



Title	空隙指標によるコンクリート強度式の表示とその応用
Author(s)	吉野, 利幸; Yoshino, Toshiyuki
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第3959号
Issue Date	1996-09-30
DOI	https://doi.org/10.11501/3118227
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/51390
Type	doctoral thesis
File Information	000000303419.pdf



空隙指標によるコンクリート強度式の
表示とその応用

平成8年6月

吉野 利幸

空隙指標によるコンクリート強度式の 表示とその応用

平成8年6月

吉野利幸

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砕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は、空隙として捉えた最小径以上の空隙が0の場合の強度であることを指摘している。

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、強度式を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ペ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、その表現がゴンペルツ曲線の近似となりうること、またゴンペ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。

目 次

第1章 序論	(1)
1.1 本研究の背景と目的	(1)
1.2 本研究に関連する既往の研究	(2)
1.2.1 多孔質材料の空隙構造と強度	(2)
1.2.2 コンクリートの強度発現	(11)
1.3 本研究の構成	(15)
第2章 コンクリート強度と空隙構造関係式の誘導と検証	(18)
2.1 はじめに	(18)
2.2 実験計画	(20)
2.3 実験方法	(24)
2.3.1 使用材料	(24)
2.3.2 試験体および圧縮強度試験	(25)
2.3.3 空隙構造の測定と指標化	(26)
(1) 試料の採取	(26)
(2) 空隙構造の測定	(26)
(3) 強熱減量・不溶残分量の測定	(26)
(4) 測定結果の指標化	(27)
2.3.4 実験に伴う問題点の検討	(30)
(1) 圧縮強度試験時の含水状態(乾試験・湿試験)	(30)
(2) 空隙構造測定用試料の粒度	(31)
(3) 空隙指標算出の仮定	(32)
(4) 溶解試験の簡略化	(32)
2.3.5 実験結果の検討方法	(33)
2.4 実験結果及び考察	(34)
2.4.1 調合、材齢、養生要因と空隙指標、圧縮強度の関係	(34)
(1) 空隙指標に対する調合、材齢、養生の影響	(34)

(2) 圧縮強度と総細孔量・有効細孔量との相関性	(36)
2. 4. 2 空隙指標によるコンクリート強度式の誘導	(38)
(1) 圧縮強度と空隙指標の関係式の誘導	(38)
(2) 空隙指標の圧縮強度への寄与	(42)
2. 4. 3 空隙率と圧縮強度の相関性に影響する要因の検討	(46)
(1) 骨材の影響	(46)
(2) 材齢の影響	(52)
(3) 気中養生の影響	(53)
(4) セメントの影響	(53)
2. 5 空隙指標によるコンクリート強度式の提案と固相強度の検討	(55)
2. 5. 1 強度式の提案	(55)
2. 5. 2 固相強度の検討	(57)
2. 6 既往の強度式との比較	(59)
2. 7 第2章の結論	(67)
第3章 モデル空隙によるコンクリート強度式妥当性の検証	(69)
3. 1 はじめに	(69)
3. 2 実験の概要	(70)
3. 3 実験計画	(71)
3. 4 実験方法	(73)
3. 4. 1 使用材料	(73)
3. 4. 2 モデル空隙の寸法測定	(75)
3. 4. 3 試験体	(76)
3. 4. 4 試験体の空隙率の測定	(77)
3. 4. 5 実験結果の解析法	(78)
3. 5 実験結果および考察	(79)
3. 5. 1 空隙率と圧縮強度の関係	(79)
3. 5. 2 空隙の寸法、分布、形状が圧縮強度に及ぼす影響	(80)
(1) 空隙の寸法とその分布の影響	(80)

(2) 空隙形状	(83)
3. 6 第3章の結論	(85)
第4章 少量の試料による強度推定への適用	(86)
4. 1 はじめに	(86)
4. 2 強度推定のための基本式	(87)
4. 3 強度推定の手法	
(1) 特徴	(91)
(2) 適用範囲	(91)
(3) 推定される強度	(91)
(4) 推定手順	(91)
(5) 結果の指標化	(93)
(6) 強度推定式	(94)
4. 4 強度推定式の誤差の検討	(95)
4. 4. 1 検討範囲	(95)
4. 4. 2 実験方法	(95)
4. 4. 3 実験結果および考察	(96)
(1) 試料のあばれによる誤差	(96)
(2) 試験体の上下による強度差	(97)
4. 5 強度推定の適用例	(99)
4. 5. 1 実大部材モデルに対する適用例	(99)
4. 5. 2 実際の構造物における適用例	(100)
4. 6 第4章の結論	(102)
第5章 水和反応による強度増進モデルへの適用	(103)
5. 1 はじめに	(103)
5. 2 セメントの水和反応とコンクリート強度	(104)
5. 2. 1 コンクリート強度と空隙率、空隙径の関係	(104)
5. 2. 2 セメントの水和反応の考え方	(105)

5.2.3	水セメント比(空隙径)ごとの空隙率と圧縮強度の関係	(105)
5.2.4	空隙率(P)と水和反応率(h)	(106)
5.2.5	水和反応速度式の誘導	(107)
5.2.6	水和反応によるコンクリート強度増進モデル式誘導の ための諸変数の算出	(108)
5.2.7	強度増進モデル式の誘導	(111)
5.3	積算温度とコンクリート強度	(114)
5.3.1	積算温度関数式	(114)
5.3.2	コンクリートの圧縮強度と積算温度に関する実験	(115)
	(1) 実験の方法	(115)
	(2) 実験結果	(117)
5.4	水和反応によるコンクリート強度増進モデル式と積算温度関数式	(119)
5.5	第5章の結論	(122)
第6章 総括		(123)
参考文献		(125)
著者の既発表の報告		(129)
謝辞		(135)

第 1 章 序 論

1. 1 本研究の背景と目的

今日、コンクリートは建築・土木構造物の主要な建設資材として使用されており、その経済性や性能から今後ともその重要性は変わらないと考えられる。このため、コンクリートに関して様々な研究が行われてきており、特に力学性状や耐久性に関する研究は、コンクリート構造物の重要性からかんがみて非常に重要となる。コンクリートの力学性状や耐久性は、構成材料であるセメントペースト部分の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として、コンクリートの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、圧縮強度をいわゆる Ryshkewitch の式 ($\sigma = \sigma_0 e^{-bP}$) で表すことが一般的であり、こ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は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であると考えられる。

本研究の目的は、広い範囲のコンクリートについて、その圧縮強度と空隙構造の関係を空隙率のみでとらえるのではなく、他の空隙指標の役割を含めて検討することであり、その結果をもとにコンクリート強度の空隙構造依存性に基づき、コンクリート強度を一義的に表す強度式を提案する。さらに、この成果に基づき本研究では、調合・履歴の未知な硬化コンクリートから試料を採取し、その強度を推定する方法を開発する。また、空隙構造によるコンクリート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う。

1. 2 本研究に関連する既往の研究

1. 2. 1 多孔質材料の空隙構造と強度

多孔質材料の強度と空隙構造の関係についての検討は、種々の材料による製品強度の優劣の適正な評価手法の一つとして、窯業分野において主として焼結体を対象に多くの研究が行われている。以下にそれらの概要について述べるが、その中には筆者が本研究の根幹をなす強度の空隙構造依存性の検討にもとづき強度式を提案した1977年以降に発表された研究も含まれている。

Bal'shin^{1), 2)} は、粉末金属の多孔質な焼結体に関する実験から強度の変化が(1.1)式で説明され得ることを導いている(1949年)。

$$\sigma = \sigma_{\max} \theta^m \quad (1.1)$$

ここに、 σ : 圧縮強度

σ_{\max} : $\theta = 1$ のとき(固相部分)の圧縮強度

θ : 粉末金属の相対密度

m : 実験定数 ($m = 3 \sim 6$)

この式において、空隙率を P とすると、 $\theta = 1 - P$ となるので、(1.1)式は空隙率を用いて(1.1')式で表される。

$$\sigma = \sigma_{\max} (1 - P)^m \quad (1.1')$$

Schiller^{3), 4)} は、石こう水和物の強度試験結果から強度と空隙率の関係を(1.2)式で表した(1957年)。

$$S = q \log (P_{cr} / P) \quad (1.2)$$

ここに、 S : 強度

P : 空隙率

P_{cr} : 強度が0になるときの空隙率

q : 材料固有の強度に関する定数

この式は、空隙率が100%でなくても材料中で空隙が増えるとそれらがつながり、強度を示さなくなる限界空隙率 P_{cr} ($P_{cr} < 1$) が存在するとしているのが特徴である。

また、この式は空隙率が1または0の近くを除いて次に述べる Ryshkewitch の式((1.3)式)とほぼ近似できるとされている⁵⁾。

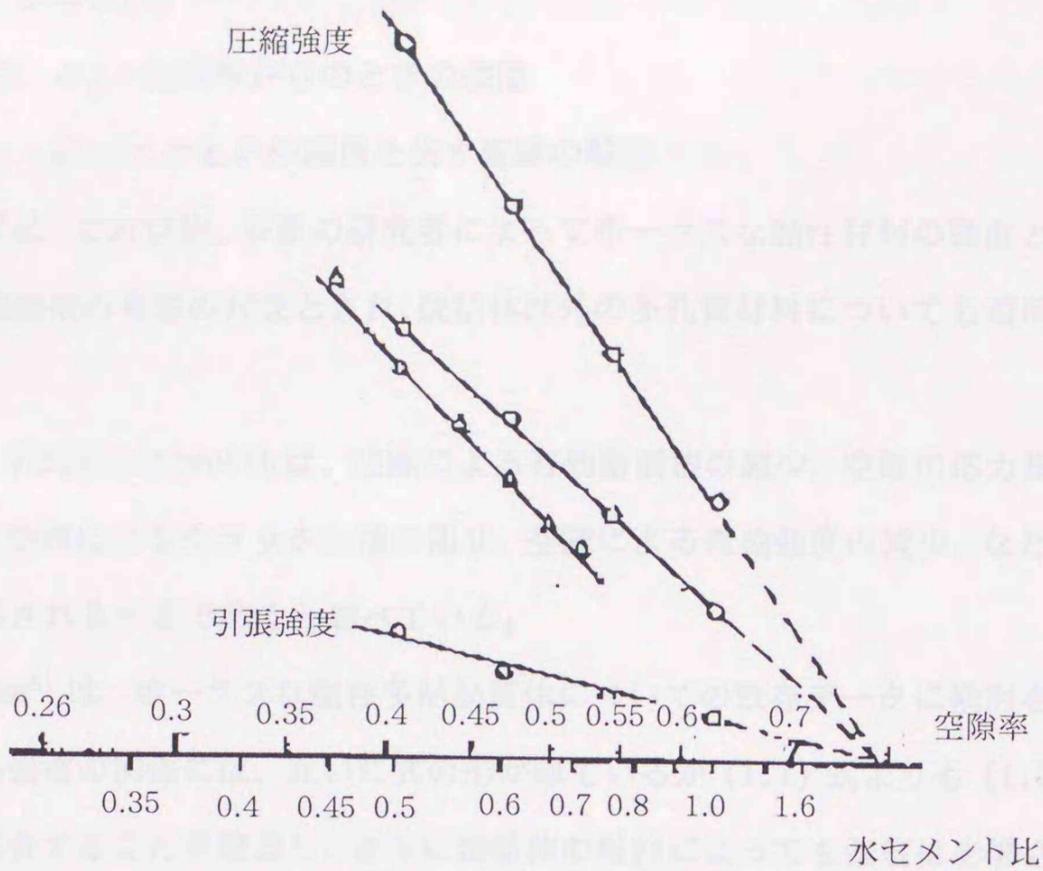


図1.1 石こうの圧縮および引張強度と空隙率、水セメント比の関係³⁾

Ryshkewitch⁶⁾ は、粒径が1～3、4 μm のアルミニウム酸化物およびジルコニウム酸化物を焼結させて作成した試験体の空隙率と圧縮強度を測定し、図1.2に示すように圧縮強度は空隙率の線形変化に伴って、対数的に変化することを明らかにし、Duckworth⁷⁾ がその関係を Ryshkewitch の式として (1.3) 式で表した (1953年)。

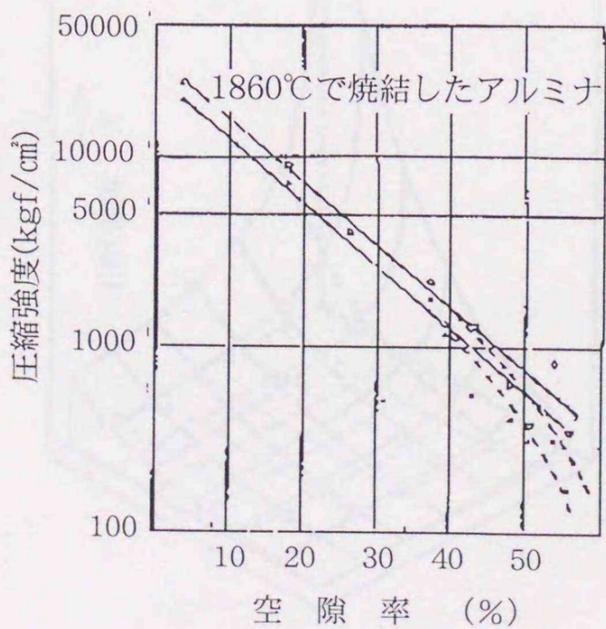


図1.2 圧縮強度と空隙率の関係⁶⁾

$$\sigma = \sigma_0 e^{-BP} \quad (1.3)$$

ここに、 σ_0 : 空隙率が0のときの強度

B : $\ln \sigma$ とPの関係を表す直線の傾き

この式は、これ以後、多数の研究者によってポーラスな脆性材料の強度と空隙率に関する実験結果の考察の対象とされ、焼結体以外の多孔質材料についても適用されることとなる。

なお、同時にDuckworthは、空隙による有効断面積の減少、空隙の応力集中係数、寸法効果、空隙によるクラック伝播の阻止、空隙による理論強度の減少、などについてさらに考察されるべきであると述べている。

Knudsen⁸⁾は、ポーラスな脆性多結晶質体についての既存データに検討を加え、空隙率と圧縮強度の関係には、互いに式の形が似ているが(1.1)式よりも(1.3)式のほうが良く適合することを確認し、さらに焼結体の粒径によっても強度は影響され、粒径と強度のあいだに(1.4)式に示す関係のあることを指摘した。

$$\sigma = K_2 G^{-a} \quad (1.4)$$

ここに、G : 粒径

K_2, a : 実験定数

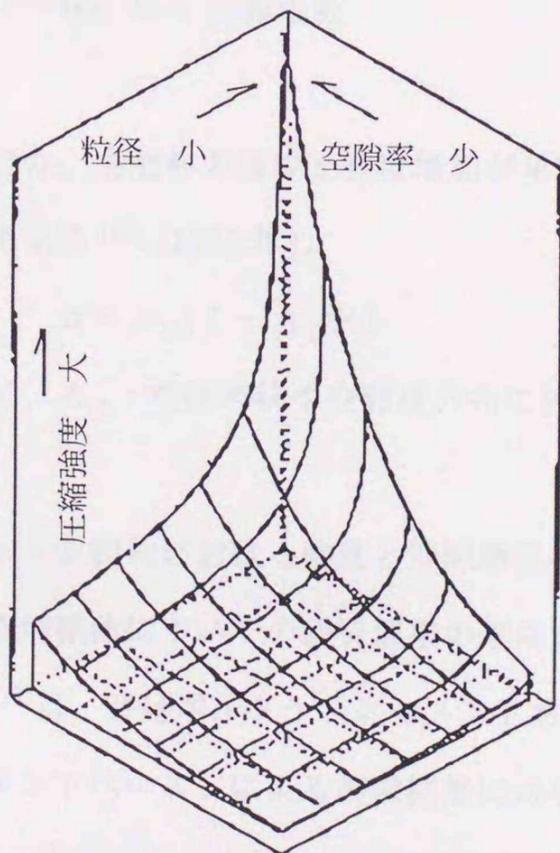


図1.3 圧縮強度の空隙率および粒径依存性の概念⁸⁾

これは、焼結体を構成する粒子同士の接触域が強度の弱点となるというもので、粒径が大きいほど強度は小さくなることを示す。そして、ポーラスな脆性多結晶質体の強度は空隙率と粒径により表されるところとして (1.5) 式を提案するとともに、その妥当性について検討している (1959年)。

$$\sigma = K_2 G^{-a} e^{-BP} \quad (1.5)$$

Passmoreら⁹⁾は、アルミニウム酸化物による実験から、粒径が強度におよぼす影響は空隙率によって変化するとし、Knudsenの式を修正し (1.6) 式を提案している (1965年)。

$$\sigma = K_2 G^{-a+cP} e^{-BP} \quad (1.6)$$

さらに、Spriggs¹⁰⁾は、多結晶アルミナによる実験から、独立した閉孔 (closed pore) と連続した開孔 (open pore) の強度におよぼす影響を区別し、強度と空隙率の関係は (1.7) 式で表されるところとしている (1962年)。また、ホットプレスしたアルミナ試験体による実験では、Knudsenの式が妥当であることを確認している¹¹⁾。

$$\sigma = \sigma_0 e^{-b_0 P_0 - b_c P_c} \quad (1.7)$$

ここに、 P_0 , P_c : それぞれ開孔または閉孔の体積比

b_0 , b_c : 実験定数

このほか、空隙率の減少と強度増加が単純な一次式である (1.8) 式で表されるところとした提案もある¹²⁾ (1963年)。

$$\sigma = \sigma_0 (1 - A_0 P) \quad (1.8)$$

ここに、 A_0 : 空隙形状や空隙径分布に依存する実験定数

セメント水和物における強度と空隙構造の関係についての研究では、前述の窯業分野における焼結体についての研究成果の適用を試みているものが多い。

高野¹³⁾は、普通ポルトランドセメントおよび中庸熱ポルトランドセメントを用いた硬化セメントペーストによる実験結果に対して (1.3) 式をあてはめることができることを示し、圧縮強度と空隙率の関係にはセメントの種類や養生温度は影響しないと報告

している。ここでは、空隙にはゲル空隙と毛細管空隙の両方を含めた値を用いている(1955年)。

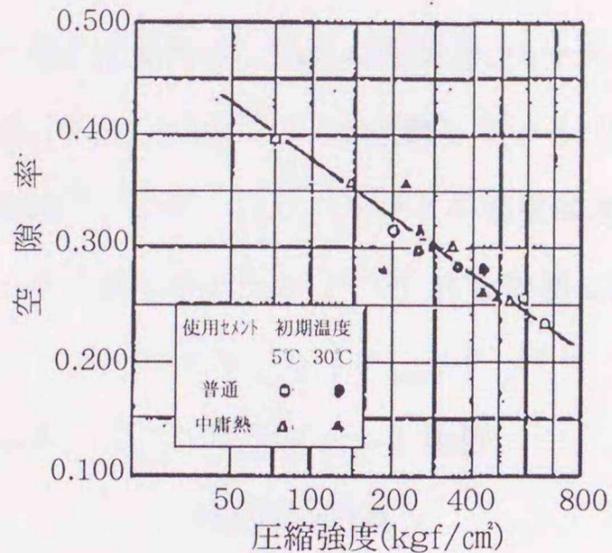


図1.4 各種セメントペーストの圧縮強度と空隙率の関係¹³⁾

近藤ら^{14),15)}は、硬化セメントペーストおよびモルタルによる実験から、圧縮強度と空隙率のあいだには、試料ごとに(1.3)式が成立するとしている(1968年)。

その際、モルタルの空隙率は、硬化セメントペーストの空隙率と比例関係にあるとし、モルタル中の空隙量に関する指標としてペーストの空隙を用い、さらに圧縮応力を負担する断面を減少させる部分は半径75 Å以上のいわゆる毛細管空隙であるとの考えから、空隙量は半径75 Å以上の空隙の測定値を用いている。このため、(1.3)式中の σ_0 は、75 Å以下の空隙のみを残す程度にまで養生されたモルタル強さに相当するとし、この値は何Å以上を毛細管空隙と見なすかにより著しく影響されると述べている。また、強度

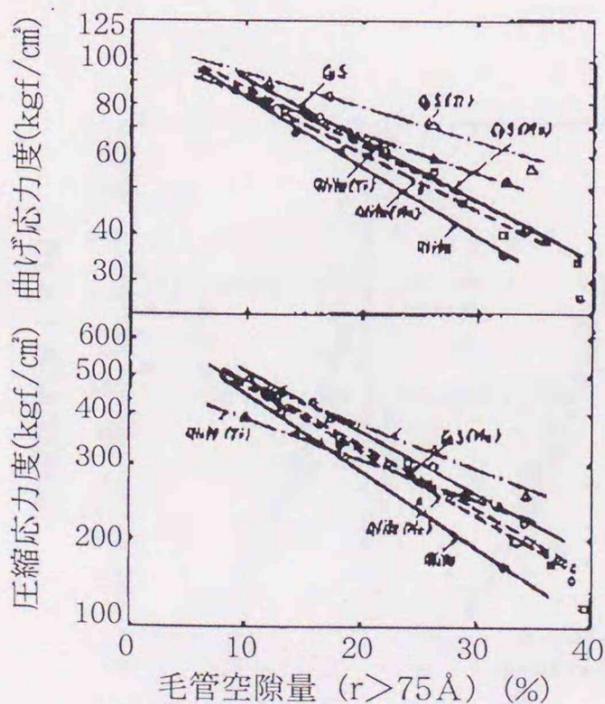


図1.5 C_3S 、エーライトおよびそれらの固溶体ペーストの毛管空隙量とモルタル強さの関係¹⁶⁾

は空隙率だけでなく、空隙の大きさ、形、分布により影響されるが、同質の材料ではこれらの状態があまり変化しないため、空隙率のみの影響が表れるとしている¹⁶⁾。

なお、モルタル試験体の空隙率をモルタル中のセメントペースト部分に対する割合で表した場合の空隙率と強度の関係が、ペースト試験体による空隙率と強度の関係と同じになることは、中山ら¹⁷⁾も指摘している(1976)。

Powers^{18), 19)}は、コンクリートの強度は水和セメントの密度で表されるとし、ゲル・スペース比説と呼ばれる(1.9)式を提案した(1958年)。

$$\sigma = A \left\{ \frac{V_{hc}}{V_{hc} + P_c} \right\}^n \quad (1.9)$$

ここで、 V_{hc} : 水和セメント容積

P_c : 毛細管空隙量

n : 実験定数 ($n = 2.4 \sim 3$)

この式で、 $P_c = 0$ のとき $\sigma = A$ となることから、 A は毛細管空隙が0のときの圧縮強度である。また、 $V_{hc} + P_c = 1$ とすると、

$$\frac{V_{hc}}{V_{hc} + P_c} = 1 - P$$

したがって、

$$\sigma = A (1 - P)^n$$

となり、(1.1')式となる。ただし、Powersの論文では、水和セメント容積 V_{hc} と毛細管空隙 P_c に未水和セメント容積 V_{uc} を加えたものを1としていることから、(1.9)式はセメントが完全水和した場合を表したものといえる。

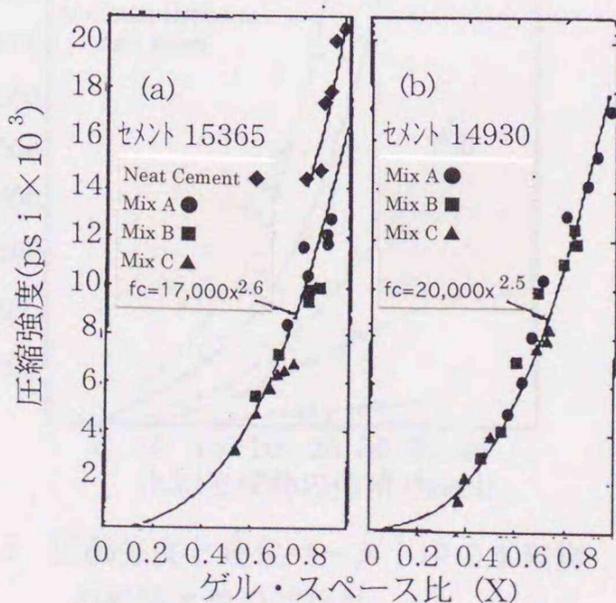


図 1.6 圧縮強度とゲル・スペース比の関係¹⁸⁾

Mindess²⁰⁾は、セメントの主成分であるカルシウムシリケート水和物による実験から、強度には空隙径分布が関係し、大きな空隙が増えるほど強度は弱くなること、硬化体の相構成がほぼ同じ場合の強度は空隙率によって決まること、結晶の大きさも強度に影響すること、などを指摘し、強度と空隙率の関係は(1.2)、(1.3)式がよく合うとしている。空隙径分布や結晶強度の影響については定性的評価にとどまっている(1970年)。

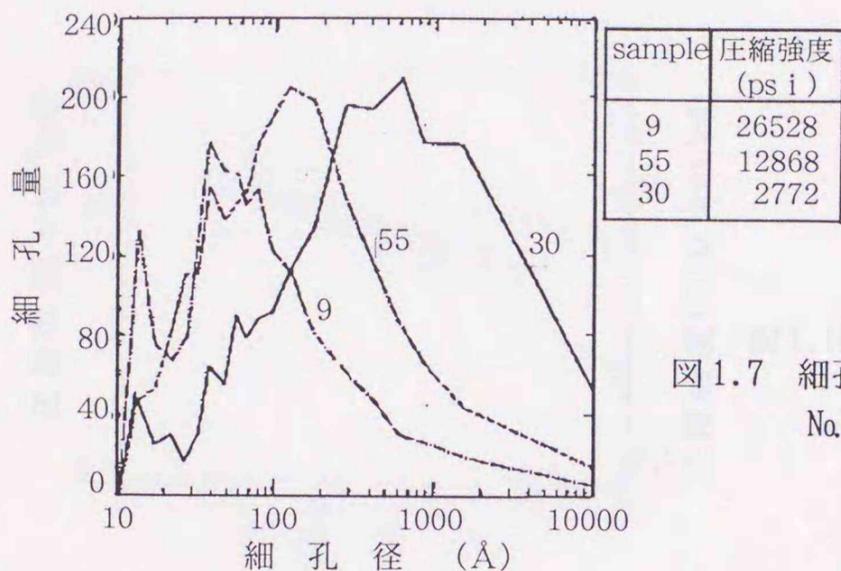


図1.7 細孔径分布 (No.9は強度が大きく No.30は強度が小さい)²⁰⁾

Jambor²¹⁾は、水和生成物の種類と量が強度および空隙構造を左右する重要な要因であり、水和生成物の種類と量によって強度が異なることを示した。そして、平均空隙半

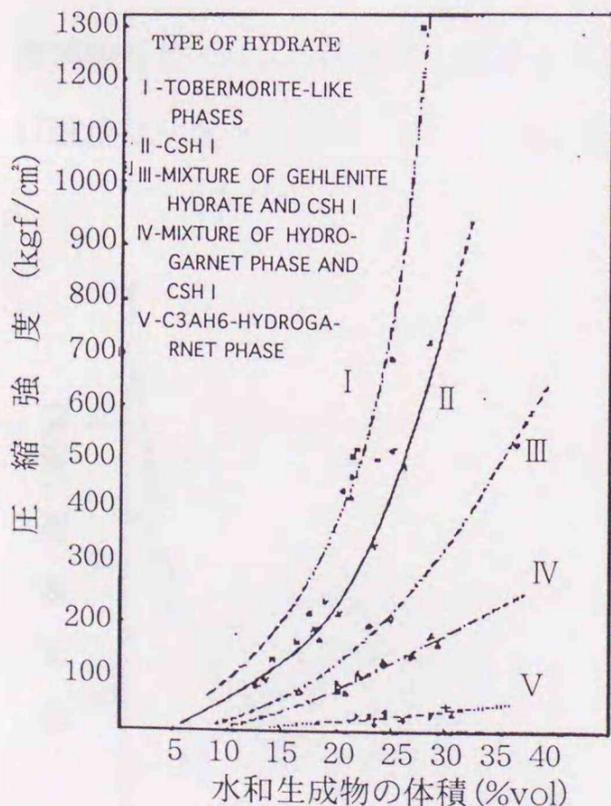


図1.8 圧縮強度と硬化ペースト中の水和物の種類と量の関係²¹⁾

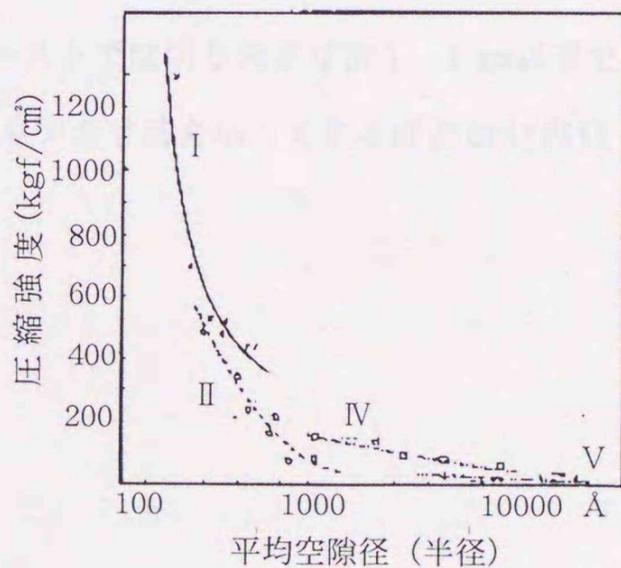


図1.9 タイプI~Vの水和生成物を含む硬化ペーストの平均空隙径と圧縮強度の関係²¹⁾

径はペーストの空隙構造を完全に特徴づけるものではないが、水和生成物の種類にかかわらず圧縮強度とのあいだに明瞭な相関性のあることを示した (1973年)。

また、Feldmanら²²⁾は(1976年)、空隙率はポルトランドセメント硬化体の強度を支配する主要な要因であるが、結晶の結合や水和物の密度も重要であると述べ、結晶性の良い水和生成物と悪い水和生成物とが適当に共存した場合に最大の強度が得られるとしており、Grennanら²³⁾もこの考えを支持している(1977年)。

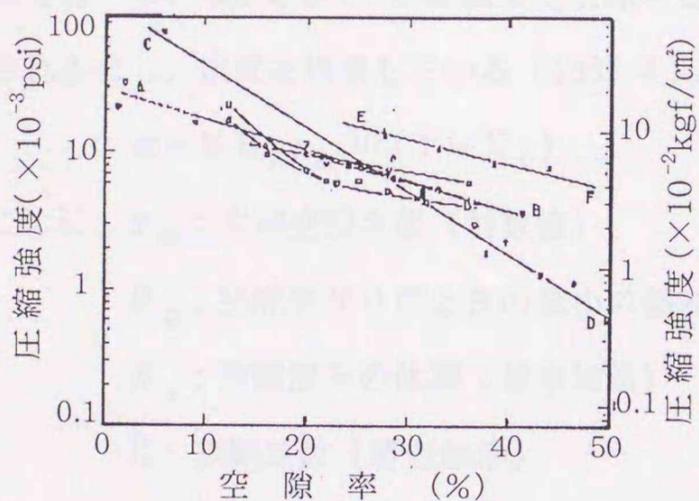


図1.10 オートクレーブ養生と室温養生した試験体の圧縮強度と空隙率の関係²²⁾

Birchallら²⁴⁾は、セメントの粒度分布を調整するとともに流動化剤を使用してセメントペースト中の粗大な空隙をなくしたMDF (Macro-Diffect-Free cement) 試験体と普通セメントペースト試験体を用い、それらに寸法の異なる切り欠きを入れた曲げ強度実験を行った。その結果、普通セメントペーストでは切り欠き寸法1.1 mm以下で曲げ強度は一定となるのに対し、MDFでは切り欠き寸法を小さくするほどGriffith理

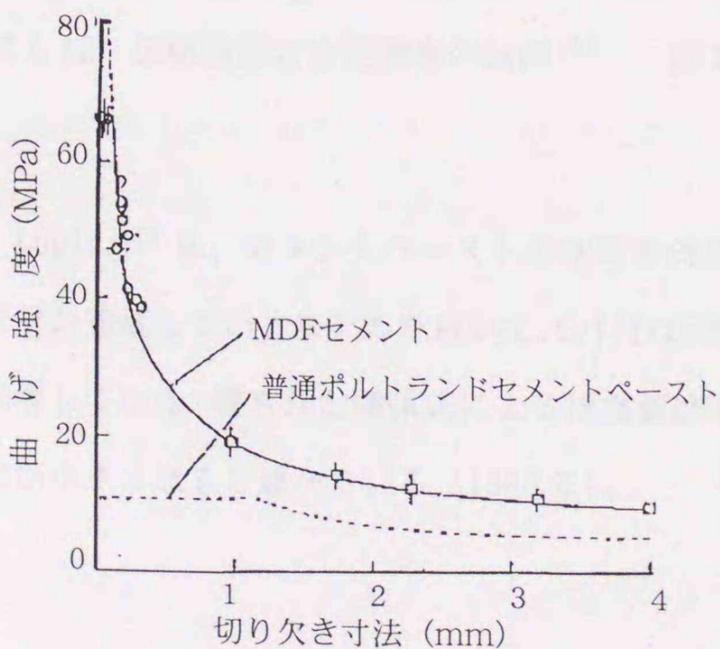


図1.11 MDFセメントと普通ポルトランドセメントペーストの曲げ試験結果²⁴⁾

論²⁵⁾の予測に近いカーブで曲げ強度が大きくなったと述べている。これは、普通セメントペーストでは、切り欠き寸法を小さくしてもそれより大きな欠陥（空隙）が試験体中に残っているためであるとし、Griffith理論が硬化セメントペーストについても成り立つと述べている。また、MDFでは圧縮強度も増加するとしている（1981年）。

Atzeniら²⁶⁾は、セメントペーストのMacro-Diffectは圧縮強度には影響せず、また、圧縮強度は平均空隙半径と良い関係があり、平均空隙径が小さくなれば圧縮強度も増加すると述べている。そして、圧縮強度は空隙率と平均空隙半径の2つの空隙指標により表されるとし、次式を提案している（1987年）。

$$\sigma = K R_c r_m^{-1/2} (1 - X_v) \quad (1.10)$$

ここに、 r_m ：平均空隙半径（対数值）

R_c ：空隙率が0のときの最小の強度

X_v ：空隙部分の体積（著者加筆）

K ：実験定数（著者加筆）

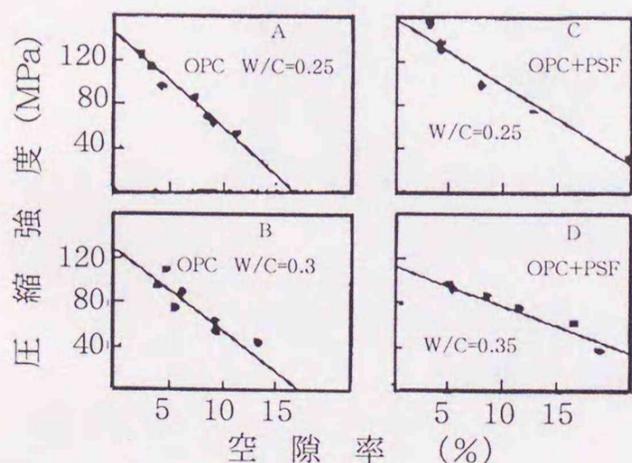


図1.12 圧縮強度と全空隙率の関係²⁶⁾

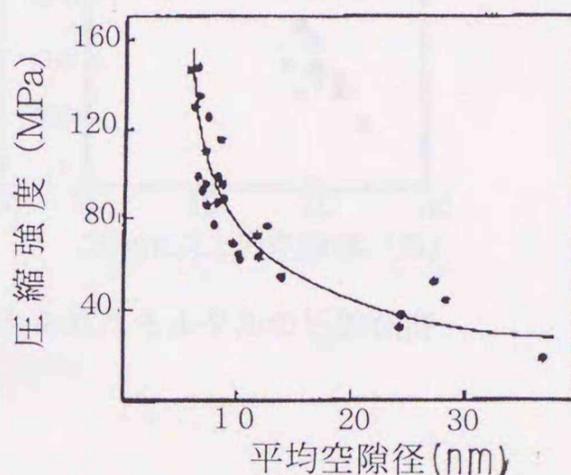


図1.13 圧縮強度と平均空隙半径の関係²⁶⁾

Luping²⁷⁾は、セメントペーストの空隙を円筒形と仮定し、それらが3次元方向にそれぞれ連続しているモデルを用いて、Griffith理論に基づいた空隙径と強度の関係式を誘導している。得られた関係式による推定値は実測値と対応し、空隙径が大きいほど強度が小さくなると述べている（1986年）。

内川ら²⁸⁾は、モルタルの圧縮強度は全空隙率よりも20nm (200 Å) 以上の空隙率と高い相関を示すが、空隙構造が同一であっても強度は水和物の凝集エネルギー(オートクレーブ養生の場合のように結晶度が高いと凝集エネルギーは低下する)、水和物の強度によって異なると述べている。

また、骨材とセメントペーストの界面部分には直径50nm以上の粗大な空隙に富む遷移帯が形成されることから、モルタルおよびコンクリートにおいては、遷移帯の空隙径を代表する50nm~2 μmの範囲の毛細管空隙と圧縮強度との相関が高いと述べている²⁹⁾(1993年)。また、この考えをもとに、羽原³⁰⁾は圧縮強度600kgf/cm²程度までのモルタルおよびコンクリートの圧縮強度の関係式として(1.11)式を提案している(1992年)。

$$\sigma = 690 - 17.2 V_{50-2} \quad (1.11)$$

ここに、 V_{50-2} : 水セメント比0.4~0.6の範囲で50nm~2 μmの空隙量

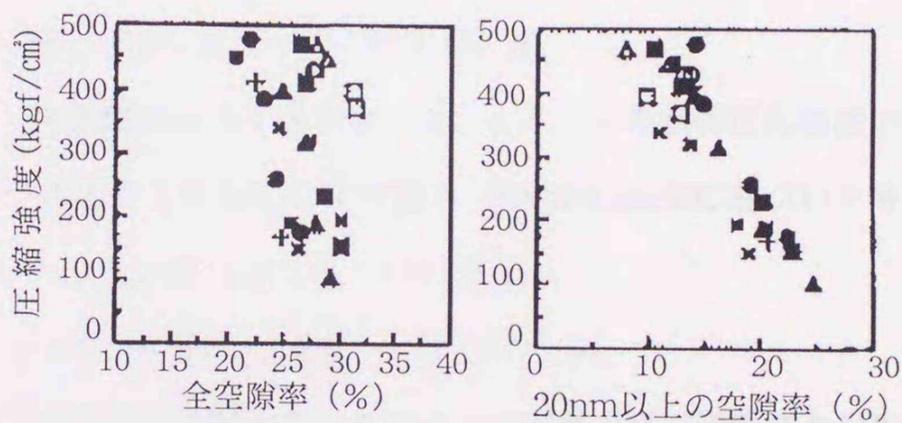


図1.14 種々の条件下で養生されたモルタルの圧縮強度と空隙径分布の関係²⁸⁾

以上のように、脆性多孔質材料の圧縮強度には空隙の量、大きさ、形、分布などの空隙構造の影響が指摘されているほか、セメント硬化体については、水和物の種類と量、結晶度などが影響することが報告されている。コンクリートについての報告は限られているものの、内川、羽原らがこれに対応しうるものといえる。

1.2.2 コンクリートの強度発現

コンクリートが硬化し、強度を増進していく過程は当然のことながらセメントの水和反応に依存しており、セメントの水和反応と強度増進の関係をj知る必要がある。このた

め、セメントの水和反応について数多くの研究が行われており、構成化合物の水和反応を数式で記述するモデルの試みがなされている³¹⁾。しかし、それらの研究はセメントの水和反応機構の解明を主目的としたものとなっており、強度増進を表現するなどの、コンクリート工学分野の要求に対応した実用性を持つものとはなっていない。

一方、コンクリートの施工やプレキャスト部材の製造の分野を中心に実用性を重視した研究が行われてきた。コンクリートの強度増進には時間と温度が大きく影響することからこれを積算温度とし、強度との関係について検討されている。初期の積算温度に関する研究については、洪³²⁾による詳細な解説がある(1978年)。

Nurseは、温度-時間関係をマチュリティ (Maturity) と名付け次式を提案し、

$$f = \sum \theta \Delta t \sim \int \theta dt \quad (1.12)$$

Bergstrom、Saulはこの式に基づいてコンクリートの強度増進が、0である時の基準温度を -10°C として次式を提案している。

$$f = \sum (\theta + 10) \Delta t \sim \int (\theta + 10) dt \quad (1.13)$$

その後、温度-時間関係を表す手法として、セメントの水和反応速度の温度依存性を活性化エネルギーを取り入れることで考慮し、Arrhenius式に基づいた等価材齢の考え方がHansenら³³⁾によって示された(1977年)。

$$t_{20} = \int \exp(E/R) \cdot (1/293 - 1/T(t)) dt \quad (1.14)$$

この式は種々の温度履歴を経たコンクリートの材齢を 20°C 養生での材齢に換算するものであり、相対積算温度といえるものである。この方式によると $-10 \sim 80^{\circ}\text{C}$ の広い範囲で養生温度の強度に対する影響を説明できるとしている。

Carino³⁴⁾はコンクリートの強度が発現し始めるのは材齢0からではなく t_0 の時であるという条件を導入し、次式に示す双曲線によって強度増進関数を表している(1984年)。

$$F = F_{\infty} \{ [K_T(t - t_0)] / [1 + K_T(t - t_0)] \} \quad (1.15)$$

ここに、 F_{∞} : 最終到達強度

K_T : コンクリート温度 T の時の温度関数の値

積算温度法で $K_T = A(T - T_0)$

等価材齢法で $K_T = B \cdot \exp(-E/R \cdot T_K)$

我が国では、洪が上記の Bergstom、Saul による温度・時間関数の有用性を認め、それを応用した積算温度方式（°D・D方式）を提案し、寒中コンクリートにおける水セメント比の決定や温度補正項の推定および型枠除去の材齢推定にまで適用できる方式を確立した。以来、我が国では、等価材齢方式はほとんど使われておらず積算温度方式が主流となっている。洪によって実用化された積算温度は次式に示すものである。

$$M = \sum_{Z=1}^n (\theta_z + 10) \quad (1.16)$$

ここに、M：積算温度（°D・D）

θ_z ：日平均気温（°C）

Z：材齢（日）

その後、コンクリートの強度発現に関する研究の進展とともに積算温度方式の修正や新たな提案がなされている。

大和³⁵⁾は、養生期間中の温度条件を変化させたコンクリートによる実験から、積算温度とコンクリート強度発現の関係が養生温度によって相違するとし、その影響を補正する方式を提案した（1981年）。

$$M = \int \beta (\theta - \alpha) dt \quad (1.17)$$

$$\beta = f (\theta - \alpha)$$

ここに、 θ ：養生温度

α ：定数（ $\alpha = -10$ ）

β ：温度効果補正項

この式による補正を行った結果をみると、若材齢時での強度と積算温度の対応は良くなるものの、この補正を材齢全体について行う場合、誤差が大きくなる恐れのあることが指摘されている。

洪、鎌田ら^{36), 37), 38)}は、コンクリート強度をそれまでの図表による推定から、ロジスティック曲線を応用した積算温度の関数式で、材齢の全体にわたって表されることを示した（1986年）。さらに、材齢初期の温度条件の相違が初期材齢時の積算温度と圧縮強度の関係を異ならせるとし、初期温度補正項Cの導入を図った（(1.18)式）。この場合、強度式（(1.18)式）の積算温度Mが対数変換されているため、 $\sum (\theta + 10)$ が大きい

くなる長期材齢時では、初期温度補正項による補正の影響は小さくなる。

$$F_c = \frac{F_\infty}{1 + \exp(-k \times \log M + m)} \quad (1.18)$$

$$M = \Sigma (\theta + 10) + C$$

ここに、 F_∞ : 最終到達強度 (kgf/cm²)

k, m : 定数

C : 初期温度補正項 ($C = f(\theta_i)$)

θ_i : 初期の養生温度 (°C)

後藤ら^{39), 40)}は、既往の強度データを直角双曲線式、Hill式、ロジスティック曲線式の3種類にあてはめ、その適合性を検討した結果、積算温度の代わりに材齢を用いたロジスティック曲線による推定強度の精度が良いことを指摘した(1989年)。さらに、寺田^{41), 42)}は、Goralの式を変形した強度式によるコンクリート強度増進式を提案している(1986年)。

1. 3 本研究の構成

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とらえるのではなく、他の空隙指標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。図1.15に本研究の構成を示し、以下に各章の内容を述べる。

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砕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は、空隙として捉えた最小径以上の空隙が0の場合の強度であることを指摘している。

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、強度式を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ペ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、その表現がゴンペルツ曲線の近似となりうること、またゴンペ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。

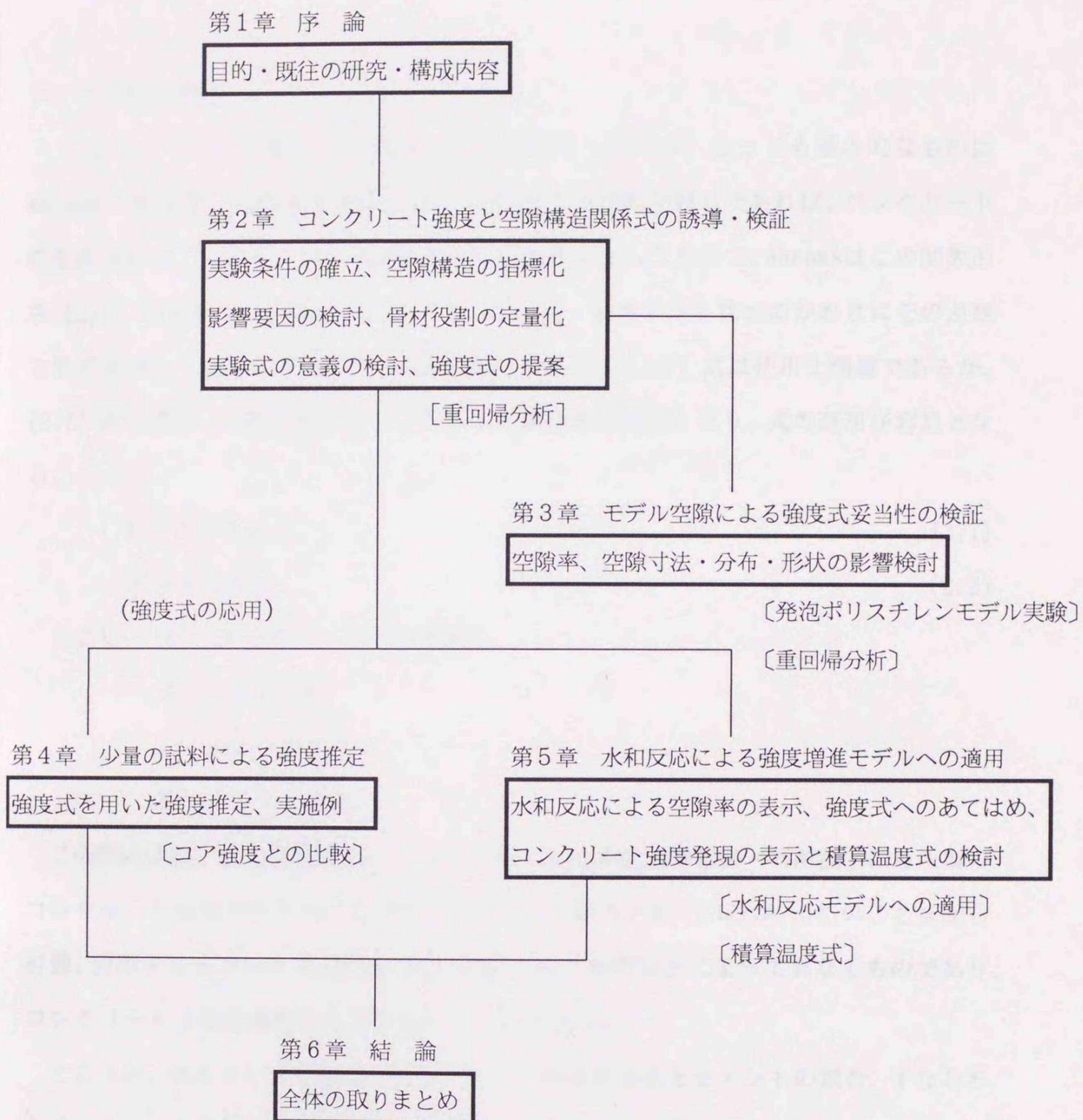


図 1.15 研究の構成

2.1 はじめに

コンクリートの圧縮強度に関する理論は数多くあるが、もっとも基本的なものは Abrams の水セメント比説である。これは、使用する材料が同じであれば、コンクリートの圧縮強度は、水セメント比の関数として表されるというもので、Abrams はこの関数形を (2.1) 式のように提案した。その後、Lyse は、水セメント比 x のかわりにその逆数であるセメント水比 X を用いて (2.2) 式で表した。(2.1) 式は使用上煩雑であるが、(2.2) 式の場合、圧縮強度はセメント水比と直線的な関係となり、式の運用が容易となる。

$$F = A / B x \quad (2.1)$$

$$F = a X + b \quad (2.2)$$

ここに、 F : コンクリートの圧縮強度

A, B, a, b : 定数

x : 水セメント比

X : セメント水比

この関係式は、日本建築学会の「コンクリートの調合設計指針・同解説」にも所要のコンクリート強度を得るための調合設計法として採用されているが、当然のことながら材齢、使用するセメントや空気量などの調合、養生条件などによって異なるものであり、コンクリートの強度発現の全体を論じるものではない。

ところで、水セメント比説は、コンクリートの強度が水とセメントの割合、すなわちセメントペースト部分の強度によって決定されることを意味している。セメントペースト硬化体の強度は、Powers¹⁸⁾ も述べているように硬化体内部の空隙量によって決まるとするならば、水セメント比はコンクリート強度を支配する直接的な要因である硬化体の空隙量を左右する間接的要因であると考えることができる。

本研究はこの点に着目したもので、ここではコンクリートの圧縮強度の空隙構造依存性を明らかにし、コンクリートの圧縮強度を空隙構造の関数として一義的に表す強度式の提案を行う。

コンクリートの空隙構造の測定値は、通常ある空隙径の範囲についての試料全体の空隙率である総細孔量で表されるが、ここでは、研究目的に対応させ、既往の研究で考慮されていないセメントペースト中の空隙量、空隙径、空隙形状を考慮した指標を導入し、これらの空隙指標と調合、材齢、養生条件などコンクリート強度を左右する要因との関係を検討した。そして、統計的手法（重回帰分析法）を用い、コンクリートの圧縮強度に影響する主要な空隙構造指標を明らかにするとともに、圧縮強度と空隙構造の関係に影響を及ぼすその他の要因とその影響量を定量的に評価した。

提案する強度式は (2.3) 式で表されるもので、コンクリート強度は硬化コンクリート中のセメントペースト部分の空隙率と空隙径の関数で表され、空隙が少ないほど、また空隙径が小さいほど強度は大きくなる。

$$\sigma = k D^{-a} \exp(-b P_p) \quad (2.3)$$

ここに、 σ : 強度

P_p : 硬化コンクリートのセメントペースト部分の空隙率

D : 空隙径

k, a, b : 定数

ここでは、空隙率はセメントペースト部分に対する半径 $31.6 \text{ \AA} \sim 56 \mu\text{m}$ 間の空隙量の割合であり、空隙径は半径 $31.6 \text{ \AA} \sim 56 \mu\text{m}$ 間の全空隙量の $1/2$ に対応する空隙半径の対数值とした。また、定数 k は、空隙の連続性やセメントの水和程度、試料中の骨材平均吸水率などで変化するものとした。

試料番号	空隙率 (%)	空隙径 (μm)	圧縮強度 (MPa)
1	10	30	25
2	15	40	20
3	20	50	15
4	25	60	10
5	30	70	5

2.2 実験計画

コンクリート強度の空隙構造依存性をできるだけ幅広く検討するため、実験は水セメント比、材齢、養生方法、空気量、スランプ、セメント強度、骨材種別、などコンクリートの圧縮強度に影響すると考えられる要因をできるだけ多く取り上げ、それらの要因と空隙構造の関係が得られる計画とした。

シリーズI、II、IIIは強度と空隙構造の関係を検討するための実験で、シリーズIでは、どの要因がどの程度強度に影響するか不明なため、コンクリート強度に影響すると考えられる基本的な要因について幅広い計画による実験とした。また、シリーズII、IIIは、シリーズIで認められた圧縮強度と空隙構造の関係の影響要因の役割をより明確にするための追加的実験である。シリーズIV、Vは同一の水セメント比でもコンクリート強度を異なるものとする骨材の影響に着目した実験である。

実験は昭和50年から昭和58年にかけて行ったもので、コンクリートの材料や調合は、当時、一般的に用いられていたもので、粗骨材は砂利、混和剤はAE剤が中心となっている。本研究で実施した実験の計画を以下に示す。

1) シリーズI

シリーズIは、水セメント比、空気量、スランプ、骨材種別などの調合要因、養生方法、材齢など強度と空隙構造の关系到影響を及ぼすと考えられる基本的な要因を広範囲に取り上げた実験である。水セメント比は、特殊な混和剤を用いないで作成可能な40%~90%のあいだの5水準とし、スランプは18cmを中心に8cm、21cmの3水準、骨材は比較的吸水率が大きく比重の小さなものおよび吸水率が小さく堅硬なものの2水準、空気量はAE剤の有無による2水準とした。材齢および養生方法は、1週および4

表2.1 シリーズIの実験計画

実施年	セメント	AE剤	骨材	水セメント比 (%)	スランプ (cm)	養生方法	試験材齢	データの内訳
1976年	普通ポルト (A社)	non	広島	50,60	8,21	水中 屋外 屋内	1週	水中養生
		AE	広島	40,50,60	18		4週	48データ
		non	当別 錦岡				70,90	3カ月
				1年				20データ

週までは水中養生とし、3カ月、1年の長期材齢で水中のほか屋外、屋内養生の水準を加えた。シリーズIの実験計画を表2.1に示す。

2) シリーズII

シリーズIの実験の結果、養生方法によって強度と空隙構造の関係が異なることが判明したため、水中、封緘、気中の各々の養生を持続させた場合のほか、封緘養生と気中養生を組み合わせ、養生過程の影響に関するデータを得ることとした。セメント、骨材、スラブは一定とし、養生条件のみを変えた計画とした。シリーズIIの実験計画を表2.2に示す。

表2.2 シリーズIIの実験計画

実施年	セメント	A E 剤	骨材	水セメント比 (%)	スラブ ^o (cm)	養生方法	試験材齢	データの内訳
1977年	普通ポルト (A社)	non A E	追分	40,50,60 70,90	18	水中	1週	水中養生 30データ
							4週	
				3カ月				
		non	浜厚真	40,60,70		封緘	2日	封緘+気中 12データ
			1週					
			4週					
					封緘+ 気中	3カ月		

3) シリーズIII

シリーズIの実験で強度と空隙構造の関係が材齢によって異なることが判明したため、シリーズIIIは、特に長期材齢による影響の検討のほか、セメント種別に関するデータを得ることを目的とした。このため、試験材齢を1週、4週、3カ月、2年の4水準とし、水中、気中およびそれらを組み合わせた養生とした。また、メーカーおよび水和速度の異なる4種類のポルトランドセメントのほか、意図的に風化させた普通ポルトランドセメントを加えた5種類を選んでセメントの影響の検討を行った。シリーズIIIの実験計画を表2.3に示す。

表 2.3 シリーズⅢの実験計画

実施年	セメント	A E 剤	骨材	水セメント比 (%)	スラブ° (cm)	養生方法	試験材齢	データの内訳			
1978年	普通 (A社)	A E		40,50,60	18	水中	1週	水中養生 90データ			
	風化普通 (B社)						4週				
		2年									
	普通 (B社)	non				当別	70,90		水中	1週	気中養生 40データ
										4週	
	2年										
超早強 (B社)	A E	錦岡		気中	1週						
					4週						
					2年						
	高炉B種(B)					4週					
						3カ月					
						2年					

4) シリーズⅣ

コンクリート強度は調合や養生、材齢のほか骨材の影響を受ける。碎石を用いると骨材表面のテクスチャーの影響で、砂利を用いたコンクリートよりも強度が高くなることが知られている。骨材の表面状態は、強度と空隙構造の関係を異なるものとするのが想像され、ここでは、この影響を明らかにすることを目的とし、碎石と普通骨材の混合割合を0%、50%、100%の3水準とした実験を行った。また、人工軽量骨材は骨材表面組織が内部と比較して著しく緻密であり、骨材の持つ平均的な空隙量の割にはコンクリート強度が高い。このため、人工軽量骨材のもつ空隙の影響を検討する目的で2種類の人工軽量骨材を粗骨材に用いた実験を加えた。シリーズⅣの実験計画を表2.4に示す。

表 2.4 シリーズⅣの実験計画

実施年	セメント	AE剤	骨材	水セメント比 (%)	スラブ° (cm)	養生方法	試験材齢	データの内訳
1979年	普通ポルト (A社)	AE	当別 錦岡	40, 50, 60 70, 90	18	水中	1週	水中養生 45データ
			当別(50%) 手稲(50%) + 錦岡				4週	
			手稲 錦岡				3カ月	
			人工軽量A 錦岡				4週	水中養生 10データ
			人工軽量B 錦岡					

※手稲：碎石

5) シリーズⅤ

骨材の吸水率は骨材中に存在する空隙量に関係し、コンクリート試料による空隙構造の測定値に影響することが考えられる。このため、骨材空隙の影響を吸水率を指標として検討することを計画し、吸水率の異なる細骨材と粗骨材をそれぞれ3種類ずつ組み合わせた9種類の骨材のコンクリートについての実験を行った。シリーズⅤの実験計画を表2.5に示す。

表 2.5 シリーズⅤの実験計画

実施年	セメント	AE剤	骨材	水セメント比 (%)	スラブ° (cm)	養生方法	試験材齢	データの内訳	
1980年	普通ポルト (A社)	AE	静内	錦岡	40 60 70	18	水中	1週	水中養生 54データ
				広島					
				和賀川					
			広島	錦岡					
				広島					
				和賀川					
			大野	錦岡				4週	
				広島					
				和賀川					

2.3 実験方法

2.3.1 使用材料

セメントは表2.6に示すごとく、シリーズI、II、IV、Vではセメント種別の要因を除くため一つに限定し、最も一般的に使用されている普通ポルトランドセメントとした。セメントの影響を検討するシリーズIIIでは、セメントの影響が成分や粉末度の違いにより強度発現速度や最終到達強度として表れるものと考え、普通ポルトランドセメントについてはメーカーを異ならせた2種類とし、普通ポルトランドセメントより強度発現が速く初期材齢での強度が大きいものとして超早強ポルトランドセメントを、逆に普通ポルトランドセメントより強度発現が遅く、1、4週強度の小さいものとして高炉B種セメントを選んだ。また、最終到達強度が普通ポルトランドセメントより低い場合を想定して、約1ヶ月間実験室内に放置して意図的に風化させた普通ポルトランドセメントを用いた。

表2.6 セメントの物理試験結果（メーカーによる）

シリーズ	セメント	比重	比表面積 (cm^2/g)	70-値 (mm)	圧縮強度(kgf/cm^2)		
					3日	7日	28日
I	普通ポルト(A社)	3.15	3,000	242	150	242	412
II	普通ポルト(A社)	3.17	3,010	249	151	246	421
III	普通ポルト(A社)	3.16	3,070	246	138	238	405
	// (B社)	3.14	3,200	246	155	243	422
	風化普通ポルト(B社)	3.15	3,180	244	131	203	364
	超早強(B社)	3.12	5,950	233	339	395	444
	高炉B種 (B社)	3.06	3,960	233	118	180	348
IV	普通ポルト(A社)	3.17	3,100	241	132	234	411
V	普通ポルト(A社)	3.16	—	258	138	220	397

骨材は、実験を実施した当時に一般的に使用されていた砂および砂利を標準とし、その影響を幅広く捉えるため、表2.7に示すように、シリーズI、II、IIIで意図的に異なった産地のものを用いた。シリーズIVの碎石には手稲産を用い、人工軽量粗骨材には造粒型のものとしてBを、非造粒型のものとしてAを用いた。シリーズVでは骨材吸水率の影響を検討する目的から、広島を標準的な吸水率の細・粗骨材をとし、約1/2の吸水

表2.7 骨材試験結果

シリーズ	骨材		種類	表乾比重	吸水率 (%)	実績率 (%)	粗粒率
I	細骨材	広島	山砂	2.63	2.79	66.4	2.54
		錦岡	海砂	2.84	0.59	69.3	2.57
	粗骨材	広島	山砂利	2.59	2.34	66.3	6.82
		当別	川砂利	2.65	2.08	65.0	6.58
II	細骨材	浜厚真	海砂	2.71	1.72	—	2.89
	粗骨材	追分	陸砂利	2.57	2.40	63.2	6.88
III, IV	細骨材	錦岡	海砂	2.80	1.18	66.5	2.55
	粗骨材	当別	川砂利	2.65	1.61	61.7	6.79
		手稲	碎石	2.66	0.97	57.4	6.81
		非造粒型A	人工軽量	1.38	10.30	65.3	6.06
		造粒型B	人工軽量	1.29	6.10	66.8	6.49
V	細骨材	錦岡	海砂	2.75	1.30	69.1	2.61
		広島	山砂	2.58	2.54	64.7	2.72
		和賀川	川砂	2.49	5.21	62.7	3.01
	粗骨材	静内	川砂利	2.74	1.22	62.4	6.96
		広島	山砂利	2.63	2.14	62.0	6.80
		大野	山砂利	2.47	4.62	65.2	6.95

率である錦岡・静内と約2倍の吸水率である和賀川・大野の6種類の細・粗骨材を用いた。

混和剤は、実験当時の混和剤の中で使用頻度の最も多かったAE剤とし、ヴィンソルを使用した。

2.3.2 試験体および圧縮強度試験

試験体はすべて10φ×20cmのシリンダーとし、材齢2日の脱型後、試験材齢まで所定の養生を行った。

圧縮強度試験はJIS A 1108に準じて行った。気中養生を行った試験体は、強度試験に先だち約48時間水中に放置し、すべてのコンクリートの圧縮強度を湿試験強度とした。

2.3.3 空隙構造の測定と指標化

(1) 試料の採取

圧縮強度試験終了後のコンクリート試験体の上下約1/3の部分および表層部分を取り除いた後、ハンマーで破碎して2.5~5mm粒度の試料を採取した。採取した試料は、アセトンで洗浄したのちD-dry処理を行い、その後、試料分取器により分割し、それぞれの実験用試料とした。

(2) 空隙構造の測定

空隙構造の測定はマイクロメリテックス社製の水銀圧入ポロシメーター903型(最大圧力2,100kg/cm²)により加圧過程、減圧過程のそれぞれについて行い、毛細管空隙を円筒形モデルと仮定し、圧力と空隙半径の関係を次式により求めた。

$$r = \frac{-2 \cdot \gamma \cdot \cos \theta}{P}$$

ここに、 r : 空隙半径

γ : 水銀の表面張力 (474 dyn/cm)

θ : 水銀と試料の接触角 (130°)

P : 圧力

1回の測定に用いる試料の量を約11gとし、各試料について2回ずつ測定を行った。

(3) 強熱減量・不溶残分重量の測定

D-dry処理後の試料を105℃で2日間乾燥させたのち、電気炉で3時間加熱して強熱減量を求めた。加熱温度は(社)セメント協会コンクリート専門委員会報告F-18(硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告)の推奨値である600℃とした。

強熱減量後の試料を約1,000mlの10%塩酸溶液に入れ、スターラーで2時間攪拌し、試料のセメントペースト部分を溶解させた。不溶残分を含む溶解液をろ紙(5種B)でろ過し、残留物をろ紙とともにろ紙に入れ、950℃の電気炉中で30分間乾燥させた後、不溶残分重量を測定した。セメントペーストを溶解させる塩酸溶液の濃

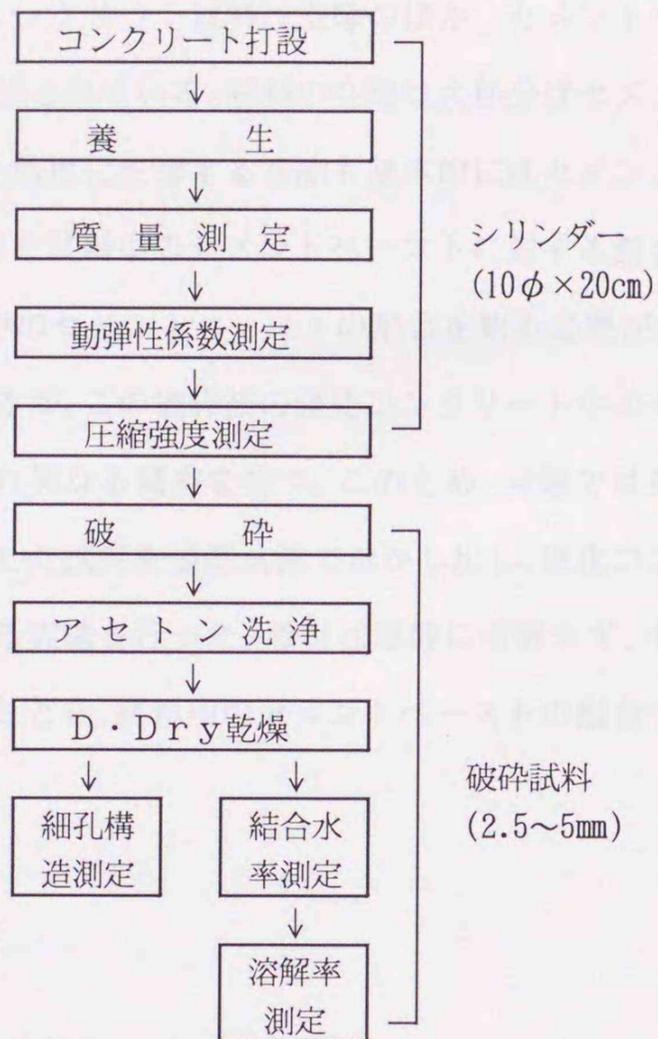


図2.1 実験の手順

度について、(社)セメント協会コンクリート専門委員会報告F-18では1%を推奨しているが、本研究では1回の測定に用いる試料の量が多く、1%濃度では多量の溶液と長い時間を要するため、10%濃度を採用した。これは、ASTM C 85-66 (硬化ポルトランドセメントコンクリート中のセメント量試験方法)に規定されている希薄な濃度に対応している。

なお、シリーズIの初期の実験では、強熱減量と不溶残分重量の測定を別試料で行っている。

以上に述べた実験手順を図2.1に示す。

(4) 測定結果の指標化

圧縮強度との相関性を検討するため、各々の測定で得られた結果を以下の指標にまとめた。

a. 溶解率 (m) コンクリート試料は空隙のほか、セメントペースト実質部および骨材の固体部分から構成されている。試料の空隙は大部分はセメントペースト中に含まれており、コンクリート強度に影響する空隙も基本的にはセメントペースト中の空隙である。このため、空隙率を試料中のセメントペーストに対する割合で表わす必要があり、この場合には、試料中のセメントペーストの割合を知る必要がある。試料作成のためコンクリートを破砕するが、この破砕後の硬化コンクリート中のセメントペースト部分の割合はその強度により異なる傾向を持つ。このため、実験では空隙構造測定用試料と全く同一の手順で採取した試料を塩酸溶液で溶かし出し、硬化コンクリート中のセメントペーストの量を求める実験を行った。骨材は塩酸に溶解せず、セメントペーストの全量が溶解すると仮定したとき、試料中のセメントペーストの割合である溶解率は次式となる。

$$m = \frac{W_0 - W_1}{W_0}$$

ここに、 W_0 : 105℃乾燥後の試料重量

W_1 : 不溶残分重量

b. 総細孔量 (TPV) コンクリートの空隙率に関する一般的な指標で、骨材を含む試料全体に対する水銀圧入試験の加圧過程で測定される全細孔量の割合として求める。本実験の場合、半径 $31.6 \text{ \AA} \sim 56 \mu\text{m}$ 間の細孔量 (cc/g) となる。

c. 有効細孔量 (ETPV) 圧縮強度が水セメント比すなわちセメントに対する水量 (空隙量) の割合に関連することから、筆者らが提案するコンクリートの空隙率に関する指標で、水銀圧入試験の加圧過程で測定される空隙量の全量を試料中のセメントペースト部分に対する割合として次式により求める。

$$\text{ETPV} = \frac{\text{TPV}}{m} \text{ (cc/g)}$$

標で、Jambor²¹⁾ の平均空隙半径に対応する。図2.2に示すように、加圧過程で測定される半径 $31.6 \text{ \AA} \sim 56 \mu\text{m}$ 間の空隙量を大きい径の空隙からその量を累加し、全空隙量の $1/2$ に対応する空隙半径として求める。空隙径分布の細かさを表す (\AA)。

e. もどり比 (R_e) コンクリートの圧縮強度を空隙形状の点から検討するための指標で、空隙の連続性が良い場合、圧入された水銀のもどりが多いものと想定して定めた指標。

図2.2に示すように、水銀圧入試験の加圧過程と減圧過程で測定された空隙量の比の値として次式による求める。

$$R_e = \frac{P_d}{P_a}$$

ここに、 P_a : 加圧過程で測定された細孔量 (総細孔量)

P_d : 減圧過程で測定された細孔量

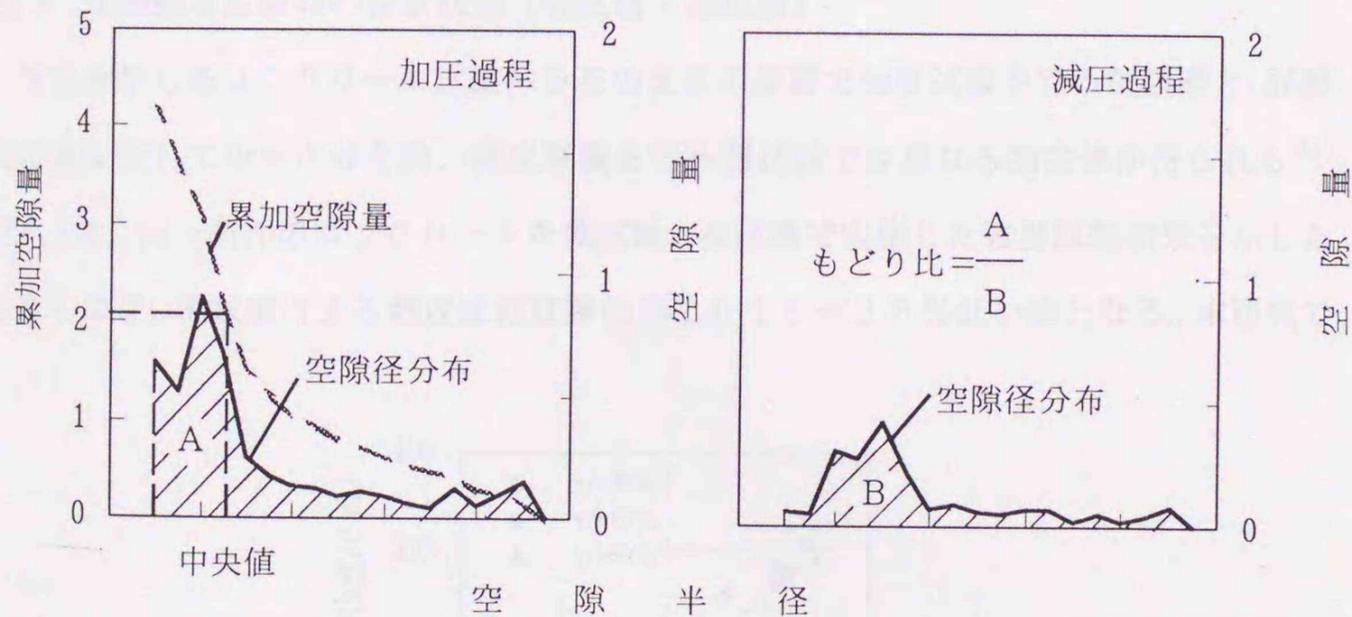


図2.2 中央値およびもどり比の求め方

f. 結合水率 (W_c) コンクリートの圧縮強度がセメントの水和反応の程度に関係していることも考えられ、試料の強熱減量をすべてセメントの結合水と仮定し、セメントペースト重量に対する結合水の割合として次式により求める。

$$W_c = \frac{W_0 - W_2}{W_0 \times m} = \frac{W_0 - W_2}{W_0 - W_1}$$

ここに、 W_0 : 105°C乾燥後の試料重量

W_1 : 不溶残分重量

W_2 : 600°C乾燥後の試料重量

g. 材齢 (Age ; 週) 結合水率のあばれが大きいことから、これに代わる指標として材齢を加えた。

結合水率および材齢は、空隙構造に関する指標ではないが、ここで取り上げた空隙構造の指標でコンクリート強度特性が表しきれないことも考慮して補助的な指標として用いたものである。

2.3.4 実験に伴う問題点の検討

(1) 圧縮強度試験時の含水状態 (乾試験・湿試験)

気中養生したコンクリート試験体をそのままの状態で行う乾試験と、試験前に水に浸して吸水させた後、強度試験を行う湿試験では異なる強度値が得られる⁴³⁾。

図2.3は、同一条件のコンクリートを乾試験、湿試験で実施した強度試験結果を示したもので、湿試験による強度は乾試験強度より15~20%低い値となる。本研究で

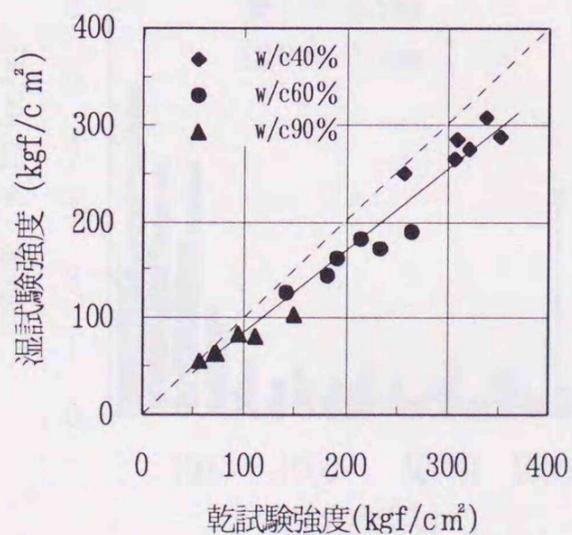


図2.3 乾試験強度と湿試験強度の関係

は、強度と細孔構造の相関性を得ることが重要であるが、細孔構造の諸指標はいずれも材料固有の特性値で、試験法の違いがもたらす強度の変化に追随しない。このため、コンクリートの圧縮強度試験はすべて湿試験（約48時間水中放置）とし、それをコンクリート固有の強度とした。

(2) 空隙構造測定用試料の粒径

図2.4は同じコンクリートから0.6~1.2、1.2~2.5、2.5~5mmの粒径の試料を採取し、水銀圧入法で空隙構造を測定した結果である。0.6~1.2mmと粒径が小さい場合は、個々の試料間の隙間が空隙として多量に測定され、空隙構造の測定値は見かけ上、試料の粒径の影響を受ける。また、試料の大きさは試料中のセメントペーストの割合も異ならせ、2.5~5mm試料中のセメントペーストの量は0.6~1.2mm試料の約65%となる。これらの結果から、実験では試料の粒径を統一する必要がある、測定のための試料分割も厳密に行う必要がある。水銀圧入法では、試料表面に現れている細孔が水銀の入り口となり、試料の大きさは細孔ができるだけ表面に多く現れる大きさ、すなわち小さな粒径の方がよいこととなるが、上記の結果を考慮して水銀圧入試験を行うコンクリート試料はすべて2.5~5mmの粒径に統一し、空隙構造測定用試料と強熱減量および溶解率測定用試料は試料分取器を用いて分割した。なお、アセトン洗浄、D-dry処理の段階で、そのコンクリートの水和は停止したものと考えた。

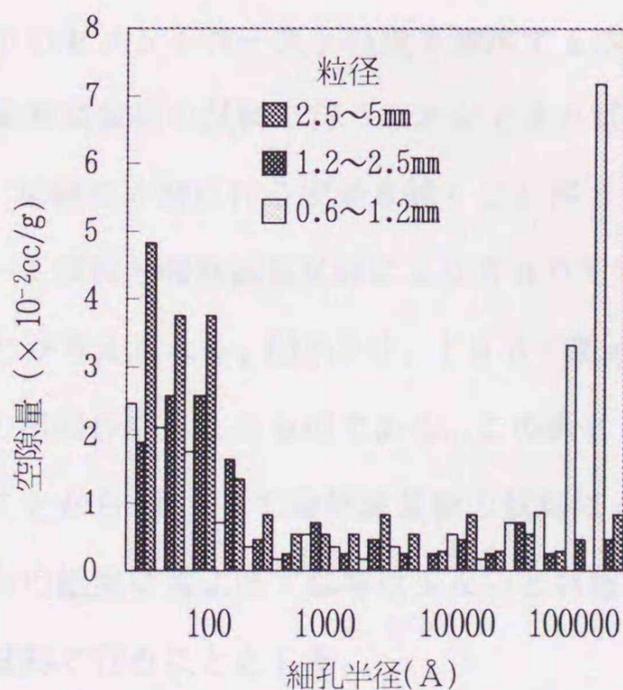


図2.4 粒径の異なる試料による空隙径分布の測定値

(3) 空隙指標算出の仮定

重回帰分析法では、説明変数 x' が目的の物理量 x を厳密に表現しない場合でも、 $\gamma x' = x$ または $\gamma x' + \gamma_0 = x$ などとなる条件では、

$$Y = b_0 + b_1 \gamma x'$$

または、

$$Y = (b_0 + \gamma_0) + b_1 \gamma x'$$

ここで、 Y : 目的変数

x' , x : 説明変数

となり、 $Y = b_0 + b_1 x$ の近似式としてと求めることができる。

本研究で用いた骨材はごくわずかに塩酸に溶解するが、上記の考えにより結果 (Y) への影響が少ない。このため、骨材は塩酸に溶解しないと仮定することが可能となる。しかし、骨材の塩酸溶解量が多い場合は骨材溶解量の補正が必要である。

セメント中にもごくわずかではあるが、塩酸に溶解しない不溶残分がある (0.1 ~ 0.2%)。これについても骨材と同様の判断から、セメントペーストは塩酸に全て溶解すると仮定することとした。

空隙指標の計算においては、試料中の骨材の空隙は全てセメントペースト中に存在するものとして算出される。この検討は 2.4.3 で行う。

(4) 溶解試験の簡略化

硬化コンクリート中のセメントペーストの量を測定する溶解試験を、コンクリートの結合水率を測定する強熱減量後の試料で行うことができれば採取試料の少量化、手順の簡略化が図れ、また、試料の分割に伴う誤差を除くことができる。しかし、105°Cで乾燥されたコンクリート試料と強熱減量試験により600°Cで加熱された試料とでは溶解量に差を生じることが考えられる。図2.5は、105°C乾燥後と強熱減量後の試料で溶解率を測定し、その相関性を示したものである。この両者の値が近似し、また、密接な関係が認められることから、600°C強熱減量後の試料による溶解試験結果を骨材量として指標化した場合の結果におよぼす影響は少ないと判断し、本実験では溶解試験をすべて強熱減量後の試料で行うこととした。

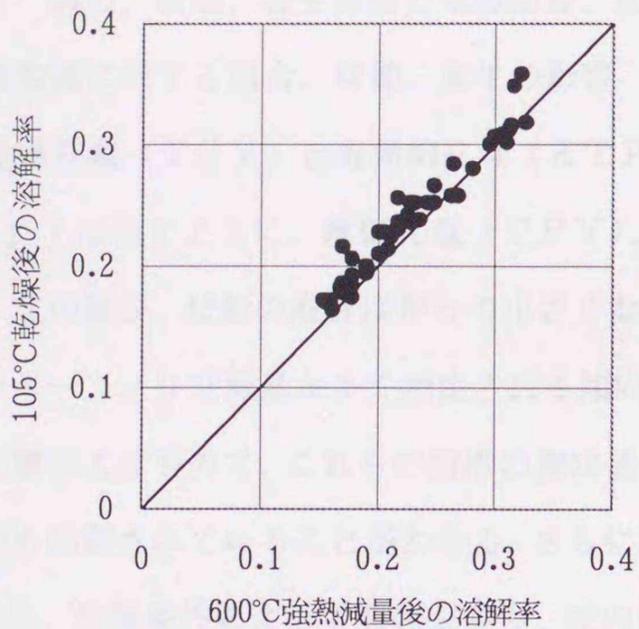


図2.5 105°C乾燥後と600°C強熱減量後の溶解率測定値

2.3.5 実験結果の検討の方法

実験結果は統計解析の一種である重回帰分析にかけ、重相関係数 R および寄与率 R^2 を用いて重回帰式の検討を行った。重相関係数 R は、重回帰式に取り入れた説明変数(空隙指標)によって目的変数(圧縮強度)をどの程度説明できるかを示す値であり、式の精度、選択した説明変数が適当であったかどうか、などを検討するための目安となる。

また、重相関係数 R の2乗(R^2)は寄与率と呼ばれ、重回帰式に取り込まれた説明変数が推定値 Y (圧縮強度)の何パーセントを説明しているかを示す指標となる。

2.4 実験結果および考察

2.4.1 調合、材齢、養生要因と空隙指標、圧縮強度の関係

(1) 空隙指標に対する調合、材齢、養生の影響

a. 総細孔量 (TPV) と有効細孔量 (ETPV)

図2.6、2.7に示すように、総細孔量 (TPV)、有効細孔量 (ETPV) はともに、水セメント比の減少、材齢の進行に伴って小さくなる。また、AEコンクリートは non AEコンクリートより空隙量が多く測定される傾向にある。これは、AE剤による連行空気泡の影響によるもので、これらの指標の測定値には半径 $56 \mu\text{m}$ 以上の連行空気泡を含む空隙も加算されていることがわかる。さらに、スランプや骨材種別による差も見られる。また、放置条件によっても差があり、屋内放置の場合、総細孔量、有効細孔量ともに水中養生の場合と比較して大きくなる。

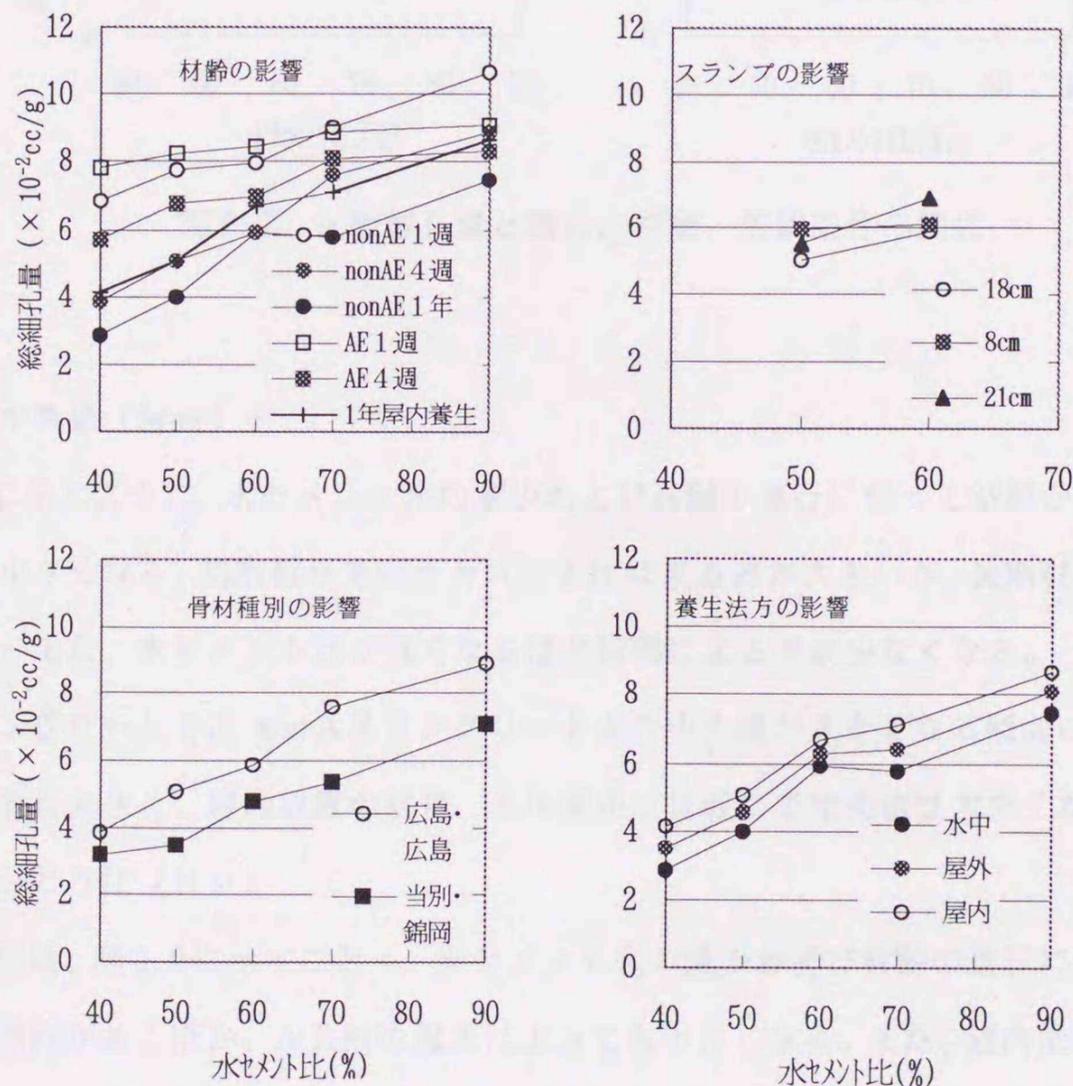


図2.6 総細孔量と調合、材齢、放置条件の関係

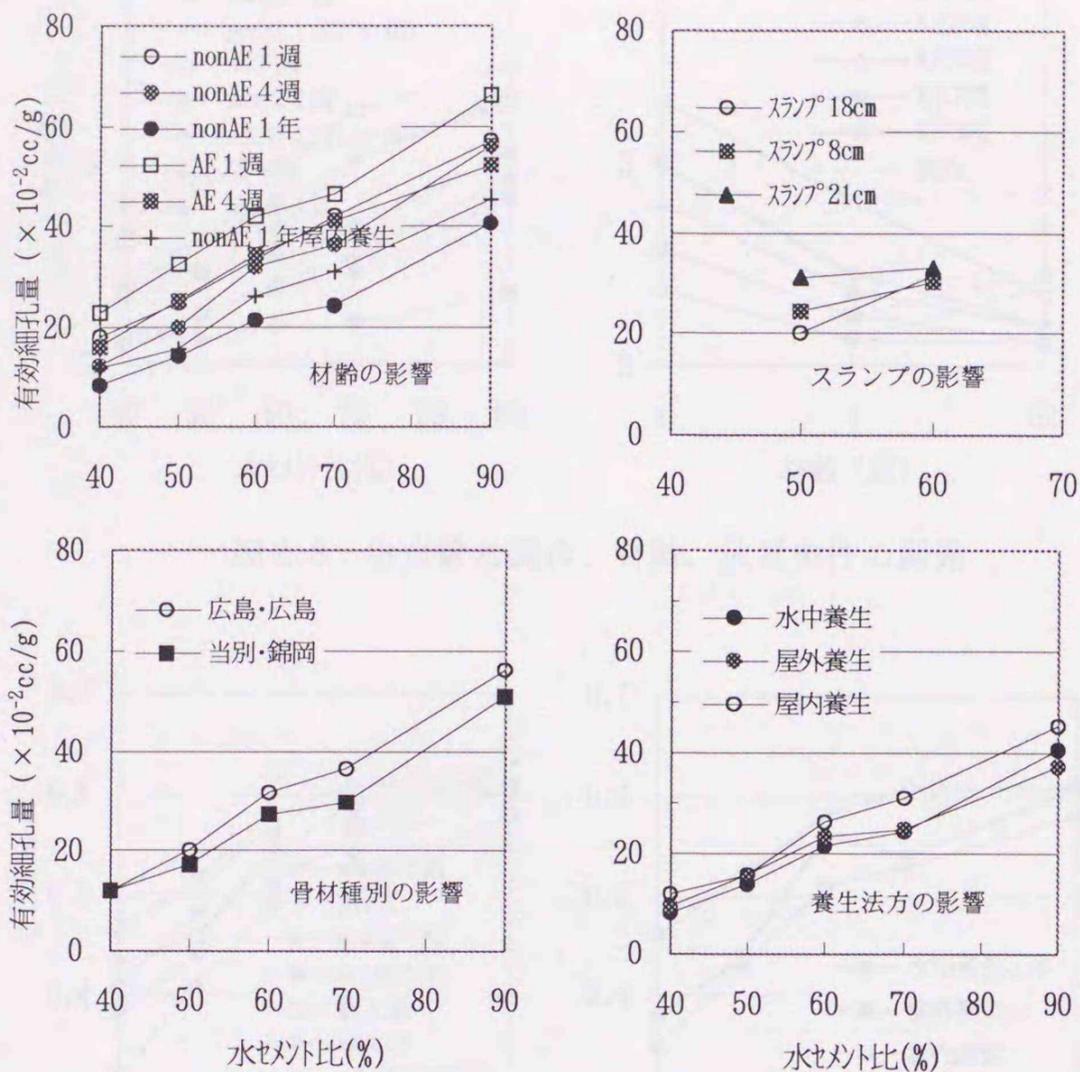


図2.7 有効細孔量と調合、材齢、放置条件の関係

b. 中央値 (Me)

図2.8に示すように、水セメント比の減少および材齢の進行に伴って空隙が緻密化し、中央値は小さくなる。初期材令では水セメント比による差が大きいが、長期材齢では小さくなる。また、水セメント比が低くなるほど材齢による差が少なくなる。

AEコンクリートでは nonAEコンクリートより中央値が大きくなる傾向にある。養生による差も大きく、屋内放置の場合、水中養生と比較して中央値は大きくなる。

c. もどり比 (Re)

もどり比は、図2.9に示すごとく、水セメント比の減少および材齢の進行に伴って小さくなる傾向があるほか、AE剤の混入によっても小さくなる。また、屋内放置したコンクリートでは、水中養生と比較してもどり比は大きくなる傾向にある。

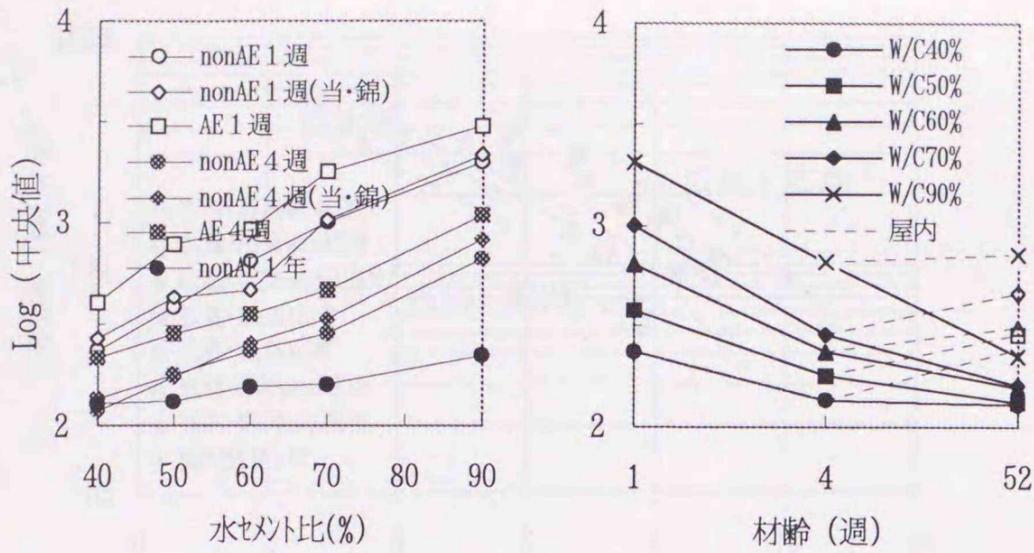


図 2.8 中央値と調合、材齢、放置条件の関係

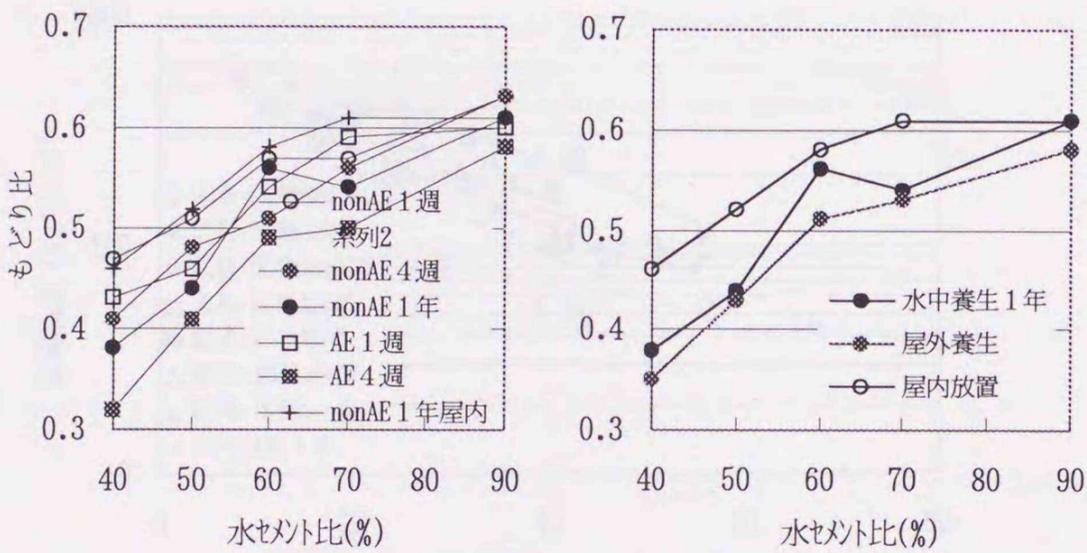


図 2.9 もどり比と調合、材齢、放置条件の関係

(2) 圧縮強度と総細孔量・有効細孔量との相関性

図 2.10 は、シリーズ I の実験結果をもとに、試料全体の空隙率を表す総細孔量と圧縮強度の関係を示したものである。この相関性は、骨材やスランプによる差があり、必ずしも優れた相関性を持つとは言えなかった。一方、空隙率の指標を有効細孔量とした場合の相関関係を検討した結果が図 2.11 である。有効細孔量は 2. 3. 4 (3) のような仮定のもとに、セメントペースト部分に対する空隙率として算出されている。この結果、圧縮強度と有効細孔量の関係は、材齢、放置条件によって層別した場合に、調合にかかわらずこれらの条件ごとに密接な関係を示した。

表 2.9 は、シリーズ II、III の実験で得られた 172 データ (表 2.8 参照) を用いて強度を含めた各指標間の単相関係数を示したもので、データの内訳は、次のとおりである。

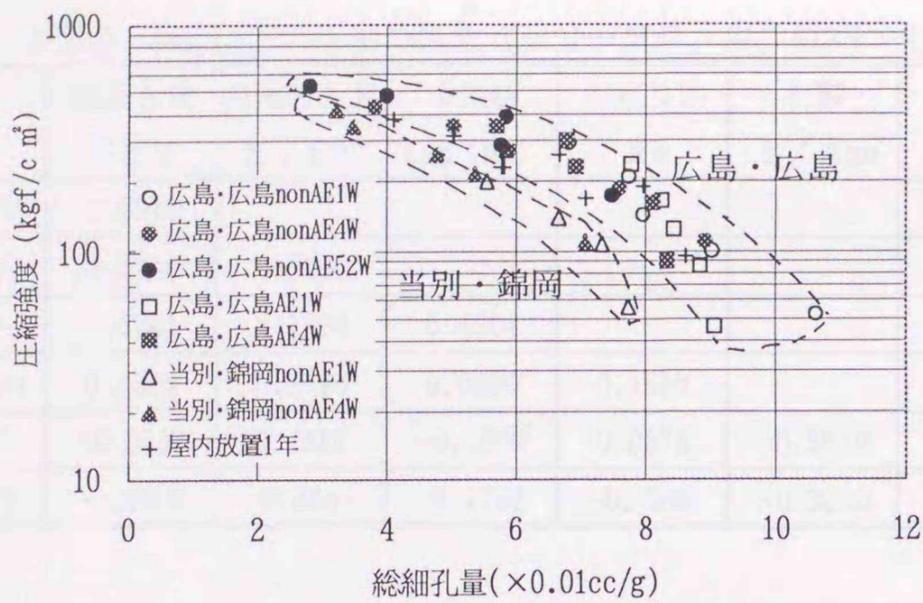


図2.10 総細孔量と圧縮強度の関係

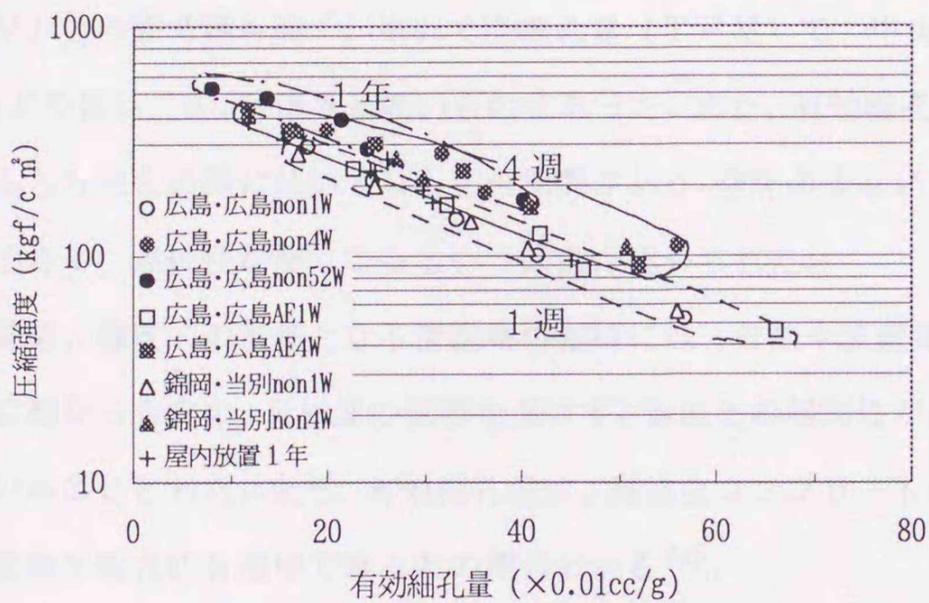


図2.11 有効細孔量と圧縮強度の関係

表2.8 各指標間の単相関係数を求めるために用いた172データの内訳

項目	種類	シリーズ		小計	合計
		II	III		
水セメント比	40%	14	26	40	172
	50%	0	26	26	
	60%	14	26	40	
	70%	14	26	40	
	90%	0	26	26	
骨材	砂利	42	130	172	172
	碎石	0	0	0	
養生方法	水中	30	90	120	172
	気中	12	40	52	

表 2.9 各指標間の単相関係数 (シリーズII, III, 172データ)

	総細孔量 TPV	有効細孔量 ETPV	中央値 Log (Me)	もどり比 Re	材齢 1 / Age	水和度 Wc
ETPV	0.8917					
Log (Me)	0.5011	0.5169				
Re	0.6281	0.7034	0.4964			
1 / Age	0.4589	0.2780	0.0966	0.1656		
Wc	-0.0932	0.1881	-0.1900	0.0878	-0.5639	
Log (σ)	-0.8358	-0.8841	-0.7752	-0.7890	-0.3264	0.0741

圧縮強度を対数値とした $\text{Log}(\sigma)$ の場合、空隙指標の諸指標との相関性は有効細孔量 (ETPV) との間で最も高く、次いで総細孔量 (TPV) で、中央値 (対数値 $\text{Log}(\text{Me})$) ともどり比は、0.8 以下と低いものであった。また、有効細孔量と中央値、有効細孔量ともどり比の間にはいずれも正の相関があり、空隙の少ないコンクリートは、空隙の径が小さく、連続性が悪くなるという傾向が認められた。

これらの結果、強度式の基礎となる空隙率の指標には、材齢や放置条件 (養生条件) ごとの層別に異なるものの、骨材量の影響を受けず、強度との相関性が最も大きい有効細孔量を用いることとした。また、有効細孔量は、高強度コンクリートの圧縮強度と空隙率の関係を表す場合にも適用できるとの報告もある⁴⁴⁾。

2.4.2 空隙指標によるコンクリート強度式の誘導

(1) 圧縮強度と空隙指標の関係式の誘導

図 2.10 の総細孔量と圧縮強度の関係を多孔質材料の強度と空隙率に関する Ryshkewitch の式 ((1.3) 式) で表すと以下となる。

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-bP) \quad (2.4)$$

ここに、 σ : 圧縮強度

σ_0 : 空隙率が 0 のときの圧縮強度

P : コンクリート全体の空隙率 (総細孔量)

b : 実験定数

しかしながら、2.4.1 (2) で検討したようにコンクリートの強度は試料全体の空隙率 (総細孔量) ではなく、セメントペースト部分の空隙率つまり有効細孔量に、よ

り比例関係にある。ここで、(2.4) 式の P を P_p (セメントペースト部分の空隙率：有効細孔量) とし、図 2.11 の関係を表すと (2.5) 式となる。

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-b P_p) \quad (2.5)$$

ここに、 P_p : 硬化コンクリート中のセメントペースト部分に対する空隙率 (有効細孔量)

図 2.11 はコンクリート強度と有効細孔量の関係が材齢、養生条件によって異なることを示しており、空隙率と強度との関係には、他の要因が影響することを示している。これを補正項 ($f(x)$) とすると (2.6) 式となる。

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-b P_p + f(x)) \quad (2.6)$$

ここに、 $f(x)$: 補正項

圧縮強度と空隙指標の関係式は (2.6) 式をもとに統計的手法 (重回帰分析) で求めることとする。ここで用いる回帰式は、

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_p x_p \quad (2.7)$$

となり、本研究では、目的変数 Y が圧縮強度 (対数変換値)、説明変数 x_1, x_2, \dots, x_p が空隙構造の諸指標となる。 x が厳密に目的の物理量を表現しない場合においても、 x_1' なる変数 (例えば有効細孔量) が目的の物理量 x_1 (セメントペースト中の空隙率) に対して $x_1' = \gamma x_1$, $x_1'' = \gamma x_1 + \gamma_0$ などとなる条件では、(2.7) 式は、

$$Y = b_0 + (b_1 \gamma) x_1' + b_2 x_2 + \dots + b_p x_p$$

$$Y = (b_0 + \gamma_0 + (b_1 \gamma) x_1'') + b_2 x_2 + \dots + b_p x_p \quad (2.8)$$

となり、特性値 x_1' , x_1'' の近似特性値として支障なく用いることができる。したがって Y と x_1' , x_1'' の関係の計算は (2.7) 式の場合とまったく同様に求めることができる。2.3.4 の (3) における溶解率の仮定、手順の簡略化の仮定の判断は主としてこの考えによっている。しかし、これらの仮定は、厳密には換算可能な関係になく、実際との差が大きな場合、絶対量も誤差の原因となる。

重回帰分析に用いた実験データはシリーズ II、III で得られた 172 データで、説明変数には総細孔量 (TPV)、有効細孔量 (ETPV) のほか、中央値 (Me)、もどり比 (Re) と結合水率 (Wc) または材齢 (Age) を用いた。解析にあたって変数の変換を行っている。この場合、それぞれの説明変数の次数、対数変換、逆数変換の有無は予備的な重回帰分析において重相関係数が最大となるように定めた。

総細孔量のみを説明変数とした重回帰分析の結果は (2.9) 式となる。

$$\log(\sigma) = -0.132 \text{TPV} + 3.12 \quad (2.9)$$

(重相関係数 $R = 0.836$ 、寄与率 $R^2 = 0.699$)

一方、有効細孔量のみを説明変数とした重回帰分析の結果 ((2.6) 式で $f(x) = 0$) は (2.10) 式となる。

$$\log(\sigma) = -0.0175 \text{ETPV} + 2.84 \quad (2.10)$$

($R = 0.884$ 、 $R^2 = 0.782$)

(2.6) 式の補正項として、 Me 、 Re 、 Age (または Wc) を選び、これらの値およびそれぞれの対数変換値、逆数変換値を説明変数として加えて解析を行い、これらの中で重相関係数を最大とする変数を求めた結果、中央値 (対数変換値 $\log(Me)$) が選択され、その関係式は (2.11) 式となる。中央値の追加は重回帰式の精度を著しく向上させ、寄与率を 0.922 にまで高める結果となった。図2.12に有効細孔量に中央値 ($\log(Me)$) を追加した場合と、他の指標 (Re や Wc (あるいは $1/Age$)) を加えた場合の寄与率の増加傾向を示す。中央値の追加が寄与率の著しい増加に役立っていることが示されている。

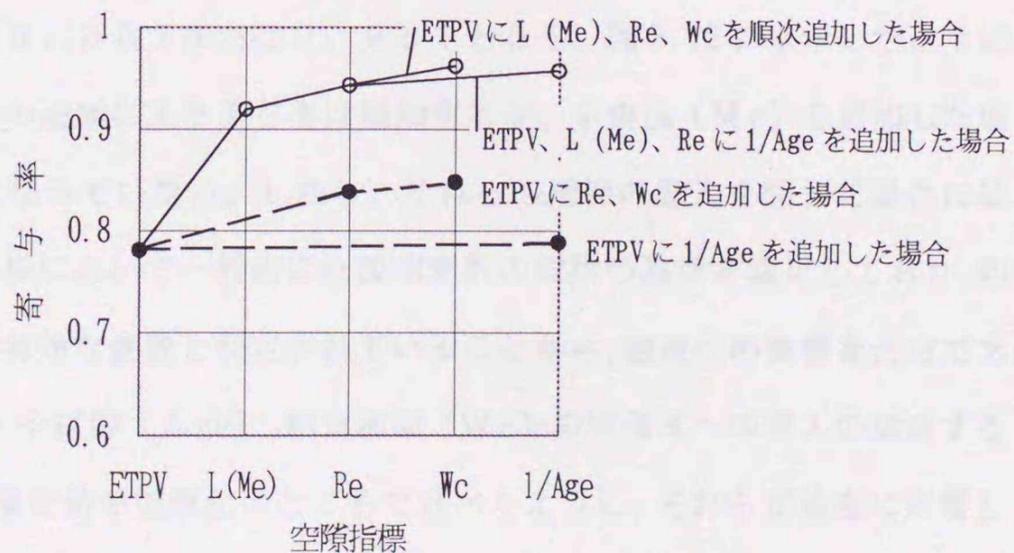


図2.12 変数の追加に伴う寄与率の増大 (シリーズ II, III)

$$\log(\sigma) = -0.0130 \text{ETPV} - 0.2611 \log(\text{Me}) + 3.38 \quad (2.11)$$

$$(R = 0.960, R^2 = 0.922)$$

(2.11) 式は変形すると、

$$\sigma = 2344 \cdot 10^{-0.0130 \text{ETPV} - 0.2611 \log(\text{Me})} \quad (2.12)$$

さらに、

$$\sigma = 2344 \text{Me}^{-0.2611} 10^{-0.0130 \text{ETPV}} \quad (2.13)$$

これを一般化し、通常用いられている表現で表すと (2.14) 式となる。

$$\sigma = k D^{-a} \exp(-b P_p) \quad (2.14)$$

ここに、D : 空隙径 (中央値 Me)

P_p : セメントペースト部分の空隙率 (有効細孔量 : ETPV)

k, a, b : 定数

ここで、(2.14) 式に Re と Age または Re と Wc を追加して 4 変数による重回帰式を求めると、寄与率は 0.957 または 0.961 となる。図 2.12 にも示したように、Re と Age または Wc の追加により寄与率は増加するが、中央値 (Me) を追加した場合ほど大きなものとはなっていない。しかし、これらの指標の導入を図った場合には、重回帰分析法による解析において一般的にな説明変数の取捨の基準を満足しており、回帰式の寄与率の増大に有効な変数と判定されていることから、強度への影響を否定できない。もどり比 (Re) や材齢 (Age)、結合水率 (Wc) の回帰式への導入の意味するところは、空隙構造の測定値の指標化のところでも述べたように、それらが強度に影響しているとも考えられるほか、空隙率や空隙径の指標がその意味するところを十分に表し切れないための補完として、回帰式に取り入れられたと考えることもできる。例えば、

図2.13は水セメント比60%で水中養生を行ったコンクリートの材齢1週、4週、2年の空隙径分布を示したものであるが、材齢の進行によって微細化した空隙の多くの部分が半径31.6 Åをはずれており、特に長期材齢や水セメント比の低いコンクリートでは空隙が減少し、微細化しているにもかかわらず、若干測定される粗大径のために中央値が増大する場合がある。このことは、測定限界を31.6 Åとする場合には、中央値によるコンクリートの空隙構造の十分な特性化ができないことを示している。

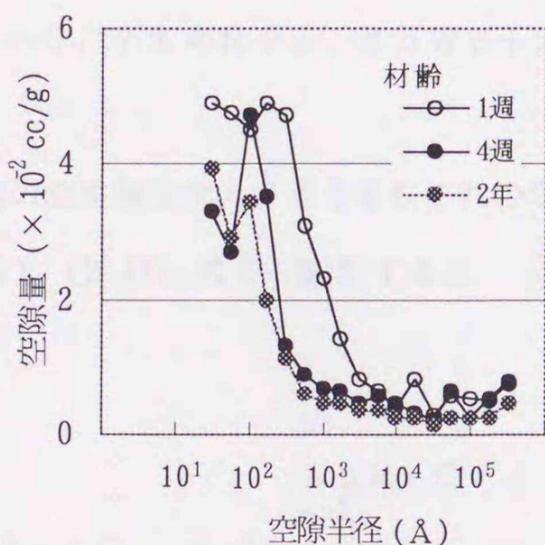


図2.13 材齢の進行に伴う空隙の微細化

(2) 空隙指標の圧縮強度への寄与

コンクリートの圧縮強度には有効細孔量 (ETPV) および中央値 (Me) が大きく係わっていることが明らかになった。ここでは、その意味するところが必ずしも明確ではないが、強度への影響が少なからず認められるもどり比や結合水率または材齢を含めた場合も含めてこれらの指標がそれぞれどの程度強度に関係しているかを検討する。検討は、有効細孔量と中央値の2変数のみによる場合と、これにもどり比 (Re) と材齢 (Age) を加えた4変数による場合に分けて行った。

有効細孔量、中央値の2変数による回帰式は (2.15) 式に示したものであり、また、もどり比、材齢または結合水率を加えた4変数による回帰式は (2.16)、(2.17) 式となる。

$$\log(\sigma) = -0.0130 \text{ETPV} - 0.2611 \log(\text{Me}) + 3.37 \quad (2.15)$$

$$\log(\sigma) = -0.00952 \text{ETPV} - 0.240 \log(\text{Me}) - 0.723 \text{Re} - 0.0794 / \text{Age} + 3.57 \quad (2.16)$$

$$\log(\sigma) = -0.0113 \text{ETPV} - 0.204 \log(\text{Me}) - 0.714 \text{R} + 1.85 \text{Wc} + 3.20 \quad (2.17)$$

これらの式に空隙構造の測定値を代入するとそれぞれの場合の圧縮強度が求められる。

まず、(2.15)、(2.16)、(2.17) 式を一般化すると、

$$\log(\sigma) = \sum_{n=1}^P b_n x_n + C, \quad \sigma = 10^{\sum_{n=1}^P b_n x_n + C} \quad (2.18)$$

ここに、 x : 説明変数、 b : 偏回帰係数

個々の説明変数の役割を検討するため、圧縮強度を2種類のコンクリートの強度比とすると、

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = 10^{\sum_{n=1}^P (b_n x_{n1} - b_n x_{n2})} = 10^{b_1 (X11-X12)} \cdot 10^{b_2 (X21-X22)} \cdot \dots \cdot 10^{b_P (XP1-XP2)} \quad (2.19)$$

この(2.19)式の個々の10のべき乗項は、それぞれの説明変数の差によってもたらされ、 σ_1 / σ_2 の比率となる。

表2.10は、材齢および養生が一定で水セメント比が異なる場合、水セメント比およ

び養生が一定で材齢が異なる場合または材齢が一定で養生方法が異なる場合について (2.15) 式および (2.16) 式で得られた圧縮強度を、それぞれの場合の最小の圧縮強度値 (水セメント比 90%、材齢 1 週または気中養生) を基準とする比率で求め、個々の説明変数の効果を検討したものである。この場合、個々の指標 (説明変数) による強度増加率の積が水セメント比 90%、材齢 1 週または気中養生に対する比率となる。

この結果、水セメント比および材齢による強度増加に最も寄与した説明した指標は ETPV (有効細孔量) であり、次に中央値ともどり比が同程度であった。養生方法による強度の違いを最も説明した指標は Me (中央値) であった。すなわち、水セメント比や材齢の変化に伴う強度変動は有効細孔量 (空隙率) の影響が大きく、養生方法の相違による強度変動は中央値 (空隙径分布) の影響が大きいこと示唆される。また、説明変数を 2 変数から 4 変数に増やした場合、水セメント比や材齢が異なる場合の中央値の強度増加率はほとんど変化しておらず、一方、有効細孔量では、4 変数の (2.16) 式とした場合、2 変数の (2.15) 式と比較して強度増加率が小さくなっている。すなわち、有効細孔量が説明していた部分はもどり比や材齢に分散される結果となっている。

表 2.10 強度増加率としての各指標の圧縮強度への寄与
(1)水セメント比が異なる場合, 2 変数(シリーズ III AE, 材齢4週, 水中養生)

水セメント比 (%)	推定圧縮強度 (kgf/cm ²)	水セメント比90% に対する比率	各指標による強度増加率	
			ETPV	Log(Me)
40	384	3.80	2.82	1.35
50	319	3.16	2.40	1.32
60	236	2.34	1.87	1.26
70	189	1.87	1.54	1.22
90	101	1.00		

(2)水セメント比が異なる場合, 4 変数(シリーズ III AE, 材齢4週, 水中養生)

水セメント比 (%)	推定圧縮強度 (kgf/cm ²)	水セメント比90% に対する比率	各指標による強度増加率			
			ETPV	Log (Me)	Re	1/Age
40	423	3.95	2.19	1.32	1.36	1.00
50	356	3.33	1.94	1.30	1.32	1.00
60	260	2.43	1.60	1.24	1.21	1.00
70	203	1.90	1.38	1.21	1.14	1.00
90	107	1.00				

(3)材齢が異なる場合, 2変数(シリーズ III, AE, W/C60%, 水中養生)

材齢	推定圧縮強度 (kgf/cm ²)	材齢1週に 対する比率	各指標による強度増加率	
			E T P V	Log(Me)
2年	310	1.78	<u>1.49</u>	1.20
3カ月	289	1.66	<u>1.48</u>	1.12
4週	236	1.36	<u>1.25</u>	1.09
1週	174	1.00		

(4)材齢が異なる場合, 4変数(シリーズ III, AE, W/C60%, 水中養生)

材齢	推定圧縮強度 (kgf/cm ²)	材齢1週に 対する比率	各指標による強度増加率			
			E T P V	Log (Me)	Re	1 / Age
2年	317	2.06	<u>1.35</u>	1.19	1.06	1.21
3カ月	316	2.05	<u>1.35</u>	1.11	1.14	1.20
4週	260	1.69	<u>1.18</u>	1.08	1.13	1.16
1週	154	1.00				

(5)養生方法が異なる場合, 2変数(シリーズ III, nonAE, W/C60%)

材齢	養生方法	推定圧縮強度 (kgf/cm ²)	気中養生に 対する比率	各指標による強度増加率	
				E T P V	Log(Me)
4週	水中	312	1.65	1.08	<u>1.52</u>
	気中	189	1.00		
2年	水中	388	2.55	1.44	<u>1.76</u>
	気中	152	1.00		

(6)養生方法が異なる場合, 4変数(シリーズ III, nonAE, W/C60%)

材齢	養生方法	推定圧縮強度 (kgf/cm ²)	気中養生に 対する比率	各々指標による強度増加率			
				E T P V	Log (Me)	Re	1 / Age
4週	水中	294	1.64	1.06	<u>1.49</u>	1.04	1.00
	気中	179	1.00				
2年	水中	352	2.46	1.32	<u>1.71</u>	1.09	1.00
	気中	143	1.00				

2.4.3 空隙率と圧縮強度の相関性に影響する要因の検討

(1) 骨材の影響

a. 骨材吸水率

骨材吸水率は、コンクリート強度に対する影響は少ないが、実験手法上から骨材中の空隙がセメントペースト部分の空隙率として測定されることになり、骨材の吸水率を骨材空隙の指標としてその影響を検討する。

解析にはシリーズIで行った広島砂利・広島砂および当別砂利・錦岡砂による各10データ(水セメント比5種×材齢2種)を用いた。この前者の骨材吸水率はそれぞれ2.34, 2.79%、後者は2.08, 0.59%である

骨材吸水率の影響の解析に用いた骨材種別20データの内訳

シリーズI	広島・広島	10データ
	当別・錦岡	10データ

(2.18) 式の一般式に骨材吸水率の影響を与える項Sを加えると次式となる。

$$\log(\sigma) = \sum_{n=1}^p b_n x_n + C + S$$

ゆえに

$$\begin{aligned}\sigma &= 10^{b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_n x_n + C + S} \\ &= 10^{(b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_n x_n + C)} \times 10^S\end{aligned}$$

となり、さらに

$$\frac{\sigma}{10^S} = 10^{b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_n x_n + C} \quad (2.20)$$

したがって、骨材吸水率の影響は(2.20)式において、 σ に対する補正項(10^S)として求まる。検討には、有効細孔量および中央値による2変数のほか、算定の精度を向上させる目的から材齢または結合水率を含む4変数の重回帰式を用いた。

吸水率の違いを骨材種別に対応させて解析を行った結果は、(2.21) 式に示すものである。

$$\begin{aligned} \log(\sigma) = & -0.0097 ETPV - 0.388 \log(Me) - 0.327 Re \\ & - 0.0845 / Age + 0.0152 At + 3.45 \quad (2.21) \\ & (\text{重相関係数 } 0.995) \end{aligned}$$

ここで、At: 骨材種別 (広島-広島の場合 At=1, 当別-錦岡の場合 At=0)

この結果、1.035の補正項が得られ、空隙率の多い広島・広島で、同一空隙構造を持つ当別・錦岡のコンクリートよりも、強度が約4%大きいことが示された。これは、主として広島骨材に存在する空隙が、ETPVの算出にあたりセメントペースト部分の空隙に加算されるのに対し、この空隙量に対応する強度低下がないことによると思われるが、(2.16) 式により広島・広島の10データおよび当別-錦岡の10データの推定強度を計算し、実測強度との比から骨材種別の影響を求めた場合は約1%となり、上述の方法と若干異なる値となった。このため、骨材吸水率の影響についての定量化は不十分であると考え、再度、シリーズVにおいて実験を行った。

解析に用いたデータは、骨材の組み合わせとして粗骨材に静内、広島、大野 (吸水率はそれぞれ1.22, 2.14, 4.26%)、細骨材に錦岡、広島、和賀川 (1.30, 2.54, 5.21%) を用いた9種類で、水セメント比を40、60、70%の3種類、材齢を1、4週とした54種類である。

骨材吸水率の影響の再検討の解析に用いた54データの内訳		
シリーズV	静内・錦岡、静内・広島、静内・和賀川	18データ
	広島・錦岡、広島・広島、広島・和賀川	18データ
	大野・錦岡、大野・広島、大野・和賀川	18データ

骨材吸水率の影響の解析方法は次のとおりである。

実験は破碎試料を用いて行っており、破碎試料と原コンクリートでは骨材割合が異なる。

るため、骨材吸水率の指標となる骨材空隙を試料中の骨材割合で補正する必要がある。

このため、(2.20) 式の補正項 S を

$$S = (1 - m) \text{Agg}$$

ここに、m : 溶解率, Agg : 細・粗骨材の平均吸水率 (%)

とすると、2変数による重回帰分析の結果、(2.22) 式が得られる。

$$\begin{aligned} \log(\sigma) = & -0.0074 \text{ETPV} - 0.568 \log(\text{Me}) \\ & - 0.0344(1-m)\text{Agg} + 4.03 \end{aligned} \quad (2.22)$$

(重相関係数 0.983)

4変数による重回帰分析の結果は、(2.23)、(2.24) 式となる。

$$\begin{aligned} \log(\sigma) = & -0.00705 \text{ETPV} - 0.452 \log(\text{Me}) - 0.359 \text{Re} \\ & - 0.0441/\text{Age} - 0.0359(1-m)\text{Agg} + 3.93 \end{aligned} \quad (2.23)$$

(重相関係数 0.986)

$$\begin{aligned} \log(\sigma) = & -0.00729 \text{ETPV} - 0.484 \log(\text{Me}) - 0.380 \text{Re} \\ & + 0.008169 \text{Wc} - 0.0418(1-m)\text{Agg} + 3.89 \end{aligned} \quad (2.24)$$

(重相関係数 0.986)

2変数式による場合の吸水率の影響は $10^{-0.0344(1-m)\text{Agg}}$ であり、 $1-m=0.862 \sim 0.622$ であるので、平均骨材吸水率 1%あたりの補正量は $10^{-0.0344 \times 0.862 \times 1} = 0.93$ から $10^{-0.0344 \times 0.622 \times 1} = 0.95$ となり、吸水率 1%につき見かけ上、約 5~7%の強度変動を与える結果となった。

4変数式による場合、両式の骨材吸水率の影響項を平均すると $10^{-0.0389(1-m)\text{Agg}}$ となり、 $1-m=0.862 \sim 0.622$ であるので、平均骨材吸水率 1%あたりの補正量は $10^{-0.0389 \times 0.862 \times 1} = 0.93$ から $10^{-0.0389 \times 0.622 \times 1} = 0.95$ となり、2変数

式の場合と同様の結果となった。

b. 骨材形状

水セメント比が同一の砂・砂利コンクリートと碎石コンクリートでは圧縮強度は異なり、空隙構造を指標とする強度式では異なる結果を与えることが考えられる。このため、骨材の圧縮強度および空隙構造への影響を定量的に評価する。

検討に用いたデータは、碎石項と他の説明変数との相関がほぼ0となるように、水セメント比5種類、材齢3種類の合計15種類のコンクリートを砂利、碎石、両者の混合のすべてについて作製したシリーズIVの結果で行った。

碎石の影響の解析に用いた45データの内訳

シリーズIV	砂利のみ	15データ
	砂利+碎石	15データ
	碎石のみ	15データ

解析はa.の場合と同様、碎石項を独立させてとらえる方法によった。

碎石項を独立させた重回帰分析の結果は(2.25)、(2.26)、(2.27)式となる。

$$\begin{aligned} \log(\sigma) = & -0.0115ETPV - 0.369 \log(Me) \\ & + 0.0143S + 3.61 \end{aligned} \quad (2.25)$$

(重相関係数 0.989)

ここで、S：骨材種類（碎石の場合S=1，砂利の場合S=0）

$$\begin{aligned} \log(\sigma) = & -0.0086ETPV - 0.319 \log(Me) - 0.637Re \\ & - 0.0023/Age + 0.0216S + 3.71 \end{aligned} \quad (2.26)$$

(重相関係数 0.993)

$$\begin{aligned} \log(\sigma) = & -0.0101ETPV - 0.290 \log(Me) - 0.537Re \\ & + 0.724Wc + 0.0261S + 3.51 \end{aligned} \quad (2.27)$$

(重相関係数 0.994)

得られた補正項は2変数式の場合 $10^{0.0143} = 1.033$ となり、4変数式の場合はそれぞれ、 $10^{0.0216} = 1.051$ および $10^{0.0261} = 1.062$ となった。これは、碎石コンクリートの圧縮強度が同一空隙構造をもつ砂利コンクリートよりも3~6%高いことを示し、砂利と碎石の相違すなわち骨材の表面形状及びテクスチャーの影響による強度差が、3~6%程度となることを意味している。

また、砂利と碎石では吸水率が異なるため、圧縮強度の実測値を吸水率で補正し、再度上記と同様の解析を行った場合は(2.28)、(2.29)、(2.30)式となり、骨材の表面形状及びテクスチャーの影響による強度差は1~3%程度であった。

$$\begin{aligned} \log(\sigma) = & -0.0113ETPV - 0.371 \log(Me) \\ & + 0.00463S + 3.65 \end{aligned} \quad (2.28)$$

(重相関係数 0.989)

$$\begin{aligned} \log(\sigma) = & -0.00871ETPV - 0.323 \log(Me) - 0.606Re \\ & - 0.0201/Age + 0.0109S + 3.75 \end{aligned} \quad (2.29)$$

(重相関係数 0.992)

ここで、S：骨材種類（碎石の場合S=1，砂利の場合S=0）

$$\begin{aligned} \log(\sigma) = & -0.0104ETPV - 0.290 \log(Me) - 0.495Re \\ & + 0.821Wc + 0.0139S + 3.53 \end{aligned} \quad (2.30)$$

(重相関係数 0.993)

c. 人工軽量骨材

人工軽量骨材を用いたコンクリートでは、砂利や碎石を用いたコンクリートの2倍以上の空隙量が測定され、有効細孔量と圧縮強度の関係は砂利や碎石を用いたコンクリートの場合と著しく異なっている。これは、有効細孔量に人工軽量骨材中の空隙が加算されているのに対し、その空隙率に見合ったコンクリートとしての強度低下を生じていないため、図2.15に示すように、このようなコンクリートには空隙率を基本とする強度式の適用は困難である。

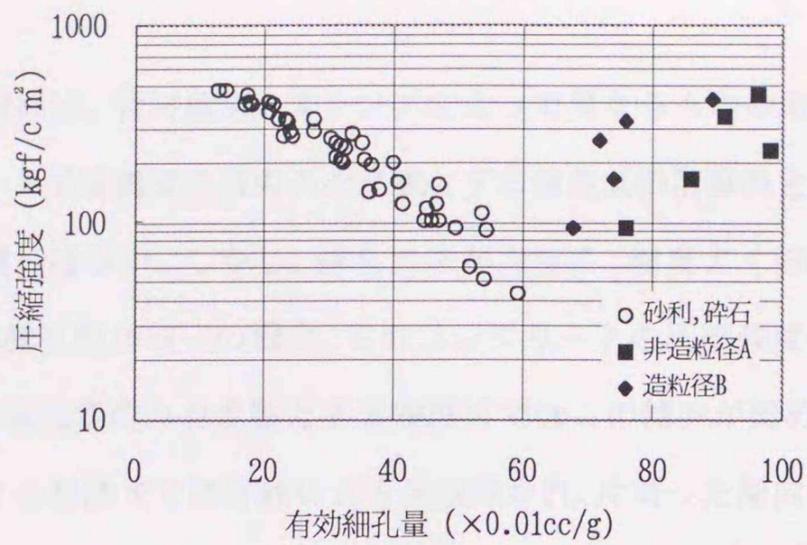


図2.14 人工軽量骨材を用いたコンクリートの有効細孔量と圧縮強度の関係

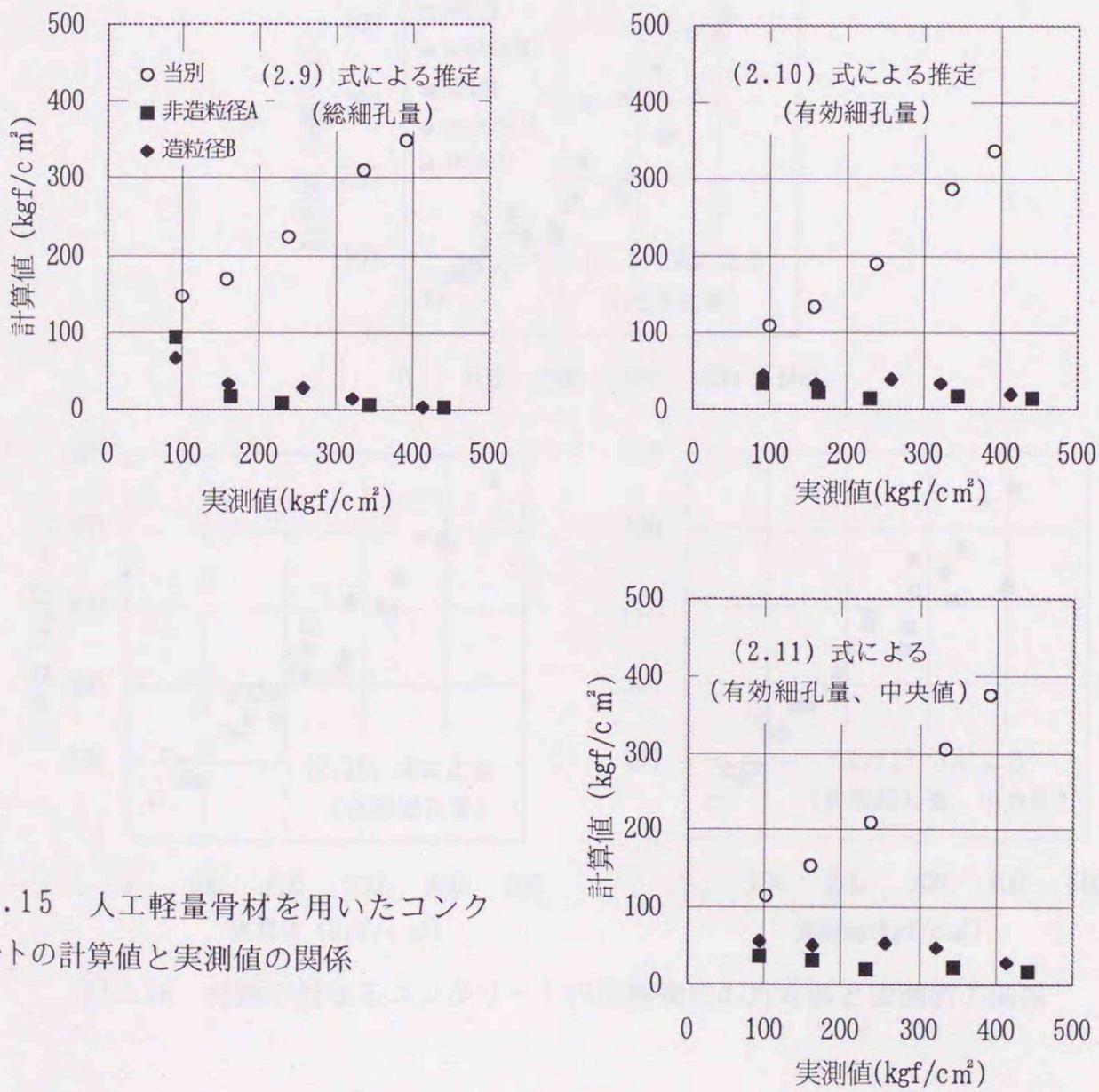


図2.15 人工軽量骨材を用いたコンクリートの計算値と実測値の関係

(2) 材齢の影響

総細孔量と強度の関係は、骨材種別、スランプによって異なるものの同一骨材、同一スランプのコンクリートでは総細孔量のみを変数とする強度式の計算値と実測値の関係は材齢による傾向の違いはない。しかし、ばらつきが大きく、精度よく強度を表しているとは言い難い。有効細孔量が同一の場合、そのコンクリートの圧縮強度は若材齢ほど弱い傾向を示す。有効細孔量のみを変数とする強度式ではこの傾向が認められるが、有効細孔量と中央値による強度式では材齢による差は除かれ、片寄った傾向は認められない。なお、図2.16の(2.11)式による図で、強度の大きいところで計算値と実測値の差が大きくなっているのは、対数値として求めた圧縮強度の計算値を実数値に変換して表しているためである。

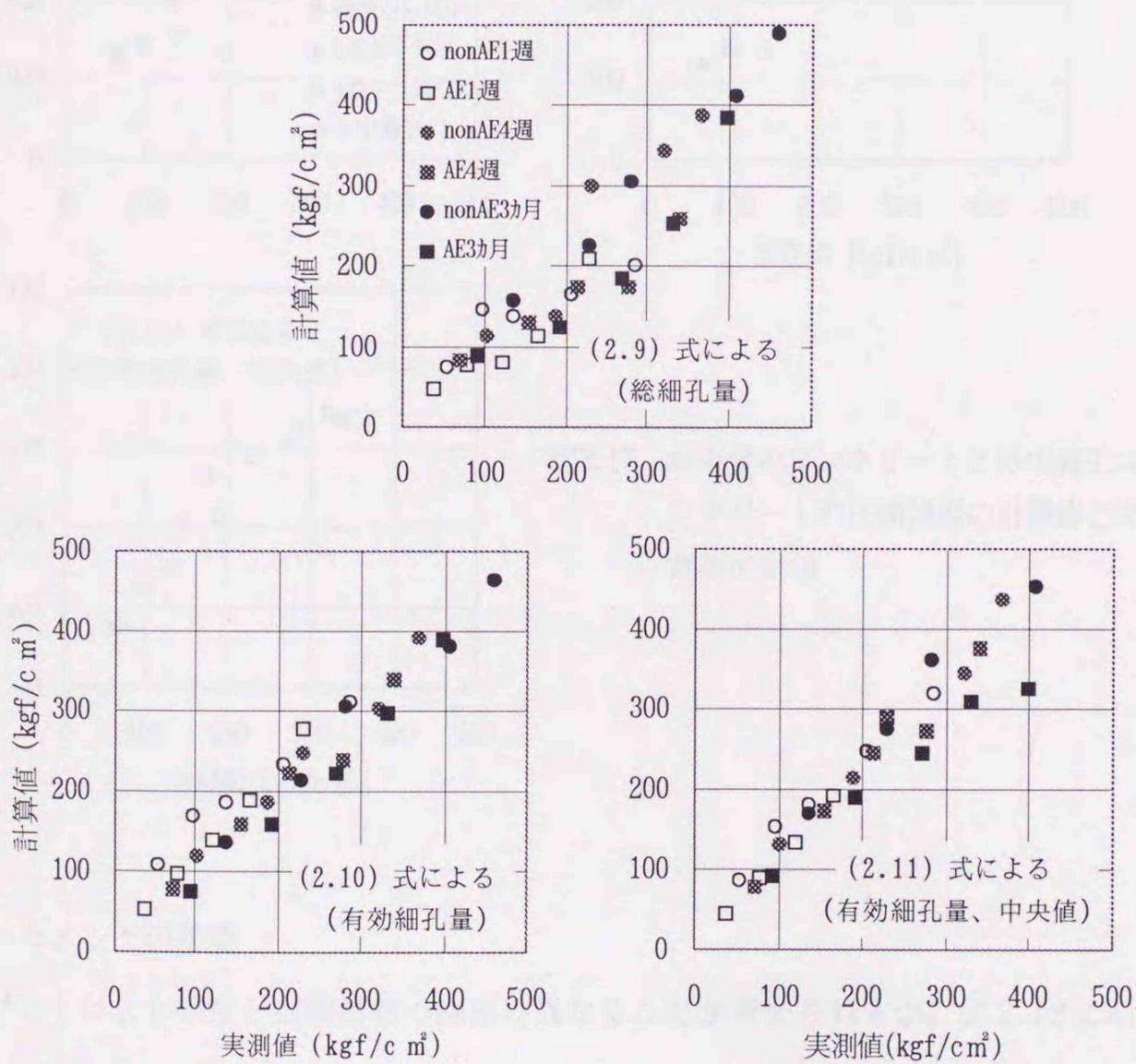


図2.16 材齢の異なるコンクリートの圧縮強度の計算値と実測値の関係

(3) 気中養生の影響

水中養生を継続したコンクリートと気中養生されたコンクリートの圧縮強度と総細孔量または有効細孔量の関係はかなり異なっている。図2.17は総細孔量または有効細孔量のみを変数とした(2.9)、(2.10)式と中央値を含む(2.11)式による圧縮強度の推定値と実測値の関係を示したもので、(2.11)式では、材齢の場合と同様に気中養生の影響がほぼ除かれている。

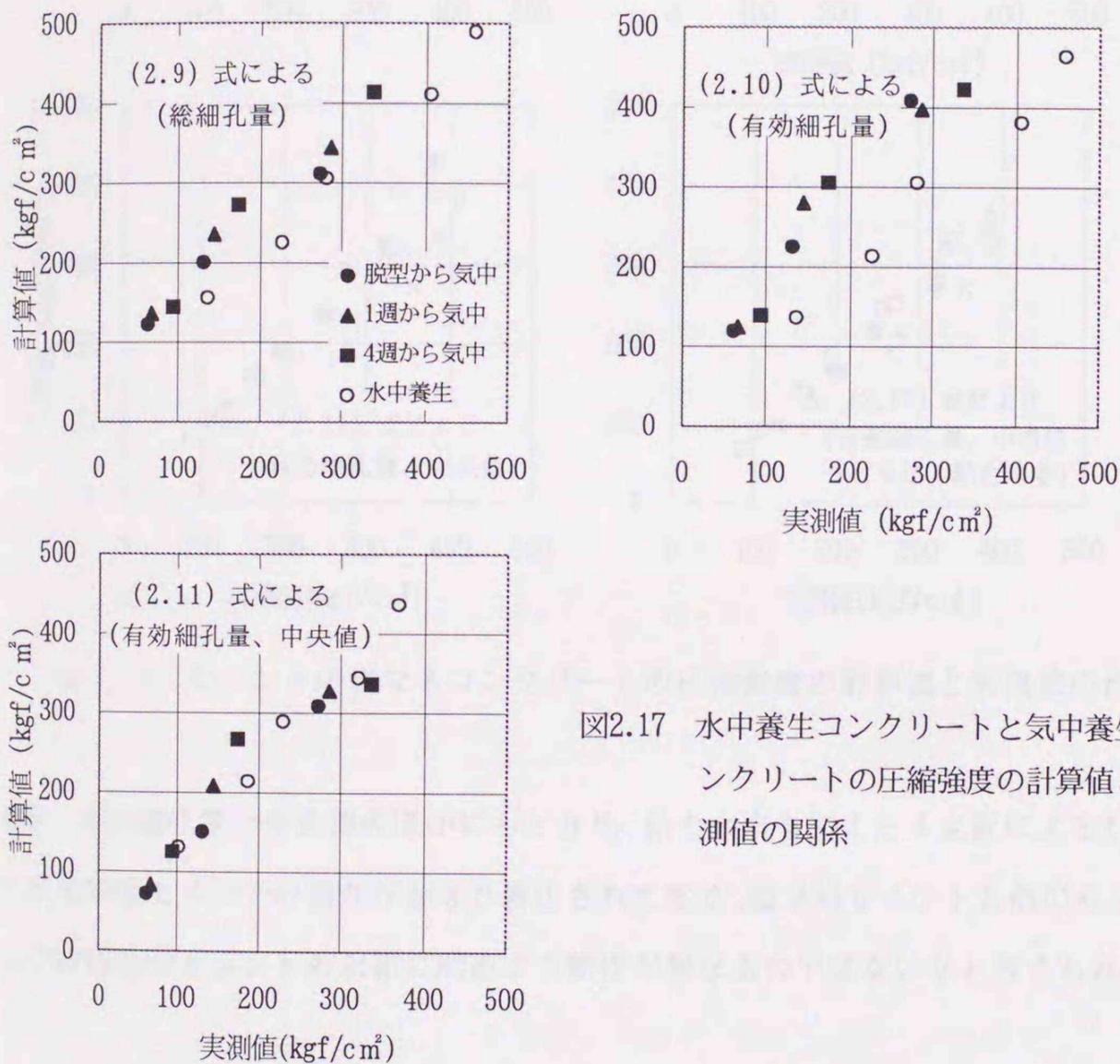


図2.17 水中養生コンクリートと気中養生コンクリートの圧縮強度の計算値と実測値の関係

(4) セメントの影響

セメントにより強度と空隙指標の関係の異なることが考えられるが、図2.18に示すように有効細孔量のみを変数とした(2.10)式でも中央値を加えた(2.11)式でも、超早強セメントの場合を除いてセメントの影響はない。しかし、超早強セメントを用いたコンクリートの場合は、中央値の導入によっても偏りは修正されなかった。

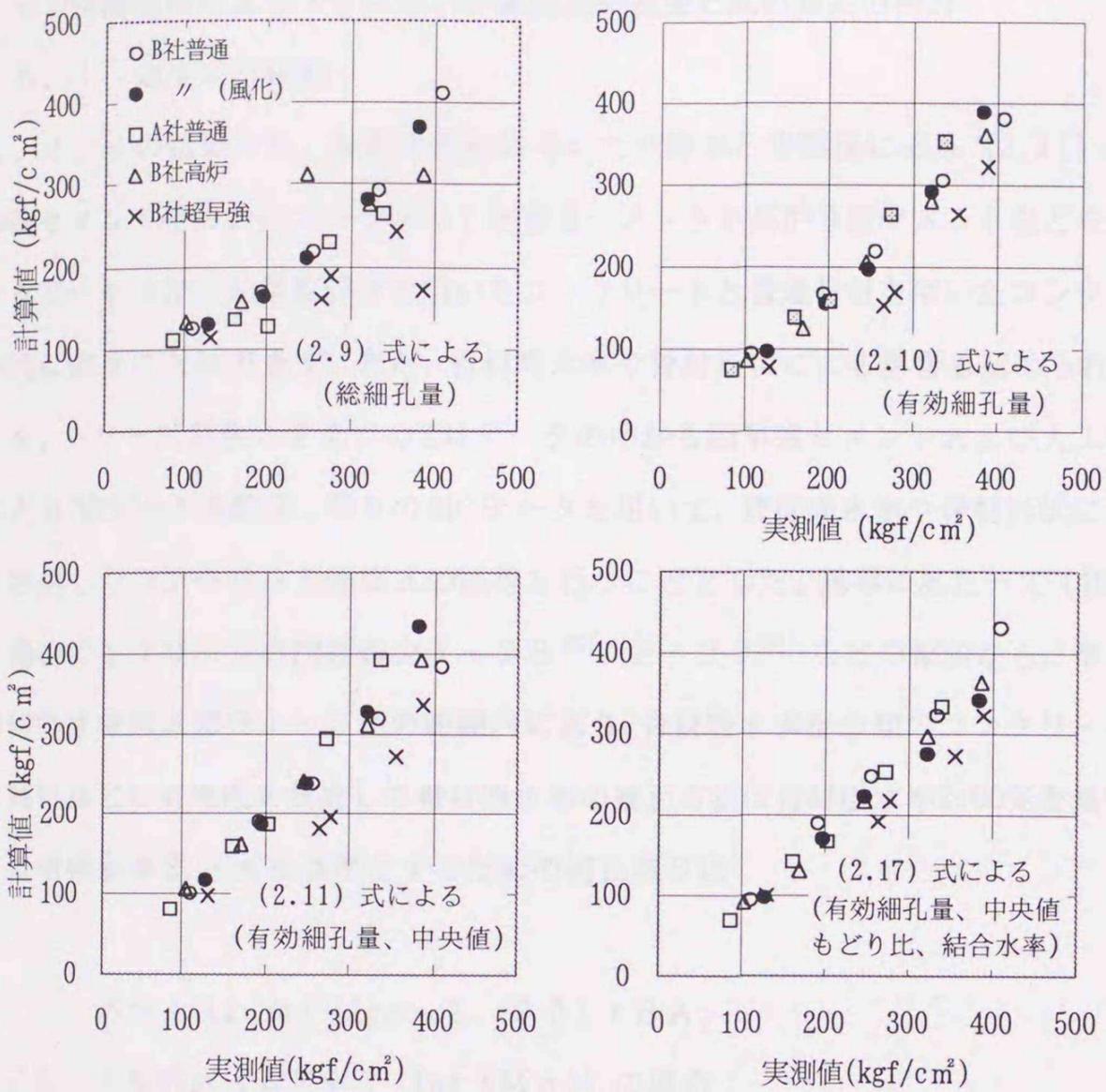


図2.18 セメントの異なるコンクリートの圧縮強度の計算値と実測値の関係

なお、有効細孔量と中央値のほかにもどり比、結合水率を加えた4変数による(2.17)式では超早強セメントの偏りがかなり修正されており、超早強セメントと他のセメントでは空隙構造やセメントの水和に関連する物性が異なるのではないかと考えられる。

2.5 空隙指標によるコンクリート強度式の提案と固相強度の検討

2.5.1 強度式の提案

2.4.2の結果から、検討のために導いた空隙率と空隙径による(2.11)式では、超早強セメントを用いたコンクリートと普通セメントや高炉B種セメントなどを用いたコンクリート及び人工軽量骨材を用いたコンクリートと普通骨材を用いたコンクリートを同時に表すことはできず、また、骨材吸水率や骨材形状による影響も認められた。このため、シリーズIIからVまでの281データの中から超早強セメントおよび人工軽量骨材による30データを除き、残りの251データを用いて、骨材吸水率や骨材形状による補正を考慮したコンクリート強度式の誘導を行うこととした。誘導にあたって(社)セメント協会コンクリート専門委員会F-28⁴⁵⁾、F-29⁴⁶⁾などの報告から、常用される骨材吸水率は大部分1~3%の範囲内にあり、骨材吸水率が未知のコンクリートに対する適用などの実用性を考慮して骨材吸水率の補正方法は骨材吸水率2.00%を基準とした。骨材吸水率2.00%を基準とするための補正項Sは

$$S = A(1 - m)(\text{Agg} - 2.00) + BA_t$$

ここに、2変数式(E T P V, log(M e))の場合:

$$A = -0.0344, B = 0.00463$$

4変数式(E T P V, log(M e), R e, W c)の場合:

$$A = -0.0389, B = 0.0147$$

Agg: 細・粗骨材の平均吸水率(%)

m: 溶解率

A_t: 碎石の場合A_t = 1, 砂利の場合A_t = 0

であり、実測強度を上記の補正項で骨材の吸水率2.00%、さらに骨材の形状に応じた強度に補正する。そして骨材吸水率、骨材形状による補正を加えた強度を目的変数、有効細孔量、中央値を説明変数とし、その相関が最も良くなるように変数の変換をして重回帰分析を行うと(2.31)式が得られる。

$$\log \sigma - S = a E T P V + b \log (M e) + C \quad (2.31)$$

(2.31)式の左辺の補正項を右辺に移行して

$$\log \sigma = a E T P V + b \log (M e) + S + C \quad (2.32)$$

となる。

以上の方法により 251 データの重回帰分析で得られたのが (2.33) 式である。

$$\log \sigma = -0.0128 E T P V - 0.286 \log (M e) + 3.42 + S \quad (2.33)$$

$$S = -0.0344 (1 - m) (A g g - 2.00) + 0.00463 A_t$$

(重相関係数 0.967)

空隙率と空隙径のほかに空隙の連続性やセメントの水和程度に関する指標を加えて重回帰分析を行った場合は、結果が (2.34) 式で表され、重相関係数は 0.975 となって精度が向上する。

$$\log \sigma = -0.0107 E T P V - 0.254 \log (M e) - 0.559 R e \\ + 0.893 W c + 3.40 + S \quad (2.34)$$

$$S = -0.0389 (1 - m) (A g g - 2.00) + 0.0147 A_t$$

(重相関係数 0.975)

式 (2.33)、(2.34) 式を一般化すると

$$\sigma = K D^{-a} \exp (-b P_p) \quad (2.35)$$

ここに、 P_p : 空隙率 (有効細孔量)

D : 空隙径 (中央値)

K : 定数 (空隙の連続性やセメントの水和程度、骨材平均吸水率、骨材形状などにより幾分変化する)

a, b : 定数

(2.35) 式は、コンクリートの圧縮強度を空隙率のみで表わす Ryshkewitch の強度式 ($\sigma = \sigma_0 e^{-B P}$) に対し、Knudsen⁸⁾ が誘導した焼結体に関する強度式 ($S = k G^{-a} e^{-b P}$) の粒径 G を空隙径 D とおきかえた式となる。焼結体を構成する個々の粒の粒径が大となることはその粒間の空隙径が大となることに対応する。Knudsen の説明は、この読みかえを正当づけるものではないが、Jambor²¹⁾ は、空隙径が強度と密接な相関性の

あることを指摘している。

この式は、同じ空隙率を持つコンクリートでは、空隙径が細かいほど強度が高いことを示している。この式に、測定手法の特性上、空隙指標でとらえきれない骨材吸水率や骨材形状などの補正を加えることにより、超早強セメントを除くポルトランドセメントを用いた調合や材齢、養生の異なる普通コンクリートの圧縮強度を精度よく表すことができる。また、空隙の形状や水和程度による補正を加えることにより、コンクリート強度はより厳密に示される。本研究では、(2.35) 式を空隙指標に基づくコンクリートの強度式として提案する。

2.5.2 固相強度の検討

(2.35) 式は空隙率と空隙径により強度を表示するものであり、空隙率が0の場合には径は存在せず、従来の強度式が示すような空隙率が0の場合の強度、すなわち固相強度を表示することは出来ない。ここでは、空隙率が極めて0に近づいた場合の状況を想定し、空隙率と強度の関係をモデル化した図2.19をもとに固相強度の検討を行う。

ある径を持つ空隙が多孔体中に多量に存在するものとする。その多孔体では空隙の数を減らすことにより、空隙率は低下するものの、空隙率の最小値は空隙が1個(単位)に相当する場合以下とはなり得ない。つまり、図2.19において、空隙径 D_1 の場合の空隙率の極限值は P_1 となり、それ以下の空隙率は存在しない。したがって、より小さな空隙率はより小さな空隙径を持つ多孔体のみが存在することとなり、空隙率が極限的に0に近い多孔体の空隙径は極限的に0に近い値となる。この極限值の変化を示すものが図中の曲線A-Bである。つまり、多孔体の固体部分の強度を表す真の固相強度は曲線

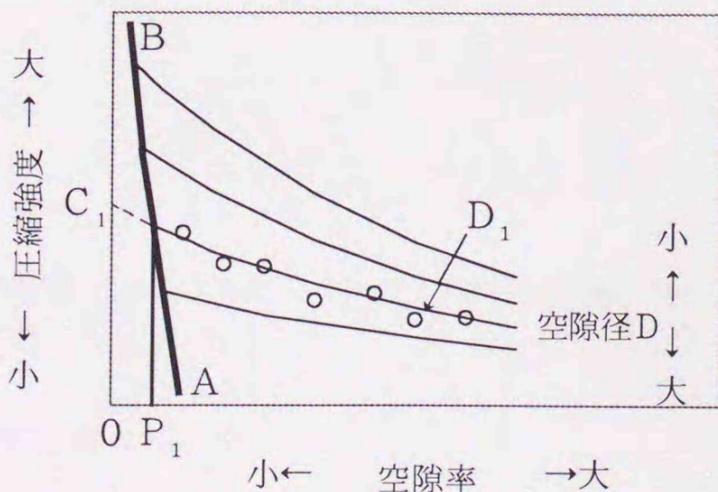


図2.19 圧縮強度と空隙率、空隙径の関係の概念

A-Bの延長線上に存在することとなり、空隙率と強度の関係を外挿して得た強度 C_1 は真の固相強度とはなり得ず、その径を持つ空隙が支配的な多孔体についての見かけ上の固相強度となり、径が異なれば異なる強度値が得られることとなる。

ここで、原子核や電子の段階から目視し得る程度まで多様な空隙の存在する物体の固体部分の強度（固相強度）とはいかなるものであるかの概念上の問題が生じる。固相強度とはある径以下の空隙を無視し、これを含んだ系を固相部分と考え、それ以上の径を持つ空隙が0となった場合に得られる強度に他ならない。

このような定義のもとで、固相強度は、空隙としてとらえた最小の径以上の空隙率を0とした場合の強度として求められ、本研究で行った半径31.6 Å以上の空隙についての検討では、径の最小値31.6 Åを用いた場合、約980kgf/c m²が求められる。この値は、実験に用いたコンクリートの平均空隙半径572 Åに対応した見かけ上の値であるRyshkewitch式による値約690kgf/c m²の約1.4倍となる。

なお、高強度コンクリートなどでは1000kgf/c m²を超える圧縮強度値が得られており、本研究で得られた固相強度の小さいことが懸念されるが、水銀圧入法による測定結果は入り口細孔の測定値であるため実際の空隙径はより大きいであろうこと、また、固相としてその空隙構造を無視した半径31.6 Å以下の空隙部分の緻密化もあるであろうと考えることにより、その矛盾は解消しうるものと考えている。

2.6 既往の強度式との比較

脆性多孔質材料の強度と空隙構造の関係については、第1章の既往の研究で述べているような数多くの強度式が報告されている。ここでは、定数の定量化が可能で一般的な強度式について、本研究での提案式と比較検討した。比較に取り上げた強度式は、空隙率のみによる式である Ryshkewitch の式と羽原の式、空隙径のみによる式である Jambor の式、また、コンクリートの調合を既知としなければ強度との対応ができないが、コンクリートの圧縮強度と空隙構造の関係式としてよく知られている Powers によるゲル・スペース比による式も取り上げた。検討は、本研究で得られたシリーズ II、III、IV、V の 251 データを用い、提案式を除いて骨材の吸水率および形状の影響は考慮していない。

a. Ryshkewitch による式

空隙率のみによる強度式として最も一般的に知られた Ryshkewitch の式は、焼結体による実験から誘導されたものであるが、セメント硬化体を含む広い範囲の多孔質材料について成り立つと言われている。

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-bP) \quad (2.36)$$

ここで、 σ : 多孔体の圧縮強度

σ_0 : 空隙率がゼロのときの圧縮強度

P : 空隙率

b : 定数

空隙率としてコンクリート試料全体の空隙率を表す総細孔量 (TPV) とセメントペースト部分の空隙率を表す有効細孔量 (ETPV) を用いて解析を行った結果は、それぞれ (2.36)' , (2.36)" 式となり、これらの式による実測値と計算値の関係は図 2.20 となる。

$$\log(\sigma) = -0.0987 \text{TPV} + 2.94 \quad (2.36)'$$

(重相関係数 0.737)

$$\log(\sigma) = -0.0180 \text{ETPV} + 2.87 \quad (2.36)''$$

(重相関係数 0.902)

実測値と計算値の対応は、前述のように空隙率として硬化コンクリート中のセメント

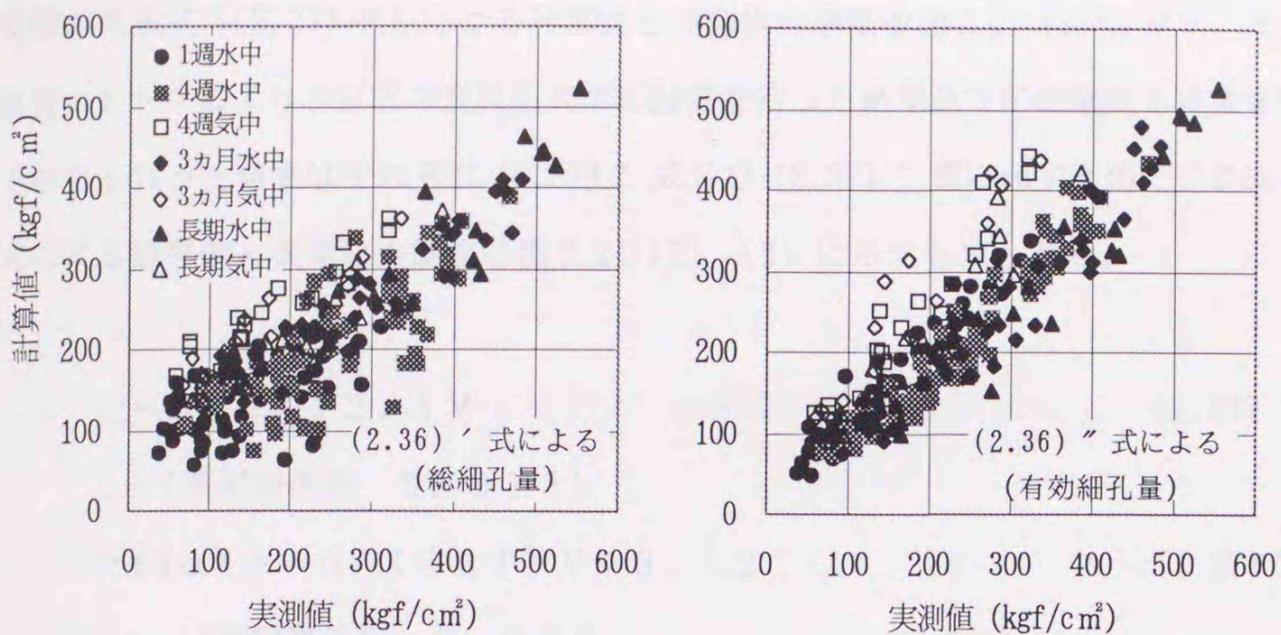


図2.20 Ryshkewitch式による圧縮強度の計算値と実測値の関係

ペースト部分の空隙率を用いた(2.36)''式の方がよい。しかし、この式では養生による傾向の偏りが見られ、気中養生のコンクリート強度が実測値より小さく計算される。

b. 羽原の式

羽原³⁰⁾はコンクリート中の骨材とセメントペースト界面の遷移帯の影響を考慮し、空隙量を水銀圧入法の加圧過程で測定される直径50nm (500 Å) ~ 2 μm間の径を持つ空隙に限定し、通常の強度範囲(600kgf/cm²)で(2.37)式を提案している。この式では、圧縮強度を変数変換せずに空隙率と関係づけているのが特徴である。検討にあたっては、本研究と羽原の研究での水銀の接触角や表面張力の定数の違いを考慮し、羽原が用いた直径50nmおよび2 μmでの空隙量の測定値に最も近い59nmおよび1.87 μmでの空隙量の測定値を用いた。また、空隙量をセメントペースト部分の体積割合で表した場合と質量割合で表した場合とでは、強度との相関性は質量割合で表した方が若干高くなる傾向があるため、検討には、本研究で用いてきたセメントペースト部分の質量割合で表される空隙率を用いた。羽原の提案式は(2.37)式に示すものである。

$$\sigma = 690 - 17.2V \quad (2.37)$$

ここで、V: 直径50nm~2 μm間の空隙量で、硬化コンクリート中のセメントペースト部分に対する質量割合。

羽原の提案式 ((2.37) 式) による計算値と実測値の関係を図2.21 (1) に示す。また、本研究のデータにより羽原式の変数形式で再計算を行った結果及び圧縮強度を対数変換して解析を行った結果はそれぞれ (2.37)' 式及び (2.37)'' 式に示すもので、これらの式による計算値と実測値の関係は図2.21 (2)、(3) に示すものとなる。

$$\sigma = 378 - 12.1V \quad (2.37)'$$

(重相関係数 0.873)

$$\log(\sigma) = -0.132TPV + 3.12 \quad (2.37)''$$

(重相関係数 0.920)

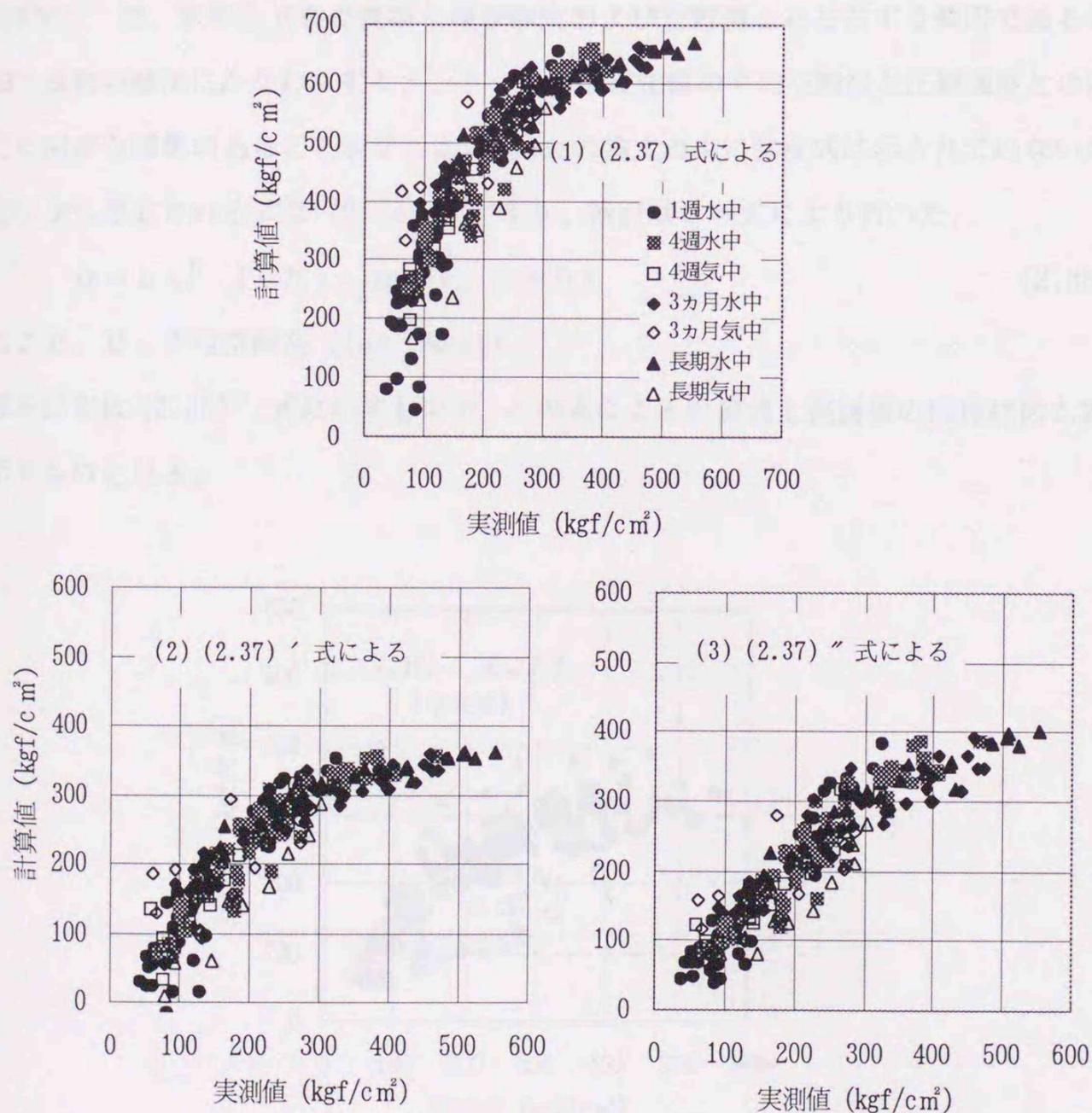


図2.21 羽原の式による圧縮強度の計算値と実測値の関係

(2.37) 式では、実測値に対して計算値が大きめになり、さらに強度が高くなるにしたがって計算値が一定の値に収斂していく傾向を示した。

(2.37) ' 式では、計算値と実測値の対応が良くなっているが、高い強度で計算値が一定の値に収斂していく傾向は変わらない。

圧縮強度の対数変換を行った (2.37) " 式では、高い強度での計算値の一定値への収斂傾向が解消されており、また、材齢や養生による傾向の違いも見られないが、400kgf/cm²以上ではやや弱く計算される傾向がある。つまり、羽原の式で記述される強度と空隙量の関係はコンクリート強度全体を表すものではなく、その範囲を限定する必要があることを意味している。

c. Jambor による式

Jambor²¹⁾ は、水和生成物の種類と量が強度および空隙構造を左右する要因であるが、水和生成物の種類にかかわらずセメントペースト硬化体の平均空隙径と圧縮強度とのあいだに明瞭な関係のあることを示した。Jamborの論文の中に強度式は示されていないが、説明図から想定される式は (2.38) 式となり、検討はこの式により行った。

$$\sigma = b a^D \quad (\text{ただし、} a < 1, b > 0) \quad (2.38)$$

ここで、D : 平均空隙径 (log (Me))

解析結果は (2.38) ' 式に示すもので、この式による計算値と実測値の関係は図2.22に示すものとなる。

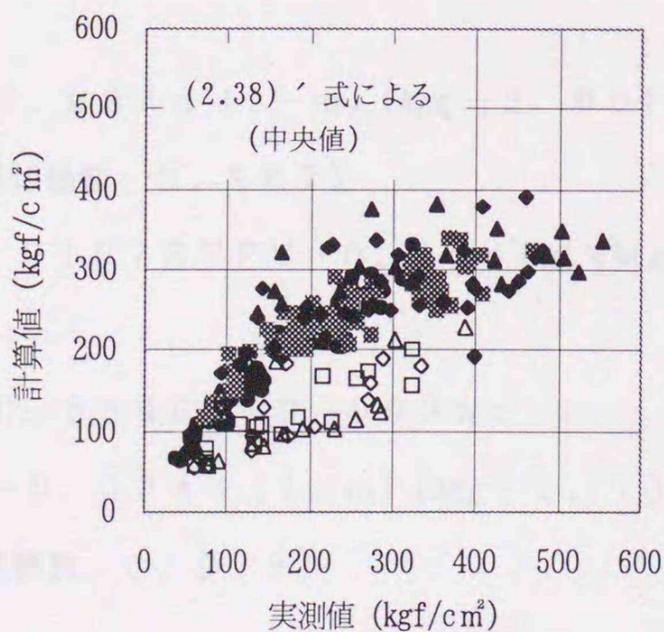


図2.22 Jombar 式による圧縮強度の計算値と実測値の関係

$$\log(\sigma) = -0.523 \log(Me) + 3.62 \quad (2.38)'$$

(重相関係数 0.807)

(2.38)' 式では実測値と計算値の対応は良くなく、養生による傾向の違いが顕著に見られる。

d. 提案式

提案式は (2.39) 式に示すものである。

$$\sigma = K D^{-a} \exp(-b P_p) \quad (2.39)$$

kを一定の定数とし、空隙率 (P_p) としてセメントペースト部分の空隙率を表す有効細孔量 (ETPV) を用いて解析を行った結果は (2.39)' 式となり、この式による実測値と計算値の関係は図 2.23 (1) となる。

Kが一定の場合

$$\log \sigma = -0.0131 \text{ETPV} - 0.279 \log(Me) + 3.42 \quad (2.39)'$$

(重相関係数 0.968)

また、kを条件によって変化する定数として同様の解析を行った結果は (2.39)" , (2.39)' " 式および図 2.23 (2) , (3) となる。

Kが変化する場合

$$\log \sigma = -0.0128 \text{ETPV} - 0.286 \log(Me) + 3.42 + K \quad (2.39)''$$

$$K = -0.0344(1-m)(\text{Agg} - 2.00) + 0.00463 A_t$$

(重相関係数 0.967)

$$\log \sigma = -0.0107 \text{ETPV} - 0.254 \log(Me) + 3.40 + K \quad (2.39)'''$$

$$K = -0.559 Re + 0.893 Wc$$

$$-0.0344(1-m)(\text{Agg} - 2.00) + 0.00463 A_t$$

(重相関係数 0.975)

これらの式による計算値と実測値の対応性は、空隙率に空隙径を加えたことにより、空隙率依存性を基本とする Ryshkewitch の式による結果よりもはるかに向上し、養生による傾向の違いは除かれている。

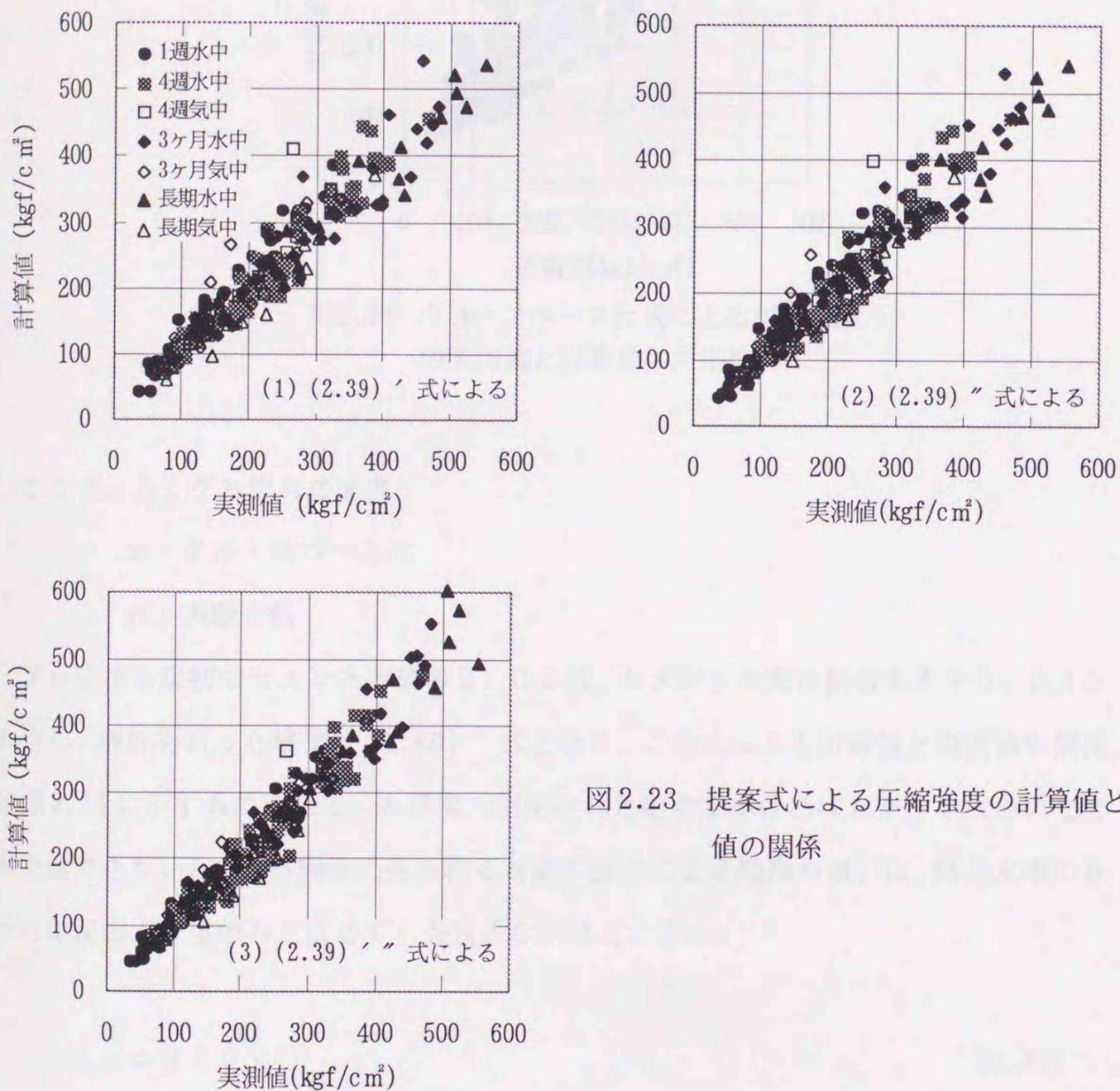


図2.23 提案式による圧縮強度の計算値と実測値の関係

e. ゲル・スペース比による強度式

Powers¹⁸⁾ は、コンクリートの圧縮強度をセメントペーストの空隙部分と固相部分の比であるゲル・スペース比の関数として (2.40) 式で表した。ゲル・スペース比は、ゲル容積、毛細管空隙量およびセメントペースト中の空気量の和に対するゲル容積の比と定義される。

$$\sigma = A x^n \quad (2.40)$$

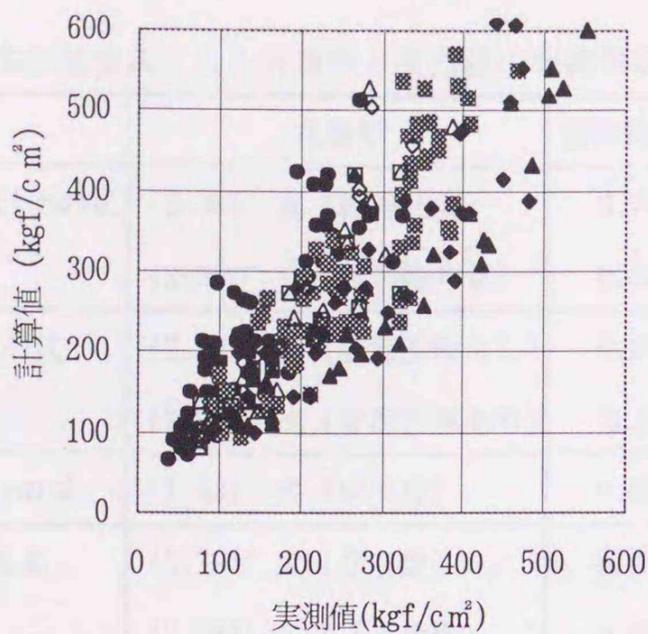


図2.24 ゲル・スペース比式による圧縮強度の実測値と計算値の対応性

ここで、A：ゲル固有の強度

x：ゲル・スペース比

n：実験定数

ゲル容積を最初のセメント容積の2.06倍、セメントの完全結合水率を0.23と仮定し、解析を行った結果は(2.40)'式となり、この式による計算値と実測値の関係は図2.24に示すものとなる。本研究で測定された結合水率はあばれがやや大きいため断定はできないが、この関係に見られる材齢や養生による傾向の違いは、結合水率のあばれに起因する差のみとは必ずしも言えないほど大きい。

$$\sigma = 920 x^{2.3} \quad (2.40)'$$

(重相関係数 R = 0.738)

各強度式の計算値と実測値の対応性を表す重相関係数をまとめて表2.11に示す。この結果、コンクリートの圧縮強度を空隙率と空隙径で表した本提案式 ($\sigma = K D^{-a} \exp(-b P_p)$) が最も優れた実測値との対応性を示した。

表2.11 既往の強度式による計算値と実測値の相関係数の比較

	式番号	重相関係数
Ryshkewitchの式	(2.36)' 式 (総細孔量)	0.737
	(2.36)" 式 (有効細孔量)	0.902
羽原の式	(2.37)' 式 (変数変換なし)	0.873
	(2.37)" 式 (変数変換あり)	0.92
Jombarの式	(2.38)' 式 (中央値)	0.807
提案式	(2.39)" 式 (2変数)	0.738
	(2.39)' " 式 (4変数)	0.967
ゲル・スペース比	(2.40)' 式	0.975

2.7 第2章の結論

本章では、コンクリートの圧縮強度の空隙構造依存性を明らかにし、コンクリートの圧縮強度を空隙構造の関数として一義的に表す強度式の提案を行うことを目的に、まず、コンクリートの圧縮強度や空隙構造の測定方法を検討した。つぎに、空隙構造の測定値を既往の研究で考慮されていないセメントペースト中の空隙量、空隙径、空隙形状を考慮した指標で表し、これらの空隙指標と調合、材齢、養生条件などコンクリート強度を左右する条件との関係を検討した。そして、統計的手法（重回帰分析法）を用いて、コンクリートの圧縮強度に影響する主要な空隙構造指標を明らかにするとともに、圧縮強度と空隙構造の関係に影響を及ぼすその他の要因とその影響量を定量的に評価した。最後に、これらの結果から空隙指標に基づくコンクリートの強度式を提案し、既往の強度式と推定精度の比較を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) コンクリートの含水状態、空隙構造測定用試料の粒径は圧縮強度や空隙構造の測定値に影響する。このため、測定にあたってはこれらの条件を統一する必要がある。本研究では、コンクリートの強度試験を湿試験とし、試料粒径を2.5～5 mmとした。
- (2) 空隙率に関する指標である総細孔量および有効細孔量、空隙径に関する指標である中央値、空隙の連続性に関する指標であるもどり比は、いずれも水セメント比の減少、材齢の進行に伴って小さくなる。また、屋内養生と比較して水中養生では総細孔量、有効細孔量、中央値およびもどり比のいずれも小さくなる。A E剤による連行空気泡は空隙の測定値に加算され、A E剤の混入したコンクリートではもどり比は小さくなる。
- (3) 総細孔量と圧縮強度の対数値とには相関性がある。しかし、この相関性は骨材やスランプなど試料中の骨材量の影響を受け、優れたものではなかった。有効細孔量と圧縮強度の対数値の相関性は、材齢、養生条件によって層別した場合、調合にかかわらずそれらの条件毎に優れたものであった。セメントの水和程度に関する指標（結合水率または材齢）を含めた空隙指標と圧縮強度の相関性は、圧縮強度の対数値と有効細孔量とのあいだで最も高く（ -0.887 ）、次いで総細孔量（ -0.836 ）、中央値の対数値（ -0.781 ）であった。これらの

結果、強度式の基礎となる空隙率の指標には有効細孔量が適当と判断し、これを用いることとした。

(4) コンクリートの材齢、養生方法、セメント種別、骨材吸水率の違い、人工軽量骨材の使用、骨材の形状、などの要因によって圧縮強度と空隙率の相関性が影響を受ける。このうち、材齢と養生方法の要因による相関性の違いは、空隙径を加えた式で修正される。また、骨材吸水率の違い、骨材形状による要因は、補正値の導入により偏りの補正が可能で、骨材吸水率では吸水率1%につき約3~6%、砕石使用では約1~3%の強度補正となる。人工軽量骨材を用いたコンクリートでは、本研究での方法を適用することはできず、超早強セメントを用いたコンクリートでは強度と空隙率の相関性の偏りが解消しきれず、強度の計算値は実測値より小さくなる。

(5) コンクリートの圧縮強度は、空隙率を硬化コンクリートのセメントペースト部分に対する割合である有効細孔量とし、従来の一般的な強度式では考慮されていない空隙径に関する指標を加えた次式で表される。

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

ここに、 σ : コンクリートの圧縮強度

P_p : 硬化コンクリートのセメントペースト部分の空隙率

D : 空隙径 (半径 $31.6 \text{ \AA} \sim 56 \mu\text{m}$ の空隙量の $1/2$ に対応する空隙径の対数值)

K, a, b : 定数

この式は、Knudsenの式の粒径(G)を空隙径(D)と読み変えた式であり、この式に空隙形状(Re : もどり比)やセメントの水和程度(Wc : 結合水率または Age : 材齢)に関係する指標を導入することにより、式の精度はさらに向上する。

(6) 提案式の場合によると、Ryshkewitchの式による固相強度はその空隙径に対応するものであり、真の固相強度はより大きな値となる。

(7) 空隙構造を指標とした既往の強度式によるコンクリート強度の計算値と実測値の対応性を本研究での提案式と比較した結果、本提案式が最も優れた結果となった。

第 3 章 モデル空隙によるコンクリート強度式妥当性の検証

3.1 はじめに

第 2 章までの検討において、コンクリートの圧縮強度には、硬化コンクリートのセメントペースト部分の空隙率だけではなく、空隙径が影響することが示された。さらに、それほど大きくはないが、空隙の連続性やセメントの水和程度も影響することが示された。

ここでは、形状と寸法をそろえた人為的な空隙をセメントペーストに混入し、それら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の検証を行う。

この検証では、人為的なモデル空隙のみの影響を見ようとするものであるので、母材となる材料は、モデル空隙以外の強度要因を含まないものとする必要がある。このため実験には、エントラプトエアを出来るだけ少なくしたセメントペーストを用いることとした。また、モデル空隙は、その強度が測定強度にできるだけ影響を及ぼさない必要があり、このため発泡ポリスチレン製のビーズ、パック材、シート材を空隙モデルとして用いることとした。

3.2 実験の概要

本実験は、空隙の寸法や分布、形状が圧縮強度にどのような影響を与えるかを見ようとするもので、検討項目は、空隙径の違いの影響、空隙の形状の違いの影響、固相部分の強度の違いによる変化、の3つである。実験では、寸法と形状を変えた11種のモデル空隙を用意し、それらを空隙率が5%、10%、15%、20%となるようにセメントペーストの中に混入させ、圧縮強度試験を行った。

空隙率は、全体の体積に対するモデル空隙の量で表した。すなわち、

$$P = V_p / (V_s + V_p) \times 100 \quad (\%)$$

ここに、P：空隙率

V_p ：モデル空隙の体積

V_s ：セメントペーストの体積

この実験では、モデル空隙のみを空隙として扱っている。前章2.4.3(2)で考察したように、セメントペーストに含まれる毛細管、エントラプトエア、その他のより微小径の空隙は固相として想定している。

3.3 実験計画

試験体の作成において、セメントには普通ポルトランドセメント、混和剤にはナフタリン酸系の減水剤を使用した。

空隙径の違いの影響を見るための試験体は、粒径（直径）が0.78 mm、1.10 mm、1.55 mm、2.19 mm、3.10 mm、4.38 mm、6.20 mmの7種類の球状のポリスチレン発泡体をモデル空隙とし、それぞれ単一粒径でセメントペーストに混入したものと、それら7種のモデル空隙を平均粒径が1.10 mm、2.19 mm、4.38 mmとなるように混合してセメントペーストに混入させたものとした。

表3.1 実験計画表

モデル空隙				水セメント比 (%)	炭酸カルシウム混入率 (%)
形状	粒径分布	呼び寸法 (mm)	混入率 (%)		
球	なし (単一)	6.20	5, 10, 15, 20	26.0	0
		4.38			
		3.10			
		2.19			
		1.55			
		1.10			
		0.78			
	あり (混合)	4.38			
		2.19			
		1.55			
なし (単一)	4.38	32.5	20		
	3.10				
	2.19				
	4.38	37.0	30		
	3.10				
	2.19				
角柱	3×3×4.9	26.0	0		
	3×3×17.7				
円柱	3φ×6.2	26.0	0		
	3φ×13.9				
—	—	—	—	26.0	0
				32.5	20
				37.0	30

空隙の形状の違いの実験では、パック材を $3\phi \times 6.2\text{ mm}$ と $3\phi \times 13.9\text{ mm}$ の2種類に切断したもの、シート材を $3 \times 3 \times 4.9\text{ mm}$ と $3 \times 3 \times 17.7\text{ mm}$ の2種類に切断したものをモデル空隙としてセメントペーストの中に混入した。

さらに、固相と見なした部分の強度が空隙と試験体全体の強度との関係に及ぼす影響について調べるため、水セメント比を26%、32.5%、37%としたセメントペーストを作製した。なお、水セメント比32.5%および37%では分離を防ぐための粉体増量材として炭酸カルシウムを混入している。

試験体の養生は水中養生とし、試験材齢は4週とした。実験計画表を表3.1に示す。

試験体番号	空隙形状	水セメント比	増量材	試験材齢	試験方法	試験結果	備考
1	$3\phi \times 6.2\text{ mm}$	26%	なし	4週	圧縮強度	15.2 MPa	
2	$3\phi \times 13.9\text{ mm}$	26%	なし	4週	圧縮強度	12.8 MPa	
3	$3 \times 3 \times 4.9\text{ mm}$	26%	なし	4週	圧縮強度	14.5 MPa	
4	$3 \times 3 \times 17.7\text{ mm}$	26%	なし	4週	圧縮強度	11.9 MPa	
5	$3\phi \times 6.2\text{ mm}$	32.5%	あり	4週	圧縮強度	16.8 MPa	
6	$3\phi \times 13.9\text{ mm}$	32.5%	あり	4週	圧縮強度	14.1 MPa	
7	$3 \times 3 \times 4.9\text{ mm}$	32.5%	あり	4週	圧縮強度	15.7 MPa	
8	$3 \times 3 \times 17.7\text{ mm}$	32.5%	あり	4週	圧縮強度	13.2 MPa	
9	$3\phi \times 6.2\text{ mm}$	37%	あり	4週	圧縮強度	18.3 MPa	
10	$3\phi \times 13.9\text{ mm}$	37%	あり	4週	圧縮強度	15.6 MPa	
11	$3 \times 3 \times 4.9\text{ mm}$	37%	あり	4週	圧縮強度	17.1 MPa	
12	$3 \times 3 \times 17.7\text{ mm}$	37%	あり	4週	圧縮強度	14.8 MPa	

3.4 実験方法

3.4.1 使用材料

(1) セメント

セメントは、日本セメント社製造の普通ポルトランドセメントとした。JIS R 5201による物理試験結果を表3.2に示す。

表3.2 セメントの物理試験結果

比重	凝 結		フロー 値 (mm)	強 度 (kgf/cm ²)					
	(h-mm)			曲 げ			圧 縮		
	始発	終発		3日	7日	28日	3日	7日	28日
3.16	2h50	3h50	248	31	48	68	136	237	406

(2) 混和剤

混和剤には、ナフタリン酸系の減水剤である花王石鹼(株)製造のマイティ150を使用した。

(3) 炭酸カルシウム

炭酸カルシウムは、恒和化学(株)のG#100で、平均粒径0.1mm、見かけの比重は1.0である。

(4) 水

水は、水道水を使用した。

(5) モデル空隙

a. 球状モデル空隙

球状モデル空隙には、油化バーディッシュ社製造の発泡ポリスチレン製ビーズを使用し、粒径をできるだけ統一するため図3.1に示すように14種類の篩を使い、7種類の呼び寸法にふるい分けた。

b. 円柱状モデル空隙

円柱状モデル空隙には、旭化成社製造の直径約3mmの円柱状の発泡ポリスチレン製パック材を用い、呼び寸法が6.2mmと4.38mmの球状モデル空隙の体積にほぼ対応した、約6.2mmと13.9mmの長さとした。

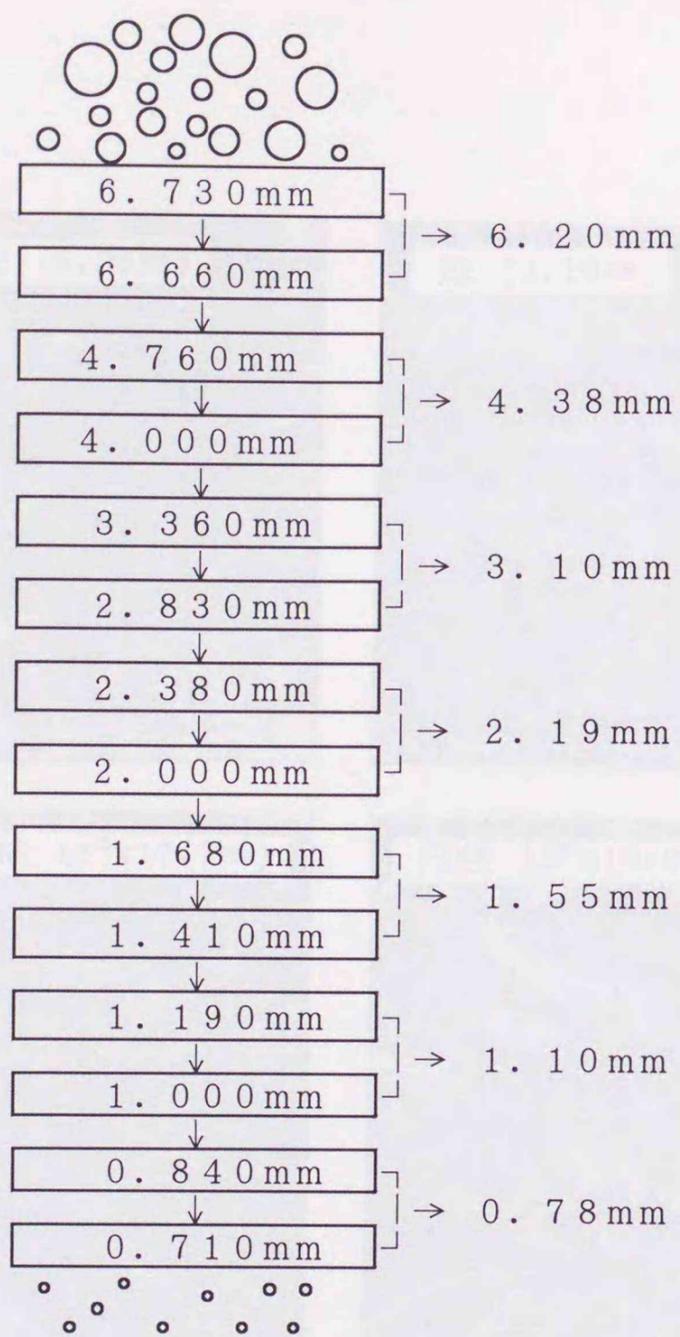


図3.1 球状モデル空隙のふるい分け方法

c. 角柱状モデル空隙

角柱状モデル空隙には、文房堂製造の厚さ約3 mmの発泡ポリスチレン製シート材を約3 mmの幅で、呼び寸法が6.2 mmと4.38 mmの球状モデル空隙の体積にほぼ対応した、長さ約4.9 mmと17.7 mmの長さに切断して用いた。

モデル空隙の例を写真3.1に示す。

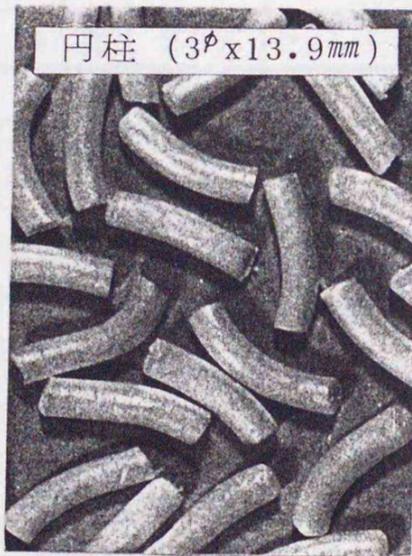
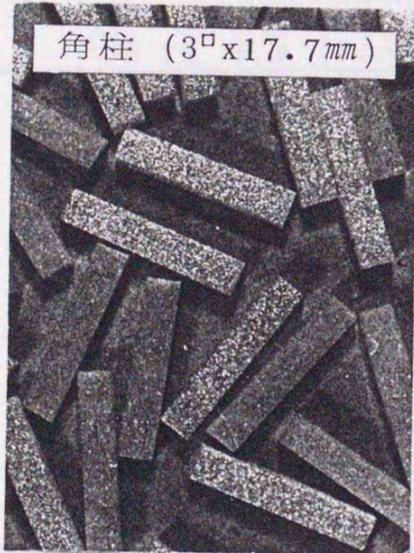
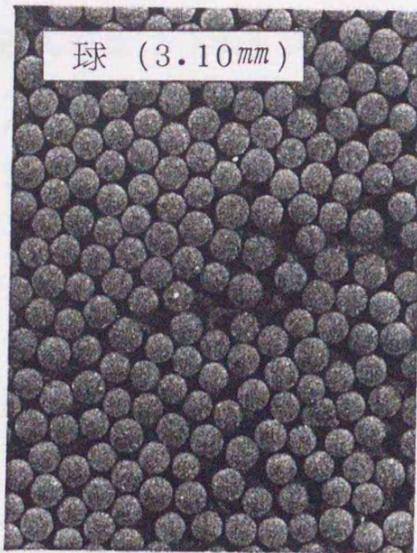
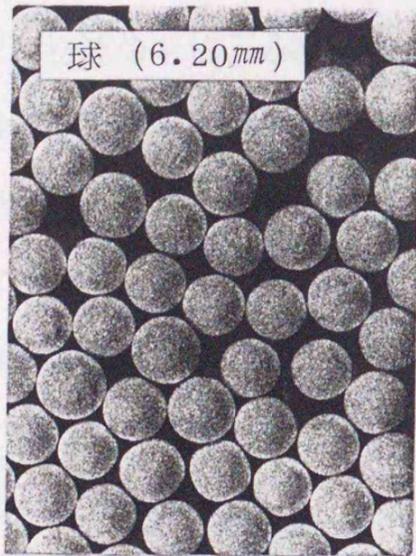


写真 3.1 モデル空隙の形状

3.4.2 モデル空隙の寸法測定

モデル空隙の寸法測定は、理化学研究所の技協 2 型コンパレーターを用い、各種類に

表 3.3 モデル空隙の寸法測定結果 (単位: mm)

形状	球							円柱		角柱	
呼び寸法	6.20	4.38	3.10	2.19	1.55	1.10	0.78	3φ×13.9	3φ×6.2	3×3×17.7	3×3×4.9
実測直径または長さ	5.97	4.55	3.15	2.10	1.55	1.12	0.79	14.40	6.13	17.60	5.04
標準偏差	0.27	0.21	0.15	0.11	0.10	0.08	0.04	0.61	0.41	0.31	0.17

ついて50個ずつ行った。球状モデル空隙は直径のみを、円柱状、角柱状については、長さや断面寸法を測定した。モデル空隙の寸法測定結果を表3.3に示す。

3.4.3 試験体

調合は、モデル空隙の寸法、分布、形状、混入率および水セメント比を異ならせた8種類で表3.4に示したものである。

このうち、空隙に分布を持たせた混合I、II、IIIは寸法の異なる7種類の球状モデル空隙を図3.2に示すような割合で混合したものである。

圧縮強度試験用試験体は4.0cm×4.2cm×8.0cmの四角柱とした。混練、打ち込みお

表3.4 セメントペーストの調合

水セメント比(%)	粒径分布	呼び寸法	モデル空隙混入量 (g)				質量 (g)		
			5%	10%	15%	20%	セメント	混和剤	炭酸カルシウム
26.0	なし (単一)	6.20	1.4634	3.0894	4.9068	6.9512	2300	46	0
		4.38	1.5220	3.1919	5.0695	7.1818			
		3.10	1.6091	3.3969	5.3951	7.6431			
		2.19	1.7894	3.7776	5.9997	8.4996			
		1.55	1.7963	3.7923	6.0230	8.5325			
		1.10	2.1778	4.5976	7.3020	10.3445			
		0.78	2.7604	5.8275	9.2554	13.1118			
	あり (混合)	3.10	1.6489	3.4812	5.5288	7.8325			
		1.55	1.9186	4.0505	6.6330	9.1135			
		0.78	2.3057	4.8675	7.7307	10.9519			
32.5	なし (単一)	4.38	1.5220	3.1919	5.0695	7.1818	1840	36.8	460
		3.10	1.6091	3.3969	5.3951	7.6431			
		2.19	1.7894	3.3776	5.9997	8.4996			
37.0	なし (単一)	4.38	1.5220	3.1919	5.0695	7.1818	1610	32.2	690
		3.10	1.6091	3.3969	5.3951	7.6431			
		2.19	1.7894	3.3776	5.9997	8.4996			
26.0	なし (単一)	3×3×17.7	2.8575	6.0325	9.5810	13.5730	2300	46	0
		3×3×4.9	2.8575	6.0325	9.5810	13.5730			
		3φ×13.9	2.1292	4.4951	7.1392	10.1139			
		3φ×6.2	2.1292	4.4951	7.1392	10.1139			
26	空隙無混入					2300	46	0	
32.5	空隙無混入					1840	36.8	460	
37.0	空隙無混入					1610	32.2	690	

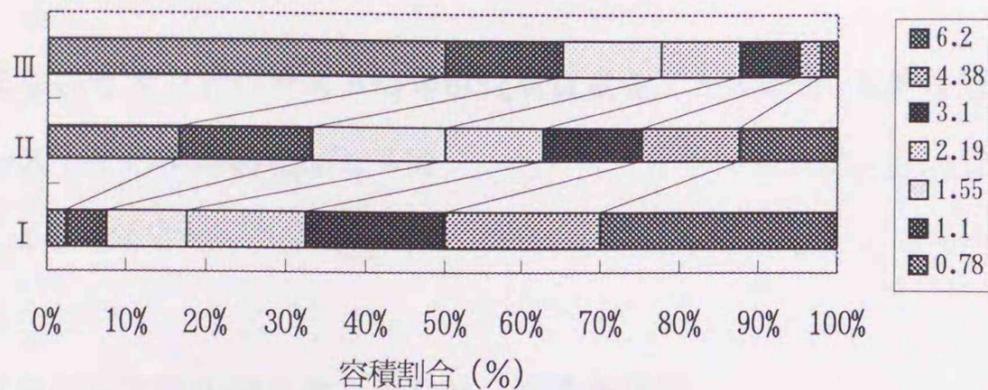


図3.2 球状モデル空隙の混合割合

よび脱型は全て20℃の恒温室で行った。混練は、比重差のある材料の練り混ぜに適していると言われるオムニキサー（公称容量5リットル）を用いて行った。試験体は脱型した後、20℃±2℃の水槽内で試験材齢まで水中養生を行った。1回の圧縮強度試験に用いた試験体は4本で、圧縮強度はその平均で表した。

3.4.4 試験体の空隙率の測定

モデル空隙の混入率は、練り上がり直後のモデル空隙を含んだセメントペーストの単位容積質量の実測により求めた。すなわち、混練に用いた材料の質量をそれぞれ

- セメント : W_c
- 炭酸カルシウム : W_k
- 水 : W_w
- 混和剤 : W_m
- モデル空隙 : W_B

とし、単位容積質量測定容器内のセメントペーストの質量を W_u とすると、その中のモデル空隙の重さ W_{uB} は

$$W_{uB} = \frac{W_u}{W_c + W_k + W_w + W_m + W_B} \times W_B$$

となる。

モデル空隙の質量をゼロとし、単位容積質量測定容器の体積を V とすると、セメントペーストの単位容積質量 W_p は

$$W_p = (W_u - W_{uB}) / V$$

となる。

空隙を含まないセメントペーストの単位容積質量を T とすると、モデル空隙の入ったセメントペースト中の空隙容積 $V_u B$ は

$$V_u B = (T - W) / T \times V$$

となる。

したがってモデル空隙の混入率、すなわち空隙率 P は

$$P = V_u B / V \times 100 (\%)$$

で求めることができる。

3. 4. 5 実験結果の解析法

各空隙の寸法、分布、形状について、例えば7種類の径の球状モデル空隙のデータについて、空隙率を説明変数 x とし、圧縮強度を目的変数 Y として各径ごとに重回帰分析を行うと次式が得られる。

$$Y = b_0^{(1)} + b_1^{(1)} x$$

$$Y = b_0^{(2)} + b_1^{(2)} x$$

⋮

⋮

⋮

$$Y = b_0^{(7)} + b_1^{(7)} x$$

ここで、上つきの添字は空隙径の水準を表す。これらの式の係数 $b_1^{(1)}$ 、 $b_2^{(2)}$ 、 \dots 、 $b_1^{(7)}$ および $b_0^{(1)}$ 、 $b_0^{(2)}$ 、 \dots 、 $b_0^{(7)}$ の差の有無を検定し、空隙径により空隙率と圧縮強度の関係式の傾き ($b_1^{(k)}$) や定数項 ($b_0^{(k)}$) が異なるかどうかを検討する。空隙分布の有無、空隙形状、固相部分の強度についても同様に行う。なお、空隙径はモデル空隙の実測値、空隙率はセメントペーストによる実測値から求めた値を解析に用いた。

3.5 実験結果および考察

3.5.1 空隙率と圧縮強度の関係

図3.3は、モデル空隙を用いたセメントペースト試験体の空隙率と圧縮強度の関係を示したものである。モデル空隙のみを空隙と想定した場合でもセメントペースト中の空隙に対応する毛細管空隙の場合と同様、空隙率と圧縮強度の対数値とのあいだに直線的な関係がある。また、これらの関係は空隙寸法によって異なっている。固相部分と見なしたセメントペーストの強度が異なる場合は、同じ空隙構造では固相部分の強度の高いほど試験体全体の強度が高くなる。このため、セメント水和物や骨材などの固相部分の強度差を無視できない場合は、圧縮強度と空隙構造の関係は異なるものになる。

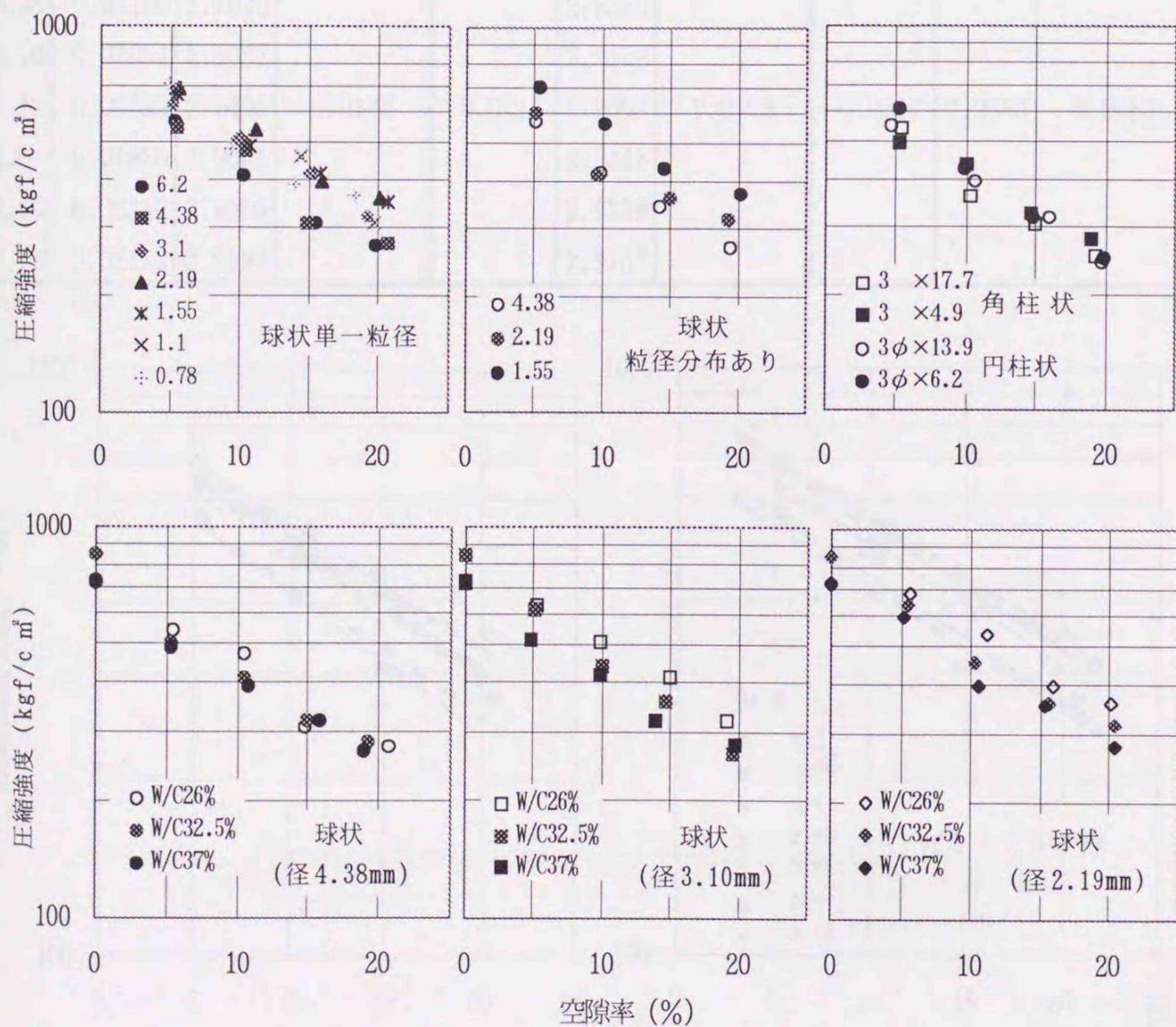


図3.3 空隙の寸法、分布、形状、固相部分の強度の異なるセメントペーストの空隙率と圧縮強度の関係

3.5.2 空隙の寸法、分布、形状が圧縮強度に及ぼす影響

(1) 空隙の寸法とその分布の影響

単一粒径の球状モデル空隙7種類28データについて、各空隙径ごとの空隙率 (x) と圧縮強度 (Y) の関係式を $Y = b_0^{(k)} + b_1^{(k)} x$ ($k = 1, \dots, 7$) で表し、この式の係数 b_0 , b_1 を各粒径ごとに求めた結果は表3.5の(1)、 b_1 を共通とした場合の結果が(2)となり、それぞれ図3.4および3.5に示すものとなる。ここで、 b_1 を共通とした回帰分析で求めた場合の残差平方和0.0168は、空隙径ごとに求めた0.01

表3.5 球状モデル空隙による空隙率と圧縮強度の回帰分析結果

粒径 (mm)	(1)空隙径ごとの回帰分析			(2) b_1 を共通とする回帰分析			(3)空隙径を無視した回帰分析		
	回帰係数 b_1	定数項 b_0	残差平方和	回帰係数 b_1	定数項 b_0	残差平方和	回帰係数 b_1	定数項 b_0	残差平方和
6.20	-0.02257	2.8577	0.0148	-0.0211	2.8391	0.0168	-0.0210	2.9088	0.0663
4.38	-0.02160	2.8620			2.8559				
3.10	-0.02054	2.9082			2.9152				
2.19	-0.02038	2.9496			2.9592				
1.55	-0.01820	2.9066			2.9448				
1.10	-0.02340	2.9655			2.9369				
0.78	-0.02138	2.9199			2.9167				

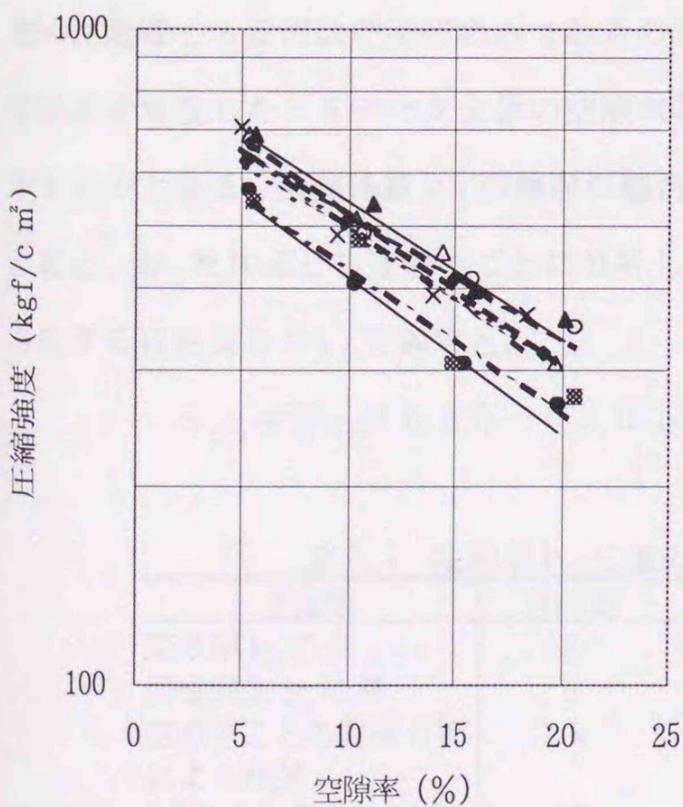


図3.4 空隙径ごとの回帰直線

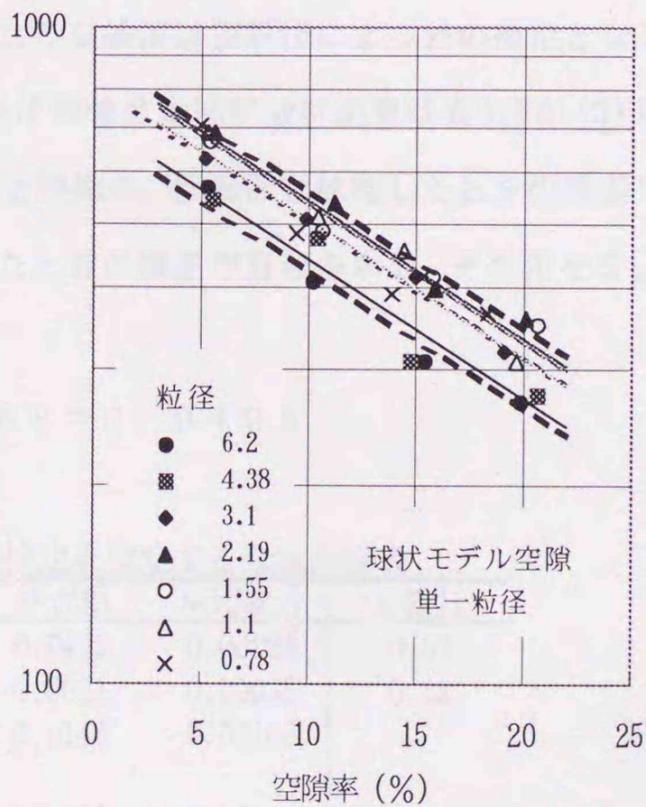


図3.5 傾きを共通とする回帰直線

4.8より大きい。これは回帰係数 b_1 を共通としたことに起因することから、この差を S_{β_1} とすると、

$$S_{\beta_1} = 0.0168 - 0.0148 = 0.0020$$

となる。また、これに対する自由度 f_{β_1} は、

$$f_{\beta_1} = 20 - 14 = 6$$

となる。これを分散分析表の形にまとめたのが表3.6である。

表3.6 回帰係数 b_1 の差を検定する分散分析表

変動因	自由度	平方和	平均平方	分散比
回帰係数 b_1 の差	6	0.0020	0.00033	0.32
空隙径ごとの回帰分析による残差	14	0.0148	0.00106	
b_1 を共通とする回帰分析による残差	20	0.0168		

分散比 $F = 0.32$ は、F表の値 $F(6, 14; 0.05) = 2.85$ より小さいので、 b_1 の差は有意とは言えず、空隙率と圧縮強度の関係を表す直線の傾きは各空隙径とも共通の値となる。

次に、空隙率と圧縮強度の関係を表す直線の傾きである回帰係数 b_1 を共通とする回帰分析で得られた式の定数項 $b_0^{(k)}$ に差があるかどうかを検討する。ここで、定数項の違いに影響する要因は空隙径のみであるので、この検討は空隙径による差の検定となる。空隙径を無視した28データ全体の空隙率と圧縮強度の回帰分析結果は表3.5の(3)に示すものとなる。回帰係数 b_1 の検討の場合と同様に、空隙径を無視したときの残差平方和と、 b_1 を共通とし空隙径ごとに分析したときの残差平方和を求め、その差を S_{β_0} 、対応する自由度を f_{β_0} で表すと、

$$S_{\beta_0} = 0.0663 - 0.0168 = 0.0495$$

表3.7 定数項 b_0 の差の検定を検定する分散分析表

変動因	自由度	平方和	平均平方	分散比
定数項 b_0 の差	6	0.0495	0.00825	9.82
回帰係数 b_1 の差	6	0.0021	0.00035	0.33
空隙径ごとの回帰分析による残差	14	0.0148	0.00106	
b_1 を共通とする回帰分析による残差	20	0.0168	0.00084	

となる。また、これに対する自由度 f_{β_1} は、

$$f_{\beta_1} = 26 - 20 = 6$$

となる。これを分散分析表の形にまとめたのが表 3.7 である。分散比 $F = 9.82$ は、 $F(6, 20; 0.01) = 3.87$ より大きいので、定数項すなわち空隙径によって顕著な差があると判断される。これゆえ、これらのデータについては、傾きが共通で定数項の異なる平行な回帰直線をあてはめるべきであることが確認された。

同様に、空隙分布がある場合やセメントペーストの水セメント比の異なる試験体の解析結果を含めて表 3.8 に示す。

表 3.8 空隙径の差の影響を検定する分散分析表

W/C (%)	空隙		データ数	回帰式					
	形状	分布		傾き			定数項		
				自由度	分散比	F検定	自由度	分散比	F検定
26	球	単一	28	(6,14)	0.32		(6,20)	9.82	**
		混合		(2,6)	0.72		(2,8)	20.65	**
単一		12	(2,6)	1.6		(2,8)	8.21	*	
単一			(2,6)	0.18		(2,8)	3.57		
26		単一,混合	40	(9,20)	0.4		(9,29)	11.69	**

** : 1%の危険率で有意、 * : 5%の危険率で有意

いずれの場合でも、空隙率と圧縮強度の関係を示す直線の傾きに差はなく、水セメント比 37%、単一粒径の場合を除いて F 検定の結果は有意となる。これらの結果より、圧縮強度は傾きが共通で定数項、すなわち空隙径で異なる直線式で表されることとなる。

セメントペーストの水セメント比が 26% である 40 データについて圧縮強度の対数値を目的変数とし、空隙率と空隙径 (D) の対数値を説明変数として回帰分析を行うと、

$$\log(\sigma) = -0.0205P - 0.1300 \log D + 2.942 \quad (3.1)$$

(重相関係数 0.949)

となる。この式において、空隙率や空隙径が圧縮強度の予測に役立っているかどうか、言い換えると空隙率や空隙径の回帰係数が 0 でないかどうかを検定した結果、空隙率の分散比 F は、 $F = 222.4$ 、空隙径は $F = 16.8$ となり、いずれも $F(1, 25; 0.01) = 7.77$ より大きく、回帰係数は 0 でないことが明らかとなった。また、空隙径の係数が負となることから、空隙寸法は圧縮強度に影響を及ぼし、球状と毛細管

の相違はあるが、空隙寸法が小さくなるほど強度が高くなるとの第2章の(2.15)式と同じ傾向が得られた。

3種類の単一粒径のモデル空隙による12データと、平均空隙径がこれらと同じになるように7種類の単一粒径のモデル空隙を混合した12データの合計24データを用いて、モデル空隙の混合の有無(空隙径の分布の有無)により空隙率と圧縮強度の関係に差があるかどうかについて回帰分析を行った結果は表3.9に示すものである。

表3.9 空隙径分布の有無の影響を検定する分散分析表

W/C (%)	空隙		データ数	回帰式					
	形状	分布		傾き			定数項		
				自由度	分散比	F検定	自由度	分散比	F検定
26	球	単一,混合	24	(2,18)	3.57		(1,20)	8.54	**

** : 1%の危険率で有意、 * : 5%の危険率で有意

F検定の結果は、モデル空隙の混合の有無によって空隙率、空隙径と圧縮強度の関係に差のあることを示し、その差を層別因子として重回帰式を求めた結果は以下となる。

$$\log(\sigma) = -0.0199P - 0.2304 \log D - 0.0358B + 3.001 \quad (3.2)$$

ここで、B : 層別因子(単一粒径の場合 ; B = 0、混合粒径の場合 ; B = 1)

この結果はモデル空隙を混合した場合、すなわち空隙径に分布がある場合、圧縮強度はより大きな径の空隙に依存する傾向があることを示している。

(2) 空隙形状

角柱状および円柱状のモデル空隙の長さの影響について、長短2種類のモデル空隙の長さが空隙率と圧縮強度の関係に影響するかどうかの検討を行った結果を表3.10に示す。角柱状、円柱状いずれの場合でも、モデル空隙の長短によって空隙率と圧縮強度の

表3.10 円柱状および角柱状のモデル空隙の長さの影響を検定する分散分析表

W/C (%)	空隙		データ数	回帰式					
	形状	長さ (mm)		傾き			定数項		
				自由度	分散比	F検定	自由度	分散比	F検定
26	角柱状	4.9,17.7	8	(1,4)	1.12		(1,5)	1.22	
	円柱状	6.2,13.9	8	(1,4)	2.36		(1,5)	1.01	

** : 1%の危険率で有意、 * : 5%の危険率で有意

関係式の傾きおよび定数項に差のない結果であった。

直径 3.15 mm の球、一辺が 3 mm で長さが 4.9 mm と 17.7 mm の角柱、直径が 3 mm で長さが 6.2 mm と 13.9 mm の円柱について、空隙形状の影響を検討した結果を表 3.11 に示す。

表 3.11 空隙形状の違いの影響を検定する分散分析表

W/C (%)	空隙形状	データ数	回 帰 式					
			傾 き			定数項		
			自由度	分散比	F 検定	自由度	分散比	F 検定
26	球, 角柱, 円柱	12	(2,6)	0.43		(2,8)	28.13	**

** : 1%の危険率で有意、 * : 5%の危険率で有意

分散分析の結果、空隙の形状によって空隙率と圧縮強度の関係式の定数項に差のあることが示され、空隙形状の違いを層別因子として重回帰分析を行い、得られた結果は、

$$\log(\sigma) = -0.0222P - 0.1066B_p - 0.0910B_c + 2.928 \quad (3.3)$$

ここで、 B_p , B_c : 層別因子 (球 ; $B_p = B_c = 0$, 角柱状 ; $B_p = 1$, $B_c = 0$, 円柱状 ; $B_p = 0$, $B_c = 1$)

となる。この結果、圧縮強度は球状の場合に最も高く、次いで円柱状、角柱状の順に強度が低くなり、角張った形状の空隙では応力集中により、破壊強度が低くなるという一般的な傾向と一致した。

3. 6 第3章の結論

第2章において、コンクリートの圧縮強度には、硬化コンクリートのセメントペースト部分の空隙率だけではなく、空隙径が影響することが示された。さらに、それほど大きくはないが、空隙の連続性やセメントの水和程度も圧縮強度に影響することが示された。このため、形状と寸法をそろえた人為的な空隙をセメントペーストに混入し、モデル空隙のみを空隙と想定した実験結果を統計的に解析してモデル空隙の寸法や分布の有無、形状が圧縮強度におよぼす影響を検証した。その結果は次のようにまとめられる。

- (1) 球状、円柱状、角柱状のモデル空隙のみを空隙と想定したセメントペースト試験体においても、圧縮強度の対数値と空隙率とのあいだに直線的な関係がある。また、同じ空隙率でも固相部分の強度の高い方が試験体強度が高くなる。
- (2) 圧縮強度と空隙率の関係はモデル空隙の空隙径によって差があり、同じ空隙率では空隙径が小さいほど圧縮強度が大きくなる。これは、コンクリート中の空隙は毛細管であり、本実験では球状であるとの違いがあるものの、第2章の結果が妥当であることを示すものと考えられる。
- (3) 空隙径に分布がある場合、圧縮強度はより大きな径に依存する傾向がある。
- (4) 球状、円柱状、角柱状など空隙形状によって圧縮強度と空隙率の関係が異なり、球状<円柱状<角柱状の順に球状が最も圧縮強度に影響を及ぼす。これは角張った形状の空隙では応力集中がより大きくなるため、破壊強度が小さくなるものと考えられる。
- (5) 球状、円柱状、角柱状のモデル空隙を含むセメントペースト試験体の圧縮強度はモデル空隙の空隙率や空隙径に依存し、強度との関係はコンクリートによる実験と同様、空隙率および空隙径が小さくなるほど強度が大きくなることを確認した。また、空隙の形状、固相部分の強度も試験体強度に影響していることが示され、第2章の提案式で考慮していない空隙形状の影響、固相部分の強度の影響も厳密には考慮されなければならない。

第 4 章 少量の試料による強度推定への適用

4.1 はじめに

第 2 章において、広範囲のコンクリートの圧縮強度が空隙率と空隙径を指標とする次式により一義的に表わされることを示した。

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

ここに、 σ : コンクリートの圧縮強度

P_p : 硬化コンクリートのセメントペースト部分の空隙率

D : 空隙径 (半径 $32 \text{ \AA} \sim 56 \mu\text{m}$ 間の空隙量の $1/2$ に対応する空隙径の対数值)

k, a, b : 定数

この強度式は、骨材表面のテクスチャーの違い (例えば碎石と砂利) や骨材吸水率の要因による影響の補正が可能であり、強度と空隙指標との対応が従来提案されているいずれの関係式よりも優れている。

本章は、この関係式を用いてコンクリートの圧縮強度を推定する手法を開発し、その精度を検討したもので、第 2 章で提案した強度式をコンクリートの圧縮強度推定法として適用するための具体的方法のほか、推定式の誤差検討、適用例について記述する。

ここで提案する強度推定法は、コンクリート強度がセメントペースト部分の空隙構造に依存することを基礎としているため、配合推定の場合と異なり試料中の骨材の割合が全体のコンクリートを代表する必要がない。したがって、空隙指標の測定に必要な試料は破碎された少量のコンクリート片でよいという利点もある。

4.2 強度推定のための基本式

強度推定の場合、推定式の精度の高い方が望ましいことは言うまでもない。第2章でも述べたように、空隙率と空隙径のほかに空隙の連続性やセメントの水和程度に関する指標（もどり比や結合水率）を追加することにより強度式の精度が向上する（図4.1）。このため、ここではこれらの指標を取り入れ、さらに骨材の影響を加味した(4.1)式を強度推定のための基本式とする。

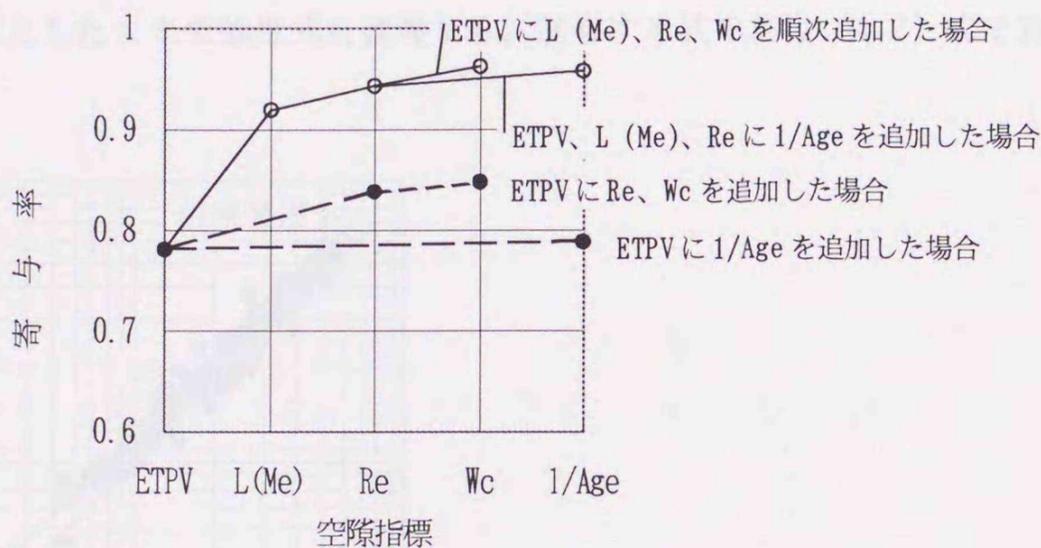


図4.1 変数の追加に伴う寄与率の増大 (シリーズ II, III)

$$\log \sigma = a \text{ETPV} + b \log (\text{Me}) + c \text{Re} + d \text{Wc} + C + S \quad (4.1)$$

$$S = e (1 - m) (\text{Agg} - 2.00) + f A_t$$

ここに、 σ : 推定圧縮強度 (kgf/cm^2)

ETPV : 有効細孔量

Me : 中央値

Re : もどり比

Wc : 結合水率

Agg : 細・粗骨材の平均吸水率 (%)

m : 溶解率

A_t : 碎石の場合 $A_t = 1$, 砂利の場合 $A_t = 0$

a, b, c, d, e, f, C : 実験定数

ところで、重回帰分析法により (4.1) 式を誘導する場合、実測強度 ($\log \sigma_m$) と推定強度 ($\log \sigma$) の差、すなわち誤差 e_i の総和 $\sum e_i^2 = \sum (\log \sigma_m - \log \sigma)^2$ が最小となるように式の係数 a, b, \dots, C を定めることになり、このため、誘導された強度式による推定値と実測値の誤差は、図4.2に示すように対数軸上で強度の大小にかかわらず一定となる。しかし、この関係を実数軸で見た場合は、図4.3に示すように推定値と実測値の誤差は強度が大きくなるほど大きくなる。強度推定式としては推定値の誤差が強度の大小に係わらず一定である方がより実用的であることから、ここでは圧縮強度を実数値としたままで強度式を誘導する。誘導する式の形は (4.2) 式で表

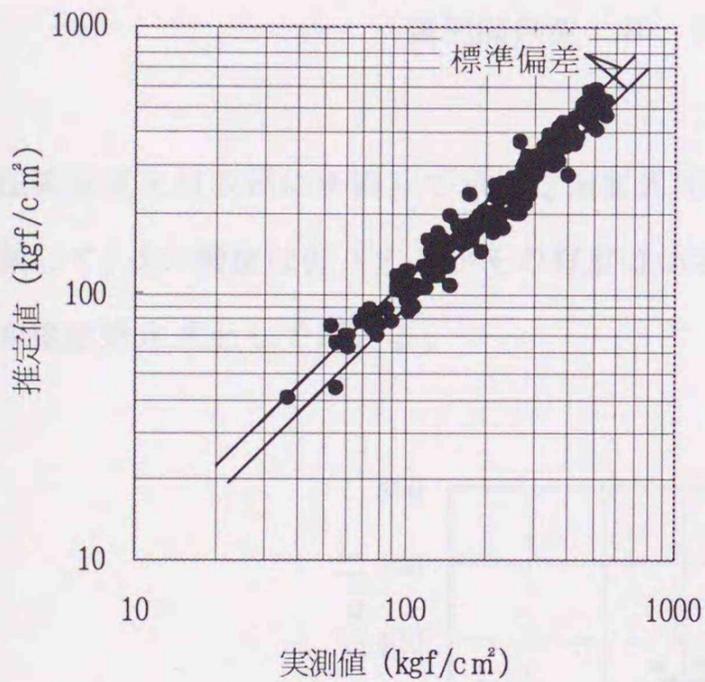


図4.2 対数とした圧縮強度の実測値と推定値の対応性

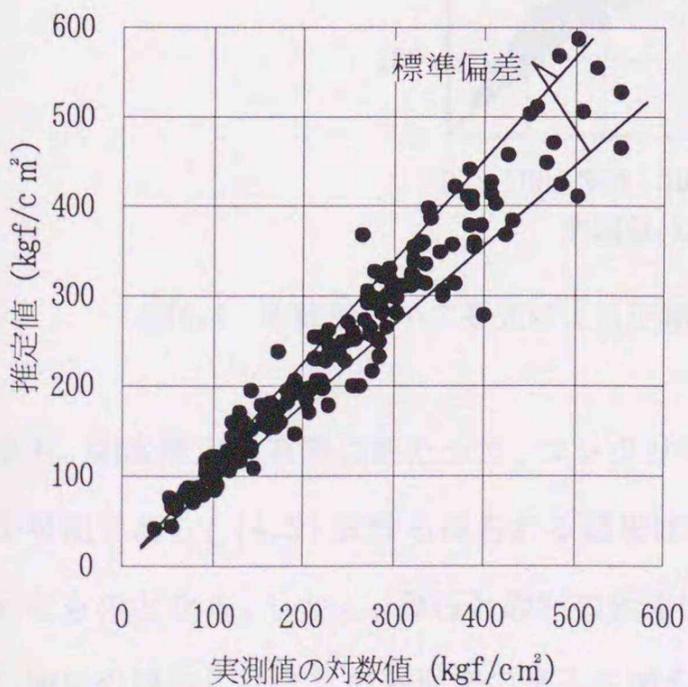


図4.3 実数とした圧縮強度の実数値と推定値の対応性

されるもので、この関係式は非線形最小二乗法を用いることにより求められる。

$$\sigma = C \cdot S \exp(a E T P V + b \log(M e) + c R e + d W c) \quad (4.2)$$

式の誘導には、シリーズIIからVまでの281データの中から空隙指標と強度との関係が他のデータとは異なる超早強セメントおよび人工軽量骨材による30データを除いた251データを用い、非線形最小二乗法により得られる式は(4.3)式となり、この式による実測値と計算値の関係は図4.4に示すものとなる。

$$\sigma = 1470 \exp(-0.0267 E T P V - 0.485 \log(M e) - 0.96 R e + 3.53 W c) \quad (4.3)$$

(重相関係数 0.973)

圧縮強度を対数値に変換して求めた強度式((2.34)式)の重相関係数0.975と比較して、式の精度は低下するがその程度は小さく、使用上問題はないと判断し、(4.3)式を強度推定式として用いる。

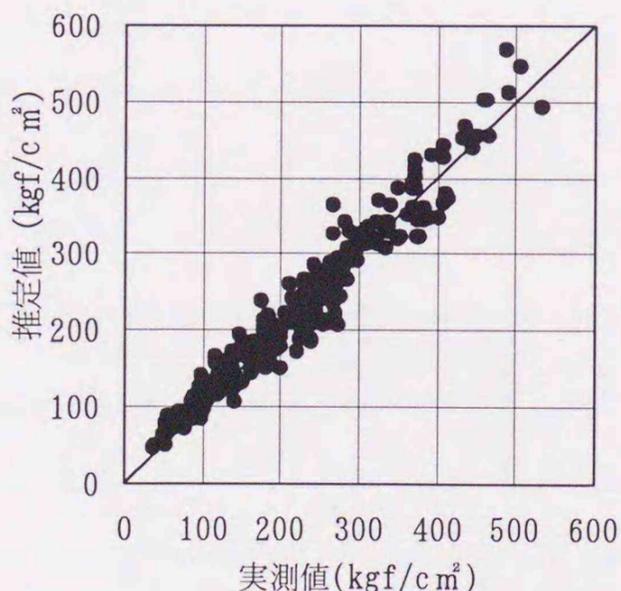


図4.4 非線形最小二乗式による圧縮強度の実測値と推定値の対応性

なお、強度推定の実際にあたって、コンクリート中の骨材吸水率を知ることはほとんど不可能であり、(4.3)式から得られる結果は、細・粗骨材の平均吸水率を2.00%と仮定したものとなる。しかし、碎石と砂利の相違はコンクリート片から知ることが可能で、碎石使用の場合には3%の強度増の補正を加えたものとなる。また、空気量は、有効細

孔量と強度の係に影響する要因であり、硬化後の少量の試料片ではその値を知ることができない。しかし、水銀圧入法の測定は入り口細孔を測定することから、コンクリート中の空気泡は有効細孔量の測定結果に加わっているものとしてその補正は考えない。さらに、コンクリートの圧縮強度は試験時の試験体の含水状態により異なるが、本研究で得た空隙構造の指標は、いずれも特性値でこのような変化に追随しない。このため、ここでは、コンクリートの湿試験強度（約48時間水中放置）をコンクリート固有の強度と想定している。また、試験体はすべて10φ×20cmであり、推定強度はこの形状の湿試験強度に対応している。

4.3 強度推定の手法

(1) 特徴

ここで提案する強度推定法は、コンクリート強度がセメントペースト部分の空隙構造に依存することを基礎としているため、配合推定の場合と異なり試料中の骨材の割合が全体のコンクリートを代表する必要がない。したがって、空隙指標の測定に必要な試料は破碎された少量のコンクリート片でよく、最小限200～300gのコンクリート片でよい。

(2) 適用範囲

本推定法は、健全な普通コンクリートに適用する。石灰岩質骨材を用いたコンクリートの場合には塩酸による溶解試験を含んでいるため適用できない。また、人工軽量骨材を用いたコンクリートでは、骨材の空隙が影響し、骨材吸水率による強度と空隙率の関係の補正が困難なため、適用できない。同様に、凍害など組織の変化、特にひびわれが強度低下の原因となっている場合にも、本推定法の適用は困難と思える。

(3) 推定される強度

推定強度は湿試験によって得られる10φ×20cmの形状のシリンダー強度に対応する。

コンクリートの圧縮強度は試験時の試験体の含水状態により異なるが、本研究で得た空隙構造の指標は、いずれも特性値でこのような変化に追随しない。このため、ここでは、コンクリートの湿試験強度(約48時間水中放置)をコンクリート固有の強度と想定している。

(4) 推定手順

破碎試料による実験は1回の測定に用いる試料を約11gとし、それぞれ2回ずつ行うものとする。したがって予備試料を必要としない場合、1回の推定には約50gの試料が必要で、200～300g程度のコンクリート塊によってこの試料を得ることができる。圧縮強度の推定手順は図4.5に示すものである。

a 前処理

i) コンクリートを破碎し、破砕片を篩でふるって2.5～5mmの試料を約50g採取し、それを約300mlのアセトン中で10分間洗浄する。

ii) D-Dryにより約48時間真空乾燥を行った後、試料分取器により4分し、各

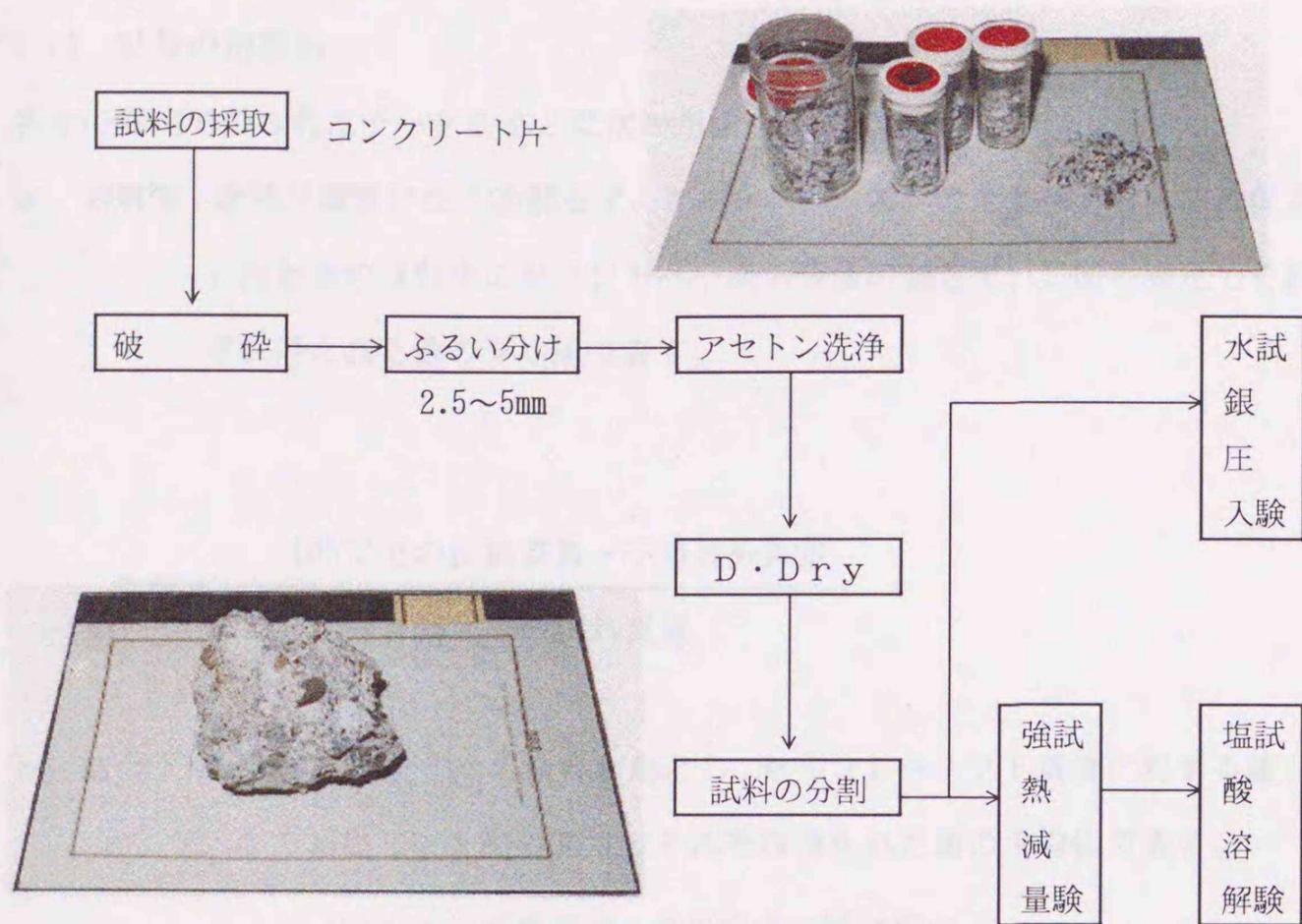


図 4.5 実験の手順と試料

測定の前回の試料とする。試料は測定までの期間デシケータ中で保存する。

b) 空隙構造の測定 (2回)

D-Dry処理後の試料をそのまま用い、水銀圧入法により空隙形状を円筒形と仮定した半径 $31.6 \text{ \AA} \sim 56 \mu\text{m}$ の範囲の空隙量を測定する。測定は、加圧過程と減圧過程について行う。

c) 結合水率・溶解率の測定 (2回)

i) D-Dry処理後の試料を 105°C で2日間乾燥し、乾燥後の試料質量を測定する。

ii) 乾燥後の試料をるつぼに入れ、 600°C の電気炉中で3時間強熱し、デシケータ中で30分間冷却した後、強熱減量を測定する。

iii) 強熱減量後の試料を10%の塩酸溶液約1000ml中で2時間攪拌し、試料のペースト部分を溶解させる。

iv) 不溶残分を含む溶解液を濾紙(5種B)で濾過し、残留物を濾紙とともにるつぼに入れ、 950°C の電気炉中で30分間乾燥する(濾紙は低温で灰化させる)。

v) デシケータ中で 30 分間冷却した後、不溶残分質量を測定する。

(5) 結果の指標化

各々の測定で得られたデータをもとに次の指標を計算する。

- a 溶解率：骨材が塩酸に全く溶解せず、セメントペーストの全量が溶解すると仮定したときの試料中のセメントペースト重量の割合で、2 回の測定でそれぞれ得られた値の平均値で表す。

$$\text{溶解率} = \frac{105^\circ\text{Cでの試料質量} - \text{不溶残分質量}}{105^\circ\text{Cでの試料質量}}$$

- b 結合水率：強熱減量をすべて結合水量とし、セメントペースト質量に対する値として算出し、2 回の測定でそれぞれ得られた値の平均値で表す。

$$\text{結合水率} = \frac{105^\circ\text{Cでの試料質量} - 600^\circ\text{Cでの試料質量}}{105^\circ\text{Cでの試料質量} \times \text{溶解率}}$$

- c 総細孔量：水銀圧入試験の加圧過程で測定される全空隙量（半径 $32 \text{ \AA} \sim 56 \mu\text{m}$ 間の空隙量。ただし、測定方法の特性から $56 \mu\text{m}$ 以上の空隙でも入口半径が $56 \mu\text{m}$ 以下であればその量も加算されている）。2 回の測定結果を平均して求める。

- d 有効細孔量：骨材中に空隙を含まないと仮定した場合のセメントペースト部分の空隙の総量で、セメントペースト質量に対する割合として算出する。

$$\text{有効細孔量} = \frac{\text{総細孔量}}{\text{溶解率}}$$

- e もどり比：減圧過程で測定された空隙量と加圧過程での空隙量との比の値。

$$\text{もどり比} = \frac{\text{減圧過程での空隙量}}{\text{加圧過程での空隙量}}$$

f 中央値：加圧過程での空隙径分布において、全空隙量の1/2に対応する空隙半径の値。2回の測定結果を平均した空隙径分布から計算する。

(6) 強度推定式

上記で得られた指標を以下の式にあてはめ、推定強度を算出する。

$$\sigma = 1470 \exp(-0.0267 ETPV - 0.485 \log(Me) - 0.96 Re + 3.53 Wc)$$

ここに、 σ ：推定圧縮強度 (kgf/cm²)

ETPV：有効細孔量 ($\times 10^{-2}$ cc/g)

Me：中央値 (Å)

Re：もどり比

Wc：結合水率 (g/g)

(ただし、碎石使用の場合は推定圧縮強度を3%増とする)

試料名	空隙率 (%)	空隙径分布 (Å)	もどり比	結合水率 (g/g)	推定強度 (kgf/cm ²)
試料A	15.2	1.2	0.8	0.5	1200
試料B	18.5	1.5	0.9	0.6	1350
試料C	22.1	1.8	1.0	0.7	1500

4.4 強度推定式の誤差の検討

4.4.1 検討範囲

強度推定値の誤差には、強度推定式が推定の対象となる条件範囲を十分に包括していないために生じる誤差と、実験によって得られたデータのばらつきの誤差がある。特に、少量の試料による特性値の判断では、このデータのばらつきの誤差が大きくなりやすく、ここでは主としてこの点の検討を行う。また、型枠などに打ち込まれたコンクリートはブリージングなどの影響により上部と下部で強度の異なることが知られており、この点についても空隙構造の観点から検討を行う。

4.4.2 実験方法

これまでの実験が主として10φ×20cmのシリンダー試験体から採取した試料によっているのに対し、本実験では135×255×15cmの版状コンクリートからコアを抜き取り、これから試料を採取した。版を作製するにあたりコンクリートにはレデーミクストコンクリートを使用し、通常の床を想定して上端筋、下端筋を配置した。レデーミクストコンクリートのセメントは小野田社の普通ポルトランドセメント、細骨材は浜厚真産海砂(比重2.68、吸水率1.61)、粗骨材は追分産山砂利(2.57、2.42)、混和剤はヴィンソルである。調合および練り上がり性状を表4.1に示す。

表4.1 コンクリートの調合および練り上がり性状

調 合			練り上がり性状					
水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位水量 (kgf/m ³)	絶対容積 (1 / m ³)			スラフ° (cm)	空気量 (%)	単位容積 質量(t/m ³)
			セメント	細骨材	粗骨材			
56.1	42.7	175	98	291	391	18.4	3	2.31

コンクリート打設後は約24℃の水中に放置し、材令4週で強度試験が可能となるよう4週以前に版から30本のコアを採取した。このコアによる強度試験ののち、破碎試料を採取し、強度推定のための実験を行った。実験回数はそれぞれのコアについて1回、合計30回とした。版模型とコアの採取位置を図4.6に示す。

また、コアの上下の位置による強度差を検討をするため、30本のコアのうち5本について上下方向に5分割し、破碎試料を採取して強度推定のための実験を行った。

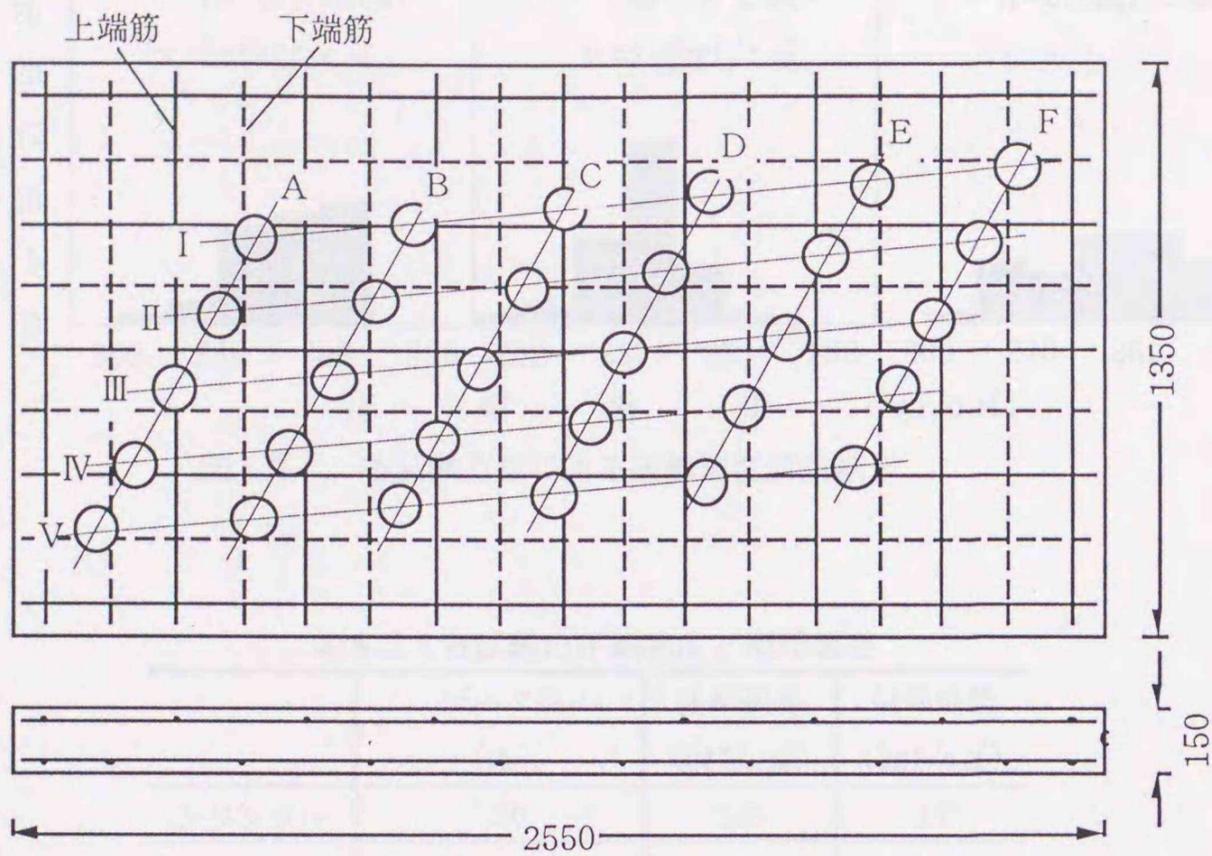


図4.6 版模型からのコア採取位置

4.4.3 実験結果および考察

(1) 試料のあばれによる誤差

表4.2にそれぞれの場所から採取した1本のコアの圧縮強度（JIS A 1107による補正強度，湿試験）と、そのコアより採取した試料による推定強度を示す。

30個のコア強度、推定強度を、同時に作製したシリンダー30本のデータとともに示したものが図4.7および表4.3で、シリンダー強度の標準偏差 $17\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、コア強度の標準偏差 $16\text{kgf}/\text{cm}^2$ に対し、(4.3)式による推定値の標準偏差は約 $24\text{kgf}/\text{cm}^2$ となり、

表4.2 コア強度と推定強度

	A		B		C		D		E		F	
	コア強度	推定値										
I	240	258	232	212	243	251	236	244	256	222	213	312
II	204	261	242	287	225	244	241	224	247	218	226	285
III	243	250	233	246	244	267	245	235	224	246	245	279
IV	234	261	241	243	219	252	231	265	235	260	244	286
V	253	223	227	249	227	240	219	226	272	288	186	257

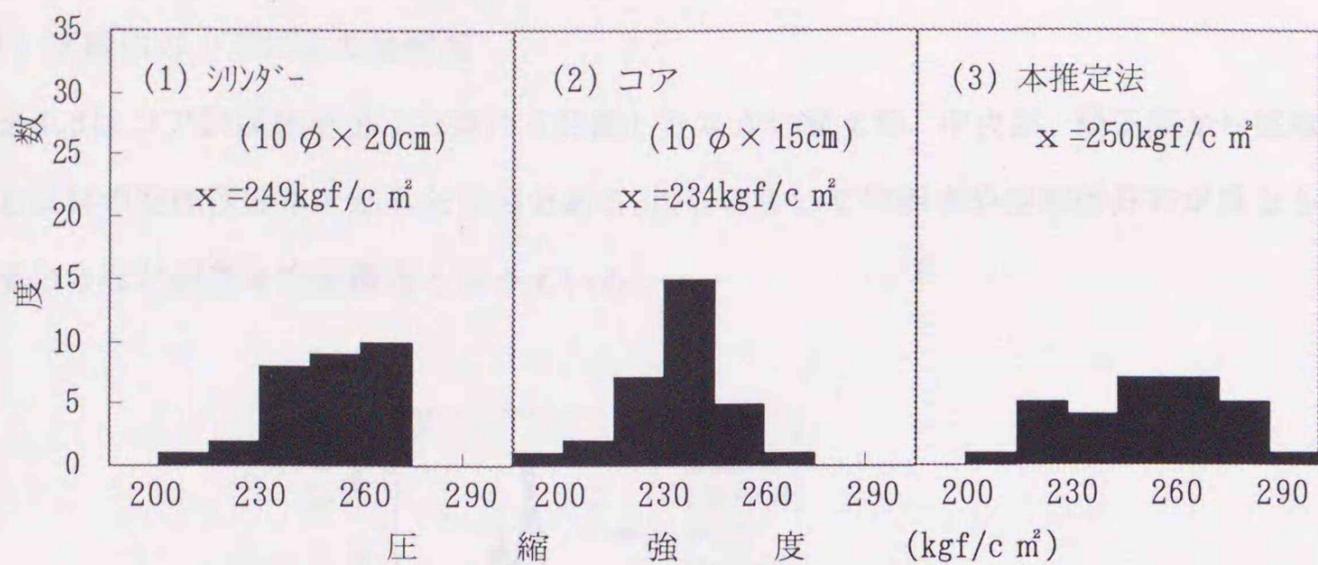


図4.7 各試験方法による圧縮強度試験結果

表4.3 各試験の圧縮強度と標準偏差

	データ数		圧縮強度 (kgf/cm^2)	標準偏差 (kgf/cm^2)
	(本)			
シリンダー	30		249	17
コア	30		234	16
本推定法	30		253	24
	2ヶ平均	15		16

推定強度のばらつきは実際の強度試験による値と比較してやや大きな値を示した。しかしながら、図4.7のデータを乱数表により2データずつ組み合わせて平均し、それぞれを1データとした場合の標準偏差は 16 kg/cm^2 となり、コアの標準偏差と同程度となった。このため、破砕試料による2回の測定値の平均値を1データとして本推定法により得られる推定強度の標準偏差は、コアの標準偏差に匹敵する程度であると判断した。

図4.7に示す30個のデータによるシリンダー強度、コア強度に対する推定強度の平均値の差は、このコンクリートの条件に限定した実験式に起因する誤差を示すものといえる。この結果では、シリンダー強度 249 kgf/cm^2 に対して推定値は 253 kgf/cm^2 であり、シリンダー強度と推定強度はほぼ一致している。コア強度は 234 kgf/cm^2 と、推定強度と比較して小さな値となっているが、鉄筋が配置されていること、コア抜き取りにともなうコンクリート組織のみだれ⁴⁷⁾などを考慮すると、むしろこの差は妥当な程度であると考えることができる。

(2) 試験体の上下による強度差

図4.8はコア供試体を上下方向に5分割したなかの最上部、中央部、最下部から採取した試料の空隙径分布を示したものである。位置によって空隙率や空隙径分布が異なり、下部の方ほど緻密な空隙構造となっている。

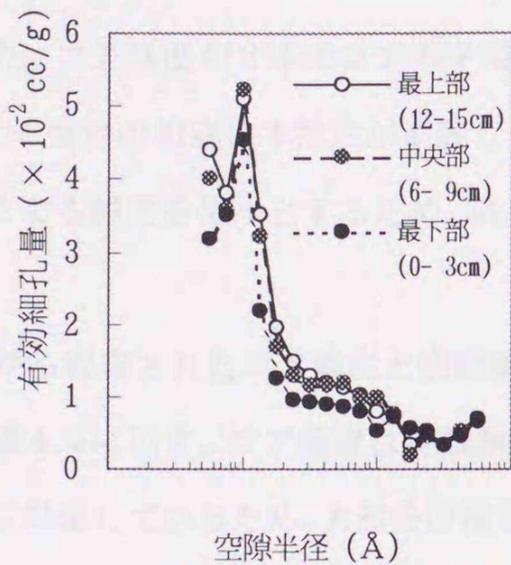


図4.8 上下の位置による空隙径分布の相違

コアを5分割した部分ごとの圧縮強度の推定値を示したのが図4.9である。下部の方ほど圧縮強度が大きく、一般的な傾向と一致している。この結果は、本推定法が実測困難な狭い範囲のコンクリートの強度分布の推定にも有効なことを示すとともに、ブリージングなどの影響が考えられる場合の試料採取に注意が必要なことを示している。

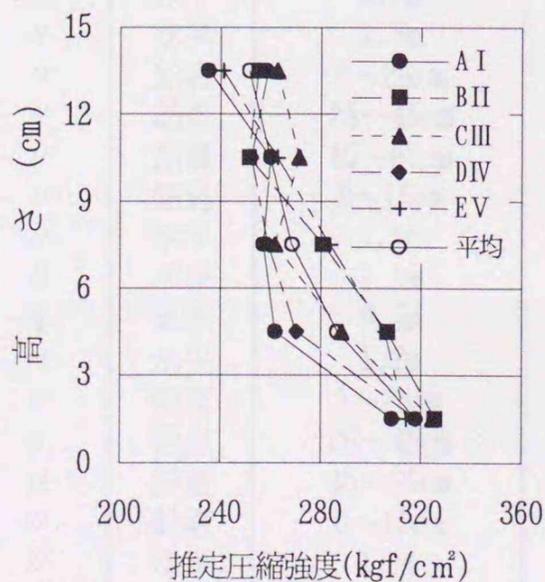


図4.9 上下の位置による推定圧縮強度の相違

4.5 強度推定の適用例

4.5.1 実大部材モデルに対する適用例

大林組技術研究所における構造体コンクリートの強度管理に関する研究⁴⁸⁾の一環として、材令3から4年を経た実大の模型構造物からコアが抜き取られた。圧縮強度試験後、このコアの空隙構造の測定が北海道大学に依頼され、強度推定法を種々の模型部材に適用する機会を得た。コア強度が3本のコアの平均値であること、この強度推定の目的が、構造体部位による強度の相違に本推定が追随しうるかどうかの検討にあることから、データのあばれによる誤差を最小とするため、各試料について測定は4回ずつ行った。

大林組技術研究所から報告されたコア強度と空隙構造測定結果を(4.3)式に適用して求めた推定強度を表4.4に示す。コア強度は乾試験によって得られたものであり、本推定法は湿試験強度に対応しているため、大部分の推定強度はコア強度を下回っている。

この推定値と実測値の関係を、本研究での実験条件の検討過程で得られた乾試験強度と湿試験強度の関係とともに図示したものが図4.10で、乾試験—湿試験による強度差を考慮すると、概ね満足できる結果であること、また、実測強度の大きいものは推定強

表4.4 コンクリート強度の実測値と計算値

部材	材齢	打設季節	抜取方向	抜取り位置 (上端からの深さ)	圧縮強度(kgf/cm ²)	
					実測値 (乾試験、 コア強度)	推定値 (湿試験、 シリンダー)
壁	3.7年	夏	水平	0.5m	273	193
壁	//	//	水平	1.7m	331	231
はり	//	//	鉛直	5~25cm	307	221
はり	//	//	鉛直	25~45cm	304	232
はり	//	//	鉛直	45~65cm	311	227
スラブ	//	//	鉛直	0~15cm	235	169
柱	//	//	水平	1.1m	354	271
柱	//	//	水平	1.1m	313	265
壁	3.3年	冬	水平	0.5m	340	230
壁	//	//	水平	1.7m	375	221
はり	//	//	鉛直	5~25cm	378	293
はり	//	//	鉛直	25~45cm	386	311
はり	//	//	鉛直	45~65cm	391	295
スラブ	//	//	鉛直	0~15cm	312	214
柱	//	//	水平	1.1m	491	352
柱	//	//	水平	1.1m	474	420

度も大きく、推定強度が部材位置による強度の相違に追随していることが明らかとなった。

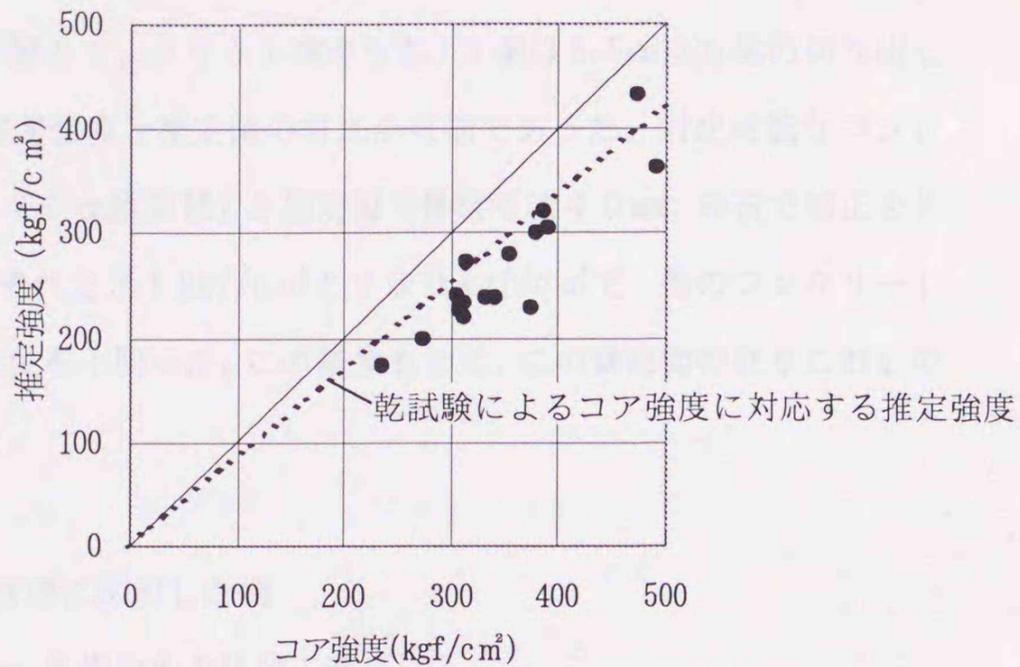


図4.10 コア強度と推定強度の関係

4.5.2 実際の構造物における適用例

本研究の実施過程においても、コンクリート塊による強度推定の要望があり、研究段階の方法であること、推定可能な範囲が十分明かではないことなどを説明した上で、その段階までに得られた実験式による強度推定を行った。実験強度との対比の可能な二、三の例を記述する。推定強度は(4.3)式によって求めたもので、骨材吸水率や碎石使用の補正は行っていない。

〔例1〕管理用供試体の強度が不足した例

—— 札幌市内の公共建築物の冬期工事

施工者の事情の説明において、管理用試験体の初期凍害が想定された。問題となったコンクリートは地下構造物で、初期凍害のおそれがなく、強度推定が可能であると判断した。強度推定の結果は材令35日で265kgf/cm²で、その後、念のために行ったコア試験強度は湿試験で308 kg kgf/cm² (材令44日)であった。

〔例2〕強度不足が心配された例

—— 北海道内某町の土木建造物

研究室に持ち込まれた4個のコンクリート塊のうち、1個は8.5cm立方体の切り出しが可能で、この場合のみ実測強度と推定値の対比が可能であった。対比可能なコンクリートの実測値(10φ×20cm換算値)と推定値(骨材寸法40mm, 碎石で補正を8kgf/c³増と仮定)はそれぞれ231kgf/c³と230kgf/c³で、他のコンクリート塊の推定強度も設計基準強度を上回った。この結果もとに、この建造物の取りこわしの処置を避けることができた。

〔例3〕寒中施工の強度管理に応用した例

—— 札幌市内の住宅工事

壁体のせき板が所定の材令よりも早く取りはずされたため、コアが採取された。せき板の取りはずし材令とコンクリート強度には直接的な関係がないため、強度管理のための推定となったが、持ち込まれたコアが破損していた。このため、10φ×20cmの試験体の切り出しが可能な部分で強度試験を、残りの部分で強度推定を行った。

得られた結果は実測値が120kgf/c³、推定値が80kgf/c³であった。コアの採取位置が床面で、実測部分が下部、推定部分が上部であったこと、寒中施工の採暖の影響で実測部分の養生温度が高いことなどが判明したが、当時は実測値と推定値の差40kgf/c³にどの程度の誤差が含まれているかは判断できなかった。その後、厚さ15cmの床スラブモデルを厚さ方向に3cm間隔で分割してそれぞれの強度推定を行った結果が得られ、コア強度の平均値240kgf/c³程度のコンクリートに対し、最上端部と最下端部で76kgf/c³の強度差があることが判明した。この結果をもとに、本例における実測値と推定値の差は主として試験体上下の強度差によるものと判断することになった。

4.6 第4章の結論

本章では、第2章で検討されたコンクリート強度の空隙構造依存性を応用し、空隙構造からコンクリートの圧縮強度を推定する方法を開発し、推定誤差を検討した。ここで得られた推定式は、次式である。

$$\sigma = 1470 \exp(-0.0267 ETPV - 0.485 \log(Me) - 0.96 Re + 3.53 Wc)$$

ここに、 σ : 推定圧縮強度 (kgf/cm²), ETPV : 有効細孔量 ($\times 10^{-2}$ cc/g),

Me : 中央値 (Å), Re : もどり比, Wc : 結合水率 (g/g)

(ただし、碎石使用の場合は推定圧縮強度を3%増とする)

推定の手法はコンクリート試料から約11gの試料を採取し、水銀圧入法による空隙構造の測定と強熱減量による結合水率の測定を行い、得られた結果を指標化して推定式に適用するものであり、この方法についての検討の結果、以下の結論が得られた。

- (1) 30個のコア強度およびシリンダー強度と強度推定式((4.3)式)による推定値の誤差検討の結果、1本のコア、シリンダー強度と1回の強度推定の結果では、推定値のあばれは幾分大きいものであった。
- (2) 破碎試料による2回の測定の平均値を1データとして得られる推定強度の標準偏差は約16 kg/cm²となり、コアの標準偏差と大差のない結果となった。
- (3) 材令3年から4年を経た実大の模型構造物から抜き取られたコアの強度推定を行った結果、大部分の推定強度はコア強度を下回ったが、乾試験-湿試験による強度差を考慮すると、概ね満足できるものであり、また、推定強度が部材位置による強度の相違に追随していることが明らかとなった。
- (4) 本推定法は少量の試料による実験を特徴としており、強度の実測が困難であるコンクリートの局所的な強度推定にも有効である。

5.1 はじめに

コンクリートの水セメント比、養生温度、材齢はセメントの水和反応を支配し、強度増進過程を表す要因であるが、一方で、これらはコンクリートの空隙構造を決定する要因でもある。つまり、水セメント比、養生温度、材齢は水和反応という過程を経てコンクリートの空隙構造を形成し、その結果としてコンクリートの強度が定まるものと考えることができる。

本章では、第 2 章で得られた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う。また、水セメント比、養生温度、材齢により工学的に定められるコンクリート強度増進過程の記述式であるゴンペルツ曲線と対比し、両者の関係について検討を加える。なお、ゴンペルツ曲線は、養生温度と材齢の積である積算温度を関数としてコンクリート強度を表す積算温度方式を基本としている。

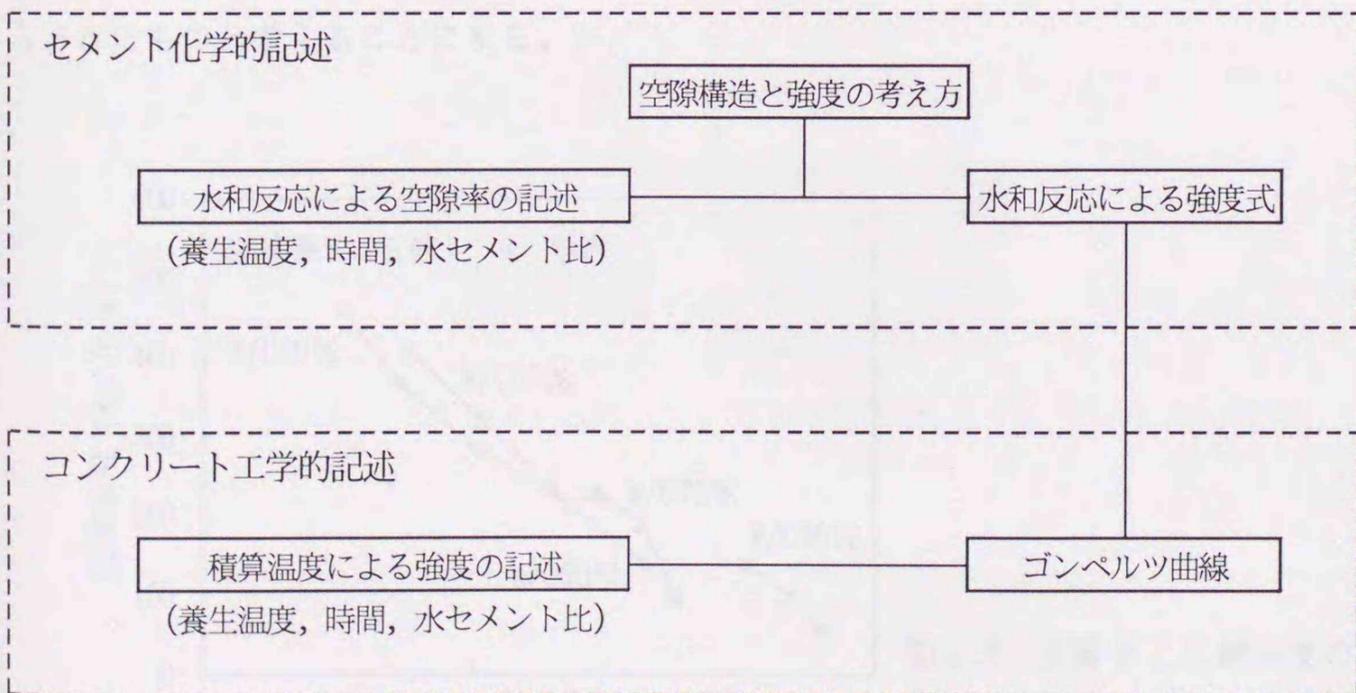


図 5.1 第 5 章の構成

5.2 セメントの水和反応とコンクリート強度

5.2.1 コンクリート強度と空隙率、空隙径の関係

空隙率、空隙径と強度の関係は第2章をもとに(5.1)式で表す。

$$\sigma = K D^{-a} \exp(-b P_p) \quad (5.1)$$

ここに、 σ : コンクリートの圧縮強度

D : 空隙径

P_p : 硬化コンクリートのセメントペースト部分の空隙率

K, a, b : 定数

(5.1)式はコンクリートの圧縮強度が硬化コンクリートのセメントペースト部分の空隙率と空隙径に支配されることを示す。ところで、硬化コンクリートのセメントペースト部分の空隙率である有効細孔量とコンクリートの圧縮強度の対数值との関係を水セメント比毎に表した場合、図5.2に示すような関係が見られる。すなわち、同一空隙率に対応する圧縮強度は水セメント比毎に異なる値となる。(5.1)式では、強度と空隙率の差をもたらすものは空隙径であり、ここでは水セメント比による強度と空隙率の関係の相違が、同じ空隙率となる水和率の相違に関係して得られる空隙径の相違によってもたらされたものと考えられることにする。

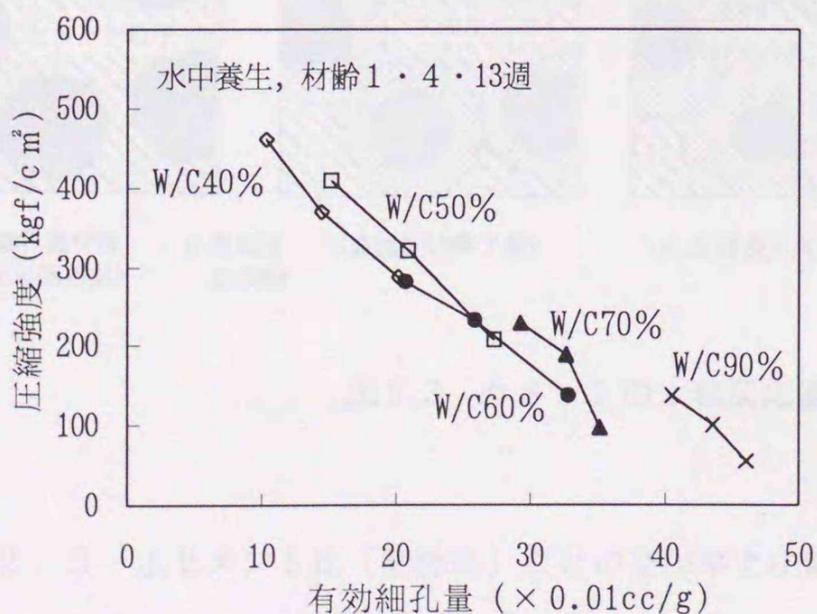


図5.2 空隙率と圧縮強度の関係

5.2.2 セメントの水和反応の考え方

セメントの水和反応を記述し、コンクリートの強度発現に対する温度、材齢の寄与を空隙率の変化として表すにあたり、モデル化の容易さのために、セメント粒子は均一な粒径を持つ球体であり、水和生成物は均一であると仮定する。また、セメントの水和反応過程を図5.3に示すように仮定する。すなわち、水の中に分散したセメント粒子（図5.3(a)）は水和の進行にともないセメント粒子の表面を境に外部、内部に水和物が生成して固体部分の体積が増大する（図5.3(b)；表面反応段階）。この体積増加は、もとのセメントの粒子の位置で生じる。その後、セメント粒子を水和生成物で連続させ、強度を形成する（図5.3(c)；全面浸入反応段階）。一方、練り上がり直後に水で満ちていた空間は、水和の進行により狭まり、水和生成物によって完全に充填されないで残った部分が毛細管空隙となる（図5.3(d)）。

表面反応は、セメント全表面が水和した時点で終了し、表面反応終了時は全面浸入反応開始時に対応する。また、強度は全面浸入反応開始時から発現するものとする。さらに、水和反応過程はセメント構成化合物の半数を占める C_3S の水和反応形態に対応するものとして水和反応速度式を設定する。

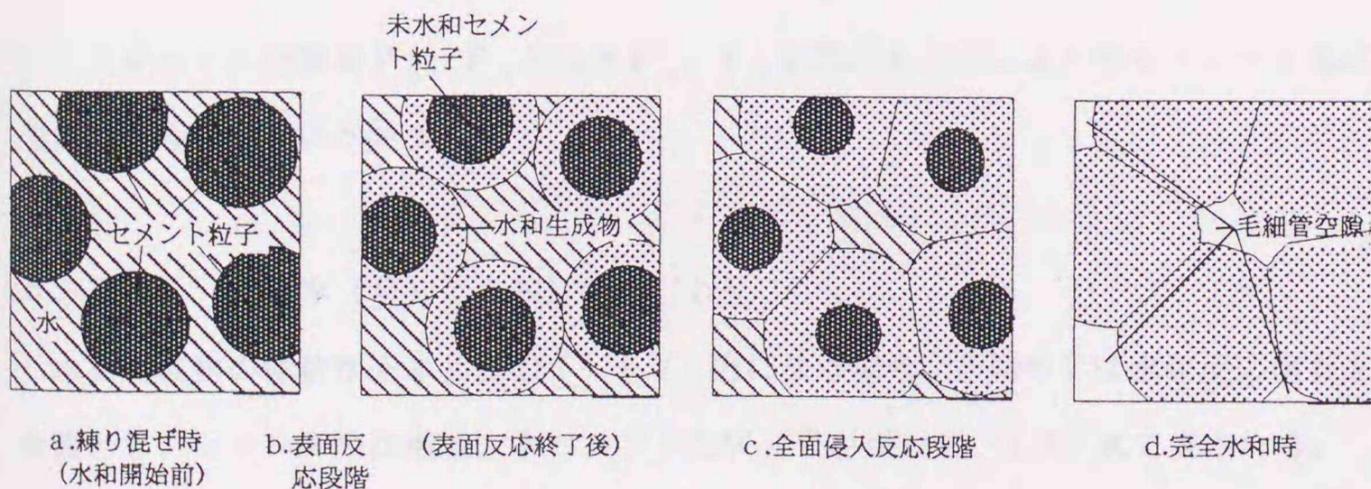


図5.3 セメントの水和反応過程

5.2.3 水セメント比（空隙径）ごとの空隙率と圧縮強度の関係

図5.4に示した強度-空隙率関係を、 $(P_f, \ln F_f)$ と $(P_0, \ln F_0)$ の2点を通る一次式で表わすと次式となる。

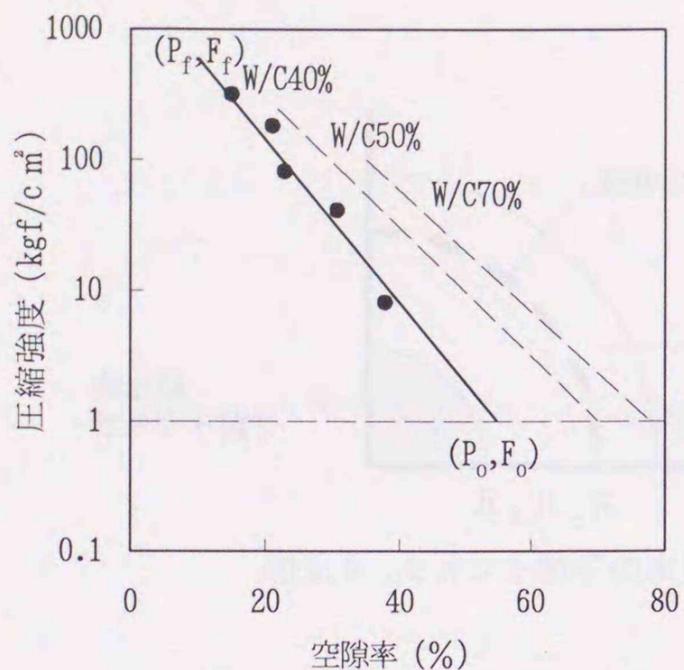


図5.4 空隙率と圧縮強度の関係

$$\ln(\sigma) = (\ln(F_o) - \ln(F_t)) \cdot (P - P_f) / (P_o - P_f) + \ln(F_f) \quad (5.2)$$

ここに、 P_o ：強度が得られる直前の空隙率

F_o ：強度が得られる直前の空隙率に対応する強度 ($F_o = 0$ であるが、ここでは、数値解析を可能とするため、 $F_o = 1$ と仮定する。)

P_f ：完全水和時の空隙率

F_f ：完全水和時の強度

したがって、空隙率 P_o 、 P_f と強度 F_o 、 F_f を求めることにより水セメント比毎に強度と空隙率の関係が定まる。

5.2.4 空隙率 (P) と水和反応率 (h)

水和生成物の体積が未水和物の $(1 + V)$ 倍になる場合、空隙率 P は水和反応率 h を変数とし、セメントの比重 ρ 、水セメント比 W/C を用いて (5.3) 式で表される。

$$P = 1 - \frac{C/\rho}{C/\rho + W} - \frac{C/\rho}{C/\rho + W} Vh = 1 - \frac{1 + Vh}{1 + \rho W/C} \quad (5.3)$$

また、セメントの水和反応率 h は、図5.5に示すようにもとのセメント粒子の体積とセメント粒子の未水和部分の体積比により次式で表される。

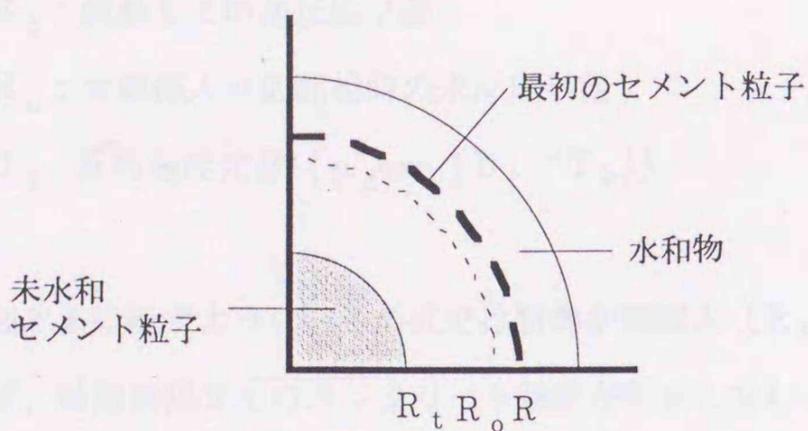


図5.5 セメント粒子の水和

$$h = 1 - R_t^3 / R^3 \quad (5.4)$$

ここで、 R_t : 材齢 t におけるセメント粒子の未反応半径

R : はじめのセメント粒子の半径

5.2.5 水和反応速度式の誘導

(1) 表面反応段階の水和反応速度式

表面反応段階は、硬化コンクリートのセメントペーストの表面積が水和により増加する過程であり、この段階では個々のセメント粒子の表面の接触はない。この反応は、増殖的に進み、その表面が全て水和生成物で覆われたときに終了する³¹⁾。

ここでは表面反応段階の最初のセメント粒子の反応は表面の面積に対して自触媒反応的に進むものと仮定し、得られる反応表面積についての表面反応段階の反応速度式を(5.5)式とした。

$$dn/dt = J_1(m-n)n \quad (5.5)$$

ここに、 m : 単位セメントペースト中のセメント表面積

n : 反応表面積

J_1 反応速度定数 ($a_1 \exp(b_1/T_k)$)

(2) 全面浸入段階の水和反応速度

藤井によると、全面浸入反応段階の C_3S の反応速度は、反応厚層 ($R_o - R_t$) に逆比例する形の(5.6)式で表される。

$$-dR_t/dt = J_2 / (R_0 - R_t) \quad (5.6)$$

ここに、 R_t : 材齢 t での未反応半径

R_0 : 全面侵入反応開始時の未反応半径

J_2 : 反応速度定数 ($a_2 \exp(b_2/T_k)$)

しかし、図5.6に示すように、この式では材齢が無限大 ($R_t = 0$) の時に反応速度が0とならず、材齢無限大でのコンクリート強度が収束しないことになる。

このため、ここでは反応層厚についての藤井の(5.6)式を、モデル化の容易さも考慮して、未反応半径 R_t の E 次式で近似し、材齢無限大 ($R_t = 0$) での反応速度が0となる形の(5.7)式で近似させる。

$$-dR_t/dt = J_2 R_t^E \quad (5.7)$$

ここに、 E : 反応次数

(5.7)式では図5.6に示すように、べき乗項 E 値を適切に選ぶことにより、ある程度の精度で(5.6)式に近似することができる。

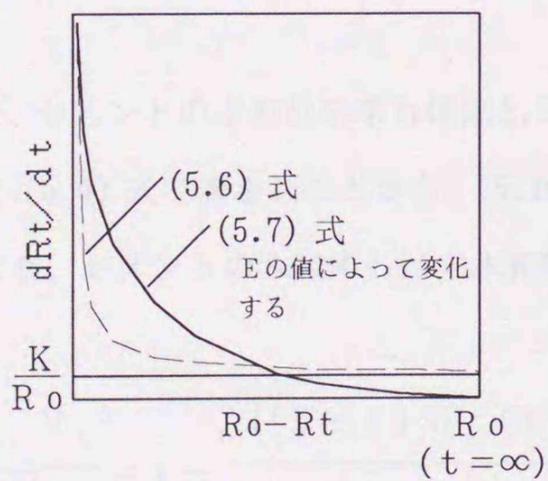


図5.6 (5.6)式と(5.7)式の比較

5.2.6 水和反応によるコンクリート強度増進モデル式誘導のための諸変数の算出

(1) 水和反応率 h と空隙率 P の算出

セメントの水和反応速度式(5.7)式を解くと(5.8)式となる。

$$-dR_t/dt = J_2 \cdot R_t^E$$

$$\int (1/R_t^E) \cdot dR_t = - \int J_2 \cdot dt$$

$$\frac{R_t^{1-E}}{1-E} = -J_2 \cdot t + C \quad (5.8)$$

ここに、C：積分定数

全面侵入反応が始まる時刻を t_0 とすると、 $t = t_0$ のときのセメント粒子の未反応半径 R_t は、 $R_t = R_0$ なので(5.8)式中の積分定数Cは(5.9)式として求められる。

$$C = J_2 \cdot t_0 + \frac{R_0^{1-E}}{1-E} \quad (5.9)$$

ここに、 t_0 ：全面侵入反応が始まる時刻

R_0 ：全面侵入反応が始まる時のセメント粒子の未反応半径

したがって、(5.8)式を R_t について解くと(5.10)式を得る。

$$R_t = \{(E-1) J_2 (t-t_0) + R_0^{1-E}\}^{1/1-E} \quad (5.10)$$

ところで、セメントの水和反応率 h は図5.5に示したセメント粒子の未水和部分の体積を用いて(5.4)式で表されことから、(5.10)式で表される R_t を(5.4)式に代入することにより、セメントの水和率 h は未水和物の体積で表され(5.11)式となる。

$$h = 1 - \frac{R_t^3}{R^3} = 1 - \frac{\{(E-1) J_2 (t-t_0) + R_0^{1-E}\}^{3/1-E}}{R^3} \quad (5.11)$$

得られた水和反応率 h を(5.3)式に代入すると空隙率 P が定まる。

ここで、(5.11)式の変数 t_0 および R_0 は以下のようにして求まる。

(2) 全面侵入反応開始時刻 t_0 の算出

全面侵入反応は、表面反応終了後直ちに生じることから、全面侵入反応開始時刻 t_0 。

は表面反応終了時と同値であるとする。このため、全面浸入反応開始時刻 t_0 は、表面反応段階の反応速度式(5.5)式を解いて求めることができる。

$$dn/dt = J_1(m-n)n \quad (5.5)$$

$$\int \{1/(m-n)n\} dn = \int J_1 \cdot dt$$

$$\int \{(1/m)/(m-n) + (1/m)/n\} dn = \int J_1 \cdot dt$$

$$(1/m) \log(m-n) + (1/m) \log(n) = J_1 \cdot t + C$$

$$\therefore \log(m-n) + \log(n) = m \cdot J_1 \cdot t + C' \quad (5.12)$$

ここで、積分定数 C' を数値的に解くために、 $t=0$ のときの反応率 0 を $(n/m) = 0.001$ 、 $t=t_0$ のときの反応率 1.0 を $(n/m) = 0.999$ と近似する。

ここで、 n/m ：水和反応面積/セメント粒子のはじめの表面積

$$t=0 \text{ のとき、 } n=0.001m$$

$$t=t_0 \text{ のとき、 } n=0.99m$$

であるので、

$$\log(m-0.001m) + \log(0.001m) = C'$$

$$\log(m-0.99m) + \log(0.99m) = m \cdot J_1 \cdot t_0 + C'$$

$$\log(0.999m) + \log(0.001m) = \log(0.000999m^2) = C'$$

となる。さらに、

$$\log(0.01m) + \log(0.99m) = m \cdot J_1 \cdot t_0 + \log(0.000999m^2)$$

$$\log(0.01m) + \log(0.99m) - \log(0.000999m^2) = m \cdot J_1 \cdot t_0$$

$$\log(0.0099m^2) - \log(0.000999m^2) = \log(9.909) = m \cdot J_1 \cdot t_0$$

となり、したがって全面浸入反応開始時刻 t_0 は次式で表される。

$$t_0 = 0.996 / m \cdot J_1 \quad (5.13)$$

ここで、 m は単位セメントペースト中のセメント表面積であり、 $m = S / (C/\rho + W)$ 、 S はセメント粒子の比表面積、 C は単位セメント量、 W は単位水量、 ρ はセメントの比重であるので、(5.13)式は(5.14)式となる。

$$t_o = 0.996 (1 + \rho \cdot W/C) / \rho \cdot S \cdot J_1 \quad (5.14)$$

(3) 全面浸入反応開始時 (t_o) の未反応セメント粒子半径 R_o の算出

藤井によると、表面反応時の反応層厚 r は次式で表される。

$$r = J_3 \cdot t_o^b \quad (5.15)$$

ここで、 J_3 : 反応速度定数 ($a_3 \exp(b_3/T_k)$)

b : 定数

したがって、全面浸入反応開始時の未反応セメント粒子半径 R_o は、もとのセメント粒子半径を R とすると (5.16) 式で表される。

$$R_o = R - r = R - J_3 t_o^b \quad (5.16)$$

5.2.7 強度増進モデル式の誘導

水セメント比毎の強度と空隙率の関係は前述の (5.2) 式である。

$$\ln(\sigma) = (\ln(F_o) - \ln(F_f)) \cdot (P - P_f) / (P_o - P_f) + \ln(F_f)$$

ここに、 σ : コンクリートの圧縮強度

P : 空隙率

P_o : 強度が得られる直前の空隙率

F_o : 強度が得られる直前の空隙率に対応する強度

P_f : 完全水和時の空隙率

F_f : 完全水和時の強度

ここで、コンクリートの強度発現は全面浸入反応の開始時刻 t_o とほぼ同時に始まり、 $F_o = 1$ ((5.2) 式参照)、これに対応する空隙率 P_o は $P_o = 1 - (1 + V h_o) / (1 + \rho W/C)$ となる。また、完全水和時の強度 F_f には、5.3 で述べる実験データからその終局値を推定して求めることとし、これに対応する完全水和時の空隙率 P_f は $P_f = 1 - (1 + V h_f) / (1 + \rho W/C)$ となる。これらの値を (5.2) 式に代入して、空隙率 P ($P = 1 - (1 + V h) / (1 + \rho W/C)$) における圧縮強度 σ を求めることができる。

ここで、(5.11) 式より、材齢 t および強度が得られる直前 t_0 時における水和反応率はそれぞれ

$$h = 1 - \{(E - 1) J_2 (t - t_0) + R_0^{1-E}\}^{3/1-E} / R^3$$

$$h_0 = 1 - R_0^3 / R^3$$

であり、完全水和時の水和反応率 h_f は次式で表される。

$$h_f = (\rho W / C) / V$$

また、

$$t_0 = 0.996 (1 + \rho \cdot W / C) / \rho \cdot S \cdot J_1$$

$$R_0 = R - r = R - J_3 \cdot t_0^b$$

$$R = \text{セメントの平均粒径} (R = 30000 / (S / \rho))$$

S : セメントの比表面積

ρ : セメントの比重

W / C : 水セメント比

V : 水和反応によるセメントの体積増分比

E : 反応次数

J_1, J_2, J_3 : 反応速度定数

b : 定数

したがって、これらの値を (5.2) 式に代入すると、コンクリートの圧縮強度 σ は時間 t 、水セメント比 W / C 、養生温度 T 、セメントの平均粒径 R によって記述されることとなる。(5.2) 式中、未知数は体積増分比 V 、反応次数 E 、反応速度定数 J_1, J_2, J_3 および定数 b であり、これらの未知数を、コンクリート強度の実測値と計算値の差の 2 乗和を最小にする非線形最小 2 乗法により求め、モデル式を得る。解析にあたっては、その過程で得られる全面浸入反応開始時およびそれ以降の水和反応率について、既往の文献データ⁴⁹⁾ を参考に補正を加えながら、最適な未知数を求めた。

未知数をもとめるための解析に用いたデータは、5.3 の実験でセメントに普通ポルトランドセメント、混和剤に A E 減水剤標準形を用い、養生温度を 5 ~ 40 °C としたシリーズ I の 135 データである。解析により得られた値を以下に示す。

$$\text{体積増分比 } V = 1.2$$

反応次数 $E = 5.5$

定数 $b = 1.42$

反応速度定数 $J_1 = 200 \exp(-3496 / (T + 273))$

$J_2 = 1500970 \exp(-4179 / (T + 273))$

$J_3 = 161829 \exp(-4917 / (T + 273))$

コンクリート強度増進モデル式による計算値と実測値の関係を図5.7に示す。相関係数は0.973で、低水セメント比ほど推定値が小さくなる傾向がある。表面反応終了時の水和反応率を大きくした場合に実測値との対応が良くなることから、表面反応段階や全面浸入反応時の水和生成物の体積増分比 (V) や表面反応段階終了時の圧縮強度 (F_0) の仮定値の異なることが考えられる。

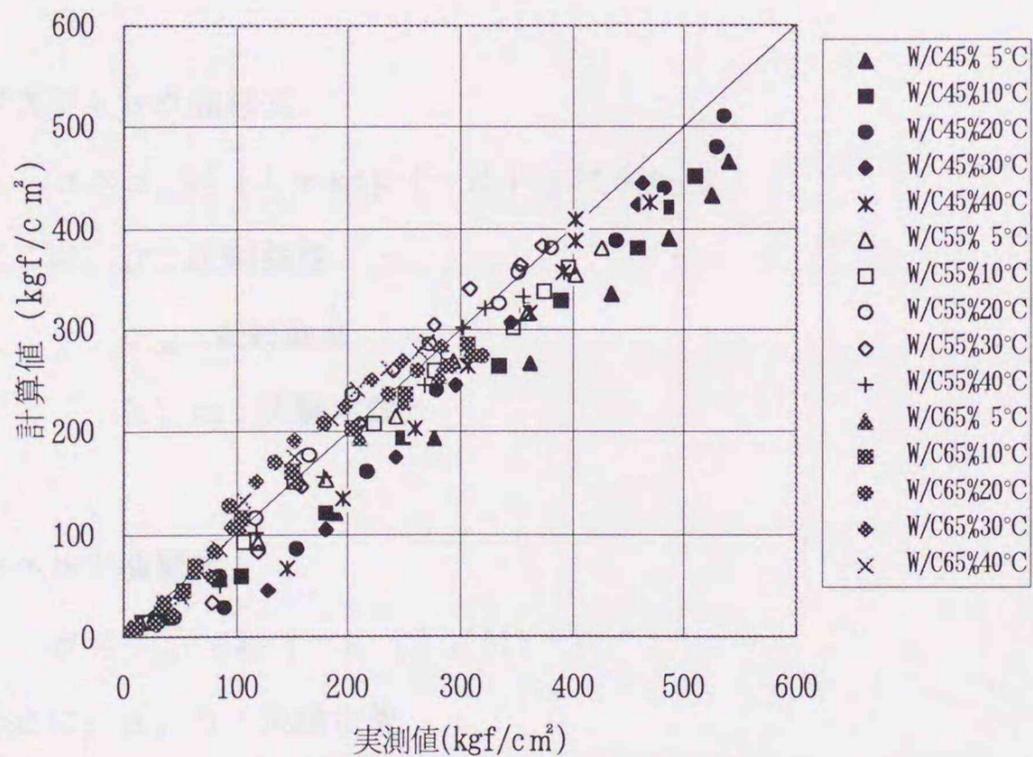


図5.7 コンクリート強度増進モデル式による圧縮強度の推定値と実測値の関係

5.3 積算温度とコンクリート強度

5.3.1 積算温度関数式

コンクリートの強度発現に寄与するセメントの水和反応はセメントと水の化学反応であるので、その過程は温度と時間によって制御される。したがって、コンクリートの強度増進を温度と時間の関数として表すことが可能となる。洪、鎌田らは温度と時間の積である積算温度 ((5.17) 式) によりコンクリート強度の増進過程の全体を表す関数式としてロジスティック曲線 ((5.18) 式) のあてはめが可能であることを示し³⁷⁾、その後、高強度コンクリートの強度発現過程について、ゴンペルツ曲線 ((5.19) 式) のほうがより良好な記述ができることを示した⁵⁰⁾。

・積算温度

$$M = \sum_{z=1}^n (\theta z + 10) \quad (5.17)$$

ここに、M：積算温度 (°D・D)

θz ：日平均気温 (°C)

Z：材齢 (日)

・ロジスティック曲線式

$$\sigma = \sigma_{\infty} / \{1 + \exp(-k \log M + m)\} \quad (5.18)$$

ここに、 σ ：圧縮強度

σ_{∞} ：最終強度

k, m：実験定数

・ゴンペルツ曲線式

$$\sigma = \sigma_{\infty} \cdot \exp\{-a(1/M)^b\} \quad (5.19)$$

ここに、a, b：実験定数

ここでは、積算温度とコンクリートの圧縮強度の関係についての実験を行い、これらの関係を表す関数式としてのロジスティック曲線およびゴンペルツ曲線の適合性を検討を行う。

5.3.2 コンクリートの圧縮強度と積算温度に関する実験

(1) 実験の方法

a. 実験計画

実験は、コンクリートの寒中施工と暑中施工に相当する範囲を考慮して、養生温度を表5.1に示すように5℃～40℃まで異ならせたシリーズIとセメント種別及び混和剤を異ならせたシリーズIIから構成されている。各養生温度は一定に持続し、練り混ぜ直後のコンクリート温度も養生温度に一致させた。圧縮強度の測定材齢は、積算温度が30°D・Dから2730°D・D（20℃養生の場合で材齢1日から91日）までの範囲で対数軸上で均等に分布するような9材齢とした。

表5.1 実験計画

シリーズ	セメント	混和剤	水セメント比 (%)	養生温度 (°C)	試験時 積算温度 (°D・D)
I	普通ポルトランドセメント	AE減水剤 (標準形)	45, 55, 65	5, 10, 20 30, 40	30
II	普通ポルトランドセメント	高性能AE減水剤 (標準形)	45	5, 10, 20	60
		AE減水剤 (標準形)	60		90
		AE減水剤 (遅延形)	45, 60	20, 30, 40	210
					300
	中庸熱ポルトランドセメント			480	
			840		
			1500		
			2730		

b. 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメントと中庸熱ポルトランドセメントを用いた。JIS R 5201による物理試験結果を表5.2に示す。

混和剤はリグニンスルホン酸系のAE減水剤標準形を中心とし、このほか、AE減水剤遅延形（リグニンスルホン酸系）、高性能AE減水剤（ポリカルボン酸エーテル系）を用いた。

骨材は細骨材として音別産海砂、粗骨材として青梅産砕石を用いた。骨材の物理試験結果を表5.3に示す。

表5.2 セメントの物理試験結果

シリーズ	セメント	比重	比表面積 (cm^2/g)	凝 結			安定性	圧 縮 強 度 (kgf/cm^2)		
				水 量 (%)	始 発 h-m	終 結 h-m		3日	7日	28日
I	普通ポルト(A社)	3.16	3,100	28.5	3-14	4-19	良	139	238	411
II	普通ポルト(A社)	3.16	3,100	28.5	3-14	4-19	良	139	238	411
	中庸熟ポルト(A社)	—	—	—	—	—	—	—	—	—

表5.3 骨材の物理試験結果

シリーズ	骨 材		表乾比重	吸水率 (%)	実績率 (%)	粗粒率
I	細骨材	音別海砂	2.75	1.16	66.2	2.43
	粗骨材	青梅碎石	2.63	0.56	60.9	6.71
II	細骨材	庶路海砂	2.65	0.97	67.2	2.57
	粗骨材	青梅碎石	2.63	0.56	60.9	6.71

c. 調合

調合は、各セメントごとに練り上がり温度20℃、スランプ18cm、空気量4.5%を目標にした試し練りを行い、この結果を、養生温度の違いにかかわらず同一セメントの調合の全てに適用した。コンクリートの調合を表5.4に示す。

表5.4 コンクリートの調合

シリーズ	セメント	混和剤	水セメント比 (%)	S/A (%)	単位水量 (kg/m^3)	セメント (l/m^3)	細骨材 (l/m^3)	粗骨材 (l/m^3)	混和剤 (kg/m^3)
I	普通ポルト	AE減水剤(標準形)	45	43.5	167	117	303	393	0.928
			55	48.0	171	98	341	370	0.778
			65	50.8	180	88	362	350	0.693
II	普通ポルト	高性能AE減水剤	45	42.5	127	90	316	427	0.396
		AE減水剤(標準形)	60	49.5	170	90	347	353	0.708
		AE減水剤(遅延形)	45	43.5	162	114	298	386	0.828
	60		49.5	170	90	347	353	0.708	
	中庸熟ポルト		45	43.5	162	112	298	388	0.720
		60	49.5	170	88	347	355	0.566	

d. 試験体の作成及び養生方法

供試体は10φ×20cmのシリンダーとし、練り混ぜたコンクリートを鋼製の簡易型枠に打ち込んだ後、打ち込み面をラップフィルムで覆い、コンクリート温度を目標の養生温度と一致するように養生方法を工夫しながら所定の積算温度になるまで養生を行った。

e. 空気量による圧縮強度の補正

コンクリート中の空気量の変動は圧縮強度に影響を及ぼす。このため、圧縮強度に及ぼす空気量の変動の影響を考慮し、空気量1%につき圧縮強度が4%増減するものと仮定し、練り上がり時の空気量測定値にもとづいて空気量4.5%の圧縮強度の補正値が0となるよう補正した。この場合、空気量が過剰となった高性能AE減水剤を用いたコンクリートではこの仮定に基づく補正が困難となったため検討から除いた。

(2) 実験結果

圧縮強度と積算温度の関係を養生温度ごとにロジスティック曲線式およびゴンペルツ曲線式として求めた結果は表5.5に示すものである。強度増進曲線式による推定強度と実測強度の相関係数は非常に高く、養生温度毎にいずれの式によっても圧縮強度の増進過程が精度良く表されており、コンクリート強度増進過程がロジスティック曲線やゴンペルツ曲線で表されるとする洪・鎌田らの結果が確認された。また、ロジスティック曲線式とゴンペルツ曲線式を比較した場合、実験データの近似はわずかながらゴンペルツ曲線が良いようである。

なお、積算温度方式は養生温度にかかわらず、水セメント比と積算温度のみにより強度が表されるとの仮定に基づいたものであるが、図5.8に示すように温度範囲が極端に広い場合には長期材齢時において、養生温度によって積算温度と強度の関係に差が見られる。

表 5.5 強度増進曲線式の諸係数

シリーズ	セメント	混和剤	W/C (%)	養生温度(°C)	ロジスティック曲線式				ゴンペルツ曲線式			
					最終強度	k	m	相関係数	最終強度	a	b	相関係数
I	普通ポルト	AE減水剤	45	5	545	3.10	6.90	0.9982	584	49.1	0.823	0.9998
				10	525	2.69	6.07	0.9984	575	27.5	0.693	0.9993
				20	582	2.20	4.88	0.9990	651	13.4	0.555	0.9979
				30	494	1.92	3.85	0.9982	532	8.9	0.535	0.9983
			40	462	1.98	3.68	0.9904	488	8.9	0.582	0.9910	
			55	5	449	2.66	6.39	0.9973	508	28.5	0.646	0.9991
				10	423	2.69	6.53	0.9986	485	28.0	0.635	0.9986
				20	434	2.08	5.10	0.9977	535	11.8	0.457	0.9966
				30	427	1.66	3.80	0.9977	497	7.2	0.407	0.9986
			40	362	2.04	4.16	0.9945	392	10.5	0.563	0.9955	
			65	5	326	2.79	6.98	0.9991	384	32.0	0.632	0.9997
				10	335	2.68	6.76	0.9994	401	27.1	0.593	0.9992
20	464	1.66		4.96	0.9975	918	8.0	0.256	0.9976			
30	361	1.55		4.09	0.9978	515	6.6	0.303	0.9978			
40	296	1.98	4.40	0.9983	334	10.4	0.503	0.9985				
II	普通ポルト	AE減水剤(標準形)	60	5	368	2.72	6.39	0.9986	410	29.6	0.674	0.9982
				10	401	2.29	5.64	0.9912	481	16.1	0.516	0.9923
				20	409	1.95	4.64	0.9968	483	10.4	0.458	0.9965
		AE減水剤(遅延形)	45	20	470	2.29	4.68	0.9892	499	15.9	0.656	0.9918
				30	550	1.95	4.21	0.9921	614	9.7	0.505	0.9922
				40	515	1.87	3.72	0.9968	551	8.6	0.535	0.9978
	60	20	379	2.00	4.85	0.9848	454	11.2	0.461	0.9844		
		30	423	1.67	3.95	0.9984	512	7.2	0.387	0.9982		
		40	320	1.81	4.02	0.9967	362	8.4	0.459	0.9967		
	中庸熱	AE減水剤(遅延形)	45	20	528	1.95	4.51	0.9946	602	10.8	0.486	0.9955
				30	556	1.95	4.41	0.9967	636	10.1	0.483	0.9964
				40	565	1.87	4.18	0.9982	637	9.3	0.478	0.9986
60		20	452	1.75	4.82	0.9925	703	8.3	0.313	0.9914		
		30	472	1.48	4.40	0.9963	970	6.6	0.225	0.9956		
		40	365	1.99	4.93	0.9969	464	10.3	0.420	0.9946		

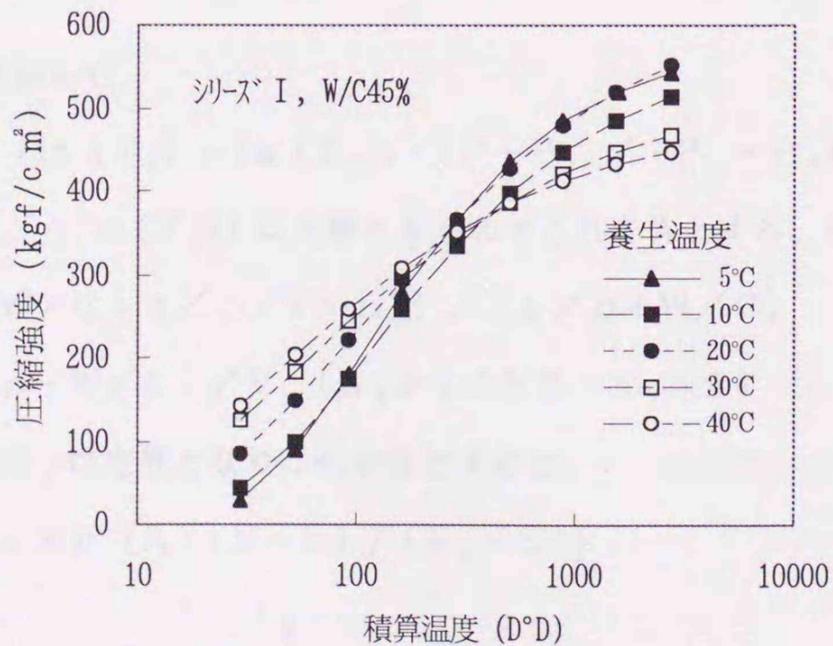


図 5.8 養生温度毎の強度と積算温度の関係 (ゴンペルツ曲線式表示)

5.4 水和反応によるコンクリート強度増進モデル式と積算温度関数式

水和反応によるコンクリート強度増進モデル式(以下水和モデル式と呼ぶ)と積算温度関数式であるゴンペルツ曲線式を以下に示す。

水和モデル式

$$\ln(\sigma) = (\ln(F_0) - \ln(F_f)) \cdot (P - P_f) / (P_0 - P_f) + \ln(F_f) \quad (5.2)$$

ここに、 σ : 圧縮強度

P : 空隙率

P_0 : 強度が得られる直前の空隙率

F_0 : 強度が得られる直前の空隙率に対応する強度

P_f : 完全水和時の空隙率

F_f : 完全水和時の強度(最終強度)

ゴンペルツ曲線式

$$\sigma = \sigma_\infty \cdot \exp\left(-a \cdot \frac{1}{M^b}\right) \quad (5.19)$$

ここに、 σ_∞ : 最終強度

M : 積算温度

a, b : 実験定数 ($a > 0, 1 > b > 0$)

水和モデル式は変形して、

$$\sigma = F_f \exp\left\{(\ln(F_0) - \ln(F_f)) \cdot (P - P_f) / (P_0 - P_f)\right\}$$

ここで、 $(\ln(F_0) - \ln(F_f))$ は定数となるのでこれを A とする。また、

$$P_f = (W/C - 1/\rho \cdot V \cdot h_f) / (1/\rho + W/C)$$

$$h_f = (\rho \cdot W/C) / V \quad (h_f > 1 \text{ のとき } h_f = 1)$$

であるので、空隙率 P_f は定数となりこれを B とすると、

$$\sigma = F_f \exp\{A \cdot (P - B) / (P_0 - B)\}$$

$$\sigma = F_f \exp\left\{A \cdot \frac{1}{\frac{(P_0 - B)}{(P - B)}}\right\} \quad (5.20)$$

となる。ここで、(5.20) 式右辺の $(P_0 - B) / (P - B)$ 項について見てみると、

$$P_0 = (W/C - 1 / \rho \cdot V \cdot h_0) / (1 / \rho + W/C)$$

$$h_0 = 1 - R_0^3 / R^3$$

$$R_0 = R - J_2 \cdot t_0^b$$

$$t_0 = 0.996 (1 + \rho \cdot W/C) / \rho \cdot S \cdot J_1$$

$$\therefore P_0 = A_2 + B_2 (1 - R_0^3 / R^3)$$

$$= A_3 + B_3 R_0^3$$

$$= A_3 + B_3 (R - J_2 \cdot t_0^b)^3$$

$$= A_3 + B_3 (R - J_2 \cdot \{0.996 (1 + \rho \cdot W/C) / \rho \cdot S \cdot J_1\}^b)^3$$

$$= A_3 + B_3 (R - C_3 \cdot J_2 / J_1^b)^3$$

$$\therefore P_0 = f(T_k)$$

であり、 J_1 、 J_2 は絶対温度 T_k の関数であるので P_0 は絶対温度の関数となる。また、空隙率 P は水和反応率 h の関数であり、 h は反応速度定数 J_2 および材齢 t の関数であるので、 P は反応速度定数すなわち絶対温度 T_k および材齢 t の関数となる。

$$P = (W/C - 1 / \rho \cdot V \cdot h) / (1 / \rho + W/C)$$

$$h = 1 - \{(E - 1) J (t - t_0) + R_0^{1-E}\}^{3/1-E} / R^3$$

$$\therefore P = A_2 + B_2 (J_2 \cdot t)^D$$

$$= A_2 + (B_2 \exp(G/T_k) \cdot t)^D$$

$$\therefore P = f(T_k, t)$$

したがって、(5.20) 式中の $(P_0 - B) / (P - B)$ は絶対温度と材齢の関数となり、式の形の上から、また、この項の持つ意味からも (5.19) 式の温度時間関数である積算温度 M^b と対応し、水和モデル式はゴンペルツ曲線式の近似となりうる。

ここで、(5.20) 式中の A および (5.19) 式中の a はいずれも定数であるので、 $(P_0 - B) / (P - B)$ と M^b の直接対比ができる。図 5.9 は、5.3 の実験データを用いて誘導した水和モデル式による $(P_0 - B) / (P - B)$ 値と、同じ実験で養生温度の異なる

る水セメント比45%のデータ全体を一つのゴンペルツ曲線式として求めた場合の M^b との関係を示したものである。これらの関係は養生温度で異なり、図5.8で見られたようにゴンペルツ曲線式が広い養生温度範囲での積算温度と強度の関係を表せず、ゴンペルツ曲線による強度の表現には温度による限界のあることを示唆している。

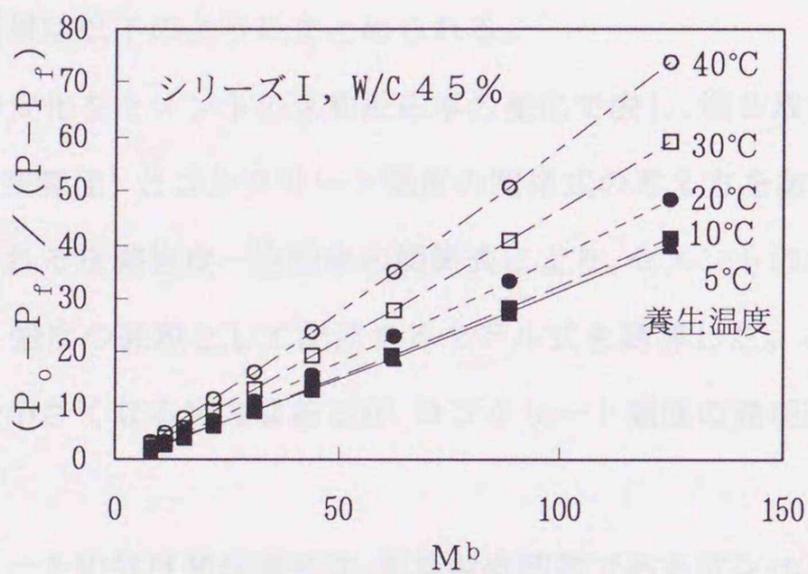


図5.9 水和モデル式の変数項 $(P_o - P_f) / (P - P_f)$ とゴンペルツ曲線式の変数項 M^b の関係

5.5 第5章の結論

第2章で得られたコンクリート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た。また、水セメント比、養生温度、材齢により工学的に定められるコンクリート強度増進過程の記述式であるゴンペルツ曲線と対比し、両者の関係について検討を加えた。その結果は以下のようにまとめられる。

- (1) 空隙率の変化をセメントの水和反応率の変化で表し、第2章で得られた空隙構造（空隙率と空隙径）とコンクリート強度の関係式の考え方をあてはめ、水セメント比毎に表される圧縮強度－空隙率の関係式により、セメントの水和反応の進行をコンクリート強度の発現として記述するモデル式を誘導した。このモデル式では、推定値がやや小さくなる傾向はあるが、コンクリート強度の発現過程を十分表現する。
- (2) コンクリートの強度発現過程は、積算温度関数であるゴンペルツ曲線で表されるとする洪・鎌田らの結果が確認されたが、温度範囲が極端に広い場合には長期材齢時において、積算温度と強度の関係に養生温度による差が見られる。
- (3) 空隙率をセメントの水和反応で表わしたコンクリート強度式は積算温度の関数であるゴンペルツ曲線式と、式の形および変数項の持つ意味とも対応し、ゴンペルツ曲線式の近似となりうる。また、両式の変数項の関係は養生温度で異なり、ゴンペルツ曲線式による強度の表現には温度による限界がある。

これまでのコンクリート強度と空隙構造に関する研究においては、強度がいわゆる Ryshkewitch の式で表される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かった。

本研究は、コンクリート強度と空隙構造の関係を空隙率のみでとらえるのではなく、他の空隙指標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たものである。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った。以下に本研究のまとめを示す。

第 1 章は序論であり、研究の目的と意義について述べ、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うとともに、論文の各章の構成を示したものである。

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た。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た。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た。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た。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砕石に対する補正により対応が可能であることを示した。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

とを示した。さらに、強度式が表す固相強度は、空隙として捉えた最小径以上の空隙が0の場合の強度であることを指摘した。

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た。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を明らかにし、第2章で得られた結果が妥当であることを述べた。また、強度は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た。

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を開発した。まず、強度式を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、強度推定式とした。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示した。

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試みた。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た。

参考文献

- 1) M.Yu.Bal'shin : Relation of Mechanical Properties of Powder Metals and Their Porosity and the Ultimate Properties of Porous Metal-Ceramic Materials, Doklady Akad. Nank. SSSR, Vol.67, pp831-834, 1949
- 2) M.Yu.Bal'shin : Doklady Akad. Nank. SSSR, Vol.82, pp80-82, 1964
- 3) K.K.Schiller : Strength of Highly Porous Brittle Materials, Nature, Vol.180, pp862-863, 1957
- 4) K.K.Schiller : Skeleton Strength and Critical Porosity in Set Sulphate Plasters, Brit. J. Appl. Phys., Vol.11, pp338-342, 1960
- 5) K.K.Schiller : Strength of Porous Materials, Cem. Concr. Res., Vol.1, pp419-422, 1971
- 6) E.Ryshkewitch : Compression Strength of Porous Sintered Alumina and Zirconia, J. Am. Ceram. Soc., Vol.36, pp65-68, 1953
- 7) W.Duckworth : Discussion of Ryshkewitch Paper, J. Am. Ceram. Soc., Vol.36, pp68, 1953
- 8) F.P.Knudsen : Dependence of Mechanical Strength of Brittle Polycrystalline Specimens on Porosity and Grain Size, J. Am. Ceram. Soc., Vol.42, pp376-387, 1959
- 9) E.M.Passmore, and R.M.Spriggs, and T.Vasilos : Strength-Grain Size-Porosity Relations in Alumina, J. Am. Ceram. Soc., Vol.48, No.1, pp1-7, 1965
- 10) R.M.Spriggs : Effect of Open and Closed Pores on Elastic Moduli of Polycrystalline Alumina, J. Am. Ceram. Soc., Vol.45, No.9, pp454, 1962
- 11) R.M.Spriggs, and T.Vasilos : Effect of Grain Size on Transverse Bend Strength of Alumina and Magnesia, J. Am. Ceram. Soc., Vol.46, No.5, pp224-228, 1963
- 12) D.P.H.Hasselmann : Relation Between Effects of Porosity on Strength and on Young's Modulus of Elasticity of Polycrystalline Materials, J. Am.

- Ceram. Soc., Vol.46, No.11, pp564-565, 1963
- 13) 高野俊介：打ち込み温度がマッサコンクリートの強度に及ぼす影響の研究，土木学会論文集，No.26, pp1-40, 1955
 - 14) 近藤連一，吉田孝三郎：C₃S系固溶体のペースト水和反応による細孔構造の変化と水和反応速度およびモルタル強さ，セメント技術年報 XX III，pp76-80, 1968
 - 15) 近藤連一，大門正機，岡林茂生：セメントの粒度分布がモルタル硬化体の細孔径分布と強度におよぼす影響，セメント技術年報 XXV，pp82-87, 1971
 - 16) 近藤連一，後藤誠史，大門正機：セメントの水和と硬化，コンクリート工学，Vol.14, No.1, pp24-34, 1976
 - 17) 中山紀男，根本明洋，富田六郎，原田正：オートクレーブ養生における強度と諸性状について，セメント技術年報 XXX, pp316-320, 1976
 - 18) T.C.Powers: The Nonevaporable Water Content of Hardened Portland-Cement Paste - Its Significance for Concrete Research and Its Method of Determination, ASTM BULLETIN, pp68-76, 1949
 - 19) T.C.Powers: Structure and Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste, J. Am. Ceram. Soc., Vol.41, NO.1, pp1-6, 1958
 - 20) S.Mindess: Relation Between the Compressive Strength and Porosity of Autoclaved Calcium Silicate Hydrates, J. Am. Ceram. Soc., Vol.53, No.11, pp621-624, 1970
 - 21) J.Jamber: Influence of Phase Composition of Hardened Binder Pastes on Its Pore Structure and Strength, RELEM/IUPAC Symposium on Pore Structure and Properties of Materials, Part V, D-75-96, 1973
 - 22) R.F.Feldman, and J.J.Beaudoin: Microstructure and Strength of Hydrated Cement, Cem. Concr. Res., Vol.6, pp389-400, 1976
 - 23) J.M.Grennan, and S.A.S.El-Hemaly, and H.F.W.Taylor: Autoclaved Lime-Quartz Materials I. Some Factors Influencing Strength, Cem. Concr.Res., Vol.7, pp493-502, 1977
 - 24) J.D.Birchall, and A.J.Howard, and K.Kendall: Flexural Strength and Porosity of Cements, Nature, Vol.289, pp388-390, 1981

- 25) A.A.Griffith : The Phenomena of Rupture and Flow in Solids, Phil. Trans. Roy. Soc., A221, pp163-198, 1920
- 26) C.Atzeni, and L.Massidda, and U.Sanna : Effect of Pore Distribution on Strength of Hardened Cement Paste, RILEM/IUPAC Int. Symp. Pore Structure and Materials Properties, Vol.1, pp195-202, 1987
- 27) T.Luping : A Study of The Quantitative Relationship Between Strength and Pore-Size Distribution of Porous Materials, Cem. Concr. Res., Vol.16, pp87-96, 1986
- 28) 内川浩, 岡村隆吉, 武広実 : FT-NMR, GPC, SFCにより解析したC-S-H中のシリケートアニオンの縮合度とモルタル強度の関係, コンクリート工学論文集, 第1巻, 第1号, pp13-23, 1993
- 29) 内川浩, 羽原俊祐, 沢木大介 : 硬化モルタル及びコンクリート中の遷移帯厚さの評価並びに遷移帯厚さと強度との関係の検討, コンクリート工学論文集, 第1巻, 第2号, pp1-8, 1993
- 30) 羽原俊祐 : 硬化コンクリートの組織及び空隙構造と物性に関する研究, 学位論文, pp152, 1992
- 31) 藤井欽二郎 : けい酸三石灰、二石灰水和の反応速度論, セメント技術年報XXX II, pp22-28, 1978
- 32) 洪悦郎 : 寒中コンクリート施工指針案・同解説, 日本建築学会, pp25-26, 1978
- 33) P.F.Hansen, and E.J.Pedersen : Maturity Computer for controlled curing and hardening of concrete, nordisk betong, pp21-25, 1977
- 34) N.J.Carino : The Maturity Method: Theory and Application, cement, concrete, and aggregates, Vol6, No.2, pp61-73, 1984
- 35) 大和孝和 : 養生温度の変動がコンクリート強度発現に及ぼす影響, 日本建築学会論文報告集, No.307, pp1-11, 1981
- 36) 金武漢, 洪悦郎, 鎌田英治 : モルタルおよびコンクリートの積算温度と圧縮強度発現に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, No.355, pp1-6, 1985
- 37) 洪悦郎, 鎌田英治, 田畑雅幸, 浜幸雄 : ロジスティック曲線を応用したコンクリート強度推定式の提案-普通ポルトランドセメントの場合-, 日本建築学会構造系

- 論文報告集, No.367, pp1-7, 1986
- 38) 鎌田英治, 洪悦郎, 林直樹: 各種セメントを用いたコンクリートの強度増進性, セメント・コンクリート論文集, No.44, pp360-365, 1990
- 39) 後藤知以, 野月博征, 橋田奨, 前川直樹: 水中恒温養生コンクリートの圧縮強度発現式に関する研究, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No.60, pp1-4, 1987
- 40) 後藤知以, 橋田奨, 松田智仁, 村上勇: コンクリートの圧縮強度発現に及ぼす養生効果に関する研究, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No.62, pp17-20, 1989
- 41) 寺田米男: コンクリート強度の推定式に関する研究 (I), 日本建築学会構造系論文報告集, No.361, pp12-20, 1986
- 42) 寺田米男: コンクリート強度の推定式に関する研究 (II), 日本建築学会構造系論文報告集, No.366, pp18-26, 1986
- 43) 堀素夫: 表面エネルギーから見たセメント硬化体の強さ, 窯業協会誌, Vol.70, No.7, pp268-273, 1962
- 44) 柿崎正義, 依田和久, 枝広英俊, 榎木隆, 横山滋, 大島博文: 超高強度現場打ちコンクリートの開発研究 (その2 強度性状と細孔構造), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州) 材料・施工, pp485-486, 1989
- 45) セメント協会コンクリート専門委員会報告 F-28 (細骨材の品質調査報告), 1976
- 46) セメント協会コンクリート専門委員会報告 F-29 (粗骨材の品質調査報告), 1977
- 47) 毛見虎雄, 平賀友晃, 倉林清, 荒巻哲生: コア強度による壁・スラブコンクリートの充填性について, セメント技術年報 XXX II, pp383-386, 1978
- 48) 中根淳, 久保田昌吾, 高橋久雄, 永井康淑: 構造体コンクリートの強度管理に関する研究 (その16 長期材令における部材別コア強度の実態とその考察), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿) 材料施工, pp159-160, 1980
- 49) 桂 修, 森本丈太郎, 名和豊春: セメントの水和反応を考慮した強度発現モデルに関する一考察, セメントコンクリートの反応モデル解析に関するシンポジウム論文集, pp109-114, 1996
- 50) 鎌田英治, 千歩修, 浜幸雄, 韓千球, 芝池達司, 梶山毅: 躯体コンクリートの温度履歴を考慮した高強度寒中コンクリートの温度補正について, 日本コンクリート工学会自然環境とコンクリート性能に関するシンポジウム論文集, pp49-60, 1993

著者の既発表の報告

《1. 本論文に関連する論文》

- 1) 鎌田英治、吉野利幸：空隙率および水和度によるコンクリート強度の表示，セメント技術年報32，pp.216-220，1978
- 2) 吉野利幸、鎌田英治、田畑雅幸、柳 敏幸：コンクリート強度の空隙率依存性を応用したコンクリートの強度推定法の提案，セメント技術年報33，pp.249-252，1979
- 3) Eiji Kamada, Toshiyuki Yoshino and Yoshiro Koh : A Proposed Method for Estimation of Strength of Structural Concrete Based on the Correlation between Strength and Porosity, Proc. of RILEM Symposium on Quality Control of Concrete Structure, Stockholm, Vol.1, pp81-90, 1979
- 4) 鎌田英治、田畑雅幸、柳 敏幸、吉野利幸：コンクリート強度の空隙率依存性を応用した強度推定，特に骨材修正と誤差検討について，セメント技術年報35，pp.98-101，1981
- 5) 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—第1報 圧縮強度と空隙構造の関係—，日本建築学会論文報告集，第312号，pp.9-17，1982
- 6) 桂 修、吉野利幸、鎌田英治：セメントの水和度と空隙率の変化を考慮したコンクリートの強度増進モデル，セメント・コンクリート論文集No.44，pp.324-329，1990
- 7) 桂 修、吉野利幸、鎌田英治：セメントの水和機構を考慮したコンクリート強度増進の検討，セメント・コンクリート論文集No.45，pp.286-291，1991
- 8) 吉野利幸、大楽隆男、鎌田英治：高温域を含む各種養生温度でのコンクリート強度増進性状，セメント・コンクリート論文集No.45，pp.370-375，1991
- 9) 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，(1996年7月掲載決定)

《2. その他の論文》

- 1) 吉野利幸、谷川 伸、鎌田英治、十河哲也、入田 一：外装仕上塗材によるALCの凍害防止に関する研究(その1.全体計画と室内実験結果)日本建築仕上学会1992

- 年大会学術講会研究発表論文集, pp.75-78, 1992
- 2) 谷川 伸、吉野利幸、鎌田英治、十河哲也、入田 一：外装仕上塗材によるALCの凍害防止に関する研究(その2.実大構造物暴露試験結果), 日本建築仕上学会 1992年大会学術講会研究発表論文集, pp.79-82, 1992
 - 3) 桂 修, 鎌田英治, 吉野利幸: 高強度コンクリートの初期凍害に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, 第11巻第1号, pp1027-1032, 1992
 - 4) N.NiLi, 鎌田英治, 桂 修, 吉野利幸: A Study on Frost Resistance and Strength Properties of High Strength Concrete Using Andesite and Limestone, コンクリートコンクリート工学年次論文報告集, 第11巻第1号, pp1167-1172, 1992
 - 5) 桂 修, 吉野利幸, 田畑雅幸, 鎌田英治: 交流2電極法によるコンクリート中の含水率測定についての理論的検証, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.1, pp735-740, 1994
 - 6) 桂 修, 吉野利幸, 鎌田英治: 交流2電極法によるセメント硬化体中の凍結水量測定と水分凍結の細孔構造依存性, コンクリート工学論文集, Vol.7, No.1, pp57-66, 1996

《3. 本論文に関連する口頭発表》

- 1) 鎌田英治、田畑雅幸、吉野利幸、寺井靖人: 水銀圧入法による構造体コンクリートの強度推定の試み(その1.硬化したコンクリートの強度と細孔構造の関係), 昭和52年度日本建築学会大会学術講演会, 材料・施工部門, 1977
- 2) 鎌田英治、田畑雅幸、吉野利幸、寺井靖人: 水銀圧入法による構造体コンクリートの強度推定の試み(その2.実験式の誘導と実際のコンクリートへの適用例), 昭和52年度日本建築学会大会学術講演会, 材料・施工部門, 1977
- 3) 吉野利幸、鎌田英治: 細孔構造による構造体コンクリートの強度推定に関する研, 昭和52年度日本建築学会北海道支部研究報告会, 1978
- 4) 吉野利幸、鎌田英治: 水銀圧入法による構造体コンクリートの強度推定の試み(その3.材齢履歴が未知の場合の相関関係式), 昭和53年度日本建築学会大会学術講演会, 材料・施工部門, 1978

- 5) 吉野利幸、鎌田英治、田畑雅幸、柳 敏幸、金子正昭：水銀圧入法の応用による構造体コンクリートの強度推定の試み(その4.セメント種別による実験と実験式の適用性の検討)，昭和54年度日本建築学会大会学術講演会，材料・施工部門，1979
- 6) 柳 敏幸、鎌田英治、田畑雅幸、吉野利幸：水銀圧入法の応用による構造体コンクリートの強度推定の試み(その5.空隙率と圧縮強度の相関性に影響する要因の検討)，昭和55年度日本建築学会大会学術講演会，材料・施工部門，1980
- 7) 吉野利幸、鎌田英治、田畑雅幸、柳 敏幸：水銀圧入法の応用による構造体コンクリートの強度推定の試み(その6.実験データのあばれと試験体の上下による差の検討)，昭和55年度日本建築学会大会学術講演会，材料・施工部門，1980
- 8) 吉野利幸、鎌田英治、田畑雅幸、柳 敏幸：水銀圧入法の応用による構造体コンクリートの強度推定の試み(その7.既往の強度式との対応性の比較)，昭和56年度日本建築学会大会学術講演会，材料・施工部門，1981
- 9) 吉野利幸、鎌田英治、田畑雅幸：水銀圧入法の応用による構造体コンクリートの強度推定の試み(その8.空隙寸法が圧縮強度に及ぼす影響)，昭和59年度日本建築学会大会学術講演会，材料・施工部門，1984

《4. その他の口頭発表》

- 1) 鎌田英治、大内一之、吉野利幸：硬化セメントペースト内部の水分の凍結融解温度と細孔構造，昭和51年度日本建築学会大会学術講演会，材料・施工部門，1976
- 2) 大内一之、鎌田英治、吉野利幸：硬化セメントペーストの耐凍害性・凍害劣化の様相と細孔構造，昭和51年度日本建築学会大会学術講演会，材料・施工部門，1976
- 3) 鎌田英治、吉野利幸：コンクリートの凍結水量測定のための熱量計の試作とその特性，昭和51年度日本建築学会大会学術講演会，材料・施工部門，1976
- 4) 吉野利幸、葛西英夫、西川 忠：鉄筋コンクリート構造物への海塩浸透に関する調査，昭和61年度日本建築学会大会学術講演会，材料・施工部門，1986
- 5) 吉野利幸：北海道産組積材の諸性状に関する研究(その1.単体及び組積プリズムの強度、変形性状について)，昭和62年度日本建築学会大会学術講演会，材料・施工部門，1987
- 6) 吉野利幸、馬場明生：組積造に関する日米共同耐震実験研究(92) - 補強組積造の

- 耐久性能(その3.組積ユニットの凍結融解抵抗性),1989年度日本建築学会大会学術講演会,材料・施工部門,1989
- 7) 十河哲也,吉野利幸,谷川 伸,鎌田英治:外装仕上塗材によるALCの凍害防止に関する研究(その1.概要),1990年度日本建築学会大会学術講演会,材料・施工部門,1990
 - 8) 谷川 伸,鎌田英治,十河哲也,吉野利幸:外装仕上塗材によるALCの凍害防止に関する研究(その2.予備実験結果),1990年度日本建築学会大会学術講演会,材料・施工部門,1990
 - 9) 吉野利幸,十河哲也,谷川 伸,鎌田英治:呼吸性防水塗膜材によるALC建築物の凍害防止に関する研究,第6回オホーツク海と流氷に関する国際シンポジウム,1991
 - 10) 桂 修,鎌田英治,阿部宏侑,吉野利幸,西川 忠:高強度コンクリートの耐凍害性及び力学性状に影響を与える要因とその効果に関する研究(その1.耐凍害性に関する検討),1991年度日本建築学会大会学術講演会,材料・施工部門,1991
 - 11) 吉野利幸,鎌田英治,阿部宏侑,桂 修,西川 忠:高強度コンクリートの耐凍害性及び力学性状に影響を与える要因とその効果に関する研究(その2.力学性状に関する検討),1991年度日本建築学会大会学術講演会,材料・施工部門,1991
 - 12) 谷川 伸,入田 一,鎌田英治,吉野利幸,十河哲也:外装仕上塗材によるALCの凍害防止に関する研究(その3.暴露試験に供した塗材の透湿性・透水性について),1991年度日本建築学会大会学術講演会,材料・施工部門,1991
 - 13) 十河哲也,谷川 伸,鎌田英治,吉野利幸,入田 一:外装仕上塗材によるALCの凍害防止に関する研究(その4.実大建築物暴露試験),1991年度日本建築学会大会学術講演会,材料・施工部門,1991
 - 14) T.YOSHINO, A.BABA:FROST RESISTANCE OF MASONRY UNITS FOR REINFORCED BUILDINGS, 9th International Brick/Block Masonry Conference (Berlin), Vol.1, pp117-123, 1991
 - 15) 吉野利幸,鎌田英治,田畑雅幸,桂 修:バイブレーターによる振動締固めの程度がコンクリートの凍害劣化におよぼす影響,日本建築学会コンクリート構造物の凍害とその対策シンポジウム,1992

- 16) 十河哲也, 谷川 伸, 鎌田英治, 吉野利幸, 入田 一: 外装仕上塗材によるALCの凍害防止に関する研究(その5. 実大建築物暴露試験における塗膜とALC劣化および塩分浸透), 1992年度日本建築学会大会学術講演会, 材料・施工部門, 1992
- 17) 入田 一, 谷川 伸, 鎌田英治, 吉野利幸, 十河哲也: 外装仕上塗材によるALCの凍害防止に関する研究(その6. ALCの含水率と仕上塗材の透湿性の関係), 1992年度日本建築学会大会学術講演会, 材料・施工部門, 1992
- 18) 田畑雅幸, 吉野利幸, 桂 修, 鎌田英治: コンクリートの振動締め固めが耐凍害性に及ぼす影響, 1992年度日本建築学会大会学術講演会, 材料・施工部門, 1992
- 19) 吉野利幸, 洪 悦郎, 鎌田英治, 桂 修, 韓 千求: 高強度コンクリートの圧縮強度増進性状に関する研究(その1. 高強度コンクリートの強度増進性状), 1992年度日本建築学会大会学術講演会, 材料・施工部門, 1992
- 20) 桂 修, 洪 悦郎, 鎌田英治, 吉野利幸, 韓 千求: 高強度コンクリートの圧縮強度増進性状に関する研究(その2. 積算温度を用いた高強度コンクリートの強度増進曲線の誘導), 1992年度日本建築学会大会学術講演会, 材料・施工部門, 1992
- 21) 韓 千求, 洪 悦郎, 鎌田英治, 吉野利幸, 桂 修: 高強度コンクリートの圧縮強度増進性状に関する研究(その3. 平均養生温度による寒中コンクリートの強度補正值の試算), 1992年度日本建築学会大会学術講演会, 材料・施工部門, 1992
- 22) 吉野利幸, 桂 修, 鎌田英治: 高強度寒中コンクリートに関する研究, 1994年度日本建築学会北海道支部研究報告会, 1994
- 23) 吉野利幸, 桂 修, 鎌田英治: 再生コンクリートの諸性状に関する研究(その1. 実験計画及び圧縮強度), 1994年度日本建築学会大会学術講演会, 材料・施工部門, 1994
- 24) 桂 修, 吉野利幸, 鎌田英治: 再生コンクリートの諸性状に関する研究(その2. 耐久性に関する検討), 1994年度日本建築学会大会学術講演会, 材料・施工部門, 1994
- 25) 米澤稔, 吉野利幸, 斎藤健人, 西川忠: ブロック造壁体による高流動モルタルの階高充填性, 1994年度日本建築学会大会学術講演会, 材料・施工部門, 1994
- 26) 十河哲也, 鎌田英治, 谷川伸, 吉野利幸, 入田一: 外装仕上塗材と壁工法によるALCの凍害防止に関する研究(その1: 実験概要と塗装材の透湿・透水性), 1994

年度日本建築学会大会学術講演会，材料・施工部門，1994

- 27) 入田一，鎌田英治，吉野利幸，谷川伸，十河哲也：外装仕上塗材と壁工法によるALCの凍害防止に関する研究（その2：実大暴露構造物での試験結果），1994年度日本建築学会大会学術講演会，材料・施工部門，1994
- 28) 吉野利幸，関口岳彦，桂 修，鎌田英治：再生コンクリートの凍害・初期凍害に関する研究（その1．再生骨材の処理程度の影響），1995年度日本建築学会大会学術講演会，材料・施工部門，1995
- 29) 関口岳彦，吉野利幸，桂 修，鎌田英治：再生コンクリートの凍害・初期凍害に関する研究（その2．初期凍害抵抗性），1995年度日本建築学会大会学術講演会，材料・施工部門，1995
- 30) 桂 修，吉野利幸，関口岳彦，鎌田英治：再生コンクリートの凍害・初期凍害に関する研究（その3．耐凍害性と骨材の物性），1995年度日本建築学会大会学術講演会，材料・施工部門，1995

《5．その他》

- 1) 鎌田英治、吉野利幸、田畑雅幸、柳 敏幸：少量の試料片によるコンクリート圧縮強度の推定 —強度管理への水銀圧入法の応用—，セメント・コンクリート，No.398，pp.36-43，1980
- 2) 鎌田英治、吉野利幸、田畑雅幸、柳 敏幸：少量の試料片によるコンクリート圧縮強度の推定 —骨材修正を考慮した強度推定式と誤差検討—，セメント・コンクリート，No.412，pp.7-14，1981

謝 辞

本研究は筆者が在籍した北海道大学および現在勤務する北海道立寒地住宅都市研究所において昭和51年から平成8年までの間に実施した研究成果をとりまとめたものです。

本論文をとりまとめるにあたって、北海道大学教授 鎌田英治先生には終始懇切丁寧なご指導、ご教示を賜り心から感謝いたします。さらに、鎌田英治先生には、卒業論文でお世話になって以来、21年の長きにわたりご指導いただくとともに、くじけそうな筆者を幾度となく励まし導いて下さいました。今日の私があるのは先生のお陰によるものであり、感謝の気持ちは言葉では言い表せません。

北海道大学名誉教授 洪 悦郎先生には貴重なご教示、ご意見を賜り心から感謝いたします。また、北海道大学工学部建築工学科建築材料学講座助手 長谷川寿夫先生、北海道職業能力開発短期大学校建築学科教授 田畑雅幸先生には、研究の遂行、論文のとりまとめにあたり多くのご助言、激励をいただき深く感謝申し上げます。

さらに、北海道立寒地住宅都市研究所前所長 中村裕史氏をはじめ研究所のみなさまには論文のとりまとめにご配慮いただき、誠に感謝に堪えません。

北海道大学建築材料学講座の修了生であり、研究所の同僚でもある桂 修氏に実験・解析など多大のご援助を受けたことに感謝いたします。また、実験に携わっていただいた北海道大学建築材料学講座の卒業生、修了生の寺井靖人、柳 敏幸、梅原龍太、村本英一郎、坂本 立の諸氏のご苦勞とご協力に心から感謝申し上げます。

元事務官の二宮嘉子さんには筆者が講座に在籍して以来、終始温かいご配慮とご援助をいただき、感謝申し上げます。

本研究は、これら多くの方々のご指導、ご支援により達成されたものであり、改めて感謝の意を表する次第です。

最後に、これまで暖かく見守ってくれた私の年老いた両親に深い感謝を捧げるものです。

The Equation Describing Concrete Strength as a Function of Pore Structure
and its Application

by Toshiyuki YOSHINO

The mechanical properties and durability of concrete particularly depend on its pore structure, and it is indispensable in the understanding of these properties to know the pore structure. In the researches aiming at this point in the field of concrete engineering, those concerning the compressive strength and frost damage have advanced. As regards the mechanical properties and pore structure of concrete, the strength is generally represented by a so-called Ryshkewitch equation, in which only the porosity is taken into consideration as the pore characteristics, and the influence of pore characteristics other than the porosity such as the diameter and shape of the pore has not been sufficiently confirmed. For this reason, to clarify these points is considered important for further understanding the mechanical properties of concrete.

This paper studies relation between concrete strength and pore structure including the roles of not only the porosity but also other pore characteristics, and derives a concrete strength equation obtained by developing a conventional equation by statistical analysis on the experimental results using various concrete, and then verifies the properties of this equation by experiments using model void. Further, as practical application of the knowledge thus obtained, I developed a method of estimating the concrete strength, and applied it to a concrete strength improving model.

This paper is composed of six chapters, the outlines of each chapter are as follows:

The first chapter describing the object and significance of the research, and shows researches concerning the subject in the past in Japan and abroad.

The second chapter forms the root and trunk of this paper. This chapter studies

the relation between strength and pore structure for various concrete, and derives a strength equation for representing the compressive strength of concrete by the porosity and the pore diameter for verification. In deriving the strength equation, the test condition for the compressive strength of concrete and the measurement condition for pore structure are determined at the beginning, and an index for measured value is determined. Next, by studying the material, mixing, age, curing condition, and the relation between the pore index and the compressive strength of concrete, it has been found that a correlation between the concrete compressive strength and the porosity of the hardened cement paste portion is better than that between the concrete compressive strength and the porosity for the entire sample, and that the former somewhat differs depending on the age and the curing condition. In addition to the porosity, indexes representing the pore diameter, continuity of pore, and the correlation between the concrete compressive strength and each of them are analyzed by using the statistical technique to derive the concrete strength equation represented by the porosity and the pore diameter. The strength equation thus derived shows that the difference in the relation between compressive strength and porosity depending on the age and curing condition method can be eliminated, and that it is possible to cope with water-absorption and shape of aggregate which affects the relation between compressive strength and porosity by means of correction of ordinary aggregate or crushed stone. On the basis of these results, this chapter proposes a strength equation for representing the concrete compressive strength by the porosity and pore diameter of hardened cement paste, indicates the excellence of the strength equation by comparing it with the past equations for verification.

The third chapter mixes eleven kinds of artificial voids (model voids) with different shape and dimensions into cement paste, and studies how the mixture affects the strength to verify the propriety of the result obtained in the second chapter. For the model voids, spherical, cylindrical and prismatic ones made of expanded polystyrene were used, and hardened cement paste specimens, in which

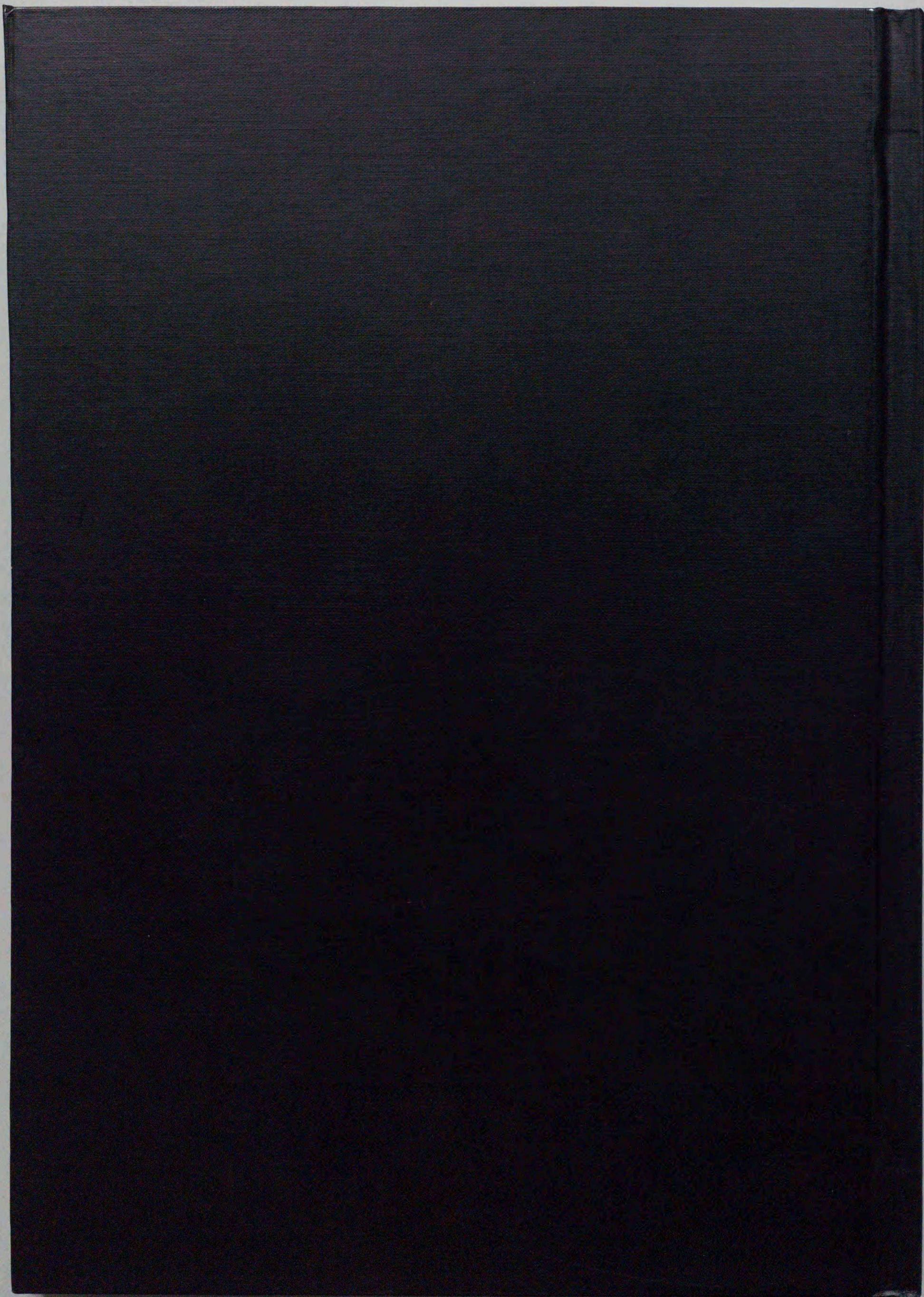
model voids alone were assumed to be voids, were used to perform experiments. From these experiment results, this chapter describes that the compressive strength when the void diameter is smaller is greater even at the same percentage of void, and the results obtained in the second chapter are reasonable. In addition, the following knowledge has been obtained: that the strength depends on the void having larger diameter; that the void shape also affects the strength in the order of spherical < cylindrical < prismatic; the greater the strength of cement paste which has been assumed to be a solid phase portion even at the same percentage of void is, the higher the strength as a whole becomes, and the like.

The fourth chapter describes the application of a strength estimation method using a small quantity of concrete pieces as an application of the concrete strength equation obtained in the second chapter. First, the strength equation is converted into such a model of equation that the estimated error becomes constant irrespective of the magnitude of the strength, and further, the second chapter adds indexes (return ratio and combined water ratio) included in the constant term to derive a concrete strength equation, thus regarding the concrete strength equation as a strength estimation equation. Next, the fourth chapter studies standard deviations for each of the strength of concrete core specimen gathered from the slab model, the strength of a cylinder specimen made with a steel mold, and the estimated strength by the strength estimation equation, and describes that the error in the strength estimation is somewhat larger than that in the core or the cylinder specimen, and is satisfactory together with the estimated value.

In the fifth chapter, as another application of the strength equation, the view of the strength equation is applied to a hydration process of cement, and the hydration progress which is described cement-chemically is captured as the expression of concrete strength. It is known that the concrete strength improving process is represented by Gompertz curve using accumulated temperature as functions of the curing temperature and age, but this paper represents the

expression state of concrete strength by changes in porosity and pore diameter of the hardened cement paste portion. This expression that it can approximate to the Gompertz curve, and that the strength equation using the Gompertz curve has a limitation on temperature.

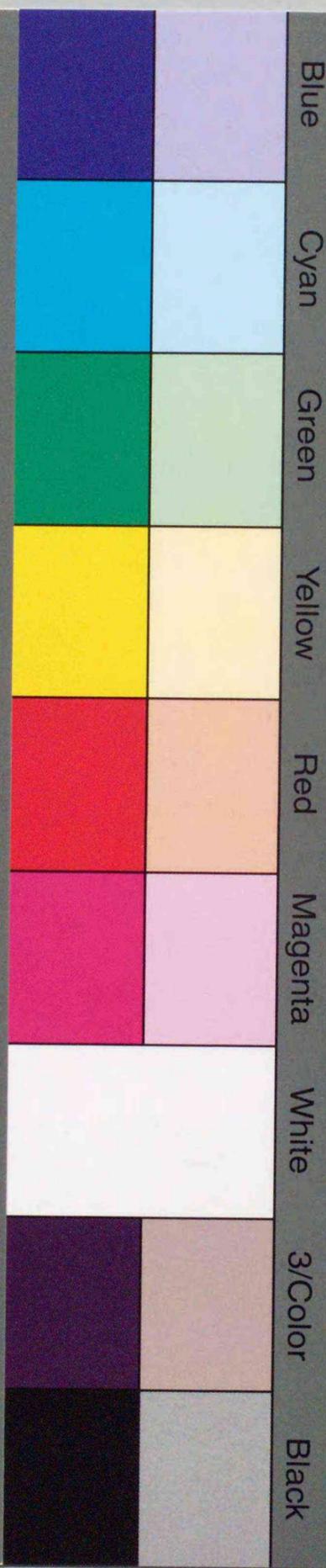
The six chapter is the summarization, and summarizes the results obtained in this research.



Inches 1 2 3 4 5 6 7 8
cm 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19

Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM: Kodak



Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM: Kodak

A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19

