

重交通対応型短繊維補強ポーラスコンクリートの実験的研究

○宅和大助*1 砂田栄治*1 古井博*2 小出貴夫*3 坂本英輔*4

要旨：ポーラスコンクリートにポリプロピレン短繊維を混入して曲げ強度及び骨材飛散抵抗性を改善し、重交通対応型短繊維補強ポーラスコンクリートの実用可能性を見出すことを目的として実験を行った。実験の結果、早強ポルトランドセメント及び砕石 1005 を主材料として、材齢 7 日で設計曲げ強度 4.5N/mm^2 及びカンタプロ質量損失率 20%が確保できることを確認した。一方、短繊維混入による曲げ強度及び骨材飛散抵抗性の改善効果は確認できなかった。これは、作製した供試体の空隙率にバラツキが大きかったためであり、短繊維の有効性を確認するためには、フレッシュ性状の評価方法及び締固め方法の標準化による的確な配合設計方法の確立が課題と考えられた。

キーワード：ポーラスコンクリート、コンクリート舗装、曲げ強度、ポリプロピレン短繊維、骨材飛散抵抗性

1. はじめに

ポーラスコンクリート（以下、POC と略記）舗装は、雨天時の歩行・走行安全性に優れ、主に歩道など軽交通舗装に使用されている。しかし、重交通道路の場合、POC は強度や骨材飛散抵抗性などの耐久性が通常のコンクリートより劣るために、単独で舗装版とすることは難しい現状がある。近年、POC の強度及び耐久性を向上させるために、短繊維補強 POC の研究が行われており、POC に有用であるものの一つとして、ポリプロピレン短繊維（以下、短繊維と略記）が挙げられている。本研究では、生コン工場で製造可能な重交通対応型 POC 舗装の実現を目指し、POC に短繊維を混入したときの強度及び骨材飛散抵抗性への影響を確認・評価するために、曲げ強度試験、連続・全空隙率試験及びカンタプロ試験を実施した。

2. 使用材料及び配合

2.1 使用材料

本実験の使用材料を表 1 に示す。各材料は、生コン工場で POC を製造することを前提に、入手が比較的容易なものを選定した。セメントは養生期間の短縮を目的として早強ポルトランドセメントを使用し、粗骨材は粒径 5~10mm の砕石 1005、化学混和剤は流動性を確保するために高性能減水剤を使用した。なお、POC において細骨材はダレ防止効果などが期待でき、AE 剤（エントレインドエア）は耐凍害性などの耐久性向上に有効とされているが、本実験では短繊維混入による曲げ強度及び骨材飛散抵抗性の改善効果確認を目的としたため使用していない。短繊維は、

*1 広島県生コンクリート工業組合 技術委員会 品質技術部会

*2 広島地区生コンクリート協同組合 共同試験場

*3 住友大阪セメント株式会社 広島支店

*4 広島工業大学 工学部 建築工学科

JIS A 6208「コンクリート用ポリプロピレン短繊維」適合品で、コンクリート剥落防止用として商品化されている、ポリプロピレン短繊維 A (以下、短繊維 A と略記) 及びポリプロピレン短繊維 B (以下、短繊維 B と略記) を使用した。短繊維の物性値を表-2 に示す。

表-1 使用材料

材料名	記号	種類	密度 (g/cm ³)	備考
セメント	C	早強ポルトランドセメント	3.14	
水	W	上水道水	1.00	
粗骨材	G	砕石 1005	2.71 注 1	広島市安佐北区筒瀬産 (実積率 58.7%)
短繊維	PPA	ポリプロピレン短繊維	0.91	短繊維 A
	PPB	ポリプロピレン短繊維	0.91	短繊維 B
混和剤	SP	高性能減水剤	1.05~1.09	ポリカルボン酸エーテル系

注 1: 粗骨材は表乾密度である。

表-2 短繊維の物性値

材料名	繊維度 decitex(dt) 注 2	繊維径 注 3 (μm)	繊維長 (mm)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング率 (N/mm ²)
短繊維 A	30	64.8	12	530	5,000
短繊維 B	13	42.6	12	482	5,000

注 2: decitex とは繊維長 10,000m 当りのグラム数で、繊維の太さを示す単位である。

注 3: 断面形状は真円でないため、換算して直径として表示している。

2.2 配合水準と目標性能

本実験の配合水準を表-3 に示す。短繊維を混入しないケースをベースとし、短繊維 A の混入率は容積分率で 0.1%、0.2% 及び 0.3%、短繊維 A より繊維径の小さい短繊維 B の混入率は 0.1%、0.3% 及び 0.5% とした。

本実験の設計曲げ強度は、重交通道路に適用できるように 4.5N/mm² (材齢 7 日) とし、目標曲げ強度は 5.63N/mm² (正規偏差 2、変動係数 10%) とした。また、「舗装設計便覧」¹⁾ に従って透水係数を 0.01cm/sec 以上とするため、空隙率は 15% 以上とし、設計空隙率は 16.5 (±1.5) % とした。配合設計は、骨材の実積率を基準としてモルタル粗骨材空隙比 (Km) 及びペースト細骨材空隙比 (Kp) を用いる手法とした。なお、傾き α は実験定数であるが、既往の報告²⁾ から 6 号砕石と 7 号砕石による Kp と α の対数近似値の交点を α の最大値とし、細骨材を使用しない場合 (Kp=∞) の α=0.377 とした。Km は表-3 に示す割合で粗骨材と短繊維を混合した実積率を用い、設計空隙率が 16.5% となるようにした。水セメント比 (以下、W/C と略記) は、既往の報告²⁾ から最も小さい 20% に設定した。

表-3 配合水準

No.	配合番号	W/C (%)	空隙率 (%)	Km	単位量 (kg/m ³)			短繊維混入率 (Vol%)		SP 添加率 (C×wt%)
					C	W	G	PPA	PPB	
1	B0	20	16.5	0.658	510	102	1,547	—	—	1.10
2	PPA1			0.663	515	103	1,536	0.1	—	1.14
3	PPA2			0.671	524	105	1,522	0.2	—	1.18
4	PPA3			0.682	535	107	1,503	0.3	—	1.22
5	PPB1			0.668	521	104	1,529	—	0.1	1.10
6	PPB2			0.674	527	105	1,515	—	0.3	1.18
7	PPB3			0.682	535	107	1,497	—	0.5	1.26

3. 実験方法

練混ぜ方法、供試体作製方法などの試験方法を以下に述べる。なお、多くの試験方法は、(公社)日本コンクリート工学会発行の「性能設計対応型ポーラスコンクリートの標準施工と品質保証体制の確立研究委員会 報告書」で(試案)として示されている方法(以下、JCI基準と略記)に準じて行った。

3.1 練混ぜ方法

POCの練混ぜには、公称容量60Lの水平2軸形強制練りミキサを使用した。1バッチあたりの練混ぜ容積は30Lとし、セメント及び粗骨材を投入後15秒間練り混ぜ、水及び化学混和剤を投入後に3分間練り混ぜた。その後短繊維を投入してさらに1分間練り混ぜた。練混ぜ完了後、ダレ試験や試作供試体の側面及び底面を目視観察することでフレッシュ性状を確認してから供試体作製を行った。

3.2 供試体作製方法

3.2.1 曲げ強度試験用供試体(以下、曲げ供試体と略記)

供試体は、 $100 \times 100 \times 400$ mmの型枠でJCI基準に準じて作製した。試料は、型枠寸法に対して締固め後の空隙率が所定値となる理論質量分を量り取って用いた。締固めは、型枠上面まで試料を投入し、鋼製のタンピング治具(断面 100×200 mm)及び電動ハンマ(打撃回数2900回/分)を用いて、型枠上面を横に移動しながら約30秒間打撃を加える方法とした。試料は一度で全量投入できないため、数回に分けて投入と締固めを繰り返し、型枠寸法とほぼ一致する供試体を作製した。

3.2.2 カンタプロ試験用供試体(以下、カンタプロ供試体と略記)

供試体は、 $\phi 100 \times 200$ mmの型枠を使用して、ZKT-214に準じて作製した。試料は、 $\phi 100 \times 63.5$ mmに対して締固め後の空隙率が所定値となる理論質量分を量り取って用いた。締固めは量り取った試料をすべて投入し、高さ63.5mmとなるように鋼製のタンピング治具(断面 $\phi 100$ mm)及び電動ハンマを用いて1層で締固めを行った。

3.2.3 供試体の養生

供試体は、作製直後に食品包装用ラップで型枠上面を覆い、環境温度 20 ± 2 °Cの室内で翌日まで封かん養生した。供試体は練混ぜ開始から約24時間後に脱型し、所定の材齢まで 20 ± 2 °Cの水中で養生した。

3.3 試験の種類と方法

試験の種類を表-4に示す。

表-4 試験の種類と方法

No.	試験の種類	試験の方法
1	ダレ試験	・ ZKT-213 ポーラスコンクリートのダレ試験方法 ・ 各配合において1回の試験値を結果とした。
2	空隙率試験	・ JCI基準 ポーラスコンクリートの空隙率の試験方法(案) ・ 曲げ供試体は容積法による連続空隙率及び質量法による全空隙率を実施した。 ・ カンタプロ供試体は質量法による全空隙率を実施した。
3	曲げ強度試験	・ JIS A 1106 コンクリートの曲げ強度試験方法 ・ 材齢7日まで 20 ± 2 °C水中養生した。 ・ 各配合において供試体は3本とした。
4	カンタプロ試験	・ ZKT-214 ポーラスコンクリートのカンタプロ試験 ・ 材齢6日まで 20 ± 2 °C水中養生後、 20 ± 2 °C、相対湿度 60 ± 3 %の条件下で24hr自然放置し、材齢7日で実施した。 ・ 各配合において供試体は3本とした。

3.3.1 ダレ試験

ダレ試験は、事前の予備試験において、2回の試験値の差が大きくダレ率も大きな値となったことから、容器表面に残った粗骨材を除去して試験することとした。

3.3.2 空隙率試験

空隙率試験は、JCI 基準によると、 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 60%の条件下で 24 時間自然放置後に気中質量を測定する手順である。しかし、本実験における曲げ供試体の気中質量は、乾燥による曲げ強度値への影響が出ないように、材齢 4 日の供試体を養生水槽から取り出した後、圧縮空気水滴を飛ばし、扇風機で表面を乾燥させた時点とした。また、供試体寸法はこの時点で測定した。

カンタプロ供試体の空隙率試験では、JCI 基準に基づき気中質量及び供試体寸法を測定した。また、曲げ供試体と同様の気中質量も測定した。

3.3.3 曲げ強度試験

曲げ供試体におけるキャッピングについては、予備実験により検討した結果、キャッピングの有無は曲げ強度に影響しないと判断して行わなかった。

3.3.4 カンタプロ試験

カンタプロ試験は、ZKT-214 に準じて行った。試験後、カンタプロ供試体に付着した小片や微粉は、圧縮空気を用いて除去した後、その質量を測定した。

4. 実験結果と考察

4.1 ダレ試験

図-1 にダレ率と全空隙率を示す。ダレ率は 0.110~0.245%の範囲で、ミキサからの排出時に異常なペーストのダレやミキサへの残留もなく、良好なフレッシュ性状の POC が得られた。また、本実験では、試作の供試体締固め直後に型枠を解体して供試体の側面及び底面の目視観察を行うことで、締固め時に過度なペーストのダレが生じない良好な供試体を作製できた。しかし、ダレ試験は、POC の締固め作業時に、ペーストのダレに伴って閉塞する連続空隙を評価する指標と考えられる。したがって、次の課題の一つとして、ダレ率及び目視観察により、連続空隙率を評価できるようにすることが挙げられる。

4.2 全空隙率試験

図-2 に供試体別の全空隙率を示す。曲げ供試体の全空隙率は、18.0~20.3%の範囲となり、設計全空隙率 ($16.5\pm 1.5\%$) より大きくなる傾向であった。配合修正や締固め方法の改善を重ねることで、配合設計の的確性を向上させる必要があると判断される。

一方、供試体種類や配合を個別に見ると、

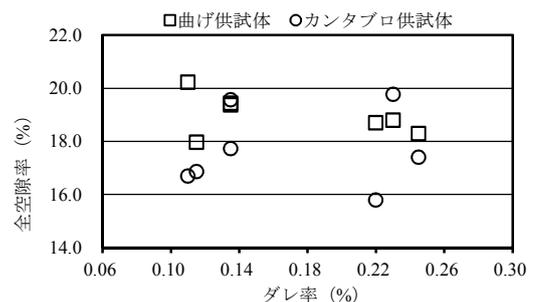


図-1 ダレ率と全空隙率

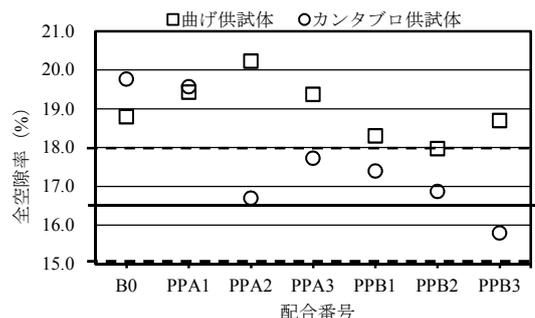


図-2 曲げ及びカンタプロ供試体の全空隙率

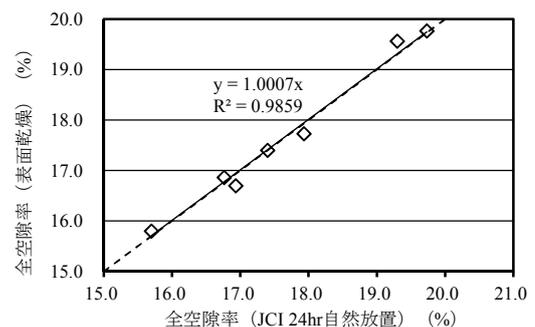


図-3 カンタプロ供試体の全空隙率

カンタブロ供試体の B0 及び PPA1 以外では、設計全空隙率に対して適切な全空隙率の供試体が作製できており、この範囲では、配合及び締固め方法は適切であったと考えられる。B0 及び PPA1 の全空隙率はいずれの供試体も目標空隙率より大きく、Km の低下等の配合修正が必要と判断される。

カンタブロ供試体で実施した、表面乾燥による全空隙率と JCI 基準に沿った 24hr 自然乾燥による全空隙率を 図-3 に示す。いずれの乾燥方法も同等の結果であることが分かった。したがって、本試験方法を簡易法として、今後の実験でも採用していく方針である。ここで、供試体の乾燥程度が異なるものの全空隙率が同等であるのは、 図-4 に示すように、乾燥が進むにつれ気中質量 (W2) が減少し、減少量に比例して、供試体容積 (V1) も小さくなったためと考えられる。

4.3 曲げ強度試験

曲げ強度試験の結果を 図-5 に示す。各配合の曲げ強度は、 $4.97 \sim 5.51 \text{ N/mm}^2$ ですべて設計曲げ強度 4.5 N/mm^2 を上回った。本実験では、W/C を 20% とすることで、全空隙率が最も大きい 20.3% においても設計曲げ強度 4.5 N/mm^2 を確保できることを確認した。

全空隙率と曲げ強度の関係を 図-6 に示す。全空隙率と曲げ強度には負の相関関係があることが分かる。全空隙率の曲げ強度への影響を考慮すると各配合の曲げ強度の差は小さく、本実験の範囲では、短繊維混入による曲げ強度の向上は確認できなかった。これは、本実験で使用した短繊維が架橋効果を発揮できなかったためと考えられる。

4.4 カンタブロ試験

カンタブロ試験の結果を 図-7 に示す。カンタブロ試験の質量損失率の目安は、アスファルト舗装の高機能舗装一型の配合試験基準値である質量損失率 20% 以下とした³⁾。すべての配合で質量損失率は 20% を下回り、骨材

飛散抵抗性が確保できることが確認できた。次に、全空隙率と質量損失率の関係を 図-8 に示す。全空隙率と質量損失率には強い相関がうかがえる。全空隙率の質量損失率への影響を考慮すると、短繊維混入の影響の有無を判断することはできな

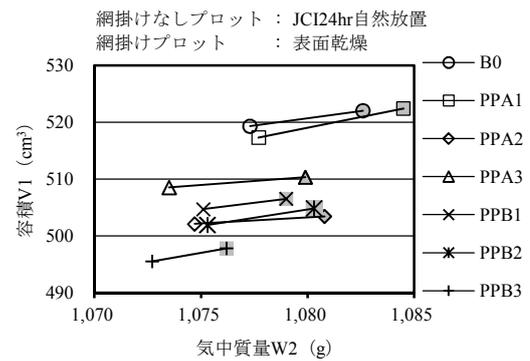


図-4 カンタブロ供試体の気中質量と容積

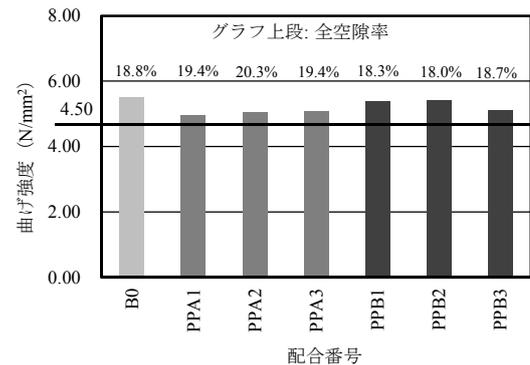


図-5 曲げ強度

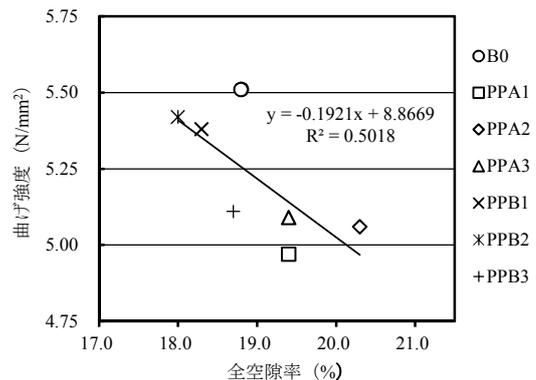


図-6 全空隙率と曲げ強度

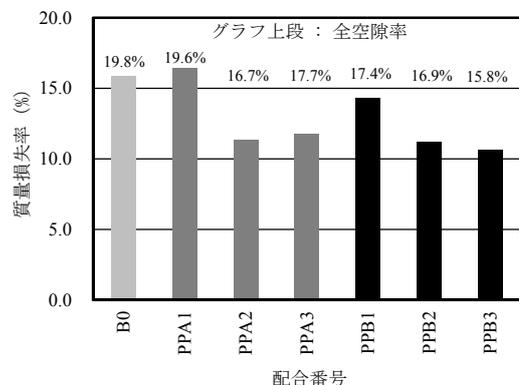


図-7 カンタブロ試験質量損失率

った。短繊維を混入すると、衝撃によりセメント硬化体にひび割れが発生した場合でも、短繊維とセメント硬化体の付着による架橋効果が発揮され、質量損失率の低下が期待できると考えたが、本実験ではその効果を確認できなかった。

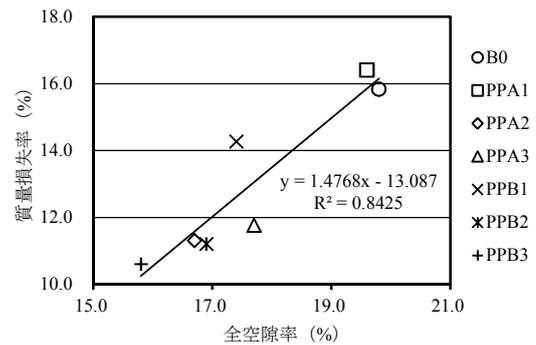


図-8 全空隙率と質量損失率

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- ① ダレ試験は、変動が大きいため明確な管理値を定めることは難しいが、容器表面に残った粗骨材を除去する方法のダレ率 0.110～0.245%の範囲では、目視観察でも異常なダレは認められず、概ね良好な POC 供試体を作製できた。
- ② 曲げ供試体の全空隙率は、設計空隙率を 2.5%程度上回った。配合修正や締固め方法の改善で、配合設計の的確性を向上させる必要があると考えられる。
- ③ 全空隙率を求める際に用いる気中質量の測定は、JCI 基準の 24hr 自然放置を行わなくても、圧縮空気で水滴を飛ばし、扇風機で表面乾燥させれば、JCI 基準とほぼ同じ空隙率が得られた。簡易法として採用できると考えられる。
- ④ 表面 24hr 自然乾燥による全空隙率試験において、予想以上に供試体容積が小さくなる現象を確認した。今後、この現象が実構造物に対して、どのような影響を及ぼすか確認する必要があると考えられる。
- ⑤ 早強ポルトランドセメント及び砕石 1005 を主材料として、W/C を 20%で配合設計することで、設計曲げ強度 4.5N/mm^2 を確保することができた。一方、今回使用した 2 種類の短繊維の混入（混入量=0.3%及び 0.5%の範囲）では、曲げ強度の改善効果は確認されなかった。
- ⑥ カンタブロ試験における質量損失率は、すべての配合で目安の 20%を下回り、骨材飛散抵抗性を確保可能と考えられる。一方、短繊維の混入による骨材飛散抵抗性の向上については明らかにできなかった。
- ⑦ 今後の課題は、フレッシュ性状の評価方法及び締固め方法の標準化による的確な配合設計方法の確立と考えられる。この課題の解決後、実験データを蓄積して解析することで、短繊維の有効性が確認できるものと考えられる。

6. おわりに

実験で使用したポリプロピレン短繊維は、萩原工業(株)からご提供頂きました。また、実験は広島地区生コンクリート協同組合 共同試験場及び(株)まるせ五日市工場のご協力によったことを報告させて頂き、改めて謝意を表します。

参考文献

- 1) (公社) 日本道路協会編：舗装施工便覧 平成18年度版、2006.2
- 2) (一社) セメント協会編：車道用ポーラスコンクリート舗装設計施工技術資料、pp.12-21、2007.10
- 3) 東日本高速道路(株)、中日本高速道路(株)、西日本高速道路(株) 編：設計要領 第一集 舗装編、pp35、2015.8