

論文 ポーラスコンクリートの強度改善

小椋 伸司^{*1}、国枝 稔^{*2}、栗原 哲彦^{*3}、六郷 恵哲^{*4}

要旨: ポーラスコンクリートの力学特性は、骨材やセメントペーストの性質に大きく左右される。そこで、混和材料や骨材を変化させ、ポーラスコンクリートの各強度と空隙率について検討した。高性能AE減水剤を用いてペーストの強度を改善し、増粘剤を用いてペースト厚さを確保することにより、ポーラスコンクリートの曲げ強度および引張強度を改善できた。また、ポーラスコンクリートの切断面について画像解析を行い、各種供試体の骨材の充填状態およびセメントペーストの付着状態について検討した。

キーワード: ポーラスコンクリート、強度、混和材料、画像解析

1. はじめに

ポーラスコンクリートは、力学的な性質以外の特殊な機能をあわせ持ったコンクリートであり注目されている[1]。ポーラスコンクリートは、粗骨材間における接点でのみ付着しているため、普通のコンクリートと同様の強度を期待することは難しく、ポーラスコンクリートの使用範囲は自ずと制限される。ポーラスコンクリートの強度は、使用骨材やセメントペーストの性質などに強く依存しており、各種混和材料及び各種骨材を使用することによって強度の改善がある程度可能であると考えられる。著者らも、ポーラスコンクリートの強度改善に関する研究を行ってきた[2]。本研究では各種の混和材料及び骨材を使用してポーラスコンクリートを作製し、ポーラスコンクリートの高性能化（主に曲げ強度や引張強度の改善）について、主に実験により検討した。その際、特に画像解析により、骨材に付着しているセメントペーストの厚さに着目して検討した。

2. 実験概要

2.1 作製した供試体

ここでは、ポーラスコンクリートの高性能化について検討するにあたり、(1)骨材に付着するセメントペースト厚の影響、(2)鋼纖維を混入することによる影響、(3)骨材の種類の違いによる影響に着目し、以下に示すような供試体を作製した。なお、各シリーズ(A～Iシリーズ)のポーラスコンクリートの特徴と示方配合をそれぞれ表-1、2に示す。

表-1 ポーラスコンクリートの種類

シリーズ	特徴
A	通常のポーラスコンクリート
B	高性能AE減水剤
C	高性能AE減水剤+増粘剤
D	高性能AE減水剤+増粘剤(セメント增量)
E	高性能AE減水剤+シリカフューム
F	高性能AE減水剤+増粘剤+鋼纖維
G	人工軽量骨材
H	人工軽量骨材+高性能AE減水剤
I	再生骨材

*1 岐阜大学工学部 土木工学科（正会員）

*2 岐阜大学大学院 工学研究科生産開発システム工学専攻、工修（正会員）

*3 岐阜大学助手 工学部土木工学科、工修（正会員）

*4 岐阜大学教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

表-2 示方配合

供試体 シリーズ	水セメント比 (%)	単位量 (kg/m ³)						
		水	セメント	シリカフューム	粗骨材	混和剤 ^{*1}	増粘剤 ^{*2}	鋼纖維
A	30	96.5	318	—	1622	—	—	—
B	24	32.2	160	—	1639	6.39	—	—
C	23	63.2	314	—	1598	9.43	0.182	—
D	23	73.0	365	—	1580	10.9	0.210	—
E	24	32.3	145	11.4	1652	5.81	—	—
F	23	62.2	309	—	1572	9.30	0.179	78.3
G	30	57.2	191	—	1136 ^{*3}	—	—	—
H	24	35.0	174	—	1067 ^{*3}	6.95	0.105	—
I	30	101	333	—	1599 ^{*4}	—	—	—

*1 高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系) *2 セルロース系 *3 人工軽量骨材 *4 再生骨材

(1) 骨材に付着するセメントペー

スト厚を変化させた供試体

ここでは、混和剤などを使用して骨材に付着するペースト厚さを変化させた供試体を作製した。Aシリーズでは、水、セメントおよび粗骨材をミキサに一括投入して練り混ぜ、ポーラスコンクリートを作製した。ここでは、このAシリーズを基準に検討する。Aシリーズに比べて薄いペースト厚さを目標としたBシリーズでは、水セメント比を小さくし、高性能AE減水剤(添加量:セメントの4%)を添加した。さらに、Eシリーズでは、目標とするペースト厚さはBシリーズと同程度とし、セメントペーストの高強度化をねらってシリカフューム(セメントの10%置換、比重2.2)を混入した。

一方、Aシリーズと同程度のペースト厚さを目標とするCシリーズは、単位セメント量をAシリーズと同程度とし、高性能AE減水剤(添加量:セメントの3%)に加え増粘剤(添加量:水の0.25%)も添加した。同様に、Dシリーズは、Cシリーズに比べてさらにペースト量を増加させた。

(2) 鋼纖維を混入する供試体

Fシリーズでは、曲げおよび引張強度を上げることを目的に、高性能AE減水剤と増粘剤をえたCシリーズに鋼纖維(混入率1%、比重7.85、φ0.5×10mm)を混入した。

(3) 骨材の種類を変化させた供試体

ここでは、粗骨材として人工軽量骨材を用いたGシリーズと、粗骨材に人工軽量骨材を用い、さらに高性能AE減水剤(添加量:セメントの4%)と増粘剤(添加量:水の0.24%)を添加したHシリーズを作製した。その際、Hシリーズでは、Gシリーズより水セメント比を小さくした。Iシ

表-3 使用粗骨材の物性値

	玉碎石	人工軽量骨材	再生骨材
表乾比重	2.61	1.63	2.46
吸水率(%)	1.44	27.5	5.94
実績率(%)	60.1	47.2	58.6

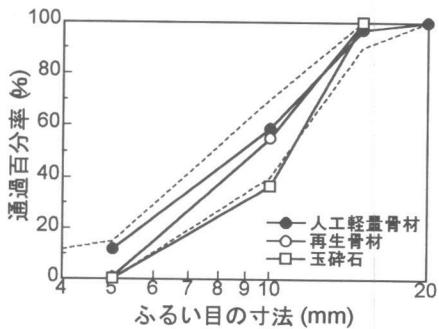


図-1 各種骨材の粒度分布

リーズでは、粗骨材に再生骨材を用いた。表-3に使用した粗骨材の物性を、図-1に粒度分布図を示す。

2.2 供試体作製方法

練り混ぜには容量 100リットルの強制練りミキサーを使用し、セメントペーストを十分に練り混ぜた後、粗骨材を投入し、強度試験用の供試体（曲げ強度用 $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ 、引張強度用 $\phi 15 \times 15\text{cm}$ 、圧縮強度用 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ ）を作製した。なお、セメントには早強セメント（比重：3.13）を用い、粗骨材の最大寸法はすべて 15mm とした。

すべての供試体は打設した翌日に脱型し、載荷試験直前まで恒温室（温度 20°C 、湿度 80%）内で湿布養生した。供試体は湿润状態で載荷試験を行った。養生期間は 27～30 日間である。

2.3 画像解析用の供試体の作製

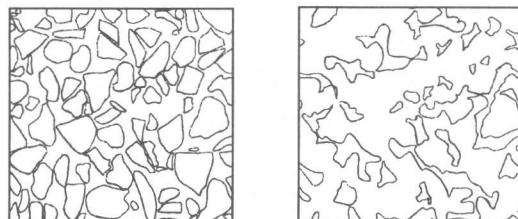
上記の A、B、C、E、F、I の 6 シリーズを対象に、前述の強度試験用供試体の作製方法に準じて、別途に断面解析用の角柱供試体（ $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ ）を作製した。供試体作製後、ポーラスコンクリートの空隙を石膏で充填し、供試体を長さ方向に 4 等分（ $10 \times 10 \times 10\text{cm}$ を 4 個作製）した。切断面の中心付近の領域（ $7.1 \times 8.2\text{cm}$ ）を調査領域とし、1 シリーズに付き 3箇所の切断面の骨材分布および空隙分布をトレースした。そのトレース結果を画像解析することにより空隙・骨材・ペーストの各面積比および調査領域内の総骨材周長を算出し、見かけのペースト厚を算出し、各種強度との関係を示した。

3. 実験結果と考察

3.1 見かけのペースト厚および空隙率

図-2 に、切断面のトレース図をもとに作成した骨材および空隙分布の一例を示す。

画像解析により得られた空隙・骨材・ペーストの各面積比、総骨材周長およびペースト厚を表-4 に示す。なお、ペースト厚とは、調査領域面積から骨材面積と空隙面積を除いた残りのペースト面積を骨材周長で除したものであり、骨材周囲に付着するペーストの見かけの平均厚さである（以下、ここでは単にペースト厚と呼ぶ）。これらより、A シリーズと同程度のペースト厚を目標に作製した C シリーズ、および A シリーズに比べて薄いペースト厚を目標にした B、E シリーズがそれぞれ目標通りに作製されていることが確認された。さらに、F、I シリーズについてもペースト厚については A シリーズと同程度であることが確認された。



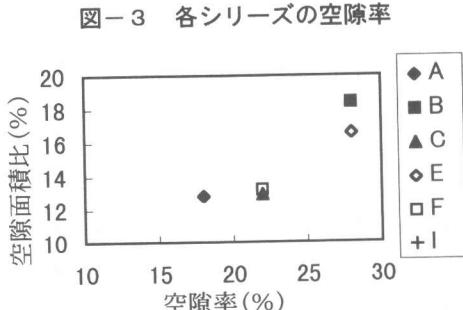
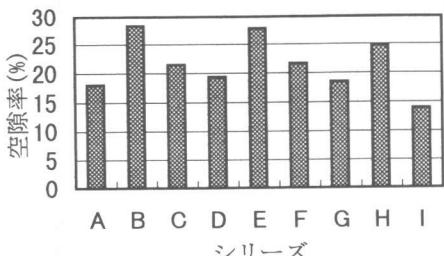
(a) 骨材分布

(b) 空隙分布

図-2 切断面のトレース図

表-4 画像解析結果

シリーズ	空隙 (%)	骨材 (%)	セメント (%)	骨材周長 (mm)	ペースト厚 (mm)
A	12.8	47.4	39.8	1690	1.15
B	18.4	48.5	33.1	1810	0.901
C	12.9	44.8	42.3	1680	1.24
E	16.6	51.2	32.2	1680	0.946
F	13.2	44.5	42.3	1740	1.20
I	7.70	48.6	43.7	1910	1.12



同時に、各シリーズの供試体の気中重量と水中重量から算出した空隙率を図-3に示すとともに、画像解析により得られた空隙面積比（調査領域面積に対する空隙面積の比）との関係を図-4に示す。図から両者はほぼ直線関係にあった。断面の画像解析により得られた空隙面積比の大小関係は、図-3に示す実際の空隙率と一致し、空隙面積比から空隙率の推測が可能であると思われる。

3.2 各種強度および空隙率

各シリーズの強度試験結果を表-5および図-5～7に示す（1試験条件あたり3～5個の供試体を用いて求めた）。なお、表-5には空隙率の実測値も示す。曲げ強度は供試体の自重を考慮して補正を行ったものである。

(1) 骨材に付着したセメントペースト厚の影響

ここでは、A～Eシリーズの実験結果により、骨材に付着したセメントペースト厚の影響について検討した。基本となるAシリーズについては、圧縮強度 178kgf/cm²、曲げ強度 31.7kgf/cm²、引張強度 16.5kgf/cm²、ペースト厚は1.15mmであった。

Bシリーズは、Aシリーズに比べ空隙率は約57%増大したが、圧縮強度は約47%、引張強度は約27%、

表-5 強度試験結果および空隙率

シリーズ	空隙率 (%)	強度(kgf/cm ²)			弾性係数 (kgf/cm ²)
		曲げ	引張	圧縮	
A	18.0	31.7	16.5	178	1.84×10^5
B	28.3	24.9	12.0	96.4	1.39×10^5
C	21.5	31.9	17.7	121	1.65×10^5
D	19.4	37.1	24.2	158	1.56×10^5
E	27.8	26.6	11.8	96.1	1.12×10^5
F	21.7	37.2	18.5	122	1.47×10^5
G	18.5	20.4	11.7	116	0.819×10^5
H	24.8	17.9	9.90	63.0	0.603×10^5
I	14.0	26.4	18.4	145	1.53×10^5

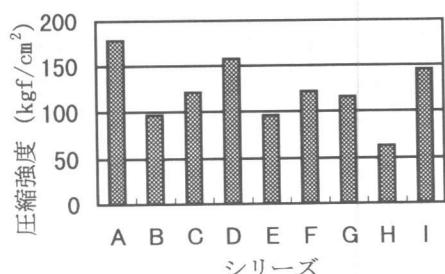


図-5 各シリーズの圧縮強度

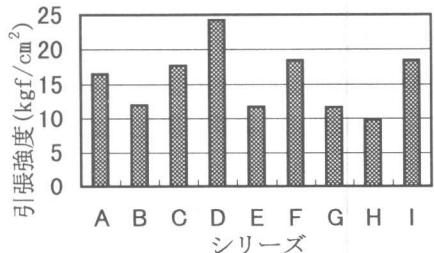


図-6 各シリーズの引張強度

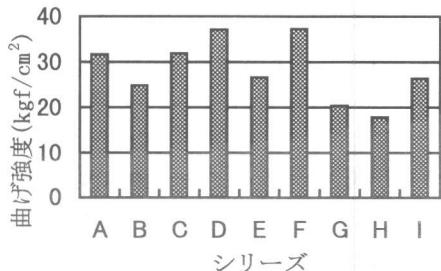


図-7 各シリーズの曲げ強度

曲げ強度は約22%減少した。これは、高性能A-E減水剤によりセメントペーストの流動性が増加し、ペースト厚が約22%減少したことによると考えられる。

次に、Bシリーズのセメント量の10%をシリカフュームに置換し、セメントペースト自身の強度の増加をねらったEシリーズは、Bシリーズに比べ圧縮強度、引張強度、空隙率、ペースト厚とともに同程度であり、曲げ強度は7%増大という結果となり、シリカフュームを用いたことによるポーラスコンクリートの各種強度の向上は認められなかった。

一方、ペーストの流動性を増粘剤によって抑え、Aシリーズと同程度のペースト厚を確保したCシリーズでは、Aシリーズに比較して、圧縮強度は33%減少したが、引張強度で約7%、曲げ強度で6%増大し、空隙率は20%増大した。

Cシリーズよりもさらにペースト量を増加させたDシリーズは、Aシリーズと比較すると、圧縮強度は約15%減少、引張強度は約47%増大、曲げ強度は17%増大、空隙率は8%増大という結果となり、Cシリーズと比較すると、圧縮強度で約27%、引張強度で約37%、曲げ強度で約10%増大し、空隙率は約10%減少という結果となった。

A、B、C、E、F、Iシリーズの各種強度とペースト厚との関係を図-8～10に示す。両者は、ほぼ直線関係にあり、ペースト厚がポーラスコンクリートの各種強度に大きな影響を与えることが分かる。

以上より、Aシリーズにくらべてペースト厚が薄いBシリーズおよびEシリーズは、Aシリーズの各強度と比べてもいずれも小さくなり、引張強度および曲げ強度においてAシリーズよりも強度を改善（向上）させることができた。特に、Dシリーズの引張強度は、Aシリーズと比較して著しく改善することができた。よって、今回の実験からポーラスコンクリートの各種強度はペースト厚に大きく依存していることが分かった。

(2) 鋼繊維を混入することによる影響

Cシリーズに鋼繊維を混入したFシリーズは、Aシリーズと比較すると、圧縮強度は約32%減少したが、引張強度は約12%、曲げ強度は約27%増大し、空隙率は約20%増大した。また、CシリーズとFシリーズでは、圧縮強度にはあまり差が見られなかった。このことは、通常の鋼繊維補強コンクリートにおいても一般に言われていることであり、繊維自体は圧縮力に対してはほとんど寄

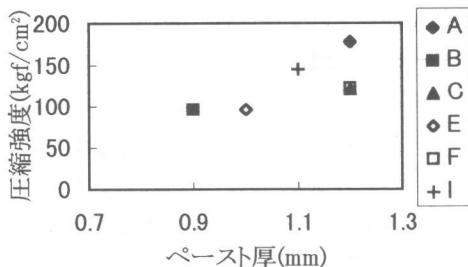


図-8 圧縮強度-ペースト厚分布

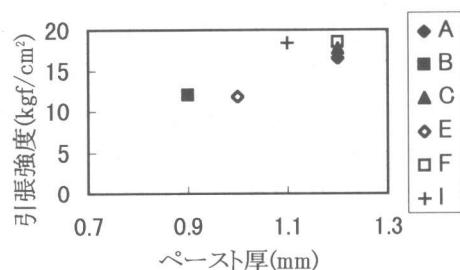


図-9 引張強度-ペースト厚分布

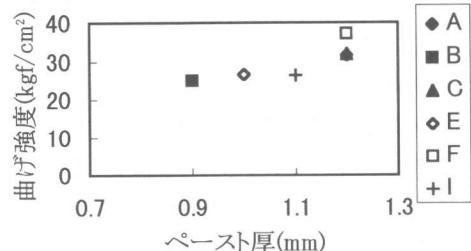


図-10 曲げ強度-ペースト厚分布

与せず、引張力に対してその効果を発揮することが分かる。なお、実際のポーラスコンクリートに鋼繊維を使用する場合には、錆にくいステンレス繊維が望ましいと考える。

(3) 骨材の種類の違いによる影響

人工軽量骨材を用いたGシリーズとHシリーズを比較すると、HシリーズはGシリーズより圧縮強度で約49%、引張強度で約15%、曲げ強度で約12%減少し、空隙率は約34%増大した。これは、AシリーズとBシリーズとを比較したときと同じように、高性能AE減水剤の使用によりペーストの流動性が増加し、ペーストの皮膜厚さが減少したためと推察される。

また、ほぼ同配合であるHシリーズとBシリーズとを比較すると、Hシリーズの各種強度および空隙率は、Bシリーズのそれらに比べ、少さな値となった。空隙率が小さくなつたにも関わらずHシリーズの各種強度がBシリーズより小さくなつたのは、人工軽量骨材自身の強度が玉碎石より低かつたためと考えられる。

再生骨材を用いたIシリーズは、Aシリーズと比較すると、圧縮強度は19%減少、引張強度は約12%増大、曲げ強度は約17%減少、空隙率は約23%減少し、特に、空隙率が大きく減少した。その理由としては、練混ぜの際に再生骨材の表面に付着していたモルタルが粉碎され、その破片が空隙を埋めてしまったためと推察される。しかし、強度的には通常のポーラスコンクリート(Aシリーズ)と大きな違いは認められなかった。

4.まとめ

各種混和材料と骨材を用いて作製したポーラスコンクリートの強度試験と切断面の画像解析結果をもとに、ポーラスコンクリートの強度改善について検討し、以下の結論を得た。

- (1) ポーラスコンクリートの切断面のトレース結果を画像解析し、見かけのペースト厚を算定した。その結果、ペースト厚の改善がポーラスコンクリートの各強度の改善につながることを確認した。
- (2) 高性能AE減水剤を用いてペーストの強度を改善し、さらに増粘剤を用いてペースト厚さを確保することにより、同程度の空隙率を保ったまま、ポーラスコンクリートの引張強度および曲げ強度を増大させることができた。
- (3) 再生骨材を用いたポーラスコンクリートにおいても、練混ぜ中に粉碎された骨材表面の付着モルタルの影響で空隙は減少したもの、通常の骨材を用いたポーラスコンクリートと同程度の強度を得ることができた。

[参考文献]

- [1]玉井元治：透水性コンクリート、特集*コンクリートの高性能化高機能化、コンクリート工学 Vol. 32、No. 7、pp. 134-138、1994. 7.
- [2]安藤貴宏、栗原哲彦、内田裕市、六郷恵哲：ポーラスコンクリートの曲げ破壊性状、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 17、No. 1、pp. 765-770、1995.