

重交通対応型繊維補強ポーラスコンクリートの実験的研究(2)

○栗津原 大輔*1 宅和 大助*1 砂田 栄治*1 古井 博*2 小出 貴夫*3

要旨：ポーラスコンクリートに短繊維を混入して曲げ強度及び質量損失率を改善し、重交通対応型繊維補強ポーラスコンクリートの実現可能性を見出すために3回の実験を行った。実験の結果、供試体作製時の締固め方法を標準化することにより、空隙率のバラツキを小さくすることができた。また、増粘タイプの混和剤を使用することで、締固め時のダレが小さくなり、連続した空隙の多い透水性の高い供試体が作製できるが、連続空隙率が大きくなるため曲げ強度が小さくなる傾向になることが分かった。さらに、ペーストに14種類の短繊維をバッチ毎に混入して曲げ強さ試験などを実施した結果、曲げ強さ向上効果などがある短繊維を見出すことができた。

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、骨材飛散抵抗性、カンタプロ試験、静弾性係数試験、ポリプロピレン短繊維、ワラストナイト、塩基系硫酸マグネシウム

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は曲げ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。本研究では、①生コン工場で製造可能で、②重交通に対応できるPOC舗装の実現を目指して3回の実験を行った。なお、POCの実験は平成25年度から実施しており、平成25年度及び平成26年度の実験結果は第19回生コン技術大会で発表した¹⁾（以下、既往の実験と略記）。

2. 実験概要

2. 1 実験Ⅰの概要

実験Ⅰの目的は、曲げ強度試験用供試体（以下、曲げ供試体と略記）及びカンタプロ試験用供試体（以下、カンタプロ供試体と略記）の締固め方法の標準化である。その後に標準化した締固め方法で供試体を作製して全空隙率試験を行い、全空隙率にバラツキがないかを確認した。また、曲げ強度試験及びカンタプロ試験も実施した。

2. 2 実験Ⅱの概要

既往の実験及び実験Ⅰで実施した曲げ強度試験は、すべての配合で設計曲げ強度の 4.5N/mm^2 を上回ったが、目標曲げ強度の 5.63N/mm^2 には達しなかった。実用化のためには曲げ強度は目標曲げ強度以上とする必要がある。実験Ⅱでは、方法aとしてペースト容積を増加し、粗骨材周りのペーストを厚くすること、方法bとしてW/Cを20%から18%に小さくしてペーストを強固にすることでPOCの曲げ強度などの性能を向上させることができないかを検証した。

2. 3 実験Ⅲの概要

既往の実験、実験Ⅰ及びⅡでは汎用性の高いポリプロピレン短繊維（以下、PP短繊維と略記）

*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

を使用した。しかし、実験で使用した PP 短繊維は繊維長が 12mm で、方向性があるため曲げ強度向上に寄与しにくいことや、PP 短繊維が POC から飛び出して性能を十分に発揮できないなどの課題があった。そこで、繊維径及び繊維長が非常に小さい粉末状の短繊維をペーストに混入し、ペーストを強固にすることで POC の曲げ強度などの性能を向上させることができるのではないかと考えた。実験Ⅲではペーストに 14 種類の短繊維をバッチ毎に混入し、ペーストの曲げ強さ試験、圧縮強度試験及び静弾性係数試験を行い、短繊維の効果を検証した。

3. 使用材料

実験Ⅰ、Ⅱ及びⅢで使用した材料を表-1に示す。表中の○印がそれぞれの実験の使用材料である。

表-1 使用材料

材料名	記号	種類	実験Ⅰ	実験Ⅱ	実験Ⅲ	備考
セメント	C	早強ポルトランドセメント	○	○	○	養生期間の短縮のため
水	W	上水道水	○	○	○	
粗骨材	G	砕石 1005	○	○	-	広島市安佐北区筒瀬産
混和剤	SP1	高性能減水剤	○	-	○	
	SP2	消泡剤 A	-	-	○	SP1 用
	SP3	高性能 AE 減水剤増粘一液タイプ	-	○	-	増粘タイプ
	SP4	消泡剤 B	-	○	-	SP3 用
短繊維	PPA	ポリプロピレン短繊維	○	○	-	繊維度 30decitex、繊維長 12mm
	PPB	ポリプロピレン短繊維	○	-	-	繊維度 13decitex、繊維長 12mm
	-	その他の短繊維	-	-	○	表-9 参照

表-2 実験Ⅰの配合

配合番号	短繊維混入率 (vol%)	
	PPA	PPB
B0	-	-
PPA1	0.15	-
PPA2	0.30	-
PPB1	-	0.25
PPB2	-	0.50

4. 実験Ⅰ

4.1 実験Ⅰの配合水準と目標性能

実験Ⅰの配合水準を表-2に、目標性能を表-3に示す。短繊維を混入しないケースをベース (B0) とし、PPA の混入率は容積分率で 0.15%及び 0.3%とし、PPA より繊維径の小さい PPB の混入率は 0.25%及び 0.5%とした。なお、W/C は 20%とした。

4.2 実験Ⅰの試験方法

(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ーを使用した。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。

(2) 供試体作製方法

曲げ供試体及びカンタブロ供試体の作製方法は表-4に示す 3 種類とした。方法 A は突き棒を用いて突き固める方法である。方法 B はスライド式ダンパーの柄を約 1m 上部から自由落下させて押し固める方法である。方法 C は鋼製のタンピング治具及び電動ハンマ (打撃回数 2900min^{-1}) を用いて打撃を与えて締め固

表-3 実験Ⅰの目標性能

性能	目標
設計曲げ強度	4.5N/mm ² (材齢 7 日)
目標曲げ強度	5.63N/mm ² (正規偏差 2、変動係数 10%)
連続空隙率	10%以上
全空隙率	15%以上
設計空隙率	16.5 (±1.5) %
質量損失率	20%以下 ²⁾
W/C	20%

表-4 実験Ⅰで試行した供試体作製方法

方法	断面寸法 (mm)	
	曲げ供試体	カンタブロ供試体
A	突き棒	φ 16mm
B	スライド式ダンパー	□ 90×200mm
C	鋼製タンピング治具と電動ハンマ	□ 100×200mm

める方法である。

曲げ供試体は $100\times 100\times 400\text{mm}$ の型枠を、カンタブロ供試体は $\phi 100\times 200\text{mm}$ の型枠を使用した。曲げ供試体を作製するときは、型枠容積に対して締固め率 100%となる理論質量分の試料を用いた。また、カンタブロ供試体を作製するときも同様に、 $\phi 100\times 63.5\text{mm}$ となる理論質量分の試料を用いた。

(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 $20\pm 2^\circ\text{C}$ 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 24 時間以上経過後に脱型し、所定の材齢まで $20\pm 2^\circ\text{C}$ の水中で養生した。

(4) 全空隙率試験

全空隙率試験は、(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)の「ポーラスコンクリートの空隙率の試験方法(案)」に準じて質量法で行った。曲げ供試体の乾燥方法は JCI 基準とは異なる、既往の実験で定めた表面乾燥方法とした。カンタブロ供試体の全空隙率試験は、JCI 基準に基づき気中質量及び供試体寸法を測定した。

(5) 曲げ強度試験及びカンタブロ試験

曲げ強度試験は「JIS A 1106 コンクリートの曲げ強度試験方法」、カンタブロ試験は「ZKT-214 ポーラスコンクリートのカンタブロ試験」に従って行った。

4. 3 実験 I の実験結果と考察

(1) 供試体作製方法の検討

方法 A 及び方法 B では、繰り返し締固めを行っても試料が型枠内に収まらなかった。一方、方法 C では、振動時間などを調整することで試料が型枠上面とほぼ等しくなるよう締固めを行うことができた。標準化した供試体作成方法を表-5 に示す。

表-5 実験 I で標準化した供試体作製方法

曲げ供試体	① 2層のほぼ等しい層に分けて詰める。投入後の試料表面はほぼ平坦となる様に均す。 ② 鋼製タンピング治具 ($100\times 200\text{mm}$) と電動ハンマを用いて、型枠の左、右、中央の順でそれぞれ 3 ± 1 秒を目安にダレが大きくなるよう振動を与えて締め固める。 ③ 底盤を外した型枠を上部にセットした後に 2層目の試料を投入する。2層目も同様に、試料が型枠上面とほぼ等しくなるよう振動を与えて締め固める。 ④ 上面の均しは、スライド式ダンパーなどを用いて、表面が平滑になるように仕上げる。
カンタブロ供試体	① 1層で詰める。 ② 鋼製タンピング治具 ($\phi 100\text{mm}$) と電動ハンマを用いて、 4 ± 1 秒を目安に供試体高さが 63.5mm になるよう振動を与えて締め固める。その後、1秒程度再度振動を与える。

(2) 全空隙率

各配合の全空隙率は、15.6~17.0%ですべての配合で設計空隙率 $16.5\pm 1.5\%$ の範囲内であった。既往の実験では、全空隙率は 18.0~20.3%で許容値に入らない配合もあったが、締固め方法の標準化により全空隙率のバラツキが改善されたと考えられる。

(3) 曲げ強度及びカンタブロ質量損失率

各配合の曲げ強度は $5.0\sim 6.0\text{N/mm}^2$ ですべての配合で設計曲げ強度 4.5N/mm^2 を上回ったが、目標曲げ強度 5.63N/mm^2 に達しない配合があった。また、質量損失率は 12.4~15.6%で目安の 20%を下回った。

5. 実験 II

5. 1 実験 II の配合水準と目標性能

配合水準を表-6に示す。目標性能は実験Ⅰと同じである。実験Ⅰのベースケースと同じ配合をベースケース(B0-20)とした。B0-20Zはペーストを増量、B0-18はW/Cが18%、PPA-0.3-20Zはペーストを増量し、PPAを容積分率で0.30%混入した。混和剤は、ダレ防止を目的として、高性能AE減水剤増粘剤一液タイプ(以下、増粘タイプと略記)及び消泡剤を使用した。

表-6 実験Ⅱの配合

配合番号	W/C	ペースト容積	短繊維混入率
	(%)	(L/m ³)	(Vol%)
B0-20	20	283	-
B0-20Z	20	326	-
B0-18	18	283	-
PPA-0.3-20Z	20	326	0.3

5.2 実験Ⅱの試験方法

供試体の作製は実験Ⅰで標準化した方法で行った。練混ぜ、供試体の養生、全空隙率試験、曲げ強度試験及びカンタブロ試験は実験Ⅰと同様の方法で行った。また、連続空隙率試験は、JCI基準ポーラスコンクリートの空隙率の試験方法(案)の容積法に従って行った。

5.3 実験Ⅱの実験結果と考察

(1) 全空隙率と連続空隙率

全空隙率・連続空隙率試験の結果及びの両者の差を表-7に示す。各配合の全空隙率は、16.9~18.7%であった。水セメント比を18%としたB0-18の全空隙率は18.7%で許容値を超えたが、その他の配合では許容値の16.5±1.5%以内であった。B0-18は混和剤の添加率及び練混ぜ時間を調整しても十分に練り混ぜられず、供試体作製が困難であったため、全空隙率が大きくなったと考えられる。

表-7 実験Ⅱの全空隙率及び連続空隙率

配合番号	全空隙率	連続空隙率	差
	%	%	%
B0-20	17.9	10.8	7.1
B0-20Z	17.8	15.9	1.9
B0-18	18.7	15.1	3.6
PPA-0.3-20Z	16.9	15.5	1.4

各配合の連続空隙率は10.8~15.9%で目標の10%以上を満足した。また、全空隙率と連続空隙率の差は1.4~7.1%であった。増粘タイプを使用したB0-20Z及びPPA-0.3-20Zは全空隙率と連続空隙率の差がそれぞれ1.9%及び1.4%と小さかった。これは、増粘タイプの粘性効果によりダレにくくなり、連続した空隙が多くなったためと考えられる。既往の報告³⁾では全空隙率と連続空隙率との差は最大5%程度とされているが、増粘タイプを使用した場合、全空隙率と連続空隙率との差を2%程度とすることができる可能性がある。

(2) 曲げ強度とカンタブロ質量損失率

曲げ試験及びカンタブロ試験の結果を表-8に示す。曲げ強度は4.4~5.8N/mm²であった。B0-20Zの曲げ強度は4.4N/mm²で設計曲げ強度に達しなかった。また、PPA-0.3-20Zの曲げ強度も4.6N/mm²であり、増粘タイプを使用した場合、曲げ強度が小さくなる傾向にあった。これは、増粘タイプは連続空隙率が大きいこと、透水性は向上するが、曲げ強度は小さくなる傾向があると考えられる。増粘タイプを使用する場合は、全空隙率と連続空隙率の差を2%程度とし、設計空隙率は連続空隙率を10%以上とするために13.5±1.5%程度(下限値12%)に設定して曲げ強度の向上を図る必要があると考える。

表-8 実験Ⅱの曲げ強度と質量損失率

配合番号	曲げ強度	質量損失率
	N/mm ²	%
B0-20	5.8	14.0
B0-20Z	4.4	18.7
B0-18	4.9	15.0
PPA-0.3-20Z	4.6	13.3

質量損失率は、13.3~18.7%ですべての配合で目標値の20%を下回った。しかし、B0-20Zの質量損失率は他と比べて18.7%と大きかった。これは、連続した空隙が多いB0-20Zは、空隙の周りがペーストで囲まれた独立した空隙が多いB0-20に比べて衝撃に対する抵抗性が低くなるためと考える。また、PPA-0.3-20Zの質量損失率がB0-20と同程度だったのは、短繊維PPAの剥落防止効果が発揮されたためと推察される。

6. 実験Ⅲ

6. 1 実験Ⅲの配合水準

使用した短繊維の種類を表-9に示す。W/C は練混ぜが十分できるようにすべて25%とした。短繊維を混入しない配合をベースケース (B0) とした。短繊維を混入するケースでは混入率を容積分率で 0.5% とし、残りの 99.5%分の容積を W/C = 25% のペーストとした。SF の混入率はセメント質量の 10%としてセメントと置換し、水結合材比 25%とした。ペーストのフレッシュ性状は、「JIS R 5201 セメントの物理試験方法 12 フロー試験」により、150±15mm のフロー値となるよう SP1 の添加率を調整した。また、エア混入による試験結果への影響を抑えるために消泡剤 (SP2) を使用した。

6. 2 実験Ⅲの試験方法

曲げ強さ試験、圧縮強度試験及び静弾性係数試験の試験方法を表-10に示す。

6. 3 実験Ⅲの実験結果と考察

曲げ強さ試験、圧縮強度試験及び静弾性係数試験の結果を表-11に示す。

(1) 曲げ強さ

短繊維を混入した配合の曲げ強さは GLA2、AT 及び SF を除いて B0 より大きかった。特に、PP3、GLA1、WA2、WA3、WA4 及び MA は B0 に比べ 10%以上曲げ強さが向上した。一方で、GLA2、AT 及び SF で曲げ強さが小さかった。これは、後者の短繊維を混入するとペーストの粘性が増加して締固めが難しかったため、供試体に気泡などの欠陥ができたことが原因と考えられる。

(2) 圧縮強度

短繊維を混入した場合の圧縮強度を B0 と比較すると、PP3 及び MA 以外は低下した。MA は圧縮強度の増加が最も大きく、10%以上増加した。また、PVA2 及び AT は約 30%低下した。

(3) 静弾性係数

B0 の静弾性係数が 29.3N/mm²であった

表-9 実験Ⅲの短繊維の種類

配合番号	短繊維	寸法	
		断面	長さ
B0	-	-	-
PP1	ポリプロピレン	φ 42.6μm	6mm
PP2	ポリプロピレン	40×220 μ m	3mm
PP3	ポリプロピレン	40×220 μ m	6mm
PVA1	ビニロン	φ 27μm	6mm
PVA2	ビニロン	φ 200μm	6mm
GLA1	ガラス	十数 μm	9mm
GLA2	ガラス	十数 μm	数十～数百 μm
WA1	ワラストナイト	D50 (約 18μm)	15～2000μm
WA2	ワラストナイト	D50 (約 8μm)	約 156μm
WA3	ワラストナイト	D50 (約 5μm)	約 156μm
WA4	ワラストナイト	11μm	7～9μm
AT	アタパルジャイト	0.1μm	-
MA	塩基系硫酸 マグネシウム	0.5～1.0μm	8～30μm
SF	シリカフェーム	0.15μm	-

表-10 実験Ⅲの試験方法

試験	試験方法
曲げ強さ試験	<ul style="list-style-type: none"> ・ JIS R 5201 セメントの物理試験方法 (11.強さ試験) ・ テーブルパイプレーターを用いて 2 層に詰めて成形する。 ・ 24hr 以上経過後に脱型し、材齢 7 日まで 20±2℃で水中養生する。
圧縮強度試験	<ul style="list-style-type: none"> ・ JSCE-F 506-2010 モルタルまたはセメントペーストの圧縮強度試験用円柱供試体の作り方 ・ 型枠内に試料を連続して流し込み、テーブルパイプレーターを用いて充填する。 ・ JSCE-G 505-2013 円柱供試体を用いたモルタルまたはセメントペーストの強度試験方法 (案) ・ 24hr 以上経過後に脱型し、材齢 7 日まで 20±2℃で水中養生する。 ・ 両面研磨し、圧縮強度試験を行う。
静弾性係数試験	<ul style="list-style-type: none"> ・ JIS A 1149 コンクリートの静弾性係数試験方法 ・ 供試体表面を乾燥させてひずみゲージを取り付け、圧縮強度試験と同時に静弾性係数試験を行う。

表-11 実験Ⅲの曲げ強さ・圧縮強度・静弾性係数

配合番号	短繊維	曲げ強さ N/mm ²	圧縮強度 N/mm ²	静弾性係数 kN/mm ²
B0	-	13.9	89.0	29.3
PP1	ポリプロピレン	15.2	73.7	28.2
PP2	ポリプロピレン	15.0	88.5	26.7
PP3	ポリプロピレン	15.6	89.2	22.5
PVA1	ビニロン	15.0	72.3	27.0
PVA2	ビニロン	14.6	62.0	28.0
GLA1	ガラス	15.9	69.3	26.4
GLA2	ガラス	13.9	71.8	27.7
WA1	ワラストナイト	14.4	74.1	27.6
WA2	ワラストナイト	15.4	77.3	20.9
WA3	ワラストナイト	16.4	81.1	25.9
WA4	ワラストナイト	15.6	76.6	27.9
AT	アタパルジャイト	13.6	62.7	27.8
MA	塩基系硫酸 マグネシウム	15.6	97.5	28.8
SF	シリカフェーム	12.2	71.8	27.2

のに対し、短繊維を混入し場合の静弾性係数は、20.9～28.2kN/mm²とすべての配合で低下した。特に、PP3及びWA2は約20%低下した。

(4) POCの性能向上に有効な短繊維の選定

短繊維の混入により曲げ強さ、圧縮強度及び静弾性係数が前述のような結果になった原因は、本実験だけでは明確に説明することはできない。しかし、POCの曲げ強度向上や質量損失率の低減などができる可能性の高い短繊維を選定することはできると考える。ペーストの曲げ強さが大きい方がPOCの曲げ強度向上に寄与する可能性がある。また、圧縮強度及び静弾性係数が大きいと脆性破壊しやすく質量損失率が大きくなる可能性があり、大きいから有利とはいいいきれない。実験結果とコストも加味し、曲げ強度は大きい圧縮強度及び静弾性係数の小さいWA3と、曲げ強度及び圧縮強度が大きく静弾性係数がB0とほぼ同等のMAが、POCの性能向上に寄与する可能性があるかと推定した。

7. まとめと課題

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 本研究の重交通対応型繊維補強POCは、生コン工場で比較的入手が容易な早強ポルトランドセメントなどが主材料であることや各種短繊維を投入した場合の練混ぜ性能が良好であることから、生コン工場で製造可能であると考えられる。ただし、曲げ強度は設計基準強度や目標強度を下回る場合があり、重交通に対応するには曲げ強度向上などが課題となる。
- (2) 曲げ及びカンタブロ供試体の作製方法を標準化し、全空隙率のバラツキを小さくすることができた。
- (3) 増粘タイプの混和剤を使用することで、締固め時のダレを小さくでき、全空隙率と連続空隙率の差が2%程度になることが分かった。この場合、連続空隙率を10%以上とするための設計空隙率は、13.5±1.5%（下限値12%）と設定できる。よって、設計空隙率は16.5±1.5%から13.5±1.5%程度と小さく設定できるため、曲げ強度の向上や質量損失率の低減効果が期待できる。
- (4) 短繊維を混入したペーストの曲げ強さ試験、圧縮強度試験及び静弾性係数試験の結果から、ワラストナイトや塩基系硫酸マグネシウムなどの短繊維は、POCの曲げ強度向上や質量損失率低減に寄与する可能性があることが分かった。

今後の課題として、増粘タイプの混和剤を使用することでPOCの曲げ強度が低くなる傾向にあることが挙げられる。そのため、上記の知見を基に、設計空隙率を小さくした配合とし、曲げ強度向上などが期待できる短繊維を用いてPOC実験を行い、曲げ強度向上効果などを検証する必要がある。

8. おわりに

短繊維及び混和材は多くの繊維・混和材メーカーから、混和剤はコンクリート用化学混和剤協会からご提供いただきました。また、実験は広島地区生コンクリート協同組合 共同試験場及び中国生コンクリート(株)広島工場の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) 宅和大助、砂田栄治、古井博、小出貴夫、坂本英輔：重交通型短繊維補強ポラスコンクリートの実験的研究、第19回生コン技術大会研究発表論文集、pp.159-164、2017.4
- 2) 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
- 3) (一社)セメント協会編：車道用ポラスコンクリート舗装設計施工技術資料、pp.12、2007.10