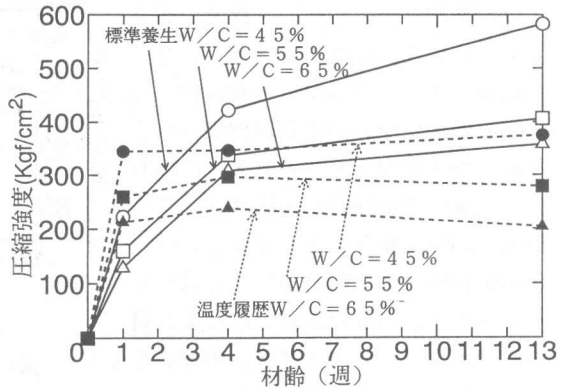


図-6 高炉セメントを使用したモルタルの圧縮強度特性

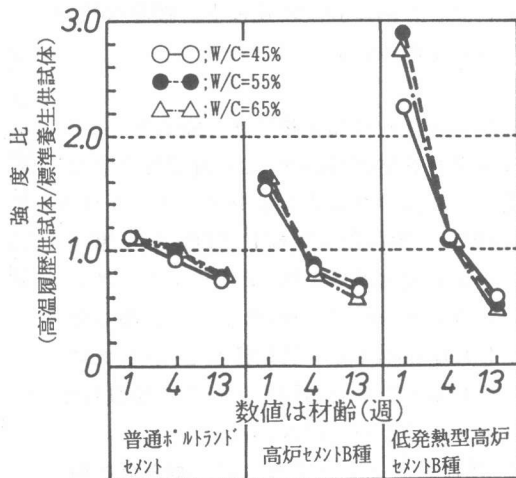


図-7 温度履歴を受けたモルタルの強度比

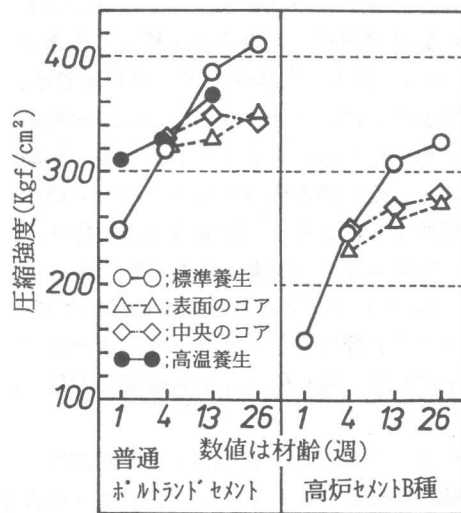


図-8 ブロックに使用したコンクリートの圧縮強度特性

週では標準養生の0.82~0.88程度の値を示している。温度履歴を受けたコンクリートはモルタル実験の場合と同様に、長期強度の増加が小さいことが理解される。

なお、普通ポルトランドセメントにおける高温養生供試体の圧縮強度は、コア供試体と同様な傾向を示しており、外部から強制的に温度履歴が与えられたコンクリートと、自分の水和反応により温度上昇するコンクリートでは、強度面で大きな違いは無い様である。さらに、ブロック供試体の深さ方向の圧縮強度分布を図-9に示すが、深さ方向の強度変化にも、顕著な傾向は見られなかった。

### 3.2 モルタルの塩化物イオン浸透性

モルタルを材齢13週から2ヶ月間海水中に浸漬し、0.1%のフルオレッセインナトリウムと0.1規定の硝酸銀を噴霧して測定した塩化物イオンの浸透深さを図-10に示す。さらに、拡散セルに厚さ1cmのモルタルを挟んで測定した塩化物イオン拡散係数を図-11に示してある。いずれの図も大変良く類似しており以下のことが理解される。

- ① 普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種のいずれにおいても、温度履歴を受けたモルタルの塩化物イオン浸透深さや拡散係数は標準養生の場合に比較して大きい。
- ② 一方、低発熱型高炉セメントB種では、温度履歴を受けたモルタルの方が標準養生の場合に比較して小さい値を示している。圧縮強度は、温度履歴を受けたモルタルの方が小さい値を示しており、圧縮強度と塩化物イオン浸透性では受ける影響が異なる様である。
- ③ 高炉セメントB種あるいは低発熱型高炉セメントB種は、普通ポルトランドセメントに比較して、塩化物イオンの浸透性が低い。

### 3.3 コンクリートの塩化物イオン浸透性

材齢91日においてコンクリートブロックよりコアを採取し、AASHTOの方法に従って塩化物イオン浸透性を検討した結果を図-12に示す。同図は、コンクリートブロックの打設面から35cmまでの範囲を測定し、標準養生あるいは高温養生供試体の試験結果(図中の破線)と比較して示して

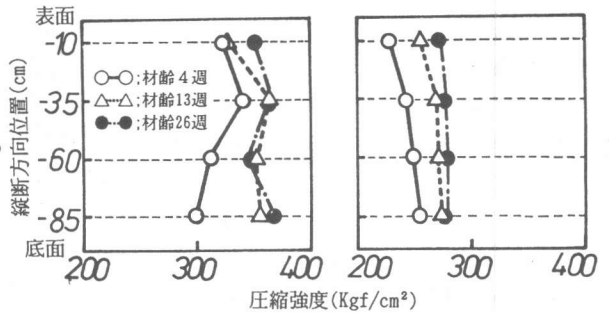


図-9 ブロックの縦断方向圧縮強度分布

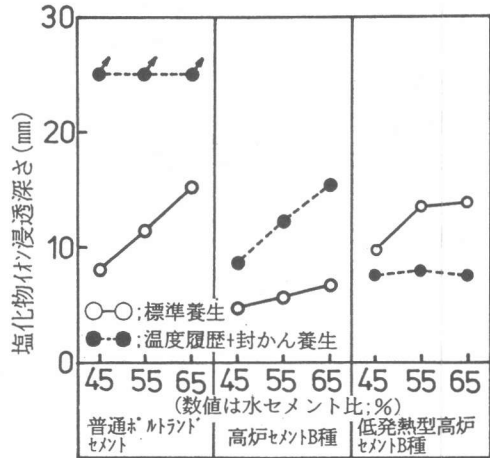


図-10 モルタルの塩化物イオン浸透深さ

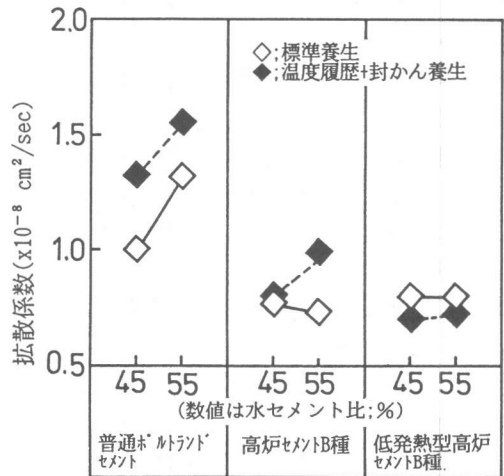


図-11 モルタルの塩化物イオン拡散係数

ある。普通ポルトランドセメントにおいては、打設面付近のコンクリートの温度履歴は比較的穏やかと推測されるが、塩化物イオンの浸透性は高温養生供試体と同程度であった。一方、高炉セメントB種ではコア供試体と標準養生供試体に大きな違いは見られず、その値は普通ポルトランドセメントに比較して大変小さく、これらの傾向はモルタル試験結果と同様であった。

さらに、 $\phi 10\text{cm}$ の供試体の1面を残してシール材で覆い、材齢13週より3ヶ月間海水中に浸漬して、塩化物イオン浸透性を評価した結果を図-13に示す。同図より、塩化物イオンの濃度分布においては、厳しい温度履歴を受けていると思われる「中央のコア」は、他の供試体に比較して分布の勾配が緩やかであり、塩化物イオンの拡散係数が大きいことが理解される。しかし、コア表面から0.5cm付近の塩分濃度は、「中央のコア」の方が小さい値を示している。この原因は明確ではないが、中央のコアにおいては、暴露面(コアの表面)が切断面であり微細なひびわれが発生していた可能性も考えられる。

### 3.4 細孔径分布

水銀圧入式ポロシメーターを用いて、ブロックに使用されたコンクリートの細孔径分布を測定した結果を図-14に示す。モルタル実験では、温度履歴を受けることにより直径 $0.081\mu\text{m}$ 以上の細孔容積の増加が見られたが、ここではその傾向は見ら

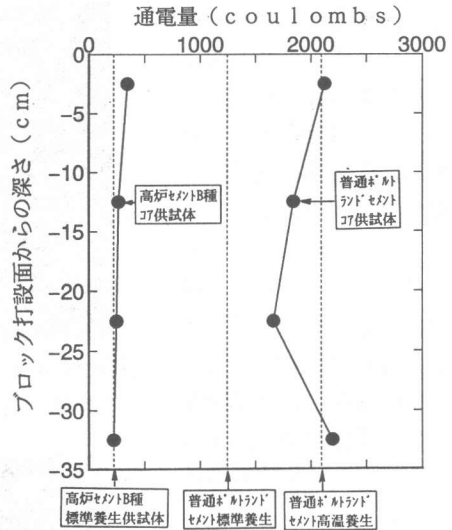


図-12 ブロックの塩化物イオン促進浸透試験結果

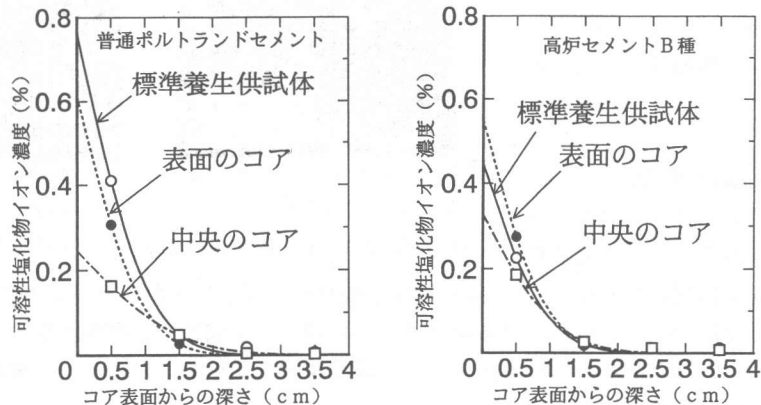


図-13 ブロックに使用されたコンクリートの塩水浸漬試験結果

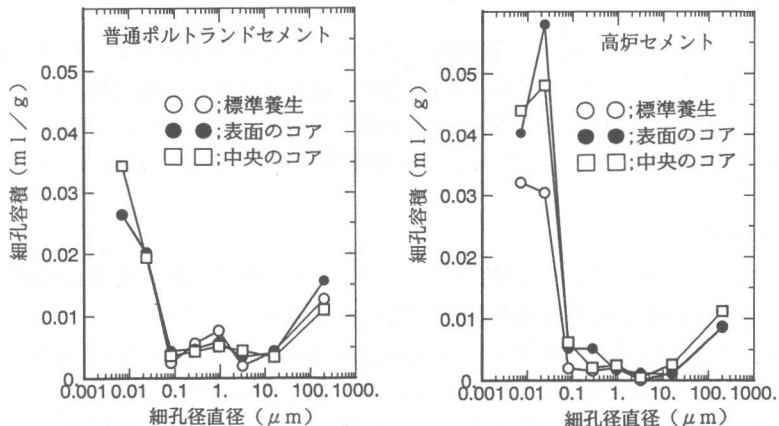
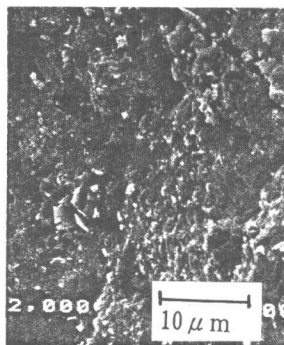


図-14 ブロックに使用されたコンクリートの細孔径分布

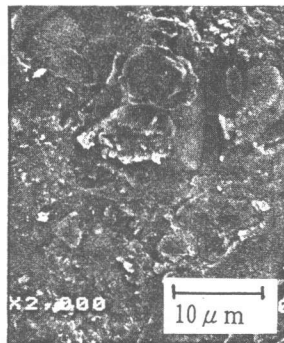
れず、温度履歴が細孔径分布に与える影響を明確に評価することはできなかった。塩化物イオンの拡散係数と細孔径分布の関係については、「半径20 Å以下の細孔容積が多くなるとイオンの拡散係数は小さくなる」ことが指摘されており[3]、さらに細孔径の測定範囲を広げた検討が必要と思われる。なお、全細孔容積は高炉セメントB種の方が普通ポルトランドセメントより大きな値を示すなど、全細孔容積の大小関係と拡散係数の間には明確な相関は見られなかった。

### 3.5 顕微鏡観察

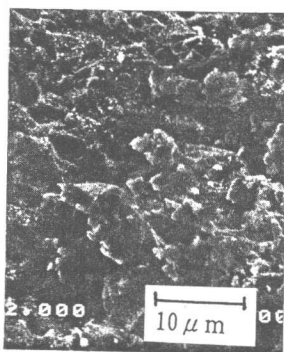
コンクリートのモルタル部分を、走査型電子顕微鏡で観察した結果を図-15に示す。観察の結果、いずれのセメントにおいてもブロック中央部(打設面から50cm)におけるコンクリートの水和生成物は、標準養生の場合に比較して外観上、緻密さの低下が認められる。従って、温度履歴を受けることにより、微細構造が変化していることが推測される。



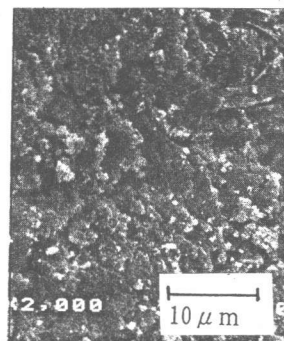
普通ポルトランドセメント  
(標準養生供試体)



高炉セメントB種  
(標準養生供試体)



普通ポルトランドセメント  
(ブロック中央)



高炉セメントB種  
(ブロック中央)

図-15 ブロックに使用されたコンクリートの顕微鏡観察結果

観察の結果、いずれのセメントにおいてもブロック中央部(打設面から50cm)におけるコンクリートの水和生成物は、標準養生の場合に比較して外観上、緻密さの低下が認められる。従って、温度履歴を受けることにより、微細構造が変化していることが推測される。

### 4. 結論

これまでの実験の結果、若材齢で水和熱による温度履歴をうけるマスコンクリートは、標準養生の場合に比較して、長期にわたる強度の増加が小さく、塩化物イオンの浸透性や細孔径分布あるいは水和生成物の形態が異なること等が判明した。しかし、実際のコンクリートの場合は養生条件、施工条件なども影響している可能性も高く、今後さらに検討して行く必要がある。

### 参考文献

- [1] 福手勲、守分敦郎、竹村英樹: マスコンクリートの耐久性に関する基礎的研究、土木学会第47回 年次学術講演会講演概要集第5部、pp. 346-347、1992. 9
- [2] AASHTO DESIGNATION T277-83: Standard Method of Test for Rapid Determination of Chloride Permeability of Concrete、pp. 1229-1234
- [3] 後藤誠史、茂啓二郎、高木達雄、大門正機: セメント硬化体の細孔径分布、セメント技術年報36、pp. 49-52、1982