

再生コンクリートにおける新しい配合方法（前編） — A new method for proportioning recycled concrete (Part 1) —

著：P.Gupta, Z.Khaudhair, A.Ahuja
訳：会誌編集委員会海外部会

本稿では、等価粗骨材質量法（equivalent coarse aggregate mass method, ECAM法）と呼ばれる再生骨材（RCA）を用いたコンクリート（以下、再生コンクリート）の新しい配合方法を提案する。この基本的な概念は、14種類の配合設計と99個の供試体（57個の立方体供試体および42個の円柱供試体）の実験により示される。この実験は全2段階で行った。第1段階では、一軸圧縮強度試験により、この配合設計法を実証した。この段階では、0%、25%、50%、75%および100%の初期質量置換率の再生コンクリートにおける実験を行い、ECAM法により50%以下の質量置換率で再生コンクリート（RaC）の配合設計を行うことが可能であると結論づけた。さらに、第2段階では、再生コンクリートの機械的性質を調べるために、3種類のコンクリート強度の配合設計を行った。7種類の機械的性質である圧縮強度、割裂引張強度、弾性係数、シュミットハンマによる強度、超音波パルス速度、硬化前密度および硬化後密度の試験を行った。本稿では、これらについて実証し、報告する。

キーワード：再生コンクリート、再生骨材、質量置換率、コンクリート配合設計

1. はじめに

インフラの大規模開発により、天然粗骨材（NCA）の使用がますます増えてきている。さらに、持続可能な構造物を構築する動きが高まるにつれて、天然粗骨材を使用したコンクリートのさまざまな代替案が検討されている。既設インフラの廃コンクリートを使用する動き、すなわち再生コンクリートを使用する動きは、この研究分野の先駆けの1つである。その結果、再生コンクリートの研究は関係者の注目を集めている。

記録にあるかぎり初めて廃コンクリート中の再生骨材を使用したのは、破壊された建造物から大量に廃材が発生した第二次世界大戦後のドイツであった。再生骨材は、古い建造物および破砕物から得られる材料から処理された不均等な無機粒子からなる。これらの材料は、一般に老朽化して利用できなくなった建物、道路および橋梁などから採取することができる。当初、再利用施設が限られていたため、埋立地やそのほかの重要度の低い用途で使用されていた。しかしながら、このような状況は、広範な研究と現代のコンクリート技術の著しい進歩に伴って変化してきた。廃コンクリートの品質と供給源に関する再生骨材の機械的性質の評価におけるさまざまな研究が行われている¹⁻¹³⁾。さらに、再生コンクリートの最適な配合設計法についてもさまざまな研究が行われている¹⁴⁻¹⁷⁾。

1.1 再生骨材の機械的性質

Yannas⁴⁾は、普通コンクリート（NC）および天然粗骨材を再生骨材に代替した再生コンクリートのワーカビリティおよび強度に関する実験を行った。Yannasは、再生コンクリートと普通コンクリートのワーカビリティが同等であり、再生コンクリートの圧縮強度が普通コンク

リートの76%以上であると報告した。さらに、再生コンクリートの弾性係数が普通コンクリートの弾性係数の60%であると報告した。

Nixon⁵⁾は、再生コンクリートのワーカビリティを調べるために実験を行った。この実験により、再生骨材を表面乾燥飽水状態で使用した場合、再生コンクリートのワーカビリティは普通コンクリートより低いことが示された。Nixonは、この要因を天然粗骨材と比較して再生骨材の吸水率が高いためであると結論づけた。再生骨材の吸水率が高くなる要因は、再生骨材が一般に残留モルタルまたは旧モルタル分（OM）と呼ばれる付着硬化セメントモルタルを含むことにあった。

Hansen⁶⁾は、最新研究において再生骨材のモルタル含有量が、粒径4~8mm、8~16mmおよび16~32mmでそれぞれ体積の約60%、40%および30%であると報告した。HansenとNarud⁷⁾は、再生骨材の原材料となる廃コンクリートの圧縮強度が、その再生コンクリートに与える影響を調べるために、広範な実験を行った。再生骨材には、低強度から高強度の廃コンクリートを用いている。HansenとNarudは、再生コンクリートの圧縮強度が元のコンクリートの水セメント比によって大きく左右されると結論づけた。また、再生骨材の吸水率が普通コンクリートに比べて高いため、普通コンクリートよりセメント含有量が5%多くなることがわかった。

Ettxeberriaら⁸⁾は、0%、25%、50%および100%で質量置換された4種類の再生コンクリートの配合の違いによる圧縮強度を調べた。これらは、同程度の圧縮強度を目標にして配合された。再生骨材の吸水率が高いため、シートによる湿潤養生を行った。その結果、質量置換率100%では、普通コンクリートの圧縮強度（材齢28日）より20~25%低くなり、弾性係数も低くなることが示

された。Etxeberria らはまた、質量置換率 25% で作製した再生コンクリートの圧縮強度が、普通コンクリートとおおむね同等になると結論づけた。

Corinaldesi⁹⁾ は、実験において再生コンクリートの弾性特性と機械的性質について調べた。この実験では、配合の異なる再生コンクリートを作製し、普通コンクリートと結果を比較した。この結果により、質量置換率 30% で、コンクリート強度 C32/40 (円柱供試体/立方体供試体強度) までの再生コンクリートを作製できることが示された。さらに、質量置換率 30% で作製された再生コンクリートの弾性係数は普通コンクリートに比べて 15% 低下することも示された。

Xiao ら^{11, 12)} は、0%, 30%, 50%, 70% および 100% の質量置換率の再生コンクリートにおける残存圧縮強度と残存曲げ強度の実験を行った。この実験により、再生コンクリートの残存圧縮強度と残存曲げ強度は、温度上昇に伴って低下することが示された。Xiao らは、再生コンクリートに関する長期強度、収縮、クリープ、耐中性化、耐凍害性、耐浸透性、耐摩耗性、アルカリ骨材反応、硫酸塩腐食および疲労挙動について報告し、再生コンクリートの長期特性は一般に普通コンクリートよりも劣っていると結論づけた。

Fan ら¹³⁾ は、0%, 33%, 66% および 100% の質量置換率における再生骨材の収縮挙動とクリープ挙動について実験を行った。Fan らは、質量置換率が増加するにつれて、再生コンクリートの収縮およびクリープが増加し、再生骨材に付着した旧モルタル分の特性が再生コンクリートの収縮およびクリープに大きな影響を与えると結論づけた。

1.2 再生コンクリートの配合設計

再生コンクリートの配合設計について、適切な手法を確立するための研究が行われている。

Bairagi ら¹⁴⁾ は、再生コンクリートを設計するにあたり、IS コード法、ACI コード法、RRL 法および表面粗度・摩耗度法を採用し実験を行った。主な目的は、最適な配合設計法を特定することであった。その結果、ACI コード法により配合設計を行った再生コンクリートは、普通コンクリートと同等の圧縮強度を得られることが分かった。次の段階で、再生コンクリートの新しい配合設計法を検討したが、提案された配合設計法の手順では、従来の配合設計よりもセメント量が 8~13% 多く必要となった。

Tam ら¹⁵⁾ は、実験により再生コンクリートの品質の低下が、吸水率および骨材間隙率が高いこと、再生骨材とセメントとの間の遷移帯が脆弱であることに起因すると結論づけた。したがって、Tam らは、コンクリートを混練りする新しい手法「2段階混練法 (two-stage mixing approach, TSMA 法)」を提案した。これは、コンクリートの原材料と混合する水を 2 回に分けて投入する手法である。Tam らは、この手法により再生コンクリートの圧縮強度を改善することができると報告した。この実験では、質量置換率 0%, 10%, 15%, 20%, 25% および

30% の再生コンクリートについて従来の配合設計法および TSMA 法が使用された。この結果により、TSMA 法が再生コンクリートの圧縮強度およびそのほかの機械的性質を向上させる有効な方法であることが示された。

Fathifazul ら¹⁶⁾ はまた、再生コンクリートの新しい配合設計法を提案した。Fathifazul らは、コンクリートの全モルタル含有量の一部に旧モルタル分を含める等価モルタル容積法 (equivalent mortar volume method, EMV 法) を新たに導入した。この結果により、同量の水およびセメントで配合した再生コンクリートにおいて従来の配合設計法と EMV 法を比較した場合、EMV 法がより高いスランプ値、硬化前密度、硬化後密度、弾性係数および圧縮強度となることが示された。また、ACI 55517) では、コンクリート構造物への再利用に適した骨材の製造における廃コンクリートの取扱いに関する機械的性質および技術要件が報告されている。

1.3 研究の意義

混和材または混和剤を使わずに、普通コンクリートと同等の機械的性質 (圧縮強度や弾性係数) を有する質量置換率 50% 以下の再生コンクリートの配合設計法は、既往の研究では行われていなかった。本稿では、ECAM 法と呼ばれる新しい配合設計法を行い、質量置換率が異なる再生コンクリートにおける機械的性質について実証し、報告する。この実験は全 2 段階で行った。第 1 段階では、1 種類のコンクリート配合に対し、5 種類の質量置換率で再生骨材を配合し、適用可能な最大質量置換率を検討した。第 1 段階の結果に基づいて、第 2 段階では 3 種類の再生コンクリートを作製するために、それぞれ適用可能な質量置換率を 3 つ選定した。また、所要の圧縮強度を得たあとに、機械的性質の試験を行った。

2. 配合設計法の確立

本研究の目的は、再生コンクリートの配合設計法を確立することである。同量の水およびセメントで配合した従来のコンクリートと同等の機械的性質を有するように再生コンクリートを作製するにあたり、粗骨材には機械的性質の不明な廃コンクリートが含まれている。再生コンクリートの配合には、再生骨材と現地の川砂を使用する。この基本的な概念と配合設計は容易で分かりやすく、40 MPa 以下の圧縮強度を有する普通コンクリートに適用可能である。実験を行ったコンクリートの機械的性質は、圧縮強度、割裂引張強度、弾性係数、シュミットハンマーによる強度、超音波パルス速度および硬化前密度・硬化後密度である。

再生骨材には、原骨材と、セメントペーストもしくは旧モルタル分が付着した 2 つの成分が含まれている。旧モルタル分の影響により、再生骨材の表面は天然粗骨材とは異なる性質を有している。既往の研究¹¹⁻¹³⁾ より、旧モルタル分は低密度で再生骨材に高い吸水性をもたらすことが報告されている¹⁵⁾。これらの 2 つの事象により、再生コンクリートの圧縮強度および密度を低下させる可能性がある。旧モルタル分の影響により、再生コンクリ

ートは2つの遷移帯（再生骨材と新規モルタル、および再生骨材内の原骨材と旧モルタル分の境界）を有している。これらの遷移帯は再生コンクリートの不均質性を著しく増大させ、圧縮強度を低下させる可能性がある。

本研究で提案する配合設計法の ECAM 法の概要は、再生コンクリート配合における細骨材の一部に付着した旧モルタル分を考慮し、普通コンクリートの粗骨材の質量が再生コンクリートの粗骨材の等価質量に置き換えられるということである。

Fathifazul らによって提案された手順に従って、再生骨材に含まれる付着した旧モルタル分の質量 (M_{OM}) を推定することにより、再生骨材中における原骨材の質量 (M_{OVA}) を計算する。このように、再生骨材中における原骨材の質量は、再生骨材の総質量から旧モルタル分の質量を差し引くことによって計算される。よって、再生コンクリート中における粗骨材の総量は、天然粗骨材の質量 (M_{NCA}) と再生骨材中における原骨材の質量 (M_{OVA}) の合計に等しいということである。

3. ECAM 法による計算

まず、普通コンクリートを ACI 211.1¹⁸⁾ で示される標準配合設計手順に従って設計する。ECAM 法の適用により、この配合を修正し、再生コンクリートの配合設計を行う。セメント質量 (M_{C-NC}) と水の質量 (M_{W-NC}) は、普通コンクリートと再生コンクリートで同量となる。ECAM 法では、普通コンクリートの粗骨材質量を M_{CA-NC} とし、天然粗骨材から再生骨材への質量置換率を $X\%$ とする。付着した旧モルタル分の質量 (M_{OM}) を考慮した再生コンクリートの場合、 M_{OM} は Fathifazul らによって提案された詳細手順に従って計算される。また、再生コンクリートに必要な粗骨材の全質量 (M_{CA-RC}) は次式によって計算される。

$$M_{CA-RC} = M_{NCA-RC} + M_{RCA-RC} \quad (1)$$

M_{NCA-RC} と M_{RCA-RC} はそれぞれ再生コンクリートにおける天然粗骨材と再生骨材の質量を示しており、次式で計算される。

$$M_{NCA-RC} = \left[\left(\frac{100-x}{100} \right) \times (M_{CA-NC}) \right] \quad (2)$$

$$M_{RCA-RC} = \left[\left(\frac{x}{100} \right) \times \left(\frac{M_{CA-NC}}{1 - \% M_{OM}} \right) \right] \quad (3)$$

最後に、セメント、水および粗骨材の質量が決定するため、これらの構成材料の体積を 1 m^3 に調整することによって細骨材の質量を計算することができる。したがって、見かけの質量置換率は次式によって計算される。

$$\begin{aligned} & \% \text{ actual replacement ratio} \\ & = \frac{(M_{RCA-RC})}{(M_{RCA-RC}) + (M_{NCA-RC})} \times 100 \quad (4) \end{aligned}$$

※ 2号へと続く

参考文献

- 1) Park, S. G.: Recycled concrete construction rubble as aggregate for new concrete. Study report, The Resource Center for Building Excellence, report No. 86, 1999.
- 2) Yang, J., Du, Q., Bao, Y.: Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(4), pp. 1935-1945.
- 3) Bhatia, R.: Study of engineering properties of recycled concrete aggregate concrete. Thesis submitted to Dept. of Civil Engineering, Indian Institute of Technology Roorkee, 2013.
- 4) Yannas, S. F.: Waste concrete as aggregate for new concrete. *ACI Journal*, 1977, 74(8), pp. 373-376.
- 5) Nixon, P. J.: Recycled aggregate as an aggregate for concrete - a review. *Materials and Structures*, 1978, 11(5), pp. 371-378.
- 6) Hansen, T. C.: Recycled aggregates and recycled aggregate concrete, 2nd state-of-the-art report, developments 1945-1985. RILEM Technical Committee-37-DRC, 1986, 19(111), pp. 201-246.
- 7) Hansen, T. C., Narud, H.: Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. *Concrete International*, 1983, 05(01), pp. 79-83.
- 8) Etxeberria, M., Vazquez, E., Mari, A., Barra, M.: Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 2007, 37(5), pp. 735-742.
- 9) Corinaldesi, V.: Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(9), pp. 1616-1620.
- 10) Xiao, J., Li, L., Tam, V. W. Y., Li, H.: The state of the art regarding the long-term properties of recycled aggregate concrete. *Structural Concrete*, 2014, 15(1), pp. 3-12.
- 11) Xiao, J., Fan, Y., Tawana, M. M.: Residual compressive and flexural strength of a recycled aggregate concrete following elevated temperatures. *Structural Concrete*, 2013, 14(2), pp. 168-175.
- 12) Fan, Y., Xiao, J., Tam, V. W. Y.: Effect of old attached mortar on the creep of recycled aggregate concrete. *Structural Concrete*, 2014, 15(2), pp. 169-178.
- 13) Bairagi, N. K., Vidyadhara, H. S., Ravande, K.: Mix design procedure for recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 1990, 4(4), pp. 188-193.
- 14) Tam, V., Gao, X., Tam, C.: Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35, pp. 1195-1203.
- 15) Fathifazul, G., Abbas, A., Razaqpur, G., Isgor, O. B., Fournier, B., Foo, S.: New mixture proportioning method for concrete made with coarse recycled concrete aggregate. *Journals of Materials in Civil Engineering*, ASCE, 2009, 21(10), pp. 601-611.
- 16) ACI 555: Removal and reuse of hardened concrete. American Concrete Institute, 2001.
- 17) ACI 211.1: Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete (ACI 211.1-91). American Concrete Institute, 1991.

This article was first issued in *Structural Concrete*, the official journal of the fib, December 2016, Volume 17, Number 4, page 677-687
Structural Concrete (Wiley Online Library)
[http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/\(ISSN\)1751-7648](http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/(ISSN)1751-7648)

* : 会誌編集委員会海外部会委員
濱崎 景太 (首都高速道路 ㈱)
渡邊 秀知 (㈱ピーエス三菱)
佐藤 千鶴 (㈱ 銭高組)
田中 慎也 (㈱ IHI インフラ建設)
森田 遼 (鹿島建設 ㈱)

【2017年12月5日受付】