

論文 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

田中 雅章^{*1}・大村 剛^{*2}・岩田 数典^{*3}・前田 直文^{*4}

要旨：中国地方では、年間約 4,000 本もの配電用コンクリート柱が廃棄されており、これらを路盤材などとして再資源化する取り組みが進められている。この廃棄コンクリート柱を再びコンクリート柱の骨材として有効利用することによる環境負荷低減を目的として、再生骨材の特徴、再生骨材を用いたコンクリート柱の物性に関する検討、実物大のポール曲げ試験による構造特性の検討を行った。その結果、再生骨材置換により無置換と同等もしくはそれ以上の強度発現性およびポール構造性能を有することが明らかとなった。これらは結合水量の測定結果から再生骨材置換によるセメント水和率の増加によるものと推察された。

キーワード：再生骨材，遠心締固め，コンクリート柱

1. はじめに

送電・配電を目的とする電柱は、従来木製のものが多かったが、昭和初期ごろから耐久性や耐火性に優れたコンクリート製の電柱（コンクリート柱）が製造され始め、中国地方においては 1960 年代から本格的に供用されている。近年、中国地方においては、経年劣化および交通事故等による破損により、年間約 4,000 本ものコンクリート柱が廃棄されており、コンクリートのリサイクル推進の観点から、これらを再資源化する取り組みが進められている。

再生骨材については、2005 年 3 月に高品質な再生骨材が JIS A 5021（コンクリート用再生骨材 H）として、また 2006 年 3 月には低品質な再生骨材を利用したコンクリートが JIS A 5023（再生骨材 L を用いたコンクリート）として規格化されており、再生骨材のコンクリート骨材としての有効利用体制が整いつつある。しかしながら、廃棄コンクリート柱から製造される再生骨材については、道路用路盤材への利用のみに留まっております。今後、良質な天然骨材が不足している

中国地方で積極的にリサイクル材料を有効利用することは大変意義のあることと考える。

そこで、本研究では廃棄コンクリート柱から製造される再生骨材について、遠心締固め整形により高強度かつ高密度の製品を製造するコンクリート柱への有効利用を目的に、再生骨材の特徴、再生骨材を用いたコンクリート柱の物性に関する検討、実物大ポール曲げ試験による構造特性の検討を行った。

2. 再生骨材の製造方法

本研究で用いた再生骨材の製造方法を図-1 に示す。廃棄・回収されたコンクリート柱を、鋼線切断刃付き油圧ショベル破碎機を用いて 1 次破碎処理を行い、コンクリート塊と鋼線とを選別する。次に、選別されたコンクリート塊を、破碎型クラッシャーを用いて粒径 0~40mm 程度の範囲に 2 次破碎処理を行う。さらに、コンクリート塊に混入されていた鉄くず片を除去するための磁気選別、微粒分の除去を目的として水洗い処理を行う。また、コンクリート用の骨材

*1 中国電力（株） 事業支援部門 火力・変電土木担当 工修（正会員）

*2 中国電力（株） 島根原子力建設所 第二土木課課長（正会員）

*3 中国電力（株） エネルギー総合研究所 土木・建築担当副長

*4 中国高圧コンクリート工業（株） 広島工場 生産部 技術・リサイクル担当課長

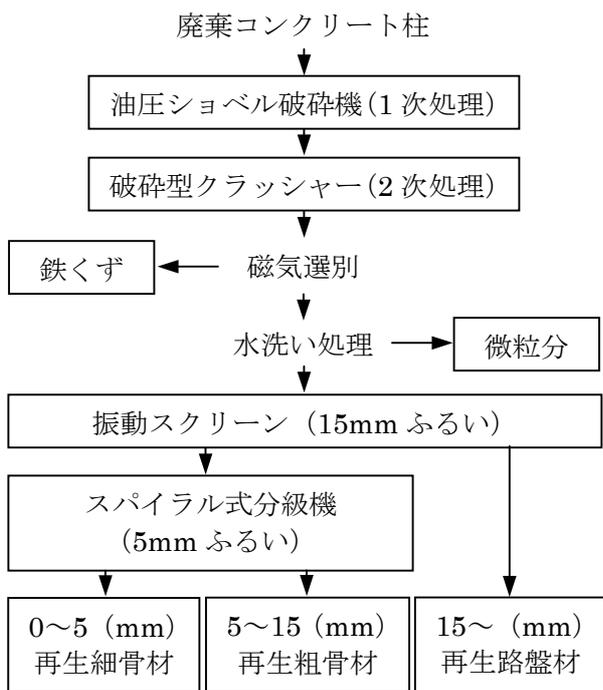


図-1 再生骨材の製造方法



写真-1 再生骨材

として利用するために、振動スクリーンおよびスパイラル式分級機を用いて細骨材と粗骨材に分類する。なお、目視以外での選別が不可能な樹脂製およびプラスチック製の足場ソケット片については、おおむね再生粗骨材中の不純物として混入される。この処理方法から製造され

た再生骨材の外観を写真-1に示す。

3. 実験概要

3.1 再生骨材の品質

すべてのコンクリート柱には、製造年が記載された表示ガイシが設置されており、廃棄されるコンクリート柱についても製造工場、配合および使用材料などが特定できる。ここでは、廃棄コンクリート柱から製造される再生骨材の品質を明らかにするために、1971年から1999年にかけて無作為に抽出したコンクリート柱10体（製造年代規格別、原コンクリートの仕様が特定できるもの）を対象とし、「粗骨材の密度及び吸水率試験方法」(JIS A 1110) および「細骨材の密度及び吸水率試験方法」(JIS A 1109) に準拠し再生粗骨材および再生細骨材の絶乾密度および吸水率の測定を行った。

また、実際のコンクリート柱への利用時の再生骨材の使用条件を念頭におき、製造される骨材すべてを混合した再生骨材（以下、混合再生骨材）についても測定を行った。

3.2 再生骨材を用いたコンクリート柱の物性およびポール曲げ試験による構造部材特性に関する検討

(1) コンクリートの配合

コンクリートの配合を表-1に示す。再生骨材は、上述の混合再生骨材を用いた。水セメント比 W/C は 36.3%とし、再生骨材の置換率は全骨材の質量に対し 15%および 25%の 2 水準（配合名 M15, M25）とした。また、比較用として基本配合の普通コンクリート（配合名 M0）についても作製した。

表-1 コンクリートの配合

配合名	単位量 (kg/m ³)								
	水 W	セメント C	細骨材			粗骨材		FA	減水剤
			砕砂 S1	再生 RS1	海砂 S2	砕石 G2	再生 RG2		
M0	160	440	627	—	263	916	—	40	6.72
M15	160	440	548	73	263	709	198	40	6.72
M25	160	440	496	121	263	570	330	40	6.72

注) FA: フライアッシュ, 水セメント比 W/C36.3%, 粗骨材の最大寸法 15mm, 細骨材率 49.8%

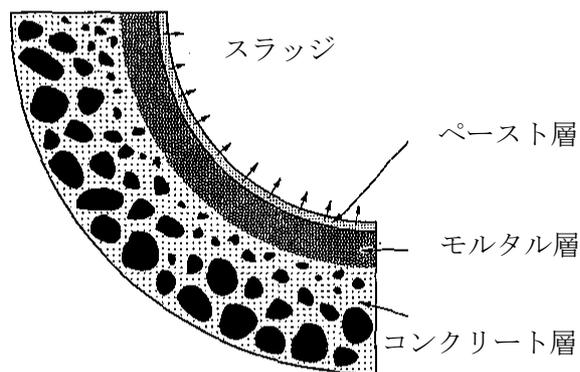


図-2 遠心力締固め後の断面の状況

中空円筒形のコンクリート柱は、遠心成形機を用いて遠心締固めを行い、回転時の微振動による締固め効果と遠心力による余剰水の絞り出しによって、高強度かつ高密度の製品を製造することが特徴である¹⁾。遠心締固め後の断面の状況を図-2に示す。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。一方、排出される余剰水と一緒にセメントが排出されるという問題が生じていたが、これに対し、遠心力の観点からセメントより密度の小さいフライアッシュを混入することでフライアッシュが優先的に排出され、同一セメント量に対する強度増加を可能としている。

(2) 養生方法

養生方法について、前置・昇温 5 時間、65℃一定 3 時間、以降自然冷却とした蒸気養生を行った。材齢 1 日の脱枠以降、物性試験用供試体は製品貯蔵場での環境を想定し水分供給のない気中養生（温度 20.0±0.5℃）を行った。

(3) 実験方法

① 圧縮強度

圧縮強度は、「遠心力締固めコンクリートの圧縮強度試験方法」(JIS A 1136) に準拠し、外径φ 200mm、高さ 300mm、厚さ 40mm の中空円筒形供試体にて測定を行った。測定材齢は、1 日（脱枠強度）、14 日（出荷時強度）および 365 日とした。

② 結合水量

材齢 365 日に圧縮強度試験を行ったコンクリート片を用いて、図-2 に示すコンクリート層の

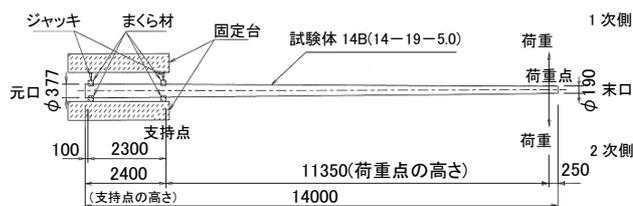


図-3 ポール曲げ試験

中央部からモルタル片を採取し結合水量の測定を行った。採取した試料は、恒量になるまで 105℃にて乾燥後、乳鉢や振動ミルを用いて、最大粒径が 88 μm ふるいをすべて通過するまで粉碎し、「ポルトランドセメントの化学分析法」(JIS R 5202) の強熱減量の定量方法に準拠し、600℃にて強熱減量 (ig. loss) を測定した。結合水量 (H) は(1)式により算出した。

$$H = \frac{ig.loss}{1-ig.loss} \times 100 \quad (1)$$

③ 収縮ひずみおよびクリープ

圧縮強度試験用と同寸法の供試体を用いて、自己温度補償型ゲージにより、材齢 1.3 日以降の無拘束ひずみを測定した。同様に、載荷応力比 0.2 におけるクリープひずみを測定した。

④ ポール曲げ試験

ポール曲げ試験用供試体の形状寸法は、「プレキャストプレストレストコンクリート製品」(JIS A 5373) に準拠した。対象とするポールは、送電・配電用ポール 1 種 14B（長さ 14m、元口径 377mm、末口径 190mm）とし、曲げ試験は出荷時材齢である 14 日に実施した。試験方法は、図-3 に示すようにポールを端部で固定し、載荷点でポールの中心軸に対して直角となる方向に載荷した。

4. 実験結果および考察

4.1 再生骨材の品質

再生粗骨材および再生細骨材における絶乾密度と吸水率の関係を、それぞれ図-4 および図-5 に示す。2000 年度までの関連学会に投稿された文献を引用し²⁾、本研究で用いた再生骨材との比較結果も表記した。いずれの再生骨材も吸水

率が大きくなると絶乾密度は小さくなる傾向にあり、高い相関関係を示している。製造年代規格別の再生粗骨材について、絶乾密度は $2.32\sim 2.49\text{g/cm}^3$ 、吸水率は $2.9\sim 5.6\%$ の範囲にあり、天然粗骨材の規格値である絶乾密度 2.5g/cm^3 以上、吸水率 3.0% 以下を満足しないものの、再生粗骨材全体から評価すると比較的良質であることがいえる。また、混合再生粗骨材の品質は、製造年代規格別の再生粗骨材を代表するほぼ中間の品質を示す値となった。一方、再生細骨材は、製造年代規格別の絶乾密度は $2.04\sim 2.21\text{g/cm}^3$ 、吸水率は $7.1\sim 11.4\%$ の範囲にあり、比較的品質の良くない再生細骨材となっている。しかしながら、混合再生細骨材は、絶乾密度 2.30g/cm^3 、吸水率 5.8% となり、良好な品質を示す結果となった。これは、製造年代規格別の再生細骨材をシート上にて人力で混合する過程で密度および吸水率に大きく影響する微粒分が取り除かれたことが考えられる。したがって、再生細骨材の

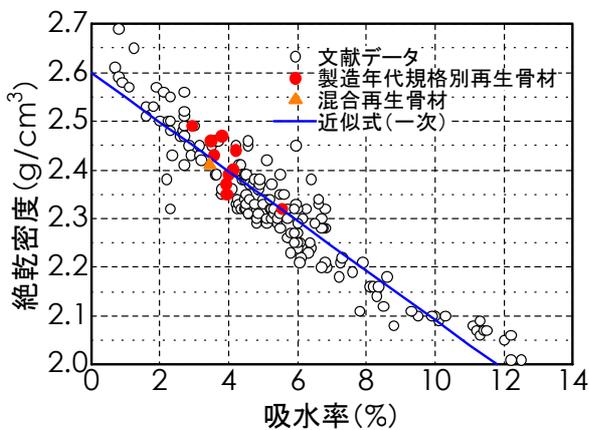


図-4 絶乾密度と吸水率の関係（再生粗骨材）

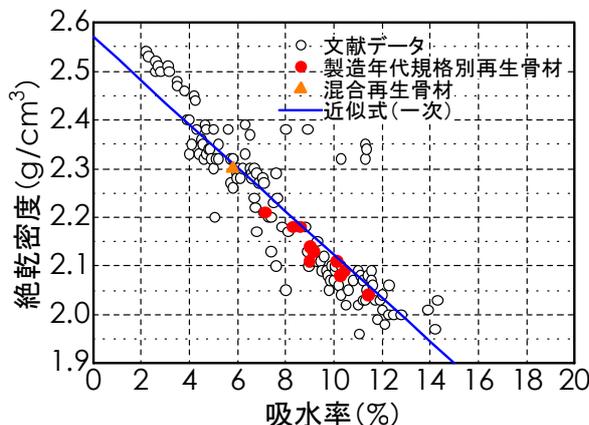


図-5 絶乾密度と吸水率の関係（再生細骨材）

使用にあたっては微粒分の混入等の品質管理を入念に行う必要がある。

4.2 強度発現性

中空円筒形供試体による材齢 1 日、14 日および 365 日の圧縮強度試験結果を図-6 に示す。いずれの材齢においても再生骨材置換率が増加するにしたがって圧縮強度は若干大きくなっている。この理由として、使用した再生骨材の原骨材は、強度面において品質の高い骨材を製造当時から厳選して使用していたこと、また原骨材に付着、混入されている旧コンクリートの圧縮強度も 60N/mm^2 以上を有していることから、モルタル・ペースト部分が一般解体構造物から製造される再生骨材と比較し高強度であると考えられる。また、再生骨材 25%置換 (M25) では、材齢 1 日から 14 日までの強度増加量は 9.9N/mm^2 と大きくなっている。これは、再生骨材の置換によるコンクリート内部からの養生（内部養生効果）によってセメント水率が增加したことが考えられる。コンクリート柱が製造される環境条件は、蒸気養生後、直ちに乾燥暴露する環境のため、水分供給などの外部養生効果は期待できず、さらに余剰水の絞り出しによる実質 W/C の低下により未水和セメントが多く残存する状態となっていることから、セメント総量に対する強度増加は比較的小さい^{3,4)}。つまり、ポ

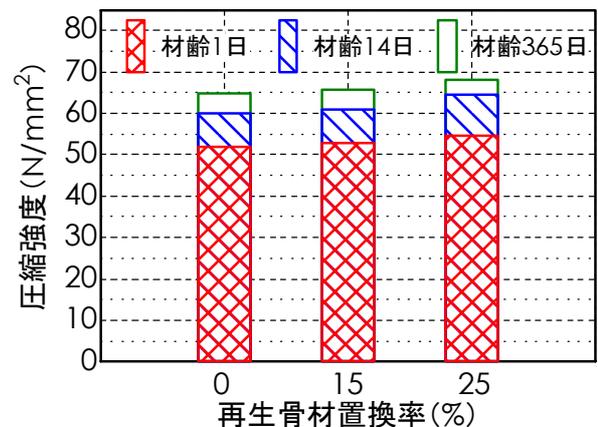


図-6 強度発現性

表-2 結合水量（材齢 365 日）

配合名	M0	M15	M25
結合水量 (%)	2.2	2.5	2.8

ーラスなセメントペーストが混入する再生骨材の多孔性とそれによる含水量を天然骨材を用いた場合と比較すると、再生骨材を表面乾燥飽水状態として用いることによるコンクリート内部の水分量の増加で、セメント水和率を増加させることができるものと考えられる。あわせて、材齢365日における結合水量の測定結果を表-2に示す。再生骨材置換率が増加するに従い結合水量も大きくなっていることから、再生骨材置換によるセメント水和率の増加が裏付けられる。今後は、再生骨材の品質（吸水率等）および強度などの関係を明らかにする必要がある。

4.3 収縮・クリープ特性

コンクリート打込み後 1.3 日で乾燥開始した収縮ひずみの経時変化を図-7に示す。乾燥後日数160日における再生骨材無置換M0の収縮ひずみは -375×10^{-6} 程度となっている。一方、再生骨材15%置換(M15)では -410×10^{-6} (9%)、再生骨材25%置換(M25)では -435×10^{-6} (14%)程度と収縮ひずみの増加が見られた。これは、多

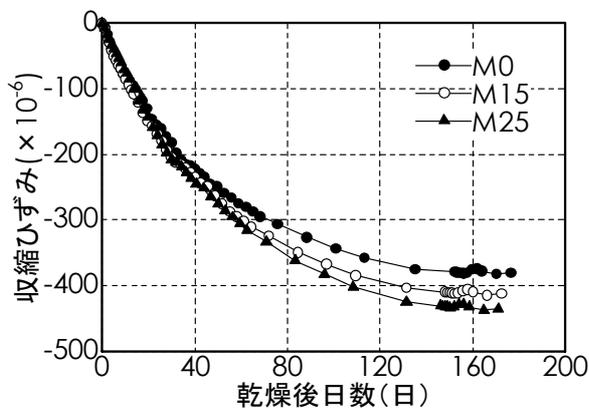


図-7 収縮ひずみの経時変化

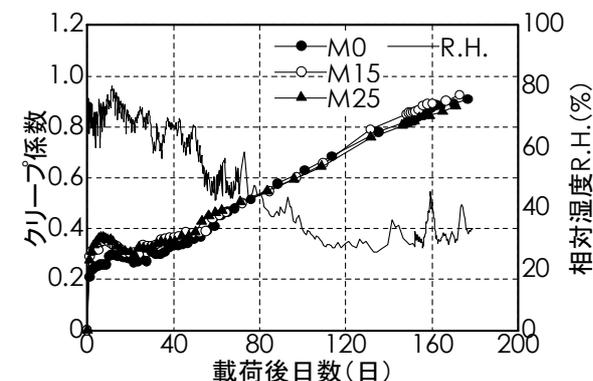


図-8 クリープ係数の経時変化

孔性である再生骨材の小さな空隙に存在する水の移動による毛細管張力の増大が収縮に寄与しているものと思われる⁴⁾。

図-8にプレストレス導入直後からのクリープ係数(載荷応力比0.2)の経時変化を示す。クリープ係数の算出には、材齢1日に測定したヤング係数を用いた。材齢の経過にともないクリープ係数は大きくなり、乾燥後日数160日におけるクリープ係数はいずれの配合においても0.9程度と再生骨材の置換率による違いは見られなかった。またクリープ係数は乾燥後日数160日では収束する傾向にないが、これは、図-8に併記した相対湿度が測定開始時期である夏季の高湿度から冬季の低湿度へと大きく変化したことにより、クリープが進行している状態となっていると考えられる。

4.4 ポール曲げ試験による構造部材特性

実規模の配電用コンクリート柱(14B)を各配合につき3本作製し、写真-2のようにポール曲げ試験を行った。ひび割れ試験荷重5.0kNを一次側(右側)および二次側(左側)に与えた場合、さらにひび割れ荷重の1.5倍(7.5kN)を与えた場合のたわみ性状を図-9に示す。たわみ性状はいずれの配合においても同程度となっており、さらにひび割れ幅およびひび割れ本数についても大きな違いは見られなかった。

破壊荷重から求めた破壊安全率(破壊荷重のひび割れ試験荷重(設計荷重)5.0kNに対する比)



写真-2 ポール曲げ試験状況

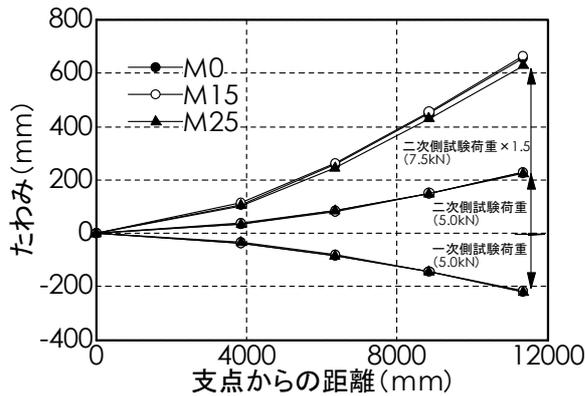


図-9 たわみ性状

表-3 破壊安全率

配合名	破壊安全率
M0	2.32
M15	2.35
M25	2.41

の結果を表-3に示す。いずれの配合も規定値の安全率2.0を満足し、再生骨材置換の場合、圧縮強度の増加により再生骨材無置換(M0)より破壊安全率は若干大きくなった。また、破壊位置の壁厚は40~50mmの範囲にあり、壁厚が設計値の40mmと仮定しても曲げ圧縮破壊(圧縮縁ひずみが $3,000 \times 10^{-6}$ となったときに圧壊)を仮定した構造計算上では安全率2.0以上を満足する。さらに、再生骨材置換による収縮ひずみの差が小さい段階における曲げ試験であったが、これらに起因するストレスロスを反映しても、曲げ圧縮破壊を仮定した場合、収縮ひずみの差が曲げ耐力へおよぼす影響は小さいことから、再生骨材置換による収縮ひずみの差は構造部材特性へほとんど影響しない範囲であると考えられる。

5. まとめ

廃棄コンクリート柱から製造される再生骨材を高強度コンクリート柱の骨材として有効利用することを目的として、再生骨材を全骨材量の25%以内の範囲で置換した場合について各種試験を行い、以下の結果が得られた。

(1) 再生骨材の置換によるコンクリート内部か

らの水分供給により、再生骨材無置換と同等もしくはそれ以上の強度発現性を有することが明らかとなった。また、結合水量の測定結果からセメント水和率が増加していることが推察された。

- (2) 再生骨材の置換により収縮ひずみは若干大きくなるが、クリープについては再生骨材無置換とほぼ同程度となった。
- (3) ポール曲げ試験では、再生骨材の置換による圧縮強度の増加により再生骨材無置換より破壊安全率はわずかに増加した。ひび割れ試験荷重5.0kNおよび7.5kN載荷時のたわみ性状は、いずれの配合においても同程度となっており、ひび割れ幅およびひび割れ本数についても大きな違いは見られなかった。

本研究では再生骨材の原コンクリートの仕様が特定できるものを使用したにもかかわらず、再生骨材の密度および吸水率にばらつきが大きかった。再生骨材の製造方法も含めてこの要因を究明するとともに、強度等におよぼす影響をより明確にし、コンクリート柱の製造管理に活かしていきたい。

参考文献

- 1) 下山善秀:遠心力締固め製造時のスラッジ防止剤および低減剤の現状,コンクリート工学, Vol.34, No.5, pp.16-22, 1996
- 2) 土木学会:電力施設解体コンクリートを用いた再生骨材コンクリートの設計施工指針(案), 2005
- 3) 田澤栄一ほか:エース土木工学シリーズ コンクリート工学, 朝倉書店, p.218, 2002
- 4) 田澤栄一ほか:セメント・コンクリートの水の挙動,セメント・コンクリート研究会 水委員会, pp.33-50, 1993