コンクリートの強度に及ぼす空隙欠陥の影響に関する考察

EFFECT OF MACRO-VOID ON CONCRETE STRENGTH

三上 貴正*, 上 沢 聡 史**, 坂 井 映 二***

Takamasa MIKAMI, Satoshi KAMISAWA and Eiji SAKAI

In this study, the relation between concrete strength and property of macro-void is investigated by testing mortar and concrete specimens containing various combination of artificial void in them. The shapes of macro-void in the experiment are sphere, circle disk and oval disk. As a result, the estimate strength obtained from the following equation showed adequate correlation with the measured strength.

$F_c/F_{c0} = \exp(a A_z)$, where F_c/F_{c0} : relative strength of concrete, A_z : maximum ratio of projected sectional area of void, a : constant.

Keywords: Macro-void, Property of void, Artificial void, Relative strength of concrete,

Maximum ratio of projected sectional area of void

空隙欠陥、欠陥性状、モデル欠陥、圧縮強度比、最大投影欠陥断面積比

1. 序論

近年、建設後10～20年という早い時期に、劣化現象を示すコンクリート構造物が多数存在することが社会的問題となっている。このような早期劣化が生じた構造物の被害報告によると、その約半数は施工中に生じた欠陥に起因するものであり、現場でのコンクリートの調査、打設および養生の不具合が欠陥の主な原因であると指摘されている^{1), 2)}。このように、コンクリート構造物の強度や耐久性に関しては施工の良否が著しく影響を及ぼすが、とりわけコンクリート構造物は型枠内部への十分なコンクリートの充填を前提としているため、締固め不足などでコンクリートの充填が不十分な場合は、耐久性が低下したり設計基準強度に達しないなど、要求される性能水準を確保できなくなることがある。

以上より、コンクリート構造物の耐久性、信頼性、安全性向上の観点から、コンクリートの充填度を測定、評価する必要があると考えられる。さらに、昨今、P C型枠や鋼管コンクリート柱など、コンクリート硬化後も脱型しない新たな構造型式が実用化されてきており、これらに関してはより一層、充填度を検査する必要性が高まっていくと考えられる。

コンクリートの型枠内への充填状況や内部空隙欠陥のモニタリングシステムの構築に関しては、これまでも様々な研究が行われて

おり、各種の方法が提案されている^{3), 4)}。しかしながら、欠陥性状とコンクリートの品質との関係についての定量的検討が不足しているため、測定対象とすべき欠陥の範囲や指標とすべき欠陥のパラメータは明確にされておらず、コンクリート打設時や硬化後の充填状況の検査は、適正に行われていないのが現状である。したがって、施工不良による欠陥の性状がコンクリートの品質に及ぼす影響を明らかにすることが必要であると考えられる。

本研究は、コンクリート構造物の品質に及ぼす内部空隙欠陥の影響を定量的に評価するための基礎的段階として、モデル空隙欠陥を有する供試体に関して、欠陥の性状がコンクリートの最も基本的な品質項目である圧縮強度に及ぼす影響を実験的に把握し、コンクリートの充填状況を把握する際に指標とすべき空隙欠陥のパラメータに関して考察することを目的としたものである。

なお、本研究で対象とする欠陥は、コンクリートの充填が不十分な場合に生ずる、いわゆるジャンカなどに代表される、コンクリートの表面や断面において目視による判別が可能な大きさの空隙欠陥（以降、マクロな空隙欠陥と記す）とした。ただし、基礎的段階にある本論文では、対象とする空隙欠陥の形状は比較的単純なものに限定し、実際の施工不良により生じることの多い不整形な形状の空隙欠陥に関しては、次報以降の課題とした。

* 東京工業大学大学院情報理工学研究科 助教授・工博

** 旭硝子(当時東京工業大学大学院生) 修士(工学)

*** 東京工業大学工学部建築学科 助手・修士(工学)

Assoc. Prof., Graduate School of Information Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Asahi Glass Co., Ltd., M. Eng.

Research Assoc., Dept. of Architecture and Building Engineering, Faculty of Eng., Tokyo Institute of Technology, M. Eng.

2. 実験概要

供試体の調合、およびモデル欠陥の性状の範囲を設定し、モルタル・コンクリート供試体の圧縮強度試験を行った。以下に、主要な事項について説明する。

(1) 調合の設定

基本となるモルタル・コンクリートには、モデル欠陥以外の空隙欠陥や材料分離が極力発生しないように、均質で安定した性状を持つものが求められる。また、モデル欠陥の配置の制御を容易とするため、流動性に優れた、自己充填性を有するものが求められる。以上の2点を基本方針とし、調合を設定した。

① 使用材料

使用材料を表1に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを用い、モルタル・コンクリートは流動性に優れ、材料分離を生じないものとするため、混和剤としてナフタリンスルホン酸塩系高性能減水剤を使用した。本研究ではモデル欠陥以外の空隙の発生をできるだけ抑えるという基本方針から、混和剤もA E作用のないものとした。骨材に関しては、骨材の不均一さによる影響を少なくするため、均質で安定した性状を持つように通常より最大寸法を小さいものとした。細骨材は、モルタルには最大寸法600 μ mの(イ)を用い、コンクリートには最大寸法2.5mmの(ロ)を用いた。粗骨材の骨材寸法の範囲は10～15mmとした。

② 調合の設定

試し練りにより、要求される条件を満たす調合を設定し、水セメント比(W/C)35%、砂セメント比(S/C)100%、混和剤添加率(A/C)2.4%のモルタルを基本調合とした。また、W/Cの違いによるセメント硬化体構造の差異の影響をみるため、比較的組織が粗悪なものとしてW/C:70%のもの、および、W/Cによる強度算定式⁵⁾から求めた、これらの中間の強度に相当するW/C:46%のもの、計3種のW/Cの調合を設定した。なお、S/C、A/Cは試し練りにより、モルタルフローが基本調合と同程度となるように設定した。また、粗骨材の有無による影響をみるため、コンクリートもあわせて設定した。コンクリートのモルタル部分の調合は、先に設定したモルタルと同様、W/Cの異なる3種を設定し、粗骨材の割合はいずれも、コンクリート重量の40%とした。表2に調合を示す。

(2) 実験条件の設定

強度に影響を及ぼす空隙欠陥の因子として、欠陥の形状・寸法・量・配置に着目し、モデル欠陥の性状の範囲を設定した。モデル欠陥には、強度が母材の強度と比較してほぼ0とみなせる、発泡スチロールを使用した。形状は、最も単純な球状、および配置によって強度に及ぼす影響が大きく異なるであろうと考えられる、板状の2種を設定した。欠陥寸法は、球状モデル欠陥では直径12、20、30、40mmの4種、板状モデル欠陥では、直径20mmで厚さ5mm(C1)、ならびに、直径40mmで、厚さ3mm(C2)と5mm(C3)の円板状のもの、および、厚さ3mmで、長径90mm、短径40mm(O1)、ならびに、長径55mm、短径40mm(O2)の楕円板状のものの5種とした。球状モデル欠陥の配置は、欠陥が1カ所に集中したものを模したA、比較的均等に存在するB、横方向に偏って存在するC、縦方向に偏って存在するDなど、計8種の配置を設定した。板状モデル欠陥の配置は载荷方向に対する角度 θ が、0、45、90度および、 $\tan \theta = 1/2$ となる、26.6度の4種を設定した。図1にモデル欠陥の配置を示す。

表-1 使用材料

材 料	種 類	比 重		
セメント(C)	普通ポルトランドセメント	3.15		
混和剤(A)	ナフタリンスルホン酸塩系高性能減水剤	1.20		
骨材	種類	比重	吸水率	粒径
細骨材(イ)(S)	千葉県産	2.61	1.56%	<0.6mm
細骨材(ロ)(S)	山砂			<2.5mm
粗骨材(G)	碎石	2.57	0.73%	10～15mm

表-2 供試モルタル・コンクリートの調合

	W/C (%)	W	A	C	S	G
		(kg/m ³)				
モルタル	35	311	23	955	955	—
	46	392	5	862	862	—
	70	407	4	586	1055	—
コンクリート	35	187	14	573	573	1028
	46	235	3	517	517	1028
	70	244	2	352	633	1028

図-1 モデル欠陥の配置

供試体は $\phi 5 \times 10$ cmの円柱状のものを基本とし、寸法の違いによる影響をみるため $\phi 7.5 \times 15$ cm、 $\phi 10 \times 20$ cmのものもあわせて設定し、計3種とした。

以上、モルタル・コンクリートの調合、モデル欠陥の形状・寸法

表-3 実験条件

球状モデル欠陥を有する供試体							板状モデル欠陥を有する供試体										
供試体寸法 (cm)	W/C (%)			粗骨材 の有無	モデル欠陥			空隙率 Pv (%)	供試体寸法: φ 5 × 10 cm, W/C: 35%, モルタル								
	35	46	70		直径 Dv(mm)	数	配置		モデル欠陥					空隙率 Pv(%)			
								記号	形状	直径 (mm)	長径 (mm)	短径 (mm)	厚さ (mm)		配置 θ (度)		
φ 5 × 10	○	○	○	無	20	1	A	2.13	C 1	円	20	—	—	5	0	0.80	
	○	○	○		30	1	A	7.20			20	—	—	5	45	0.80	
	○	○	○		40	1	A	17.07			20	—	—	5	90	0.80	
	○	○	○		12	8	B	0.46			40	—	—	3	0	1.92	
	○	○	○		20	8	B	17.07			40	—	—	3	26.6	1.92	
	○	○	○		20	8	C	17.07			40	—	—	3	45	1.92	
	○	○	○		20	8	D	17.07	C 2		40	—	—	3	45	1.92	
	○	○	○		20	4	E	8.53			40	—	—	3	90	1.92	
	○	○	○		20	6	F	12.80			40	—	—	5	0	3.20	
	○	○	○		20	4	G	8.53			40	—	—	5	26.6	3.20	
	○	○	○		20	4	H	8.53			40	—	—	5	45	3.20	
	○	○	○		20	4					40	—	—	5	90	3.20	
φ 7.5 × 15	○	○	○	有	20	1	A	0.63	O 1	楕円	—	90	40	3	0	4.32	
	○	○	○		30	1	A	2.13			—	90	40	3	26.6	4.32	
φ 10 × 20	○	○	○		20	1	A	0.27	O 2		—	55	40	3	0	2.64	
	○	○	○		40	1	A	2.13			—	55	40	3	26.6	2.64	
φ 10 × 20	○	○	○		40	1	A	2.13				—	55	40	3	45	2.64

図2 欠陥性状の異なる供試体の F_c/F_{c0}

・配置、供試体寸法の組み合わせよりなる、表3に示す実験条件を設定した。

(3) 圧縮強度試験

試験材齢は40℃水中養生で1週、試験体数は1条件につき4体とした。所定材齢に達した供試体を用いて、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準じて圧縮強度試験を行った。

3. 実験結果および考察

(1) 実験結果

図2に圧縮強度試験結果を示す。強度の指標としては、欠陥の存在による圧縮強度 (F_c) の低下の割合をみるため、同一の調合、供試体寸法でモデル欠陥を持たない供試体の圧縮強度 (F_{c0}) を基準とした圧縮強度比 (F_c/F_{c0}) を用いた。図2より、モデル欠陥の存在により強度が低下すること、また、低下の割合は欠陥性状により大きく異なることがわかる。

(2) 欠陥性状の影響に関する考察

① 欠陥の量の影響

既往の研究より、脆性多孔質材料の空隙率 (P_v) と強度との間には高い相関があるといわれている⁶⁾。図3に、モデル欠陥の P_v と F_c/F_{c0} との関係、および既往の強度推定式による一般的な多孔質材料 (実線) とコンクリート (破線) の場合の、 P_v をパラメータとした F_c/F_{c0} の推定曲線を示す。

図3より、マクロな空隙欠陥を有するモルタル・コンクリートの

図3 P_v と F_c/F_{c0} との関係
および一般的な強度推定式 図4 P_v と F_c/F_{c0} との関係
およびその近似曲線 図5 欠陥配置の異なる
供試体の F_c/F_{c0} (球状欠陥) 図6 欠陥配置の異なる
供試体の F_c/F_{c0} (板状欠陥)

F_c/F_{c0} は、硬化セメントペースト中のミクロな空隙を主な対象とする F_c/F_{c0} の推定値に比較して低くなる傾向があることがわかる。これは、マクロな空隙欠陥の場合、欠陥への応力集中の度合いが高いため、均等に空隙が分散している場合に比較して強度が低下しやすいと考えられる。また、同一の P_v でも、強度の低下の割合に差が生じることがわかる。図4に欠陥配置が同一で、 P_v の異なる供試体の P_v と F_c/F_{c0} との関係、およびその指数近似曲線を示す。これより、同一の欠陥配置では P_v と F_c との間には高い相関があることがわかる。つまり、逆に言えば、ミクロな空隙の場合は、空隙がより均一に分散していることもあって、空隙の配置の影響は結果として十分小さくなっているといえる。

② 欠陥の配置、形状の影響

図5に調合、供試体寸法、 P_v が同一で、欠陥配置の異なる、球状モデル欠陥を有する供試体の F_c/F_{c0} 、図6に調合、供試体寸法、 P_v が同一で、欠陥配置(θ :モデル欠陥が荷重方向となす角度)の異なる、板状モデル欠陥を有する供試体の F_c/F_{c0} を示す。これらより同一の P_v でも欠陥配置の違いにより、 F_c/F_{c0} に差が生じることがわかる。特に、板状欠陥の場合、全く同一の欠陥であっても、配置(θ)の違いにより、 F_c/F_{c0} の最大値と最小値との比が最大4.9となっており、配置の影響が非常に大きいことがわかる。

図7に θ と F_c/F_{c0} との関係を示す。これより、板状欠陥の場合、同一の欠陥では F_c/F_{c0} は θ と高い相関があることがわかる。

以上から、マクロな空隙欠陥が卓越して強度に影響を与える場合は、欠陥の形状や配置の影響の度合いが大きいことがわかる。

(3) W/Cの影響に関する考察

図8に同一の欠陥性状、供試体寸法でW/Cの異なる供試体のW/Cと F_c/F_{c0} との関係を示す。W/Cの高い70%のものと、中間の46%のものとは F_c/F_{c0} はほぼ同等で、W/Cの違いによる影響は明確ではないが、W/Cの低い35%のものは他の2つに比較して、強度の低下が著しい。これは、W/Cの低い高強度のものの方が、より脆性的傾向が顕著になり、欠陥の影響に敏感となるためと考えられる。したがって、今後のコンクリートの高強度化を考慮すれば、マクロな空隙欠陥の抑制はより重要な課題といえる。

(4) 供試体寸法の影響に関する考察

図9にモデル欠陥を持たない供試体の供試体横断面の直径(ϕ)と F_c との関係、また図10に同一の調合、欠陥性状で ϕ の異なる供試体の ϕ と F_c/F_{c0} との関係を示す。一般に、欠陥の相対量が同じ場合、強度は供試体寸法が大きくなるほど低下するといわれている。一方、非均質脆性材料であるモルタル・コンクリートの場合、供試体寸法が大きくなるほど、ゲル空隙や毛細管空隙、あるいは応力集中が生じる硬化セメントペーストと骨材との界面などの潜在的な欠陥の存在確率が高くなるため、マクロな空隙欠陥による影響は緩和されると考えられる⁷⁾。しかしながら、モデル欠陥を持たない供試体では、供試体寸法が大きくなるほど F_c は同等かやや高い(図9)。また、欠陥の相対量が同じ(P_v :2.13%)場合は、 F_c/F_{c0} はほぼ等しく、供試体寸法の違いによる影響は明確にはみられない(図10)。

(5) 粗骨材の影響に関する考察

図11にモデル欠陥を持たないモルタル・コンクリート供試体の F_c を示す。W/C:35%、70%ともにモルタルのほうがコンクリートよ

りも強度が高い。これは、コンクリートは粗骨材の存在により骨材下部の水隙、硬化セメントペーストと骨材との界面に形成される脆弱な遷移帯など応力集中が生じる界面が存在しやすくなり、同一のW/Cでもモルタルに比較して強度が低下するためと考えられる^{8), 9)}。

図12に同一の供試体寸法、欠陥性状を有するモルタル・コンクリートの F_c/F_{c0} を示す。W/C:70%では粗骨材の存在による影響はみられないが、W/C:35%ではコンクリートのほうが強度の低下が著しい。これは、低水セメント比のほうが、粗骨材の存在の影響に敏感となるためと考えられる。

4. 強度推定式の誘導、提示

設定したモデル欠陥の性状ならびに圧縮強度試験の結果より、欠陥性状と F_c/F_{c0} との関係について回帰分析を行い、 F_c/F_{c0} の推定式の誘導、提示を通じて、空隙欠陥の性状がコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響を考察することとした。

(1) 球状欠陥を有する供試体に関する検討

既往の研究より、一般に脆性多孔質材料の P_v と F_c の間には高

図7 θ と F_c/F_{c0} との関係

図8 W/Cと F_c/F_{c0} との関係

図9 モデル欠陥を持たない供試体の ϕ と F_c との関係

図10 モデル欠陥を有する供試体の ϕ と F_c/F_{c0} との関係

図11 モデル欠陥を持たないモルタル・コンクリートの F_c

図12 モデル欠陥を有するモルタル・コンクリートの F_c/F_{c0}

い相関があるといわれている。Pvによる強度推定式として、Ryshkewitchの式⁶⁾

$$F_c = F_{c0} \exp(-a P_v) \quad (1)式$$

との対応について検討した。(1)式を変形して、回帰分析を行った結果(2)式を得た。

$$F_c/F_{c0} = \exp(-0.077 P_v) \quad (P_v \leq 17.07\%) \quad (2)式$$

図13に、PvとF_c/F_{c0}の実測値との関係および(2)式による推定曲線を示す。図から、F_c/F_{c0}はおおよそPvにより推定できるものの、同一のPvでもF_c/F_{c0}の相違は小さくない場合のあることがわかる。

また、コンクリートの強度はPvに加えて、空隙径(Dv)にも影響を受けると報告されており、Pvのみによる強度推定式よりも対応のよい、PvとDvによる(3)式が提案されている^{10), 11)}。

$$F_c = \exp\{a P_v + b \ln(D_v) + c\} \quad (3)式$$

Pv、Dvを説明変数として重回帰分析を行った結果(4)式を得た。

$$F_c/F_{c0} = \exp\{-0.065 P_v - 0.044 \ln(D_v)\} \quad (P_v \leq 17.07\%, D_v \leq 20\text{mm}) \quad (4)式$$

図14に(4)式によるF_c/F_{c0}の実測値と推定値との対応を示す。(4)式も対応は十分とはいえない。(1)~(4)式で対象としている空隙は、コンクリートの場合、硬化セメントペースト中のゲル空隙や毛細管空隙、エントレインドエアといったコンクリート中にほぼ均等に分散するミクロな空隙であるが、以上より、マクロな空隙欠陥を有するコンクリートの強度は、これらの推定式では十分には推定できないことがわかる。

また、図5より、同一の欠陥量でも配置の違いにより強度の低下の割合に差が生じており、中でも配置Cは他の配置と比較して、強度の低下は小さい。これは配置Cでは、載荷方向に垂直な平面で切断した欠陥の断面積と、供試体の載荷方向に垂直な断面の面積との比(欠陥断面積比)の最大値が、他の配置の1/2と小さいためと考えられる。そこで、マクロな空隙欠陥を有するコンクリートの強度は、最弱部分を示す最大欠陥断面積比(Ar)に強く影響を受けていると考え、Arを説明変数としてF_c/F_{c0}とArとの間に指数関係を仮定して回帰分析を行い、結果として(5)式を得た。

$$F_c/F_{c0} = \exp(-1.959 A_r) \quad (A_r \leq 0.64) \quad (5)式$$

図15にArの概要を示す。

図16にArとF_c/F_{c0}の実測値との関係、および(5)式による推定曲線を示す。(4)式より(5)式の方が実測値と推定値との対応がよいことがわかる。これより、球状欠陥がコンクリートの強度に及ぼす影響は、Pvや、PvとDvの組み合わせよりArを用いたほうが適切に表現できるといえる。

(2) 板状欠陥を有する供試体に関する検討

板状欠陥を有する供試体の圧縮強度試験結果につい

図15 Arの概要

図13 PvとF_c/F_{c0}との関係および(2)式による推定曲線

図16 ArとF_c/F_{c0}との関係および(5)式による推定曲線

図14 F_c/F_{c0}の実測値と(4)式による推定値との対応

図17 PvとF_c/F_{c0}との関係および(6)式による推定曲線

てPvを説明変数として回帰分析を行った結果(6)式を得た。

$$F_c/F_{c0} = \exp(-0.317 P_v) \quad (P_v \leq 4.32\%) \quad (6)式$$

図17にPvとF_c/F_{c0}の実測値との関係、および(6)式による推定曲線を示す。球状モデル欠陥を有するものよりも、実測値と推定値との対応性はさらに低下している。そこで、球状モデル欠陥を有するもので対応の良好であった、Arを説明変数として回帰分析を行った結果(7)式を得た。

$$F_c/F_{c0} = \exp(-3.128 A_r) \quad (A_r \leq 0.64) \quad (7)式$$

図18にArとF_c/F_{c0}の実測値との関係、および(7)式による推定曲線を示す。これも(6)式と同様、対応はよくない。これは、3.(2)②で述べたように、欠陥配置が強度に影響を与えるためと考えられる。次に、欠陥を載荷方向に垂直な平面に投影した面積(欠陥投影面積)と供試体の載荷方向に垂直な断面の面積との比(投影欠陥面積比:Ap)を用いて検討を行った。図19にApの概

図18 ArとF_c/F_{c0}との関係および(7)式による推定曲線

図19 Apの概要

図 20 A_p と F_c/F_{c0} との関係 および(8)式による推定曲線

図 21 A_p と F_c/F_{c0} との関係 および(9)式による推定曲線

要を示す。 A_p を用いて回帰分析を行い(8)式を得た。

$$F_c/F_{c0} = \exp(-2.490 A_p) \quad (A_p \leq 0.64) \quad (8)式$$

図 20 に A_p と F_c/F_{c0} の実測値との関係、および(8)式による推定曲線を示す。実測値と推定値との対応は非常によく、板状欠陥がコンクリートの強度に及ぼす影響は P_v や A_r より A_p を用いたほうが適切に表現できるといえる。

(3) 欠陥性状の違いに影響を受けない強度推定式の誘導、提示

球状モデル欠陥を有する供試体について、 A_p を説明変数として回帰分析を行った結果(9)式を得た。

$$F_c/F_{c0} = \exp(-1.823 A_p) \quad (A_p \leq 0.64) \quad (9)式$$

図 21 に A_p と F_c/F_{c0} の実測値との関係、および(9)式による推定曲線を示す。

以上より、 A_p を説明変数とする

強度推定式による実測値と推定値との対応は、板状欠陥を有するものではよい(図 20)。一方、

球状欠陥を有するものも悪くはないが(図 21)、 A_r を説明変数とする強度推定式(図 16)に比較すると、対応はやや劣り、十分とはいえない。そこで、欠陥形状の違いに影響を受けない強度推定式を提示するため、 A_r 、 A_p にかわるパラメータとして、供試体を切断する平面によってできる欠陥の断面を、載荷方向に垂直な平面に投影したものの面積(投影欠陥断面積)の最大値と、供試体の載荷方向に垂直な断面の面積との比(最大投影欠陥断面積比: A_z)について検討した。図 22 に A_z の概要を示す。

A_z を説明変数として回帰分析を行った結果(10)式を得た。

$$F_c/F_{c0} = \exp(-2.184 A_z) \quad (A_z \leq 0.64) \quad (10)式$$

図 23 に A_z と F_c/F_{c0} の実測値との関係および(10)式による推定

図 22 A_z の概要

図 23 A_z と F_c/F_{c0} との関係 および(10)式による推定曲線

曲線を示す。実測値と推定値との対応は良好といえる。

以上より、本論文で対象としたマクロなモデル空隙欠陥の範囲では、欠陥がモルタル・コンクリートの強度に及ぼす影響はほぼ A_z によって表すことができるといえる。

5. 結論

- 1) マクロなモデル空隙欠陥を有するモルタル・コンクリートの圧縮強度比は、空隙の量のみならず、形状、配置に大きく影響を受ける。
- 2) 硬化セメントペースト中のミクロな空隙を主な対象とした既往の強度推定式では、マクロな空隙欠陥を有するモルタル・コンクリートの圧縮強度比を十分説明することはできない。
- 3) マクロな空隙欠陥を有するコンクリートの圧縮強度比は、他の条件が同じ場合、 W/C の小さい、すなわち高強度のコンクリートほど低下する傾向にある。
- 4) 球状および円板状のマクロな空隙欠陥がモルタル・コンクリートの圧縮強度に及ぼす影響は、空隙欠陥の量・寸法・配置に関わらず、また、モルタル・コンクリートの W/C ・骨材寸法・供試体寸法に関わらず、最大投影欠陥断面積比 (A_z) によってほぼ表すことができる。

参考文献

- 1) コンクリート工学協会耐久性研究会抄訳：コンクリート構造物の耐久性，コンクリート工学，vol.22，No1，pp.39-53，1984.1
- 2) 中埜 良昭：RC構造物の損傷評価に関する最近の研究，コンクリート工学，vol.29，No5，pp.67-71，1991.5
- 3) (社)日本コンクリート工学協会編：コンクリートの非破壊試験法研究委員会報告書，日本コンクリート工学協会，1992
- 4) 渡辺 博志，河野 広隆：コンクリート構造物の維持管理の合理化と健全度診断技術，コンクリート工学，vol.33，No9，pp.19-28，1995.9
- 5) (社)日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説5 鉄筋コンクリート工事，日本建築学会，pp.212-214，1997.1
- 6) E.Ryshkewitch：Compression Strength of Porous Sintered Alumina and Zilucania，Jour. of the Amer. Ceramic Society，vol.36，No2，pp.65-68，1953
- 7) 羽原 俊祐：コンクリートの構造とその物性，セメント・コンクリート，No549，pp.31-43，1992.11
- 8) 菅谷 秀幸：骨材 - セメントペースト界面，セメント・コンクリート，No567，pp.46-48，1994.5
- 9) 内川 浩：セメントペーストと骨材の界面の構造・組織がコンクリートの品質に及ぼす影響，コンクリート工学，vol.33，No9，pp.5-17，1995.9
- 10) 吉野 利幸，鎌田 英治，田畑 雅幸，柳 敏幸：空隙構造依存性に基づくコンクリート強度推定法に関する研究，日本建築学会論文報告集，第312号，pp.9-17，1982.2
- 11) 吉野 利幸，鎌田 英治，桂 修：空隙指標で表したコンクリート強度式の提案とその検証，コンクリート工学論文集，vol.7，No2，pp.65-77，1996.7

(1997年4月10日原稿受理，1997年9月26日採用決定)