

ポラスコンクリートの圧縮強度特性に及ぼす影響因子に関する研究

— 締固め程度および砕石粒径が結合材の分布状態と圧縮強度特性に及ぼす影響 —

THE INFLUENCE FACTOR ON THE COMPRESSIVE STRENGTH OF POROUS CONCRETE

— The influence of vibration and coarse aggregate size on the binder distribution and compressive strength in porous concrete —

大谷 俊浩*, 村上 聖**, 佐藤 嘉昭***, 三井 宜之****, 平居 孝之*****

Toshihiro OTANI, Kiyoshi MURAKAMI, Yoshiaki SATO,
Yoshiyuki MITSUI and Takayuki HIRAI

The object of this research project is to establish the theory of compressive strength of porous concrete, and in this paper, the influence of the vibration and the coarse aggregate size on the properties of porous concrete were studied. The test results showed as follows: (1) the distribution of binder in porous concrete was influenced by both the condition of vibration and the coarse aggregate size, (2) the compressive strength was explained by the void ratio regardless of the coarse aggregate size, (3) the modulus of elasticity was calculated by using the formula for normal concrete proposed by AIJ.

Keywords: Porous Concrete, Compressive Strength, Modulus of Elasticity, Vibrating Compaction, Coarse Aggregate Size, Distribution of Binder

ポラスコンクリート, 圧縮強度, ヤング係数, 振動締固め, 骨材粒径, 結合材の分布状態

1. はじめに

ポラスコンクリートは内部に連続した空隙を多量に有するコンクリートである。その形状特性から、通気や透水が可能であり、近年地球環境問題がクローズアップされるなか、環境負荷低減や環境共生が可能なエココンクリート¹⁾として注目されている。ポラスコンクリートに関する研究は、各研究機関において精力的に行われており、それらの研究が委員会報告書²⁾としてまとめられるに至っている。しかしながら、ポラスコンクリートの圧縮強度特性一つをとりあげてみても、粘弾塑性サスペンション要素法を用いたシミュレーションなどにより破壊性状の解析的な研究³⁾が進められているものの、理論体系が十分に確立されているとは言えないのが現状である。今後ポラスコンクリートの利用を拡大していくためには、要求された性能を保証できるような調合設計法の確立が必要であり、そのためには強度理論体系を確立する必要がある。

ポラスコンクリートの圧縮強度特性を把握するためには、圧縮強度特性に影響を及ぼす影響因子について整理しておく必要がある。ポラスコンクリートの圧縮強度特性に影響を及ぼす主な影響因子として次の5つが挙げられる。

(1) 空隙率

(2) 結合材強度

(3) 骨材強度

(4) 骨材粒径

(5) 締固めの程度

結合材強度と骨材強度は相対的な関係にあるため1つの影響因子として取り扱うことが妥当であると考えられるが、それらの圧縮強度に及ぼす影響が大きいという報告もあれば、少ないというものもある。また、骨材粒径の影響については、粒径が小さいものほど圧縮強度は大きくなると報告されている研究もあれば、影響は少ないとされているものもあり、統一した見解に至っていない。このような結論に至った原因として、村尾ら⁴⁾が指摘しているように、ポラスコンクリートの圧縮破壊形態には結合材、結合材と骨材界面および骨材破壊の3種類が存在し、その支配的破壊形態によって傾向が変化することが考えられる。さらに、一般にポラスコンクリートの調合は骨材の実積率を元に決定されるが、実際には骨材接点間に結合材が入り込むなどの理由で前提条件となる骨材の実積率が変化するため計画調合とずれを生じることはよく知られている。そのため、(社)日本コンクリート工学協会が制定されているポラスコンクリート製造・施工指針(案)²⁾では、単位粗骨材量の決定

* 大分大学工学部福祉環境工学科 助手・工修
** 熊本大学大学院自然科学研究科 助教授・工博

*** 大分大学工学部福祉環境工学科 教授・工博
**** 熊本大学工学部環境システム工学科 教授・工博

***** 日本文理大学工学部建築デザイン学科 教授・工博

Research Assoc., Dept. of Architectural Eng., Faculty of Eng., Oita Univ., M. Eng. Assoc. Prof., Graduate School of Science and Technology, Environmental Science, Kumamoto Univ., Dr. Eng.
Prof., Dept. of Architectural Eng., Faculty of Eng., Oita Univ., Dr. Eng.
Prof., Dept. of Architecture and Civil Eng., Faculty of Eng., Kumamoto Univ., Dr. Eng.
Prof., Dept. of Architectural Designs, Faculty of Eng., Nippon Bunri Univ., Dr. Eng.

の際に、実積率に補正係数を乗じることで対応している。以上のように、ポーラスコンクリートの強度特性は、使用する材料特性のみならず調合や製造方法の影響を受けており、上記の主な影響因子が複合的に影響していることが予想されるが、それらの影響が整理されておらず強度理論体系の構築に至っていないのが現状である。

そこで、本研究ではポーラスコンクリートの強度理論体系の確立を最終的な目標とし、まず締固め程度や粗骨材粒径が圧縮強度特性に及ぼす影響について検討した。なお、本論文は結合材の分布状態がポーラスコンクリートの圧縮強度特性に及ぼす影響について既に報告した論文^{5),6)}に対して、新たな実験データおよび知見を追加し、締固め程度および碎石粒径がポーラスコンクリートの圧縮強度特性へ及ぼす影響について総合的に再構成したものである。

2. 締固め程度が結合材の分布状態および圧縮強度に及ぼす影響 (シリーズ1)

2.1 実験目的

ポーラスコンクリートの締固めは、一般に振動締固めにより行われる。しかしながら、適切な結合材の粘性を確保しなければ振動締固めにより結合材に垂れが生じ、強度特性に影響を及ぼすことになる。さらに、粗骨材粒径が変化した場合、単位容積に占める骨材数や骨材表面積が変化することから、振動による適切な締固めの程度も変化することが予想される。

そこで、粒径が異なる2種類の骨材を使用したポーラスコンクリートに対して振動による締固めの程度を変化させ、骨材粒径および締固めの程度が結合材の分布性状および圧縮強度特性に及ぼす影響を調べた^{5),6)}。

2.2 実験方法

表1に使用材料を示す。セメントには高炉セメントB種を使用した。また、表中の粗骨材に付記する記号A, Bは産地の違いを示す。本シリーズでは、産地Aの硬質砂岩碎石5号および6号の2種類の骨材を使用した。

調合を表2に示す。調合は水セメント比を25%、結合材空隙充填率(骨材の実積率をもとに計算した空隙を結合材で充填する割合)を40%(空隙率:25.5%(碎石5号), 26.1%(碎石6号))で一定とし、高性能AE減水剤によって結合材のフロー値を150, 175および200mmの3水準に調整した。

混練は、セメントペーストを先練りする方法で行った。まずモルタルミキサでセメントペーストを作製し、練り混ぜたセメントペーストを強制二軸ミキサに移し、粗骨材と混ぜ合わせた。練りあげたコンクリートは、φ10×20cmの円柱供試体用型枠へJIS A 1132に準拠して2層詰めで打設した。上層までコンクリートを詰めた供試体は、卓上バイブレータ(振動数:3000vpm, 振幅:1.5mm)で振動締固めを行い、振動時間を0, 2, 4, 6, 10および20秒の6段階に変化させて締固め程度の異なる供試体を作製した。なお、振動によりコンクリートが沈下したものは、その分のコンクリートを追加した。

作製した供試体は、材齢1日で脱型し、20℃水中養生を行った。次に材齢14日で容積法により空隙率の測定を行い、材齢28日に圧縮強度試験に供した。圧縮強度試験は、容量1000kN万能試験機を

表1 使用材料

セメント	高炉セメントB種: 密度 3.04 g/cm ³	
粗骨材	硬質砂岩碎石5号A: 表乾密度 2.60 g/cm ³ 吸水率 2.00 % 粒径 13~20 mm 実積率 57.5 % 破砕値 15 %	硬質砂岩碎石5号B: 表乾密度 2.64 g/cm ³ 吸水率 1.02 % 粒径 13~20 mm 実積率 55.9 % 破砕値 14 %
	硬質砂岩碎石6号A: 表乾密度 2.58 g/cm ³ 吸水率 2.55 % 粒径 5~13 mm 実積率 56.5 %	硬質砂岩碎石6号B: 表乾密度 2.62 g/cm ³ 吸水率 1.64 % 粒径 5~13 mm 実積率 56.8 %
		硬質砂岩碎石7号B: 表乾密度 2.60 g/cm ³ 吸水率 1.70 % 粒径 2.5~5 mm 実積率 54.6 %
混和剤	ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤	

表2 調合(シリーズ1)

No.	W/C (%)	CP/V (%)	骨材種類	目標フロー値 (mm)
1	25	40	碎石5号A	150
2				175
3				200
4			碎石6号A	150
5				175
6				200

注) W/C:水セメント比, CP/V:結合材空隙充填率

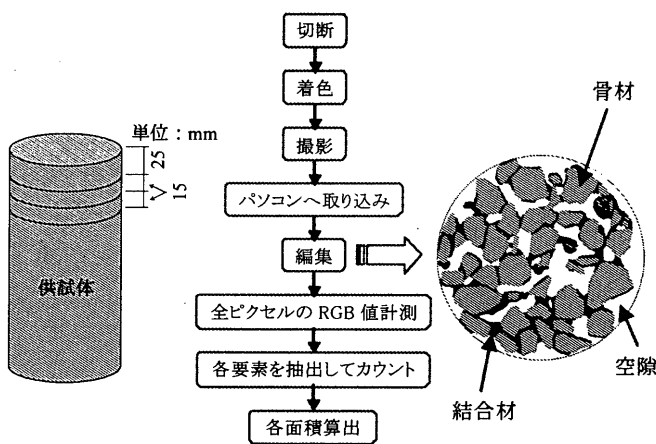


図1 供試体切断位置

図2 断面算定のフローチャート

使用し、JIS A 1108に準拠して行った。供試体端面は、セメントペーストまたは硫黄によるキャッピングを行った。また、結合材の分布状態の測定は、セメントの水和反応が十分に進行したフロー値が175mmの供試体を使用して行ったが、その方法は次のとおりである。まず、湿式のコンクリートカッターを用いて図1に示すような振動で結合材が垂れを生じ減少する⁷⁾供試体上部の3箇所を切断し、各断面の骨材、結合材および空隙の面積を求め、振動締固めによる高さ方向の結合材の分布状態を調べた。切断面の各面積の算出方法は、図2に示すフローチャートに沿って行い、画像データとしてパソコンに取り込み、色分けした骨材、結合材および空隙部分のピクセル

を RGB 要素によって識別して集計した。なお、画像データは分割するピクセル数が多いほど精度は向上するが、解析速度は遅くなるため、予備実験の結果より解析精度を落とさないと判断された供試体直径に相当するピクセル数が約 350 になる大きさにした。

2.3 実験結果および考察

1) 締固め程度が空隙率および圧縮強度に及ぼす影響

表 3 に実験結果を平均値で示す。図 3 に空隙率と加振時間の関係を、図 4 に圧縮強度と加振時間の関係を示す。両図はともに加振時間 0 秒に対する相対比で表されている。図より、加振時間の増加とともに空隙率は減少し、加振によりコンクリートが密実になっていくことがわかる。さらに、加振時間が 10 秒以上で横ばいの値を示していることから、加振時間 10 秒でコンクリートが十分に締固められたものといえる。一方、図 4 の圧縮強度をみると碎石 5 号は 2 から 6 秒程度で、碎石 6 号は 4 から 10 秒程度でピーク値を示し、以降圧縮強度が低下しており、特に碎石 5 号の方が急激な強度低下を示している。圧縮強度がピークを示す時間が最適な加振時間であることから、粒径が小さいほど最適な加振時間は長くなることわかる。また、圧縮強度がある加振時間でピークを示したのは、加振初期の増加は空隙率の減少から分かるようにコンクリートが密実になることによるものであるが、加振後期の低下は結合材の垂れの影響を受けているものと推察される。

2) 結合材の分布状態が圧縮強度に及ぼす影響

図 5 に供試体上部断面における振動締固めによる結合材の推移の様子

表 3 実験結果 (シリーズ 1)

No.	骨材種類	フロー値 (mm)	振動時間 (秒)	空隙率 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	結合材面積 (%)
1	碎石 5 号 A	150	0	31.2	9.39	-
			2	29.8	9.76	-
			4	29.7	10.8	-
			6	29.1	10.9	-
			10	29.0	10.5	-
			20	30.4	8.34	-
2	碎石 5 号 A	175	0	29.8	8.18	18.7
			2	28.9	11.7	14.1
			4	28.1	11.0	14.3
			6	27.9	10.4	13.1
			10	28.9	8.93	12.5
			20	28.8	7.74	8.52
3	碎石 5 号 A	200	0	35.0	7.98	-
			2	32.0	10.2	-
			4	32.0	9.27	-
			6	31.3	9.93	-
			10	30.0	9.12	-
			20	29.9	7.89	-
4	碎石 5 号 A	150	0	32.0	7.97	-
			2	28.9	10.2	-
			4	29.0	9.57	-
			6	27.2	10.5	-
			10	27.2	11.5	-
			20	26.2	10.4	-
5	碎石 6 号 A	175	0	29.4	11.0	15.1
			2	26.4	12.6	16.0
			4	26.4	13.6	16.1
			6	24.6	13.6	15.9
			10	22.9	13.0	15.5
			20	23.2	11.8	14.4
6	碎石 6 号 A	200	0	28.6	10.5	-
			2	26.5	11.9	-
			4	26.7	12.0	-
			6	26.0	11.5	-
			10	24.8	12.6	-
			20	25.8	11.7	-

一例を示す。実験の都合上、同一供試体かつ同一断面ではないが、碎石 6 号と比較して碎石 5 号の結合材の減少量が多いことがわかる。図 6 はそれら各断面より算出した結合材面積の全平均を振動締固めを行わなかったものに対する相対比として示したものである。図より、碎石 5 号の場合、加振時間 20 秒で無振動の 50% 以下に結合材量が減少しているのに対して、粒径が小さな碎石 6 号の場合、加振時間 20 秒においても結合材がほとんど減少していないことがわかる。このことは、粒径が大きいほど振動締固めにより結合材が垂れ

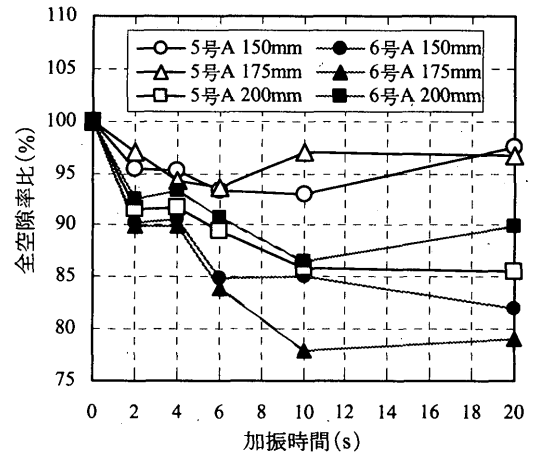


図 3 全空隙率と加振時間の関係

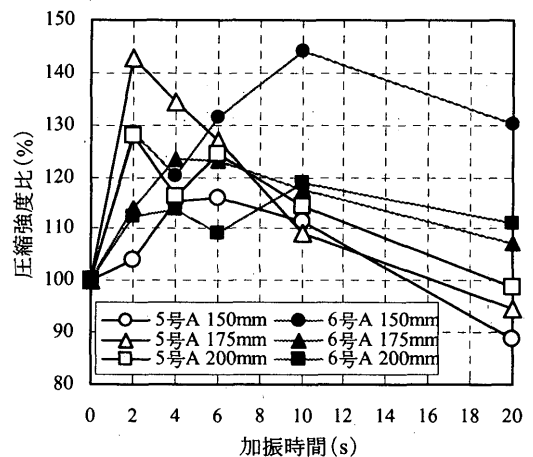


図 4 圧縮強度と加振時間の関係

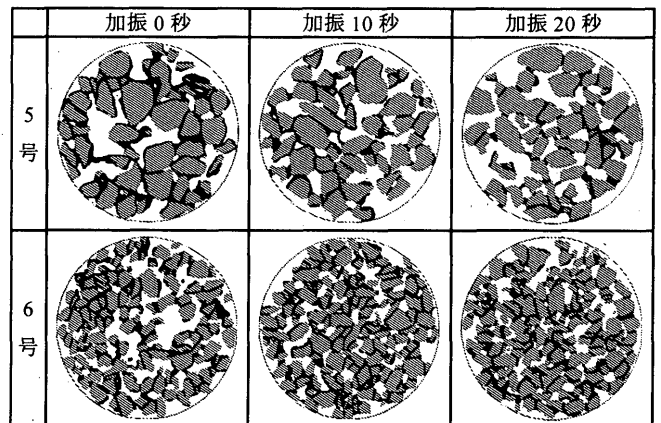


図 5 振動締固めによる供試体上部結合材の推移の様子 (一例)

やすいことを示唆しており、粒径が小さいほど同一空隙率で調査した供試体の圧縮強度が高くなる一要因であると考えられる。

粒径が大きい方が結合材が振動締固めにより垂れやすくなるのは、骨材表面積と結合材膜厚が関係している。表4は前述と同様の手法により振動締固めを行っていないほぼ同一空隙率の供試体の断面より算出した2次元における骨材周長および結合材の平均膜厚であるが、表より粒径が大きい砕石5号の方が骨材周長が短く、結合材膜厚が厚くなっていることがわかる。そのため、粒径が大きくなるほど結合材が厚くなり、振動締固めにより結合材が垂れやすくなり、圧縮強度は局所的な影響を受けるため強度低下が生じたものと考えられる。

3. 砕石粒径が圧縮強度特性に及ぼす影響 (シリーズ2)

3.1 実験目的

シリーズ1において結合材の分布状態が骨材粒径により変化し、それが骨材粒径の違いによる圧縮強度の変化の一要因になることが示された。そこで、結合材に垂れが生じないように供試体を作製し、骨材粒径が圧縮強度特性に及ぼす影響を調べた。

3.2 実験方法

骨材は表1中の産地Bの粒径の異なる3種類の砕石を使用した。表5に調査を示す。結合材強度の違いによる影響を排除することを目的として、水セメント比を25%で一定とした。また、結合材のフロー値は、高性能AE減水剤により200±10mmに調整した。

混練方法は、シリーズ1と同様のセメントペースト先練りによるものと、砕石5号の一部については試料を一つのミキサで一括して練り混ぜる方法の2種類とした。後者の練混ぜ方法は、まずセメントおよび粗骨材を二軸ミキサで30秒間空練りを行い、次に水および混和剤を投入後150秒間練り混ぜてコンクリートを作製した。また、型枠への打設時の締固めについては、シリーズ1の実験結果より骨材粒径が異なった場合、同程度の振動締固めを与えるのが困難であることが確認されたため、目標空隙率0%の一部を除き結合材の垂れによる影響を排除することを目的として振動による締固めは行わず、突き棒による突固めのみで締固めを行った。目標空隙率0%の残りの供試体については、目視により確認可能な大きな空隙がなくなるまで、卓上パイプレータにより振動締固めを行った。

養生方法、空隙率測定方法および圧縮強度試験方法は、シリーズ1と同様である。ただし、本実験の圧縮強度試験では、ポーラスコンクリート用に爪の部分が横長に改良されたコンプレッソメータ⁹⁾を使用し、コンクリートの縦ひずみを測定し、1/3割線ヤング係数を算出した。なお、改良されたコンプレッソメータの1つの爪の幅は50mm(円弧長52.4mm, 円周の1/6に相当)、高さは3mmである。図7に強度試験時の縦ひずみの測定状況を示す。

3.3 実験結果および考察

1) 空隙率

表6に実験結果を平均値で示す。実測した空隙率は目標空隙率と大きな差があり、図8に示すように、目標空隙率が小さいほど、また骨材粒径が大きいほどその差が大きくなっている。これは、骨材と測定容器の接触面で骨材配列が乱されその箇所の実積率が低下

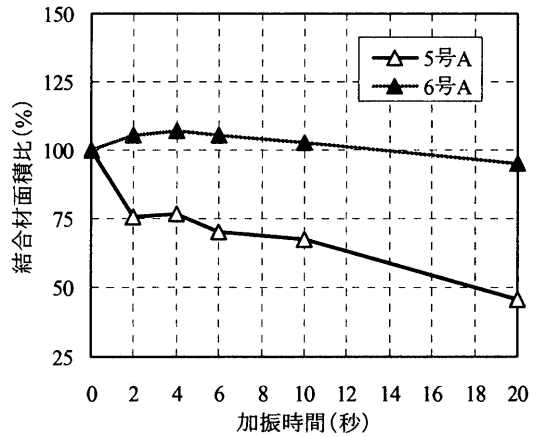


図6 振動締固めによる供試体上部の結合材量の推移

表4 結合材平均膜厚測定結果

骨材種類	空隙率 (%)	骨材周長 (mm)	結合材面積 (mm ²)	結合材膜厚 (mm)
砕石5号A	29.8	2201	1133	0.51
砕石6号A	29.4	4824	1278	0.27

表5 調査 (シリーズ2)

No.	W/C (%)	フロー値 (mm)	粗骨材種類	混練方法	目標空隙率 (%)	
1	25	200 ± 10	砕石5号B	ペースト先練り, 一括	0*	
2				一括	5	
3				一括	10	
4				ペースト先練り, 一括	15	
5				ペースト先練り, 一括	20	
6				一括	25	
7			砕石6号B	ペースト先練り		0**
8					15	
9					20	
10					0**	
11					15	
12					20	

注) W/C:水セメント比
 締固め方法: * 「突き棒+卓上パイプレータ」の1条件
 ** 「突き棒+卓上パイプレータ」, 「突き棒のみ」の2条件

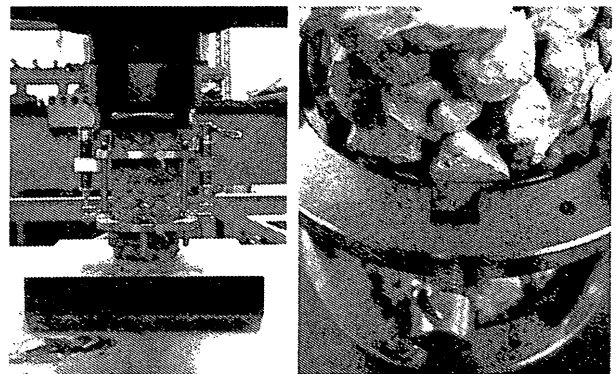


図7 圧縮強度試験状況とコンプレッソメータの固定状況

する壁効果^{9), 10)}の影響と、骨材接点間に結合材が入り込むことによる実積率の低下の影響などが関与していると考えられる。壁効果の影響をみるため、同骨材を使用してJIS A 1104の骨材の実積率試験方法に規定された容器(5号および6号は容量10リットルの容器、

7号は容量2リットルの容器を使用)と供試体作製に使用したφ10×20cmの円柱容器を使用して実積率を測定した。その結果を表7に示す。なお、当試験方法によれば、骨材表面のならし方を容器の上面からの粗骨材粒の突起が、上面からのへこみと同じくらいになるようにすると規定されているが、φ10×20cmの供試体用型枠については供試体作製時を考慮して骨材粒の突起が容器上面を越えないようにした。表より、3種類の骨材ともJIS規定容器より供試体用型枠で測定した実積率の方が小さな値を示しており、かつ骨材粒径が大きくなるほどその差が大きくなっている。

図8の縦軸に示す目標空隙率と実測空隙率の差から壁効果による増加量を減じたものと目標空隙率の関係を図9に示す。図より、壁効果以外の影響による空隙率の増加量が、目標空隙率が小さいほど、また全体的にみて骨材粒径が大きいほど大きくなっている。これはシリーズ1の実験で明らかにしたように、骨材粒径が大きいほど、目標空隙率が小さいほど、骨材周りの結合材の膜厚は厚くなり、骨材接点間に入り込む結合材の増加によって骨材の実積率の低下量が大きくなり、空隙率が増加したものと考えられる。一方、混練方法の違いによる影響をみると、ペースト先練りで作製した場合より一括練りで作製したものが小さな値を示している。これは、加藤ら¹¹⁾が指摘しているように、強制二軸ミキサで混練した場合、粗骨材が破碎されて骨材粒度が変化するため本実験では粗骨材の混練時間がペースト先練りの場合が60秒、一括練りの場合が150秒と両者の混練方法には粗骨材の混練時間に差が存在しており、混練時の骨材の破壊により骨材の実積率に変化が生じた結果であると考えられる。したがって、ポーラスコンクリートのように粗骨材量が多いコンクリートの場合、混練時の骨材破壊による実積率の変化は無視できないほど大きな影響を及ぼすことが予想されるため、骨材の破壊を生じないように骨材の混練は可能な限り短い時間で行うか、骨材破壊が少ないミキサを使用することが望ましい。

2) 空隙率と圧縮強度およびヤング係数との関係

ポーラスコンクリートの強度は空隙率の影響を大きく受けるため、骨材粒径が圧縮強度に及ぼす影響をみるためには、空隙率の影響を考慮する必要がある。図10に圧縮強度と空隙率の関係を示す。図には、既報の実験結果^{12), 13)}のうち本実験と使用セメント種類および水セメント比が同一な調合で行った実験データも合わせて示す。図より、5%前後の低空隙率部分で砕石5号を使用したものの圧縮強度が近似曲線から離れ低くなっているものが存在するが、骨材および結合材強度が同じであれば、圧縮強度と空隙率の関係は相関性が高く、また骨材粒径の影響は少ないことが分かる。そのため、これまで骨材粒径が圧縮強度に影響を及ぼす要因として、骨材接点の変化などが挙げられていたが、実際にはそのような影響が小さく、前述したように空隙率の変化が影響していたものと考えられる。また、練混ぜ方法の違いが圧縮強度と空隙率の関係に及ぼす影響は小さいことが分かる。以上のことから、結合材に垂れが生じないような適切な状態で締固めを行ったポーラスコンクリートは、骨材粒径および混練方法の違いにより空隙率が変化するが、圧縮強度の変化は空隙率の変化に起因するものであり、圧縮強度に直接的に影響を及ぼすものではない。したがって、空隙率を適切に管理することで、

表6 実験結果 (シリーズ2)

No.	骨材種類	混練締固め方法	目標空隙率 (%)	空隙率 (%)	気乾単位容積質量 (g/cm ³)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
1	5号B	先練, 振	0	-	2.42	63.5	32.0
		一括, 振	0	4.80	2.28	36.0	27.3
		先練, 突	5	19.2	2.04	24.2	19.6
		一括, 突	10	21.4	2.00	21.5	18.4
		先練, 突	15	28.9	1.84	11.1	12.4
		一括, 突	15	25.1	1.92	16.2	16.4
2	5号B	先練, 突	20	30.7	1.81	8.43	11.6
		一括, 突	20	27.2	1.88	16.7	16.1
		一括, 突	25	31.3	1.81	10.9	13.1
3	6号B	先練, 振	0	0.85	2.39	65.0	31.4
		先練, 突	0	16.6	2.08	20.7	17.8
		先練, 突	15	25.4	1.91	13.6	14.2
4	6号B	先練, 突	20	29.4	1.83	9.87	11.8
		先練, 振	0	0.60	2.37	65.6	31.4
		先練, 突	0	13.8	2.07	22.7	19.4
5	7号B	先練, 突	15	24.5	1.86	12.6	13.5
		先練, 突	20	25.1	1.85	10.5	11.8
		先練, 突	20	25.1	1.85	10.5	11.8

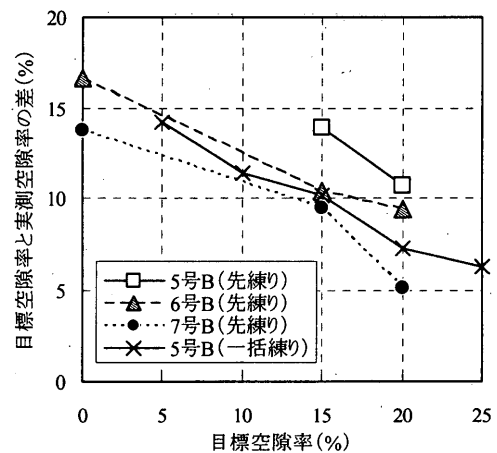


図8 骨材粒径と目標空隙率の違いによる空隙率の変化

表7 骨材の実積率に影響する測定容器の大きさの違い

骨材種類	実積率 (%)		差 (%)
	JIS 規定容器*	φ10×20cm	
5号B	56.7	52.0	4.8
6号B	56.6	54.3	2.2
7号B	55.3	53.9	1.5

*5号および6号は10リットル容器, 7号は2リットル容器を使用

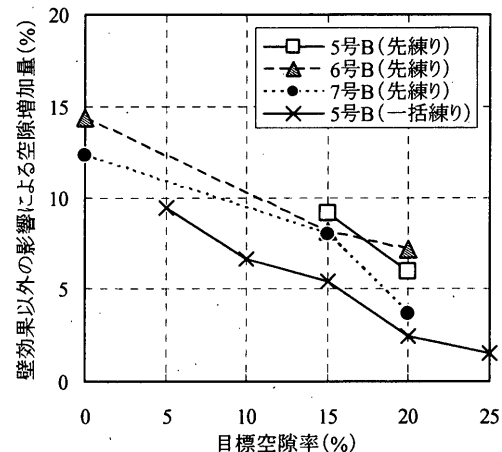


図9 壁効果以外の影響による空隙増加量と目標空隙率の関係

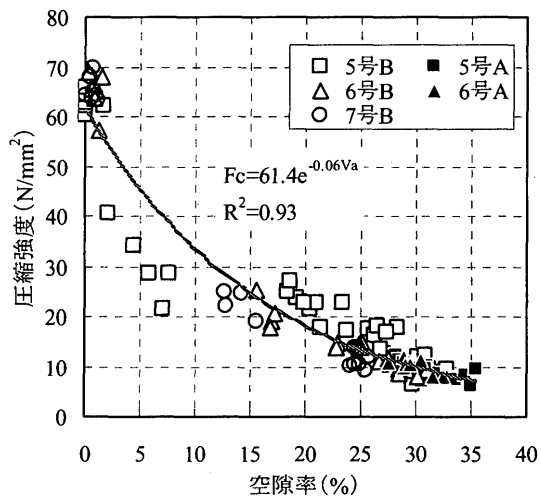


図 10 圧縮強度と空隙率の関係

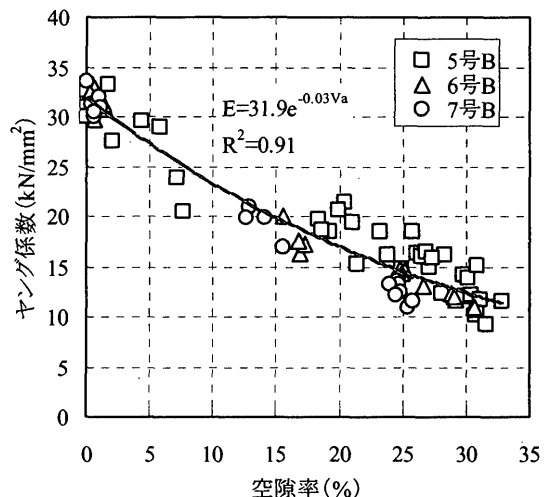


図 11 ヤング係数と空隙率の関係

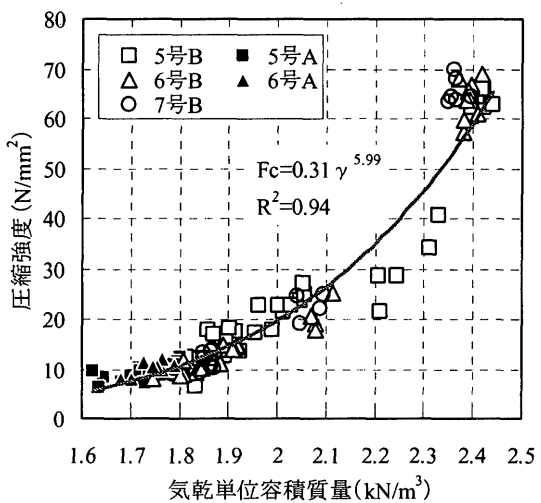


図 12 圧縮強度と気乾単位容積質量の関係

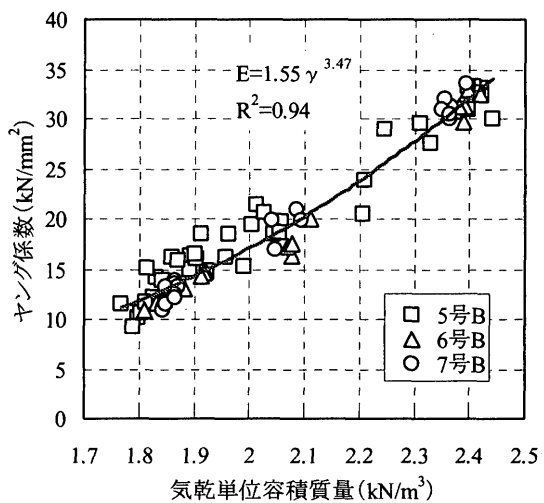


図 13 ヤング係数と気乾単位容積質量の関係

圧縮強度の管理も可能であると考えられる。

図 11 にヤング係数と空隙率の関係を示す。ヤング係数と空隙率の関係も圧縮強度と同様に相関性が高いことが分かる。

3) 気乾単位容積質量と圧縮強度およびヤング係数との関係

強度を評価する指標値としては、空隙率のほかにコンクリートの単位容積質量が挙げられる。図 12 に圧縮強度と気乾単位容積質量の関係、図 13 にヤング係数と気乾単位容積質量の関係を示す。単位容積質量が 0 のとき圧縮強度やヤング係数が 0 であるという仮定のもと、累乗関数で近似した曲線を図中に示すが、空隙率と同様に気乾単位容積質量も圧縮強度とヤング係数との相関性が高いことが分かる。今回使用した気乾単位容積質量は、材齢 14 日における空隙率測定時のデータを使用したため、強度試験時では若干異なった値を示すと考えられるが、気乾単位容積質量の測定は簡便であるため、強度管理の指標値として気乾単位容積質量を取り入れることの優位性は高い。ただし、コンクリートの気乾単位容積質量の測定には硬化後のコンクリートが必要となるため、コンクリート打設時点での評価は行えないという問題点が存在する。

以上の結果より、ポーラスコンクリートの圧縮強度とヤング係数

の関係には普通コンクリートと同様に良い相関があると推察される。そこで、普通コンクリートで採用されている日本建築学会 RC 構造計算規準式との対応について検討を行うこととした。以前は式

(1) (1991 年度版 RC 構造計算規準式。以下、旧規準式) が採用されていたが、昨今のコンクリートの高強度化にともない現在は式

(2) (以下、New RC 式) が採用されている。また、JASS 5 では、設計基準強度 36N/mm² を境に低強度側では式 (1)、高強度側では式

(2) が良い近似を示すことから用いられている。ポーラスコンクリートは空隙率の変化によりコンクリートの単位容積質量も変化する。そのため、横軸に両式の数項、縦軸にヤング係数ととり、

定数項との関係を求めた。

$$E = 21.0 \times \left(\frac{\gamma}{2.3}\right)^{1.5} \times \left(\frac{Fc}{20}\right)^{0.5} \quad (1991 \text{ 年度版}) \quad (1)$$

$$E = 33.5 \times k_1 \times k_2 \left(\frac{\gamma}{2.4}\right)^2 \times \left(\frac{Fc}{60}\right)^{1/3} \quad (\text{New RC 式}) \quad (2)$$

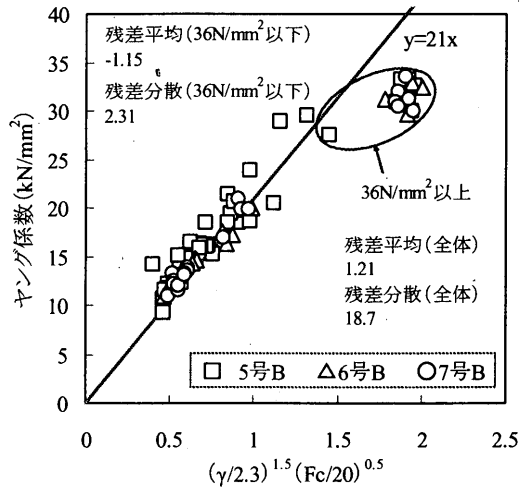


図 14 旧日本建築学会 RC 構造計算規準式との対応

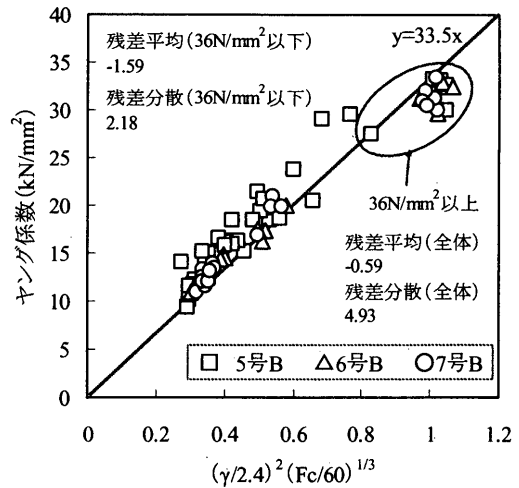


図 15 日本建築学会 RC 構造計算規準式との対応

ここに、 E ：コンクリートのヤング係数 (kN/mm²)
 γ ：コンクリートの単位容積質量 (kN/m³)
 F_c ：コンクリートの設計基準強度 (N/mm²)
 k_1, k_2 ：骨材、混和材による係数

図 14 に旧規準式、図 15 に New RC 式の結果を示す。両図より、旧規準式で圧縮強度が 36N/mm² を超えるような高強度域で式との相違が認められるが、全体的に両規準式と良い近似が認められ、特にポーラスコンクリートの現実的な強度域を 36N/mm² 以下と考えれば、その強度域では旧規準式の方が式より算出した値と実測値との差である残差の分散は若干大きいものの、残差平均ではその絶対値が小さくヤング係数を精度良く推定できることがわかる。また、旧規準式は約 15~36N/mm² の強度域を想定したものであったが、15N/mm² 以下の低強度域においても良い近似が認められる。したがって、品質の安定した材料を使用したポーラスコンクリートならば圧縮強度を測定すれば旧 RC 構造計算規準式を用いることでヤング係数を比較的精度良く求めることが可能であることが分かった。

4. まとめ

ポーラスコンクリートの強度理論体系を確立することを目的として、締固めの程度および骨材粒径の違いが圧縮強度特性に及ぼす影響について検討を行った。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 骨材粒径の違いが振動による締固め性状およびマトリックスの形成状況に影響を及ぼし、間接的に圧縮強度に影響を及ぼす。
- 2) 結合材に垂れを生じないような適切な締固めが行われた場合、骨材粒径に関係なく空隙率で強度管理を行うことが可能である。
- 3) 骨材および結合材強度が同一である場合、ポーラスコンクリートの単位容積質量により圧縮強度およびヤング係数を精度良く推定することが可能であり、単位容積質量の測定は簡便であるため、品質管理指標値として取り入れることの優位性は高い。
- 4) ポーラスコンクリートのヤング係数は、日本建築学会旧 RC 構造計算規準式により算出することが可能である。

参考文献

- 1) エココンクリート委員会：委員会報告、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.19-28, 1996.6
- 2) 日本コンクリート工学協会：ポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する研究委員会報告書、日本コンクリート工学協会, 2003.5
- 3) 朴 相俊, 谷川恭雄, 森 博嗣, 平岩 陸：粘弾塑性サスペンション要素法によるポーラスコンクリートの圧縮破壊解析、コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.321-326, 2002.6
- 4) 村尾 健, 湯浅幸久, 三島直生, 畑中重光：砕石並びに再生骨材を用いたポーラスコンクリートの圧縮強度性状に関する実験的研究、日本コンクリート工学協会ポーラスコンクリートの設計・施工法と最近の適用例に関するシンポジウム論文集, pp.71-76, 2002.5
- 5) 大谷俊浩, 村上 聖, 佐藤嘉昭, 三井宜之：結合材の分布状態がポーラスコンクリートの締固め性状に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.139-144, 2001.6
- 6) 大谷俊浩, 村上 聖, 佐藤嘉昭, 三井宜之：砕石粒径が小さい場合の結合材の分布状態がポーラスコンクリートの強度特性に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1155-1160, 2002.6
- 7) 大谷俊浩, 村上 聖, 佐藤嘉昭, 三井宜之：ポーラスコンクリートの結合材の分布状態の評価方法に関する一考察、日本コンクリート工学協会ポーラスコンクリートの設計・施工法と最近の適用例に関するシンポジウム論文集, pp.51-54, 2002.5
- 8) 音野琢也, 国枝 稔, 吉田知弘, 古川浩司, 六郷恵哲：ポーラスコンクリートの静弾性係数試験に関する基礎的研究、日本コンクリート工学協会ポーラスコンクリートの設計・施工法と最近の適用例に関するシンポジウム論文集, pp.57-62, 2003.5
- 9) 越 健, 古川浩司, 国枝 稔, 六郷恵哲：せき板効果を取り除くことによるポーラスコンクリートの透水試験方法の改善、コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.157-162, 2001.6
- 10) 三輪茂雄：粉体工学通論, 日刊工業新聞社, 1981.2
- 11) 加藤俊二, 河野広隆, 森濱和正, 土屋浩樹：骨材強度と練混ぜ時の骨材の破砕性に関する検討、コンクリート工学年次論文集, Vol.19, No.1, pp.325-330, 1997.6
- 12) 大谷俊浩, 村上 聖, 佐藤嘉昭, 三井宜之：ポーラスコンクリートの空隙率と圧縮強度に及ぼす供試体寸法の影響、セメント・コンクリート論文集, No.56, pp.298-303, 2003.2
- 13) 大谷俊浩, 村上 聖, 佐藤嘉昭, 三井宜之：ポーラスコンクリート結合材の加振充填による簡便な曲げ補強方法に関する研究、日本コンクリート工学協会ポーラスコンクリートの設計・施工法と最近の適用例に関するシンポジウム論文集, pp.37-42, 2003.5

(2004年2月10日原稿受理, 2004年7月16日採用決定)