論文　６号砕石ポーラスコンクリートの全空隙率－調合空隙率関係と圧縮･曲げ強度の変動係数

山本　貴正 *1・河野　伊知郎 *2・須田　裕哉 *3

要旨：６号砕石を用いたポーラスコンクリートの i）全空隙率と調合空隙率の関係，ii）実施設計用の圧縮･曲げ強度の変動係数，について実験的に検討した。その結果，i）調合空隙率に対する締固め前の全空隙率および調合結合材率の関係は，切片 1.0 の正の直線で表すことができる，ii）締固めを施す前の全空隙率に対するその締固後と調合空隙率に対する締固め前の全空隙率の関係は，負の累乗曲線で表すことができる，iii）実施設計における圧縮強度の変動係数は，0.1 以上が妥当である，iv）同一の全空隙率における角柱供試体の曲げ強度の変動係数は，舗装コンクリートで推定される最大値より高い，などの知見を得た。

キーワード：実積率，結合材，詰め方，締固め，供試体形状，半円柱供試体

１．はじめに

近年，ポーラスコンクリート（以下，POC）の物性，適用性などに関する研究が数多く行われ，透水性，吸音性などそれぞれの機能を充分に活かすための各用途に適した空隙率および強度が明らかにされている。しかし，i）POC の全空隙率と調合空隙率の関係に及ぼす各種要因，ii）圧縮･曲げ強度の変動係数，について明らかにされていない。今後，信頼性のある実施設計を確立するためには，これらを明らかにしておく必要がある。

以上より，本研究では，既往の研究で使用頻度の高い６号砕石を用いた POC（以下，６号砕石 POC）の i）全空隙率と調合空隙率の関係に及ぼす各種要因，ii）実施設計用の圧縮･曲げ強度の変動係数，について実験的に検討した。また，実構造体から採取されるコア供試体で曲げ強度を推定することを目的として[1]，円柱供試体を用いた曲げ強度試験（以下，簡易曲げ強度試験）についても検討した[注1]。さらに，POC の圧縮強度試験用供試体は，端面の研磨ができないため，その圧縮強度に及ぼす供試体端面の最大平行度の影響についても検討している。

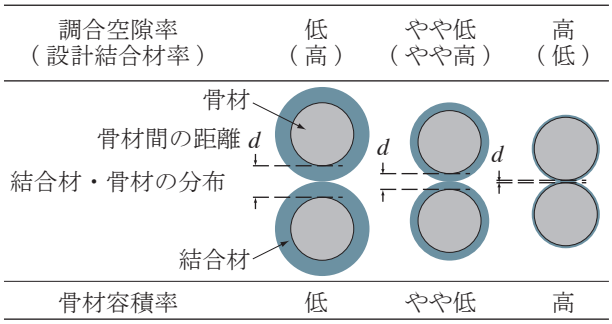
２．既往の研究

２．１　調合空隙率と全空隙率の関係

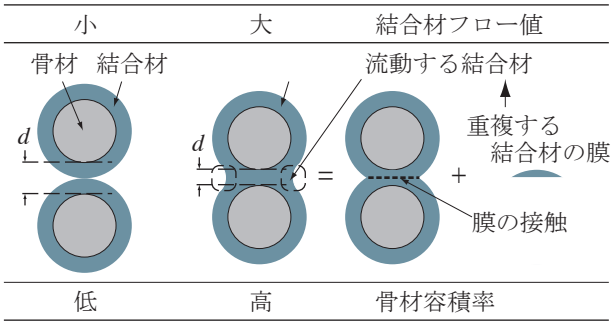
POC の調合設計では，一般に，まず単位容積当りの骨材粒子体積（以下，骨材容積率）を使用骨材の実積率とし，次に調合空隙率が得られるよう結合材を割当て，各材料の調合量を決定する[注2]。一方，型枠に打設される POC は，i）壁効果で，骨材容積率が実積率より低くなる，ii）調合空隙率が低いほど，言い換えれば，調合結合材率が高いほど，ミキサ，練り板の壁・底面に結合材が付着しやすい，iii）調合空隙率が低いほど，骨材に被覆する結合材の膜厚が増し，隣り合う骨材の距離（以下，骨材間の距離）が長くなり，骨材容積率が低下する（**図－１**），iv）結合材フロー値が小さいほど，結合材の膜が重複しにくいため，骨材容積率が低くなる（**図－２**），などで，締固めを施す前（以下，締固め前）の全空隙率が調合空隙率より高くなると考えられている[例えば，3]。

２．２　全空隙率の変動係数

筆者ら[4]は，POC の全空隙率の平均値が小さいほど，変動係数が大きくなる実験結果を得ている。これは，前述２．１を踏まえ，調合空隙率が低いほど，i）骨材容積



図－１　骨材容積率と調合空隙率の関係（概念図）[3]



図－２　骨材間の距離と結合材フロー値の関係（概念図）[3]

*1 国立豊田工業高等専門学校　建築学科准教授　博士（工学）（正会員）
*2 国立豊田工業高等専門学校　環境都市工学科准教授　博士（工学）（正会員）
*3 国立豊田工業高等専門学校　環境都市工学科助教　博士（工学）（正会員）

率が低くなること，ii）結合材がミキサ，練り板の壁・底面に付着しやすいこと，が影響していると考えている[3)]。なお，６号砕石 POC の全空隙率の変動係数の上限値について，次式を得ている[4)，注3)]。

$$V_u = -0.34 P_a + 14.5 \qquad (1)$$

ここに，V_u：全空隙率の変動係数の上限値（%），P_a：全空隙率（%）

２．３　圧縮強度と全空隙率の関係

POC の圧縮強度と全空隙率は，相関性がある。また，全空隙率の高低および締固め程度は，同一指数曲線上を推移する例えば，[5)]。なお，筆者ら[6)]は硫黄キャッピングを施した６号砕石 POC の圧縮強度－全空隙率関係について，次式を得ている[注3)]。

$$F_c = f_c \cdot \exp(-0.075 \cdot P_a) \qquad (2)$$

ここに，F_c：圧縮強度，f_c：結合材の圧縮強度

式（２）から求めた計算値に対する実験値の平均値は 1.00，またその最小値は 0.73，最大値は 1.23，標本標準偏差は 0.114 である。なお，POC の設計・施工法の確立に関する研究委員会報告書：2003[2)]（以下，POC 報告書）では，実績がなければ，圧縮強度の変動係数を 0.1 以上とすることが望ましいとしている。

２．４　曲げ強度と全空隙率の関係

POC の曲げ強度と全空隙率の関係は，圧縮強度と同様に，全空隙率の高低は，同一指数曲線上を推移する例えば，[7)]。なお，結合材の６号砕石 POC の曲げ強度－全空隙率関係については，大谷ら[7)]，前川ら[8)]により次の近似式が得られている。

$$F_b = f_b \cdot \exp(-0.06 \cdot P_a) \qquad (3)$$

ここに，F_b：曲げ強度，f_b：結合材または調合空隙率 0.0 の POC の曲げ強度

式（３）で対象としている供試体は，文献 7）では，水セメント比 25%，設計結合材フロー値 200mm，調合空隙率 0-20%，文献 8）は，水セメント比 25%，設計結合材フロー値 150mm および調合空隙率 10%，設計結合材フロー値 190mm および調合空隙率 20-30% である。

POC の曲げ強度の変動係数に関する実験データは得られていない。なお，舗装コンクリートでは，曲げ強度の実態調査の結果，約 80% の工事がその変動係数は 0.1 以下であると推定されている[9)]。

３．実験概要

本研究の POC の実験概要一覧を**表－１**に示す。なお，比較･参考のため，i)POC 供試体用型枠を容器とした骨材の実積率試験，ii）結合材の曲げ･圧縮強度試験，も合わせて実施している。

３．１　実験要因・水準

実験要因は，調合空隙率であり，水準は 20, 25 および 30% の３種類である。骨材の実積率試験では，試料の詰め方（後掲**図－５**参照）を取り上げた。

表－１　POC の実験概要一覧

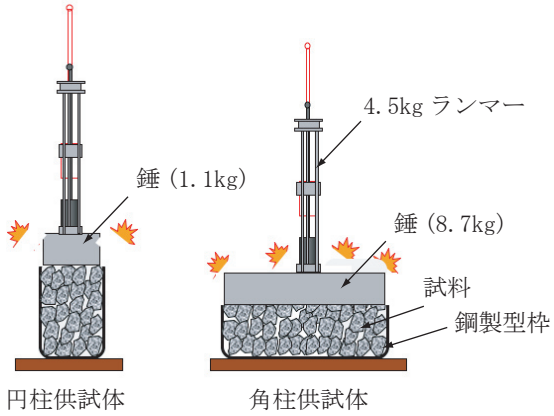
P (%)	設計FL (mm)	供試体形状	空隙率試験		圧縮強度試験	曲げ強度試験
20, 25, 30	110	円柱	(12)	→	(7)	(5x2*)
		角柱	(5)	→	-	(5)

［注］　P= 調合空隙率，FL= 結合材フロー値
（）内＝供試体の標本数，＊後掲**図－４**参照

表－２　調合表

P (%)	B (vol.%)	W/C (%)	設計FL (mm)	水 W (kg/m³)	セメント C (kg/m³)	粗骨材 G (kg/m³)
20	22.2	25	110	97	391	1561
25	17.2			76	303	
30	12.2			54	215	

［注］　P= 調合空隙率，B= 調合結合材率



図－３　POC の締固め方法

３．２　調合表･使用材料

表－２に調合表一覧を示す。骨材容積率は，JIS に準拠して測定した実積率（以下，JIS 実積率）としている。

水は水道水，セメントは普通ポルトランドセメント（密度 =3.15g/cm³）を使用した。骨材は瀬戸産の JIS A 5001:2008 の６号砕石（粒径＝５-13mm，表乾密度 =2.70g/cm³，吸水率 =0.52%，JIS 実積率 =57.8%）を用いた。なお，骨材は，微粒分を水洗いして取り除いた表乾状態を使用している。

３．３　供試体作製

POC の練混ぜ方法は，文献[5)]を参照して，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。混練には，容量 60*l* の二軸強制練りミキサを使用した。なお，別バッチで，結合材単体の 40x40x160mm の角柱供試体（以下，強度試験用結合材）を，３連型枠（JIS R 5201:1997）で６体作製した。POC と強度試験用結合材の１バッチの混練量はそれぞれ 36*l* と 11*l* である。

練り上がった試料を，円柱型枠（公称内寸：断面直

径 100mm，高さ 200mm）と角柱型枠（公称内寸：断面幅 100mm，長さ 400mm）に，それぞれ高さ方向に２層 15 回突きと横方向に１層 50 回突きで詰め込み，最後に試料を各型枠の上面に揃うようにならした（後述４．１参照）。試料詰込み後の締固めは，**図－３**に示す 4.5kg ランマーを用いた突固めでり，落下高さ 100mm，突き回数 15 回である。

各供試体ともに，材齢７日後に脱型し，28 日強度実施日まで水中養生をした。なお，材齢 21 日に空隙率試験を実施している。

３．４ 実験方法

空隙率試験は，POC 報告書[2] の容積法で実施した。なお，締固めによる沈下で失われた空隙を無視するために，供試体のかさ容積を供試体用型枠の容積として算出した全空隙率[3] を，締固め前の全空隙率としている。

圧縮強度試験は，JIS A 1108:2006 に準拠した。なお POC 供試体は，端面の平滑度を保証するため，硫黄キャッピングを施し，その端面の最大平行度を傾斜計（精度 0.1 度）で測定した。

曲げ強度試験は，JIS A 1106:2006 に準拠した。なお，角柱供試体に対し，試験力および支点が接する箇所に，石膏などの塗布は施していない。

簡易曲げ強度試験の供試体は，**図－４**に示すように，円柱供試体を，刃の厚さ３mm のコンクリートカッターで，長手方向に二分割した半円柱とした。なお，切断作業による著しい供試体の欠損は生じなかった。荷重載荷方式は，スパン 140mm の二等分点とし，供試体中央部に加力が確実に伝わるように，厚さ３mm のゴム製シートを載荷点と供試体の間に敷いた。断面係数は，簡単に断面を半円として仮定および空隙を無視し，次式で求めた。

$$Z = 0.0325\,D^3 \qquad (4)$$

ここに，Z= 断面係数，D= 切断前の断面直径

POC 供試体用型枠を容器とした骨材の実積率試験は，JIS A 1104:2006 に準拠した。ただし，最後の工程は，POC の作製に合わせて（前述３．３参照），試料を各型枠の上面に揃うようにならした。標本数は，円柱は 10，角柱は５である。

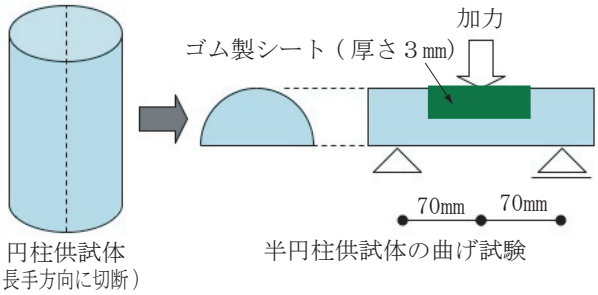
結合材の強度試験は，JIS R 5201 のセメントの曲げ強さ･圧縮強さの試験方法に準拠した。

４．実験結果・考察

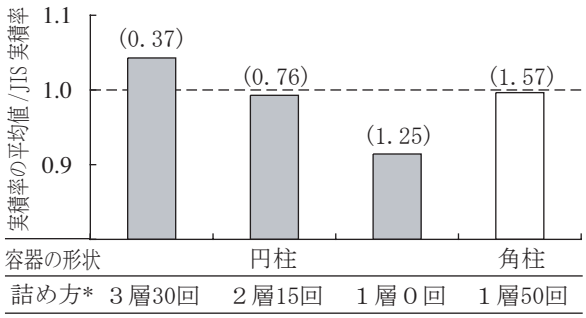
４．１ 骨材の実積率

図－５に，骨材の実積率の平均値と試料の詰込み方法の関係を示す。図の縦軸は，JIS に準拠して測定した実積率［以下，JIS 実積率（=57.8%）］に対する実積率の平均値を，括弧内は標本変動係数である。

同図より，i）円柱容器での２層 15 回で詰めた供試体



図－４ 半円柱供試体の曲げ強度試験方法（概念図）



*試料の詰め方：*層*回=試料*層詰め各層付き棒で*回突き
()内:標本変動係数(%)

図-５ 骨材の実積率と試料の詰め方の関係

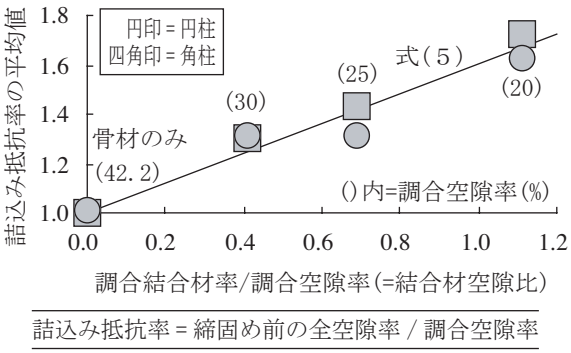


図-６ 締固め前の全空隙率の平均値と調合空隙率の関係

および角柱容器での１層 50 回の供試体の実積率のそれぞれの平均値は，JIS 実積率に近いこと，ii）突き棒による突き回数が少ないほど，言い換えれば，締め方が緩いほど，実積率の標本変動係数が大きくなること，がわかる。

上記 i）より，POC の全空隙率に及ぼす試料の詰め方の影響を抑制するため，POC 試料の詰込み方法を円柱型枠では２層 15 回，角柱型枠では１層 50 回とした（前述３．３参照）。これらを踏まえ，以下，骨材のみを詰めた場合を，調合結合材率が 0.0 の POC 供試体として，その締固め前の全空隙率が調合空隙率と等しいとする。

４．２ 空隙率

(a) 締固め前の全空隙率

図－６に，締固め前の全空隙率の平均値と調合空隙率の関係に及ぼす供試体形状の影響を示す。図の縦軸と横軸は，それぞれ調合空隙率に対する締固め前の全空隙率

（以下，詰込み抵抗率）の平均値と調合結合材率（以下，結合材空隙比）である。実線は，前述４．１より，結合材空隙比が 0.0 では，詰込み抵抗率が 1.0 である条件を加え，全供試体形状を対象として，最小二乗法による直線近似より得た次式を表している。

$$P_b / P = \alpha \cdot B / P + 1.0,\ \alpha = 0.602 \qquad (5)$$

ここに，P_b= 締固め前の全空隙率，α= 実験変数

回帰式（５）の決定係数は 0.86 である。

同図･上述より，i）詰込み抵抗率と結合材空隙比の関係は，切片 1.0 の正の直線で表すことができる，ii）詰込み抵抗率と結合材空隙率比の関係に及ぼす供試体形状の影響はほとんどない，ことがわかる。

上述 i）は，結合材の膜厚が増して，骨材容積率が低くなるため（前述２．１参照）である。また ii）より，型枠への試料の詰込みを考慮（前述４．１および４．１参照）することで，締固め前の全空隙率に及ぼす供試体形状の影響を小さくすることができると考えられる。なお，前述２．１より，i）結合材フロー値が小さいほど，ii）ミキサ，練り板の壁・側面に結合材が付着しやすいほど，式（５）の実験変数は，大きくなると考えられる。

(b) 締固め後の全空隙率

図－７(a) に，円柱と角柱供試体の締固め前の全空隙率に対するその締固め後（以下，締固め抵抗率）と詰込み抵抗率の関係を合わせて示す。図中に示す R は，各供試体形状の両軸対数の相関係数であり，それぞれの両関係には強い負の相関が認められている。なお，実線は，最小二乗法による累乗近似式である。

同図 (a) より，i）各供試体形状ともに，締固め抵抗率と詰込み抵抗率の関係は，負の累乗曲線で表すことができる，ii）角柱供試体の締固め抵抗率は，円柱より高い，ことがわかる。

上述 i）は，調合空隙率が低いほど，骨材容積率が低くくなること（前述２．１参照），ii）は，角柱供試体の締固めに要するエネルギー[5]が，円柱より低いこと，が影響していると考えられる。

図－７(b) に，既報の実験データ[3)，注4)]の締固め抵抗率と詰込み抵抗率の関係を示す。図中の記号は結合材フロー値を表している。なお，各結合材フロー値の供試体の調合空隙率は 20% と 30% であるが，前掲**図－７(a)** より，調合空隙率の高低は，同一の締固め抵抗率と詰込み抵抗率の関係曲線上を推移するため，ここでは，調合空隙率の影響を無視している。

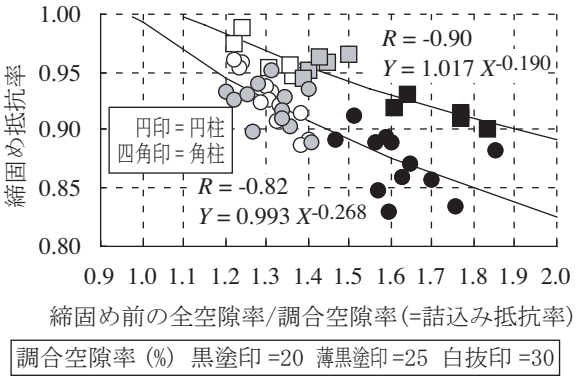
同図 (b) より，両関係には強い負の相関が認められる。よって，同図 (a) も踏まえ，締固め抵抗率と詰込み抵抗率の関係は，供試体形状，詰込みおよび締固め方法が同一ならば，調合空隙率の高低および結合材フロー値の大小は，同一指数曲線上を推移すると言える。

(c) 全空隙率の変動係数

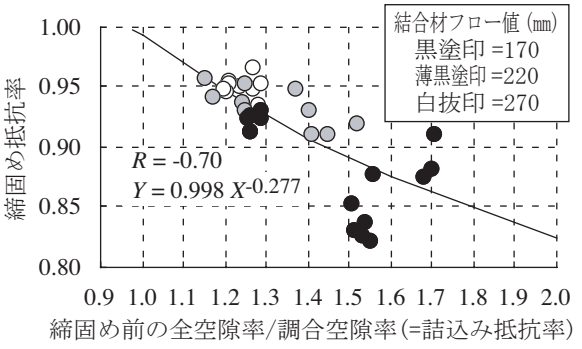
図－８に，円柱と角柱供試体の全空隙率の標本変動係数と平均値の関係に及ぼす締固めの影響を示す。図中の実線は式（１）である。

同図より，各供試体形状ともに，i）締固め後の全空隙率の変動係数は，締固め前と比較して低い（ただし，締固め前の全空隙率の標本標準偏差が，他と比較して低い調合空隙率 25% の角柱は除く），ii）締固め前後ともに，全空隙率の平均値が高いほど，変動係数が小さくなる，iii）締固め後の全空隙率の変動係数は，式（１）の上限値と比較し高い，ことがわかる。

上述 i）より，締固めるほど，全空隙率の変動係数が小さくなると言える。なお，i）および ii）は，前述２．１と４．１より，骨材容積率が影響している，iii）は，前



（ａ）本研究の実験データ



（ｂ）既往の実験データ（円柱供試体）[3)]

締固め抵抗率＝締固め後の全空隙率 / 締固め前の全空隙率

図-７ 締固め前後の全空隙率と詰込み抵抗率の関係

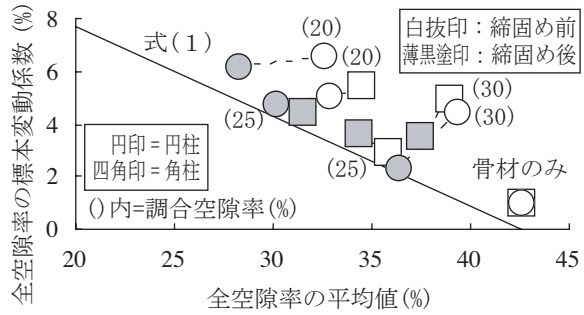


図-８ 全空隙率の標本変動係数と平均値の関係

表－3 結合材の曲げ･圧縮強度試験結果一覧

空気量 (%)	実測FL (mm)	密度 (g/cm^3)	曲げ強度 平均値 (N/mm^2)	圧縮強度 平均値 (N/mm^2)
3.3	119	2.13 (0.03)	13.5 (0.83)	80.7 (0.73)

［注］ () 内＝標本変動係数

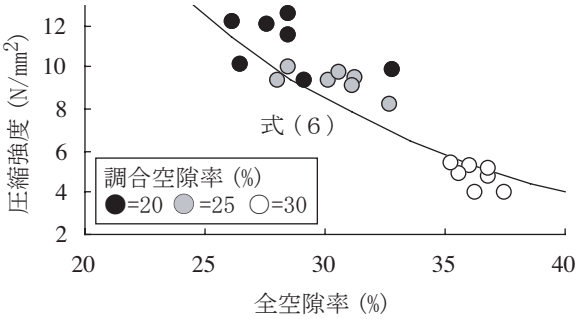


図 - 9 圧縮強度と全空隙率の関係

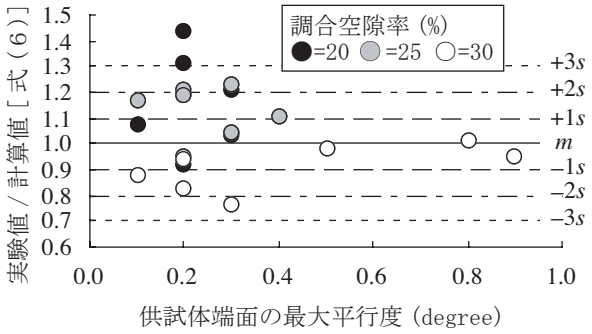


図 -10 POC の圧縮強度と供試体端面の最大平行度の関係

述４．１を踏まえ，本研究の型枠への試料の詰め方が，式（１）の対象である供試体と比較して緩いため，と考えられる。

４．３ 圧縮･曲げ強度

(a) 結合材の曲げ強度･圧縮強度

表－３に，結合材の曲げ･圧縮強度試験結果を示す。なお，表中の空気量は，JIS A 1128:2005 に準拠し，モルタル用エアメーターを用いて計測している。

(b) POC の圧縮強度

図－９に，POC の圧縮強度と締固め後の全空隙率（以下，「締固め後」省略）の関係に及ぼす調合空隙率の影響を示す。図中の実線は，式（２）に，結合材の圧縮強度（前掲**表－３**を参照）を代入した次式である。

$$F_c = 80.7 \cdot \exp(-0.075 \cdot P) \qquad (6)$$

また，**図 -10** には，式（６）から求めた計算値に対する実験値と供試体端面の最大平行度の関係に及ぼす調合空隙率の影響が示してある。図中の実線は平均値を，破線，一点鎖線と点線は，それぞれ $\pm 1s$，$\pm 2s$ と $\pm 3s$ を表している。なお，平均値 m は既報 6) で得られている 1.00，標準偏差 s は 0.1(=POC 報告書[2] の変動係数下限値 0.1x 平均値 1.0) である。

同図より，i）$+3s$ 超の黒塗印で示す２体を除き，計算値に対する実験値は，各調合空隙率ともに $\pm 3s$ 以内に存在している，ii）計算値に対する実験値と最大平行度の関係に及ぼす供試体端面の最大平行度の影響がない，ことがわかる。なお，実施設計では，$+3s$ 以上の圧縮強度は，安全側になる。

以上を踏まえ，６号砕石 POC の実施設計における圧縮強度の変動係数は，POC 報告書[2] の 0.1 以上が妥当であると考えられる。

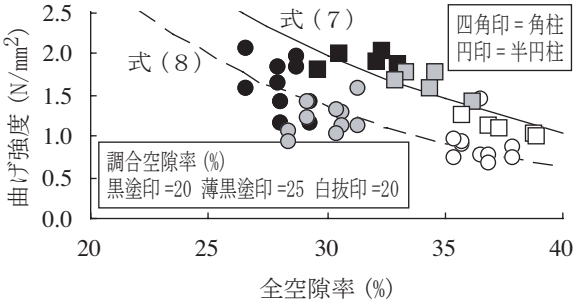


図 -11 角柱･半円柱供試体の曲げ強度と全空隙率の関係

表－４ POC の曲げ強度の計算値と実験値

式番号		（7）	（8）
検討対象		角柱	半円柱
回帰式の決定係数		0.80	0.53
実験値 計算値	平均値 （最小値，最大値）	1.02 (0.89, 1.20)	1.01 (0.60, 1.79)
	標本標準偏差	0.114	0.228
	標本変動係数	0.111	0.226

(c) POC の曲げ強度

図 -11 に，POC の角柱と半円柱供試体の曲げ強度と全空隙率の関係を合わせて示す。また半円柱供試体の全空隙率は，切断前の円柱供試体の全空隙率である。図中の実線と点線は，圧縮強度試験結果（前述４．３(b) 参照）を踏まえ，全空隙率が 0.0 では，曲げ強度が結合材のその平均値（前掲**表－３**を参照）であると仮定し，それぞれ角柱と半円柱供試体を対象として，最小二乗法による指数近似より得た次式を表している。

case 角柱供試体

$$F_m = 13.5 \cdot \exp(-0.064 \cdot P) \qquad (7)$$

case 半円柱供試体

$$F_m = 13.5 \cdot \exp(-0.077 \cdot P) \qquad (8)$$

また，**表－４**に，式（７）（８）より求めた計算値と実験値の比較が示してある。

同図表より，i）半円柱供試体も，曲げ強度と全空隙率の関係は，圧縮強度と同様に，全空隙率の高低は，同一指数曲線上を推移する，ii）半円柱供試体の曲げ強度は，角柱供試体より低く，また標本変動係数が大きい，iii）半円柱において，計算値に対する実験値の最大値が他と比較して著しく高い 1.79 の供試体がある，iv）式（７）の指数は，既往の近似式（３）の少数第２位までと同じである，v）同一の全空隙率における角柱供試体の曲げ強

度の標本変動係数は0.111であり，前述２．３の推定されている最大値0.1より高い，ことがわかる。

上述ii）については，完全弾性体を仮定した応力分布から算出した式（４）の断面係数を使用している，また半円柱供試体の作製において試料を型枠に２層で詰込んだため，**写真１**に示すその境界付近に発生した比較的大きい空隙の箇所で曲げひび割れが生じたこと，iv）は，試験方法が一点集中載荷であるため，最大曲げモーメントが作用する断面の空隙率が他と比較して低いこと，が影響していると考えられる。iii）は，通常のコンクリートと異なり，POCは内部に空隙と結合材の分布が生じるなどの，特有の要因によると推測される。

５．おわりに

本研究で得られた知見を以下に示す。

1) 詰込み抵抗率と結合材空隙比の関係は，切片1.0の正の直線で表すことができる。
2) 締固め抵抗率と詰込み抵抗率の関係は，負の累乗曲線で表すことができる。
3) 実施設計における圧縮強度の変動係数は，POC報告書[2)]の0.1以上が妥当である。
4) 角柱供試体の曲げ強度の変動係数は，舗装コンクリートで推定される最大値の0.1より高い。
5) 簡易曲げ強度試験から得た曲げ強度－全空隙率関係は，圧縮強度と同様に，調合結合材率の高低は，同一指数曲線上を推移する。ただし，曲げ強度は，通常の角柱供試体と比較して低く，また変動係数も大きい。

謝辞

本稿の研究成果は，大林財団平成25年度研究助成「都市型水害を抑制するポーラスコンクリート舗装の合理的な調合方法の確立」の支援による。

参考文献

1) 森野奎二，西野昭：コンクリートの円柱供試体による曲げ強度試験方法について，愛知工業大学研究報告B通号14，pp.243-253，1979.3
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，2003.5
3) 山本貴正，山田将也，河野伊知郎，小池狹千朗：締固めを考慮したポーラスコンクリートの空隙率に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1475-11480，2011
4) 山本貴正，小池狹千朗，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
5) 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
6) 山本貴正，小池狹千朗，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試験体の端面処理方法に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.1705-1710，2009
7) 大谷俊浩，藤田純，村上聖，佐藤嘉昭，清原千鶴，三井宜之：ポーラスコンクリートの力学特性に及ぼす骨材粒径の影響に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集.A-1，pp.403-404，2004.8
8) 前川明弘，畑中重光，三島直生，山本晃:小粒径ポーラスコンクリートの基礎的特性に関する実験的研究，セメント･コンクリート論文集，No.60，pp.35-40，2006
9) 柳田力：舗装用コンクリート，コンクリート工学，Vol.14，No.6，pp.31-34，1976.6

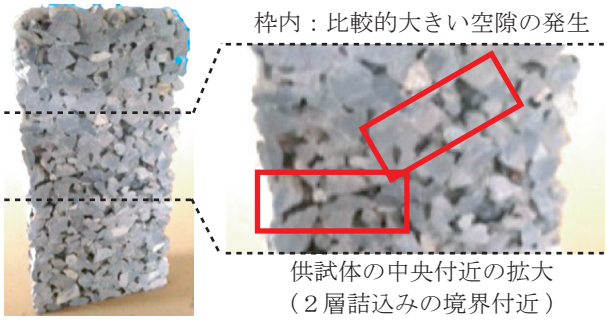


写真１ 切断後のPOC供試体（半円柱供試体）の断面

注

1) 森野ら[1)]は，断面直径150および100mmのコア供試体の曲げ強度試験を，円柱供試体用載荷装置を用いて実施している。
2) POC報告書[2)]では，実積率に，骨材容積率がそれより低くなることなどを考慮した補正係数を加味するとしている。
3) 既報[4,6)]の供試体（結合材フロー値=170-270mm）は，作製において，バイブレーティングタンパによる振動締固めをしている。また振動締固め後の供試体高さが型枠と同等程度になるように試料を型枠へ詰込んでいる。なお，著しい結合材の垂れが生じた供試体（調合空隙率20%以下および結合材フロー値270mm）は，検討対象外としている。
4) 既報[3)]の実験方法は本研究と異なり，POCの混練は，強制撹拌ミキサを使用している，またランマーの落下回数を18としている。