

論文 骨材の粒度分布を考慮したコンクリート強度の寸法効果予測式

畑中 重光*¹・岸 圭介*²・山田 和夫*³・谷川 恭雄*⁴

要旨：圧縮強度の寸法効果に関する既往の研究をレビューするとともに、過去に谷川・山田によって提案された圧縮強度の寸法効果の予測式を、より現実的な(粒度分布を考慮した)コンクリートに適用できるように拡張することを試みた。その結果、単一粒径の骨材を用いたコンクリートでは、供試体寸法の増大に伴ってコンクリートの圧縮強度が増大する可能性があるが、実際の骨材の粒度分布を考慮した場合、コンクリートの圧縮強度は、骨材最大寸法が大きい場合(ここでは40mm)を除き、供試体寸法の増大に伴って、ほぼ一定かあるいは減少するという弱い寸法効果を示すことが解析上明かになった。

キーワード：コンクリート、圧縮強度、寸法効果、骨材寸法、供試体寸法

1. はじめに

コンクリートの寸法効果に関しては、その必要上、古くから数多くの実験、解析的研究が行われており、また近年の破壊力学を含むマイクロメカニクスの発展によっても、原因の解明や予測モデルの提案等、多くの成果が得られている[1]。

本研究では、圧縮強度の寸法効果に関する既往の研究をレビューするとともに、過去に谷川・山田によって提案された圧縮強度の寸法効果の予測式[2]を、より現実的な(粒度分布を考慮した)コンクリートに適用できるように拡張することを試みた。

2. 既往の研究

コンクリートの圧縮強度の寸法効果に関する研究は比較的多い。以下にこれらの研究を簡単にまとめる。なお詳細については、文献[1]～[4]にまとめられているため参照されたい。

2.1 供試体寸法の影響

多くの国でRC構造物の基準強度として $\phi 15 \times 30$ cmまたは $\phi 10 \times 20$ cm円柱体の圧縮強度を使用している。これらの円柱体と種々の寸法を持つ構造物の強度との違いを検討する必要上、古くから多くの研究がなされている[3]。これらのうち、Gonnerman、Blanks、Gyengo、Neville、Hollis、Rajendran、Pahl・Mirza、Malhotraなどの研究者は、一般に供試体寸法が大きいほどコンクリート強度は低下すると述べている[2, 3]。また、Blanks、Pahl・Mirzaらは、コンクリートの圧縮強度は直径の約10乗根に反比例して減少する弱い寸法効果を示すことを報告している[3]。

このように供試体寸法の増大とともに圧縮強度が減少する傾向を説明するモデルとして、最も一般的なものにGriffith理論に代表される「エネルギー変換機構」に基礎をおくものと、Weibull理論に代表される「材料欠陥の存在確率の増大」に基礎を置くものとの二つが挙げられる。これらの理論によって説明できるコンクリートは、コンクリート中の骨材の寸法が供試体寸法に比べて相対的に小さく、コンクリートをほぼ等質連続体とみなし得る場合である。このようなコンクリートでは、供試体寸法の増大とともに圧縮強度は減少する。

*1三重大学助教授 工学部建築学科、工博(正会員) *2旭化成工業(株)、工修(正会員)
*3愛知工業大学助教授 建築学科、工博(正会員) *4名古屋大学教授 工学部建築学科、工博(正会員)

2. 2 骨材寸法の影響

コンクリート中の骨材寸法が及ぼす影響についての研究も多く行われ、Powers、Collier、Walker・Bloem、Cordon・Gillespie、Hughes・Chapman等の研究によって、一般的に骨材寸法が大きいほど圧縮強度が低下するとの結論を得ている[2, 3]。その理由は、寸法が大きい骨材を用いると骨材の全表面積が減少し、ペーストと骨材の界面における応力が増大するためと、セメントペーストの収縮を拘束するために生じる内部応力が局部的に大きくなるためであると考えられている。

一方、Sangha・Dhirは、供試体寸法と骨材寸法の比が小さい範囲では、供試体寸法が大きくなるほど強度が増大する場合のあることを報告している[2, 3]。また笠井は約2000個の円柱体の実験から、わずかではあるがφ15x30cm円柱体の圧縮強度が、φ10x20cm円柱体のそれよりも大きいことを報告している[2, 3]。これらの供試体寸法が大きいほど強度が増加する現象は先に述べた確率論エネルギー変換理論などではまったく説明できない現象である。

2. 3 谷川らの研究[2]

谷川らは、コンクリートのような極度に非均質な材料の寸法効果は供試体の容積効果のみでは説明できず、供試体寸法と骨材寸法の相対的な大きさに依存するシステム全体としての幾何学的非均質度が寸法効果に対する重要な影響因子となることを指摘し、供試体寸法(直径:D=5、10、15cm)、骨材寸法(d=0.6~25mm)を種々に組み合わせたコンクリートの圧縮実験を行った。その結果式(1)のような圧縮強度の寸法効果(F/F₀)に関する表示式を提案した。つまり、圧縮強度の寸法効果を、式(1)に示すように供試体中の欠陥量の多少に起因する容積効果(V₀/V)と供試体内部の幾何学的非均質性(D/d)に起因する効果との複合効果として表した。図-1に、式(1)を用いた圧縮強度比(F/F₀)の解析結果(両対数表示)の一例を示す[1]。

$$\frac{F}{F_0} = \frac{a-b\{\log(D/d)\}^{-c}}{a-b\{\log(D_0/d)\}^{-c}} \cdot \left(\frac{V_0}{V}\right)^{1/(\beta+d)} \quad \text{----- (1)}$$

ここに、

D: 供試体直径、d: 骨材寸法、V: 供試体体積、β: 材料定数、a、b、c: 実験定数、添字0は基本寸法

図によれば、供試体寸法に比べて相対的に骨材寸法が小さい場合には、供試体寸法の増大とともに、強度は低下するが、骨材寸法が大きく供試体内部の幾何学的非均質度が増すと、供試体体積の増大とともに強度が増大する場合が生じる。このことから、供試体寸法の増大とともに強度が増大する現象が説明できるとしている。

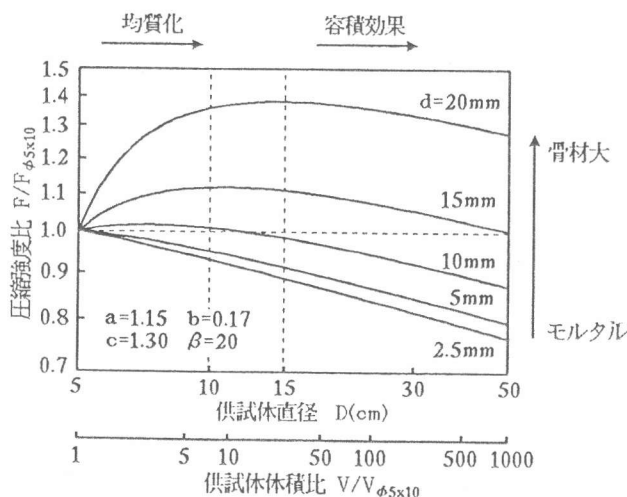


図-1 コンクリートの圧縮強度比(F/F₀)の計算例

2. 4 本研究の目的

谷川らの研究は骨材粒径がほぼ一定の

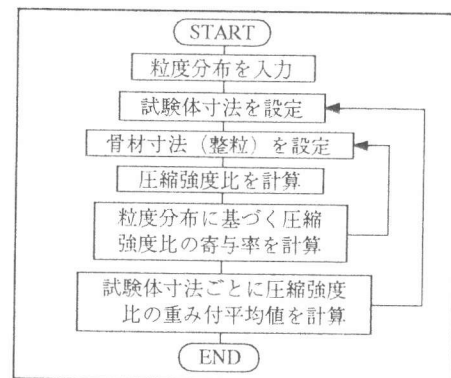


図-2 解析プログラムの概要

場合、すなわち整粒について得られたものであることに注意を要する。そのためか通常の粒度分布の骨材を用いたコンクリートの実験結果を必ずしも良く推定しているとはいいがたい。そこで本研究では、単一粒径のみの骨材を用いたコンクリートではなく、より現実的な(粒度分布を考慮した)コンクリートの圧縮強度の寸法効果則を得ることを目的とし、式(1)の拡張を試みる。

3 解析方法および解析結果

3.1 寸法効果則

川上[6]の報告を参考として、ある寸法のコンクリート供試体の基準供試体に対する圧縮強度比は、骨材寸法(整粒)ごとに予測される圧縮強度比(式(1))の重み付き平均値として得られるものと仮定する。このときの重みとは、ある寸法の骨材(整粒)の骨材全体に占める割合と見なすものとする。

3.2 解析方法

解析プログラムの概要を図-2に示す。解析には、式(1)に基づいて粒度分布を考慮できるように拡張した式(2)を使用した。骨材寸法および骨材割合は、粒度分布に基づいて設定した(例えば10mm~15mmが10%の場合、11, 12, 13, 14, 15mmがそれぞれ2%ずつとした)。但し、表示式中の実験定数には、川砂および川砂利を用いたコンクリートに対して得られた値を用いる(図-1参照)。また、適用範囲は $D/d > 2$ である。

$$\frac{F(m)}{F_0} = \sum_{k=1}^n \left[\frac{a-b\{\log(D(m)/d(k))\}^{-c}}{a-b\{\log(D_0/d(k))\}^{-c}} \cdot \left(\frac{V_0}{V(m)}\right)^{1/(\beta+d)} \cdot P(k) \right] \quad \text{----- (2)}$$

ここに、

n : 骨材寸法の分割数、 m : 設定供試体数

$P(k)$: k 番目の骨材の割合、他は式(1)と同様

3.3 解析結果および考察

図-3に、本解析に使用した骨材の粒度分布を示す。図の粒度分布は、JASS 5[5]の標準粒度(骨材最大寸法: 20mm、25mm、40mm)である。図-4 a)~c)に解析結果(両対数表示)を示す。ここでは基準供試体を $\phi 10 \times 20$ cmとした。また図中には参考のため、前節の単一粒径の骨材を用いたコンクリートに対する計算結果も併せて示してある。

図-4 a)によれば、骨材最大寸法が20mmの場合、供試体直径(D)が15cmまでは、圧縮強度比はほぼ一定かわずかに減少、それ以上では減少する。同図 b)によれば、骨材最大寸法が25mmの場合、 $D=20$ cm

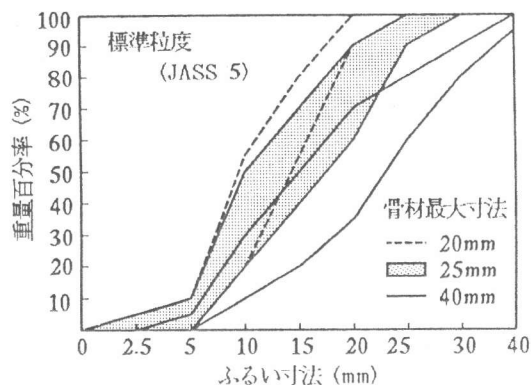


図-3 普通コンクリート用骨材の標準粒度範囲(JASS 5)

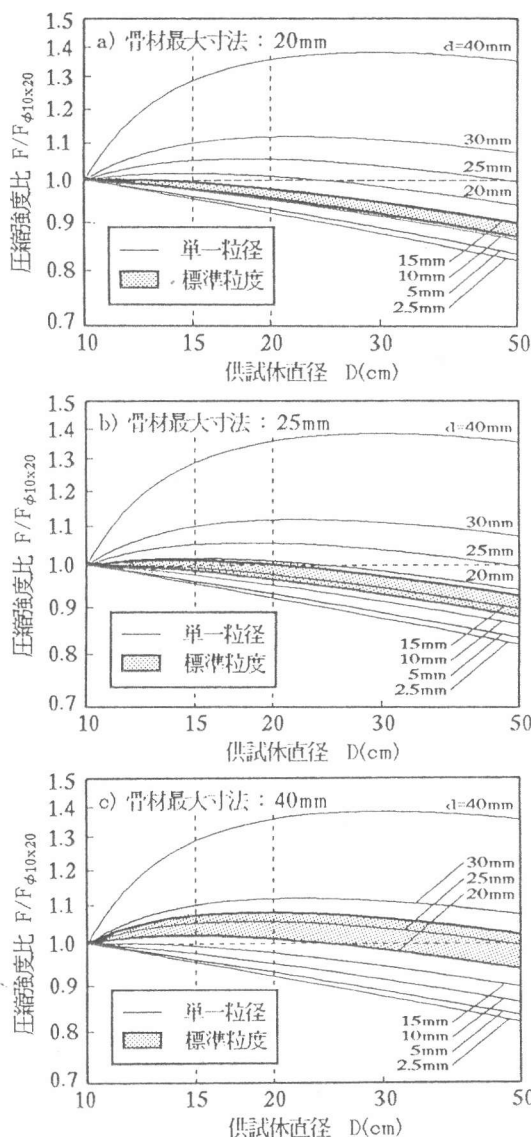


図-4 コンクリートの圧縮強度比と供試体直径の関係

ぐらいまでは強度が増大する場合があるが、それ以上では減少する。同様に同図c)によれば、骨材最大寸法が40mmの場合、 $D=40\text{cm}$ ぐらいまでは強度がほぼ増大し、それ以上では減少する。すなわち、骨材最大寸法、つまり入力した骨材の粒度によって、その傾向は若干異なっているが、どの場合も単一粒径を用いた場合に計算されるほどの顕著な圧縮強度比の増加は見られない。図には示していないが、基準供試体の寸法(D_0)を変化させた場合にも同様なことがいえる。つまり、実際の骨材粒度分布を考慮した場合、コンクリートの圧縮強度は、骨材最大寸法が大きい場合(ここでは40mm)を除き、供試体寸法の増大に伴って、ほぼ一定かあるいは、減少するという弱い寸法効果を示すことが解析上明らかになった。

図-4において単一粒径の骨材と標準粒度の骨材を用いた場合とを比較すると、骨材最大寸法が20mmの場合は、単一粒径の11~15mmに、25mmの場合は13~19mmに、45mmの場合は20~27mmにほぼ相当しているといえる。すなわち、JASS 5の粒度分布の骨材を用いたコンクリートの圧縮強度比を式(1)から推定するのであれば、最大骨材寸法の約0.6倍の単一粒径の骨材のみを用いたコンクリートと見なせばよいことになる(図-5参照)。

4 まとめ

- 1) 単一粒径の骨材を用いたコンクリートの圧縮強度の寸法効果の予測式(1)を、粒度分布を考慮した式(2)に拡張した。
- 2) 単一粒径の骨材を用いたコンクリートでは、供試体寸法の増大に伴ってコンクリートの圧縮強度が増大する場合がある。しかし、実際の骨材の粒度分布を考慮した場合、コンクリートの圧縮強度は、骨材最大寸法が大きい場合(ここでは40mm)を除き、供試体寸法の増大に伴って、ほぼ一定か、あるいは減少するという弱い寸法効果を示すことが解析上明らかになった(図-4)。
- 3) 供試体直径が10cm~20cmの範囲であれば、標準粒度の骨材を用いたコンクリートでは、単一粒径の骨材を用いた場合に比べ、コンクリートの圧縮強度比に及ぼす骨材寸法の影響はあまり顕著には現れない(図-4)。
- 4) JASS 5の粒度分布の骨材を用いたコンクリートの圧縮強度比を式(1)から推定するのであれば、最大骨材寸法の約0.6倍の単一粒径の骨材のみを用いたコンクリートと見なせばよい(図-5)。

式(1)中の諸定数は、骨材容積比や水セメント比などコンクリートの調査要因等によって相違すると考えられる。今後これら定数の定量化が必要である。

[謝辞]本研究に際し御助力を得た小池狭千朗先生(愛知工業大学)、大澤潤君(三重大学大学院)、および福西輝正君(大林組)に深謝致します。また、本研究費の一部は平成6年度一般研究(C)(研究代表者:畑中重光)によったことを付記する。

[参考文献]

- [1] JCI破壊力学の応用研究委員会報告書-第3章:コンクリート構造の強度と破壊性状の寸法効果-、日本コンクリート工学協会、pp. 215-269、1993. 10
- [2] 谷川恭雄・山田和夫:コンクリートの圧縮強度の寸法効果について、日本建築学会論文報告集、No. 262、pp. 13-21、1977. 12
- [3] 小池狭千朗・畑中重光:プレーンおよびコンファインドコンクリートの圧縮特性の寸法効果に関する実験的研究、日本建築学会論文報告集、1995. 5
- [4] コンクリート技術の現状と示方書改訂の動向、コンクリートライブラリー第79号、土木学会
- [5] 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事、3節:材料、日本建築学会
- [6] 川上英雄:粗骨材とコンクリート強度に関する基礎的研究(その1)、日本建築学会論文報告集、No. 166、pp. 19-27、1969. 12

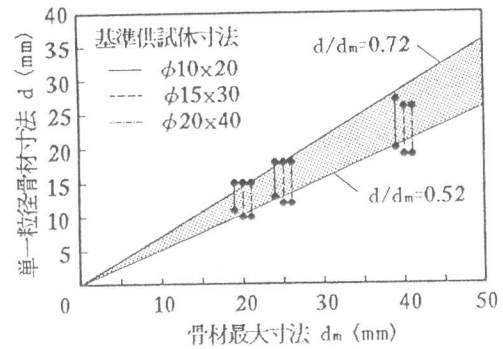


図-5 骨材最大寸法(JASS 5)と単一粒径骨材寸法の関係