

論文

[1161] 温度応力対策を施したマスコンクリートの力学的特性と耐久性に関する検討

秋葉 泰男*1・福手 勤*2・竹村 英樹*3・守分 敦郎*4

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の大規模化が進み、マスコンクリートと呼ばれる構造物が数多く建設されてきている。そのようなマスコンクリートは若材齢において厳しい温度履歴を受けるため温度応力によるひびわれのほかにコンクリート自体の耐久性についても十分な検討が必要と思われる。筆者らは、数種類のセメントを用いたモルタル[1]やコンクリート[2]による室内実験、大型の供試体を用いた実験[3]を行い基礎的な知見を得た。今回は温度応力対策として有効なプレクーリング工法、パイプクーリング工法あるいは低発熱型高炉セメントB種を用い力学的特性や耐久性についての検討を行った。

2. 実験方法

2. 1 使用材料

今回使用した材料を表-1に、セメントの物理試験結果を表-2に示す。セメントは、高炉セメントB種(BB)と、低発熱型高炉セメントB種(LBB)の二種類を使用した。表-2にあるようにLBBは、BBと比較して水和熱が小さく温度応力対策として有効とされている。

表-1 使用材料

セメント	高炉セメントB種(BB)
	低発熱型高炉セメントB種(LBB)
細骨材	砂(比重2.59)
粗骨材	山砂利(比重2.67)
	碎石2005(比重2.71)
練り混ぜ水	水道水
混和剤	A E 減水剤遅延形
	A E 剤

表-2 使用したセメントの物理試験結果

セメントの種類	比重	比表面積 (cm ² /g)	凝結時間(h-m)		安定性	圧縮強度(kgf/cm ²)			水和熱(cal/g)	
			始発	終結		3日	7日	28日	7日	28日
BB	3.04	4134	2-55	4-30	良	127	207	426	72.3	84.1
LBB	3.03	4390	3-10	5-35	良	63	142	369	44.9	53.4

2. 2 コンクリートの配合

実験に使用したコンクリートの配合を表-3に示す。いずれのケースも水セメント比を55%、単位水量を150kg/m³とした。

表-3 コンクリートの配合

セメントの種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					混和剤(kg/m ³)		コンクリートの性状		
			W	C	S	G ₁	G ₂	AE減水剤遅延形	AE剤	スラフ* (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)
BB	55.0	43.4	150	273	803	537	547	0.546	0.0150	11.0	6.5	30.5
LBB	55.0	43.4	150	273	804	536	546	1.092	0.0055	19.0	4.2	30.0

*1 東亜建設工業(株) 技術研究所 材料構造研究室研究員(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所研究員
 *4 東亜建設工業(株) 技術研究所 材料構造研究室室長(正会員)

3. 実験方法

3. 1 実験ケース

表-4に実験ケースを示す。ケース1からケース4はBBを、ケース5はLBBを使用した。ケース1、ケース5は温度対策を施さず、ケース2とケース3は、プレクーリングを行った。プレクーリングは、二重にした圧送管の外側に約-10℃程度に冷却させた不凍液を通水し圧送中のコンクリート温度を低下させる方法を採用した[4]。配管の長さは30mでそのうち冷却部分は25mである。プレクーリングにより打設時のコンクリート温度は、それぞれ10.1℃と14.2℃低下させることができた。ケース4は、温度対策としてパイプクーリングを実施した。パイプクーリング工法は、供試体の鉛直方向に直径25mmの鋼管を約40cm間隔で

表-4 実験ケース

実験ケース	温度対策	セメントの種類
ケース1	なし	BB
ケース2	プレクーリング (10.1℃低下)	
ケース3	プレクーリング (14.2℃低下)	
ケース4	パイプクーリング	
ケース5	なし	LBB

表-5 試験項目

試験項目	材齢3日		材齢7日		材齢28日		材齢91日	
	管理	管理	管理	管理	コア	管理	コア	管理
圧縮強度試験(静弾性係数試験)	●	●	●	●	●	●	●	●
引張強度試験	●	●			●	●		●
塩化物イオン 浸透試験	促進浸透試験				●	●		
	浸透深さ試験				●	●		
促進中性化試験					●	●		
電子顕微鏡観察					●	●		
細孔径分布測定					●	●		
温度計測	打設開始直前から23日間							

リングにより打設時のコンクリート温度は、それぞれ10.1℃と14.2℃低下させることができた。ケース4は、温度対策としてパイプクーリングを実施した。パイプクーリング工法は、供試体の鉛直方向に直径25mmの鋼管を約40cm間隔で

配置し26℃の水道水を毎分約10リッターの速度で通水した。通水時間は27時間である。

試験項目は表-5に示す通り、力学的特性(材齢91日)と、耐久性に関する試験(材齢28日)を実施した。塩化物イオン浸透試験の促進浸透試験の方法は、AASHTOで規定された試験方法に準じ、供試体の両端に電極を取り付け電位差を与えたときに流れる通過電荷量を測定し塩化物イオンの浸透性を判定する方法を用いた[5]。浸透深さ試験は、材齢28日から海水中に90日間浸漬した後、0.1%フルオレセインナトリウム水溶液と0.1N硝酸銀水溶液を噴霧し、表面から発色域までの距離を浸透深さとして測定した。また、促進中性化試験は、材齢28日から温度30℃、湿度60%、CO₂濃度5%の環境に最大75日間暴露した後、フェノールフタレイン溶液を噴霧して表面から発色域までの深さで測定した。細孔径分布の測定は、直径約5mmのモルタル部分をD-乾燥により水和を停止した後、水銀圧入ポロシメーターを用いて測定した。中性化深さに関する検討は、中性化速度係数を用いて行なった[6]。

3. 2 供試体の形状

コンクリートの供試体は、図-1に示すように側面と底面を厚さ10cmの発泡スチロールで囲み温度の逸散を防いだ一辺が1mの立方体である。また、供試体内部には表面から深さ10cmと50cmの中央部(側面から50cmの位置)に二カ所の熱電対を取付け温度計測を行なった。また、後に示す試験に使用するコアは、同図に示すように表

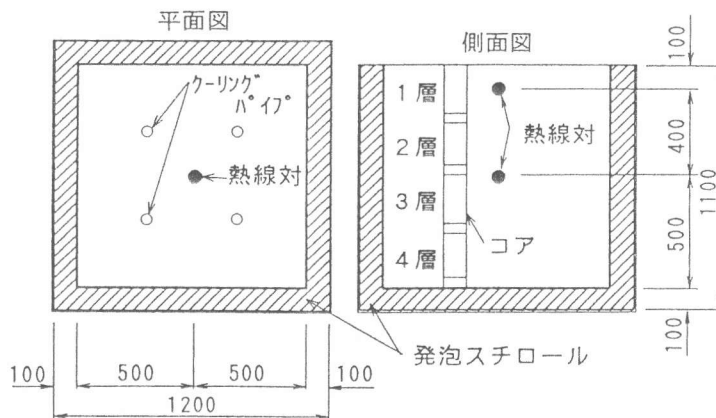


図-1 供試体の形状と熱電対の位置及びコアの採取位置

面を1層とし、順に4層まで番号をつけた。養生はコンクリート打設後26日間、表面に養生マットを敷き散水を行なった。

4. 試験結果

4.1 温度計測結果

各ケースについて、温度履歴の計測結果を図-2に示す。対策を施していないケース1とプレクーリングを実施したケース2、ケース3を比較すると、打設温度が低いほど最高温度が低く、また、表-6に示すように各ケースの供試体中央（表面から50cmの位置）での最高温度と、そのときの表面から10cmの位置での温度差を比較するとケース1は13.5℃、ケース2は12.3℃、ケース3は10.8℃となり、

打設温度が低いほど温度差は低くなる傾向を示している。この結果より、プレクーリングを実施することによりコンクリートの内部と表面の温度差を小さくすることが可能であり内部拘束ひびわれの発生を抑制する効果があることが理解される。また、パイプクーリングを実施したケース4あるいはLBBを使用したケース5は、最高温度が49.0℃、50.2℃、表面付近と中心の温度差は、6.6℃、5.8℃の値を示しておりプレクーリングに比較していずれも小さい値を示している。

4.2 力学的特性に関する試験結果

圧縮強度は、図-3に示すように材齢28日において管理供試体とブロック供試体のコアは近い値を示しているが、コア供試体の場合その後の強度増加が小さく材齢91日では明らかにコアの値が管理供試体の値より小さい値を示している。これらの傾向は、筆者らが過去に行なった実験結果と同様の傾向を示すものである[1][2][3]。また、ケース2、ケース3を比較するとプレクーリングにより打設温度を下げるほど大きな値を示している。コアの強度試験結果を見ると、各ケースとも温度履歴の厳しい中心部より比較的穏やかな表面のコアの方が小さい値を示している。これは、表層部のブリージングや内部拘束応力（初期引張応力）の影響等が考えられる。

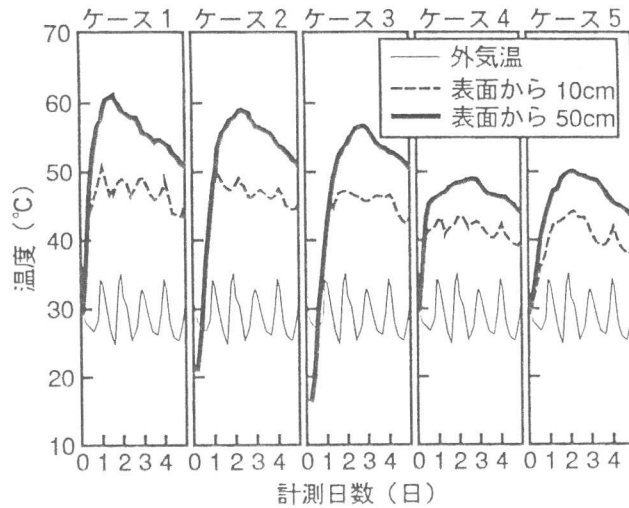


図-2 温度計測結果

表-6 最高温度に達した時の温度差

実験ケース	表面から50cmの最高温度 A (°C)	表面から10cmの温度 B (°C)	温度差 A - B (°C)
ケース1	61.1	47.6	13.5
ケース2	59.4	47.1	12.3
ケース3	56.7	45.9	10.8
ケース4	49.0	42.4	6.6
ケース5	50.2	44.4	5.8

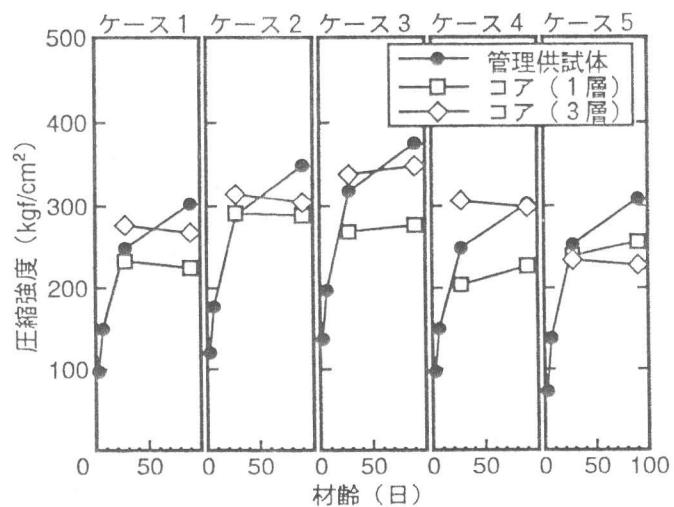


図-3 圧縮強度試験結果

管理供試体の圧縮強度とヤング係数の関係を図-4に示す。各ケースともほぼ同様の値を示しており温度応力対策やコンクリートの種類による影響は見られない。また、ブロックから採取したコア供試体のヤング係数は、図-5に示すように多少のばらつきはあるものの管理供試体の場合と同様な傾向を示している。

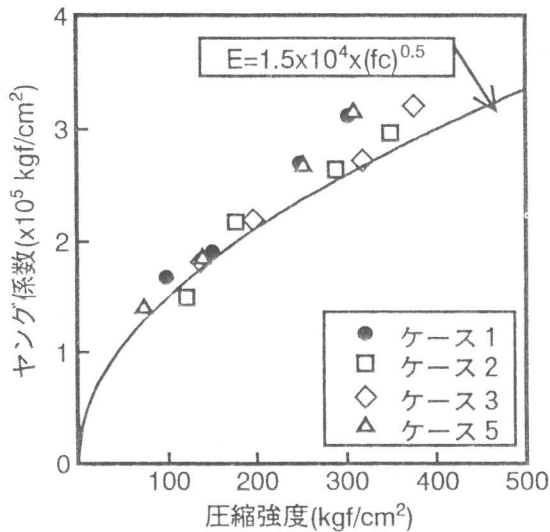


図-4 圧縮強度とヤング係数の関係
(管理供試体)

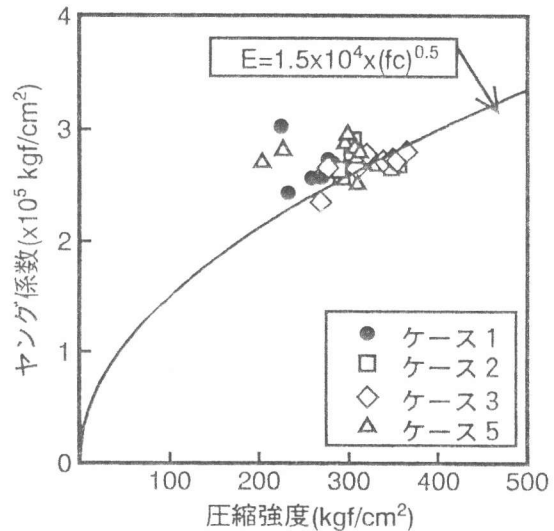


図-5 圧縮強度とヤング係数の関係
(コア供試体)

以上の検討の結果、①プレクーリングにより打設温度を低下させても、長期材齢における強度の増加の傾向は、対策を施さない場合と比較して大きな違いは見られなかった。②打設温度は同じでも温度上昇量を抑えたパイプクーリングにおいても先と同様の傾向であった。③ブロック表面の強度に与える影響はブリージングや内部拘束応力等が温度履歴以上に大きいようである。

4. 3 耐久性に関する試験結果

中性化促進試験から得られた試験の結果を図-6に示す。プレクーリングを実施したケース2、ケース3はこの様な対策を実施していないケース1、4と比較してわずかではあるが小さな値を示している。これは、プレクーリングをすることにより中性化速度が多少遅くなるものと推測できる。ケース5については、ケース1と比較すると大きな値を示しており、過去の結果と同様に中性化の進行の速いことが理解される。

次に、塩化物イオン浸透試験の浸透深さの測定結果を図-7に示す。浸透深さはいずれにケースにおいても、コア供試体の方が管理供試体に比較して大きい値を示しており、しかも表面から温度上昇量の大きい中心に進むほど大きくなる傾向を示している。従って、塩化物イオンの浸透性においては、温度履歴の影響を明確に理解することができる。しかしながら打設温度を下げた影響あるいは温度の上昇量を抑えたことによる影響は明確ではない。LBBを使用したケース5のコアについては、ケース1と比較して大きな値を示している。これは、BBとLB

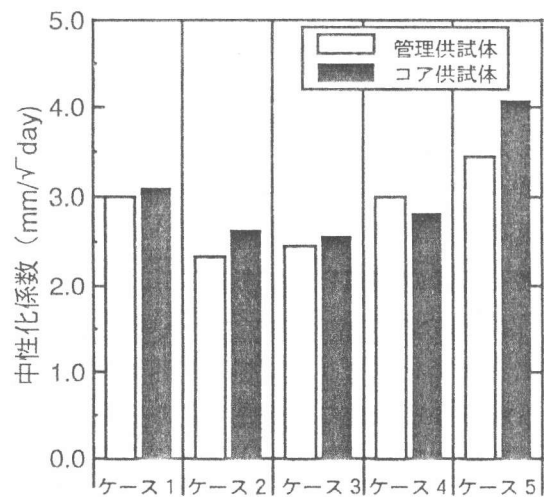


図-6 促進中性化試験結果

Bでは、セメントの水和に伴って生成される水酸化カルシウム量が異なってくるのが影響していると考えられる。

促進浸透試験の結果を図-8に示す。ケース1からケース4の温度対策を施したものは、ほとんど違いは見られず、この試験結果からは温度対策の影響を評価することは難しい。しかし、ケース5については、他のケースと比較して明らかに小さい値を示している。塩化物イオン浸透深さとASHTOの促進浸透試験の関係を比較すると、図-9に示すように両者の間に本実験で測定した

通過電荷量がLOW(1000)以下となる範囲では、明確な相関関係が認められない。

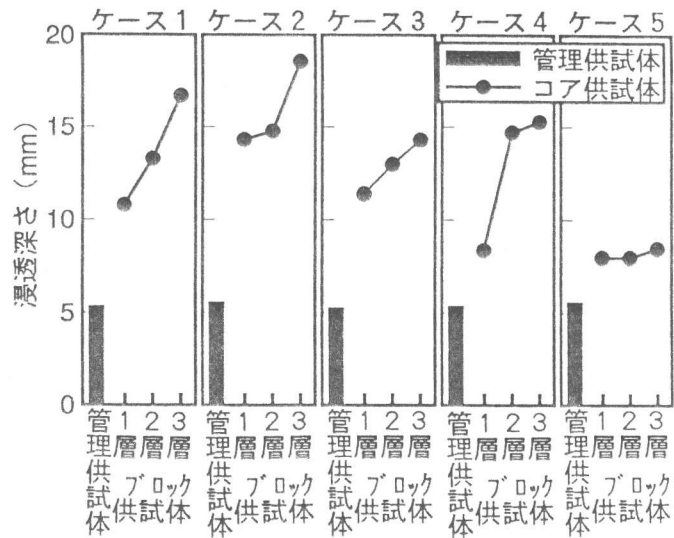


図-7 塩化物イオン浸透深さ

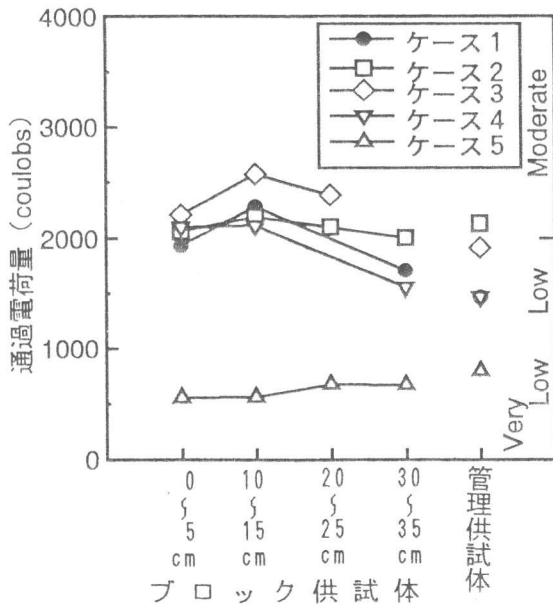


図-8 塩化物イオン促進浸透試験結果

全細孔容積の測定結果においても、図-10に示す様に塩化物イオンの浸透性の小さい管理供試体の方がコア供試体に比較して全容積が大きく全細孔容積と耐久性の間に明瞭な関連は見られなかった。細孔径分布の測定結果を図-11に示す。コアの測定結果は、温度応力対策の影響は認められない。管理供試体とコア供試体の相異を見ると、全体の分布形状はいずれも同様な傾向を示しており細孔径0.007 μ m以下においてはコアの値が大きく0.024 μ m付近の値は管理供試体が大きい値を示している。これらの結果は筆者らが行ったモルタル試験あるいはコンクリ

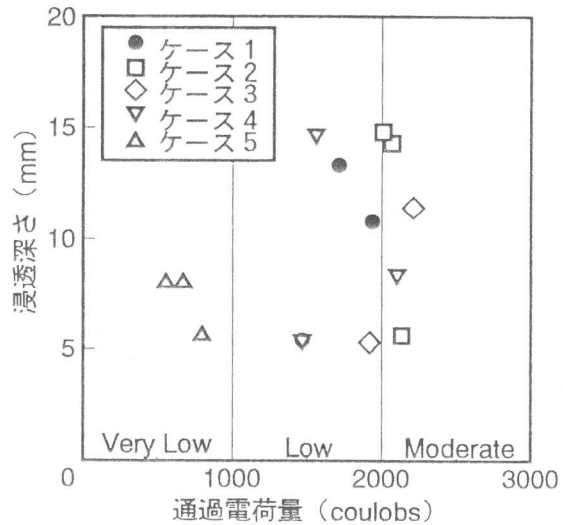


図-9 浸透深さと促進試験結果の関係

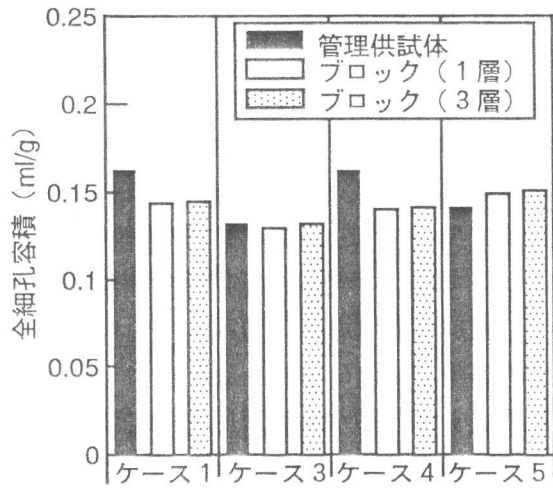


図-10 全細孔容積測定結果

ート試験結果とかならずしも整合しておらず、細孔径分布とコンクリートの圧縮強度や塩化物イオンの浸透性の結び付けは大変難しいようである。

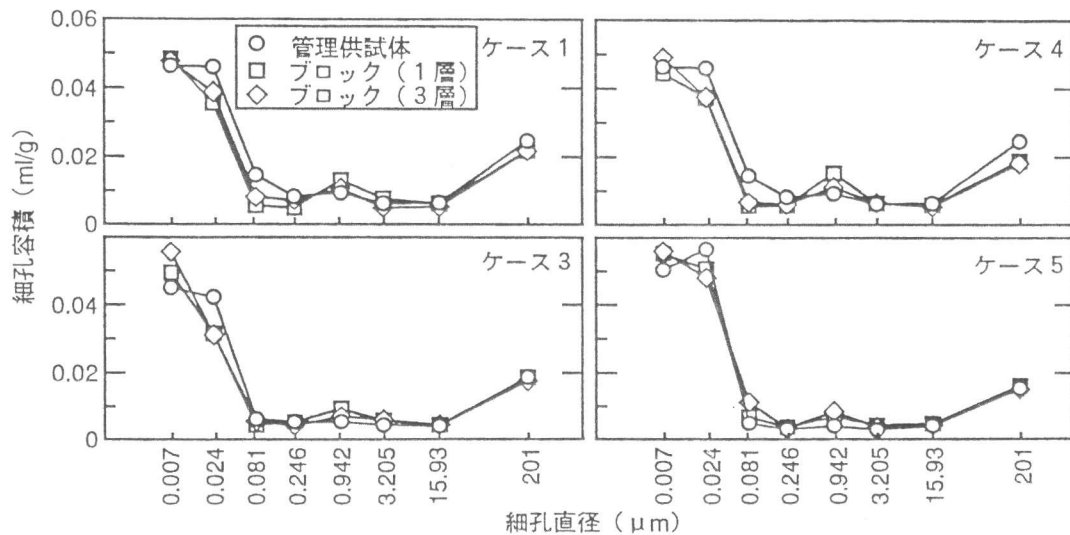


図-11 細孔径分布測定結果

走査型電子顕微鏡による観察においても明確な違いは認められなかった。

5. 結論

今回行った検討により次の様な結論を得た。

①プレクーリングにより打設温度を低下させた場合、あるいはパイプクーリングにより温度上昇量を小さくした場合において、コンクリートの受ける温度履歴は対策を施さない場合に比較して異なってくるが圧縮強度に代表される力学特性や塩化物イオン浸透性状には大きな相異は見られなかった。

②L B Bにおける力学特性については、B Bと同様であったが塩化物イオン浸透性は大幅に向上した。

今回の結果は、筆者らが過去に行なった結果と必ずしも同様の傾向ではなかった。今後は、さらに詳細に検討を重ねて行くことが必要である。

参考文献

- 1) 福手勤・守分敦郎・竹村英樹: マスコンクリートの耐久性に関する研究、土木学会第47回年次学術講演会講演概要集第5部、pp346-347, 1992
- 2) 秋葉泰男・竹村英樹・福手勤・守分敦郎: 若材齢において温度履歴を受けるコンクリートの耐久性について、土木学会第48回年次学術講演会講演概要集第5部、pp200-201, 1993
- 3) 守分敦郎・福手勤・堀口浩司: マスコンクリートの耐久性に関する検討、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 15, pp859-864, 1993
- 4) 羽瀧貴士・守分敦郎・西川正夫・秋葉泰男: ポンプ圧送中におけるコンクリートのプレクーリング手法に関する検討、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 16, 1994(投稿中)
- 5) ASSHTO Designation T277-83: Standard Method of Test for Rapid Determination of Chloride Permeability of Concrete, pp1229-1234
- 6) 友澤史紀: R C 建築物の耐久性 中性化による問題、施工、No229, pp71-78, 1985