

# コンクリートの材料設計システムの概念と数量化手法に関する一考察

大林組技術研究所 正会員 三浦 律彦  
 大林組技術研究所 フェロー 十河 茂幸

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の設計システムが従来の仕様規定型から性能規定型<sup>1)</sup>に変わろうとしている。これは、構造物の要求性能の多様化により一律の設計手法では対応し難くなったことや、LCCの概念の導入により構造物の長期的変状（耐久性能）を正確に捉える必要が生じたことも一因である。このようなシステムの変化に加え、資源・環境問題から廃棄物利用の要請も強まっていて、コンクリートの配合設計を従来手法のみで行うことが難しくなり、新しい配合設計システムの構築が求められるようになってきた。

筆者らは、所定の材料で所要のスランプ、強度、耐久性を有する配合を選定する従来の設計システムからの脱皮を目指し、広範な要求性能への対応が可能で、使用材料の取捨選択や再調整（修正加工）が考慮でき、さらには試験練りによる配合修正が省力化できる、コンクリートの新設計システム（以下「材料設計システム」と呼称）の構築の検討を進めてきた。本報文では、新システムの概念と検討課題について考察を加える。

## 2. 材料設計システムの概念

### 2.1 配合設計の現状と課題

一般に、コンクリートの配合は適用構造物の要求性能と施工条件（環境条件、材料条件を含む）を基に、硬化特性の代表値とされる圧縮強度とスランプ、空気量等の荷卸し時の品質から定められる。近年は、レディーミクストコンクリートの使用が常態化し、圧縮強度やスランプに応じた標準配合が提供されるシステムとなっている。しかし、工場の常用材料以外を用いたり、高強度・高流動コンクリート等の特殊な配合で過去に実績のない場合には、配合選定のために多大な労力や時間を要する試験練りが必要となり、費用がかさみ、多様な材料・配合が自由に選定でき使用できるシステムと言うにはほど遠い。今後、性能設計が一般化すると、これまで以上に多様な材料・配合が現実のものとなることが予想され、これらのシステムで使われてきた経験則に基づく従前の配合設計システムでは、個々の特殊な配合の設計に迅速に対応できなくなる恐れがある。

### 2.2 材料設計システムの概念と検討課題

RC構造物に使用するコンクリートの配合設計手順の骨格を図-1に示す。現状の手順（図中左の波線で囲った手順）に従えば、環境条件・施工法を基に鉄筋コンクリート構造物の要求性能が規定され、構造設計の結果を経て、それに見合ったコンクリート材料の品質仕様（目標）が先ず規定される。レディーミクストコンクリートの発注形態で言うなら、粗骨材最大寸法(Gmax)、スランプ、強度（呼び強度）、セメントの種類といった項目になる。耐久性やひび割れの品質規定がある場合にはW/Cや単位水量・セメント量の上下限值等も指定される。次いで、既往の経験事例（標準配合）を基に配合が選定され、試験練りによる確認が行われ、品質に差異が生じれば経験に基づいた修正が施され、配合確定となる。

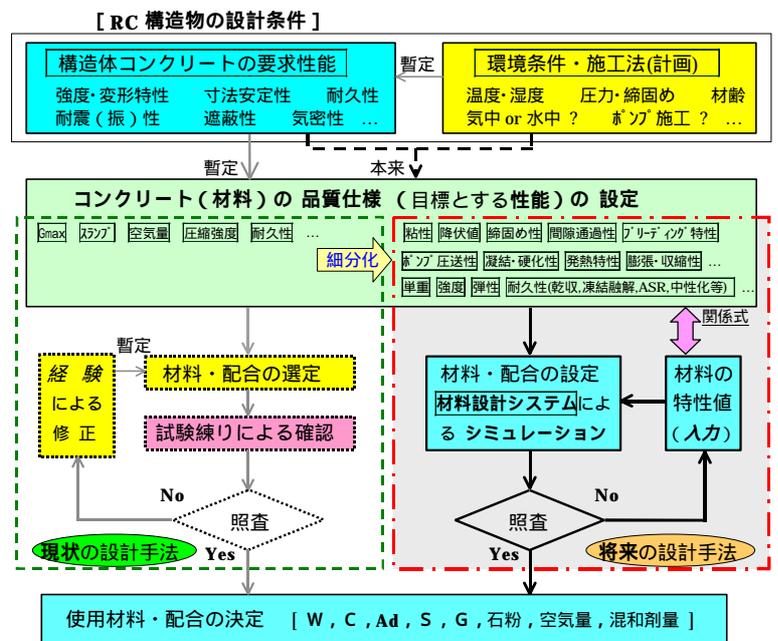


図-1 現配合設計の手順と新システムの概要

一方、新材料設計システムでは、これまで経験則で定められていた材料特性値や配合値とコンクリート品質特性(物性)の関係を数式化又は数値化して、コンクリート物性の定量的な修正を可能にし、解析(数値シミュレーション)上で配合選定を行うものである。この場合、これまで経験により人為的に行われていた配合修正を数値解析できるようシステム化するための技術が必要となる。また、個々の使用材料の変動を代表的な特性値で正しく評価する手法が不可欠となり、従来以上に材料特性値の評価手法が重要となる。なお、性能照査にきめ細かく対応するため、コンクリートの要求性能は細分化されることになるが、例えばこれまでスランプのみで代表的に示されていたフレッシュコンクリートの品質は、レオロジー的手法により降伏値や粘度で、あるいは施工則的には締固め性といった新たな指標で数値化する必要が生じ、代表的なコンクリート物性の抽出とその評価手法の確立も重要となる。最近、耐久性照査型のコンクリート標準示方書(施工編<sup>2)</sup>)が出版されており、その中で物性(耐久性)の数量化手法が示されているので、それらを参照されたい。

### 3. 材料設計システム構築のための数量化手法

#### 3.1 材料特性の数量化手法と課題

コンクリートの使用材料は、セメントや混和材等(石粉を含む)の粉体材料と、細骨材や粗骨材等の粒状体材料、それに水や化学混和剤等の液体材料に分類できる。このうち粉体材料については化学組成、粒子形状(真球度)、表面性状(ガラス化率等)、粒度分布(粉末度)、実積率(ポロシティ)などが数値化できる特性である。粒状体については、同様に岩質(硬度)、粒子形状、表面性状、粒度分布(Gmax、粗粒率)、実積率、保水性などである。液体材料については、化学成分(界面活性成分)、減水率、粘度等が数量化できるが、混和剤同士の相性などは数量化が難しい特性と思われる。

#### 3.2 コンクリート物性の数量化技術と課題

物性として現状で数量化ができるのは流動性(スランプ等)、分離抵抗性(粘性)、間隙通過性(充填性)、締固め性(モビリティ<sup>3)</sup>)、経時変化性、ポンプ圧送性(圧力損失)、ブリーディング、自立性(凝結時間)、発熱性(温度上昇量)、強度、弾性、単位容積質量、寸法安定性(膨張・収缩量)、耐久性(凍結融解、中性化、塩分浸透、ASR、水密性)等で、まだ数量化されていないのは仕上げ性、脱枠性、ひび割れ抵抗性、それに養生切切りの判定手法などで、今後の研究が待たれる。

#### 3.3 コンクリート物性と材料特性や配合値との関係の数量化手法

材料特性には上記以外にも様々なものがあり、コンクリート中の配合量の影響を介して各種のコンクリート物性に影響を与える。これらの関係は必ずしも単純な数式で示せるものではないと思われるが、新しい材料設計システムにおいては、これらの関係の数値による関連付け(数量化、数式化)が不可欠である。要因や項目が確定すれば、これらの相互関係を数量化する手法が必要となるが、最新の学習(関連付け)システムであるニューラルネットワーク手法が使える。この手法は化学製品の開発分野ではすでに使用されており、従来は必要だった膨大な確認実験の省力化に役立っている。コンクリートの材料設計にも同様に適用できる。

表-1は一例として、ピーライト系セメントの種類がモルタルの物性に及ぼす影響について46個の試験成績データをもとに、密度、粉末度、CaO・SiO<sub>2</sub>等の化学成分、C<sub>2</sub>S・C<sub>3</sub>S等の組成化合物量の違いが、凝結時間、圧縮強度(3,7,28,91日)、水和熱(7,28,91日)等の物性に及ぼす影響を代表的項目の相関係数で示したものである。例えば自立性に影響する始発時間に関しては、比表面積、C<sub>3</sub>Sがの順に促進効果があり、SiO<sub>2</sub>、密度、C<sub>2</sub>Sの順に遅延硬化があると言える。91日圧縮強度では密度、SiO<sub>2</sub>、C<sub>2</sub>Sがの順に増進効果があるが、この場合、図-2に示す実測値と推定値の対比結果から明らかなように、ニューラルネットワーク手法を用いて物性推定が精度よく行えることが判明した。この手法は特性値の逆推定にも使えるため、効果的と思われる。

#### [参考文献]

- 1) 例えば 特集/仕様規定から性能規定へ、コンクリート工学 Vol.35, No.11, 1997.11
- 2) 平成11年版「コンクリート標準示方書[施工編]」 耐久性照査型, 2000.1
- 3) 十河・近松・三浦:フレッシュコンクリートの比表面積の数量化に関する一提案,土木学会第52回年次講演会V-117,1997.9

表-1 ニューラルネットワークによる解析例

| ニューラルネットワーク手法を用いた解析結果(相関係数)    |         |         |         |         |         |         |
|--------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 特性                             | 凝結時間    |         | 圧縮強度    |         | 水和熱     |         |
|                                | 始発      | 終結      | 3日      | 91日     | 7日      | 91日     |
| 密度                             | 0.7050  | 0.6418  | -0.3517 | 0.7625  | -0.4213 | 0.1797  |
| 比表面積                           | -0.6122 | -0.2720 | 0.6652  | -0.6291 | 0.7584  | -0.3124 |
| SiO <sub>2</sub>               | 0.7666  | 0.4061  | -0.7282 | 0.7097  | -0.8020 | 0.2890  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | -0.1715 | -0.4394 | -0.3086 | -0.2301 | -0.1646 | 0.2744  |
| CaO                            | -0.1295 | 0.0367  | 0.3367  | -0.0535 | 0.2467  | 0.0971  |
| SO <sub>3</sub>                | -0.0942 | 0.3340  | 0.8261  | 0.0537  | 0.6993  | -0.3715 |
| C <sub>2</sub> S               | 0.5565  | 0.1607  | -0.7597 | 0.5401  | -0.7633 | 0.3419  |
| C <sub>3</sub> S               | -0.5510 | -0.1727 | 0.7666  | -0.5264 | 0.7127  | -0.2770 |

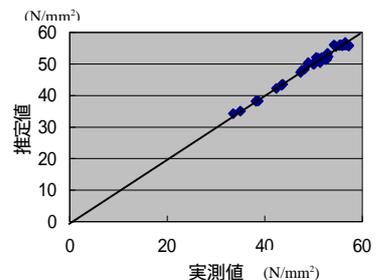


図-2 91日強度の推定例