

論文 コンクリートの強度に及ぼす施工不良による欠陥の影響に関する研究

上沢聡史*¹・三上貴正*²・坂井映二*³

要旨：本研究は、構造体中のコンクリートの充填状況や内部欠陥のモニタリングシステムにおいて、測定対象とすべき欠陥の範囲を明らかにするための基礎的段階として、施工不良によって生ずる欠陥の寸法、量、配置といった性状が、コンクリートの強度に及ぼす影響を明らかにすることを目的としている。本研究は、まず、性状を制御したモデル欠陥を内部に有するモルタル、コンクリート供試体を作製し、それらの圧縮強度試験を行い、その結果からモデル欠陥の性状が、モルタル、コンクリートの強度に及ぼす影響を把握し、欠陥性状の影響を取り入れた強度推定モデルを構築したものである。

キーワード：施工不良、欠陥性状、モデル欠陥、最大欠陥断面積比、欠陥径の総和

1. 序論

近年、建設後10～20年という早い時期に劣化現象を生ずる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コンクリート構造物の被害報告によると、その約半分は施工中に生じた欠陥に起因するものであると指摘されている[1]。鉄筋コンクリート造や鉄骨鉄筋コンクリート造などの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。そのため、締固め不足などで充填が不十分な場合は、設計基準強度に達しなかったり、耐久性が低下したりするなど、要求される性能水準を確保できなくなることもある。

これらのことより、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、コンクリート構造物の健全度を測定、評価する必要があると考えられる。また、昨今、PC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いる。これらは更に、健全度チェックの必要性が高くなると考えられる。しかしながら、コンクリート打設時や硬化後の充填状況のチェックは、適正に行われていないのが現状である。

昨今、コンクリートの充填状況や内部欠陥のモニタリングシステムの構築に関する様々な研究が行われており、サーモグラフィ法やAE法、超音波法など各種の方法が提案されてきている[2]。しかしながら、欠陥性状と強度との関係の定量的検討が不足しているため、これらのシステムで測定対象とすべき欠陥の範囲は明らかにされていない。これらのことから、施工不良による欠陥の性状が、コンクリートに必要とされる性能のうち最も基本的な、強度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、施工不良による欠陥を模したモデル欠陥を用いて、欠陥性状を制御した、モルタル、コンクリート供試体を作製し、その圧縮強度試験結果から、欠陥性状と強度との関係を把握し、その関係から、欠陥の影響を取り入れた強度推定モデルを構築することを目的とする。

*1 旭硝子(株) (当時東京工業大学大学院生) 修士(工学)(正会員)

*2 東京工業大学助教授 大学院情報理工学研究科情報環境学専攻、工博(正会員)

*3 東京工業大学助手 工学部建築学科、修士(工学)(正会員)

2. 実験概要

強度試験に適用する供試体の調合ならびに、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。

2.1 調合の設定

基本となる母材は、モデル欠陥以外の要因によって強度に影響を受けない、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、自己充填性を有するものにする必要がある。以上の2点を基本方針とし、調合を選定することとした。

2.1.1 使用材料

表1に使用材料を示す。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。骨材は、細骨材として千葉県産の山砂、粗骨材として碎石を用いた。細骨材はモルタルには、均質で安定した性状を持ち、骨材の不均一さによる強度への影響を少なくするため、最大寸法600 μ mのAを用い、コンクリートには最大寸法2.5mmのBを用いた。

2.1.2 調合の設定

試し練りによって、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100%、混和剤添加率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/C70%のもの、および、JASS5に示される強度推定式より求めた、これらの中間の強度にあると考えられるW/C46%のもの、計3種類の調合を設定した。なお、砂セメント比、混和剤添加率は試し練りにより、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、コンクリートも併せて設定した。コンクリートは細骨材としてBを用い、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種類、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。

2.2 モデル欠陥の性状の設定

欠陥が強度に影響を与える要因として、欠陥の寸法、量、配置に着目し、欠陥性状の範囲を設定した。供試体は $\phi 5 \times 10$ cm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の計3種類とした。モデル欠陥には、強度がほぼ0とみなせる発泡スチロール球を使用した。欠陥寸法は、直径12、20、30、40mmの4種、欠陥の配置は8種とし、これらを組み合わせて表3に示す実験条件を設定した。なお、本研究においては、形状が単純でかつ制御も容易な球状のモデル欠陥のみを対象とした。

2.3 圧縮強度試験

養生条件は、40 $^{\circ}$ C水中養生とし、試験材齢は1週とした。所定材齢に達した供試体を用いて、JIS A 1108に準じて圧縮強度試験を行った。試験体数は1条件につき4体とした。

表1 使用材料

				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		比重	吸水率	粒径
細骨材A(S)	千葉県産	2.61	1.56%	<0.6mm
細骨材B(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

	水セメント比 W/C (%)	砂セメント比 S/C (%)	混和剤 添加率 A/C(%)	細骨材率 s/(s+g) (%)
モルタル	35	100	2.4	—
	46	100	0.6	—
	70	180	0.6	—
コンクリート	35	100	2.4	36
	46	100	0.6	33
	70	180	0.6	38

表3 実験条件

供試体寸法 (cm)	水セメント比 (%)			粗骨材の有無	モデル欠陥			空隙率 Pv (%)	最大欠陥断面積比 Ar	モデル欠陥の配置				
	35	46	70		直径 Dv (mm)	数	配置			0	A	B	C	D
φ5×10	○	○	○	無	20	1	A	2.13	0.16					
	○				30	1	A	7.20	0.36					
	○				40	1	A	17.07	0.64					
	○				20	8	B	17.07	0.64					
	○				12	8	B	0.46	0.06					
	○				20	8	C	17.07	0.32					
	○				20	8	D	17.07	0.64					
	○				20	4	E	8.53	0.64					
	○				20	6	F	12.80	0.64					
	○				20	4	G	8.53	0.32					
φ7.5×10	○		○		20	1	A	0.63	0.07					
	○		○		30	1	A	2.13	0.16					
φ10×20	○		○		20	1	A	0.27	0.04					
	○		○		40	1	A	2.13	0.16					
φ10×20	○	○	○	有	40	1	A	2.13	0.16					

3. 実験結果

3.1 欠陥の量による影響

図1に圧縮強度試験結果の例を示す。強度の指標としては、欠陥の存在による強度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有さない供試体の圧縮強度を基準とする圧縮強度比(F_c/F_{c0})を用いた。図1より、モデル欠陥の存在により強度が低下し、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。既往の研究より、脆性多孔質材料の強度と空隙率(P_v)との間には高い相関があるといわれている[3]。図2にモデル欠陥の P_v と F_c/F_{c0} との関係を示す。施工不良によるマクロな欠陥の場合は、多孔質材料に潜在的なマイクロな空隙の P_v を用いた一般的な強度推定式で推定される推定強度に比べて、同一の P_v でも強度が低くなる傾向がある。これは、マクロな欠陥の場合、そこに応力集中が生じるため、均等に空隙が分散している場合に比べて強度が低下しやすいためと考えられる。

3.2 水セメント比による影響

図3に同一の供試体寸法、欠陥性状で、 W/C が異なる供試体の W/C と F_c/F_{c0} との関係を示す。 W/C の高い70%のものとの中間の46%のものとは、 W/C の違いによる影響は明確でないが、 W/C の

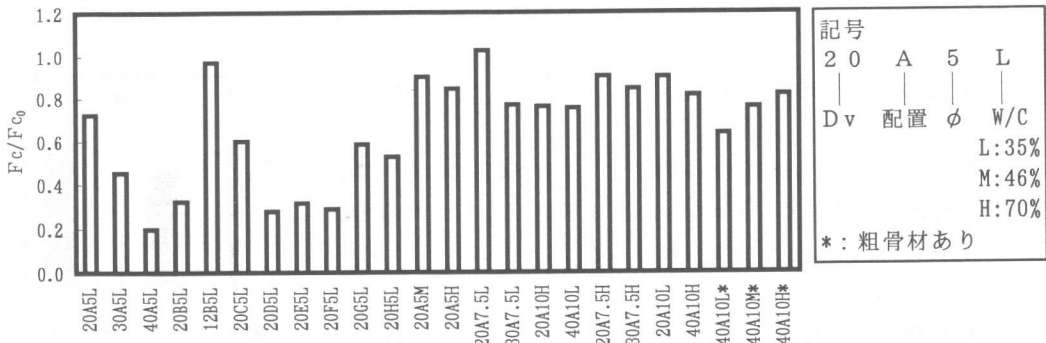


図1 欠陥性状の異なる供試体の圧縮強度比 (F_c/F_{c0})

低い35%のものは他の2つに比べて、強度の低下が著しかった。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となり、欠陥の影響に敏感となるためと考えられる。

3.3 供試体寸法による影響

図4に同一の調合、欠陥性状で、寸法の異なる供試体の、供試体の直径(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、供試体寸法が大きくなるほど母材の強度は低下する。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潜在的な欠陥の存在確率が高くなるので、施工不良によるマクロな欠陥の影響は緩和されると考えられる。本実験の範囲では、供試体寸法の違いによる影響は明確でなかった。

3.4 粗骨材の有無による影響

図5に同一の供試体寸法、欠陥性状を有する供試体の F_c/F_{c0} を示す。W/C70%では、粗骨材の有無による影響はみられなかったが、W/C35%ではコンクリートの方が強度の低下が著しかった。

4. 強度推定式の誘導

設定したモデル欠陥の性状ならびに圧縮強度試験結果に関して、圧縮強度比と欠陥性状との関係を回帰分析により求めた。

4.1 基本条件に関する検討

まず、施工不良による欠陥の性状以外の要因を取り除いて検討するため、基本条件($\phi 5 \times 10$ cm、W/C35%のモルタル)の結果に関して回帰分析を行った。

4.1.1 既往の強度推定式との対応

既往の研究より、一般に、脆性多孔質材料の強度とPvとの間には高い相関関係があるといわれている。そこで、Pvによる強度推定式[3]

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

との対応について検討する。(1)式を変形して、回帰分析を行い(2)式を得た。

$$\ln(F_c/F_{c0}) = -0.058 P_v - 0.233 \quad (2) \text{式}$$

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[4]。

$$\ln(F_c/F_{c0}) = a P_v - b \ln(D_v) + c \quad (3) \text{式}$$

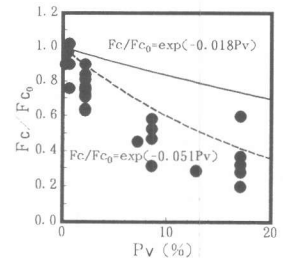


図2 モルタル欠陥のPvと F_c/F_{c0} との関係、及びPvによる強度推定式

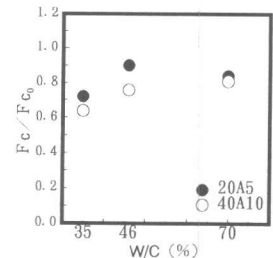


図3 W/Cと F_c/F_{c0} との関係

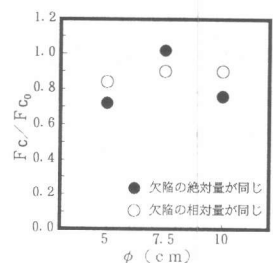


図4 ϕ と F_c/F_{c0} との関係

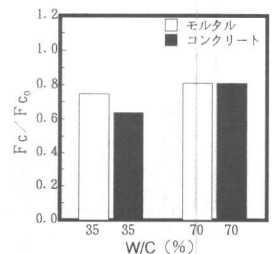


図5 同一欠陥性状のモルタルとコンクリートの F_c/F_{c0}

Pv、Dvを説明変数として回帰分析を行い(4)式を得た。

$$\ln(Fc/Fc_0) = -0.470Pv - 0.632\ln(Dv) + 1.591 \quad (4)式 \quad (Dvは統計的に有為とされない)$$

図6、図7に(2)式、(4)式による実測値と推定値との対応を示す。(2)式、(4)式とも対応はあまりよくない。これは、これらの式は、セメント硬化体中に潜在的なマイクロな空隙を対象としているため、施工不良によるマクロなものの影響については説明できないためと考えられる。

4. 1. 2 強度推定式の誘導

図8に調合、Pvが同一で、欠陥の配置の違う供試体のFc/Fc₀を示す。これより、同一のPvでも欠陥の配置の違いにより、Fc/Fc₀に差が生じることがわかる。中でも配置Cは、他の配置と比較して、強度の低下の割合は少なかった。これは、配置Cでは、載荷方向と垂直な断面内において欠陥の面積が占める割合(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、施工不良によるマクロな欠陥は、最弱部分を表す最大欠陥断面積比(Ar)に強く影響を受けるのではないかと考え、Arを説明変数とした回帰分析を行い(5)式を得た。

$$\ln(Fc/Fc_0) = -2.028Ar + 0.014 \quad (5)式$$

図9に(5)式による実測値と推定値との対応を示す。(5)式の方が(4)式より、対応がよいことがわかる。施工不良による欠陥のように、特定の欠陥が卓越して強度に影響をあたえる場合、Arの方がPvよりも説明変数として優れていると考えられる。続いて、Arに加えて、他の欠陥性状に関するパラメータを加え重回帰分析を行った。その結果、重相関係数が最大となった(6)式を示す。

$$\ln(Fc/Fc_0) = -2.275Ar + 0.002\sum Dv - 0.040 \quad (6)式$$

$\sum Dv$: 欠陥径の総和

図10に(6)式による実測値と測定値との対応を示す。(5)式でも十分推定しうるが、(6)式のように最弱部分を表すArに加え欠陥の総量を表す $\sum Dv$ を説明変数として取り入れた方がよりよいと考えられる。

4. 2 全条件に関する検討

W/C、 ϕ 、粗骨材の有無といった欠陥性状以外の要因の影響を検討するため、全条件の結果に関して回帰分析を行った。

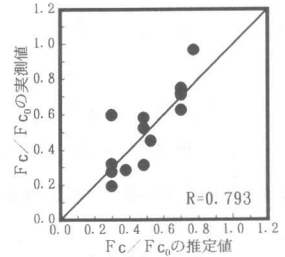


図6 (2)式による
実測値と推定値との対応

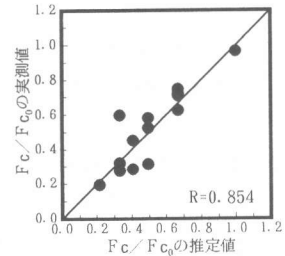


図7 (4)式による
実測値と推定値との対応

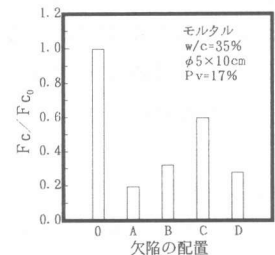


図8 欠陥配置の異なる
供試体のFc/Fc₀

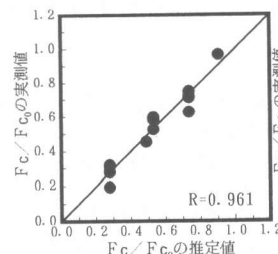


図9 (5)式による
実測値と測定値との対応

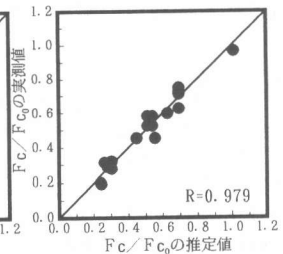


図10 (6)式による
実測値と推定値との対応

4. 2. 1 既往の強度推定式との対応

(1)式、(3)式に全条件の結果に関して回帰分析を行い、(7)式、(8)式を得た。

$$\ln(Fc/Fc_0) = -0.063Pv - 0.140 \quad (7)式$$

$$\ln(Fc/Fc_0) = -0.065Pv - 0.150\ln(Dv) + 0.343 \quad (8)式 \quad (Dvは統計的に有為とならない)$$

図11、図12に(7)式、(8)式による実測値と推定値との対応を示す。これらの式も基本条件と同様、対応はあまりよくない。

4. 2. 2 強度推定式の誘導

全条件に関しても、重回帰分析により、基本条件と同様、強度推定式を求めた。回帰結果を(9)式、(10)式に示す。

$$\ln(Fc/Fc_0) = -2.074Ar + 0.047 \quad (9)式$$

$$\ln(Fc/Fc_0) = -2.248Ar + 0.002\sum Dv + 0.003(W/C) - 1.608 \quad (10)式$$

図13、図14に(9)式、(10)式による実測値と推定値との対応を示す。Arのみを説明変数とした(9)式でも十分だが、説明変数としてArに加えて $\sum Dv$ 、W/Cを取り込んだ(10)式のほうがよりよい対応を示した。また、本実験の範囲では、 ϕ 、粗骨材の有無による影響はあまり大きくなく、統計的に有為とならなかった。

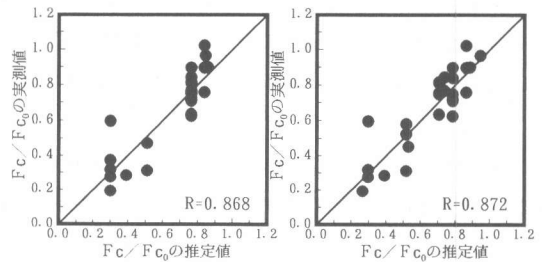


図11 (7)式による 実測値と推定値との対応
図12 (8)式による 実測値と推定値との対応

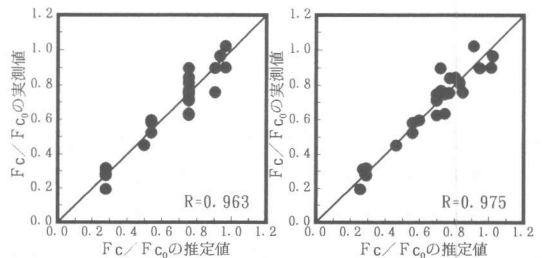


図13 (9)式による 実測値と推定値との対応
図14 (10)式による 実測値と推定値との対応

5. 結論

1. 施工不良によるマクロな欠陥を有するモルタル、コンクリートの強度は、セメント硬化体中に潜在的なミクロな空隙を対象とする強度推定式とあまりよく対応しない。
2. 施工不良によるマクロな欠陥がモルタル、コンクリートの強度におよぼす影響は最大欠陥断面積比と欠陥径の総和、水セメント比によって表すことができる。

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、No.1、pp.39-53、1984.1
- [2] (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、1992.3
- [3] E.Ryshkewitch：Compression Strength of Porous Sintered Alumina and Zirconia, Jour. of the Amer. Ceramic Society, vol.36, No.2, pp.65-68, 1953
- [4] 吉野 利幸ほか：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、No.2、pp.65-77、1996.7