

論 文

[1068] 一軸圧縮応力を受けるコンクリートの透気性および吸水特性

正会員 ○米倉亞州夫（広島大学工学部）

正会員 田澤榮一（広島大学工学部）

黒澤 功（広島大学大学院）

井上英司（広島大学大学院）

1. まえがき

近年、鉄筋コンクリート構造物の早期劣化が問題となっているが、コンクリート構造物の劣化原因としては凍害、塩害、アルカリ骨材反応、中性化などが挙げられる。このなかでコンクリートの中性化は、一般環境下であっても確実に進行してゆく。コンクリートの中性化が鉄筋部にまで達するとコンクリートによる防食機能は失われ、腐食に必要な水と酸素が供給されれば鉄筋は容易に腐食する¹⁾。コンクリートの中性化はコンクリート中のCa(OH)₂と空気中のCO₂が反応して生じると言われているので、コンクリートの透気性と密接に関係している。また、コンクリート表面からの吸水性は、外部から塩分が水に溶けてコンクリート内部に侵入していくので重要となるが、透気性に及ぼす要因と重複しているものが多いと思われる。しかしプレストレスを導入したコンクリートの透気性、吸水性に関する研究はほとんど報告されていない。また、コンクリート中の細孔構造やブリージングによって骨材下面に生ずる欠陥と透気性、吸水性、さらには中性化との関係についての研究も少ないようである。そこで本研究においては一軸圧縮応力を受けるコンクリートの透気性、吸水性だけでなく、細孔構造やブリージングによる欠陥部の相違が透気性、吸水性に及ぼす影響についても検討した。

2. 実験概要

セメントは普通ポルトランドセメントを用い、細骨材は風化花崗岩系山砂、粗骨材は石灰岩碎石を用いた。骨材の品質は表-1に示す。混和材としてシリカフューム、高炉スラグ微粉末（粉末度4000cm²/gおよび8000cm²/g）を用い、置換率はシリカフュームは10%、スラグは55%とした。混和剤として高性能減水剤、AE減水剤を使用した。コン

表1 骨材の品質

	細骨材		粗骨材
	山砂	石灰岩	
最大寸法(mm)	5	15	
比重	2.61	2.71	
吸水率(%)	1.32	0.31	
粗粒率	2.88	6.55	

表2 コンクリートの配合

クリートの配合を表-2、水セメント比と養生条件の一覧を表-3、供試体寸法を図-1に示す。練り混ぜ方法は従来の練り混ぜ法（シングルミキシング：以下SMと記す）のほかにブリージング率を変化させるため、練り混ぜ水を2度に分けて投入する練り混ぜ法（ダブルミキシング：以下DMと記す）を採用した（図-2参照）。供試体は材令1日で脱

W/C(%)	s/a(%)	W(kg)	C(kg)	S _f (kg)	Si(kg)	s(kg)	G(kg)	f'(%)	マイ(%)
1 35	45 175		500		752	919	0.4	0.8	
2			350		809	988	0.3	0.7	
3 50			350		809	988	0.3	0.7	
4			350		809	988	0.3	0.7	
5 60			292		808	1025	0.15	0.25	
6 35			225	275	743	908	0.3	0.6	
7			158	193	851	1041	0.3	0.5	
8 50			158	193	851	1041	0.3	0.5	
9			158	193	851	1041	0.3	0.5	
10 60			131	160	820	1002	0.2	0.25	
11 35			450		50	728	0.3	1.0	
12			315		35	802	0.3	1.0	
13 50			315		35	802	0.3	1.0	
14 60			263		29	826	0.3	1.0	

*「 s_f 」はスラグを表し「Si」はシリカフュームを表す。「 ϕ' 」はボーリスNo.70、「マイ」はマイティ150を表し添加量は結合材料の重量百分率とする。

型し20°Cの水中にて28日まで養生した。オートクレーブ養生（以下ACと記す）した供試体も含水状態による影響を少なくするためにAC後28日まで水中にて養生した。その後は20°C、R.H.50%の恒温恒湿室内に静置した。乾燥28日目にまず無応力状態で透気性試験を行い、同じ供試体を用いて、プレストレスを圧縮強度の1/3の応力で導入し、応力下での透気性及び吸水性の試験を行った（普通コンクリートW/C=50%，SMについては1/6の応力のものも作成した）。乾燥収縮歪み、重量変化を恒温恒湿室内に静置中、透

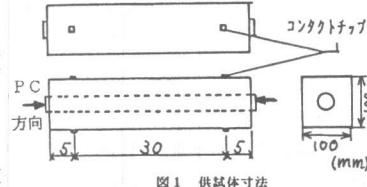


図1 供試体寸法

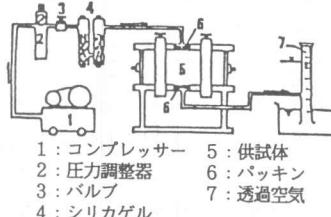


図3 透気性の測定

	普通コンクリート			スラグ (B-4000)			シリカフューム		
	W/C=35	50	60	35	50	60	35	50	60
普通養生	①	②③	⑤	⑥	⑦⑧	⑩	⑪	⑫	⑭
オートクレーブ養生		④			⑨			⑬	

※ ②はシングルミキシング、③はダブルミキシングとする。

⑩はB=8000とする。

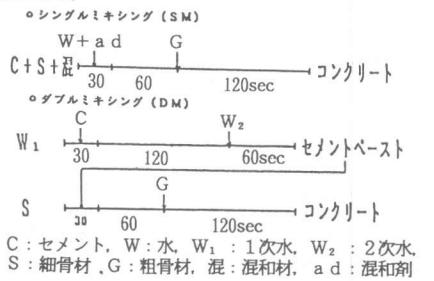


図2 SMとDM

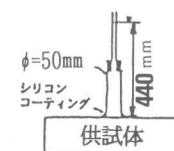


図4 吸水性の測定

気性試験を行う日まで測定し、さらに透気性試験時の圧縮強度及び細孔径分布を測定した。乾燥収縮歪みの測定はコンタクトゲージを用い、透気性の測定は図-3に示す装置を用い、気中養生開始28日目に3kgf/cm²の圧縮空気を送り透過量を測った。吸水性の測定は図-4に示す方法で透気性試験後に行なった。細孔径分布の測定は吸水性測定後、水銀圧入法で測定した。

3. 実験結果および考察

3-1 透気性

3-1-1 欠陥部の位置と透気方向が透気性に及ぼす影響

コンクリートにはブリージング等による異方性が存在するので、まず透気方向の違いが透気性に及ぼす影響について検討する。図-5にブリージングによって粗骨材下面にブリージング水がたまつてできる欠陥部を模式的に示すが、図のような3方向について透気性試験を行い、その結果を図-6に示す。これより、透気性は①方向が1番大きく、次いで③、②の順に小さくなっているが①の透気性は③、②に比べてかなり大きいことが分かる。この差の原因は透気方向とブリージングによりできた骨材下面の空隙（欠陥部）と骨材の位置関係にある。この透気性試験は空気の圧力勾配による流れを利用しているので、供試体中を空気が透過しているとき、空気透過を助長する骨材下面の空隙と妨げる骨材の位置関係により圧力損失の差が生じ、その差が空気透過量に影響を及ぼすと思われる。①方向の場合、空気透過方向と骨材下面の空隙の方向は平行で、空気は骨材に比較的関係なく移動できる。また骨材下面の空隙が透気方向に対して比較的連続な状態にあるためと思われる。

②③方向の場合は、骨材により空気透過方向と骨材下面の空隙が不連続の状態になり、骨材が空

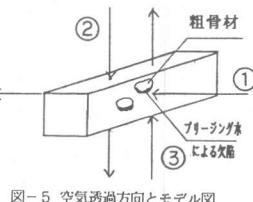


図-5 空気透過方向とモデル図

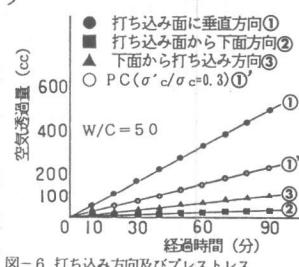


図-6 打ち込み方向及びプレストレスの有無と透気量

気の移動を妨げ圧力損失が大きいためと思われる。②③方向の透気量の差は、③方向の場合、空気透過方向に対して骨材下面の空隙、骨材の順で存在するので、空気は骨材下面の空隙に溜まりやすく、この欠陥部を通り進むが、②方向では、空気透過方向に対してまず欠陥のない骨材上面、次に骨材下面の空隙の順に存在するので、空気は骨材下面の空隙に到達しにくく、直接健全なコンクリート中を透過する割合が多くなるために透気量が③方向より少ないのでないかと思われる。また、図-6に示すように応力-強度比0.3のプレストレスを加えて①方向に透過させた場合の透気量より②、③の方向でプレストレスなしの場合の方が小さい。このように、透気方向に対して骨材と骨材下面の欠陥部の位置が透気性に及ぼす影響は極めて大きく、コンクリートの異方性の影響が顕著である。従って、ブリージングによって生じる欠陥部ができるだけ小さくすることが重要となるが図-7にブリージングを著しく小さくできるダブルミキシング(DM)法によって製造したコンクリートの透気性を図-5の①方向に透過させた場合について示す。図-7は通常の練混ぜ方法であるシングルミキシング(SM)とDMにより製造したW/C=50%の普通コンクリートの場合について示している。DMはDM効果の最適条件を用いれば表-5に示すようにSMよりもブリージングを大幅に減少できる。図-7よりDMの空気透過量はSMに比べ約2/3になった。これはDMの最大ブリージング率がSMの1/7であるので、ブリージングによる骨材下面の欠陥や材料分離が少なかったことによる影響であろう。このようにDMで練り混ぜて、ブリージングを減少させることは空気透過性を減少させるのに有効な手段であるといえる。

3-1-2 プレストレスの有無が透気性に及ぼす影響

図-6に示すように、プレストレスを応力-強度比で0.3導入した場合の透気性は①の透気方向の場合、プレストレスなしの場合の約1/2となっていることから、プレストレスの影響も極めて大きいと思われる。そこでプレストレスを導入した供試体について図-5の①の方向の場合の透気性について検討する。

図-8に普通、スラグ混入、シリカフューム混入コンクリートで水結合材比35、50%のプレストレス導入前後の透気性を示す。プレストレス導入前より導入後のはうが空気透過量が少なくなった。これは透気性に大きな影響を及ぼす欠陥部、連行空気や細孔の大きな空隙が、プレストレスの導入により変形し、無応力の場合に比べ細孔容積が減少したためと思われる。また図-9に導入応力を圧縮強度の0.3と0.15としたコンクリートの透気性試験結果を示す。この図より透気速度は応力の増大とともに直線的に減少している。これは導入応力により、細孔および欠陥部の変形による縮小が比例的に大きくなつたためと思われる。

3-1-3 養生方法および混和材の相違が透気性に及ぼす影響

図-10はプレストレスなしの場合の普通養生(NC)とオートクレーブ養生(AC)の透気性の違いについて示す。普通コンクリート、スラグ混入コンクリート、シリカフューム混入コンクリートの各々の場合、ACを施すといずれの場合にもNCに比べ空気透過量が増加している。これは表-4に示すように、ACによりコンクリート中のセメントペーストの細孔構造がNCの場合より粗大化し、大きな細孔および欠陥部の割合が増加したためと思われる。また、図-

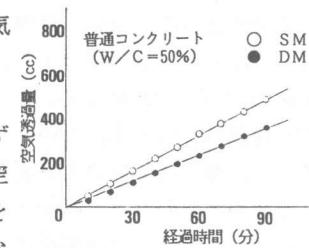


図-7 空気透過量と経過時間の関係

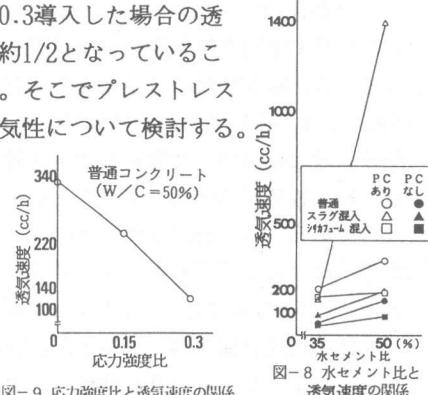


図-8 水セメント比と透気速度の関係

11に示すように、ACした場合のプレストレスによる透気量の減少割合は、図-8に示すNCの場合より著しく大きく、透気量はプレストレスなしの場合の1/2~1/5となっている。これは、ACの場合、細孔構造が粗大化し、大きな細孔が増すが、このような細孔はプレストレス導入時にほとんど変形して縮小化されるためと思われる。高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの透気性は、普通コンクリートの場合より、NCおよびACともに著しく大きく、シリカフュームコンクリートの場合の透気性は、普通コンクリートの場合より著しく小さく、ACした場合とNCした場合の透気性の差は最も小さくなっている。シリカフュームを混入した場合は、ACしても普通コンクリートの場合より著しく細孔構造が緻密になるためと思われる。以上、透気性に最も影響を及ぼす要因は、欠陥部と細孔構造であることを述べてきたが、これらのこととは図-12、図-13より一層明らかである。すなわち、透気速度は圧縮強度が大きくなるほど、また、細孔容積が小さいほど小さくなっている。ここで、W/C=50%でSMによって製造した普通コンクリートの透気速度は、ブリージングによる欠陥部のために、ブリージングがほとんどないW/C=35%の普通コンクリートの場合や、シリカフュームをセメント重量の10%置換した場合で水結合比が50%および35%の場合より大きくなっている。W/C=35%のSMで製造した普通コンクリートの場合と、W/C+Si=50%のシリカフュームコンクリートとの圧縮強度はほぼ同じで同一の透気速度となっている。これは、細孔容積がほぼ同一でブリージングが殆ど生じなかたためである。図-13に示すように、ブリージングによる欠陥部がほとんど存在しないコンクリートの場合の透気速度は、同一細孔容積において、W/Cおよびコンクリートの種別に関係なく同一の値となっている。(例えばW/C=50(DM)とW/(C+Si)=50(AC))

3-2 コンクリートの細孔特性及び欠陥部が吸水特性に及ぼす影響

3-2-1 プレストレスの有無が吸水特性

に及ぼす影響

図-14、15に普通養生W/C=50%、SMのプレストレス導入時と無応力時の吸水量、吸水速度を示す。この図より0.3の応力-強度比のプレストレスを導入することにより透気性試験のときと同様に、無応力の場合に比べて吸水量、吸水速度は減少し、5時間の吸水量は無応力の場

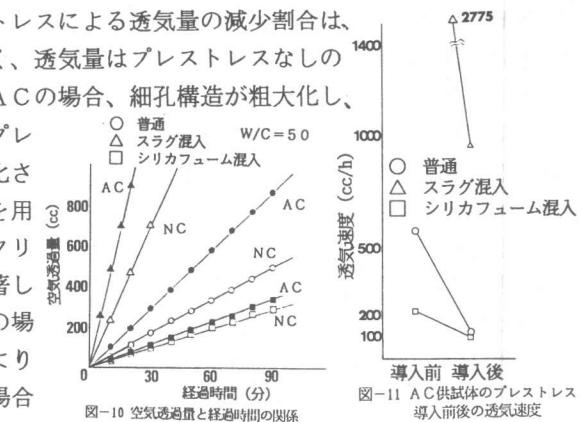


図-10 空気透過量と経過時間の関係



図-11 AC供試体のプレストレス導入前後の透気速度

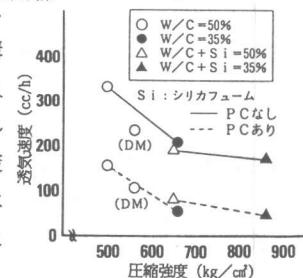


図-12 圧縮強度と透気性の関係

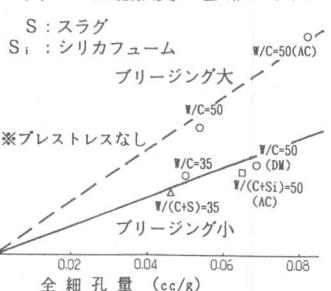


図-13 全細孔量と透気速度の関係

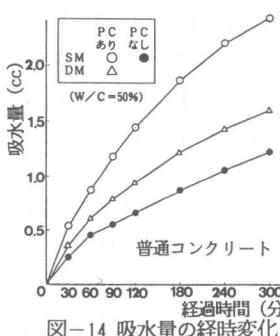


図-14 吸水量の経時変化

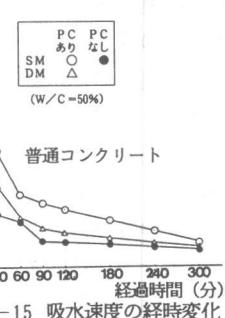


図-15 吸水速度の経時変化

合の約0.6~0.7倍となった。これは3-1-2に述べたように、プレストレスの導入により、吸水量に大きな影響を及ぼす連行空気や細孔の大きな空隙が変形し、細孔容積が減少したためと思われる。

3-2-2 ブリージングの違いが吸水特性に及ぼす影響

図-14, 15に示す吸水特性試験の結果は透気性試験の結果と同じ傾向になり、SMの方がDMより吸水性・吸水速度がともに大きくなつた。図-16にSM, DMの重量減少率・乾燥収縮ひずみの関係を示す。この図より、SMとDMは重量減少率に差はほとんど見られないが、DMした場合の乾燥収縮ひずみが大きいということは、毛細管張力が強いことであり²⁾、細孔径の小さいものの割合が多いことを意味する。これは表-4の50%径(平均細孔直径)からみても、SMよりDMの方が小さい径の方に片寄つてゐる。さらに全細孔容積(cc/g)は、DMの方がやや大きい。重量減少率が同程度で毛細管張力が強いということは、DMの方がSMより吸水する力が強いことを示しているが、細孔径が小さいので、内部まで浸透しにくく、水の流れは小さいことが考えられる。また、表-5のブリージング試験結果が示すように、SMの場合、ブリージングによる骨材下面の欠陥部は、細孔の径よりずっと大きく水も流れやすい。このため吸水量・吸水速度がDMより大きくなつたものと考えられる。このようにDMで練りませて内部欠陥を少なくするということは、水の浸透を低減させるのに有効な手段であるといえる。

3-2-3 養生方法の違いが吸水特性に及ぼす影響

図-17に普通コンクリート及びスラグ混入コンクリートの水セメント比・水結合材比50%の標準養生(NC)とオートクレーブ養生(AC)の吸水量を示す。吸水特性試験の結果は、透気性試験の結果と同様に、ACの方がNCより吸水量、吸水速度がともに大きくなつた。これは表-4の50%径、全細孔容積が示すようにACによりコンクリート中のセメントペーストの細孔構造がNCより粗大化し、大きな細孔の割合が増加したためである。図-18に示す重量減少率・乾燥収縮ひずみの関係からも、ACはNCに比べて重量減少率が大きく、乾燥収縮ひずみの値が小さい。ACの重量減少率がNCに比べて大きいということは、NCに比べて水を吸収しやすいことを意味し、ACの方がNCに比べて乾燥収縮ひずみが小さいということはNCに比べて毛細管張力が小さいということであり²⁾、換言すれば毛細管空隙の径が大きいということである。

吸水は毛細管現象によって起こり、毛細管上昇高さは式(1)によって示されるので、径の小さい細孔の方が毛細管張力が大きく、吸水力も大きいが、本研究の場合、供試体上において水を入れた容器の高さ(44cm)だけの水頭(圧力)が作用しているので、コンクリート内部への水の浸透は透水も同時に生じていると思われる。この場合は、

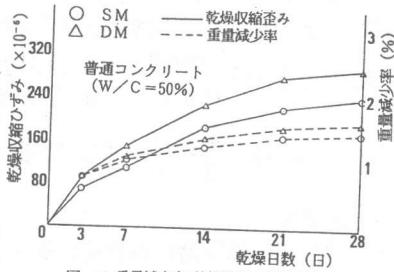


図-16 重量減少率・乾燥収縮の経時変化

表4 細孔径

	全細孔容積 (cc/g)	50%径 (μm)
普通 W/C=50	0.0535	0.0342
" (DM)	0.0686	0.0247
" (AC)	0.0821	0.0562
スラグ W/C+S=50	0.0541	0.0280
" (B-8000)	0.0471	0.0152
" (AC)	0.0774	0.0247
シリカフューム W/C+Si=50(AC)	0.0650	0.0203

表5 ブリージング率

練り混ぜ法	ブリージング率
SM	4.10%
DM	0.57%

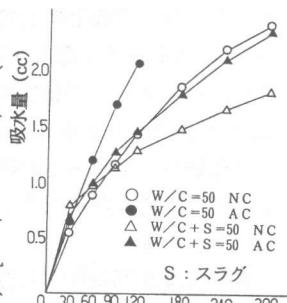


図-17 NCとACの吸水量の経時変化

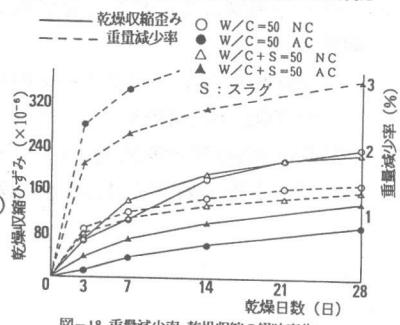


図-18 重量減少率・乾燥収縮の経時変化

Poiseuilleの法則により式(2)のように流量は細孔半径が大きいほど大くなる。このため、ACの場合の吸水量がNCの場合より大きかったものと思われる。このようにACはNCに比べて水密性が著しく劣り、水密性を要求されるものには不適当である。

$$\text{式 (1)} \quad h = \frac{2T \cos \alpha}{\rho g r} \quad (T: \text{水の表面張力}, \alpha: \text{表面張力の垂直線となす角度}, \rho: \text{水の密度}, g: \text{重力加速度}, r: \text{毛細管半径})$$

$$\text{式 (2)} \quad Q = \frac{\pi r^4 h}{8 \eta l} \quad (Q: \text{流量}, r: \text{管の半径}, l: \text{管の長さ}, h: \text{水頭差}, \eta: \text{粘性係数})$$

4. まとめ

本研究は一軸圧縮応力を受けるコンクリートの透気性、吸水性の関係、また細孔構造や欠陥部の違いが透気性、吸水性に及ぼす影響について検討したが、本研究の範囲内で次のようなことが明らかとなった。

- (1)透気速度は透気方向により異なり、打ち込み面に垂直方向に透気させたとき最も大きくなつた。また打ち込み面から透気させた場合が、その逆向き(底面から)に透気させた方より小さくなつた。
- (2)ブリージングによって生じた欠陥部が透気性に及ぼす影響が極めて大きいため、ダブルミキシングによりブリージングを著しく減少させた供試体は気密性、水密性とも向上した。
- (3)オートクレーブ養生を施すことにより透気性、吸水性とも大きくなつた。
- (4)プレストレスを導入することにより空気透過量は少なくなり、応力強度比が0.3の場合、プレストレスなしの場合の1/2以下となつた。その減少の割合は、導入応力が大きいほど大きく、圧縮強度の0.3の応力を導入した場合、0.15のときの倍となり、普通養生を施したものより、オートクレーブ養生のもののはうが大きかつた。
- (5)プレストレスを導入することにより吸水量は約6~7割に減少した。透気性同様、普通養生よりもオートクレーブ養生のほうが、その減少率は大きい。
- (6)シリカフュームを用いたコンクリートは、極めて緻密な組織となるので、透気性、吸水性とともに普通コンクリートの場合より小さく、水セメント比が50%の場合でNCの場合約6割に、ACの場合は約4割に低下した。ただし、同一圧縮強度においてはほぼ同様な値となつた。

5. あとがき

本研究は文部省科学研究費補助金総合研究(A) (課題番号63302044, 研究代表者, 岡村 甫東大教授) の分担研究の一部であり、また細孔径の測定にあたっては、昭和鉱業(株) (安芸津工場) の御協力を得たことを付記して深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 平井和喜ら: コンクリートの中性化に関する研究の現状と課題, セメント・コンクリート No.496, June. 1988
- 2) 長瀧重義・米倉亜州夫: コンクリートの乾燥収縮およびクリープの機構に関する考察、コンクリート工学論文 Vol.20 No.82.12. Dec. 1982 PP.85~95