

## 学位論文題名

## 空隙指標によるコンクリート強度式の表示とその応用

## 学位論文内容の要旨

コンクリートの力学性状や耐久性は、その組織構造、特に空隙構造に大きく依存しており、これらの性状を理解する上で空隙構造を知ることが不可欠である。コンクリート工学の分野でこの点に着目した研究では、圧縮強度および凍害に関するものが進んでいる。コンクリートの力学性状と空隙構造については、強度をいわゆる Ryshkewitchの式で表すことが一般的であり、そこでは空隙の特性として空隙率のみが考慮され、空隙の径や形状など空隙率以外の空隙特性の影響については十分に確かめられていない。このため、これらの点を明らかにすることは、コンクリートの力学的性質を一層理解する上で重要なものと考えられる。

本論文は、コンクリート強度と空隙構造の関係を空隙率のみではなく、他の空隙特性の役割を含めて検討したものであり、広範なコンクリートによる実験結果の統計的な解析により、従来の式を発展させたコンクリート強度式を誘導し、この式の妥当性を、モデル空隙による実験により検証している。さらに、得られた知見の実務的な応用としてコンクリート強度推定法の開発とコンクリート強度増進モデルへの適用を行い、その研究成果を纏めたものである。

本論文は、全6章から構成されており、各章の概要は次のとおりである。

第1章では、研究の目的と意義を述べるとともに、主題に関する国内外の既往の研究を示し、本研究の位置づけを行っている。

第2章は本論文の根幹をなすものである。ここでは、広い範囲のコンクリートについて、強度と空隙構造の関係を検討し、コンクリートの圧縮強度を空隙率と空隙径によって表す強度式を誘導してその検証を行っている。強度式の誘導にあたり、最初に、コンクリートの圧縮強度の試験条件や空隙構造に関する測定条件を定めるとともに、測定値の指標化を行っている。次に、コンクリートの材料、調合、材齢、養生方法と空隙指標および圧縮強度の関係について検討を加え、コンクリートの圧縮強度が試料全体の空隙率よりも硬化セメントペースト部分の空隙率とより良い相関関係にあり、その相関関係は材齢や養生方法ごとに幾分異なることを見いだしている。そして、空隙率のほかに空隙径、空隙の連続性、セメントの水和程度を表す指標を加えてコンクリートの圧縮強度との関係を統計的手法によって解析し、空隙率と空隙径で表されるコンクリート強度式の誘導を行っている。誘導された強度式では、材齢や養生方法による圧縮強度と空隙率の関係の相違が解消されること、圧縮強度と空隙率の関係に影響する骨材吸水率および骨材形状については普通骨材や碎石に対する補正により対応が可能であることを示している。これらの結果に基づき、コンクリートの圧縮強度を硬化セメントペ

ーストの空隙率と空隙径で表す強度式を提案し、この強度式の適用性を既往の式と比較・検証して、その優れていることを示し、さらに、強度式が表す固相強度について統一的な解釈を加えている。

第3章では、形状・寸法を異ならせた11種類の人為的な空隙（モデル空隙）をセメントペーストに混入し、それが強度にどのように影響するかを検討し、第2章で得られた結果の妥当性を検証している。モデル空隙は発泡ポリスチレン製の球状、円柱状、角柱状とし、モデル空隙のみを空隙と想定した硬化セメントペースト試験体による実験から、圧縮強度と空隙率とのあいだの関係は、同じ空隙率でも空隙径の小さい方が圧縮強度が大きいことなど、第2章で得られた結果が妥当であることを述べている。また、強度は空隙の平均径ではなく、より大きな径に依存すること、空隙形状も球状<円柱状<角柱状の順に強度に影響を及ぼすこと、同じ空隙率でも固相部分として想定した硬化セメントペーストの強度が大きいほど全体としての強度が高くなることなどの知見を得ている。

第4章では、第2章で得られたコンクリート強度式の応用として、少量のコンクリート片による強度推定法への利用について述べている。まず、強度推定式としての実用性を高めるため、推定誤差が強度の大小にかかわらず一定となるような式の形態に変換し、さらに、第2章では定数項に含めた指標（もどり比および結合水率）を加えてコンクリート強度式を誘導し、強度推定式としている。次に、版模型から採取したコアの強度、鋼製型枠で作製したシリンダーの強度、強度推定式による推定強度のそれぞれについての標準偏差を検討し、強度推定の誤差はコアやシリンダーの場合と比較して幾分大きい程度であり、その推定値とともに、満足できるものであることを述べている。

第5章では、強度式のもう一つの応用として、強度式の考え方をセメントの水和反応過程にあてはめ、セメント化学的に記述される水和反応の進行をコンクリート強度の発現としてとらえることを行っている。コンクリートの強度増進過程は養生温度、材齢の関数として積算温度を用いたゴンベルツ曲線で表されることが知られているが、本論文では、硬化セメントペースト部分の空隙率、空隙径の変化によってコンクリート強度の発現状況を表し、その表現がゴンベルツ曲線の近似となりうること、またゴンベルツ曲線による強度式には、温度による限界のあることを示している。

第6章は総括であり、本研究で得られた成果を要約したものである。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 鎌 田 英 治  
副 査 教 授 佐 伯 昇  
副 査 教 授 井 野 智  
副 査 教 授 城 攻

学 位 論 文 題 名

## 空隙指標によるコンクリート強度式の表示とその応用

コンクリートの圧縮強度を空隙構造の関数として表示する強度式として、焼結体の特性から導かれた Ryshkewitch の式が広く知られている。しかし、この強度式ではコンクリートの圧縮強度が空隙率のみの関数とされており、空隙の径や形状など空隙率以外の特性は考慮されていない。本論文は、コンクリート強度と空隙構造の関係を広範なコンクリートによる実験結果の統計的な解析により検討したものであり、従来の式を発展させたコンクリート強度式を誘導し、この式の妥当性を検証している。さらに、得られた知見の実務的な応用としてコンクリートの強度推定法の開発と強度増進モデルへの適用を行ったものである。

得られた成果を要約すると次の通りである。

①コンクリートの圧縮強度と空隙構造の関係を表すため、空隙率を硬化セメントペースト部分の空隙率とし、空隙径をその分布の中央値として指標化して次のような強度式を提案した。

$$\sigma = K D^{-a} \exp(-b P_p)$$

ここに  $\sigma$  : コンクリートの圧縮強度  $D$  : 空隙径 (中央値)  
 $P_p$  : 硬化セメントペースト部分の空隙率  $K, a, b$  : 常数

提案式は、従来の式でコンクリート全体の空隙とされている空隙率を、それが存在する硬化セメントペースト部分についての値として求め、従来の強度式では考慮されていなかった空隙径を指標化して式に導入したものである。これにより、広い条件範囲のコンクリートについて、強度と空隙構造の関係が精度良く表すことが可能となった。また、この提案式は特性が異なる複数の組織からなる多孔質材料の強度式となり得ることが期待できる。

②空隙径をコントロールした発泡スチロールをセメントペーストに混入した実験を工夫し、定性的ではあるが上述の強度式の妥当性を実験的に検証している。ここでは、同一の空隙率を持つ材料の強度に空隙径が明確に影響することから強度式に空隙径を導入することの意義を示し、さらに、強度には大きな径の空隙の影響が大きい傾向があること、空隙形状も球状 < 円柱状 < 角柱状の順に強度に影響を及ぼすこと、同じ空隙率でも固相部分の強度が大きいほど全体の強度が高くなることなど、強度の空隙構造依存性に関する幅広い知見を得ている。

③コンクリート強度と空隙構造の関係を精度良く表すことが出来たことから、この関係を応用し、少量のコンクリート片の空隙構造を測定して、この結果からコンクリートの圧縮強度を推定する方法を開発している。版模型や構造体から採取したコアの強度、鋼製型枠で作製したシリンドラーの強度と空隙指標によって得られる推定強度の比較検討の結果は、この方法による圧縮強度の推定値および実験誤差は実用上満足できるものであることを示している。

④強度式の考え方をセメントの水和反応過程に適用することにより、セメント化学的に記述される水和反応の進行を養生条件の異なるコンクリートの強度発現の過程として表している。この結果は、コンクリートの強度増進過程で問題となる温度依存性、材齢の進行など、コンクリート工学的立場から検討されている影響要因の役割を理論的に取り扱う重要な手がかりを与えるものといえる。

これを要するに、著者は、コンクリートの空隙構造と強度の関係をもとに、新たな強度式を提案するとともに、実務的な応用として強度推定法の開発を行い、さらに、コンクリート工学的知見の理論的な検討を行っており、コンクリート工学・建築材料学の進歩に寄与するところ大である。

よって、著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。