

# 論文 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

大谷 俊浩<sup>\*1</sup>・村上 聖<sup>\*2</sup>・佐藤 嘉昭<sup>\*3</sup>・三井 宜之<sup>\*4</sup>

**要旨:** ポーラスコンクリートの結合材の流動性および分布状態の違いが強度特性へ及ぼす影響を求めるために、結合材のフロー値および供試体成型時における卓上バイプレータによる振動締固め時間を変化させることによって、結合材の鉛直方向の分布状態を変化させた供試体を用いて、その強度特性、空隙および結合材の分布状態を調べた。その結果、ポーラスコンクリートの強度は結合材のフロー値よりも振動締固め時間の影響を大きく受けること、空隙率の測定値だけからは内部の結合材の分布状態を把握することができず、空隙率と同様に結合材の分布状態が強度に大きく影響することが分かった。

**キーワード:** ポーラスコンクリート、結合材の分布、空隙の分布、振動締固め

## 1. はじめに

近年、ポーラスコンクリートはエココンクリートとして注目され様々な研究が行われております。その強度特性は骨材粒径、結合材強度および空隙率に大きく依存している<sup>1), 2)</sup>。しかしながら、これらの結果は結合材の分布状態が一様であることが前提とされており、結合材が不均一に分布した場合の影響についての検討はほとんどされていない。打設時に振動締固めを行う場合に適切な加振時間を選定できれば問題ないが、それが不可能な場合は結合材の分布状態は不均一となり、強度特性は大きく変化してしまうことが予想される。また、ポーラスコンクリートの調合設計を行い最適な打設成型方法を求める上においても、結合材の分布状態が強度特性に及ぼす影響を把握する必要があると考えられる。

そこで本論では、ポーラスコンクリートの結合材の流動性および振動締固め時間を変化させた供試体を用いて、結合材の分布状態および強度特性を調べることでそれらの関連性について実験的検討を行った。

## 2. 実験方法

### 2.1 供試体作製

実験に使用した材料を表-1に示す。セメントは、緑化コンクリートを想定して、pHが低く緑化に適している高炉セメントB種、骨材は5号碎石、混和剤はポリカルボン酸エーテル系の高性能AE減水剤をそれぞれ使用した。

調合を表-2に示す。調合条件は、水セメント比を25%で一定、かつ、結合材であるセメントペーストの空隙充填率を40%(空隙率25.5%)で一定とし、高性能AE減水剤の添加量をセメント質量比に対して0.39%, 0.43%および0.50%として、結合材の目標フロー値を150mm, 175mmおよび200mmの3段階とした。

表-1 使用材料

セメント	高炉セメントB種		
	密度 3.04 g/cm <sup>3</sup>		
粗骨材	碎石5号		
	表乾密度 2.60 g/cm <sup>3</sup>	吸水率 2.00 %	実積率 57.5 %
混和剤	高性能AE減水剤 ポリカルボン酸エーテル系		

\*1 大分大学助手 工学部福祉環境工学科 工修 (正会員)

\*2 熊本大学助教授 工学部環境システム工学科 工博 (正会員)

\*3 大分大学教授 工学部福祉環境工学科 工博 (正会員)

\*4 熊本大学教授 工学部環境システム工学科 工博 (正会員)

表-2 調合およびフロー値

調合番号	水セメント比(%)	セメントペースト空隙充填率(%)	粗骨材種類	混和剤添加量(%)	目標フロー値(mm)	計測フロー値(mm)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )		単位量(g/m <sup>3</sup> )
							C	W	
1	25	40	5号	0.39	150	158	293.6	73.4	1495.0 1145.2
2				0.43	175	173	293.6	73.4	1495.0 1262.6
3				0.50	200	201	293.6	73.4	1495.0 1468.2

C:高炉セメントB種, W:水, G:粗骨材, SP:高性能AE減水剤

混練方法は、セメントペーストプレミックス法とした。まず、セメントを容量 50ℓモルタルミキサで 10 秒間空練りし、水と減水剤を投入して 30 秒間練り混ぜ、セメントの搔き落とし作業をした後、さらに 90 秒間練り混ぜた。次に、容量 100ℓ二軸ミキサに骨材および作製したセメントペーストを投入して、60 秒間練り混ぜた。練り上がったコンクリートは φ 10×20cm の円柱供試体用型枠に、JIS A 1132 に準拠して 2 層で詰め、各層を突き棒で 11 回突いた。突固め条件をできる限り同一とするため、かつ、この段階での結合材の垂れを生じさせないため、木槌等は用いずに突き棒だけによる突固めとした。2 層まで詰めた供試体は、卓上バイブレータ（振動数 3000vpm、振幅 1.5mm）で加振して結合材の分布状態を変化させた。加振時間は 0, 2, 4, 6, 10 および 20 秒の 6 段階とした。加振後、コンクリートが沈下した供試体は沈下した分のコンクリートを追加投入し、供試体の表面をコテでならして成型した。供試体数は、1 調合につき圧縮強度試験用と、結合材分布状態測定用の各々に対して加振時間ごとに 3 本の計 36 本である。

作製した供試体は、室内で湿布養生を行い、2 日後に脱型した。脱型した供試体は、20℃水中養生材齢 28 日で圧縮強度試験に供した。

## 2.2 強度試験および空隙率測定方法

強度試験は容量 2000kN 万能試験機を用いて両端面に硫黄キャッピングを施した圧縮強度試験用供試体で行った。縦方向のひずみの測定はアルミ板を介して装着したコンプレッソメータで行った。

全空隙率の測定は、材齢 14 日後、日本コン

クリート工学協会ポーラスコンクリートの物性試験方法（案）に準拠して、結合材分布状態測定用供試体を用いて容積法で行った。

## 2.3 切断面算定方法

今回は計測フロー値が 173mm の供試体の結合材の分布状態を調べた。作製した供試体の切断面の算定方法は、図-1 に示すフローチャートに沿って行った。供試体の切断は湿式のコンクリート切断機にて行った。まず供試体上部の打設面約 1cm を切り落とし、残りの部分の上下から約 1.5cm 厚で各 5 枚切り出して計 11 枚に分割した（中心部分の厚さは約 4cm）。すなわち算定を行う断面数は、上下各 6 面である。

切断後、各断面の骨材と結合材部分に着色して、その断面をデジタルカメラで撮影した。そのデータをパソコンに取り込み、骨材、結合材および空隙の部分のピクセルを RGB 要素によって識別して集計した。各部分の面積は、各ビ

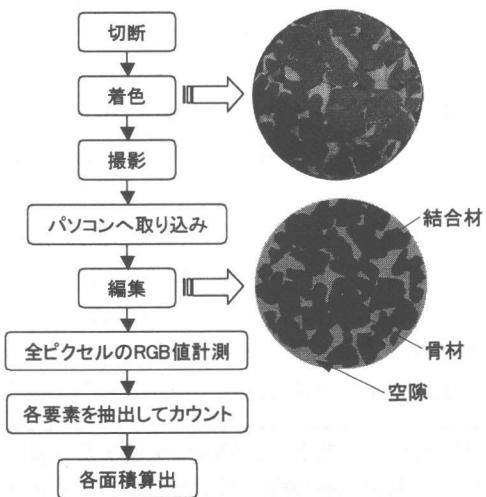


図-1 断面算定フローチャート

クセル数の比によって算出した。なお、画像データは供試体直径にあたるピクセル数が約350個になる大きさとした。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 空隙率および強度特性

表-3に実験結果を平均値で示す。全空隙率が理論値である25.5%よりもすべて4~10%高い値を示しているが、この原因として、骨材のまわりに結合材が付着していることから骨材の接点間に結合材が入り込むことや、結合材の粘性抵抗によって骨材の移動が妨げられるために骨材の実積率試験のように理想的に骨材が充填されなかつたことが考えられる。その他に混練にコンクリートとの接触面積が大きい二軸ミキサを使用したため、ミキサに付着したセメントペーストの量が多くなり空隙率が増加したことが考えられる。後者は混練前に捨て練りを行うことで解消されると考えられる。

加振時間の変化が全空隙率、圧縮強度およびヤング係数に及ぼす影響をそれぞれ図-2、図-3および図-4に示す。これらの図は、加振時間0秒の値を100として各加振時間の値を相対比で表したものである。

図-2より、全空隙率は加振初期に加振時間の増加とともに低下し、その後安定している。原因として、突き棒による突き固めだけでは締固めが不十分であったことが考えられ、加振初期はコンクリートが密実になることで空隙率が低下し、その後はコンクリートが十分に締固められたことで空隙率が安定したものと考えられる。全空隙率に及ぼすフロー値の違いによる影響はフロー値201mmで大きな変化の割合を示しているが、明確な差および傾向は認められなかった。

図-3より、圧縮強度は加振時間の増加にともない、初期に強度の急激な増加がみられるが、その後大きく低下していることが分かる。また、その変化の割合は、フロー値158mmが小さいものの、フロー値173mmおよび201mmにはあ

表-3 実験結果

フロー値 (mm)	加振時間 (秒)	全空隙率 (%)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (×10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup> )
158	0	31.2	9.39	1.22
	2	29.8	9.76	1.27
	4	29.7	10.83	1.38
	6	29.1	10.39	1.27
	10	29.0	10.46	1.45
	20	30.4	8.34	1.37
173	0	29.8	8.18	0.98
	2	28.9	11.70	1.45
	4	28.1	11.01	1.35
	6	27.9	10.38	1.41
	10	28.9	8.93	1.34
	20	28.8	7.74	1.29
201	0	35.0	7.98	1.05
	2	32.0	10.22	1.30
	4	32.0	9.27	1.28
	6	31.3	9.93	1.30
	10	30.0	9.12	1.52
	20	29.9	7.89	1.41

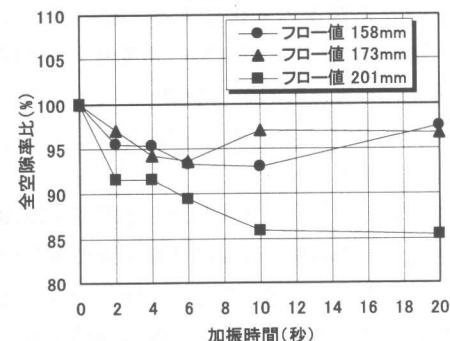


図-2 全空隙率と加振時間の関係

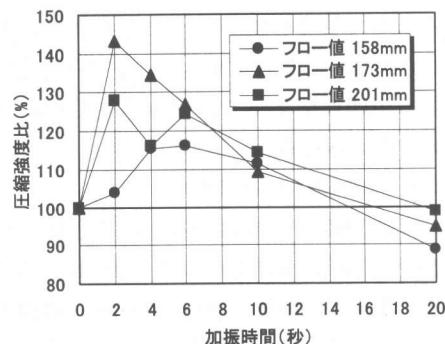


図-3 圧縮強度と加振時間の関係

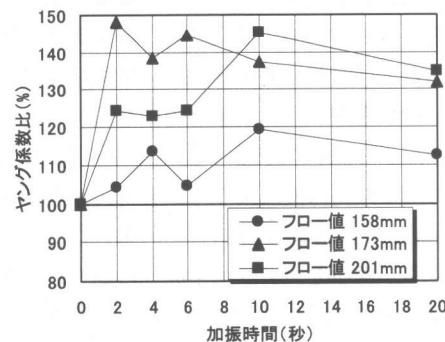


図-4 ヤング係数と加振時間の関係

まり明確な差はみられなかった。添田らが行った実験<sup>3)</sup>のうち本実験と同水準（水結合材比25%, 空隙充填率40%, フロー値175mm, 200mmおよび260mm）の場合、フロー値200mmで圧縮強度がピークを示している。本実験では加振時間10秒および20秒でフロー値201mmが高い値を示し同様の傾向を示したが、その他の加振時間ではそのような傾向を示さなかった。これは締固めによる影響が出ているものと考えられる。ポーラスコンクリートの空隙率と圧縮強度には負の相関関係があることから<sup>1)</sup>、初期の変化は空隙率の変化によって説明することが可能であるが、6秒以降の強度低下は空隙率の変化だけでは説明がつかない。そのため、結合材の垂れによる強度低下が現れていることが予想される。

図-4より、ヤング係数は加振時間の増加にともない、4秒までは圧縮強度と同じ変化を示しているが、その後の低下は、ばらつきはあるもののあまりみられない。これは後述するように、結合材の垂れの影響は上下部で大きく、加振によって結合材量が低下した上部に大きなひずみが発生したと推測され、ひずみ測定区間である中間部にあまりひずみが生じなかつたためと考えられる。

### 3.2 結合材の分布状態

強度試験結果と供試体内部の結合材分布状態の因果関係を求めるために、各切断面の結合材量を測定した結果を図-5に示す。縦軸の結合材面積率は、切断面の結合材面積がその断面の面積に占める割合であり、各断面位置の結合材量を表している。図より、加振時間の増加にともない結合材に垂れが生じ、供試体上部で結合材面積率が低下し、下部で増加していることが分かる。中間部であまり変化がみられないが、その理由は、加振によって結合材に垂れが生じた場合、供試体上部は結合材の垂れによって結合材量が減少し、供試体中間部は結合材の垂れによる結合材量の減少と上部からの結合材の垂れによる結合材量の増加が同時に進行して

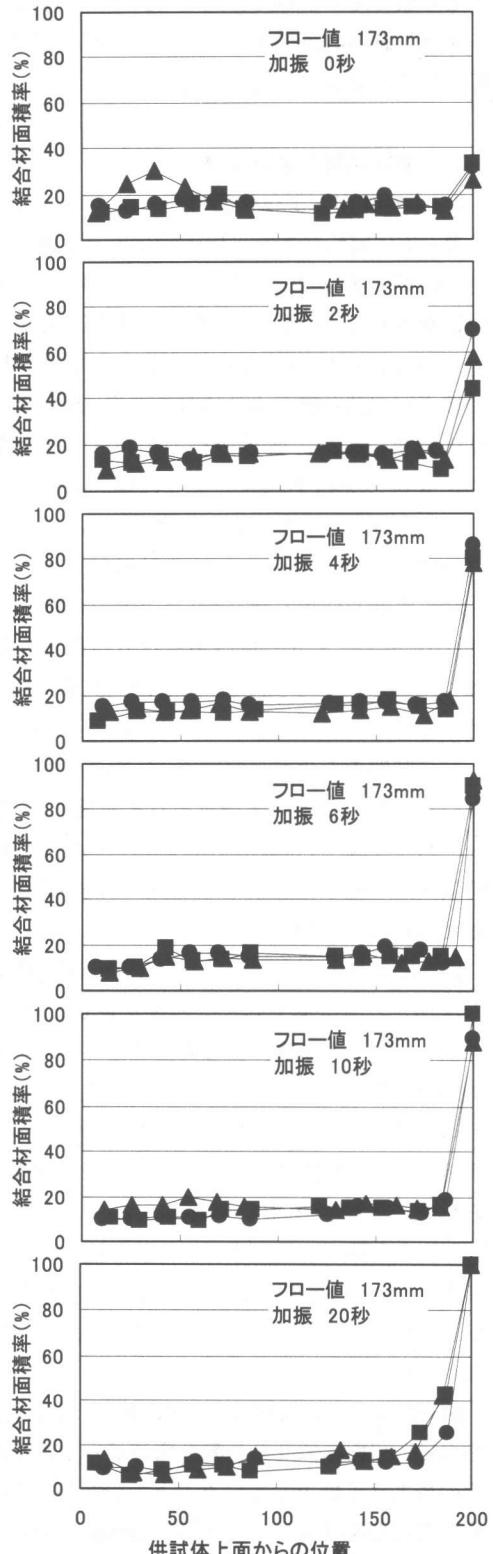


図-5 供試体断面の空隙面積の推移

結合材量があまり変化せず、供試体下部は上部や中間部からの結合材の垂れによって結合材量が増加するためと考えられる。なお、加振 0 秒で底面部分の結合材面積率がその他の部分と比較して約 20%程度高くなっているが、これは底面の型枠に接している部分では、骨材部分と結合材部分の区別がつかないことから、骨材部分も結合材として面積を算出しているためである。また、供試体上面より 10mm の結合材面積率の低下があまりみられないが、これは今回の実験では振動締固め時に加振によってコンクリートが沈下した分を加振終了後に追加投入したため、結合材面積率が低下しなかったものと考えられる。

ポーラスコンクリートの圧縮強度は、骨材の剪断滑りや骨材の圧縮破壊といった破壊機構によって異なると考えられるが、破壊機構が骨材の剪断滑り破壊の場合、骨材の剪断滑りを拘束する結合材強度または結合材量によって決定され、結合材量が減少すれば圧縮強度は低下すると考えられる。このことは、供試体全体の結合材量が同一でも局所的に結合材量が変化した場合でも同様と考えられ、結合材量が減少した箇所で圧縮強度は決まると考えられる。そのため、結合材の分布状態がポーラスコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響を調べるために、上述したように結合材量が減少する供試体上部の結合材の変化量を求めることが適切であると考えられる。しかし今回の実験では、振動締固め後に沈下したコンクリート分を追加投入したため、図-6 に示すように追加投入部分である供試体上面より 10mm を除く、25, 40 および 55mm の 3 箇所の結合材面積率の平均値を求めて、加振時間の増加に伴う結合材量の変化量を求めた。その結果を図-7 に示す。図より、振動締固めを行っていない加振 0 秒で大きなばらつきが認められるが、加振時間の増加とともに評価区間の結合材量は減少している。そのためこの区間の圧縮強度が低下し、供試体全体の圧縮強度が低下するものと考えられる。こ

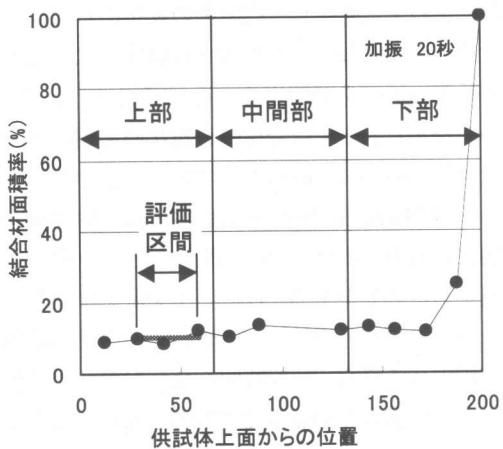


図-6 結合材面積率の評価区間

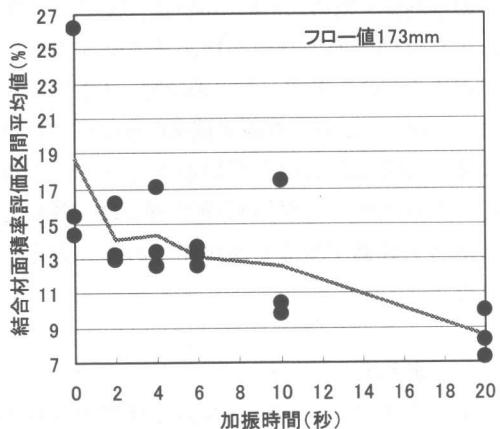


図-7 結合材面積率の評価区間平均値と加振時間の関係

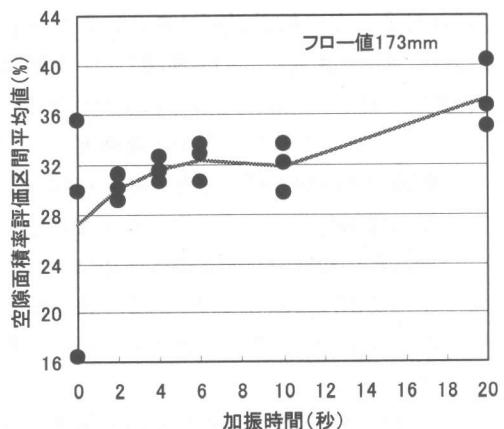


図-8 空隙面積率の評価区間平均値と加振時間の関係

れによって、前述した空隙率の変化からだけでは説明がつかなかった加振 6 秒以降の大きな圧縮強度の低下を説明することが可能である。しかしながら、今回結合材の分布状態を調べたのはフロー値が 173mm のみであることから、フロー値 158mm と 201mm の供試体についても同様に結合材の分布状態を調べて上記の考察を確かめる必要がある。なお、本実験で使用した卓上バイブレータで  $\phi 10 \times 20\text{cm}$  の円柱供試体を締固める場合、加振時間を結合材の分布状態が一様である 2~10 秒にするのが適切であると考えられる。

結合材面積率と同様に評価区間の空隙面積率の平均値を求めたものが図-8 である。空隙面積率は切断面の空隙面積がその断面の面積に占める割合を表す。この図は図-7 とほぼ対称形をなしており、空隙面積率の変化は結合材面積率の変化に起因しているものと考えられる。そのため、結合材の分布の評価は空隙の分布からも評価することが可能であると考えられる。

#### 4.まとめ

ポーラスコンクリートの結合材であるセメントペーストのフロー値および卓上バイブルータによる振動締固め時間を変化させて、結合材の流動性がその分布状態に及ぼす影響および結合材の分布状態がポーラスコンクリートの物性に及ぼす影響について検討した。本研究の範囲内で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) ポーラスコンクリートの圧縮強度は、振動締固め時間の増加とともに、初期に急激な増加を示し、その後、大きな低下を示した。初期の急激な強度増加は、空隙率の変化に起因しており、その後の強度低下は結合材の垂れに起因していると考えられた。
- (2) 結合材の流動性が物性に及ぼす影響については、フロー値 158mm の圧縮強度およびヤング係数の変化割合が小さな値を示

- したもの、フロー値 173mm および 201mm では明確な差がみられなかった。
- (3) 空隙率の測定だけからはポーラスコンクリート内部の結合材の分布状態を把握することはできず、空隙率と同様に結合材の分布状態が強度に大きく影響することが明らかとなった。
  - (4) 供試体内部の結合材の分布状態は、空隙率の分布状態でも適切に評価できることが分かった。また、振動締固めによる結合材の垂れで生じる空隙の閉塞は、供試体底面より徐々に進行することが分かった。
  - (5) 振動数 3000vpm・振幅 1.5mm の卓上バイブルータで  $\phi 10 \times 20\text{cm}$  の供試体を締固める場合、加振時間を 2~10 秒にするのが適切と考えられた。
  - (6) 今後、フロー値 158mm および 201mm の供試体の結合材の分布状態を調べて、それらが強度特性に及ぼす影響がフロー値 173mm の場合と同じであるかを確かめる必要がある。

#### 謝辞

断面算定方法について大分大学工学部建設工学科佐藤誠治教授並びに小林祐司助手に御指導賜りました。また、本実験について大分大学工学部建設工学科永松静也教授、清原千鶴助手並びに遠矢義秋技官、同学部学生田口宏道、荒川堅太郎および大鍛治洋介君に御助力賜りました。ここに記して深謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 松川徹ほか：緑化コンクリートの空隙性状、コンクリート工学年次論文報告集, vol.18, No.1, pp.999-1004, 1996
- 2) 岩佐祐一ほか：緑化用基盤としてのポーラスコンクリートの基礎物性に関する実験的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.513-514, 2000
- 3) 添田政司ほか：ポーラスコンクリートへの再生骨材の適用性に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集, vol.20, No.2, pp.1117-1122, 1998