

# 論文 ポーラスコンクリートの圧縮強度の変動に及ぼす試験体の端面処理方法に関する実験的研究

山本 貴正<sup>\*1</sup>・小池 狭千朗<sup>\*2</sup>・牧野 智英<sup>\*3</sup>・畑中 重光<sup>\*4</sup>

**要旨:** 本研究では、ポーラスコンクリートの圧縮強度の変動に及ぼす試験体の端面処理方法の影響を把握することを目的として、実験的な検討を行った。試験体の端面処理方法は硫黄キャッピングの縁あり、縁なし、およびセメントペーストキャッピングの3種類である。実験の結果、圧縮強度試験結果に及ぼす硫黄キャッピングの縁ありおよび縁なしの影響はほとんどないこと、本実験の施工方法では、セメントペーストキャッピングを施した試験体は、硫黄キャッピングのそれと比較すると、圧縮強度が低下し、またその変動が大きくなること、などが明らかとなった。

**キーワード:** 水セメント比, 空隙率, 圧縮強度 - 空隙率関係, 平均値, 変動係数, 標準偏差

## 1. はじめに

環境負荷低減型コンクリートの一種であるポーラスコンクリートは、その連続空隙によって透水性および吸音性の機能を有し、また生物が生息することも可能である。これまでポーラスコンクリートの物性および適用性に関する様々な実験的・理論的研究が行われており、それら機能を十分に活かすための各用途に適した空隙および強度に関する報告がなされている(例えば1)。

コンクリートの各種試験結果には、必ずバラツキを伴うことが知られている(例えば2)。しかし、ポーラスコンクリートについては、その特性を示す空隙、強度などのバラツキに関してあまり詳細な実験データが得られておらず、現状では実施設計に適用されるまでに至っていない。ポーラスコンクリートは、内部に空隙や結合材の分布が生じるなど、特有のバラツキの原因が存在する。従って、普通コンクリートの強度などのバラツキに関するデータをポーラスコンクリートにそのまま適用することはできないと考えられる。よって、筆者らは、これまでに、ポーラスコンクリートの基本的特性である空隙率および圧縮強度のバラツキに及ぼす水セメント比、空隙率、結合材のフロー値および骨材粒径の影響について実験的な検討を行ってきた<sup>3) - 5)</sup>。そのなかで、ポーラスコンクリートの圧縮強度用試験体の端面処理方法について、硫黄キャッピングとセメントペーストキャッピングを施した場合とでは、圧縮強度の平均値および変動係数が異なる傾向が得られた。

そこで、本研究では、ポーラスコンクリートの圧縮強度の変動に及ぼす試験体の端面処理方法(以下、端面処理)の影響を把握することを目的として、実験的な検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

本実験の概要を表-1に示す。実験は2期にわたって行った。ここでは、それぞれシリーズIおよびIIと呼ぶことにする。シリーズIでは、実験要因として、設計空隙率および端面処理を取り上げた。設計空隙率は20、25および30%の3種類、端面処理は図-1に示す硫黄キャッピングの縁あり、縁なし、およびセメントペーストキャッピングの3種類とした。結合材の水セメント比

表-1 実験概要  
I シリーズ

設計空隙率 (%)	20, 25, 30
試験体端面処理	硫黄キャッピング 硫黄キャッピング縁なし セメントペーストキャッピング
W/C (%)	25
標本数	15
II シリーズ	
W/C (%)	20, 25, 30, 35
試験体端面処理	硫黄キャッピング セメントペーストキャッピング
設計空隙率 (%)	25
標本数	22
I・II シリーズ共通	
使用骨材	単粒度砕石6号
設計フロー値 (mm)	220
混練用ミキサ	二軸強制練りミキサ
締固め方法	表面振動
起振力 (N)	1225
締固め時間 (s)	10

[註] W/C : 結合材の水セメント比

\*1 豊田工業高等専門学校 建築学科講師 博士(工学) (正会員)

\*2 愛知工業大学 工学部都市環境学科建築学専攻教授 博士(工学) (正会員)

\*3 静岡市役所 都市局建築部 修士(工学)

\*4 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻教授 工学博士 (正会員)



図-1 試験体の端面処理方法

表-2 調査表一覧

W/C (%)	設計空隙率 (%)	W	C (kg/m <sup>3</sup> )	G	HAE/C (%)
	20	93	371		
25	25	71	282		**2.00
	30	49	195		
20		62	310	1624	*0.55
30	25	78	260		**0.40
35		84	240		-

[註] W\*/C : 水セメント比, W\*=W+HAE, W : 水  
 C : セメント, G : 骨材, HAE : 混和剤 (質量)  
 \* 高性能減水剤, \*\* 高性能 AE 減水剤

表-3 使用材料一覧

セメント	普通ポルトランドセメント 密度 : 3.16 g/cm <sup>3</sup>
骨材	単粒度砕石6号 (粒径 : 5-13mm) 表乾密度 : 2.61 g/cm <sup>3</sup> 実積率 : 59.0 %
混和剤	高性能減水剤 密度 : 1.10 g/cm <sup>3</sup> 高性能AE減水剤 密度 : 1.09 g/cm <sup>3</sup>

(以下、水セメント比)は25%、標本数は各要因ごとに15体である。シリーズIIでは、実験要因として、水セメント比および端面処理を取り上げた。水セメント比は20、25、30および35%の4種類、端面処理は硫黄キャッピングの縁あり、およびセメントペーストキャッピングの2種類とした。設計空隙率は25%、標本数は各要因ごとに22体である。シリーズIおよびIIに共通して使用した骨材は単粒度砕石6号(粒径:5-13mm)、結合材の設計フロー値(以下、フロー値)は220mmである。標本数の合計は、312体である。

## 2.2 使用材料

表-2に調査表一覧を、表-3に使用材料一覧を示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、骨材は微粒分を水洗いして取り除き、それらを表乾状態としたものを用いた。

## 2.3 試験体製作・試験方法

ポーラスコンクリートの練混ぜ方法は、ペースト先練りとし、セメントおよび水を投入後270秒まで練り混ぜた後、骨材を投入してさらに90秒間練り混ぜた。なお、ポーラスコンクリートの混練には、容量100lの二軸強制練りミキサーを使用した。練り上がったコンクリートは、

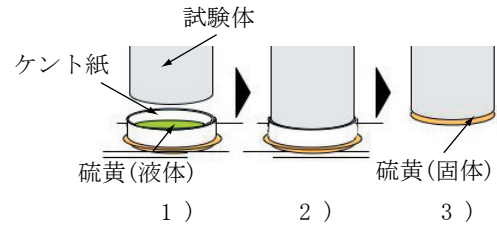


図-2 硫黄キャッピング縁なしの製作方法(両端同様)

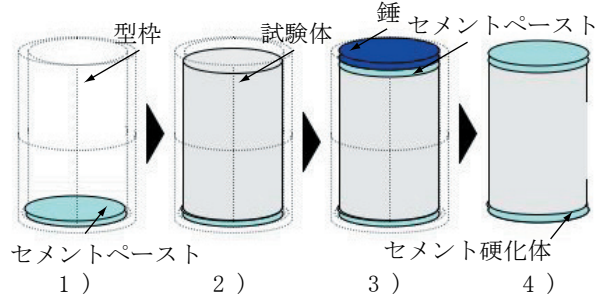


図-3 セメントペーストキャッピングの製作方法

直径100mm、高さ200mmの円柱形型枠に2層で詰め、各層を突き棒で15回突き、その後、パイブレイティングタンパ(起振力1225N)で、10秒間締め固め、翌日脱型の後に水中養生を行った。

空隙率は文献<sup>6)</sup>に示されている容積法を用いて計測した。なお、本報に示す空隙率とは、全空隙率である。圧縮強度試験は2000kN級耐圧試験機を用いて行い、荷重荷荷は単調中心圧縮とした。

## 2.4 端面処理

硫黄キャッピングは、一般に使用されている硫黄キャッピング装置を用いて施した。なお、硫黄キャッピングの縁なしは、図-2に示すように以下の手順で行った。1)硫黄キャッピング装置に液体硫黄とリング状のケント紙を設置する。2)硫黄キャッピング装置のケント紙に囲まれた液体硫黄の部分に試験体の端部を浸す、3)硫黄が固まった後にキャッピング装置から試験体を取り外し、ケント紙とその周辺についた縁部を取り除く。4)試験体の上下を逆にし、この操作を繰り返す。

セメントペーストキャッピングは、空隙率を計測した後、図-3に示すように以下の手順で行った。1)円柱形鋼製型枠の底面に水セメント比30%のセメントペーストを充填する。2)1)の型枠に試験体をはめ込む。3)2)の上面にセメントペーストを塗布し、その上に錘を置く。3)セメントペーストが固まった後に型枠から試験体を取り外す。

## 3. 実験結果・考察

ここでは、試験時の計測不良および偏心荷重が加わったと思われる試験体についてはデータを棄却してある。棄却した試験体は計4体で、そのうち空隙率の計測不良と考えられる試験体が2体、偏心荷重が加わったと考え

られる試験体が2体であった。本報では、既報<sup>3)-5)</sup>と同様に空隙率および圧縮強度の確率分布は議論を簡単にするため正規分布に従うとして進める。

### 3.1 設計空隙率の影響 (シリーズ I)

図-4に、圧縮強度の平均値と設計空隙率の関係に及ぼす端面処理の影響を示す。ここでの水セメント比は25%である。図中の黒塗印および白抜印は、それぞれ端面処理をセメントペーストおよび硫黄によるキャッピングを施したものであり、四角印および円印はそれぞれ硫黄キャッピングの縁ありおよび縁なしを表している。同図より、各設計空隙率とともに、セメントペーストキャッピングを施した圧縮強度の平均値は、硫黄のそれと比較して低いことがわかる。なお硫黄キャッピングの縁部の影響はほとんど認められない。

図-5に、圧縮強度の変動係数と設計空隙率の関係に及ぼす端面処理の影響を示す。図中の記号は図-4と同様である。図-5より、各設計空隙率とともに、セメントペーストキャッピングを施した圧縮強度の変動係数は、硫黄のそれと比較して大きいことがわかる。なお硫黄キャッピングの縁部の影響はほとんど認められない。

### 3.2 水セメント比の影響 (シリーズ II)

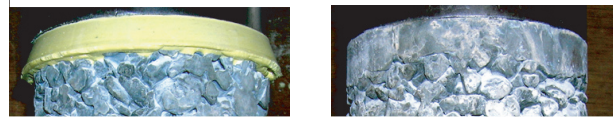
図-6に、圧縮強度の平均値と水セメント比の関係に及ぼす端面処理の影響を示す。図中の黒塗印および白抜印は、それぞれ端面処理をセメントペーストおよび硫黄

によるキャッピングを施したものを表している。同図より、各水セメント比ともに、セメントペーストキャッピングを施した圧縮強度の平均値は、硫黄のそれと比較して若干低いことがわかる。

図-7に、圧縮強度の変動係数と水セメント比の関係に及ぼす端面処理の影響を示す。図中の記号は図-6と同様である。図-7より、各水セメント比とともに、セメントペーストキャッピングを施した圧縮強度の変動係数は、硫黄のそれと比較して大きいことがわかる。

### 3.3 端面処理方法の影響

上述のように、セメントペーストキャッピングを施した試験体は、硫黄キャッピングのそれと比較し、圧縮強度の平均値が小さいこと、および変動係数が大きいことが明らかとなった。また、水セメント比25%および設計空隙率25%でセメントペーストキャッピングを施した試験体については、シリーズIとシリーズIIで結果に差異が生じた。これは、セメントペーストキャッピングを施す場合、本研究による施工方法(図-3参照)では、



(a) 硫黄 (b) セメントペースト  
写真-1 端面処理

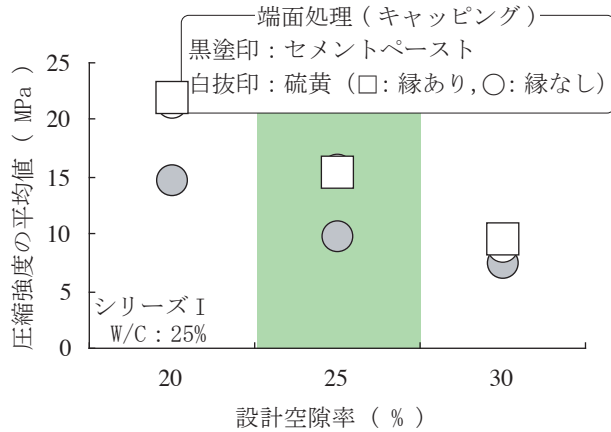


図-4 圧縮強度の平均値と設計空隙率の関係

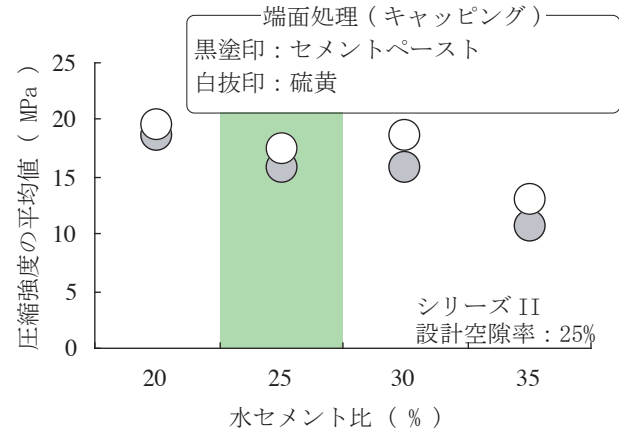


図-6 圧縮強度の平均値と水セメント比の関係

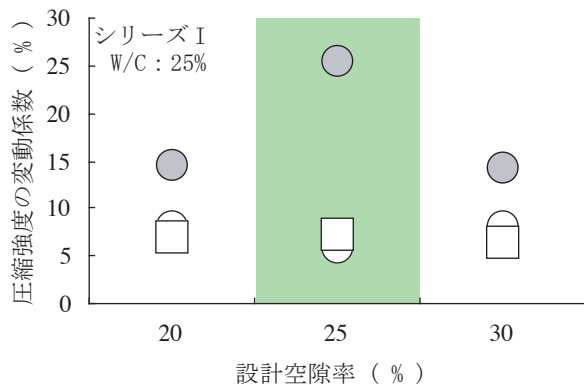


図-5 圧縮強度の変動係数と設計空隙率の関係

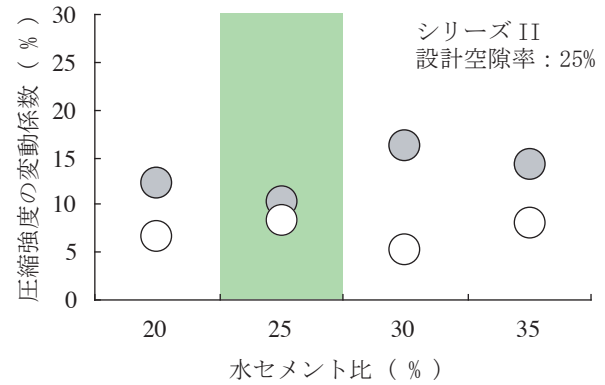
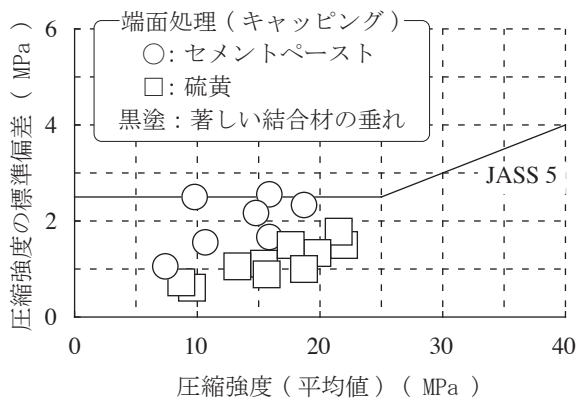


図-7 圧縮強度の変動係数と水セメント比の関係

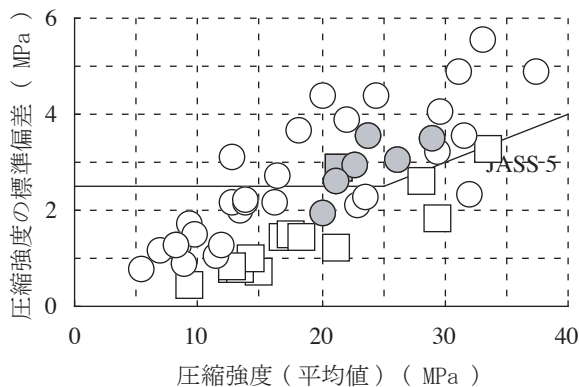
試験体の上端は、セメントペーストが垂れ（写真-1 (b) 参照）、圧縮強度試験の際、この硬化セメントを通じて作用する応力が断面内で一様に生じないため、圧縮強度が低下し、またその変動が大きくなったと考えられる。一方、硫黄キャッピングを施した場合、試験体の上下端は、図-2に示すように、硫黄が垂れることがない（写真-1 (a) 参照）ため、圧縮強度試験の際、作用する応力が断面内で一様に生じ、変動が小さくなると考えられる。従ってポーラスコンクリートの強度試験を行う際、その材料固有の強度を得るためには、本実験における硫黄キャッピングと同様な手法が望ましいと言える。なお、これらが生じる原因については今後、詳細に検討を行う必要がある。

### 3.4 標準偏差

図-8 (a) (b) に、本報および既報<sup>3), 5)</sup>それぞれの圧縮強度の標準偏差と圧縮強度の平均値の関係に及ぼす端面処理の影響を示す。図中の円印および四角印は、それぞれ端面処理をセメントペーストおよび硫黄によるキャッピングを施したものを表し、また、黒塗印は著しい結合材の垂れが生じた試験体である。実線は JASS 5<sup>7)</sup>で示されている普通コンクリートの調合設計上の標準偏差を示している。同図 (b) より、セメントペーストキャッピングの場合、JASS 5 に示された普通コンクリートの



(a) 本報の試験体



(b) 既報の試験体

図-8 圧縮強度の標準偏差

値より大きいことがわかる。なお、硫黄キャッピングを施したものについては、著しい垂れを生じたものを除けば、JASS 5 に示された普通コンクリートの値より小さい。よって、3.3 の考察を踏まえれば、ポーラスコンクリートの調合設計上の際には、JASS 5 に示された普通コンクリートの標準偏差と同様もしくは若干大きい値をとっておけば良いと考えられる。

### 3.5 圧縮強度と空隙率の関係

ポーラスコンクリートの圧縮強度と空隙率の関係には高い相関関係があることが知られている。この圧縮強度-空隙率関係は、一般的な脆性多孔質材料に用いられる次式に示す指数関数で近似することができる<sup>8)</sup>。

$$F = A \exp(-B \cdot P) \quad (1)$$

ここに、 $F$  : 圧縮強度 (MPa)

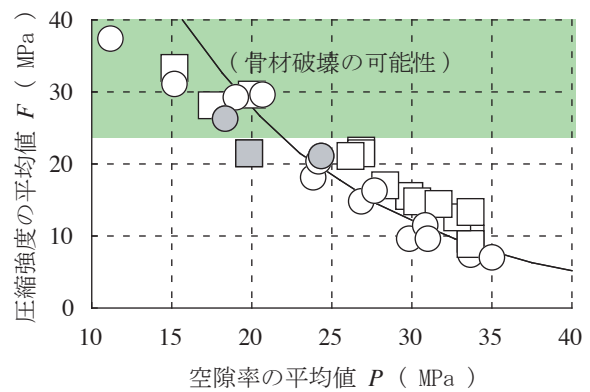
$A$  : 材料定数 (MPa)

$B$  : 材料定数

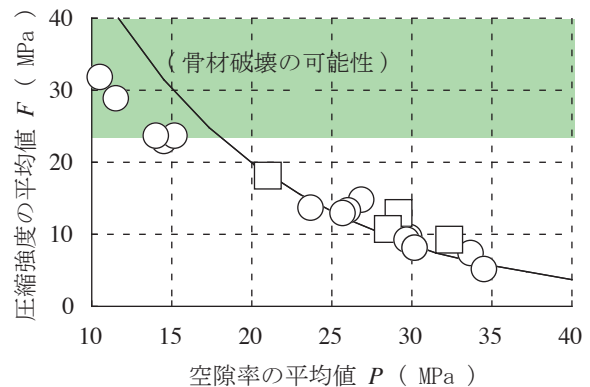
$P$  : 空隙率 (%)

なお、式 (1) の適用に関しては、骨材破壊が結合材に先行していない、および結合材の著しい垂れが生じていないことが基本的な条件となる。

図-9 (a) (b) に、それぞれ水セメント比 25% および 35% の場合の圧縮強度と空隙率の関係をそれぞれ示す。図の縦軸は圧縮強度の平均値、横軸は空隙率の平均値で



(a) 水セメント比 25%



(b) 水セメント比 35%

図-9 圧縮強度の平均値と空隙率の平均値の関係

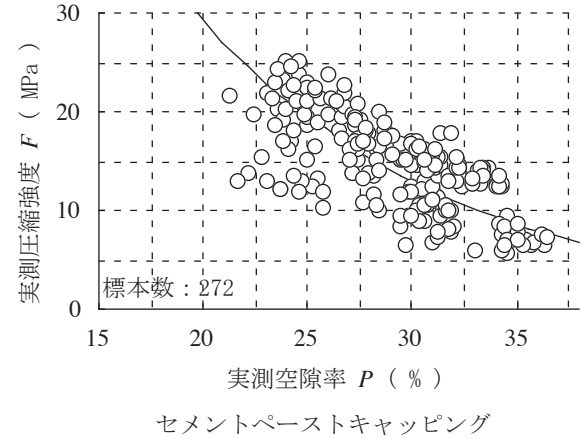
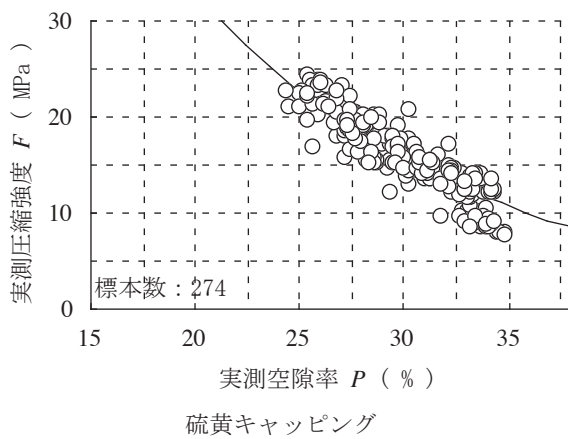
ある。図中の記号は図-8と同様である。実線は、筆者らが既報<sup>5)</sup>において、単粒度砕石6号を有するセメントペーストキャッピングを施したポーラスコンクリートの試験結果を近似して得た指数近似式〔式(1)〕である<sup>2)</sup>。それら近似曲線式を以下に示す。

$$W/C=25\% : F = 149 \exp(-0.084 \cdot P) \quad (2)$$

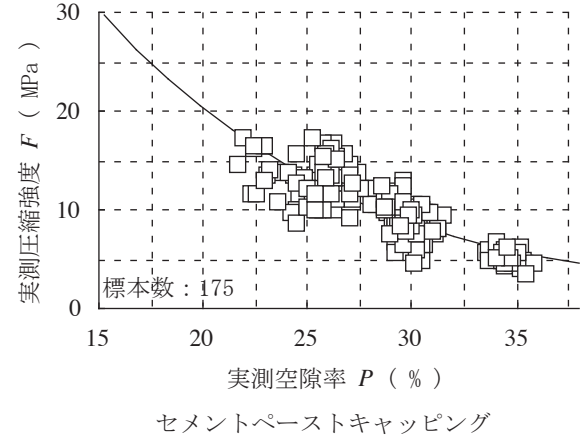
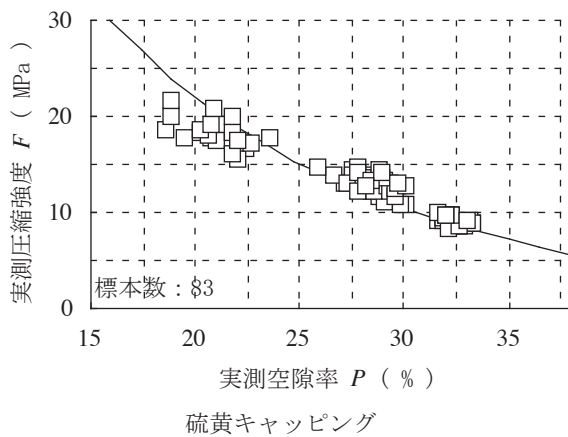
$$W/C=35\% : F = 107 \exp(-0.084 \cdot P) \quad (3)$$

図-9(a)(b)より、骨材破壊が生じない場合は、著しい結合材の垂れが生じたものを除く硫黄キャッピングを施した試験体のデータが、図中実線で示す式(2)および式(3)の曲線上にほぼ位置することがわかる。

図-10(a)(b)に、水セメント比25および35%の場合の圧縮強度と空隙率の関係をそれぞれ示す。図の縦軸は実測圧縮強度、横軸は実測空隙率である。図中の実線は、

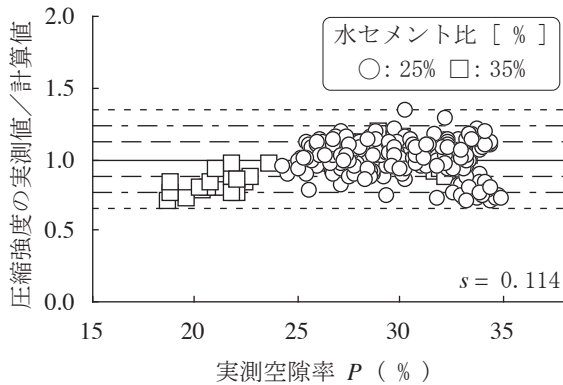


(a) 水セメント比 25%

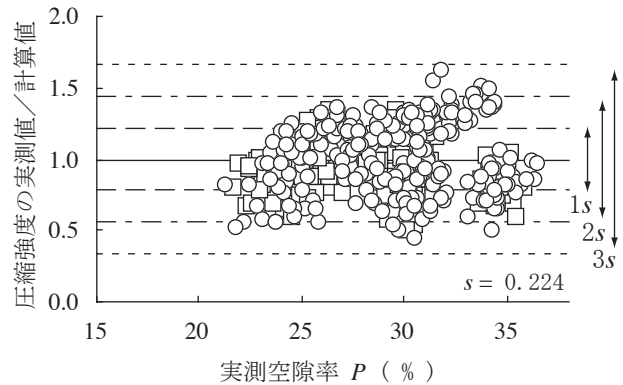


(b) 水セメント比 35%

図-10 実測圧縮強度と実測空隙率の関係



(a) 硫黄キャッピング



(b) セメントペーストキャッピング

図-11 圧縮強度の計算値に対する実測値

各水セメント比での関係を式(1)で近似した曲線である。また結合材の強度で決定する切片の値には、式(2)および式(3)と同じ値を用いた。なお、近似する際、著しい結合材の垂れが生じたもの、および骨材破壊が結合材破壊より先行したため強度が低下したものと推測される試験体は除外した。得られた近似曲線式を以下に示す。

硫黄キャッピング：

$$W/C=25\% : F = 149 \exp(-0.075 \cdot P) \quad (4)$$

$$W/C=35\% : F = 107 \exp(-0.075 \cdot P) \quad (5)$$

セメントペーストキャッピング：

$$W/C=25\% : F = 149 \exp(-0.082 \cdot P) \quad (6)$$

$$W/C=35\% : F = 107 \exp(-0.082 \cdot P) \quad (7)$$

図-11(a)(b)に、硫黄およびセメントペーストキャッピングの場合の式(4)-(7)から算出した圧縮強度の計算値に対するその実測値の比  $F_{exp}/F_{cal}$  を示す。図中の円印および四角印は、それぞれ水セメント比25%および35%を、破線、一点鎖線、および点線は、1s、2sおよび3s(s：標準偏差)の範囲である。ここでは各  $F_{exp}/F_{cal}$  の確率分布は、簡単に正規分布に従うとする。同図より、水セメント比および実測空隙率によって、平均値およびバラツキの傾向は異なるが、 $F_{exp}/F_{cal}$  はほぼ図中の点線で示す3s範囲内に存在していることが確認できる。なお、空隙率25%以下の範囲では  $F_{exp}/F_{cal}$  が1.0を下回るデータが認められる。これは圧縮強度が高い場合は、骨材破壊などの影響を受け、理想的な圧縮強度-空隙率関係が得られなかったことが原因として考えられる。

#### 4. まとめ

本報では、ポーラスコンクリートの圧縮強度の変動に及ぼす試験体の端面処理方法の影響を把握することを目的として、実験的な検討を行った。本研究の範囲内で得た結果を以下に示す。

- 1) 圧縮強度の平均値および変動係数に及ぼす硫黄キャッピングの縁部の影響はほとんど認められない。
- 2) セメントペーストキャッピングを施す場合、本研究による施工方法(図-3参照)では、試験体の上端は、セメントペーストが垂れる。よって、圧縮強度試験の際、この硬化セメントを通じて作用する応力が断面内で様に生じないため、圧縮強度が相対的に小さくなり、またその変動が大きくなると考えられる。
- 3) 硫黄キャッピングを施した場合、試験体の上下端は、硫黄が垂れることがないため、圧縮強度試験の際、応力が断面内で様に生じ、その変動が小さくなると考えられる。従ってポーラスコンクリートの強度試験を行う際、その材料固有の強度を得るためには、本実験における硫黄キャッピングと同様な手法が望ましいと言える。

4) 上記3)を踏まえ、硫黄キャッピングを施した試験体の結果より、ポーラスコンクリートの調合設計の際に、JASS 5の普通コンクリートの標準偏差と同等もしくは若干大きい値をとっておけばよいと考えられる。

5) 圧縮強度と空隙率のおおよその関係は式(4)-(7)で表すことができた。これらの式から算出した計算値に対する実測圧縮強度の比の標準偏差は、確率分布を正規分布と仮定した場合、硫黄およびセメントペーストキャッピングそれぞれ0.114および0.224であった。

#### 謝辞

本研究および実験に関して、御助力を得た三重大学大学院工学研究科の三島直生助教、愛知工業大学の永田昇技術員および平成18年度小池狭千朗研究室卒研生の諸君に深謝致します。

#### 参考文献

- 1) 玉井元治，杉野守，芦田馨：連続空隙を有するポーラスコンクリートを用いた緑化に関する研究，コンクリート構造物の緑化に関するシンポジウム論文報告集，pp. 37-42，1993. 9
- 2) 谷川恭雄，山田和夫：セメント系複合材料の強度に関する確率論的研究(第2報：モルタルおよびコンクリート強度の確率分布指標について)，日本建築学会論文報告集，No. 286，pp. 1-12，1979. 12
- 3) 山本貴正，畑中重光，小池狭千朗，三島直生，湯浅幸久：ポーラスコンクリートの圧縮強度特性の変動変動に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，No. 601，pp. 9-14，2006. 3
- 4) 山本貴正，小池狭千朗，牧野智英，畑中重光：ポーラスコンクリートの圧縮強度の変動に及ぼす骨材粒径の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 29，No. 2，pp. 301-306，2007. 7
- 5) 山本貴正，小池狭千朗，牧野智英，畑中重光：ポーラスコンクリートの空隙率・圧縮強度の変動に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 30，No. 2，pp. 289-294，2008. 7
- 6) 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，2003. 5
- 7) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説，2003
- 8) 湯浅幸久，畑中重光，三島直生，前川明弘，宮本高秀：ポーラスコンクリートの振動締固めに関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，No. 552，pp. 37-44，2002. 2