

## 再生コンクリートにおける新しい配合方法（後編）

### － A new method for proportioning recycled concrete (Part 3) －

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の新しい配合設計法を提案する。この設計法の基本的な概念は、14 種類の配合設計と 99 個の供試体を用いた実証実験により示される。実験は 2 段階に分けて行った。第 1 段階では、圧縮強度試験およびスランプ試験により、この配合設計法の適用範囲を実証した。さらに、第 2 段階では、ECAM 法を用いて配合設計した再生コンクリート（RaC）の機械的性質が、おおむね普通コンクリートと同等となることを実証した。

前編では、ECAM 法の基本的な概念および計算方法について、中編では、全 2 段階の実験のうち第 1 段階について報告した。本編では、実験の第 2 段階および本稿の結論について報告する。

#### 5. 実験計画：第 2 段階

第 2 段階では、ECAM 法による配合設計が適用可能な質量置換率（25 % および 50 %）において C25（25 MPa）、C30（30 MPa）および C40（40 MPa）の圧縮強度を有する 3 種類の再生コンクリートについて、ECAM 法による配合設計を行い、供試体の機械的性質を調べた。

##### 5.1 第 2 段階の配合

普通コンクリート（0 % 置換）と 25 %、50 % で質量置換した 2 種類の再生コンクリートをそれぞれ 3 種類の強度（C25、C30 および C40）で準備した。表 - 4 に普通コンクリート（NC）と再生コンクリートの配合と質量置換率を示す。

##### 5.2 第 2 段階の試験

第 2 段階では、27 個の立方体供試体（150 mm 立方）および 42 個の円柱供試体（直径 150 mm × 高さ 300 mm）の試験を行った。立方体供試体および円柱供試体のサンプリングおよび養生は、それぞれ ASTM C172<sup>22)</sup> および ASTM C192<sup>23)</sup> に準じて行った。また、ASTM C39<sup>24)</sup>、ASTM C496<sup>25)</sup>、ASTM C469<sup>26)</sup>、ASTM C138<sup>27)</sup>、ASTM C805<sup>28)</sup> および ASTM C597<sup>29)</sup> に準じて、普通コンクリー

トおよび再生コンクリートについて、圧縮強度、割裂引張強度、弾性係数、硬化前密度・硬化後密度、シュミットハンマーによる強度および超音波パルス速度の試験を行った。硬化前密度を除くすべての試験を、材齢 28 日で実施した。なお、硬化前密度試験は打設時に行った。材齢 28 日の硬化コンクリートについては最初に全ケースで硬化後密度試験を行い、測定値の平均値を硬化後密度とした。そのうち、すべての供試体でシュミットハンマー試験および超音波パルス速度試験を行い、圧縮強度試験を行った。立方体供試体の圧縮強度は、試験を行った 3 個の平均値とし、円柱供試体の圧縮強度、割裂引張強度および弾性係数は、おのおのの試験を行った 2 個の平均値とした。また、割裂引張強度および弾性係数の測定値と国際コード式より算出される推定値との比較を行った。

##### 5.3 第 2 段階の結果と考察

第 2 段階の実験結果を図 - 2(a)～(g) に示す。図 - 2 より、再生コンクリートにおける機械的性質はおおむね普通コンクリートと同等となる。

図 - 2(a) より、再生コンクリートおよび普通コンクリートの圧縮強度は同等となることが示される。再生コン

表 - 4 第 2 段階の配合表

Component per m <sup>3</sup>	C25			C30			C40		
	NC	RaC-25	RaC-50	NC	RaC-25	RaC-50	NC	RaC-25	RaC-50
Cement (kg)	380	380	380	463	463	463	484	484	484
Natural fine aggregate (FA) (kg)	843	679	517	769	581	395	790	627	499
Natural coarse aggregate (NCA) (kg)	914	685.5	457	956	717	478	966	724.5	483
Recycled concrete aggregate (RCA) (kg)	0	352	703	0	368	736	0	371	703
Water (kg)	190	190	190	199	199	199	179	179	179
Superplasticizer (l)	0	0	0	0	0	0	1.15	1.15	1.15
Actual replacement ratio*	0 %	34 %	61 %	0 %	34 %	61 %	0 %	34 %	59 %
Nominal replacement ratio	0 %	25 %	50 %	0 %	25 %	50 %	0 %	25 %	50 %

\* = mass of RCA / (mass of RCA + mass of NCA)

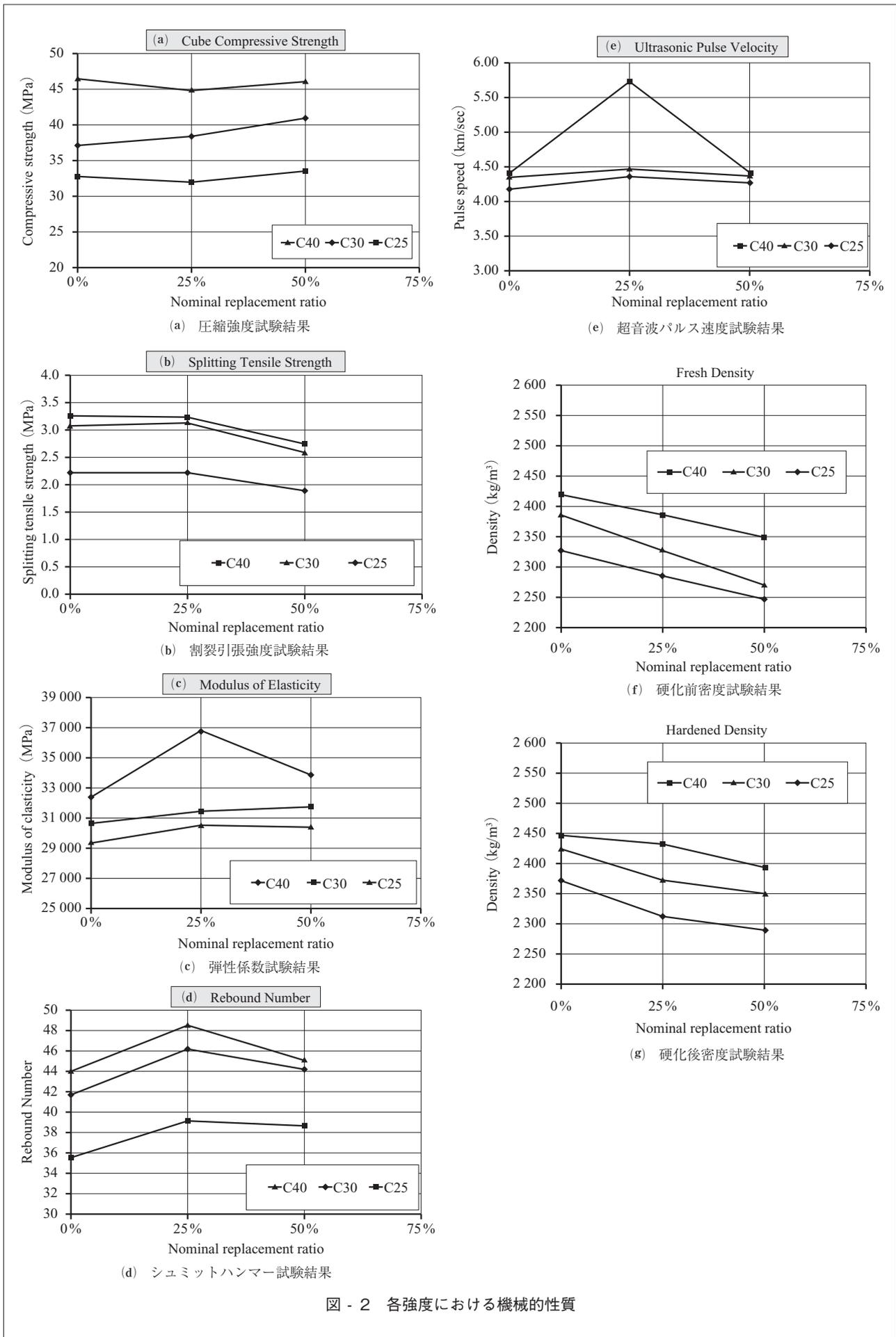


図 - 2 各強度における機械的性質

クリートにおける粗骨材の質量は、天然粗骨材の質量と再生骨材中における原骨材の質量から構成される。これらの合計は、普通コンクリートの天然粗骨材の質量に等しい。主な違いは、再生骨材に付着した旧モルタル分の割合に応じ、再生コンクリートの細骨材量が減少することである。細骨材量の減少は高い質量置換率により再生コンクリートのスランプが低下する要因となり、ワーカビリティを低下させるが、再生コンクリートの強度への影響は軽微である。また、高い質量置換率により旧モルタル分が増え、再生骨材の吸水量が増加することもワーカビリティを低下させる要因となるが、高性能減水剤を使用することでワーカビリティを改善することができる。一方、細骨材量を計算するために、セメント、水、天然粗骨材および再生骨材の単位体積に対する割合を調整することは、再生骨材中の旧モルタル分を細骨材の一部とみなしていることになる。旧モルタル分を細骨材の一部として考えると、天然粗骨材を再生骨材で質量置換する通常の置換方法の場合、再生コンクリートの圧縮強度の低下を抑制することができる。この置換質量は、旧モルタル分を実質的に粗骨材とみなしているが、旧モルタル分と粗骨材とは密度および強度に差異があるため、実際とは異なる。さらに、再生骨材中に付着したモルタル分中のセメントが、その結合特性を失い、Fathifazulらが提案したようなすべてのモルタル分の一部としてではなく、不活性材料としてのみ作用する。

また、立方体供試体と円柱供試体の圧縮強度の関係を得るために、C30についても円柱供試体の圧縮強度試験を行った。NC、RaC-25およびRaC-50における円柱供試体の圧縮強度は、それぞれ立方体供試体の82%、83%および77%であった(表-5、図-3)。したがって、割裂引張強度および弾性係数の推定値は、C25およびC40の円柱供試体の圧縮強度を立方体供試体の圧縮強度

表 - 5 C30 における立方体供試体と円柱供試体の圧縮強度

Mix	NC	RaC-25	Rac-50
Compressive strength (MPa)			
Cylinders (average of two cylinders)	30.5	32.0	31.50
Cubes (average of three cubes)	37.0	38.4	41.0

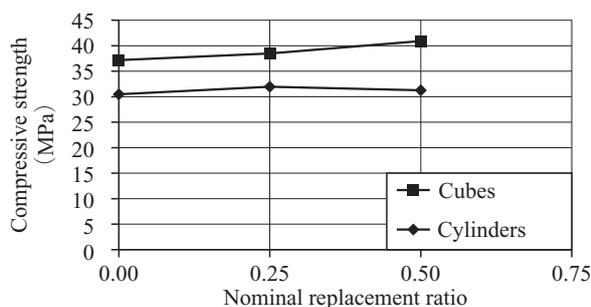


図 - 3 C30 における立方体供試体と円柱供試体の圧縮強度

の81%として計算した。

図-2(b)によれば、NCおよびRaC-25の割裂引張強度はおおむね同等となったが、RaC-50ではすべてのコンクリート強度においてNCおよびRaC-25をわずかに下回った。しかしながら、割裂引張強度は、円柱供試体の圧縮強度の約7~10%に収まった。

図-4に割裂引張強度の測定値と、ACI 318<sup>30)</sup>およびEurocode2<sup>31)</sup>から得られる推定値の比較を示す。これらは次式によって計算される。

ACI 318 [30] :

$$f_{ct} = 0.56 \sqrt{f'_c} \quad (7)$$

Eurocode 2 [31] :

$$f_{ct} = 0.3 (f'_c)^{2/3} \quad (8)$$

ここに、 $f_{ct}$ と $f'_c$ はそれぞれコンクリートの割裂引張強度と円柱供試体の圧縮強度である。図-4より、NC、RaC-25およびRaC-50におけるC25の割裂引張強度の推定値は、いずれも測定値よりも高い結果となった。また、NCおよびRaC-25におけるC30およびC40の推定値は測定値と同等となり、RaC-50の推定値は、すべてのコンクリート強度について測定値よりも著しく高くなった。

図-2(c)に弾性係数試験の結果を示す。再生コンクリートの弾性係数は、すべてのコンクリート強度において普通コンクリートの弾性係数とおおむね同等となる結果となった。これは、普通コンクリートおよび再生コンクリートが同量の粗骨材を有することに起因している。

図-5に再生コンクリートの文献で適用可能な式および普通コンクリートにおける3種類の国際コード式による弾性係数の推定値と測定値との比較を示す。これらは次式によって計算される。

ACI 318 [30] :

$$E_c = w_c^{1.5} 0.043 \sqrt{f'_c} \quad (9)$$

Eurocode 2 [31] :

$$E_c = 22\,000 \left[ \frac{f'_c + 8}{10} \right]^{0.3} \quad (10)$$

Canadian Standard [32] :

$$E_c = (33\,000 \sqrt{f'_c} + 6\,900) \left( \frac{w_c}{2\,300} \right)^{1.5} \quad (11)$$

Ravindrarajah and Tam [10] :

$$E_c = 7\,770 (f'_{c,cu})^{0.33} \quad (12)$$

Corinaldesi [9] :

$$E_c = 18\,800 \sqrt[3]{\frac{0.83 f'_{c,cu}}{10}} \quad (13)$$

ここに、 $E_c$ と $w_c$ はそれぞれコンクリートの弾性係数と密度であり、 $f'_{c,cu}$ は立方体供試体の圧縮強度(単位:MPa)である。図-5より、Corinaldesi<sup>9)</sup>、RavindrarajahとTamによって提案された再生コンクリートの式による弾性係数の推定値は測定値よりも低くなった。Eurocode

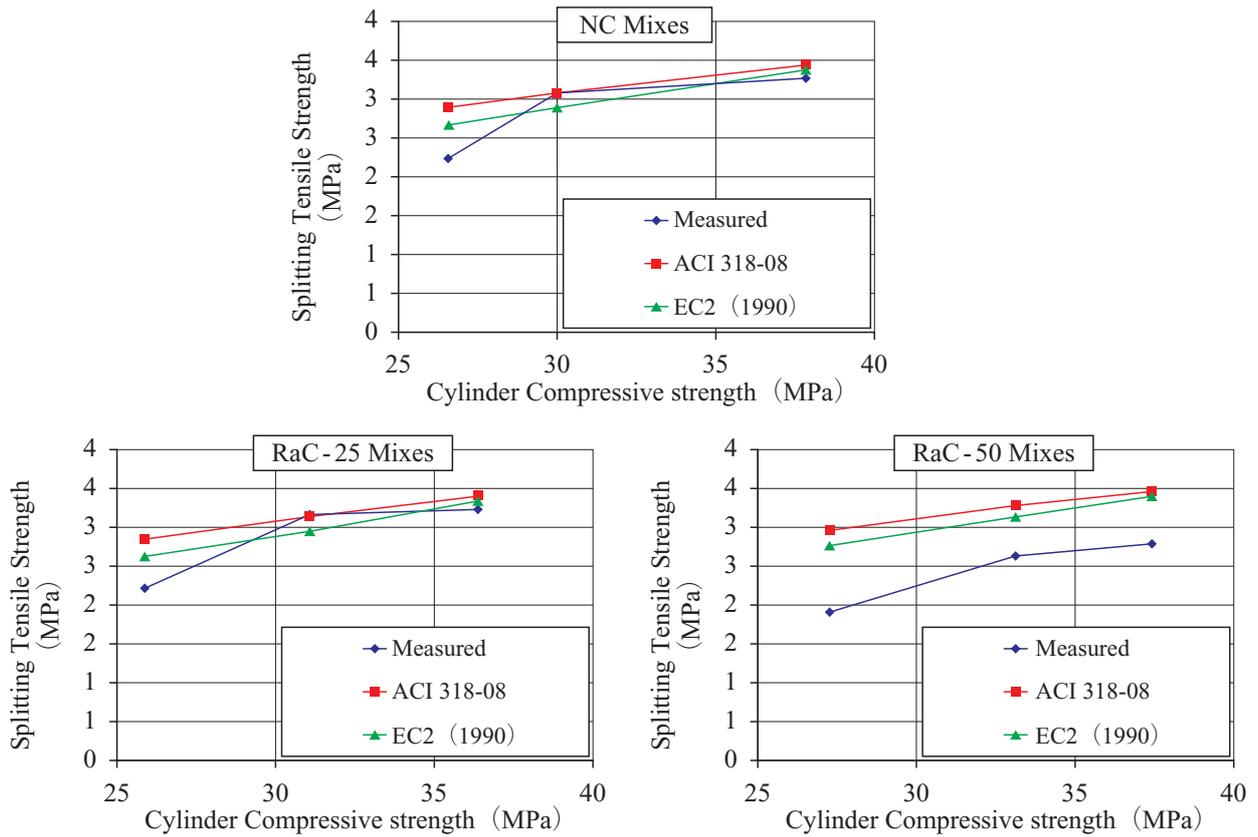


図 - 4 各配合における割裂引張強度の推定値と測定値の比較

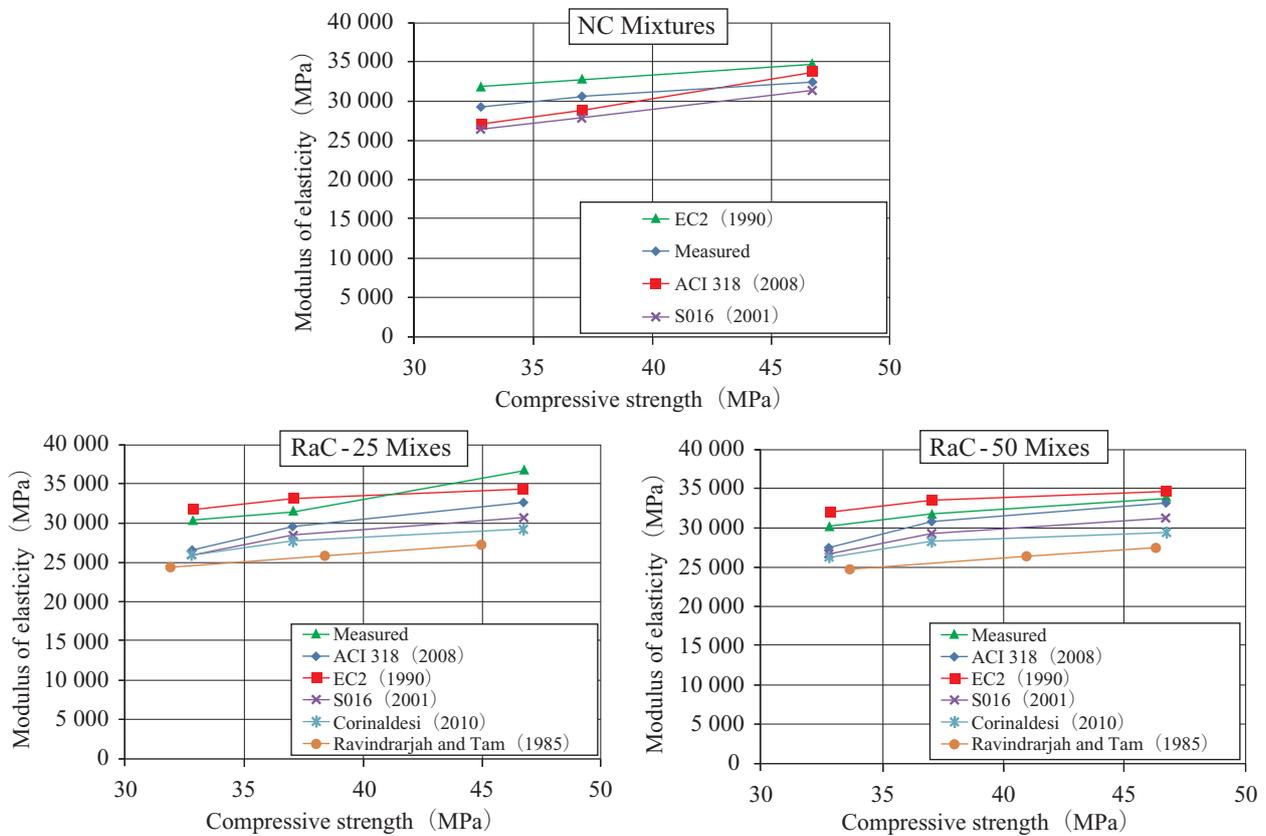


図 - 5 各配合における弾性係数の推定値と測定値の比較

2による推定値は測定値よりわずかに高かったが、ACI 318による推定値は測定値とおおむね同等となった。さらに、Canadian Standard<sup>32)</sup>による推定値は、わずかに測定値を下回った。

また、図-2(d)および図-2(e)では、再生コンクリートにおけるシュミットハンマー試験のリバウンド数および超音波パルス速度試験のパルス速度が、普通コンクリートとおおむね同等となることが示される。したがって、これらの試験に基づいたコンクリートの圧縮強度および均質性における評価式は、ECAM法により配合設計された再生コンクリートに適用可能であると結論づけることができる。

図-2(f)および図-2(g)に硬化前密度と硬化後密度の試験結果を示す。すべての圧縮強度において、質量置換率が高くなるにつれて、密度が低下すると結論づけることができる。

## 6. 結 論

今回の実験では、ECAM法と呼ばれる再生コンクリートにおける新しい配合設計法を提案し、2段階の実験によって実証した。提案したECAM法の基本的な概念は、普通コンクリートの配合を修正し、再生コンクリートの配合設計を行うことである。この実験の第1段階では、0%、5%、50%、75%および100%の質量置換率を有する圧縮強度C30のコンクリートの配合設計を行った。第1段階より、ECAM法を用いて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。第2段階では、3種類のコンクリート強度(C25、C30、C40)について実験を行った。本実験より、以下の結論を導くことができる。

- ECAM法により配合設計された再生コンクリートは、普通コンクリートとおおむね同等以上の機械的性質を有する。
- ACI 318に記載されている普通コンクリートの割裂引張強度および弾性係数の推定式は、ECAM法により配合設計された再生コンクリートにおいても適用可能である。
- 文献に記載されているシュミットハンマー試験のリバウンド数および超音波パルス速度試験のパルス速度と普通コンクリートの圧縮強度の関係は、ECAM法により配合設計された再生コンクリートにも適用可能である。

## 参考文献

- 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.
- 22) ASTM C172/C172M: Standard practice for sampling freshly mixed concrete. American Society for Testing and Materials, 2010.
- 23) ASTM C192/C192M: Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory. American Society for Testing and Materials, 2007.
- 24) ASTM C39/C39M: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. American Society for Testing and Materials, 2011.
- 25) ASTM C496/C496M: Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens. American Society for Testing and Materials, 2011.
- 26) ASTM C469/C469M: Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression. American Society for Testing and Materials, 2010.
- 27) ASTM C138/C138M: Standard test method for density (unit weight), yield, and air content (gravimetric) of concrete. American Society for Testing and Materials, 2010.
- 28) ASTM C805/C805M: Standard test method for rebound number of hardened concrete. American Society for Testing and Materials, 2008.
- 29) ASTM C597: Standard test method for pulse velocity through concrete. American Society for Testing and Materials, 2009.
- 30) ACI 318: Building code requirements for structural concrete (ACI 318M-08) and commentary. American Concrete Institute, 2008.
- 31) EN 1992: Eurocode2: Design of concrete structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings, 2004.
- 32) S016 CS: Limit state design of steel structures. Canadian Standard, 2001.

*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 景大 (首都高速道路(株))  
 渡邊 秀知 (株)ピーエス三菱  
 佐藤 千鶴 (株)銭高組  
 田中 慎也 (株)IHIインフラ建設  
 森田 遼 (鹿島建設(株))

[2018年3月13日受付]



刊行物案内

# PE シースを用いた PC 橋の設計施工指針 (案)

平成 27 年 8 月

定 価 4,800 円 / 送料 300 円

会員特価 4,000 円 / 送料 300 円

公益社団法人 プレストレストコンクリート工学会