

[1083] 石灰石粉を用いたコンクリートのブリージング水の移動機構と強度分布について

平田隆祥^{*1}・竹田宣典^{*2}・十河茂幸^{*3}

1. はじめに

構造物が大型化する昨今、良質な骨材は減少の一途をたどり、コンクリートのブリージングの発生は増大する傾向にある。ブリージング現象は、水分がフレッシュコンクリートの内部を上昇すると同時に、セメント粒子や骨材が沈降するため、鉛直断面内での水セメント比が一定でなくなり、硬化コンクリートの品質が不均一になる。著者らは、石灰石粉の添加によりブリージングを制御することを考え、ブリージングを抑制したコンクリートを用いて、ブリージング率がコンクリートの諸性質に及ぼす影響を調査・検討し報告[1]を行った。しかし、ブリージングを抑制したにもかかわらず部材上下間で強度差が生じ、ブリージング現象が、単純な比重差によるブリージング水の移動だけでは解明できないことが明らかとなった。この原因について著者らは、部材上部表面のコンクリートが、ブリージング水の移動を抑制していると推察した。そこで、ブリージング水の移動機構について、さらに検討することとした。

本論文では、石灰石粉の添加によりブリージングを制御したコンクリートを用いて、フレッシュコンクリート内部のブリージング水の移動機構を調査し、ブリージング水の移動がコンクリートの品質に与える影響について述べる。

2. ブリージング現象の既往の研究

コンクリートには、硬化反応に必要とする水量以外に、ワーカビリチーを確保するために余剰水が含まれている。この余剰水は、コンクリート材料の比重差や、自重による加圧で分離し上昇する。ブリージング現象は図-1, 2に示すように、マクロ的には自重による1次元圧密といえ、また、固体粒子の沈降速度より水の上昇速度が数倍大きいため、ミクロ的には浸透流としての性格が強いことが報告[2]されている。ブリージング現象は、材料の粒径や比重からブリージング水の湧出初期の発生速度を解析するPowersの方法[3]や、多孔体中の表面張力・Darcy 則[4]による解析などが行われているが、実構造物での現象を評価できていないのが実状である。

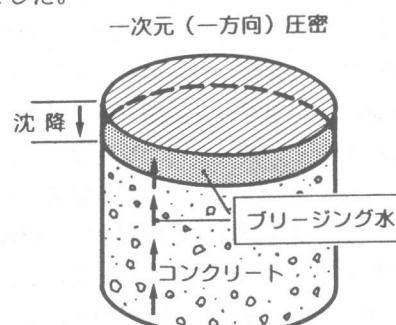


図-1 ブリージングのマクロモデル

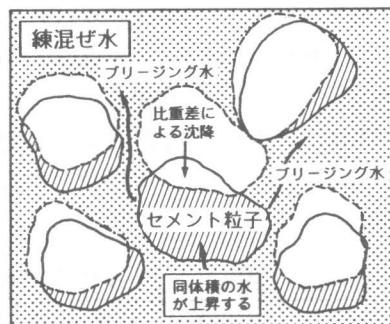


図-2 ブリージングのミクロモデル

*1 (株)大林組技術研究所 土木第三研究室 研究員(正会員)

*2 (株)大林組技術研究所 土木第三研究室 研究員, 工修(正会員)

*3 (株)大林組技術研究所 土木第三研究室 主任研究員, 工博(正会員)

3. 実験概要

実験は最初に、図-3に示す柱供試体を作製し、コア供試体を採取して高さ方向の圧縮強度分布を測定した。また、同様の柱供試体を別に作製して、フレッシュ時における、高さ方向の水圧分布と水セメント比の分布を測定した。次に、柱供試体を作製したコンクリートの加圧ブリージング率と透水係数を測定した。最後に、測定した柱供試体の水圧分布とコンクリートの加圧ブリージング率および透水係数を用いて、柱供試体内部のブリージング現象のシミュレーションを行い、ブリージング水の移動機構の解明を試みた。

3.1 コンクリートの材料および配合

表-1に実験に用いた材料を示す。セメントは、B種高炉セメントを用いた。細骨材は0.3mm以下の微粒分の少ない海砂と山砂を混合して標準粒度に調整したものを、粗骨材は最大寸法20mmの碎石を用いた。図-4に骨材の粒度分布曲線を示す。表-2にコンクリートの配合とフレッシュコンクリートの試験結果を示す。配合はブリージング現象を想定して、単位水量以外の各材料の容積構成比率を一定とし、水セメント比を変えたA～Eの5配合とした。

3.2 柱供試体の作製・養生方法

柱供試体の型わくは漏水しないようにシールし、コンクリートはホッパを用いて、打設速度1.8m/45分で上方から打設した。コンクリートの打設はほぼ均等な4層として、棒状振動機を用いて締固めを行った。養生は、室温20°Cで封緘養生とした。

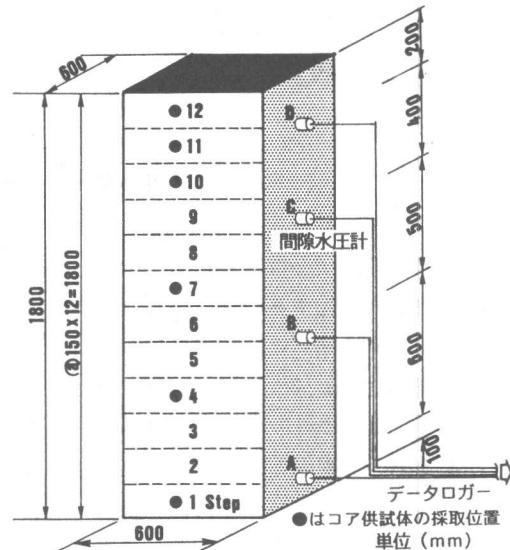


図-3 柱供試体の形状および間隙水圧の測定位置

表-1 使用材料

材料	記号	物理的性質
セメント	C	B種高炉セメント; JIS R 5211 規格品 :比重 3.04, 比表面積 3790 cm ² /g
細骨材	S1	香川県広島産海砂: 比重 2.56 , 吸水率 1.83 %, 粗粒率 2.22
	S2	木更津産山砂: 比重 2.60 , 吸水率 1.98 %, 粗粒率 3.03
粗骨材	G	青梅産碎砂: 最大寸法 20mm, 比重 2.64, 吸水率 0.78, 粗粒率 6.76
石灰石粉	Lf	舗装用石粉: JIS A 5008 規格品 :比重 2.73, 比表面積 5400 cm ² /g
AE減水剤	Ad.	リグニンスルホン酸系

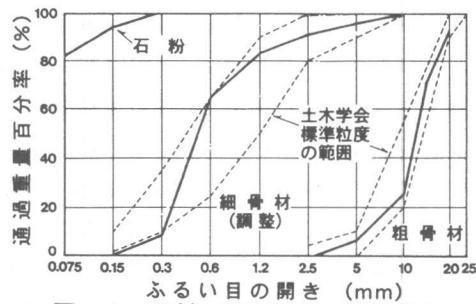


図-4 骨材・石灰石粉の粒度分布

表-2 コンクリートの配合およびフレッシュコンクリートの試験結果

No.	Gmax (mm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						S1. (cm)	Air (%)	U.W. (t/m ³)	Temp (°C)	ブリージ 量 (cm ³ /cm ²)	ブリージ 率 (%)	凝結時間 (h:min)						
					W	C	Lf	S1	S2	G							始業	終結					
A			73.7		186	253	58	457	199	1093						21.0	2.7	2.30	19.7	0.24	5.06	7: 54	10: 36
B			68.7		176	256	59	463	201	1108	C×					17.0	3.2	2.30	19.8	0.17	3.92	7: 06	9: 56
C	20	4.0	63.5	40.0	165	260	60	469	204	1124	0.25					11.0	4.0	2.30	20.2	0.12	2.82	6: 20	8: 55
D			60.9		159	262	60	473	206	1132	%					8.0	3.8	2.32	20.2	0.11	2.89	6: 11	8: 36
E			58.3		154	264	61	476	207	1140						6.0	3.8	2.32	20.1	0.10	2.56	5: 20	8: 00

3.3 試験項目および試験方法

表-3に試験項目および試験方法を、図-3にコア供試体の採取位置と間隙水圧の測定位置を示す。フレッシュコンクリートの水セメント比の推定は、水中重量法・乾燥重量法とコア強度の3種類とし、配合A～Eのコンクリートを用いて、予め水セメント比と各試料の重量・強度の関係から校正曲線を求めて行った。試料は、コンクリート打設から5時間後に、ブリージングの終了を確認

し、コア供試体と同じ位置から採取した。水中重量法は、試料を5mmでウェットスクリーニングし、気中で400gの試料の水中重量を計測した。乾燥重量法は、2000gの試料を110°Cで48時間乾燥後、乾燥重量を計測した。加圧ブリージング試験は実際のコンクリートの自重を想定し、加圧力を0.1～0.4 kgf/cm²とした。フレッシュコンクリートの透水試験は、図-5に示すように試料容器下部の水圧を0.20kgf/cm²に固定し、水温20°C、室温20°Cの条件下で試料容器上下部の水圧差を0.010～0.100 kgf/cm²の5段階に設定し、1段階毎に別の試料を用いて180分まで計測した。透水係数は、水圧やブリージングによる試料の圧密がないものと仮定して求めた。

4. 実験結果および考察

4.1 ブリージング率および凝結時間

図-6に配合A～Eのブリージング率の経時変化を示す。ブリージング率は、水セメント比の増大に伴って増大し、2～5%になった。また、凝結時間も水セメント比の増大に伴って遅くなり、2時間程度の差を生じた。

4.2 柱供試体の高さ方向の圧縮強度分布

図-7に配合A～Eの標準養生供試体の圧縮強度と水セメント比の関係を示す。配合Eに比べ、配合Aの圧縮強度と静弾性係数は、材令28日において各々約30%, 10%低くなった。図-8に配合Cを用いた柱供試体の高さ方向の圧縮強

表-3 測定項目および試験方法

測定項目	試験方法
フレッシュコンクリート	スランプ JIS A 1101に準拠
	空気量 JIS A 1128に準拠
	練上り温度 デジタル式温度センサーにて測定
	ブリージング率 JIS A 1123に準拠
	水セメント比推定 3種：乾燥重量法、水中重量法、コア強度
	間隙水圧 間隙水圧計にて計測 容量：2 kgf/cm ²
硬化コンクリート	加圧ブリージング率 コンクリート耐力指針案参考；加圧力 0.1～0.4 kgf/cm ²
	透水係数 透水試験、図-5参照；水圧 0.200 kgf/cm ²
	凝結時間 JIS A 6204付属書1に準拠
	圧縮強度 JIS A 1108に準拠（標準、コア供試体：材令28日）
静弾性係数	JSCE-1988 案に準拠（標準、コア供試体：材令28日）
	単位容積質量 圧縮強度試験用供試体の質量・寸法より算定

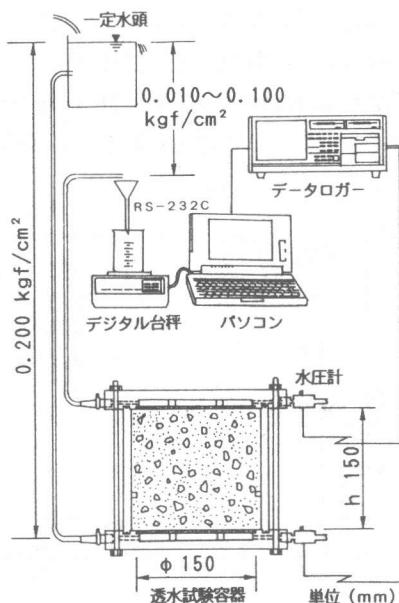


図-5 フレッシュコンクリートの透水試験装置

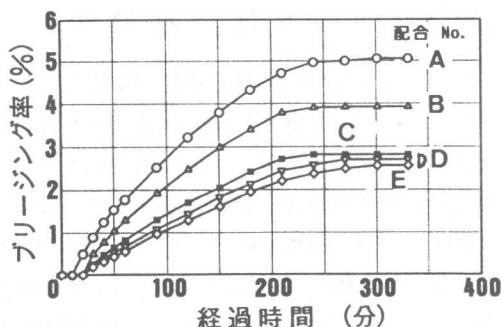


図-6 ブリージング率の経時変化

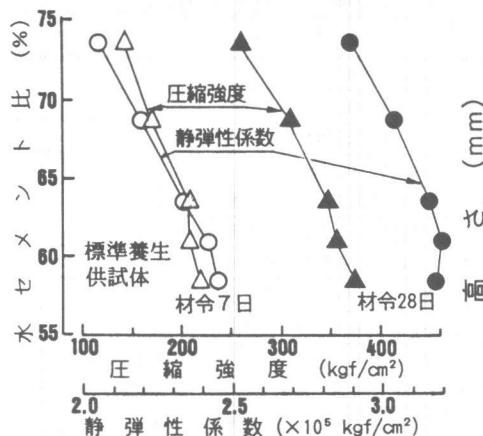


図-7 圧縮強度と水セメント比

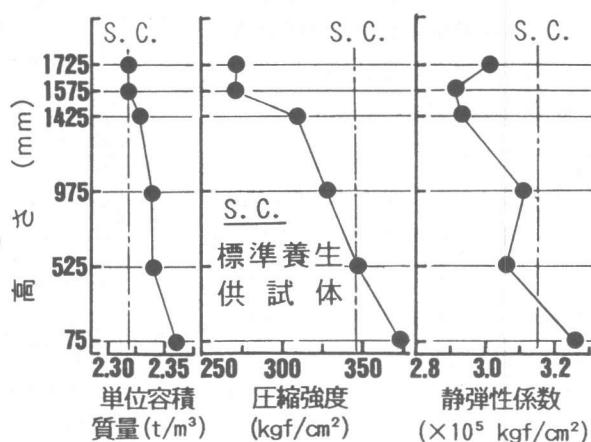


図-8 柱供試体の強度分布(材令28日)

度分布を示す。柱供試体の圧縮強度は、上部の20cmの範囲で強度低下が大きく、標準養生供試体より80 kgf/cm²程度、柱供試体下部より 100 kgf/cm²程度低下した。単位容積質量は、柱供試体上部が 2.32 kg/m^3 、下部が 2.36 kg/m^3 となり、柱供試体上部の空気量が4.0%と仮定すると下部は2.3%になっていると考えられる。この単位容積質量の差は、自重による空気量の変化などの影響によるものと考えられる。

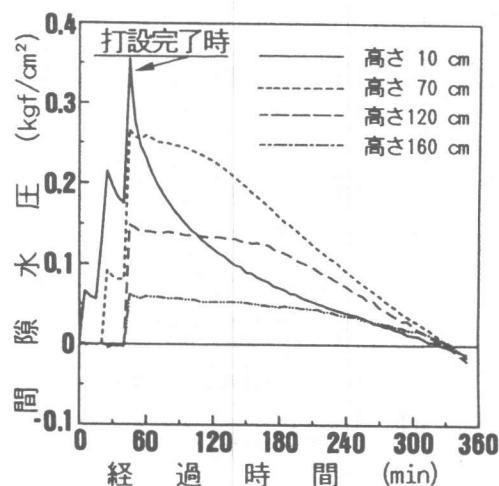


図-9 間隙水圧の経時変化

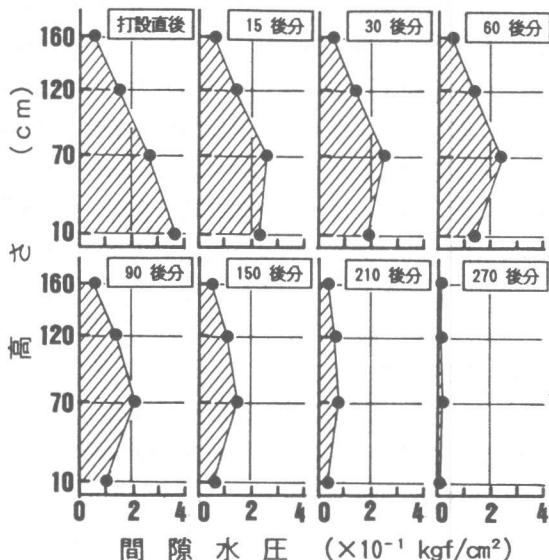


図-10 高さ方向の間隙水圧の分布

4.3 柱供試体の高さ方向の間隙水圧の分布

配合Cを用いて高さ1.8mの柱供試体を作製し、柱供試体内部の間隙水圧の分布を調査した。図-9に高さ方向の間隙水圧の経時変化を、図-10に高さ方向の間隙水圧の分布を示す。高さ10cmの位置の間隙水圧は、コンクリートの打設完了直後に最大値を示した後減少し、打設15分後に高さ70cmの位置の間隙水圧より小さくなかった。また、間隙水圧は、コンクリートの打設完了直後に最下部で最大値 0.35 kgf/cm^2 を示し、330分後にはどの高さでも水圧は 0 kgf/cm^2 となった。すなわち、コンクリート打設後330分の時点においてコンクリート内部の水の移動は完了したと考えられ、これは、JIS A 1123のブリージング試験が終了した時間とほぼ一致する。

4.4 柱供試体の高さ方向の水セメント比の分布

表-4に配合Cを用いた柱供試体の、高さ方向の水セメント比の測定結果を示す。柱供試体の推定水セメント比は、下部ではどの推定法でも57%程度で差が小さいが、上部の差は大きい。水中重量法・乾燥重量法では、柱供試体上下部の推定水セメント比の差が約5~10%なのに對し、コア強度から推定した水セメント比の上下差は約14%となった。即ち、柱供試体上部は、実際の水セメント比の増加分より強度の低下の割合が大きいことを示している。これは、柱供試体上部のコンクリートの骨材下面に空隙が発生するなど、ブリージングの影響で脆弱部が形成されたためと考えられる。

4.5 自重による加圧ブリージングの促進

図-11に配合Cの加圧ブリージング試験結果を示す。ブリージング試験(JIS A 1123)でのブリージング率が2.82%であったのに対し、加圧ブリージング率は8~18%となった。また、加圧ブリージングは、いずれも、加圧後約150分までに終了し、圧力が増すほど増加した。また、同一経過時間では、加圧力と加圧ブリージング率とは、正の相関関係を示した。

このコンクリートを高さ1.8mまで打設した場合、実験結果より最下部のコンクリートは自重で 0.35 kgf/cm^2 に加圧されるため、加圧ブリージング率は15%程度となり、水セメント比は63.5%から54%に低下するものと考えられる。しかし、4.4の結果より、最下部の水セメント比が57%であると考えると、実際の加圧ブリージング率は7%程度であると推定できる。この加圧ブリージング率の差は、ブリージング水の排水条件の違いによるものと考えられる。

4.6 フレッシュコンクリートの透水試験結果

表-5に配合Cのコンクリートの透水試験結果を示す。試験では水が試料容器側面を上昇する現象は見られず、単位時間当たりの透水量は一定であった。Darcy則を用いて算定した結果、このフレッシュコンクリートの透水係数は約 $5 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$ であることが判明した。試料容器上下部の水圧差が、 0.02 kgf/cm^2 まで透水しなかったため、この水圧以下では透水しにくいと考えられる。これは、部材上部にブリージング水が溜り強度低下を誘発する一因になっていると考えられる。

表-4 高さ方向の推定水セメント比

試験方法	水 中 重 量 法	乾 燥 重 量 法	コア強度 による推定
高さ (mm)	推定水セメント比 (%)		
1725	62.3	65.4	72.4
1575	63.3	64.6	72.6
1425	63.3	59.4	67.3
975	61.4	59.0	64.9
525	60.6	59.0	62.5
75	57.7	54.5	58.7
標準試料	63.1	59.7	63.5

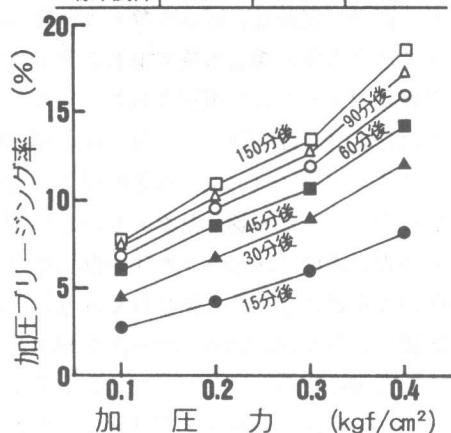


図-11 加圧力と加圧ブリージング率

表-5 フレッシュコンクリートの透水係数

水圧差 (kgf/cm ²)	透水量 $\times 10^{-2}$ (cc/sec)	透水係数k $\times 10^{-5}$ (cm/sec)
0.010	なし	透水せず
0.020	なし	透水せず
0.035	1.24	3.00
0.050	1.39	2.36
0.100	12.56	10.67

5. ブリージング現象のシミュレーション

図-12にブリージング現象のシミュレーション方法の概念を、表-6にシミュレーションによる柱供試体内部の水セメント比の変化を示す。計算は、高さ1.8mの柱供試体を15cm毎に12段に分割

し、中心差分によってコンクリート打設直後から15分毎に300分まで水セメント比を求めた。計算では次の仮定を用いた。①ブリージング水は鉛直上方向に移動する。②各段の水圧差が0.02 kgf/cm²まで透水しない。③最下段には加圧による脱水だけが生じる。

シミュレーションでは、コンクリート内部のブリージング水の移動は、打設から105分後にはほぼ終了した。また計算より、ブリージング現象は、透水現象と加圧脱水による圧密現象の複合現象であると考えた方が適切であることが確認された。水セメント比は、最上段が64.2%，最下段が58.8%になり、水セメント比の推定結果とほぼ同等になることが確認された。しかし、表-

6の太枠内は下段の方が水圧が低いので、①の仮定により水の移動はなくなり、この影響で、5段目の水セメント比が最小となって実情に合わなくなっている。シミュレーションでは、おおよそブリージング現象をとらえていると考えられるが、詳細については今後もさらに検討する必要があると考えられる。

6. 結論

実験の結果得られた知見を下記に示す。

①ブリージング現象によるコンクリー

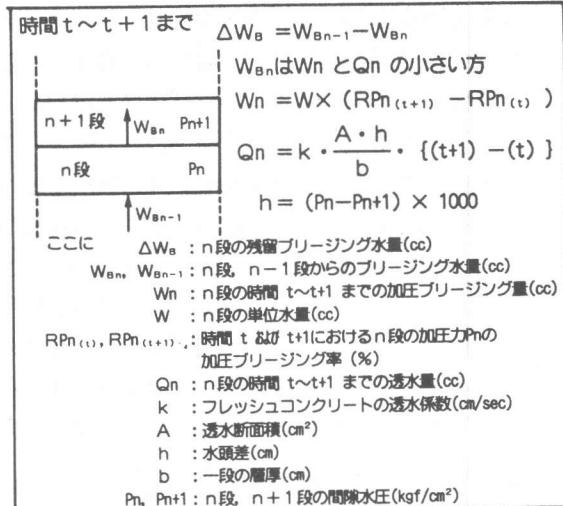


図-12 シミュレーションの概念図

表-6 ブリージングのシミュレーション結果

段 No.	高さ (mm)	経過時間(分)								
		直後	15	30	45	60	75	90	105	300
		計算による水セメント比(%)								
12	1725	63.5	64.0	64.1	64.2	64.2	64.2	64.3	64.4	64.4
11	1575	63.5	63.8	63.9	64.0	64.0	64.1	64.1	64.1	64.1
10	1425	63.5	63.8	64.0	64.0	64.0	64.1	64.1	64.1	64.1
9	1275	63.5	63.9	63.4	64.0	64.1	64.1	64.1	64.1	64.1
8	1125	63.5	63.8	64.0	64.0	64.1	64.1	64.1	64.0	64.0
7	975	63.5	63.5	64.0	64.0	64.1	64.1	64.1	64.1	64.1
6	825	63.5	63.3	56.0	62.0	63.1	63.9	56.5	56.5	56.5
5	675	63.5	62.6	62.6	59.2	57.4	56.3	56.3	56.3	56.3
4	525	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5
3	375	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5
2	225	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5
1	75	63.5	58.8	58.8	58.8	58.8	58.8	58.8	58.8	58.8

ト部材上部の強度低下は、骨材下面の空隙の発生などにより脆弱部が形成され、実際の水セメント比の増加による強度低下より大きいと考えられる。②ブリージング水の移動解析により、自重を受けるコンクリートの高さ方向の水セメント比の推定が可能であると考えられる。③ブリージング現象は、透水現象と加圧脱水による圧密現象の複合現象であると考えられる。

今後の課題として、ブリージングの移動機構とコンクリートの品質への影響に関するデータをさらに集積し、コンクリートの要求品質に応じたブリージング率の規定手法を提案して行く。

【参考文献】

- [1] 平田隆祥・竹田宣典・十河茂幸：石灰石粉によるブリージングの低減がコンクリートの強度・耐久性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14，No.1, pp.309-314, 1992.5
- [2] 岩崎訓明：コンクリートの特性，共立出版，pp.38-43, 1975
- [3] T.C. Powers: The Properties of Fresh Concrete, Wiley, pp.533-603, 1968
- [4] 沢出 稔・池谷純一：セメントモルタルおよびコンクリートのブリージング水の挙動に関する速度論的解析，清水建設研究報告，第52号，1990.10, pp.1-11