高強度プレストレストコンクリートポールのクローズドリサイクルに関する調査研究

RESEARCH STUDY ON CLOSED RECYCLE OF HIGH STRENGTH PRESTRESSED CONCRETE POLE

船本憲治 ——— * 1

キーワード:

コンクリートポール, 再生骨材, クローズドリサイクル, 強度特性, 乾燥収縮, クリープ

Keywords:

Concrete pole, Recycle aggregate, Closed recycle, Strength property, Drying shrinkage, Creep

Kenji FUNAMOTO ——— * 1

This paper describes the results of research study on closed recycle of high strength prestressed concrete pole. As the result, the main conclusions are as follows. 1) The quality of recycled coarse aggregate made from used concrete poles corresponds to the recycled aggregate class M. 2) The quality of recycled fine aggregate made from used concrete poles corresponds to the recycled aggregate class L. 3) There is a possibility that recycled aggregate made from used concrete pole can be applied for new concrete pole, if natural aggregate is replaced with a part of recycle aggregate.

1. はじめに

高強度プレストレストコンクリート（以下、HPC）ポールは、配電、通信、鉄道等の用途に広く用いられおり、建築分野では、防球ネット柱や夜間照明柱等の工作物として一般的に利用されている。しかし、経年劣化や折損等により、電柱の年間撤去量だけでも全国で20万tとも言われている¹⁾。

HPC ポールは、現在、破碎された後、ほとんどが再生路盤材として利用されているが、今後は路盤材の需要も減少することが考えられ、路盤材以外での活用法として、HPC ポールクローズドリサイクルに関する研究や一部実用化が進められている。しかし、遠心成形を行ったHPC ポールから製造される再生骨材を、コンクリート用骨材として用いるためには、幾つかのJIS規格の制約を受け、限られた範囲での利用に留まっているのが実情である。

そのような状況のなか、JIS規格等の課題を解決し、アルカリ骨材反応性も含め履歴が明確なHPC ポール起源再生骨材をクローズドリサイクルにより活用していくためには、まず、その品質を把握すると共に、特に、コンクリートとしての乾燥収縮やクリープ等の耐久性を明らかにしていくことが必要である。

そこで、本報告は、HPC ポールクローズドリサイクルの現状を把握し今後の普及へ資するべく、既往文献により、HPC ポール起源再生骨材の品質およびそれをを用いたコンクリートとしての強度、乾燥収縮、クリープの特性に関して検討を行ったものである。

2. HPCポールクローズドリサイクルに関連するJISの現状

JISA5021（コンクリート用再生骨材H）の解説の「5.2 適用範囲」では、遠心成形を行った高強度コンクリート製品から製造される再生骨材は、①大量のセメントペーストによるアルカリシリカ反応への影響が不明確である、②乾燥収縮ひび割れが生じやすくなるおそれがあるとの理由により、この規格の対象外となっている。

また、JISA5364（プレキャストコンクリート製品）では、①乾燥収縮およびクリープが大きくプレストレスの損失が大きくなる、②緊張力を受けた鋼材を保護する性能が明確でないとの理由から、PC製品の場合には再生骨材を使用してはならないとなっている。

3. HPCポールの概要

HPC ポールの形状は、テーパ1/75の中空さい頭円すい体で、壁厚は50~100mm程度、かぶり厚は10mm程度である。コンクリート設計基準強度は50~80N/mm²程度で、主筋はPC鋼材（緊張材および非緊張材）から成り、PC鋼材によりコンクリート設計基準強度の10~15%程度のプレストレスが導入されている。また、横拘束形式としてスパイラルまたはフープ形式が用いられ、変形能力に優れた構造となっている²⁾。

コンクリートの配合は、コンクリート強度が高いこともあり、通常の現場打設コンクリートに比べて水セメント比が小さく、結合材量が多くなり、粘性が高い特徴を有している。

HPC ポールの製造は、遠心力締固め方法により成形を行い、その日のうちに蒸気養生（65℃程度）を行い、その後、オートクレーブ（AC）養生（10気圧、180℃程度）または気中養生を行っている。

上記のように、HPC ポールは、遠心力締固め方法による成形のため、密度の大きいコンクリート材料が製品の外側に分布することになり、密度の小さい水が搾り出され、外側から内側に向かってコンクリート層、モルタル層、ペースト層が形成されている。なお、その時、搾り出される水の影響を考慮した修正水セメント比と強度との相関が良いとの報告³⁾もなされている。

4. HPCポール起源再生骨材の製造方法および生産体制

HPC ポール起源再生骨材に関する既往文献を調査した結果、3つの機関で検討がなされており、製造方法および生産体制として、CASE1~3を下記に記載する。

¹⁾ 九州高圧コンクリート工業(株) 技術本部長・博士（工学）
（〒828-0021 福岡県豊前市八屋 2544-61）

¹⁾ Engineering Division Manager, Kyushu Kouatsu Concrete Industries Co., Dr. Eng.

なお、各設備名称等において各ケースで不整合と思われる表記もあるが、ここではその詳細を既往文献以外では把握できていない、各文献に記載されている表現をそのまま記載した。

(1) CASE 1⁴⁾

筆者らが検討している文献 4)では、HPC ポールを一次処理として圧縮式破砕機（スクリーンクラッシャー）で破砕を行い、鉄屑とコンクリート塊（40mm 以下）に分離し、その後、二次処理としてインパクトクラッシャーを用い、振動スクリーンにて粗骨材（5～13mm）と細骨材（5mm 以下）に分級している。

本方法による製造工場は 2 箇所存在し、A 工場は平成 10 年より、B 工場は平成 24 年 11 月より生産が開始されている。ただし、前述のように JIS の制約があり、両工場とも、一部のコンクリート二次製品を、別途、ユーザーと取り決めた仕様書に基づき製造している。なお、A 工場は粗骨材と細骨材を、B 工場は粗骨材のみを生産している。

そのうち B 工場では、アルカリ骨材反応に対して無害の骨材を使用して 1986 年以降に自社で製造した履歴が明確な HPC ポールを起源とした再生骨材を用い、粗骨材置換率 10%で配電用コンクリート柱のクローズドリサイクルが実用化されている。

(2) CASE 2^{1),5)～8)}

文献 1), 5)～8)では、HPC ポールを重機にて適当な長さに切断した後、同機で一次粗破壊して鋼材の分別を行っている。その後、インパクトクラッシャーにより二次破砕し、同時に磁選機にかけて鋼材を除去して、コンクリート塊（40mm 以下）を得ている。最後に、コンクリート塊のふるい分けを行い、粗骨材（5～15mm）と細骨材（5mm 以下）の生産を行っている。なお、本方法は、現在検討段階であり、まだ実用化はなされていない。

(3) CASE 3^{9),10)}

文献 9)では、HPC ポールを鋼線切断刃付き油圧ショベル破砕機を用いて一次破砕処理を行い、コンクリート塊と鋼線とを選別している。次に、選別したコンクリート塊を、破砕型クラッシャーを用いて粒径 0～40mm 程度の範囲に二次破砕処理を行っている。その後、

振動スクリーンおよびスパイラル式分級機を用いて粗骨材（5～15mm）と細骨材（5mm 以下）に分級している。なお、本方法により、配電用コンクリート柱のクローズドリサイクルが平成 20 年 2 月より実用化されている¹⁰⁾。

5. 製造方法 CASE 1 における HPC ポール起源再生骨材の品質

再生粗骨材の品質を表 1 に、再生細骨材の品質を表 2 に、再生骨材の不純物量を表 3 に示す。なお、A 工場は至近 3 年間の月 1 回の合計 36 回（不純物量は至近月 1 回の 15 回）、B 工場は過去 1 年間の月 1 回の合計 12 回の試験結果である。

(1) 再生粗骨材（A 工場、B 工場）

両工場とも、平均値では再生骨材 H 規格を満足できる品質であるが、製品の品質変動や前述の JIS 規格を考慮し、再生骨材 M 規格相当品として生産されている。

絶乾密度は、A 工場は製品の品質変動を考慮すると H 規格を満足できないが、B 工場は品質変動を考慮しても H 規格を満足できる。これは、両工場に入荷されている HPC ポールの品種が異なり、B 工場の方が、元々、密度の大きい骨材を使用していた B 工場製造の既設 HPC ポールを現在破砕処理しているためであると推察される。

吸水率および微粒分量は、両工場とも、平均値では再生骨材 H 規格を満足する品質であるが、製品の品質変動を考慮すると H 規格を超過する場合がある。

なお、実績率および塩化物量は、製品の品質変動を考慮しても規格値を満足する。

(2) 再生細骨材（A 工場）

ほぼ再生骨材 M 規格に相当しており、再生骨材 M 規格相当品として生産されている。

絶乾密度および吸水率は、平均値でも H 規格を満足できず、再生骨材 M 規格に相当している。

微粒分量は、製品の品質変動を考慮しても H 規格を満足する。

なお、実績率および塩化物量は、製品の品質変動を考慮しても規格値を満足する。

(3) 不純物量（A 工場、B 工場）

HPC ポールの場合、不純物としては、足場ソケット類のプラスチック片が考えられるが、他には不純物が混入する可能性は少なく、表 3 の不純物量もその想定を裏付けており、十分に JIS 規格上限値以下となっている。

表 1 再生粗骨材の品質

再生粗骨材 (1305)		JIS ランク	絶乾 密度 (g/cm ³)	吸水 率 (%)	微粒 分量 (%)	実績 率 (%)	塩化物 (NaCl) (%)	摩耗 減量 (%)
A 工場	平均(N=36)	M	2.55	2.57	0.9	57.4	0.004	18.0
	標準偏差		0.03	0.26	0.3	0.5	0.001	1.2
B 工場	平均(N=12)	M	2.62	2.72	0.7	58.1	0.018	—
	標準偏差		0.04	0.18	0.3	0.6	0.007	—
JIS 規格 値	H	—	≥2.50	≤3.0	≤1.0	≥55	≤0.04	≤35
	M		≥2.30	≤5.0	≤2.0			—
	L		—	≤7.0	≤3.0			—

表 2 再生細骨材の品質

再生細骨材		JIS ランク	絶乾 密度 (g/cm ³)	吸水 率 (%)	微粒 分量 (%)	実績 率 (%)	塩化物 (NaCl) (%)
A 工場	平均(N=36)	M	2.35	4.1	4.1	56.1	0.004
	標準偏差		0.03	0.2	0.9	1.1	0.001
JIS 規格 値	H	—	≥2.50	≤3.5	≤7.0	≥53	≤0.04
	M		≥2.20	≤7.0	≤8.0		
	L		—	≤13	≤10		

表 3 再生骨材の不純物量

再生粗骨材 (1305)		JIS ランク	不純物量 (%)							
			A	B	C	D	E	F	G	合計
A 工場	平均(N=15)		0	0	0	0	0.039	0.023	0.000	0.062
	標準偏差	M	0	0	0	0	0.016	0.013	0.000	0.023
B 工場	平均(N=12)	M	0	0	0	0	0.031	0.002	0.011	0.044
	標準偏差		0	0	0	0	0.015	0.002	0.008	0.008
JIS 規格 上限 値	H	—	1.0	0.5	0.1	0.5	0.1 蒸気 養生	0.1	1.0	2.0
	M		2.0				0.5			3.0
	L		—				—			—

A：タイル，れんが，陶磁器類，アスファルトコンクリート塊

B：ガラス片，C：石こう，石こうボード片

D：C以外の無機系ボード片，E：プラスチック片

F：木片，竹片，布切れ，紙くず，アスファルト塊

G：アルミニウム，亜鉛以外の金属片

6. HPCボール起源再生骨材に関する文献調査

6.1 再生骨材の品質

文献 1), 4)～10)を基に、HPC ボール起源再生骨材の品質を比較したものを表 4 に示す。

表 4 によると、全体的な評価として、製造方法 CASE1 の骨材性能が他のケースの骨材性能より良い結果が得られている。これは、前述の「4. HPC ボール起源再生骨材の製造方法および生産体制」に示した製造方法の違いによるものと考えられるが、詳細は既往文献以外に直接確認できていなく、今後の課題としたい。

(1) 再生粗骨材

絶乾密度および吸水率は、文献 4)ではほぼ再生骨材 H 規格を満足しているが、その他の文献はほぼ M 規格相当品となっている。

一方、微粒分量は、再生骨材 M 規格を満足しており、実績率および塩化物量も規格を満足している。

上記の結果、再生粗骨材は、平均値では再生骨材 JIS の H 規格を満足できる場合もあるが、製品の品質変動も考慮すると、一般的には、再生骨材 M 規格相当品となっている。

(2) 再生細骨材

絶乾密度は、文献 4), 5)では再生骨材 M 規格を満足しているが、その他の文献は満足できていない。

吸水率は、文献 4)では再生骨材 M 規格を満足しているが、その他の文献は L 規格となっている。

一方、微粒分量はほぼ再生骨材 H 規格を満足し、実績率および塩化物量は規格を満足している。

上記の結果、再生細骨材は、再生骨材 JIS の M 規格を満足しているものもあるが、一般的には、再生骨材 L 規格相当品となっている。

6.2 コンクリートの強度・乾燥収縮・クリープ特性

HPC ボール起源再生骨材コンクリートに関する既往文献の試験水準を、再生骨材置換率や耐久性試験に着目して纏めたものを表 5 に示す。また、各文献毎に、強度、乾燥収縮、クリープ特性に関して得られた試験結果を表 6 に示すが、その中で以下に示すような特性が得られている。なお、試験体は、HPC ボールを対象とし、φ20cm×H30cm (t=4cm) の遠心成形中空円筒形供試体であり、クリープ試験の載荷応力は HPC ボールの実プレストレス量(コンクリート設計基準強度の 10～15%程度) から 10N/mm²としている。

(1) 再生骨材置換率

表 5 によると、再生骨材置換率に関して、各文献で目標とする値が異なっている。製造方法 CASE1 の文献 4) では、実機での安全側の運用を考慮し、粗骨材のみの 10%置換となっていると推察される。一方、製造方法 CASE2 の文献 1), 6)～8)では、粗骨材置換率 50%、細骨材置換率 25%を目標として検討がなされている。また、製造方法 CASE3 の文献 9), 10)では、粗骨材置換率 25%かつ細骨材置換率 25%を目標として検討がなされている。

(2) 強度特性

圧縮強度は、粗骨材による影響は小さく、骨材置換率 50%までは強度低下は僅かであり^{6),7)}、所定材齢で調合強度 65N/mm²を満足でき、電柱のクローズドリサイクルとして実用化できる⁸⁾。一方、細骨材の影響が大きく、骨材置換率 50%以上では著しい強度低下が生じ⁶⁾、置換率 25%から 50%にかけても大きな強度低下となる⁷⁾。

また、粗骨材および細骨材を 25%まで置換した圧縮強度は、無置換と同程度は確保できる⁹⁾。

(3) 乾燥収縮およびクリープ特性

乾燥収縮は、粗骨材置換による影響は比較的小さいが、細骨材置換による影響が大きい⁶⁾。

粗骨材を 50%まで置換したコンクリートの乾燥収縮およびクリープは、水セメント比が小さくかつ遠心成形の為、十分な品質(乾燥収縮 350μ, クリープ係数 0.7 程度)が確保できる⁸⁾。

また、粗骨材および細骨材を 25%まで置換したコンクリートの乾燥収縮は、無置換に対して 1.16 倍と若干増加するが、クリープ係数は無置換と同程度である⁹⁾。

表 5 HPC ボール起源再生骨材コンクリートの既往試験水準

製造方法	文献 No	目標製品	JIS ランク	再生骨材置換率 (%) *										耐久性試験項目				
				粗骨材					細骨材									
				粗骨材	細骨材	10	15	25	50	100	15	25	50	100	乾燥 収縮	クリー プ	中性 化	凍結 融解
CASE 1	4)	ボ ー ル	M		◎										○	○		
CASE 2	6) 7)		M	L				◎	◎	○	◎	◎	○	○	○		○	○
	8)		M					◎	◎							○	○	○
CASE 3	9) 10)		M L	L			◎	◎				◎	◎			○	○	

*◎は各文献で品質が確保できると報告されている置換率

表 4 HPC ボール起源再生骨材の品質比較

製造方法	再生骨材規格No 文献No	再生粗骨材							再生細骨材					
		JIS ランク	最大 粒径 (mm)	絶乾 密度 (g/cm ³)	吸水 率 (%)	微粒 分量 (%)	実績 率 (%)	塩化物 (NaCl) (%)	JIS ランク	絶乾 密度 (g/cm ³)	吸水 率 (%)	微粒 分量 (%)	実績 率 (%)	塩化物 (NaCl) (%)
—	JIS A 5021	H	—	≧2.5	≦3.0	≦1.0	≧55	≦0.04	H	≧2.5	≦3.5	≦7	≧53	≦0.04
	JIS A 5022	M	—	≧2.3	≦5.0	≦2.0			M	≧2.2	≦7.0	≦8		
	JIS A 5023	L	—	—	≦7.0	≦3.0			L	—	≦13	≦10		
CASE 1	文献4)	M	13	2.50～ 2.69	1.90～ 2.93	0.3～ 1.5	56.6～ 59.5	0.004～ 0.026	M	2.28～ 2.41	3.00～ 4.30	2.1～ 5.6	55.0～ 58.5	0.001～ 0.004
CASE 2	文献5)	M	15	2.41～ 2.43	3.63～ 3.97	0.23～ 0.43	58	—	L	2.22～ 2.23	7.60～ 7.70	3.04～ 7.10	—	—
	文献6), 7)	M	15	2.4	4.47	1.07	59.3	—	L	2.11	9.07	5.04	—	—
	文献8)	M	15	2.4	3.97	—	—	—						
CASE 3	文献9), 10)	M L	15	2.32～ 2.49	2.9～ 5.6	—	—	—	L	2.04～ 2.21	7.10～ 11.4	—	—	—

表 6 HPC ポール起源再生骨材コンクリートの既往試験結果

製造方法	文献 No	目標製品	製造方法	水セメント比 (%)	JIS ランク		コンクリート試験結果	
					粗	細	強度特性	乾燥収縮・クリープ
CASE 1	4)	ポール	遠心成形	32	M		再生粗骨材置換率10%であり、無置換と同等	再生粗骨材置換率10%であり、乾燥収縮およびクリープは無置換と同等となり、クリープ係数は0.78で電柱の実設計の2.0より小さい
CASE 2	6) 7)			27 ~ 45	M	L	強度への影響は、粗骨材では小さく、細骨材で大きい 粗骨材置換率50%までは強度低下は僅か 細骨材置換率50%以上では著しい強度低下 細骨材置換率25%から50%にかけ大きな強度低下	乾燥収縮は、粗骨材置換による影響は比較的小さいが、細骨材置換による影響が大きい
	8)			35 ~ 43	M		粗骨材を50%まで置換したコンクリートは、所定材齢で調合強度65N/mm ² を満足でき、電柱のクローズドリサイクルとして実用化できる	粗骨材を50%まで置換したコンクリートの乾燥収縮およびクリープは、遠心成形の為、十分な品質を確保でき、乾燥収縮は材齢26週で350 μ 、クリープ係数は0.70~0.71で電柱の実設計の2.0より小さい
CASE 3	9) 10)			36	M L	L	再生粗骨材および細骨材を25%まで置換した強度は、無置換と同等もしくはそれ以上	再生粗骨材および細骨材を25%まで置換したコンクリートの収縮ひずみは、置換率が大きくなるほど若干増加(25%置換で無置換の1.16倍)するが、クリープ係数は、乾燥後日数160日で0.9と無置換とほぼ同程度

7. まとめ

今回、既往文献により、筆者らが実施中である再生骨材の製造方法も含め、3つの異なる製造方法で生産される HPC ポール起源再生骨材の品質を下記のように明らかにできた。また、今後の HPC ポールのクローズドリサイクルに向け、骨材置換率を基に強度、乾燥収縮、クリープ特性に関して、下記の知見が得られた。

- 1) 再生粗骨材は、平均値では再生骨材 JIS の H 規格を満足できる場合もあるが、製品の品質変動も考慮すると、一般的には、再生骨材 M 規格相当品となっている。
- 2) 再生細骨材は、再生骨材 JIS の M 規格を満足しているものもあるが、一般的には、再生骨材 L 規格相当品となっている。
- 3) 再生骨材の不純物としては、足場ソケット類のプラスチック片が考えられるが、他には不純物が混入する可能性は少なく、再生骨材 JIS の H または M 規格を十分満足できている。
- 4) コンクリートとしての強度および乾燥収縮は、再生粗骨材置換による影響は小さく、再生細骨材置換による影響が大きい。
- 5) 粗骨材を 10%まで置換したコンクリートは、強度、乾燥収縮、クリープ特性において、無置換の場合と比較して差異は見受けられない。
- 6) 粗骨材を 50%まで置換したコンクリートは、強度低下は僅かであり、乾燥収縮およびクリープ特性は、水セメント比が小さかつ遠心成形の為、十分な品質が確保できる。
- 7) 粗骨材および細骨材を 25%まで置換したコンクリートの強度低下は見られず、乾燥収縮は若干増加するが、クリープ係数は無置換と同程度である。

ただし、上記の知見は限られた既往文献での結果であり、今後、製造方法の詳細検討、骨材品質とコンクリート性能の相関関係、またそれらを踏まえた製造方法の改善、更にアルカリ骨材反応抑制対策等、HPC ポールのクローズドリサイクルに向け、更なるデータの蓄積と分析が必要と考える。

参考文献

- 1) 小山明男・濱田康平・本間雅人ほか：撤去コンクリート電柱を用いた再生骨材コンクリートの性状に関する研究，日本建築学会構造系論文集第 74 巻第 643 号，pp.1537-1542，2009.9
- 2) 船本憲治・藤祐介：高強度プレストレストコンクリートボールの曲げ変形性能に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），pp.849-850，2013.8
- 3) 船本憲治・藤祐介・古賀智博ほか：遠心成形した高強度コンクリート製品の基本性状に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1541-1546，2006
- 4) 船本憲治：プレストレストコンクリートボール起源再生骨材の品質に関する研究，日本建築学会九州支部研究報告集，第 53 号，pp.125-128，2014.3
- 5) 本間雅人：廃コンクリートボールから製造した再生骨材の品質試験，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），pp.651-652，2006.9
- 6) 沖倉大善・小山明男・本間雅人ほか：撤去電柱から製造される再生骨材を用いたコンクリートの基礎性状に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），pp.141-144，2007.8
- 7) 本間雅人・青山裕之・小山明男ほか：撤去電柱由来の再生骨材コンクリートの実用化に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）（関東），pp.1071-1072，2010.9，pp.255-256，2011.8
- 8) 濱田康平・小山明男・本間雅人ほか：コンクリート電柱のクローズドリサイクルに関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集（中国），pp.1153-1156，2008.9
- 9) 田中雅章・大村剛・前田直文ほか：廃棄コンクリート柱から製造される再生骨材を活用した遠心締固めコンクリート柱に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.2，pp.355-360，2007
- 10) 中国高圧コンクリート工業(株)広島工場：配電用コンクリート柱のクローズドリサイクル推進に向けた取り組み，コンクリートテクノ，Vol.29，No.2，pp.48-51，2010.2

[2014 年 5 月 9 日原稿受理 2014 年 8 月 19 日採用決定]